

## 한국의 전기비저항탐사

김희준\*

부경대학교 환경탐사공학과

### Electrical Resistivity Methods in Korea

Hee Joon Kim\*

Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Although application of electrical methods in Korea began with observation of self potentials before World War II, the methods were developed slowly by the beginning of 1980's when a major burst of development activity took place. DC resistivity methods are applied in Korea more to geotechnical problems rather than to environmental ones unlike other developed countries. As with every other branch of technology, the evolving speed of the silicon chip and of streaming data to hard disk has revolutionized data collection and noise reduction processing. The last two decades saw major advances in data collection, processing, and interpretation of electrical data. Development of smooth-model two-dimensional (2D) resistivity inversion is one of the most visible changes to geophysical interpretation of the last 40 years and is now routinely applied to apparent resistivity data. The ability to represent resistivities in section rather than pseudosection view has revolutionized interpretation. Although calculation of sensitivities for general electromagnetic problems require numerous forward modelings, DC resistivity methods can enjoy computational efficiencies if sources and receivers occupy the same position, and previously intractable 3D inversion is now becoming available.

**Key words :** DC resistivity, inversion, dipole-dipole, pseudosection, sensitivity, modeling

비록 2차 세계대전 이전에 자연전위가 관측되었다는 기록도 있기는 하지만, 한국에서 대전 이후 서서히 발전하던 전기탐사가 본격적으로 보급된 것은 1980년대 이후의 일이다. 다른 선진국과 달리 한국의 경우 전기비저항법을 환경 문제보다 토목 건설 문제에 상대적으로 더 많이 적용하고 있다. 다른 모든 기술분야와 마찬가지로 반도체산업의 발전은 자료 수집과 잡음 감쇄처리에서 혁신을 가져왔으며, 지난 25년 동안 전기비저항 자료의 수집, 처리 및 해석에 있어서 두드러진 발전이 있었다. 평활화제약 모델에 의한 2차원 전기비저항 역산의 개발은 지난 40년 동안 물리탐사 자료해석에서 가장 현저한 변화 중 하나이며, 지금은 겉보기비저항 자료에 일반적으로 적용되고 있다. 전기비저항 분포를 가단면도가 아니라 단면도로 나타낼 수 있게 된 것은 자료해석에 혁신을 가져왔다. 일반적인 전자기 문제에서는 감도 계산을 위해 대단히 많은 전진 모델링을 필요로 하지만, 전기비저항법에서는 전류원과 수신점이 같은 위치를 차지하기 때문에 계산효율이 높아서 이전에는 처리하기 어려웠던 3차원 역산도 이제는 가능해졌다.

**주요어 :** 전기비저항, 역산, 쌍극자, 가단면, 감도, 모델링

### 1. 서 론

지하의 전기적 물성 차이에 의한 전자기 반응을 측정하여 지하구조를 영상화하는 물리탐사기법을 전기·전자탐사라고 할 수 있다. 그러나 전자기현상을 이용

한다고 해서 모두가 전기·전자탐사는 아니다. 예를 들면 자연 자기장을 측정하는 탐사는 오래 전부터 자력탐사라고 하고 있었고, 고주파수 전기장을 안테나로 송수신하는 탐사는 지중레이다(ground-penetrating radar, GPR)탐사로서 최근에는 전기·전자탐사와는 별도로

\*Corresponding author: hejkim@pknu.ac.kr

취급하는 경향이 있다.

전기·전자탐사에는 많은 종류의 탐사법이 있으나, 그 중 어느 것이 전기탐사고 어느 것이 전자탐사인지를 구별하는 것은 다소 애매한 점이 있어 쉬운 일이 아니다. 탐사 시 자기장을 측정하는지 여부로 구별하는 방법도 있지만, Tripp (2005)처럼 저주파수 전류원을 이용하는 탐사를 전기탐사라고 정의할 수도 있다. 이 정의에 따르면, 전기비저항(dc resistivity)법, 유도분극(induced polarization, IP)법 그리고 자연전위(self potential or spontaneous polarization, SP)법이 전기탐사에 속하게 되며, 자기 유도분극(magnetic IP, MIP)법이나 자기비저항(magnetometric resistivity, MMR)법도 자기장을 측정하지만 전기탐사에 포함된다.

전기탐사는 사용빈도가 매우 높은 방법이기 때문에 많은 교과서에서 비교적 상세히 기술되어 있으며, Ward(1990b, 전기비저항법과 IP법)과 Corwin(1990, SP법)에는 교과서 수준보다 더욱 자세한 설명이 나와 있다. 이 밖에도 일본 물리탐사학회에서 1998년에 창립 50주년을 기념하여 편찬한 총 7권으로 된 물리탐사 해설서에도 전기탐사에 관한 상세한 설명을 찾을 수 있고(SEGJ, 1998), 국내의 물리탐사학회에서도 간단한 해설을 펴낸 바 있다(물리탐사학회 편집실, 1998a; 1998b).

여러 전기탐사법 중 전기비저항법은 이론이 간단하고 자료 획득이 비교적 간편하다는 장점이 있어 국내에서는 지하수나 토목 환경문제 등에 많이 적용되고 있다. 서정희 등(2006, 부록 참조)에 의하면 최근 5년간 국내 외에서 발표된 전기탐사 관련 논문 중 전기비저항법이 239편(81.6%)으로, 40편(13.7%)과 14편(4.8%)에 그친 IP법과 SP법에 비해 압도적으로 많다. 이러한 이유로 전기탐사라고 하면 보통 전기비저항법을 가리키는 것으로 받아들여지고 있다.

전기비저항법은 전류전극과 전위전극을 이용하여 지하매질의 전기비저항 분포를 알아내는 탐사법으로 지표뿐만 아니라 시추공이나 터널을 비롯한 지하공간에서도 실시할 수 있다. 땅에 박은 전류전극 사이에 전류가 흐르면서 생기는 전위의 공간적 변화를 측정하여 지하의 체적(bulk)전기비저항을 결정하는데 사용된다. 이 방법은 공극수의 양과 화학성분의 변화에 민감하기 때문에 전도성(conductive) 물질을 추적하는데 유용하다. 그리고 전자탐사의 저항성(resistive) 물질에 대한 감도가 낮은 것이 오히려 이러한 물질에 대한 전기비저항탐사의 적용성을 상대적으로 높이는 요인이 되고 있다.

IP법은 자료 취득 면에서는 전기비저항법과 유사하지만, 전류 차단 후 지층에서 전기적 산란에 걸리는 시간을 해석한다는 점에서 차이가 있다. 지층의 방전률은 유전체(capacitor)의 그것과 유사하며 유도 전위의 감쇠율은 전류가 흐르는 곳에서 이온의 이동성에 의존한다. 예를 들어 점토광물은 이온의 이동성이 크다. IP 탐사에는 시간함수인 전위를 직접 측정하는 시간영역과 주파수 변화에 따른 전위의 위상 지연을 측정하는 주파수영역 두 가지 방식이 있으며, 주파수는 일반적으로 약 0.05 Hz에서 1 kHz사이이다. 이 방법은 황화 광물이나 특정 지역에서의 지하수 탐사에 이용된다.

