

지진파에 의해 발생하는 ULF 전자기장 변동

이희순^{1)*}, 이춘기²⁾, 권병두²⁾, 양준모³⁾, 오석훈⁴⁾, 송윤호⁵⁾, 이태종⁵⁾, Toshihiro Uchida⁶⁾

¹⁾경인교육대학교 과학교육과 yihsoon@gin.ac.kr

²⁾서울대학교 지구과학교육과

³⁾기상연구소 해양기상지진연구실

⁴⁾수자원연구원 댐안전연구소

⁵⁾한국지질자원연구원 지하수지열연구부

⁶⁾Institute of Geo-Resource and Environment, Geological Survey of Japan

ULF electromagnetic variation associated with seismic wave

Heuisoon Lee¹⁾, Choon-Ki Lee²⁾, Byung-Doo Kwon²⁾, Jun-Mo Yang³⁾, Seokhoon Oh⁴⁾, Yoonho Song⁵⁾, Tae Jong Lee⁵⁾, and Toshihiro Uchida⁶⁾

¹⁾GyeongIn National University of Education, Dept. Science Education

²⁾Seoul National University, Dept. Earth Science Education

³⁾Marine-Meteorology and Earthquake Research Lab., Meteorological Research Institute

⁴⁾Korea Institute of Water and Environment

⁵⁾Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

⁶⁾Institute for Geo-Resources and Environment, Geological Survey of Japan, AIST.

요약 : 최근 제주도에서 실시된 자기지전류(Magnetotelluric) 탐사 자료에서 일본의 Kii 반도 남동쪽 해상에서 발생한 지진활동과 관련된 전자기 현상이 관측되었으며, 이러한 동지진 전자기장 신호의 특성과 메카니즘을 분석하였다. 전파속도, 파워 스펙트럼의 특성, 지진 기록과의 비교, MT 임피던스의 변화, 타원분극 방향 등의 분석으로부터 전자기장 변동이 지진파 전파 과정에서 측정 주변에서 유도된 전자기장으로 판단되며, 측정 주변의 지전기 및 수리지질학적 구조에 의해 전자기장 변동이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 전기역학적 효과의 간단한 고찰을 통해 관측된 전자기장의 크기가 이론적 근사와 유사함을 알 수 있었으며 전자기장의 파워가 가속도 파워와 밀접히 관련되어있음을 알 수 있으나 측정에 따라 전자기장의 크기와 방향이 크게 차이가 나는 것은 설명하기 위해서는 전기역학적 메카니즘 이외의 효과를 고려할 필요가 있다.

주요어 : 동지진 전자기 신호, 자기지전류, 전기역학적 효과

Abstract : The electromagnetic signals associated with the seismic activity in the south-east offshore of Kii peninsula, Japan, were clearly recorded at the MT sites in Jeju island, Korea. In this research, we have identified the co-seismic electromagnetic signals associated with the seismic activity and have analyzed the characteristics of significant electromagnetic variations. The analysis of phase

velocity, power spectral density, MT impedance and polarization direction shows that the significant earthquake signals have the frequency band of about 0.05 to 0.5 Hz and that the sources of electromagnetic field are local effects of passing seismic waves. The simple approximation using electrokinetic effect successfully explains the co-seismic EM signals coincides with measured data but cannot explain the localities of electromagnetic variations.

Keywords : Co-seismic EM signal, Magnetotelluric, Electrokinetic effect

1. 서론

최근 많은 관측 자료에 의해 지진 발생 전 ULF 대역에서의 전자기장 변동이 발생한다는 사실이 알려졌으며 이를 이용한 지진예지 가능성에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 전자기장의 교란을 설명하는 메카니즘으로 압전기(piezoelectric) 효과(Ogawa *et al.*, 1985), 전기역학적(electrokinetic) 효과(Fenoglio *et al.*, 1995), 수리자기(hydromagnetic) 효과(Draganov *et al.*, 1991), 유도 탄성-전자기(inductive seismo-electromagnetic) 효과(Surkov *et al.*, 2003) 등이 제안되어왔으나 연구사례에 따라 관련된 지진, 관측 방법, 관측 장소 등에 따라 전자기장 변동의 특성이 매우 다르게 나타나고 있어서 관측결과의 정량적 상관성 혹은 명확한 메카니즘의 정립이 어려운 실정이다. 반면, 지진 발생과 동시에 발생하는 동지진(co-seismic) 전자기장, 특히 지진파의 전파와 관련되어 발생하는 전자기장 변동은 지진파의 관련성이 보다 명확하기 때문에 이에 대한 정략적 이해가 지진과 관련된 전자기장 변동 현상을 이해하는데 도움이 될 수 있다. 지진파의 전파에 의해 발생하는 전자기장 변동의 형태에는 전위차가 급격히 증가했다가 서서히 감쇠하는 형태와 지진파와 같이 진동하는 형태로 나눌 수 있으며, 두 현상 모두 관측 지점의 국부적인 지전기 혹은 수리지질학적 구조에 매우 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Nagao, *et al.*, 2000). 최근 제주도에서 실시된 자기지전류(Magnetotelluric) 탐사 자료에서 일본의 Kii 반도 남동쪽 해상에서 발생한 지진활동과 관련된 전자기 현상이 관측되었으며, 전자기장 변동의 특성과 메카니즘을 분석하고자 한다.

