

청양 지자기관측소에서 획득된 지자기전달함수와 분극값의 시간변동성에 대한 연구

양준모^{1,*} · 이희순² · 오석훈³

¹한국해양연구원 심해·해저자원연구부, 426-744, 경기도 안산시 상록구 사2동 1270

²경인교육대학교 과학교육과, 430-739, 경기도 안양시 만안구 석수동 산 6-8

³강원대학교 지구시스템공학부, 200-701, 강원도 춘천시 효자동 192-1

A Study on Temporal Variations of Geomagnetic Transfer Functions and Polarization Values Obtained at Cheongyang Geomagnetic Observatory

Junmo Yang^{1,*}, Heuisoon Lee², and Seokhoon Oh³

¹Deep Sea and Marine Resource Research Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Gyeonggi 425-600, Korea

²Department of Science Education, Gyeongin National University of Education, Gyeonggi 430-739, Korea

³Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

Abstract: We analyzed a total of six months of geomagnetic data obtained at Cheongyang observatory, which is operated by Korean Meteorological Administration, to monitor earthquake precursors. Geomagnetic transfer functions (GTFs) and polarization values, which reflect the time-variations of the resistivity of subsurface, were estimated from 3-component geomagnetic data. The time-variant fluctuations were compared with the earthquake events occurred in the same period. Now that the daily GTFs show fairly irregular variations, we can not identify any correlation with the already occurred earthquakes and Kp index. On the other hand, we detect clear increases of the Ultra-Low-Frequency (ULF) band polarization values before the earthquakes, but the similar features are also observed even though the earthquake did not occur. This result may indicate that these time-variations are not just due to the earthquake precursor. For further understanding about these results, we need to investigate the relationship between the previous earthquake events and the geomagnetic data of other observatories.

Keywords: geomagnetic field, 3-component geomagnetic fields, geomagnetic transfer function, polarization analysis, earthquake precursor

요약: 지진전조현상을 모니터링하기 위해 기상청이 운영하고 있는 청양 지자기관측소에서 총 6개월간 획득된 지자기장 자료를 분석하였다. 지자기 3성분 자료로부터 지하의 전기비저항 변화를 반영하는 전달함수 및 분극값을 계산하였고, 이를 동일기간 발생한 지진이벤트와 비교하였다. 전달함수의 경우 일별 전달함수 값의 변화가 상당히 심하였으며, 발생한 지진 및 Kp 인덱스와의 상관성을 찾기 어려웠다. ULF 대역 자기장은 지진발생 전 뚜렷한 분극값의 증가가 관찰되었으나, 지진이 발생하지 않은 기간에도 이러한 변동 패턴이 나타났다. 따라서 이러한 분극값의 변화는 지진전조현상으로 단정하기에는 한계가 있고, 향후 타 관측소 자료의 추가적인 확보 및 분석을 통해 과거 발생한 일정규모 이상의 지진과 관련성을 분석할 필요가 있다.

주요어: 지자기장, 지자기 3성분, 지자기 전달함수, 분극값, 지진전조현상

*Corresponding author: jun95017@kordi.re.kr

Tel: 82-31-400-7687

Fax: 82-31-400-6147

전기비저항은 지표에서 측정될 수 있는 매우 중요한 물성중 하나이며, 고정된 측정에서 전기비저항의 시간적 변화는 지하의 상태변화, 특히 지진발생과 관계있는 것으로 알려져 있다. 현재까지 지진과 관련된 전기비저항 변동은 암석내의 투수율 및 공극률 증가에 기반을 둔 dilatancy 이론(Scholtz et al., 1973), 전기역학적(electrokinetic) 효과(Fenoglio et al., 1995), 응력변화에 의한 암석내의 미세균열(microfracturing)의 증가(Ohta et al., 2005) 등으로 설명된다. 실제적인 지진예측에서, 지하의 전기비저항 변화를 모니터링하기 위한 방법은 직접적인 전기비저항 측정보다는 자기장 관측을 통한 지자기전달함수(geomagnetic transfer function), 분극값(polarization value), 고유치값 등의 시간적 변동을 조사하는 방법이 주를 이루고 있다. 이는 전기비저항을 직접 측정을 할 수 있는 전기탐사방법이 진원 깊이(주로 하부지각 또는 최상부 맨틀)까지 충분한 가탐심도를 확보하기 어렵기 때문이다. 반면, 지자기장 관측에서 획득될 수 있는 전달함수나 분극값은 획득된 최저 주파수의 하한에 따라 다르지만, 최대 상부맨틀 깊이까지의 변동이 반영될 수 있다. 따라서 지자기 전달함수나 분극값의 시간적 변동은 지각 및 상부맨틀내의 전기비저항 변화를 감지하기 위해 유용하게 이용될 수 있다.

지진발생과 지자기전달함수의 변동을 분석한 최초의 연구는 Yanagihara(1972)로서, 1923년 발생한 규모 7.8의 Kanto 지진 및 규모 5의 Tashkent 지진과 전달함수의 시간적 변동에 대해 보고하였다. 이후 전달함수에 대한 보다 정밀한 분석을 수반한 연구들이 활발히 수행되어, 전달함수의 시간적 변동이 지진발생과 밀접한 관계가 있음을 보여주었다(Yanagihara and Nagano, 1976; Rikitake, 1979; Chen, 1981; Gong, 1985; Fujita, 1990; Chen and Fung, 1993; Chen et al., 2006).

