지난 3년 동안(2009-2011) 한반도 지역에서 발생한 지진의 지자기 변동성 분석

오석훈* · 지윤수

강원대학교 에너지 · 자원공학과, 200-701, 강원도 춘천시 강원대학길 1

Analysis of Geomagnetic Variations Related to Earthquakes Occurred in and Around the Korean Peninsula from 2009 until 2011

Seokhoon Oh* and Yoonsoo Ji

Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University,
Gangwon 200-701, Korea

Abstract: Recent three years of geomagnetic data were analyzed using a method of Principal Component Analysis (PCA) and Wavelet Based Semblance Analysis to investigate any geomagnetic variation caused by earthquakes. This method predicts the geomagnetic variation using the PCA analysis of geomagnetic data, then compares the predicted geomagnetic field with the observation of finding any significant residual. Although it is well known that geomagnetic variation is related with earthquake, most analyses have been limited to some specific cases reflecting the correlation. In this study, we analyze seventeen cases of earthquakes that occurred in and around the Korean peninsula from 2009 to 2011 and that show the precursory and co-seismic relation between the earthquakes and geomagnetic variations.

Keywords: geomagnetic variation, earthquake, precursor, co-seismic

요약: 최근 3년간 지진과 연관된 지자기 변동성을 파악하기 위해 주성분 분석 및 웨이블릿 기반 셸블런스에 기반한 분석 기술을 적용하였다. 이 기술은 지자기 관측 자료의 주성분을 이용하여 지자기 예측을 수행하고, 지진이 발생한 전후로 예측한 지자기장과 실제 관측된 지자기장 사이에 유의미한 변화량이 있는지 분석한다. 일반적으로 지자기자료가 지진에 의한 변동성을 잘 반영하는 것으로 알려져 있지만, 특정 지진에 대한 분석을 통해 상관성을 증명한 것이 대부분이다. 본 연구에서는 2009년부터 2011년까지 한반도 및 주변에서 발생한 총 17차례의 지진에 대해 다양한 지자기 변동성을 분석하여 지진 전조 및 지진 동반 신호를 성공적으로 발견할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 지자기 변동성, 지진, 지진 전조, 지진 동반신호

서론

지자기장 관측 자료는 우주 환경의 상태를 파악할 수 있는 우주 기상의 영역에서부터, 지구 내부의

심부 전기비저항 구조를 파악할 수 있는 순수 지구 물리학적 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 et al., 2002; Harada et al., 2004; Oh, 2009). 이는 관측장비의 현대화에 따른 안정적인 자료의 축적과 함께 다양한 신호 처리 기술의 적용으로 주 신호에 비해 매우 작은 크기

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

를 가지는 지진에 의한 전조 현상을 성공적으로 구분해 낼 수 있었기 때문에 분석된다. 국내에서는 지진 전조 현상 분석을 위한 지자기장 자료의 활용이 많이 이루어지지 않았으나, 지자기 전달함수 분석을 통해 한반도 심부의 전기적 구조를 해석하기 위한 연구가 진행되면서(Oh et al., 2002; Yang et al., 2002), 이를 지진 전조 현상 연구에 적용하려는 노력이 이루어지고 있다(Yang et al. 2004; Oh, 2009). 또한, 2009년 3월에 기상청에서 지진 전조 현상의 관측을 목표로 충남 청양에 지자기 관측소를 설립하면서 이에 대한 관심이 높아지고 있다.

Rikitake and Honkura (1985)에 의해 기록된 바와 같이, 지진과 관련된 지구물리학적 전조 혹은 동반신호는 오직 지자기장 변화만이 가장 명확하고 이론적으로 개연성이 확인되어있다. 다만, 실제 지구환경에서는 그 신호가 매우 미약하여 배경 잡음 등에 의해 드러나지 않는 것으로 파악되며 이런 이유로 대규모 지진의 경우에만 명확한 징후가 나타나는 예를 보여왔다(Hayakawa et al., 2000; Hattori et al., 2002; Harada et al., 2004). 따라서 규모가 큰 지진과 연관된 지자기장 신호기술을 한반도에서 발생한 미세규모의 지진에 의한 지자기 변동성 분석에 활용하는 것은 적절하지 못하다고 할 수 있다. Oh (2009)는 작은 규모의 지진에 의한 지자기장의 미세한 변동성을 분석하기 위해서 주성분 분석과 웨이블릿 샘플링스 기술에 기반한 해석기술을 제안하였으며, 이를 2009년 안동지진 자료 분석에 활용한 바가 있다.

