

한국의 전자탐사 현황

조동행*

인하대학교 지리정보공학과

Electromagnetic Survey in Korea

Dong-heng Cho*

Dept. of Geoinformatic Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea

Electromagnetic(EM) survey has been in use for over a half century as a standard routine for mineral exploration in many parts of the world. But EM survey work and serious research effort were initiated in Korea only as late as in early 1980s, largely inspired by four pioneers who did their graduate studies in the U.S.A. in 1970s. Nevertheless domestic achievements in the field of EM survey are remarkable in the last two decades: the field operations and related interpretational skills appear to have reached a global standard, even compared with the most advanced in other countries, virtually in a whole spectrum of the method which includes magneto-tellurics(MT), Controlled Source Audio-frequency Magneto-tellurics(CSAMT), geomagnetic sounding, small loop survey systems, Very Low Frequency(VLF), Ground Penetrating Radar(GPR), time domain surveys, and noise analysis. Besides mineral exploration, EM survey has been applied in Korea to hydrogeology, geotechnical engineering, non-destructive investigation of structures, unexplored ordnance(UXO) investigation, environmental monitoring, and archaeological investigation as well. Now that original contributions of several Korean geophysicists are found even in new frontiers such as high-frequency EM survey, investigation in time-domain EM field for buried metal objects and structures, and also modern data inversion scheme, it is duly hoped that they make some technical breakthrough to unravel still entangled knots of EM survey method in a foreseeable future.

Corresponding author:

Key words : electromagnetic, loss tangent, propagation constant, skin depth, induction number

다른 물리탐사법과는 달리, 전자탐사의 실질적인 국내 활용과 연구는 1980년대부터이다. 이렇게 늦게나마 시작하게 된 것은 1970년대 미국 유학한 네 명의 연구자들의 영향이고, 이들과의 공동연구와 유대는 현재까지 지속되고 있다. 그 동안 국내 연구진이 이룬 성과는 괄목할 만 하다. 이제 우리는 MT와 CSAMT탐사, 지자기수직탐사, 소형루프탐사, VLF탐사, GPR탐사, 시간영역 전자탐사 등 전 분야에 걸쳐 국제 수준의 기술력을 확보하게 되었고 신기술인 고주파수 전자탐사, 시간영역 전자탐사, 역산기법 분야에서 창의 있는 연구 성과를 내고 있다. 활용 분야도 지하자원탐사에서 지반조사, 환경조사, 고고학조사, 구조물 결함조사, 땅굴조사 등으로 엄청나게 확장되었다. 아직도 자료해석이 난삽하기 이를 데 없는 전자탐사법을 한 단계 높일 결정적인 돌파구가 국내 연구진에 의해서 나올 날이 멀지 않을 것이다.

주요어 : 전자기, 손실탄젠트, 전파상수, 표피심도, 유도상수

1. 서 론

이 글의 주제가 국내 전자탐사의 현황이라 국내 탐사활동과 연구에 국한해서 기술하는 것이 상식이겠으나, 전자탐사에 관한 한 불모의 시대였던 1970년대에

외국유학을 가서 공부하고 연구한 네 사람의 업적과 영향이 1980년대 국내 연구와 활동을 일으킨 계기가 되고, 이 들 중 세 사람은 현재 미국에 정착하였어도 국내 연구진과의 공동연구와 유대가 현재까지 지속되므로, 이 들의 연구와 활동을 아울러 기술한다.

*Corresponding author: dhcho@inha.ac.kr

1970년대는 간접적으로 국내 전자탐사 연구와 활동을 위한 준비 기간으로 생각할 수 있다. 1980년 초 호주의 SIROTEM시스템을 이용한 시간영역 탐사법이 국내 도입되고 현장테스트와 기초 연구가 태동한다. 이러한 연구가 주파수영역 탐사분야에서도 동시 다발적으로 수행된다. 주파수영역 탐사기기는 1970년대부터 국내사용이 된 간단한 VLF탐사기기 밖에 없음에도 불구하고 기초 연구는 수준 높게 진행된다.

1980년대 중반부터 CSAMT, MT 탐사가 도입되고 현장테스트와 정량적 해석을 위한 기초연구가 병행된다, VLF 탐사자료의 정량적 해석을 위한 수치모델링도 이 때 이루어진다.

1990년대는 GPR탐사법, 소형루프 탐사법, 고주파수 탐사법이 차례로 국내에서 활용되고 연구가 활성화된다. 현대적인 역산법에 의한 정량적 해석이 화두로 등장하고 이에 의한 해석법이 개발된다. 이제 탐사의 주체가 지하자원탐사에서 지반조사, 환경조사, 기타 조사 등으로 이동한다. 시추공 물리탐사법도 새로이 개발되고 활용된다.

2000년대에 들어 와서는 지자기 수직탐사법이 연구 활용되고, 시추공전자탐사, 고주파수 전자탐사, 역산 분야 등에서 선진 수준의 논문이 외국유학을 하지 않은 국내파의 주도로 발표되기 시작한다.

전자탐사가 전문이 아닌 사람들의 이해를 돕기 위하여 먼저 전자기학의 기초를 간략히 기술한다.

2. 전자기학 기초

2.1. 맥스웰(Maxwell)의 방정식

벡터장(vector field)은 이 벡터의 발산(divergence)과 회전(curl)에 의해서 유일무이하게 결정된다는 Helmholtz의 정리에 따라, 벡터장인 전자장도 자연히 이 둘의 발산과 회전으로서 표시한다. 이러한 형식으로 간결하게 표시한 식을 Maxwell의 방정식이라고 부르며, 이는 전자기 관련 연구의 시발점이 된다. 이해를 돕고자, 미분형에 적분형을 아래에 병기한다.

미분형 적분형

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \text{emf} = \int_{\text{line}} E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{surface}} B \cdot da \quad (1)$$

이 식은 Faraday의 전자감응법칙을 나타낸 것이다.

$$\nabla \cdot D = \rho_{\text{free}}, \int_{\text{surface}} D \cdot da = \int_{\text{volume}} \rho_{\text{free}} dv \quad (2)$$

이 식은 전하에 의해서 전장이 발생함을 말하며 분극전하 아닌 자유전하 만에 의한 관점에서 표기한 것

이다.

$$\nabla \times H = J_{\text{true}} + \frac{\partial D}{\partial t}, \int_{\text{line}} H \cdot dl = \int_{\text{surface}} \left(J_{\text{true}} + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot da \quad (3)$$

이 식은 암페어(Ampere)의 법칙을 나타낸다. $\partial D/\partial t$ 는 전하 분극에 기인한 변위전류(displacement current)를 나타낸다.

$$\nabla \cdot B = 0, \int_{\text{surface}} B \cdot da = 0 \quad (4)$$

이 식은 자장을 발생시키는 자하(磁荷, magnetic charge)는 실재하지 않는다는 사실을 나타낸다.

상기한 식들에서

E = 전장(電場, electric field)벡터 volt/m

H = 자장(磁場, magnetic field)벡터 ampere turn/m

D = 전장 변위(displacement)벡터 coulomb/m²

B = 자속(磁束)밀도(magnetic induction)벡터 weber/m²(tesla)

ρ = 전하(電荷)밀도(electric charge density) coulomb/m³

J = 전류밀도(electric current density)벡터 ampere/m²

E, D, B, H, J 이다. 간에는 등방성 매질과 통상적인 조건하에서 다음과 같은 선형 관계식을 만족한다.

$$B = \mu H, D = \epsilon E, J = \sigma E \quad (5), (6), (7)$$

여기에

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (8)$$

로 표시되는 연속의 방정식이 필요하다. 이방성인 매질을 위해서는 μ, ϵ, σ 를 스칼라대신 2계 텐서(2nd rank tensor)로 나타내야 할 것이다.

투자율(magnetic permeability) μ 는 매질의 자성을 나타내는 지표로서 허공에서 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henry/m 이고 대부분의 광물 및 암석의 투자율은 μ_0 에 근사하다. 자성광물이라고 할지라도 투자율은 μ_0 의 3배 즉 상대 투자율 $\mu_r = \mu/\mu_0$ 가 3을 넘지 않는다. 금속의 상대투자율은 1 이상 100을 상회하여 특수금속에서 최대 100,000이 될 정도로 크다. 그러나 100 정도에서 자기포화가 되므로 물리탐사로서 100 이상의 상대투자율 구분은 어렵다.

전기분극 축전의 척도가 되는 유전율(electric permittivity) ϵ 는 허공에서 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ farad/m, 대부분의 암석과 광물의 대표적인 유전율은 이의 9배 정도 즉 상대유전율 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 이 9 정도이다. 특이하게 물의 상대유전율은 81에 달한다.

투자율과 유전율과 달리 전기전도도(electric conduc-

tivity) σ 의 변화폭은 아주 크다. 공기 중에선 거의 0, 보통 암석의 대표적인 값은 10^{-3} siemens/m 정도이나, 전도성 광물의 경우 10^4 siemens/m 정도로 높은 값을 보이며, 암석의 변화폭은 대략 $10^{-5} \sim 10^5$ siemens/m로서 변화폭이 크다. 전기비저항은 전기전도도의 역수이다. 그러나 금속의 경우는 $10^6 \sim 60 \times 10^6$ siemens/m 정도의 높은 값을 나타낸다.

대부분의 경우, 상기한 투자율, 유전율, 전도도가 전자장의 주파수에 따라 변하지 않는다고 간주해도 좋으나, 일반적으로는 주파수의 함수가 되어 소위 확산(dispersion)현상이 나타난다(Olhoeft and Strangway, 1974).

Fourier 영역에서 Faraday의 법칙과 Ampere의 법칙은 아래와 같이 된다.

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H, \quad (9) \quad \nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon)E \quad (10)$$

이제 여기서 E 와 H 는 위치와 주파수의 함수인 벡터이다. 주파수영역 전자탐사 해석은 이 형식의 방정식에서 출발함이 상례이다. 또한 여기서 $j\omega$ 를 Laplace 변환 변수 s로 치환하면 Laplace 영역에서의 식이 되며 이는 시간영역 전자탐사 해석(解析)에 유용하다(Cho, 1978; Mizunaga *et al.*, 1999). 축대칭(axial symmetry) 문제의 경우 Bessel (혹은 Hankel) 영역에서 문제를 접근함이 편리하다.