2. 전자기장 관측

2004년 9월 5일 일본의 Kii 반도 남동쪽 해상에서 전진-본진-여진의 형태를 가지는 지진활동이 시작되었다. 10시 7분(UT)에 규모 6.9의 전진이 발생하였고 14시 57분(UT)에 규모 7.4의 본진이 발생하였다. 가장 큰 여진은 규모 6.4의 지진으로 9월 6일 23시 29분(UT)에 발생하였다. 지진들은 Nankai 해구를 따라 분포하며, 지진 발진기구는 남북 방향의 압축력을 받는 역단층의 형태를 보여준다. 본진인 규모 7.4 지진의 진원은 10 km 깊이에 위치한다.

같은 시기인 9월 5일부터 9월 16일 동안 한국지질자원연구원은 제주도일대에서 자기지전류 탐사를 실시하였으며 자료처리 과정에서 9월 5일 발생한 전진과 본진과 관련된 전자기장 변동이 확인되었다. 9월 5일에는 제주도의 3측점과 일본에 위치한 원거리 기준점에서 측정이 이루어졌으며 모든 측점에서 지진관련 신호가 포착되며, 특히 제주도 동쪽 측점(JJE-355)에서 가장 큰 신호가 기록되었다.

지진파에 의해 발생하는 ULF 전자기장 변동

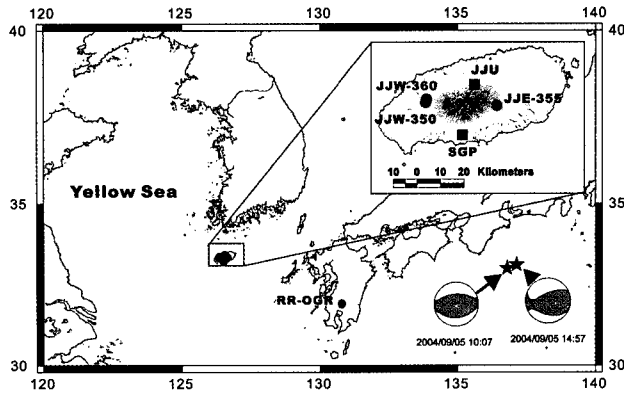


Fig. 1 The epicenter of earthquakes (stars) and location of MT sites (circles) and seismic observation sites (squares)

초동의 도달시간은 지진발생 약 2.5분 후, 최대 진폭은 약 5분후에 기록되었으며 지속시간은 30분내외이다. 도달 시간과 지속시간을 고려하면 S파나 표면파가 측점을 지나갈 때 전자기장의 변동이 발생하는 것으로 생각된다. 측정된 전자기장 자료로부터 지진관련 신호를 추출하기 위해서는 신호의 주파수 대역을 결정할 필요가 있다. 지진과 관련된 전자기장 변동은 주파수 특성이 명확히 알려져 있지 않으며 배경 MT 신호 및 주변의 인공잡음들로 인해 주파수 특성을 명확히 구별하기가 쉽지 않다. 배경 MT 신호로부터 지진과 관련된 전자기장 변동을 구별하기 위하여 전기장 파워 스펙트럼의 시간에 따른 변화를 살펴보았다(Fig. 2).