SP법은 대부분 100 mV를 넘지 않는 자연전위 변화를 측정하는 방법으로 전기화학적 현상에 대한 정보를 제공한다. 땅 속에서 이동하는 유체, 이온, 열 등에 의한 전위는 SP 이상을 발생시킬 수 있으며, SP탐사는 이러한 전위를 측정하는 수동적인 기술을 이용하기 때문에 탐사로 인해 원인물체의 전류 또는 구조는 변하지 않는다. 측정하고자 하는 전위가 낮기 때문에, SP 신호는 전선, 파이프라인, 전자기폭풍, 그 외 환경적인 요인에 의해 잡음이 생기기 쉽다는 약점이 있다. 그리고 SP 기술에는 반복측정의 결핍이라는 또 다른 문제점도 있다. SP법은 지하수의 움직임 모니터링하기 위해 주로 이용된다.

여기서는 전기탐사의 국내의 발전 단계를 1980년 이전과 이후로 나누어 설명하고, 전기탐사 자료의 대표적인 해석법을 보여준 다음, 마지막으로 전기탐사의 미래에 대해 전망해 본다.

## 2. 1980년 이전

자원탐사의 역사는 역사시대까지 거슬러 올라가겠지만, 전기탐사의 시작은 1830년 Robert W. Fox에 의한 Cornwall 동광산에서의 SP 이상 발견이라는 것이 통설이다(Ward, 1980). 1912년에 Conrad Schlumberger는 직류 등전위선 전기비저항법을 도입하였고, 1917년에는 Harry W. Conklin가 전자탐사법으로 처음 특허를 받았다. 이를 시작으로 이어서 개발된 IP, 자기지전류(magnetotelluric, MT) 및 전자(electromagnetic, EM)탐사법의 역사는 지금까지 이어지고 있다. 전기탐사가 1920년에서 1930년 사이에 일시적으로 번창했었다는 것은 다소 흥미로운 사실이지만, 본격적으로 발전하기 시작한 것은 2차 세계대전 이후의 일이다.

전기·전자탐사 장비는 1960년 이후 점차적으로 발전하여, 일관성(coherency) 인식 및 원거리 기준점을

이용한 잡음 제거 기능을 가진 광대역 IP, MT 및 EM 자료의 획득뿐만 아니라 현장에서 디지털자료의 처리나 해석도 가능해졌다. 전기탐사 자료의 해석에 있어서 2차원 또는 3차원 경계치문제를 컴퓨터를 이용한 수치해석을 통해 모델링하고 역산하는 것이 가능해진 것은 1970년 이후이다. 2차원 모델링을 위해 Coggon (1971)은 유한요소법을, Lee (1975) 및 Snyder (1976)는 적분방정식을, 그리고 Dey and Morrison (1979a)은 유한차분법을 이용하였다. 연이어 개발된 3차원 모델링에서 Hohmann (1975)은 적분방정식을, Dey and Morrison (1979b)은 유한차분법을, Pridmore *et al.* (1981)은 유한요소법을 이용하였다.

비록 2차 세계대전 이전에 일본인에 의해 SP 이상이 관측되었다는 기록도 있지만, 한국에서 전기탐사가 본격적으로 보급된 것은 1960년 이후의 일이다. 자원 탐사에 있어서는 SP 탐사가 자력탐사와 함께 가장 중요한 기술로 간주되었으며, 전기비저항 탐사는 주로 Schulumberger 수직탐사로 지하수조사를 위해 활발히 사용되었다. IP 탐사 또한 70 년대에 도입되어 광물자원탐사를 위한 신기술로 사용되었다.

### 3. 1981년 이후

지난 25년 동안 전기·전자탐사는 자료의 취득, 처리 및 해석에 있어서 두드러진 발전을 보였다(Nabighian and Macnae, 2005; Tripp, 2005). 다른 모든 기술분야와 마찬가지로, 반도체산업의 발전은 자료 획득과 잡음의 감쇄 처리에서 혁신을 가져왔다. 특히 중요한 것은 전자탐사 자료 취득시스템에서 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 크게 증가시킬 수 있었다는 점과 이전에는 어려웠던 2차원과 3차원 자료의 역산도 가능하게 되었다는 점이다.

평활화제약(smoothness constraint)에 의한 2차원 전기비저항 역산의 개발은 물리탐사 자료해석의 역사에서 가장 눈에 띄는 변화 중 하나이며, 전기비저항 분포를 가단면도(pseudosection)가 아니라 단면도로 나타낼 수 있는 능력은 자료해석의 혁신을 가져왔다. 2차원 역산법의 시작은 아마 Pelton *et al.* (1978)라고 할 수 있지만, 이 방법은 제약이 너무 많아 실용적이라 할 수 없었다. 이후 Petrick *et al.* (1981)은 alpha center를 이용한 역산법을 개발했고, 연이어 Sasaki (1981), Smith and Vozoff (1984), Tripp *et al.* (1984) 등이 개발에 성공했다. 이들 중 마지막 2편의 논문을 비선형 최소자승법을 이용한 본격적인 2차원 역산법의

시작으로 보는 견해가 우세하다. 한국에서의 2차원 역산법은 Kim and Kim (1988)과 김정호 등(1989a; 1989b)에 의해 시작되었으며, 이는 이후 한국의 전기탐사 해석기술이 세계적인 수준까지 급속히 따라가게 하는 발판이 되었다.

최근의 다채널 전기비저항 측정시스템의 보급은 직류 전기비저항 탐사의 현장작업 효율과 유연성을 크게 향상시켰을 뿐만 아니라 복잡한 지하구조를 조사하기 위한 전기비저항 토모그래피(tomography)의 적용도 용이하게 하였다. 양질의 3차원 자료가 주어진다면, 3차원 역산에서도 지난 날의 2차원 역산에 필적할만한 성공을 거둘 수 있을 것이다. 그리고 전기비저항법에 이용되는 대표적 전극배열인 쌍극자배열이나 단극배열의 경우, 측정에서 전류전극과 전위전극을 공용으로 사용하기 때문에 대규모 역산에서의 최대 약점인 막대한 감도 계산량을 크게 줄일 수 있다.

1990년대에 들어오면서 전기비저항의 3차원 역산기술이 보급되기 시작하였다. Park and Van (1991)이 소규모 문제에 적용한 것을 시작으로, Shima (1992)는 alpha center를 역산문제에 적용하였다. 이후 본격적이 역산법이 소개되었는데, 역산에 필요한 최적화기법에 Ellis and Oldenburg (1994)은 conjugate gradient법을, Sasaki (1994)는 Gauss-Newton법을, Loke and Barker (1996)는 quasi-Newton법을 이용하였다.

