

해상중력자료를 이용한 서해 중부해역의 정밀지오이드 산정 Precise Geoid Calculation Using Shipborne Gravity Data of the Mid-Yellow Sea Around KOREA

최윤수* · 박병욱** · 최광선*** · 김진섭****

Choi, Yun Soo · Park, Byung Uk · Choi, Kwang Sun · Kim, Jin Sub

요 旨

본 연구에서는 국립해양조사원이 1999년 '해양2000호'로 측정한 서해 중부해역의 해상중력 자료와 해면고도계 위성자료, 미국 GSFC/DMA에서 제공하는 EGM96 중력모델자료를 이용하여 이 지역의 정밀지오이드 산정을 위한 구체적인 자료처리 방법을 제시하였으며, 아울러 해상중력자료와 해면고도계 위성중력자료를 비교하였다. 연구결과, EGM96 모델을 167차수로 계산한 광역 지오이드와 적분 반경 27km로 계산한 상대 지오이드를 합성하여 산정한 서해 중부해역의 정밀지오이드는 평균 18.339m이고 최저 13.564m에서 최고 22.785m 사이에서 변화하였다. 해상중력이상과 해면고도계 중력이상을 비교한 결과 해상중력이상의 정밀도가 더 높음을 알 수 있으며, 차이의 평균은 -0.56mGal, RMSE는 4.195mGal로 나타났다.

ABSTRACT

This study suggests a data processing method for precise geoid height calculation through sea gravity data of mid-Yellow Sea provided by Haeyang 2000 and satellite altimetry data and the EGM96 geopotential model from GSFC/DMA in USA. Also it compared sea gravity data with satellite altimetry gravity data. As a result, precise geoidal undulation of the mid-Yellow Sea presented from calculating and integrating EGM96 geopotential model in degree and order 167 and a relative geoid by integral radius of 27km respectively. It has a mean value of 18.339m, varying from 13.564m to 22.785m. the comparison between sea gravity data and satellite altimetry data shows that the former is more precise than the latter, which showed an anomaly of 0.56mGal and RMSE of 4.195m.

1. 서 론

각종 측지 작업의 기준이 되는 지오이드는 지구의 중력 방향에 직각인 일종의 등포텐셜면으로 물리적인 지구의 형상을 나타내며, 수학적으로 정의된 지구타원체와 지오이드간의 높이 차이인 지오이드고(geoidal height)로 표현되고 있다. 지오이드고에 대한 연구는 1849년 Stokes에 의해 적분 방정식이 개발된 이래 주로 중력자료의 분석에 의하여 행하여지고 있으나, Stokes 함수는 일부 지역의 지오이드 연구에도 지구 전체의 중력자료를 이용해야 하는 문제점과 계산상의 어려운 점이 있다.

최근 각종 중력측정기기의 발달과 인공위성의 이용 등 중력자료 획득 방법의 개발에 따라 중력자료의 질적 향상은 물론 관측자료의 양이 획기적으로 증가하고 있으며, 지구중력모델(global geopotential model)의 정밀도가 향상됨으로서 절대 지오이드의 연구가 간편하면서도 정밀하게 되었다. 일반적으로 지구중력모델 중 계수의 차수를 최대 360 degree and order까지 계산하며, 그 분해능이 50km×50km 정도이고 지오이드의 절대오차가 ±1m 정도이다. 그러므로 지구중력모델에 의한 지오이드는 장파장의 변화 양상을 나타내는 일종의 광역 지오이드이며 이를 정밀 측지 작업에 이용하기는 미흡하다. 따라서 정밀 지오이드에 대한 최근의 연구 경향은 지구중력모델을 이용하여 광역 지오이드를 계산하고 연구지역 주위의 중력자료를 이용하여 단파장의 상대 지오이드를 구한 후 이들을 합성하여 정밀 지오이드를 계산하고 있다.

