

## 2차원 이방성 구조의 MT 반응

이춘기 · 권병두

서울대학교 지구과학교육과

### 요 약

상부맨틀이나 하부지각의 고전도층(HCL)에서 나타나는 고이방성은 MT 탐사에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 고이방성 매질이 MT 반응에 미치는 영향을 고찰하기 위한 모델연구를 수행하였다. 각각의 균질한 암체의 전기적 성질은 대칭적인 전기전도도 텐서로 주어지며 모델링을 위한 기본방정식은 전기장과 자기장 성분이 결합되어진 주파수 영역 분산 방정식으로 주어진다. 이방성 매질에서는 전기장의 왜곡에 의해 항상 4성분의 임피던스가 존재하며, 2차원 구조에서는 대각선 성분, 특히 YY성분의 임피던스가 증가한다. 어떤 경우에는 서로 이방성 주향이 다른 매질의 상호작용에 의해 TM 모드의 위상이  $90^\circ$  이상으로 증가하고 겐보기비저항이 낮아지는 현상이 발생한다. GB 분리법은 광역적인 반응을 추출하는데 이용될 수 있으나, 심부의 이방성의 영향을 크게 받는다. 이상의 모델연구의 결과를 BC87자료에 적용하여 현장자료에서의 이방성 효과를 고찰하였다.

**주요어:** 자기지전류 모델링, 전기적 이방성, GB 분리법

**Lee, Chun-Ki and Kwon, Byoung-Doo, 1999, MT response on the two dimensional anisotropic structure. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 2, p. 123-134.**

**ABSTRACT:** Magnetotelluric responses may be affected by strong anisotropy of the high-conductivity layers (HCL) in the upper mantle or lower crust. We have studied two-dimensional anisotropy MT modelling to examine the effect of high anisotropic media. Electrical properties of a homogeneous anisotropic body are defined by a symmetric conductivity tensor and the problem is described by coupled diffusion equation in the frequency domain. In two-dimensional anisotropic environments, diagonal elements of the impedance tensor have higher values than those in isotropic environments. In some cases, TM mode phases reach more than  $90^\circ$  and apparent resistivities decrease for some frequency range because of telluric distortion. GB decomposition may be used to recover regional responses, but can be affected by the regional anisotropic effect. Considering these results, BC87 dataset was interpreted with a modified anisotropic model.

**Key words:** Magnetotelluric modelling, Electrical anisotropy, GB decomposition

(Lee, Chun-Ki and Kwon, Byoung-Doo, Department of Earth Science, Seoul National University, Shillim-Dong, Kwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea. email: chunki@crust.snu.ac.kr)

### 1. 서 론

많은 암석은 광물 자체의 이방성이나 층리 구조에 의한 방향에 따른 평균적인 전기전도도 차이 등에 의해 전기적 이방성이 존재하는 것으로 알려져 있다. 특히, 특정한 방향으로 발달한 절리들이

나 지온구배에 의해 나타나는 이방성은 조구조적 운동의 양상이나 지질 구조를 파악하는데 중요한 단서가 될 수 있다.

암석의 전기적 이방성은 최대, 최소 전기전도도의 비로부터 구해지는 이방성 계수로 정량화할 수 있는데, 실험적으로 1~3의 값을 가진다(Keller ·

Frischknecht, 1966). 그러나, 심부 전자 탐사 결과에 의하면 상부맨틀이나 하부지각의 고전도층(HCL)에서 매우 큰 위상차가 관찰되므로 이방성 계수가 10 이상인 고이방성 매질이 존재할 수 있다는 견해들이 제기되고 있다(Kurtz et al., 1993, Jones et al., 1993, Marquis et al., 1995). 암석의 전기적 연결성(electrical connectivity)에 대한 Bahr (1997)의 연구에 따르면 서로 전기전도도 차이가 큰 입자들의 연결에 의해 나타나는 이방성은 미시적인 범위에서보다 거시적인 범위에서 더 큰 값을 가질 수 있다. 이것은 실험적으로 얻어지는 암석의 저이방성과 현장 탐사자료로부터 얻어지는 고이방성의 차이를 뒷받침해준다. 따라서, 지각심부의 해석을 주목적으로 하는 자기지전류(MT) 탐사에서는 상당히 큰 이방성의 영향이 반영될 가능성이 높다. 본 연구에서는 고이방성 매질이 MT 반응에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 2차원 모델링을 수행하였다.

주향과 경사를 가지는 임의의 이방성을 고찰하기 위해서는 TE모드와 TM모드가 결합된 형태의 모델링이 요구되어지며, 수치 해석 기법의 발달과 아울러 2차원 혹은, 3차원 구조에 대한 연구가 진행되고 있다. 수치적 방법으로는 유한요소법(Reddy · Rankin, 1975), Rayleigh FFT기법(Osella · Matinelli, 1993), 유한차분법(Pek · Verner, 1997) 등의 방법이 주로 이용되어왔다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하였으며, 기저 함수로 사각형 요소의 4지점에 절점을 가지는 쌍일차 요소(bilinear element)를 사용하여 간단한 구조들에 대한 수치 모델링을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결과를 고려하여 BC87자료(Jones, 1993)에 대한 새로운 해석을 시도하였다.

## 2. 이방성 매질에 대한 MT장 이론

이방성 매질에 전기장이 작용할 때 지하에 유도되는 전류 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{J} = \bar{\sigma} \vec{E},$$

$$\bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$  텐서는 대칭텐서이며 3개의 주성분

( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ )과 3개의 회전각을 이용한 Euler 변환에 의해 계산할 수 있으나, 이 연구에서는 이방성 주향  $\alpha$ 와 경사  $\theta$  방향으로의 회전만을 고려하였다. 즉, 2차원 구조에서의 전기전도도는 5개의 매개변수( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \alpha, \theta$ )로 기술이 가능하며, 이방성 매질의 전기전도도는  $\sigma_x/\sigma_y/\sigma_z/\alpha/\theta$  로 표시한다. Fig. 1은 기준좌표계와 이들 매개변수와 의 관계를 도시하고 있다.

