

Article

지자기이상을 이용한 동해 독도 및 독도주변의 구조와 성인에 관한 고찰

김창환*¹ · 박찬홍¹ · 민경덕² · 한현철³ · 권문상⁴ · 심재설⁵ · 최성호⁶ · 오순복⁶¹한국해양연구원 지구환경연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29²연세대학교 지구시스템학과
(120-749) 서울시 서대문구 신촌동 134³한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
(305-350) 대전시 유성구 가정동 30⁴한국해양연구원 연구정책실
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29⁵한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29⁶국립해양조사원 측량과
(400-800) 인천시 중구 향동 7가 1-17A Study on the Structure and Origin of the Dokdo and it's Surroundings
in the East Sea (Japan Sea) Using Magnetic AnomaliesChang Hwan Kim*¹, Chan Hong Park¹, Kyung Duck Min², Hyun Chul Han³,
Moon Sang Kwon⁴, Jae Seol Shim⁵, Sung Ho Choi⁶, and Soon Bock Oh⁶¹Global Environment Research Change Laboratory, KORDI
Ansan P.O. BOX 29, Seoul 425-600, Korea²Earth System Sciences, Yonsei University
Seoul 120-749, Korea³Petroleum and Marine Resource Division, KIGAM
Taejon 305-350, Korea⁴Policy Research and Development, KORDI
Ansan P.O. BOX 29, Seoul 425-600, Korea⁵Coastal and Harbor Engineering Laboratory, KORDI
Ansan P.O. BOX 29, Seoul 425-600, Korea⁶Survey Division, NORI
Incheon 400-800, Korea

Abstract : Magnetic anomalies in the Dokdo and it's surroundings were investigated with respect to structure and origin of the Dokdo and surrounding seamounts. After normal and diurnal correction of measured magnetic data, crossover correction was applied to reduce errors between sets of magnetic anomalies. The errors from crossover operation result in decrease of about 51%, from 62.2 nT to 30.1 nT in standard deviation. Reduction-to-the-pole, second vertical derivative and analytic signal processing were

*Corresponding author. E-mail : kimch@kordi.re.kr

applied to explore magnetic anomaly signatures in detail. Magnetic anomalies are most complicated in the 1st-Dok seamount, show SWW-NEE linear pattern in the 2nd-Dok seamount and lower to the 3rd-Dok seamount. Different magnetic anomaly patterns in three seamounts imply that three volcanic seamounts were formed at different times and are composed of rocks that were produced in different conditions. It seems that the 3rd-Dok seamount was first to form and followed by the 1st-Dok seamount. The complicated magnetic and second vertical derivative anomaly patterns in the 1st-Dok seamount may be due to subsidiary cones around crater or the presence of intruded magma bodies below sea surface and the Dokdo is probably a marginal subsidiary part of crater.

Key words : 자력자료(magnetic data), 독도(Dokdo), 일변화보정(diurnal correction), 교차점오차보정(crossover correction), 자극화변환(reduction-to-the-pole), 2차수직미분(second vertical derivative), 아날니틱신호처리(analytic signal processing), 부속화산체(subsidiary cone), 화구륜(crater).

1. 서 론

서태평양 배호상 분지인 동해는 울릉분지, 일본분지, 그리고 야마토 분지로 구성되며, 이들 분지는 해령(ridge)과 해저대지(Korea Plateau)들로 경계 분리되면서 각각 독립적으로 형성되어 있다. 한국대지나 해령들은 일본열도가 유라시아 대륙으로부터 분리될 때 동해에 남아있는 대륙 지각의 조각들로 추정된다(Jolivet *et al.*, 1991). 동해의 남서부에 위치하는 울릉분지는 한국대지에 의해 북쪽의 일본분지와 그리고 오키뱅크에 의해 북동쪽 야마토분지와 각각 분리된다. 독도는 울릉분지의 북쪽 경계부분에 위치하고 있으며 평균수심 2000 m의 해양평원에 솟아 있는 화산섬으로 동도와 서도로 이루어져 있다. 독도는 울릉도 화산암류와 비슷한 전암 화학조성을 갖는 알칼리 현무암, 조면 현무암, 조면 안산암 및 조면암으로 구성되어있으며, 그 산출상태에 의해 하부의 화산쇄설암의 활동과 상부의 용암류의 활동으로 독도의 화산활동을 구분하였다(Sohn and Park, 1994). 초기 플라이오세에 처음으로 해저화산활동에 의해 원시 독도가 생성되었으며, 화산활동이 재개되기까지 약 2백만년 동안 원시 독도의 형태 및 크기가 상당량 손실된 후 후기 플라이오세까지 지속적인 화산활동에 의하여 현재와 같은 독도의 모양을 갖추게 되었다(Sohn, 1995). 또한, 구성암석의 두께 변화, 암상의 변화 및 단층의 특성 등을 고려하여 독도를 생성시킨 화도(volcanic vent)는 독도에서 북동쪽으로 수백미터 떨어진 곳에 위치할 것이라고 추정되었다.

기존의 독도에 대한 연구는 대부분 국지적이고 산발적으로 이루어 졌으며, 주로 육상부분에 대한 지형학적 연구가 수행되었으나 1996년 다중빔 음향 탐사에 의한 해양조사결과에서 독도의 하부는 수심 약 2000 m 이상인 해저면에서부터 원형의 매우 큰 화산체를 이루고 있는 것으로 확인되었다(한상준 외, 1996).

본 연구에서는 경도 131.50°~132.50°, 위도 37.00°~37.60°인 독도를 포함하는 주변지역이고, 한국자원연구소

(’97), 국립해양조사원(’97) 및 한국해양연구소(’98a, ’98b)에서 획득된 수심 및 자력자료를 통합처리, 사용하였고 독도해산들의 자기이상의 특성을 분석하여 독도해산들의 구조와 성인에 관하여 고찰하였다.

