

발간등록번호

11-1613436-000309-01

국가기준점 수직위치 망조정 및 정비계획 연구

2022. 03.



국토지리정보원
National Geographic Information Institute

제 출 문

국토지리정보원장 귀하

본 보고서를 「국가기준점 수직위치 망조정 및 정비계획 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 03

대한공간정보학회 회장 서 용 철

참여연구진

이석배	경 상 국 립 대 학 교	연구책임자
이창경	군 산 대 학 교	책임연구원
민관식	한 남 대 학 교	책임연구원
한수희	경 일 대 학 교	책임연구원
차득기	대한공간정보학회	연구원
윤공현	대한공간정보학회	연구원
어수창	대한공간정보학회	연구원
이기홍	대한공간정보학회	연구원
이재철	대한공간정보학회	연구원
장재일	대한공간정보학회	연구원
김성수	대한공간정보학회	연구원
정지윤	대한공간정보학회	연구원
홍성현	대한공간정보학회	연구보조원
이윤수	대한공간정보학회	연구보조원
이주용	대한공간정보학회	보조원
서동현	대한공간정보학회	보조원
이선기	동 신 G T I	연구원
김병윤	동 신 G T I	연구원
김상연	동 신 G T I	연구원
홍우경	동 신 G T I	연구원

자문위원

이흥규	창 원 대 학 교	교수
박준규	서 일 대 학 교	교수
이동하	강 원 대 학 교	교수
조재명	송 원 대 학 교	교수
이강원	서울공 간 정 보	대표이사
주현희	엘 티 메 트 리	연구소장

국토지리정보원

이진우	위치기준과	과장
박찬영	위치기준과	사무관
안영준	위치기준과	주무관

국토지리정보원은 국민에게 고정밀 높이기준 체계를 제공하기 위하여 지속적으로 3차원 국가위치기준망을 확립하고 있다. 이를 위해 전국 수준환 및 통합기준점을 엮은 통합 망조정을 실시('17~'19)하였으며 연차별로 불부합 노선과 지역에 대한 보완을 실시하여 수준 성과에 대한 신뢰성 향상에 기여하고 있다. 또한 '20년 및 '21년 수행된 개방 및 불부합 노선에 대한 수준측량 결과값과의 통합망 조정을 통해 최종적으로 3차원 국가위치 기준망 체계를 완성하였다.

높이기준은 건설공사, 하천의 물관리 등에서 필수적으로 사용되는 국가 인프라이며 국민의 안전과 재산에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 공간정보 인프라이다. 또한 향후 디지털트윈 등 3차원 공간정보의 핵심인프라로 중요하게 인식되고 있으며, 3차원 공간정보 구축에서 과거와는 달리 그 중요성이 인식되고 있다. 하지만 현재 수준측량과 성과는 과거 수준점과 노선측량에 기반하여 성과가 산출되어 각 환에 대한 정확한 성과 해석과 분석이 필요하다.

본 연구는 3차원 국가위치기준망 확립을 위해 수준점과 통합기준점 기반의 “수준측량의 정규정표고와 정표고 기반의 망조정 성과 분석 및 조정성과 제시”를 목표로 한다. 이를 위해 각 기준점의 중력값을 집계하고 분석하여 타원보정량과 정사보정량을 산출하여 이를 적용하여 망조정을 실시하였다. 이를 위해 최초로 점검부에 이력관리 기능과 중력값 연산식을 적용하여 망조정을 실시하였다. 국가위치기준망 확립을 위하여 향후 중장기 수직통합망 정비방안을 제시하여 지속가능한 수직위치 망조정이 가능하도록 국가 정책 수립에 이바지 하는 것이 본 연구의 목표이며 연구를 통하여 이러한 목표를 달성하였다.

본 연구의 공간적 범위는 국가기준점 중 수준점과 통합기준점이 분포된 한반도와 부속도서이며, 시간적 범위는 2002년부터 2021년까지 우리나라에서 수준측량이 수행된 사업기간을 대상으로 하며, 특히 '통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축' 사업 이후에 수준측량자료가 수집된 시간들을 포함하고 있다. 이와 같은 공간과 시간적 범위의 수준측량자료에 대한 연구내용은 다음과 같이 5개 세부과제로 구성하여 연구를 수행하고 결과를 도출하였다.

1) 재관측 필요 수준점 및 통합기준점에 대한 불부합 원인 분석

전국 통합 망조정에 사용된 수준점과 통합기준점의 수준측량 데이터 이력 및 성과분석을 실시하였다. 2001년부터 2021년까지 수행된 우리나라 수준측량 데이터를 이용하여 우리나라 1등환 기준 17개환, 2등환 기준 육지부 1,426개의 환과 제주도 등 독립환 48개의 환에 대하여 왕복차 및 환폐합차를 계산하고 환별

예비조정을 통하여 수준측량 불량구간을 도출하였다. 아울러 불량구간에 대한 망조정 성과 등을 이용하여 불부합 원인을 분석하였다. 또한 2009년부터 2021년까지 측정된 중력자료중 수준점 및 통합기준점에 대하여 수행된 13,071점의 중력성과 DB를 구축하여 정사보정량 계산을 수행하였으며, 이를 정표고 성과 계산에 활용하였다.

2) 수준점 및 통합기준점 높이성과에 대한 상시 망조정성과 산출체계 전략 수립

수준점과 통합기준점을 통합한 국가기준점 수직위치 성과산출을 위하여 상시 망조정성과 산출체계 전략을 수립하였다. 타원보정량을 기반으로 산출하는 정규정표고 성과의 산출체계 전략뿐 아니라 Heiskanen & Moritz식에 따른 정사보정량 계산 및 정사보정량에 근거한 정표고 망조정성과 산출체계 전략을 제시하였다.

3) 정규정표고 기반 수직 망조정 및 이전 고시성과 기준 기준점 표고변동량 분석

2019년까지 수행된 수준환 및 통합기준점 수준측량 결과에 2020~2021년까지 수행된 수준측량 결과를 통합하여, 육지부 1,426개의 환과 제주도 등 독립환 48개의 환에 대하여 1등 환을 기준으로 타원보정량 기반의 국가기준점 수직위치 예비조정과 전국 통합망조정을 실시하였다. 모든 수준점 및 통합기준점에 대한 직접 수준측량 높이차에 정규중력을 이용한 “타원보정”을 실시하여 “정규정표고”에 의한 통합 망조정을 수행하고 이전 고시성과 기준 기준점과의 표고변동량을 분석하고 그 결과를 제시하였다. 예비조정 결과 모든 환에 대하여 0.01m 이내의 사후기준표준편차값을 나타냈으며, 전국 통합 망조정성과와 고시성과와의 차이는 $-0.05m < D < 0.05m$ 범위에 있는 국가기준점이 96.3%인 10,708점인 반면, $|D| > 0.05m$ 범위에 있는 국가 기준점은 417점(3.7%)이었다. 표고차이가 $\pm 0.5m$ 이상인 국가기준점은 표석이 이설되었으나 그 성과가 재고시가 되지 않았거나 고시에 오류가 있었을 것으로 추정되며, 표고차이가 $\pm 0.5m$ 이하인 국가기준점은 표석의 자연적 변위(지각변동 또는 표석 설치지점의 융기나 침하), 수준측량 오차, 수직기준망 자료정리의 오류가 그 원인일 것으로 추정된다.

4) 정표고 기반 국가기준점 수직 망조정

모든 수준점 및 통합기준점에 대한 직접수준측량 높이차에 실측중력을 이용한 “정사보정”을 실시하고 “정표고”에 의한 전국 통합 망조정을 최초로 수행하였다. 아울러 이렇게 산출된 우리나라 수직기준점의 정표고 성과가 3) 정규정표고

기반 수직 망조정에서 계산된 정규정표고와 어떤 차이를 가지는지 높이체계간 기준점 표고변동량을 분석하여 제시하였다. 정표고기반 전국 통합망조정 결과 조정 표고의 평균표준오차는 0.0194m로 나타났고, 정표고와 정규정표고의 표고체계간 변동량은 최소 -0.0178m에서 최대 0.0933m, 평균 0.0007m를 보여주고 있어, 정규정표고에 비하여 정표고는 살짝 높아지는 경향을 보이고 있으며, 차이의 RMSE값은 0.0075m로 나타났다.

5) 국토 수직변위 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비 방안 제시

미국, 일본, 유럽연합(EU) 등의 국가수직기준계 및 수준망 관리체계 조사하였고, IERS의 글로벌 높이체계에 부합하기 위한 수준망 정비계획(안) 마련하였다. 아울러 4차산업혁명시대에 그 중요성이 더해가고 있는 표고 공간 정보의 고정밀 대국민 서비스를 어떻게 수행하여야 할지 국토 수직변화 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비방안 제시하였다.

[목 차]

제1장 연구개요	1
1. 연구의 배경	3
2. 연구의 목적	4
3. 연구의 범위	4
제2장 재관측 필요 수준점 및 통합기준점에 대한 불부합 원인 분석	7
1. 수준측량 데이터, 수준점 및 통합기준점 성과 분석	9
2. 수준점 및 통합기준점 중력측정값 분석	28
제3장 수준점 및 통합기준점 높이성과에 대한 상시 망조정성과 산출체계 전략 수립 ..	31
1. 수준망에 통합기준점을 추가한 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출의 최적 방안	33
2. 국가기준점 수직위치 상시 망조정 산출 체계 전략	44
제4장 정규정표고 기반 수직 망조정 및 이전 고시성과 기준 기준점 표고변동량 분석 ..	47
1. 2020년 이전 및 이후 수준측량자료통합 수직기준망 조정	49
2. 정규정표고기반 수직망조정에 따른 표고변위량 분석	103

제5장 정표고 기반 국가기준점 수직 망조정	109
1. 표고와 정사보정	111
2. 정사보정량에 의한 정표고 기반 수직기준망조정	120
3. 정표고와 정규정표고의 높이체계간 기준점 표고 변동량 분석	150
제6장 국토 수직변위 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비 방안 제시 ...	159
1. 미국, 일본, 유럽연합(EU) 등의 국가수직기준계 및 수준환 관리체계 조사	161
2. IERS의 글로벌 높이체계에 부합하기 위한 수준환 정비계획(안) 마련 ...	169
3. 국토 수직변화 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비방안 제시 ...	172
참고문헌	207
부록	211
부록 1. 연도별 수준측량 사업지구 및 기준점 수	
부록 2. 환폐합차점검부 작성 매뉴얼	
부록 3. 환폐합차점검부(15A환 일부)	
부록 4. 허용 교차 초과 2등 환	
부록 5 이설 등 표지변위에 따른 기준점 표고보정 내역	
부록 6. 허용 환폐합차 초과 2등 환	
부록 7. 2021 수직기준망 조정 정규정표고와 고시성과 차이(일부)	
부록 8. 재고시 대상 국가기준점(안)	

부록 9. 2021 수직기준점 망조정(GeoLAB)정규정표고와 정표고 비교(일부)

부록 10. 국가기준점 수준측량 정비물량

부록 11. 수준망조정 입력자료작성 Visual Basic Application 프로그램
(GeoConv2)

<표 2-1> 수준점의 연도별 설치 및 정비 현황	0	1
<표 2-2> 환별 1등 및 2등 수준점 수 와 비율	1	1
<표 2-3> 환별 높이 기준점 수와 비율	3	1
<표 2-4> 기준점별 경위도값, 높이값 및 중력값(일부발취)	4	1
<표 2-5> 기준점 고시성과 집계표(일부 발취)	5	1
<표 2-6> 환별 관측구간 및 기준점 수량	7	1
<표 2-7> 환별 기준점 밀도	7	1
<표 2-8> 2020년 및 2021년 수준측량 사업물량	8	1
<표 2-9> 기존 계산부와의 차별성	0	2
<표 2-10> 기존 연구 및 계산부 성과 비교표	2	2
<표 2-11> 1등 환별 조정성과와 고시성과의 표고차이 분포	5	2
<표 2-12> 연도별 중력기준점 성과 집계표	8	2
<표 2-13> 정사보정량 산출을 위한 기준점별 중력값 집계	9	2
<표 3-1> 기존 국토지리정보원 망조정 소프트웨어	7	3
<표 3-2> 주요 망조정 소프트웨어 비교 결과	0	4
<표 4-1> 우리나라 수준측량 허용오차	1	5
<표 4-2> 허용교차를 초과하는 2등환 수	7	5
<표 4-3> 이설 및 표지변위에 따른 표고보정 국가기준점 수	1	6
<표 4-4> 허용 환폐합차 초과 2등환 수	2	6
<표 4-5> GeoConv로 작성한 수준망 조정(MatLab 소프트웨어) 입력데이터 파 일(1등 16환)	2	
<표 4-6> GeoLab 수준측량용 입력데이터 레코드 구성	7	7
<표 4-7> 정규정표고 1등 환별 수직기준망 조정 입력자료 구성	0	8
<표 4-8> MatLab소프트웨어 수직기준망조정 결과 파일	4	8
<표 4-9> 사후 기준 표준편차(σ_0)에 근거한 수준망조정 입력 데이터 착오 검출 및 수정		86
<표 4-10> 정규정표고체계 1등 환별 수직기준망 예비조정 결과	8	8
<표 4-11> 수직기준망 시작단계 조정 데이터 구성	1	9
<표 4-12> 국부검정(local test)에서 도출된 과대오차 구간 및 조치	7	9

<표 4-13> 수직기준망(육지) 최종 조정 성과	101
<표 4-14> 수직기준망 최종단계 조정 데이터 구성	101
<표 4-15> 2021년 수직기준망조정 국가기준점 조정표고 및 고시성과 차이(예)	102
<표 4-16> 정규정표고 기반 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과 차이 분포	101
<표 4-17> 조정표고와 고시표고 차이가 $\pm 0.05\text{m}$ 인 국가기준점 상태 분류	601
<표 4-18> 2021년 수직기준망 조정결과 재고시 대상 국가기준점(일부)	701
<표 5-1> 정사보정량 계산 비교를 위한 테스트베드의 선정과 표고 분포	121
<표 5-2> 평탄지(15-35환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과	221
<표 5-3> 구릉지(16-17환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과	321
<표 5-4> 산악지(16-20환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과	321
<표 5-5> 세 개 지역 테스트베드에서 Heiskannen & Moritz식과 네 개의 수식 과의 정사보정량 차이 통계값	128
<표 5-6> 15A환 2등환별 정사보정량과 타원보정량과의 차이 및 중력값 통계표	128
<표 5-7> 정표고 1등 환별 수직기준망 조정 입력데이터 구성	821
<표 5-8> 정표고 1등 환별 수직기준망 예비조정 결과	141
<표 5-9> 국소검정(local test)에서 도출된 과대오차 구간 및 조치	641
<표 5-10> 정표고기반 전국 수직기준망조정 수행결과	941
<표 5-11> MatLab 전국망조정 정표고와 정규정표고의 비교 (100점)	151
<표 5-12> MatLab 전국망조정에 의한 정규정표고와 정표고의 표고체계간 변동 량 통계표	153
<표 5-13> 정표고와 정규정표고의 차이 분포	451
<표 5-14> MatLab 조정성과와 Geolab 조정성과의 정표고 차이 통계표	158
<표 6-1> 연도 및 기관별 W0 변화	701
<표 6-2> 3차원 국가위치기준점(망)과 기본기준점(망)의 정의	371
<표 6-3> 측량기준점 유지관리 비용 산출(예)	471

<표 6-4> 국가기준점 1점 유지관리 비용(국토지리정보원, 2017)	571
<표 6-5> 기준점 성과 발급 횟수 및 점수	671
<표 6-6> 3차원 국가위치기준점 미포함 수준점의 관리 방안	771
<표 6-7> 재측량 노선 추출 전략	691
<표 6-8> 국가기준점 정비사업(국토지리정보원, 2011b)	781
<표 6-9> 우리나라 연도별 수준측량 수행 사업지구 및 노선수	881
<표 6-10> 국가수직기준망 재정비 방안	791
<표 6-11> 기준점 정보 관리 데이터베이스의 개선 효과	202
<표 6-12> 노선 정보 관리 데이터베이스의 신설 효과	202
<표 6-13> 수준환 정보 관리 데이터베이스의 신설 효과	302

■ 그림목차 ■

[그림 1-1] 사업추진 배경 및 필요성	3
[그림 1-2] 연구 목적	4
[그림 1-3] 세부과제 구성과 연계 수행체계	6
[그림 2-1] 수준점표지의 형상 및 규격(법률 시행규칙 별표1)	9
[그림 2-2] 1, 2등 수준점 현황	10
[그림 2-3] 2017년 통합기준점 표지의 형상 및 규격(법률 시행규칙 별표1)2	11
[그림 2-4] 통합기준점 현황	31
[그림 2-5] 1등환 배치도	61
[그림 2-6] 기준점 정리의 일관성 확보로 점검부 자동연산	9
[그림 2-7] 2019년 환폐합차 점검부	12
[그림 2-8] 2021년 점검부 및 특징	12
[그림 2-9] 개방노선에 포함된 기준점	42
[그림 2-10] 환별 통합기준점 비율과 정확도 상관성	62
[그림 2-11] 이·재설점 누락	62
[그림 2-12] 수준망도의 이·재설점	62
[그림 2-13] 구점과 신점의 불일치	72
[그림 2-14] 수준망도의 구점 확인	72
[그림 2-15] 고시성과 불일치 사례	72
[그림 2-16] 수준망도의 고시불일치 점	72
[그림 2-17] 우리나라 중력값 분포도	92
[그림 2-18] 정사보정량 산출을 위한 중력값 적용	103
[그림 3-1] 우리나라 표고 체계	43
[그림 3-2] 3차원 통합기준점 체계 변화	43
[그림 3-3] 추가 통합기준점 기반 수직망	43
[그림 3-4] 정표고 체계 전환 및 수직 위치정보 고도화	63
[그림 3-5] GeoLab 소프트웨어	83
[그림 3-6] StarNet 소프트웨어	93
[그림 3-7] Axis3D Net 소프트웨어	93
[그림 3-8] Columbus 소프트웨어	104

[그림 3-9] 소프트웨어별 망조정 결과 비교	1· 4
[그림 3-10] 수준측량 관측자료 오차 처리 방안	2· 4
[그림 3-11] 국가기준점 수직위치 망조정 성과 산출 최적방안	3· 4
[그림 3-12] 국가기준점 관측자료 관리시스템 연계 서비스	4· 4
[그림 3-13] 국가기준점 수직위치 상시 망조정 성과 산출체계 전략	5· 4
[그림 4-1] 직접수준측량의 시준선 오차	1· 5
[그림 4-2] 중력 등포텐셜면 경사와 직접수준측량 높이차	2· 5
[그림 4-3] 정규중력포텐셜경사와 정규정표고 보정량	5· 5
[그림 4-4] 수준측량 총괄계산부 작성 오류 유형(예)	6· 5
[그림 4-5] 환폐합차점검부.xlsx에 계산된 정규정표고 보정량과 정규정표고 높이 차	56
[그림 4-6] 환폐합차점검부_측량기준점 이설 전후 수준측량 높이차 보정(예) ...	6
[그림 4-7] 수직기준망도_기준점 이설 전후 수준측량 높이차 보정	0· 6
[그림 4-8] 허용환폐합차 초과 2등환 분포	3· 6
[그림 4-9] 전역검정과 국소검정 과정(data snooping)	1· 7
[그림 4-10] GeoConv의 기본화면	27
[그림 4-11] 수준망조정 프로그램 개선 - 조정표고 기록포맷 오류 수정 ·3·...	7
[그림 4-12] 수준망조정 프로그램 개선 - 고정점 탐색구간 오류 수정	4· 7
[그림 4-13] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 조정결과 저장기능 추가 ·5·...	7
[그림 4-14] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 입력데이터 파일 탐색기능 추가	75
[그림 4-15] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 중력부여방법 선택기능 추가	7
[그림 4-16] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 과대오차 검정기능 추가	7· 7
[그림 4-17] GeoLab의 수준측량 입력데이터(~.iob) 편집 창	8· 7
[그림 4-18] GeoLab 수준측량자료 최소제공조정 결과(~.lst) 창	8· 7
[그림 4-19] 1등 환별 환구성/개방 수준측량 구간 수	1· 8
[그림 4-20] 1등 환별 1등/2등 수준측량 구간 수 분포	1· 8
[그림 4-21] 정규정표고기반 수직기준망조정 및 조정성과 도출 전략	3· 8
[그림 4-22] 본 노선연결 수직기준망과 독립 수직기준망	3· 8

[그림 4-23] 수직기준망 조정 사후기준표준편차에 근거한 과대오차 구간 검출	86
[그림 4-24] 전역검정에 의한 입력데이터 착오검출 및 수정	7·8
[그림 4-25] 1등 환별 수직기준망조정에서 인접 2등 환 통합	7·8
[그림 4-26] 2019년과 2021년 수직기준망조정 자료구성 변화	1·9
[그림 4-27] GeoLab에 의한 수직기준망조정에 적용한 프로젝트 옵션	2·9
[그림 4-28] 관측값의 중량부여 방법에 따른 망조정 표고 차이	4·9
[그림 4-29] 관측값의 중량부여 방법에 따른 망조정 표고 차이별 기준점 수	9
[그림 4-30] 조정 프로그램에 따른 조정 표고 차이	4·9
[그림 4-31] 수직기준망 조정(GeoLab) - 제24차 과대오차검정 최대 표준화잔차 구간	96
[그림 4-32] 정규정표고 기반 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과 차이 분포	104
[그림 4-33] 국가기준점 표고변위(조정표고 - 고시표고) 1등 환별 분포	5·0 1
[그림 5-1] 표고와 지오폠펜셀 수와의 관계	111
[그림 5-2] A점과 B점 사이의 수준측량	51
[그림 5-3] 중력데이터베이스 예	1
[그림 5-4] 평탄지(15-35환)에서 5개 수식에 의한 정사보정량 계산결과	5·2 1
[그림 5-5] 구릉지(16-17환)에서 5개 수식에 의한 정사보정량 계산결과	5·2 1
[그림 5-6] 산악지(16-20환)에서 5개 수식에 의한 정사보정량 계산결과	6·2 1
[그림 5-7] 수준노선의 분포와 15A환의 위치	72
[그림 5-8] 우리나라 수준망의 구성(국토지리정보원)	131
[그림 5-9] 정표고기반 통합 망조정 수행절차	231
[그림 5-10] 정사보정량과 정표고 높이차의 산출	331
[그림 5-11] GeoConv2 Visual Basic Application의 실행	135
[그림 5-12] GeoConv2 VBA로 생성한 정표고조정 MatLab 입력파일	31
[그림 5-13] GeoConv2 VBA로 생성한 정표고조정 GeoLab 입력파일	7
[그림 5-14] 정표고기반 수준망조정 및 조정성과 계산 전략	931
[그림 5-15] MatLab 'LSAdj4LN,m' 수준망조정 정표고 입력데이터(일부)	341

[그림 5-16] MatLab ‘LSAdj4LN,m’ 수준망조정 정표고 출력데이터(일부)	341
[그림 5-17] GeoLab 수준망조정 정표고 입력데이터(일부)	441
[그림 5-18] GeoLab 수준망조정 정표고 출력데이터(일부)	441
[그림 5-19] 정규정표고와 정표고의 표고체계간 표고변동량 분석 프로세스	051
[그림 5-20] 정표고와 정규정표고의 표고체계간 차이 분포	451
[그림 5-21] 6환 정표고의 분포(위) 및 정표고와 정규정표고의 표고변동량(아래)	156
[그림 5-22] 16환 정표고의 분포(위) 및 정표고와 정규정표고의 표고변동량(아래)	157
[그림 6-1] 미국 내륙에서 NAVD 88과 NGVD 29 사이의 높이 차이	221
[그림 6-2] NGVD 29 조정과 NGVD 29 구속조건 조정 간의 높이 차이	221
[그림 6-3] 알래스카에서 NAVD 88과 NGVD 29 사이의 높이 차이	321
[그림 6-4] IGLD 85와 IGLD 55의 평균 높이 차이	4
[그림 6-5] 신규 기준의 높이 비교	61
[그림 6-6] 좌 : 개정 성과 계산을 위한 환 폐합도, 우 : 개정 성과와 2000년도 평균 성과의 차이	166
[그림 6-7] LHN95와 LN02의 차이 (단위 m)	71
[그림 6-8] W0의 변화 개념	7
[그림 6-9] 각종 높이 기준의 비교	71
[그림 6-10] 격자 중심으로부터 거리를 고려한 점수	671
[그림 6-11] 기본기준점에 대한 5년 주기 재관측	681
[그림 6-12] 수준점과 통합기준점을 잇는 망구성	181
[그림 6-13] 총괄계산부 노선별 분류 체계	221
[그림 6-14] 입력자료 개선 방안	3
[그림 6-15] 예비분석 과정 내 최신 관측자료 기반 수정	381
[그림 6-16] 불부합에 따른 특이 환 부분망 조정 예시	481
[그림 6-17] 정표고 및 정규정표고 활용	51
[그림 6-18] 선행연구와의 망조정 과정 비교	51
[그림 6-19] GPS로 측정된 지각판 운동(NASA, JPL)	291

[그림 6-20] ITRF2014 기준 수평지각판 운동(IERS)	291
[그림 6-21] 지구 극축(north pole)의 변화(1900~2007년)	391
[그림 6-22] 지구의 운동	9
[그림 6-23] SAR 데이터에 의한 포항 조위관측소의 지반침하 해석결과 (국토지리정보원, 2021b)	195
[그림 6-24] SAR 데이터에 의한 포항 형산강 주변의 지반침하 해석결과 (국토지리정보원, 2021b)	195
[그림 6-25] (a) 환 중심의 수직기준망 (b) 권역 중심의 수직기준망	8-9 1
[그림 6-26] 총괄계산부의 복잡한 폴더 트리 구조	991
[그림 6-27] (한 자리 노선 번호로 구성된 총괄계산부: (좌) 한글(HWP) 형식, (우) Excel 형식	200
[그림 6-28] AutoCAD 노선도에서 신·구 노선의 부정합	102
[그림 6-29] AutoCAD 노선도에서 환의 위상관계 파악이 어려운 예	102
[그림 6-30] (좌) 자동 환 구성의 개념 (Mayachita, 2020), (우) 노드-링크 구조 (Saylor Academy, 2012)	203
[그림 6-31] 성과 입력 방법의 변화와 각종 지침의 제정	402
[그림 6-32] 수준환 정보 관리 데이터베이스로부터 수준환 직접 가시화	402

제1장

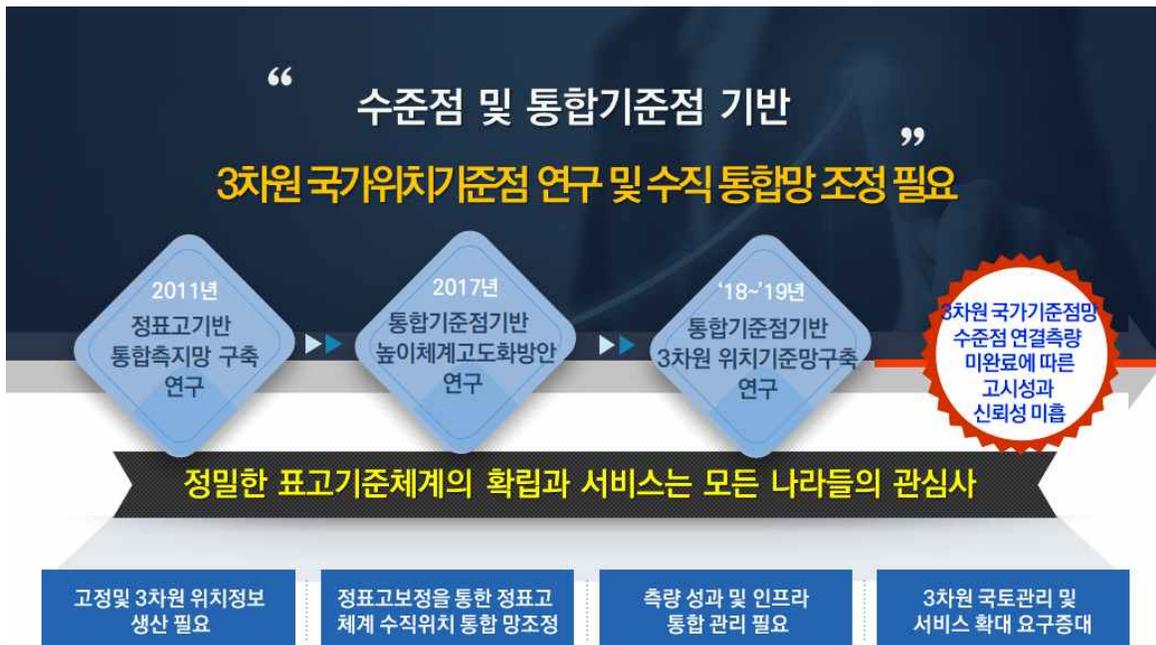
연구개요

1. 연구의 배경
2. 연구의 목적

1. 연구의 배경

국토지리정보원은 국민에게 고정밀 높이기준 체계를 제공하기 위하여 지속적으로 3차원 국가위치기준망을 확립하고 있다. 이를 위해 전국 수준환 및 통합기준점을 엮은 통합 망조정을 실시('17~'19)하였으며 연차별로 불부합 노선과 지역에 대한 보완을 실시하여 수준 성과에 대한 신뢰성 향상에 기여하고 있다. 또한 '20년 및 '21년 수행된 개방 및 불부합 노선에 대한 수준측량 결과값과의 통합망 조정을 통해 최종적으로 3차원 국가위치 기준망 체계를 완성하고자 한다.

높이기준은 건설공사, 하천의 물관리 등에서 필수적으로 사용되는 국가 인프라이며 국민의 안전과 재산에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 공간정보 인프라이다. 또한 향후 디지털트윈 등 3차원 공간정보의 핵심인프라로 중요하게 인식되고 있으며, 3차원 공간정보 구축에서 과거와는 달리 그 중요성이 인식되고 있다. 하지만 현재 수준측량과 성과는 과거 수준점과 노선측량에 기반하여 성과가 산출되어 각 환에 대한 정확한 성과 해석과 분석이 필요하다.

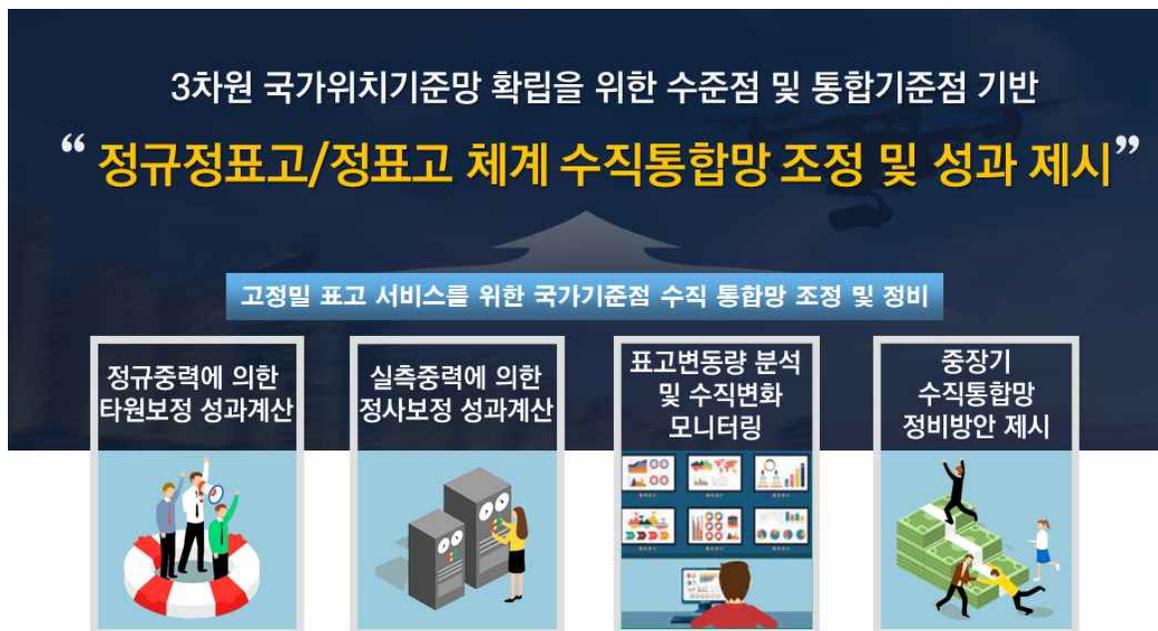


[그림 1-1] 사업추진 배경 및 필요성

2. 연구의 목적

본 연구는 3차원 국가위치기준망 확립을 위해 수준점과 통합기준점 기반의 “수준측량의 정규정표고와 정표고 기반의 망조정 성과 분석 및 조정성과 제시”를 목표로 한다. 이를 위해 각 기준점의 중력값을 집계하고 분석하여 타원보정량과 정사보정량을 산출하여 이를 적용하여 망조정을 실시하였다. 이를 위해 최초로 점검부에 이력관리 기능과 중력값 연산식을 적용하여 망조정을 실시하였다.

국가위치기준망 확립을 위하여 향후 중장기 수직통합망 정비방안을 제시하여 지속가능한 수직위치 망조정이 가능하도록 국가 정책 수립에 이바지 하는 것이 본 연구의 목표이다.



[그림 1-2] 연구 목적

3. 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 국가기준점 중 수준점과 통합기준점이 분포된 한반도와 부속도서이며, 시간적 범위는 2002년부터 2022년까지 우리나라에서 수준측량이 수행된 사업기간을 대상으로 하며, 특히 '통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축' 사업 이후에 수준측량자료가 수집된 기간을 포함하고 있다. 이와 같은 공간과 시간적 범위의 수준측량자료에 대한 연구내용은 다음과 같이 5개 세부과제로 구성하여 단계적으로 수행하였다.

1) 재관측 필요 수준점 및 통합기준점에 대한 불부합 원인 분석

- (1) 수준점과 통합기준점 1차 통합 망조정에 사용된 수준측량 데이터 분석 및 2020~2021년 개방 및 불부합 노선에 대한 수준측량 데이터, 수준점, 통합기준점 이력 및 성과 분석
- (2) 정사보정량 계산을 위하여 망조정에 사용될 전국 수준점 및 통합기준점의 중력측량 값 분석

2) 수준점 및 통합기준점 높이성과에 대한 상시 망조정성과 산출체계 전략 수립

- (1) 수준망에 통합기준점을 추가한 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출의 최적 방안 도출
- (2) 국가기준점 수직위치 상시 망조정 산출 체계 전략 수립

3) 정규정표고 기반 수직 망조정 및 이전 고시성과 기준 기준점 표고변동량 분석

- (1) 전국 수준환 및 통합기준점 망조정 실시('17~'19) 결과와 '20~'21년 수준측량 결과를 통합한 국가기준점 수직위치 통합 망조정 실시
- (2) 모든 수준점 및 통합기준점에 대한 직접수준측량 높이차에 정규중력을 이용한 “타원보정”을 실시하여 “정규정표고”에 의한 통합 망조정을 수행하고 이전 고시성과 기준 기준점의 표고변동량 분석

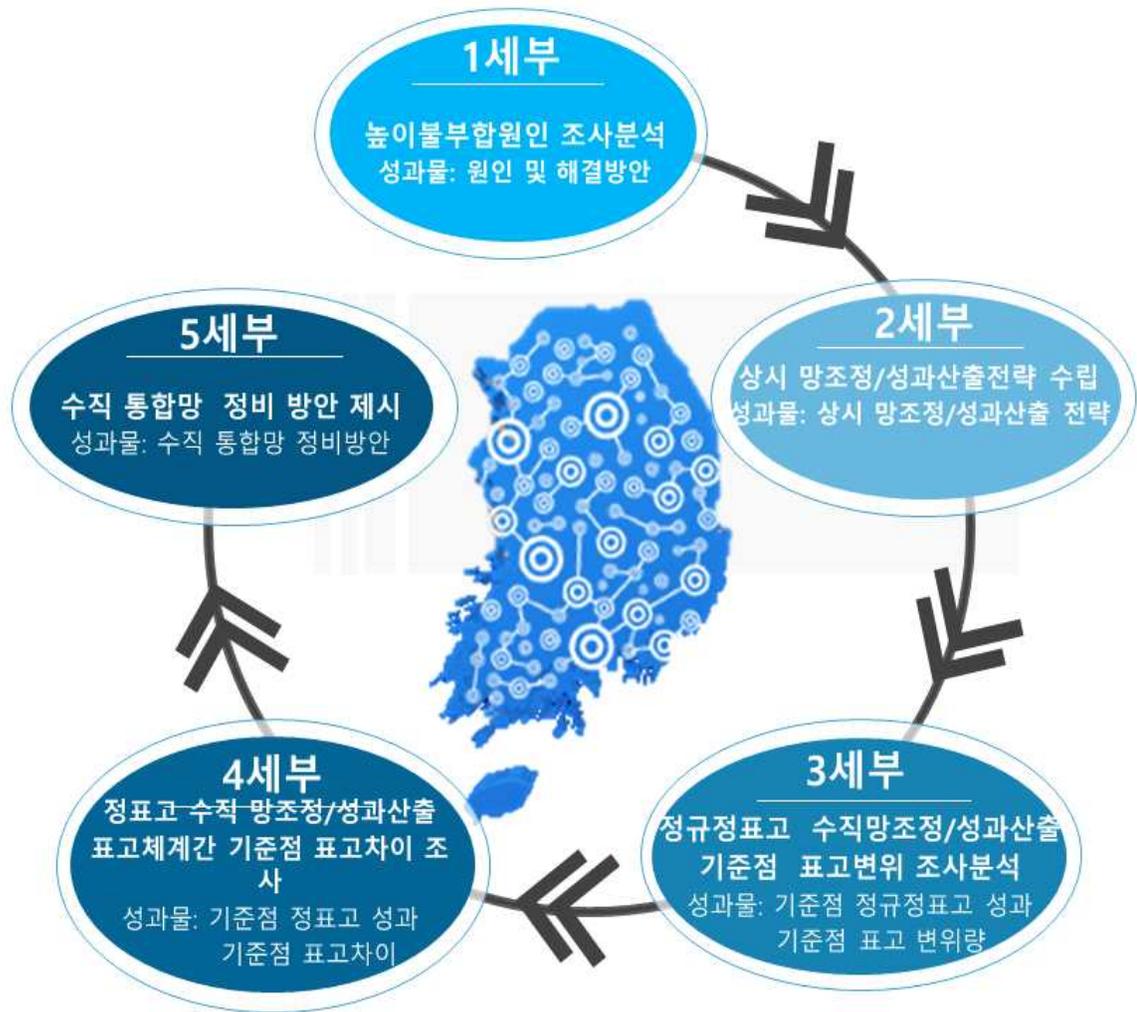
4) 정표고 기반 국가기준점 수직 망조정

- (1) 모든 수준점 및 통합기준점에 대한 직접수준측량 높이차에 실측중력을 이용한 “정사보정”을 실시하고 “정표고”에 의한 통합 망조정 수행
- (2) 정규정표고와 정표고의 높이체계간 기준점 표고변동량 분석

5) 국토 수직변위 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비 방안 제시

- (1) 미국, 일본, 유럽연합(EU) 등의 국가수직기준계 및 수준망 관리체계 조사
- (2) IERS의 글로벌 높이체계에 부합하기 위한 수준망 정비계획(안) 마련
- (3) 국토 수직변화 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비방안 제시

본 연구내용은 다음과 같이 5개 세부과제로 구성하여 단계적으로 수행하였다.



[그림 1-3] 세부과제 구성과 연계 수행체계

제2장

재관측 필요 수준점 및 통합기준점에 대한 불부합 원인 분석

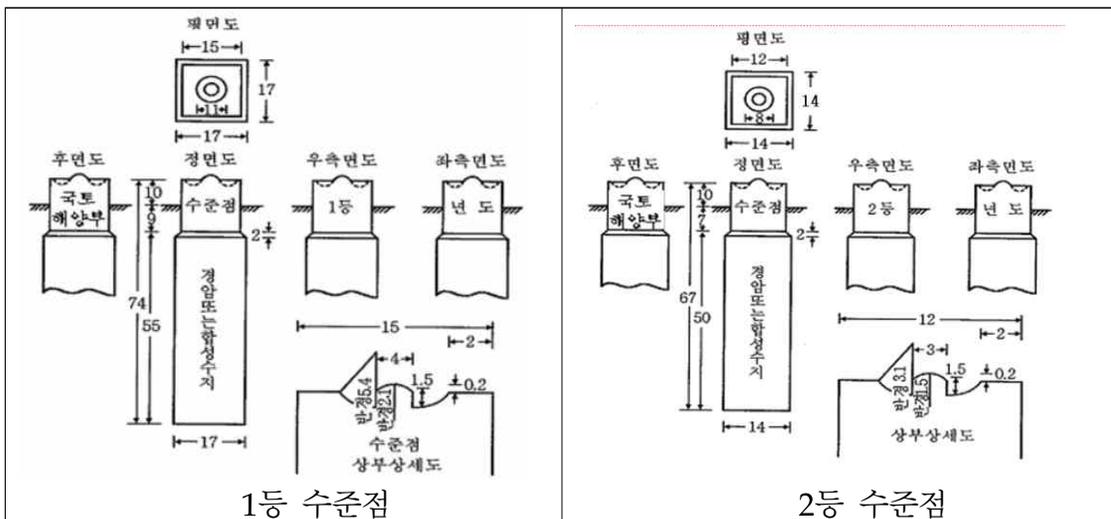
-
1. 수준측량 데이터, 수준점 및 통합기준점 성과 분석
 2. 수준점 및 통합기준점 중력측정값 분석

1. 수준측량 데이터, 수준점 및 통합기준점 성과 분석

가. 수준점 현황

현재 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률」 제2조(정의)에 의하면, 측량기준점¹⁾이란 측량의 정확도를 확보하고 효율성을 높이기 위하여 특정 지점을 측량기준에 따라 측정하고 좌표 등으로 표시하여 측량 시에 기준으로 사용되는 점을 말한다. 측량기준점은 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률」 제7조(측량기준점)에 의거하여 국가기준점, 공공기준점, 지적기준점으로 구분하고 있다. 국가기준점²⁾은 측량의 정확도를 확보하고 효율성을 높이기 위하여 국토교통부장관이 전 국토를 대상으로 주요 지점마다 정한 측량의 기본이 되는 측량기준점이다.

「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령」 제8조(측량기준점의 구분)에서 국가기준점 7종(우주측지기준점, 위성기준점, 수준점, 중력점, 통합기준점, 삼각점, 지하점), 공공기준점 2종(공공삼각점, 공공수준점), 지적삼각점 3종(지적삼각점, 지적삼각보조점, 지적도근점)으로 구분하고 있으며, 수준점의 정의는 “높이 측정의 기준으로 사용하기 위하여 대한민국 수준원점을 기초로 정한 기준점”으로 정의된다.



[그림 2-1] 수준점표지의 형상 및 규격(법률 시행규칙 별표1)

1) 국토교통부, 공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률, 제2조(정의)제7항
 2) 국토교통부, 공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률, 제7조(측량기준점) 제1항

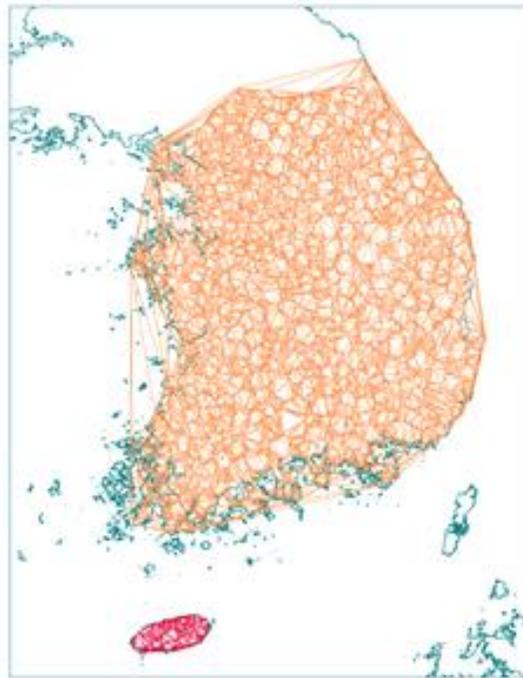
수준점은 통합기준점 신설에 따라 2013년부터 추가로 설치되지 않고 있으며, 지역별로 정비 및 유지관리만 수행되고 있다. 하지만 기준점의 이설은 삼각점 보다 활발히 수행되고 있어 국토지리정보원에서도 지속적으로 관리하고 있다.

<표 2-1> 수준점의 연도별 설치 및 정비 현황

(단위:점)

연 도	설치현황		정비 및 유지관리		이 설	비 고
	수량	지 역	수량	지 역		
총 계	7,218	전체		전체	296	
2007년 이전	4,748/400	경기,전남,제주	846	경기,전남,제주	16	
2008년	756	전남,전북,경남	957	경기, 경북, 강원 일부	22	
2009년	814	경기,전남,전북,경북,충북	-	-	34	
2010년	207	경기,전남	4,630	전국유지관리,환경개선	29	
2011년	223	전남,경남	313	8환 전체	27	
2012년	70	경기,강원	882	9환, 11환, 20환 전체	27	
2013년	-		488	7환 전체	29	
2014년	-		134	강원	54	
2015년	-		-		58	

<자료: 국토지리정보원 국토측량과> 발췌 : 측량기준점 통합체계 연구보고서



[그림 2-2] 1,2등 수준점 현황

본 연구에서는 총 5,997(1등: 935점, 2등:5,062점)개의 수준점 현황을 조사하였으며, 각 환별에서 사용된 기준점으로 다시 정리하였다.

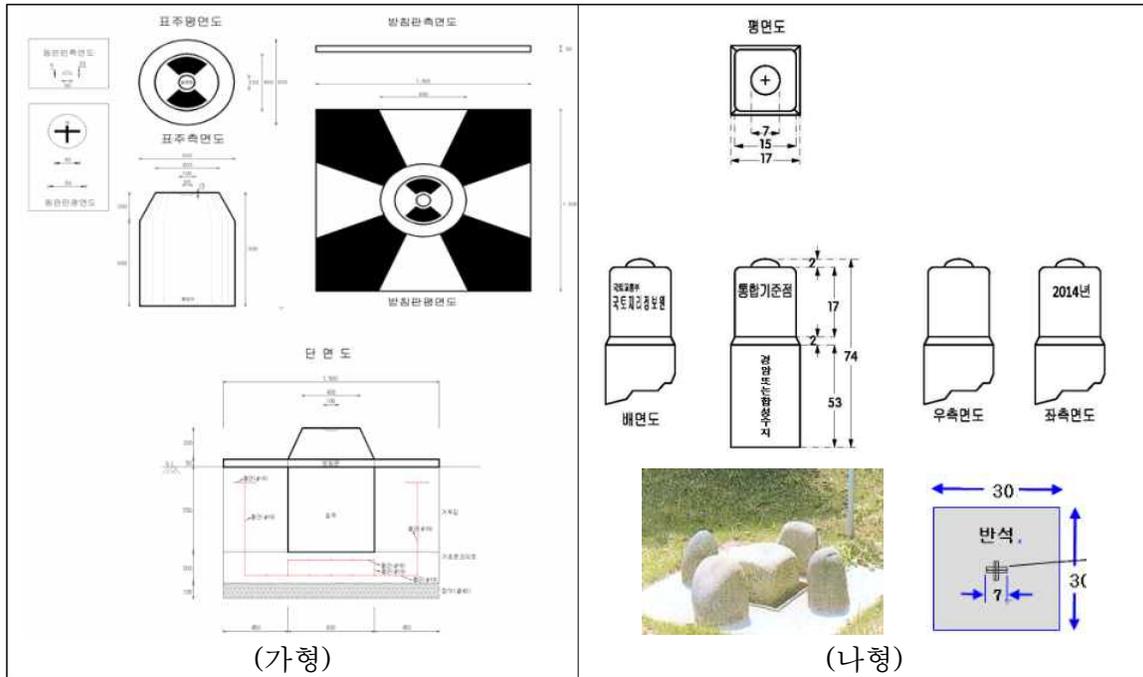
<표 2-2> 환별 1등, 2등 수준점수와 비율 (2등환 경계 노선의 중복점 포함)

환 번호	1등수준점수	2등수준점수	총 합계	1등수준점비율	2등수준점비율
01환	136	459	595	22.9%	77.1%
02환	210	533	743	28.3%	71.7%
03환	140	231	371	37.7%	62.3%
04환	118	341	459	25.7%	74.3%
05환	144	433	577	25.0%	75.0%
06환	99	220	319	31.0%	69.0%
07환	139	478	617	22.5%	77.5%
08환	89	244	333	26.7%	73.3%
09환	127	294	421	30.2%	69.8%
10환	106	203	309	34.3%	65.7%
11환	17	214	231	7.4%	92.6%
12환	108	238	346	31.2%	68.8%
13환	45	222	267	16.9%	83.1%
14환	53	366	419	12.6%	87.4%
15환	103	271	374	27.5%	72.5%
16환	0	177	177	-	100.0%
20환	53	375	428	12.4%	87.6%
계	1,687	5,299	6,986	24.1%	75.9%

나. 통합기준점 현황

국토지리정보원은 국가위치체계에서 평면위치체계와 높이위치체계가 이원화되는 문제를 해결하기 위하여 2008년부터 경위도, 높이 및 중력값을 포함하는 통합기준점을 신설하여 현장에 설치하고 있다. 이러한 높이기준체계 변화에 따라 기존 수직망조정에 통합기준점을 이용하여 새로운 망조정을 지속적으로 실시하고 있다.

현재 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행규칙」 제3조 제1항 및 [별표1]에 의한 통합기준점 형상은 기존의 “가”형 이외 추가로 “나형”을 이용하고 있다.



[그림 2-3] 2017년 통합기준점표지의 형상 및 규격(법률 시행규칙 별표1)

통합기준점(나형)은 1개의 표주와 반석으로 구성된다. 반석은 30cm×30cm의 사각형 형태로 과거 1등 삼각점의 반석과 크기와 형태가 동일하다. 표주는 1등 수준점과 크기는 유사하나, 표석 상부가 호의 형태로 돌출되어 있으며 상부의 십자선은 음각으로 되어있다. 또한, 수준점과 같이 보호석이 포함되어 있다. 통합기준점은 전국에 5,384점이 있으며 점간 평균밀도를 3km를 목표로 설치되고 있다.



[그림 2-4] 통합기준점 현황

본 연구에서는 국토지리정보원에서 관리하고 있는 수준점과 통합기준점과 기타 기관에서 관리하고 있는 점(예, 중력점, 위성기준점) 중 총 11,596점을 이용하였으며, 그 중 수준점은 6,174점으로 53%, 통합기준점은 5,355점으로 46%, 그 외 기준점은 67점으로 1%를 차지한다.

<표 2-3> 환별 높이 기준점 수와 비율 (2등환 경계 노선의 중복점 포함)

환 번호	1등수 준점 수	2등수 준점 수	(1등+2 등) 수준점	통합기 준점	기타	총 합계	수준점 비율	통합기 준점비 율	기타 비율
01환	136	459	595	504	4	1103	53.9%	45.7%	0.4%
02환	210	533	743	538	10	1291	57.6%	41.7%	0.8%
03환	140	231	371	290	5	666	55.7%	43.5%	0.8%
04환	118	341	459	343	7	809	56.7%	42.4%	0.9%
05환	144	433	577	619	8	1204	47.9%	51.4%	0.7%
06환	99	220	319	303	8	630	50.6%	48.1%	1.3%
07환	139	478	617	499	8	1124	54.9%	44.4%	0.7%
08환	89	244	333	279	7	619	53.8%	45.1%	1.1%

09환	127	294	421	285	9	715	58.9%	39.9%	1.3%
10환	106	203	309	287	4	600	51.5%	47.8%	0.7%
11환	17	214	231	216	4	451	51.2%	47.9%	0.9%
12환	108	238	346	369	5	720	48.1%	51.3%	0.7%
13환	45	222	267	279	6	552	48.4%	50.5%	1.1%
14환	53	366	419	318	6	743	56.4%	42.8%	0.8%
15환	103	271	374	233	6	613	61.0%	38.0%	1.0%
16환	0	177	177	128	2	307	57.7%	41.7%	0.7%
20환	53	375	428	331	6	765	55.9%	43.3%	0.8%
계	1,687	5,299	6,986	5,821	105	12,912	13.1%	45.1%	0.8%

다. 수준측량 데이터 수집

1) 기준점 수집 및 정리

현재 국토지리정보원에서 보유하고 있는 수준점과 통합기준점에 대한 경위도값과 높이값, 중력값에 대한 집계표를 작성하였다. 자료 조사를 위해 점의 조서를 찾아 점별 성과를 찾아 집계표를 작성하였으며, 최종 성과는 엑셀 파일로 저장하여 순번과 기준점 별로 정리하였다.

<표 2-4> 기준점별 경위도값, 높이값 및 중력값(일부발취)

연번	점명	세계측지계		H (m)	관측중력 (mGal)
		B	L		
1	20-00-33-01	38-23-39.5	128-27-42.8	4.524	980045.315
2	20-00-33-02	38-24-17.6	128-28-27.6	2.463	980052.175
3	20-00-33-03	38-25-30.9	128-27-39.4	5.046	980053.296
4	20-00-33-04	38-26-15.8	128-26-45.2	4.062	980054.506
5	20-00-33-05	38-27-07.3	128-25-42.3	8.143	980055.493
6	20-00-33-06	38-28-10.2	128-25-15.0	8.687	980058.601
7	20-00-33-07	38-29-03.0	128-26-02.7	3.852	980064.587
8	20-00-33-08	38-29-48.8	128-25-22.5	14.159	980063.209
9	34-44-00	38-15-53.4	128-21-31.6	519.635	979911.067
10	34-47-00	38-19-42.8	128-22-38.5	114.568	979997.968
11	34-48-00	38-21-22.9	128-22-54.0	70.424	980011.806

12	34-49-00	38-22-29.3	128-24-51.3	24.827	980029.173
13	34-50-00	38-22-38.6	128-26-20.0	16.002	980035.825
14	교BM23	38-22-42.6	128-28-01.6	16.745	980040.754
15	09-00-16-15	37-51-03.1	128-46-01.6	31.062	979973.611

(후략)

<표 2-5> 기준점 고시성과 집계표(일부 발췌)

종류	명칭	상태	관측일	고시일	경도	위도	표고
수준점	07-14-25-11	사용 가능	2017- 09-07	2007- 11-01	128 55 39.3	37 7 16.8	809.7908
수준점	12-00-38-05	사용 가능	1955- 01-01	2009- 12-15	126 39 15.5	35 56 28.7	7.5860
수준점	37-06-01	사용 가능	2006- 06-01	2007- 11-01	126 43 48	35 58 49.6	4.4788
수준점	02-02-00-00	사용 가능	2005- 08-18	2007- 11-01	127 25 31.4	35 47 30	291.9809
수준점	02-05-10-06	사용 가능	2005- 07-24	2007- 11-01	127 41 4.1	35 53 28.6	443.8950
수준점	13-05-13-10	사용 가능	1955- 01-01	2007- 11-01	126 33 34.3	35 41 49.2	14.8648
수준점	01-02-09-08	사용 가능	2005- 10-17	2007- 11-01	127 9 26.8	35 30 36.9	128.2360
수준점	02-13-34-08	사용 가능	2005- 10-04	2007- 11-01	127 40 37	35 42 7	512.8705
수준점	13-04-11-06	사용 가능	2007- 07-22	2007- 11-01	126 27 15.6	35 21 31.3	6.7800

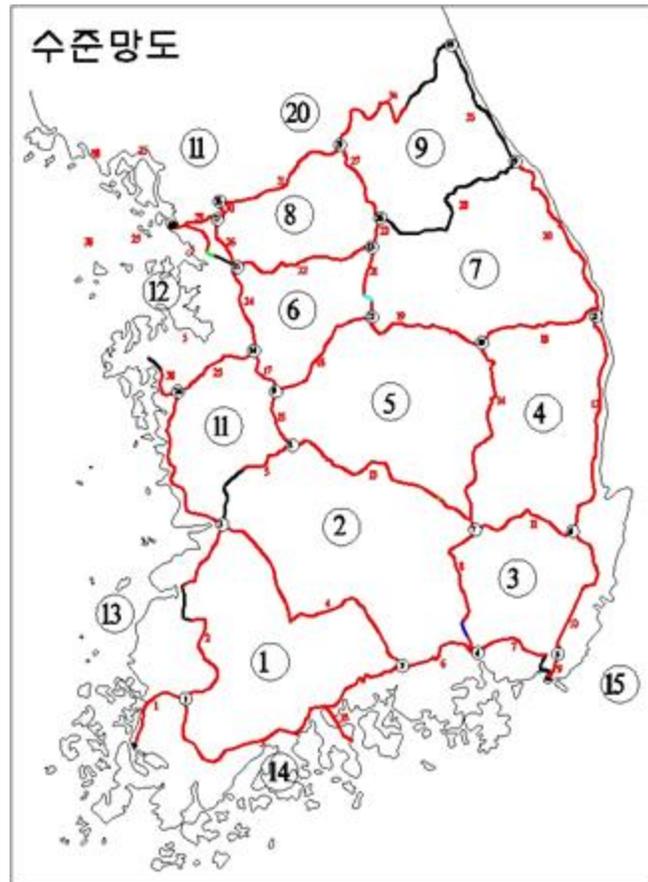
중략

통합 기준점	U청송30	사용 가능	2019- 07-18	2019- 12-24	129 14 31.29217	36 26 48.98702	130.4263
통합 기준점	U청송46	사용 가능	2019- 07-22	2019- 12-24	129 07 46.63032	36 23 01.52042	239.3059
통합 기준점	U청송65	사용 가능	2019- 07-22	2019- 12-24	129 07 06.79363	36 20 48.25435	275.8787
통합 기준점	U청송73	사용 가능	2019- 07-30	2019- 12-24	129 03 05.76704	36 18 27.54598	514.9341
통합 기준점	U청송74	사용 가능	2019- 08-25	2019- 12-24	129 04 53.23269	36 19 03.71454	290.3167

라. 환별 기준점 및 노선 집계

수직위치 망조정을 위해 먼저 1등환 현황과 경계에 대한 자료를 정리하였다. 각 환별로 사용된 기준점과 2등환에 대한 현황파악을 실시하였다. 2021년 사업의 가장 큰 성

과는 제주도 지역인 16환을 추가로 망조정을 실시한 것이다. 아래 그림은 전국의 1등환 배치도를 나타낸 것이다.



[그림 2-5] 1등환 배치도

환별 관측구간과 기준점 수량은 아래 표과 같다. 2021년 연구사업에서는 총 16개의 육지부 1등환을 사용하였으며, 제주도 지역의 환으로부터 점검계산부를 작성하여 별도의 망조정을 실시하였다. 2등환은 육지부에서 1,440개, 제주도 48개로 총 1,488개를 사용하였으며, 구간은 경계부의 중복을 제외하고 총 13,079개, 기준점은 경계부의 중복을 제외하고 총 11,596점을 사용하였다.

<표 2-6> 환별 관측구간 및 기준점 수량 (2등환 경계의 중복 노선 및 중복점 포함)

1등환	관측구간(개방)	기준점	2등환
1환	1216(24)	1103	138
2환	1416(12)	1291	138
3환	727(6)	666	68
4환	888(10)	809	95
5환	1365(10)	1204	172
6환	690(13)	630	74
7환	1156(65)	1124	98
8환	678(15)	619	75
9환	758(19)	715	63
10환	655(7)	600	63
11환	504(6)	451	60
12환	819(16)	720	117
13환	595(28)	552	73
14환	790(34)	743	85
15환	661(4)	613	55
16환	351(2)	307	48
20환	804(25)	765	66

각 환별로 사용된 기준점은 평균적으로 km당 약 0.33점이며, 점당으로 환산하면 각 점은 약 3.01km 간격으로 설치되었다. 점의 밀도가 가장 빈약한 구간은 12환으로 1km에 약 0.29점이 있으며, 점 간격이 3.41km이다. 반대로 기준점의 밀도가 가장 높은 환은 16환으로 km당 0.38점을 보유하고 있으며, 이는 점당 2.61km 간격으로 설치됨을 알 수 있다.

<표 2-7> 환별 기준점 밀도 (2등환 경계의 중복 노선 및 중복점 포함)

1등환	기준점 수량	길이	km당점수	점당km	비고
1환	1103	3433	0.32	3.11	
2환	1291	3854	0.33	2.99	
3환	666	1903	0.35	2.86	
4환	809	2732	0.30	3.38	

5환	1204	4030	0.30	3.35	
6환	630	1831	0.34	2.91	
7환	1124	3156	0.36	2.81	
8환	619	1776	0.35	2.87	
9환	715	1891	0.38	2.64	
10환	600	1734	0.35	2.89	
11환	451	1343	0.34	2.98	
12환	720	2457	0.29	3.41	
13환	552	1776	0.31	3.22	
14환	743	2378	0.31	3.20	
15환	613	1768	0.35	2.88	
16환	307	800	0.38	2.61	
20환	765	2039	0.38	2.67	
합계	12912	38902	0.33	3.01	

금번 연구에서 추가로 반영한 2020년 사업물량과 2021년 사업물량은 아래 표와 같다.

<표 2-8> 2020년 및 2021년 수준측량 사업물량

19년 사업물량	661.9	20년 사업물량	2341.9	21년 사업물량	1825.3
		덕산지구	252.4	고흥지구	187.3
		사천지구	262.3	곤양지구	193
		안동지구	289.5	광주지구	188.4
		언양지구	290.8	김해지구	189.9
		여주지구	233.7	나주지구	167.5
		영암지구	181.4	남원지구	194.2
		임계지구	253	부산지구	192.8
		정읍지구	362.3	영암지구	168.2
		홍천지구	216.5	자은지구	171
				해남지구	173

마. 환별 점검부 작성을 위한 방법 정립

1) 폐합차 점검부 작성 기준 및 방법 제정

수준환폐 합차 점검부의 표준화와 작업효율을 높이기 위해 매뉴얼을 제작하였다. 매뉴얼은 수준환 폐합차 점검부의 작성 과정에 따라 아래 주제별로 구분되어 있으며, 전문은 <부록 2>에 수록하였다.

- I. 사전준비
- II. 환별 수준측량자료정리.xlsx 정리
- III. AutoCAD에서 수준-노선_환도 그리기
- IV. 환폐합차 점검부 작성
- V. 이설, 재설, 수준측량 왕복 높이차 수정

바. 수준측량 데이터 분석을 위한 점검부 작성

1) 분석을 위한 자료 정리

자료처리의 일관성과 통일성을 유지하기 위해 사용된 기준점은 엑셀(Excel) 파일로 저장하여 관리하였다. 엑셀에서 각 환별로 연산식을 적용하여 기준점 성과와 자동으로 연계하여 전체적으로 각 환에서 통일된 작업이 이루어지도록 수행하였다.

또한 망조정을 위해 기준점의 인식이 안되는 문제를 해결하기 위해 각 기준점의 명칭을 통일하였다. 특히 구점의 명칭이 달리 표현되어 인식의 오류가 가장 많았다.

본 연구에서는 아래 그림과 같이 환폐합차점검부에서 연산식을 적용하여 기준점과의 자동연계 및 적용을 실시하였다.

업 입 세 인 주										대한공간정보학회 컨소시엄										
□ 국가기준점 수직위치 항조정 및 정비가력연구										환번호* 15										
순번	점 번호	종류	거리 (m)	부속거리 (m)	동	북	평균	교차	교차	관측표고	분	영	타감정량	최종성과	상과 백 교	정	위	도	사업지구명	타
		상태								97.1665	오	자		97.166	0.00	129-15-31.3	35-31-47.4			
627	2	10-12-00	2.046	2.046	-18.80600	18.80910	-18.809350	-0.00090	0.00358	78.3610	0.0036			78.364	78.3687	-0.00	129-14-26.3	35-31-09.1	15	15
628	3	10-13-01	2.674	4.720	-31.23430	31.23600	-31.235150	0.00170	0.00409	47.1258	0.0062			47.134		-0.01				
629		계	4.720		-50.04030	50.04190	-50.04070	0.00080	0.00839	125.4868										
630		10-12-01								47.1258							129-14-47.0	35-31-43.8		
632	4	10-13-00	2.152	6.872	-18.87930	18.87720	-18.87830	-0.00030	0.00867	28.2473	0.0118			28.254	28.2574	-0.0005	129-15-30.2	35-31-36.6	06	06
634		10-13-00								28.2473							129-15-30.2	35-31-36.6		
636	6	10-12-07	4.185	12.591	-32.29045	32.28933	-32.289290	-0.00112	0.00311	14.3516	0.0146			14.3534	14.3536	0.0018	129-15-24.4	35-31-09.9	17	17
637	7	10-06-07-32	2.844	4.35	-32.7010	32.70340	-32.70220	-0.00030	0.00340	14.6330	0.0198			14.6408	14.6358	0.0068	129-17-42.8	35-31-41.1	17	17
639		계	8.983		-13.81478	13.81254	-13.81365	-0.00032	0.01651	29.8660							129-15-34.6	35-31-02.0		
640		10-02-07-32								14.6333							129-15-34.6	35-31-02.0		
641	8	10-00-07-31	2.050	17.485	-9.40530	9.40540	-9.405750	0.00070	0.00558	5.2281	0.0303			5.2354	5.2446	0.0068	129-15-25.2	35-29-59.5	09	09
642		계								14.6333										

엑셀 연산식 적용으로 자동연계 설정

4659	4657	10-10-00	35-27-57.9	129-12-35.1	60.1288	979788.495
4660	4658	10-12-00	35-31-09.1	129-14-26.3	62.8854	979795.37
4661	4659	10-13-00	35-32-36.6	129-15-30.2	28.2674	979809.87
4662	4660	10-14-01	35-33-11.9	129-16-50.5	4.2294	979823.428

[그림 2-6] 기준점 정리의 일관성 확보로 점검부 자동연산

2) 기존 계산부와의 차별성 및 특징

2021년 연구사업에서는 기존의 점검부에서 타원보정량과 정사보정량을 산출하여 기준점별로 정규정표고와 정표고를 산출하여 각 환별로 망조정을 실시할 수 있는 기초자료를 생성하였다.

또한 수준측량에서 가장 중요한 부분인 환폐합을 확인하기 위하여 각 환의 개방노선의 유무 및 측량 방향성을 파악할 수 있도록 하였다. 이는 2등환의 이력확인과 주석을 부여하여 시간이 지나도 각 환의 생성과 수정 내역을 알 수 있도록 하였다. 또한 매크로 기능을 적용하여 각 노선의 시점과 종점의 높이차를 확인하여 망조정을 쉽게 하는 기능을 부여하였다.

<표 2-9> 기존 계산부와의 차별성

구분	2014년 사업	2019년	2021년 연구
사업명	차세대 국가기준점망 연구	통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축	국가기준점 수직위치망조정 및 정비계획 연구
계산부 작성	수준측량계산부(xlsx) 작성 (시-종점 순차 연결)	환폐합차점검부(xlsx) 작성 (시-종점 순차 연결)	환폐합차점검부 (xlsx) 작성 (시-종점 관측순 정리)
이력관리	이설점 정리(근거제시)	이설점 정리	이설점정리(근거제시)
보정량 계산	타원보정량 계산	없음	타원보정량 계산 정사보정량 계산
특이사항	계산부 작성으로 수준측량 문서화 기여	환별 환폐합차 확인 및 초과 여부 판단 우수	- 주석 부여 - 이력관리 - 개방/결합 환 확인 가능 - 매크로 적용으로 시/종점 자동 산출 기능 부여

아래 그림은 2019년의 점검부이며, 2등환의 사용된 점과 전체 왕복교차의 성과 및 한계를 파악하는 목적으로 작성되어 각 환의 환폐합차 한계 및 초과 여부를 판단하기에는 우수하였다. 하지만 타원보정량 및 정사보정량 산출 및 적용이 없어 정규정표고와 정표고에 대한 망조정에는 한계가 있으며 이에 대한 개선이 필요하였다.

순번	점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관측 결과			교차 한계	분 배 오차량	타점정량	최종성과	성과 비교		경도	위도	사업지구명	
					량	폭	평균	교차				기준성과	차이				
1	20-00-33-08	완전							14.1560			14.1560	0.0000	128-29-23.0	38-29-49.0	14°00'00"00"00"	
2	니고998	완전	-4.339	4.339	-46.46923	-46.46962	-46.469425	-0.00039	0.00291	60.6254	-0.0006	60.6248	60.6093	0.0155	128-29-39.9	38-30-06.7	14°00'00"00"00"
3	니고996	완전	1.905	6.245	-14.00784	14.00758	-14.007710	-0.00026	0.00345	46.6177	-0.0008	46.6169	46.6013	0.0156	128-29-39.1	38-30-49.4	14°00'00"00"00"
4	니고995	완전	3.813	10.057	82.18846	-82.18717	82.187815	0.00129	0.00488	128.8055	-0.0013	128.8042	128.7807	0.0155	128-21-34.5	38-31-09.8	14°00'00"00"00"
5	니고994	완전	2.689	12.746	390.33207	-390.33081	390.331440	0.00126	0.00410	519.1370	-0.0017	519.1353	519.1201	0.0152	128-20-22.4	38-30-51.6	14°00'00"00"00"
6	니고984	완전	3.171	15.917	-108.64122	108.64079	-108.641005	-0.00043	0.00445	410.4960	-0.0021	410.4939	410.4778	0.0161	128-20-32.8	38-32-11.3	14°00'00"00"00"
7	니고984	완전	4.177	20.094	-188.63461	188.63388	-188.635245	0.00127	0.00511	221.8607	-0.0027	221.8581	221.8415	0.0166	128-20-42.1	38-33-46.2	14°00'00"00"00"
8	니고985	완전	6.697	26.790	-178.73126	178.73086	-178.731060	-0.00040	0.00647	43.1297	-0.0036	43.1261	43.1096	0.0165	128-22-25.6	38-34-32.2	14°00'00"00"00"
9	니고987	완전	2.811	29.601	-22.55609	22.55669	-22.556390	0.00060	0.00419	20.5733	-0.0039	20.5693	20.5530	0.0163	128-23-20.8	38-34-17.9	14°00'00"00"00"
10	니고977	완전	2.491	32.093	-11.12129	11.12193	-11.121610	0.00064	0.00395	9.4517	-0.0043	9.4474	9.4312	0.0162	128-24-13.6	38-33-27.6	14°00'00"00"00"
11	20-00-33-11	완전	1.942	34.035	-5.83681	5.83797	-5.837390	0.00116	0.00348	3.6143	-0.0045	3.6098	3.6112	-0.0014	128-24-03.0	38-32-29.0	14°00'00"00"00"
12	20-00-33-10	완전	1.840	35.875	65.42311	-65.41658	65.419845	0.00653	0.00339	69.0341	-0.0048	69.0294	69.0312	-0.0018	128-24-25.0	38-31-37.0	14°00'00"00"00"
13	니고997	완전	1.760	37.635	-65.99404	65.99442	-65.994380	0.00006	0.00332	3.0397	-0.0050	3.0347	3.0188	0.0159	128-25-15.2	38-31-13.5	14°00'00"00"00"
14	20-00-33-09	완전	935	38.570	15.65551	-15.65490	15.655205	0.00061	0.00342	18.6949	-0.0051	18.6898	18.6898	0.0000	128-25-06.0	38-30-55.0	14°00'00"00"00"
15	20-00-33-08	완전	2.313	40.883	-4.53036	4.53066	-4.530320	0.00032	0.00380	14.1614	-0.0054	14.1560	14.1560	0.0000	128-25-23.0	38-29-49.0	14°00'00"00"00"
20	계			40.883	40.883	0.01456	0.00372	0.005420	0.01828	0.01279	총합량차 한계			-0.0054	계합차		

[그림 2-7] 2019년 환폐합차 점검부

이에 본 연구에서는 아래 그림과 같이 타원보정량과 정사보정량을 적용하여 각 점의 정규정표고 높이차와 정표고 높이차를 산출하였다. 이를 바탕으로 전체 정규정표고 망조정과 정표고 망조정 수행의 기초자료로 활용하였다. 또한 이력관리를 위해 2등환의 단순 나열에서 망조정 성과를 확인하면서 수준측량의 노선별 성과를 입력하여 각 환의 측량 순서와 연결 흐름을 확인하여 수준측량 환 작업을 쉽게 확인하였다.