한편, 1990년대 들어 단기 지진예측에서 매우 중요한 관측결과가 보고되었는데, 이는 지진발생 전 Ultra-Low-Frequency(ULF, <0.1 Hz) 대역 자기장 분극값의 급격한 증가이다(Fraser-Smith et al., 1990; Molchanov et al., 1992; Molchanov and Hayakawa, 1995; Hayakawa et al., 1996; Hayakawa et al., 1999; Hattori et al., 2004; Ohta et al., 2005; Hayakawa et al., 2007; Ida et al., 2008). 현재까지 보고된 바에 따르면, 0.01 Hz 대역 자기장 분극값의 변화가 지진발생과 가장 뚜렷한 상관성을 보여주며, 대부분의 사

례에서 지진발생 2-3주전 분극값의 지속적인 증가가 관찰되었다. 그러나 ULF 자기장 변동은 지진규모와 진앙거리에 따라 관측여부가 결정된다. Hayakawa et al.(2007)에 의하면, 경험적으로 $0.025R=M-4.5$ (R:진앙거리(km), M: 지진규모)인 관계가 있다. 즉, 진앙과의 거리가 100 km이면 규모 7 정도의 지진이 발생해야 자기장 분극값의 변동을 뚜렷하게 감지할 수 있다는 의미이다.

국내의 경우, 지진전조현상과 관련된 전자기학적 연구는 양준모 외(2004)와 이춘기 외(2003)가 있다. 양준모 외(2004)는 지자기전달함수 추정과 모니터링에 대한 연구를 수행하였고, 이춘기 외(2003)는 2차원 수치모델링을 통해 ULF 대역 자기장의 변동에 대한 연구를 수행하였다. 이들의 연구는 국내에서 최초로 시도된 전조현상 관련연구로서 의미가 있으나, 전조현상 관측을 위한 실측자료의 정교한 분석은 수행되지 않았다.

한반도는 지진학적으로 비활성인 지역으로 알려져 있다. 1978년 규모 5의 홍성지진 이후, 대규모 피해를 유발한 지진은 발생하지 않았으나 2000년 이후 지진발생 횟수는 뚜렷하게 증가하는 추세이다. 이러한 상황에 발맞추어 기상청에서는 지진전조현상과 관련된 지자기장 변동을 관측하기 위해 2008년 충청남도 청양에 상시 지자기 관측소를 설치하여 운영하고 있다. 청양관측소는 국내 최초로 지진과 관련된 자기장 변동을 모니터링하기 위해 설치되었다는데 의의가 있다. 본 연구에서는 청양관측소에서 2009년 3월부터 8월까지 총 6개월간 획득된 자료를 이용하여 지자기전달함수 및 분극값의 시간적 변동을 조사한다. 또한 동일기간 한반도에서 발생한 지진과의 연관성도 살펴볼 것이다. 국외 사례와 비교했을 때, 6개월간의 자료는 청양관측소의 지자기 변동 특성을 파악하기에 매우 짧은 기간이고 지진과의 연관성을 찾기는 어려울 것이라 예상된다. 그러나 본 연구는 지자기장 모니터링에 대한 이해와 향후 연구방향을 모색하기 위한 기반을 마련한다는 데 의미가 있다.

지자기 자료 및 지자기전달함수

통상적인 지자기관측소에서는 총자기장과 지자기 3성분(북쪽방향, 동쪽방향, 연직방향) 자료를 측정한다. 청양관측소도 이와 동일하며, 총자기장 측정을 위한 핵자력계(proton magnetometer)와 3성분 측정을

위한 플러스게이트(Flux-gate) 자력계가 상시 운영되고 있다. 자기장 자료는 1초 간격으로 기록되며, 측정 정밀도는 0.01 nT이다. 본 연구에서 사용된 자료는 2009년 3월 1일부터 8월 31일까지 총 6개월 동안의 자료인데, 이 기간 중 자료가 전혀 기록되지 않았거나 중간에 공백이 존재하는 기간이 상당히 많다. 일단위의 지자기장을 주파수 영역에서 분석하려면, 연속적인 자료의 측정이 필수적이므로 자료의 공백이 발견된 기간은 처리에서 제외되었다. 실제로 총 184일의 자료 중 약 75%에 해당하는 137일 자료가 분석을 위해 이용되었다.

한편, 지자기전달함수라는 개념은 지자기 3성분 사이의 관계에서 도출되는데, 이들은 주파수 영역에서 다음과 같은 선형관계를 만족한다(Vozzof, 1972; Rikitake and Honkura, 1985).

$$H_z(f) = A(f)H_x(f) + B(f)H_y(f) \quad (1)$$

여기서 H 는 자기장을, f 는 주파수, 침자 x, y, z 는 각각 북쪽, 동쪽, 연직 방향을, 마지막으로 A 와 B 는 지자기전달함수를 의미한다. 지자기전달함수 A, B 는 복소수로서 각각 실수 성분(u)과 허수 성분(v)으로 구분하여 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} A(f) &= A_u(f) + iA_v(f) \\ B(f) &= B_u(f) + iB_v(f) \end{aligned} \quad (2)$$

이론적으로, 지하구조가 일차원일 경우 H_z 는 존재하지 않으며 A, B 는 모두 0이다. 따라서 지자기전달함수의 존재자체는 지하구조가 2차원 이상임을 의미한다. 전통적인 지자기전달함수의 표현방법은 유도지시자(induction arrow)인데, 이중 실수 유도지시자

