

포텐셜 자료해석을 통한 화산칼데라 구조 해석

박계순^{1,*} · 류희영¹ · 양준모³ · 이희순² · 권병두¹ · 임주영¹ · 김동오¹ · 박찬홍³

¹서울대학교 사범대학 지구과학교육과, 151-742 서울특별시 관악구 신림동 관악로 599

²경인교육대학교 과학교육과, 430-804 경기도 안양시 만안구 경인교대길 353

³한국해양연구원, 426-744 경기도 안산시 상록구 해안로 454

Analysis of the Geological Structure of the Hwasan Caldera Using Potential Data

Gyesoon Park^{1,*}, Hee-Young Yoo¹, Jun-mo Yang³, Heuisoon Lee², Byung-Doo Kwon¹, Joo-Young Eom¹, Dong-O Kim¹, and Chan Hong Park³

¹Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Department of Science Education, Gyeongin National University of Education, Gyeonggi 430-804, Korea

³Korea Ocean Research and Development Institute, Gyeonggi 426-744, Korea

Abstract: A geophysical mapping was performed for Hwasan caldera which is located in Euisung Sub-basin of the southeastern part of the Korean Peninsula. In order to overcome the limitation of the previous studies, remote sensing technic was used and dense potential data were obtained and analyzed. First, we analyzed geological lineament for target area using geological map, digital elevation model (DEM) data and satellite imagery. The results were greatly consistent with the previous studies, and showed that N-S and NW-SE direction are the most dominant one in target area. Second, based on the lineament analysis, highly dense gravity data were acquired in Euisung Sub-basin and an integrated interpretation considering air-born magnetic data was made to investigate the regional structure of the target area. The results of power spectrum analysis for the acquired potential data revealed that the subsurface of Euisung Sub-basin have two density discontinuities at about 1 km and 3-5 km depth. A 1 km depth discontinuity is thought as the depth of pyroclastic sedimentary rocks or igneous rocks which were intruded at the ring vent of Hwasan caldera, while a 3-5 km depth discontinuity seems to be associated with the depth of the basin basement. In addition, three-dimensional gravity inversion for the total area of Euisung Sub-basin was carried out, and the inversion results indicated two followings; 1) Cretaceous Palgongsan granite and Bulguksa intrusion rocks, which are located in southeastern part and northeastern part of Euisung Sub-basin, show two major low density anomalies, 2) pyroclastic rocks around Hwasan caldera also have lower density when compared with those of neighborhood regions and are extended to 1.5 km depth. However, a poor vertical resolution of potential survey makes it difficult to accurately delineate the detailed structure caldera which has a vertically developed characteristic in general. To overcome this limitation, integrated analysis was carried out using the magnetotelluric data on the corresponding area with potential data and we could obtain more reasonable geologic structure.

Keywords: caldera, potential, remote sensing, magnetotelluric

요약: 본 연구에서는 한반도 남동부의 의성분지 내에 위치하는 화산칼데라 지역을 대상으로 지구물리학적 연구를 수행하였다. 기존 연구들의 한계를 극복하기 위해 원격탐사를 통한 전체적인 구조 특성을 분석한 후에 정밀한 3차원 포텐셜 해석을 수행하는 기법을 적용하였다. 첫 번째 단계로, 수치지질도 및 DEM 자료와 인공위성 영상을 이용하여 대상 지역의 선구조를 분석하였다. 선구조 분석 결과는 선행 연구결과와 상당히 잘 부합되었고, 남-북 방향과 남동-북서 방향이 가장 우세함을 보여주었다. 두 번째 단계로, 선구조 분석 결과를 고려하여 의성분지 전체 지역에서 조밀한 중력

*Corresponding author: gyesoon@paran.com

Tel: 82-2-880-4069

Fax: 82-2-874-3289

탐사 자료를 획득하였고 항공자력탐사 자료와의 복합 해석을 통해 광역적인 칼데라의 구조를 조사하였다. 파워 스펙트럼 기법을 이용한 분석 결과, 의성 분지 하부는 개략적으로 2개의 밀도 불연속면이 존재하는 것으로 해석되었다. 첫 번째 불연속면의 심도는 약 1 km로 칼데라 지역 내에 존재하는 화산쇄설성 퇴적암의 심도나 화산칼데라의 ring vent 위치에서 관입하고 있는 관입암의 심도로 판단되며, 두 번째 심도는 약 3-5 km로 분지기반암의 심도와 관련 있는 것으로 추정된다. 또한 3차원 중력역산을 실시한 결과 남서쪽의 백악기 팔공산 화강암과 북동쪽의 불국사 관입암류에 의한 저밀도체가 나타나고, 화산칼데라 중앙부 부근에는 화산쇄설성 퇴적암류 또는 칼데라 형성 과정에서 침강된 상부의 퇴적층으로 해석된 퇴적층이 주변보다 낮은 밀도를 가지며 하부로 약 1.5 km까지 연장되어 있는 것으로 분석되었다. 그러나 포텐셜 자료는 그 특성상 수직 분해능이 양호하지 못하므로, 수직적인 발달 특성을 갖는 칼데라의 구조를 정확히 파악하기는 어렵다. 본 연구에서는 이런 한계점을 극복하기 위해서 동일 지역에서 이루어졌던 자기지전류 탐사 결과와 비교 분석하여 효과적인 해석을 수행하였다.

주요어: 칼데라, 포텐셜 탐사, 원격 탐사, 자기지전류

서 론

칼데라는 화산체의 중심부, 또는 그 가까이에 발달하여 일반적으로 수직 또는 급경사의 내측벽으로 둘러싸여 있는 원형에 가까운 함몰지의 형태를 보인다. 칼데라의 성인에 대하여 함몰설, 폭발설 또는 침식설 등 다양한 설명이 시도되었으나, 대부분의 칼데라는 화산활동 후기에 하부의 빈 공간이 생성되면서 일어나는 대규모 함몰에 의해서 형성된 것이다. 이러한 칼데라 구조는 그 형성과 관련된 마그마활동과 지구 조운동, 광상의 형성, 지열에너지원 등으로서의 중요성 때문에 지질학 및 자원개발의 관점에서 중요한 의미를 가진다. 따라서 지구물리학적 자료의 체계적인 분석과 관리는 국내 칼데라 구조들의 지질학적 성인을 개별적으로 규명하는 데 중요한 단서를 제공해 줄 뿐만 아니라 나아가 한반도의 지구조적 난제를 해결하는 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

국외의 경우, 대상 칼데라 구조의 성인 및 진화과정을 규명하기 위해 상세 지질조사와 더불어 중력 및 자력 탐사, 자기지전류(MT: MagnetoTelluric) 탐사, 탄성파 탐사, 물리검층 등과 같은 다양한 지구물리 탐사들이 적용되고 있다(Park and Torres-Verdin, 1988; Barberi et al., 1991; Yokoyama and Mena, 1991; Hunt, 1992; Davy and Caldwell, 1998; Pous et al., 2002; Santos et al., 2006). 현재까지도 화산활동이 활발한 일본의 경우, 제4기에 형성된 칼데라에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 지하구조의 기하학적 형태와 화산활동의 특성을 비교하는 연구(Yokoyama and Ohkawa, 1986)가 지열에너지 개발을 위해 수행되었다.