순번	점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관측 결과			교차 한계	분 배 오차량	타점정량	최종성과	성과 비교		경도	위도	사업지구명	
					량	폭	평균	교차				기준성과	차이				
6	계우동점	완전							11.1320			11.1320	0.0000	128-31-18.7	35.30-48.3		
7	16-00-02-01	완전	2376	2376	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
8	16-00-02-01	완전	2376	4752	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
9	16-00-02-01	완전	2376	7128	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
10	16-00-02-01	완전	2376	9504	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
11	16-00-02-01	완전	2376	11880	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
12	16-00-02-01	완전	2376	14256	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
13	16-00-02-01	완전	2376	16632	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
14	16-00-02-01	완전	2376	19008	35.7268	-35.7273	35.7268	-0.00051	0.00077	48.8588	0.0008	47.8828	47.8828	-0.0001	128-32-21.3	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
15	계우동점	완전							11.1319			11.1319	0.0000	128-31-18.7	35.30-48.3		
16	16-00-02-01	완전	1471	1471	6.4898	-6.4898	-0.0007	0.00064	20.8192	0.0017	20.8192	20.8192	-0.0001	128-30-57.2	35.30-52.2	16°00'00"00"00"	
17	16-00-02-01	완전	1471	2942	6.4898	-6.4898	-0.0007	0.00064	20.8192	0.0017	20.8192	20.8192	-0.0001	128-30-57.2	35.30-52.2	16°00'00"00"00"	
18	합계		3607	3607	0.0041	-0.0033	0.0040	0.0010	0.01028	총합량차 한계							
19	L160001,계우도 환원,16-00-02-01,35.72608,2376.07 수준점,계우,2.126-31.16,7.33-30.48,5,11.32																
24	16-00-02-01	완전							47.8828								
25	16-00-02-01	완전	1818	1818	25.9407	-25.9404	25.9406	0.00003	0.00008	61.8038	0.0008	61.8038	61.8038	-0.0001	128-30-08	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
26	16-00-02-01	완전	1818	3636	25.9407	-25.9404	25.9406	0.00003	0.00008	61.8038	0.0008	61.8038	61.8038	-0.0001	128-30-08	35.30-02.4	16°00'00"00"00"
27	16-00-02-01	완전	1818	5454	25.9407	-25.9404	25.9406	0.00003	0.00008	61.8038	0.0008	61.8038	61.8038	-0.0001	128-30-08	35.30-02.4	16°00'00"00"00"

[그림 2-8] 2021년 점검부 및 특징

2021년 연구의 환폐합차 점검부의 특징은 다음과 같다.

- ① 통합기준점포함 수준환을 1등 수준환 기준 2등 수준환에 포함하여 정리
- ② 타원보정량과 정규정표고 표고차 계산
- ③ 정사보정량과 정표고 표고차 계산
- ④ 망조정 입력자료 자동 작성 프로그램 포함
- ⑤ 이력관리, 이(재)설점 표고정리 근거 기록

2019년에 작성된 점검부와의 차별성과 특징은 아래 표와 같다. 2019년 점검부는 전국단위 수준측량 망조정과 각 환별 폐합차를 확인 및또한 각 환에 사용된 기준점의 고시성과 및 경위도를 입력하여 정규정표고 산출 및 노선별 순차연결 확인에 편리하도록 작성되었다.

하지만 환의 노선별 시·중점의 관측순 연결과 분류체계를 확인할 수 있는 세밀함은 부족하여 각 환에 사용된 기준점과 노선의 1차적인 점검 및 성과 확인에는 부족함이 있었다. 이에 본 연구에서는 각 노선의 분류체계를 제시하여 노선별 주석 및 이력관리를 가능하게 하였으며, 특히 각 기준점의 중력값을 입력하여 정사보정량을 계산하여 전국 단위의 정표고 망조정을 가능하게 하였다.

<표 2-10> 기존 연구 및 계산부 성과 비교표

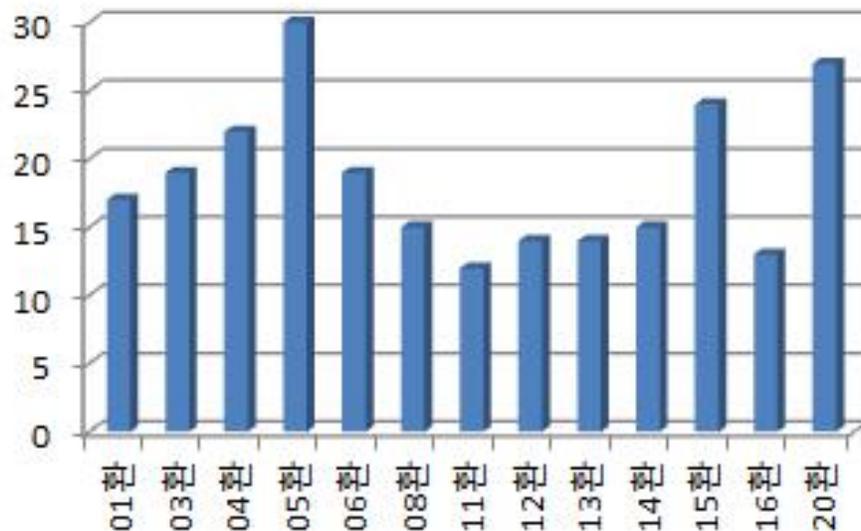
구분	통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축 (2019년)	국가기준점 수직위치망조정 및 정비계획 연구 (2021년)
계산부 작성	- 환폐합차점검부(xlsx) 작성 - 시-중점 순차 연결	- 환폐합차점검부 (xlsx) 작성 - 시-중점 관측순 정리
계산부 비교	- 환별 환폐합차 확인 및 초과 여부 판단 우수	- 주석 부여 - 이력관리 - 개방/결합 환 확인 가능 - 매크로 적용으로 시/중점 자동 산출 기능 부여
환별 노선별 분류 및 점검	- 환별 점검 중심으로 작성되어 노선별 분류 체계 부재 - 노선별 점검 및 검토를 할 수 없음 - 개방/결합노선 등에 대한 판단 불가	- 환별 노선 분류 체계 최초 제시 - 노선별 성과 및 이력을 직접 확인 가능 - 노선에 대한 개방/결합 등 판단 가능
환별 노선 작성	- 수준측량계산부의 측량순서 및	- 수준측량계산부의 측량순서 및

방식	년도별 측량사업 구간을 구분하지 않고 시점→종점 순서로 재정리하여 왕높이차와 복높이차, 평균높이차를 기입	년도별 측량사업 구간을 구분하여 측량된 순서대로 시점→종점의 왕높이차, 복높이차, 평균높이차를 기입
계산부의 중점사항	<ul style="list-style-type: none"> - 전국 단위의 환별 점검부 최초 작성 - 환별 사용된 기준점 정렬, 관측결과, 경위도 입력 중점 - 정규정표고 산출 및 계산 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 환별 점검부에 노선별 분류체계 정립 - 노선별 주석, 이력관리, 개방/결합 노선 표기 - 기준점 관측결과, 경위도에 추가적으로 중력값을 입력하여 정표고 산출 토대 마련 - 정규정표고와 정표고 동시 산출 및 계산
조정 대상	<ul style="list-style-type: none"> - 1등환 7개환(4,5,7,8,9,11,20환) + 연결환 일부 - 1150개환 조정 	<ul style="list-style-type: none"> - 1등환 17개환(전국 : 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,20환) - 1370개환 조정
물량	<ul style="list-style-type: none"> - 관측구간 : 12,597 - 기준점 수량 : 11,484 	<ul style="list-style-type: none"> - 관측구간 : 13,734 (△1,137) - 기준점 수량 : 12,240 (△756)
조정계산 알고리즘	- 최소제곱법에 의한 망조정	- 최소제곱법에 의한 망조정
사용 소프트웨어	- MatLab	<ul style="list-style-type: none"> - MatLab - GeoLab - 자체 개발 SW적용(시중점 자동계산) ※ 서로 다른 소프트웨어로 계산하여 상호비교 및 분석
타원보정량 계산	○	○
정사보정량 계산(중력데이터 사용)	×	○
성과물	- 수준점 및 통합기준점의 정규정표고 성과	- 수준점 및 통합기준점의 정규정표고 성과, 정표고 성과
특징	- 3차년도에 나누어 전국 수직망 조정 수행	<ul style="list-style-type: none"> - 한번에 전국수직망 조정 수행 - 최초로 전국단위 정사보정량 계산 및 정표고 성과 산출

사. 수준측량 오류(오차) 사례 현황

수준측량이 실시된 기준점이 환을 구성하지 않은 경우 개방노선이 되어 이 노선상의 관측 높이차는 수준망조정이 되지 않는다. 개방노선에 포함된 기준점은 수준측량의 환 폐합강도에 영향을 미치는 것으로 개방점이 많은 것은 환폐합의 강도가 떨어짐을 의미한다. 전체적으로 약 3%의 개방점을 포함하며, 1등 환별 개방점의 분포는 아래 그림과 같으며 대체적으로 유사한 경향을 보였다. 최대 4%를 보이는 환은 15환, 16환, 20환이며 최저 2%를 보이는 1환과 비교했을 때 특별한 경향은 없는 것으로 판단된다.

따라서 이상점에 대한 분석 결과는 특정 환에 대한 수준측량의 오류의 경향은 찾기 어려우며, 이는 특정지역과 측량 연도에 따른 오류 발생은 아님을 확인할 수 있었다.



[그림 2-9] 개방노선에 포함된 기준점

1) 통합기준점 사용에 따른 환별 정확도 상관성 분석

통합기준점 확장 정책에 따라 수준측량의 수준환 망도에서 통합기준점 신규설치로 인하여 1등환 내에서 다수의 작은 환이 생기고 이로 인해 작은 규모의 2등환과 개방노선이 발생하였다. 이에 통합기준점의 추가 설치로 전체 망도의 정확도 변화 및 경향을 분석하기 위해 아래와 같이 환별 통합기준점 적용 비율 및 정확도와의 상관성을 확인하였다.

각 환에서 조정성과와 고시성과의 표고차이를 산출하였으며 가장 정확도가 높은 0.05m 이내의 구간을 정확도가 높은 구간으로 가정하였을 때, 이 구간의 경향과 통합

기준점 포함 비율과의 상관성을 분석하였다.

3환, 13환~15환에서 0.05m 초과 비율이 다른 환에 비해 많았으며 4환~9환 등은 비슷한 값을 확인하였다. 반대로 통합기준점은 전체 환에서 비슷한 비율로 적용되었기 때문에 이를 감안한다면, 통합기준점 신규설치로 작은 2등환이 많이 발생하여 정확도 저하 및 오류를 발생한다고 판단하기는 어렵다.

<표 2-11> 1등 환별 조정성과와 고시성과의 표고차이 분포

D = 정규정표고 조정표고 - 고시성과)				
1등환	0.05m>D	오차기준점의 비율	통합기준점 비율	비고
01환	35	3%	47%	
02환	63	5%	43%	
03환	173	31%	45%	
04환	17	2%	44%	
05환	30	3%	52%	
06환	21	4%	50%	
07환	19	2%	45%	
08환	4	1%	46%	
09환	2	0%	40%	
10환	31	6%	50%	
11환	6	1%	49%	
12환	65	9%	52%	
13환	64	13%	51%	
14환	111	17%	43%	
15환	84	18%	43%	
16환	5	2%	41%	
20환	6	1%	45%	
계	736	6%	46%	



[그림 2-10] 환별 통합기준점 비율과 정확도 상관성

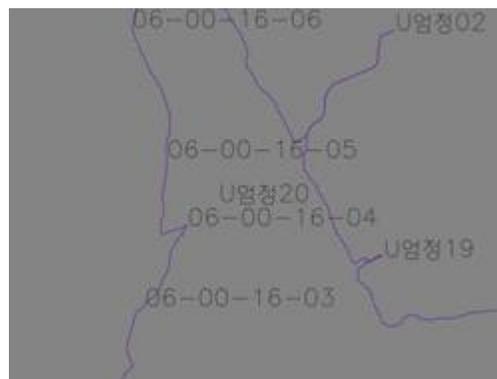
2) 오류 유형별 사례

가) 이설 등으로 점검부 누락 등 오입력 사례

가장 많은 오류 유형으로 이·재설 기준점이 환폐합차점검부에 누락된 사례이다. 이러한 오입력은 전체 환폐합차 결과값에 영향을 주어 환폐합 정확도 저하의 원인이 되고 있다. 따라서 점검부 작성을 위해서는 각 환의 망도와 필요에 따라 점의조서를 확인하는 작업을 거쳐 오입력이 되지 않도록 주의해야 한다.

1597	14	06-00-16-07				
1598	15	U업정02	U업정20노선미 누락되어	7,330		80
1599	16	U업정19	초79값.	13,674		-54
1600	17	U업정16		20,341		5
1601	18	U0310		28,516		56
1602		21-05-00	환선	99	28,115	-0
1603				28,115	97,476	88
1604						
1605	19		인물			
1606	20		인물	2,260	2,260	8
1607	21		인물	2,339	4,000	-17
1608	22		인물	1,958	6,537	-2
1609		U업정20		857	817	
1610	23		인물	1,631	3,469	3
1611	24		인물	2,462	5,051	-8
1612			인물	2,190	5,3129	-
1613				13,985	46,762	-81
1614						
1615						
1616						
1617						
			계	54,624		1

[그림 2-11] 이·재설점 누락



[그림 2-12] 수준망도의 이·재설점

나) 구점-신점 불일치 사례

구점과 신점의 불일치로 각 점을 개별적으로 오인하여 전체 망도와 환폐합을 오류를 발생시키는 사례이다. 점검부 작성에서 점의 명칭과 표기 오류에 따라 구점과 신점을 다른 점으로 판단하여 망조정에서 정확도 저하 원인이 된다. 따라서 작성 지침에 따라 구점에 대한 명확한 표기 및 확인이 필요하다.

8				
9		24-03-01	완전	
0	6	24-02-00(구)	폐기	3,035
1				
2		24-03-01	완전	
3	7	U평택20	완전	99
4	8	U평택21	완전	4,976
5	9	U평택22	완전	4,585
6	10	24-01-00	완전	4,206
7		계		13,866
8				

[그림 2-13] 구점과 신점의 불일치



[그림 2-14] 수준망도의 구점과 신점

다) 망조정 성과와 고시성과 불일치 사례

수준점에 대한 망조정 성과와 고시성과의 불일치가 현저한 경우는 정확한 원인을 판단하기 어렵다. 지반 침하와 같은 자연적인 문제일수도 있으며, 기준점 자체에 대한 부정확한 성과일 수도 있다.

04-03-06-24					
12-08-00	완전	3,459	18,248	-68,49258	68,49307
04-03-06-24					
04-03-06-25	완전	1,969	1,969	-82,85780	82,86060
12-07-00	완전	1,462	3,431	-4,08750	4,08890
계		3,431		-86,94530	86,94950

[그림 2-15] 고시성과 불일치 사례



[그림 2-16] 수준망도의 성과 불일치 점

2. 수준점 및 통합기준점 중력측정값 분석

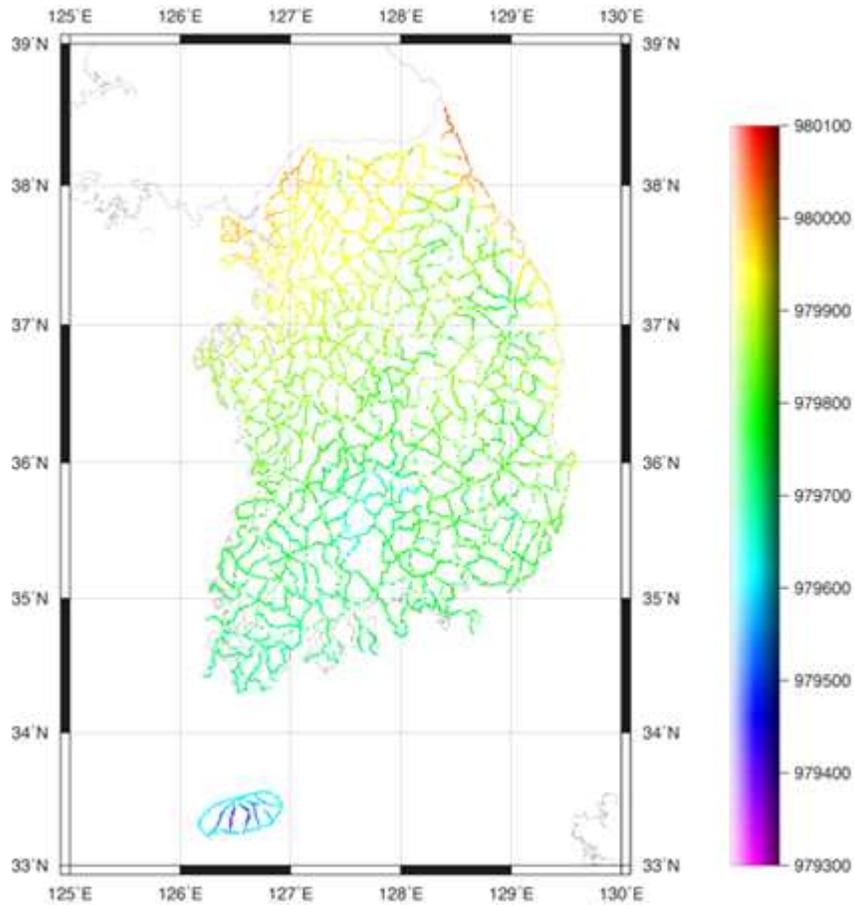
본 연구에서는 정규정표고와 정표고 기반의 망조정을 위해 각 기준점의 중력측정값을 집계하여 분석하였으며 정사보정량 계산을 위한 기본자료로 활용하였다.

<표 2-12>에서 보는 것과 같이 2009년부터 2021년까지 국토지리정보원에서 측정된 중력자료는 총 15,819점이며 그 결과를 DB를 구축하여 관리하고 있다. 이에 2021년 12월에 고시된 724점(통합기준점 93점)을 추가하면 최종적으로 16,534점의 중력성과 DB를 구축하여 본 연구에 활용하였다.

<표 2-12 >연도별 중력기준점 성과 집계표

사업년도	사업지구	Sheet 1				Sheet 2				연도 합계
		수준점	통합기준점	지구별 소계	년도별 소계	절대중력점	위성기준점	삼각점	년도별 소계	
2020	동부지구	235	82	317	635		22	12	61	696
	서부지구	228	90	318		1	11	15		
2019	남부지구		640	640	1443	9		10	74	1517
	북부지구	19	784	803				55		
2018	동북지구		675	675	1430	5			10	1440
	서남지구		755	755		5				
2017	대구지구		76	76	844				0	844
	경기지구		768	768						
	충청지구		729	729		763				
2016	경남지구		34	34	116	4		235	499	615
	경북지구		61	61		1	1	245		
2015	강원지구	1	54	55	135	4		248	508	643
	충북경북		67	67		6		232		
2014	서남지구		68	68	113			270	550	663
	서북지구	29	56	85		10	43	250		
2013	문경지구	14	14	28	152	5		242	531	683
	운봉지구		59	59		1		278		
2012	설악지구	93	0	93	358	13		239	475	833
	태백지구	13	0	13				265		
2011	남부지구	345	0	345	1035	11		199	15	1050
	중부지구	96	0	96		10				
2010	경주지구	939	0	939	2055	5			12	2067
	공주지구	1024	0	1024		2				
	광주지구	1031	0	1031		3	7			
	서울지구	1007	307	1314		1				
	통영지구	1022	0	1022		4				
2009	강원지구	721	0	721	1425				0	1425
	경북지구	704	0	704						
총계		7521	5319	12840	12840	100	84	2795	2979	15819

아래 그림은 전국에 분포된 중력값을 도식화한 것이다.



[그림 2-17] 우리나라 중력값 분포도

정표고 망조정을 위해 각 기준점의 중력값을 집계하였으며, 이와 연계한 정사보정량을 산출하였다. 2021년 연구사업에서 최초로 점검부에서 정사보정량을 산출하였으며 이를 위해 각 기준점의 중력값을 산출하여 정사보정량과 정표고 망조정에 활용하였다.

<표 2-13> 정사보정량 산출을 위한 기준점별 중력값 집계

연번	점명	세계측지계		H (m)	관측중력 (mGal)
		B	L		
1	20-00-33-0 1	38-23-39.5	128-27-42.8	4.524	980045.315
2	20-00-33-0 2	38-24-17.6	128-28-27.6	2.463	980052.175
3	20-00-33-0 3	38-25-30.9	128-27-39.4	5.046	980053.296
4	20-00-33-0 4	38-26-15.8	128-26-45.2	4.062	980054.506
5	20-00-33-0	38-27-07.3	128-25-42.3	8.143	980055.493

	5				
6	20-00-33-0	38-28-10.2	128-25-15.0	8.687	980058.601
	6				
7	20-00-33-0	38-29-03.0	128-26-02.7	3.852	980064.587
	7				
8	20-00-33-0	38-29-48.8	128-25-22.5	14.159	980063.209
	8				
9	34-44-00	38-15-53.4	128-21-31.6	519.635	979911.067
10	34-47-00	38-19-42.8	128-22-38.5	114.568	979997.968
11	34-48-00	38-21-22.9	128-22-54.0	70.424	980011.806
12	34-49-00	38-22-29.3	128-24-51.3	24.827	980029.173
13	34-50-00	38-22-38.6	128-26-20.0	16.002	980035.825
14	교BM23	38-22-42.6	128-28-01.6	16.745	980040.754
15	09-00-16-1	37-51-03.1	128-46-01.6	31.062	979973.611
	5				

중략

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet titled '2021년 수직기준점 조정' (2021 Vertical Reference Point Adjustment). The spreadsheet is divided into several sections, with the main data table titled '점 검 계 산 부' (Point Check Calculation Section). The table contains multiple columns of numerical data, including station IDs, elevations, and various adjustment parameters. A red box highlights a specific section of the data on the right side of the spreadsheet, which appears to be a summary or a specific subset of the main data.

[그림 2-18] 정사보정량 산출을 위한 중력값 적용

수준점 및 통합기준점 높이성과에 대한 상시 망조정성과 산출체계 전략 수립

1. 수준망에 통합기준점을 추가한 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출의
최적 방안
2. 국가기준점 수직위치 상시 망조정 산출 체계 전략

1. 수준망에 통합기준점을 추가한 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출의 최적 방안

가. 수직기준망 현황 분석으로 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출 최적방안

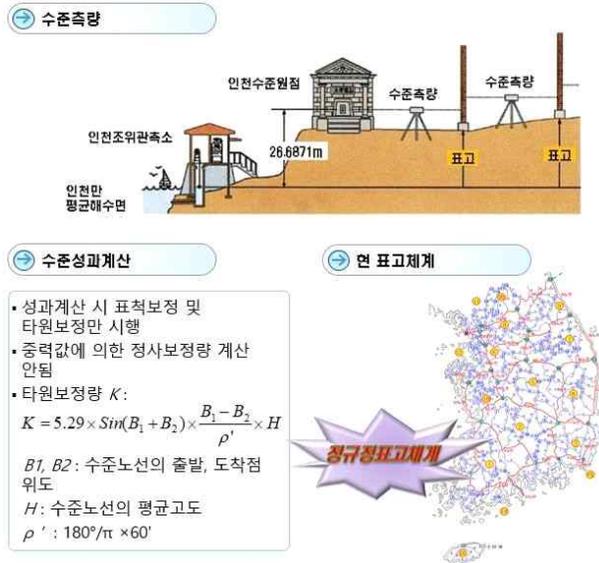
수직기준(Vertical Datum)이란 높이의 기준이 되는 기준면(Reference Surface)를 말하며, 이를 통합하여 수직기준면(Vertical Reference Surface)라고 부르는 것이 일반적이다. 이러한 수직기준면은 육지의 지형이나 구조물 등의 표고를 결정하는 기준이 되며, 해상에서는 해안선이나 수심 등을 결정하는 기준으로 측지학·해양학적으로 중요한 의미를 가지고 있다.

따라서 국가적으로 균일하고, 정확한 국가수직기준체계를 정립하고, 관리하는 것은 정확한 높이 결정이 필요한 건설, 방재, 공간정보 구축과 같은 다양한 분야에서 경제적·시간적 효율성을 확보할 수 있게 할 뿐만 아니라, 다양한 형태의 높이정보 관측자료와 연계되어 최근 급변하는 지구운동(해수면 상승, 지진, 해일 등)에 관한 연구에도 중요한 역할을 수행할 수 있다.

1) 국내 표고체계 현황 분석

표고 체계는 표고기준면과 표고의 척도로 정의되며, 국토지리정보원은 주요 도로를 따라 설치한 수준점들로 수준망을 구축하고, 직접수준측량으로 관측한 수준점 간 높이차를 조정하여 수준점의 성과를 정한다. 우리나라 표고체계는 인천만 평균해수면을 기준으로 전국의 수준점 표고가 결정되며 1990년부터 수행된 1등수준망 재측을 시작으로 2005년까지 2등 수준망 측량을 완료하여 2007년에 신수준성과를 고시하였다.

하지만 기존에 수행된 수준측량은 정규중력식에 의한 타원보정량을 이용하여 매개 수준점에서의 중력 영향을 대체하였으며, 따라서 현재의 표고체계는 정규정표고에 속하고 있다. 하지만 표고 서비스체계가 수준점 중심에서 2008년부터 통합기준점을 기반으로 정비되고, 수준점과 통합기준점에서 중력을 실측하게 되어 정표고 체계로의 전환이 요구되고 있다.



[그림 3-1] 우리나라 표고 체계

2) 3차원 국가위치기준망 수립에 따른 수직기준망 구축

국토지리정보원의 새로운 수직 위치 기준망을 정의하여 기존수준점에 2020년 5월 12일 기준 5625점 통합기준점(1차 1197점 2차 4428점)을 추가하였다.



[그림 3-2] 3차원 통합기준점 체계 변화



[그림 3-3] 추가 통합기준점 기반 수직망

나. 정표고 체계전환 기반 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출 최적방안

1) 정표고 체계 전환의 필요성

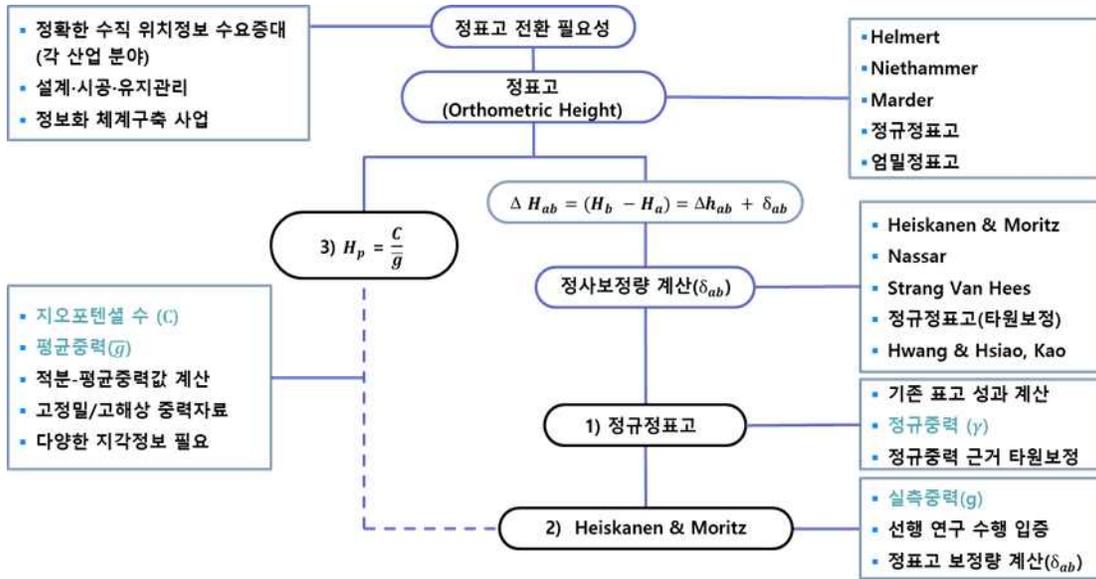
수평 성과의 경우 VLBI를 기준으로 위성기준점 성과를 결정하고 이를 기준으로 통합기준점 전체에 대한 수평 위치를 결정하며, 표고는 수준원점으로부터 연결측량을 실시해 통합기준점 높이를 결정하게 된다. 다시 말해, 표고 성과의 경우 기존의 수준점과 연결 측량을 실시해 새로운 망을 구성한 후 높이를 결정한 후 통합기준점만을 골격으로 하여 관리하게 된다는 것이다. 이는 1~2등급으로 구분했던 기존의 기준망이 단일의 통합기준점망으로 재편된다는 특징이 있으며, 통합기준점에서 중력측량이 수반되는 만큼 국제 표준에 따라 직접수준측량과 중력보정을 실시해 높이 성과로 정표고 계산을 목표로 하고 있어 정표고 체계 전환이 필요하다.

또한 통합기준점에서는 기존의 정규정표고 체계를 정표고로 전환하고, 국가 지오이드 모델 구축을 위한 기반자료 수집을 목적으로 중력측량이 수반되기 때문에 지구물리 성과까지 보유한 다목적 기준점으로서의 역할을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

2) 최적 높이성과 산출을 위한 정표고 체계 전환

정규정표고는 기본적으로 정표고와 동일한 표고체계이나, 실측중력이 아닌 타원체로부터 수학적으로 계산된 정규중력(normal gravity)으로 직접수준측량 높이차를 보정한 거리를 표고로 하는 체계이다. 따라서 직접수준측량 시 모든 지점에 대한 실측중력을 구하기 어려워 사용된 체계로서 정표고와는 값의 차이가 있으며, 특히 산악지나 급경사지에서는 포텐셜면의 변화가 급격해지기 때문에 실제 연직선과의 거리(정표고)와 급격한 차이가 날 수 있다.

정표고는 수직기준면으로부터 중력방향의 연직선을 따라 측정된 거리를 표고로 하는 표고 체계이다. 일반적으로 직접수준측량에 의해 측정한 두 지점 사이의 높이차에 대해 두 지점의 실측중력값에서 구한 지구중력 포텐셜 간 불균일에 따른 오차량을 보정하여 구하며 정규정표고 체계의 정표고 전환 시 실측중력을 활용하기에 최적 높이성과를 산출할 수 있다.



[그림 3-4] 정표고 체계 전환 및 수직 위치정보 고도화

다. 망조정 소프트웨어 비교검증으로 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출 최적방안

고유 수직 위치 망조정 소프트웨어 검증을 통한 신뢰성 확보를 위해 기존 국토지리정보원 수준망조정 소프트웨어를 분석하여 장·단점을 도출하였으며 실제 사용되고 있는 상업용 망조정 소프트웨어의 특징·장점·단점을 분석하였으며 망조정 결과 비교를 통한 최적 망조정 소프트웨어 선정으로 망조정 소프트웨어 신뢰성 확보 방안을 제시하였다.

1) 기존 국토지리정보원 망조정 소프트웨어

기존 국토지리정보원에서 사용하는 망조정 소프트웨어로는 MATLAB 프로그램 기반 “LSAdj4LevelN.m 소프트웨어와 “Adjust Comp” 망조정 소프트웨어 2가지가 있다. 국토지리정보원 수준망조정 소프트웨어 기능으로는 관측방정식을 수립하고 최소제곱법 계산 기반 조정정확도로 수준환을 자동파악하고 처리가능 관측값이 1,000개라는 장점이 있다. 단 과대오차 점검 모듈이 미비하다는 단점이 존재하였다.

“Adjust Comp” 망조정 소프트웨어 기능으로는 관측방정식을 수립하고 최소제곱법 계산 기반 조정정확도로 과대오차 점검이 가능하였다. 학습용 무료 소프트웨어인 동시에 수준환 자동파악이 가능하다는 장점이 있으나, 처리기능 관측값이 300개로 제한되는 단점이 존재하였다.

<표 3-1> 국토지리정보원 망조정에 이용한 소프트웨어

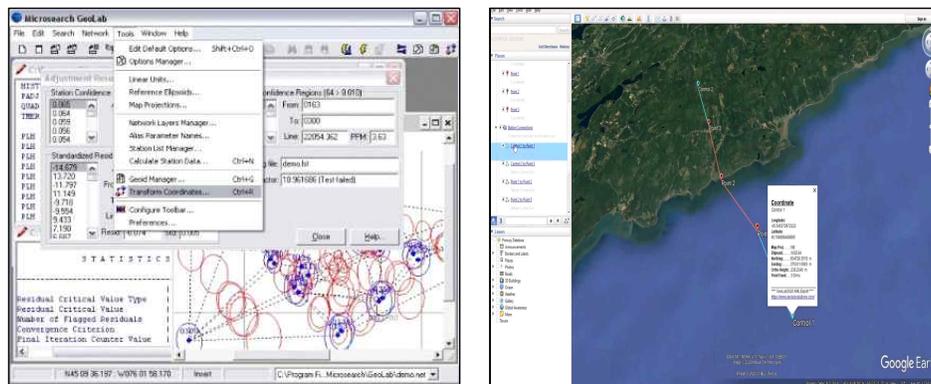
	NGII 소프트웨어 (LSAdj4LevelN.m)	Adjust.Comp. (R.Wolf)
기능	<ul style="list-style-type: none"> 관측방정식 수립 최소제곱법 조정정확도 	<ul style="list-style-type: none"> 관측방정식 수립 최소제곱법 조정정확도 과대오차 점검
장점	<ul style="list-style-type: none"> 수준환자동파악 처리가능 관측값1,000개 	<ul style="list-style-type: none"> 학습용 무료 소프트웨어 수준환자동파악
단점	<ul style="list-style-type: none"> 과대오차 점검 모듈 미비 	<ul style="list-style-type: none"> 처리기능 관측값제한(300개)

2) 주요 수준망 조정 소프트웨어 특징 비교 및 검토

상업용 수준망 조정 소프트웨어는 “GeoLab”, “StarNet”, “Axis3D Net”, “Columbus” 등 4가지가 있으며 비상업용 수준망 조정 소프트웨어는 “Java·Applied·Geodesy·3D”, “EasyNet”, “QOCA”, “LOCUS”, “Bernese”, “SNAP” 등이 있다.

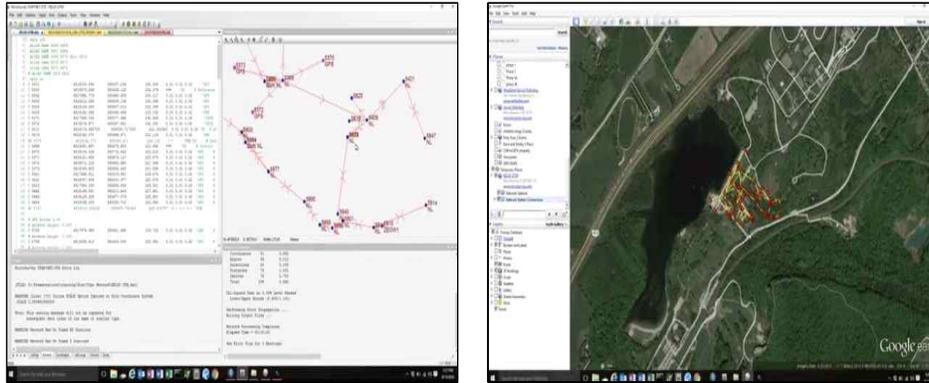
상업용 수준망 조정 소프트웨어와 비상업용 수준망 조정 소프트웨어는 자료처리 데이터 형태 및 처리가능 수준점의 개수 등 성능면에서 상업용 수준망 조정 소프트웨어가 우위로 판단되어 상업용 수준망 조정 소프트웨어들의 특징을 비교하고 검토하고자 한다.

“GeoLab” 망조정 소프트웨어는 망조정으로부터 표준오차를 도출하고, 망조정 이후 SINEX 파일 생성 불가능으로 DMPGeolab, AXIS 등의 프로그램으로 산출되는 특징을 가지고 있다. 레벨측량, 토탈스테이션 측량, GNSS 측량 등 모든 관측 유형의 망조정 기능을 제공하며, 입력 데이터의 제한이 없고 GPS 데이터, EDM데이터, 토탈스테이션 측량 데이터 등의 이종데이터간 혼합조정이 가능한 장점이 있다. 또한 플러그인 기반 외부 형식 데이터 파일을 직접 가져올 수 있어 별도 변환작업이 필요없다.



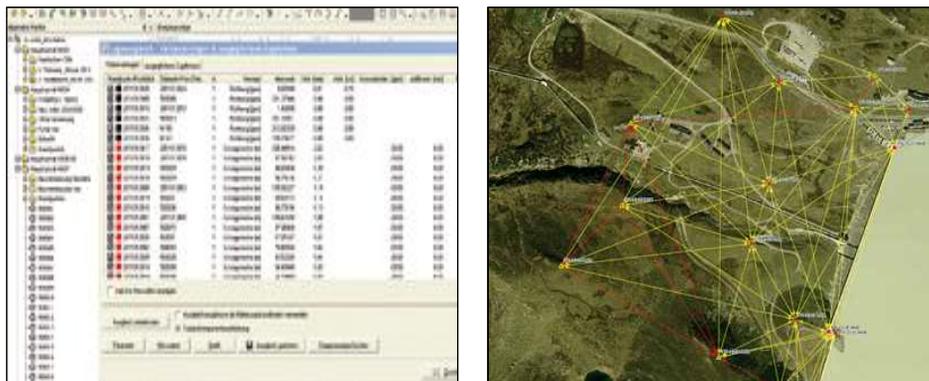
[그림 3-5] GeoLab 소프트웨어

“StarNet” 망조정 소프트웨어는 관측값의 표준오차를 알고 있다는 가정하에 망조정을 수행하며, 변형탐지에 대한 데이터는 미제공한다는 특징을 가지고 있다. 파일 입력·출력 시스템의 편리성과 다양한 형태의 데이터를 지원하고 GPS 측량 데이터 및 레벨 측량 데이터의 통합 등 데이터 통합이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 모든 형식에 대한 데이터 변환이 가능하고 미국의 몇몇 지방정부는 소규모지역에 한하여 수준망 조정 작업계획 시 해당 프로그램을 의무적으로 사용하도록 지정되었다.



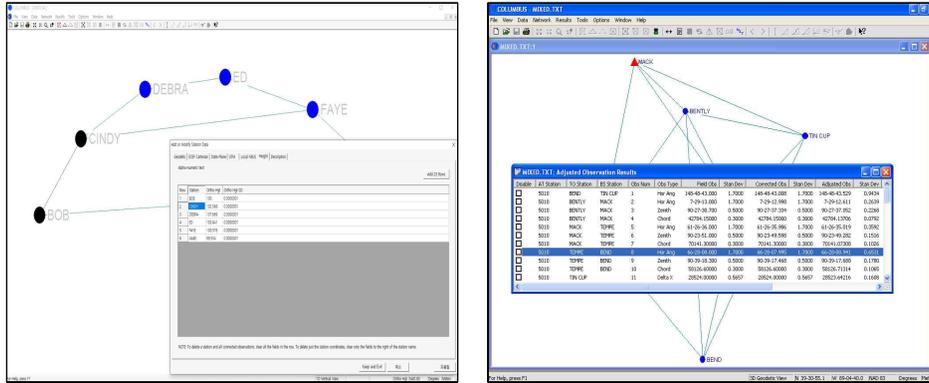
[그림 3-6] StarNet 소프트웨어

“Axis3D Net” 망조정 소프트웨어는 조정된 망 그래픽을 3차원 DXF 또는 PDF 파일 형태로 출력이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 거리 관련 측정, 기준점 정확도, 편심 오차 등 가중치 개별 계산 방식에 따른 이중 데이터 혼합조정이 가능하며 망조정 이전에 총오차 및 중복 대상제거로 오류 발견이 용이하다는 장점이 있다.



[그림 3-7] Axis3D Net 소프트웨어

“Columbus” 망조정 소프트웨어는 모든 좌표 결과를 엑셀과 같은 행렬 구조의 데이터 목록이 포함된 파일인 CSV(Comma Separated Values) 파일 형태로 출력한다는 특징을 가지고 있다. OPUS, StarNet, Google, Trimble, Topcon, RAW, RW5, Leica 등 여러 제품의 데이터 이용이 가능하며 다양한 좌표계로 변환 이후 타 소프트웨어 제품으로 출력이 가능하다는 특징을 가지고 있다.



[그림 3-8] Columbus 소프트웨어

상업용 수준망 조정 소프트웨어 중 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 “GeoLab” 망조정 소프트웨어와 “StarNet” 망조정 소프트웨어를 집중 비교하였다.

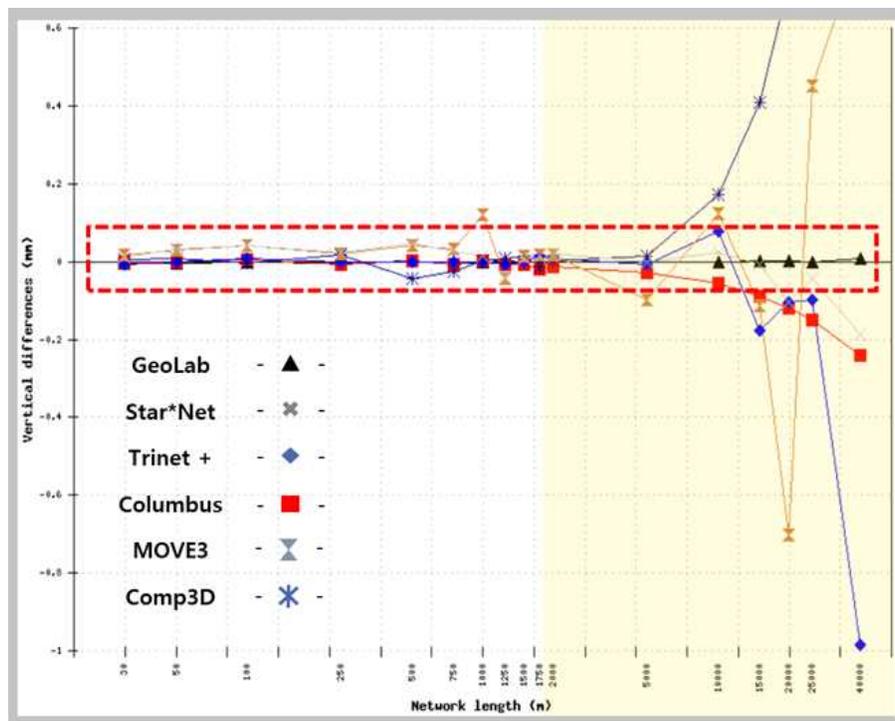
<표 3-2> 주요 망조정 소프트웨어 비교 결과

	GeoLabPX5 (Bitwise Ideas Inc.)	StarNet (MicroSurvey)
특징	<ul style="list-style-type: none"> 관측방정식 수립 최소제곱법 기반 조정 조정정확도 과대오차 점검 	
	<ul style="list-style-type: none"> 망조정으로부터 표준오차 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 관측값의 표준오차를 알고 있다는 가정하에 망조정
장점	<ul style="list-style-type: none"> 모든 관측 유형의 망조정 기능 제공 입력 데이터의 제한 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 파일 입력/출력 시스템의 편리성 3차원 망조정에 특화
단점	<ul style="list-style-type: none"> 측량조건에 따른 표준오차의 범위 	<ul style="list-style-type: none"> 변형 탐지에 필요한 데이터 미제공 가격협의 불가
검토사항	<ul style="list-style-type: none"> GeoLab은 입력 데이터의 제한이 없어 국가 단위의 대규모 측량망 조정에 적합함 StarNet의 경우 대규모 데이터를 입력시 지연된다는 사례가 존재 관측치의 표준오차가 망조정 자체에서 해결될 경우 여러 조건이 수반됨 GeoLab은 가격협의 가능 StarNet의 경우 가격협의 불가능 	

3) 망조정 결과 비교를 통한 최적 망조정 소프트웨어 선정

수준망 조정에 사용되는 소프트웨어별 망조정 결과를 비교하여 연구진행에 있어 최적인 망조정 소프트웨어를 선정하고자 하였다. 프랑스 지질학 및 육상 연구소(GeF)는 자체 개발한 망조정 소프트웨어 CoMeT 성능 검증 실험의 일환으로 동일 조건내 여러 망조정 소프트웨어들의 망조정 결과를 비교하였다.

주요 소프트웨어인 GeoLab과 타 소프트웨어의 망조정 결과를 비교하여 소프트웨어 성능을 검증하고자 하였으며 소프트웨어별로 수준망 길이에 따른 조정 결과의 수직오차가 결과값으로 나타났다. 망조정 비교결과 GeoLab 소프트웨어의 수직오차가 최소로 나타났으며 수준망 길이에 관계없이 균일하였다.



[그림 3-9] 소프트웨어별 망조정 결과 비교

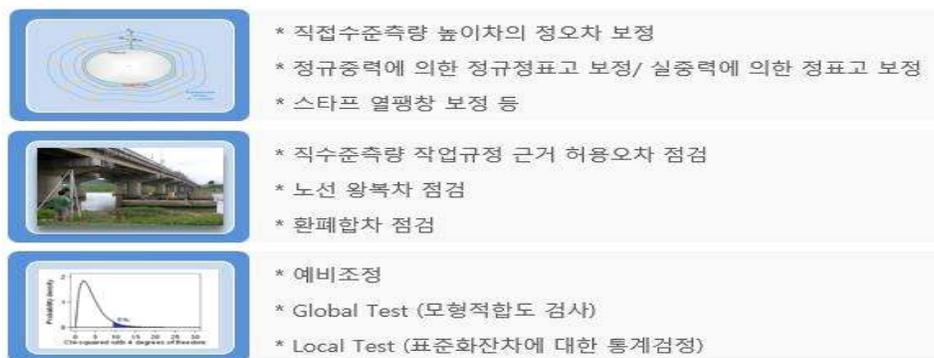
라. 국가기준점 수직위치 망조정 성과산출 최적방안

국가기준점 통합 수직망 성과는 국토의 높이 정보를 제공하는 것으로 지도제작, 시설물 설계, 유지관리, 방재, 지반침하 및 지각변동 등의 다양한 분야에서 핵심 기초 자료로 활용되고 있다.

기존 정규중력에 기반한 정규정표고 체계에서 실측중력에 기반한 정표고 체계로 변환하여 고품질 표고 서비스 및 세계 높이 기준체계(IHRS)에 부응하는 방안을 제시하도록 하였다. 또한 우리나라 1등 수준점과 2등 수준점, 통합기준점의 정표고를 산출하기 위한 국가기준점 수직위치 망조정 성과 산출 최적방안을 마련하였다.

1) 수준측량 관측자료 오차처리 체계화

수준측량 관측자료의 오차에는 직접수준측량 높이차의 정오차, 수준측량 작업규정 근거 허용오차를 초과하는 왕복차오차, 환폐합차 초과 오차 등이 있다. 해당 오차들을 소거 하여 수직위치 망조정에 있어 최적화된 산출체계를 구축한다.



[그림 3-10] 수준측량 관측자료 오차 처리 방안

2) 국가기준점 수직위치 망조정 성과 산출 체계

국가기준점 수직위치 망조정 성과 산출 체계는 중력측량 관측계산부로부터 중력데이터와 수준측량 총관계산부로부터 수준측량 데이터를 활용한다. 수준점·통합기준점이 결합된 수준측량 관측자료의 노선/환별 환폐합차·교차 점검으로 이상 구간을 확인하고, 망조정 데이터에 활용되는 ASCII 포맷의 입력자료를 추출한다.

정사보정량 계산에 있어 정규중력을 사용하는 정규정표고의 타원보정을 진행하고, “Heiskanen&Moritz”의 실측중력을 이용한다. 정사보정 과정을 거쳐 정표고 성과를 도출한뒤, 1등 수준점의 경우 2.5mm/1km, 2등 수준점의 경우 5mm/1km의 차등 가중치를 적용하여 수준망 조정 계산을 진행한다. 이때 높이기준망에 신규자료 수준원점보조

점을 고정하여 일괄 조정하며 “GeoLab“과 ”LSAdj4LN.m“ 소프트웨어로 검출된 이상구간을 제거한다. 두 소프트웨어의 망조정 결과를 비교하고 수준점·통합기준점 고시 성과를 기준으로 재측량이 필요한 구간을 선정한다. 이후 국토지리정보원 DB 등록으로 정표고 성과를 고시한다.



[그림 3-11] 국가기준점 수직위치 망조정 성과 산출 최적방안

2. 국가기준점 수직위치 상시 망조정 산출 체계 전략

가. 국가기준점 수직위치 상시 망조정 및 표고 서비스 전략 수립

한국형 국가기준점 수직위치 상시 망조정 및 표고 서비스 전략 수립으로는 첫째, 국가기준점 수직위치 상시 망조정 성과 산출체계를 구축하도록 한다. 둘째, 고품질 수직 위치 인프라를 구축한다. 셋째, 수직 위치 정보의 대국민 서비스 연계 전략을 수립방안을 제시하고자 한다.

1) 국가기준점 수직위치 상시 망조정 체계 구축

관측망도, 기준점조서, 관측데이터 등의 관측 자료관리 시스템과 수직위치 망조정 소프트웨어, 성과관리 시스템 연계체계를 제안하였다. 국가기준점 관측자료 관리시스템 연계의 경우, 수준측량 높이 성과산출을 위한 관측자료는 국토지리정보원에서 2021년 구축예정인 관측자료 관리시스템으로부터 수급받을 수 있도록 체계를 수립하였다.



[그림 3-12] 국가기준점 관측자료 관리시스템 연계 서비스

국토지리정보원 수직위치 망조정 소프트웨어를 검증하고 이식성을 확대하였으며 3차원 국가위치 기준망 완성을 위한 수직 통합망 준비를 하였다.

2) 고품질 수직위치 인프라 구축

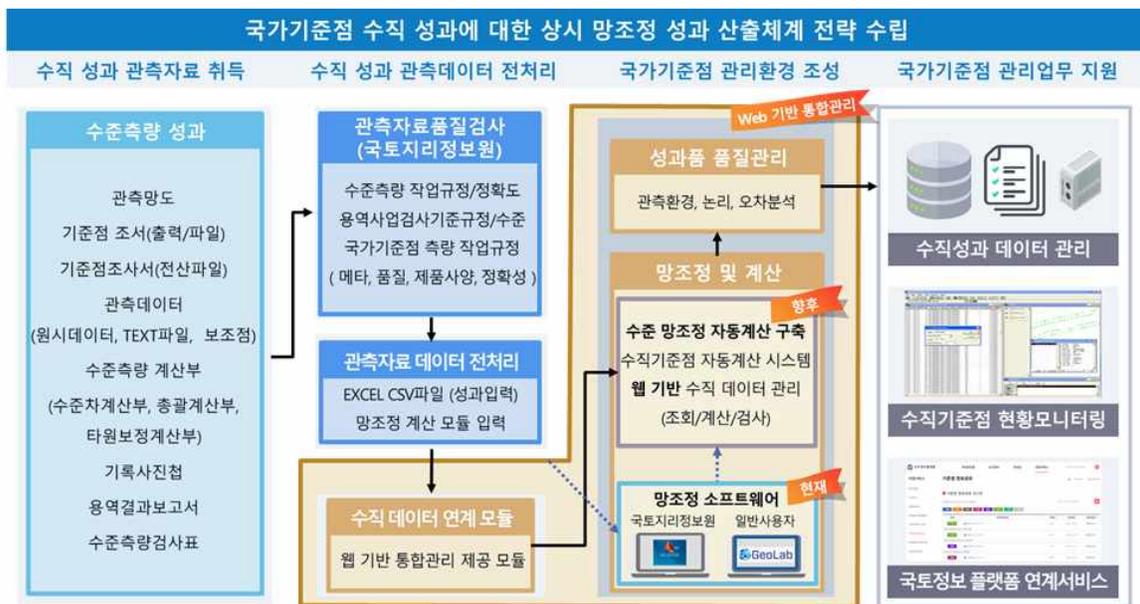
관측자료 품질검사를 수행하고 관측자료의 데이터 전처리를 통하여 기존 전국 수준점 및 통합기준점이 결합된 수직위치 기준 망조정 및 산출에 따른 고품질 수직위치 성과를 산출한다. 관측자료 품질검사 시 수준측량 작업규정, 용역사업검사기준 규정, 국가기준점 측량 작업규정의 품질 규정을 준용한다.

또한 수직 데이터 연계 모듈로서 웹 기반 통합관리 제공 모듈을 적용하여 현재 단순 망조정 소프트웨어 사용단계에서 수준 망조정 자동계산 기능을 구축하고, 수직기준점 자동계산 시스템 및 조회·계산·검사 부문 웹 기반 수직 데이터 관리를 지원하도록 한다.

성과품 품질관리 이후 국가기준점 관리업무 지원 단계로 수직성과 데이터 관리, 수직기준점 현황모니터링, 국토정보 플랫폼 연계서비스 등을 지원한다.

3) 수직위치 성과의 대국민 서비스 연계

국토지리정보원 국토정보 플랫폼은 수치지도, 항공사진, 기준점 등 국토지리정보원에서 생산하는 다양한 공간정보의 제공 및 서비스를 담당하는 국가공간정보 허브로서, 민간, 공공 등 다양한 분양에서 공간정보의 융·복합, 개방, 활용을 담당하는 대표 서비스 창구로서 해당 플랫폼을 활용하여 수직위치 성과를 대국민에게 서비스하도록 한다.



[그림 3-13] 국가기준점 수직위치 상시 망조정 성과 산출체계 전략



의도적
공백입니다

제4장

정규정표고 기반 수직기준망 조정 및
이전 고시성과 기준 기준점 표고변동량
분석

-
1. 2020년 이전 및 이후 수준측량자료통합 수직기준망 조정
 2. 정규정표고 기반 수직망조정에 따른 표고변위량 분석

1. 정규정표고기반 수준측량자료통합 수직기준망 조정

가. 직접수준측량과 정규정표고 보정

1) 표고와 수준측량

높이(height)란 기준면으로 부터 그 측점을 잇는 연직선을 따라 측정한 거리이다. 측점이 지표면상에 있으면 이때의 높이를 표고(elevation)라 한다. 높이는 기준면(reference surface), 측선(line orthogonal to the reference surface), 척도(scale)에 따라 달라지는데 기준타원체면을 기준한 높이를 타원체고(ellipsoidal height)라 하고, 평면해면에 일치하는 등포텐셜면인 지오이드(geoid)를 기준하는 높이는 역학고(dynamic height), 정표고(orthometric height), 정규고(normal height)로 구분된다.

지표면에 위치한 점의 표고나 점간 높이차를 구하는 일반적인 측량방법은 수준측량(leveling)이다. 레벨과 표척을 이용하여 두 점간 높이차를 구하는 직접수준측량(differential leveling)과 두 점간의 경사거리와 연직각을 측정하여 두 점간 높이차를 구하는 삼각수준측량이 측지, 지도, 시설물 설계 및 시공에 가장 많이 이용되는 수준측량이었으나, 1990년대 이후 GNSS가 활성화되면서 GNSS 수준측량도 활발하게 이용되고 있다. 우리나라의 국가기준점(수준점, 통합기준점, 중력점 등)의 높이측량은 직접수준측량에 의해 수행된다.

(1) 직접수준측량의 오차

측량은 기술자가 현장에서 장비를 이용하여 수행하기 때문에 측정값에 오차가 포함되며, 측량의 오차는 정오차와 우연오차로 크게 구분된다. 직접수준측량의 정오차는 망원경 시준선 오차(collimation error), 지구곡률 오차(earth curvature error), 광선의 대기 굴절 오차(refraction error) 등이 있으며 장비의 검교정 및 관련 보정식에 의해 보정된다. 직접수준측량의 우연오차는 측정 때마다 레벨의 정준, 표척 설치, 및 눈금 읽음에서 발생하는 미세하고 불규칙한 오차로 그 크기는 현장 대기조건, 레벨 망원경의 성능, 레벨 기포관과 자동정준장치(compensator)의 성능, 표척의 눈금과 읽음방식에 따라 영향

을 받으며, 우연오차 이론에 따라 처리된다.

직접수준측량에서 시준선 오차는 레벨의 시준선이 수평선에 있지 않아 발생하는 오차로 전·후시 시준거리를 되도록 짧게 하거나 같게 하여 최소화시킨다. [그림 4-1]에서 수준측량 전시 및 후시 표척 읽음값이 r_1, r_2 , 시준거리가 각각 D_1, D_2 , 시준선이 수평선으로부터 이탈 각이 α (라디안)라면, 이 구간에서 두 점간 높이차는 다음과 같다.

$$\Delta h = (r_1 - D_1 \alpha) - (r_2 - D_2 \alpha) \quad (4.1)$$

레벨과 표척간 거리가 D 이고 단위길이당 읽음오차가 $\sigma_{r/D}$ 라면 표척의 읽음오차(σ_r)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r = D \sigma_{r/D} \quad (4.2)$$

즉, 직접수준측량의 오차를 표척 읽음오차와 시준선 오차로 단순화시키고, 이들 독립 측정값으로 가정하여 오차전파법칙을 적용하면

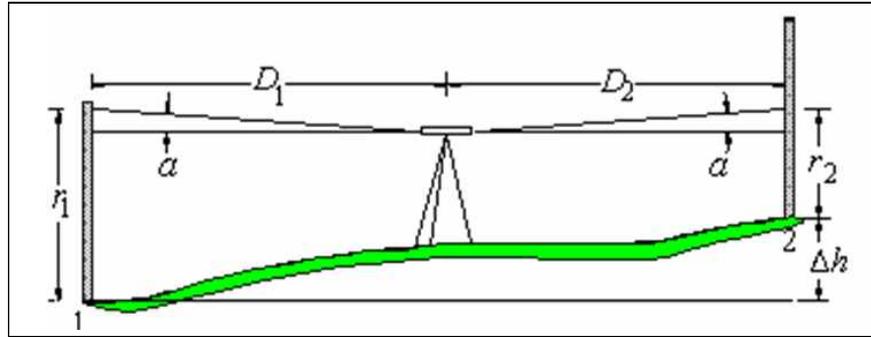
$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{(D_1 \sigma_{r/D})^2 + (D_2 \sigma_{r/D})^2 + (-D_1 \sigma_\alpha)^2 + (D_2 \sigma_\alpha)^2} \quad (4.3)$$

식(4.3)에서 전·후시거리 $D_1 = D_2 = D$ 라 하고, 노선(거리 S)에 대해 이와 같은 수준측량을 N 번 수행하였다면 $S = N(2D)$ 이므로, 이 노선에서 직접수준측량의 오차는 다음과 같다.

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{(\sigma_{r/D} + \sigma_\alpha)^2} \sqrt{SD} \quad (4.4)$$

식(4.4)에서 직접수준측량의 오차가 노선거리 S 의 평방근에 비례함을 알 수 있으며, 이에 따라 수준측량의 오차는 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma_{\Delta h} = \pm k(mm) \sqrt{S(km)} \quad (4.5)$$



[그림 4-1] 직접수준측량의 시준선 오차

(2) 직접수준측량 허용오차

우리나라는 국토지리정보원의 국가기준점측량 작업규정(2020. 12. 31 고시)에는 수준점을 1등 및 2등으로 구분하고, 주요 도로를 따라 각각 4km와 2km 간격으로 설치하도록 하였다. 또한 동 규정 제25조(관측의 제한 및 허용범위)에 제시된 왕·복관측값의 교차, 환폐합차, 재설 및 신설의 경우 기지점간의 폐합차는 식(4.5)에 근거하여 관측장비의 성능과 측량방법, 기술자의 숙련도를 감안하여 설정한 것으로 아래 표와 같다.

<표 4-1> 우리나라 수준측량 허용오차*

구분	1등 수준측량	2등 수준측량	비 고
왕·복 관측값의 교차	$2.5\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	$5.0\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	S:관측거리 (편도, km)
검측의 경우 전회의 관측고저차와의 교차	$2.5\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	$5.0\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	
재설 및 신설의 경우 기지점간의 폐합차	$15\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	$15\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	
환폐합차	$2.0\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	$5.0\text{mm} \sqrt{S}$ 이하	

* 국가기준점측량 작업규정(2020. 12. 31 고시), 제25조

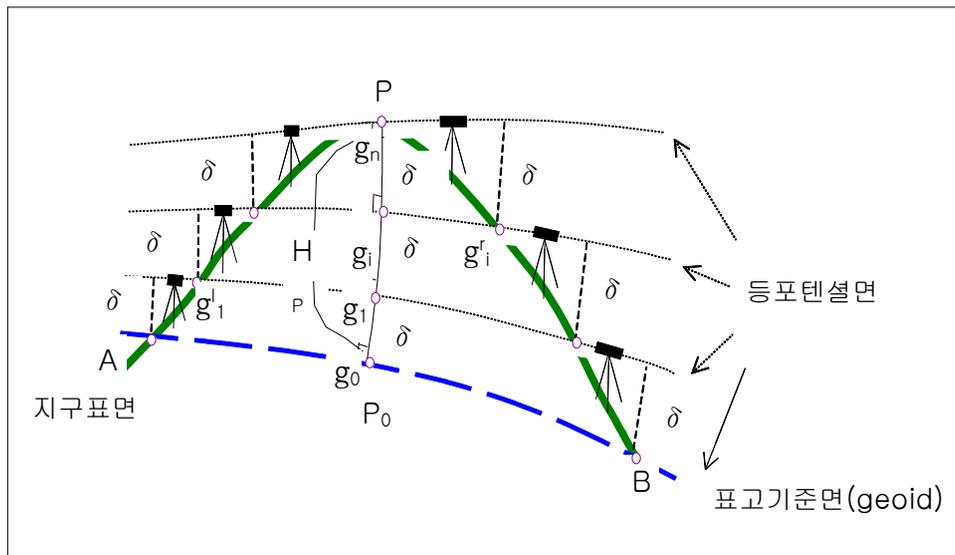
2) 정규정표고 보정

(1) 정규중력포텐셜면과 정규정표고 보정

지표면의 한 점을 지나는 등포텐셜면은 유일하며, 그 높이는 일정하여야 하나, 한 점에서 출발하여 임의 노선을 경유하고 다시 그 점에 이르는 폐합환에 대해 직접수준측량하여 구한 높이차를 합하면 0이 되지 않는다. 즉, 높이가 달라지는 모순이 발생한다. [그림 4-2]에서 높이의 기준면이 등포텐셜면 AP_0B 라면 경로 AP를 따라 수준측량한 높이차 H_{PA} 와 경로 BP를 따라 수준측량한 높이차 H_{PB} 는 각 등포텐셜면이 평행하지 않기

때문에 좌측경로의 등포텐셜 간격이 우측경로의 등포텐셜 간격과 달라, H_{PA} 가 H_{PB} 보다 적다. 즉, 수준측량경로에 따라 점 P의 높이가 달라지며, 식(4.6)과 같이 수준환의 높이차 합은 0이 되지 않는다.

$$\oint_A^B dn = \sum_A^P \delta n_i + \sum_P^B \delta n_i + \sum_B^A \delta n_i \neq 0 \quad (4.6)$$



[그림 4-2] 중력 등포텐셜면 경사와 직접수준측량 높이차

이와 같은 경로 의존적 수준측량의 모순은 중력(g)을 고려하면 해소될 수 있다. 정규정표고 보정은 중력(g) 대신 지구의 구성물질이 균일하다고 가정한 정규중력(N)을 근거로 포텐셜의 경사에 따른 직접수준측량 높이차를 보정하는 방법이다.

정규중력 등포텐셜면의 균일성을 고려하여 [그림 4-3]에서 지표면 점 O, 점 P, 점 T의 등포텐셜 선을 각각 지오이드, 곡선 PT'' , 곡선 $P''T$ 라 하고, 곡선 $O''P'$ 는 점 O'' 를 지나는 지오이드와 평행한 곡선, 곡선 $P''T'$ 은 점 P'' 를 지나는 곡선 PT'' 와 평행한 곡선이라 하자. 측점 P와 측점 T의 높이 및 두 점 사이의 높이차를 평행한 등포텐셜면간 높이차(직접수준측량 높이차)와 높이가 다른 지점을 지나는 등포텐셜면의 경사로 인한 차이(정규정표고 보정량)로 나타내면 다음과 같다(Bernhard Hofmann-wellenhof & helmut Moritz, 2006).

$$\begin{aligned}
H_P^N &= \Delta H_{OO'} + \delta H_{P'P} = \sum_0^{O'} \delta n_i + \delta H_{P'P} \\
H_T^N &= H_P^N + \Delta H_{PP'} + \delta H_{T'T} = H_P^N + \sum_P^{P'} \delta n_i + \delta H_{T'T} \\
\Delta H_{PT}^N &= H_T^N - H_P^N = \sum_P^{P'} \delta n_i + \delta H_{T'T}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

위도 ϕ_P 인 점 P와 점 P' 간 높이차를 $\Delta H_{PP'}$, 평균 정규중력을 γ_P , 위도 ϕ_T 인 점 T'와 점 T 간 높이차를 $\Delta H_{T'T}$, 평균 정규중력을 γ_T 라 하면, 점 P'와 점 T의 지오포텐셜은 동일하므로, 정표고의 원리로부터 다음 식(4.8)이 성립한다.

$$\Delta H_{PP'} \gamma_P = \Delta H_{T'T} \gamma_T \tag{4.8}$$

정규 중력 식을 이용하여 두 지점의 높이차의 비율을 구하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta H_{PP'}}{\Delta H_{T'T}} &= \frac{\gamma_T}{\gamma_P} \simeq \frac{[1 - \frac{2}{a}(1+f+m-2f \sin^2\phi_T) h_T]}{[1 - \frac{2}{a}(1+f+m-2f \sin^2\phi_P) h_P]} \\
&\simeq [1 - \frac{2}{a}(1+f+m-2f \sin^2\phi_T) h_T]
\end{aligned} \tag{4.9}$$

따라서, 두 측점간 정규중력 포텐셜 면의 경사로 인한 높이차의 차이, 즉, 정규정표고 보정량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
OC_{PT}^N &= \delta H_{T'T} = \Delta H_{T'T} - \Delta H_{PP'} \\
&\simeq \frac{2}{a} [(1+f+m)(h_T - h_P) - 2f(h_T \sin^2\phi_T - h_P \sin^2\phi_P)] \Delta H_{T'T}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

높이에 따른 정규중력의 미소한 변화를 무시한다면 기준 타원체면의 정규 중력인 식(4.10)을 이용한 두 지점의 높이차의 비율은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta H_{PP'}}{\Delta H_{T'T}} = \frac{\overline{\gamma_T}}{\overline{\gamma_P}} \simeq \frac{(1 + 0.00529 \sin^2 \phi_T)}{(1 + 0.00529 \sin^2 \phi_P)} \simeq 1 + 0.00529(\sin^2 \phi_T - \sin^2 \phi_P) \quad (4.10)$$

두 측정간 정규중력 포텐셜 면의 경사로 인한 높이차의 차이는 다음과 같다.

$$\delta H_{T'T} = \Delta H_{T'T} - \Delta H_{PP'} = -0.00529 (\sin^2 \phi_T - \sin^2 \phi_P) \Delta H_{T'T} \quad (4.11)$$

식(4.11)에서 고위도 지점 P로 부터 저위도 지점 T 방향의 수준측량인 경우 높이차의 차이는 양수이다. 즉, 점 T의 정규정표고와 정규정표고 보정량은 식(4.12)와 같다.

$$H_T = H_P + \sum_P^P \delta n_i + OC_{PT}^N$$

$$OC_{PT}^N = -0.00529 (\sin^2 \phi_T - \sin^2 \phi_P) \Delta H_{PT} \quad (4.12)$$

식(4.12)에서 삼각함수 법칙과 수준측량에서 ϕ_T 와 ϕ_P 차이가 미소함을 고려하면

$$\begin{aligned} \sin^2 \phi_T - \sin^2 \phi_P &= (\sin \phi_T + \sin \phi_P)(\sin \phi_T - \sin \phi_P) \\ &= \sin(\phi_T + \phi_P) \sin(\phi_T - \phi_P) \simeq \sin 2\phi \frac{\delta \phi''}{\rho''} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\text{단, } \delta \phi'' = \phi_T - \phi_P$$

와 같이 쓸 수 있고, 위도차와 표고차가 미소한 수준점 구간에 대한 정규 정표고 보정량은 아주 미소하므로, 수준점 n개 구간이 연속된 수준노선에 식(4.13)을 적용하면

$$OC_i^N = -0.00529 (\sin 2\phi)(\delta'')(\Delta H_{0,1} + \Delta H_{1,2} + \dots + \Delta H_{n-1,n}) \quad (4.14)$$

식(4.14)을 간략히 정리하면 다음과 같다(Bomford, 1980).

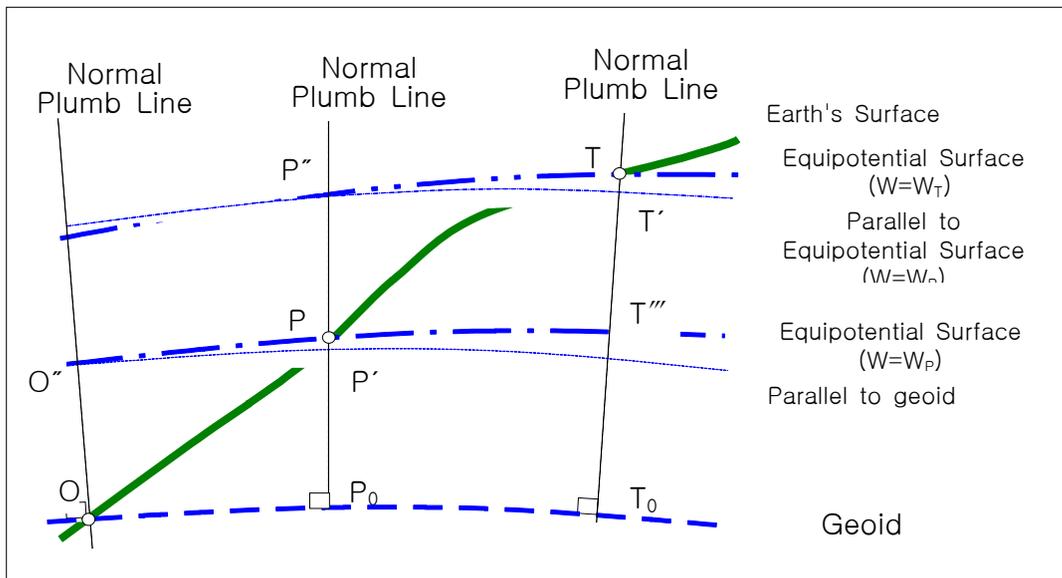
$$OC_{PT}^N = 0.00529 (\sin 2\phi) \frac{\Delta\phi''}{\rho''} H = 0.00529 (\sin 2\phi) \frac{\Delta\phi^\circ}{57.2957795131} H \quad (4.15)$$

$$\text{단, } \phi = (\phi_T + \phi_P) / 2$$

$$\Delta\phi'' = (\phi_T - \phi_P)''$$

$$H = (H_T + H_P) / 2$$

이 보정량은 북반구에서 고위도 지점 P에서 저위도 지점 T로 향하는 수준노선 구간에서 양(+) 부호를 갖는 보정량이며 타원보정이라고도 한다.



[그림 4-3] 정규중력포텐셜경사와 정규정표고 보정량

(2) 직접수준측량 데이터와 정규정표고 보정

직접수준측량 데이터는 제2장에서 기술한 바와 같이 국토지리정보원에서 수준점 및 통합 기준점에 대해 2002년 ~ 2021년 수준측량사업으로 축적된 것으로 수직기준망 조정의 입력 데이터로 이용할 수 있도록 환폐합차점검부를 작성하여 수준환을 구성하는 구간(기준점과 기준점간) 높이차의 합이 허용환폐합차 이내인지 검토하였다. 이 과정에서 국토지리정보원 수준측량사업에서 납품받은 수준측량계산부(또는 총괄계산부)의 몇 구간에서 오류가 있음을 발견하였으며, 그 유형은 관측원시자료로부터 수준차 계산부를 작성하는 과정 또는 수준차계산부로부터 수준측량계산부(또는 총괄계산부)를 작성하는 과정에서 왕복높이차를 혼동하여 발생되었음을 알 수 있다([그림 4-4]). 이와 같이 환폐합차점검부에서 환폐합차를 점검한 수

준측량자료에 대해 수준측량 구간 시점과 종점의 관측표고와 위도를 식(4.15)에 대입하여 정규표고 보정량(또는 타원보정량)을 계산하고, 정규표고 보정량을 관측표고차에 더하여 정규표고보정 높이차(타원보정 높이차)를 계산하였다([그림 4-5]).

