

# 침출수로 오염된 불포화사질토의 전기비저항 변화에 대한 연구

## A Study on the Variation of Resistivity of the Unsaturated Sandy Soils Contaminated by Leachate

윤 춘 경\* · 유 찬\*\*  
Yoon, Chun Gyeong · Yoo,

Chan

### Summary

Measurement of electrical resistivity in soils has been used for many years with purpose of estimating in situ porosity or density. Recently electrical resistivity has also been used as an indicator of soil contamination. This paper presents the result of laboratory experiment to investigate the resistivity variation in contaminated sandy soils. The results can be used with the Cone Penetrometer Test (CPT) result to analyse ground condition. In the experiment, the water content and leachate concentration of soils were controlled by groundwater and leachate, and then the resistivity measurement was made with 'STING-R1' by Advanced Geosciences Inc. In the case of using groundwater, the resistivity was in the range of over  $1000\Omega\cdot m$ , but in the case of using polluted water by leachate, the resistivity decreased significantly down to  $10\sim 100\Omega\cdot m$  for the same moisture content. Also the resistivity varied according to the degree of saturation.

Therefore, if soil is contaminated by leachate, the CPT with electrical resistivity sensor might be used to investigate the contamination status and plume migration. But exact component of leachate and the pollutant concentration are still hard to identify.

### I. 서 론

고도의 경제발전으로 국민의 경제적 생활수준이 향상되면서 예전에는 그 중요성이 부각되지 않았던 우리 주위의 환경적인 측면에 대해서 관심이 고조되고 있다. 환경문제는 크게 수질, 대기 그리고 토양의 오염 등으로 구분할 수 있는데, 이 중에서 토양의 오염은 공학적인 측면과

토양의 물리·화학적인 측면에서 모두 문제를 야기한다. 공학적인 측면에서는 우리나라에서 대규모로 건설되고 있는 위생쓰레기 매립장의 안정성 문제, 침출수에 의한 지하수의 오염, 매립후 시간경과에 따른 지반의 전단강도와 압축특성의 변화 등이 중요하며, 물리·화학적인 측면에서는 농경지의 중금속 오염 등이 작물생육과 밀접한 관계를 갖고 있다. 토양오염문제에 대해서는 최선

\* 건국대학교 농업생명과학대학  
\*\* 건국대학교 대학원(박사과정)

키워드 : CPT, 전기비저항, 침출수, 오염토양

의 방법이 '예방'이고 그 다음이 신속한 대처이지만, 기존에 이미 오염되었거나 오염이 진행되고 있는 곳에 대한 효과적인 대처방안은 아직까지도 초보적인 단계라고 할 수 있다. 따라서 오염된 토양의 복원을 위해서는 우선 오염지역을 정확하고 신속하게 탐사할 수 있는 기술이 필요하다. 오염지반의 탐사는 현장과 실내실험이 병행되어 실시되어야 하는데, 현재까지는 주로 현장시험으로 비저항(Resistivity)법이 많이 사용되었다.

그러나 비저항법을 이용한 지질탐사 및 지반오염탐사에서는 여러개 층으로 구성된 지역의 탐측곡선을 해석하는데 탐측곡선에 반응을 나타내는 인자가 많기 때문에 단일(unique)한 해석이 어렵다. 따라서 이러한 부분을 보완하기 위해서 다른 물리탐사방법에 의한 결과와 비교하면서 탐측곡선을 해석하여 지반의 상태를 분석한다. 특히 지반조건을 균질하다고 가정하고 지표면에서 실시하기 때문에 불균질한 지반조건을 충분히 반영하지 못한다는 단점을 가지고 있다.<sup>14)</sup>

그에 대한 대책으로 최근 외국에서는 지반의 지지력을 측정하는 콘관입시험기(static cone penetration test)에 전기비저항 측정장치(electrical resistivity sensor)를 부착한 비저항콘을 이용하여 국부지역의 오염여부와 오염의 정도를 파악하는 탐사방법이 활발히 연구되고 있다. 이는 지반내에서 전류의 흐름은 이온을 띠고 있는 층, 즉 주로 대수층을 통해서 이루어지고 지반이 오염되면 지반의 전기전도도도 달라진다는 사실에 착안하였다. 물론 BTEX와 같은 유기성분들은 이온을 띠지않아 비저항값 변화만으로 그 오염여부를 판별할 수 없지만, 실제로 있어서 오염물질은 순수하게 단일성분만이 존재할 수 없고 여러가지 성분들이 혼재되어 있는 경우가 일반적이다. 따라서 현장과 실내시험의 결과를 종합적으로 분석하면 오염지반의 분석이 가능하다. 특히 산업폐기물 매립장의 침출수에 다량 포함되어 있는 전기전도도가 좋은 중금속 성분으로 간극유체가 오염된 경우에는 이 방법이 매우 효과적으로

적용될 수 있다.<sup>4,5,7,8,11)</sup>

따라서 본 연구에서는 지반의 오염여부 및 오염범위의 탐사에 있어서 앞으로 그 활용도가 증가될 것으로 예상되는 비저항콘을 이용하여 지반의 전기비저항 변화를 이용한 지반오염 판정의 가능성과 오염농도와 대수층을 형성할 수 있는 사질토의 토질에 따른 전기비저항의 변화를 알아 보기 위하여 실내에서 모형실험을 실시하였다.

