

지자기장 및 지자기 전달함수의 시간적 변동성 분석

양준모*, 이덕기, 권병두**, 류용규*, 윤용훈*

* 기상연구소(email:yjm@metri.re.kr)

** 서울대학교 지구과학교육과

ABSTRACT

We investigate the time-variational characteristics of power spectrum and transfer function of geomagnetic field by robust estimation technique. In the case of power spectrums of geomagnetic field, there are some the periodic fluctuations related with solar activity. Meanwhile, the geomagnetic transfer function shows so considerable weak time-variational fluctuation that the estimations of transfer function seem to be comparatively stable in time-variant view.

1. 서론

지진활동이 활발한 일본, 미국, 그리스 등에서는 지진 전조현상으로 제시되는 여러 요소 중, 정량적인 접근이 가능하며 지속적인 모니터링에 적합하다고 생각되는 전자장의 측정이 1980년대 이후 활발히 진행되고 있다. 이러한 지속적 전자장 측정의 성과로 임박지진의 경우 지진 발생 전 ULF대역(0.01Hz~10Hz)에서 전자장의 교란이 관측된 사례가 수차례 보고되었다(Fraser-Smith et al., 1990; Park et al., 1993). 또한 USGS의 Park Field 관측소 경우처럼, 장기적이며 지속적인 전자장 측정은 지진 전조현상뿐 아니라 관측점 하부의 지하구조를 반영하는 임피던스 및 임피던스의 시간적 변동 및 안정성에 대한 정량적 정보를 제공한다(Eisel and Egbert, 2001). 국내의 경우, 역사지진에서 발견되는 적지 않은 강진과 90년대 중반이후 증가세에 있는 지진발생 횟수는 지진 전조현상 연구에 대한 동기를 부여하고 있다. 그러나 다양한 지구물리적 측정 자료의 부족과 전조현상에 대한 정량적 접근 방법의 어려움으로 그 연구 결과 및 성과는 상당히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 지진 전조현상 연구의 기초적 단계로서 이천에서 획득된 6개월간의 지자기장 자료를 분석하였다. 장기간에 걸쳐 획득된 지자기장 자료의 분석은 그에 파생되는 다양한 파라미터(파워 에너지, 유도 지시자의 크기, 위상 등)의 시간적 변동 및 안정성을 살펴볼 수 있는 매우 드문 기회이며, 그 결과는 지진 전조현상으로서의 전자장 변동에 대한 기본적인 유용한 정보를 제공할 것이라 기대된다.

2. 자료 및 분석 방법

한국지질자원연구원과 전파연구소에서는 총 6개의 고정 지자기관측소를 운영하고 있으며, 본 연구에서는 전파연구소에서 운영하는 이천 지자기관측소의 2002년 7월부터 12월까지 총 6개월 기간의 지자기장 자료를 분석하였다. 자료의 샘플링 간격은 5초이며, 주파수 성분 계산 시 계단형 데시메이션(Cascade-Decimation)과 고속 푸리에 변환(FFT)이 결합된 기법을 사용하였다. 지자기장 분석은 일별 파워 스펙트럼, 지자기 전달함수를 계산하였다.

한편 지자기 스펙트럼, 전달함수 계산 시 기존의 최소자승 방법은 외치(outlier)에 민감하고, 또 가우스 분포를 따르지 않는 오차 분포의 경우, 결과값이 편향되고 안정적이지 못하다고 알려져 있다(Egbert and Booker, 1986). 그러므로 결과의 편향을 최소화하며 부드러운 해를 도출할 수 있는 로버스트 추정방법을 사용하였다. 지자기 전달함수의 로버스트 추정에 대한 자세한 내용은 양준모 등(2002)에 소개되어 있다.

3. 지자기 3성분 자료의 파워스펙트럼

총 6개월간 지자기장의 주파수별 특성을 살펴보기 위해 하루 단위로 로그 파워스펙트럼을 계산하였다. Fig.1은 총 6개월 동안의 파워스펙트럼인데, 스펙트럼 이상을 효과적으로 확인하기 위하여 6개월 동안 각 주파수별 중간값을 계산하여 일별 스펙트럼 파워를 중간값으로 정규화 시킨 결과이다. 즉 정규화된 값이 1보다 큰 값은 그날 특정 주파수에서 파워가 평균적인 파워보다 강하고 1이하의 약함을 의미한다. Fig.1에서 확인할 수 있듯이, 지자기장의 파워는 무작위적인 강약을 반복하고 있다. 이러한 무작위적인 변화는 주로 태양활동에 기인한다(Egbert and Booker, 1986; Eisel and Egbert, 2001). 한편 이춘기 등(2003)에 의하면 단층대나 지진이 발생하는 지역에서 전기전도도의 급격한 변동은 지자기장의 이상을 일으키고, 이는 ULF 대역에서 자기장의 세기를 증폭시킬 수 있다고 보고하였다. 그러나 전기전도도 변동에 의해 증폭되는 자기장의 세기는 일반적인 경우 매우 미약하며 강력한 태양활동이 있을 경우 이를 감지하는 것이 쉽지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 지진전조현상과 관련지을 수 있는 이상 신호의 감지를 위해서는 장기적이고 정밀한 관측과 더불어 정상적인 자기장의 변화 양상에 대한 연구가 필수적으로 요구된다.

