

EGMs의 지형보정에 따른 국내 지역별 지오이드고 연구

A Study on Geoid Height of Provinces in South Korea by Terrain correction of Earth Gravitational Models

이용창

시립인천전문대학 토목공학과 교수

Lee yong-chang

Department of Civil Engineering, Incheon City College

요약

최근 새로운 지구중력장 모델의 개발로 인하여 중력관련 응용분야의 향상된 연구결과가 기대되고 있다. 본 연구는 지구중력장 모형으로부터 남한지역에 대한 고도이상(height anomalies)를 산정하고 지형보정 여부에 따른 지역별 지오이드고의 특성을 분석하여 국내 지오이드고 개발연구에 기여하고자 한다. 이를 위하여 다양한 중력 관측 자료를 조합한 5가지 지구중력장모형과 지형보정을 위한 ETOPO2모형을 선정하고 남한지역의 경·위도 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 6개 육상부 및 4개 해상부에 대한 30" 격자의 지오이드고를 산정한 후, 국립해양조사원의 NORI-05모델에 의한 결과와 비교하였다.

육상부의 경우, GPS 관측이 수행된 수준점 50측점 및 삼각점 30측점을 점검점으로 선정하여 GPS/Leveling, NORI-05 및 5가지 지구중력장모형에 의한 지오이드고를 비교·분석하였다. 연구결과, EIGEN-CG03C 및 EIGEN-CG04C 중력장모형이 GPS/Leveling 결과에 근접함을 보였고 국내 정밀 지오이드고를 산정할 경우, 육상 및 해상에서 지형의 요철이 심한 지역일수록 정밀한 지형보정의 필요성을 확인할 수 있었다.

Abstract

The new gravity field combination models are expected to improve the knowledge of the Earth's global gravity field. This study evaluates six global gravity field models derived from gravimetry and altimetry surface data in a comparison with ground truth in South Korea. For calculating a more accurate estimate of the geoid heights from the height anomalies, the terrain corrections due to the terrain masses over geoid have considered, the model for the topographic correction is a spherical harmonic expansion of the ETOPO2 DTM model.

Geoid heights obtained from GPS and levelling in land area of South Korea are compared with those from the EGMs. The results show that EIGEN-CG03C EGM and EIGEN-GL04C EGM displayed the nearest results to GPS/leveling, and also confirmed the importance of terrain correction for geoid height in case of the uneven topography.

I. 서론

최근 들어 GNSS 위성항법시스템(미국의 GPS ; Global Positioning System, 러시아의 GLONASS ; Global Navigational Satellite System, EU의 GALILEO, 중국의 COMPAS, 일본의 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System ; 준천정위성)은 국내·외적으로 측위분야는 물론 항법, 과학, 군사, 레저 스포츠, 119, Ubiquitous 등 다방면에서 이를 활용한 다양한 콘텐츠의 개발과 상품화 등 다가올 유비쿼터스 시대를 대비한 응용에 많은 관심과 기대를 보이고 있다.

국내에서도 GNSS 시대 세계화에 대비할 수 있도록 측량법의 개정과 함께 그동안 사용해오던 Tokyo 데이텀(Bessel 타원체)을 폐지하고 2010년 1월 1일부터는 GRS80 세계기준계를 전면시행하게 됨으로서 국내 지도 좌표계의 대대적인 전환을 앞두고 있다. 새로이 GRS80 타원체를 채택하고 TM 지도 투영법을 적용할 경우 기존 배포된 벡셀타원체에 근거한 지형

도와는 수평위치에서 350m ~ 400m 정도의 지역간 편차가 발생할 것으로 예견된다. 그러나 수직 데이텀의 경우는 우리나라를 비롯한 대다수의 국가가 지역타원체를 채택하여 사용할 당시에도 평균해수면이나 국가에 따라 별도로 정한 기준으로 부터 정표고(Orthometric height)를 결정, 사용해온 관계로 세계타원체로 전환 후, 고도성분의 경우 GNSS 시스템에 의한 세계타원체면에 기준한 높이(타원체고) ; Ellipsoidal height)를 정표고로 변환하여 활용하는 연구가 필요하며 이를 위해서는 해당 지역에 적합한 정밀한 지오이드고가 사전에 모형화 되어야 한다. 유럽이나 미국, 동남아 일부 국가의 경우에서도 국가적 차원의 지오이드 모델이 높은 정확도로 구성되어 있다. 반면 그동안 우리나라의 경우에는 지오이드고 모델의 실용성이 확산되지 않은 사유로 국가적인 차원의 연구는 미진한 상태이다. 그러나 GNSS 시대, 우리나라도 세계측지계로 전환하면서 GPS와 GALILEO 위성을 이용한 3차원 위치

