

통계적 사전 처리방법을 통한 MT 전달함수 추정의 향상 기법 연구

양준모¹⁾, 권병두²⁾, 이덕기¹⁾, 송윤호³⁾, 윤용훈¹⁾

¹⁾기상연구소 해양기상지진연구실, yjm@metri.re.kr

²⁾서울대학교 지구과학교육과

³⁾한국지질자원연구원 지하수지열연구부

An improvement of MT transfer function estimates using by pre-screening scheme based on the statistical distribution of electromagnetic fields

Junmo Yang^{1)*}, Byung-Doo, Kwon²⁾, Duk-Kee Lee¹⁾, Youn-Ho Song³⁾ and
Yong-Hoon Youn¹⁾

¹ Marine Meteorology & Earthquake Res. Lab.

² Department of Earth Science Education

³ Groundwater & Geothermal Resource Division, KIGAM

Abstract : Robust magneto-telluric (MT) response function estimators are now in standard use in electromagnetic induction research. Properly devised and applied, these methods can reduce the influence of unusual data (outlier) in the response (electric field) variable, but often not sensitive to exceptional predictor (magnetic field) data, which are termed leverage points. A bounded influence estimator is described which simultaneously limits the influence of both outlier and leverage point, and has proven to consistently yield more reliable MT response function estimates than conventional robust approach. The bounded influence estimator combines a standard robust M-estimator with leverage weighting based on the statistics of the hat matrix diagonal, which is a standard statistical measure of unusual predictors. Further extensions to MT data analysis are proposed, including a establishment of data rejection criterion which minimize the influence of both electric and magnetic

outlier in frequency domain based on statistical distribution of electromagnetic field. The rejection scheme made in this study seems to have an effective performance on eliminating extreme data, which is even not removed by BI estimator, in frequency domain. The effectiveness and advantage of these developments are illustrated using real MT data.

Keyword : MT transfer function, BI estimation, M-estimation, RMP (Rejection based on Median Power)

요약: MT 전달함수의 추정과정에서 로버스트 방법의 적용은 현재 전자탐사 분야에서 일반적이다. 적절하게 고안되고 적용된 로버스트 방법은 출력 채널인 전기장에 포함되어 있는 외치의 영향을 감소시킬 수 있으나, HLP(High leverage point)라 불리우는 자기장(입력 채널)의 외치에 종종 민감하지 못하다. 이 문제를 해결하기 위해 HLP의 영향을 최소화할 수 있는 BI(Bounded Influence) 추정이 제안되었고, 전통적인 로버스트 방법보다 신뢰성 있는 전달함수를 제공하는 것으로 보고되었다. 이는 BI 추정이 M-추정을 적용함과 동시에 자기장 성분만으로 결정되는 모자행렬의 통계적인 특성을 고려하여 가중치를 부여하는 방법이기 때문이다. 본 연구에서는 전달함수 추정과정에 BI 추정을 적용하고, 이와 더불어 전처리 단계로서 전자기장의 통계적 분포를 이용해 주파수 영역에서 극단적인 전기장과 자기장 자료의 영향을 감소시키는 기법을 개발하였다. 개발된 전처리 기법은 BI 추정으로 제거될 수 없는 자료를 주파수 영역에서 효과적으로 제거하는 것으로 생각된다. 본 연구에서 개발된 기법의 효율성과 장점은 합성 자료와 현장 자료를 이용하여 도시될 것이다.

주요어: MT 전달함수, BI 추정, M-추정, RMP(Rejection based on Median Power)

1. 서론

MT(Magnetotelluric) 및 GDS(Geomagnetic depth sounding) 탐사는 자연적으로 발생하는 전자기장의 변동을 지표에서 측정하여 지하의 전기전도도 구조를 밝혀내는 방법이다. 두 탐사에서 기본적으로 제공하는 자료는 국지적이며, 주파수 의존적인 전기장과 자기장 사이의 상관관계, 즉 전달함수이다. MT의 경우 이 전달함수는 임피던스 텐서로, GDS의 경우 티퍼 또는 지자기 전달함수로 불리운다. 한편 실제 측정된 (전기장)과 (자기장)은 잡음의 존재 때문에 서로 수직한 두 전자기장 사이에 정확한 선형관계가 성립되지 않으므로 통계적인 방법으로 전달함수 및 그 오차를 추정해야 한다. 전통적인 MT 자료 처리는 최소자승법과 가우스 분포 모델에 기반을

