Jour. Korean Earth Science Society, v. 30, no. 6, p. 683–691, October 2009

안동지진(2009년 5월 2일) 발생 기간 지자기장 자료의 변동성 분석

오 석 훈*

강원대학교 지구시스템공학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자동 192-1

Variation Analysis of Geomagnetic Data Observed Around the Event of Andong Earthquake (May 2, 2009)

Seokhoon Oh*

Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University, Kangwon 200-701, Korea

Abstract: Geomagnetic variation around May 2, 2009 when Angdong earthquake broke out was analyzed using the data recorded at the Cheong-yang geomagnetic observatory, KMA. Firstly, we predict the geomagnetic variation by PCA analysis of geomagnetic data, and then compare the predicted value with the observed data to find any significant differences in residuals. Secondly, wavelet semblance technique is applied to compare the time series before and after the earthquake. Some meaningful change is detected in the Z-field. Thirdly, eigen value analysis for the 3 component geomagnetic data is performed. The location of the observatory was too far from the epicenter and the magnitude was too small to find decisive precursory phenomenon. Nevertheless we can detect some significant correlation between the earthquake and the variation of the geomagnetic field. Various signal processing methods applied in this study will give some opportunity to find precursory effects in the future.

Keywords: Angdong earthquake, seismic precursor, geomagnetic variation, wavelet semblance

요약: 2009년 5월 2일 규모 4.0의 안동 지진이 발생한 시기에 기상청 청양 지자기 관측소에 기록된 자료를 이용하여 지자기 변동성을 분석하였다. 먼저 지자기 관측자료의 주성분을 이용하여 지자기 예측을 수행하고, 지진이 발생한 전후로 예측한 지자기장과 실제 관측된 지자기장 사이에 유의미한 변화량이 있는지 분석하였다. 두 번째로, 지진 발생일과 다른 날의 지자기장을 웨이블릿 셈블런스 기법을 통해 상호 비교하였다. 이 결과에서는 자기장의 수직성분에서 차이가 있음을 발견하였다. 마지막으로 3성분 자료에 대한 고유값 분석을 통해 지진 발생 시기 부근에 고유값의 변화가 발생하였는지 분석하였다. 청양 관측소의 위치가 지진 발생지점과 매우 많이 떨어져 있고 규모가 작아서 명확한 전조 현상을 발견할 수는 없었으나, 지진과 상관성이 높은 지자기 변동성을 발견하였다. 본 연구에서 개발된 다양한 지자기 신호 처리 기술은 향후 전조현상 탐지를 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대 한다.

주요어: 안동지진, 지진 전조, 지자기 변동성, 웨이블릿 셈블런스

서 론

지구자기장 관측 자료는 우주 환경의 상태를 파악할 수 있는 우주 기상의 영역에서부터, 지구 내부의 심부 전기비저항 구조를 파악할 수 있는 순수 지구물리학적 영역에 이르기까지 다양한 분야에 활용되고 있다. 이와 더불어, 지진과 관련해서는 지진으로 인한 지구의 자기장의 변동성에 대한 논의가 오랫동안 있어왔다(Rikitake and Honkura, 1985; Johnston, 1997). 최근 자기장의 극저주파 대역(ULF)에서 지진의 전조현상과 관련된 것으로 보이는 다양한 사례가 성공적으로 관측되고 있다(Kawate et al., 1998; Hayakawa et al., 2000; Hatorri, 2002; Harada et al., 2004). 이는 관측장비의 현대화에 따른 안정적인 자료의 축적과 함께 다양한 신호 처리 기술의 적용으로 주 신호에 비해 매우 작은 크기를 가지는 지진에 의한 전조 현상을 성공적으로 구분해 낼 수 있었기 때문으로 분석된다.

*Corresponding author: gimul@kangwon.ac.kr
Tel: 82-33-250-6258
Fax: 82-33-252-5550

