

## 2차원 MT(Magneto-Telluric) 모델링을 이용한 지자기 수직탐사(Geomagnetic Depth Sounding)에서의 차이 지시자의 연구

양준모\* · 오석훈 · 이덕기 · 윤용훈

기상연구소 해양기상지진연구실

### A study on the Difference Arrow of GDS (Geomagnetic Depth Sounding) Survey using 2-D MT (Magneto-Telluric) Modeling

Junmo Yang\*, Seokhoon Oh, Duk-kee Lee and Yong-hoon Youn

Marine Meteorology & Earthquake Res. Lab., Meteorological Research Institute, 460-18, Shindaebang-Dong, Dongjak-Gu, Seoul, 156-720, Korea.

Two-dimensional MT (Magneto-Telluric) modeling is performed to verify the validity of difference arrow for GDS (Geomagnetic Depth Sounding) survey. The electromagnetic mutual coupling between the sea and in-land conductor is used as a criterion that judges the validity of difference arrow. In this study, the mutual coupling between them is examined according to the spatial distance between them and the period of magnetic variations. The difference arrow is valid for conductors located at surface which are far from the sea or when the long period is used, but the mutual coupling is weak for buried conductor in all the periods. However, when a conductor extends vertically down to the deep part, the validity of difference arrow is in doubt, since the strong mutual coupling influences up to the long period. Therefore, to remove the known conductor effect such as sea effect from the observed induction arrow, the mutual coupling between them must be examined and the caution must be exercised in interpreting the resultant difference arrow if mutual coupling between them is strong.

**Key words** : difference arrow, mutual coupling, GDS (Geomagnetic Depth Sounding)

2차원 MT 모델링을 수행하여 지자기 수직탐사(GDS)에서의 차이 지시자의 유용성을 조사하였다. 해양과 육지에 위치한 전도체의 전자기적인 상호 결합 정도는 차이 지시자의 유용성을 판단하는 기준으로서 본 연구에서는 해양과 전도체의 공간적인 위치와 주기에 따른 상호 결합을 조사하였다. 전도체가 지표에 존재하는 경우 해양에서 충분히 떨어져 있거나 사용된 주기가 장주기일 때 차이 지시자가 유용하였고, 전도체가 심부에 매몰된 경우에는 상호 결합이 약해 전 주기에서 차이 지시자가 물리적인 의미를 가졌다. 그러나 전도체가 지표로부터 심부까지 확장되어 있는 경우 상호 결합이 장주기까지 강하게 영향을 미쳐 차이 지시자의 유용성을 확신할 수 없다. 따라서 획득된 유도 지시자로부터 해양처럼 이미 알고 있는 전도체의 효과를 제거하기 위해서는 수치 모델링을 통한 전도체 간의 상호 결합에 대한 정보가 요구되며 상호 결합이 큰 경우 차이 지시자의 해석은 정확하지 않으므로 주의해야한다.

**주요어** : 차이 지시자, 상호 결합, 지자기 수직탐사(GDS; Geomagnetic Depth Sounding)

### 1. 서 론

지자기 수직탐사(GDS; Geomagnetic Depth Sounding)는 자연적으로 존재하는 지구 자기장의 변화를 송신원으로 이용하여 지각구조를 규명하는 극심부 전자탐사

기술이다. 지자기 수직탐사는 통상 서로 직교하는 자기장의 3성분의 측정만으로 지하의 전기전도도 구조를 제공하므로 정성적인 정보를 제공한다. 그러나 가탐심도면에서 주파수의 상, 하한에 따라 다르지만 통상 맨틀 상부까지의 정보획득이 가능하므로 지하의 심부구조를 파악하는데 유리하다(오석훈 등, 2002; 양준모 등, 2002). 지자기 수직탐사의 일반적인 표현은 유도 지시

\*Corresponding author: yjm@metri.re.kr

자(induction arrow)이며, 이는 근본적으로 지구의 지자기 변화의 이상을 나타내는 방법이다(Parkinson, 1962; Wiese, 1962; Rikitake and Honkura, 1985). 유도 지시자가 주파수 영역에서 전달함수(transfer function)라는 현대적인 개념과 해석은 Schmucker(1970)와 Vozzof(1972)에 의해 정립되었고 주파수 영역에서 수직 지자기 성분과 수평 지자기 성분은 다음과 같은 선형 시스템을 만족한다고 가정한다.

$$H_z(f) = AH_x(f) + BH_y(f) \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $H_z$ 는 지자기장의 수직성분,  $H_x$ ,  $H_y$ 는 각각 지자기장의 북쪽, 동쪽 방향 성분을 의미하고  $A$ ,  $B$ 는 MT(Magneto-Telluric) 탐사에서는 Tipper라는 용어로, 지자기 수직탐사에서는 지자기 전달함수(geomagnetic transfer function)라는 용어로 정의된다. 적도나 극지방을 제외한 지역에서  $H_z$ 는 지구의 수평적인 전기전도도 변화와 관련이 있으며  $H_x$ ,  $H_y$ 는 광역적인 효과가 지배적이다.

