

2006년 우리나라 1등 수준망 조정

Adjustment of 1st order Level Network of Korea in 2006

이창경¹⁾ · 서용철²⁾ · 전부남³⁾ · 송창현⁴⁾

Lee, Chang Kyung · Suh, Young Cheol · Jeon, Bu Nam · Song, Chang Hyun

Abstract

The 1st order level network of Korea was adjusted simultaneously in 1987. After that, the 1st order level network of Korea was adjusted simultaneously by National Geographic Information Institute in 2006. The levelling data were acquired by digital level with invar staff from 2001 through 2006. The 1st order level network consists of 36 level lines. Among them, 34 level lines comprise 11 level loops. Among 36 level lines, 4 level lines have fore & back error larger than the regulations for the 1st order levelling of NGII, Korea. Also, the closing error of 3 loops of level network exceed the regulation for the 1st order levelling of NGII. The standard error of fore and back leveling between bench marks(η_1) are distributed between 0.2 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ and 1.7 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. The standard error of loop closing(η_2) is 2.0 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. This result means that the 1st order level network of Korea qualifies for the high precision leveling defined by International Geodetic Association in 1948. As the result of the 1st order level network adjustment, the reference standard error ($\hat{\sigma}_0$) of the level network was 1.8 mm/ $\sqrt{\text{km}}$, which is twice as good as that of the 1st adjustment of level networks in 1987.

Keywords : Adjustment of 1st order level network, Fore and back error, Loop closing error, Gross error testing, Reference standard error

초 록

우리나라 1등 수준망은 1974년부터 1986년간 관측된 자료를 1987년 동시 조정된 바 있다. 이후, 국토지리정보원에서는 2001년부터 2006년까지 전자레벨과 바코드 합척을 이용하여 1등 수준망에 대한 직접수준측량 실시하였고, 본 연구는 이들 관측자료 분석 및 수준망 조정 결과이다. 우리나라 1등 수준망은 총 36개 노선으로 구성되어 있는데, 그 중 34 노선이 11개 폐합 환을 구성한다. 1등 수준측량 관측자료 중 4개 노선은 1등 수준측량 허용 왕복차를 초과하였으며, 3개 수준환은 허용 환 폐합차를 초과하였다. 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1)는 0.2 ~ 1.7mm/ $\sqrt{\text{km}}$, 환 폐합차의 표준오차(η_2)는 2.0mm/ $\sqrt{\text{km}}$ 로 IGA의 고정밀 수준측량기준을 충족하였다. 1등 수준망은 1점(수준원점) 고정방식에 의한 망조정이 수행되었으며, 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)는 1.8mm/ $\sqrt{\text{km}}$ 로, 1987년 1등 수준망 조정의 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)보다 2배 향상된 결과이다.

핵심어 : 1등 수준망 조정, 왕복차, 환폐합차, 과대오차 검정, 기준 표준오차

1. 서 론

거리인 정표고가 있으며, 우리나라는 정표고 체계를 채택하고 있다.

1.1 표고 및 수준망

표고는 지구물리적인 등포텐셜면을 동일 높이로 보는 역표고와 기준면에서 측점을 잇는 연직선상의 기하학적

대개 지오이드(평균해수면)를 육상 표고 기준면으로 채택하고 있지만, 평균해수면은 지구물리 및 해수동역학, 기상 등의 영향으로 미소한 경사가 있을 수 있다. 따라서 임

1) 군산대학교 공과대학 토목환경공학부 교수(E-mail:leeck@kunsan.ac.kr)
2) 부경대학교 환경·해양대학 위성정보공학과 교수(E-mail:suh@pknu.ac.kr)
3) 국토지리정보원 측지과(E-mail:jbunam@moc.go.kr)
4) 군산대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(E-mail:sug8318@kunsan.ac.kr)

의 지점의 표고를 서로 다른 두 해안의 평균해수면으로부터 수준측량하면 수준측량에 내재된 오차가 없더라도 동일하지 않을 수 있다. 이와 같은 모순을 없애기 위하여 나라마다 한 지점의 평균해수면을 표고기준면으로 정하고 있으며, 우리나라는 인천항의 평균해수면이 표고기준이다.

해수면은 조석으로 인하여 조위가 항상 변하고 있으므로, 장기간의 검조자료로부터 평균해수면을 정한 후, 지반이 안정된 육지에 표석(수준 원점)을 매설하고 평균해수면으로부터 그 표고를 측량하여 두고, 육지의 표고는 이 표석(수준원점)으로부터 그 높이차를 구하여 정한다. 그러나 수준원점으로부터 멀리 떨어진 내륙에 위치한 측점의 표고를 직접수준측량에 의해 수준원점으로부터 측량하는 일은 비효율적이므로 전국에 일정한 밀도로 표석(수준점)을 매설하고, 각 수준점의 표고를 미리 수준측량하여 정하여 두면, 일반 사용자는 부근에 매설된 수준점으로부터 수준측량에 의해 측점의 표고를 구할 수 있다.

수준점은 주요 도로를 따라 매설되어 있으며, 이들 수준점을 차례로 연결한 선을 “수준노선”이라하며, 수준노선이 여러 갈래로 나뉘는 지점의 수준점을 특별히 “교점”이라한다. 수준노선이 연결되어 폐곡선이 되면 그 폐곡선을 “수준환”이라 하며, 여러 수준환이 모여 “수준망”이 된다. 우리나라는 전국의 주요도로를 따라 약 4km간격으로 매설된 1등 수준점의 집합인 1등 수준망과 1등 수준망 외의 주요도로를 따라 약 2km간격으로 매설된 2등 수준점의 집합인 2등 수준망을 구축하여 육지 표고 기준점 정보를 제공하고 있다.

1.2 우리나라 수준망의 발전

우리나라의 수준망은 1910년대에 청진, 원산, 목포, 인천, 진남포의 평균해면을 표고기준으로 한 수준점 성과(KLN1910)가 나온 이래로, 1933년에 원산에 수준원점 설치, 1937년 - 1943년 만주와 수준망 연결사업이 시초이다.

해방과 6.25 동안 중에 대부분의 수준점이 망실되어, 1957년 수준점 복구사업(건설부 국립건설연구소, 1969년) 조사보고서에 의하면 수준점 732점 중 86%인 610점이 망실되었다. 이 사업에 따라 연차적으로 기설 수준점 중 보존상태가 양호한 수준점에 근거하여 복구한 성과 및 전면 개측을 통하여 얻은 잠정적인 성과(KLN1957)를 1988년까지 이용하였다.