국내에서는 이명중 등(1999)을 시작으로 여러 편의 관련 논문이 발표된 바 있다. 현재 한국은 GPR탐사를 포함한 전기·전자탐사분야에서 질적 수준으로 보나 인적자원으로 보나 세계적인 수준을 유지하고 있다. 이러한 사실은 2004년에 일본 센다이에서 열린 지하영상화에 관한 국제학술회의(SEGJ International Symposium - Imaging Technology-, 2년에 한 번씩 개최됨)에서 전기·전자탐사와 관련된 논문 총 26편 중 국내학자의 논문이 13 편을 차지한 것으로도 알 수 있다. 그리고 2006년(일본 교토)에는 계획된 12개 session 중 유독 전기·전자 session 만은 국내과학자가 convener를 맡을 것으로 예정되고 있다.

최근 25년 동안 국내학회지에 게재된 전기탐사와 관련된 논문수의 추이를 Fig. 1에 나타내었다. 총 8개 학회지(지구시스템공학회지, 지질학회지, 자원환경지질, 지질공학, 지하수토양환경학회지, 물리탐사, 지구물리, Geosystem Engineering)를 대상으로 하였다. 1997년을 경계로 하여 논문수가 크게 증가된 것을 볼 수 있다. 즉, 그 이전에는 한해 10편이 채 되지 않았는데 그 이후부터는 대부분 10편 이상이다. 이와 같은 논문수의

증가와 3개 학회지(물리탐사, 지구물리, Geosystem Engineering)가 1998년에 창간된 것과 어떤 연관이 있는지는 불분명하다. 2002년도에는 21편의 논문이 발표되어 최고를 이루었지만, 최근에는 3년 연속으로 논문수가 큰 폭으로 감소하고 있다. 이러한 감소는 전기탐사 대신 전자탐사의 적용 사례가 많아지고 있는 추세와 관련이 있을 것으로 판단된다. 또한 최근의 연구업적을 중요시 하는 풍토로 인해 해외 저명학술지에의 투고가 많아진 것도 하나의 요인일 수 있다.

전기탐사가 국내에서 어떤 분야에 적용되었는지를 알아 보기 위해서, 적용분야를 자원탐사, 지반조사, 재해방지, 환경오염(토양), 수리지질, 고고학, 이론연구의 7개로 나누어 최근 5년간의 동향을 살펴보았다. 총 70편의 논문 중 자원탐사 7, 지반조사 13, 재해방지 9, 환경오염(토양) 3, 수리지질 13, 고고학 4, 이론연구 21로 나왔다. 서로 비슷한 분야인 지반조사와 재해방지를 Geotechnical, 수리지질과 환경오염을 Environmental로

분류한다면, 논문수는 Geotechnical이 가장 많고 그 다음이 이론연구(Theoretical), 그리고 Environmental 순이다(Fig. 2).

국내에서 Geotechnical 분야의 논문이 많은 것은 이 분야가 건설이나 토목과 같은 큰 시장을 기반으로 하고 있기에 연구비나 조사비가 많기 때문이다. Environmental 분야가 많은 것은 최근 들어 환경오염이 사회적인 문제로 대두되면서 큰 관심의 대상이 되고 있기 때문으로 판단된다. 또한 이론연구의 경우도 논문수가 많은데 이것은 논문 발표를 통해서만 알고리즘이나 전극배열법의 타당성을 검증 받을 수 있기 때문으로 여겨진다.

전기탐사의 적용에 있어서 Geotechnical 분야가 Environmental 분야보다 비중이 더 큰 국내 사정은 세계적인 추세와는 사뭇 다른 양상이다. 예를 들어 Ward (1990a)는 천부물리탐사에 관해 세 권의 책으로 펴낸 바 있는데, 이 속에 토목, 환경 및 지하수에 대한 적용 사례를 총 57편(토목 23편, 환경 및 지하수 34편) 수록하였다(Fig. 3). 그 중 전기탐사를 이용한 사례는 총 24편(토목 5편, 환경 및 지하수 19편)으로 42%에 이른다. 전기탐사가 상대적으로 토목에 대한 적용이 적은 것은 지층의 탄성계수를 비롯한 역학적 변수를 구하기에는 탄성과탐사가 더 유리하기 때문이다. 지하수를 포함한 환경분야의 경우는 전자탐사를 적용하는 사례도 많으며 그 경향은 전자탐사의 고도화와 더불어 증가 추세이다.

서정희 등(2006)은 1995년부터 2005년까지 국내에서 발표된 천부물리탐사 관련 논문을 분석하여 데이터베이스로 구축하였다. 이 데이터베이스에서 부록에 제시한 논문집을 선택하여 최근 5년간 자료에 대해 위에서 한 분류에 따라 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내

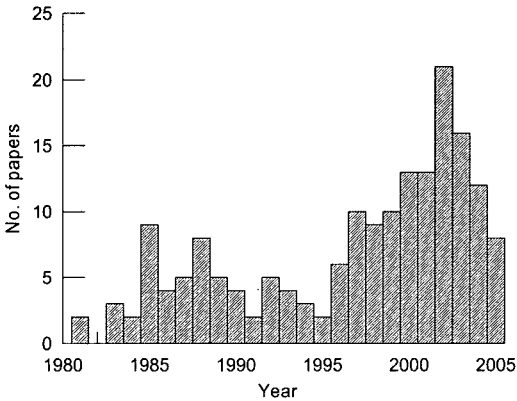


Fig. 1. Number of papers on electrical methods published in Korea from 1981 to 2005.

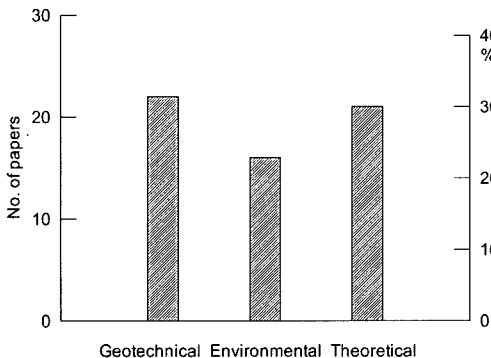


Fig. 2. Number of papers in each of three disciplines in electrical geophysics in Korea during recent five years.

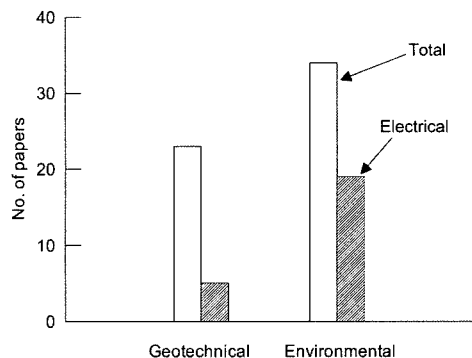


Fig. 3. Number of articles in each of two disciplines appeared in Ward (1990a).

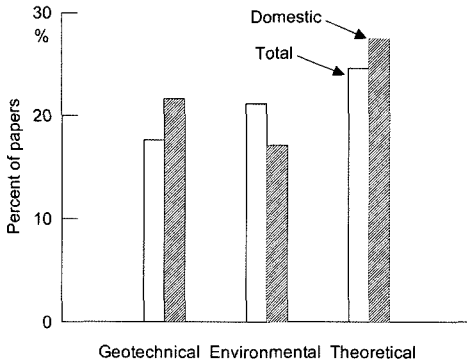


Fig. 4. Percent of papers in each of three disciplines in near-surface geophysics during recent five years (modified from Suh *et al.* (2006)).