총괄계산부

□ 통합기준점 이전 설치용역

(단위 : m)

순번	점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관측 결과				교차 한계	관측표고	분 배 오차량	타원정량 (mm)	최종성과	성과 비교		비고
					왕	복	평균	교차						기준성과	차이	
1	BM02-34-00	완전							11.7179				11.7179	0.0000	수준점	
2	U익산75	이설	4,691	4,691	18.57999	-18.68048	18.58024	-0.00049	0.00541	30.2981	-0.0090	0.00005	30.2892		통합기준점	
3	BM02-35-00	이설	420	5,111	-4.11984	4.11901	4.11943	-0.00083	0.00162	34.4176	-0.0098	-0.00001	34.4078	34.4078	-0.0098	수준점
															-0.0098	

[그림 4-4] 수준측량 총괄계산부 작성 오류 유형(예)

점 검 계 산 부																				
□ 2021년 수직기준망 조정																				
환번호 16 - 1																				
대한공간정보학회 컨소시엄																				
(단위 : m)																				
순번	점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관측 결과				교차 한계	관측표고	분 배 오차량	타원 정량	최종성과	성과 비교		경 위도	사업지구명	타원보정량	타원보정 높이차	
					왕	복	평균	교차						기준성과	차이					
	계수도환점	완전							11.13200				11.1319		126-31-16.7	33-30-46.5				
	16-00-02-01	완전	2376	2376	-35.7265	-35.7255	35.7261	0.0011	0.00771	46.85905		0.00003	47.08328	-46.8574	0.0233	126-30-21.3	33-30-00.4	07 수문점_계주2	0.00003	35.7261
	16-00-01-01	완전							39.34700				39.347		126-30-23.8	33-30-15.9				
	16-00-02-01	재설	621	621	7.5102	-7.5099	7.5101	0.0003	0.00394	46.85705	0.00033	0.00002	46.8574	-46.8574		126-30-21.3	33-30-00.4	12 국가기준점이전	0.00002	7.5101
	U1181	완전							20.63900				20.639		126-30-37.2	33-30-52.2				
	16-00-01-01	완전	1399	1399	18.7122	-18.7120	18.7121	0.0003	0.00591	39.35110			39.3511		126-30-23.8	33-30-15.9	21 행남지구(보연51)	0.00003	18.7121	
	계수도환점	완전							11.13190				11.1319	0.0000	126-31-16.7	33-30-46.5				
	U1181	완전	1411	1411	9.4996	-9.5003	9.4999	-0.0007	0.00594	20.63182			20.63182	-20.639	-0.0072	126-30-37.2	33-30-52.2	20 통일기준점_영암(31노)	0.00000	9.4999
	관 합계		5807		0.0045	-0.0035	0.0040	0.0010	0.01205											

[그림 4-5] 환폐합차점검부.xlsx에 계산된 정규표고 보정량과 정규표고 높이차

나. 직접수준측량 자료정리 및 허용오차 점검

1) 수순환의 교차(왕복차)

수준측량 관측값의 제한 및 허용범위는 <표 4-1>과 같으며, 이 중 수순측량 구간의 높이차에 관련된 왕복 관측값의 교차, 검측의 교차, 재설 및 신설의 경우 기지점간의 폐합차는 국토지리정보원에서 매년 수순측량사업 검수에서 점검하여 이상이 있는 경우 오류수정이나 재측을 하고 있기 때문에 본 연구에서는 재검토할 필요가 없었다. 단, 수순환이 여러 수순노선으로 구성되거나, 여러 해에 걸쳐 수행된 수순측량 자료로 구성된 경우, 왕복관측값의 교차가 허용오차를 초과하는 경우가 발생할 수 있다.

본 연구에서 수순점과 통합기준점을 연결하는 수순노선으로 기초 환(2등환)을 구성하

는 노선의 교차(구간 왕관측값의 높이차의 합계와 복관측 높이차의 합의 차이)가 허용 오차($5.0\text{mm}\sqrt{S}$ 이하, S는 환을 구성하는 노선 편도거리(km))를 초과하는 환은 <부록 4>에 수록하였으며, 허용오차를 초과하는 1등환별 2등환의 개수는 <표 4-2>와 같다. 허용교차를 초과하는 2등환은 81개 환으로 전체 2등 환 수(1,489개)의 5%에 해당한다. 관측값의 교차가 허용오차를 초과하는 2등환의 개수 비율이 20%를 상회하는 1등환은 7환과 9환이다. 이 환들은 험준한 태백산맥 지역의 환이라 지형적 영향을 받았을 것으로 추정되나, 휴전선 남쪽의 험준한 산악지역에 위치한 20환은 2등환의 8%만 수준측량 교차가 허용오차를 초과하고 있어 지형적 원인만이라고 할 수는 없다. 즉, 20환은 비교적 최근에 통합기준점이 많이 신설되어 다른 1등환보다 수준측량자료의 신뢰성이 높다. 다음으로 14환의 교차가 허용오차를 초과하는 환 개수 비율이 13%로 높다. 이런 현상은 14환의 2등 환들이 상대적으로 지반이 연약한 서남해안 지역에 분포하고 있고 수준측량도 상대적으로 오래전에 시행되었기 때문으로 생각된다. 특히 수준측량 교차가 허용오차의 2배를 초과하는 2등환이 9환에 2개, 13환에 1개, 20환에 1개가 발견되었는데, 이들 환을 구성하는 노선의 구간 중, 교차를 크게 포함한 구간은 재측이 필요하다.

<표 4-2> 허용교차를 초과하는 2등환 수

1등환 번호	$EA_{BF} < \text{교차} < 2EA_{BF}$	$\text{교차} > 2EA_{BF}$	합계	2등환 총수	백분율
1	4	0	4	139	3%
2	2	0	2	135	1%
3	4	0	4	69	6%
4	2	0	2	96	2%
5	5	0	5	172	3%
6	0	0	0	74	0%
7	20	0	20	98	20%
8	1	0	1	75	1%
9	13	2	15	64	23%
10	0	0	0	60	0%
11	0	0	0	60	0%
12	0	0	0	118	0%
13	4	1	5	73	7%
14	11	0	11	85	13%
15	4	0	4	56	7%
16	3	0	3	47	6%
20	4	1	5	66	8%
합계	77	4	81	1,489	5%

허용교차 $EA_{BF} = 5.0\text{mm}\sqrt{S}$ 이하, S는 환을 구성하는 노선 편도거리(km)

2) 수준환의 환폐합차

이론상 수준측량의 정오차나 우연오차가 없다면 수준환을 구성하는 노선의 왕복 수준측량 평균 높이차의 합은 0.0m 이어야 하나, 실제로 수준측량 노선의 왕복 높이차의 교차가 허용오차 이내라고 하더라도 이들 노선의 왕복 수준측량 평균 높이차의 합은 0.0m가 되지 않는다. 그 원인은 중력 포텐셜 면이 평행하지 않아 발생하는 정오차, 수준측량에 포함된 우연오차, 그리고 수준측량 높이차에 포함된 착오에 있을 것이다. 이 중 우연오차와 소거되지 않은 착오는 어찌할 수 없더라도 정규정표고 기준 수준망조정에서는 중력포텐셜이 평행하지 않아 발생하는 정오차는 정규중력에 근거한 정규정표고 보정(타원보정)으로 보정한다. 이외에 어느 측량기준점을 경유하는 수준측량사업이 여러 해에 걸쳐 수행된 경우, 이 기간 중 측량기준점이 이설되거나 자연적인 지반변위가 발생할 수 있으며, 이 경우 변위 이전 수준측량 높이차는 변위 이후 수준측량 높이차로 보정되어야, 수준망조정으로 측량기준점의 최확표고를 구할 수 있다. 즉, 2등환의 환폐합차를 계산하기 전에 이들 측량표지 변위에 따른 표고보정이 선행되어야 한다.

(1) 측량기준점 표지 변위에 따른 표고보정

수준점과 통합기준점의 표고성과를 구하기 위해 측량기준점 표지 설치시 수준측량을 실시하고, 이후 이 측량기준점이 속한 수준노선에 대한 수준측량이 일정 주기로 다시 실시(재측)하거나, 이 측량기준점 근처에 다른 측량기준점이 신설(또는 재설, 이설)되는 경우, 이 측량기준점을 시점(또는 종점)으로 하여 수준측량이 실시된다. 이설점의 수준측량 기록이 있는 경우는 이를 이용하여 이설전에 실시된 수준측량 높이차를 보정하면 되나, 이설측량이 기록이 없는데도 어느 구간에서 과년도 수준측량과 그 이후 년도 수준측량의 높이차가 다르다면 수준측량에 오차가 있었거나, 과년도 수준측량 이후에 이 구간 시종점의 표지의 변위가 있었다고 할 수 있다. 이와 같은 수준측량 높이차의 차이는 환폐합차가 허용범위를 초과하는 주요 원인이다.

과년도와 근년도 수준측량의 차이가 수준측량의 오차에 기인되었다면, 가용한 수준측량 자료에서 그 오차를 발견하여 소거하거나, 불가피한 경우 그 구간의 수준측량을 다시 하는 수 밖에 없다. 반면에 측량기준점 표지의 변위는 현실적으로 발생할 수 있는 원인으로 이로 인하여 과년도와 근년도 수준측량 높이차가 달라졌다면 그 변위량을 추정할 수 있다. 이때의 측량기준점 변위에 따른 표고보정량 계산 방법은 제2장에서 기술한 바와 같이 [부록 2]에 수록하였으며, 이에 따라 수준점 16-00-01-14의 표고변위량은 다음과 같이 보정하였다.

2007년 수준점 16-00-01-14 → 16-00-01-15 구간 수준측량이 실시되었고, 당시 이 구간의 높이차는 1.7786m 이었는데, 이후 2017년 수준점 16-00-01-14 → 16-00-01-15 구간을 잇는 인접 경로에 통합기준점 U모술포03이 신설될 때 그 표고를 결정하기 위해 수준측량(16-00-01-14 → U모술포03 → 16-00-01-15)이 실시되었고, 이 구간의 높이차는 1.8117m이었다. 즉, 이 구간(16-00-01-14 → 16-00-01-15)의 높이차는 2007년에 비해 2017년에 관측 높이차 기준 -0.0399m (고시표고 기준으로는 -0.0380m) 만큼 차이가 있음을 알 수 있다. 2007년과 2017년 수준측량에 오차가 없었다고 가정하면, 수준점 16-00-01-14가 침하되었거나 수준점 16-00-01-15이 융기되었다고 할 수 있으며, 이중 수준점 16-00-01-14의 고시표고는 2007년에 5.8320m에서 2017년 5.7940m로 낮아진 반면에 수준점 16-00-01-15의 고시표고는 7.6100m로 변동이 없었으므로, 이로부터 수준점 16-00-01-14가 침하되었음을 알 수 있다. 수준점 16-00-01-14가 침하되었다고 하더라도 이들 수준점 구간에서 관측 높이차(-0.0399m)와 고시성과 높이차(-0.0380m)는 일치하지 않는다. 이때에 표고변위량은 표고변동점과 연결된 측량기준점에 대한 수준측량자료를 근거로 관측표고 또는 고시표고 중 어느 표고를 기준으로 표고변위량을 결정할지 결정하였다. [그림 4-6]에서 볼 수 있는 바와 같이 수준점 16-00-01-14의 경우는 관측표고를 기준으로 표고변위량을 결정하고 과년도 수준측량 높이차에 이를 보정하였으며, 이 구간이 속한 환의 환폐합차가 표고변위량 보정 전에는 허용 환폐합차를 초과하였으나, 표고변위량 보정 후 허용환폐합차 이내로 줄어들었음을 알 수 있다. 이와같이 수준환 폐합차점검에 사용된 수준측량자료중 측량표지의 변동이 발견되어 표고를 보정한 측량기준점은 <부록 5>에 수록하였으며, <표 4-3>은 1등환 별 표고변위량 보정 측량기준점의 수이다. 표지변위에 따른 표고보정 점은 1등 1환, 13환, 14환, 16환에서는 10점 이상이었고, 3환, 20환에서는 1점도 없었다.

(2) 2등 수준환의 환폐합차

수준환을 구성하는 노선의 수준측량이 여러 사업년도에 수행된 경우, 기준점 표지의 표고는 현재 상태의 표고가 고시되어야 하므로, 가장 최근 수준측량자료를 선정하였고, 이어 앞에서 기술한 바와 같이 수준환을 구성하는 노선의 기준점 중 그 표지가 변위 전과 후에 실시된 경우 그 기준점이 포함된 구간의 수준측량 높이차 중 변위 이전에 실시한 수준측량의 높이차를 변위높이 만큼 보정하였다.

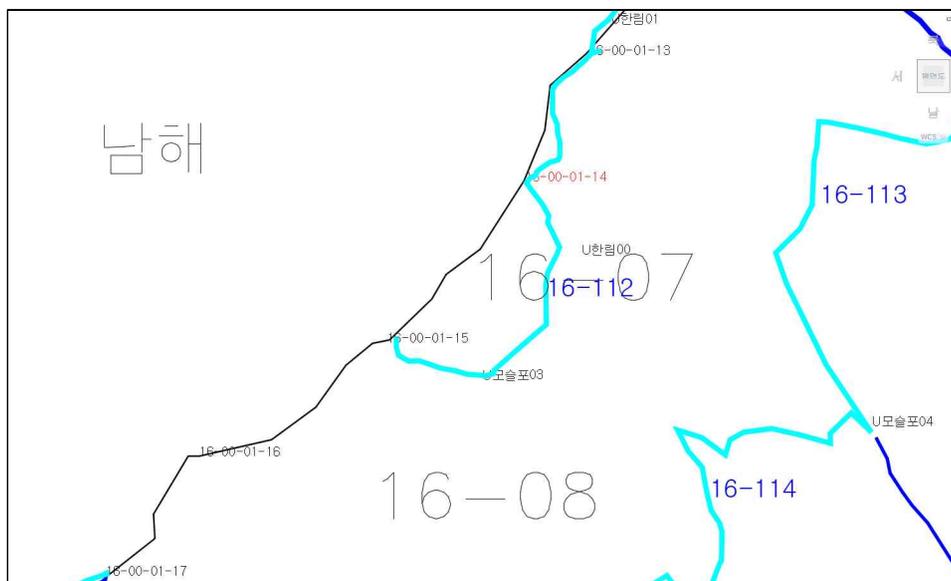
점 검 계 산 부																		
□ 2021년 수직기준망 조정										환번호 16 - 7		대한공간정보학회 컨소시엄						
순번	점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관 측 결 과				교차 한계	관측표고	분 배 오차량	타경정량	최종성과	성 과 비 교		경 위 도		사업지구명
					왕	복	평균	교차						기준성과	차이	경도	위도	
16-00-01-14	완전								5.7920			5.7940	5.7940	0.0400	126-15-43.8	33-24-46.9		
U모슬포03	완전	2628	4493	26.1296	-26.1262	26.1279	0.0035	0.00405	31.9199	0.00490	0.00003	31.9248	31.9248		126-15-26.2	33-23-37.3	17'통합기준점_제주지구_도	
16-00-01-15	완전	1323	5816	-24.3159	24.3166	-24.3163	0.0008	0.00288	7.6037	0.00634		7.6100	7.61	0.0063	126-14-45.7	33-23-50.2	17'통합기준점_제주지구_도	
계		3951		1.8138	-1.8096	1.8117	0.0042	0.00994										
16-00-01-14	재설								5.8320			5.8320	5.832		126-15-43.8	33-24-46.9		
16-00-01-15	재설	2517	34804.4	1.7786	-1.7786	1.7786	0.0000	0.00793	7.6106		0.00900	7.6106	7.61		126-14-45.7	33-23-50.2	07'수준점_제주2	
계		2517		1.7786	-1.7786	1.7786	0.0000	0.00793										
합계		6468		0.0352	-0.0310	0.0331	0.042	0.0127										

A) 이 · 재설점 표고 보정 전

점 검 계 산 부																		
□ 2021년 수직기준망 조정										환번호 16 - 7		대한공간정보학회 컨소시엄						
순번	점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관 측 결 과				교차 한계	관측표고	분 배 오차량	타경정량	최종성과	성 과 비 교		경 위 도		사업지구명
					왕	복	평균	교차						기준성과	차이	경도	위도	
16-00-01-14	완전								5.7920			5.7940	5.7940	0.0400	126-15-43.8	33-24-46.9		
U모슬포03	완전	2628	4493	26.1296	-26.1262	26.1279	0.0035	0.00405	31.9199	0.00490	0.00003	31.9248	31.9248		126-15-26.2	33-23-37.3	17'통합기준점_제주지구_도	
16-00-01-15	완전	1323	5816	-24.3159	24.3166	-24.3163	0.0008	0.00288	7.6037	0.00634		7.6100	7.61	0.0063	126-14-45.7	33-23-50.2	17'통합기준점_제주지구_도	
계		3951		1.8138	-1.8096	1.8117	0.0042	0.00994										
16-00-01-14	재설								5.7920			5.8320	5.832		126-15-43.8	33-24-46.9		
16-00-01-15	재설	2517	34804.4	1.8186	-1.8186	1.8186	0.0000	0.00793	7.6106		0.00900	7.6106	7.61		126-14-45.7	33-23-50.2	07'수준점_제주2	
계		2517		1.8186	-1.8186	1.8186	0.0000	0.00793										
합계		6468		-0.0048	0.0090	-0.0069	0.042	0.0127										
16-00-01-14	완전								5.7920			5.7940	5.7940	0.0400	126-15-43.8	33-24-46.9		
U모슬포03	완전	2628	4493	26.1296	-26.1262	26.1279	0.0035	0.00405	31.9199	0.00490	0.00003	31.9248	31.9248		126-15-26.2	33-23-37.3	17'통합기준점_제주지구_도	
16-00-01-15	완전	1323	5816	-24.3159	24.3166	-24.3163	0.0008	0.00288	7.6037	0.00634		7.6100	7.61	0.0063	126-14-45.7	33-23-50.2	17'통합기준점_제주지구_도	
계		3951		1.8138	-1.8096	1.8117	0.0042	0.00994										
16-00-01-14	재설								5.8320			5.8320	5.832		126-15-43.8	33-24-46.9		
16-00-01-15	재설	2516.5	34804.4	1.7786	-1.7786	1.7786	0.0000	0.00793	7.6106		0.00900	7.6106	7.61		126-14-45.7	33-23-50.2	07'수준점_제주2	
높이차									-0.0399					-0.0380				

B) 이 · 재설점 표고 보정 전 구간 높이차와 환 폐합차

[그림 4-6] 환폐합차점검부_측량기준점 이설 전후 수준측량 높이차 보정(예)



[그림 4-7] 수직기준망도_기준점 이설 전후 수준측량 높이차 보정

<표 4-3> 이설 및 표지변위에 따른 표고보정 국가기준점 수

1등환 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	합계
표지변위 표고보정 기준점 수	13	2	0	2	4	1	5	2	1	3	3	6	8	10	3	14	0	77

이와같이 선정된 최신 수준측량자료와 표지변위 보정 높이차를 이용하여 2등 수준환 (1등 수준점, 2등 수준점, 통합기준점 연결노선으로 구성)의 환폐합차를 계산하고 2등 수준측량의 허용오차($5.0\text{mm}\sqrt{S}$ 이하, S는 환을 구성하는 노선 편도거리(km))를 초과하는지 점검하였다.

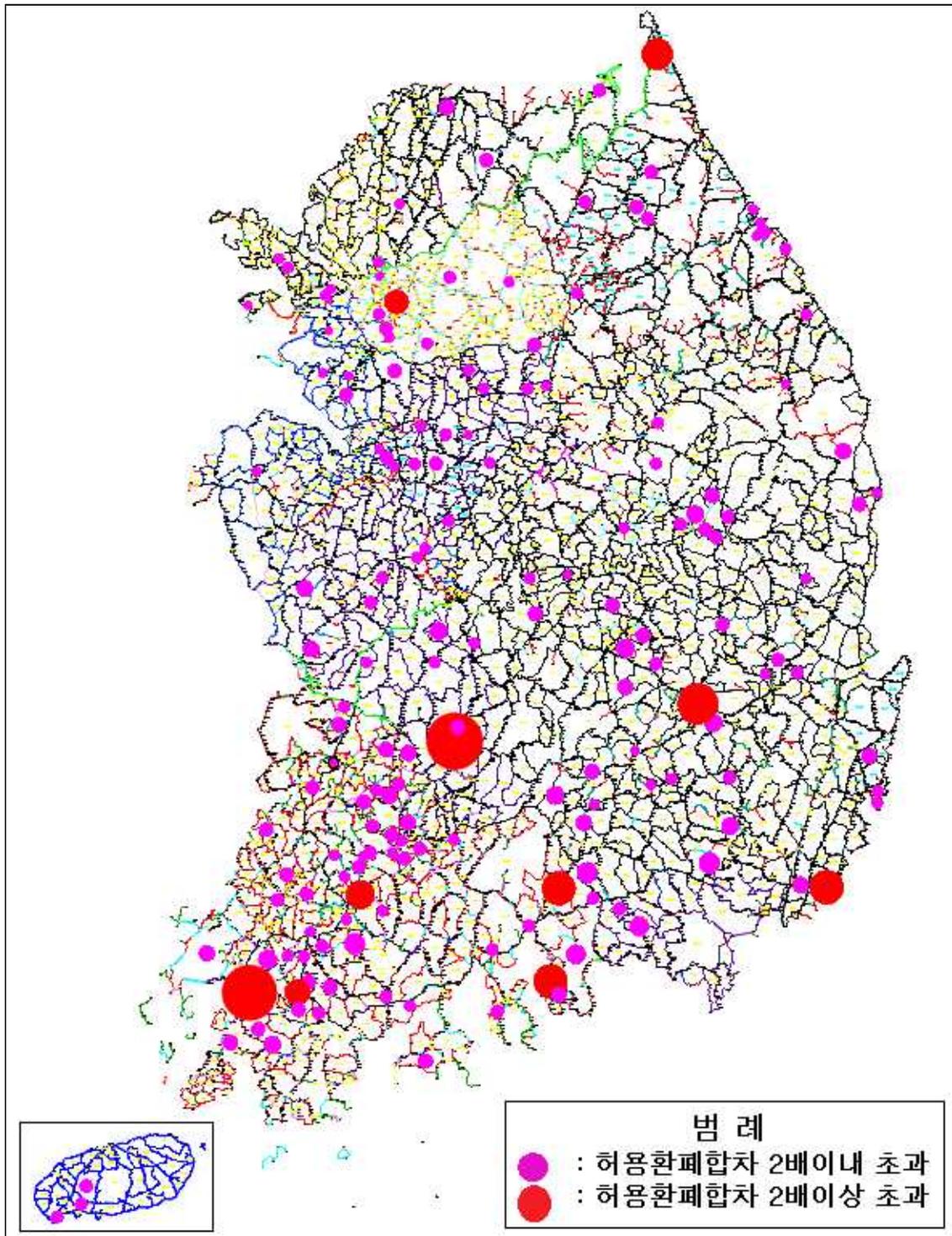
환폐합차가 허용오차를 초과하는 경우, 환의 시점과 종점이 동일한 측량기준점 인지?, 환을 구성하는 측량기준점 연결이 연속적인지?, 수준환이 사업년도나 사업지구, 이설 등으로 여러 구간으로 조합된 노선으로 수준환이 구성된 경우 구간 높이차의 부호(±)가 시·종점 순서에 부합되게 결정되었는지, 구간 높이차의 합계 및 환폐합차계산에 누락된 구간이 없는지를 점검하여, 오류가 발견된 경우, 이를 수정하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 수정하고도 환폐합차를 초과하는 2등 환은 <부록 6>에 수록하였다. 이로부터 허용환폐합차를 초과하는 1등환별 2등환 수를 허용환폐합차의 2배이내 초과와 2배이상 초과로 구분하여 정리하면 <표 4-4>와 같다. 허용환폐합차를 초과하는 2등환은 168개로 전체 2등환 수(1,488개)의 11.2%에 해당하여 교차를 초과하는 2등환의 비율(5%)보다 2배 이상 크다. 즉, 우리나라 수직기준망에서 교차는 허용오차이내에 있더라도 환폐합차가 허용오차를 초과하는 2등환이 2배 이상인 것은 교차와 허용환폐합차의 상관관계가 크지 않다는 증거이다. 실제로 허용교차와 허용환폐합차를 동시에 초과하는 2등 환은 총 5개로 전체 2등환의 0.3%, 허용환폐합차를 초과한 2등 환의 2.9%에 불과하였다. 1등 환별로 허용환폐합차를 초과하는 2등환의 비율이 20% 이상인 1등환은 1환과 14환으로 서남해안지역에 위치한 환인데, 이 원인은 이 지역의 지반이 연약한 점과 최근 수준측량사업이 다른 지역에 비해 적었기 때문으로 추정된다. 허용환폐합차를 초과하는 2등 환의 비율이 20% ~ 10% 범위인 1등환은 2환, 4환, 6환, 8환, 13환 14환, 15환으로 전국에 고르게 분포한다. 제주도의 16환은 허용 환폐합차를 초과하는 2등환의 개수가 가장 적었다. [그림 4-8]은 허용환폐합차를 초과하는 168개 2등환의 분포도이다. 이들 허용환폐합차를 초과하는 환들이 인접한 경우, 그 공통 노선(구간)은 수준측량오차가 포함되었다고 1차적으로 추정되는 바 재측이 필요하다.

<표 4-4> 허용 환폐합차 초과 2등환 수

1등환 번호	$EA_c^* < \text{환폐합차} < 2EA_c$	$\text{환폐합차} > 2EA_c$	합계	2등환 총수	백분율
1	27	2	29	139	21%
2	14	1	15	135	11%
3	5	0	5	69	7%
4	10	1	11	96	11%
5	15	0	15	172	9%
6	12	0	12	74	16%
7	7	0	7	98	7%
8	8	1	9	75	12%
9	6	0	6	64	9%
10	5	0	5	60	8%
11	5	0	5	60	8%
12	8	0	8	118	7%
13	9	0	9	73	12%
14	14	3	17	86**	20%
15	5	1	6	56	11%
16	3	0	3	47	6%
20	5	1	6	66	9%
합계	158	10	168	1,488	11%

* 허용환폐합차 $EA_c = 5.0\text{mm} \sqrt{S}$ 이하, S는 환을 구성하는 노선 편도거리(km)

** 완도군 청산도 환 1개 포함



[그림 4-8] 허용한폐합차 초과 2등환 분포

다. 최소제공조정과 과대오차 검정

1) 최소제공법의 기본 원리

본 연구에서는 수준측량 측정값은 기하학적 제약조건이라 불리는 확립된 수치적 관계(수준환의 높이차의 합은 0 이어야 함)를 만족해야 한다. 또한 측정값의 오차는 확률법칙에 부합(오차는 정규분포)하므로, 수준측량 측정값은 이와 같은 수학 법칙에 따라 조정되어야 한다.

결정해야 할 대상의 관측을 반복 관측한 경우, 최확값(most probable value)은 그 값이 동시에 발생할 확률이 가장 큰 값이며, 최확값과 관측값의 차이를 잔차(residuals)라 할 때 잔차의 제곱의 합이 최소일 때 최확값의 확률이 가장 크게 된다. 관측값 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ 이고, 이들의 상대 중량(weights)이 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ 라면 최확값의 확률은 다음 식을 만족할 때 최대가 된다.

$$w_1 v_1 + w_2 v_2 + w_3 v_3 + \dots + w_n v_n = \sum w_i v_i \rightarrow \text{최소} \quad (4.16)$$

여기서, v_i 는 잔차이다.

측정값에 이와 같은 원리를 적용하여 최확값을 구하는 수학모델은 통계모형과 함수모형으로 구성된다.

2) 통계모형

측정값의 중량(weights)이란 다른 측정값과 비교한 상대적인 가치(worth)이며, 조정 계산에서 측정값의 보정량을 제어한다. 즉, 측정값의 정밀도가 높을수록 분산(variances)은 작고, 조정에서 그 측정값의 보정량은 상대적으로 적다. 즉, 최소제공조정법에서 분산, 결국은 중량을 결정하는 것을 통계모형(stochastic model)이라 한다.

상관관계가 있는 측정값의 중량은 공분산 행렬(covariance matrix)의 역행렬과 비례 관계가 있다. 이때 공분산 행렬을 기준분산(σ_0^2 , reference variance, variance of unit weight)으로 나눈 행렬을 코팩터행렬(cofactor matrix)이라 한다. 식 (4.17)에서 기준분산 σ_0^2 은 중량의 크기 조절(scaling)의 역할을 한다(Ghilani, C. D. & Wolf, P. R., 2010).

$$Q = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma \quad (4.17)$$

따라서, 중량과 분산, 그리고 코팩터행렬의 관계는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$W = Q^{-1} = \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \quad (4.18)$$

상관관계가 있는 관측에서 공분산행렬과 코팩터행렬을 갖더라도 코팩터행렬이 비정칙행렬(singular matrix)이면 그 역행렬을 구할 수 없으므로 중량행렬을 계산할 수 없다.

3) 함수모형

조정계산에서 조정의 조건을 정의한 방정식의 집합을 함수모형(functional model)이라 한다. 기본적인 함수모형으로 조건 조정법(conditional adjustment)과 매개변수 조정법(parametric adjustment)이 있다. 조건조정법에서는 측정값과 그 잔차가 기하학적 조건을 만족하도록 강제된다. 매개변수 조정법에서는 측정값을 직접 측정되지 않은 매개변수의 함수로 나타낸다. 두 조정법의 결과는 같으나, 본 수직기준망 조정에서는 관측값마다 관측값, 매개변수, 상수로 방정식을 구성하는 매개변수 조정법을 이용하였으며, 적용된 관측방정식, 정규방정식, 정확도에 관한 식은 다음과 같다.

- 관측방정식

$$AX = L + V, \quad W \quad (4.19)$$

단, V : 잔차 벡터

A : 매개변수 계수행렬

X : 매개변수(수준노선 시·중점 정표고) 벡터

L : 관측값(노선 시·중점간 높이차)

W : 관측값의 중량

- 정규방정식

$$(A^TWA)X = A^TWL \quad (4.20)$$

$$X = (A^TWA)^{-1}A^TWL \quad (4.21)$$

이로부터 V 와 \bar{L} 은 다음 식으로부터 계산한다.

$$V = AX - L \quad (4.22)$$

$$\bar{L} = L + V \quad (4.23)$$

- 사후기준표준오차

단위중량(unit weight)에 대한 추정 기준분산값(estimated reference variance)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sigma_0^2} = \frac{V^T W V}{m - n} \quad (4.24)$$

단, m : 관측값 수

n : 미지수 수

코팩터행렬 전파법칙에 따라 매개변수(X), 조정 높이차(L), 잔차(V)의 코팩터행렬(cofactor matrix)은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{xx} = (A^TWA)^{-1} \quad (4.25)$$

$$Q_{vv} = W^{-1} - A(A^TWA)^{-1}A^T \quad (4.27)$$

$$Q_{ii} = A(A^T W A)^{-1} A^T \quad (4.26)$$

이때 공분산행렬(covariance matrix)은 사전 기준분산(a priori reference variance) σ_0^2 을 알고 있는 경우에는 Q_{xx} , Q_{ii} , Q_{vv} 에 σ_0^2 을 곱하여야 하며, 이를 알지 못하는 경우에는 식(4.24)의 추정값을 사용한다.

- 조정된 수준점표고 표준오차

$$M_1 = m_0 \sqrt{q_{11}}, M_2 = m_0 \sqrt{q_{22}}, \dots, M_n = m_0 \sqrt{q_{nn}} \quad (4.28)$$

$$\text{단, } Q_{(n,m)} = (A^T W A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{nm} \end{bmatrix}$$

한편, 상관계수행렬과 회귀계수는 다음과 같이 계산한다.

$$r_{(a,c)} = \frac{q_{ac}}{\sqrt{q_{ac}} \sqrt{q_{cc}}} \quad (4.29)$$

$$b_{(a,c)} = \frac{r_{(a,c)} \sigma_0 \sqrt{q_{ac}}}{\sigma_0 \sqrt{q_{cc}}} = \frac{q_{ac}}{q_{cc}} \quad (4.30)$$

여기서, q_{ii} 는 코팩터행렬 Q_{xx} 의 대각선 요소를 가리킨다.

4) 과대오차 검정

조정계산에서 본 연구에서 조정의 조건을 정의하는 방정식의 집합을 함수모델이라 한다.

(1) 전역검정(global test)

GMM(Gauss-Markoff Model)에서 측정값들이 정규분포를 이루고 서로 독립적이라고 가정하고, 이때 정오차나 과대오차가 없고 단지 우연오차만 존재한다면 오차전파의 법칙에 따라 다음 관계가 성립된다.

$$L \sim N (AX, \sigma_0^2 Q_L) \quad (4.31)$$

$$\bar{X} \sim N (X, \sigma_0^2 Q_{\bar{X}}) \quad (4.32)$$

$$V \sim N (0, \sigma_0^2 Q_V) \quad (4.33)$$

$$V^T W V \sim \sigma_0^2 \chi^2_{(f)} \quad (4.34)$$

이 중에서 가장 대표적인 값인 식(4.34)에 기반하여 사후기준분산(a posteriori reference variance factor) $\hat{\sigma}_0^2$ 와 사전기준분산(a priori reference variance factor) σ_0 를 비교하기 위한 통계량인 아래 식(4.35)가 전역검정에 사용된다. 일반적으로 전역검정에서 유의수준 $\alpha = 5\%$ 이다.

$$T = V^T W V / \sigma_0^2 = f \times \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 \sim \chi^2_{(f)} \quad (4.35)$$

식 (4.35)에 의한 귀무가설 H_0 가 기각될 때는 만일 전역검정(global test)이 기각된다면 잔차의 제곱 합이 너무 크다는 의미이므로 함수모형의 부적합, 확률모형의 부적당, 관측값의 실수, 착오 등이 기각원인일 것이나, 이중 어떤 원인인지 판단하기 어렵기 때문에 위의 세 번째 원인에 국한하여 과대오차를 추정한다. 이 방법은 매우 간단하여 계산에 소요되는 시간이 짧은 장점이 있지만, 다음과 같은 단점이 있다.

- 과대오차가 관측값에 포함되어 있음을 알려준다 해도 그 위치를 알 수 없다.
- 검정의 기각값이 잉여관측수에 의존하므로 자유도가 커지면 기각 임계값도 커져

검정의 예민성이 떨어진다.

- 과대오차의 크기가 작거나 개수가 적은 경우 검정의 신뢰성이 낮으며, σ_0 의 추정에 따른 불확실성이 큰 문제점이다.

Baarda(1968)는 국소검정(local test)을 적용할 판단근거로 전역검정을 이용하였다.

(2) 국소검정(local test)

조정계산을 통하여 구한 $\overline{\sigma_0}$ 은 항상 부정확한 모델로부터 구해지기 때문에 다음 관계를 갖는다.

$$E(\overline{\sigma_0^2}) \geq \sigma_0^2 \tag{4.36}$$

이때 내포된 오차의 크기 Δ 를 직접 구할 수 없기 문에 검정기법을 사용하게 된다. 즉, Δ 가 구해질 수 있다고 한다면 자유도 f 이고 비심도모수(non-centrality parameter) λ 인 χ^2 분포가 된다.

$$\frac{V^T W V}{\sigma_0^2} \sim \chi^2_{f,\lambda} \tag{4.37}$$

이때 λ 는 Δ , W , Q_V , σ_0 의 함수이므로 다차원인 경우에는 처리가 어렵다. 그러므로 1차원의 경우 관용적인 대립가설(conventional alternative hypothesis)인 과대오차만이 내포되어 있다고 가정하면 단순화 될 수 있다.

식 (4.37)에서 제1 과오(귀무가설이 진실인데도 귀무가설을 기각)를 범할 확률, 즉, 유의수준 $\alpha = \alpha_0$ 로 고정하고 제2 과오를 범할 확률 $\beta = \beta_0$ 인 Baarda 검정방법에 있어서는 잔차가 정규분포를 이루며 σ_0 를 알고 있다고 가정되므로 표준잔차의 개념으로 검정될 수 있다. 즉,

$$W_i = \frac{v_i}{\sigma_{vi}} = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{q_{vi}}} \sim t (\approx N(0,1)) \quad (4.38)$$

이때 W_i 의 임계값은 $N_{1-\alpha_0/2}$ 로 $\alpha_0 = 0.001$ 이고, 검정력(1-β)가 0.2일 때 4.1이다. Amer(1979)와 Harvey(1994)는 과대오차의 기각기준으로 3.29를 제안했다. 식 (4.38)에 의한 국소검정은 식 (4.35)에 의한 전역검정이 기각될 때만 실시한다.

Pope(1976)는 실제로 σ_0^2 를 정확히 알 수 없기 때문에 $\overline{\sigma_0^2}$ 을 대용하며, 이때 v_i 와 $\overline{\sigma_{v_i}}$ 는 서로 종속되므로 아래와 같은 특별한 Tau분포를 제안했다.

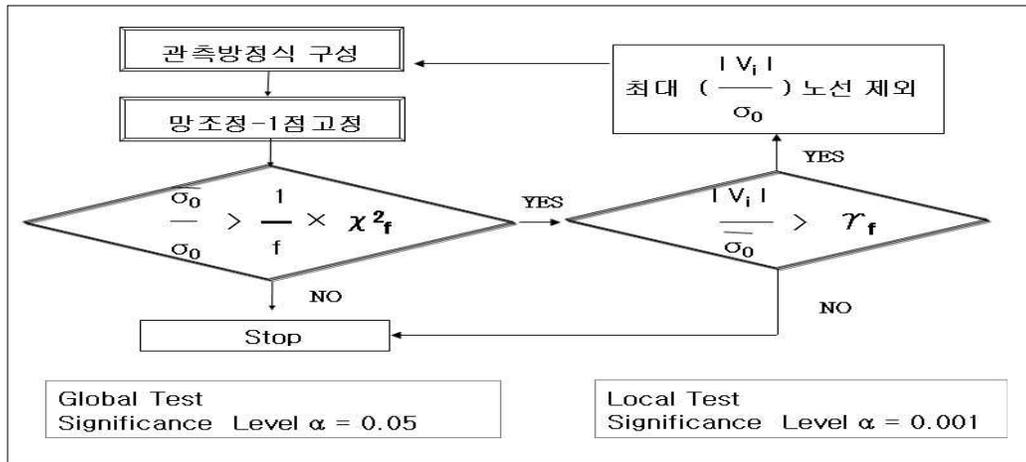
$$T_i = \frac{|v_i|}{\overline{\sigma_{v_i}}} = \frac{|v_i|}{\sigma_0 \sqrt{q_{v_i}}} \sim \tau_f \quad (4.39)$$

τ 분포식은 복잡하므로 다음의 t-분포 함수가 사용될 수 있으며, 관용적 검정 (conventional test)에서 $\alpha_0 = 0.01$ 인 양측검정(two-side test)이 제안되고 있다.

$$\tau_{\alpha/2, f} = \frac{t_{\alpha/2, f-1} \sqrt{f}}{\sqrt{f-1 + t_{\alpha/2, f-1}^2}} \quad (4.40)$$

즉, 식 (4-39)에서 표준화잔차($\frac{|v_i|}{\sqrt{q_{v_i}}}$)를 사후기준표준편차($\overline{\sigma_0}$)으로 나눈 값이 식 (4.40)의 $\tau_{\alpha/2, f}$ 보다 크면 그 관측값은 과대오차가 포함되었다고 간주한다.

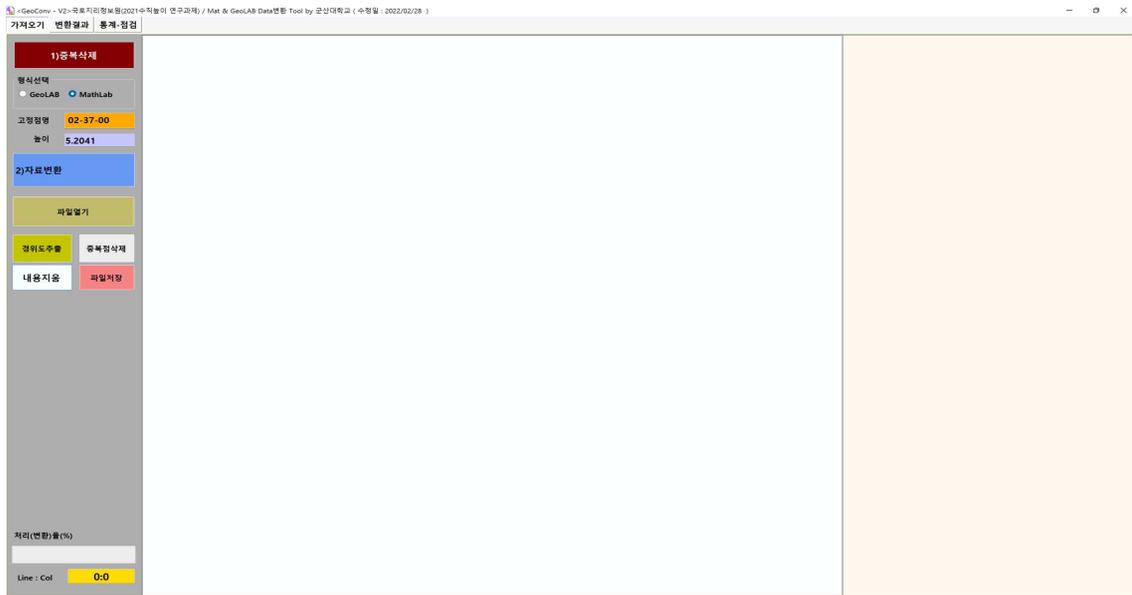
Barda검정법이나 Pope검정법은 망조정 자료에 1개의 과대오차만이 포함되어 있다는 가정하에 수립된 것이므로 조정단계마다 global test가 기각되면 local test를 실시하여 가장 큰 표준화 잔차를 보인 1개 관측값을 관측자료에서 삭제하는 과정을 조정에 사용된 관측값이 전역검정과 국소검정에서 기각역을 벗어나지 않을 때까지 반복한다. [그림 4-9]는 과대오차 검정과정 흐름도이다.



[그림 4-9] 전역검정과 국소검정 과정(data snooping)

5) 수직기준망 조정 소프트웨어 입력 데이터 작성 도구 개발

국토지리정보원에서 수준측량사업으로 얻은 데이터 중 수직기준망조정에 가장 기본이 되는 자료는 ‘총괄계산부’ (또는 ‘수준측량계산부’) 인데, 현재 이들은 측정값(시점, 종점, 거리, 높이차, 관측표고)과 기존 고시표고가 기록된 Excell 파일이다. 이로부터 환폐합차 점검을 위한 ‘환폐합차점검부’도 Excell 파일로 작성되었다. 반면에 본 연구에서 사용하는 수준망 조정 프로그램 ‘LSAdj4LevelN.m’과 상업용 GeoLab 프로그램은 모두 입력데이터 파일로 ASCII 코드로 기록된 문서(text) 파일을 사용한다. 따라서 수직기준망 조정 프로그램 입력데이터 문서파일을 만들기 위해 ‘환폐합차점검부’(Excell 파일)의 맨 우측 열(column)에 Excell 수식을 이용하여 ‘LSAdj4LevelN.m’ 프로그램과 GeoLab 프로그램 입력데이터 포맷으로 데이터를 작성하였다. 하지만 수준환이 인접 수준환과 접한 경우, 접한 구간의 수준측량자료는 양쪽 환의 ‘환폐합차점검부’에 공유되어 있어, 두 번 포함된 동일 구간자료가 수직기준망조정에서 허구의 환을 구성하는 오류가 발생한다. 이와 같은 불합리를 해소하기 위해서 ‘환폐합차점검부’에 포함된 수준측량구간 자료 중 중복(시점/종점 및 높이차가 동일)된 구간 자료는 그중 하나만 남기고 나머지는 삭제할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와같이 중복 데이터를 검색하고 삭제하는 기능을 수행하는 VBA 프로그램을 개발하여, ‘환폐합차점검부’의 2등환 구성 수준측량 구간자료에서 중복구간자료를 검색하여 그중 한 자료만 남기고 나머지 자료를 삭제한 후, ‘LSAdj4LevelN.m’ 프로그램 및 GeoLab 프로그램에 입력할 데이터 파일(ASCII 코드 txt 파일)로 변환하였다. [그림 4-10]은 수준망 조정 입력데이터 작성 프로그램의 메뉴 구성이며, <표 4-5>는 작성된 입력데이터 파일의 예이다.



[그림 4-10] GeoConv의 기본화면

<표 4-5> GeoConv에 의해 환폐합차점검부로부터 작성된 수준망조정 입력데이터 파일

LI160001	제주도원점	16-00-02-01	35.72608	2.376	07'수준	-
LI160001	16-00-01-01	16-00-02-01	7.51007	0.621	12'국가	-
LI160001	U1181	16-00-01-01	18.71213	1.399	21'해남	-
LI160001	제주도원점	U1181	9.49992	1.410895	20'통합	-
LI160002	16-00-02-01	16-00-02-02	21.06578	1.62	12'국가	-
LI160002	16-00-02-02	U한림14	38.75526	1.6875	12'국가	-
LI160002	16-00-01-02	U한림14	51.33949	2.858	17'통합	-
.....						
LI160045	U성산06	16-00-01-70	-11.61307	2.652	17'통합	-
LI160046	U1186	16-00-01-68	14.17594	1.955	20'통합	-
LI160046	16-00-01-68	16-00-01-69	-7.98287	2.3418	07'수준	-
BMP						← 관측데이터끝 표시
제주도원점	11.1320					← 고정점번호고정점표고(m)
EOF						← 파일 끝 표시, 소프트웨어는 여기까지만 자료 읽음

6) 국토지리정보원 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램

본 연구의 수직위치망 조정은 2011년 국토지리정보원의 '정표고기반 통합측지망 구축 연구'에서 개발한 수준망조정 전용 MatLab 프로그램 'LSAdj4LevelN.m'을 개선하여 이용하였다. 이 프로그램은 수준측량 관측값(시·중점간 높이차)를 중량(1/구간거리)을 부여하여 최소제곱법에 근거하여 최확값과 관련 정확도를 계산하며 이와 관련된 통계모형 및 함수모형은 앞에서 기술한 식 (4.17) ~ 식 (4.30)과 같다. 본 연구에서는 국토지리정보원의

수준망조정 전용 프로그램 'LSAdj4LevelN.m'을 검토한 결과 다음과 같은 오류와 미비점이 있어 이를 개선하였다.

(1) 오류 수정

① 조정결과 출력 포맷 오류 수정

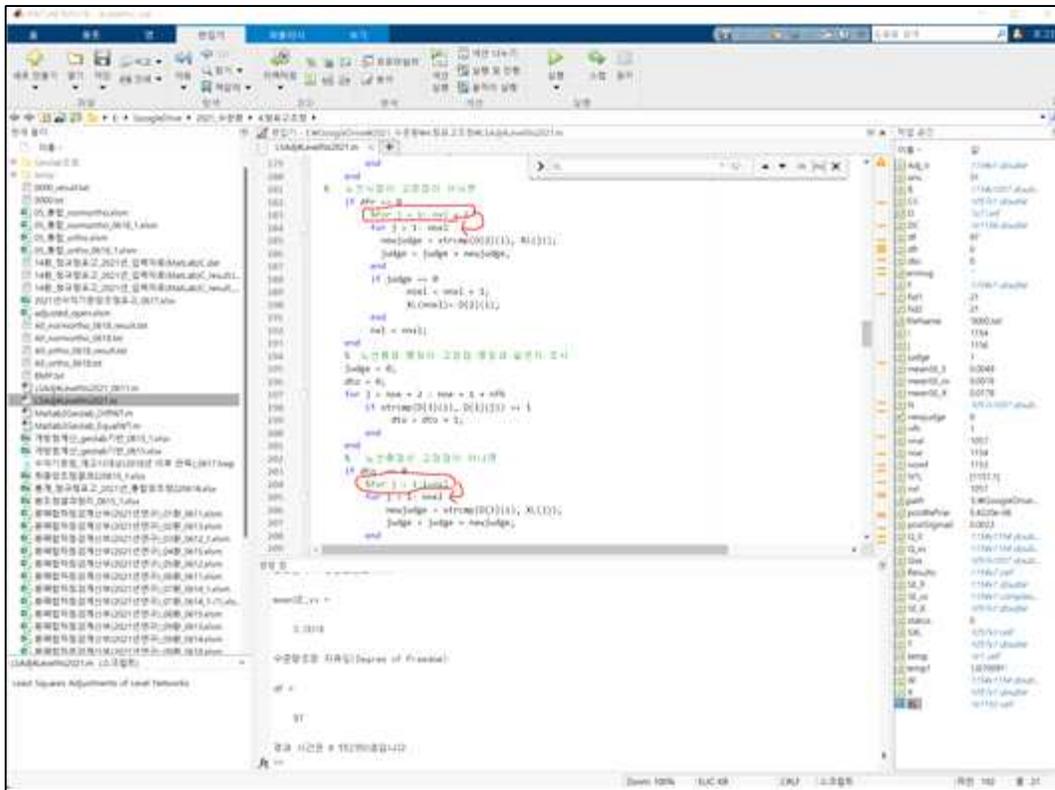
조정결과를 MatLab 편집창에 기록할 때 기준점의 표고가 1,000m보다 높은 경우, 자동으로 지수형 포맷으로 기록하여 cm 단위 이하의 높이 값이 절삭 됨을 발견하고, 조정 높이가 1,000m를 초과하는 경우에도 고정 소수점 포맷으로 소수점이하 4자리(0.1mm 단위)까지 기록하도록 수정하였다[그림 4-11].

점명	정표고 보정	정표고 보정 X	정표고 보정 X	정표고 보정 X	정표고 보정 X	정표고 보정 X	정표고 보정 X	정표고 보정 O	정표고 보정 O	정표고 보정 O	정표고 보정 O
149	16-00-05-04	567.8928	567.8922	567.8921	567.8921	567.8921	-0.0001	-0.0007	0.0001	-0.0007	
150	16-00-05-05	707.6297	707.6289	707.6280	707.628	707.628	-0.0009	-0.0017	0.0009	-0.0017	
151	16-00-05-06	921.4375	921.4362	921.4356	921.4356	921.4356	0.0006	-0.0019	0.0006	-0.0019	
152	16-00-05-07	1008.6292	1008.6272	1008.6000	1.0086e	1008.6275	-0.0272	-0.0292	-0.0003	-0.0017	
153	16-00-05-08	1095.5080	1095.5048	1095.5000	1.0955e	1095.5056	-0.0048	-0.0080	-0.0008	-0.0024	
154	16-00-05-09	1004.2954	1004.2912	1004.3000	1.0043e	1004.2917	0.0088	0.0046	-0.0005	-0.0037	
155	16-00-05-10	909.3532	909.3485	909.3486	909.3486	909.3486	0.0001	-0.0046	0.0001	-0.0046	
156	16-00-05-11	753.4305	753.4249	753.4255	753.4255	753.4255	0.0006	-0.0050	-0.0006	-0.0050	
157	16-00-05-12	583.0549	583.0493	583.0476	583.0476	583.0476	-0.0017	-0.0073	0.0017	-0.0073	
158	16-00-05-14	182.9497	182.9438	182.9435	182.9435	182.9435	-0.0003	-0.0062	0.0003	-0.0062	

[그림 4-11] 수준망조정 프로그램 개선 - 조정표고 기록포맷 오류 수정

② 관측 시·중점의 고정점 여부 판별 탐색구간 설정 오류 수정

이 프로그램은 관측자료를 읽은 후 그 구간의 시점과 중점이 망조정에서 고정점으로 주어진 점인지 판별하여 관측방정식의 계수행렬과 관측값 행렬(식(4.19)의 A와 L)을 구성한다. 기존 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램에서 미지수 벡터 크기를 순 관측자료(= 관측자료 갯수 - 고정점 개수)로 설정하였는데, 환이 1개인 경우 배열 참조 초과 오류(index exceed the number of array elements)가 발생하여 망조정이 중단되었음을 발견하였다. 이에 따라 아래 [그림 4-12]와 같이 국토지리정보원 망조정 프로그램 'LSAdj4LevelN.m'의 미지수 벡터 참조할 때 설정한 미지수 벡터 크기를 벗어나지 않도록 수정함으로써, 단일 환으로 구성된 수준망도 조정이 가능하게 되었다.

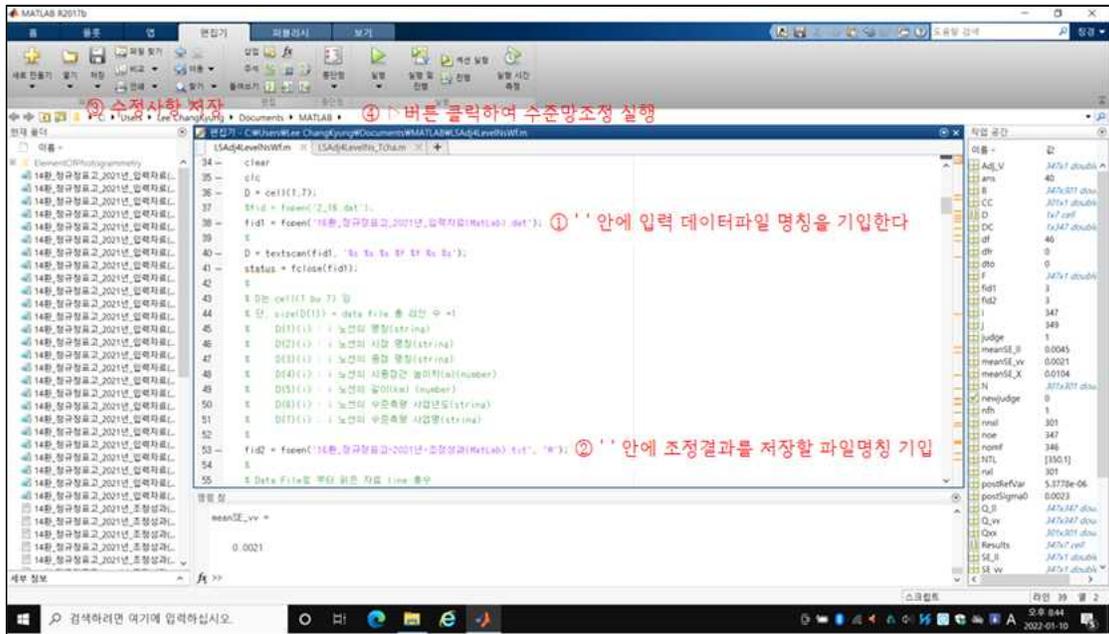


[그림 4-12] 수준망조정 프로그램 개선 - 고정점 탐색구간 오류 수정

(2) 기능 추가

① 조정결과 ASCII 파일로 직접 저장 기능

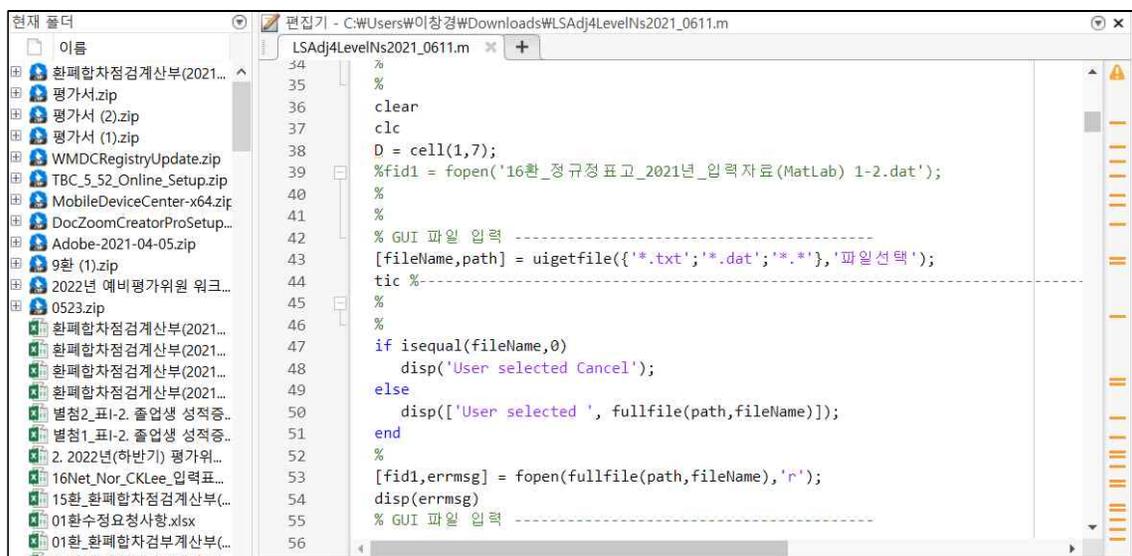
2011년에 개발한 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램은 수직기준망 조정에서 입력자료오류 및 과대오차검정을 쉽게 하기 위해 조정결과를 MatLab 편집창에 기록하고, MatLab 편집창에서 조정결과를 보고 입력 데이터의 과대오차를 순차로 소거한 후 최종 조정 결과를 얻으면, MatLab 편집창에서 최종 조정 결과를 복사(Ctrl+C)하여 문서파일에 붙여넣기(Ctrl+V) 하여 저장하도록 프로그램되었으나, 본 연구에서는 조정 결과를 MatLab 편집창 뿐만 아니라 문서파일에 동시에 기록하여 저장하는 기능을 추가하였다[그림 4-13].



[그림 4-13] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 조정결과 저장기능 추가

② 입력데이터 파일 탐색 기능

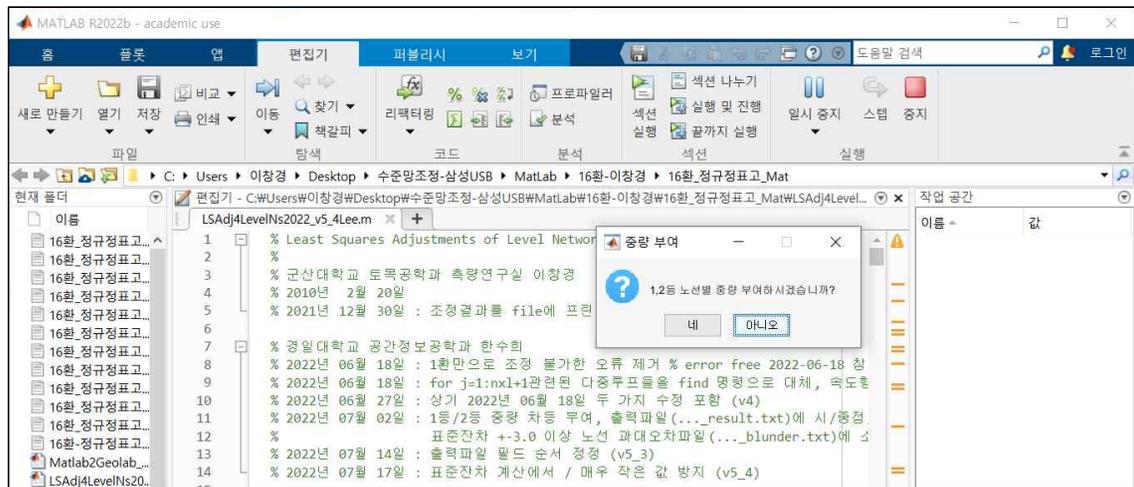
기존의 수직기준망조정 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램은 편집기 창을 열고 망조정을 수행하기 때문에 입력파일명과 결과저장 출력파일명을 편집기에서 해당 명령어 라인에 기입하여 실행하였으나, 프로그램 실행 후 수준망조정 입력데이터 파일을 Windows 탐색기 기능을 이용하여 찾아 지정하면, 해당 파일을 열어 수준망조정을 수행할 수 있도록 기능을 추가하였다([그림 4-14]).



[그림 4-14] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 입력데이터 파일 탐색기능 추가

③ 관측값 중량부여방법 선택기능

수직기준망 조정 전용 프로그램(LSAdj4LevelN.m)은 우리나라 기존 수준망이 1등 및 2등 수준망의 2계구조로 구성되었기에 입력데이터의 구간 명칭에 1등수준측량 구간과 2등수준측량 구간을 구분하여 입력하고, 이를 근거로 1등 및 2등 수준측량의 중량을 차등하여 부여하도록 프로그램 되었었다. 그러나 통합기준점의 도입으로 1등 수준측량과 2등 수준측량 구간이 기존 1등 수준노선과 2등 수준노선과 무관하게 실시되고 있어 프로그램에 수준측량 구간 시·종점 명칭으로부터 1등 및 2등 수준측량을 판별하고 이에 근거하여 중량을 1 / 구간거리(km)에 부가하여 차등하여 부여할 것인지 균등하게 부여할 것인지 선택할 수 있는 옵션을 추가하였다[그림 4-15].



[그림 4-15] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 중량부여방법 선택기능 추가

④ 국소검정

수직기준망 조정 전용 ‘LSAdj4LevelN.m’ 프로그램은 최소제곱법에 의한 망조정 결과로 최확조정표고와 그 정확도를 계산하여 제시하였으나, 본 연구에서 국소검정(local test)에서 과대오차 관측값의 근거인 시·종점간 높이차의 표준화잔차값을 식(4-39)에 의해 계산하고 그 크기가 3.0인 이상인 구간을 크기순서로 정렬하여 망조정결과 파일에 기록하는 기능을 추가하였다. 수준망조정 프로그램에서 계산한 표준화잔차는 상업용 GeoLab 프로그램의 과대오차 검정에서 계산된 값과 동일하므로 국토지리정보원 수준망 전용 프로그램으로도 과대오차 검정을 할 수 있게 되었다. [그림 4-16]은 국토지리정보원 수준망 전용 망조정 프로그램의 과대오차 검정기능 추가 전후 실행과정에서 MatLab 편집기 화면이다.

노선명	노선거리(km)	관측		조정		높이차		잔차	
		높이차(m)	높이차(m)	표준오차(m)	조정잔차(m)	표준오차(m)	표준오차(m)	표준오차(m)	
LI110001	1.3497	-0.8665	-0.8665	0.0038	-0.0000	0.0008			
LI110001	2.4479	-25.8287	-25.8288	0.0051	-0.0000	0.0015			
LI110001	1.4210	-7.1098	-7.1098	0.0039	0.0000	0.0009			
LI110001	2.4260	22.2243	22.2243	0.0051	0.0000	0.0015			
LI110001	1.1240	-22.1970	-22.1969	0.0035	0.0001	0.0007			
LI110001	1.9586	42.2488	42.2489	0.0046	0.0002	0.0012			
LI110001	4.9013	63.1570	63.1575	0.0068	0.0005	0.0031			
LI110001	1.1339	21.8913	21.8904	0.0033	-0.0009	0.0014			

과대오차검정 기능 추가 후 ↓

노선명	시점	종점	노선거리(km)	관측	조정	높이차표준오차(m)	조정잔차(m)	표준오차(m)	표준화잔차(m)
				높이차(m)	높이차(m)				
LI020024	U대구20	14-01-01	0.9960	-1.2391	-1.2424	0.0026	-0.0033	0.0006	-5.4906
LI020024	14-02-00	13-00-00	1.4860	30.8643	30.8594	0.0031	-0.0049	0.0009	-5.4906
LI020024	14-01-01	14-02-00	2.2120	2.5694	2.5621	0.0037	-0.0073	0.0013	-5.4906
LI020024	U대구32	14-01-00	3.0140	-3.5235	-3.5335	0.0042	-0.0099	0.0018	-5.4906
LI020024	14-01-00	U대구20	0.4080	1.1531	1.1518	0.0017	-0.0013	0.0002	-5.4906
LI20B0001	20-00-33-04	U0003	1.0616	1.2163	1.2186	0.0027	0.0023	0.0004	5.1284
LI20B0001	교BM23	20-00-33-01	2.1280	-12.2203	-12.2249	0.0038	-0.0045	0.0009	-5.1284
LI20B0001	20-00-33-03	20-00-33-02	2.6976	-2.5939	-2.5708	0.0075	0.0230	0.0045	5.1284

[그림 4-16] 수준망조정 전용 프로그램 개선 - 과대오차 검정기능 추가

7) 사업용 GeoLab 소프트웨어

(1) 일반 사항

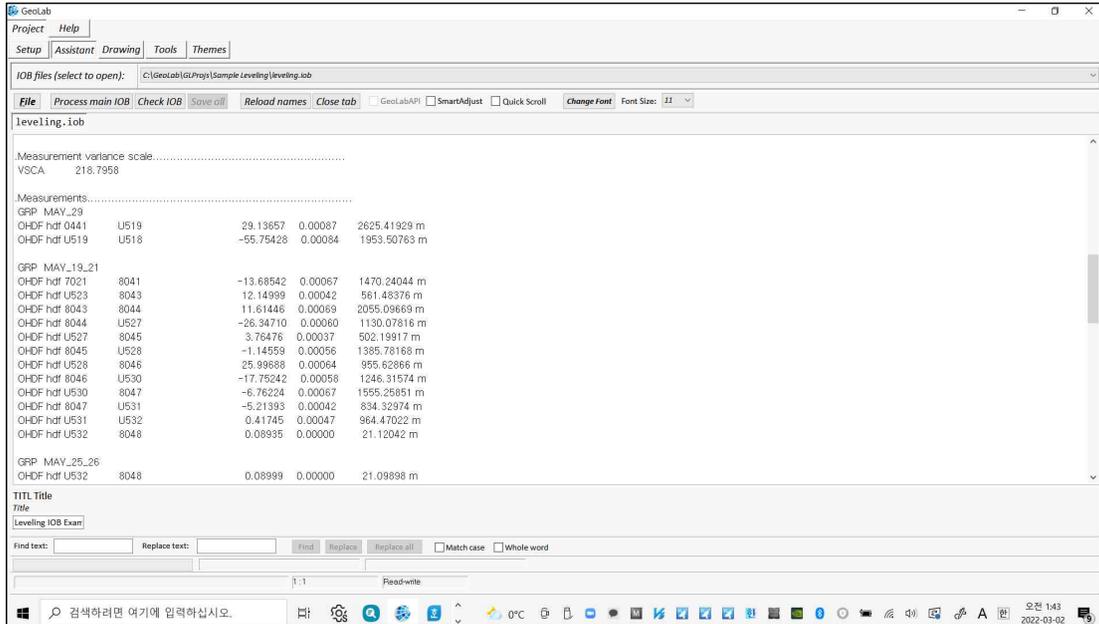
GeoLab 소프트웨어는 GeoLab Solutions사에서 1985년 개발한 1~3D 측량관측값 조정계산 프로그램으로 GNSS, GPS-RTK, Total Station, 트래버스측량, 삼각측량, 수준측량, 관성측량 관측자료 등을 최소제곱조정할 수 있으며, 데이텀변환, 지도투영변환 등 다양한 기능을 제공한다. Windows XP/7/8/10 이후 버전에서 구동되며, 세계 여러 기관에서 실무에 사용되고 있다. 본 연구에는 GeoLab 2020 버전을 사용하였다. [그림 4-17]은 수직기준망조정 입력데이터(~.job)가 GeoLab에 업로드된 창이며, [그림 4-18]은 입력자료를 최소제곱법으로 조정한 결과(~.lst) 창이다.

(2) 수준망 조정용 입력자료 형식(OHDF)

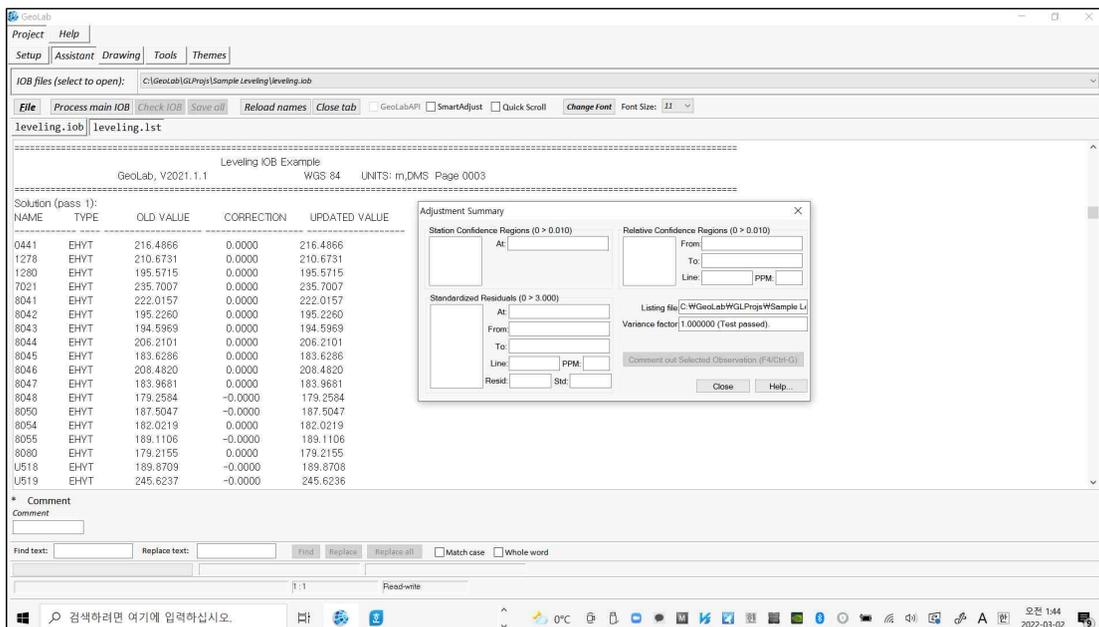
GeoLab은 처리하는 측량자료에 적합한 다양한 입력데이터 형식을 제공하는데, 수준측량 측정자료 조정에 적합한 입력자료 형식은 OHDF(Orthometric Height Difference)이다. OHDF 레코드 형식의 구성과 주요 특징은 다음과 같다.

- 시점과 종점의 번호를 12자리까지 부여할 수 있는 단축형 기준점 명칭 포맷(short parameter name format) 관측자료 레코드 구성은 다음 <표 4-6>과 같다. 단, 관측자료 레코드의 10열에 '*' 표시하면 확장형 기준점 명칭 포맷(long parameter name format)으로 매개변수 명칭을 30자리까지 표기할 수 있다.

- 이 포맷으로 주어진 수준측량 관측값 조정에서 중량은 $1/\sigma^2$ 이며, 수준측량 규정, 시점-중점간 거리, 관련 관측오차 자료를 이용하여 이 구간 높이차의 표준편차(σ)를 계산하고, 이 값을 066~075열에 기입한다.



[그림 4-17] GeoLab의 수준측량 입력데이터(~.iob) 편집 창



[그림 4-18] GeoLab 수준측량자료 최소제곱조정 결과(~.lst) 창

<표 4-6> GeoLab 수준측량용 입력데이터 레코드 구성

열	입력자료
002-005	'OHDF'
007-009	Sigma 레코드 확인자
010-010:	파라미터 명칭을 12자리 이내로 기입할 경우 빈공간 파라미터 명칭을 30자리 이내로 기입할 경우'*'
011-022:	측정 시점 번호
024-035	측정 종점 번호
050-064	정표고높이차 측정값
066-075	측정값의 표준편차
077-091	(선택사항) 시점-종점간 거리
093-094	측정 단위

라. 정규정표고기반 수직기준망 조정

1) 수직기준망 예비조정 입력자료

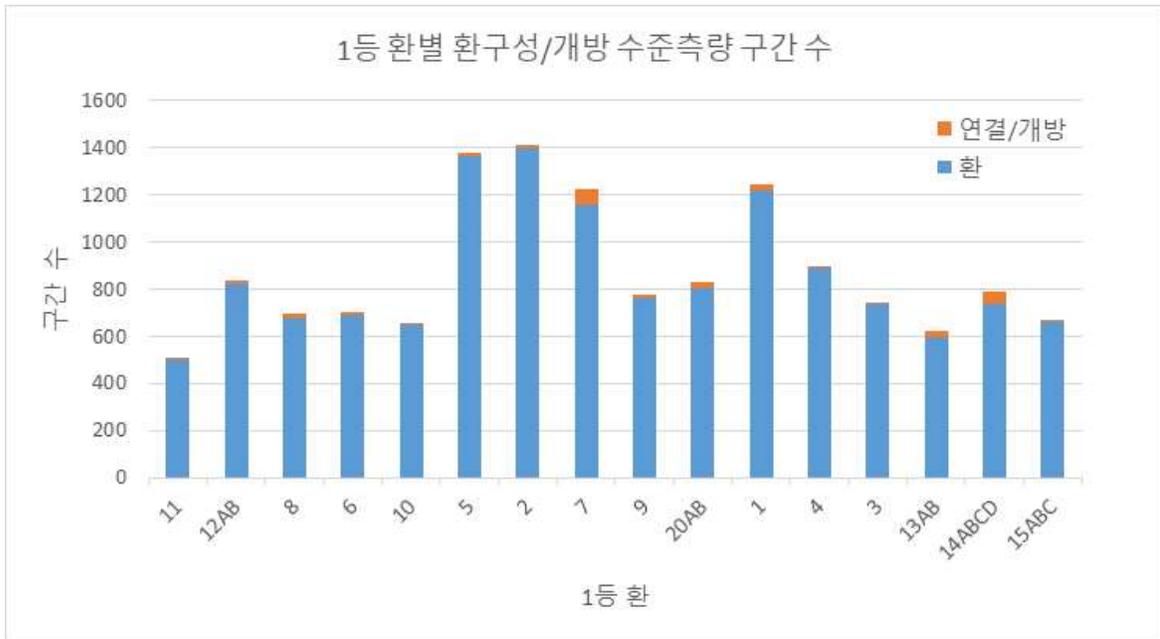
국토지리정보원의 2000년 이후 수준점과 통합기준점에 대한 수준측량사업으로 축적한 자료 중 '수준측량계산부'로부터 '환폐합차점검부'를 작성하고 이로부터 1등 환별 수직기준망 조정 입력자료를 작성하였다. 우리나라 '수준측량 작업규정'의 허용왕복차 규정을 인용하여 관측 높이차의 표준편차(σ)를 1등 수준측량구간은 $2.5\text{mm}\sqrt{S(\text{km})}$, 2등 수준측량구간은 $5.0\text{mm}\sqrt{S(\text{km})}$ 로 하고, 중량(weight)은 표준오차의 제곱에 반비례하므로 1등 수준측량 관측값의 중량(weight)은 $1 / \text{구간거리}(\text{km})$, 2등 수준측량 관측값의 중량은 $1 / (4 \times \text{구간거리}(\text{km}))$ 로 부여하였다. <표 4-7>은 이와같이 작성한 수준망조정 입력데이터 구성 통계이다. [그림 4-19]는 1등 환별 수준측량 구간의 환구성 구간과 개방/연결 구간 수 분포인데, 환을 구성하는 구간은 전체의 97.5%이고, 개방구간이거나 인접하지 않은 환을 연결하는 구간 전체의 2.5%이다. [그림 4-20]은 1등 환별 1등 또는 2등 수준측량 구간 수인데 1등 수준측량 구간은 72%이고, 2등 수준측량 구간은 나머지 28% 구간임을 알 수 있다. 단, 두 그림의 구간 수는 동일하지 않은 것은 [그림 4-19]는 환별 망조정 입력자료의 구간 수 기준으로 인접 1등환과 중복된 구간 수가 포함되어 있으며, [그림 4-20]은 중복구간이 소거된 전국 통합망조정 입력자료의 구간 수를 기준하였기 때문이다.