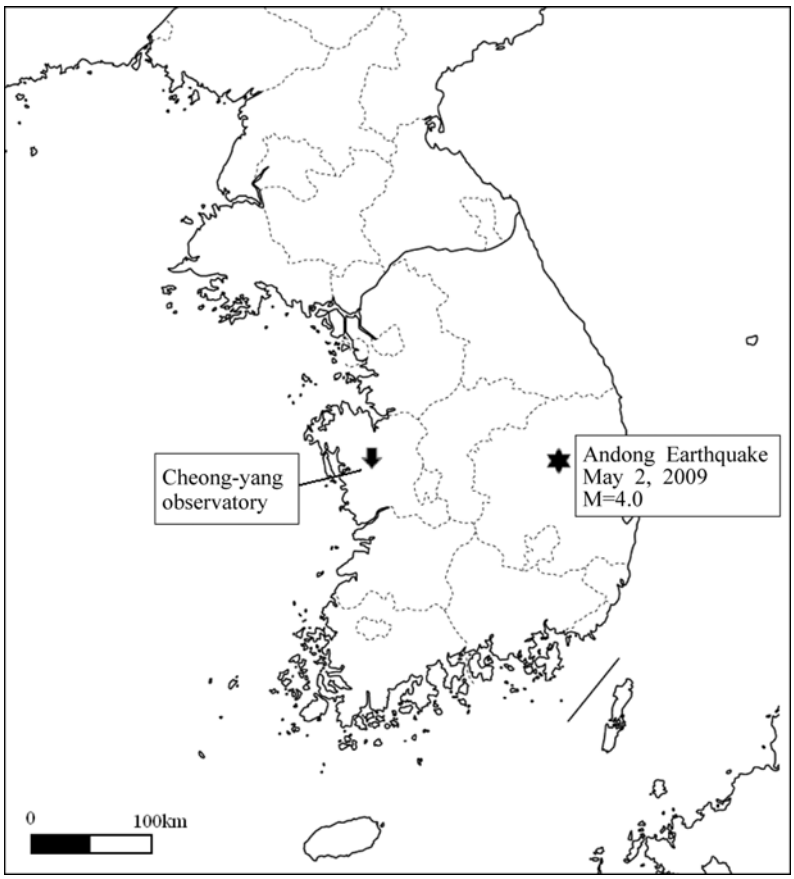

Fig. 1. The epicenter of Andong earthquake and the location of the Cheong-yang geomagnetic observatory, KMA.

반면 국내에서는 지진전조 현상 분석을 위한 지자기장 자료의 활용이 많이 이루어지지 않았다. 다만, 지자기 전달함수 분석을 통해 한반도 심부의 전기적 구조를 해석하기 위한 연구가 진행되면서(오석훈 외, 2002; 양준모 외, 2002), 이를 지진 전조 현상 연구에 적용하려는 노력이 이루어지고 있다(양준모 외, 2004). 또한, 2009년 3월에 기상청에서 지진 전조 현상의 관측을 목표로 충북 청양에 지자기 관측소를 설립하면서 이에 대한 관심이 높아지고 있다.

지자기장 관측자료와 같은 시계열 자료에 담겨있는 주기성을 연구하기 위해서는 일반적으로 푸리에 변환 등을 이용하여 주파수 영역에서 분석을 수행한다. 그러나 자연계에서 관측되는 시계열 자료는 잡음이 포함되어 있고 비정상상태(non-stationary)인 경우가 많은데, 푸리에 변환은 이에 대해 적절히 대응하기 어렵다. 이를 극복하기 위한 방법으로 다중감쇠 방법(multitaper method)이나 웨이블릿 변환 등이 최근 적용되고 있다. 이러한 방법들은 특정 위치의 신호에 대한 주파수 및 시간 영역에서의 정보를 제공하기 때문에, 잡음이 섞인 비정상상태의 시계열 자료를 처리하는데 큰 도움이 되지만, 전체 자료를 처리하여 그 특징을 파악하기에는 어려움이 있다. 이에 Nordemann et al.(2008)은 푸리에 변환이 제공하는 시계열 자료의 전체적인 분석 정보를 이용하면서 시간 영역의 특성을 반영하기 위해, 시계열 자료의 주성분을 분석하여 최적화 기법에 의해 각 주성분을 반영할 수 있는 사인(sin)함수의 계수를 결정하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 Nordemann 등이 제안한 방법을 지자기 관측자료에 적용하여 지자기 자료를 재구성하고 예측함으로서 지자기 관측자료와 지진과의 연관성을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 2009년 5월 2일 발생한 안동 지진과 당시에 기록된 지자기 기록의 상호 연관성을 분석하였다.

또한 셈블런스 기법은 상관성을 갖는 자료의 도출

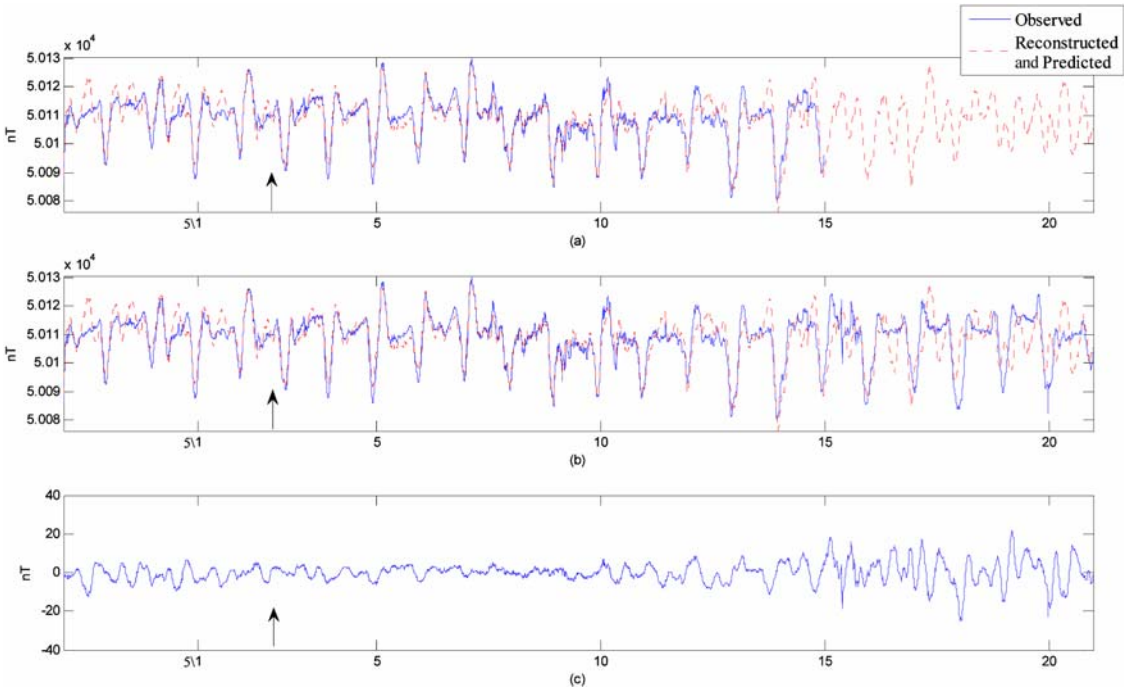

Fig. 2. Reconstruction and prediction of geomagnetic field based on 17 days of observation, Apr 28-May 15, 2009 at Cheongyang site, KMA. Dotted line is for reconstruction and prediction, and line indicates the observed data. The arrow indicates the event time of Andong earthquake. (a) Reconstructed and predicted values for only 17 days (Apr 28 to May 15) of observation, (b) plot of observation extended to May 21, 2009, (c) and their residuals. Axis of x indicates the day of May.