2차원 구조에서는  $\partial/\partial x=0$  이며, 전기전도도 텐서의 대칭성을 적용하면 주파수 영역에서의 준정적 맥스웰 방정식으로부터  $E_x$ 와  $H_x$ 가 결합되어진 이방성 분산 방정식들을 얻을 수 있다.

$$(TE)$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + i\omega\mu_0 (\sigma_{xx} + A\sigma_{zx} + B\sigma_{xy})E_x$$

$$(2)$$

$$+ i\omega\mu_0 A \frac{\partial H_x}{\partial y} - i\omega\mu_0 B \frac{\partial H_x}{\partial z} = 0$$

$$(TM)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\sigma_{yy}}{D} \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\sigma_{zz}}{D} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\sigma_{yz}}{D} \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\sigma_{yz}}{D} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)$$

$$(3)$$

$$+ i\omega\mu_0 H_x + \frac{\partial(BE_x)}{\partial z} - \frac{\partial(AE_x)}{\partial y} = 0$$

$$A = (\sigma_{xy}\sigma_{yz} - \sigma_{xz}\sigma_{yy})/D,$$

$$B = (\sigma_{xz}\sigma_{yz} - \sigma_{xy}\sigma_{zz})/D$$

$$D = \sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{yz}^2$$

위의 지배방정식에 유한요소법을 적용하여 4개의 절점을 가지는 직사각형 모양의 쌍일차 요소(bilinear element)의 각 절점에서 2개의 자유도를 가지는 알고리즘을 구성하여 모델링하였으며, 서로 다른 분극을 가지는 2개의 입사파를 경계 조건으로 하여 4성분의 임피던스를 계산하였다. 이 연구에서는 1차원 이방성 구조의 해석적 해(Reddy · Rankin, 1971)를 좌우의 경계조건으로 사용하였다. 상부와 하부경계에서는 좌우경계에서 계산된 해석적 해를 선형보간하여 사용하였으며 하부경계는 최대 표피 심도의 10배 거리에 설정하였다.

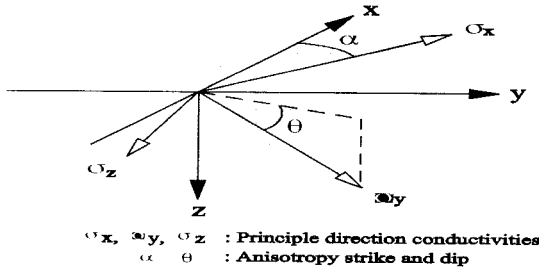


Fig. 1. Relationship of conductivity anisotropy to reference coordinate.

### 3. 이방성 매질의 MT 반응 특성

입의 이방성매질에서는 전기장의 왜곡에 의해 항상 4성분의 임피던스가 모두 존재하게 되며, 이방성 계수가 커질수록 임피던스의 대각선 성분인

XX, YY 성분이 무시할 수 없을 만큼 커진다. 특히 수직경계가 존재할 경우, 저비저항 지역에서 XY, YX 성분에 대한 XX, YY 성분의 비가 상대적으로 커지게 된다.

이방성의 반응을 구체적으로 살펴보기 위하여 Fig. 2에 도시되어 있는 4가지의 모델에 대해 고찰하였다. 가장 단순한 2차원 구조인 수직경계와 수직암맥이 존재하는 모델에서의 임피던스의 양상을 살펴보았으며, 보다 복잡한 서로 다른 이방성을 가지는 매질이 혼재하는 모델에서의 반응 특성을 알아보았다.

#### 3.1. 수직경계

Fig. 3은 모델 1과 같은 입의 이방성을 가지는 두 매질의 수직경계에서 나타나는 각각의 임피던스를 걸보기비저항과 위상으로 도시하였다. 저비저항 매질에서는 수직경계에 다가갈수록 YY성분의 걸보기비저항이 증가하며, 고비저항 쪽에서

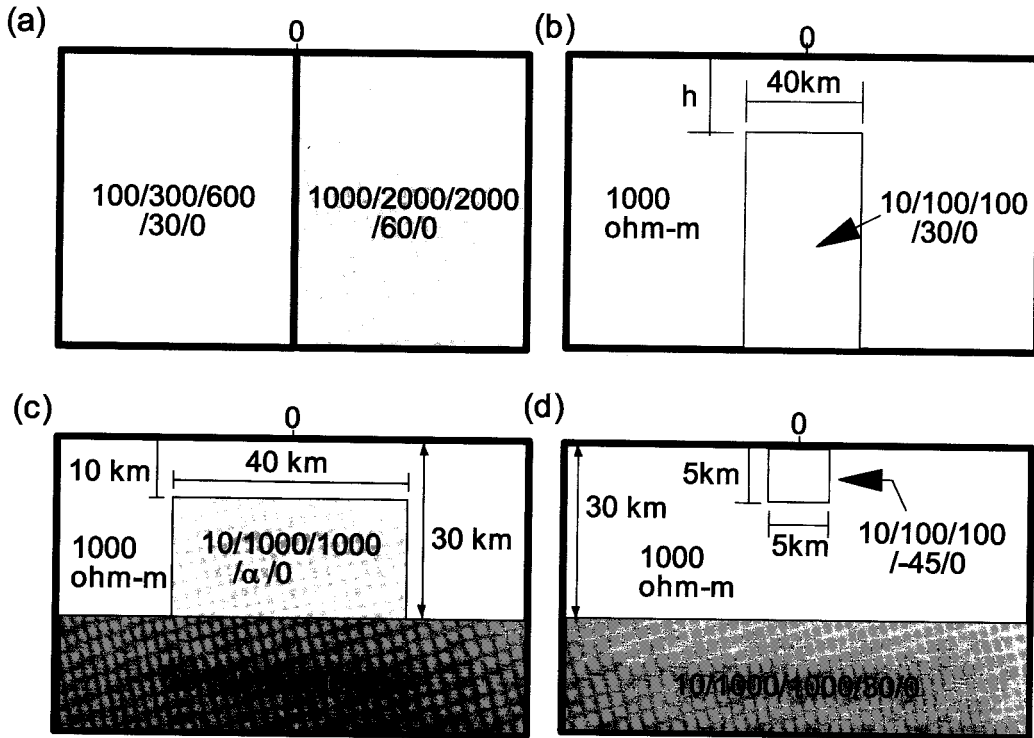


Fig. 2. Subsurface models. (a) vertical contact of different anisotropic bodies (model 1), (b) vertical dyke in isotropic half space (model 2), (c) vertical stack of anisotropic bodies with different anisotropy strikes (model 3) (d) 1-D regional structure with a local body (model 4).

