

한국의 육상 자력탐사

박영수*

한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

A Review of Magnetic Exploration in Korea

Yeong-Sue Park*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Magnetic method is rapid, cheap and simple geophysical exploration technique, and has wide range of applications such as resources prospecting, geological structure investigation and even geotechnical and environmental problems. Especially, aeromagnetics gives fundamental and useful geoscientific data for not only assessment of potential resources, but also national land planning. Magnetic method, perhaps the oldest geophysical technique, was relatively early introduced into Korea. Documents during Japanese occupation says that magnetic method was used for exploring metallic ore deposits and hot spring, and that a geomagnetic observatory was operated. From mid 1950's, after Korean War, magnetic explorations for natural resources such as metallic ore, uranium, coal, and groundwater were intensively executed for industrialization. Apache aeromagnetic survey project during 1958~1959 and its ground follow-up surveys are typical and important cases in those days. Magnetic survey techniques were rapidly advanced during 1970's and 1980's with improvements of instruments, growth of geophysical manpower, and availability of computers. The national aeromagnetic mapping project by KIGAM in 1981 showed the improved technical capability of those days. Decline of mining industry since mid 1980's moved the exploration objects from traditional resources to new ones such as groundwater and geothermal resources, and applications to investigation of geological structure were revived. Recently appeared applications such as natural hazard assessment, and engineering and environmental studies increased the magnetic method's utility in the realm of exploration.

Key words : magnetic exploration, magnetic database, ore prospecting, geologic structure investigation, engineering and environmental applications

자력탐사는 신속, 간편, 저렴한 물리탐사법으로서 자원 탐사, 지질구조 조사, 토목, 환경 문제 등 다양한 분야에 효과적으로 적용된다. 특히, 항공 탐사는 유용 지하자원의 부존 및 개발에 대한 잠재력 평가 뿐 아니라 국토 전반에 대한 지질 특성 평가를 통하여 국토의 효율적인 활용 계획의 수립과 지질 재해의 예측 등 국가의 기본적인 지구과학 정보를 제공한다. 자력탐사는 가장 역사가 오래된 물리탐사법으로서, 우리나라에도 비교적 일찍 도입되었다. 일본 강점 기에도 지구자기장을 관측하였고 광상조사와 온천조사에 이용하였다는 기록이 있다. 해방과 한국전쟁의 혼란이 끝난 1950년대 중반부터 산업화를 위한 지하자원의 개발이 요구됨에 따라 우라늄, 철광을 비롯한 금속 광물자원, 석탄 그리고 지하수 등을 대상으로 자력탐사가 활발하게 수행되었는데, 1958~1959년의 Apache 항공 자력탐사와 그 결과 확인된 이상대에 대한 육상 확인 자력탐사들을 대표적인 사례로 들 수 있다. 1970, 80년대는 물리탐사 전문 인력이 많이 배출되었고, 탐사 장비가 현대화되었으며, 컴퓨터가 활용됨으로써 탐사, 자료처리 및 해석 기술이 비약적으로 발전하였다. 1981년 한국동력자원연구소에서는 전국도에 대한 광역적인 자력 이상 분포를 파악하여 지질 구조를 규명하고 광상 부존의 잠재력을 평가하기 위한 항공 자력탐사 프로젝트를 수행하였는데, 이것은 이 시기에는 이러한 대형 프로젝트를 수행할 만한 기술, 인력 그리고 연구비 등을 가지고 있었다는 것을 보여준다. 그러나 1980년대 중반부터 시작된 광업의 쇠퇴는 자력탐사를 비롯한 물리탐사의 관심이 전통적인 광물, 에너지 자원에서 새로운 지하자원으로 대두한 지하수, 지열 등으로 옮겨갔으며, 물리탐사의 본질인 지질 구조 조사 연구가 활발해졌다. 또한 1990년대 이후 등장한 토목, 환경 물리탐사라는 새로운 대상에 대한 관심이 높아지면서 자력탐사도 부지평가, 지반조사, 지하 매장물, 환경오염 등의 문제에 다양한 방법으로 접근하고 있다.

주요어 : 자력탐사, 자력 D/B, 광체탐사, 지질구조규명, 토목·환경 응용

*Corresponding author: yspark@kigam.re.kr

1. 자력탐사

자력탐사는 지구 외핵 내의 유체운동으로 생성되는 지자기장 혹은 그 성분을 측정함으로써 지하 유용 광물을 확보하거나 지질구조를 규명하는 물리탐사 방법이다. 암석의 조암광물 중 자철광 같은 자성 광물은 지자기장에 의하여 자화되는데, 그 세기는 암석의 성분과 암층의 구조에 따라 달라진다. 단층, 파쇄대 등의 구조에 의한 대자율의 차이는 그 구조의 존재와 발달 양상을 인식할 수 있도록 하고 퇴적암과 기반암의 대자율 차이는 상부 퇴적암의 두께와 하부 기반암의 형상을 파악할 수 있게 한다.

지자기장과 자석에 대한 관심은 기원전까지 거슬러 올라갈 수 있지만, 1600년 William Gilbert에 의하여 이론적 체계를 갖출 수 있었고, 1870년 Thalen과 Tiberg가 자력 측정기기를 고안함으로써 근대적인 자력탐사가 시작되었다. 자력탐사가 광물자원 탐사에 이용될 수 있을 정도의 정밀도와 신뢰도를 가질 수 있었던 것은 2차 세계대전 동안 플럭스게이트 자력탐사기가 개발되고 항공기를 이용한 탐사가 가능해진 이후이다. 2차세계의 세계전쟁을 치른 후, 에너지와 광물자원의 수요가 급격하게 증가하였고 핵자력계, 세습자력계 등 정밀도와 편의성이 향상된 자력탐사 기기가 개발됨으로써 자력탐사 기술은 크게 향상되었다. 20세기 말에 이르러 등장한 PC는 자료처리, 해석, 영상화 등 탐사 기술 전반에 걸쳐 크게 발전시켰다.

자력탐사는 (1)신속, 간편, 저렴한 탐사법이며, (2)비접지식 탐사이므로 자동차, 항공기, 배, 인공위성 등 탈것에 실어서 움직이면서 탐사할 수 있으며, (3)광역 지질 구조 규명에서 소규모 천부 토목, 환경 문제까지 다양하게 적용할 수 있고, (4)인공 잡음에 비교적 강하다는 등의 장점이 있는데 반해 (1)수직 구조는 분해하기 어렵고, (2)해석의 비유일성이 강하다는 단점이 있다.

자력탐사는 철광석 등의 광물자원을 직접적으로 탐사하는데 이용될 수 있을 뿐 아니라 배사구조, 단층, 파쇄대 등의 지질 구조를 파악함으로써 석유, 지열, 지하수 등의 지하자원의 탐사에 간접적으로 이용될 수 있다. 특히, 항공 탐사를 통하여 각종 유용 지하자원의 부존 및 개발에 대한 잠재력 평가를 통한 장기적 계획에 활용된다. 더욱이 국토 전반에 대한 지질 특성 평가를 통하여 국토의 효율적인 활용 계획의 수립, 지질 재해의 예측 등 국가의 기본적인 지구과학 정보를 신속하고 저렴하게 획득할 수 있다는 관점에서 대부분의 나라에서 국가 혹은 대륙 규모의 자력 탐사를 실시하

여 자력 D/B를 구축하여 운용하고 있다.

2. 한국의 자력탐사 발자취

한국에서의 자력탐사에 대한 가장 오랜 기록은 일본 강점기였던 1918~1944년에 측량을 위한 자기 편각의 규정과 지진 관측의 일환으로 인천에 지자장 관측소를 운영하였다는 것과 1940년대에는 조선지질조사소에 자력계를 비롯한 몇 가지 물리탐사 장비를 보유하고 있었고, 광상조사나 온천조사에 이들을 이용하였다는 기록이 있다.

해방과 한국전쟁의 혼란을 겪은 1950년대 중반부터 산업화를 위하여 지하자원의 개발이 크게 요구됨에 따라 우리나라, 철광을 비롯한 금속 광물자원, 석탄 그리고 지하수 등을 대상으로 자력탐사를 비롯한 물리탐사가 활발하게 수행되었다. 자력탐사는 철광 탐사에서 가장 주도적인 역할을 하였으며, 니켈, 구리, 아연 등의 금속 광상, 우리나라 그리고 지하수 탐사에서도 광상 배태를 위한 지질구조 확인을 통한 간접탐사도 활발하였다. 이 시기의 가장 대표적인 자력탐사는 1958~1959년의 항공 자력탐사 Apache project와 1975년의 항공 자력 및 전자탐사 Sander project, 그리고 이들 항공 탐사에서 확인된 이상대들에 대한 육상 확인 자력탐사들을 들 수 있다.

Apache project는 미국 Aero Service Corp.와의 기술 계약으로 한국의 주요한 광화대를 포함하는 태백산 지역, 소백산 지역 및 경남 일대에서 수행된 항공 자력 탐사인데, 탐사 넓이는 45,000 km²이고 탐사 연장 29,600 L-km에 달하였으며, 측선 간격은 1 mile이었고, 사용한 탐사 장비는 플럭스게이트 자력계 Gulf Mark-III이었다. 탐사의 목적은 자철광 탐사가 가장 중요한 목적이었고 이외에도 비자성 광상의 배태구조의 파악, 화성 지질의 파악 그리고 퇴적층의 분포와 그 두께의 결정 등 광화대의 광상 분포 및 잠재성을 종합적으로 평가하고자 하였다.