본 연구에서는 Oh (2009)가 제안한 기술을 바탕으로 특정 지진에 대한 지자기 변동성이 아닌, 연속적인 지진에 대한 반응성을 보기 위해 2009년 이후 3년간 발생한 지진에 대해 지자기 변동성이 어떻게 파악되었는지에 대해 분석하고자 한다.

연구 내용

지자기 자료와 같은 시계열 자료의 분석에 널리 이용되는 방법 중의 하나는 자기상관 이동 평균 기법(ARIMA; integrated auto-regressive moving average)(Cryer and Chan, 2010)이다. ARIMA 기법은 시계열 자료의 모형화에 매우 유용하지만, 모형을 직관적으로 이해하기 힘들고 정확한 모델 작성을 위해서는 원 자료의 분석에 매우 많은 시간을 투자해야 한다는 점에서 지자기와 같이 복잡한 성격의 자료에는 적용이 어려운 면이 존재한다.

이를 극복하기 위해 본 연구에서는 주성분 분석 및 최소자승 기술에 의한 지자기 자료 복원기술을 웨이블릿 기반 샘플링스 기술과 접목한 지자기 자료 처리 기술을 사용하여 분석에 활용하였다.

주성분 분석에 의한 지자기 자료의 복원과 예측

지자기장 관측 자료와 같은 시계열 자료에 담겨있는 주기성을 연구하기 위해서는 푸리에 변환 등을 이용하여 주파수 영역에서 분석을 수행한다. 그러나 자연계에서 관측되는 시계열 자료는 잡음이 섞이고 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.

Nordemann et al. (2008)는 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 방법을 제안하였다. 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 지자기 신호를 예측할 수 있다. 이러한 예측 자료를 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.

Fig. 1. Reconstruction and prediction of geomagnetic field based on 17 days of observation, Apr 28-May 15, 2009 at Cheongyang site, KMA. Dotted red lines are for reconstruction and prediction, and blue lines in (a) and (b) mean the observations. The arrow indicates the event time of Andong earthquake. (a) Reconstructed and predicted value plotted with only 17 days of observation, (b) plot of observation extended to May 21, 2009, (c) and its residual.

Fig. 1은 주성분 분석에 의한 지자기 자료의 복원과 예측 가능성을 검토하기 위해서 기상청 청양 관측소에서 측정한 2009년 4월 28일부터 5월 15일까지의 지자기 기록을 토대로 5월 21일까지의 지자기장을 재구성하고 예측한 것을 나타낸 그림이다. Fig. 1a는 재구성 및 예측에 이용한 관측 자료(실선)를 주성분 분석에 의해 재구성된 성분 및 5월 16일 이후 21일까지의 예측 기록(점선)과 함께 나타낸 것이다. Fig. 1b는 비교를 위해서 실제 기록일을 예측일까지 연장하여 나타낸 것이고, Fig. 1c는 실제 기록과 예측값의 차이를 기록한 것이다. 시계열 상에서는 예측일의 길이와 상관없이 실제 측정값과 예측값의 차이가 비교적 일정한 양상을 보이고 있다. 주성분 분석 예측에 대한 주파수 특성을 파악하기 위해 웨이블릿에 기반한 샘플런스 분석을 수행하였다.

웨이블릿 기반 샘플런스

시계열이나 탄성과 트레이스 자료를 처리하는 과정에서 서로 다른 신호의 상관성을 분석하기 위한 방법은 다양하게 존재한다(Carr, 1994). 샘플런스 기법

은 두 시계열 자료에 나타난 위상성분의 동질성을 파악하는데 널리 이용되는 방법이다(von Frese et al., 1997). 샘플런스는 일반적으로 푸리에 변환된 주파수 영역에서 처리되는데, 두 자료의 위상차에 대한 코사인 값으로 주어지며, 상관도에 따라 -1에서 1 사이의 값을 갖는다.