방법으로 추정된 전달함수는 심각하게 편향되어 물리적으로 해석하기 어려운 상황을 빈번히 초래한다. 최근 들어 이러한 상황은 원격참조(Gamble et al., 1979) 기법과 로버스트 M-추정 방법에 의해 상당 부분 극복되었다. 현재 일반적으로 MT 전달함수 추정에 사용되는 방법은 원격참조 기법과 M-추정이 결합된 방법이다(Egbert and Booker, 1986; Chave and Thomson, 1989; Larsen et al., 1996; Smirnov, 2003). 그러나 소스의 비균질성이 존재하고 인공적인 잡음이 심한 환경에서는 로버스트 원격참조(RR) 기법도 물리적 해석이 가능한 전달함수를 추정하는 데 종종 실패한다. 이 상황을 극복하기 위하여 Garcia et al. (1997)는 극단적인 자기장 자료의 영향을 최소화하는 BI(Bounded Influence) 추정을 적용하였고, Chave and Thomson(2004)은 이를 보다 향상시킨 기법을 개발하였다.

위에서 언급된 방법들은 자료에 잡음이 심하지 않다면 편향되지 않고 안정적인 결과를 제공한다. 특히 자연적인 전자장의 세기가 매우 미약한 대역에서 로버스트 추정과 BI 추정도 편향을 초래할 수 있다. 이 문제의 해결 방법은 로버스트 또는 BI 추정 과정 전에 적절한 신호대 잡음비를 가진 자료를 선별하는 전처리 과정을 수행하는 것이다. 이를 위해 현재까지 Egbert and Likelybrooks (1996), Garcia and Jones (2002), Jones and Spratt (2002) 등이 전처리 방법을 제안하였는데, 세 가지 방법 모두 전처리 과정 후에 보다 향상된 결과를 보여주었다. 본 연구에서는 기존 연구들에서 제시된 M-추정 및 BI 추정 방법을 적용하고 더불어 한반도에서 측정되는 전자장의 특성을 고려하여 새로운 전처리 과정을 제시한다. 한반도는 고도의 산업화와 도시화 과정에 의해 측정 사이트 주변에 다양한 인공 잡음원의 존재가 일반적이고, 지표의 전기비저항이 매우 높기 때문에 잡음에 의한 영향이 먼 거리에서도 무시할 수 없을 정도로 크다. 따라서 코히런스 소팅과 같은 기법을 적용하였을 경우, 잡음원에 의한 자료가 선택되고 실제 지하 정보를 포함하고 있는 자료를 거부할 가능성이 크며, 추정된 전달함수는 최소자승 추정보다 불안정하며 물리적인 해석이 불가능한 경우가 자주 발생한다. 이러한 상황을 극복하기 위해서 본 연구에서는 각 전자기장의 통계학적 분포를 바탕으로 비정상적인 자료가 처리과정에 포함되지 않도록 하는 기준을 개발하였다. 개발된 추정방법의 성능 및 효율성을 검증하기 실제 자료에 적용하여 그 결과를 분석한다.

2. 자료처리 방법

시간영역에서 처리된 자료를 주파수 영역으로 변환하기 위해서 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)과 인수 4 의 병렬 제거법(Cascade decimation)을 결합하여 사용하였는데, 처리 방법은 양준모 등(2004)과 동일하다. 한편, Vozoff(1986)에 의하면 일반적으로 신호의 강약은 각 자료의 기여도에 비례하고 가장 큰 신호들이 불규칙한 잡음의

분출에 기인하는 경우가 적지 않다. 한반도와 같이 주변에 인공적인 잡음원이 산재하고 있는 경우 매우 큰 신호들은 잡음원에서 기인할 가능성이 크다. 본 연구에서는 이러한 신호들의 영향을 최소화하고 안정적인 추정값을 획득하기 동일 주파수 밴드에서 각 자료마다 중간파워와의 차이를 계산한 후, 로버스트 통계학(robust statistics)에서 사용되는 에리 스케일 d 로 정규화 하여, 기준값을 초과하는 자료는 추정 단계에서 제외되었다. 이 때 에리 스케일 d 의 결정이 매우 중요하며, Chave and Thomson (1989)에 의하면 동일 주파수 밴드에서 각 파워의 분포는 레일레이(Rayleigh) 분포를 따르므로, 이를 고려하여 에리 스케일 d 를 결정하였다.