Sander project는 1975년 경상 광화대와 태백산 광화대 일부에 대하여 철과 유화광물의 탐사를 위하여 UNDP의 재정지원과 캐나다의 Sander Geophysics Ltd.의 기술에 의하여 약 12,000 L-km에 걸쳐 수행한 항공 자력 및 전자탐사이다. 이용한 탐사장비는 핵자력계 Sander NPM-5와 동축배열 주파수 영역 전자탐사기 Sander EM-3A이었다.

Apache project를 통하여 자력 이상대 118개와 Sander project를 통해서 100여개의 자력 및 EM 이

상대를 선정하였으며, 이들에 대한 육상 확인 탐사가 1970년대 중반까지의 중요한 자력탐사 활동으로서, 충주 지역, 옥천계 지역, 청도 가라골 지역, 양양 지역 등을 들 수 있다.

1960년대까지는 수직 성분 자력탐사기 Sharpe A-3를 주로 많이 사용하였으며, 1974년에 이르러서야 비로소 총자력 측정이 가능한 핵자력계가 도입되었다. 탐사 자료의 해석은 지질조사나 시추 결과 등과 함께 정량적인 해석에 머물렀으며, 1960년대 말에 이르면 Peters법과 같은 자력 프로파일의 간단한 특성을 이용하는 심도법칙(depth rule) 혹은 표준곡선(standard curve) 접합법 등으로 준정량적으로 해석하기 시작하였다. 1970년대에 이르러 컴퓨터를 활용할 수 있게 되면서 순모델링, 역모델링, 이상의 분리와 향상 등 탐사, 자료처리 및 정량 해석에서 발전의 큰 전기를 이룬다.

1980년대는 자력탐사를 비롯한 물리탐사 기술이 빠르게 발전된 기간이라 할 수 있다. 한국의 전반적인 국력이 향상되면서 물리탐사 전문 인력이 많이 배출되었고 탐사 장비가 현대화되었다. 자력탐사 분야에서 가장 의미 있는 것은 1981년 한국동력자원연구소에서 항공 방사능 및 자력탐사 시스템을 구입하여 자체적으로 항공 물리탐사를 수행하였다는 것이다. 이 프로젝트의 직접적인 목적은 우라늄 광상의 확보이지만 지금까지 지엽적으로 해 온 탐사와는 달리 전국토를 대상으로 광역적인 자력 이상 분포를 통하여 지질 구조를 규명하고 광상 부존의 잠재력을 평가하며 아울러 탐사 기술의 발전을 도모하고자 하였다는 데에 의미가 있다. 이 프로젝트는 현재까지도 한국지질자원연구원에서 계속되고 있는데 지리산 일대 일부와 서울 및 휴전선 부근을 제외하고는 거의 완료되었다.

그러나 1980년대 중반부터 시작된 광업의 쇠퇴는 자력탐사를 비롯한 물리탐사의 관심을 전통적인 광물, 에너지 자원에서 새로운 지하자원으로 대두한 지하수, 지열 등으로 옮겨갔으며, 지구과학의 근본적 역할이라 할 지질 구조의 연구가 활발해졌다. 또한 1990년대 이후 등장한 토목, 환경 물리탐사라는 새로운 대상에 대한 관심이 높아지면서 자력탐사도 부지평가, 지반조사, 지하 매장물, 환경오염 등의 문제에 다양한 방법으로 접근하고 있다.

3. 광역 자력탐사와 자력 D/B

자력탐사가 다른 종류의 물리탐사에 비하여 차별적인 장점은 항공탐사를 통하여 적은 비용으로 광역적

규모의 자력 이상을 측정하고 그 자료를 다양한 연구자들에게 제공하여 다양한 목적에 활용할 수 있게 한다는 점이다. 그래서 대부분의 나라에서는 전 국토에 대한 자력 이상 D/B를 구축하여 운용하며 나아가 국제 협력을 통하여 대륙 규모로 취합하기도 한다.

1981년 한국동력자원연구소는 우리나라를 위시한 유용 지하자원에 대한 보다 체계적인 조사, 평가를 위하여 전 국토에 대한 항공 방사능 및 자력탐사를 계획하고, G-813 핵자력계와 GR-800 gamma spectrometer로 구성된 미국 GeoMetrics 사의 항공 탐사 시스템을 도입하여 장기 프로젝트로 수행하여(구자학 등, 1982), 현재 국토의 90% 이상 탐사되었고 앞으로 3~4년 내에 전 국토에 대한 광역 자력 이상도를 완성할 것이다.

획득된 자력 자료는 일변화 보정과 IGRF reduction 등의 적절한 자료 처리를 거친 후 지상 300m로 연속하여 자료들의 측정 높이를 일치시켜 자력 D/B에 보관, 운용, 제공되고 있다. 자력 D/B는 다양한 사용자의 편의를 위하여 측정의 위치 및 시간 정보와 함께 측정 자력값, 보정된 자력값, IGRF를 뺀 자력값 그리고 300m로 연속한 자력값 등의 정보를 포함하고 있다(박영수와 이희일, 1996). Fig. 1은 2005년 현재까지 획득된 자력 자료를 취합한 자력 이상도이다.

광역 자력탐사 자료는 조구조 연구, 지진 및 지질 재해 방지 등을 위해서는 대륙 규모의 광역적이고 종합적인 접근에도 유용하게 이용되므로 인접 나라들 사이에 자료의 교환과 취합이 이루어지기도 한다. 1990~1992년의 CCOP Aeromagnetic map compilation programme으로 아시아 여러 나라들의 자력자료가 취합, 발간되었으며(CCOP and GSJ, 1994), 1997~2000년에는 한·일 공동연구로 한국과 일본의 자력탐사 자료를 비롯한 6종의 지구물리 자료가 취합되기도 하였다(박영수 등, 2000; GSJ and KIGAM, 2002).

4. 자력탐사의 활용-광역 탐사

모든 물리탐사가 그러하지만 자력탐사의 가장 원천적인 목적은 지하자원을 확보하기 위한 것이다. 한국 전쟁을 겪은 1950년대의 한국은 산업화를 위한 에너지와 광물 자원이 절실하게 필요하였다. 이에 정부는 1958~1959년 Apache 항공 자력탐사를 통하여 118개의 자력 이상대를 추출하였고 이를 근거로 947개 광구를 출원하여 지질조사소가 이상대에 대한 지상 확인 자력탐사를 수행하게 되는데, 이것이 한국에서 1970년대까지의 가장 주된 자력탐사 활동이었다.

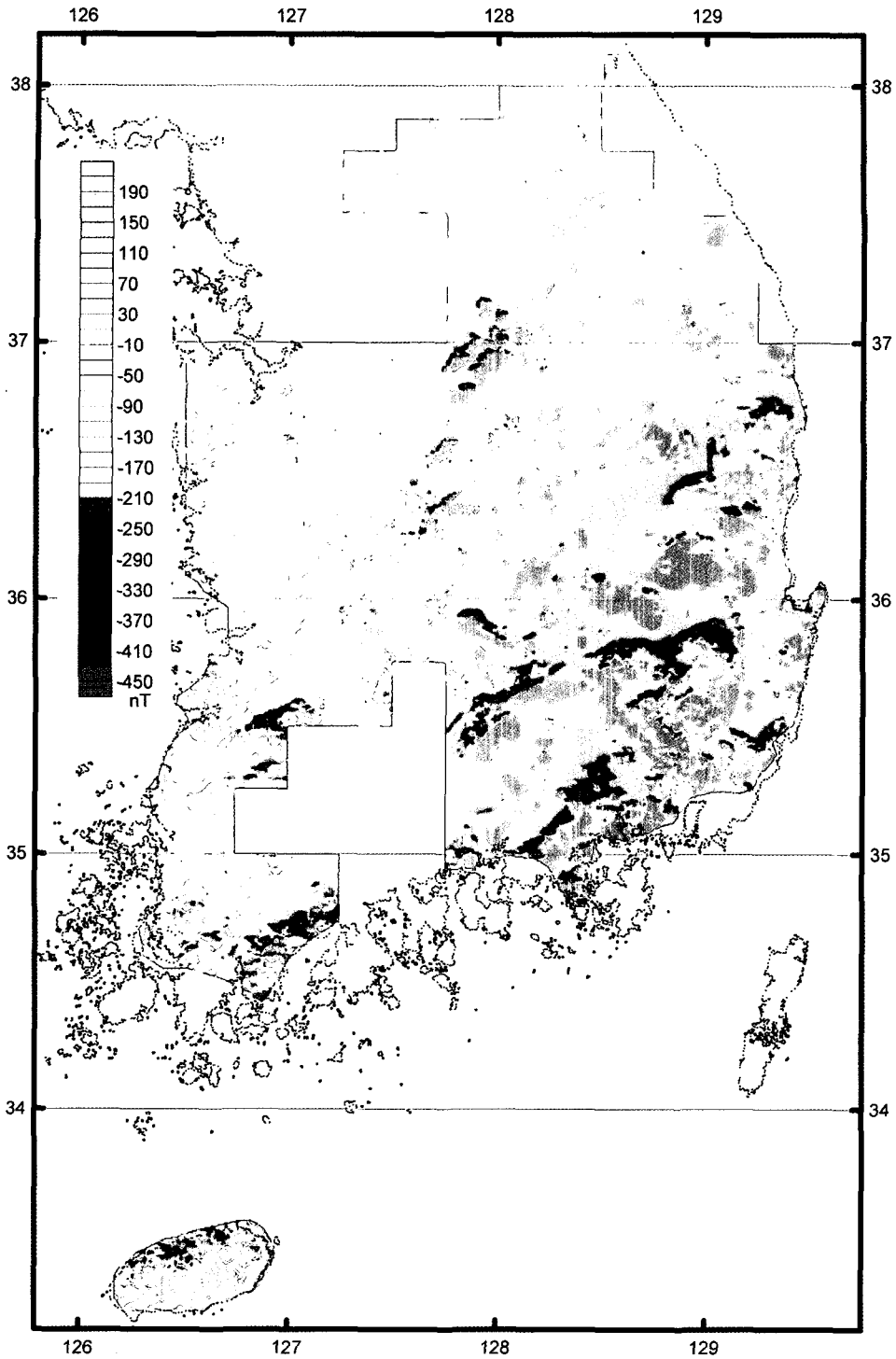


Fig. 1. Magnetic intensity map of Korea (Koo *et al.*, 2005).

