

저위도 캄보디아 스통트렝 지역의 항공자력탐사 자료처리 및 해석

신은주^{1*} · 고광범¹ · 유영준² · 정연호³

¹한국광물자원공사 기술연구원 기술사업팀

²한국광물자원공사 기술연구원 기술개발팀

³한국광물자원공사 탐사사업처 전략금속탐사팀

A Case Study on The Data Processing and Interpretation of Aeromagnetic Survey Conducted in The Low Latitude Area: Stung Treng, Cambodia

Eun-Ju Shin^{1*}, Kwangbeom Ko¹, Young-June You², and Yeonho Jung³

¹Technology Business Team, Korea Resources Corporation

²Research & Development Team, Korea Resources Corporation

³Strategic Metals Exploration Team, Korea Resources Corporation

요 약: 본 연구는 캄보디아 스통트렝 지역의 항공자력탐사 자료처리 및 해석에 관한 사례 연구이다. 자료처리 및 해석에는 다음의 세 가지 관점에 중점을 두었다. 첫째, 저위도 지역 자력자료의 자기극변환 시 문제가 되는 편각방향의 영상 왜곡을 고찰하고 이를 최소화하기 위한 여러 방법을 검토함으로써 최선의 결과를 도출하는 방안을 모색하였다. 둘째, 조사지역은 사전정보가 거의 없기 때문에 전통적인 자료처리 기법과 함께 geographic information system (GIS) 분야의 경사, 곡률 및 최대 경사면 방위각 등의 기법을 새로이 도입, 검토하였다. 이로부터 조사지역의 구조지질 정보를 도출하고 그 유용성을 확인하였다. 마지막으로, 오일러 곱풀기를 이용하여 자력이상대의 심도정보를 도출하고 앞서의 고찰결과와 종합하여 향후의 정밀 조사영역을 선정, 추천하였다. 본 연구에서 수행한 일련의 자료처리 과정은 국내는 물론 해외 자원개발에 있어서 적절한 지침이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

주요어: 항공자력탐사, 저위도, 자기극변환, 경사, 곡률, 최대 경사각, 오일러 곱풀기

Abstract: In this case study, we present the various and consistent processing techniques for the reasonable interpretation of aeromagnetic data. In the processing stage, we especially focused on the three major respects. First, in the low latitude area, severe artifacts are occurred as a result of reduction to the pole technique. To overcome this problem, variable alternative methods were investigated. From the comparison of each technique, we concluded that energy balancing method gives more fruitful result. Second, because of limited a priori information, it is nearly impossible to employ detailed geological survey due to wide and thick spreading of soils in the survey area. So we especially investigated the new techniques such as extracting slope, curvature and aspect information mainly used in GIS field as well as conventional methods. Finally, by using the Euler deconvolution, we extracted the depth information on the magnetic anomalous body. From the synthetic analysis between depth information and previous discussed results, the detailed future survey area was proposed. We think that a series of processing techniques discussed in this study may perform an important role in the domestic and abroad resource development project as a useful guideline.

Keywords: aeromagnetic survey, low latitude, reduction to the pole, slope, curvature, aspect, Euler deconvolution

서 론

자력탐사는 광물자원개발 목적의 전통적인 탐사에서부터 건

설, 환경 목적의 지하 매질물 조사는 물론 고고학적 측면의 유적조사까지 다양한 분야에 널리 적용되는 물리탐사법이다. 자력탐사는 다른 물리탐사 방법들과 비교해 신속·간편하고 비접지식 탐사가 가능하기 때문에 해양, 육상 및 항공 탐사가 모두 가능하다(박영수, 2006). 특히 항공자력탐사는 자원개발 초기 탐사단계에서 필수적인 탐사법으로 인식되고 있는 바, 이는 무엇보다 항공자력탐사가 조사지역의 전체적인 구조지질적 정보를 가장 효과적으로 도출해 낼 수 있는 장점을 가진 것에 연유한다.

2012년 6월 29일 접수; 2012년 7월 20일 수정; 2012년 8월 17일 채택;

*Corresponding author

E-mail: shinej1003@naver.com

Address: Technology Business Team, Technology Research Institute
Korea Resources Corporation 606 Siheung-daero,
Dongjak-gu, Seoul, Korea

본 연구는 한국광물자원공사가 해외자원개발(철 및 동) 목적의 기획탐사의 일환으로 수행한 캄보디아 스통트렝(Stung Treng) 지역의 항공자력탐사 자료로부터 일련의 자료처리 및 해석을 담은 사례연구이다. 조사지역인 스통트렝은 북위 13°의 저위도 지역으로 자력탐사의 해석에 중요한 역할을 담당하는 자기극변환 시 편각방향의 영상왜곡이 심하게 나타난다. 또한 스통트렝 지역 인근에 메콩강이 흐르고 있어 조사지역 서쪽의 산악지형을 제외하고는 조사영역 대부분은 전형적인 퇴적환경이다. 따라서 층적층이 두껍게 발달한 관계로 노두관찰이 힘들어 지표지질조사 자체가 거의 불가능하다. 캄보디아는 자원개발이나 국토의 효율적 이용 등을 목적으로 하는 지질조사 등 정부차원의 기초연구는 미흡한 상태이며 사전정보로서, 과거 프랑스 식민지배하에서 자원침탈 목적으로 수행되었던 기존의 조사자료 역시 구하기 어려운 상황이다.

이러한 조사지역의 상황을 고려하여 본 연구의 자료처리는 다음의 세 가지에 중점을 두었다. 첫째, 저위도 지역 자료처리에서 대두되는 자기극변환 시 영상왜곡을 검토하고 이를 극복하기 위한 방안으로 기존 연구결과를 다각도로 검토하여 최선의 결과를 선택함으로써 해석의 합리성을 유지하고자 하였다. 둘째, 사전정보가 미흡하고 지표지질조사가 불가능한 상황에서 자력탐사 자료는 조사지역의 구조지질적인 정보를 도출하는 유일한 방법이라 할 수 있다. 이러한 자력탐사의 중요성을 감안하여 수직미분이나 tilt derivative 등 기존의 보편적인 처리기법은 물론 경사(slope), 곡률(curvature) 및 최대 경사면 방위각(aspect) 등 GIS 분야의 기법을 새로이 적용하여 조사지역의 다양한 구조지질 정보를 최대한 확보하고자 하였다. 마지막으로 오일러 곱풀기를 통해 심도정보를 추가하고 이를 여러 구조지질 정보와 종합적으로 비교, 검토함으로써 해석의 일관성을 유지하였으며 이를 토대로 향후 정밀 조사영역을 선정, 추천하였다.