이나 필터링에 응용될 수 있는데, 푸리에 변환에 기반한 셈블런스 처리는 단기적 변동성을 갖는 비정상 신호(non-stationary signal)에 대해서는 좋은 결과를 보여주지 못하는 것으로 나타났다(Cooper and Cowan, 2008). 이에 주파수 특성을 시간 영역에서도 파악할 수 있는 장점을 갖는 웨이블렛 변환에 기반한 셈블런스 기법이 등장하였는데, 이를 이용하여 재구성 및 예측된 지자기장 자료와 실측 자료를 비교하여 보았다.

이와 더불어, 지자기장 3성분 자료의 고유값 변화 분석을 통해 지진전조현상과 관련하여 사례가 보고되고 있다(Hattori et al., 2002). 본 연구에서도 셈블런스 분석을 통해 지진 발생 시기에 지자기의 수직성분 변화가 감지되고, 주성분 분석에 의한 비교에서도 지자기 변동의 이상이 발견되어 고유값 분석을 수행하게 되었다.

Fig. 1은 본 연구에서 이용한 기상청 청양 지자기 관측소의 위치와 2009년 5월 2일에 4.0의 규모(기상청 발표)로 발생한 안동 지진의 진앙지를 나타낸 것이다.

주성분 분석에 의한 지자기 예측

Nordemann et al.(2008)의 방법은 푸리에 변환이 제공하는 시계열 자료의 전체적인 분석정보를 이용하면서 시간영역의 특성을 반영하기 위해 시계열 자료의 주성분을 분석하여 최적화 기법에 의해 각 주성분을 반영할 수 있는 사인 함수의 계수를 결정하는 방법이다. 이를 지자기 관측 자료에 적용하기 위하여 지자기 시계열 자료의 자기상관을 수행하여 고유값을 추출해서 주성분을 도출하고, 이의 푸리에 변환을 통해 주성분의 특성을 반영하는 주파수들을 추출한다. 이들 주파수 중에서, 사인 함수를 가정한 목적함수의 진폭, 위상을 변화시켜 가면서 가장 오차가 적은 계수와 주파수를 최소자승법을 이용하여 결정한다. 이때 주성분은 크기순으로 분류해서 각 성분에 해당하는 주파수로 시간에 대한 삼각함수들의 집합을 만들게 된다.

