

삼량진 칼데라 지역의 항공자력특성 연구

구성본 · 이태섭 · 박영수¹⁾

Aeromagnetic Characteristics of the Samryangjin Caldera Area

Koo, Sung-Bon, Lee, Tai-Sup and Park, Yeong-Sue

요약 : 항공자력탐사자료를 이용하여 경상분지 동남부 유천소분지의 화산암류 분포지 내에 발달되는 삼량진 칼데라 지역에 대한 자력특성을 고찰하였다. 연구방법은 자력탐사 자료를 이용하여 잔여자력도, 자극화변환도, 수평미분도와 수직 2차미분도를 작성하여 자력암상특성을 분대하고 칼데라구조 및 단층과 관련된 지질구조적 양상에 대한 자력구조 특성을 고찰하는 정성적 해석을 실시하였다. 또한 칼데라 구조를 북동-남서방향으로 종단하는 14.5 km의 단면선에 대해 forward modelling을 실시함과 동시에 전지역에 3-D Euler deconvolution 방법을 이용하여 자력 이상체의 심부 발달상태 및 특성을 고찰하는 정량적 해석을 실시하였다. 이들 결과에 의하면 본역의 자력암상특성은 4개의 unit로 분대되며 이들은 일반적으로 본역의 지질분포와 잘 일치되거나 삼량진 칼데라 북측 경계부에 관입한 흑운모화강암은 고자력을 보이므로 인접의 여타 저자력 흑운모 화강암체와 자력암상특성에서 분명한 차이를 보인다. 따라서 이 흑운모화강암은 삼량진 칼데라의 화산작용과 밀접한 관계가 있으며 칼데라립을 따라 발달된 구조대를 따라 관입한 것으로 해석된다. 본역의 삼량진 칼데라 구조 및 단층선 구조는 각종 자력이상도에서 분명한 자력구조로 인지가 가능하며 지형특성도 이들 구조를 잘 반영한다 할 수 있다. 본 역의 심부 자력이상체 발달상태를 규명하기 위한 자력단면선의 forward modelling 결과, 경상퇴적분지의 심도는 칼데라 내에서 평균 약 6 km이며(최고 약 10 km) 칼데라의 외측으로 갈수록 화강암류의 천부 관입에 따라 심도가 얕아짐을 보인다. Euler deconvolution 방법을 이용한 자력이상체의 3차원적 위치 및 심도특성을 고찰한 결과도 칼데라 구조 및 단층구조선을 잘 나타내며 화산암류와 관계된 비교적 천부의 자력이상체는 주로 동-서와 북동방향으로 발달하고 있음에 반하여 심부의 자력이상체는 주로 북서방향으로 발달하고 있음을 알 수 있었다.

Abstract : Using airborne magnetic data, magnetic characteristics were studied at the Samryangjin caldera area developed in the volcanics of the Yuchon sub-basin, the south eastern part of the Gyeongsang basin. Residual magnetics, reduction to the pole, horizontal derivative, and vertical derivative maps are prepared. Using these maps, the magnetic lithofaces are zoned and the geological structures such as caldera and faults were qualitatively interpreted. In addition, the two quantitative interpretations were performed. Firstly, the forward modelling were done to the 14.5 line km crossing the caldera area to the northeast-southwest direction. Applying the 3-D Euler deconvolution method to the whole study area, the depth extent and the characteristics of the magnetic anomalous bodies were studied. According to the results, the magnetic lithofaces of the area are zoned by 4 units. In general, these are well matched with the geological distributions. But the biotite granites intruded in the northern boundary of the Samryangjin caldera show the high magnetic intensity, while the biotite granites of the other areas show the low magnetic intensity and the different magnetic lithofaces. Thus, we interpreted that the biotite granites are closely related with the volcanic activity of the Samryangjin caldera, and are intruded in the fracture zones developed along the caldera rim. The Samryangjin caldera and fault structures of the area can be easily recognized by the distinct magnetic structures from the various magnetic anomaly maps. Also the topographic characteristics well reflect these structures. The results of the forward modelling show that the magnetic basement depth of the Gyeongsang sedimentary basin is on the average about 6 km and in maximum 10 km. And the depth becomes shallower toward the caldera boundary due to the shallow intrusion of the volcanics. The results of the 3-D Euler method also show the caldera and fault structures. And the relatively shallow magnetic anomalous bodies which are related with the volcanics are generally developed to the east-west and northeast directions, while the deep magnetic anomalous bodies to the northwest direction.

Keywords : Aeromagnetics, Caldera, Magnetic lithofaces, Euler deconvolution

서 론

항공자력탐사는 항공기에 탐사장비를 탑재하고 단기간 내

에 광범위한 지역내의 자력특성을 체계적으로 획득하고 이 자력자료를 전산처리하여 단면도, 이상도 등을 작성하여 해석하고 혹은 주파수영역에서 자력의 스펙트럼을 분석함으로써

*1998년 8월 17일 접수

1) 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Materials) 자원탐사연구부

써 암상을 mapping하거나 심부 지질구조를 규명하는 보편화된 광역탐사의 한 기법이다.

항공자력탐사자료는 현재의 컴퓨터산업의 발전과 더불어 영상처리기법을 이용한 자료처리과정을 거쳐 다양한 형태의 해석도면으로 작성되고 이 결과에 의한 지질 및 구조정보는 석유, 지열, 광물탐사 등의 핵심 자원탐사는 물론 지질구조와 관련된 유관분야의 문제해결을 위하여 다양하게 활용되고 있다. 또한 이들 자료는 자료은행으로 운용되거나 지역간, 국가간 자료종합을 통한 범세계적 자료종합을 시도하고 있는 실정이다.

본 연구는 이러한 항공자력탐사분야에서의 발전을 토대로 한국자원연구소가 1990년 5월경 proton magnetometer를 이용하여 경상분지내의 삼랑진 칼데라지역 일대에서 획득한 총자력치를 재 전산처리하여 본역에서의 항공자력특성을 규명코자 하였다. 본 연구지역의 지질은 경상분지의 유천소분지에 해당하는 화산암류가 집중적으로 분포하는 지역으로 후기에 불국사 화강암류가 이들 화산암류를 관입하고 있으며 trap door형 칼데라로 알려진 삼랑진 칼데라가 본역 중서부에 위치한다. 단층은 경상분지내의 주된 단층계인 N20°E 단층계에 해당하는 밀양단층, 모량단층 등이 본역 서측에서 동측으로 발달되며, N50°W 단층계에 해당하는 어영단층이 본역 서부에서 모량단층에 의해 우수향으로 단절되어 발달된다.

