

원격참조(RR: Remote Reference) 기법과 신호잡음분리(SNS: Signal Noise Separation) 기술을 이용한 용인 관측소의 지자기 전달함수 분석

양준모^{1*} · 이덕기¹ · 권병두² · 류용규¹ · 윤용훈¹

¹기상연구소 해양기상지진연구실, ²서울대학교 지구과학교육과

An Analysis on the Geomagnetic Transfer Function at Yongin Observatory Using by RR (Remote Reference) and SNS (Signal Noise Separation) Technique

Junmo Yang^{1*}, Duk-Kee Lee¹, Byung-Doo Kwon², Yong-Gyu Ryu¹ and Yong-Hoon Youn¹

¹Marine Meteorology & Earthquake Res. Lab., Seoul 156-720, Korea

²Department of Earth Science Education, Seoul 151-748, Korea

For an unbiased TF (Tansfer Function) estimations we investigate geomagnetic TF derived from ICHEON and YONGIN sites, employing RR (Remote Reference) and SNS (Signal Noise Separation) techniques. The RR technique, which requires synchronized field variations recorded at a clean remote site, is a reliable method to minimize the bias of TF by uncorrelated noises in magnetic channels. Meanwhile, SNS technique based on the assumption of noise-free remote data can improve the signal-noise level by separating signal TF and noise TF, which is successfully applied to the environments with strong correlated noises. In this study, TF at YONGIN is analyzed using geomagnetic data from ICHEON site as a remote reference, which seem to have somewhat better data quality. The application of RR technique reduces the bias of TF, which appears in single site robust estimation, and makes curves in the amplitude and phase of TF more smooth as frequency. Futhermore, in order to investigate noise source quantitatively, SNS technique is applied. The results of SNS suggest that dominant noise source seems to be located at western region of YONGIN. This noise source is considered to originate from railway system such as KTX and national subway, which passes through the west regions of YONGIN.

Key words : RR (Remote Reference), SNS (Signal Nositie Separation), geomagnetic transfer function

RR (Remote Reference)과 SNS (Signal Noise Separation) 기법을 도입하여 용인과 이천에서 측정된 지자기 전달함수를 분석하였다. RR 기법은 측정 사이트와 동시에 기록되는 원격참조 자료를 사용하여 자기장의 비상관 잡음(un-correlated noise)을 제거하는 기법으로서 전달함수의 편향을 최소화한다. 한편 SNS 기법은 원격참조 자료가 잡음이 거의 없다는 가정을 바탕으로 신호에 의한 전달함수와 상관잡음(correlated noise)에 의한 전달함수를 분리하는 기법으로서, 측정 사이트에 상관잡음이 지배적인 경우에도 신호에 의해 전달함수를 성공적으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 자료의 질이 양호하다고 판단되는 이천을 원격참조 자료로 사용하여, 용인에서의 전달함수를 분석하였다. RR 기법을 적용한 결과, 단일 로버스트 추정(Single robust estimation)에서 나타났던 편향이 감소되었고, 주파수에 따른 전달함수의 연결성도 향상되었다. 잡음원에 대한 보다 정량적인 분석을 위해 SNS 기법을 적용한 결과, 주기 100초 이하에서 용인의 서쪽에 존재하는 잡음원의 존재를 확인하였다. 이러한 잡음원은 용인의 서쪽을 지나가는 국철, 고속철도 등의 철도 시스템에 의한 것으로 생각된다.

주요어 : 원격참조 기법, 신호잡음 분리 기법, 지자기 전달함수

1. 서 론

저주파수 MT (Magneto-Telluric) 탐사와 GDS (Geomagnetic Depth Sounding) 탐사는 광역적인 심부 전기전도도 구조 규명에 효과적이며 다양한 지질학적 자료와 결합하여 대상 지역의 지체구조 및 그 진화과정을 추론할 수 있는 강력한 도구로서 인식되고 있다 (Honkura, 1974; Shimoizumi *et al.*, 1996; Pringle *et al.*, 2000). 그러나 산업화와 도시화 과정에 따른 전자기적 잡음의 증가는 탐사환경을 악화시켰고, 최악의 경우 두 탐사의 결과물인 전달함수에 심각한 편향을 초래하여 유의미한 지질학적 정보 획득을 어렵게 만들고 있다.

잡음이 심한 환경에서 전달함수의 편향을 최소화하기 위해 제안된 방법은 입력 채널인 수평 자기장의 비상관 잡음(uncorrelated noise)을 최소화시키는 원격참조(RR; Remote Reference) 기법(Gamble *et al.*, 1979a)과, 출력 채널인 전기장 또는 수직 자기장에서 에러의 가우스 가정을 완화하고 외치(outlier)에 덜 민감한 추정자(estimator)를 사용하는 RME (Regression M-estimation) 기법 혹은 로버스트(Robust) 기법(Egbert & Booker, 1986; Chave *et al.*, 1987; Larsen, 1989)으로 구분될 수 있다. 현재 가장 일반적이고 광범위하게 사용되는 추정방법은 RR과 RME가 결합된 형태이며, 원격참조 자료를 이용할 수 없는 경우 입력채널에서 코히런스 소팅(Coherency Sorting)과 같은 방법으로 외치의 영향을 최소화 하는 방법(Jones *et al.*, 1984; Egbert & Livelybrook, 1996)이 제안되고 있다. 그러나 원격참조 자료와 측정 사이트에 강한 상관잡음(correlated noise)이 존재할 경우 정확한 전달함수의 추정은 어렵다고 알려져 있다.