4. 지자기 전달 함수의 시간적 변동

수직 지자기 성분과 수평 지자기 성분은 주파수 영역에서 다음과 같은 선형 시스템을 만족한다고 가정한다.

$$H_z(f) = AH_x(f) + BH_y(f) \quad (1)$$

여기서 H_z 는 지자기장의 수직성분, H_x , H_y 는 각각 지자기장의 북쪽, 동쪽 방향 성분을 의미하고 A, B는 MT(Magneto-Telluric)관점에서는 티퍼(tipper)라는 용어로, 지자기수직탐사에서는 지자기 전달함수(geomagnetic transfer function)라는 용어로 정의된다. 식 (1)에

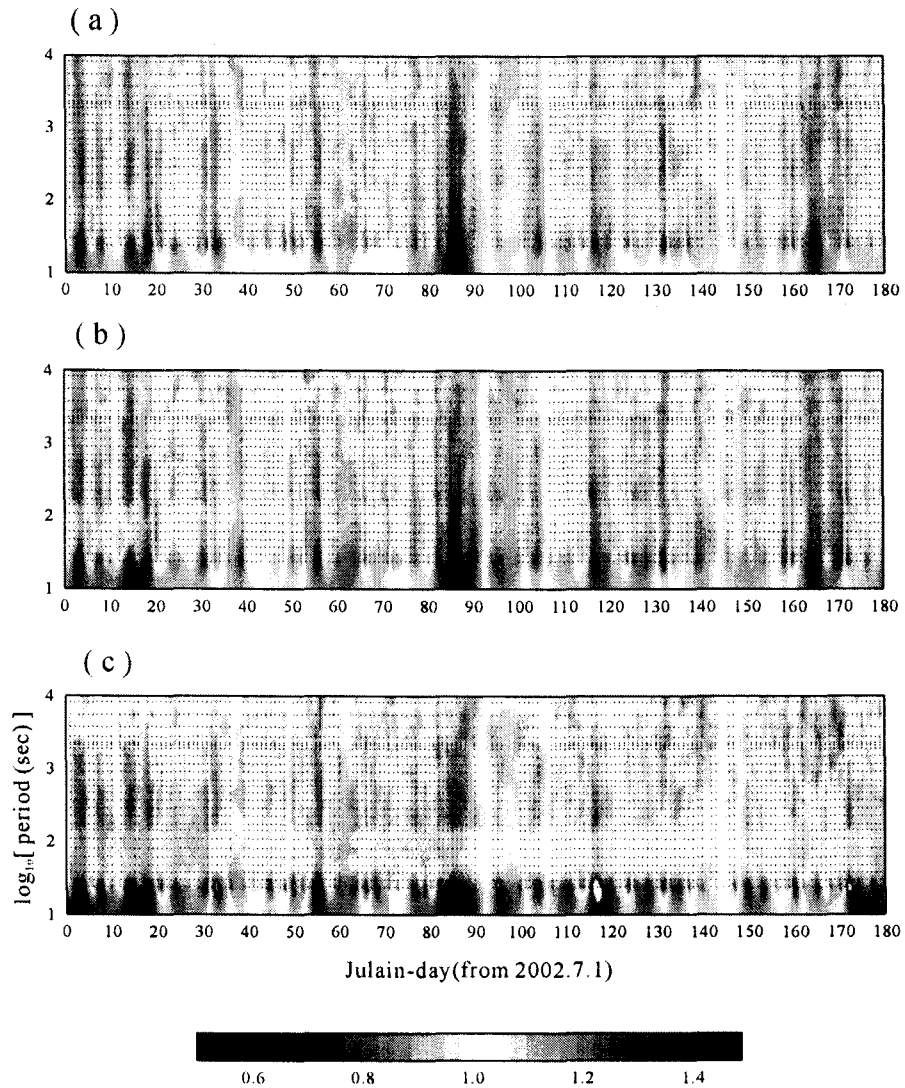


Fig. 1 Normalized amplitude spectra of geomagnetic field for day-to-day variation over the broad period bands. Each panel show the normalized one of (a) Hx (northward), (b) Hy (eastward) field and (c) Hz (vertical field), respectively.

