

鬱陵盆地 남단해역의 地磁場 特性 및 磁氣異常 解析

박찬홍 · 석봉출 · 김창렬

한국해양연구소

Geomagnetic Field Properties and Magnetic Interpretation in the Southern Part of the Ulleung Basin

CHAN-HONG PARK, BONG-CHOO SOK AND CHANG-RYOL KIM

Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P. O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

울릉분지 남단해역의 해상전자력치와 인근 육상고정관측점에서 장기관측한 지자기자료로부터 지자장의 거동을 분석하고 자기이상분포를 해석하였다.

육상고정관측점에서 14일에 걸쳐 지자장을 연속측정하여 연구지역 지자장의 변화양상을 분석하였으며, 해상에서 측정된 전자력치의 일변화보정에 이용하였다. 연구지역의 자기이상분포는 해저지형의 변화에 의한 영향을 거의 반영하지 않는데, 그 원인은 주로 퇴적층하부의 기반암분포에 있다. 자기이상분포로 볼 때 연구지역은 그 특성을 달리하는 2구역으로 구분된다; 연안 대륙붕을 따라서는 최대 약 600 nT의 파장이 짧고 진폭이 큰 자기이상분포가 나타나며, 그 동쪽으로는 해저지형의 큰 변화에도 불구하고 자기이상치가 단순히 감소하면서 완만하고 진폭이 작은 저자기이상대가 분포한다. 연안의 고이상대는 자기이상분포 형태 및 인근 육상지질분포 등으로 미루어 볼 때 화성관입체나 분출암 등의 존재에 의한 것으로 보이며, 외해쪽의 저자기이상분포의 주요 원인은 자력원인 기반암의 심도가 깊은 데 있다. 외해지역의 저자기이상대 내에서 선정된 3개의 자기이상단면으로부터 스펙트럼 분석방법을 적용하여 구한 기반암까지의 심도는 외해로부터 차례로 7.0 km, 5.0 km, 2.6 km이며, 이는 기존의 탄성파 탐사 및 시추결과에 잘 대비된다. 울릉퇴적분지의 특징적인 저이상대 및 자성기반의 심도분포가 분지의 생성과정 및 형태와 함께 Yamato 분지와 Japan 분지 등 동해내의 다른 분지들과 유사한 것으로 보아, 연구지역인 울릉분지 남단에서의 자성기반도 Yamato 분지와 Japan 분지에서 정의된바 있고, 주로 화산용회암과 현무암이 혼재되어 있으면서 자성이 낮은 것으로 알려져 있는 L-2층에 대비할 수 있다.

Marine total magnetic intensity over the southern part of the Ulleung Basin and geomagnetic data measured at a land base station are analyzed.

Fourteen days observation of geomagnetic field at a fixed on-land base station showed how the geomagnetic field around the study area behaves. Geomagnetic data at the base station can also be used as correction data for a diurnal variation. Magnetic anomalies in the study area do not reflect an effect of seabottom topography but mainly subsurface basement. The southern part of the Ulleung Basin can be divided into two zones according to a different anomaly pattern; along the coastal shelves the isolated anomalies with a short wave and a strong amplitude are dominant, and toward the open sea the anomalies become much more subdued. The high anomaly zone adjoined to land is interpreted to be caused by granitic intrusives or volcanic rocks, and the weak anomaly zone to the outer sea to be arisen from an existence of deep basement. A spectrum analysis is applied to estimate magnetic basement depths from three anomaly profiles with a long period and a weak amplitude toward the outer sea. The calculated depths are 7.0 km, 5.0 km, and 2.6 km respectively from outer profile. The basement might be correlated with the mixed layer of tuff, basalt, and sediment, which had been defined as L-2 layer in the Yamato Basin and the Japan Basin.

서 론

지금까지 국내에서 동해에 대한 지구물리연구는 주로 연안의 대륙붕을 위주로 이루어져 왔으며(Bossum *et al.*, 1970 ; 박 등, 1981 ; Huntet Ltd., 1968), 동해의 심부 지구조적 해석을 위한 지구물리자료는 매우 불충분한 형편이다. 그렇기 때문에 동해 심부 지구조 연구는 주로 동해의 일본측 해역을 중심으로 이루어져 왔으며, 특히 자기이상해석을 통하여서는 동해가 해저확장에 의해 생성되었을 가능성을 제시 해주었다(Isezaki, 1975 ; Isezaki and Uyeda, 1973 ; Kobayashi and Isezaki, 1976). Hilde and Wageman(1973)이 해저지형 및 퇴적물의 연구를 통해서 일본해분(Japan Basin)과 야마토해분(Yamato Basin) 각각의 중심에 해저확장축의 존재를 주장한 이래 Isezaki(1975)는 자기이상분포를 분석하여 대략 E-W 방향을 갖는 두 개의 해저확장축을 확인 하였다. 이어 Kobayashi and Isezaki(1976)는 일본해분내 자기이상분포의 대칭성을 분석한 결과로써 일본해분과 야마토해분내에 기존의 확장축방향과 다른 해저확장축을 발견하고 자기선구조를 시대표에 대비하려 시도하였다. 이 외에도 동해에서는 1989년에 미국 Texas A & M 대학의 주도하에 다국적 연구팀이 참여한 심해지굴착사업(ODP, Ocean Drilling Project)이 실시된 바 있으며 여기서는 지구물리조사와 함께 6개 지점에서 심부시추 등을 포함하는 많은 조사가 이루어져 지질 및 지구물리학적 연구를 위한 귀중한 자료가 확보되었다.

연구지역인 울릉분지 남단을 포함하는 동해의 여러 분지들은 퇴적층의 두께가 수 km에서 10여 km에 이를 정도로 두터워 실제로 퇴적기반구조나 심도와 약에는 강력한 탄성파원을 갖춘 탄성과 탐사방법의 적용이 필요하나 자기이상치의 spectrum 분석을 통하여 비교적 간단한 방법으로 기반암의 심도를 예측할 수 있다. Spector and Grant(1970)는 이론적 모형으로부터 얻은 spectra와 실측 격자자료로부터 얻은 spectra를 비교함으로써 자성기반 심도를 계산하는 방법을 개발한 바 있다. 한편, Treitel *et al.* (1971)은 자기이상치의 power spectrum에 자연로그를 취하여 주파수에 대한 함수로 표시하고 그 기울기로서 자기기반암의 심도를 구하였다. Bose and Sengupta(1984)는 이 방법을 적절히 활용하여

해상자기이상단면으로부터 기반암심도 분포를 계산한 바 있다. 이 방법은 특정깊이에 존재하는 선형 자력원의 하부가 무한히 연장되어 있고 그 상부에는 비자성 물질이 존재하는 단순한 2층 구조이고, 자력원의 자기효과는 자기복각과 편각에 무관하다고 가정하여 적용한다. 그러므로 이 방법은 매질의 자성이 뚜렷이 차이나는 퇴적분지 등 두꺼운 퇴적층 지역의 기반암 심도를 간단히 계산하는데 특히 경제적이고 효과적이다.

본 연구에서는 동해 울릉해분 남단해역의 해상자력탐사와 아울러 육상 지자기조사를 병행함으로써 이 지역의 지역적인 지자장의 변화특성을 분석하고, 이를 보다 정확한 자기이상치의 산출에 이용하는 방법을 제시하며 자기이상분포 특성의 분석 고찰을 통해서 해저지형분포와 비교하고 지질구조를 해석하고자 한다. 또한 자기이상치에 spectrum 분석방법을 적용하여 두꺼운 퇴적기반(자성기반)까지의 심도를 구함으로써 기존의 탄성과 굴절법에 의해 구분되어진 지층과 대비하여 자성기반을 논의할 것이다.

자료획득 및 분석

현장자료획득

해상자력탐사는 한반도 동남해역으로 남쪽의 야마토 북동해역으로부터 북쪽의 구룡반도까지와 동쪽으로는 132° E까지 범위에서 남북간 축선간격을 약 6'(약 11.1 km)로 하여 동서방향의 축선으로 실시하였다(Fig. 1). 또 구룡포에서 울산 동쪽으로 130° 10' E에 이르는 지점까지는 주축선을 횡단하면서 측정하였다. 자력계는 1.0 nT의 측정오차를 갖는 proton형 G-801 해상자력계(Geometrics 사)를 사용하였으며 선위(ship's position)는 Loran-C를 사용하여 매 10분 간격으로 측정 기록하였다. 자력계의 감지기(magnetometer sensor)는 조사선 후미 약 80 m에 두고 예인하면서 조사선의 선속은 7 knots로 유지하였다.

