

공간 모델링을 이용한 자기지전류 탐사의 전자기 잡음 예측

이춘기^{1*} · 이희순² · 권병두¹

¹서울대학교 지구과학교육과

²경인교육대학교 과학교육과

Prediction of Electromagnetic Noise using Spatial Modelling in Magnetotellurics

Choon-Ki Lee^{1*}, Heuisoon Lee² and Byung-Doo Kwon¹

¹Seoul National University, Dept. Earth Science Education

²Gyeongin National University of Education, Dept. Science Education

요약 : 자기지전류 탐사의 적용에 있어 인공잡음의 영향은 탐사의 승패를 좌우하는 중요한 요소이며 인공잡음의 영향을 최소화할 수 있는 탐사의 설계와 자료처리가 요구되고 있다. 이 연구에서는 수치공간자료를 이용한 공간모델링을 통해 MT 주파수 대역에서의 잡음을 예측하고 실제 탐사 자료와 비교분석하여 MT 잡음 모델링의 가능성을 살펴보았다. 수치지도로부터 추출된 잡음원일 가능성이 높은 건물, 도로, 고압 송전선에 의해 발생하는 전자기장의 강도를 지하매질의 전기전도도에 따른 전자기파의 전파 특성을 고려하여 예측하는 잡음모델을 제안하였다. 제안된 잡음모델로부터 예측된 잡음 파워와 실제 탐사를 통해 측정된 MT 자료와의 상관도 분석을 수행한 결과, 전반적으로 전기장에서는 넓은 주파수 대역에서 높은 상관관계를 보이는 반면 자기장은 60 Hz 부근의 대역에서만 상관관계를 가진다. 이 연구에서 제안된 공간 모델링을 통한 잡음 예측은 특히 고도로 산업화되어가는 도시 주변지역에서의 MT 탐사를 수행하는데 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

주요어 : 자기지전류 탐사, 인공 잡음, 잡음모델, 공간 모델링

Abstract : The quality of MT (magnetotellurics) data highly depends on the level of artificial noise from industrial sources. We have conducted the feasibility study of MT noise modelling using digital spatial data and spatial modelling through the comparison between the predicted and the measured MT noises. A simple noise model predicting the intensity of electromagnetic field radiated from the latent noise sources, that is, the electric facilities in the building, road and high-voltage powerline, is developed in consideration of the propagation property of electromagnetic waves. From the analysis of correlation between the predicted and the measured noise power, the correlation coefficients of electric field are higher than those of magnetic field in whole frequency band. The magnetic field component has the high correlation in the narrow band near 60 Hz only. The spatial noise modelling proposed in this study would provide some useful informations for the MT surveys in the noisy environment like urban area.

Keywords : magnetotellurics, artificial noise, noise model, spatial modelling

서론

국내에서 전기 및 전자 탐사를 수행함에 있어서 주변에 없이 많은 잡음 요소들이 존재한다. 과도한 전자기 잡음은 전기 및 전자 탐사 자료의 질을 떨어뜨리는 중요한 잡음요소이며 인공 송신원을 사용하지 않는 MT 탐사의 경우 인공 전자

기 잡음 수준은 탐사의 승패를 좌우하기도 한다. MT 탐사는 $10^5 - 10^{-5}$ Hz에 이르는 매우 넓은 주파수 대역을 사용하므로 이 대역에 속하는 자연적인 전자기 신호와 인공적인 신호들이 다양하게 존재하여 주파수 대역에 따라 MT 신호의 전자기적 특성들이 다르다. 예를 들면, 주변 전력선에서 방출되는 60 Hz 전자기파는 탐사 측정에서 평면파 가정을 만족하기 힘들기 때문에 자연적인 전자기장을 심각하게 왜곡시키는 인공잡음으로 인식되고 있다. 또한, 소위 "dead band"라고 불리는 1 - 0.01 Hz 대역은 자연 전자기장의 세기가 매우 약하기 때문에 임피던스의 정확한 추정이 매우 어렵다. 특히, 주변에 인공적인 잡음이 존재하는 경우, 임피던스의 값이 매우 불안정해지거나 심각하

2005년 9월 5일 접수; 2005년 11월 21일 채택

*Corresponding author

E-mail: cklee92@snu.ac.kr

Address: Geophysics Laboratory, Department of
Earth Science Education, Seoul National University,
Sillim-dong, Kwanak-gu, Seoul, 151-742 Korea

전자기 잡음 모델

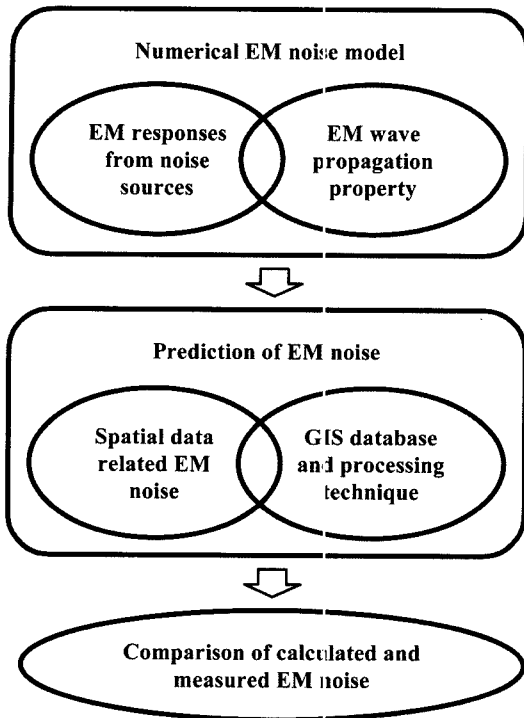


Fig. 1. Strategy for the geo- electromagnetic noise analysis.

게 왜곡되는 현상을 보인다. 즉, 자기장의 잡음으로 인해 겉보기 비저항이 하향 왜곡(downward bias)되거나 전기장의 잡음으로 인해 상향 왜곡(upward bias)되는 양상을 나타내며, 주변 잡음원의 위치에 따라 V자형 겉보기 비저항 양상을 나타내기도 한다. 선행 연구들에 의하면 전기 철도, 인접한 도시 등이 이러한 심각한 왜곡 현상을 일으키는 것으로 알려져 있다 (Qian and Pedersen, 1991; Iliceto and Santarato, 1999). 이 논문은 인공 송신원에 의한 잡음 수준을 모델링함으로써 탐사 현장 주변의 전자기 환경을 결정하여 최적화된 탐사를 설계하거나 자료처리의 사전 정보로 이용하기 위한 유용한 정보를 추출하는 것이 목적이다.

공간적으로 분포된 잡음의 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 다음의 세 가지 단계가 필요하다(Fig. 1). 첫째, 잡음원의 분포, 전자기 잡음의 전파를 근사적으로 정의할 수 있는 수학적 모델이 필요하다. 둘째, 정의된 모델을 이용하여 잡음의 영향을 효과적으로 계산할 수 있는 방법론이 필요하다. 최근 들어 지리정보시스템(GIS)의 발달에 의해 인공구조물들에 대한 공간자료가 방대하게 축적되고 있어 수학적 모델을 구현하는데 있어 GIS 기법의 적용이 효과적인 대안으로 생각된다. 마지막으로, 모델 파라미터들의 결정과 보다 신빙성 있는 잡음 수준을 규정하기 위해서는 모델로부터의 결과를 실제 측정 자료와 비교 분석할 필요가 있다. 이를 위해서는 한반도 중부 지역에서 광범위하게 실시된 MT 탐사자료를 이용하였으며 향후 더욱 많은 자료가 축적됨에 따라 보다 정확하고 보편적인 모델을 개발할 수 있을 것이다.

인공 잡음원 모델

인구밀도가 높은 도시, 대단위 공업단지, 발전소나 변전소와 같은 대용량의 전기시설물, 전기 철도, 고압 송전선 등은 강력한 전자기장을 방출하는 대표적인 인공잡음원이다. 바람이나 지진동에 의해 자기장 센서에서 발생하는 잡음과 온도 변화나 수리화적인 원인에 의한 자연전위의 변화 등도 MT 탐사에 있어 잡음으로 인식되고 있으나 이 연구에서는 인공 시설물에서 방출되는 전자기장의 영향만을 고려한다.