항공자력특성 규명은 전산처리결과 작성된 IGRF를 제거한 잔여자력도, 자력화변환도, 수평/수직 2차미분도 등을 이용한 자력암상분대와 자력구조로부터의 칼데라 및 지질구조 인지 등의 정성적 해석을 실시하였다. 또한 심부의 지질구조

규명을 위하여 삼랑진 칼데라를 종단하는 단면도를 작성하여 forward modelling을 실시하였으며 현재 각광을 받고 있는 3-D Euler deconvolution을 이용하여 심부 자성체의 3차원적인 위치, 심도 및 자성체의 발달 특성을 규명하는 정량적 해석을 실시하였다.

지질 개요

삼랑진 칼데라 지역의 지질(김규봉과 황상구, 1988)은 경상분지의 유천소분지에 해당하는 화산암류가 집중적으로 분포하는 지역으로 후기에 불국사 화강암류가 이들 화산암류를 관입하고 있다(Fig. 1). 유천소분지 내의 화산암류는 화산암류의 주요 분포지를 향하여 분상구조가 매우 뚜렷하며 이와 같은 분상구조는 화산작용 말기에 두터운 화산암류가 집중적으로 집적되어 화산암류 분포지만이 구조적인 향심구조를 이루면서 기울어짐에 기인된다(김상욱, 1986). 유천소분지의 화산암류는 하부의 중성 화산암류인 주사산 안산암질 암류와 상부의 산성 화산암류인 운문사유문암질 암류로 구성된다. 운문사화산암질 암류는 칼데라 형성과 회류응회암과 강하응회암이 서로 밀접한 관계를 보임에 따라, 칼데라 형성과 관련된 분출암을 하나로 묶어 양산응회암, 원동응회암, 삼랑진응회암으로 구분한 바 있다. 그러나 칼데라는 칼데라 형성 후에 환상암맥, 소생도움 등의 관입암체를 소유하므로 반드시 회류응회암-칼데라-환상암맥을 이루고 있다. 따라서 서로 인접하지 않은 관입암체끼리의 생성순서를 밝히는 것은 시간적 간격이 짧기 때문에 칼데라와 관입체를 결부하여 토곡산화산

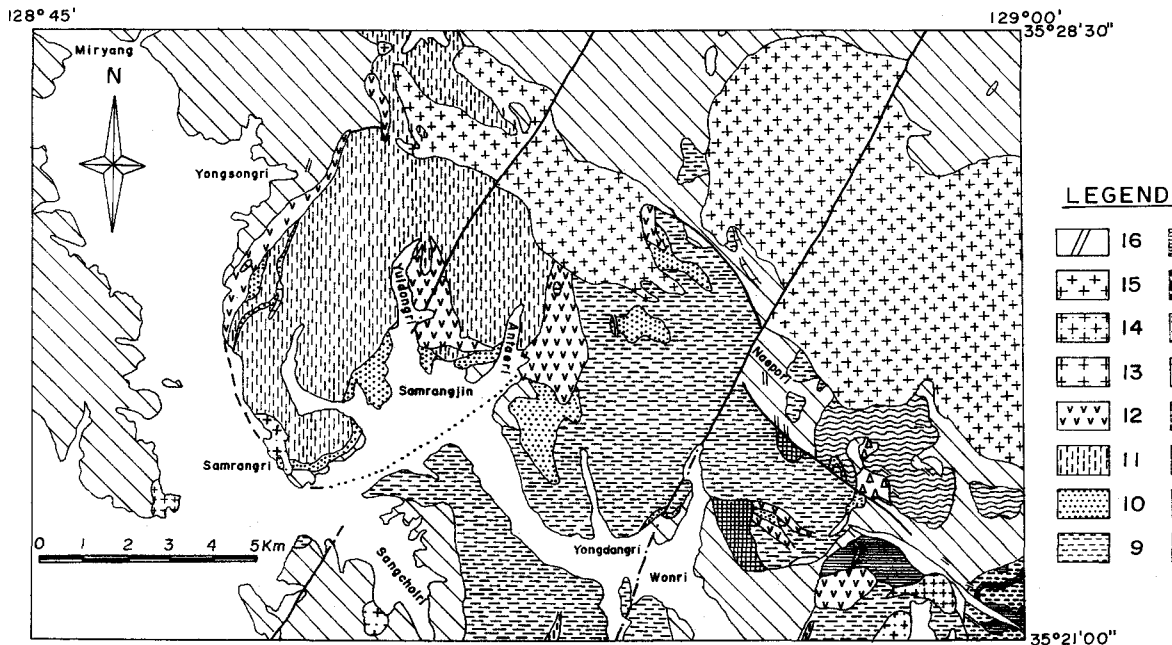


Fig. 1. Geologic map of the Samrangjin caldera area. 1: Chusasan andesitic rocks, 2-4: Yangsan tuff (2: Tuff breccia, 3: Dacitic ash-flow tuff, 4: Dacite), 5-6: Wondong tuff (5: Rhyolitic fallout tuff, 6: Rhyolitic ash-flow tuff), 7: Quartz porphyry, 8-9: Hwajeri formation (8: Volcaniclasti sediments, 9: Non-welded tuff), 10-11: Samrangjin tuff (10: Fallout tuff, 11: Rhyodacitic ash-flow tuff), 12: Rhyolite 13: Fine-grained granodiorite, 14: Hornblende biotite granite, 16: Biotite granite, 17: Acidic dyke.

암 복합체(황상구, 1990)라는 용어를 사용하였다. 불국사화강암류는 세립 화강섬록암, 각섬석흑운모화강암, 흑운모화강암, 산성암맥 등으로 구분되나 이중 세립 화강섬록암 및 각섬석흑운모화강암은 칼데라 생성 후속 단계의 관입암체로 작용하므로 전술한 토곡산화산암복합체에 해당된다. 화강암류 중 흑운모 화강암체는 본역의 삼랑진 칼데라 북측과 경계를 이루며 또한 본 역 북동부에 광범위하게 분포하며 이들은 밀양 단층과 모량단층에 의해 우수향으로 단절된다.

본 연구지역의 단층은 경상분지내의 주된 단층계인 N 20°E 단층계에 해당하는 밀양단층, 모량단층 등이 본역 서측에서 동측으로 발달되며, N50°W 단층계에 해당하는 어영단층이 본 역 서부에서 모량단층에 의해 우수향으로 단절되어 발달된다.

토곡산화산암복합체내에 발달되는 칼데라구조는 그 유형에 따라 trap door형 칼데라, 재침몰 칼데라, 소생도움 칼데라 등으로 구분된다. Trap door형 칼데라는 칼데라구조의 내부에서 한쪽만이 침몰하고 다른 한쪽에는 침몰이 일어나지 않은 칼데라 유형으로 본 연구지역 내에 발달되는 삼랑진 칼데라는 trap door형 칼데라로 알려져 있다. 재침몰형 칼데라는 화산작용 후 생성된 칼데라구조 내에 또 다른 화산활동이 동일 칼데라구조에서 일어나 재침몰이 일어난 유형이며 소생도움형 칼데라는 칼데라구조운동이 일어난 후 칼데라의 중앙부에 새로운 관입암체가 관입하여 도움형태의 칼데라구조를 이루는 유형이다.