물금 철산은 1960년대 초 자력탐사를 통하여 대대적인 개발이 이루어진 대표적인 사례이다. 이밖에도 충

주 지역(구자학 등, 1968a), 옥천계 지역(김인빈 등, 1971), 양양지구(김인빈 등, 1974), 청도 가라골 지역

(구자학과 이기동, 1978) 등에서도 철광상 확보를 위한 자력탐사가 대규모로 수행되었다. 이 외에도 기존의 철광산에서도 광체의 연장, 발달 상황 파악하여 매장량을 증가하기 위한 자력탐사도 많이 수행되었는데, 김종수(1962), 이현기와 장정진(1964) 그리고 김주태(1967) 등이 보고되어 있다.

한편, 항공 자력탐사 결과를 활용하여 보다 효율적으로 광상을 확보하기 위해서는 광역적인 자력 이상대 해석을 통하여 체계적인 탐사 계획을 수립하는 것이 바람직하다. 현병구와 조동행(1973)은 항공 자력 이상대의 배열과 특성으로 구분한 자기구는 지각 및 지질 구조와 광상군의 배열과 밀접한 관계가 있다는 개념에서 소백산 지역의 Apache 항공 자력 이상도를 정성 분석하여 여러 개의 자기구로 나누고 이들에 대한 자력 분포 특성을 분석하여 광상 부존의 잠재성을 평가하였다.

또한, 자력탐사를 위한 중요한 기초 연구로서 암석의 대자율 통계를 마련한 것은 매우 의미 있는 연구 성과라고 할 수 있다. 구자학 등(1968b)은 21개 지역에서 채취한 15종류 626개 암석 시료의 대자율을 측정하여 한국의 암석 대자율 통계를 제시하면서 앞으로 광범위하고 조직적으로 암석 시료를 채취하여 일반적이고 정확한 통계를 마련하여야 한다고 하였는데, 그 후 더 이상의 체계적인 후속 연구가 없어 아직도 신뢰성 있는 대자율 통계가 미흡하다는 것은 애석한 일이라 하겠다.

광체 탐사를 위한 자력탐사 자료의 해석의 핵심은 자력 이상으로부터 이상원(광체)의 깊이와 형태에 관한 정보를 구하는 것이다. 해석법은 깊이 법칙(depth rule)과 같이 이상 곡선의 기울기나 폭 또는 최대, 최소점 등 곡선의 형태로부터 광체의 깊이나 폭을 구하는 간단한 어렵셈, 모델 변수를 바꾸어 가면서 모델 반응을 계산하여 작성한 표준곡선(standard curve)과 현장 측정 자료를 비교함으로써 광체의 깊이와 형상을 예측하는 curve matching, 그리고 이상 곡선에서 모델 변수를 가장 잘 반영하는 특징인 특성 추정자를 축으로 하는 특성곡선(characteristic curve)을 이용하여 광체의 형태와 깊이를 개략적으로 계산하는 방법 등으로 발전하였고, 현재는 최적화(optimization) 개념을 바탕으로 하여 모델 변수의 반복적 조정으로 측정값과 계산값의 오차가 최소가 되는 변수를 구하는 수치 역산(numerical inversion)이 가장 일반적으로 이용된다.

1960년대 중반까지는 자력탐사 자료의 해석은 반진폭 너비법 같은 깊이 법칙을 이용하거나 노두 및 시추

정보를 더한 대략적인 해석에 머무르고 있다(김종수, 1962; 이현기와 장정진, 1964). 김주태(1967)는 금곡철산에서 획득한 자력탐사 자료를 Gay(1963)가 작성한 판상광체의 표준곡선을 이용하여 광체의 심도와 경사를 구하여 시추 위치를 추천하고 시추 설계를 제시하였다. 양승진 등(1969)은 어래광산 자력탐사 자료를 역시 Gay(1963)의 판상광체 표준곡선을 이용하여 주향, 경사, 깊이, 폭, 대자율, 연장 등 광체의 형태에 대한 자세한 정성 해석을 하였으며, 아울러 Peters법이나 Henderson법 등의 깊이 법칙도 보조적으로 이용하였다.

1970년대에 이르면 컴퓨터를 자료처리와 해석에 이용하기 시작한다. 현병구 등(1972)은 자력이상의 정량적 해석에 관한 현황 분석을 하였다. 즉, 표준곡선의 한계와 2차원 해석의 한계 등을 논하고, 3차원 해석과 더불어 자력 이상을 쉽게 인식하고 강조해 주는 주파수 필터의 필요성을 역설하였다. 또한, 컴퓨터를 이용하여 다항식 접합법으로 소백산 지역의 잔여 자력 이상을 계산하고, 판상 광체의 특성 곡선을 작성하였다.

서상용 등(1976)은 판상광체 모델을 이용하여 가우스 소거법에 의한 2차원 역산 프로그램을 작성하였고, 이것은 구자학과 이기동(1978)에 의하여 청도 가라골 자력탐사 자료에 실제 적용되었다. 박영수와 현병구(1986)는 simplex 알고리즘을 이용하여 프리즘 모델에 대한 자력탐사 자료의 3차원 역산 프로그램을 작성하였다.

그러나 1980년대 중반에 이르러서는 한국의 광업이 쇠퇴하여 대부분의 금속광산은 문을 닫게 되고, 따라서 광체 탐사를 목적으로 하는 물리탐사는 거의 이루어지지 않았고, 석탄, 지하수, 지열 등의 탐사 등에 간접적으로 이용되었다. 이런 경우는 철광 등의 금속광산의 경우와 같이 광체를 직접적으로 탐지하는 것이 아니고, 탐사하고자 하는 대상 지하자원이 부존, 발달할 수 있는 단층, 파쇄대, 기반암의 형태 등의 지질 정보를 제공하는 간접 탐사이다. 예를 들어, 박영수 등(1988)은 해남지역에 대한 항공 자력 이상도로부터 자력 선구조도를 작성하고 이것이 열수변질 광화작용과 관련이 있는 해남 함몰대의 가장자리와 일치함을 보였다. 또한, 박영수 등(1992)은 항공자력 탐사자료 프로파일을 2차원 모델링 함으로써 한보탄광 주변의 분출화산암의 전반적인 피복 양상을 해석하여 탄층의 발달 경향 및 한계를 제시하였다.

5. 자력탐사의 활용-지질구조 규명

자력탐사 자료로부터 지질 구조를 해석하는데 가장

널리 이용되는 것이 자력 선구조와 자력 기반의 깊이이다. 자력탐사는 자기장과 자화의 합인 자기유도를 측정하는 것인데, 자화는 자기장과 대자율의 곱으로 표현된다. 대자율은 강자성 광물의 함량에 의하여 결정되므로 암석의 종류에 따라 그 크기가 다르다. 대체로 퇴적암은 대자율이 매우 낮고, 화성암은 높는데, 염기성 화성암이 산성 화성암보다는 높다. 그러므로 자력 이상도로부터 암상의 분포와 경계를 인식할 수 있으며, 퇴적암으로 덮여진 기반암의 깊이와 형태도 추정할 수 있다.

자력 이상을 해석한다는 것은 자력 이상원(source)의 위치와 형태를 구하는 것이다. 자력원의 위치를 간단한 계산으로 추정하는 Werner deconvolution과 Euler deconvolution, 그리고 수평 및 수직 미분으로 표현되는 analytic signal을 이용하여 자력원의 위치를 추정하는 자동 해석법들이 있으며, 자력원의 위치를 모델 변수로 하는 역산, 그리고 반복적 시행착오에 의한 대회식 모델링 등의 방법이 있다. 그리고 특정한 지질 구조에 의한 자력 이상을 분리하고 강조하는 연속, 주파수 필터, 방향 필터 등의 분리·향상(isolation and enhancement)은 자력 탐사 자료의 수평, 수직적 분해능을 높여줌으로써 지질 구조 해석에 도움을 준다.

자력 이상도로부터 인식되는 선구조를 지질 구조선과 구분하여 자력 선구조(magnetic lineament)라고 한다. 자력 선구조는 구조선 양쪽의 암석의 조성 즉, 대자율의 차이에 기인하므로 자력 선구조의 지질적 원인은 대부분 단층이라 할 수 있다. 한편, 구조선이나 파쇄대에 따라 광화작용이 수반되면, 강한 자력 이상을 나타내기도 하며, 파쇄대에서 지하수에 의하여 강자성인 자철석이 반강자성인 적철석으로 산화되어 (-) 이상을 보이기도 한다. 또한, 지표 하부에 노출되지 않은 관입암의 존재를 암시하거나 분출암의 분포, 칼데라 등의 분출구에 의한 원형 자력 이상 등의 지질 및 지질 구조에 대한 다양한 정보를 제공한다.