## II. 이론고찰

### 1. 기초이론

비저항(resistivity)법은 1912년에서 1914까지 Conrad Schlumberger가 지반탐사에 전기비저항을 사용하는 방법을 연구한 것에서 시작하여 2차대전을 겪으면서 불란서, 러시아, 독일의 지질학자들의 이론과 실제에 관한 본격적인 연구에 힘입어 발전해 왔으며, 근래에는 지하수탐사에서 지하오염원의 탐사에 이르기까지 여러 방면에 다양하게 사용되고 있다.<sup>2,16)</sup>

저항(R, resistance)은 ohms 단위로 표시하며 도체의 길이(L)에 정비례하고 단면적(A)에 반비례한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 즉,

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

여기에서  $\rho$ 는 비례상수로써 전기비저항(electrical resistivity)이며 이것은 모양이나 크기에 상관없이 그 물질의 고유한 특성치를 나타내게 된다. Ohm의 법칙에서

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

이며 여기에서  $\Delta V$ 는 도체사이의 전위차이며,  $I$ 는 도체를 통과하는 전류이다. 그러나 흙이 균질 재료이고 전극이 완전한 전도체라고 가정하면, 측정장치에서 전류를 일정하게 통과시키면 측정장치마다  $A/L$ 은 일정하기 때문에 이 값을  $K$

로 나타낸다. 따라서 전기비저항값은 식 (3)과 같이 계산된다.

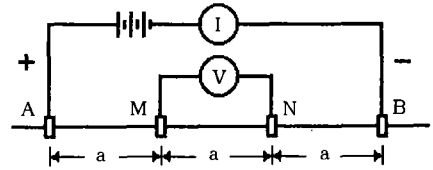
$$\rho = \frac{A}{L} R = KR = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (3)$$

$K$ 는 측정장치의 전극의 배열형태에 따라 영향을 받는 보정계수이다.  $K$ 값은 사전에 비저항값을 알고 있는 항온의 용액속에 측정장치를 넣고 비저항값을 측정함으로써 구할수 있다.

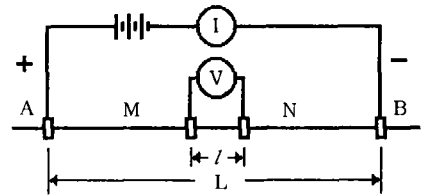
흙의 비저항은 크게 (1) 지반을 구성하고 있는 흙이나 암석의 전기적 성질, (2) 흙의 구조내에 함유하고 있는 간극수의 전기적 성질에 따라서 달라질 수 있다. 일반적으로 지반을 구성하고 있는 많은 흙이나 암석이 완전한 고체일 경우에는 절연체이지만, 대부분은 다공질체이므로 어느 정도는 전도성 간극수가 함유되어 있으며, 그 비저항 및 분극성은 흙이나 암석을 구성하고 있는 광물의 성분, 입자의 종류, 함유하고 있는 간극수의 전기전도도, 간극의 용적, 간극의 배치, 입자의 결합방향, 그리고 온도 및 압력 등의 요인에 따라서 변화한다. 특히 간극수의 경우에는 무기물질의 성분에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 금속광물의 비저항값은 낮고, 다른 광물은 높은 비저항값을 보인다. 또한 흙이나 암석은 구성광물의 종류, 구조, 풍화, 변질작용, 함수상태 및 지역적인 차이에 따라서 큰 비저항차를 나타낸다.<sup>12,17)</sup>

## 2. 비저항법

직류(DC) 비저항법은 인위적으로 지중으로 전류를 흐르게 하여 발생하는 저항을 측정하는데, 여기에는 전류를 주입시키는데 사용하는 두 개의 전류전극과 전위에 의해 발생하는 전위의 반응측정을 voltmeter로 측정하기 위한 두 개의 전위전극을 합하여 총 4개의 전극이 사용된다. 비저항은 전극의 모양과 전극들간의 거리, 그리고 주입한 전류와 측정된 전압에 의해 계산할 수 있다. DC 비저항법은 지하수자원의 탐사에



(a) Wenner electrode array



(b) Schlumberger electrode array

**Fig. 1. Wenner and Schlumberger electrode arrays**

1930년대부터 적용해 오고 있으며 근래에는 오염지반의 탐사에 이르기까지 다양하게 사용하고 있다. DC 비저항법은 Fig. 1과 같이 전류전극과 전위전극의 배치형태에 따라 구분되는데 1960년대 까지는 Wenner, Lee-Partitioning, 그리고 Schlumberger형태가 사용되어 왔으나 최근에는 Wenner방법과 Schlumberger방법이 많이 사용되고 있다.<sup>10)</sup> 따라서 본 연구에서는 시료의 전기비저항 측정을 위한 전극의 배열방법을 Wenner방법과 Schlumberger방법으로 선정하였다.