*서울시립대학교 지적정보학과 교수

**한경대학교 토목공학과 교수

***부산대학교 지구과학교육과 교수

****국립해양조사원 해도과

그동안 국내의 육상 지오이드에 대한 연구는 천문측량 자료¹⁾, 중력자료²⁾, 위성고도자료³⁾, GPS/Leveling⁴⁾ 등 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 반면, 해상 지오이드는 해상 중력자료 및 위성고도자료에 의해 분석할 수 있는데, 그동안 국내의 해상중력자료는 해상중력시스템 및 조사선의 미비로 학문적인 연구에 활용할 만한 자료는 일본, 러시아 등 주변국에 의해서 관측된 자료를 제외하면 거의 전무한 실정이었다. 따라서 주로 위성고도자료에 의한 분석이 이루어졌다.^{5),6)}

그러나 최근 국립해양조사원 및 한국해양연구소를 비롯한 국내 연구기관에서 잇달아 신형 조사선 및 해상중력계를 도입, 운영하기 시작하면서 국내 연안에서의 해상중력 측정의 전기를 맞게 되었으며, 국립해양조사원은 국가해양 기본도 구축사업의 일환으로 1996년부터 2000년에 걸친 5개년 계획을 수립, 우리나라 영해에 대한 중력관측을 실시하여 풍부한 양질의 해상중력 관측자료를 획득하였다.

본 연구에서는 국립해양조사원이 1999년 '해양2000호'로 측정한 우리나라 서해 중부해역(E122° 44' 13" 부터 E125° 29' 06" 까지, N33° 59' 03" 부터 N35° 31' 17" 까지)의 해상중력자료와 해면고도계 위성자료, 미국 GSFC/DMA에서 제공하는 EGM96 중력모델자료를 이용하여 이 지역의 정밀지오이드 산정을 위한 구체적인 자료처리 방법을 제시하였으며, 아울러 해상중력자료와 해면고도계 위성중력자료를 비교하였다.

2. 해상중력측정

2.1 해상중력계

'해양2000호'에 탑재된 해상중력계는 미국 LaCoste & Romberg사의 모델 'S' 중력계로서(Fig. 1), 특수합금으로 제작한 zero-length 용수철을 이용하는 beam type의 상대중력계이다. 이 해상중력계는 실험실에서의 정적인 상태의 정밀도는 0.01mGal 이내이고, 해상의 환경을 가정하여 수평, 수직방향의 가속도 변화로부터 결정된 정밀도는 0.25mGal 이내지만, 실제 해상에서는 해상 조건, 탐사선의 크기, 항해 환경 등에 의한 영향으로 이보다 정밀도가 떨어져 그 정밀도가 1mGal 이내이면 매우 양호한 것으로 취급된다.

해상에서의 중력측정은 항해 중에 이루어지므로 선박의 운동에 의한 영향을 최소화하기 위해 자이로를 사용하여 큰 가속도의 변화에도 정확한 측정이 가능하도록 수평안정

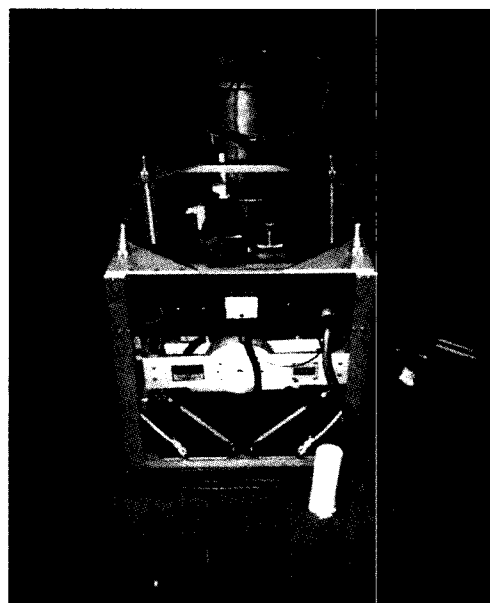


Fig. 1. LaCoste and Romberg marine gravity meter sensor

판 위에 해상중력계를 올려놓고 중력을 측정한다. 항해 중 선박의 운동으로 기인되는 수평안정판의 움직임은 각 방향의 자이로에 의해 감지되고, torque motor에 의해 수평안정판의 수평을 유지하며, 모든 장치의 움직임은 SEASYS 소프트웨어에 의해 자동적으로 제어되고 결과를 기록한다.

