

단층대의 전기전도도 변동에 의한 UHF 전자기장 교란

이춘기¹⁾ · 이희순²⁾ · 권병두¹⁾ · 오석훈³⁾ · 이덕기³⁾

UHF Electromagnetic Perturbation due to the Fluctuation of Conductivity in a Fault Zone

Choon-Ki Lee¹⁾, Heuisoon Lee²⁾, Byung-Doo Kwon¹⁾, SeokHoon Oh³⁾ and Duk Kee Lee³⁾

요 약 : 지진 발생을 전후로 ULF 대역 지자기장의 진폭이 증가하는 현상이 관측 보고 되고 있으며, 그 원인으로서는 단층대 전기전도도의 빠른 변동이 거론되고 있다. 즉 단층대 매질에 유도전류가 발생하면 전자기장의 변동이 발생할 수 있다고 하는 것이다. 본 연구에서는 2차원 단층구조 모델에 대한 수치 계산을 통해 전자기장 교란의 발생 가능성을 살펴본다. 전기전도도가 ULF 대역의 주파수로 진동하면 낮은 주파수의 전자기장들이 ULF 대역의 주파수로 변조되어 좁은 주파수 대역에 중첩됨으로써 상대적으로 큰 전자기장의 교란을 일으킬 가능성이 있다. 단층대의 전기전도도와 형태, 전기전도도 변동의 크기와 주파수, 지각 및 맨틀의 전기비저항 구조, 관측 전자기장 주파수 대역의 폭 등에 의해 전자기장 교란의 관측가능성이 결정됨을 확인할 수 있었다. 지진과 관련된 전자기적 활동의 관측을 위해서는 단층대의 구조 뿐만 아니라 심부 지각의 전기비저항 구조의 연구가 이루어져야 하며, 관측 주파수 대역의 적절한 선택이 필요하다.

주요어 : 지자기장, ULF 대역, 전기전도도

Abstract : ULF geomagnetic field anomalies related to earthquakes have been reported and a mechanism that magnetic field variations could be generated by the induced telluric current due to the high frequency fluctuation of conductivity in a fault zone have been proposed. In this study, we calculated electromagnetic anomalies using a simple fault model and investigated the possibility of significant perturbation. Since low frequency electromagnetic fields are modulated by the high frequency oscillation of conductivity and the modulated fields are concentrated in a narrow ULF band, the electromagnetic fields in ULF band could be perturbed significantly. The amplitude of electromagnetic field anomaly depends on various factors: the geometry and conductivity of fault zone, the magnitude and frequency of conductivity fluctuation, the resistivity structure of crust or mantle, the frequency bandwidth of observational data and so on. Therefore, it is strongly required to reveal the deep resistivity structure of crust as well as the structure of fault zone and to select the optimal observation frequency band for the observation of electromagnetic activities related with earthquakes.

Keywords : Geomagnetic field, ULF band, Electrical conductivity

서 론

단층대 및 인근 지역에서 지진이 발생하는 경우, ULF 대역 (0.01 Hz~10 Hz)에서 전자기장의 교란이 관측 보고되고 있다 (Fraser-Smith *et al.*, 1990; Park *et al.*, 1993). ULF 대역에서의 전자기장의 교란을 설명하는 메커니즘으로 압전(piezoelectric) 효과(Ogawa *et al.*, 1985; Yamada *et al.*, 1989), 전기역학적(electrokinetic) 효과(Fenoglio *et al.*, 1995), 수리자기(hydro-magnetic) 효과(Draganov *et al.*, 1991) 등이 제안되어왔다. 그러나 이러한 메커니즘들에서 제시된 암석의 균열이나 유체의 운동에 의해 발생하는 전자기장은 관측된 전자기장의 교란을

충분히 설명할 수 없었다. Merzer and Klempere(1997)와 Egbert(2002)는 단층대에서 시간에 따른 전기전도도의 변동에 의해 유도되는 지전류가 전자기장을 교란시킬 수 있음을 수치 모델링을 통하여 제시하였다.

본 연구에서는 Egbert(2002)의 모델을 바탕으로 전기전도도의 변동에 의해 유도되는 전자기장의 교란을 고찰하기 위하여 유한요소법을 이용하여 간단한 단층모델에 대해 그 효과를 계산하였다. 전기전도도 변동에 의해 유도되는 전자기장의 크기는 자연(natural) 전자기장의 크기에 비례하기 때문에 자연 전자기장의 파워스펙트럼을 정확히 결정하는 것이 중요하다. 이를 위해서 경기도 이천에 위치한 지자기 관측소에서 측정된 6

*2003년 4월 19일 접수

1) 서울대학교 지구과학교육과(Dept. of Earth Science Education, Seoul National University)

2) 경인교육대학교 과학교육과(Dept. of Science Education, Gyeongin National University of Education)

3) 기상연구소 해양기상지진연구실(Marine Meteorology & Earthquake Research Lab., Meteorological Research Institute)

개월간의 지자기 관측 자료를 이용하였다.

전자기장 변조 모델

지진에 의한 전기전도도의 변동

지진과 관련된 전기비저항의 변화는 dilatancy water diffusion 이론(Trimmer *et al.*, 1980)을 그 기반으로 하고 있다. 이 이론에 따르면 응력에 의해 새로운 균열이 생성될 경우 암석의 공극률이 증가하여 균열 속으로 유체의 확산이 이루어짐으로써 전기비저항이 감소하게 된다. 또한, 새로운 균열의 발생으로 인한 공극률의 증가를 동반하지 않더라도 공극간의 연결성이 향상됨에 따라 전기비저항이 감소할 수도 있다. 장기적인 전기비저항의 관측 연구를 통해 지진 전후에 발생하는 전기비저항의 변화가 관측되어 왔으며(Sadovsky *et al.*, 1972; Park, 1991), 최대 약 24%의 겉보기 전기비저항의 변화가 관측되기도 하였다(Mazella and Morrison, 1974).