자력 선구조는 등자력선의 형상(magnetic contour pattern)으로부터 추출하는데, 지구물리 및 지질학 지식과 해석 경험이 요구된다. stereo map이나 음영도(shaded relief map)는 contour pattern을 구분하기 쉽게 해주며, 수직 2차 미분이나 Werner deconvolution 등도 도움이 된다. Fig. 4는 자력 음영도 위에 작성한 경상분지의 자력 선구조인데 자력 선구조가 지표 지질과 지질 구조를 이해하는 데 얼마나 유용한가를 볼 수 있다.

자화의 세기는 거리의 2제곱 혹은 3제곱에 반비례하므로 대자율이 거의 0인 퇴적암 하부의 화성 기반암의

깊이를 추정할 수 있다. 자력탐사 자료로부터 구한 기반암은 지구물리 개념적인 기반암이므로 실제하는 지질적 기반암과 구별하여 자력 기반이라고 부른다. 자력 이상으로부터 자력 기반의 깊이를 구하는 방법은 Euler deconvolution 같은 자동 해석, 기반암의 깊이를 역산으로 구하는 방법, Spector and Grant(1965)가 제시한 공간 주파수와 파워 스펙트럼의 관계, 즉 공간 파장이 x-축, 파워에 자연대수를 취한 것을 y-축으로 하여 직선으로 회귀하였을 때의 절편이 자력원의 평균 깊이라는 log-power법 등이 흔히 이용된다. 공간 주파수와 자력원의 깊이에 관한 관계를 좀 더 확장하여 중력이나 자력 자료를 깊이의 의미를 갖도록 분리하는 것을 수직 분리라고 한다.

이호영 등(1985)은 기반암을 얇은 2차원 무한 프리즘으로 나누고 각 프리즘의 깊이를 Marquardt 법을 이용한 2차원 역산으로 구하였으며, 전정수(1995)는 3차원 프리즘 모델을 이용하여 평활화 제한을 첨가한 creeping 알고리즘으로 경상분지 남부 밀양 소분지의 자력 기반의 구조를 3차원 역산하였다.

서상용 등(1978)은 자국 변환한 자력 이상을 파워 스펙트럼으로 구한 평균 자력기반 깊이까지 연속함으로써 자력 기반의 높낮이를 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 울산 근해(신원철, 1982)와 영월충군 분포 지역(구자학 등, 1983)에서 기반암의 형태를 계산하는데에 이용되었다.

박영수 등(2003)은 공간 주파수와 자력 source의 깊이에 관한 관계를 이용하여 연속과 주파수 필터를 적절히 설계함으로써 퍼텐셜 자료의 수직 분리를 수직적 다층 구조로 확장하여 특정한 층에 의한 효과를 분리할 수 있거나 분리된 이상을 깊이에 관하여 정량적으로 규정할 수 있으므로 이것을 깊이 분리(separation-sounding)라 할 수 있다고 하였다.

자력탐사 자료를 이용한 지질구조 해석 연구는 상당히 많은 연구 실적이 있는데, 자력 탐사의 특성상 분지 해석에 가장 유리하므로 경상분지와 옥천대 가장자리의 작은 분지들에서 가장 많이 연구되었으며, 화산암이 분포하는 제주도과 울릉도 그리고 경상분지 내의 칼데라 구조 연구 등에도 효과적으로 이용되었다.

박창엽과 권병두(1994)는 옥천대 가장자리에 발달한 진안분지의 항공 자력탐사 자료의 2차원 모델링을 통하여 분지의 남동쪽이 북서쪽보다 깊어 최고 1.5 km에 이르며, 분지의 북서부에 관입암체의 존재를 상정함으로써 분지의 발달사를 제시하였다. 박창엽 등(1996)은 능주분지의 항공 자력탐사 자료를 해석한 결과, 분지

의 북부가 남부보다 깊어 최대 3 km에 이르며, 기저부는 서쪽이 동쪽보다 경사가 급하다고 해석하였다. 또한 분지내 퇴적암은 상당한 양의 화산암류가 포함되어 있을 것으로 추정하였다.

권병두 등(1995b)은 제주도의 항공 및 육상 자력탐사 자료를 파워 스펙트럼 분석, apparent magnetic boundary 그리고 3차원 역모델링 등을 통하여 자력 이상은 장축을 따라 발달한 열곡대와 한라산체 그리고 화산암의 경계를 잘 보여주며, 기반암의 깊이는 장축을 따라서는 1.5~3 km, 용암대지에서는 1~1.5 km, 그리고 한라산 하부에서는 최대 5 km에 이른다고 하였다.

민경덕 등(1994)은 중력과 자력탐사 자료의 스펙트럼 분석과 2.5D 모델링을 이용하여 의성 분지 내의 금성산 칼데라와 선암산 칼데라의 화도 위치, 함몰 형태 및 깊이, 수반 단층, 화산암의 두께 등의 칼데라 구조를 해석하였다.

구성분 등(1999)은 삼랑진 칼데라 일대의 항공 자력탐사 자료를 수직 및 수평 미분, Werner deconvolution 그리고 2차원 모델링 등을 이용하여 칼데라의 형태를 분석하였으며, 지질도 상에서 구분되지 않는 흑운모화강암을 칼데라 화산 작용과 관련된 관입암과 직접적인 관계가 없는 후기 관입암으로 구분될 수 있음을 보였다.

이렇게 자력탐사를 이용하여 다양한 지역에서 다양한 목적의 지질 구조 연구가 수행되었지만, 가장 체계적이고 광역적으로 연구된 것은 한국의 지체구조 연구의 중요한 연구 주제 중의 하나인 경상분지이다. 경상분지에 관한 많은 지구물리적 연구 중 가장 광역적이고 체계적인 연구는 전정수(1995)의 밀양 소분지, 김원균(1999)의 의성분지 그리고 박인석(2000)의 경상분지

등 3개의 박사학위 논문일 것이다.

전정수(1995)는 중력과 자력탐사 자료를 분석, 해석하여 경상분지 남부지역 밀양 소분지의 심부 지질구조를 연구하였다. 자력 탐사 자료는 스펙트럼 분석과 Werner deconvolution을 이용하여 자력 이상원의 심도, 분포상황 그리고 자력 선구조를 구하였으며 3차원 역산으로 심부 구조를 규명하였다.

스펙트럼 분석 결과에 의하면 5.4 km과 14.3 km에서 두개의 경계면이 존재하며 동남부가 깊고 북동부에서 얇은 분포를 보이는데 이들은 각각 기반암과 콘라드면에 해당할 것으로 분석하였다. 또한 자력 선구조는 크게 북북동-남남서 방향과 북서-남동 방향으로 구분되는데, 이들은 단층이나 이를 관입한 화성암체들의 선상 분포에 의한 것으로 해석하였다. 또한, 모든 중력과 자력 자료의 분석을 종합하여 밀양 분지를 동서로 가르는 진주-울산 간의 지질 단면을 작성하였다(Fig. 2).

김원균(1999)은 경상분지 중 하나의 소분지인 의성분지의 지질 특성과 지질 구조를 규명하기 위하여 중력, 자력, 인공위성 영상 및 수치고도 자료를 이용하였는데, 파워 스펙트럼, 역산, 2차 수직 미분, analytic signal 그리고 중·자력 상관관계 분석 등을 통하여 분석하였다.

스펙트럼 분석에 의한 불연속면의 평균 깊이는 4.4~4.7 km와 11.3~13.2 km인데, 이들을 각각 기반암과 콘라드면으로 해석하였는데, 전체적으로 남동부는 얇고, 북서부는 깊은 양상을 보인다. 또한, 중력과 자력 이상에서 기반암 상부의 효과를 추출하여 상관관계를 분석하였는데, 이것은 암체의 공간적 분포의 비교에 유용하며 지표에 노출되지 않은 관입암의 물성 예측과 구조의 존재 가능성을 지시해 줄 수 있다고 하였

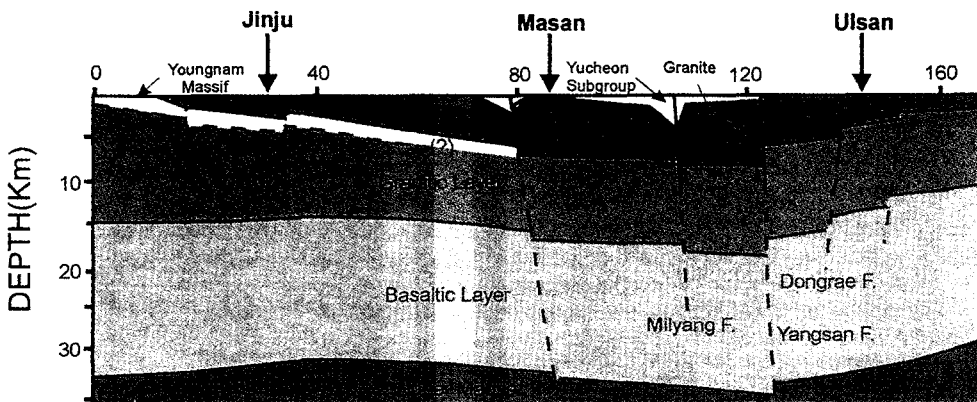


Fig. 2. Geologic cross section along Jinju-Ulsan by analyses of gravity and magnetic data (Jeon, 1995).