2.2 해상중력측정

1999년 4월14일부터 5월17일까지의 기간 중 총 3회의 항차에 걸쳐 27일 동안 서해 중부해역에서 해상중력을 측정하였다. 해상중력측정의 육상 기준점으로는 국립지리원이 매설한 목포 해안심판원 내의 수준원점 중력값을 기준으로 '해양2000호'가 기항할 목포항 제 1부두와 대불 부두에 간이 중력기점을 전이하였으며, 해상중력값은 이를 기준으로 절대중력으로 환산하였다.

해상중력측정시 에트보스(Eötvös) 효과에 의한 영향을 줄이기 위해 남-북 방향의 항로를 주축선으로 택하였으며, 자료처리를 위한 교점(cross-over point)의 생성이나 이동을 하기 위한 경우 다른 방향의 항해를 하였다. 남-북 방향 항해의 경우 각 축선 간격을 3분으로 일정하게 항해하였으며, 교점 생성을 위한 동-서 방향의 경우 약 0.25도 간격으로 항해하였고, 각 축선에서 0.033분 간격으로 중력측정을 하였다(Fig. 2 참조). 측정된 중력측점 수는 199,142점이나 모항에 가까운 E126° 이상의 자료를 제거한 측정 수는 185,395점이다.

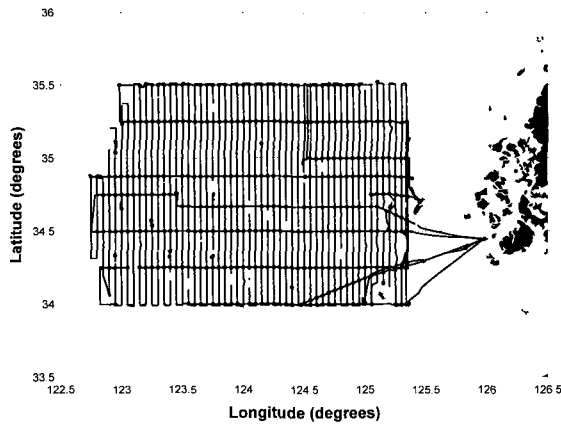


Fig. 2. Gravity survey line and cross-over point(solid circle) of the RV 'Haeyang2000' in 1999

3. 해상중력자료 처리

3.1 절대중력 계산과 기계변위 보정

목포 수주원점(E126° 23' 2.76", N34° 46' 57.65", 표고 2.70m)의 중력값(979,715.471 mGal)을 기준으로 측정 선박이 정박할 목포 제 1부두(E126° 23' 3.8", N34° 46' 43.5", 표고 3.0m)의 간이 중력기점값(979,714.820 mGal)과 대불부두(E126° 25' 35.4", N34° 46' 0.3", 표고 3.0m)의 간이 중력기점값(979,715.865mGal)을 계산하였다. 이를 이용하여 각 항차별 출항 직전과 입항 직후의 해상중력값과 안벽고 측정값을 이용하여 해상중력을 절대중력으로 환산하였으며, 각 항차별로 기계변위를 보정하였다. 가장 큰 drift가 나타난 제3항차의 경우도 4.3mGal/month로 측정시 항해 환경은 비교적 양호하였다.

3.2 지구조석 보정

달과 태양 인력의 영향으로 지구의 중력장이 변화하며 이러한 중력 변화량을 보정하는 것이 조석보정이다. 조석에 의한 중력변화의 크기는 작기 때문에 해상중력 처리시 대부분 이를 무시하고 있지만 본 연구에서는 보다 정밀한 해상중력 자료처리를 위해 조석보정을 실시하였으며 Tamura(1982)⁷⁾의 FORTRAN 프로그램을 이용하였다.