한편, 원격참조 자료에 잡음이 거의 없다는 가정이 성립할 때 전달함수를 신호에 의한 전달함수와 상관잡음에 의한 전달함수로 분리가 가능하다(Larsen *et al.*, 1996; Oettinger *et al.*, 2001). 이러한 기법을 SNS (Signal Noise Separation) 기법이라 하는데, 상관잡음에 의한 전달함수는 전기비저항과 위상의 관점에서 근거리장 효과(near field effect)를 보이는 것으로 보고되었다. 그러나 자기장만을 이용하는 GDS 탐사에서 상관잡음에 의한 전달함수의 거동에 대해서는 현재까지 밝혀진 바가 없다.

본 연구에서는 용인과 이천에서 측정된 지자기 자료를 사용하여, 이전 연구(양준모 등, 2004)의 후속 연구로서 용인의 지자기 전달함수를 추정하였다. 용인 사

이트는 이천 사이트에 비해 도심지역에 가까우며 고속철 및 국철과 지리적으로 인접하여 전자기적인 잡음이 심한 지역이므로 단일 로버스트 추정(Single site robust estimation)은 주기 200초 이하의 주파수대역에서 상당히 불안정하며 편향된 결과를 보인다. 이 문제를 해결하기 위해 이천을 원격참조 자료로 사용하여 RR 기법을 적용하였고, 잡음원의 정량적인 확인을 위하여 SNS 기법을 도입하여 지자기 전달함수 관점에서 상관 잡음의 전달함수를 추정하였다.

2. 자료 처리 방법

2.1. 원격참조(Remote Reference) 기법

티퍼(Tipper) 또는 GDS 관점에서 측정된 3성분 지자기장(\vec{B}) 자료는 주파수 영역에서 식 (1)와 같은 선형관계를 만족한다.

$$\vec{B}_z = Z_x \vec{B}_x + Z_y \vec{B}_y \quad (1)$$

여기서, z 는 수직 하향 성분, x 는 북쪽, y 는 동쪽 방향을 의미하고 Z 는 지자기 전달함수이며 모든 수는 복소수(complex number)이다. 전통적인 최소자승 추정에서는 식 (1)의 잔차의 제곱을 최소화 시키는 관점에서 전달함수를 추정하며 Z_x 의 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고 Z_y 의 경우도 이와 유사하다.

$$Z_x = \frac{[B_z B_y^*][B_x B_x^*] - [B_z B_x^*][B_x B_y^*]}{[B_x B_x^*][B_y B_y^*] - [B_x B_y^*][B_y B_x^*]} \quad (2)$$

여기서 [...]는 한 주파수 대역에서 평균된 자기(auto)와 교차(cross) 파워를, *는 켈레 복소수(complex conjugate)를 의미한다. 그러나 실제 자기장 성분에는 일정 수준의 잡음이 포함되어 있으므로 추정된 전달함수는 분모에 존재하는 수평자기장의 자기파워(auto-power) 성분에 의해 필연적으로 왜곡된다.

이러한 입력채널에서의 잡음에 의한 편향을 최소화하기 위해 원격참조 기법이 Gamble *et al.* (1979a)에 의해 제안되었는데, 측정 사이트에서 수 백km 떨어진 원격사이트에서 측정 사이트와 동시에 자기장 성분을 기록하여 수평자기장의 자기 파워의 편향을 최소화하는 방법으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Z_x = \frac{[B_z B_{ry}^*][B_x B_{rx}^*] - [B_z B_{rx}^*][B_x B_{ry}^*]}{[B_x B_{rx}^*][B_y B_{ry}^*] - [B_x B_{ry}^*][B_y B_{rx}^*]} \quad (3)$$

여기서, 첨자 rx , ry , rz 는 원격참조 사이트의 각각 북쪽, 동쪽, 수직 하향 자기장 성분을 의미한다. 그러나 원격참조 방법에서 최소화 할 수 있는 것은 비상관

잡음의 영향이며 측정 사이트와 원격 사이트에 무시할 수 없는 상관잡음이 존재할 경우 단일 로버스트 추정보다 왜곡된 결과를 제공할 수 있다. 이러한 문제의 해결을 위해 여러 연구자들(Egbert and Booker, 1986; Chave & Thomson, 1989; Larsen, 1989; Larsen *et al.*, 1996)은 로버스트 방법을 제안하였으며, 원격참조 기법과 결합된 로버스트 과정은 일정 수준의 상관잡음의 존재하는 경우에도 안정적이고 편향되지 않은 결과를 제공하는 것으로 보고되었다. 그러나 원격 사이트와 측정 사이트에 강한 상관잡음이 존재할 경우 편향되지 않은 전달함수의 추정을 보장하기는 어렵다.

2.2. 신호잡음분리(SNS; Signal Noise Separation) 기법

Larsen(1997)과 Oettinger *et al.*(2001)에 의하면 지표면에서 측정되는 자기장은 신호에 의한 부분(S), 상관잡음에 의한 부분(CN; Correlated Noise), 비상관잡음(UN; Uncorrelated Noise)에 의한 부분으로 구분될 수 있다. 위의 관계는 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \vec{B}^S + \vec{B}^{CN} + \vec{B}^{UN} \quad (4)$$

상관 잡음은 주로 근거리에서 존재하는 대규모 건물, 전철 시스템, 고압 전선, 송전탑 등의 인공적인 시설물에 기인하는데(Junge, 1996), 이는 지표에 접지된 전기 쌍극자에 의한 근거리장(near-field) 효과로 설명될 수 있다(Zonge and Hoshes, 1987).

대부분의 시계열 자료가 상관된 잡음(Correlated noise)을 포함하고 있다면, RR 기법도 편향된 전달함수를 추정하게 된다. 이러한 편향을 최소화하는 방법은 원격참조 자료를 이용하여 입력 채널에서 신호와 잡음을 분리하는 것이다. 이 기법은 Larsen *et al.* (1996)에 의해 제안되었고 SNS 기법이라 불린다. 기본적으로 이 기법은 모든 신호를 측정지 특정 소스에 대해 원거리장 또는 근거리장에 위치하는 지에 의존하여 두 개의 그룹으로 나눈다. 일반적으로 근거리장 부분은 측정 주변의 다양한 전자기적 시설 및 장비에 의해 발생하는 모든 잡음의 조합이다.