우리나라 근대화사업의 모체인 국토개발계획을 수립할 때에 가장 기초적이고 시급한 자료가 국토 기본도였고, 국토 기본도 제작에 필요한 기준점의 위치좌표(평면 및 표고)를 정비하기 위한 기준점측량 정비사업(건설부 국립건설연구소, 1960)이 착수되었다. 1963년 인천항의 평균조위를 표고기준으로 하여 수준원점이 설치되었고, 1등 수준점번호부여 방법이 개정되었다. 즉, 해방이전의 수준노선의 명칭은 노선 양단의 지명에서 1자씩을 따서 조합하였고, 수준점 번호도 일정한 규칙이 없이 부여되어 사용되어 오다가 현재의 노선-수준점 체계가 수립되었다. 이어 1967년 2등 수준노선 및 수준점 번호부여 방법이 재정되었다. 이 당시 수준망은 수준점 4,806점(1등 수준점 806점, 2등 수준점 4,000점)으로 계획되었다.

국토지리정보원(당시 국립지리원)에서는 1974년부터 1986년의 1등 수준측량 관측값(왕복 수준측량 평균값)을 타원보정하여 정규정표고로 환산한 후 인천 수준원점을 1점고정하여 망조정하였다(국립지리원, 1987년). 이때의 1등 수준망은 11개 환, 38개 노선, 1등 수준점 439점, 1등 수준노선 총 연장 3,306km로 구성되었고, 수준망 조정 결과 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)는 4.9mm/√km이었다. 이어 1967년부터 1987년간의 2등 수준측량사업에서 획득한 관측값을 환별로 1등 수준망 연결점을 고정한 다정고점 망 조정하여 2등 수준망 성과를 산출하였다(국립지리원, 1988년). 당시 2등 수준망은 15개 환(9환 미관측), 306노선, 2등 수준점 3,748점, 2등 수준 총연장 8,309km로 구성되었고, 수준망 조정 결과 환별 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)의 평균값은 9.1mm/√km(1점 고정)이었다. 1987년 1등 수준망 조정성과와 1988년 2등 수준측량 조정성과를 KLN1987이라 하며, 2006년 까지 그 성과를 이용하여 왔다.

수준점은 대부분 도로변에 매설되어 있기 때문에 1988년 수준점 성과를 고시한 이후에 빈번한 도로 확장 공사로 인하여 2006년 조사당시 1등 수준점 중 30%, 2등 수준점 중 약 70%가 망실되어 수준점 성과발급에 따른 민원이 끊이지 아니하였다. 이에 국토지리정보원에서는 1990년부터 1999년간에 1등 수준망을 재측하였고, 2000년부터 2005년까지 2등 수준망(일부 1등 노선 포함) 중 남서해안 일부 지역을 제외한 전국의 2등 수준측량을 수행하였다. 2006년 1등 및 2등 수준망 조정에 임하여 1990년 1999년 수행된 1등 수준측량자료를 정리하여보니, 관측 이후 망실 및 이설된 수준점이 많았고, 광학레벨과 수기방식으로 측량한 자료의 신뢰성을 감안하여 2006년에 대부분의 1등

수준측량을 전자레벨을 이용하여 다시 하였다.

1.3 수준망 재조정의 필요성

처음 수준망이 도입될 때에는 매설, 관측, 망조정되어 성과가 고시된 수준점은 그 표고가 영구불변할 것으로 인식되어 수준표석에 그 고시성과를 새겨 둔 경우도 있었으나, 이제는 지표면도 시간에 따라 변동하는 동적대상으로 인식되고 있다. 즉, 지표면에 매설된 수준점의 표고는 시간과 더불어 변동하고 있다.

수준점의 고시표고가 관측당시의 표고로 관측과 망조정에 아무런 오류가 없더라도 현재표고와 일치하지 않을 수 있다면, 다음과 같은 두 가지 근본적인 의문에 직면하게 된다. 그 하나는 “수준망을 유지 관리할 필요가 있는가?” 이고, 또 하나는 “수준망을 유지 관리할 필요가 있다면 재측량 및 재조정은 언제 해야 하는가?” 이다. 첫 번째 의문에 대한 해답은 지표면이 동적인 것은 사실이지만 그 변동은 지역적으로 급격하게 발생하는 경우도 있고 광역에서 장기간에 걸쳐 발생할 수 있다는 사실에서 찾을 수 있다. 즉, 협소한 지역에서 단기간의 상대적인 표고변화는 매우 미소하므로 수준망의 고시표고는 지도제작 및 건설공사, 지구물리학적 연구에 일정 기간 동안 소요 정확도를 가진 표고자료로 이용될 수 있다.

수준망의 고시표고가 일정기간 동안 만 유효한 표고자료라면, 위의 두번째 의문이 자연스럽게 제기된다. 이에 대한 해답은 나라마다 다르겠지만, 미국의 NAVD88이나 일본의 JGD2000(vertical)의 경우에서 찾을 수 있으며, 한마디로 사용자의 필요 및 그 필요를 충족할 관련 과학기술의 발전에 달려 있다고 볼 수 있다. 미국은 NGVD28의 경우 지오이드의 불균일 및 지각변동으로 인한 수준망 오차해소와 표고정보서비스 지역 확대, GPS의 활용급증에 따른 표고획득방법개선 목적을 달성하기 위해 NAVD88에서 표고기준면 재설정, 표고 재정의, 수준망의 확충, GPS에 의한 정표고 측정방법을 도입하였다(Young, 1988 & Zilkoski, 1992)

일본도 1883년 맨 처음 수준측량이 시작된 이래, 1949년 이후 수준측량자료를 1953년 부터 1963년 사이에 지역별로 수계산으로 망조정하여 그 성과(정규정표고)를 고시하였다. 그 이후 1962년부터 1968년 사이에 북부 섬인 홋카이도를 제외한 일본 전국을 수준측량하여 1969년에 동시조정하고 그 결과를 고시하였다. 그 30년 이후 지진에 의한 지각변동, 화산폭발, 지하수 채수에 따른 지표

침하로 기존 고시성과(1969년)의 신뢰성이 저하되자, 일본 국토지리원은 고시성과의 불일치 해소와 사회적 필요에 부응하기 위하여 1993년 JGD2000(vertical) 계획을 수립하여 2002년 4월 이를 고시하였다. JGD2000은 수준측량 관측자료 관리 및 처리는 전용 DB인 LAGSAS를 이용하였으며, 일본의 주요 3개 섬인 홋카이도, 혼슈, 큐슈를 연결한 동시조정일 뿐 만 아니라, 중력자료를 이용하여 기존의 정규 정표고대신 정표고(Helmert 표고)를 고시하는 발전을 가져왔다(Imakiire, 2004).