콘관입시험(CPT)법은 지반의 공학적인 성질을 분석하는데 사용되며, 관입되는 CPT에서는 지층의 연속적인 선단 지지력과 측면에서 마찰저항을 측정할 수 있는데, 여기에 Fig. 2와 같이 전기비저항을 측정할 수 있는 기능을 추가시키면 지반공학적인 성질 외에도 지구물리학적 탐사(geophysical investigation)도 동시에 수행이 가능하다. 따라서 지구물리학적 성질 하나만으로는 파악하기 어려운 성질도 CPT자료를 함께 검토하면 지반상태의 파악이 용이해진다. 이와 같은 방법을 지반의 오염원탐사에 적용시키면 적은 비용으로 신뢰성 있는 분석이 가능하다. 그러나 비저항법을 이용하였을 경우에는 이온을 띠는 성분

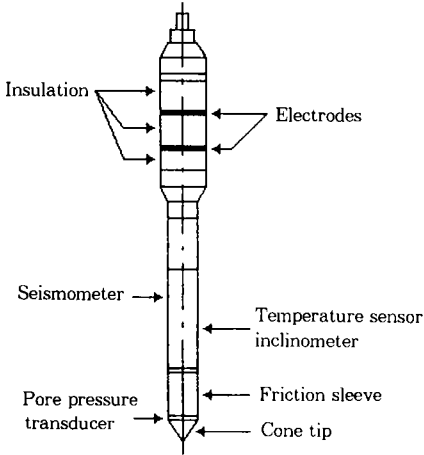


Fig. 2. Example of two ring electrode resistivity cone penetrometer(Woeller et al., 1991)

에만 적용된다는 한계점도 있다. 따라서 외국의 경우에는 비저항값외에, 온도, pH 측정장치와 지하수 샘플러 등의 장치도 함께 부착하여 그 효율을 넓히고 있다.<sup>11)</sup>

### III. 실험재료 및 방법

#### 1. 기초실험의 결과

비저항값의 변화로 지반오염의 탐사가 가능한가의 여부를 알아보기 위하여 액체상태와 토양에 대해서 전기비저항을 측정하는 기초실험을 실시하였다. 측정에 사용한 전기비저항탐사기는 Advanced Geosciences, Inc.의 "STING-R1"이다. 액체는 수돗물, NaCl 용액, 우유, BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene), 생활쓰레기 매립장 침출수, 한강물과 연못물을 대상으로 하였고 토양은 잔디가 덮인 지역에서 전기비저항을 측정하였다. 그 결과는 Table 1에 요약되어 있다.

수돗물의 경우는 증류수와 달리 비저항치가 측정되어서 수돗물에는 순수한 물분자외에 염소와 같은 이온성분들이 함유되어 있음을 알 수 있었다. 순수한 증류수에서는 전류가 흐르지 않았으나 증류수에 NaCl을 조금만 넣어도 전류가 흘

Table 1. Results of the preliminary test on the soil and various liquids

Item		Resistivity( $\Omega$ -m)	
		Wenner array	Schlumberger array
NaCl + Water(ppm)	10	4,605.75	5,287.59
	50	951.98	1,652.16
	100	453.57	1,313.84
Milk		437.51	1059.96
Water		1,416.76	2,168.82
River water		39.66	99.70
Pond water		51.29	78.65
Soil	Before test ( $w_n=17\%$ )	35.62	46.81
	Afer test ( $w_n=20\%$ )	39.83	50.34
Leachate(Kim-po)		54.59	88.69

렸다. 우유의 경우에도 비저항값이 측정되었는데, 우유는 구성성분이 많으며 이들은 대부분 콜로이드 상태로 존재한다. 일반적으로 콜로이드의 미립자들은 전기를 띠고 있으며 콜로이드의 종류에 따라 양전기 또는 음전기를 띠는데, 우유속의 기름입자같은 경우는 음전하를 띠고 있으며 또한 일정농도의 NaCl이 함유되어 있어서 전류가 흐른다.

일반적으로 토양 및 지하수의 오염성분 중 대표적인 BTEX와 같은 방향족 유기화합물(aromatic organic compounds)은 물에 잘 녹지 않으며 이온화되지 않으므로 전류가 통하지 않는다. 기초실험을 위하여 BTEX 각각의 성분을 증류수에 혼합시켜 전기비저항을 측정하고자 했으나 전류가 통하지 않아 측정이 불가능하였다. 김포 생활 쓰레기 매립장에서 채취한 침출수를 사용하여 전기비저항을 측정하였는데, 증류수에 소금을 혼합한 소금물과 수돗물에서 측정한 값들보다 훨씬 낮았다. 그 이유는 침출수내에 여러 가지의 이온성분이 많이 포함되어 있어 전류의 흐름이 용이한 것으로 생각된다. 한편 서울 덕섬부근의 한강물과 건국대학교 교내에 있는 연못물에 대하여 전기전도도와 전기비저항을 측정한 결과 이들은

모두 전류가 잘 흘러서 비저항 측정이 가능하였다. 잔디가 덮인 자연상태 토양의 표층을 대상으로 전기비저항을 측정한 후에 수돗물 약 2liter를 면적 약 360cm<sup>2</sup>의 실험구역에 부은 후에 2분 간격으로 10분간 측정해 보았다. 시간에 따라서 전기비저항이 약간 변화하였으나 변동범위는 크지 않았으나 수돗물을 부어서 토양내 함유수가 증가되고 전기비저항도 증가하였다. 이는 자연상태 토양보다 전기비저항값이 훨씬 높은 수돗물이 토양내 수분과 혼합하여 토양 전체적인 전기비저항값을 높였기 때문으로 판단된다. 이상의 기초실험에서 증류수에 비전도적인 단일성분을 용해시켰을 경우 전기비저항값의 측정은 불가능하였지만, 수돗물과 같이 여러 가지 성분이 혼재되어 있는 경우에는 비저항측정이 가능하였다. 일반적으로 지반을 구성하는 간극유체는 수돗물과 같이 여러 가지 성분들이 혼합된 상을 이루고 있으며, 이런 경우에 비저항법의 적용이 가능하다고 판단된다.