전기전도도 변동에 의한 전자기장의 변조

지진활동과 관련된 응력에 의해 단층대 매질의 전기전도도가 변동하게 되면 단층대 매질에서 지진류의 변화가 유도되고 이로 인해 자기장의 변동이 발생할 수 있다. 실제 지진 발생 전 지하매질의 전기전도도의 변화는 일정 시간 내에서의 변화일 가능성이 높지만 수치계산의 편의를 위하여 전기전도도의 변동을 시간에 대한 조화함수로 가정한다(Egbert, 2002). 2차원 구조의 단층대에서 전기전도도가 변동하는 주파수를 w_f 라고 하면, 전기전도도를 식 (1)과 같이 시간에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \Delta\sigma(t) = \sigma_0(1 + \varepsilon\delta_f e^{iw_f t}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta_f &= 1 && \text{in a fault zone} \\ \delta_f &= 0 && \text{elsewhere} \end{aligned}$$

여기서 σ_0 는 정상시의 전기전도도 분포를 나타내는 함수이며, ε 은 전기전도도의 변동폭을 나타내는 상수로 아주 작은 값으로 가정한다.

y 방향의 주향을 가지는 2차원 구조를 가정하면, TE 모드는 y 방향의 전기장 E_y 와 x 방향의 자기장 H_x 를 이용하여 표현할 수 있다. 전기전도도가 시간에 대한 함수이므로 시간영역에서의 TE 모드 준정적 맥스웰 방정식(quasi-static Maxwell's equation)은 다음과 같다.

$$\nabla^2 E_y = \mu \frac{\partial \sigma}{\partial t} E_y + \mu \sigma \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2)$$

전기전도도의 변동이 매우 작은 경우($\varepsilon \ll 1$), 식 (2)의 해는 근사적으로 다음과 같다.

$$E_y = E_0 e^{iw t} + \varepsilon E_m e^{iw_m t} \quad (3)$$

여기서 두 번째 항은 변조에 의해 발생하는 전자기장이며 변조 주파수는 $w_m = w + w_f$ 이다. E_0 는 정상시의 전기전도도 분포에서의 전자기장 성분이며, E_m 은 전기전도도 변동에 의해 유도된 전류로부터 발생하는 전자기장 성분이다. E_0 와 E_m 은 식 (4)와 (5)를 만족한다.

$$(\nabla^2 - i\mu\sigma_0 w)E_0 = 0 \quad (4)$$

$$(\nabla^2 - i\mu\sigma_0 w_m)E_m = i\mu\sigma_0 \delta_f w_m E_0 \quad (5)$$

식 (5)의 오른쪽 항은 전기전도도의 변동에 의해 단층대에 발생하는 유도전류를 나타낸다. 유도 전류에 의해 발생한 변조 전자기장(E_m)은 변조 자기장(H_m)을 유도하게 된다. 따라서, 지표에서의 자기장은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_x &= (iw\mu)^{-1} \partial_z E_0|_{z=0} e^{iw t} + \varepsilon (iw_m \mu)^{-1} \partial_z E_m|_{z=0} e^{iw_m t} \\ &= H_0 e^{iw t} + \varepsilon H_m e^{iw_m t} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)에서와 같이 H_0 는 정상시의 전기전도도 분포에서의 자기장 성분이며, H_m 은 전기전도도 변동에 의해 유도된 전류로부터 발생하는 자기장 성분이다.

한편, 전자기장의 변조를 도식적으로 나타낸 Fig. 1과 같이 전기장 혹은 자기장은 전기전도도 변동 주파수에 따라 다른 양상으로 변조된다. 즉, Fig. 1(a)와 같이 배경 전자기장 주파수(w)가 전기전도도 변동 주파수(w_f)보다 매우 작은 경우, $w_m \approx w_f$ 이므로, 전기전도도 변동 주파수로 변조된 전자기장이 배경 전자기장에 중첩된 형태의 교란이 발생한다. 전기전도도

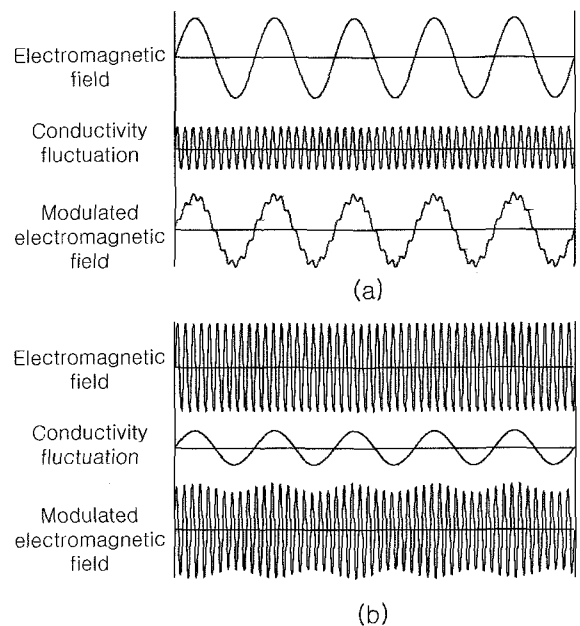


Fig. 1. Schematic behavior of the modulated electromagnetic field by the conductivity fluctuation in the case of (a) $w \ll w_f$ and (b) $w \gg w_f$, where w and w_f are the frequencies of electromagnetic field and conductivity fluctuation, respectively.