2.2. 직교좌표계에서의 선형미분방정식

Maxwell의 방정식을 보아 알 수 있듯이, 전자기 현상은 거의 언제나 전장과 자장이 동반하여 존재하며, 시간과 위치의 함수인 이 두 역장이 벡터 미분방정식으로 서로 얽혀 있기(coupling) 때문에, 주어진 경계조건과 초기조건하에서 전자기문제를 푼다는 것은 대단히 번거롭고 어렵다. 이렇게 복잡한 문제를 명료하게 검토하기 위하여, Maxwell의 방정식 대신, 전장과 자장이 각기 동일한 형태의 선형편미분방정식을 만족함에 주목하자 (Grant and West, 1965).

$$\nabla^2 E - \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla^2 H - \sigma\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (12)$$

단 이 방정식은 직교좌표계(cartesian coordinate system)에서만 사용이 가능하며, 전자장의 근원이 존재하는 점 이외의 모든 점에서 만족하는 방정식이다(다른 직교좌표계에서의 식은 복잡하다). 전자장의 근원에 해

당하는 항은 이 방정식의 오른쪽에 삽입한다. 상기한 식에서 알 수 있는 바와 같이 전자기에너지는 일반적으로 감쇄를 동반한 파동의 형태로 전파된다. 감쇄는 주로 매질의 전기전도도에 관련되고 파동현상은 유전을 때문에 가능하다.

2.3. 전자기현상의 여러 가지 경우

전자탐사에서의 물리 현상은 물성과 사용주파수에 따라 상이하므로 이에 따라 여러 가지 경우로 나누어 고찰함이 편리하다. 먼저 주파수 영역에서의 평면파를 고찰하자(평면파를 조합하여 구면파, 원통형파 등을 도출할 수 있다는 사실은 잘 알려져 있다). Fourier 영역에서 전기한 미분방정식들은 Helmholtz 방정식이 된다.

$$\nabla^2 E - (j\sigma\mu\omega - \epsilon\mu\omega^2)E = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 H - (j\sigma\mu\omega - \epsilon\mu\omega^2)H = 0 \quad (14)$$

이제 E 와 H 는 이제 위치와 주파수의 함수이다. 다음과 같이 전파상수(propagation constant) γ 를 정의한다(Kraichman, 1970).

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{-\epsilon\mu\omega^2 + j\sigma\mu\omega} \quad (15)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} - 1} \quad (16)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} + 1} \quad (17)$$

여기서 α 를 감쇄상수(attenuation constant), β 를 위상상수(phase constant)라고 부른다. 일반적으로 전자기 에너지는 위상속도 $v = \omega/\beta$, 감쇄상수 α 의 지수함수 감쇄를 하면서 전파된다. 표피심도(skin depth)는 $\delta = 1/\alpha$ 이다. 또한 위의 식에서

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\epsilon\omega} = \frac{\sigma E(\text{conduction current})}{\epsilon\omega E(\text{displacement current})} \quad (18)$$

는 전도전류와 변위전류의 상대적인 기여도를 나타내나 전도전류에 기인한 에너지 손실을 나타내는 지표(loss factor)로 사용할 경우는 이를 손실탄젠트(loss tangent)라고 부른다. 이 지표에 따라 각기 상이한 전자기 현상이 나타난다.

(1) $\sigma/\epsilon\omega \ll 1$ “불량도체(poor conductor)”의 경우

근사적으로 감쇄상수 $\alpha = \frac{\sigma}{2\sqrt{\epsilon\mu}}$, 위상상수 $\beta = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ 가 된다. 위상속도는 $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ 로 완전유전체(perfect

dielectric)의 경우와 같으며 주파수와 무관하다. 즉 파동의 분산(dispersion)이 없다. 표피심도 역시 감쇄상수의 역수이므로 주파수와 무관하나 특이하게 표피심도는 대단히 작다. 100 MHz~1 GHz 범위의 GPR탐사가 이 경우에 속한다. 이 주파수 범위 내에서 ϵ 및 μ 가 주파수에 따라 변하기 때문에 이에 기인한 분산을 고려한 해석이 시도되고 있다(Powers, 1997).

(2) $\sigma/\omega \gg 1$ “양도체(good conductor)”의 경우

감쇄상수와 위상상수는 근사적으로 $\alpha = \beta = \sqrt{\omega\sigma\mu/2}$, 위상속도 $v = \sqrt{2\omega/\sigma\mu}$, 파장 $\lambda = 2\pi\sqrt{2/\omega\sigma\mu}$, 표피심도 $\delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu}$ 가 된다. 전파하면서 진폭이 급격히 감쇄되며, 위상속도가 주파수에 따라 다른 분산현상(dispersion)을 수반한 에너지 확산(diffusion)에 가깝다. 지반의 유전율은 전자현상에 별 영향을 끼치지 못한다.

이상대를 대표하는 크기를 l 이라 할 때, 무차원의 수 $\omega\sigma\mu^2 l^2$ 를 감응파라미터(induction parameter) 혹은 응답 파라미터(response parameter)라고 부른다 (이 파라미터가 클수록 표피심도는 작아지며 반대로 작을수록 표피심도는 커짐에 유의할 것). 또는 응답파라미터의 평방근인 $\sqrt{\omega\sigma\mu} l$ 을 유도상수(induction number)라 부르고 대신 사용하기도 한다. 만일 이 응답파라미터가 1보다 아주 크다면 감응전류는 이상대를 통과하지 못하고 유도전류는 표면에 흐른다. 반대로 1보다 아주 작으면 이상대 전체에 유도전류가 흐르나 전류의 세기는 무척 작다. 파라미터가 이 둘 중간이면 어느 정도 심도까지 상당한 유도 전류가 흐르나 (그러나 전류세기의 공간적 분포는 균일하지 않다) 그 위상은 자장의 위상과 다르다. 대부분의 전자탐사는 “양도체” 탐사인 경우에 해당한다. 응답의 동상(in-phase)성분과 이상(out-of-phase)성분이 모두 충분한 크기로 측정되도록 응답파라미터의 사용 주파수를 결정함이 바람직하다.

(3) $\sigma/\omega \approx 1$ 인 경우

전도전류와 변위전류의 크기가 비근한 전자장의 경우, 전기한 두 경우와 달리, 물리현상을 단순화하기가 어렵고 근사식으로 처리할 수가 없다. 이러한 이유로 이에 해당하는 0.1 MHz~100 MHz 주파수의 전자장은 별로 사용되지 않았으나, 근년에 이 범위의 주파수를 이용하려는 본격적인 시도가 있다. 레이더주파수 경우 보다는 투과심도가 크고, 통상적인 전자탐사의 경우 보다는 파장이 작기 때문에 높은 분해능을 필요로 하는 전자검층에 특히 유용한 할 것이다. 물성에 의한 분산(dispersion)도 고려함이 좋을 것이다.

3. 국내 전자탐사 현황

3.1. 주파수영역 탐사

한국인으로 전자탐사를 전공한 사람은 류지수가 처음일 뿐만 아니라 그의 논문(Ryu *et al.*, 1970)이 발표 당시에는 물론 현재도 참조할 가치를 충분히 가지고 있으므로 먼저 소개한다. 수평다층구조, 각층의 전도도, 유전율, 투자율, 주파수 모두 임의, 임의 크기의 수평 송신 루프에 의한 자장과 수직(vertical) 및 수평(radial)성분, 전장의 수평(tangential)성분을 나타내는 수학적 엄밀해(analytic solution)를 구하고, 유도상수(induction number) 0.1~10 범위(혹은 1 Hz~2 MHz)에 걸쳐 도시하고 분석한다. 탐사방식으로 다주파수 측정에 의한 감응수직탐사(induction depth sounding)와 중앙감응수직탐사(central induction sounding) 두 가지를 제시한다. 전자는 수신루프를 송신루프 밖에 두어 자장 분극타원의 경사각(tilt angle) 혹은 타원을(ellipticity)을 측정하며, 후자는 수신루프를 송신루프 안에 두어 수직자장성분의 이상성분을 측정함이 좋다고 밝히고 있다. 전도성, 자성, 등방성 반무한 매질을 대상으로 한 저주파 중앙감응수직탐사에서 원위치(in-situ) 투자율을 구할 수 있음을 밝힌다. 아울러 지반 전도도가 10^{-3} siemens/m 이상일 때 지반 전도도에 기인한 보정을 대형 루프 Turam탐사 자료에 해주어야 함을 밝힌다. 또한 손실탄젠트(loss tangent)가 1보다 작을 경우 변위전류를 무시할 수 없음을 밝히고, 사막, 빙하, 달(月)에서의 탐사를 거론한다. 당시에는 금속광물탐사가 주관심사이고 아직 광물탐사 이외 목적의 천부물리탐사(near-surface geophysics)가 태동하지 않았다. 이어서 200 Hz~10 kHz 범위의 14개 주파수를 이용하여 캘리포니아에서 지하수탐사를 성공적으로 수행한다(Ryu *et al.*, 1972).

다음 임의의 전도도, 유전율, 투자율을 가지는 3개 영역, 즉 공기, 이상대, 모암을 포함한 전자탐사 문제를 적분방정식으로 정형화 하고, 이의 응용으로 전도성 반무한 공간에 배대된 2차원 원통, 광맥, 썩기상 이상대의 자기쌍극자 응답을 계산하여 스케일모델링 결과와 비교 검토한 흥미있는 연구가 원인재에 이해서 이루어 진다(Won and Kuo, 1975a & 1975b).

이기는 자기쌍극자에 의한 2차원 이상대 응답을 전장에 기초한 유한요소법으로 구하고자 한다(Lee, 1978). 자장에 기초한 류지수의 유한요소법(Ryu, 1971)이 자장의 변화가 심한 지반-공기 경계면에서 계산상 어려움이 있기 때문에 동일한 문제를 전장에 기초하여

재정립한 것이다. 이 문제를 훗날 다시 시도하여 스케일 모델링 결과와 비교하여 정확을 기하고 있다(Lee and Morrison, 1985a & 1985b). 상기한 유한요소법은 에너지최소화에 의한 변분 적분(variational integral)에 기초한 것이다.

이상의 연구는 모두 1970년대에 미국에서 수행되었고 국내 연구계에 지금까지 많은 영향을 주고 있다.

