시계열 지자기 측정 자료의 복원, 예측 및 잡음 분석 연구

지윤수¹ · 오석훈^{1,*} · 서백수¹ · 이덕기²

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

²기상청 지진정책과, 156-720, 서울시 동작구 여의대방로 16길 61

Restoration, Prediction and Noise Analysis of Geomagnetic Time-series Data

Yoonsoo Ji¹, Seokhoon Oh^{1,*}, Baeksoo Suh¹, and Duk Kee Lee²

¹Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

²Earthquake Division, Korea Meteorological Administration, 156-720, Korea

Abstract: Restoration, prediction and noise analysis of geomagnetic data measured in the Korean Peninsula were performed. Restoration methods based on an optimized principal component analysis (PCA) and the geostatistical kriging approach were proposed, and its effectiveness was also interpreted. The PCA-based method seemed to be effective to restore the periodical signals and the geostatistical approach was stable to fill the gaps of measurements. To analyze the noise level for each observatory, the geomagnetic time-series was plotted by scattergram which reflects the spatial variation, using data observed during same period. The scattergram showed that the observation made at Cheongyang seemed to have better quality in spatial continuity and stability, and the restoration result was also better than that of Icheon site. For the restoration, both of the methods, geostatistical and optimized PCA, showed stable result when the missing of observation was within 20 points. However, in case of more missing observations than 20 points and prediction problem, the optimized PCA seemed to be closer to the real observation considering the frequency-domain characteristics. The prediction using the optimized PCA seems to be plausible for one day of period for interpretation.

Keywords: geomagnetic data, restoration, prediction, noise analysis

요약: 한반도에서 측정되고 있는 시계열 지자기 자료에 대해 결측 자료에 대한 복원과 측정 자료에 기반한 예측, 그리고 기관별 관측 자료에 대한 잡음도를 분석하였다. 결측 자료의 복원을 위해 주성분 분석을 통한 최적화 기법과 지구통계학적 접근에 의한 방법을 적용하고 그 효과를 비교하였다. 주성분 기법은 자료의 주기성을 효율적으로 반영하는 특성을 보였으며, 지구통계학적 방법은 안정적인 복원 능력을 보였다. 관측소 별 잡음도를 파악하기 위해 이천 및 청양에서 동일 기간에 관측한 지자기 자료에 대해 공간적 분산성을 스캐터그램을 이용해 파악하였다. 그 결과 청양 관측소의 자료가 이천 관측소의 자료보다 연속적이며 안정적인 측정이 이루어진 것을 알 수 있었으며, 복원을 위한 크리깅 추정에서도 실제 자료의 추정이 매우 정확하게 이루어졌다. 결측자료의 복원의 경우 20분 이내의 결측 자료에 대해서는 크리깅 기법과 주성분 기법 모두 유사한 결과를 보였으나, 그 이상의 결측에 대한 복원과 지자기 자료의 예측이 필요한 경우에는 주성분 기법을 적용해야 주파수 영역에서의 특성이 실제와 더욱 유사하게 나타났다. 또한 지자기 자료의 예측을 위해서는 주성분 분석이 효율적으로 이용될 수 있음을 파악하였으며, 하루 정도의 지자기장을 예측할 수 있는 것으로 보인다.

주요어: 지자기 자료, 복원, 예측, 잡음분석

*Corresponding author: gimul@kangwon.ac.kr

Tel: +82-33-250-6258

Fax: +82-33-252-5550

서 론

지구자기장 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; 오석훈, 2009). 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. 국내에서는 지진전조 현상 분석을 위한 지자기장 자료의 활용이 많이 이루어지지 않았으나, 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; 오석훈, 2009). 또한, 2009년 3월에 기상청에서 지진 전조 현상의 관측을 목표로 충남 청양에 지자기 관측소를 설립하면서 이에 대한 관심이 높아지고 있다.