국내의 경우, 칼데라에 대한 지구물리학적 연구는

진례칼데라 지역에서의 중력해석(권병두 외, 1994), 부평칼데라 지역의 은광상 중력이상 해석(권병두와 황희승, 1991), 화산칼데라 지역의 중력특성(이정민, 1995) 등 많은 연구가 수행되었다. 그러나 현재까지의 연구 동향은 포텐셜 탐사를 통한 2차원적인 광역 구조 해석으로 파워 스펙트럼(power spectrum) 분석과 역산을 수행하여 밀도 변화 층의 두께를 해석하거나, 자력자료를 통한 정성적인 화성암 분포 분석 등의 연구가 이루어져 왔다. 따라서 정밀한 칼데라의 구조를 해석하고 지열 자원 개발을 위한 기초 자료로 사용하기에는 정보의 양이나 연구 결과가 매우 부족하다. 또한 한반도에 분포하는 칼데라의 대부분은 현재 상부가 심한 침식을 받아 칼데라의 윤곽을 확인하기 쉽지 않고, 형성 당시의 특성들이 많이 유실되어 종합적이고도 정밀한 조사가 필수적이다. 따라서 이러한 한계성을 해결하기 위해서는 더욱 정밀한 지구물리학적 해석이 필요할 것이다.

본 연구에서는 이를 위하여 격자형태의 조밀한 중력 자료와 자력 자료를 이용하여 경상분지 남동부의 의성분지 내에 위치하는 화산칼데라 지역에 대하여 3차원적인 해석을 수행하였으며, 동일 지역에서 이루어진 자기지전류 탐사 결과와 비교하여 기존 포텐셜 탐사 자료의 약점인 수직 분해능 문제를 해결하고, 보다 신뢰성 높은 지하 구조를 추정하고자 하였다.

탐사지역의 지질개요

본 연구의 주요 지질구조는 의성소분지의 화산칼데라로 형성 시기는 대략 신생대 제 3기(약 54.5 Ma) 초로 알려져 있다(윤성호, 1988). 화산칼데라는 중심부 분출, 침강, 환상단층대 형성 및 단층대를 따른

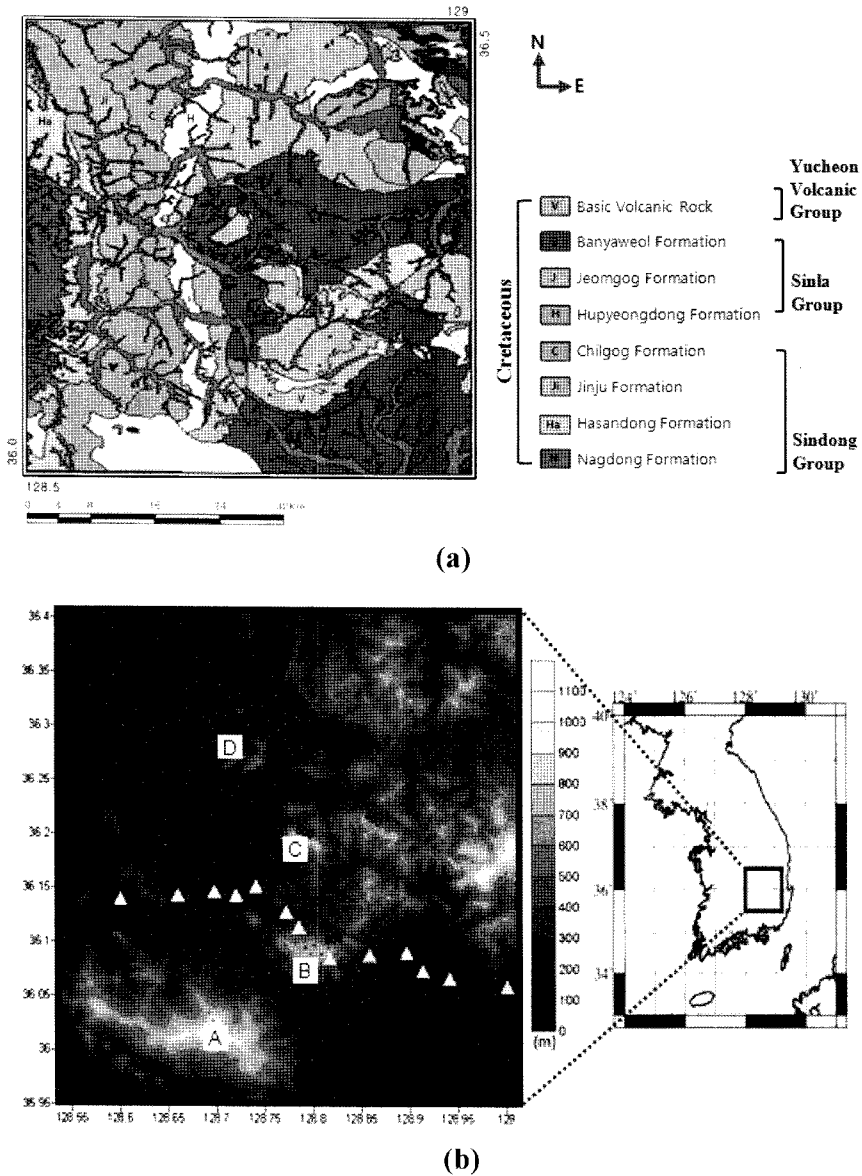


Fig. 1. Geological map of the survey area (a) and measurement points (dots are gravity points and triangles are MT points) on the terrain map. A is Palgongsan, B is Hwasan, C is Seunamsan, and D is Geumseungsan (b).

분출의 단계를 거쳤으며, 환상단층대의 수평 규모는 약 16(E-W) km × 13(N-S) km이다. 화산칼데라 내부의 퇴적암은 약하게 습곡 및 혼펠스화 되었으며, 중심부의 화산암복합체는 유문암질 암석으로 구성되며 하양층군 위에 놓여 있다. 또한 중심부 화산암 복합체 내부에도 침강 양상을 확인할 수 있는데, 이는 중심부에서 추가적인 내부분출이 있었으며, 이에 수반한 반심성 화성작용과 침강에 따른 단층 형성이 있

었음을 지시한다(윤성호, 1988; 장기홍과 박순옥, 1997). 화산칼데라 지역의 전반적인 층서구조는 최하부로부터 낙동층-하산동층-진주층(신동층군), 일직층-후평동층-점곡층-시곡층-반야월층-화산층-춘산층(하양층군)이며, 중앙부의 유문암질 화산복합체와 화성암 관입체는 가장 최후에 형성되었다. 또한 Fig. 1은 탐사지역의 지질도와 지형도 및 탐사위치를 보여준다.

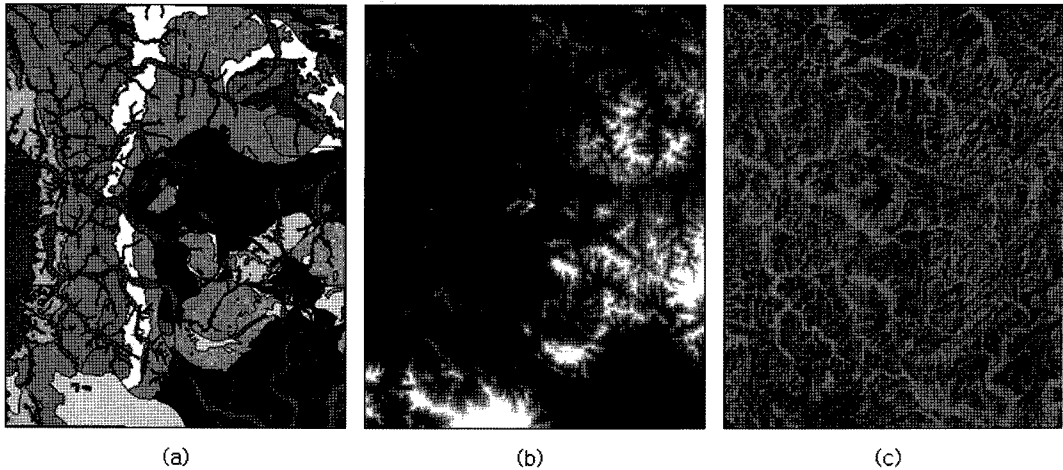


Fig. 2. The used data for extracting lineament: (a) digital geologic map, (b) digital elevation model (DEM) and (c) LANDSAT 7 ETM+ image.

