

# 오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구

A Study on the Correlation between Electrical Resistivity and Properties of Contaminated Soils

윤길림* <sup>1</sup>	유찬* <sup>2</sup>
Yoon, Gil-Lim	Ryu, Chan
이영남* <sup>3</sup>	윤춘경* <sup>4</sup>
Lee, Young-Nam	Yoon, Chun-Gyeong
이용길* <sup>5</sup>	
Lee, Yong-Gil	

---

## ABSTRACT

Parametric studies based on laboratory pilot tests were performed to investigate the relationships between electrical resistivity and properties of contaminated soils. Three kinds of sandy soils sampled and leachate from an industrial waste landfill were mixed to model the contaminated soils. Electrical resistivity of soils was measured by using a simulated resistivity cone penetrometer probe. In the experiments, the electrical resistivity was observed by changing the water content, void ratio, unit weight, degree of saturation, and concentration of the leachate. The test results show that the electrical resistivity of soils depends largely on the water content and the electrical property of pore water rather than unit weight and types of soils.

## 요 지

실내모형실험으로 전기비저항치와 오염된 흙의 물리적 성질과의 상관관계를 규명하기 위해서 요소분석을 수행하였다. 세가지의 모래질 흙에 산업폐기물매립지의 침출수를 첨가하여 모형실험에 이용했다. 혼합토의 전기비저항치는 비저항콘을 모사한 프로브를 제작하여 측정했다. 실내모형실험에서는 흙의 함수비, 간극비, 단위중량, 함수비 및 침출수의 농도를 변화시키면서 혼합토의 전기비저항치를 계측했다. 실험결과는 흙의 종류 및 단위중량보다는 흙의 함수비, 간극수의 전도성이 전기비저항치에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Soil properties, Electrical resistivity, Leachate, Contaminated soils, CPT, Water content, Pore water, Saturation, Correlation

---

- \*1 정희원, 한국해양연구소, 항만토질팀, 선임연구원
- \*2 정희원, 건국대학교 대학원 농공학과 박사과정
- \*3 정희원, 현대건설기술연구소, 연구위원
- \*4 정희원, 건국대학교 농과대학 농공학과 교수
- \*5 정희원, 현대건설기술연구소, 연구원

## 1. 서론

흙의 비저항치는 흙입자나 암석의 전기적 성질, 흙 간극에 함유하고 있는 간극수의 전기적 성질에 따라서 변한다. 즉, 지반을 구성하고 있는 흙이나 암석이 완전한 고체일 경우에는 절연체이지만 대부분은 다공질체이므로 어느 정도의 전도성 간극수가 함유되어 있다. 따라서 그 비저항성 및 분극성은 흙이나 암석을 구성하고 있는 광물의 성분, 입자의 종류, 함유하고 있는 간극수의 전기전도도, 간극의 용적, 간극의 배치, 입자의 결합방향, 그리고 온도 및 압력등에 따라서 달라질 수 있다. 지반오염은 흙의 비저항특성에 영향을 주는데 오염성분에 의해서 흙의 전기적 성질이 변하기 때문이다. 즉, 오염성분이 비전도성이면 비저항값이 크게 나타날 것이며 오염성분이 전도성이면 비저항값이 감소할 것이다. 그러나 대부분의 오염지반은 이들이 혼합되어 있는 경우가 많으며 또한 전도성 성분이 비전도성 성분보다는 지반의 비저항값에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이들 오염성분들은 주로 대수층을 중심으로 전기전도도가 높은 층을 형성하게 된다.

물리탐사기법으로 전기 비저항법은 인위적으로 지하에 전류를 흐르게 하여 이때 발생하는 저항을 측정하는데, 이때 토양의 간극수가 오염되어 있으면 정상적인 경우보다는 현저히 낮은 비저항값을 나타내게 되므로 쉽게 지하의 오염 여부를 판별할 수 있다. 그러나 이 방법을 지반을 구성하는 재료가 균질하다고 가정하고 오염된 지반과 오염되지 않은 지반 사이에 적어도 5%~10%이상의 전기적 차이가 있어야 효과적으로 오염영역을 파악할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 비저항법을 이용한 지질탐사 및 지반오염탐사에서는 여러개 층으로 구성된 지역의 탐측곡선을 해석하는데 탐측곡선에 반응을 나타내는 인자가 많기 때문에 해석이 어렵다 (Campanella and Weemees, 1990; Zohdy et al., 1974). 따라서 기존에 현장에서 지반조사에 주로 이용되는 콘관입시험기(cone penetration

test: CPT)에 여러 가지 오염여부를 판단할 수 있는 측정장치를 장착하여 오염된 지반의 탐사에 사용하기 위한 노력이 수년전부터 외국에서 시작되었다(Brandl and Robertson, 1996; Campanella and Weemees, 1990; Campanella and Davies, 1997). CPT법은 지반의 공학적인 성질을 분석하는데 사용하는 방법인데, 관입되는 콘은 연속적으로 지층의 선단 지지력과 측면에서 마찰저항을 측정할 수 있으며 여기에 전기비저항을 측정하는 기능을 추가시키면 지반공학적인 성질 외에도 지구물리학적 탐사(geophysical investigation)도 동시에 측정이 가능하다. 이와같이 전기비저항 측정이 가능하도록 만들어진 콘을 비저항콘이라고 하며 기존의 연구성과에 따르면 비저항콘은 비균질지반에서도 상당한 정확도를 가지고 적용될 수 있으므로 매우 활용성이 큰 장비라고 할 수 있다. 이와 같은 방법을 지반의 오염원탐사에 적용시키면 적은 비용으로 신뢰성 있는 분석이 가능하지만 아직 흙의 비저항성질이나 비저항콘에 대한 연구성과는 미흡한 상태이다(Campanella and Weemees, 1990; Campanella and Davies, 1997; Mlynarek, et al., 1995; Yeung and Akhtar, 1997).

본 논문은 장차 활용도가 증가될 것으로 예상되는 전기비저항콘을 대상으로 오염현장에 적용할 경우, 오염지반에서 측정된 비저항값의 변화, 오염영역의 분포 그리고 오염원의 형태 추정에 필요한 흙의 물리적 성질과 전기비저항값의 관계를 실내 모형실험을 통하여 조사하였다. 이를 위해서 모형 비저항콘을 제작하여 전기비저항탐사기와 연결하고, 대수층을 형성할 수 있는 사질토를 사용하여 간극비와 함수비를 변화시키면서, 간극유체는 침출수를 희석시켜 오염농도를 변화시키는 방법으로 전기비저항값을 측정하여 그 변화양상을 고찰하였다.

