

공간 모델링을 이용한 자기지전류 탐사의 전자기 잡음 예측

이춘기^{1)*}, 이희순²⁾, 권병두¹⁾

¹⁾서울대학교 지구과학교육과

²⁾경인교육대학교 과학교육과

요약 : 자기지전류 탐사의 적용에 있어 인공잡음의 영향은 탐사의 승패를 좌우하는 중요한 요소이며 인공잡음의 영향을 최소화할 수 있는 탐사의 설계와 자료처리가 요구되고 있다. 본 연구에서는 수치공간자료를 이용한 공간모델링을 통해 MT 주파수 대역에서의 잡음을 예측하고 실제 탐사 자료와 비교분석하여 MT 잡음 모델링을 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. 본 연구에서 제안된 공간모델링을 통한 잡음 예측은 특히 고도로 산업화되어가는 도시 주변지역에서의 MT 탐사를 수행하는데 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

1. 서 론

국내에서 전기 및 전자 탐사를 수행함에 있어서 주변에 수없이 많은 잡음 요소들이 존재한다. 과도한 전자기 잡음은 전기 및 전자 탐사 자료의 질을 떨어뜨리는 중요한 잡음요소이며 인공 송신원을 사용하지 않는 MT 탐사의 경우 인공 전자기 잡음 수준은 탐사의 승패를 좌우하기도 한다. 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. 첫째, 잡음원의 분포, 전자기 잡음의 전파를 근사적으로 정의할 수 있는 수학적

인 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 잡음수준을 규정하기 위해서는 모델로부터의 결과를 실제 측정 자료와 비교 분석할 필요가 있다. 이를 위해서는 한반도 중부 지역에서 광범위하게 실시된 MT 탐사자료를 이용하였다.

2. 전자기 잡음 모델

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 전자기장의 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 Illiceto and Santarato(1999)의 직류 전기철도에 의해 발생하는 전자기 간섭 문제에 적용된 바 있다.

1차원 구조의 매질에서 전기 쌍극자에 의해 발생하는 전자기장의 이론은 매우 잘 알려져 있다. 수평 쌍극자에 의한 전자기 반응을 계산하기 위하여 준정적(Quasi-static) 근사를 적용하면 원통형 좌표계에서의 전기장과 자기장은 다음과 같다(Zonge and Hughes, 1987).

$$E_r = \frac{Idl\cos\phi}{2\pi\sigma r^3} [1 + e^{-ikr} (1 + ikr)] = \frac{i\mu\omega Idl\cos\phi}{2\pi r (ikr)^2} [1 + e^{-ikr} (1 + ikr)]$$

$$= E_0(r) E_1(kr) \cos\phi$$

(1)

$$E_\phi = \frac{Idl\sin\phi}{2\pi\sigma r^3} [2 - e^{-ikr} (1 + ikr)] = \frac{i\mu\omega Idl\sin\phi}{2\pi r (ikr)^2} [2 - e^{-ikr} (1 + ikr)]$$

$$= E_0(r) E_2(kr) \sin\phi$$

(2)

$$H_r = \frac{Idl \sin \phi}{2\pi r^2} \left\{ 3I_1\left(\frac{ikr}{2}\right)K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) + \frac{ikr}{2} \left[I_1\left(\frac{ikr}{2}\right)K_0\left(\frac{ikr}{2}\right) - I_0\left(\frac{ikr}{2}\right)K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) \right] \right\}$$

$$= H_0(r) H_1(kr) \sin \phi$$

(3)

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

(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) 혹은 전파 상수(propagation constant)라고 불린다.