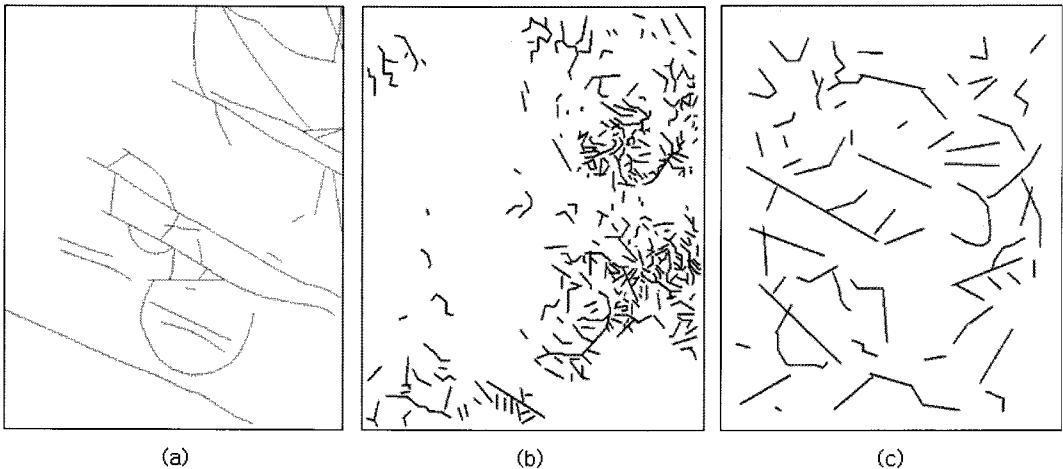


Fig. 3. The extracted lineaments from Fig. 2: (a) displays fault lines in geologic map and (b) and (c) show the lineament extracted from DEM and Landsat image, respectively.

자료 분석

원격 탐사 자료 해석

지질학적 선구조는 단층, 차별침식에 의해 나타나는 지층의 경계나 습곡에 의한 구조 등과 같이 지하의 물성이나 지질구조를 반영하여 나타난다. 따라서 선구조는 지질 구조 파악이나 지구구조 운동 분석의 기초 자료가 될 수 있기 때문에 선구조자료와 지구 물리, 지화학 자료와의 통합 분석은 지질구조 연구, 광물 탐사 등에 널리 사용되었다(Casting and Debeglia, 1992). 원격탐사 자료를 이용한 여러 지구 과학 응용분야 중 위성 영상으로부터 절리, 단층, 습

곡, 암맥, 파쇄대 및 암상의 경계 등에 나타나는 지질학적 선구조를 찾는 여러 연구가 있었다(Koike et al., 1995; 원중선 외, 1998; 김원균 외, 2000). 이 연구에서는 연구지역의 광역적인 지질구조를 파악하기 위해 GDPA(Gradient Direction Profile Algorithm)기법을 이용해 DEM, Landsat7 ETM+ 영상으로부터 선구조를 추출하고 기존의 지질도에 표시된 단층선과 함께 그 방향성을 알아보았다.

Wang et al.(1992)에 의하여 제안된 GDPA 알고리즘은 위성 영상 정보로부터 직접 도로 정보를 추출하는데 유용한 방법으로 알려져 있으며(Wang and Zhang, 2000; Lee and Yu, 2001) 지질학적 선구조를

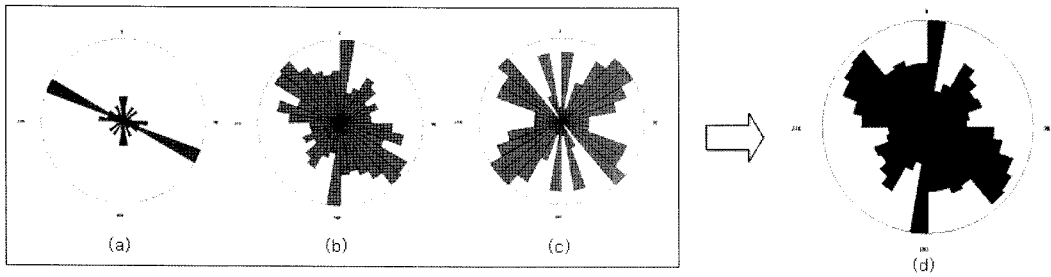


Fig. 4. The rose diagram of lineaments in study area: (a), (b) and (c) results from each lineament in (d) represents all lineaments (a, b, and c) by one rose diagram.

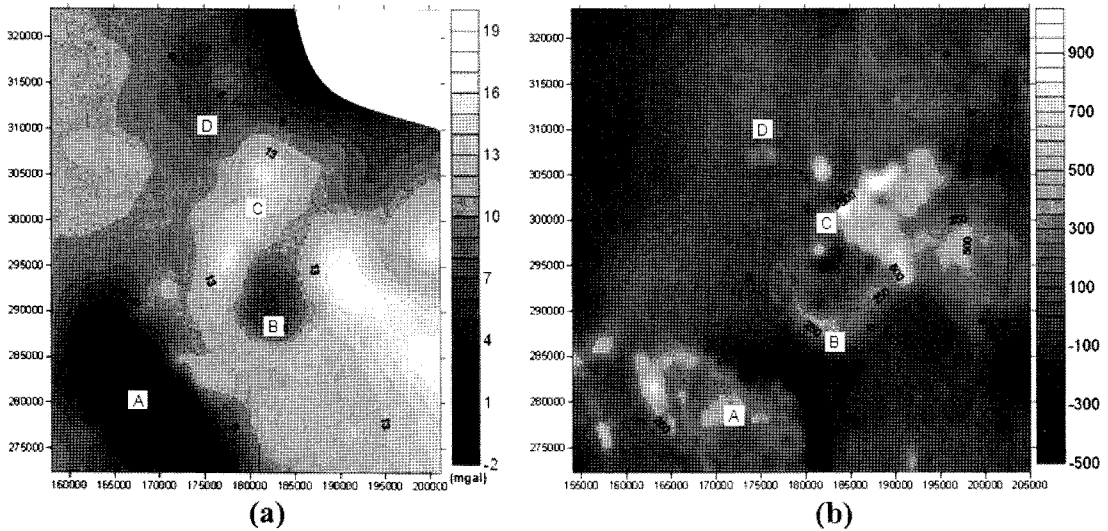


Fig. 5. Bouguer anomaly map (a) and magnetic anomaly map (RTP) (b) of survey area. A, Palgongsan; B, Hwasan; C, Seunamsan; and D, Geumseungsan.

추출하는데도 이용가능하다고 연구되었다(류희영, 2004). GDPA 알고리즘은 0, 45, 90, 135도 중 가장 기울기가 큰 방향으로 프로파일의 방향을 결정한 후 프로파일(0도 방향)에 적합한 최소자승 다항식 함수 (Least square polynomial fitting function)를 구한다. 그리고 그 다항식의 극값을 찾아 이를 연속적으로 연결, 선형 지물로 산정하게 된다. GDPA를 이용해 선구조를 구하는 과정은 다음과 같다. 먼저 기하보정이 끝난 영상을 전처리과정으로 smoothing filter와 sharpen filter를 이용해 필터링을 한다. 전처리 과정을 거친 영상은 GDPA 알고리즘으로 선구조를 추출하게 된다. 추출된 선구조는 픽셀 하나의 폭을 갖는 선으로 만들기 위해 후처리과정인 thinning과정을 거치게 된다. 이 결과이미지를 벡터화한 후 로즈다이아그램을 그려 방향성을 분석하였다.