우리나라의 경우도 KLN1987 이후에 수준망의 표고정보 신뢰성 향상, 표고정보 서비스 지역 확대, 차세대 수준측량방법도입, 망설 수준점 재설 및 수준점 설치 밀도향상, 도서지역 수준망 확충을 도모하게 되었다.

본 연구는 2007년부터 우리나라 국가기준측지계를 세계측지계로 전면개정하기 위한 사업의 일환으로 국토지리정보원에서 2001년~2006년까지 재관측된 1등 수준측량자료의 왕복차 및 환폐합차 분석, 타원보정, 최소제곱법에 의한 망조정, 수준점 표고성과산출에 관한 연구의 일부이다.

2. 수준측량자료 분석

2.1 수준측량 관측자료

본 연구의 1등 수준망 조정에 사용된 수준측량자료는 2001년 이후 국토지리정보원의 1등 수준측량사업으로 관측된 것으로, 수준노선 총연장은 3,342km에 달하고, 교점 및 수준기점을 포함한 1등 수준점 총수는 1,138(수준원점 제외)점으로 1987년 1등 수준망 조정당시보다 300여 점이 증가되었는데, 이것은 1등 수준점의 밀도를 높이기 위하여 기존 1등 수준점 사이에 1등 수준점을 1점씩 증설한 노선이 있기 때문이다. 따라서 1등 수준노선의 1등 수준점 배치간격은 4km인 구간외에 2km인 구간도 있다. 2006년 1등 수준측량사업에서는 1등 수준노선의 89%에 달하는 약 3,000km에 대한 수준측량이 수행되었으며, 더불어 1등 수준점의 약 31%인 350점이 재설되었다. 이와 더불어 1등 수준점으로부터 우리나라 주요항만에 국립해양 조사원에서 설치한 9개 검조소 기본수준점(TBM)을 연결하는 수준측량 자료는 1등 수준노선에 속하지 않으나 본 수준망 조정자료에 포함되었다.

우리나라 1등 수준망의 노선명칭은 수준측량작업규정에서 정한 바에 따라 국토의 남서부에서 북동방향으로 중

가하는 일련번호로 1노선부터 38노선까지 부여되었다. 이 중 33노선은 2등 수준망 14환 2노선과 중복되어 결측되었고, 36노선은 결번으로 현재 36개 노선의 왕복수준측량이 완료되었다. 수준노선 분기점인 교점은 노선번호부여방법과 동일하게 ①부터 ④까지 일련번호로 부여되어 있다. 이 중 ②과 ③ 교점은 결번이므로 1등 수준망의 교점은 총 22점이다.

1등 수준망의 수준노선 36개 노선 중 1등 수준환을 구성하지 않는 개방노선인 1노선과 38노선을 제외한 34개 1등 수준노선은 교점에서 서로 연결되어 11개의 1등 폐합 수준환과 해안 및 휴전선 부근에 6개의 폐합되지 않은 환을 구성한다. 수준환도 수준노선과 마찬가지로 국토의 서남단에서부터 동북방향으로 증가하는 일련번호를 환번호로 부여하였다. 우리나라 1등 수준환의 평균 환거리는 438km이다. 표 1은 1987년 1등 수준망 조정과 본 연구의 2006년 1등 수준망조정 구성자료 통계표이다.

본 수준망 조정에 사용된 1등 수준측량('01~'06) 자료는 최신성과 신뢰성을 갖춘 수치수준측량자료로 1등 수준망 조정(1987년) 당시의 1등 수준측량('74~'86) 자료 및 2등 수준망 조정(1988) 당시의 2등 수준측량('67~'87) 자료와 비교할 때 다음과 같은 특징이 있다.

- 2006년 수준망 조정에 사용된 1등 수준측량자료는 2001년부터 2006년 사이에 수행된 1등 수준측량사업 결과로 36개 노선 중 2001년에 2구간, 2002년에 2구간, 2004년에 1구간, 2005년에 2구간을 제외한 전 구간이 2006년에 관측된 최신의 자료이다.
- 2004년 이후에 수행된 1등 수준측량은 최신장비인 정밀전자레벨(DNA03, DINI12)과 바코드 인바표척(GPCL3,

LD13)을 사용하였기에 이전의 광학레벨과 육안 읽음값을 수기한 수준측량자료에 비해 표척 읽음 및 기록 오차를 획기적으로 줄인 신뢰성있는 자료이며, 관측수부, 수준차계산부, 수준측량계산부를 수치형태로 납품받아 자료관리의 혁신을 이루었다.

- 2006년부터 1등 수준측량시 1등 수준점은 주위 반경 100m 이내에 1점의 보조점을 설치하여, 수준점의 변동확인 및 망실 또는 훼손 시 복구와 재설의 편리를 도모하였다.
- 2005년 이후에 실시한 수준측량은 수준점의 경위도좌표(WGS84기준)를 간이 GPS로 측정하였다.
- 2006년 수준측량에서는 왕복수준측량의 교차(왕복차)가 허용오차를 초과하더라도 성과를 납품받았다.
- 2006년에 관측된 1등 수준점 중 약 30%인 350 점이 재설되었다.

2.2 왕복차 및 환폐합차

2.2.1 노선 왕복차

1등 수준측량은 2001년 이후 5년간에 걸쳐 수행되었기에 관측이후 수준점이 망실 또는 이설될 수 있으므로, 수준측량 노선 왕복차 및 환 폐합차를 분석하기에 앞서 망실 또는 이설 수준점의 관측자료를 정정하였다. 이외에도 수준측량 관측값에는 기계적 원인, 관측자의 원인 및 자연적 원인에 의해 발생한 정오차와 우연오차가 포함되어 있다. 주지하다시피 노선 왕복차는 수준점간 구간 왕복차의 누적이며, 구간 왕복차는 전·후시 표척간 왕복차의 누적이므로, 수준측량 오차의 근원은 표척간 전·후시 왕복차라 할 수 있다. 본 수준망 조정에서 기본자료로 이용한 “수준측량계산부”의 구간은 수준점간 구간 왕복차이므로 수준점간 구간 왕복차로부터 수준측량 오차분석을 하였다.

1등 수준측량('01~'06) 노선 왕복차(교차)가 허용 왕복차(2.5mm/√km)를 초과하는 1등 수준노선은 전체 36개 노선(사업년도별 구분 노선은 49개 노선) 중 7개 노선으로 전체의 약 15%이며, 서남부 해안, 중부 백두대간, 북부 영동산간을 따라 분포한다(표 2 및 그림 1). 허용 왕복차를 초과하는 노선의 분포를 보면, 그 원인은 지형적 요인(고지대 및 급경사, 연약지반 등)과 관계가 있어 보이나, 이와 유사한 지형을 지나는 다른 노선에서는 허용 왕복차 규정을 만족하는 노선들이 있으므로 지형 및 장비 등을 포함한 복합적인 것으로 추정된다.

