

사질토 간극수의 이온 성분들에 따른 전기비저항값의 변화

Variation of the Electrical Resistivity with Ion Components
of Pore Water in the Sand

유	찬* ¹	윤	춘	경* ²	
Yu,	Chan	Yoon,	Chun-Gyeong		
이	영	남* ³	이	용	길* ⁴
Lee,	young-Nam	Lee,	yong-Gil		

Abstract

A laboratory experiment was performed to examine the relationship between resistivity and ionic components in the pore water of a sand by using soil resistivity test box and STING-R1. The resistivity measurement was performed with the concentration changes of ionic components. Also, the resistivity change was evaluated for multiple components. The results showed that the resistivity of Arsenic was less than other heavy metals. In the case of complex components, resistivity ranges depended on the resistivity of components existed in the pore water.

요 지

실내실험에 의하여 사질토 간극수의 이온 성분들사이 관계를 규명하기 위하여 흙의 비저항측정상자와 STING-R1비저항 측정기를 이용하여 분석을 수행하였다. 실험은 이온성분들의 농도를 변화시키면서 실시하였다. 또한 2~3가지 성분을 혼합한 경우에 대해서도 비저항값의 변화를 측정하였다. 실험결과는 성분중에서 비소(As)의 비저항값의 감소가 가장 컸으며, 나머지 성분들은 일반성분들과 큰 차이를 보이지는 않았다. 또한 혼합성분의 경우에는 비저항값의 범위가 간극수에 포함된 성분들의 비저항값에 따라 달라지는 것으로 나타났다.

Keywords : Electrical Resistivity, Ion, Heavy Metal, Soil Resistivity Test Box, STING-R1, Sand

- *1 정회원, 건국대학교 대학원 박사과정 수료
- *2 정회원, 건국대학교 농과대학 농공학과 조교수
- *3 정회원, 현대건설기술연구소, 연구위원
- *4 정회원, 현대건설기술연구소, 연구원

1. 서 론

사회적으로 심각하게 대두되고 있는 다양한 오염현상 중에서 토양과 지하수의 오염을 의미하는 지반오염은 현재 수 천개에 이르는 매립지 및 산업단지를 중심으로 전국에 산재하여 발생하고 있다(이기춘, 1997). 지반오염은 탐지가 어렵고 심각한 상황에 이르러서 문제를 야기시킨 후에야 실체가 나타나는 특성이 있어 오염원을 조기에 탐지하는 과정이 매우 중요하다. 최근에는 토양의 자정능력을 초과하는 폐기물의 지속적인 투기로 인하여 지반오염이 심화되어 주변 자연환경을 오염시키는 것은 물론 국민건강이나 삶의 질에 위협을 주고 있다.

오염지반의 복원에는 오염원을 조기에 탐지하는 것과 신속한 복원노력이 중요한데, 오염지반 탐사에는 오래전부터 사용되어 오던 지구물리학적 탐사법인 전기비저항법을 이용하여 지반의 오염여부를 파악하려는 연구가 활발하다. 전기비저항법은 지반에 전류를 흐르게 하여 이때 발생하는 전압차이로서 겐보기비저항을 계산하여 지반의 오염도와 범위를 파악하는 방법이다(윤춘경 등, 1998; 윤길림 등, 1998; 건설교통부, 1997; 과학기술처, 1996; Brandl and Robertson, 1996; Lunne et al., 1997; Mlynarek et al., 1995). 흡입자의 표면이나 공극수에 포함되어 있는 성분중에서 대부분 오염물질로 간주되는 금속성 및 이온성 물질이 많이 함유된 지반에서는, 이러한 성분들이 생화학 또는 물리화학적 반응에 의하여 매질내에 자유 이온농도를 증가시키고 이는 결국 전기비저항을 낮게 하여 오염되지 않은 지반과 현저한 차이를 나타내게 된다(Campanella and Weemees, 1990; Campanella and Davies, 1997). 이러한 특성은 오염지반을 찾는 데 효과적으로 이용될 수 있다. 이러한 특성을 본격적으로 오염지반 탐사에 활용하기 위해서는 토양내에서 전기비저항의 기본적 특성을 규명하여야 하며 이를 이용해서 실제 거동에 관한 연구가 실시되어야 한다. 이러한 필요성에도 불구하고

하고 이에 대한 연구나 측정방법이 아직까지는 미비한 상태이다.

본 연구에서는 전기비저항값을 이용하여 지반의 오염여부 및 정량적인 오염도 분석에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 대수층을 구성하는 주요 토질인 모래를 대상으로 실내실험을 통하여, 개별적 이온성분의 농도변화에 따른 비저항값의 변화와 몇 가지 성분이 혼합되어 있는 경우에 성분간의 농도와 비저항값의 관계에 대하여 비교·연구하였다.

