

심부 석탄층 탐사에 있어서 CSAMT 탐사법 적용

정승환^{*}· 김정호^{*}· 전정수^{*}

The Application of CSAMT to Deep-seated Coal Seams Exploration.

Seung-Hwan Chung*, Jung-Ho Kim*and Jeong-Soo Jeon*

Abstract: Controlled source audio-frequency magnetotelluric (CSAMT) has the great advantage of efficient mapping resistivity distribution and relatively deep depth of investigation. Moreover, CSAMT may be regarded more attractive than audio-frequency magnetotelluric in the sense of the strong and controllable signal. However, it has the problem such as undershoot and/or near-field effect that is hard to be interpreted if the interpretation method of MT is directly applied. The problem arises from the existance of controlled source which makes CSAMT attractive. So the characteristics of CSAMT response should be thoroughly understood prior to interpretation stage.

In this study, numerical modeling program for horizontally layered earth was developed for the interpretation of CSAMT field data.

CSAMT field survey was run as a follow-up to resistivity dipole-dipole study over the same survey line at Bongmyung coal mine. The survey used a grounded dipole source 2 Km in length and located 7.5Km south in this study. A good agreement between field CSAMT data and calculated data was demonstrated even in geologically complex earth situations.

서 론

근자에 들어 국내에서는 채탄의 심부화, 심부 금속광상의 확보, 온천 및 지열탐사등에 심부물리탐사 방법의 확립의 필요성이 대두되고 있다. 이와 같은 목적을 위해 주로 사용되는 물리탐사법은 쌍극자 배열 또는 Schlumberger 배열 전기 비저항 탐사, 가청주파수 대역 MT (Audio-frequency magneto-telluric, AMT) 탐사등이 있다. 국내에서는 가탐심도 약 1 km 미만의 탐사를 위해 근래에 들어 쌍극자 배열 비저항 탐사는 활발히 사용되고 있으나 AMT 탐사는 사용되지 않고 있으며 변형의 하나인 ELF-MT (민경덕 외, 1988)는 지질조사 목적으로 적용된다. 전기 비저항 탐사는 현장작업이 어려우며 상대적으로 시간이 많이 소요된다는 단점을 갖는다. 이에 반해 AMT 탐사는 지구 대기권에서 발생되는 천동, 번개등에 의한 자연 전자파를 그 파원으로 사용하므로 시간적으로,

계절적으로 변동이 심하여 측정이 불가능할 때가 많다. 뿐만 아니라 자연 전자장의 방향이 시간에 따라 변하므로 텐서(tensor) 측정을 필요로 한다. 이러한 AMT 탐사에 대한 문제점을 보완하기 위해 도입된 탐사법이 AMT의 자연장 대신에 인공 전자파원을 사용하는 CSAMT (controlled source AMT) 탐사이다. CSAMT 탐사는 1971년에 Goldstein에 의해 제안된 이래 금속광상탐사(Goldstein and Strangway, 1975), 지열탐사(Sandberg and Hohmann, 1982; Yamashita and Hallof, 1985; Bartel and Jacobson, 1987) 등을 위해 최근에 들어 실용화되고 있는 최신 물리탐사법 중 하나이다. 뿐만 아니라 이웃 일본에서는 CSAMT 탐사를 이용하여 대규모 온천형 금광의 발견에 성공한 바가 있다 (Kawasaki et al., 1986).

국내에서는 최근 2~3년 동안 한국동력자원연구소 탐사개발연구실에 의해 실험적인 CSAMT 탐사가 시도되었을 뿐이다. 본 연구에서는 심부 물리탐사법의 확립의 일환으로 이미 물리탐사가 수행되었던 봉명탄전지역에서 실시하였으며, 국내에서의 CSAMT 탐사 적용성 문제를 검토하였다.

* 한국동력자원연구소 탐사개발연구실(Korea Institute of Energy and Resources P. O. Box 5 Daedeok, Science Town, Doejeon, Korea)

CSAMT 탐사의 기초이론

AMT 및 MT 탐사는 자연장을 그 에너지원으로 이용하므로 신호가 대단히 약할 경우가 많기 때문에 잡음이 함유될 소지가 많고 파원의 방향을 알 수 없으며 시간적으로 그 방향 및 세기가 변한다는 약점을 갖는다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 자연 전장을 에너지원으로 사용하는 대신에 수 km 이하의 양단을 접지한 긴 전선에 전류를 흘려 이를 에너지원으로 사용하는 방법이 시도되었다. 현재 일반적으로 사용되는 CSAMT 탐사의 주파수 대역은 0.1~1,000Hz이다. CSAMT 탐사의 강점은 강력한 에너지원을 사용한다는 데에 있으며 이에 연유하는 장점은 다음과 같다(Yamashita, 1984).

