

자기지전류 탐사 자료에 나타나는 옥천대의 전기적 이방성 구조

이춘기^{1,*} · 이희순² · 권병두¹ · 조인기³ · 오석훈⁴ · 송윤호⁵ · 이태종⁵

¹서울대학교 지구과학교육과, 151-748, 서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1

²경인교육대학교 과학교육과, 430-739, 경기도 안양시 만안구 석수1동 산 6-8

³강원대학교 지구물리학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192-1

⁴강원대학교 지구시스템공학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192-1

⁵한국지질자원연구원 지열자원연구실, 305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Electrical Anisotropy of the Okchon Belt Inferred from Magnetotelluric Data

Choon-Ki Lee^{1,*}, Heuisoon Lee², Byung-Doo Kwon¹, In-Ky Cho³,
Seokhoon Oh⁴, Yoonho Song⁵, and Tae-Jong Lee⁵

¹Department Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-748, Korea

²Department Science Education, Gyeongin National University of Education, Gyeonggi 430-040, Korea

³Department Geophysics, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

⁴Department Geosystem Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

⁵Geothermal Resources Group, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Abstract: The MT data at the Okchon Belt show peculiar phase responses exceeding 90°. A reasonable explanation is that those responses are due to an electrical anisotropy structure which is composed of a narrow anisotropic block and an anisotropic layer. Considering the dominant anisotropic strikes of the block (NE-trend) and the layer (NW-trend) inferred from the MT data, if existing, the electrical anisotropy in the Okchon Belt was probably produced by the deformations in the pre-Jurassic period, since the NE-trending shearing or thrusting should create alternating bands of metamorphic rocks and fractures with NE-trending. Correlation of the structural strike of 2-D block with the latest EW-trending deformation events demonstrates that the geometrical structure of the anisotropic block was formed by the latest Daebo and Bulgugsa orogeny.

Keywords: electrical anisotropy, magnetotellurics, Okchon Belt, phases exceeding 90°

요 약: 옥천대에서의 자기지전류 탐사자료는 위상이 90°를 초과하는 매우 특이한 반응을 보이고 있으며 이러한 특이성은 매우 강한 이방성 매질의 영향에 기인하는 것으로 추정된다. 자료를 설명할 수 있는 타당한 모델은 좁은 이방성 블록과 이방성 층으로 이루어진 모델이다. 상부의 이방성 블록은 북동 방향의 주향을, 하부의 이방성 층은 북서 방향의 이방성 주향을 가지고 있으며 이방성 매질은 쥐라기 이전 지각변형에 의해 형성된 것으로 추정된다. 이는 옥천대가 백악기 이전에 북동 방향성을 가지는 전단 변형과 트러스트 습곡 변형을 경험하였기 때문에 그 방향으로의 교대구조와 파쇄대가 발달했을 가능성이 높기 때문이다. 반면 이방성 블록의 구조적 주향은 동서 방향이 우세하며 이것은 이방성 블록의 기하학적 구조가 백악기 지각변동인 불국사 조산운동에 의해 형성되었을 가능성을 시사한다.

주요어: 전기적 이방성, 자기지전류 탐사, 옥천대, 90° 초과 위상

*Corresponding author: cklee92@snu.ac.kr

Tel: 82-17-362-1937

Fax: 82-2-874-3289

서 론

균일한 반무한 매질에 전자기장이 입사하는 경우, 전기장과 자기장의 위상차는 45° 혹은 -135° 이며 지하의 전기전도도 구조에 따라 위상차가 변한다. 자기지전류(Magnetotelluric, MT) 탐사의 위상 자료는 이러한 전기장과 자기장의 위상차를 의미하며 겔보기 비저항과 함께 자료해석에서 매우 중요한 파라미터이다. 일반적인 MT 반응에서는 XY성분의 위상은 0° 와 90° 사이에 존재하고 YX 성분의 위상은 -90° 와 -180° 사이에 존재하며, 지하의 전기전도도 구조에 변화가 없는 경우 45° 와 -135° 근처에 분포한다. YX 성분의 음의 위상은 전자기장의 부호에 따라 0° 와 90° 사이의 양의 위상으로 표현할 수 있으므로 여기서는 양의 위상으로 표현하도록 하겠다.

MT 탐사 자료 중 지역에 따라 매우 큰 값을 가지는 위상이 나타나거나 90° 를 초과하여 다른 사분면의 값을 가지는 위상이 나타나는 경우가 가끔 발생한다. 이러한 현상은 1차원 혹은 2차원 MT 자료 해석 기술로는 해석할 수 없는 특이한 현상으로서, 전류의 강한 채널링에 의해 발생하는 전자기장의 왜곡현상에 기인하는 것으로 생각된다. 최근 매우 큰 위상을 보이는 이상대에 대한 여러 가지 해석이 이루어지고 있는데, 크게 세가지 방식으로 접근한다. 첫째는 표층 이상체에 의한 강한 전류의 채널링 현상(Livelybrooks et al., 1996; Jones et al., 1993), 둘째는 매우 전기전도도가 높은 소규모 3차원 구조(Weckmann et al., 2003, Pous et al., 2002), 마지막으로 특정한 방향으로 발달한 이방성 구조들의 조합(Pek and Verner, 1997; Weckmann et al., 2003; Heise and Pous, 2003)이다.

이춘기 등(2007)은 한반도를 횡단하는 MT 탐사를 수행하던 중, 옥천대 지역에서 90° 를 초과하는 위상 반응이 나타남을 확인한 바 있다. 본 연구에서는 이 지역에서 나타나는 위상의 이상 반응의 메카니즘을 고찰하고자 하였다. 옥천대의 비정상적인 위상반응은 40 km에 이르는 넓은 범위에서 나타나고 동반되는 겔보기 비저항이 매우 높은 형태이므로 표층의 채널링이나 소규모의 고전도성 매질보다는 대규모의 이방성 구조에 의한 전류의 왜곡에 기인할 가능성이 높다. 이에 따라 Pek and Verner(1997)의 이방성 모델에 기반한 2차원 이방성 모델링을 이용하여 옥천대에서 나타나는 MT 위상반응을 설명하고자 하였으며,

모델링과 실제 자료의 비교를 통해 옥천대에 존재하는 이방성 매질의 특성을 규명하고 옥천대가 경험한 지각변형과의 관계를 고찰하였다.

연구지역의 지질

옥천대는 임진강 벨트와 함께 한반도의 대표적인 조산운동지역이다. 옥천누층군의 층서는 10개 이상의 층으로 나누어지긴 하지만 그 상호관계가 아직 명확하게 규명되지 않았다(Chough et al., 2000). 이 조산대는 중국의 쉐링-다비-수루 조산대와 관련되어 있을 수 있다고 제안된 적도 있어, 옥천대의 진화는 여러 각도에서 조명되고 있다(Ree et al., 1996, Chough et al., 2000, 조문섭과 김현철, 2002). 옥천대는 선캄브리아기의 경기육괴와 영남육괴를 나누는 지질구조이며, 한반도를 가로질러 350 km 이상에 걸쳐 약 40~70 km의 폭으로 분포하고 있다. 암상과 변성 정도에 따라 남서쪽의 옥천분지와 북동쪽의 태백산분지로 나누어진다.