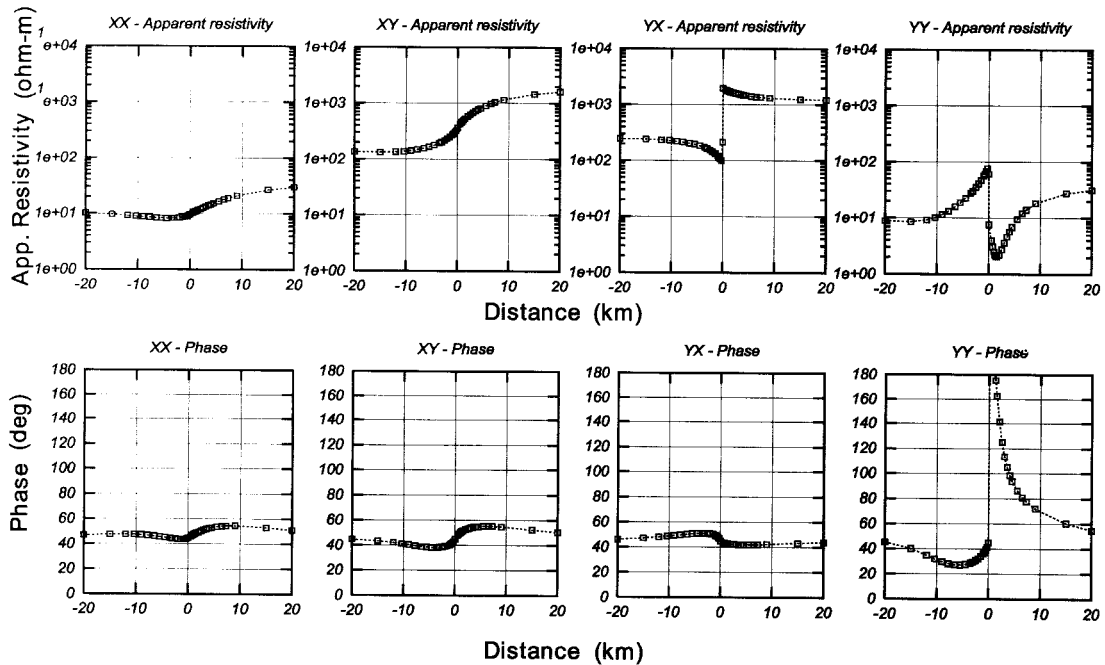


Fig. 3. Comparison of apparent resistivities and phases for the vertical contact model (model 1) for the frequency of 1 Hz.

는 수직경계에서 약간 벗어난 지역에서 최소값이 나타난다. 이것은 Reddy · Rankin (1975)이 구한 수직암맥구조에서도 잘 나타나는 이방성 효과의 특징적인 반응이다. 반면, XX 겐보기비저항은 수직경계에서 연속적으로 변하므로 크게 증가하지는 않는다. 위상 반응 역시 YY성분이 경계에서 급격하게 변하는 것을 볼 수 있다.

### 3.2. 수직암맥

수직경계에서는 전하의 집적에 의해 Y방향의 전기장이 불연속적으로 변하면서 전기장이 이방성에 의해 왜곡되어 YY성분의 증가를 가져온다. 이러한 경향은 수직암맥에서 더욱 잘 나타나며 모델 2의 수직암맥 상부가 지표와 가까워질수록 YX성분의 겐보기비저항은 작아지고 YY성분은 커져서 대각선 성분을 무시할 수 없게 된다(Fig. 4). 일반적으로 임피던스의 대각선 성분이 큰 경우, 임피던스 행렬은 행렬의 회전에 민감하게 되어 방향성을 결정하기가 어렵게 된다.

### 3.3. 수직스택

등방성 매질만을 고려할 때, 수직 경계에서 위

상은 항상 연속적으로 변한다. 그러나, Pek · Verner (1997)에 의하면 이방성 주향이 서로 다른 매질이 포개져 있을 경우, 수직 경계에서 TM (YX) 모드 위상이 불연속적으로 변하는 현상이 생긴다. 이러한 현상은 상하 이방성 주향의 차이에 의해 전기장과 전류 밀도의 방향이 큰 각도로 벌어지게 되고 측정방향에 대하여 서로 다른 사분면에 놓이게 됨으로써 발생한다. 뿐만아니라 주파수가 증가함에 따라 위상이 90°를 넘어서게 되고 겐보기비저항도 매우 낮은 값을 가진다. 수직 스택의 폭이 커지거나 지표 아래로 내려갈수록 이러한 효과는 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 하부지각의 높은 이방성을 고려하면 심부의 이방성 주향의 변화도 이러한 효과를 발생시킬 수 있다. 모델 3은 높은 이방성을 가지는 상부맨틀과 하부지각에 서로 다른 주향을 가지는 이방성이 발달한 지역의 모델로서 이방성 주향이 충분히 차이가 날 경우 YX 위상이 90° 이상으로 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5).

### 3.4. 표층 이방체

모델 3과 같은 구조에서 수직스택의 상부가 표

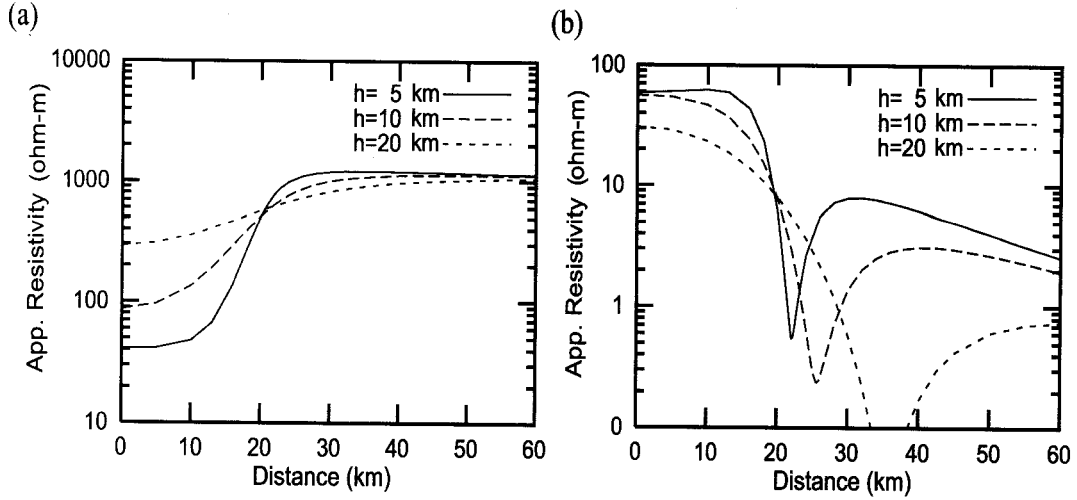


Fig. 4. (a) YX and (b) YY apparent resistivities for the anisotropic dyke model (model 2). the frequency is 0.01 Hz and h indicates the depth from ground surface to the top of dyke.