서 A, B는 시간 영역의 지자기 3성분 자료를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 표현한 것이므로

$$A(f) = A_r(f) + iA_i(f), \quad B(f) = B_r(f) + iB_i(f) \quad (2)$$

이고, 복소수이며, 주파수 의존적이다. 일반적으로 $(A_r(f), B_r(f))$ 는 실수 유도 지시자, $(A_i(f), B_i(f))$ 는 허수 유도 지시자로 정의되며 실수 유도 지시자를 180. 회전시킨 파킨슨(Parkinson) 지시자 $(-A_r(f), -B_r(f))$ 은 주변보다 상대적으로 전도도가 높은 쪽으로

향하며 그것의 길이는 H_z 의 이상 성분 에 대한 강도를 반영한다.

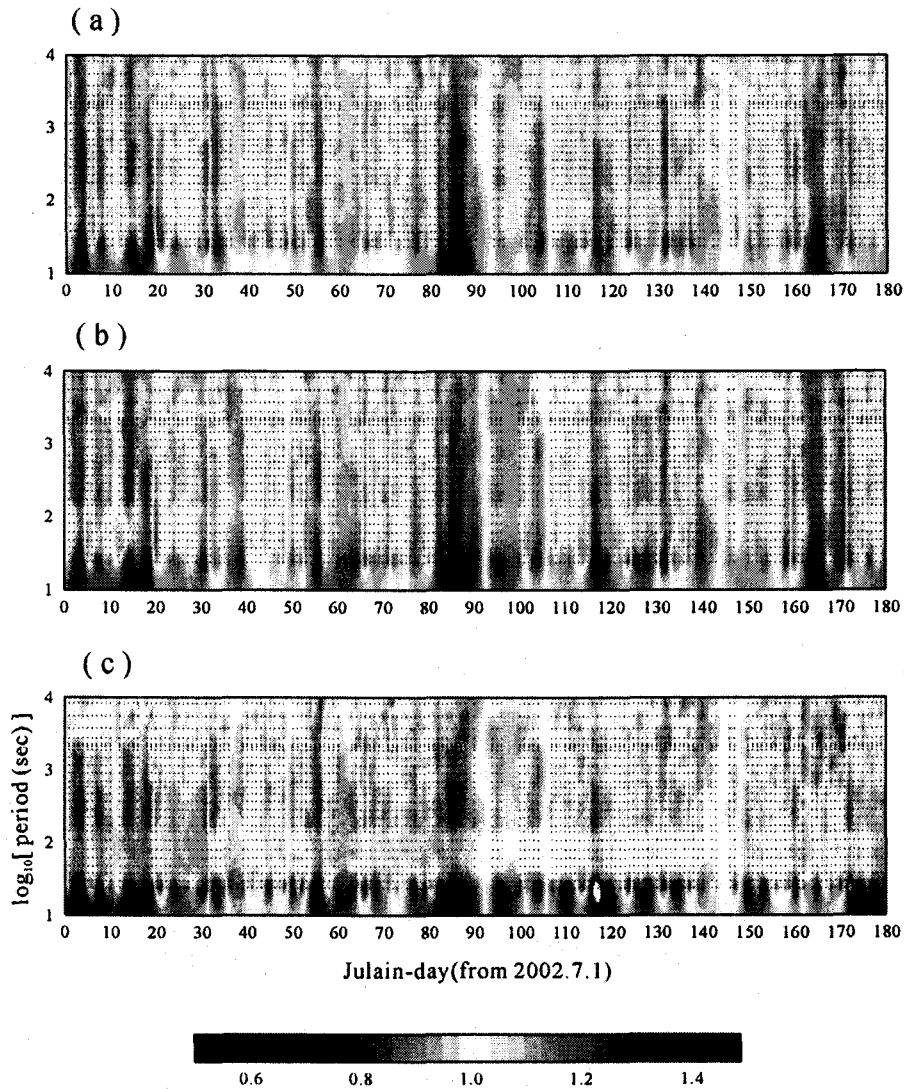


Fig. 2 Normalized amplitude spectra of geomagnetic field for day-to-day variation over the broad period bands. Each panel show the normalized one of (a) H_x (northward), (b) H_y (eastward) field and (c) H_z (vertical field), respectively.