2. 자료분석

기초처리

본 연구에서는 국립해양조사원, 한국자원연구소의 두 기관의 자력자료를 사용하였는데 국립해양조사원의 자료는 직접 처리하여 자원연구소 자료와 통합하였다. 지자기의 시간적 변화는 해저에 존재하는 자성체에 의한 자기이상효과를 교란시키기 때문에 해상측정치로부터 이 변화량을 분리해내는 것이 필요하고 이를 일변화 보정이라한다. 국립해양조사원 자료처리시 일변화 보정을 위한 자료는 해상관측기간을 포함하는 1997년 3월 10일부터 8월 19일까지 국립해양조사원이 고정관측소에서 연속 관측하였으나, 관측기간중 장비 이상으로 관측이 안된 것도 있다. 국립해양조사원이 설치 운영한 고정관측소에서 관측된 7월 초와 8월 해상관측 기간중의 일변화 자료를 사용하였고, 일변화 자료가 없는 4월과 7월 중순 이후 기간 동안의 해상지자기 관측자료에 대한 일변화 보정은 정보통신부 산하 전파연구소 자료를 활용하였다. 전파연구소의 지자기 일변화 관측자료는 국립해양조사원의 관측자료와 비교할 때 전반적인 위상 및 강도에서 차이를 나타냈다. 전파연구소 관측치는 국립해양조사원 관측치에 비해서 19분 정도 지연을 보이고 있다. 전파연구소의 일변화 관측치에서 기준치는 50528.4 nT로서 국립해양조사원의 기준치 50273.3 nT에 비해서 전반적으로 255 nT의 강도차를 나타냈다. 국립해양조사원 및 전파연구소에서 연속관측한 자료를 근거로 산출한 일변화 기준치를 이용하여 구한 일변화량을 동일한 시각의 해양지자기 관측치에서 보정하였다. 일변화 보정된 해상 지자기 자료로부터 국제표준지자장(IGRF90)을 계산하여 소거함으로써 자기이상을 산출하였다.

각각의 자료는 조사 기간의 차이와 사용장비의 차이로 인하여 자료들간의 오차가 나타난다. 이와 같은 오차는 비교적 안정된 자료를 기준으로하여 상대적인 보정을 실시한 후 통합하였다.

자기 이상의 분리

자력탐사는 다른 지구물리 탐사보다 천부에 존재하는 화산암이나 기반암에 관한 자세한 정보를 줄 수 있다. 그러나, 자력탐사 자료는 자성암체의 대자율의 횡적인 변화가 심하고, 잔류자기의 크기나 자화방향에 따라 강도의 변화가 심하여 자료 해석시 세심한 주의를 요한다. 1970년대 이후 자기이상의 수평/수직 미분에 근거한 암체의 경계 및 심도를 효과적으로 결정하기 위한 여러 기법들이 개발되면서 이러한 해석상의 제약들이 많이 해소되었다(Hsu *et al.*, 1996, Roest *et al.*, 1992, Nabighian, 1972, 1974).

특히, Nabighian(1972, 1974)이 제안한 아날니틱 신호를 이용한 자기이상 해석 기법은 잔류자기의 크기, 자화방향 또는 지자기장 요소에 대한 어떠한 가정 없이 자성암체의 경계 및 심도를 구할 수 있다(Thurston & Brown, 1994; Hsu *et al.*, 1996).

아날니틱 신호 산출법

아날니틱 신호란 M 을 자력이상이라 하고, x, y, z 방향의 단위벡터를 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 라고 할 때

$$A(x, y) = \left(\frac{\partial M}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial M}{\partial y} \hat{y} + i \frac{\partial M}{\partial z} \hat{z} \right), i = \sqrt{-1} \quad (1)$$

로 정의되며, 각 자력이상의 미분값은 푸리에 변환을 통한 주파수영역에서 아래의 식에 의해 얻어진다. 즉

$$F\left[\frac{d\phi}{dx}\right] = (ik_x)F(\phi)$$

$$F\left[\frac{d\phi}{dy}\right] = (ik_y)F(\phi)$$

$$F\left[\frac{d\phi}{dz}\right] = |k_r|F(\phi), k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, k: \text{wave number} \quad (2)$$

이다.

아날니틱 신호의 절대값은 Energy envelope이라고도 불리며, 하나의 수직 미분과 두 개의 수평 미분값을 각각 제곱시킨 후 더한 값의 제곱근으로 정의된다. 즉

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

으로 표현되며, 이상값이 수직경계면에 의한 것일 경우, 예를 들어 직사각주 모양의 이상체가 지하에 존재할 때, 자화방향이나 잔류자기에 관계없이 이상체의 경계에 해당

하는 곳에서 최대값을 갖는다(Walter *et al.*, 1992).

자극화변환법

지자기장은 측정위치에 따라 편각 및 복각이 변화하므로 현장 측정자료는 측정당시의 지자기장의 방향성에 따라 자력이상이 왜곡되어 나타난다. 또한, 실제 측정에서는 자력의 수직성분보다는 총자력 성분을 측정하는 경우가 많으므로 총자력에서 자력의 수직 성분만을 구해야 한다. 이는 수직자화에 의한 자력이상으로서 편각이 0°이고 복각이 90°인 자극에서 측정된 값으로 변환시킴으로서 이상대의 해석을 용이하게 할 수 있다. 이와 같이 수직자화에 의한 이상으로 변화시키는 과정을 자극화 변환(Reduction-to-the-pole; RTP)이라고 한다.

자극화 변환을 위한 필터는 푸리에(Fourier) 변환 후, 주파수 영역에서

$$F(\alpha) = \frac{1}{[\sin(I) - i \cos(I) \cos(D + \alpha)]^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(k_x/k_y), i = \sqrt{-1}$$

로 표현되는 필터를 적용한 후, 다시 역푸리에 변환을 하면 된다. 여기서, I 와 D 는 지자기장의 복각 및 편각이다(Blakely, 1995).

2차 수직미분법

중력 또는 자력이상이 ϕ_{ij} , $i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$ 이고 $\Delta x, \Delta y$ 의 샘플링 간격으로 표현되었다면, i, j 점에서의 $\phi(x, y)$ 의 수평미분은

$$\frac{d\phi(x, y)}{dx} \approx \frac{\phi_{i+1, j} - \phi_{i-1, j}}{2\Delta x}$$

$$\frac{d\phi(x, y)}{dy} \approx \frac{\phi_{i, j+1} - \phi_{i, j-1}}{2\Delta y} \quad (5)$$

으로 근사되고(Blakely, 1995), 식 (5)는 푸리에 영역에서

$$F\left[\frac{d^n \phi}{dx^n}\right] = (ik_x)^n F(\phi)$$

$$F\left[\frac{d^n \phi}{dy^n}\right] = (ik_y)^n F(\phi) \quad (6)$$

로 구할 수 있으며, n 은 미분차수이다. 수평미분은 중·자력 이상의 횡적인 변화를 반영하며, 수평미분값의 진폭은 이상체의 경계에서 큰 값을 보인다.