잡음원 모델을 정의하기 위해서는 잡음원의 형태와 분포 모델을 가정하여야 한다. 지하에 유도되는 임의의 전류 분포는 다극자(multipole)들의 급수로 표현될 수 있으며 이 급수의 주된 항들은 전기 쌍극자(electric dipole), 자기 쌍극자(magnetic dipole), 전기 4극자(electric quadrupole) 순으로 구성되어 있다(Stratton, 1941). 따라서 임의로 분포하는 잡음 송신원을 전기 쌍극자로 가정하는 것은 유의미한 근사가 될 수 있다. 특히, 지표면 위에 분포하는 송신원의 경우 기하학적인 면에서 볼 때 수평 전기쌍극자로의 근사가 타당하며 이러한 근사적 적용은 Qian and Pedersen (1991)의 도시에 의한 전자기 간섭 문제나 Iliceto and Santarato (1999)의 직류 전기철도에 의해 발생하는 전자기 간섭 문제에 적용된 바 있다.

잡음원 분포 모델은 각 잡음원의 기하학적 형태나 에너지 강도 등 개별적인 파라미터들에 의해서 결정되어야 하지만 대부분 명확하게 알려져 있지 않다. MT 탐사의 경우 좋은 자료의 질을 확보하기 위해 최대한 인공 시설물들로부터 최대한 멀리 떨어진 탐사 축점을 선택하는 것이 일반적이며 축점 간격 역시 수 km에 달하므로 이 연구에서는 잡음원을 점원(point source)의 분포형태로 가정하며 잡음원의 에너지 강도 역시 명확하지 않으므로 같은 종류의 잡음원은 같은 크기의 강도를 가지는 것으로 가정한다. 따라서 이 논문에서는 잡음원의 형태를 균일한 강도를 가지는 점원의 수평 전기 쌍극자로 가정한다.

1차원 구조의 매질에서 전기 쌍극자에 의해 발생하는 전자기장의 이론은 매우 잘 알려져 있다. Fig. 2와 같이 x 방향으로 놓여져 있는 수평 쌍극자에 의한 전자기 반응을 계산하기 위하여 준정적(Quasi-static) 근사를 적용하면 원통형 좌표계에서의 전기장과 자기장은 다음과 같다(Zonge and Hughes, 1991).

$$\begin{aligned}
 E_r &= \frac{Idl\cos\phi}{2\pi\sigma r^3}[1 + e^{-ikr}(1 + ikr)] \\
 &= \frac{i\mu\omega Idl\cos\phi}{2\pi r(ikr)^2}[1 + e^{-ikr}(1 + ikr)] \\
 &= E_0(r)E_1(kr)\cos\phi
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

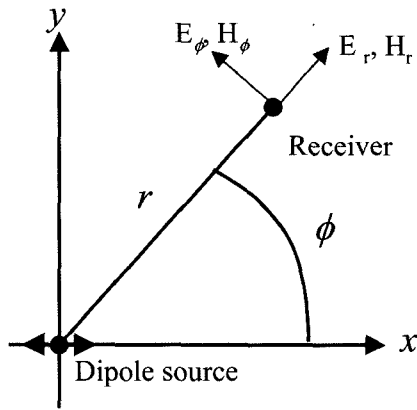


Fig. 2. Geometrical parameters of horizontal electric dipole. The dipole source is oriented along the x -direction. The polar coordinates are used for calculation.

$$\begin{aligned} E_{\phi} &= \frac{Idl \sin \phi}{2\pi\sigma r^3} [2 - e^{-ikr}(1 + ikr)] \\ &= \frac{i\mu\omega Idl \sin \phi}{2\pi r (ikr)^2} [2 - e^{-ikr}(1 + ikr)] \\ &= E_0(r)E_2(kr) \sin \phi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_r &= \frac{Idl \sin \phi}{2\pi r^2} \left\{ 3I_1\left(\frac{ikr}{2}\right)K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{ikr}{2} \left[I_1\left(\frac{ikr}{2}\right)K_0\left(\frac{ikr}{2}\right) - I_0\left(\frac{ikr}{2}\right)K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) \right] \right\} \\ &= H_0(r)H_1(kr) \sin \phi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_{\phi} &= \frac{Idl \cos \phi}{2\pi r^2} \left[I_1\left(\frac{ikr}{2}\right)K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) \right] \\ &= H_0(r)H_2(kr) \cos \phi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, I 는 전류, dl 은 쌍극자 길이, k 는 파수(wave number), σ 는 전기전도도, I_m , K_m 은 수정 베셀 함수를 나타낸다. 식 (1)-(4)로부터 전기장과 자기장은 송신원과의 기하학적 거리 r , 파수와 거리의 곱 kr , 방위각 ϕ 의 함수로 주어짐을 알 수 있다. 여기서, 파수와 거리의 곱의 절대값 $|kr|$ 은 유도 상수(induction number)라고 불린다.

전자기장의 전파 특성

전자기장은 기하학적 감쇠 외에도 전도성 매질을 통하여 전파할 때 주변 매질에 발생하는 유도 전류에 의해 감쇠되는 특성을 가지며 매질의 전기전도도에 따라 감쇠 정도가 달라진다. 공간상에 분포하는 잡음원으로부터 전파되는 전자기파를 정확하게 모델링하기 위해서는 이러한 감쇠특성을 고려할 필요가 있다. 식 (1)-(4)를 이용하면 균질한 매질에서의 전자기장의 감쇠를 정확하게 계산할 수 있으나 일반적으로 지하구조는 불균일한 구조를 가지고 있으므로 균일 구조로 가정하기가 어렵

다. 2차원 혹은 3차원 구조의 수치모델링은 매우 많은 계산과 시간을 필요하기 때문에 측정 주변에 분포하는 모든 잡음원의 효과를 계산하는 것은 거의 불가능하므로 복잡한 전기비저항 분포에서의 전자기장 감쇠 정도를 적절히 근사할 수 있는 방법이 필요하다.

평면파 전자기장이 지하로 투과하면서 $1/e$ 만큼 감쇠하는 깊이를 표피심도(skin depth)라고 하며 다음과 같이 지하 매질의 전기비저항(ρ)과 주파수(f)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5)$$

즉, 전기비저항이 클수록 깊이까지 전파하며 전기비저항이 작을수록 감쇠가 심함을 의미한다. 이러한 특성을 고려하여 전자기장의 감쇠 특성을 근사적으로 고려하기 위하여 다음과 같이 지전기 거리(geoelectric distance)를 정의하도록 하겠다. 즉, ρ 의 전기비저항을 가지는 매질에서의 기하학적 거리(Euclidean distance)를 기준 매질에서 같은 정도의 감쇠가 일어나는 거리로 변환하는 것이다.

$$r' = \frac{r}{\sqrt{\rho/\rho'}} \quad (8)$$

여기서 r' 는 지전기 거리, r 은 기하학적 거리이며, ρ' 는 기준 전기비저항(reference resistivity)이라고 하자. 기준이 되는 지역의 전기비저항(ρ')이 $1000 \Omega\text{m}$ 라고 하면 어떤 지역의 전기비저항이 $100 \Omega\text{m}$ 일 때 이 지역에서의 지전기 거리는 $r' = \sqrt{10}r$ 이므로, 기준 매질에서 만큼 떨어진 지점에 평면파의 송신원이 위치한 것과 같다. 같은 지전기거리를 가지는 곳을 연결한 선을 등지전기거리선(Equi-geoelectric distance line)이라고 한다면 전기비저항이 높은 지역에서는 등지전기거리선이 중심으로부터 멀어지며 반대로 전기비저항이 낮은 지역에서는 등지전기거리선이 가까워진다(Fig. 3a). 한편, 유도 상수(induction number)를 지전기 거리와 기준매질의 파수를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$|kr| = r/\delta = r'/\delta = |k'r'| \quad (9)$$

여기서 δ 와 k' 는 ρ' 의 전기비저항을 가지는 매질에서의 표피심도와 파수이다. 따라서, 어떤 매질에서의 전자기장을 계산하는데 있어서 기하학적 거리와 그 매질의 파수를 이용하는 대신 지전기 거리와 기준매질의 파수를 이용할 수 있으며 이러한 방법은 공간자료 처리기법들을 이용하여 공간상의 많은 송신원의 효과를 근사적으로 계산하는데 용이하게 이용될 수 있다.