2. 실험 재료의 특성

흙의 간극유체의 성질에 따른 전기 비저항특성을 연구하기 위하여 지하수와 산업폐기물 매립장에서 발생하는 침출수를 농도를 달리하여 비저항값의 변화를 측정하였다. 실험에 사용된 시료는 입도가 균등한 모래(SAND), 화강암 풍화토(MASA) 그리고 사질토가 주성분이고 실트 성분을 약 8% 정도 함유한 산토(SAN-TO)이다.

각각의 흙에 대한 물리적 성질과 입도분포곡선은 Table 2와 Fig. 4와 같으며, 실험 대상 토양에 대해서 6종의 증류수에 대해 함유량을 조사하였으며, 그결과는 Table 3에 제시되어 있고 Cd와 Cu는 검출되지 않았다.

실험에 사용된 침출수는 산업폐기물 매립장의 침출수 원수를 PVC용기로 실험 장소로 운반하여 사용하였다. 각각의 성분에 대한 이화학적 특성을 분석한 결과는 Table 4에 제시하였다.

Table 2. Physical characteristics of soils used

Soil Type	Gs	#200 passing (%)	LL (%)	PI (%)	$\gamma_{d\_max}$ (gt/cm <sup>3</sup> )	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
MASA	2.68	0.66	-	N.P.	1.90	8.1	SP

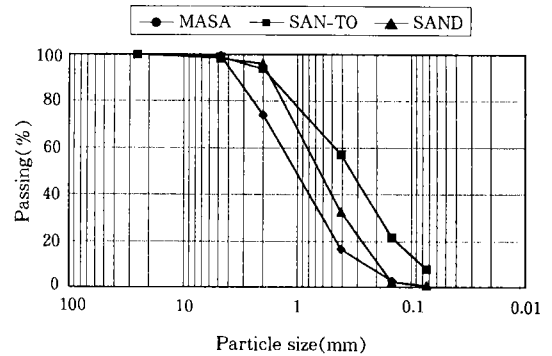


Fig. 3. Grain-size distribution

Table 3. Heavy metal concentrations in soils and leachate used

Item	Soils(ppm)			Leachate (mg/ℓ)	Environmental standard (ppm)	Typical resistivity (10 <sup>-8</sup> Ω·m)
	MASA	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 4. The physical and chemical characterization of leachate used**

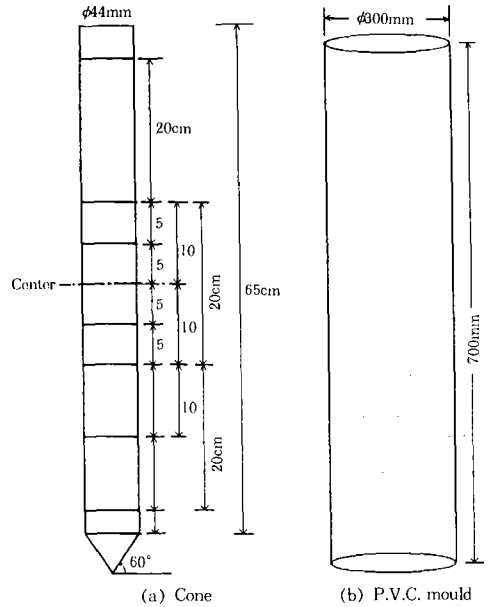
Item	Leachate	Unit
pH	8.76	—
EC	23.51	mS/cm
BOD	285	mg/ℓ
COD	820	"
TKN	131.6	"
TP	6.14	"
Cr	1.015	"
As	0.215	"
Cd	0.03	"
Pb	0.44	"
Cu	0.03	"
Hg	0.005	"

주)TKN : Total Kijeldahl Nitrogen

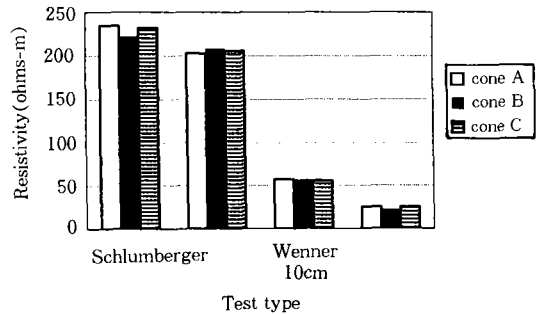
### 3. 실험방법

실내에서 현장지반과 같은 조건을 모사하기 위해서는 각각의 흙에 따라서 적절한 밀도와 함수비를 가질 수 있도록 조절해 주어야 한다. 그러나 사질토의 경우에 밀도와 함수비의 조절이 쉽지 않기 때문에 일정한 체적(49,480cm<sup>3</sup>)을 가진 몰드에 세가지 시료를 등간격으로 건조단위중량을 증가시키고, 각각의 건조단위중량에 대해서 함수비를 3단계로 증가시키면서 시료를 성형하였다. 즉, 하나의 건조단위중량에 대해서 3가지로 함수비를 달리하며 실험을 실시하였다. 시료 성형에 사용된 모형토조는 직경 30cm, 높이 70cm의 PVC관으로서 바닥면은 함수비의 변화를 방지하기 위하여 방수처리하였다. 모형관과 PVC몰드는 Fig. 5에 나타내었다.