한편, ϕ 가 포텐셜이면 수직미분은 라플라스 방정식인 $\nabla^2 \phi = 0$ 에 의해

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}\right) \quad (7)$$

가 되며, 푸리에 영역에서

$$F\left[\frac{d^n \phi}{dz^n}\right] = k_x^2 F[\phi] + k_y^2 F[\phi] \\ = |k_r|^n F(\phi) \quad (k_r^2 = k_x^2 + k_y^2) \quad (8)$$

로 구해지며, n 은 미분차수이다. 수직미분 필터는 포텐셜 장의 고주파 성분을 강화시켜, 천부의 소규모 이상체에 의한 이상을 강조시킨다. 2차 수직 미분은 포텐셜 자료의 1차 수직 미분에 의한 이상의 기울기(slope)의 변화정도인 곡률을 표시한다. 따라서, 2차 수직미분값은 이상의 곡률이 큰 지점에서 큰 값을 가진다. 일반적으로 광역적이고 깊은 이상체에 의한 이상보다 규모가 작고 천부의 이상체에 의한 이상의 곡률이 크므로, 천부의 이상에 의한 효과가 2차 수직 미분에서 강조된다.

3. 결과 및 토의

조사지역은 한반도 동해의 독도 주변지역이고 주변의 심해역으로 이어지며 매우 복잡한 해저지형을 보인다. 독도를 중심으로 반경 약 10 km 지역은 화산체의 정상울 중심으로 수심 약 150 m를 전후하여 매우 평탄하게 형성되어 있다. 그 이후에 서쪽으로 매우 급격한 경사를 보이며 수심이 약 2,200 m까지 급격히 낮아진다(Fig. 1).

대륙붕의 모양은 남쪽이 비교적 넓고 북쪽으로 가면서 점차 좁아지며, 조사지역의 북쪽지역은 해저곡(valley)들

이 심해의 분지로 연결되어 복잡한 해저 지형을 이룬다.

조사지역의 북동, 북서 심해지역은 남서-북동 방향으로 가로지르며, 북서쪽으로는 한국대지의 남쪽 경계지역과 인접해 있으며, 북동쪽으로는 일본분지로 이어지는 울릉해저수로가 연장되어 있다. 이 해저수로는 울릉분지 해저 평원으로 유입된 저탁류 퇴적물의 일부가 수로를 따라 일본분지로 운반되는 이동통로의 역할을 하였을 것으로 판단되고, 울릉해저수로는 저탁류 해저수로(turbidite channel)로 간주된다. 독도 북쪽의 심해지역은 2,300 m 정도로서 매우 평탄한 해저지형으로 발달하여 울릉해저수로와 경계된 지역까지 독도로부터의 많은 해저곡이 형성되어 있다(한상준 외, 1998).

교차점보정은 서로 다른 자료간의 교차점의 오차를 보정해주는 것인데(Park, 1998) 국립해양조사원, 한국자원연구소 두 기관의 자력자료를 취합하여 사용하였기 때문에 자료값의 차이를 이 방법을 사용하여 상호보정하였다. Fig. 2과 Fig. 3은 각각 한국자원연구소와 국립해양조사원에서 측정한 자기이상 값인데 둘 다 안정된 모습을 보여 주긴 하지만 두 자료를 취합하여 그린 Fig. 4를 보면 두 자료 사이에 값의 차이가 있음을 보여주어 선형적인 레벨보정을 실시하였다. 자기이상의 보정전 교차점의 차이값의 표준편차는 62.2 nT인데 보정후는 30.1 nT로 51% 감소되었다. Fig. 5과 Fig. 6는 각각 교차점 보정후의 자기이상값과 총자력값을 보여주며 보정전에 비해 안정되며 신뢰성이 향상되었다. 이 보정된 자료들을 이용하여 자력특성을 분석하였다.

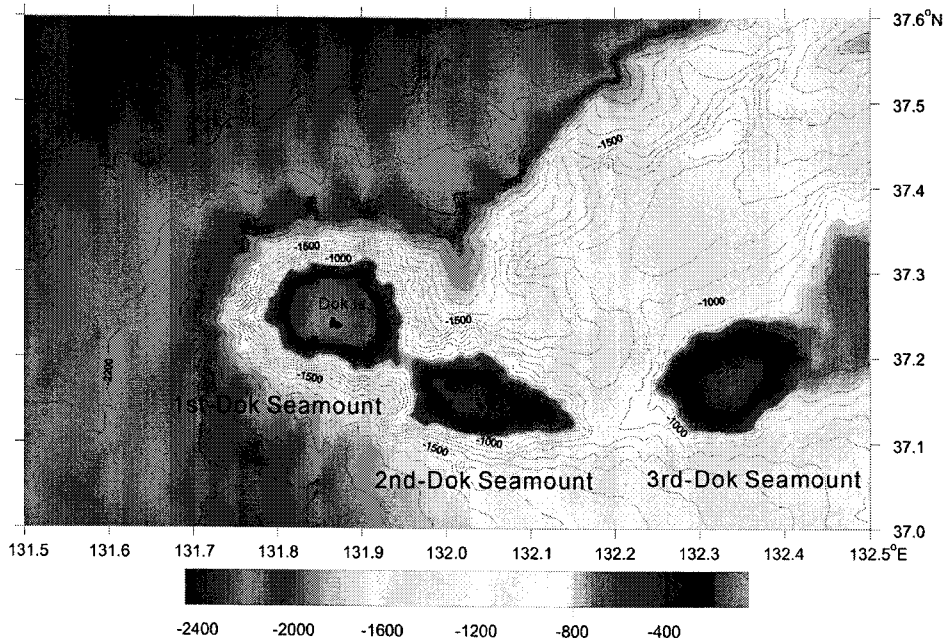


Fig. 1. Bathymetry map of the Dokdo and its surroundings. Contour interval is 100 m.

