

울릉분지에서의 선상중력과 위성중력 통합에 의한 중력 해상도 향상 및 해석

박찬홍* · 김정우** · 허 식* · 원중선*** · 석봉출* · 유해수*

*한국해양연구소 해양지질연구단 · **세종대학교 지구과학과

***연세대학교 지구시스템학과

요 약

최근 공개된 위성중력을 이용하는 오차 최소화 기법을 적용하여 선상중력내 존재하는 구간 측선 간 오차나 교차점 오차를 성공적으로 보정하였으며, 보정된 선상중력을 위성중력과 결합하여 고해상 중력분포를 도출하였다. 오차 최소화 과정에서 울릉분지의 선상중력은 위성중력보다 장주기 성분에서 상대적으로 크게 보정되었으나 단주기 성분은 그대로 보존되었다. 이것은 선상중력이 갖는 단주기의 중력 성분이 훼손되지 않은 채 안정되고 연속성을 갖는 장주기의 인공위성 중력분포에 잘 접합될 수 있다는 것을 보여 준다. 통합된 후리에어이상도는 위성중력의 장주기 성분과 선상중력의 단주기 성분을 모두 표현하므로 해저지형 및 지질분포의 해석에서 보다 상세하고 신뢰성 있는 정보를 제공한다. 후리에어이상은 수심이 깊은 분지 중앙 지역이 해저산이나 대지 등 높은 지형으로 이루어진 분지 주변부 보다 상대적으로 낮게 분포하는 등 전반적으로 해저지형의 분포 경향에 부합되어 변화한다. 그러나 대륙사면을 이루고 있는 분지의 서쪽 및 동쪽 주변부를 따라서는 지역적으로 함몰된 퇴적기반과 두꺼운 퇴적층 및 대륙 주변부에서 특징적인 가장자리 효과로 인한 지이상대가 발달하고 있다. 울릉도 북동부에 위치한 한국대지 및 울릉대지에서 북동-남서방향의 선형분포를 갖는 중력이상은 동해가 열개되는 동안 균열된 지각 사이를 따라 일어난 화산활동의 결과로 형성된 해산이나 관입암체가 선형으로 배열함으로써 기인한 것으로 해석된다. 선형으로 배열된 고중력분포는 울릉대지 서쪽 경계부에서 급구배를 보이는 북북서-남남동 방향의 직선적인 중력 분포에 의해 절단되고 있는 데 이 급구배의 중력이상은 울릉대지 서부 경계를 이루는 단층선에 기인한다. 울릉대지가 서쪽으로 뚜렷한 단층 접촉을 나타내고 있으나 지형적인 형태에 있어서 대비되지 않는 것은 울릉대지가 단층을 경계로 분리되어 이동되어 왔을 가능성을 시사한다. 분지의 중앙 북동부에서는 수심이 깊어지는 데 비해 중력치는 오히려 높아지는 경향을 나타내고 있는 것은 맨틀이 주변부에 비해서 상대적으로 천부에 존재하고 있는 것이 가장 큰 요인이며, 해저지각의 두께가 얇은 대신 지각의 밀도가 주변 대륙보다 높은 데도 기인한다.

주요어: 선상중력, 위성중력, 교차점오차, 후리에어이상, 울릉분지, 단층선에

Park, Chan-Hong, Kim, Jeong Woo, Huh, Sik, Won, Joong-Sun, Suk, Bong-Chool and Yoo, Hai-Soo, 1999. High Resolution Gravity Mapping and Its Interpretation from both Shipborne and Satellite Gravity Data in the Ulleung Basin. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 1, p. 27-38.

ABSTRACT: The errors between track segments or at the cross-over points of shipborne gravity were successfully reduced by applying a cross-over error adjustment technique using satellite gravity. The integration of shipborne and satellite altimeter-implied free-air gravity anomalies after the cross-over error adjustment resulted in a high resolution gravity map which contains both short and long wavelength components. The successful adjustment of the cross-over errors in the shipborne gravity using the satellite gravity suggests that the shipborne gravity can be combined with the satellite anomalies characterized by a stable and

long wavelength component. The resulting free-air anomaly map is evenly harmonized with both short and long wavelength anomalies. Thus the corrected anomaly map can be better used for the geological interpretation. Free-air anomalies with more than 140 mGal in total variations generally correspond to the seafloor topographic changes in their regional patterns. A series of gravity highs are aligned from the Korea Plateau to the Oki Island, which are interpreted to be caused by seamounts or volcanic topographies. The gravity minima along the western and southern shelf edge are associated not only with the local basement morphology and thick sediment fill at the continental margin, but also possibly with the crustal edge effect known for passive continental margins. Series of NE-trending linear anomalies are possibly caused by a swarm of volcanic intrusions followed the initial opening of the Ulleung Basin. The linear high anomalies in the Ulleung Plateau are terminated by the straightly NNW-trending anomalies with a sharp gradient in its western boundary which indicates a fault-line scarp. The opposite side adjoined with the fault-line scarp shows no correlation with the fault-line scarp in geometry indicating that the block might be horizontally slid from the north. A gravity high in contrast to the deepening in seafloor toward the northeastern central Ulleung Basin is probably responsible for the thin crust and shallow seated mantle. The gravity minima along the western and southern shelf edge are associated not only with the local basement morphology and thick sediment fill at the continental margin, but also possibly with the crustal edge effect known for passive continental margins. Series of NE-trending linear anomalies are possibly caused by a swarm of volcanic intrusions followed the initial opening of the Ulleung Basin. The linear high anomalies in the Ulleung Plateau are terminated by the straightly NNW-trending anomalies with a sharp gradient in its western boundary which indicates a fault-line scarp. The opposite side adjoined with the fault-line scarp shows no correlation with the fault-line scarp in geometry indicating that the block might be horizontally slid from the north. A gravity high in contrast to the deepening in seafloor toward the northeastern central Ulleung Basin is probably suggestive of a thin crust and shallow seated mantle.