이와 같은 과정에서 주성분을 모두 사용하지 않고 큰 값만을 이용하면 잡음 성분은 반영하지 않는 지

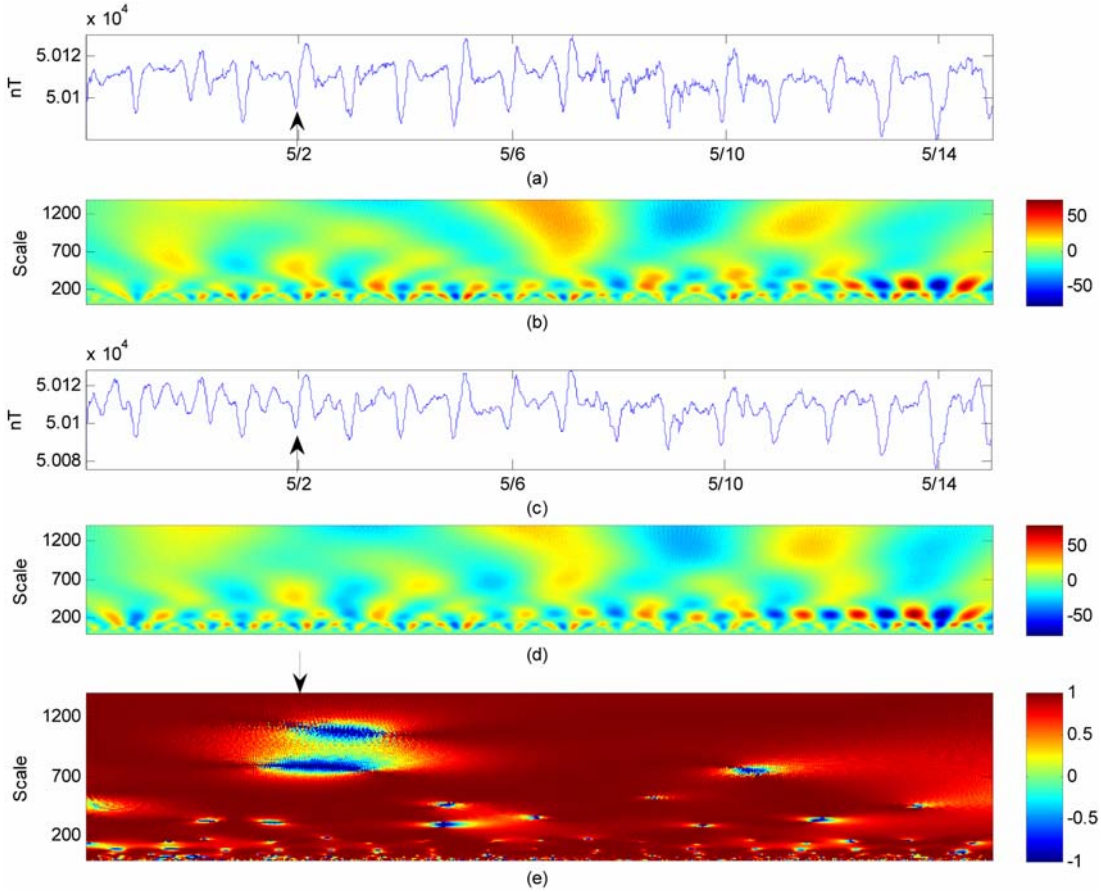

Fig. 3. Wavelet based semblance of Fig. 2. (a) observed geomagnetic total field, and (b) its CWT real part; (c) reconstructed value from principal component anaylsis and (d) its CWT real part; (e) semblance of the two data. The arrow indicates the event time of Andong earthquake.

자기 신호를 예측할 수 있다. 이러한 예측자료를 이용하면, 실제 관측 자료와 비교하여 큰 변동성이 있는 경우에 대한 각종 해석을 미리 할 수 있게 될 것이다. 또한 주성분 분석을 통해 재구성한 자료는 시계열 자료내의 일관된 주파수 성분을 반영하게 되므로, 실제 측정 자료와 비교할 경우 특정 시간대에서의 주파수 이상 변동성을 파악할 수 있게 된다. 이와 같은 분석은 다음 절의 웨이블릿 기반 셈블런스 분석을 통해 수행하였다.

Fig. 2는 주성분 분석에 의한 지자기 자료의 예측 가능성을 검토하기 위해서 기상청 청양 관측소에서 측정한 2009년 4월 28일부터 5월 15일까지의 지자기 기록을 토대로 5월 21일 까지의 지자기장을 재구성하고 예측한 것을 나타낸 그림이다. (a)는 재구성 및 예측에 이용한 관측자료(실선)를 주성분 분석에 의해 재구성된 성분 및 5월 16일 이후 21일까지의 예측기록(점선)과 함께 나타낸 것이다. (b)는 비교를 위해서 실제 기록일을 예측일까지 연장하여 나타낸 것이고, (c)는 실제 기록과 예측값의 차이를 기록한 것이다. 시계열 상에서는 예측일의 길이와 상관없이 실제 측정값과 예측값의 차이가 비교적 일정한 양상을 보이고 있다. 주성분 분석예측에 대한 주파수 특성을 파악하기 위해 웨이블릿에 기반한 셈블런스 분석을 수행하였다.

웨이블릿 셈블런스에 의한 비교

Fig. 3은 Fig. 2의 (a) 부분, 즉 실제 측정 자료와 주성분 분석을 통해 재구성된 지자기자료의 상관성을 웨이블릿 셈블런스를 이용하여 분석한 것이다. 그림