Fig. 2는 이 연구에서 사용한 대상지역의 수치지질도, 수치고도모델, 위성영상자료를 보여준다. 수치지질도로부터는 단층선만을 선구조로 이용하였고 수치고도모델에서는 차별침식에 의해 나타나는 연약대나 층의 경계 또는 습곡에 의해 나타나는 구조를 주로 추출할 수 있다. 위성영상자료는 30 m의 공간해상도를 갖는 Landsat 7 ETM+ 영상으로 지질학적 응용에서 널리 사용되는 1, 4, 7 밴드를 사용하였다. 위성영상으로부터는 층적지, 삼림지역, 암상에 의해 달라지는 화소값으로부터 선구조를 추출할 수 있다. 그리고 Fig. 3(a)는 수치지질도에서 얻은 단층선, (b)와 (c)는 각각 수치고도모델(DEM)과 Landsat 영상으로부터 GDPA를 이용해 얻어낸 선구조이다. 단층선을 제외하고는 시각적으로 어느 방향으로 선구조가 우세한지 확인하기 어려우므로 Fig. 4의 로즈다이아그램으로 그

방향성을 확인하였다. 단층선의 경우 화산에서 환상의 단층이 나타나기도 하지만 전반적으로 북서에서 남동방향으로 길고 뚜렷한 단층선이 존재하여 로즈다이아그램에서도 120~130도 방향으로 강한 경향성을 보인다.

한편 DEM에서 얻은 선구조는 비교적 고른 방향으로 존재하나 주된 방향은 0~10도와 120~140도 방향이다. 마지막으로 Landsat 영상으로부터 얻은 선구조는 40~60도와 130~140도 방향이 우세하다. 공통적으로는 130도 부근에서 강한 선구조가 나타남을 알 수 있다. 마지막으로 세 가지 선구조를 모두 합하여 한꺼번에 로즈다이아그램을 그린 결과를 Fig. 4(d)에 도시하였다. 그 결과 DEM에서 얻어진 선구조의 로즈다이아그램과 가장 유사하게 0~10도와 130~140도 방향으로 가장 우세한 결과를 보였다.

본 연구지역의 선구조적 특성을 살펴보면, 거의 수직하는 두 방향으로의 구조적 특징이 나타나기 때문에 2차원적 해석으로는 칼데라의 전체적인 구조적 특성을 해석하는데 한계를 가질 것이라고 생각된다. 이에 본 연구에서는 조밀한 격자형 포텐셜 자료를 획득 해석하여 3차원적인 해석을 수행하였다.

포텐셜 자료 해석

한반도 남동부 경상분지에 위치하고 있는 화산칼데라와 그 주변지역의 지하구조를 밝히기 위하여 중력탐사를 수행하였다. 탐사는 화산칼데라를 중심으로 약 32 km × 32 km의 범위에서 약 1 km의 간격으로 510개의 측정점에서 수행되었다. 획득된 중력자료는 위도보정, 조력보정, 계기보정, 망보정, 후리어보정, 부계보정, 지형보정을 수행하여 지질 구조에 의한 중력효과만을 추출하여 해석에 사용하였다.

Fig. 5의 (a)는 중력 자료의 부계 이상치를 보여준다. 연구지역의 북동부와 남서부에서 낮은 이상치를 보이고 북서-남동 방향으로 고이상대가 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 정상계 퇴적층 보다 밀도 낮은 화강암체가 이들 지역에 각각 관입하고 있다고 생각할 수 있다. 또한 화산 지역을 기준으로 하여 북쪽에 낮은 이상대가 존재하고 이것을 둘러싸며 환형으로 높은 이상대가 분포하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 본 연구에서는 중력 탐사와 함께 항공자력 자료를 획득하여 칼데라 지역의 광역 지질구조를 해석하였다. 획득된 자력이상 자료는 한국지질자원연구

원에서 1980년대 후반부터 1997년까지 측정된 약 150 m 등간격 자료로, 비행측선의 편차에 대한 위치보정, Base station을 운영한 후 최소자승법에 의한 기기보정 및 일변화보정, 동서방향의 측선자료와 남북방향의 측선자료간의 가중평균법을 이용한 Tie line 보정, 300 m로 고도보정 및 IGRF 보정이 수행된 자료이며, 본 연구에서 RTP 보정을 수행한 후 해석에 사용하였다.

Fig. 5의 (b)에서 RTP 보정을 수행한 자력 이상치를 보면 A, B, C, D로 표시된 화성기원으로 형성된 팔공산, 화산, 선암산, 금성산 지역에서 고이상대가 분포하고 있으며 이를 통하여 연구지역의 화산분출의 공간적 특성을 확인할 수 있다.

Analytic Signal: 자력탐사는 분지 연구에 유용하게 사용되는 방법으로, 특히 다른 지구물리 탐사보다 분지의 구조적 특성, 천부에 존재하는 화성암이나 기반암에 관한 정보를 제공한다. 그러나 자력탐사 자료는 자성체의 대자율의 횡적인 변화가 심하고, 잔류자기의 크기나 자화방향에 따라 강도의 변화가 심하여 자료 해석 시 세심한 주의를 요한다. 이러한 이유로 자력이상의 수평, 수직 미분에 근거한 암체의 경계 및 심도를 효과적으로 결정하기 위한 여러 기법들이 개발되었는데, 가장 대표적인 것으로 analytic signal을 이용한 자력이상 해석 방법이 존재한다. 구조의 경계 위치를 파악하는데 있어서 analytic signal 분석이 가지는 가장 큰 장점은 지구 자기장 요소와 자성체의 자화방향 등에 관계없이 결과를 도출할 수 있다는 것이다(Nabighian, 1974). Analytic signal의 진폭은 수평 방향의 기울기와 수직 방향의 기울기로 표현될 수 있고, 구조의 경계에서 종 모양 형태의 양상을 띠게 된다. 또한, Hsu et al.(1996)에 의하면 자성체와 측정까지의 수평거리가 0이 되는 지점의 analytic signal의 크기는

$$|A_n(x, y)| = \sqrt{(\nabla^n M_x)^2 + (\nabla^n M_y)^2 + (\nabla^n M_z)^2} \Big|_{\max} \\ = \frac{|1 \times 2 \times 3 \times \dots \times n \times \alpha|}{d^{n+1}} \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 위 식에서 d 는 자성암체의 심도, α 는 대자율차, 지구자기장 크기 등과 같은 요인에 의해 결정되는 계수이다. 여기서 2차 enhanced analytic signal 절대치의 최대치 - 종 형태의 함수의 최대치 - 와 simple analytic signal의 절대치는 각각 식 (2)와