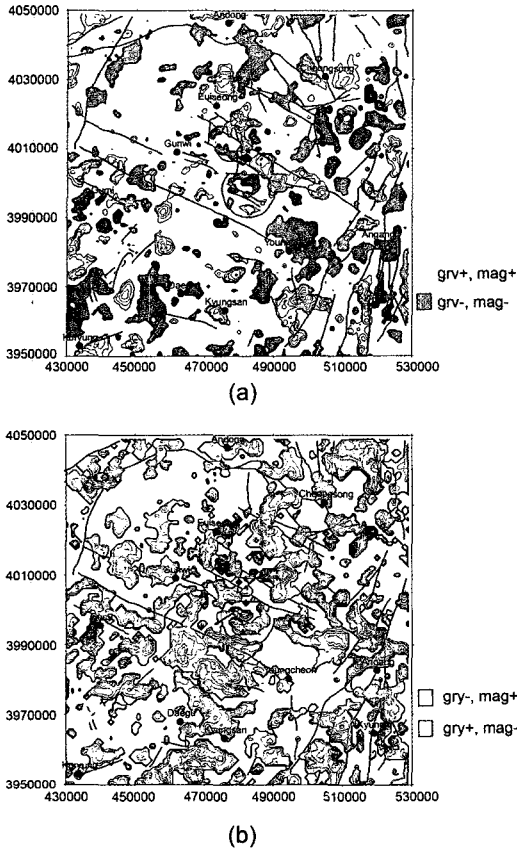


Fig. 3. Correlative gravity and magnetic features above the basement (Kim, 1999).

다(Fig. 3).

자력 선구조는 대체로 북동-남서, 북서-남동, 북북서-남남동, 동북동-서남서의 방향성을 보이는데, 북동-남서와 북서-남동 방향은 화성 활동의 주 통로 역할을 했던 연약대의 방향과 일치하며, 북북서-남남동은 청송 용기대 및 분지의 서쪽 경계부, 동북동-서남서 방향은 의성 분지에 발달하는 주향이동 단층의 방향과 일치하는 것으로 분석하였다.

박인석(2000)은 경상분지 전역에 걸쳐 중력과 자력 탐사자료를 연속, 미분, 파워 스펙트럼, analytic signal, internal correspondence, 역산 그리고 큐리점 깊이 계산 등을 통하여 지질구조의 특성을 분석, 해석하였다.

파워 스펙트럼 분석에 의하면 자력 불연속면은 4.8 km와 12.4 km에서 나타나며 각각 기반암과 콘라드면에 해당한다. 역산 모델링에 의하면 기반암은 2.5~6.3 km의 깊이 분포를 보이고, 콘라드면은 10.5~13.4 km의 깊이 분포를 보이는데, 대체로 마산-

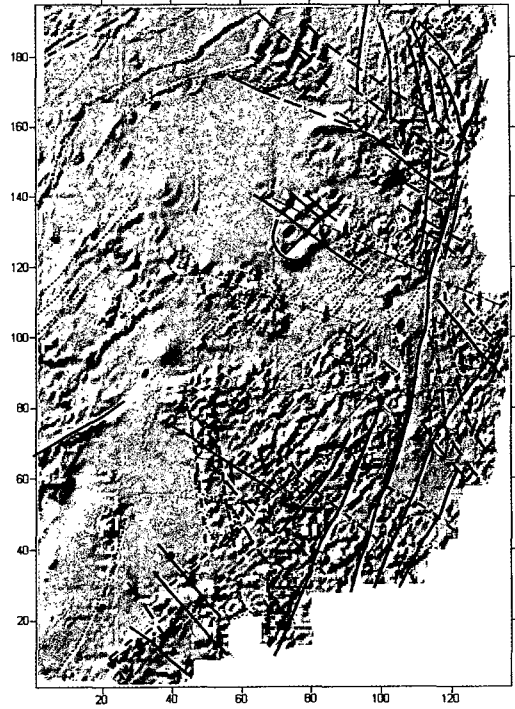


Fig. 4. Magnetic lineaments on the shaded-relief map of Kyeongsang basin (Park, 2000).

밀양-운문산과 청송 지역에서 얇고 분지 북부외곽과 서남부의 진주 남부에서 깊다.

자력 선구조는 분지의 남부와 중부에서 북북동-남남서와 북동-남서 방향이 우세하고 남서부 지역과 중북부 지역에서는 북북서-남남동 방향이 우세하다. 또한, 원형 구조가 많이 관찰되는데, 이들은 잘 알려진 칼데라 및 콜드론 구조와 일치한다(Fig. 4). 한편, 이 연구에서는 자력이상으로부터 큐리점 깊이(Fig. 5)를 계산하였는데 북서부 지역이 가장 깊어 14 km이며, 마산, 창원, 밀양 지역은 가장 얇아서 11.4 km인데, 자철석의 큐리 온도가 550° 이므로 지온 증가율은 49°/km 정도로서 안정 대륙지각으로서는 꽤 높은 값을 보인다고 하였다.

지열류량 분석, 자력 선구조, 역산 모델링, 큐리점 심도 계산 등을 토대로 경상분지의 심부 화성활동은 주로 경상분지 남부 지역의 밀양-운문산-마산 지역이 그 중심이 되었을 것이며, 경상분지는 침강에 의해 형성된 분지일 가능성이 높다고 하였으며, 잔류열의 존재 가능성도 높다고 보았다.

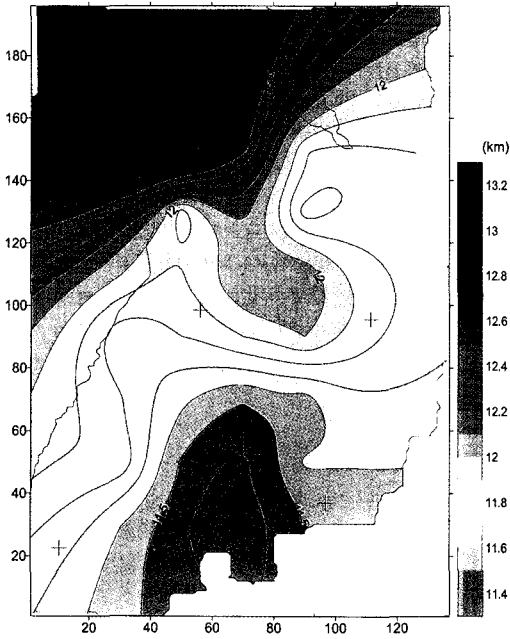


Fig. 5. Curie point depth map of Kyeongsang basin (Park, 2000).

6. 자력탐사의 활용-토목, 환경

1988년 개최된 SAGEEP(Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems)은 물리탐사 기술이 심부의 대규모 지질구조 및 광체 탐사 뿐 아니라 부지 선정, 지반 안정성, 환경, 지하 매장물 탐지 등 천부의 소규모 지질구조의 파악에도 응용되어야 함을 인식하는 계기가 되었다. 자력탐사는 토목, 환경 문제 중에서 지질 경계부 확인, 연약대 확인, 매립지 조사, 자성 물체 탐지, 고고 유적지 조사 등에 효과적으로 이용될 수 있다(Hinze, 1990). 최근 한국에서도 천부 지반조사, 고고 유적지, 매립지 조사, 환경 오염대 탐지 등에 활발히 활용되고 있다.

한국에서 토목 지반조사에 전기비저항 탐사, 굴절법 탄성파 탐사, GPR 탐사 등이 가장 널리 쓰이지만, 자력탐사는 암상 경계, 파쇄대 등을 적은 시간과 비용으로 탐지할 수 있어 함께 이용되는 경우가 많다. 특히, 자력탐사는 강이나 호수 등 접지가 필요한 물리탐사를 적용하기 어려운 조건에서도 쉽게 활용될 수 있다는 장점도 있다.

Chung et al. (2004)은 지하철 예정 한강 하부의 지질 조사를 위하여 비저항 물리탐사와 수상 자력탐사를



Fig. 6. Boat-borne magnetic survey over planned site of subway tunnel (Chung et al., 2004).

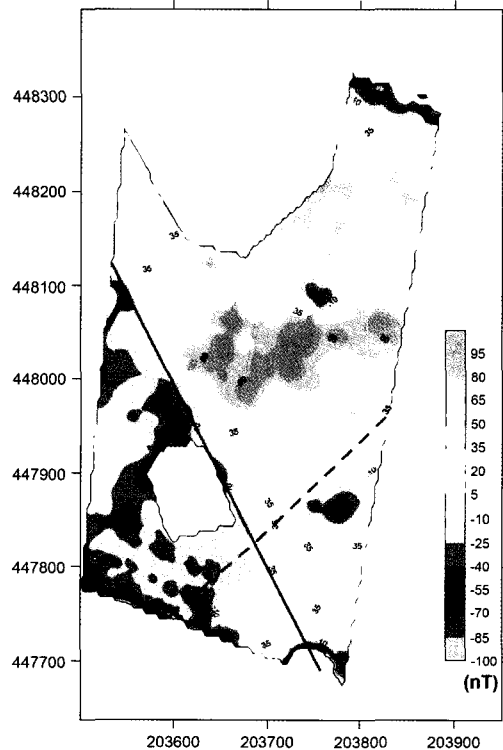


Fig. 7. Magnetic anomaly map of planned site of subway tunnel (Chung et al., 2004).