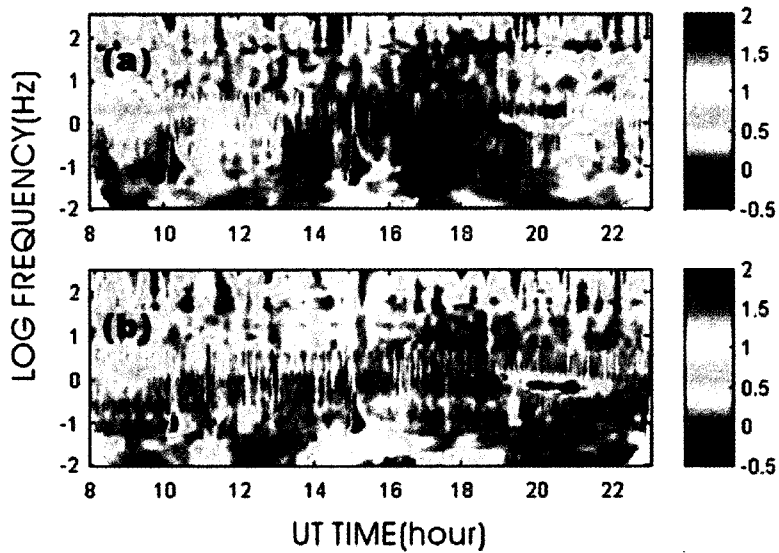


Fig. 2 The time variations of power spectrum of E_x (a) and E_y (b) at JJE-355. The color scale indicates the normalized amplitude for all frequencies in the log scale.

측정에 사용된 MTU-5A 시스템은 2400Hz(밴드 3), 150Hz(밴드 4), 15Hz(밴드 5)를 샘플링 주파수로 하는 3개의 밴드를 가지고 있다. 밴드 5의 경우 측정시간동안 연속적으로 측정하는 반면, 밴드 3 과 밴드 4는 연속적으로 측정하지 않고 10분간 각각 1초, 8초 동안 측정하게 되므로, 이 밴드들의 경우 10분 간격의 평균 파워를 도시하였다. 밴드

3(320–35Hz)의 경우 시간에 따른 파워의 변화가 심하게 나타나고 있으며 지진 발생 직전과 직후에 큰 파워를 나타내는 경향이 있다. ELF 및 VLF 대역에서 지진 전조로서의 전자기장 변동이 보고되고 있으나 본 연구에서 관측된 자료의 경우 10분마다 간헐적으로 짧은 시간동안 측정하는 밴드의 특성상 지진과의 상관성을 명확히 단정하기는 어렵다.

배경 MT 신호로부터 뚜렷하게 구별될 수 있는 지진 관련 신호의 주파수 대역은 0.5–0.05Hz 이며 뚜렷하게 구별되지는 않지만 2Hz 부근까지 관련 신호가 있음을 알 수 있다. 이 대역의 시간에 따른 변화를 살펴보면 지진발생 초기에는 주파수 대역이 넓게 분포하며 시간이 흐름에 따라 0.1Hz 부근으로 수렴하는 경향을 보인다. 이는 초기에는 S파와 함께 저주파의 표면파에 의해서, 후기에는 표면파의 분산(dispersion) 현상 때문에 고주파의 표면파에 의해서 전자기장이 유도됨을 알 수 있다. 이러한 결과 역시 관측된 전자기 신호가 진원에서 발생한 것이 아니라 지진파의 전파에 의해서 유도되는 현상임을 암시한다.

스펙트럼 분석결과를 바탕으로 0.05–0.5Hz의 주파수 대역을 가지는 대역통과 필터링을 실시하여 Fig. 3에 도시하였다. 측정에서 가장 가까운 지진관측소는 기상청에서 운영하는 제주 관측소(JJU)이며 20Hz 샘플링 주파수를 가지는 광대역 속도계에 의해 지진파가 기록되었다. 전자기장 변동과 지진파의 파형을 비교하면 거의 비슷한 양상을 보인다. 필터링된 전자기장을 이용하여 제주도 동쪽 측점(JJE-355)과 서쪽 측점(JJW-360)에서 기록된 신호의 도달 시간 차이를 상호상관을 통해 계산한 결과 약 3.5–4km/s의 위상속도를 가지는 것으로 추정되며, 이는 S파 혹은 표면파의 전파 속도와 유사함을 알 수 있다.