한편, 1등 수준노선의 표준 노선 왕복차(노선 왕복차/√노선거리(km))를 보면 3노선, 19노선, 34노선의 일부

표 1. 우리나라 1등 수준망 구성

구분	1987년 1등 수준망조정	2006년 1등 수준망조정
측량 년도	'74-'86	'01~'06
환(폐합환)	16(11)	17(11)
노선	37	36
길이(Km)	3,306	3,342
표척	원점(보조점)	1(0)
	기 점	2
	교 점	22
	수준점	810
	합 계	835

가 10mm/√km를 초과하는 표준 왕복차를 보이고 있다. 이들 노선의 특징은 노선방향이 대체로 동서방향이며, 사용된 장비(레벨)의 모델이 동일하다. 미국 NAVD88사업에서는 특정장비가 지구자기장에 의한 영향으로 관측값의 표준오차를 증가시킨 사례가 있었으므로, 우리나라도 이에 유의할 필요가 있다(Zilkoski et al, 1992).

우리나라 1등 수준측량의 노선거리는 일부 노선을 제외하고는 50~250km이므로 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1)는 Vignal(1936)이 제안한 아래 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$\eta_1^2 = \left(\frac{1}{4n}\right) \sum_i^n \frac{\Delta_i^2}{r_i} \text{ mm}^2/\text{km} \quad (1)$$

단, Δ : 수준점간 왕복차(mm)

r : 수준점간 거리(km)

n : 수준점간 구간 수

식 (1)을 적용하여 각 노선별 수준점간 왕복차의 1km 당 표준오차(η_1)를 구하면 표 2의 맨 오른쪽 열과 같다.

허용 왕복차를 초과하는 노선의 표준 노선 왕복차는 2.7~13.7mm/√km 인 반면, 이들 노선의 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1)는 0.7~1.7mm/√km 로 다른 노선에 비해 상대적으로 크다.

노선 왕복차로부터 구한 표준 노선 왕복차(1km당 왕복차)는 구간 왕복차의 부호가 고려된 값이고, 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1)는 수준점간 왕복차의 절대값으로부터 계산한 값이므로 수준점간 왕복차(크기와 부호)가 정규분포를 이룬다면 표준 노선 왕복차가 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1)보다 적어야 하나, 우리나라 1등 수준노선의 경우는 대체로 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1)가 표준 노선 왕복차보다 적다. 그 원인은 외연적으로 수준점간 왕복차의 크기는 비슷하나 양(+) 부호가 66%로 음(-) 부호 34% 보다 약 2배 자주 발생하는데 있었다.

1948년 International Geodetic Association(IGA)에서 수준노선의 길이가 수십 km 이상인 경우 수준점간 왕복차 표준오차(η_1)가 3mm/√km 이내이면 고정밀 수준측량으로 간주하기로 결정하였다(Bomford, 1980). 우리나라 1등 수준노선의 수준점간 왕복차 표준오차(η_1)는 0.2~1.7mm/√km 의 분포를 보이며, 그 평균값은 0.5mm/√km 로 IGA에서 제안한 고정밀수준측량 기준(< 3mm/√km)에 부합되었다.

표 2. 1등 수준측량('01~'06) 노선 왕복차

노선	관측 년도	거리 (km)	노선 왕복차 (mm)	노선 허용 왕복차 (mm)	표준 노선 왕복차 (mm/km)	수준점간 표준오차 η_1 (mm/√km)
1	2006	54.309	36.2	18.4	4.9	0.74
	2006	80.293	26.7	22.4	3.0	0.66
2	2005	10.456	0.4	8.1	0.1	0.54
	2005	9.569	4.4	7.7	1.4	0.51
	2006	58.119	14.0	19.1	1.8	0.74
3	2006	223.350	184.7	37.4	12.4	0.94
4	2006	195.864	56.8	35.0	4.1	0.71
5	2005	44.540	-15.1	16.7	-2.3	0.52
	2006	45.063	-5.1	16.8	-0.8	0.59
6	2006	62.276	19.6	19.7	2.5	0.45
7	2006	61.256	18.2	19.6	2.3	0.47
	2002	19.362	-1.2	11.0	-0.3	0.32
8	2006	96.694	9.2	24.6	0.9	0.50
9	2006	9.799	-2.4	7.8	-0.8	0.33
10	2006	100.459	14.8	25.1	1.5	0.57
11	2006	83.988	7.0	22.9	0.8	0.29
12	2006	161.805	13.2	31.8	1.0	0.43
13	2006	154.208	20.4	31.0	1.6	0.32
14	2006	151.626	71.6	30.8	5.8	0.84
15	2006	45.092	4.2	16.8	0.6	0.61
16	2006	91.960	20.9	24.0	2.2	0.40
17	2006	37.615	10.1	15.3	1.6	0.65
18	2006	106.302	15.5	25.8	1.5	0.50
19	2006	99.778	136.1	25.0	13.6	1.70
20	2006	130.371	27.2	28.5	2.4	0.66
21	2006	54.227	-15.1	18.4	-2.0	0.50
22	2006	113.160	-1.0	26.6	-0.1	0.61
23	2006	16.937	-8.3	10.3	-2.0	0.58
24	2006	67.081	-12.5	20.5	-1.5	0.56
25	2006	65.286	14.1	20.2	1.7	0.38
26	2006	35.697	13.3	14.9	2.2	0.46
27	2006	64.677	-15.0	20.1	-1.9	0.54
	2006	24.927	8.9	12.5	1.8	0.37
	2002	26.073	4.8	12.8	0.9	0.32
	2001	34.288	7.9	14.6	1.3	0.61
28	2001	54.612	0.9	18.5	0.1	0.22
	2006	29.399	-9.3	13.6	-1.7	0.48
29	2006	15.838	1.4	9.9	0.4	0.37
30	2006	101.468	57.6	25.2	5.7	0.75
31	2006	39.552	-0.9	15.7	0.1	0.41
	2006	23.773	7.0	12.2	1.4	0.36
32	결측					
33	2006	113.676	112.6	26.7	10.6	1.02
	2002	32.487	-0.2	14.2	0.0	0.23
	2004	28.010	14.4	13.2	2.7	0.85
34	2004	94.903	24.3	24.4	2.5	0.46
35	결번					
36	2006	132.759	6.6	13.6	1.2	0.46
	2006	26.109	0.6	12.8	0.1	0.51
37	2004	11.750	0.7	8.7	0.2	0.21
	합		3,342.796		85.5	26.22