식 (1)에서  $A$ ,  $B$ 는 시간 영역의 지자기 3성분 자료를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 표현한 것이므로

$$\begin{aligned} A(f) &= A_r(f) + iA_i(f) \\ B(f) &= B_r(f) + iB_i(f) \end{aligned} \quad (2)$$

이고 복소수로서 주파수의 함수이다. 일반적으로  $A_r(f)$ ,  $B_r(f)$ 는 실수 유도 지시자,  $A_i(f)$ ,  $B_i(f)$ 는 허수 유도 지시자로 정의되며 실수 유도 지시자를  $180^\circ$ 회전시킨 Parkinson 지시자( $-A_r(f)$ ,  $-B_r(f)$ )는 주변보다 상대적으로 전도도가 높은 쪽으로 향하며 그것의 길이는  $H_z$ 의 이상 성분에 대한 강도를 반영한다(Parkinson, 1962). 예를 들어, 해양이 인접한 지역에서는 우세한 전도도 경계면이 해안선이므로 Parkinson 지시자는 해양쪽을 향하게 된다. 그 외 지역에서는 잠음에 오염되지 않은 자료가 측정되었다면 그 방향은 전기전도도가 높은 구조와의 경계면에 직교하게 되므로 공간적으로 분포하는 측정에서의 결과로부터 지하 심부의 구조를 추정하게 되며, 이것이 GDS의 근본원리이다.

한편 몇 개의 전도성 이상체에 의해 유도 지시자가 영향을 받을 때 각 이상체의 효과를 벡터적으로 취급할 수 있는가라는 의문에 많은 논란이 있어왔다. 그럼에도 불구하고 다양한 수치 및 물리적 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 유도 지시자를 벡터적으로 취급하여 물리적 해석을 수행한 많은 연구들이 보고되었다(Agarwal and Dosso, 1990; Weaver and Agarwal, 1991; Dosso and Meng, 1992; Bapat *et al.*, 1993; Dosso *et al.*,

1996; Chen and Dosso, 1997; Shimoizumi *et al.*, 1997; Pringle *et al.*, 2000). 이러한 연구들의 전형적인 예는 해양이 존재하는 지역에서 관측된 유도 지시자로부터 해양만 존재하였을 때 수치적 혹은 물리적 실험에 의해 계산된 해양 효과를 제거하는 것이다. 위의 과정을 통해 계산되는 차이 지시자(difference arrow)는 일반적으로 대륙 내에 존재하는 전도성 이상체를 지시하는 것으로 간주할 수 있다. 그러나 차이 지시자의 해석은 전도성 이상체들이 독립적으로 유도 지시자에 영향을 끼치는 것이 아니므로 주의를 필요로 한다. 즉, 전도성 이상체들 사이에는 이상체의 경계에서 전하의 재분포와 전도체 사이의 상호 유도(mutual induction)로 인해 전자기적인 결합이 존재한다(Wolf, 1983). 실제로 이러한 전자결합이 강할 경우 유도 지시자와 차이 지시자의 물리적 해석은 상당히 어렵다. 그러나 두 이상체가 상호 유도를 무시할 정도로 분리될 수 있다면 차이 지시자는 물리적인 의미를 갖게 되며 해양 효과가 제거된 유도 지시자는 육지 내에 존재하는 전도체의 탐지에 보다 강력한 판단 기준을 제공할 것이다.

본 연구에서는 유한 차분법을 기반으로 한 Mackie *et al.*(1994)의 MT(Magneto-Telluric) 계산 알고리즘을 사용하여 여러 가지 2차원 구조에서 유도 지시자의 특성 및 차이 지시자의 유용성을 보다 자세히 검증하려고 한다.