결정이 사회 전반에 보편화될 전망으로 국가차원의 지오이드고 모델의 구축이 매우 절실한 상황에 있다. 지오이드고 결정에는 육상, 해상 및 항공에서 취득한 중력자료, 위성 Altimeter 자료 및 GPS/Levelling 자료와 해당지역의 지형보정자료 등을 종합적으로 해석하여 모형화 할 수 있는데 가장 대표적인 모형이 구면조화함수로 표현된 지구중력장모형(EGM ; Earth Gravitational Model)이다. 활용도가 높은 대표적인 지구중력장 모형들로는 OSU91A(1991년 발표), EGM96(1996년 발표) 및 WGS84(NIMA) 등이 있다. 최근 들어 지구중력장모형의 중요성이 강조되고 고해상도의 급수(n=m=360, degree=n, order=m)를 해석할 수 있는 모델링기술의 향상과 지표면 중력 자료의 확대, CHAMP, GRACE 위성 등 첨단기술에 힘입어 기존의 모형에 비해 현격히 향상된 지구중력장 모형이 발표되고 있어 중력관련 응용분야의 향상된 연구결과가 기대되고 있다.

본 연구는 지구중력장 모형으로부터 남한지역에 대한 고도 이상(height anomalies)을 산정하고 지형보정 여부에 따른 지역별 지오이드고의 특성을 분석하여 국내 지오이드고 개발연구에 기여하고자 한다. 이를 위하여 5가지 지구중력장 모형(EIGEN-GL04C, EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04S1, ITG-Grace02S 및 EGM96)과 지형보정을 위한 DEM자료로 NOAA NGDC에서 지표면을 2' 간격으로 모형화한 ETOPO2(v2, 2006)모형을 활용하였다. 지형에 따른 지형보정의 특성을 좀더 세부적으로 검토하기위해 남한지역의 육상부를 경·위도 1°×1° 크기의 6개 구역으로 구획하고 해상부는 4개 구역(서해, 남해에 각각 1구역, 동해에 2구역)을 선정하였다. 10개의 각 구역을 30" 간격의 격자로 세부 구획한 후 5가지 중력장 모형을 활용하여 각 격자점의 지오이드고를 산정한 후, 국립해양조사원에서 EGM96 모델과 13,493지점의 육상중력자료, 관할해역 1,723,252 지점의 선상중력자료 및 최신의 해면고도계 자료 등을 조합·해석하여 구성한 NORI-05모델(2005년 발표)에 의한 결과와 비교하였다. 아울러 육지부의 경우, GPS 관측이 수행된 수준점 50측점 및 삼각점 30측점을 점검점으로 선정하고 GPS/Leveling, NORI-05 및 5가지 지구중력장모형에 의한 지오이드고를 산정하고 비교·분석한 결과를 종합적으로 검토하여 GNSS 시대에 대비한 국내 지오이드고 모형 개발에 기여하고자 한다.

II. 지오이드고 산정 이론

2.1 구면조화함수의 지구중력장모형

고차 구면조화계수를 이용한 임의 점(r ; 지심거리, ϕ ; 지심위도, λ ; 지심경도)의 지오이드고는 타원체상 정규중력포텐셜 V(r,ϕ)에서 지구 상 임의 점 P(r,ϕ,λ)에서의 지구중력장 U

를 차감(T=V-U)하고 Bruns 정리(교란중력장 Disturbing potential T=YN, Y ; 타원체 표면상의 정규중력)를 적용하여 식(1)과 같이 산정할 수 있다. 여기서, 중력장 모델의 C, S(Zonal, Tesserial 및 Sectorial Harmonic 계수), 만유인력 상수 kM, 축척계수 a 및 Associated Legendre 함수 P_{nm}(cos ϕ)를 대입하여 지오이드고(height anomaly) N를 산정하며 부가적으로 지오이드상 임의 점 P의 중력과 상응되는 타원체상 중력값 간의 차이 중력이상(δg, gravity anomaly) 및 교란중력장 T의 편미분인 중력섭동(Δg, gravity disturbance)값을 산출할 수 있다.

$$N = \frac{kM}{\gamma r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \{ C_{nm} \cos(m\lambda) + S_{nm} \sin(m\lambda) P_{nm}(\cos\phi) \} \right]$$

$$\delta g = -\frac{\partial T}{\partial r}, \quad \Delta g = -\frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{r} T \quad (1)$$