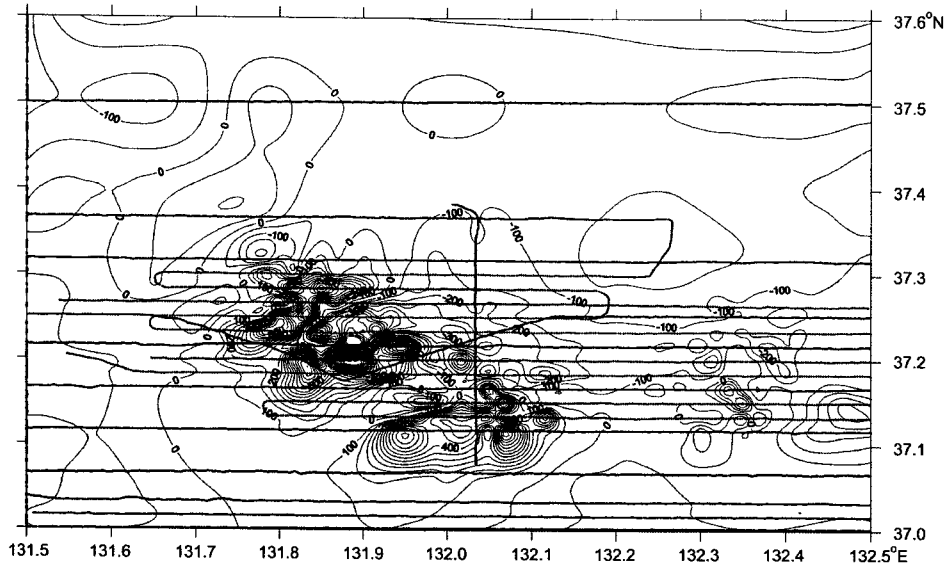


Fig. 2. Magnetic anomaly map by using KIGAM data. Dotted lines are survey track lines. Contour interval is 50 nT.

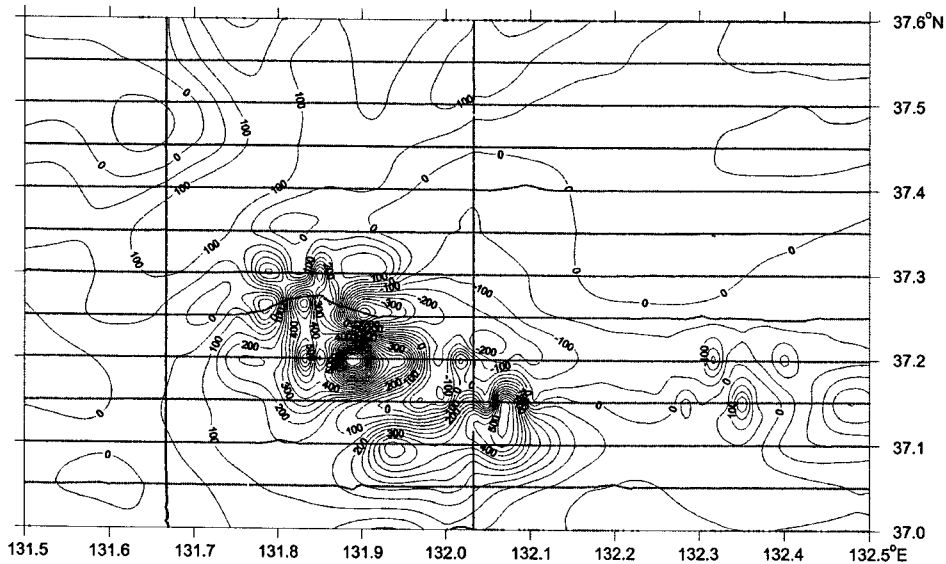


Fig. 3. Magnetic anomaly map by using NORI data. Dotted lines are survey track lines. Contour interval is 50 nT.

본 연구지역내의 자력을 분석하기 위해서 1' 간격으로 자료를 격자화하여 자기이상도(Fig. 5)와 총자력도(Fig. 6)를 작성하였는데 비교하여 보면 총자력도의 모습과 자기이상도의 모습이 거의 흡사하다. 그 이유는 지구전체의 자기장이 이 지역에 미치는 영향보다 해산들이 형성될 당시 남은 잔류자기의 영향이 훨씬 강하기 때문에 이런 모습이 나타나는 것으로 사료된다.

이 지역에서는 세 개의 자기 이상대가 나타나는 데 모두 세 개의 해산을 중심으로 나타난다. 제 1 독도해산을 중심으로는 매우 복잡한 양상을 띄는 이상대가 나타나고

제 2 독도해산을 중심으로는 남서서에서 북동동의 선형배열형태의 이상대가 나타나고 제 3 독도해산을 중심으로는 두 해산 지역에 비해서 작은 값의 양의 이상대와 음의 이상대가 존재하는 것으로 보인다(Fig. 5). 자기이상도에서 서쪽으로 $-100 \sim 0$ nT 정도의 음의 이상값으로 시작해서 동쪽으로 제 1 독도해산지역으로 가면서 $700 \sim 800$ nT 정도의 양의 이상값으로 증가했다가 제 1 독도해산 정상부에서 약 -600 nT 정도의 음의 이상값으로 갑자기 감소하여 음의 이상대가 길게 서쪽으로 뻗어서 제 2 독도해산의 음의 이상대와 연결되는 모습을 보인다. 그 음의 이상대