## 2. 수치 모델링 및 결과

### 2.1. 2차원 해양-육지-전도체 모델에 대한 차이 지시자의 유용성

2차원 해양-육지-전도체 모델에서 유도 지시자 및 차이 지시자의 특성을 조사하기 위하여 수치 모델링을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 모델들을 간단히 나타낸 것으로 해양은 전기비저항  $1\Omega \cdot m$ , 두께 3 km, 육지는 전기비저항  $1000\Omega \cdot m$ 을 가지며 지표로부터 깊이 210 km까지 확장되어 있고, 그 하부는  $1\Omega \cdot m$ 의 반무한 공간으로 일차원 확장을 묘사한 것이다. 여기서 S는 해양-육지(sea-land) 모델, C는 육지-전도체(sea-conductor) 모델, SC는 해양-육지-전도체(sea-land-conductor) 모델이며, C와 SC에서의 전도체는 두께 3 km이고 해안선으로부터 40 km 떨어져 있다(모델 1). 또한 유한 차분법의 특성상 해의 정확성은 물성이 변하는 경계에서 격자의 크기에 의존적이므로 사용된 소스(source)의 주기에 따른 표피 심도를 고려하여

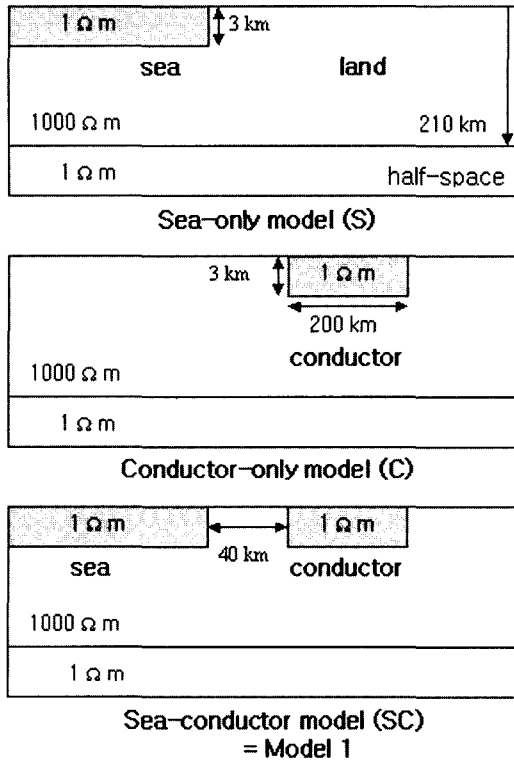


Fig. 1. The two-dimensional numerical models for (S) sea-land model (C) conductor-land model (SC) sea-land-conductor model.

격자의 간격과 크기를 결정하였다.

Rokityansky(1982)에 의하면 2차원 해양-육지 모델에서 실수 유도 지시자의 크기가 최대, 허수 유도 지시자의 크기가 최소(0)인 주기가 존재하는데 이를 해양 특성 주기(oceanic characteristic period)라 정의하였다. Agarwal and Dosso(1990)는 2차원 해양-육지 수치 모델링에서 전도성 반무한 층의 상부에 존재하는 비전도성 층의 깊이가 어떤 주기의 표피 침도(skin depth)와 거의 동일할 때 그 주기의 실수 유도 지시자가 최대, 허수 유도 지시자가 최소가 됨을 보여주었다. 해양 특성 주기는 다음 식으로 간단하게 구할 수 있다.

$$P = \frac{1}{f} = \frac{(2\delta)^2}{\rho} \quad (3)$$

여기서 P는 주기(sec), f는 주파수(Hz), δ는 표피 침도(km), ρ는 반무한 공간층 상부의 비전도성 층의 전기비저항(Ω·m)을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 해양-육지 모델의 경우, 전도성 반무한 공간 상부의 비전도성 층의 깊이가 210 km이므로 이를 표피 침도로 가정

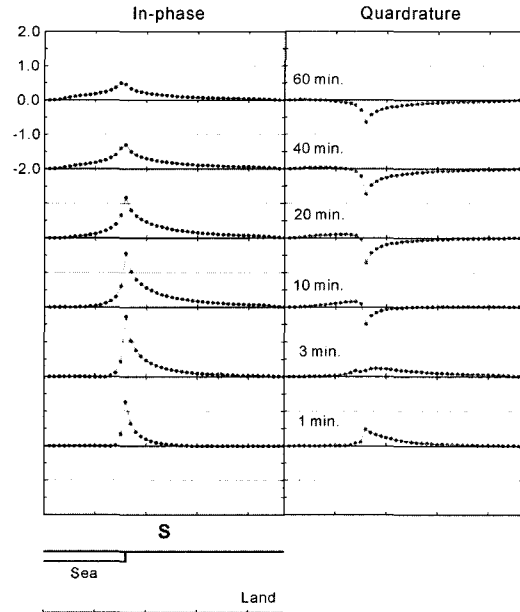


Fig. 2. The responses at six periods of variations of the sea-land model(S). A horizontal scale in above graph is 200 km.