조사지역 및 지질

본 연구의 조사지역은 캄보디아 북부에 위치한 스통트렝(Stung Treng) 지역으로서 남서쪽의 E105°32'40", N13°18'3"~E105°51'33" N13°28'37"에 걸치며(Fig. 1(a)), 총 면적은 727 km²이다. 스통트렝 지역은 대략 북위 13°의 저위도로서 북각 13.5° 및 편각 359.5°로 지자기마당은 거의 수평으로 지표면에 입사한다. 스통트렝 지역의 지형적 특성은 서쪽영역에 산악지형과 수계가 형성되어 있으나 전체적으로는 열대우림지역으로 조사영역 동쪽의 메콩강 유역으로 인해 대부분 전형적인 퇴적환경을 나타내며 층적층이 두껍게 발달하고 있다(Fig. 1(b)). 한국광물자원공사의 기획탐사 기간 중 항공자력탐사와 더불어 지표지질조사를 시도하였으나 조사영역 전체에 걸쳐 노두를 거의 관찰하지 못해 자원개발조사 초기단계에서 필수적인 조사영역의 구조지질 정보가 거의 전무한 상태이다.

캄보디아는 2차 대전 후 독립한 국가로서 프랑스 식민지배하에 있을 때 자원침탈 목적의 지질조사 및 시추조사는 다수 행해진 것으로 알려져 있으나 독립 후 프랑스가 철수하면서 관련 자료를 거의 회수하고 공개하지 않아 스통트렝 조사지역에 대한 여타 자원개발 관련 사전정보를 확보하기 어려운 상황이다. 또한 캄보디아는 자원개발이나 국토의 효율적 이용 등을 목적으로 하는 지질조사 등 정부차원의 기초연구를 수행할 만한 여력은 현재 미흡한 상태이다.

자료획득 및 전처리

본 연구에서 이용한 항공자력탐사 자료는 한국광물자원공사의 해외자원개발(철, 동)을 위한 기획탐사의 일환으로 수행된 캄보디아 스통트렝 지역 자료이다. 조사지역은 캄보디아 북부에 위치한 스통트렝(Stung Treng)에서 남서쪽으로 약 20 km

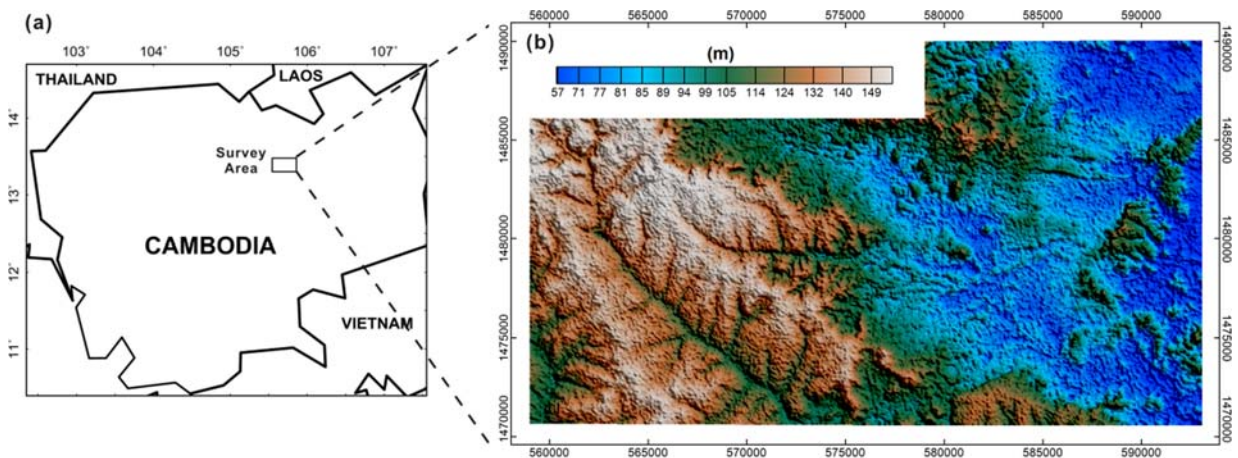


Fig. 1. (a) Location map and (b) topographical map of study area.

떨어진 지역으로 2011년 8월에 항공자력탐사가 수행되었다. 조사에 이용한 항공기는 Eurocopter사의 AS350 B2와 B3+이며 항공기에 장착하며 자력측정에 사용한 센서는 Geometrics사의 G-823A Cesium Vapour 자력계로 동서방향으로 비행하면서 탐사를 수행하였다. 비행고도는 평균 188 m이며 지형기복에 따라 비행하면서 자료를 획득하였다. 동서방향의 탐사측선 간 간격은 200 m이다. 지자기 일변화 보정을 위해 육상 고정관측점을 설치하고 Geometrics사의 G-856 자력계를 이용하여 5초 간격으로 연속 측정하였다.

연구지역의 항공자력탐사를 통해 획득한 총자기마당을 Fig. 2(a)에 도시하였다. 총 자기마당은 대략 41365 nT에서 42628 nT의 범위를 가진다. 조사지역의 중앙부에서 양 및 음의 이상대가 함께 나타나며 서쪽은 양의 자력이상, 북동쪽은 음의 자력이상대가 우세하게 나타난다. 지구자기마당의 일변화를 보정하기 위해 육상 고정관측점의 지자기마당 측정값을 이용하여 일변화보정을 수행하였다. 광역 지자기마당은 국제 표준 지자기마당인 IGRF (International Geomagnetic Reference Field, 11th generation; Finlay *et al.*, 2010)를 이용하여 자력이상도를 산출하였다.