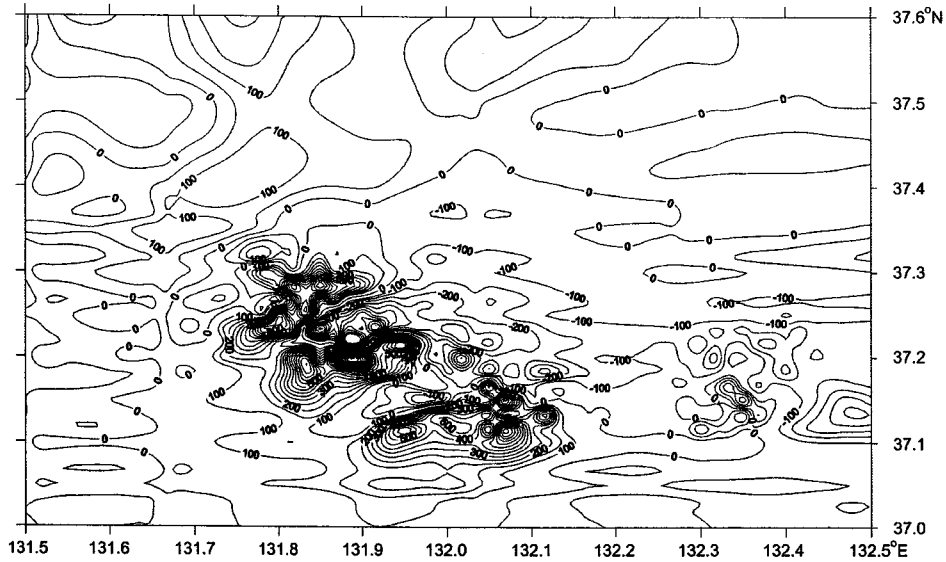


Fig. 4. Magnetic anomaly map by using KIGAM data and NORI data before crossover adjustment. Contour interval is 50 nT.

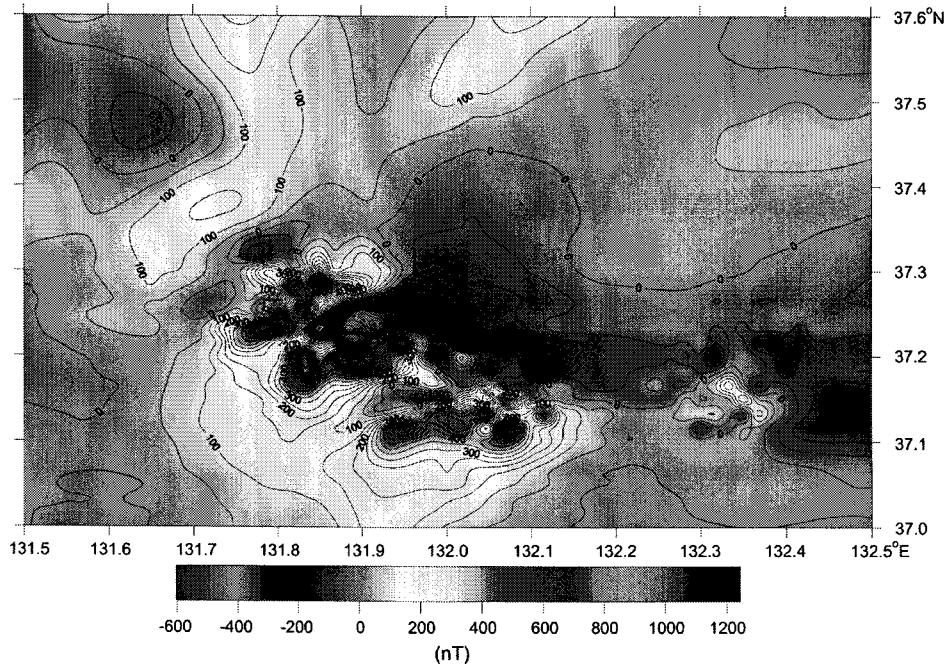


Fig. 5. Magnetic anomaly map by using KIGAM data and NORI data after crossover adjustment. Contour interval is 50 nT.

남쪽으로는 약 1000 nT의 양의 이상대가 나타나는데 전체적인 모습은 제 1 독도해산 정상부의 음의 이상대를 그 주변의 여러 고이상대들이 감싸고 있는 모습을 보인다. 제 2 독도해산은 제 1 독도해산과 약 0 nT의 등자력선을 경계로 구분지어지며 쌍극자의 자기 배열이 남서서에서 북동동의 긴 선형배열로 나타나는 것이 특징이며 정상부에

는 남쪽으로는 약 600 nT의 양의 이상대와 그 북쪽으로는 약 -200 nT의 음의 이상대가 보이고 있다. 비교적 제 1 독도해산보다는 단순한 선형배열의 자기이상 형태를 보이고 있다.

제 2 독도해산에서 동쪽으로 가면서 점차적으로 자기 이상값이 줄어 들면서 약 -100 nT 등자력선에 의해 경계

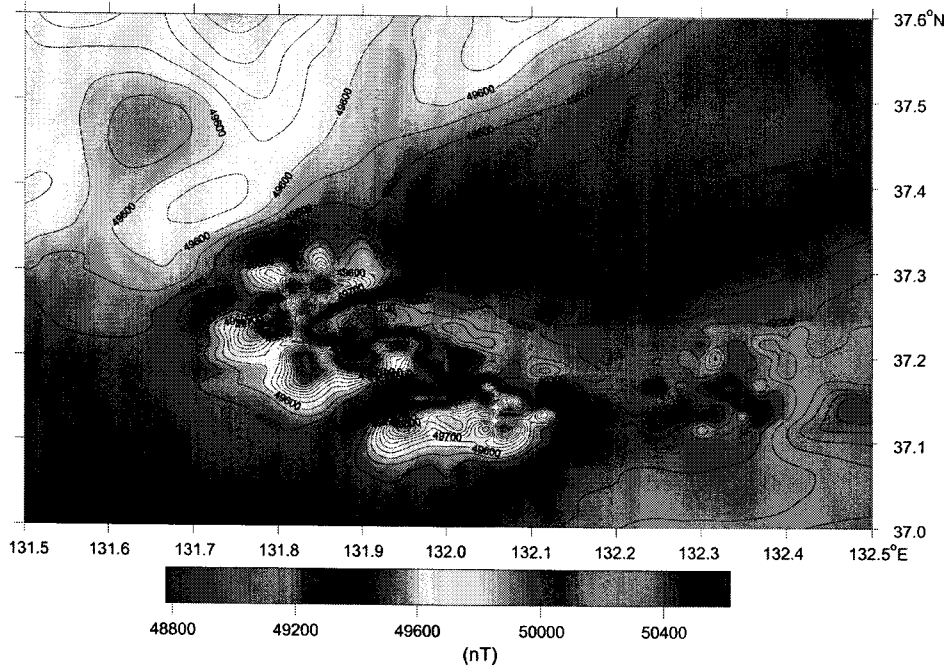


Fig. 6. Total magnetic intensity map by using KIGAM data and NORI data after crossover adjustment. Contour interval is 50 nT.