하고 그 깊이까지의 평균적인 전기비저항을 1000Ω·m이라 가정했을 때 특성 주기는 약 3분으로 계산된다 (P=(2×210)²/1000=176.4 초≈3 분)

Fig. 2는 TE(Transverse Electric) 모드일 때 해양-육지 모델(S)의 반응(H<sub>z</sub>/H<sub>x</sub>)을 주파수 별로 축선(x 방향)을 따라 나타낸 것이다. 반응값이 양이면 유도 지시자의 방향이 왼쪽이고 음이면 오른쪽으로 정의된다. 예상되었던 바처럼 특성 주기(3분)에서 실수 유도 지시자의 반응이 가장 크며 허수 유도 지시자의 반응이 가장 작게 나타났다. 주파수 별 유도 지시자의 방향성은 특성 주기보다 장주기에서 실수 유도 지시자와 허수 유도 지시자는 해양-육지의 경계에서 반대의 방향을 나타내었고, 특성 주기보다 단주기에서는 해양-육지 경계에서 실수 유도 지시자와 허수 유도 지시자의 방향이 동일하였다. 또한 주파수 별 유도 지시자 반응 크기를 보면 단주기에서 반응이 크지만 장주기에서 해양 효과가 미치는 공간적 범위가 크다는 것을 알 수 있으며 특성 주기까지 유도 지시자의 반응이 증가하다가 그 이하의 단주기에서는 다시 반응이 감소함을 확인하였다. 한편 육지 쪽 허수 지시 유도자의 경우 특성 주기보다 장주기에서 변곡점이 나타나는데 변곡점은 대략적으로 해양과 육지의 경계에 위치한다.

Fig. 3은 육지-전도체 모델(C) 결과로서 전도체의 폭

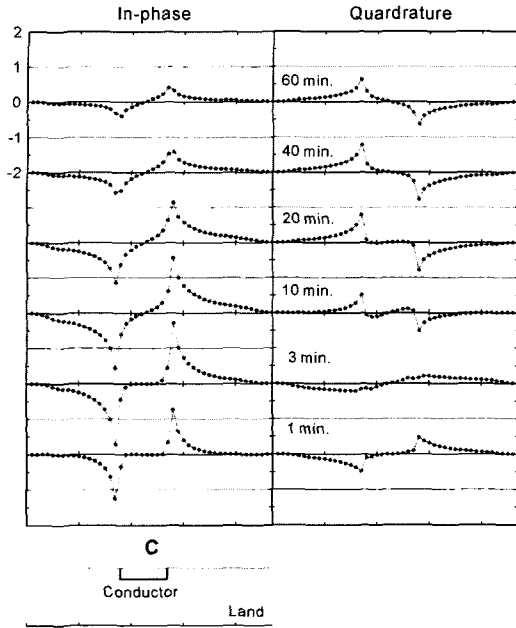


Fig. 3. The responses at six periods of variations of the conductor-land (C) model. A horizontal scale in above graph is 200 km.

은 200 km로 육지에서 40 km 떨어져 있으며 지표로부터 깊이 3 km까지 확장되어 있다. 육지-해양 모델과 마찬가지로 주기 3분 부근에서 실수 유도 지시자의 반응이 최대이며 허수 유도 지시자의 크기는 최소이다. 또한 장주기에서 전도체에 의한 반응이 부드러운 곡선 형태지만, 단주기에서는 육지-전도체 경계에서 유도 지시자의 반응이 날카롭고 강하게 나타난다.

Fig. 4는 2차원 모델에서 차이 지시자의 유용성을 검증하기 위해 해양-육지-전도체 모델(SC)과 육지-전도체(S)와 해양-육지 모델(C)을 대수적으로 합한 결과를 도시한 것이다. 실수 유도 지시자의 경우 대체적으로 20분 이상의 장주기에서는 SC와 S+C가 유사하지만, 10분 이하의 단주기에서는 전도체의 왼쪽 경계(해양과 가까운 경계)에서 둘 사이의 큰 차이가 나타나며 보다 단주기일 수록 그 차이가 증가한다. 그러나 특성 주기 이하에서 그 차이는 다시 감소하는 경향을 보여주었다. 한편 10분 이하의 단주기에서 주목할 만한 것은 S+C가 SC보다 크다는 것으로 이는 해양과 전도체 사이의 상호 결합으로 인해 SC의 크기가 작아졌다는 물리적 사실이 반영된 결과라 판단된다. 위의 결과로 볼 때, 본 절에서 사용한 모델의 경우 차이 지시자의 유용성은 소스의 주기에 의존적이며, 대략 20분 이상의 장주기에서 해양과 전도체 간의 상호 결합이 무시할 정도