의 변동이 매우 작은 값을 가질 경우, 변조된 전자기장의 크기 역시 매우 작겠지만 충분히 낮은 모든 주파수의 전자기장이 전기전도도 변동 주파수로 변조되어 증첩되기 때문에 전기전도도의 변동이 작은 경우에도 변조된 전자기장의 크기는 큰 값을 가질 가능성이 있다. 반면, $w \gg w_f$ 이면 $w_m \approx w$ 이므로, Fig. 1(b)와 같이 주파수의 변조는 발생하지 않고 전기전도도의 변동에 의해 전자기장의 진폭만이 변하게 된다. 전기전도도의 변동이 매우 작은 값을 가질 경우, 진폭의 변화 역시 작은 값을 가지게 되므로 배경 잡음 속에서 전자기장의 교란을 관측하기가 쉽지 않다.

수치 모델

2차원 전기비저항 구조에서의 전기전도도 변동에 의한 전자기장의 변조를 2차원 수치모델링을 이용하여 구할 수 있다. 식 (4)를 이용하여 E_0 를 구할 수 있으며, E_0 와 식 (5)를 이용하여 E_m 을 구할 수 있다. 한편, 일반적으로 E_y 를 구하기 위한 수치모델링에 있어서 지표로부터 매우 멀리 떨어진 공기 중에서의 자기장 $H_x(=i\omega\mu)^{-1}\partial E/\partial z$ 는 0이 아닌 일정한 값을 가진다고 가정한다(이성곤, 1993). 이는 지표로부터 매우 멀리 떨어진 지점으로부터 입사하는 전자기파를 가정하는 것이다. 식 (4)의 수치계산에서도 이와 같은 가정을 경계조건으로 사용할 수 있다. 반면, 식 (5)의 수치계산에서는 국부적인 단층대에 유도된 전류에 의해 발생하는 전기장을 구하는 경우이므로 단층대로부터 매우 멀리 떨어진 지점에서는 전자기장의 크기가 0이어야 하므로 상하좌우 모든 경계에서 전기장의 값이 0인 경계조건을 부여하여야 한다.

단층모델의 전자기장 변조

단층대의 전기전도도 변동에 의한 전자기장의 변조 양상을 살펴보기 위하여 Fig. 2과 같은 600 m의 폭과 3 km의 깊이를 가지는 대규모 단층대를 모델로 가정하였다. 전기전도도 변동

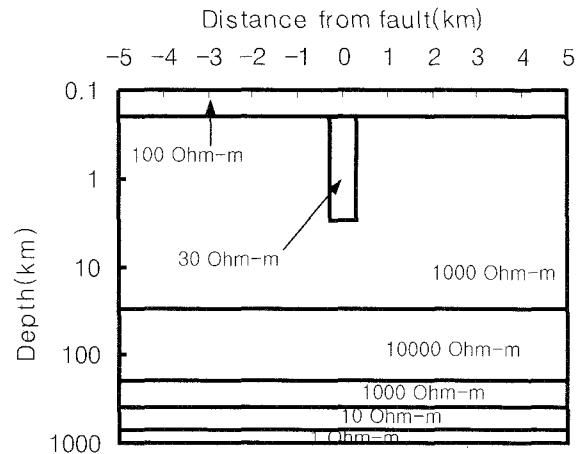


Fig. 2. Section view of two-dimensional model which includes a conductive fault zone.

주파수는 0.1 Hz로 가정하여, 자연적인 배경 전자기장은 0.1 Hz보다 낮은 주파수에 대해서만 고려한다. 매우 낮은 주파수의 경우, 지각 심부의 전기비저항 구조에 의해 크게 좌우될 수 있기 때문에 지각 심부 전기비저항 구조의 규명이 선행되어야 한다. 그러나, 우리나라 지각심부 및 맨틀의 전기비저항 구조가 아직 명확히 규명되지 않았기 때문에 여기서는 Fig. 2와 같은 구조로 가정한다. 맨틀의 전기비저항 구조는 Egbert and Booker(1992)의 장주기 자기지진류(MT) 관측 결과를 참조하였으며, 지각의 전기비저항은 1000 Ohm-m로 가정하였다.

Fig. 2에 도시된 형태의 지각 구조 모델에서의 정규화된 배경 자기장(H_0)과 단층대에 유도된 전류에 의한 자기장(H_m)의 분포를 Fig. 3에 도시하였다. 전기비저항이 낮은 단층대에서는 전기장의 감쇠가 주변보다 심하므로 전기장의 수직방향의 변화량에 비례하는 수평자기장의 값은 단층대의 상부에서 증가한다(Fig. 3a). 변조 자기장(H_m)의 크기는 Fig. 3b의 형태를 가지며, 배경 자기장의 주파수가 작아질수록 작아진다. 배경 자기장의 주파수가 0.1 Hz 일때 변조 자기장은 최대 약 0.24의

