

화산칼데라 지역 중력 및 자기지전류 탐사 자료의 복합해석을 통한 지질구조 해석

박계순¹⁾, 오석훈²⁾, 이희순³⁾, 김정호¹⁾, 권병두⁴⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지반안전연구부, gyesoon@paran.com

²⁾강원대학교 지구환경공학부

³⁾경인교육대학교 과학교육과

⁴⁾서울대학교 지구과학교육과

Geologic Structure Analysis from the Integration of Magnetotelluric and Gravity Models at Hwasan Caldera

Gyesoon Park¹⁾, Seokhoon Oh²⁾, Heuisoon Lee²⁾,
Jung-Ho Kim²⁾, Byung-Doo Kwon²⁾

¹⁾Engineering Geophysics Group, KIGAM

²⁾Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University

³⁾Department of Science Education, Gyeongin National University of Education

⁴⁾Department of Earth Science Education, Seoul National University

요약 : 의성소분지에 위치하는 화산칼데라 지역에서 복합지구물리 자료를 획득 하였다. 기존 연구들의 한계를 극복하기 위해 조밀한 중력 탐사 자료를 획득 하였고, 동일 지역에서 이루어진 자기지전류 (magnetotelluric, MT) 탐사 자료와의 복합 해석을 통해 화산칼데라 지역의 지구물리학적 구조 연구를 수행 하였다.

이 연구에서는 중력과 MT 자료의 독립 역산 결과 모델과 상관관계 및 분류 기법을 이용하여 연구지역의 지질구조를 해석하였다. 해석 결과는 다음과 같다. 1) 화산칼데라 중심부의 화산쇄설성 퇴적층은 저밀도와 저비저항의 특성을 갖으며, 약 1 km 심도까지 연장되어 있고, 2) 화산칼데라의 환상단층대를 따라 관입하고 있는 화성암은 고밀도와 고비저항의 특성을 나타내고 있으며, 3) 또한 5 km 심도에서 고밀도와 상대적으로 낮은 비저항을 갖는 기반암 상부를 확인할 수 있었다. 또한, 이 연구에서는 복합해석을 위하여 Structure Index 기법을 제안하였다. 이는 이중 물리탐사 자료의 공간적 물성분포 상관성을 통해 Type Angle과 Type Intensity를 계산하고 이를 이용하여 지질 구조를 해석하는 방법으로 효과적인 구조 해석과 그에 따른 물성의 특성을 분석할 수 있었다.

주요어 : 화산칼데라, 중력, 자기지전류, Structure Index, Type Angle, Type Intensity

Abstract : A multi-geophysical surveys were carried out at Hwasan caldera which is located in Euisung Sub-basin. In order to overcome the limitation of the previous studies, dense gravity data and magnetotelluric (MT) data were obtained and integrated. In this study, the independent inversion models from gravity and MT method were integrated using a correlation and classification approaches to map geologic structure.

The results of integration analysis indicated followings; 1) pyroclastic rocks around the central area of Hwasan caldera have lower density and resistivity when compared with those of

neighborhood regions and are extended to around 1 km in depth, 2) the high resistivity and density intrusive igneous rocks are imaged around the ring fault boundary, and 3) the basement structure, which has low resistivity and high density, 5 km deep inferred by integration analysis. Also, for integration analysis, we suggested Structure Index method. This method is analyzed using Type Angle and Type Intensity, which are calculated by the spatial correlation of the physical properties. In this study, we can perform the integration analysis effectively using Structure Index method.

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

1. 서론

우리나라의 칼데라에 대한 지구물리학적 연구를 살펴보면 포텐셜 탐사를 통한 광역적 해석이 주를 이루고 있으며, 파워스펙트럼 분석과 역산을 수행하여 밀도 변화 층의 두께를 해석하거나, 자력자료를 통한 화성암 분포 분석 등의 연구가 이루어져 왔다(권병두와 황희승, 1991; 권병두 등, 1994; 권병두 등, 1995; 유상훈 등, 2005; 박계순 등, 2008). 그러나 정밀한 칼데라의 구조를 해석하기에는 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 탐사가 필수적이다. 따라서 이러한 기존 연구의 한계성을 해결하기 위해서는 통합적 복합지구물리 해석 기법의 개발이 필수적이며, 특정한 물성 차이에만 반응하는 지구물리기법의 한계로 인하여 필요한 정보를 제공하지 못하는 약점을 극복할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 의성소분지 내에 존재하는 화산칼데라 지역에서 조밀한 중력탐사와 자기지전류 (magnetotelluric, MT) 탐사를 수행하여 밀도 구조와 전기비저항 구조를 연구하고 두 물성간의 상관관계를 분석하여 지질 구조와의 연관성을 살펴보는 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 각 지질 구조를 분류할 수 있는 Structure Index 기법을 개발, 밀도와 전기비저항의 물성 값을 이용하여 이를 계산하고 지질구조별 특성을 고려하여 해석하였다.