3.3 선속, 선수방향 계산과 에트보스 보정

해상중력측정은 선박이 항해 중에 중력을 측정하므로 선박의 운동 성분 중에서 지구자전방향의 성분이 중력에 영향을 미치게 되어 해상에서 측정된 중력은 이 양만큼 차

이가 나타나게 된다. 이러한 영향을 제거하는 것을 에트보스 보정이라 하며, GPS 측위 성과를 이용하여 선속과 선수 방향을 계산하여 각 시점의 에트보스 효과를 보정하였다.

한편, 현재의 위치추적시스템인 GPS 자료로는 선박의 회전점에서 나타나는 원심력을 보정할 수 없는 단계이므로, 해상중력자료에서 이러한 회전점의 자료를 먼저 제거하였으며, 그 결과 자료 수는 157,798점이 되었으며 교점의 수도 제거 전 406점에서 278점이 되었다.

일반적으로 연안 지역에서의 중력 이상은 \pm 수십 mGal 범위인데 반해, 에트보스 보정치는 \pm 100mGal에 이르고 있어 정확한 에트보스 보정이 중요하다. 에트보스 보정치를 정확히 계산하기 위하여 특히 선속을 정확히 추적하여야 하나 현재의 GPS 시스템으로는 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 에트보스 보정치에 내재된 이러한 오차를 제거하기 위해 Savitzky-Golay filter⁸⁾를 적용하였으며, 이는 일종의 low-pass filter로 시간에 따른 변동량에 포함되어 있는 작은 진폭의 noise를 제거하는데 적합하다.

또한 본 연구에 사용된 해상중력계는 가속도의 영향을 줄이기 위해 beam의 움직임을 인위적으로 매우 느리게 만들고, 중력계에 의한 수분간의 중력 변화와 자이로에 의한 선박의 움직임을 기록한 후 이들 자료를 이용하여 최적의 중력값을 출력하므로, 중력계에 출력되는 중력값은 그 시각의 중력값이 아니고 수분전의 중력값이다. 이 때문에 나타나는 time-lag는 항상 일정한 것이 아니고 항해 환경에 따라 달라질 수도 있기 때문에 계산된 중력이상에 이러한 시간 지연 효과를 보정하여야 한다.

본 연구에서는 에트보스 보정치의 filtering과 time-lag 보정을 함께 처리하였다. 에트보스 보정치를 filtering 하기 위한 window의 길이를 0에서 80까지, smoothing 강도를 0에서 18까지 변화시키며 각각의 조건에 의한 중력이상을 계산한 뒤 각각의 중력이상에 0초에서 600초까지 time-lag를 준 중력 이상을 재계산하고 교점에서의 이들 RMSE를 계산하였다. 이 과정에서 자료 수는 150,878점으로 줄어들었고, 교점의 수도 264점이 되었다. window의 길이가 54, smoothing 강도가 2, time-lag가 310초인 경우의 RMSE가 2.182mGal로 가장 작게 나왔다.

중력이상 계산시 적용하는 표준중력은 기준타원체에 따라 달라지는 것으로 본 연구에서는 GPS를 이용하여 측정의 좌표를 결정하였으므로 GPS의 기준타원체인 WGS84 타원체의 표준중력을 이용하였다.

3.4 교점보정

대부분의 중력측정에서 나타나는 특징이지만 해상중력 자료도 동일지점을 측정시간을 달리하여 재측정하는 경우, 탐사조건 및 자료처리 과정 등의 여러 요인에 의해 중력이 상이 서로 다르게 나타난다. 이러한 차이를 교점오차라 하며, 중력이상의 정확도 개선을 위하여 필수적으로 보정해야 한다.⁹⁾ 그러나 한 지점에서의 교점오차는 계산 과정에서 인근의 교점에 영향을 미치므로 meter drift 보정과 에트 보스 보정 등 교점보정 이전의 각종 보정이 정확히 이루어져야만 한다.