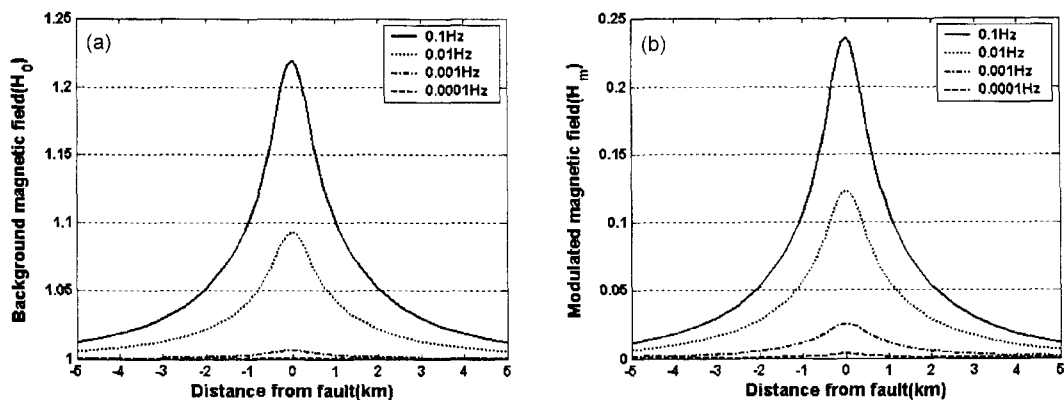


Fig. 3. (a) Background magnetic fields (H_0) at the four frequencies. (b) Anomalous (modulated) magnetic fields due to modulation of each low frequency electromagnetic field in the case that the frequency of conductivity fluctuation is 0.1 Hz.

값을 가진다. 그러나 식 (6)에서와 같이 전자기장의 변조에 의해 발생하는 실제 자기장은 전기전도도의 변동폭(이 곱해져야 하므로 전기전도도의 변동폭이 10%라고 가정하면($\epsilon = 0.1$), 약 2.4%의 실제 변조 자기장(ϵH_m)이 발생하게 된다.

Fig. 3b와 같이 배경 자기장의 주파수가 작아질수록 변조 자기장의 크기가 작아지는 것은 단층대에 유도되는 유도전류의 크기가 작아진다는 것을 의미한다. 자기장의 크기를 정규화하여 계산을 수행하였으므로, 전기장의 크기는 임피던스에 비례하게 되며, 유도전류도 임피던스에 비례하게 된다. 임피던스는 주파수에 비례하며, 1차원 전기비저항 구조와 2차원 단층구조에 의해 결정된다. 변조 자기장의 크기는 1차원 전기비저항 구조와 주파수에 의해 그 크기가 크게 작아지기 때문에 2차원 구조에 의한 효과만을 살펴보기 위하여 1차원 구조에서의 임피던스의 비율로 보정된 함수(h_m)를 다음과 같이 정의한다.

$$h_m(w, w_m) = \frac{Z(w_m)}{Z(w)} H_m(w, w_m) \quad (7)$$

여기서 Z 는 1차원구조에 대한 임피던스를 나타낸다. Fig. 4에 식 (7)의 보정된 자기장 함수를 도시하였다. Fig. 4b에서와 같이 1차원 구조에 대한 임피던스의 비율로 보정하면 전기전도도 변동 주파수보다 낮은 주파수 대역에서는 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 낮은 주파수 대역에서는 포피심도가 매우 깊기 때문에 주로 전류 집중(current channeling) 효과에 의해서만 단층대의 효과가 반영되고 있음을 나타낸다. 따라서, 변조 자기장 함수를 식 (8)과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$H_m(w, w_m) \approx \frac{Z(w)}{Z(w_m)} h_m(0, w_m) \quad (8)$$

지금까지 w 의 주파수를 가지는 배경 전자기장에 의해 유도되는 w_m 의 주파수를 가지는 변조자기장을 식 (8)의 형태로 구하였다. 충분히 낮은 주파수의 배경자기장에 의해 유도되는 변조자기장의 주파수는 전기전도도 변동 주파수와 거의 같으므로($w_m \approx w_f$), 변동주파수 부근에서 발생하는 총 변조자기장의 크기는 각 배경주파수에 대한 변조자기장들을 적분함으로써

구할 수 있다. 식 (8)의 H_m 함수는 입사하는 자기장의 크기를 정규화하여 계산된 값이므로, 0에서 w 까지의 배경 전자기장에 의해 유도되는 총변조자기장의 파워(C_{HM}^2)는 다음과 같이 자기장의 파워 스펙트럼 밀도 함수(S_H^2)와 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{HM}^2(0, w) &= \int_0^w \epsilon^2 S_H^2 H_m(w, w_m)^2 dw \\ &= \int_0^w \epsilon^2 S_H^2 \left| \frac{Z(w)}{Z(w_m)} \right|^2 |h_m(0, w_m)|^2 dw \\ &= \frac{\epsilon^2 |h_m(0, w_m)|^2}{|Z(w_m)|^2} \int_0^w S_E^2 dw = \frac{\epsilon^2 |h_m(0, w_m)|^2}{|Z(w_m)|^2} C_E^2(0, w) \end{aligned} \quad (9)$$

즉, 총변조자기장의 파워는 식 (9)와 같이 0에서 w 까지의 낮은 주파수에 대한 전기장의 누적 파워 스펙트럼(C_E^2)을 이용하여 구할 수 있다.