자료획득

본 연구를 위한 삼랑진칼데라지역 일대의 항공자력탐사 자

료는 한국자원연구소가 1990년 5월 항공물리탐사사업의 일환으로 실시한 자료를 이용하였다. 자료획득은 한국항공(주)의 BK-117 쌍발 헬리콥터에 미국 Geometrics사제 G-813 proton magnetometer를 적재하고 자력감지부는 헬리콥터 동체 100 ft 하부에 coaxial cable로 연결하여 절대비행고도 약 400 ft를 유지하면서 탐사를 실시하였다. 자료획득 방법은 1/50,000 지형도를 기준으로 1 km 간격으로 설정된 동서방향의 탐사측선과 약 5 km 간격으로 설정된 보조측선을 따라 비행속도를 50 knots/hr로 유지하면서 매 1초 간격으로 탐사자료를 측정하였다.

탐사자료의 위치확인용 탐사작업시 1/50,000 지형도 위에 비행측선을 따라 확인 가능한 지점에 자료번호를 기재하고 탐사측선을 따라 비행경로를 35 mm strip film에 촬영하여 자료번호를 재확인하는 비행경로도를 작성한 후 이를 좌표화하여 위치자료를 부여하였다.

자료처리

자료처리는 SUN workstation에서 당소가 개발한 KADIPS version 1(서상용 등, 1983)을 보완한 version 2를 이용하여 일차적인 자료편집, 보정을 실시하였다. 자료편집은 위치좌표와 결합된 자료를 측선별로 단면도를 작성하여 획득된 자력자료 및 고도 자료 등을 검토하여 돌발적으로 나타나는 잡음을 필터, 제거 혹은 수정하는 전과정이다. 각 지역별로 자료편집이 끝난 자료에 대한 자료보정작업은 일변화보정, 교차점의 오차보정, 상하향 연속 등이 이에 해당된다. 지구자기장의 일변화보정은 최소자승법(Yarger et al., 1979)을 이용하였는데 이 방법은 탐사측선과 보조측선간의 교차점에서 상이치

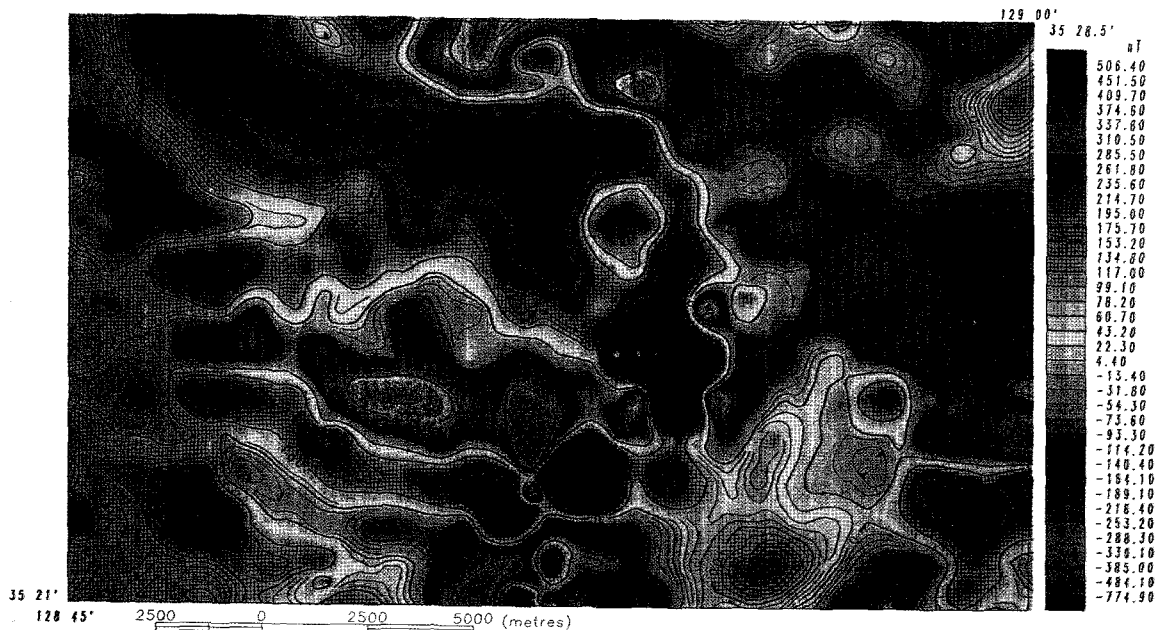


Fig. 2. IGRF removed magnetic field.

들의 square sum을 최소로 하는 값을 구하는 방법을 이용하였다. 탐사측선과 보조측선의 교차점에서의 오차에는 일변화 등 low polynomial로 표시될 수 있는 오차 이외에도 location error 등 잔여 error가 있기 마련이며 이를 보정하기 위해 모든 교차점에 대한 mistie의 크기에 따라 가중치를 결정하는 방법 (Mittal, 1984)을 이용하였다. 상하향연속은 어떠한 조건도 없이 임의의 곡면에서 임의의 곡면으로 연속이 가능한 equivalent source layer 방법(Hansen and Miyazaki, 1984)에서 1차원의 방법을 이용하여 절대고도를 1000 ft로 상향 연속시켰다.

KADIPS version 2에 의해 자료의 편집 및 보정작업이 완료된 자료는 이차적으로 캐나다 PG&W(Paterson, Grant and Watson Inc.)사의 Gipsi program packages를 이용하였다. 즉 모든 보정작업이 완료된 자력탐사 자료를 축선별로 경도(x), 위도(y), 자료번호(z1), 절대고도(z2), 해발고도(z3), 자력치(Zz) 등을 순서대로 Gipsi xyzformat으로 변환시켰다. 이들은 다시 위도, 경도의 위치좌표를 동경 129°를 기준으로 하여 spheroid를 BSSL184, central scale factor를 0.9996으로 하여 UTM(Universal Transverse Mercator)으로 좌표변환을 실시하였다. 좌표변환이 완료된 자료는 100 m의 격자간격으로 그리딩을 하고 n, m 상수를 8까지 하여 산출한 1995년 5월의 IGRF(Langel, R. A., 1992)값을 총자력에서 제거함으로써 잔여자력을 산출하여 등고선 및 색채도(Fig. 2)로 작성하였다. 잔여자력을 2중 푸리에 급수로 전개하여 스펙트럼분석(Spector, A. and Grant, F. S., 1970)을 실시한 결과(Fig. 3)는 자력자료를 100 m로 격자화함에 따라 5 cycle/km에서 Nyquist noise가 나타남을 알 수 있고 천부의 노이즈가 0.2 cycle/km 보다 고주파에서 나타남을 알 수 있다. 따라서 이들 고주파는 주파수영역에서 자극화변환과 수평-수직 미분을 할 경우 노이즈로 작용하는 것을 방지하기 위해 기준 주파수를 0.2 cycle/km로 하고 order를 8로 하는 Butterworth low pass 필터를 적용하여 고주파를 제거하였다. 자력탐사자료는 자성체의 형태뿐 아니라 자화방향과 지자장 벡터의 방향에 의해