SNS를 구현하는 첫 번째 단계는 측정된 자기장을 신호와 잡음으로 구분하는 것이다. 이를 위하여 분리 텐서 T를 평가할 원격 참조 자료가 필요하다. 여기서 노이즈가 없는 원격 참조 자료를 B_r , 측정의 자기장 자료를 B라 하자. 예를 들어, 북쪽 성분에 대하여 $B_x = B_r T_x + R_x$ 라는 관계를 가정하고, 이를 자세히 전

개하면

$$\begin{pmatrix} B_{x1} \\ \vdots \\ B_{xN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{x1r} & B_{y1r} \\ \vdots & \vdots \\ B_{xNr} & B_{yNr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{x1} \\ \vdots \\ R_{xN} \end{pmatrix} \quad (5)$$

균질한 소스와 수평 다층 구조에서 T는 단위행렬이다. 그러나 지하의 전기전도도 이상은 수평 자기장의 이상을 일으키므로 T는 일반적으로 주파수 의존적이며 복소수 값이다(Larsen *et al.*, 1996).

잔차 R_x 는 측정의 자기장에 존재하는 비상관 잡음이다. 위의 잔차를 최소화하는 관점에서 R_x 를 최소화 시키면,

$$T_x = (B_r^* B_r)^{-1} (B_r^* B_x) \quad (6)$$

이다. 원격참조 자기장에 잡음이 포함되어 있지 않다고 가정하면, R 은 상관된 잡음과 비상관된 잡음, 즉 $\vec{B}^{CU} = \vec{B}^{CN} + \vec{B}^{UN}$ 으로 취급할 수 있다. 그러면,

$$\vec{B}^{MT} = T \vec{B}^r \quad (7)$$

이고,

$$\vec{B}^{CU} = \vec{B} - \vec{B}^{MT} = \vec{B} - T \vec{B}^r \quad (8)$$

여기서 T는 분리텐서(Separation tensor)이다. 분리된 자기장 성분과 $\vec{E}^{CN} = Z^{CN} \vec{B}^{CN}$ 을 이용하여 분리 방정식을 정리하면,

$$\begin{aligned} \vec{E}(w) &= \vec{E}(w)^{MT} + \vec{E}(w)^{CN} + \vec{E}^{UN} \\ &= Z^{MT}(w) \vec{B}(w)^{MT} + Z^{CN}(w) \vec{B}(w)^{CN} + \vec{E}^{UN} \\ &= Z^{MT}(w) \vec{B}(w)^{MT} + Z^{CN}(w) \vec{B}(w)^{CN} \\ &\quad + Z^{CN}(w) \vec{B}(w)^{UN} - Z^{CN}(w) \vec{B}(w)^{UN} + \vec{E}^{UN} \\ &= Z^{MT}(w) \vec{B}(w)^{MT} + Z^{CN}(w) \vec{B}(w)^{CU} + \vec{R} \end{aligned} \quad (9)$$

이고, $\vec{R} = \vec{E}^{UN} - Z^{CN} \vec{B}^{UN}$ 이다. 식 (9)을 이용하면 다음과 같이 선형 연립방정식을 풀어 Z^{MT} 와 Z^{CN} 을 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{x1} \\ \vdots \\ E_{xN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{x1r}^{MT} & B_{x1r}^{MT} & B_{y1r}^{MT} & B_{x1r}^{MT} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{xNr}^{MT} & B_{yNr}^{MT} & B_{xNr}^{CU} & B_{yNr}^{CU} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{xx}^{MT} \\ Z_{xy}^{MT} \\ Z_{xx}^{CN} \\ Z_{xy}^{CN} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{x1} \\ \vdots \\ R_{xN} \end{pmatrix} \quad (10)$$

이 식을 간단히 텐서 형식으로 나타내면,

$$E_x = (B^{MT} B^{CU}) (Z_x^{MT} Z_x^{CN}) + R_x = \underline{BZ}_x^T + R_x \quad (11)$$

이며, 위의 잔차를 최소화시키면,

$$\underline{Z}_x = (\underline{B}^* \underline{B})^{-1} (\underline{B}^* E_x) \quad (12)$$

이다. 실제 식 (12)는 로버스트 방법이 결합된 과정에 의해 계산되고 전기장 E 는 수직 성분 자기장 H_z 로 대체된다.

상관잡음의 전달함수 Z^{CN} 은 독립적으로 계산되므로, SNS 기법은 측정된 시계열에 포함된 잡음을 연구할 수 있는 기회를 제공한다. Z^{CN} 은 모든 잡음원의 평균된 전달함수임을 유의해야 한다. 그러나 한 개의 잡음이 강도(amplitude)나 밀도(intensity)에서 지배적이라면, Z^{CN} 은 이 잡음원의 특성을 잘 묘사할 수 있다. 이 경우 다른 상관잡음의 영향은 잔차에 남게 된다.

3. 자료처리 결과

본 연구에서는 전파연구소가 용인과 이천에서 운영하는 고정 지자기 관측소에서 2002년 7월부터 2002년 12월까지 총 6개월 동안 획득된 지자기 3성분 자료를 이용하였다. 두 관측소 모두 측정 장비는 플럭스 게이트(Flux-Gate) 형태이며 측정 간격은 5초, 측정 정밀도는 0.01 nT이다. 양준모 등(2004)에 의하면 이천에서 일별 지자기 전달함수의 변화는 유의미한 수준의 변동을 보이지 않으므로 이천과 공간적으로 멀지 않은 용인 사이트의 경우도 이와 유사한 상황으로 판단된다. 따라서 용인과 이천 사이트에서 동일한 기간에 측정된 대표적인 10일 길이의 시계열을 지자기 전달함수 추정을 위해 사용하였다. 측정된 시계열에 대한 전처리 과

정과 전달함수 추정방법은 양준모 등(2004)와 동일하고 추가적으로 RR과 SNS 기법을 적용하였다. Fig. 1은 두 관측소의 지정학적 위치를 보여주는데, 특기할 만한 사항은 용인 관측소의 서쪽 약 5.8 km 지점에 국철 및 경부선이 지나가고 있다는 것이다.