MT 측선은 옥천 분지와 태백산 분지가 접하고 있는 문경과 괴산지역을 통과하여 설정하였다(Fig. 1). 문경에 가까운 MT 측선의 남동쪽 부분에는 캄브리아-오르도비스기의 조선 누층군으로 알려진 퇴적 변성암이 선캄브리아기의 편마암 등 영남육괴의 변성암류를 부정합으로 덮고 있다. 이 고생대 퇴적암은 주로 얇은 바다 기원이며 주로 석탄층이 다량 포함되어 있으며 사암과 셰일은 상대적으로 적다. 괴산지역의 옥천 누층군은 퇴적암, 화산암 및 화산 쇄설암으로 형성되어있으며 녹색편암과 각석암류로 변성되어 있다. 한편, 대보 조산 운동 시기에 형성된 유라기 화강암이 옥천대의 북쪽과 남쪽 경계를 따라 관입되어 있다. 대보화강암이 관입한지 160 내지 100 만년 이후 백악기 화강암이 경상분지 전체와 옥천대 중앙부의 일부분에 관입되었다.

전기적 이방성

미세 결정 구조의 이방성을 제외하고 이방성 매질은 어떤 방향으로 두 가지 이상의 매질이 교대로 섞여 있어 저주파의 전자기파에 대하여 방향에 따라 다른 전기 전도도를 보이게 된다. Wannamaker (2005)는 실제 현장 및 실험실내의 실험결과를 기반으로 전기적 이방성의 원인을 다음과 같이 여러 가

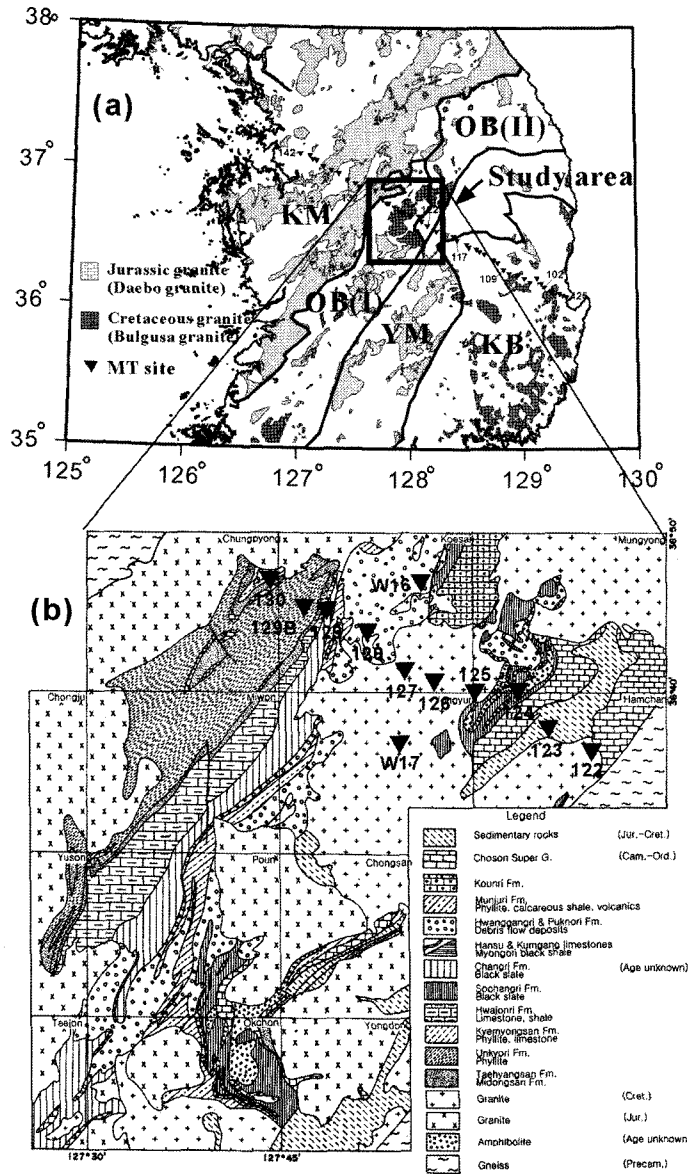


Fig. 1. (a) Simplified geologic map of the Korean Peninsula including the location of study area. (b) A detailed geologic map of the Okchon Belt from Chough and Bahk (1992). The triangles show the locations of MT sites.

지로 설명하였다. 지각에서의 이방성은 주로 파쇄대 공극들의 방향에 따른 차이, 교대 암상, 비균질 구조의 방향성, 유체화/용융(fluidized/melt-bearing), 혹은 흑연화된 전단대에 기인한다. 마지막 두 원인은 주로 하부지각의 이방성과 밀접한 관련이 있다. 상부 맨틀에서는 전단 응력을 따라 배열된 감람석결정내의 탈수에 의해 전기적 이방성이 흔히 발생하는 것으로 알려져 있다.

전세계적으로 심부 지각과 맨틀의 전기적 이방성이

연구되고 있는데, 뉴질랜드 남 알프스나 남 칠레 안데스 산맥 등 활동적인 변환압축(transpression)지역에서는 대부분 화산열도 하부의 고전도 이상대에서 강한 전기적 이방성이 존재한다(Brasse and Soyer, 2001; Wannamaker et al., 2002). 이런 지역의 강한 고전도 이상대는 보통 높은 온도의 유체 혹은 용융, 연성 전단대(하부지각), 파쇄대(상부지각) 등과 연관되어 있으며 임피던스의 주된 주향 방향이 화산 열도나 해구와 평행한 특성을 가진다. 활동적인 변환인

장(transtension)지역에서는 하부 지각과 상부 맨틀내의 유체와 부분용융이 역시 이방성의 주된 원인이며 네바다의 Great Basin과 유럽의 Rhenish Shield 지역 등에서 나타난다(Brasse and Soyer, 2001; Wannamaker et al., 2002).

캐나다의 선캠브리아 평원에서 300 km 이상의 길이에 걸쳐 이방성이 관찰되고 있으며 과거 지구구조 패턴과 일치하는 방향성을 보여주고 있다. Boerner et al. (2000)는 이러한 이방성이 맨틀로부터 지각의 단층대를 따라 나오는 CO₂의 흐름에 의해 형성된 흑연의 고전도성에 기인하는 것으로 해석하였다. 전기전도도와 탄성파의 이방성이 비스듬한 각도를 보이는 것은 암석 결정의 이방성과 구조적인 이방성이 서로 다른 방향을 가지기 때문이다.

North American Central Plains(NACP), Great Slave Lake 전단대, 독일 KTB 시추 지역 등의 MT 자료는 하부지각의 높은 전기전도도와 전기적 이방성

의 원인으로서는 흑연 필름의 역할을 보여주고 있다 (Eaton et al., 2004; Jones et al., 1997; Wannamaker, 2000). 전단대를 따라 형성된 흑연 필름과 감람석에서의 탈수는 전기적 이방성의 메카니즘을 제공한다. 연이은 변성작용은 흑연을 이동시켜 암맥과 같은 형태로 재배열시킴으로써 보다 좋은 연결성을 가지게 만든다(Eisel et al., 2001).