한편 연구지역 지자장의 변화추이를 분석하고 해상자기자료로부터 지자기 일변화량을 보정하기 위하여 해상자력탐사기간 내내 인근 육상지역에 지자기 고정관측소를 설치 운영하였다(Fig. 1). 육상 지자기고정관측점(경북 기장읍 연화리)은 되도록 조

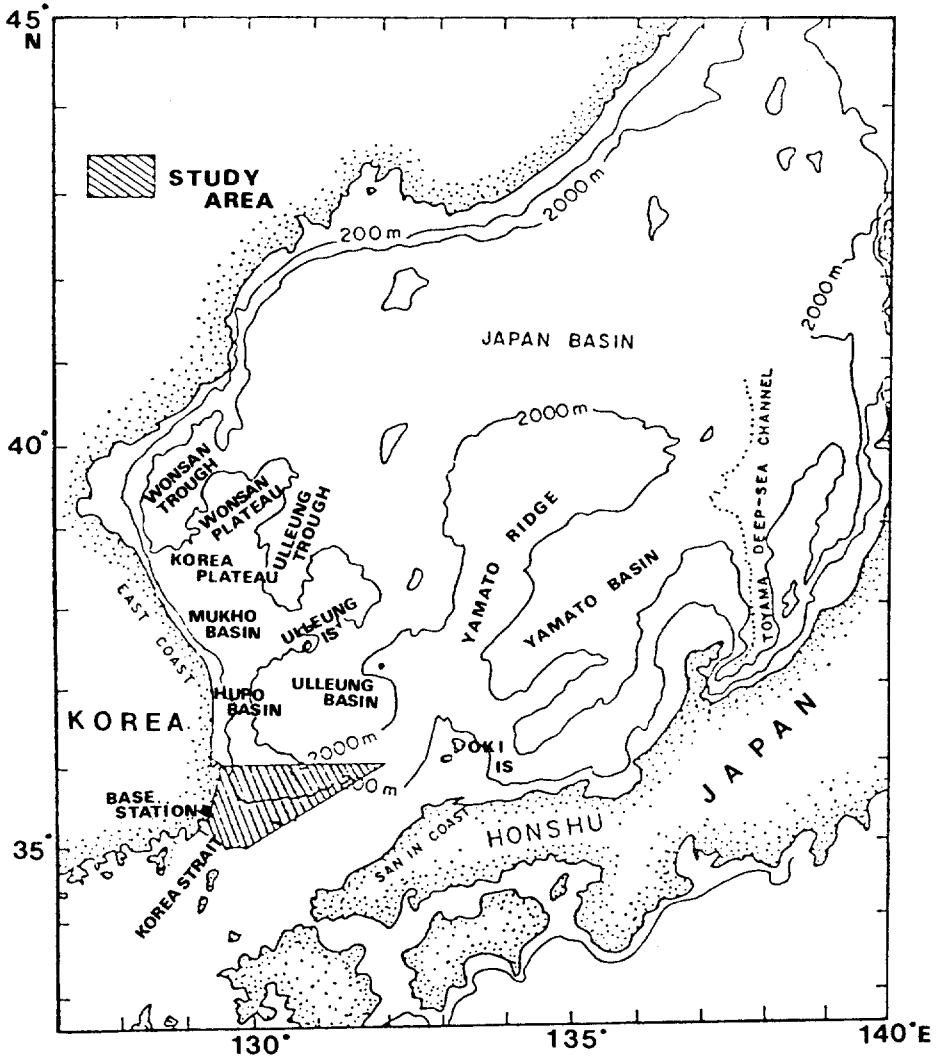


Fig. 1. Topographical features of the East Sea (Japan Sea) and location.

사해역의 지자장변화를 대표적으로 나타낼 수 있도록 조사해역에 가까운 지점에 설치하였으며 자력계는 proton형 육상자력계(Model G-866, Geometrics)를 이용하여 측정오차 0.1 nT인 신호를 10초 간격으로 받아 1분 간격으로 내장된 아날로그 기록계와 외부로 연결된 PC에 각각 아날로그와 디지털로 기록하였다.

자기이상치 산출

지구의 자기장은 쌍극자가 지구의 중심에 있다는 가정하에서 계산된 것과 달리 실제로 어느 정도

차이가 있다. 그 차이 부분을 비쌍극자장이라고 하며 그것은 지구외핵에서 일어나는 용융된 금속성 광물들의 유동에 의한 것으로 알려져 있다. 국제표준지자장(IGRF, International Geomagnetic Reference Field)은 이와 같이 지구의 외핵에서 발생하는 지구내부의 주요 지자장에 대한 수학적 표현이다(민등, 1987). 그러므로 지표면의 특정지점에서 측정된 전자력치로부터 국제표준지자장 값을 제거하면 지각내에 분포하는 지질암상이나 구조변화에 의한 자력치로서 간주할 수 있다. 물론 지구핵에 의한 지자장 생성역학이 완전히 밝혀져 있지 않기 때문에

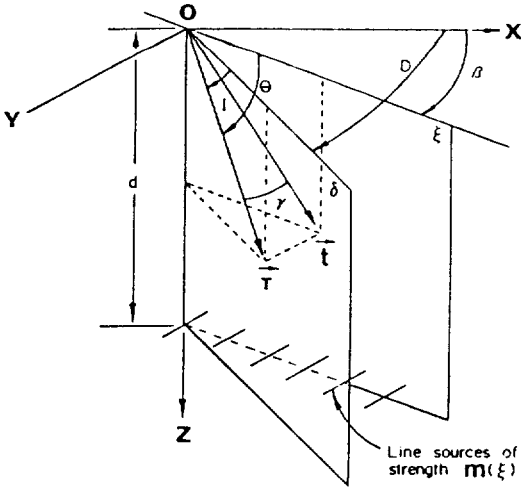


Fig. 2. Distribution of a buried magnetic line source.

상기의 해석도 정확할 수는 없으나 가정된 모델은 지구상 도처에서 측정된 실측과 인공위성 측정자료에 의해서 일정기간에 한번씩 개정하기 때문에 그 오차가 매우 적어진다. 본 연구에서는 IGRF 1985 개정계수를 이용하여 전자력치를 구하고 일변화 보정된 해상전자력치에서 이를 제거함으로써 잔여자기이상치를 추출하였다.

Spectrum 분석에 의한 기반심도 계산

자기이상단면의 spectrum을 분석하여 기반암까지의 심도를 구하는 방법은 간편하고 효율적이어서 대략적인 기반암의 심도 분포를 구하는데 많이 이용되어 왔다(Gudmundsson, 1966; Spector and Grant, 1970; Treital *et al.* 1971; Negi *et al.*, 1983; Bose and Sengupta, 1984; 박 등, 1986).

Spectrum 분석에 의한 기반암심도 계산에는 특정 깊이에 존재하는 자력원의 하부는 무한히 연장되어 있고 그 상부에는 비자성 물질이 분포한다는 단순한 2중 구조이고 자력원에 의한 자력효과가 자기편각과 복각에 무관하다는 기본적 가정을 두고 이론적인 전개가 이루어 졌다. 실제로 이런 가정은 비자성체로 보는 퇴적암층 자체와 그들 사이에 있는 천부의 자기이상체에 의한 간섭이 있을 경우 성립되지 않으나, 가정에 가깝게 부합되는 대상지역이 선정될 경우 매우 좋은 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 자력기반암 심도 계산은 다음과 같이

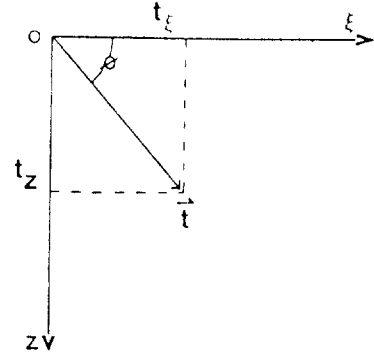


Fig. 3. Component *t* of the total magnetic intensity field vector *T* in the (*z*-*ξ*) plane.

전개되는 Treital *et al.*(1971)의 spectrum 분석방법을 적용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 Z축은 수직 하향이고 X축은 도북을 향하도록 직교좌표계를 설정하고 X-Y 평면상에 있는 축선의 직하부로 깊이 *d*에 평면적으로 분포하는 선형의 자력원이 분포한다 하자. 축선 *oξ*는 X축과 β각을 이루며 자력원의 자기강도는 임의적으로 변화될 수 있으나 여기서는 공간 좌표인 ξ의 단위 길이당 함수인 *m(ξ)*로 생각한다. \vec{T} 는 전자력 강도 벡터이고 *I*와 *D*는 자기 복각과 편각이다. 여기서 선형 자력원의 미소 성분인 *m(ξ)dξ*는 Z-ξ 평면에 직각 방향으로 무한히 연장된다 가정한다. Z-ξ 평면에 \vec{T} 의 투사성분인 \vec{t} 을 표시하면 Fig. 3과 같다. 먼저 전자력 강도 벡터인 \vec{T} 를 Z-ξ 평면상에 투사하여 \vec{t} 를 구한다음 이것에 대한 power spectrum $v_t(\kappa)$ 을 구하면

$$v_t(\kappa) = \Gamma(\kappa)\Gamma^*(\kappa) = (2\pi)^2 e^{-|\kappa| \cdot d} M(\kappa)M^*(\kappa) \tag{1}$$

과 같다. 일반적으로 선형자력원의 자력강도에 대한 power spectrum은 알기 어려우므로 $M(\kappa)M^*(\kappa)$ 를 상수 C^2 로 보면

$$v_t(\kappa) = (2\pi C)^2 e^{-2|\kappa| \cdot d} \tag{2}$$

이 된다. 그러나 실제로 \vec{t} 를 측정하는 것이 아니고 \vec{T} 를 측정하므로 식 (2)를 \vec{T} 에 관하여 전환하면

$$v_T(\kappa) = \left[\frac{2\pi C}{\cos \gamma} \right]^2 e^{-2|\kappa| \cdot d} \tag{3}$$

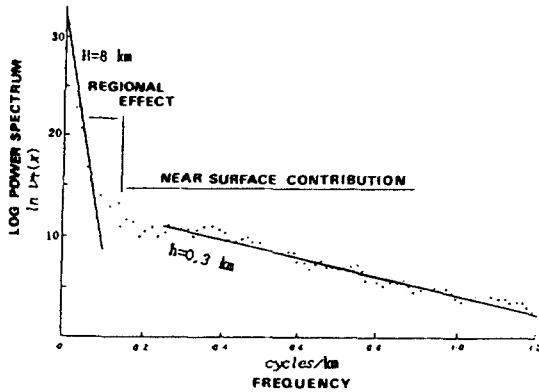


Fig. 4. Determination of the magnetic basement depth by log-power spectrum.

이되며, 이것이 $T(\xi)$ 의 power spectrum이다. Power spectrum인 식 (3)의 양변에 로그를 취하고 자력기반심도 d 와는 독립적인 자화강도의 power spectrum인 C^2 과 γ 를 상수항으로 놓으면,

$$\ln v_T(\kappa) = A - 2 \left| \kappa \right| d$$

로 쓸 수 있으며, 여기서 $A = 2 \ln \left[\frac{2\pi C}{\cos \gamma} \right] = \text{constant}$ 이다.