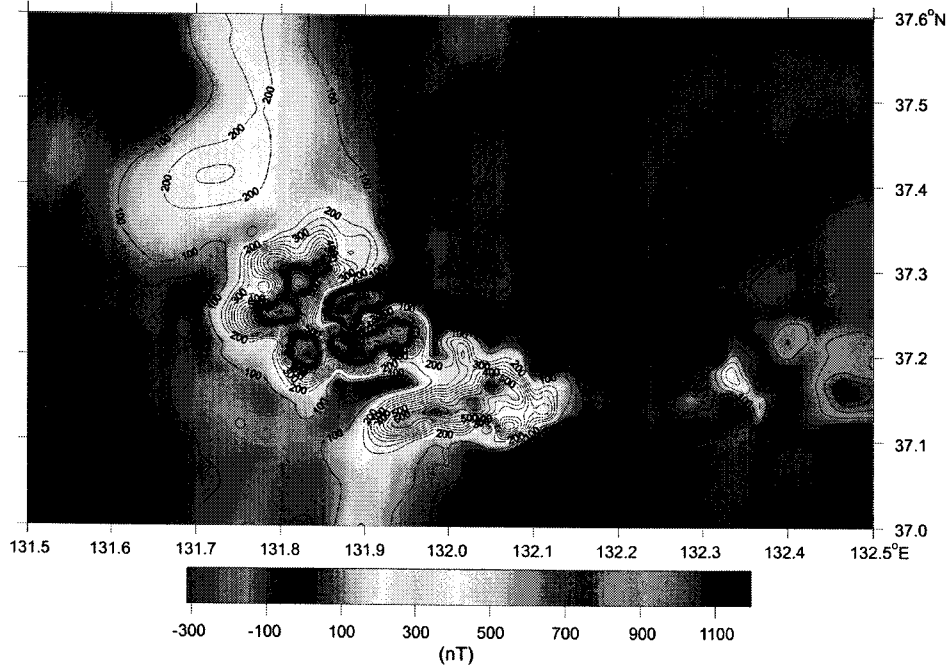


Fig. 7. Magnetic anomaly reduced to the pole map. Contour interval is 50 nT.

지워지며 제 3 독도해산의 정상부는 약 200 nT 정도의 양의 이상대를 형성하고 있고 그 주변부는 약 -100 nT 정도의 음의 이상대가 분포하고 있다. 제 3 독도해산에서 동쪽 오키뱅크로 갈수록 음의 이상대가 값이 감소하면서 나타

난다.

자기이상 자료의 정확한 해석을 위하여 본 연구에서는 자극화변환, 2차수직미분 및 아날네틱 신호를 분석하였다. 자기이상은 측정당시의 지자기장의 방향인 편각과 북

각에 따라 동일한 이상체에 대해서도 다양하게 나타나므로 수직자화에 의한 효과로 변화시키는 자극화변환을 실시하여야 한다. 본 연구에서는 연구지역의 중심점의 편각과 북각인 $N7.9^{\circ}W$ 와 52.5° 를 기준으로 자극화변환을 실시하였다. 자극화변환을 실시한 결과는 Fig. 7과 같으며

분포범위는 $-386.9 \sim 1431.9$ nT, 평균은 -43.7 nT, 표준편차는 155.8 nT이다. Fig. 7과 같이, 본 연구지역의 자극화변환이상은 연구지역 북부에서 서부에 이르는 약 $100 \sim 200$ nT의 이상대와 세 개의 해산을 중심으로 나타나는 이상대로 특징지어진다. 제 1 독도 해산은 해산의 중앙부에

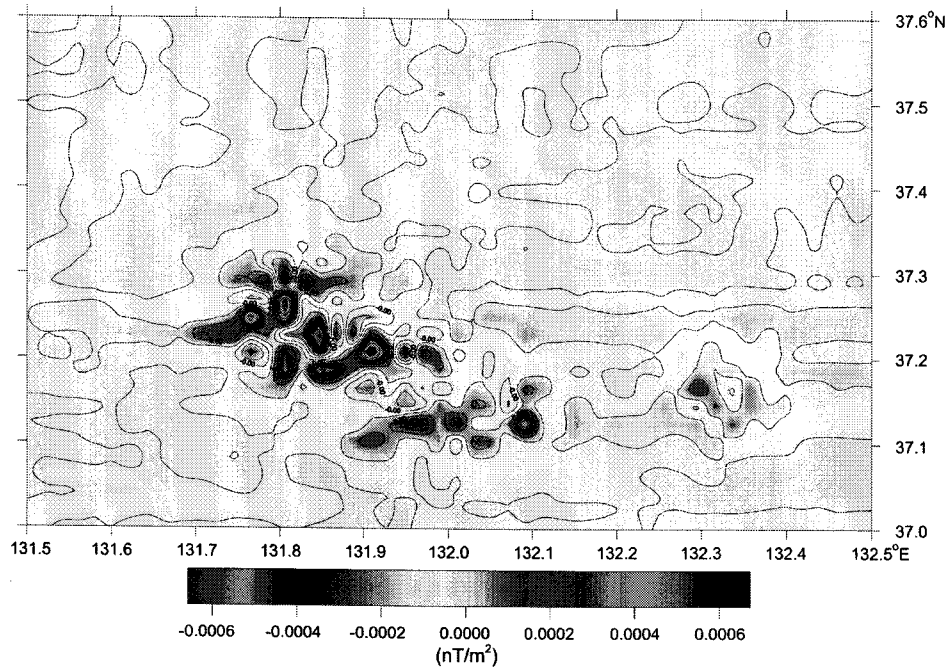


Fig. 8. Second vertical derivative map.