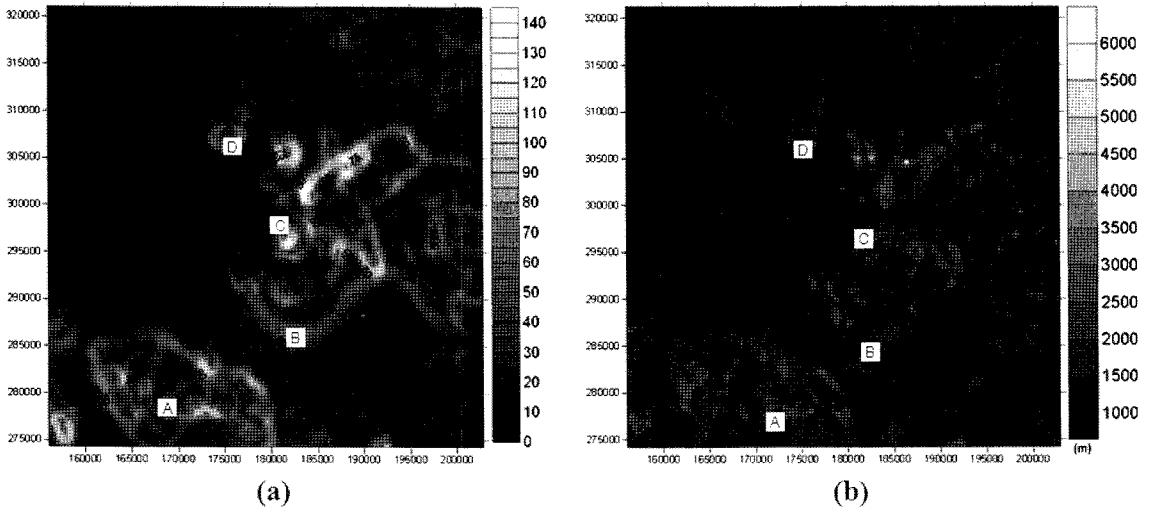


Fig. 6. Energy envelope of analytic signal of RTP data (a) and locations and their depths of boundary of geologic structure by advanced analytic signal (b). A is the location of Palgongsan, B is the location of Hwasan, C is the location of Seunamsan, and D is the location of Geumseungsan.

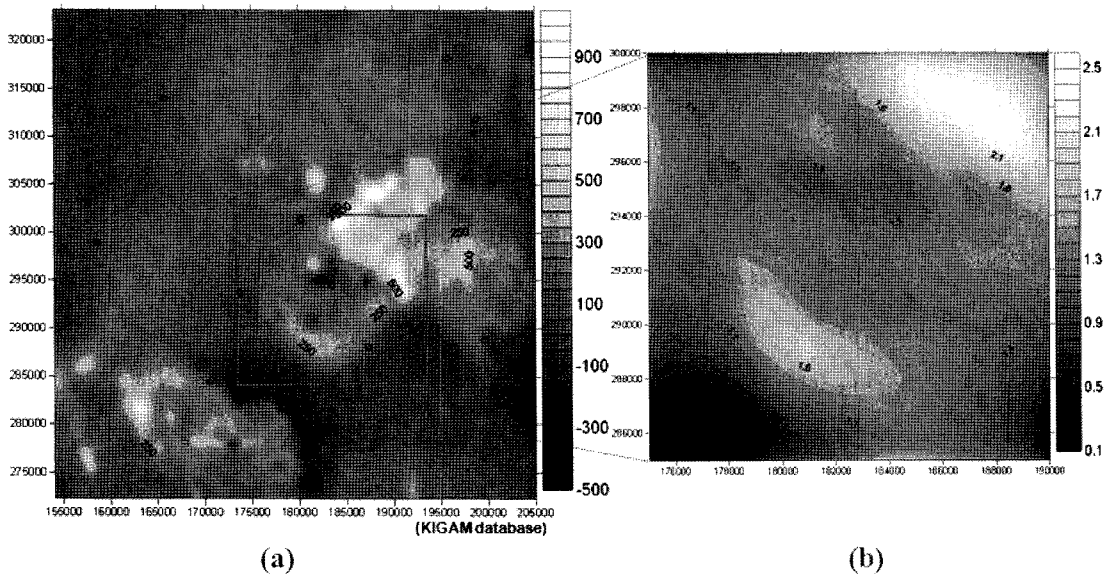


Fig. 7. RTP anomaly map (a) and pseudo gravity anomaly map (b) calculated using poisson relation.

(3)과 같이 표현된다.

$$|A_2(x,y)|_{\max} = \frac{|2\alpha|}{d^3} \quad (2)$$

$$|A_0(x,y)|_{\max} = \frac{|\alpha|}{d} \quad (3)$$

결국 이상체의 경계부근에서 이상체 심도는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$d = \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{A_0(x,y)}{A_2(x,y)}} \quad (4)$$

본 연구 지역의 analytic signal의 energy envelope와 이상체 경계부근에서의 심도는 Fig. 6과 같이 나타나며, 이 결과는 다음에 설명될 파워스펙트럼 분석에서 나타난 값과 전반적으로 잘 부합하고 있고, 위치적인 정보가 추가되어 보다 효과적인 분석이 가능하였다.

