

농경지 오염탐사를 위한 비저항콘의 적용성에 관한 연구

유 찬* · 윤 춘 경*

*건국대학교 농공학과

A Study on the Applicability of Resistivity Cone for Contaminant Investigation in Farm Land

Yu, Chan* · Yoon, Chun-Gyeong*

* Depart. of Agricultural Eng., Konkuk Univ.

ABSTRACT

The applicability of resistivity cone for contaminant investigation in farm land was examined in laboratory and in-situ. To verify the resistivity variations in sand with contaminants, laboratory experiment used soil resistivity test box was performed. Heavy metal and others ions were appeared steep variations in low concentration. Pilot test results were the same as laboratory test results. In the in-situ test used resistivity cone, resistivities of waste landfill layer were low than the common soil layers and resistivities had been difference with concentration of contaminant components. Therefore contaminant investigation in farm land using resistivity cone was expected very effective.

1. 서 론

고도의 경제발전으로 국민의 경제적 생활수준이 향상되면서 예전에는 그 중요성이 부각되지 않았던 우리 주위의 환경적인 측면에 대해서 관심이 고조되고 있다. 우리나라 농촌지역의 수질오염, 토양오염 등의 정도도 이제는 도시지역과 마찬가지로 그 영향이 매우 심각한 실정이다. 특히 토양오염의 경우에는 오염에 따른 피해가 수질이나 대기의 경우보다 그 징후가 늦게 나타나고 혹은 다른 매체들에 의해서 2차적으로 진행되기 때문에 대중적인 관심도 다소 낮았던 것이 사실이다.

정부에서 1995년 토양환경보전법을 제정하여 뒤늦게나마 이에 대한 대책을 마련한 것은 다행이라 하겠다. 그러나 우리나라 농경지에는 과거 다량의 폐기물 매립이 의심되는 지역이 많으며, 이렇게 오염된 농경지를 복원시키기 위해서는 오염성분에 노출되지 얼마되지 않은 경우에는 그 오염전파의 예측이나 처리대책 수립이 비교적 용이하지만, 오랜 기간동안 오염이 진행된 경우에는 오염영역과 오염성분의 파악에도 많은 시간과 경비, 그리고 노력을 필요로 하며, 오염지역의 정화에는 더 많은 노력이 필요하다. 따라서 토양오염의 경우에는 오염지역을 정확하고 신속하게 탐사할 수 있는 기술이 필요하며, 탐사의 정확도가 복원대책의 수립에

많은 영향을 미친다.

현재까지는 오염지반의 탐사에 주로 비저항(Resistivity)법이 많이 사용되어 왔다. 그러나 이 방법은 지반을 구성하는 재료가 균질하다고 가정하고 오염된 지반과 오염되지 않은 지반사이에 적어도 5~10%이상의 전기적 차이가 있어야 효과적으로 오염영역을 파악할 수 있으며, 또한 비저항법을 이용한 지질탐사 및 지반오염탐사에서는 여러개 층으로 구성된 지역의 탐측곡선을 해석하는데 탐측곡선에 반응을 나타내는 인자가 많기 때문에 단일(unique)한 해석이 어렵다는 문제점이 있었다(Zodhy, et al, 1974).

그런데 기존에 토목공사시 기초지반의 지지력을 측정하던 정적 콘 관입시험기(static cone penetration test; CPT)에 여러 가지 오염여부를 판단할 수 있는 측정장치를 부착하여 오염지반의 탐사에 사용하기 위한 노력이 몇 년전부터 외국에서 시작되었다. 콘관입시험기는 지층의 연속적인 선단 지지력과 측면에서 마찰저항을 측정할 수 있는데, 여기에 전기비저항 측정장치를 추가하여 지구물리학적 탐사도 동시에 수행할 수 있도록 만들어진 콘을 비저항콘(resistivity cone)이라고 한다. 지금까지의 연구성과에 따르면 비저항콘은 비균질지반에서 $\pm 1\%$ 의 정확도를 가지고 적용될 수 있으므로 매우 활용성이 큰 장비라고 할 수 있다(Campanella & Weemees, 1990; Campanella & Davies, 1997; Yeung & Akhtar, 1997). 이와 같은 방법을 지반의 오염원탐사에 적용시키면 적은 비용으로 신뢰성 있는 분석이 가능하나 아직 흙의 비저항성질이나 비저항콘에 대한 연구가 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 앞으로 활용도가 증가될 것으로 예상되는 비저항콘을 실제 농경지의 오염탐사에 적용할 경우에 오염영역의 분포와 오염정도의 추정에 활용될 수 있는 자료를 제공하기 위하여 실내실험으로 중금속성분의 농도에 따른 비저항값의 변화와 모형콘을 이용한 pilot 실험을 실시하였다. 또한 실제 폐기물의 불법매립으로 인하여 오염된 농경지 지반에서 현장실험을 실시하여 비저항콘을 이용한 농경지 오염탐사의 적용성에 대해서 알아보았다.

II. 이론고찰

1. 흙의 비저항값 특성

토양의 비저항값은 토양을 구성하고 있는 흙입자와 공

극수의 전기적성질에 따라서 달라질 수 있다. 일반적으로 지반을 구성하고 있는 많은 종류의 흙이 완전한 고체일 경우에는 절연체이지만, 대부분은 다공질체이므로 어느 정도는 전도성 공극수가 함유되어 있다. 일반적으로 흙입자를 구성하는 광물들의 비저항값은 분포범위가 매우 넓은데, 금속광물의 비저항값은 낮고, 다른 광물은 높은 비저항값을 보인다.