면에 가까울수록 전기장과 전류밀도의 왜곡은 급격히 증가하며, 표면에 드러나 있을 때 그 효과가 가장 크다. 따라서, 심부의 고이방성 층과 지표에 가까운 이방체와의 상호 작용에 의해서도 심한 왜곡이 발생할 것으로 생각된다. 표층에 국부적인 2차원 등방성 이상체가 존재하는 경우에는 일반적으로 저주파의 TM모드 겉보기비저항에서 정적효

과가 발생하며, TE모드와 위상에는 거의 영향을 미치지 않는다. 표층에 2차원 이방성 이상체가 존재하고 광역적인 구조는 등방성 매질로 이루어진 경우에도 정적효과가 지배적인 반응을 이루며, 겉보기비저항과 위상이 약간 왜곡된다. 그러나, 표층에 이방체가 있고 심부에도 서로 다른 주향을 가지는 이방성 매질이 있는 모델 4와 같은 구조에서

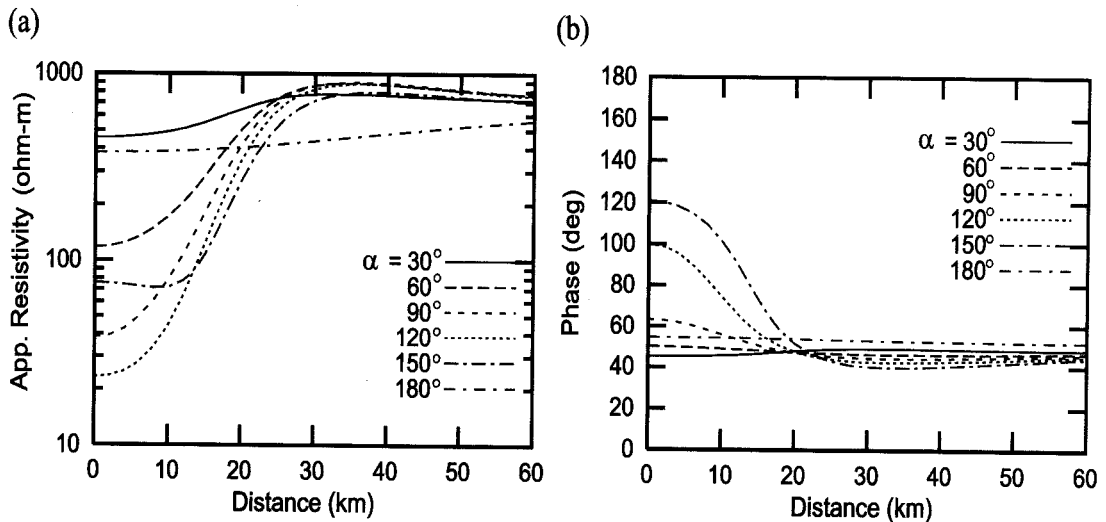


Fig. 5. (a) YX apparent resistivities and (b) YX phases for the anisotropic vertical stack model (model 3). the frequency is 0.01 Hz and the anisotropic strike  $\alpha$  varies from  $30^\circ$  to  $180^\circ$

는 겉보기비저항 곡선과 위상이 모두 심하게 왜곡되는 것이 관찰된다(Fig. 6). 모델 3에서 이방성 주향의 차이가 클 때 발생하는 위상의 증가( $>90^\circ$ )가 여기서도 관찰되는데, 심부의 이방성층의 반응이 나타나기 시작하는 0.3 Hz정도부터 위상이 급격히 증가하여 계속 진동하는 양상을 보인다. 이러한 형태의 반응은 현장에서 잡음요인들에 의한 것으로 오인하기 쉬우므로 이방성의 존재유무에 대해 주의 깊은 고려가 있어야 한다.

#### 4. 이방성 매질에서의 임피던스 성분분리

일반적인 MT 탐사의 특성상, 표층의 물성변화가 전체적인 가단면도의 형태나 지질 주향 결정에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 표층의 효과를 제거하고 정확한 지질 주향을 추정함으로써 MT자료의 질을 향상시키기 위한 많은 기법들이 개발되어 왔다. 가장 큰 영향을 주는 정적효과를 보정하기 위한 여러 방법들이 연구되어 왔으며 (Jones, 1988, Beamish · Travassos, 1992), EMAP과 같은 특수한 배열을 사용하는 방법도 개발되었다. 그러나 표층에 3차원 구조가 발달되어 있을 때는 정적효과 외에 비저항 곡선의 왜곡이 전주파수 대역에 걸쳐 일어나기도 한다. 국부적인 3차원 구조

의 효과를 가지는 자료로부터 정확한 지질주향을 구하고, 광역적 반응만을 추출하는 방법들로는  $2 \times 2$  임피던스 텐서로부터 8개의 파라미터를 추출하는 Eggers (1982), Spitz (1985) 등의 방법이 있으며, 제한된 구조에 적용되는 방법들로 Zhang *et al.* (1987), Groom · Bailey (1989, 1991) 등의 방법들이 개발되었고, 2차원 광역구조와 3차원 국부구조를 고려하는 Groom · Bailey (1989, 1991)의 방법(GB decomposition)이 현재 널리 이용되고 있다. 이방성의 효과는 모든 성분을 가지는  $2 \times 2$  임피던스를 형성하므로 3차원 효과와 유사하게 다루어질 수 있다. Smith (1997)는 3차원 반응의 예로써 1차원 이방성 모델에 임피던스 성분분리 방법을 적용하여 표층의 영향을 제거할 수 있음을 보였다.

##### 4.1. Groom-Bailey 의 임피던스 성분분리 방법

광역적인 2차원 구조에서는  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$  임피던스 성분만이 존재하므로, 다음의 관계가 만족된다.

$$\vec{E}_r = Z_2 \cdot \vec{H}_r = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \vec{H}_r \quad (4)$$

여기서, 아래 첨자 r 은 광역적 반응을 가리킨다. 국부적인 이상체에 의해 전기장은 심하게 교란

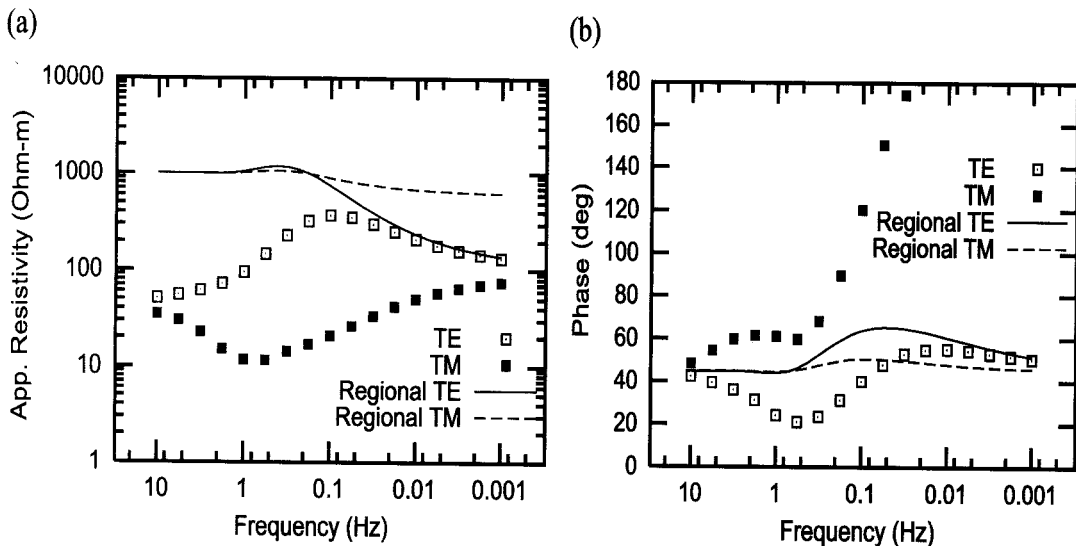


Fig. 6. (a) Apparent resistivities and (b) phases for the 1-D regional structure with a local body (model 4) calculated at the center of local body.