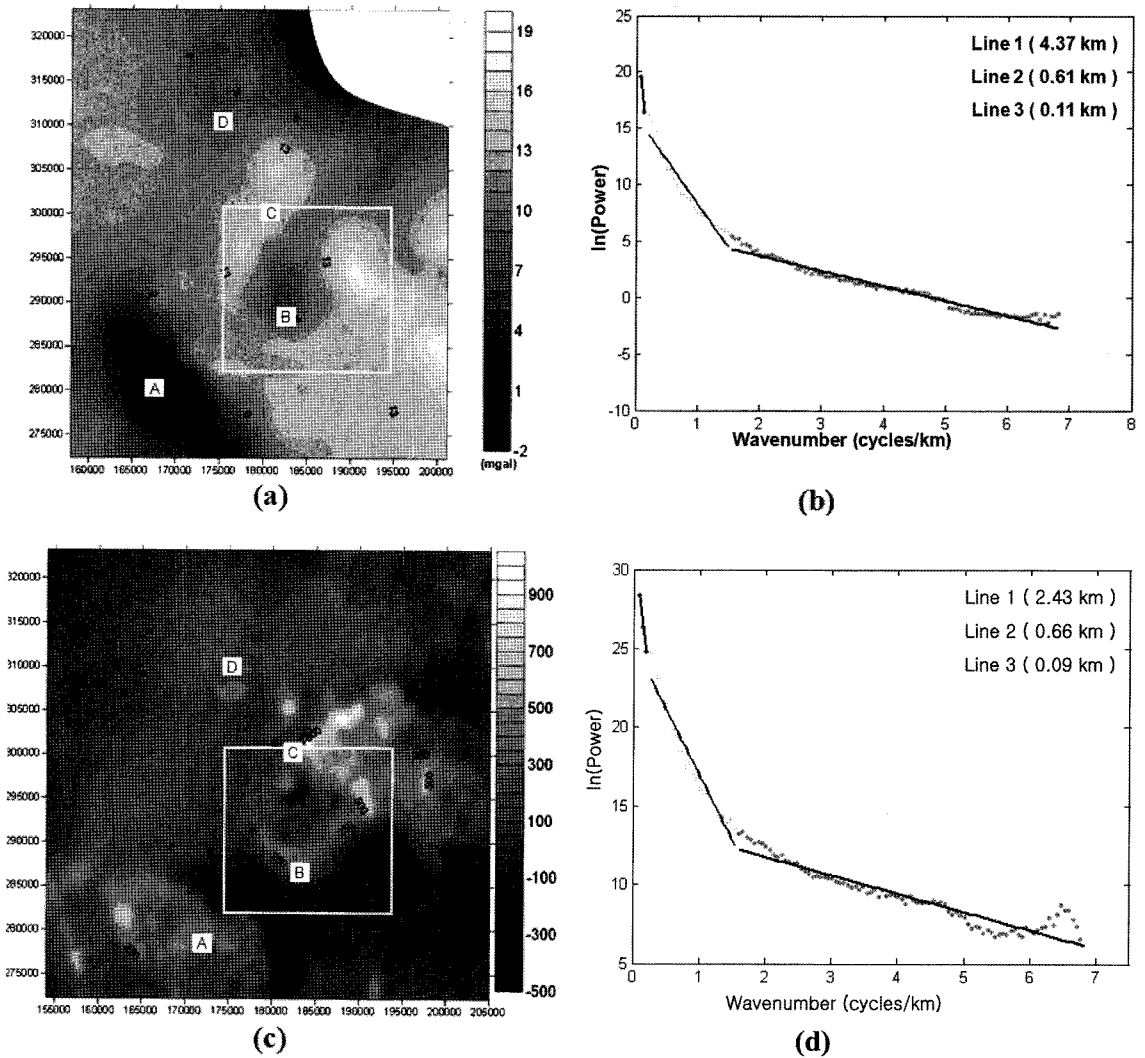


Fig. 8. The results of two-dimensional power spectrum analysis using Bouguer anomaly values (a) of the Hwasan caldera area (b), and magnetic anomaly map (RTP) (c) of the Hwasan caldera area (d).

연구 지역 내의 북쪽에 위치한 금성산 칼데라 지역의 경우 화성암과 퇴적암과의 경계부근에서 나타나고 있는 이상체의 심도는 약 1-2 km의 범위로 화산 분출시 관입된 화성암의 깊이를 나타내고 있을 것으로 생각된다. 이에 반해 화산칼데라 지역의 경우 center vent인 금성산 칼데라와 달리 ring vent 형태를 나타내는 모습을 나타내며 그 심도 역시 금성산 칼데라 지역보다 다소 깊은 2-3 km의 범위를 나타낸다. 또한, 연구지역의 남서쪽에는 팔공산 화강암의 전반적인 형태와 그 심도가 잘 나타나고 있으며, 연구지역의 동부에 전반적으로 분포하고 있는 관입암의 형태와 그 깊이를 잘 보여주고 있다. 그러나 선암산

칼데라의 경우 금성산과 화산칼데라와는 달리 주변의 화성암체들과 뚜렷이 분리된 모습이 나타나지 않아 정확한 해석을 수행하기 위해서는 보다 정밀한 추가 탐사가 필요할 것이다.

Poisson 관계식을 이용한 기중력 자료 분석: 포아송 관계식에 의하면 동일 축점에서 관측된 자기장의 스칼라 포텐셜 $V \equiv V(x, z)$ 와 중력 스칼라 포텐셜 $U \equiv U(x, z)$ 는 다음의 관계를 갖는다(Blakely, 1995).

$$V = -p \frac{\delta U}{\delta m} \quad (5)$$

여기서 m 은 자화 방향의 단위벡터를 나타내며, p 는 포아송 계수로 다음과 같이 표현된다.

$$p = \frac{\Delta M}{G\Delta\rho} \quad (6)$$

G : 중력상수, $\Delta\rho \equiv \Delta\rho(x', z')$: 밀도차, M : 배경과의 총자기차이

따라서 포아송 관계식을 적용하면 밀도와 자화강도의 비($r \equiv \frac{\Delta M}{\Delta\rho}$)의 분포도를 이용하여 암석 특성의 분포 특성을 해석할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 동일한 근원암에 대하여 성립하므로 본 연구에서는 화산칼데라의 ring vent에서 분출되어 동일한 기원으로 생각되는 관입암 지역에 대하여 분석을 수행하였다.

Fig. 7에 보여지는 화산칼데라 부근의 중심으로 살펴보면, 화산칼데라의 ring vent 부분에 관입된 화성암류의 효과가 잘 나타나고 있다. 그러나 관입 화성암류에 의한 중력효과가 나타나는 위치는 전반적인 부계 중력이상에서 음의 이상이 나타나는 위치와 일치하며, 이는 관입화성암의 밀도가 주변에 위치하고 있는 경상계 퇴적암류의 밀도보다는 낮게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 보다 정밀한 지질 구조를 해석하기 위해서는 자기전류탐사와 같이 수직적인 해상도가 높은 탐사가 수행되어 수직적인 구조 해석을 포함한 해석이 수행되어야 할 것이다.

파워 스펙트럼: 파워 스펙트럼은 지하 물질의 밀도나 지각 평형에 대한 가정 없이 지하 불연속면의 평균 깊이를 구할 수 있는 매우 유용한 방법이다. 측선을 따라 측정된 중력 이상값을 Fourier 급수로 전개한 후 정리하면, $\Delta g(x)$ 의 파워 스펙트럼은, $P_n = A_n^2 + B_n^2 = (2\pi G\Delta\rho)^2 \cdot e^{-4\pi nDL} (C_n^2 + D_n^2)$ 이 됨을 알 수 있다. 여기서 G 는 중력상수, A_n, B_n, C_n, D_n 은 Fourier와 급수와 관련된 계수이다. 불연속면의 기복이 random하다고 가정하면 불연속면의 파워 스펙트럼은 white spectrum이 되어 상수값을 가지게 되고, $\Delta g(x)$ 의 파워 스펙트럼에 자연 로그를 취하게 되면 다음과 같은 식이 되며, 아래의 식으로부터 불연속면의 평균 깊이 (D)를 알 수 있다(Tomoda, 1960).

$$\log P_n = C - 4\pi nD/L \cdot n \quad (7)$$

(C : 상수, L : 측선의 길이)

Fig. 8의 (a)는 중력 자료의 부계이상도, (c)는 화산 지역의 자력 자료의 RTP이상도이며 (b), (d)는 사각

형으로 표시된 지역(화산 주변)의 자료를 이용하여 계산한 2차원 파워 스펙트럼의 결과를 보여준다. 스펙트럼 분석을 통해 절단파수를 결정하고 각 파수 영역에서 파워 스펙트럼 분석을 수행하였다. 분석을 수행한 결과 중력 자료와 자력 자료에서 모두 크게 2개의 밀도 불연속면이 해석되었다. 상부의 불연속면의 경우 두 자료 모두 약 1 km 이내에 존재하는 것으로 해석되었으나, 하부 불연속면의 경우 자력 자료에서는 약 2 km, 중력자료에서는 약 4 km로 해석되었다. 윤성호(1988)의 연구 결과를 고려하여 해석해 볼 때 상부에 존재하는 밀도 불연속면은 칼데라 지역 내에 존재하는 화산쇄설성 퇴적암의 심도로 생각되며, 자력자료의 하부 불연속면은 화산칼데라의 ring vent 위치에서 관입하고 있는 관입암의 심도, 중력자료의 하부 불연속면은 기반암의 심도로 추정된다.

중력 역산을 통한 지질 구조 해석: 본 연구 지역에서 수행된 중력 탐사 자료를 일반적인 보정 과정을 통하여 사전처리 한 후 3차원 밀도 역산을 수행하였다(Fig. 9). 광역적인 밀도 분포 패턴을 살펴보면, 남서쪽에 팔공산 화강암과 북동쪽에 분포하는 불국사 관입암류에 의한 저밀도체의 모습이 크게 나타나고 있다. 또한 화산칼데라 부근에서는 주위의 경상계 퇴적암에 비하여 생성 시기가 늦은 칼데라 중앙부의 화산쇄설성 퇴적암류 및 침강된 상부의 퇴적층이 주변보다 낮은 밀도를 나타내며, 하부로 약 2~3 km 정도 연장되어 있는 모습을 나타내고 있다. 그러나 화산칼데라의 ring vent에 의해 형성된 관입암류의 밀도는 칼데라 중앙부의 저밀도 퇴적암류와 주변의 경상계 퇴적암류 밀도의 사이 값을 갖을 것으로 예상되지만, 수직적인 분포를 해석하기에는 포텐셜 자료의 한계가 있기 때문에 보다 정밀한 구조 해석을 위해서는 수직 분해능이 좋은 물리탐사 기법이 함께 도입되어야 할 것이다.