<표 4-7> 정규정표고 1등 환별 수직기준망 조정 입력자료 구성

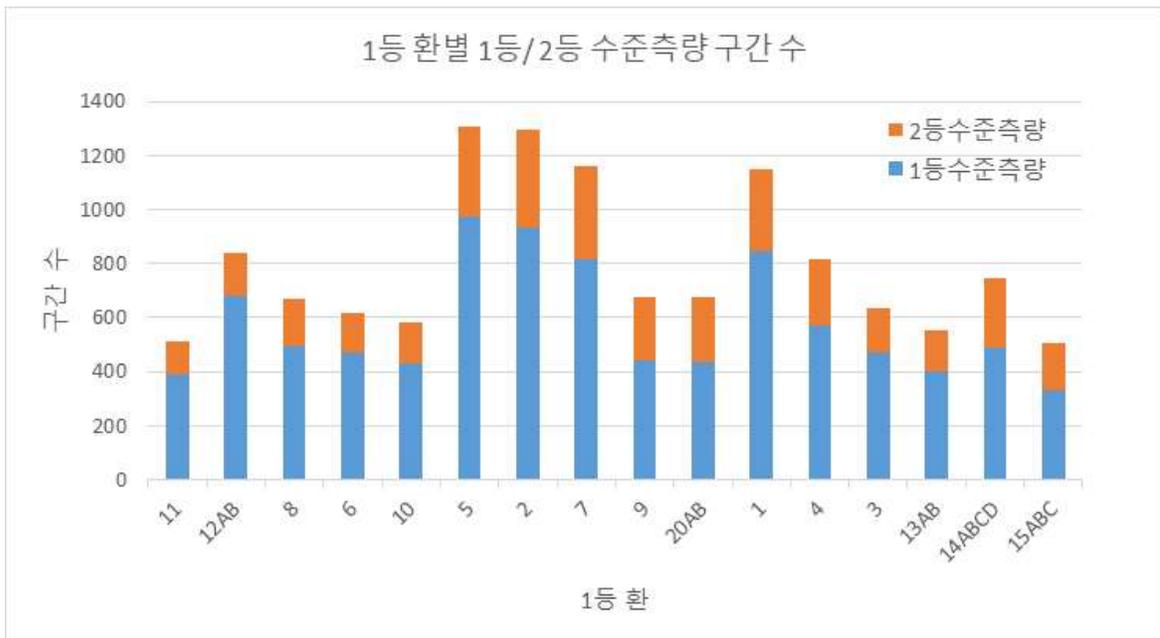
구분	1등환 번호	구간 수					기준점 수			2등환 수
		망 구성 요소		합계	측량 등급		망 구성 요소		합계	
		환	개방/연결*		1등	2등	환구성	개방/연결*		
육지	11	500	10	510	389	121	441	10	451	60
	12AB	819	16	835	680	155	704	16	720	117
	8	678	15	693	520	173	604	15	619	75
	6	690	13	703	554	149	617	13	630	74
	10	640	7	647	506	148	581	7	588	60
	5	1373	27	1400	1063	337	1199	27	1226	175
	2	1398	14	1412	1047	365	1264	14	1278	135
	7	1156	65	1221	878	343	1059	65	1124	98
	9	761	17	778	542	236	698	17	715	64
	20AB	804	25	829	574	255	740	25	765	66
	1	1217	24	1241	935	306	1079	24	1103	139
	4	888	10	898	650	248	794	10	804	95
	3	735	6	741	578	163	667	6	673	69
	13AB	592	31	623	468	155	521	31	552	73
	14ABCD	766	34	790	540	250	675	34	709	85
	15ABC	662	4	666	484	182	609	4	613	56
	소계	13,679	318	13,987	10,408	3,586	12,252	318	12,570	1,441
	순 소계**	12,435	318	12,753	9,166	3,557	10,977	335	11,312	
	섬 지역	14환 청산도	3	1	4	4	0	4	0	4
보길도		0	4	4	4	0	0	4	4	0
조도		0	3	3	3	0	0	4	4	0
거문도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
초도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
여서		0	1	1	1	0	0	1	1	0
16환 제주도		351	2	353	236	117	304	2	306	47
우도		0	3	3	3	0	0	2	2	0
가파도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
마라도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
추자도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
소계	354	19	373	256	117	308	18	326	48	
순합계*	12,789	337	13,126	9,452	3,677	11,285	353	11,638	1,489	

* 개방노선: 수준노선 시·종점 중 하나가 환에 연결되지 않는 노선
 연결노선: 두 환이 2점 이상의 기준점을 공유하지 않을 때 두 환을 연결한 수준노선

** 수준환 조정자료에서 중복자료가 소거된 자료의 개수



[그림 4-19] 1등 환별 환구성/개방 수준측량 구간 수



[그림 4-20] 1등 환별 1등/2등 수준측량 구간 수 분포

2) 수직기준망 예비조정

(1) 1등 환별 수직기준망 조정 및 전역검정(global test) 개요

본 연구에서는 1등 환별로 수직기준망을 조정하여 입력데이터의 오류와 과대오차를 소거하고, 우리나라 17개 1등환으로 구성된 수직기준망을 통합한 통합 수직기준망 조정

을 통하여 국가기준점의 최확표고를 산출하는 전략을 따랐으며, 수직기준망조정 과정은 [그림 4-21]과 같다.

전역검정은 국소검정(local test)이 필요한가를 판별하는 선행과정으로 사후 기준 분산(a posteriori reference variance) $\overline{\sigma}_0$ 와 사전 기준 분산(a priori reference variance) σ_0 를 비교하기 위한 통계량인 식 (4.35)에 따라 실시되며, 본 연구에서는 귀무가설 H_0 가 기각될 때의 원인은 관측값에 실수나, 착오 등이 있는 경우로 한정하여 수직기준망조정에 이용된 수준측량 관측값에 실수나 착오 등이 있는지를 조사하여 이를 수정하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

- 1등 환별로 망조정하였으며, 고정점은 환의 좌상단 수준원점에 가까운 1등 수준점 1점을 선정하였다.

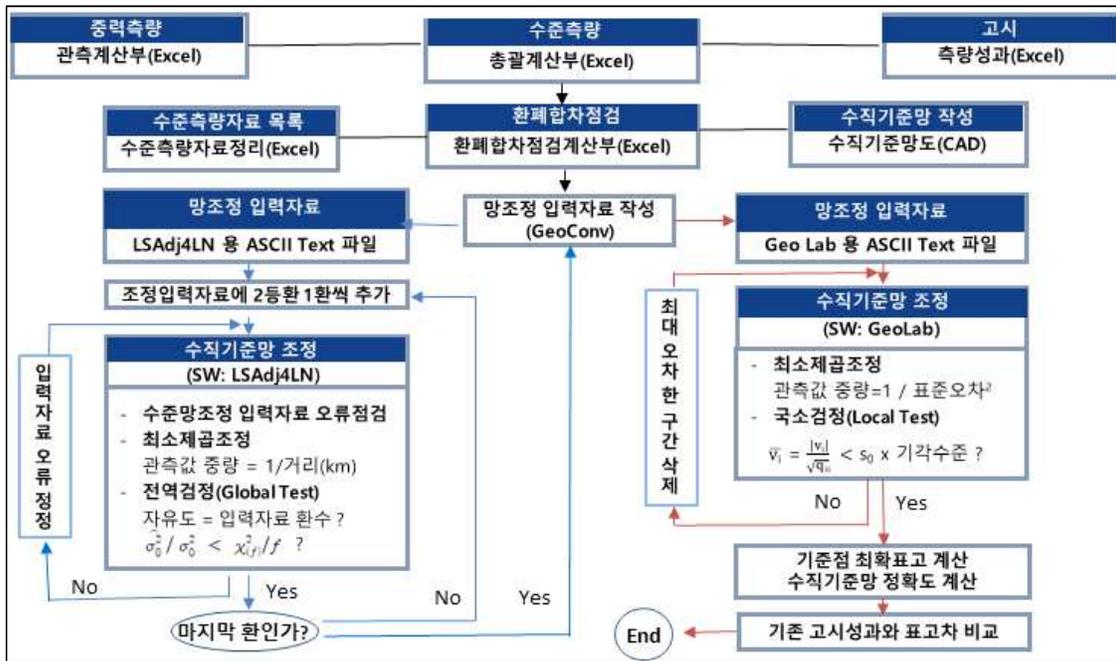
- 육지 내륙에 위치한 수준 환은 모두 인접 환과 1점 이상의 기준점을 공유하고 있으나, 서남 해안 연육도서에 위치하는 수준환은 인접 환에 공유하는 기준점이 없는 노선으로 연결된다. 단, 육지 환과 연결되지 않은 독립된 수준환(예, 제주도 및 청산도)은 그 섬의 조위기준점을 고정점으로 하여 별도로 망조정하였다([그림 4-22]).

- 수준망조정 예비조정은 2011년 국토지리정보원 통합측지망구축 연구사업에서 개발한 수준망조정 전용 프로그램 ‘LSAdj4LN.m’을 개선(오류 수정과 기능 추가)하여 사용하였다. 국토지리정보원 수직기준망 조정 전용 프로그램은 최소제곱법에 구간(시점 ~ 종점) 수준측량 높이차를 주어진 중량을 적용하여 조정하고, 총 수준측량 구간 수, 조정 기준점 수, 자유도, 사후 기준 표준편차($\hat{\sigma}_0$), 기준점의 조정표고와 표준오차, 표준화 조정잔차를 계산하여 텍스트 파일로 저장한다(<표 4-8>).

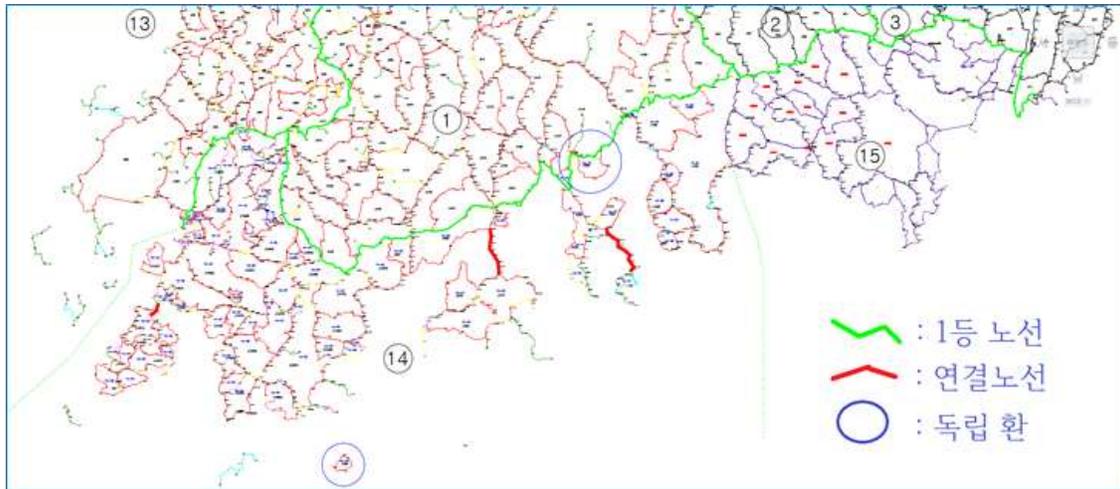
- 예비조정에서는 관측값의 중량(weight)은 1등 또는 2등 수준측량 구별없이 1 / 구간거리(km)로 부여하였다.

- 망조정 자료의 1차적인 전역검정은 입력자료의 2등환 수와 망조정 결과의 자유도(f)가 일치하는지 검사하였다. 통계적인 전역검정(global test)은 식 (4.35)에 제시된 $\chi^2_{(\alpha, f)}$ 검정에 근거하며, 유의수준 α 는 5%를 적용하였다. 즉, 식 (4.35)로 부터 $f \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 > \chi^2_{(\alpha, f)}$ 이면 수준망에 해소되지 않은 과대오차가 포함되어 있다고 판단하여 수준측량계산부와 환폐합차점검부를 근거로 망조정 입력자료의 시·종점 명칭, 높이차, 중량(또는 구간거리)에 오류가 있는지 검토하였다. 이때 2019년 연구사업의 사후기준 표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 $\pm 0.0033\text{m}$ 를 본 연구의 사전기준표준편차(σ_0)로 이용하였다. 1등 환의 첫 2등환부터 망조정 전역검정이 통과되면 조정된 2등 환에 이에 접한 2등환 1개씩

차례로 추가하여 조정(전역검정)을 반복하여 모든 2등 환을 전역검정하였다.



[그림 4-21] 정규정표고기반 수직기준망조정 및 조정성과 도출 전략



[그림 4-22] 본 노선연결 수직기준망과 독립 수직기준망

<표 4-8> MatLab소프트웨어 수직기준망조정 결과 파일

16환_정규정표고_2021년_입력자료(MatLab)16.dat			← 입력자료파일 명칭			
Number of Total Lines of Data File : 350			← 입력자료 총 행수			
수준측량노선 수 : 347			← 입력자료관측값개수			
높이 고정점수 : 1						
높이 고정점: 제주도원점11.1320						
미지 표고점 수 : 301						
중량(weight) : [1등 수준측량: 2등 수준측량= 1 : 0.5]						
수준망조정자유도(Degree of Freedom): 46						
사후단위중량표준오차(PosteriStandard Error of Unit Weight)(m) : 0.0023						
기준점	조정 표고((m)	조정표고표준오차(m)				
16-00-01-01	39.3458	0.0038	← 조정성과(최확표고와 표준오차)			
16-00-01-02	55.3424	0.0057				
.....						
U1166	8.5490	0.0120				
.....						
U모슬포01	9.6759	0.0121	← 조정성과와공분산 행렬			
수준점 조정표고의평균표준오차(Mean SE of Unknown Parameters)(m): 0.0104						
노선명	노선거리	관측높이차	조정높이차	높이차	조정잔차(m)	잔차
		(m)	(m)	표준오차(m)		표준오차(m)
LI160001	2.3760	35.7261	35.7247	0.0037	-0.0014	0.0034
LI160001	0.6210	7.5101	7.5109	0.0024	0.0008	0.0010
.....						
조정노선높이차의 평균표준오차(m) : 0.0045						
조정잔차의평균표준오차(m): 0.0021						

(2) 망조정 사후기준표준오차($\hat{\sigma}_0$)에 근거한 입력자료 오류검출 및 수정

1등 14환 수준망 조정에서 사후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)에 근거하여 과대오차 의심구간 검출 및 수정과정은 다음과 같다.

1등 14환은 1등 1노선을 경계로 13환 남측, 1등 3노선을 경계로 1환 남측, 교BM03에서 남쪽으로 분기되는 15환 1노선을 경계로 15환 서측에 위치한다. 14환을 구성하는 2등 환들은 이들 인접한 1등 환을 구성하는 노선과 연결되어 있으나, 1등 14환만을 보면 14-01환 ~ 14-68환, 14-69환 ~ 14-76환, 14-78환 ~ 14-85환의 3그룹의 독립환으로 구성된다. 따라서, 우선 이들 독립된 그룹별로 환을 망조정하여 환폐합차점검부의 이상 유무를 확인하고, 나아가 전국 단일 수준망조정을 위한 1등 14환 입력자료를 정비하였다. 이때 이들 그룹별 수직기준망조정 사전 기준 표준편차(a priori reference standard deviation, σ_0)은 2019년 연구성과를 참조하면 $\pm 0.0033m$ 이다. 현 단계는 2등 수준환 예비조정 단계이므로 1등 수준환에 속한 첫 번째 2등환 관측자료를 망조정

하여, 자유도가 환의 개수와 맞는지 조사하고, 사후 기준 표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 계산하고, $f \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 > \chi_{(\alpha=5\%, f)}^2$ 이면 환폐합차점검부 또는 수준망조정 입력자료에 오류가 있을 것으로 가정하고, 이들 오류를 찾아 수정하였다. 이후 첫번째 2등환에 접한 2번째 2등환 관측자료를 추가하여 망조정한 결과 자유도가 1 증가하고, $f \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 > \chi_{(\alpha=5\%, f)}^2$ 이면, 관측자료의 오류를 찾아 보정하는 과정을 1등환에 속한 모든 2등환을 다 추가할 때까지 반복하였다.

다음 <표 4-9>는 1등 14환 3개 그룹 독립환의 수준망조정 과정에서 검출한 과대오차 의심구간이며, [그림 4.19]는 이와 관계된 수준망도이다. 독립환 그룹 3에서 14-78환 ~ 14-82환까지 통합한 수직기준망 조정의 사후 기준 표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 0.0051m 이었으나 14-83환이 추가되면서 사후 기준 표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 0.1030m 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이로부터 14-82환 환폐합차점검부를 조사한 바 2021년 수준측량(14-05-11-03 → U남해35)과 2011년 수준측량(14-05-11-04 → U남해35)에서 U남해35의 고시표고가 2011년 수준측량 때에 비해 2.1289m 높아져, 2011년 수준측량구간의 높이차를 수정하였으나, 14-83환의 2011년 수준측량(14-05-11-04 → U남해35)에서는 이를 미처 수정하지 못했음을 발견하고 이를 수정한 결과, 14-83환이 포함된 사후 기준 표준편차가($\hat{\sigma}_0$)는 0.0051m로 작아졌다. [그림 4-23]은 관련된 수직기준망도이고, [그림 4-24]는 관련 ‘환폐합차점검부’이다,

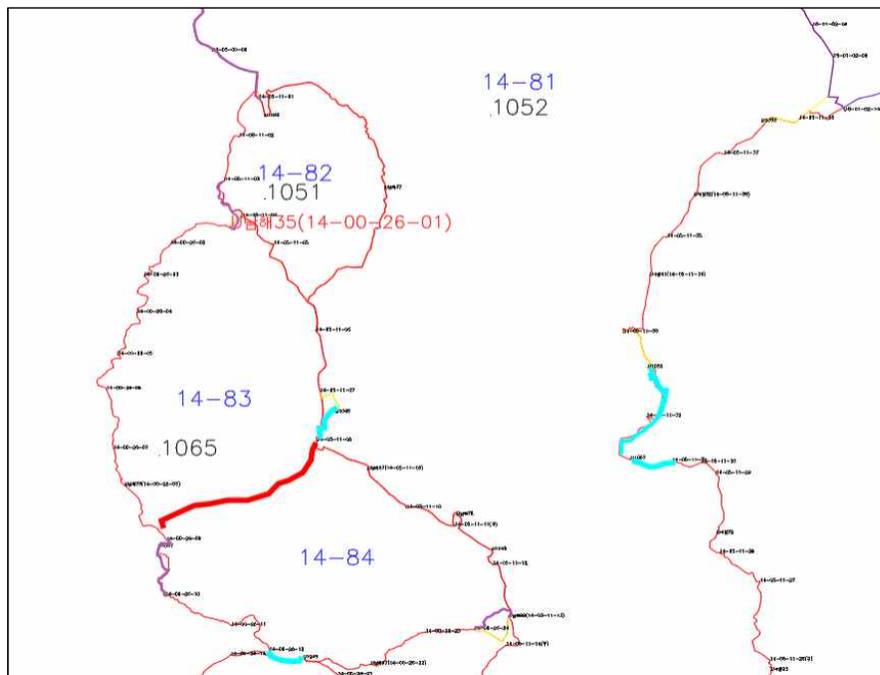
한편, 어느 2등환의 관측자료를 추가하여 망조정한 결과 자유도가 1 증가하고, $f \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 > \chi_{(\alpha=5\%, f)}^2$ 인데도, 관측자료의 오류를 발견하지 못한 경우 이 환에 속한 수준측량 구간(노선) 중 일부 구간(노선)을 제외하고 수준망 조정한 결과, $f \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 < \chi_{(\alpha=5\%, f)}^2$ 이면, 제외된 구간(노선)은 과대오차 포함구간(노선)으로 판단하여 수준망조정 입력자료에서 삭제하였다. 즉, 1등 12A-54환은 1등 환별 망조정시 큰 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 보였음에도 망조정 입력데이터의 오류(시중점 명칭, 높이차, 중량)를 발견할 수 없었으나 인접한 12A-52환과 공통구간(U평택49 → 12-00-34-12)의 관측자료를 수준망조정 자료에서 제외한 후 조정하니 자유도와 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)가 정상으로 되어 이 구간 자료를 망조정 입력데이터에서 소거하여 2개 환을 하나로 통합하였다. 또한 4-26환도 1등 환별 조정시 사후 기준 표준편차가 크게 나왔으나 인접한 4-25환과 공통노선(04-00-23-04 → U병곡26 → U0525)을 수준망조정자료에서 제외하여 통합하니 사후 기준 표준편차가 정상으로 되어 이들 2개 환을 통합하였다. [그림 4-25]는 1등 환별 수직기준망조정에서 제외된 2등 환노선(구간)이다.

이와 같은 과정으로 수직기준망조정 입력데이터의 착오를 검출하여 환폐합차점검부를 수정하여 1등 1환부터 20환까지 환별로 망조정된 결과는 <표 4-10>과 같다. 단, 1등 16환(제주도)과 남해안 청산도에 소재한 수준환은 육지 수직기준망(수준원점 기준)에 연결하지 않고 그 섬의 조위기준점을 기준으로 별도로 조정하였다.

<표 4-9> 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)에 근거한 수준망조정 입력 데이터 착오 검출 및 수정

1등 14환 그룹	망조정 포함 2등환	사후 기준 표준편차 ($\hat{\sigma}_0$)	비고
1	14-01~38환	0.0034 m	
	14-01~38c47환*	0.0031 m	14-39~47환은 진도의 2등환으로 단일노선으로 연결
	14-01~38c47~65환	0.0028 m	
	14-01~38c47~65c68환	0.0028 m	14-66~68환은 고흥반도의 2등환으로 단일노선으로 연결
2	14-69~75환	0.0017 m	
	14-69~75c76환	0.0015 m	14-76환은 여수시 불무섬 2등환으로 단일노선으로 연결
3	14-78~82환	0.0051 m	
	14-78~83환	0.1030 m	2011년 수준측량 (14-05-11-04 → U남해35) 높이차 수정 전
	14-78~83환	0.0051 m	2011년 수준측량(14-05-11-04 → U남해35) 높이차 수정 후

* c는 육지 환에 인접되지 않은 해안의 환을 노선으로 연결하였음을 표시

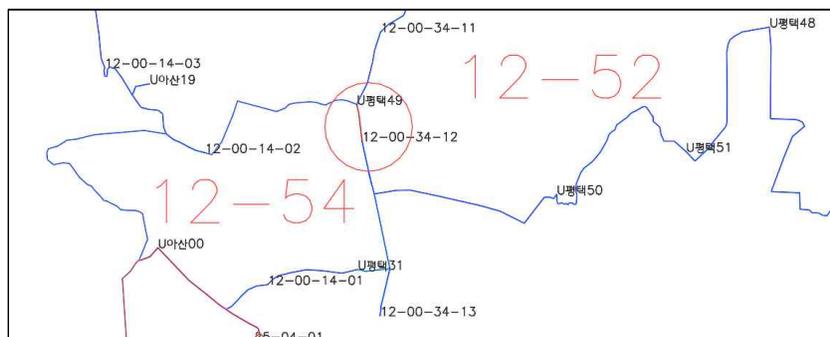
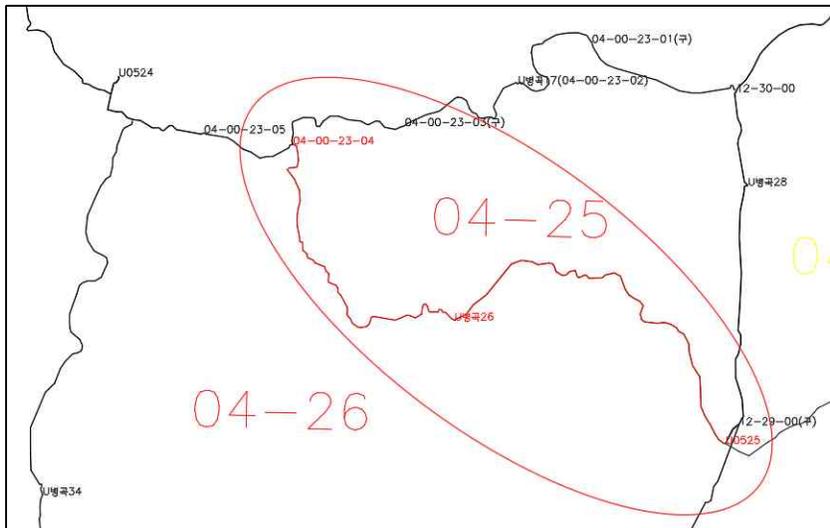


[그림 4-23] 수준망 조정 사후기준표준편차에 근거한 과대오차 검출

점 검 계 산 부																
□ 2021년 수직기준망 조정																
환번호 14- 82																
대한공간정보부 (단위:m)																
점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관 측 결 과			교차 한계	관측표고	분 배 오차량	타경정량	최종성과	성 과 비 교		경 위 도	사업명	
				왕	복	평균						기존성과	차이			
321	14-05-11-01	재설						38.5962			38.5967			127-52-22.5	34-56-25.2	
322	14-05-11-02	재설	1758.17	4497.26	-30.1580	30.1593	-30.158645	0.0013		8.4276	8.4277	8.441		127-51-56.6	34-55-44.2	06수준_13남해
323	14-05-11-03	재설	1834.59	6331.85	12.3223	-12.3192	12.320715	0.0031		20.7483	20.7484	20.7617		127-51-37.6	34-54-56.7	06수준_13남해
324	계		3.593		-17.83571	17.84015	-17.83793	0.00444	0.00348							
325	14-05-11-03	완전														
326	14-05-11-03	완전	3378	3378	-14.8613	14.8604	-14.860830	-0.0009	0.0046		5.9009	5.8769	-0.0243	127-51-37.6	34-54-56.7	완안영(노선07)
328	14-05-11-04	완전								33.0530	33.0530	0.0000		127-51-59.9	34-54-17.4	
330	14-05-11-04	신설	2113.645	2113.645	-27.1762	27.1764	-27.176258	0.0002	0.0073	3.7470	3.7470	-0.000148	0.0000	127-51-43.9	34-54-05.2	11수준측량_전남_(14-00-26노선)
331	14-05-11-04	완전			17.4871											
332	14-05-11-04	완전								33.0400				127-51-59.9	34-54-17.4	
333	14-05-11-05	재설	2618.42	10973.83	-9.6893	9.6897	-9.689485	0.0005		23.3505	23.3505	0.0431		127-52-55.6	34-53-13.5	06수준_13남해
343	환 합 계		26.603		-0.00435	-0.0043	0.00000	-0.00870	0.02579							
344																
345																

점 검 계 산 부																
□ 2021년 수직기준망 조정																
환번호 14- 83																
대한공간정보부 (단위:m)																
점 번호	점의 상태	거리 (m)	누적거리 (m)	관 측 결 과			교차 한계	관측표고	분 배 오차량	타경정량	최종성과	성 과 비 교		경 위 도	사업명	
				왕	복	평균						기존성과	차이			
357	14-05-11-04	완전								33.0530	33.0530	0.0000		127-51-59.9	34-54-17.4	
360	14-05-11-04	신설	2113.645	2113.645	-29.3059	29.3061	-29.306030	0.0002	0.0073	5.8767	5.8767	-0.000148	0.0000	127-51-43.9	34-54-05.2	11수준측량_전남_(14-00-26노선)
361	14-05-11-04	신설	2113.645	2113.645	-29.3059	29.3061	-29.306030	0.0002	0.0073	5.8767	5.8767	-0.000148	0.0000	127-51-43.9	34-54-05.2	11수준측량_전남_(14-00-26노선)
362	14-05-11-04	완전								33.0400				127-51-59.9	34-54-17.4	
363	14-05-11-05	재설	2618.42	10973.83	-9.6893	9.6897	-9.689485	0.0005		23.3505	23.3505	0.0431		127-52-55.6	34-53-13.5	06수준_13남해
364	14-05-11-06	재설	2284.89	13258.72	-10.4781	10.4785	-10.478300	0.0004		12.8722	12.8722	0.0263		127-53-33.6	34-52-13.0	06수준_13남해
366	계		4.903		-20.16736	20.16821	-20.16779	0.00085	0.01107							
367	14-05-11-06	재설								12.8722				127-53-33.6	34-52-13.0	
368	14-05-11-07	재설	2233.28	15492	19.2759	-19.2761	19.276035	-0.0002		32.1482	32.1482	0.0356		127-53-38.1	34-51-07.5	06수준_13남해
370	14-05-11-07	완전								32.1620	32.1620	0.0000		127-53-38.1	34-51-07.5	
371	14-05-11-07	신설	1157	1157	-3.5530	3.5549	-3.553970	0.0019	0.0054	28.6080	28.6080			127-53-57.5179	34-50-44.68379	09통합_부산
372	14-05-11-08	완전								28.6080				127-53-57.5179	34-50-44.68379	
373	14-05-11-08	완전								28.6080				127-53-57.5179	34-50-44.68379	
374	14-05-11-08	완전	1343	1343	1.1049	-1.1041	1.104480	0.0008	0.0029	29.7125	29.7125	-0.02668		127-53-33.3	34-50-14.2	09통합사천_48노선
375	14-05-11-08	완전								29.6858	29.6858	-0.0267		127-53-33.3	34-50-14.2	09통합사천_48노선
376																

[그림 4-24] 전역검정에 의한 입력데이터 착오 검출 및 수정



[그림 4-25] 1등 환별 수직기준망조정에서 인접 2등 환 통합

<표 4-10> 정규정표고 1등 환별 수직기준망 예비조정 결과

구분	1등 환 번호	구간 수	기준점 수	2등 환 수	1등 환별 조정*					1등 환 누적 조정**		
					통합 환**	자유도 f	$\hat{\sigma}_0(m)$	$\frac{f\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}$	χ_f^2	자유도 f	$\hat{\sigma}_0(m)$	χ_f^2
육지 환	11	510	451	60	0	60	0.0017	16	79	60	0.0017	
	12A	824	710	116	1	115	0.0023	56	141	175	0.0022	
	8	693	619	75	0	75	0.0022	33	96	250	0.0022	
	6	703	630	74	0	74	0.0025	42	95	324	0.0023	
	10	647	588	60	0	60	0.0018	18	79	384	0.0022	
	12B	11	10	2	0	2	0.0021	1	6	386	0.0022	
	5	1400	1226	175	0	175	0.0020	63	203	561	0.0022	
	2	1412	1278	135	0	135	0.0025	77	163	696	0.0023	
	7	1221	1124	98	0	98	0.0017	26	122	794	0.0022	
	9	778	715	64	0	64	0.0018	19	84	858	0.0022	
	20AB	829	765	66	0	66	0.0016	16	86	924	0.0022	
	1	1241	1103	139	0	139	0.0031	123	167	1,063	0.0023	
	4	898	804	96	1	95	0.0025	55	119	1,158	0.0023	
	3	741	673	69	0	69	0.0022	31	89	1,227	0.0023	
	13AB	623	552	73	0	73	0.0026	45	94	1,030	0.0024	
	14ABCD	790	709	85	0	85	0.0034	90	107	1,385	0.0024	
	15ABC	666	613	56	0	56	0.0033	56	74	1,441	0.0024	1582
	소계	13,987	12,570	1,443	2	1,441						
	순소계***	12,753	11,312									
	섬 지역 독립 환	14환 청산도	14	15	1	0	1	0.0004	0	4		
16환 제주도		359	311	47	0	47	0.0017	12	64			
순 소계		373	326	48	0	48	*					
순 합계	13,126	11,638	1,491	2	1,489	*						

* 망조정 중량 = 1 / 거리(km), 1등과 2등 수준측량 공통적용

** 1등 환별 망조정에서 2등 환에 포함된 과대오차 의심구간을 소거하여 인접 2등 환 2개를 1개로 통합

*** 1등 환 조정자료에 인접 1등 환 8 조정자료를 덧붙이면 두 환의 공통노선 자료가 2번 포함되므로, 공통노선이 한번만 포함되도록 중복을 제외한 자

3) 수직기준망 본 조정

(1) 수직 기준망 조정의 중량(weight)과 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)

최소제곱조정에서 최확값은 중량이 있는 관측값에 대한 최확값을 결정하며, 이때에 중량은 식(4.18)과 같이 관측값의 분산행렬의 역행렬에 사전기준분산(σ_0^2)를 곱한 값으로 단위가 없는 비율이다. 따라서 수준망조정 중량결정에서 중요한 두 요소는 사전기준분산(σ_0^2)과 관측값의 분산이다. 수준측량에서 각 구간의 높이차가 독립관측되었다면 관측값의 분산행렬은 대각선 행렬이 되고, 분산은 표준편차의 제곱이므로 대각선의 요소는 각 구간 측량 높이차의 표준편차 제곱이다. 일반적으로 수준측량의 표준편차를 '수준측량작업규정'의 교차(왕복차) 허용값으로 간주한다. 따라서 중량행렬 식(4.18)에서 사전기준표준편차(σ_0)를 적당한 값(1등 수준측량의 경우 2.5mm 제곱)으로 주면 각 구간의 중량은 1 / 구간거리(km)가 된다. 중요한 점은 사전기준표준편차(σ_0)를 어떤 값을 취하더라도 관측값간 중량의 비율은 변하지 않기 때문에 망조정의 결과로 계산되는 최확값은 동일하다. 한편 망조정 결과로 식(4.24)에 의해 계산되는 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 중량(W)에 따라 달라진다. 즉, 중량계산시 취한 사전기준표준편차(σ_0)에 따라 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 크기가 달라진다.

국토지리정보원 수준망 조정 연구는 1987년 '정밀수준망의 조정에 관한 연구'부터 시작되었는데 2011년 '정표고기반 통합측지망에 관한 연구'까지는 1등 수준망을 먼저 조정 후 그 내부의 2등 수준망을 1등 환별로 조정하는 순차 조정방식을 택하였다. 이때 관측값의 중량은 1 / 구간거리(km)로 부여하였고, 우리나라 '수준측량작업규정'에서 1등 수준측량의 허용교차(왕복차)가 2등 수준측량 교차(왕복차)의 1/2배임을 감안하여 2등 수준망조정에 포함된 1등 수준측량 관측값과 2등 수준측량 관측값의 중량비를 1:1/2로 부여하였고, 식 (4-24)에 의해 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 계산하였다.

한편 2019년 "통합기준점기반의 3차원 국가위치기준망 구축(3차)"에서는 기존의 수준망을 체계(1등 및 2등 수준망)에 얽매이지 않은 통합기준점-수준점 연결 단일 수직 기준망을 구성하고, 망조정에서 중량은 표준오차의 제곱에 반비례하므로 우리나라 '수준측량작업규정'의 1등 및 2등 수준측량 교차(왕복차) 허용값을 표준편차로 간주하여 1등 수준측량 관측값과 2등 수준측량 관측값의 중량을 부여하였고, 식 (4-24)에 의해 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 계산하였다.

종합하면 중량은 수직기준망을 1등과 2등망으로 구별하여 순차 조정하지 않고 통합망 동시 조정하는 경우 2019년 연구에서 적용한 바와 같이 '수준측량작업규정'의 교차(왕복차 허용값을 표준오차로 간주하여 1등 수준측량 관측값 대비 2등 수준측량 관측값의 비를 1 : (1/2)² 으로 부여함이 타당하여 본 연구에서도 이를 적용하였다. 단, 수

직기준망 조정의 조정표고는 관측값 중량(W)의 절대값이 다르더라도 관측값간 중량의 비율이 동일하면 변하지 않으나, 정밀도를 나타내는 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 관측값 중량의 절대 크기에 따라 달라진다. 우리나라 2019년 이전에 수준망 조정, 2019년 수직기준망 조정 및 본 연구의 수직기준망 조정의 정밀도를 동일기준으로 비교하기 위해서 2019년 연구사업 수직기준망조정에 이용된 수준측량 관측값의 값의 경우도 1 / 수준측량 구간거리(km), 2등 수준측량의 경우 1 / (4 × 구간거리(km))로 하였다.

(2) GeoLab 프로그램 입력데이터 작성

국토지리정보원 수직기준망 조정 LSAdj4LN.m 프로그램은 최소제곱법에서 입력데이터의 구간 높이차와 거리(km)를 읽어 높이차를 관측값으로 하고 1 / 거리(km)를 중량으로 한다. 반면에 상업용 GeoLab 프로그램은 입력데이터의 구간 높이차와 표준편차(σ)를 읽어 높이차를 관측값으로 하고 1 / 표준편차의 제곱을 중량으로 한다. 따라서 본 연구에서는 국토지리정보원 LSAdj4LevelN.m 프로그램으로 예비조정을 완료한 전국 통합 수직기준망 조정 입력데이터로부터 상업용 GeoLab 프로그램 입력데이터를 다시 작성하였다.

전국 통합망의 수준측량은 1등 수준측량을 적용한 구간도 있고, 2등 수준측량을 적용한 구간도 있다. 따라서 앞에서 기술한 바와 같이 GeoLab 망조정 프로그램 입력데이터에서 관측값의 중량은 1등 수준측량 구간의 경우 1/ 구간거리(km)로 하고, 2등 수준측량의 표준오차는 1 / 4 × 구간거리(km)로 환산하여 입력하였다. 이때 1등 수준측량과 2등 수준측량 구간의 판별은 국토지리정보원의 수준측량사업 과업지시서를 바탕으로 2등 수준측량은 2등 수준점과 2등 수준점 구간과 1등 수준점과 2등 수준점 구간에서만 실시되었기에 수준측량 구간 시점 및 종점의 명칭을 근거로 1등 및 2등 수준측량을 구분하였다.

이와같이 제작된 통합 수직기준망 조정 GeoLab 입력데이터의 구간, 기준점, 환의 구성은 <표 4-11>과 같다. 2019년 연구사업에 비해 본 연구사업에 이용된 수준측량 구간은 514개, 조정 기준점 수는 101개, 환은 385개, 증가하였음을 알 수 있다. [그림 4-26]을 보면 2019년 수직기준망 조정 수준측량 기준점 수와 수준측량 구간 수의 증가에 비해 2등 환의 수가 상대적으로 많이 증가되었음을 볼 수 있는데, 이는 2020~2021년 수준측량사업에서 통합기준점에 대한 연결측량이 주로 수행되어 이에 따라 소규모 2등 환이 추가되었기 때문이다.

<표 4-11> 수직기준망(육지) 시작단계 조정 데이터 구성

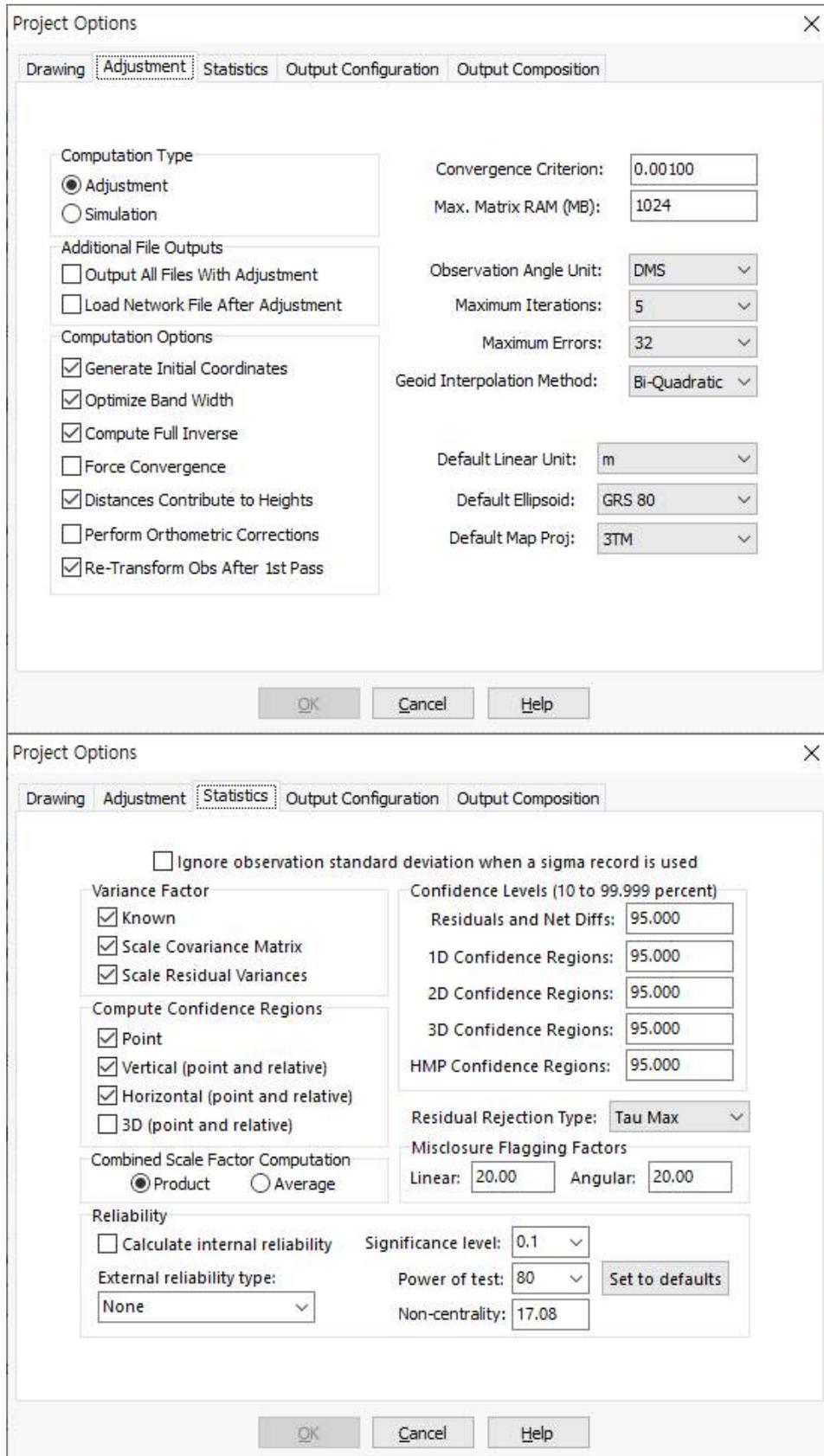
연구 사업		구간			기준점			2등 환
		환구성	개방/연결	합계	환구성	개방/연결	합계	망조정포함
2021년	육지	12,355	318	12,673	11,077	355	11,312	1,441
	섬	354	19	373	308	18	326	48
	합계	12,709	337	13,046	11,385	373	11,638	1,489
2019년	전체			12,610			11512	1,103
	망조정 대상			12,584			11483	1103
증감				+514			+101	+385



[그림 4-26] 2019년과 2021년 수직기준망조정 자료구성 변화

(3) GeoLab 프로그램에 의한 수직기준망 조정

GeoLab에 의해 레벨에 의한 직접수준측량 관측값을 조정할 때 관계가 깊은 프로젝트 옵션은 조정(Adjustment)과 통계(Statistics)이며, 본 연구에서는 조정(Adjustment)의 계산옵션(Computation Option)에서 거리가 높이에 기여하는 옵션을 선택하였다. 통계(Statistics)옵션에서 표준편차가 사용될 때는 관측 표준편차를 무시하도록 하고, 국소 검정은 τ 분포를 이용한 검정(유의수준: 0.1%, 검정력: 0.1%)를 선택하였다. [그림 4-27]은 본 연구에서 GeoLab에 의한 수직기준망조정을 위해 선정한 옵션이다.



[그림 4-27] GeoLab에 의한 수직기준망조정에 적용한 프로젝트 옵션

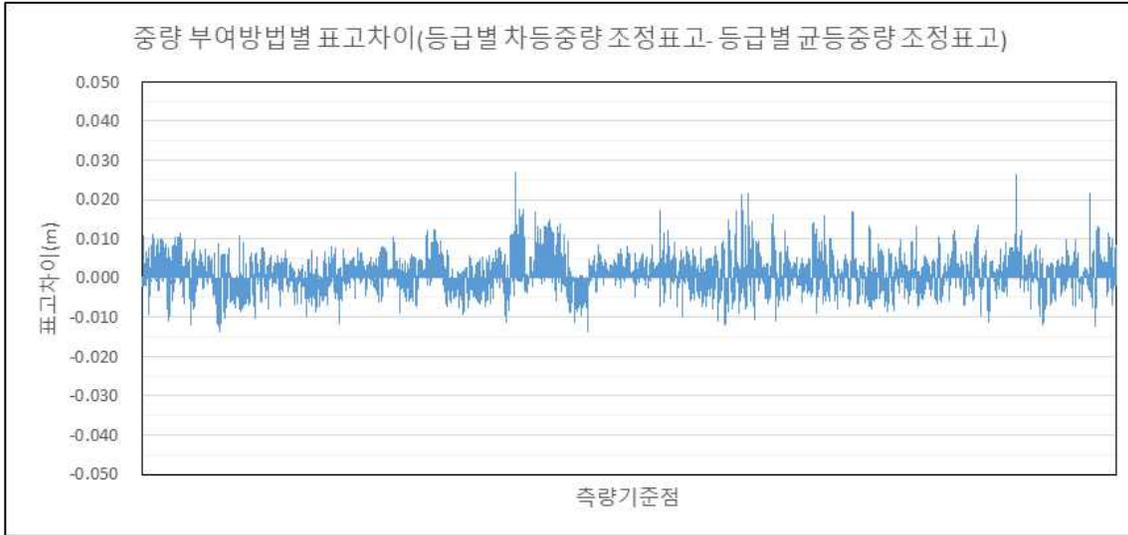
(4) 관측값의 중량과 조정 프로그램에 따른 조정결과 분석

관측값의 최소제곱조정에서 관측값이 달라지면 당연히 조정결과가 달라지며, 동일한 관측값이더라도 관측값의 중량이 달라지면 조정결과가 달라진다. 단, 관측값의 중량의 경우, 중량이 다른 중량의 절대값이 다르다는 의미가 아니라 관측값간 중량의 비율이 다르다는 의미이다. 본 연구에서 구축한 수직기준망 조정 입력데이터(구간 높이차)의 경우에도 관측값의 중량 절대값이 달라지더라도 그 비율이 같은 경우 조정표고는 변함이 없었으나, 동일 관측값(구간 높이차)에 대해 중량의 비율이 달라지면 조정 표고는 달라졌다. 즉, 1등 수준측량과 2등 수준측량 구간의 거리가 같은 경우 중량 비율을 1:1 부여하여 조정한 표고와 중량 비율을 '수준측량작업규정'의 1등 및 2등 수준측량 허용 교차에 따라 1:1/4로 부여하여 조정한 표고는 $-0.0137 \sim 0.0273\text{m}$ 의 차이를 보였고, 그 분포는 [그림 4-28]과 같다. 망조정에 포함된 기준점 총 11,596점 중 -0.01m 이상 차이를 보이는 기준점은 0.6%, $-0.01 \sim 0.01\text{m}$ 의 차이를 보이는 기준점은 95.7%, 0.01m 보다 큰 차이를 보이는 기준점은 3.8%로 대부분 $\pm 0.01\text{m}$ 이내의 차이가 있었다. 또한 [그림 4-29]에서 볼 수 있는 바와 같이 전반적으로 1등 및 2등 수준측량의 관측값에 중량을 차등 부여하는 경우 조정표고가 높아지는 기준점 수 비율이 63.6%로 낮아지는 기준점 수 비율 36.4%보다 많았다.

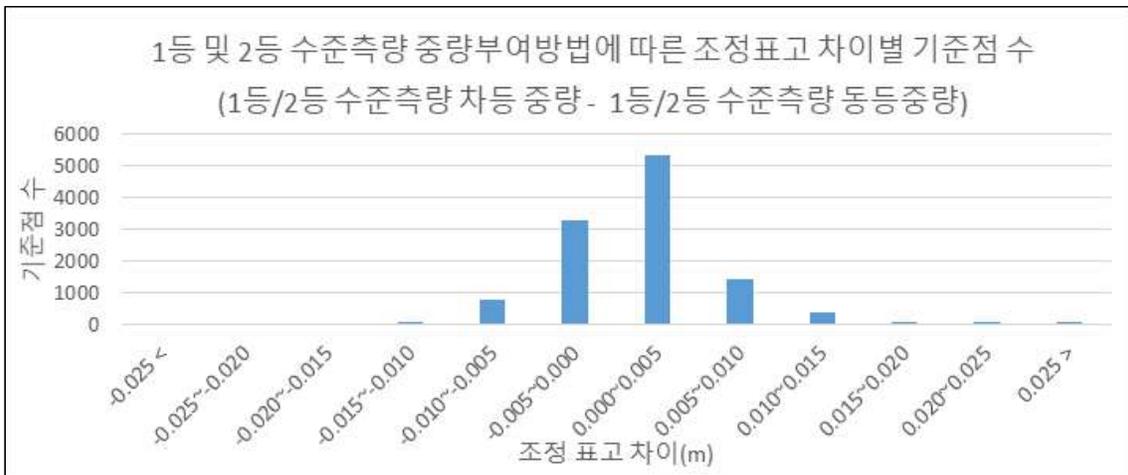
동일한 관측값과 동일한 중량의 입력데이터를 국토지리정보원 수직기준망조정 프로그램(LSAdj4LevelN.m)과 상업용 프로그램 GeoLab을 이용하여 조정한 조정표고 차이는 [그림 4-30]과 같이 $-0.0004 \sim 0.0002\text{m}$ 범위에 있었다. 이 표고 차이는 두 프로그램의 망조정 논리(통계모형과 함수모형)가 동일하다면 망조정 입력데이터의 유효숫자와 수치처리 과정 중 절단오차가 누적된 결과로 추측된다. '수준측량작업규정'에서 수준점의 최종성과는 1등 수준점의 경우 0.1mm 까지, 2등 수준점의 경우 1mm 까지 계산하도록 규정되어 있는데, 두 조정 프로그램 조정표고가 $\pm 0.1\text{mm}$ 이하의 차이를 보이는 기준점 수 비율이 86.1%이므로 국토지리정보원 수직기준망 조정에 자체 개발한 수직기준망조정 프로그램(LSAdj4LevelN.m)을 이용하더라도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

(5) GeoLab 프로그램에 의한 국소검정(local test)

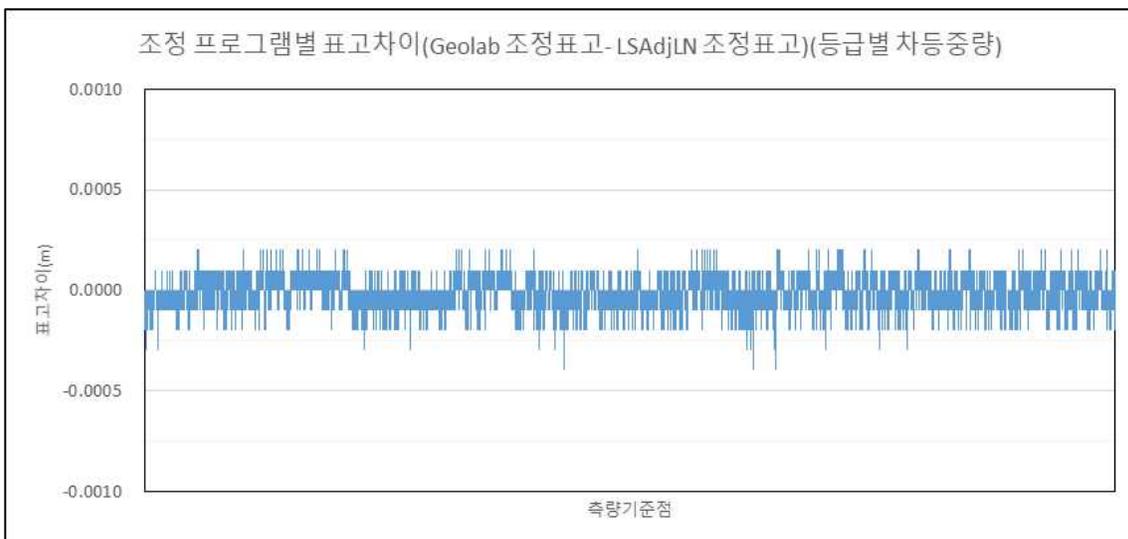
GeoLab 프로그램은 관측자료 조정에서 도출된 관측값의 표준화잔차에 대해 τ -분포에 기반한 방법 과대오차 검정을 채택하고 있다. 식(4.39)에서 유의수준 $\alpha = 0.1\%$, 검정력 $1 - \beta = 20\%$ 일 때 기각역 임계값은 4.1이나, 본 연구에서는 Armer(1979)와 Harvey(1994)가 제안한 3.29를 적용하여 조정결과의 신뢰도를 높였다.



[그림 4-28] 관측값의 중량부여 방법에 따른 망조정 표고 차이



[그림 4-29] 관측값의 중량부여 방법에 따른 망조정 표고 차이별 기준점 수

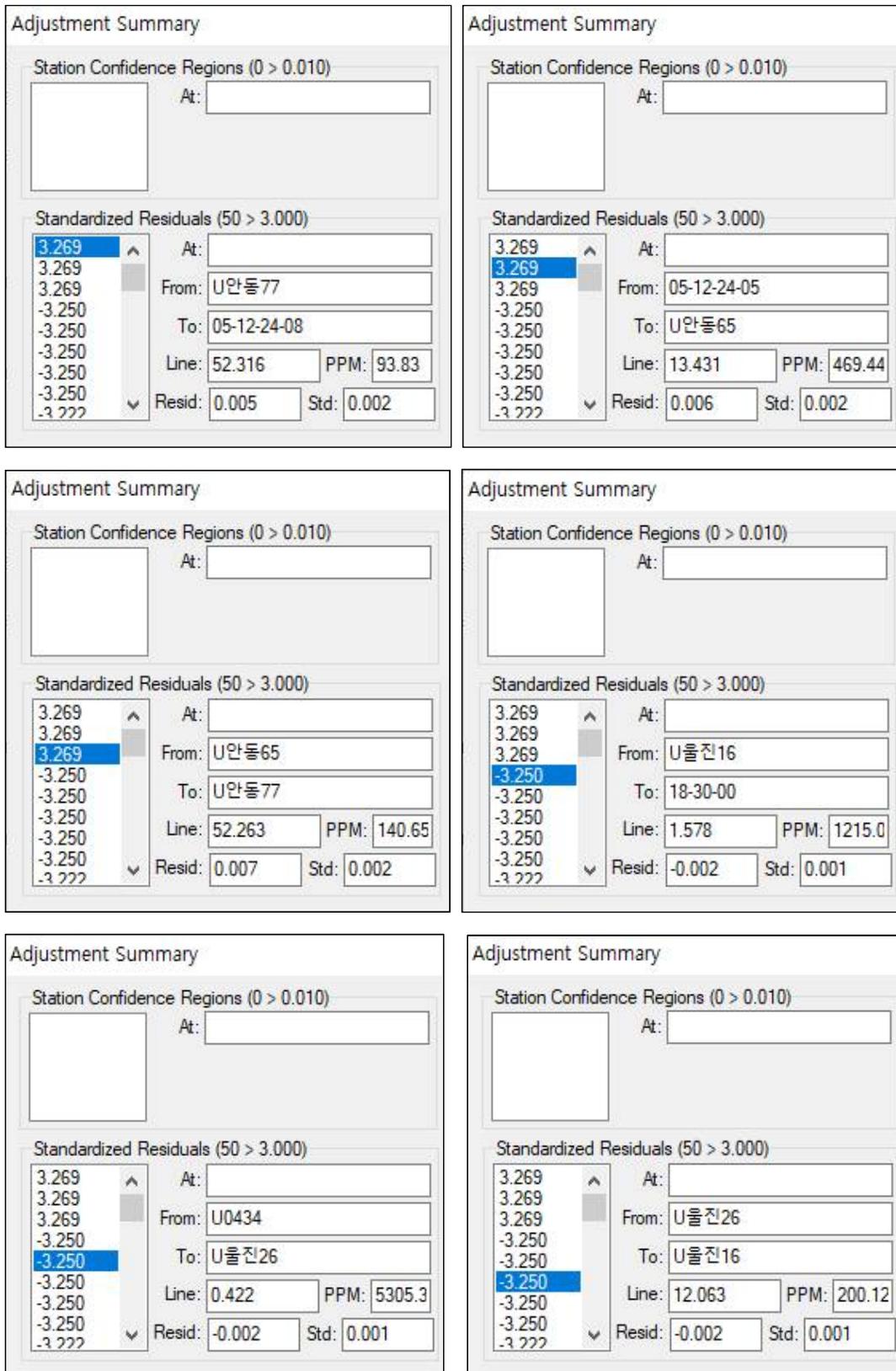


[그림 4-30] 조정 프로그램에 따른 조정 표고 차이

전국 통합 수직기준망 관측자료를 상업용 GeoLab 소프트웨어에 의해 망조정하면 [그림 4- 31]에서 보는 바와 같이 표준화잔차(standardized residual)가 큰 순서로 해당 구간을 추출하여 제시한다. 어느 구간의 과대오차라도 주변 관측값 조정에 영향을 미치므로, 원칙적으로 가장 큰 표준화잔차 구간의 오류(시·종점 명칭, 높이차, 중량)를 수정하거나, 수정할 수 없다면 그 구간의 자료를 조정 데이터에서 제외하고 다시 망조정하는 과정을 반복하였다. 본 통합 수직기준망 조정에서 조정 차수별로 검출된 과대오차 구간에 대해 관측값이 기준점 이설 전후 관측값이 포함되었으나 표고보정이 되지 않은 경우와 장기간 시차를 두고 수행된 인접 기준점 구간간 수준측량의 높이차가 큰 경우는 지각변동으로 간주하여 환폐합차점검부에서 그 높이차를 과거 수준측량 높이차에 가감하여 보정하고, 이에 따라 수직기준망 조정 입력데이터를 수정하고, 명확한 원인을 알 수 없는 경우에는 가장 큰 표준화잔차를 보이는 구간 중 1구간을 망조정 자료에서 제외하고 수직기준망을 재조정하는 과정을 반복하였다. 즉, 제1차 조정결과 자유도는 1,441(환폐합차점검부 상의 2등 환은 1,443개이었으나, 1등 환별 망조정에서 2개 환이 통합되어 잔여 환은 1,441개), 최대 표준화잔차 12.47, 과대오차로 검출된 구간은 33-02-00 → 33-03-00 → U0140 → U1039 이나 이중 수준측량이 가장 오래전에 수행(2006년 사업)된 구간(33-02-00 → 33-03-00)을 제2차 망조정 자료에서 제외하였다. 제2차 조정결과 최대 표준화잔차 -5.51, 과대오차로 검출된 구간은 14-01-00 → U대구20 → 14-01-01 → 14-02-00 → 14-03-00이나 이중 수준측량이 가장 오래전에 수행(2006년 사업)된 구간(14-01-01 → 14-02-00)을 제2차 망조정 자료에서 제외하였다.

수직기준망조정 국소검정 과정별 표준화 잔차와 과대오차 구간선정 내역인 <표 4-12>에서 보는 바와 같이 과대오차 구간으로 판명된 1개 구간을 차례로 망조정 자료에서 제외하면서 망조정한 결과 제24차 조정(23개 구간 망조정 자료 제외)에서 자유도는 1,418, 최대 표준화잔차는 3.27로 3.29보다 작았다. 과대오차 구간으로 검출된 4개 노선은 모두 수준측량이 2016년에 수행되었기에 수준측량 높이차가 가장 크고 구간거리가 가장 긴 1 구간(U안동65 → U안동77)을 제외하여 제25차 망조정을 실시하였다. [그림4-31]에서 보는 바와 같이 제25차 망조정 결과 자유도는 1,417, 표준화 잔차는 3.24으로 제24차 망조정 결과처럼 3.29 보다 작았다. 따라서, 본 연구에서는 제24차 망조정(망조정 제외구간 23개)의 조정표고를 최종 조정표고로 하였다.

제주도 1등 16환 수준망(306점)과 청산도 수순환(3점)에 대해서는 육지 수직기준망과 연결되어 있지 않으므로 해당 섬의 조위관측점(TBM)의 표고를 기준으로 독립 망조정하여 조정표고와 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 계산하였다.



[그림 4-31] 수직기준망 조정(GeoLab) - 제24차 과대오차검정 최대 표준화잔차 구간

<표 4-12> 국소검정(local test)에서 도출된 과대오차 구간 및 조치

제외 구간 수 (자유도)	망조정 결과				
	표준화 잔차	시점	종점	사업년도(지구)	차회 망조정에서 제외 구간
0 (1,441)	-7.08	13-05-00	U왜관07	20년 통합(언양)	
		U왜관07	13-05-01	"	
	-6.37	13-05-01	13-05-00	06년 수준(경주)	○
1 (1,440)	-6.28	U0730	14-03-00-	19년 연구(대구)	○
2 (1,439)	-5.18	20-00-33-04	U0003	19년 연구(간성)	
		U0003	20-00-33-03	"	
		20-00-33-03	20-00-33-02	"	
		20-00-33-02	20-00-33-01	12년 수준(20환)	○
		20-00-33-01	교BM03	"	
3 (1,438)	5.14	02-02-00-00	02-02-04-01	05년 수준(익산)	○
4 (1,437)	-4.52	01-00-35-12	01-00-35-13	09년 수준(목포)	○
5 (1,436)	4.52	교BM03	교BM03구	20년 이전	
		교BM03구	03-54-00구	10년 이전	○
		03-54-00구	03-53-00	"	
6 (1,435)	4.53	U0640	U김천23	20년 통합(안동)	
		U김천23	13-11-00	16년 통합(김천)	○
7 (1,434)	-4.17	U0963	U곤양56	20년 수준(사천)	○
8 (1,433)	-3.84	U화북76	04-02-05-17	03년 수준(청송)	
		04-02-05-17	04-02-05-18	"	
		04-02-05-18	U0661	19년 연구(청송)	
		U0661	04-02-05-19	"	
		04-02-05-19	U화북97	03년 수준(청송)	○
		U화북97	04-02-05-21	"	
9 (1,432)	-3.75	01-03-12-15	U전주86	21년 수준(남원)	
		U전주86	01-11-23-27	05년 수준(임실)	○
		01-11-23-27	01-11-23-26	05년 수준(임실)	
10 (1,431)	-3.63	U0525	U병곡29	19년 통합(병곡)	
		U병곡29	12-31-00	"	
		U0525	U병곡28	17년 통합(강원)	
		U병곡28	12-30-00	"	
	< 3.0	12-30-00	12-31-00	06년 수준(부산)	○
11 (1,430)	-3.61	15-00-19-15	15-00-19-16	17년 통합(울산)	
		15-00-19-16	U울산23	"	

		U울산23	15-00-19-17	"	
		15-00-19-17	15-00-19-18	10년 수준(신규)	○
		15-00-19-18	10-15-01	21년 수준(부산)	
12 (1,429)	-3.56	13-00-17-09	U자은70	21년 수준(영암)	
		U자은70	U자은02	18년 연구	○ (천사대교 구간)
		U자은02	U자은06	17년 통합(제주)	
13 (1,428)	-3.58	13-05-01	13-06-00	06년 수준(경주)	
		13-06-00	13-06-01	"	○ (환폐합차 초과)
14 (1,427)	3.52	22-22-00	U0292	21년 수준(고흥)	
	< 3.0	22-21-00	22-22-00	06년 수준(수원)	○
		22-22-00	06-00-12-14	07년 수준(안성)	
		22-22-00	06-00-17-01	07년 수준(안성)	
		U0292	U수원32	19년 연구(용인)	
15 (1,426)	3.48	U1036	U광양15	18년 연구	
	-3.46	03-35-00	U광양15	06년 수준(전주)	○
		03-35-00	U1036	09년 통합(광주)	
16 (1,425)	< 3.0	08-01-04-11	08-01-04-10	11년 수준(8환)	
	3.40	08-01-04-10	U0225	11년 통합(유지)	○
	< 3.0	U0225	U수원10	20년 통합(여주)	
17 (1,424)	-3.40	10-19-00	10-19-01	06년 수준(부산)	○
		10-19-00	10-18-01	"	
		10-18-01	U울산10	17년 통합(울산)	
	-3.38	10-19-01	U0836	21년 수준(부산)	
18(1,423)	3.33	U0190	U구정24	14년 통합(봉평)	○
19 (1,422)	-3.33	06-01-00	06-01-01	13년 이전	○
		06-01-01	U진주37	19년 연구(진주)	
20 (1,421)	3.32	U담양28	01-12-24-07	16년 통합(순창)	
		01-12-24-07	01-12-24-06	21년 수준(광주)	
		01-12-24-06	01-12-24-05	05년 수준(담양)	○
		01-12-24-05	01-12-24-04	21년 수준(광주)	
21 (1,420)	3.30	05-05-00-00	U보은08	15년 통합 보은	
		U보은08	05-04-06-15	"	
		05-04-06-15	05-04-06-14	03년 수준(관기)	○
		05-04-06-14	05-04-06-13	"	
22	3.28	05-12-24-05	U안동65	16년 통합(속리)	

(1,419)		U안동65	U안동77	"	○ (구간 높이차 크고 장거리)
		U안동77	05-12-24-08	"	
		05-12-24-08	05-12-24-07	"	
23 (1,418)	3.24	12-37-00	12-38-00	10년 통합(삼척)	
		12-38-00	U0434	"	●
		U0434	U울진26	17년 통합(강원)	
		U울진26	U울진16		
24 (1,417)	-3.24	08-01-04-04	U수원20	15년 통합(성동)	
		13-16-00	13-16-01	06년 수준(경주)	●
25 (1,416)	3.25	08-01-04-04	U수원20	15년 통합(성동)	●
	3.21	02-01-05-01	U금산73	18년 통합(전주)	
26 (1,415)	3.22	02-01-05-01	U금산73	18년 통합(전주)	
		U금산73	U금산74	"	●
		U금산74	U금산64	"	
27 (1,414)	-3.22	01-12-26-08	01-12-26-09구	05'수준(담양)	
	3.21	14-06-13-02	U화원10	16년 이전	
		U영덕22	04-07-16-15	17'통합(강원)	
	-3.21	U영덕12	04-07-16-14	19'통합(병곡)	

● 시험적 제외 구간

(6) 수직기준망 조정 결과

본 연구에서 기준점의 최종 표고를 구하기 위해 사용한 GeoLab 프로그램은 관측값을 조정하여 기준점의 최확표고와 그 표준편차를 제공하나 관례적으로 망조정의 정밀도 척도로 사용되어 온 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 제공하지 않는다. 이에 본 연구의 수직기준망 정밀도와 기존 연구 및 국외 수직기준망 정밀도와 비교하기 위해 국토지리정보원 수직기준망 조정 프로그램(LSadj4LevelN.m)을 이용하여 동일 수준측량 관측값(구간 높이차)에 대해 수직기준망 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 계산한 결과는 1등 및 2등 수준측량 등급에 따라 중량을 균등 부여한 경우 3.0mm이었고, 수준측량 등급에 따라 차등 부여한 경우 2.4mm인 것으로 보아 수준측량 등급에 따라 중량을 차등 부여한 경우의 정밀도가 약간 향상되었음을 알 수 있다. 단, 이것은 1등 및 2등 수준측량 허용교차(왕복차)규정에 따라 망조정에서 중량을 차등 부여함이 더 합리적이라는 증거라기보다는 2등 수준측량 구간의 중량이 1등에 비해 1/4만큼 작아졌기 때문에 이에 따라 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)가 줄어든 것이다.

또한 <표 4-13>에서 보는 바와 같이 2021년 수직기준망조정 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 2019년 연구 망조정에 비해 약간 향상되었음을 알 수 있다. 반면에 2011년 우리나라 수직기준망은 통합기준점이 수준망에 삽입되기 이전으로 당시 망조정 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 본 연구의 결과보다 우수하다. 즉, 우리나라 통합기준점의 표고를 고시하기 위한 수준측량사업이 1등 수준측량 규정에 따라 수행되었다 하더라도, 대부분 기존 1등 또는 2등 수준점들과 통합기준점의 연결측량 방식으로 수행되었기 때문에 이들 수준측량 관측값이 포함된 환의 환폐합차가 증가하였고, 이로 인하여 망조정 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 미소하나 오히려 증가하였다.

한편 우리나라의 2021년 정규정표고체계 수직기준망조정 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 일본의 2000년 정표고체계 1등수준망조정 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$) 1.5mm나 북미의 1991년에 정표고체계 수준망조정 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$) 1.2mm보다 약간 크다. 그 원인은 우리나라 수준측량자료의 구축기간이 길어 측량기준점 표지의 인위적 또는 자연적 변위에 따른 오차, 수준측량 관측자료에서 보정되지 않은 정오차(표척보정 등), 수준측량관측자료의 체계적인 관리 미흡, 망조정 자료에 포함된 오류 등이라 추정된다.

본 연구에서는 과대오차 검정과정을 24차에 걸쳐 수행하여 <표 4-14>에서 보는 바와 같이 육지부에서 수준원점을 기준으로 수준점과 통합기준점 11,312점의 조정표고를 계산하였고, 제주도와 남해안의 섬에 배치된 수준점과 통합기준점은 독립된 조위기준점을 기준으로 326점의 조정표고를 계산하여 총 11,638점의 조정표고를 계산하였다.

<표 4-15>는 국가기준점 조정표고와 기존 고시성과의 표본이며, 그 일부 목록을 <부록 7>에 첨부하고, 전체 목록 파일은 연구성과 외장하드에 담았다.

<표 4-13> 수직기준망(육지) 최종 조정 성과

국가	표고 체계	조정 년도	구간 수	기준점 수	환 수	중량	사후기준 표준편차(mm)		
한국	정규 정표고	2021년	12,753	11,312	1,419*	1등:1/거리(km)	3.0		
						2등:1/거리(km)			
		2019년	12,549	11,481	1,068*	1등:1/거리(km)	2.4		
						2등:1/(4×거리(km))			
						2011년	11**	1등:1/거리(km)	1.7
								312*	
2등:1/거리(km)	1.6								
2등:1/(4×거리(km))									
일본***	정표고	2000년		16,172	72	1/거리(km)	1.4		
북미****	정표고	1991년			71,389	1/거리(km)	1.2		

* 1등 + 2등 통합 수준망

** 1등 수준망

*** 1등 기준점 및 1등 수준 환(총 86개 환 중 14개 제외)

**** 캐나다, 미국 멕시코 연결 수준망

<표 4-14> 수직기준망 최종단계 조정 데이터 구성

연구사업/환		구간			기준점			2등 환		
		환구성	개방	합계	환구성	개방	합계	망 조정 포함	망 조정 제외	합계
2021년	육지	12,435	318	12,753	10,977	335	11,312	1,419	22	1,441
	섬	354	19	373	308	18	326	46	2	48
	소계	12,789	337	13,126	11,285	353	11,638	1,465	24	1,489
2019년		12,572			11,481			1,068	35	1,103
증감		+554			+157			+397	-11	+386

<표 4-15> 2021년 수직기준망조정 국가기준점 조정표고 및 고시성과 차이(예)

구분	기준점 명	사업지구	조정표고 (m)	고시성과 (m)	차이 (m)
수준점	01-01-00	21'영암(7노선)	4.5810	4.5905	-0.0095
	01-02-00	17'연구(서남해)	14.1235	14.1312	-0.0077
	01-05-00	16'통합(목포)	14.2757	14.2858	-0.0101
	01-07-00	16'통합(목포01)	16.9619	16.9720	-0.0101
	01-08-00	18'연구	23.4775	23.4879	-0.0104
	교BM01	21'나주()	7.1080	7.1171	-0.0091
	교BM03	20'기준점이전	25.3781	25.3851	-0.0070
	01-00-04-01	21'곤양(01노선)	4.1555	4.2600	0.0251
	01-00-04-03	06'수준(구례)	9.2596	9.2778	-0.0182
	01-00-04-06	06'수준(구례)	11.0376	11.0567	-0.0191
	01-00-04-10	06'수준(구례)	26.5636	26.5821	-0.0185
	01-00-04-11	06'수준(구례)	19.5034	19.5193	-0.0159
	부산기점	02'수준(경남)	16.5087	16.5712	-0.0625
	목포기점	16'통합(높)_목포	2.8138	2.8220	-0.0082
	16-00-01-01	12'기준점이전	39.3453	39.3470	-0.0017
	16-00-01-02	17'통합_제주	55.3409	55.3460	-0.0051
	16-00-01-03	07'수준점_제주2	8.9286	8.9320	-0.0034
	16-00-01-04	07'수준점_제주2	4.6953	4.6970	-0.0017

	통합 기준점	U0001	19'연구(2)(수원)	46.0084	46.0200
U0002		10'통합(속초)	423.6334	423.6430	-0.0096
U0003		19'연구(3)(간성)	5.2629	5.4242	0.0156
U0004		14'수준(1지구)	23.0278	23.0551	-0.0273
U0006		17'이전	33.2447	33.2605	-0.0158
U가야08		18'통합(무주)	155.2023	155.2028	-0.0005
U가야14		18'통합(무주13)	332.0018	332.0277	0.0268
U가야26		21'이전	193.7660	193.7842	-0.0182
U가야34		18'통합(무주13)	235.3837	235.4098	0.0268
U가야38		18'통합(무주)	154.1531	154.1564	-0.0033
U모슬포01		17'통합(제주)	9.6825	9.6883	-0.0021
U모슬포02		17'통합(제주)	11.7683	11.7667	0.0016
....	