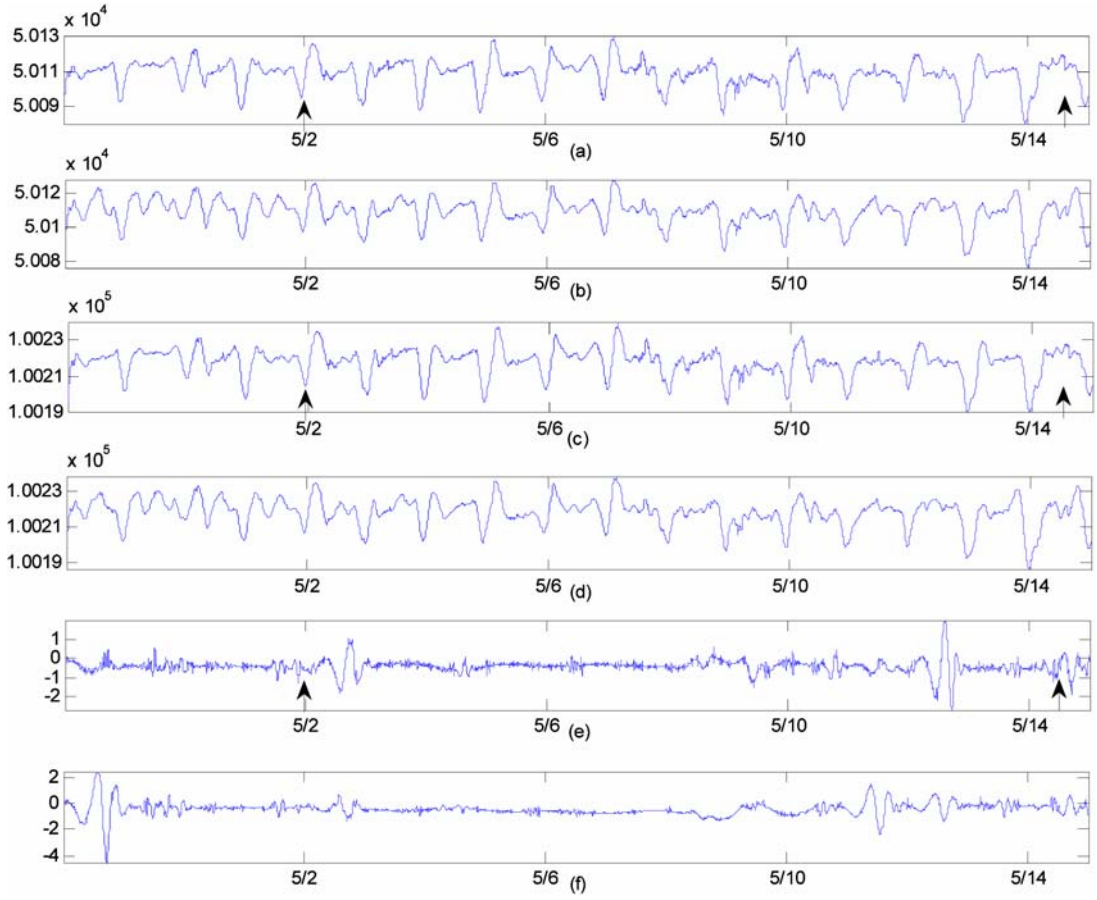

Fig. 4. Wavelet based semblance filtering of (a) observed data and (b) reconstructed and predicted value, and its accepted parts for (c and d) and its rejected parts (e and f). The time reference for x axis is UTC and the arrow indicates the event time of each earthquake. The unit of y axis is nT.

에서 볼 수 있는 바와 같이, 전반적으로 두 자료의 셈블런스는 매우 좋은 상관성을 보인다. 그런데, 지진 발생 직전부터 지진 발생 시기까지 두 자료의 셈블런스는 -1에 가까운 역 상관성을 보이고 있다. 이것은 이 부근의 위상이 주성분 분석을 통해 획득한 위상과 다른 지역적 특성을 갖는 것을 의미한다. 즉, 주성분 분석에 사용한 시계열의 일반적인 위상 특성과 다른 점을 보인다는 것이다. Fig. 4는 이를 더욱 구체화시켜 보여준다. 이 그림은 오석훈(2009)이 이용한 필터링 기법을 이용하여, 두 자료의 상관성을 분석하여 상관성이 낮은 부분만 남겨서 자료를 비교한 결과이다. 즉, 전체 시계열 자료와 주성분 분석을 통해 재구성한 자료에 대하여 상관성이 낮은 부분만 필터링을 거쳐 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이, 안동 지진 부근에서 전체 지자기 자료와 큰 차이를 보이는 강한 지자기 변동성을 보이고 있다. 또한 5월 14일 발생한 지진(충남 논산, 규모 2.1) 부근에서도 비슷한 현상이 보이고 있다. 하지만, 5월 12일 후반부의 변동성을 설명할 수 있는 근거는 없다.

이와 같은 특성은 재구성된 자료에서만 나타나는 것이 아니다. Fig. 5는 지진발생시기인 5월 2일과 1일에 대한 지자기 수직성분(Z)의 셈블런스 분석을 수행한 결과이고, Fig. 6은 5월 2일과 일주일 뒤인 5월 9일의 비교를 수행한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 두 자료 사이에는 매우 상이한 셈블런스의 양상을 보이고 있다. 이는 지금까지 일반적으로 주파수 분석에 사용한 푸리에 변환 방식 대신에, 주파수의 시간적 변동성을 파악할 수 있는 웨이블릿 변환을 이용함으로써 보다 민감한 변화를 잘 파악할 수 있었던 것으로 판단된다. 이와 같은 지자기의 변

