



## VLF 전자탐사 자료의 해석

김희준<sup>1)</sup> · 남명진<sup>2)</sup> · 송윤호<sup>3)</sup> · 서정희<sup>2)</sup>

### Simple Interpretation of VLF Data

Hee Joon Kim<sup>1)</sup>, Myung Jin Nam<sup>2)</sup>, Yoonho Song<sup>3)</sup> and Jung Hee Suh<sup>2)</sup>

**요약** : VLF 주파수 평면파에 대한 지하의 반응을 지배하는 요소들을 물리적으로 간단히 설명하고자 하였다. VLF 법은 비록 탐사심도나 사용 주파수의 제한과 같은 심각한 단점들도 있지만, 지금까지 가장 흔하게 사용되어 온 전자탐사법으로 장점 또한 대단히 많다. 자기장 측정 모드의 경우 가볍고 값싼 장비 덕분에 넓은 영역에서 지하의 전도체를 신속하게 탐사하는데 유용하다. VLF 법을 전기장 모드에서 적용하면 비록 단순하지만 정량적 해석이 가능하며, 저렴한 장비와 신속한 현장작업이라는 장점 덕분에 개략탐사용으로 탐사 초기에 적합하다.

**주요어** : VLF, 전자탐사, 개략탐사

**Abstract** : We have attempted to give some physical insight into the factors that control the response of subsurface target to plane wave excitation at VLF (very low frequency) frequencies. Although the VLF technique has some serious disadvantages, such as a lack of penetration depth and limited frequencies, its advantages are also extremely important to have made it by far the most popular electromagnetic technique in current use. In the magnetic-field measurement mode these lightweight, relatively low-priced tools allow us to survey large areas rapidly and inexpensively, to locate and roughly define subsurface electrical conductors. When used in the electric-field mode the technique is, in simple environments, capable of quantitative interpretation and once again the speed and relative cheapness of these devices makes them a natural "first electromagnetic tool" to use in reconnaissance mapping.

**Keywords** : VLF, electromagnetic technique, reconnaissance mapping

## 서론

VLF (very low frequency) 탐사는 세계 곳곳에 있는 VLF 송신소에서 발신하는 전자기파를 이용하여 지하의 전기전도도 구조를 유추하는 개략탐사 방법 중 하나이다. 이 방법은 탐사를 위한 별도의 인공적인 송신원이 필요 없고, 송신원의 방향이나 출력이 일정하며 측정이 간편하다는 장점이 있다. 따라서 탐사 대상이 비교적 지하 천부인 경우나 탐사 범위를 한정하는 mapping의 경우에 적합한 방법이다. 국내에서도 경상 분지에서 지층의 수평적 경계 구분, 단층 등의 지질구조 파악, 광상 탐사 등에 적용된 바 있다(송영수 등, 1992; 송영수 등, 1993a; 1993b; 1994; 송영수 등, 1996). 그러나 VLF 탐사는 송신원의 위치, 주파수, 발신시간을 마음대로 선택할 수 없으며, 이상체의 전기전도도나 심도에 대한 정량적 해석이 쉽지 않다

는 한계점도 지니고 있다.

VLF 탐사에는 자기장의 수직과 수평 성분을 측정하는 VLF-EM 법과 전기장과 자기장의 수평성분을 측정하는 VLF-MT 법이 있다. VLF 탐사의 이론으로는 McNeill and Labson (1991)의 해설이 잘 알려져 있으며, 최근에는 Sampaio and Dias (2001)에 의해 단층 및 암맥(dike) 모델에 대한 표준 곡선이 발표되었다. 본지에서도 이미 McNeill and Labson (1991) 해설의 일부를 요약한 것에 ABEM WADI Instruction Manual을 간추린 내용을 추가한 간단한 해설이 나온 바 있다(편집실, 1999). 그러나 최근에 바뀐 VLF 송신곡에 관한 내용이 누락되어 있고, 내용면에서도 다소 미흡한 부분들이 발견되어 본보에서는 이에 대해 수정 보완을 시도하고자 한다. 그리고 VLF 평면파에 대한 지하의 반응을 지배하는 물리적인 요소들에 대해 중점적으로 설명하고자 한다.

\*2005년 1월 21일 접수

1) 부경대학교 환경탐사공학과(Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University) hejkim@pknu.ac.kr

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University)

3) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부(Ground Water and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

## 이론

### VLF 전자기파란?

일반적으로 통신 등에 많이 이용되는 전자기파(electromagnetic wave)는 Table 1과 같이 주파수 대역에 따라 각기 다른 이름으로 불린다. 이중 VLF 파는 3~30 kHz의 주파수 대역으로 비교적 감쇠율이 낮고 해양으로의 침투심도가 깊어서 항공기나 잠수함 등의 항해에 도움을 주기 위한 방송 및 통신에 이용되어 왔다. 그러던 중 이 전자기파의 전파(propagation)가 땅의 전기전도도에 영향을 받는다는 사실이 알려지면서 지구물리학적 관심을 끌게 되었다.

VLF 송신소는 세계 각지에 존재하며 그곳에서 항상 큰 전력으로 전자기파를 발신하고 있다. 그 중 대표적인 곳은 Table 2와 같다(다만, 송신 여부나 주파수가 자주 바뀌는 경향이 있어 탐사 시에는 인터넷 등으로 확인하는 것이 바람직함). 국내에서의 VLF 탐사를 위해서는 일본의 JJI 송신소에서 송출하는 전자기파를 주로 이용하게 되지만, 조건이 좋으면 미국 하와이의 NPM, 호주의 NWC도 이용할 수 있다.