2.2.2 환폐합차

1등 수준측량('01~'06) 자료로 구성되는 폐합 1등 수준환은 총 11개환이며, 이중 3개 환(4환, 5환, 10환)의 환 폐합차가 2.3mm~3.8mm로 허용 환 폐합차 ($\pm 2.0\text{mm} \times \sqrt{S\text{km}}$, S는 환 길이)를 약간씩 초과하고 있다(표 3). 한편, 타원보정(Bomford, 1980)된 수준측량 왕복차를 이용

표 3. 1등 수준측량('01~'06)의 환 폐합차

환번호	환길이(km)	환 폐합차(mm)				표준 환 폐합차
		허용 오차	타원 보정 전 (A)	타원 보정 후 (B)	차이 (B)-(A)	
0	122.74	22.2	5.6	4.9	-0.7	0.4
1	577.65	48.1	-31.0	-24.1	-6.9	-1.0
2	607.81	49.3	-36.7	-32.9	-3.8	-1.3
3	371.56	38.6	-20.6	-19.2	-1.4	-1.0
4	503.72	44.9	-80.4	-68.3	12.1	3.0
5	533.32	46.2	-92.2	-87.8	4.4	3.8
6	364.04	38.2	8.2	2.7	-5.5	0.1
7	547.52	46.8	5.7	22.0	16.3	0.9
8	347.78	37.3	7.8	13.2	5.4	0.7
9	473.65	43.5	20.7	24.2	3.5	1.1
10	370.36	38.5	46.1	44.4	-1.7	2.3

하면 1등 수준망 전체적으로 환 폐합차가 축소되나 이들 3개 수준 환은 여전히 허용 환 폐합차를 초과한다(표 3 및 그림 1).

우리나라 1등 수준망의 환 거리는 0환을 제외하고는 모두 300~700km이므로 환 폐합차의 표준오차(η_2)는 Vignal(1936)이 제안한 식 (2)에 의하여 구할 수 있다.

$$\eta_2^2 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i^n \frac{e_i^2}{S_i} \text{mm}^2/\text{km} \quad (2)$$

단, e : 환 폐합차(mm)

S : 환 길이(km)

n : 수준망의 환 수

우리나라 1등 수준망('01~'06)의 환 폐합차의 표준오차(η_2)는 1.8mm/ $\sqrt{\text{km}}$ 로 IAG 고정밀 수준측량기준(< 3mm/ $\sqrt{\text{km}}$)을 만족하였다.

2.2.3 허용오차 초과노선의 처리

수준측량의 노선 왕복차가 허용오차를 초과하는 노선을 포함한 환의 환 폐합차가 허용오차를 초과했다면, 우선 수준측량 노선 왕복차에서 그 원인이 있을 것이다. 수준측량 노선 왕복차는 허용오차를 초과하더라도 이들 노선을 포함한 환의 환 폐합차가 허용오차내에 있다면, 이것은 노선 왕복차가 크더라도 그 평균 왕복차는 정확하거나, 허용왕복차를 초과하는 노선들에서 유발된 양(+) 및 음(-)부호 오차가 서로 상쇄되어 환 폐합차를 감소시켰다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 허용 환 폐합차를 초과하는 환에 포함된 노선 중 허용 왕복차를 초과한 노선인 14노선과 22노선이 검토대상으로 부각되었다. 14노선과 22노선 중 수준점간 왕복차가 허용 왕복차를 초과하는 구간에 대하여 재측한 결과, 노선 왕복차의 크기는 줄었으나 여전히 수준점간 왕복차의 양(+) 부호가 음(-) 부호보다 많아 노선 왕복차가 허용오차를 초과하였을 뿐만 아니라, 그 평균값도 거의 변화가 없었다. 즉, 노선 왕복차와 환 폐합차가 허용오차를 초과하는 원인을 명확히 규명할 수 없었다.

“수준측량작업규정(건설교통부, 1992년)”에 따르면, 노선 왕복차나 환 폐합차가 허용오차를 초과하는 노선이나 환은 재측하도록 규정되어 있으나, 본 연구에서는 1등 수준측량 작업규정을 준수하였음에도 불구하고 노선 왕복차나 환 폐합차가 허용오차를 초과한 노선은 수준망 조정의 과대오차검정 결과에 따라 처리하였다.

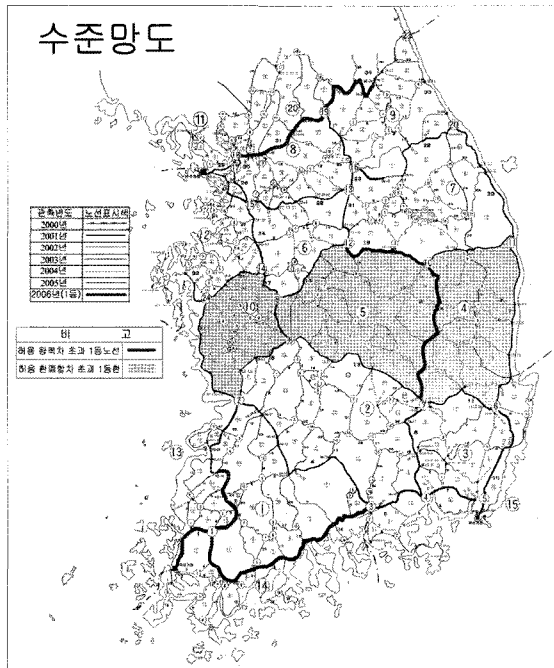


그림 1. 허용 왕복차 초과노선과 허용 환폐합차 초과 환

3. 수준망 조정

3.1 수준망 조정 과정 및 프로그램

조정이란 관측값이 우연오차만 포함하고 있다는 가정 아래 확률변수 추정값과 그 분포 파라미터를 유도해 내는 것을 말한다. 1등 수준망은 관측방정식에 의한 최소제곱법을 적용하여 조정되었다. 이때 관측값(L)은 수준노선 표고차(왕복 수준측량 평균값)이며, 미지수(H)는 교점의 최확표고이다. 모든 관측값은 오차(V)를 포함하고 있으므로 관측방정식은 아래 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$V = AH - L \quad (3)$$

단, A: 계수행렬

교점의 최확표고를 과대오차가 포함되지 않았다고 판단되는 관측값만으로 구하기 위하여 사전 기준 분산(σ_0^2)과 사후 기준 분산($\hat{\sigma}_0^2$)을 비교하는 망 전체 검정(global test)과 수준망이 과대오차를 포함하고 있다면 어느 관측값이 과대오차를 포함하고 있는지를 검색하는 개별 관측값 검정(local test)을 차례로 수행하였다. 수준망 조정 및 과대오차 검정의 확률이론 및 수학적모델은 우리나라 수준망 조정에 관한 이전 연구(이석찬, 1987, 1988, 1991)와 같다.