복합 자료 해석

본 연구 지역에 대하여 파워스펙트럼 분석을 수행한 결과 중력 자료와 자력 자료에서 모두 크게 2개의 밀도 불연속면이 해석되었다. 첫 번째 밀도 불연속면의 심도는 약 1 km 심도에서 존재하며, 두 번째 밀도 불연속면은 3~5 km 심도 구간에 존재하는 것으로 해석되었다. 상부에 존재하는 것으로 생각되는 밀

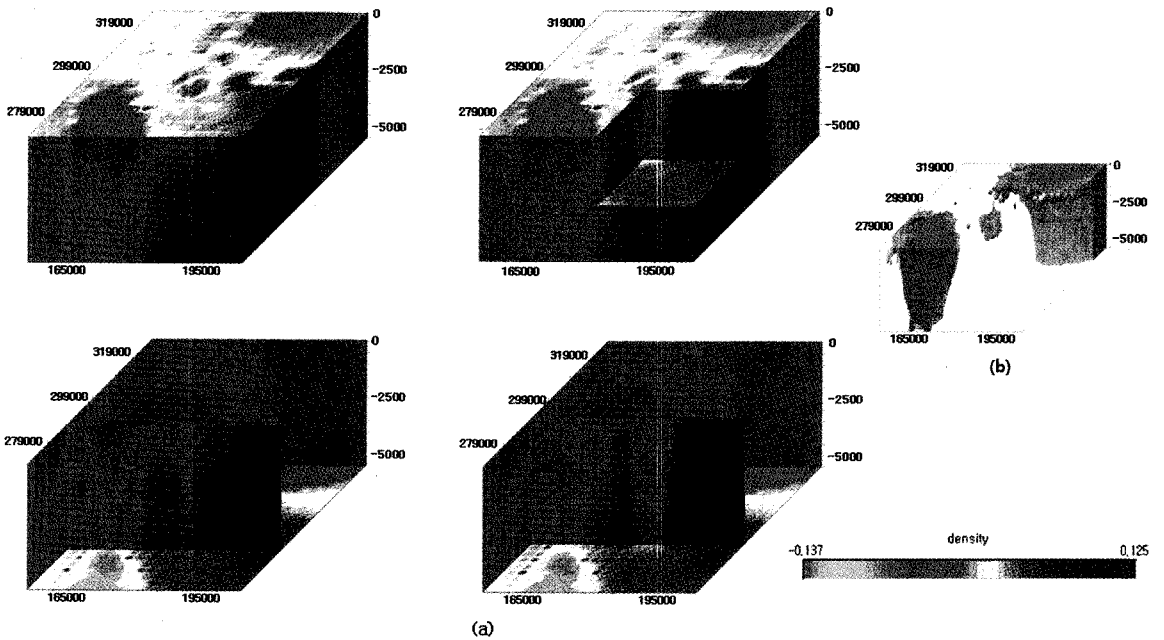


Fig. 9. Density distributions of 3-D gravity inversion (a) and model of low density structure (b).

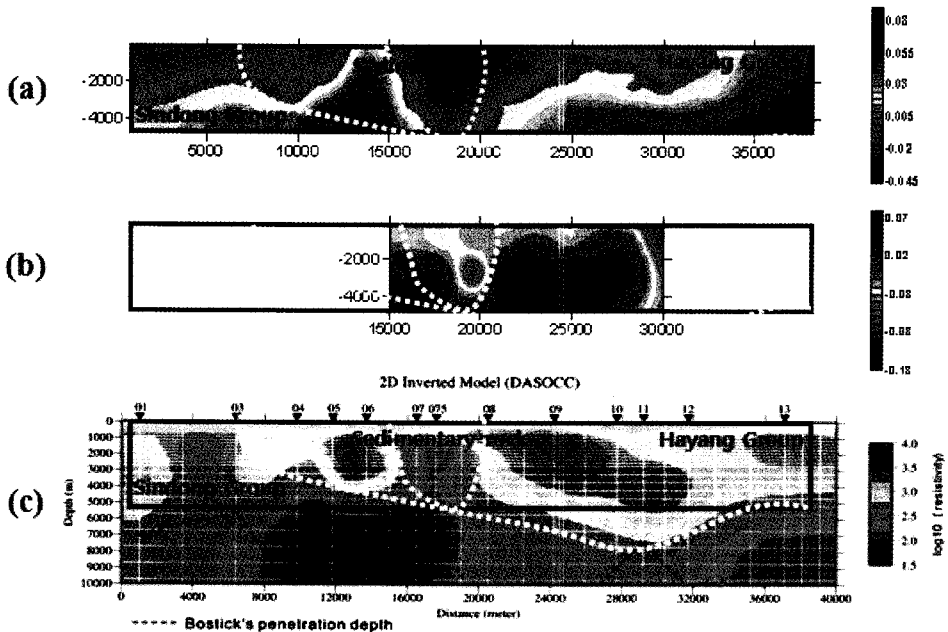


Fig. 10. Results of gravity density inversion (a), pseudo-gravity inversion (b) and MT inversion (c).

도 불연속면은 칼데라 지역 내에 존재하는 화산쇄설성 퇴적암의 심도나 화산칼데라의 ring vent 위치에서 관입하고 있는 관입암의 심도로 생각되며, 하부의 불연속면은 기반암의 심도로 추정된다. 또한 analytic signal의 energy envelope와 이상체 경계부근에서의

심도는 Fig. 6과 같이 나타나며, 이 결과는 위의 파워스펙트럼 분석(Fig. 8)에서 나타난 값과 전반적으로 잘 부합하고 있으며, 위치적인 정보가 추가되어 보다 효과적인 분석이 가능하였다.

포텐셜 자료의 3차원 해석을 위하여 3차원 중력

밀도 역산(Fig. 9)과 자력자료를 이용하여 가중력을 구해 화산칼데라 주위의 지역에 대하여 역산을 수행하였다(Fig. 10(b)). 전반적인 패턴을 살펴보면, 남서쪽에 팔공산 화강암과 북동쪽에 분포하는 불국사 관입암류에 의한 저밀도체의 모습이 크게 나타나고 있고, 화산칼데라 부근에서는 주위의 경상계 퇴적암에 비하여 생성 시기가 늦은 칼데라 중앙부의 화산쇄설성 퇴적암류 또는 칼데라 형성 과정에서 침강된 상부의 퇴적층으로 해석되는 퇴적층이 주변보다 낮은 밀도를 나타내며, 하부로 약 2~3 km 정도 연장되어 있는 모습을 나타내고 있다. 그러나, 화산칼데라의 ring vent에 의해 형성된 관입암류의 밀도는 칼데라 중앙부의 저밀도 퇴적암류와 주변의 경상계 퇴적암류 밀도의 사이 값을 가질 것으로 예상되지만, 수직적인 분포를 해석하기에는 포텐셜 자료의 한계가 있기 때문에 동일 지역에서 수행된 수직 분해능이 좋은 MT 탐사 결과(양준모 외, 2007)를 함께 해석하였다(Fig. 10(c)).

