

서해남부에서의 선상중력 자료 획득 및 처리에 관한 고찰

최광선* · 옥수석** · 서만철*** · 최영섭**** · 김백수****

* 부산대학교 지구과학교육과 · ** 경성대학교 강사

*** 공주대학교 문화재비파괴진단연구실 · **** 국립해양조사원

요 약

국립해양조사원이 1999년도 '해양2000'호를 이용하여 측정한 서해 남부지역의 선상 중력자료를 처리하였다. 자료처리 결과 264개 교점에서 고도이상의 RMS는 0.436 mGal로 매우 좋은 결과를 나타내고 있다. 국립해양조사원이 '해양2000'호를 이용하여 측정한 선상 중력은 우리나라 일원의 중력관련 연구에 매우 큰 기여를 할 것이다.

주요어: 선상중력, 고도 이상, 부우개 이상, Eötvös 보정, 교점 보정

Kwang Sun Choi, Soo Suk Ok, Man Cheol Suh, Young Sub Choi, Beak Soo Kim, 2000, Study on the aquisition and processing of the shipborne gravity data from the southern area of Yellow sea. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 4, p. 291-310

ABSTRACT: In this study, a series of data processing methods to calculate gravity anomaly from observed marine gravity data by NORI(National Oceanic Research Institute) using RV 'Haeyang2000' in 1999 at southern part of the yellow sea were developed. As a results, the RMS difference of Free air anomaly among 264 crossover points is 0.436 mGal. The shipborne gravity data by NORI using RV 'Haeyang2000' will be very useful for gravitational research in and around Korean peninsula.

Key words: shipborne gravity, free air anomaly, Bouguer anomaly, Eötvös correction, cross over correction.

(Kwang Sun Choi, Pusan National University, E-mail: ksunchoi@hyowon.cc.pusan.ac.kr, Soo Suk Ok, Keyongsung University, Man Cheol Suh, Nondestructive Reserch Lab. of Cultural Property, Kongju National University, E-mail: mcsuh@kongju.ac.kr Young sub Choi and Baek Soo Kim, National Oceanic Research Institute)

1. 서 론

지구 중력장에 관한 측지학 및 지구물리학적 연구에는 넓은 지역의 중력자료가 필요하며 이에 따라 육상지역 뿐만 아니라 해양지역에 대한 중력자료가 요구된다. 이를 위해 전 세계의 선진국들이 주축이 되어 각지의 육상 지역에 대한 중력 측정뿐만 아니라 해양지역에 대한 선상중력 측정도 지속적으로 이루어지고 있다.

해양지역 중력자료의 경우, 지난 20여년 사이에 각종 해면고도계 위성자료의 분석에 의하여 중력장을 계산할 수 있게 되어 종전의 제한적인 선상중력 측정과는 달리 대부분의 해양에서 중력

자료를 얻을 수 있게 되었다. 한편 과거 선상 중력자료들의 대부분은 그 정밀도가 교점에서 약 10~15 mGal에 달해(Wessel and Watts, 1988) 자료의 해석이나 이의 응용이 제한적이었다. 그러나 최근에는 GPS 등에 의한 위성측지 시스템으로 정확한 항해 정보를 얻을 수 있고, 관측장비의 정밀도 향상으로 현재의 선상중력 자료는 국지적이지만 탐사를 한 지역에서는 해면고도계 위성에 의한 중력자료에 비해 측정 밀도가 높아졌으며, 정밀도도 3~5 배 좋아졌다. 또한 선상중력자료는 해면고도계 위성의 자료처리 및 이들을 이용한 중력장 계산 과정에서 이의 정밀도를 높이기 위하여 비교 분석 자료로 활용 될 수 있다(Small

and Sandwell, 1992).

이러한 선상중력자료는 해면고도계 위성 자료로부터 계산한 중력자료와 함께 해양 연구분야에도 활용되며(Arabelos, 1998), 또한 지오이드 결정 및 이의 정확도 개선 등의 물리측지학 분야의 연구에도 함께 사용할 수 있다(Kirby and Forsberg, 1998). 그러므로 최근의 중력장의 연구를 위하여 해양지역에 대한 양질의 선상중력자료가 광범위하게 필요하며, 기존의 해면고도계 위성에 의한 중력자료와 함께 여러 연구분야에 사용되는 것이 전 세계

적인 추세이다. 더구나 우리나라의 경우 삼면이 바다에 접해 있으므로, 이러한 중력장 연구와 이의 응용을 위하여 한반도 일원의 해양에 대한 선상중력자료의 필요성이 더욱 절실히 요구된다.

한반도 해역 일원에서는 1962년부터 미국, 일본, 구 소련 등이 주로 동해와 남해의 외해 지역에서 선상중력 측정을 실시하였으며 이들 자료는 미국 상무성의 NOAA산하의 국립지구물리자료센터(NGDC)에서 소장하고 있다(Fig. 1). 이 자료는 주로 일본의 관련 기관이나 대학 연구소에 의해

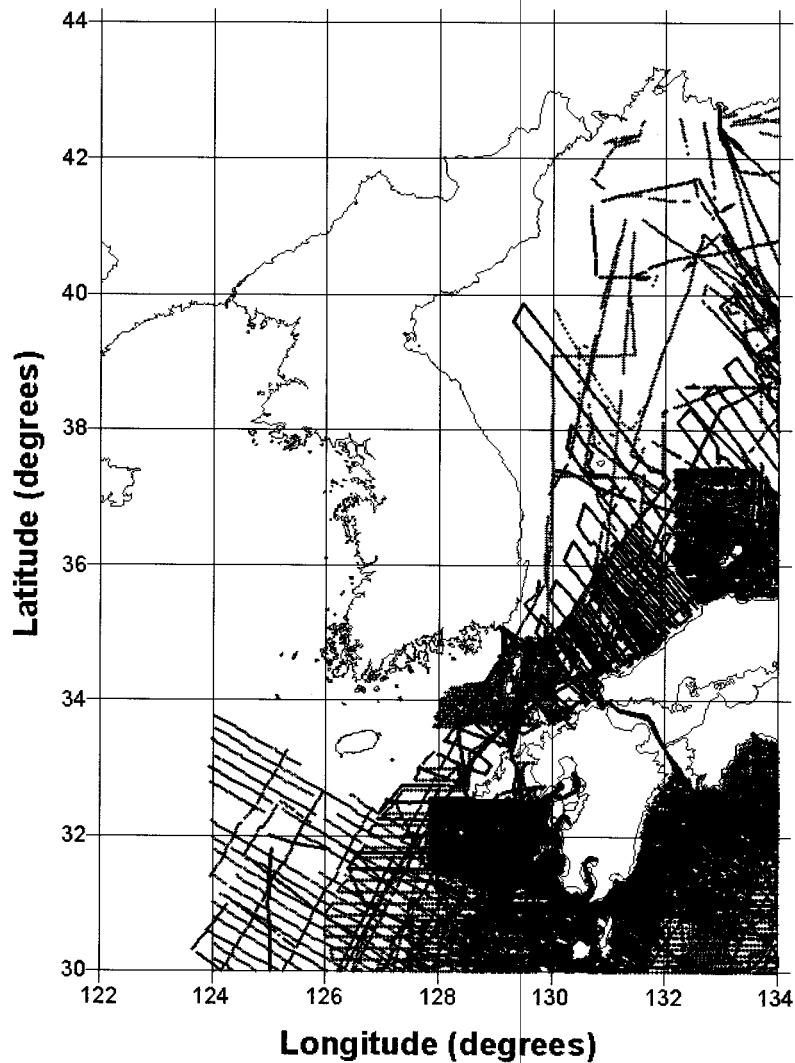


Fig. 1. Distribution map of shipborne data point of NOAA from 1962 to 1996.

측정된 것으로, 대부분 일본 주위의 해양지역 자료로써 우리나라 영해지역의 자료는 거의 전무한 것을 알 수 있다.

한편 지난 20년간 각종의 해면고도계 인공위성 자료의 누적과 측정기술의 향상으로 이에 의한 중력자료의 정밀도가 향상되고 전 세계 대양의 1분×1분 자료까지 공개되고 있다. 그러나 이자료의 정밀도는 선상자료와 비교하여 4~7mGal 정도로 선상 중력자료에 비해 정밀도가 매우 떨어지고 있으며 특히 우리나라와 같이 일본열도 등으로 둘러 쌓인 지역에서는 정밀도가 더욱 떨어질 것이다(Sandwell and Smith, 1997).

우리나라에서 본격적인 선상중력자료 획득은 1994년 해양연구소의 1,500 톤급 탐사선 '온누리'호와 1996년 해양수산부 국립해양조사원의 2,500 톤급 탐사선 '해양2000'호 및 1997년 한국자원연구소의 2,000 톤급 탐사선 '탐해2'호 등 선상 중력계를 탑재한 대형 탐사선을 도입하면서부터 이루어지고 있으며(권병두 외, 1995; 최광선 외, 1998) 그 중에서도 국립해양조사원의 업적이 탁월하다. 국립해양조사원은 1996년 '해양2000'호를 도입한 이래 우리나라 해역에서 집중적으로 중력을 측정하고 있으며 측정량은 해마다 150,000 ~ 300,000 점에 이른다. '해양2000'호가 1996년부터 1999년까지 중력을 측정한 범위는 Fig. 3과 같다(국립해양조사원, 1997, 1998, 1999, 2000).

Fig. 1과 비교하여 우리나라 일원의 지구물리학적 연구에 있어 국립해양조사원의 '해양2000'호가 측정한 자료의 중요성을 알 수 있다. Fig. 3에서 연안지역의 측정이 이루어지지 않은 것은 '해양2000'호가 2,500 톤으로 이 지역에서 중력을 측정할 수 없기 때문이며, 국립해양조사원은 이 지역의 중력측정을 위해 600 톤 규모의 소형 탐사선을 건조 중에 있으므로 장차 이에 의한 자료획득이 기대된다.

그러나 선상 중력자료는 육상과는 달리 항해하는 선박에서 측정하게 되므로 측정과 처리 과정에 있어 여러 가지 사항을 고려하여야 한다. 이 중에서 가장 큰 영향은 Eötvös 효과의 보정이다. Eötvös 효과는 선속과 선수 방향의 함수로 이를 효과적으로 보정하기 위하여 선박의 순간 위치를

정확히 추적하여야 한다. 현대의 대부분의 탐사선은 GPS 등 위성항법장치를 탑재하고 있지만 현재의 항법 시스템으로 Eötvös 효과를 정확히 보정하기는 아직도 어려운 상황이다. 또한 육상중력기점을 이용하여 선상측정 자료를 절대중력으로 환산하는 문제, 중력계의 기계적 특성과 중력 측정이 이루어질 때의 해상 조건, 그리고 탐사선의 크기에 의한 영향 등으로 선상중력자료에 오차가 포함되며, 자료처리에 있어 이들의 효과를 최소화하여야 한다. 이러한 모든 작업이 교점(crossover point)을 기준으로 수행되기 때문에 탐사 항해를 설계할 때 교점이 많이 나타날 수 있도록 계획을 세워야 한다.