결정됨으로 자력이상의 중심이 자성체의 직상부에서 벗어나게 되며 대칭성도 없어 자료해석에 어려움이 따른다. 따라서 자극화변환은 자력치를 마치 복각이 90°이어서 수직성분이 곧 총자력이상이 되는 자극에서 측정된 값과 같이 변환시키는 수치기법이다. 즉 자극화변환에 의하여 자화와 지자장의 편각과 복각에 의한 효과를 제거하면 자력이상이 마치 중력 이상과 같이 이상의 중심이 자성체 직상부에 위치하게 되어 해석이 용이하게 된다. 따라서 본 연구에서는 복각은 50°, 편각은 -7°를 적용하여 자극화 변환도(Fig. 4)를 작성하였다. 또한 미분도는 광역적 이상치로부터 국지적 이상체에 의한 자력이상을 분리하는데 유용하며 실제 자력자료의 해석시 이상의 경계를 찾거나 선구조를 발견하는데 유용한 해석 도구로 널리 이용된다. 그러나 수직미분도는 차수를 증가할수록 축선간의 비행고도차 혹은 기타의 원인에 의한 잡음이 나타나며 이를 제거하기 위해 상기의 low-pass 필터를 적용한 자료를 이용하여 수평미분도(Fig. 5)와 수직 이차미분도(Fig. 6)를 작성하였다. 자료해석에서는 단일자료보다 다양한 자료를 복합적으로 해석할 경우 해석의 신뢰도를 증진시킬 수 있으며 이러한 자료해석의 일환으로 본 연구지역에서는 수치지형자료를 자력자료와 동일한 100 m 크기로 격자화한 후 이를 지형기복도(Fig. 7)로 작성하였다. 이 지형기복도는 음영도로 작성하였는데 이상치의 크기가 비교적 작고 또한 이상치의 분포 폭이 좁은 자료의 경우 기존의 등고선도로는 일반적으로 식별이 곤란한 경우가 많다. 이러한 이상치를 식별하기 위해서는 자료가 이루는 평면에 특정한 방향에서 빛을 비추어 반사되는 빛의 양을 반사도로 계산하여 표현한다면 이 반사도는 한 지점의 표면경사와 비추어지는 빛의 방향에 의해 결정된다. 따라서 크기는 작더라도 변화율이 큰 이상치는 크기가 크면서 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 이상치보다 두드러지게 보이게 된다. 이러한 자료표현기법을 음영처리라 하며 이 음영처리기법은 지표지형을 강조하거나 자동항법, 원격탐사 자료의 영상처리에 널리 이용되고 있다.

정성적 자료해석

본 연구에서의 항공자력탐사 자료해석은 정성적 해석과 정량적 해석으로 대분 된다. 정성적 해석은 자력암상(magnetic lithofaces)특성을 분대(zoning)하여 지질암상과 비교검토하고 본 역의 화산암체내에 형성된 칼데라구조와 주요 단층선을 규명하기 위하여 자력구조(magnetic structure)를 분석하였다. 자력암상특성은 자극화변환도(Fig. 4)에서 나타난 대자율(susceptibility)과 자력조직(magnetic texture)의 변화에 기인된 자력이상을 유사한 특성으로 분대(zoning)하였는데 이차적인 지질환경에서 동일 암상도 상당히 다른 자력특성을 보일 수도 있음으로 유사한 특성을 지질적으로 분대하기는 상당히 어려운 것이 사실이다. 본역의 자력암상특성을 자력이상의 형태에 따라 분대하면 4종류(unit 1~unit 4)로 분대가 가능하

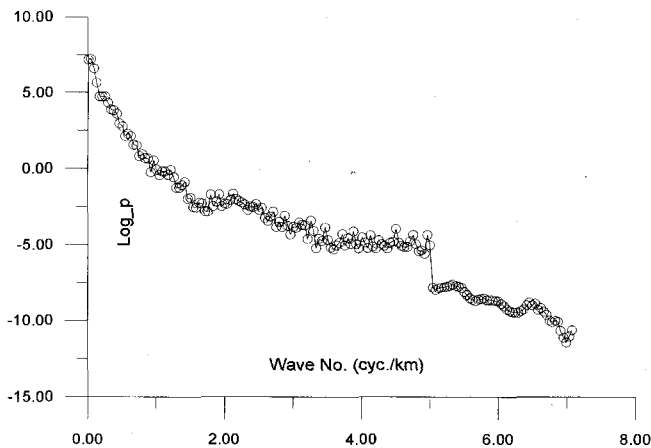


Fig. 3. 2-D Radially averaged power spectrum.

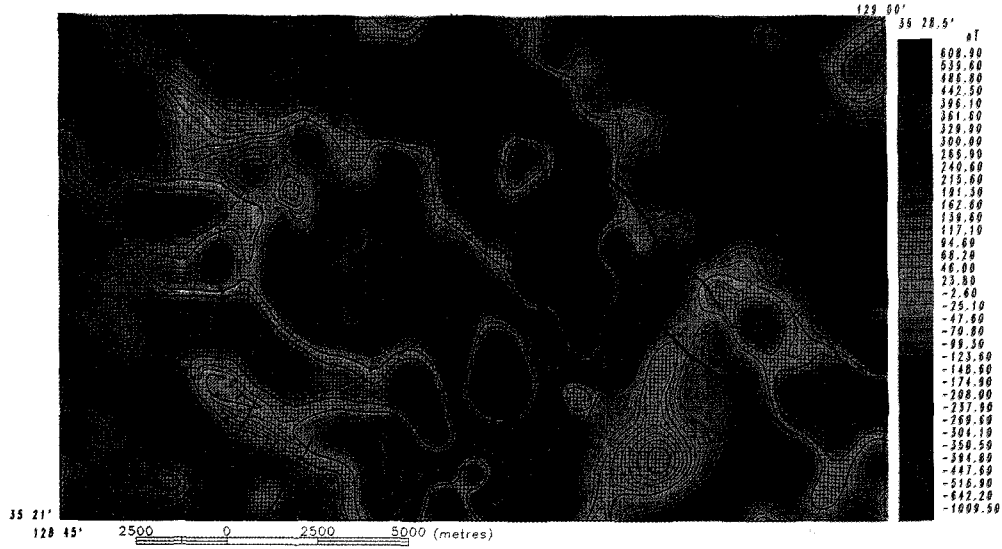


Fig. 4. IGRF removed magnetic field reduced to the pole.