한편, Fig. 2(a)에서 동서방향 비행에 따른 주름모양의 잡음이 관찰되며 이것은 일반적으로 항공자력탐사를 수행할 때 측

선 간의 고도 차이에 의해서 주로 발생한다. 이러한 잡음을 제거하기 위해 마이크로 레벨링(micro-levelling, 또는 decorrugation)을 수행하였으며 필터링 방법으로는 버터워스(Butterworth high-pass)필터와 방향코사인(directional cosine)필터의 조합을 선택하였다(Fig. 2(b)).

자료처리 및 해석

캄보디아 스통트렝 지역의 항공자력탐사 자료처리 및 해석을 수행함에 있어서 다음의 두 가지 사항에 중점을 두었다. 첫째, 스통트렝 지역은 북위 13°의 저위도 지역으로 북각은 13.5°로서 자기극변환 시 편각방향의 영상왜곡을 심하게 유발한다. 이의 해결방안은 기존 연구들에 의해 많이 보고되었으며, 가-북각 변환, 자기적도변환 및 파수영역 필터링 등 다양하다(Leu, 1981; Hanson and Pawlowski, 1989; Keating and Zerbo, 1996). 여기에서는 합리적인 해석을 유지하고자 기존 연구결과를 다각도로 검토하여 최선의 결과를 선택하는 방식을 취하였다.

다른 하나의 중점사항은 조사지역의 광상형성과 관계가 깊은 구조지질 정보 도출에 관한 부분이다. 자력탐사는 조사지역의 구조지질 특성을 가장 잘 드러내는 장점을 가진다. 이를 감안하여 본 연구에서는 보편적인 처리기법과 더불어 GIS 분야의 기법의 적용성을 고찰하여 조사지역의 다양한 구조지질 정보를 최대한 확보하고자 하였다.

저위도 지역의 자기극변환

자기이상은 중력이상과 달리 지자기마당 방향과 이상체의 자화방향 및 형상에 따라 각기 다른 양상이 나타난다. 또한 양과 음의 이상이 같이 나타나는 쌍극자장 고유의 특성으로 이상체와 자기이상대의 위치가 일치하지 않는다. 따라서 해석의 편의를 위해 이상체와 자기이상대 위치가 동일하도록 자기극변환(reduction to the pole)을 수행하고 이로부터 추가적인 자료처리를 진행함이 일반적이다. 자기극변환은 북각이 90°이고 편각이 0°인 자기극에서의 자기마당으로 변환시키는 과정을 의미하며 식 (1)로 정의된다(Branov, 1957; Baranov and Naudy, 1964).

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i\cos(I)\cos(D-\theta)]^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 θ 는 방위각이고, I 와 D 는 각각 조사지역 지자기마당의 북각과 편각을 나타낸다. 자기극변환은 중위도와 고위도에서는 안정된 결과를 보이지만, 약 20° 이하의 북각을 가지는 저위도 지방의 경우 불안정한 자기이상을 보인다(Nabighian *et al.*, 2005). Fig. 3(a)는 스통트렝 조사지역의 자기극변환을 적용한 자력탐사 결과로 남북방향의 편각방향(W 0.5°)의 심각한 선형 왜곡양상이 나타난다. 따라서 자기이상의 왜곡 없이 쌍극

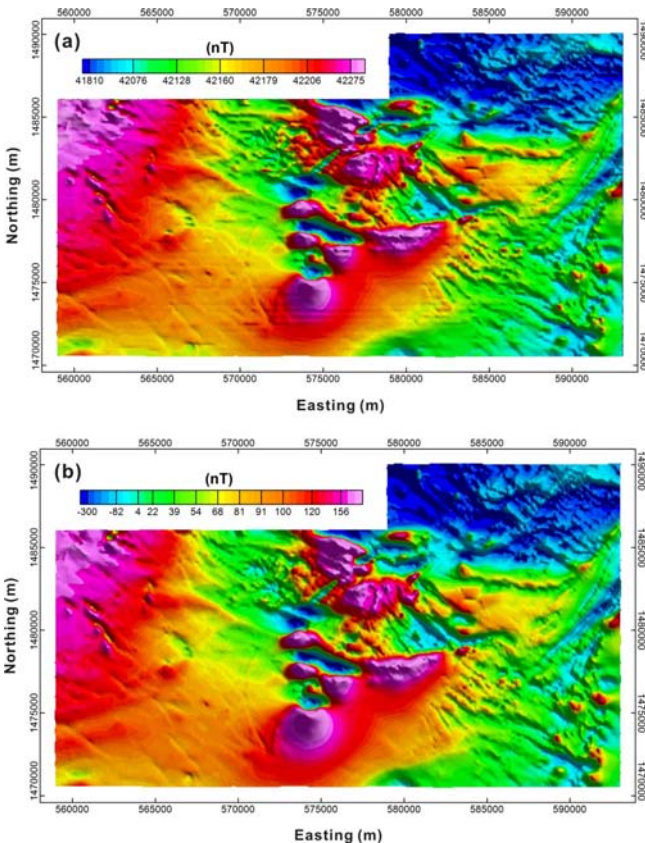


Fig. 2. (a) Total magnetic Intensity map and (b) magnetic anomaly map after micro-levelling, showing distinct visual improvement.

