자기지전류 및 중력 모델의 복합해석을 통한 화산칼데라 지역의 3차원 지질구조 해석

박계순^{1,*} · 이춘기² · 양준모³ · 이희순⁴ · 권병두⁵

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

²극지연구소 극지지구시스템연구부, 460-840, 인천광역시 연수구 송도동 7-50

³한국원자력안전기술원 구조부지실, 305-338, 대전광역시 유성구 과학로 34

⁴(주)아이피그룹, 152-743, 서울특별시 구로구 구로동 197-5

⁵서울대학교 사범대학 지구과학교육과, 151-742, 서울특별시 관악구 신림동 관악로 599

3-D Geological Structure Interpretation by the Integrated Analysis of Magnetotelluric and Gravity Model at Hwasan Caldera

Gyesoon Park^{1,*}, Chunki Lee², Junmo Yang³, Heuisoon Lee⁴, and Byung-Doo Kwon⁵

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Mineral Resource Research Division,
Daejeon 305-350, Korea

²Korea Polar Research Institute, Division of Polar Earth-System Science, Incheon 460-840, Korea

³Korea Institute of Nuclear Safety, Department of Structural Systems and Site Evaluation,
Daejeon 305-338, Korea

⁴IPGroup Co., Seoul 152-743, Korea

⁵Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract: 3-D Multi-geophysical surveys were carried out around the Hwasan caldera at the Euisung Sub-basin. To overcome the limitations of resolutions in previous studies, dense gravity data and magnetotelluric (MT) data were obtained and analyzed. In this study, the independent inversion models from gravity and MT data were integrated using correlation and classification approaches for 3-D imaging of the geologic structures. A Structure Index (SI) method was proposed and applied to the integration and classification analyses. This method consists of Type Angle (TA) and Type Intensity (TI) values, which are estimated by the spatial correlation and abnormality of the physical properties. The SI method allowed the classification analysis to be effectively performed. Major findings are as follows: 1) pyroclastic rocks around the central area of the Hwasan caldera with lower density and resistivity than those of neighboring regions extended to a depth of around 1 km, 2) intrusive igneous rocks with high resistivity and density were imaged around the ring fault boundary, and 3) a basement structure with low resistivity and high density, at a depth of 3-5 km, was inferred by the SI analysis.

Keywords: Hwasan caldera, gravity, magnetotelluric, Structure Index, Type Angle, Type Intensity

요 약: 의성소분지 화산칼데라 지역에서 3차원 복합 지구물리탐사를 수행하였다. 2차원적인 해석이 주를 이루었던 선행 연구의 제한점을 극복하기 위하여 간격이 조밀한 자기지전류탐사와 중력탐사를 수행하였다. 자기지전류탐사와 중력탐사 자료로부터 각기 해석된 역산 결과들에 대해 역산 자료간의 상관관계 및 새로 제안된 구조해석 방법을 이용하여 복합 해석하였으며, 이를 각 구조별로 3차원 지질구조로 영상화하였다. 이 연구에서 제안하는 구조화 지수(Structure Index; SI) 기법은 물성간의 공간적 상관관계와 물성 값의 이상 정도를 이용하여 계산되는 구조화 각도(Type Angle; TA) 및 구조화 강도(Type Intensity; TI) 값의 분포를 이용하는데, 이 기법을 통한 3차원 구조 해석을 수행하였다. 제안 기법을

*Corresponding author: gyesoon@kigam.re.kr

Tel: +82-42-868-3142

Fax: +82-42-868-3418

화산칼데라에 적용한 결과 1) 화산칼데라 중앙부에서 심도 1 km 부근까지 연장되는 낮은 밀도와 전기비저항을 갖는 화산쇄설성 퇴적암류, 2) 높은 밀도와 전기비저항을 갖는 ring fault 주변의 관입 화성암류, 3) 3-5 km 심도의 상대적으로 낮은 전기비저항과 높은 밀도를 갖는 기반암을 3차원으로 영상화할 수 있었다.