Fig. 3b와 같이 수평방향으로 서로 다른 전기비저항을 가지는 경계에서의 예를 들어 보자. 기준 전기비저항(ρ_1)을 ρ_1 이라고 한다면 ρ_1 의 전기비저항을 가지는 지역에서는 지전기 거리는 기하학적 거리와 같다. 반면, ρ_2 의 전기비저항을 가지는 지역에서의 지전기 거리 $r_2 = r_1/\sqrt{\rho_2/\rho_1}$ 가 된다. $\rho_2 > \rho_1$ 이면

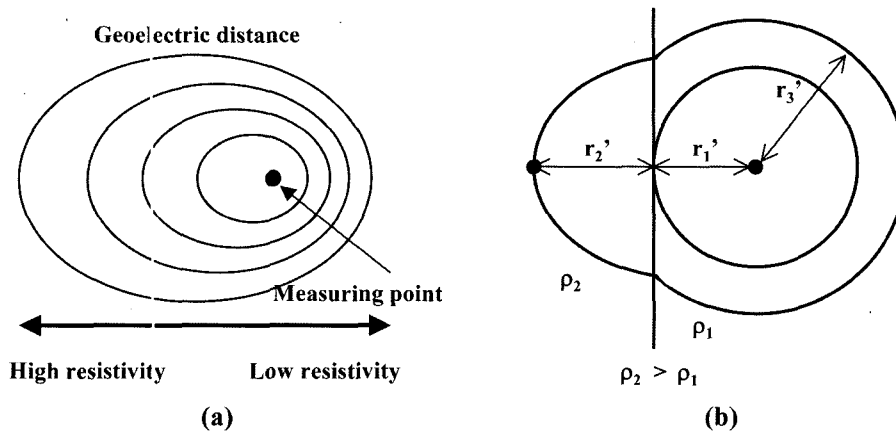


Fig. 3. (a) Conceptual distribution of equi-geolectric distance line. Each contour line represents the same geolectric distance. (b) An example in the case of the horizontal contrast resistivity. If r_1' , r_2' and r_3' are the geolectric distances, $r_1' + r_2' = r_3'$.

지전기 거리가 기하학적 거리보다 작아지므로 $r_1' + r_2' = r_3'$ 가 될 수 있다. 유한 송신원의 기하학적 감쇠를 고려하지 않는다면, 수평적으로 전기비저항이 복잡하게 변하는 구조에서는 기하학적 거리 대신 지전기 거리를 사용함으로써 전기비저항에 따른 전자기장의 감쇠 특성을 근사적으로 고려할 수 있다.

유한 송신원(finite source)의 경우, 평면파와는 달리 기하학적 감쇠가 발생하므로 감쇠특성이 유도상수 뿐만 아니라 기하학적 거리와도 관계를 가지고 있다. 예를 들면, 근거리장($r \ll \delta$) 영역에서는 전기장의 수평성분이 ρ 에 비례하고 r^3 에 반비례하며 자기장의 수평성분은 ρ 에는 무관하고 r^2 에 반비례한다. 원거리장($r \gg \delta$) 영역의 경우 전기장의 수평성분은 역시 ρ 에 비례하고 r^3 에 반비례하지만 자기장의 수평성분은 $\sqrt{\rho}$ 에 비례하고 r^3 에 반비례한다. 이러한 각 영역과 성분별 차이는 기하학적 감쇠와 매질에 의한 감쇠가 동시에 작용하기 때문이다. 식 (1)-(4)에서 볼 수 있듯이 전기장과 자기장은 kr 에 대한 함수와 r 에 대한 함수의 곱으로 나타내어지므로 지전기 거리와 기하학적 거리를 동시에 사용하여 유한 송신원의 효과를 근사할 수 있다.

거리에 따른 전자기장의 감쇠 이외에도 많은 요소들이 전자기장의 전파를 좌우하게 된다. 지형에 의한 전자기장의 왜곡 등 다양한 원인에 의해 전자기장의 전파 특성이 결정되지만 3차원 구조에서의 EM 모델링은 매우 복잡하고 많은 계산시간을 요하기 때문에 이 연구에서는 전자기장의 감쇠특성만을 고려하도록 한다.

공간모델링을 이용한 잡음 예측

전자기장 잡음과 관련된 공간자료

전자기장 잡음원으로 고려될 수 있는 공간 개체들은 도로, 주거용 건물, 고압송전선, 발전소 등의 전기시설물, 공장, 철도 등 매우 다양하다. 이러한 요소들을 디지털화한 자료는 국토지리정보원(www.ngi.go.kr)에서 제작한 수치지형도가 대표적이다. 수치지형도는 dxf 파일 형태로 제공되며 이로부터 도로,

Table 1. Spatial data used in this study for the EM noise analysis.

Data	Content	Data type
Digital geographic map	Road, building, railway, industrial plant etc.	Vector 1 : 25,000 digital map
Digital geologic map	Geologic boundary, rock type, fault, cross-section etc.	Vector 1 : 50,000 digital map
High voltage powerline map	Location of high voltage powerline	Vector

건물, 철도 등 다양한 형태의 개체들을 추출할 수 있다. 고압 송전선 자료의 경우 수치 지형도에서 부분적으로 제공되며 현장에서의 매핑을 통해서 보완할 수 있다. 전기비저항의 공간분포를 근사적으로 정의하는데 필요한 지질도는 한국지질자원연구원에서 제공하는 지질도나 수치지질도를 이용할 수 있다. 이 연구에서 사용된 수치 공간 자료는 Table 1과 같다.

GIS 기법을 이용한 전자기 잡음 모델링

공간상에 분포하는 많은 송신원에서 발생하는 전자기장의 크기를 모델링하기 위하여 수치화된 공간자료와 GIS 기법을 적용하는 방법에 대하여 논하도록 하겠다. Fig. 4와 같이 어떤 지역에서의 공간자료가 존재한다고 하자. 지질도 혹은 기타 전기비저항과 관련된 정보를 이용하여 대략적인 전기비저항 분포를 구축하였다고 가정한다(Fig. 4a).

먼저, 전기비저항 분포와 전자기자의 전파 특성을 이용하여 MT 측정으로부터의 지전기 거리를 계산한다. 지전기 거리를 산술적으로 계산하기 위하여 비용거리(cost distance) 개념을 적용하였다(윤재준 등, 1999). 식 (8)을 고려하면 지전기 거리는 이를 비용으로 하는 거리로 생각할 수 있으므로 MT 측정으로부터 임의의 지점까지의 최단 비용거리(minimum cost distance)를 구하여 그 지점의 지전기 거리로 가정하였다. Fig. 4b는 Fig. 4a의 전기비저항 분포로부터 계산되어진 지전기 거