1. 신호가 강력하므로 MT 혹은 AMT 탐사에 사용되는 측정장비와 같이 민감한 수신장비가 필요없을 뿐 아니라 S/N비가 AMT에 비해 대단히 높다.
2. 신호원의 방향 및 세기를 알 뿐만 아니라 제어가 가능하므로 통상적인 신호처리 기법 및 enhancement 기법의 채용이 더욱 더 효율성을 갖게 된다.
3. 따라서 CSAMT 탐사의 속도가 AMT 탐사에 비해서 상당히 빠르다.

한편 CSAMT 탐사의 문제점 또한 인공 에너지원을 사용한다는 점에서 연유한다. 즉 CSAMT 탐사자료의 처리 및 해석은 MT 자료의 해석방법을 이용하게 되는데, 이는 평면파라는 근본적인 가정의 도입을 필요로 한다. Goldstein and Strangway(1975)는 표피심도(skin depth) 3배 이상의 거리에서는 평면파 근사가 가능함을 밝혔다. 그러나 저주파 대역에서는 이와 같은 표피심도의 3배라는 거리가 불

가능하게 되며, 따라서 소위 근접장 영역에 속하게 된다. 국내의 경우와 같이 비저항이 상당히 높은 지질학적 환경에서는 이와 같은 근접장 영역에 속하는 주파수 대역이 상당히 중대된다. 전 주파수 대역에서 원거리장 영역에 속하기 위해서는 에너지원과 측정점과의 거리를 증대시킬 수 밖에 없으나, 이는 신호 강도의 기하급수적인 감소를 초래하며 CSAMT 탐사의 최대 강점인 강한 신호라는 장점을 잃어버리게 된다.

CSAMT 탐사는 전기장 및 자기장을 측정한다는 점에서 MT 탐사와 동일하나 MT 혹은 AMT 탐사가 텐서 측정을 필요로 하는 반면에 CSAMT 탐사는 전기장 및 자기장 각각의 단일 성분만을 측정함으로써 가능하다. 이는 CSAMT 탐사에서는 에너지원의 방향을 알고 있기 때문에 가능하게 된다. 일반적으로 측정되는 성분은 에너지원인 선전원의 방향을 x축으로 할 때 전기장은 이와 나란한 성분(Ex component)이 측정되며, 자기장은 이에 수직인 성분(Hy component)을 이용한다(Fig. 1). 측정된 Ex 및 Hy로부터 겉보기 비저항 및 위상차(phase difference)를 계산하여 이를 이용하여 해석한다. CSAMT의 겉보기 비저항은 MT에 사용되는 Cagniard 비저항을 사용하여 계산식은 다음과 같다.

$$\rho_a = \frac{1}{\mu \omega} \left| \frac{Ex}{Hy} \right|^2 \simeq \frac{1}{5f} \left| \frac{Ex}{By} \right|^2 \quad (1-a)$$