되지만 자기장은 상대적으로 변화가 심하지 않으므로  $\vec{H} = \vec{H}_r$  로 가정한다. 국부적인 반응에 의한 전기장의 왜곡을 텐서의 형태로 표시하면,

$$\vec{E} = C \vec{E}_r \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, C는 왜곡텐서를 나타낸다.

MT 탐사에 의해 측정된 임피던스를  $Z_m$  이라고 하면,

$$\vec{E} = Z_m \vec{H} \quad (6)$$

$$Z_m = C Z_2$$

이 성립한다. 그러나, 실제 측정에 있어서 측정 방향이 광역적 구조의 주향과 일치하지 않으므로 좌표 회전을 고려하면,

$$Z_m = R(\theta) C Z_2 R^T(\theta) \quad (7)$$

와 같다. R은 회전 행렬이라고 한다.

Groom · Bailey (1989)에 의하면, 왜곡 텐서 C는 다음과 같은 여러 행렬로 분리될 수 있다.

$$C = gTSA \quad (8)$$

g는 측정 이득(site gain)이라는 상수이고, T는 트위스트(twist), S를 전단(shear), A를 이방성(anisotropy) 텐서라고 하며, 그 형태는 다음과 같다.

$$T = g_T \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix},$$

$$S = g_S \begin{bmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$A = g_A \begin{bmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{bmatrix}$$

한 측정점에서 지역적인 이방성과 광역적인 이방성을 구별할 수 없으므로 A를 추출하는 것은 불가능하다. 또한 측정 이득 g는 정적 효과를 나타내는 것으로 이것 역시 한 측정점의 임피던스로부터 그 값을 얻을 수 없다. 따라서, g와 A를 포함하는 텐서  $\hat{Z}_2$ 를 정의하면,

$$Z_m = R T S \hat{Z}_2 R^T \quad (10)$$

로 기술된다. 즉, 측정된 임피던스는 2차원 광역 임피던스  $\hat{Z}_{xy}$ ,  $\hat{Z}_{yx}$ 와 광역적 주향  $\theta$ , 왜곡 매

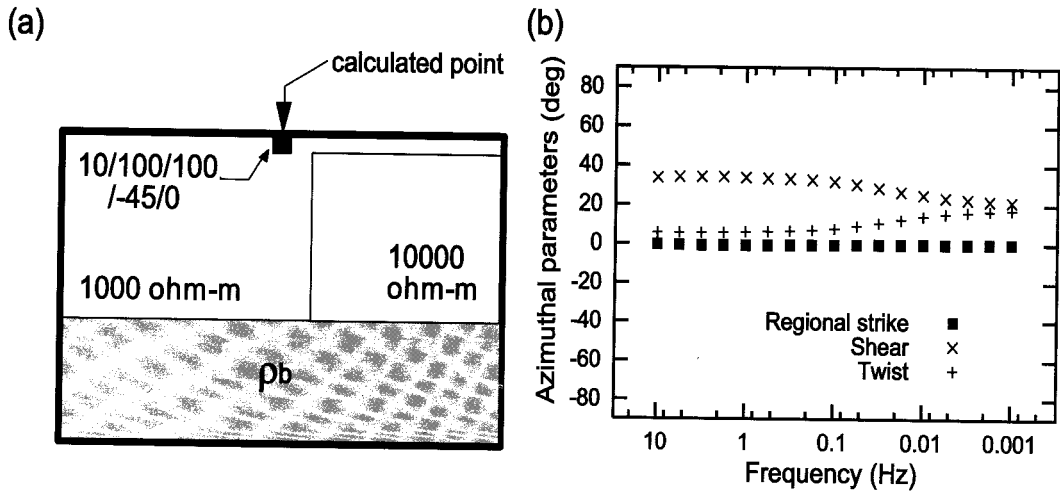


Fig. 7. (a) Model of 2-D regional structure with a near-surface anisotropic body and (b) GB decomposition parameters for the model with 100 ohm-m isotropic basement.

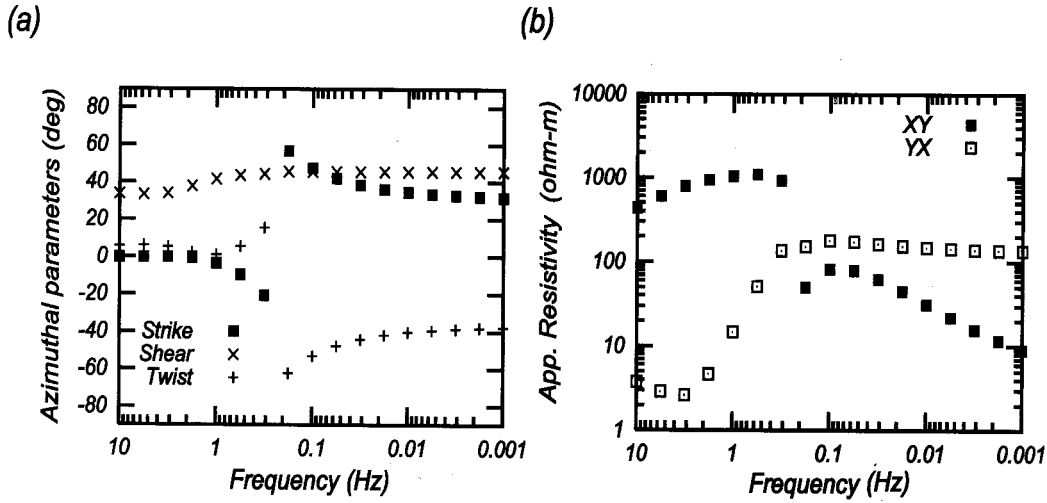


Fig. 8. (a) GB decomposition parameters and (b) estimated apparent resistivities for the model with anisotropic basement (10/1000/1000/30/0).

개변수  $t, e$  로 모델링되어질 수 있다.

위와 같은 5개의 매개변수로 모델링되어진 임피던스와 실제 측정된 임피던스와의 잔차를 최소화승법으로 최소화시킴으로써 5개의 매개변수를 추출할 수 있으며, 어떤 매개변수를 일정하게 유지하는 제한조건을 가하여 위의 방법을 수행함으로써 국부적인 효과가 제거된 임피던스를 추출할 수 있다.