위의 통계학적인 전처리 단계를 RMP(Rejection based on Median Power)라 명명하였고, 제안된 방법은 주파수 추정 단계에서 극단적으로 큰 파워뿐만 아니라 작은 파워를 갖는 자료의 영향을 최소화할 수 있다. 이와 더불어 Egbert and Likelybrooks(1996)과 Smirnov(2003)이 제안한 코히런스 소팅(coherency sorting) 방법도 주파수 성분 추정 단계에 적용하였다. 그러나 자료에 상당한 수준의 잡음이 포함되어 있어 신호대 잡음비가 낮은 경우 코히런스 소팅은 유용한 정보를 포함하고 있는 자료를 제거할 가능성이 크다. 이는 근거리장 효과에 의한 잡음에서 명확하게 확인된다. 예를 들어, 잡음원이 근거리장 범위에 존재할 때, 서로 수직한 전기장과 자기장은 위상차가 거의 없으므로, 코히런스는 1에 가까운 값을 갖고, 코히런스 소팅에 의해 유용한 정보로서 채택이 될 것이다. 반대로 실제 지하 정보를 포함하고 있는 코히런스가 낮은 자료는 거부될 것이다. 한반도의 경우처럼 지표의 전기비저항이 높고 주변에 인공적인 잡음원이 산재한 상황에서 코히런스 소팅의 적용은 전달함수를 편향시킬 수 있는 가능성이 매우 크므로 상황에 따라 제한적으로 적용되어야 한다.

3. 자료처리 결과 및 토의

본 연구에서 새롭게 제안된 전처리 방법인 RMP 기법을 제주도에서 측정된 현장 자료(Jeju-1, Jeju-2)에 적용하여 RMP 기법 전(Fig. 1, Fig. 3)과 후의 결과(Fig. 2, Fig. 4)를 분석하였다. 주목할 만한 점은 코히런스 정렬 기법을 적용하지 않았음에도 불구하고 대부분 대역에서 RMP 기법 후 서로 직교하는 전기장과 자기장의 코히런스가 전반적으로 향상되었다는 것이다(Fig. 2, Fig. 4). 그러나 Jeju-2의 주기 10초 부근 대역의 경우 대역 코히런스가 RMP 기법 적용 후 감소하였는데, 이는 대역 코히런스가 높은 근거리장 효과를 RMP 기법이 성공적으로 제거했기 때문에 나타나는 결과로 보인다. 본 연구에서 도시하지는 않겠지만, 코히런스 정렬 기법을 두 자료(Jeju-1, Jeju-2)에 적용한 결과, 대부분 대역에서 전달함수의 심각한 편향이 발생했고, 물리적으로 거의 해석이 불가능한 결과를 보여주었다.

일례를 들어, Jeju-2 자료의 경우, 10 초 대역에서 RMP 기법 적용을 하지 않았을 경우 XY 모드에서 상당히 높은 코히런시를 가졌다. 이 자료에 코히런시 정렬을 적용하면 RMP 기법에 의해서 제거된 자료들이 전달함수 추정 과정에서 선택될 것이고, 이 세그먼트들은 필연적으로 전달함수를 편향시키는 데 기여하게 된다.

기본적으로 MT 탐사에서는 잡음이 적은 환경에서 서로 직교하는 전기장과 자기장의 코히런스가 높을 것이라고 가정하고, 이것은 코히런시 정렬의 핵심적인 기본 가정이다. 그러나 한반도의 경우처럼 주변에 많은 인공 잡음이 존재하고, 높은 지표 비저항으로 인해 이들의 영향이 먼 거리까지 미칠 것이라는 사실을 고려하면, 상당수의 잡음은 근거리장 효과로 나타날 것이고 서로 직교하는 전기장과 자기장의 코히런시도 매우 높을 것이라 예상할 수 있다. 특히 자연적인 전자기장의 신호가 매우 미약한 주파수 대역에서, 이 상황은 더욱 명확하다. 따라서 이런 환경에서 코히런시 정렬 기법의 적용은 실제 정보를 가지고 있는 정보를 거부하고 잡음에 의한 자료를 선택할 가능성이 크므로 그 적용 유무에 대한 주의 깊은 고려가 요구된다.