지자기장 관측자료와 같은 시계열 자료의 특성을 분석하기 위해서는 측정자료의 연속성, 측정 잡음의 최소화 등이 반드시 전제되어야 한다. 특히, 지진과 관련한 연동성을 파악하기 위해서는 푸리에 변환에 의한 주파수 분석이나 웨이블릿 방법에 기반한 스케일 분석이 이루어지게 되는데, 매우 미세한 지자기 변동성을 추출해 내기 위해서는 더욱 더 높은 자료의 질이 요구된다. 하지만, 대부분의 지자기 측정은 기기상의 오류나 계측기기의 점검 등을 위해서 짧게는 수 초 단위에서 길게는 수 일에 이르기까지 결측기간이 발생하게 된다. 또한 지진 전조와 관련한 분석을 위해서는 지자기 자료의 예측이 필요한데, 이 예측은 지자기 자료의 주기성과 공간적 특이성 등이 모두 반영되어야 한다. 결측이 발생한 기간에 대해 주변의 측정 자료를 이용하여 그 기간을 채우는 것을 복원(restoration)이라 하고, 과거의 반복된 지자기

측정 자료를 이용하여 미래의 지자기 기록을 추정하는 것을 예측(prediction)이라 한다.

본 논문에서는 국내에서 측정되고 있는 지자기 시계열 자료에 대해, 지구통계학적 크리깅 기법과 주성분 분석에 의한 복원 및 예측 기법, 그리고 웨이블릿 기반의 시계열 자료 분석 기법을 이용하여, 측정의 정밀도 및 잡음 효과, 복원 기법 별 분석 효과 및 예측 정확도에 대한 연구결과를 제공하고자 한다.

지자기 시계열 자료

현재 한반도의 고정 지자기 관측소에서 측정되는 자료는 모두 4개 기관에서 각자 수집되고 있다. 기상청, 전파연구원, 천문연구원, 한국지질자원연구원에서 각 기관의 목적에 따라 운영되고 있으며, 대개의 기관이 3성분 및 전(total) 성분의 지자기장 자료를 수집하고 있다. 본 연구에서 비교 분석을 위해 사용한 자료는 전파연구원 이천 분소와 기상청 청양관측소에서 동일 기간(2009년 4월 9일부터 4월 16일)에 수집한 자료를 이용하였다. 이천 분소는 오석훈 외(2002)의 연구에서 소개된 바와 같이 1999년부터 관측이 시작되었으며, 전파 환경의 감시를 위해 운영되어 왔다. 그동안 훌륭한 관측환경 및 유지 관리 등으로 좋은 자료의 질을 유지해 왔으나, 최근 관측소 부근 도시의 확장 등으로 문제가 되고 있다. 이 관측소의 측정은 플럭스게이트 관측기로부터 획득되는 3성분의 경우 1초 간격으로, 핵자력 측정 방식의 전 성분 자료는 1분 간격으로 수집되고 있다. 기상청 청양관측소는 2009년 3월에 지진전조와 관련한 지자기 변동성을 파악하기 위해 설치되었으며, 3성분 및 전 성분 모두 1초 간격으로 수집되고 있다. 본 연구에서는 이천 자료와의 효율적인 비교를 위해 1분 간격으로 재추출(decimation)하여 사용하였다. Fig. 1은 복원 및 잡음 분석을 위해 이용한 청양 및 이천 지자기 관측소에서 관측한 동일 기간의 전 성분 자료를 도시한 것이고, Fig. 2는 두 자료의 히스토그램을 나타낸 것이다.

지구통계적 방식에 의한 잡음 분석

지구통계학에 대해 일반인들이 오해하고 있는 가장 큰 부분은 크리깅(Kriging)이라는 대표적인 지구통계적 기법이 단순히 보간법(interpolation)의 일종이라

Fig. 1. Geomagnetic time series observed at Cheongyang (a) and Icheon (b) observatory.

Fig. 2. Histogram of each geomagnetic time series in Fig. 1 for Cheongyang (a) and Icheon (b).