본 연구에서는 Prince & Forsyth(1984)¹⁰⁾의 알고리즘을 FORTRAN 프로그램으로 구현하여 교점보정을 수행하였다. 이 방법은 교점오차를 감소시키면서도 개개의 선분에 따른 원래 중력이상의 경향을 유지하는 장점을 가지고 있다. 교점오차를 보정한 결과 264개의 교점에서 RMSE는 0.436mGal로 교점오차 보정전보다 많이 개선되었음을 알 수 있었다. 따라서 교점의 수가 많을수록 더 좋은 결과를 얻을 것으로 기대되며, 해상중력측정시 가능하면 많은 교점이 나타날 수 있도록 항해를 계획하여야 할 것이다.

4. 정밀지오이드 산정

4.1 해상중력이상

이상의 자료처리 결과에 의한 서해 중부해역의 중력이상은 Fig. 3과 같이 나타나며, 평균 14.75mGal로 최저 -11.28mGal(E123.45°, N35.50°)에서 최고 49.87mGal(E124.81°, N35.30°) 사이에 분포한다.

한편, 1999년 미국 NOAA 및 캘리포니아 대학의 Sandwell 박사가 중심이 되어 계산한 해면고도계 인공위성자료에 의한 본 연구지역의 중력이상은 Fig. 4와 같으며,¹¹⁾ 평균 14.05mGal로 최저 -22.69mGal에서 최고 47.40mGal 사이에서 변화한다.

Fig. 3과 Fig. 4의 해상중력이상을 비교하면, 연구지역 중앙부에서 해면고도계 위성에 의한 중력이상보다 해상중력 자료에 의한 중력이상이 확연하게 잡음이 없는 밀도분포로 나타나는 것이 특징이다. 두 중력이상간의 차이는 Fig. 5와 같으며, 차이의 평균은 -0.56mGal, RMSE는 4.195mGal로, 최소 -15.63mGal에서 최대 23.03mGal 사이에 분포한다.

4.2 정밀지오이드 산정

정밀지오이드의 산정에 있어서 지구중력모델에 의한 광

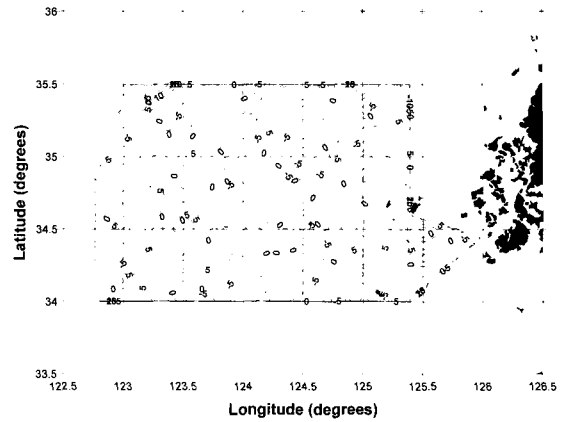


Fig. 3. Free air anomaly measured by RV 'Haeyang2000' (unit : mGal)

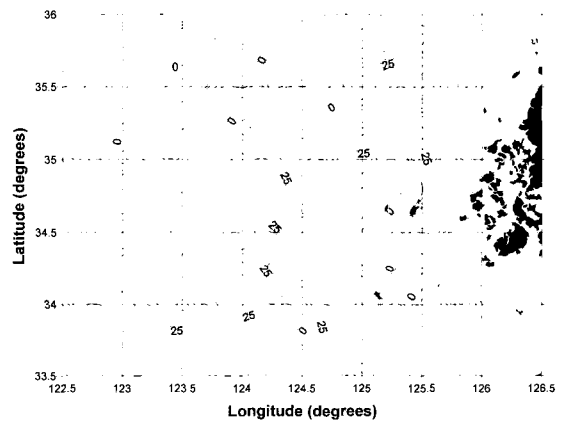


Fig. 4. Free air anomaly by satellite altimetry of mid-Yellow Sea around Korea(unit : mGal)

