

## 중력자료와 지형자료를 이용한 울릉분지 해산들의 지각평형에 관한 연구(독도해산들을 중심으로)

김창환<sup>1)</sup>, 박찬홍<sup>2)</sup>, 유상훈<sup>3)</sup>, 심재설<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 한국해양연구원 해저환경·자원연구본부, [kimch@kordi.re.kr](mailto:kimch@kordi.re.kr)

<sup>2)</sup> 한국해양연구원 해저환경·자원연구본부, [chpark@kordi.re.kr](mailto:chpark@kordi.re.kr)

<sup>3)</sup> 연세대학교 지구시스템학과, [ysh@yonsei.ac.kr](mailto:ysh@yonsei.ac.kr)

<sup>4)</sup> 한국해양연구원 연안항만·공학연구본부, [jsshim@kordi.re.kr](mailto:jsshim@kordi.re.kr)

### 1. 서 론

동해의 서남부에 위치한 울릉분지는 동해의 생성기 중 말기인 15 Ma에서 12 Ma 시기에 생성된 것으로 추정하고 있으며 연구지역인 울릉분지 북동쪽의 해산들은 해수면 위의 독도는 작은 반면 해수면 아래는 울릉도같이 큰 화산체들로 이루어져 있다(Lee *et al.*, 1999; 송원오 등, 2000). 수면위의 독도에서 얻은 암석의 연대측정으로 독도의 생성 연대는  $4.6 \pm 0.4$  Ma 인 초기 플라이오세에서  $2.7 \pm 0.1$  Ma인 후기 플라이오세 사이에 형성되었다고 밝혀졌다(손영관 등, 1994). 이 결과에 따르면 독도는 동해가 생성된 후 10 Ma가 지난 후에 생성되었다고 사료되지만 이것은 수면위의 독도에 대한 조사만을 가지고 추정한 것이며 수면아래의 해산들의 연대측정과 같은 조사는 이루어진바 없다. 이와 같은 수면아래의 해저 화성암체(하와이 해산들, 온통자바 대지 등)의 지구조 진행, 특히 지각 평형 보상을 잘 이해하기 위해 중력과 수심자료가 광범위하게 사용되어져 왔다(Watts, 2001). 본 연구에서는 선상중력계와 다중빔 음향측심기로 측정된 중력자료와 수심자료를 이용하여 해산들의 지각평형에 관하여 연구함으로써 울릉분지의 진화와 관련된 독도해산들의 형성에 관하여 이해하고자한다.

### 2. 연구 방법

후리에어이상은 지형과 밀접한 관계를 보이고 지각위에 짐(load)의 규모와 지각의 flexural response에 민감하며 이들 사이의 관계는 아래 수식과 같이 정의 된다.

$$Z(k) = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \Delta \frac{g(k)}{H(k)}$$

$Z(k)$ 는 중력 어드미턴스(gravitational admittance)로서 Fourier 변환에서 주파수영역에서의 지형과 중력의 관계를 나타낸다.  $\Delta g(k)$ 와  $H(k)$ 는 각각 중력과 지형의 Fourier 변환값이다. 여기서 지각, 짐(load)과 보상되는 채움(infill)의 밀도는 같고 지각은 균일하다고 가정한다(Watts, 2001).

이 중력 어드미턴스를 이용하여 지각평형이 보상이 안 된 모델, 유효탄성판(flexure) 모델 및 Airy 모델을 가정하여 구한 중력 계산치와 선상중력계로부터 얻은 중력 관측치에 대하여 correlation과 RMS를 구하고 서로 비교함으로써 독도해산들의 지각평형보상의 정도를 알아 보았다. 또한 이 결과로부터 얻은 독도해산들 하부 지각의 유효탄성두께와

주요어 : 독도해산, 지각평형보상, 후리에어이상, 중력어드미턴스, 유효탄성판모델, cooling plate model

다른 지역의 해산들 하부 지각의 경우를 비교하여 독도해산들의 형성시기와 형성환경에 관하여 유추하여 보았다.

### 3. 결과 및 토의

Fig. 1 (a)와 (b)는 연구지역의 등수심도와 후리에어 중력이상을 보여주고 있는데 등수심도와 후리에어 이상은 형태적으로 흡사한 모습으로 나타나고 있으며 해산들의 크기에 비해 낮은 이상치를 보이는데 이는 지각평형보상이 어느 정도 이루어져있음을 제시한다 (김창환, 2000). 이와 같이 규모에 비해 낮은 중력 이상치를 보이는 경우는 태평양의 사스키 플라토와 하와이 해산들에서도 나타난다(Han, 1992; Watts, 2001).

