

## 수은과 비소로 오염된 시료의 측정주파수와 농도 변화에 따른 전기적 특성

### Electrical Characteristics against Frequency and Concentration of Contaminated Soils by Mercury and Arsenic

손영환\* · 봉태호\*\*† · 장병욱\*\*\*

Son, Young Hwan \* · Bong, Tae Ho \*\*† · Chang, Pyoung Wuck \*\*\*

#### Abstract

In general, ground pollution can be classified with soil pollution and underground water pollution. And ground pollution contaminates the land with garbage dumps and other harmful waste products as heavy metals that can also eventually enter our water supply. This study was conducted to define a characteristics of the electrical resistivity and the permittivity of weathered soil that was contaminated with heavy metals as Mercury and Arsenic. It is not easy whether contamination of soil as subsurface contamination is decided or not and at an early stage especially do that. Therefore the electrical resistivity and the permittivity were used to make up for this defects. These methods are more economical and more effective than the existing methods. And variation of the electrical resistivity and the permittivity values were found against the change of concentration of Mercury and Arsenic aqueous solutions and measuring frequency. These analyzed results indicate that the electrical resistivity and the permittivity tend to decrease against increasing measuring frequency. The electrical resistivity and the permittivity are also found to show the function of frequency.

*Keywords : Electrical resistivity, Permittivity, Frequency, Mercury, Arsenic*

## 1. 서 론

지반오염은 크게 토양오염과 지하수에 대한 오염으로 생각할 수 있다. 토양오염은 지하수와 지표수를 오염시키는 직접적인 원인이 되며, 토양의 기능을 상

실시킨다.

또한 토양의 유해물질을 적절히 처리하는 것은 쉽지 않고 처리비용이 엄청나기 때문에 토양오염은 거의 영구적인 환경오염 문제가 되고 있다(Harrison and Wilson, 1985). 한편, 납, 카드뮴, 수은 그리고 비소는 인간의 건강을 위협하는 주요한 중금속이며, 이러한 중금속에 대한 연구는 광범위하게 연구되고 있다. WHO와 같은 국제기구에서는 정기적으로 이들이 인간의 건강에 미치는 영향에 대해 조사하고 있다(Lars Jarup, 2003). 이와 같이 납이나 카드뮴에 비해 농경지에서 측정되는 빈도나 오염정도가 낮으

\* 위스콘신주립대학교 토목및환경공학과 연구원

\*\* 서울대학교 지역시스템공학과 박사과정

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: bth21@snu.ac.kr

2008년 5월 19일 투고

2008년 11월 10일 심사완료

2008년 11월 10일 게재확정

나 수은과 비소도 인간에게 치명적인 해를 입힐 수 있다.

수은의 경우는 온도계, 압력계 등의 측정기나 제어기에 이용되며 플라스틱 생산의 촉매로 이용되기도 한다. 공업용 수은에 비하면 소비량이 크지는 않으나 씨앗 등의 소독제로서 농업에서 사용되고 있으며, 석탄과 석유의 연소에 의해 수은이 환경으로 방출되기도 한다. 또한 비소화합물은 독성이 높아 살균제, 제초제, 살충제, 살서제 등의 여러 가지 농약에 포함되어 있다.

이러한 무색, 무취의 수은이나 비소로 토양이 오염된 경우 시각적인 오염여부의 판단이 어려울 뿐 아니라 초기에 오염 여부를 판정하기가 더욱 어렵다. 그래서 오염이 상당히 많이 진행된 이후에 인지할 수 있고, 이때는 큰 문제를 일으키기도 한다. 그러므로 오염여부의 조기진단과 파악은 매우 중요하다고 볼 수 있다.

이에 본 연구에서는 수은과 비소로 오염된 토양의 오염여부와 정도를 판단하기 위하여 전기적 특성을 이용하였으며, 특히 측정시 적용되는 주파수와 오염 농도의 변화에 따라 나타나는 측정값의 변화와 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 전기비저항의 측정값에 대한 신뢰를 높이기 위해 전기비저항 값의 측정과 더불어 유전상수 값을 측정하였다.