예를 들면 비전도성 광물인 흑연은 $10^6 \Omega \cdot m$ 정도로 매우 낮고 건조한 석영암은 $10^{12} \Omega \cdot m$ 이상으로 매우 높아 자연계에 존재하는 암석이나 토양의 어떤 특성도 이것보다 넓은 범위의 분포를 나타내지 않는다. 대부분의 암석에서는 전류가 암석사이 액체의 전해에 의하여 전달되며 따라서 비저항은 암석의 구조보다도 공극율이나 수분함유량, 그리고 수질에 의해 더 영향을 받는다. 이는 건조한 모래, 또는 자갈의 경우에 $1,000 \Omega \cdot m$ 이상까지 나타내기도 한다.

그러나 민물로 포화된 모래나 자갈의 비저항값은 약 $15 \Omega \cdot m$ 에서 $60 \Omega \cdot m$ 정도의 분포를 나타낸다(日本土質工學會, 1981). 공극수의 전기전도도는 이온성분의 농도에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있는데, 토양을 오염시키는 성분들은 대부분 공극수내의 이온농도에 영향을 준다. 또한 일부 오염성분이 비전도성이라도 대부분의 오염토양은 전도성 오염성분이 혼합되어 있는 경우가 많으며, 또한 전도성 성분이 비전도성 성분보다는 지반의 비저항값에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이들 오염성분들은 주로 대수층을 중심으로 높은 전기적 전도층을 형성하게 된다. 모든 재료에서 이온을 이동시킬 수 있는 능력은 전기적 비저항이라는 기본적인 성질에 의해서 좌우된다(Mitchell, 1993). 토양의 경우에 전기비저항은 간극율(porosity), 간극유체의 전기비저항, 흙입자의 조성, 포화도, 입자의 모양과 방향, 간극의 구조, 지반의 온도 등 많은 인자들에 영향을 받는다. (Arulanandan & Muraleetharan, 1988; Thevanayagan, 1993; Jackson et al, 1978; Telford et al, 1976).

그러나 이 모든 인자들을 사용하여 비저항값을 예측하는데에는 어려움이 있으며, 학자들에 따라서는 중요한 인자한 두가지의 변화에 따른 흙의 비저항치 변화에 대해서 연구한 결과를 발표한 바도 있다. 그러나 각 나라의 특정지역이나 토질을 대상으로하고 있어 그 자료의 범용적 적용성은 극히 제한적이다.

2. 전기 비저항법

비저항법은 인위적으로 지하에 전류를 흐르게 하여 발생하는 저항을 측정하는데, 여기에는 전류를 주입시키는데 사용하는 두 개의 전류전극과 전류에 의해 발생하는 전위의 반응측정을 voltmeter로 측정하기 위한 두 개의 전위전극을 합하여 총 4개의 전극이 사용된다. 비저항은 전극의 모양과 전극들간의 거리, 그리고 주입한 전류와 측정한 전압에 의해 계산할 수 있다. DC 방법은 지하수자원의 탐사에 1930년대부터 적용해 오고 있으며 근래에는 오염지반의 탐사에 이르기까지 다양하게 사용하고 있다.

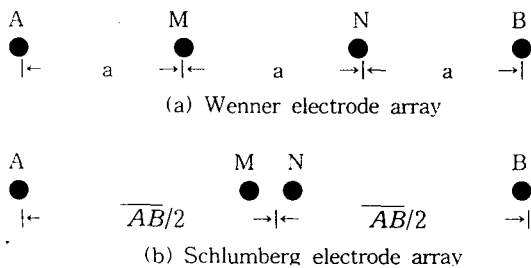


Fig. 1. electrode arrays of DC resistivity method

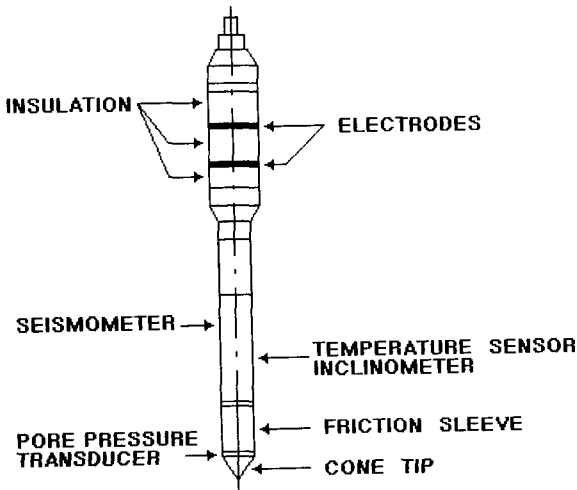


Fig. 2. Resistivity cone

1960년대까지는 Wenner, Lee-Partitioning, 그리고 Schlumberger형태가 사용되어 왔으나 최근에는 Fig.1(b)와 같은 전류전극과 전위전극의 배치형태를 사용 Schlumberger 방법이 선호되고 있다(민병덕 등, 1987; 과학기술처, 1996; EPA, 1993; AASHTO, 1988).

한편 비저항콘은 DC비저항법과 같으나 콘에 전극이 설

치되어야 하므로 전극의 간격이 짧고 기존의 CPT의 구조에서 약간 변화된 Fig. 2와 같은 형태를 이루고 있다(Lunne et al, 1997; Brandl and Robertson, 1996).

III. 재료 및 방법

1. 실내실험재료 및 방법

실내실험에서는 오염성분의 확산이 투수계수가 작은 점성토층보다는 투수계수가 큰 사질토로 이루어진 대수층을 통해서 이루어지는 경우가 많기 때문에 시료는 모래만을 사용하여 실시하였는데, 시료의 물리적·역학적성질과 입도 분포곡선을 Table-1과 Fig. 3에 나타내었다.