주요어: 화산칼데라, 중력, 자기지전류, 구조화 지수, 구조화 각도, 구조화 강도

서론

일반적으로 칼데라는 화산활동 후기 하부의 빈 공간으로 대규모 함몰이 발생하여 형성된다. 이러한 칼데라 구조를 이해하게 되면 마그마 활동과 지구조 운동의 특성, 광상의 형성 가능성, 지열에너지원 등의 가능성을 예측할 수 있기 때문에 지질학적, 경제적으로 중요한 의미를 갖는다. 이 때문에 국외의 경우 칼데라 구조의 성인이나 진화과정을 규명하기 위해 지표지질조사와 함께 다양한 복합지구물리 탐사를 수행하고 있다(Park and Torres-Verdin, 1989; Barberi et al., 1991; Yokoyama and Mena, 1991; Hunt, 1992; Davy and Caldwell, 1998; Pous et al., 2002; Santos et al., 2006). 그동안 우리나라에서는 규모가 큰 칼데라 구조를 해석하기 위하여 중력탐사와 자력탐사 방법이 일반적으로 수행되어 왔으며, 칼데라의 밀도 불연속면이나 관입암체의 심도를 해석하기 위해서는 power spectrum 분석, 모델링, 역산 기법과 같은 여러 해석 기법이 이용되었다(권병두와 황희승, 1991; 권병두 외, 1994; 권병두 외, 1995; Yu et al., 2005; 박계순 외, 2008). 그러나 이러한 방법들은 중력탐사나 자력탐사가 갖는 근본적인 수직 분해능의 한계 때문에 정밀한 수직 구조 해석이 어려운 한계가 있다. 특히 우리나라에 위치한 대부분의 칼데라 구조들은 오랜 시간동안 풍화 침식되어 초기 생성 모습을 지표에서 확인하기 난해하기 때문에 정밀한 구조 해석에 많은 제한점이 있다. 이 때문에 최근에는 중력 및 자력 탐사 이외의 다양한 물리탐사 기법을 이용한 칼데라 구조 해석 연구가 시도되고 있다(양준모 외, 2008).

이번 연구에서는 위에서 언급된 칼데라 구조 해석의 많은 제한점을 극복하고자 조밀한 측점 간격으로 중력탐사와 함께 상대적으로 높은 수직 분해능을 갖는 자기지전류(MT) 탐사를 수행하였다. 효과적인 탐사 수행과 해석을 위하여 화산칼데라를 중심으로 MT 탐사의 경우 방사상 형태의 탐사를 중력탐사의 경우 그리드 탐사를 수행하였다. 두 탐사 결과의 역산을 통해 3차원 밀도 모델과 전기비저항 모델을 구

하였으며, 동일 영역의 밀도 모델과 전기비저항 모델의 상관관계를 분석하였다. 일반적으로 단일 물성을 이용하여 지질 구조를 해석하게 되면 암종 간의 물성 차이가 크지 않을 경우 효과적인 해석이 어렵게 된다. 이번 연구에서는 이러한 제한점을 극복하기 위하여 두 물성 모델의 상관관계 패턴과 특성을 고려하여 보다 효과적인 지질 구조 해석을 수행하고자 한다. 이를 위하여 효과적인 상관관계 분석을 수행할 수 있는 구조화 지수(Structure Index; SI) 기법을 제안하였다. SI 기법은 두 모델간의 공간적 상관관계를 이용하여 산출되는 구조화 각도(Type Angle; TA)와 구조화 강도(Type Intensity; TI) 값으로 구성되는데 TA 값은 두 물성의 상관관계 패턴을 지시하며, TI 값은 각 물성 모델 내에서의 분포 위치를 지시할 수 있다. 따라서 이 TA 값과 TI 값을 이용하여 구조를 해석하는 SI 기법은 복합물리탐사 자료를 이용한 지질 구조 해석시 효과적으로 이용이 가능하리라 생각되며, 이 연구에서는 화산 칼데라의 3차원 지질 구조 영상화를 위해 적용하였다.

