

지구통계학적 방법을 이용한 포텐셜 자료와 MT 자료의 복합 해석 연구

박계순¹⁾, 오석훈²⁾, 이희순³⁾, 권병두¹⁾, 양준모⁴⁾

¹⁾서울대학교 지구과학교육과, gyesoon@paran.com

²⁾강원대학교 지구시스템공학과

³⁾경인교육대학교 과학교육과

⁴⁾한국해양연구원 해양환경연구본부

Integrated Analysis of Gravity and MT data by Geostatistical Approach

Gyesoon Park¹⁾, Seokhoon Oh²⁾, Heui-soon Lee³⁾,
Byung-Doo Kwon¹⁾, Jun-Mo Yang⁴⁾

¹⁾Dept. Earth Science Education, Seoul National University

²⁾Dept. Geosystem Engineering, Kangwon National University

³⁾Dept. Science Education, Gyeongin National University of Education

⁴⁾Korea Ocean Research and Development Institute

Abstract: : We have studied feasibility of the geostatistical approach to enhance the result of analysis of the sparsely obtained MT(Magnetotelluric) data by combining with gravity data. We have attempted to use geostatistics for integrating the MT data along with gravity data. To evaluate the feasibility of this approach, we have studied about interrelation between geological boundary and density distribution, and corrected density distribution for conversion to more sensitive to geological boundary by minimization of difference between z-directional variogram values of resistivity distribution obtained MT inversion and density distributions. Then, this method has been tested on model and field data. In model test, the results obtained were good agreement with real model. And in a real field data, the result of analysis demonstrate convincingly that our geostatistical approach is effective.

Keywords: Potential data, MT data, Geostatistical integration

1. 서론

최근 물리탐사 분야에서는 대상체에 대한 보다 정확하고 신뢰성 있는 해석을 수행하기 위해 다양한 기법의 복합 탐사가 수행되고 있다. 그러나 기존의 복합 탐사 해석 기법에서는 각각의 물리탐사 방법이 측정하는 지하매질의 물리적 특성이나 분해능이 서로 다르기 때문에 개개의 탐사 자료를 분석한 뒤 정성적으로 그 결과를 취합 해석하는 수준에 머물러 있으며, 복합 탐사의 장점을 효과적으로 이용하지 못하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 복합 해석의 어려움을 극복하고자, 저비용의 광역 해상도가 좋은 포텐셜 자료와 수직 분해능이 좋은 MT 자료와의 복합 해석 기법

에 대하여 연구를 수행하였다. 우선 동일 지역에서 획득된 중력 자료와 MT 자료의 역산을 수행하여 각 자료간의 물리적, 공간적 상관성을 분석하고, 이를 광역적인 분해능이 좋은 중력 자료와 수직 분해능과 정밀도가 높은 MT 자료를 지구통계학적으로 분석하여 타당성이 높은 광역적인 지하 구조를 추출해 내고자 한다.

2. 본론

2.1 자료 처리

Fig. 1은 지구통계 기법을 이용한 중력 역산 결과의 층 밀도 분석 및 복합 해석의 흐름도를 나타내고 있다. 이 방법은 통상적인 역산 과정을 거친 중력 역산 결과를 층 밀도 분석을 통해 지질 경계에 민감한 중력 역산 결과로 해석하고, MT 역산 결과와의 지구통계학적 복합해석 기법을 수행하여 향상된 역산 결과를 획득하기 위한 기법이다.

중력 역산은 지하 하부의 밀도 분포를 해석하기 위한 방법으로 실제적인 지질 구조에서 공극을 갖는 암석이 지하 깊은 곳에 존재하면, 상부로부터의 하중 때문에 경화되어, 시간의 흐름에 따라 같은 종류의 암석이라도 하부로 갈수록 암석의 밀도는 증가하게 된다. 따라서, 밀도 분포의 경우 단순히 지질 구조와 암석의 종류에 의해서만 그 반응이 나타나는 것이 아니라 심도에 따라서 밀도 값의 변화가 나타날 수 있다. 따라서 밀도 역산 결과는 단순히 지질 경계에 의해 그 구조가 나타나는 것이 아니라 수직적인 밀도 변화 양상이 결과에 영향을 미치게 된다. 또한, 통상적인 중력 역산은 보다 높은 정밀도의 해석을 위하여 상대 중력을 통해 해석을 수행한다. 이때 고려할 것은 층별로 각기 다른 밀도를 각 층의 전체 블록에 더해준다 하더라도 각 측정에서의 상대 중력 값의 변화가 없기 때문에 수직 분해능이 낮은 단점을 가지고 있다. 더욱이, 중력 자료의 관심 변수가 동일 지질 구조 내에서도 수직적인 변화가 나타나는 밀도 값이기 때문에 보다 타당한 지질 구조를 해석하기 위해서는 이러한 효과를 고려하여 해석을 수행 하여야 한다.