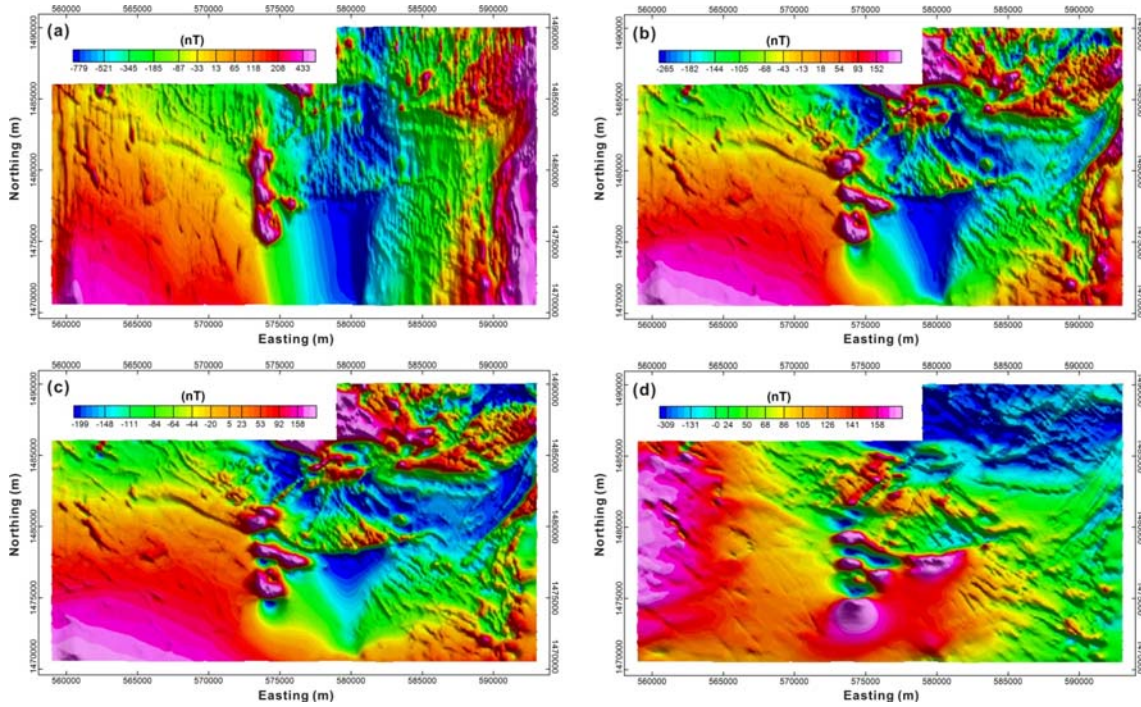


Fig. 3. (a) Original Reduction to the pole map ($I = 13.5^\circ$). Reduction to the pole maps using Pseudo inclination method: (b) $I' = 30^\circ$; (c) $I' = 52^\circ$. (d) Reduction to the equator map.

자장 효과를 제거할 수 있는 대안이 필요하다.

Grant와 Dodds (1972)는 북각을 경험적으로 조절하는 방법인 가-북각방법(pseudo-inclination method)을 제안하였으며 이는 다음 식 (2)와 같다.

$$R(\theta) = \frac{[\sin(I) + i\cos(I)\cos(D-\theta)]^2}{[\sin^2(I') + \cos^2(I')\cos^2(D-\theta)][\sin^2(I) + \cos^2(I)\cos^2(D-\theta)]} \quad (2)$$

가-북각 방법은 식 (2)의 가-북각 I' 을 증가시키는데 따른 자력 이상도의 왜곡을 관찰하여 왜곡이 최소화할 때까지의 최소 가-북각에 의한 결과를 최종 자기극변환으로 선택하는 경험적 방법을 취한다. 이 방법을 스통트렝 지역의 항공자력탐사자료에 적용한 결과를 Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)에 도시하였다. 30° 의 가-북각을 적용한 Fig. 3(b)의 경우 자력이상도 중앙부에 영상 왜곡이 관찰된다. 가-북각을 52° 까지 증가시켰을 경우에도 많이 감소는 하였으나 중앙부의 국부적 왜곡은 여전히 존재하는 것으로 나타난다(Fig. 3(c)). 스통트렝 지역의 북각이 13.5° 임을 감안하였을 때 최소 왜곡의 가-북각은 최소 50° 이상이어야 하고 또한 국부적인 왜곡이 효과적으로 제거되지 않는 점으로부터 자기극변환의 대안으로는 적합하지 않다고 판단하였다.

다음으로 검토한 방법은 자기적도에서 측정된 값으로 변환하는 자기적도변환(RTE, Reduction to the equator)이다(Leu, 1981). 자기적도변환을 스통트렝 지역의 자력이상도에 적용한 결과를 Fig. 3(d)에 도시하였다. 결과는 변환전의 자기이상과

매우 유사하여 변환의 효과가 거의 없는 것으로 나타난다. 이는 조사지역이 적도에 매우 가까운 저위도 지역으로 변환에 따른 자력 이상의 진폭 및 위상변화량이 매우 작기 때문이다. 변환에 따른 자력 이상의 왜곡은 발생하지 않는다는 점에서 긍정적이나 변환의 원래 목적인 쌍극자장을 효과적으로 제거하였는지 여부는 판단이 어려워 본 연구에서는 이 방법을 선택하지 않았다.

한편, Macleod *et al.* (1993)은 저위도의 자력 이상을 해석하는데 있어서 일차 수직적분과 Analytic signal의 조합이 자기극변환의 대안이 될 수 있다고 보고한 바 있다. 여기서 Analytic signal은 자기 이상, M 의 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$|A(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

또한 주파수 영역에서 일차 수직적분 연산자, L 은 다음의 식 (4)에 의해서 정의된다(Macleod *et al.*, 1993).

$$L(\mu, \nu) = \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \quad (4)$$

식 (4)의 μ 와 ν 는 북쪽과 동쪽방향의 파수이다. 일차 수직적분과 일차 수직적분 및 Analytic signal의 조합에 의한 결과를 Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)에 각각 도시하였다. Fig. 4(b)의 결과를 보면 저주파 통과 필터(low pass filter)의 역할을 하는 일차 수직적분의 한계와 위상정보를 잃어버리는 Analytic signal의 특성상 이 방법은 자기극변환의 대안이라 하기보다 효과적인