그리고 전기비저항값 측정을 위해서 'STRING-R1'에 연결하여 사용할 수 있는 길이 60cm의 모조콘을 제작하였는데, 재질은 플라스틱체로서 절연이 되게 하였다. 비저항방식은 Wenner방법과 Schlumberger방법으로 측정하였으며, 모조콘에서는 Wenner방식으로 측정할 경우에 한번 성형한 시료를 교란하지 않고 외부에서 전극의 간



**Fig. 5. Specification of cone and P.V.C. mould**



**Fig. 6. Resistivity of groundwater**

격(Fig. 1(a)에서 'a')을 20cm, 10cm, 5cm로 조절하여 측정할 수 있도록 제작되었다. 실험에서는 3개의 모조콘을 제작하여 사용하였는데 모조콘들 사이에 비저항 측정시 발생할 수 있는 차이를 보정하기 위하여 실험에 사용된 지하수를 대상으로 보정실험을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 6에 제시되어 있는데, 그 차이가 미소하므로 보정하지 않고 측정값을 그대로 사용하기로 하였다.

#### IV. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 모래, 산토 그리고 화강암풍화토 세가지 사질토에 대해서 건조단위중량과 지하수에 침출수를 섞어서 오염농도를 변화시키면서 전기비저항값을 측정하였다. 측정된 결과값들에 대해서는 측정방식과 함수비의 변화, 오염농도의 변화에 따른 비저항값의 변화를 비교 검토하였다.

##### 1. 함수비 변화와 측정방식에 따른 비저항값의 변화

흙의 비저항값은 함수량이 미소하게 증가해도 비저항값은 현저하게 감소되며, 그 극한에서는 흙의 구성광물의 종류와 조성이 비저항값을 지배한다고 알려져 있다. 또한 건조한 상태의 흙이나 암석에서의 비저항값은 주로 광물의 양과 그의 전도성 광물에 영향을 받는다.<sup>12)</sup> 그리고 대부분의 경우 지반에서는 전류가 간극사이 액체의 전해에 의하여 전달되며 따라서 비저항은 흙입자의 구조보다는 간극율이나 함수비 그리고 수질에 의해 더 영향을 받는다고 알려져 있다.<sup>17)</sup> 본 연구

에서도 이와 같은 경향을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 우선 지하수만으로 함수비를 변화시키면서 Wenner의 전극간격 20cm, 10cm, 5cm와 Schlumberger 방식에 의한 비저항측정값의 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 그림은 시료들의 건조단위중량에 관계없이 측정방식에 따라서 측정된 비저항값만 나타내었다.

모래와 화강암풍화토의 경우 함수비의 증가에 따라서 비저항값은 감소하였다. 측정방식별로는 Wenner 20cm와 Schlumberger 방식의 결과가 비슷한 양상을 보였으며, Wenner 방식에서는 전극의 간격이 작아질수록 비저항값은 작아졌다.

그러나 산토의 경우에는 모래나 화강암풍화토보다 비저항값은 작게 측정되었으나 측정방식 모두에서 함수비에 따른 비저항값의 변화가 일정한 경향을 보이고 있지 않으며, 자료의 분산의 정도도 매우 심하게 나타났다. 이 원인은 Jackson (1975)에 의하면 세립분이 없는 모래나 자갈의 경우에는 비저항값이 주로 간극유체의 전도도에 지배되지만 점성토나 점토광물을 함유하고 있는 암석의 비저항값은 간극유체와 입자표면의 전기