실시하였는데, 자성체가 없는 고무보트에 RTK GPS 안테나와 자력계를 실어 탐사하였다(Fig. 6). 탐사 결과에 의하여 탐사 영역 전체적으로는 파쇄를 수반하는 암맥의 관입 등의 심한 지질적 교란은 없는 것으로 보이나, 북서-남동 방향의 단층으로 보이는 구조선이 뚜렷이 관찰되는데, 구조선의 북동부가 남쪽에 비하여 신선한 기반암의 깊이가 얕을 것으로 보이며 구조선 부

근에서는 부분적으로 암질의 변화 또는 파쇄현상이 수반될 수도 있을 것이라고 해석하였다(Fig. 7). 또한, 북서부에서 염기성 암맥으로 우려되는 강한 자력 이상은 후에 버려진 철제 도관임이 밝혀지기도 하였는데, 이것이 자력탐사가 수중의 UXO, 자성 폐기물 그리고 매장 문화재 등을 탐사하는 데 이용될 수 있음을 보여주는 것이라고 하였다(정현기 등, 2004).

원자력 발전소, 핵폐기물 저장소, 댐 등 대형 구조물을 설계하기 위해서는 건설부지 예정지에 대한 지질적 타당성 확인을 위한 지구물리학적 검토가 필수적이며, 자력탐사는 광역 및 준정밀 탐사 과정에서 효과적으로 활용된다(정승환 등, 1993). 박영수 등(2005)은 대형댐의 안전을 위한 비상 여수로 개설 예정지의 지질적 타당성 검토의 일환으로 금강 수계 일대에 대하여 중력, 자력 자료를 이용한 광역적 지질구조를 해석하였다. 항공 자력 자료를 자력 음영도, Euler deconvolution 그리고 2차원 모델링 등을 이용한 정량적, 정성적 분석을 통하여 예정 부지의 자력 분포는 단층, 파쇄 또는 관입 등에 의한 지질 운동과 관련되어 교란된 패턴을 보이지 않으며 주목할 만한 자력 선구조도 발달하지 않다고 보고하였다.

교량, 건물, 지하철 등 대형 구조물의 붕괴 사건들에서 보다시피 구조물의 안전 관리를 위해서는 비파괴 진단이 필요하다. 대형 구조물의 건축에서 기초 파일의 깊이와 상태를 파악하는 것은 구조물의 장기적인 안정성을 위하여 매우 중요하다. 정현기 등(1999)은 기초 파일의 철근의 자력 반응을 측정하여 파일의 깊이와 상태를 평가하기 위한 시추공내 3성분 자기장 측정 시스템을 개발하여 특허를 획득하였으며, 3곳의 현장에서 성공적으로 적용하였다.

최근에 이르러 환경 문제가 사회의 중요한 이슈로 떠오르면서 물리탐사 기술을 각종 환경 문제에 적용하는 사례가 늘고 있다. 자력탐사는 매장된 금속성 폐기물 탐지, 지질구조 규명을 통한 오염 경로 예측, 매립지 평가 및 모니터링 등에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

권병두 등(1995a)은 난지도 매립장에서 매립장의 규모와 매립물의 종류 및 물리적 상태를 조사하기 위하여 중력, 자력탐사를 하였다. 자력 이상대는 산업 폐기물과 슬러지 매립 구역과 높은 상관관계를 나타냄을 보였다. 강한 양의 자력 이상을 철제 폐기물과 건축 폐자재가 매립되어 있는 구역으로 구체적으로 예상하였고 음의 자력 이상이 나타나는 구역은 생활 폐기물이 매립된 것으로 해석하였다.

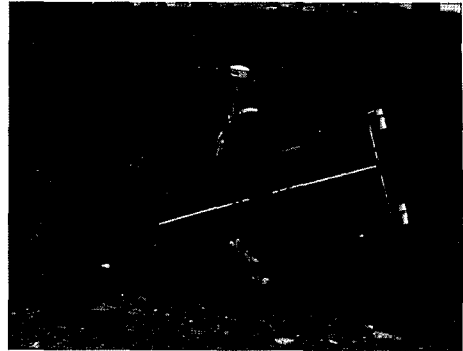


Fig. 8. Magnetic gradient survey over abandoned site for buried wastes detection (Park *et al.*, 2002).

이기화 등(2000)은 난지도 매립장의 안정화에 따른 지질환경 변화를 조사하기 위하여 중력, 자력, 전기 비저항, SP 탐사 등을 수행하였는데, 특히 중력과 자력 탐사는 권병두 등(1995a)의 결과와 비교하였다. 자력탐사 결과는 4년 전의 선행 연구 결과에 비하여 자력 이상의 분포 범위가 좁아졌고 분포 양상도 단순해졌는데, 이것은 침하가 계속되었고 안정화 공사의 일환으로 시행된 복토작업으로 매립물과 흙이 혼합되면서 안정화 효과가 나타나고 있는 것으로 해석하였다.

권병두 등(1998)은 매립이 완료된 부산시 석대 매립장의 안정화 작업과 침출수 등의 오염 확산 방지를 위한 환경지질학적 자료를 제공하고자 중력, 자력 및 VLF 탐사를 하였다. 자력탐사 결과는 매립물의 특성에 따라 매립지 구역마다 자력적 특성이 다르게 나타나며, 특히 자력 분포가 매립물의 두께와 거의 일치하고 있다는 점에서 자력탐사가 매립 이전의 지형 정보가 없는 상황에서 매립의 두께를 파악하는 경제적인 방법임을 암시한다고 하였다. 또한, 자력이상의 방향성 분석을 통하여 자력이상이 매립물의 매립 형태에 가장 크게 영향을 받는 것으로 해석하면서, 이를 통하여 매립지의 침하, 침출수의 유출 경로 그리고 오염 물질의 분포 등을 파악하는 데도 유용하다고 하였다.

박영수 등(2002)은 부산시의 신축 예정지에서 지하 환경오염 및 폐기물 매립상태를 규명하기 위하여 다주파수 전자탐사, GPR 및 수직 및 수평 자력 변화율 탐사를 수행하였다(Fig. 8). 자력탐사는 UXO를 비롯한 금속성 매설물 탐사에 매우 유용한 탐사법인데, 이 사례와 같이 기존 구조물의 잔해 등 인공 잡음이 많은 경우에는 고분해능과 고주파 잡음 사이에서 적절한 자료처리가 필요하고 하였다. Fig. 9는 자력 이상도와 모든 탐사 결과, trench 그리고 시추 결과에 의한 매설

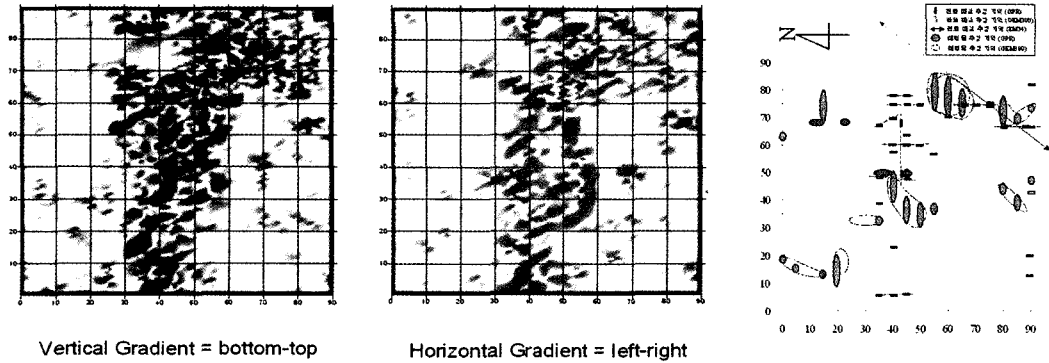


Fig. 9. Horizontal and vertical magnetic gradient maps and synthetic interpretation of buried wastes (Park *et al.*, 2002).

물 예상도인데, 가장 강한 자력이상을 보이는 오른쪽 위 부분은 전자탐사 결과와 일치하여 급속성 폐기물이 매설되어 있을 가능성이 가장 높으며 가운데에 선상으로 긴 이상대는 전자탐사에서는 나타나지 않았는데, 이것은 전자탐사의 탐사 가능 깊이보다 깊은 매설물에 의한 영향으로 예측하였으며, 실제로 관로 등이 매설된 것으로 나중에 확인되었다.

물리탐사는 대상물을 훼손하지 않고 지표에서 비파괴적인 조사로 지하의 인공 구조물이나 매장물의 존재를 파악하므로 고고학적 발굴에 많이 이용되고 있는데, 자력탐사는 고분, 도요지 그리고 선사 주거지 등에 대한 조사와 매장 문화재의 탐지에 효과적이며, 이집트, 이탈리아, 멕시코 등 세계적으로 적용 사례가 많다 (Abdallatif *et al.*, 2004; Godio and Piro, 2005; Arzate *et al.*, 1990).

서만철과 이남석(2000)은 충남 천안시 두정동 고고학적 발굴지역에서 발굴 전에 실시한 자력탐사와 발굴 결과를 비교, 연구하였다. 기존에 발견된 토기로 시험 탐사한 결과를 바탕으로 설계, 실시된 격자 탐사에 의한 자력 이상의 위치는 발굴 결과 발견된 토기의 위치 7곳 중에서 6곳에서 일치하였으며, 나머지 1곳의 토기는 연토기로 밝혀졌다. 또한, 원인이 확인되지 않은 자력 이상 위치들은 발굴 깊이보다 더 깊은 곳에도 유물이 존재할 가능성을 시사한다고 하였다.

임성근 등(2004)은 공주시 백제 고분군 예상 지역에서 자력 변화율 탐사를 통하여 고고학 발굴을 위한 가능 지역을 선정하고자 하였다. 토양, 고분 재료 암석, 대상지역의 암석 등에 대한 대자율 측정과 확인된 고분에 대한 모델링 등을 통하여 고분의 존재 가능성이 높은 이상대를 추천하였다.