었다. Geotechnical과 Environmental의 비중이 국내와 국외에서는 역전되어 있음을 알 수 있다. 만일 전기탐사에 대한 논문으로만 국한시키면 Geotechnical이 더 많아져 이론연구와 비슷해질지도 모른다. 이와 같이 전기탐사의 Geotechnical에 대한 적용이 많은 것은 고도로 발달된 국내의 역산기술도 한 요인으로 생각된다.

#### 4. 전기비저항 토모그래피

광물조사에서 채택된 전도체에 전류원을 설치하는 인공분극법(mise-a-la-masse method)은 금속 광물과 모암의 경계를 식별해야 하는 필요성으로 인해 주로 발전해왔다. 이러한 시추공 전기탐사에는 지난 20년 동안 괄목할 만한 몇몇 발전이 있었으며, 최근에는 천부 물리탐사의 많은 부분이 시추공탐사에 의존하게 되었다. 이는 시추공탐사가 지표탐사에 비해 해상도가 상대적으로 높을 뿐만 아니라 지하천부에서 주로 일어나는 신호의 감쇄가 적고, 지층의 불균질성과 여러 종류의 잡음의 영향을 감소시킬 수 있기 때문이다. 한국과 같이 복잡한 지질조건을 가지는 환경 하에서는 지하구조에 대한 정밀 영상을 제공할 수 있는 기술에 대한 수요가 많으며, 전기비저항 토모그래피는 특히 토목 건설 분야에서의 지반조사, 지반안정성 평가, 환경 오염대 조사 등 비교적 고분해능의 탐사기술이 요구되는 분야에서의 적용이 기대되고 있다.

토모그래피 기술은 의학분야에서 아주 성공적으로 사용되고 있는 CT(전산 단층 촬영)스캐너로 널리 알려진 신체 내부의 3차원 X-ray영상화와 동일한 수학적 접근법에 기초한다. 이러한 기술은 지층을 통과하는 대량의 (탄성파 또는 전자기파의) 투사를 통해 지구물리

학적 특성을 측정하는데 이용된다. 이 측정에는 관심 대상 물질의 전기적, 전자기적, 역학적 특성을 포함할 수 있다. 그러나 전기비저항 토모그래피의 경우는 투영정리보다 뒤에서 설명할 역산기법을 이용하는 것이 일반적이다.

전기비저항 토모그래피에 대한 연구는 1990년대에 본격화되었으며, 먼저 2차원문제를 대상으로 해외에서는 Daily and Owen(1991), Sasaki(1992) 등에 의해, 국내에서는 이명중 등(1995), 조인기 등(1997a)에 의해 수행되었으며, 이어서 3차원문제에 대해서 Pain *et al.* (2002), 이명중 등(2002)에 의해 수행되었다. 그리고 자료 해석에 있어서는 이수(mud)에 의한 시추공효과에 주의를 기울일 필요가 있으며(조인기 등, 1997b), 이로 인해 전극간격이 좁은 자료는 크게 왜곡될 수 있다.

#### 5. 전기탐사 모델링과 역산

전기탐사 자료의 정량적 해석을 위해서는 역산이 필수적이다. 물론 최소자승법을 기초로 하는 자동 역산만이 전기탐사 자료의 유일한 해석법은 아니지만, 현재 국내외적으로 역산을 통한 해석이 표준화되어 있다고 해도 과언은 아니다. 현대적인 컴퓨터를 이용한 자동 역산법의 시작은 아마 Inman *et al.* (1973)의 수직탐사 자료에 대한 1차원 역산법 개발이라 할 수 있다. 그리고 이러한 기술 개발의 배경에는 Ghosh(1971)부터 시작되는 선형필터법 개발이 중요한 계기가 되었다. 역산에 대한 개념을 크게 바꾼 것은 Constable *et al.* (1987)에 의한 평활화제약(smoothness constraint) 역산법의 도입이다. 이 방법의 중요성은 그 논문이 학회지 Geophysics 75년 역사상 인용회수가 2번째로 많은 것으로도 알 수 있다(Peltoniemi, 2005). 그 후 모델링과 역산법은 컴퓨터의 발달과 더불어 빠르게 발전하고 1990년대 후반에는 3차원 해석도 가능해졌다(Oristaglio and Spies, 1999). 이하에서는 국내에서 잘 알려진 유한요소법을 이용한 전기비저항 모델링과 Gauss-Newton법에 의한 역산법에 대해 소개한다. 설명에서 모델링은 3차원문제를 다르지만, 역산은 기본적으로는 문제의 차원과 무관하다.

3차원 직류 전기비저항 문제에 대한 유한요소법의 적용은 Pridmore *et al.* (1981)을 시작으로 Zhou and Greenhalgh (2001) 등에 의해서 상세히 논의되었다. 다른 수치계산법에 비해 유한요소법의 가장 큰 장점은 복잡한 기하학적 형상, 일반적인 경계조건, 공간적으로 변화가 심하거나 비선형인 물성 등을 비교적 쉽게 다

를 수 있다는 것이다. 게다가 유한요소법은 전기비저항 모델링에서 겪어야 할 전류원(source)에서의 특이점 문제(Lowry *et al.*, 1989; Zhao and Yedlin, 1996)를 적분형 범함수의 최소화를 통해 제거할 수도 있다. 그러나 특이점 제거를 통하여 2차 포텐셜을 구하는 것은 유한요소법에서도 여전히 해의 정확도 향상에 유용하다(Coggon, 1971; Rucker *et al.*, 2006). 그리고 전극을 격자점이 아닌 요소 내부에도 쉽게 설정할 수 있다는 점도 유한요소법의 장점이다(Pain *et al.*, 2002; Rucker *et al.*, 2006).

전기포텐셜의 변화를 설명하는 편미분방정식은 다음과 같이 포아송(Poisson) 방정식으로 표현된다.

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla u = \nabla \cdot \mathbf{J}, \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 전기전도도(S/m),  $u$ 는 전위(V), 그리고  $\mathbf{J}_s$ 는 소스의 전류밀도(A)이다. (1) 식으로부터 다음의 변분적분이 유도된다.

$$\chi = \int [\sigma (\nabla u)^2 - 2u \nabla \cdot \mathbf{J}_s] dv. \quad (2)$$

(2) 식의 해는 적분  $\chi$ 를 정상(stational)으로 만드는  $u$ 로 주어진다.

모델화해야 할 3차원 영역을 다수의 직육면체요소로 나눈다. 이것은 다시 다섯 개의 사면체요소로 나눌 수도 있다. Zhou and Greenhalgh (2001)는 사면체요소를 이용하는 것이 직육면체요소를 이용하는 것 보다 계산이 빠르다고 하였다.