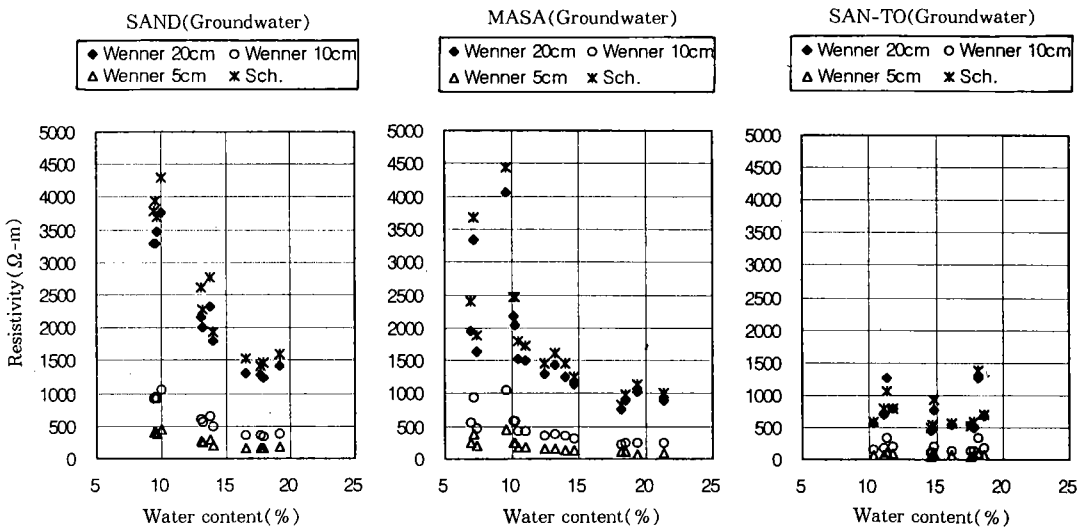


Fig. 7. Resistivity according to the test methods (Leachate 0%)

적 성질에 많은 영향을 받는다고 알려져 있다.<sup>7)</sup> 따라서 산토에 포함되었는 세립분의 영향으로 모래와 화강암풍화토보다 비저항값이 작았으며, 경향도 다르게 나타났다고 판단된다.

또한 함수비가 높은 경우에 측정된 비저항값의 분산정도는 작았으나 함수비가 작은 경우에는 Wenner 방식에서 측정된 비저항값의 분산치가 작게 나타나고 있으며, Wenner 20cm와 Schlumberger 방식이 비슷한 비저항값을 나타내는 것으로 나타났다.

## 2. 간극유체의 오염정도에 따른 전기비저항값의 변화

지반오염을 모사하기 위하여 지하수에 산업폐기물 매립장의 침출수를 5%, 10%, 30%로 섞어서 오염농도를 변화시키면서 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 8~10에 제시하였다.

지하수에 작은 양(5%)의 침출수를 섞어서 함수비를 조절하여 실험하였다. 모래와 화강암풍화토는 비저항값이 약 1/10정도로 급격히 감소되었으며, 산토도 약 1/2정도 비저항값이 감소되었다(Fig. 8참조). 즉 오염되지 않은 지하수에 소

량의 침출수만 섞어도 흙의 비저항값은 크게 감소함을 나타내고 있다. 그러나 산토의 경우에는 측정방식에 따라서 함수비의 증가에 따라서 비저항값이 감소하는 경향을 보이기 시작하였으며, 측정된 비저항값의 분산의 정도도 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 앞의 결과와 비교할 때, 세립분의 전기전도특성에 영향을 받았던 산토가 지하수보다는 전기전도도가 큰 침출수가 첨가되므로서 간극유체의 비저항값에 크게 영향을 받았음을 알 수 있다.

이번에는 지하수에 침출수를 조금 더 넣어 10%로 섞어서 오염농도를 증가시켰을 때 침출수 농도 5%인 경우와 비저항값의 변화를 비교하여 보았다(Fig. 9참조). 모래와 화강암풍화토는 농도증가에 비례해서 약간씩 비저항값이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 산토의 경우에는 오염농도의 증가에도 불구하고 비저항값의 감소는 나타나지 않았다. 이 역시 세립분의 영향으로 판단되며, 오염농도 증가에 따른 비저항값 변화에 세립분이 영향을 줄을 알 수 있었다.

이번에는 침출수를 초기 5%의 6배인 30%로 섞어서 오염농도를 증가하여 실험하여 보았다

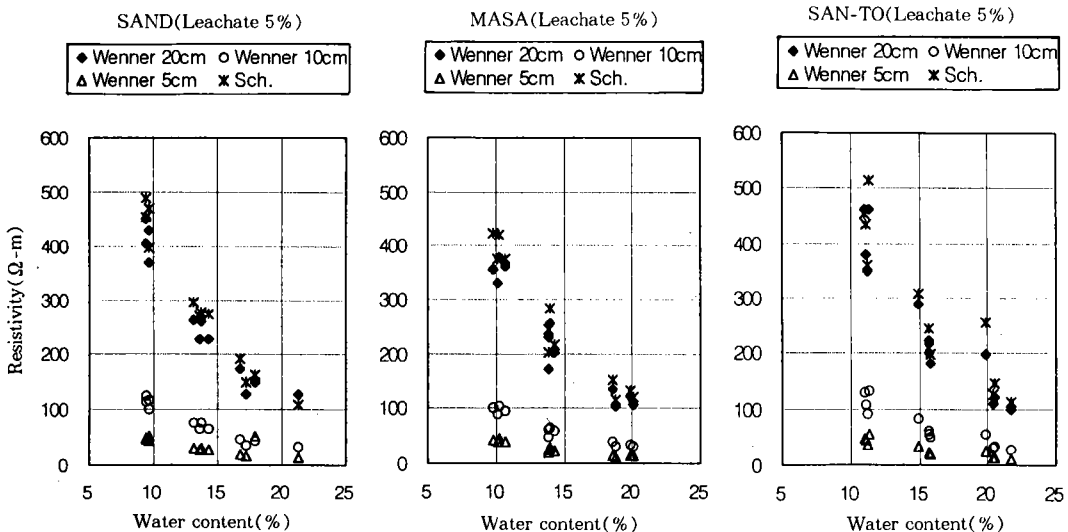


Fig. 8. The variation of resistivity according to the water content and the concentration of leachate 5%