$$\phi = \phi_E - \phi_H \quad (1-b)$$

where ρ_a : apparent resistivity in ohm-m

Ex: E-field magnitude in mV / Km

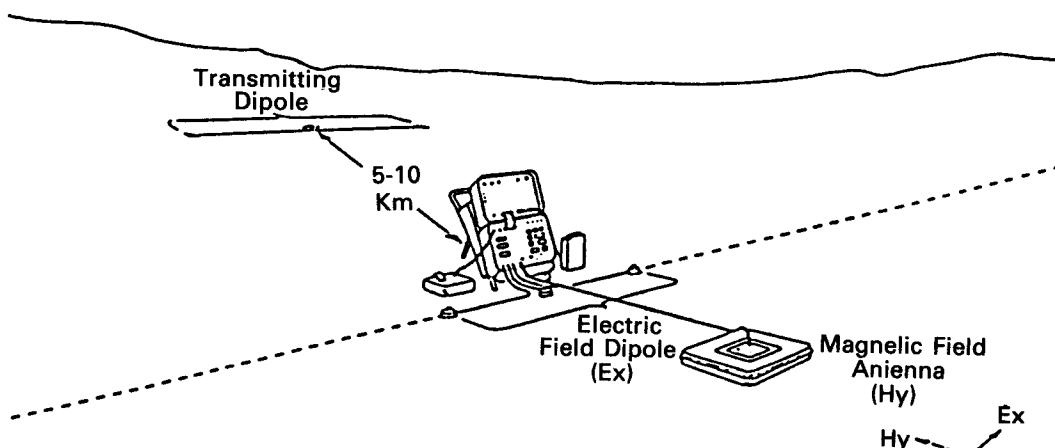


Fig. 1. Schematic illustration of CSAMT survey.

By : magnetic flux density in milli-gamma
 Hy : H-field magnitude in Ampere / meter
 ω : angular frequency
 μ : magnetic permeability in vacuum
 ϕ_E : E-field phase
 ϕ_H : H-field phase

CSAMT 탐사자료의 해석

전 절에서 논한 CSAMT 탐사자료 해석상의 난점을 극복하기 위해 본 연구에서는 CSAMT 탐사의 수치 모델링 방법을 이용하여 해석의 정확성을 기하였다.

CSAMT 탐사는 양단을 접지한 유한 길이 직선 전류 파원에 대한 전자반응의 문제이다. 이러한 문제에 대한 좌표계와 모형은 Fig. 2와 같으며 각 층은 전자기적인 물성인 유전율, 투자율 및 전기전도도로 표시되나, 본 연구에서는 편의상 각 층의 유전율 및 투자율은 전공의 물성과 같다고 가정하고 단지 전기전도도만이 지층에 따라 변화한다고 가정한다.

편의상 x축을 전자파원인 직선 전류 파원의 방향과 일치시키고 원점을 파원의 중심에 위치시키면, CSAMT 탐사는 지표상 임의의 좌표 $(x, y, 0)$ 에서의 x 성분 전기장 E_x 와 y 성분 H_y 를 구하는 문제로 귀착된다. 유한 선 전자파원에 대한 전자반응의 문제는 다음과 같이 전기 쌍극자 전자파원에 대한 전기, 자기장 성분의 선적분으로 표시될 수 있다(Anderson, 1974).

$$\begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \\ H_x & H_y & H_z \end{bmatrix}_{\text{line}} = \int_{-L/2}^{L/2} \begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \\ H_x & H_y & H_z \end{bmatrix}_{\text{dipole}}$$

윗식의 피적분항인 전기쌍극자 파원에 대한 E_x , H_y 이론해를 이용하여 CSAMT 탐사 자료 수치 모델링을 위한 전산 프로그램을 작성하였다.

해석은 현장탐사자료와 1차원 수평다층구조에 대한 전산 프로그램에 의한 이론자료의 차이가 없을 때까지 수회 반복하는 시행착오적 방법(trial and error)을 사용하였다.

CSAMT 탐사자료의 1차적인 해석의 시작은 쌍극자배열 전기 비저항 탐사와 마찬가지로 겉보기 비저항 가단면도를 작성하는 것이다. CSAMT 탐사자료의 가단면도 작성 원리는 저주파수는 심부의 자료에 고주파수는 천부의 자료에 대응됨에 있다. 이는 쌍극자 전기 비저항 탐사에서 전위전극과 전류전극간의 거리와 심도와의 관계와 같다. 따라서

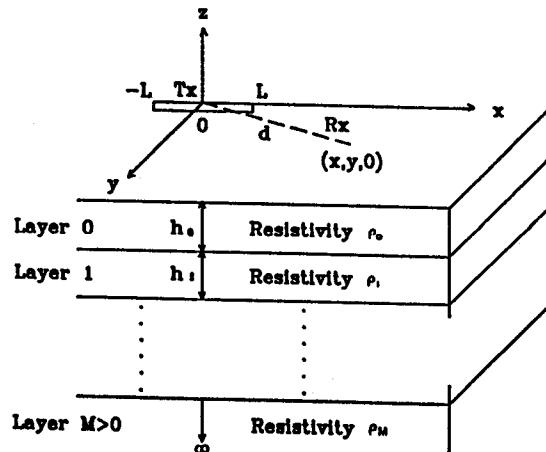


Fig. 2. Coordinate system of n-layered isotropic earth model and source-receiver configuration.