한편, 방향에 따른 이방성 매질의 조합은 90°를 초과하는 비정상적인 위상의 이상을 만들어 낸다. Pek and Verner(1997)은 먼저 이방성 층위에서 서로 다른 방향의 이방성주향을 가지는 이방성 블록이 존재하는 모델에 대한 유한차분법 모델링을 수행하였다. 그들은 표층의 이방성 블록의 구조적 주향에 수직하게 흐르는 전류와 전기장의 방향이 일치하지 않아서 발생하는 것으로 부분적으로는 전기장과 전류가 서로 반대방향이 되어 나타나는 현상으로 설명하였다. 그들의 2차원 이방성 모델링은 매우 큰 위상반응을 보

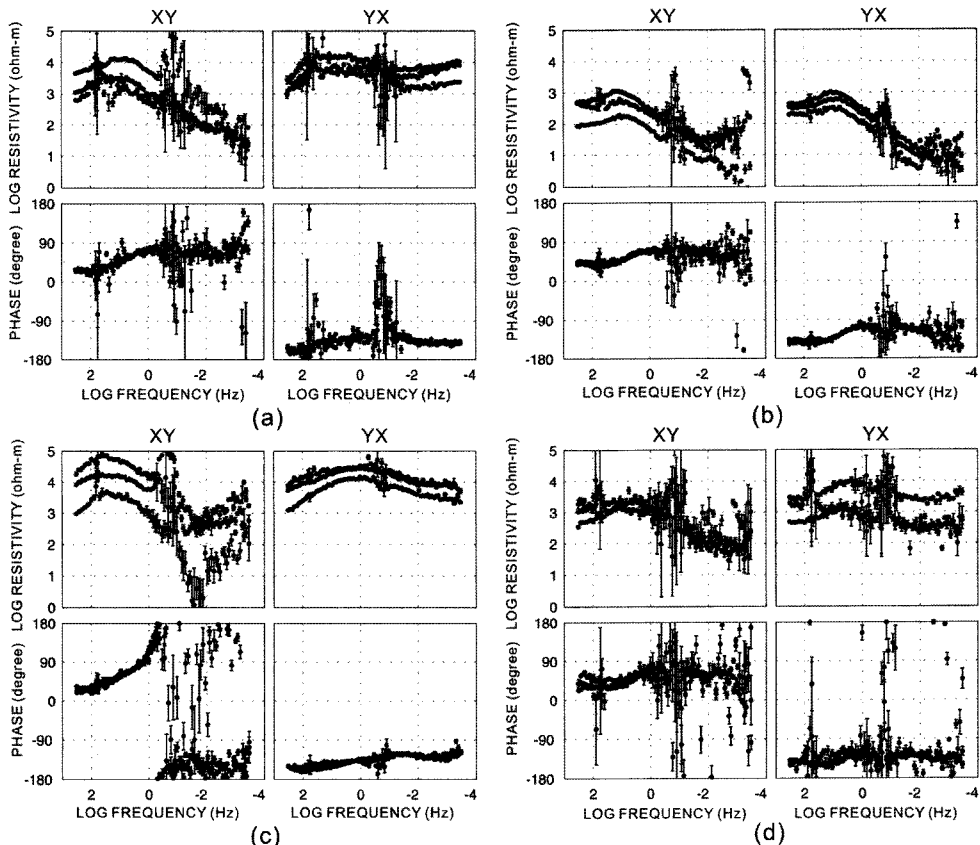


Fig. 2. Examples of apparent resistivity and phase curves: (a) sites 101, 102, and 103, (b) sites 113, 114, and 115, (c) sites 125, 126, and 127, (d) sites 133, 134, and 136. X denotes the north.

이는 자료들의 해석에 종종 이용되어져 왔다. 나미비아의 Damara Belt에서는 매우 큰 스쿠 값과 90°를 초과하는 매우 큰 위상 반응이 관찰되었다. 이 반응은 인접한 단층 시스템을 따라 나타나는 고전도 이방성을 가지는 상부지각과 알려지지 않은 방향의 이방성을 가지는 하부지각을 모델로 하여 관측된 위상 반응을 설명하였다(Weckmann et al., 2003). 비슷하게 남서 Iberia 지역에서도 이러한 반응이 관찰되었으며 이 지역은 흑연이 풍부한 흑색 편암과 일반적인 편암이 교대로 나타나는 암상에 기인하는 이방성이 그 원인인 것으로 지적되었다(Heise and Pous, 2003).

옥천대에서 나타나는 90°를 초과하는 위상

Fig. 2는 측정된 모든 MT 측정 중 각 지역을 대표하는 걸보기 비저항과 위상 곡선의 예를 나타내고 있으며 모든 측정의 자료는 Lee (2006)에서 확인할

수 있다. 탐사의 편의상 전기장과 자기장의 측정을 동서남북 방향으로 실시하였기 때문에 X는 남북방향, Y는 동서 방향을 나타낸다. 0.1 Hz-1 Hz 주파수 대역에서는 일부 측정점을 제외하고는 매우 큰 오차가 발생하여 자료처리에 이용하기 어렵다. 이 주파수 대역은 자연적인 MT 신호의 크기가 매우 작기 때문에 이른바 'dead band'라고 불린다.

MT 반응에서 XY성분의 위상은 0°와 90° 사이에 존재하고 YX 성분의 위상은 -90°와 -180° 사이에 존재하는 것이 일반적이다. Fig. 2(c)를 제외한 나머지 반응에서는 몇몇 주파수에서 잡음과 임피던스 추정 오차에 의해 부분적으로 범위를 벗어나는 경우가 있으나 전체적으로는 일반적인 위상의 범위 내에 존재한다. 그러나 옥천대에서는 XY성분에서 일관적으로 90°를 넘어서는 위상이 관찰된다(Fig. 2(c)). 위상 반응이 전주파수 대역에서 연속적인 변화를 보이고 있으며 옥천대 지역 대부분의 측정점에서 이러한 현상이 관찰되고 있고, 임피던스 추정 오차도 작은 편에

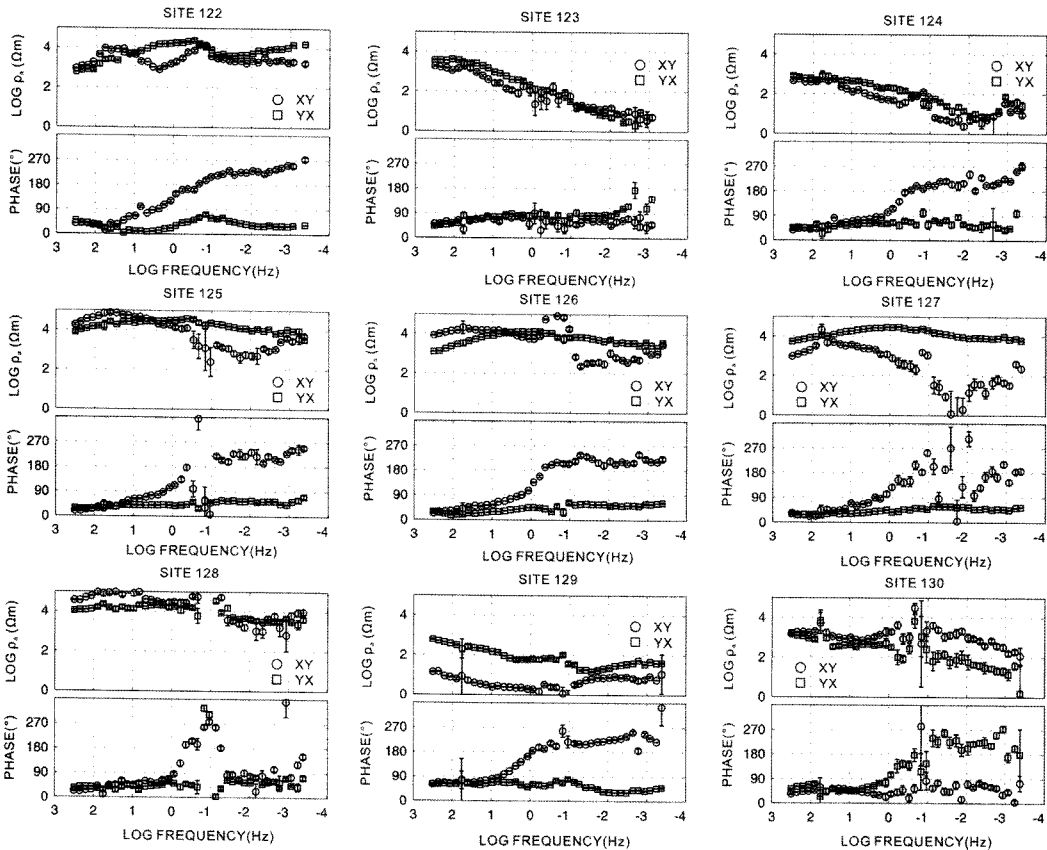


Fig. 3. Apparent resistivities and phases at sites on the Okchon Belt.