3.1. 단일 및 원격참조 로버스트 추정

이천에서 측정된 지자기장이 원격참조 자료로서 적합한지를 평가하기 위해 용인에서 단일 및 원격참조 로버스트 추정을 수행하였다. Fig. 2는 용인에서의 단일 로버스트 추정 결과를 보여주는데, 약 주기 200초 이하에서 전달함수의 크기가 불안정하고, 주파수에 따른 그 연결성이 매우 떨어짐을 확인할 수 있다. 부드러운 해가 정확하다고 보장할 수 없지만, 부드럽지 않은 해는 필연적으로 잡음에 오염되어 있다. Fig. 3은 이천에서 동일 기간 측정된 자료를 이용하여 RR 기법을 적용한 결과이다. 주기 200초 이하의 전달함수의 크기에서 놀랄만한 향상을 확인할 수 있는데, 단일 추정에서 0.6-0.8 사이의 값을 보이던 전달함수의 크기는 0.2 안팎으로 부드럽게 감소하였다. 또한 추정값의 신뢰도를 나타내는 에러 막대(error bar)의 크기도 상당히 작아졌으며 주파수에 따른 전달함수의 연결성도 향상되었다. 전달함수 위상의 경우 150° 부근에서 120° 이하로 감소하였다. 이는 주기 200초 이하에서 수평 자기장 성분에 존재하던 비상관 잡음이 RR 기법에

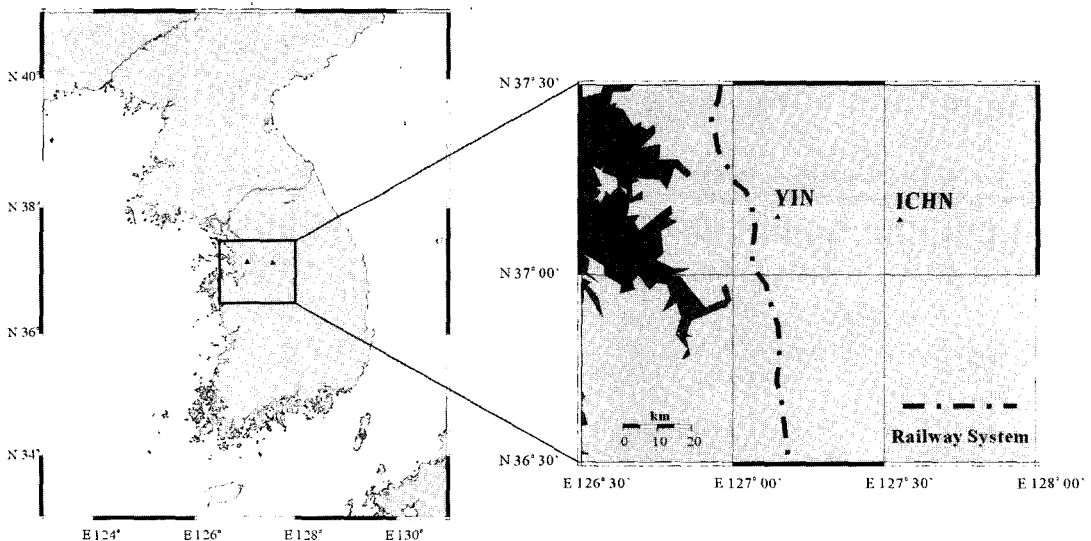


Fig. 1. Geographical map showing the locations of two fixed geomagnetic observatory, Yongin (YIN) and Icheon (ICHN). The left panel shows the electrified railway system Kyung-Boo line running through the western region of YIN and ICHN. The distance between YIN observatory and railway system is about 5.8 Km and the remote site ICHN is located in eastern area 40 Km away from YIN.