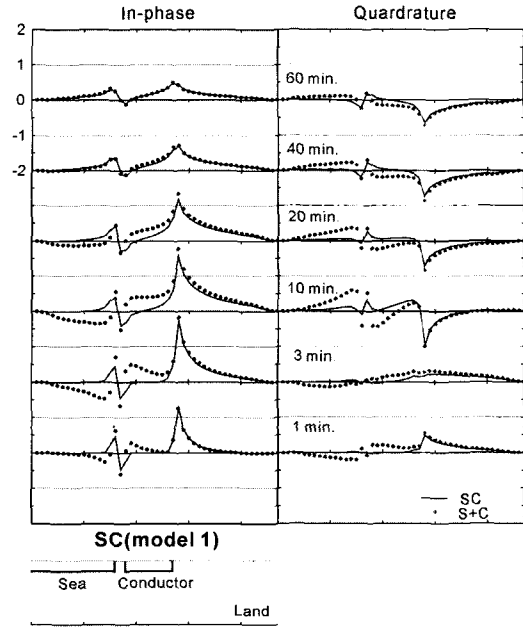


Fig. 4. The responses at six periods of variations of the sea-land-conductor model (SC, Model 1). It shows the SC(solid line) response and the algebraic summed response S+C(circle), respectively. The distance between sea and conductor is 40 km and a horizontal scale in above graph is 200 km.

로 작아 차이 지시자가 물리적인 의미를 갖는다고 할 수 있다.

2.2. 전도체의 위치에 따른 차이 지시자의 유용성

앞 절에서 조사한 해양-육지-전도체 모델은 20분 이상의 장주기에서만 차이 지시자가 유용하다는 사실을 보여주었다. Weaver and Agarwal(1991)은 차이 지시자의 유용성은 육지 내에 존재하는 전도체의 위치, 크기, 전기전도도에 의존적이라고 보고하였는데 이 절에서는 전도체의 수평적인 위치에 따른 차이 지시자의 유용성에 대해 조사해 보고자 한다. Fig. 5는 수평적 위치가 다른 두 개의 해양-육지-전도체 모델을 묘사한 것인데, 전도체의 폭, 전기비저항, 두께는 모델 1과 동일하며 전도체는 각각 해안선으로부터 120 km(모델 2), 200 km(모델3) 떨어져 있다.

Fig. 6, Fig. 7은 각각 모델 2, 3의 S+C와 SC를 나타낸 것인데, 전도체가 해안선에서 멀어지고 장주기일 수록 S+C와 SC의 차이가 감소하는 경향을 보인다. 모델 2의 경우 모델 1과 비교해 보면 전 주기에서 S+C와 SC의 차이가 감소하였고 주기 3분을 제외한 나머지 주기에서 대략적으로 S+C와 SC가 잘 일치하고

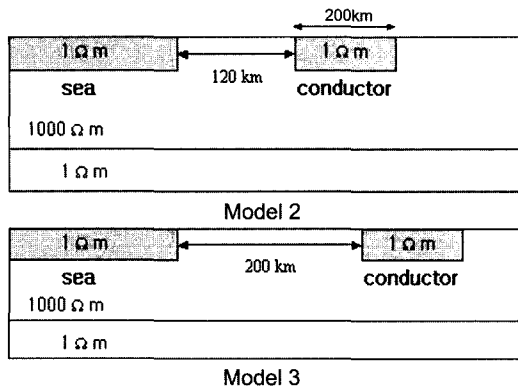


Fig. 5. The two-dimensional numerical model to examine the validity of difference arrow with respect to distance between sea and conductor. The distances between them are 120 km (Model 2) and 200 km (Model 3), respectively.