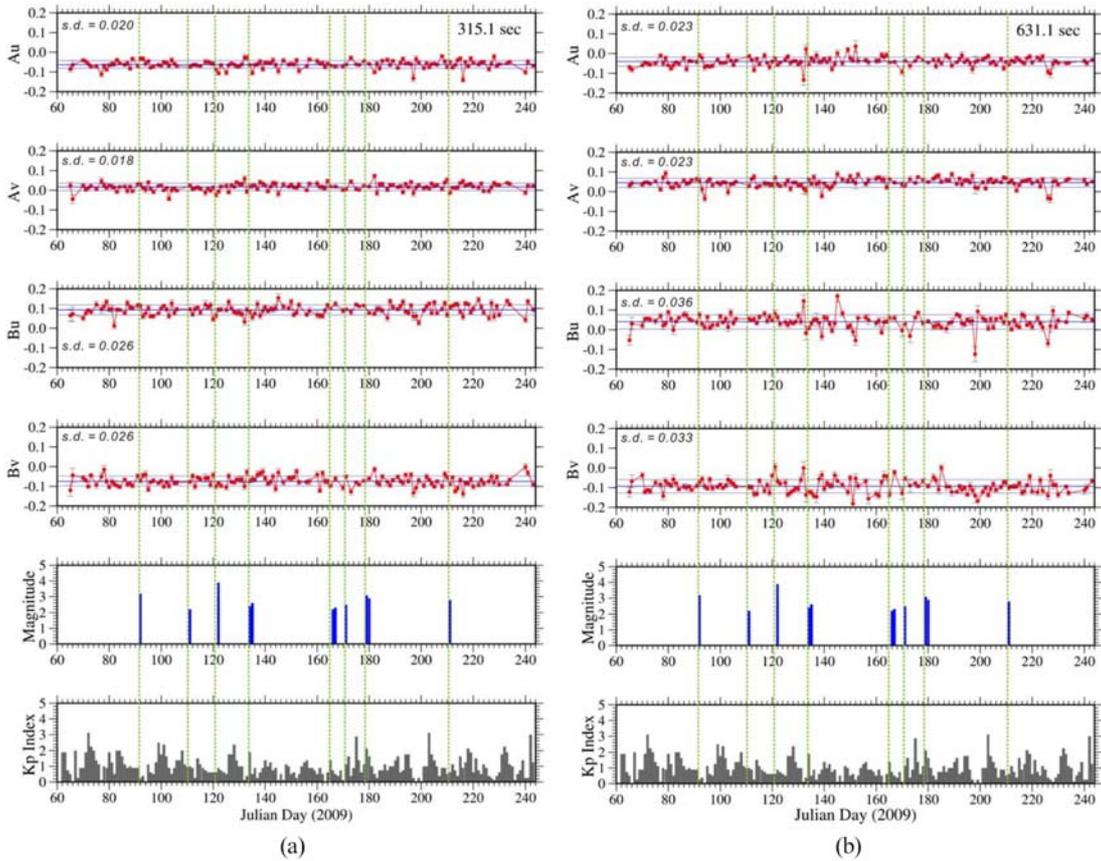


Fig. 1. Temporal variations of geomagnetic transfer functions A and B with error bars for the period of (a) 315 s, (b) 631 s, and (c) 1260 s at the Cheongyang observatory. Solid and dotted lines in the four upper panels indicate the average and one standard deviation of each component. The earthquakes occurred within 200 km from the Cheongyang observatory are displayed. The lowest panel shows the daily averages of K_p index.

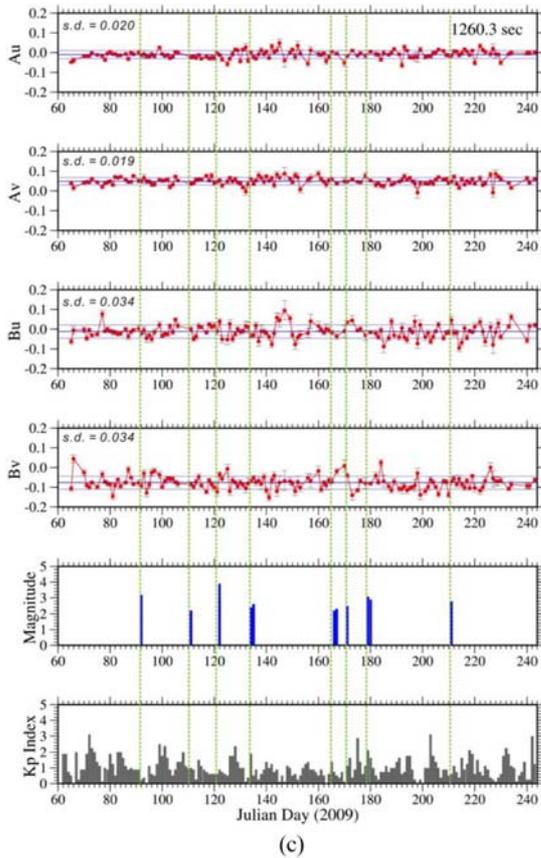


Fig. 1. Continued.

(Au, Bu)가 주로 이용되며, 그 방향은 전기비저항이 낮은 지역을 가르킨다(Rikitake and Honkura, 1985). 이로 볼 때, 전달함수 A, B는 직접적인 전기비저항의 측정은 아니나 간접적으로 지하의 전기비저항 분포를 반영한다. 지자기전달함수의 추정은 자기지전류 탐사(MT; Magnetotelluric)의 임피던스 추정과 동일하며, 본 연구에서는 양준모 외(2005)에 의해 개발된 로버스트 통계학 기반의 전달함수 추정기법을 이용하였다.

한편, 지진예측에서 지진활동과 관련된 A, B의 시간적 변동은 가장 중요한 관심사이다. 지난 20여년 동안 이에 대한 많은 연구들이 수행되었고, 이 중 가장 중요한 연구는 Yanagihara(1972)의 결과이다. 이 연구에서는 1928년 발생한 규모 7.8의 지진과 관련하여 전달함수 A의 뚜렷한 시간적 변동을 보고하였는데, 지진발생 전 A의 값이 최소로 감소했다가 이후 빠르게 정상적인 값으로 복원되었다. 다른 연구들도 이와 유사한 경향 보이는데, 주로 B보다는 A의

값에서 지진발생과 관련된 시간적 변동이 보고되었다. 그러나 Chen et al.(2006)은 A, B 모두에서 변동이 있음을 보고하였고, 현재까지 A, B 중 어떤 값이 지진발생과 더욱 상관성이 있는지는 명확하지 않다.