본 연구의 수준망 조정은 Microsoft Fortran 77에 의해 코딩된 프로그램(KORVD2006)에 의해 수행되었다. KORVD2006은 국토지리정보원의 1등 수준망 조정(국립지리원, 1987년)과 2등 수준망 조정(국립지리원, 1988년)을 위해 처음 개발된 프로그램(KORVD)을 본 수준망 조정을 위해 수정한 것으로, 고정점의 선택에 따라 고정망, 자유망, 제약망조정이 가능하며, 과대오차 검정, 수준망 정확도 및 수준점의 최확표고 산정을 할 수 있다. KORVD2006 프로그램의 수준망 조정과정은 그림 2와 같으며, 본 연구에서 1등 수준망조정에 적용한 원칙 및 파라미터 값은 다음과 같다.

- 표고는 정규 정표고로서 직접수준측량 왕복관측 표고차에 타원보정(Bomford, 1980)으로 구한다.
- 망 조정 시 관측값(L)의 중량(W)은 노선거리(D)의 역수(1/D)로 한다.
- 수준망의 조정은 수준원점을 고정점으로 하는 1점 고정방식을 취한다.
- 사전 기준 표준오차(σ_0)는 1등 수준망정(1987년)의 사

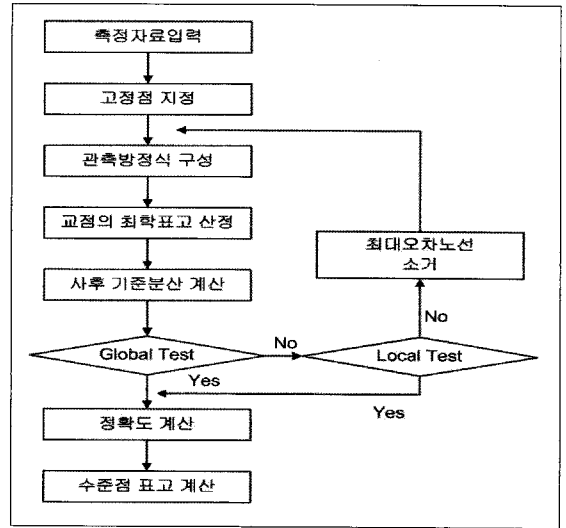


그림 2. 수준망 조정 과정

후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)가 4.9mm/√km이었음에 착안하여 5mm/√km로 한다.

- 과대오차의 검정은 1점 고정 망조정에서 수행하고, 망 전체 검정이 기각될 경우에 개별 관측값 검정을 실시한다.
- 망 전체 검정은 χ^2 test(유의수준 $\alpha_0=5\%$), 개별 관측값 검정은 Baarda test와 Pope test(유의수준 $\alpha_0=0.1\%$)를 적용한다(Baarda, 1968, Pope, 1976).
- 과대오차검정을 통과한 수준노선 자료만을 이용하여 수준망 정확도 및 교점 표고계산을 위한 수준망 조정을 실시한다.

3.2 과대오차검정

1등 수준측량('01~'06) 자료인 노선 왕복수준측량 평균값에 타원보정하여 수준망 조정 입력자료를 작성하고, 수준망조정 프로그램(KORVD2006)을 실행하여 과대오차를 검정하고 정확도를 계산하였다. 이때에 고정점은 1점(수준원점)이고, 1등 수준노선 중 분할된 노선이 있어 관측 노선 수는 47, 미지수(교점 표고)의 갯수는 36점으로 자유도(f)는 11이다.

과대오차의 검정은 1점 고정(수준원점) 망조정에서 수행하였으며, 망 전체 검정이 기각될 경우에 개별 노선 검정을 실시하였다. 망 전체 검정 통계량(T)은 아래 식 (4)와 같다.

$$T = V^T WV / \sigma_0^2 = f \times \hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2 \sim \chi_{(f)}^2 \quad (4)$$

본 수준망 조정결과 검정 통계량(T)은 1.4로 유의수준 $\alpha_0=0.05$ 일 때의 검정 임계값($\chi_{(f,1-\alpha_0)}^2$)인 31.2보다 적으므로 귀무가설(H_0)을 만족한다. 즉, 1등 수준측량('01~'06)으로 구성된 수준망은 95% 신뢰수준에서 과대오차를 포함하고 있지 않다. 따라서 개별 관측값 검정은 수행할 필요 없었다.

앞 절에서 기술한 바와 같이 망 전체 검정은 사전 기준 분산(σ_0^2)과 사후 기준 분산($\hat{\sigma}_0^2$)을 비교하는 검정이고 사후 기준 분산은 주어진 관측값에 따라 결정되는 반면 사전 기준 분산(σ_0^2)은 경험에 근거하여 미리 설정한 양이므로 사전 기준 분산(σ_0^2)에 따라 검정 통계량이 달라진다. 즉, 본 연구에서도 수준망 조정의 결과 사후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)는 1.8mm로, 가정한 사전 기준 표준오차(σ_0) 5mm/√km 보다 약 2.5배 적었다. 따라서 사전 기준 표준오차(σ_0)를 본 수준망 조정의 사후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)와 근사한 2mm/√km로 가정하여 망 전체검정을 실시할 필요가 있었으며, 그 결과 검정통계량(T)는 13.58로 증가하였으나 검정 임계값($\chi_{(f,1-\alpha_0)}^2$) 보다 작아 귀무가설은 기각되지 않았다.

3.3 수준망 조정 정확도

1등 수준망 조정의 최종 목적은 과대오차가 없다고 선별된 관측값만으로 수준망 조정하여 미지수(교점 표고) 최확값을 구하는데 있으며, 이와 더불어 수준망의 정확도를 평가하는데 있다. 수준망 조정으로 산출할 수 있는 수준망 정확도를 나타내는 대표적인 통계량은 사후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$), 노선 높이차 표준오차($\sigma_{\hat{L}}$), 교점 표고 표준오차($\sigma_{\hat{H}}$)가 있다(Mikhail, 1981).

전체 1등 수준측량('00~'06)자료 중 개방노선인 1노선과 38노선만을 제외한 수준측량 관측값이 1등 수준망의 교점 표고 최확값을 산출하기 위한 1등 수준망 조정(수준원점 1점 고정)에 이용되었다.