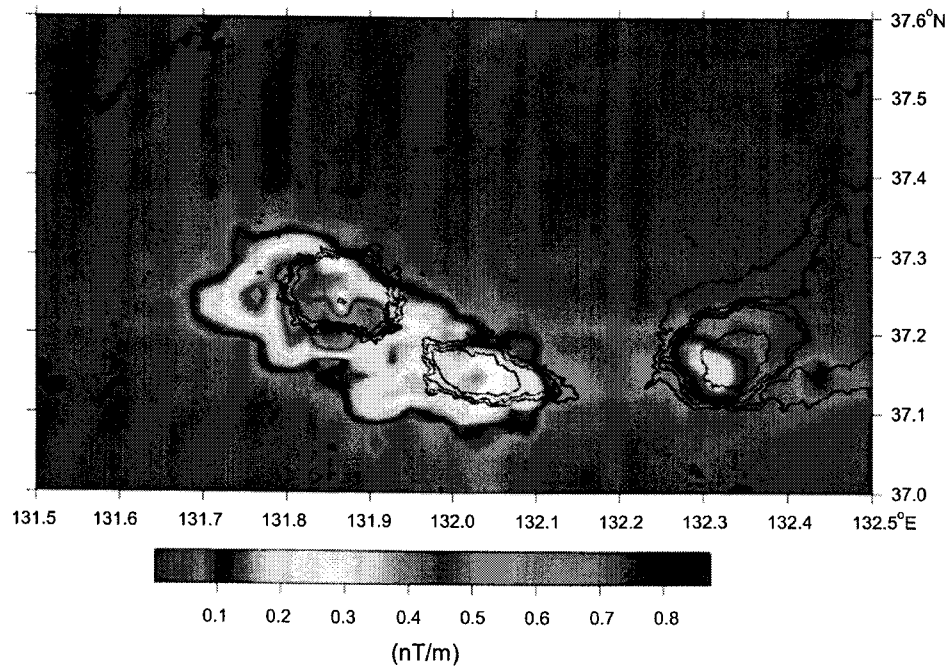


Fig. 9. Analytic signal map.

서 동부에 이르는 부분은 저이상을, 나머지 연변부는 고이상을 나타낸다. 제 2 독도해산은 북부의 저이상대와 남부의 고이상대가 나타나는 선형배열형태를 이루며, 제 3 독도해산은 중심부에 100 nT 전후의 작은 이상대가 존재한다. 독도 해산을 따른 자기이상은 제 1 독도해산에서 중앙부는 저이상이, 연변부에서는 고이상이 가장 특징적으로 나타난다. 반면에 제 2 독도해산의 중심부에서는 주위보다 높은 약 800 nT, 제 3 독도해산에서는 200 nT의 고이상만이 나타난다.

이차 수직미분된 후의 자기이상은 Fig. 8과 같으며 $-0.001 \sim 0.001 \text{ nT/m}^2$ 의 분포를 나타내며, 평균은 0.0014 nT/m^2 , 표준편차는 0.006 nT/m^2 이다. 1차 수직미분 및 수평미분을 이용하여 구한 아날니틱 신호는 $0.001 \sim 1.073 \text{ nT/m}$ 의 범위를 가지며, 평균은 0.049 nT/m , 표준편차는 0.097 nT/m 이다(Fig. 9). Fig. 8의 2차 수직미분치의 고이상은 3개의 해산 모두에서 주로 급격한 경사를 보이는 해산의 연변부를 따라 원형을 이룬다. 이러한 단주기의 이상은 천부의 지질 특성을 반영하는 것으로 자기이상분포나 총자력분포에서 잘 확인하기 어려운 것이었다. 이러한 원형의 분포는 해산의 형성과 관련이 있는 화구의 형태로 예측된다. 그러나 2차 수직미분 이상은 고이상과 저이상이 연속적으로 반복되므로 정확한 형태의 예측 및 연장성을 고찰하기 힘들다. 반면에 Fig. 9의 아날니틱 신호 분포에서는 독립적인 이상의 분리가 가능하다. Fig. 9에서와 같이 제 1 독도해산은 4개의 분리된 고이상이, 제 2 독도해산은 3개의 이상이 원형으로 분포하고 있으며, 급경사의 연변부를 따라 배열하고 있음을 보인다. 이러한 고이상은 화륜으로 예상되며, 해산을 형성시킨 화산활동 이후 침식 작용 또는 함몰에 의해 해산의 상부는 편평해졌지만, 일부 화륜의 위치에서 subsidiary cone들의 영향으로 독립적인 고이상이 나타나는 것으로 해석되고 제 1 독도해산의 정상부에서 고이상이 많이 분포하고 있음을 보인다. 독도가 위치하고 있는 제 1 독도해산 주변이 복잡한 자기이상을 보이는 이유는 제 1 독도해산의 생성이 한번의 화산분출에 의한 것이 아니라 여러 시기에 걸쳐 여러 번 분출했거나, 먼저 생성된 암체가 다음 분출 때 회전과 같은 위치변동을 받았을 수도 있다는 것을 암시한다. 또한 제 2, 제 3 해산보다 후기에 분출했을 가능성을 제시한다. 이와 같이 해산들의 형성 위치가 비슷함에도 불구하고 해산에서의 자력분포 양상이 다른 것은 해산들의 형성 시기가 서로 다르거나 형성환경이 다른 마그마가 분출했을 수도 있다는 것을 간접적으로 나타낸다. 동해의 형성과 판구조론과 관련지어 생각해보면 해산들의 형성시기가 다르다는 것이 더 타당하게 생각된다. 판의 하부에 존재하는 맨틀 플룸(mantle plume)에 의해 판이 이동하면서 연결된 해산들이 차례로 생성되었을 것이다(White, 1989). 수면위로

올라와 있는 독도 육상에서 수행된 연대측정분석에 의하면 초기 플라이오세부터 후기 플라이오세까지 독도가 생성되어 현재와 같은 모습을 갖추게 되었다(Sohn, 1995). 수심 밑에 있는 해산들의 생성시기를 알수 없지만 동해의 생성과 함께 생각해본다면 독도의 해산을 생성시킨 맨틀 플룸은 제 1 독도해산 서측에 있었을 것으로 추정되며 제 3 독도해산이 가장 먼저 생성된 후에 지각이 동쪽으로 이동하고 다시 제 2 독도해산이 생성되고 마지막으로 제 1 독도해산이 생성되었을 것으로 추정된다. 제 1 독도해산의 수면위에서 관찰된 가장 최근 암석이 후기 플라이오세의 암석으로 추정되므로 제 3 독도해산은 플라이오세 훨씬 이전에 생성되었을 것으로 생각해볼 수 있다. 제 3 독도해산과 같이 저자기이상대의 원인은 여러 가지가 있지만 2차변환, 즉 변성작용이나 풍화에 의해서 원래 암석에 함유되어있던 강자성광물이 변화하여 이와 같은 현상이 나타날 가능성이 가장 높다(Gorodnitsky, 1995).