Key words: Shipborne gravity, satellite gravity, free-air anomaly, Ulleung Basin, fault-line scarp

(Park, Chan-Hong, Huh, Sik, Suk, Bong-Chool and Yoo, Hai-Soo, Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P. O. Box 29, 425-600, Korea., Kim, Jeong Woo, Department of Earth Sciences, Sejong University 98, Kunja-dong, Kwangjin-Ku, Seoul, 143-150, Korea. and Won, Joong-Sun, Department of Earth System Sciences, Yonsei University 134, Shinchon-dong, Soedaemun-Ku, Seoul, 120-140, Korea. email: chpark@sari.kordi.re.kr)

1. 서 론

대부분의 선상중력측정은 울릉분지의 동부에 집중되었기 때문에 분지 서부 및 중앙부에서는 자료 공백인 지역들이 많다(Fig. 1). 더구나, 선상중력자료는 측선 간 혹은 측선 교차점에서 오차가 존재할 수 있기 때문에, 서로 다른 조사에서 얻은 자료들을 곧바로 결합하여 사용하기 어려운 경우가 대부분이다. 선상중력자료에 존재하는 오차는 회전하는 지구상을 상대적인 속도로 이동하는 선박에서 중력을 측정할 때 중력계에 미치는 가속도에서 기인하는 Eötvös 효과 보정의 정도 차이에 의해서 발생한다. Eötvös 효과는 항해자료, 즉, 선속, 선위 및 항진방위 등과 직접적인 함수관계에 있으므로 항해자료의 오차는 부정확한 Eötvös 효과 산출을 야기하고 결과적으로 교차점에서 오차를 발생시킨다(Prince · Forsyth, 1984). 기타 오차들은 중

력관측시 사용하는 기기 특성이나 해상상태에 따른 선체의 요동을 보정하는 시스템이 각각 다르거나 표준중력식 적용의 일관성이 결여된 경우 등에 의해서도 기인할 수 있다. 미세한 오차들은 조석 간만의 차 뿐만 아니라 계기특성 변화 등의 보정 과정에서도 나타날 수 있다. 그러므로 이러한 모든 오차들은 자료를 통합하는 과정에서 최소화시키는 것이 필요하다.

동해 중력 연구의 대부분은 거의 야마토분지 혹은 일본분지에 집중되어 있었다(Ishihara, 1984; Joshima, 1978; Ludwig *et al.*, 1975; Oshida, 1992; Stroyev, 1971 등). 반면에 울릉분지에서는 선상중력측정이 매우 적었을 뿐만 아니라 관련 연구도 많지 않았고, 일부 중력자료를 이용한 지각 구조의 연구는 빈약하게 분포된 선상중력이나 저해상도 위성 중력자료(서만철 외, 1993; 박찬홍 외, 1996)에 근거를 둔 것들이다. 다행스럽게도 최근

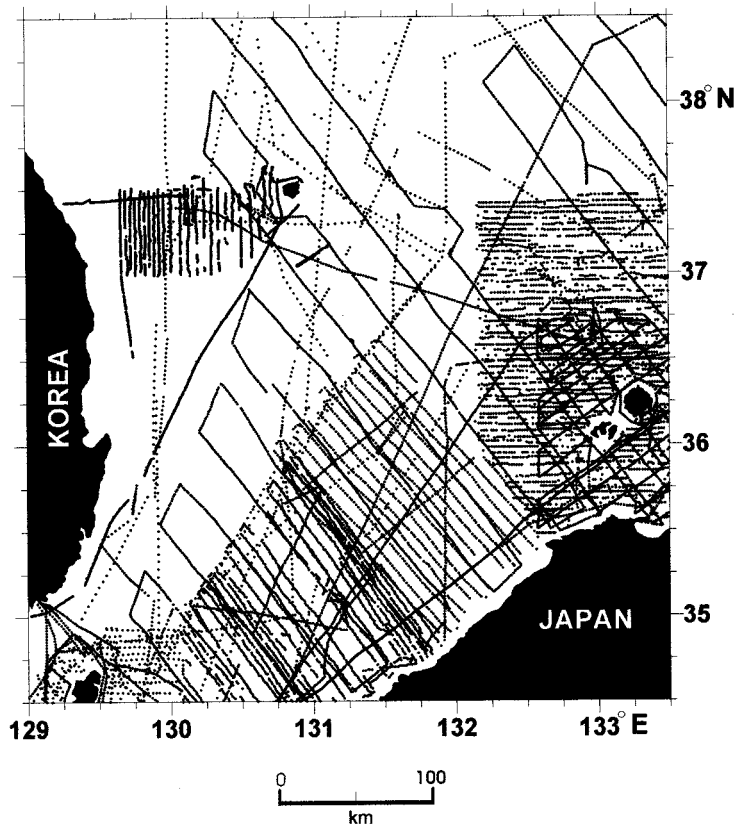


Fig. 1. Shipborne coverage.

들어 정밀도가 크게 향상된 위성으로부터 관측한 해수면 고도자료로부터 산출한 중력자료가 공개되면서 선상중력자료가 빈약한 지역을 채울 수 있게 되었다. 그러나 위성으로부터 도출된 중력자료는 자료분포의 연속성 및 균질성은 뛰어나지만 위성의 제한적인 측정영역과 측정범위의 한계 때문에 선상중력에 비해서 해상도에서는 근본적인 한계를 가질 수밖에 없다(Campbell, 1995). 항해시스템, 측량시스템 및 해상조건은 개별적인 항해에 따라 달라지기 때문에 선상중력의 정확도를 제량화하는 것이 어려울 수도 있으나(Wessel · Watts, 1988), 일반적인 조건과 과정 속에서 획득된 선상중력은 본질적으로 위성중력과 비교할 때 단주기 성분에서 훨씬 좋은 해상도를 갖는다. 따라서 선상중력과 위성중력의 장점을 결합할 수 있다면 해상중력의 불균질성을 보정하고 중력이상도의 해상도를

훨씬 높일 수 있을 것이다. 본 연구의 목적은 위성을 통해 얻은 중력의 안정된 속성을 이용함으로써, 선상중력에서 나타나는 측선간, 서로 다른 항해에서 얻은 자료간 오차를 보정하고, 중력이상도의 해상도를 높이는 방향으로 선상중력과 위성중력을 결합하여 궁극적으로 생성된 고해상도 중력이상도가 갖는 지질학적인 의미를 해석하는 데 있다.