전자기장은 기하학적 감쇠 외에도 전도성 매질을 통하여 전파할 때 주변 매질에 발생하는 유도 전류에 의해 감쇠되는 특성을 가지며 매질의 전기전도도에 따라 감쇠 정도가 달라진다. 전자기파의 감쇠 특성을 고려하여 표피심도의 개념으로부터 다음과 같이 지전기 거리(geolectric distance)를 정의하도록 하겠다. 즉, ρ 의 전기비저항을 가지는 매질에서의 기하학적 거리(Euclidean distance)를 기준 매질에서 같은 정도의 감쇠가 일어나는 거리로 변환하는 것이다.

$$r' = \frac{r}{\sqrt{\rho/\rho'}}$$

(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 Ωm 라고 하면 어떤 지역의 전기비저항이 100 Ωm 일 때 이 지역에서의 지전기 거리는 $r' = \sqrt{10}r$ 이므로, 기준 매질에서 $\sqrt{10}r$ 만큼 떨어진 지점과 평면파의 송신원이 위치한 것과 같다. 한편, 유도 상수(induction number)를 지전기 거리와 기준매질의 파수를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$|kr| = r/\delta = r'/\delta' = |k'r'|$$

(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.

3. 공간모델링을 이용한 잡음 예측

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, 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.

공간상에 분포하는 많은 송신원에서 발생하는 전자기장의 크기를 모델링하기 위하여 수치화된 공간자료와 GIS 기법을 적용하는 방법에 대하여 논하도록 하겠다. Fig. 1과 같이 어떤 지역에서의 공간자료가 존재한다고 하자. 지질도 혹은 기타 전기비저항과 관련된 정보를 이용하여 대략적인 전기비저항 분포를 구축하였다고 가정한다(Fig. 1(a)).

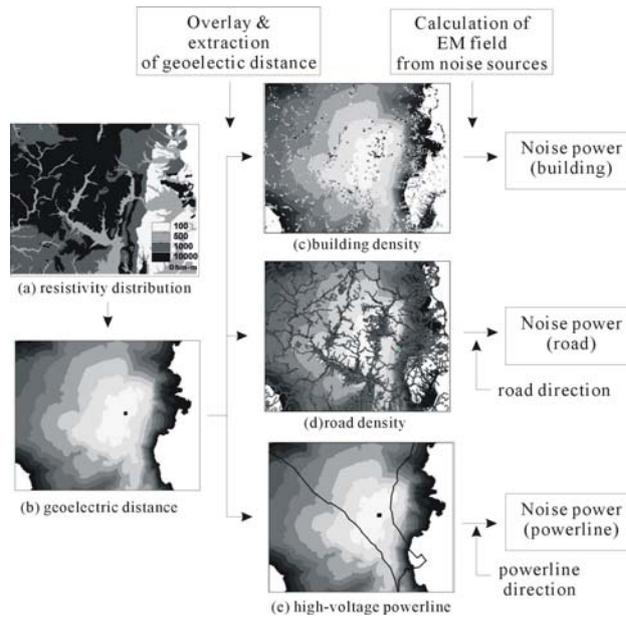


Fig. 71 Procedure of EM noise modelling.

먼저, 전기비저항 분포와 전자기자의 전파 특성을 이용하여 MT 측정으로부터의 지 전기 거리를 계산한다. 지전기 거리를 산술적으로 계산하기 위하여 비용거리(cost distance) 개념을 적용하였다(윤재준 외, 1999). 식 (8)을 고려하면 지전기 거리는 $\sqrt{\rho/\rho'}^{-1}$ 를 비용으로 하는 거리로 생각할 수 있으므로 MT 측정으로부터 임의의 지점까지의 최단 비용거리(minimum cost distance)를 구하여 그 지점의 지전기 거리로 가정하였다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 전기비저항 분포로부터 계산되어진 지전기 거리를 도시한 것이다. 높은 전기비저항의 매질로 이루어진 지역에서는 지전기 거리가 짧아지며 낮은 전기비저항 지역에서는 지전기 거리가 멀어진다.

잡음원의 분포와 지전기 거리의 분포를 겹쳐서 각 잡음원 위치에서의 지전기 거리를 추출하여(Fig. 1(c), Fig. 1(d), Fig. 1(e)) 잡음원이 측점에 미치는 전자기적 효과를 계산할 수 있다. 식 (9)로부터 $kr = k'r'$ 이므로 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

(10)

따라서, 건물, 도로와 같은 잡음원의 위치에서 계산되어진 지전기 거리 r' 와 기하학적 거리 r 을 이용하면 복잡한 전기비저항 분포를 가지는 공간에서도 기준 전기비저항

만을 이용하여 근사적으로 전자기장의 크기를 예측할 수 있다.