한반도는 고도의 산업화, 도시화 및 인공적인 잡음들이 멀리 영향을 미칠 수 있는 높은 지표 전기비저항으로 인해 대부분의 MT 및 GDS 탐사 지역은 상당한 전자기적 잡음에 노출되어 있다. 또한 인공적인 잡음의 다양성으로 인해 잡음의 시간적, 공간적 특성을 파악하는 것도 쉽지 않은 상황이다. 본 연구에서 개발된 기법은 시, 공간적으로 제한적인 자료에 적용되었기 때문에 한반도에서 측정된 모든 자료에 대해 항상 향상된 결과를 도출할 수 있다는 보장은 할 수 없다. 그러나 새롭게 제안된 RMP 기법이 자료에 명확하게 나타났던 근거리장 효과를 최소화하였고, 코히런시 정렬기법을 사용하지 않았음에도 불구하고 대부분의 주파수 대역에서 서로 직교하는 전기장과 자기장의 코히런시를 전반적으로 향상시켰음을 확인하였다. 향후 한반도에서 측정된 다양한 MT 및 GDS 자료에 본 연구에서 개발된 기법이 적용된다면, 잡음에 대한 보다 심층적인 이해와 이러한 잡음의 영향을 최소화할 수 있는 기법에 대한 단서를 제공할 것이라 기대된다.

사사

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

참고문헌

양준모, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2004, 이천관측소에서 측정된 지자기장 및 지자기 전달함수의 시간적 변동성, 한국지구과학회지, 25, 604-614.

- Chave, A. D. and Thomson, D. J., 1989, Some comments on magnetotelluric response function estimation, *J. geophys. Res.*, **94**, 14215-14225
- Chave, A. D. and Thomson, D. J., 2004, Bounded influence magnetotelluric response function estimation, *Geophys. J. Int.*, **157**, 988-1006.
- Egbert, G. D. and Booker, J. R., 1986, Robust estimation of geomagnetic transfer functions, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **87**, 173-194.
- Egbert, G. D. and Likhlybrooks, D., 1996, Single station magnetotelluric impedance estimation: coherence weighting and the regression M-estimate, *Geophysics*, **61**, 964-970.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M. and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with a remote reference, *Geophysics*, **44**, 55-68.
- Garcia, X., Chave, A. D. and Jones, A. G., 1997, Robust processing of magnetotelluric data from auroral zone, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1451-1468.
- Garcia, X. and Jones, A. G., 2002, Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding, *Geophysics*, **67**, 448-458.
- Jones, A. G. and Spratt, J., 2002, A simple method for deriving the uniform field MT responses in auroral zones, *Earth Planets Space*, **54**, 443-450.
- Larsen, J. C., Mackie, R. L., Manzella, A., Fiordelisi, A. and Rieven, S., 1996, Robust smooth magnetotelluric transfer functions, *Geophys. J. Int.*, **124**, 801-819.
- Smirnov, M. Yu., 2003, Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point, *Geophys. J. Int.*, **152**, 1-7.
- Vozoff, K., 1986, Magnetotelluric Methods, *Soc. Expl. Geophys. Reprint Ser. No. 5*, Soc. Expl. Geophys., Tulsa, OK.

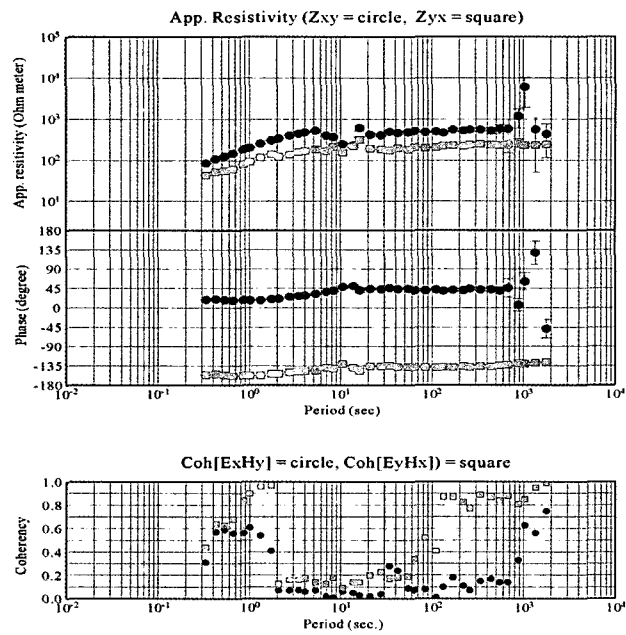


Fig. 1 The apparent resistivity (top), phase (middle) and partial coherency (bottom) between mutually orthogonal electrical and magnetic fields of real MT data, Jeju-1, without RMP technique. The apparent resistivity around the period of 10 seconds is obviously downward biased, and over 1000 seconds have somewhat random appearances, especially, in XY mode.