2. 방 법

2.1. 자료

본 연구에서 사용된 데이터는 수심 측량자료, 선상중력, 위성중력 등으로 구성되어 있다. 사용된 자료는 울릉분지를 포함한 북위 34.5°~38.5°와 동경 129.0°~133.5° 사이의 지역에 분포

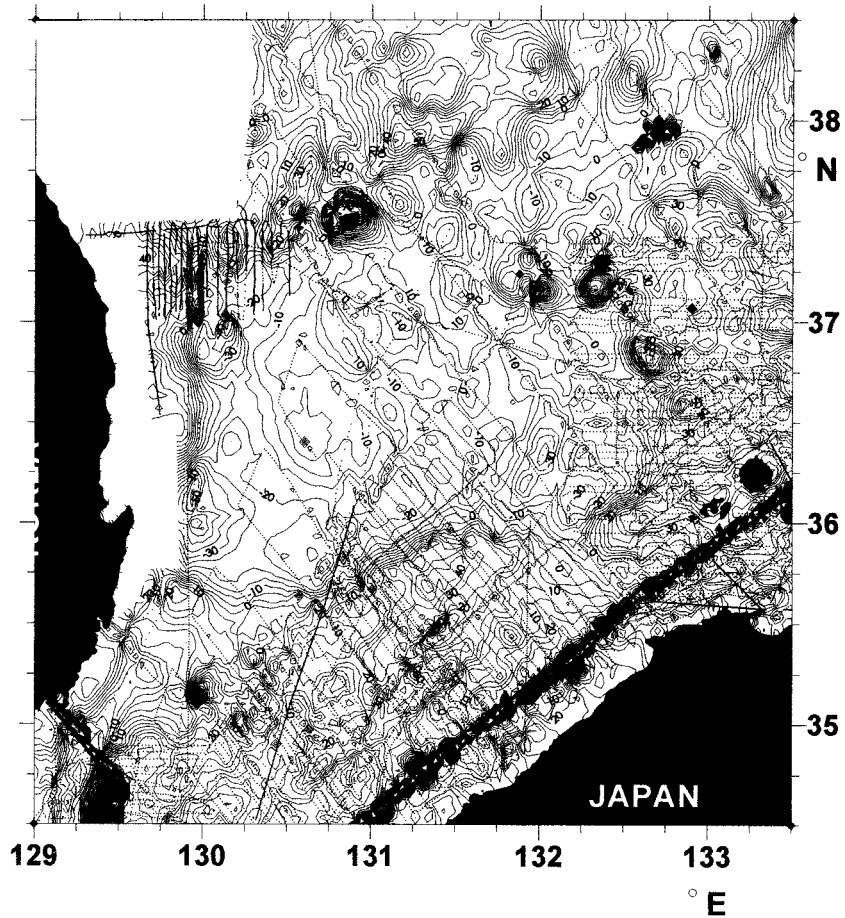


Fig. 2. Shipborne FA gravity anomalies before crossover adjustment.

한다(Fig. 1). 수심 측량자료와 선상중력은 부분적으로 미국 National Geophysical Data Center (NGDC)의 자료에 바탕을 두고 있다. 2' 간격의 격자로 구성된 위성중력자료는 ERS-1, Geosat ERM, Geosat-GM 위성의 해수면 고도 측량으로부터 산출한 최신 자료(Sandwell · Smith, 1997; Smith · Sandwell, 1995)에 기초하고 있다. 수심 측량자료와 선상중력자료 중에는 최근 한국해양연구소가 울릉분지 북서 주변부에서 획득한 자료도 포함한다.

2.2. 선상중력자료의 획득과 처리

선상중력자료 중 일부는 1993년에 울릉분지의 북서 주변부에서 연구선 온누리호에 장착된

LaCoste-Romberg 선상중력계를 이용하여 획득하였다. 이 때 선상중력은 종합관측시스템인 MDM 300을 통하여 항해자료인 선위, 항진방위, 선속 등과 함께 동시 기록되었으며, 선위 측정에는 전 지구적 위치측정시스템(GPS)이 사용되었다. 지구의 회전이 동-서 방향인데 따라 발생하는 Eötvös 효과를 최소화하기 위하여 주로 남-북 방향을 주 축선으로 하여 중력을 측정하였다. 해상중력의 절대중력전이를 위해서 출항 및 입항지인 진해항 부도에 설치된 중력 보조기점에 연결 측정하였다. 선상중력으로부터 조석변화 및 계기특성변화에 따른 미세 중력변화를 보정하고, 절대치로 변환한 후에 Eötvös 보정과 표준중력식(GRS 67, IAG)에 의한 정상보정을 실시하였다. 다음으로 항해 코스나 속

도의 변화 중 혹은 그 전후에 Eötvös 보정에서 야기되는 큰 오차를 갖는 중력치들을 소거하였다. 이와 같이 산출된 선상중력은 위성중력과 NGDC 자료에 바탕을 둔 다른 선상중력들과 통합되어졌다.

2.3. 선상중력 및 위성중력자료의 통합

본 연구에서는 측선간 혹은 조사시기 및 기간의 차이에 따른 오차를 갖는 불균질한 선상중력을 Sandwell · Smith (1997)가 최근 공개한 정밀 위성중력 자료를 이용하여 보정하고 결합하였다. 서로 다른 시기나 다른 기관, 다른 조사선과 장비에 의해서 관측된 선상중력자료로부터 얻은 후리에어 이상은 조사단위간 혹은 측선간의 오차로 인하여 불규칙하고 단속적인 분포로 나타난다(Fig. 2). Sandwell · Smith (1997)는 미해군이 기밀로 미 공개하였던 Geosat-GM 위성자료 및 유럽 우주국 (European Space Agency)의 ERS-1 위성 해수면고도 측정자료에서 후리에어 이상을 산출하여 2' 간격의 격자자료로 공개한 바 있다. Smith · Sandwell (1995)에 따르면, 위성중력과 선상중력을 비교할 때 위성중력의 정밀도는 임의적인 선박의 항로에 대해 약 4-7 mGal이고, 선박의 항로가 GeoSat/ERM (Geosat Exact Repeat Mission) 궤도와 일치한 경우에는 정밀도가 3 mGal까지 개선된다. 그러나 울릉분지의 경우는 선상중력자료가 빈약할 뿐만 아니라 분포도 균질하지 않아서 실제 위성중력에서 단주기가 갖는 오차는 상대적으로 클 것으로 판단된다. 선상중력을 위성중력과 결합하는 첫 단계로서 선상중력자료의 교차점 오차 계산 기법

(Wessel · Watts, 1988; Wessel, 1989)에 의해 선상중력 분포에서 측선 교차점에서의 오차가 산출되었다. 이 과정에서, 1530개 지점의 교차점 오차가 산출되었다. Fig. 3은 모든 교차점의 오차 빈도를 나타내는 히스토그램이다. 통계적으로 산출한 평균 오차는 2.8 mGal이며 표준 편차는 16 mGal이다. 교차점 오차의 약 33%는 5 mGal 이상으로 나타났다. Fig. 4는 위성중력 격자자료에 의거한 울릉분지에서의 후리에어 이상도를 나타낸다. 위성중력은 전반적으로 광역적인 분포에서 연속적이고 균질한 특성을 갖는 반면 단주기의 이상들을 결여하고 있다.