식 (1)-(4)에서 I_{dl} 항은 쌍극자 잡음원의 강도를 의미한다. 그러나 잡음원의 강도는 알려져 있지 않으므로 모두 동일하다고 가정한다. 건물에서 발생하는 전자기장을 쌍극자로 가정하였을 때 쌍극자의 방향은 알려져 있지 않으므로 방향성을 무시하고 최대값을 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.

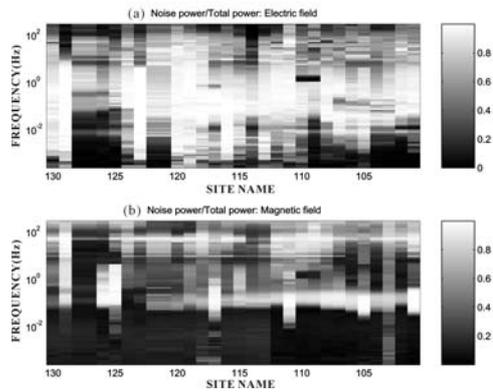


Fig. 72 Distribution of the noise power divided by the total power of MT signal: (a) electric field and (b) magnetic field.

Table 37 Resistivity ranges of rocks. The resistivity values used in this study were determined using the averaged resistivity value of 2-D MT inversion result.

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

* Bulgooksa Granite intrusion, ** gneiss in Youngnam massif, *** Tertiary sediment in Pohang basin.

4. 현장자료와의 비교분석

측정 잡음과 예측잡음의 비교분석을 위해 한반도 중동부지역인 흥해-괴산 구간 총 150 km 연장의 측선 상에서 획득되어진 MT 자료를 사용하였다(박계순 외, 2005). Fig. 2는 각 측정에서의 주파수에 따른 잡음 파워 스펙트럼과 총 파워 스펙트럼의 비를 나타낸다. 전기장과 자기장 모두 전력선에 기인하는 60Hz 조화파와 소위 'Dead band'라고 불리는 1-0.1Hz 대역에서 가장 큰 잡음 파워를 보이고 있다.

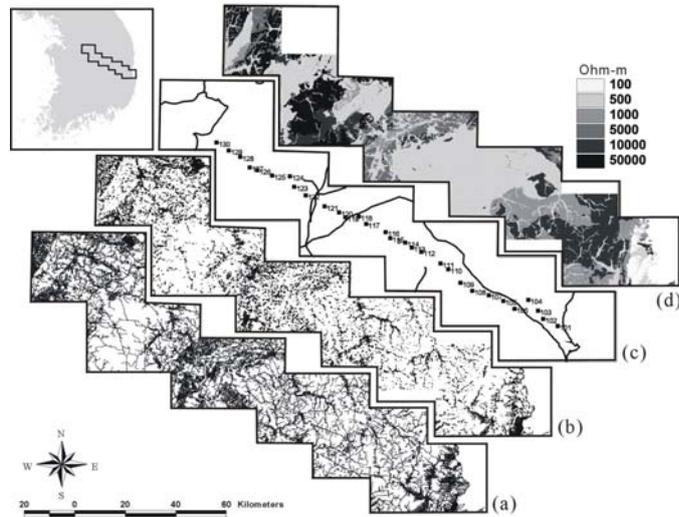


Fig. 73 Spatial data used in this study. (a) Road distribution, (b) building distribution, (c) high-voltage powerlines and MT site and (d) resistivity map defined using the geology map and MT inversion result.

연구지역에서의 건물과 도로의 분포는 Fig. 3과 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.