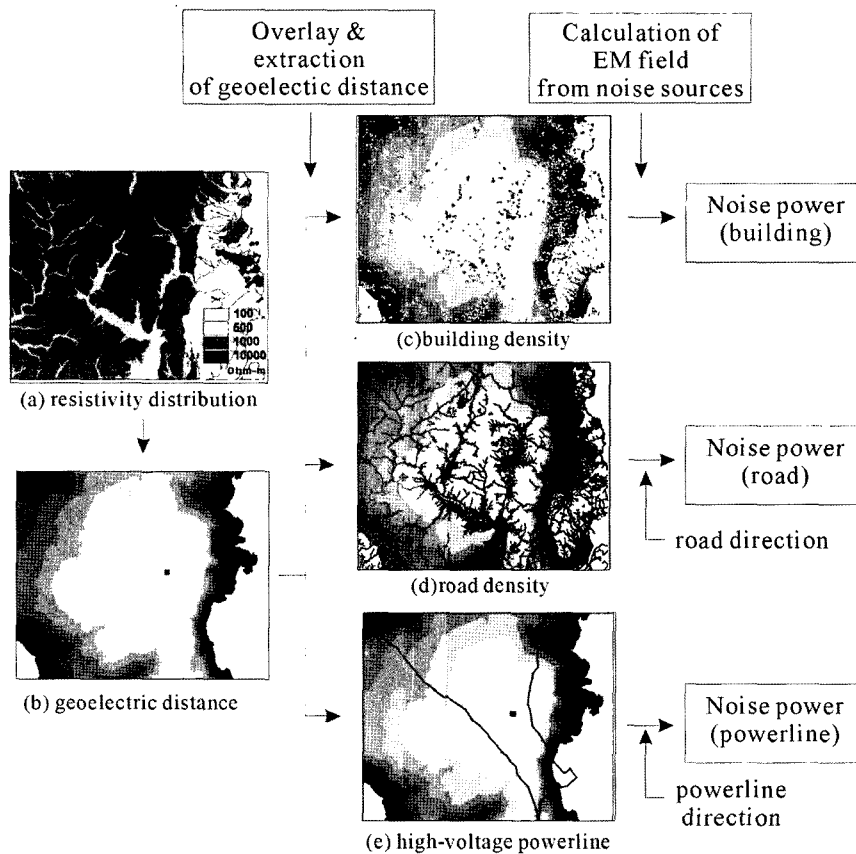


Fig. 4. Procedure of EM noise modelling. (a) The resistivity distribution is determined using the assignment of resistivity to the rock type on the geologic map and (b) the geoelectric distances is calculated using the resistivity distribution and GIS tools. The features of the buildings (c), roads (d) and high-voltage power line (e) are used for calculating the powers of EM field from noise sources.

리를 도시한 것이다.

잡음원의 분포와 지전기 거리의 분포를 겹쳐서 각 잡음원 위치에서의 지전기 거리를 추출하여(Fig. 4c, Fig. 4d, Fig. 4e) 잡음원이 측정점에 미치는 전자기적 효과를 계산할 수 있다. 식 (9)로부터 이므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_r = E_0(r)E_1(kr)\cos\phi = E_0(r)E_1(k'r')\cos\phi \quad (10)$$

식 (2)-(4)도 마찬가지로 건물, 도로와 같은 잡음원의 위치에서 계산되어진 지전기 거리 r' 와 기하학적 거리 r 을 이용하면 복잡한 전기비저항 분포를 가지는 공간에서도 기준 전기비저항만을 이용하여 근사적으로 전자기장의 크기를 예측할 수 있다.

식 (1)-(4)에서 Idl 항은 쌍극자 잡음원의 강도를 의미한다. 그러나 잡음원의 강도는 알려져 있지 않으므로 모두 동일하다고 가정한다. 건물과 도로와 같이 매우 많은 수의 잡음원이 존재하는 경우 불필요하게 많은 계산이 필요하므로 점 혹은 선으로 이루어진 잡음원의 분포를 격자형(raster) 자료로 변환하는 것이 유용할 수 있다. 건물의 경우 점 개체로 볼 수 있으므로 일정한 격자 내에 존재하는 점의 밀도를 계산하고 도로의 경우 선 개체로 이루어져 있으므로 격자 내의 선밀도를 계산하여 격자형의 잡음원 분포를 생성할 수 있다. 격자형으로 계

산되어진 건물이나 도로의 밀도를 쌍극자의 강도로 사용함으로써 모든 건물과 도로의 분포를 근사적으로 고려할 수 있다.

건물에서 발생하는 전자기장을 쌍극자로 가정하였을 때 쌍극자의 방향은 알려져 있지 않으므로 방향성을 무시하고 최대 값을 가지는 전자기장을 사용한다. 도로의 경우 일정한 방향을 가지고 있으며 도로를 따라 설치된 전력선의 경우의 선형의 송신원이다. 이를 고려하기 위하여 도로의 방향을 쌍극자의 방향으로 하는 미소 쌍극자들의 효과를 합함으로써 선형 송신원의 효과를 근사할 수 있다.

현장자료와의 비교분석

MT 탐사 자료

측정 잡음과 예측잡음의 비교분석을 위해 한반도 중동부지역인 홍해-괴산 구간 총 150 km 연장의 측선 상에서 획득되어진 MT 자료를 사용하였다(박계순 등, 2005). 측정장비는 한국지질자원연구원에서 보유하고 있는 Phoenix Geophysics Ltd. 사의 MTU-5A 시스템이다. MTU-5A 시스템은 전기장 2 성분(E_x, E_y), 자기장 3 성분(H_x, H_y, H_z)을 측정할 수 있으며, 2400, 150, 15 Hz의 샘플링 밴드를 가지고 있으며, 해석가능

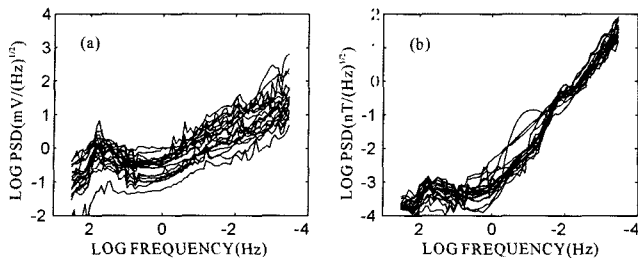


Fig. 5. Power spectral density of (a) horizontal electric field and (b) horizontal magnetic field.

한 주파수 대역은 약 320 - 0.0003 Hz 이다. 측정명은 포항 쪽에서부터 101에서 130으로 증가하도록 명명하였다. 101 - 112 측정점은 충남 금산 지역에, 113 - 130 측정점은 강원도 홍천에 원거리기준점(remote reference)을 운영하여 GPS 동기화를 통해 탐사 측정점과 원거리기준점에서 동시에 전자기장을 측정하였다.

MT 자료의 신호 및 잡음 파워

MT 신호의 주파수별 특성을 살펴보기 위하여 수평성분 전기장과 자기장의 파워 스펙트럼을 Fig. 5에 도시하였다. 자연 전자기장의 특성상 저주파 대역으로 갈수록 파워가 커지며 60 Hz 주변에 60 Hz 전력 사용에 기인하는 강한 파워가 보인다. 8 - 20 Hz 대역에서는 지표면과 전리층이 도파관(waveguide) 역할을 하여 생기는 슈만 공진(Schuman resonance)에 의한 다소 강한 파워가 관찰된다. 측정점에 따라서 자기장의 차이가 나는 것은 지하매질의 영향도 있으나 주로 시간에 따른 지자기장 활동 정도의 변화나 잡음에 기인한다. 전기장의 경우, 지자기장의 활동이나 잡음뿐만 아니라 지하매질의 전기비저항에 따라 크게 좌우되기 때문에 전기장이 자기장보다 분산이 훨씬 크게 나타난다. 예측된 잡음과의 비교를 위해서는 전자기장의 시간과 장소에 따른 변동으로부터 잡음의 파워만을 추출하여야 하며 이를 위해 원거리 기준점 기법의 적용이 반드시 필요하다.