#### 4.2. 2차원 이방성 구조에서의 GB 분리법

2차원 이방성 구조에서의 GB 분리법의 적용성을 고찰하기 위하여 모델 4와 같은 구조에 단층이 추가된 Fig. 7a의 모델에서 0.5 km의 길이를 가지는 표층이방체 중앙에서의 반응에 대해 살펴보았다. 하부 기반암이 등방성 매질일 경우, 예를 들어,  $\rho_b$  가 100 ohm-m 일 때, 표층의 이방체에 기인한 전기적 왜곡은 전주파수대역에서 거의 일정하게 작용하며 GB 분리법으로 분해되어 거의 정확한 광역주향을 추출할 수 있다(Fig. 7b).

한편, 심부에 고이방성 매질이 존재하는 경우, 즉  $\rho_b$  가 10/1000/1000/30/0의 비저항 구조를 가질 때, 저주파대역에서는 이방성 주향을 잘 반영하고 있다(Fig. 8). 그러나, 0.2 Hz 부근에서 성분분리 파라미터들이 불연속적으로 변하며, 겉보기비저항 곡선에서는 TE와 TM 모드가 뒤바뀌는

모드 전환(mode-swap)이 일어난다. 이것은 상부에서는 단층구조에 의해 X방향의 전기장이 우세하지만, 하부에서는 이방성 매질에 의해 Y방향의 전기장이 더 강화되기 때문이다. 모드전환된 부분을 서로 일치시켜주면 결국 주향은 단층의 주향( $0^\circ$ )에서 이방성 주향( $-60^\circ$ )으로 변화하는 경향을 가진다. 이와 같이 GB 분리법을 이용하여 심부의 이방성 주향변화를 추출할 수 있다. 그러나, GB 분리법은 광역적인 구조를 2차원 구조로 가정하는 성분분리 방법이므로 3차원과 유사한 효과를 가지는 광역적인 이방성 구조가 존재할 때 표층의 국부적인 이상체의 효과만을 제거하기는 어렵다.

#### 5. 현장자료의 이방성 효과

이상과 같은 MT 반응에 대한 이방성의 고찰을 뒷받침하기 위하여 현장자료에서 나타나는 이방성의 영향을 살펴보았다. 고이방성 반응이 알려진 기존의 자료를 이용하기 위하여 British Columbia에서 LITHOPROBE 프로젝트의 일환으로 150 km에 걸쳐 27측점에서 획득되어진 BC87자료를 사용하였다(Jones, 1993). 이 지역은 북미판의 가장자리에 위치하고 있으며, 중기원생대에서 중생대의 암석이 주를 이루고 있다. 주요 지질 구조로는 Fig. 11a에 도시된 바와 같이 Slocan Lake Fault (SLF)가 발달되어 있다. 20000 ohm-m의 고비저항을



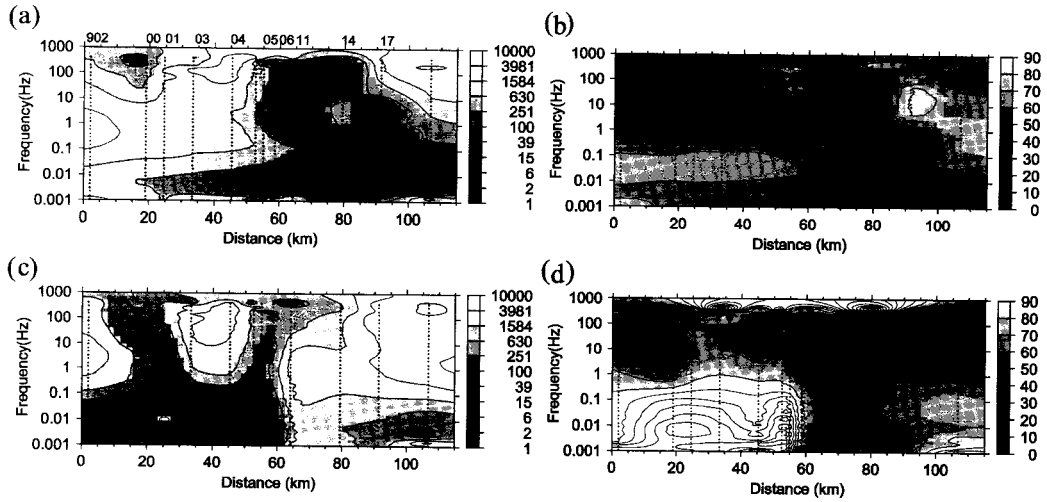


Fig. 9. Pseudosections of the BC87 dataset in a geographic coordinate system with x north. (a) XY apparent resistivity, (b) XY phase, (c) YX apparent resistivity, (d) YX phase section.

가지며, SLF에 접해있는 Nelson 저반(Nelson batholith;NB)은 폭이 약 30 km, 깊이가 약 4 km이며, 동쪽으로 50 ohm-m의 저비저항대를 동반하고 있다. 심부지각에는 30~100 ohm-m의 고전도성 지층이 있을 것으로 생각되며, 그 하부에 높은 이방성을 가지는 상부맨틀이 약 33 km부터 시작 되는 것으로 알려져 있다.

Fig. 9는 BC87자료를 이용하여 TE, TM모드 가 단면도를 작성한 것이다. TE, TM 모드 전반에 걸쳐 Nelson 저반과 그 동쪽의 저비저항대의 반응이 고주파대역에서 잘 반영되고 있으며, TM 모드의 저주파대역에서는 SLF의 서쪽으로 겹보기비저항이 매우 낮고 위상이 90°를 넘어서는 특이한 이상대가 존재한다.

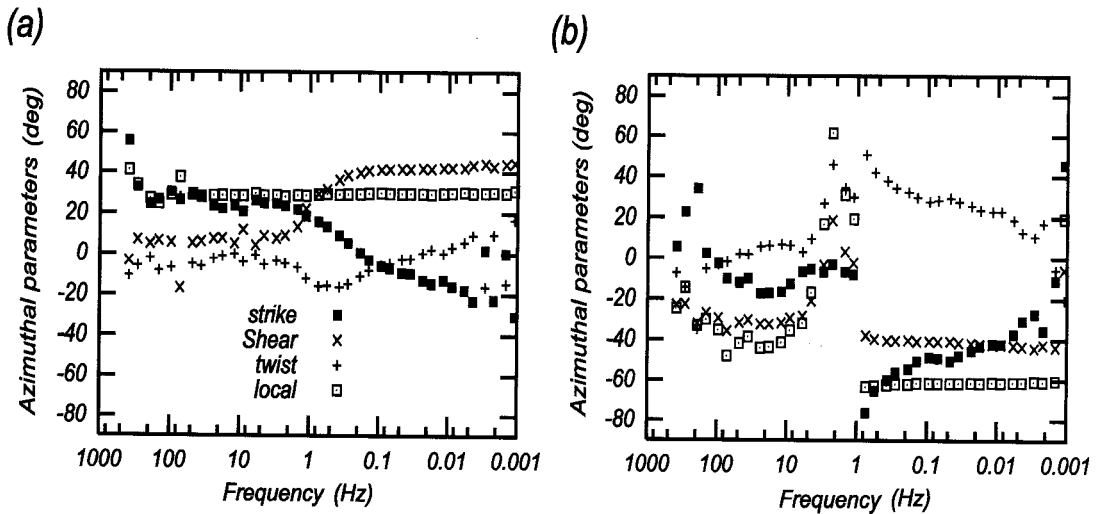


Fig. 10. The unconstrained GB parameters for the data from the site (a) lit000 and (b) lit017.