국내 탐사선의 선상중력계가 모두 미국의 LaCoste & Romberg사의 model 'S' 중력계임을 고려하면, 선상중력의 측정 및 이들 자료의 처리에 대한 일관성 있는 처리 과정 및 방법에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 국립해양조사원이 '해양2000'호를 이용하여 1999년 측정한 서해 남부지역의 자료를 처리하면서 필요한 각종의 보정 절차와 문제점 등을 알아보았다.

2. 선상중력 측정

국립해양조사원의 '해양2000'호에 탑재된 선상중력계는 미국 LaCoste & Romberg사의 model 'S' 중력계이다. 이는 특수합금으로 제작한 zero-length 용수철을 이용하는 beam type의 상대중력계로 육상중력계와 똑같은 시스템을 사용하고 있다. 이 선상중력계는 실험실에서의 정적인 상태의 정밀도는 0.01 mGal 이내이고, 해상의 환경을 가정하여 수평, 수직방향의 가속도 변화로부터 결정된 정밀도는 0.25 mGal 이내이다(LaCoste & Romberg Gravity Meters, Inc., 1992). 그러나 해상 조건, 탐사선의 크기 그리고 항해 환경 등에 의한 영향으로 실제 해상에서는 이보다 정밀도가 떨어지며, 또한 중력 이상을 계산하기 위한 각종의 보정 과정 중 오차가 필연적으로 유발된다. 따라서 선상중력계로 측정한 중력 이상은 그 정밀도가 1 mGal 이내이면 매우 양호한 것으로 취급하고 있다.

2.1 선상중력계 특징

해상에서의 중력 측정은 항해 중에 이루어지므로 선박의 운동에 의한 영향을 최소화하기 위해 선상중력계의 축이 항상 연직 방향을 유지하도록 하여야 한다. 이를 위하여 초기의 LaCoste & Romberg 선상중력계는 gimbal joint에 의해 매달려 있는 형태였으나, 1965년 이후부터는 gyros를 사용하여 큰 가속도의 변화에도 정확한 측정이 가능하도록 수평안정판(stabilized platform) 위에 선상중력계를 올려놓고 중력을 측정한다(LaCoste *et al.*, 1967; Lafer *et al.*, 1967). 항해 중 선박의 운동으로 기인되는 수평안정판의 움직임은 각 방향의 gyros에 의해 감지되고, torque motor(servo motor)에 의해 수평안정판의 수평을 유지한다(Fig. 2). 그러나 다양한 선박의 운동으로 기인하는 각 방향의 가속도는 cross-coupling 및 off-levelling 오차의 원인이 되고, 이러한 이유로 LaCoste & Romberg 선상중력계는 gyros로 감지된 수분간의 자료를 이용하여 이들 오차에 대

한 최적의 보정이 이루어지도록 제어한다. 한편, LaCoste & Romberg 선상중력계의 sensor, stabilized platform, gyros 등 모든 장치의 움직임은 SEASYS 소프트웨어에 의해 자동적으로 제어되고 결과를 기록한다(Fig. 2).

Cross-coupling 보정은 각 방향의 가속도와 속도의 조합으로 이루어지며, 조합에 필요한 cross-correlation 상수들은 중력계 제작 시 실험실에서 다양한 환경변화에 따른 중력을 측정하여 중력계가 최적의 중력 값을 나타낼 수 있는 상수로 결정된다(Table 1). 그러므로 중력계가 출고될 때 각 중력계는 고유의 초기 cross-correlation 상수들을 가지고 있으나, 이 초기 상수는 중력계의 사용 조건 및 시간에 따라 달라질 수 있음을 유의해야 한다(LaCoste, 1973).

LaCoste & Romberg 선상중력계의 drift는 출고 시 3 mGal/month 이내이며 약 2년 정도 사용 후에는 1 mGal/month 이내의 매우 안정된 기계변이를 가진다. 이는 정적인 환경에서의 값으로 실제

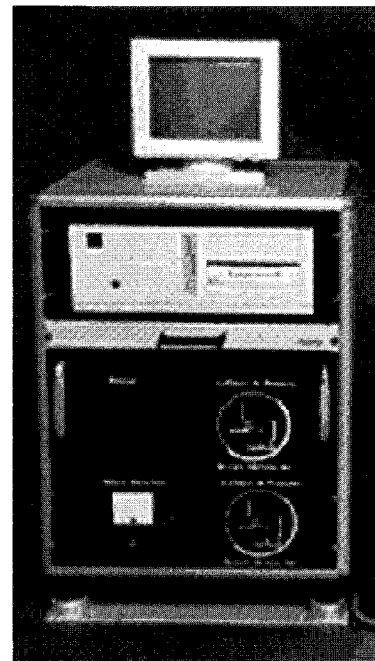
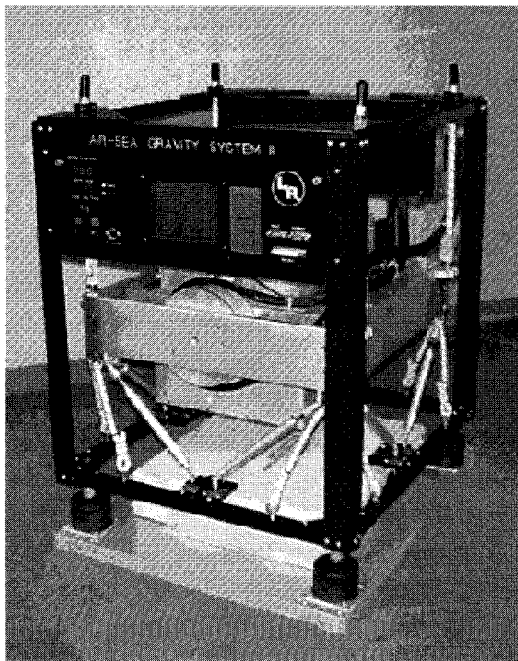


Fig. 2. LaCoste & Romberg Shipborne Gravimeter, Model 'S'. (a) : Sensor and stabilized platform (b) : Control Console of Gravimeter

해양환경에서의 drift는 수 mGal/month가 된다. 측정 범위는 Eötvös 영향 등을 고려하여 12,000 mGal이며 이는 전 세계 모든 지점의 중력변화를 측정할 수 있는 범위이다(Nettleton, 1976).

2.2 선상중력계의 오차 요인

LaCoste & Romberg 선상중력계는 zero-length

Table 1. Factory defined parameters of the gravity meter of RV 'Haeyang2000'(S115).

FULL SCALE BEAM VOLTS	9.100000
BEAM SCALE FACTOR	1.460000
CROSS PERIOD SETTING	0.000070
LONG PERIOD SETTING	0.000070
CROSS DAMPING FACTOR	0.810000
LONG DAMPING FACTOR	0.835000
CROSS GAIN	6.500000
CROSS LEAD	0.100000
LONG GAIN	6.500000
LONG LEAD	0.100000
VCC	0.045000
AL	-0.023000
AX	0.015000
VE	-0.015000
AX2	0.105000
XACC*XACC	0.000000
LACC*LACC	0.000000
CROSS COMPENSATION	-0.000800
LONG COMPENSATION	-0.002000
AX PHASE	0.450000
AL PHASE	0.530000
VCC PHASE	0.800000
CROSS COMPENSATION PHASE	1.000000
LONG COMPENSATION PHASE	1.000000
MAXIMUM SPRING TENSION VALUE	19999.000000

용수철 시스템을 이용하여 주기를 크게 한 불안정형 중력계이다. 이는 육상중력계와 거의 같은 원리이나, 육상중력계보다 damping을 매우 크게 증가시켰기 때문에 beam의 움직임이 매우 느리며 큰 주기를 가진다. 이러한 이유로 선상중력계에는 고유의 오차가 나타난다.

Cross-coupling 오차는 항해에 의한 선박의 움직임에 비해 중력계의 beam이 매우 천천히 변화하기 때문에 나타나는 것으로 선박의 수평가속도 성분의 일부가 수직가속도로 측정되는 오차이며, 20 mGal 이내로 비교적 크게 나타난다(LaCoste et al., 1967).

이 때문에 중력계 제작회사에서는 실험실 내에서 해상의 환경을 가정하여 x, y, z 방향의 세 성분에 대한 속도와 가속도의 조합 하에서 중력계가 최적의 중력 값을 유지할 수 있는 상수를 결정하고 있으며(Table 1), 이를 이용하여 cross-coupling 오차를 보정한다. 그러나 항해환경이 매우 다양하고, 시간의 경과나 중력계에 가해지는 충격에 의해 중력계의 특성이 달라짐으로써 초기에 결정된 상수가 변화할 수 있으므로 cross-correlation 방법 등을 이용하여 초기의 상수를 수시로 점검해 보아야 한다(LaCoste, 1973).

Off-levelling 오차는 cross-coupling 오차처럼 중력계의 수평이 이루어지지 않기 때문에 생기는 오차이나, cross-coupling 오차와의 차이는 중력계의 각 방향성을 고려하지 않고 수평성분만의 영향으로 나타나는 오차이다. 즉, 수평안정판의 수평을 유지하는 torque motor(servo motor)가 선박의 운동 이후에 수평을 맞추는 것이 늦어지기 때문에 발생하는 오차이다. 이에 의한 오차는 3 mGal 이내이며 off-levelling 각을 측정하여 보정이 이루어진다(Wall et al., 1966).

2.3 선상중력 측정 과정

선상중력계를 이용한 중력 측정은 일반적인 육상중력 측정과 마찬가지로 절대 중력기점을 기준으로 상대적인 중력 측정이 이루어진다. 따라서 선상중력계로 측정한 중력을 절대중력으로 환산하기 위하여 절대중력을 알고 있는 육상 중력기점과의 연계가 필요하다. 이를 위하여 탐사선의

입·출항 시에 간이중력기점을 설정하고 육상 중력기점과 연계하여야 한다. 또한 탐사선의 출항 직전 또는 입항 직후에 육상 중력을 측정함과 동시에 선상 중력을 측정하며, 해양조석을 보정하기 위하여 안벽고 관측을 하여야 한다. 이를 이용하여 선상중력을 절대중력으로 환산할 수 있고 중력계의 기계변이 보정도 한다.

LaCoste & Romberg 선상중력계가 사용하고 있는 zero-length 용수철 시스템은 용수철이 온도에 따라 수축·팽창하므로 이에 의한 영향을 제거하기 위하여 일정한 온도 유지가 필요하다. 따라서 출항 5일 전에 중력계의 전원을 공급하여 중력계 내부의 적정온도를 유지하고, 출항 하루 전에 중력 측정을 시작하여 기계적 특성을 점검하여야 한다. 출항 1시간 전에는 기계변이 보정을 위한 안벽고 관측과 선상중력 및 육상중력을 측정하여야 하며 귀항 후에도 이 과정을 역으로 반복 실시한다.