그러나 동해가 생성되면서 어떤 변형을 받았는지 그리고 몇 번 분출에 의해 생성이 되었는지 알수는 없다. 보다 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 ODP(Ocean Drilling Project)와 같은 작업을 통해 독도해산들의 생성연대와 각 시대의 자화방향을 측정한다면 독도해산들의 생성이 동해의 생성과 관련하여 많은 정보를 우리에게 제공해 줄 것이다.

4. 결 론

서태평양 배호상분지인 동해는 울릉분지, 일본분지 그리고 야마토분지로 구성되며, 독도는 울릉분지의 북쪽 경계부분에 위치하고 있으며 평균 수심 2000 m의 해양 평원에 솟아있는 화산섬으로 동도와 서도로 이루어져 있다. 기존의 독도에 대한 연구는 대부분 국지적이고 산발적으로 이루어졌으며 주로 육상 부분에 대한 지형학적연구가 수행되었다. 그러나 독도는 수면 밑의 울릉도와 비슷한 규모의 해산을 가지고 있다.

서로 다른 조건에서 획득된 자료임을 감안하여 자기이상의 오차를 줄이기 위해 crossover 보정을 실시하였다. 자력자료의 교차점 오차보정은 62.2 nT에서 30.1 nT로 51% 감소하였다. 자기이상의 특징은 해산들 주변에서 복잡한 형태로 나타나는데 제 1 독도해산이 가장 복잡하고 제 2 독도해산은 남서서-북동동 방향의 선형배열이 나타나며 제 3 독도해산은 약한 쌍극자의 이상이 나타난다. 이렇듯이 자기이상이 복잡한 이유는 독도해산들이 한번의 분출로 생성된 것이 아니라 여러시기에 걸쳐 여러번의 분출에 의해 생성되었거나 형성환경이 다른 마그마가 분출되었다는 것을 암시한다. 제 1 독도해산의 복잡한 변화 양상으로 보아 시기상으로 제 1 독도해산이 제 2 독도해산이

나 제 3 독도해산보다 후기에 분출했을 가능성이 크다고 볼수 있다. 동해의 생성과 판구조론과 관련시켜 생각해보면 제 3 독도해산이 먼저 생성되고 제 1 독도해산이 가장 최근에 생성됨을 추정해 볼 수 있고 이들을 생성시킨 맨틀 플룸의 위치는 제 1 독도해산의 서측에 위치했을 것이라고 생각된다. 제 1 독도해산의 수면위 독도에서 관찰된 암석 중 가장 최근 암석이 후기 플라이오세의 암석으로 추정되므로 제 3 독도해산은 플라이오세 훨씬 이전에 생성되었을 것으로 생각된다. 천부 지질의 특성을 반영하는 단주기의 고이상은 3개의 해산 모두에서 주로 급격한 경사를 보이는 해산의 연변부를 따라 원형을 이룬다. 이러한 원형의 분포는 해산의 형성과 관련이 있는 화구의 형태로 예측된다.

제 1 독도해산의 자기이상의 양상은 해수면 아래 화구륜 주위의 subsidiary cone들의 영향 때문이라고 추정되며 제 1 독도해산의 생성이 한번의 화산분출에 의한 것이 아니라 여러시기에 걸쳐 여러번 분출했거나 먼저 생성된 암체가 다음 분출 때 회전과 같은 위치변동을 받았을수도 있다는 것을 암시한다.

사 사

이 연구는 해양수산부의 지원하에 한국해양연구원의 주관으로 1999년부터 2000년까지 수행된 “독도 생태계 등 기초조사 연구(BSPM 99045-00-1282-6)”의 연구비를 통해 이루어졌다. 이 연구를 할 수 있도록 도와주신 해양수산부와 한국해양연구원 관계자에게 감사할 드리며 현장조사에 아낌없는 도움을 주신 이어도호 승조원분들께 감사할 드린다. 또한 귀중한 자료를 함께 이용하도록 도와주신 한국지질자원연구원과 국립해양조사원의 여러분들께 감사를 드린다.

참고문헌

한상준 등. 1996. 한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구 (II-III). 548 p. 한국해양연구소(BSPN00312-950-5).
 한상준 등. 1998. 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구(2차년도). 101 p. 한국해양연구소(BSPE 98709-00-136-5).
 Blakely, R.V. 1995. Potential theory in gravity and magnetic

application. Cambridge Univ. press, p. 141-342.
 Gorodnitsky, M.A. 1995. Anomalous Magnetic Field of the World Ocean. CRC Press, Moscow, p. 171-222.
 Hsu, S.K., J.C. Sibuet, and C.T. Shyu. 1996. High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. *Geophysics*, 61(2), 373-386.
 Jolivet, L., P. Huchon, X. Lepichon, N. Chamot-Rooke, and J.C. Thomas. 1991. Arc Deformation and Marginal Basin Opening: Japan Sea as a Case Study. *J. Geophys. Res.*, 96(B3), 4367-4384.
 Nabighian, N.M. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.
 Nabighian, N.M. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39, 85-92.
 Park, C.H. 1998. Crustal structure and evolution of the Ulleung Basin in the east sea of Korea(the Japan Sea) by deep penetrating seismic refraction, reflection, and potential field data. Ph. D. Thesis, Univ. Chiba. p. 10-217.
 Roest, W.R., J. Verhoef, and P. Mark. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 37(1), 116-125.
 Sohn, Y.K. 1995. Geology of Tok Island, Korea: Eruptive and Depositional Processes of a Shoaling to Emergent Island Volcano. *Bull. Volcanol.*, 56, 660-674.
 Sohn, Y.K. and K.H. Park. 1994. Geology of Tok Island, Korea. *J. Geol. Soc. Korea.*, 30(3), 242-261.
 Thurston, J.B. and R.J. Brown. 1994. Automated source-edge location with a new variable pass-band horizontal-gradient operator. *Geophysics*, 59(4), 546-554.
 Walter, R.R., J. Verhoef, and P. Mark. 1992. Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116-125.
 White, R. and D. Mckenzie. 1989. Magmatism at Zones: The Generation of Volcanic Continental Margins and Flood Basalts. *J. Geophys. Res.*, 94(B6), 7685-7729.

Received Oct. 21, 2002

Accepted Dec. 24, 2002