### VLF 파의 전파

VLF 송신소의 송신 안테나는 일반적으로 수직 전기쌍극자(vertical electric dipole)로 생각할 수 있으며, 이 안테나에 교류 전류를 흘려주면 전자기파를 방사하게 된다(Fig. 1). 이렇게 방사되는 전자기파는 공기 중에서 두 성분(x 및 z 성분)의 전기장과 한 성분(y 성분)의 자기장이 전파하는 형태를 띠게 된다. 이 전자기파는 전리층과 땅 사이에서 연속적으로 반사되면

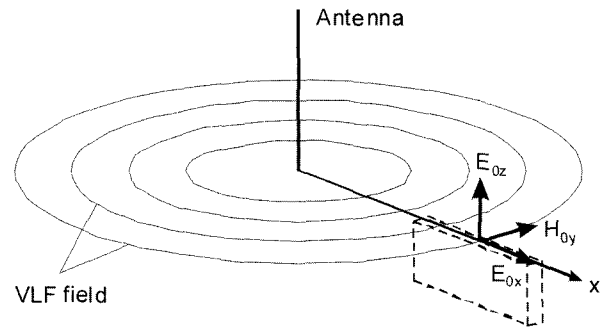


Fig. 1. Principle of VLF method (redrawn from Kearey *et al.*, 2002). Dashed lines show a tabular conductor striking towards the antenna which is cut by the magnetic vector of the electromagnetic field.

서 전파하는 가이드파(guided wave) 형태로 존재하며, 송신소에서 멀어짐에 따라 전자기장의 크기가 거의 일정한 평면파에 가까워진다.

한편 공기 중에서 거의 수평 방향으로 전파하던 전자기파는 땅에 입사되면 땅과 공기의 전기전도도 차이가 매우 크기 때문에 거의 수직으로 전파한다. 이때 땅속에서는 공기에서와는 다르게 전기장의 수직성분은 거의 0이 되는데 이것으로 경계면에서 수직 전류밀도가 연속이라는 경계조건이 만족됨을 알 수 있다.

VLF 전자기장을 좀 더 정량적으로 알아보기 위하여 각 성분을 수식으로 나타내면 지표면( $z=0$ )에서는 다음과 같다 (McNeill and Lobson, 1991).

$$H_{oy} = 2a_0 \cos \omega t \tag{1}$$

$$E_{ox} = 2a_0 |\eta_1| \cos(\omega t + \pi/4) \tag{2}$$

$$E_{oz} = 2a_0 \eta_0 \cos \omega t \tag{3}$$

여기서 첨자 0과 1은 각각 공기층과 땅을 나타내며,  $a_0$ 는 입사 자기장의 세기,  $\omega (= 2\pi f)$ 는 각주파수, 그리고  $\eta$ 는 임피던스 ( $\Omega$ , ohm), 즉

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi, \quad |\eta_1| = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\sigma_1}}$$

이다. 여기서  $\mu$ ,  $\epsilon$  및  $\sigma$ 는 각각 투자율, 유전률 및 전기전도도를 나타낸다. 단, VLF 주파수 대역에서는 변위전류(displacement current)를 무시할 수 있는 것으로 가정하였다(준정적 근사, quasi-static approximation). 식(1)~(3)에서 보면 공기 중에서는  $E_{ox}$ 가  $H_{oy}$ 와  $E_{oz}$ 에 비해 위상이  $\pi/4$ 만큼 앞선다는 것을 알 수 있다. 또한  $H_{oy}$ 와  $E_{oz}$ 는 매질의 전기전도도와는 무관하고,  $E_{ox}$ 는 매질의 전기전도도가 크면 작고, 전기전도도가 작으면 커짐을 알 수 있으며, 이를 도시하면 Fig. 2와 같다.

한편 전기전도도가  $\sigma_1$ 인 땅속을 (거의 수직으로) 전파하는 자기장 성분  $H_{1y}$  및 전기장 성분  $E_{1x}$ 는 각각 식(4) 및 (5)와 같

Table 1. Electromagnetic wave bands.

Band	Frequency
SHF	3 ~ 30 GHz
UHF	0.3 ~ 3 GHz
VHF	30 ~ 300 MHz
HF	3 ~ 30 MHz
MF	0.3 ~ 3 MHz
LF	30 ~ 300 kHz
VLF	3 ~ 30 kHz
ELF	3 ~ 3,000 Hz
ULF	< 3 Hz

Table 2. VLF stations and frequencies.