LaCoste & Romberg 선상중력계는 SEASYS 프로그램을 이용하여 중력계가 최상의 상태를 유지할 수 있도록 자동적으로 제어하면서 각종 자료를 수분간 관찰한 후 이를 필터링하여 1초 간격

으로 중력 치를 기록한다(LaCoste and Romberg Gravity Meters, Inc., 1992). 기록되는 값은 ID, hours, minutes, seconds, gravity, spring tension, beam, cross-coupling, total correction 값들로 이중 gravity는 필터링한 상대 중력 치로 10 초 동안은 동일한 값이다. 다시 말하면 LaCoste and Romberg 선상중력계는 1 초 간격으로 중력 값을 기록하지만 10 초 동안 동일한 값이므로 실제로는 10 초 간격으로 측정하는 셈이 된다.

탐사선은 GPS를 장착하여 이에 의한 위치정보를 이용하여 항해등을 한다. 또한 GPS의 위치 정보를 이용하여 Eötvös 보정 등의 자료 처리를 하게 된다. 원시 GPS 자료에는 여러 가지 요인에 의한 오차가 들어 있으므로 DGPS나 자료의 후처리에 의해 오차를 필터하게 된다. '해양2000'호의 경우 서해안 지역 중력측정 시에는 후처리 방식을 택하고 있다.

또한 '해양 2000'호는 중력 측정시 3대의 음향 측심기를 이용하여 수심을 측정하고 있다. 그러므로 선상중력자료를 처리하기 위해 필요한 중력 자료, GPS 자료, 수심자료 등이 측정된다.

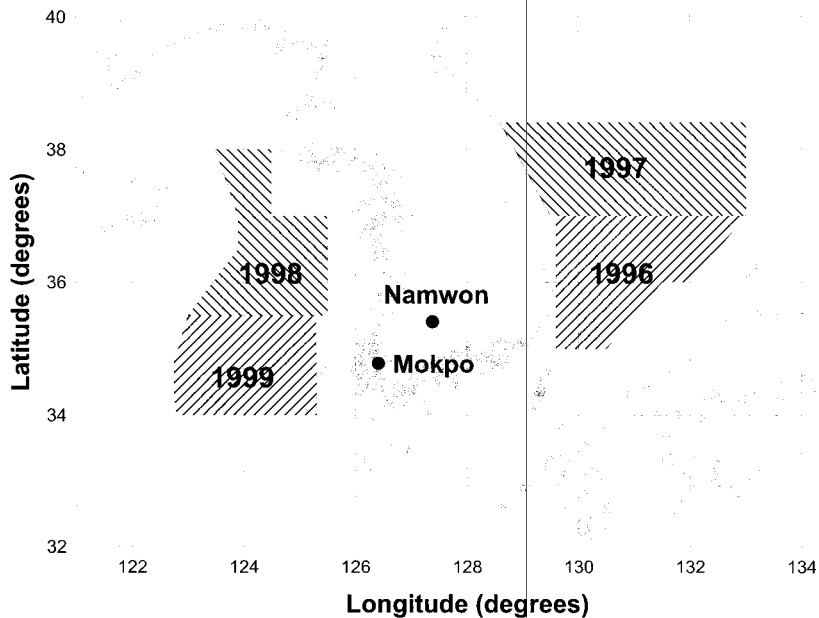


Fig. 3. Shipborne gravity survey area of the RV 'Haeyang2000' from 1996 to 1999.

2.4 '해양2000'호 선상중력측정

'해양2000'호는 1999년 4월 14일부터 5월 17일 까지의 기간 중 총 3 회의 항차 기간 중 연 27일 동안 서해 남부지역에서 선상중력을 측정하였으며 (Fig. 3, 4), 측정 일정은 Table 2와 같다. '해양2000'호는 이 기간 동안 목포항의 제 1 부두와 대 불 부두를 모항으로 이용하였으며, GPS 자료를 후 처리하기 위한 고정 기준점은 전북 남원시의 한국 전력 사무소의 GPS 자료를 이용하였다(Fig. 3).

국립해양조사원은 '해양2000'호의 선상 탐사의

일정이 확정된 직후 Scintrex 사의 CG-3 중력계를 이용하여 육상중력을 측정하였다. 1999년 3월 15일 국립지리원이 매설한 목포 해난심판원 내의 수준원점의 중력 값을 기준으로 '해양2000'호가 기항할 목포항 제 1부두와 대불 부두에 간이중력 기점을 전이하였으며 선상중력 치는 이를 기준으로 절대치로 환산하였다.

'해양2000'호는 선상 중력 측정 시 Eötvös 효과에 의한 영향을 줄이기 위해 남-북 방향의 항로를 주 축선으로 택하였으며, 자료처리를 위한

Table 2. Shipborne gravity survey schedule of the RV 'Haeyang 2000' in 1999.

cruise	export		import	
	time in KST	port	time in KST	port
First	07:24 April 14	First port	09:20 April 24	First port
Second	16:10 April 29	Daebul port	08:50 May 7	First port
Third	16:10 May 11	First port	00:30 May 17	Daebul port

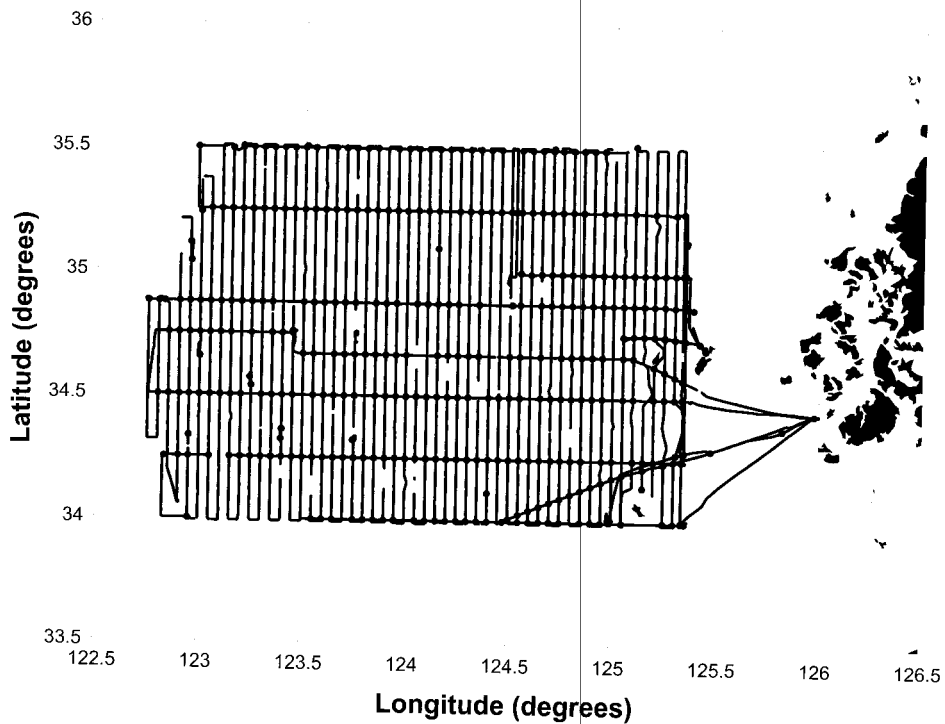


Fig. 4. Gravity survey line and cross-over point(solid circle) of the RV 'Haeyang2000' in 1999.

교점의 생성이나 이동을 하기 위한 경우 다른 방향의 항해를 하였다. 남-북 방향의 항해의 경우 각 측선 간격을 3 분으로 일정하게 항해하였으며, 교점 생성을 위한 동-서 방향의 항해의 경우 약 0.25 도 간격으로 항해하였다(Fig. 4).

‘해양2000’호가 1999년 측정한 중력 측정수는 199,142 점이나 모항에 가까운 경도 126 도 이상의 자료를 제거한 측정수는 185,395 점으로 Fig. 4와 같다.

3. 선상 중력자료 처리

3.1 선상자료의 검색과 합병

‘해양2000’호는 측정한 선상중력 치, GPS 자료, 수심자료 등을 통합하여 저장하는 것이 아니고 자료별로 저장하며, 각 자료에는 각 기기의 오작동에 의한 또는 자료저장 중의 오류 등이 포함되어 있다. 그러므로 각 자료의 오류를 검색한 후 모든 자료를 통합하여 하나의 자료로 합병하여야 한다. 본 연구에서는 각 자료에서 오류를 검색한 후 각 자료를 중력측정 시간을 기준으로 합병하여 자료처리에 이용하였다.

중력자료 처리에 관련된 자료는 다음과 같다.

3.1.1 중력자료

‘해양2000’호의 선상 측정 중력자료는 1 초 간격으로 저장되지만 필터 과정을 거치면서 10 초간은 동일한 값이 저장된다. 따라서 실제의 선상 중력자료는 10 초 간격으로 중력을 측정하는 셈이 된다. 이 자료는 측정 시각과 중력 값으로 되어있으나 간혹 중력 치가 수 100 mGal 이상 튀는 값이 기록되므로 이러한 값을 골라내야 한다.

3.1.2 GPS 자료

‘해양2000’호에는 미국 Trimble 사의 4000GSi GPS가 부착되어 있으며 이에 의한 위치 정보를 이용하여 항해를 한다. 뿐만 아니라 GPS에 의한 위치 정보는 컴퓨터에 저장되어 중력자료 처리를 위한 자료로 사용된다. 원시 GPS 자료는 평균 1 초 간격으로 저장되며 저장되는 정보는 시각과 경도, 위도, 타원체고 등이다. 또한 원시 GPS 자

료에는 여러 가지 요인에 의한 오차가 포함되어 있으므로 이를 후처리 방식으로 오차를 제거한다. 후처리를 위한 기준점 자료는 한국전력의 남원지사에 있는 고정 GPS 관측국의 자료를 이용하였다(Fig. 3). 이러한 후처리 과정을 거친다 하여도 기준점인 남원과의 거리가 수 100 km가 되고 ‘해양2000호’가 관측한 자료는 선박 항해중의 실시간 자료이므로 후 처리 결과를 다시 필터링 하여야 한다. 또한 중력자료는 실제로 10 초 간격 자료이므로 GPS 자료도 10 초간격의 평균자료를 계산하여 자료 처리에 이용하였다.

3.1.3 수심자료

‘해양2000’호에는 총 3 대의 음향측심기를 부착하여 수심을 측정하고 있으며, 수심자료는 GPS 자료와 연계되어 저장된다. 수심자료도 중력자료의 시간과 같이 10 초간격의 평균 수심자료를 계산하여 자료처리에 이용하였다.