김승섭 등(2002)은 충남 보령과 논산의 고분 및 주

거지 유적 조사에 자력탐사를 적용한 결과, 석실분과 주거지에서는 양의 이상을 보이며, 토광에서는 뚜렷한 자력 이상을 확인하지 못하였다고 보고하였다. 김기현과 서만철(2001)은 공주 능치지역의 고고학적 이상체의 존재 가능성을 확인하기 위하여 전기비저항탐사, 탄성파탐사, 중력탐사 그리고 자력탐사 등을 적용하여 모든 탐사 결과에서 공통적으로 일치하는 지하 인공 구조물 또는 공동으로 예측되는 이상체가 존재하는 것으로 해석하였다.

7. 앞으로

한국 전역에 대한 광역 항공 자력탐사는 가까운 장래에 완료될 것이다. 그러나 항공 자력탐사는 어떠한 지형조건에서도 빠른 시간 내에 적은 비용으로 높은 정밀도의 신뢰성 높은 탐사 자료를 제공하며, 더욱이 근래에 이르러는 탐사장비와 GPS의 발전에 힘입어 측선 간격이 좁고 비행 높이가 낮은 정밀 항공탐사 (HRAM; High Resolution AeroMagnetics)가 가능해졌기 때문에 그 역할은 앞으로도 여전히 중요한 것이다 (McConnell, 1998).

자력탐사기는 핵자력계보다 10배 정도의 정밀도를 가지며, 연속 측정이 가능한 세습 광펄핑 자력계가 주목을 이룰 것이다. 분해능과 탐지능을 향상할 수 있는 수평, 수직 변화율 탐사(magnetic gradiometry)가 보다 널리 이용될 것이며, 3성분의 3방향에 대한 변화율 자력탐사기(full-tensor gradiometry)도 상용화될 것으로 전망된다 (Stolts *et al.*, 2006).

자력탐사 자료처리에 탄성과 탐사에서는 꽤 많이 이용되고 있는 wavelet 변환이 도입되었고, 앞으로 주요한 연구 주제가 될 전망이다. 푸리에 방법은 자력

source와 주파수와의 관계로 인하여 자료처리에서 매우 중요하지만, 약점도 있다. 자력탐사 자료는 국부적인 특성(local transient feature)이 포함되어 있으므로 전체적인 평균에 의존하는 푸리에 방법보다 신호의 국부적 특성에 맞추는 wavelet 방법이 보다 더 효과적이고 안정적일 수 있다(Ridsdill-Smith and Dentith, 1999).

한국에는 경상분지, 옥천대, 임진강대 등 한국 뿐 아니라 동북아 지구조 규명의 열쇠가 될 수 있는 흥미로운 과제들이 아직도 명확하게 규명되지 못하고 있는데, 이들 문제들을 해결하는데 자력탐사를 비롯한 지구물리학적 접근이 매우 큰 도움이 될 것이다. 이러한 측면에서 항공 자력탐사 자료는 비교적 체계적이고 균질하게 획득된 신뢰성 높은 자료로서 활용될 수 있으며, 대부분의 나라에서는 자력 D/B가 구축, 운용되고 있기 때문에 동북아 또는 지판 규모의 지구조 연구에는 핵심적인 역할을 할 수 있을 것이다.

물리탐사의 토목, 환경 분야에의 활용은 좀더 활발해지고 다양해 질 것이다. 자력탐사는 여러 가지 천부지질 및 환경 문제 중에서도 UXO, 매립 폐기물, 매장문화재 등과 같은 매장물 탐지에서는 앞으로도 여전히 가장 효과적인 수단으로 이용될 것이다. 최근에는 탐지의 효율성을 높이기 위하여 두 가지 이상의 탐사법을 동시에 적용하는 시스템이 활성화되고 있다. 최근의 보고에 의하면, 자력탐사, 전자탐사 그리고 GPR 탐사 중 두 가지의 탐사기기를 하나의 시스템(dual-sensor)으로 하여 시험해 본 결과 자력탐사/전자탐사 시스템이 가장 효과적이었다고 한다(Butler *et al.*, 2006). Fig. 10은 GeoMetrics G-823A 자력탐사기와 Geonics EM73주파수 영역 전자탐사기를 조립한 휴대용 dual-sensor 매장물 탐지기이다.

환경 문제에 대한 사회적 관심은 더욱 높아질 것이

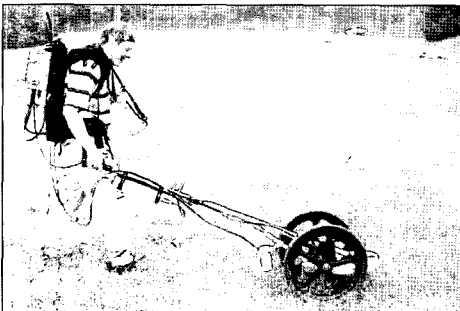


Fig. 10. Man-portable magnetic/FEM dual-sensor system (Butler *et al.*, 2006).

분명하며, 따라서 환경문제에 대한 물리탐사의 활용 요구도 더욱 증가할 것이다. 현재까지 한국에서 자력탐사가 가장 많이 적용된 환경문제는 쓰레기 매립장의 환경 변화와 매립 폐기물의 탐지이다. 물론 이러한 인공적인 환경오염에 대한 탐지와 감시는 앞으로도 여전히 중요한 주제가 될 것이다.

최근 외국의 사례 중에서 주목되는 것은 자력탐사를 통하여 호수로 유입된 오염된 퇴적물의 범위와 두께를 분석하거나(Pozza *et al.*, 2004) 표토층의 대자율이 환경오염을 감시하는 중요한 수단이 된다는(Boyko *et al.*, 2004) 보고이다. 한국은 하천, 인공 호수 그리고 간척지 등이 많고, 황사 등 공기중 중금속 오염이 심각한 문제로 대두되고 있어 강이나 호수의 퇴적물이나 표토층의 환경 변화 감시는 중요한 주제가 될 수 있지 않을까 예측된다.

또한, 환경 문제는 측정되는 물리량이 미세하며, 시간에 따른 변화가 중요하기 때문에 장기적이고 체계적인 물리탐사 시간 모니터링(time-lapse monitoring)이 효과적인 수단일 뿐 아니라, 장래의 환경 변화를 예측할 수도 있을 것이다(Rybakov *et al.*, 2006).

참고문헌

- 구성분, 이태섭, 박영수 (1999) 삼랑진 칼데라 지역의 항공자력 특성 연구. 물리탐사, 1권, p. 101-109.
- 구성분, 임무택, 박영수, 임형래, 성낙훈, 고인세, 송승업 (2005) 지구물리 이상도 작성 연구(GAA2001004-2005(5)). 한국지질자원연구원/산업자원부.
- 구자학, 김주태, 구자덕 등 9명 (1968a) 충주도폭 자력탐사 보고서. 물리탐사보고, 2권, p. 5-36, 국립지질조사소.
- 구자학, 박영수, 우선문 (1982) 항공 방사능 및 자력탐사 시험비행. 연구요보, 8호, p. 7-39, 한국동력자원연구소.
- 구자학, 박영수, 이희일, 최종호 (1983) 항공 방사능 및 자력탐사 연구. 우라늄 광역탐사 연구(82-핵연료자원-1-08), p. 7-58, 한국동력자원연구소.
- 구자학, 유공열, 조동행 (1968b) 한국 암석의 대자율에 대하여(1). 물리탐사보고, 2권, p. 98-105, 국립지질조사소.
- 구자학, 이기동 (1978) 가라골 UNDP 항공자력 이상대 지상 자력탐사. 조사연구보고, 3호, p. 45-55, 자원개발연구소.
- 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈 (1995a) 난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경 연구: 중력 및 자력탐사. 자원환경지질, 28권, p. 469-480.
- 권병두, 서정희, 오석훈 (1998) 부산시 석대 매립지에서의 중력, 자력, VLF 탐사. 자원환경지질, 31권, p. 59-68.
- 권병두, 이희순, 정귀금, 정승환 (1995b) 중력 및 자력탐사에 의한 제주도 지질구조 연구. 자원환경지질, 28권, p. 395-404.
- 김기현, 서만철 (2001) 공주 능치지역 천부 지하구조에 대한 지구물리학적 연구, 지구물리, 4권, p. 103-111.

김승섭, 도성재, 박용희, 이상목, 이홍중 (2002) 지력탐사를 이용한 매장 문화재의 발굴 가능성 연구: 충남 보령과 논산 지역의 예. 대한환경지질학회, 대한지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회 2002년도 춘계 공동 학술발표회, 한양대학교.

김원균 (1999) 의성분지의 지질 및 지구구조 연구; 중력, 지력, 위성영상 및 수치지도자료의 해석과 GIS를 이용한 종합 분석. 박사학위 논문, 연세대학교 대학원 지구시스템과학과.

김인빈, 이종태, 황환석, 한만석 (1974) 양양지구 지력탐사보고. 지질광물조사 연구보고서, 2호 part II, p. 227-230, 국립지질광물연구소.

김인빈, 이천훈, 조동행, 구자덕, 홍무선, 김창기, 김병각, 오안식 (1971) 육천계지역 지력탐사 보고서. 지구물리화학탐사 연구보고, 5권, p. 55-67, 국립지질조사소.

김중수 (1962) 서석철산 주변 구역 자탐 보고. 지질광상조사 연구보고, 5호, p. 186-192, 국립지질조사소.

김주태 (1967) 금곡철산 자력 정밀탐사 보고서. 물리탐사보고, 1권, p. 107-115, 국립지질조사소.