본 연구에서는 지질 구조에 민감한 밀도 분포로의 변환을 위하여 식(1)을 이용 수직 방향으로의 상대 베리오그램을 수평상의 모든 지점에서 각각 획득하였다. 이는 통상적으로 베리오그램은 전체적인 공간 분포를 해석하기 위하여 이용되지만, 보다 많은 정보를 분석하기 위해 각 지점에서의 모든 전기비저항과 중력의 상대 베리오그램값 오차를 최소화하여, 두 해석 결과에서 나타나는 지질 구조의 유사성이 가장 높은 층별 밀도 분포 양상을 분석 하였고, 결과적으로 보다 지질 구조에 민감한 밀

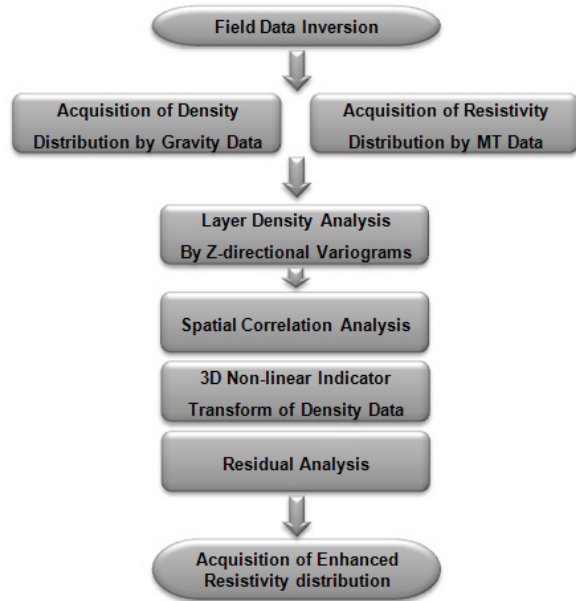


Fig. 1. Flowchart for the geostatistical integrating method by non-linear indicator transform.

도 분포 해석을 수행할 수 있었다(Fig. 4, Table.1(a),(b)).

$$\gamma_i(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} \frac{[z_i(u_\alpha) - z_i(u_\alpha + h)]^2}{\left[\frac{z_i(u_\alpha) + z_i(u_\alpha + h)}{2} \right]} \dots\dots\dots (1)$$

- i : 최상부 블록의 인덱스
- $N(h)$: 같은 위치에서 수직방향으로 거리가 h만큼 분리되어 있는 순서쌍 자료의 수
- $z_i(u_\alpha)$: i 지점 u_α 심도에서의 자료 값

보정을 거친 중력 역산 자료는 복합해석을 수행하기 위하여 비선형 지시자 변환(Oh, 2004)을 수행하여 전기비저항 분포로 변환 하였으며, 변환된 자료를 통하여 전기비저항의 지역 평균을 구하였고, 가변적 지역평균에 의한 단순 크리깅(Goovaert, 1997)을 수행하여 MT 탐사의 수직 분해능과 중력 탐사의 광역 정보를 통합 해석 하였다(Fig. 6,7).