고 여기는 것이다. 지구통계학은 시공간자료의 연속성을 배리오그램(variogram)이라는 분산식을 통해 파악하고 그것에 기반하여 각종 공간적 특성을 분석하는 분야이다. 즉, 지구통계학적 기법들이 시공간자료가 가지고 있는 물리적 특성 그 자체를 고려하는 것은 아니지만, 각각의 위치에서 측정된 자료가 갖는 공간적 특성 분석을 통해 실제로 관측이 되지 못한

지점에 대한 정보를 제공하고, 측정된 자료가 공간적으로 어떤 특성을 갖는지 분석할 수 있는 도구를 제공하는 것이다. 이와 같은 특징은 근본적으로 지하의 지질구조에 의해 공간적으로 연속적인 값을 가져야 하는 지하구조의 특성과 매우 큰 상관성을 갖는 것으로 보이며, 이중 탐사자료의 기초적인 복합처리에 매우 유용한 접근을 수행할 수가 있다(Oh and

Fig. 3. Scattergram using observation in Cheongyang.

Kwon, 2001; Oh et al., 2004). 본 연구에서는 지자기 시계열 자료에 대해 1차원적인 지구통계 기법을 적용하여 분석을 수행하였다.

배리오그램은 일정한 거리(혹은 본 연구에서는 시간)만큼 떨어져 있는 관측값들의 차이를 그림으로 나타내는 것이다. 이는 스캐터그램(scattergram)을 통해서 각각의 거리에 대한 산포도를 일괄적으로 표현하는 것인데, 이 스캐터그램을 살펴보면 각 자료가 가지는 정밀도를 대략적으로 살펴볼 수 있다. Fig. 3과 4는 이천관측소와 청양관측소에서 동일 기간에 관측한 전 성분의 지자기 자료에 대해 스캐터그램을 나타낸 것이다. 비교 간격이 좁을수록 두 측정소의 자료가 모두 높은 상관도를 보이고 있으며, 간격이 넓어질수록 상관성이 떨어지는 양상이 공통적으로 나타나고 있다. 그러나 비교 간격이 좁은 경우에 청양 관측소의 스캐터그램이 훨씬 좋은 상관도를 보이고 있는 반면에, 이천 관측소의 것은 다소 퍼져 있는 양상을 보인다. 또한 비교 간격이 넓어질 때, 이천 관측소의 스캐터그램은 무작위적으로 골고루 분포하고 있는데 반해서, 청양 관측소의 자료는 특정 경로를 따

라 자체적으로 매우 좁은 범위의 변화를 보이고 있다. 이는 청양 관측소의 측정 자료가 매우 안정적이며 무작위적 잡음에 비교적 영향을 덜 받고 있다는 것을 암시한다. 즉, 지자기장의 변화가 자연적인 상태에서 급박하게 변화하기 어렵다는 점을 고려할 때, 인접한 측정점끼리의 변화가 되도록 작은 양상을 보이며, 측정 간격이 다소 떨어진 자료의 경우에도 일정한 패턴을 유지한다는 점이 청양 관측소에서 정밀한 측정이 이루어진다고 볼 수 있는 주된 이유라 할 수 있다.

다음으로 두 관측소 자료에 대해 지구통계학적 교차검증(cross-validation)을 수행하였다. 지구통계학적 교차검증은 크리깅의 정확도를 평가하기 위해 이용하는 방법으로, 실제로는 측정 자료가 존재하는 지점에 대해 크리깅을 통해 획득한 자료와 비교하여 추정치의 정확성을 평가하는 기법이다. 본 기법의 적용이 갖는 의미는 다음과 같이 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 먼저 크리깅의 특성상, 자료의 시간적 연속성이 잘 반영된 자료의 경우 교차 검증에 의한 오차도 매우 작게 나타날 것이므로 무작위적 잡음에 대한 속성을

Fig. 4. Scattergram using observation in Icheon.

Fig. 5. The Cross-validation result presented by histogram of prediction error for Cheongyang (a) and Icheon (b).

알아볼 수 있다. 다음으로 실제 결측에 의해 자료가 존재하지 않는 경우, 지구통계학적 크리깅을 통한 복원이 효율적으로 적용될 수 있는지에 대한 평가이다. 교차 검증을 통해 실제 자료와의 오차가 너무 큰 경

우에는 결측 자료의 복원을 위해 크리깅은 적절하지 않은 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 5는 이천과 청양 관측소에 획득한 동일기간의 지자기 자료에 대해 교차 검증을 수행하여 실제 값

Fig. 6. Reconstructed and its residual for every 5 missing measurements for (a) and (b), 10 missing measurements for (c) and (d), 20 missing measurements for (e) and (f), and 50 missing measurements for (g) and (h) observed at Cheongyang.