구하고자 하는 포텐셜은 각각의 요소에서  $u$ 의 절점 값을 사용하여 정의되는 선형다항식으로부터 근사된다(Rucker *et al.* (2006)은 전극을 격자점이 아닌 요소 내부에 설정할 때에는 선형다항식보다 고차다항식이 더 유용하다고 하였다). (2) 식에 선형다항식을 대입하고 요소의 체적에 대해 적분하면  $u$ 의 절점 값에 관한 요소적분을 낳는다. 전체 적분  $\chi$ 는 이들 요소적분의 합이다. 적분  $\chi$ 의 최소화는 절점 값에 대하여  $\chi$ 의 일차미분을 0로 놓음으로써 찾을 수 있으며, 결국 다음과 같은 유한요소 행렬식이 유도된다.

$$\mathbf{K}u = \mathbf{s}, \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{K}$ 는 띠 모양의 대규모 산재 계수 행렬,  $u$ 는 모든 절점에서의 포텐셜 값으로 구성된 벡터이고,  $\mathbf{s}$ 는 소스 벡터이다.

(3) 식은 일반적으로 incomplete Cholesky conjugate gradient (ICCG)법으로 효율적으로 풀 수 있다. 실제로, Sasaki (1999)와 Zhou and Greenhalgh (2001)은 ICCG

법이 PC에서의 3차원 계산으로는 수렴률 면에서 적절한 선택이라고 하였다. 그러나 최근 Wu (2003)에 의하면 유한요소 행렬의 경우 ICCG법이나 행렬의 대각요소에만 가중치를 주는 modified ICCG (MICCG)법으로는 수렴이 느리거나 아예 수렴하지 않는 경우가 있으며, 비 대각요소에도 가중치를 주는 shifted ICCG (SICCG)법이 유효하다는 것이 밝혀졌다. 참고로 계산 시간 면에서는 유한요소법은 유한차분법에 미치지 못한다(Wu *et al.*, 2003). 이는 유한차분 행렬은 유한요소 행렬과 달리 대각 우위인 M행렬의 특징을 가지며 단순한 ICCG법 적용이 가능하기 때문이다.

직류 전기비저항 역산 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{m}, \quad (4)$$

여기서  $\Delta \mathbf{d}$ 는 측정된 자료와 모델링으로 계산한 자료의 차이로 구성된 벡터,  $\Delta \mathbf{m}$ 은 초기모델  $\mathbf{m}_0$ 에 대한 보정 벡터,  $\mathbf{J}$ 는 자코비안 행렬(모델 변수에 대한 모델링 응답의 편미분 행렬)이다. 모델의 매개변수화(parameterization)를 위해 일반적으로 모델을 미지의 매개변수들의 많은 블록들로 나눈다. 자코비안 행렬의 안정화를 도모하고 전기비저항을 양의 값으로 제한하기 위해 모델 전기비저항과 측정된 겉보기비저항의 대수 값을 이용하여 매개변수와 자료를 규격화한다.

대부분의 물리탐사 역산 문제에서처럼, 식(4)의 역산 과정을 안정시키기 위해서 거칠기(roughness, 매끄러움(smoothness)의 역)항을 도입한다(Tikhonov and Arsenin, 1977). 가장 매끄러운(smoothest) 해를 구하기 위해 역산에서 최소화해야 할 목적함수는 아래와 같다.

$$U = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{J}\Delta \mathbf{m} - \Delta \mathbf{d})\|^2 + \lambda \|\mathbf{W}_m(\mathbf{m}_0 + \Delta \mathbf{m})\|^2 + \varepsilon \|\Delta \mathbf{m}\|^2 \quad (5)$$

여기서  $\|\cdot\|^2$ 는 유클리드  $l_2$  놈(norm),  $\mathbf{W}_d$ 와  $\mathbf{W}_m$ 는 각각 자료와 모델의 가중행렬,  $\lambda$ 는 라그랑지 곱수,  $\varepsilon$ 는 양의 상수이다.

(5) 식에서 정규화(regularization) 변수인 라그랑지 곱수  $\lambda$ 는 자료의 비적합도(misfit)와 모델 거칠기 사이의 비중을 조절한다(Tikhonov and Arsenin, 1977; Parker, 1994).  $\lambda$ 가 커지면 분해능은 나빠지나 매끄럽고 안정된 해를 구할 수 있는 반면에,  $\lambda$ 가 작아지면 잘못된 모델을 초래하기 쉬운 약조건(ill-condition) 최소자승 역산문제에 더 가까워지게 된다(e.g., Parker, 1980). 역산 해를 제약하기 위한 추가적인 방법은 가중치를 도입하는 것이다. 자료 가중행렬  $\mathbf{W}_d$ 는 일반적으로 자료 표준 편차의 역수값을 성분으로 하는 대각행

렬이다. 만약 일반적인 전기비저항 측정에서 자주 접하게 되는 것처럼, 그러한 정보가 없을 경우  $W_d$ 는 대각요소를 측정값의 역수로 놓을 수도 있다(Torres-Verdin *et al.*, 2000). 그리고 모델 가중행렬  $W_m$ 로서는 모델 거칠기를 정량화하기 위한 유한차분 연산자가 많이 사용되고 있다(e.g., Sasaki, 1989; deGroot-Hedlin and Constable, 1990).

(5) 식의 최소화는 다음과 같은 정규방정식의 형태인 선형 연립방정식을 유도한다.

$$[J^T W_d^T W_d J + \lambda(W_m^T W_m + \mathbf{I})] \Delta \mathbf{m} = J^T W_d^T W_d \Delta \mathbf{d} - \lambda W_m^T W_m \mathbf{m}_0 \quad (6)$$

관측방정식의 형태로는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} W_d J \\ \sqrt{\lambda} W_m \\ \sqrt{\lambda} \mathbf{I} \end{bmatrix} (\Delta \mathbf{m}) = \begin{bmatrix} W_d \Delta \mathbf{d} \\ -\sqrt{\lambda} W_m \mathbf{m}_0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{I}$ 는 항등(identity)행렬이다. (7) 식으로부터 구해지는 해는 (6) 식에서 얻어지는 것보다 정확하다고 알려져 있다(e.g., Lines and Treitel, 1984). 보정 벡터  $\Delta \mathbf{m}$ 은 초기 벡터  $\mathbf{m}_0$ 에 더해진다. 이러한 과정은 측정 자료와 모델링 자료 사이의 차이  $\Delta \mathbf{d}$ 가 만족스러운 수준으로 감소될 때까지 반복된다. 그 판단의 기준으로 주로 이용되는 평균 제곱근인 잔차  $E$ 는 다음과 같다.

$$E = \sqrt{\frac{\Delta \mathbf{d}^T \Delta \mathbf{d}}{N}} \quad (8)$$

여기서  $N$ 은 자료의 개수이다.