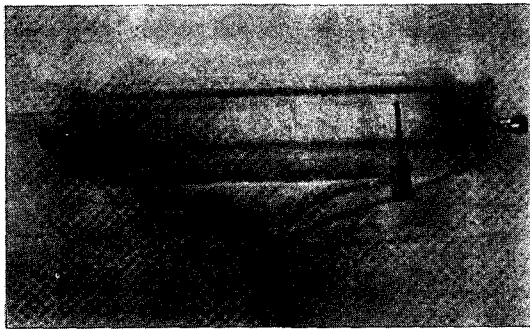
2. 실험방법 및 재료

2.1 실험방법

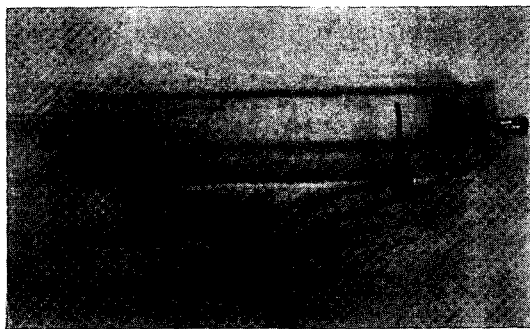
지구물리 탐사법은 비접촉, 비파괴적인 방법으로 원하는 위치의 지역을 개략적으로 신속히 조사하는 방법으로서 지금까지는 주로 지질구조 파악이나 광물자원의 파악에 사용되어 왔으며, 현재까지 전기비저항 측정방법으로서는 직류(direct current: DC)비저항법이 주로 사용되어 왔다(土質工學會, 1992). DC법은 인위적으로 지하에 전류를 흐르게 하여 발생하는 저항을 측정하는데, 1930년대부터 지하수자원의 탐사에 적용해 오고 있으며, 최근에는 이러한 기법이 지반환경분야에 적극적으로 도입, 이용되고 있다. DC 방법은 전류전극과 전위전극의 배치형태에 따라 구분되는데, 1960년대까지는 Wenner, Lee-Partitioning 및 Schlumberger형태가 사용되어 왔으나 최근에는 Wenner방법보다 Schulmberger방법이 선호되고 있다(민병덕 등, 1987; Zohdy et al., 1974; AASHTO, 1988; EPA, 1993; 土質工學會, 1981).

이상의 방법들은 현장에서 전극의 간격을 조절하면서 측정하는 방법이며, 이때의 간격은 좁게는 수 십cm에서 넓게는 수백미터에 이르기 때문에 실내에서 실험을 하기에는 어려움이 있다. 따라서 실내실험용으로는 Fig. 1(a)와 같은 흙의 비저항 실험상자(soil resistivity test box)를 이용하여 비저항값을 측정하는

Resistance방법이 있는데, 흙의 비저항 측정상자는 실험에서 바로 $\Omega \cdot \text{cm}$ 단위로 값이 측정되도록 고안된 실험기구이다(Advanced Geosciences, Inc., 1997). 본 연구에서는 이 측정상자를 Fig. 1(b)의 Advanced Geosciences, Inc.의 STING-R1 전기비저항 측정장치에 연결하여 실험을 수행하였다.



(a) soil resistivity test box



(b) Sting-R1

Fig.1. Test Box and Sting-R1

시료는 주문진 표준사를 사용하였으며, 시료를 포화시킬 간극수는 증류수를 사용하였다. 여기서 증류수는 인위적으로 간극수를 중금속이나 일반 이온성분으로 오염시키기 위하여 각각의 경우를 500ml용량의 비이커에 준비하여 노건조시킨 표준사와 잘 섞은 후 실험상자에 채워서 비저항값을 측정하였다. 이때, 흙의 비저항 측정상자를 사용하여 비저항을 측정할 경

우에는 시료의 채움상태, 함수비 온도, 구성요소의 용해도 등에 의해 영향을 받을 수 있으므로 실험에서는 함수비와 채움상태에 의한 영향을 최소화하기 위하여 우선 대상시료를 상자에 넣기 전에 포화시켰다. 이때는 증류수를 사용하였으며, 일정한 간극비를 갖도록 준비된 시료를 동일한 체적의 상자안에 별도의 다짐없이 채웠으며, 이때에는 시료 사이에 공기층이 생기지 않도록 주의하였다.

2.2 재료의 성질

실험에서 사용된 주문진 표준사에 대해서는 한국공업규격(KSF)에 준해서 물리적 성질을 분석하였으며, 그 결과와 입도분포곡선을 Table-1과 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Physical properties of Jumunjin sand

Soil	Gs	Cu	Cg	USCS
Jumungin-Sand	2.65	6.76	1.13	SW

각종 오염성분들에 의하여 지반이 오염되었을 경우에 흙의 전기비저항 값에는 많은 변화가 발생되는데, 흙입자를 구성하는 광물들의 비저항값이 매우 크기 때문에 비저항값의 변화는 주로 간극수의 성질에 영향을 많이 받으며, 가장 큰 영향을 미치는 성분은 이온을 띠는 성분이다(Campanella and Weemees, 1990; Campanella and Davies, 1997; Yeung and Akhtar, 1997). 그러나 이온을 띠는 성분에도 금속성분과 일반 이온성분 등 그 종류가 많고 각각의 전기비저항값이 다르다. 본 실험에서는 토양환경보전법상에 명시되어 있는 중금속류 규제성분들중에서 실험시 취급에 위험성이 큰 수은(Hg)을 제외한 나머지 5가지 중금속 성분들(Cd, Cu, Pb, As, Cr⁶⁺)에 대해서 이온성분이 포함되지 않은 경우에서부터 공장·산업지역의 토양오염 대책기준농도까지 일정한 간격으로 농도를 변화시키면서 비저항값을 측정하였다(환경부, 1995).