3.1.4 자료 합병

이상의 ‘해양2000호’ 관측자료는 서로 다른 시간 단위로 관측된 것이므로 모든 자료를 중력자료의 시간에 맞추어 10 초 간격의 자료로 합병하였다. 합병한 결과 자료의 수는 199,142 점으로 Fig. 4와 같다. 자료 중 중력자료와 GPS 자료는 199,142 개이지만 때때로 음향측심기가 작동하지 않는 경우가 있어 수심자료는 이보다 적다.

3.2 교점(cross-over point) 계산

선상 중력자료는 교점을 기준으로 이들의 RMS (Root Mean Square) 차이가 작게 나타나도록 모든 보정을 실시한다. 그러므로 선상 중력 측정시 항해 설계단계에서 교점이 많이 생성되도록 계획을 세워야 한다. Fig. 4에 교점을 검정 색 원으로 나타내었다. 선박의 위치가 50 m 이내로 접근하는 경우를 교점으로 하였으며 Fig. 4에서 교점의 수는 406 점이다.

3.3 절대중력 계산과 기계변위 보정

국립지리원이 매설한 목포 수준원점(경도 126° 23' 2.76", 위도 34° 46' 57.65", 표고 2.70 m)의 중력

Table 3. Meter drift rate of the RV 'Haeyang2000' in 1996

Cruise	Drift(mGal/hour)
First	0.002855382
Second	-0.003502946
Third	0.005949335

치는 979,715.471 mGal이다. 이를 기준으로 '해양 2000'호가 정박할 목포 제1 부두(경도 126° 23' 3.8", 위도 34° 46' 43.5" 표고 3.0 m, 중력치=979,714.820 mGals)와 대불부두(경도 126° 25' 35.4", 위도 34° 46' 0.3", 표고 3.0 m, 중력치=979,715.865 mGals)의 간에 중력기점 값을 계산하였다. 이를 이용하여 각 항차별 출항 직전과 입항 직후의 선상 중력 치와 안벽고 측정치를 이용하여 선상 중력을 절대 중력으로 환산하였으며, 각 항차별로 기계변위를 보정하였다. 각 항차 별 기계변위는 Table 3 과 같다.

Table 3의 drift를 월 단위로 표시하면 3 항차의 경우가 4.3 mGal/month 로 가장 크게 나타난다. 이로 미루어 볼 때 1999년도 '해양2000호'의 항해 환경은 비교적 양호하였다고 할 수 있다.

3.4. 지구조석 보정과 해양조석 보정

달과 태양의 인력의 영향으로 지구의 중력장이 변화하며 이러한 중력변화량을 보정하는 것이 조석보정이다. 조석에 의한 중력변화의 크기는 작기 때문에 선상중력 처리 시 대부분 이를 무시하고 있지만 본 연구에서는 이를 보정하여 보았다.

조석의 영향은 지구조석과 해양조석으로 나눌 수 있으며 각각은 다음과 같다.

지구조석은 최대 0.3 mGal(Dehlinger, 1978) 정도 변화하며, 본 연구에서는 Tamura(1982)의 FORTRAN 프로그램을 이용하여 보정하였다.

조석에 의한 중력 변화의 영향으로 해수는 규칙적인 승강운동을 한다. 이 때문에 선상중력계의 해면고도가 달라지며 중력이 변화한다. 먼바다에서는 변화량이 작아 무시할 수 있지만 서해와 같이 조석간만의 차가 큰 지역에서는 해양조석 차

이에 의한 중력 변화량을 무시할 수 없을 것이다. 이를 위하여 다음과 같이 각 선상중력 측정 지점의 실시간의 해양조석을 계산하였다.

- 1) 실측 자료가 있는 검조소를 기준점으로 선택한다.
- 2) 자료 처리를 하고자 하는 지역에 가까운 검조소 및 선상 관측 지점을 표준점으로 선택한다.
- 3) 선택된 기준점 및 표준점에 대한 조시차와 조고비를 구한다.
- 4) 조석보정을 하고자 하는 임의의 점의 조시차 및 조고비를 선택된 점들을 이용하여 Inverse Interpolation Method를 사용하여 구한다.
- 5) 임의의 점의 임의의 시간에 대응하는 표준점의 조위를 Linear Interpolation하여 구한다.
- 6) 조시차 및 조고비를 이용하여 관측점의 관측시간에 대한 조석을 계산한다.

이상의 절차에 의한 해양조석은 M₂ 분조에 의한 양이며 Fig. 5는 위의 과정에 의해 계산한 선상중력 측정에서 해양조석의 누적 분포도이다.

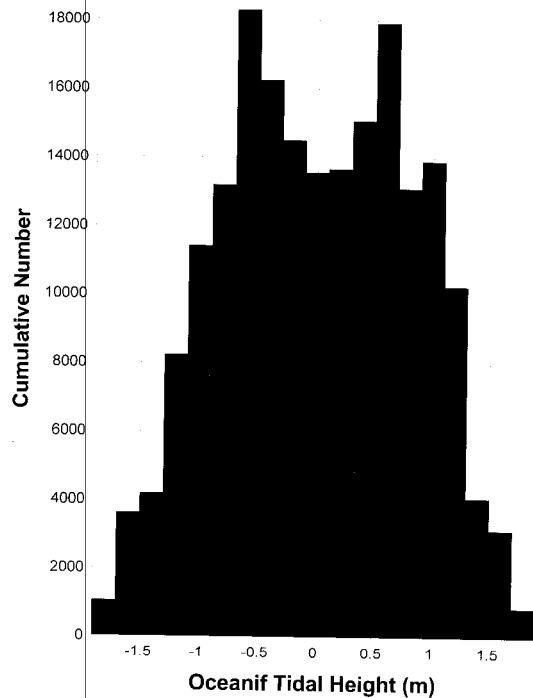


Fig. 5. Cumulative distribution of the oceanic tidal height.

해양조석이 가장 높게 나타나는 곳은 1999년 5월 16일 17시 34분 09초에 경도 126.422 도 위도 34.777 도에서 +1.84 m 이며, 가장 낮게 나타나는 곳은 1999년 5월 15일 10시 35분 01초에 경도 125.350 도 위도 34.466 도에서 -1.81 m 이며 이들의 RMS는 0.81 m 이다. 이상에서 해양조석 변화에 의한 중력 변화량이 약 0.22 mGal 정도임을 알 수 있다.

본 연구에서 해양조석에 의한 중력 변화를 보정한 결과 406 개의 교점에서의 고도 이상의 RMS 차이가 보정 전보다 0.049 mGal 향상되었다. 이는 예상 치에 비해 작은 값으로 이의 원인은 서해와 같은 만 지역에서는 조류에 의한 영향이나 파랑에 의한 영향이 M₂ 분조의 크기보다 크기 때문으로 사료된다.

3.5 선속, 선수 방향 계산과 Eötvös 보정

선상 중력 측정은 선박이 항해 중에 중력을 측정한다. 그러므로 선박의 운동 성분 중 지구 자전 방향의 성분이 중력에 영향을 미치게 되어 선상에서의 측정 중력은 이 양만큼 차이가 나게 된다. 이러한 영향을 보정하는 것이 Eötvös 보정으로 선상 중력 측정에 가장 큰 영향을 주는 요소로 이의 크기는 다음의 식 (1)과 같다(Nettleton, 1976).

$$E = 2\omega V \cos\phi \sin\alpha + \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

여기서, E = Eötvös 효과, ω = 지구자전 각속도, V = 선박의 속도, ϕ = 위도,

α = 선박의 진행방향으로 진북을 기준 한 시계방향 각, R = 지구의 반경이다.

식 (1)에서 Eötvös 효과는 선박의 속도, 선수 방향, 위도의 함수임을 알 수 있다. 식 (1)에서 선속을 km/hour 단위로 하면 mGal 단위의 Eötvös 효과는 식 (2)와 같다.

$$E = 0.14584 V \cos\phi \sin\alpha + 1.5696 \times 10^{-6} V^2 \quad (2)$$

식 (2)에서 선속이 매우 크지 않는 경우 우변의 두 번째 항은 무시할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 위도 35 도에서 선속과 선수방향에 따른 Eötvös 효과를 나타낸 것이다. 식 (2)에서도 알 수 있듯이 그림에서 선수 방향이 남북인 경우 Eötvös 효과는 거의 0 이나 동서의 경우는 최대가 됨을 알 수 있으며 또한 속도가 클수록 더욱 커짐을 알 수 있다. 그러므로 선상 중력측정목적의 항해 때에는 항로를 남북으로 그리고 선속도 가능한 한 줄여야 할 것이다.

Fig. 7은 위도 35 도에서 Eötvös 효과를 10 mGal 에서 50 mGal 이내로 유지하기 위한 선속과 방위각을 나타낸 것이다. 위도 35 도에서 Eötvös 효과를 30 mGal 이하로 유지하기 위해 선속을 15 km/hour 이하로 유지하여야 함을 알 수 있다. 또한 그림에서 위도 35 도에서 선속 25 km/hour로 동서 방향으로 진행하는 선박에는 약 80 mGal의 Eötvös 효과가 나타나며 이를 1 mGal 이내의 정밀도로 보정하기 위하여 선속을 $(25 \text{ km/hour})/80 = 8.68 \text{ cm/sec}$ 의 정밀도로 추적하여야 함을 알 수 있다. 이는 최근의 GPS 시스템을 이용한다 하여

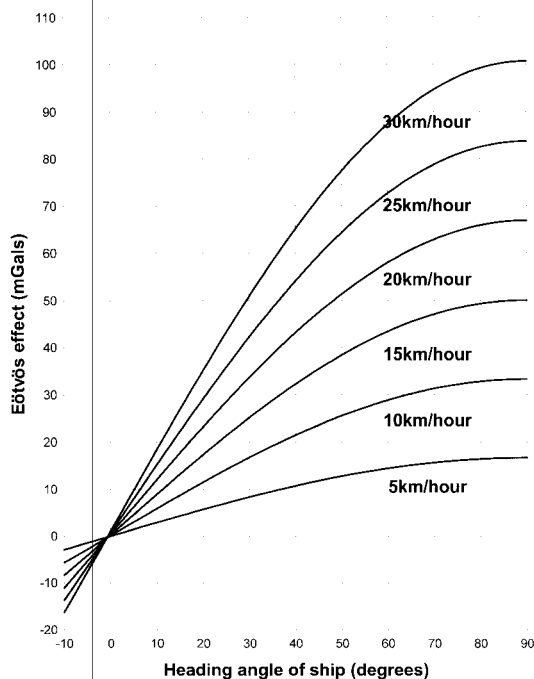


Fig. 6. Eötvös effects and heading angles for the ship velocities of 5, 10, 15, 20, 25 and 30 km/hour and various heading angles at the latitude 35 degrees.