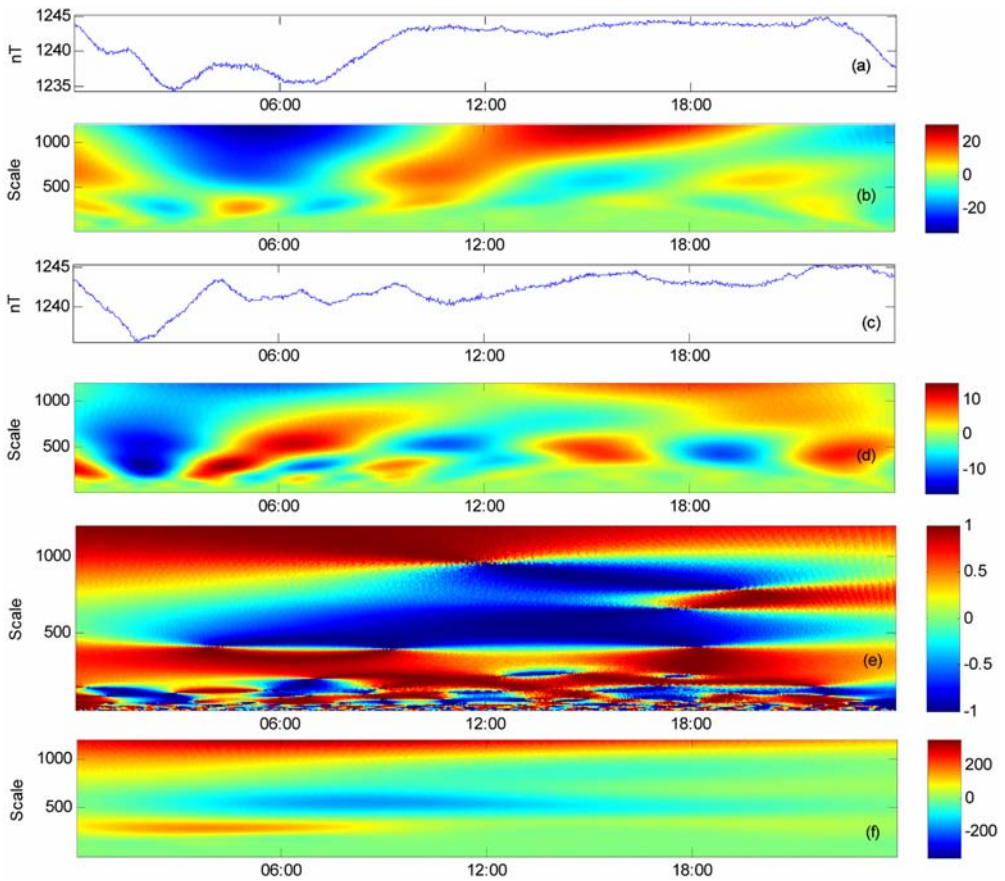

Fig. 5. Wavelet based semblance of Z component of geomagnetic data (a) observed at May 02 and (c) May 01. (b) and (d) are its CWT component, respectively. (e) semblance result; (f) dot product of semblance.

동성을 다른 방법으로 확인하기 위해 수평 및 수직 성분의 고유값 분석을 수행하였다.

고유값 분석

Fig. 7은 4월 28일부터 5월 20일까지의 지자기 3 성분 자료를 3시간 단위로 고유값 분석을 수행한 결과를 보여준다. Hattori et al.(2002)이 언급한 바와 같이, 고유값의 1성분 및 2성분은 지자기장의 일주기와 거의 일치하는 양상을 보이고 있다. 일반적으로 지진과 관련된 변동성은 고유값의 제 3 성분과 상관성이 있는 것으로 알려져 있다. 안동 지진이 발생한 시기의 부근에 미세한 변동이 있음을 확인할 수 있었으나, 지자기 배경값(Kp index)과 신호가 섞여있어 이를 분리하기 위해 앞에서 수행한 셈블런스 필터링을 Kp값과 고유값의 제 3성분에 대해 수행하였다. 즉, 지자기 배경값과 상관성이 높은 신호는 분리하고, 그 외의 신호만을 추출해서 재구성하였다(Fig. 8). Fig. 8에서 볼 수 있는 것처럼 안동 지진 발생 즈음에 주변과 구별되는 고유값의 변동이 관측되었다. 더욱 흥미로운 것은 규모는 안동지진에 비해 작지만, 관측소와 비교적 가까운 충남 지역에서 14일과 15일 연속적으로 지진이 발생하였고, 이 기간에도 역시 고유값의 변동이 나타나고 있다. 다만, 5월 6일 부근의 고유값 변동은 필터링을 통하여 제거되었으나, 5월 5일 부근의 고유값 변동에 대해서는 분석할 수 있는 근거가 없다.

결 론

2009년 5월 2일, 4.0의 규모로 발생한 안동 지진과 관련한 지자기 자료의 변동성을 다양한 처리 기법을

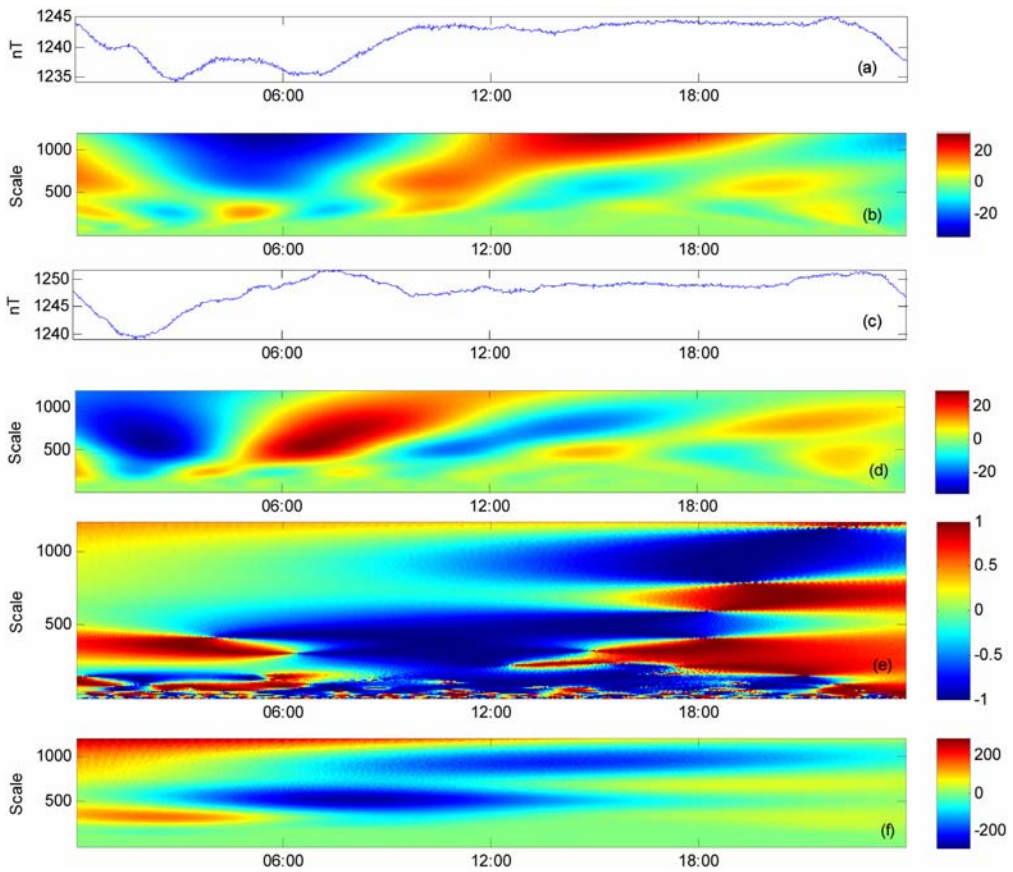

Fig. 6. Wavelet based semblance of Z component of geomagnetic data (a) observed at May 02 and (c) May 09. (b) and (d) are its CWT component, respectively. (e) semblance result; (f) dot product of semblance.