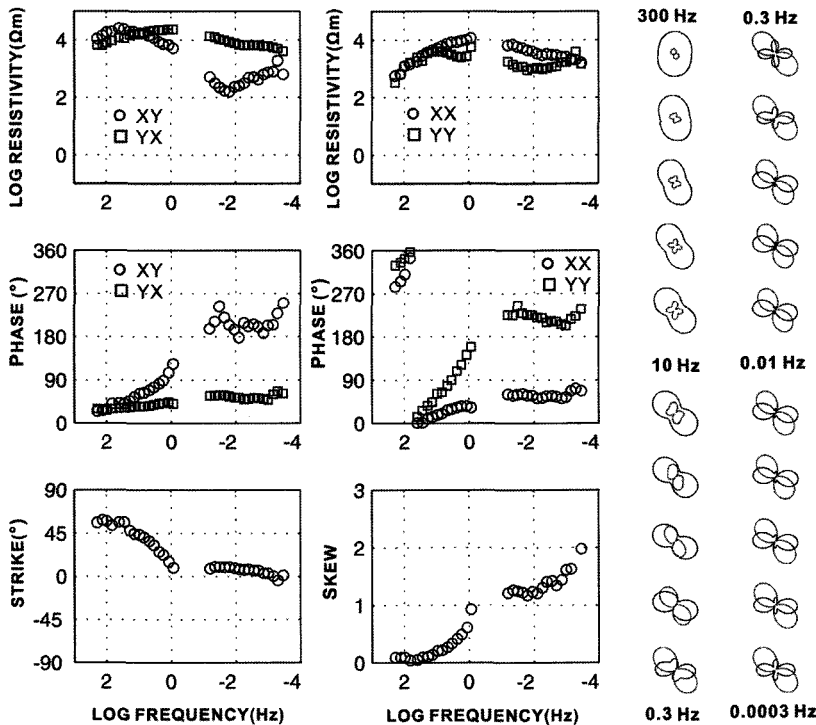


Fig. 4. MT parameters derived from the impedances spatially averaged using data from sites 125, 126, and 127: apparent resistivity curves (top panels), phase curves (middle panels), strike and skew (bottom panels), and polar diagram (right panels). The black lines in the polar diagram denote the XY components and the gray lines show the XX components.

속하므로 잡음에 의한 영향일 가능성은 거의 없다.

Fig. 3는 옥천대 내에 위치한 MT 측정점에서 나타나는 겉보기비저항과 위상 곡선의 형태를 보여주고 있다. 앞으로 편의상 YX, YY성분의 위상이 XX, XY성분의 위상과 같은 사분면에 위치하도록 하기 위하여 180°를 더하여 표현하기로 하겠다. 측정점 128을 제외한 옥천대 내의 모든 측정점에서 XY 성분의 위상이 90°를 초과하며, 많은 측정점에서 270°까지 증가하는 특성을 보인다.

대표적인 반응의 특성을 알아보기 위하여 옥천대 중앙의 관입 화강암 위에 위치한 측정점 125, 126, 127 (Fig. 1)의 자료를 평균하여 임피던스를 구하고 겉보기비저항, 위상, Swift 주향, 스큐, 극다이아그램을 Fig. 4에 도시하였다. YX 성분의 겉보기비저항과 위상은 주파수에 따라 부드럽게 변화하는데 반해 XY 성분은 겉보기 비저항이 급격히 감소하고, 위상이 급격히 증가하는 형태를 보인다. 임피던스로부터 추정된 주향(Swift strike)은 북쪽으로부터 시계방향의 각도를 의미하며 고주파대역에서 약 50°에서 시작하여 저주파대역에서는 0° 부근까지 변화한다. 스큐는 자

료의 차원성을 반영하는 것으로서 1 Hz 이하에서 1을 초과하는 매우 큰 스큐가 나타나므로 1차원 혹은 2차원 등방성 구조로 가정할 수 없다.

이방성 2차원 MT 모델링

이방성 문제에서 전기전도도는 3차 텐서로 주어진다. 하지만 Fig. 5에서 보는 바와 같이 단순한 층상 구조를 고려하면 전기전도도는 평행 전기비저항(ρ_p), 수직 전기비저항(ρ_n), 이방성 주향(α), 이방성 경사(ϕ)의 네 가지 파라미터로 묘사가 가능하다. 이 파라미터들은 $\rho_p/\rho_n/\alpha/\phi$ 와 같은 형식으로 간단히 표현할 수 있으며, 이방성 주향은 최소 전기비저항을 가지는 방향을 의미한다. 실제로 모델의 단순화를 위해 이방성 경사는 거의 고려하지 않으며 항상 경사가 90°인 것으로 가정한다.

90° 이상의 위상 반응을 계산하기 위하여 Pek and Verner(1997)의 유한차분 모델링 코드와 Fig. 6과 같은 모양의 모델을 사용하였다. 이 모델에는 좁은 이방성 블록과 이방성 층이 있고 이들은 서로 다른 방

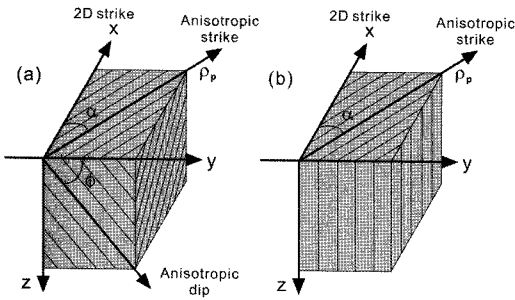


Fig. 5. Conceptual representation of anisotropy. (a) For simple laminar geometry, anisotropy is defined in terms of the bulk resistivities that are normal and parallel to the laminar with strike and dip which may be non-parallel to the geometric 2-D strike. (b) Practically, the anisotropic dip is not considered in the problem of deep earth structure to retain the simplicity of the model.

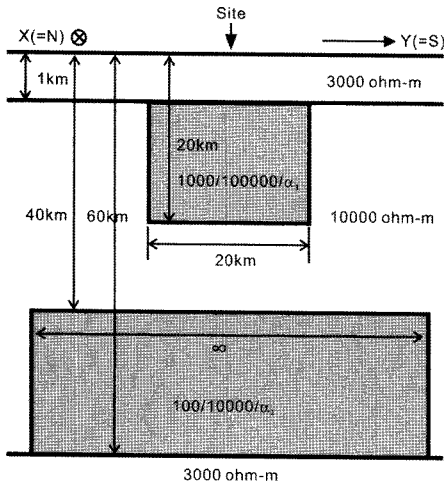


Fig. 6. An anisotropic resistivity model as the basis of this study. The gray color indicate the region of anisotropic medium. X denotes the north.

향의 이방성 주향을 가지고 있다.