과의 오차를 도수분포도(histogram)로 나타낸 것이다. 참고로 두 자료의 배리오그램은 매우 부드러운 공간적 연속성을 보이고 있어, 배리오그램 만으로는 자료의 질을 평가하기 어렵다. 교차 검증 결과를 보면, 7일간 관측된 지자기 자료에 대해 청양관측소의 오차 분포는 평균 0에 가까운 값을 중심으로 매우 좁은 폭으로 나타나고 있지만, 이천 관측소의 자료는 분산 폭이 매우 넓고 오차가 다양하게 분포하는 것을 파악할 수 있다.

Fig. 5의 교차 검증은 1점의 측정 자료에 대해 크리깅 추정과의 차이를 비교한 것이므로, 크리깅에 의한 복원을 검증하기 위해서는 연속적으로 결측이 발생하였다고 가정할 때의 결과를 분석해야 한다. Fig. 6과 Fig. 7은 청양과 이천 관측소에서 각각 5점, 10

점, 20점, 50점의 결측이 발생하였다고 가정할 때 실제 측정값과 크리깅에 의한 추정 결과를 함께 나타낸 것이다. 즉, 5점, 10점, 20점, 50점 간격으로 재추출된 자료를 크리깅하여 원래의 관측자료와 함께 나타낸 것이다. 결측이 발생하는 시점의 측정 자료에 따라 오차는 달라지겠지만, 주변 자료와의 분산을 최소화하려는 크리깅의 특성(Goovaerts, 1997)으로 인해 매우 부드럽게 추정이 이루어지고 있는 것을 파악할 수 있다. 크리깅에 의한 복원에서도 청양관측소와 이천관측소 관측자료의 질이 쉽게 구분되는데, 청양관측소의 복원 자료가 이천자료에 비해 오차가 훨씬 적은 것을 파악할 수 있다. 이에 대한 분석은 다음 절에서 보다 자세히 수행하였다.

Fig. 7. Reconstructed and its residual for every 5 missing measurements for (a) and (b), 10 missing measurements for (c) and (d), 20 missing measurements for (e) and (f), and 50 missing measurements for (g) and (h) observed at Icheon.

Fig. 8. Reconstruction and prediction of geomagnetic field based on the optimized principal component analysis (a) and its residual (b).

웨이블릿 기반 셴블란스를 이용한 주성분 분석과 지구통계학적 방식에 의한 복원 효과의 분석

지자기 자료와 같은 시계열 자료의 복원이나 예측에서 널리 이용되는 방법 중의 하나는 자기상관 이동평균 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.

본 연구에서는 적용 절차가 비교적 명확하고 직관적인 두 가지의 방법을 이용하여 복원과 예측을 수행하였는데, 주성분 분석에 의한 방법과 지구통계학적 기법에 의한 방법이다.

주성분 분석에 의한 복원

Nordemann et al.(2008)은 푸리에 변환이 제공하는 시계열 자료의 전체적인 분석정보를 이용하면서 시간

영역의 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 변화시켜가면서 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 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 시간대에서

Fig. 9. Wavelet-based semblance filtering of geomagnetic data. (a) Geomagnetic dataset observed at Icheon, Kyeong-gi province, by RRL and (b) Geomagnetic dataset observed at Cheong-yang, Chung-buk province, by KMA. Filtered signal for Icheon (c) and Cheong-yang (d) sites by accepting the components which meet some criteria based on their phase correlation, and rejected part of (e) Icheon and (f) Cheong-yang which does not meet the criteria. Sampling rate is one minute. Axis of x indicates the time as minute and the unit of y axis is nT.

의 주파수 이상 변동성을 파악할 수 있게 된다.