이러한 샘플런스 기법은 상관성을 갖는 자료의 도출이나 필터링에 응용될 수 있는데, 푸리에 변환에 기반한 샘플런스 처리는 단기적 변동성을 갖는 비정상 신호(non-stationary signal)에 대해서는 좋은 결과를 보여주지 못하는 것으로 나타났다(Cooper, 2009). 이를 보완하기 위해 시간 영역에서도 주파수 특성을 파악할 수 있는 장점을 갖는 웨이블릿 변환 기반의 샘플런스 기법이 등장하였다. 처리하고자 하는 신호가 시간에 따라 주파수 성분이 변하지 않는 정상상태(stationary)라면 푸리에 변환을 통해 주파수 영역을 분석하는 경우 문제가 발생하지 않는다. 그러나 자연계에 존재하는 신호들은 대부분 짧은 시간영역에서 신호 상태의 변화가 발생하여 주파수가 시간에 따라 변하는 비정상상태(non-stationary)를 보이는 경우가

Fig. 2. Result of wavelet-based semblance; (a) observed geomagnetic total field, (b) its CWT real part, (c) reconstructed value from principal component analysis, (d) its CWT real part, and (e) wavelet semblance of the two data. The arrows indicate the event time of Andong earthquake.

많다. 이는 푸리에 변환이 무한히 지속되는 삼각함수를 기저함수로 이용하기 때문인데, 웨이블릿 변환에서는 유한한 웨이블릿을 기저함수로 이용하여 기존의 푸리에 변환이 갖고 있던 여러 문제점을 극복하였다. 이에 대한 자세한 논의는 웨이블릿에 대한 다양한 이론서를 참고할 수 있다(Strang and Nguyen, 1996).

지진에 의한 지자기 변동성 분석

본 연구에서는 주파수 특성을 시간 영역에서도 파악할 수 있는 장점을 갖는 웨이블릿 변환에 기반한 샘플런스 기법을 이용하여 재구성 및 예측된 지자기장 자료와 실측 자료를 비교하여 보았다. Fig. 2는 Fig. 1a 부분, 즉 실제 측정 자료와 주성분 분석을 통해 재구성된 지자기 자료의 상관성을 웨이블릿 샘플

런스를 이용하여 분석한 것이다. 분석기간은 규모 4.0의 안동지진이 발생한 기간 동안 (2009. 4. 28-5. 15)이며, 기상청에서 운영하는 청양 지구자기 관측소의 측정값을 이용하였다. 화살표로 표시된 부분이 국제 표준시각 기준 안동지진이 발생한 시점이다. Fig. 2a는 제시된 기간 동안 관측된 총 지구자기장 결과이며, Fig. 2b는 이를 웨이블릿 변환하여 나타낸 실수부이다. Fig. 2c와 Fig. 2d는 각각 관측 자료를 재구성하여 나타낸 값과 그것의 웨이블릿 변환 결과이다. Fig. 2e는 두 자료에 대해 웨이블릿 기반 샘플런스 분석을 한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 전반적으로 두 자료의 샘플런스는 매우 좋은 상관성을 보인다. 그런데, 지진 발생 직전부터 지진 발생 시기까지 두 자료의 샘플런스는 -1에 가까운 역 상관성을 보이고 있다. 이것은 이 부근의 위상이 주성분 분석을 통

Fig. 3. The same as Fig. 2, but using the geomagnetic series observed Aug 20-Sep 3, 2010 at Cheong-yang site, KMA, and its reconstructed series. The left line indicates the earthquake occurred at Aug 24 and the right line indicates the earthquake occurred at Aug 28.

해 획득한 위상과 다른 지역적 특성을 갖는 다는 것을 의미한다. 즉, 주성분 분석에 사용한 시계열의 일반적인 위상 특성과 다른 점을 보인다는 것이다.

이와 같은 결과로부터, 지진 발생 부근의 관측 자료를 주성분 분석하여 재구성한 결과를 실제 측정 결과와 웨이블릿 쉘블런스 비교하면, 지진 발생 시기 전후로 이상대역이 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 이제 이러한 현상을 다양한 지진을 대상으로 동일한 방법으로 분석하였다.

지진이 짧은 간격으로 발생했을 때의 반응

Fig. 3은 2010년 8월 24일(규모 2.5, 황해북도 송림 동쪽 23 km 지역)에 일어난 지진과 8월 28일(규모 3.2, 제주 서귀포시 남남서쪽 45 km 해역)에서 일어난 지진을 포함한 기간 동안 청양 관측소에서 측정된 데이터로 구성된 쉘블런스 그림이다. 8월 24일 지진(앞쪽 실선)이 있기 전 21일과 22일에 변동성이

나타나는 것을 볼 수 있고, 28일 지진(뒷쪽 실선) 하루 전부터 지진이 일어나고 이를 후까지 큰 변동성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 두 개의 지진이 각기 분리되어 지자기 변동에 영향을 미친 것을 확인할 수 있다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 짧은 기간을 두고 연이어 발생한 지진에 대한 지자기장의 변동성도 본 연구에서 제시한 방법으로 잘 나타나고 있다. 다만, 규모나 진원지와 관측소 간의 거리에 따른 상관성에 대해서는 추가적인 연구가 더 필요할 것으로 생각되며, 현재 단계에서 이를 일관적으로 정의하기는 다소 불확실성이 크다.