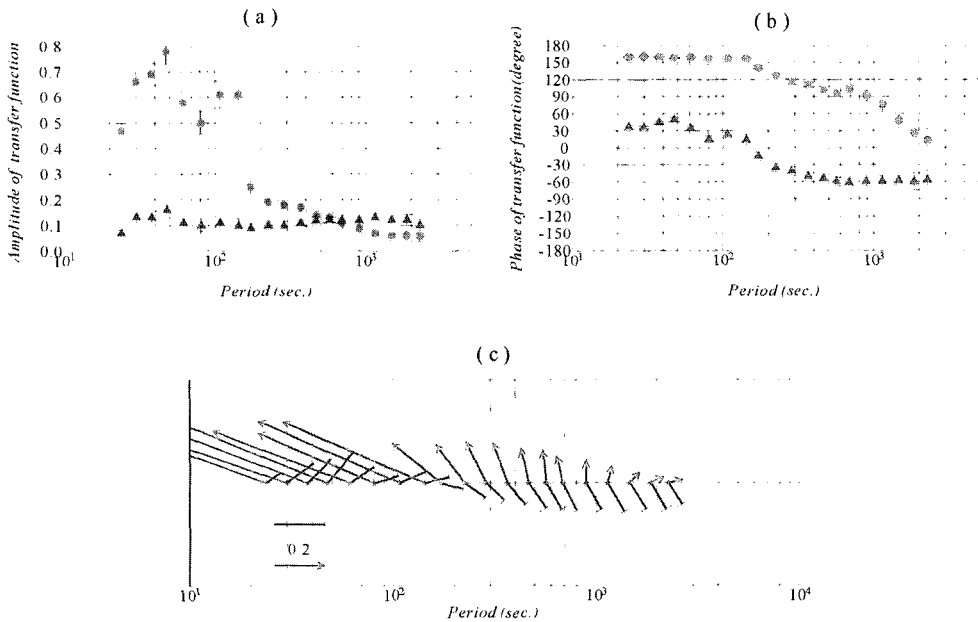


Fig. 2. (a) The amplitude and (b) phase of geomagnetic transfer function computed from single site robust estimations over the broad bands at Yongin Observatory. The panel (c) shows the graphical representations of induction arrows according to (a) and (b). The symbol of circle and triangle in upper panels denote real and imaginary part of induction arrow, and the normal and flat arrow in lower panel represent real and imaginary induction arrows, respectively.

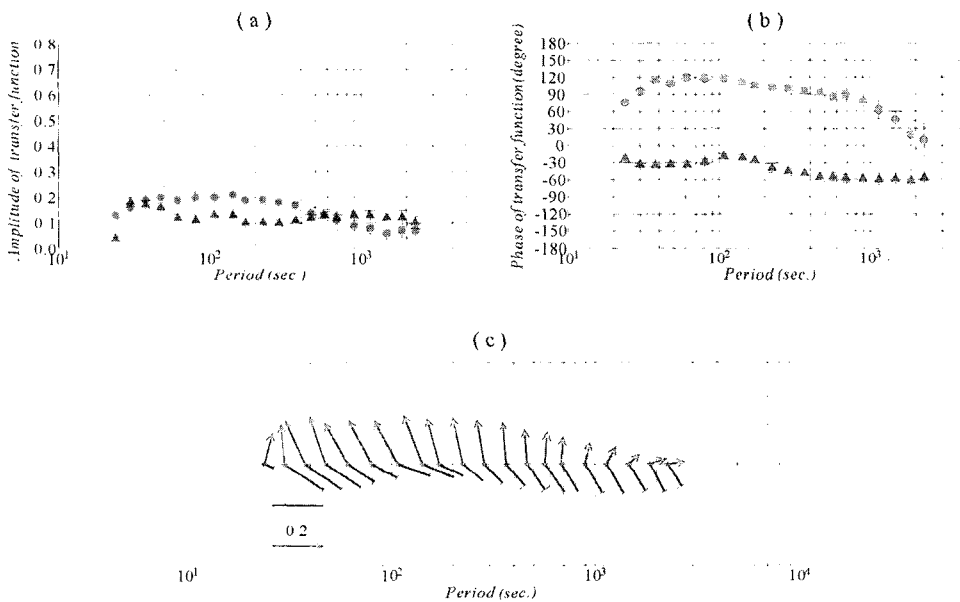


Fig. 3. (a) The amplitude and (b) phase of geomagnetic transfer function computed from remote reference robust estimations over the broad bands at Yongin Observatory. The panel (c) shows the graphical representations of induction arrows according to (a) and (b). The symbol of circle and triangle in upper panels denote real and imaginary part of induction arrow, and the normal and flat arrow in lower panel represent real and imaginary induction arrows, respectively.

의해 감소했기 때문이다. 또한 주기 200초 이상에서는 눈에 띄게 주목할 만한 변화가 보이지 않지만, 보다

부드러운 형태로 크기 및 위상이 조정되었음을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 두 관측소 사이에 상관잡

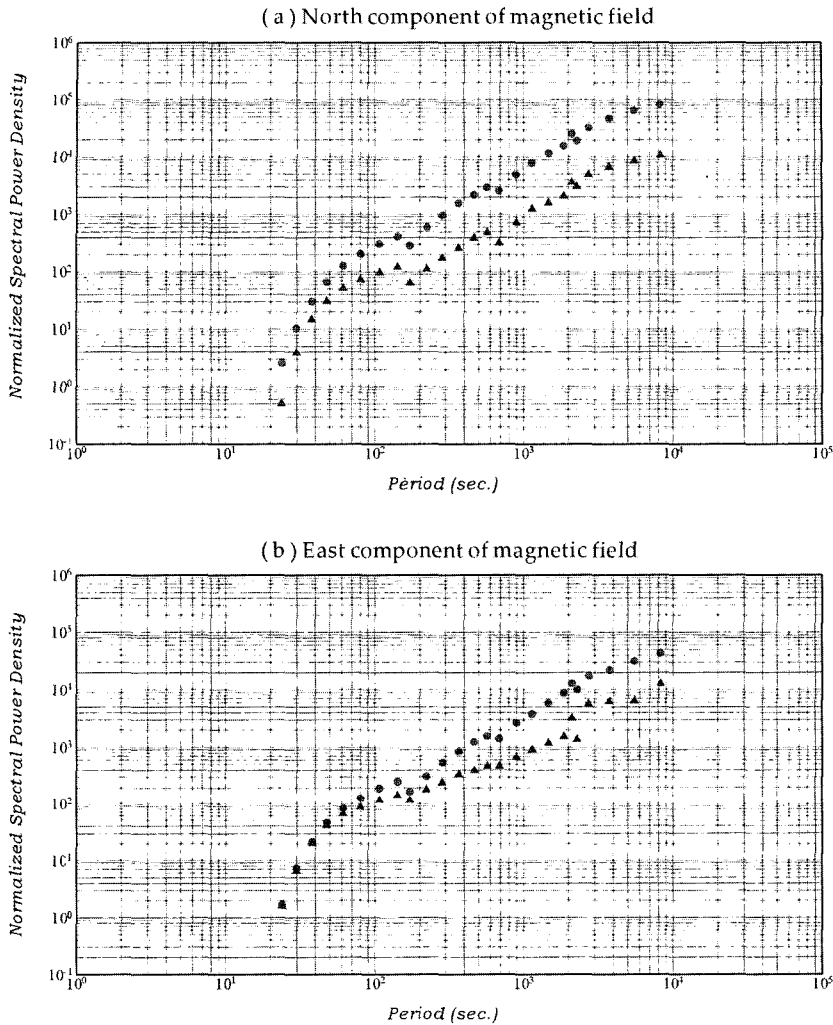


Fig. 4. Horizontal magnetic field signal and noise power spectral densities versus period obtained from Yongin Observatory: (a) north component, (b) east component of magnetic field. The symbol of circle and triangle denote signal and noise power density in a estimated band, respectively.