Table-1. Physical properties of soils

Soil Type	G _s	#200 Passing(%)	C _u	C _c (C _g)	γ _{d_max} (gf/cm ³)	O.M.C. (%)	USCS
Sand	2.64	1.5	2.63	1.07	1.67	15.9	SP

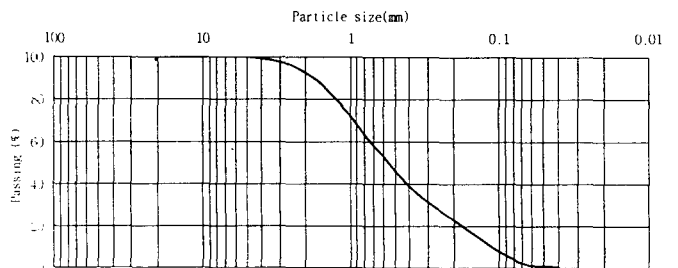


Fig. 3. Grain-size distribution curve

모형콘을 이용한 실험에서는 각종 오염성분들이 혼재되어 있는 산업폐기물 매립장에서 채취한 침출수의 농도 5%, 10% 그리고 30%로 일반상수에 희석시켜 모래의 함수비를 조절하면서 농도변화에 따른 비저항값의 변화를 관찰하였다. 일반상수, 침출수, 그리고 모래의 화학적성분은 Table-2

와 같다.

현장에서 비저항값 측정시에는 전극의 간격을 좁게는 수십cm에서 넓게는 수백미터로 조절하면서 실시되기 때문에 비저항값이 달라질수 있으며, 이때에 측정되는 비저항값은 겉보기 비저항값이다. 따라서 실내실험에서는 Fig. 4(a)와 같은 흙의 비저항 실험상자(soil resistivity test box)를 이

용하여 비저항값을 측정하는 Resistance방법을 주로 사용하는데, 흙의 비저항 측정상자는 비저항값이 $\Omega \cdot \text{Cm}$ 단위로 측정되도록 고안된 실험기구이다 (Advanced Geosciences, Inc., 1997).

Table-2. Chemical properties of leachate used

Item	Leachate (mg/l)	Sand ($\mu\text{g/l}$)
pH	8.910	-
BOD	585.000	-
COD	1100.000	-
TKN	243.300	-
TP	10.900	-
Cr	N.D.	0.750
As	1.328	5.000
Cd	0.077	N.D.
Pb	0.245	17.000
Cu	21.480	N.D.
Hg	N.D.	N.D.

본 연구에서는 이 측정상자를 Fig. 4(b)의 Advanced Geosciences Inc.의 STING-R1 전기비저항 측정장치에 연결하여 실험을 수행하였다. 흙의 비저항 측정상자를 사용하여 비저항을 측정할 경우에는 시료의 채움상태, 함수비 온도, 구성요소의 용해도 등에 의해 영향을 받을 수 있으므로 실험에서는 함수비와 채움상태에 의한 영향을 최소화하기 위하여 우선 대상시료를 상자에 넣기 전에 포화 시켰다. 이때는 증류수를 사용하였으며, 준비된 시료를 상자안에 채울때는 시료사이에 공기층이 생기지 않도록 주의하였다.

이온성분의 농도변화에 따른 비저항값의 변화를 알아보기 위한 실내실험에서는 중금속성분들은 토양환경보전법상에 명시되어 있는 6가지 성분중에서 수은(Hg)을 제외한 나머지 5가지 성분들에 대해서 농경지의 대책기준보다 큰 농도인 공장·산업지역의 토양오염 대책기준농도까지 일정한 간격으로 농도를 변화시키면서 비저항값을 측정하였다

(환경부, 1995). 또한 성분마다 대책기준농도에 차이가 있으므로 농도 0.5, 2, 10, 20, 30, 50mg/kg에 대해서는 공통적으로 실험을 실시하였으며, 이외에 일반 이온성분중에서는 염화나트륨(NaCl), 염화칼슘(CaCl_2), 산화마그네슘(MgO), 황산나트륨(Na_2SO_4)등을 임의로 선정하여 중금속성분과 동일한 방식으로 실험을 실시하였다. 또한 이들 성분이 2~3가지 조합된 경우에 비저항값의 변화에 대하여 실험하였다.

2. 실내모형실험

현장과 유사한 조건을 만들기 위하여 실제 비저항콘과 유사하게 모형 콘을 제작하여 모형실험

을 실시하였다. 모형콘은 STING-R1에 연결하여 비저항을 측정하였으며, 실험에서는 PVC관($\phi = 300\text{mm}$)을 이용하여 토조를 제작하여 바닥면은 수분의 손실을 방지하기 위하여 방수처리하였다. 모형콘의 재질은 전기가 통하지 않는 플라스틱제로서 내부로 전선을 배선하여 원하는 형태나 간격으로 비저항치를 측정할 수 있도록 제작되었으며, PVC 토조는 콘 상에서 전위가 분포되는 영향거리의 2배보다 조금은 크게 관의 직경을 결정하였다. 모형 콘과 PVC토조의 제원을 Fig. 5에 상세하게 나타내었다.

모형콘을 이용한 실험에서는 모래를 침출수가 희석된 배합수로 포화시킨후 PVC토조에 모조콘을 관입시켜 비저항값을 측정하였는데, 이때는 측정방법 (Wenner와 Schlumberg)과 전극의 간격(Wenner의 경우, 20cm, 10cm, 5cm)을 고려하여 측정하였다.

3. 현장실험방법

실내와 모형실험결과와 비교하기 위하여 현장실험을 실시하였으며, 조사지역은 경기도 양평군 소재 불량매립지로서 이곳은 1992년부터 1997년말 까지 주로 생활쓰레기를 매립했으며, 매립지 크기는 약 $150 \times 150\text{m}$ 정도였다. 현장에서는 총 30여공의 비저항콘 관입시험이 Fig. 6과 같은 위치에서 수행되었으며, 17개소에 보링을 실시하여 토양 및 폐기물 시료를 채취하여 오염물질인 이온물질과 중금속에 대한 실내실험을 실시하였다. 채취시료에 대한 용출실험결과 중금속과 이온성분의 농도는 Table-3과 같다.