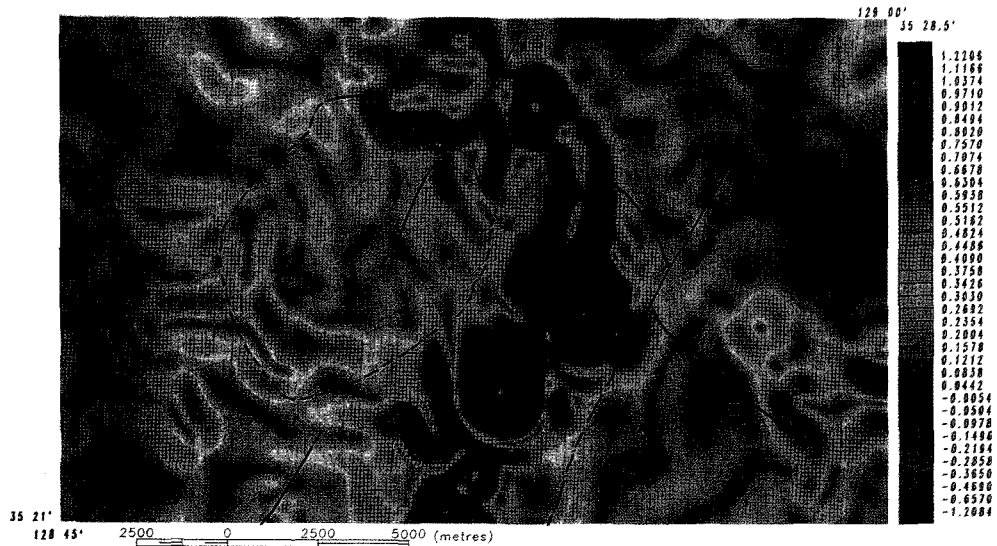


Fig. 5. IGRF removed, reduced to the pole, horizontal derivative map.

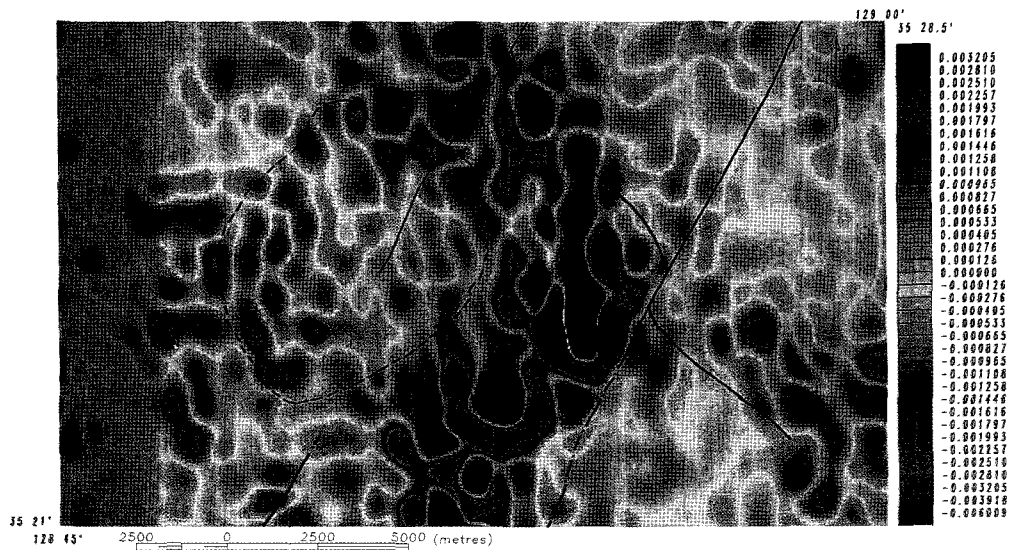


Fig. 6. IGRF removed, reduced to the pole, 2nd vertical derivative map.

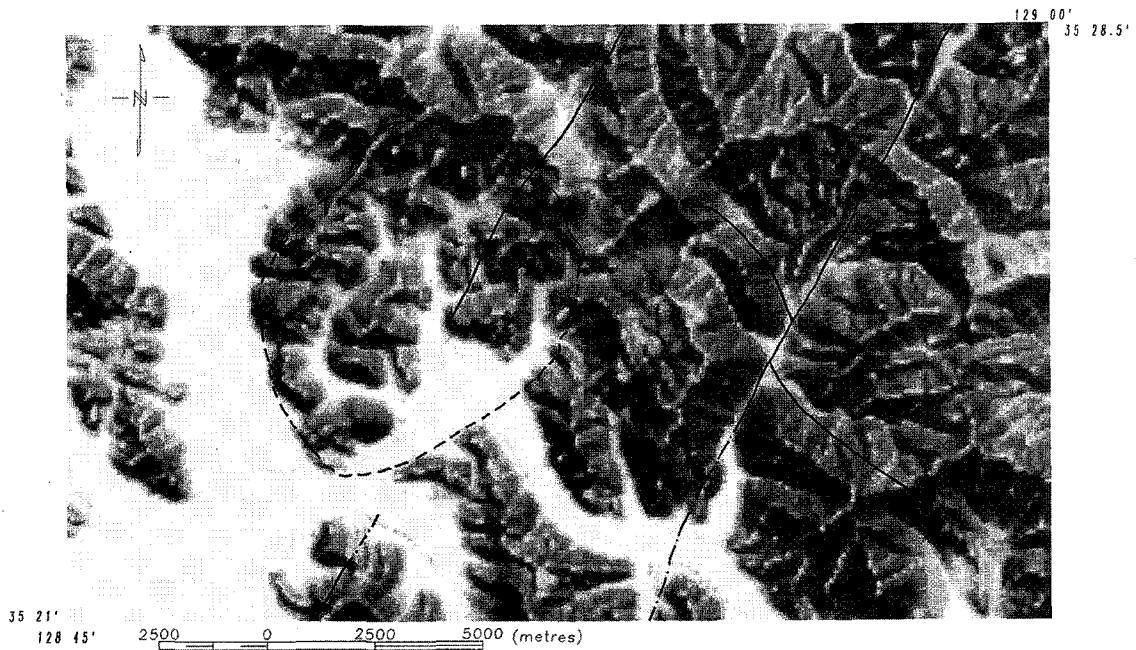


Fig. 7. Topographic relief map of the Samryangjin caldera area.