Station	f (kHz)	Latitude	Longitude	Location
NLK	24.8	48°12' N	121°55' W	Seattle, USA
NAA	24.0	44°39' N	67°17' W	Cutler, USA
JJI	22.2	32°03' N	130°52' E	Ebino, Japan
NPM	21.4	21°25' N	158°09' W	Lualualei, USA
NWC	19.8	21°56' S	114°07' E	North West Cape, Australia
HWU	18.3	46°42' N	1°15' E	Le Blanc, France
GBR	16.0	52°22' N	1°11' W	Rugby, UK

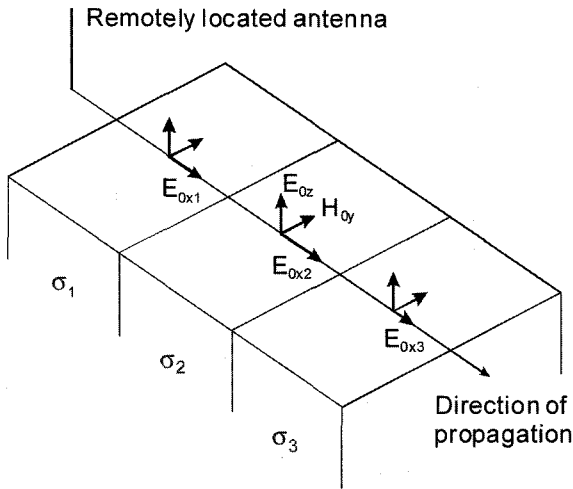


Fig. 2. Wave propagating over ground of variable resistivity assumed to change slowly and smoothly from one region to the next (redrawn from McNeill and Labson, 1991).  $E_{0x2} > E_{0x1} > E_{0x3}$  for  $\sigma_3 > \sigma_1 > \sigma_2$ .

이 나타낼 수 있다.

$$H_{1y}(z,t) = 2a_0 e^{-z/\delta_1} \cos\left(\omega t - \frac{z}{\delta_1}\right) \quad (4)$$

$$E_{1x}(z,t) = 2a_0 |\eta_1| e^{-z/\delta_1} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \frac{z}{\delta_1}\right) \quad (5)$$

여기서

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma_1}}$$

는 표피심도(skin depth)이다.  $E_{1x}$ 의 경우 위상이  $\pi/4 - z/\delta_1$ 로 깊이  $z$ 에 따라 위상이 달라짐을 알 수 있다. 이를  $H_{0y}$ , 즉  $\cos\omega t$ 를 기준으로 동상(in-phase)과 이상(quadrature)성분으로 분리하면 식(6)과 같이 된다.

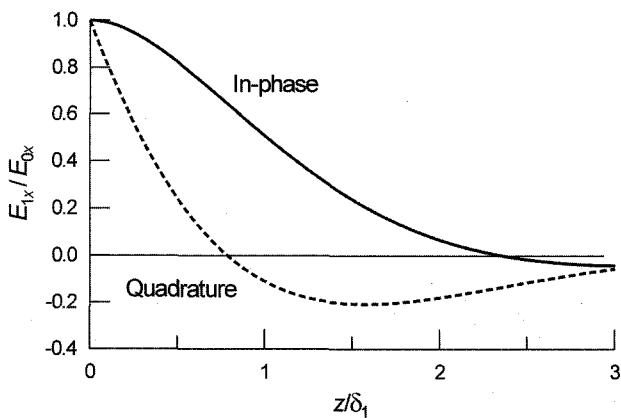


Fig. 3. Behavior of in-phase and quadrature components of horizontal electric field (normalized with respect to its amplitude at the surface) as a function of depth.

$$E_{1x}(z,t) = 2a_0 |\eta_1| e^{-z/\delta_1} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{z}{\delta_1}\right) \cos\omega t - 2a_0 |\eta_1| e^{-z/\delta_1} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{z}{\delta_1}\right) \sin\omega t \quad (6)$$

Fig. 3은  $E_{1x}$ 의 동상 및 이상성분을 각각 지표면에서의 진폭으로 정규화한 값을 보여준다. 동상성분은 서서히, 이상성분은 급격히 감쇠하고, 동상성분은  $z/\delta_1 = 3\pi/4$ , 이상성분은  $\pi/4$ 일 때 부호의 역전이 일어난다. 또한  $E_{1x}$  성분은 옴의 법칙(Ohm's law)에 의해  $\sigma_1 E_{1x} = J_{1x}$ 의 전류를 발생시키며 전류밀도  $J_{1x}$ 의 위상 역시  $E_{1x}$ 와 동일하게 된다.

수직자기장 성분( $H_z$ )

앞에서 살펴본 바와 같이 만약 땅이 균질한 매질이라면 땅으로 입사한 VLF 파에는 수직 자기장 성분  $H_z$ 는 존재하지 않는다. 그러나, 지하에 균질하지 않는 전기적인 이상체가 존재하면 수직성분  $H_z$ 가 발생하게 되며, 이  $H_z$ 는 VLF 탐사에서 매우 중요한 요소가 된다(VLF-EM 법). 전기장  $E_{1x}$  성분은 옴의 법칙에 따라 땅속에서  $x$  방향으로 전류를 흘려 보내게 된다. 이 전류는 땅이 균질한 전기전도도를 가지거나 수평 층서(1차원)구조라면 수평 방향으로 균일한 크기로 흐르며, 따라서 수직 자기장 성분은 발생하지 않는다. 그러나 전기비저항이 서로 다른 매질이 2차원이나 3차원적으로 존재하면 상황은 달라진다.