측정된 MT 탐사 자료로부터 잡음 파워를 추정하는 방법은 다음과 같다. 측정에서 측정된 전기장과 자기장을 각각 E , H 라고 하고 원거리기준점에서 측정된 자기장을 R , 원거리 기준점 기법을 이용하여 추정된 임피던스를 Z^R 이라고 하자. 이때 예측 전기장 E^P 는

$$E^P = Z^R H \quad (10)$$

이며, 예측 전기장은 자기장의 신호 성분과 잡음 성분의 영향을 동시에 가지고 있다. 만약 자기장과 전기장의 잡음과 잡음, 잡음과 신호가 서로 상관없다면 파워 스펙트럼은

$$[E^P E] = Z^R [H E] = [E R][H R]^{-1} [H E] \quad (11)$$

와 같으며 이것의 기댓값은 신호 파워 스펙트럼 $[E_s E_s]$ 이다. 이때 $[E_s E_s]$ 의 최적 추정은 $[E^P E]$ 의 에르미티안(Hermitian) 성분으로 볼 수 있으므로 $[E_s E_s]^P$ 은 다음과 같다.

$$[E_s E_s]^P = ([E^P E] + [E^P E]^T)/2 = ([E^P E] + [E E^P])/2 \quad (12)$$

식 (12)로부터 구해진 신호 파워 스펙트럼을 측정된 파워 스펙트럼으로부터 빼면 잡음의 파워 스펙트럼을 구할 수 있다 (Gamble *et al.*, 1978).

$$[E_n E_n] = [E E] - [E_s E_s]^P \quad (13)$$

비슷한 방법으로 자기장의 잡음 파워 스펙트럼을 구할 수는 있으나 일반적인 원거리 기준점 기법은 원거리 기준점의 자기장 성분을 사용하여 임피던스를 추정하므로 전기장으로부터 예측 자기장을 추정하는 것은 전기장의 잡음에 의해 매우 왜곡된 결과를 나타내기 때문에 자기장의 잡음 추정으로는 적합하지 않다. 만약 자기장의 잡음과 잡음, 잡음과 신호가 서로 상관없다면 잡음은 서로 상쇄되고 신호는 증폭되므로 장시간 측정된 측정점의 자기장 성분과 원거리 기준점의 자기장 성분의 교차 파워 스펙트럼 $[H R]$ 을 신호 스펙트럼으로 가정할 수 있다.

$$[H_s H_s] \approx [H R] \quad (14)$$

따라서 자기장의 잡음 파워 스펙트럼은 다음과 같이 추정하도록 하겠다.

$$[H_n H_n] = [H H] - [H_s H_s] = [H H] - [H R] \quad (15)$$

Fig. 6는 각 측정점에서의 주파수에 따른 잡음 파워 스펙트럼과 총 파워 스펙트럼의 비를 나타낸다. 전기장과 자기장 모두 전력선에 기인하는 60 Hz 조화파와 소위 'Dead band'라고 불리는 0.1 - 1 Hz 대역에서 가장 큰 잡음 파워를 보이고 있다.

연구지역의 공간자료

연구지역에서의 건물과 도로의 분포는 Fig. 7과 같다. MT 측선 상에서의 주요 주거 지역으로는 흥해읍, 의성읍, 문경시, 괴산읍이 분포하고 있으나 주로 산악지형으로 이루어져 있다. 고압 송전선은 흥해 부근에서 MT 측선과 나란하게 지나가고 있으며 문경 부근에서 교차한다. 지질학적으로는 경상분지, 영남육괴, 옥천대로 이루어져 있으며 흥해 지역에는 제3기 퇴적층으로 구성되어 있다.

공간상에 분포하는 잡음원의 감쇠효과를 정량적으로 근사하기 위해서 먼저 지하 매질의 전기비저항 분포를 가정할 필요가 있다. 공간적인 전기비저항 분포는 다른 전기 및 전자 탐사의 결과들이 존재하는 경우 이를 이용할 수 있으나 실제적으로 거의 불가능한 경우가 많으므로 이 연구에서는 지질도에서 구별되는 암상에 적당한 전기비저항을 부여하는 방법을 사용하여 전기비저항의 분포를 정의하였다. 이 때 MT 탐사 자료의 2차원 역산 결과에서 각 측정점하부 5 km까지의 전기비저항을 평균하여 이 값을 참고로 각각의 암상에 적당한 전기비저항을 결정하였다(Table 2). MT 탐사 결과 경상분지 신동층군, 하양층군의 퇴적암들은 수 백 ohm-m의 전기비저항을 가지며, 경상분지 및 옥천변성대에 관입된 불국사화강암은 수 만 ohm-

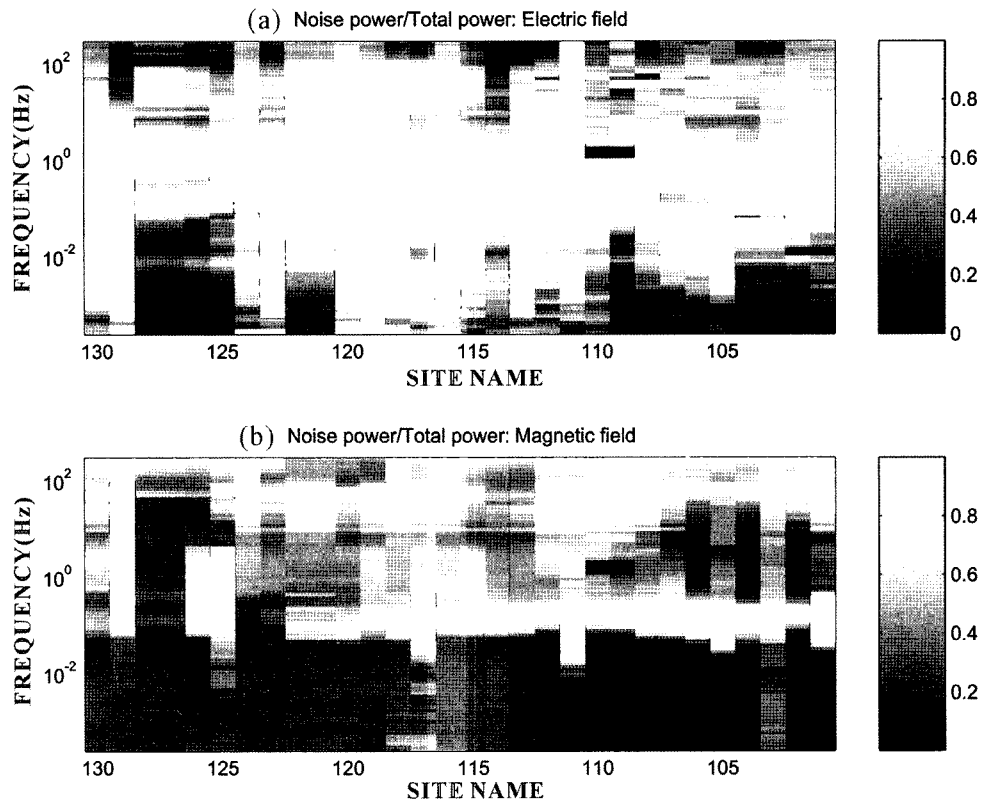


Fig. 6. Distribution of the noise power divided by the total power of MT signal: (a) electric field and (b) magnetic field.

m, 영남육괴의 변성암들은 수 천 내지 수 만 ohm-m의 전기비저항을 가지는 것으로 추정된다(박계순 등, 2005). MT 탐사 결과로부터 결정된 암상별 전기비저항과 지질도를 이용하여 전기비저항 분포를 정의하면 Fig. 7d와 같으며 정의된 전기비저항 분포와 MT 역산 결과의 전기비저항 분포를 MT 측선을 따라 도시하면 Fig. 8과 같다.

잡음 모델에 의한 잡음 예측

지질도와 MT 탐사 결과로부터 결정된 전기비저항의 공간분포를 이용하여 MT 측정으로부터의 지전기 거리를 계산한다. 이 때 기준 전기비저항은 1000 ohm-m로 한다. 공간자료의 제한과 계산시간을 고려하여 기준 전기비저항을 가지는 매질에서 10 km에 해당하는 지전기 거리 이내의 영역만을 고려하였다. Fig. 9은 모든 측정으로부터의 지전기 거리의 분포를 보여주는 것으로 측선의 서쪽과 동쪽 지역은 전기비저항이 높은 화강암 관입대이므로 먼 거리에 위치한 잡음원도 고려하여야 하며 측선 중앙부의 낮은 전기비저항 지역에서는 수 km 이내의 잡음원만이 영향을 미칠 것이라는 것을 예상할 수 있다.