Fig. 1은 청양관측소에서 획득된 6개월간 전달함수의 시간적 변화를 보여준다. 선택된 주기는 기존 연구들에서 제시하고 있는 주기 300, 600, 1200초 부근이다. 또한 지진과의 연관성을 살펴보기 위해, 동일기간 한반도에서 발생한 지진 및 지구자기장의 강도를 나타내는 Kp 인덱스도 함께 도시하였다. Fig. 1에 도시된 지진이벤트는 청양관측소에서 진앙거리가 200 km 이내인 지진들이며, 각 지진이벤트에 대한 자세한 사항은 Table 1, Fig. 2에 나타내었다. 전달함수의 시간적 변화를 살펴보면, 시간 및 주파수에 따라 뚜렷한 경향성이 없으며, 지진 및 Kp 인덱스와의 상관성도 발견되지 않는다. 해외사례를 볼 때, 지진과 관련된 전달함수 변동은 10-20년 이상의 장기간 자료를 분석했을 때 명확히 나타나며, 전달함수의 영년 변화(secular variation) 및 계절변화(seasonal variation) 등이 제거되었을 때 지진과의 상관성이 보다 뚜렷해졌다(Chen et al., 2006). 이는, Fujita(1990)가 지적했듯이, 전달함수의 변동은 한 지진이벤트와 상관성이 낮으며, 일정기간 누적된 지진발생 빈도와 높은 상관성을 보이는 경향이 있기 때문이다. 이러한 경향은 지진과 관련된 전달함수 변동이 나타나는 주기를 고려하면 이해할 수 있다. 즉, 주기 300초의 전달함수는 하루지각 내지 상부맨틀의 변화가 반영되며, 이는 이 지역에 일정 수준이상의 탄성에너지가 방출 또는 축적되어야 전달함수의 뚜렷한 변동이 관측될 수 있음을 의미한다. 따라서 장기간 전달함수의 관측을 통해, 전달함수의 지속적인 증가 또는 감소가 지진이벤트들과 어떤 상관성을 갖는지 조사하는 것이 바람직하다.

다음으로 검토해 볼 부분은 자기장 자료의 질이다. 실제로 전달함수 추정에서 자기장 자료의 질은 전달함수 추정값의 신뢰도를 결정하는 중요한 요소이다. 지진전조현상에 의한 전달함수 변동이 상당히 미약하기 때문에, 이를 탐지하기 위해서는 전달함수 추정치에 대한 신뢰도, 즉 오차가 상당히 작아야 한다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이, 청양의 전달함수 A, B의 오차는 몇몇 구간에서 값 자체에 근접할 정도로 상당히 큰 편이었고 일별 A, B 값 자체의 변화도 상당히 심하였다. 이는 자료의 질이 양호하지 못함을 의

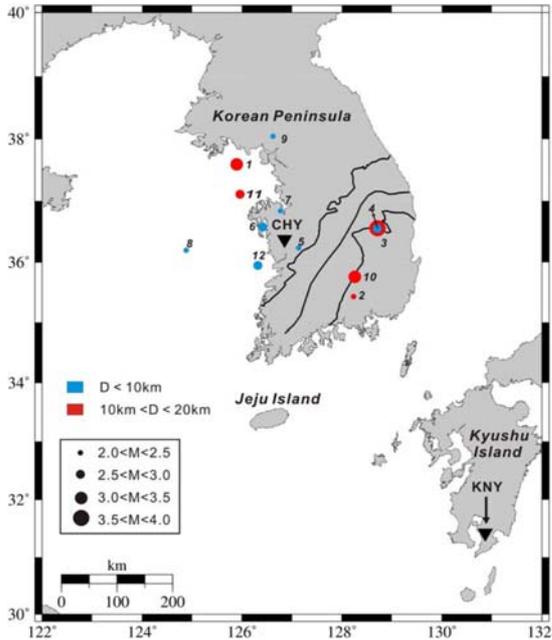


Fig. 2. The map showing the earthquakes occurred within 200 km from the Cheongyang observatory (site CHY) during March to August 2009. The solid lines indicate major tectonic boundaries of the southern Korean Peninsula. The Kanoya observatory (site KNY) is a fixed permanent observatory operated by Japan Meteorological Agency. The number in the map indicate the occurred earthquake event number listed in Table 1.

미한다. Fig. 3은 동일기간 일본 기상청이 운영하는 규슈지역의 Kanoya 관측소의 전달함수를 보여준다. Kanoya 관측소는 1940년대 말부터 운영되고 있는 대

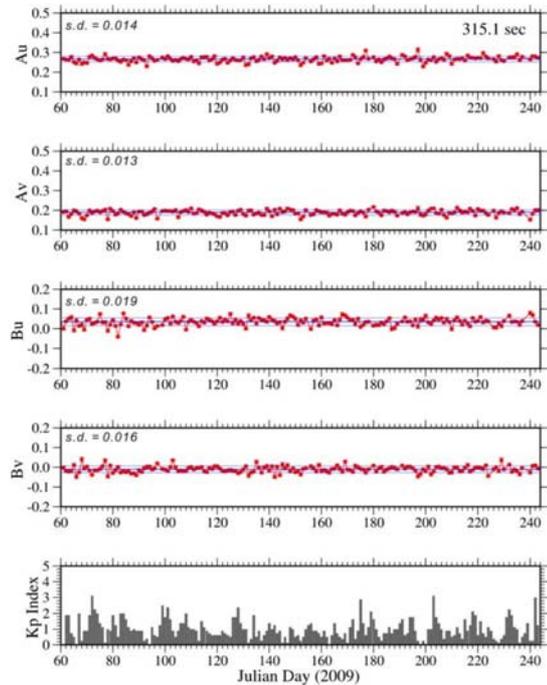


Fig. 3. Temporal variations of geomagnetic transfer functions A and B with error bars for the period of 315 s at the Kanoya (site KNY) observatory. Solid and dotted lines in the four upper panels indicate the average and one standard deviation of each component. The lowest panel shows the daily averages of Kp index. Compared to Fig. 1a, time changes in transfer functions are fairly stable.