Fig. 8은 주성분 방식을 이용해 복원을 수행한 결과와 그 잔차를 보여준다. 지구통계학적 크리깅에 의한 복원과 주성분 분석에 의한 복원의 가장 큰 차이는, 전자의 경우 이미 존재하는 측정점에 대해서는 그 값을 그대로 이용하는 방식(exact interpolation)이라면, 후자는 측정점의 값을 고려만 할 뿐 정확하게 일치시키지는 않는다는 점에 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 주성분 분석에 의한 복원은 자료가 있는 지점에 대해서도 원래 값과 일치되고 있지 않다. 이러한 점은 결측에 대한 복원의 경우 지구통계학적 방식이 보다 적절하다는 점을 잘 보여주는 부분이지만, 미래 자료의 예측에 관해서는 주성분 방식이 보다 정확한 특징을 나타내 주는 것으로 분석된다. 즉, 지구통계학적 크리깅은 주변에 관측점이 존재하는 경우, 측정값을 그대로 유지한 채 내부의 값을 추정하므로 시계열 자료의 결측을 복원하는 데는 유용하지만, 주변에 자료가 존재하지 않는 미래값의 예측에는 주성분 분석보다 정확하지 못하다는 것이다.

웨이블릿 기반 샘플런스

시계열이나 탄성과 트레이스 자료를 처리하는 과정에서 서로 다른 신호의 상관성을 분석하기 위한 방법은 다양하게 존재한다(Carr, 1994). 샘플런스 기법은 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. 본 연구에서는 웨이블릿 변환에 기반한 샘플런스 기법을 이용하여 동일

Fig. 10. Result of wavelet based semblance of the part (a) in Fig. 2. (a) observed geomagnetic total field, (b) and its CWT real part; (c) reconstructed value from principal component analysis (d) and its CWT real part (e) semblance of the two data. The arrow indicates the event time of Andong earthquake.

Fig. 11. Result of wavelet based semblance (e) between the observed series in (a) and reconstructed series (c) by geostatistical kriging based on 5 missing observation. (b) and (d) are continuously wavelet based transformed parts of (a) and (c), respectively.

시간에 서로 다른 지자기 관측소에서 측정된 신호를 상호 비교하고 상관성이 있는 성분만 추출하여 잡음을 제거하는 필터링 방법을 수행함으로써, 신뢰도 있는 지자기 자료를 추출하게 되고, 특정 관측소의 자료의 질을 파악할 수 있는 방안을 제공하게 된다.

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 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).

Cooper and Cowan(2008)에 의하면 웨이블릿 영역에서 semblance 함수는,

$$S = \cos(\theta) \quad (1)$$

로 주어지는데, 여기서 위상 θ 는

$$\theta = \tan^{-1}(\text{Im}(\text{CWT}_{1,2})/\text{Re}(\text{CWT}_{1,2})) \quad (2)$$

로 주어지며,

$$\text{CWT}_{1,2} = \text{CWT}_1 \cdot \text{CWT}_2^* \quad (3)$$

Fig. 12. Result of wavelet based semblance (e) between the observed series in (a) and reconstructed series (c) by geostatistical kriging based on 20 missing observation. (b) and (d) are continuously wavelet based transformed parts of (a) and (c), respectively.

이다. CWT_1 과 CWT_2 는 각 신호의 연속 웨이블릿 변환을 의미하며, *는 켈레복소수임을 나타낸다.

위의 식에서 볼 수 있는 바와 같이, 웨이블릿 기반 쉐블런스 분석을 위해서는 연속 웨이블릿 변환 결과를 이용해야 하지만, 이는 원래 신호값을 복원할 수 있는 역변환을 제공하지 않기 때문에 이산 웨이블릿 변환(DWT; Discrete Wavelet Transform)을 적용하는 방법(Cooper, 2009)을 이용하였다.

쉐블런스에 의한 필터링 과정은, 입력된 신호를 두 가지로 구분하는 것으로 시작된다. 즉, 쉐블런스를 통해 위상의 상관성이 문턱값(threshold) 이상이 되면, 그 성분은 상관성이 있는 것으로 판단되어 승낙되고(accept), 그렇지 않은 성분은 거절되어(reject) 따로 분류가 된다. 이렇게 분류된 각 성분은 다시 역 웨이블릿 변환 과정을 통해 시계열 함수로 복원이 된다.