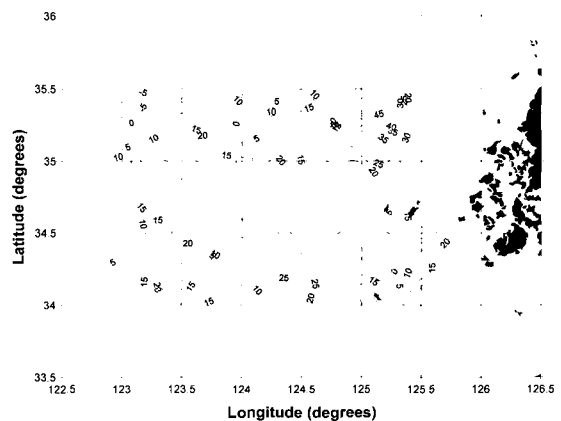


Fig. 5. Free air anomaly difference between shipborne and altimetry anomaly(unit : mGal)

역 지오이드를 계산할 때 몇 차까지의 중력모델을 이용할 것인지와, 상대 지오이드 계산시 적분반경을 얼마로 할 것인지가 문제가 된다. 이는 지역마다 다르게 나오므로 정밀 지오이드 계산에 중요하면서도 매우 까다로운 문제이다. 한편 Choi 등(1997)¹²⁾은 우리나라 일원의 지오이드인 PNU95 지오이드를 개발하면서, 지구중력모델로 OSU91A와 우리나라 육상지역 중력자료 및 71개 지점의 GPS/Leveling 지오이드를 사용한 결과 광역 지오이드의 차수를 167, 상대 지오이드의 적분반경을 27km로 한 경우의 RMSE가 0.149m로 최적의 지오이드가 계산된다고 하였다. 본 연구에서는 이 결과를 적용하여 정밀 지오이드를 계산하였다. 지구중력모델로는 미국의 EGM96 중력모델을 사용하였으며¹³⁾, 이에 대해 최대 차수를 167 degree and order로 계

산한 연구지역의 광역 지오이드는 Fig. 6과 같다. 지오이드의 평균은 18.348m이며 최저 13.817m에서 최고 23.040m 사이에서 변화하고, 서북단에서 동남단쪽으로 가면서 증가하고 있다.

절대 지오이드를 구하기 위해 장파장의 EGM96 지오이드와 중력측정자료의 적분에 의한 상대 지오이드를 합성하면 EGM96 중력모델의 계산에 들어간 중력이상 효과가 중첩되게 된다. 따라서 Fig. 5의 해상중력이상에서 EGM96 중력모델의 중력이상(Fig. 7)을 제거한 Fig. 8의 중력이상을 이용하여야 한다. Fig. 7은 EGM96 중력모델에서 최대 차수 167 degree and order로 계산할 경우의 연구지역 중력이상도이며, 평균 13.80mGal로 최저 3.77mGal에서 최고 28.81mGal 사이에 분포한다.

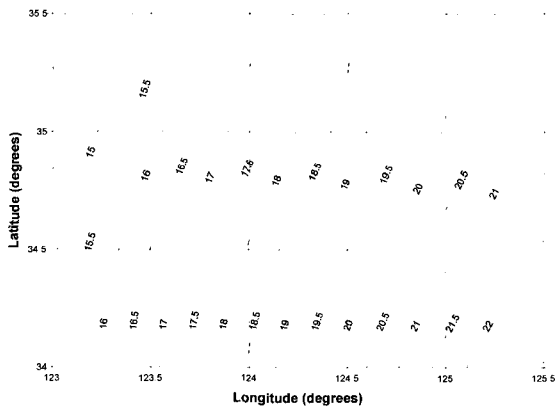


Fig. 6. Geoidal undulation of mid-Yellow Sea around Korea area using the EGM96 model up to degree and order 167 referred to WGS84 ellipsoid(unit : meter)