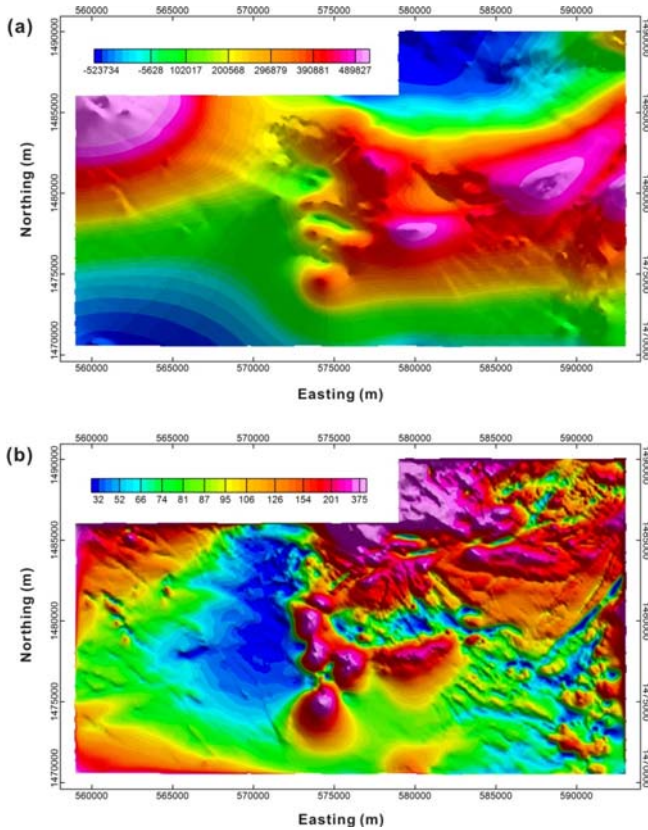


Fig. 4. (a) Vertical integration map and (b) Analytic signal map.

해석을 위한 다른 형태의 자력이상 정보를 제공하는 기법으로 보아야 함이 타당할 것이다. 따라서 자기극변환의 대안으로서 는 적절치 않다고 판단하였다.

Hanson과 Pawlowski (1989)는 자력이상에 내재되어 있는 잡음이 자기극변환의 편각방향의 왜곡에 큰 영향을 준다는 점 에 착안하여 파수영역 Wiener filtering 기법을 제안하였다. 여 기서 Wiener filter는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\alpha = \frac{P^*}{P^*P + \frac{\langle N^*N \rangle}{\langle R^*R \rangle}} \quad (5)$$

여기서 α 는 오차를 최소화하는 Wiener filter이며, P^{-1} 는 자기 극변환 연산자, *는 복소공액을 의미하며 $\langle N^*N \rangle$ 과 $\langle R^*R \rangle$ 은 각각 잡음과 신호의 평균 에너지이다. 식 (5)의 Wiener filter는 잡음이 없을 경우 원래의 자기극변환 연산자와 동일해지며 결 국 분모항의 잡음 대 신호비의 수준에 의해 연산자의 특성이 결정된다. 식 (5)의 잡음 대 신호비 설계에서는 잡음수준을 적 절히 설정해야 한다. Hanson and Pawlowski (1989)는 잡음은 모든 파수에 관계없이 일정한 백색잡음으로 간주하고 로그-파 위 스펙트럼 상에서 잡음수준을 경험적으로 검토, 결정하는 경 험적 방법을 제시하였다.

Fig. 5(a)는 로그-파위 스펙트럼상에서 잡음수준 -5 이하의

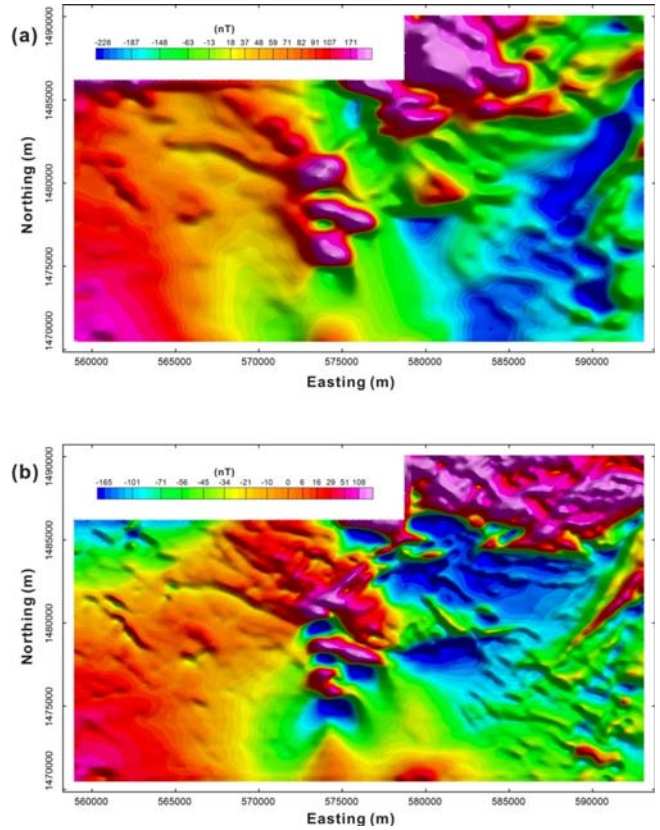


Fig. 5. The results of filtering in wavenumber domain. (a) Reduction to the pole map by wiener filtering method and (b) Reduction to the pole map by Energy balancing method under an assumption of fractal noise.

로그파워값을 백색잡음으로 하였을 때의 Wiener filtering 결과 를 나타낸 것이다. Wiener filtering은 식 (5)에서 알 수 있듯이 낮은 파수 통과필터의 특성을 가진다. 따라서 잡음수준을 크게 할수록 변환에 따른 영상왜곡은 줄어드나 그 대신 분해능이 낮아지게 된다. 검토에 의하면 Fig. 5(a)의 잡음수준보다 낮 으면 다소간의 영상왜곡이 나타나는 것을 확인하였는 바, 이 결 과는 분해능 관점에서 미흡하다고 판단하였다.

한편, Keating과 Zerbo (1996)는 잡음이 파수에 관계없는 백 색잡음이라기 보다는 파수에 따라 신호 대비 일정한 감쇠양상 을 나타내는 프랙탈 특성을 가진다고 설명하였다. 이에 기초하 여 식 (5)의 잡음 대 신호비는 파수영역에서 편각방향의 왜곡 이 큰 영역과 둔감한 영역을 파수영역 상에서 각각 분리하고 두 영역의 평균에너지가 같을 때의 잡음 대 신호비를 적용하 는 Energy balancing법을 제안하였다. 이때 식 (5)의 잡음과 신 호의 평균에너지 비율은 모든 파수에서 일정한 값을 가진다. Energy balancing 기법을 적용한 결과를 Fig. 5(b)에 도시하였 다. 이 결과는 Wiener filtering 기법에 비해 높은 파수에서의 감쇠가 상대적으로 적은 양호한 결과를 보여주고 있다. 이상의 검토를 거쳐 본 연구에서는 자기극변환의 대안으로서 Energy balancing에 의한 결과가 가장 양호한 결과를 나타낸다고 결론

짓고 이후의 모든 조사지역의 구조지질적인 특성을 고찰하는데 이용하였다.