3.1.1. “양도체” 근사: 전도전류 우세

(1) 소형루프 시스템

국내에서 전자탐사가 본격적으로 실시되고 연구 성과가 발표되기 시작한 것은 1980년대부터이다. 이두성은 전도성 매질 내 자기쌍극자 송수신 거리가 커지거나 높은 주파수에서 전자장계산의 정확도가 떨어지는 것을 복소평면에서의 경로적분(contour integration)으로 극복할 수 있다는 것을 보여준다(이두성, 1982). 정현기등은 수평루프전류원(수직자기쌍극자)에 대한 구형(球形) 도체의 응답을 계산한 예를 제시한다(정현기와 서정희, 1985). 또한 이들은 자성(permeable) 구상도체의 수평루프전류 응답을 검토 한다(정현기 등, 1985).

이상규 등은 수평 전기쌍극자에 의한 층서구조 전자기 응답을 수치적분으로 구한다. Bessel 영역에서의 적분은 디지털 선형필터법으로도 구할 수 있으나 먼저 가우스 구적법으로 계산한다(이상규와 서정희, 1981). 이어서 다주파수 전자탐사에 의한 층서구조 수직탐사를 검토하여 수평 전기쌍극자법의 효율을 확인하고, 층서분해능은, 전도도가 심도에 따라 증가할 경우, 향상됨을 밝힌다(이상규와 서정희, 1982). 이번에는 적분계산에 디지털 선형필터를 이용한다.

소형루프 전자시스템을 UXO탐지, 환경 및 건설 지반조사에 적용하여 괄목할만한 성과(Witten *et al.*, 1997; Won *et al.*, 2001; Norton and Won, 2001)를 거둔 팀은 국내외를 막론하고 원인재 탐을 먼저 꼽아야 할 것이다. 이를 위한 이론적 단초는, 뒤에 소개하는 이인재의 소인주파수 전자탐사에서 찾아야 하겠지만, 실용화시킨 방법은 단지 몇 개의 주파수와 아주 간단한 지하 모델을 이용한 전자탐사이다. 상품명 GEM-2(Won *et al.*, 1996), GEM-3(Won *et al.*, 1997) 탐사시스템은 한 사람이 휴대하여 사용할 수 있는 것들이고, GEM-2A는 헬기탑재 탐사시스템이다. 사용 주파수 범위는 GEM-2가 300 Hz~24 kHz, GEM-3가 30 Hz~24 kHz, GEM-2A 300 Hz~48 kHz 이다. 대략 3~4 데케이드(decade)에 걸친다. 원인재는 주파수 소인이 아닌 상기한 다주파수 시스템으로 얻은 가단면도

역시 스펙트럼응답(spectral response)이라고 부른다. 이 응답이 피탐사체의 정체를 나타내는 지문이 된다고 주장하고 이러한 탐사법을 전자유도 스펙트로스코피(EM induction spectroscopy)라고 명명하였다(Won *et al.*, 1998; Won *et al.*, 2001). 상기한 방법의 탁월성은 무엇 보다 탐사자료 해석(解釋)에 있다. 그 단서는 먼저 소개한 류지수의 1970년 논문에 있을 지도 모른다. 반무한 매질에 배대된 구(球)의 경우도 주파수가 어느 문턱 값보다 적어지면 동상 성분이 음(陰)이 될 뿐만 아니라 주파수와 무관하고 오직 투자율에만 관련이 된다(Nabighian, 1987). 즉 저주파 탐사 자료에서 반무한 매질의 투자율을 구할 수 있다는 사실에 입각하여, 먼저 유도상수 0.1 이하 되게 하는 저주파에서 얻은 동상 및 이상 성분에서 상대투자율을 구한 후, 이로부터 높은 주파수들에서의 자료를 이용 전도도를 구한다. 여기서 구한 투자율과 전도도의 분포를 도시한 도면은 반무한 매질의 것이기 때문에 겹보기투자율 분포도, 겹보기전도도 분포도인 것이다(Huang and Won, 2000; Huang and Won, 2004). 이럼에도 불구하고 겹보기물성도가 실제 이상체의 분포를 다른 팀의 방법보다도 정확하게 나타내고 가상 이상을 잘 선별해내는 점이 인상적이다. 자력이상은 음과 양의 부분이 짝으로 나타나나 전자기상은 중력이상과 같이 체 자리에 하나만 나타나며, 전자탐사에선 전도체뿐만 아니라 자성물체도 동시에 탐지한다(Won *et al.*, 1997).

국내에서도 지반조사 및 매설물 탐지를 위한 전자탐사연구가 최근 부쩍 증대하고 있다. 송윤호, 정승환, 설순지, 유진상, 송윤호, 조성준, 손정술등이 2차원 문제를 적분방정식으로 정리하여 수치모델링에 현장조사 시험을 병행하고 있다(유진상 등, 2001; 송윤호와 정승환, 2002; 설순지 등, 2002). 현장조사 시험을 위해서 Geonics사의 EM34-3XL, GSSI사의 GEM300등이다. 조인기등은 2차원 모델링을 통하여 동상성분 측정에는 주파수 수직탐사(frequency sounding), 이상성분 측정에는 기하학적 수직탐사(geometrical sounding)가 적합함을 확인한다. 그러나 전도도가 낮고 잡음이 많은 국내 조건에는, 동상성분과 같이 거동하는 이상성분(주파수를 달리한)의 차이를 이용하는 새로운 주파수수직탐사법에서 얻는 겹보기비저항도가 유력하다고 주장하고(조인기와 임진택, 2003a) 1차원역산프로그램을 작성 (조인기와 임진택, 2003b) 현장탐사 자료에 적용한 결과를 검토한다(임진택과 조인기, 2003). 전자탐사에 의한 논도양분석(송완호 등, 2003), 매장탐 침출수 조사(송성호 등, 2003; 손정술 등, 2005), 해수침투 조사(Song,

2006) 사례도 보고 되고 있어 소형루프탐사법의 활용영역이 계속 확대되고 있음을 알 수 있다. 정호준 등은 3차원 유한요소 모델링을 이용하여 수평원통형 도체의 탐사문제를 고찰한다(정호준 등, 2000).

(2) 중심 전자탐사

송신원 대형루프 중심에서 소형루프로 자장의 3성분을 모두 측정하는 중심전자탐사 스케일 모델링이 1980년대 후반기에 수행된다(조동행 등, 1987). 대형루프 송수신에 의한 시간영역 전자탐사의 경우 지형의 기복에 의한 영향이 크지 않은 현장 탐사 경험을 참작하고(조동행 등, 1982) 아울러 송신 루프 내에서는 자장의 분포가 비교적 균일하다는 이점을 고려하여 이러한 시스템을 생각한다. 모델링 주파수는 현장 사용주파수 400 Hz에 해당한다. 이상체는 판상 전도체를 채택하였다. 예상대로 이상체 구분의 신빙성이 많이 향상되나, 60도 이상급경사일 경우는 3성분 측정에도 불구하고 분해능이 불량하다. 그러나 3성분 측정은 탐사 초기에 최적측선 방향 설정에도 도움이 된다. 앞으로 3성분 주파수 측정에 의한 UXO(Unexplored Ordnance)탐지를 검토함도 유익할 것이다. 전자기학에서 단위 근원 응답인 Green함수가 2계 텐서임을 상기할 때 3성분 측정은 오히려 자연스런 일이다.

(3) 소인주파수(sweep frequency) 전자탐사

물리탐사의 한 방법으로 소인주파수 전자탐사를 고안한 사람은 윈이재이다. 그는 전자기 에너지의 표피심도가 이상체의 매몰심도보다 다소 클 때 응답이 최대가 됨을 2차원 전자탐사 이론으로 확인하였다. 그러나 탐사대상체의 심도를 미리 알지 못하기 때문에 최적 사용 주파수를 미리 정하기가 어렵다. 다주파수 시스템은 이러한 목적으로 유용하나 동일한 측정을 매 측정점에서 반복해야 하는 번거로움이 있다. 먼저 판상도체를 대상으로 소인주파수스케일 모델링이 수행된다. 4 kHz~4 Mhz 범위의 송신신호를 대수적으로 연속 소인한다. 송수신은 동심축(co-axial) 수평 자기쌍극자 시스템과 동일면(co-planar) 수직쌍극자시스템이다. 측정치의 진폭을 거리(수평축)·주파수(수직축)로 주파수 감소) 평면에 등고선으로 도시한다. 심부에 있는 이상체일수록 주파수축 하부에 나타남으로 이는 전기탐사의 비저항 가단면도와 비견될 수 있다. 탐사이론이 충분히 뒷받침 되면 가단면도를 실단면도로 변환할 수 있으리라고 희망한다(Won, 1980, 1983). 이 후 국내에서도 서정희가 동일한 소인주파수 전자탐사 스케일 모

델링을 수행하였다(서정희, 1983). 그러나 이 후 윈이재는 주파수 소인이 아닌 다주파수 시스템으로 얻은 가단면도도 스펙트럼응답(spectral response)라고 부르고 이 응답이 피탐사체의 정체를 나타내는 지문이 된다고 주장하며 이러한 탐사법을 전자유도 스펙트로스코피(EM induction spectroscopy)라고 명명하였다(Won et al., 1998).

(4) VLF 전자탐사

이 탐사에선 선박, 항공, 잠수함 운항을 위하여 송신하는 15 kHz~25 kHz 범위의 자장신호를 수신하여 이용한다. 수신점이 송신소에서 워낙 멀기 때문에 실질적으로 평면파이다. 수신기가 휴대용이고 측정이 간단하여 일찍이 1970년대 중반기부터 국내에 소개되어 현재까지 많이 이용되고 있다. 국내에 도입되어 실용화된 최초의 전자탐사법이다. 이 탐사법은 다음과 같은 특징이 있다. 물성과 주파수에 의하여 결정되는 유도상수(induction number)가 천부 이상대와 잘 부합하여 다른 어떤 탐사법에서 보다는 많은 전자상이 얻어진다. 이는 장점이자 단점이다. 예컨대 광화대에 의한 응답이 수포화 파쇄대에 의한 응답과 비슷하다. 따라서 자료 해석이 생각보다 용이하지가 않다. 그러나 단층파쇄대, 지질경계등의 탐지와 수리지질조사에는 효율적이라고 알려져 있다. 다른 전자탐사를 본격적으로 시행하기 전에 개사 단계에서 이 방법을 적용함도 좋을 것이다.