각종 조사결과 매립지의 상태는 매립이 완료된 후에 상부에 약 1m정도 복토되어 있었으며, 토층은 상부 성토층,

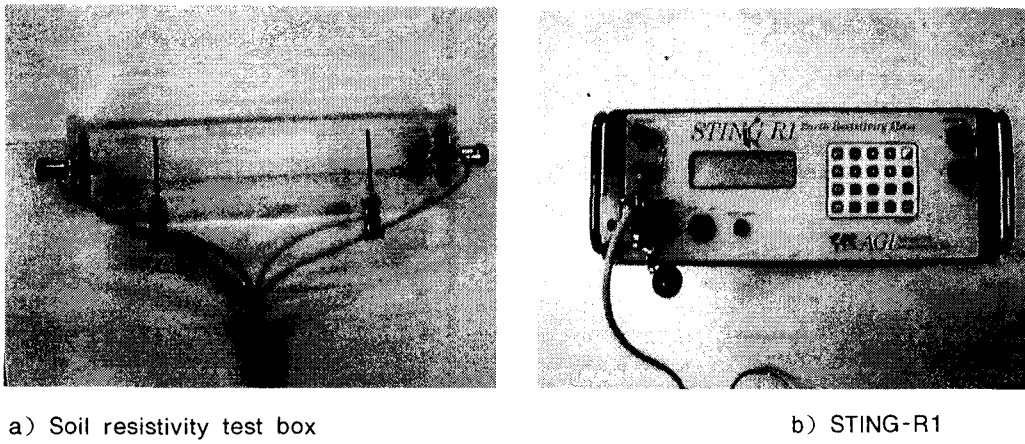


Fig. 4. Test Box and Sting-R1

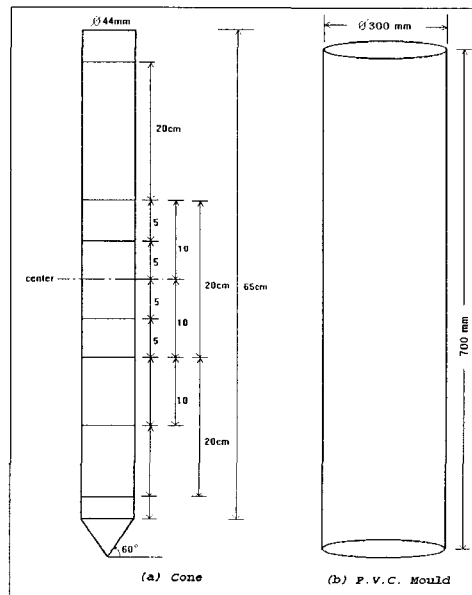


Fig.5. Resistivity cone probe and PVC mould

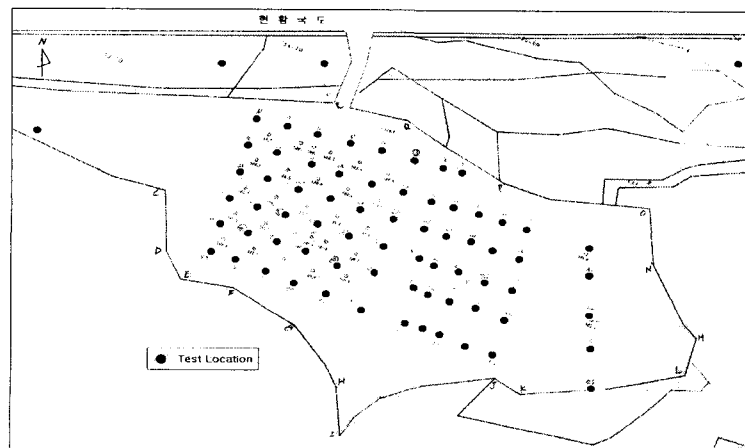


Fig. 6. Site map

Table-3. Concentration of heavy metals

Item	Cd	Cu	Cr ⁶⁺	Pb	Cl	NH ₄ ⁺
conc' (mg/ℓ)	0.012~0.070	0.002~0.308	N.D.~0.546	0.240~1.068	0.673~301.000	N.D.~169.500

쓰레기 매립층, 하부층, 풍화토층으로 구분되는데, 상부성토층은 주로 화강암질 풍화토(일명 마사토)가 주성분을 이루고 하부층은 실트와 점성토층으로 구성되었다.

한편 쓰레기 매립은 4m매립후 50cm복토한 후 다시 4m를 매립하고 상부 1m를 최종적으로 복토한 상태로 매립층의 총 깊이는 약 10m이다. 현장실험에서는 자주식 콘관 입시험기에 네델란드의 Gouda사의 비저항콘을 장치하여 비저항값을 측정하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 이온성분의 농도에 따른 비저항값의 변화

비저항 실험상자에 모래를 공극비, $e = 0.70$ 로 고정하고, 증류수에 중금속을 용해시켜 이 용액으로 모래를 포화시켰다. 실험에서는 증류수만을 사용하여 비저항값을 측정하였을 경우에 증류수내에 이온성분들이 존재하지 않기 때문에 비저항값이 측정되지 않았다. 그러나 표준사를 증류수로 포화시킨 경우에는 모래의 전기전도적성질에 의해서 비저항값을 측정할 수 있었으며, 그 값은 $57 \Omega \cdot m$ 이었다.

