의성소분지 화산 칼데라 지역에서의 복합지구물리 탐사 해석

박계순[1)]* · 이희순[2)] · 오석훈[3)] · 권병두[1)] · 양준모[4)] · 류희영[1)] · 최종근[1)]

1. 서 론

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 왔으나 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 통합적 복합지구물리 해석 기법의 개발이 필수적이며, 특정한 물성 차이에만 반응하는 지구물리기법의 한계로 인하여 필요한 정보를 제공하지 못하는 약점을 극복할 수 있을 것이다.

2. 본 론

지질개요

본 연구의 주요 지질구조는 의성소분지의 화산 칼데라로 형성 시기는 약 신생대 제 3기(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. 화산 칼데라 내부의 퇴적암은 약하게 습곡 및 혼펠스화되었으며, 중심부의 화산암복합체는 유문암질로서 하양층군 위에 놓여져 있다. 또한 중심부 화산암 복합체 내부에도 침강 양상을 확인할 수 있는데, 이는 중심부에서 추가적인 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 화산복합체와 화성암 관입체는 가장 최후에 형성되었다(Fig. 1).

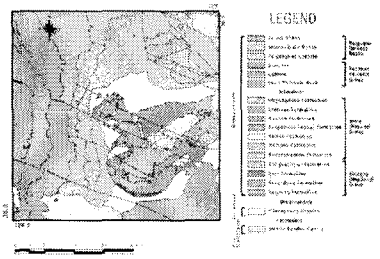

Fig. 1 Geologic map of survey area.

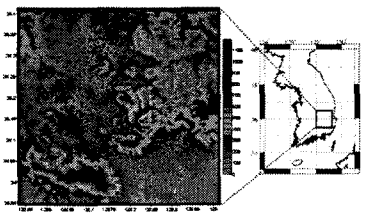

Fig. 2. Elevation map of survey area and observed MT (triangle) and gravity (quadrangle) sites.

1) 서울대학교 지구과학교육과 (gyesoon@paran.com)
2) 경인교육대학교 과학교육과 (yihsoon@gin.ac.kr)
3) 강원대학교 지구환경공학부 (gimul@kangwon.ac.kr)
4) 한국해양연구원 해양환경연구본부 (yjm@mantle.snu.ac.kr)

탐사 개요

본 연구에서는 화산칼데라와 금성산 칼데라 일대에 걸쳐 약 1×1 km의 격자 형태로 510개의 중력 측정을 수행하였으며, 한국지질자원연구원에서 1980년대 후반부터 1997년까지 측정된 약 150 m 등간격 항공 자력자료를 이용하여 함께 해석하였다(Fig. 3). 중력자료는 위도보정, 조력보정, 계기보정, 망보정, 후리에어보정, 부게보정, 지형보정을 수행하여 지질 구조에 의한 중력효과만을 추출하여 해석에 사용하였으며, 항공자력 자료는 비행측선의 편차에 대한 위치보정, base staion을 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. 또한, 본 연구에서는 화산 칼데라를 동서로 가로지르는 방향으로 설정된 총 13개 측점에서 MT(Magnetotelluric) 탐사를 수행하였다(Fig. 2). 사용된 탐사 장비는 한국지질자원연이 보유하고 있는 캐나다 Phoenix사의 MTU-5A 시스템이며, 인공잡음의 영향을 최소화하고자 오후 5시부터 익일 오전 8시까지 총 15시간을 측정하였고, 측정 주파수 대역은 320-0.001 Hz이다. 측정 채널은 총 5채널로서, 두 채널의 수평 전기장 성분(남북 x, 동서 y)과 세 채널의 자기장 성분(남북 x, 동서 y, 수직 z)을 측정하였다. 측선의 총 길이는 약 37 km이고, 양쪽 끝 측점을 제외한 평균 측점 간격은 약 2.5 km로서, 해발고도 120-280 m에 분포한다. 한편, 측점주변에 존재하는 잡음의 영향을 최소화하고자 원거리 기준점 기법이 사용되었는데, 본 연구에서 이용한 원거리 기준점은 측점으로부터 약 1000 km 이상 떨어진 일본 에사시의 고정 MT 관측소이다.

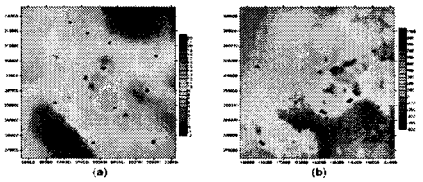

Fig. 3. Bougure anomaly map(a) and magnetic anomaly map (RTP)(b) of survey area.