이와 같이 전자력치 power spectrum에 자연로그를 취하고 주파수에 대해 도시하면 Fig. 4에서 보는 바와 같이 일정한 구간에서 직선적인 경향으로 분포한다. 이 power spectrum은 저주파 구간에서 급격히 하락하며 하나 이상의 변곡점에서 완만한 경사를 갖는 spectrum군과 경계를 이룬다. 저주파군의 spectrum은 주로 심부 자력원에 기인한 것이며 고주파부분에 나타나는 불규칙하고 변화가 작은 spectrum은 천부에 존재하는 자력원의 분포 때문이다. 자력원이 기반암까지의 심도 d 는 Fig. 4에서 나타나는 이 주파수에 대한 power spectrum의 자연로그와의 직선식의 기울기로서 결정된다. 이 방법을 퇴적 분지 등과 같이 지질구조가 단순한 지역에 적용하면 빠르고 간편하게 자력기반심도가 계산될 수 있다. 반면에 가정에서와 같이 기반암의 상부를 비자성체로 보고 계산하기 때문에 실제의 경우 기반암 상부에 존재하는 국부적인 자력이상체들도 존재할 수 있으므로 계산된 심도에 어느정도 오차가 예상되나 Treitel *et al.*(1971)의 계산 결과들을 볼 때 실제 심도와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

동해 및 연구지역의 지형과 지질

동해는 서태평양 판구조운동의 영향으로 배호상(back-arc) 분지형태로 생성되어 진화된 것으로 해석되고 있다(Chough, 1983). 탄성과 반사법 및 굴절법에 의해 밝혀진 심부와 천부 지층구조 및 구조선의 분포에 따르면 동해(East Sea of Korea 또는 Sea of Japan)는 최소한 세 개의 해저지형 및 지질구조로 나눌 수 있다(Tamaki *et al.*, 1990). 즉 일본해분(Japan Basin), 울릉해분(Ulleung Basin)과 야마토해분(Yamato Basin) 등과 같은 분지지역, 야마토해령(Yamato Rise)과 같이 단층에 의해 형성된 해령지역 및 활성 역단층이 경계를 이루고 있는 북향의 해령과 대상으로 좁게 발달하고 있는 트러프지역이다(Fig. 1). 한편 동해의 서부지역인 한국대륙연변부에는 원산海台(Wonsan Plateau), 한국海台(Korea Plateau)와 원산트러프(Wonsan Trough), 울릉트러프(Ulleung Trough)과 같은 고저지대가 어우러져 있으며, 묵호해분, 후포해분 등의 크고 작은 분지들도 존재한다(박 등, 1981). 이와 같이 동해는 해분(basin), 해령(rise), 해대(plateau), 트러프(trough), 해산(sea mount) 등 다양한 해저지형 및 지질을 포함하며, 200 m 내외의 대륙붕지역에서부터 최고 약 3,700 m에 이르는 해분지역까지 수심의 변화도 크다.

야마토해령의 북부에 위치한 일본해분(Japan Basin)은 동해지역에서 가장 광범위하고, 깊은 수심지역을 분포하며 수심은 3.0-3.7 km, 탄성과 기반암까지의 심도는 수면하 4.2-5.0 km에 달한다(Hilde and Wageman, 1973 ; Ludwig *et al.*, 1975). 분지내에는 대소의 해저산들이 분포하고 있다. 야마토해령의 서쪽으로 한국대륙연변분지가 해안선을 따라 발달하고 있고 그 남단에는 울릉해분이 있다. 울릉해분은 북동-남서 방향을 축으로하는 타원형 모양을 가진 저면침강지역으로서 중앙 해저면은 2000 m 이상의 수심을 갖는다. 한편, 야마토해령의 동쪽에 있는 야마토해분은 일본해분에 이어 두번째로 크며 수심은 2.0-2.5 km이고 탄성과기반암의 심도는 해저면하 3.3-3.9 km로서 일본해보다 훨씬 얕다(Tamaki *et al.*, 1990). 특히 일본해분과 야마토해분의 중앙부에서는 곳곳에 분포하는 해저산들을 제외하면 탄성과기반암이 대체로 평탄하게 나타나는데 이는 보다 기복이

심한 기반암상부에 다시 화산용암(volcanic flows), 병반(sills) 및 협재 퇴적층들이 피복된 때문으로 해석되어진다(Ludwig *et al.*, 1975; Tokuyama *et al.*, 1987).

동해지역의 도처에는 화강암이나 화산암으로 되어있는 대륙성 기반암이 용기된 지역들을 이루고 있다(Tamaki *et al.*, 1990). 그 중에 야마토해령은 규모가 가장 크며 좁은 단층으로 형성된 두 개의 뱅크(bank)로 이루어져 있다(Fig. 1). 또 이와 같이 대륙성 기반암이 돌출되어 형성된 해령은 동해서부의 한반도대륙연변부 뿐만 아니라 북서부 및 남부 지역에도 크고 작은 해령이 분포하고 있다.

울릉해분과 한반도 동해안선에 이르는 해역에는 대륙붕과 대륙사면이 좁게 발달하고 있다. 대륙붕은 해안으로부터 16-25 km 사이에서 해안선과 거의 평행하게 발달하는 호르스트(horst)형의 해저뱅크(submarine bank)에 의해서 대륙사면과 분리된다(박 등, 1981).

결과 및 고찰

지자장의 시간적 변화 및 그 보정

육상고정관측소에서 1990년 6월 23일부터 7월 6일까지 약 14일간에 걸쳐 지자장을 연속측정한 결과 대체적으로 하루단위의 주기적인 변화가 뚜렷하며 일부기간을 제외하면 지자장은 전반적으로 안정된 것으로 나타났다(Fig. 5). 주로 야간 시간대인 15시에서 익일 6시까지 지자장변화가 미약하고 오전 6시부터 감소하기 시작해서 오전 11전후에 최저값을 나타내며 이 시간을 경계로 다시 상승하면서 오전과 오후가 대칭되는 형태로 변화한다. 그러나 6월에서 7월로 시간이 지나면서 지자장의 최저점은 약간씩 빨라지는 경향을 보인다. 지자장이 불안했던 기간은 6월 28일 12시부터 18시까지와 동월 29일 14시경부터 17시까지이며 이 때의 변화량은 28일 같은 시간대 평온기의 경우가 기준치 대비 5내지 10 nT 인데 비해서 최고 42 nT로 크게 변화하며 29일 동 시간대에서도 안정기 변화량인 2내지 4 nT를 크게 웃도는 23 nT의 변화를 나타낸다.

이와 같이 해상지자기측정시 지자장은 시간에 따라 규칙적으로 변화하는 것은 물론이고 때때로 큰 폭으로 불규칙하게 변하기도 한다. 지자장의 일변

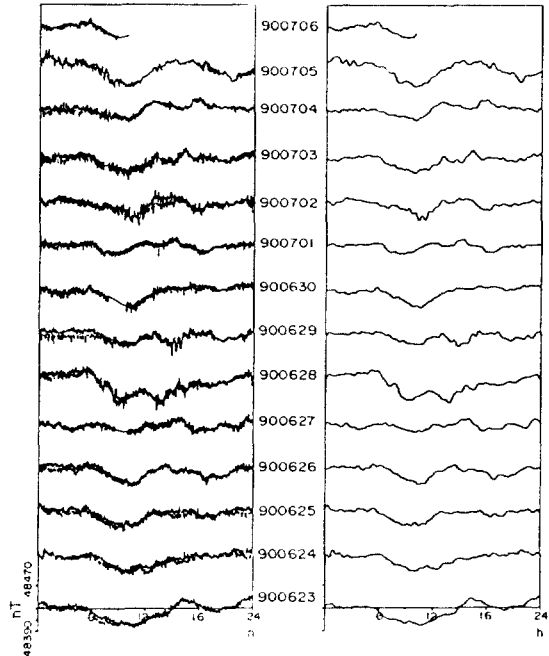


Fig. 5. Diurnal changes of geomagnetic field measured at the land base station (left) and the filtered ones (right).

화는 지구 내·외부 모두에 그 원인이 있지만 대부분은 지구외부적인 영향이 크며 특히 태양과 달의 영향이 지배적이다. 그러므로 일반적으로 자력탐사에서 얻고자 하는 지구내부기원의 자력치만을 분리하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 이와 같은 외부적 원인의 지자장을 제거해야 한다. 되도록 정확한 일변화 보정치를 산출하는데 있어서 문제점은 그 기준치의 계산에 있으나 기준치 계산은 많은 논란의 여지가 있어 왔다. 처음에 Chapman(1919)은 하루 24시간 전체의 지자장치를 평균한 값을 보정치로 활용하였으나 그 후는 실제로 지자장이 대부분 야간에 거의 변화가 없으므로 가장 안정된 지자장으로 간주하고 야간시간대의 평균치를 이용하는 것이 보다 신뢰성이 있다는 의견이 지배적이었다(Matsushita and Campbell, 1967). 그러나 Price and Stone(1964)는 위와 같은 가정은 단지 외부적원인(external source)에만 적용되고 밤에도 변화의 가능성이 있는 내부적원인(internal source)은 고려되지 못하기 때문에 그것만으로는 완전한 기준치가 되지 못한다고 제안하였다.