2. 정규정표고기반 수직기준망조정에 따른 표고변위량 분석

가. 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과의 비교

1) 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과의 차이

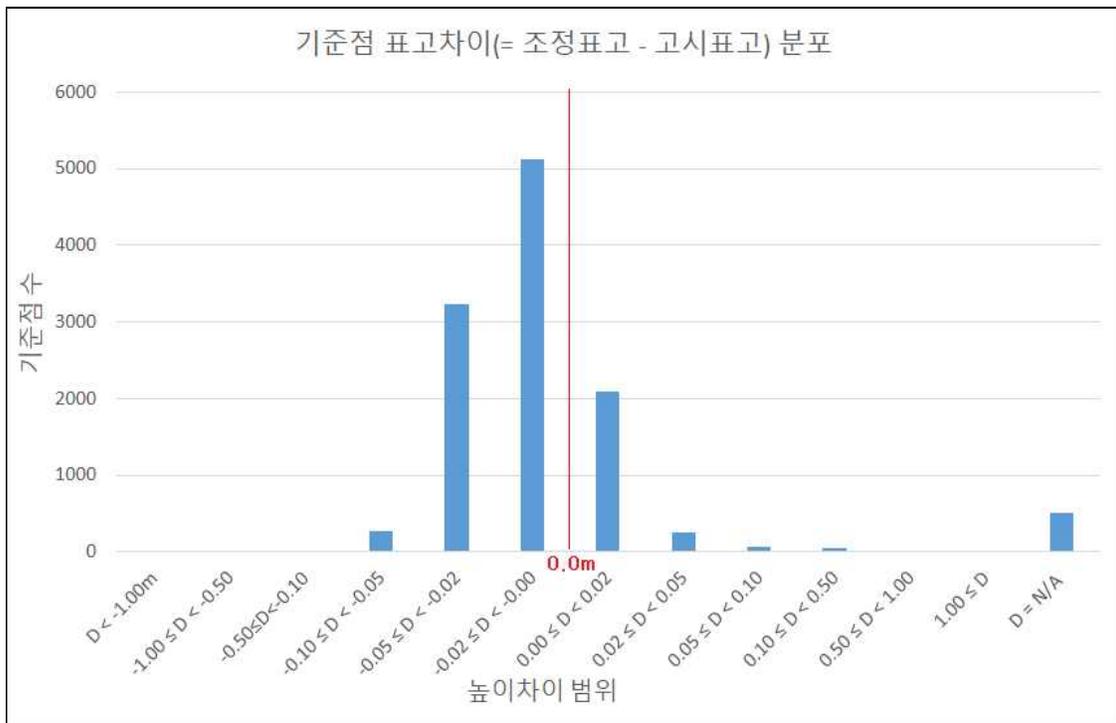
본 연구의 결과 계산된 조정표고와 기존 고시표고와 차이는 수준측량과 수직기준망조정자료 편집에 오류가 없었다면, 국가기준점 표석의 자연적인 수직이동, 즉, 지반 융기/침하와 관계가 깊고, 그 일부는 인위적인 표석 이설로 인한 것이다. 국가기준점의 수직기준망 조정(GeoLab 소프트웨어 이용) 표고와 고시표고의 차이를 계산하여 본 보고서 <부록 7>에 그 일부를 첨부하였다.

본 연구의 수직기준망 조정표고와 고시표고의 차이(조정표고 - 고시성과)를 살펴보면 수직기준망 조정표고가 고시성과보다 높아진 국가기준점은 2,462점(21.2%)이고, 낮아진 국가기준점은 8,663점(74.4%), 고시성과가 없어 차이를 계산하지 못한 국가기준점이 512점(4.4%)로 우리나라 국가기준점의 표석은 침하 경향이 있음을 알 수 있었다. 전국 17개 1등 환에서 수직기준망 조정표고가 고시성과보다 높아진 국가기준점은 19.2%이고, 낮아진 국가기준점은 76.3%, 고시성과가 없어 차이를 계산하지 못한 국가기준점이 4.5%로 우리나라 국가기준점의 표지가 침하 경향이 있음을 알 수 있었다. 조정표고와 고시표고의 차이(조정표고 - 고시성과)가 $\pm 1.0\text{m}$, $\pm 0.5\text{m}$, $\pm 0.1\text{m}$, $\pm 0.05\text{m}$, $\pm 0.02\text{m}$ 구간 범위에 속한 기준점 수를 조사한 결과는 <표 4-16>과 같으며 <그림 4-32>는 이를 도시한 그래프이다. 조정성과와 기존 고시성과 차이가 $-0.05\text{m} < D < 0.05\text{m}$ 범위에 있는 국가기준점은 전체(11,125점)의 96.3%인 10,708점, 반면 $|D| > 0.05\text{m}$ 범위에 있는 국가 기준점은 417점(3.7%)이었다. 표고차이가 $\pm 0.5\text{m}$ 이상인 국가기준점은 표석이 이설되었으나 그 성과가 재고시가 되지 않았거나 고시에 오류가 있었을 것으로 추정되며, 표고차이가 $\pm 0.5\text{m}$ 이하인 국가기준점은 표석의 자연적 변위(지각변동 또는 표석 설치지점의 융기나 침하), 수준측량 오차, 수직기준망 자료정리의 오류가 그 원인일 것으로 추정된다. 이들 국가기준점의 1등 환별 분포는 [그림 4-33]과 같다.

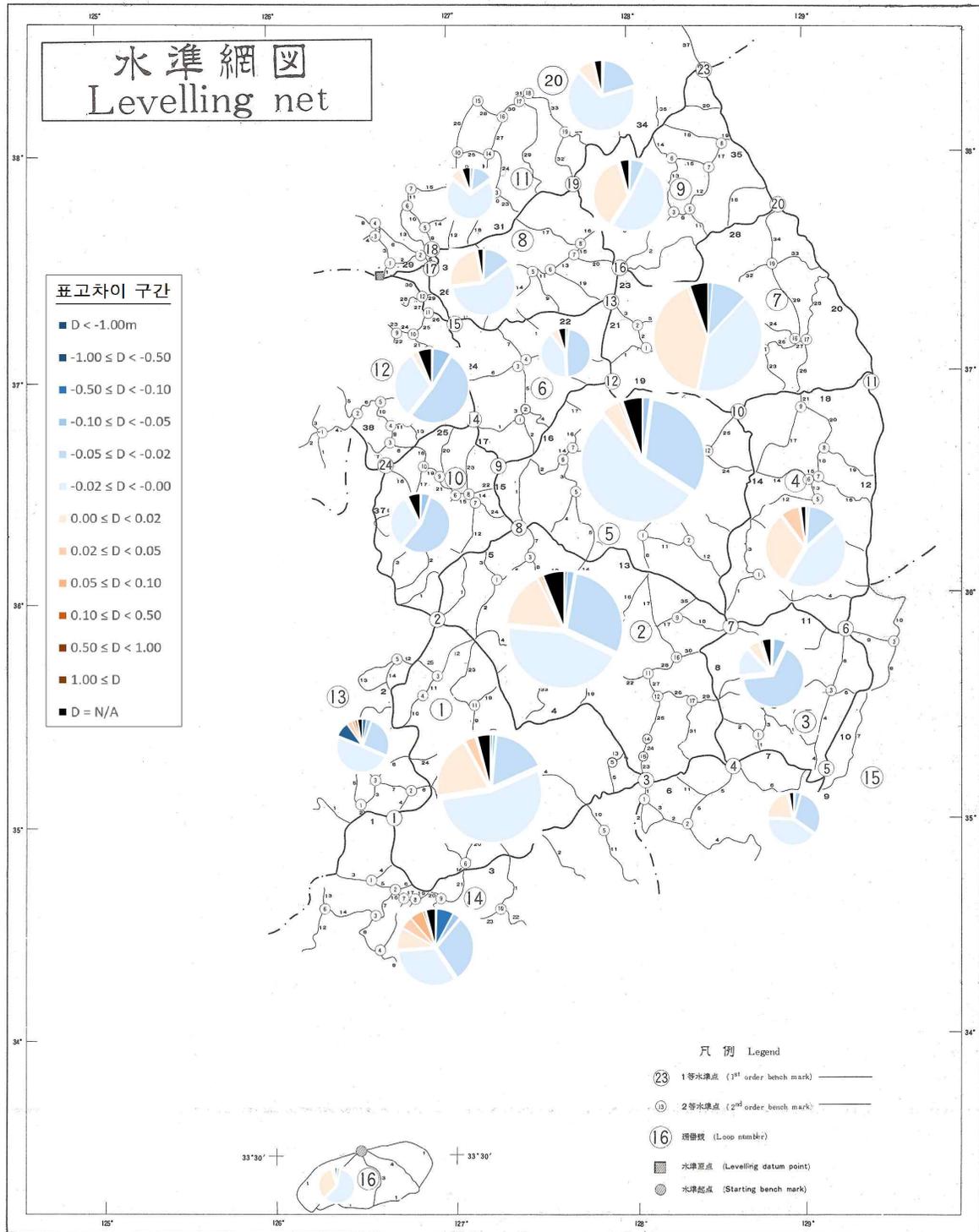
<표 4-16> 정규정표고 기반 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과 차이 분포

차이 구간 (m)	D < -1.0	-1.0 <D < -0.5	-0.5 <D < -0.1	-0.1 <D < -0.05	-0.05 <D < -0.02	-0.02 <D < 0.00	0.00 <D < 0.02	0.02 <D < 0.05	0.05 <D < 0.1	0.1 <D < 0.5	0.5 <D < 1.0	D > 1.0	N/A*	합계	
수량	8	5	19	263	3239	5129	2096	244	59	44	3	16	512	11,637	
비율 (%)	0.1	0.0	0.2	2.3	27.8	44.1	18.0	2.1	0.5	0.4	0.0	0.1	4.4	100	
수량				295		8,368		2,340					122	512	11,637
수량						8,663							2,462	512	11,637

* 성과 고시되지 않은 국가기준점



[그림 4-32] 정규정표고 기반 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과 차이 분포



[그림 4-33] 국가기준점 표고변위(조정표고 - 고시표고) 1등 환별 분포

2) 재고시 대상 국가기준점의 선별

국가기준점의 표고 고시값과 수직 기준망조정 표고와 차이가 얼마 이상일 때, 국가기준점의 표고를 재고시해야 한다는 규정이나 법칙은 없다. 단, 현재 지도제작이나 건설

공사에서 평면 및 표고측량에 사용되고 있는 주요 장비인 GNSS 경우, 캘리브레이션 기법을 적용하면 표고에서 $\pm 0.05\text{m}$ 정밀도를 얻을 수 있다고 알려져 있다. 따라서, 국가기준점의 고시표고와 수직기준망 조정 표고가 $\pm 0.05\text{m}$ 이상의 차이이면 이는 GNSS 수준측량으로도 감지되므로, 우선 재고시해야 할 필요가 있다. 앞 절 <표 4-16>에서 살펴본 바와 같이 국가기준점 수직기준망 조정표고와 기존 고시성과와 차이가 $\pm 0.05\text{m}$ 이상인 국가기준점 417점 중 용기된 국가기준점이 122점, 침하된 국가기준점이 295점이다. 이들 국가기준점을 상태별로 구분하면 <표 17>과 같다. 이중 국가기준점 상태가 사용가능과 사용보류인 경우는 아래와 같이 조치(안)을 제시하였고, 점 상태가 사용불가능과 폐기인 국가기준점은 재고시할 필요가 없다고 판단하였다.

- 성과고시일 이후(최근)에 실시한 수준측량 자료를 이용하여 망조정된 국가기준점은 재고시 대상으로 선별하였다. 재고시 사유는 수준측량사업 보고서나 총괄계산부에 이전되었다는 기록이 있는 국가기준점은 이설측량 년도를 기록하였고, 이설측량기록이 없는데도 $\pm 0.5\text{m}$ 이상 표고차이가 있는 국가기준점의 재고시 사유는 이설 추정 또는 지반 침하/용기로 하였다.

- 성과고시일 이전에 실시한 수준측량 자료를 이용하여 망조정된 국가기준점은 현재 고시표고는 망조정에 사용한 수준측량 관측데이터 보다 최근에 실시된 수준측량에 의해 표고가 조정되어 고시되었을 가능성이 있어, 재고시보류로 하였다.

<표 4-17> 조정표고와 고시표고 차이가 $\pm 0.05\text{m}$ 인 국가기준점 상태 분류

구분	사용가능	사용보류	사용 불가능	폐기	합계
갯수	362	24	7	24	417

이와 같은 기준에 맞춰 선별한 성과 재고시 대상 국가기준점 386점 중 일부는 <표 4-18>과 같으며, 전체 성과 재고시 대상 국가기준점과 재고시 보류 국가기준점 목록은 <부록 8>에 첨부하였다.

<표 4-18> 2021년 수직기준망 조정결과 재고시 대상 국가기준점(일부)

기준점 명	조정표고 (m)	사업지구	고시성과 (m)	차이 (m)	점상태	조치(사유)
01-02-06-07	66.5311	20'정읍(51)	66.6149	-0.0838	사용가능	재고시(표석변위)
01-12-24-06	64.2662	21'광주(32)	64.2107	0.0555	사용가능	재고시(표석변위)
02-01-05-12	157.7288	17'통합(전라)	157.7798	-0.0510	사용가능	재고시(표석변위)
02-08-16-11	156.3447	21'통합_김해	156.4142	-0.0695	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-11-14	9.0368	17'통합(밀양)	9.0889	-0.0521	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-13-01	12.656	21'수준(부산)	12.7064	-0.0504	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-19-04	14.8711	11'수준(경남)	14.9496	-0.0785	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-19-05	48.2422	11'수준(경남)	48.3182	-0.0760	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-21-01	62.2643	11'수준(경남)	62.3436	-0.0793	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-21-03	65.6005	11'수준(경남)	65.68	-0.0795	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-21-06	63.9364	11'수준(경남)	64.0137	-0.0773	사용가능	재고시(표석변위)
03-00-21-07	46.4887	11'수준(경남)	46.5634	-0.0747	사용가능	재고시(표석변위)
03-01-18-13	13.0795	17'통합(창원)	13.1313	-0.0518	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-01	112.2596	21'수준(부산)	112.3147	-0.0551	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-02	142.4009	17'통합(울산)	142.4575	-0.0566	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-08	62.9554	10'수준(정비)	63.013	-0.0576	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-09	48.145	10'수준(정비)	48.2012	-0.0562	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-10	40.0251	17'통합(울산)	40.0803	-0.0552	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-12	18.9953	10'수준(정비)	19.0521	-0.0568	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-04-13	11.1368	17'통합(울산)	11.1911	-0.0543	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-05-08	10.5048	03'수준(동곡)	10.5783	-0.0735	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-05-09	13.191	21'수준(부산)	13.2682	-0.0772	사용가능	재고시(표석변위)
03-03-06-01	108.5953	22'기준점이설	108.6498	-0.0545	사용가능	재고시(22년 이설, 연결점 표석변위)
03-03-06-03	169.1961	17'통합(울산)	169.2491	-0.0530	사용가능	재고시(표석변위)
04-00-23-04	75.6653	20'이전	75.7189	-0.0536	사용가능	재고시(표석변위)
.....					
02-06-13-01	245.0935	05'수준(무주)	245.1451	-0.0516	사용가능	재고시보류 (05년 수준측량, 07년 고시)
02-06-13-02	309.7761	05'수준(무주)	309.8298	-0.0537	사용가능	재고시보류 (05년 수준측량, 07년 고시)
03-43-00	43.2011	06'수준(진주)	10.5667	32.6344	사용가능	재고시 보류 (06년 수준측량, 22년 고시)
.....					

기준점 명	조정표고 (m)	사업지구	고시성과 (m)	차이 (m)	점상태	조치(사유)
01-08-16-11	6.1001	11'이전	7.5215	-1.4214	사용보류	재고시(21년 재설)
01-12-26-09	63.8895	21'수준(광주)	57.0625	6.8270	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 07년 고시)
03-02-08-04	144.3967	21'수준(부산)	143.3567	1.0400	사용보류	재고시(21년 이설)
04-12-02	151.3165	16'이전	152.5744	-1.2579	사용보류	재고시 (16년 이설, 연결점 표석변위)
05-11-22-07	80.8695	03'수준(보은)	80.4418	0.4277	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 07년 고시)
05-11-22-25	53.3844	21'수준(부산)	53.055	0.3294	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 07년 고시)
10-11-01	106.1811	21수준(부산)	97.1105	9.0706	사용보류	재고시 (21년 이설 추정)
12-19-00	3.8726	21'통합(화북)	4.572	-0.6994	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 07년 고시)
12-20-00	15.6	21'통합(화북)	12.109	3.4910	사용보류	재고시 (21년 이설 추정)
12-28-00	6.0595	21'통합(화북)	5.4062	0.6533	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 07년 고시)
14-04-24-10	27.1876	21'기준점이전	26.8459	0.3417	사용보류	재고시 (21년 이전, 09년 고시)
18-03-00	183.8542	21'영주(37)	183.7457	0.1085	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 07년 고시)
U0009	188.5772	20'이전	188.2185	0.3587	사용보류	재고시 (20년 이설, 연결점 표석변위)
U0160	218.2162	20'통합(홍천)	194.075	24.1412	사용보류	재고시 (20년 수준측량, 14년 고시)
U0230	65.5057	22'이전	64.6755	0.8302	사용보류	재고시(22년 이설, 연결점 표석변위)
U구미19	36.8508	21'수준(김해)	32.7633	4.0875	사용보류	재고시 (21년 수준측량, 15년 고시)
U연양25	64.6874	22'이전	67.2565	-2.5691	사용보류	재고시(22년 이설)
.....					
U교동71	10.7962	15'통합(문산)	10.8695	-0.0733	사용보류	재고시보류 (15년 수준측량, 고시일 불명)
U교동73	28.8701	15'통합(문산)	28.9435	-0.0734	사용보류	재고시보류 (15년 수준측량, 고시일 불명)
U여주02	59.1195	11'수준(8-3)	50.7098	8.4097	사용보류	재고시보류 (11년 수준측량, 22년 고시)
U연안90	12.5414	15'통합(문산)	12.6147	-0.0733	사용보류	재고시보류 (15년 수준측량, 고시일 불명)
.....					

제5장

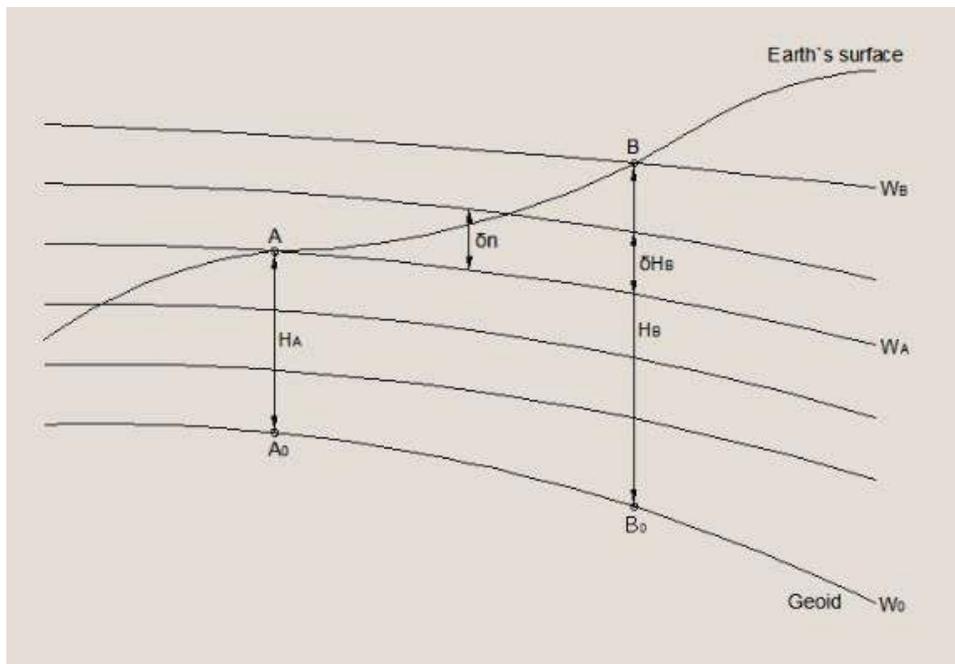
정표고 기반 국가기준점 수직 망조정

1. 표고와 정사보정
2. 정사보정량에 의한 정표고 기반 수직기준망조정 수행
3. 정규정표고와 정표고의 높이체계간 기준점 표고 변동량 분석

1. 표고와 정사보정

가. 표고의 정의

표고(標高)란, 지오이드에서부터 지구상 임의의 점 P에 이르는 연직거리를 뜻하는 것으로, 표고의 산출방법에 따라 역학고(dynamic height)와 정규고(normal height), 정표고(orthometric height)로 나뉘어 진다. 1955년 Florence에서 열린 IAG(International Association of Geodesy)총회에서 지오폠펜설(geopotential) 개념이 도입되기 전까지는 역학고를 표고로 사용하여 오다가, 지오폠펜설 개념이 도입된 이후에는 정규중력을 사용한 정규고가 표고로서 사용되어 왔다. 그러나 중력측정이 보편화되어 높이 기준점에서 중력측정이 가능해지면서 실측중력값으로 보정량을 계산한 정표고를 사용하게 되었다.



[그림 5-1] 표고와 지오폠펜설 수와의 관계 (Hofmann and Moritz, 2005)

[그림 5-1]에서 보는 것과 같이 지오이드면상의 A_0 점과 A_0 점의 수직선상에 있는 지표상의

A점 사이에 지오폠펠셀 수(geopotential number) C 는 다음 식에 따라 결정된다.

$$\int_{A_0}^A g \, dn = W_0 - W_A = C \quad (5.1)$$

따라서 이 지오폠펠셀값을 이용하여 역학고(H^d)와 정표고(H), 정규정표고(H^*)는 각각 식 (5.2), 식 (5.3) 및 식 (5.4)와 같이 정의할 수 있다(Moritz, 2000)

$$H^d = \frac{C}{\gamma_0} \quad (5.2)$$

$$H = \frac{C}{\bar{g}} \quad (5.3)$$

$$H^* = \frac{C}{\bar{\gamma}} \quad (5.4)$$

여기서, γ_0 는 위도 45° 에서의 정규중력을 의미하며, \bar{g} 와 $\bar{\gamma}$ 는 평균 실측중력과 평균 정규중력을 의미한다.

[그림 5-1]에서 보는 것과 같이 지구상의 두 점 A와 B사이의 수준측량을 정밀하게 수행한다 하더라도 두 점간의 정확한 표고차는 수준측량의 결과와 일치하지 않는다. 이는 수준측량의 결과에 보정이 필요하기 때문이며 두 점 A와 B사이의 역학고, 정표고, 정규고의 차이는 다음 식들과 같이 수준측량 결과(Δn_{AB})에 역학보정(DC_{AB}), 정사보정(OC_{AB}), 정규보정(NC_{AB})을 실시하여야 한다.

$$\Delta H_{AB}^d = \Delta n_{AB} + DC_{AB} \quad (5.5)$$

$$\Delta H_{AB} = \Delta n_{AB} + OC_{AB} \quad (5.6)$$

$$\Delta H_{AB}^* = \Delta n_{AB} + NC_{AB} \quad (5.7)$$

역학보정(dynamic correction), 정사보정(orthometric correction), 정규보정(normal correction)의 계산은 다음 식 (5.8), 식 (5.9) 및 식 (5.10)에 의하여 각각 이루어진다.

$$DC_{AB} = \sum_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} \delta n \quad (5.8)$$

$$OC_{AB} = \sum_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} \delta n + \frac{\bar{g}_A - \gamma_0}{\gamma_0} H_A - \frac{\bar{g}_B - \gamma_0}{\gamma_0} H_B \quad (5.9)$$

$$NC_{AB} = \sum_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} \delta n + \frac{\bar{\gamma}_A - \gamma_0}{\gamma_0} H_A^* - \frac{\bar{\gamma}_B - \gamma_0}{\gamma_0} H_B^* \quad (5.10)$$

여기서, H_A 와 H_B 는 A점과 B점의 정표고를 의미하며, H_A^* 와 H_B^* 는 두 점의 정규정표고를 의미한다.

나. 정표고(orthometric height)

정표고란 “지오이드에서부터 높이”, 또는 “지오이드에 대한 연직선상의 지표 한 지점과 지오이드간의 거리”라고 정의한다. 여기서 연직선(plumb line)이란 “지구중력장에 의한 모든 등포텐셜면에 수직으로 교차하는 선”이다(Heiskanen et al., 1967), (National Resources Canada, 2008).

[그림 5-1]을 보면, 지구표면의 지점 A에서 지오이드상의 지점 A_0 까지 이어진 연직선의 길이를 지점 A의 정표고(H_A)라 하며, 그 지점의 지오폠펠셜 수에 대하여 식 (5.11)과 같은 관계를 갖는다.

$$C_A = \int_0^{H_A} g dH \quad (5.11)$$

지점 A에서의 평균중력은 식 (5.12)로 표현되는데, 이를 식 (5.11)에 적용하면 지오폠펠셜 수와 정표고간의 관계를 구할 수 있다.

$$\bar{g}_A = \frac{1}{H_A} \int_0^{H_A} g dH \quad (5.12)$$

$$\bar{g}_A = \frac{C_A}{H_A} \quad (5.13)$$

평균 중력 \bar{g} 와 지오폠펠셜 수를 알면 정표고 H를 계산할 수 있다. 그러나 지오이드면과 A점 사이의 지하의 중력을 관측하기는 거의 불가능하다. 반면에 평균 중력 \bar{g} 는 H와

거의 무관하며, 이론적으로 거의 정확하게 평균 중력 \bar{g} 를 계산할 수 있으므로 Prey reduction에 의한 중력값을 사용하고 있다.

식 (5.12)에 식 (5.13)을 적용하면 식 (5.14)가 된다.

$$\bar{g}_A = \frac{1}{H_A} \int_0^{H_A} g(z) dz \quad (5.14)$$

중력 g 의 구배 $\frac{\partial g}{\partial h}$ 는 표준 중력의 구배 $\frac{\partial \gamma}{\partial h}$ 와 지오이드면과 H사이의 물질의 영향으로 나타낼 수 있으며, 식 (5.15)로 표현된다.

$$\frac{\partial g}{\partial h} = \frac{\partial \gamma}{\partial h} + 4\pi G\rho \quad (5.15)$$

여기서, G : 만유인력상수

ρ : 평균밀도

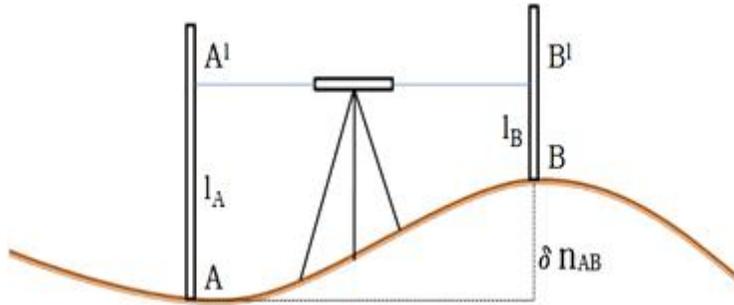
이때, $\frac{\partial g}{\partial h} = 0.3086 \text{ mGal/m}$, $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ 로 하면 식 (5.16)으로 표현된다.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial h} = -0.3086 + 0.2238 = -0.0848 (\text{Gal/km}) \quad (5.16)$$

그러므로 지점 A에서의 정표고 H_A 는 식 (5.17)에 의해 다음과 같이 표현된다

$$H = \frac{C}{g + 0.0424H} \quad (5.17)$$

다. 정사보정량(orthometric correction)



[그림 5-2] A점과 B점 사이의 수준측량

<그림 5-2>와 식 (5.18)은 두 점 A, B 사이의 표고차와 수준측량의 관계를 보여주고 있다. 식 (5.18)에서 보는 바와 같이 두 점 A와 B 사이의 표고차 ΔH_{AB} 는 지표면상에서의 높이차($H_B - H_A$)를 의미하나 이것이 꼭 수준측량에 의한 기하학적인 표고차(Δn_{AB})와 일치하지는 않는다. 이는 두 점 사이를 지나는 수준측량 노선에 따라서 지각밀도가 달라지므로 중력값이 달라지기 때문이다. 따라서 두 점간의 정확한 표고차를 구하기 위해서는 두 점간의 물리적인 정사보정량(OC_{AB})을 고려해 주어야만 한다.

$$\Delta H_{AB} = (H_B - H_A) = \Delta n_{AB} + OC_{AB} \quad (5.18)$$

① Heiskanen & Moritz의 표준식

정사보정량(orthometric correction)을 계산하는 표준식은 Heiskanen & Moritz에 의하여 제안되었으며, 두 지점 A, B 사이의 정사보정량(OC_{AB})은 다음 식 (5.19)과 같이 표현된다(Heiskanen et al., 1967).

$$OC_{AB} = \int_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} dH + \frac{\bar{g}_A - \gamma_0}{\gamma_0} H_A - \frac{\bar{g}_B - \gamma_0}{\gamma_0} H_B \quad (5.19)$$

여기서,

- \bar{g}_A, \bar{g}_B : A와 B에서의 연직선 평균중력
- H_A, H_B : A와 B점의 표고
- γ_0 : 기준위도(45°)에서의 정규중력
- g : A와 B의 평균중력

② Nassar의 정사보정량

1977년 UNB Technical Report에 실린 Gravity Field and Levelled Heights in Canada에서 제안된 정규중력을 기본변수로 한 정사보정량 계산법으로 기존의 USC & GS의

정사보정량 식을 재 공식화한 것으로 식 (5.20)과 같다.

$$OC_{AB} = -2\bar{n}_{AB} c_1' \sin 2\bar{\phi}_{AB} \left[1 + \left(c_1' - \frac{2c_2'}{c_1'} \right) \cos 2\bar{\phi}_{AB} \right] \Delta\phi_{AB} \quad (5.20)$$

여기서, \bar{n}_{AB} : 수준측량에 의해 얻어진 표고의 평균 ($=\frac{1}{2}(n_A + n_B)$)

$\bar{\phi}_{AB}$: 평균 측지위도 ($=\frac{1}{2}(\phi_A + \phi_B)$)

$\Delta\phi_{AB}$: 측지위도 차 ($=\phi_B - \phi_A$)

c_1 : 계수 ($=0.002644$, USC & GS formulas)

c_2 : 계수 ($=0.000007$, USC & GS formulas)

$$OC_{AB} = -\frac{\bar{n}_{AB}}{\bar{\gamma}_{AB}} \Delta\gamma_{AB} - \bar{n}_{AB} \Delta\phi_{AB} c_1'^2 \sin 4\bar{\phi}_{AB} \quad (5.21)$$

여기서, $\bar{\gamma}_{AB}$: A, B 두 점의 평균 정규중력 ($=\frac{1}{2}(\gamma_A + \gamma_B)$)

$\Delta\gamma_{AB}$: 정규중력 차 ($=\gamma_B - \gamma_A$)

실질적으로 두 번째 항은 극단적인 경우의 조건 식(5.22)를 적용하면 $-0.0041mm$ 로 계산되고 이 값은 무시하기 충분히 작으므로 다음 식 (5.23)과 같이 표현된다.

$$\bar{\phi}_{AB} = 67^\circ 30'$$

$$\Delta\phi_{AB} = 1 \text{ arc min (거리 } 2km \text{에 대한)} \quad (5.22)$$

$$\bar{n}_{AB} = 2km$$

$$OC_{AB} = -\frac{\bar{n}_{AB}}{\bar{\gamma}_{45^\circ} \Delta\phi_{AB}} \Delta\gamma_{AB} \quad (5.23)$$

최종적으로, 식 (5.23)에 대하여 $\bar{n}_{AB} = \frac{1}{2}(n_A + n_B) = n_A + \frac{1}{2} \Delta n_{AB}$, $\Delta\gamma_{AB} = \gamma_B - \gamma_A$ 를 적용하여 정리하면 다음 식 (5.24)가 된다.

$$OC_{AB} = \frac{1}{\bar{\gamma}_{AB}} \left[n_A (\gamma_A - \gamma_B) + \Delta n_{AB} (\bar{\gamma}_{AB} - \gamma_B) \right] \quad (5.24)$$

따라서 Nassar의 실측 중력에 의한 정규보정량 제안식은 식 (5.25)와 같다.

$$OC_{AB,1} = \frac{1}{\gamma_{AB}} [n_A(\bar{g}_A - \bar{g}_B) + \Delta n_{AB}(\bar{g}_{AB} - \bar{g}_B)] \quad (5.25)$$

여기서, \bar{g}_A : 수준점 A의 연직선 평균중력(= $g_A + 0.0424 H_A$)

\bar{g}_B : 수준점 B의 연직선 평균중력(= $g_B + 0.0424 H_B$)

$\bar{g}_A = g_A + 0.0424 H_A$: 지각의 밀도가 2.67 g/cm^3 라고 가정

g_A, g_B : 각 수준점(A, B)에서 실측중력

\bar{g}_{AB} : A, B두 점의 평균 실측중력(= $\frac{1}{2}(g_A + g_B)$)

③ Hwang & Hsiao의 정사보정량

정표고차(ΔH_{AB})의 전개과정은 다음 식 (5.26)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta H_{AB} = H_B - H_A &= \frac{C_B}{g_B} - \frac{C_A}{g_A} = \frac{1}{g_B}(C_B - C_A) + \frac{C_A}{g_B} - \frac{C_A}{g_A} \\ &= \frac{1}{g_B} \int_A^B g dn + \frac{C_A}{g_B} - \frac{C_A}{g_A} \end{aligned} \quad (5.26)$$

여기서, g : 지면에서의 실측중력

식 (5.26)의 우변을 나누면 다음 식 (5.27)과 식 (5.28)이 된다.

$$\frac{C_A}{g_B} - \frac{C_A}{g_A} = H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{g_B} - 1 \right) \quad (5.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{g_B} \int_A^B g dn &= \frac{1}{g_B} \int_A^B (g - \bar{g}_B + \bar{g}_B) dn \\ &= \int_A^B dn + \frac{1}{g_B} \int_A^B (g - \bar{g}_B) dn \\ &\approx \sum_{i=1}^k \delta n_i + \frac{1}{g_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) dn \end{aligned}$$

$$= \Delta n_{AB} + \frac{1}{g_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i \quad (5.28)$$

여기서, i : 측점 A, B 사이에 수준측량 점

k : 측점 A, B 사이에 수준측량 횟수

식 (5.27)과 식 (5.28)을 식 (5.26)에 대입하면 식 (5.29)가 되므로, 식 (5.29)에서 수준측량 결과 Δn_{AB} 을 제외하게 되면 정사보정량 식 (5.30)을 얻을 수 있다.

$$\Delta H_{AB} = \Delta n_{AB} + \frac{1}{g_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i + H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{g_B} - 1 \right) \quad (5.29)$$

$$OC_{AB,2} = \frac{1}{g_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i + H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{g_B} - 1 \right) \quad (5.30)$$

측점간의 거리가 비교적 짧은 거리(2km 이내)이고 더욱이 평지에서라면, 중력은 높이에 대한 선형적인 함수로 존재한다고 가정할 수 있으므로 식 (5.31)로 식 (5.28)을 유도할 수 있다. 따라서 2km이내 측점간의 정사보정량은 식 (5.32)가 된다.

$$\frac{1}{g_B} \int_B^A (g - \bar{g}_B) dn = \frac{1}{g_B} \left(\frac{g_A + g_B}{2} - \bar{g}_B \right) \Delta n_{AB} \quad (5.31)$$

$$OC_{AB,3} = \frac{1}{g_B} \left(\frac{g_A + g_B}{2} - \bar{g}_B \right) \Delta n_{AB} + H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{g_B} - 1 \right) \quad (5.32)$$

④ G.L. Strang van Hees의 정사보정량

Strang Van Hees는 1992년 그의 논문 'Practical Formulas for The Computation of The Orthometric, Dynamic and Normal Heights'에서 정사보정량 계산에 다음 식 (5.33)과 같이 부계 중력이상(Bouguer anomaly)을 변수로 활용하였다.

$$OC_{AB,4} = 0.114 \times 10^{-3} \bar{n}_{AB} \Delta n_{AB} - 1.02 \times 10^{-3} (\Delta g_B^B - \Delta g_A^B) \bar{n}_{AB} - 0.83 \times 10^{-3} \sin 2\bar{\phi}_{AB} S \bar{n}_{AB} \quad (5.33)$$

여기서, S : 두 수준점(A, B)간의 남북거리

Δg_A^B : 수준점 A에서의 Bouguer 중력이상

Δg_B^B : 수준점 B에서의 Bouguer 중력이상

$\bar{\phi}_{AB}$: 두 수준점(A,B)간의 평균위도

⑤ Szu-Pyng Kao 등의 수정식

Kao 등(2000)은 실측중력에 기반하여 대만의 정사보정량을 계산한 바 있다. Kao 등은 대만 정사보정량 연구를 통하여 두 점 A와 B 사이의 중력값의 차이($\Delta g_B^B - \Delta g_A^B$)가 크지 않을 때 부계이상을 이용하는 Strang Van Hees의 정사보정량 수식을 다음 식 (5.34)와 같이 수정하여 적용할 수 있다고 발표하였다.

$$OC_{AB} = 0.114 \times 10^{-3} H_m \Delta H_{AB} - 0.83 \times 10^{-3} \sin 2\bar{\phi}_{AB} S H_m \quad (5.34)$$

아울러, Kao 등은 부계이상의 계산에 있어서 Dong (1990)이 제안한 다음 수식을 사용하였다.

$$\Delta g^B = g + 0.197H - \gamma(\phi) \quad (5.35)$$

여기서, $\gamma(\phi) = \gamma_e(1 + \beta_1 \sin^2 \phi + \beta_2 \sin^2 2\phi)$ 이며, γ_e 는 적도에서의 정규중력을, ϕ 는 측지 위도를, β_1, β_2 는 정규중력장 파라미터이다(NGS 1986).

2. 정사보정량에 의한 정표고 기반 수직기준망조정

가. 중력데이터베이스의 활용

정사보정량을 계산하기 위한 중력데이터베이스는 [표 2-12]에서 보는 것과 같이 국토지리정보원의 중력기준점 성과를 이용하였다. 국토지리정보원의 중력데이터베이스는 2009년부터 2021년까지 중력을 관측한 총 16,534점이며, 망조정 계산에 필요하여 사용된 점은 13,088점으로 중력성과 DB를 [그림 5-3]과 같이 간략화하여 본 연구에 활용하였다.

연번	점명	세계지계		H (m)	관측중력 (mGal)
		B	L		
1	20-00-33-01	38-23-39.5	128-27-42.8	4.524	980045.315
2	20-00-33-02	38-24-17.6	128-28-27.6	2.463	980052.175
3	20-00-33-03	38-25-30.9	128-27-39.4	5.046	980053.296
4	20-00-33-04	38-26-15.8	128-26-45.2	4.062	980054.506
5	20-00-33-05	38-27-07.3	128-25-42.3	8.143	980055.493
6	20-00-33-06	38-28-10.2	128-25-15.0	8.687	980058.601
7	20-00-33-07	38-29-03.0	128-26-02.7	3.852	980064.587
8	20-00-33-08	38-29-48.8	128-25-22.5	14.159	980063.209
9	34-44-00	38-15-53.4	128-21-31.6	519.635	979911.067
10	34-47-00	38-19-42.8	128-22-38.5	114.568	979997.968
11	34-48-00	38-21-22.9	128-22-54.0	70.424	980011.806
12	34-49-00	38-22-29.3	128-24-51.3	24.827	980029.173
13	34-50-00	38-22-38.6	128-26-20.0	16.002	980035.825
14	교BM23	38-22-42.6	128-28-01.6	16.745	980040.754
15	09-00-16-15	37-51-03.1	128-46-01.6	31.062	979973.611
16	09-00-16-16	37-51-11.5	128-47-19.4	25.656	979979.194
17	09-00-16-17	37-51-01.7	128-48-17.3	12.696	979983.628
18	09-00-16-18	37-51-27.1	128-49-46.9	6.121	979990.5
19	35-01-00	37-46-39.5	128-53-06.7	7.975	979989.956
20	35-02-00	37-48-11.3	128-51-41.6	67.232	979976.615
21	35-03-00	37-49-24.5	128-50-56.6	9.352	979986.447
22	35-03-01	37-50-45.5	128-50-29.5	20.224	979987.493
23	35-04-00	37-51-35.4	128-50-14.3	4.322	979992.89
24	35-07-00	37-55-09.2	128-48-15.8	5.03	980001.74
25	35-08-00	37-56-10.7	128-47-12.7	5.117	980003.184

[그림 5-3] 중력데이터베이스 예

나. 정사보정량의 계산

1) 정사보정량 계산 수식의 결정

정사보정량 계산을 위하여 우리나라에 적합한 정사보정량 수식을 결정하고자 하였다. 따라

서 Heiskanen & Moritz의 식을 비롯하여 정사보정량 계산에 많이 사용되어 온 5개의 수식을 검토하고자 하였다.

5개의 수식에 의한 정사보정량 계산결과를 비교하기 위하여 지형에 다른 테스트베드를 구축하였다. 지형에 의한 기준은 측량 표준품셈의 기준에 따라 평탄지, 구릉지, 산악지의 세가지로 구분하였다. 평탄지는 평지 또는 보통 야산으로서 교통이 편리한 곳으로 해발고도 100m 미만 또는 50m 미만인 지역을 말하며, 구릉지는 험한 야산지대 및 수목이 우거진 보통 산악지대로서 교통이 불편한 곳이며 해발고도 300m 미만 또는 150m 미만인 지역을 말한다. 산악지는 산림이 우거진 험준한 산악지대로서 교통이 극히 불편한 곳으로 해발고도 300m 이상인 지역을 말한다.

따라서 이러한 기준에 따라 평탄지는 15-35환을, 구릉지는 16-17환을, 산악지는 16-20환을 선정하였다. 여기서 앞의 두자리 숫자는 1등환을 의미하며 뒤의 두자리 숫자는 그 1등환에 속해 있는 2등환 번호를 의미한다. 5개 정사보정량 계산 수식 비교를 위한 테스트베드의 특징은 <표 5-1>과 같다.

<표 5-1> 정사보정량 계산 비교를 위한 테스트베드의 선정과 표고 분포

구 분	평탄지	구릉지	산악지
대상환	15-35환	16-17환	16-20환
최대값(m)	68.814	283.576	1095.521
최소값(m)	2.692	56.574	418.914
평균(m)	20.661	162.625	599.842

<표 5-1> 정사보정량 계산 비교를 위한 테스트베드의 선정과 표고분포에서 보는 것과 같이 평탄지 15-35환은 표고가 최소 2.692m, 최대 68.814m, 평균 20.661m를 나타내는 전형적인 평탄지역이다. 구릉지 16-17환은 표고가 최소 56.574m, 최대 283.576m, 평균 162.625m를 나타내는 구릉지이며, 산악지 16-20환은 표고가 최소 418.914m, 최대 1095.521m, 평균 599.842m를 나타내는 산악지이다.

이렇게 선정된 테스트베드들에 대하여 앞에서 설명한 Heiskanen & Moritz의 식, Nassar의 전통적 수식, Hwang & Hsiao의 수정식, Szu-Pyng Kao의 수정식 그리고 Strang Van Hees의 식의 5개 수식에 의하여 정사보정량을 각각 계산하였으며, 그 결과는 <표 5-2> ~ <표 5-4>와 같다.

<표 5-2> 평탄지(15-35환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과

(단위:m)

No	ID	Nassar	Heiskanen & Moritz	Hwang & Hsiao	StrangVan Hees	Szu-Pyng Kao
1	U함안89					
2	15-00-22-06	0.000006	0.000006	0.000006	-0.000002	-0.000002
3	15-00-22-07	0.000013	0.000013	0.000013	-0.000003	-0.000004
4	15-00-22-08	0.000075	0.000075	0.000075	0.000019	0.000007
5	15-00-22-09	0.000101	0.000101	0.000101	0.000052	0.000033
6	15-00-22-10	-0.000024	-0.000024	-0.000024	-0.000110	-0.000082
7	15-00-22-11	-0.000004	-0.000004	-0.000004	0.000015	0.000007
8	15-00-22-12	-0.000030	-0.000030	-0.000030	-0.000039	-0.000030
9	15-00-22-13	0.000022	0.000022	0.000022	0.000036	0.000026
10	15-00-22-14	-0.000044	-0.000043	-0.000044	-0.000041	-0.000030
11	U1059	0.000008	0.000008	0.000008	-0.000011	-0.000009
12	15-00-22-15	-0.000021	-0.000021	-0.000021	0.000042	0.000030
13	15-00-22-16	0.000203	0.000202	0.000202	-0.000050	-0.000046
14	15-00-22-17	0.000074	0.000074	0.000074	0.000042	0.000026
15	U통영28	0.000036	0.000036	0.000036	-0.000088	-0.000070
16	15-00-22-19	-0.000005	-0.000005	-0.000005	-0.000028	-0.000022
17	15-00-22-20	0.000106	0.000106	0.000106	0.000087	0.000060
18	15-00-22-21	-0.000072	-0.000072	-0.000072	-0.000117	-0.000090
19	U통영36	0.000091	0.000091	0.000091	0.000094	0.000067
20	15-02-04-05	-0.000134	-0.000134	-0.000134	-0.000083	-0.000060
21	15-02-04-04	0.000129	0.000129	0.000129	0.000215	0.000148
22	U1061	0.000004	0.000004	0.000004	0.000012	0.000006
23	15-02-04-03	-0.000238	-0.000238	-0.000238	-0.000293	-0.000220
24	15-02-04-02	-0.000051	-0.000050	-0.000051	-0.000026	-0.000020
25	15-02-04-01	-0.000031	-0.000031	-0.000031	0.000001	-0.000004
26	U1060	0.000249	0.000249	0.000249	0.000315	0.000220
27	15-02-00-00	-0.000280	-0.000280	-0.000280	-0.000361	-0.000266
28	15-02-05-01	-0.000040	-0.000040	-0.000040	-0.000033	-0.000029
29	15-02-05-02	-0.000042	-0.000042	-0.000042	-0.000027	-0.000026

30	U함안96	-0.000001	-0.000001	-0.000001	-0.000009	-0.000008
31	U함안87	-0.000008	-0.000008	-0.000008	-0.000006	-0.000006
32	U함안89	-0.000001	-0.000001	-0.000001	-0.000001	-0.000001

<표 5-3> 구릉지(16-17환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과 (단위:m)

No	ID	Nassar OC	Heiskanen & MoritzOC	Hwang & Hsiao	StrangVan Hees OC	Szu-Pyng Kao
1	16-00-01-33					
2	U모슬포23	0.000156	0.000156	0.000157	0.000418	0.000310
3	16-00-02-20	-0.000222	-0.000223	-0.000223	0.000483	0.000376
4	16-00-02-19	0.001275	0.001277	0.001279	0.001798	0.001322
5	U1190	-0.000740	-0.000742	-0.000743	-0.000167	-0.000106
6	16-00-02-18	0.000732	0.000733	0.000734	0.000920	0.000691
7	16-00-02-19	0.000050	0.000050	0.000050	-0.000475	-0.000307
8	16-00-02-17	0.003284	0.003291	0.003294	0.003873	0.002913
9	U모슬포21	-0.002204	-0.002208	-0.002211	-0.002462	-0.001685
10	16-00-02-17	0.002203	0.002208	0.002210	0.003233	0.002456
11	U모슬포27	-0.001521	-0.001524	-0.001526	-0.002527	-0.001694
12	16-00-01-36	-0.001507	-0.001510	-0.001512	-0.001871	-0.001346
13	16-00-01-36	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	16-00-01-35	0.000546	0.000547	0.000548	0.000700	0.000516
15	16-00-01-34	-0.001502	-0.001505	-0.001507	-0.000891	-0.000636
16	16-00-01-33	0.000009	0.000009	0.000009	-0.000780	-0.000558

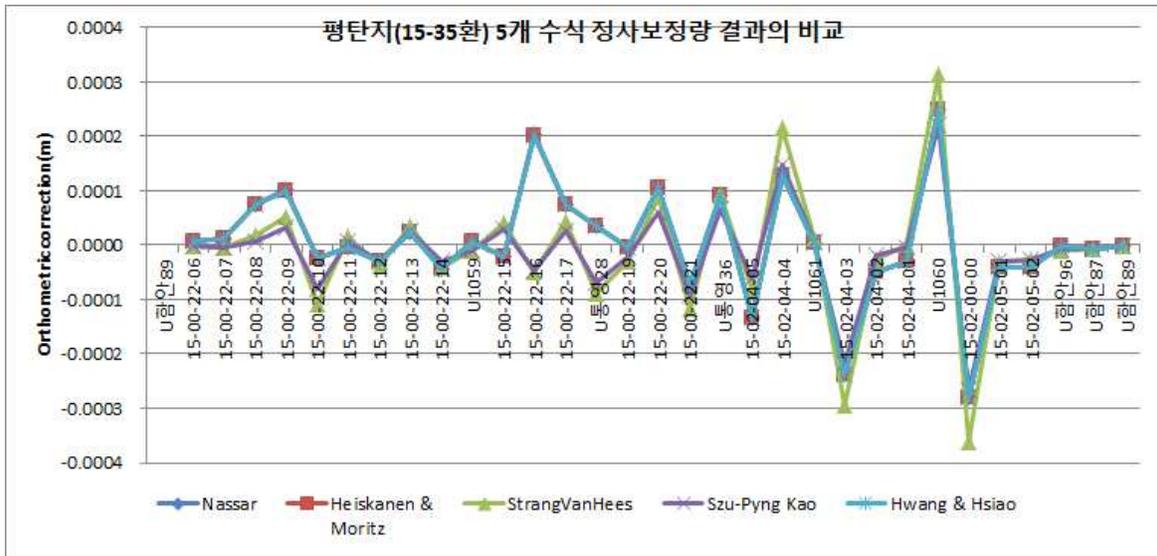
<표 5-4> 산악지(16-20환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과 (단위:m)

No	ID	Nassar OC	Heiskanen & MoritzOC	Hwang & Hsiao	StrangVan Hees OC	Szu-Pyng Kao
1	16-00-02-15					
2	U모슬포19	0.004998	0.005008	0.005014	0.003720	0.002783
3	U서귀01	-0.001547	-0.001550	-0.001552	-0.002606	-0.001723
4	U서귀03	0.003058	0.003064	0.003068	0.001197	0.000892
5	16-00-05-	0.009397	0.009418	0.009428	0.011912	0.008753

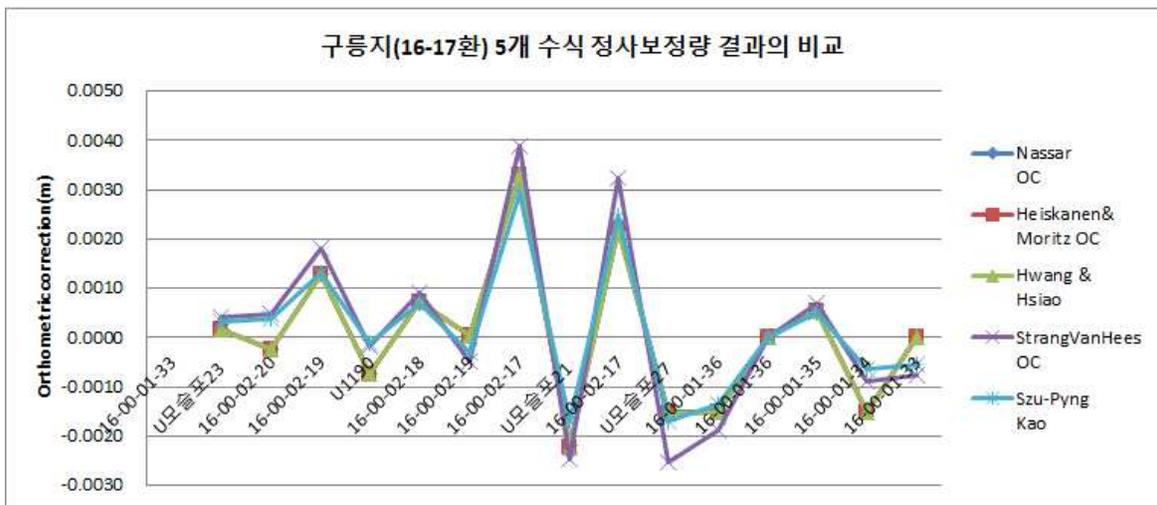
	12					
6	U서귀02	0.006338	0.006352	0.006359	0.007268	0.005328
7	16-00-05-11	0.008385	0.008403	0.008413	0.011093	0.008163
8	16-00-05-10	0.015308	0.015340	0.015358	0.021122	0.015578
9	16-00-05-09	0.010457	0.010478	0.010491	0.014864	0.010978
10	16-00-05-08	0.012546	0.012570	0.012586	0.015923	0.011827
11	16-00-05-07	-0.013889	-0.013915	-0.013932	-0.013052	-0.009143
12	16-00-05-06	-0.012284	-0.012307	-0.012322	-0.012355	-0.008756
13	16-00-05-05	-0.023914	-0.023957	-0.023985	-0.026489	-0.019041
14	U한림09	-0.004327	-0.004335	-0.004340	-0.004288	-0.003071
15	U한림10	-0.012330	-0.012351	-0.012365	-0.012637	-0.009157
16	16-00-02-09	-0.008174	-0.008188	-0.008197	-0.008008	-0.005808
17	U한림12	-0.000295	-0.000296	-0.000296	0.000298	0.000242
18	16-00-02-10	0.000209	0.000209	0.000210	0.000265	0.000201
19	16-00-02-11	0.002035	0.002038	0.002040	0.000825	0.000708
20	16-00-02-12	0.001274	0.001276	0.001277	0.002082	0.001612
21	U모슬포14	0.002608	0.002613	0.002616	0.001954	0.001529
22	16-00-02-13	-0.000678	-0.000679	-0.000680	-0.000435	-0.000287
23	16-00-02-14	-0.002892	-0.002898	-0.002901	-0.002773	-0.001930
24	U모슬포16	0.000411	0.000412	0.000412	0.000686	0.000542
25	16-00-02-15	-0.001455	-0.001458	-0.001460	-0.000876	-0.000531

<표 5-2>의 평탄지(15-35환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과를 보면 Heiskanen & Moritz의 식에 의한 정사보정량은 최소 -0.00028m에서 최대 0.000249m이며 평균값은 0.000003m로 평탄지에서 정사보정량은 거의 영향이 없는 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 Nassar의 식과 Hwang & Hsiao의 식에서 같은 결과를 나타내고 있다. 다만 정사보정량 계산에 Bouger anomaly를 사용하는 Strang Van Hees식과 Szu-Pyng Kao식에서는 약간 다르게 나타나고 있다. Strang Van Hees식에 의한 정사보정량 계산 결과는 최소 -0.00361m에서 최대 0.000315m이며 평균값은 -0.000013m를 나타내고 있고, Szu-Pyng Kao식에 의한 정사보정량 계산 결과는 최소 -0.00266m에서 최대 0.00022m이며 평균값은 -0.000013m를 나타내고 있어 평균값은 Strang Van Hees식과 같은 결과를 나타내고 있다. 이러한 계산 결과와 양상은 <표 5-3> 구릉지

(16-17환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과와 <표 5-4> 산악지(16-20환) 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과에서도 유사하게 나타나고 있다. 또 <표 5-2>, <표 5-3>, <표 5-4>의 결과를 그림으로 나타낸 [그림 5-4], [그림 5-5], [그림 5-6]의 결과에서도 이를 확인할 수 있다.



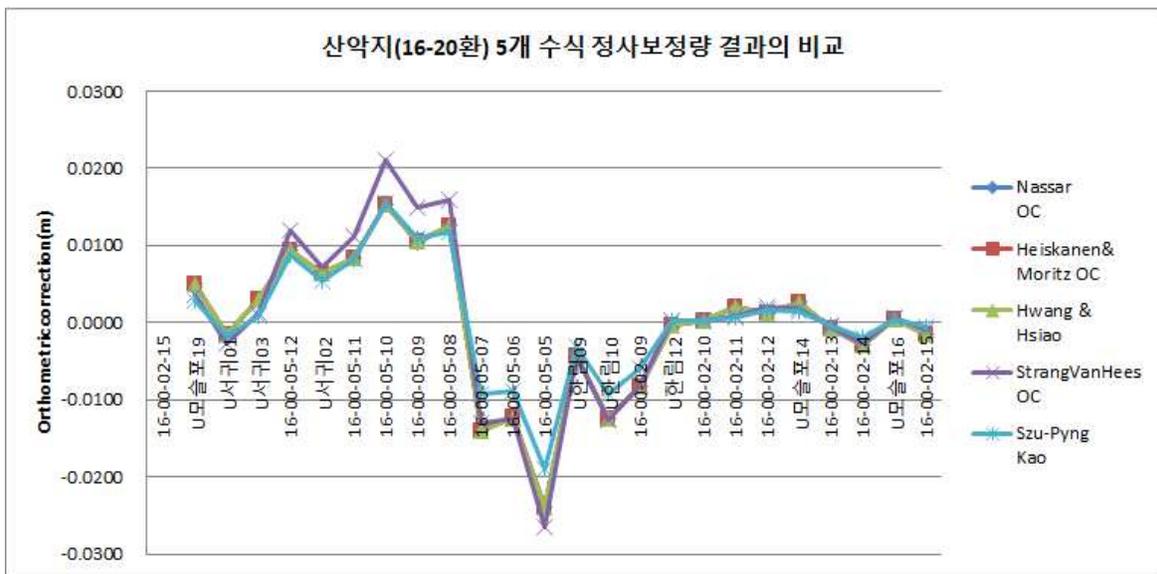
[그림 5-4] 평탄지(15-35환)에서 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과



[그림 5-5] 구릉지(16-17환)에서 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과

또한 각 수식들에 의한 정사보정량 계산결과의 차이가 얼마나 발생하고 있는지를 알아보기 위하여 Heiskanen & Moritz식을 기준으로 나머지 4개 수식에 의한 계산결과와의 차이를 계산하였으며 그 결과를 통계표로 작성하였다. 정사보정량 계산에 있어서 Heiskanen & Moritz의 식을 기준으로 Nassar의 전통적 수식, Hwang & Hsiao의 수정식, Szu-Pyng Kao의 수정식 그리고 Strang Van Hees의 4개의 수식 결과와의 차이에 대한

통계값은 <표 5-5>와 같다. <표 5-5>에서 보는 것과 같이 평탄지에서는 차이의 평균이 최소 0.000000m에서 최대 0.000015m의 분포를 보여 가장 작은 차이를 나타내고 있으며 산악지에서는 차이의 평균이 최소 0.000000m에서 최대 -0.000578m의 분포를 보여 가장 큰 차이를 만들어 내고 있다. 이는 산악지로 갈수록 정사보정량 계산결과가 크게 나타나고 있기 때문이다. 그러나 그렇다 하더라도 산악지에서 가장 큰 차이를 나타내는 값이 최소 -0.005783m이고 최대 0.002532m로 cm미만의 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.



[그림 5-6] 산악지(16-20환)에서 5개 수식에 의한 정사보정량 계산 결과

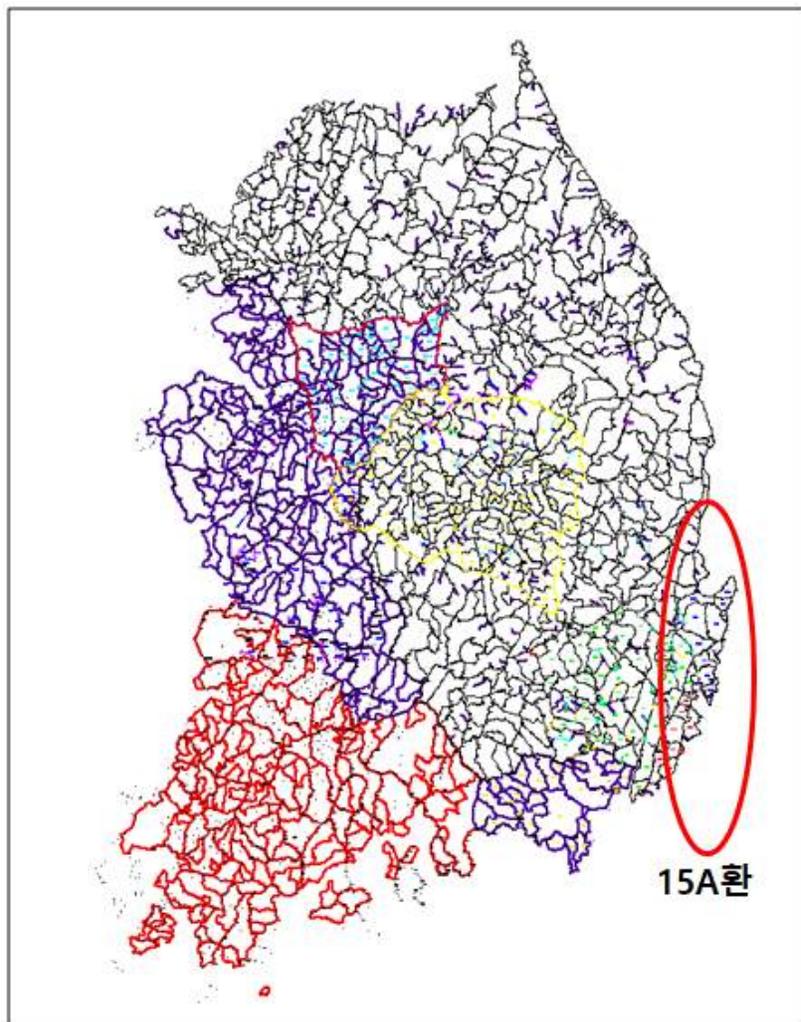
<표 5-5> 세 개 지역 테스트베드에서 Heiskanen & Moritz식(H&M)과 네 개의 수식과의 정사보정량 차이 통계값 (단위 : m)

노선	구분	H&M - Nassar	H&M - Hwang & Hsiao	H&M - Strang VanHees	H&M - Szu - PyngKao
평탄지	최대값	0.000001	0.000000	0.000252	0.000249
	최소값	0.000000	0.000000	-0.000087	-0.000073
	평균	0.000000	0.000000	0.000015	0.000015
구릉지	최대값	0.000007	0.000002	0.001003	0.000567
	최소값	-0.000005	-0.000004	-0.001025	-0.000869
	평균	0.000000	0.000000	-0.000106	-0.000106
산악지	최대값	0.000031	0.000028	0.002532	0.002226
	최소값	-0.000043	-0.000018	-0.005783	-0.004917

	평균	0.000000	0.000000	-0.000578	-0.000578
--	----	----------	----------	-----------	-----------

이러한 테스트베드에서의 계산 결과들을 바탕으로 가장 전통적인 수식으로서 Heiskanen & Moritz식이 안정된 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, Heiskanen & Moritz식을 정사보정량 계산의 기본식으로 결정하였다. 따라서 전국 모든 수준환의 수직기준점들에 대하여 Heiskanen & Moritz식으로 정사보정량을 계산하고 정표고 수직기준망조정을 수행하였다.

2) 15A환 정사보정량 계산 결과



[그림 5-7] 수준노선의 분포와 15A환의 위치

우리나라 15환은 1/50,000 지형도의 도엽명 기준으로 대보에서 부산까지 북에서 남으로

내려가는 지역이다. 15환은 바다로 인하여 세 구역으로 단절되기 때문에 15A환, 15B환, 15C환으로 구분되었다. 15A환은 2등환 기준으로 16개의 환으로 구성되어 있기 때문에 정사보정량 계산결과를 15A환을 통하여 살펴보기로 한다. 나머지 15B환과 15C환뿐만 아니라 다른 16개의 1등환들도 똑같은 방법으로 정사보정량이 계산되었다.

15A환은 [그림 5-7]에서 보는 것과 같이 동남쪽 해안가 지대로서 표고변화가 거의 없는 평탄지로 구성되어 있다. 15A환은 16개의 2등환으로 구성되어 있으며 환폐합차점검부에서 타원보정량과 정사보정량을 계산하였으며 정사보정량과 타원보정량의 차이와 중력값을 통계표로 정리하면 <표 5-6>과 같다.

<표 5-6>에서 보는 것과 같이 15A-01환의 경우 중력값은 최소 979810.418mGal에서 최대 979874.869mGal의 분포를 보이고 있고 중력 평균값은 979825.344mGal을 나타내고 있다. 이때 타원보정량은 최소 -0.00018m에서 최대 0.00014m의 분포를 보이고 있으며 평균 -0.00003m를 나타내고 있고, 동일환 지역에 대하여 정사보정량은 최소 -0.00281m에서 최대 0.00154m의 분포를 보이고 있으며 평균 -0.00019m를 나타내고 있어 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 15A-01환에 대하여 각 점(구간)별로 정사보정량과 타원보정량의 차이를 구했으며 그 차이는 최소 -0.00266m에서 최대 0.00161m의 분포를 보였으며 차이의 평균값은 -0.00015m로 나타났다. <표 5-6>은 15A환에 속해 있는 16개의 2등환에서 계산한 정사보정량 통계값을 보여주고 있으며, 아울러 모든 환의 정사보정량은 식 (5.19)에 따라 이와 같이 적절하게 계산되었으며, 이를 기반으로 하여 정표고기반 망조정을 수행하였다.

<표 5-6> 15A환 2등환별 중력값, 정사보정량, 타원보정량 및 정사보정량과 타원보정량의 차이 통계표

2등환	구분	중력값 (mGal)	타원보정량 (m)	정사보정량 (m)	정사보정량 - 타원보정량 (m)
1환	최대값	979874.869	0.00014	0.00154	0.00161
	최소값	979810.418	-0.00018	-0.00281	-0.00266
	평균값	979825.344	-0.00003	-0.00019	-0.00015
2환	최대값	979855.009	0.00019	0.00108	0.00089
	최소값	979818.512	-0.00018	-0.00032	-0.00026
	평균값	979841.546	0.00001	0.00006	0.00005
3환	최대값	979852.407	0.00001	0.00002	0.00002
	최소값	979846.767	-0.00001	-0.00003	-0.00002
	평균값	979849.355	0.00000	-0.00001	-0.00001
4환	최대값	979847.356	0.00035	0.00715	0.00739
	최소값	979773.132	-0.00029	-0.00344	-0.00326

	평균값	979818.723	0.00001	0.00017	0.00016
5환	최대값	979874.406	0.00035	0.00399	0.00367
	최소값	979783.610	-0.00011	-0.00292	-0.00327
	평균값	979836.436	0.00006	0.00008	0.00002
6환	최대값	979854.455	-0.00007	0.00017	0.00030
	최소값	979842.972	-0.00013	-0.00027	-0.00020
	평균값	979847.404	-0.00006	-0.00007	0.00002
7환	최대값	979873.789	0.00011	0.00230	0.00063
	최소값	979807.389	-0.00007	-0.00175	-0.00176
	평균값	979851.450	0.00001	0.00008	-0.00008
8환	최대값	979884.694	0.00003	0.00361	0.00058
	최소값	979807.389	-0.00004	-0.00176	-0.00177
	평균값	979868.359	-0.00001	-0.00022	-0.00005
9환	최대값	979853.906	0.00016	0.03088	0.00739
	최소값	979750.049	-0.00034	-0.00446	-0.00441
	평균값	979809.316	-0.00004	0.00204	0.00002
10환	최대값	979844.581	0.00003	0.00027	0.00027
	최소값	979827.133	-0.00014	-0.00011	-0.00013
	평균값	979834.229	-0.00002	0.00005	0.00007
11환	최대값	979833.720	0.00025	0.02939	0.01302
	최소값	979730.840	-0.00034	-0.01446	-0.01413
	평균값	979803.712	-0.00007	0.00134	-0.00015
12환	최대값	979832.950	0.00009	0.01289	0.01301
	최소값	979730.840	-0.00032	-0.01446	-0.01413
	평균값	979818.014	-0.00001	-0.00011	-0.00009
13환	최대값	979829.498	0.00008	0.00122	0.00121
	최소값	979784.941	-0.00009	-0.00189	-0.00179
	평균값	979817.954	0.00000	0.00001	0.00000
14환	최대값	979836.423	0.00025	0.00075	0.00067
	최소값	979811.731	-0.00014	-0.00038	-0.00063
	평균값	979827.058	0.00003	0.00002	-0.00001
15환	최대값	979825.551	0.00008	0.00030	0.00021
	최소값	979803.664	-0.00003	-0.00022	-0.00026
	평균값	979817.454	0.00001	0.00002	0.00000
16환	최대값	979827.294	0.00004	0.00045	0.00046
	최소값	979810.565	-0.00001	-0.00028	-0.00032
	평균값	979821.443	0.00001	0.00002	0.00001

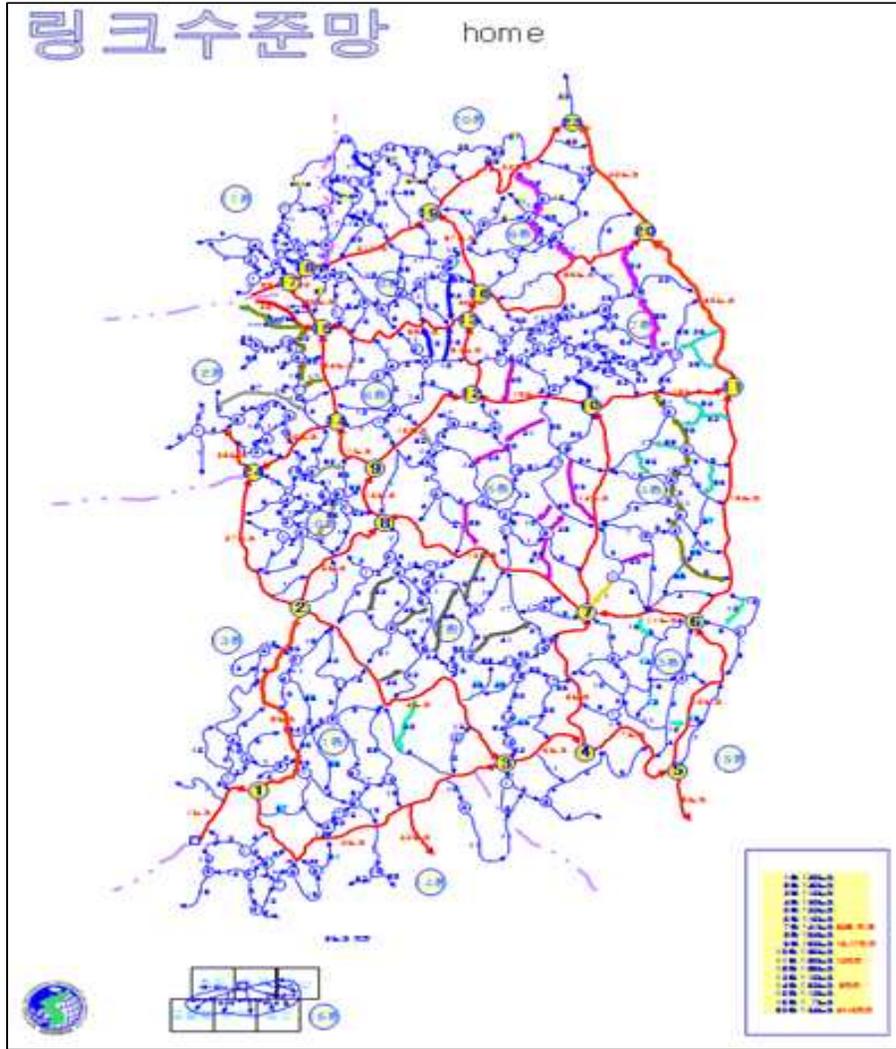
다. 최소제공조정과 과대오차의 검정

결정해야 할 대상을 반복 관측한 경우 최확값(MPV)은 그 값이 발생할 확률이 가장 큰 값이며 최확값과 관측값의 차이인 잔차의 제곱의 합이 최소가 될 때 최확값의 확률이 가장 크게 된다. 이러한 최소제공 조정이론에 따라 정표고 조정이 수행되었으며 기본적인 수식과 원리는 제4장 정규정표고기반 수직기준망 조정 및 기준점 표고변동량 분석 1. 정규정표고기반 수준측량자료통합 및 수직기준망 조정, 다. 최소제공조정과 과대오차 검정에 수록되었다.