국내에서 관련된 연구는 2차원 모델에 대한 유한요소법 수치모델링이 처음으로 정량적 해석에 많은 도움이 되었다. 여타의 국내 탐사 사례를 몇 개 소개한다. 지질의 수평적 변화 탐지(송영수 등, 1992), 단층탐지(송영수 등, 1994), 벤토나이트 광상조사(송영수 등, 1993), 맥상 황화광체 탐사(유인걸, 1998)가 그것이다.

(5) MT탐사

이 탐사에선 자연적으로 존재하는 0.001 Hz~1 Hz (때로는 audio frequency 까지) 주파수 대역의 전장과 자장을 동시에 매 수신점에서 수신하여 이용한다. 공기와 지반의 전기전도도 차이가 워낙 크기 때문에, 후에 기술하는 고주파수가 아닌 이상, 공기 중에서 지반에 입사하는 전자파의 굴절각은 아주 작아서 평면파가 수직으로 입사한다고 보아도 무방하다(Slater and Frank, 1947). 전장과 자장은 서로 수직이고 수신 전장을 E_x , 자속밀도를 B_y 라 할 때

$$\rho_a = \frac{0.2}{f} \left| \frac{E_x}{B_y} \right|^2 \quad (19)$$

로 정의되는 식은, 비저항의 차원을 갖고, MT탐사에서
의 겔보기비저항이다. 주파수 f 에 반비례 하며, 자장의
위상이 전장에 비하여 45°지연된다. 그러나 지반이 균
일하지 않기 때문에 주파수 마다 위상이 45°에서 벗어
나고 겔보기비저항이 다르게 나타난다. 또한 겔보기비
저항이 측정 자장과 전장의 방향에 따라 다르기도 하
기 때문에 겔보기비저항-주파수 그래프의 텐서해석이
필요하다(Parasnis, 1986). 원래 층서구조에 대한 주파
수수직탐사로 출발했으나 차츰 2차원 구조와 3차원 구
조 탐사로 확장되고 있다. 워낙저주파로서 파장이 길
기 때문에 대규모 지질구조 조사, 지구 연약권 조사까
지 탐사영역이 된다.

우리나라에서 최초로 MT탐사를 전공하여 국내에 소
개한 사람은 정승환이다. 그는 Fourier영역에서 에너지
총화의 최소화에 기초한 변분적분을 유한요소법으로 푸
는 접근방법을 채택하여 2차원 구조 모델로 티베트지
역의 지각구조를 연구하였다(Chung, 1984). 비슷한 시
기에 이기하등은 미국에서 TM모드(자장이 지질주향에
평행) 적분방정식 접근방법을 택하여 2차원 구조 응답
을 다른 연구자의 유한요소법 해와 비교 검토하였다.
국내 연구는 1990년대에 들어와서 측정 자료에 혼입된
정적효과(static effects) 제거(이성곤 등, 1994), 유한요
소법을 이용한 지형보정(손정술과 서정희, 1997)등이
보이고 2000년대에는 전자장의 하향연속 개선을 이용
한 지질구조 해석(서기원과 권병두, 2000), 3차원 역산
에 의한 포항지역 MT자료 해석(이태종 등, 2005), 3
차원 역산에 미치는 정적 효과의 고찰(이태종 등,
2003), 유한차분법에 의한 MT탐사 모델링(한누리 등,
2004), 원거리 기준점 MT자료를 이용한 심부지열자원
탐사 연구(이태종 등, 2005), MT자료, 시추공 자료,
통계학적 해석에 의한 암반등급평가(오석훈 등, 2004)
등이 눈에 띈다.

(6) CSAMT 탐사

주파수대역이 가청주파수 정도로 높은 자연 전자장
을 이용하여 지질영역의 탐사를 하자는 소위
AMT(Audio-frequency Magneto-tellurics)법도 있으나
이 범위의 자연 전자장의 에너지가 너무 미약하여 크
게 사용되지 못하고 있다. 우리나라에선 이의 변형인
ELF-MT법에 의한 옥천계 지질조사 연구가 보고 되어
있다(민경덕 등, 1988). 이 범위의 전자장을 인공적으
로 발생시켜 MT에서와 같이 자장과 전장을 측정하여
이용하는 탐사법이 CSAMT탐사법이다. 1980년대 후반
에 이 탐사를 수행하기 위한 기초 연구와 현장적용 시

험이 이루어 졌다. 층서구조에 대한 수치모델링(정승환
과 김정호, 1989a), 근접장 보정과 해석에 관한 연구
(정승환과 김정호, 1989b), 시험탐사연구(정현기 등,
1989)등이 그것이다. 곧 이어 심부석탄층 탐사에도 유
효함이 밝혀졌다(정승환 등, 1990). 1990년대 말에
CSAMT법에 의한 강원도 원동지역 금속광상 발견 성
공사례가 있다(이상규 등, 1998). 또한 측선방향으로
다수의 전장측정 접지쌍극자센서와 한 개의 자장측정센
서를 하나의 그룹으로 자료취득을 하는 array CSAMT
탐사가 심부 단층조사에 전기비저항탐사보다 좋다는 결
과도 있다(이상규 등, 1998). 2000년대에 들어 와서는
초정지역의 수리지질구조를 탐사한 흥미 있는 사례가
눈에 띈다(송성호 등, 2002).

(7) 지자기 수직탐사(geomagnetic depth sounding)

지자기 수직탐사는 낮은 주파수의 자연 전장과 자장
을 모두 이용하는 MT법과 달리 3성분의 자연 자장만
을 측정한다. 통상 맨틀상부까지의 심부구조 연구가 가
능하다. 이 방법이 국내에서 활용되기는 극히 최근으
로 2000년대 들어와서이다. 전기전도도 이상이 있을
때 자장의 수직성분 H_z 를 두 수평성분 H_x , H_y 의 일차
결합으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_z = AH_x + BH_y$$

여기서 A, B를 MT에서는 티퍼(tipper), 지자기수직
탐사에서는 전달함수(transfer function)라고 부른다. 이
는 주파수의 함수이고 주파수영역에서 복소수이다. 전
달함수의 실수성분과 허수성분의 크기와 방향을 나타
내는 벡터를 도시하여 이용한다. 이 벡터를 유도지시
자(induction arrow)라고 부른다. 보통 실수성분의 지
시자가 크기 때문에 신뢰도가 크다. 실수 유도지시자
를 180° 회전시킨 Parkinson지시자는 주변보다 전도도
가 높은 지역을 가르킨다. 오석훈등은 이들 지시자가
한반도의 대표적인 지구구조를 향함을 확인하였고(오석
훈 등, 2002) 이어서 전도체 부존양상에 따라 지시자
가 어떻게 달라지는가를 2차원 MT수치모델링을 통하
여 조사하였다(양준모 등, 2002).

3.1.2. 전도전류와 변위전류의 비중이 비슷한 경우

(1) 고주파수 전자탐사(high frequency EM survey)
전술한 바와 같이 0.1 MHz~100 MHz 주파수 범위
의 전자에너지는 전도전류와 변위전류를 모두 무시해
서는 안 되기 때문에 물리현상 파악과 수식처리가 어
렵고 또 필요성이 상대적으로 낮아 본격적으로 활용되

지 못하고 있다. 그러나 최근에 석유탐사, 방사성폐기물 지하처분 등의 지반공학과 관련하여, 레이더탐사보다는 탐사거리가 길고 분해능이 좋은 고주파수 전자탐사의 필요성이 대두하고 있다. 이러한 상황 하에서 이기하등이 기초연구를 1990년대 중반부터 선구적으로 수행하고 있다. 이를 위하여, 필요한 유한요소법에 의한 3차원 수치모델링(Lee and Xie, 1995)과 적분방정식의 유도를 수행한다(Lee et al., 1995). 이어서 1998년에는 효율적인 역산을 위한 연구를 수행한다(Lee et al., 1998). 또한 국내에서는 단일시추공에서 수직자기 쌍극자원에 의한 박판이상체(단층파쇄대)에 대한 주파수 범위 0~100 MHz의 적분방정식 역산 수치모델링이 수행된다(Seol et al., 2002).

또한 인공적인 고주파수(10 kHz~100 MHz) 평면파에 의한 층서구조의 임피던스 측정(서로 직교하는 수평전장과 자장의 비)의 역산이 수행된다(송윤호와 정승환, 2002). 임피던스측정으로 전자기원과 간의 결합(coupling)이 자동으로 제거된다는 이점이 있다. 그러나 고주파수영역에서 굴절각이 작지 않으므로 평면파의 수직입사 근사를 할 수 없다. 따라서 측정자료에 대한 수평파수(horizontal wave number) 보정이 필요함을 밝히고 대단히 획명적인 연구결과를 얻었다. 이 탐사법을 CSHMT(Controlled Source High-frequency MT)라고 불러도 좋을 것이다. 이러한 목적에 부합한 센서를 이기하가 고안하였다(Lee, 1997). 손정술 등의 벡터 유한요소를 이용한 고주파수 3차원 전자탐사 모델링도 의의 있는 일이다(손정술 등, 2002).

(2) 전자 토모그래피(EM tomography)

전자 토모그래피 특히 시추공간 전자토모그래피(crosshole EM tomography)는 이미 1990년대부터 기초연구가 수행되고 있으나 크게 실용화되지는 못하고 있다. 지반조사 실용화를 위해서는 전술한 고주파수 전자탐사의 진보를 전제로 한다고 말해야 될 것이나, 이를 떠나서도 제한적이지만 그 노력이 지속되고 있다.

이기하는 “양도체” 근사인 확산방정식을, 아래와 같은 적분변환을 이용하여 파동방정식으로 변환한다. 원래의 확산방정식을 만족하는 자장을 시간영역 t 에서 $H(t)$, 등가파동방정식의 자장을 (假)시간영역 q 에서 $U(q)$ 라고 할 때, $H(t)$ 는 $U(q)$ 의 아래와 같은 적분변환이다(Lee and Xie, 1993).

$$H(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}t^3} \int_0^{\infty} q e^{-q^2/4t} U(q) dq$$

파동방정식의 토모그래피는 탄성파에서 이미 잘 알려진 기법이 있으므로 이제 전자토모그래피가 가능하다. 그러나 수직자기쌍극자에 의한 수직 주파수영역 자장문제에서 최소한 10개 주파수에 해당하는 샘플이 있어야만 적분변환을 제대로 할 수 있다(Lee et al., 1994). 이와 같은 난관을 극복하기 위한 방편으로 이태종등은 $H(q)$ 을 파선급수(ray series)로 근사시켜 주파수영역의 적분대신 다음의 간단한 식을 얻는다.

$$H(\omega) = (a_0 - \sqrt{j\omega} a_1 + j\omega a_2) e^{-\sqrt{j\omega} q}$$

즉 단지 2개의 주파수 데이터로 초동 q_0 과 진폭계수 a_0, a_1, a_2 를 구할 수 있다. 전공간(whole space), 2층 구조, 판상구조, 실린더구조에 대한 역산 수치실험결과가 많이 향상되었고, 미국 캘리포니아 Lost Hills유전 지역에서 실측한 자료에 적용하여 만족할만한 성과를 올렸다(Lee et al., 2002; Lee and Uchida, 2005).