비정상적인 위상이 나타나는 조건을 결정하기 위하여 여러 가지 이방성 주향에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 7은 이방성 주향이 변화에 따라 나타나는 YX 성분 겉보기 비저항의 변화를 보여준다. 그 결과 α_1 이 -30° 와 -60° 사이에서, α_2 는 40° 와 70° 사이에서 위상이 급격히 3 사분면을 벗어나고 α_1 이 40° 와 70° 사이에서, α_2 는 -30° 와 -60° 사이에서도 같은 결과가 나타난다. 겉보기 비저항은 이방성 주향들이 $\alpha_1 = -50^\circ$, $\alpha_2 = 50^\circ$ 또는 $\alpha_1 = 50^\circ$, $\alpha_2 = -50^\circ$ 부근에서 최소값을 나타낸다. Fig. 8은 $\alpha_1 = -40^\circ$, $\alpha_2 = 50^\circ$ 일 때

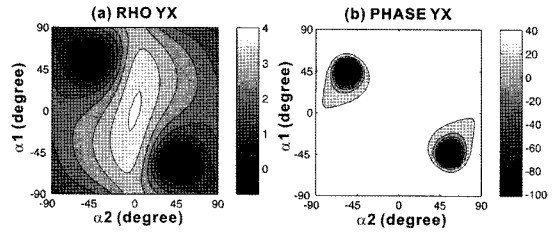


Fig. 7. Variations in apparent resistivity (a) and phase (b) at the frequency of 0.01 Hz for the varying anisotropic strikes α_1 and α_2 .

이방성 블록의 중앙에서 계산되어진 임피던스 반응을 나타낸다. YX 성분의 겉보기비저항이 급격히 감소함과 90° 이상으로 증가하여 비정상적인 위상반응이 나타난다. Fig. 4와 비교해볼 때 XY와 YX 모드가 바뀌었을 뿐 겉보기비저항 곡선의 모양이 거의 비슷하다.

YX 성분의 위상이 90° 를 넘어서는 주파수는 약 1 Hz 이다. 이 주파수를 기준으로 Swift 주향과 극 다이나그램 모양도 급격히 변한다. 즉, 1 Hz 이상에서는 극 다이나그램의 XY 성분이 XX 성분보다 항상 크고 Swift 주향이 이방성 주향의 수직 방향, 즉 이방성 블록의 전기비저항이 최대가 되는 방향에 가까운 반면, 1 Hz 이하에서는 극 다이나그램의 XX 성분이 부분적으로 XY 성분을 능가하는 경향을 보이고 Swift 주향은 2차원 구조의 주향인 X 방향에 근접한다. 이러한 이방성 주향과 2차원 구조의 주향을 반영하고 있는 Swift 주향과 극다이나그램의 특성을 고려하면 측정 자료로부터 각각의 주향을 추정할 수 있을 것이다. 즉, Fig. 4의 Swift 주향과 극 다이나그램으로부터 이방성 주향과 2차원구조의 주향이 각각 대략 북동 방향과 동서방향으로 결정될 수 있다.

이방성 블록을 가로지르는 축선을 따라 겉보기 비저항, 위상, Swift 주향을 Fig. 9에 도시하였다. 90° 이상의 위상은 경계 부근을 제외한 블록내의 대부분의 축점에서 나타난다. YX 성분 겉보기 비저항은 블록 내에서 매우 낮으며 축점 B와 같이 경계 근처에서 최소값이 나타난다. 축점 B에서 계산되어진 겉보기 비저항과 위상은 XY, YX 성분이 뒤바뀌어 있을 뿐 축점 127에서의 자료와 거의 흡사하다.

실측 MT 자료에의 적용

옥천대의 상부지각에는 층상구조를 이루는 퇴적암, 변성암, 화성암들이 많이 분포하므로 파쇄구조나 층

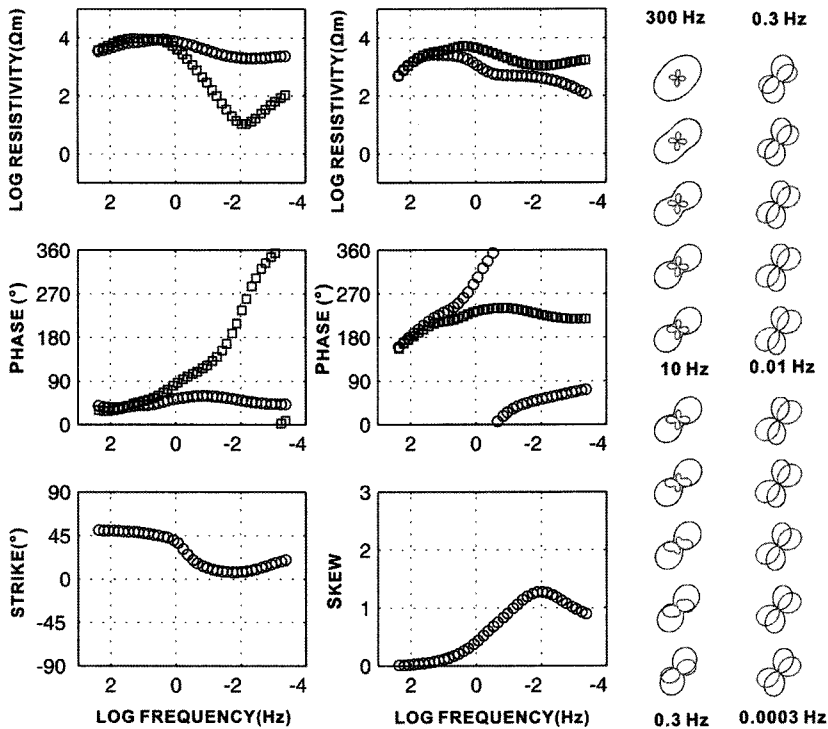


Fig. 8. MT parameters calculated using the trial model (Fig. 6) with $\alpha_1 = -40$, $\alpha_2 = 50$.

상구조에 의한 전기적 이방성이 존재할 가능성이 높다. 하지만 2차원 역산에서 나타난 하부지각은 그렇게 높은 전기전도도를 가지고 있는 편이 아니어서 하부지각에 흑연화되거나 유체가 풍부한 이상대가 존재하지는 않는 것으로 보인다. 따라서 옥천대에서는 상부지각과 상부맨틀에 전기적 이방성이 존재하는 모델로 가정하였다. 2차원 역산 결과를 참조하여 이방성 블록의 두께는 20 km로 정하였다. 맨틀의 깊이는 MT 자료로 분해되지 않지만 최근의 인공 발파에 따른 지각 속도 구조 연구에 의하면 한반도의 모호면 깊이는 30.8 km에서 36.1 km 범위에 있는 것으로 보고되고 있기 때문에 여기서는 맨틀의 깊이를 35 km로 설정하였다.

측점 126의 자료와 모델링 결과를 비교하여, 90° 이상의 위상과 임피던스의 회전에 따른 특성 등을 가장 잘 만족시키는 모델을 도출하였으며 Fig. 10은 Fig. 6의 모델로부터 수정된 모델을 보여주고 있다. 상부지각의 이방성 블록은 수 백 이상의 매우 높은 이방성 계수를 가지고 있으며 상부맨틀의 이방성 층은 약 100 정도의 이방성 계수를 가지는 매질로 설정되었다. 이러한 높은 이방성 계수는 실험실 스케일

의 실험에서는 타당하지 않은 것처럼 보이지만 광역적인 스케일에서는 100 이상의 높은 이방성 계수를 가진 매질이 종종 나타난다.