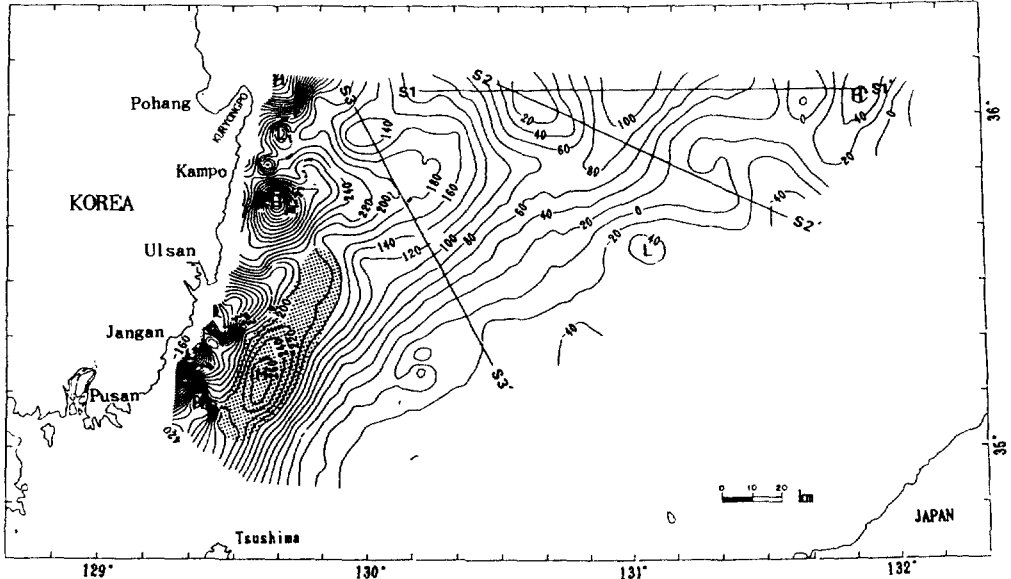


Fig. 6. Residual anomaly map. Reference field is IGRF 1985. Contour interval is 20 nT.

본 연구에서는 내부적원인이 최소이면서 주로 외 부적원인이 기여하는 부분을 추출하기 위해서 전체 측정일 중에서 야간시간대에 지자기 변화가 거의 없는 안정된 날의 15시부터 익일 6시까지의 지자 장값을 평균하여 기준치로 활용하였다. 평균치산출 에 포함된 날은 6월 23일부터 6월 26일까지와 6월 30일 및 7월 5일까지 였으며, 여기서 구한 평균치는 약 48438 nT이다. 현장측정치에는 실제 지자장 성 분이 아니면서 주기가 수초내외이면서 수 nT에서 10 nT이상되는 것까지 포함하는 기계적 잡음 내지 주변의 여타 잡음이 혼재되어 있으므로 이들을 제 거한 후에 보정치를 산출해야 한다. 이러한 잡음제 거를 위해서 고주파 차단 여과법(high cut filtering) 을 적용한 후 일변화기준치를 뺌으로서 해상자력치 의 보정치를 얻었다. 일변화보정은 해상자력자료에 서 최고 25 nT 감해지는 보정이 있으나, 지자기활 동이 정상일 때 대체적으로 야간에는 ± 5 nT, 주간 에는 최고 15 nT가 더해지는 보정이 보통이다.

자기이상분포

Fig. 6은 자기이상분포를 나타낸다. 자기이상분포 에 따르면 해안에서 약 30 km까지의 대륙붕 해역에 나타나는 단파장의 진폭이 큰 자기이상대와 그 동

쪽으로 단순 감소하면서 파장이 길고 진폭이 작은 저자기이상대로 구분된다.

해저지형과 자기이상 : Fig. 7에서와 같이 대륙붕 에서 울릉분지로 가면서 수심차가 1500 m 이상 이를 정도로 해저지형이 크게 변화함에도 불구하고 자기 이상은 지형변화와 거의 무관하게 변화한다. 즉 지 역적으로 수심 1500 m 이하인 울릉분지 중앙남단 에서 깊은 수심으로 인한 약한 자기이상대가 약간 분지의 지형적인 영향을 나타낼 뿐, 그 외 지역은 해저지형변화와 관계없이 변화한다. 수심 150 m 이 하의 주로 대륙붕지역인 해안에서 30-40 km까지의 지역에서는 자기이상의 변화가 심하게 나타나지만 그 외해쪽 남동부로 갈수록 단순하게 감소한다. 보다 구체적으로 지형변화와 자기이상분포를 비교하기 위해서 연구지역 북부에서 남부까지 대표적인 3축 선에 대해서 자기이상단면과 해저지형단면을 동시에 도시하였다(Figs. 7, 8).

3축선 모두 해저지형이 비교적 평탄한 연안 대 륙붕지역에서 자기이상치의 진폭이 크고 변화가 많 은 분포를 나타낸다. 특히 P1-P1'의 처음 약 10 km 전후까지 나타나는 500 nT 이상의 고이상대는 뚜 렷한 독립이상체에 의한 자기이상분포 특성을 보이 며, 10 km에서 40 km 사이의 약 200 nT의 고이상

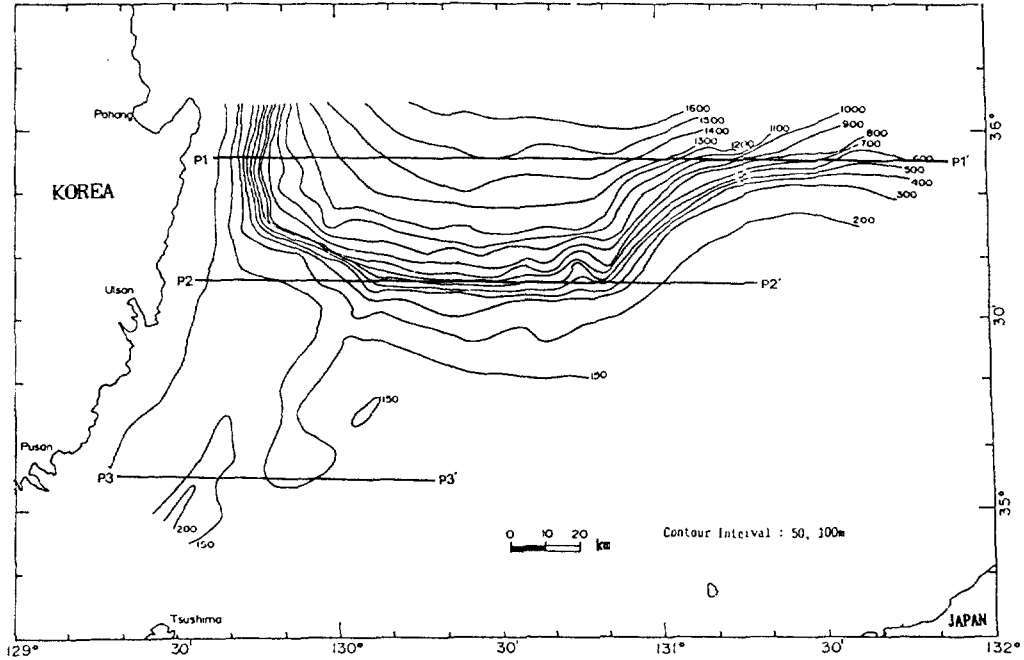


Fig. 7. Bathymetry of the survey area.

대는 20-30 km 폭으로 남서-북동으로 상당히 연장된 대상분포를 나타낸다. 한편, 울릉분지의 남단을 지나는 축선 P2-P2'와 P1-P1'의 자기이상과 해저지형 비교에서도 해저지형의 고저는 자기이상에 크게 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 두 축선의 해저지형은 중앙에서 가장 깊고 가장자리로 갈수록 대칭적으로 알아지는 전형적인 분지구조를 나타내며 천부와 심부 수심차가 남쪽 축선으로부터 각각 약 900 m, 1400 m에 이르는 데도 불구하고 그런 지형적인 변화에 무관하게 자기이상치는 동측으로 단순하게 감소하는 경향을 보인다. 이와 같이 자기이상분포가 해저지형변화를 거의 반영하지 않는 것은 해저지형의 형태를 이루는 것이 주로 퇴적층이고 자력원으로 예상되는 퇴적기반암까지의 심도가 매우 깊는데 원인이 있는 것으로 사료된다.

연안 자기이상대: 동해중부연안해역은 1972년 한국동력자원연구소와 서독이 공동으로 북부에서 탄맥의 해저 연장성여부와 남부에서 포항근해의 탄화수소 자원의 부존 가능성 파악을 목적으로 탄성과 탐사와 자력탐사를 실시한 바 있으며, 이를 토대로 Schuller and Chun(1974)과 박 등(1981)은 비교

적 자세하게 이 해역의 해저지질을 설명하였다. 본 연구해역내에서는 한국동력자원연구소와 캐나다 Hunttec사가 후포에서 울산만에 이르는 연안해역에 대한 지구물리탐사를 실시한 바 있으나 탐사해역은 주로 제3기층 분포 파악만을 목적으로 한 해안 10 km 이내의 천부에 한정되었기 때문에 자기이상치를 광범위한 지역에 걸친 해저지질에 대비하는데 어려움이 있다. 그 결과에 따르면 구룡포 남쪽의 제3기 퇴적층은 외해쪽으로 단순하게 경사져서 두꺼워지며 그 상부는 간혹 제4기 현무암층이 협재된 현생퇴적층이 수평으로 부정합을 이루고 있다(Hunttec Ltd., 1967). 또한 구룡포 북동부의 탄성과단면에 의하면 백악기 말기에서 제3기 초기에 관입·분출된 화성암체가 퇴적층으로 얇게 피복되어 있다(Fig. 9). 앞에서 설명한 바와 같이 해저지형은 자기이상분포에 거의 영향을 주지 않는 것으로 볼 때, 자기이상분포에서 구룡포 북동부에 나타나는 약 600 nT의 독립된 고이상대는 이러한 화성암체의 국부적 존재에 기인한 것으로 해석되며, 감포근해와 부산근해의 고이상대도 그 분포 특성상 이와 같은 화성암체의 존재를 시사한다. 자기이상분포가 독립적