2. 본론

(1) 지질개요

이 연구가 수행된 지역은 의성소분지의 화산칼데라로 형성 시기는 약 신생대 제3기 (약 54.5 Ma) 초로 알려져 있다(윤성효, 1988). 화산 칼데라는 중심부 분출, 침강, 환상단층대 형성 및 단층대를 따른 분출의 단계를 거쳤으며, 환상단층대의 수평 규모는 약 16(E-W)×13(N-S) km 이다. 화산칼데라 내부의 퇴적암은 약하게 습곡 및 혼펠스화되었으며, 중심부의 화산암복합체는 유문암질로서 하양층군 위에 놓여져 있다. 또한 중심부 화산암 복합체 내부에도 침강 양상을 확인할 수 있고, 이는 중심부에서 추가적인 내부 분출과 이에 수반한 반심성 화성작용과 침강에 따른 단층 형성이 있었음을 지시한다(윤성효, 1988). 화산 칼데라 지역의 전반적인 층서구조는 최하부로부터 낙동-하산동-진주층(신동층군), 일직-후평동-점곡-사곡-반야월-화산-춘산층(하양층군)이며, 중앙부의 유문암질 화산복합체와 화성암 관입체는 가장 최후에 형성되었다(Fig. 1).

- 1) 각각의 해석을 통해 획득된 물성치를 공간분포를 반영하여 임의의 지점에서의 자료값을 추정하는 kriging 기법을 수행, 동일한 공간 그리드 상에서의 물성치를 획득한다(Fig. 5).
- 2) 동일한 그리드 상에 존재하는 값들을 각 물성의 분포를 고려하여 정규화하고 물성간 산포도를 작성한다.
- 3) 산포도 상에서 각 위치가 분포하는 위치를 Four-quadrant inverse tangent를 이용하여 계산된 Type Angle과 원점에서 떨어진 거리를 이용하여 구해진 Type Intensity를 통해 결정한다.
- 4) Type Angle과 Type Intensity를 이용하여 산포도를 구하고 (Fig. 6(a)) 일정값 이상의 Type Intensity를 갖는 값들을 Type Angle을 기준으로 특성별로 분류 한다(Fig. 6(b)).
- 5) 각 class들이 갖는 물리적 의미를 고려하여 암종을 결정하고 각 class의 공간 분포도를 작성하여 지질 구조의 공간적 특성을 해석한다(Fig. 7과 Fig. 8).

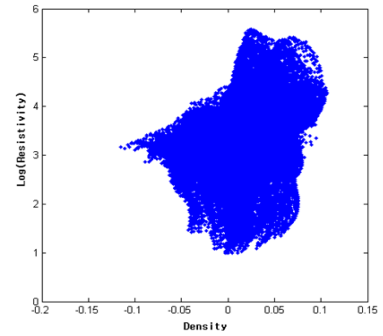


Fig. 5. The scatter plot for density versus resistivity models.

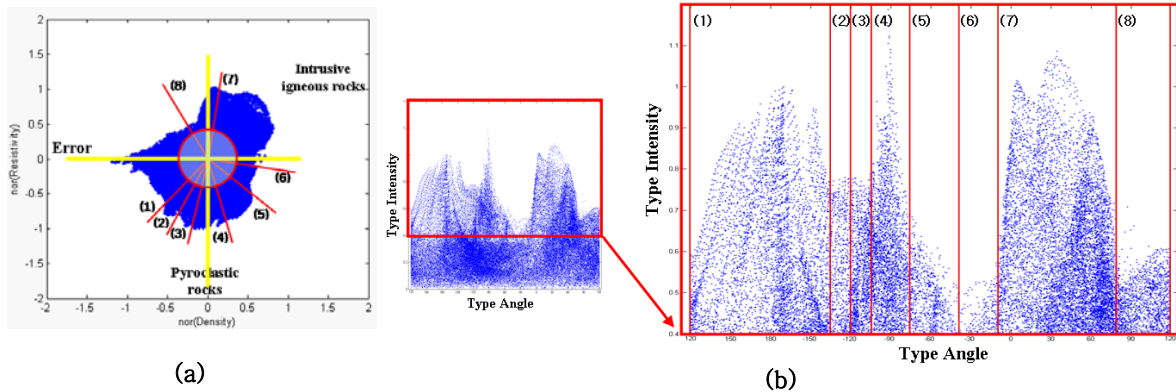


Fig. 6. (a) shows the scatter plot for normalized density versus resistivity and the grouping Structure Index. (b) is the scatter plot for Type Angle versus Type Intensity for grouping Structure Index.