파워스펙트럼 분석

유도되는 변조자기장의 크기는 낮은 주파수의 배경자기장의 크기에 좌우되므로, 자연적으로 존재하는 배경자기장의 파워 스펙트럼을 알아야 한다. 한반도 부근에서의 저주파 자기장의 파워스펙트럼을 구하기 위하여 전파연구소 이천관측소(N 37.1447, E 127.5509)의 지자기연속관측시스템으로 측정된 1초 간격의 지자기장 자료를 이용하였다(최정림 외, 1997). 이천관측소에서는 1996년부터 연속적인 지자기장 관측을 실시하고 있으며, 다른 관측소보다 자료의 상태가 양호하다. 이천관측소의 지자기장 자료를 이용한 최근 연구에 의하면, 관측된 지자기장이 심부지각 구조의 특성을 반영하고 있는 것으로 생각된다(Oh et al., 2002). 2002년 7월에서 12월까지의 6개월간의 자료를 이용하여 파워스펙트럼을 계산하였으며, 매우 넓은 주파수 대역(10^{-6} ~ 10^0)의 파워스펙트럼을 구하기 위하여 각각 10초, 1분, 10분, 1시간 간격으로 리샘플링한 후, 자기회귀(autoressive) 파워스펙트럼 분석방법을 사용하여 파워스펙트럼을 구하였으며, 알리아싱을 막기 위해 Kaiser window 필터를 사용하였다. 자기장의 파워스펙트럼과 Fig. 2에 도시된

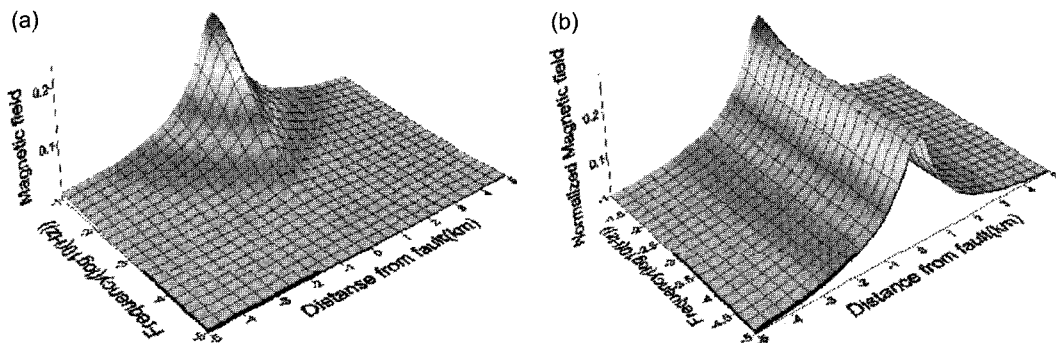


Fig. 4. The shape of (a) modulated magnetic field and (b) modulated magnetic field normalized with the ratio of one-dimensional impedance.

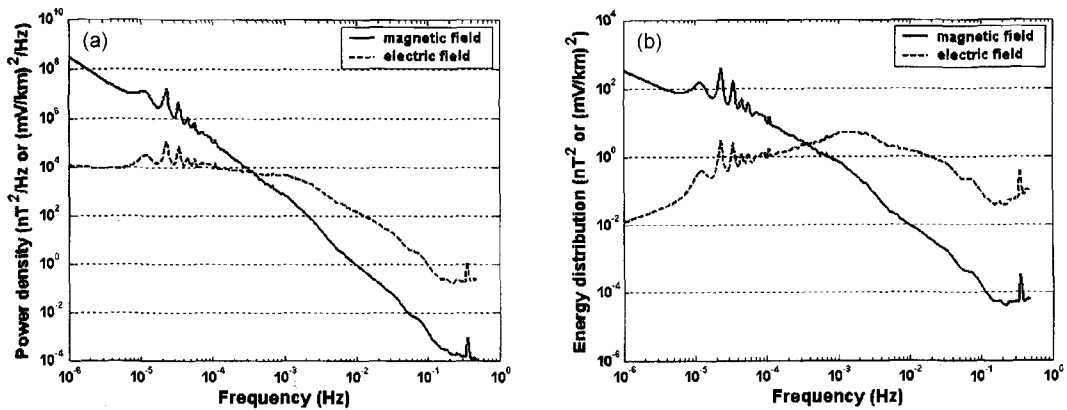


Fig. 5. (a) Power spectra of natural magnetic field and derived electric field at the Ichon geomagnetic observatory. The power spectrum of electric field is derived from magnetic field spectrum using the impedance for the one-dimensional model. (b) Variances of magnetic and electric field power spectrum. These curves are the spectra multiplied by frequency and the shape of curves shows the actual energy distribution.

모델의 1차원 구조에 대한 임피던스를 이용하여 전기장의 파워스펙트럼을 근사적으로 계산하였다(Fig. 5a). 실제적인 전자기장의 에너지 분포를 알아보기 위하여 각 파워스펙트럼에 주파수를 곱하여 Fig. 5b에 도시하였다. 전기장은 10^{-3} Hz 부근에서 가장 큰 에너지를 가지고 있으며, 저주파로 갈수록 에너지의 크기가 줄어들기 때문에 전기전도도 변동주파수 보다 충분히 낮은 모든 주파수에 대해 누적된 전기장의 파워(C_E^2)는 유한한 값을 가짐을 알 수 있다.