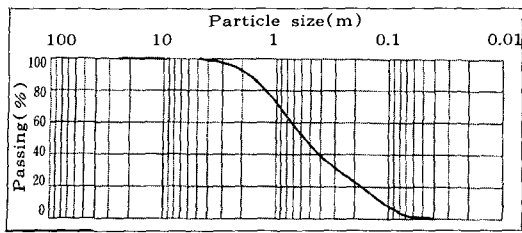


Fig. 2. Grain-size distribution curve

또한 규제대상외의 성분중에서도 일반적으로 공극수중에 함께 존재할 수 있는 염화나트륨(NaCl), 염화칼슘(CaCl₂), 산화마그네슘(MgO), 황산나트륨(Na₂SO₄)등에 대해서도 중금속성분과 동일한 방식으로 실험을 실시하였다. 그리고 이들이 2~3가지 혼합된 경우에 비저항값의 변화에 대하여 실험하였다. 단, 중금속성분의 경우에는 성분마다 규제농도에 차이가 있으므로 농도 0.5, 2, 10, 20, 30, 50mg/kg에 대해서는 공통적으로 실험을 실시하였으며, 그 이상은 대책기준농도를 전후한 현실적인 농도까지 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

실험에서는 주문진 표준사를 간극비, $e=0.70$ 로 고정하고, 증류수에 중금속을 용해시켜 이 용액으로 모래를 포화시켰다. 증류수만을 사용하여 비저항값을 측정하였을 경우에는 증류수 내에 이온성분들이 존재하지 않기 때문에 비저항값이 측정되지 않았다. 그러나 표준사를 증류수로 포화시킨 경우에는 모래의 전기전도적 성질에 의해서 비저항값을 측정할 수 있었으며, 그 값은 $57 \Omega \cdot m$ 이었다.

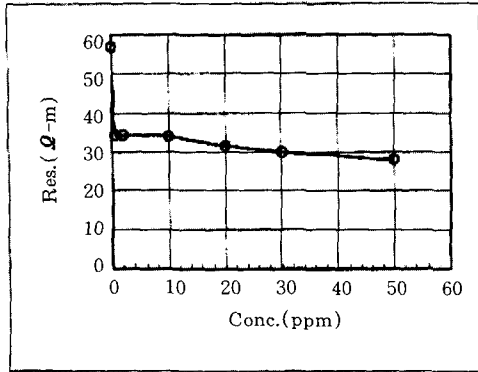
3.1 중금속 성분들의 농도에 따른 전기비저항값의 변화

Fig. 3(a)는 카드뮴(Cd)에 대한 실험결과이다. 토양보전법상에 카드뮴의 토양오염 대책기준농도는 30mg/kg이었으며, 실험에서는 50mg/kg까지 실험을 실시하였다. 그림에서는

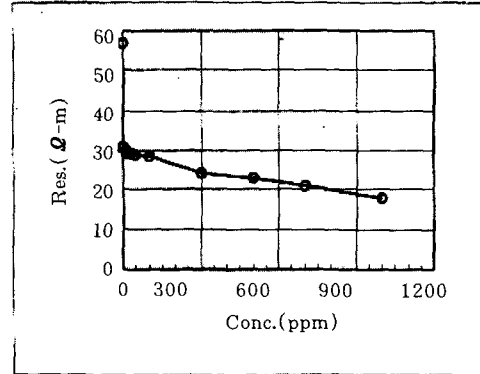
카드뮴의 농도가 0.5mg/kg으로 미세하게 증가되어도 비저항값은 $34.0 \Omega \cdot m$ 로 급격히 감소하였으며, 이 이후에는 농도가 계속 증가함에 따라서 비저항값이 완만하게 감소하여 50.0mg/kg에서는 비저항값은 $27.8 \Omega \cdot m$ 가 되었다. Fig. 3(b)는 구리(Cu)에 대한 실험결과인데, 대책기준농도는 500mg/kg이었으며, 실험에서는 1000mg/kg까지 농도를 증가시키면서 비저항값을 측정하였다. 그림에서는 구리의 농도가 0.5mg/kg만 되어도 비저항값은 $30.0 \Omega \cdot m$ 로 급격히 감소되었으며, 구리의 농도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 완만하게 감소되어 1000.0mg/kg에서는 비저항값은 $18.5 \Omega \cdot m$ 로 나타났다.

Fig. 3(c)는 납(Pb)에 대한 실험결과로서, 대책기준농도는 1000mg/kg이었으며, 실험에서는 2000mg/kg까지 측정하였다. 그림에서는 납의 농도가 0.5mg/kg일 때 비저항값이 $31.9 \Omega \cdot m$ 로 감소하였으며, 납의 농도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 완만하게 감소되어 2000.0mg/kg에서는 비저항값은 $7.6 \Omega \cdot m$ 로 나타났다. Fig. 3(d)은 6가크롬(Cr⁶⁺)에 대한 실험결과로서 대책기준농도는 30mg/kg이었으며, 실험에서는 50mg/kg까지 측정하였다. 6가크롬의 농도가 0.5mg/kg일 때 비저항값은 $36.4 \Omega \cdot m$ 로 급격히 감소하였으며, 6가크롬의 농도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 완만하게 감소되어 50.0mg/kg에서는 비저항값은 $16.7 \Omega \cdot m$ 로 나타났다. Fig. 3(e)는 비소(As)에 대한 실험결과로서, 대책기준농도는 50mg/kg이었으며, 실험에서는 70mg/kg까지 측정하였다. 그림에서는 비소의 농도가 0.5mg/kg일 때, 비저항값은 $30.5 \Omega \cdot m$ 로 급격히 감소되었으며, 비소의 농도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 완만하게 감소되어 70.0mg/kg에서는 비저항값은 $4.8 \Omega \cdot m$ 로 나타났다.