이러한 Gauss-Newton법에서는 전진해(모델링 응답)의 모델변수에 대한 편미분을 필요로 한다. 어떤 블록

의 전기비저항에 관해서 (3) 식의 양쪽을 미분하면 아래와 같이 된다.

$$K u' = -K' u, \quad (9)$$

여기서 '은 미분을 나타낸다. 역산에서 많은 모델 변수에 대한 편미분은 서로 다른 소스지점에서 얻어져야 한다. (9) 식의 오른쪽 항의 개수는 (3) 식의 소스 벡터 개수와 모델 변수 개수의 곱과 같다. 이렇게 많은 행렬식의 개수는 편미분 계산을 어렵게 한다. 그러나 상반성(reciprocity)원리를 적용하면 편미분은 행렬식을 직접 풀지 않고서도 효율적으로 얻어질 수 있다(Rodi, 1976; Tripp *et al.*, 1984; Sasaki, 1989). 그 개념의 핵심은 수신기와 소스와의 상반성 때문에 (9) 식에서 해가 수신기 지점에 위치하는(가상의 단위)소스로부터 도출되는 전진해의 1차 결합에 의해 얻어지게 된다는 것이다.

평활화제약 역산의 반복과정에서 최적의 라그랑지 곱수  $\lambda$ 을 결정하기 위해서는 Constable *et al.* (1987)에 의해 제안된 Occam법이 많이 사용된다. Occam법의 두드러진 특징은 변수  $\lambda$ 가 각 반복단계에서 수정량의 제어와 평활화 변수로서 동시에 사용되는 것이다(deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Parker, 1994). 관측방정식((7) 식) 혹은 정규방정식((6) 식)을 일련의 시험적인  $\lambda$ 값에 대해 풀 뒤, 각각의  $\lambda$ 에 대해 (8) 식에 의해서 정의되는 비적합(평균 제곱근 잔차)은 3차원 전진 문제 (1) 식을 풀면 구해진다. Occam 과정은 다음 반복을 위한 출발로써 최소 비적합을 주는  $\lambda$ 로 구해지는 모델을 선택한다. 그 최소화는 간단한 1차원적 추적(one-dimensional search)에 의해 수행될 수 있다.

최적의  $\lambda$ 을 결정하기 위한 다른 방법으로는 ABIC (Akaike's Bayesian information criterion)법(e.g.,

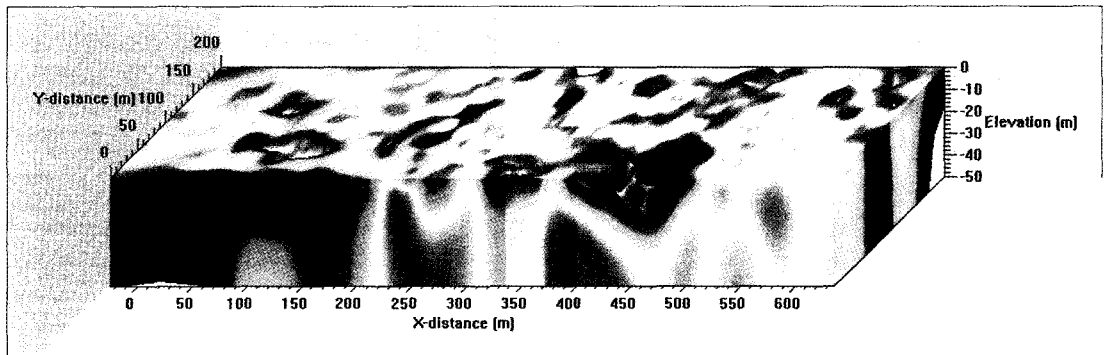


Fig. 5. Three-dimensional resistivity image (modified from Kim *et al.* (2004)).

Ucida, 1993), GCV (generalized cross-validation) 법 (e.g., Haber and Oldenburg, 2000), L-curve 법 (e.g., Gunther *et al.*, 2006) 등도 있다. 한편 이명종 등 (1999)과 Yi *et al.* (2001)은 단일  $\lambda$ 가 아닌 공간적으로 변화하는  $\lambda$ 을 Backus-Gilbert 전개함수의 원리를 바탕으로 유도하는 ACB (active constraint balancing) 법을 제안하였다.

마지막으로 Fig. 5에 한국에서 실시한 3차원 역산의 한 예를 제시한다. 이는 제천 도담지역 중앙선 철도 터널 건설을 위하여 Kim *et al.* (2004)이 수행한 3차원 전기비저항 영상이다. 역산에서는 이명종 등 (1999)의 공간적으로 변화하는 라그랑지 곱수를 이용하는 방법을 사용하였다. 조사지역에 발달하는 천부 지하공동이나 연약대 분포를 정확히 영상화하고 있으며, 특히 이상대의 심도분포를 잘 나타내어 주고 있음을 알 수 있다.

## 6. 전기탐사의 미래

탐사의 목적, 원하는 해상도, 동원 가능한 예산과 현장의 지질학적인 조건 등에 따라서 물리탐사법의 선택은 달라져야 한다. 예를 들면, 탄성과 탐사는 지구의 역학적 특성에는 민감하지만, 그 화학적 구성에는 상대적으로 둔감하다. 이와는 대조적으로 전기·전자탐사는 매질 내에 함유된 유체와 자기나 전기적 전도성 물질에 민감하다. 물질마다 역학적 특성이나 전자기적 특성이 다르기 때문에 복합 물리탐사법의 사용은 대부분의 조사지역에서 직면하는 문제에 대해 더 나은 해답을 제공할 수 있다.

전기비저항 탐사의 가장 큰 단점은 전극의 사용에 있다. 2000년 무렵부터는 OhmMapper™ 등과 같은 무전극(주로 전기용량 전극) 전기비저항 측정 시스템이 보급되기 시작하였다. 기존의 땅에 박아야 하는 전극을 사용하지 않기 때문에 총 측정시간은 크게 단축된다고 알려져 있지만, 아직은 긍정적 평가가 많은 것은 아니다. 그리고 0.1 Hz 이하의 주파수에서 전기비저항 측정을 위해 사용할 수 있는 전기용량 전극의 방호장치도 개발되었다고는 하나, 이 센서도 신뢰성 있는 IP 자료 수집에는 아직 잡음이 높은 수준이다. 여전히 기술면으로는 개발단계지만, 접지전극 없이 IP 측정을 실시하는 기술이 Gasperikova and Morrison (2001)에 의해 제안된 바 있다. 이 방법은 측정 전기장이 참조 전기장에 대해서 주파수 의존성과 위상 변화가 일어나는 낮은 주파수에서 분극체 응답의 주파수에 따른 변

화를 연속 측정함에 기초하고 있다.

전기비저항법은 광범위한 분야의 문제에 적용되고 있으며, 새로운 적용영역이 지속적으로 발생하고 있다. 지층의 전기비저항을 측정하는 이 비파괴적인 수단은 지하 천부를 조사하는데 주로 이용된다. 지난날의 대부분의 발전은 측정 장비와 컴퓨터 처리 기술의 발달에 힘입은바 크다. 현재 군사활동에 따른 미폭발 무기(UXO)의 탐지와 같은 사회적 필요성은 탐사에 강력한 동기를 부여하고 있다. 음료용 지하수의 필요성, 고고학을 목적으로 하는 조사에서 물리탐사에 박차를 가하는 법규, 농업과 지질공학분야에서 토질역학에 대한 지식의 필요성과 같은 또 다른 간과할 수 없는 요인들이 현재 전 세계적으로 존재한다.