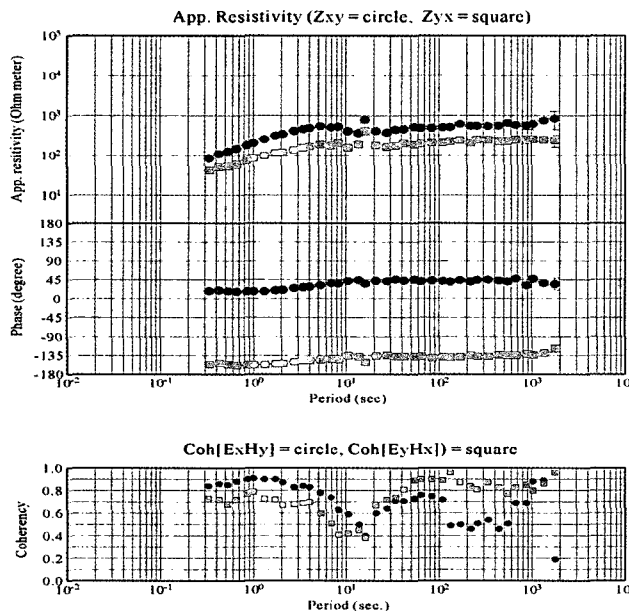


Fig. 2 The apparent resistivity (top), phase (middle) and partial coherency (bottom) between mutually orthogonal electrical and magnetic fields of real MT data, Jeju-1, with RMP technique. The apparent resistivity around the period of 10 seconds is smoothly connected to adjacent periods, and over 1000 seconds converges on consistent values in XY mode.

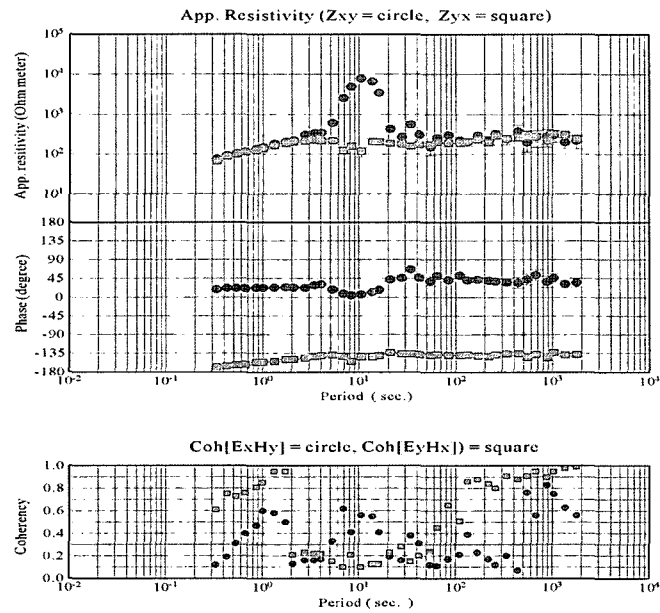


Fig. 3 The apparent resistivity (top), phase (middle) and partial coherency (bottom) between mutually orthogonal electrical and magnetic fields of real MT data, Jeju-2, without RMP technique. The apparent resistivity and phase around the period of 10 seconds show a typical near-field effect, especially, in XY mode.

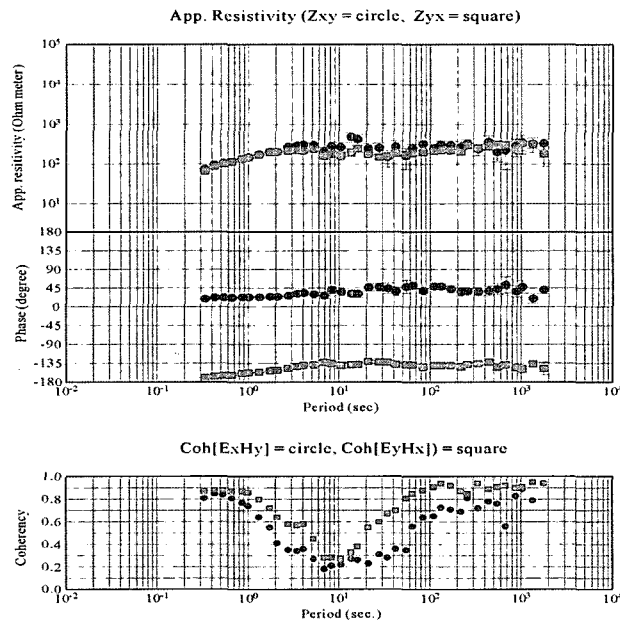


Fig. 4 The apparent resistivity (top), phase (middle) and partial coherency (bottom) between mutually orthogonal electrical and magnetic fields of real MT data, Jeju-2, with RMP technique. The apparent resistivity and phase around the period of 10 seconds is smoothly connected to adjacent periods in XY mode.