지질 개요

이번 연구가 수행된 화산칼데라는 Fig. 1의 지질도와 Fig. 2의 지형도에서 보이는 바와 같이 의성소분지 내에 위치하고 있는 타원형의 ring vent 칼데라이며, 그 규모는 16(E-W)×13(N-S) km이다. 또한, 선행 연구 결과를 Fig. 1에 도시하였는데 Fig. 1b는 2차원 중력탐사 결과이며, Fig. 1c는 동일 지역에서 수행된 2차원 MT 탐사 결과이다(박계순 외, 2008, 양준모 외, 2008). 화산 칼데라는 약 54.5 Ma의 신생대 제 3기에 중심부 분출, 침강, 환상단층대 형성 및 단층대를 따른 분출의 단계를 거쳐 형성된 것으로 알려져 있으나(윤성호, 1988), 정확한 생성 기작이나 하부 구조는 아직 확인되지 않았다. 화산 칼데라 내부의 퇴적암은 약하게 습곡 및 혼펠스화 되었으며, 중심부의 화산암복합체는 유문암질로서 하양층군 위에 놓여져 있다. 또한 중심부 화산암 복합체 내부에도 침강 양상을 확인할 수 있는데, 이는 중심부에서 추가적인

Fig. 1. Geologic map of survey area (a). (b) and (c) show the 2-D gravity and MT inversion results, respectively (modified after Park, et al., 2008; Yang, et al., 2008).

내부분출이 있었으며, 이에 수반한 반심성 화성작용과 침강에 따른 단층 형성이 있었음을 지시한다(윤성효, 1988; 장기홍과 박순옥, 1997). 화산 칼데라 지역의 전반적인 층서구조는 최하부로부터 낙동-하산동-진주층(신동층군), 일직-후평동-점곡-사곡-반야월-화산-춘산층(하양층군)이며, 중앙부의 유문암질 화산복압체와 화성암 관입체는 가장 최후에 형성된 것으로 알려져 있다(박계순 외, 2008).

물리탐사 자료 해석

의성 소분지에 위치하고 있는 화산 칼데라의 3차원 지질 구조를 해석하기 위하여 중력 탐사와 MT 탐사를 수행하였다. 중력탐사 측점은 Fig. 2의 지형도 위에 검은 점으로 표기하였으며, 화산 칼데라를 중심으로 약 32 km×32 km이 범위에서 약 1 km의 간격으로 510개의 측점에서 수행되었다. 측정된 자료에

Fig. 2. Measurement points on the terrain map. Dots and triangles are gravity and MT measurement points, respectively.

Fig. 3. Bouguer gravity anomaly map. Dots and triangles are gravity and MT measurement points, respectively.

대해 일반적인 중력 보정 단계인 위도보정, 조력보정, 계기보정, 망보정, 후리어보정, 부계보정 및 지형보정을 수행하여 지하의 밀도 구조에 의한 중력 효과를 추출하였다. 이러한 보정 단계를 거친 부계이상도는 Fig. 3에 중력 측정 및 MT 측정과 함께 도시하였다. 부계 이상치를 살펴보면, 연구지역의 북동부와 남서부에서 낮은 이상치를 보이고 있는데 북동부의 경우 중력 측점이 적기 때문에 발생하는 추정치의 오차가 일부 포함되어 있을 것으로 생각되며, 남서부의 저이상대는 팔공산 화강암체의 낮은 밀도에 기인한

것으로 해석된다. 또한, 화산칼데라는 중심으로 높은 중력 이상대가 나타나고 있는데 이는 ring fault를 따라 관입한 화성암의 영향으로 생각되며, 칼데라 중앙부의 저이상대는 화산쇄설성 퇴적층이 침강하여 생성된 구조에 기인한 것으로 해석된다. 이 부계이상 값을 Marquardt-Levenberg method(Levenberg 1994; Marquardt 1963)를 이용하여 3차원 밀도 역산을 수행하였다. 안정된 역산을 수행하기 위하여 인접한 블록간의 밀도 분포가 유사하도록 제한 행렬을 역산에 추가하였으며, 하부 역산 블록을 상부 역산 블록에

Fig. 4. (a) Density distributions of a 3-D gravity inversion. (b) The low density structure, which has lower values than 0 g/cm^3 , of the survey area (Park et al., 2008).