통해 분석하였다. 일차적으로 주성분 분석에 의한 지자기 신호의 재구성과 예측을 수행하였으며, 이를 통해 지진 발생 시기에 지자기장의 셈블런스에 변화가 생겼음을 확인할 수 있었다. 또한 3성분 자료의 고유값 분석을 통해 안동 지진 발생 부근에 3번째 고유값이 변동하였음을 확인하였고, 규모는 안동지진 보다 작지만 진앙지가 가까운 5월 14일 및 15일 지진 직전에도 변동이 있음을 분석하였다.

국외에서 지자기장의 전조 현상 분석을 위해 이용하는 지진의 규모는 4.5 이상을 주로 다룬다. 그러나 우리나라는 전반적으로 전기전도도가 낮은 지체구조를 가지고 있어, 다소 규모가 낮은 경우에도 지하의 지전기적 구조가 민감하게 반응할 수 있을 것으로 예상한다. 본 연구에서 제안한 지자기 자료처리 기법을 지속적으로 검토한다면, 향후 좋은 성과를 거둘 것으로 예상한다.

사 사

본 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2009-5303)의 지원으로 수행되었고, 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다. 또한 심사를 맡아 논문의 질을 높여주신 민동주 교수와 양준모 박사께 감사드리고, 자료를 제공해 주신 기상청과 전파연구소에 사의를 표합니다.

참고문헌

양준모, 오석훈, 이덕기, 윤용훈, 2002, 2차원 MT(Magneto-Telluric) 모델링을 이용한 지자기 수직탐사(Geomagnetic Depth Sounding)에서의 차이 지시자의 연구. 자원환경지질학회지, 35, 567-573.

양준모, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2004, 이천관측소에서 측정된 지자기장 및 지자기 전달함수의 시간적 변동성. 한국지구과학회지, 25, 604-614.