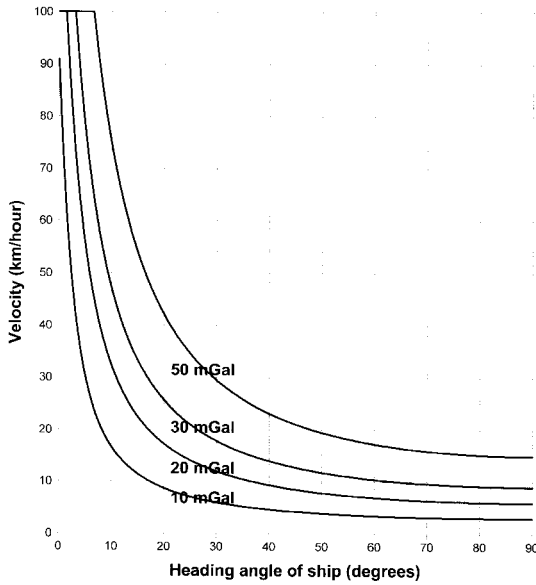


Fig. 7. Velocity and heading angle required for the Eötvös effect less or equal to 10, 20, 30 and 50 mGal at latitude 35 degrees.

도 항해중인 선박의 속도를 이러한 정밀도로 추적하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이러한 이유로 선상 측정 중력의 신뢰도가 떨어지고 있으며, 선상 중력의 정밀도는 정확한 Eötvös 보정에 좌우된다고 할 수 있다.

1999년 선상 중력 측정시 '해양2000'호는 주측선 항로를 남-북 방향으로 하였으며, 교점을 만들기 위한 항해의 경우에만 동-서 방향 항해를 하였다(Fig. 4)

Fig. 8은 1999년도 '해양2000'호의 항해 자료 중 속도와 방위각을 나타낸 것이다. 그림에서 각 방향으로 대부분 25 km/hour의 속도로 항해하였으며, 주된 항해 방향은 남-북 또는 동-서 방향임을 알 수 있다. Fig. 8에서 속도 3 km/hour의 자료는 대부분 출항 직후 또는 입항 직전의 자료이다. Fig. 6과 8을 비교하면 Eötvös 효과는 최대 90 mGal에 이르는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 '해양2000'호의 항해 자료 중 방위각과 Eötvös 효과를 나타낸 것이다. 남-북 방향의 효과는 거의 나타나지 않는 반면 동-서 방향의 효과는 대부분 90 mGal에 이르고 있음을 알 수 있다. 그러므로 더욱 정

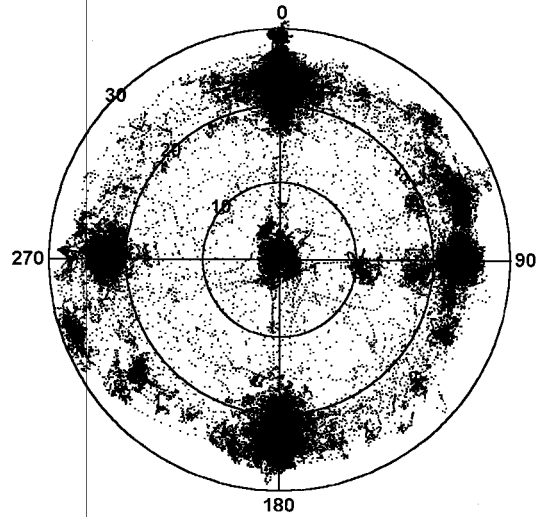


Fig. 8. Direction(degrees) and velocity(km/hour) of the RV 'Haeyang2000' during gravity survey in 1999.

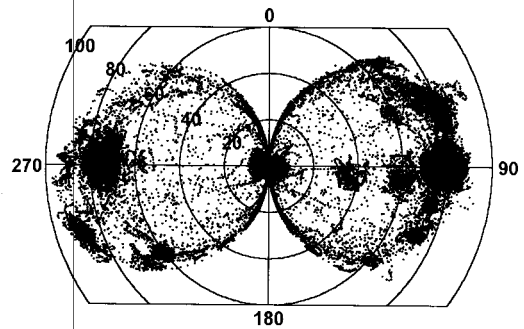


Fig. 9. Direction(degrees) and Eötvös effect(mGals) of the RV 'Haeyang2000' during gravity survey in 1999.

확한 Eötvös 보정을 위하여 동-서 방향의 선속을 더욱 줄여야 할 것이다.

3.6 고도이상 계산

선상 중력의 고도이상 (Δg_{FA})은 다음과 같다.

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} + \Delta g_{EOT} + \Delta g_{air} - \gamma_{\phi} \quad (3)$$

여기서, g_{obs} = 관측 중력

Δg_{EOT} = Eötvös 보정

Δg_{air} = 대기 보정

$$\gamma_{\phi} = \text{표준 중력}$$

표준 중력은 기준 타원체에 따라 달라지는 것으로 본 연구에서는 GPS를 이용하여 측점의 좌표를 결정하였으므로 표준중력은 GPS의 기준 타원체인 WGS84 타원체의 표준중력을 이용하여야 한다. WGS84 타원체의 표준중력 공식은 다음과 같다(DMA, 1991).

$$\gamma_{\phi} = 978032.67714 \frac{(1 + 0.00193185138639 \sin^2 \phi)}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \phi}} \quad (4)$$

WGS84 타원체와 GRS80 타원체는 매우 유사한 타원체로 두 타원체의 표준중력은 거의 같다.

이상으로 계산한 고도 이상의 406 개 교점에서의 고도이상의 차이는 다음과 같다.

RMS 오차 = 27.613 mGal 교점수 = 406
 평균 = -2.482 mGal 표준편차 = 27.502 mGal

이렇게 RMS 오차가 크게 나타나는 것은 선상

중력 측정 시 측선을 바꾸고자 할 경우나 장애물을 만나는 경우 탐사선은 항로를 바꾸기 위하여 회전을 하게 된다. 이 경우 측정 중력 치에는 선박의 회전에 의한 원심력이 포함되게 된다. 이 원심력으로 선박의 회전 점 부근에서는 고도 이상이 비 정상적인 값을 나타내며 본 연구에서도 교점에서의 고도이상의 차이가 크게 나타나는 곳은 전부 회전 점에 위치하는 자료이다.

3.7 회전점 제거

현재의 위치 추적 시스템인 GPS 자료로는 선박의 회전 점에서 나타나는 원심력을 보정할 수 없는 단계이므로 선상중력 자료에서 이러한 회전점의 자료는 제거하여야 한다. 본 연구에서는 연속된 21 개의 방향각 자료를 비교하여 variance가 25 (도)² 이상인 지점을 회전 점으로 간주하고 제거하였다.

Fig. 10은 회전 점을 제거한 후의 중력 측정 궤적과 교점을 나타낸 것으로 Fig. 4와 비교하여 남북 방향의 각 측선 끝 부근의 회전점이 제거되었음을 알 수 있다.

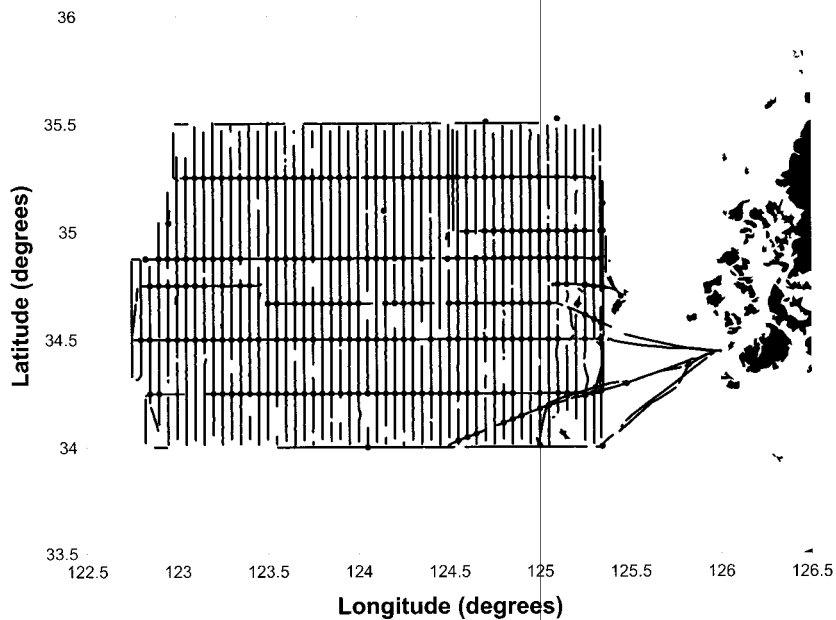


Fig. 10. Gravity survey line and cross-over point(solid circle) after cut turning point of the RV 'Haeyang2000' in 1999.

회전 점을 제거하기 전의 자료의 수는 185,395 점이었으나 제거 후 자료의 수는 157,798 점이 되었으며 교점의 수도 제거 전에는 406 점이었으나 제거 후에는 278 점이 되었다.

회전 점을 제거한 고도 이상자료의 278 개 교점에서의 고도이상의 차이는 다음과 같다.

RMS 오차 = 4.802 mGal 교점수 = 278
 평균 = -0.253 mGal 표준편차 = 4.796 mGal

Fig. 11은 회전 점 제거 후 교점에서의 고도 이상의 차이의 누적 분포도이다. 그림에서 교점의 고도 이상의 차이가 10 mGal 이상이 되는 것이 여러 지점이 나타나며 이들에 의해 RMS 값이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 부정확한 위치 정보에 의한 정확하지 못한 Eötvös 보정의 영향이며 여기서 Eötvös 보정치의 필터링이 필요함을 알 수 있다.

3.8 Eötvös 보정치의 filtering과 time-lag 보정

일반적으로 연안 지역에서의 중력 이상은 ± 10 mGal 범위이다. 반면에 앞에서 보았듯이 Eötvös 보정치는 ± 100 mGal에 이르고 있으며 정

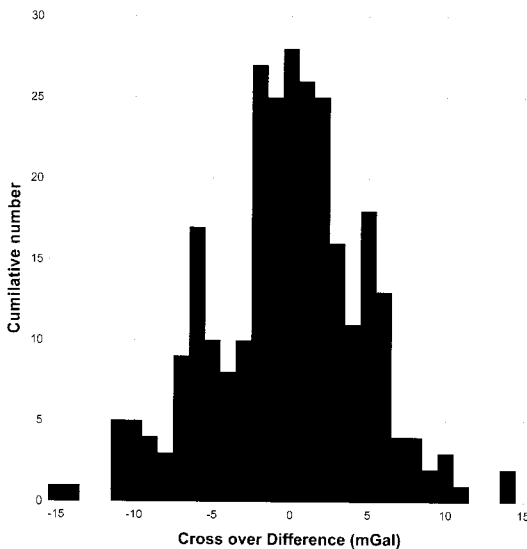


Fig. 11. Cumulative diagram of the anomaly difference in cross over point

확한 중력이상을 계산하기 위하여 정확한 Eötvös 보정이 필요함을 알 수 있다. Eötvös 보정치를 정확히 계산하기 위하여 특히 선속을 정확히 추적 하여야 하나 현재의 GPS 시스템으로 이는 매우 어려운 일이다. 그러므로 계산된 Eötvös 보정 치에 내재되어 있는 오차를 제거하기 위해 filtering 하게 된다.