한편 전기비저항법을 포함한 물리탐사의 수요는 세계 경제 동향이나 에너지 및 금속광물의 상품 가격 동향과 밀접한 관계가 있다. 예를 들면 70년 후반부터 IP법의 급격한 수요 감소는 월남전 종료와 함께 찾아온 금속 원자재 가격의 하락이 주요 원인이다. 또 이 원고를 쓰고 있는 2006년 초는 고유가와 하늘 높은 줄 모르는 금(금속 원자재의 대표로서) 값으로 몸살을 앓고 있지만, 불과 몇 년 전 2000년대 초반 하더라도 유가 및 금 값은 지금의 절반 이하이었다. 이러한 저유가는 그 당시 발전 초기단계에 있었던 아시아지역의 지열 개발에 큰 타격을 입힌바 있었다.

천부물리탐사의 미래는 밝다(Steeple, 2001; 2005). 이들 방법은 지하에서 마지막 석유가 퍼 올려진 이후에도 오래도록 존재할 공학, 환경 및 광물자원의 필요성을 충족시켜 주는데 사용될 것이다. 그리고 전기비저항법은 항상 천부물리탐사의 중심에 위치하고 있을 것이다. 마지막으로 천부물리탐사는 인류사회의 안전성과 안전에 관련된 공공정책 문제에 큰 영향을 줄 수 있음을 강조하고 싶다. 이 중에는 지진재해 완화, 자연재해 경고 시스템, 오염완화 그리고 전 지구온난화 문제까지 있다.

## 사 사

본보 작성에 있어서 좋은 의견을 주신 심사위원과 도움을 주신 이명종 박사, 남명진박사, 최지향양께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원(DJ2-101-1-0-0)으로 수행되었습니다.



## 참고문헌

- 김정호, 현병구, 정승환 (1989a) Reciprocity 원리를 이용한 2차원 비저항 탐사자료의 효율적 역산. 대한광산학회지, 26권, p. 18-27.
- 김정호, 현병구, 정승환 (1989b) 쌍극자 배열 비저항탐사 자료의 2차원 자동역산. 대한광산학회지, 26권, p. 90-100.
- 서정희, 양정아, 최지향, 한누리, 남정미, 임보성, 조호범 (2006) 물리탐사 논문 동향 분석 및 데이터베이스 작성, 한국지질자원연구원 위탁과제 보고서 (과제번호 400-20060010), 서울대학교 공학연구소.
- 이명중, 현병구, 김정호 (1995) 시추공간 전기비저항 탐사 자료의 영상화. 한국자원공학회지, 32권, p. 87-96.
- 이명중, 김정호, 조성준, 정승환, 송운호 (1999) 전기비저항 자료의 3차원 역산. 물리탐사, 2권, p. 191-201.
- 이명중, 김정호, 정승환, 서정희 (2002) 전기비저항 토모그래피에 의한 지하구조의 3차원 영상화. 물리탐사, 5권, p. 236-249.
- 조인기, 정승환, 김정호, 송운호 (1997a) 전기비저항 토모그래피에서의 전극배열비교. 한국자원공학회지, 34권, p. 18-26.
- 조인기, 김정호, 정승환 (1997b) 전기비저항 토모그래피에서의 공내수 영향. 한국자원공학회지, 34권, p. 531-538.
- 편집실 (1998a) 전기비저항 탐사(I), 물리탐사, 1권, p. 140-143.
- 편집실 (1998b) 전기비저항 탐사(II), 물리탐사, 1권, p. 188-195.
- Coggon, J.H. (1971) Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, v. 36, p. 132-155.
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G. (1987) A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, v. 52, p. 289-300.
- Corwin, R.F. (1990) The self-potential method for environmental and engineering applications. In Ward, S.H. (ed.) *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 1, Soc. Expl., Geophys., p. 127-145.
- Daily, W. and Owen, E. (1991) Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics*, v. 56, p. 1228-1235.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990) Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, v. 55, p. 1613-1624.
- Dey, A. and Morrison, H.F. (1979a) Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophys. Prosp.*, v. 27, p. 106-136.
- Dey, A. and Morrison, H.F. (1979b) Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional bodies. *Geophysics*, v. 44, p. 753-780.
- Ellis, R.G. and Oldenburg, D.W. (1994) The pole-pole 3-D resistivity inverse problem: a conjugate-gradient approach. *Geophys. J. Int.*, v. 119, p. 187-194.
- Gasperikova, E. and Morrison, H. F. (2001) Mapping of induced polarization using natural fields. *Geophysics*, v. 66, p. 137-147.
- Ghosh, D.P. (1971) The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophys. Prosp.*, v. 19, p. 192-217.
- Gunther, T., Rucker, C. and Spitzer, K. (2006) Three-dimensional modeling and inversion of dc resistivity data incorporating topography æ II. Inversion. *Geophys. J. Int.*, v. 166, p. 506-517.
- Haber, E. and Oldenburg, D.W. (2000) A GCV based method for nonlinear ill-posed problems. *Comput. Geosci.*, v. 4, p. 41-63.
- Hohmann, G.W. (1975) Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *Geophysics*, v. 40, p. 309-324.
- Inman, J.R., Ryu, J. and Ward, S.H. (1973) Resistivity inversion. *Geophysics*, v. 38, p. 1088-1108.
- Kim, H.J. and Kim, Y. (1988) Two-dimensional inversion for dipole-dipole resistivity data. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 107-113.
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., Cho, S.-J. (2004) Application of high-resolution geoelectric imaging techniques to geotechnical engineering in Korea, Proc. ISRM Internat. Symp. 3rd ARMS, Kyoto, Japan, p. 191-196.
- Lee, T. (1975) An integral equation and its solution for some two and three-dimensional problems in resistivity and induced polarization. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 42, p. 81-95.
- Lines, L.R. and Treitel, S. (1984) Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophys. Prosp.*, v. 32, p. 159-186.
- Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, v. 44, p. 131-152.
- Lowry, T., Allen, M.B. and Shive, P.N. (1989) Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques. *Geophysics*, v. 54, p. 766-774.
- Nabighian, M.N. and Macnae, J.C. (2005) Electrical and EM methods, 1980-2005. *Leading Edge*, v. 24(S1), p. S42-S45.
- Oristaglio, M. and Spies, B. (eds.) (1999) *Three-Dimensional Electromagnetics*. Soc. Expl. Geophys., 709p.
- Pain, C.C., Herwanger, J.V., Worthington, M.H. and de Oliveira, C.R.E. (2002) Effective multidimensional resistivity inversion using finite-element techniques. *Geophys. J. Int.*, v. 151, p. 710-728.
- Park, S.K. and Van, G.P. (1991) Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, v. 56, p. 951-960.
- Parker, R.L. (1980) The inverse problem of electromagnetic induction: existence and construction of solutions based upon incomplete data. *J. Geophys. Res.*, v. 85, p. 4421-4425.
- Parker, R.L. (1994) *Geophysical Inverse Theory*. Princeton Univ. Press.
- Pelton, W.H., Rijo, L. and Swift, C.M., Jr. (1978) Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data. *Geophysics*, v. 43, p. 788-803.
- Peltoniemi, M. (2005) Impact factor, citations, and Geophysics. *Geophysics*, v. 70, p. 3MA-17MA.
- Petrick, W.R., Jr., Sill, W.R. and Ward, S.H. (1981) Three-dimensional resistivity inversion using alpha centers. *Geophysics*, v. 46, p. 1148-1163.
- Pridmore, D., Hohmann, G.W., Ward, S.H. and Sill, W.R. (1981) An investigation of finite element modeling for

- electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, v. 46, p. 1009-1024.
- Rodi, W.L. (1976) A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, v. 44, p. 483-506.
- Rucker, C., Gunther, T. and Spitzer, K. (2006) Three-dimensional modeling and inversion of dc resistivity data incorporating topography æ I. Modeling. *Geophys. J. Int.*, v. 166, p. 495-505.
- Sasaki, Y. (1981) Automatic interpretation of resistivity sounding data over two-dimensional structure (I). *Butsuri-Tanko*, v. 34, p. 341-350. (in Japanese)
- Sasaki, Y. (1989) Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, v. 54, p. 254-262.
- Sasaki, Y. (1992) Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophys. Prosp.*, v. 40, p. 453-463.
- Sasaki, Y. (1994) 3-D resistivity inversion using the finite element method. *Geophysics*, v. 59, p. 1839-1848.
- Sasaki, Y. (1999) 3-D inversion of electrical and electromagnetic data on PCs: Proc. 3-D EM, p. 128-131.
- SEG of Japan (1998) Electrical methods. In: *Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. Techniques, p. 239-295. (in Japanese)
- Shima, H. (1992) 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, v. 57, p. 682-694.
- Smith, N.C. and Vozoff, K. (1984) Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, v. 22, p. 21-28.
- Snyder, D.D. (1976) A method for modeling the resistivity and IP response of two-dimensional bodies. *Geophysics*, v. 41, p. 997-1015.
- Steeple, D.W. (2001) Engineering and environmental geophysics at the millennium. *Geophysics*, v. 66, p. 31-35.
- Steeple, D.W. (2005) Near-surface geophysics: 75 years of progress. *Leading Edge*, v. 24(S1), p. S82-S85.
- Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Y. (1977) *Solutions to Ill-Posed Problems*. John Wiley and Sons, Inc.
- Torres-Verdin, C., Druskin, V.D., Fang, S., Knizhnerman, L.A. and Malinverno, A. (2000) A dual-grid nonlinear inversion technique with applications to the interpretation of dc resistivity data. *Geophysics*, v. 65, p. 1733-1745.
- Tripp, A.C. (2005) Acheron's rainbow: Free associations on 75 years of exploration geo-electromagnetics. *Geophysics*, v. 70, p. 25ND-31ND.
- Tripp, A.C., Hohmann, G.W. and Swift, C.M. (1984) Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, v. 49, p. 1708-1717.
- Uchida, T. (1993) Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 45, p. 841-858.
- Ward, S.H. (1980) Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods. *Geophysics*, v. 45, p. 1659-1666.
- Ward, S.H. (ed.) (1990a) *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Vol. 2: Geotechnical, and Vol. 3: Environmental and Groundwater. Soc. Expl., Geophys.
- Ward, S.H. (1990b) Resistivity and induced polarization methods. In Ward, S.H. (ed.) *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 1. Soc. Expl., Geophys., p. 147-189.
- Wu, X. (2003) A 3-D finite-element algorithm for DC resistivity modeling using the shifted incomplete Cholesky conjugate gradient method. *Geophys. J. Int.*, v. 154, p. 974-956.
- Wu, X., Xiao, Y., Qi, C. and Wang, T. (2003) Computations of secondary potential for 3D DC resistivity modeling using an incomplete Cholesky conjugate-gradient method. *Geophys. Prosp.*, v. 51, p. 567-577.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., Song, Y., Cho, S.-J., Chung, S. and Suh, J.-H. (2001) Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data. *Geophys. Prosp.*, v. 49, p. 483-497.
- Zhao, S. and Yedlin, M.J. (1996) Some refinements on the finite-difference method for 3-d dc resistivity modeling. *Geophysics*, v. 61, p. 1301-1307.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A. (2001) Finite element three-dimensional direct current modeling: accuracy and efficiency considerations. *Geophys. J. Int.*, v. 145, p. 679-688.

## 부록. 논문 지도

서정희 등 (2006)은 물리탐사 분야의 대표적인 논문 집들을 선정하여 1995년부터 2005년까지의 논문 내용을 분석하고, 체계화된 분류기준에 맞게 데이터베이스화하여 물리탐사 기술의 발전 동향을 살펴보았다. 여기서 그 중 다음 논문집에 대한 2001년부터 5년간 자료를 참고한다.

- 한국: 물리탐사, 물리탐사 학술발표회 논문집
- 일본: Proceedings of SEGJ international symposium
- 미국: Geophysics, Proceedings of SAGEEP (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems)
- 유럽: Geophysical Prospecting, Journal of Applied Geophysics, EAGE's Near Surface Geophysics

일반적으로 물리탐사에서 가장 권위 있는 논문으로는 미국의 Geophysics와 유럽의 Geophysical Prospecting을 들 수 있는데 이들 논문은 석유탐사에 관련된 것이 80% 이상 되어 국내 현실과의 비교에는 적절치 않다고

여겨진다. 그래서 석유분야를 제외한 지반조사나 환경오염탐지 등의 논문을 주제로 하여 비교적 신생의 논문집들을 선택하였다. 또한 가장 최신의 연구 동향을 살피기 위해서 학술지에 게재된 논문보다는 학술발표회에 발표된 논문을 분석의 주 대상으로 하였다. 국내의 논문은 물리탐사와 관련하여 여러 학회의 논문집이 있는데 그 중 최신의 물리탐사 기법에 대한 동향을 대표할 수 있는 “물리탐사” 논문을 선택하였으며, 일본 역시 일본물리탐사학회(SEGJ)의 학술 발표 논문집을 선택하였다. 미국에서의 물리탐사 관련 논문 중 지반조사, 환경오염탐지, 고고학 조사, UXO탐지 등의 논문이 가장 많이 게재되어 있는 SAGEEP의 논문집을 선택하였으며, 유럽 역시 이와 같은 이유로 Journal of Applied Geophysics와 EAGE's Near Surface Geophysics를 선택하였다. 여기서 EAGE's Near Surface Geophysics는 학술발표회 논문집이다.

탐사기술별로는 레이다탐사, 전기비저항탐사, 전자탐사, IP탐사, SP탐사, 탄성파탐사, 중자력탐사, 물리검층, 복합물리탐사, 기타 등 10개로 분류하였고, 응용분야별로는 자원탐사, 지반조사, 재해방지, UXO, 환경오염(토양), 수리지질, 산사태, 지진, 고고학, 석유지질, 자료처리 및 모델링, 기타 등 12개로 분류하였다.