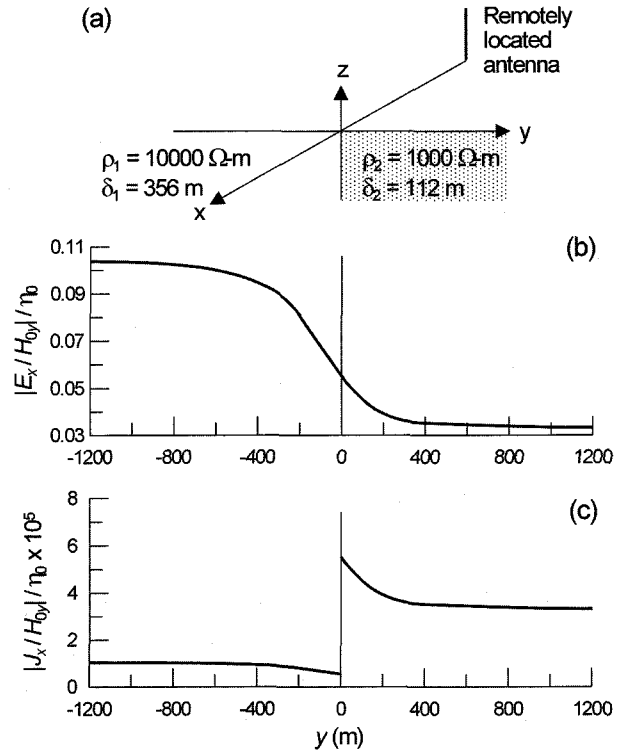


Fig. 4. Variation of horizontal surface electric field (b) and current density (c) across a contact model (a), where  $H_{0y}$  is the undisturbed surface magnetic field far from the contact.

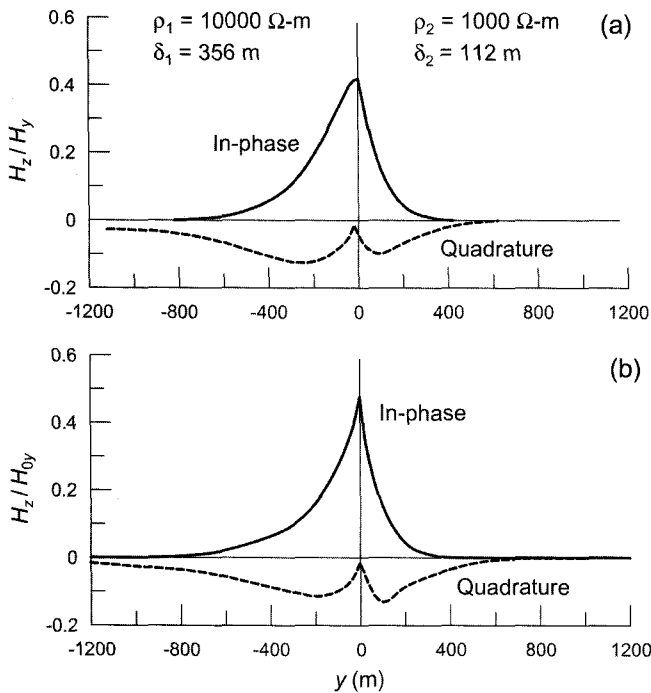


Fig. 5. Variation of vertical magnetic fields (in-phase and quadrature components) normalized by local reference (a) and remote reference (b) across the contact model shown in Fig. 4a (redrawn from McNeill and Labson, 1991).

Fig. 4a와 같이 전기비저항이 서로 다른 두 매질이 수직으로 붙어 있는 경우(단층 모델)를 생각해 보자. 각 매질은 전도성 반무한 균질매질로 각각  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 의 전기비저항을 가지는 것으로 가정한다. 이때 VLF 평면파가 Fig. 4a와 같이 주향 방향으로 입사한다면, 수직 경계면으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 균질한 무한 매질이라고 생각할 수 있으므로, 앞에서 살펴본 바와 같이 전기장의 수평성분  $E_x$ 는 수평적인 크기의 변화가 없고 심도에 따르는 감쇠만을 보이게 된다. 그러나 수직 경계면 근처에서는 경계면에 평행한 성분  $E_x$ 는 경계면에서 연속이므로 경계면을 중심으로 크기가 서서히 변하는 양상을 보인다 (Fig. 4b). 이때  $E_x$ 는  $x$  방향으로 전류를 발생시키는데 이 전류 밀도는  $E_x$ 에 전기비저항의 역수인 전기전도도가 곱해진 값이므로 경계면 양쪽에서는 전기장의 양상과는 다르게 전류의 불연속이 두드러진다(Fig. 4c). 이는 경계면 근처 양쪽의 전기장의 세기는 비슷하지만 전기비저항은 경계면 양쪽에서 차이가 있기 때문이다.

이러한  $x$  방향 전류 흐름의 차이는 자기장의 수직성분을 생기게 한다(McNeill and Labson, 1991). 위와 동일한 모델에 대해 Fig. 5a는 각각 주향 방향에 직교하게 이동하면서 자기장의 수직성분  $H_z$ 를 측정하여 경계면에서 매우 먼 곳에서 측정할 수평자기장  $H_y$ 로 나눈 값을 보여준다. 동상성분은 양의 값을, 이상성분은 음의 값을 나타내고 있다. 일반적으로 경계면으로부터 먼 곳에서 측정하는 원거리장  $H_{0y}$  대신에  $H_y$ 를  $H_z$ 와 동시에 측정하여 이를 동상성분의 기준으로 삼는데 원거리장

$H_{0y}$ 를 기준으로 할 때와 약간의 차이는 있으나 크게 문제되지 않는다. Fig. 5a는  $H_z$ 를  $H_y$ 로 나눈 값을, Fig. 5b는  $H_z$ 를  $H_{0y}$ 로 나눈 값을 보여주는데 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 따라서 현장에서는 대체로 수직성분  $H_z$ 를 측정하는 곳에서 수평성분  $H_y$ 를 같이 측정하여 이를 기준으로 삼게 된다. 이렇게 자기장 두 성분을 측정하는 방법을 VLF-EM 법이라 한다.