Fig. 2는 총 6개월 동안의 실수 유도 지시자의 크기 및 위상, 수직 지자기장의 관측치와 예측치 사이의 코히런시를 나타낸 것이다. 실수 유도 지시자의 크기는 대체적으로 1000초 이하에서는 안정적으로 0.1 정도의 크기를 보이거나 1000초 이상의 장주기에서는 무작위적인 경향을 보이지만 그 정도가 강하지는 않다. 실수 유도지시자의 위상도 1000초 이하의 주기에서는 안정적으로 60° 내외, 1000~2000초 사이에서는 0° 내외의 값을 보이며 2000초 이후는 약간 무작위적인 경향을 보인다. 유도 지시자 크기 및 위상의 광역적인 변화 양상을 조사하기 위하여 2차원 중간값 필터를 적용하였다. 2차원 필터는 Eisel and Egbert(2001)의 방

법을 따라서 날짜축으로 11일, 주기축으로 5개의 길이로 설계하였으며 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 실수 유도 지시자의 위상 및 크기는 약간의 교란이 존재하지만 총 6개월 기간에 걸쳐 비교적 안정적으로 획득되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4는 총 6개월 동안의 주파수 별로 유도 지시자 크기 및 위상의 중간값을 계산한 것인데, 기존의 연구 결과(양준모 등, 2003)과 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로 종합해보면 유도지시자의 위상 및 크기는 시간적 변동성이 약해 비교적 안정적으로 그 값을 획득할 수 있다고 판단된다.

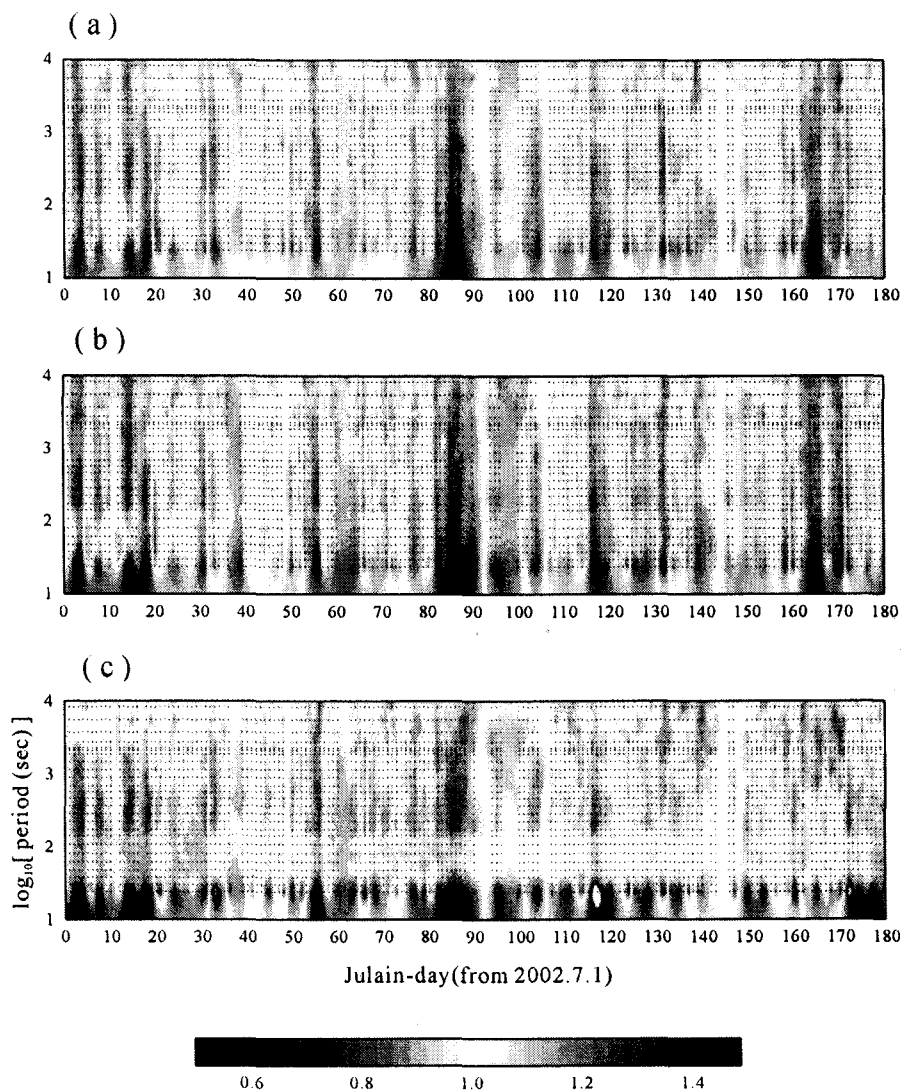


Fig. 3 Normalized amplitude spectra of geomagnetic field for day-to-day variation over the broad period bands. Each panel show the normalized one of (a) H_x (northward), (b) H_y (eastward) field and (c) H_z (vertical field), respectively.