Fig. 5. The density(a) and resistivity(b) models that were obtained by 3D inversion and Ordinary Kriging processing of the same nodes.

비해 크게 설정하였다. 또한 밀도 변화 범위를 선행 연구 결과(박계순 외, 2008)를 고려하여 -0.2 에서 0.3 g/cm^3 로 설정하였다. 역산 결과로 해석된 밀도 모델은 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 4b는 저밀도체의 분포를 3차원으로 영상화한 것으로 앞서 설명한 것과 같이 남서쪽의 팔공산 화강암체와 화산칼데라 중앙부의 화산쇄설성 퇴적층이 나타나고 있으며, 북동부의 저밀도체는 측점이 부족한 지역으로 해석상 수치적으로 나타나는 구조로 해석된다(박계순 외, 2008).

MT 탐사는 MTU-5A 시스템을 이용하여 Fig. 2와 Fig. 3의 삼각형으로 표기된 32개 측정점에서 수행하였다. 각 측정점간의 거리는 약 2-3 km이며, 측정점의 분포는 화산 칼데라를 중심으로 방사상의 형태를 보인다.

MT 탐사를 통해 N-S, E-W 두 방향의 전기장과 N-S, E-W, Vertical 세 방향의 자기장을 0.001-320 Hz 밴드의 범위에서 측정하였다. 잡음에 의한 효과를 최소화하기 위하여 전자기적 잡음이 적은 밤 시간대에 15시간 동안 측정하였으며, 화산 칼데라 지역에서 약 1,000 km 떨어진 일본 Esashi의 상시관측소 자료를 remote reference로 사용하였다. 이러한 자료의 보정은 MTU-5A 시스템과 함께 제공되는 MT-Editor 프로그램을 이용하였다. MT 자료의 3차원 역산은 2차원 역산 기법인 Occam's inversion(Siripunvaraporn and Egbert 2000)을 확장한 WSINV3DMT code(Siripunvaraporn et al., 2005)를 이용하였다.

밀도 모델과 전기비저항 모델의 공간적 상관성을

Fig. 6. Diagram of SI method. (a) shows a method for determining the TA and TI values. (b) shows an example of the SI processing.

이용한 지질 구조 해석을 수행하기 위해서는 같은 좌표 공간을 갖는 두 모델이 필요하며, 이를 위해서는 공동 좌표를 설정하고 이 좌표상의 밀도 값과 전기비저항값을 추정해야 한다. 자료 값의 추정을 위하여 정규 크리깅을 사용하였으며, 크리깅 수행은 S-GeMS(Stanford Geostatistical Modeling Software)을 이용하였다. 동일 공간에서 추정된 밀도 모델과 전기비저항 모델은 Fig. 5에 도시하였다.

구조 해석 방법론

효과적인 지질 구조 해석을 위하여 이 연구에서는 SI 기법을 제안 및 적용하였다. SI 기법은 Fig. 6에 나타난 것과 같이 각각 정규화된 물성 모델을 통해 같은 공간상의 두 물성 값의 상관성으로 계산되는 TA 값과 같은 물성 모델 내에서 그 값의 분포 위치에 의해 결정되는 TI 값을 이용하여 구조를 분리하는 방법이다. 구조의 분리를 위해 UTM(universal transverse Mercator)과 같은 프로젝션 기법을 이용하여 TA 값과 TI 값을 마치 위경도 값과 같이 표현하여 극소값을 경계로 나타나는 곡선별로 구조 분리를 수행하였다. 이 SI 기법의 적용을 위해 설정한 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 각 물성 모델에서 해석되는 물성은 각기 다르지만 지하의 같은 지질 구조를 반영 한다.
: 물리탐사 결과 물성의 차이를 갖는 지질 구조를 서로 분리하여 해석하였다.
- 2) 서로 다른 물성 모델은 지질 구조가 변화함에 따라 공간적 상관성을 갖으며 변화한다.
: 가정 1)에 의하여 서로 다른 물성 모델은 지하의 같은 지질 구조를 반영하기 때문에 서로 공간적 상관성을 갖게 된다.
- 3) 서로 다른 물성 모델은 유사한 탐사 심도와 공간 해상도를 갖는다.
: 물성간의 상관관계를 이용하여 구조를 해석하기 때문에 서로 다른 물성 모델은 유사한 탐사 공간을 공유하여야 한다.
- 4) 각 물성 모델에서 특정치 이상의 이상 값은 특정 지질 구조를 반영한다.
: 서로 다른 지질 구조라 하더라도 유사한 물성 값을 갖을 수 있다. 이러한 경우 물리탐사를 통한 구조의 해석은 많은 어려움이 있다. 따라서 이번 연구에서는 각 물성 모델을 정규화한 이후에 Fig. 6b의 0번 구조와 같이 특정 이상 값을 갖지 않을 경우 각 지질 구조의 경계부나 변이대로 가정하여 특정한 지질 구조로 분리하지 않고 해석에서 제외하였다.