CSAMT 탐사자료의 가단면도상에서 가로축은 측점, 세로축은 주파수이며 세로축의 주파수는 밑으로 갈수록 저주파가 된다. 단일 측점에서 각 주파수에 대해 전기장 및 자기장을 측정하여, 이로부터 (1)식을 이용하여 겉보기 비저항 및 위상차를 계산하여 가단면도를 작성한다.

석탄층 탐사에 CSAMT 탐사법 적용

국내에서의 CSAMT 탐사 적용성을 검토하기 위해 CSAMT 탐사를 수행하고 CSAMT 수치 모델링을 컴퓨터 대화식을 이용하여 정량해석을 하였다(정승환 외, 1989). 시험탐사를 위해 선정된 지역은 자료의 비교목적을 위해 1987년 항내출수 문제에 대한 전기 비저항 탐사의 적용성을 연구하기 위해 쌍극자 배열 탐사가 수행된 봉명탄전 지역이며 탐사가 수행된 측선 및 송신원의 위치는 Fig. 3과 같다(정승환 외, 1988). 송신 전류원의 길이는 약 2km이며, 자료가 취득된 측선 BM-1과 송신원 사이의 거리는 약 7.5km에 이른다. 전자장 측정을 위한 전극 간격은 100m이고, 측정 성분은 송신원과 나란한 방향인 E_x 성분이며, 자장 성분은 이에 수직인 H_y 성분이다. 측정된 주파수는 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 Hz의 10개 주파수이다. Fig. 4는 탐사 결과 획득된 Cagniard 겉보기 비저항 가단면도를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 CSAMT 자료의 전반적인 겉보기 비저항의 분포는 측점 23에서 35까지 걸쳐 발달되는 고비저항대와 그 우측의 측점 37에서 51에 걸치는 저비저항대로 확연히 구분됨이 특징적이다. 측점 21 하부에는