## II. 문헌고찰

흙을 통한 전기전류의 흐름은 용액과 흙 입자를 통한 경로, 접촉하고 있는 흙 입자를 통한 경로, 용액을 통한 경로(Smith and Arulanandan, 1981; Mitchell 1993)로 나눌 수 있으며, 습윤 상태 입자의 전기전도도는 건조된 흙 입자 자체의 전기전도도보다 높기 때문에 습윤 상태로 변함에 따라 전기비저항은 감소하게 된다. 윤 등(2002)은 습윤상태의 흙에서 전도는 연결된 간극유체 안에서 발생하며 매우 큰 전도성을 가지며, 간극유체는 흙에서 발생하는 전도의 지배적인 경로라고 하였다.

또한, 흙에서의 전기비저항은 많은 인자들에 의해 영향을 받게 되는데 Yoon 등(2001), Keller 등(1966),

Parkhomenko (1967), Arulanandan 등(1988), Ward (1990)와 Thevanayagam (1993)는 간극률, 간극유체의 전기비저항, 흙의 구성성분, 포화도, 입자모양과 방향성, 간극의 구조에 영향을 받는다고 하였으며, Heigold 등(1979), Mazac 등(1990)과 Abu-hassanein 등(1996)은 투수계수와 전기비저항과의 관계를 검토한 바 있다. Archie (1942)는 포화된 흙의 전기비저항( $\rho$ )과 그 흙에서의 간극유체의 전기비저항( $\rho_w$ )의 관계는 다음 식(1)과 같다고 하였으며, Archie's Law로 알려져 있다.

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (1)$$

여기서,  $n$ : 간극율,  $a, m$ : 흙이나 암석에 따른 계수 (Parkhomenko, 1967)

위 식에서 포화된 흙은 간극율, 간극유체, 간극의 구조나 흙의 특성에 따라 전기비저항이 달라짐을 알 수 있다.

한편, 정전용량은 매질에 전위차가 존재할 때, 전기적으로 분리된 전하를 저장하려는 시스템의 특성으로 정의하고 있다(ASTM D150, 1994).

Fam 등(1995)은 전극판에 충전되는 전하량은 진공상태에서 충전된 전하량  $Q_0$  외에 물질의 표면에 형성되는 전하량과 동일한 크기인  $Q_a$ 만큼 증가하게 된다고 하였으며,

Keller 등(1966)은 자유공간에서의 유전율에 대한 특정 매질의 유전율의 비를 사용한다고 하였으며, 이를 물질의 유전상수라고 하며,  $K'$ 로 표현하였다.

$$K' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = \frac{C_m}{C_0} \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon'$ : 물질의 유전율[F/m]

$\epsilon_0$ : 진공에서의 유전율( $=8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

$C_0$ : 진공상태에서의 정전용량

Francisca 등(2003)과 Santamarina(2001)는 극초단파의 주파수에서 모래와 점토에 대한 유전상수 측정을 실시한 바 있으며, Selig 등(1975)은 대부분의 흙은 낮은 유전상수를 나타내며 물은 이보다 훨씬 높은 유전상수의 값을 갖는다고 하였다. 그러나 온도의 영향은 주파수나 물의 영향에 비해 작은 편이므

로 상온에서 수행된 실험에 대해서는 그 영향이 크지 않은 것으로 알려져 있다.

### III. 재료 및 실험방법

#### 1. 재료

본 연구에 사용한 경기도 화성지역 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같으며, 채취 위치별로 각각 H-1, H-2, H-3로 명기하였다. H-1~H-3 시료는 동일한 지역의 인접 위치에서 채취된 교란시료이며, 채취심도는 1.0~3.0m이다.

연구에 적용한 중금속은 수은(Hg)과 비소(As)이며 1000 $\mu$ g/mL의 농도를 가진 표준용액(Kanto Chemical Co. Inc., Japan)을 사용하였다. 중금속 표준용액은 일정 농도에 맞게 증류수와 혼합하여 사용하였으며 실험에 사용된 중금속의 특성을 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Physical properties of soils

Soil	Specific Gravity(Gs)	% Gravel	% Sand	% Fines	USCS	LL(%)	PL(%)
H-1	2.75	0	87.1	12.9	SM	NP	NP
H-2	2.73	0	76.0	24.0	SM	NP	NP
H-3	2.72	0	82.4	17.6	SM	NP	NP