자료 분석

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 밀도 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. 4와 같이 나타나며, 이 결과는 위의 파워스펙트럼 분석에서 나타난 값과 전반적으로 잘 부합하고 있으며, 위치적인 정보가 추가되어 보다 효과적인 분석이 가능하였다. 포텐셜 자료의 3차원 해석을 위하여 3차원 중력 밀도 역산과 자력자료를 이용하여 가중력을 구해 화산칼데라 주위의 역산을 수행하였다(Fig. 5,6). 전반적인 패턴을 살펴보면, 남서쪽에 팔공산 화강암과 북동쪽에 분포하는 불국사 관입암류에 의한 저밀도체의 모습이 크게 나타나고 있으며, 화산 칼데라 부근에서는 주위의 경상계 퇴적암에 비하여 생성 시기가 늦은 칼데라 중앙부의 화산쇄설성 퇴적암류가 주변보다 낮은 밀도를 나타내며, 하부로 약 2-3 km정도 연장되어 있는 모습을 나타내고 있다. 그러나, 화산 칼데라의 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 수직 분해능이 좋은 MT탐사가 함께 수행되었다. MT자료의 2차원 역산은 Rodi and Mackie (2001)의 NLCG (Nonlinear Conjugate Gradient) 법을 이용하였는데, 본 연구 자료의 경우 TE 모드 자료는 TM 모드 비해 자료의 질이 떨어지고 수렴이 불량하여 해석에서 제외하였다. 전반적인 경향은 3층 구조로서 제 1층은 수 백 ohm-m의 전기비저항을 가진 충적층(약 500 m), 제 2층은 1000 ohm-m 이상의 전기비저항을 보이는 퇴적층 및

화산쇄설성의 신동층군과 하양층군(약 500-500 0m), 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 등, 2005)와 잘 부합된다(Fig. 6).

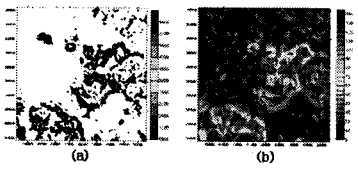

Fig. 4. Locations(a) and their depths(b) of Boundary of geologic structure by Enhanced analytic signal of rtp data.

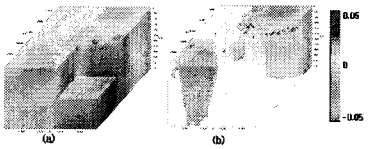

Fig. 5. Density distribution of 3-D gravity inversion(a) and model of low density structure (b).

3. 결 론

광역적인 지질구조의 수평적인 물성변화를 잘 보여주는 중·자력 자료와 수직 분해능이 좋은 MT 자료를 해석한 결과, 화산 칼데라 양쪽의 환상단층대는 주변에 비해 상대적으로 고밀도, 고자성과 고비저항값을 갖고 깊이 4 km 정도까지 연장되어 신동그룹의 기반암과 연결되어 있는 것으로 해석되고, 서쪽 경계가 동쪽 경계에 비해 그 폭이 좁다. 이는 단층대를 따라 분출한 유문암질 화성암으로 해석된다. 또한, 화산 칼데라 중심부 하부 깊이 1-2 km 이하에 나타나는 저밀도와 저비저항대는 과거 화산 칼데라 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 향후 수행될 정밀 3차원 해석시 광역 정보를 포함하는 포텐셜 자료가 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

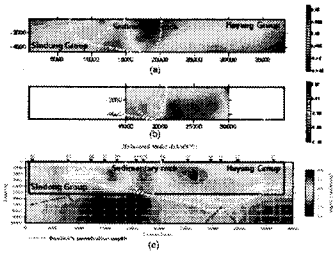

Fig. 6. Results of gravity density inversion(a), pseudo -gravity inversion(b) and MT inversion(c).

사사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구 사업인 "칼데라 구조와 지열가능성 평가를 위한 복합지구물리 연구", 한국학술진흥재단 신진 교수 연구지원 사업인 "지구통계학적 베이지안 방식에 의한 이종 물리탐사 및 보조자료의 복합 역산 연구"의 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사를 드립니다.

참고문헌

윤성효, 1988, 화산 환상화성암복합체의 발달사 및 콜드론구조, 지질학회지, 24, p. 267-288.

장기홍, 박순옥, 1997, 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사, 자원환경지질, 30, p.143-151.

유상훈, 황종선, 민경덕, 우익, 2005, 중력, 자력 및 위성영상을 자료를 이용한 의성소분지의 지질 및 지구조 연구, 자원환경지질, 38, p. 143-153.

Rodi and Mackie, 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion, *Geophysics*, **66**, 174-187.