Fig. 11은 모델링 결과와 실측자료의 XY 임피던스를 비교한 것이다. 측정된 임피던스는 75°만큼 회전되었다. 모델링 결과가 실측자료와 완전히 일치하는 것은 아니지만 90°를 초과하는 위상의 형태는 관측자료와 적절히 일치한다. 이러한 비교를 통해 이방성 블록의 2차원 구조 주향은 약 N75°E이며 이방성 블록의 이방성 주향은 약 N45°E임을 알 수 있다. 이방성 주향의 방향은 옥천대에 존재하는 주된 지질경계들과 층리면들의 방향과 거의 일치한다.

이방성 2차원 모델링은 90° 이상의 위상이 관측되는 경우의 지하 구조 모델을 제시하여 준다. 하지만 실측자료를 완전히 만족시킬 수 있는 모델을 찾는 것은 매우 많은 모델링을 필요로 하며 큰 모호성과 해의 비유일성이 존재한다. 그러나 모델링된 임피던스의 회전에 따른 특성을 잘 고려하면 실측자료로부터 이방성 주향이나 2차원 구조의 주향에 대한 정보를 추출할 수 있다. 90° 이상의 위상효과를 좌표계에 의해 좌우되기 때문에 임피던스의 회전각도가 이방성

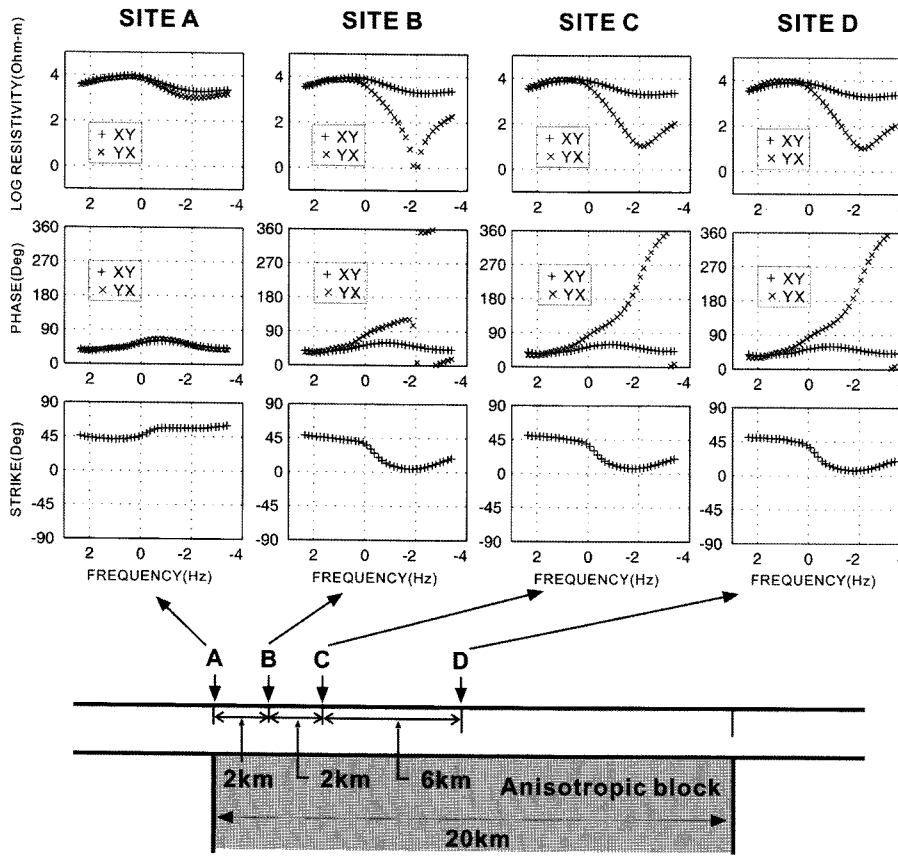


Fig. 9. Apparent resistivity, phase, and strike of four exemplary sites in the trial model (Fig. 5).

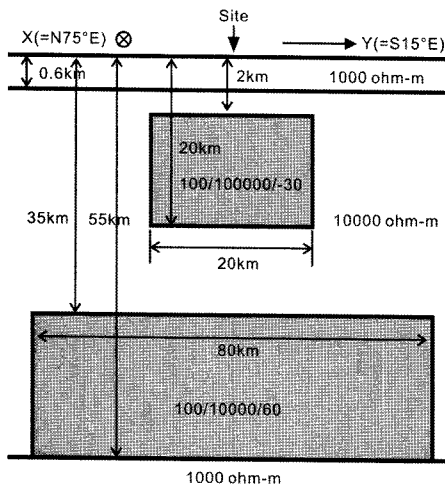


Fig. 10. Modified anisotropic model fitting the data of site 126. X denotes N75°E.

블록의 이방성 주향방향에 가까워지면 90° 이상의 위상효과가 약해지거나 사라지는 경향이 있다(Heise

and Pous, 2003). 따라서 위상이 사분면을 벗어나지 않는 회전 각도는 이방성 블록의 이방성 주향을 결정하는 기준이 된다. Fig. 12(a)는 옥천대 부근 측정에서의 XY 위상의 회전 특성을 보여준다. 예를 들면 측정 126에서는 XY 및 YX 위상이 회전 각도 45°-65°에서는 사분면을 벗어나지 않는다(Fig. 12(b)). 따라서 측정 126에서 추정되는 상부지각 블록의 이방성 주향은 N45°E-N65°E이다. 이러한 방법을 모든 측점에 적용하여 추정된 이방성 주향을 지형도에 도시하였다(Fig. 13). 대부분의 측정에서는 N20°E에서 N70°E 사이의 값을 보이고 있으며 이는 옥천대 지질 구조의 주된 주향방향인 N30°E-N50°E의 범위와 거의 흡사하다.

다음 단계는 하부 이방성 층의 이방성 주향을 결정하는 것이다. Fig. 7의 모델링 결과 분석을 고려하면 하부 이방성 층의 주향이 상부 이방성 블록의 이방성 주향과 거의 수직에 가까울 때 90° 이상의 위상은 관찰된다. 따라서 알려져 있지 않은 하부 이방성

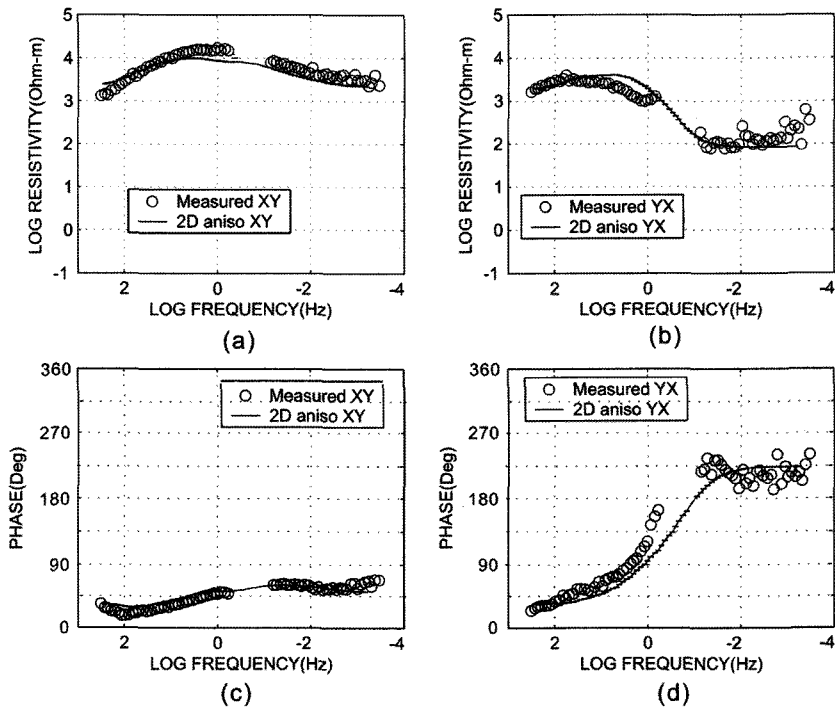


Fig. 11. Comparison between the measured data and calculated data: (a) XY apparent resistivity, (b) YX apparent resistivity, (c) XY phase, and (d) YX phase. X denotes N75°E.