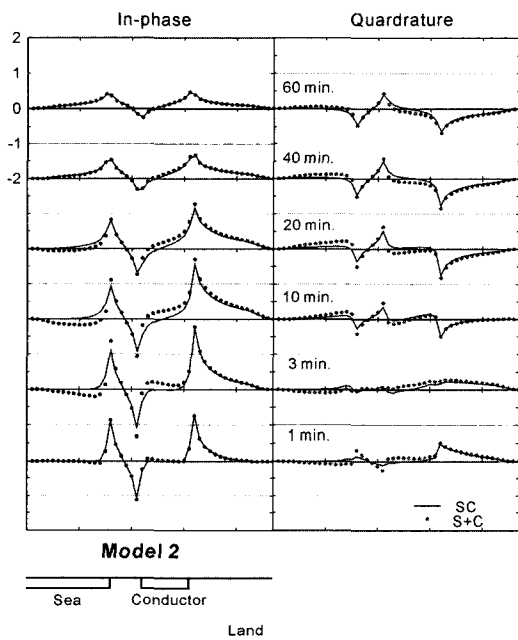


Fig. 6. The responses at six periods of variations of the Model 2. It shows the SC(solid line) response and the algebraic summed response S+C(circle). The distance between sea and conductor is 120 km and a horizontal scale in above graph is 200 km.

있다. 더욱이 모델 3은 전 주기에서 SC와 S+C가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 해안선에서 전도체가 충분히 떨어진 모델 3의 경우는 차이 지시자가 전 주기에서 유용하며, 모델 2의 경우도 특성 주파수 부근의 단주기를 제외한 주기에서 차이 지시자가 물리적 의미를 가질 수 있다고 판단된다.

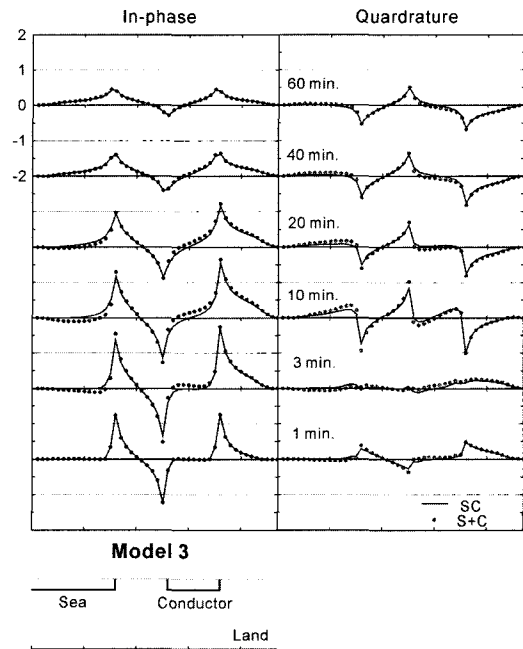


Fig. 7. The results are the same as in Fig. 6 except distance of 200 km between sea and conductor.

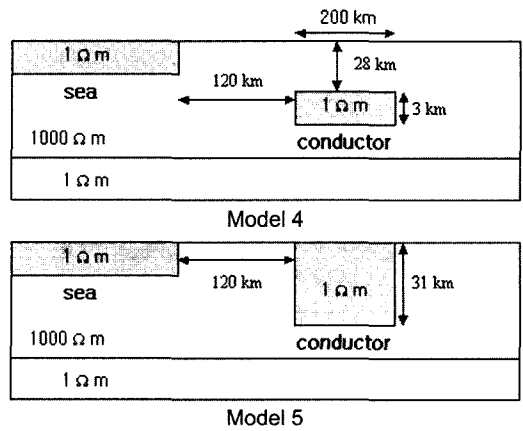


Fig. 8. The two-dimensional numerical model to examine the validity if difference arrow with respect to the buried depth (Model 4) and the size (Model 5) of the conductor. The horizontal distance between sea and conductor is 120 km same as model 2.

### 2.3. 매몰된 전도체 및 수직으로 확장된 전도체에 대한 차이 지시자의 유용성

앞 절에서는 지표에 존재하는 전도체에 대하여 해안선에서 전도체가 떨어진 위치와 소스의 주기에 따른 차이 지시자의 유용성을 검증하였다. 본 절에서는 심부에 매몰된 전도체와 지표로부터 심부까지 확장된 전도