### VLF-EM 법

앞서 설명한 바와 같이 VLF 송신소에서 충분히 먼 곳의 전자기파는 평면파라고 볼 수 있고, 1차 자기장은 수평 방향으로 변동한다( $H_y$ ). 지하에 전도체와 같은 이상체가 존재하는 경우에는 2차 전류가 발생하며, 이 전류에 의해 수직 방향의 2차 자기장이 발생한다( $H_z$ ). 지하가 균질 혹은 수평다층구조의 경우에는 수직 2차 자기장은 발생하지 않으므로  $H_z$ 의 분포로부터 지하에 (2차원 이상의) 이상체가 존재함을 알 수 있다. 그리고 그 존재 여부는 경사각(tilt angle)을 측정하면 가장 쉽게 알 수 있다. 지하구조가 2차원적인 경우 구조의 주향 방향이 송신소 방향과 일치할 때  $H_z$ 는 앞서 본 것처럼 최대가 되며, 이는 MT 법의 TE (transverse electric) 모드에 해당한다. 주향 방향이 송신소 방향과 수직인 경우는 TM (transverse magnetic) 모드가 되고  $H_z$ 는 0이다.

VLF-EM 법에서는 송신소 방향과 수직인  $y$  방향으로 측선을 설정하여 수평자기장과 같은 위상 및 90° 위상차가 나는 수직 자기장을 측정한다. 수평자기장과 수직자기장은 같은 주기로 변동하고 있지만 위상이 다르기 때문에 양자의 합성벡터는 타원을 그리게 된다. 이 타원의 장축과 수평축이 이루는 각도인 경사각  $\theta$ 와 장축과 단축의 비율인 편평률(ellipticity)  $\epsilon$ 을 구하는 경우가 일반적이다. 수직 2차 자기장 성분은 수평성분에 비해 매우 작기 때문에 식(7)과 (8)과 같은 근사식이 성립한다.

$$\tan \theta = R \cos \Delta = \text{Re}(H_z/H_y) \tag{7}$$

$$\epsilon = R \sin \Delta = \text{Im}(H_z/H_y) \tag{8}$$

여기서  $R (=|H_z/H_y|)$ 은 수직자기장과 수평자기장의 비율이고,  $\Delta (= \theta_2 - \theta_1)$ 는 위상차이다. 식(7) 및 (8)에서 알 수 있듯이 VLF의 경우 경사각 및 편평률은 각각  $R$  (수평자기장으로 정규화된 수직자기장)의 동상성분 및 이상성분과 거의 동일하며 (McNeill and Labson, 1991), 이들을 보통 백분율로 표시한다. 최근 Sampaio and Dias (2001)는 Fig. 4a와 같은 단층 모델과 Fig. 2와 같은 암맥 모델을 대상으로 경사각 및 편평률에 대한 표준곡선을 발표하면서 경사각 표준곡선을 이용한 AFMAG 탐사자료의 해석 예를 보여주었다.

국내에서는 영점 교차점(zero crossover point)을 기준으로 맥상의 황화광체를 탐사하는 시도를 많이 볼 수 있다(유인걸, 1998; 유영준 등, 2004). Fig. 6에 경사 암맥 모델에 대한 계산

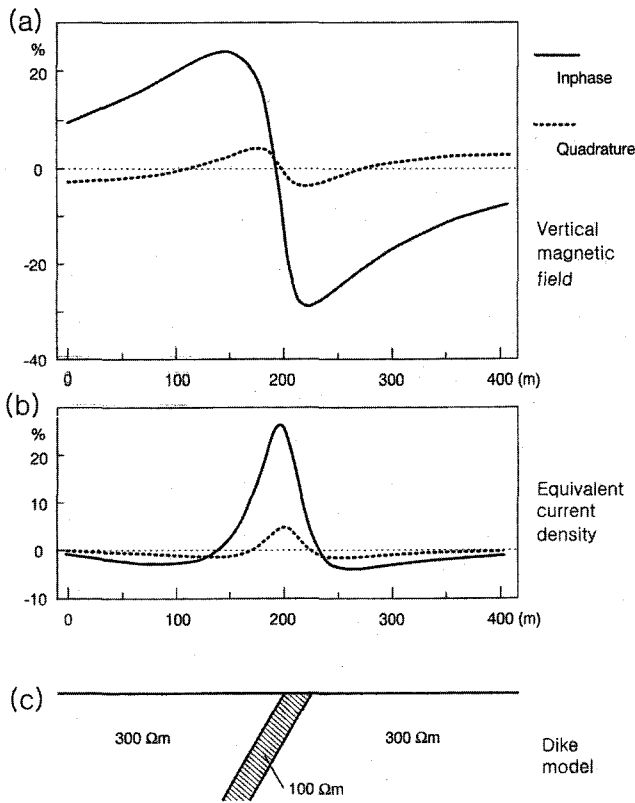


Fig. 6. Normalized vertical magnetic field (a) and equivalent current density at depth of 10 m (b) for a conductive dipping plate of 100 ohm-m in a homogeneous earth of 300 ohm-m (c) (redrawn from Saito, 1998).