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

제안된 Structure Index 기법의 효용성을 살펴보기 위하여 이 연구에서는 최대한 조밀한 구간으로 class를 나누어 해석을 수행하였다. 각 class에 해당하는 구조의 물성 범위는 위의 Table. 1에 나타내었다.

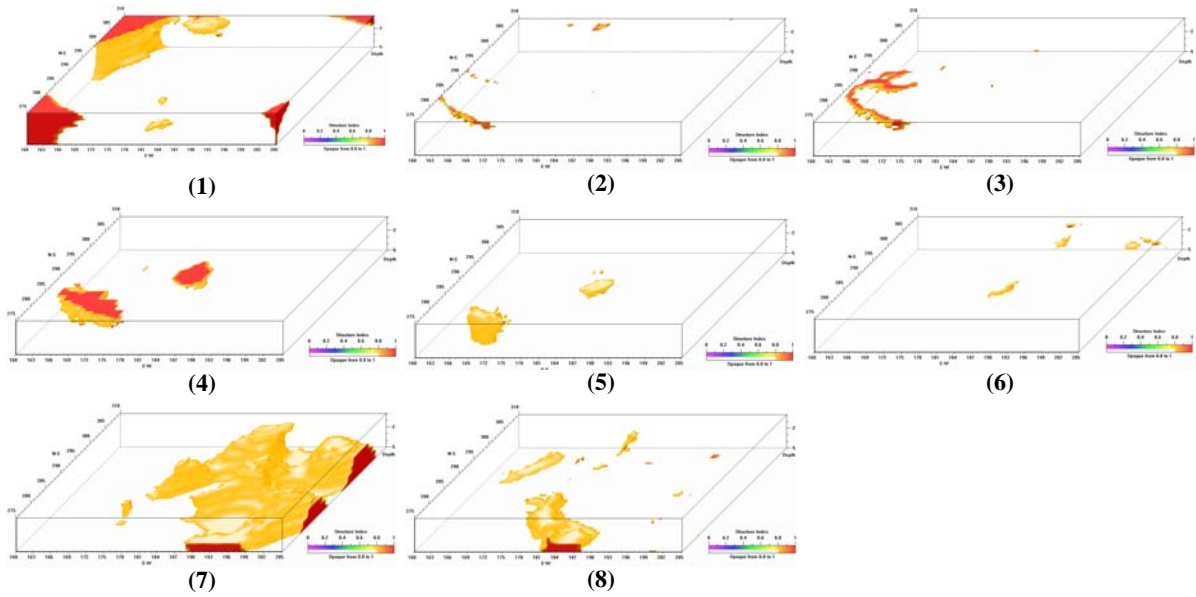


Fig. 7. The 3-D images show the models of each Structure Index.

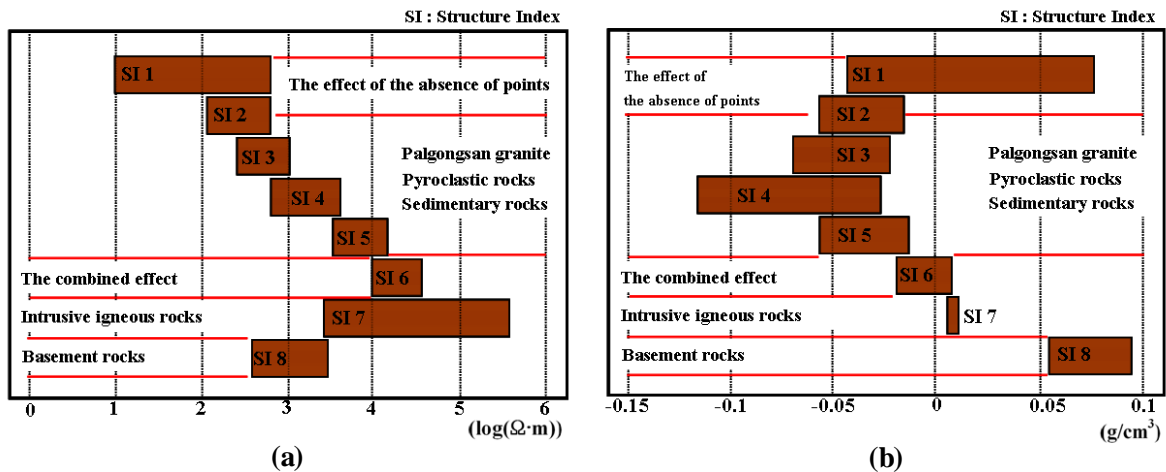


Fig. 8. (a) and (b) show the respective ranges of resistivity and relative density values according to Structure Index.