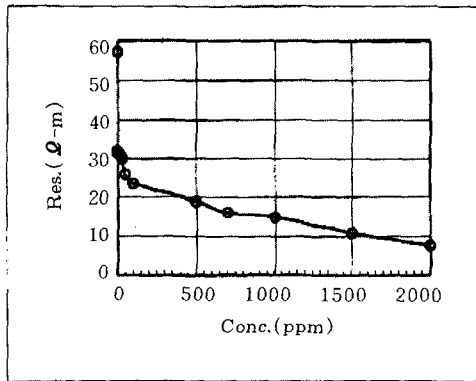
이상의 결과에서는 간극수중에 중금속성분 농도가 0.5mg/kg만 되어도 비저항값이 급격히 감소하는 것으로 나타나 전기비저항법을 이용하여 중금속으로 오염된 지반의 물리적탐사가



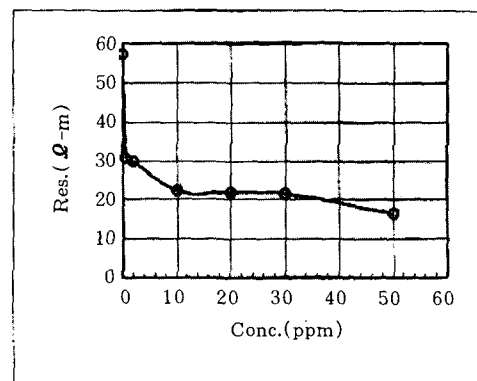
(a) Cd



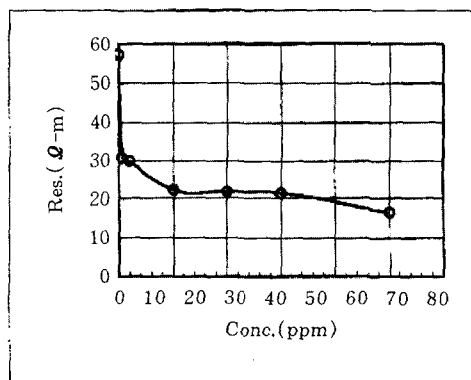
(b) Cu



(c) Pb



(d) Cr⁶⁺



(e) As

Fig3. Resistivity of heavy metal

가능하다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 성분
에 따라서 대책기준 오염농도의 차이가 심했기
때문에 상호비교를 위하여 실험한 중금속성분
들에 대해서 농도 0.5, 2.0, 10.0, 20.0, 30.0,
50.0mg/kg일때의 비저항값을 비교하였으며, 그
결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. 그림에서는 성
분의 농도가 증가함에 따라서 비소의 비저항값
감소폭이 가장 큰 것으로 나타났으며, 카드늄
의 감소폭이 가장 작게 나타났다. 크롬, 구리,
납의 경우에는 농도 2mg/kg까지는 31.9~38.9
 $\Omega \cdot m$ 로 비슷하였으며, 크롬의 경우에는 농도
50mg/kg에서 비저항값이 16.7 $\Omega \cdot m$ 로서 비소
다음으로 비저항값의 감소가 컸던 것으로 나타
났다. 카드늄의 경우에는 초기의 감소치는 작
지만 점차 농도가 증가하면서 구리나 납의 비
저항값과 비슷한 정도로 감소되는 것으로 나타
났다. 전반적으로 이들은 농도가 50mg/kg이었
을 때, 오염되지 않은 상태에 비하여 비저항값
이 절반 또는 그 이하로 감소하여 뚜렷한 차이
를 나타냄으로서 오염지반에 대한 전기비저항
법의 적용이 효과적일 것으로 판단되었다.

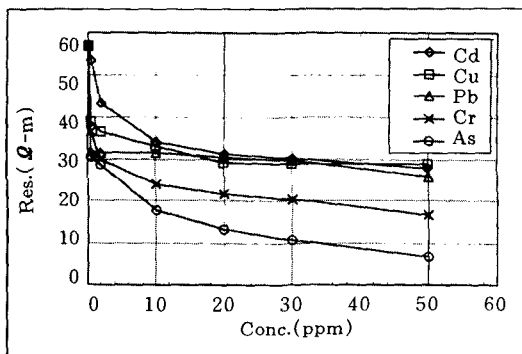


Fig. 4. Comparison of Resistivity According to the Concentration

3.2 일반 이온성분의 비저항값 변화

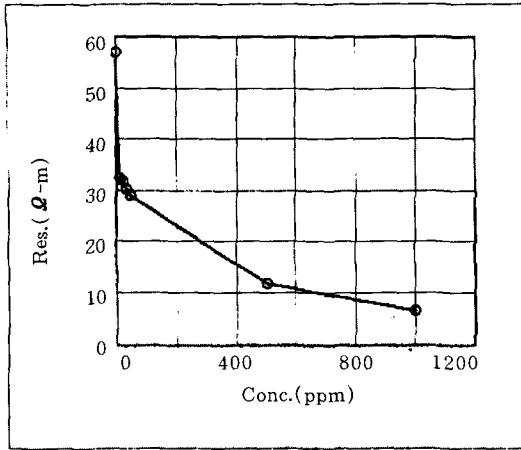
한편 지중에서 오염성분은 위의 중금속성분
외에도 일반이온 성분들이 있으며, 본 연구에
서는 이런 성분들중에서 대표적인 몇 가지 성

분들에 대해서 농도를 10ppm~1000ppm까지
조절하여 실험을 실시하였다.