중금속성분의 농도 0.5, 20, 100, 200, 300, 500mg/kg일때의 비저항값을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 7에 제시되어 있다. 중금속 성분의 농도가 증가함에 따라서 비저항값 감소가 가장 큰 것으로 나타났으며, 카드뮴의 감소정도가 가장 작게 나타났다. 그러나 카드뮴의 경우에는 초기의 감소치는 작지만 점차 농도가 증가하면서 구리나 납의 비저항값과 비슷한 정도로 감소되는 것으로 나타났다. 한편 구리(Cu)와 6가크롬(Cr⁶⁺)의 경우에는 대책기준농도가 50mg/kg보다 높은 125mg/kg과 125mg/kg으로서 이 보다 높은 농도까지 실험하였으며, 그 결과는 Fig. 8에 제시되어 있다.

이상의 결과에서는 모래의 공극수중에 중금속성분의 농도가 0.5mg/kg만 되어도 비저항값이 급격히 감소하는 것으로 나타나 전기비저항법을 이용한 농경지의 중금속오염 탐

사가 가능하다는 사실을 알 수 있었다.

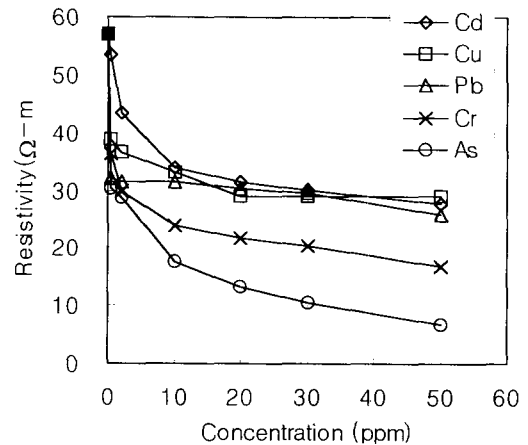
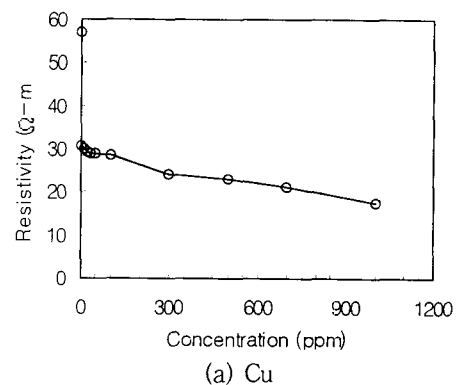
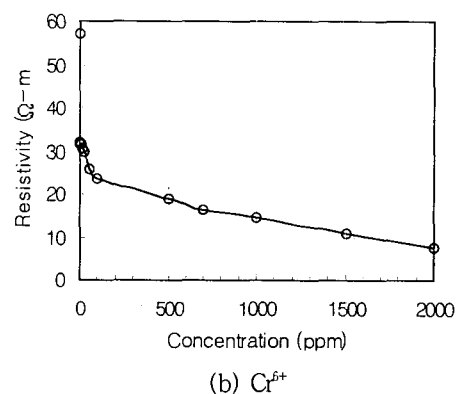


Fig. 7. Relationship between electrical resistivity and Concentration of heavy metals



(a) Cu



(b) Cr⁶⁺

Fig. 8. Resistivity of Cu and Cr⁶⁺

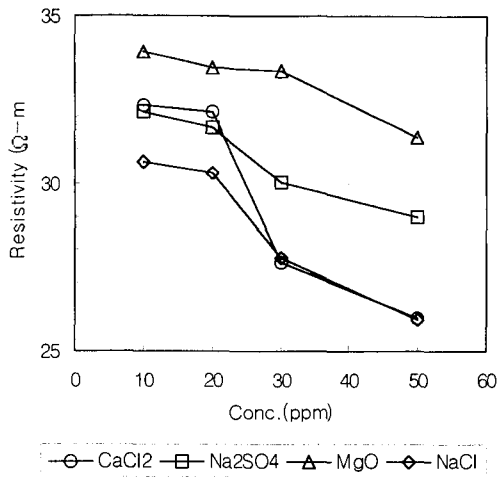


Fig. 9. Relationship between electrical resistivity and Concentration of general ions

일반이온 성분들의 경우에도 Fig. 9에서처럼 농도가 증가함에 따라서 비저항값의 감소가 현저한 것으로 나타났으며, 염화나트륨의 비저항값의 감소가 가장 크고 그 다음이 황산나트륨, 산화마그네슘의 순으로 나타났다. 그러나 염화칼슘의 경우에는 농도가 10~20ppm 사이에서는 황산나트륨과 비슷하게 나타났지만 30~50ppm사이에서는 염화나트륨과 비슷하게 비저항값이 감소하는 경향을 나타내어서 농도에 따라서 변화양상이 다르다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 중금속성분과 일반 이온성분들의 실험결과를 비교정리한 것인데, 비소와 크롬을 제외한 나머지 성분들 모두가 농도 10~50ppm사이에서는 28~30Ω·m의 비저항값을 나타내고 있어 비저항값에 의한 성분의 식별이 용이하지 않은 것으로 나타났다. 이상의 결과들에서 지반이 오염되면 비저항값의 감소정도는 오염되지 않은 경우보다는 매우 뚜렷한 것으로 나타났으나, 각 성분들에 따른 비저항값의 차이는 뚜렷하게 구별하기 어려웠다. 그러나 일반적으로 비저항법을 적용하는 경우에는 오염이 의심되는 지역이며, 오염성분에 대한 예측이 가능한 지역이 대부분이므로 앞으로의 연구결과에 따라서 주요 구성성분의 파악이 가능하리라고 판단된다.