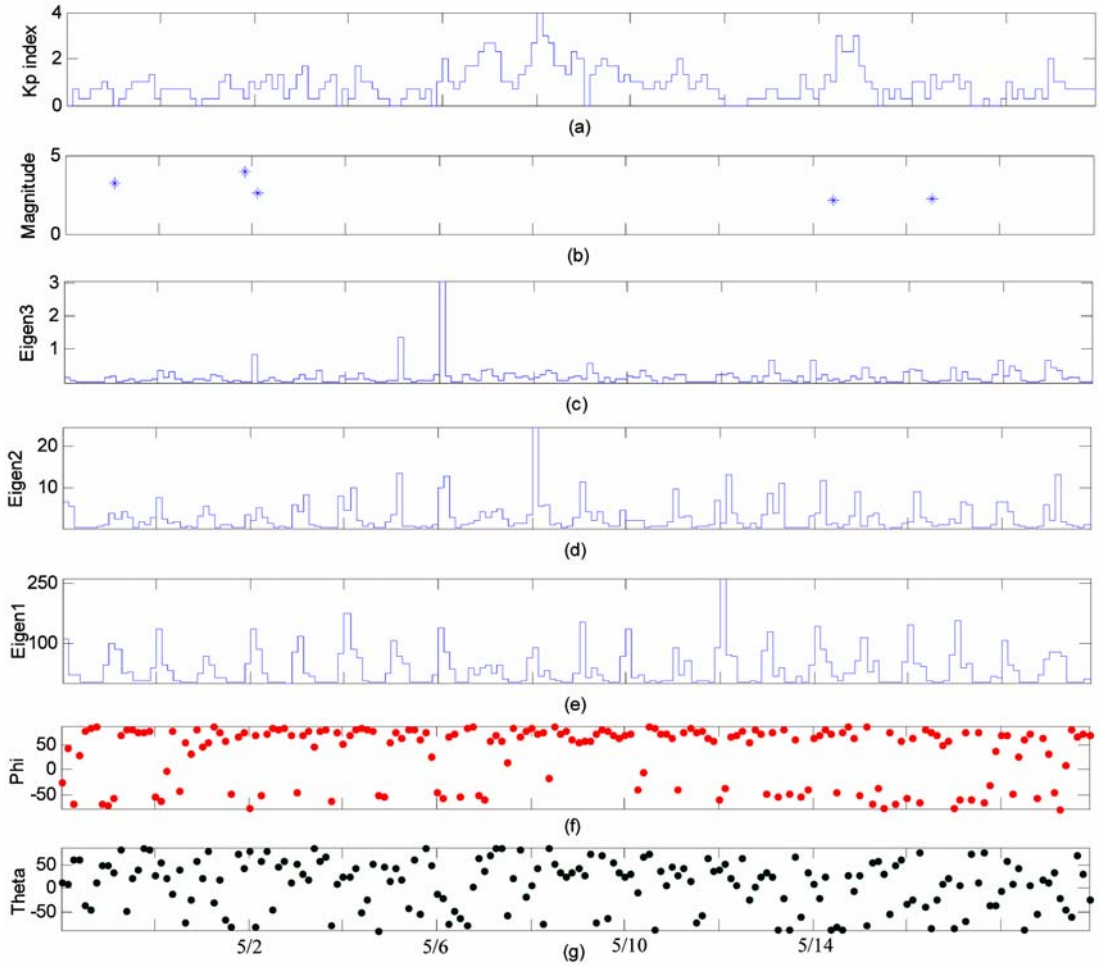

Fig. 7. Eigenvalue analysis of three component geomagnetic data. (a) Kp index; (b) earthquake events plotted with its magnitude; (c) the third eigenvalue; (d) the second eigenvalue; (e) the first eigenvalue; (f) degree Phi of eigenvector; (g) degree Theta of eigenvector. The time reference for x axis is UTC.

오석훈, 양준모, 이덕기, 남재철, 2002, 지자기 수직탐사에 의한 한반도 주변의 전기전도도 구조. 자원환경지질학회지, 35, 437-444.

오석훈, 2009, 웨이블릿 기반 셈블런스를 이용한 지구물리자료의 필터링과 그 응용. 한국지구과학회지, submitted.

Harada, M., Hattori, K., and Isezaki, N., 2004, Transfer function approach to signal discrimination of ULF geomagnetic data. Physics and Chemistry of the Earth, 29, 409-417.

Hatorri, K., Takahashi, I., Yoshino, C., Nagao, T., Liu, J.Y., and Shieh, C.F., 2002, ULF Geomagnetic and Geopotential measurement at Chia-Yi, Taiwan. Journal of Atmospheric Electricity, 22, 217-222.

Hayakawa, M., Itoh, T., Hattori, K., and Yumoto, K., 2000, ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996. Geophysical Research Letters, 27, 1531-1534.

Johnston, M., 1997, Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. Surveys in Geophys, 18, 441-475.

Kawate, R., Molchanov, O.A., and Hayakawa, M., 1998, Ultra-low-frequency magnetic fields during the Guam earthquake of 8 August 1993 and their interpretation. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 105, 229-238.

Nordemann, D.J.R., Rigozo, N.R., de Souza Echer, M.P., and Echer, E., 2008, Principal components and iterative regression analysis of geophysical series: Application to Sunspot number (1750-2004). Computers and Geosciences, 34, 1443-1453.

Rikitake, T. and Honkura, Y., 1985, Solid earth geomagnetism. Terra Scientific Pubising Company, Tokyo, Japan, 384 p.

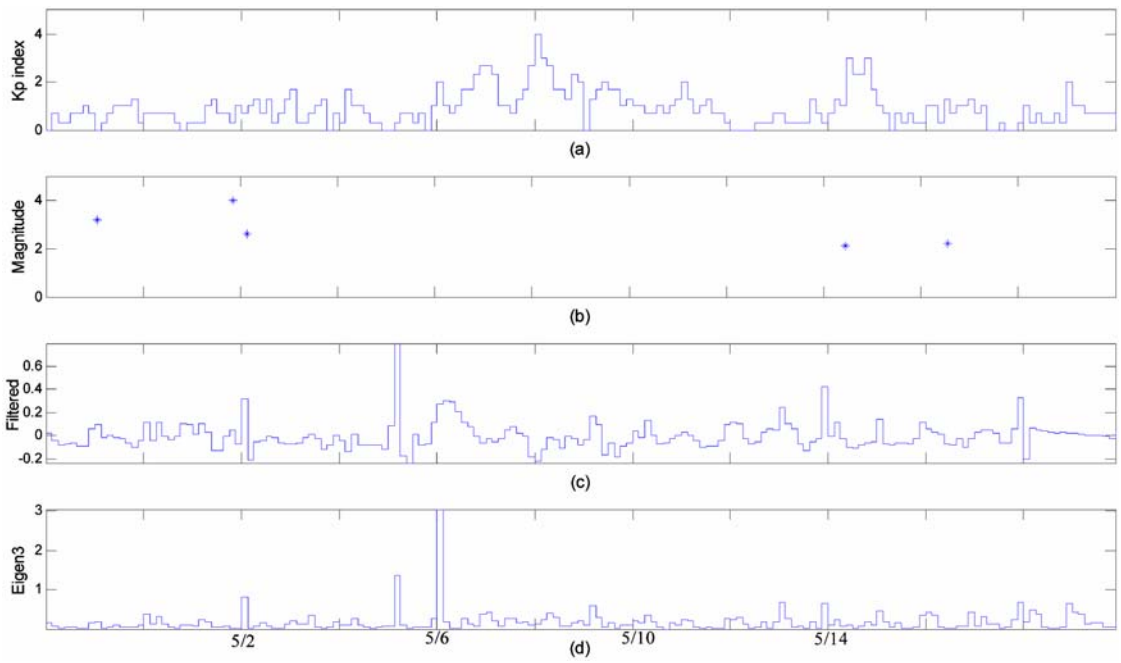

Fig. 8. Result of wavelet based semblance filtering of Kp index and Eigenvalue of three components of geomagnetic data. (a) Kp index; (b) earthquake events plotted with its magnitude; (c) Rejected component of Eigenvalue from filtering with Kp index; (d) original eigenvalue. The time reference for x axis is UTC.

2009년 9월 27일 접수
2009년 10월 13일 수정원고 접수
2009년 10월 15일 채택