2.2 GPS/Leveling 에 의한 지오이드고

임의 수준점 또는 정표고가 제공된 삼각점에 대한 GPS 관측으로부터 산출된 세계타원체면에 기준한 타원체고(h_{GPS})에서 정표고(H_{levelling})를 감하면 GPS/Levelling에 의한 지오이드고를 식 (2)와 같이 산출할 수 있게 있다.

$$N_{EGM} = h_{GPS} - H_{Levelling} \quad (2)$$

2.3 지형보정

정밀한 지오이드고를 구하기 위해서는 지형보정을 해야 한다. 보우게보정은 중력측정점이 기준면과 무한 평행평면에 위치한다는 가정하에 수행되나 현실 지형은 요철이 있는 면으로서 기복이 심한 산악 지대의 경우, 지형보정은 중요한 요소가 된다. 기준면(지오이드면) 외부에 존재하는 지형(질량)이 중력에 미치는 영향을 제거하는 보정을 “직접효과 ; direct effect”라 하며 “geoid와 co-geoid간 중력의 free-air 보정”과 같이 제거된 지형질량 영향을 다시 고려하는 것을 “간접효과 ; indirect effect”라 한다. 특히, 지구중력장 모형(EGM)으로부터 지오이드고를 결정하는 경우 기준면 외부에 위치한 지형(질량)이 반영된 중력장모형의 구면조화계수의 외부질량관련 내부 bias를 보정해야하는데 전통적으로 Helmert의 2차 condensation 기법을 사용한다. 본 연구에서는 Helmert 제안식에 NOAA의 ETOPO2 DTM모형을 사용하여 보정하였다. 관련 식은 참고문헌으로 대신한다.([5])

III. ICGEM의 최신 지구중력장모형

IAG(International Association of Geodesy)는 국제지구중

력장서비스(IGFS ; the International Gravity Field Service)를 위해 6개의 지역 센터를 운영하고 있다. 6개의 지역센터 중 독일 국가지구과학연구센터인 GeoForschungsZentrum (GFZ)내 International Centre for Global Earth Models (ICGEM)에서는 오래 전부터 기존 모든 지구중력장모델 정보를 축적하고 있으며 표준절차에 따라 중력장모형의 검증, 중력장 모형 관련 Software 축적, 보관, 실행, 변환 서비스 외에 모형 활용을 위한 접속기술, on-line 웹서비스 및 매년 IGeS 특별강좌 개최 등 다양한 서비스를 제공하고 있다. GFZ에서는 지구과학, 대기연구 및 응용을 위해 특별 임무를 수행하는 독일 단독 소형 인공위성(CHAMP ; CHALLENGING Minisatellite Payload)을 운용하고 있다. 매우 정밀하고 다양한 기능이 있는 보조 센서(magnetometer, accelerometer, star sensor, GPS receiver, laser retro reflector, ion drift meter) 및 위성의 궤도특성(near polar, low altitude, long duration)으로 CHAMP 위성을 이용하여 최초로 5년 이상 매우 정밀한 중력 및 자기장의 동시 관측을 수행할 수 있다. CHAMP 위성의 임무는 지난 10여년의 지구중력장 연구에 새로운 시대를 열었고 큰 기여를 하고 있는 중이다. GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)는 National Aeronautics and Space Administration (NASA)와 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)의 공동 프로젝트사업으로 운영되는 위성으로 GRACE의 1차 임무는 최근 5년 동안 발표된 광역 고 해상 지구중력장모형들을 대상으로 유례없는 정확도 평가를 하는 것이다. 지구중력장 측정분야에서 GRACE는 CHAMP의 임무를 연계 받게 되고 두 위성을 활용함으로써 정확도가 향상되게 된다. 최초의 GFZ GRACE 중력장모형인 EIGEN-GRACE01S이 2003년 7월 25일 발표되었고 110일간의 GRACE 위성자료 만에 의한 EIGEN-GRACE02S 중파형 지구중력장모형은 $n(\text{degree})=m(\text{order})=150$ 으로 민간에게는 2004년 8월 9일, GRACE 과학 팀에는 2004년 2월 13일 서비스가 제공되었다. CHAMP, GRACE 및 지표면 중력 자료의 조합처리로부터 $n=m=360$ 의 EIGEN-CG03C 중력장모형이 2005년 5월 12일 발표되었다.