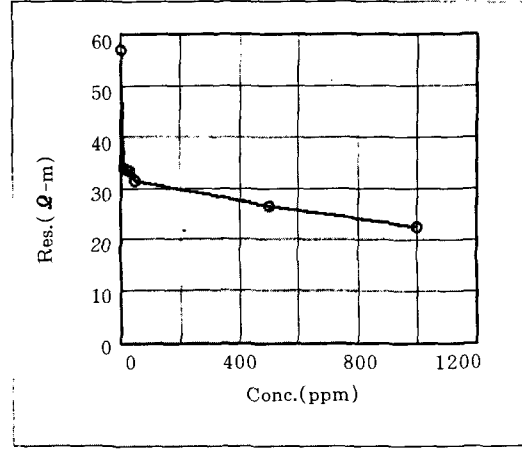
Fig. 5(a)는 황산나트륨(Na_2SO_4)에 대한 실
험결과로서 황산나트륨의 농도가 10mg/kg일
때, 비저항값은 32.1 $\Omega \cdot m$ 로 급격히 감소하였
으며, 황산나트륨의 농도가 계속 증가됨에 따
라서 비저항값은 감소되어 1000.0mg/kg에서는
비저항값은 6.8 $\Omega \cdot m$ 로 나타났다. Fig. 5(b)는
산화마그네슘(MgO)에 대한 실험결과로서 산
화마그네슘의 농도가 10mg/kg일 때, 비저항값
은 33.9 $\Omega \cdot m$ 로 감소하였으며, 황산나트륨의
농도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 완만
하게 감소되어 1000.0mg/kg에서는 비저항값은
22.6 $\Omega \cdot m$ 로 나타났다. 그러나 황산나트륨보
다는 감소의 정도가 작은 것으로 나타났다.
Fig. 5(c)는 염화칼슘($CaCl_2$)에 대한 실험결과
로서 농도가 10mg/kg일 때, 비저항값은 32.3
 $\Omega \cdot m$ 로 급격히 감소하였으며, 황산나트륨의
농도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 감소
되어 1000.0mg/kg에서는 비저항값은 5.6 $\Omega \cdot m$
로 나타났다. 감소정도는 황산나트륨보다도 더
큰 것으로 나타났다.

Fig. 5(d)는 염화나트륨($NaCl$)에 대한 실험
결과로서 농도가 10mg/kg일 때, 비저항값은
30.6 $\Omega \cdot m$ 로 감소하였으며, 염화나트륨의 농
도가 계속 증가됨에 따라서 비저항값은 감소되
어 1000.0mg/kg에서는 비저항값은 5.5 $\Omega \cdot m$ 로
나타났다. 그 감소정도는 염화칼슘과 유사한
것으로 나타났다.

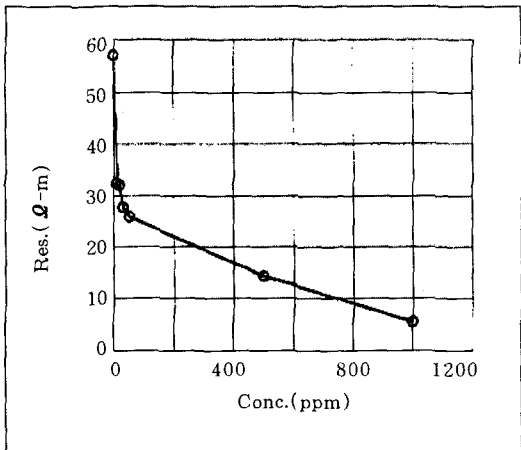
한편 Fig. 6은 일반 이온성분들의 농도가 10,
20, 30, 50ppm일 경우에 비저항값의 변화를 나
타낸 것인데, 그림에서는 농도가 증가함에 따
라서 염화나트륨의 비저항값의 감소가 가장 큰
것으로 나타났으며, 그 다음으로 황산나트륨,
산화마그네슘의 순으로 나타났다. 그러나 염화
칼슘의 경우에는 농도가 10~20ppm 사이에서
는 황산나트륨과 비슷하게 나타났지만 30~
50ppm사이에서는 염화나트륨과 비슷하게 비저
항값이 감소하는 경향을 나타내어서 농도에 따
라서 변화양상이 다르다는 것을 알 수 있었다.



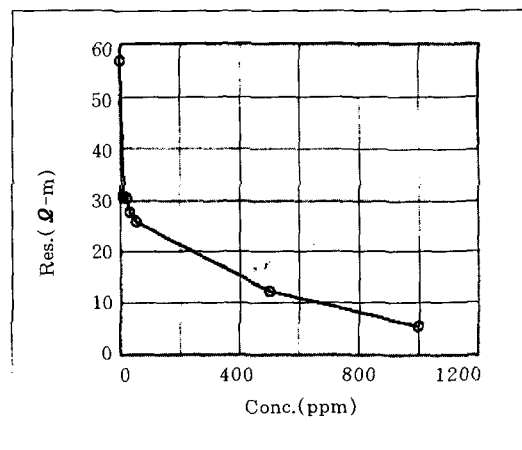
(a) Na₂SO₄



(b) MgO



(c) CaCl₂



(d) NaCl

Fig 5. Resistivity of general ion

또한 Fig. 7은 지금까지 실험하였던 중금속 성분과 그외에 이온을 띠고 있는 일반적인 성분들에 대한 실험결과를 함께 정리하여 비교한 것이다. 그림에서는 비소와 크롬을 제외한 나머지 성분들 모두가 농도 10~50ppm사이에서는 28~30 Ω·m의 비저항값을 나타내고 있어 비저항값에 의한 성분의 식별이 용이하지 않은 것으로 나타났다. 이상의 결과들에서 지반이

오염되면 비저항값의 감소정도는 뚜렷하였으나, 비저항값의 차이를 이용하여 오염성분을 식별하기는 어려웠다. 그러나 일반적으로 비저항법을 적용하여 오염지반을 탐사하는 경우에 오염성분이 개략적으로 파악되거나 의심되는 지역이 대부분이므로 앞으로의 연구결과에 따라서는 주요 구성성분의 파악까지 가능하리라고 판단된다.