본 연구에서는 Eötvös 보정치를 filtering 하기 위해 Savitzky-Golay filter(Press, et al., 1992)를 이용하였다. 이는 일종의 low-pass filter로 시간에 따른 변동량에 포함되어 있는 작은 진폭의 noise를 제거하는데 적합하다고 한다. 이 필터는 이동 평균 법과 유사하며, 필터의 강도는 0(필터가 없는 것)에서 이동 평균까지이다.

LaCoste and Romberg 중력계는 전형적인 beam type 중력계이다. 이 중력계는 beam을 평행위치인 leading line에 beam을 맞추어 중력을 측정한다. 그러나 해상에서 항해하는 선박에서의 beam을 평행위치에 맞추는 것은 매우 어려운 일이며 특히 선상 중력계는 다른 요인에 의한 가속도의 영향을 줄이기 위해 beam의 움직임을 인위적으로 매우 느리게 만들었다. 그러므로 LaCoste and Romberg 중력계는 이러한 영향을 제거하기 위해 중력계에 의한 수분간의 중력 변화와 자이로에 의한 선박의 움직임을 monitor한 후 이들 자료를 이용하여 최적의 중력 값을 출력한다. 그러므로 이 중력계에 출력되는 중력값은 그 시각의 중력치가 아니고 수분전의 중력값이다.

이 때문에 나타나는 time lag는 항상 일정한 것이 아니고 항해 환경에 따라 달라질 수도 있다. 그러므로 계산된 중력이상에 이러한 시간 지연 효과를 보정하여야 할 것이다.

본 연구에서는 Eötvös 보정치의 filtering과 time-lag 보정을 함께 처리하였다.

Eötvös 보정치를 filtering 하기 위한 window의 길이를 0에서 80까지, smoothing 강도를 0에서 18까지 변화시키며 각각의 조건에 의한 중력이상을 계산한 뒤 각각의 중력이상에 0 초에서 600 초까지 time lag를 준 중력이상을 재 계산하고 교점에서의 이들의 RMS 오차를 계산하였다. 이 과정에서 고도 이상의 자료 수는 157,798 점에서

150,878 점으로 줄어들며, 교점의 수도 278 점에서 264 점이 된다. window의 길이가 54, smoothing 강도가 2, time lag가 310 초 인경우의 RMS 오차가 가장 작게 나왔으며 결과는 다음과 같다.

RMS 오차 = 2.182 mGal 교점수 = 264
 평균 = -0.262 mGal 표준편차 = 2.166 mGal

이는 이들 보정 전에 비해 매우 좋은 결과를 나타내는 것으로 Eötvös 보정치의 filtering과 time-lag 보정이 타당함을 나타내는 것이다. Fig. 12는 이들 보정 결과에 의한 중력이상의 교점에서의 차이의 분포를 나타낸 것이다.

3.9 교점 보정

대부분의 측정치에서 나타나는 특징이지만 선상중력 자료도 동일지점을 측정시간을 달리하여 재 측정하는 경우 탐사 조건 및 자료 처리 과정 등의 여러 요인에 의해 중력 이상이 서로 다르게 나타난다. 이러한 차이를 교점오차(crossover error)라 하며, 중력 이상의 정확도 개선을 위하여 필수적으로 보정해야 된다(Nettleton, 1977, Prince and Forsysh, 1984, 이동윤, 1998).

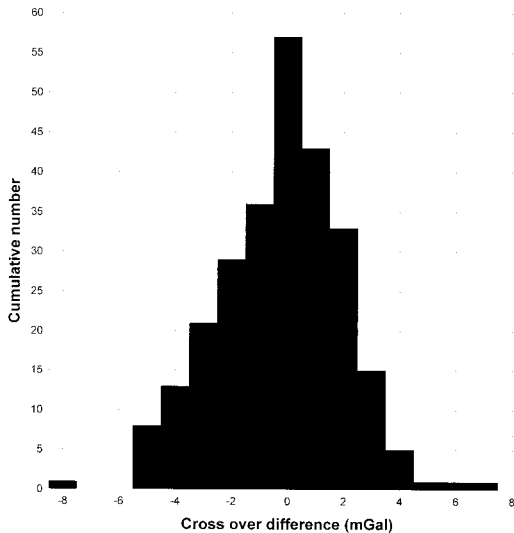


Fig. 12. Cumulative diagram of the anomaly difference in cross over point after eötvös value filtering and time lag correction.

3.9.1 교점오차의 원인

선상중력자료에는 여러 가지 원인에 의한 교점 오차를 포함하게 되며, 이러한 교점오차의 원인으로는 우선 부정확한 Eötvös 보정에 의하여 나타나는 오차를 들 수 있다. 즉, 정확한 Eötvös 보정을 위해 선박의 속도와 진행방향이 정확하게 결정되어야 한다. 그러나 현 단계에서 DGPS 등의 측위 시스템을 통한 선박의 정확한 위치정보들의 측정이 불가능하며, 이 때문에 Eötvös 보정의 부정확성이 야기되고 이에 의한 영향은 교점오차로 나타난다. 이는 교점오차의 원인 중 가장 큰 요인으로 알려져 있다(Prince and Forsysh, 1984).

선상중력계는 일종의 상대중력계로 용수철을 이용하므로 시간에 따른 기계변이가 나타나는데, 이는 출항 전과 입항 후 육상의 절대중력을 이용하여 기계변이가 선형으로 나타난다는 가정 하에 보정한다. 그러나 기계변이가 다양하고 선형이 아니며, 항해중의 충격 등으로 중력 값이 변화하는 경우는 보정을 할 수 없게 되며 교점오차에는 이러한 요인도 포함된다.

선상중력계에서 beam의 수평이 이루어지지 않은 경우나 수평안정판의 수평이 늦게 이루어지기 때문에 일어나는 cross-coupling 오차와 off-leveling 오차도 교점오차의 원인이 된다.

LaCoste & Romberg 중력계의 경우 측정된 중력 값은 수분간에 걸친 평균 중력 값이며, 이 때문에 시간지연이 발생한다. 이를 제거하기 위하여 시간지연 보정을 실시하지만 중력 값이 크게 급변하는 지역 등에서의 완전한 시간지연 보정이 이루어지는 것은 불가능하다. 이처럼 시간지연에 의한 중력 값의 오차도 교점오차의 여러 요인중 하나이다.

3.9.2 선형 최소자승법을 이용한 교점 보정

본 연구에서는 Prince and Forsysh(1984)의 알고리즘을 FORTRAM 프로그램으로 만들어 교점 보정을 하였다(이동윤, 1998)

이 방법의 이점은 교점오차를 감소시키면서도 개개의 선분에 따른 원래 중력 이상의 경향을 유지하는 장점을 가지고 있다(Prince and Forsysh, 1984).

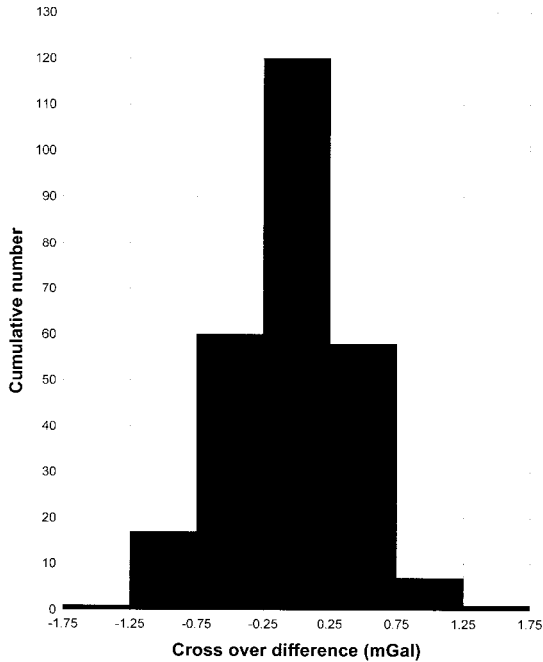


Fig. 13. Cumulative diagram of the anomaly differences in cross over points after cross over correction.

3.9.3 교점 보정 결과

교점오차를 보정한 결과 264 개의 교점에서 의 RMS는 0.436 mGal(Fig. 13)로 교점오차 보정 전의 RMS인 2.182 mGal(Fig. 12)과 비교하여 많이 개선되었음을 알 수 있다. 이상의 결과 선형 최소자승법을 이용한 교점오차 보정은 거의 원자료를 손상시키지 않으며, 또한 교점의 수가 많을수록 더 좋은 결과를 얻을 것으로 기대된다. 따라서 선상중력 측정 시 가능하면 많은 교점이 나타날 수 있도록 항해를 계획하여야 한다.

그러나 한 지점에서의 교점오차는 계산 과정에서 인근의 교점에 영향을 미치므로 meter drift 보정과 Eötvös 보정 등 교점오차 보정 이전의 각종 보정이 정확히 이루어져야만 할 것이다.

4. 중력 이상

4.1 고도 이상

이상의 자료처리 결과에 의한 연구 지역의 고도이상도는 Fig. 14와 같다.

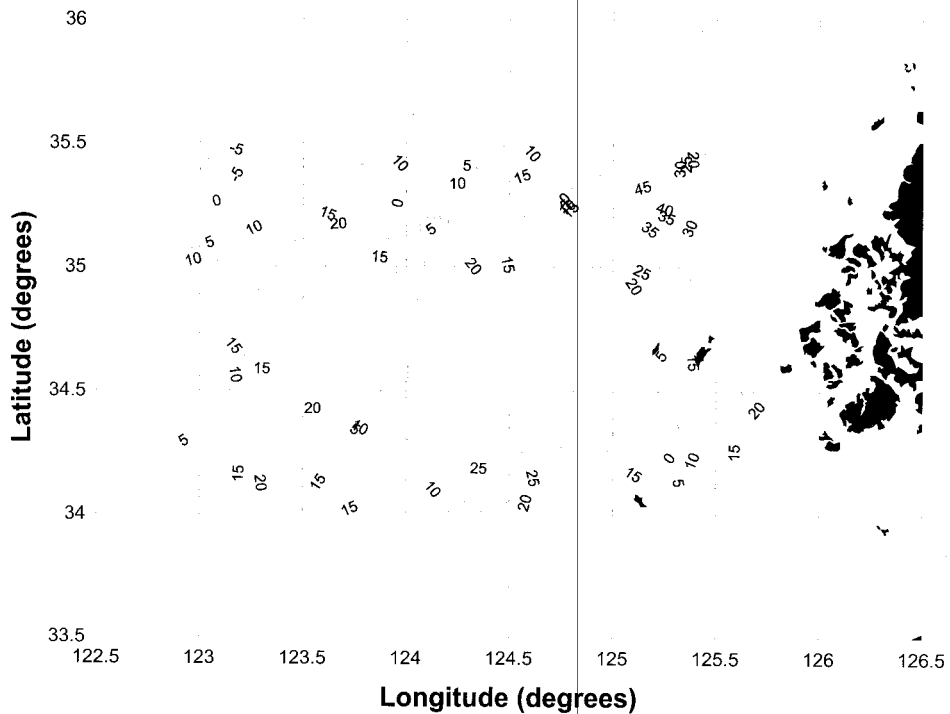


Fig. 14. Free air anomaly measured by RV 'Haeyang2000'(unit: mgal).