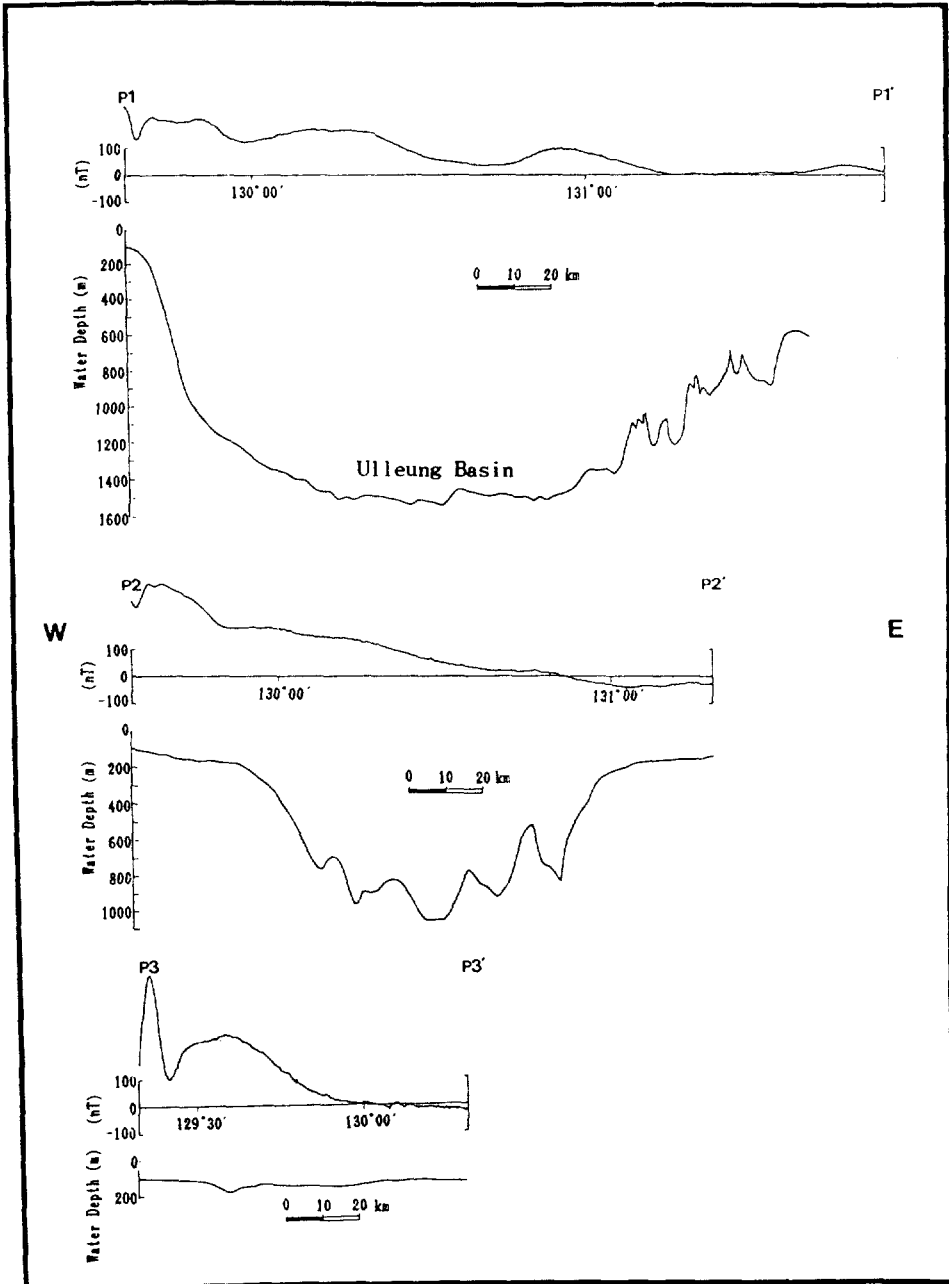


Fig. 8. Comparison of magnetic anomaly profiles with seabottom topography.

으로 나타나는 구룡포, 감포 및 부산근해의 자력원은 그 분포 특징으로 볼 때 화성관입체로 보이며, 이 지역의 지질분포상 경상계의 화강암일 가능성이 크다.

한편, 부산-울산간 해안에서 10 km에서 40 km 사

이의 해역에서는 약 30 km 폭을 가지고 남서-북동 방향으로 대상분포를 갖는 약 200 nT의 고이상대가 존재한다(Fig. 6). 이 이상대는 약 80 km 연장되며, 북쪽으로는 구룡포 북동해역의 고이상대와 연결되고 남쪽으로는 부산 동측의 고이상대와 연결되면서 울

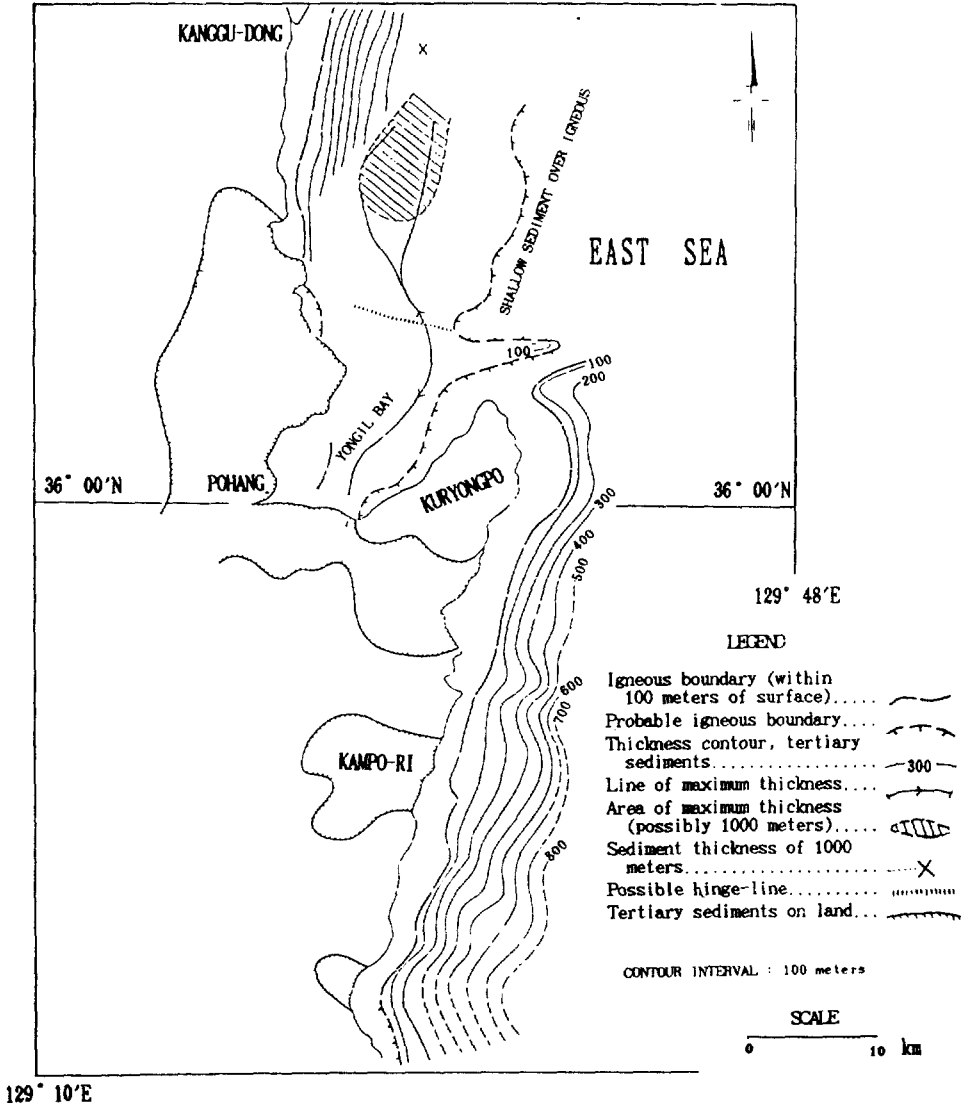


Fig. 9. Isopach map of Tertiary sediments (after Huntet Ltd., 1967).

산만과 장안근해에 -100 nT 이하의 저이상대를 고립시키고 있다. 박 등(1981)은 울진이남에서 포항에 이르는 해저기반암은 고결된 백악기 퇴적암 내지는 제 3기 초기에서 중기에 걸쳐 퇴적된 퇴적암이거나 동시대에 분출된 화성암일 가능성이 크며, 이들은 해안에서 약 25 km까지의 대륙붕에서만 나타난다고 해석하였다. 또한 대륙붕과 대륙사면에는 해안선과 거의 평행한 대소의 많은 단층들이 발달해 있으며 이런 단층들은 대부분 정단층으로서 계단 단층(step fault)를 이루거나 곳에 따라서는 호르스

트(horst)를 형성하고 있다. 이러한 해석은 지역은 다르지만 자기이상분포에 의해서 설명이 가능할 것으로 생각된다. 즉 부산-울산간 해역에서 남서-북동 방향으로 발달하고 있는 대상의 고이상대는 퇴적물의 제방역할을 하는 호르스트형 뱅크(bank)를 이루고 있는 융기된 기반암에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 특히 울산만과 장안근해에 분포하는 저이상대는 동측에 예상되는 호르스트형 뱅크에 의해서 형성된 퇴적분지의 존재를 시사한다.

울릉분지 남단의 저자기이상대 : 탄성과 반사법과

굴절법에 의해서 알려진 동해분지는 약 11-12 km에 달하는 두꺼운 지각의 상부에 놓여져 있다(Ludwig *et al.*, 1975 ; Kobayashi, 1985). Honza(1978)는 울릉분지를 포함한 동해분지의 퇴적층을 3개의 층으로 구분하였는 바 변형을 받지 않아 층리가 발달된 주로 저탁류퇴적물(turbidites)인 최상부층과 역시 층리 발달이 잘 되었으며 반사시간이 최대 1.4 sec인 중간층 및 투명한 탄성파상을 보이면서 반사시간이 1.0 sec 이상되는 주로 규조질의 하부층으로 구분된다. 이들 3개층의 총후는 약 3500 m이상 될 것으로 보이며 실제로 탄성과 기록상에서 기반암의 경계가 확인되지 않으나 시추자료에 의하면 울릉분지 남단의 제 3기 퇴적층의 총후는 약 4500 m에 이른다(박 등, 1981).