민경덕, 엄우용, 우익 (1994) 경북 의성군 금성산 및 선암산 칼데라에 대한 중력 및 자력탐사. 대한환경지질학회 제27차 학술발표회.

박영수, 현병구 (1986) 두 개의 simplex의 고대 적용에 의한 자력탐사 자료의 3차원 역해 연구. 대한광산학회지, 23권, p. 233-239.

박영수, 이희일 (1996) 지력탐사 자료의 효율적 운영체계 구축(KR-96(B)-1). 한국자원연구소/과학기술부.

박영수, 임형래, 임무택 (2003) 퍼텐셜 자료의 수직 분리. 한국지구시스템공학회 2003년도 춘계 학술발표회.

박영수, 최종호, 박인화, 서상용 (1988) 항공 방사능 및 자력탐사 연구. 광역탐사연구(KR-88-2D-1), p. 3-38, 한국동력자원연구소.

박영수, 임형래, 임무택, 구성분, 정현기 (2005) 금강 수계의 중·자력 탐사에 의한 광역 지질구조 해석 연구(수탁보고서). 한국지질자원연구원/희송이오택.

박영수, 조인기, 조진동, 최종호, 이희일, 박인화 (1992) 삼척탄전 동부지구 통리지역에 대한 석탄 물리탐사(1). 석탄지질조사연구(XI), p. 103-150, 한국자원연구소.

박영수, 이희일, 임무택, 구성분, 조진동, 정승환 (2000) 지구물리자료 취합 및 운용 시스템 공동연구(KR-00-(T)-17/I-03-078). 한국자원연구소/과학기술부.

박영수, 임무택, 구성분, 조진동, 이명중, 설순지, 정호준, 임성근 (2002) 고정밀 중력/자력 탐사기술 개발(KR-02(C)-09). 한국지질자원연구원/산업자원부.

박인석 (2000) 경상분지에 대한 지구물리학적 연구. 공학박사 학위논문, 동아대학교 대학원 자연공학과.

박창업, 강태섭, 이정모 (1996) 우천대 남서 지역의 항공 자력자료 해석. 한국석유지질학회지, 4권, p. 20-26.

박창업, 권병두 (1994) Geophysical Studies on Major Faults in the Ogcheon Fold Belt: Aeromagnetic Data Interpretation on the Jinan Sedimentary Basin, Korea, 연구논문집, 서울대학교자연과학종합연구소, p. 534-539.

서만철, 이남석 (2000) 매장문화재 확인을 위한 자력탐사 및 발굴 비교연구: 충남 천안시 두정동 발굴지역. 지구물리, 3권, p. 175-184.

서상용, 서정희, 현병구 (1978) 가중력을 이용한 자력 기반심도 계산법. 대한광산학회지, 15호, p. 115-119.

서상용, 양승진, 이희일, 박영수, 구자학 (1983) KIER Airborne Data Interactive Processing System version 1. 우라늄 광역탐사연구(82-핵연료자원-1-08), p. 149-213, 한국동력자원연구소.

서상용, 양승진, 현병구 (1976) 판상광체에 의한 자력자성의 Computer 해석. 대한광산학회지, 13권, p. 212-217.

신원철 (1982) 항공자력탐사 결과에 의한 울산 근해 자력기반 심도 계산. 공학석사논문, 서울대학교 대학원 자연공학과.

양승진, 구자학, 한대림 (1969) 장성리 아래광산 자력 정밀조사 보고서. 물리탐사보고, 3권, p. 111-121, 국립지질조사소.

이기화, 권병두, 임형래, 양준모 (2000) 난지도 매립장의 안정화에 따른 지질환경 변화 조사를 위한 지구물리탐사. 지구물리, 3권, p. 113-126.

이헌기, 장정진 (1964) 경인철산 물리탐광 보고서. 지질광상조사연구보고, 7호, p. 209-215, 국립지질조사소.

이호영, 정승환, 현병구 (1985) 반복적 비선형 역해에 의한 중력 및 자력탐사 자료의 해석과 그 응용. 대한광산학회지, 22권, p. 187-198.

임성근, 김정호, 이윤수, 손정술, 송영수, 유기정 (2004) 고고학적인 장소에서 자력탐사의 효율적인 적용에 관한 연구. 한국지구시스템공학회지, 41권, p. 17-25.

전정수 (1995) 경상분지 남부지역(밀양 소분지)의 지질구조에 관한 지구물리학적 연구, 박사학위 논문, 연세대학교 대학원 지질학과.

정승환, 김정호, 김중렬, 박근필, 박영수, 송윤호, 이상규, 이태섭, 이희일, 임무택, 장현삼, 전정수, 조인기 (1993) 지구물리탐사 품질관리지침 연구(수탁보고서). 한국자원연구소/한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터.

정현기, 박영수, 임무택, 임형래 (2004) 수중 매장물 조사에 응용되는 전기 및 자기탐사 사례들. 한국물리탐사학회 물리탐사기술 심포지엄 - 유적조사를 중심으로, 국립문화재연구소.

정현기, 임무택, 박영수, 조철원, 조광호 (1999) 지중 철근심도 탐지용 시추공 자기탐사시스템 개발 및 응용. 한국자원공학회, 대한자연환경지질학회, 한국지구물리탐사학회 1999년 춘계 공동 학술발표회, 충남대학교. 한국동력자원연구소 (1990) 한국동력자원연구소 70년사.

현병구, 조동행 (1973) 소백산 지역의 항공자력 분포에 관한 해석. 대한광산학회지, 10권, p. 62-71.

현병구, 조동행, 정승환, 이두성, 송우영, 김교각, 민병민, 이태섭 (1972) 심부 철광체에 대한 자력조사에 관한 연구(KR-72-41). 서울대학교 공과대학/과학기술처.

Abdallatif, T. F, Suh, M. C. and El-Ali, E. A. (2004) Application of magnetic method for finding the Egyptian archaeological features. 한국물리탐사학회 물리탐사 기술 심포지엄-유적조사를 중심으로, 국립문화재연구소.

Agocs, W. B., Terry, S. A. and Crosby, R. O. (1960) Interpretation of airborne magnetometer survey - Taebaek mountains, Sobaek mountains, Kyongsang-do. Aero Service Corporation.

Arzate, J. A., Flores, L., Chavez, R. E., Barba, L. and Manzanilla, L. (1990) Magnetic prospecting for tunnel and caves in Teotihuacan, Mexico; in Ward S. H., Ed., Geotechnical and environmental geophysics. v. 3, p. 155-174, Society of Exploration Geophysicists.

Boyko, T, Schoger, R. and Stanjek, H. (2004) Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. Journal of Applied Geophysics, v. 55, p. 249-259.

Butler, D. K., Bennet, H. H. and Ballard, J. H. (2006) Overview of multimethod geophysical system development for enhanced near-surface target detection, discrimination, and characterization. The Leading

- Edge, v. 25, p. 352-356.
- CCOP and GSJ, 1994, Magnetic anomaly map of East Asia 1:4,000,000. GSJ miscellaneous map series 32.
- Chung, H. K., Park, Y. S., Lim, M. T., Rim, H. R. and Lee, H. Y. (2004) 3-D DC resistivity survey beneath Han-river bottom for planning subway tunnel construction. SEGJ International Symposium "Imaging Technology", Tohoku University, Japan.
- Godio, A and Piro, S. (2005) Integrated data processing for archeological magnetic surveys. The Leading Edge, v. 24, p. 1139-1144.
- GSJ and KIGAM (2002) Geoscientific maps of southern part of Korea, western part of Japan and their adjoining seas. GSJ digital geoscience map p-4.
- Hinze, W. J. (1990) The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies; in Ward S. H., Ed., Geotechnical and environmental geophysics. v. 1, p. 75-126, Society of Exploration Geophysicists.
- MaConnell, T. J. (1998) Recent advances in high resolution aeromagnetics - Instrumentation. Canadian Journal of Exploration Geophysics, v. 34, p. 1-3.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., Lafehr, T. R., Li, Y., Pierce, J. W., Phillips, J. D. and Ruder, M. E. (2005) 75th Anniversary - The historical development of the magnetic method in exploration. Geophysics, v. 70, p. 33ND-61ND.
- Park, Y. S., Chung, S. H. and Koo, S. B. (1996) Regional gravity and magnetic study of Kyeongsang basin, Korea. ITIT International symposium - Geoscientific data compilation and interpretation in Southeast Asia, Tsukuba, Japan.
- Pozza, M. R., Boyce, J. I. and Morris, W. A. (2004) Lake-based magnetic mapping of contaminated sediment distribution, Hamilton Harbour, Lake Ontario, Canada. Journal of Applied Geophysics, v. 57, p. 23-41.
- Ridsdill-Smith, T. A. and Dentith, M. C. (1999) The wavelet transform in aeromagnetic processing. Geophysics, v. 64, p. 1003-1013.
- Rybakov, M., Millegan, P. and Shirman, B. (2006) Predictive environmental geophysics in Israel-an update. The Leading Edge, v. 25, 426p.
- Sander, G. W. (1976) Report on the helicopter-borne geophysical survey on behalf of the Geological and Mineral Institute of Korea under the direction of UNDP(Republic of Korea contract 158/74). Sander Geophysics Limited.
- Stoltz, R., Zakosarenko, V., Schulz, M., Chiwala, A., Fritsch, L., Meyer, H.-G. and Kostlin, E. O. (2006) Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical application. The Leading Edge, v. 25, p. 178-180.

2005년 11월 14일 원고접수, 2006년 5월 26일 게재승인.