$n=m=360$ 인 지구중력장모형은 130,317개의 구면조화계수로 구상되며 1파장이 약 100km 인 공간 범위를 갖고 광역적인 지오이드 및 광역적 free-air 중력이상을 나타낸다. 특히, 2006년 3월 31일에는 GRACE, Lageos 및 지표면 중력 자료의 조합에 의한 가장 최신의 중력장모형(EIGEN-GL04C, $n=m=360$)이 발표되게 되었다. EIGEN-GRACE02S 중파장 중력장모형은 110일간의 GRACE 추적 자료로부터 구성된 것이다. EIGEN-CG03C 지구중력장모형은 860일간의 CHAMP 및 200일간의 GRACE 위성중력 자료에 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 지표면 중

력자료(gravimetry and altimetry)를 조합시켜 구성된 고 해상 지구중력장모형 인 EIGEN - CG01C의 개량형으로서 동일 CHAMP 임무 및 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ gravimetry and altimetry 표면자료 및 5배가 넘는 GRACE 임무 관측 자료에 기반 한다. 즉, 구 모델의 200일 자료대신 2003년2월~5월, 2003년 7월~12월 및 2004년 2월~7월 중 376일 자료가 사용된 $n=m=360$, 1파장이 약 110km인 모델로 구성된 구면조화계수로부터 지오이드와 중력이상을 산정한다. 조합기술 사용된 'A special band-limited 기법'은 낮은 주파수 밴드에서는 위성의 자료로부터 높은 정확도를 유지할 수 있도록 하고 지표면 자료로부터 파생된 고주파정보로 smoothing 전환이 가능하다.

EIGEN-GL04C 중력장모형은 EIGEN-CG03C모델의 개량형으로서 GRACE 및 LAGEOS 추적자료, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 중력고도계 표면자료를 조합하여 구성된 모형이다. NASA에서 운영하는 LAGEOS 위성은 위성표면에 장착된 426개의 반사경으로 지상에서 발사된 레이저 광을 다시 지상으로 반사시켜 1~3cm 이내로 지상점의 위치를 계산할 수 있기 때문에 지구 중력자료 원으로 활용하고 있다. 위성관측 자료는 Potsdam에 있는 GFZ(GRACE ; 2003년 2월~2005년 7월, 2004년 1월 자료 제외) 및 Toulouse에 있는 GRGS(GRACE 및 LAGEOS ; 2003년 2월 ~ 2005년 2월)에서 해석하였다. Arc length (GRACE: 1 day, LAGEOS: 10d)와 같은 처리 표준, 중력장모형 (EIGEN-CG03C), ocean tide model (FES2004) 또는 ocean pole tide model (Desai 2002)은 두 장소 모두 동일한 조건이다. 유일한 차이점은 위성자료 처리 시 단주기 질량변동을 보정하기 위해 사용되는 해양모형을 GRGS에서는 'barotropic model MOG2D'를 GFZ에서는 'baroclinic model OMCT'를 사용한 점이다. 사용된 지표면자료는 새로운 GFZ 평균 해면고(MSSH)모델로부터 산정된 해양에 대한 지오이드 기복을 제외하고 EIGEN-CG03C와 동일하다. 앞선 지구 중력장모델과 같이 EIGEN-GL04C 모형은 $n=m=360$ 의 조합모형으로서 1파장의 공간범위는 110km이다. 본 연구에서 사용한 지구중력장 모형의 제원을 요약하면 표 1과 같으며 관련정보는 참고문헌으로 대신한다.

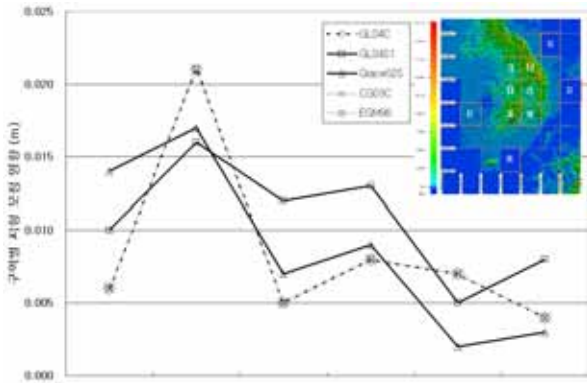
[표 1] 본 연구에 사용된 지구중력장 모형

모형 명	발표 년	n = m	기본자료
ITG-Grace02s	2006	170	S(Grace)
EIGEN-GL04S1	2006	150	S(Champ, Grace)
EIGEN-GL04C	2006	360	S(Grace, Lageos) G, A
EIGEN-CG03C	2005	360	S(Grace, Lageos)
EGM96	1996	360	EGM96S, G, A
S=Satellite tracking data, G=Gravity, A=Altimeter			