Table 2 Specification of Mercury and Arsenic

Items	Mercury	Arsenic
원소기호	Hg	As
원자번호	80	33
원자량	200.59	74.92
녹는점(°C)	-38.86	814.0
끓는점(°C)	356.66	610.0
비중	13.56(15°C)	5.73

#### 2. 실험방법

교란된 풍화토 시료와 수은과 비소 용액을 혼합하여 혼합되는 중금속의 종류에 따라 측정주파수별, 농도별로 전기비저항 및 유전상수 측정값의 변화를 고찰하였다. 용액과 혼합 전에 시료에 적용된 함수비는

15%로 동일하게 적용하였다. 일반적으로 시료의 함수비가 변하면 전기적 특성도 변하게 되므로 이를 배제하기 위하여 모든 시료에 동일한 함수비를 적용하였다. 측정 주파수는 100Hz에서 10MHz 범위에서 이루어졌다. 측정시 사용된 HP4285A LCR meter는 75kHz~30MHz 주파수 범위에 대해서 측정이 가능하며, Agilent 4263B LCR meter는 100Hz~100kHz 범위의 주파수에서 측정이 가능하다. 측정을 위한 시료의 성형은 가로 15cm, 세로 2cm, 높이 20cm의 아크릴 몰드를 사용하였으며, 몰드 및 측정개요도는 Fig. 1과 같다. 또한, 동일한 실험조건을 위하여 시료는 15cm 높이까지 채워서 실험하였으며, 저항값 및 정전용량을 측정하기 위한 장비와 mold의 전극은 Agilent 16089A Kelvin clip leads를 사용하였다. 즉, 몰드의 전극을 통하여 측정된 저항값 및 정전용량은 LCR meter를 통해 확인할 수 있으며, 이를 이용하여 전기비저항 및 유전상수를 산출하였다.

본 연구에서는 측정시 간극수의 이온에 의한 전기비저항 값의 영향을 배제하기 위하여 모든 실험에

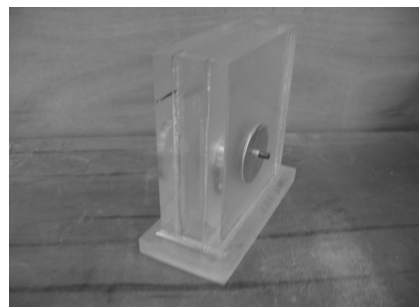
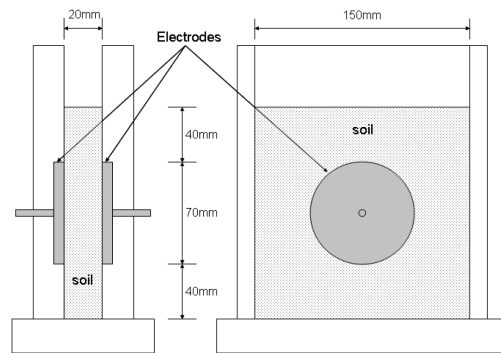


Fig. 1 아크릴 몰드 개요도 및 형상

대하여 증류수를 사용하였다. 또한 주파수에 의한 분극현상이 발생하지 않게 되는 최소 주파수인 한계주파수를 확인하여 100kHz 이상의 주파수 범위에서 측정된 결과들을 이용하여 유전상수 측정값들을 분석하였다. 그리고 수은과 비소 용액이 시료와 혼합된 후의 전기적 특성을 정확하게 파악하기 위해 이들 용액에 대한 전기비저항과 유전상수의 변화를 먼저 확인하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 수은, 비소 용액에 대한 전기적 특성

수은, 비소용액을 증류수와 혼합하여 5, 20, 30mg/L로 희석시킨 각각의 용액에 대한 전기비저항 및 유전상수의 측정결과는 Table 3과 같다.

수은 용액에 대한 전기비저항 측정값은 용액의 농도가 높아질수록 감소하는 경향을 보였다. 그러나 주파수에 따른 측정값의 변화는 크지 않았다. 단, 5MHz 이상의 주파수에서 측정된 전기비저항 측정값은 약

간 감소하는 경향을 보였다. 유전상수의 측정값 역시 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 10MHz 이상의 주파수에서는 증가하는 경향을 보였다. Santamarina(2001)는 전해질에 존재하는 수화한 이온들을 포함한 물은 자유수보다 전체 분극화에 미치는 영향이 더 작기 때문에 용액의 증금속 농도가 높아질수록 유전상수는 더 작아진다고 하였다.