## 2. 이론고찰

### 2.1. 비저항법(Resistivity Method)

저항(R, resistance)은 Ohm의 법칙에 의거 길이(L)에 정비례하고 단면적(A)에 반비례한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 즉,  $R \propto \frac{L}{A}$ 에서 식 (1)을 유추한다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

여기에서  $\rho$ 는 비저항수로서 전기비저항(electrical resistivity)이라고 불리며 이것은 모양이나 크기에 상관없이 그 물질의 고유한 특성을 나타내게 된다. 이를 토대로 다시 Ohm의 법칙에서 식 (2)가 형성된다.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

여기에서  $\Delta V$ 는 저항사이의 전위차이며, I는 저항을 통과하는 전류이다. 그러나 흙이 균질재료이고 전극이 완전한 전도체라고 가정하면, 측정장치에서 전류를 일정하게 통과시키면 측정장치마다 A/L은 일정하기 때문에 이 값을 K로 나타낼 수 있다. 따라서 전기저항값은 흙의 기본적인 성질이며, 식(3)과 같이 계산된다.

$$\rho = \frac{A}{L} R = KR = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

K는 전극의 배열형태에 따라 영향을 받는 보정계수이다. K값은 사전에 비저항값을 알고 있는 항온의 용액속에 측정장치를 넣고 비저항값을 측정함으로써 구할 수 있다.

## 2.2. 직류법(Direct Current method, DC)

DC 비저항법은 지하수자원의 탐사에 1930년대부터 적용해 오고 있으며 근래에는 오염지반의 탐사에 이르기까지 다양하게 사용하고 있다. DC 비저항법은 그림 1과 같이 전류전극과 전위전극의 배치형태에 따라 구분되는데, 1960년대까지는 Wenner, Lee-Partitioning, 그리고 Schlumberger형태가 사용되어 왔으며, 최근에는 Wenner방법과 Schlumberger방법을 주로 이용하고 있다. 본 연구에서는 두가지 방법을 모두 이용하여 다양한 시료의 전기 비저항치를

측정했다. 본 논문에서는 지면의 한계상 두가지 측정방법중에서 Schlumberger방법을 이용하여 얻은 흙의 전기 비저항치에 관해서 분석하고자한다. 전기비저항의 측정시스템 및 기본이론에 대한 설명은 Thevanayagam(1993)이나 윤길립외 4인(1997)의 보고서에 자세히 설명되어 있다.

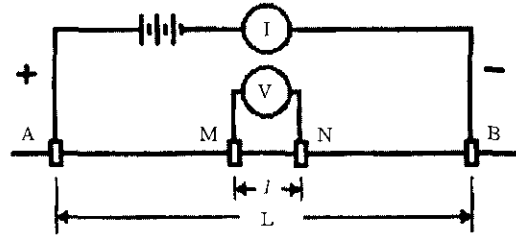


Fig. 1. Schlumberger Electrode Arrays  
(日本土質工學會, 1986)

## 3. 실험재료 및 방법

### 3.1. 실험 재료

본 연구 수행을 위해서 사용한 전기비저항 탐사기는 Advanced Geosciences, Inc.의 "STING-R1"이며, 모형실험에 사용된 시료는 균등질 입자로 구성되어 있다. 첫번째 시료는 일반 모래로 세사(이후, SAND)로 표현하며 서울시 모진동 근처의 공사현장에서 채취했다. 두번째 시료는 화강암풍화토로 화강토(이후, HWAKANG)로 표현하며 대관령근처의 도로 공사현장에서 채취했다. 그리고 세번째 시료는 실트질성분이 약 8%정도 함유되어 있는 산토(이후, SAN-TO)로 표시하며 안양시 근처 공사현장에서 채취했다. 각각의 시료에 대한 물리적 성질과 입도분포곡선은 표 1과 그림 2에 나타냈다. 채취된 시료에 대해서 6종의 중금속의 함유량을 조사하여 Table 2에 제시하였는데 Cd와 Cu는 검출되지 않았다. 또한 간극유체의 성분에 따른 전기 비저항특성을 알아보기

위하여 지하수의 성분을 변화시킬 필요가 있어 산업폐기물 매립장에서 수거한 침출수를 5%, 10%, 30%로 지하수에 희석시켜서 실험에 이용하였다. 침출수에 대해서도 사전에 중금속

성분에 대한 함유량조사를 실시하였다. 그 결과는 Table 2에 함께 제시되어 있으며, 그 외의 침출수 분석결과는 Table 3에 나타나있다.

Table 1. Physical Characteristics of the Soils

Soil Type	G <sub>s</sub>	Passing # 200(%)	LL (%)	PI (%)	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	O.M.C.(%)	USCS
SAND	2.64	1.5	-	N.P.	1.67	15.9	SP
SAN-TO	2.66	7.5	-	N.P.	1.88	9.5	SP-SM
HWAKANG	2.68	0.7	-	N.P.	1.90	8.1	SP

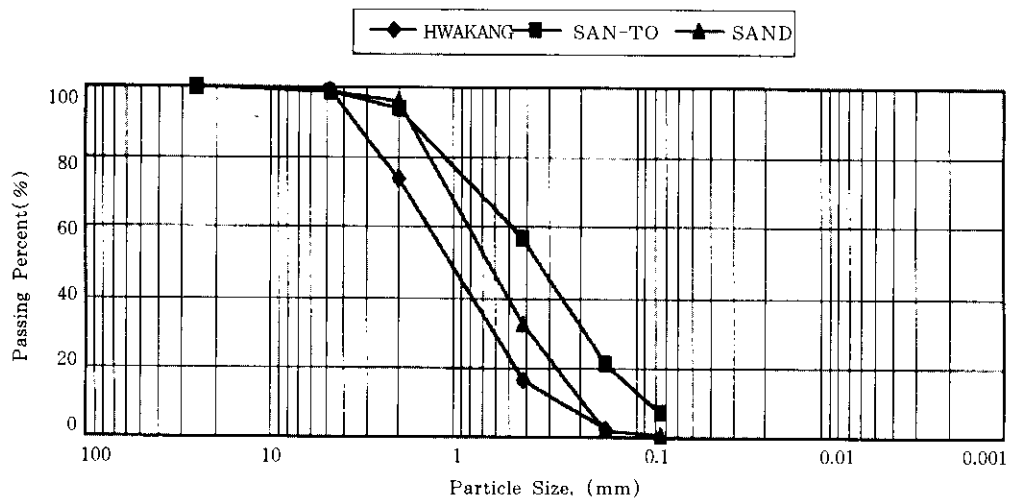


Fig. 2 Grain Size Distribution

Table 2. Heavy Metal Concentrations in Soils and Leachate

Item	Soils (ppm)			Leachate (mg/l)	Environmental Standard (ppm)	Typical Resistivity ( $10^{-4} \Omega \cdot m$ )
	HWAKANG	SAN-TO	SAND			
Cr	0.75	1	0.75	1.015	4	12.5
As	5	5	5	0.215	6	-
Cd	0	0	0	0.030	1.5	6.8
Pb	14.75	12	17	0.440	100	5.9
Cu	0	0	0	0.030	50	1.7
Hg	0.25	0	0	0.005	4	94.1