이상의 연구와는 별도로 전자토모그래피 수치모델링이 수행된다. 적분방정식 접근방정식에 의한 3차원 모델링(조인기와 정승환, 1998)에 의하여 2차자장의 수직 성분 이용이 유리함이 밝혀진다. 이 후 다주파수 이용으로 연구가 확장된다(심현미와 조인기, 2000; 임성근 등, 2000). 또한 급수전개법에 의한 3차원 전자탐사 모델링을 계산시간이 적고 정확하게 수행할 수 있음이 보고 된다(조인기 등, 2001). 배경전도도가 1차원이 아닌 경우의 3차원 전자탐사 모델링을 근사 적분방정식 접근방법으로 수행된다(이성근과 Zhdanov, 2005).

3.1.3. “불량도체” 근사: 변위전류 우세

(1) 지반투과 레이더(GPR) 탐사

전술한 바와 같이 GPR탐사는 변위전류가 주도하는 전자기파동의 전파를 이용하는 탐사방법으로 반사탄성파탐사와 흡사하다. 1990년대에 국내에 도입되어 지금까지 가장 많이 활용되고 있는 전자탐사법이다. 아마도 현장작업이 간단하고 해석이 용이하다고 인식되어서 그러한지도 모르겠다. 파동의 전파라고는 하지만 에너지의 감쇄가 극심하여 아주 천부 탐사이외에는 활용이 어렵다. 최소한 국내 지반 조건에서는 그러하다.

1990년대 중반부터 기초 연구와 활용영역 확장을 위한 노력이 돋보인다. 송신파형과 파동전과 연구(설순지, 1995), 터널 콘크리트 내벽내 공동 탐지 실내실험 연구(정해상, 1996), 김근영등의 회절토모그래피 기법 연구(김근영 등, 1998), 시추공 탐사에 의한 지층경계면의 방위각 결정(김정호 등, 1998), 3차원 지표 탐사와 방사패턴 연구(최윤경 등, 2001), 3차원 Kirchhoff 마이

그레이션(조동기 등, 2002), 네트워크분석기를 이용한 최적 탐사시스템 구현(조성준 등, 2002)이 그것이다.

활용영역도 다양하여, 토양오염 조사(장형삼 등, 1998), 암석의 풍화도 조사(신성렬 등, 1999; 설순지 등, 2001), 유적조사(오현덕과 신중우, 2004; 김정호 등, 2005), 교각주변의 하상변화 조사(박인찬 등, 2005)등은 몇 가지 사례에 불과하다.

3.2. 시간영역 전자탐사

1970년대 중반까지도 시간영역 전자탐사는 전 세계적으로 소련권을 제외한 자유세계에서는 소수의 연구자들과 광산회사 탐사종사자를 제외하곤 많이 알려지지 않았다. 기초 연구가 충분히 되어 있지 못한 때라 탐사자료의 해석도 어려웠으리라 생각된다. 그러나 전도성 표피층 하부의 전도성 광체를 식별할 수 있다는 사실이 알려지면서 신기술로 간주되었던 시절이었다. 필자가 시간영역 전자탐사에 접하게 된 것은 당시 Newmont광산회사의 탐사책임자로서 Columbia대학에 Adjunct Professor로 출강한 Misac Nabighian을 통해서였다. “호주 Mutooroo지역에서 Newmont EMP (Electromagnetic Pulse)시스템을 이용한 탐사로 동(銅)광상을 발견하고, 시추로 확인까지 한 자료가 있으니, 이론적으로 확인할 수 없느냐?” 하는 제안을 지도교수인 John T. Kuo을 통하여 받았다. 마침 그 때 다른 연구팀이 유한요소법에 의한 탄성과 수치모델링에 열중하는 중에 과내 세미나를 통하여 유한요소법 이론에 대한 기초 지식이 있어서 상기한 문제를 유한요소법으로 접근해 보기로 하였다.

유한요소식 수립에 필요한 변분적분을 구하는 일부터 착수하였다. 먼저 시간영역 감쇄선형편미분방정식(식 (11)과 식(12))을 Laplace변환하고 초기조건과 경계조건 항들을 삽입한 후 역Laplace변환을 하여 시간영역 적분미분방정식(integro-differential equation)을 얻는다. 이로부터 서로 등가한 변분적분 두개를 얻고 각기 이 적분의 변분을 0되게 하는 전자장이 상기한 적분미분방정식의 해라는 것을 증명한다(Cho, 1978). 두개의 변분적분 중 상대적으로 간단한 것을(대신 초기조건을 시간행진시 삽입) 택하여 시간영역 유한요소식을 세우기로 한다.

Mutooroo광체를 간략화한 모델은 전도성 표피층 하부에 부존하는 수직판상 광체이고 모암의 전도도가 표피층이나 광체에 비하여 작다. 비자성이나 상대유전율은 모두 5로 하여 변위전류도 고려하였다. EMP시스템은 원래 선(line)전원이고(전자장의 원천은 수학적으로

델타함수) 지질구조도 2차원이다. 먼저 표피층에 의한 자장 신호가 송신전선 주위에 집적한 후 양방향으로 사라져가는 도중 광체와 모암에 의한 신호가 나타나고 이 역시 양방향으로 사라져 간다. 모델링에서 구한 자장이상의 수치가 실측치와 상당히 근사함을 확인한다. 전장이상의 감쇄가 자장이상의 감쇄보다 느림을 확인, 전장측정의 유용성을 제안한다 (Kuo and Cho, 1979; Kuo and Cho, 1980). 전자장의 나타남과 사라짐이 Nabighian의 “smoke ring”(Nabighian, 1979)을 지표에서 관찰하면 이렇게 될 것이다. 2차원이고 지표에서의 측정만을 고찰했기 때문에 전류채널링 효과는 알지 못하였다.

3.2.1. 국내연구

국내에도 곧 시간영역 탐사법의 등장이 알려지고 호주의 SIROTEM탐사시스템이 1982년 한국자원연구소에 도입되면서 현장시험과 기초연구가 여러 연구자에 의해서 수행되기 시작한다. 연산자분리(operator splitting)에 의한 유한차분 수치모델링(서상용과 현병구, 1982), Laplace변환에 의한 과도전자장계산(김한준과 서정희, 1984), 판상광체에 대한 스케일 모델링 (임무택과 현병구, 1984), 갱내 탐사 스케일모델링(김유성과 현병구, 1986), 등가전류를 이용한 단순 역산(임해룡과 현병구, 1988), 판상광체에 의한 TEM반응의 극성변화와 감쇠 특성(황학수 등, 1989)의 기초연구, TEM탐사법 국내 적용성 연구(조동행 등, 1984), 연이연광상 탐사(이상규 등, 1984), 석탄층 구조해석을 위한 지표 및 시추공 TEM자료의 응용(이상규와 임무택, 1986), 갱내 석탄탐사(현병구 등, 1989) 등 현장조사가 이루어진다. 1990년대에도 불규칙형상의 광체 탐지를 위한 스케일 모델링(현병구 등, 1990), 영상전류를 이용한 탐사자료 역산(홍재호 등, 1992), 원거리 기준점 예측필터(황학수, 1997) 등 연구가 보고된다.

이상의 연구는 거의가 광상탐사와 관련이 있다. 이와는 별도로 시간영역 전자탐사의 활용영역을 넓히는 연구가 실시된다. 금속체 보물 탐사를 위한 스케일 모델링(Lee and Buselli, 1988)을 통하여 SIROTEM장비의 효용성 검증, 기초파일내 철근 결합탐지 실험(이상규과 김광은, 1993), 전도성 표도층과 그 하부 전도체 간의 전자감응이 시추공탐사자료에 미치는 영향 평가 실험(Buselli and Lee, 1996), TEM감쇠곡선을 이용한 해수 유동 파악(황학수 등, 2001) 연구 등이 주목을 끈다.

이 밖에 LOTEM(Long-Offset Transient Electromagnetics)과 CSAMT를 이용한 강원도 원동지역 다중

금속광체를 확인한 사례가 있다(이상규 등, 1998).

3.3. 전자기 잡음 연구

전자기탐사는 대지와 직접 전기적인 접촉이 없다고 하더라도 여러 가지의 잡음이 혼입될 수 있다. 원하는 신호가 아닌 것은 모두 잡음이라고 할 때, 이에 대한 흥미 있는 연구가 몇 편 있다.

번개에 기인한 sferics(공중전기)는 전자탐사 측정의 S/N비에 영향을 준다. 연구에 의하면 5 kHz 이상의 공중전기는 11 km 떨어진 두 측정점에서 관측한 잡음의 3성분 모두와 높은 상관관계가 있다(황학수와 이상규, 1996). 전장측정시스템에서 이러한 잡음을 제거하기 위한 예측필터 연구를 계속한다(황학수와 이상규, 1998).

단층대의 전도도 변화에 의하여 UHF대역의 전자장이 교란됨을 수치모델링으로 확인한다(이춘기 등, 2003). 이는 지진과 관련한 전자기 활동 연구에 중요할 것이다. 또한 인공적인 잡음이 MT탐사에 미치는 영향을 수치모델링으로 예측한다. MT에선 잡음의 문제가 승패를 좌우하기 때문에 이러한 연구는 특히 국내 실정에서 의미있는 일이다 (이춘기 등, 2005).

시추공 전자토모그래피는 공내수와 케이싱의 영향을 최소화 내지 제거하지 않는 한 성공하기 어렵다. 특히 케이싱의 영향 평가와 제거가 승패의 관건이다(조성준 등, 1999).