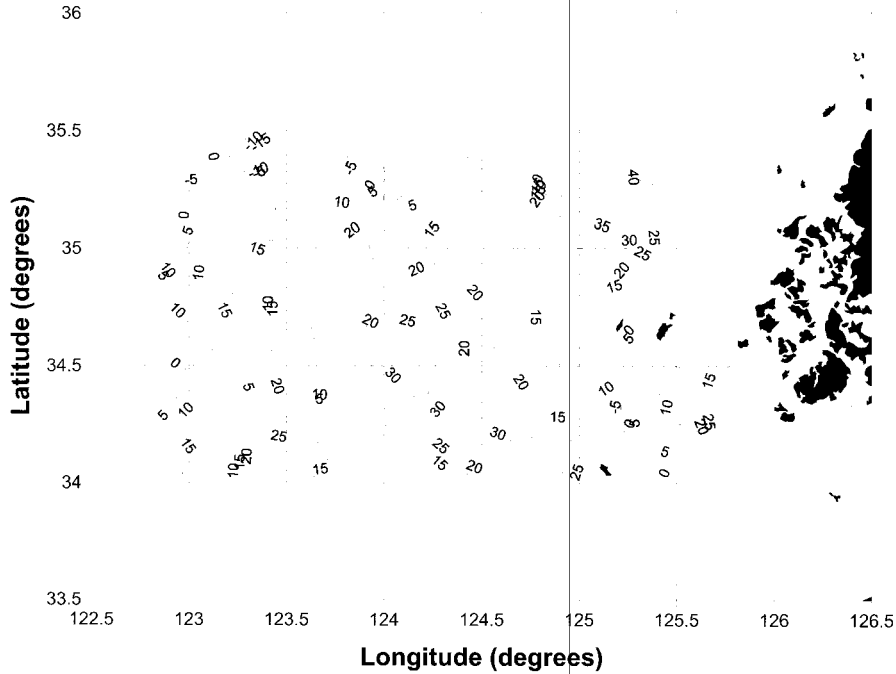


Fig. 15. Free air anomaly from altimetry data(unit: mgal).

그림에서 알 수 있듯이 연구지역의 고도이상은 평균 14.75 mGal로 최저 -11.28 mGal(경도 123.45도, 위도 35.50도)에서 49.87 mGal(경도 124.81도, 위도 35.30도) 사이에 분포한다.

한편 해면고도계 자료(Sandwell and Smith, 1997)에 의한 연구지역의 고도 이상은 Fig. 15와 같으며, 이의 평균은 15.30 mGal로 최소 -21.48 mGal(경도 123.25도, 위도 35.39도)에서 최대 47.21 mGal(경도 124.78도, 위도 35.30도) 사이에 분포한다.

Fig. 14와 15를 비교하면 연구지역 중앙부에서 해면고도 인공위성에 의한 중력이상 보다 선상 자료에 의한 고도이상이 단순하게 나타나는 것이 특징적이다.

두 고도이상의 차이는 Fig. 16과 같으며, 차이의 평균은 -0.56 mGal로 최소 -15.63 mGal(경도 124.97도, 위도 34.35도)에서 최대 23.03 mGal(경도 123.22도, 위도 35.35도) 사이에 분포하며, RMS 차이는 4.195 mGal 이다. Fig. 16에서 5 mgal 정도의 고도이상의 차이가 전역에 고르게

분포하고 있음을 알 수 있다.

4.2 지형자료와 지형보정

연구지역의 지형자료는 최광선·이영철(1991)의 3초×3초 평균고도 지형자료에 '해양2000'호가 중력측정시 측정된 수심자료를 더하여 새로운 3초×3초 평균고도 지형자료를 만들었으며(Fig. 17), 이를 이용하여 중력 측정점 40 km×40 km의 지형을 보정하였다.

지형자료 중에서 가장 높은 곳은 1942 m(경도 126.53도, 위도 33.36도)로 한라산 정상부에서 나타나며, 가장 깊은 곳은 -191 m(경도 126.24도, 위도 33.14도)로 제주도 남쪽에 나타난다. 지형보정 결과 지형보정치는 0.001 mGal에서 4.075 mGal 사이에 분포하며 평균은 0.452 mGal 이다. Fig. 17에서 알 수 있듯이 연구지역 일원의 지형이 매우 평탄함에도 평균 0.45 mGal의 지형보정치가 계산됨은 해양지역에서도 부우계 이상의 계산에 있어 지형보정이 필수적임을 시사한다.

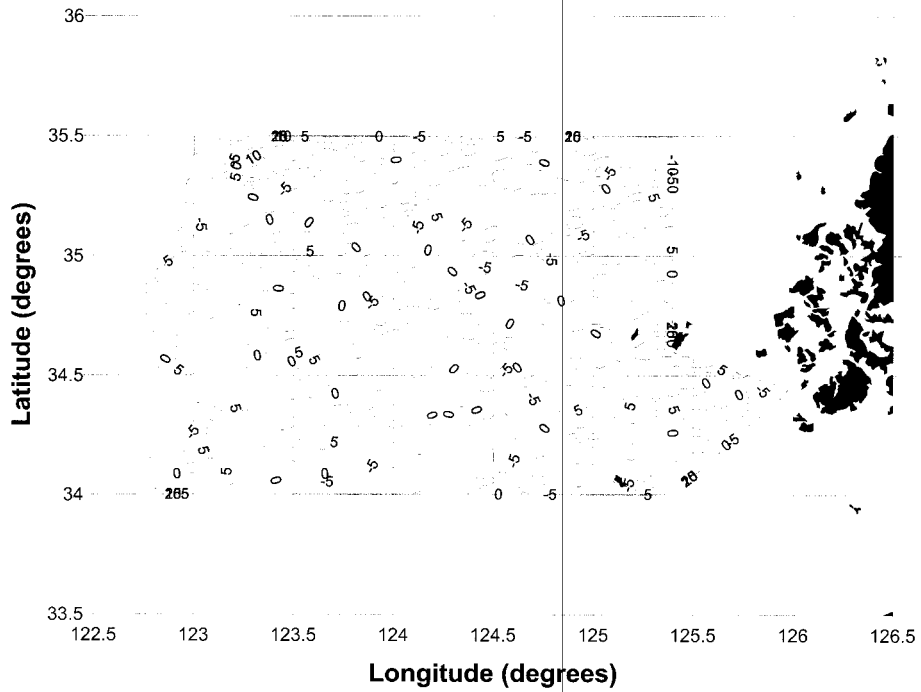


Fig. 16. Difference Free air anomaly between shipborne and altimetry data(unit: mgal).

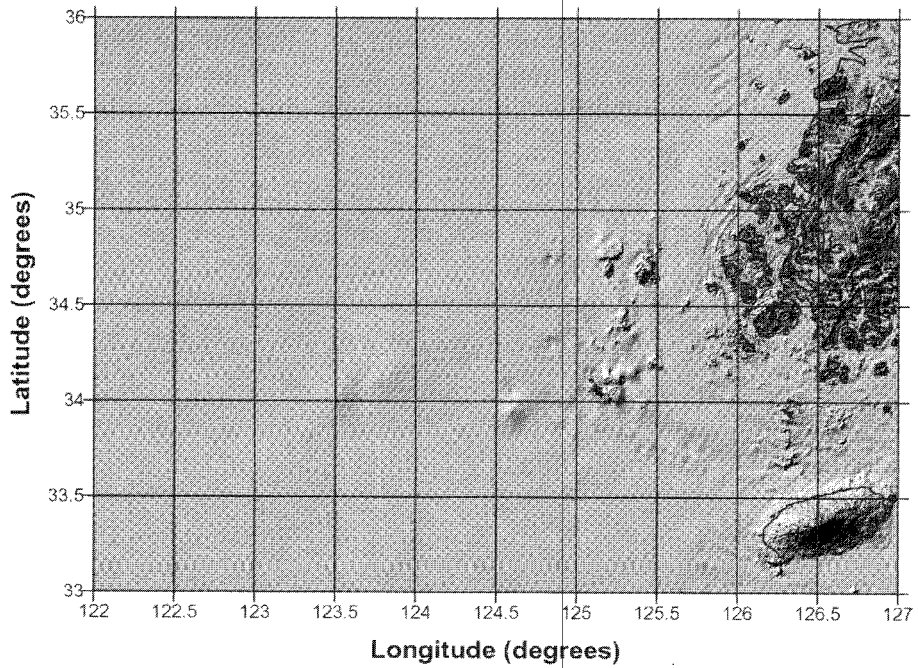


Fig. 17. Topographic relief map from terrain data for terrain correction.

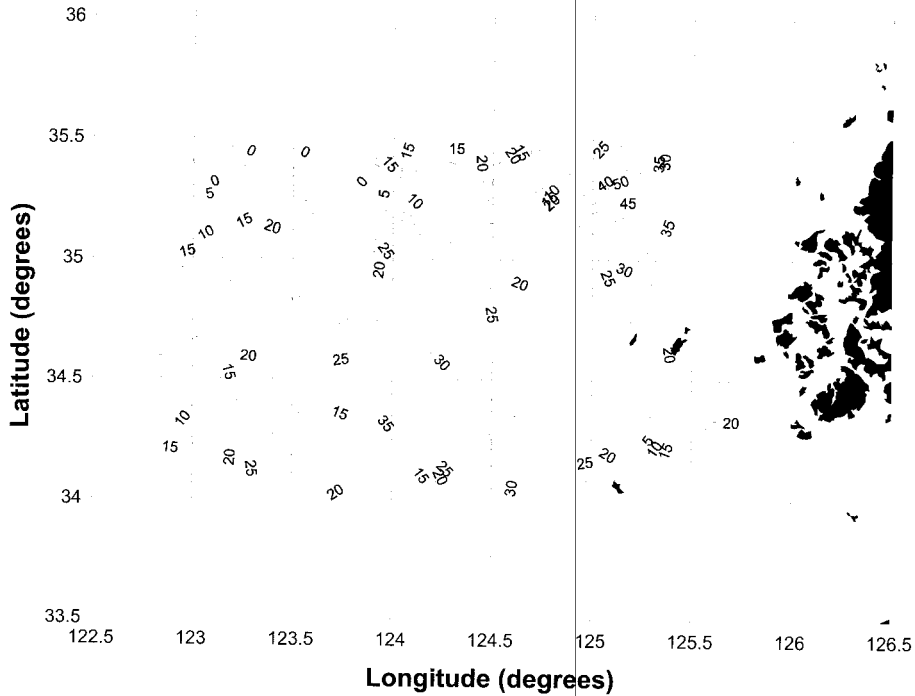


Fig. 18. Bouguer anomaly map of studied area(unit: mgal).