Table 3. Physical and Chemical Characterization of Leachates

Item	Leachate	Unit
pH	8.76	-
EC	23.51	mS/cm
BOD	285	mg/l
COD	820	"
TKN	131.6	"
TP	6.14	"

### 3.2. 실험방법

실험은 직경 30cm, 높이 70cm의 PVC관으로 제작된 모형토조를 이용하여 실시하였다. 토조의 바닥면은 함수비의 변화를 방지하기 위하여 방수처리하였다. 그리고 전기비저항값 측정은 CPT와 유사한 길이 60cm의 비저항콘을 플라스틱 재질로 모형제작하여 절연이 되게 하였다. 공시체는 적절한 간극비의 차이가 발생하도록 일정한 체적의 모형토조에 시료의 양을

각각 달리하여 밀도를 다르게 하였고 하나의 밀도에 대해서 함수비를 변화시키면서 시료를 준비하였다. 시료와 지하수의 배합은 토조 밖에서 하였으며, 실제 공시체 제작시에는 모형콘을 시료성형전에 토조의 중앙에 위치시켜 그 주위로 사전에 준비된 시료를 넣었다. 이때 별도의 다짐은 실시하지 않았으며, 일정한 체적의 토조안에 준비된 시료가 다 채워질 수 있도록 하였다. 간극수가 오염된 경우를 모사하기 위하여 침출수를 회색시켜 사용한 실험도 위와 동일하며, 이때는 흙의 함수비 조절을 위해 사용했던 지하수에 침출수를 5%, 10%, 30%첨가하여 공시체를 제작하였다. 실험에 사용된 모형콘과 PVC토조는 Fig. 3에 나타냈다.

### 4. 실험결과 및 고찰

모래, 산토 그리고 화강토 세가지 시료에 대해서 지하수와 침출수의 농도를 변화시켜 간극수의 성분을 인위적으로 조절하면서 전기비저항값을 측정하였으며, 실험의 분석결과는 다음과 같다.

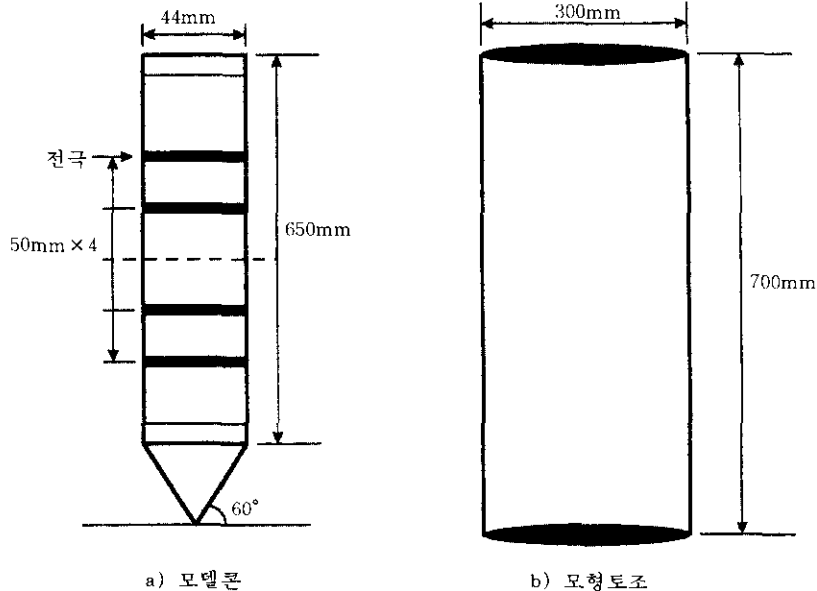


Fig 3. Specification of Cone Probe and PVC Mould

#### 4.1. 함수비의 변화에 따른 전기비저항치의 영향

간극수의 함수비에 따른 비저항치의 변화를 알아보기 위한 실험을 실시하였다.

실험결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 알 수 있는 것은 침출수가 전혀 섞이지 않은 지하수 (Leachate 0%)만으로 함수비를 조절하면서 실험했을 경우에 SAND와 HWAKANG의 비저항값이 SAN-TO보다 큰 것으로 나타났다. 함수비가 증가하면서 SAND와 HWAKANG는 비저항치가 낮은 비율로 일정하게 감소하나, SAN-TO의 경우는 함수비의 변화에 대한 비저항치의 영향은 거의 알 수 없었다. 이러한 결과는 실트질 성분을 다른 시료에 비해 비교적 많이 함유한 SAN-TO가 함수비를 증가시키면서 측정된 비저항치에 대해서 영향을 받지않은 결과가 되겠다. 그러므로 세가지 시료에 대한 전기전도성은 SAN-TO, HWAKANG, SAND의 순서로 모래질 성분을 가장 많이 함유한 SAND가 가장 전기적 성질이 낮음을 확인할 수 있다.

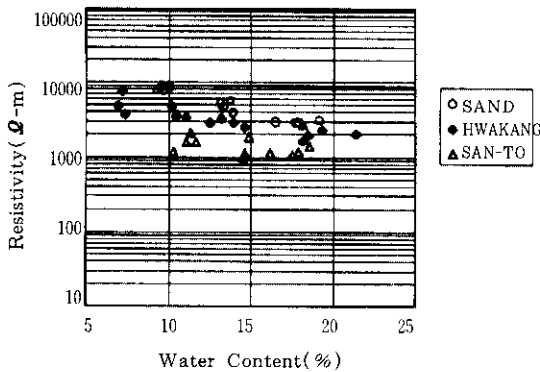


Fig. 4. Variation of Resistivity with Water Content

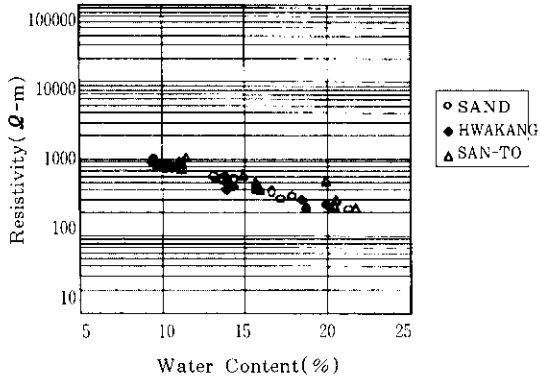
#### 4.2. 간극수의 오염에 따른 비저항값의 변화

지반이 침출수로 오염됐을 경우를 가상적으로 모사하기 위하여 지하수에 침출수를 5%, 10%, 30%로 희석시켜 함수비를 조절하면서 실험을 수행하였다. 그림 5에 세가지 시료가