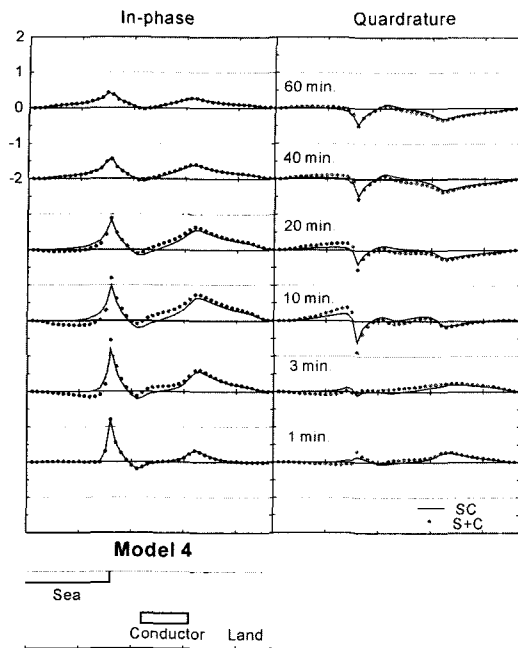


Fig. 9. The responses at six periods of variation of the Model 4. It shows the SC response (solid line) and the algebraic summed response S+C (circle). The buried depth of the conductor is 28 km and a horizontal scale in above graph is 200 km.

체에 대한 차이 지시자에 대해 조사하려 한다. Fig. 8은 해양-육지-매몰된 전도체 모델(모델 4)과 해양-육지-수직으로 확장된 전도체 모델(모델 5)로서, 모델 4의 경우 매몰된 전도체의 깊이는 28 km, 모델 5의 경우 전도체는 지표로부터 31 km 까지 확장되어 있다.

Fig. 9는 모델 4의 S+C와 SC를 나타낸 것인데, 전도체가 매몰되어 있으므로 모델 2의 결과와 달리 전 주기에서 전도체에 의한 반응이 감소했고, S+C와 SC의 차이가 보다 장주기인 10분에서 가장 크게 나타났다. 그러나 모든 주기에서 모델 2에 비해 S+C와 SC의 차이가 감소했으며 단주기에서도 상호 결합이 상당히 약해 전 주기에서 차이 지시자가 유용하다고 생각된다. 즉, 전도체가 심부에 매몰된 경우 전도체에 대한 반응이 작아지고 전도체와 해양의 상호 결합도 감소하여 전 주기에서 차이 지시자가 물리적인 의미를 갖는다. Fig. 10은 모델 5의 S+C와 SC를 나타낸 것인데, 전도체가 지표부터 심부까지 확장되어 있어 전도체의 영향이 장주기까지 크게 나타나고 있다. 또한 모델 2에 비해 전도체의 크기가 증가했기 때문에 S+C와 SC의 차이가 증가하였다. 주목할 만한 것은 모델 2의 경우 장주기인 20분과 40분에서 S+C와 SC의 큰 차이가

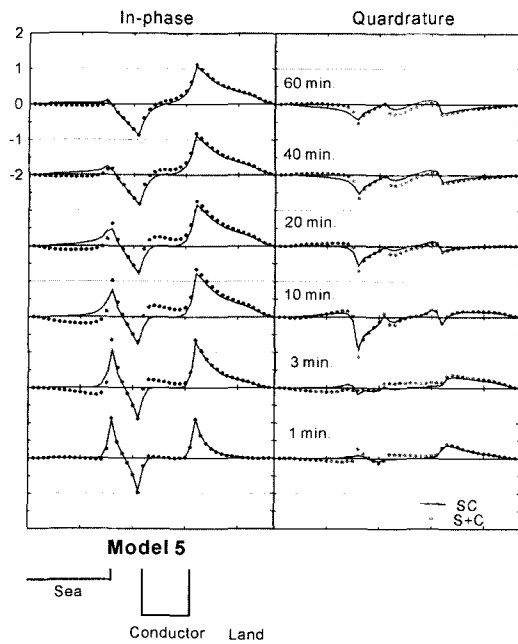


Fig. 10. The responses at six periods of variation of the Model 5. It shows the SC response (solid line) and the algebraic summed response S+C (circle). The vertical extension of the conductor is up to 31 km and a horizontal scale in above graph is 200 km.

없었으나 모델 5의 경우는 모델 2에 비해 차이가 크게 난다는 것이다. 이는 전도체가 수직적으로 확장된 경우 해양과 전도체 간의 상호 결합의 증가가 미치는 주파수 범위가 장주기까지 확대됨을 의미한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 2차원 모델에 대한 수치 모델링을 실시하여 차이 지시자의 유용성은 전도체와 해양의 공간적인 조건과 소스의 주기, 전도체의 크기 및 매몰 깊이에 의존적임을 확인하였다. 2차원 해양-육지-전도체 모델에서 전도체가 해양과 같은 두께로 지표에 존재하는 경우 해양과 전도체 간의 상호 결합의 크기는 소스의 주기와 전도체와 해양의 거리에 의존적이며 본 연구에서 사용한 모델의 경우 20분 이상의 장주기 또는 해양으로부터 120 km 이상 떨어져 있을 경우 차이 지시자가 유용함을 확인하였다. 또한 전도체가 심부에 매몰된 경우 전 주기에서 전도체에 의한 반응은 감소했고 해양과의 상호 결합도 감소하여 차이 지시자가 전 주기에서 유용하였다. 그러나 지표로부터 심부까지 확장된 전도체의 경우 장주기까지 전도체의 반

응이 크게 나타났으며 해양과의 상호 결합도 장주기까지 강한 영향을 미쳐 차이 지시자의 유용성을 확신할 수 없었다.