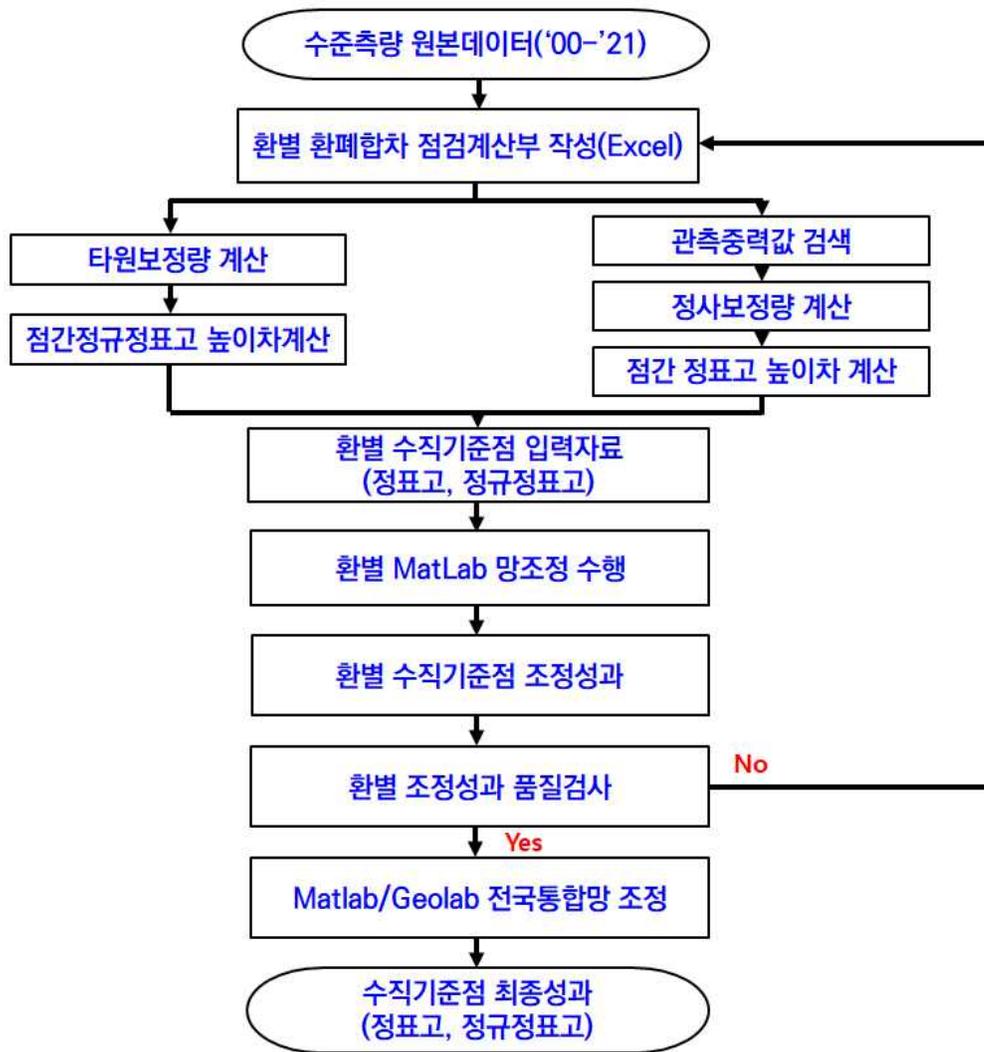
과대오차의 검정 또한 [그림 4-9]에 따라 정규정표고 조정시와 같은 방법으로 전역검정과 국소검정의 단계를 여러번 거치며 수행되었고 그 기본이론은 역시 위 제4장. 1. 4) 과대오차 검정에 수록되었다.

라. 정표고 기반 수직기준망조정 수행

정표고기반 수직기준망조정은 우리나라 1등환 17개환을 기준으로 각 환별로 수준점 및 통합기준점에서 정사보정량을 계산하고 예비조정을 실시한 후 다시 전국을 하나로 묶어 수직기준망 본조정을 실시하였다. 우리나라 수준망의 구성은 [그림 5-8]에서 보는 것과 같이 17개의 1등환과 1등환 내에 각각 수십개의 2등환으로 수준환이 구성되어 있다. 정표고 기반 통합 망조정 수행에서는 이러한 우리나라의 전통적인 수준환을 그대로 고려하여 예비조정과 본조정 망조정을 실시하였다.



[그림 5-8] 우리나라 수준망의 구성(국토지리정보원)



[그림 5-9] 정표고기반 수직기준망조정 수행절차

정표고 수직기준망조정은 [그림 5-9]에서 보는 것과 같이 수행되었다. [그림 5-9]의 흐름도에서 왼쪽 분기 그림은 타원보정량 기반의 정규정표고 망조정 수행 절차를 보여주고 있고, 오른쪽 분기 그림은 정사보정량 기반의 정표고 망조정 수행 절차를 보여주고 있다.

[그림 5-9]의 오른쪽 분기 그림에서 보여주는 것과 같이 국토지리정보원에서 2000년부터 2021년까지 수행한 수준측량 데이터를 기반으로 하여 환별 환폐합차 점검부를 작성하였으며, 이 환폐합차점검부 엑셀파일에서 각 기준점의 중력값을 우리나라 중력데이터베이스로부터 불러와 정사보정량을 계산하였다. 계산된 정사보정량에 근거하여 점간 정표고 높이차를 계산하였으며 그 결과를 불러들여 망조정 입력파일을 작성하였다. 망조정은 우리나라 1등환 기준 17개 환으로 구분하여 각 환별로 예비조정을 실시하였고 인천수준원점을 중심으로 각 환을 연결시켜 전국 수직기준망 조정을 실시하였다. 정표고 수직기준망 조정의 내용을 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

1) 환별 환폐합차 점검부 작성

수직기준망 조정계산을 위해서 먼저 1등환별로 환폐합차점검부 작성이 필요하다. 환폐합차점검부 작성은 제2장 및 제4장에서 기술한 바와 같이 국토지리정보원에서 2000년부터 2021년까지 직접수준측량을 실시한 수준점 및 통합기준점 자료를 이용하여 작성하였으며 일차적으로 왕복차와 환 폐합차를 이용하여 정확도를 검증하였다. 환폐합차 점검부는 [그림 2-8] 2021년 점검부 및 특징에서 보는 것과 같이 엑셀(Excel)파일로 정리하였다.

2) 정사보정량과 점간 정표고 높이차 계산

정사보정량과 점간 정표고 높이차의 계산은 정규정표고 계산 과정에서 작성한 환별 환폐합차점검부를 이용하였다. 환별 환폐합차점검부 엑셀파일의 사업지구명 오른쪽의 타원보정량 및 정사보정량 계산 부분을 확대하면 [그림 5-10]과 같다.

대한공간정보학회 컨소시엄							
(단위 : m)			절대중력(위도 45도) :		980619.9023		
경 위 도		사업지구명	타원보정량	정규정표고	절대중력	정사보정량	정표고
경도	위도		높이차	높이차		높이차	
128-34-58.1	35-37-35.1				979777.231		
128-35-40.3	35-37-43.7	03'수준(확북-영천)	-0.00002	-11.7442	979780.063	-0.00022	-11.74442
128-37-04.4	35-38-31.4	03'수준(확북-영천)	-0.00012	-12.8894	979784.453	-0.00035	-12.88960
128-37-04.4	35-38-31.4				979784.453		
128-36-33.1	35-39-30.9	09'수준(경북)	-0.00016	26.3280	979778.866	0.00038	26.32858
128-35-50.1	35-40-22.5	09'수준(경북)	-0.00016	8.8468	979774.818	0.00043	8.84738
128-35-20.3	35-41-24.2	09'수준(경북)	-0.00022	26.9663	979768.467	0.00061	26.96716
128-35-20.3	35-41-24.2				979768.467		
128-35-02.29480	35-42-18.89121	19'연구(3)(정도03)	-0.00023	19.2918	979766.244	0.00010	19.29212
128-35-09.6	35-42-21.1	19'연구(3)(정도03)	-0.00001	-0.7447	979766.234	0.00001	-0.74469
128-35-09.6	35-42-21.1				979766.234		
128-33-39.2	35-42-57.1	09'수준(경북)	-0.00021	120.8225	979744.111	0.00289	120.82564
128-33-39.2	35-42-57.1				979744.111		
128-33-39.1	35-43-46.5	17'통합(대구)	-0.00049	213.7540	979703.135	0.00946	213.76393
128-33-38.9	35-43-46.3	17'통합(대구)	0.00000	0.4118	979703.016	0.00004	0.41183

[그림 5-10] 정사보정량과 정표고 높이차의 산출

정사보정량 계산은 식(5.19)에 의하여 [그림 5-10]에서 보는 것과 같이 각 기준점의 중력값을 중력데이터베이스에서 불러와 정사보정량을 계산한 후에 점간 정표고 표고차

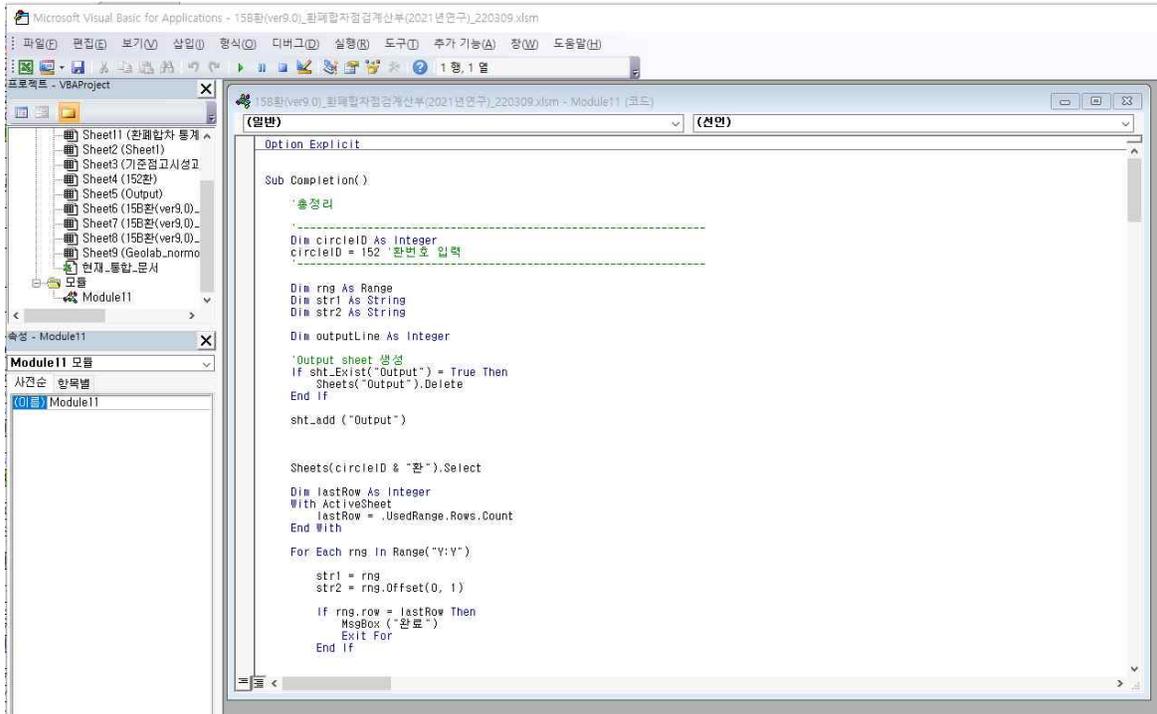
를 계산하였으며, 이를 입력데이터로 변환하여 망조정 단계를 수행하였다.

3) MatLab/GeoLab 망조정용 입력데이터 파일 작성

정사보정량에 의한 정표고 기반 통합망조정을 위하여, [그림 5-9]와 같이 정사보정량과 정표고 높이차를 산출한 뒤 이를 이용하여 MatLab과 GeoLab 소프트웨어에 사용될 입력파일을 작성하였다.

제4장 1. 2020년 이전 및 이후 수준측량자료통합 수직기준망 조정 다. 수직기준망 소프트웨어에서 설명한 바와 같이, GeoConv 소프트웨어를 개발하여 MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램과 GeoLab 프로그램을 이용하기 위한 입력파일을 작성하였다. GeoConv 소프트웨어는 '환폐합차점검부' 엑셀파일에 수식으로 작성된 MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램 및 GeoLab 소프트웨어 입력데이터 작성 매크로를 적용해 주면 중복데이터를 검색하여 삭제한 후, MatLab 소프트웨어 및 GeoLab 소프트웨어 입력데이터 포맷인 문서파일(ASCII txt 파일)을 만들어 준다. GeoConv의 기본 화면은 [그림 4-10]과 같고, GeoConv로 작성한 수준망 조정(MatLab 소프트웨어) 입력데이터 파일(1등 16환)은 <표 4-5>와 같다. 그런데 GeoConv 소프트웨어는 한 방향으로의 중복데이터만을 삭제하여 주기 때문에 양방향으로의 중복데이터를 삭제하여 주기 위하여 GeoConv2 소프트웨어를 다시 개발하였다. [그림 5-11]에서 보는 것과 같이 GeoConv2 소프트웨어는 Visual Basic Application(VBA)으로 개발하여 환폐합차점검부 엑셀파일에서 개발도구를 바로 사용할 수 있다.

환폐합차점검부 Excel파일에서 [그림 5-11]의 GeoConv2 VBA를 순차적으로 실행하면, Output파일이 먼저 만들어지고, 그 다음에 Matlab_ortho, Matlab_normotho, Geolab_ortho, Geolab_normotho 파일이 만들어진다. 그러면 이렇게 만들어진 4개의 엑셀 Sheet파일을 txt파일로 저장하여 망조정 입력데이터로 사용하게 된다. Matlab_ortho와 Matlab_normotho는 MatLab조정용 정표고와 정규정표고 입력파일을 각각 의미하며, Geolab_ortho와 Geolab_normotho는 GeoLab 조정용 정표고와 정규정표고 입력파일을 의미한다. [그림 5-12]는 GeoConv2 VBA로 생성한 정표고조정 GeoLab 입력파일 Sheet를 보여주고 있으며, [그림 5-13]은 GeoConv2 VBA로 생성한 정표고조정 MatLab 입력파일 Sheet를 보여주고 있다.



[그림 5-11] GeoConv2 Visual Basic Application의 실행

	A	B	C	D	E	F	G
257	LI150019	U양산14	10-06-01	-31,10363	1,872	17'통합(울산)	-
258	LI150020	15-00-12-04	15-00-12-05	83,78669	3,0783	08'수준(청송)	-
259	LI150020	15-00-12-05	15-00-12-06	-22,92564	1,9869	08'수준(청송)	-
260	LI150020	15-00-12-06	15-00-12-07	-58,38162	1,8829	08'수준(청송)	-
261	LI150020	15-00-12-07	15-00-12-08	-60,00945	2,2881	08'수준(청송)	-
262	LI150020	15-00-12-08	15-00-07-15	-20,60641	1,5885	08'수준(청송)	-
263	LI150020	15-00-07-15	15-00-07-16	8,7263	2,1248	08'수준(청송)	-
264	LI150020	15-00-07-16	15-00-07-17	24,18209	1,21	03'수준(동곡)	-
265	LI150020	15-00-07-17	15-00-07-18	-29,76254	2,733	03'수준(동곡)	-
266	LI150021	15-00-07-18	U양산22	0,9626	0,81	17'통합(울산)	-
267	LI150021	U양산22	U방어진15	-0,88913	3,936	17'통합(울산)	-
268	LI150021	U방어진15	15-00-07-15	-3,21551	4,086	17'통합(울산)	-
269	LI150022	09-02-00	U부산12	-0,56739	1,185	17'통합(울산)	-
270	LI150022	U부산12	15-00-07-01	27,09243	1,367	17'통합(울산)	-
271	LI150022	15-00-07-01	U0999	-24,77647	2,50863	21'수준(부산)	-
272	LI150022	U0999	15-00-07-03	13,61869	2,807	19'연구(2)(부산)	-
273	LI150022	15-00-07-03	15-00-07-04	0,37559	2,44	13'이전	-
274	LI150022	15-00-07-04	15-00-07-05	-15,20289	1,548	13'이전	-
275	LI150022	U0998	15-00-07-05	-1,46878	1,994985	21'수준(부산)	-
276	LI150022	U0998	U부산07	-3,56106	3,343	17'통합(울산)	-
277	LI150022	U부산07	U부산04	6,80498	4,648	17'통합(울산)	-
278	LI150022	U부산04	U부산03	53,06555	3,018	17'통합(울산)	-
279	LI150022	U부산03	15-00-12-06	80,95763	5,575	17'통합(울산)	-
280	LI150022	10-04-00	10-03-01	-22,73111	1,377	06'수준(부산)	-
281	LI150022	10-03-01	U양산25	65,71377	1,164	17'통합(울산)	-
282	LI150022	U양산25	10-03-00	-83,12453	1,742	17'통합(울산)	-
283	LI150022	10-03-00	10-02-01	5,91588	2,515355	21'수준(부산)	-
284	LI150022	10-02-01	U0996	14,74952	1,396005	21'수준(부산)	-
285	LI150022	U0996	10-02-00	-43,47236	2,676	19'연구(2)(부산)	-
286	LI150022	10-02-00	U부산05	-1,80991	1,99	17'통합(울산)	-
287	LI150022	U부산05	10-01-01	-2,13074	0,146	17'통합(울산)	-
288	LI150022	10-01-01	U0997	4,91775	2,892	19'연구(2)(부산)	-
289	LI150022	U0997	10-00-00	24,45771	1,86	19'연구(2)(부산)	-
290	LI150022	10-00-00	09-02-01	-31,12786	2,908625	21'수준(부산)	-
291	LI150022	09-02-01	09-02-00	-0,86999	1,71187	21'수준(부산)	-
292	LI150023	15-00-07-05	U부산16	8,23245	2,941785	15'이전	-
293	LI150023	U부산16	U부산09	53,45431	1,992	17'통합(울산)	-
294	LI150023	U부산09	15-00-07-08	-15,8162	2,009	17'통합(울산)	-
295	LI150023	15-00-07-08	15-00-07-10	-44,28736	6,5196805	19'연구(3)부산	-
296	LI150023	15-00-07-10	U부산08	1,17175	0,333718	19'연구(3)부산	-
297	LI150023	U부산08	15-00-07-11	50,17682	2,249	17'통합(울산)	-
298	LI150023	15-00-07-11	15-00-07-13	-39,03507	3,328	21'수준(부산)	-
299	LI150023	15-00-07-13	U0921	5,79632	0,897	19'연구(2)(부산)	-
300	LI150023	U0921	15-00-12-08	0,52132	0,192	19'연구(2)(부산)	-
301							

[그림 5-12] GeoConv2 VBA로 생성한 정표고조정 MatLab 입력파일

정표고 조정을 위하여 이와 같이 작성한 1등환별 수직기준망 조정 입력데이터 구성 통계

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
109	OHDF	hdf	U울산07	15-03-08-	-0.71202	0.02	55m				
110	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	0.60042	0.02	2724m				
111	OHDF	hdf	15-03-08-U울산08		84.78765	0.02	4398m				
112	OHDF	hdf	U울산08	U울산09	378.8601	0.02	7683m				
113	OHDF	hdf	U울산09	10-18-00	-434.985	0.02	5864m				
114	OHDF	hdf	15-03-08-U울산17		34.90931	0.02	1450m				
115	OHDF	hdf	U울산17	10-16-00	-58.7785	0.02	2454m				
116	OHDF	hdf	10-16-00	10-16-01	7.03773	0.02	2033m				
117	OHDF	hdf	10-16-01	10-17-00	10.32878	0.02	2208m				
118	OHDF	hdf	10-17-00	U0838	1.71661	0.02	1785.855m				
119	OHDF	hdf	U0838	10-17-01	3.8877	0.02	923m				
120	OHDF	hdf	10-17-01	10-18-00	2.9219	0.02	1717m				
121	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	22.17856	0.02	971m				
122	OHDF	hdf	15-03-08-U울산14		-8.66296	0.02	1452m				
123	OHDF	hdf	U울산14	15-03-08-	-10.5662	0.02	948m				
124	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	-0.79793	0.02	2096m				
125	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	-2.72786	0.02	1303m				
126	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	16.36592	0.02	2541m				
127	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	45.10612	0.02	1470m				
128	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	129.6191	0.02	2407m				
129	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	-66.5889	0.02	1541m				
130	OHDF	hdf	15-03-08-	15-03-08-	-97.216	0.02	1893m				
131	OHDF	hdf	15-03-08-U0839		-2.18698	0.02	703.075m				
132	OHDF	hdf	U0839	15-00-19-	0.68518	0.02	333m				
133	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	7.30414	0.02	2898m				
134	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	-1.11744	0.02	1863m				
135	OHDF	hdf	15-00-19-U울산16		-5.17684	0.02	918m				
136	OHDF	hdf	U울산16	15-00-19-	2.61816	0.02	242m				
137	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	-2.66588	0.02	1834m				
138	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	8.14018	0.02	1098m				
139	OHDF	hdf	15-00-19-U울산22		-38.3528	0.02	2887.355m				
140	OHDF	hdf	U울산22	15-00-19-	-8.77276	0.02	2413.415m				
141	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	67.81927	0.02	1512m				
142	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	-90.2451	0.02	1247m				
143	OHDF	hdf	15-00-19-U0841		4.37697	0.02	2500.215m				
144	OHDF	hdf	U0841	15-00-19-	-3.86514	0.02	1134.335m				
145	OHDF	hdf	15-00-19-U울산30		32.47821	0.02	2190m				
146	OHDF	hdf	U울산30	15-00-19-	-13.2266	0.02	993m				
147	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	-21.8182	0.02	2198m				
148	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	-26.0441	0.02	1142.255m				
149	OHDF	hdf	15-00-19-U울산29		2.91898	0.02	3631.295m				
150	OHDF	hdf	U울산29	15-00-19-	-4.36583	0.02	1325.69m				
151	OHDF	hdf	15-00-19-	15-00-19-	-0.32859	0.02	1731m				
152	OHDF	hdf	15-00-19-U울산23		5.66672	0.02	496m				
153	OHDF	hdf	U울산23	15-00-19-	-3.65771	0.02	1730m				

[그림 5-13] GeoConv2 VBA로 생성한 정표고조정 GeoLab 입력파일

결과를 <표 5-7>에 정리하였으며, 이는 <표 4-7> 정규정표고 1등환별 수직기준망 조정 입력자료 구성과 같다.

<표 5-7> 정표고 1등 환별 수직기준망 조정 입력데이터 구성은 육지부와 14환 및 16환의 섬 지역으로 구분하여 구성되었다. 육지부에서는 13,679개의 환과 318개의 개방환으로 총 13,987개의 환으로 구성되었으며, 기준점의 수는 12,252개와 318개의 개방환 기준점으로 총 12,570개의 기준점으로 구성되어 있다. 섬지역에서는 354개의 환과 19개의 개방환으로 총 373개의 환으로 구성되었으며, 기준점의 수는 308개와 18개의 개방환 기준점으로 총 326개의 기준점으로 구성되어 있다. 따라서 육지부와 섬지역을 모두 합한 환의 수는 총 13,126개이고 기준점의 총수는 11,638점이며 2등환의 총수는 1,489개이다.

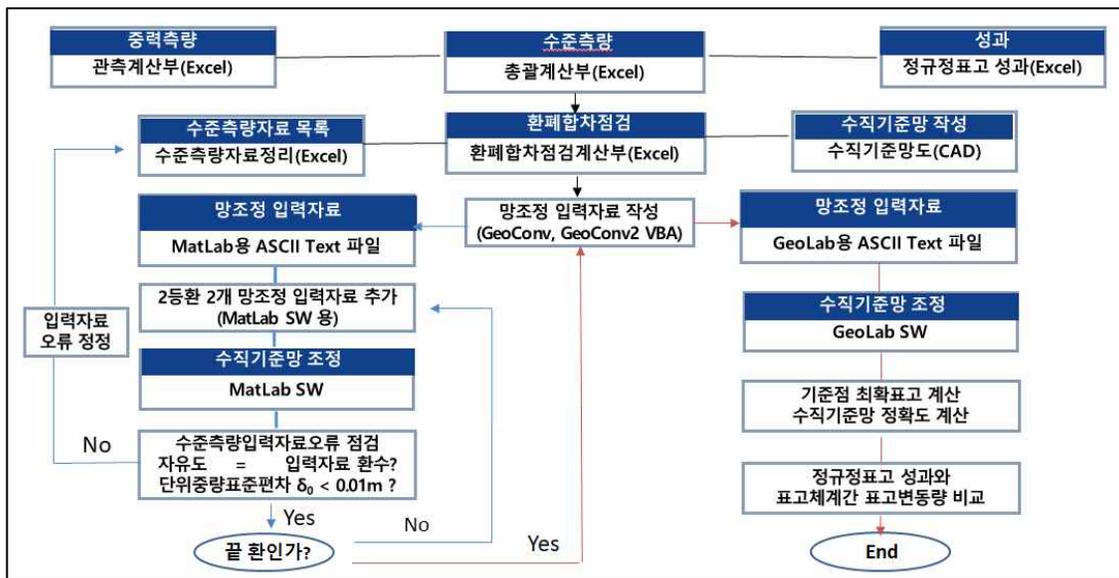
<표 5-7> 정표고 1등 환별 수직기준망 조정 입력데이터 구성

구분	1등환 번호	구간 수					기준점 수			2등환 수
		망 구성 요소		합계	측량 등급		망 구성 요소		합계	
		환	개방/연결*		1등	2등	환구성	개방/연결*		
육지	11	500	10	510	389	121	441	10	451	60
	12AB	819	16	835	680	155	704	16	720	117
	8	678	15	693	520	173	604	15	619	75
	6	690	13	703	554	149	617	13	630	74
	10	640	7	647	506	148	581	7	588	60
	5	1373	27	1400	1063	337	1199	27	1226	175
	2	1398	14	1412	1047	365	1264	14	1278	135
	7	1156	65	1221	878	343	1059	65	1124	98
	9	761	17	778	542	236	698	17	715	64
	20AB	804	25	829	574	255	740	25	765	66
	1	1217	24	1241	935	306	1079	24	1103	139
	4	888	10	898	650	248	794	10	804	95
	3	735	6	741	578	163	667	6	673	69
	13AB	592	31	623	468	155	521	31	552	73
	14ABCD	766	34	790	540	250	675	34	709	85
	15ABC	662	4	666	484	182	609	4	613	56
	소계	13,679	318	13,987	10,408	3,586	12,252	318	12,570	1,441
	순 소계**	12,435	318	12,753	9,166	3,557	10,977	335	11,312	
	섬 지역	14환 청산도	3	1	4	4	0	4	0	4
보길도		0	4	4	4	0	0	4	4	0
조도		0	3	3	3	0	0	4	4	0
거문도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
초도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
여서		0	1	1	1	0	0	1	1	0
16환 제주도		351	2	353	236	117	304	2	306	47
우도		0	3	3	3	0	0	2	2	0
가파도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
마라도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
추자도		0	1	1	1	0	0	1	1	0
소계		354	19	373	256	117	308	18	326	48
순합계*	12,789	337	13,126	9,452	3,677	11,285	353	11,638	1,489	

* 개방노선: 수준노선 시·종점 중 하나가 환에 연결되지 않는 노선
 연결노선: 두 환이 2점 이상의 기준점을 공유하지 않을 때 두 환을 연결한 수준노선
 ** 수준환 조정자료에서 중복자료가 소거된 자료의 개수

4) 수직기준망 예비조정

우리나라 ‘수준측량 작업규정’의 허용왕복차 규정을 인용하여 관측 높이차의 표준편차 (σ)를 1등 수준측량구간은 $2.5\text{mm} \sqrt{S(\text{km})}$, 2등 수준측량구간은 $5.0\text{mm} \sqrt{S(\text{km})}$ 로 하고 있으며, 따라서 본 연구에서 중량(weight)은 1등 수준측량 관측값의 중량(weight)은 $1 / \text{구간거리}(\text{km})$, 2등 수준측량 관측값의 중량은 $1 / (4 \times \text{구간거리}(\text{km}))$ 로 부여하였다. 본 연구에서는 1등 환별로 수직기준망을 조정하여 입력데이터의 오류와 과대오차를 소거하고, 우리나라 17개 1등환으로 구성된 수직기준망을 통합한 통합 수직기준망 조정을 통하여 국가기준점의 정표고 최확표고를 산출하는 전략을 따랐으며, 수직기준망조정 과정은 [그림 5-14]와 같다. [그림 5-14]는 [그림 4-21]과 유사하나 그림상단 좌측에 있는 것처럼 중력측량의 관측계산부 데이터베이스를 사용하여 정사보정량을 계산한다는 점과 조정된 정표고 성과를 앞서 계산된 정규정표고 조정성과와 비교한다는 점에서 차이를 나타내고 있다.



[그림 5-14] 정표고기반 수준망조정 및 조정성과 계산 전략

또한 전역검정은 국소검정(local test)이 필요한가를 판별하는 선행과정으로 사후기준분산 $\overline{\sigma_0}$ 와 사전기준분산 σ_0 를 비교하기 위한 통계량인 식 (4.35)에 따라 실시되며, 본 연구에서는 귀무가설 H_0 가 기각될 때의 원인은 관측값에 실수나 착오 등이 있는 경우로 한정하여 수직기준망 조정에 이용된 수준측량 관측값에 실수나 착오 등이 있는지를 조사하여 이를 수정하였다. 그 과정은 다음과 같다.

- 1등 환별로 망조정하였으며, 고정점은 환의 좌상단 수준원점에 가까운 1등 수준점 1점

을 선정하였다.

- 육지 내륙에 위치한 수준 환은 모두 인접 환과 1점 이상의 기준점을 공유하고 있으나, 서남 해안 연속도서에 위치하는 수준환은 인접 환에 공유하는 기준점이 없는 노선으로 연결된다. 단, 육지 환과 연결되지 않은 독립된 수준환(예, 제주도 및 청산도)은 그 섬의 조위기준점을 고정점으로 하여 별도로 망조정하였다.
- 수준망조정 예비조정은 2011년 국토지리정보원 통합측지망구축 연구사업에서 개발한 수준망조정 전용 MatLab 프로그램인 'LSAdj4LN.m'을 개선(오류 수정과 기능 추가)하여 사용하였다. 국토지리정보원 수직기준망 조정 전용 프로그램은 최소제곱법에 구간(시점 ~ 종점) 수준측량 높이차를 주어진 중량을 적용하여 조정하고, 총 수준측량 구간 수, 조정 기준점 수, 자유도, 사후 기준 표준편차($\hat{\sigma}_0$), 기준점의 조정표고와 표준오차, 표준화 조정잔차를 계산하여 텍스트 파일로 저장한다.
- 예비조정에서는 관측값의 중량(weight)은 1등 또는 2등 수준측량 구별없이 1 / 구간거리(km)로 부여하였다.
- 망조정 자료의 1차적인 전역검정은 입력자료의 2등환 수와 망조정 결과의 자유도(f)가 일치하는지 검사하였다. 통계적인 전역검정(global test)은 식 (4.35)에 제시된 $\chi^2_{(\alpha, f)}$ 검정에 근거하며, 유의수준 α 는 5%를 적용하였다. 즉, 식 (4.35)로부터 $f \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 > \chi^2_{(\alpha, f)}$ 이면 수준망에 해소되지 않은 과대오차가 포함되어 있다고 판단하여 수준측량계산부와 환폐합차점검부를 근거로 망조정 입력자료의 시·종점 명칭, 높이차, 중량(또는 구간거리)에 오류가 있는지 검토하였다. 이때 2019년 연구사업의 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$) $\pm 0.0033\text{m}$ 값을 본 연구의 사전기준표준편차(σ_0)로 이용하였다. 1등환의 첫 2등환부터 망조정 전역검정이 통과되면 조정된 2등환에 이에 접한 2등환 1개씩 차례로 추가하여 조정(전역검정)을 반복하여 모든 2등환을 전역검정 하였다.

수직기준망 예비조정 결과는 <표 5-8> 정표고 1등환별 수직기준망 예비조정 결과와 같다. <표 5-8>은 정규정표고 조정을 위한 예비조정 결과인 <표 4-10> 정규정표고 1등 환별 수직기준망 예비조정 결과와 같다. 이는 동일한 1등환별 수준측량환폐합차점검계산부에 기초하고 있고 정규정표고와 정표고의 분포에 큰 차이가 없기 때문이다. 육지부 1등환 누적조정 결과에서 자유도는 1,441, 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 최대값이 0.0024m를 나타내고 있다.

<표 5-8> 정표고 1등 환별 수직기준망 예비조정 결과

구분	1등 환 번호	구간 수	기준점 수	2등 환 수	1등 환별 조정*					1등 환 누적 조정**		
					통합 환**	자유도 f	$\hat{\sigma}_0(m)$	$\frac{f\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}$	χ_f^2	자유도 f	$\hat{\sigma}_0(m)$	χ_f^2
육지 환	11	510	451	60	0	60	0.0017	16	79	60	0.0017	
	12A	824	710	116	1	115	0.0023	56	141	175	0.0022	
	8	693	619	75	0	75	0.0022	33	96	250	0.0022	
	6	703	630	74	0	74	0.0025	42	95	324	0.0023	
	10	647	588	60	0	60	0.0018	18	79	384	0.0022	
	12B	11	10	2	0	2	0.0021	1	6	386	0.0022	
	5	1400	1226	175	0	175	0.0020	63	203	561	0.0022	
	2	1412	1278	135	0	135	0.0025	77	163	696	0.0023	
	7	1221	1124	98	0	98	0.0017	26	122	794	0.0022	
	9	778	715	64	0	64	0.0018	19	84	858	0.0022	
	20AB	829	765	66	0	66	0.0016	16	86	924	0.0022	
	1	1241	1103	139	0	139	0.0031	123	167	1,063	0.0023	
	4	898	804	96	1	95	0.0025	55	119	1,158	0.0023	
	3	741	673	69	0	69	0.0022	31	89	1,227	0.0023	
	13AB	623	552	73	0	73	0.0026	45	94	1,030	0.0024	
	14ABCD	790	709	85	0	85	0.0034	90	107	1,385	0.0024	
	15ABC	666	613	56	0	56	0.0033	56	74	1,441	0.0024	1582
	소계	13,987	12,570	1,443	2	1,441						
	순소계***	12,753	11,312									
	섬 지역 독립 환	14환 청산도	14	15	1	0	1	0.0004	0	4		
16환 제주도		359	311	47	0	47	0.0017	12	64			
순 소계		373	326	48	0	48	*					
순 합계	13,126	11,638	1,491	2	1,489	*						

* 망조정 중량 = 1 / 거리(km), 1등과 2등 수준측량 공통적용

** 1등 환별 망조정에서 2등 환에 포함된 과대오차 의심구간을 소거하여 인접 2등 환 2개를 1개로 통합

*** 1등 환 조정자료에 인접 1등 환 8 조정자료를 덧붙이면 두 환의 공통노선 자료가 2번 포함되므로, 공통노선이 한번만 포함되도록 중복을 제외한 자

5) 수직기준망 본 조정 계산

정사보정량에 의한 정표고 기반 수직기준망 조정은 MatLab과 GeoLab 소프트웨어를 이용하여 수행하였다. 측량을 통해 얻어진 측정값의 조정계산에 사용되는 측량 오차들

은 정규분포를 이루며 확률법칙을 따른다고 가정하기 때문에 조정계산과 조정량은 엄격한 이론적 법칙에 따라 이루어져야 한다. 최소제공법은 측량에서 가장 보편적으로 사용되는 조정방법이며 확률법칙에 근거를 두고 있다. 최소제공법의 기본 조건은 동일한 중량으로 측정된 모든 측정값에 대하여 잔차 제곱의 합이 최소가 되어야 한다는 것이다. 최소제공법에 의한 조정이론과 과대오차 검정은 제4장 1. 2020년 이전 및 이후 수준측량 자료통합 수직기준망 조정 나. 최소제공조정과 과대오차 검정에 잘 설명되어 있어 반복 설명하지 않기로 한다. 아울러 망조정 소프트웨어는 제4장 1. 2020년 이전 및 이후 수준측량자료통합 수직기준망 조정 다. 수직기준망 소프트웨어에서 설명한 바와 같이, 국토지리정보원의 MatLab 수준망조정 전용 프로그램인 'LSAdj4LN,m'을 개선한 프로그램을 이용하여 망조정을 수행하였으며 GeoLab 소프트웨어 망조정 성과로 비교하였다. 정표고 기반 수직기준망 조정 및 조정성과 계산 전략은 [그림 5-14]와 같다.

LI030001	03-00-17-04	03-00-17-05	120.825640	2.721	09'수준
LI030001	03-00-17-05	U청도01	213.763930	2.742	17'통합
LI030001	U청도01	03-00-17-06	0.411830	0.143	17'통합
LI030001	03-00-17-06	03-00-17-07	-149.271520	1.812	09'수준
LI030001	03-00-17-07	03-00-17-08	-92.320340	2.358	09'수준
LI030001	03-00-17-08	03-00-17-09	-28.026290	1.236	09'수준
LI030001	03-00-17-09	03-00-17-10	-62.871490	2.709	09'수준
LI030001	03-00-17-10	U대구24	-34.989230	2.192	17'통합
LI030001	U대구24	03-00-17-11	-1.656730	0.340	17'통합
=====	=====	=====	=====	=====	=====
LI030001	U0812	U청도11	164.692100	6.883	17'통합
LI030001	U청도11	U청도10	-102.891070	9.951	17'통합
LI030001	U청도10	03-02-07-09	-9.842330	0.679	17'통합
LI030052	09-01-00	U1000	140.127860	1.355	21'수준
LI030052	09-01-00	09-01-01	3.385470	2.386	06'수준
LI030052	09-01-01	09-02-00	-4.336710	0.925	06'수준
LI030052	09-02-00	09-02-01	0.858490	1.676	06'수준
BMP					
교BM06	55.2127				
EOF					

[그림 5-15] MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 수준망조정 정표고 입력데이터(일부)

Number of Total Lines of Data File : 683						
수준측량 노선 수 : 680						
높이 고정점 수 : 1						
높이 고정점 : 교BM06 55.2127						
미지 표고점 수 : 628						
중량(weight) : [1등 수준측량 : 2등 수준측량 = 1 : 0.5]						
수준망조정 자유도(Degree of Freedom): 52						
사후단위중량표준오차(Posteri Standard Error of Unit Weight)(m) : 0.0027						
=====						
수준점	조정 표고((m)	조정표고	표준오차(m)			
03-00-10-03	37.2949	0.0204				
03-00-10-05	189.4335	0.0208				
03-00-10-06	70.0964	0.0209				
03-00-10-07	53.2022	0.0202				
03-00-10-08	78.6122	0.0206				
03-00-10-10	199.4364	0.0209				
03-00-10-11	391.1479	0.0210				
03-00-10-13	138.0296	0.0209				
03-00-10-14	96.7810	0.0206				
03-00-11-01	8.4049	0.0177				
=====						
수준점 조정표고의 평균표준오차(Standard Error of Unknown Parameters)(m): 0.0189						
		관측	조정	높이차		잔차
노선명	노선거리(km)	높이차(m)	높이차(m)	표준오차(m)	조정잔차(m)	표준오차(m)
LI030001	1.1310	-11.7444	-11.7441	0.0039	0.0003	0.0007
LI030001	2.7800	-12.8896	-12.8888	0.0060	0.0008	0.0017
LI030001	2.6090	26.3286	26.3296	0.0059	0.0010	0.0015
LI030001	2.6270	8.8474	8.8484	0.0059	0.0010	0.0015
LI030001	2.1850	26.9672	26.9680	0.0054	0.0009	0.0012
LI030001	2.5670	19.2921	19.2931	0.0058	0.0010	0.0014
LI030001	0.4790	-0.7447	-0.7445	0.0026	0.0002	0.0003
=====						
LI030052	1.3550	140.1279	140.1282	0.0043	0.0003	0.0008
LI030052	2.3860	3.3855	3.3849	0.0056	-0.0006	0.0014
LI030052	0.9250	-4.3367	-4.3369	0.0036	-0.0002	0.0005
LI030052	1.6760	0.8585	0.8581	0.0048	-0.0004	0.0010
=====						
조정노선높이차의 평균표준오차(m) : 0.0056						
조정잔차의 평균표준오차(m): 0.0020						

[그림 5-16] MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 수준망조정 정표고 출력데이터(일부)

PLO 110 U한림09	n 33 24 31,1	e126 28 27,7	666,21789 m	0
PLO 110 U한림10	n 33 24 41,2	e126 25 43,7	530,23080 m	0
PLO 110 U한림11	n 33 26 40,5	e126 23 27,2	168,53247 m	0
PLO 110 U한림12	n 33 24 24,0	e126 23 11,7	425,30619 m	0
PLO 110 U한림13	n 33 25 29,0	e126 21 05,3	197,35008 m	0
PLO 110 U한림14	n 33 28 58,0	e126 29 45,4	106,67918 m	0
PLO 110 제주GA1	n 33 27 25,6	e126 33 50,4	291,44290 m	0
Measurement standard deviation.....				
SIGM hdf	0,00015			m
Measurement variance scale.....				
VSCA	218,7958			
Measurements.....				
OHDF hdf 제주도원점	16-00-02-01	35,72608	0,002	2376 m
OHDF hdf 16-00-01-01	16-00-02-01	7,51007	0,002	621 m
OHDF hdf U1181	16-00-01-01	18,71213	0,002	1399 m
OHDF hdf 제주도원점	U1181	9,49992	0,002	1410,9 m
OHDF hdf 16-00-02-01	16-00-02-02	21,06578	0,002	1620 m
OHDF hdf 16-00-02-02	U한림 14	38,75526	0,002	1687,5 m
OHDF hdf 16-00-01-02	U한림 14	51,33949	0,002	2858 m
OHDF hdf 16-00-01-01	16-00-01-02	15,99915	0,002	3809, m

[그림 5-17] GeoLab 수준망조정 정표고 입력데이터(일부)

Leveling IOB Jeju_16new2				
GeoLab, V2021.1.1		GRS 80	UNITS: m,DMS Page 0004	
Solution (pass 1):				
NAME	TYPE	OLD VALUE	CORRECTION	UPDATED VALUE
16-00-01-01	EHYT	39,3470	-0,0017	39,3453
16-00-01-02	EHYT	55,3460	-0,0028	55,3432
16-00-01-03	EHYT	8,9320	-0,0016	8,9304
16-00-01-04	EHYT	4,6974	-0,0007	4,6967
16-00-01-05	EHYT	13,1897	0,0001	13,1898
16-00-01-06	EHYT	31,0880	0,0005	31,0885
16-00-01-07	EHYT	34,7772	-0,0002	34,7769
16-00-01-08	EHYT	50,7786	0,0039	50,7825
16-00-01-09	EHYT	18,6060	0,0024	18,6084
16-00-01-10	EHYT	6,4962	0,0016	6,4977
16-00-01-11	EHYT	20,6370	0,0008	20,6378
16-00-01-12	EHYT	14,0726	-0,0007	14,0719
16-00-01-13	EHYT	14,4200	0,0145	14,4345

[그림 5-18] GeoLab 수준망조정 정표고 출력데이터(일부)

[그림 5-15]는 MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 수준망조정 정표고 입력데이터의 일부를 보여주고 있으며, [그림 5-16]은 MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 수준망조정에 의한 정표고 출력데이터(일부)를 보여주고 있다. [그림 5-17]은 GeoLab 수준망조정 정표고 입력데이터의 일부를 보여주고 있으며, [그림 5-18]은 GeoLab 수준망조정 정표고 출력데이터(일부)를 보여주고 있다. 이러한 과정들에 의하여 MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램과 GeoLab 소프트웨어를 이용하여 정표고 수직기준망조정을 수행하였다.

아울러 수직기준망 본조정에 있어서 GeoLab 프로그램을 이용하여 국소검정을 실시하였다. GeloLab 프로그램은 관측자료 조정에서 도출된 관측값의 표준화잔차에 대해 τ -분포에 기반한 방법 과대오차 검정을 채택하고 있다. 식 (4.39)에서 유의수준 $\alpha = 0.1\%$, 검정력 $1-\beta = 20\%$ 일 때 기각역 임계값은 4.1이나, 본 연구에서는 Armer(1979)와 Harvey(1994)가 제안한 3.29를 적용하여 조정결과의 신뢰도를 높였다.

전국 통합 수직기준망 관측자료를 상업용 GeoLab 소프트웨어에 의해 망조정하면 [그림 4-31]에서 보는 바와 같이 표준화잔차(standardized residual)가 큰 순서로 해당 구간을 추출하여 제시한다. 어느 구간의 과대오차라도 주변 관측값 조정에 영향을 미치므로, 원칙적으로 가장 큰 표준화잔차 구간의 오류(시·종점 명칭, 높이차, 중량)를 수정하거나, 수정할 수 없다면 그 구간의 자료를 조정 데이터에서 제외하고 다시 망조정하는 과정을 반복하였다. 본 통합 수직기준망 조정에서 조정 차수별로 검출된 과대오차 구간에 대해 관측값이 기준점 이설 전후 관측값이 포함되었으나 표고보정이 되지 않은 경우와 장기간 시차를 두고 수행된 인접 기준점 구간간 수준측량의 높이차가 큰 경우는 지각변동으로 간주하여 환폐합차점검부에서 그 높이차를 과거 수준측량 높이차에 가감하여 보정하고, 이에 따라 수직기준망 조정 입력데이터를 수정하고, 명확한 원인을 알 수 없는 경우에는 가장 큰 표준화잔차를 보이는 구간 중 1구간을 망조정 자료에서 제외하고 수직기준망을 재조정하는 과정을 반복하였다.

<표 5-9>는 수직기준망조정 국소검정 과정별 표준화 잔차와 과대오차 구간선정 내역으로서, <표 5-9>에서 보는 바와 같이 과대오차 구간으로 판명된 1개 구간을 차례로 망조정 자료에서 제외하면서 망조정을 실시하였다. 1차 조정에서는 최대 표준화 잔차가 -12.43으로 나타나고 있는 구간에서 2006년 수준측량(여수) 자료인 33-02-00에서 33-03-00 구간을 제외하고 2차 조정을 실시하였다. 또 2차 조정 결과 13-05-01에서 13-05-00에 이르는 2006년 수준측량(경주) 구간을 제외하고 3차 망조정을 실시하였다. 이러한 방식으로 과대오차 구간을 제외하고 다시 망조정을 순차적으로 실시한 결과, 제24차 조정에서 자유도는 1,418, 최대 표준화잔차는 3.45로 3.29보다 큰 값을 나타내고 있다. 이는 최대 과대오차 구간인 12-38-00에서 U0434 구간을 제외하지 않고 그대로 두고 망조정을 수행한 결과이다. 이 최대오차 구간을 제외하고 망조정을 수행하였을 때는 최대 표준화잔차가 3.32로 줄어들었으며 다시 또 최대오차구간을 제외하고 망조정을 수행하였을 때에는 3.26으로 줄어드는 것을 알 수 있었다. 그러나 이렇게 될 때 정규정표고와 정표고의 망조정에서 제외되는 구간이 서로 달라서 최종적으로 정규정표고와 정표고를 비교하는 데에 있어서 비교할 수 없는 점들이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이에 연구진에서는 정규정표고와 정표고의 조정자료를 서로 일치시키기로 하는 국토지리정보원의 방침에 따라 정규정표고를 기준으로 동일하게 최대오차 구간을 제외하여 정표고 조정을 수행하였다. 따라서 정표고 조정

에서는 여전히 표준화잔차값이 3.29를 넘는 구간이 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나 정규표고와 정표고의 비교를 위한 목적이 아니고 향후 정밀한 정표고를 얻을 목적으로 정표고만 조정하게 된다면 과대오차 구간을 더 제외시킬 수 있으므로 더 정밀한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 정표고에 있어서 과대오차 구간으로 새롭게 등장하는 구간은 정사보정량 계산결과나 중력값들을 다시 한번 확인해야 할 것이나 이는 차기 연구사항으로 남겨두고자 한다. 제주도 1등 16환 수준망(306점)과 청산도 수준환(3점)에 대해서는 육지 수직기준망과 연결되어 있지 않으므로 해당 섬의 조위관측점(TBM)의 표고를 기준으로 독립 망조정하여 조정표고와 사후기준표준편차($\hat{\sigma}_0$)를 계산하였다.

<표 5-9> 국소검정(local test)에서 도출된 과대오차 구간 및 조치

제외 구간 수 (자유도)	망조정 결과				
	표준화 잔차	시점	종점	사업년도(지구)	차회 망조정에서 제외 구간
1 (1,441)	-12.43	U1039	U1040	20년 통합(사천)	
		33-02-00	33-03-00	06년 수준(여수)	○
		33-03-00	U1040	20년 통합(사천)	
2 (1,440)	-7.06	13-05-00	U왜관07	20년 통합(언양)	
		U왜관07	13-05-01	"	
	-6.27	13-05-01	13-05-00	06년 수준(경주)	○
3 (1,439)	-6.27	U0730	14-03-00-	19년 연구(대구)	○
4 (1,438)	-5.18	20-00-33-04	U0003	19년 연구(간성)	
		U0003	20-00-33-03	"	
		20-00-33-03	20-00-33-02	"	
		20-00-33-02	20-00-33-01	12년 수준(20환)	○
		20-00-33-01	교BM03	"	
5 (1,437)	5.14	02-02-00-00	02-02-04-01	05년 수준(익산)	○
6 (1,436)	-4.52	01-00-35-12	01-00-35-13	09년 수준(목포)	○
7 (1,435)	4.53	교BM03구	03-54-00구	10년 이전	○
		03-54-00구	03-53-00	"	
8 (1,434)	4.53	U0640	U김천23	20년 통합(안동)	
		U김천23	13-11-00	16년 통합(김천)	○
9 (1,433)	-4.22	U0963	U곤양56	20년 수준(사천)	○
10 (1,432)	-3.85	U화북76	04-02-05-17	03년 수준(청송)	
		04-02-05-17	04-02-05-18	"	
		04-02-05-18	U0661	19년 연구(청송)	

		U0661	04-02-05-19	"	
		04-02-05-19	U화북97	03년 수준(청송)	○
		U화북97	04-02-05-21	"	
11 (1,431)	-3.73	01-03-12-15	U전주86	21년 수준(남원)	
		U전주86	01-11-23-27	05년 수준(임실)	○
		01-11-23-27	01-11-23-26	05년 수준(임실)	
12 (1,430)	-3.69	13-05-01	13-06-00	06년 수준(경주)	
		13-06-00	13-06-01	"	○ (환폐합차 초과)
13 (1,429)	-3.65	U0525	U병곡29	19년 통합(병곡)	
		U병곡29	12-31-00	"	
	3.61	U0525	U병곡28	17년 통합(강원)	
		U병곡28	12-30-00	"	
	< 3.0	12-30-00	12-30-01	06년 수준(부산)	○
14 (1,428)	-3.60	15-00-19-15	15-00-19-16	17년 통합(울산)	
		15-00-19-16	U울산23	"	
		U울산23	15-00-19-17	"	
		15-00-19-17	15-00-19-18	10년 수준(신규)	○
		15-00-19-18	10-15-01	21년 수준(부산)	
15 (1,427)	3.51	13-00-17-09	U자은70	21년 수준(영암)	
		U자은70	U자은02	18년 연구	○ (천사대교 구간)
		U자은02	U자은06	17년 통합(제주)	
16 (1,426)	3.43	U1036	U광양15	18년 연구	
	-3.45	03-35-00	U광양15	06년 수준(전주)	○
		03-35-00	U1036	09년 통합(광주)	
17 (1,425)	3.42	22-22-00	U0292	21년 수준(고흥)	
	< 3.0	22-21-00	22-22-00	06년 수준(수원)	○
		22-22-00	06-00-12-14	07년 수준(안성)	
		22-22-00	06-00-17-01	07년 수준(안성)	
		U0292	U수원32	19년 연구(용인)	
18 (1,424)	3.36	12-37-00	12-38-00	10년 통합(삼척)	
		12-38-00	U0434	"	□
		U0434	U울진26	17년 통합(강원)	
		U울진26	U울진16		

	-3.21	06-01-00	06-01-01	13년 이전	○	
		06-01-01	U진주37	19년 연구(진주)		
19 (1,423)	-3.38	10-19-00	10-19-01	06년 수준(부산)	○	
		10-19-00	10-18-01	"		
		10-18-01	U울산10	17년 통합(울산)		
	-3.33	10-19-01	U0836	21년 수준(부산)		
20 (1,422)	< 3.0	08-01-04-11	08-01-04-10	11년 수준(8환)		
	3.39	08-01-04-10	U0225	11년 통합(유지)	○	
	< 3.0	U0225	U수원10	20년 통합(여주)		
21 (1,421)	3.39	12-37-00	12-38-00	10년 통합(삼척)		
		12-38-00	U0434	"	□	
		U0434	U울진26	17년 통합(강원)		
		U울진26	U울진16			
		3.35
		U0190	U구정24	14년 통합(봉평)	○	
22 (1,420)	-3.41	12-37-00	12-38-00	10년 통합(삼척)		
		12-38-00	U0434	"	□	
		U0434	U울진26	17년 통합(강원)		
		U울진26	U울진16			
		
		-3.32	01-12-26-08	01-12-26-09구	05'수준(담양)	
		
		3.29	U담양28	01-12-24-07	16년 통합(순창)	
		01-12-24-07	01-12-24-06	21년 수준(광주)		
		01-12-24-06	01-12-24-05	05년 수준(담양)	○	
		01-12-24-05	01-12-24-04	21년 수준(광주)		
23 (1,419)	-3.42	12-37-00	12-38-00	10년 통합(삼척)		
		12-38-00	U0434	"	□	
		U0434	U울진26	17년 통합(강원)		
		U울진26	U울진16			
		
	3.29	05-05-00-00	U보은08	15년 통합 보은		
		U보은08	05-04-06-15	"		
		05-04-06-15	05-04-06-14	03년 수준(관기)	○	
24 (1,418)	-3.45	12-37-00	12-38-00	10년 통합(삼척)		
		12-38-00	U0434	"	□	
		U0434	U울진26	17년 통합(강원)		
		U울진26	U울진16			
		
		3.24	05-12-24-05	U안동65	16년 통합(속리)	
		U안동65	U안동77	"	○ (구간 높이차 크고 장거리)	

		U안동77	05-12-24-08	"	
	< 3.0	05-12-24-08	05-12-24-07	"	

□ 최대과대오차구간이나 정규정표고와 조정자료 일치시키기 위해 조정자료에 포함된 구간

마. 정표고기반 수직기준망조정 수행 결과

정표고기반 수직기준망조정은 [그림 5-9]의 정표고기반 망조정 수행절차와 [그림 5-14] 정표고기반 수준망조정 및 조정성과 계산 전략에 따라 각 환별로 예비조정을 수행하였으며, 자유도와 사후단위중량표준오차를 점검한 후, 다시 전국 통합 망조정을 수행하였다. 전국적으로 통합 수직기준망조정을 수행한 결과(MatLab)는 <표 5-10> 정표고기반 전국 수직기준망조정 수행결과에서 보여주고 있다. <표 5-10>에 따르면 전체 환폐합차점검부의 환수는 육지부 1,418개, 독립부 48개로서 미지표고점수는 11,312점, 수준측량 노선수는 12,730개를 포함하고 있다. 망조정 계산 결과는 자유도는 육지부 1,418, 독립부 48로 환구성수와 일치하고 있으며, 사후단위중량표준오차는 0.0024m, 조정표고의 평균표준오차는 0.0171m, 조정잔차의 평균표준오차는 0.0021m로서 양호한 결과를 나타내고 있다.

<표 5-10> 정표고기반 전국 수직기준망조정 수행결과

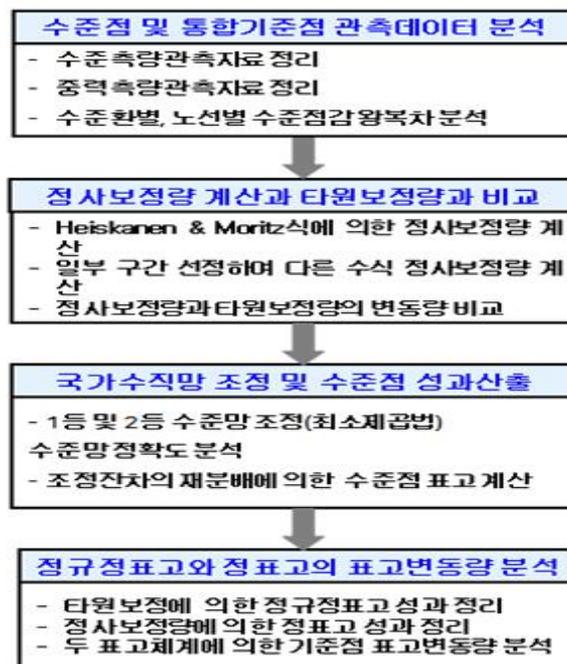
번호	구 분	결과	비고
1	환구성수	육지부 1,418 (독립부 48)	독립부는 제주도와 청산도임
2	미지 표고점수	11,638 (독립부 326점)	경계부 중복 제외
3	수준측량 노선수	12,730	
4	수준망조정 자유도	육지부 1,418 (독립부 48)	
5	사후단위중량 표준오차(m)	0.0024	
6	조정표고의 평균표준오차(m)	0.0171	
7	조정잔차의 평균표준오차(m)	0.0021	

정표고 기반 수직망조정의 절차와 방법은 제4장에서 설명한 정규정표고 기반 수직망조정의 절차와 방법 그리고 사용 소프트웨어가 동일하게 수행되었으며, 단지 입력 데이터만 정규정표고 입력데이터 대신에 정표고 입력데이터가 사용되었다.

3. 정표고와 정규정표고의 높이체계간 기준점 표고 변동량 분석

가. 높이체계간 기준점 표고변동량 분석

정표고와 정규정표고 높이체계간 표고변동량 분석은 [그림 5-19]과 같은 절차에 따라 수행되었다. 먼저 1단계로 수준점 및 통합기준점 관측데이터 분석을 선행 연구 단계에서 수행한다. 이 단계에서는 수준측량 관측자료 분석, 중력측량 관측자료 분석을 실시하고 환폐합차점검부를 작성하여 수준환별, 노선별 수준측량 점검, 왕복차 및 폐합차 분석을 수행한다. 2단계로 통합 망조정에 사용된 모든 수준점 및 통합기준점의 타원보정량과 정사보정량을 비교한다. 3단계로 국가수직망 조정 및 수준점 성과를 산출한다. 최소제곱법에 의하여 1등환별 수준망 조정을 실시하고, 조정 잔차의 재분배에 의한 수준점 표고를 계산한다. 4단계로 정표고와 정규정표고의 표고변동량을 분석한다. 전국 통합 망조정에 의하여 계산된 정표고 성과와 전국 통합 망조정에 의하여 계산된 정규정표고 성과를 비교하여 두 표고 체계간 표고변동량을 분석하였으며 그 결과는 <표 5-11> 및 <표 5-12>와 같다. <표 5-11>은 MatLab 소프트웨어를 사용하여 전국망조정을 실시한 결과로 얻은 정표고와 정규정표고를 비교한 결과의 일부(100점 예시)를 보여주고 있다.



[그림 5-19] 정표고와 정규정표고의 표고체계간 표고변동량 분석 프로세스

<표 5-11> MatLab 전국망조정 정표고와 정규정표고의 비교 (100점 예시)

연번	점명	정표고 (MatLab)	정규정표고 (MatLab)	차이 (정표고 -정규정표고)
1	01-00-04-01	4.1517	4.1554	0.0037
2	01-00-04-03	9.2558	9.2595	0.0037
3	01-00-04-05구	15.9494	15.9530	0.0036
4	01-00-04-06	11.0340	11.0375	0.0035
5	01-00-04-09구	16.6279	16.6311	0.0032
6	01-00-04-10	26.5606	26.5635	0.0029
7	01-00-04-11	19.5006	19.5033	0.0027
8	01-00-04-15구	33.4461	33.4485	0.0024
9	01-00-04-17	26.1476	26.1501	0.0025
10	01-00-04-18	28.4752	28.4779	0.0027
11	01-00-04-19	31.7626	31.7653	0.0027
12	01-00-04-21	47.1188	47.1212	0.0024
13	01-00-04-22	73.5108	73.5124	0.0016
14	01-00-04-23	91.0128	91.0139	0.0011
15	01-00-04-24	92.9173	92.9181	0.0008
16	01-00-04-25	101.6128	101.6131	0.0003
17	01-00-04-26	120.2828	120.2825	-0.0003
18	01-00-04-27	188.8261	188.8238	-0.0023
19	01-00-04-28	335.0910	335.0835	-0.0075
20	01-00-04-29	272.0841	272.0781	-0.0060
21	01-00-04-30	137.3213	137.3183	-0.0030
22	01-00-04-31	109.3857	109.3832	-0.0025
23	01-00-04-32	98.2560	98.2534	-0.0026
24	01-00-27-01	15.3453	15.3478	0.0025
25	01-00-27-02	8.9194	8.9219	0.0025
26	01-00-27-03	12.6124	12.6148	0.0024
27	01-00-27-04	16.8448	16.8473	0.0025
28	01-00-27-05	37.9619	37.9644	0.0025
29	01-00-27-06	35.7127	35.7152	0.0025
30	01-00-27-07	30.7595	30.7620	0.0025
31	01-00-27-08	68.2646	68.2668	0.0022
32	01-00-27-10	74.8524	74.8545	0.0021
33	01-00-27-11	72.6599	72.6620	0.0021
34	01-00-27-12	98.6071	98.6090	0.0019
35	01-00-27-13	162.7530	162.7540	0.0010
36	01-00-27-15	72.9367	72.9387	0.0020
37	01-00-27-16	74.9992	75.0013	0.0021
38	01-00-27-17	108.0022	108.0039	0.0017
39	01-00-27-18	74.8570	74.8591	0.0021
40	01-00-27-19	90.8563	90.8584	0.0021
41	01-00-27-20	87.6697	87.6717	0.0020
42	01-00-27-21	65.9468	65.9490	0.0022

43	01-00-27-22	63.1205	63.1228	0.0023
44	01-00-28-01	47.5725	47.5746	0.0021
45	01-00-28-02	45.9603	45.9622	0.0019
46	01-00-28-03	51.6695	51.6712	0.0017
47	01-00-28-04	56.6764	56.6779	0.0015
48	01-00-28-05	66.5088	66.5102	0.0014
49	01-00-28-06	79.5490	79.5503	0.0013
50	01-00-28-07	123.2815	123.2824	0.0009
51	01-00-28-07구	120.0570	120.0578	0.0008
52	01-00-28-08	99.8479	99.8489	0.0010
53	01-00-28-10	112.6555	112.6564	0.0009
54	01-00-28-11	127.9115	127.9123	0.0008
55	01-00-28-13	252.4493	252.4476	-0.0017
56	01-00-28-14	250.7358	250.7342	-0.0016
57	01-00-28-15	249.4159	249.4143	-0.0016
58	01-00-28-16	267.8930	267.8911	-0.0019
59	01-00-28-17	252.7192	252.7182	-0.0010
60	01-00-28-19	187.5534	187.5539	0.0005
61	01-00-28-20	223.7148	223.7145	-0.0003
62	01-00-28-21	207.2658	207.2656	-0.0002
63	01-00-28-23	128.9634	128.9649	0.0015
64	01-00-28-23구	131.2262	131.2277	0.0015
65	01-00-28-24	129.4339	129.4355	0.0016
66	01-00-28-25	121.8823	121.8840	0.0017
67	01-00-28-26	117.5228	117.5247	0.0019
68	01-00-28-27	120.3872	120.3889	0.0017
69	01-00-30-01	405.6402	405.6306	-0.0096
70	01-00-30-02	378.3269	378.3198	-0.0071
71	01-00-30-03	326.6119	326.6106	-0.0013
72	01-00-30-04	359.5481	359.5451	-0.0030
73	01-00-30-05	407.7508	407.7438	-0.0070
74	01-00-30-06	449.5181	449.5091	-0.0090
75	01-00-30-08	507.2971	507.2853	-0.0118
76	01-00-30-09	560.1319	560.1170	-0.0149
77	01-00-30-10	735.8254	735.7985	-0.0269
78	01-00-30-11	889.5133	889.4737	-0.0396
79	01-00-30-13구	945.9015	945.8237	-0.0778
80	01-00-30-14	707.8047	707.7759	-0.0288
81	01-00-30-15	558.0650	558.0490	-0.0160
82	01-00-30-16	392.0499	392.0433	-0.0066
83	01-00-30-17	195.8826	195.8824	-0.0002
84	01-00-30-18	120.9725	120.9741	0.0016
85	01-00-30-19	67.9403	67.9427	0.0024
86	01-00-30-20	38.9560	38.9586	0.0026
87	01-00-31-01	88.9479	88.9517	0.0038
88	01-00-31-02	105.5602	105.5640	0.0038

89	01-00-31-04	107.3610	107.3649	0.0039
90	01-00-31-05	142.2718	142.2751	0.0033
91	01-00-31-06	153.6501	153.6533	0.0032
92	01-00-31-07	166.0749	166.0779	0.0030
93	01-00-31-08	191.7920	191.7947	0.0027
94	01-00-31-10	569.4363	569.4222	-0.0141
95	01-00-31-11	398.2106	398.2046	-0.0060
96	01-00-31-12	295.8259	295.8247	-0.0012
97	01-00-31-14	116.3830	116.3852	0.0022
98	01-00-31-15	103.2872	103.2901	0.0029
99	01-00-32-01	33.4857	33.4879	0.0022
100	01-00-32-02	64.8027	64.8046	0.0019

<표 5-12> MatLab 전국망조정에 의한 정표고와 정규정표고의 표고체계간 변동 통계표 (단위: m)

구분	정표고 (MatLab)	정규정표고 (MatLab)	차이 (정표고 - 정규정표고)
최대값	1325.2648	1325.1715	0.0933
최소값	0.5898	0.5921	-0.0178
평균	144.2204	144.0646	0.0007
RMSE			0.0075

전국 수직기준점에 대한 정표고와 정규정표고의 차이는 전국에 걸쳐 계산되었으며 <표 5-12>에서는 MatLab 전국망조정에 의한 정표고와 정규정표고의 표고체계간 변동량 통계값을 보여주고 있다.

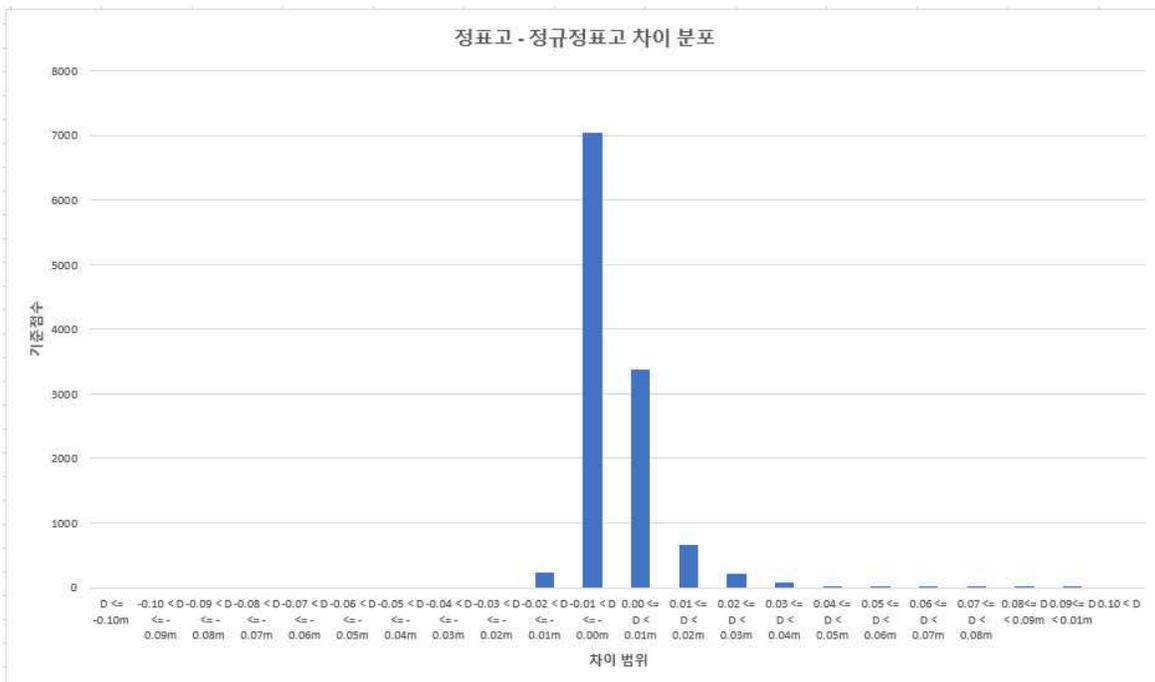
<표 5-12>에서 보는 것처럼 MatLab 'LSAdj4LevelN.m' 프로그램에 의한 전국망조정 결과 우리나라 수직기준점의 정표고는 최소 0.5898m(U영암21)에서 최대 1,325.2648m(U태백14), 평균 144.2204m의 분포를 보이고 있으며, 정규정표고와 정표고의 차이는 최소 -0.0178m에서 최대 0.0933m, 평균 0.0007m를 보여주고 있다. 따라서 정규정표고에 비하여 정표고는 전반적으로 살짝 높아지는 경향을 보이고 있으며, 차이의 RMSE값은 0.0075m로 GeoLab 조정결과와 동일하게 나타났다.