비소의 경우, 전기비저항은 농도가 높아질수록 감소하는 경향을 보였으나 수은에 비해 상당히 큰 측정값을 보였으며, 10MHz 이상의 주파수에서는 측정이 불가하였다. 또한, 유전상수는 농도와 주파수에 관계없이 82~83 정도의 일정한 값을 보였다.

이상의 결과에서와 같이 비소의 유전상수 값을 제외하면, 용액의 농도가 증가함에 따라 전기비저항 및 유전상수의 측정값은 감소하는 경향을 보였으며, 용액의 농도가 측정값에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그러나 동일 농도에서 주파수에 따른 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.

##### 2. 측정주파수와 농도에 따른 오염 시료의 전기적 특성

측정 주파수 변화에 따른 농도별 전기비저항 값과 유전상수를 구한 후 추세선을 이용하여 회귀방정식을 구하였다. 이를 Fig. 2에 도시하고, Table 4에 정리하였다.

Fig. 2에서 측정주파수가 증가할수록 전기비저항 값은 감소하는 경향이 나타나고 있으며, 모든 시료에서 감소경향은 거의 유사하게 나타났다. 또한 농도에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 특히, 20mg/L 이상의 상대적으로 높은 농도에서 더욱 뚜렷한 경향을 보여주었다. 높은 농도에서 나타나는 측정값의 감소는 이온들의 이동에 의해 더 많은 전기 전도가 발생했기 때문으로 판단된다.

유전상수 측정값도 측정주파수가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 모든 시료에서 유사한 경향을 보였다. 그러나 전기비저항의 결과와 달리 농도가 증가할수록 측정값이 증가하는 현상이 나타났다. 특히, 상대적으로 낮은 100~500 kHz의 주파수에서 이러한 현상이 잘 나타났는데, 이는 간극유체나 공기 흡

Table 3 Values of electrical resistivity and permittivity of heavy metal solution

Metal	Frequency	Electrical resistivity( $\Omega \cdot m$ )			Permittivity		
		5mg/L	20mg/L	30mg/L	5mg/L	20mg/L	30mg/L
Mercury	100Hz	61.40	11.75	7.46	-	-	-
	1kHz	60.56	11.74	7.45	-	-	-
	10kHz	60.28	11.74	7.44	-	-	-
	100kHz	60.25	11.74	7.45	85.56	59.90	18.80
	500kHz	60.25	11.71	7.45	83.62	58.48	12.64
	1MHz	60.12	11.24	7.45	83.42	58.37	12.50
	5.0MHz	56.59	9.51	7.32	83.08	56.49	10.57
	10.0MHz	97.30	9.51	6.83	102.23	87.27	43.86
Arsenic	100Hz	425.04	134.63	91.06	-	-	-
	1kHz	422.92	133.05	89.60	-	-	-
	10kHz	422.15	132.36	89.16	-	-	-
	100kHz	421.96	132.27	89.00	82.66	82.52	83.26
	500kHz	421.38	132.17	89.00	82.47	82.28	81.92
	1MHz	426.00	129.01	88.89	82.69	82.28	81.89
	5.0MHz	423.12	126.47	84.97	83.28	83.10	82.79
	10.0MHz	-	-	-	97.69	98.23	100.29