예를 나타낸다(Saito, 1998). 동상성분, 이상성분 모두 암맥 부근에서 부호가 바뀌고 있다(Fig. 6a). 이렇게 전도체 직상부에서 깊이 영점을 통과하게 되면 전도체의 위치를 파악하기 어렵다. 이러한 난점을 해결하기 위하여 필터를 이용하여 이상체 직상부에서 양의 극대값을 갖도록 하는 선형 필터링 방법이 Fraser (1969)에 의해 개발되었으며, Karous and Hjelt (1983)는 이 방법을 개선하여 심도 변화에 따른 전도체의 변화 양상을 파악할 수 있는 필터를 만들었다.

Fig. 6a의 결과를 선형 필터링 처리하여 등가전류밀도(equivalent current density, ECD)로 변환하면, ECD 값이 높은 부분이 저비저항대와 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 6b). 여기서 ECD란 샘플 간격과 같은 심도에 전류가 집중하고 있다고 가정할 때의 전류밀도를 말한다. 측정  $n$ 에서의 전류밀도  $I_{eq}(n)$ 는 그 전후의 자기장의 수직성분을 이용하여 다음의 식(9)와 같은 필터로 구해진다.

$$I_{eq}(n) = K(-0.102H_{n-3} + 0.059H_{n-2} - 0.561H_{n-1} + 0.561H_{n+1} - 0.059H_{n+2} + 0.102H_{n+3}) \quad (9)$$

여기서  $K$ 는 측정점간의 거리에 따른 상수이다. ECD는 이상체 바로 위에서 피크를 나타내고 있다(Fig. 6b). 만일 주목하는 심도를 바꾸면 가단면(pseudo-section)도 얻을 수 있다. 최근

Sharma and Baranwal (2005)은 파쇄대 검출에 이 가단면법을 이용하였다.

이 방법의 원리는 VLF 전자기파의 전기장에 의해 발생하는 전류가 지하의 전도체 주변에 상대적으로 집중되고, 이 전류밀도의 차이가 자기장의 수직성분을 발생하게 하므로 이를 역으로 수직 자기장 성분으로부터 지하의 전류밀도를 계산할 수 있다는 것이다. 따라서 이 ECD 단면상에서 등가전류가 큰 곳은 상대적으로 전도체인 것으로 간주할 수 있다. 그러나 이는 실제 지하에 흐르는 전류를 구해내는 방법은 아니므로 실제 물리량을 정량화하는 완전한 해석 방법으로 생각해서는 안 된다. 현재 시판 중인 측정장비에는 위의 ECD단면을 작성하는 소프트웨어가 내장되어 있는 것도 있다(예를 들면, ABEM WADI). 국내에서도 ECD 필터링 및 자료 도사용 소프트웨어가 한국지질자원연구원에서 개발되어 활용 중에 있다(정승환 등, 1989).

### VLF-MT 법

VLF-MT법은 통상의 MT법과 마찬가지로 수평 자기장과 이에 직교하는 수평 전기장으로부터 겐보기비저항과 위상을 구하여 지하구조를 추정하는 방법이다. 겐보기비저항  $\rho_a$  (ohm-m) 와 위상  $\phi$ 는 Cagniard (1953)이 제시한 식(10)과 식(11)로부터 구할 수 있다.

$$\rho_a = 0.2T |E_x/H_y|^2 \quad (10)$$

$$\phi = \tan^{-1}(E_x/H_y) \quad (11)$$

여기서  $T$ 는 전자기장의 주기(s),  $E$ 는 전기장(mV/km), 그리고  $H$ 는 자기장(nT)이다.

지하구조가 2차원인 경우 VLF-MT 법은 VLF-EM 법과 달리 구조의 주향 방향이 송신소 방향과 수직이 되도록 하는 TM 모드로 측정하는 것이 바람직하다(Fig. 2 참조). 이는 전기장이 구조를 횡단하도록 하여 VLF 이상을 보다 명확히 하기 위함이다. 실제 측정에서는 먼저 송신소 방향을 찾고 이 방향의 전기장  $E_x$ 와 이와 직교하는 자기장  $H_y$ 를 동시에 측정하는 것이 보통이다. 그러나 현장 상황이 여의치 않으면 방향을 조금 ( $\pm 45^\circ$  이내) 돌릴 수도 있지만, 전자기장 크기의 감소와 S/N비 저하는 각오해야 한다.

VLF-MT 법에서는 겐보기비저항과 위상을 동시에 산출한다. 전기장과 자기장의 위상차에 의해 전기비저항이 깊이에 따라서 어떻게 변화하는지를 알 수 있다. 지하가 균질이면 위상은  $45^\circ$ 이며, 지하 심부의 전기비저항이 표층에 비해 클 경우 위상은  $45^\circ$ 보다 작아진다. 반대로 지하 심부의 전기비저항이 표층보다 작을 경우에 위상은  $45^\circ$ 보다 커진다.