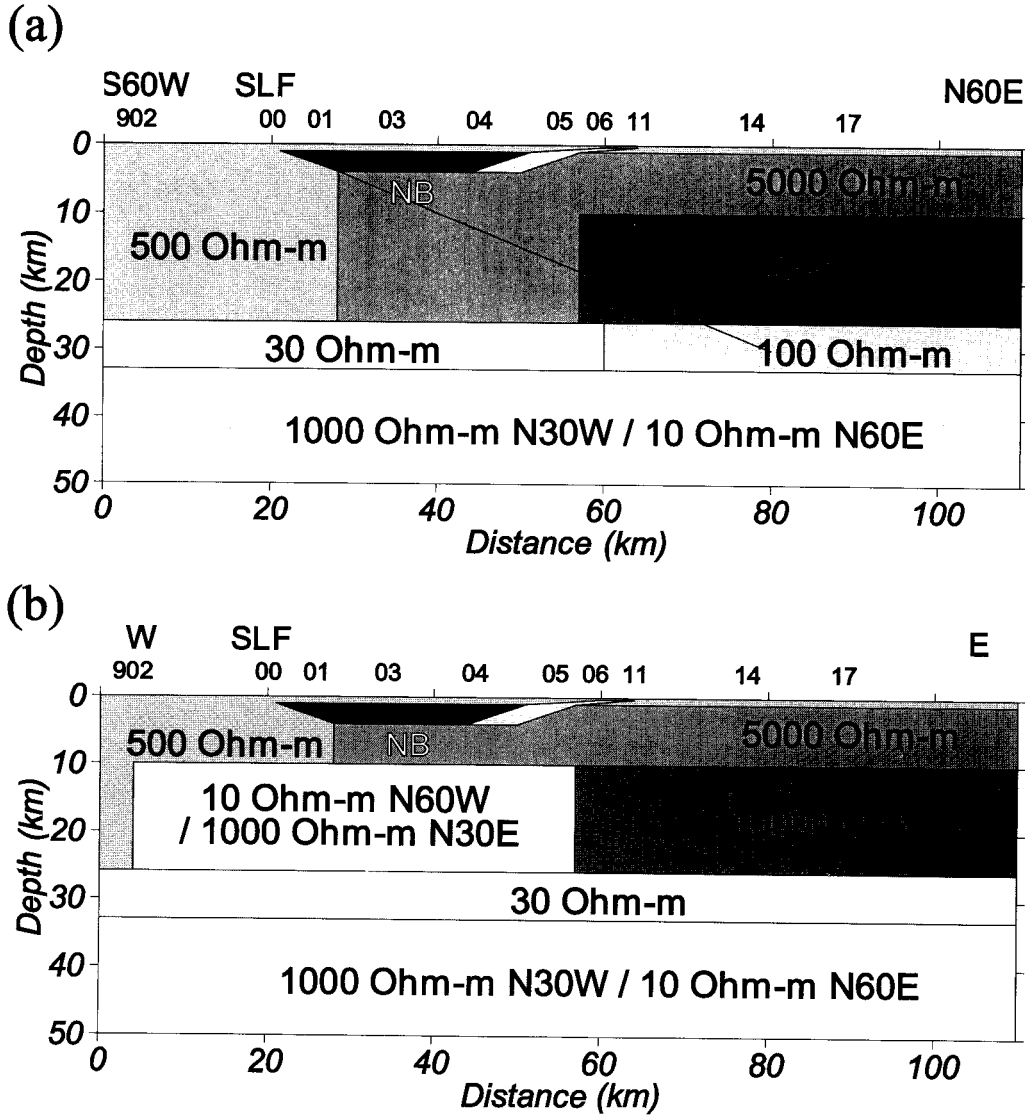


Fig. 11. (a) Subsurface model of BC87 dataset by Jones et al(1993) and (b) modified model with an additional anisotropic body.

각 측정에서의 임피던스 특성을 살펴보기 위하여 GB 분리법을 적용한 예를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10a의 lit000측점은 SLF의 서쪽에, Fig. 10b의 lit017은 SLF의 동쪽에 위치하는 측정이며, GB 분리법으로 추출된 주향은 저주파로 갈수록  $-30^\circ$  즉, N30W 부근으로 변화한다. Fig. 11에는 Jones et al. (1993)이 연구한 지하모델과 하부지각

에 이방성 매질이 추가되어진 모델을 도시하였다. Jones et al. (1993)은 GB 분리법을 적용하여 광역적 주향을 N30W로 결정하고 등방성 모델링기법으로 Fig. 11a와 같은 모델을 사용하여 모델링을 수행하였다. BC87자료의 저주파대역에서는 대체로 N30W의 주향이 관찰되고 이것은 북미판 경계의 방향성과 일치하며, Fig. 10의 lit017측점에서 발생

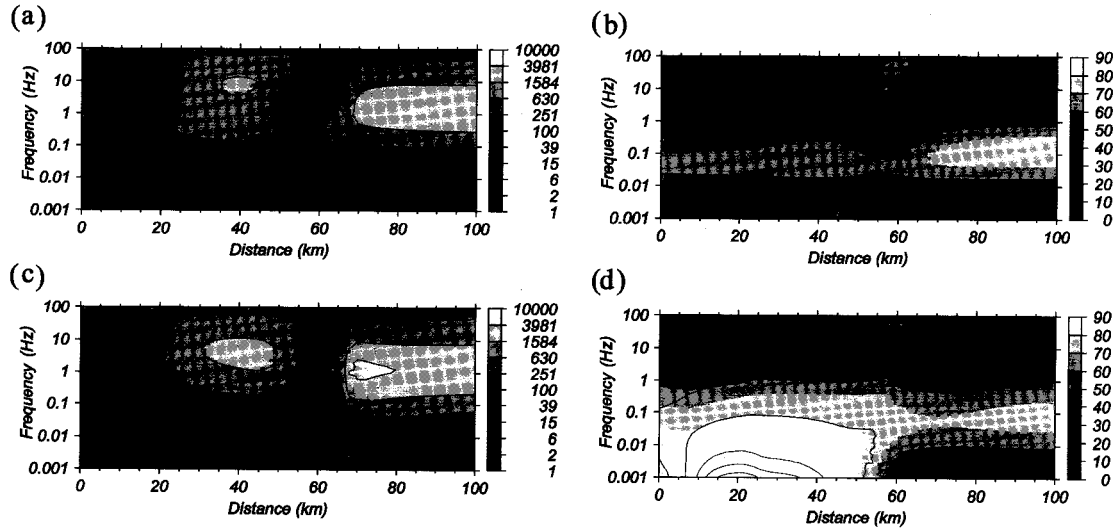


Fig. 12. Calculated pseudosections of the modified model. (a) XY apparent resistivity, (b) XY phase, (c) YX apparent resistivity, (d) YX phase section.