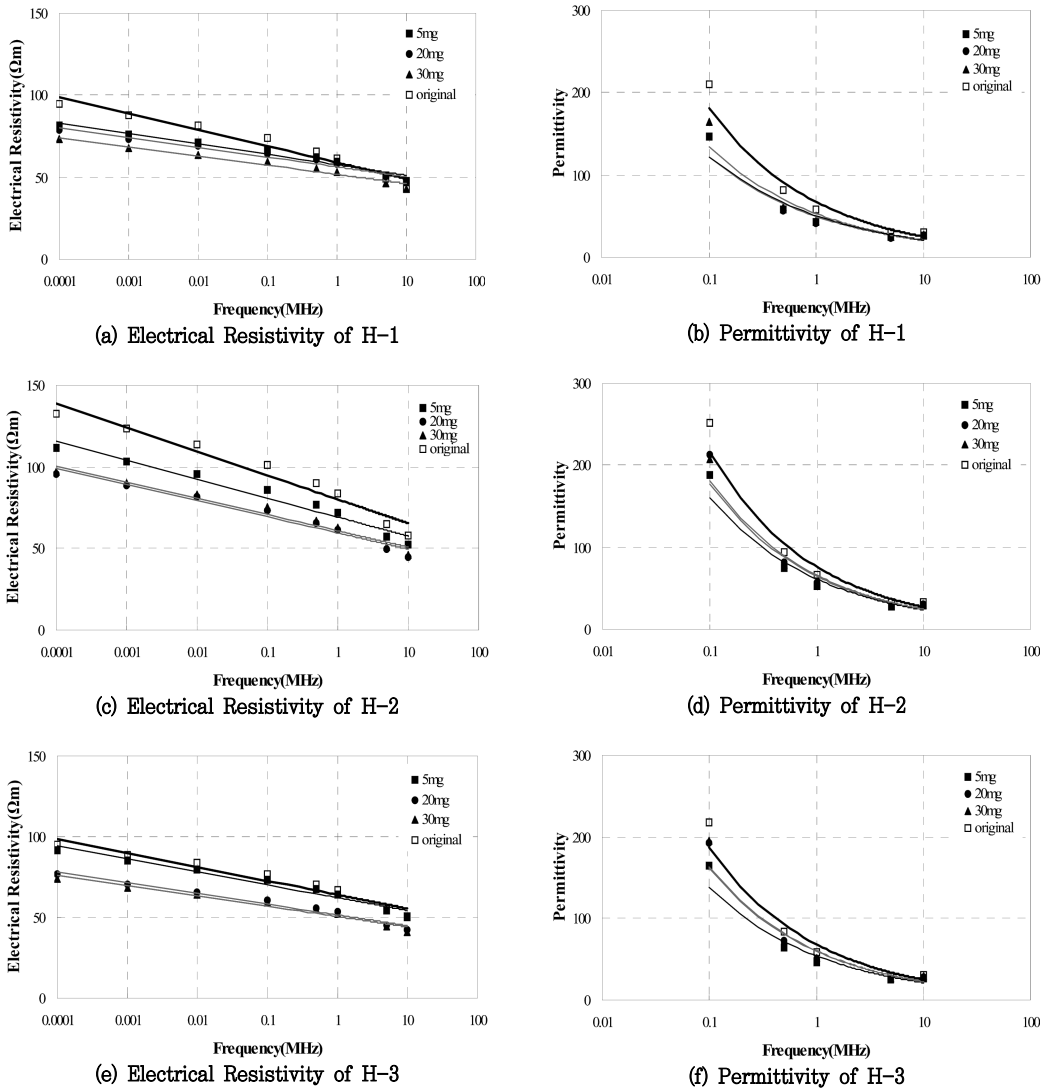


Fig. 2 Relationship between Electrical Resistivity, Permittivity, and Frequency for soils(H-1~H-3) mixed with different concentration of Hg aqueous solution

은 흙 입자사이의 상호작용에 의하여 계면에 이온 요소들이 축적되어 나타나는 공간전하분극이 낮은 주파수대에서 영향이 커지기 때문에 생기는 현상으로 판단된다.

또한, Table 4에서와 같이 전기비저항과 유전상수의 측정값은 주파수에 관한 로그와 거듭제곱의 함수로 각각 표현할 수 있었다.

$$\rho = \alpha \cdot \ln(f) + \beta \quad (3)$$

$$K' = \gamma \cdot f^\delta \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  : 계수

구해진 식을 이용하여 측정주파수별 각 농도에서의 전기비저항과 유전상수의 값을 구할 수 있으며, 측정값의 차이를 확인할 수 있다.

이후 비소로 오염된 시료에 대해서 동일한 조건으로 실험을 실시하였다.