잡음원의 공간패턴에 따라 잡음원을 고려해야할 최대 거리가 달라진다. 예를 들면 먼 거리에 매우 밀집된 잡음원이 존재하면 잡음원의 강도가 매우 크므로 근거리에서 존재하는 소규모의 잡음원보다 더 큰 영향을 줄 수 있다. 거리에 따른 잡음원의 영향을 살펴보기 위하여 지전기 거리에 따른 누적 전자기

장 파워를 살펴보았다. 최대 지전기 거리를 10 km로 설정하였으므로 10 km 이내에 존재하는 잡음원에 의한 전자기장 파워의 합을 P_{max} 라고 하고, 어떤 지전기 거리 r' 이내에 존재하는 잡음원에 의한 전자기장 파워의 합을 $P_{r'}$ 라고 하자. 연구지역의 각 MT 측정점에서 건물에 의한 $P_{r'}/P_{max}$ 를 에 따라 계산하였다. 각 MT 측정점 주변의 잡음원 분포 패턴이 다르므로 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 거리에 따른 누적 전자기장 파워의 수렴정도도 달라진다. 전기장의 경우 수 백 미터 이내에서 $P_{r'}/P_{max}$ 가 0.99 이상으로 수렴하는 측정점이 있는 반면 최대 5 km 이상의 거리에서 0.99 이상으로 수렴하는 측정점도 있다. 자기장의 경우 전자기장 파워가 수렴하는 거리가 더 길게 나타나며 최대 약 7 km 이상에서는 모든 측정점에서 $P_{r'}/P_{max}$ 가 0.99 이상으로 수렴한다. 따라서 연구지역에서는 지전기 거리 약 7 km 이내의 잡음원만을 고려하여도 정확한 모델링을 수행할 수 있다.

측정 잡음과 예측 잡음과의 상관관계

앞에서 제시된 방법들을 이용하여 잡음 모델의 파워 스펙트럼과 MT 탐사 자료의 잡음 파워스펙트럼을 구하고 각 주파수별로 상관관계를 살펴보았다. MT 신호의 파워 스펙트럼은 일반적으로 로그 정규 분포를 따르므로 로그 스케일 상에서 상관관계를 분석하여야 한다. Fig. 11은 57 Hz 주파수에서의 측정되어진 MT 잡음의 수평성분 파워스펙트럼과 공간모델링을 통해 예측되어진 수평성분 파워스펙트럼을 비교한 것이다. 건

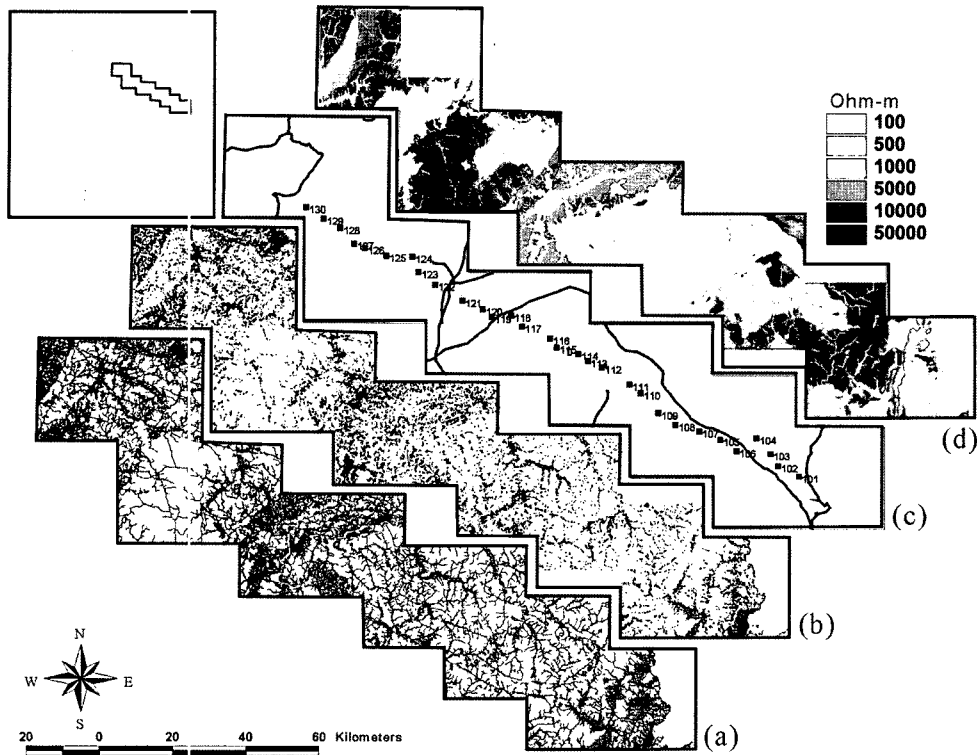


Fig. 7. Spatial data used in this study. (a) Road distribution, (b) building distribution, (c) high-voltage powerlines and MT site and (d) resistivity map defined using the geology map and MT inversion result.

Table 2. The range of resistivity values of rocks. The resistivity values used in this study were determined from the averaged resistivity value of 2-D MT inversion result.

Rock type	Typical range of resistivity (Telford <i>et al.</i> , 1976)	Resistivity value used in this study (ohm-m)
Granite	$3 \times 10^2 - 1 \times 10^6$	1×10^4 , 5×10^4
Andesite	$1.7 \times 10^2 - 4.5 \times 10^4$	1×10^4
Schist	$2 \times 10^1 - 1 \times 10^4$	1×10^3
Gneiss	$6.8 \times 10^4 - 3 \times 10^6$	5×10^3
Shale	$2 \times 10^1 - 2 \times 10^3$	5×10^2 , 1×10^2
Sandstone	$1 \times 10^0 - 6.4 \times 10^8$	5×10^2 , 1×10^2
Conglomerate	$2 \times 10^3 - 1 \times 10^4$	1×10^3
Limestone	$5 \times 10^2 - 1 \times 10^7$	5×10^2
Alluvium	$1 \times 10^1 - 8 \times 10^2$	5×10^2

*Bulgooksa Granite intrusion, **gneiss in Yeongnam massif, ***Tertiary sediment in Pohang basin. Table. The range of resistivity values of rocks. The resistivity values used in this study were determined from the averaged resistivity value of 2-D MT inversion result.

물, 도로, 고압 송전선으로부터 예측되어진 잡음은 모두 전체적인 경향이 비슷하며 측정된 MT 신호의 잡음과도 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

전체적인 경향은 상관관계를 가지지만 상관관계가 없어 보이는 몇몇 측정점이 존재하는데 104, 106, 107, 111, 127, 129 측정점이 대표적이다. 이러한 측정점에서는 국지적인 요인들로

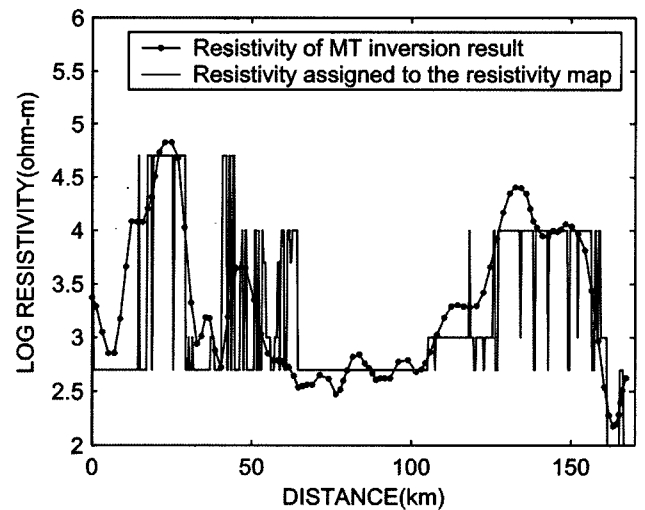


Fig. 8. Comparison between the resistivity distribution of the MT inversion result and the resistivity assigned to the resistivity map along the MT survey profile.