Fig. 7. The flowchart of SI process. D and R are the density and resistivity models, respectively. ND and NR are the normalized density and resistivity models, respectively.

위의 가정을 바탕으로 SI 기법을 이용한 지질 구조의 해석 과정은 다음과 같으며, 이에 대한 flowchart는 Fig. 7에 나타내었다. 이 논문에서는 밀도와 전기비저항 두 물성을 이용한 해석 방법을 이용하였다.

자료 획득

각각의 역산 해석을 통해 구해진 밀도 및 전기비저항 모델을 공간분포를 고려하여 임의의 지점에서의 자료 값을 추정하는 kriging 기법을 수행하여 동일한 3차원 그리드($L \times M \times N$) 상에서의 밀도 모델 $D_{data}(L, M, N)$ 와 전기비저항 모델 $R_{data}(L, M, N)$ 로 계산한다.

자료의 정규화

동일한 그리드 상에 존재하는 값 $D_{data}(L, M, N)$ 와 $R_{data}(L, M, N)$ 모델들을 각 물성의 분포를 고려, 식(1)을 이용하여 정규화 하고 $ND_{data}(l, m, n)$ 와 NR_{data}

(l, m, n) 의 물성간 산포도를 작성한다.

$$ND = [D - \text{Mean}(D)] / [(Max(D) - Min(D)) / 2] \quad (1)$$

D: 물성 모델 $D_{data}(L, M, N)$ 와 $R_{data}(L, M, N)$

ND: 정규화된 물성 모델

TA 값과 TI 값의 계산

$ND_{data}(l, m, n)$ 와 $NR_{data}(l, m, n)$ 의 물성간 산포도 상에서 각 위치가 분포하는 위치를 Four-quadrant inverse tangent를 이용하여 TA 값으로 변환하고 원점에서 떨어진 거리를 이용하여 TI 값을 Fig. 6과 같이 구한다.

임계값 결정 및 구조 분류

TA 값과 TI 값을 이용하여 구해진 산포도에서 물성 값으로 추정할 수 있는 동일 구조에 의한 영향을 Fig. 6b에 보이는 것과 같이 독립된 하나의 영역을

Fig. 8. Scatter plots of SI analysis. (a) shows the scatter plot for the normalized density versus resistivity and the grouping SI value. (b) is the scatter plot for TA versus TI values for the grouping SI value.

Table 1. The physical properties of classes categorized by Structure Index

Structure Index	Normalized resistivity	Resistivity ($\log(\Omega \cdot m)$)	Normalized relative density	Relative Density (g/cm^3)
Class 1	-0.5366 - +0.5355	0.99 - 2.80	-0.9882 - -0.2023	-0.043 - +0.076
Class 2	-0.6627 - -0.2841	2.06 - 2.79	-0.5236 - -0.2034	-0.057 - -0.015
Class 3	-0.7607 - -0.3482	2.41 - 3.02	-0.3718 - -0.1064	-0.070 - -0.022
Class 4	-1.1862 - -0.3885	2.80 - 3.63	-0.2000 - +0.1624	-0.115 - -0.027
Class 5	-0.6582 - -0.2613	3.52 - 4.16	+0.1130 - +0.3911	-0.057 - -0.013
Class 6	-0.3176 - -0.0722	3.98 - 4.55	+0.3135 - +0.5623	-0.019 - +0.008
Class 7	-0.1018 - +0.8138	3.43 - 5.58	+0.0729 - +1.0118	+0.005 - +0.011
Class 8	+0.3493 - +0.7074	2.58 - 3.47	-0.2962 - +0.0931	+0.055 - +0.095