MT자료의 2차원 역산은 Rodi and Mackie(2001)의 NLCG(Nonlinear Conjugate Gradient) 법을 이용하였다. 전반적인 경향은 3층 구조로서 제 1층은 수 백 ohm-m의 전기비저항을 가진 층적층(약 500 m), 제 2층은 1000 ohm-m 이상의 전기비저항을 보이는 퇴적층 및 화산쇄설성의 신동층군과 하양층군(약 500-5000 m), 제 3층은 수 백 ohm-m의 전기비저항을 가진 분지기반암으로 생각된다. 한편, 제 2층과 3층의 경계는 분지기반암의 깊이와 관련되는 것으로는 보이며, 기존의 중, 자력 자료 파워스펙트럼 연구에서 제시된 약 5 km 내외의 분지기반암 깊이(유상훈 외, 2005)와 잘 부합된다.

결 론

광역적인 지질구조의 수평적인 물성변화를 잘 보여주는 중력 자료 및 자력 자료를 변환한 가중력 자료의 역산 결과와 수직 분해능이 좋은 MT 자료를 해석한 결과, 화산칼데라 양쪽의 환상단층대는 주변에 비해 상대적으로 고밀도, 고자성과 고비저항값을 갖고 깊이 3~5 km 정도까지 연장되어 신동층군의 기반암과 연결되어 있는 것으로 해석되고, 서쪽 경계가 동쪽 경계에 비해 그 폭이 좁다. 이는 단층대를 따라 분출한 유문암질 화성암으로 해석된다. 또한, 화산칼데라 중심부에서 하부 깊이가 1~3 km 정도까지 나타나

는 저밀도와 저비저항대는 화산쇄설성 퇴적층과 과거 화산칼데라 중심부 분출 후 침강된 퇴적층으로 보이며 그 수평적인 범위는 정확하게 추정할 수는 없지만 적어도 4 km 이상이며, 약 200-300 ohm-m의 전기비저항값을 가진다. 연구결과, 화산칼데라 지역은 ring vent 주위의 고밀도, 고자력, 고비저항의 화성암 관입부와 칼데라 내부의 저밀도, 저자력, 저비저항의 화산쇄설성 퇴적층으로 크게 구분되며, 중력·자력·전기비저항의 상관관계가 상당히 높게 나타나고 있어 (Fig. 10).

사 사

이 논문은 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2006-000-10847-0)와 '포텐셜 자료를 이용한 독도 부근 지역의 화산체 구조 모델링 연구'의 일환으로 수행되었으며, 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업 및 경인교육대학교 2006학년도 교내학술연구사업에서 일부 지원을 받았습니다. 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사를 드립니다.

참고문헌

권병두, 황희승, 1991, 부평 칼데라의 중력 연구. 한국지구과학회지, 12 (3), 225-265.
 권병두, 권재현, 정호준, 1994, 진례칼데라의 중력이상과 지질구조. 한국지구과학회지, 15 (5), 392-397.
 김원균, 김상완, 원중선, 민경덕, 김정우, 2000, 위성 영상 선구조의 지질학적 응용-의성소분지의 경우. 대한원격탐사학회지, 16 (1), 25-36.
 류화영, 2004, 위성영상을 이용한 지질학적 선구조 자동 추출 알고리즘 분석 및 구현. 서울대학교 석사학위논문, 55 p.
 양준모, 권병두, 이희순, 박계순, 이호용, 2007, 의성소분지 화산칼데라 지역에서의 MT 탐사. 제88회 춘계발표회는 문집, 한국지구시스템공학회, 한국지질자원연구원, 70-75.
 원중선, 김상완, 민경덕, 이영훈, 1998, 지질학적 활용을 위한 Landsat TM 자료의 자동화된 선구조 추출 알고리즘의 개발. 대한원격탐사학회지, 14 (2), 175-195.
 유상훈, 황중선, 민경덕, 우익, 2005, 중력, 자력 및 위성영상 자료를 이용한 의성소분지의 지질 및 지구조 연구. 자원환경지질, 38 (2), 143-153.
 윤성호, 1988, 화산 환상화성암복합체의 발달사 및 폴드론 구조. 지질학회지, 24 (3), 267-288.
 이정민, 1995, 화산칼데라의 지하구조와 중력특성. 서울대

- 학교 석사학위논문, 39 p.
- 장기홍, 박순옥, 1997, 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사. *자원환경지질*, 30 (2), 143-151.
- Barberi, F., Cassano, E., Torre, La P., and Sbrana A., 1991, Structural evolution of Campi Flegrei caldera in light of volcanological and geophysical data. *Journal of volcanology and geothermal research*, 48 (1), 33-49.
- Blakely, R.J., 1995, *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, 468 p.
- Casting, C. and Debeglia, N., 1992, A new method for combining gravimetric and geological data. *Tectonophysics*, 204, 151-162.
- Davy, B.W. and Caldwell, T.G., 1998, Gravity, magnetic and seismic surveys of the caldera complex, Lake Taupo, North Island, New Zealand. *Journal of volcanology and geothermal research*, 81 (1), 69-89.
- Hsu, S.K., Sibuet, J.C., Shyu, C.T., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. *Geophysics*, 61 (2), 373-386.
- Hunt, T.M., 1992, Gravity anomalies, caldera structure, and subsurface geology in the Rotorua area, New Zealand. *Geothermics*, 21 (1/2), 65-74.
- Koike, K., Nagano, S., and Ohmi, M., 1995, Lineament analysis of satellite images using a Segment Tracing Algorithm (STA). *Computers and Geosciences*, 21 (9), 1091-1104.
- Lee, K. and Yu, Y.-C., 2002, Automatic extraction of road network using GDPA (Gradient Direction Profile Algorithm) for transportation geographic analysis. *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing*, 775-779.
- Nabighian, M.N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39 (1), 85-72.
- Park, S.K. and Torres-Verdin, C., 1988, A systematic approach to the interpretation of magnetotelluric data in volcanic environments with applications to the quest of magma in Long Valley, California. *Journal of Geophysical Research*, 93 (B11), 13265-13283.
- Pous, J., Heise, W., Schnegg, P., Munoz, G., Marti, J., and Soriano, C., 2002, Magnetotelluric study of the Las Canadas caldera (Tenerife, Canary Island): Structural and hydrogeological implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 204 (1), 249-263.
- Rodi, W.L. and Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66 (1), 174-187.
- Santos, F., Trota, A., Soares, A., Luzio, R., Lourenco, N., Matos, L., Almeida, E., Gaspar J., and Miranda, J., 2006, An audio-magnetotelluric investigation in Terceira Island (Azores). *Journal of applied geophysics*, 59 (4), 314-323.
- Tomoda, Y., 1960, Thickness of the earth's crust from Bouguer anomaly statistics. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 6, 47-56.
- Wang, J., Treitz, P.M., and Howarth, P.J., 1992, Road network detection from SPOT imagery for updating geographical information systems in the Rural-Urban Fringe. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (2), 141-157.
- Wang, J. and Zhang, Q., 2000, Applicability of a Gradient profile algorithm for road network extraction-sensor, resolution and background considerations. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26 (5), 428-439.
- Yokoyama, I. and Ohkawa, S., 1986, The subsurface structure of the Aira caldera and its vicinity in southern Kyushu, Japan. *Journal of volcanology and geothermal research*, 30, 253-282.
- Yokoyama, I. and Mena, M., 1991, Structure of La primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results. *Journal of volcanology and geothermal research*, 47, 183-193.

2007년 12월 6일 접수
 2008년 1월 8일 수정원고 접수
 2008년 1월 17일 채택