자력이상으로부터 구조지질적 정보 도출

스퉁트렝 조사지역은 사전정보가 전무하기 때문에 항공자력탐사자료로부터 도출하는 구조지질적인 정보는 매우 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 자력이상으로부터 구조지질과 관련된 정보를 파악하는 방법으로는 수치미분, Analytic signal 및 tilt derivative 등 다양하며, 각 방법마다 고유의 구조지질 정보를 보여준다. 전통적인 자료처리 결과를 Fig. 6에 일례로서 도시하였다. Fig. 6(a)는 각각 일차 수치미분, Fig. 6(b)는

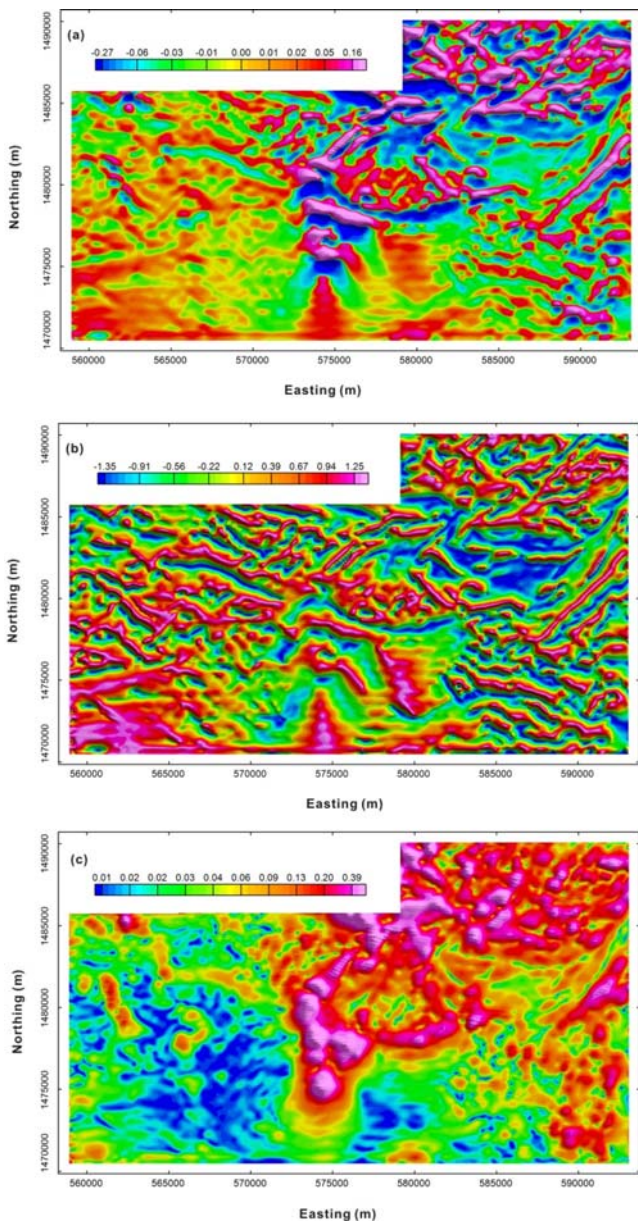


Fig. 6. Derivative maps using the results of Energy balancing method (Fig. 5 (b)). (a) First vertical derivative map, (b) Tilt derivative map and (c) Analytic signal map (total derivative map).

tilt derivative 및 Fig. 6(c)는 Analytic signal에 의한 자료처리 결과이다. 스통트렝 지역의 선구조는 대략 북서-남동방향과 북동-남서방향의 2조로 인지되며 주로 조사지역의 중앙과 북동쪽에서 우세하게 발달하는 것으로 나타난다.

한편, 본 연구에서는 특히 광상형성에 있어 중요한 의미를 가지는 선구조를 포함하는 구조지질적 정보를 최대한 도출하기 위한 여러 기법들을 중점적으로 검토하였다. Fig. 7(a)는 Blakely and Simpson (1986)의 방법에 의한 선구조 분석결과를 나타낸 것이다. Blakely and Simpson (1986)은 선구조 분석 시 격자의 중앙과 주변 8개 격자점의 값을 비교하는 4가지 조건 중 만족하는 조건 수를 유의수준으로서 함께 제시하였다. Fig. 7(a)는 유의수준을 2로 설정하여 구한 결과이다. 김원균 등(2000)은 지질학적 경계를 찾고자 할 때에 유의수준 값을 2 또는 3으로 하는 것이 효과적이라고 한 바 있다. 스통트렝 지역의 선구조는 중앙을 기준으로 서쪽과 동쪽영역이 뚜렷이 구분되는데, 서쪽영역은 북서-남동 방향, 중앙부와 동쪽은 북서-남동 및 북동-남서 방향의 선구조가 혼재하여 발달하는 것으로 나타난다.

또한 본 연구에서는 자력이상으로부터 구조지질 정보를 도출하기 위한 새로운 시도로서 수치지형분석에서 사용하는 GIS 기법의 응용을 시도하였다. 적용한 방법은 경사(slope), 곡률(curvature) 및 최대 경사면 방위각(aspect)로서 자력이상을 수치지형도의 고도와 등가라고 상정하여 조사지역의 구조지질 정보를 산출하였다. 이 경우 경사(slope)는 Analytic signal과 유사한 THD (Total horizontal derivative)와 동등하며 최대 경사면 방위각(aspect)은 최대 경사면이 향하는 방위각을 의미한다(Zevenbergen and Thorne, 1987). 경사, 최대 경사면 방위각 및 곡률을 구한 결과를 Fig. 7(b) ~ 7(d)에 각각 도시하였다.