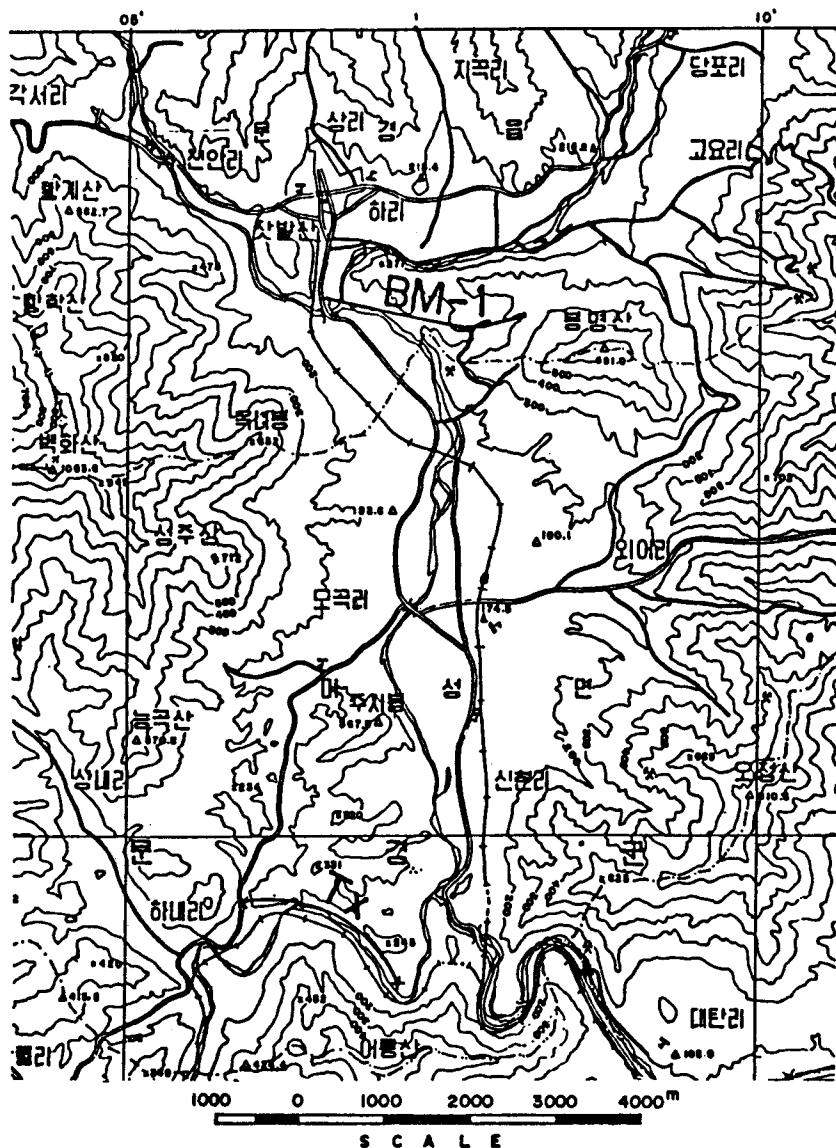


Fig. 3. Location map of source and survey line for CSAMT in the vicinity of Bong Myung Coal mine. Tx : Transmitter, BM-1 : Survey line

256Hz에서 2048Hz 주파수 대역에서 저비저항대가, 측점 37에서 51하부에는 64Hz에서 512Hz 주파수 대역에서 저비저항대가 출현한다. 측점 37과 39에는 64Hz에서 2048Hz까지 상당히 낮은 비저항대가 발달된다.

CSAMT 탐사 자료 모델링 방법은 수평다층 구조에 대해서만 개발되었으므로 좀 더 정교한 2차원 해석을 위해서는 사용이 불가능하며 MT 탐사 모델링이나 역산 기법을 사용할 수 밖에 없다. 이러한 면에서도 근접장 보정이 의

미를 갖으며, 상기한 문제점을 해결할 수 있는 해석 방법이나, 보정 방법에 대한 연구가 기대된다. 그러나 undershoot 효과가 그다지 심하지 않을 경우는 근접장 보정을 통한 MT 해석이 계산시간면에서나 2차원 해석이 가능하다는 면에서 추천된다(정승환 외, 1989).

Fig. 5는 수평다층 구조, 즉 1차원 지하모형에 대해 각 측점의 주파수에 대한 겉보기 비저항의 변화로 부터 계산된 지하 비저항 분포도이다. Fig. 6은 Fig. 5의 비저항 분

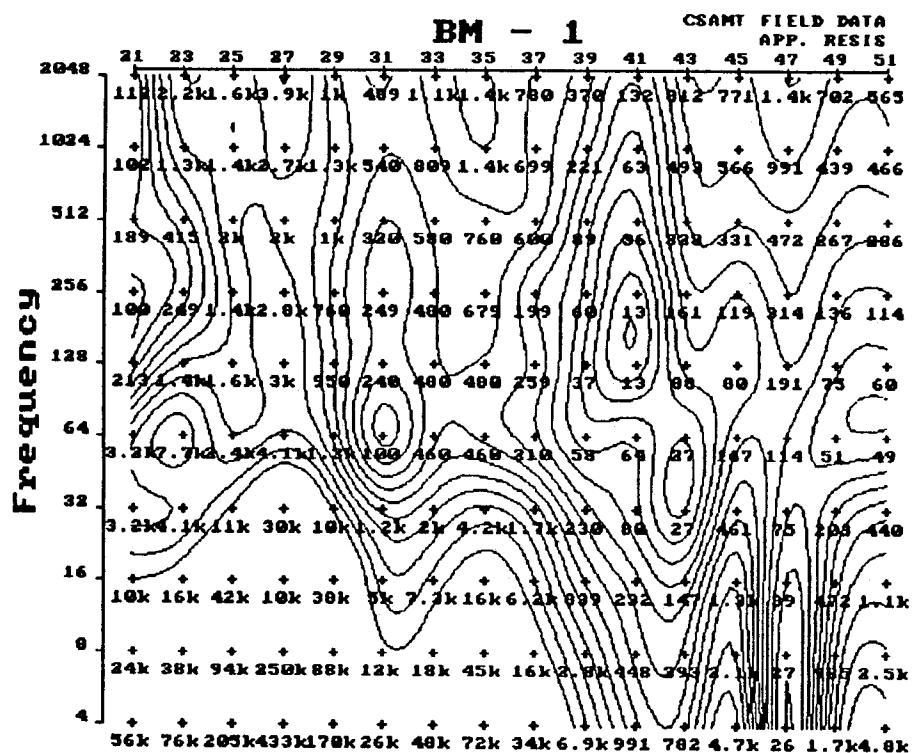


Fig. 4. Contour of CSAMT apparent resistivity field data.