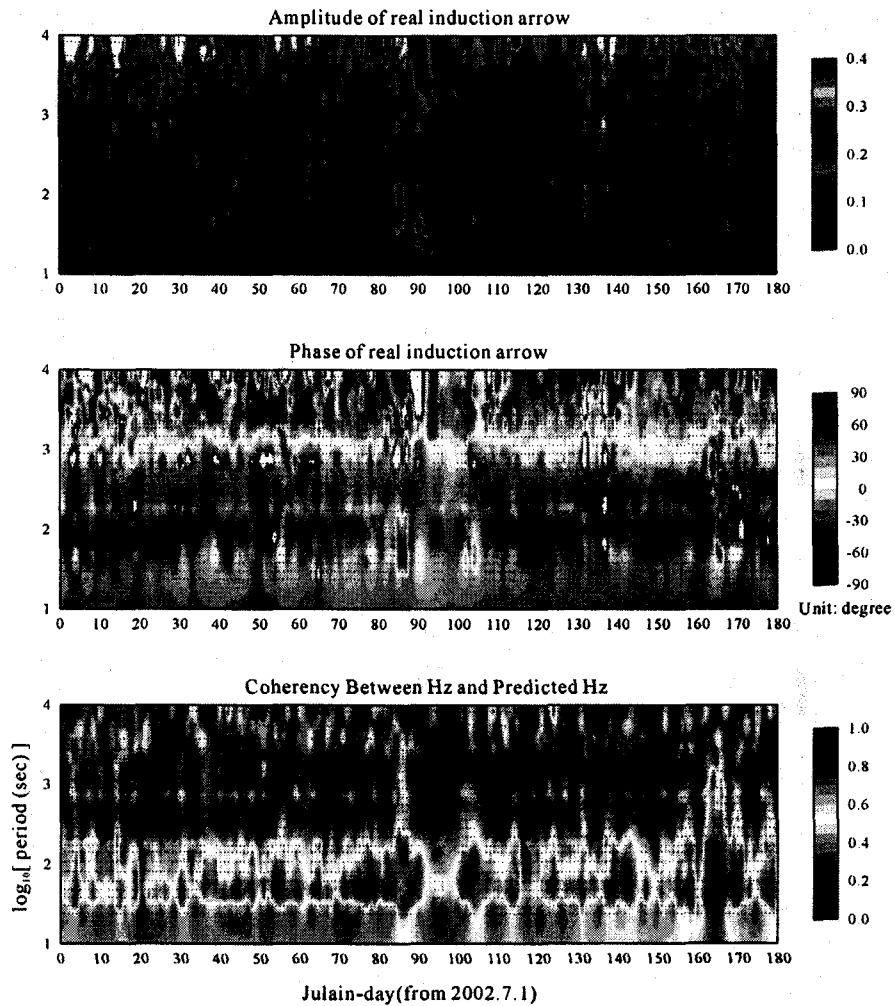


Fig. 4 The daily variations in the amplitude, phase and coherency of induction arrow. The amplitude and phase show somewhat random patterns over the period of 2000 seconds.