한편 일반적인 지반조건에서는 각각의 성분들이 독립적으로 존재하기 보다는 여러 가지 성분들이 혼재되어 있는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 2~3가지 성분이 혼합된 경우에 비저항값의 변화양상에 대해서 알아보기 위한 실험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

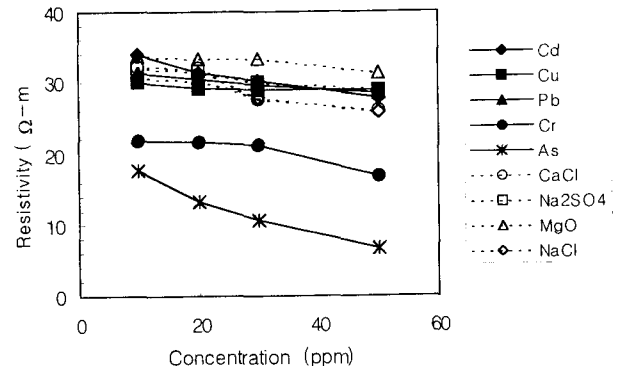


Fig. 10. Resistivity Comparison of general ions with heavy metals

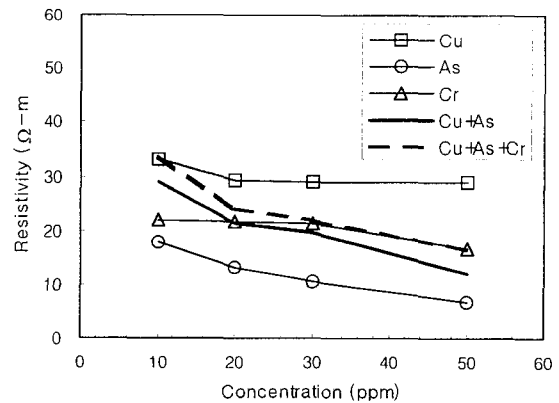


Fig. 11. Comparison of resistivity on the As, Cu, Cr, As+Cu, and As+Cu+Cr

Fig. 11에서는 비저항값 감소의 정도가 가장 크게 나타났던 비소와 두번째였던 크롬 그리고 구리 3가지 성분을 이용하여 첫 번째는 비소와 구리의 농도를 1:1로 해서 2가지 성분을 합친 전체 농도가 10, 20, 30, 50mg/kg일때의 비저항값의 변화를 측정하고 두 번째는 비소, 구리, 그리고 크롬의 1:1:1로 해서 3가지 성분을 합친 전체 농도가 10, 20, 30, 50mg/kg일때의 비저항값의 변화를 측정하여 각각의 중금속성분이 나타내었던 농도에 따른 비저항감소값과 비교하였다. 그림에서는 비소와 구리를 혼합한 경우의 비저

항값 감소가 비소의 비저항값보다 크지 않은 것으로 나타났으며, 비소, 구리 그리고 크롬을 혼합한 경우의 비저항값이 비소와 크롬을 혼합한 경우의 비저항값 보다 약간 큰 것으로 나타났다. 따라서 성분이 혼합된 경우에는 각각의 성분들이 나타내었던 비저항값과 약간씩의 차이를 나타내는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 비저항값 감소의 정도가 가장 작았던 카드뮴과 중간정도였던 납을 1:1로 혼합하여 실험한 결과이다. 그림에서는 혼합한 경우의 비저항값이 카드뮴이나 납 각각의 성분이나 나타내었던 비저항값보다는 약간 작게 나타났다. 그러나 이는 두 성분간의 비저항값 차이가 크지 않았으며, 약간의 실험오차를 감안한다면 앞에서의 경우와 비슷한 결과로 판단되었다. 한편 금속이온과 일반이온성분이 혼합된 경우에 대해서 알아보기 위하여 비소와 염화나트륨을 1:1로 혼합하여 증류수에 농도 10, 20, 30, 50ppm이 되도록 희석시켜 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 13에 나타내었다.

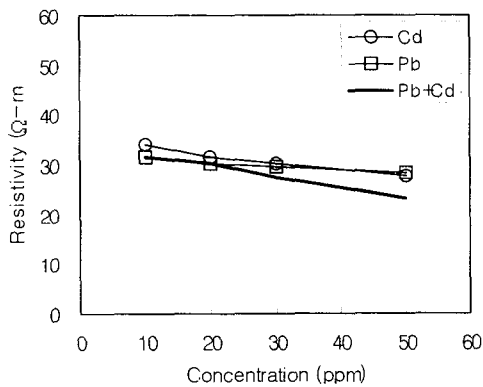


Fig. 12. Resistivity of Cd, Pb, Cd+Pb

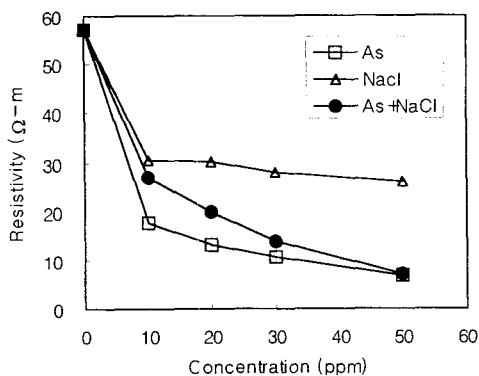


Fig. 13. Resistivity of As+NaCl

그림에서는 중금속성분만이 혼합된 경우와 같이 혼합용

액의 비저항값은 비소와 염화나트륨의 중간정도로 나타났 다. 이상에서는 중금속이나 일반 이온성분들이 2~3가지 혼합된 경우에는 각각의 성분들이 나타내는 비저항값과 조금은 다르게 나타났는데, 혼합된 경우의 비저항값은 대개 각 성분들이 나타냈던 비저항값의 중간 정도의 값을 나타내었다.