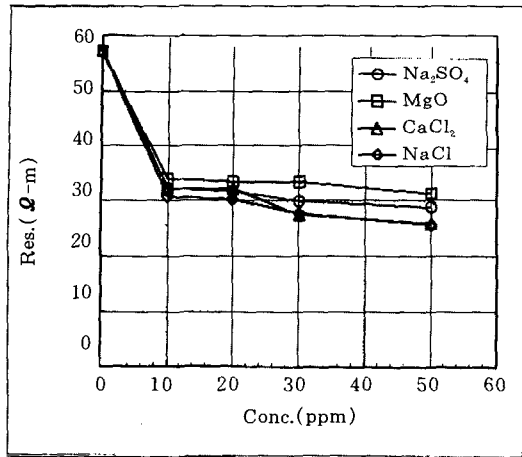


Fig. 6 Resistivity Comparison of general ions

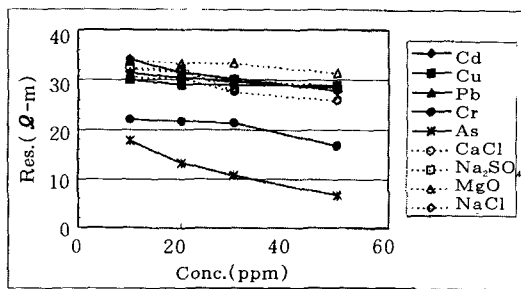


Fig. 7 Resistivity Comparison of general ions with heavy metals

항값의 변화를 측정하고, 두번째는 비소, 구리, 그리고 크롬을 1:1:1로 해서 3가지 성분을 합친 전체 농도가 10, 20, 30, 50mg/kg일때의 비저항값의 변화를 측정한 결과를 개별 중금속성분에 따른 비저항값 변화와 비교하였다. 그림에서는 비소와 구리를 혼합한 경우의 비저항값 감소는 비저항값 감소가 가장 큰 비소 단독의 경우보다 작았으며, 비소와 구리 그리고 크롬을 혼합한 경우의 비저항값 감소는 두가지를 혼합한 경우보다 작게 나타났다.

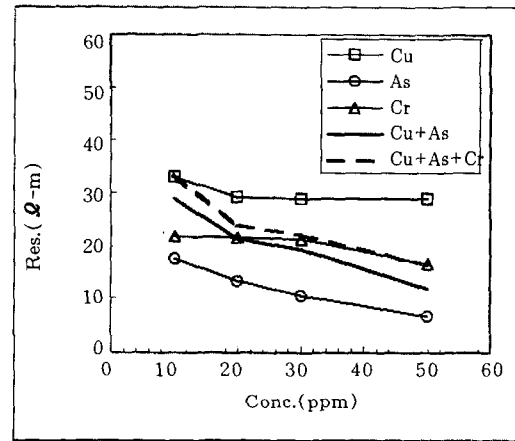


Fig. 8 Comparison of resistivity on the As, Cu, Cr, As+Cu, and As+Cu+Cr

3.3 이온성분들의 혼합에 따른 비저항값의 변화

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. 8에서는 비저항값 감소의 정도가 가장 크게 나타났던 비소와 두번째였던 크롬 그리고 구리 3가지 성분을 이용하여 첫번째는 비소와 구리의 농도를 1:1로 해서 2가지 성분을 합친 전체 농도가 10, 20, 30, 50mg/kg일때의 비저

이 결과에 의하면 개별성분으로서 가장 비저항 감소폭이 큰 비소가 혼합상태에서도 가장 큰 영향을 미치는데, 동일한 농도에서 혼합된 양이 단독, 2가지, 그리고 3가지로 증가함에 따라 농도는 감소하여 그 영향이 감소하여 전체적인 비저항값 감소가 상대적으로 줄어들었다고 생각된다.

Fig. 9는 비저항값 감소의 정도가 가장 작았던 카드뮴과 중간정도였던 납을 혼합하여 실험한 결과인데, 혼합한 경우의 비저항값이 카드뮴이나 납 각각의 성분이 나타내었던 비저항값 보다는 약간 작게 나타났다. 한편 금속이온과 일반이온성분이 혼합된 경우에 대해서 알아보기 위하여 비소와 염화나트륨을 1:1로 혼합하