Fig. 8. IGRF removed magnetic field reduced to the pole and overlaid on the topographic relief map.

다. unit 1은 240 nT(자주색) 이상의 자력이상을 보이는 이상대로 삼랑진 칼데라의 북동 경계부를 따라 본역 중앙부를 관통하는 남동-북서 주향의 자력이상과 삼랑진 칼데라의 립을 따라 발달되는 자력이상들이다. 이 자력이상들 중 칼데라의 북측경계부를 나타내는 이상대는 흑운모화강암, 각섬석흑운모화강암과 이들 화강암체 관입 인접부에 위치한 주사산 안산암질암류, 원동 유문암질응회암과 양산 조면암질응회암과 관계된다. unit 2는 -25에서 240 nT(황색~적색)의 자력강도와 자력조직의 방향성이 불규칙한 이상들로 이는 주로 주사

산 안산암질암류와 관계된다. unit 3은 -350에서 -25 nT의 자력이상과 평탄한 자력구배를 보이는 이상들로 이는 흑운모화강암으로 분대되며 이는 본역 북동부의 흑운모화강암체에서 나타나는 전형적인 자력특성이다. unit 4는 본역에서 가장 저자력인 -350 nT(청색) 이하를 나타내며 이는 삼랑진응회암류로 분대되며 삼랑진 칼데라 동측과 모량단층 사이에서 나타나는 원동 유문암질 응회암 내의 이러한 자력이상은 고자력에 기인된 상대적 저자력이상과 모량단층에 의한 자력이상으로 해석된다. 이상의 본역 자력암상특성을 요약하면 화

산암류는 저자력과 고자력구배로 특징되며 화산암류들 중 주사산 안산암질암류는 상부의 토곡산 산성화산암질류보다 상대적으로 고자력 강도를 보인다. 그러나 본역의 특이한 자력 암상은 흑운모화강암에서 나타나는 자력특성으로 모량단층으로 단절되는 본역 북동부의 흑운모 화강암체와 삼랑진칼데라 북측 경계부를 따라 북서-남동방향으로 발달되는 흑운모 화강암체는 지질도에서 동일 화강암체로 기재되어 있는 반면 자력 암상특성으로는 상이한 특성을 나타낸다. 이는 위치적으로 삼랑진 칼데라의 남서부에서 칼데라림을 따라 각섬석흑운모 화강암체가 관입하여 고자력을 형성함을 미루어 볼 때 칼데라 북측 경계부를 따라 나타나는 고자력 흑운모 화강암체도 화산활동과 직접 관계된 것으로 해석되며 본역 북동부의 흑운모 화강암체는 화산활동 후기에 본 역을 관입한 화강암체로 해석된다.

본역의 주요 지질구조는 칼데라구조와 북동방향의 주향을 가지는 밀양단층 및 모량단층과 북서주향의 어영단층이 모량단층에 의해 단절된다. 칼데라 구조를 지표지질조사를 통해 확인하기에는 그 규모에 따라 수많은 시간과 노력이 요구되며 특히 칼데라구조는 층적층에 의해 피복되고 단층에 의해 잘림으로 지표지질조사로서 확인하기에는 상당한 한계성을 나타낸다 할 수 있다. 따라서 항공자력탐사 자료로부터 칼데라구조를 확인할 수 있다면 이러한 시간과 노력을 상당부분 절감할 수 있으며 화산암체내에서 새로운 칼데라구조를 인지할 수 있는 보완적 방법이라 할 수 있다. 일반적으로 칼데라 구조는 대규모의 화산화나 부석이 빠른 속도로 분출되어 마그마가 퇴각할 때 생성되며 칼데라의 지질구조적 특징은 칼데라 주위를 따라 나타나는 환상단열대(ring fracture zone), 칼데라림을 따른 관입, 분상구조, 화도를 따라 화강암체가 이차적으로 관입한 소생도움 등의 특징으로 대별되며 이들 지질구조적 특징은 자력이상으로 확인할 수 있다. 자력탐사 자료로부터 지질구조를 파악하는 방법은 잔여자력을 주파수영역에서 자극화변환하여 자력의 편각 및 북각에 따른 자력이상의 위치편차를 보정한 후 자력이상의 경계부를 명확히 하기 위하여 수평미분도와 수직 2차미분도를 작성하여 자력암상분대와 같은 자력조직의 변화양상과 자력이상의 불연속 등으로부터 해석한다.

본역의 자력탐사 자료로부터 작성된 자극화변환도(Fig. 4)에는 잔여자력도(Fig. 2)에서 나타난 자력이상이 자극화 변환됨으로 이상의 중심이 북측으로 약간 이동하였으며 삼랑진 칼데라의 환상단열대의 위치가 더욱 명확히 드러나며 특히 칼데라의 남측을 관통하는 낙동강 하부에서도 환상구조가 연장됨이 확인된다. 이러한 환상자력이상은 칼데라의 림을 따라 관입한 각섬석흑운모 화강암체와 칼데라 북측 경계부를 따라 관입한 흑운모화강암체의 고자력이상과 칼데라 내부의 삼랑진응회암류가 칼데라 외부의 주사산 안산암질암류보다 저자력을 보이는 자력특성임에 기인된다. 이러한 자력구조양상은 수평미분도(Fig. 5)와 수직 2차미분도(Fig. 6)에서도 환

상구조를 매우 잘 나타낸다. 본역의 밀양단층은 자극화변환도에서는 고자력에 피복 되어 불명확한 단층선이 수평미분도와 수직 2차미분도에서 확실히 연장됨이 확인된다. 또한 모량단층은 본역 북동부의 저자력 흑운모화강암체를 단절하여 북동-남서 주향으로 연장되며 모량단층에 의해 단절되는 북서주향의 어영단층 등은 자극화변환도에서도 확인되지만 수평미분도와 수직 2차미분도에서도 확인된다. 따라서 자력탐사 자료에 의한 자력구조는 지질구조와 매우 잘 일치되며 특히 미분도는 지질구조 확인에 강력한 도구로 사용될 수 있음을 입증하였다. 이러한 지질구조적 특징 이외에 삼랑진 칼데라의 남서부에는 환상단열구조의 외곽에서 동일한 환상구조를 보이는 자력이상이 존재함을 알 수 있는데 이는 삼랑진 칼데라 생성이전에 발달된 외부 칼데라이며 이 칼데라구조는 후기에 생성된 삼랑진 칼데라에 의해 파괴된 것으로 해석된다. 이러한 항공자력탐사 자료의 정성적 해석결과를 공간적 위치에 표현하고 지형적 특성을 지질 및 자력탐사자료와 대비하기 위하여 지형기복도(Fig. 7) 위에 자극화변환도를 중첩 표현(Fig. 8)하였다. 이 결과에 의하면 우리 나라의 경우 지표에 암석노출이 양호하여 지형적 요소도 칼데라 및 주요 지질구조선과 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.