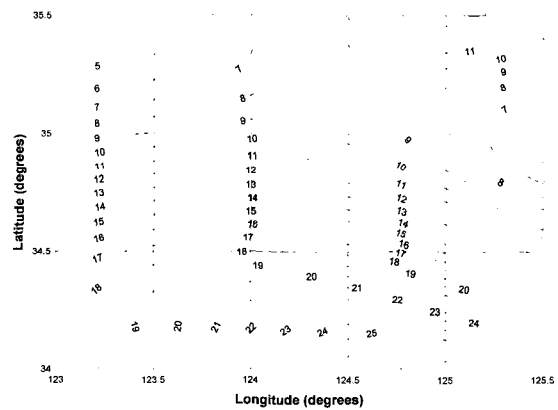


Fig. 7. Free-air anomaly of mid-Yellow Sea around Korea using the EGM96 model up to degree and order 167(unit : mGal)

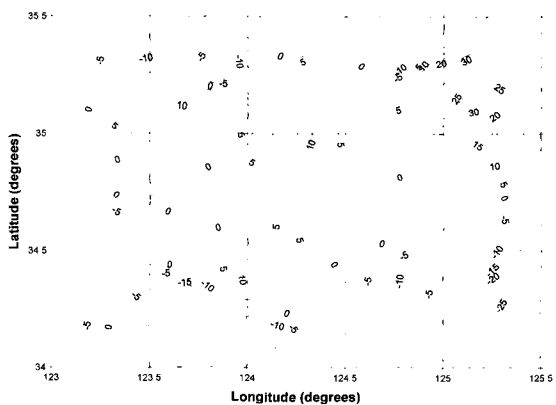


Fig. 8. Removed Free-air anomaly of the study area from the shipborne gravity anomaly to the EGM96 gravity anomaly up to degree and order 167(unit : mGal)

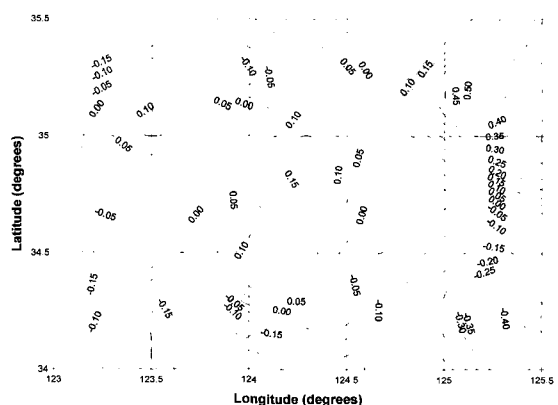


Fig. 9. Relative geoid calculated by the removed Free-air anomaly. Integral radius is 27km(unit : meter)

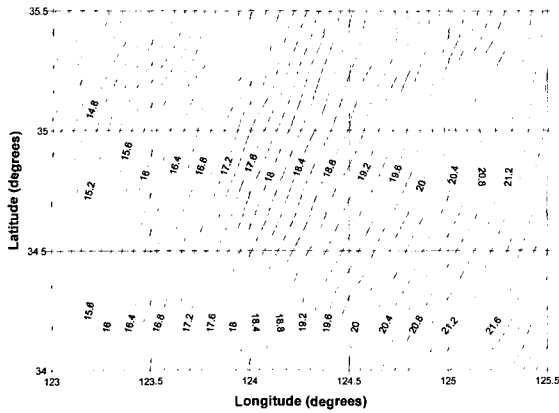


Fig. 10. Precise geoidal undulation of mid-Yellow Sea around Korea calculated from this study(unit : meter)

Fig. 9는 Fig. 8의 중력 이상을 적분 반경 27km로 계산한 상대 지오이드로서, 이 때 해상중력측정 주위 지역에 대해서는 Fig. 4의 해면고도계 위성자료를 이용하였다. 상대 지오이드의 평균은 -0.009m이며 최저 -0.440m에서 최고 0.509m 사이에 분포한다.