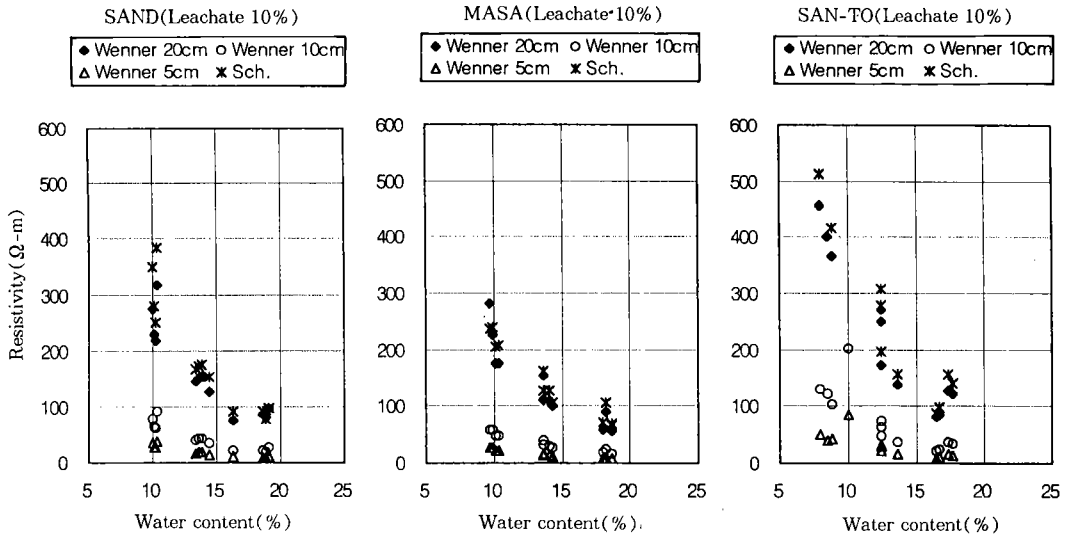


Fig. 9. The variation of resistivity according to the water content and the concentration of leachate 10%

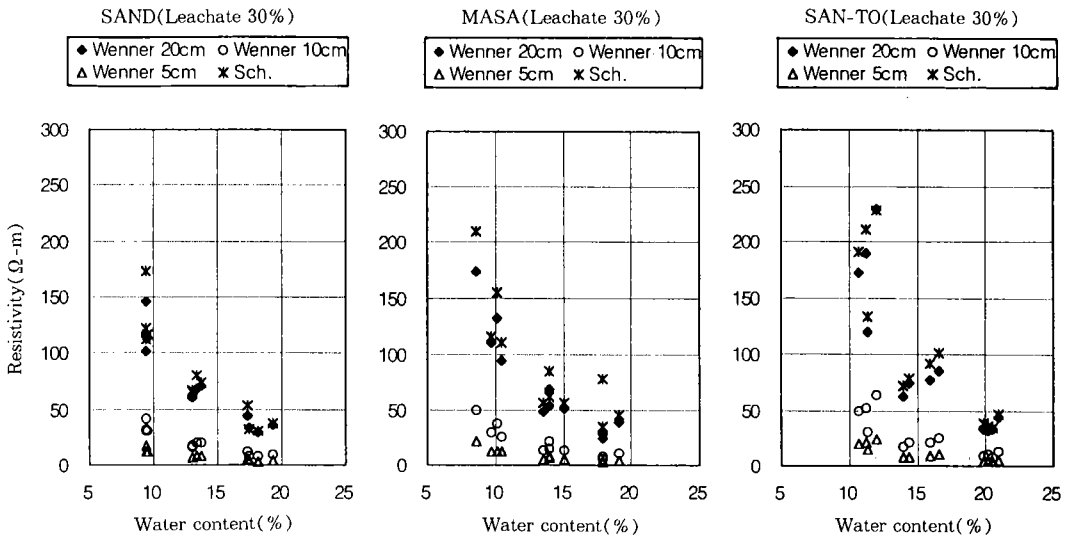


Fig. 10. The variation of resistivity according to the water content and the concentration of leachate 30%

(Fig. 10. 참조). 농염농도가 증가됨에 따라서 3 가지 시료에서 측정된 비저항값은 모두에서 이전의 침출수 농도 10%에 비해서 약 1/2정도로 감소되었다. 하지만 이는 오염되지 않았던 지하수에 처음 침출수 5%가 희석되었을 때의 비저항 감소치 1/10에 비하면 급격히 큰 변화는 아니었다.

한편 산토의 경우에는 비저항값이 침출수 10%가 희석되었을 경우보다는 약 1/2정도 감소되었지만 모래나 화강암풍화토의 비저항값보다 크게 측정되었다. 이 역시 산토에 포함되어 있는 세립분의 영향으로 판단된다. 따라서 침출수 농도 5%, 10%의 결과를 함께 고려하면 세립분이 포함된

산토의 경우에서 오염되지 않은 경우에는 순수사질토보다 비저항값은 낮지만, 오염성분이 들어가서 발생하는 비저항값의 감소는 순수사질토와 비교해서 급격한 변화는 발생하지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 이 원인은 큰 토립자사이의 간극을 작은 세립자들이 메우고 있어 상대적으로 간극의 대부분을 오염된 간극유체로 채우고 있는 순수사질토에 비해서 전기전도도가 떨어지기 때문이라고 판단된다.