차지하게 된다. 이를 바탕으로 두 개 이상의 영역으로 구분이 가능한 TI 값의 범위를 결정하고, 결정된 범위 중 최소값을 Threshold(임계값) 값으로 결정한다. Threshold 값 이상의 TI 범위에서 독립된 극대점을 갖는 각각의 포물선을 TA 값을 기준으로 구분하여 구조 해석을 수행한다.

구조 분석

각기 구분된 class들이 갖는 물성적 특성과 지질학적 위치를 고려하여 암상이나 암종 및 구조를 결정하고 각 class의 공간 분포도를 3차원으로 작성하여 지질 구조의 공간적 특성을 해석한다.

화산 칼데라의 3차원 구조 해석

SI 기법을 적용하기 위하여 Fig. 5에 나타난 동일 좌표상에 분포하는 화산 칼데라의 밀도 및 전기비저항 모델을 이용하였다. 정규화된 물성 모델들은 Fig. 8a와 같이 물성간 산포도로 나타내었으며, 이를 이용

하여 Fig. 8b에 보이는 것처럼 TA값과 TI 값을 계산하였다. 제안된 SI 기법의 적용성을 확인하기 위하여 Fig. 8b처럼 가능한 모든 극소값에서 지질 구조 class를 구분하였으며, 효과적인 화산 칼데라의 지질 구조 해석을 위해 Threshold 값은 포물선이 구분되는 0.4로 설정하였다. 각 class의 물성값 범위는 Table 1에 나타내었다.

SI 기법에 의해 구분된 각 class 구조는 Fig. 9에 3차원으로 영상화하였다. 선행 연구 자료들(윤성호, 1988; 이춘기, 2006; 엄주영 외, 2008; 박계순 외, 2008; 양준모 외, 2008)과 물성 모델의 이상 영역 등을 공간적으로 고려할 때 화산 칼데라 지역은 물리탐사를 통해 Fig. 9, Fig. 10에서 구분한 것과 같이 크게 3가지 지질 구조로 구분할 수 있다.

Classes 2, 3, and 4: 팔공산 화강암체와 화산 칼데라 중심 상부의 화산쇄설성 퇴적층

이 지질 구조는 $-0.1 g/cm^3$ 정도까지 낮아지는 저 밀도와 200 ohm-m 부근의 낮은 전기비저항 분포를

Fig. 9. The 3-D images show the models of each SI value.

Fig. 10. The analyzed ranges of physical properties. (a) and (b) show the respective ranges of resistivity and relative density values based on the SI value.

보이는 지질 구조이다. 이 지질 구조가 나타나는 지역은 화산 칼데라 중심부로 지표에서부터 심도 약 1 km 부근까지 연장되어 있는 화산쇄설성 퇴적층과 팔공산 화강암 지역이다. 화산쇄설성 퇴적층이 1 km 부근까지 연장되어 나타나는 것으로 보아 초기 분출 후 화산체 중앙부의 붕괴에 의해 생성된 퇴적층의 형상을 예상할 수 있다. 그러나 연구지역 남서쪽의 팔공산 화강암 지역의 경우 MT 탐사 측점이 없기 때문에 해석 결과와 같은 낮은 전기비저항을 기대하기는 어려우며 오히려 높은 전기비저항을 갖는 화강암의 특성을 고려하면 높은 전기비저항을 가질 것으로 예상된다. 만약 팔공산 화강암 지역에서 MT 탐사가 이루어졌다면 팔공산 화강암체와 화산쇄설성 퇴적층을 각기 다른 구조로 해석이 가능했을 것으로 예상된다.