각 측선상의 선상중력을 안정된 위성중력분포에 보정하고 결합하기 위하여 모든 가용한 선상중력자료는 측선별로 분리하였다. 분리된 선상중력 측선은 총 616개였으며 모두 직선적인 성분을 갖는다. 위성중력을 선상중력 측선자료와 비교를 위해서 GMT (Generic Mapping Tools, Wessel · Smith, 1995) 모듈인 SURFACE와 GRDTRACK을 이용하여 격자자료로 된 위성중력으로부터 5' 간격의 북동-남서 방향 측선을 따라 매 2' 마다 중력치를 재추출하였다. 측선단위로 세분된 선상중력자료 및 위성중력에서 추출한 측선자료와의 교차점과 오차 크기를 산출하고 보정하기 위하여 교차점 오차 산출 및 보정 프로그램(Knudsen, 1987)을 사용하였다. 산출된 교차점 오차를 최소화하고 각 단편화된 측선에 적용될 수 있는 편차를 얻기 위하여 최소자승법을 적용하였다. 교차점은 자료점 사이의 거리가 16.75 km 보다 작은 경우부터 시작하여 최소가 되는 자료점으로 결정되도록 하여 5299개의 교차점이 결정되었다. 교차점의 최대 검색범위는 대략 9노트 속도의 약 1시간 간격의 자료점으로 하였다. 각 단편화된 측선에 대한 다단계 보정은 잉여 교차오차의 최소자승 합계를 최소화하는 방향으로 적용되었다. 이 방식은 개별 측선을 따라서 상대적인 중력 이상을 보존하면서 교차오차를 감소시키는 이점을 갖기 때문에 선상중력-선상중력간의 교차점 오차 보정 기법에 비해서 훨씬 신뢰성이 높다.

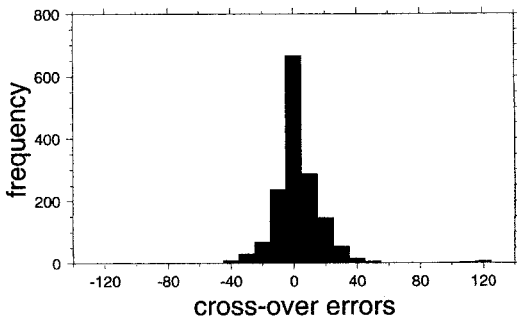


Fig. 3. Histogram of crossover errors in shipborne FA gravity anomalies before crossover adjustment.

3. 결과 및 토의

3.1. 교차보정 및 결합 결과

Fig. 5는 선상중력의 모든 측정에서 교차점 보정 전후 선상중력과 인공위성중력간의 오차를 빈

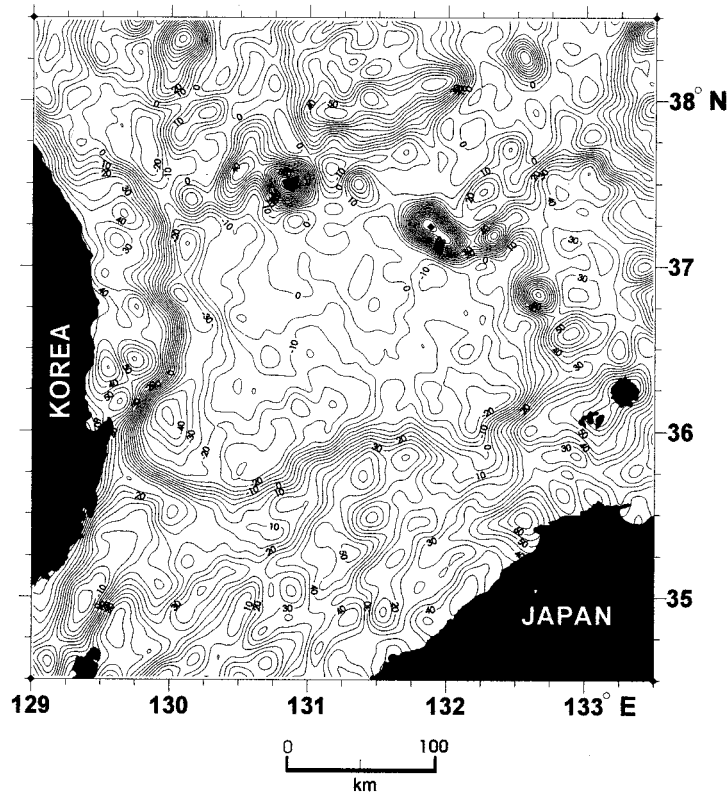


Fig. 4. Satellite altimeter-implied FA gravity anomalies.

도분포로 나타낸 것으로서 교차점 오차는 보정 후에 현저히 감소되었음을 보여 준다. 특히, 오차가 5 mGal 이하인 자료점의 빈도 수는 보정 후 보정 전에 비해 거의 두 배로 증가하였다. 모든 선상중력 관측점에서 선상중력과 위성중력간의 오차 평균은 보정 전 5.3 mGal에서 보정 후 단지 0.3 mGal로 감소되었으며, 표준 편차는 14.5 mGal에서 6.1 mGal로 감소하였다. 10 mGal보다 큰 오차를 갖는 선상중력 자료점은 64%에서 34%로 감소된 반면, 5 mGal보다 작은 오차는 38%에서 66%로 증가하였고, 10 mGal보다 작은 오차는 63%에서 91%로 증가하였다. 교차점 보정 전후 위성중력의 변화는 2' 간격의 격자점 자료의 비교에서 얻어졌으며, 그 차이의 분포는 Fig. 6의 히스토그램에서 보여준다. 위성중력 자체는 교차점 보정 후 12% 만이 5 mGal 이상 보정되었고, 5 mGal보다 큰 오차의 97%가 대략 - 10 mGal의 범위로 집중

되는데, 이것은 대부분의 위성중력은 음수값으로 조정되었다는 것을 지시한다(Fig. 6 (a)). 반면에 선상중력은 위성중력에 비해서 조정의 폭이 컸다(Fig. 6 (b)). 선상중력은 모든 자료점의 33% 이상에서 5 mGal 이상 조정되었는데 이는 위성중력보다 거의 세 배 이상의 자료점에서 크게 보정되었다는 것을 지시한다. Fig. 7은 GMT 모듈인 SURFACE와 GRIDTRACK를 이용하여 임의의 측선상에서 보정 전후 선상중력자료와 선정된 선상중력 축선을 따라 위성중력으로부터 보간법으로 구한 중력치를 비교한 것이다. 오차 보정 후의 선상중력치는 보정 전에 비해서 전체적으로 안정된 장주기의 인공위성 중력에 훨씬 가까워진 것을 알 수 있다. 이것은 교차점 보정 후에 선상중력이 갖는 단주기의 성분을 손실하지 않고서 보다 장주기의 안정된 분포를 갖는 위성중력으로 조정되었다는 것을 지시하는 것이다. 이 결과는 10 mGal