현장에서 획득한 유도 지시자로부터 해양처럼 우리가 이미 알고 있는 전도체에 의한 효과를 벡터적으로 제거하기 위해서는 수치 모델링을 통한 전도체 간의 상호 유도에 대한 정보를 획득해야 하며 전도체 간의 상호 유도가 강한 경우에는 차이 지시자의 해석에 주의해야 한다. 또한 본 연구에서는 비교적 간단한 2차원 구조에 대해 차이 지시자를 검증하였는데 보다 정확한 차이 지시자의 이해를 위해서는 다양한 3차원 모델에 대한 연구가 요구된다. 실제적인 적용성에서 본 연구 결과는 한반도에 대한 조밀한 GDS 자료와 심부 MT 탐사와 자료가 획득된다면 광역적인 심부의 전기적 구조를 규명하는 데 기여할 것이라 사료된다.

## 사 사

이 연구는 기상청 기상연구소 기상지진기술개발 사업의 「지진예지 및 지진해일 예측기술 개발」의 지원으로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 오석훈, 양준모, 이덕기, 남재철 (2002) 지자기 수직 탐사에 의한 한반도 주변의 전기전도도 구조, *자원환경지질*, 35권, p. 437-444.
- 양준모, 오석훈, 이덕기, 윤용훈 (2002) 지자기 전달함수의 로버스트 추정. *대한지구물리학회*, 5권, p. 131-142.
- Agarwal, A.K. and Dosso, H.W., (1990) On the behaviour of the induction arrows over a buried conductive plate-a numerical model study. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 60, p. 265-277.
- Bapat, V.J., Segawa, J., Honkura, Y. and Traits, P. (1993) Numerical estimation of the sea effect on the distribution of induction arrows in the Japanese island arc. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 81, p. 215-229.
- Chen, J. and Dosso, H.W. (1997) EM responses of an elongated conductor near an ocean-analogue model studies. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 99, p. 83-89.
- Dosso, H.W. and Meng, Z.W. (1992) The coast effect response in geomagnetic field measurements. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 70, p. 39-56.
- Dosso, H.W., Chen, J., Chamalaun, F.H. and McKnight, J.D. (1996) Difference electromagnetic induction arrow responses in New Zealand. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 97, p. 219-229.
- Mackie, R.L., Smith, J.T. and Madden, T.R. (1994) Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations; the magnetotelluric example. *Radio Sci.*, v. 29, p. 923-935.
- Parkinson, W.D. (1962) The influence of continents and oceans on geomagnetic variations. *Geophys. J.R. Astro. Soc.*, v. 6, p. 441-449.
- Pringle, D., Ingham M., McKnight J.D. and Chamalaun F.H. (2000) Magnetovariational soundings across the South Island of New Zealand: difference induction arrow and the Southern Alps conductor. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 119, p. 285-298.
- Rikitake, T. and Honkura, Y. (1985) *Solid earth geomagnetism*. Terrapub, Tokyo, p. 295-347.
- Rokityansky, I.I. (1982) *Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle*. Springer-Verlag, Berlin, 287p.
- Schmucker, U. (1970) Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* 13, Chapter 3.
- Shimoizumi M., Mogi, T., Nakada M., Yukutake T., Handa S., Tanaka Y., Utada, H. (1997) Electrical conductivity anomalies beneath the western sea of Kyushu, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, v. 24, p. 1551-1554.
- Vozzof, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basin, *Geophys.*, v. 37, p. 98-141.
- Weaver, J.T. and Agarwal, A.K. (1991) Is addition of induction vectors meaningful?. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 65, p. 163-181.
- Wiese, H. (1962) *Geomagnetische Tiefentellurik*. *Geophys. Pura Appl.*, v. 52, p. 83-103.
- Wolf, D. (1983) Inductive coupling between idealized conductors and its significance for the geomagnetic coast effect. *J. Geophys.*, v. 52, p. 22-33.

2002년 10월 2일 원고접수, 2002년 12월 6일 게재승인.