동일 지진에 대한 지자기 관측소별 반응

지진에 의한 지자기 변동성을 확인하기 위해서는 분석한 자료가 지역적 잡음이나 특성에 의해 나타난 것이 아닌 점을 확인해야 한다. 이를 위해서는 동일

Fig. 4. The same as Fig. 2 but using the geomagnetic series observed Feb 2-Feb 16, 2010 at Cheong-yang site, KMA, and its reconstructed series. The black line indicates the earthquake occurred at Feb 9, 2010, with magnitude 3.0.

한 지진에 대해 관측소별로 분석한 결과가 동일한 반응을 보이는 지를 체크해야 한다.

Fig. 4와 5는 각각 기상청의 청양 관측소와 천문연구원 구원의 보현산 관측소에서 2010년 2월 2일부터 16일까지 각각 관측한 자료를 셴블런스 분석을 수행하여 나타낸 결과이다. 이 기간 중 2010년 2월 8일 시흥 부근에서 규모 3.0의 지진이 발생하여 수도권 일대에 유감 지진으로 기록되기도 하였다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 위상에 약간의 차이가 있기는 하지만 두 관측소의 자료가 시흥지진과 매우 잘 연관되어 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 시흥지진 이외에도 규모가 큰 지진일 경우 모든 관측소의 웨이블릿 셴블런스 결과는 매우 유사한 양상을 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 점은 본 연구에서 제시한 방법이 매우 안정적으로 지자기장과 지진의 연관성을 주장하고 있음을 보여주는 사례라 할 수 있다.

성분별 변동성 양상

앞 절에서 동일 지진에 대해 각기 다른 관측소에서 유사한 반응 결과를 보임을 제시하였다. 여기에서는 지자기장의 3성분이 셴블런스 분석에서 어떻게 반응하는지를 분석하고자 하였다.

Fig. 6은 앞서 설명한 2010년 2월 9일 규모 3.0의 시흥지진에 대해 청양 관측소에서 측정된 지자기 3성분의 셴블런스 분석 결과를 나타낸다. 그림의 맨 위부터 차례로 X축, Y축, Z 축의 결과이다. Fig. 4에서는 동일 지진에 대해 총 지자기장의 결과를 나타낸 바 있다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼, 세 개의 성분이 모두 일치하는 양상을 보이고 있으며, Fig. 4의 총 지자기장 셴블런스 결과와도 일부 유사한 양상을 보인다. 총 지자기장의 분석결과를 검증하고 확인하는데 성분별 지자기 변동성을 상호 체크하는 것이 가능함을 보여준다.

Fig. 5. The same as Fig. 2 but using the geomagnetic series observed Feb 2-Feb 16, 2010 at Cheong-yang site, KMA, and its reconstructed series. The black line indicates the earthquake occurred at Feb 9, 2010, with magnitude 3.0.

2009년-2011년에 발생한 지진에 의한 지자기 변동성

그동안 지진에 의한 지구물리학적 반응 분석 연구에 대해 대중의 시각이 회의적이었던 이유는, 분석 결과가 잘 나타나는 특정 지진에 대한 연구 결과만 제시되고 동일한 방법으로 다른 지진에 대해 적용했을 때의 결과가 좋지 않거나 반응이 미약하였기 때문이다. 본 연구에서는 앞서 다양한 사례에 대해 같은 방식의 분석 기술을 적용하고 그 결과가 매우 양호함을 제시하였다.

Table 1과 Fig. 7은 2009년부터 2011년까지 한반도 및 그 주변에서 발생한 지진에 대해 주성분 분석 및 웨이블릿 샘플런스 기반 분석을 통해 지자기 변동성이 어떻게 나타났는지를 보여주고 있다. 각 표와 그림에서 ○로 표시된 것은 Fig. 2 나 Fig. 4와 같이

지진 발생 시기 전후로 전형적인 샘플런스 이상을 보이는 지진에 대해 나타낸 것이다. 샘플런스 이상은 평균 1일 정도 지속되는 것으로 확인되었고, 총 17개의 지진 가운데 9개의 지진에 대해 이러한 반응을 보인 것으로 나타났으며, 이는 매우 높은 확률로 본 연구에서 제시한 분석 기법이 지진과 지자기장 변동성을 연관짓는데 유의미하다는 것을 보여준다.