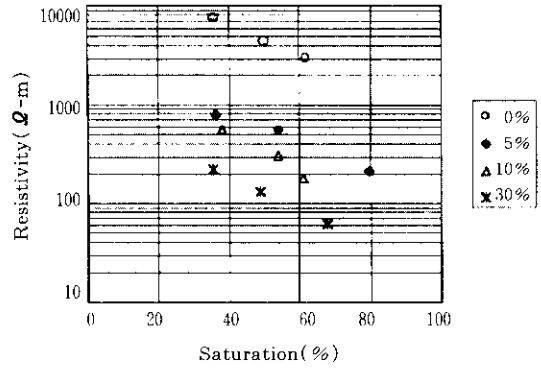
나타내는 비저항치를 나타냈다. 그림 5는 그림 4의 기본 조건에 침출수를 첨가한 결과로서 침출수가 전기비저항치에 어느정도 영향을 미치는가를 조사한 결과이다. 그림 5에서는 침출수로 오염된 간극수에 의한 함수비를 증가하면서 측정된 시료들의 비저항치는 그림 4에 비해서 크게 감소했으며 세가지 시료가 함수비 증가에 따라서 매우 유사한 경향을 보였다. 침출수 5%(그림 5a)를 첨가한 경우는 세가지 시료의 비저항값이 함수비에 따라서 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 이것은 오염되지 않은 경우보다 오염된 간극유체의 전기전도적 성질이 흙의 비저항값에 직접적으로 큰 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이며, 침출수가 5%정도만 함유되어도 비저항값은 오염되지 않은 경우에 비해 현저히 낮아지므로 이러한 성질은 비저항법을 이용한 오염지반 탐사의 적용가능성을 제시하는 것이라 하겠다. 침출수 10%(그림 5b)를 첨가한 경우는 5%를 첨가한 경우보다 전체적으로 비저항치의 감소는 약간 있었고 SAN-TO의 경우가 역시 실트질흙을 함유한 관계로 함수비증가에 대해 가장 민감했다. 하지만 세가지 시료의 비저항치 산포도는 증가했다. 침출수 30%(그림 5c)에서는 SAND의 비저항값 감소가 현저하였으며, HWAKANG도 비저항값이 약간 감소하였다. 그러나 산토는 침출수 10%와 비교해서 거의 감소되지 않은 것으로 나타났다. 따라서 흙의 비저항값은 간극유체의 전기전도도에 민감하게 반응하지만 흙의 종류에 따라서 그 반응정도에 차이가 있어 비저항값의 변화양상은 매우 복잡한 특성을 보이거나 어느정도 경향을 가지고 있다는 사실을 알 수 있었다.

#### 4.3. 포화도와 비저항의 관계

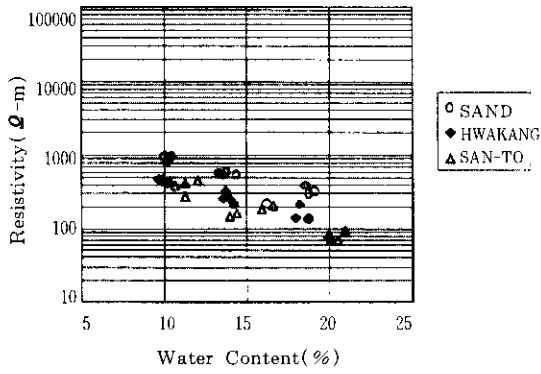
흙의 포화도에 따른 비저항값의 변화를 알아보기 위하여 간극비를 0.7로 일정하게 조절하여 동일한 방법으로 포화도에 따른 비저항치의 변화를 침출수 농도별로 측정하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서는 동일한 간극비에서



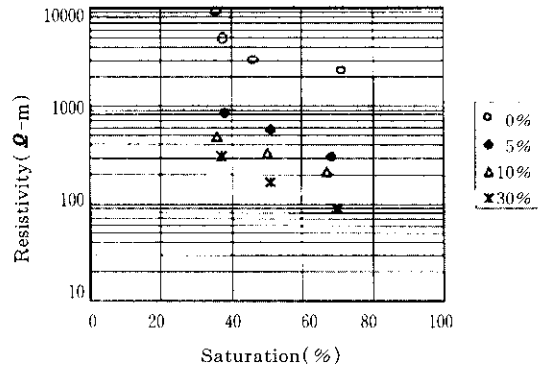
(a) Leachate 5%



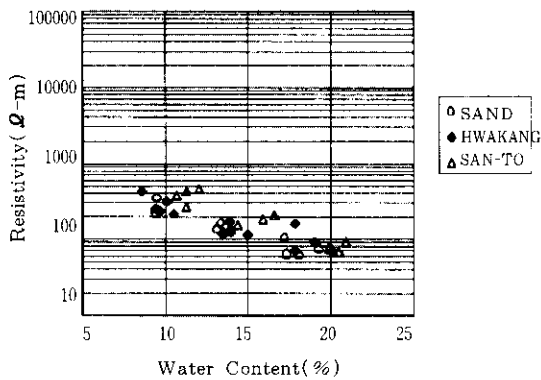
(a) SAND



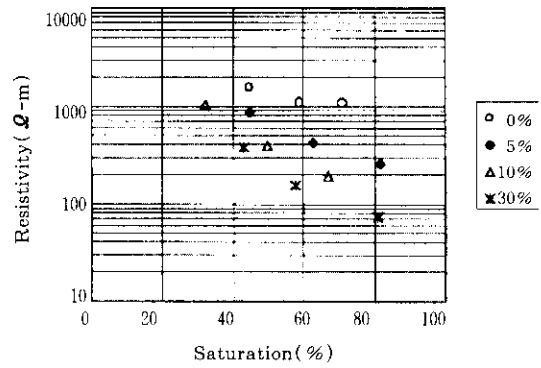
(b) Leachate 10%



(b) HWAKANG



(c) Leachate 30%



(c) SAN-TO

Fig 5. Variation of Resistivity with Pollution of the Pore Water

Fig 6. Relationship between Resistivity and Degree of Saturation

세가지 흙의 비저항치는 포화도와 오염농도에 비례하여 감소함을 알 수 있다. SAND의 경우 침출수 농도에 따른 비저항값의 감소가 가장 크게 나타나고 있으며 그 다음이 HWAKANG이고 SAN-TO도 포화도와 침출수 농도의 증가에 따라 비저항값은 감소하지만 SAND나 HWAKANG에 비해서는 그 변화경향이 달랐다. 그림 5와 같이 침출수의 첨가(침출수 0% ... > 5%)로 가장 민감도가 작은 것은 SAN-TO임을 알 수 있었다.