음의 존재유무는 파악하기 어렵다. 만약 상관잡음이 존재한다면 원격참조 기법을 이용한 추정도 일정 수준의 편향을 피할 수 없다.

한편 RR 기법에서 제공할 수 있는 또 하나의 장점은 실제적인 신호 대 잡음 비를 계산할 수 있다는 것이다(Gamble *et al.*, 1979b). Fig. 4는 남북방향 자기장과 동서방향 자기장의 신호와 잡음의 세기를 주파수별로 나타낸 것이다. 남북방향의 경우 주기 수십초 부근에서 신호의 세기가 약하기는 하지만 잡음보다는 크며 그 이후에는 대략 신호가 잡음보다 10배 이상 강한 세기를 보여준다. 그러나 동서방향 자기장의 경우 주기 200초 이하에서 신호와 잡음의 세기가 거의 차이가

없으며 그보다 장주기에서도 남북방향에 비해 신호 대 잡음비가 높지 않다. 이러한 잡음의 성질이 상관인지 비상관인지는 구분할 수 없지만, 주기 200초 이하에서 동서방향 자기장은 잡음이 신호의 세기와 비슷하므로 용인에서의 단일 로버스트 추정이 상당히 편향될 것임을 쉽게 알 수 있다.

3.2. 신호잡음분리(Signal Noise Separation)에 의한 전달함수

원격참조 자료가 잡음이 거의 없다는 가정을 만족할 경우 전달함수는 SNS 기법을 사용하여 신호에 의한 전달함수(STF; Signal Transfer Function)와 상관잡음

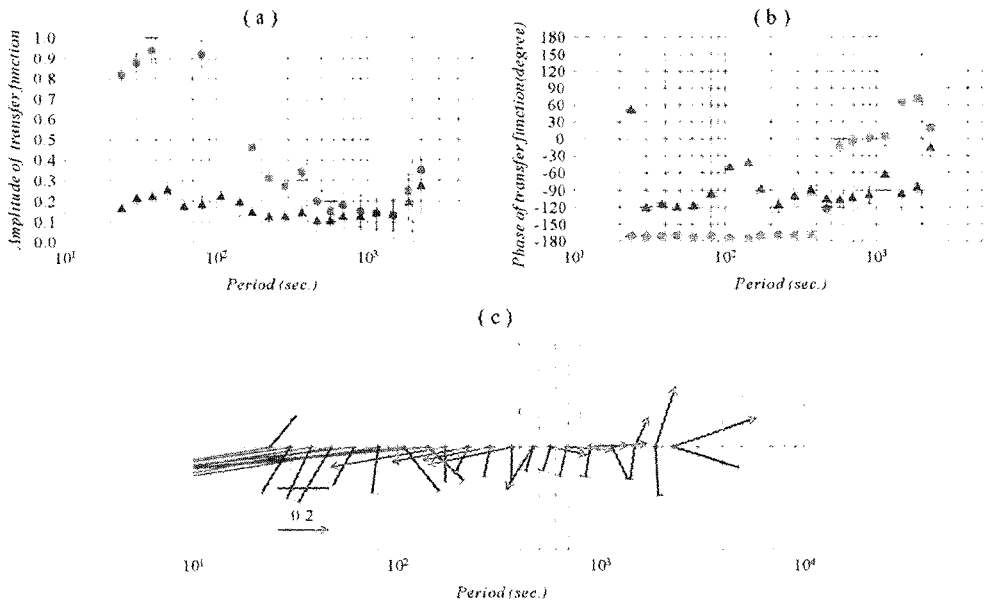


Fig. 5. (a) The amplitude and (b) phase of CNTF (Correlated Noise Transfer Function) computed from SNS (Signal Noise Separation) robust estimations over the broad bands at Yongin Observatory. The panel (c) shows the graphical representations of induction arrows according to (a) and (b). The symbol of circle and triangle in upper panels denote real and imaginary part of CNTF, and the normal and flat arrow in lower panel represent real and imaginary CNTF, respectively.