Fig. 2 (a)은 Fig. 1 (a)의 해산들에 따른 지형단면도인데 그 규모에서 세 개의 해산들은 비슷한 크기를 보이고 있다. Fig. 2 (b)는 해산들의 후리에어 중력이상 단면을 보여 주는데 제 1 독도해산이 가장 큰 값을 가지며 제 2 독도해산이 그 다음 큰 값을 가지며 제 3 독도 해산이 가장 작은 값을 가지는데 제 1 독도해산 최고치와 제 3 독도 해산의 최고치는 약 50 mGal의 차이를 보이는데 이 두 해산이 규모면에서는 비슷하지만 후리에어 이상이 이와 같은 차이가 나는 이유는 보상정도의 차이로 생각된다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 제 1 독도해산, 제 2 독도해산, 제 3 독도해산의 단면들의 관측된 중력이상치를 (a) 보상이 안 된 모델의 계산치, (b) 유효탄성판모델에 의한 계산치, (c) Airy 모델에 의한 계산치를 비교하여 놓은 그림이다. 퇴적층에 의해 덮혀진 평평한 북쪽지역을 제외한 해산 근접지역, 사면, 정상부에 대하여 구한 correlation 값과 RMS 값은 Table 1과 같다. Table 1의 결과와 Fig. 3, 4, 5를 보면 제 1 독도해산에서 제 3 독도해산으로 갈수록 보상이 안 된 모델에서 Airy 모델에 가깝게 근접하는데 유효탄성판 모델에서는 세 개의 해산들의 유효탄성두께 ( $T_e$ )는 제 1 독도해산이 5km, 제 2 독도해산이 3km, 제 3 독도해산이 2km 로 가정하여 계산하였고 이 계산치가 해산들의 후리에어 관측치와 가장 잘 부합되는 것으로 판단된다. 이 결과로 유효탄성판모델의 강도(탄성 두께,  $T_e$ )가 제 3 독도해산에서 제 1독도해산으로 갈수록 강해짐(두꺼워짐)을 알 수 있다. 해저 화산체의 중력이상은 화산체가 위치한 해저 지각의 탄성도에 매우 민감하며 유효탄성 두께는 탄성도의 척도이고 화산체가 생성될 때 그 밑의 지각의 열량 연대를 반영한다 (Watts, 2001). 이 결과와 비교하면 제 3 독도해산이 생성될 당시의 지각의 연대가 가장 젊었고 제 1 독도해산이 생성될 때가 가장 오래되었다고 볼 수 있다. 유효 탄성판 모델은 cooling Plate Model의 경우를 따르며 해구(trench)보다 해령(ridge)과 같은 spreading center에서 잘 일치하는데, 즉 해산의 생성시기의 지각연대가 젊을수록 잘 일치하는 경향을 보인다. 젊은 지각(<25M.y.)인 경우는 2-20Km의  $T_e$  값에 잘 들어맞으며 해산의  $T_e$ 는 Cooling plate model에서 isotherm 200° C-400° C사이의 구간에 들어가며 해구의  $T_e$ 는 600° C-800° C사이의 구간을 따라간다(Fig. 6).

독도해산들의 경우는 계산된  $T_e$ 값을 보면 약 2-5 Km 정도로 예상되며 이 값은 태평양에서 해령 근처에서 생성된 해산들의 경우와 비슷한 것으로 비교되며 이에 따라 독도해산들은 spreading center가 있는 해양지각 위에 생성되어진 것이고 그 center의 위치는 독도해산들에서 가까이에 있었을 것으로 판단된다. 독도해산들이 Fig. 6의 그림과 같이 isotherm 200° C-400° C 사이 구간을 따른다고 가정하고 육상연대측정의 결과를 토대로 유추하여 보면 해산들의 생성시기의 범위는 울릉분지가 완성된 후 1 Ma - 10 Ma의 기간사이에 형성 이 되었으며 생성순서는 제 3 독도해산이 가장 먼저 생성되었고 제 2 독도해산, 제 1 독도해산의 순으로 생성되었을 것으로 생각된다. 제 3 독도해산의 생성시기는 울릉분지의 열개가

중력자료와 지형자료를 이용한 울릉분지 해산들의 지각평형에  
 관한 연구(독도해산들을 중심으로)