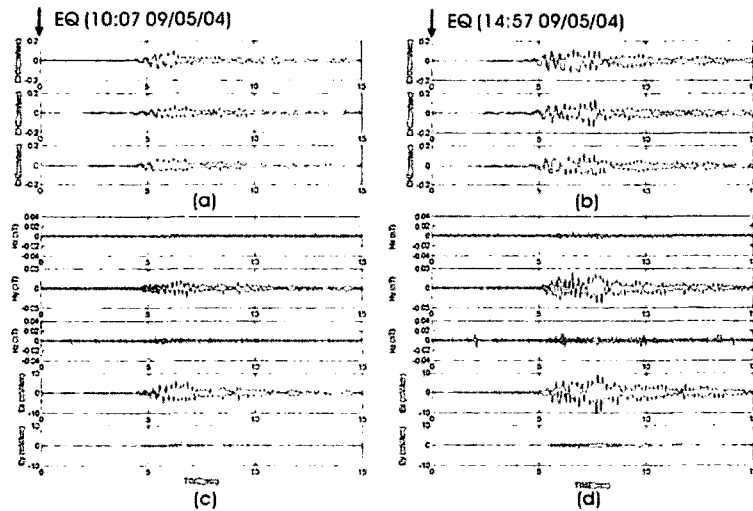


Fig. 3 Broad band seismic velocity signals of (a) M 6.9 earthquake and (b) M 7.4 earthquake at JJU seismographic station and band-pass filtered electromagnetic signals of (c) M 6.9 earthquake and (d) M 7.4 earthquake at east MT site (JJE-355). The frequency band of band-pass filter is 0.5–0.05 Hz.

4. ULF 전자기장 변동의 특성

MT 임피던스의 관점에서 볼 때, 지진관련 신호는 걸보기 비저항은 증가시키고, 위상은 0으로 수렴하게 하는 효과를 나타내고 있다. 이는 전기장과 자기장이 같은 위상을 가지

고 있다는 것을 의미하며 전자기 송신원의 근거리장(near-field) 지역에 측점이 위치하고 있음을 나타낸다. 제주도 동-서쪽 측점을 비교하여보면 지진관련 신호의 진폭이 2-10배 차이로 동쪽 측점에서 크게 나타나고 있으며, 전자기장의 분극 방향 역시 서로 다른 양상으로 나타나고 있으며, 특히 전기장의 경우, 위상이 역전되어 나타나기도 한다. 이러한 특성으로 보아 지진파에 의한 전자기장의 발생이 국부적인 지전기 구조 및 수리 지질학적 구조에 의해 좌우되는 것으로 생각된다.

5. 지진파와 관련된 전자기장 변동의 메카니즘

지진파의 전파와 관련된 전자기장 변동의 원인으로 압전기(piezoelectric), 압자기(piezomagnetic), 전기역학적(electrokinetic) 효과를 고려할 수 있다. 지하매질의 운동에 의해 유도되는 압력변화는 매우 작은 값이기 때문에 일반적 토양이나 암석의 경우 압전기, 압자기 효과가 관측될 만큼 크지 않다. 전기역학적 효과는 유동전위(streaming potential)이라고도 하며, 전해질의 용액이 다공질 매질을 따라 운동하는 경우 고체와 액체 표면에서 유도되는 흡착전위(zeta potential)에 의해 발생하게 된다. 균일한 매질에서 유동전위(ΔV)와 압력차(ΔP)의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta V/\Delta x = (\Delta P/\Delta x) (\epsilon\zeta/\eta\sigma) \tag{1}$$

여기서, 상수들은 전해액의 물성을 나타내며 ϵ 은 유전상수(dielectric constant), ζ 는 흡착전위, η 는 점성, σ 는 전기전도도를 나타낸다. 전형적인 값은 각각 $80/(4\pi \times 9 \times 10^9) F/m$, $10^{-2} \sim 10^{-1} V$, $10^{-4} Pa \cdot s$, $10^{-1} S/m$ 이다. (Mizutani *et al.*, 1976). 토양과 전해액의 밀도차를 $1 g/cm^3$ 라고 가정하면, 가속도가 $1 cm/sec^2$ 일 때 압력차는 $10 Fa/m$ 로 근사할 수 있으므로 제주관측소에서의 최대 가속도인 $0.1 cm/sec^2$ 을 적용하면 전기역학적 효과에 의한 전위차는 약 $0.8 \sim 8 mV/km$ 이다. 동쪽 측점(JJE-355)의 관측 전기장은 최대 진폭이 $11.0 mV/km$ 이고 서쪽 측점(JJW-360)의 경우 최대 진폭이 $0.65 mV/km$ 로 계산치의 상한과 하한을 다소 벗어나는 값을 가진다.