2.2 모델 검증

본 연구에서 제안하는 자료 처리 기법의 효율성을 검증하기 위하여 모델 검증을 수행하였다. 사용된 모델(Fig. 2)은 60×10(수평×수직) km의 크기로, 배경은 퇴적암으로 최상층과 최하층이 0.08 g/cm³의 밀도 차를 갖으며 하부로 갈수록 밀도가 증가하고, 약 1.5 km, 5 km 지점에 화성암 관입에 의한 이상체를 설정하였다. 관입체의 밀도는 퇴적암 하부의 밀도와 유사하게 하였으며, 전기비저항은 퇴적암과 화성암을 각각 100 Ω-m, 10000 Ω-m로 설정하였고, 변동치의 5%, 10%에 해당하는 가우시안 잡음을 밀도와 전기비저항치에 포함하여 모델을 구성 하였다. 본 연구에서는 각 자료의 역산이 타당하게 이루어졌다는 가정 하에서 연구를 수행 하였으며, 연구에 사용된 역산 결과는 50개의 층으로 이루어진 잡음이 포함된 모델을 공간분포를 고려하여 10개의 층으로 값을 재추정한 후 역산 결과(Fig. 3)로 가정하고 검증을 수행하였다. 또한, 자료처리는 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 모든 지역의 광역 중력 역산 자료와 일부분에만 존재하는 MT 역산 결과를 통해 이루어 졌다. 이후, 베리오그램 분석을 통해 적합한 층별 밀도를 분석하여 보정하였으며(Fig. 4), 비선형 지시자 변환 기법을 통해 전기비저항의 광역적인 부분에 있어서의 지역평균값을 구하였고(Fig. 6(a),(b)), 가변적 지역평균에 의한 단순

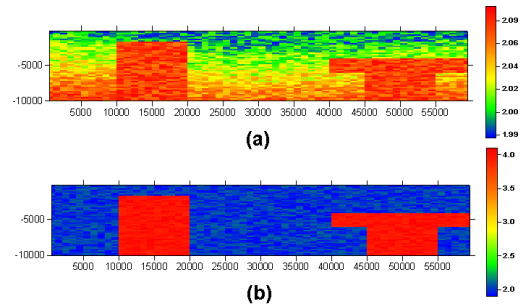


Fig. 2. Density distribution(a) and resistivity distribution(b) of the real models.

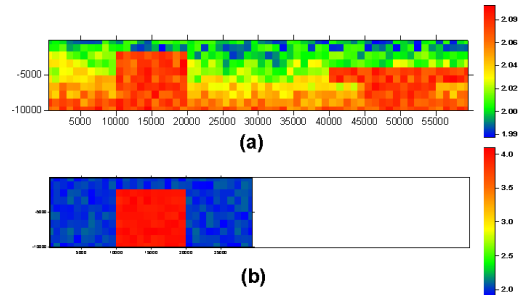


Fig. 3. Density distribution(a) and resistivity distribution(b) of the input models which were assumed inversion sections.

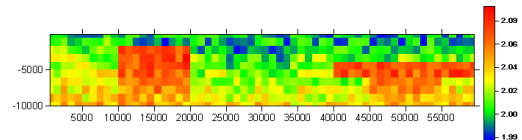


Fig. 4. Edited density distribution obtained by layer density analysis with MT inversion results and their Z-directional variograms.

크리깅 기법과 잔차 분석(Fig. 5)을 이용하여 정보가 없었던 3000-6000 m 위치의 전기비저항 분포를 해석하였다(Fig. 6(c),(d)). 또한, 지질 구조에 적합한 층별 밀도 분석의 향상 결과를 확인하기 위하여 밀도 역산 결과를 그대로 사용하였을 경우(Fig. 6(a),(c))와 층별 밀도 보정을 수행한 자료를 사용 하였을 경우(Fig. 6(b),(d))의 결과를 모두 도시하였다.

모델 검증 결과, 광역 정보를 가지는 낮은 해상도의 중력 자료와 좁은 지역이지만, 수직 분해능이 좋은 MT 자료를 복합 해석하여 광역적으로 해상도가 높아지는 결과를 획득하였다. 또한, MT 자료를 통한 밀도 구조의 층별 밀도 보정을 통해서 잔차의 변동폭이 크게 감소하였으며(Fig. 5,6) 보다 지질 구조에 민감한 해석 결과를 획득 할 수 있었다(Table. 1).