끝난 다음 1-3Ma정도 지난후 즉 약 14-11Ma 정도로 판단되다. Fig. 7. (a)는 자기이상도이며 Fig. 7. (b)는 해산들의 자기이상단면이다. 여기서 볼 수 있듯이 제 1 독도해산과 비교하여 제 3 독도해산에서 저자기이상이 나타나는데 그 원인으로 생각되는 생성 후 오랜시간이 지나면서 2차 변환, 즉 변성작용이나 풍화에 의해서 원래 암석에 함유되어있던 강자성 광물이 변화하여 이와 같은 현상이 나타날 가능성과 일치하는 결과이다(Gorodnitsky, 1995). 중력자료를 이용한 방법과 함께 자력자료를 이용하여 계산할 수 있는 고지자기극을 분석하여 본다면 독도해산들의 생성시기에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각되며 이를 통하여 울릉분지의 진화연구에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

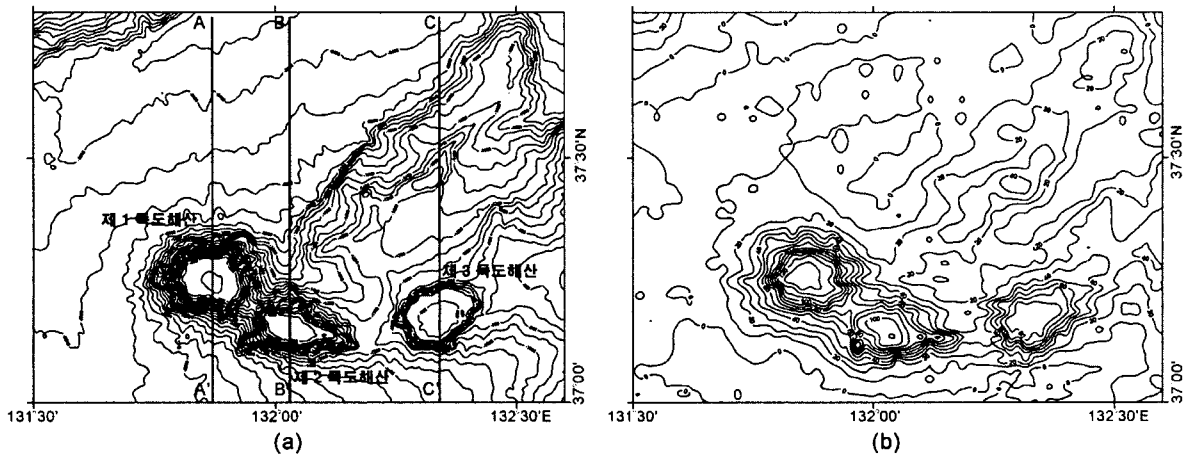


Fig. 1. (a) Topographic map of the study area, (b) Free-air gravity anomaly map

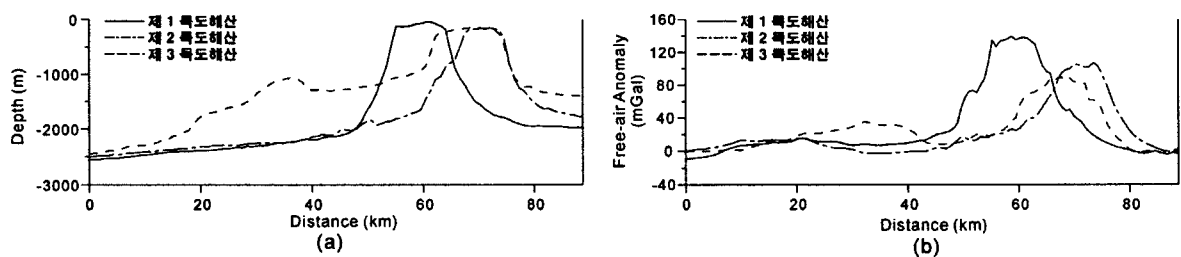


Fig. 2. (a) Topographic profiles of seamounts(see Fig. 1 (a)), (b) Free-air gravity anomaly profiles