조사지역의 대마도 북동부에서 울릉분지의 남단에 이르는 외해지역에서는 낮은 자기이상분포를 보이고 있다. 특히 울릉분지 남단에서 대마도 북서해역에서는 약 200 nT대의 이상대로부터 점차 진폭이 작아지고 완만한 변화를 보이면서 연구지역의 동쪽경계부를 따라서는 -50 nT까지 낮아진다. 이같은 분포는 퇴적층이 두껍게 쌓여 있고 기반암의 자성이 약한 것에 원인이 있는 것으로 해석된다.

퇴적 기반암의 심도분포

자기이상도에서 보는 바와 같이 육지에 연한 대륙붕지역을 따라서는 파장이 짧고 진폭이 큰 자기이상분포가 특징이며, 그 외해지역으로 갈수록 변화가 완만하고 진폭도 작아진다(Fig. 6). 외해쪽에서 특징적인 장주기의 낮은 진폭을 갖는 자기이상분포는 거의 비자성을 띠는 퇴적층이 막대한 두께로 기반암 상부를 덮고 있는데 주로 원인이 있다.

Spectrum을 이용한 기반암심도 계산방법은 본 연구지역의 외해지역과 같이 퇴적층과 기반암의 2층 지질구조를 이루는 지역을 대상으로 적용하는 것이 가장 효과적이다. 따라서 두꺼운 퇴적층으로 인해 낮은 자기이상분포를 나타내는 것으로 보이는 외해지역에서 3개의 자기이상단면 S1-S1', S2-S2', S3-S3'를 선정하여 이 spectrum 분석방법을 적용하였다(Fig. 6). 각 단면의 자료는 보간법을 이용하여 매 0.25 km마다 재채취하여 등간격화하였으며, 고속 Fourier 변환에 필요한 2°개 자료를 만들기 위하여 그 나머지는 외삽하였다. 자료의 간격을 줄이고, 구

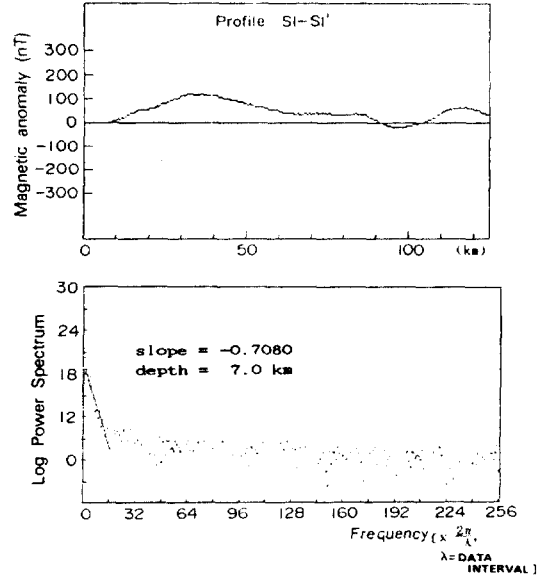


Fig. 10. Determination of the magnetic basement depth using log-power spectrum (lower) in the magnetic anomaly profile S1-S1' (upper).

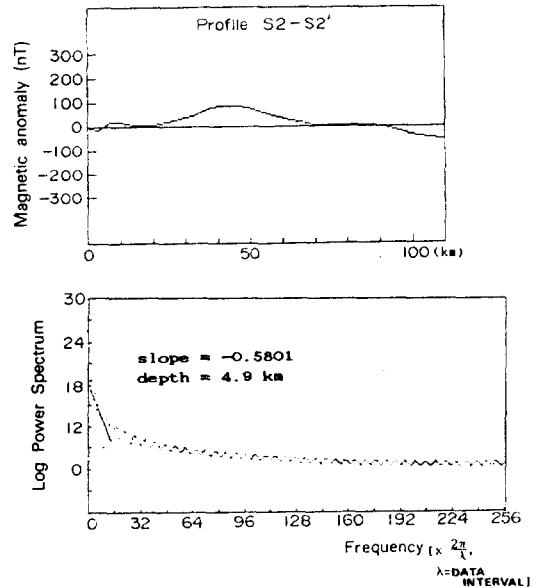


Fig. 11. Determination of the magnetic basement depth using log-power spectrum (lower) in the magnetic anomaly profile S2-S2' (upper).

간을 보다 확장시키는 것은 Fourier 계수를 구하는데 있어 나타나는 절단(truncation)과 알리아싱(aliasing) 효과를 되도록 작게하는데 있다. 그러나

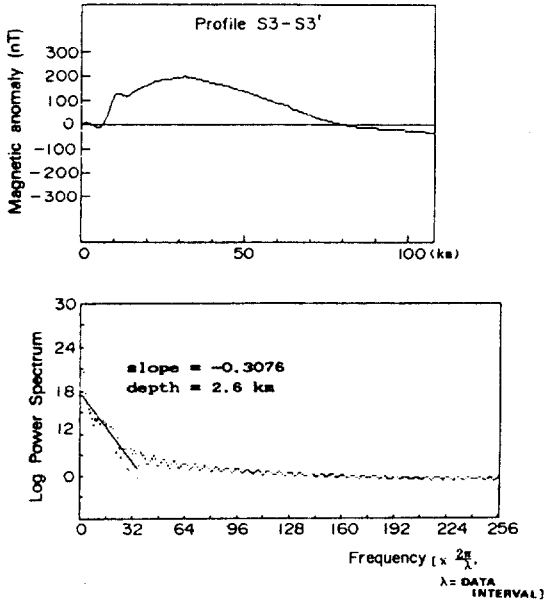


Fig. 12. Determination of the magnetic basement depth using log-power spectrum (lower) in the magnetic anomaly profile S3-S3' (upper).

Table 1. Results of spectrum analysis

Profile	Profile gate (km)	Data interval (km)	Slop of spectrum group	Basement depth(km)
S1-S1'	125	0.25	-0.7080	7.0
S2-S2'	108	0.25	-0.5801	5.0
S3-S3'	108	0.25	-0.3076	2.6

실제로 알리아싱효과는 고주파군에서 나타나므로, 본 연구에서 분석대상인 심부기반암으로부터 기인한 장주기의 자기이상단면을 Fourier 변화하는데는 이 같은 효과가 심각한 문제는 아니다.

Figs. 10-12는 3개의 자기이상단면과 그로부터 구한 spectrum 분석결과를 보여준다. 3단면 모두에서 저주파군의 spectrum이 고주파군에 비해서 뚜렷이 강하고 직선적 경향을 나타낸다. 이와 같은 경향은 자기이상기 천부에서 기인하는 단파장 성분보다는 주로 깊은 심도에 있는 기반암으로부터의 영향이 지배적이라는 것을 시사한다. S3-S3'의 spectrum 분포에서는 저주파군의 경사가 다른 두 단면의 것에

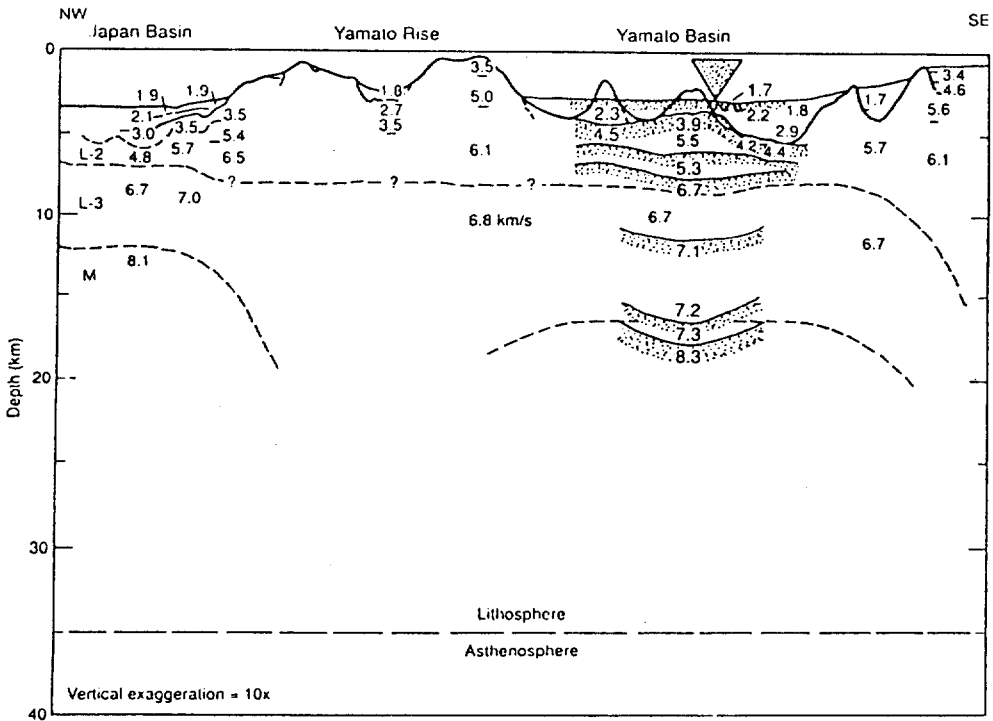


Fig. 13. Crustal cross section through the Yamato Basin, Yamato Rise, and Japan Basin (after Ludwig *et al.*, 1975; stippled segments are from Hirata *et al.*, 1987; Hirata *et al.*, 1989).