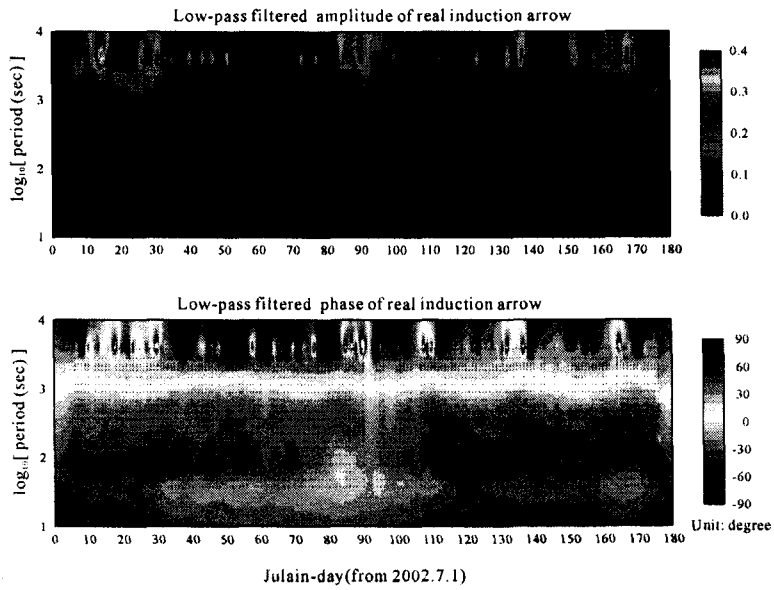


Fig. 5 Low-pass filtered variations in amplitude and phase of induction arrow. A median filter of dimensions 6(in the period direction) and 11(in time direction) was applied to the upper two panels of Fig. 2.

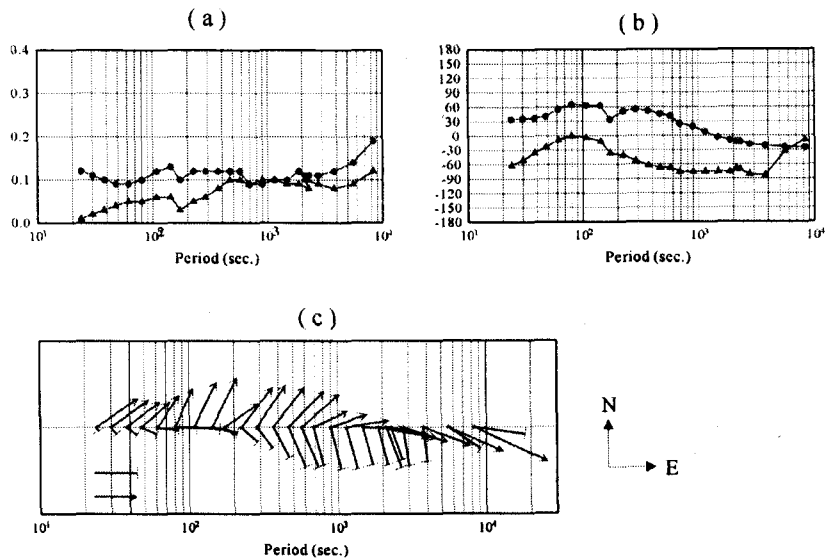


Fig. 6 (a) The amplitude and (b) phase of induction arrow computed from the median of all daily transfer function estimations over the broad bands. The panel (c) shows the graphical representations of induction arrows from (a) and (b).