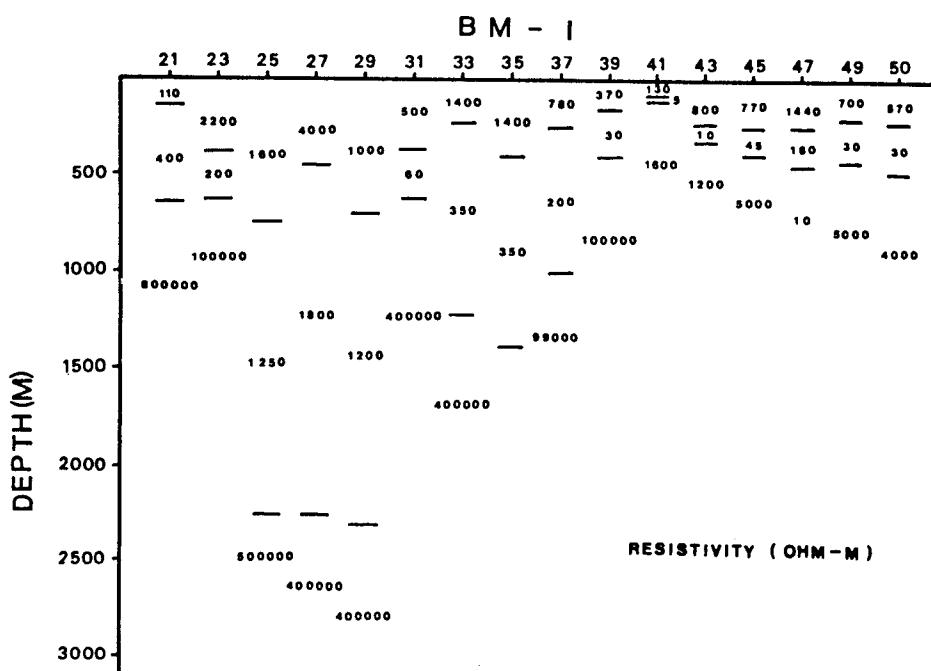


Fig. 5. Interpreted resistivity distribution using interactive CSAMT computer modeling.

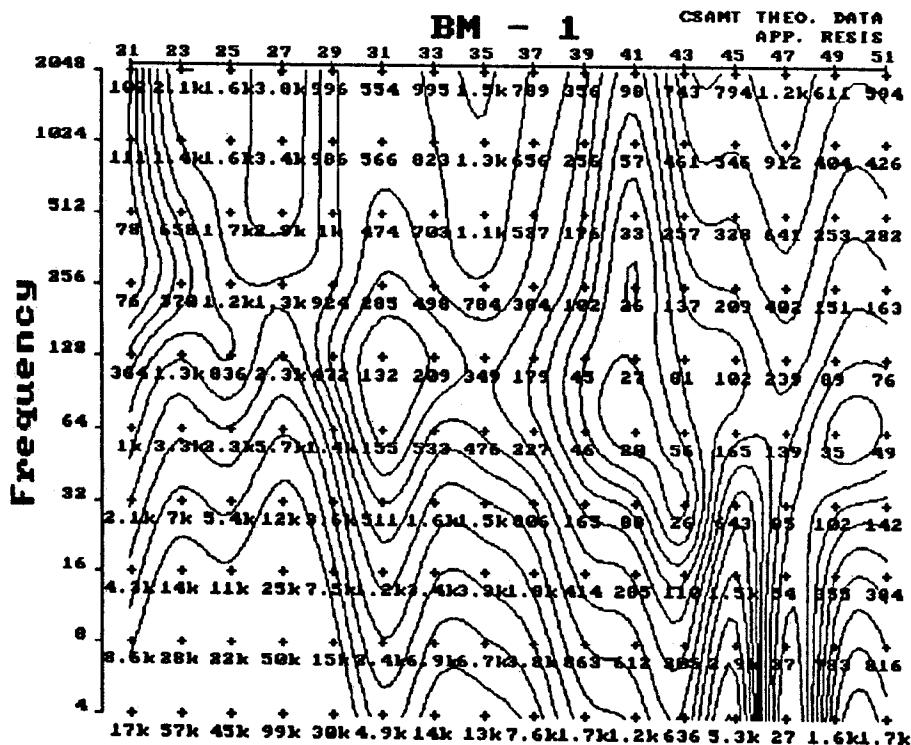


Fig. 6. Contour of theoretical CSAMT apparent resistivity calculated from the model shown in Fig. 5.