각각의 실험결과에 대해서 측정 주파수 변화에 따

Table 4 Regressive equations of Electrical Resistivity &amp; Permittivity vs. Frequency for soils mixed with different concentration of Hg aqueous solution

Soils	Concent-ration (mg/L)	Electrical Resistivity( $\rho$ )		Permittivity( $K'$ )	
		Regressive Equation	$R^2$	Regressive Equation	$R^2$
H-1	0	$\rho = -4.32 \cdot \ln(f) + 58.97$	0.9477	$K' = 67.32 \cdot f^{-0.429}$	0.9562
	5	$\rho = -2.78 \cdot \ln(f) + 57.67$	0.9622	$K' = 50.76 \cdot f^{-0.382}$	0.9305
	20	$\rho = -2.61 \cdot \ln(f) + 56.33$	0.9612	$K' = 49.82 \cdot f^{-0.386}$	0.9300
	30	$\rho = -2.45 \cdot \ln(f) + 51.72$	0.9662	$K' = 53.27 \cdot f^{-0.402}$	0.9284
H-2	0	$\rho = -6.37 \cdot \ln(f) + 80.14$	0.9556	$K' = 76.33 \cdot f^{-0.451}$	0.9605
	5	$\rho = -5.07 \cdot \ln(f) + 69.22$	0.9593	$K' = 61.36 \cdot f^{-0.418}$	0.9554
	20	$\rho = -4.31 \cdot \ln(f) + 59.47$	0.9662	$K' = 66.39 \cdot f^{-0.437}$	0.9560
	30	$\rho = -4.33 \cdot \ln(f) + 60.83$	0.9635	$K' = 64.68 \cdot f^{-0.436}$	0.9550
H-3	0	$\rho = -3.75 \cdot \ln(f) + 64.07$	0.9461	$K' = 68.35 \cdot f^{-0.437}$	0.9583
	5	$\rho = -3.45 \cdot \ln(f) + 62.24$	0.9655	$K' = 54.17 \cdot f^{-0.406}$	0.9409
	20	$\rho = -2.89 \cdot \ln(f) + 51.61$	0.9697	$K' = 60.03 \cdot f^{-0.429}$	0.9425
	30	$\rho = -2.75 \cdot \ln(f) + 50.48$	0.9660	$K' = 60.60 \cdot f^{-0.431}$	0.9431

\*.  $f$  : Frequency (MHz)

른 농도별 전기비저항 값과 유전상수를 구한 후 추세를 이용하여 회귀방정식을 구하였으며, 이를 Fig. 3에 도시하였다. 그림에 명기된 회귀방정식과 이에 대한 상관도  $R^2$ 의 값은 오염되지 않은 시료(original), 5mg/L, 20mg/L, 30mg/L의 농도를 가진 비소용액과 혼합된 시료에 대한 결과 순으로 명기하였다.

비소용액 혼합시료의 결과에서도 측정주파수와 농도가 증가함에 따라 전기비저항은 감소하고 유전상수의 측정값은 증가하는 경향을 보여주었다. 그리고 비소 용액의 전기비저항 값은 다른 중금속 용액의 측정값보다 크게 나왔으나, 시료와 혼합시 수는 혼합시료와 크게 차이가 없었다. 또한, 전기비저항과 유전상수의 측정값은 주파수에 관한 로그함수와 거듭제곱의 함수로 각각 표현할 수 있었다.

### 3. 수은과 비소로 오염된 시료의 전기적 특성 비교

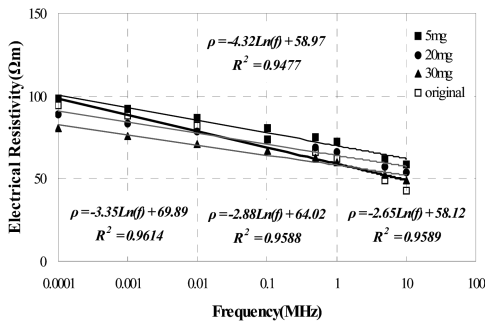
실험에 적용된 3 종류의 시료에 대해서 측정주파수와 농도가 증가함에 따라 전기비저항은 감소하는 경향이 나타났으며, 이러한 경향성은 두 중금속에서 모두 유사하게 나타나 주파수에 관한 함수로 표현할 수 있었다. 또한, 유전상수의 경우도 주파수에 관한

함수로 표현할 수 있었다. 그러므로 각 시료에서 구해진 측정값을 평균하여 각 농도별 측정값을 기준으로 수은과 비소로 오염된 시료를 비교해 보았다. Fig. 4에 측정값과 추세를 도시하였고, 회귀방정식은 Table 5에 정리하였다.