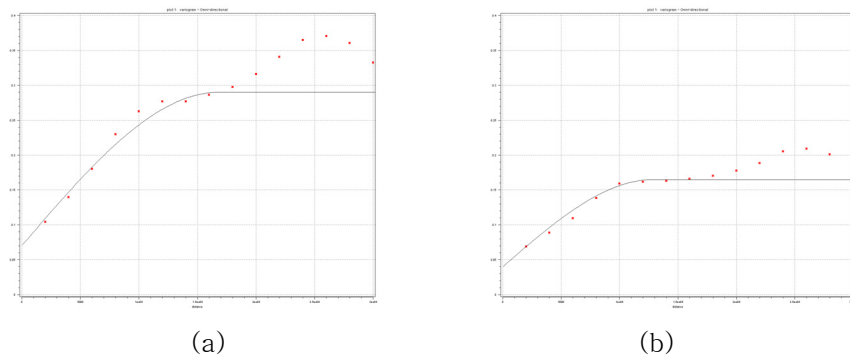


Fig. 5. Variograms for residual values obtained by difference of resistivity and non-linear transformed resistivity from density(a) and difference of resistivity and non-linear transformed resistivity from converted density by layer density analysis(b).

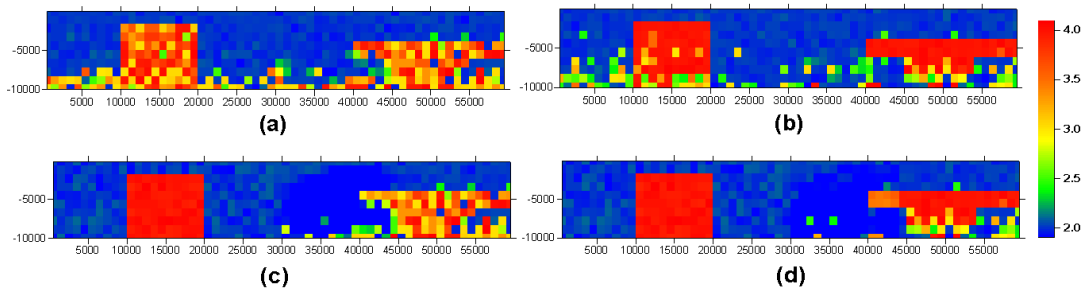


Fig. 6. Resistivity distributions from non-linear indicator transform and density distribution using simple density inversion(a) and edited density distribution by layer density analysis(b). And results of residual analysis using data of (a)(c) and data of (b)(d).

Table 1. Summary of Statistics are obtained before non-linear indicator transform((a),(b)) and after non-linear indicator transform((c),(d))

(a)		X variable	resistivity	Y variable	density
plotted data	300	Number of data	300	Number of data	300
Coef. correl	0.667043	Mean	2.53589	Mean	2.04467
		Variance	0.784041	Variance	0.000971671

(b)		X variable	resistivity	Y variable	edited_density
plotted data	300	Number of data	300	Number of data	300
Coef. correl	0.755898	Mean	2.53589	Mean	0.00799996
		Variance	0.784041	Variance	0.000621559

(c)		X variable	resistivity	Y variable	resistivity (from density)
plotted data	533	Number of data	533	Number of data	533
Coef. correl	0.78208	Mean	2.57327	Mean	2.53843
		Variance	0.823623	Variance	0.556954

(d)		X variable	resistivity	Y variable	resistivity (from edited_density)
plotted data	533	Number of data	533	Number of data	533
Coef. correl	0.86816	Mean	2.57327	Mean	2.54189
		Variance	0.823623	Variance	0.681576

2.3. 야외 탐사 자료에의 적용

본 연구에서는 기법의 적용 가능성을 확인하기 위하여 의성소분지의 화산 칼데라 일대에 걸쳐 약 1×1 km의 격자 형태로 얻어진 510개의 중력자료와 화산 칼데라를 동서 방향으로 가로질러 측정된 13개의 MT 자료를 이용하여 2차원 섹션 상에서 그 가능성을 살펴보았다. 자료의 처리 과정은 모델 검증 과정과 같으며, 복합 해석의 결과를 평가하기 위하여 제안 기법을 통한 해석에는 모든 MT 자료를 사용하지 않고, 13개의 자료 중 2개의 자료만을 사용하여 해석하고, 모든 자료를 이용해 해석하였을 경우와 비교하여 보았다. 결과적으로 중력 역산의 외곽 경계 부근에서는 모든 데이터를 사용하여 MT 해석을 수행한 결과와 패턴의 상이함이 일부 발견되고 있으나, 중력 측정의 밀도가 높은 칼데라 내부 지역에서는 해석에 사용된