## V. 결 론

일반 사질토 지반이 침출수로 오염되어 있는 경우에 오염지반의 전기비저항값의 변화양상을 파악하기 위하여 실내실험을 실시하였다. 비저항값 측정방식은 현재 외국에서 많이 활용되고 있는 CPT를 이용한 전기비저항 측정법이었으며, 이를 위하여 실내에서 현장조건을 모사하여 큰 관입방식에 의한 비저항측정을 실시하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기초실험 결과에 의하면 일반적으로 무기물 이온을 탐지하는데 많이 사용되는 전기비저항방법은 유기물이라도 이온성분을 띤 경우에 전기비저항을 측정할 수 있음을 확인하였다. 김포 매립장 침출수의 경우는 매립장내 고행폐기물이 호기성·혐기성분해과정을 거치면서 유기산을 포함한 여러 가지 이온성분을 띠게되고 액체상태의 폐기물로 유입된 이온도 혼합되어 이온성분이 충분히 함유되어서 전기비저항의 측정이 가능하였다. 따라서 비저항방법을 이용한 침출수의 탐지가 가능하다고 판단된다.

2. 측정방식에 따른 비저항값은 Schlumberger 방식과 Wenner 방식중에는 전극간격 20cm가 비슷한 비저항값을 나타내었으며, Wenner 방식에서는 전극의 간격이 작을수록 비저항값이 작게 측정되었다. 또한 함수비가 작은 경우 Wenner 방식이 Schlumberger 방식보다는 작은 분산치를 가지는 비저항값을 제공하고, 함수비가 높아 거

의 포화된 상태가 되면 두가지 측정방식이 모두 비슷한 비저항값을 나타내는 것으로 나타났다.

3. 모래와 화강암풍화토는 간극수가 소량(5%)의 침출수로 오염되어도 비저항값이 급격하게 감소되었다. 또한 오염농도가 증가됨에 따라 비저항값의 감소경향이 뚜렷하였다. 즉, 오염되지 않은 지반에 이온을 띤 오염성분(침출수)이 들어가면 아주 작은 양이라고 하여도 흙의 비저항값의 변화 경향이 급격하고 또한 농도가 증가함에 따라 비례하여 비저항값이 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 이와 같이 침출수성분 함유여부에 따라 전기비저항값이 현격히 낮아지는 성질은 실제 침출수 성분의 탐사에 전기비저항탐사법의 적용 가능성을 강력히 시사하는 것이다.

4. 산토의 경우에는 사질토중에 포함되어 있는 세립토의 영향으로 모래와 화강암풍화토에 비해서 오염되지 않은 경우(지하수만을 사용한 경우)의 비저항값은 작았으나, 오염되었을때 비저항값의 감소는 모래와 화강암풍화토와 비교했을 때 급격하지는 않았다. 따라서 세립분의 존재는 흙의 비저항값 변화에 영향을 줄수 있다는 사실을 알 수 있었다.

5. 동일한 오염농도에서 시료에 따라서 비저항값에 차이를 보였다. 이는 시료를 구성하고 있는 광물의 전기적 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다.

이상의 내용은 여러 가지 성분이 혼재되어 있는 침출수를 이용하고, 흙샘플도 입자크기만으로 보면 주로 사질토(sand)이지만 균질한 재료는 아니었다. 본 연구의 결과는 여러 가지 영향인자들이 복합적으로 반응해서 나타난 결과일 것이다. 또한 오염성분이나 정량적인 분석을 위해서는 본 연구의 자료만으로는 부족하므로 앞으로 실제 현장에서 이용하기 위해서는 흙의 구성광물의 성분에 대해 오염성분이 미치는 영향을 파악할 수 있어야 한다. 따라서 앞으로 좀 더 활발한 실험과 자료조사를 통하여 많은 자료를 축적해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김재정 역(1985), 토양물리학, 대한교과서주식회사, pp. 285~321.
2. 민병덕, 서정희, 권병두(1987), 응용지구물리학, 도서출판 우성, pp. 252~309.
3. 과학기술처(1996), 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구.
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.(1996), Fundamental Approach to soil characterization with Applications to In Situ Testing and Property Evaluation, Electromagnetic Wave Propagation and Method, pp. 53~59.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Das, B. M.(1995), Principles of Foundation Engineering 3/e, PWS.
10. Lambe, T. W. & Withman, R. V.(1979), Soil Mechanics SI version, Wiley.
11. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.(1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional.
12. Mitchell, J. K.(1993), Fundamentals of Soil Behavior 2/e, John Wiley & Sons.
13. Yong, R. N., Mohamed, A. M. O. & Warkentin, B. P.(1992), Principles of Contaminant Transport in Soils, Elsevier.
14. 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.
15. AASHTO(1988), Manual on Subsurface Investigation, pp. 92~93.
16. 土質工學會(1992), 技術手帳2 - 實務に役立つ土質工學用語の解説.
17. 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.