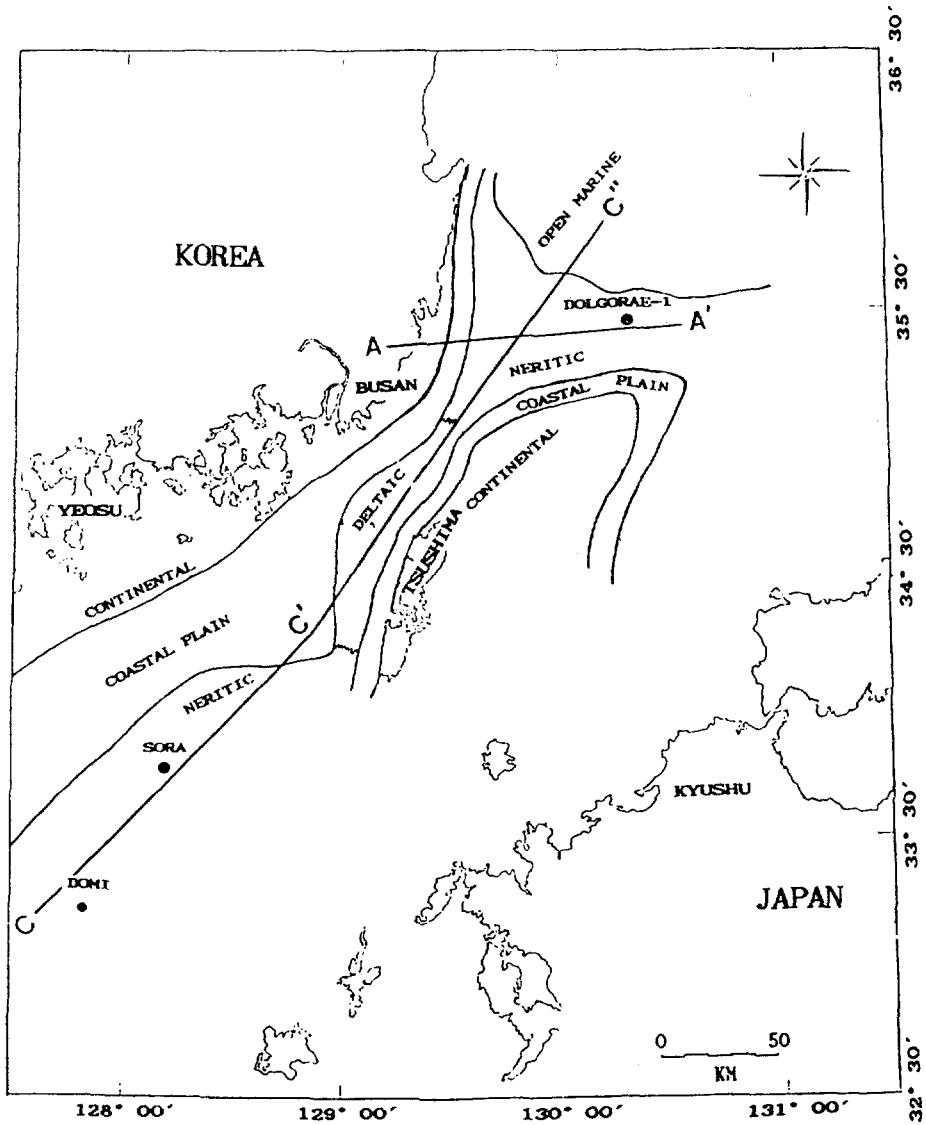


Fig. 14. Plio-Pleistocene paleoenvironmental deposition map (after Cho *et al.*, 1982).

비해 훨씬 완만해지며 거의 무상관성을 나타내고 있는 고주파군과 뚜렷이 분리된다. 이처럼 spectrum군의 경사가 완만한 것은 이 지역이 육지로부터 가까운 쪽에 있어서 기반암이 얕음을 지시하는 것이며 계산 결과 2.6 km이다. 그 밖의 스펙트럼분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

단일 채널 탄성파탐사에 의해서 밝혀진 동해에서의 퇴적층 두께는 왕복주시로 1.5-3.0 sec(약 1.8-3.75 km)이나 동해분지내에서는 2.0 sec이상의 두꺼운

퇴적층이 쌓여있다(Ishiwada *et al.*, 1984). Fig. 13은 보다 해저 심부지질의 파악을 위해서 해양저지진계(ocean bottom seismometer)를 이용한 탄성과 굴절법 탐사로 얻은 구간속도에 의해서 중앙 Yamato해분, Yamato해령 및 Japan 분지를 횡단하는 지각구조를 구분한 것이다. 그 중에 L-2층은 탄성과 속도가 3.8-5.5 km/sec 범위를 갖는 층을 통칭하며 두께가 3-4 km 정도이나 지역적으로 약간의 차이가 있다(Tamaki *et al.*, 1990). L-1층은 탄성과 층간속

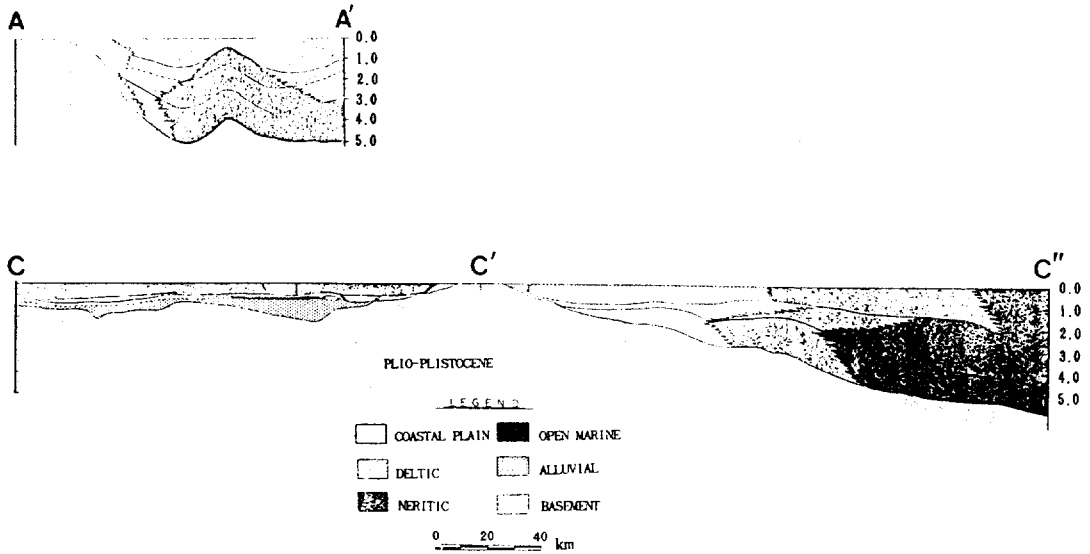


Fig. 15. Sequential geological and paleoenvironmental development cross section (after Cho *et al.*, 1982)

도가 1.7-2.4 km/sec되는 층을 이루며 주로 퇴적암 층으로 이루어져 있다. Yamato 해분내에서 음파기반암(acoustic basement)을 이루고 있는 응회암, 현무암, 퇴적암층 등은 Fig. 13에서 L-2층에 해당하며, 이들은 빠른 속도로 퇴적되었거나 정치된 층으로서 자화상태가 교란되어 분지지역에서 나타나는 낮은 자기이상의 원인인 것으로 알려져 있다(Ingle *et al.*, 1990).

한편, 울릉분지 남단의 돌고래-1 지점에서 약 4300 m 하부까지 시추한 결과 전체 심도에서 퇴적층으로 이루어져 있으며 심도 1820 m를 경계로 상부는 연안 퇴적환경의 천해성 퇴적암으로, 그 하부는 심해성 환경하에서 퇴적된 퇴적암으로 되어있다(조 등, 1982). 이 돌고래-1호공을 포함하는 퇴적분지는 중생대말이나 제 3기초에 배호상분지(back-arc basin)의 형성과정에서 확장되어 형성된 것으로 알려져 있다. Fig. 14는 탄성과 탐사결과와 시추지질자료에 의해서 작성된 한국동남해 일대의 플라이오-플라이토세 이후의 고퇴적환경도이며, Fig. 15는 이 지역의 동서와 남서-북동방향의 단면도이다. 두 지질단면에서 기반심도는 서쪽에서 동쪽으로 남서쪽에서 북동방향으로 울릉분지 남단을 향하여 길어지나 육지에서 동쪽방향으로 훨씬 가파른 변화를 나타낸다. 기반암의 최대심도는 울릉분지남단인 단면 C-C' -C''의 북동단

지역으로 약 8-9 km(왕복주시 약 6.0 sec)에 이르며, 분지저의 심부는 약 5-7 km(왕복주시 4-5 sec) 정도의 심도분포를 보인다(Fig. 15). 본 연구에서 spectrum 분석결과 얻은 기반암 평균심도중 단면 S 1-S1'의 약 7 km, S2-S2'의 약 5 km는 어느정도 오차를 감안하더라도 실제 퇴적기반까지의 심도에 비교될 수 있다. 한편, 단면 S3-S3'에서 계산된 평균심도는 2.6 km로서 외해지역의 다른 두 단면지역의 심도에 비해 매우 얕아진다. 이것은 S3-S3' 지역이 Fig. 15에서 단면 A-A' C-C' -C''의 심부기반지역을 통과하기도 하지만 그 북쪽으로는 분지의 가장자리로 이어지면서 급하게 얕아지기 때문인 것으로 보인다. 자기이상단면에서도 북서쪽으로 진폭이 커지고 다른 두 단면보다 단파장 성분이 강한 것은 그 반증이다.

울릉분지부근 심부 지질구조 및 기반암에 대해서는 Yamato 분지와 같이 탄성과굴절법 자료와 직접적으로 확인이 가능한 시추자료 등이 결여되어 있어 명확한 해석이 이루어지지 않았으나, 다중채널 탄성과반사법 탐사결과 음파기반암은 비화성 기원의 대륙지각 및 관입·분출된 화성암으로 이루어져 있는 것으로 해석된다(이 등, 1989). 동해의 열개는 두개의 확장축으로부터 시작되었으며 일본분지가 먼저 확장되고 뒤이어 Yamato 분지, 울릉분지순으로

확장되었다(Hilde and Wageman, 1973). 그와 같은 사실은 동해내 분지들의 생성과정과 그에 수반된 화성활동의 시기 및 형태가 유사하거나 서로 관련되었음을 시사한다. 만약 그렇다면 단면 S1-S1'과 S2-S2'에서 계산한 자력기반심도가 거의 L-2층과 대비하며, 그 경우 기반암은 Yamato 분지의 기반암과 같은 응회암, 현무암과 퇴적암 등의 교층으로 이루어져 있을 가능성이 있다. 그러나 이를 확인할 수 없는 시추자료 등 직접적인 자료가 부족하여 논란의 여지가 있다.