<표 5-13> 정표고와 정규정표고의 차이 분포

(단위 : m)

차이 구간 (m)	D<-0.1	-0.1<D<-0.09	-0.09<D<-0.08	-0.08<D<-0.07	-0.07<D<-0.06	-0.06<D<-0.05	-0.05<D<-0.04	-0.04<D<-0.03	-0.03<D<-0.02	-0.02<D<-0.01	-0.01<D<0.00	소계	
수량	0	0	0	0	0	0	0	0	0	237	7040	7277	
비율 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.0	60.5		
구간 수량											237	7040	7277
구간 수량											7277		7277

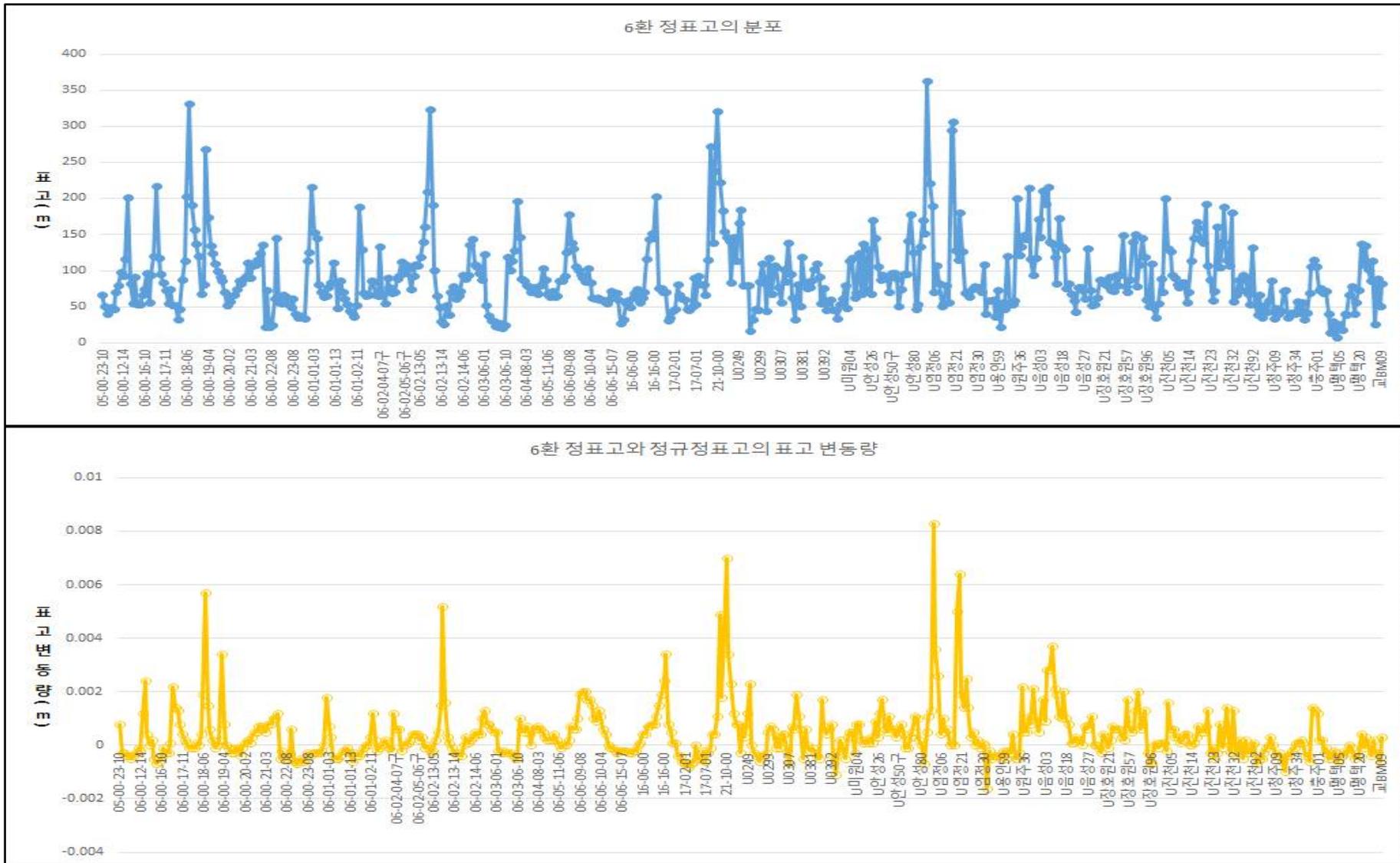
차이 구간 (m)	0.00<D<0.01	0.01<D<0.02	0.02<D<0.03	0.03<D<0.04	0.04<D<0.05	0.05<D<0.06	0.06<D<0.07	0.07<D<0.08	0.08<D<0.09	0.09<D<0.10	0.10<D	소계	합계
수량	3382	656	207	70	23	7	8	4	2	1	0	4360	11,637
비율 (%)	29.1	5.6	1.8	0.06	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0	39.5	100.0
구간 수량	3382										978	4360	11637
구간 수량											4360	4360	11637



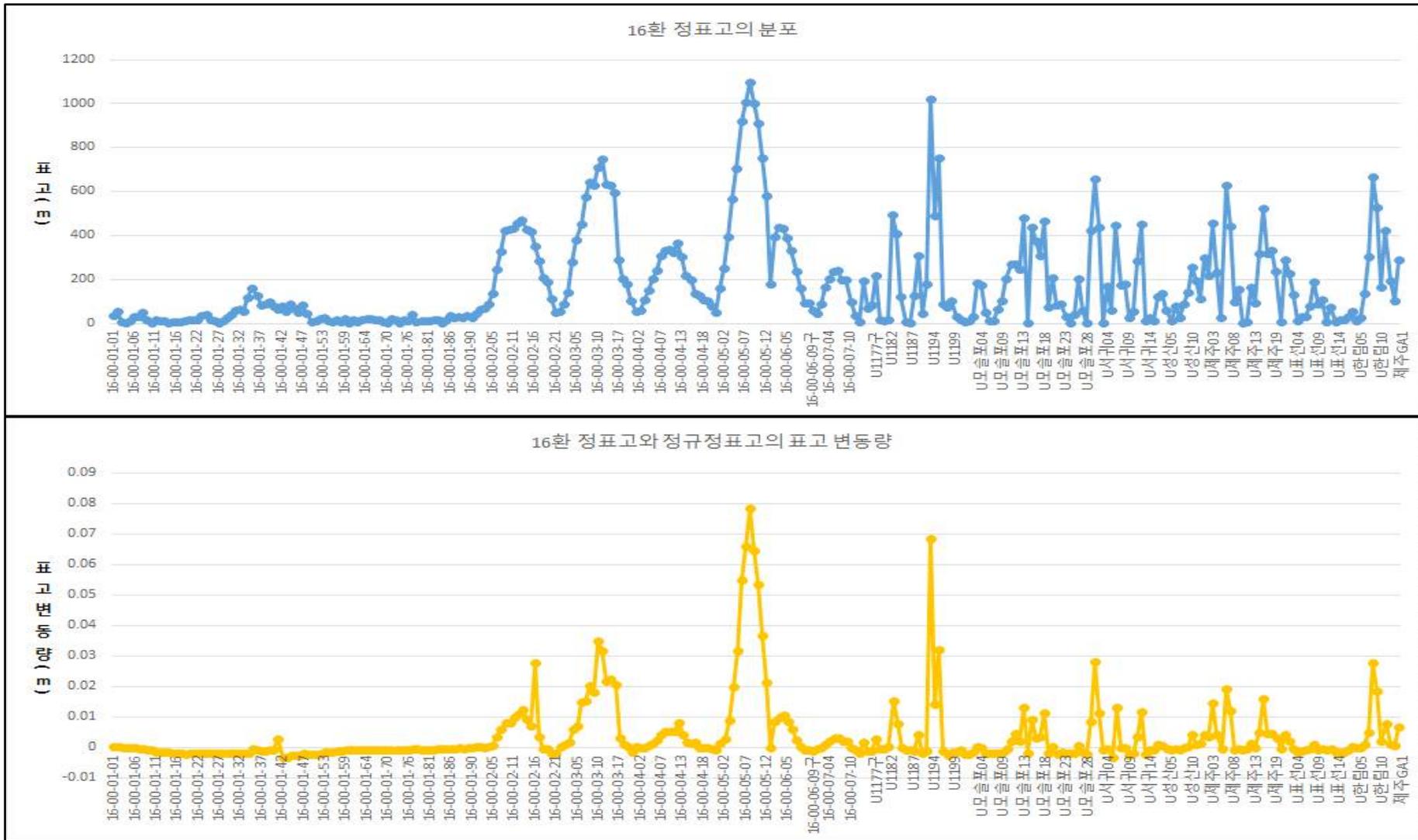
[그림 5-20] 정표고와 정규정표고의 표고체계간 차이 분포

<표 5-13>은 정표고와 정규정표고의 차이 분포를 구간별로 나타낸 것이며 [그림 5-20]은 이 차이 분포를 막대그래프로 보여준 것이다. <표 5-13>과 [그림 5-20]에서 보는 것과 같이 정표고와 정규정표고의 차이는 $\pm 1\text{cm}$ 구간에 10,422점이 분포하여 전체의 89.6%를 차지하고 있다. 또 +5cm 이상 차이나는 점의 수는 22점으로 전체의 0.2%를 차지하고 있다. 표고차가 +9.33cm의 가장 큰 차이를 나타내는 점은 U태백14로 표고값은 정표고 기준 1325.1715m, 정규정표고 기준 1325.2648m를 나타내고 있다. 표고차가 -1.78cm의 가장 작은 값을 나타내는 점은 수준점 12-38-00이었다.

정표고와 정표고 및 정규정표고의 차이의 분포를 보기 위하여 1등환별로 각각 기준점별로 꺾은선 그래프를 그려보았다. 그 중 대표적인 두 개 환의 그래프를 [그림 5-21]와 [그림 5-22]에 나타냈다. [그림 5-21]는 내륙에 위치한 환들중 6환에 소속된 기준점들의 정표고값을 보여주고 있으며(위), 아래 그래프는 6환에 소속된 기준점들의 정표고와 정규정표고의 표고변동량을 그래프로 보여주고 있다. 또한 [그림 5-22] 위 그림은 16환에 소속된 기준점들의 정표고값을 보여주고 있으며, 아래 그래프는 16환에 소속된 기준점들의 정표고와 정규정표고의 표고변동량을 그래프로 보여주고 있다. 이 그래프들을 통해서 볼 때 정표고의 분포와 정표고 및 정규정표고의 차이 분포는 거의 일정한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 표고와 중력값은 선형적 관계를 가지고 있고 정사보정량은 표고 차이에 따라 계산되고 타원보정량은 위도값에 따라 계산되므로 정표고의 분포와 정표고 및 정규정표고의 차이 분포가 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.



[그림 5-21] 6환 정표고의 분포(위) 및 정표고와 정규정표고의 표고변동량(아래)



[그림 5-22] 16학 정표고의 분포(위) 및 정표고와 정규정표고의 표고변동량(아래)

나. 소프트웨어간 기준점 조정성과 차이 분석

이번 전국 통합수직망 조정사업에 있어서는 국토지리정보원의 MatLab ‘LSAdj4LN,m’ 프로그램을 사용하여 환별 예비조정 및 전국 통합망 본조정을 실시하였다. 또한 이렇게 MatLab ‘LSAdj4LN,m’ 프로그램에 의하여 조정된 결과를 비교검증하기 위하여 국내가 아닌 외국의 수직망조정 프로그램을 구입하여 별도로 조정계산을 실시하였다. 이렇게 함으로써 MatLab 소프트웨어에 의한 전국 망조정성과의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

<표 5-14> MatLab 조정성과 Geolab 조정성과와의 정표고 차이 통계표는 두 소프트웨어에 의하여 전국 망조정된 성과(2022년7월22일 기준)를 점별로 비교하여 그 차이에 대한 통계표를 작성한 것이다. <표 5-14>에서 보는 것과 같이 MatLab 조정성과와 Geolab 조정성과의 정표고 차이는 최소 -0.0004m에서 최대 0.0002m의 분포를 보이고 있으며, 평균 -0.0001m, RMSE 0.0001m의 차이를 보여 sub-mm 단위의 차이를 보여주고 있으며 이는 이번 정표고 기반 수직망조정 성과의 신뢰도가 매우 높다는 것을 보여주는 것이다. 또한 이 차이는 GeoLab 망조정 프로그램은 표고차 계산에 있어서 소수 4자리에서 반올림하도록 설정되어 있어 그 차이에 근거한 것이다. 보다 자세한 내용은 제4장 1. 라. 정규정표고기반 수직기준망조정 3) 수직기준망 본조정 (3) GeoLab 프로그램에 의한 수직기준망조정 부분을 참고하기 바란다.

<표 5-14> MatLab 조정성과와 Geolab 조정성과의 정표고 차이 통계표 (단위: m)

구분	최대값	최소값	평균	RMSE
차 이	0.0002	-0.0004	-0.0001	0.0001

국토 수직변위 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비 방안 제시

1. 미국, 일본, 유럽연합(EU) 등의 국가수직기준계 및 수준환
관리체계 조사
2. IERS의 글로벌 높이체계에 부합하기 위한 수준환 정비계획(안)
마련
3. 국토 수직변화 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비방안
제시

1. 미국, 일본, 유럽연합(EU) 등의 국가수직기준계 및 수준환 관리 체계 조사

가. 미국

1) NGVD 29와 NAVD 88의 비교 분석

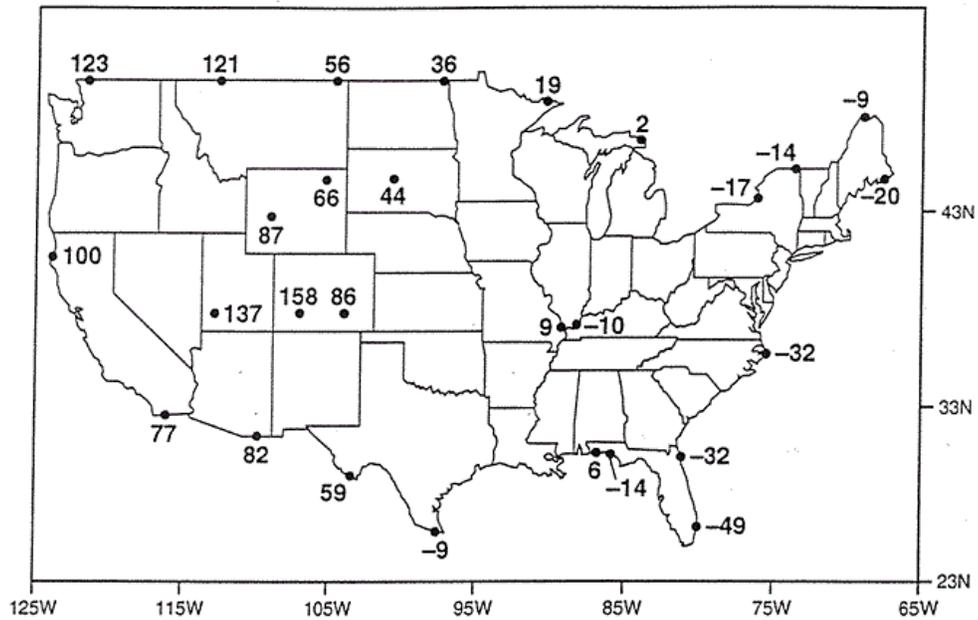
NAVD 88과 NGVD 29의 미국 내륙 전체 차이는 -40cm에서 +150cm 사이이다. 조위 높이의 전반적인 변화를 계통 오차, 지각 운동 및 기준 왜곡의 영향과 같은 개별 구성 요소로 분리하는 것은 어렵다. 보정을 적용하거나 적용하지 않고 조정된 높이를 비교하면 자기 보정을 제외하고 조정된 높이는 전체적으로 크게 다르지 않지만 일부 지역(Zilkoski, Balazs 및 Bengston)에서는 큰 차이가 있음을 나타낸다. [그림 6-1]은 국부적 영향으로 인한 NAVD 88 높이와 NGVD 29 높이 값 간의 차이에 대한 예이다.

바다와 걸프 연안을 따라 NAVD 88과 NGVD 29의 차이는 매우 크다. 이는 대부분 1929년에 부과된 구속요건(constraint) 때문이다(NGVD 29에서 26개의 수준점으로 구속, NAVD 88에서는 하나의 수준점만 유지됨). [그림 6-2]는 구속요건으로 인한 영향 중 일부를 보여준다(예: 대서양과 플로리다 북부의 걸프 연안 사이에 22cm의 차이를 보임). 미네소타에서 워싱턴까지의 두 기준 사이에는 1m 이상의 차이가 있으며 이것은 대부분 1929년 조정에 적용된 89cm의 편위 때문이다(Zilkoski, Balazs, and Bengston 1989). 1991년 이전 몇 년 동안의 일관성 없는 조정으로 인해 플로리다의 panhandle과 남부 일리노이에 밀접하게 배치된 수준점에 상대적인 큰 차이가 발생했다.

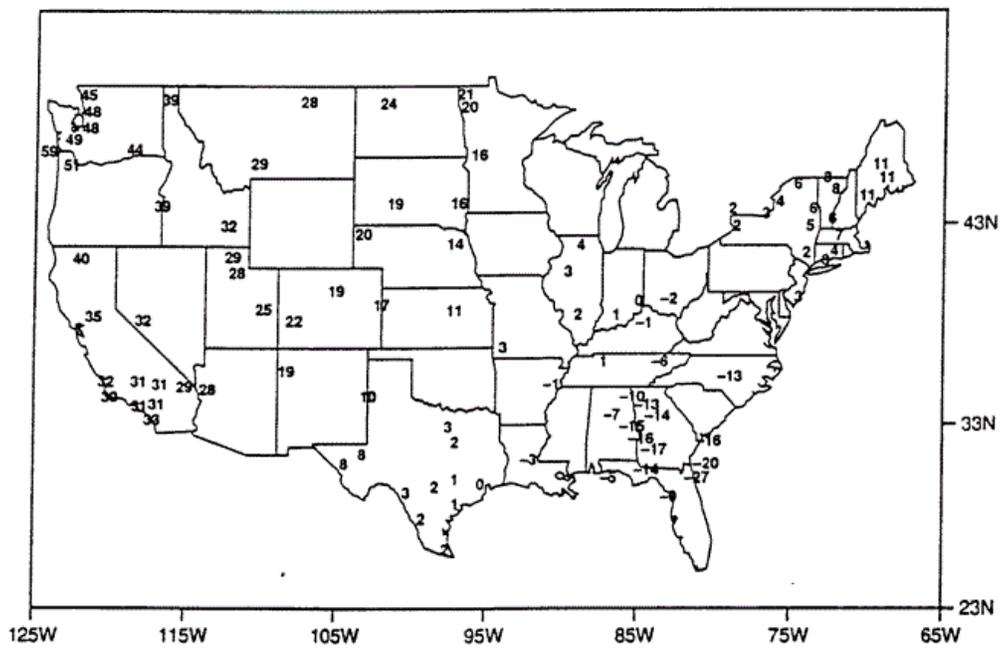
조정된 Helmert 정표고(관측 중력에 기반한 지오폠펜셀차를 사용하여 계산됨)와 조정된 정규정표고(정규 중력 공식을 사용하여 계산됨) 간의 차이는 [그림 6-1]에 표시된 차이의 원인이며 Rocky 산맥 주에서 보이는 차이의 주된 원인이다.

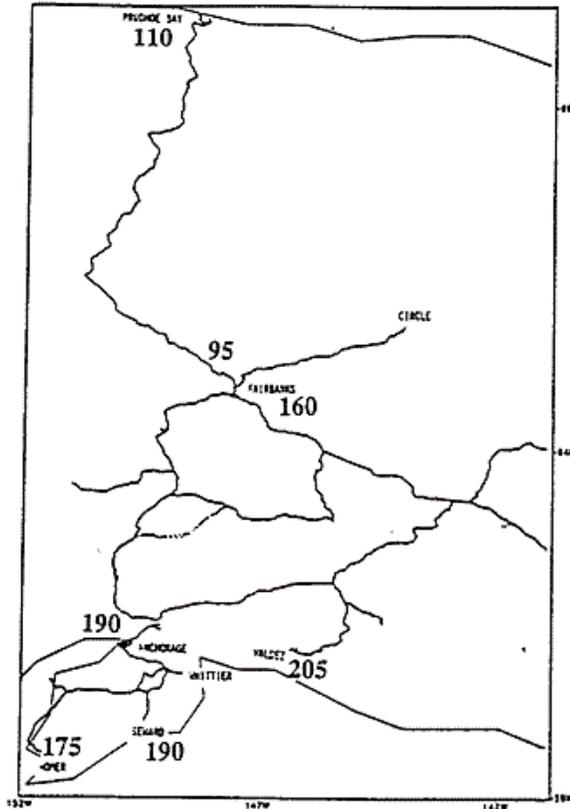
[그림 6-3]은 알래스카의 국지적 영향으로 인한 NAVD 88 높이와 NGVD 높이 값 간의 차이에 대한 예이다. Fairbanks에서는 NGVD 29의 일관되지 않은 구속요건으로 인해 밀접하게 간격을 둔 수준점 사이에 65cm의 상대적 차이가 있다. 다른 차이는 지각 운동의 영향, NGVD 29에 부과된 구속요건, Helmert 정표고와 정규정표고 높이차로 인한 것이다.

알래스카의 주요 도시에 대한 NAVD 88과 NGVD 29 간의 차이점의 몇 가지 예는 Prudhoe Bay(110cm), Fairbanks(160cm), Anchorage(190cm), Valdez(205cm) 및 Homer(175cm)에서 발견할 수 있다.



[그림 6-1] 미국 내륙에서 NAVD 88과 NGVD 29 사이의 높이 차이





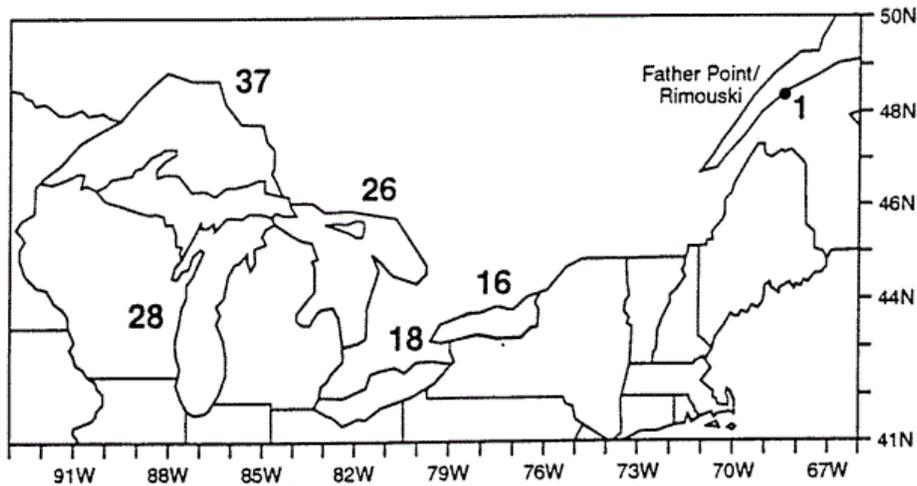
[그림 6-3] 알래스카에서 NAVD 88과 NGVD 29의 높이 차이

2) NAVD 88과 IGLD 85의 비교 분석

NAVD 88 및 1985년 International Great Lakes Datum(IGLD 85)의 조정 계산을 위해 캐나다-멕시코-미국 고저측량의 최소 제약 조건 조정(minimum constraint adjustment)이 수행되었다. IGLD 85와 NAVD 88의 유일한 차이점은 IGLD 85 수준점 높이가 동적고로 제공되고 NAVD 88 값이 Helmert 정표고로 제공된다는 것이다. IGLD 85와 1955년 International Great Lakes Datum(IGLD 55)의 동적고 사이의 전반적인 차이는 1cm에서 40cm 사이이다[그림 6-4]. IGLD 85는 동적고 표현되며 이는 비공식적으로는 평균 해수면보다 높은 등가 높이(단위 질량을 높이는 작업을 기반으로 함)로 볼 수 있다. IGLD 85는 Point Rimouski/Father's Point에서 채택된 고도를 기반으로 오대호의 조위 관측소에서 평균 수위로 구현한다. 다양한 관찰, 동적 및 입체 효과로 인해 동적고와 IGLD 85 높이 사이에 약간의 차이가 있다. 이러한 차이는 수리 보정(hydraulic corrections)으로 알려져 있으며 NAVD 88/IGLD 85 데이터 변환의 근거가 된다.

수리 보정은 10cm를 거의 초과하지 않는 소량이다. 복잡한 특성 때문에 수리 보정값은 격자를 기반으로 각 점에 대한 수리 보정값으로 보간한다. 조위 관측소에서 수리 보정 값을 다시 보간한 후 사후 맞춤 테스트는 1mm 미만의 오차를 보였다. 물론, 수리 보정의 도구적

오류와 공간적 변동으로 인해 변환이 약 1~2센티미터보다 더 정확하지 않을 수 있다.



[그림 6-4] IGLD 85와 IGLD 55의 평균 높이 차이

나. 일본

1) 기준점표고의 공표의 경위

기본수준점의 고도를 부여하기 위한 수준측량은 메이지 16년부터 시작되어 제1회의 전국 측량의 성과는, 육지 측량부내의 사업으로서 행해진 지도 작성 외, 국가 차원에서 실시하는 사업 등에 이용된 것으로 추측된다. 공공 측량의 기초가 되는 기본 측량의 성과는, 쇼와 28년부터 쇼와 38년에 걸쳐 지역마다 손 계산에 의한 수준망 평균 계산이 행해져, 완료한 지구마다 에 순차적으로 발표되었다.

제2회의 성과는 동시망 평균 처리를 실시하여 쇼와 37년부터 쇼와 43년에 취득한 수준 측량 데이터로부터 홋카이도 지방을 제외한 지역에 대해서, 쇼와 44년에 쇼와 44년도 평균 성과를 발표했다. 또, 홋카이도 지방에 대해서는, 쇼와 43년부터 쇼와 47년에 얻은 수준 측량 데이터를 이용해, 인노 시험 조장 근방의 일등 수준점(No6996)을 1점 고정해, 혼슈 지방과는 독립한 표고를 요구, 쇼와 47년에 쇼와 47년도 평균 성과를 공표했다(이러한 2개의 성과를 아울러, 이하에서는 구 성과라고 부른다).

제2회의 성과 공표 이래 약 30년을 경과해, 전국 측량의 반복 측량마다 변동량이 큰 지역을 부분적으로 개정을 도모했지만, 광역적인 지진·화산에 의한 지각 변동의 영향, 지반 침하 등에 의한 성과의 부정합이 생겼다. 이러한 변형을 해소하고 사회의 고도화의 진전에 대응하는 것을 목적으로 개정한 성과가 제3회의 2000년도 평균 성과이다.

2) 2000년도 평균 성과 구축과 특징

2000년도 평균 성과 계산에서는, 전체 수준 노선의 최신의 관측 데이터에 근거해, 일본 수준 원점 1점을 고정으로서 계산했다. 또, 최신의 전국적으로 조밀한 중력 데이터가 갖추어져, 이것에 의한 임의의 지점의 중력치를 높은 정밀도로 추정하는 것이 가능하게 되었기 때문에, 그간 사용했던 정규 중력식에 의한 정규 정표고 보정을 바꾸어, 실측 중력치를 이용한 정표고 보정을 사용하기로 하고, 전국의 수준점 성과 약 21,000점에 대해 성과를 개정하였다. 2000년도 평균 성과는, 측량법 개정에 수반하는 삼각점등의 성과와 아울러 2002년 4월에 공표했다. 또한, 갱신 성과의 결과는 정표고를 채용한 것 외에 혼슈, 홋카이도 및 규슈 지방을 직접 수준 측량에 의해 결합해, 골격 노선을 전국 동시망 평균 계산에 의해 성과를 얻은 것이 주된 특징이다.

3) 2000년도 평균 성과와 구 성과의 고도 비교

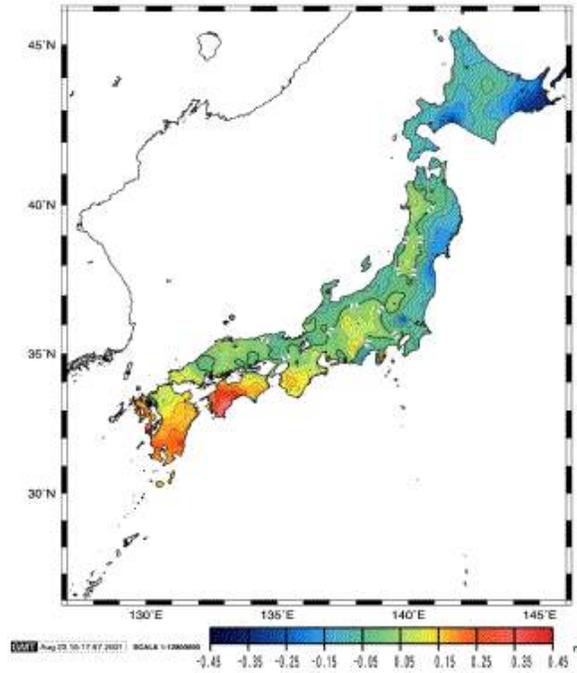
[그림 6-5]에서 30년간의 지각 변동이나 계산 방법의 차이에 의한 고도의 변화를 볼 수 있다. 전국적인 경향으로서, 일본 수준 원점 근방의 도쿄 주변에서는 거의 차이는 없고, 홋카이도측에서 음의 경향(최대 -43cm), 규슈·시코쿠측에서 양의 경향(최대 +35cm)을 나타내고 있다. 이것은 구 고도의 계산에서는 홋카이도는 혼슈측과 분리되어 계산되었고, 규슈·시코쿠측은 혼슈측의 서쪽 블록을 계산할 때 각각 간몬·내도·세토 경로의 노선만으로 결합되어 중력치의 보정 계산 방법의 차이 등에 의해 계통적인 표고차가 생긴 것으로 판단된다. 홋카이도 동부나 도호쿠의 산리쿠 연안역 및 미젠자키 지역의 음의 경향은 판 운동에 의한 침몰, 센다이, 간토 평야, 보소, 사가 평야의 현저한 음의 경향은, 지반 침하에 의한 침하, 이즈 반도 동부의 현저한 양의 경향은 자주 발생한 지각 이상 용기에 의한 것으로 보인다.

4) 측지 성과 2011 구축과 특징

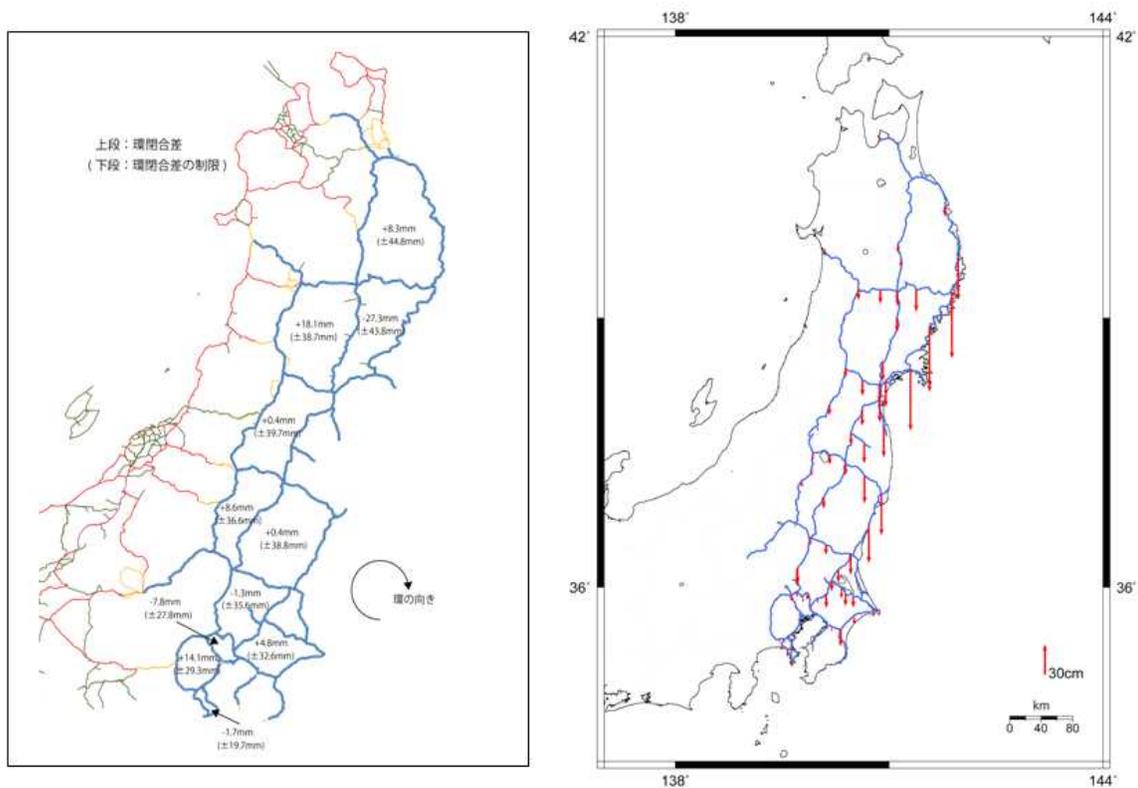
헤세이 23년(2011년) 도호쿠 지방 태평양 앞바다 지진에 따라 큰 지각 변동이 관측되었다. 일본 국토지리원에서는 도호쿠 지방을 중심으로 수준점 1,897점, 3,660km의 현지측량을 실시하고, 그 결과를 바탕으로 수준점표고의 계산을 진행하여 개정치를 공표했다. 새로운 측량 성과의 명칭은, 삼각점 및 수준점 모두 전국적으로 측지 성과 2011로 바꾸어, 기준점 성과표의 서식도 변경했다.

해당 수준점의 새로운 표고의 산출은 2점 고정망 평균 계산으로 실시하였고, 지진의 영향을 받았지만 관측을 실시하지 않은 수준점에 대해서는 과거의 관측 데이터를 이용해 보간 계산에 의해 새로운 표고를 계산했다. 아울러 도쿄 주변의 전자 기준점의 변동 등으로부터, 일본 수준 원점은 5cm 침강했다고 추정되었기 때문에, 지진 전후의 조위 관측 등에 의해 수준 원점의 새로운 원점 수치를 구해 일본 수준 원점의 높이를 개정했다. 실측에 기초한 개

정량은 2.4cm의 침강이었다. 일본 수준 원점의 원점 수치 개정은, 다이쇼 12년의 관동 대 지진 후의 쇼와 3년에 개정된 이래 2번째였다. 개정한 전국의 수준점의 측량 성과는 최근 개정된 원점 수치에 근거해 계산된 것이다[그림 6-5, 6].



[그림 6-5] 신구 기준의 높이 비교



[그림 6-6] 좌 : 개정 성과 계산을 위한 환 폐합도, 우 : 개정 성과와 2000년도 평균 성과의 차이

다. 유럽 (스위스 National height network LHN95)

LN02(1902년에 도입됨)는 원시 수준차에서 계산된 공식 높이 체계이다. LN02의 계산을 위한 고저측량은 기존 수준점으로 제한되었다. 그러나 중앙 고원에 비해 연간 최대 1.5밀리미터의 고산 용기가 있기 때문에 고정 값은 더 이상 대표성을 갖지 못한다. 또한 중력의 영향을 고려하지 않았기 때문에 LN02는 potential-theoretic의 엄격한 높이 체계와는 계통 편차를 보인다.

국가 측량 LV95에서 적절한 수직 기준 좌표계(LHN95)의 필요성이 대두되었다. LHN95에는 엄격한 정표고를 포함하였다. 약 220개의 GNSS/수준점에서 LHN95와 타원체 높이를 위성 항법을 사용하여 계산하였다. 이 점은 1~3센티미터의 정확도 범위로 LHN95 정표고와 타원체고 사이의 변환을 허용하는 스위스의 지오이드 모델(CHGeo2004)을 지원한다. LHN95의 원점은 Zimmerwald의 LV95 전국 측량의 원점이다. 그러나 높이 기준은 Repère Pierre du Niton의 기준 값이 첫 번째 근사값으로 유지된 것과 같은 방식으로 선택되었으며 기존 LN02 높이와 최대 50cm 다르다 [그림 6-7].



[그림 6-7] LHN95와 LN02의 차이 (단위 m)

LHN95는 운동학적 현상(알프스의 용기)을 고려하고 엄격한 정표고를 기반으로 하는 potential-theoretic이고 엄격한 높이 체계이다. 정규정표고에 비해 GPS 높이와 더 잘 조합될 수 있다는 것이다. 다음은 LHN95의 핵심 특징이다.

- 정확한 고저측량을 위한 운동학적 조정
- 지오폠펀셜 높이 기준(± 15 mgpu, 1 시그마)
- 정표고 체계
- 고산 용기의 고려
- GPS 관측 포함(알려진 지오이드 포함)

라. 시사점

현행 높이측량은 “수준측량 작업규정”에 따라 레벨을 이용하여 전시점과 후시점의 고저 차이를 측정하는 방식이며, 높이측량 성과는 표척보정, 타원보정 실시 후 수준평균계산을 거쳐 결정하는 방식이다. 현행 높이측량의 결과값은 타원보정량만 적용한 정규정표고로서 중력에 따라 달라지는 실질적인 높이(정표고)를 반영하지 못하는 한계가 있다.

미국의 NAVD88, 일본의 JGD2000, 그 외 일부 국가의 높이체계가 실측 중력에 기반한 정표고 체계이며, 전국적으로 중력을 정확하게 측정하기 위해 노력하고 있다. 따라서 우리나라의 공식 높이체계를 실측중력에 기반한 정표고 체계로 전환할 필요가 있다.

이를 위해 수준점의 중력값 추가·보완, 새롭게 수준점을 측량할 때에는 중력 측량을 수반해야 한다. 아울러 표고를 높이의 기준으로 사용해온 현행 체계에 혼란이 없도록 지오폠펀셜 수와 정표고를 함께 제공해야 한다.

2. IERS의 글로벌 높이체계에 부합하기 위한 수준환 정비계획

(안) 마련

전세계적으로 균일한 측지 정확도를 보장하는 참조체계가 필요하며 IERS가 구축하는 ITRS/ITRF는 정확하고 신뢰도가 높은 참조체계로서 세계 표준이 되어 있다. ITRS와 그 구현인 ITRF는 높은 공간 및 시간 해상도에서 대규모 변위로부터 소규모 변위를 결정하고 모니터링하기 위한 참조체계이다. 현재 주요 이슈는 국제 높이 기준 프레임(IHRF)의 설정이며 IHRF는 ITRF와 동일한 구조를 따를 것으로 예상된다. IUGG 2015 총회에서 발표된 IAG 결의안 1호는 국제 높이 참조 시스템(IHRS)의 정의에 대한 5가지 규칙을 간략하게 설명하고 있다.

수준원점의 등포텐셜면(W_0^{LVD})을 결정하기 위한 방법은 1) 지역적인 수준원점에서 범지구중력장 모델로부터 지오폠폠펬셜 수 W_0 를 결정한 뒤 가용한 수준측량, 중력측량, GNSS 측량 등의 자료를 이용해 범지구 평균해수면과의 포텐셜 차이를 계산하여 보정하는 방법과 2) 지역적인 지오이드 모델과 범지구 지오이드 모델 간의 차이를 이용하는 방법으로 나뉜다.

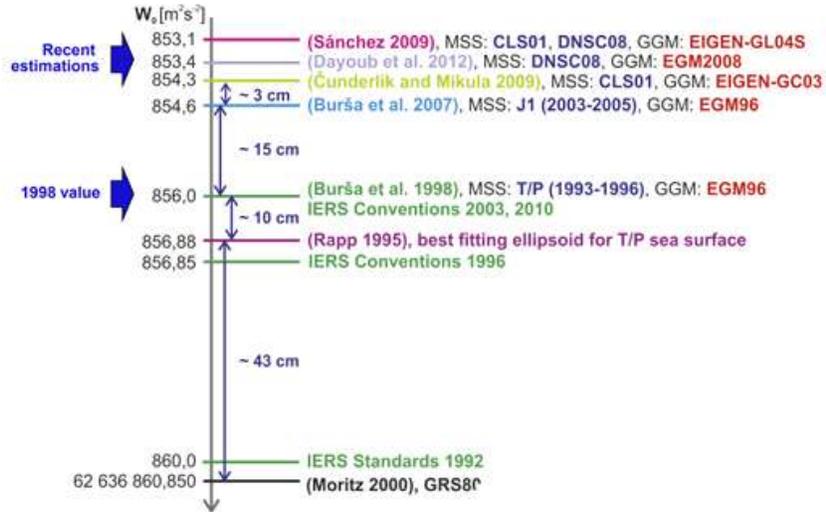
먼저, W_0 를 계산한 뒤 오프셋을 계산하는 방법은 한 지점에서의 포텐셜 차이인 ΔC 를 계산해 보정한다는 의미이며, 포텐셜 차이는 기반자료의 종류에 따라 1) 범지구중력장 모델, 수준측량, 중력측량 관측자료를 활용하는 방법과 2) 범지구중력장 모델, GNSS 측량, 수준측량, 중력측량 자료를 이용하는 방법으로 나누어 계산 가능하다.

$$C = W_0^{LVD} - W_0$$

여기서 C 는 전 세계 평균해수면을 기준으로 한 지오폠펬셜수와 지역적인 수직기준체계를 대표하는 지오폠펬셜수 간의 차이, W_0 는 범지구중력장 모델을 기준으로 한 포텐셜 수, W_0^{LVD} 은 지역적인 포텐셜 수를 의미한다.

전지구 평균해수면에 가장 잘 부합되는 지표면 상의 등포텐셜면 즉, 지오이드 상에서의 포텐셜 수를 의미하는 W_0 는 기후 변화 등으로 인해 평균해수면에 변동이 발생하므로 꾸준히 계산 및 갱신되어 오고 있다. 지오이드 즉, 등포텐셜면 상에서의 값을 의미하는 W_0 는 Gauss(1828), Bessel(1837), Listing(1873), Helmert(1884) 등에 의해 전세계 평균해수면을 대표하는 값으로 정의 및 계산되었다. 현재 공식적으로 '평균해수면'에 대

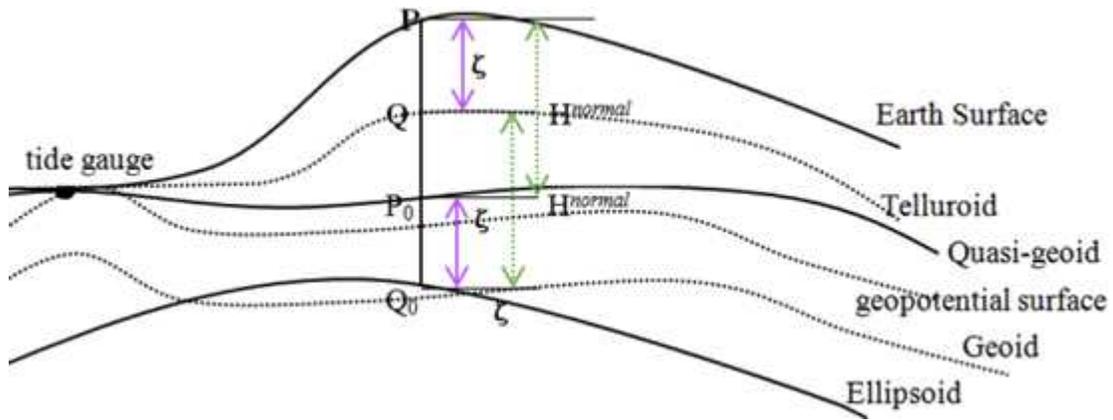
한 명확한 정의는 없으나 실제 포텐셜과 기준 포텐셜 간의 차이가 해수면 전반에 걸쳐 최소가 되어야 한다는 조건을 이용해 W_0 가 추정되고 있다[그림 6-8, 9]<표 6-1>.



[그림 6-8] W_0 의 변화 개념

<표 6-1> 연도 및 기관별 W_0 변화

년도	개발 / 발표	$W_0 [m^2/s^2]$	년도	개발 / 발표	$W_0 [m^2/s^2]$
1980	GRS80	62,636,860.850	2005	Sanchez	62,636,854.4
1992	IERS Standards 1992	62,636,860.860	2007	Bursa	62,636,854.6
1996	IERS Convention 1996	62,636,856.85	2009	Cunderlik and Mikula	62,636,854.3
1995	Rapp	62,636,856.88	2010	IERS Convention 2010	62,636,856.0
1998	Bursa	62,636,856.0	2012	Dayoub	62,636,854.2
1999	Groten	62,636,856.0	2015	IAG GGOS	62,636,853.4
2003	IERS Convention 2003	62,636,856.0	2017	IERS Convention 2017	62,636,853.4



[그림 6-9] 각종 높이 기준의 비교

가. 시사점

국가 및 지역마다 서로 다른 높이 기준을 사용하고 있으므로 우리나라의 높이값은 전 세계는 물론 인근 국가의 높이값과도 호환되지 않고 있다. UN-GGIM에서는 일관성 있는 측지기준계를 구현 및 활용하기 위한 결의안을 발표하였으며, 이 중 높이와 관련해서는 IAG에서 추진중인 ‘전세계 높이 기준체계와의 단일화’를 최종 목표로 하는 계획을 추진 중에 있다.

각 국가에서는 지역적인 높이 기준면(평균 해수면)에서의 지오폠폠텔 수인 W_0^{LVD} 를 결정하여 새롭게 도인 예정인 범지구중력장 모델의 지오폠폠텔 수 W_0 와의 편의를 계산함으로써 수직기준체계를 단일화(결국 W_0^{LVD} 와 W_0 을 일치시킴)를 위해 노력하고 있다. 따라서 우리나라의 높이 기준면에 대한 W_0^{LVD} 를 결정하고 W_0 와의 차이를 계산하여 국제적으로 호환 가능한 높이 체계를 구축해야 한다.

3. 국토 수직변화 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비방 안 제시

국토지리정보원은 “통합기준점 기반의 높이기준체계 고도화 방안 연구”(국토지리정보원, 2017)에서 1)통합기준점 기반의 신규 높이기준망(안), 2)최적의 높이성과 확보를 위한 측량 환경 별 세부작업매뉴얼(안), 3)최적의 높이성과 망조정 및 유지관리 방안, 4)글로벌 높이기준체계 도입준비를 위한 중장기 추진전략(안)을 제시하였다. 이어서 “통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축(2차)(국토지리정보원, 2019b)”과 “통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축(3차)(국토지리정보원, 2020a)” 사업을 통해 통합기준점과 수준점을 포함한 전국적 규모의 망조정을 실시하였다. “2025 국가위치기준체계 중장기 기본전략 연구(국토지리정보원, 2019a)”에서는 1)국가측지기준계 정립 방안, 2)3차원 국가위치기준망 구성 및 효율적 유지관리 방안, 3)기본계획 및 로드맵을 제시하였다. 이를 기반으로 “국가위치기준체계 고도화를 위한 추진 전략방안(국토지리정보원, 2020b)”에서는 1)국제기준에 부합하는 평면높이기준체계 도입, 2)선택과 집중을 통한 국가기준점 관리 효율화, 3)측지측량 전문기관으로서 시스템 및 제도 확대 방안을 제시하였다. 이 후 “남북 SOC사업 지원용 통합기준점 구축 및 글로벌 높이체계 전환 연구(국토지리정보원, 2021a)”에서는 1)높이기준 체계 구축 방안, 2)다중 수준원점 체계 기반 수준망 재정비 방안, 3)정표고 전환을 위한 테스트베드 구축, 4)평면좌표 망조정 방안 등을 제시하였다. 본 장에서는 상기 연구와 구축사업, 전략방안을 검토하고, 본 연구에서 도출된 결과를 기반으로 국토 수직변화 모니터링을 위한 국가기준점 수직위치 정비 방안을 제시하고자 한다.

가. 3차원 국가위치기준점(망) 및 기본기준점(망)의 검토

1) 3차원 국가위치기준점 및 기본기준점의 개념

우리나라 수직 기준은 1913년부터 1916년까지 3년간 관측한 인천만의 평균해수면을 0m로 정하고 정밀수준측량에 의해 1964년 인하공업전문대학 내의 수준원점의 높이를 결정함으로써 제정하였다. 이후 직접수준측량을 전국적으로 실시하여 2021년 기준으로 고시되어 있는 수준점의 수는 5981개이다. 통합기준점은 GNSS, 수준, 중력측량을 실시하여 위도, 경도, 타원체고, 표고, 중력성과를 보유한 3차원 기준점으로서, 2008년부터 2010년까지 수행된 1차 사업에서 전국에 걸쳐 약 10km 간격으로 약 1200여점을 설치하였고, 2012년부터 2019년까지 2차 사업에서는 3~5km 간격으로 설치하여, 2021년 기준으로 고시되어 있는

통합기준점의 수는 5580개이다.

“新국가위치기준체계”(국토지리정보원, 2015)에서는 평면 기준으로서 위성기준점, 삼각점, 통합기준점과 수직 기준으로서 수준점과 통합기준점으로 이분화된 기준점 체계를 통합기준점을 기본 골격으로 직접 연결하는 것으로 재편할 것을 계획하였다. 특히 수준점과 통합기준점의 연결 측량을 실시하고 새로운 환을 구성한 후 높이를 결정한다는 내용, 1~2등급으로 구분했던 기존의 수순환을 단일 통합기준점망(환)으로 재편한다는 내용, 통합기준점에 대한 직접수준측량과 중력보정을 실시해 정표고 계산을 목표로 한다는 내용이 담겨 있다. 상기 계획에 따라 “통합기준점 기반의 높이기준체계 고도화 방안 연구”(국토지리정보원, 2017)에서는 시범적으로 수순점과 통합기준점을 연결한 수순환을 구성하여 높이 성과를 도출하였다. 이후로 “통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축(2차)”(국토지리정보원, 2019b)와 “통합기준점 기반의 3차원 국가위치기준망 구축(3차)”(국토지리정보원, 2020a) 사업을 통해 전국적 규모로 수순점과 통합기준점을 연결하고 수순환을 구성하여 높이 성과를 도출하였다. 상기 사업에서는 정표고 결정 및 지오이드 모델 개발을 위해 신뢰할 수 있는 중력성과 확보가 중요하므로 절대중력점의 관리 중요성도 피력하였다.

“2025 국가위치기준체계 중장기 기본전략 연구”(국토지리정보원, 2019a)에서는 통합기준점, 위성기준점, 1등 수순점, 절대중력점을 포함하는 7000여개의 새로운 “3차원 국가위치기준점(망)”을 구성할 것을 제안하였다. 특히 해당 기준점으로 구성되는 7000여개의 기준점을 권역별로 순차적으로 갱신하면 지역적인 편의가 반복해서 발생하는 문제가 발생하므로 그 중 핵심이 되는 기준점을 별도의 그룹으로 선정하여 “기본기준점(망)”으로 명명하여 관리할 것을 제안하였다<표 6-2>.

<표 6-2> 3차원 국가위치기준점(망)과 기본기준점(망)의 정의

3차원 국가위치기준점	위도, 경도, 타원체고, 표고, 중력성과를 보유한 3차원 국가기준점
3차원 국가위치기준망	3차원 국가위치기준점으로 구성된 위치기준망
기본기준점	3차원 국가위치기준점 중 핵심 관리를 위해 약 10km 간격으로 선정된 국가기준점 (통합기준점 및 수순점 일부)
기본기준망	기본기준점으로 구성된 위치기준망

상기 제안에 의하면, 기본기준점은 1300~1500개이며 주기적인 GNSS 측량 및 수순측량, 중력측량을 실시해 성과의 변공 여부를 확인하고 훼손이 발생했을 때 즉시 복구하는 것을 원칙으로 한다. 기본기준점을 제외한 3차원 국가위치기준점은, 기본기준점의 모니터링 결과 대상지역에서 변위가 발생하였다고 판단되었을 때 추가적인 검증 측량을 실시한다는 것이다.

이와 같은 제안의 경제적 근거는 “통합기준점 기반의 높이기준체계 고도화 방안 연구”(국토지리정보원, 2017)의 기준점 유지 관리 비용 산출에 있다. 해당 연구에서는 당시 설치된 삼각점 16411점과 수준점 7296점의 유지관리 비용과 향후 운영될 통합기준점이 7000점이라 가정하여 산출한 유지관리 비용을 비교하였다. 여기서 유지관리 비용은, 10년간 기준점 중 10%가 망실될 수 있다는 가정으로 재설(이설) 비용을 산출한 것이다. 삼각점과 수준점을 각각 유지관리하기 위해서는 각각 320억원, 640억원이 소요되는 반면 통합기준점을 관리에는 630억원이 소요되므로 통합기준점만 관리하는 것이 효율적이라는 판단이다<표 6-3>.

<표 6-3> 측량기준점 유지관리 비용 산출(예)

단위 : 천원(천원이하 버림)

	삼각점 (16,411점)	수준점 (7,296점)	통합기준점 (7,000점)	
			GNSS	수준
총계	64,177,390	32,049,768	62,861,282	
직접측량비	28,924,286	14,986,804	12,816,455	16,264,479
직접인건비	19,382,631	9,312,459	8,692,789	9,771,615
직접경비	9,522,528	5,674,345	4,123,666	6,492,864
· 여비	8,353,164	4,197,588	3,596,600	4,821,600
· 인부노임	40,538	1,332,068	7,183	1,540,812
· 재료비	202,237	31,909	207,515	-
· 운반비	25,533	-	-	-
· 기기상각비 및 정비비	915,405	112,778	312,368	130,452
간접측량비	29,418,795	14,149,348	28,065,686	
제경비	21,285,224	10,243,705	20,310,844	
기술료	8,133,571	3,905,643	7,754,841	
부가세	5,834,308	2,913,615	5,714,662	
[참고기준]	2013 삼각점 유지관리사업	2015 수준점 유지관리사업	통합기준점(높이측량) 사업	
노임단가	2017년	2017년	2017년	
건설공사표준품셈	2009년	2015년	2015년	
기기상각비 및 정비비 품셈	2017년	2017년	2017년	

※ 통합기준점 기반의 높이기준체계 고도화 방안 연구 (2016)

아울러 상기 유지관리 비용을 1점당 유지관리 비용 및 2019년 현가로 계산한 결과는 <표 6-4>와 같다.

<표 6-4> 국가기준점 1점 유지관리 비용(국토지리정보원, 2017)

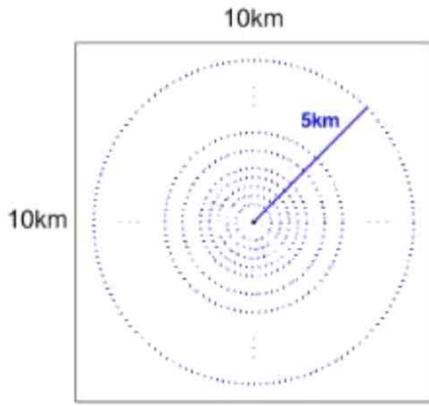
점의 종류	삼각점	수준점	통합기준점	기준연도
계산기준 점의 수	16,411점	7,296점	7,000점	2017년
관리비용(1점/1년)	391,063원	439,279원	898,018원	
	395,377원	444,124원	907,924원	2019년

따라서 3차원 국가기준점 및 기본기준점의 제안은 핵심 관리 대상이 되는 기준점 수가 줄어들어 더 넓은 지역에 분포하는 기본기준점을 대상으로 정기적인 검증 측량을 수행할 수 있으며 비용 면에서도 장점이 있는 것으로 판단이다.

2) 3차원 국가위치기준점 및 기본기준점의 선정

3차원 국가위치기준점은 기본적으로 위성기준점, 절대중력점, 통합기준점(이미 통합기준점으로 전환된 수준점 포함), 1등 수준점을 대상으로 한다. 3차원 국가위치기준점에 포함될 통합기준점은 위도, 경도, 타원체고, 표고 성과를 모두 보유하여야 하며 그 중 한 가지라도 없는 점은 제외한다. 그러나 모든 정보가 있더라도 연육교가 없는 섬에서 육지와 다른 기준면으로부터 계산된 표고를 채택한 점, 개방수준측량으로 표고를 채택한 산악지역의 통합기준점은 기본기준점 대상에서 제외하며, KNGeoid18 모델과의 높이 차이가 10cm를 초과하거나 반경 15km 이내 점들과의 상대정밀도가 5cm를 초과하는 통합기준점도 제외한다. 3차원 국가위치기준점에 포함될 수준점은 현황이 “사용 가능”인 1등 수준점 및 교BM을 대상으로 하며 이 중 중력성과가 없는 점은 제한한다. 2등 수준점은 산악 지역과 같이 통합기준점과 1등 수준점이 존재하지 않는 지역에 한정하여 선정한다.

기본기준점은 전국 내륙을 10km 격자로 나누고 격자 중심과 가까우며 활용도가 높은 3차원 국가위치기준점을 대상으로 점수를 부여하여 점수가 가장 높은 점을 선정한다. 구체적으로 1)격자 중심 근접성 점수는 최대 5점을 부여하며 격자 중심으로부터 500m 멀어질 때마다 0.5점을 감점한다. 2)기준점 활용도 점수는 국토지리정보원의 성과 발급 횟수를 기준으로 최대 3점을 부여한다. 추가적으로 통합기준점은 KNGeoid18과의 차이에 따라 최대 3점의 점수를 부여하고 유지/관리의 효율성을 위해 망실 가능성이 낮은 국공유지에 존재하는 여부에 따라 3점 또는 1점을 부여한다. 수준점은 1등 수준점과 교BM은 3점, 2등 수준점은 1점을 부여한다[그림 6-10]<표 6-5>.



거리	0.5km 이내	0.5 ~ 1km	1 ~ 1.5km
점수	5	4.5	4
거리	1.5 ~ 2km	2 ~ 2.5km	2.5 ~ 3km
점수	3.5	3	2.5
거리	3 ~ 4km	4 ~ 5km	5km 이상
점수	2	1	0.5

[그림 6-10] 격자 중심으로부터 거리를 고려한 점수

<표 6-5> 기준점 성과 발급 횟수 및 점수

(a) 기준점 발급 횟수								
단위 : 회	<5회	<10회	<15회	<20회	<30회	<40회	<50회	>50회
통합기준점	1,095	1,384	892	532	594	234	122	204
수준점	2,051	3,156	2,191	1,436	1,633	761	441	651
(b) 기준점 발급 횟수 통계								
단위 : 회	통합기준점			수준점				
	범위	평균	범위	평균				
기준점 발급 횟수	1 ~ 172	14.51	1 ~ 185	16.95				

기준점 발급 횟수	5회 이하	5 ~ 15회	15회 이상
점수	1	2	3

선정된 3차원 국가위치기준점은 총 5921점으로 그 중 위성기준점은 60개, 절대중력점은 23개, 통합기준점은 4924개, 수준점은 914개(1등:851개, 2등: 63개)이다. 우리나라의 내륙으로 간주할 수 있는 총 1506개의 10km 격자에서 “사용 가능”한 3차원 국가위치기준점이 존재하는 격자는 1322개이다. 따라서 선정된 기본기준점은 총 1322점으로서 그 중 통합기준점은 1273개, 수준점은 49개이다.

3) 직접수준측량의 범위와 방법

2008년부터 설치한 1,2차 통합기준점의 높이성과는 인접 수준점과 왕복 측량에 의한 개방 노선으로 단순 계산하여 신뢰성에 문제가 있었다. 통합기준점 기반 3차원 국가기준점망을 구축 연구(국토지리정보원, 2017; 국토지리정보원, 2019b)에서는 통합기준점의 수준노선을 최소 2개 기준점에 결합 측량 후 조정에 의해 성과를 산정함으로써 신뢰성을 확보하였다. 다만 통합기준점망에 의해 전국에 걸친 수준망 구축을 위한 시간, 비용 절감을 위해 기준 1,

2등 수준 노선을 병용하였다. 2025년 이후에는 통합기준점 기반 3차원 국가기준망이 구축 될 것으로 예상하여, 기존 수준노선 사용을 최소화하는 새로운 수준망을 계획하여 기본기준 망 정기적으로 관측할 것을 언급하였다.

수준노선에 대한 보완관측은 GNSS 측량에서와 같은 사유와 GNSS 정기 관측에 대한 조 정계산 결과 타원체고 변동이 의심되는 경우에 수행할 수 있을 것으로 보았다. 수준측량 상 대 정확도는 2등 수준노선을 포함하기 위하여 단기적으로는 $2.5\text{mm}\sqrt{L}$ 로 설정하고 중· 장기적으로는 $2.0\text{mm}\sqrt{L}$ 로 설정하였다. 향후 중력측정에 의한 정표고 체계로 전환할 경 우 지오폠펜셀수를 기준으로 하는 환폐합차 기준으로 개정하는 것을 타당하게 보았다.

4) 3차원 국가위치기준점 및 기본기준점 미포함 기준점 관리방안

“2025 국가위치기준체계 중장기 기본전략 연구(국토지리정보원, 2019a) 당시 3차원 국가 위치기준점에 포함된 수준점은 약 914개로서 미포함 수준점은 약 5500개로 산출되었다. 상 기 연구에서 제안한 미포함 수준점에 대한 관리방안은 <표 6-6>과 같다.

<표 6-6> 3차원 국가위치기준점 미포함 수준점의 관리 방안

<p>1단계 (~2025년)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 3차원 기준점에 준하여(현재와 동일) 표지 현황조사·관리하나, 이전요청이 있을 때 그 점이 3차원 기준망 수준노선에 포함되어 기본기준점에 연결된 경우는 재설, 그렇지 아닐 때는 폐기함(망조정에는 포함하나 성과는 미 고시) - 따라서 이 단계에서 직접수준측량에 사용할 수 있는 것은 3차원 기준점과 수준점임
<p>2단계 (2025 ~ 2030년)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 기본기준점 연결을 우선하는 최적 수준망을 구성하여 관측을 수행하며, 이때 망 구성에 수준노선이 연결된 수준점 관측을 포함하도록 함 - 수준점 표지는 3차원 기준망 수준노선 포함한 점들은 이에 같이 관리하 나, 미포함 수준점 중 중력측량 미수행 점들은 GNSS 높이측량 활성화 정도와 성과발급 횟수에 의해 활용도를 반영해 우선 폐기하도록 함 - 3차원 기준점 수준노선 포함 수준점에 대해서는 기본기준점 수준망 구성 에 문제없는 한 폐기도록 함 - 따라서 이 단계에서 직접수준측량에 사용할 수 있는 3차원 기준점은 3차 원 기준점과 3차원 기준점 수준망에 포함된 수준점임
<p>3단계 (2030년~)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 기본기준점 수준망(일부 3차원 기준점 및 수준점 노선 포함 가능)에 대한 지속적 정기관측을 통해 성과의 정확성과 무결성을 관리를 원칙으로 함 - 기본기준점 수준노선에 포함되는 수준점은 기본기준점에 준해 관리하나, 미포함 수준점 중 중력측량 미수행 점들은 GNSS 높이측량 활성화 정도 와 성과발급 횟수에 의해 활용도를 반영해 폐기하도록 함

	<ul style="list-style-type: none"> - 단, 이들 수준점 중 중력측량이 이루어진 것들은 3차원 위치기준점에 준하여 표지 현황 관리를 추진함 - 따라서 이 단계에서 직접수준측량에 사용할 수 있는 3차원 기준점은 3차원 기준점과 기본기준점 수준망에 포함된 수준점임
--	--

5) 3차원 국가위치기준점 및 기본기준점에 대한 고찰

3차원 국가위치기준점 및 기본기준점 방안은 관리 대상 기준점을 대폭 축소함으로써 기준점 관리 비용의 저감과 전국적 규모의 갱신 주기 감소의 긍정적인 효과가 있을 것으로 판단된다. 다만 방안을 시행하기에 앞서 다음과 같은 관점에서 면밀히 검토하고 시행 시기와 수준점 포함/미포함 규모를 제고할 필요가 있다.

가) 수준점의 분포와 수준측량 특성

우리나라의 1등 수준점은 전국의 주요 도로를 따라 4km 이내의 간격으로 설치하였고 2등 수준점은 2km 이내의 간격으로 배치하였다. 수준측량의 중요한 특성은 반드시 이전 점과 다음 점의 수준차를 측정해야 한다는 것이고 정확도 향상을 위해 환을 구성할 수 있어야 한다는 것이다. 따라서 수준점은 시통이 가능하며 적절한 거리 및 경사를 유지해야 하므로 수평적인 분포 밀도는 불규칙한 편이다. 반면 근본적으로 삼각점의 대체인 통합기준점은 GNSS 측량으로 평면위치 정확도 확보와 독립적인 관측이 가능하므로 전국적으로 3~5km 간격의 격자형 분포를 지향한다. 다만 충분한 수직위치 정확도를 확보하기 위해서 여전히 직접수준측량을 시행하므로 수준점 또는 다른 통합기준점의 시통이 가능한 위치에 설치해야 한다. 한편 현행법상 1등 결합 수준측량은 km당 2mm, 왕복 수준측량은 km당 2.5mm의 오차를 허용하며 2등 결합 및 왕복 수준측량은 km당 5mm의 오차를 허용한다. 그러나 1등 수준점-2등수준점-통합기준점 상호간 수준측량을 수행하고 수준측량 장비의 신뢰성이 향상됨으로서 사실상 1, 2등 수준측량의 구분은 의미를 상실하고 있다.

따라서 3차원 국가기준점을 선정할 때 1등 수준점만을 대상으로 하는 것 역시 큰 의미가 없으며, 통합기준점의 설치 또는 관리를 위해 2등 수준점이라도 가능한 가까운 점으로부터 직접수준측량을 시행하는 것이 유리하다. 아울러 기존 수준점을 통합기준점으로 전환하기 위해서는 GNSS 측량으로 평면위치를 결정해야 하나 주변 장애물의 영향으로 정확한 GNSS 측량이 어려울 수 있다. 따라서 정확한 수직 위치 확보를 위해 적절한 양의 수준점을 유지할 필요가 있다.

남북 SOC사업 지원용 통합기준점 구축 및 글로벌 높이체계 전환 연구(국토지리정보원, 2020)에서는 3차원기준점망과 기본기준점망에는 포함된 수준점의 수가 매우 제한적임을 지적하였다. 3차원기준점의 수준망을 구성할 때는 GNSS와 달리 기준점 사이를 연결하는 직접 수준 관측 노선을 포함해야 하므로 실제 신규 수준망에 포함되는 수준점 수가 훨씬 많아진다. 그럼에도 수준망 구성에 포함되는 수준점을 3차원기준점에 포함되지 않는 기타 기준점과 같이 소극적 관리와 변동시 폐기 원칙을 적용하는 것은 무리가 있다고 보았다. 이로 인해 3차원기준망에 포함되지 안더라도 수준망의 노선에 포함되는 수준점은 3차원기준점에 준해서 관리가 필요함을 언급하였다.

반면, 동 연구에서 3차원기준망의 통합기준점 기반 신규 수준망에서 기준점의 공간 배점 밀도는 3km로서, 4km와 2km 간격으로 설치된 1, 2등 수준점보다 높을 것이므로 기존 수준점의 역할이 축소할 것이라고 보았다. 결국 3차원기준망에 포함되지 않은 수준점을 폐기하더라도 국가기준점 사용자에게 주는 불편은 제한적일 것으로 판단하였으며, 이것은 통합기준점을 우선순위로 새로운 수준노선을 구성한다는 것을 의미한다.

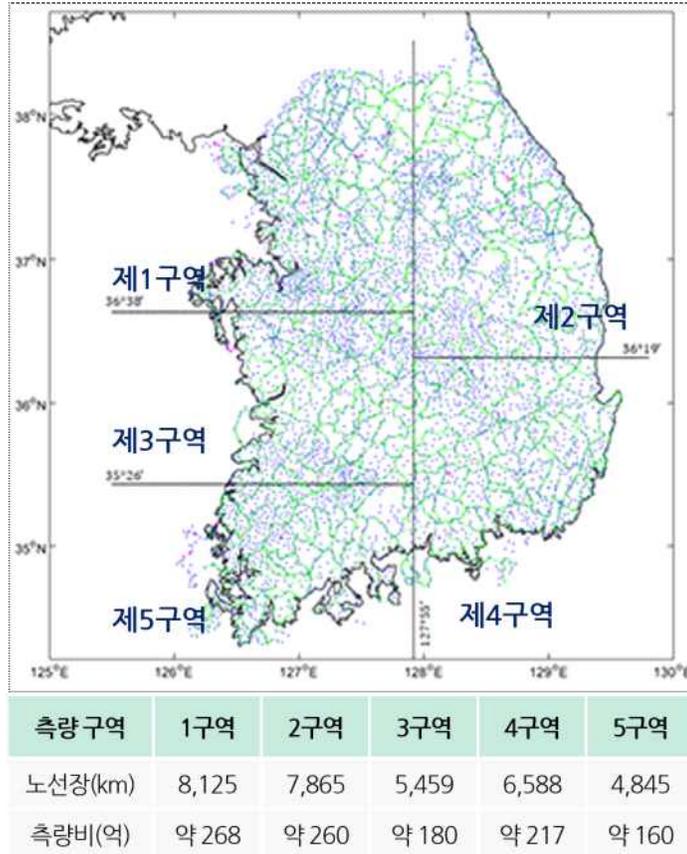
나) 수준점 유지 비용과 재관측 주기

앞서 살펴보았듯이 2019년 기준으로 수준점의 연간 관리 비용은 444,124원/점, 통합기준점의 관리 비용은 907,924원/점으로 통합기준점의 관리비용이 두 배를 상회한다. 2021년 고시성과 기준으로 상태가 “사용 가능”인 수준점은 5981개, 통합기준점은 5580개로 2019년 기준으로 관리비용을 산출하면 연간 약 77억원이다. 만약 수준점의 일부를 통합기준점으로 전환하여 7000개의 통합기준점만을 운용할 때 관리비용을 산출하면 연간 약 63억원이다. 비록 후자의 경우 14억원의 관리비용을 절감할 수 있지만, 전자의 경우 더욱 높은 수준의 수직 정확도를 확보하고 수직 기준점 서비스를 지속할 수 있다.

한편, 국가위치기준체계 고도화를 위한 추진전략방안(국토지리정보원, 2020b)에서는 기본기준점에 대한 2년 주기 GNSS 관측(동·서)과 5년 주기 정밀수준측량 구역을 설정하였다. 그러나 남북 SOC사업 지원용 통합기준점 구축 및 글로벌 높이체계 전환 연구(국토지리정보원, 2020)는, 점의 수만을 고려해 구역을 나누었기 때문에 기준점과 관측자료의 분포는 균일하지 않으며 각 구역의 수준노선을 연차별로 재관측할 때 예산은 160~268억 원으로 추정되는 바 현실적이지 않다고 언급하였다. 따라서 5년 주기 재관측을 위해서는 구역별로 약 2000km 내외의 기본기준점 위주 수준망 재구성이 필요하다고 판단하였다[그림 6-11].

따라서 수준노선 재관측의 주기와 권역을 보다 면밀하게 분석하여 구성할 필요가 있다. 연간 국가기준점 유지 비용을 약 110억 원으로 가정했을 때, 5년주기 재관측을 고수한다면 모든 수준노선에 대한 재관측은 사실상 불가능하다. 만약 재관측 주기를 10년으로 확장한다면 현재 모든 통합기준점과 수준점을 포함한 수준망의 재관측도 가능한 것으로 계산된다(총 연

장 26000km, 매년 2600km 재관측, 4.4백만원/km 가정). 그러나 매년 균등한 재관측을 위한 수순환과 사업권역의 재조직을 수반하여야 한다. 아울러 3차원국가기준망에서 제외되는 수순점의 제외도 엄정하게 평가해야 할 것이다.



[그림 6-11] 기본기준점에 대한 5년 주기 재관측

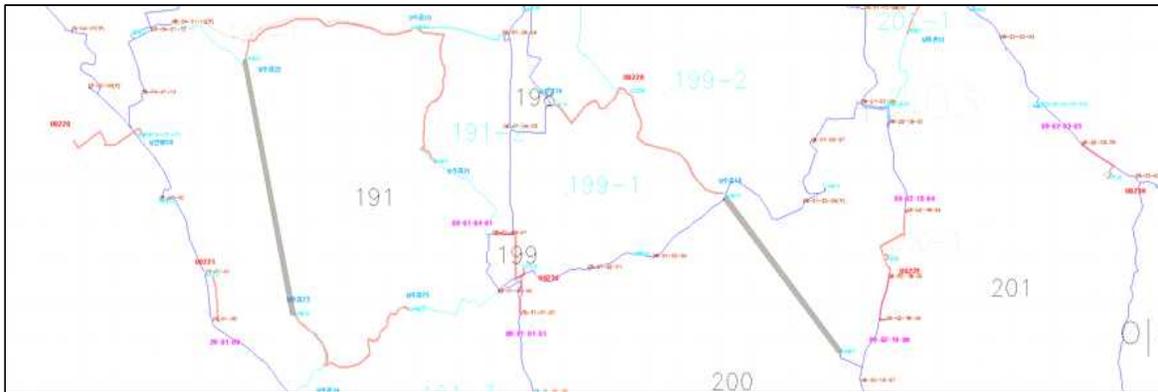
다) 기본기준점의 선정 방식

기본기준점의 선정 방식에서 10km 격자 설정은 근거가 다소 부족하다고 판단된다. 즉, 10km 격자 내부에 존재하는 한 개의 기본기준점이 대상지역의 변화 또는 유지를 대표하기 어렵고, 70%가 산지로 구성된 우리나라의 지형에서 기본기준점의 상당수가 인간 활동이 상대적으로 적은 산간 지역에 분포되었을 가능성이 높기 때문이다. 또한 기준점 활용도 점수는 국토지리정보원의 성과 발급 횟수를 기준으로 하고 있는데, 이제는 공식적으로 성과 발급을 하지 않더라도 단순 조회만으로도 같은 수준의 정보를 얻을 수 있기 때문에 기준점 활용도 점수의 신뢰성이 높다고 보기 어렵다.

나. 현행 수준환 구성 및 조정 방법의 개선 방안

앞에서 살펴본 바와 같이 3차원 국가위치기준점 및 기본기준점에 의한 수준환 구성 방식에는 분명한 장·단점이 있고, 본 연구와 선행 연구(국토지리정보원, 2020a)와 같이 모든 통합기준점과 수준점으로 구성된 수준환을 유지하는 방식도 고비용과 긴 재관측 주기의 문제를 안고 있다.

기존 수준환 조정 방식은 수준원점의 높이를 고정하여 1등 수준환을 조정하고 1등 수준점의 성과를 고정한 후 2등 수준환의 성과를 조정하는 방식이었다. 망조정 방식으로 최소제곱 조정을 실시하였으며 수준원점으로부터 거리가 멀어질수록 오차가 누적되어 중부 이하의 지역에서는 신뢰도가 저하되는 한계가 있었다. 아울러 매년 지역별로 시행하는 높이측량 사업은 해당 지역 내부의 1등 수준점 성과를 고정하여 나머지 성과를 산출하기 때문에 인접 지역과 연결할 때 잘 맞지 않는 문제도 있었다.



[그림 6-12] 수준점과 통합기준점을 잇는 망구성

새로운 수준환 구성을 위해서는 [그림 6-12]와 같이 수준원점과 1, 2등 수준점, 통합기준점을 연결하여 전국적인 수준환을 구성하고 개방 관측으로 인해 제외되어 있는 통합기준점 성과를 포함하도록 노선 및 수준환을 구성할 필요가 있다. 그런 다음 도로를 기준으로 하는 수준환 구성 방식을 개선하여 지역의 특성(지형, 지세, 개발 계획 등)에 맞게 권역별로 수준환을 구성하여 평가하고, 전국적으로 균등하게 갱신할 수 있도록 연차별 사업 물량을 고려한 전국 수준환을 구성해야 한다.

전국적인 수준환을 구성한 다음에는 수직 기준점별 지오폠펜셜 수로부터 산출한 정표고 성과를 기반으로 전국 규모의 망조정을 실시한다. 이에 본 연구는 1) 입력자료 생성, 2) 예비분석, 3) 부분망 조정, 4) 본조정, 5) 분석결과 및 정리, 6) 재측량 노선 추출 등의 선행연구 망조정 방법에 대하여 개선 방안을 제시하고자 한다.

또한 타원보정높이차, 정사보정 높이차, 정규정표고와 정표고에 대한 수준망조정 입력자료는 조정소프트웨어 입력 파일의 형식에 맞춰 ASCII 형식으로 변환되어 저장한다. [그림 6-14]는 선행연구 입력자료에서 개선된 본 연구 입력자료의 변경사항을 정리하였다.



[그림 6-14] 입력자료 개선 방안

2) 예비분석 개선 방안

예비분석은 환·노선별 폐합차를 계산하여 허용기준을 초과하거나 고시성과와 관측표고의 차이를 점검하고, 이를 기반으로 과대오차를 포함하는 노선이 있는지 판정하여 입력자료 파일을 수정하는 과정이다. 즉 관측 자료 내 오류가 포함된 이상 구간에 대한 점검을 수행하여 신뢰할 수 있는 기반자료로 재구성하기 위한 것으로, 본 연구에서는 환폐합차와 관측 자료의 왕복교차를 점검하였다. 선행연구의 경우 관측데이터와 고시/초기좌표 파일을 입력하여 수준 원점 또는 1등 수준점 1점으로 고정하는 최소제약방식을 참고하여 부분환의 시점을 고정하여 문제가 있는 구간들을 추출하였다.