IV. 비교분석

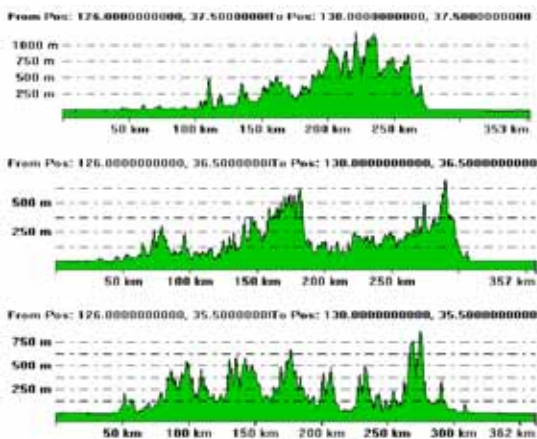
4.1 EGMs의 지역별 지형보정 영향

그림 1은 경도×위도, 1° × 1° 크기의 육상부 6개 구역에 대하여 5가지 지구중력장모형을 적용하고 구역별로 30" 간격의 14,641개 격자점에 대한 지형보정 전·후의 지오이드 고를 산정하고 모형별 표준편차를 구역별로 도시한 것이다. 지형보정의 영향은 5가지 중력장모형에서 “나”(강원), “라”(경북), “마”(전남) 지역 순으로 나타나 주로 산악지형이 많은 구역에서 보다 많은 영향을 나타내었다. ITG-Grace02s 및 EIGEN-GL04S1 모형에서는 “가”(서울 경기) 및 “바”(경남) 구역에서 다른 모델과 반대 경향을 나타내었는데 이는 n=m의 차수가 다른 모델에 비해 저 차수 모형의 특성에 기인된 지역적 편차로 사료된다.



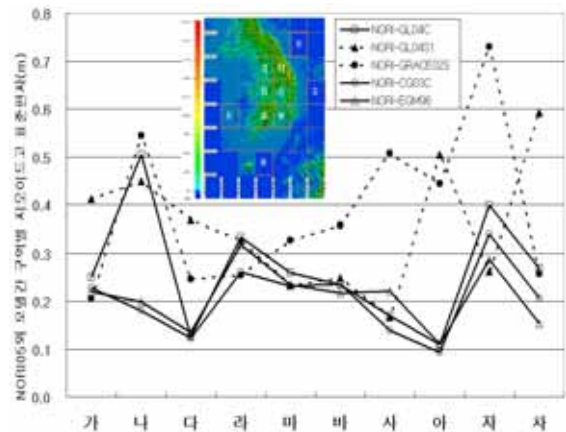
▶▶ 그림 1. EGMs 지오이드고의 육상 구역별 지형보정영향

그림 2는 그림 1에서 비교적 지형보정영향이 크게 나타난 “나”, “라” 및 “마” 구역의 중심 위도에 대한 경도 대역(126°~130°)의 횡단면을 도시한 것이다. 지형의 횡단면에서도 표고와 지형영향이 비례하고 있음을 확인할 수 있다.



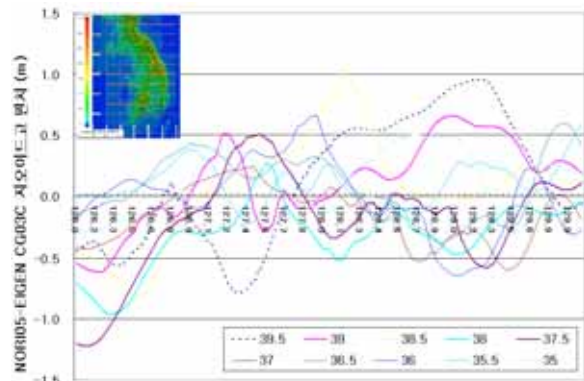
▶▶ 그림 2. 위도 37.5°(상), 36.5°(중) 및 35.5°(하)의 경도대역 (126°~130°)의 횡단면도

그림 3은 국립해양조사원에서 개발한 경도 124°~131°, 위도 32°~40° 지역의 지오이드고 모형(EGM-05)을 기준으로 육·해상 10개 구역의 30" 격자점에 대한 5가지 지구중력장 모형의 지형보정을 고려한 지오이드 고를 산정하고 편차를 구역별로 도시한 것이다. NORI-05를 기준한 것은 EGM96모형과 ±13.2cm의 편차로서 비교적 국내에서 발표된 최근의 우수한 모형이기 때문이다. 저 차수 중력장모형인 ITG-Grace02s 및 EIGEN-GL04S1 모형과 고차 중력장모형의 편차는 지역별로 ±5~30cm의 분포를 보였고 육상부에서는 “나”, “라”, “마”순, 해상부에서는 동해, 남해 및 서해 순으로 나타나 5가지 중력장 모형간의 지형보정 결과와 동일한 경향을 보였다.