3.4. 역산 연구

모든 물리탐사가 그렇듯이 전자탐사에서도 측정 자료를 해석하여 지질구조와 물성분포를 추정한다는 것이 수학적으로는 소위 역산(inversion)에 해당한다. 이러한 역산이 컴퓨터의 본격적인 활용에 편승하여 1960년대 말부터 자동화와 정교화의 길로 들어선 이래 현재는 이론적인 골격이 거의 갖추어 졌다고 볼 수 있다. 먼저 G. Backus와 F. Gilbert는 모델추정 오차와 분해능이라는 상반된 요구를 어떻게 조화하느냐 하는 문제를 제기하고 논술한다. 이러한 문제의 해결책으로 1970년대 말 D.D.Jackson은 선형적 정보(a priori information)의 이용을 제안한다. 그러나 이러한 논의와 제안은, 역산과정이 선형모델을 반복 사용하므로, 대부분이 비선형인 물리탐사 혹은 지구물리 문제와 상치된다. 이러한 모순에 대한 명확한 설명과 해결을 위하여 1980년대 초 A. Tarantola와 B. Valette는 확률론에 근거한 역산의 정형화를 이루어 그 이전의 역산이 일반적인 역산의 특수한 경우임을 밝힌다. 1980년대 후반에는 H. Akaike가 엔트로피최대화에 근거한 ABIC

(Akaike Bayesian Information Criterion)을 모델선택의 기준으로 제시하고 그 효용성이 입증된다. 현재는 역산이 실제로 얼마만큼 잘 되고 있는지 그 내역을 알 수 있는 것이다(김희준과 정승환, 1999).

국내에서 컴퓨터를 이용한 최초의 역산은 1980년대 초의 서상용일 것이다. 이는 판상광체에 대한 자력탐사 역산으로서 필자가 직접 사용한 적이 있다. 그러나 유감스럽게도 학회나 보고서에 발표는 하지 않았다. 이후 역산은 1990년대에 하나의 화두로 자리매김하고 근년에는 역산법의 활용은 물론 역산법 자체에 대한 창의적인 연구 성과가 보고 되고 있다. 예컨대 지형을 포함한 MT자료의 2차원 역산 모델링(이성곤 등, 2002), 단일시추공 전자탐사자료의 고속역산(김희준과 이정모, 2002), ACB(active constraint balancing)에 의한 역산 분해능 향상(Yi et al., 2003), CSAMT탐사자료 역산을 위한 GRRI법의 감도분석(Park et al., 2006)등이 그 예가 될 것이다.

4. 결 론

전자탐사법은 자력, 중력, 전기비저항, 자연전위, 유도분극, 굴절탄성과, 반사탄성과, 방사능탐사와 지열측정 등 여타의 대다수 탐사법에 비하여서 뒤늦은 1970년대 후반에 간단한 VLF탐사로 국내 활용이 시작되었다. 이렇게 초라한 출발에도 불구하고 지금까지 이룩한 이 방면의 연구 성과는 다른 어느 분야 못지않다.

이러한 계기와 원동력의 단초는 1970년대 미국에 유학하여 세계 수준의 학회지인 Geophysics에 즉시 그들의 박사논문이 게재될 정도로 좋은 연구 성과를 거둔 네 사람에게서 찾아야 할 것이다. 주파수영역에서 류지수, 원인재, 이기하, 시간영역에서 조동행이 그들이다. 이들의 국내 영향력은 공동연구와 인적 유대관계로 지금까지 지속되고 있다.

VLF탐사법 다음으로 국내 활용이 시작 된 것은 시간영역탐사법으로 1980년대 초엽이다. 당시로서는 신기술이었던(당시 시판되기 시작한 유일한 시간영역 탐사장비가 호주의 SIROTEM이었다) 이 탐사법이 주파수영역 탐사법보다 먼저 국내 도입된 것은 순서가 바뀐 느낌이다. 즉시 금속광상과 석탄을 대상으로 한 현장시험이 시작되고 이론적 토대 마련을 위한 노력이 뒤따른다. 새로운 광체발견 사례도 보고 된다. 갱내탐사, 시추공탐사를 위한 발판이 추가로 마련되고 지하자원 탐사가 아닌 영역으로 활용영역을 확대한다. 숨겨진 금속물체 탐지, 기초파일의 결함 탐지와 해수유

동 파악을 위한 이상규 등의 연구는 앞으로도 지속되어야 할 것이다.

다음으로 국내에 도입된 기술은 CSAMT와 MT법이다. 이들은 그 원리가 비교적 간단하여 저주파의 인공 혹은 자연의 평면전자에너지를 원천으로 한다. 그러나 자료의 취득, 처리, 역산 해석 등 일련의 과정을 소화하여 수준 높은 광역조사와 지구물리학적 활용이 가능하게 된 계기는 프랑스에서 이를 전공하고 1984년 귀국한 고(故)정승환이다. 이제 3차원 해석을 위한 노력이 이어지고 있다.

다른 주파수영역 탐사 연구도 1980년대 초부터 시작되어 연구에 필요한 물리, 수학, 수치해법 등을 두루 소화하여 좋은 연구 성과를 거둔다. 이상규의 수평전기쌍극자를 에너지원으로 하는 다주파수 전자탐사법 이론 연구가 특히 흥미 할만 하다고 생각한다.

1990년대 중반 GPR전자탐사법이 국내에 도입되고 지금까지 건설, 환경, 고고학 분야 등에서 수시 활용되고 있다. 기초연구도 활발하여 김정호, 설순지 등이 물리현상의 파악과 자료해석을 세계적 수준으로 끌어 올렸다.

1990년대 말 소형루프 탐사시스템이 국내에서 천부 지반환경 조사에 활용되기 시작하고 이론연구도 수반된다. 제일 먼저 국내 활용이 되었어야 할 소형 루프 시스템이 이렇게 늦게, 그나마 제한적으로 활용되는 것은, 사실 기이한 일이다. 2000년대 초반에 국제적 수준의 주파수영역 전자탐사 연구 성과가 나온다. 송운호 등의 임피던스측정에 의한 고주파수 탐사법, 설순지 등의 단일시추공 고주파수 전자탐사, 이태종 등의 정확하고 간편한 확산방정식의 파동방정식화 연구 등이 Geophysics에 게재되어 국제적인 인정을 받는다.

또한 1990년대 말부터 전자기 잡음에 대한 연구가 시작된다. 황학수와 이상규에 의한 spherics, 이춘기 등에 의한 단층대 전도도 변화에 의한 UHF대역 전자장 교란, 조성준 등에 의한 시추공 케이싱의 영향 등이 중요하다.

2000년대에 들어와, MT와 비슷한 대역의 자연 전자에너지를 이용하는 지자기수지탐사(geomagnetic depth sounding)연구가 오석훈, 양준모 등에 의하여 국내 최초로 보고 된다. 지구 연약대까지의 심부탐사 기술이 추가된 것이다.

끝으로 역산연구에 대한 연구를 언급할 수 있다. 현대적인 역산법의 활용은 물론 역산기법 자체에 대한 연구 성과가 Geophysics에 게재 되는 등 한층 고양된 국내 수준이 주목할 만 하다.

근년에 보고 되는 세계적인 연구 성과는 하나의 공통점이 있다. 이들 연구의 주역이 대개 외국 유학을 하지 않은 순수 국내파라는 것이다. 명실 공히 과학기술의 자립화가 물리탐사 분야에서도 이루어지고 있는 것이다. 이러한 좋은 전통은 계승 발전되어야 할 것이다.

5. 끝맺는 말

가능한 한 국내연구 성과를 모두 섭렵하여 올바르게 보고하려고 노력하였다. 그러나 본인의 불찰과 능력부족으로, 혹시 중요한 것이 누락되거나, 본의 아니게 편파적인 판단을 하거나, 혹은 판단의 오류를 범하였는지도 모른다. 기탄없는 비판과 정정을 기대한다. 이번에 명예롭게 은퇴하시는 민경덕 교수님과 돌이켜 전자기학을 독습하던 학창시절의 기억이 엇그제 같은데 한 세월이 흘러 이런 글을 쓴다. 아무쪼록 민 교수님 건강하시기를 빌고 계속 저희들을 이끌어 주시기를 바란다.

참고문헌

김근영, 신창수, 서정희 (1998) 지표레이다 자료에 대한 회절지오토모그래피의 적용성 연구, 물리탐사, 1권, p. 64-70.

김정호, 조성준, 이명종, 정승환 (1998) 방향탐사아테나를 이용한 시추공레이다 반사법탐사에 있어서 반사층 방위각의 자동결정, 물리탐사, 1권, p. 176-182.

김정호, 이명종, 손정술, 조성준, 박삼규 (2005) 유적지 발굴을 위한 효율적3차원 GPR탐사, 물리탐사, 8권, p. 262-269.

김한준, 서정희 (1984) 층계함수파원에 의한 시간영역 과도전자장의 계산, 대한광산학회지, 21권, p. 9-15.

김희준, 정승환 (1999) 지구물리자료의 역산해석에 관한 개관, 물리탐사, 2권, p. 112-121.

김희준, 이정모 (2002) 단일시추공 전자탐사자료 해석을 위한 빠른 역산법(영문), 물리탐사, 5권, p. 316-322.

민경덕, 전정수, 정승환 (1988) 옥천대내 신당-도전리 지역에 대한ELF-MT 탐사연구, 광산지질, 21권, p. 277-285.

박인찬, 조원철, 이종국 (2005) 지하투과레이다를 이용한 교각 주변의 하상변화 조사, 물리탐사, 8권, p. 119-128.

서상용, 현병구 (1982) 저주파 과도전자장의 유향차분해법, 대한광산학회지, 19권, p. 227-232.

서기원, 권병두 (2000) 개선된 MT장의 하향연속을 이용한 지하지질구조해석, 한국자원공학회지, 37권, p. 297-306.

서정희, 이상규, 김정호, 정현기 (1981) 위상성분 측정법을 이용한 전자탐사법의 모형연구, 대한광산학회지, 18권, p. 44-53.

서정희 (1983) 소인주파수 전자탐사법에 대한 연구, 대한광산학회지, 20권, p. 82-88.

설순지 (1995) 지오레이더의 송신파형 및 모형반응 계산에 관한 연구, 서울대학교 공학석사학위논문.