Class 6: 화산칼데라의 환상단층대에 관입한 화성암과 화산칼데라의 북동부에 걸쳐 나타나는 관입 화강암류

이 지질 구조는 0.1 g/cm³와 10,000 ohm-m가 넘는 높은 밀도와 전기비저항을 갖는 구조를 나타내고 있다. 이러한 물성값은 이 지역의 화성암류의 물성을 잘 반영하고 있으며, 화산칼데라의 환상단층대와 연구지역 북동부에 걸쳐 나타나는 관입 화성암류의 구조를 나타내고 있다.

Class 7: 기반암

이 지질 구조는 높은 밀도와 상대적으로 낮은 전기비저항을 갖는다. 이 구조가 나타나는 공간적 위치와 물성값의 특성, 선행 연구 자료, 화산 칼데라 주변의 지질 구조를 고려하면 이는 기반암 또는 Fig.

Fig. 11. The physical properties distribution of each class. (a) shows the respective distribution of the number of relative density and resistivity values based on the SI value. (b) shows the respective probability of the relative density and resistivity values based on the SI value.

1b, 1c의 신동충균으로 해석되며 밀도는 높지만, 이 춘기(2006)에 의해 제안된 의성소분지 하부의 전기전도도가 좋은 층과 관련하여 상대적으로 낮은 전기비저항값을 보이고 있다. 단순히 각각의 물성 모델로만 해석을 수행한다면 고밀도 높은 전기비저항을 갖는 class 6과 구분하는 것이 용이하지 않지만, SI 기법을 이용하여 수월하게 구분이 가능함을 확인할 수 있다.

그러나 class 5의 경우 Fig. 8b와 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 class 4와 class 6의 점이 지역으로 해석되어 구조 해석에 포함시키지 않았다. 또한, class 1의 경우, 하나의 지질 구조로 다른 지역과 구분은 가능하지만, 이 지역에 중력 측정과 MT 측정이 존재하지 않는 지역으로 연구지역의 가장자리에서 나타나고 있어 SI 기법을 통해 역산의 신뢰도가 떨어지는 지역의 자료를 효과적으로 제거할 수 있었다.

Fig. 11a는 연구지역 전체 및 각 class의 밀도와 전기비저항의 분포도를 보여주고 있으며, Fig. 11b는 연구지역 전체 및 각 class의 밀도와 전기비저항의 확률 분포도를 보여주고 있다. 이를 통해 각 class에

속하는 물성 값의 범위 및 물성 값에 따른 노두의 수를 확인할 수 있어 각 class의 물성 특성을 한눈에 확인할 수 있다. 또한, 전체 연구지역의 확률 분포도를 보면 넓은 영역에 흩어져서 나타나고 있지만, 각 class의 경우 각 구조가 구분되어져서 좁은 영역의 물성 값으로 보이고 있다. 또한, 구조 해석에 있어서 한 물성 값에서는 비슷한 양상을 띠지만 두 물성 자료가 복합해석되어 구분되는 효과도 확인할 수 있다.

결론

이 연구에서는 이중의 물성을 갖는 복합 지구물리 자료의 객관적인 해석을 위하여 SI 기법을 제안하고 이를 이용하여 해석을 수행하였다. SI 기법은 이중 물성의 공간적 상관관계와 분포도를 이용하여 계산되는 TA와 TI 값을 이용하여 구조를 구분하기 때문에 독립된 물리탐사 해석 결과에서는 유사한 물성치를 나타내어 구분하기 어려운 구조를 이중의 물성치를 이용하여 구조적으로 구분하여 해석할 수 있으며, 3

차원 영상화에 효과적으로 이용될 수 있다.

이번 연구에서 중력 자료와 MT 자료를 통해 해석된 화산 칼데라 지역의 3차원 지하구조는 지표지질 및 기존의 중력, 자력 탐사를 통해 제시된 광역 지하구조와 상당히 잘 부합하고 있다. 첫 번째로, 화산칼데라의 환상단층대와 연구지역의 북동부에 분포하고 있는 고밀도, 고비저항의 화성암 관입체, 화산칼데라 중앙 상부에 약 1 km 심도로 분포하고 있는 화산쇄설성 퇴적층의 공간 분포가 3차원으로 해석되었다. 또한, 상대적으로 전기비저항이 낮고 밀도가 높은 하부 기반암이 약 5 km 부근에서 나타남을 확인하였다.