▶▶ 그림 3. NORI-05와 EGMs간 육해상 구역 별 지오이드고 편차(지형보정 반영, 점선 : 해양부, 실선 : 육상부)

그림 4는 NORI-05와 EIGEN-CG03C모형 간, 경도 126°~130° 대역, 위도 35°~39.5° 대역에 대한 위도 0.5° 간격의 지오이드고 편차를 도시한 것으로 좌측 초반부의 북부지역, 1/3 지점의 전남지역과 가장우측의 동해해상지역을 감안하면 동부지역으로 진행할 수 록 편차가 증가함을 알 수 있다.

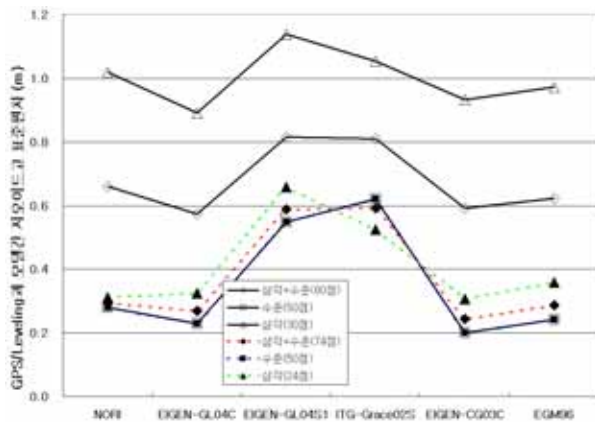


▶▶ 그림 4. NORI-05와 EIGEN-CG03C간 경·위도대역별 편차

4.2 GPS/leveling과 EGMs 간 지오이드고

그림 5는 육상부에서 GPS 관측이 수행된 수준점 50측점 및 삼각점 30측점을 점검점으로 하여 NORI-05, 지형보정을 적용한 5가지 지구중력장모형과 GPS/Leveling 간의 지오이드고 편차를 점검점의 6가지 경우조건에 따라 도시한 것이다.

과대편차를 보인 6개 삼각점을 제외한 74개 점검점의 편차 분포(점선)를 검토하면 수준점(50개 측점)으로 구성된 점검점이 모든 모형에서 가장 작은 편차를 보였다. 특히, 두 저차모형을 제외하면 나머지모형의 경우 GPS/leveling 지오이드고를 평균 $\pm 20\sim 30\text{cm}$ 의 편차분포로 나타났다.



▶▶ 그림 5. GPS/leveling과 EGMs 간 지오이드고 편차

V. 결론

남한지역의 육상 및 해상부에서 경·위도 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 10개 구역을 선정하고 각 구역의 30" 간격, 14,641개 격자점에 대해서 지형보정 여부에 따라 5가지 지구중력장모형, NORI-05 및 GPS/leveling에 의한 지오이드고를 산정하고 비교 분석한 결과, 국내 정밀 지오이드고 모델링 시, 육상 및 해상에서 지형의 요철이 심한 지역일수록 정밀한 지형보정의 필요성을 확인할 수 있었다. 특히, 육상부, 80개 점검점의 GPS/leveling 결과를 기준으로 한 $n=m=360$ 중력장모형의 지오이드고 편차는 평균, $\pm 20\text{cm}\sim 30\text{cm}$ 의 표준편차로 나타났다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>
- [2] 이용창, "최신 지구중력장모델(EGMs)의 남한지역적용 평가", 한국측량학회 학술발표논문집, pp.99~104, 2006. 4
- [3] <http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/results/>
'Combined Gravity Field Model EIGEN-GL04C', 2006. 4
- [4] Förste, C. 외 11인, "A mean global gravity field model from the combination of satellite mission and altimetry/

gravimetry surface gravity data", EGU General Assembly 2006.

- [5] Hossein Nahavandchi, "Precise Gravimetric-GPS Geoid Determination with Improved Topographic Corrections Applied over Sweden", ISSN 1400-3155, 1998.