Fig. 9는 이천과 청양 지자기 관측소에서 획득한 동일 시간대의 지자기 자료에 대해 쉐블런스 필터링을 수행한 결과이다. 참고로 전파연구소에서 운영하는 이천의 지자기 관측소는 국내 전자파 시험과 관련해서 표준적으로 쓰이는 관측자료로 그 신뢰도가 매우 높다. (a)에서 볼 수 있는 바와 같이, 이천 관측소의 지자기 관측 자료는 고주파수 성분의 잡음이 다소 높은 것으로 보이지만, 이것이 잡음인지 고주파의 신호인지 파악하기 쉽지 않다. 이 자료에 대해 기상청의 지자기 자료와 필터링을 수행한 결과, 두 자료의 고주파 성분은 상관성이 낮은 것으로 판단되어 모두 거절되고 ((e),(f)), 승낙 된 신호는 비교적 저주파의 성분만 남게 되었다. 여기서 거절과 승낙에 대한 판별은 쉐블런스의 상관도를 이용해서 결정하였으며, 본 자료는 상관도 0.9를 기준으로 하였다. 참고로

Fig. 13. Result of wavelet based semblance (e) between the observed series in (a) and reconstructed series (c) by geostatistical kriging based on 50 missing observation. (b) and (d) are continuously wavelet based transformed parts of (a) and (c), respectively.

앞에서도 언급한 바와 같이 쉘블런스 상관도는 -1에서 1의 범위를 가지게 된다.

이 방법을 통해서 청양 관측소의 자료의 질을 평가할 수 있는데, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 무작위성의 고주파 잡음이 이천 관측소의 자료에 비해 매우 약하고, 상호 상관 필터링을 통해 남아있는 자료가 필터링 되기 이전의 자료와 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 점을 고려하면, 청양 관측소의 자료는 잡음에 대한 강도, 시계열 자료의 안정성, 저주파 자료의 항상성 등이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다.

크리깅 결과와의 비교

오석훈(2009)에 의하면, 지진에 의한 지자기의 변동성을 구분하기 위해 복원자료와 관측자료를 웨이블

릿 쉘블런스로 비교할 때, Fig. 10과 같이 스케일 범위 700-1000 영역에서 이상이 관측되는 것으로 발표하였다. 이러한 점을 고려할 때, 복원된 결과가 지자기 자료의 해석에 영향을 미치지 않기 위해서는 비슷한 영역에서 복원에 의한 잡음이 나타나지 말아야 한다. Fig. 11에서 Fig. 13은 각각 5점, 20점, 50점 결측자료를 크리깅을 통해 복원한 결과를 실제 관측 자료와 웨이블릿 쉘블런스를 통해 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 5점 및 20점 결측의 자료는 쉘블런스 상에서 큰 차이가 나타나고 있지 않아, 복원을 통한 지진과 관련한 지자기 변동성을 분석하는 데 큰 문제가 없을 것으로 보인다. 그러나 50점 결측자료의 경우, 지진과 연관된 지자기 변동성이 나타날 수 있는 영역에서 복원에 의한 잡음의 효과가 나타나고 있어, 이를 이용하는 것은 오해석의

Fig. 14. Result of wavelet based semblance (e) between the observed series in (a) and reconstructed series (c) by optimized principal component analysis. (b) and (d) are continuously wavelet based transformed parts of (a) and (c), respectively.

결과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 14는 주성분 분석에 의한 복원 자료에 대해 마찬가지로 웨이블릿 셴블란스 분석을 수행한 결과이다. 예상대로, 크리깅에 비해 셴블란스 오차가 다소 크게 나타나고 있다. 그러나 특정 지점에 국한되게 이상이 나타나지 않고 전체 영역에 대해 고르게 약간의 오차가 나타나고 있어, 지진 이벤트와 연동된 지자기 변동성을 분석하는 데는 크게 어려움이 없을 것으로 예상된다.

주성분 분석 방식에 의한 예측 결과의 분석

Fig. 15는 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. Fig. 15와 16은 자료를 처리하는 컴퓨터 메모리의 한계로 인해 원래 데이터를 재추출하여 나타냈다. 대략적인 시간은 지자기 자료의 주기성(하루에 한 주기)으로부터 파악할 수 있다. (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. 그림 상에서는 예측 시점부터 잔차가 증가한 것으로 나타나 있

Fig. 15. 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 means the observation. (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.