다음으로 △로 표기한 것은 지진 전 혹은 후 하루 이내의 차이로 이상대의 위치가 어긋나는 경우이다. 즉, 지진 발생 기간 근처에 샘플런스 이상이 보이는 하지만, 정확하게 진원시와 일치하지 않는 경우를 표기한 것이다. 총 6차례의 지진에 대해 이러한 표기가 이루어졌다. 향후 추가적인 분석이 이루어질 경우, 가장 집중적인 분석이 이루어져야 할 부분이다. 마지막으로 ×로 표시된 것은 지진 발생 시기 전후로 샘플

Fig. 6. Result of wavelet-based semblance for three components of geomagnetic field observed from Feb 2 to Feb 16, 2010 at Cheong-yang site, KMA. (a)-(c) show the semblance of X, Y, and Z component, respectively, for the earthquake occurred at Feb 9, 2010, with magnitude 3.0 which is indicated by center black line.

블렌스 이상이 발생하지 않은 경우이며 오직 두 차례만 나타나고 있다. 향후 지진과 셴블렌스의 연관성을 명확히 하기 위해 지진 미발생기간의 셴블렌스 이상 빈도에 대한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

총 17차례의 지진에 대한 분석결과를 살펴보면, 먼 저 규모가 일정 수준 이상이거나, 내륙에서 발생한 지진에 대해서는 본 연구에서 제시한 분석방법이 잘 적용되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 특징은 지진에 의한 지자기장의 변동성에 있어서 지진에너지에 비례하며 관측소의 위치가 중요하다는 점을 제시하고 있다. 반면 규모가 너무 작거나 해양에서 관측되어 관측소와의 거리가 많이 떨어지는 경우에는 상관성이 약하거나 반응이 잘 나타나지 않고 있다는 점을 확인할 수 있다. 이와 같은 점을 고려할 때, 수 천개의 지자기 관측소를 가지고 있는 일본과 비교하기는 어렵겠지만 향후 국내 지자기 관측소의 추가적인 설치

가 필요하다는 점을 역설한다고 할 수 있다.

결론

주성분 분석에 의한 재구성 결과를 웨이블릿 기반 셴블렌스 기술로 분석한 결과, 한반도 주변에서 일어난 규모 3.0 내외의 지진에 대해 대부분의 경우 지자기 변동성의 상관성을 관측할 수 있음을 확인하였다. 상대적으로 내륙에서 발생하고 규모가 클수록 그 명확성이 큰 것으로 보이며, 관측소에서 멀어지거나 규모가 작은 경우에는 분석의 신뢰도가 다소 낮게 나타났다.

본 연구는 특정 지진에 대한 분석만을 수행한 기존의 지자기 변동성 연구와 달리, 연속된 기간 동안 발생한 지진에 의한 지자기 변동성이 유의미한 상관성을 보인다는 점에서 의미가 있으며, 향후 지자기

Table 1. List of semblance test result for earthquakes occurred from 2009 to 2011 in and around the Korean peninsula. ○ means the test was very successful to relate the earthquake and geomagnetic variation in time series and △ indicates the test showed only limited correlation, and × means the test could not show any anomaly