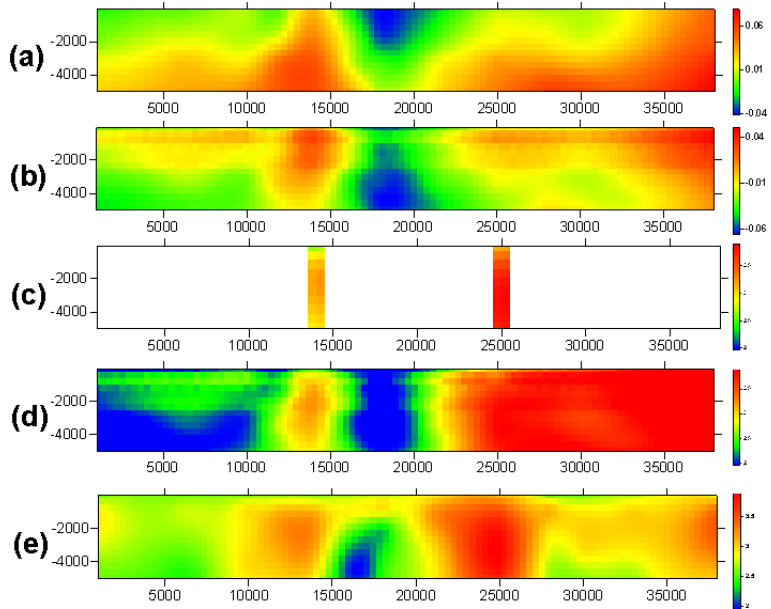


Fig. 7. Results of the integrated analysis of gravity and MT data. (b) shows edited density distribution by layer density correction with gravity inversion(a) and MT 1-D inversion(c) which was analyzed by only 2 points data. (d) shows integrated resistivity distribution using simple kriging with varying local means and (e) show 2-D MT inversion section which was analyzed by 13 points data.

MT 자료의 양이 적더라도 높은 상관관계를 나타내고 있어(Fig. 7), 기법의 적용 가능성을 확인 할 수 있었다.

3. 결론

이번 연구에서는 정밀도가 높지만, 많은 경제적 비용과 노력이 필요하고 잡음에 민감한 MT 탐사의 자료처리에 있어서 보다 타당한 해석을 수행하기 위하여, 저비용으로 광역적인 지역에서 큰 잡음 없이 자료를 획득할 수 있는 중력 자료 해석 결과를 이용하여 지구통계학적 복합 해석을 수행 하였다. 이 과정에서 중력 해석 결과를 보다 지질 구조에 민감하게 변환하기 위하여 수직 분해능이 좋은 MT 자료와 수직방향의 상대 베이오그램 분석을 수행하여 보정하였다. 그 결과 지질 경계의 공간적 분포에 대한 두 해석 결과의 상관관계가 증가 하였으며, 복합 해석을 통해서 보다 타당성 높은 광역 구조 해석을 수행할 수 있었다.

향후, 본 연구 기법을 이용하여 한반도와 같이 인공적인 전기 잡음이 많은 환경에서 수직 분해능 및 정밀도가 높은 MT 자료의 획득 및 처리를 수행할 경우, 일반적으로 환경적 잡음에 의한 영향이 적고 넓은 지역에서 적은 비용으로 탐사가 가능한 중력 자료를 이용하여 보다 향상된 결과를 획득 할 수 있을 것이다.

또한, 비단 MT 자료 해석 뿐만 아니라 탄성파와 같이 수직 분해능이 좋고 비용적, 지역적 제한 조건이 존재하는 탐사 기법의 해석에 있어서 지질 경계에 민감한 밀도 구조해석을 통해 보다 향상된 해석 결과를 해석하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 신진교수 연구지원 사업인 “지구통계학적 베이지안 방식에 의한 이종 물리탐사 및 보조 자료의 복합 역산 연구”와 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2006-000-10847-0).

참고문헌

- Goovaert, P., 1997, *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Oxford, 483 p.
- Oh, S., Chung, H., Lee, D.K., 2004, Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation, *Environmental Geology*, **46**,1070-1078