2. 모형실험의 결과

Fig. 14는 모형콘을 사용하여 실험한 결과를 정리한 것이다. 비저항값의 변화양상은 앞의 결과와 유사하게 일반상수에 침출수가 약간만 희석되어도 비저항값의 감소는 현저한 것으로 나타났으며, 측정방식이나 전극간격에 관계없이 침출수의 농도가 높아지면 비저항값은 반비례해서 감소하는 경향을 나타내었다.

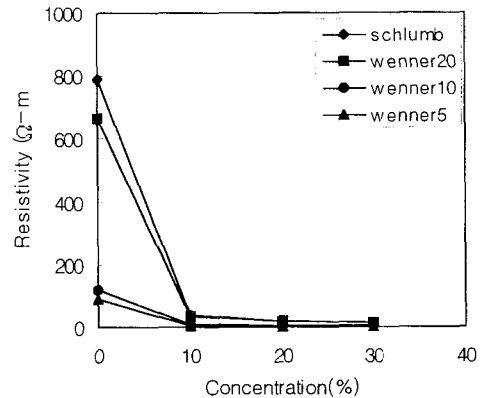


Fig. 14. Resistivity of sand according to the concentration of leachate used

그림에서는 일반상수만을 사용한 경우에는 비저항값이 약 80~800 Ω·m 범위였으나, 일반상수에 침출수 10%를 희석해서 포화시킨 경우에는 비저항값이 약 4~40 Ω·m, 20%일 때 약 2~21 Ω·m 그리고 30%일 때는 약 1~17 Ω·m의 범위를 나타내었다. 따라서 모래의 경우의 주요 조성 광물이 비전도성 광물인 석영이라는 사실에 근거하면, 공극수내의 이온성분이 토양의 전체적인 비저항값에 미치는 영향이 매우 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