Structure Index 기법을 이용하여 해석을 수행한 결과, Fig. 7과 Fig. 8에서 보여지는 것과 같이 화산칼데라 지역은 다음의 세 가지 구조로 해석될 수 있다. 1) class 2의 일부와 class 3,4,5로 구성된 팔공산 화강암과 칼데라 중심 상부의 화산쇄설성 퇴적층, 2) class 7에 나타나는 화산칼데라의 환상단층대에 관입암 화성암과 화산칼데라의 북동부에 걸쳐 나타나는 관입 화강암류, 3) class 8에 나타나는 기반암 상부이다. 첫 번째 구조에서 팔공산 화강암과 퇴적층이 구분되지 않은 이유는 팔공산 화강암과 퇴적층이 전기비저항 측면에서 차별성을 나타낼 수 있으나 팔공산 화강암 지역에서 MT 탐사가 이루어지지 않았기 때문에 저밀도의 두 구조가 중력 결과에서 구분되지 않기 때문이다. 두 번째 구조인 화성암 관입암들의 효과는 상대적으로 고밀도와 고비저항값을 갖으며, 세 번째 구조인 상부 기반암은 고밀도와 상대적으로 낮은 비저항값을 갖기 때문에 하나의 class에 의해서 용이하게 구분되어 질 수 있었다. 또한, class 1은 MT 측점이 거의 존재하지 않는 지역에서 광범위하게 나타나고 있는 오해석 결과이다.

3. 결론

이번 연구의 중력 자료와 MT 자료를 통해 해석된 화산 칼데라 지역의 지하구조는 지표 지질 및 기존의 중력, 자력 탐사를 통해 제시된 광역 지하구조와 상당히 잘 부합하고 있다. 첫 번째로, 화산칼데라의 환상단층대를 따라 분포하고 있는 고밀도, 고비저항의 화성암 관입체와 화산칼데라 중앙 상부에 약 1 km 심도로 분포하고 있는 화산쇄설성 퇴적층의 공간 분포가 해석되었다. 또한, 상대적으로 전기비저항이 낮고 밀도가 높은 하부 기반암이 약 5 km 부근에서 나타남을 확인하였다.

이 연구에서는 이중의 물성을 갖는 복합 지구물리 자료의 객관적인 해석을 위하여 Structure Index 기법을 제안하고 이를 이용하여 해석을 수행하였다. 이는 이중 물성의 분포도를 이용하여 Type Angle과 Type Intensity로 결정 된다. 이를 이용하면 독립된 물리탐사 해석 결과에서는 유사한 물성치를 나타내어 구분하기 어려운 구조를 이중의 물성치를 이용하여 구조적으로 구분하여 해석할 수 있으며, 그 구조에서의 반응 특성인 물성의 변화양상, 분포 등을 객관적으로 해석할 수 있다. 또한, 이는 국부지역의 정밀 재해석의 기본 자료로 이용될 수 있다. 이 연구에서 제안한 Structure Index 방법은 벡터로 결정되기 때문에 선형대수적으로 확장성이 좋다. 따라서 두개 이상의 여러 복합지구물리 탐사가 수행되었을 경우에도 효과적으로 복합 해석이 이루어질 수 있는 장점을 갖으며, 향후 동일 지역에서 이루어진 다양한 물리탐사 자료를 객관적이며 효과적으로 데이터베이스화 하고 지하 모델을 영상화하는데 효과적으로 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2006-000-10847-0)와 한국지질자원연구원의 전문연구사업 ‘지하정밀 영상화 융합 기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 또한, MT 자료 처리를 도와주신 이춘기 박사님께 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 금성산 칼데라와 그 부근의 지질구조와 중력특성, 지질학회지, **31**, 125-137.
- 박계순, 류희영, 양준모, 이희순, 권병두, 엄주영, 김동오, 박찬홍, 2008, 포텐셜 자료해석을 통한 화산칼데라 구조 해석, 한국지구과학회지, **29**, 1-12.
- 이정민, 1995, 화산 칼데라의 지하구조와 중력특성, 서울대학교 교육학석사학위논문, 44p.
- 유상훈, 황중선, 민경덕, 우익, 2005, 중력, 자력 및 위성영상을 자료를 이용한 의성소분지의 지질 및 지구구조 연구, 자원환경지질, **38**, 143-153.
- 윤성효, 1988, 화산 환상화성암복합체의 발달사 및 콜드론구조, 지질학회지, **24**, 267-288.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uyeshima, M., 2005, Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **150**, 3-14.