전자기장 교란의 관측 가능성

전기장의 누적 파워스펙트럼을 계산하고, 식 (9)를 이용하면 변조자기장의 총파워를 예측할 수 있다. 그러나, 변조자기장의 크기가 변조주파수 대역에 존재하는 배경전자기장에 비해 큰 값을 가져야만, 자기장의 관측을 통해 전자기장의 교란을 관측할 수 있다. 지진활동과 관련된 전자기장의 교란은 좁은 주파

수 대역에서 관측되고 있으므로(Fraser-Smith *et al.*, 1990), 좁은 주파수 대역에서의 배경자기장과 총 변조자기장의 진폭비를 이용하여 전자기장의 교란의 관측 가능성을 예측할 수 있다. 즉, 전기전도도 변동 주파수 부근의 주파수 대역에서 배경자기장에 대한 총 변조자기장의 진폭비는 식 (10)과 같이 전기장의 누적 스펙트럼의 비율로서 계산할 수 있다.

$$\frac{C_{HM}(0, w)}{C_H(w_1, w_2)} = \frac{\epsilon |h_m(0, w_m)| C_E(0, w)}{|Z(w_m)| C_H(w_1, w_2)} = \epsilon |h_m(0, w_m)| \frac{C_E(0, w)}{C_E(w_1, w_2)} \quad (10)$$

전기전도도 변동 주파수를 0.1 Hz, 전기전도도 변동 진폭(ϵ)을 0.1, 관측주파수 밴드를 0.056~0.18 Hz로 가정하였을 때, 변조자기장의 크기가 최대가 되는 단층대의 중앙에서의 진폭 누적비를 Fig. 6a에 도시하였다. 배경자기장의 주파수가 0.08 Hz 이상이면, 변조주파수가 관측주파수 밴드를 벗어나므로,

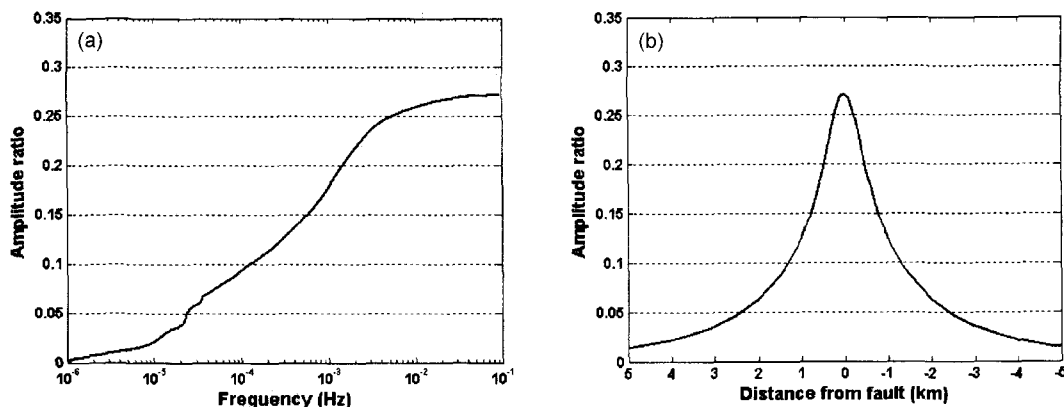


Fig. 6. Amplitude ratio between modulated and normal magnetic field. The amplitude and frequency of conductivity fluctuation are 0.1 and 0.1 Hz, respectively. The amplitude of normal magnetic field is calculated in a narrow frequency band: 0.056~0.18 Hz (0.5 decade). (a) Cumulative amplitude ratio at the center of fault zone. (b) Amplitude ratio distribution of modulated magnetic field due to the inducing electromagnetic field at frequencies of 10^{-6} through 0.08 Hz.

0.08 Hz까지 누적된 총변조자기장의 분포를 Fig. 6b에 도시하였다. 단층대의 중앙에서 자기장의 진폭이 최대 약 27% 증가함을 볼 수 있다.

투 의

전기전도도 변동에 의한 전자기장의 교란에 영향을 미치는 요소들에는 전기전도도 변동 진폭(ϵ) 및 주파수(w), 단층대의 전기전도도, 지각 및 맨틀의 전기적 구조, 관측 주파수 밴드의 폭 등을 생각할 수 있다. 전기전도도 변동의 진폭은 변조자기장의 크기와 선형 비례하는 관계를 가지고 있으며, 좁은 주파수 밴드 내에서는 관측 주파수 밴드의 폭과 그 밴드 내의 배경자기장 크기에도 선형의 관계를 가진다. 그러나, 전기전도도

변동 주파수, 단층대의 전기전도도, 지각 및 맨틀의 전기적 구조는 발생가능한 변조자기장의 크기와 비선형의 관계를 가지므로 몇 개의 모델을 통해 전자기장 교란의 양상을 살펴보았다.

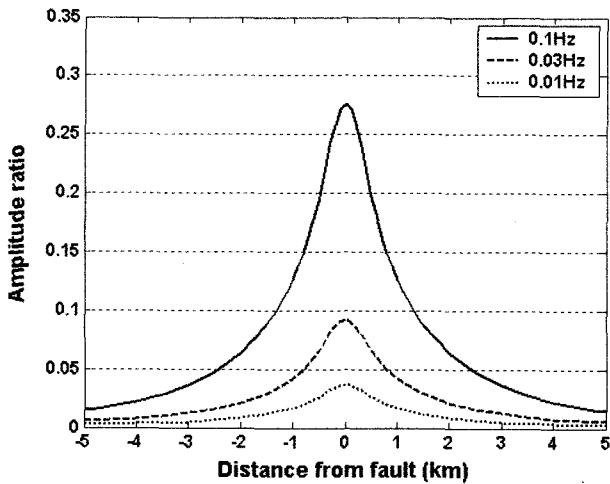


Fig. 7. Amplitude ratio between modulated and normal magnetic field according to the frequency of conductivity fluctuation: 0.1 Hz, 0.03 Hz and 0.01 Hz.