최대 경사면 방향 분포도를 살펴보면 북서-남동 방향과 북동-남서 방향의 선구조가 발달하는 것으로 보이며(Fig. 7(c)) 이는 Blakely and Simpson (1986)의 결과와 잘 부합한다. 경사와 곡률 분포도에서는 특히 연구지역의 중앙과 북동쪽에서 북서-남동 및 북동-남서 방향의 교차 선구조가 두드러지는 특징을 보인다.

이상의 조사지역의 선구조 분석 및 고찰로부터 광화작용을 배태할 만한 지질구조적 특성은 조사지역의 두 방향의 선구조가 혼재하는 경계부인 중앙부가 가장 유력하다고 일차적으로 결론지었다. 이때 새로이 적용한 GIS 기법은 매우 유용하게 활용할 수 있는 자료처리 기법임을 확인하였다.

지질구조의 심도분포-오일러 곱풀기

자력이상으로부터 자력이상을 야기시키는 이상체의 위치 및 심도를 정량적으로 도출하기 위한 방법의 하나로서 오일러 곱풀기를 들 수 있다. 오일러 곱풀기는 자력 이상체의 반응 T 가 차수 N 의 homogeneous한 함수형태일 때 다음과 같이 정의된다(Thompson, 1982).

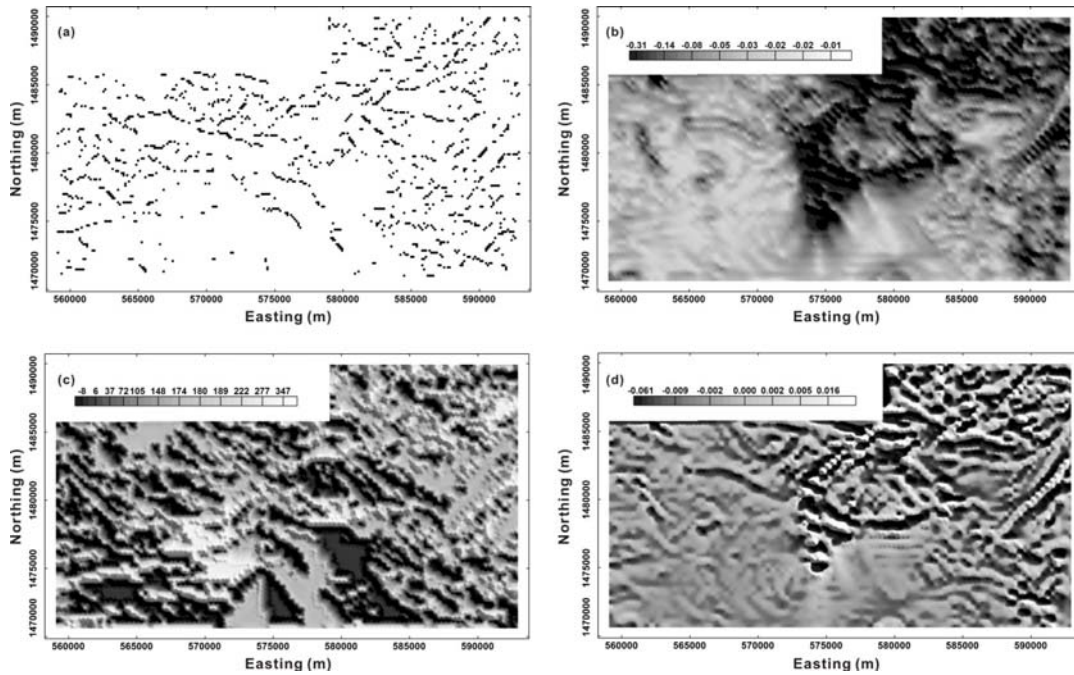


Fig. 7. The extracted geological information from the reduction to the pole anomaly. (a) the result of lineament analysis using Blakely and Simpson algorithm; (b) slope, (c) aspect and (d) curvature calculated using Zevenbergen and Thorne algorithm.

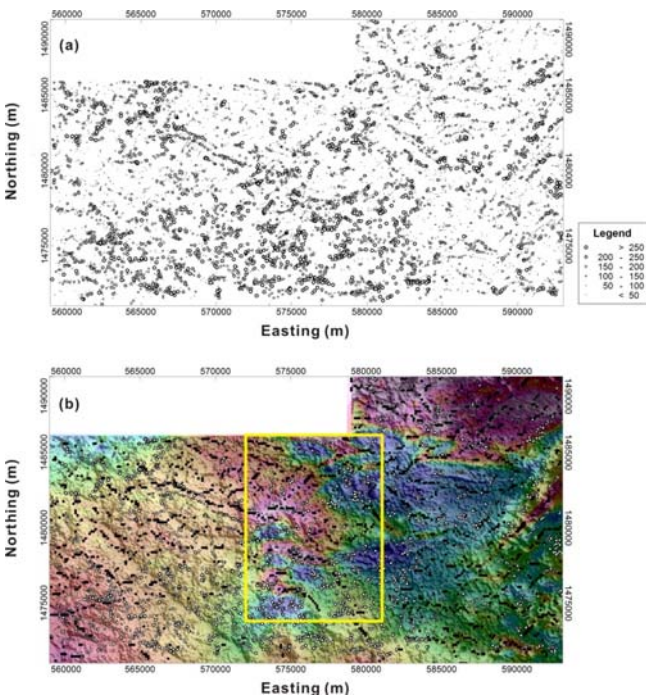


Fig. 8. The results of 3D Euler deconvolution (a) and overlaid with the topographic relief map, lineaments, and reduction to the pole map (b). The yellow rectangle indicates the second detailed survey area.

$$(x-x_0)\frac{\partial T}{\partial x} + (y-y_0)\frac{\partial T}{\partial y} + (z-z_0)\frac{\partial T}{\partial z} = N(B-T) \quad (6)$$

x_0, y_0, z_0 는 자성체의 위치를 지시하며, T 는 임의의 위치에서

의 자력이상을 의미하고, N 과 B 는 각각 Structure index (SI)와 Bias로 정의된다. 식 (6)과 자력이상, 자력이상의 수평 및 수직미분을 이용하여 자성체의 위치 및 심도에 대한 정보를 산출할 수 있다. Fig. 8(a)는 Fig. 5(b)의 자력이상도로부터 SI를 2로 하여 오일러 곱풀기를 적용한 결과이다. 원의 위치는 이상체의 위치, 원의 크기는 최대 300 m까지의 심도정보를 의미한다. Fig. 8(b)는 지표지형, 선구조 및 선구조의 심도별 분포양상을 종합적으로 살펴보기 위해 오일러 곱풀기의 결과에 지형 음영기복도, 자력이상도 및 선구조 분석결과를 중첩, 도시한 결과이다.