Fig. 10은 Fig. 6의 광역 지오이드와 Fig. 9의 상대 지오이드를 합성하여 계산한 연구지역의 정밀 지오이드이다. 이 지역에서 정밀 지오이드는 평균 18.399m이고, 최저 13.564m에서 최고 22.785m 사이에서 변화하며, 광역 지오이드의 영향으로 서북단에서 동남단으로 점진적으로 증가하고 증가폭은 9.2m에 이른다.

5. 결 론

본 연구에서는 국립해양조사원이 1999년 '해양2000호'로 측정한 서해 중부해역의 해상중력 자료를 이용하여 정밀지오이드 산정을 위한 구체적인 자료처리 방법을 제시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 서해 중부해역에서 광역 지오이드와 상대 지오이드를 합성하여 계산한 정밀지오이드는 평균 18.339m이고 최저 13.564m에서 최고 22.785m 사이에서 변화한다.
2. 해상중력이상과 해면고도계 중력 이상을 비교한 결과 해상중력 이상의 정밀도가 더 높음을 확인할 수 있으며, 차이의 평균은 -0.56mGal, RMSE는 4.195mGal로 나타났고, 최소 -15.63mGal에서 최대 23.03mGal 사이에 분포하였다.
3. 현재 해상중력측정시 동서 간격을 3분 간격으로 측정하고 있으나 1분 간격으로 더욱 조밀한 측정이 요구되며 이로써 더욱 정밀한 지오이드를 계산할 수 있을 것이다. 또한 본 연구

지역 일원에서 GPS 관측에 의한 GPS/Leveling 지오이드를 측정하면 본 연구 결과를 더욱 개선할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문에 필요한 귀중한 자료를 제공해 주신 국립해양조사원 관계자 여러분과 일부 장비(2001년도 서울시립대학교 첨단기자재사업)를 제공해 주신 서울시립대학교당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. 조규전, 이영진, "우리나라의 천문측지 지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지, 제9권 제2호, 1991, pp. 1-8.
2. 최경재, 최윤수, "EGM96모형을 이용한 Bessel지오이드의 계산", 한국측지학회지, 제17권 제1호, 1999, pp. 33-40.
3. 윤홍식 "The Altimeter Geoid of the Region of Korean Peninsula", 한국측지학회지, 제13권 제1호, 1995, pp. 61-68.
4. 윤홍식, "Geometric Geoid Determination in South Korea using GPS/Levelling Data", 한국측지학회지, 제13권 제2호, 1995, pp. 285-289.
5. 김광배, 최재화, 윤홍식, 이석배, "위성 고도자료를 이용한 한반도 해상지역에서의 중력 이상의 결정", 한국측지학회지, 제13권 제2호, 1995, pp. 177-185.
6. 김정희, "Enhanced Recovery of Gravity Fields from Dense Altimeter Data", 한국측지학회지, 제14권 제2호, 1996, pp. 127-139.
7. Tamura, Y., "A Computer Program for Calculating the Tide Generating Force", The Publications of the International Latitude Observatory of Mizusawa, Vol. 16, 1982, pp. 1-19.
8. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., Numerical recipes 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 1992.
9. 이동운, 선형 최소자승법을 이용한 선상중력자료의 교점오차 보정, 이학석사 학위논문, 부산대학교, 1998.
10. Prince, R. A. and Forsyth, D. W., "A Simple Objective Method for Minimizing Crossover Errors in Marine Gravity Data", Geophysics, Vol. 49, 1984, pp. 1070-1083.
11. Yale, M. M. and Sandwell, D. T., "Stacked Global Satellite Gravity Profiles", Geophysics, Vol. 100, 1999, pp. 15117-15127.
12. Choi, K. S., Kim, J. H. and Yang, C. S., "PNU95 Geoid", Korean Journal of Geophysical Research, Vol. 25, 1997, pp. 1-13.
13. 박병욱, 최윤수, 신상호, "GPS/Leveling의 실용적 활용 방법에 관한 연구", 한국지형공간정보학회논문집, 제10권 제2호, 2002, pp. 107-114.

(2002년 8월 16일 원고접수)