인하여 이 연구에서 제안된 잡음모델이 적합하지 않은 것으로 생각된다. 특히 이 측정점들은 건물이나 도로가 매우 가까이 위치하는 곳이기 때문에 잡음원의 분포 특성보다는 근접한 잡음원의 강도에 매우 민감할 것이다. 모든 잡음원을 동일한 강도를 가지는 쌍극자로 가정하는 잡음원 모델은 이러한 측정점들의 잡음 수준을 예측하기 어렵기 때문에 상관도 분석에서는 제외

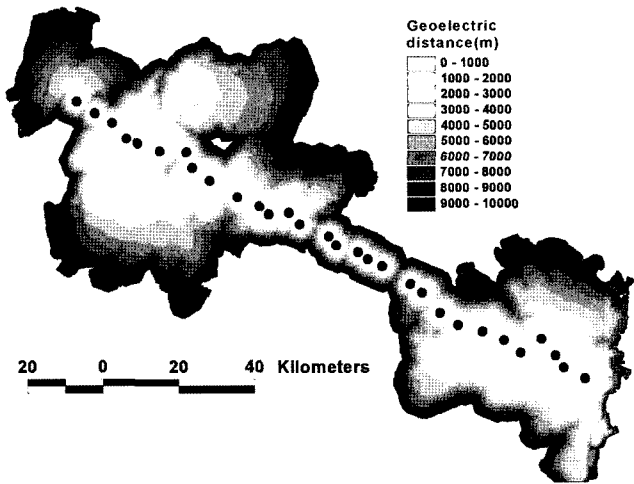


Fig. 9. Distribution of minimum geoelectric distances from the MT sites.

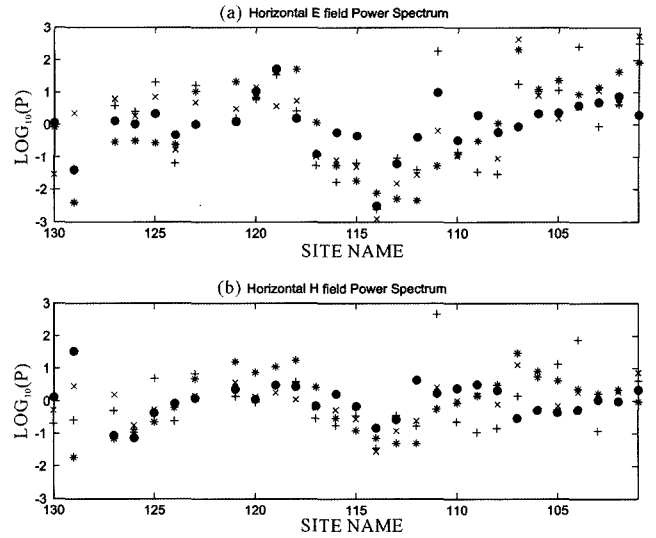


Fig. 11. Distribution of the measured noise power spectra (●) and predicted noise power spectra (building : ×, road : +, high-voltage powerline : *) at the frequency of 57 Hz.

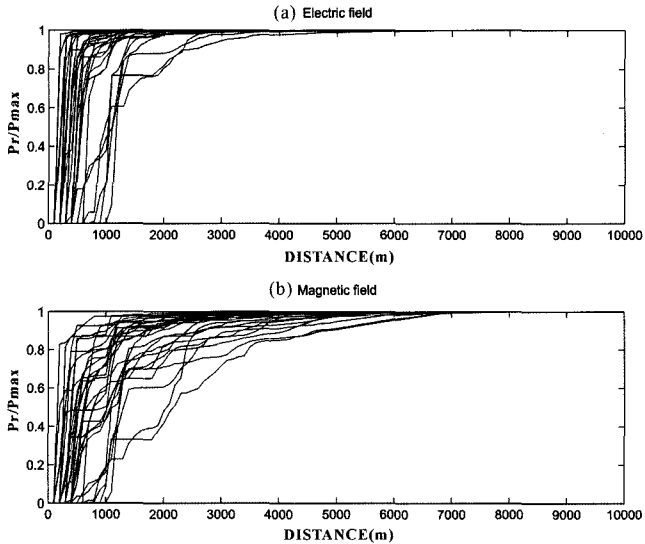


Fig. 10. Cumulative power spectrum with respect to the geoelectric distance.

하도록 한다.

상관도가 크게 떨어지는 6개 측정점과 원거리기준점 자료에 문제가 있는 2개 측정점을 제외하고 총 22개 측정점에 대하여 측정된 잡음수준과 예측된 잡음수준의 상관계수를 각 주파수 별로 계산하였다(Fig. 12). 전기장의 측정 잡음과 예측 잡음의 상관도가 자기장에 비해 높으며 0.01 Hz 이상에서는 0.5 이상의 높은 상관도를 보인다. 반면 자기장 성분은 60 Hz 부근의 대역을 제외하고는 매우 낮은 상관도를 나타낸다. 60 Hz 주파수 대역에서도 건물에 의한 잡음과의 상관도는 높으나 도로에 의한 잡음과의 상관도는 매우 낮다. 이러한 특성은 인접한 건물이나 도로 등의 전기시설물에 의한 전기장 잡음은 주파수 대역 전반에 영향을 주고 있음을 말하고 자기장 잡음은 60 Hz 부근의 고주파 대역에서 큰 영향을 미치고 있음을 말해 준다.

특히 건물에 의한 잡음이 가장 높은 상관도를 보여주고 있는데 이는 도시와 같은 강력한 잡음원을 건물의 분포가 가장 잘 묘사하고 있기 때문으로 생각되며 점원의 쌍극자 모델과도 가장 잘 부합하는 잡음요소이기 때문이다. 도로의 경우, 전력선이 도로를 따라 지나가는 경우가 많지만 모든 도로에 전력선이 존재하는 것은 아니기 때문에 잡음 예측이 정확하지 않은 것으로 생각된다. 고압 송전선의 경우 저주파 대역으로 가면 상관도가 크게 떨어지는 경향을 보이며 주목할 만한 것은 약한 상관관계이지만 1-10 Hz 대역의 자기장 성분에서 건물이나 도로에 비해 높은 상관관계를 보인다. 이러한 특성은 자기장 성분에서 추출되는 티퍼(Tipper)자료에도 반영되고 있다. Fig. 13은 3 Hz 주파수의 티퍼에서 추출된 유도지시자의 방향과 크기를 보여준다. 고압 송전선에 인접한 측정점에서 유도지시자의 크기가 커지고 유도지시자의 방향이 고압송전선을 향하게 되는 경향을 가지고 있음을 알 수 있고 이는 1-10 Hz 대역에서 공통적으로 나타나는 특징이다. 예측 잡음의 상관도와 유도지시자의 경향성을 고려해 볼때 고압송전선은 1-10 Hz 대역에서 다른 잡음원에 비해 더 큰 영향을 주고 있는 것으로 생각된다.