4.3 부우계 이상

연구 지역의 부우계 이상은 Fig. 18과 같다.

연구 지역의 부우계 이상은 최대 60.71 mGal(경도 125.10 도, 위도 35.31 도)에서 최소 -9.18 mGal(경도 123.59 도, 위도 35.50 도) 사이에 분포하며, 평균 20.83 mGal 이다.

5. 고 찰

국립해양조사원이 1999년 '해양2000'호를 이용하여 중력을 측정하던 서해 남부지역의 자료를 처리하여 보았다.

자료처리 결과 264 개의 교점에서 RMS 차이가 0.436 mGal로 매우 좋은 결과를 얻었다. 그러나 처리과정에서의 미비점 및 개선 방안을 나열하면 다음과 같다.

'해양2000'호는 선상 중력 측정시 대부분 선박의 최대 속력인 25 km/hour의 선속으로 항해를 하였으며 이 때문에 Eötvös 보정치가 최대 80 mGal을 상회하고 있다. 그러므로 특히 교점을 생성하기 우

한 동-서 방향의 항해를 할 경우 선속을 선속을 15 km/hour 이하로 줄여야 할 것이다. 이 경우 Eötvös 보정치는 최대 50 mGal 정도가 되며 좀 더 정확한 교점 보정 등을 할 수 있을 것이다.

'해양2000'호는 탐사지역을 벗어나면 곧바로 새 측선에 들어가기 위해 회전을 하고 있다. 예로 1999년도 측정의 경우 위도 34도와 35.5도를 기준으로 측선이 이를 벗어나면 곧바로 새 측선에 진입하고 있다. 그러므로 회전점 제거시 위도 34도와 35.5도 지역의 자료가 삭제된다. 또한 이 지역에 생성된 교점도 상실하게 된다. 그러므로 이를 고려하여 탐사지역을 벗어나 1~2분 정도 연장하여 측정한 뒤에 새 측선에 진입하여야 할 것이다.

해양조성을 보정하기 위하여 M_2 분조 이외에 조류나 파랑에 의한 해면 높이 변화를 이용하여야 할 것이다. GPS 자료는 위도와 경도 및 타원 체고로 주어지며, 지오이드를 이용하면 이들의 영향에 의한 해면 높이 변화를 추출할 수 있을 것이다. 그러나 SA(selective availability) 등과 GPS

기준국과의 거리 등의 영향으로 정확한 해면 높이 변화의 추출이 쉽지 않다. 2000년 5월을 기준으로 SA가 없어 졌으므로 이 이후의 자료에 이를 적용해 볼 수 있을 것이다.

'해양2000'호는 남북을 주 축선으로 경도방향 3분 간격으로 중력을 측정하고 있으며 선속을 25 km/hour라 하면 위도방향 약 70 m 간격으로 측정하는 셈이 된다. 물론 이러한 중력자료도 우리나라의 중력관련 연구에 매우 큰 기여를 할 것이지만 '해양2000'호가 seabeam 등을 운용하기 위해 항해하는 경우에도 중력계를 작동시켜 더욱 조밀한 자료를 획득하여야 할 것이다.

6. 결론

국립해양조사원이 1999년도 서해 남부에서 '해양2000'를 이용하여 측정한 선상중력자료를 중력 이상으로 계산하는 일련의 처리 과정과 방법에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

1) 동서 방향의 축선들에서 큰 Eötvös 효과가 나타나며 이 경우 최대효과는 ± 90 mGal 내외가 되며, Eötvös 효과의 영향을 줄이기 위해 동서 방향의 항해시 선박의 속도를 줄여야만 한다.

2) 시간지연 보정 이전의 교점들에 대한 RMS는 4.802 mGal이며, 보정 후에는 2.182 mGal로 매우 개선되었으며 시간 지연량을 310 초가 된다.

3) 각 축선들은 탐사지역을 1~2 분정도 연장하여 측정함으로써 회전점 제거에 의한 자료 소멸을 대비하여야 할 것이다.

4) 정확한 해양조석 보정을 위하여 조류 및 파랑을 고려한 해면 높이 변화량을 추출하여야 할 것이다.

5) 교점오차 보정 후 교점들에 대한 고도이상의 RMS는 0.436 mGal로 매우 좋은 결과를 나타내고 있다.

6) 연구지역의 고도이상은 최소 -11.28 mGal에서 최대 49.87 mGal 사이에 분포하며, 평균 14.75 mGal이다. 또한 해면고도계 인공위성 자료와 비교한 결과 이들의 RMS 차이는 4.20 mGal이다.

7) 지형 보정값은 4.075 mGal이 최대값이며, 평균 0.452 mGal이다. 서해 남부 지역의 해저지

형 기록이 비교적 완만함을 고려하면 해양에서의 부우계 이상 계산시 지형보정이 꼭 필요함을 알 수 있다.

8) 연구지역의 부우계이상은 최소 -9.18 mGal에서 최대 60.71 mGal 사이에 분포하며, 평균 20.83 mGal이다.

9) 국립해양조사원의 선상중력자료는 우리나라 일원에서의 중력관련 연구에 매우 큰 기여를 할 것이며, 장차 600 톤급의 소형 탐사선의 자료가 기대된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-133-002-5)의 지원으로 수행되었으며,

아울러 본 연구에 필요한 자료의 협조와 지원을 아끼지 않은 국립해양조사원 관계자에게 감사 드린다.

참고문헌

- 권병두, 김규중, 김성렬, 1995, 울릉도의 중력 및 자력탐사 연구, 지질학회지, v. 31, p. 138-150.
- 박찬홍, 김한준, 양철수, 석봉출, Isezaki, N., 1996, 중력 및 해저면지진계탐사 자료에 의한 울릉분지의 지각구조 연구, 지질학회지, v. 32, p. 276-290
- 이동윤, 1998, 선형 최소자승법을 이용한 선상중력자료의 교점오차 보정, 이학석사 학위논문, 부산대학교, 37p.
- 최광선, 양철수, 김정희, 1996, 선상중력계를 위한 육상 중력기점 전이, 지구과학회지, v. 17, p. 417-421.
- 최광선, 양철수, 김정희, 한인우, 박필호, 1998, 한반도 일원의 지구중력장의 정밀화와 GPS에 의한 3차원 측지좌표의 정밀결정, 한국과학재단 특정연구 최종 보고서, 134p.
- 理科年表, 1999, 國立天文部 編, 丸善株式會社, 1050p.
- Anderson, B. D. O. and Moore, J. B., 1979, Optimal filtering, Prentice-Hall.
- Arabelos, D., 1998, On the possibility to estimate ocean bottom topography from marine gravity and satellite altimeter data using collocation, R. Forsberg., M. Feissel., R. Dietrich(Eds.), Geodesy on the move, Springer, p. 105-112.
- Dehlinger, P., 1978, Marine gravity, Elsevier Scientific Publishing Co., 322p.
- Defence Mapping Agency, 1991, DMA Technical Report

- TR 8350.2, DMA.
- Genrich, J. F. and Minster, J. B., 1991a, Ship navigation for geophysical applications using Kalman-Filtered GPS fixes, *Geophysics*, v. 56, p. 1961-1970.
- Genrich, J. F. and Minster, J. B., 1991b, Near-real time reduction of shipboard gravity using Kalman-filtered GPS measurement, *Geophysics*, v. 56, p. 1971-1979.
- Kirby, J. F. and Forsberg, R., 1998, A comparison of techniques for the integration of satellite altimeter and surface gravity data for geoid determination, R. Forsberg., M. Feissel., R. Dietrich(Eds.), *Geodesy on the move*, Springer, p. 207-212.
- LaCoste, L. J. B., 1973, Crosscorrelation method for evaluating and correcting shipboard gravity data, *Geophysics*, v. 38, p. 701-709.
- LaCoste, L. J. B., Clarkson, N. and Hamilton, G., 1967, LaCoste and Romberg stabilized platform shipboard gravity meter, *Geophysics*, v. 32, p. 99-109.
- LaCoste and Romberg Gravity Meters, Inc., 1992, Manual - Mosel-S Digital Marine Gravity Meter with Stabilized Platform, LaCoste and Romberg Gravity Meters, Inc.
- Lafehr, T. R. and Nettleton, L. L., 1967, Quantitative evaluation of a stabilized platform shipboard gravity meter, *Geophysics*, v. 32, p. 110-118.
- Moritz, H., 1980, *Advanced physical geodesy*, Herbert Wichmann Verlag, 504p.
- Nettleton, L. L., 1976, *Gravity and magnetics in oil prospecting*, McGraw-Hill Book Co. Inc., 464p.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1994, *Numerical recipes* 2nd ed., Cambridge Univ. Press.
- Prince, R. A. and Forsyth, D. W., 1984, A simple objective method for minimizing crossover errors in marine gravity data, *Geophysics*, v. 49, p. 1070-1083.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F, 1997, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *JGR*, v. 102, p. 10,039-10,054.
- Seeber, G., 1993, *Satellite geodesy - Foundations, methods, and applications*, Walter de Gruyter. 532p.
- Small, C. and Sandwell, D. T., 1992, A comparison of satellite and shipboard gravity measurements in the Gulf of Mexico., *Geophysics*, v. 57, p. 885-893.
- Talwani, M., 1966, Some recent developments in gravity measurements aboard surface ships from 'gravity anomalies : unsurveyed areas', *Geophys. Monograph of Am. Geophys. Union*, v. 9, p. 31-47
- Tamura, Y., 1982, A computer program for calculating the tide generating force, *The publications of the international latitude observatory of Mizusawa*, v. 16, p1-19.
- Wall, R. E., Talwani, M. and Worzel, J. L., 1966, Cross-coupling and off-leveling errors in gravity measurements at sea, *JGR*, v.71, p. 465-485.
- Wessel, P. and Watts, A. B., 1988, On the accuracy of marine gravity measurements, *JGR*, v.93, p. 393-413.

2000년 11월 4일 원고접수

2000년 12월 20일 원고채택