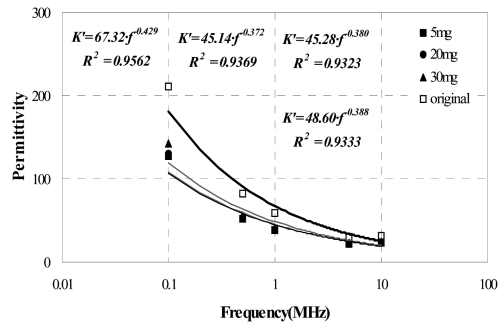
상기 결과에서 농도가 증가할수록 전기비저항의 측정값은 공히 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 수은과 혼합된 시료의 측정값이 비소와 혼합된 시료에 비해 모든 농도에서 약간 큰 값을 보였다. 유전상수는 공히 약간 증가하는 경향을 보였으며, 비소와 혼합된 시료의 측정값이 모든 농도에서 약간 큰 값을 보였다. 특히, 비소용액의 경우 동일한 농도와 주파수에서 측정한 전기비저항 값이 수은에 비해 약 7~12배의 큰 값을 보였으나 시료와 혼합되면서 수은과 혼합된 시료에 비해 약간 작은 값을 나타내는 특성을 보였다. 또한 일정한 유전상수 값을 보였던 용액의 경우와 달리 시료와 혼합시 약간 증가하는 경향을 보였으며, 수은이 혼합된 시료와 거의 유사한 거동을 보였다.

상기 결과와 같이 전기비저항과 관련된 계수  $\alpha$ 의 절대값과  $\beta$  값은 오염되지 않은 시료에 비해, 오염 농도가 증가하면서 감소하는 경향을 보였다.

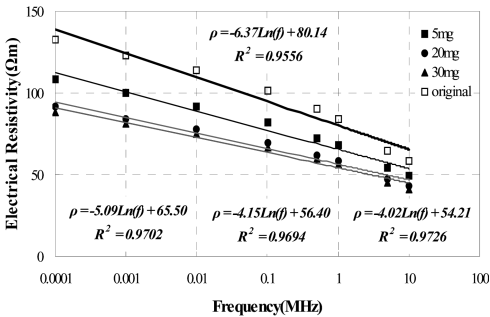
유전상수와 관련된 계수  $\gamma$  값과  $\delta$ 의 절대값은 오



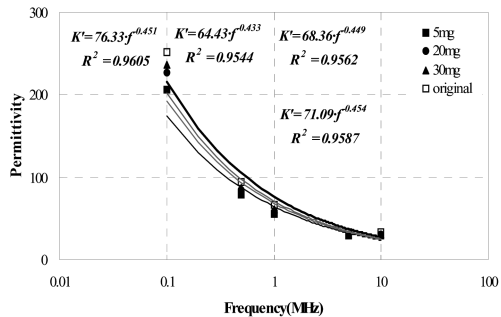
(a) Electrical Resistivity of H-1



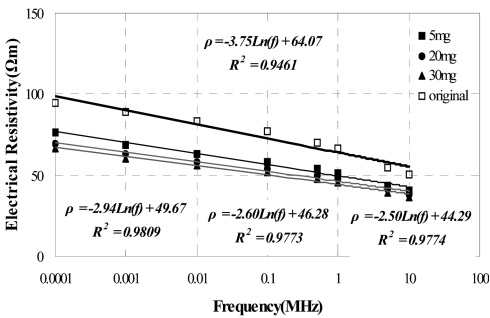
(b) Permittivity of H-1



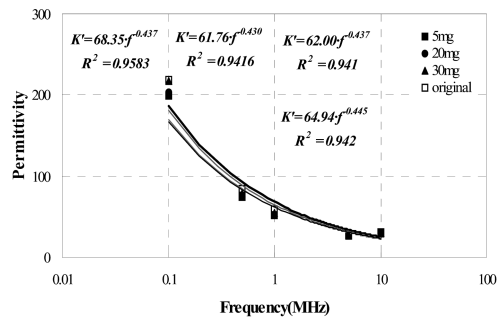
(c) Electrical Resistivity of H-2



(d) Permittivity of H-2



(e) Electrical Resistivity of H-3



(f) Permittivity of H-3

Fig. 3 Relationship between Electrical Resistivity, Permittivity, and Frequency for soils(H-1 ~ H-3) mixed with different concentration of As aqueous solution