정량적 자료해석

정량적 해석은 칼데라를 북동-남서방향으로 종단하는 단면선(A-A')을 작성(Fig. 3)하고 시행착오(try and error)방법을 이용한 forward modelling을 실시하여 단면하부의 심부구조를 파악함과 동시에 전지역에 Euler deconvolution을 이용하여 자력이상체의 3차원적인 공간적 위치(x, y, z)와 특성을 평가하는 새로운 방법을 시도하였다.

자력탐사자료의 forward modelling은 500 m 마다 자력자료를 샘플링하여 14.5 km의 단면을 작성하고 미국 NGA (Northwest Geophysical Associates, Inc)의 GM-SYS 프로그램을 이용하였다. 본 단면 아래의 심부구조는 대자율이 0.005인 화강암으로 구성된 기반암 위에 경상퇴적분지의 퇴적암류 및 화산암류가 동일 대자율을 가진다는 가정 하에 기반암까지의 심도변화를 고찰하였다. 이 결과(Fig. 9)에 의하면 삼랑진 칼데라는 단면 중앙부에서 분상구조를 보이며 북측이 남측보다 심도가 깊은 trap door형 칼데라 구조를 잘 나타낸다. 또한 이 칼데라의 남측 및 북측 경계부를 따라 화강암체가 지표까지 노출되어 있으며 칼데라의 내측에도 상당히 천부까지 화강암류가 관입한 양상을 나타낸다. 경상퇴적분지의 심도는 칼데라 내에서 평균 약 6 km이며 최고 약 10 km이며 칼데라의 외측으로 갈수록 화강암류의 천부 관입에 따라 심도가 얕아짐을 보인다.

일반적으로 자력단면에 대한 forward modelling 기법은 단면 하부의 자력이상체의 심도 변화만을 계산할 수 있는 반면에 Euler deconvolution에 의한 방법은 자력이상체의 3차원적

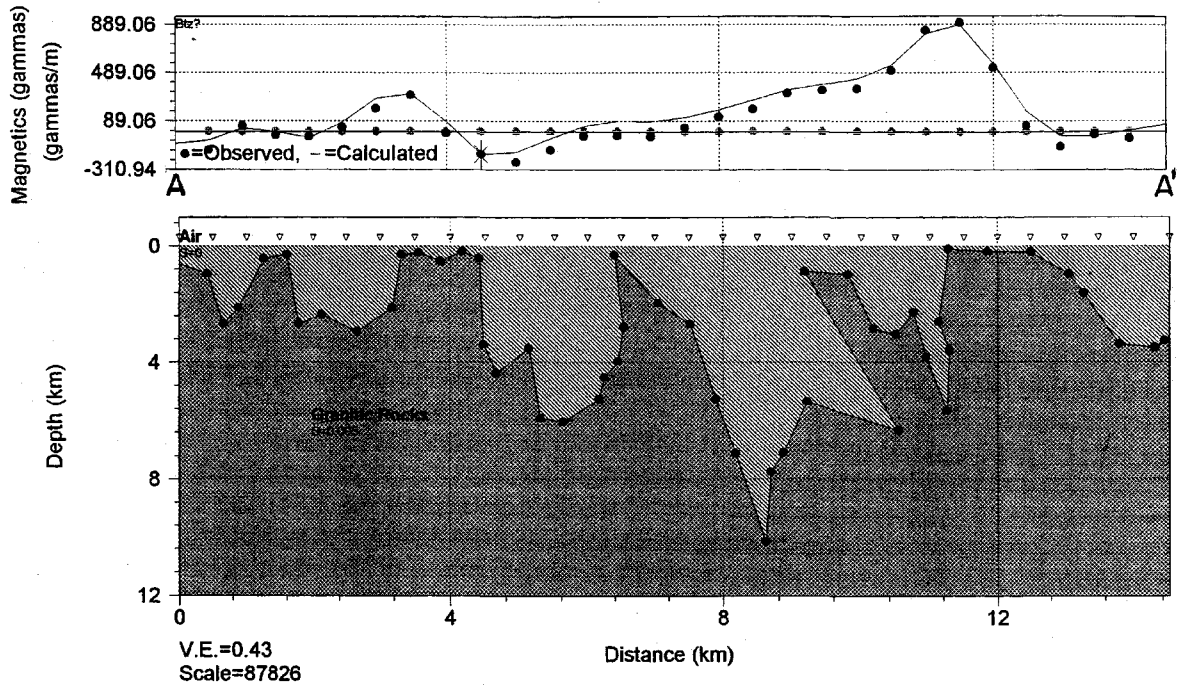


Fig. 9. Magnetic modelling result along A-A' profile.

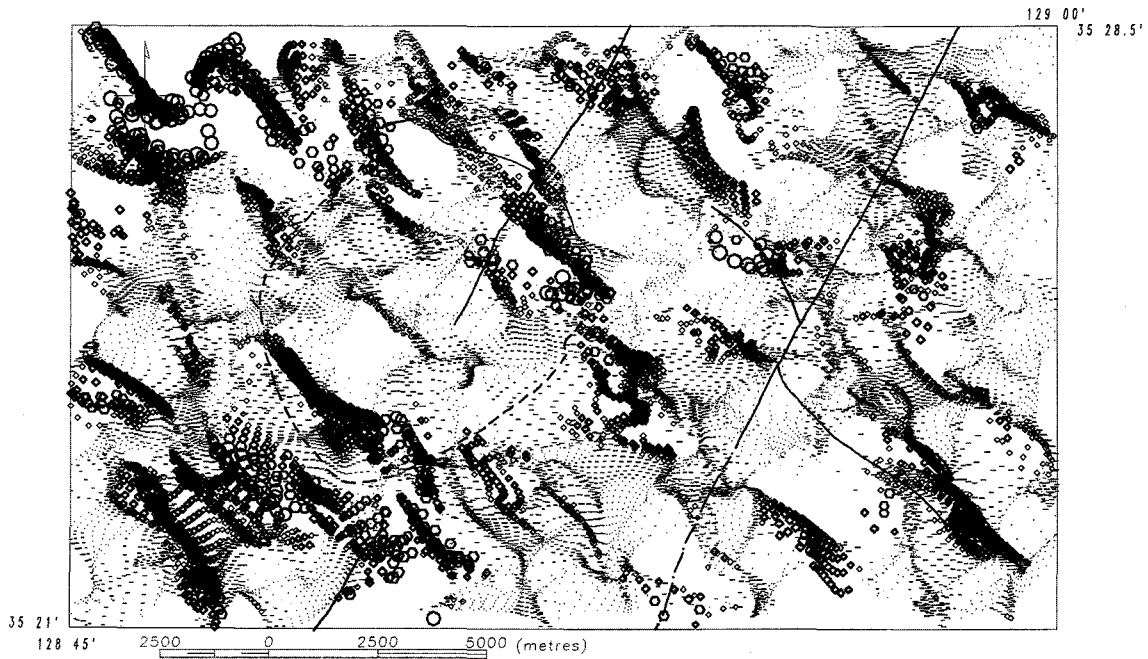


Fig. 10. The Position and depth of magnetic sources determined by 3-D Euler deconvolution.