3. 현장실험

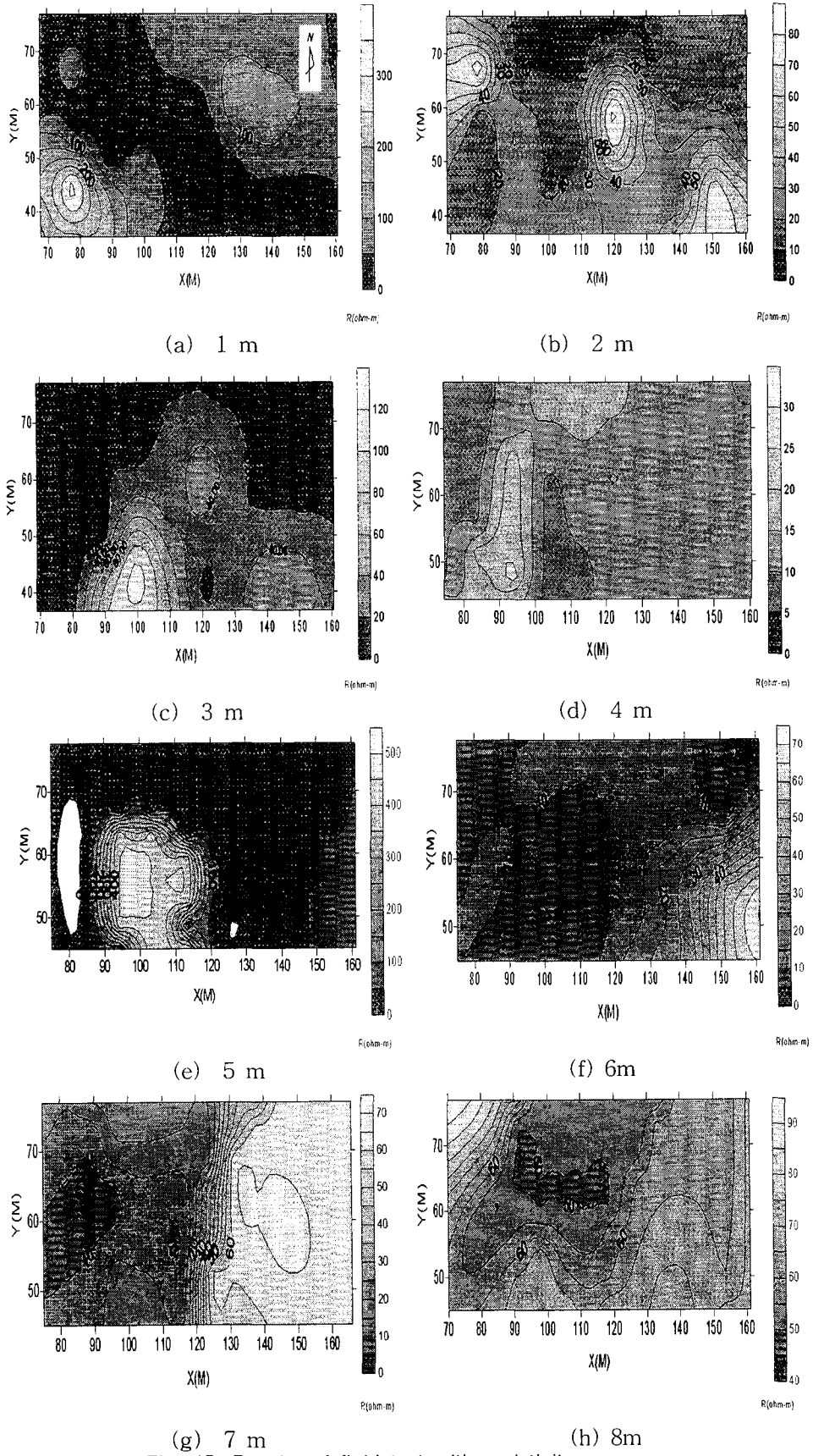


Fig. 15. Results of field test with resistivity cone

Fig. 15는 지하 1m에서 지하 8.4m지점까지 매 1m마다 비저항콘의 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 15(a)는 지하 1m의 복토층으로서 비저항값이 50~400 $\Omega \cdot m$ 정도였으며, Fig. 15(b)는 지하 2m부근으로서 상부복토층과 폐기물 매립층의 경계부분으로서 비저항값은 100 $\Omega \cdot m$ 이하로 상층부보다 비저항값이 작은 것으로 나타났다. Fig. 15(c)는 폐기물 매립층인 지하 3m지점으로서 비저항값은 0~130 $\Omega \cdot m$ 로 나타났다. 그런데 본 지역에서는 폐기물 매립층인데도 불구하고 고비저항대가 나타났다. 이런 이유는 폐기물의 성상이 건축폐자재나 기타 조립질의 특성을 지니는 물질이 존재하기 때문이라고 판단되었다. Fig. 15(d)는 상부 폐기물 매립층의 바닥부분인 지하 4m부분으로서 비저항값은 35 $\Omega \cdot m$ 이하로 나타나 매우 작게 나타나서 오염물질의 농도가 가장 높을 것으로 예상되었다.

Fig. 15(e)는 하부복토층과 1차 폐기물 매립층과의 경계부분인 지하 5m부분으로서 비저항값은 0~450 $\Omega \cdot m$ 로 나타나 오염물질이 많이 존재하지 않는다고 판단되었다. Fig. 15(f)는 1차매립층으로서 지하 6m부근이다. 비저항값은 50 $\Omega \cdot m$ 이하로 보이면서 대체로 동쪽보다 서쪽의 비저항값이 작게 나타나 서쪽부분에 오염성분들이 많이 존재한다고 판단되었다. Fig. 15(g)와 Fig. 15(h)는 1차 매립층의 하단부분과 풍화대와의 토층경계부분으로 비저항값은 0~70 $\Omega \cdot m$ 의 분포로 역시 서쪽의 비저항값이 작은 것으로 나타났다. 따라서 장래에 복원계획을 수립할 경우에는 최초 적용구간이 동쪽보다 서쪽이 먼저 이루어져야 한다는 사실을 나타내고 있다.

V. 결 론

비저항콘을 이용한 오염 농경지탐사의 적용성을 알아보기 위한 실내와 모형, 현장실험을 수행하였으며, 그 결과를

요약하면 다음과 같다.

1. 실내실험에서는 이온성분이 미량만이라도 포함되면 비저항값의 변화가 매우 뚜렷한 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 금속류나 일반 이온성분사이에서 비슷한 것으로 나타났다.

2. 2가지이상의 성분이 혼합된 경우에 비저항값은 각 성분들이 독립적으로 나타내는 비저항값의 중간정도인 것으로 나타났다. 그러나 성분들마다 농도증가에 따른 비저항값의 차이가 크지 않아 비저항값에 의한 구성성분의 판단은 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

3. 실제 매립장에서 채취한 침출수를 희석시켜 사용한 모형실험에서도 실내실험에서와 같이 오염성분의 농도증가에 따라서 비저항값은 현저하게 감소되는 것으로 나타났으며, 전극간격에 따라서 측정되는 비저항값은 달라지는 것으로 나타났다.

4. 현장실험에서는 오염성분이 많이 분포하는 위치에서 비저항값의 감소가 오염성분의 분포가 작은부분보다는 현저하게 작게 나타나고 있어 오염범위의 파악이 용이하였으며, 오염부분 중에서도 그 농도에 따라서 비저항값에 차이가 나타나 오염원의 식별도 가능한 것으로 판단되었다.

이상의 실험결과에 따르면 비저항콘을 이용한 오염된 농경지의 지반탐사는 가능할 것으로 나타났다. 따라서 기존에 산업 폐기물이나 기타 불법매립등에 의한 지반오염의 의심되거나 또는 오염 농경지의 복원대책수립시에 오염범위와 오염원의 파악에 비저항콘의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

參 考 文 獻

1. 민병덕, 서정희, 권병두(1987), 응용지구물리학, 도서출판 우성, pp. 252~309
2. 과학기술처(1996), 지구물리 지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구
3. 환경부(1995), 토양환경보전법
4. Abu-Hassanein Z. S., Benson C. H. and Boltz, L. R.(1996), Electrical resistivity of Compacted Clays, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 5,

pp. 397~406

5. Arulanandan, K. and
6. Arulanandan, K.(1996), Fundamental Approach to soil characterization with Applications to In Situ Testing and Property Evaluation, Electromagnetic Wave Propagation and Method, pp. 53~59
7. Brandl, H. and Robertson, P. K.(1996), Geo-environmental site investigation and characterization, 2nd Intl' Congress on Environmental Geotechnics, State-of-the-art Reports, pp. 117~140
8. Campanella, R. G. and Weemee, I.(1990), Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies, Can. Geotchn. J., 27, pp. 557~567
9. Campanella, R. G. and Davies, M. P.(1997), In-Situ testing for geo-environmental site characterization: A mine tailings example, 14th ICSMFE, pp. 43~46
10. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.(1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional
11. Mitchell, J. K.(1993), Fundamentals of Soil Behavior 2/e, John Wiley & Sons
12. Yong, R. N., Mohamed, A. M. O. & Warkentin, B. Contaminant Transport in Soils, Elsevier
13. Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P. and Mabey D. R.(1974), Application of surface Geophysics to Ground-Water Investigations, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter D1, Collection of Environmental Data
14. AASHTO(1988), Manual on Subsurface Investigation, pp. 92~93
15. Advanced Geoscience, Inc(1997), Sting R1 Instruction Manual
16. EPA(1983), Use of Airbone, Surface, and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Site, A Reference Guide
17. 土質工學會(1981), 土質基礎工學ライブラリ 21 - 土と基礎の物理探査, pp. 97~115