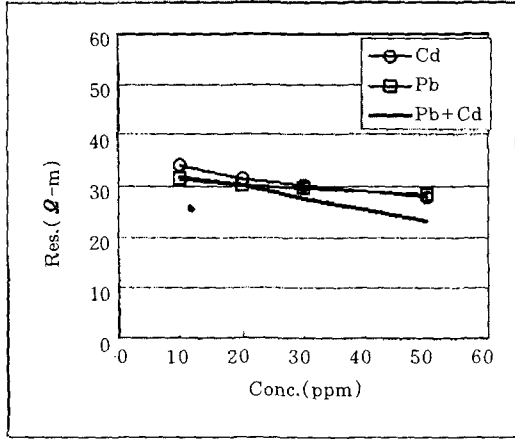


Fig. 9 Resistivity of Cd, Pb, Cd+Pb

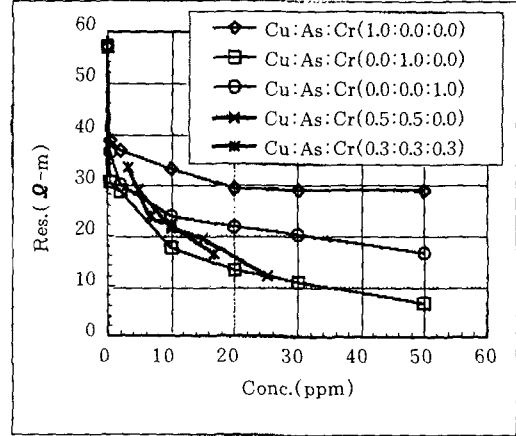


Fig. 11 Resistivity of Cu+As+Cr

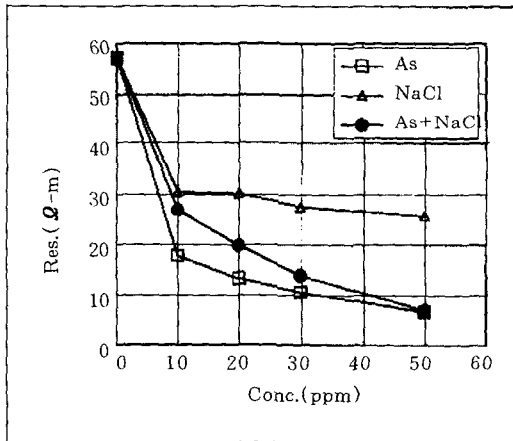


Fig. 10 Resistivity of As+NaCl

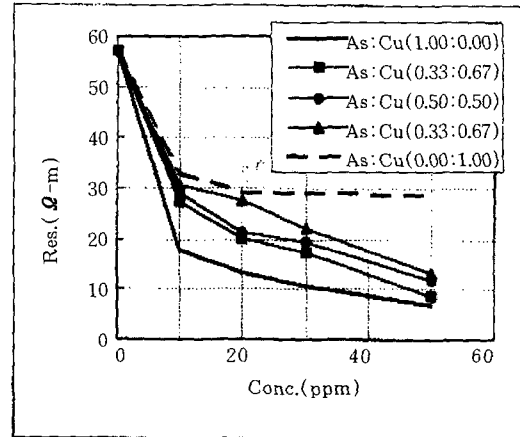


Fig. 12 Resistivity of Cu+As

여 증류수에 농도 10, 20, 30, 50ppm이 되도록 희석시켜 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서는 중금속성분만이 혼합된 경우와 같이 혼합용액의 비저항값은 비소와 염화나트륨의 중간정도로 나타났다. 이 결과는 Fig. 8의 경우와 유사하며 비저항값 변화에 강하게 영향을 미치는 비소의 경우에 가깝게 그래프가 이동함을 알 수 있다.

이상에서는 중금속이나 일반 이온성분들이 2~3가지 혼합된 경우에 개별 성분들이 나타

내는 비저항값의 중간 정도의 값을 나타내었다. 따라서 각종 이온성분들이 혼합된 경우에는 비저항값이 혼합용액내에서 각 성분들의 농도와 관계가 있을 것으로 예상되었으며, 실험 결과를 혼합용액중의 각 성분들의 농도를 중심으로 정리하여 보았다.

Fig. 11은 비소+구리, 그리고 비소+구리+크롬의 경우를 각 성분의 농도를 기준으로 다시 정리한 것인데, 그림에서는 혼합용액의 농도에 따른 비저항값의 변화양상이 비소의 결과와 유

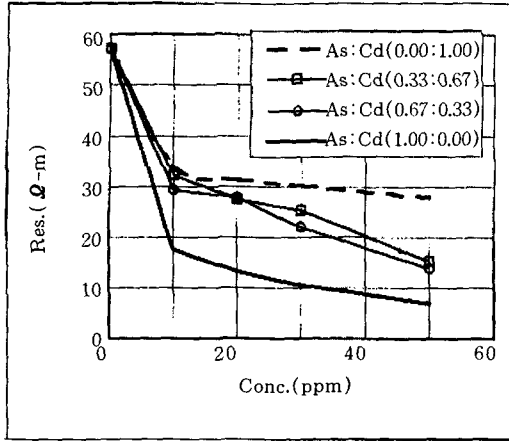


Fig. 13 Resistivity of Cd+As

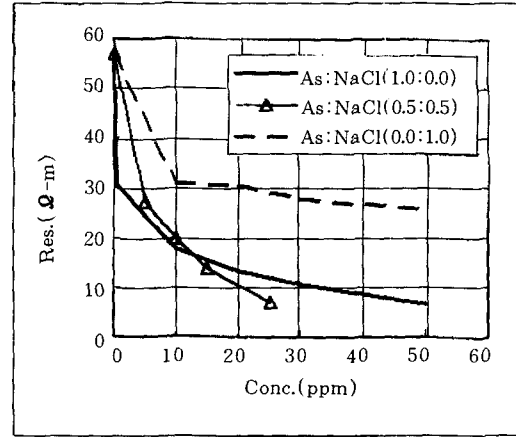


Fig. 14 Resistivity of As+NaCl

사하게 나타났다. 이러한 사실을 확인하기 위하여 구리와 비소를 혼합한 경우의 결과를 조금 더 확장하여 구리와 비소의 혼합비율을 1:2와 2:1로 조절하여 다시 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서는 구리와 비소의 혼합용액중에서 비소성분이 차지하는 비율이 높아짐에 따라서 원래 비소성분이 나타내었던 비저항값에 접근하는 경향을 나타내었다. 또한 구리성분이 차지하는 비율이 높은 경우에는 원래 구리성분이 나타내었던 비저항값에 접근하는 경향을 나타내었다. 따라서 흡에서의 비저항값은 간극수의 성분중 농도가 큰 성분의 비저항값에 큰 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 13은 단일 중금속성분만 사용했을 때, 비저항값이 가장 낮았던 비소와 반대로 비저항값이 가장 크게 나타났던 카드뮴을 1:2와 2:1의 비율로 혼합하여 실험한 결과를 정리한 것이다. 여기서도 비소의 농도가 높을수록 비저항값은 원래 비소의 비저항값으로 접근하는 것으로 나타나 혼합성분에서 비저항값은 구성 성분 각각의 농도에 따라서 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 또한 중금속과 일반

이온성분이 혼합된 비소와 염화나트륨이 혼합된 경우에서 각 성분의 실제 농도에 따른 비저항값을 나타낸 것이 Fig. 14에 제시되어 있는데, 그림에서는 혼합용액의 비저항값이 비소의 실험결과와 비슷한 경향을 나타내어 중금속만을 혼합한 경우와 유사한 것으로 나타났다.