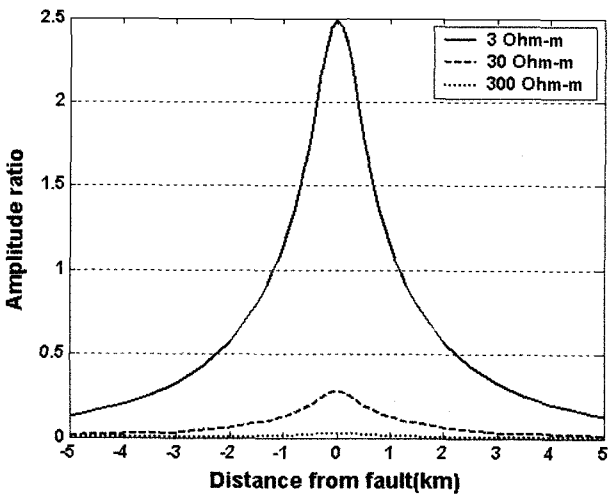


Fig. 8. Amplitude ratio between modulated and normal magnetic field according to the conductivity of fault zone: 3 Ohm-m, 30 Ohm-m and 300 Ohm-m.

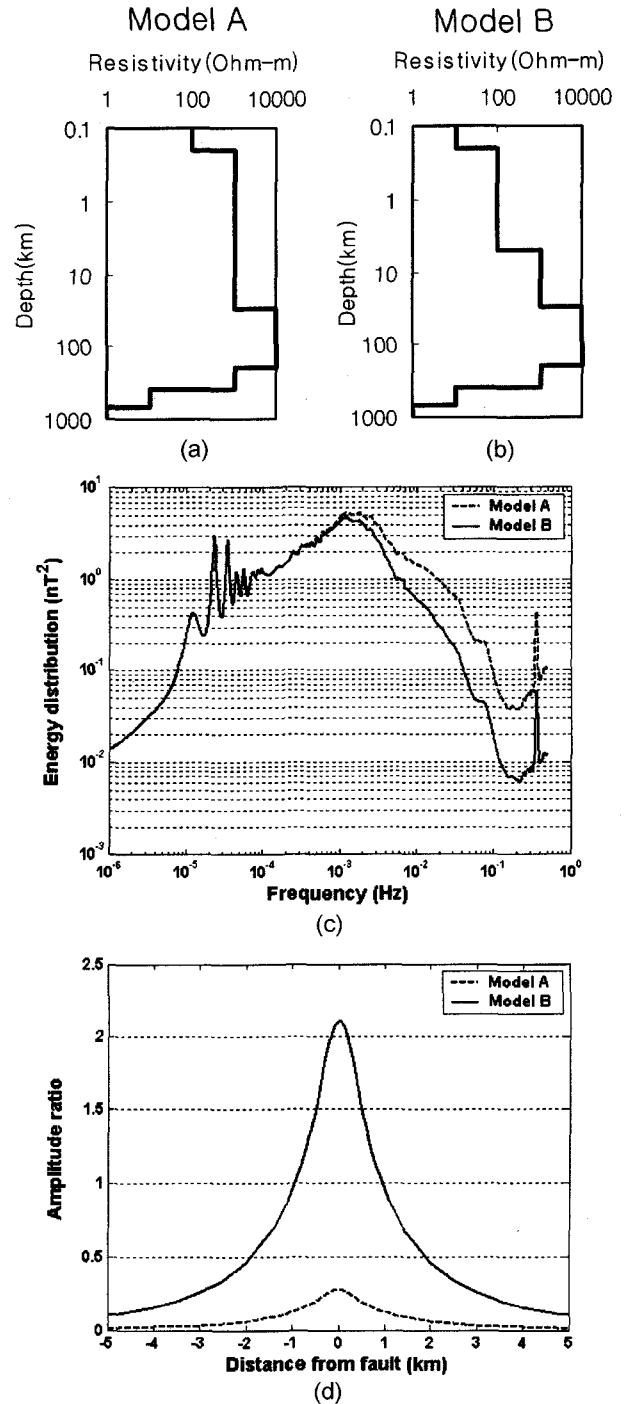


Fig. 9. Comparison of the responses according to the different one-dimensional crustal structures. The variances of electric-field power spectra (c) and amplitude ratios of the modulated magnetic fields (d) for one-dimensional models A (a) and B (b). The upper layers are more conductive in model B than in model A.

동일한 구조에 대하여 전기전도도 변동 주파수(0.1, 0.03, 0.01 Hz)에 따른 변조자기장의 진폭비를 Fig. 7에 도시하였다. 전기전도도 변동 주파수가 낮아질수록 누적되는 변조자기장의 크기가 작아지고, 관측주파수 밴드에서의 배경자기장의 크기는 증가하기 때문에 진폭비는 점점 작아진다. Fig. 8에는 단층대의 전기비저항이 각각 3, 30, 300 Ohm-m인 구조에 대한 결과이다. 단층대의 전기비저항이 매우 낮을 경우, 수 배에 달하는 전자기장의 교란이 발생할 수도 있다.