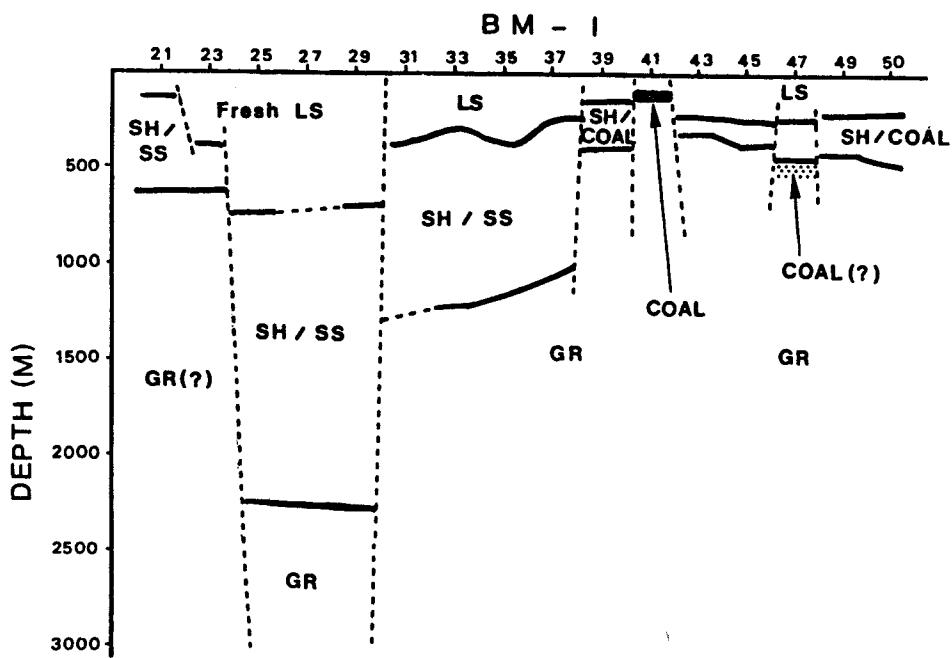


Fig. 7. Geology interpretation of line BM-1 at Bongmyung coal mine.

포도를 기본으로 다시 수치모델링을 통해 계산된 이론자료이다. 실측자료인 Fig. 4와 이론자료인 Fig. 6을 비교하면 이론자료가 실측자료에 비해 전반적으로 부드러운 느낌을 주나 세세한 부분까지 상당히 잘 부합됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 5의 해석된 비저항 분포도가 적절함을 의미한다고 하겠다.