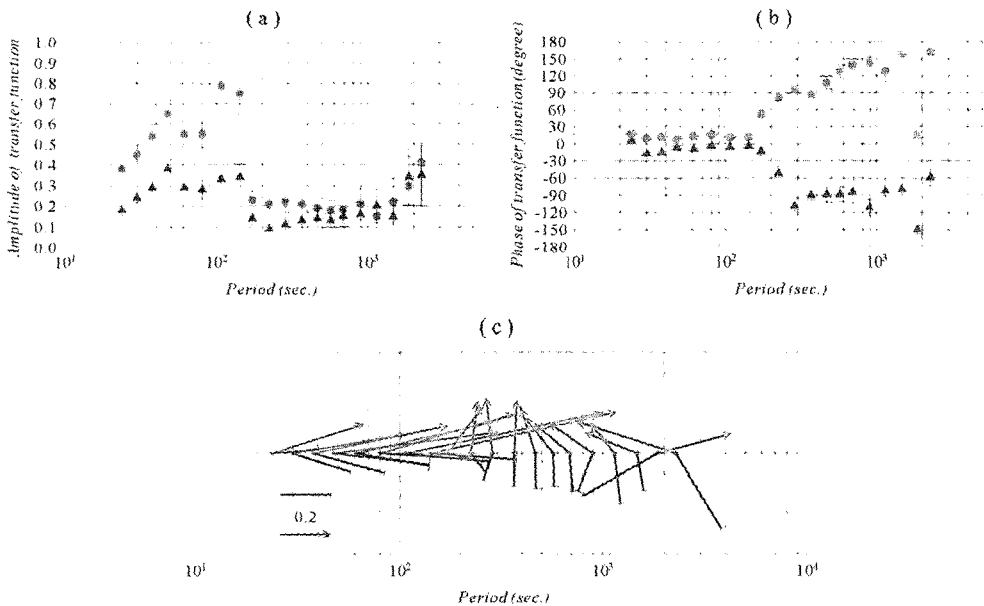


Fig. 6. (a) The amplitude and (b) phase of STF (Signal Transfer Function) computed from SNS (Signal Noise Separation) robust estimations over the broad bands at Yongin Observatory. The panel (c) shows the graphical representations of induction arrows according to (a) and (b). The symbol of circle and triangle in upper panels denote real and imaginary part of STF, and the normal and flat arrow in lower panel represent real and imaginary STF, respectively.

에 의한 전달함수(CNTF; Correlated Noise Transfer Function)로 분리될 수 있다. 위의 가정을 완화하면 원

격참조 사이트와 측정 사이트 간에 공통된 상관잡음이 없다면 전달함수의 분리가 가능하다. 두 관측소 사이

에 상관잡음이 존재하지 않는다면 RR기법 결과와 STF는 거의 유사해야만 하고, 상관잡음이 존재하는 경우 SNS 기법은 상관잡음의 전달함수를 정확하게 분리할 수 없으므로 RR기법 결과와 STF는 서로 다르고 STF 역시 왜곡된 형태의 정보를 제공할 것으로 예상된다.

Fig. 5는 SNS 기법을 사용하여 계산한 CNTF를 나타낸 것인데, 주기 200초 이하에서 전달함수의 위상이 180° 에 근접하는 뚜렷한 패턴을 보여주고 있다. 본 연구에서 전달함수의 위상은 동쪽 수평선을 기준으로 반시계 방향으로 회전한 각으로 정의되므로, 위상 180° 는 전달함수가 남북방향의 자기장에는 거의 상관없이 동서방향의 자기장에만 의존한다는 의미이다. 또한 CNTF가 상관잡음의 전달함수라는 관점에서 볼 때, CNTF의 실수 유도 지시자는 잡음원의 위치를 지시하는 것으로 생각할 수 있다. 위의 두 가지 결과와 용인과 이천의 지정학적 환경, 주기 200초 이하 동서방향 자기장의 신호 대 잡음 비를 고려해 볼 때, 용인 관측소와 이천 관측소에 영향을 끼치는 주된 잡음원은 용인 관측소의 서쪽에 존재하는 국철 및 경부선으로 생각된다. 직류 철도 시스템이 주기 10~100초 대역의 전달함수의 변동 및 편향에 책임이 있다는 양준모 등(2004)과 Egbert *et al.*(2000)연구는 이러한 추측을 뒷받침해 준다.

한편, Fig. 6은 용인에서 얻은 STF를 나타내는데, 단일 로버스트 추정보다도 주파수에 따른 부드러움이나 연결성이 좋지 않으며 전달함수의 위상을 해석하기도 쉽지 않다. 또한 주기 200초 이하에서 감소할 것이라 여겨졌던 전달함수의 편향이 여전히 나타나고 있다. 이는 용인과 이천 사이트 모두 무시할 수 없는 수준의 상관잡음이 존재한다는 사실을 의미한다. 이는 분리된 서의 주파수에 따른 거동에서 확인할 수 있는데,

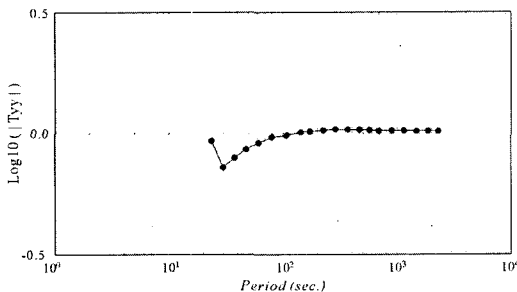


Fig. 7. Separation transfer function between the east component of magnetic field at Yongin and remote site Icheon Observatory. The show a relatively low amplitude under the period of 100 s.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 자기장 성분의 신호와 잡음의 분리가 주기 100초 이하의 주파수 대역에서 성공적이지 못함을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 바처럼, CNTF는 모든 잡음원의 평균된 전달함수이고 단일 잡음원이 강도나 밀도에서 지배적이라면, 다른 잡음원들의 영향은 SFT에 남게 된다. 따라서 지배적인 잡음원만이 CNTF에 반영이 되었고 나머지 잡음들은 여전히 STF에 존재하므로 STF는 단일 로버스트 추정보다 불안정하고 해석하기 힘든 전달함수의 형태를 보여주는 것으로 판단된다. 한편, 주기 수백초 이상의 장주기 대역에서도 STF의 결과가 상당히 왜곡된 것으로 보이는데 이 원인에 대해서는 현재 수준에서 판단하기 어렵다.