일정한 침출수 농도에 대해서 포화도 증가에 따른 오염농도별 비저항값 변화를 알아보기 위해서 실험을 한 결과를 그림 7에 나타냈다. 침출수를 0%에서 5%로 증가한 결과, 비저항치는 현저히 감소하여 전기전도도가 현저히 증가한 현상을 알 수 있었다. 전체적으로 세가지 시료가 침출수 및 포화도의 증가와 함께 비저항치가 감소하는 경향을 보였다. 침출수가 없는 경우 즉, 0%와 약 10%를 첨가한 경우에 SAND는 포화도와 관계없이 일정한 경향으로 비저항치가 가장 높게 측정됐으나 침출수가 5%와 30%인 경우에는 HWAKANG과 SAN-TO가 SAND보다 비저항치가 컸다. 그러므로 침출수의 농도와 흙의 종류에 따라서 비저항치는 다른 경향을 보인다고 할 수 있다. SAND와 HWAKANG의 경우는 포화도 60%에 도달하면 두가지 시료의 절대 비저항값이 유사하게 나타나고 있어 두가지 시료가 사질토에 가까운 흙이기 때문으로 판단된다. 포화도 60% 이전에는 흙에서의 이온전달이 간극내의 유체와 흙입자가 분담하게 되고 비전도체에 가까운 각 시료의 구성광물의 전기적성질이 비저항값에 영향을 주어서 두가지 시료의 비저항값이 달랐으며 포화도가 증가되면 이온의 전달이 완전히 유체를 통해서만도 가능하기 때문에 이때부터는 유체의 전기전도적 성질이 흙의 비저항값에 미치는 영향이 커지게 되었다고 판단된다. 하지만 포화도 60%이상에서도 흙의 종류에 따라서 비저항값에 약간에 차이가 발생하는 것은 흙입자 고유의 전기적 성질이 일부 영향을 미

치고 있기 때문이라고 판단된다(Abu-Hassanein et al., 1996). 이러한 사실은 침출수의 농도가 높아지면서 흙에 따라서 비저항값의 변화양상이 달라지고 있다는데서도 찾아볼 수 있다. 즉 침출수 5%의 경우, 세가지 시료의 비저항값은 비슷하게 나타나고 있으나 침출수 10%에서는 다시 흙의 종류에 따라서 비저항값에 차이가 발생하고 있다. 그리고 침출수 30%에서 다시 비슷한 비저항값을 나타내고 있는데, 이는 사질토에 가까운 흙은 간극유체의 전기전도도가 동일하다고 보았을 때 침출수가 흙의 구성입자들의 전기적 특성에 영향을 주고 있기 때문으로 사료된다. SAN-TO는 포화도 60%전후에서 비저항값의 변화양상이 달라지고 있음이 관찰되었다. 즉 포화도가 60%에 도달하면 비저항값의 감소경향이 약간 둔화되는 양상을 보이고 있다.

#### 4.4. 흙의 건조단위중량이 비저항치에 미치는 영향

세가지 시료에 대해서 단위중량의 크기를  $1.4 \text{ kg/cm}^3$ 에서  $1.55 \text{ kg/cm}^3$ 까지 변화시키면서 비저항치의 민감도를 측정하였다. 측정결과를 그림 8~10에 나타냈다.

그림에서 알 수 있는 것은 그림 8의 SAND는 함수비와 침출수 농도의 증가에 따라 비저항값이 감소하였고 건조단위중량의 차이가 있음에도 불구하고 동일한 함수비에서 단위중량에 따른 비저항값의 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. 그림 9에서 HWAKANG도 동일한 함수비와 침출수의 농도아래에서 건조단위중량 차이에 따른 비저항값의 차이는 크지 않았으나 측정치의 자료분산이 HWAKANG의 경우보다는 컸다. 그림 10의 SAN-TO의 경우에는 침출수가 없는 경우에는 동일한 함수비에 대한 비저항치의 변화가 일정하지 않았으나 침출수를 첨가한 후에는 일정한 침출수농도와 함수비 아래에서 건조단위중량의 차이에 따른 비저항치가 크게 다르지 않았으나 HWAKANG 및



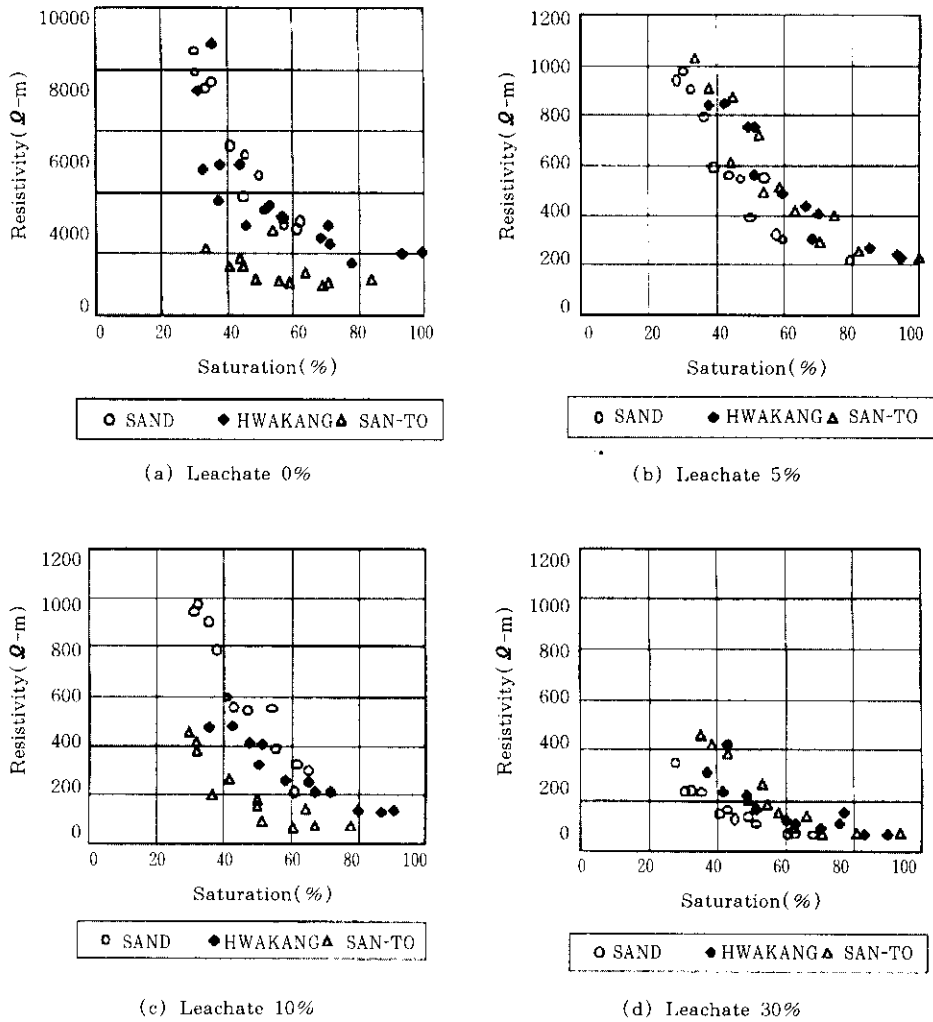
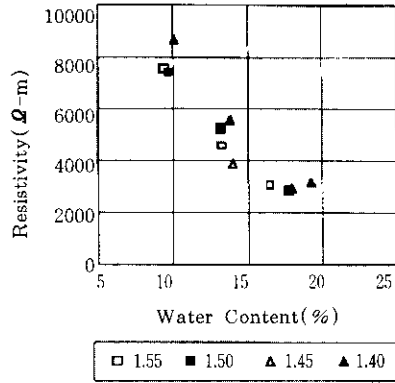