Fig. 7은 지하 비저항 분포도 Fig. 5를 기본으로 하여 추정한 지질 단면도이다. 측점 21에서 측점 31까지의 구간에서 지표에서 심도 500m까지 연장되어 있는 $1000\text{ohm}\cdot\text{m}$ 이상의 제1층 고비저항은 신선한 석회암층에, 그 하부의 약 1.5km까지의 1층보다는 낮은 비저항은 세일(shale) 또는 사암층에 해당되며, 그 하부의 기반암을 형성하는 고비저항 대는 화강암의 발달로 추정된다. 측점 31에서 37까지의 구간은 동일한 암층으로 구성되나 석회암층으로 추정되는 제1층의 두께는 200~300m, 그 하부의 세일 또는 사암층으로 생각되는 제2층의 두께는 800~1000m로서 인접 지역과 각 층의 심도 및 그 층후가 급격한 차이가 발생한다. 이는 단층등에 의해 측선 31에서 37 사이의 하부 지역이 좌측에 비해 상대적으로 상승한 것으로 해석된다. 상기한 측점 37 우측의 저비저항 이상대 지역에서 수십 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ 의 낮은 전기 비저항을 갖는 제2층은 석탄 또는 탄질 세일의 협재에 의한 것으로 추정된다. 특히 본 지역의 저비저항 이상대 중 가장 천부에 발달하는 측점 41 하부 70m 심도의 $50\text{ohm}\cdot\text{m}$ 비저항은 석탄층에 의한 것으로 생각된다. 본 구간의 화강암으로 추정되는 수천 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ 이상의 제3층은 그 심도가 약 300~400m 하부에 발달되며 이는 측점 37 좌변부의 약 1km 하부에 발달되는 화강암으로 추정되는 기반암과 대응된다고 가정하면, 이는 단층 등의 구조적 활동에 의해 상승된 것으로 생각된다. 측점 47 하부에는 $100\text{ohm}\cdot\text{m}$ 의 낮은 비저항 층이 450m의 상대적으로 심부에 발달함이 특기할 만한 사실이며, 이는 심부에 존재하는 석탄층 내지는 탄질 세일층의 존재를 의미한다고 해석된다. 본 저비저항층이 제3층으로 해석되었으나, 그 하부 심부에 주변부 기반암에 대응되는 층이 존재할 것으로 사료되며, 이러한 지층이 CSAMT 탐사자료에 나타나지 않는 것은 심부의 낮은 저비저항층 효과에 가려져서 반응이 감지되지 못한 때문으로 추정된다.

결 론

심부 물리탐사법의 개발을 위해 약 1km 이상의 가탐심도

를 갖는 CSAMT 탐사법의 국내의 적용성 및 국내 실정에 맞는 해석접근 방법에 대한 연구가 시도되었다. 국내 환경에의 CSAMT 탐사법의 적용성을 검토하기 위해 봉명 탄전지역에서 CSAMT 시험탐사가 실시되고 이의 정량해석을 시도하였다.

CSAMT 탐사법은 국내의 높은 비저항의 전기적인 지질학적 환경에도 불구하고 심부지하 구조를 밝히는데 상당히 효율적이고 성공적으로 적용될 수 있으며 심부 탐사를 위해 적극 활용되리라 기대된다.

참 고 문 헌

- 민경덕, 전정수, 정승환, 1988, 옥천대내 신당-도전리 지역에 대한 ELF-MT 탐사 연구, 광산지질, v. 21, pp. 277~285.
 정승환, 김정호, 1989, A 수평다층구조에 대한 CSAMT 탐사의 수치모델링에 관한 연구, 탐사기술개발연구, KR-88-2D-2, 한국동력자원연구소.
 정승환, 김정호, 1989년, B. CSAMT 탐사자료의 근접장 보정과 해석에 관한 연구, 탐사기술개발연구, KR-88-2D-2, 한국동력자원연구소.
 정승환, 김정호, 서재영, 1988, 탄전지역 단층, 파쇄대 탐지를 위한 전기 비저항 탐사 적용성 연구, 탐사기술개발연구, KR-87-11, 한국동력자원연구소.
 Anderson, W. L., 1974, Electromagnetic fields about a finite wire source, U. S. G. S. Rep., GD-74-041.
 Bartel, L. C. and Jacobson, R. D., 1987, Results of a controlled-source audio-frequency magnetotelluric survey at the Puhiimau thermal area, Kilauea Volcano, Hawaii, Geophysics, v. 52, pp. 665-677.
 Goldstein, M. A. and Strangway, D. W., 1975, Audio-frequency magnetotelluric with a grounded electric dipole source, Geophysics, v. 40, pp. 669-683.
 Kiyoshi Kawasaki, Kazuya Okada and Ryo Kubota, 1986, Geophysical surveys in the Hishikari mine area, Mining Geology, v. 36, pp. 131-147 (in Japanese).
 Sandberg, S. K. and Hohmann, G. W., 1982, Controlled-source audio magnetotellurics in geothermal exploration, Geophysics, v. 47, pp. 100-116.
 Yamashita, M., 1984, CSAMT controlled source audio magnetotellurics, Phoenix Geophysics Limited.
 Yamashita, M. and Hallot, P. G., 1985, CSAMT case histories with a multichannel CSAMT system and discussion of near-field data correction, the 55th SEG Annual Meeting, Washington D. C.