1등 수준측량('01~'06) 조정결과로 계산된 사후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)는 1.8mm/√km, 노선 높이차 표준오차($\sigma_{\hat{L}}$)의 평균값은 1.57mm, 교점 표고 표준오차($\sigma_{\hat{H}}$)의 평균값은 20.5mm이었다.

그림 3은 수준망 조정 결과 계산된 교점 표고 표준오차를 해당 수준점의 위치에 원으로 도시한 것이다. 수준원점

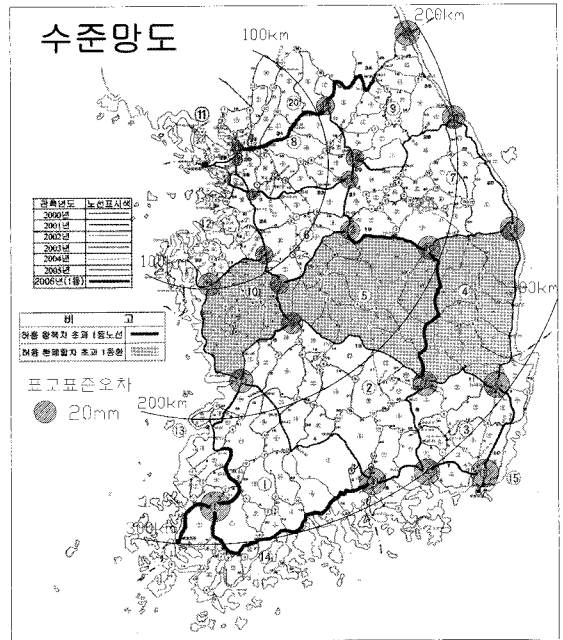


그림 3. 1등 수준측량('01~'06) 교점 표고 표준오차

부근인 교BM17의 표준오차는 8.5mm로 가장 적고, 수준원점에서 멀리 떨어진 부산기점의 표준오차는 25.2mm, 목포 방향의 교BM01의 표준오차는 27.1mm로 가장 큰 값을 보였다. 즉, 1점 고정(수준원점) 수준망 조정의 결과 이므로 고정점에서 멀어질수록 교점 표고 표준오차는 증가하는 양상을 보였으며, 노선 왕복차와 환 폐합차가 미치는 영향은 뚜렷하지 않았다.

3.4 수준점의 표고산정

1등 수준망 조정(수준원점 고정)의 결과로 수준 노선의 최확 높이차(\hat{L})가 결정되면, 노선 내에 있는 각 수준점간 관측 높이차를 보정하여 각 수준점의 조정표고를 구할 수 있다.

노선 시점과 종점의 최확표고를 각각 \hat{H}_A , \hat{H}_B 라고 하고 \hat{H}_A 와 \hat{H}_B 사이에 n개의 수준점이 있어, 각 수준점의 조정표고를 $\hat{H}_1, \hat{H}_2, \dots, \hat{H}_n$ 이라 한다면, 그 노선에 속한 수준점 i의 조정표고 \hat{H}_i 는 다음과 같이 노선 높이차 관측값 보정량을 수준점간 거리를 중량으로 배분하여 아래 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\widehat{H}_i = \widehat{H}_{i-1} + \Delta H_{i-1,i} + \delta_{i-1,i}, \quad (5)$$

단, $\Delta H_{i-1,i}$: 수준점 i-1과 i구간의 관측 높이차

$\delta_{i-1,i}$: 수준점 i-1과 i구간 관측 높이차 조정량

1등 수준노선 중 1등 수준환을 구성하지 않는 개방노선(1노선과 38노선)은 1등 수준망 조정에서 노선 시·종점 중 한쪽 교점의 최확표고만 계산되었으므로 관측오차를 알 수 없다. 이들 노선 중 38노선은 2등 수준망과 연결되어 환을 구성하므로, 2등 수준망과 연계하여 조정하였고, 1노선에 속한 수준점의 표고는 식 (4)에서 $\delta_{i-1,i}$ 는 0이라 간주하여 계산하였다. 본 연구에서는 표 1과 같이 수준점 1,138점(수준원점 제외)의 표고를 산정하였다.

4. 비교분석 및 고찰

4.1 노선 왕복차 및 환 폐합차

1987년 1등 수준망 조정에 사용된 수준측량 자료는 1974년부터 1986년간에 걸쳐 수행된 노선 왕복수준측량에서 획득된 것이다. 당시에는 정밀광학레벨로 읽은 인바 표척의 전·후시 관측값을 야장에 수기하였고, 노선 왕복차가 허용 왕복차($\pm 2.5\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$)를 초과하면 검수에서 결격사유가 되었으므로, 모든 1등 수준노선의 왕복차는 허용오차보다 적었다. 반면에 본 연구에서 사용한 1등 수준측량 관측값은 표 2에서 볼 수 있는 바와 같이 7개 노선의 노선 왕복차 허용왕복차를 초과하고 있다. 이 현상만을 기준으로하면 1등 수준망 조정(1987년)의 관측자료가 더 우수한 것처럼 보인다.

한편 1987년 1등 수준망 조정시 사용한 1등 수준측량 자료로부터 계산한 표준 환 폐합차(환 폐합차/ $\sqrt{\text{km}}$)와 본 연구의 표준 환 폐합차를 비교하면 그림 4와 같다. 1987년 1등 수준측량 관측자료는 5개환의 환 폐합차가

허용 환 폐합차($2\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$)를 초과하고 있으며, 그 초과정도도 2006년 1등 수준망 표준 환 폐합차에 비해 월등히 크다.

왕복차와 환 폐합차를 종합적으로 평가할 때, 1987년 1등 수준망 조정때의 수준측량 관측자료에도 허용 왕복차를 초과하는 노선이 있었을 것으로 추측되나 당시에는 그 노선과 오차의 크기를 찾을 수 없었다. 반면에 2006년 1등 수준망 조정에 이용된 자료는 7개 노선과 3개 환이 허용오차 기준을 초과하고 있지만 오히려 1987년 수준망 조정 자료에 비해 신뢰성이 있는 자료라 평가된다.

4.2 수준망 정확도

수준망의 정확도는 앞에서 기술한 바와 같이 수준점간 왕복차로부터 계산한 표준 오차 η_1 , 환 폐합차로부터 계산한 표준오차 η_2 , 망조정 결과로 얻어지는 사후 기준 표준오차 $\hat{\sigma}_0$, 노선 최확 높이차의 표준오차 σ_L , 교점 최확 표고 표준오차($\sigma_{\widehat{H}}$)가 있다.