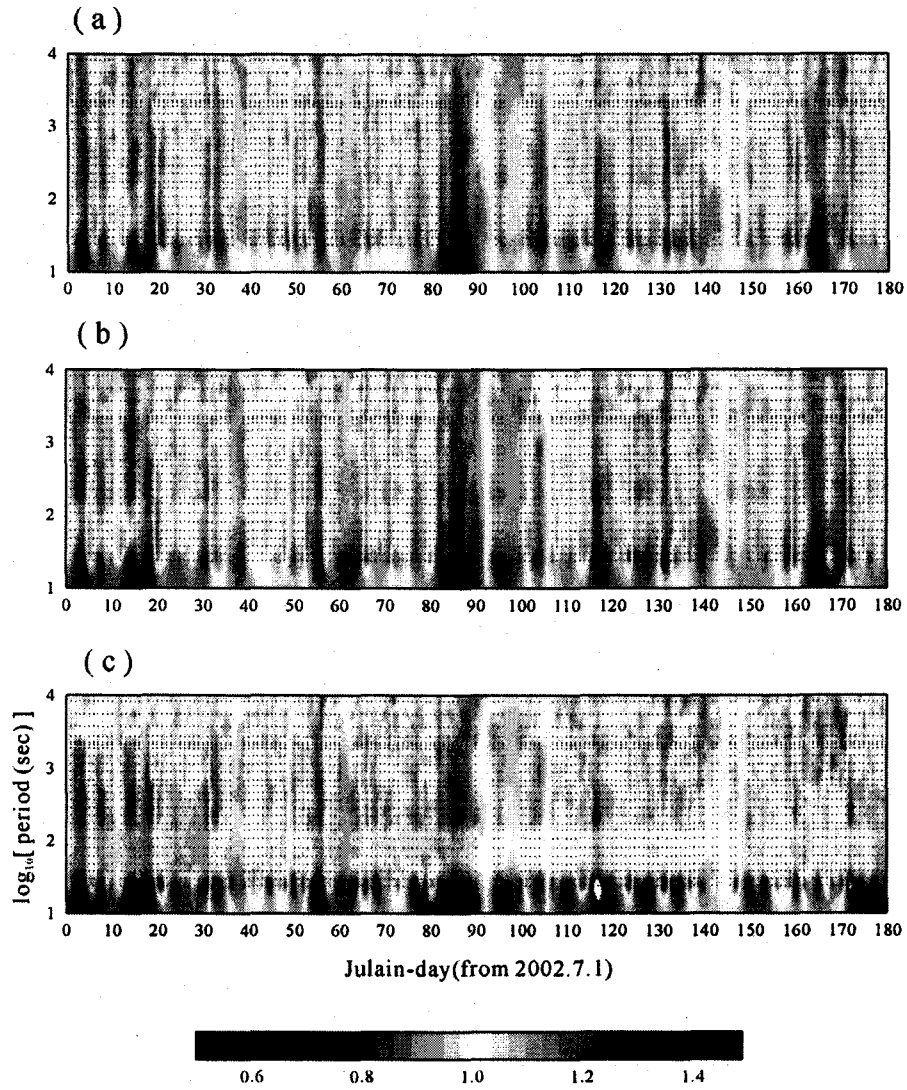


Fig. 7 Normalized amplitude spectra of geomagnetic field for day-to-day variation over the broad period bands. Each panel show the normalized one of (a) Hx (northward), (b) Hy (eastward) field and (c) Hz (vertical field), respectively.

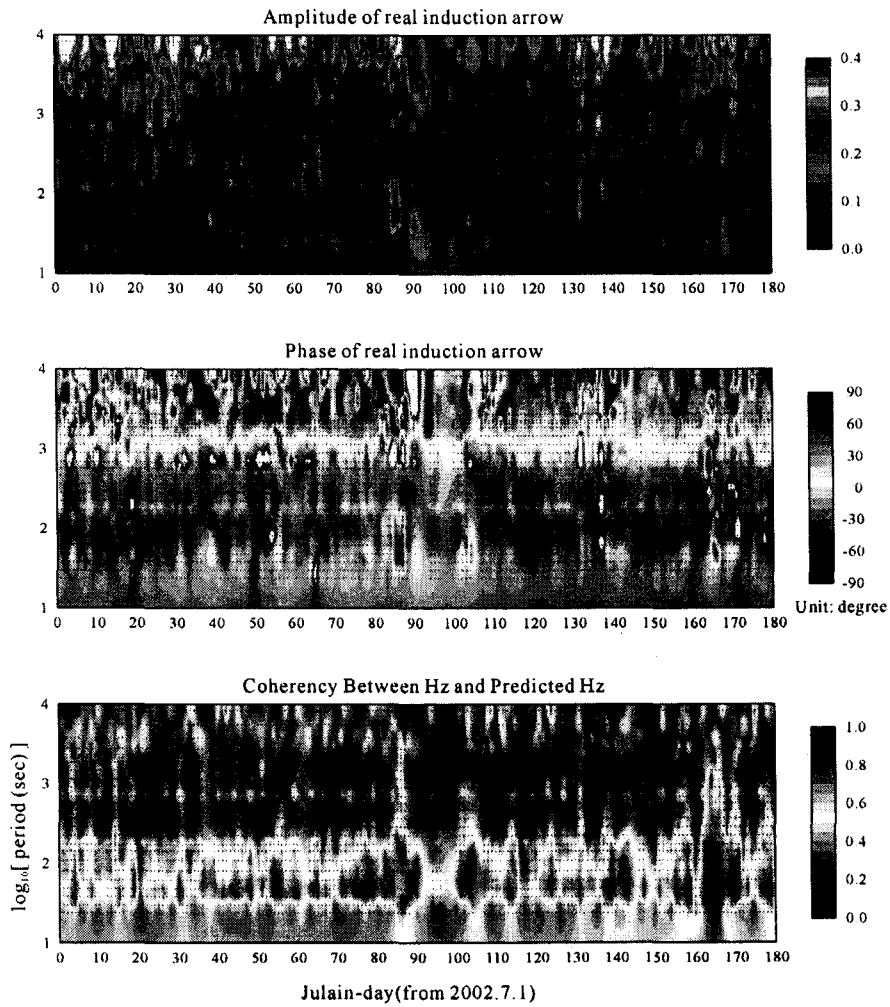


Fig. 8 The daily variations in the amplitude, phase and coherency of induction arrow. The amplitude and phase show somewhat random patterns over the period of 2000 seconds.