은 NW 방향의 이방성을 가지는 것으로 추정된다.

최종적으로 Fig. 7에서처럼 블록의 이방성 주향은 2차원 구조 주향과 30°에서 60° 사이의 차이가 있어야 90° 이상의 위상이 나타난다는 사실을 고려해 보면 Fig. 13로부터 이방성 블록의 2차원 구조 주향을 추출할 수 있다(Fig. 14).

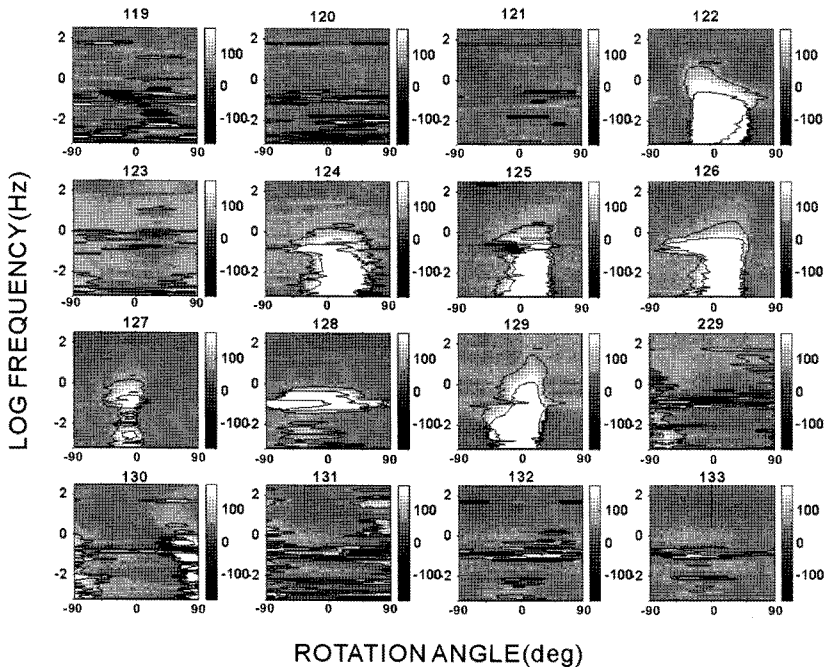
주향의 범위가 상당히 넓긴 하지만 Fig. 14는 예상되는 2차원 구조의 주향이 EW 방향의 경향을 가진다는 것을 보여준다. 이러한 방향성은 지형기복도에서 나타나는 선형구조의 경향과 거의 일치한다. 이 선형구조들은 안동 단층과 팔공산 단층과 같은 몇몇의 단층 시스템과 연관된 것들로 보인다.

토 의

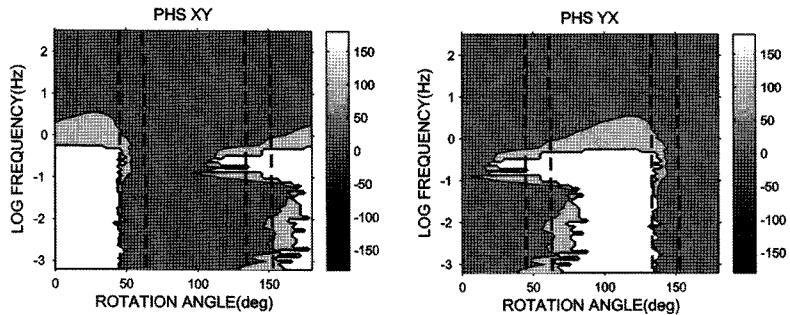
옥천대는 여러번에 걸쳐 형성된 드러스트 습곡대이다. Cluzel et al.(1990)은 옥천 분지가 세 번의 조산운동을 경험하였다고 하였다: (1) 실루리아-데본기의 칼레도니아(혹은 옥천) 조산운동, (2) 후기 페름-트라이아스기의 인도시니아(혹은 송림) 조산운동, (3) 중기 쥐라기-초기 백악기의 대보 조산운동. 하지만 옥

천대에서 칼레도니아 조산운동의 존재는 명확하지 않다. Kim(1996)은 한반도 지괴의 초기 변형이 후기 페름-초기 트라이아스기에 송림조산운동의 형태로 형성되었으며 뒤 이은 대보 조산운동이 현재의 주된 주향방향인 NE 방향의 습곡 및 드러스트를 형성시켰다고 주장하였다. Lee(2000)은 옥천대의 변형사를 크게 보아 (a) NE-SW 방향의 압축력으로 인해 NW 주향의 면구조가 발달한 후 (b) NW-SE 방향의 압축력으로 인해 옥천변성대의 주엽리면에 해당하는 NE 방향의 면구조가 발달하였음을 주장하였다. 한편, 태백산 분지에 대한 연구들은 초기 지각 변형이 NE 주향의 연성 전단대와 습곡 및 드러스트를 형성했음을 보고하였다(Chough et al., 2000). 그 이후 대보 운동과 관련된 지각 변형이 또한 NE 주향의 습곡과 드러스트를 SE 방향으로 수렴하는 형태로 형성시켰다. 마지막으로 아마도 백악기 후기에서 제3기초기의 불국사 변동과 관련된 지각 변형이 EW방향의 주향을 가지는 습곡과 단층들을 형성시켰을 것이다(김정환 등, 1994).

MT 자료로부터 추정되는 이방성 블록의 주된 이방성 주향이 NE 방향으로 발달한 것을 고려해 볼



(a)



(b)

Fig. 12. (a) Rotational variation of the XY phase and (b) determination of the rotation angle in which phases do not leave the quadrant. The dashed lines exhibit an angle interval as the anisotropy direction of upper block. X denotes the north.

때, 옥천대 상부에 존재하는 전기적 이방성은 대보조산운동과 관련된 지각변형에 의해 형성되었을 것이다. 하부지각이나 상부맨틀에 NW 방향을 가지는 이방성이 존재하는 것에 대한 지구조적 증거는 명확하지 않으나 대보조산운동 이전의 초기 지각변형이 NW 방향의 이방성을 형성시켰을 가능성이 높다. 즉, 옥천 조산운동이나 옥천 분지와 태백산 분지의 봉합과정, 송림 조산운동이 NW 방향의 이방성을 형성시켰을 가능성이 존재할 수 있다. 한편, 이방성 블록의 2차원 구조적 주향(EW)이 지형에 나타난 선형구조나 단층시스템의 방향과 일치하는 것은 이방성 블록의

기하학적 구조가 후기 대보 조산운동에서 불국사 조산운동에 걸쳐 발생하였음을 의미한다. 하지만, 이방성 블록을 가로지르는 NS 방향의 축선을 따라 획득된 자료가 부족하여 현재 이방성 블록의 폭을 비롯한 기하학적 구조를 추정하기가 어려운 것으로 판단된다.