1987년 수준망 조정과 2006년 수준망 조정 결과에 근거하여 이들 정확도를 비교하면 표 4와 같다. 수준점간 왕복차로부터 계산한 표준 오차 η_1 은 앞에서 분석한 바와 같이 1987년 수준망 조정자료에 내재된 문제로 인하여 오히려 2006년 수준망 조정 정확도가 약간 악화된 것처럼 보이나, 나머지 정확도는 모두 2~3배 향상되는 결과를 보여주고 있다.

4.3 수준점의 표고 차이

1987년 1등 수준망 조정 이후 2006년 1등 수준망 조정 시까지 완전점(이설 혹은 재설되지 않은 수준점)으로 유지된 수준점의 표고는 1987년 수준망 조정 표고와 다소 차이가 있었다. 그 원인은 1987년 또는 2006년 수준측량의 오차와 수준망 조정 자료정리의 오류와 같은 인위적인 실수와 수준점이 매설된 지표의 지각변동, 화산활동, 지하수 변동에 따른 융기나 침강과 같은 자연적 변위에 있

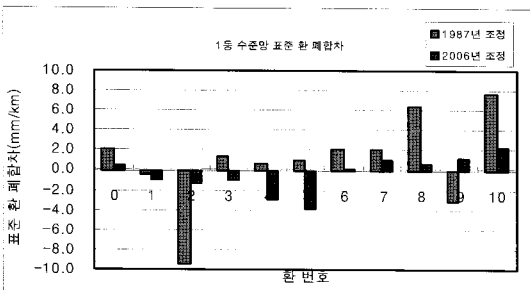


그림 4. 1등 수준망 관측자료의 표준 환 폐합차 비교

표 4. 우리나라 1등 수준망 정확도 비교

구 분	η_1 (mm/ $\sqrt{\text{km}}$)	η_2 (mm/ $\sqrt{\text{km}}$)	$\hat{\sigma}_0$ (mm/ $\sqrt{\text{km}}$)	σ_L (mm)	$\sigma_{\widehat{H}}$ (mm)
1987년 수준망	0.4	4.4	4.9	5.0	58.0
2006년 수준망	0.5	1.8	1.8	1.6	20.5

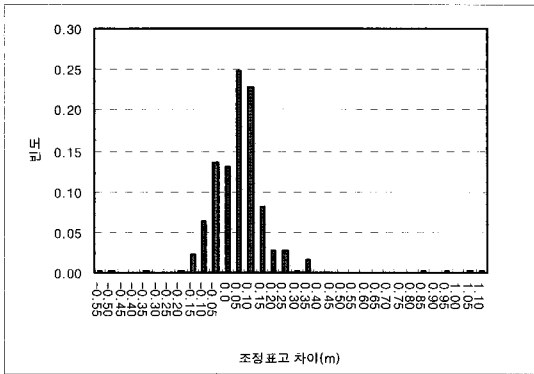


그림 5. 1등 수준점의 수준망 조정 표고 차이

을 것이다. 2006년 1등 수준망 조정으로 표고 조정된 1등 수준점 1,138점 중 1987년 이후 완전점으로 유지된 1등 수준점은 전체의 57%인 646점이고 이들 수준점들의 표고차이(1987년 1등 수준망 조정 표고 - 1999년 1등 수준점 조정표고) 분포를 보면 그림 5와 같다. 수준점의 조정 표고 차이는 - 0.58m로부터 + 1.1m까지 분포하는데 비교대상 수준점의 약 22% 수준점의 표고차이는 $\pm 0.025\text{m}$ 이 내 이었고, 비교대상 수준점의 약 95%의 수준점의 표고 차이는 $\pm 0.200\text{m}$ 이내 이었다.

3. 결 론

국토지리정보원에서 2001년~2006년까지 재관측된 1등 수준측량자료의 오차분석 및 망조정 에 관한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 1등 수준측량('01~'06) 자료 중 일부 노선 및 환은 허용 노선 왕복차 및 허용 환 폐합차를 초과하였지만, 수준점간 왕복차의 표준오차(η_1) 및 환 폐합차의 표준오차(η_2)는 IGA의 정밀 수준측량 기준($< 3\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$)을 충족하였다.

2. 수준망 조정(수준원점 1점 고정)의 과대오차검정(사전 기준 표준오차(σ_0) = $10\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$, 유의 수준 α = 0.05)에서 기각되는 수준노선은 없었으며, 사후 기준 표준오차($\hat{\sigma}_0$)는 $1.8\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$ 로 1987년 1등 수준망 조정결

과보다 2배 이상 향상된 정확도를 보였다.

3. 1987년 1등 수준망 조정으로 표고가 결정된 수준점 중, 현재까지 완전상태로 보존된 수준점은 전체 수준점의 약 57%인 646점이고, 이중 약 95%의 수준점 표고는 본 연구에서 구한 조정표고와 $\pm 0.200\text{m}$ 이내의 오차를 보였다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 (사)한국측량학회에서 수행한 “국가기준점 망조정에 관한 연구”의 일부이며, 본 연구를 지원해 주신 건설교통부 국토지리정보원 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

국립지리원 (1987), 정밀 수준망의 조정에 관한 연구, 보고서.
 국립지리원 (1988), 2등 수준망의 조정에 관한 연구, 보고서.
 이석찬, 조규전, 고영호, 이영진 (1987), 우리나라 1등 수준망의 조정, 한국측량학회지, 제5권 제2호, pp. 12-23.
 이석찬, 조규전, 이영진, 이창경 (1988), 우리나라 2등 수준망의 조정, 한국측량학회지, 제6권 제2호, pp. 1-9.
 이석찬, 조규전, 이창경, 최병길 (1991), 수준망 정보 시스템의 개발, 대한토목학회지, 제11권 제2호, pp. 39-49.
 Bomford, G. (1980), Geodesy, Clarendon Press, Chap. 3.
 Imakiire and Hakoiwa (2004), JGD2000(vertical) - The New Height System of Japan, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. 51. pp. 31-51.
 Mikhail, E.M. and Grace, G. (1981), Analysis and Adjustment of Survey Measurements, Van Nostrand Reinhold Company, Chap. 6.
 Pope, A. J. (1976), The Statistics of Residuals and the Detection of Outliers, NOAA technical report, NOS 65, NGS.
 Vignal J. (1936), Evaluation de la précision d'une méthode de nivellement, Bull. Géod, No. 49, pp. 1-159.
 Young, G. M. (1988), The New Adjustment of the North American Vertical Datum (Article No. 23, NAVD88 Status Report), ACSM Bulletin, February 1988, American Congress on Surveying and Mapping, pp. 49-51.
 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, Vol. 52, No. 3, pp. 133-149.

(접수일 2007. 10. 22, 심사일 2007. 10. 30, 심사완료일 2008. 2. 15)