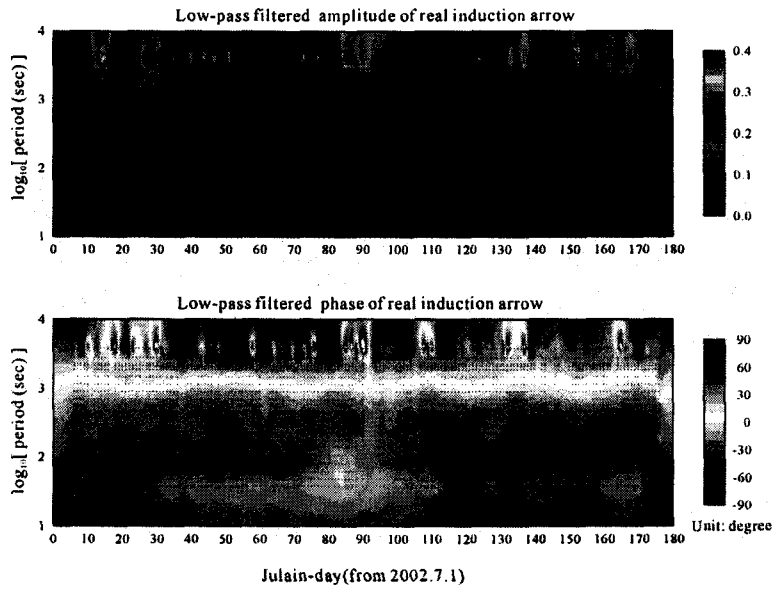


Fig. 9 Low-pass filtered variations in amplitude and phase of induction arrow. A median filter of dimensions 6(in the period direction) and 11(in time direction) was applied to the upper two panels of Fig. 2.

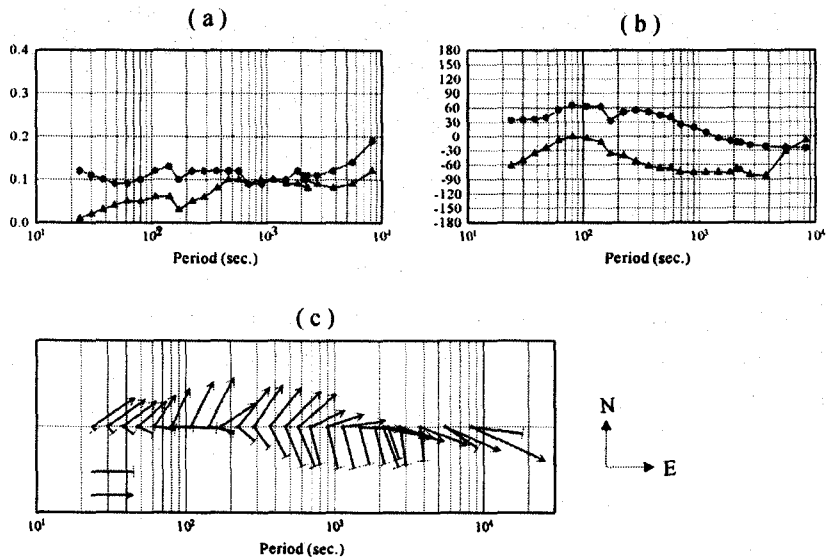


Fig. 10 (a) The amplitude and (b) phase of induction arrow computed from the median of all daily transfer function estimations over the broad bands. The panel (c) shows the graphical representations of induction arrows from (a) and (b).

참고문헌

- 양준모, 오석훈, 이덕기, 윤용훈, 2002, 지자기 전달함수의 로버스트 추정, 대한지구물리학회지, 5(2), 131-142.
- 양준모, 오석훈, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2003, 한반도내 전도성 구조를 고려한 지자기 모델링 및 차이 지시자의 적용, 한국지구과학회, 24(5), 440-448
- 이춘기, 이희순, 권병두, 오석훈, 이덕기, 단층대의 전기전도도 변동에 의한 UHF 전자기장 교란, 한국물리탐사학회지, 6(2), 87-94.
- Egbert, G., and Booker, J. R., 1986, Robust estimation of geomagnetic transfer functions, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 87, 173-194
- Eisel M. and Egbert G., 2001, On the stability of magnetotelluric transfer function estimates and the reliability of their variances, Geophys. J. Int., 144, 65-82.
- 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 ML 7.1 Loma Prieta earthquake, Geophys. Res. Lett., 17, 12951-12958.
- Park S. K., Johnston M. J. S., Madden T. R., Morgan F. D. and Morrison H. F., 1993, Electromagnetic precursors to earthquake in the ULF band: a review of observations and mechanism, Review of Geophysics, 31, 117-132