4. 결 론

용인 사이트에서 지자기 전달함수의 불편 추정과 잡음의 특성 파악을 위해 RR 기법과 SNS 기법을 적용하였다. RR 기법의 적용으로 단일 로버스트 추정보다 특히 주기 200초 이하에서 부드럽고 연결성이 향상된 전달함수를 추정할 수 있었다. 이는 이천에서의 자기장 자료가 수평자기장의 비상관 잡음을 효과적으로 감소시켰으며 원격참조 자료로서 효용성을 갖는다는 의미이다. 이와 더불어 수평 자기장 성분의 신호와 잡음의 세기를 계산하였는데 동서방향의 자기장이 주기 200초 이하에서 잡음의 세기가 신호의 세기와 비슷함을 확인하였는데, 이러한 신호 대 잡음 비는 주기 200초 이하 단일 로버스트 추정의 편향에 주된 책임이 있는 것으로 보인다.

한편 잡음에 대한 보다 정량적인 분석을 위해 SNS 기법을 적용하였다. SNS 기법이 적용되기 위해서는 원격참조 자료에 잡음이 없어야 하나, 실제 상황은 이 조건을 만족시키지 어렵다. 용인 관측소의 경우 STF와 RR 기법의 결과가 상당한 차이를 보였다. 이는 지배적인 잡음원은 CNTF에 반영되었으나 나머지 잡음들이 여전히 STF에 영향을 미치기 때문이다. 그 결과, STF의 추정값은 단일 로버스트 추정보다 왜곡된 결과를 보여주었다. 그러나 SNS 기법을 통하여 용인 관측소와 이천 관측소 사이에 주기 200초 이하에서 상당한 수준의 상관잡음이 존재함을 확인하였고, CNTF의 위상은 상관잡음원이 용인 관측소의 서쪽에 존재하는 국철 및 경부선이라는 추측을 강하게 뒷받침해 주었다.

결론적으로 SNS 기법은 RR 기법으로 확인할 수 없는 상관잡음의 존재와 잡음원의 방향에 대한 정보를 제공지만, 용인과 이천 관측소처럼 일정 수준의 상관

잡음이 존재할 경우 SNS 기법의 전달함수 추정 결과는 RR 및 단일 로버스트 추정보다 향상된 결과를 보여주기 어렵다. 본 연구에서는 상관잡음의 존재와 잡음원의 위치 파악수준에서 SNS 기법을 적용하였지만, 잡음의 매우 적은 혹은 적어도 측정사이트와 상관잡음이 존재하지 않는 원격참조 사이트가 확보된다면 전달함수 추정의 향상 및 잡음원의 위치 및 성질에 대한 다양하고 정량적인 정보를 획득할 수 있을 것이라 기대된다. 따라서 보다 안정되고 편향이 최소화 된 전달함수 추정을 위해서는 원격참조 사이트 선정에 매우 주의하여야 한다.

사 사

이 연구는 기상청 기상연구소 기상지진기술개발 사업의 「지진해일 예측 및 지진전조탐지기술 개발」의 지원으로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

양준모, 이덕기, 권병두, 윤용훈 (2004) 지자기 및 지자기 전달함수의 시간적 변동성. 한국지구과학회지, 25권, p. 604-614.

Chave, A.D., Thomson, D.J. and Ander, M. (1987) On the robust estimation of power spectra, coherence and transfer functions. *J. Geophys. Res.*, v. 92, p. 633-648.

Chave, A.D. and Thomson, D.J. (1989) Some comments on the magnetotelluric response function estimation. *J. geophys. Res.*, v. 94, p. 14215-14225.

Egbert, G.D. and Booker, J.R. (1986) Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, v. 87, p. 173-194.

Egbert, G.D. and Likelybrooks, D. (1996) Single station magnetotelluric impedance estimation: coherence weighting and the regression M-estimation. *Geophysics*, v. 61, p. 964-970.

Egbert, G.D., Eisel, M., Boyd, O.S. and Morrison, H.F. (2000) Pc3s: source effects in mid-latitude geomag-

netic transfer functions. *Geophysical Research Letters*, v. 124, p. 25-28.

Gamble, T.D., Goubau, W.M. and Clarke, J. (1979a) Magnetotellurics with a remote reference. *Geophysics*, v. 44, p. 55-68.

Gamble, T.D., Goubau, W.M. and Clarke, J. (1979b) Error analysis for remote reference magnetotellurics. *Geophysics*, v. 44, p. 959-968.

Honkura, Y. (1974) Electrical conductivity anomalies beneath the Japan arc. *J. Geomagn. Geoelectr.*, v. 26, p. 147-171.

Jones, A.G. and Jodicke, H. (1984) Magnetotelluric transfer function estimation improvement by a coherence-based rejection technique: Presented at 54th Annual International Meeting, Soc. of Expl. Geophys., Extended Abstract, p. 51-55.

Junge, A. (1996) Characteristics of and correction for cultural noise. *Surv. Geophys.*, v. 17, p. 361-391.

Larsen, J.C. (1989) Transfer functions: smooth robust estimates by least square and remote reference methods. *Geophys. J. Int.*, v. 99, p. 655-663.

Larsen, J.C., Mackie, R.L., Manzella, A., Fiordelisi, A. and Rieven, S. (1996) Robust smooth magnetotelluric transfer functions. *Geophys. J. Int.*, v. 124, p. 801-819.

Oettinger, G., Haak, V. and Larsen, J.C. (2001) Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif. *Geophys. J. Int.*, v. 146, p. 659-669.

Pringle, D., Ingham, M., McKnight, D. and Chamalaun, F. (2000) Magnetovariational soundings across the South Island of New Zealand: difference arrows and the Southern Alps conductor. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, v. 119, p. 285-298.

Shimoizumi, M., Mogi, T., Nakada, M., Yukutake, T., Handa, S., Tanaka, Y., and Uchida, H. (1997) Electrical conductivity anomalies beneath the western sea of Kyushu. Japan, *Geophysical Research Letters*, v. 24, p. 1551-1554

Zonge, K.L. and Hughes, L.J. (1987) Controlled source audio-frequency magnetotelluric, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics Application*, pp. 713-809, ed. Nabighian, M. N., SEG, Tulsa.