결론

한반도를 횡단하는 MT 탐사를 수행하는 중 옥천대에서 90°를 초과하는 매우 큰 위상 반응이 관찰되

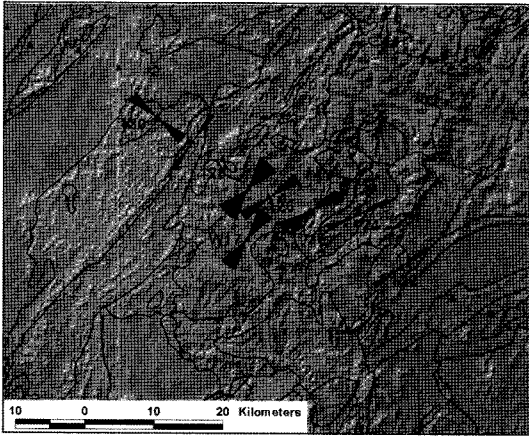


Fig. 13. Anisotropic strike ranges of the upper block derived from the rotational properties of phase. The background map shows the topography and geological boundaries.

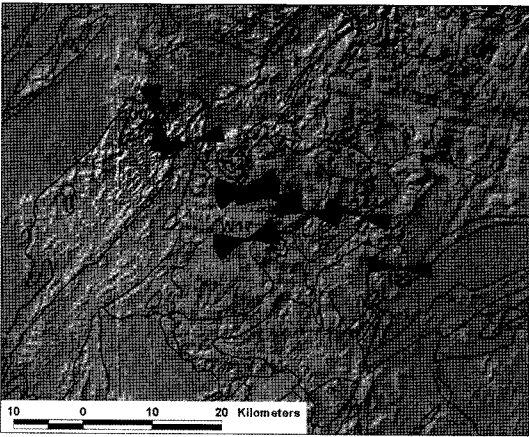


Fig. 14. 2-D structural strike ranges of the upper block derived from the rotational properties of phase.

었다. 이러한 현상은 전 세계적으로도 쉽게 측정되지 않는 특이한 현상으로서 강한 이방성 층과 이방성 블록의 조합형태에서 나타나는 전형적인 반응이다. 이는 상부지각에 존재하는 이방성 매질이 블록의 형태로 존재한다는 것을 시사하며 하부의 이방성층은 하부지각 혹은 상부맨틀에 해당하는 것으로 생각된다. 또한, 이방성 블록은 북동 방향의 이방성 주향을 가지고 있으며 이방성 블록의 하부에 존재하는 이방성 층은 북서 방향의 이방성 주향을 나타내고 있다. 따라서, 백악기 이전 북동방향의 전단작용과 스트러스트 작용이 수반되는 지각 변동에 의해 변성암들의 교대 작용과 파쇄대의 발달이 북동방향의 전기적 이방성을

발생시키는 원인으로 추정된다. 그러나 이방성층에서 나타나는 북서방향의 이방성은 그 원인이 명확하지 않다. 한편, 이방성 블록의 구조적인 주향은 동서 방향을 나타내고 있어 후기 대보 혹은 불국사 조산운동이 이방성 블록의 구조적인 형태를 최종적으로 만들어낸 것으로 생각된다.

참고문헌

- 김정환, 이재용, 남길현, 1994, 단양탄전 지역에서의 선주라기 드러스트 운동. 지질학회지, 30(1), 35-40.
- 이춘기, 권병두, 이희순, 조인기, 오석훈, 송윤호, 이태중, 2007, 한반도 횡단 자기지전류 탐사에 의한 상부 지각의 지전기적 구조 연구. 한국지구과학회지, 28(2), 187-201.
- 조문섭, 김현철, 2002, 중부 옥천변성대의 변성진화: 최근의 연구결과 논평 및 문제점. 암석학회지, 11(3-4), 121-137.
- Boerner, D.E., Kurtz, R.D., and Craven, J.A., 2000, A summary of electromagnetic studies on the Abitibi-Grenville Transect. Canadian Journal of Earth Sciences, 37 (2-3), 427-437.
- Brasse, H. and Soyer, W., 2001, A magnetotelluric survey in the Southern Chilean Andes. Geophysical Research Letter, 28 (19), 3757-3760.
- Chough, S.K. and Bahk, K.S., 1992, The Hwangkangri Formation in the Okchon Basin. In Chough, S.K. (ed.), Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas. Korean Sedimentology Research Group, Special Publication. Hanrimwon publishers, Seoul, 77-101.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H., and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view. Earth-Science Reviews, 52 (1-3), 175-235.
- Cluzel, D., Cadet, J.P., and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon Belt (South Korea). Tectonophysics, 183 (1-4), 41-56.
- Eaton, D.W., Jones, A.G., and Ferguson, I.J., 2004, Lithospheric anisotropy structure inferred from collocated teleseismic and magnetotelluric observations: Great Slave Lake shear zone, Northern Canada. Geophysical Research Letter, 31 (L07610), 1961-1964.
- Eisel, M., Haak, V., Pek, J., and Cerv, V., 2001, A magnetotelluric profile across the German Eep Drilling Project (KTB) area: two- and three-dimensional modeling results. Journal of Geophysical Research, 106 (B8), 16061-16073.
- Heise, W. and Pous, J., 2003, Anomalous phases exceeding 90° in magnetotellurics: anisotropic model studies and a field example. Geophysical Journal International, 155 (11), 308-318.
- Jones, A.G., Groom, R.D., and Kurtz, R.D., 1993, Decom-

- position and modelling of the BC87 dataset. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45 (9), 1127-1150.
- Jones, A.G., Katsube, T.J., and Schwann, P., 1997, The longest conductivity anomaly in the world explained: sulphides in fold hinghes causing very high electrical anisotropy. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 49 (11-12), 1619-1629.
- Kim, J.H., 1996, Mesozoic tectonics in Korea. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 13 (3), 251-265.
- Lee, H., 2000, Significance of systematic changes in crenulation asymmetries within metasediments across the Ogcheon Supergroup in the Goesan area. southern Korea. *Geosciences Journal*, 4 (2), 115-134.
- Livelybrooks, D., Mareschal, M., Blais, E., and Smith, J.T., 1996, Magnetotelluric delineation of the Trillabelle massive sulfide body in sudbury. Ontario, *Geophysics*, 61 (4), 971-986.
- Pek, J. and Verner, T., 1997, Finite difference modelling of magnetotelluric fields in 2-D anisotropic media. *Geophysical Journal International*, 128 (3), 505-521.
- Pous, J., Heise, W., Schnegg, P., Munoz, G., Marti, J. and Soriano, C., 2002, Magnetotelluric study of the Las Canadas Caldera (Tenerife, Canary Islands): structural and hydrogeological implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 204 (1-2), 249-263.
- Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T., and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang Belt. *Geology*, 24 (12), 1071-1074.
- Wannamaker, P.E., 2000, Comment on "The petrologic case for a dry lower crust", by Yardley, B.D. and Valley, J.W.. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B3), 6057-6064.
- Wannamaker, P.E., 2005, Anisotropy versus heterogeneity in continental solid earth electromagnetic studies: fundamental response characteristics and implications for physicochemical state. *Surveys in Geophysics*, 26 (6), 733-765.
- Wannamaker, P.E., Jiracek, G.R., Stodt, J.A., Caldwell, T.G., Porter, A.D., Gonzalez, V.M., and McKnight, J.D., 2002, Fluid generation and movement beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric (MT) data. *Journal of Geophysical Research*, 107 (B6), doi:10. 1029/2001JB000186.
- Weckmann, U., Ritter, O., and Haak, V., 2003, A magnetotelluric study of the Damara Belt in Namibia 2. MT phases over 90° reveal the internal structure of the Waterberg Fault/Omaruru Lineament. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 138 (2), 91-112.

2007년 1월 11일 접수

2007년 3월 21일 수정원고 접수

2007년 3월 27일 채택