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 측정하부 5km까지의 전기비저항을 평균하여 이 값을 참고로 각각의 암상에 적당한 전기비저항을 결정하였다(Table 1). MT 탐사 결과 경상분지 신동층군, 하양층군의 퇴적암들은 수 백 ohm-m의 전기비저항을 가지며, 경상분지 및 옥천변성대에 관입된 불국사화강암은 수만 ohm-m, 영남육괴의 변성암들은 수 천 내지 수 만 ohm-m의 전기비저항을 가지는 것으로 추정된다. MT 탐사 결과로부터 결정된 암상별 전기비저항과 지질도를 이용하여 전기비저항 분포를 정의하면 Fig. 3(d)와 같다.

앞에서 제시된 방법들을 이용하여 잡음 모델의 파워 스펙트럼과 MT 탐사 자료의 잡음 파워스펙트럼을 구하고 각 주파수 별로 상관관계를 살펴보았다. MT 신호의 파워 스펙트럼은 일반적으로 로그 정규 분포를 따르므로 로그 스케일 상에서 상관관계를 분석하여야 한다. Fig. 4는 57 Hz 주파수에서의 측정되어진 MT 잡음의 수평성분 파워 스펙트럼과 공간모델링을 통해 예측되어진 수평성분 파워스펙트럼을 비교한 것이다. 건물, 도로, 고압 송전선으로부터 예측되어진 잡음은 모두 전체적인 경향이 비슷하며 측정된 MT 신호의 잡음과도 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

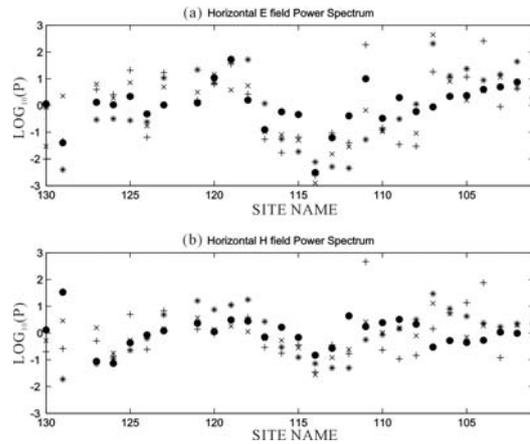


Fig. 74 Distribution of the measured noise power spectra(●) and predicted noise power spectra(building:×, road:+, high-voltage powerline:*) at the frequency of 57Hz.

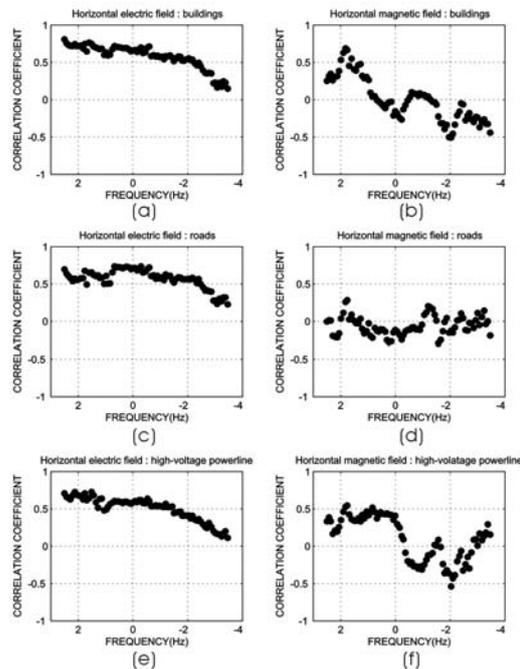


Fig. 75 Correlation coefficients between the power spectrum of measured noises and predicted noises.

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. 5). 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 60Hz 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 도로

를 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 1-10Hz 대역의 자기장 성분에서 건물이나 도로에 비해 높은 상관관계를 보인다. 이러한 특성은 자기장 성분에서 추출되는 티퍼(Tipper)자료에도 반영되고 있다.

5. 결 론

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.

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 나타낸다.

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.

6. 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.

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 Pederson, 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.

Zonge, K. L. and Hughes, L. J., 1991, Controlled source audio-frequency magnetotellurics: in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Vol. II.