표적인 상시 지자기관측소로서, 관측소 주변에 잡음 원이 매우 적기 때문에 자료의 질이 매우 높은 관측

Table 1. The earthquakes occurred within 200 km from the Cheongyang observatory during March to August 2009, with epicenter, magnitude, focal depth, and distance from the Cheongyang observatory to epicenter. The earthquake No. 3 has the largest magnitude, while No. 5 and 6 are the first and second nearest earthquakes occurred around the observatory. The earthquake No. 4 is thought of as the aftershock of the earthquake No. 3

No.	Julian Day	Latitude	Longitude	Magnitude	Depth (km)	Distance (km)
1	92	125.89	37.59	3.2	14.6	160.5
2	111	128.23	35.43	2.2	13.1	162.3
3	121	128.71	36.56	3.9	11.6	167.6
4	122	128.70	36.55	2.9	6.9	166.7
5	134	127.13	36.23	2.4	6.0	29.3
6	135	126.41	36.57	2.6	5.8	45.6
7	165	126.77	36.84	2.2	4.8	52.6
8	166	124.89	36.20	2.3	7.6	177.5
9	171	126.62	38.04	2.5	2.3	187.1
10	179	128.25	35.76	3.1	15.3	143.3
11	180	125.96	37.11	2.9	11.7	114.6
12	211	126.32	35.94	2.8	3.8	67.7

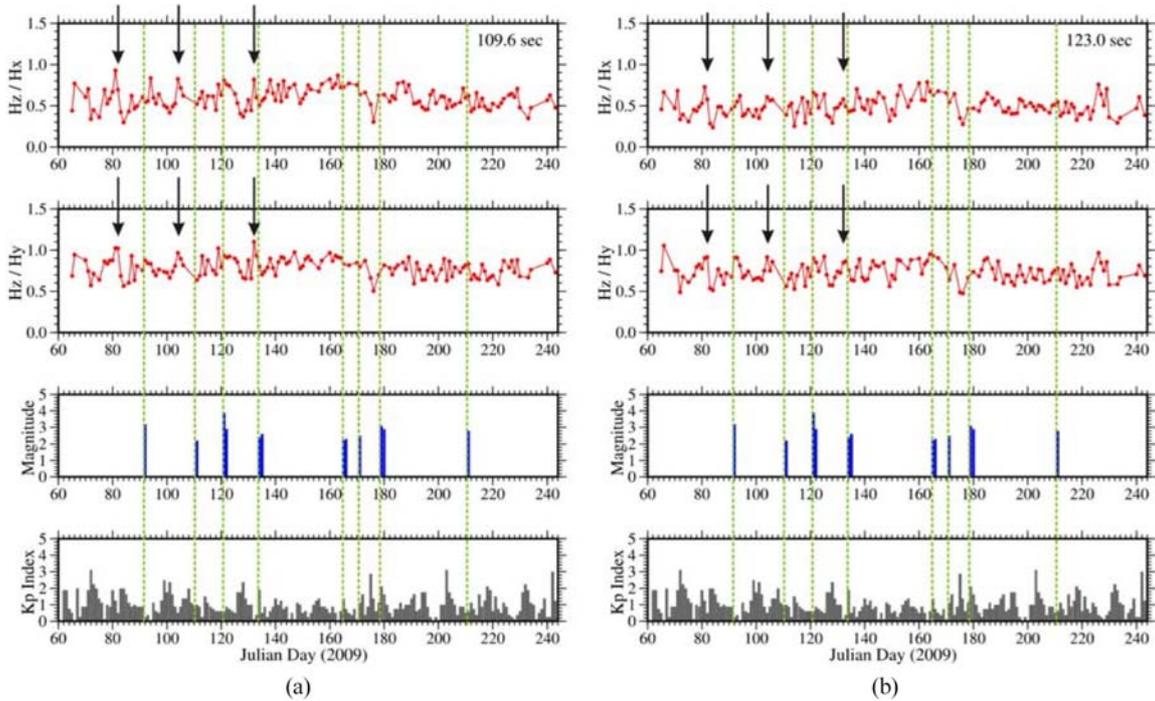


Fig. 4. Temporal polarization results (H_z/H_x and H_z/H_y) for the period of (a) 109 s and (b) 123 s at the Cheongyang observatory, before applying standardization. The earthquakes occurred within 200 km from the Cheongyang observatory are displayed. The lowest panel shows the daily averages of Kp index. The vertical arrows indicate anomalous peaks associated with earthquake occurrences.

소 중 하나이다. 자료처리 방법이 청양과 동일함에도 불구하고, Fig. 1과 비교해보면 알 수 있듯이 전달함수의 값이 상당히 안정적이며 표준편차도 상당히 작다. 이는 자료 질이 전달함수 추정에 미치는 영향을 단적으로 보여주는 예이다. 청양의 경우, 관측소를 이전하지 않은 이상 자료 질의 향상을 기대하기 어려우므로 주변 잡음의 영향을 최대한 억제할 수 있는 추정기법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

분극 분석(polarization analysis)

1990년대 이후 단기 지진예측에서 ULF 대역 자기장의 분극이 가장 중요한 주제로 부상하였고, 이와 관련된 다수의 결과들이 보고되었다(Molchanov et al., 1992; Molchanov and Hayakawa, 1995; Hayakawa et al., 1999; Hattori et al., 2004; Ohta et al., 2005). 자기장의 분극은 주파수 영역에서 수평 자기장과 수직 자기장 성분의 분광에너지(spectral power) 비로서, 다음과 같이 정의된다(Hayakawa et al., 1996).

$$P_{xz}(f) = H_z(f) / H_x(f)$$

$$P_{zy}(f) = H_z(f) / H_y(f) \tag{3}$$

기존의 연구들을 종합적으로 정리한 Hayakawa et al.(2007)에 의하면, 지진발생 전 분극값의 뚜렷한 증가가 발견된 사례가 다수 존재하며, 주기 100초 대역이 이 특성을 가장 잘 반영한다. Fig. 4는 주기 100초 부근에서 청양관측소의 분극값의 변화를 보여준다. 국지적인 고점(peak)이 다수 보이며, 이 중 지진 발생과 관련 있는 고점도 3 구간 정도에서 확인된다. 그러나 고점들이 상당히 무작위적으로 분포하는 것으로 보여, 해당 고점이 지진전조와 관련 있는지를 명확히 판단하기는 어렵다.