제안 기법은 각 구조에서의 반응 특성인 물성의 변화양상, 분포 등을 객관적으로 해석할 수 있을 뿐만 아니라 개별 분석으로는 발견되지 않은 해석 가능한 유용한 정보의 추출이 가능하며, 이 결과는 국부지역의 정밀 재해석의 기본 자료로 이용될 수 있다. 이 연구에서 제안한 SI 기법은 벡터로 결정되기 때문에 확장이 용이한 장점이 있다. 따라서 두 개 이상의 여러 복합지구물리 탐사가 수행되었을 경우에도 효과적으로 복합 해석이 이루어질 수 있는 장점을 가지며, 향후 동일 지역에서 이루어진 다양한 물리탐사 자료를 객관적이며 효과적으로 데이터베이스화 하고 지하 모델을 영상화하는데 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 2011년도 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘해의 광물자원탐사 및 부존 잠재성 평가(11-1121)’과제와 한국연구재단의 ‘기초연구사업(2010-0007031)’의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문을 세심하게 검토해 주시고 많은 조언을 해주신 오석훈 교수와 박노옥 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- 권병두, 황희승, 1991, 부평 칼데라의 중력 연구. 한국지구과학회지, 12, 225-265.
- 권병두, 권재현, 정호준, 1994, 진례칼데라의 중력이상과 지질구조. 한국지구과학회지, 15, 392-397.
- 권병두, 권재현, 정호준, 1995, 의성지역 금성산칼데라와 그 부근의 지질구조와 중력 특성. 지질학회지, 31, 125-137.
- 박계순, 류희영, 양준모, 이희순, 권병두, 엄주영, 김동오, 박찬홍, 2008, 포텐셜 자료해석을 통한 화산칼데라 구조 해석. 한국지구과학회지, 29, 1-12.
- 양준모, 권병두, 조인기, 이희순, 박계순, 엄주영, 2008, 자기전류 탐사를 이용한 의성소분지 화산 칼데라의 지구물리학적 연구. 물리탐사, 11, 99-108.
- 윤성호, 1988, 화산 환상화성암복합체의 발달사 및 콜드론 구조. 대한지질학회지, 24, 267-288.
- 장기홍, 박순옥, 1997, 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사. 자원환경지질, 30, 143-151.
- Barberi, F., Cassano, E., La Torre, 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, 33-49.
- 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, 69-89.
- Eom, J., Park, G., Yang, J., Kwon, B.D., and Lee, H., 2008, A geophysical study on the Hwasan caldera in the Euisung sub-basin, Korea, using gravity and magnetotelluric data. 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway.
- Hunt, T.M., 1992, Gravity anomalies, caldera structure, and subsurface geology in the Rotorua area, New Zealand. Geothermics, 21, 65-74.
- Lee, C.K., 2006, Magnetotelluric study on the deep geoelectrical structure across the Korean Peninsula. Ph. D. Thesis, Seoul National University, Korea, 152 p.
- Levenberg, K., 1944, A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. Quarterly of Applied Mathematics, 2, 164-168.
- Marquardt, D.W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Society for Industrial and Applied Mathematics, 11, 431-441.
- 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, 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, 249-263.
- 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, 314-323.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. Geophysics, 65, 791-803.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uye-

- shima, M., 2005, Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-space method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150, 3-14.
- 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.
- Yu, S.H., Hwang, J.S., Min, K.D., and Woo, I., 2005, Sub-surface Geology and Geologic Structure of the Euiseong Basin using Gravity, Magnetic, and Satellite Image Data. *Journal of Economic and Environmental Geology*, 38, 143-153.

2011년 7월 1일 접수
2011년 7월 27일 수정원고 접수
2011년 8월 5일 채택