조사지역의 중앙과 북동쪽 지역은 비교적 천부에 자력 이상체가 존재하는 것으로 나타나며 남서쪽은 상대적으로 심부에 분포하는 것으로 판단된다. 또한 선구조로 특징짓는 이상체의 구조지질적 특성은 앞서 고찰결과와 잘 일치한다. 덧붙여 음영기복도로 나타낸 수치지형도 상의 수계 및 산계의 방향과 추출된 구조선을 비교해 볼 때 조사지역 서쪽 산악지형의 수계는 일반적으로 지질구조선을 따라 형성된 것이 아님을 지시하고 있다.

이상의 고찰을 종합하였을 때 조사영역의 중앙부를 광상을 배태할 가능성이 가장 높은 곳으로 판단하여 2차 정밀 조사영역(Fig. 8(b)의 노란색 사각형)으로 선정, 추천하였다.

결론

본 연구는 한국광물자원공사가 해외자원개발(철 및 동) 목적의 기획탐사의 일환으로 수행한 캄보디아 스텝트랭(Stung

Treng) 지역의 항공자력탐사의 자료처리 및 해석에 관한 사례 연구이다. 일련의 자력자료의 처리 및 고찰로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 저위도 지역 자력자료의 난점인 자기극변환의 영상왜곡을 고찰하고 이를 최소화하기 위한 방안으로서, 기존 연구에서 제시된 바 있는 여러 방법들을 개별적으로 검토하여 그 중 Energy balancing 방법이 가장 좋은 결과를 보여주었는 바, 이를 추가 자료처리 및 해석에 활용하였다.

2. 사전정보가 거의 없고 지표지질조사 등 현장조사가 불가능한 상황에서 자력탐사는 조사지역의 구조지질적인 정보를 도출할 수 있는 매우 효과적인 탐사법이다. 본 연구에서는 전통적인 기법과 함께 경사(slope), 곡률(curvature) 및 최대 경사면 방위각(aspect) 등 GIS 분야의 기법의 적용성을 새로이 검토하였다. 그 결과 GIS 분야의 기법이 조사지역의 구조지질 정보를 도출하는 데 매우 유용함을 확인하였다.

3. 정량적인 심도정보를 도출하기 위한 방법으로서 오일러 곱풀기를 수행하고 앞서 고찰한 구조지질 정보와 종합적으로 비교, 검토한 결과 스톱트렝 조사지역 중앙부를 광상을 배태할 만한 가장 유력한 후보지로 판단하였다. 이의 구조지질적 특성과 광상 배태여부는 향후에 수행될 2차 정밀조사를 통해 그 결과를 통합적으로 분석함으로써 정확히 규명될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지자원기술개발사업의 지원(과제번호: 2010201030003A)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Kim, W. K., Min, K. D., Kim, J. W., Won, J. S., Park, C. H., and Koo, S. B., 2000, Geologic Structure of the Euseong Sub-basin by Analytic Aeromagnetic Anomaly Data, *Economic and Environmental Geology*, **33**, 229-237.
- Park, Y. S., 2006, A Review of Magnetic Exploration in Korea, *Economic and Environmental Geology*, **39**, 403-416.
- Baranov, V., 1957, A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies, *Geophysics*, **22**, 359-383.
- Baranov, V., and Naudy, H., 1964, Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole, *Geophysics*, **29**, 67-69.
- Blakely, R. J., and Simpson, R. W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics*, **51**, 1494-1498.
- Finlay, C. C., Maus, S., Beggan, C. D., Bondar, T. N., Chambodut, A., Chernova, T. A., Chulliat, A., Golovkov, V. P., Hamilton, B., Hamoudi, M., Holme, R., Hulot, G., Kuang, W., Langlais, B., Lesur, V., Lowes, F. J., Lüher, H., Macmillan, S., Manda, M., McLean, S., Manoj, C., Menvielle, M., Michaelis, I., Olsen, N., Rauberg, J., Rother, M., Sabaka, T. J., Tangborn, A., Tøffner-Clausen, L., Thébault, E., Thomson, A. W. P., Wardinski, I., Wei, Z., and Zvereva, T. I., 2010, International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophysical Journal International*, **183**, 1216-1230.
- Grant, F. S., and Dodds, J., 1972, MAGMAP FFT processing system development notes, Paterson Grant and Watson Limited.
- Hansen, R. O., and Pawlowski, R. S., 1989, Reduction to the pole at low latitudes by Wiener filtering, *Geophysics*, **54**, 1607-1613.
- Keating, P., and Zerbo, L., 1996, An improved technique for reduction to the pole at low latitudes, *Geophysics*, **61**, 131-137.
- Leu, L. K., 1981, Use of reduction-to-the-equator process for magnetic data interpretation, 51st Ann. Internat. Mtg., Soc. Exp. Geophys. Los Angeles, Expanded Abstract, *Geophysics*, **47**, 445.
- Macleod, I. N., Vieira, S., and Chaves, A. C., 1993, Analytic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes, third international congress of the Brazilian society of geophysics, 830-835.
- Nabighian, N. M., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., and Ruder, M. E., 2005, The historical development of the magnetic method in exploration, *Geophysics*, **70**, 33ND-61ND.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH-A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, **47**, 31-37.
- Zevenbergen, L. W., and Thorne, C. R., 1987, Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, **12**, 47-56.
- Thorne, C. R., Zevenbergen, L. W., Burt, T. P., and Butcher, D. P., 1987, Terrain analysis for quantitative description of zero-order basins, *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim*, IAHS Publication, **165**, 121-130.