한편, 자기장의 분광에너지는 외부 자기장 강도에 따라 국지적인 변동이 심하고, 또한 각 성분마다 통계적 특성이 다를 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요할 수 있다. Ida et al.(2008)은 각 자기장 성분을 정규화하여 분극값을 계산하였는데, 정규화전 확인하기 어려웠던 분극값의 증가가 정규화후 명확히 확인

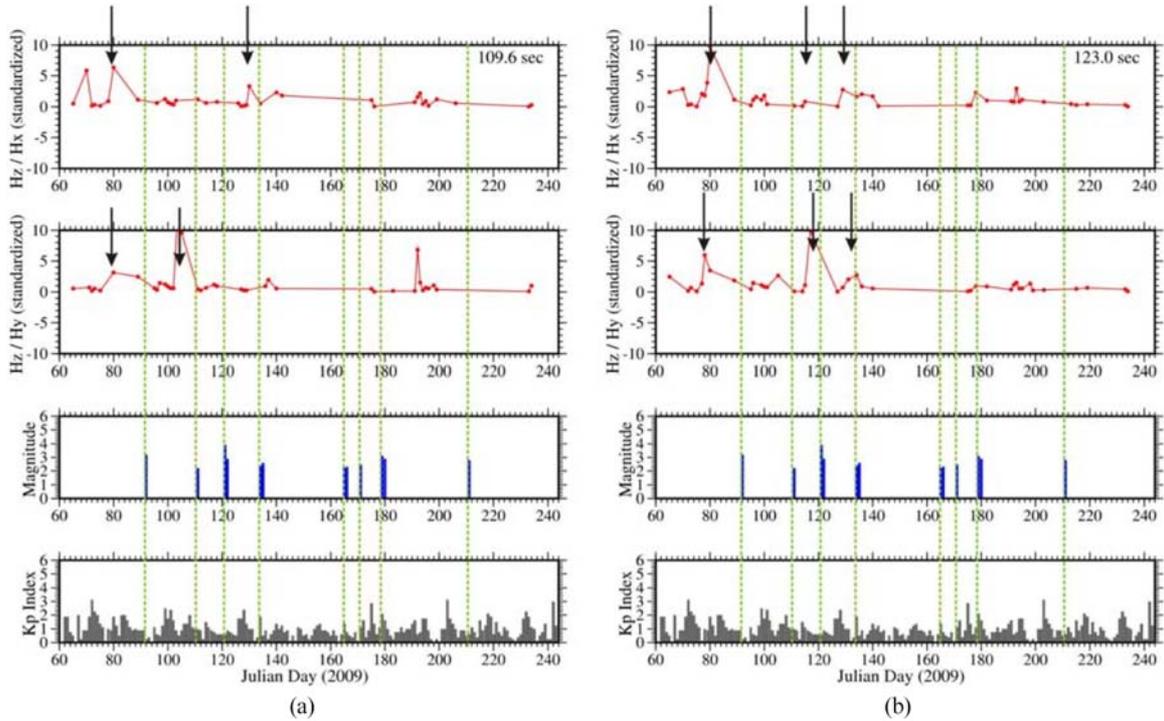


Fig. 5. Temporal polarization results (Hz/Hx and Hz/Hy) for the period of (a) 109 s and (b) 123 s at the Cheongyang observatory, after applying standardization. The earthquakes occurred within 200 km from the Cheongyang observatory are displayed. The lowest panel shows the daily averages of Kp index. The vertical arrows indicate anomalous peaks associated with earthquake occurrences.

되었다. 정규화된 분극값은 다음과 같이 각 자기장 성분의 분광에너지를 정규화함으로써 계산된다.

$$S_i = (X_i - \mu_i) / \sigma_i \quad (4)$$

여기서, 첨자 i 는 측정일자, S 는 정규화된 분광에너지, X 는 정규화된 분광에너지, μ 는 측정기간 동안 분광에너지의 평균, σ 는 측정기간 동안 분광에너지의 표준편차를 나타낸다. 식 (3)과 (4)로부터 알수 있듯이, 매우 큰 분극값은 수평 성분이 평균 분광에너지에 가깝거나 수직 성분이 평균보다 매우 클 때 나타날 것이다. Ida et al.(2008)와 유사하게, 본 연구에서는 각 수평 성분의 S 값이 0에 근접했을 때 분극값의 급격한 증가를 방지하기 위해 수평 성분의 S 값이 0.1 이상이고, 수직 성분의 S 값이 0보다 클 경우에만 정규화된 분극값을 계산하였다.

Fig. 5는 청양의 정규화된 분극값을 보여준다. Fig. 4와 비교해 보았을 때, 정규화된 분극값에서 고점이 보다 뚜렷하게 나타난다. 특히, 주기 123초의 결과는 지진과의 상관성이 잘 나타나며, 지진 발생 전 세 구

간에서 뚜렷한 분극값의 증가가 관찰된다. Kayakawa et al.(2007)와 Ida et al.(2008)에 사례를 보면, 분극값의 변화는 2-3주에 걸쳐 지속적으로 증가하다가 지진 발생 후 안정적인 값으로 복귀하는데, 본 연구 결과는 이러한 패턴과 유사하다. 세 구간 중, 주목할 만한 것은 5번과 6번 지진이 그 규모가 작음에도 진앙이 청양관측소에서 50 km 이내이기 때문에 분극값 증가가 관찰되었다는 것이다. 한편, 1번 지진(규모 3.2)과 3번 지진(규모 3.9)은 그 반대상황인데, 진앙거리가 매우 크에도 불구하고(약 160 km) 분극값 증가가 관찰되었다. 즉, 한반도의 경우 Hayakawa et al. (2007)이 제시했던 기준보다 먼 거리에서, 또한 작은 규모의 지진에서 분극값의 증가가 관찰된다. 이는 한반도 지각의 평균 전기비저항이 수 천 ohm-m를 상회할 정도로 다른 나라의 지각에 비해 매우 높기 때문이다. 이 때문에 진원역(focal zone)에서 방사된 ULF 대역 전자기파의 감쇄가 덜하며, 작은 규모의 지진임에도 불구하고 먼 거리까지 전파되는 것으로 생각된다.