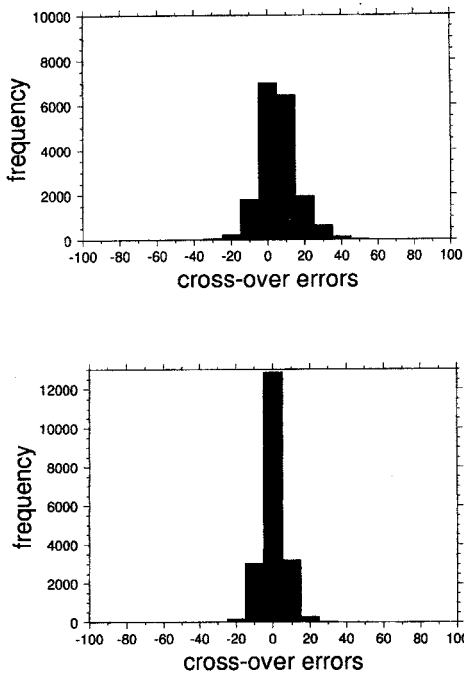


Fig. 5. Histograms of errors between satellite and shipborne at shipborne data points. (a) before and (b) after crossover adjustment.

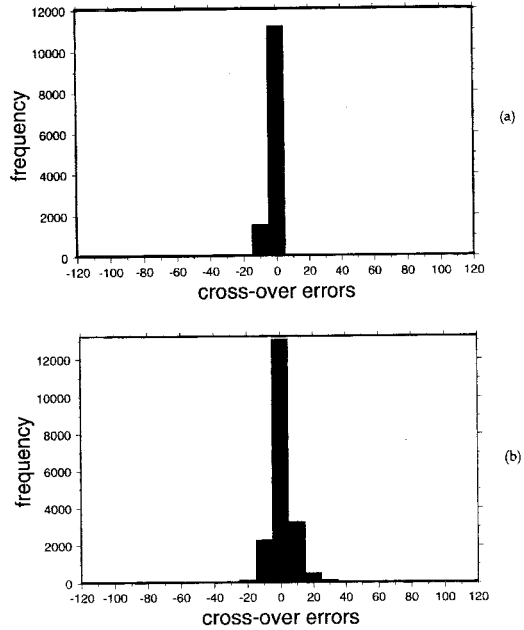


Fig. 6. (a) Histogram of differences between before and after the adjustment of the satellite gravity. Only 12% was adjusted by greater than 5 mGal. (b) Histogram of differences between before and after the adjustment of the shipborne gravity. The shipborne values of more than 33% have been adjusted with greater than 5 mGal.

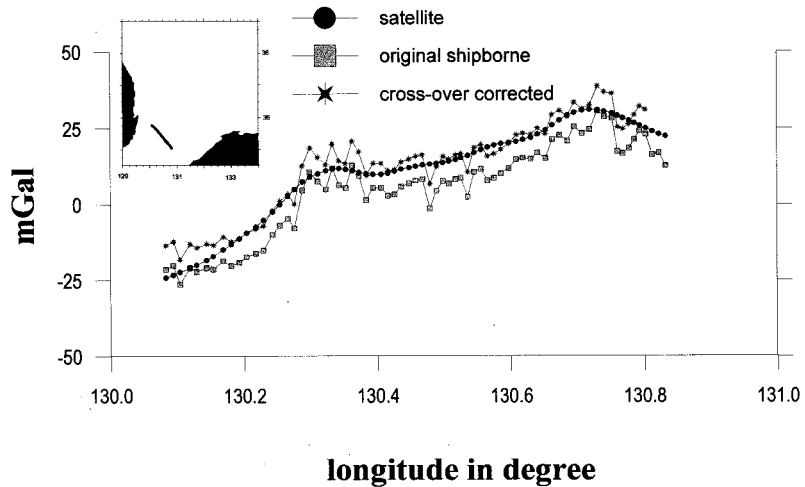


Fig. 7. FA gravity anomaly profiles of satellite and shipborne along a random shipborne track before and after crossover adjustment.

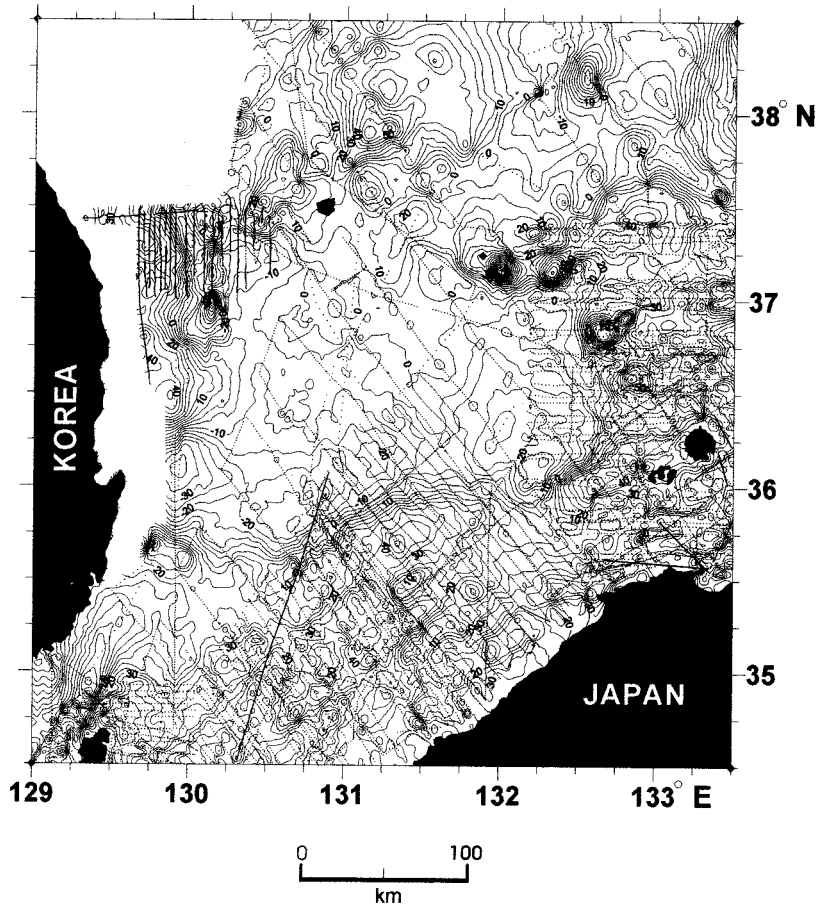


Fig. 8. Shipborne FA gravity anomalies after crossover adjustment.