위치 및 심도를 계산할 수 있는 방법으로 이 algorithm (Thompson, 1982)은 다음의 식에 의해

$$(x - x_0) \times \frac{dT}{dx} + (y - y_0) \times \frac{dT}{dy} + (z - z_0) \times \frac{dT}{dz} = N(B - T) \quad (1)$$

where (x_0, y_0, z_0) is the position of a magnetic source
 T is total field detected at (x, y, z)

B is regional value
 N is structure index
 $dT/dx, dT/dy$ and dT/dz are the measured or computed gradients in x, y and z

로 정의되며, 이로부터 source position(x_0, y_0, z_0)과 regional field(B)를 알 수 있다.

이 방법은 격자화된 포텐셜자료에서 사용할 수 있으며

structure index(0-3), 격자단위와 계산심도를 요구하며 index가 높을수록 심부의 정보를 획득할 수 있다. 본 연구에서는 자력자료의 왜곡을 피하고자 필터링을 사용하지 않은 자극화 변환 자력자료와 이를 수평(x, y방향) 및 수직 일차 미분한 자료를 이용하여 PG&W사의 GRIDEPTH 프로그램을 사용하였다. 본 연구는 연구대상 지역이 상대적으로 넓지 않으며 연구지역이 화산암체로 인한 복잡한 자력이상으로 구성되며 연구의 주목적이 화산암체 분포지역에서의 칼데라구조 및 단층과 관련된 지질구조의 항공자력특성이다. 따라서 index를 1로 하고 격자단위를 10 격자셀로 하여 최고 심도 2 km까지의 자력이상체에 대한 특성을 고찰하였다. 결과는 자력이상체를 평면상에 3차원적인 위치좌표와 심도를 원으로 나타내는데 본 연구에서는 심도를 표시하는 원의 직경을 1/1,250,000으로 나타나게 작성하였다.

이 결과(Fig. 10)에 의하면 전반적으로 심부의 자력이상 경계가 뚜렷이 나타나며 화산암류와 관계된 비교적 천부의 자력이상체는 주로 동-서와 북동방향으로 발달하고 있음에 반하여 심부의 자력이상체는 주로 북서방향으로 발달하고 있음을 알 수 있다. 또한 삼랑진 칼데라구조는 칼데라의 남북측에서 나타나는 심부 자력이상체에 둘러 쌓인 천부 자력이상으로 그 분포규모가 잘 나타나며 북동방향의 단층구조선은 북서방향의 심부 자력이상체를 단절하는 양상으로 매우 잘 나타난다.

결론

경상분지 유천소분지에 해당하는 삼랑진 칼데라 지역에 대한 항공자력특성 연구결과는 다음과 같이 요약된다. 자력이상특성은 자력강도 및 자력조직에 따라 4개의 unit로 분대가 가능하며 이들은 본 역의 지질암상과 매우 잘 일치된다. 그러나 삼랑진 칼데라의 북동측 경계를 따라 북서방향으로 관입한 흑운모 화강암체는 높은 자력 이상을 나타내며 인접한 부역동층의 흑운모화강암체의 저자력 이상과 상이한 자력특성을 보인다. 이들은 기존의 지질도에 동일 암상으로 기재되어 있으나 자력적으로 분명한 차이를 보이는데 전자의 흑운모화강암은 삼랑진 칼데라의 화산작용과 밀접한 관계가 있으며 칼데라림을 따라 발달된 구조대를 따라 관입한 것으로 해석된다. 그러나 모량단층에 의해 단절되는 본역 동측의 흑운모화강암체는 화산작용과 직접적인 관계가 없는 보다 후기의 관입암체로 해석된다. 본역의 삼랑진칼데라 구조 및 단층선 구조는 각종 자력이상도에서 분명한 자력구조로 인지가 가능

하며 지형특성도 이들 구조를 잘 반영한다 할 수 있다.

본역의 심부 자력이상체 발달상태를 규명하기 위한 자력단면선의 forward modelling에서는 경상퇴적분지의 심도가 칼데라 내에서 최고 약 10 km, 평균 약 6 km이며 칼데라의 외측으로 갈수록 화강암류의 천부 관입에 따라 심도가 얕아짐을 보인다. Euler deconvolution 방법을 이용한 자력이상체의 3차원 위치 및 심도특성을 고찰한 결과도 칼데라 구조 및 단층구조선을 잘 나타내며 화산암류와 관계된 비교적 천부의 자력이상체는 주로 동-서와 북동방향으로 발달하고 있음에 반하여 심부의 자력이상체는 주로 북서방향으로 발달하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김규봉, 황상구, 1988, 밀양도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소.
2. 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구, 이상만 교수 송수기념 논문집, 167-194.
3. 서상용, 양승진, 이희일, 박영수, 구자학, 1983, KIER airborne data interactive processing system version 1, 우리나라 광역탐사연구, 82-핵연료자원-1-08, 한국동력자원연구소, 149-213.
4. 황상구, 1990, 유천소분지 중앙부의 백악기 화산암류에 대한 화산학적 및 암석학적 연구, 이학박사 학위논문, 경북대학교.
5. Hansen, R. Q. and Miyazaki, Y., 1984, Continuation of potential fields between arbitrary surfaces, *Geophysics*, **49**, 787-795.
6. Langel, R. A., 1992, International Geomagnetic Reference Field, 1991 revision, *Geophysical journal int.*, **108**, 945-946.
7. Reid, A. A., Allsop, J. M., Graner, H., Millet, A. J. and Somerson, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics*, **55**, 80-91.
8. Mittal, P. K., 1984, Algorithm for error adjustment of potential field data along a survey network, *Geophysics*, **49**, 467-469.
9. Spector, A. and Grant, F. S., 1970, Statistical method for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, **35**, 293-302.
10. Thompson, D. T., 1982, EULDPH- A new technique for making computer-assisted depth estimation from magnetic data, *Geophysics*, **47**, 31-37.
11. Yarger, H. L., Roberson, R. R. and Wentland, R. L., 1978, Diurnal drift removal from aeromagnetic data using least square, *Geophysics*, **43**, 1148-1166.