전기장의 파워스펙트럼에서 알 수 있듯이, 지각의 전기비저항이 낮을수록 고주파 대역에서 전기장의 파워가 감소하게 된다. 이러한 경우, 관측 주파수 대역에서 배경자기장의 크기가 감소하기 때문에 변조자기장의 진폭비가 증가한다. 3 km까지의 지각이 Fig. 2에 도시된 모델의 1/10에 해당하는 전기비저항을 가질 때, 파워스펙트럼의 에너지 분포와 변조자기장의 진폭비를 Fig. 9에 도시하였다. 지각내의 1차원 전기비저항 구조에 따라 수 배에 달하는 변조자기장이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

지금까지 전기전도도 변동에 의한 전자기장의 교란을 Egbert(2002)의 이론에 따라 간단한 구조에 대해 살펴보았다. 이러한 이론은 단층대에서 전기전도도가 ULF 대역의 주파수로 변동한다는 이론적 근거나 관측 자료가 있어야만 타당하다. 지진과 관련된 미세균열들의 생성 및 소멸에 따라서 암석 내의 공극률이나 공극 간의 연결성이 빠르게 변동한다는 견해들이 제시되고 있으나(Byerlee, 1993), 전기전도도의 빠른 변동에 대한 명확한 이론적 근거나 관측 자료가 부족한 실정이다. 그럼에도 불구하고, 지진활동과 관련된 전기전도도의 급격한 변동이 짧은 시간 내에 발생할 가능성은 충분하며, 이로 인해 전자기장의 변조가 발생한다면 정밀한 관측을 통해 전자기장의 교란을 관측하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

결 론

간단한 2차원 단층대 구조에서 전기전도도 변동에 의한 전자기장의 교란을 수치모델링을 통하여 살펴보았다. ULF 대역의 주파수로 진동하는 전기전도도 변동에 의해 낮은 주파수의 전자기장들이 ULF 대역의 주파수로 변조되어 좁은 주파수 대역에 중첩됨으로써 상대적으로 큰 전자기장의 교란을 일으킬 가능성이 있으며, 낮은 주파수 대역으로 갈수록 자연적인 전자기장의 파워스펙트럼이 커지는 특성도 이러한 가능성을 뒷받침한다. 단층대의 전기비저항이나 크기, 전기전도도 변동의 크기나 주파수, 지각 및 맨틀의 전기적 구조, 관측주파수 대역의 폭에 따라 전자기장 교란의 검출 가능성이 좌우된다. 특히, 지각 천부의 전기비저항이 지각 심부의 전기비저항보다 매우 낮을 경우와 단층대의 전기비저항이 주변 암석들의 전기비저항보다 매우 낮을 경우에는 관측이 가능할 만큼 큰 전자기장의

진폭 변화가 발생할 수 있다. 따라서 지진활동과 관련된 전자기장의 교란을 예측하기 위해서는 단층대의 구조를 파악하는 것 뿐만 아니라 지각 심부의 전기적 구조를 규명하는 것이 선행되어야 한다.

사 사

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 지진예지 및 지진해일 예측기술개발 과제에서 수행된 것입니다

참고문헌

- 최정림, 조경석, 박재수, 이근호, 이성환, 성숙경, 이동훈, 1997, 한반도 지자기 연속 관측망 구축 및 초기 관측 결과: 한국우주과학회지, **14**, 126-135.
- 이성근, 1993, 2차원 MT 모델링과 공간 필터링을 이용한 정적 효과 제거에 관한 연구: 공학석사학위논문, 서울대학교.
- Byerlee, J., 1993, Model for episodic flow of high-pressure water in fault zones before earthquakes: *Geology*, **21**, 303-306.
- Draganov, A. B., Inan, U. S., and Taranenko, Y. N., 1991, ULF Magnetic signatures at the earth surface due to ground water flow: a possible precursor to earthquakes: *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1127-1130.
- Egbert, G. D., 2002, On the generation of ULF magnetic variations by conductivity fluctuations in a fault zone: *Pure Appl. Geophys.*, **159**, 1205-1228.
- Egbert, G. D. and Booker, J. R., 1992, Very long period magnetotellurics at Tucson observatory: implications for mantle conductivity: *J. Geophys. Res.*, **97**, 15099-15112.
- Fenoglio, M. A., Johnston, M. J. S., and Byerlee, J. D., 1995, Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones; application to the Loma Prieta ULF emissions: *J. Geophys. Res.*, **100**, 12951-12958.
- Fraser-Smith, A. C., Bernardí, A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A., and Villard, Jr. O. G., 1990, Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the ML 7.1 Loma Prieta earthquake: *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1465-1468.
- Merzer, M. and Klemperer, S. L., 1997, Modeling low-frequency magnetic-field precursors to the Loma Prieta earthquake with a precursory increase in fault-zone conductivity: *Pure Appl. Geophys.*, **150**, 217-248.
- Ogawa, T. and Hill, D. P., 1985, Electromagnetic radiations from rocks: *J. Geophys. Res.*, **90**, 6245-6249.
- Oh, S. H., Yang, J. M., Lee, D. K., and Nam, J. C., 2002, Geomagnetic depth sounding to investigate the trend of electrical conductivity in and around the Korean peninsula: *Econ. Environ. Geol.*, **35**, 437-444.
- Park, S. K., 1991, Monitoring changes of resistivity prior to earthquakes in Parkfield, California, with telluric arrays: *J. Geophys. Res.*, **96**, 14211-14237.

- Park, S. K., Johnston, M. J. S., Madden, T. R., Morgan, F. D., and Morrison, H. F., 1993, Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms: *Review of Geophysics*, **31**, 117-132.
- Sadovsky, M. A., Nersesov, I. L., Nigmatullaev, S. K., Latynina, L. A., Lukk, A. A., Semenov, A. N., Simbireva, I. G., and Ulomov, V. I., 1972, The processes preceding strong earthquakes in some regions of middle Asia: *Tectonophysics*, **14**, 295-307.
- Trimmer, D., Bonner, D., Heard, C. H., and Duba, A., Effect of pressure and stress on water transport in intact and fractured gabbro and granite: *J. Geophys. Res.*, **85**, 7059-7071.
- Yamada, I., Masuda, K., and Misutani, H., 1989, Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture: *Phys. Earth. and Planet. Inter.*, **57**, 157-168.