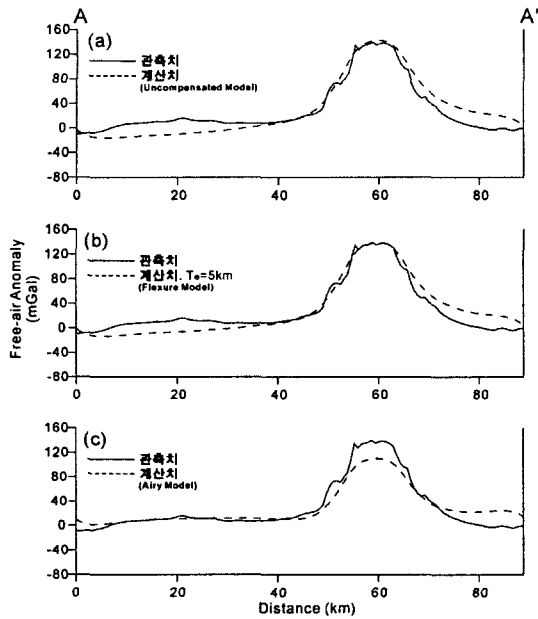


Fig. 3. Comparison between observed values and calculated values of profile A-A'(see Fig. 1 (a))

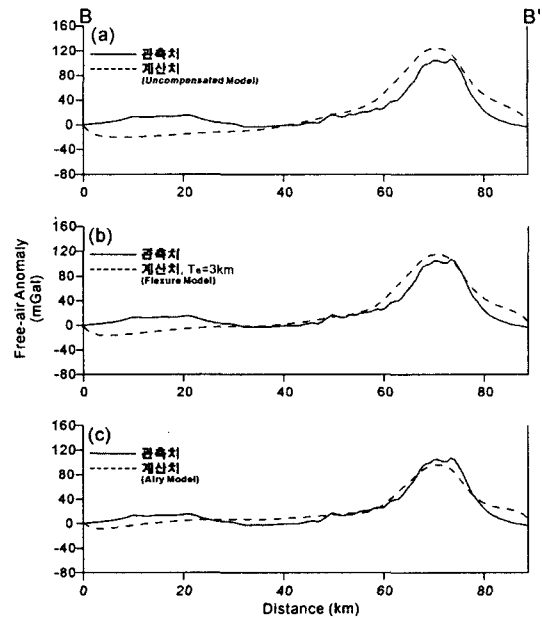


Fig. 4. Comparison between observed values and calculated values of profile B-B'(see Fig. 1 (a))

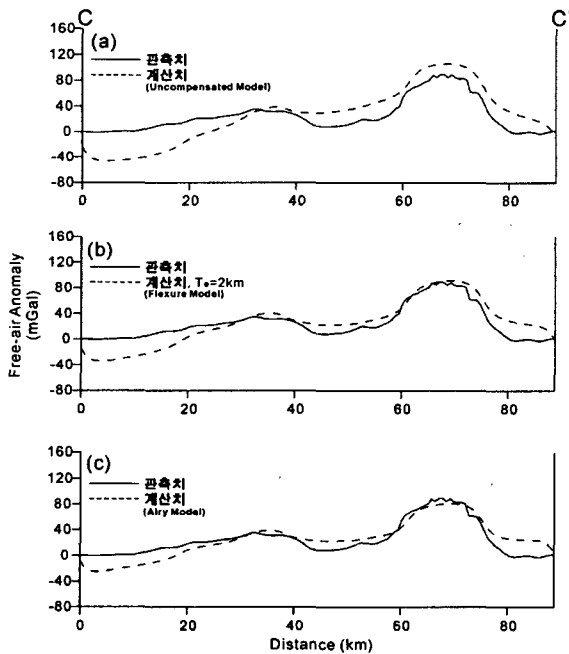


Fig. 5. Comparison between observed values and calculated values of profile C-C'(see Fig. 1 (a))

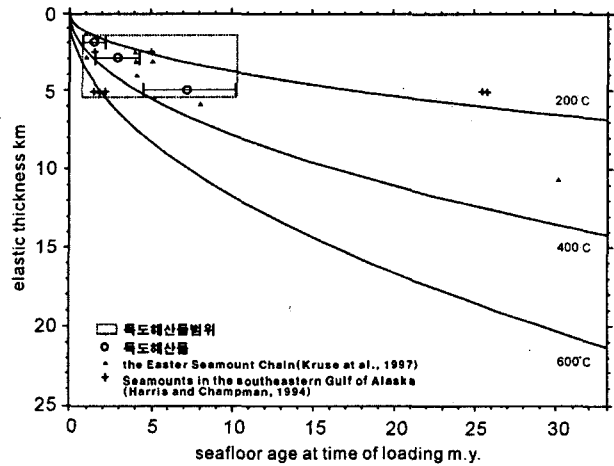


Fig. 6.  $T_e$  versus age of sea floor at time of loading. Curves are isotherm for the cooling plate model (parson and sclater, 1977).