설순지, 김정호, 조성준, 이명종, 정승환 (2001) 화강암 석

- 산지역에서의 레이더 탐사의 적용, 물리탐사, 4권, p. 8-18.
- 설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환 (2002) 소형루프 전자탐사를 이용한 매설물탐지 및 지하 전기비저항 영상화, 물리탐사, 5권, p. 309-315.
- 손정술, 서정희 (1997) 유한요소법을 이용한 MT자료의 지형보정, 한국자원공학회지, 34권, p. 83-93.
- 손정술, 김정호, 이명중, 고정석 (2005) 쓰레기매립장 주변의 침출수 오염조사 사례: 전자탐사 및 자력탐사의 적용, 물리탐사, 8권, p. 137-144.
- 손정술, 송윤호, 정승환, 서정희 (2002) 벡터유한요소를 이용한 고주파3차원 전자탐사 모델링, 물리탐사, 5권, p. 280-290.
- 송영수, 용환호, 김진호, 송승협, 정형재(2002) 전기 및 CSMT탐사를 이용한 조정지역 수리지질구조 해석, 물리탐사, 5권, p. 118-125.
- 송성호, 용환호, 안중기, 김기표 (2003) 제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용, 물리탐사, 6권, p. 143-152.
- 송영수, 정승환, 채효석 (1992) 지층의 수평적 구분 및 지질 구조 파악을 위한 VLF 탐사 결과 해석, 한국자원공학회지, 29권, p. 16-24.
- 송윤호, 정승환 (2002) 소형루프 전자탐사의 감도 분석 및 가탐심도 추정, 물리탐사, 5권, p. 299-308.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤희수 (1993) 유도분극, 전기비저항, VLF전자탐사법을 이용한 벤토나이트 광상탐사 연구, 한국자원공학회지, 30권, p. 102-107.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤희수 (1993) 의성 오토산 지역의 전기비저항, IP 탐사 및 VLF 전자탐사 연구, 한국자원공학회지, 30권, p. 526-535.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 윤희수 (1994) 안동지역의 이천단층에 대한 HLEM 및 VLF 전자탐사 연구, 한국자원공학회지, 31권, p. 333-337.
- 신성열, 박부성, 장원일 (1999) 지표투과레이더를 이용한 온양 편마암의 풍화특성 고찰, 물리탐사, 2권, p. 1-7.
- 심현미, 조인기 (2000) 확장된 Born근사에 의한 다중주파수 EM토모그래피한국자원공학회지, 37권, p. 196-203.
- 안희윤, 조인기 (2001) 3차원 전자탐사 모델링에서 근사법의 비교, 한국자원공학회지, 38권, p. 169-177.
- 양준모, 오석훈, 이덕기, 윤용훈 (2002) 2차원 MT모델링을 이용한 지자기수직탐사에서 지시자의 연구, 자원환경지질, 35권, p. 567-573.
- 오석훈, 양준모, 이덕기, 남재철 (2002) 지자기 수직탐사에 의한 한반도주변의 전기전도도 구조, 자원환경지질, 35권, p. 437-444.
- 오석훈, 정호준, 이덕기 (2004) 암반등급평가를 위한 MT와 시추공자료의 지구통계학적 복합해석, 물리탐사, 7권, p. 121-129.
- 오현덕, 신종우 (2004) 경주 월성 지하유구에 대한 GPR 탐사자료의 고고학적 해석, 물리탐사, 7권, p. 256-261.
- 용환호, 송성호, 김진호, 조인기 (2003) 소형루프 전자탐사에 의한 논 토양분석, 물리탐사, 6권, p. 207-214.
- 유인걸(1998) 맥상 황화광체에 대한 전기 및 전자탐사 반응, 물리탐사, 1권, p. 110-115.
- 유진상, 송윤호, 설순지, 송영수 (2001) 지반조사를 위한 루프루프 전자탐사 기법의 적용, 물리탐사, 4권, p. 25-33.
- 윤왕중 (1984) 평면파 전자탐사에서 불규칙 지하 경계면의 영향, 대한광산학회지, 21권, p. 261-268.
- 이두성 (1982) 수직 자기쌍극자 송신에 의한 전도성 매질 내 전자장의 계산방법, 대한광산학회지, 19권, p. 67-74.
- 이상규, 서정희 (1981) 수평 전기쌍극자 파원에 의한 층서 구조의 전자장 근사해, 대한광산학회지, 18권, p. 162-168.
- 이상규, 서정희 (1982) 층서구조에 대한 다중주파수 전자측탐법의 분해능에관하여, 대한광산학회지, 19권, p. 233-241.
- 이상규, 구자학, 조동행, 임무택 (1984) TEM법에 의한 경북 천지57호 광구연·아연 유화광상 물리탐사, 대한광산학회지, 21권, p. 197-208.
- 이상규, 임무택 (1986) 판상 탄층구조해석에 있어서의 지표 및 시추공 과도전자탐사자료의 응용, 대한광산학회지, 23권, p. 119-128.
- 이상규, 황세호, 오민수, 황덕환, 박인화, 김유동 (1998) LOTEM 및 CSAMT 탐사에 의한 강원도 원동지역 심부 다중금속광체 확인, 한국자원공학회지, 35권, p. 501-511.
- 이상규, 황세호, 이동영, 이진수, 황학수, 박인화 (1998) 단층조사를 위한array CSAMT 적용사례, 물리탐사, 1권, p. 92-100.
- 이성근, 현병구, 정승환, 송윤호 (1994) 2차원 MT모델링과 공간필터링을 이용한 정적효과 제거에 관한 연구, 한국자원공학회지, 31권, p. 444-456.
- 이성근, 송윤호, 김정호, 정승환 (2002) 지형을 포함한 MT탐사자료의 2차원 모델링과 역산, 물리탐사, 5권, p. 291-298.
- 이태중, 송윤호, Uchida, Toshihiro (2005) 포항지역개발지역 MT탐사자료의 2차원 및 3차원 해석, 한국자원공학회지, 42권, p. 297-307.
- 이춘기, 이희순, 권병두, 오석훈, 이덕기 (2003) 단층대의 전기전도도 변동에 의한 UHF전자기장 교란, 물리탐사, 6권, p. 87-94.
- 이춘기, 이희순, 권병두 (2005) 공간모델링을 이용한 자기지전류 탐사의 전자기 잡음예측, 물리탐사, 8권, p. 251-261.
- 임무택, 현병구 (1984) 판상광체에 대한 TEM법의 실험적 연구, 대한광산학회지, 21권, p. 185-196.
- 임성근, 송영수, 조인기 (2000) EM토모그래피에서 배경매질의 전기전도도 결정, 한국자원공학회지, 37권, p. 385-394.
- 임진택, 조인기 (2003) 소형루프 전자탐사법의 의한 지하 영상화, 물리탐사, 6권, p. 187-194.
- 임해룡, 현병구 (1988) 등가전류를 이용한 TEM탐사자료의 단순역해, 대한광산학회지, 25권, p. 281-293.
- 장현삼, 임해룡, 홍재호 (1998) 쓰레기 매립장의 토양오염 조사를 위한 전자탐사 및 전기탐사, 물리탐사, 1권, p. 87-91.
- 조동행, 구자학, 구성분, 임무택 (1982) TEM탐사법 국내 적용성 연구, 한국동력자원연구소 금속광상연구 82-광물자원-2-12, p. 409-431.
- 조동행, 김준석, 정현기 (1987) 3-성분추정 주파수영역 중심전자탐사 스케일모형실험연구, 대한광산학회지, 24권, p. 245-25.
- 조성준, 김정호, 이명중, 정승환, 송윤호 (1999) 공내수 및 케이싱이 시추공전자탐사 반응에 미치는 영향, 물리탐사, 2권, p. 104-111.
- 조성준, 김정호, 이성근, 손정술, 정승환 (2002) 네트워크 분석기를 이용한 레이더탐사 시스템의 구현, 물리탐사, 5권, p. 272-279.
- 조인기, 정승환 (1998) 시추공간 전자탐사법의 3차원 모델링, 한국자원공학회지, 35권, p. 50-58.
- 조인기, 용환호, 안희윤 (2001) 급속전개법에 의한 3차원 전자탐사 모델링, 물리탐사, 4권, p. 70-79.