Fig. 7에 VLF-MT 법에 의한 측정 예를 보여준다(Saito, 1998). 이는 일본 북부에 있는 어느 단층을 가로지르는 방향으

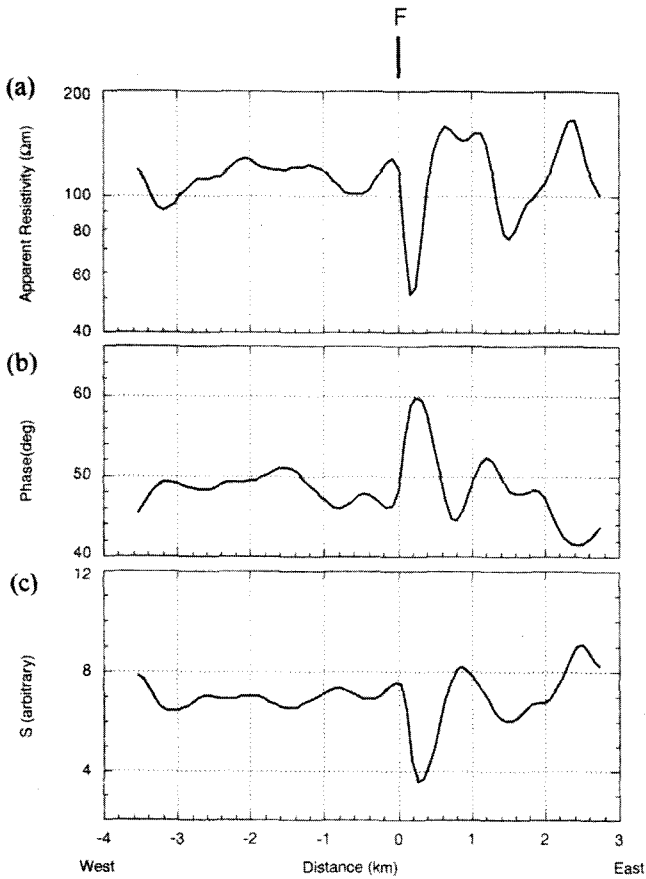


Fig. 7. VLF-MT field example gathered in a fault zone (after Saito, 1998). Apparent resistivity (a), impedance phase (b) and *S* value (c) are shown.

로 측정된 경우이다. 그림은 지표에서 볼 수 있는 단층의 위치를 0 (km)에 일치시켜 그렸다. 이 위치보다 동쪽(우측)에서 겘보기비저항이 낮고 위상이 커지고 있으므로 단층 파쇄대는 지표에서 볼 수 있는 단층선보다 약간 동쪽에 위치하는 것으로 추정할 수 있다.

VLF-MT 법은 간편하고 mapping을 쉽게 수행할 수 있다는 장점은 있지만 아쉽게도 탐사대상물에 대한 깊이 정보를 얻기가 어렵다. 정성적으로는 이상체의 깊이에 따라서 다음과 같이 말할 수 있다. 즉 이상체가 지표에 가까우면 얻어지는 겘보기비저항과 위상은 좁은 범위에서 급격한 변화를 나타내고, 반대로 이상체가 깊은 곳에 있으면 관측 값은 넓은 범위에서 완만하게 변한다. 그러나 송신소 방향과 지하구조와의 위치 관계에 의해서도 측정 이상이 다르게 나타날 수 있기 때문에 해석에는 주의를 요한다.

겘보기비저항의 변화나 위상의 변화만으로도 개략적인 구조를 파악할 수 있으나 해석을 보다 용이하게 하기 위한 방법이 몇 가지 있다. 그 중 하나는 겘보기비저항과 위상으로부터 식 (12)를 이용하여

$$S = \sqrt{\rho_a \cos \phi} \tag{12}$$

계산하는 방법이다. 이 *S*는 Poynting 벡터를 나타내는 것으로 에너지의 흐름에 해당하는 양이다. 지하에 이상체가 존재하는 부근에서는 *S* 값에 변화가 나타날 수 있다. 단층 파쇄대에서는 보통 *S*가 작아지는데 Fig. 7c는 그러한 예이다. 또 다른 하나의 방법은 1차원 2층 구조 모델을 가정하여 겘보기비저항과 위상으로부터 모델변수를 추정하는 방법이다. 제 2층의 전기비저항을 주고 제 1층의 전기비저항과 두께를 추정하는 경우와 제 1층의 전기비저항을 주고 제 1층의 두께와 제 2층의 전기비저항을 추정하는 경우가 있다.

VLF-MT 법에서는 전기장 측정이 필요하기 때문에 탐사 효율은 VLF-EM 법에 비해 일반적으로 크게 떨어진다. 그래서 VLF-MT 법에서는 자연전위(SP)법을 병행하는 것이 효율적일 수 있다. Kasaya *et al.* (2004)은 이러한 방법을 조간대역에서 탐수 유입에 대한 조사에 이용하였다. 그러나 겘보기비저항 분포와 SP 이상에 대해 동시에 정량적인 해석을 시도한 예는 거의 찾아볼 수 없다.