이하의 해상도지만 장주기의 균질한 분포를 갖는 위성중력에 선상중력을 안정적으로 결합할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. Fig 8은 교차점 보정 후의 선상중력분포이다. 선상중력분포는 보정 전 (Fig. 2)과 비교할 때 측선을 따라 혹은 교차점에서 자료간 오차가 현저히 줄고 전반적으로 안정적이고 연속적인 분포를 나타내고 있다. 교차점 보정 후의 선상중력은 위성중력의 수준에서 결합되었다(Fig. 9). 결합된 후리에어이상 분포에는 위성중력의 광역적 성분과 선상중력의 상세한 성분이 잘 조화되고 있으며 두 자료는 연구지역인 울릉분지 전체를 조밀하게 채우고 있다. 위성중력과 선상중력의 결합은 선상중력자료의 불균질성을 해소

하고 단주기 성분을 포함한 고해상도의 중력 분포를 제공할 뿐 아니라 선상자료가 결여된 지역과 광역적으로 연결시키 때문에 해저지질구조 해석에 크게 기여할 수 있다.

3.2. 중력이상도의 지질학적 해석

후리에어이상은 광역적인 경향에 있어서 해저면 지형적인 변화와 유사하다(Figs. 9, 10). 즉, 후리에어이상은 수심이 약 2300 m 까지 깊어지는 울릉분지 내부 쪽으로 낮고 주변의 고해저지형을 따라 높게 나타난다. 후리에어이상 분포에서 대부분의 대륙붕 지역은 양수값이 특징적으로 나타난다. 울릉도와 독도 같은 화산섬이나 울릉도-독도간 해저

**Free-air anomaly
(satellite + shipborne) after x-over**

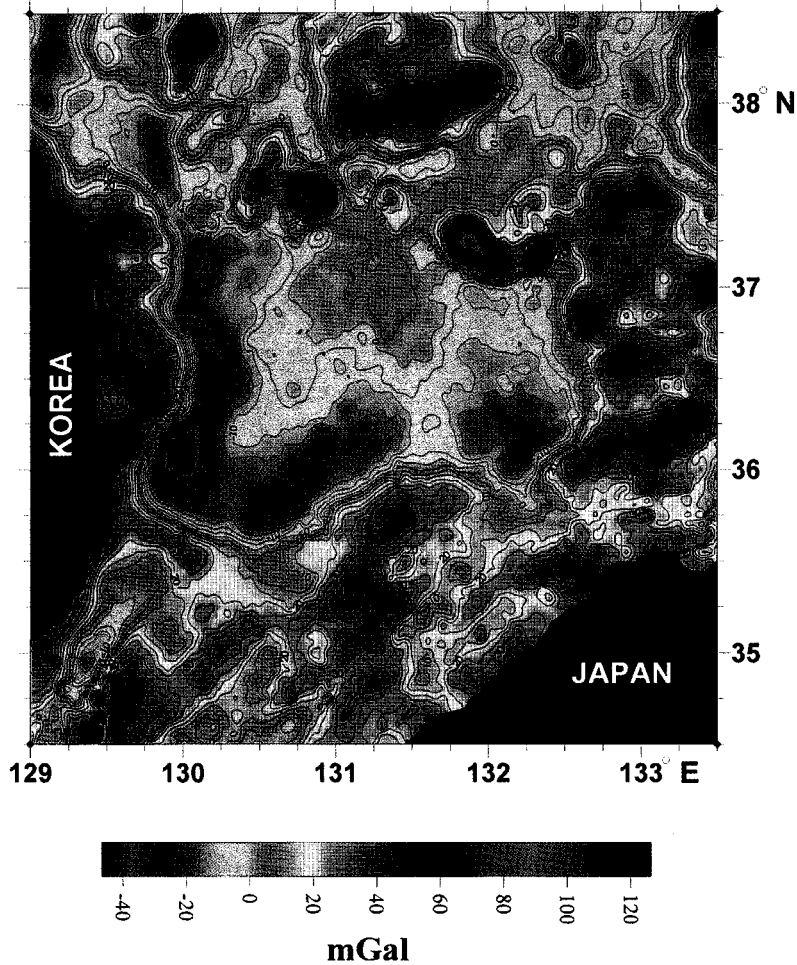


Fig. 9. Combined shipborne and satellite altimeter-implied FA gravity anomalies after crossover adjustment.

의 울릉해산 및 울릉도 북서쪽에 위치한 해저산에서도 뚜렷한 고 이상대를 나타낸다. 이와 같은 국지적인 고 이상대들은 독도의 서쪽인 오끼뱅크에서도 발견된다. 그러나 오끼뱅크에서의 후리에어 이상은 해저지형 변화와 상관성이 적다. 해저지형적으로 오끼뱅크는 뚜렷한 굴곡이 나타나지 않지만 후리에어 이상은 최고 약 100 mGal까지 높은 값을 보이며 국지적으로 불규칙하게 변한다. 이러

한 변화는 퇴적층으로 피복된 해저면 하부의 화성 관입암체나 돌출 기반암의 존재와 관련이 있다. 후리에어 이상 분포에서는 울릉도와 독도를 포함하여 해저화산이나 관입암체 등이 북서단의 한국대 지로부터 오끼제도까지 북서-남동 방향으로 배열되어 있는 것을 보여준다. 울릉도 북동부에 위치한 울릉대지에서 북동-남서 방향의 선형분포를 갖는 후리에어 이상은 서쪽 경계부에서 북북서-남남