이상에서 중금속이나 일반 이온성분들이 혼합된 경우의 비저항값은 각각의 구성성분의 농도에 따라서 크게 영향을 받았으며, 혼합용액이 나타내는 비저항값의 범위는 최소 비저항값을 나타내는 성분의 비저항값과 최대 비저항값을 나타내는 성분의 비저항값 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 또한 이 범위안에서 변화양상도 성분들간의 농도차이에 비례해서 나타났다. 따라서 구성성분간의 비저항값의 차이가 크지 않으면 성분간의 농도변화에 따른 비저항값의 변화는 크지 않았으나, 비소와 같이 감소폭이 큰 성분이 포함된 경우에는 이 성분의 농도변화에 따른 비저항값의 변화가 뚜렷한 것으로 나타나 앞으로 이에 대한 체계적인 연구가 이루어지면 오염분포외에도 구성성분간의 농도차이에 따른 정량적인 분석도 시도해볼 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

모래의 간극수내 이온성분에 따른 비저항값의 변화양상을 조사하기 위하여 중금속과 일반 이온성분을 이용하여 실내실험을 실시하였으며, 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 간극수중에 중금속이나 일반이온성분의 농도가 0.5mg/kg만 되어도 비저항값이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 그 이후에도 농도가 증가함에 따라서 전기비저항값은 완만하지만 계속적으로 감소되었다. 감소의 정도는 오염되지 않은 상태의 절반 또는 그 이하로 감소하여 비저항값에 뚜렷한 차이를 나타냄으로써 비저항법을 이용한 오염지반의 탐사가 가능하다는 사실을 알 수 있었다.

2) 실험된 중금속성분중에서는 농도가 증가함에 따라 비소의 비저항값 감소가 가장 큰 것으로 나타났으며, 카드늄의 비저항값 감소가 가장 작은 것으로 나타났다.

3) 일반 이온성분들도 농도 증가에 따른 비저항값의 감소는 급격한 것으로 나타났다. 다만 중금속성분들의 결과와 많은 차이를 보이지는 않아 비저항값으로 오염성분들을 뚜렷하게 구별하기는 어려운 것으로 나타났다.

4) 중금속이나 일반 이온성분들이 2~3가지 혼합된 경우에 측정된 비저항값은 각각의 성분들이 나타내는 비저항값과 조금 다르게 나타났으며, 혼합된 각성분들의 비저항값의 중간 정도의 값을 나타내었다.

5) 중금속이나 일반 이온성분들이 혼합된 경우의 비저항값은 각각의 구성성분의 농도에 따라서 크게 영향을 받았으며, 혼합용액이 나타내는 비저항값의 범위는 성분중에서 최대와 최소값을 나타내는 성분의 비저항값사이에 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 이에 대한 체계적인 연구가 이루어지면 비저항법을 이용하여 오염분포범위외에도 구성성분간의 농도차이도 정량적인 분석이 가능할 것으로 예상되었다.

감사의 글

본 논문은 1996년도 건설교통부 선정 국책 과제(과제번호 96-0022)인 "오염지반의 거시적 분포 및 오염원의 형태조사기법 개발"의 연구결과임을 밝히며, 연구수행이 가능하도록 지원하여 주신 건설교통부 및 한국건설기술연구원의 관계자분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, (1997), 오염지반의 거시적 분포 및 형태조사기법 개발
2. 과학기술처(1996), 지구물리 지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구
3. 민병덕, 서정희, 권병두(1987), 응용지구물리학, 도서출판 우성, pp. 252~309
4. 윤길림, 유찬, 이영남, 윤춘경, 이용길(1998), 오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구, 한국지반공학회지, 제14권, 제2호, pp. 79~92
5. 윤춘경, 유찬(1998), 침출수로 오염된 불포화 사질토의 전기비저항 변화에 대한 연구, 한국농공학회지, 제40권, 제2호, pp. 112~122
6. 이기춘(1997), 폐금속광산 관리, 환경공무원교육원, 토양환경관리반, 전문교육교재, pp. 153~170
7. 환경부(1995), 토양환경보전법
8. 土質工學會(1981), 土質基礎工學ライフ"ラリ 21 - 土と基礎の物理探査, pp. 97~115
9. AASHTO(1988), Manual on Subsurface Investigation, pp. 92~93
10. Advanced Geosciences, Inc.(1997), STING R1 Instruction Manual
11. EPA(1993), Subsurface characterization and monitoring techniques, A desk reference guide, Volume I: solids and ground water, Appendices A and B, EPA/625/R-93/003a
12. 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

13. 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
14. Campanella, R. G. and Weemees, I.(1990), Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies, *Can. Geotchn. J.*, 27, pp. 557~567
15. 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
16. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.(1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional
17. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamentals of Soil Behavior 2/e*, John Wiley & Sons
18. Mlynarek, Z., Welling, E., and Tschuschke, W.(1995), Conductivity piezocone penetration test for evaluation of soil contamination, *Proceedings CPT' 95*, Vol. 2, pp. 233~237
19. Thevanayagam, S.(1993), Electrical Response of Two-Phase Soil: Theory and Applications, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 8, pp. 1250~1275
20. Yeung, A. T. and Akhtar, A. S.(1997), Characterization of subsurface contamination by an electrical immittance cone penetrometer, 14th ICSMFE, pp. 623~626
21. 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

(접수일자 1998. 12. 1)