하지만 이는 예비분석 시 고정 시점의 관측표고가 고시성과와 차이가 크거나 이설점/재설점 등의 문제구간에 해당할 경우 부분환 전체의 오차를 야기할 수 있다. 해당 문제가 있는 구간들에 대하여 [그림 6-15]와 같이 사업지구명의 관측년도 기준 최신자 관측표고로 잠재적 불량노선의 시점 관측표고를 수정하여 일관성을 점검해 해당 문제가 있는 구간들을 수정하였다. 문제 구간자료의 이력, 특징을 살펴봄으로서 이상 구간으로 제거할지 여부를 결정하며 최종적으로 제거된 구간은 향후 검측이 필요한 노선으로 정리하여 재측량 사업구간 대상으로 지정하였다.

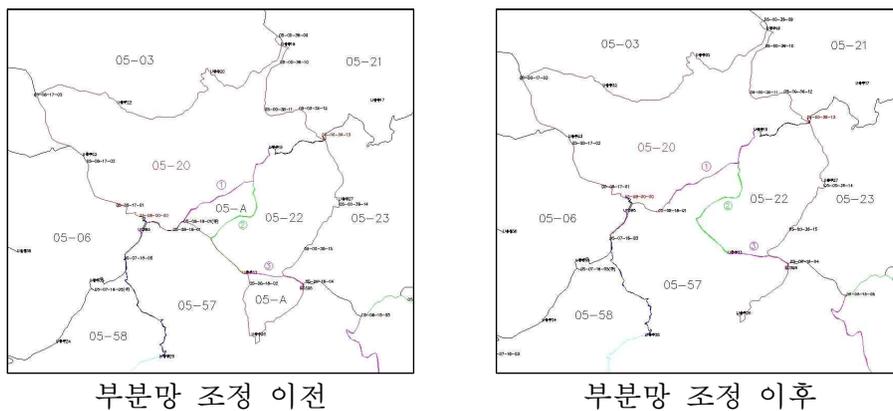
관측표고	분 배 오차량	타경정량	최종성과	성 과 비 교		사업지구명
				기준성과	차이	
85.03560			85.0356	85.0356	0.0000	
76.68846	0.00000		76.68846	76.6956	-0.0071	19'연구(2)(중주01)
76.68846			76.68846	76.6956	-0.0071	
75.53371	0.00000		75.53371	75.5411	-0.0074	06'수준(중주-울성)
			71.35391	71.3614	-0.0075	06'수준(중주-울성)

[그림 6-15] 예비분석 과정 내 최신 관측자료 기반 수정

3) 부분망 조정 개선 방안

선행연구에서는 부분망 조정의 기본 전략으로 관측 자료 정밀도 기준 가중치 설정을 제시하였다. 선행연구의 경우 통합기준점 간 연결측량이 실시된 경우, 1등 수준점 간 연결 측량이 실시된 경우, 수준점과 통합기준점 간 연결 측량이 실시된 경우는 1등 수준측량 방법을 준용한 것으로 간주해 관측 자료의 정밀도 기준으로 1등 왕복 교차인 $2.5mm/\sqrt{S}$, 1등 수준점에서 2등 수준점으로 연결하거나 2등 수준점 간 연결측량이 실시된 경우는 2등 왕복 교차 기준인 $5.0mm/\sqrt{S}$ 를 적용하였으나 본 연구에서는 1등 왕복 교차 기준인 $2.5mm/\sqrt{S}$ 를 일괄 적용하여 높이성과의 정확성을 제고하고자 하였다.

또한 불부합에 따른 특이 환의 경우 분할된 여러개의 환으로 보이지만 실제 하나의 환으로 환폐 합차점검부 작성 및 망조정 시에 혼란을 줄 수 있다. 이에 본 연구는 [그림 6-16]과 같이 수준노선의 폐기 및 경계로 사용전환 등을 통해 부분망을 조정하는 방안을 제시하였다.



[그림 6-16] 불부합에 따른 특이 환 부분망 조정 예시

4) 본조정 개선 방안

본조정은 이상구간 제거 후 최종 성과를 산출하기 위한 조정 단계를 의미한다. 선행연구는 당시 기반자료인 중력자료의 완전성이 확보되지 않아 포텐셜 기반조정이 불가능하였다. 이에 수준측량으로 관측한 자료에 타원보정을 수행한 값인 정규정표고만을 입력자료로 조정하였으며 수준원점의 높이를 기준으로 단일망 최종 성과를 산출하였다.

우리나라에서 사용하고 있는 정규정표고는 수준측량 관측 자료에 타원을 기준으로 계산된 중력값을 기반으로 보정을 실시해 계산되는 값이다. 하지만 정규중력에 의한 타원보정량과 정규정표고 체계는 표고체계 구축의 용이함에 있어 정표고 체계에 다소 뒤쳐져 있다. 지오폠펌셜 수로부터 유도되는 높이 중 정표고는 측점의 높이가 측정경로에 무관하게 고유한 값이 되도록 하는 표고의 자연척도이다.

5) 분석 결과의 정리 및 재측량 노선 추출

분석 결과의 정리 및 검정측량 노선 추출은 폐합차 점검 결과, 이상 구간에 대한 목록, 고시성과와의 비교 등을 통해 점검이 필요한 경우 등을 복합적으로 고려해 재측량이 필요하다고 판단되는 노선을 정리 및 제시하고자 하는 것이다.

선행연구는 폐합차 점검, 이상구간 제거, 고시성과와의 비교 과정을 통해 차이를 보이는 곳들에 대한 원인 분석을 수행하고, 검증 및 보완측량이 필요한 구간을 추출 및 정리 하였다. 선행연구의 점검구간 선정을 위한 첫 번째 전략은 점검부 상 구간별 관측된 높이 차이를 더해 계산되는 폐합차 점검 결과를 바탕으로 문제가 되는 구간을 선정하는 것이다(2등 허용교차 $5.0mm/\sqrt{S}$). 두 번째 전략으로는 망조정 입력자료 구성 후 잔차 및 인접환과의 연결성을 고려해 일관성이 없어 신뢰도를 저하시키는 요인이 된다고 판단되는 구간을 추출하였다. 마지막 전략으로는 망조정성과와 고시성과와의 차이 $\text{평균}\pm 3 \times \text{표준편차}$ 초과구간을 추출 대상으로 설정하였다.

본 연구는 선행연구의 기존 3가지 전략을 부분수정하고 2가지를 추가하여 다음 <표 6-7>과 같이 5가지의 재측량 노선 추출 전략을 제시하였다. 추가된 2가지의 전략은 통합기준점 연결구간에 해당하는 환 분할 구간과 관측자료의 최신성을 고려한 수준측량 주기 초과 구간을 추출 대상으로 설정하였다.

<표 6-7> 재측량 노선 추출 전략

전략	내용
전략 1	환폐합차 허용오차 초과환 문제구간 선정
	문제구간을 1등 허용교차($2.5\sqrt{S} \text{ mm}$) 초과구간으로 결정
	이설점/재설점 문제구간 선정
전략 2	(전략 1에 해당하지 아니하나) 망조정시 신뢰도를 저하시키는 구간
전략 3	망조정성과와 고시성과와의 차이 $\text{평균}\pm 3 \times \text{표준편차}$ 초과구간
	차이가 5cm를 초과하는 구간
전략 4	환 분할 구간(통합기준점 연결구간)
전략 5	2005년 이전 수준측량 구간

다. 국가수직기준망 재정비

1) 권역중심의 국가수직기준망 관리 방안

우리나라의 수준망은 1910년대에 청진, 원산, 목포, 인천, 진남포의 평균해면을 표고기준으로 한 수준점 성과(KLN1910)가 있었으나 관리소홀과 6·25동란으로 인하여 대부분의 수준점이 망실되었다. 따라서 1957년 건설부 국립건설연구소가 주도한 수준점 복구사업에 의하여 얻은 잠정적인 성과 KLN1957을 1988년까지 사용하였다. 또 우리나라의 국토개발계획을 수립하기 위하여 국토기본도가 시급하게 필요하였으며, 국토기본도 제작을 위하여 기준점 좌표가 필요하였기 때문에 기준점측량 정비사업이 1960년에 착수되었다(건설부 국립연구소, 1960). 1963년 인천만의 평균해면을 표고기준으로 하여 수준원점이 설치되었으며 1967년에 이르러 2등 수준노선 및 수준점 번호부여방법이 제정되어 현재의 노선-수준점체계가 수립되었다(이창경 외, 2006). 이 당시 수준망은 1등 수준점 806점, 2등 수준점 4,000점으로 총 4,806점의 표고 기준점 계획이 수립되었다.

따라서 국토지리정보원(당시 국립지리원)에서는 1974년부터 1986년까지 1등 수준측량 관측값을 타원보정하여 정규정표고로 환산한 후 인천 수준원점을 고정하여 망조정하였다(국립지리원, 1987). 1987년 수준망 조정성과인 KLN1987은 2006년까지 사용되어 왔으나, 2006년 수준점 조사 당시 국가의 빈번한 도로 확장공사로 인하여 1등 수준점의 30%, 2등 수준점의 약 70%가 망실된 것으로 나타나 민원이 끊이지 아니하였다. 이에 따라 국토지리정보원에서는 1990년부터 1999년까지 1등 수준망을 재측하였고, 2000년부터 2010년까지 2등 수준망과 일부 1등 수준점을 재측량하였다. 이는 <표 6-8>의 2011년도 국토지리정보원의 국가기준점 정비사업 발주문서에도 나타나 있다. <표 6-8>에서 보는 것과 같이 2010년까지 국토지리정보원이 수준측량을 시행한 수준점수는 7,724점이었으며, 일부 점의 신설을 포함하여 276점을 남겨둔 상태였다.

<표 6-8> 국가기준점 정비사업(국토지리정보원, 2011b)

구 분	전체계획	'10까지	잔 량	비 고
- 삼각점유지관리	16,410점	5,393점	11,017점	
- 수준점정비	8,000점	7,724점	276점	향후 일부 신설
- 통합기준점	1,197점	1,197점	-점	향후 유지관리
- 중력측량(수준점 부문)	6,800점	6,800점	-점	향후 삼각점 추진
계	32,407점	21,114점	11,293점	

이렇게 <표 6-8>에 집계된 국가기준점 정비사업중 수준측량으로 발주된 사업지구와 기준점 수량을 <표 6-9>에 자세하게 수록하였다. <표 6-9> 우리나라 연도별 수준측량 수행 사업지구 및 노선수에서는 최근 2021년까지 수행된 연도별 수준측량 사업지구 및 노선수를 국토지리정보원의 수준측량 자료 DB를 바탕으로 정리하였다.

<표 6-9> 우리나라 연도별 수준측량 수행 사업지구 및 노선수

사업년도	사업지구수	사업지구	노선수
2000	2	경기, 강원	56
2001	3	경기-충북, 청송, 태백	225
2002	4	경북, 경남, 예천-강진, 화천-청송	221
2003	7	관기-군위, 동곡-언양, 미원-음성, 보은-대진, 청송-의성, 춘양-예안, 화북-영천	506
2004	14	강화, 공주, 당진, 보령, 봉화, 삼척, 서산, 속초, 양평, 인제, 제천, 진천, 청양, 홍천	1,352
2005	13	거제, 거창, 고창, 곡성, 담양, 무주, 부안, 익산, 임실, 철원, 파주, 합천, 화천	1,252
2006	17	남해, 진주-나주, 마산-대구, 구례, 순천, 산청-익산, 인천-인제, 청주-음성, 경주-대전, 부산-울진, 영암, 영주-강릉, 부안-홍성, 여수, 예산-연기, 화순, 칠곡-충주	1,272
07	9	고흥, 안성, 양구, 와도, 제주2, 진도, 평창, 해남, 제주1	843
2008	14	경기지구, 경북지구, 무주, 문경, 순창, 양산, 장성, 전의, 철원, 청송, 강원지구, 충청지구, 경기지구, 충청1지구	1,303
2009	15	강원, 경북, 군산, 남양주, 목포, 안성, 영종, 울릉, 전남, 충주, 광주, 대구, 무주, 부산, 서해	1,417
2010	8	신규사업, 정비사업, 속초, 남해, 서해, 삼척, 속초, 춘천	750
2011	6	경남, 전남, 8환1, 8환2, 8환3, 국가검기선장	556
2012	11	9환1, 9환2, 9환3, 11환1, 11환2, 11환3, 20환1, 20환2, 20환3, 경기북부, 국가기준점이전사업	1,105
2013	6	7환1, 7환2, 7환3, 7환4, 7환5, 국가기준점이전사업	823
2014	28	수준측량1, 수준측량2, 수준측량3, 수준측량	1,224

		4, 국가기준점이전사업, 방산지구, 서화지구, 공주지구, 광주지구, 간성, 오호, 속초, 연곡, 강릉, 봉평, 도암, 구정, 임계, 정선, 청일지구, 춘천지구, 안흥, 평창, 원주, 포천지구, 갈말지구, 일동지구, 철원지구	
2015	34	국가기준점이전사업, 김화지구, 문산지구, 영월, 단양, 미원, 보은-대전, 보은-보은, 서울-서울, 서울-안양, 성동-성동, 성동-수원, 아산-아산, 아산-당진, 예산-예산, 원주-원주, 원주-홍천, 인천-김포, 인천-강화, 인천-인천, 인천-용유, 제천-제천, 제천-덕산, 진천-음성, 진천-진천, 청양, 충주-엄정, 충주-충주, 태백-목호, 태백-삼척, 태백-매원, 태백-태백, 태백-장성, 평택-평택	1,590
2016	32	국가기준점이전사업, 갈담-갈담, 갈담-정읍, 고창-고창, 구미, 김천/김천, 김천/영동, 남원-임실남원, 남원-함양운봉, 단양, 목포(목포), 목포(영암), 목포(와도), 부안-법성, 부안-부안, 부안-위도, 순창-담양, 순창-순창, 완도, 왜관, 임실-임실, 임실-조도, 해남, 홍성, 화원(진도), 화원(화원), 관기-군위, 문경, 상주, 속리, 안계, 예천지구	1,330
2017	25	대구도엽, 영천도엽, 청도도엽, 이천도엽, 여주도엽, 안성도엽, 장효원도엽, 언양, 울산, 양산, 방어진, 부산, 제주지구-기타노선, 제주지구-모슬포노선, 제주지구-서귀노선, 제주지구-성산노선, 제주지구-제주노선, 제주지구-표선노선, 제주지구-한림노선, 창원지구, 강원지구, 경기지구, 전라지구, 국가기준점이전, 서남해안지역	1,443
2018	59	국가기준점이전사업, 거제지구, 거창지구, 구례지구, 남해지구, 논산지구, 무주지구, 방산지구, 양수지구, 용인지구, 장흥지구, 전주지구, 창녕지구, 연구-갈담, 연구-거제, 연구-고남, 연구-공주, 연구-금산, 연구-김해, 연구-남원, 연구-남지, 연구-논산, 연구-대전, 연구-마산, 연구-무주, 연구-밀양5, 연구-보령, 연구-부산, 연구-사천, 연구-서산, 연구-	773

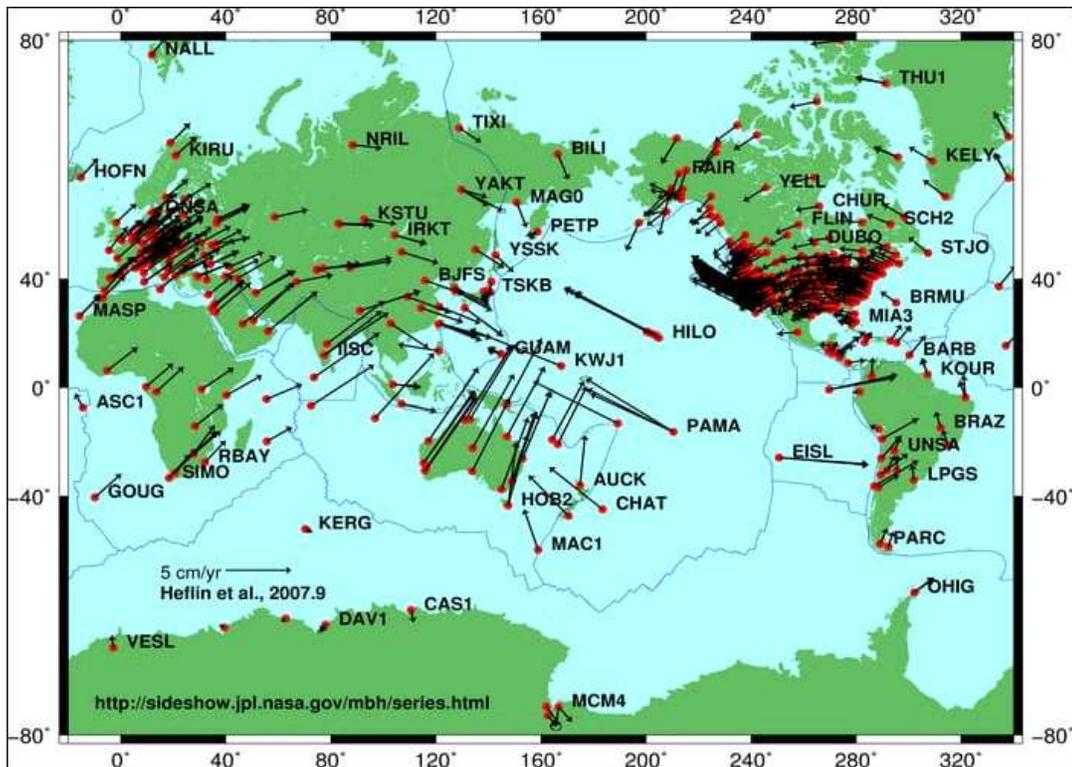
		서천, 연구-수원, 연구-신은, 연구-안성, 연구-엄정, 연구-여주, 연구-예산, 연구-용인, 연구-운봉, 연구-원주, 연구-음성, 연구-이원, 연구-이천, 연구-임실, 연구-장호원, 연구-전의, 연구-전주, 연구-진안, 연구-진주, 연구-진천, 연구-청양, 연구-청주, 연구-충주, 연구-통영, 연구-평택, 연구-한산, 연구-함안, 연구-함양, 연구-홍성	
2019	86	국가기준점이전사업, 경주지구, 병곡지구, 설악지구, 영덕지구, 예안지구, 의성지구, 청송지구, 연구-가야, 연구-간성, 연구-감포, 연구-강릉, 연구-강화, 연구-거제, 연구-경주, 연구-관기, 연구-교동, 연구-구미, 연구-구정, 연구-기계, 연구-길안, 연구-김천, 연구-김포, 연구-김해, 연구-내평, 연구-당진, 연구-대구, 연구-도암, 연구-동곡, 연구-마산, 연구-매원, 연구-문경, 연구-미원, 연구-병곡, 연구-보은, 연구-부산, 연구-부안, 연구-삼가, 연구-상주, 연구-서울, 연구-설악, 연구-성동, 연구-소천, 연구-속리, 연구-속초, 연구-수원, 연구-, 아산, 연구-안계, 연구-안동, 연구-양구, 연구-양산, 연구-양수, 연구-엄정, 연구-영동연구-영양, 연구-영월, 연구-영주, 연구-영천, 연구-예미, 연구-예안, 연구-예천, 연구-왜관, 연구-용두, 연구-울산, 연구-울진, 연구-원주, 연구-이원, 연구-이천, 연구-인제, 연구-일동, 연구-정선, 연구-제천, 연구-죽변, 연구-창녕, 연구-창원, 연구-청도, 연구-청송, 연구-춘양, 연구-춘천, 연구-태백, 연구-통영, 연구-합천, 연구-현리, 연구-화북, 연구-화천, 연구-통합기준점신설	575
2020	11	국가기준점이전사업, 덕산지구, 보령지구, 사천지구, 안동지구, 언양지구, 여주지구, 영암지구, 임계지구, 정읍지구, 홍천지구	844
2021	10	고흥지구, 곤양지구, 광주지구, 김해지구, 나주지구, 남원지구, 부산지구, 영암지구, 자은지구, 해남지구	800
합 계	414		20,260

국토지리정보원의 수준측량 자료 DB를 바탕으로 정리한 <표 6-9> 우리나라 연도별 수준측량 수행 사업지구 및 노선수를 보면 2000년부터 2010년까지 수행된 수준측량 기준점 수가 9,197점이었으며 2011년부터 2021년까지 수행된 수준측량 기준점 수는 11,063점이었다.

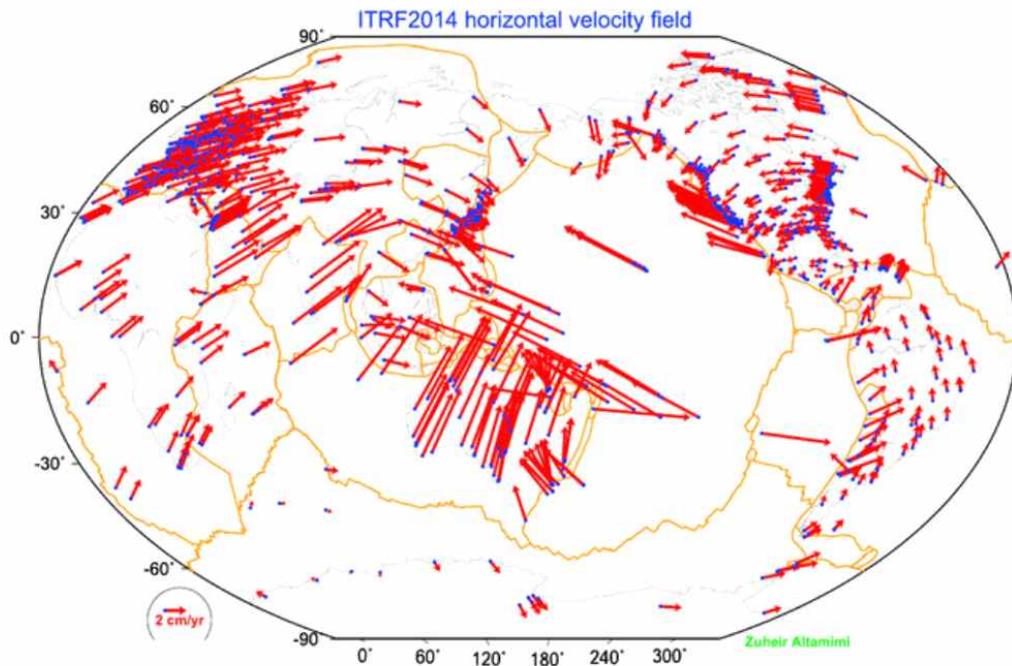
2021년 국토지리정보원에서 고시하고 있는 표고기준점 정보는 수준점 5,981점, 통합기준점 5,580점으로 11,561점으로 2011년부터 2021년까지 수행된 수준측량 기준점 수를 약간 상회하는 숫자이다. 따라서 11년간에 걸쳐서 수준측량을 수행한 기준점수는 2021년을 기준으로 국토지리정보원에서 관리하고 있는 수직기준점 수와 유사하므로 전국을 수준측량하는데 11년 정도가 걸린다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제로 국토지리정보원의 수준측량 자료 DB와 망조정계산을 위한 환폐합차점검부를 살펴보면 2002년부터 2011년까지의 수준측량 자료중 상당수가 아직도 수준환 구성에 사용되며 망조정계산에 이용되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 일부구간은 계속하여 중복 관측되고 있지만 다른 일부구간은 새로운 관측이 이루어지지 않고 있다는 것을 말해주는 것으로, 이 사실은 <표 6-9> 우리나라 연도별 수준측량 수행 사업지구 및 노선수를 통해서도 확인가능하다. 2011년부터 2013년까지는 8환, 9환, 20환, 7환 등 1등환을 기준으로 구역을 분할하여 순환 발주되고 있는 것을 보여주지만 2014년 이후에는 구역에 따른 순환발주 양상을 보기 어려우며 최근 들어서는 불량노선에 대한 수준측량 위주로 발주되고 있는 듯한 모습이다. 이러한 발주 양상은 수준망의 강도가 약한 불량노선을 집중적으로 개선시킬 수 있는 단기적 효과는 가져올 수 있으나 장기적으로 균등하고 효율적인 수준노선 관리에 있어서는 어려움을 초래할 수도 있다. 따라서 2001년부터 2011년까지 국가 전체를 권역별로 수준측량 재정비 계획을 수립하여 진행하였던 방식에서의 회귀가 필요한 시점이라고 할 수 있다.

2) 국가수직기준망 재정비의 필요성

지구는 정형화된 고체로서 고정되어 있는 것이 아니며 회전하고 움직이며 수평과 수직방향으로 여러 가지 변형을 만들어낸다. 이는 국민들이 필요로 하는 공간정보를 정확하게 제공하기 위하여 국가가 기준점을 주기적으로 관측하고 관리해야만 하는 기본적인 이유이다.



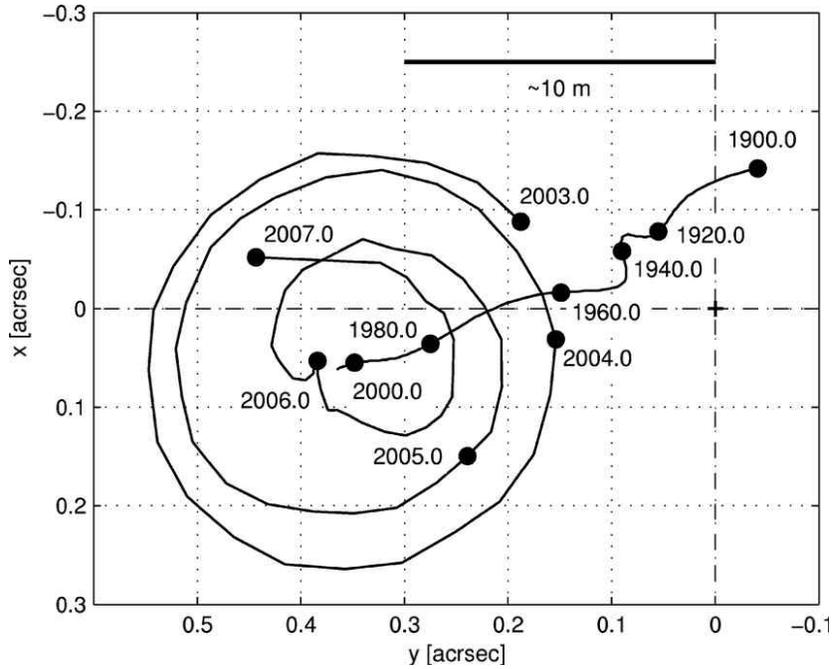
[그림 6-19] GPS로 측정한 지각판 운동(NASA, JPL)



[그림 6-20] ITRF2014 기준 수평지각판 운동(IERS)

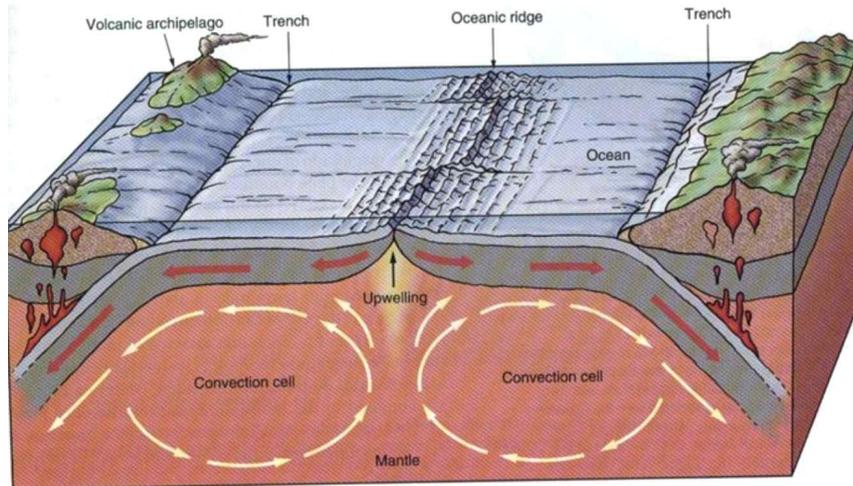
[그림 6-19] GPS로 측정한 지각판 운동(NASA, JPL)과 [그림 6-20] ITRF2014 기준 수평지각판 운동(IERS)에서는 지각판의 거동을 보여주고 있다. 이 자료에 따르면 한국은 태평양의

중심쪽인 남동쪽으로 연간 3cm씩 이동하고 있으며, 일본은 남동쪽으로 연간 0.7~0.8cm씩, 호주는 약 6cm씩 북동쪽으로, 아메리카 대륙은 2~3cm씩 태평양 중앙을 향해 움직이고 있는 것으로 나타났다. 일본은 우리나라와는 달리 여러 개의 지각판에 걸쳐 있어 일정한 패턴을 만들어내지 못하고 있다.



[그림 6-21] 지구 극축(north pole)의 변화(1900~2007년)

[그림 6-21] 지구 극축(north pole)의 변화(1900~2007년)은 지난 107년 동안의 지구의 운동으로 인하여 지구 극축(north pole)이 어떻게 변화하는지를 보여주는 그림이다. 이러한 극축의 변화는 평면위치뿐 아니라 궤고 변화도 가져오는 요인이 되고 있다.



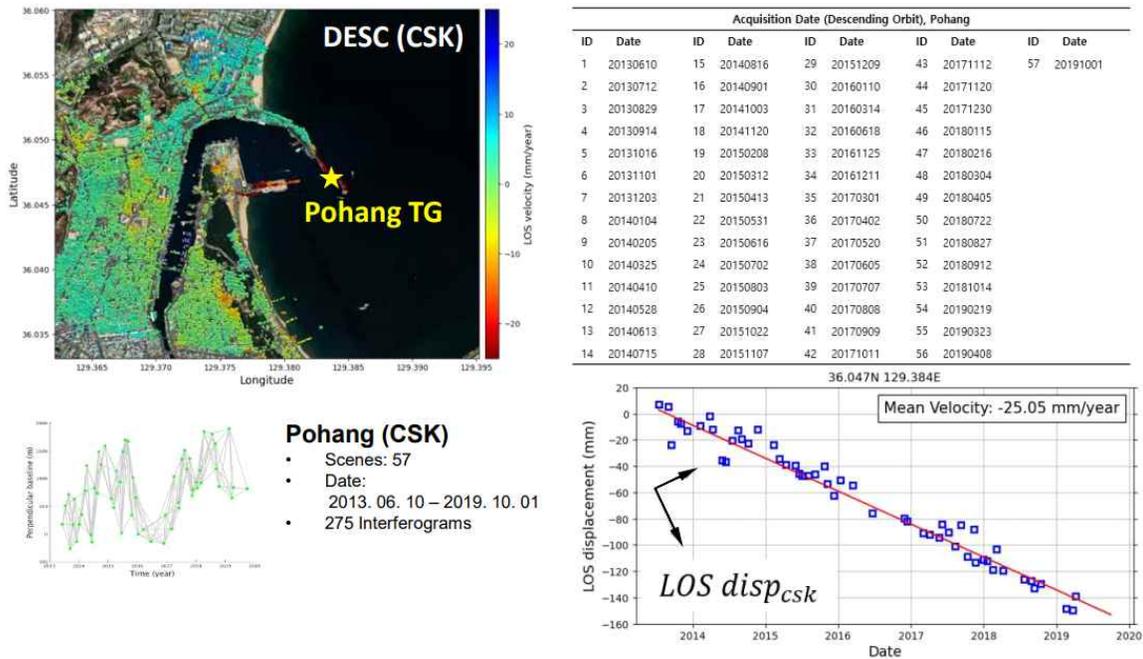
[그림 6-22] 지구의 운동

수직방향에 있어서도 지구는 여러 가지 변형을 만들어 낸다. [그림 6-22] 지구의 운동과 같이 지각판 운동, 화산활동, 해수의 흐름 등과 같이 지구는 끊임없이 운동하고 있기 때문이다. 전지구 평균해수면인 지오이드 상에서의 포텐셜 수를 의미하는 W_0 는 기후 변화 등으로 인해 평균해수면에 변동이 발생하므로 꾸준히 계산 및 갱신되어 오고 있다. 전세계적인 위치기준 체계인 ITRF를 유지관리하고 있는 IERS에서 전세계 표고기준의 통일을 위하여 전지구 평균해수면에 대한 포텐셜 수(potential number) W_0 를 발표해 오고 있는데, 1996년 IERS Convention에서 발표한 $W_0 = 62,636,856.85\text{gpu}$ 이었는데, 2010년에 발표한 $W_0 = 62,636,856.85\text{gpu}$ 이었다. 이를 높이차로 환산하면 [그림 6-8]에서 보는 것과 같이 10cm 이상의 차이를 나타내고 있다. 이는 표고의 기준 또한 시간에 따라 변하고 있음을 보여주는 것이다.

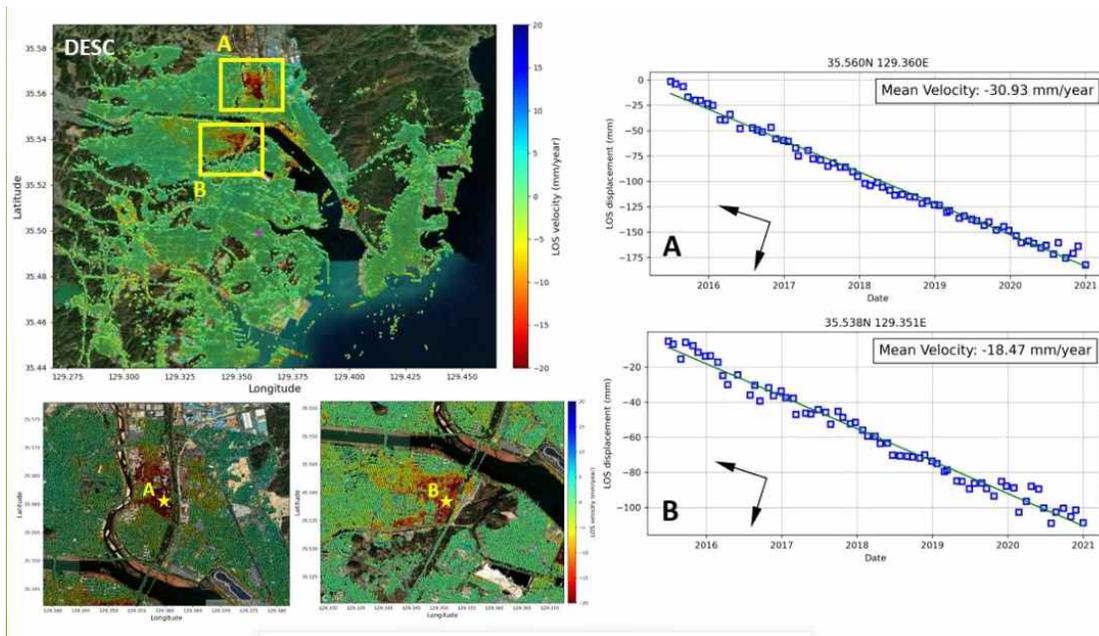
우리나라 수직방향의 지각변동 속도에 관한 학술연구는 많지 않다. 김수경 등(2012)은 ‘한반도 지각의 2011 도호쿠 대지진 영향분석’에서 도호쿠 대지진 이후 한반도에서 남북방향으로 0.21cm, 동서방향으로 2.75cm, 수직방향으로 0.37cm 이동하였다고 주장하였다. 또 박준규(2010)는 2005년 9월에서 2006년 8월까지의 GPS 관측자료를 처리하여 양산 상시관측소의 Z방향 이동속도가 $-19.9\text{mm} \pm 0.9\text{mm}$ 라고 발표하였다. 이는 표고가 연간 약 2cm가 움직인다는 것을 GPS 관측결과로 밝혀낸 수치로서 매우 의미 있는 연구결과라고 할 수 있다. 이렇게 지구는 지구의 극운동, 지각판 운동, 지진 등의 크고 작은 영향으로 수평방향으로의 변위와 함께 수직방향으로의 변위를 내포하고 있다. 이러한 변위가 몇 년동안 쌓이게 된다면 지역에 따라서 상당한 차이를 발생하게 되고 민원을 유발하는 요인이 되고 있다.

최근 한반도 주변에 지각활동이 활발해지면서 우주측지기술을 이용한 지각변동 연구가 주목을 받고 있다. 국토지리정보원(2021b)에서 수행한 ‘우주측지기술 및 SAR 영상을 이용한 광역 지각변위 실증 연구’ 결과를 보면 우리나라에서의 지각변위를 보다 분명하게 파악할 수 있다. 우리나라는 동일본대지진이나 바이칼 호수 일대 지진과 같은 한반도 주변지역의 지진과 경주·포항지진이나 제주도 일대 지진과 같은 우리나라 내에서의 지진 등이 활발해지면서 다양한 형태로 지각변위가 발생하고 있고, 아울러 지하수위의 변화나 해수면 변화와 같은 지각변동 이외의 환경변동으로 인한 지각변동도 활발하게 발생하고 있다. 국토지리정보원(2021b) 연구에서는 해수면 상승과 관련하여 연안 지반변위 분석 결과 [그림 6-21]에서 보는 것과 같이 포항 조위관측소에서 2013년부터 2019년까지 6년간의 SAR데이터 해석결과 -25.05mm/year 의 속도로, GNSS 분석결과 -26.35mm/year 의 속도로 지반 침하가 발생하고 있었음을 밝혀냈으며, 제주 조위관측소에서는 지난 5년간의 SAR 데이터 분석결과 -3.34mm/year 의 속도로 지반침하가 발생하였음을 밝혀냈다.

- 높은 해수면 상승률을 보이는 조위관측소 부지에 대한 지반침하 발생 여부 분석 (포항, CSK)



[그림 6-23] SAR 데이터에 의한 포항 조위관측소의 지반침하 해석결과 (국토지리정보원, 2021b)



[그림 6-24] SAR 데이터에 의한 포항 형산강 주변의 지반침하 해석결과 (국토지리정보원, 2021b)

우리나라 주요 강의 하류지역에서는 비닐하우스 재배가 활발하게 이루어지고 있다. 이는 농가소득 증대 사업의 일환으로 지방자치단체마다 비닐하우스 재배를 장려하고 지원한 결과이며 이를 통해 많은 농가가 고소득을 올리고 있는 것이 사실이다. 그러나 대부분의 비닐하우스에서 작물의 사철 재배를 위하여 관정을 뚫고 지하수를 이용하여 비닐하우스 난방에 활

용하고 있다. 그런데 강 주변에 매우 많은 비닐하우스가 밀집하게 되고 많은 수의 지하수 관정이 뚫리고 많은 양의 지하수를 끌어올려 사용하다 보니 지하수위가 내려가는 문제가 발생하게 되었다. 이러한 지하수위의 하강에 따라 기존 지하수가 차있던 상부 지역에는 공동이 발생하고 또 시간이 지나면서 이 공동이 주저앉아 침하를 일으키는 원인으로 작용하게 되었다. 따라서 우리나라 주요 강의 하류지역에서는 지반침하가 지속적으로 발생하고 있고 주변 지역의 표고변화를 일으키는 요인이 되고 있다. [그림 6-28] SAR 데이터에 의한 포항 형산강 주변의 지반침하 해석결과를 보면 형산강 북쪽의 A지역에서는 -30.93mm/year 의 속도로, 형산강 남쪽 지역의 B지역에서는 -18.47mm/year 의 속도로 지반침하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 비슷한 지역이라 할지라도 지역에 따라 큰 편차를 가지고 지반침하가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 이유들은 국가 수직기준망을 재정비하여 주기적으로 관측하여야 하는 요인들로 작용하고 있으며, 그 필요성을 요약하면 다음과 같다.

- 지구는 회전하고 움직이며 수평과 수직방향으로 여러 가지 변형을 만들어 냄
- 한반도 주변의 활발한 지각활동에 따른 변위 발생
- 아모르판 주변의 활발한 지진 활동
- 지구 극축의 변화 및 해수면 변화
- 주요 국가하천 하류지역의 지하수위 하강에 따른 지반침하 발생
- 스마트건설에 대비한 고정밀 표고 서비스의 수요 증대

3) 국가수직기준망 재정비 방안

<표 6-9> 우리나라 연도별 수준측량 수행 사업지구 및 노선수에서 살펴본 바와 같이 우리나라 수준측량의 발주는 2000년부터 2010년까지는 권역에 따라 순환발주가 이루어졌으며, 2011년부터 2021년까지는 권역별 순환발주와 불량노선 우선 발주방식이 혼재되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 이제 어느 정도 불량노선이 해소되었고 3차원 기준점망의 구성, 통합 기준점의 증대 등 새로운 국가기준점망의 수요와 필요성에 따라 국가수직기준망을 재정비하여야 할 시점이다. 이에 따라 국가수직기준망 재정비 방안을 요약하면 <표 6-10> 국가수직기준망 재정비 방안과 같다.

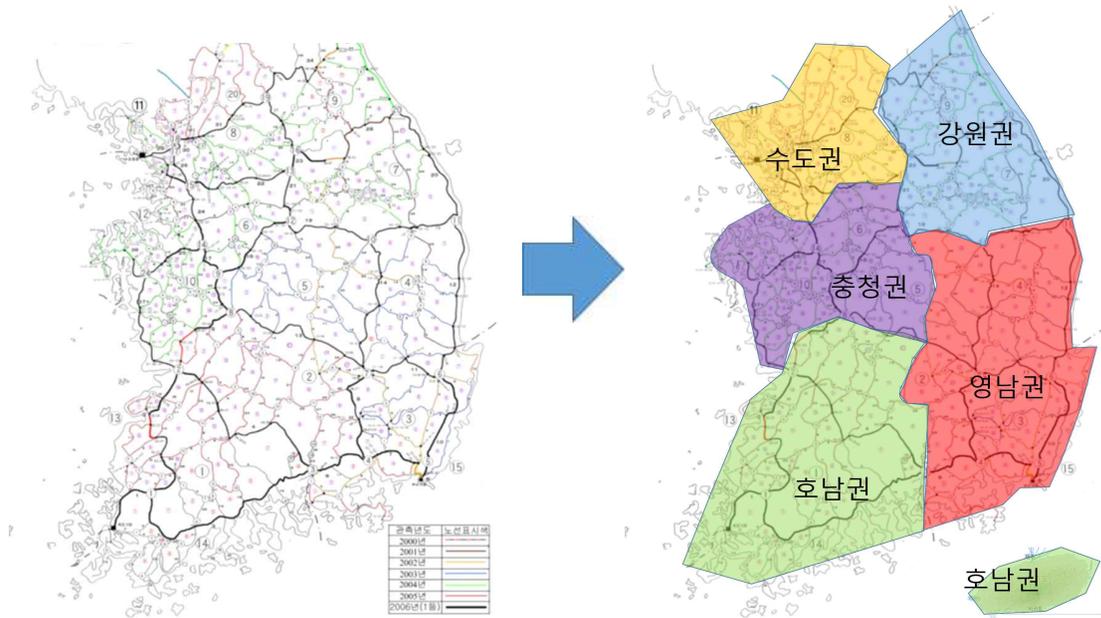
<표 6-10> 국가수직기준망 재정비 방안

예측가능 표고성과 관리시스템 구축	고정밀 표고의 대국민 서비스 강화
<ul style="list-style-type: none"> - 전국의 권역 구분에 의한 기준점 관리 - 권역별 수준측량 순환발주 방식 적용 - 3차원 기준점망(6,600점)의 집중 관리 - 수준환의 소규모화(정밀도 향상) - 개방 통합기준점의 수준환 연결 	<ul style="list-style-type: none"> - 수직기준점의 표고정확도 개선 (1등수준측량 기준 적용) - 수준점의 3차원 기준점화 - 수준측량 데이터의 디지털 DB화 - 정표고산출 프로그램 개발 - 정표고체계 전환 로드맵 수립

<표 6-10> 국가수직기준망 재정비 방안은 예측가능한 표고성과 관리시스템 구축과 고정밀 표고의 대국민 서비스 강화의 두가지 방안으로 나뉘고 있다.

먼저 예측가능 표고성과 관리시스템 구축을 위해서는 ① 전국의 권역 구분에 의한 기준점 관리 ② 권역별 수준측량 순환발주 방식 적용 ③ 3차원 기준점망(6,600점)의 집중 관리 ④ 수준환의 소규모화(정밀도 향상) ⑤ 개방 통합기준점의 수준환 연결이 추진되어야 한다.

전국의 권역 구분에 의한 기준점 관리는 [그림 6-25]와 같이 환중심의 수직기준망 관리에 권역 레이어를 추가하여 권역중심의 수직기준망 관리로 전환하는 것을 의미한다. 이는 우리나라 수준측량의 역사에서 1990년부터 1999년까지 1등 수준망을 재측하였고, 2000년부터 2010년까지 2등 수준망을 재측량하여 10년 주기의 관측을 완성해 온 것을 알 수 있다. 그러나 1990년부터 2010년까지는 지금과 같은 기준점 관측예산이 확보되지 못한 시기로 전체 20년이 걸렸으나 이제는 기준점 관측 예산이 확보될 수 있기 때문에 전국을 10년 주기로 관측하는 것이 타당하다고 사료된다. 이렇게 10년 주기의 관측을 하기 위해서는 전국을 수도권, 강원권, 충청권, 영남권, 호남권의 5개 권역으로 구분하고 지역별 순환발주 방식을 도입한다면 예측가능한 측량과 관리가 이루어 질 수 있을 것으로 기대된다. 이렇게 볼 때 수준측량 대상은 3차원 기준점 6,600점(노선거리 19,800km)과 3차원기준점화로 줄어드는 수준점 수를 고려할 때 수준점 약 3,100점(6200km)이 되므로 전체 수준측량 노선거리는 약 26,000km가 된다. 따라서 10년 주기의 관측이 수행된다면, 연간 수준측량 물량은 2,600km이고 예산은 약 104억을 필요로 하게 된다. 이는 우리나라가 측지선진국으로 발돋움하고자 하는 시점에서 부담할 수 있는 적절한 기준점측량 수준으로 판단된다.



[그림 6-25] (a) 환 중심의 수직기준망

(b) 권역 중심의 수직기준망

고정밀 표고의 대국민 서비스 강화를 위해서는 ① 수직기준점의 표고정확도 개선(1등수준 측량 기준 적용) ② 수준점의 3차원 기준점화 ③ 수준측량 데이터의 디지털 DB화 ④ 정표고산출 프로그램 개발 ⑤ 정표고체계 전환 로드맵 수립이 필요하다.

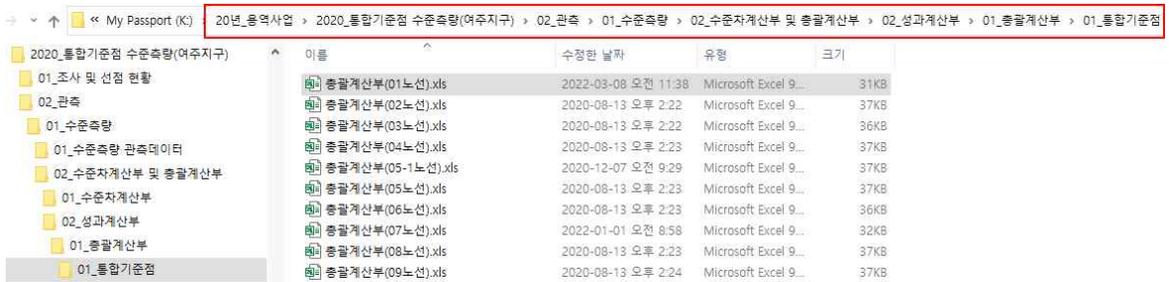
이번 연구사업을 통하여 전국 수직기준점의 정규정표고와 정표고가 전국 동시망 조정으로 산출되었다. 그러나 아직 정표고체계로의 전환 준비가 미흡한 부분이 있으므로 국토지리정보원에서도 이러한 부분의 준비를 서둘러야 할 시점이다. 따라서 정표고 전환 로드맵은 1) 2021년 전국 수직기준점 정표고 시범산출, 2) 2022년 개방 통합기준점(3차원기준점)의 수준환 연결, 3) 2023년 중력성과 미보유 기준점의 중력측량 완성 및 정표고 전환 작업규정 개정 4) 2024년 전국 통합망조정 정표고 산출 및 성과 고시와 정표고 산출 프로그램 서비스로 진행하는 것이 타당하다고 사료된다.

라. 통합기준점 기반 수준점 정보 관리 체계의 개선

1) 수준점 관리 및 수준환 구성의 한계

2021년 고시성과 기준 수준점 5981개와 통합기준점 5580개(이하 기준점)를 관리하고 있으며, 계속된 측량 사업으로 인하여 기존에 관리하던 수준노선의 변화가 크다. Excel 형식의 총괄계산부 파일과 AutoCAD 형식의 노선도로 관리하던 방식으로는 더 이상 방대한 양의 기준점을 효율적으로 관리할 수 없는 상황에 이르렀다.

특히 Excel 형식의 총괄계산부 파일은 방대한 노선 정보 검색 및 관리에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 사업지구별로 수집한 측량 성과의 폴더 구조에서 총괄계산부는 작게는 4단계, 크게는 8단계의 하위 폴더에 존재한다[그림 6-26].



[그림 6-26] 총괄계산부의 복잡한 폴더 트리 구조

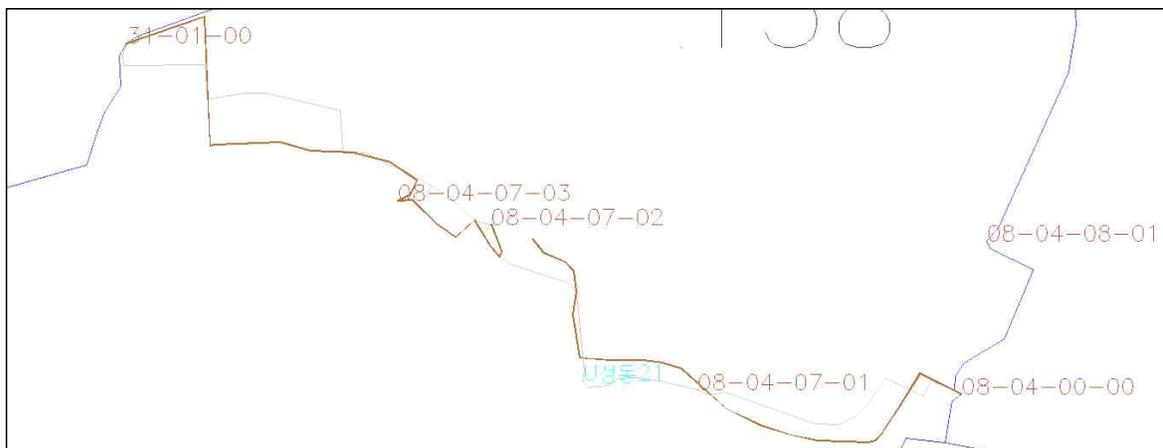
총괄계산부의 파일명은 “수준측량계산부”, “성과계산부”, “총괄계산부”, “수준총괄계산부”, “[노선]”, “[시작기준점]~[종료기준점]” 또는 이들의 조합으로 구성되어 일관성이 없다. 아울러 찾고자 하는 노선이 시·종 노선이 아닐 경우 해당 노선이 존재하는 총괄계산부를 찾는 것이 매우 어렵다. 총괄계산부의 구성도 일관성을 가지지 못한다. 하나의 Excel sheet에 다수의 노선 정보가 존재하는 경우, 노선마다 서로 다른 sheet에 존재하는 경우, 노선마다 서로 다른 Excel에 존재하는 경우가 있다. 과거의 총괄계산부는 노선 번호가 한 자리로 된 경우가 있고 Excel이 아닌 한글(HWP)이나 PDF로 되어 있는 경우도 있다[그림 6-27]. 따라서 총괄계산부를 검색하고 그 내용을 열람하는 작업을 자동화하기 어렵고, 수준환을 구성하면서 단절된 구간이 있을 때 이를 이어줄 노선이 존재하는지 확인하기 어려우며, 같은 노선에 대한 최신 성과가 존재하는지 확인하기도 어렵다.

순번	점 번호	거리 (m)	누적 거리(m)	왕	복	평균		A	B	C	D	E	F
1	12-8-0-0							1	26-04				
2	12-8-20-1	847	847	+12.2217	-12.2237	+12.2227		2	12-12-29-1	2960	2960	+0.0094	-0.0110
3	12-8-20-2	1,667	2,514	+28.4664	-28.4659	+28.46615		3	12-12-29-2	2518	5478	+26.3292	-26.3316
								4	12-12-29-3	1992	7470	-18.4566	+18.4570
								5	32-04-1	2010	9480	-12.9115	+12.9133

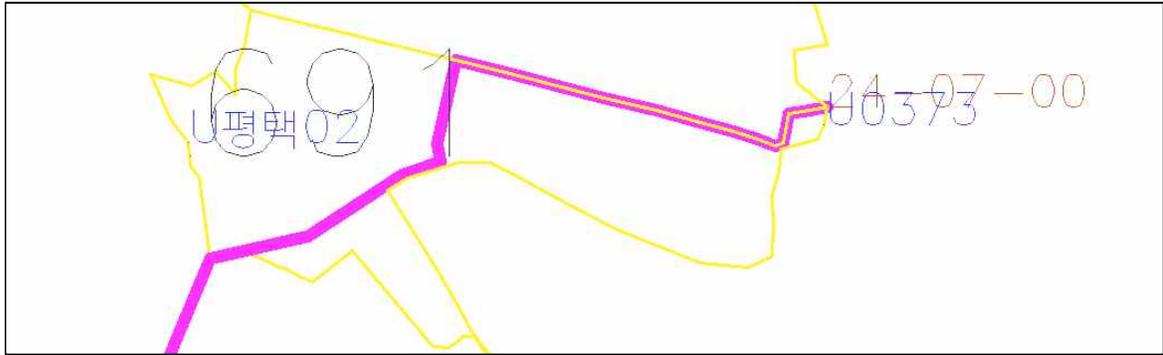
[그림 6-27] 한 자리 노선 번호로 구성된 총괄계산부: (좌) 한글(HWP) 형식, (우) Excel 형식

본 연구에서는 국토지리원에서 취득 가능한 측량 성과로부터 총괄계산부를 전수 조사하고 목록을 작성하여 수준환 구성에 활용하였다. 그러나 목록 제작에 많은 노력이 소요되고 자료 누락의 가능성이 있으며 필요한 노선의 검색 및 정보 활용에도 여전히 비효율적인 면이 존재한다.

수준환에 새로운 노선 측량 성과가 추가되었을 때 기존 환을 분할할지, 아니면 단순히 기존 노선을 대체할지 판단을 필요로 있다. 이 때 AutoCAD 도면과 같이 노선을 가시적으로 확인할 수 있는 자료가 필요하다. 그러나 AutoCAD 도면에 새로운 노선을 추가할 때, 신·구 기준점의 혼동으로 인한 작도 오류, 신·구 노선의 겹쳐 보임, 서로 다른 도면(좌표계)에서 작도함에 따른 신·구 노선의 부정합, 기타 작업자의 착오 등으로 인해 정확하게 확인하기 어려운 경우가 발생한다[그림 6-28, 29]. 이 경우 다시 총괄계산부를 열람하여 수준점 간의 연결 관계를 정확하게 파악해야 한다. 보다 근본적으로 또한 AutoCAD 도면의 각 노선은 폴리라인 개체로서, 노드의 속성 정보(기준점명, 표고)를 담지 못하여 노드 간 위상관계를 구성할 수 없으므로, 정확한 의미에서의 수준환을 구성할 수 없다. 아울러 AutoCAD 도면과 총괄계산부는 별도의 파일로 존재하므로 노선의 변화 또는 오류를 인지했을 때에는 상호 수정해줘야 하는 불편이 따른다.



[그림 6-28] AutoCAD 노선도에서 신·구 노선의 부정합



[그림 6-29] AutoCAD 노선도에서 환의 위상관계 파악이 어려운 예

수준환을 Excel 형식의 환폐합차점검부(이하 점검부)로 구성·관리하는 방식도 개선할 필요가 있다. 환을 구성하는 기존 노선의 수정 또는 삭제, 새로운 노선의 추가, 환의 분할 또는 새로운 환의 구성 등의 작업에서 셀의 형식 유지, 값 계산 및 참조를 위한 수식의 복사 등의 작업에 비교적 높은 숙련도를 요구한다. 환 구성에 변화가 있을 때 적절성 여부는 왕 또는 복합계, 왕복평균, 교차 등으로 파악할 수 있지만 여전히 노선도를 별도로 업데이트해야 하며, 반대의 경우도 마찬가지이다. 더욱이 현행 점검부에는 환 또는 노선의 변화 이력을 포함할 수 없으므로 시계열적 분석이 불가능하다. 한편 한 환의 노선 구성에 변화가 발생했을 때 인접한 환에도 동일한 조치를 취해주어야 하나 이 역시 수동으로 진행해야 하므로 이 과정에서 오류가 발생할 수 있다. 그 외에 기준점명과 관측 결과 입력 및 계산 과정에서 단순 오류가 발생할 수 있다. 상기와 같은 오류는 수준환 조정계산에 과대 오차 발생, 자유도 증가 또는 감소 등의 결정적인 오류를 일으키는 주요 원인이 된다.

결국 현행 수준점 및 수준환 관리 체계에서는 수준환 구성의 자동화 또는 효율성 향상에 한계가 존재한다. 이는 신규 관측에 의한 상시 수준환 조정계산이라는 목표를 달성시키는데 주요 걸림돌로 작용한다고 판단된다. 따라서 기준점 관리 및 수준환 구성을 위한 새로운 체계의 개발의 필요하다.

2) 개선 방안

기준점 정보를 관리하기 위한 국토지리정보원 성과 데이터베이스를 개선 또는 연동하여 노선 정보와 수준환 정보를 함께 관리할 수 있는 종합 수준환 관리 데이터베이스를 신설한다. 기준점 정보, 노선 정보, 수준환 정보 관리 체계 개선 방안과 기대 효과는 다음과 같다.

기존의 조서와 데이터베이스로 관리하던 기준점 기본 정보를 데이터베이스 관리로 일원화한다. 현행 데이터베이스에는 이설, 재설, 재고시 등에 의한 기준점 변동 이력이 존재하지 않으므로, 변동 이력 정보를 관리할 수 있도록 데이터베이스를 개선한다. 현재는 기준점이 어떤 노선 및 환에 포함되어 있는지를 알 수 없으므로, 뒤에 설명할 노선 및 수준환 정보 데이터베이스와 상호 연동하여 기준점의 변동이 영향을 미치는 노선과 환을 파악할 수 있다.

록 한다<표 6-11>.

Excel(한글, pdf) 형식의 총괄계산부로 관리하던 노선 정보를 효과적으로 관리하기 위한 노선 정보 관리 데이터베이스를 신설한다. 노선 정보 관리 데이터베이스에는 노선의 기본 정보를 관리하고, 기준점 정보 관리 데이터베이스와 연동하여 기준점의 변동(기준점명, 고시성과, 중력값 등)이 발생하면 노선의 정보와 해당 노선에 포함된 다른 기준점들의 정보도 함께 변경될 수 있도록 한다. 또한 노선을 구성하는 기준점의 변동 이력을 관리하여 수준환 변동의 시계열적 분석이 가능하도록 지원한다<표 6-12>.

Excel 형식의 환폐합차점검부로 관리하던 수준환 정보를 효율적으로 관리하기 위한 수준환 정보 관리 데이터베이스를 신설하고 수준환의 기본 정보를 관리하도록 한다. 노선 정보 관리 데이터베이스와 연동하여 노선의 변동이 발생하면 해당 노선을 포함하는 모든 환의 정보도 함께 변경됨으로써 수준환의 완결성을 유지하도록 한다. 이 때 교차점검과 환폐합차점검을 자동으로 수행하여 수준환의 유효성을 바로 검증할 수 있도록 하며, 이 과정을 통해 불량 노선을 판별할 수 있는 근거를 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 일부 노선의 추가·삭제·수정에 의한 기존 수준환의 갱신·분할 등이 수월해질 것으로 판단되고, 노선의 위상관계를 바탕으로 수준환을 자동으로 구성하기 위한 알고리즘 개발의 기반을 제공할 것으로 기대된다. 수준환을 구성하는 노선의 변동 이력을 관리함으로써 수준환 변동의 시계열적 분석이 가능함은 물론, “신규 노선으로 기존 노선을 대체”하거나 “신규 노선에 의해 수준환을 분할”하는 등의 의사결정을 지원할 수 있으며, 신규 또는 과거 노선의 사용으로 인한 수준환 조정계산 결과를 비교·분석할 수 있도록 한다<표 6-13>.

<표 6-11> 기준점 정보 관리 데이터베이스의 개선 효과

	현행	개선
기본 정보 (기준점명, 경위도, 표고, 중력값 등)	조서, 데이터베이스로 관리	데이터베이스로 관리
변동 이력(이설, 재설, 재고시 정보 등)	일부 조서로 존재, 데이터베이스에는 없음	0
소속 노선, 환 정보	X	0 (노선·수준환 DB 연동)

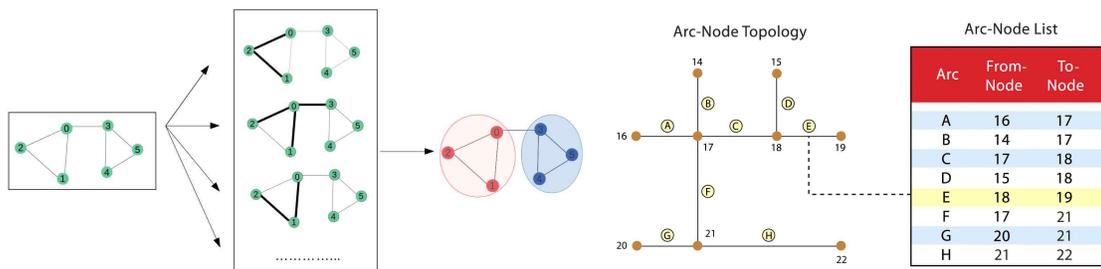
<표 6-12> 노선 정보 관리 데이터베이스의 신설 효과

	현행	개선
기본 정보 (시중점, 거리, 관측결과, 사업명 등)	Excel(한글, pdf) 형식 총괄계산부로 관리	데이터베이스로 관리
기준점 변동 반영	수동	자동 (기준점 DB 연동)
기준점 변동 이력	X	0

<표 6-13> 수준환 정보 관리 데이터베이스의 신설 효과

	현행	개선
기본 정보 (환번호, 사업명, 계산 및 확인자 등)	Excel 형식 환폐합차점검부로 관리	데이터베이스로 관리
노선 변동에 따른 재계산	반자동(수동입력 + 수식)	자동(노선 DB 연동)
취약(불부합) 노선 인식	수동	(반)자동
수준환 갱신·분할·신규구성	수동	(반)자동
수준환 변동 이력	X	O
조정계산 결과 및 이력	X	O

상기 기준점, 노선, 수준환 정보 관리 데이터베이스를 구성하기 위해서는 자료 간 연계를 위한 적절한 테이블의 구성과 양방향 노드-링크 구조의 관계형 데이터베이스의 설계가 필요하다. 기준점명이 자료 간 연계를 위한 기본 키(key)가 되겠지만 향후 수준환의 통합기준점 전환, 기준점의 상태 변경(사용 불가, 폐기)을 대비하여 별도의 키를 마련할 필요가 있다. 양방향 노드-링크 구조는 전통적으로 많이 다루어진 구조이지만 교점과 같이 1:多 대응 관계가 발생하는 기준점에서의 원활한 위상관계 정립을 고려할 필요가 있다. 또한 자동 수준환 구성을 위한 알고리즘의 개발에서도 교점에서의 1:多 대응으로 인해 폐합이 완결되지 않고 다른 환으로 연결되는 오류가 발생할 여지가 있으므로 수준환이 올바르게 구성되도록 면밀한 검토가 필요할 것으로 보인다[그림 6-30].



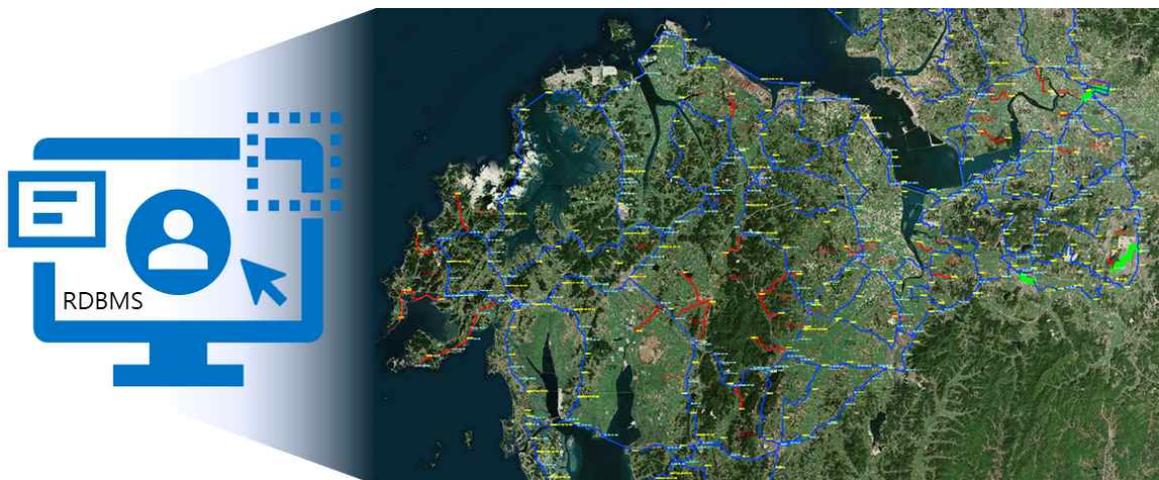
[그림 6-30] (좌) 자동 환 구성의 개념 (Mavachita, 2020), (우) 노드-링크 구조 (Saylor Academy, 2012)

아울러 새로운 관측 성과를 데이터베이스에 입력하기 위해서는 관측 성과의 납품 형식과 방법에 변화가 있어야 한다. 또한 일관성 있고 체계적인 작업지침과 새로운 관측 성과 관리 시스템 운영을 위한 작업지침도 함께 제정할 필요가 있다[그림 6-31].



[그림 6-31] 성과 입력 방법의 변화와 각종 지침의 제정

수준환의 갱신·분할·신규구성 결과를 확인하기 위한 자동 가시화 도구를 개발할 필요가 있다. 이를 위해 오픈소스를 기반으로 하는 기존의 GIS 소프트웨어에 플러그인 형식으로 구현(예, QGIS에 파이썬 플러그인 탑재)하거나 새로운 플랫폼 개발을 고려할 수 있다[그림 6-32]. AutoCAD 도면에 기반한 기존 방식과는 달리 수준환 정보 관리 데이터베이스로부터 기준점과 노선의 위상관계를 전달 받아 자동으로 수준환을 가시화하는 방식으로서, 작업자의 착오로 인한 오류를 방지할 수 있으며 수준환의 변화를 즉시 가시화할 수 있다는 장점이 있다. 노선의 관측 시기, 기준점의 종류(통합기준점, 1·2등 수준점), 사업 권역 등 다양한 조건에 따라 성과를 확인·점검할 수 있는 기능을 구현함으로써, 상대적으로 품질이 떨어지는 수준환을 선택하고 불량 노선을 검출하는 과정을 보다 효율적으로 수행하고, 재측 물량의 산출과 우선순위 도출도 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 서버-클라이언트의 웹 기반으로 구현하여 현장에서 관측 성과를 입력함과 동시에 수준환 구성과 검증을 일괄적으로 수행함으로써 재측 및 추가 관측 여부의 결정, 성과 품질 관리에 도움이 될 것으로 기대된다.



[그림 6-32] 수준환 정보 관리 데이터베이스로부터 수준환 직접 가시화

마지막으로, 수준환 자동 구성 알고리즘을 소프트웨어로 구현하고 국토지리정보원에서 개발 중인 수준환 조정계산 소프트웨어에서 활용할 수 있는 형태로 자료를 추출하는 기능을 구현하도록 한다.

결론적으로 본 제안으로부터 관측 구간 및 물량 설계로부터 관측 성과 입력, 수준환 구성 및 조정계산, 결과 검증에 이르는 전 단계의 효율성 및 신뢰성 향상이 기대된다.

참고문헌

1. 국립지리원 (1987) 정밀수준망의 조정에 관한 연구, 연구보고서
2. 국립지리원 (1988) 2등 수준망의 조정에 관한 연구, 연구보고서
3. 국토지리정보원 (2011a) 정표고 기반 통합측지망 구축에 관한 연구, 연구보고서
4. 국토지리정보원 (2011b) 국가기준점 정비사업 사전정보공개
5. 국토지리정보원 (2015) 新국가위치기준체계
6. 국토지리정보원 (2017) 통합기준점 기반의 높이기준체계 고도화 방안 연구, 연구보고서
7. 국토지리정보원 (2019a) 2025 국가위치기준체계 중장기 기본전략 연구, 연구보고서
8. 국토지리정보원 (2019b) 통합기준점기반의 3차원 국가위치기준망 구축(2차), 연구보고서
9. 국토지리정보원 (2020a) 통합기준점기반의 3차원 국가위치기준망 구축(3차), 연구보고서
10. 국토지리정보원 (2020b) 국가위치기준체계 고도화를 위한 추진 전략방안, 연구보고서
11. 국토지리정보원 (2021a) 남북 SOC사업 지원용 통합기준점 구축 및 글로벌 높이체계 전환 연구, 연구보고서
12. 국토지리정보원 (2021b) 우주측지기술 및 SAR 영상을 이용한 광역 지각변위 실증연구, 최종보고회 발표자료
13. 김두식 (2017) 동일본 대지진 이후 남한지역의 지각운동 분석. 한국측량학회 학술대회 자료집, 55-71
14. 김수경, 배태석 (2012) 한반도 지각의 2011 도호쿠 대지진 영향 분석, 한국측량학회지 30(1), 2012.2, 87-96
15. 김민규, 박준규 (2012) 정밀절대측위에 의한 지진 전 후 동아시아 지역 지각변동 모니터링. 한국측량학회지, 30(5), 477-484
16. 김철영, 이석배 (2011) 우리나라 수준노선에서의 실측중력에 의한 정사보정량 계산, 한국측량학회지 29(3) 319-325
17. 윤홍식, 조재명, (2004) "正射補正에 의한 正標高의 情密計算", 한국측량학회지, 22(2), 117-125.

18. 이석찬, 조규전, 고영호, 이영진 (1987) 우리나라 1등 수준망의 조정, 한국측량학회지, 5(2), 12-23.
19. 이석찬, 조규전, 이영진, 이창경 (1988) 우리나라 2등 수준망의 조정, 한국측량학회지, 6(2), 1-9.
20. 이석배, (2018) 우리나라 산악지에서의 정밀 표고 결정, 지적과 국토정보, 48(2), 2508-3392
21. 이창경, 서용철, 전부남, 송창현, (2008) "2006년 우리나라 1등 수준망 조정", 한국측량학회지, 26(1), 17-26.
22. 이창경, 전부남, 김광배, (2015) "2014년 우리나라 수준망 조정", 한국측량학회 2015 학술발표회, 서울
23. Barda, W. (1968) A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks, Netherlands Geodetic Commission, Delft.
24. Ghilani, C. D. & Wolf, P. R. (2010) Adjustment Computations - Spatial Data Analysis(5th ed), John Wiley & Son., Chap. 9 ~ Chap 12.
25. El-Mowafy, A., Fashir, H., Al Habbai, A., Al Marzooqi, Y., and Babiker, T., (2006) Real-Time Determination of Orthometric Heights Accurate to the Centimeter Level Using a Single GPS Receiver : Case Study, *Journal of Surveying Engineering*© ASCE, 132:1(1), 1-6.
26. Featherstone, W.E., and Dentith, M.C., (1998) A Geodetic Approach to Gravity Data, *Computers & Geosciences*, 23(10), 1063-1070.
27. Heiskanen, W.A. and Moritz, H., (1967), Physical Geodesy, *Freeman and Company*, 160-172.
28. Hofmann-Wellehof, B. and Moritz, H., (2006) Physical Geodesy(2nd ed), *SpringerWienNewYork*, Chap. 4. 156-172.
29. Hwang, C, and Hsiao Y.S., (2003), Orthometric Corrections from Leveling, Gravity, Density and Elevation data : a Case Study in Taiwan, *Journal of Geodesy*, 77, 279-291.
30. Mayachita, I., (2020), Understanding Graph Convolutional Networks for Node Classification, <https://towardsdatascience.com/understanding-graph-convolutional-networks-for-node-classification-a2b9db7aba7b> (accessed Mar., 2022)
31. Moritz, H., (2000), Geodetic Reference System 1980", *Journal of Geodesy*, No. 74(1), 128-162.
32. NASA, JPL, Plate Tectonics,

<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/images/global.jpg>(accessed Feb., 2022)

33. Nassar, M.M., (1977), Gravity Field and Levelled Heights in Canada, *Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report*, 41, 54–72.
34. Pope, A. J. (1976) The Statistics of Residuals and The Detection of Outliers, NoAA technical Report NOS 65 NGS 1.
35. Saylor Academy, 2012, Essentials of Geographic Information Systems, https://saylordotorg.github.io/text_essentials-of-geographic-information-systems/s08-02-vector-data-models.html (accessed Mar., 2022)
36. Strang van Hees, G.L., (1992), Practical Formulas for The Computation of The Orthometric, Dynamic and Normal Heights, *Zeitschrift fur Vermessungswesen*, 727–734.
37. Zilkoski D. B., Richards J. H. and Young G. M. (1992), Result of the General Adjustment of the North American Vertical Datum of 1988, *Surveying and Land Information Systems*, American Congress on Surveying and Mapping, 52(3), 133–149.