으나, 이것이 실제 샘플링 분석에서 어떤 의미를 지니는지 파악하기 위해서 두 자료에 대해 웨이블릿 기반의 샘플링 분석을 수행하였다.

Fig. 16은 주성분 분석을 통한 예측자료와 실제 자료에 대한 샘플링 분석을 수행한 결과이다. 샘플링 상의 x 축의 1000부근에서 나타나는 이상은 2009년 5월 1일 발생한 안동 지진에 의한 지자기 변동성으로 보인다(오석훈, 2009). 그 외의 영역에서는 이상대가 관측되지 않고 있다. 예측 영역에서의 샘플링을 구별하기 위해, 예측이 시작되는 지점을 화살표로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 처음 예측이 시작되고 약 하루 반동안은 예측값과 실제값이 샘플링 상에서 큰 변화가 없지만 그 이후에 급격하게 변화를 보이고 있다. 이를 고려하면 최소 하루 정도의 지자기 자료에 대한 예측이 가능한 것으로 판단된다.

결론

한반도에서 측정되고 있는 시계열 지자기 자료에 대해 결측 자료에 대한 복원과 측정 자료에 기반한 예측, 그리고 기관별 관측 자료에 대한 잡음도를 분

석하기 위해, 지구통계학적 크리깅, 최적화된 주성분 분석 그리고 웨이블릿 기반 샘플링 기법을 적용하였다. 먼저 지구통계학적 교차분석과 임의의 시간차에 의한 스캐터그램 분석을 통해 각 관측소의 자료가 가지는 잡음도를 파악하였다. 크리깅 복원을 통해 잡음도에 따라 복원 정밀도에도 영향을 미치는 것을 파악할 수 있었으며, 20분 내외의 결측은 크리깅 복원을 통해 비교적 해석에 문제가 없는 범위에서 적용될 수 있음을 알아냈다. 이는 지진과 관련한 지자기 변동성을 웨이블릿 기반의 샘플링 기법으로 파악할 때, 오차 한계를 가정하여 판단한 것으로, 다른 방법을 적용할 경우에는 보다 자세한 분석이 필요하다. 또한, 주성분 분석을 통한 지자기 자료의 예측의 경우, 하루 정도까지는 해석에 문제가 발생하지 않는 범위에서 예측이 가능함을 파악하였다.

감사의 글

본 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2011-5308)의 지원으로 수행되었고, 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

Fig. 16. Result of wavelet based semblance between the real observed series (a) and reconstructed and predicted series (b), and its continuously wavelet-based transformed results in (b) and (d), respectively. Their semblance is appeared in (e). The arrow indicates the starting point of prediction.

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.

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

오석훈, 2009, 안동지진(2009년 5월 2일) 발생기간 지자기장 자료의 변동성 분석. 한국지구과학회지, 30, 683-691.

Carr, J.R., 1994, Numerical Analysis for the Geological Sciences. Prentice Hall, NJ, USA, 592 p.

Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2008, Comparing time series using wavelet-based semblance analysis. Computers and Geosciences, 34, 95-102.

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, NY, USA, 491 p.

Goovaert, P., 1997, Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, Oxford, UK, 483 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.

- 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 Geophysics*, 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.
- Oh, S. and Kwon, B., 2001, Geostatistical approach to Bayesian inversion of geophysical data: Markov chain Monte Carlo method. *Earth Planets Space*, 53, 777-791.
- Oh, S., Chung, H., and Lee, D.K., 2004, Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation. *Environmental Geology*, 46, 1070-1078.
- Rikitake, T. and Honkura, Y., 1985, Solid earth geomagnetism. Terra Science Publish, Tokyo, Japan, 384 p.
- Strangand, G. and Nguyen, T., 1996, Wavelets and Filter banks. Wellesley-Cambridge Press, MA, USA, 490 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.

2011년 7월 11일 접수
 2011년 8월 30일 수정원고 접수
 2011년 8월 31일 채택