- 조인기, 임진택 (2003a) 소형루프 전자탐사법의 주파수 수직탐사, 물리탐사, 6권, p. 119-125.
- 조인기, 임진택 (2003b): 주파수 수직 전자탐사자료의 1차원 역산, 물리탐사, 6권, p. 180-186.
- 조동기, 서정희, 최윤경 (2002) 3차원 Kirchhoff 구조보정을 위한 지표레이다 자료의 영상화, 물리탐사, 5권, p. 185-192.
- 정승환 (1985) 유한요소법에 의한 VLF전자탐사 모형연구, 대한광산학회지, 22권, p. 241-248.
- 정승환, 김정호 (1989a) 수평다층구조에 대한 CSAMT 탐사자료의 수치모델링에 관한 연구, 탐사기술개발연구 KR-88-2D-2, 한국동력자원연구소.
- 정승환, 김정호 (1989b) CSAMT 자료의 근접장 보정과 해석에 관한 연구, 탐사기술개발연구, KR-88-2D-2, 한국동력자원연구소.
- 정승환, 김정호, 전정수 (1990) 심부 석탄층 탐사에 있어서 CSAMT 탐사법의 적용, 자원환경지질, 23권, p. 73-79.
- 정용현, 서정희, 신창수 (1998) GRRI를 이용한 2차원 MT자료의 역산, 물리탐사, 1권, p. 71-78.
- 정호준, 정현기, 박영수, 조철원 (2000) 3차원 FEM모델링에 의한 수평 도전성 관로의 전자기 반응 특성, 물리탐사, 3권, p. 48-52.
- 정해상 (1996) 콩크리트 배면의 공동탐지를 위한 지반투과레이더 탐사연구인하대학교 공학석사학위논문.
- 정현기, 서정희 (1985) 자기쌍극자원에 의한 구형도체의 주파수영역 전자반응: 제1보 일반해 계산, 대한광산학회지, 22권, p. 17-24.
- 정현기, 서정희, 주형태 (1985) 광체의 자화율이 전자탐사에 미치는 영향, 대한광산학회지, 22권, p. 1-16.
- 정현기, 이태섭, 이상규, 박인화 (1989) CSAMT 시험탐사연구, 탄전물리탐사연구, KR-88-5A-2, 한국동력자원연구소.
- 최윤경, 설순지, 서정희 (2001) 쌍극자안테나를 고려한 3차원 지표레이다탐사 모델링과 방사패턴에 관한 고찰, 물리탐사, 4권, p. 45-54.
- 홍재호, 서정희, 송윤호, 박관호 (1992) 영상전류를 이용한 TEM수직탐사자료의 역산, 한국자원공학회지, 29권, p. 347-356.
- 한누리, 이성근, 송윤호, 서정희 (2004) FDM을 이용한 MT탐사의 3차원모형 반응 연구, 물리탐사, 7권, p. 136-147.
- 현병구, 지준, 김유성, 정현기 (1989) 심부 석탄층 탐사를 위한 갱내 전자탐사법의 현장적용, 한국자원공학회지, 26권, p. 354-363.
- 현병구, 송윤호, 이태종, 유인걸 (1990) 불규칙 형상 광체 탐지를 위한 전자탐사법연구, 한국자원공학회지, 27권, p. 154-166.
- 황학수, 이상규, 송무영 (1989) 판상광체에 대한 TEM반응의 극성변화와 감쇠특성, 한국자원공학회지, 26권, p. 364-377.
- 황학수, 이상규 (1996) 고주파 공중전기측정과 상관성 분석, 한국자원공학회지, 33권, p. 318-331.
- 황학수 (1997) 시간영역 전자탐사에서의 원거리 기준점 예측필터, 한국자원공학회지, 34권, p. 505-512.
- 황학수, 이상규 (1998) 전기장 측정시스템에서의 잡음예측 필터의 연구, 한국자원공학회지, 35권, p. 246-252.
- 황학수, 문창규, 이상규, 이태섭 (2001) TEM감쇠곡선을 이용한 해수의 지하유동 파악, 자원환경지질, 34권, p. 499-2001.
- Buselli, G and Lee, S.K. (1996) Modelling of drill-hole TEM responses from multiple targets covered by a conductive overburden, Exploration Geophysics, v.27, p.141-153.
- Cho, D.H. (1978) Variational principles for transient electro-magnetics and their applications to the exploration of deep-seated mineral deposits, Ph.D thesis, Columbia University
- Chung, S.H. (1984) Etude de l'effet des structures a deux dimensions en magneto-tellurique par la methode des elements finis, Ecole Nationale Superieure de Geologie et de Prospection Miniere, These (Docteur Ingenieur)
- Grant, F.S. and West, G.F. (1965) Interpretation theory in applied geophysics, McGraw-Hill, p. 466-484
- Huang, H. and Won, I.J. (2004) Electromagnetic detection of buried metallic objects using quad-quad conductivity, Geophysics, v.69, p. 1387-1393
- Huang, H. and Won, I.J. (2000) Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v.5, p. 31-41
- Kim, H.J., Song, Y.H. and Lee, K.H (1997) High-frequency electromagnetic inversion for a dispersive layered earth, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, v.49, p.1439-1450
- Kraichman, M.B. (1970) Handbook of Electromagnetic Propagation in Conducting Media, NAVMT P-2302, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402
- Kuo, J.T. and Cho, D.H. (1980) Transient time-domain electro-magnetics, Geophysics, v.45, p. 271-291
- Kuo, J.T. and Cho, D.H. (1979) Finite element verification of Newmont EMP field results, Presented at the 49th SEG meeting, New Orleans, U.S.A.
- Lee, K.H. (1978) Electromagnetic scattering by a two-dimensional inhomogeneity due to an oscillating magnetic dipole, Ph.D thesis, University of California, Berkeley.
- Lee, K.H. and Morrison, H.F. (1985a) A numerical solution for the electromagnetic scattering by a two-dimensional inhomogeneity, Geophysics, v.50, p. 466-472.
- Lee, K.H. and Morrison, H.F. (1985b) A solution for TM-mode waves incident on a two-dimensional inhomogeneity, Geophysics, v.50, p. 1163-1165.
- Lee, K.H. and Xie, G. (1993) A new approach to imaging with low frequency electromagnetic fields, Geophysics, v.58, p.780-796.
- Lee, K.H., Xie, G., Habashy, T.M. and Torres-Verdin, C. (1994) Wavefields transform of electromagnetic fields, 64th Ann. Internat.Mtg., SEG Expanded Abstracts, p. 633-635.
- Lee, K.H. and Xie, G. (1995) Finite element 3-D electromagnetic modelling, Proceedings on Progress in electromagnetics research symposium, University of Washington, Seattle.
- Lee, K.H., Xie, G., Hoversten, M. and Pellerin, L. (1995) EM imaging for environmental site characterization, International Symposium on 3-dimensional Electromagnetics, Schulumberger-Doll Research, p. 483-489.
- Lee, K.H. (1997) High-frequency electric field measurement using a toroidal antenna, LBNL-39894 UC-2040
- Lee, K.H., Xie, G. and Kim, H.J. (1998) Electrical and EM methods for High-Resolution Subsurface Imaging

- In 3-D, Butsuri-Tansa, v.51, p. 109-116.
- Lee, S.K. and Buselli, G. (1988) Transient EM analogue modelling for Korean treasure hunting with the SIROTEM system, *Geophysical Prospecting*, v.36, p. 976-994.
- Lee, S.K. and Kim, K.E. (1993) Test for detection of steel cage defects in concrete pile substructure with transient electromagnetic logging(in Japanese), *Butsuri-Tansa*, v. 46, p. 183-189.
- Lee, T.J., Suh, J.H., Kim, H.J., Song, Y.H. and Lee, K.H. (2002) Electromagnetic travelttime tomography using an approximate wavefield transform, *Geophysics*, v.67, p. 68-76.
- Lee, T.J. and Uchida, T. (2005) Electromagnetic travelttime tomography: Application for reservoir characterization in the Lost Hills oil field, California, *Geophysics*, v.70, p.G51-G58.
- Mizunaga, H., Lee, K.H. and Kim, H.J. (1999) Three dimensional electromagnetic modelling in the Laplace domain, LBNL-42677.
- Nabighian, M.N. (1987) Electromagnetic methods in applied geophysics, v.1 Theory, *Investigations in Geophysics* n.3, SEG, p. 288
- Norton, S.J. and Won, I.J. (2001) Identification of buried unexploded ordnance from broadband electromagnetic induction data, *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, v.39, p. 2253-2361.
- Olhoeft, G.R. and Strangway, D.W. (1974) Magnetic relaxation and the electromagnetic response parameter, *Geophysics*, v.39, p. 302-311.
- Park, M.K., Seol, S.J. and Kim, H.J. (2006) Sensitivities of generalized RRI method for CSAMT survey, *Geosciences Journal*, v.10, p. 75-84.
- Parasnis, D.S. (1986) Principle of applied geophysics, Chapman and Hall Powers, M.H. (1997) Modelling frequency-dependent GPR, *The Leading Edge*, p. 1647-1662.
- Ryu, Jisoo, Morrison, H.F. and Ward, S.H. (1970) Electromagnetic fields about a loop source of current, *Geophysics*, v.35, p. 862-896.
- Ryu, Jisoo (1971) Low frequency electromagnetic scattering, Ph.D thesis, University of California, Berkeley
- Ryu, Jisoo, Morrison, H.F. and Ward, S.H. (1972) Electromagnetic depth sounding experiment across Santa Clara Valley, *Geophysics*, v.37, p. 351-374.
- Seol, S.J., Suh, J.H., Song, Y.H., Kim, H.J. and Lee, K.H. (2002) The potential of fracture imaging using high-frequency, single-hole electromagnetic data, *Geophysics*, v. 67, p. 1087-1094.
- Slater, J.C. and Frank, N.H. (1947) *Electromagnetism*, Dover, p. 128.
- Song, S.H. (2006) Spatial analysis of small-loop electromagnetic survey data in a seawater intrusion area Mulli-Tamsa(issued jointly by ASEG, SEGJ, and KSEG), v.9, p. 114-120.
- Song, Y.H., Kim, H.J. and Lee, K.H. (2002) High-frequency electromagnetic impedance for subsurface imaging, *Geophysics*, v.67, p. 501-510.
- Tseng, H.W., Lee K.H. and Becker, A. (2003) 3D interpretation of electromagnetic data using a modified extended Born approximation, *Geophysics*, v.68, p. 127-137.
- Witten, A., Won, I.J., Norton, S. (1997): Imaging underground structures using broadband electromagnetic induction, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.2, p. 105-114.
- Won, I.J. and Kuo, J.T. (1975a) Representation theorems for multiregional electromagnetic diffraction problem Part 1: Theory, *Geophysics*, v.40, p. 96-108.
- Won, I.J. and Kuo, J.T. (1975b) Representation theorems for multi-regional electrodynamic diffraction problem Part 2, *Geophysics*, v.40, p. 109-1199.
- Won, I.J. (1980) A wide-band electromagnetic exploration method-Some theoretical and experimental results, *Geophysics*, v. 45, p. 928-940.
- Won, I.J. (1980) A wideband electromagnetic exploration method: some theoretical and experimental results, *Geophysics*, v.45, p. 928-940.
- Won, I.J. (1983) A sweep-frequency electromagnetic exploration method, Chapter 2, in *Development of Geophysical Exploration Methods-4*, Editor; A.A. Fitch, Elsevier Applied Publishers, Ltd., London, p. 39-44.
- Won, I.J., Keiswetter, D.A., Fields, G.R.A. and Sutton, L.C. (1996) GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.1, p. 129-137.
- Won, I.J., Keiswetter, D.A., Hanson, D.R., Novikova, Elena. and Hall, T.M. (1997) GEM-3: A monostatic broadband electro-magnetic induction sensor, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.2, p. 53-64.
- Won, I.J. and Keiswetter, D.A. (1997) Comparison of magnetic and electromagnetic anomalies caused by underground structures, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.2, p. 115-125.
- Won, I.J., Keiswetter, D. and Novikova, E. (1998) Electromagnetic Induction Spectroscopy, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.3, p. 27-40
- Won, I.J., Keiswetter, D.A. and Bell, T.H. (2001) Electromagnetic induction spectroscopy for clearing landmines, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.39, p. 703-709.
- Yi, M.J., Kim, J.H. and Chung, S.H. (2003) Enhancing the resolving power of least-square inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, v.68, p. 931-941.