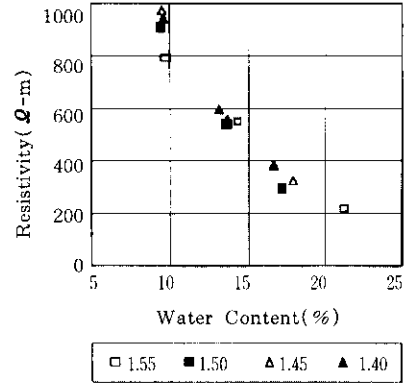
Fig 7. Relationship between Electrical Resistivity and Concentration of Leachate

SAND보다는 비저항치에 차이가 있었다. 이러한 SAN-TO의 특이한 경향은 Jackson et al.(1978)에 의하면 세립분이 없는 모래나 자갈의 경우에는 비저항값이 주로 간극유체의 전도도에 지배되지만 점성토나 점토광물을 함유하고 있는 시료의 비저항치는 간극유체와 입자 표면의 전기적 성질에 많은 영향을 받는다고 알려져 있다. Campa-nella and Weemees (1990)는 이러한 결과를 뒷받침하는 결과를

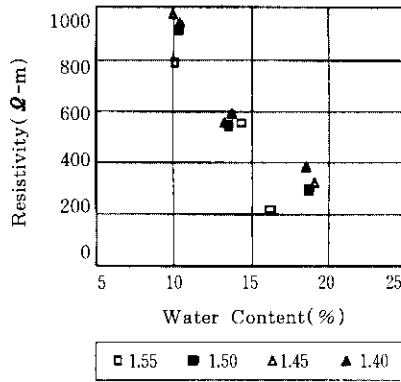
실험을 통해서 검증하고 연구결과를 발표했다. 따라서 그림 2의 입도분포곡선에서 알 수 있듯이 SAND나 HWAKANG는 세립분의 함유량이 매우 적은 순수사질토이고 SAN-TO는 세립분의 함유량이 약 8%정도 함유하고 있다. 그러므로 SAND나 HWAKANG는 비저항값이 주로 침출수로 오염된 간극유체의 전기전도도적 성질에 영향을 받은 것으로 판단되며, SAN-TO의 경우에는 오염된 간극수 외에도 세립분



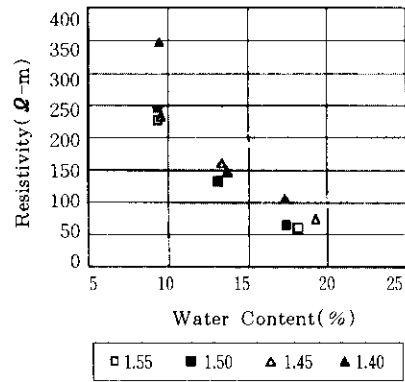
(a) SAND (Leachate 0%)



(b) SAND (Leachate 5%)

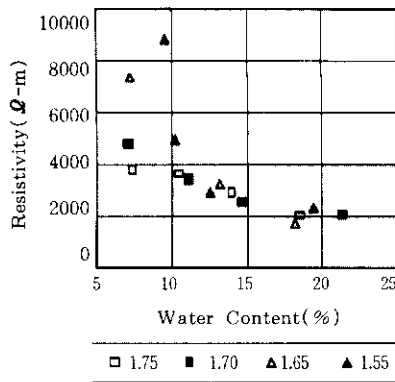


(c) SAND (Leachate 10%)

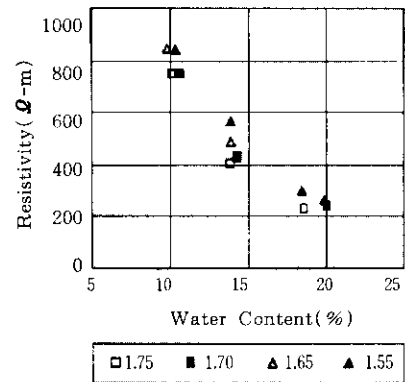


(d) SAND (Leachate 30%)

Fig 8. Relationship of Resistivity Versus Unit Weight of SAND

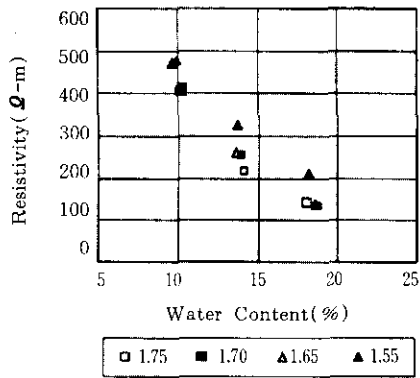


(a) HWAKANG (Leachate 0%)

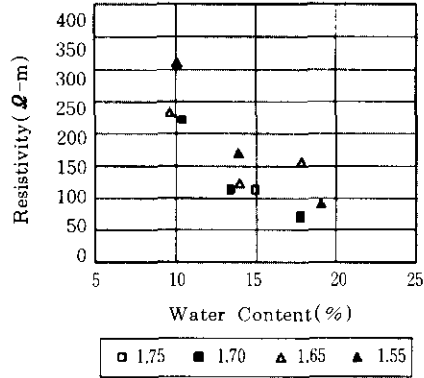


(b) HWAKANG (Leachate 30%)

Fig 9. Relationship of Resistivity Versus Unit Weight of HWAKANG(continued)