Focal time	M	Lat.	Lon.	Location	Index
2009. 05. 02 07:58:28	4.0	36.56N	128.71E	area WSW 2 km, Andong-si, Gyeongsangbuk-do, Korea	○
2009. 05. 14 20:50:12	2.1	36.25N	127.13E	the sea north 11 km, Nonsan-si, Chungcheongnam-do, Korea	△
2010. 01. 05 20:12:11	2.6	36.97N	126.52E	area 13 km, Dangjin-gun, Chungcheongnam-do, Korea	○
2010. 02. 03 20:57:07	2.6	33.33N	127.19E	the sea east 64 km, Seogwipo-si, Jeju-do, Korea	○
2010. 02. 09 18:08:14	3.0	37.45N	126.8E	area north 8 km, Siheung-si, Gyeonggi-do, Korea	○
2010. 02. 16 18:53:30	3.2	35.63N	129.95E	the sea ENE 64 km, Dong-gu, Ulsan-si, Korea	×
2010. 02. 22 23:29:30	3.0	33.29N	127.17E	the sea east 61 km, Seogwipo-si, Jeju-do, Korea	○
2010. 03. 09 12:50:14	3.2	36.42N	125.75E	the sea SE 28 km, Seokyeulbiyeoldo, Taean-gun, Chungcheongnam-do, Korea	△
2010. 08. 28 07:35:52	3.2	32.9N	126.27E	the sea east 45 km, Seogwipo-si, Jeju-do, Korea	○
2010. 09. 06 19:32:43	2.8	36.56N	129.01E	area NNW 15 km, Cheongsong-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea	△
2010. 09. 30 02:07:37	2.6	33.36N	127.24E	area ESE 67 km, Jeju-si, Jeju-do, Korea	○
2010. 10. 22 11:59:11	2.5	35.85N	128.18E	area SW 12 km, Seongju-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea	×
2010. 10. 25 12:36:57	2.5	34.29N	127.39E	area SSE 37 km, Goheung-gun, Jeollanam-do, Korea	○
2010. 11. 07 20:11:34	2.9	40.28N	128.2E	area WNW 11 km, Bukchoeng, Hamgyeongnam-do, Korea	△
2010. 11. 20 00:07:17	2.7	36.83N	126.76E	area ESE 13 km, Dangjin-gun, Chungcheongnam-do, Korea	△
2011. 02. 27 18:50:50	3.7	33.63N	125.94E	the sea WNW 57 km, Jeju-si, Jeju-do, Korea	△
2011. 03. 06 11:04:40	2.9	38.66N	125.67E	area SSE 9 km, Songlim, Hwanghaebuk-do, Korea	○

Fig. 7. The location map of semblance test result for earthquakes occurred from 2009 to 2011 in and around the Korean peninsula. ○ means the test was very successful to relate the earthquake and geomagnetic variation in time series and △ indicates the test showed only limited correlation, and × means the test could not show any anomaly.

이외의 다른 전조 파악이 가능한 지구물리학적 신호와의 복합적인 해석을 통해 정확도를 높일 필요성이 있음을 보였다.

사 사

본 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2012-8020)의 지원으로 수행되었고, 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

References

- Carr, J.R., 1994, Numerical Analysis for the Geological Sciences. Prentice Hall, NJ, USA, 592 p.
- Cooper, G.R.J., 2009, Wavelet-based semblance filtering. Computers and Geosciences, 35, 1988-1991.
- Cryer J.D. and Chan K.-S., 2010, Time series analysis: With application in R. Springer, New York, USA, 491 p.
- 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.
- Hattori, 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.
- Johnston, M., 1997, Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. Surveys in Geophysics, 18, 441-475.
- Masashi, H., 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.
- Nordemann, D.J.R., Rigozo, N.R., 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.
- Oh, S., 2009, Variation analysis of geomagnetic data observed around the event of Andong earthquake (May 2, 2009). *Journal of the Korean Earth Science Society*, 30, 683-691. (in Korean)
- Oh, S., Yang, J., Lee, D.-K., and Nam, J.-C., 2002, Geomagnetic depth sounding to investigate the trend of electrical conductivity in and around the Korean peninsula. *Economic and environmental geology*, 35, 437-444. (in Korean)
- Ryusuke, K., 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.
- Strangand, G. and Nguyen, T., 1996, *Wavelets and Filter banks*. Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, USA, 490 p.
- Tsuneii, R. and Yoshimori, H., 1985, *Solid earth geomagnetism*. Terra Scientific Publishing, Tokyo, Japan, 384 p.
- von Frese, R.R.B., Jones, M.B., Kim, J.W., and Kim, J.H., 1997, Analysis of anomaly correlations. *Geophysics*, 62, 342-351.
- Yang, J., Lee, D.-K., Kwon, B.-D., and Youn, Y.-H., 2004, On the temporal variability geomagnetic field and transfer function at Icheon observatory. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 25, 604-614. (in Korean)
- Yang, J., Oh, S., Lee, D.-K., and Youn, Y.-H., 2002, A study on the difference arrow of GDS (Geomagnetic Depth Sounding) survey using 2-D MT (Magnetotelluric) modeling. *Economic and environmental geology*, 35, 567-573. (in Korean)

Manuscript received: September 15, 2014

Revised manuscript received: October 2, 2014

Manuscript accepted: October 10, 2014