결론

울릉도 남단해역의 지자기특성과 해저지질을 연구하기 위하여 해상과 육상 고정점에서 장기간 지자기를 관측하였다. 일변화가 보정된 울릉도 남단해역의 해상지자기 자료로부터 자기이상분포를 구하고 자력기반심도를 계산한 결과를 기존의 탄성과 및 시추자료와 대비·해석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 연구지역의 지자장은 야간에 변화가 미약하고 오전 11시 전후에 최저치를 경계로 오전 오후가 거의 대칭을 갖는 하루단위 주기로 변화하며 전반적으로 안정되었다.

2. 지자장이 불안했던 기간은 6월 28일과 29일에 각각 약 6시간과 약 4시간 이었으며 그때의 변화량은 안정기의 2-10 nT에 비해서 훨씬 큰 23-42 nT였다.

3. 해상자력자료의 일변화보정치는 지자장이 안정된 날의 야간시간대 평균값을 기준으로하여 산출하였으며, 기준치는 48438 nT이다. 해상자력자료로부터의 일변화보정량은 지자기가 안정된 기간의 야간에는 5 nT, 주간에는 최대 약 15 nT로서 보정폭은 20 nT 이상되며 지자기가 불안한 기간에는 30 nT 이상으로 커진다.

4. 연구지역은 해안에서 약 30 km까지의 대륙붕 해역에서 나타나는 단파장의 진폭이 큰 자기이상대와 그 동쪽으로 단순 감소하여 -50 nT에 이르는 파장이 길고 진폭이 작은 저자기이상대로 구분된다.

5. 자기이상분포는 급격한 해저지형변화에도 거의 영향을 받지 않는데, 이는 해저지형을 이루고 있는 것이 주로 퇴적층이고 주요 자력원인 기반암까지의 심도가 깊은데 원인이 있다.

6. 주로 연안지역인 구룡포 북동부 약 600 nT 이상의 고이상대 및 갑포근해와 부산근해에서 나타나는 고이상대 등 국부적으로 고립된 자기이상분포는 그 분포형태 및 주변지질로 볼 때 화성관입체 혹은 분출암의 영향으로 사료된다.

7. 부산-울산간 연안해역에서 남서-북동방향으로 약 200 nT 크기를 가지고 대상으로 분포하고 있는 고이상대는 퇴적분지내에 용기된 기반암의 존재를 시사하며, 그 외해의 저이상대는 두꺼운 퇴적층과 자성이 낮은 기반암에 의한 것으로 해석된다.

8. 로그 스펙트럼분석 결과 외해의 3개의 자기이상단면에서 계산한 기반암 심도는 각각 7.0 km, 5.0 km, 2.6 km이며, 이는 기존의 탄성과탐사 및 시추 결과로부터 추정된 기반암심도와 잘 대비된다.

9. 울릉퇴적분지의 특징적인 저이상대 및 자성기반의 심도분포가 분지의 생성과정 및 형태와 함께 Yamato 분지와 Japan 분지 등 동해내의 다른 분지들과 유사한 것으로 보아 자성기반은 Yamato 분지와 Japan 분지에서 정의된 바 있고, 주로 화산쇄설물과 분출암이 혼재되어 있으면서 자성이 낮은 것으로 알려져 있는 L-2층과 대비될 것으로 보이나 보다 구체적인 자료가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구소 1990년도 기본연구사업인 동해울릉분지의 지구물리학적 연구(PE00198) 및 수탁사업(PI00118)의 일부연구비 지원에 의해 수행되었다. 현장 자료획득에 수고하신 해양지구물리실 여러분과 본 논문을 세세하게 검토해 주시고 많은 조언을 아끼지 않으신 부산대학교 김인수 교수님과 전남대학 김광호 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 민경덕, 서정희, 권병두, 1987. 울릉지구물리학. 우성문화사, 서울, 772pp.
- 박근필, 김종수, 김철민, 신원철, 조규장, 박관순, 1981. 동해심부지질 및 광물자원조사. 연구보고, 10: 149-161.
- 박찬홍, 김성렬, 한상준, 강정극, 1986. 북동태평양적도대 KONOD-1 지역의 자력이상 해석. 해양연구, 8: 17-27.
- 이경은, 전승수, 조성권, 한종환, 1989. 울릉분지의 후열도열개와 화성(산)활동. 한국해양학회지, 24: 214.

- 조규장, 이원영, 김승우 등, 1982. 대륙붕 석유탐사자료평가연구. 한국동력자원연구소, 342pp.
- Bose, P.K. and B.J. Sengupta, 1984. Spectral analyses of offshore magnetic data for computing depths to the basement rocks. *Mar. Geophys. Res.* 6: 245-256.
- Bosum, W., E.G. Kind and J.H. Koo, 1970. Aeromagnetic survey of offshore areas adjoining the Korean Peninsula: United Nations ECAFE. *CCOP Tech. Bull.* 4: 1-21.
- Chapman, S., 1919. An outline of a theory of magnetic storms. *Proc. Roy. Soc. London A*, 95: 61-83.
- Chough, S.K., 1983. Marine geology of Korean Seas. International Human Resources Development Corporation, Boston, 156pp.
- Gudmundsson, G., 1966. Interpretation of One-dimensional Magnetic Anomalies by Use of the Fouriertransform. *Geophys. J. R. Astro. Soc.*, 12: 87-97.
- Hilde, T.W.C. and J.M. Wageman, 1973. Structure and Origin of the Japan Sea. In: *The Western Pacific Island Arcs*. Ed. by P.J. Coleman, Univ. of Western Australia Press, 413-434.
- Hirata, N., H. Kinoshita, K. Suyehiro, M. Suemasu, N. Matsuda, T. Ouchi, H. Katao, S. Koresawa and S. Nagumo, 1987. Report on DELP cruises in the Japan Sea. Part II: Seismic refraction experiment conducted in the Yamato Basin, southeast Japan Sea. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 62: 347-365.
- Hirata, N., H. Tokuyama and T.W. Chung, 1989. An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Japan Sea: the final stage of back-arc spreading. *Tectonophysics*, 165: 303-314.
- Honza, E.(ED.), 1978. Geological investigations in the Northern Margin of the Okinawa Trough and the Western Margin of the Japan Sea. *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, 10: 1-79.
- Huntec Limited, 1968. Report on the offshore geophysical survey in the Pohang area. Republic of Korea. *CCOP*, 1: 1-12.
- Ingle, J.C. Jr., K. Suyehiro and M.T. von Breyman *et al.*, 1990. Proceeding of the Ocean Drilling Program: Initial Reports, 652pp.
- Isezaki, N., 1975. Possible spreading centers in the Japan Sea. *Mar. Geophys. Res.* 2: 265-277.
- Isezaki, N. and S. Uyeda, 1973. Geomagnetic anomaly pattern of the Japan Sea. *Mar. Geophys. Res.*, 2: 51-59.
- Ishiwata, Y., E. Honza and K. Tamaki, 1984. Sedimentary basins of the Japan Sea. *Proc. 27th Int. Geol. Congress*, 23: 43-65.
- Kobayashi, K., 1985. Sea of Japan and Okinawa trough. In: *The Ocean Basins and Margins, 7A, The Pacific Ocean*. Eds. by A.E.M. Nairn, F.G. Stehli and S. Uyeda. Plenum Press, NewYork, 419-457.
- Kobayashi, K. and N. Isezaki, 1976. Magnetic anomalies in Japan Sea and Shikoka Basin and their possible tectonic implications. In: *The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its margin*. Eds. by G.H. Sutton, M.H. Manghnani and R. Moberly, *AGU Monogr. Ser.* 19: 235-251.
- Ludwig, W.J., S. Murauchi and R.E. Houtz, 1975. Sediments and structure of the Japan Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86: 651-664.
- Matsushita, S. and W.H. Campbell, 1967. Physics of geomagnetic phenomena vol. 1. Academic Press, New-York, 623pp.
- Negi, J.G., P.K. Agrawal and K.N.N. Rao, 1983. Three-dimensional model of the Koyna area of Maharashtra State (India) based on the spectral analysis of aeromagnetic data. *Geophys.* 48: 964-974.
- Price, A.T. and D.J. Stone, 1964. The quiet-day magnetic variations during the I.G.Y., *Ann. I.G.Y.*, 35: 63-269.
- Schluter, H.U. and W.C. Chun, 1974. Seismic surveys off East coast of Korea. *U.N. ESCAP CCOP Tech. Bull.*, 8: 1-16.
- Spector, A. and F.S. Grant, 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophys.* 35: 293-302.
- Tamaki, K., K. Pisciotto, J. Allan *et al.*, 1990. Proceedings of the Ocean Drilling Program; Initial Reports, 652 pp.
- Tokuyama, H., M. Suyemasu, K. Tamaki, E. Nishiyama, S. Kuramoto, K. Suyehiro, H. Kinoshita and A. Taira, 1987. Report on DELP 1985 cruises in the Japan Sea. Part III: seismic reflection studies in the Yamato Basin and the Yamato Rise area. *Tokyo Daigaku Jishin Kenkyusho Iho*, 62: 367-390.
- Treitel, S., W.G. Clement and R.K. Kaul, 1971. Spectral determination of depths of buried magnetic basement rocks. *Geophys. J. R. Astro. Soc.*, 24: 415-428.

Received February 23, 1991

Accepted May 4, 1991