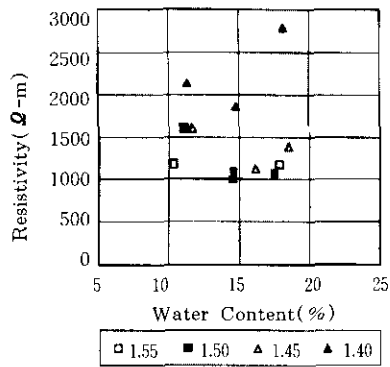


(c) HWAKANG (Leachate 10%)

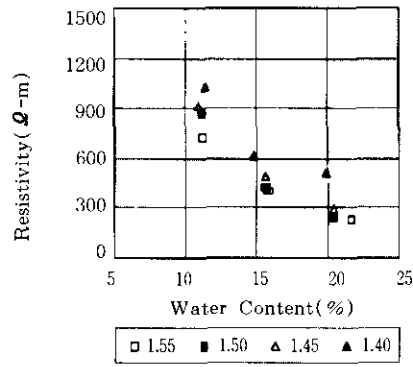


(d) HWAKANG (Leachate 30%)

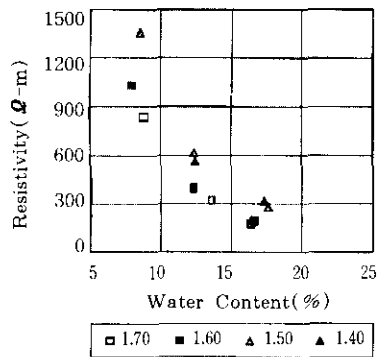
Fig 9. Relationship of Resistivity Versus Unit Weight of HWAKANG



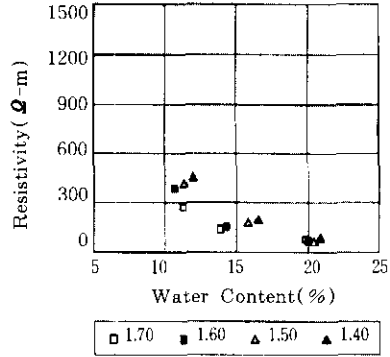
(a) SAN-TO (Leachate 0%)



(b) SAN-TO (Leachate 5%)

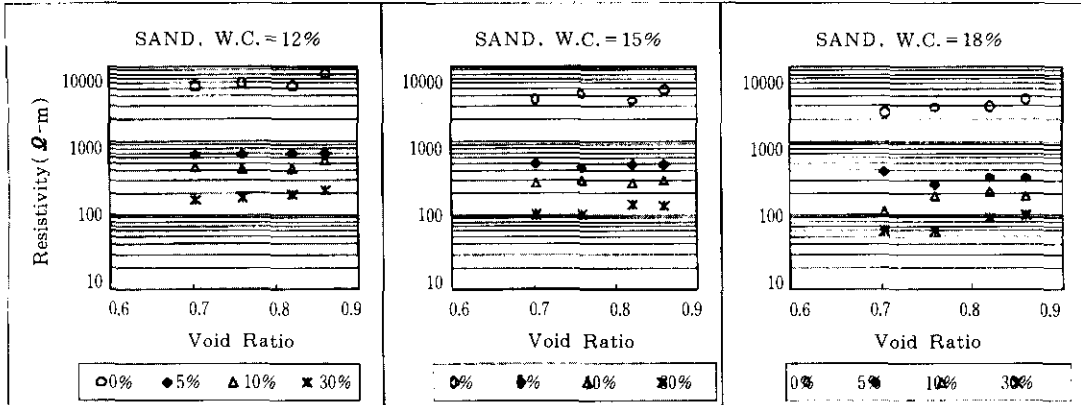


(c) SAN-TO (Leachate 10%)

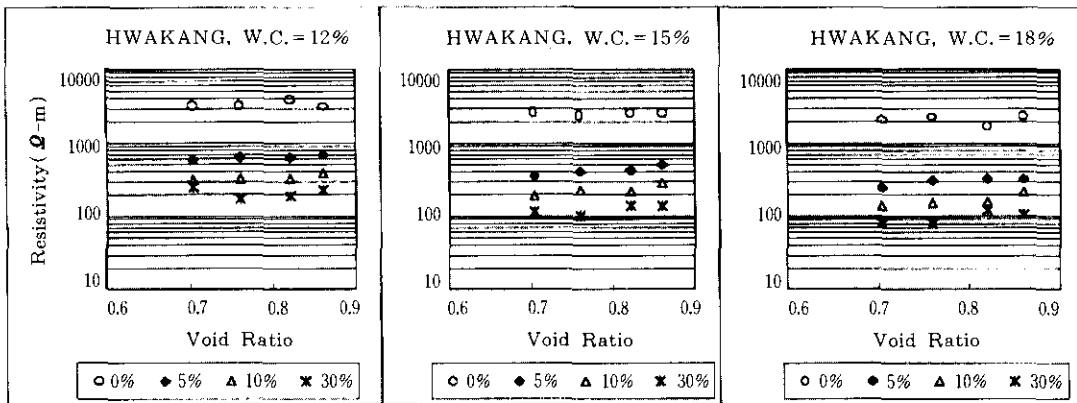


(d) SAN-TO (Leachate 30%)

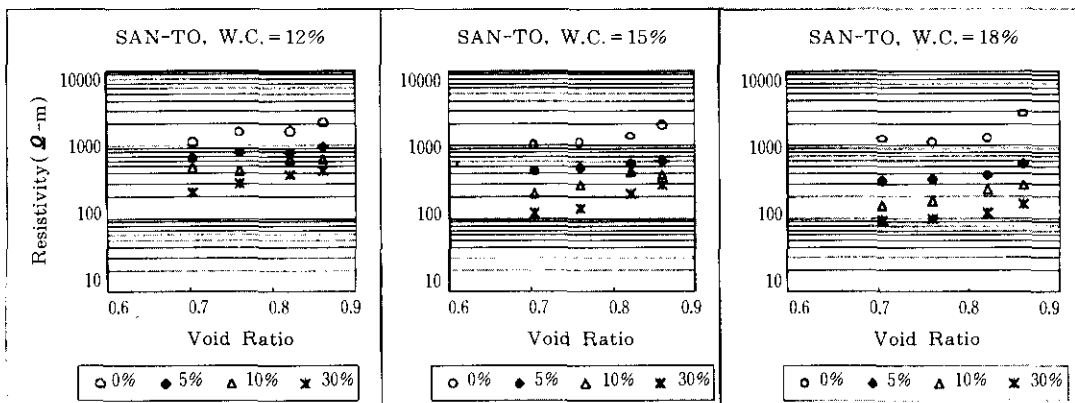
Fig 10. Relationship between Electrical Resistivity and Unit Weight of SAN-TO



(a) SAND



(b) HWAKANG



(c) SAN-TO

Fig 11. The Relationship between Resistivity and Void Ratio

입자의 전기적 영향을 받아서 나타나는 경향이라고 판단된다. 따라서 SAND나 HWAKANG와 같이 순수사질토는 간극유체의 전기전도도가 흙의 비저항값에 큰 영향을 주고 건조단위중량의 영향은 미소하였으나, SAN-TO와 같이 세립분의 함량이 어느 포함되어 있으면 흙의 비저항값은 흙의 건조단위중량에도 영향을 받는다고 판단된다.