### 마지막으로

실제 VLF 탐사 시에는 정확한 송신주파수 설정, 측정 방향에 따라서 탐지능력이 달라지기 때문에 송신소와 측정 지점을 잇는 직선을 기준으로 한 측선 설정 등에 주의하여야 할 것이다. VLF 법은 개략탐사법으로서 탐사 초기에 실시되며 특히 단층, 파쇄대, 광상, 지하수와 같은 불균질 구조를 파악하는데 유용한 방법이다. 그러나, VLF 탐사는 유도전류에 의한 2차 자기장 성분을 대체로 단일 주파수에 대해 측정하고 있으므로 지하구조가 주로 층서구조로 구성되어 파쇄대가 별로 발달하지 않은 경우에는 그다지 좋은 결과를 내지 못한다. 특히 기존의 전자기 유도법칙에 기초를 둔 전자탐사법 중 비교적 주파수가 높으므로 가탐심도도 수십 미터에 불과하며 측정결과를 탐사 심도나 지하의 전기전도도로도 정량화하기도 쉽지 않아 정성적인 해석이 주를 이루고 있다. 또한 지표의 전기전도도가 큰 경우에도 좋은 결과를 기대하기 어려우며 이럴 때는 숲림 버저배열 전기비저항 수직탐사 등 다른 탐사법을 같이 수행하는 것이 바람직하다. 그리고 지하의 케이블, 금속 파이프, 지표의 금속 펜스 등의 영향을 받기 쉬워 본래의 탐사목표와 다른 부분의 영향이 크게 나타날 수도 있다. 특히 도시지역과 같이 개발이 많이 이루어진 지역에서는 주위의 전자기적 잡음 때문에 좋은 결과를 기대하기 어려우며, 이 경우에는 비교적 인위적 잡음에 강한 다른 탐사법을 강구하는 것이 효과적일 것이다.

VLF 탐사에서는 저녁 무렵에서 수신상태가 나빠지는 것을 자주 경험하게 되는데 이는 저녁에 전리층의 고도가 달라져

VLF 파의 전파특성이 바뀌기 때문이다. 또한 태양의 흑점 활동의 영향을 받아 수신에 어려움이 있을 경우도 있다. 일본 JJI국의 경우 시설의 보수를 위해 매월 세 번째 화요일에는 송신을 하지 않으며, 2, 5, 8 및 11월 세 번째 화요일로부터 4일 동안 송신이 중단되는 것에 유의해야 한다.

## 사 사

이 논문은 2004년도 한국지질자원연구원의 일반사업 심부 지열에너지 개발사업 및 한국과학재단(R05-2004-000-12529-0)의 연구비 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 송영수, 정승환, 채효석, 1992, 지층의 수평적 구분 및 지질 구조 파악을 위한 VLF 탐사 결과 해석, 한국자원공학회지, **29**, 16-24.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤혜수, 1993a, 유도분극, 전기비저항, VLF 전자탐사법을 이용한 벤토나이트 광상 탐사 연구, 한국자원공학회지, **30**, 102-107.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤혜수, 1993b, 의성 오토산 지역의 전기비저항, IP 탐사 및 VLF 전자탐사 연구, 한국자원공학회지, **30**, 526-535.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤혜수, 1994, 안동지역의 이천단층에 대한 VLF 전자탐사 연구, 한국자원공학회지, **31**, 333-337.
- 송영수, 이상규, 오세영, 송승엽, 1996, 제주도 서부지역에서의 구조선 파악을 위한 전기비저항 및 VLF 전자탐사, 한국자원공학회지, **33**, 484-493.
- 유영준, 유인걸, 김정호, 2004, 삼보광산 금 광화대에 대한 전기 탐사 반응, 물리탐사, **7**, 217-224.
- 유인걸, 1998, 맥상 황화광체에 대한 전기 및 전자탐사 반응, 물리탐사, **1**, 110-115.
- 정승환, 이소훈, 김정호, 조인기, 전정수, 1989, 필터링 기법을 이용한 VLF 전자탐사자료의 심도 변환, 탐사기술개발연구, KR-89-2D-2, 한국동력자원연구소, 97-115.
- 편집실, 1999, VLF 전자탐사, 물리탐사, **2**, 63-67.
- Cagniard, 1953, Basic Theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, **18**, 605-635.
- Fraser, D. C., 1969, Contouring of VLF-EM data, *Geophysics*, **34**, 958-967.
- Karous, M., and Hjelt, S. E., 1983, Linear filtering of VLF dip-angle measurements, *Geophys. Prosp.*, **31**, 782-794.
- Kasaya, T., Goto, T., Sato, S., and Shimada, J., 2004, VLF-MT and SP measurements around the seep age on tidal flat of Yatsuhiro sea, *Proc. 111st SEGJ Conf.*, 221-224. (in Japanese)
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I., 2002, An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd ed., Blackwell Pub.
- McNeill, J. D., and Labson, V. F., 1991, Geological mapping using VLF radio fields, in: Nabighian, M. N., ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2, Application, Parts A and B*, Soc. Expl. Geophys., 521-640.
- Saito, A., 1998, VLF method, in: SEGJ, ed., *Handbook of Geophysical Exploration*, Ch. 6, 366-369. (in Japanese)
- Sampaio, E. E. S., and Dias, C. A., 2001, Electromagnetic profiling interpretation across vertical and dikes, *Geophys. Prosp.*, **49**, 107-119.
- Sharma, S. P., and Baranwal, V. C., 2005, Delineation of groundwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data, *J. Appl. Geophys.*, **57**, 155-166.