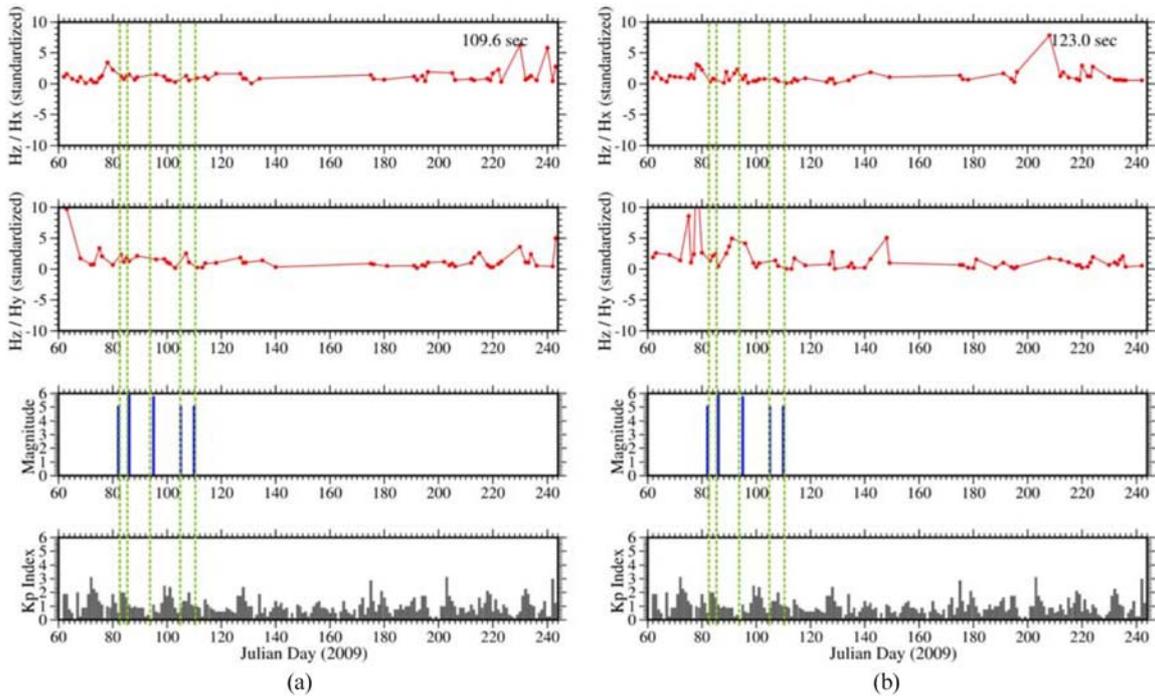


Fig. 6. Temporal polarization results (H_z/H_x and H_z/H_y) for the period of (a) 109 s and (b) 123 s at the Kanoya observatory, after applying standardization. The earthquakes occurred within 200 km from the Kanoya observatory are displayed. The lowest panel shows the daily averages of Kp index.

본 연구의 분극값 분석결과는 지진전조현상의 간접적인 증거로 제시될 수 있으나, 다른 기간에도 고점들이 나타나고 있기 때문에, 이러한 변화를 지진전조현상라고 단정하기는 어렵다. 한편, 이러한 고점의 패턴이 다른 관측소에서도 확인되는지 조사하기 위하여 Kanoya 관측소에서 획득된 정규화된 분극값을 조사하였다(Fig. 6). 청양 관측소와 유사하게, 주기 123 초에서 앞의 세 지진이벤트는 분극값과 좋은 상관성을 보여준다. 그러나 분극값의 고점이 나타나는 위치 및 패턴은 청양과는 다르며, 이는 청양 관측소에서 나타난 고점이 전지구적인 변화에 기인하는 것이 아니라 관측소의 지역적 특성을 반영한다는 것이다. 따라서 청양 관측소에서 나타나는 고점은 주변에서 발생한 지진이벤트와 관련될 가능성이 상당히 높다고 판단된다.

해외의 사례를 볼 때, 분극값의 변화가 명확하게 전조현상으로 제시되기 위해서는 규모 5 이상, 관측소와 진앙과의 거리는 100 km 이내의 자료가 확보되어야 한다. 국내의 경우, 지각의 전기비저항이 높기 때문에 상기 조건이 완화될 수는 있다. 그러나 실제적인 자기장 분극값의 변화를 감지하기 위해서는 2-3

년 이상의 지속적인 관측 자료와 진앙근처에 최대한 많은 지자기관측소가 확보되어야 하며, 지진규모도 4 이상은 되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 청양관측소에서 획득된 6개월의 자료만 이용하였고, 또한 동일기간 규모 4이상의 지진도 발생하지 않았기 때문에 명확한 결과를 도출하기에는 한계가 있었다. 따라서 향후 타기관에서 운영하고 있는 지자기장 자료를 모두 이용한 분석이 필요하며, 과거 발생한 일정규모 이상의 지진과 상관관계를 면밀히 분석해 본다면 지진전조 현상과 관련된 보다 확실한 실마리를 발견할 수 있을 것이라 기대된다.