#### 4.5. 흙의 간극비가 비저항치에 미치는 영향

간극비의 변화가 비저항치에 미치는 영향을 알아보기 위하여 함수비를 12%, 15% 그리고 18%로 조절하여 실험한 결과를 그림 11에 나타냈다. 실험을 수행하기 위해서 세가지 시료에 대해서 함수비를 일정하게 유지하고 침출수의 농도를 증가시키면서 얻는 결과이다. SAND와 HWAKANG는 동일한 함수비에서 간극비가 변하여도 비저항값의 변화는 크지 않았다. 따라서 간극비의 변화가 비저항치에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 동일한 함수비에서 간극비가 크면 포화도가 낮아지므로 간극내의 이온을 전달할 수 있는 능력이 낮아지기 때문이라고 판단된다. SAN-TO의 경우에는 함수비 12%에서 간극비가 증가함에 따라서 비저항치의 변화가 비교적 컸다. 이는 SAN-TO내에 함유되어 있는 8%의 세립토의 영향으로서 SAN-TO의 경우에는 전기전도도가 간극유체외에도 세립질 입자표면을 통해서 이루어지기 때문에 간극비의 변화에 따른 비저항값의 변화양상이 다른 2가지 시료에 비해서는 다른 양상을 나타내고 있기 때문이다.

### 5. 결론 및 토의

오염지반을 조사하는 방법을 개발하기 위해서 흙의 물리적특성과 전기비저항값과의 상관관계를 규명하는 연구를 수행했다. 실내모형토조와 모형비저항콘을 제작하여 요소분석실험을 통해서 얻은 연구결과는 다음과 같다.

1. 흙의 물리적특성에 따른 전기비저항값의 변화를 조사하였는데, 전기비저항에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 함수비와 오염물질의 함유여부이었다. 세가지 시료 모두 함수비의 증가에 따라서 비저항치가 감소되는 경향을 보였다. 간극유체를 중금속을 함유한 침출수로 오염시켜 실험한 결과, 비저항값이 현격하게 감소되어 비저항값이 중금속에 매우 민감하게 반응함을 발견할 수 있었다. 이러한 결과는 비저항콘으로 오염지반을 조사할 수있다는 사실을 입증하는 것이다.
2. 입도분포가 유사한 세가지 시료의 비저항값을 측정된 결과, 흙의 종류에 따라서는 비저항치에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 연구결과를 분석한 결과, 모래를 많이 함유한 순서로 비저항치가 컸으며 실트질 흙을 함유한 경우는 비저항치가 작아 전기전도성이 큰 것으로 확인되었다.
3. SAND나 HWAKANG의 경우에는 동일한 함수비에서 건조단위중량에 따른 비저항치의 차이가 거의 없었으나, SAN-TO의 경우에는 동일한 함수비에서 건조단위중량의 변화에 따라서 비저항치의 변화가 있었다. 그러므로 SAND나 HWAKANG와 같이 세립분 함유량이 매우 적은 조립질 흙에서는 비저항값이 주로 침출수로 오염된 간극유체의 전기전도적 성질에 영향을 받으며, SAN-TO와 같이 세립질 흙이 포함되는 흙에서는 간극수외에도 세립분 입자표면의 전기적성질에 영향을 받아 다른 비저항 특성을 나타내고 있다고 판단된다.
4. SAND와 HWAKANG는 포화도가 60%에 도달하면 비저항치가 유사하게 나타나고 있어 두가지 시료의 입도분포가 순수사질토에 가까운 흙이기 때문으로 판단된다. 하지만 포화도를 60%보다 작게 한 경우, 흙에서의 이온전달이 간극내의 유체와 흙입자가 분담하게되고, 비전도체에

가까운 각 시료의 구성광물의 전기적 성질이 비저항치에 영향을 주기 때문에 두 가지 시료의 비저항치가 달라진 것으로 판단되었다. 포화도가 증가되면 이온의 전달이 완전히 유체를 통해서만도 가능하기 때문에 유체의 전기전도적 성질이 흙의 비저항값에 미치는 영향이 커지게 되었다고 판단된다. 그러나 포화도 60% 이상에서도 흙의 종류에 따라서 비저항치에 약간의 차이가 발생하는 것은 흙입자 고유의 전기적성질이 일부 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다.

5. SAN-TO는 함수비증가나 오염농도증가에 따른 비저항값 감소치가 SAND나 HWAKANG보다 작았고 간극비 변화에 대해서도 비저항값이 변화하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 SAND와 HWAKANG에 비교하면 완전히 다른 변화양상인데, 이는 8%정도 포함되어있는 세립질토의 영향이라고 판단된다.

### 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 한국건설기술연구원 관계자분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 윤길림, 이용길, 정연문, 윤춘경, 유찬 (1997). 오염지반의 거시적 분포 및 오염원의 형태조사기법 개발. 1996년도 건설교통부 1차년도 연차 보고서 번호 RD/0022. 현대건설기술연구소
2. 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
3. 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.
4. Campanella, R. G. and Weemeees, I.(1990), "Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 557~567.
5. 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.
6. Jackson, P.D., Taylor-Smith, D., and Stanford, P.N., (1978), "Resistivity-Porosity-Particle Shape relationships for marine sands." *Geophysics*, Vol. 43, No. 6, pp. 1250-1268.
7. Mlynarek, Z., Welling, E., and Tschuschke, W.(1995), "Conductivity piezocone penetration test for evaluation of soil contamination." *Proceedings of CPT' 95*, Vol. 2, pp. 233~237
8. Thevanayagam, S.(1993), "Electrical Response of Two-Phase Soil: Theory and Applications." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 8, pp. 1250~1275
9. Yeung, A. T. and Akhtar, A. S.(1997), "Characterization of subsurface contamination by an electrical immittance cone penetrometer." *Proceedings of 14th ICSMFE*, pp. 623~626
10. 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.
11. 日本土質工學會(1986). 土質基礎工學ライフラ 21 - 土と基礎の物理探査, pp. 97~115  
(접수일자 1998. 3. 18)