이 연구에서 제안된 잡음원의 공간분포와 전기비저항 분포를 고려한 잡음 예측은 잡음 환경을 매우 단순화시킨 것이기 때문에 다양한 불확정성이 존재하는 실제 잡음환경을 정확하게 예측하기는 어렵다. 실제로 모든 건물, 도로, 고압송전선이 잡음을 발생시키는 것이 아닐 뿐만 아니라 각 잡음원의 강도 역시 일정하지 않기 때문에 잡음원의 공간분포를 명확하게 정의하는 것은 불가능하다. 또한 전기비저항 분포 역시 지질도를 기반으로 한 단순한 모델이므로 실제 지하 매질의 불균일성을 근사적으로 묘사할 수밖에 없는 한계를 가지고 있고 특히 각

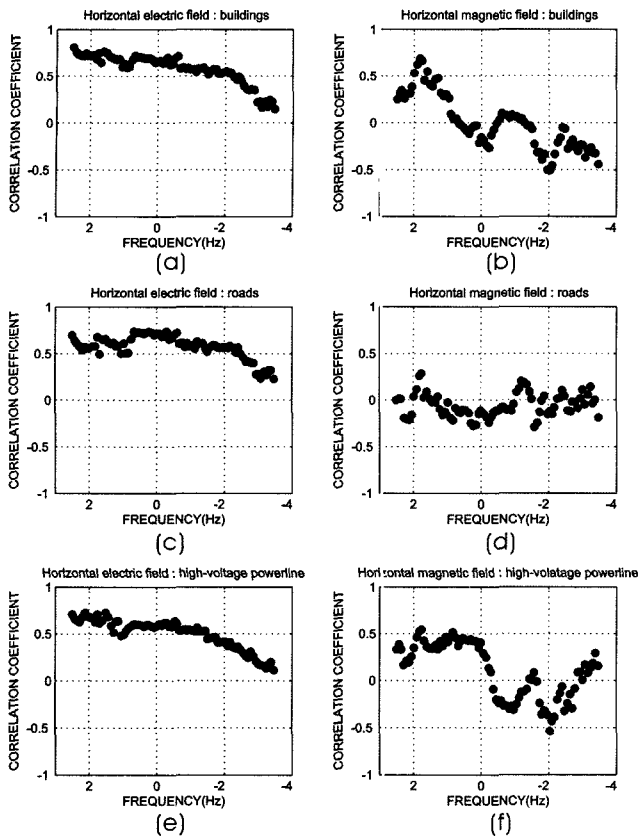


Fig. 12. Correlation coefficients between the power spectrum of measured horizontal noise and predicted horizontal noise from building, road and high-voltage powerline distribution. The six plots show the coefficients of (a) electric noise and (b) magnetic noise from building, (c) electric noise and (d) magnetic noise from road and (e) electric noise and (f) magnetic noise from high-voltage powerline.

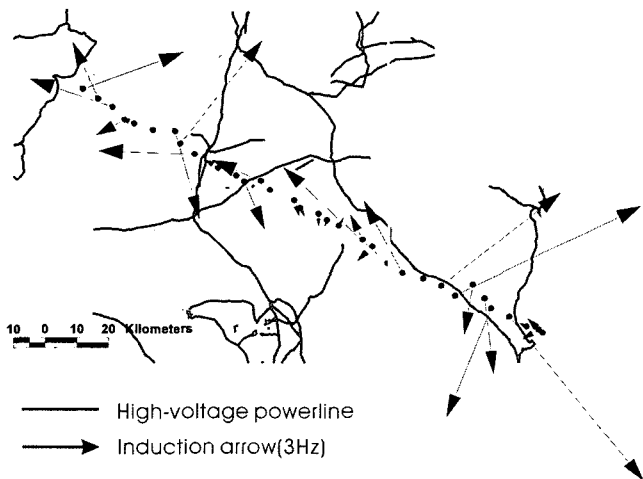


Fig. 13. Induction arrow and high-voltage powerline distribution at the frequency of 3 Hz.

측점 부근의 전기비저항, 지형, 수계 등 국지적인 요소들은 전 자기장 파워에 큰 영향을 줄 수 있다. 이상적인 원거리기준점

이 존재하지 않는 이상 측정 자료로부터 정확한 잡음 성분을 추출하는 것 역시 쉬운 일은 아니다. 그럼에도 불구하고 상관도 분석을 통해 공간상의 잡음원 분포가 측정 자료와 어느 정도 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있었으며 향후 보다 많은 MT 자료의 획득이 이루어지면 보다 신뢰도 높은 통계적 분석이 가능할 것으로 생각되며 보다 다양한 공간자료로부터 의미 있는 정보들을 추출할 수 있게 되면 보다 정확한 전자기 잡음 환경 예측이 가능하리라 생각된다.

결론

공간상의 잡음원의 분포로부터 MT 탐사 측정에서의 잡음 강도를 예측할 수 있는지 여부를 알아보기 위하여 수치지도로부터 잡음원일 가능성이 높은 건물, 도로, 고압 송전선의 개체를 추출하고 전기 쌍극자 형태의 송신원에 의한 전자기장의 강도를 계산하여 잡음을 예측할 수 있는 잡음모델을 제안하였다. 이 과정에서 지하매질의 전기전도도에 의한 전자기파의 감쇠를 고려하기 위해 전기비저항으로 정규화되는 지전기 거리를 정의하고 비용거리를 계산하는 GIS 기법을 적용하여 복잡한 전기전도도 분포 하에서의 지전기 거리를 근사적으로 계산하였다. 결과적으로 한반도 중동부 지역에서의 잡음 예측에 있어 모든 잡음원이 동일한 강도를 가지는 경우 측정으로부터 수 km 이내의 잡음원이 주된 역할을 한다.

제안된 잡음모델로부터 예측된 잡음 파워와 실제 탐사를 통해 측정된 MT 자료의 잡음 파워를 비교하여 상관도를 분석하였다. 전반적으로 전기장에서는 넓은 주파수 대역에서 높은 상관관계를 보이는 반면 자기장은 60 Hz 부근의 대역에서만 상관관계를 가진다. 측정 주변의 전기시설물은 0.01 Hz 이하의 저주파 대역을 제외한 주파수 대역의 전기장에 매우 큰 영향을 주는 것으로 보이나 자기장의 경우 대표적인 상관잡음 대역인 60 Hz 부근 대역에서만 주도적임을 알 수 있다. 도로나 고압송전선에 비해 건물이 다소 높은 상관관계를 보이는 것으로 보이며 고압송전선의 경우 1-10 Hz 대역에서의 자기장이 건물이나 도로에 비해 다소 높은 상관관계를 보이고 있으며 이 대역에서는 유도지시자의 방향과 크기도 고압송전선의 위치와 밀접한 관련이 있으므로 고압송전선과의 거리가 중요한 요소임을 알 수 있다.

단순화된 잡음모델은 매우 다양한 불확정성이 존재하는 실제 잡음 환경을 정확하게 예측하기는 어려우나 예측 잡음과 실제 잡음이 상관관계를 보이고 있는 것으로 보아 MT 신호의 잡음 예측에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 보다 많은 MT 자료의 획득이 이루어지고 보다 다양한 공간자료의 축적이 이루어진다면 더욱 신뢰할 수 있는 잡음모델의 구축이 가능할 것으로 보이며 잡음 예측을 통해 최적화된 MT 측정의 선정과 잡음에 의한 자료의 왜곡을 정확히 인지하는 것이 가능하리라 생각된다. 특히 고도로 산업화되어가는 도시 주변지

역에서의 MT 탐사를 수행하는데 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구 사업인 “한반도 심부 전기구조의 지구물리학적 연구”의 일환으로 수행되었으며, 연구 지원을 해주신 한국과학재단에 감사드립니다. 탐사 자료 획득과 처리에 많은 도움을 주신 한국지질자원연구원 송윤희, 이태종 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 박계순, 이춘기, 이희순, 권병두, 조인기, 오석훈, 2005, 경상분지의 심부 지전기 구조, 한국물리탐사학회, 대한지구물리학회 공동학술대회 논문집, 한국지질자원연구원, 2005년 5월 26-27일, 대전, 203-208.
- 윤재준, 김채승, 윤창진, 1999, 지리정보체계, 대영사, 서울.
- Gamble, T. D., Goubou, W. M., and Clarke, J., 1978, Error analysis for remote reference magnetotellurics, *Geophysics*, **44**, 959-968.
- Iliceto, V., and Santarato, G., 1999, On the interference of man-made EM fields in the magnetotelluric ‘dead band’, *Geophysical Prospecting*, **47**, 707-719.
- Qian, W., and Pedersen, L. B., 1991, Industrial interference magnetotellurics: An example from the Tangshan area, China, *Geophysics*, **56**, 265-273.
- Stratton, J. A., 1941, *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, *Applied geophysics*, Cambridge Univ. Press.
- Zonge, K. L., and Hughes, L. J., 1991, Controlled source audio-frequency magnetotellurics, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics, Soc. Expl. Geophys.*, Vol. **II**, 713-809.