중력자료와 지형자료를 이용한 울릉분지 해산들의 지각평형에  
 관한 연구(독도해산들을 중심으로)

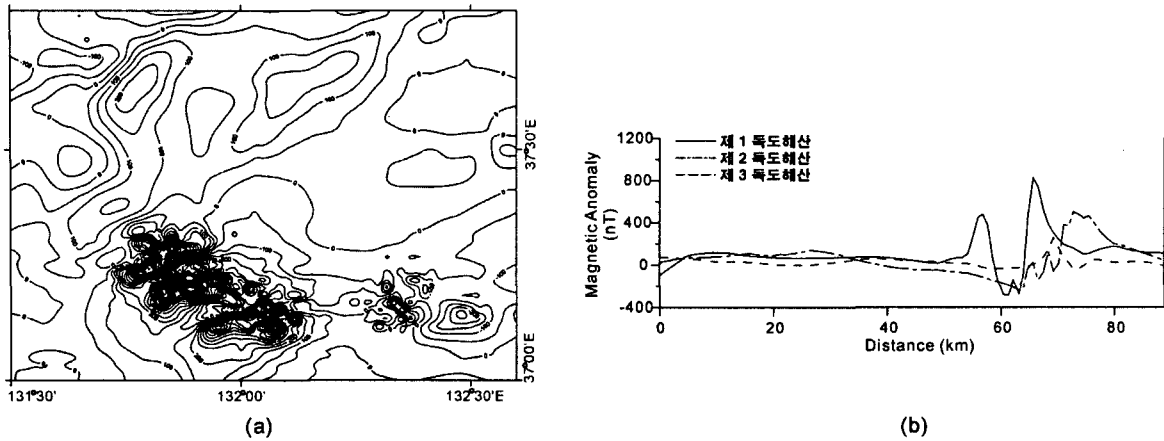


Fig. 7. (a) Magnetic anomaly map of the study area and (b) Magnetic anomaly profiles.

Table 1. Correlation and RMS of observed value and calculated value

모델 해산	제 1 해산 (Fig. 3)	제 2 해산 (Fig. 4)	제 3 해산 (Fig. 5)
Uncompensated	corr=0.969 RMS=9.582 mGal	corr=0.954 RMS=11.38 mGal	corr=0.905 RMS=11.47 mGal
Flexure	corr=0.971 RMS=9.252 mGal	corr=0.964 RMS=8.249 mGal	corr=0.93 RMS=8.538 mGal
Airy	corr=0.969 RMS=13.85 mGal	corr=0.972 RMS=7.64 mGal	corr=0.933 RMS=9.017 mGal

#### 4. 참고문헌

- 김창환 (2000) 지구물리자료를 이용한 독도 및 그 주변의 지구조연구. 연세대학교 지구시스템과 학과 석사학위 논문, p. 1-83.
- 손영관, 박기화 (1994) 독도의 지질과 진화. 지질학회지, v.30, p.242-261.
- 송원오 등 (2000) 독도 생태계 등 기초조사 연구. 한국해양연구소 (BSPM99045-00-1282-6), p. 385-600.
- Gorodnitsky, M.A. (1995) Anomalous Magnetic Field of The World Ocean. CRC Press, Moscow, p. 171-222.
- Han, H.C. (1993) Geophysical constraints on the origin of the Shatsky Plateau: Ph. D. Dissertation, Texas A&M University, p. 48-235
- Harris, R.N. and Chapman, D.S. (1994) A comparison of mechanical thickness estimates from trough and seamount loading in the southeastern Gulf of Alaska. J. Geophys. Res., Vol. 99, B5, p. 9,297-9317.
- Kruse, S.E., Liu, Z.J., Naar, D.R. and Duncan, R.A. (1997) Effective elastic thickness of the lithosphere along the Easter Seamount Chain. J. Geophys. Res., Vol. 102, B12, p. 27,305-27,317.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Suh, M.C. and Hong, J.K. (1999) Crustal Structure, Volcanism and Opening mode of the Ulleung Basin, East Sea(Sea of Japan). Tectonophysics, 308, p. 503-525 .

- Parsons, B. and Sclater, J.G. (1977) An analysis of ocean floor bathymetry and heat flow with age. *J. Geophys. Res.*, 82, p. 803-827.
- Watts, A.B. (2001) *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. Cambridge Univ. Press, P. 45-249.