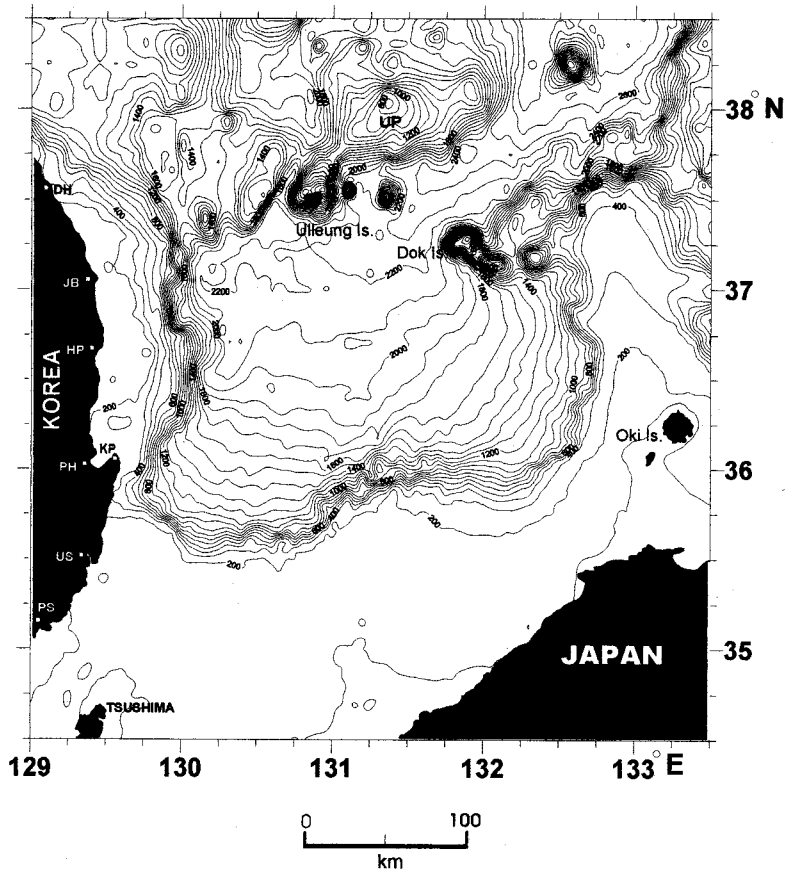


Fig. 10. Bathymetry of the Ulleung Basin. The contour interval is 100 m. DH=Donghae, JB=Jukbyeon, HP=Hupo, PH=Pohang, KP=Kuryong-po, US=Ullsan, PS=Pusan, and UP=Ulleung Plateau.

동 방향의 급구배의 선형분포에 의해 절단된다. 이 급구배의 후리 에어 이상은 울릉대지의 서부 경계를 이루는 단층구조에 기인한다. 한편, 단층애의 서쪽에서 남서-북동 방향으로 연장되어 오는 선상 구조는 이 단층애 부근에서 끊어진다. 그러나 단층애의 양측은 지형적으로 대비되지 않는다. 울릉대지가 서쪽으로 뚜렷한 단층구조를 지시하면서도 그 맞은 편 지괴와 지형적인 형태에 있어서 대비되지 않는 것은 울릉대지가 단층을 경계로 분리되어 이동되어 왔을 가능성을 시사하는 것이다. 울릉도 북부 한국대지에서 고 이상대는 남서-북동 방향의 선상 형태로 배열되어 나타나는 데 이는 동

해가 열개되는 동안 균열된 지각 사이를 따라 일어난 화산활동의 결과로 형성된 해산이나 관입암체에 기인한 것으로 해석된다.

한반도 동해연변부는 제3기 퇴적분지의 두꺼운 퇴적층으로 인한 낮은 이상치가 특징적으로 나타나고 있다. 특히, 포항 북쪽 연안, 후포-울진 연안과 삼척 북부연안에서 제3기 퇴적분지는 저 이상대로 인하여 그 위치와 발달범위가 잘 나타나고 있다. 가장 북쪽에 있는 묵호분지는 북북서-남남동 방향으로 발달하고 있으며, 두 개의 소분지로 구분되어 나타난다. 후포분지는 동측의 단층을 경계로 하여 남북으로 발달하다가 북위 37° 부근에서

동서방향으로 휘어진다. 한편, 포항-영덕분지는 두 분지에 비해 후리에어이상이 훨씬 미약하게 나타나는 데, 이것은 포항-영덕분지가 북쪽 2개의 제3기 분지에 비하여 상대적으로 얇은 퇴적층후를 갖고 있기 때문으로 해석된다. 그러나 포항과 그 북쪽으로 나타나는 소규모 저 이상대는 퇴적층후가 국부적으로 증가하고 있음을 지시한다. 탄성과 탐사결과 묵호분지는 퇴적층후가 1400 m 이상으로 동해안 제3기 분지중 가장 두꺼운 퇴적층후를 나타내며 후포분지가 850 m정도인 반면에 포항-영덕분지는 700 m를 넘지 않는다(Huntec, 1967). 포항-영덕 분지는 우향주향이동단층인 양산단층과 후포단층 사이에 발달하고 있으며, 이들 주향이동단층들은 단층간에 장력이 작용함으로써 저지대를 형성하였다(Yoon · Chough, 1993).

울릉해곡에는 백악기 경상계의 퇴적 복합체로 이루어진 기반암 위에 신기 지층이 두껍게 쌓여 있으며 두께는 최대 8 km 이상으로 추정된다(Park, 1990). 한편 대한해곡에서는 -5 내지 -30 mGal의 음 이상대가 해곡의 발달방향에 따라 남서-북동 방향으로 좁고 길게 나타나고 있으며 쓰시마섬 북서연안을 따라 급구배를 보인다. 이 저 이상대는 어느 정도 대한해곡을 따라 발달하고 있는 수심 180-200 m의 깊은 해저골에 기인하지만 동측의 단층을 경계로 퇴적분지내에 형성된 10 km 이상의 두꺼운 퇴적층의 영향을 반영한다. 울릉분지 남동단에 나타나는 북서-남동 방향의 양 이상대는 울릉분지와 울릉해곡 사이의 구조적 융기대에 의한 영향이며 이 융기대는 그 북동쪽과 남서쪽에 형성된 퇴적분지를 분리하고 있다. 분지의 남동 경계부에서 분지 경계를 따라 북쪽으로 연장되는 급구배의 이상대는 단애의 발달에 기인한다.

후리에어이상 분포에서 급구배의 변화는 울릉분지의 서측 및 동측 주변부를 따라 특징적으로 나타나고 있다. 이와 같이 대륙에서 해양쪽을 가로지르면서 특징적으로 나타나는 급구배의 중력변화는 Dehlinger (1978)에 의해 제안된 대로 비활성 대륙 주변부에서 알려진 전형적인 지각 가장자리 효과이다. 대륙사면의 최하부 지역은 분지중앙보다 비교적 더 가파르고 지형적으로도 알개 형성되어 있으나 오히려 낮은 음의 후리에어이상이 나타난다. 이와 같은 저이상대는 지역적으로 함몰되어 있는 기반암 상부의 두꺼운 퇴적층과 대륙 주변부에서 특징적인 가장자리 효과에서 기인한 것으로

자료된다. 후리에어이상은 수심이 약 2200 m까지 깊어지는 울릉분지 중심의 약간 북동부에서 최고 17 mGal 정도로서 수심이 얇은 분지내 주변지역보다 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 Kim *et al.* (1994), 박찬홍 외(1996), 서만철 외(1998) 및 서만철 · 이원국(1998)이 제안한대로 지각두께가 얇아지고, 모호면이 현격하게 높아지는 것과 관련이 있다.