하는 TE, TM 모드전환을 고려하면, N30W로 고비저항을, N60E의 방향으로 저비저항을 가지는 상부 맨틀의 모델은 타당한 것으로 생각된다. 그러나 지표에 드러난 SLF의 주향은 대략 N15E 안팎이며 Nelson 저반 역시 이러한 방향성을 가진다. 또한, 고주파대역에서는 국부적인 3-D 이상체들에 의해 각 측정마다 변화가 심하지만 대체로  $-5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 의 범위를 보인다. 따라서, Fig. 11b에 도시한 새로운 모델에서는 SLF의 주향을 N으로 설정하였다.

Fig. 11a 모델의 또다른 문제는 이 모델이 TM 모드의 저주파에서 나타나는 높은 위상 변화를 설명할 수 없다는 것이다. 그러나, 앞에서 언급되었던 Fig. 2의 모델 3, 모델 4와 같은 구조에서는 위상이 매우 급격히 증가하는 현상을 볼 수 있으므로 상부맨틀뿐만 아니라 하부지각 혹은 표층에 이방성 매질이 존재할 가능성이 있다. 표층의 이방성 이상체가 수십 km 범위에 걸쳐 분포하기는 어려우므로 하부지각에 이방성 지층이 광범위하게 존재할 가능성이 높으며, 상부맨틀의 이방성 주향과 차이가 커야하며 이방성 계수도 큰 값을 가져야 할 것으로 생각된다. Fig. 11b의 모델을 사용하여 계산된 결과를 Fig. 12에 도시하였다. TM모드의 저주파에서  $90^{\circ}$  이상의 위상값을 갖는 부분이 생기는 것을 볼 수 있다.

## 6. 결론 및 토의

이방성 매질에서는 임피던스의 대각선 성분이 존재하며, 이방성 계수에 따라 무시할 수 없을 만큼 커질 수도 있다. 2차원 구조에서는 수직경계에 집적되는 전하에 의해 전기장의 불연속이 발생하고 이방성에 의한 전기장의 왜곡으로 인하여 YY 성분이 강한 값으로 나타난다. 서로 다른 이방성을 가지는 매질들이 혼재할 경우, 이방성 주향의 차이가 크고, 이방성 계수가 큰 매질들일수록 TE 모드와 TM모드의 위상차가 커지며, 어떤 경우에는 TM모드의 위상이  $90^{\circ}$  이상으로 증가할 수도 있다. 이방성 매질에서의 GB 분리법은 제한적으로 적용될 수 있다. 광역적인 구조가 등방성 매질일 때는 표층의 이방성 이상체의 영향을 쉽게 다룰 수 있으나, 이방성 매질을 가지는 광역구조에서는 적용되기 어렵다. 그러나, GB 분리법으로 추출되는 주향은 심부의 이방성 주향을 추정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

이상의 결과들을 통하여 얻은 이방성 매질에 의한 영향의 이해를 토대로 BC87자료로부터 이방성 매질의 존재 가능성을 추정해보았다. 기존의 많은 연구들에 의해 알려져 왔듯이 상부맨틀에는 강한 이방성이 존재할 가능성이 높으며, BC87자료에  $90^{\circ}$  이상의 위상이 나타나는 것으로 보아 하부지

각 내에 상부맨틀과는 다른 이방성 주향을 가지는 매질이 존재할 가능성이 있다.

벡터 혹은 텐서 형태의 자료를 얻을 수 있는 MT 탐사나 탄성파 탐사에서는 이방성을 고려함으로써 보다 정확한 해석이 이루어질 수 있으며 지질구조에 대한 보다 많은 정보를 추출할 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고 문헌

- Bahr, K., 1997, Electrical anisotropy and conductivity distribution functions of fractal random networks and of the crust: the scale effect of connectivity, *Geophysical Journal International*, 130, 649-660.
- Beamish, D. and Travassos, J. M., 1992, A study of static shift removal from magnetotelluric data, *Journal of Applied Geophysics*, 29, 157-178.
- Eggers, D. E., 1982, An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor, *Geophysics*, 47, 1204-1214.
- Groom, R. W. and Bailey, R. C., 1989, Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *Journal of Geophysical Research*, B, 93, 1913-1925.
- Groom, R. W. and Bailey, R. C., 1991, Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decompositions, *Geophysics*, 56, 496-518.
- Jones, A. G., 1988, Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment, *Geophysics*, 53, 967-978.
- Jones, A. G., 1993, The BC87 Dataset: Tectonic Setting, Previous EM Results, and Recorded MT Data, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 1089-1105.
- Jones, A. G., Groom, R. W., and Kurtz, R. D., 1993, Decomposition and Modelling of the BC87 Dataset, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 1127-1150.
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966, *Electrical methods in Geophysical Prospecting*, Pergamon Press, Oxford.
- Kurtz, R. D., Craven, J. A., Niblett, E. R., and Stevens, R. A., 1993, The conductivity of the crust and mantle beneath the Kapuskasing Uplift: electrical anisotropy in the upper mantle, *Geophysical Journal International*, 113, 483-498.
- Marquis, G., Jones, A. G., and Hyndman, R. D., 1995, Coincident conductive and reflective middle and lower crust in southern British Columbia, *Geophysical Journal International*, 120, 111-131.
- Osella, A. M. and Martinelli, P., 1993, Magnetotelluric response of anisotropic 2-D structures, *Geophysical Journal International*, 115, 819-828.
- Pek, J. and Verner, T., 1997, Finite-difference modelling of magnetotelluric fields in two-dimensional anisotropic media, *Geophysical Journal International*, 128, 505-521.
- Reddy, I. K. and Rankin, D., 1971, Magnetotelluric effect of dipping anisotropies, *Geophysical Prospecting*, 19, 84-97.
- Reddy, I. K. and Rankin, D., 1975, Magnetotelluric response of laterally inhomogeneous and anisotropic structure, *Geophysics*, 40, 1035-1045.
- Smith, J. T., 1997, Estimating galvanic-distortion magnetic fields in magnetotellurics, *Geophysical Journal International*, 130, 65-72.
- Spitz, S., 1985, The magnetotelluric impedance tensor properties with respect to rotations, *Geophysics*, 50, 1610-1617.
- Zhang, P., Roberts, R. G., and Pederson, L. B., 1987, Magnetotelluric strike rules, *Geophysics*, 52, 267-278.

---

1999년 2월 19일 원고접수

1999년 6월 2일 원고채택