결론

본 연구에서는 기상청에서 운영하고 있는 청양 지자기관측소의 자기장 자료로부터 지자기전달함수 및 분극값을 추정하여 동일기간 발생한 지진과의 연관성을 살펴보았다. 국외사례와 비교해 보았을 때, 자료 획득 기간이 짧았고 동일한 기간에 큰 지진이 발생하지 않았기 때문에 지진전조와 관련된 이상(anomalous) 현상을 관측하기에는 쉽지 않은 조건이었다. 지자기

전달함수의 경우, 일본 Kanoya 관측소와 비교해서 일별 전달함수 값의 변화가 심하였고, 동일기간 발생한 지진 및 Kp 인덱스와의 상관성도 발견되지 않았다. 실제적으로 6개월간의 자료는 지진과 관련된 전달함수 변동을 조사하기에는 매우 짧은 기간이며, 일본 및 대만의 사례를 볼 때 최소 10년 이상의 자료가 축적되어야만 전달함수 변동에 대한 유의미한 패턴을 찾을 수 있다. 따라서 전달함수를 이용한 모니터링은 장기지진예측에 보다 적합한 것으로 생각된다. 최근 단기 지진예측에서 각광받고 있는 분극 분석의 경우, 지진발생과 관련 있어 보이는 변동들이 관찰된다. 특히, 정규화된 분극값에서 지진전조현상으로 의심되는 뚜렷한 변동이 관찰되었고, 일본 Kanoya 관측소에서 계산된 분극값과 비교해보았을 때 이러한 변동은 주변에서 발생한 지진이벤트와 관련될 가능성이 높다. 이는 한반도 지각의 전기비저항이 다른 나라에 비해 매우 높기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 이러한 변동은 지진이 발생하지 않은 시기에도 관찰되기 때문에, 보다 정밀하고 확실한 전조현상 탐지를 위해서는 과거 발생한 일정규모 이상의 지진과 확보 가능한 인근 지자기관측소 자료를 비교해 볼 필요가 있다. 국내의 지자기장 모니터링 기술은 현재 걸음마 단계이지만, 지속적인 자료 축적과 국내 상황에 최적화된 분석기술 개발을 통하여 지진예측을 위한 발판을 마련해야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2008-5503)의 지원으로 수행되었고, 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 양준모, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2004, 이천관측소에서 측정된 지자기장 및 지자기 전달함수의 시간적 변동성. 한국지구과학회지, 25, 604-614.
- 양준모, 권병두, 이덕기, 윤용훈, 2005, BI (Bounded Influence) 와 RMP(Rejection based on Median Power) 기법을 이용한 MT 전달함수의 로버스트 추정. 한국지구시스템공학회지, 42, 419-428.
- 이춘기, 이희순, 권병두, 오석훈, 이덕기, 2003, 단층대의 전기전도도 변동에 의한 ULF 전자기장 교란. 물리탐사, 6, 87-94.
- Chen, P.F., 1981, A search for correlation between time change in transfer functions and seismic activity in north Taiwan. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 33, 635-643.
- Chen, P.F. and Fung, P.C.W., 1993, Time changes in geomagnetic transfer functions at Luning before and after the 1986 Hualian earthquake (Ms=7.6). Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 45, 251-259.
- Chen K.J., Chiu, B., and Line, C.H., 2006, A search for a correlation between time change in transfer function and seismic energy release in northern Taiwan. Earth, Planet and Space, 58, 981-991.
- Fraser-Smith, A.C., Bernardi, 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 Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. Geophysical Research Letters, 17, 1465-1468.
- 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 zone: Application to the Loma Prieta ULF emissions. Journal of Geophysical Research, 100, 12951-12958.
- Fujita, S., 1990, Monitoring of time changes of conductivity anomaly transfer functions at Japanese magnetic observatory network. Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory, 23, 53-87.
- Gong, S.J., 1985, Anomalous changes in transfer functions and the 1976 Tangsan earthquake (Ms=7.8). Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 37, 503-508.
- Hattori, K., Takahashi, I., Yoshino, C., Isezaki, N., Iwasaki, H., Harada, M., Korepanov, K., Molchanov, O., Hayakawa, M., Noda, Y., Nagao, T., and Uyeda, S., 2004, ULF geomagnetic field measurements in Japan and some recent results associated with Iwakenen Nairiku Hokunu earthquakes in 1998. Physics and Chemistry of the Earth, 29, 481-494.
- Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O.A., and Yumoto, K., 1996, Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during Guam earthquake of 8 August 1993. Geophysical Research Letters, 23, 241-244.
- Hayakawa, M., Itoh, T., and Smirnova, N., 1999, Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993. Geophysical Research Letters, 26, 2797-2800.
- Hayakawa, M., Hattori, K., and Ohta, K., 2007, Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. Sensors, 7, 1108-1122.
- Ida, Y., Yang, D., Li, Q., Sun, H., and Hayakawa, M., 2008, Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to an earthquake in China with an improved polarization analysis. Natural Hazards and Earth System Science, 8, 775-777.
- Molchanov, O.A., Kopytenko, Y.A., Voronov, P.M., Kopy-

- tenko, E.A., Matiashvili, T.G., Fraser-Smith, A.C., and Bernadi, A., 1992, Results of ULF magnetic field measurements near epicenters of Spitak ($M_s=6.9$) and Loma Prieta ($M_s=7.1$) earthquakes: Comparative analysis. *Geophysical Research Letters*, 19, 1495-1498.
- Molchanov, O.A. and Hayakawa, M., 1995, Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing. *Geophysical Research Letters*, 22, 3091-3094.
- Ohta, K., Watanane, N., and Hayakawa, M., 2005, The observation of ULF emissions at Nakatsugawa in possible association with the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake. *Earth, Planet and Space*, 57, 1003-1008.
- Rikitake, T., 1979, Changes in the direction of magnetic vector of short-period geomagnetic variations before the 1972 Sitka, Alaska, earthquake. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 31, 441-448.
- Rikitake, T. and Hokura, Y., 1985, *Solid earth geomagnetism*. Terrapub, Tokyo, Japan, 400 p.
- Scholtz, C.H., Sykes, L.R., and Aggarwal, Y.P., 1973, Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 181, 803-810.
- Vozzof, K., 1972, The magnetotelluric in the exploration of sedimentary basin. *Geophysics*, 37, 98-141.
- Yanagihara, K., 1972, Secular variation of the electrical conductivity anomaly in the central part of Japan. *Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, 15, 1-11.
- Yanagihara, K. and Nagano, T., 1976, Time change of transfer function in the central Japan anomaly of conductivity with special reference to earthquake occurrences. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 28, 157-163.

2009년 9월 30일 접수
2009년 12월 1일 수정원고 접수
2009년 12월 16일 채택