4. 결 론

안정적인 장주기의 위성중력을 이용하여 각각의 측선간 혹은 조사단위간 오차를 갖는 선상중력을 보정하여 결합함으로써 중력분포의 해상도를 크게 향상시킬 수 있었다. 그 결과는 장주기 요소가 강한 위성중력을 이용하여 선상중력의 단주기 성분을 훼손하지 않고 안정적인 위성중력 기준 분포면으로 보정하고 결합하므로 두 자료 세트가 갖는 특성을 보완적으로 활용할 수 있다는 것을 보여준다. 위성중력과 선상중력의 결합은 선상중력 자료내 오차를 줄이고, 해상도 높은 선상중력을 안정된 인공위성중력과 접합하여 선상자료가 없는 지역까지 광역적이고 연속적으로 중력분포를 연결시킬 수 있으므로 해저지형 및 지질분포의 해석에서 보다 상세하고 신뢰있는 정보를 제공할 수 있다. 후리에어이상 분포는 수심이 낮은 해저 고지대에서 높고 수심이 깊은 분지나 해저 수로 등에서 낮게 나타나는 등 전반적으로 해저지형의 분포 경향에 잘 부합되고 있으나, 대륙사면을 이루고 있는 분지의 서쪽 및 동측 주변부를 따라서는 지역적으로 함몰된 퇴적기반과 두꺼운 퇴적층 및 대륙 주변부에서 특징적인 가장자리 효과로 인한 저이상대가 발달하고 있다. 울릉도 북동부에 위치한 한국대지 및 울릉대지에서 북동-남서 방향의 선형분포를 갖는 후리에어이상은 동해가 열개되는 동안 균열된 지각 사이를 따라 일어난 화산활동의 결과로 형성된 해산이나 관입암체의 배열에 기인한 것으로 해석된다. 울릉대지 서쪽 경계부에서 급구배를 보이는 북북서-남남동 방향의 직선적인 중력분포는 울릉대지 서부 경계를 이루는 단층과 관련이 있다. 분지의 중앙 북동부에서는 수심이 깊어지는데 비해 중력치는 오히려 높아지는 경향을 나타내고 있는 것은 맨틀이 주변부에 비해서 상대적으로 천부에 존재하고 있는 것이 가장 큰 요인이며, 해저지각의 두께가 얇은 대신 지각의 밀도가 주변

대륙보다는 높은 데에도 기인한다.

사 사

본 연구는 과학기술처 연구비(PSPN 00213-625-5, BSPK 00020-951-5, BSPE 97605-00-1037-5)에 의하여 수행되었다. 동해지역 해상조사시 수고하여 주신 해양지구물리연구그룹 연구원 및 은누리호 승조원들께 고마움을 전한다. 프로그램을 제공하고 토의에 임해주신 미국 오하이오 주립대학의 D.R. Roman 박사께도 감사를 드린다. 특히, 논문을 검토하시고 값진 의견을 주신 두 심사자들에게 심심한 감사를 드린다.

참고문헌

박찬홍, 김한준, 양철수, 석봉출, N. Isezaki, 1996, 중력 및 해저면지진계탐사 자료에 의한 울릉분지의 지각구조 연구, 지질학회지, 32, 276-290.
 서만철, 이광훈, 손호웅, 1998, 동해울릉분지의 지구조 및 성인에 관한 지구물리학적 연구, 바다, 3, 34-44.
 서만철, 이미경, 석봉출, 1993, 해상중력을 이용한 울릉분지의 지질구조연구, 지질학회지, 29, 119-127.
 서만철, 이원국, 1998, 동해울릉분지의 Moho면 깊이 분포, 지구과학회지, 19, 302-309.
 Campbell, S., 1995, Southeast Asia Gravity Project, Technical Rept., GETECH (Geophys. Expl. Tech.), Department of Earth Sciences, University of Leeds.
 Dehlinger, P., 1978, Marine Gravity, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
 Huntex, Ltd., 1967, Report on the offshore geophysical survey in the Pohang area, Republic of Korea, CCOP Technical Bulletin, 1, 1-12.
 Ishihara, T., 1984, CCOP proceedings of the 19th session Tokyo, Japan 29 Nov.-10 Dec., Technical Report, Bangkok Thailand.
 Joshima, M., 1978, Gravity measurements, in Geological investigations in the northern margin of the Okinawa Trough and the western margin of the Japan Sea, edited by E. Honza, Geological Survey of Japan Cruise Report, 10.
 Kim, H.J., C.H. Park, J.K. Hong, and H.T., Jou, 1994,

A seismic experiment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwestern Japan Sea (East Sea of Korea), Geophysical Research Letters, 21, 1975-1978.
 Knudsen, P., 1987, Adjustment of satellite altimeter data from cross-over differences using covariance relations for the time varying components represented by Gaussian functions, Proc. IAG Symposia TOME II, 617-628.
 Ludwig, M.S., S. Murauchi and R.E. Houtz, 1975, Sediments and structure of the Japan Sea, Geological Society American Bulletin, 86, 651-664.
 Oshida, A., 1992, Basement topography and magnetic anomalies in the Japan Sea. Ph.D. thesis, University of Tokyo.
 Park, K.S., 1990, The seismic stratigraphy, structure and hydrocarbon potential of the Korea Strait. Ph.D. thesis, Imperial College.
 Prince, R.A., and D.W. Forsyth, 1984, A simple objective method for minimizing crossover errors in marine gravity data, Geophysics, 49, 1070-1083.
 Sandwell, D.T. and W.H.F. Smith, 1997, Marine Gravity Anomalies From Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry, J. Geophys. Res., 102, B5, 10,039-10,054.
 Smith, W.H.F. and D.T. Sandwell, 1995, Marine gravity field from declassified Geosat and ERS-1 altimetry, EOS Transection, AGU, 76, G42A-2.
 Stroyev, P.A., 1971, Gravity anomalies in the Sea of Japan, Doklady of the Academy of Sciences of the U.S.S.R. Earth Sciences Sections, 198, 18-21.
 Wessel, P. and A.B., Watts, 1988, On the accuracy of marine gravity measurements, Journal of Geophysical Research, 93, 393-413.
 Wessel, P. and W.H. Smith, 1995, The Generic Mapping Tools (GMT) version 3 Technical Reference & Cookbook, SOEST/NOAA.
 Wessel, P., 1989, Xover: A cross-over error detector for track data, Computers and Geosciences, 15, 333-346.
 Yoon, S.H. and S.K. Chough, 1993, Evolution of Neogene sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea, The Korean Journal of Petroleum Geology, 1, 15-27.

1998년 10월 28일 원고접수

1999년 2월 26일 원고채택