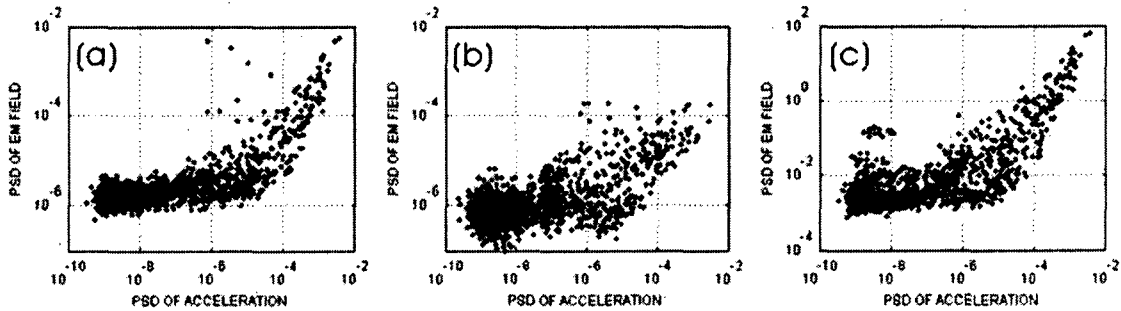


Fig. 4 Relationship between the power spectral density of seismic acceleration and EM field signals: (a) horizontal magnetic field, (b) vertical magnetic field and (c) horizontal electric field. The units of PSD of acceleration, magnetic field and electric field are $cm/(s^2Hz^{1/2})$, $nT/(Hz^{1/2})$ and $mV/(Hz^{1/2})$ respectively.

Takeuchi *et al.*(1998)은 수직 전기장과 지진파의 가속도와 선형적인 상관관계를 이용하여 지진파에 의한 전기장의 변동이 전기역학적 효과에 의한 것으로 해석하였다. 이 방법에 기초하여 지진파의 가속도의 파워 스펙트럼과 전자기장의 수평성분과 수직성분의 파워 스펙트럼의 상관관계를 도시하였다(Fig. 4) 가속도 파워가 작은 경우 전자기장은 일정한 배경 MT 신호의 파워를 나타내고 있으며 가속도가 커질수록 양의 상관관계를 보

인다. 선형의 관계가 시작되는 부분에서 분산이 커지는 것은 고주파 대역의 경우 10^{-5} cm/s²Hz^{1/2} 이상의 가속도에서 전자기장과 양의 상관관계를 보이며 저주파의 경우는 더 낮은 가속도에서도 전자기장의 파워가 증가하기 때문이다. 이러한 특성은 전기역학적 효과가 주파수와 관련이 있음을 나타낸다.

6. 논의

제주도에서 관측된 지진과 관련된 전자기장 변동은 전파속도, 파워 스펙트럼의 특성, 지진 기록과의 비교, MT 임피던스의 변화 등의 분석으로부터 지진과 전파 과정에서 측정 주변에서 유도된 전자기장으로 판단되며, 동-서 측정에서 타원분극 방향과 위상 차이가 크게 나타나는 것으로 보아 측정 주변의 지전기 및 수리지질학적 구조에 의해 전자기장 변동이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 전기역학적 효과의 간단한 고찰을 통해 관측된 전자기장의 크기가 이론적 근사와 유사함을 알 수 있었으며 전자기장의 파워가 가속도 파워와 밀접히 관련되어있음을 알 수 있다. 그러나 측점에 따라 전자기장의 크기와 방향이 크게 차이가 나는 것은 설명하기 위해서는 유도자기(inductive seismomagnetic) 효과 등 전기역학적 메카니즘 이외의 효과를 고려할 필요가 있다. 향후 보다 많은 자료의 획득과 분석을 통해 지진과 관련된 전자기장 변동의 보다 자세한 메카니즘을 규명해 갈 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 지진해일 예측 및 지진 전조 탐지기술 개발 과제에서 수행된 것입니다. 이 연구에서는 한국지질자원연구원 “심부지열에너지개발사업”의 수행에서 얻어진 자료를 이용하였다.

참고문헌

- 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.
- Fenoglio, M.A., Johnston, M.J.S., 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.
- Molchanov, O., Kulchitsky, A. and Hayakawa, M., 2001, Inductive seismo-electromagnetic effect in relation to seismogenic ULF emission, *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 1, 61-67.
- Nagao, T., Orihara, Y., Yamaguchi, T., Takahashi, I., Hattori, K., Noda, Y., Sayanagi, K., Uyeda, S., 2000, Co-seismic geoelectric potential changes observed in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1535-1538.
- Ogawa, T. and Hill, D. P., 1985, Electromagnetic radiations from rocks, *J. Geophys. Res.*, 90, 6245-6249.
- Surkov, V.V., Molchanov, O.A. and Hayakawa, M., 2003, Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing, *J. Atm. Solar Terr. Phys.*, 65, 31-46.
- Takeuch, N., Chubachi, N., Hotta, S and Narita, K., 1998, Analysis of earth potential difference signals by using seismic wave signals, *Electrical Engineering in Japan*, 125, 1219-1224.