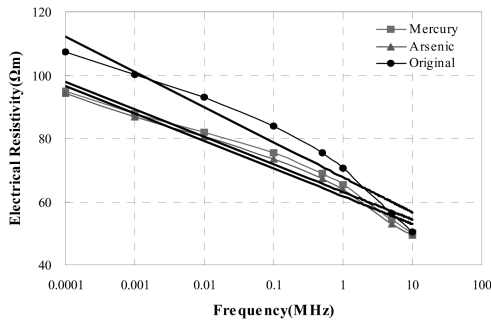
염되지 않은 시료에 비해 크지는 않았으나, 농도가 증가하면서 증가하는 경향을 보였다.

## V. 요약 및 결론

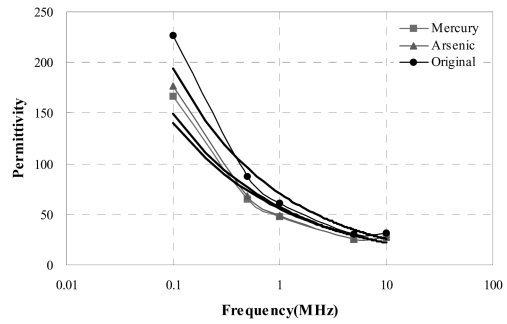
본 연구에서는 수은과 비소로 오염된 시료의 전기적 특성을 확인하기 위하여 측정주파수와 농도별 측정을 실시하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

(1) 수은과 비소 용액에 대한 전기비저항과 유전상수 측정에서 비소용액의 유전상수 값은 농도와 주파수에 관계없이 일정한 값을 보임을 알 수 있었다.

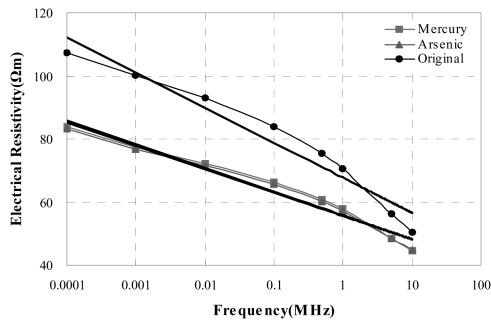
(2) 수은과 비소로 오염된 시료에서는 주파수와 오염농도가 증가할수록 전기비저항은 감소하는 경향을 보였으나 유전상수는 오염농도가 증가할수록 측정값이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 비소로 오염된 시료의 유전상수는 용액의 경우와 달리 오염농도와 측



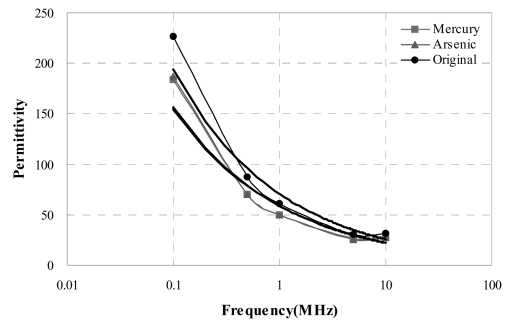
(a) Electrical Resistivity with 5mg/L



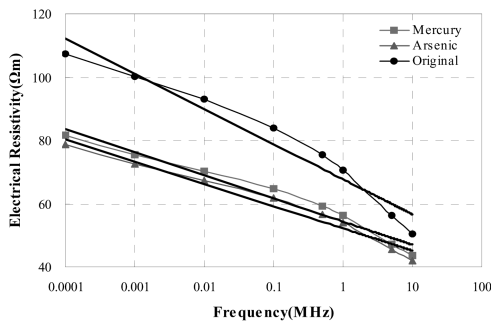
(b) Permittivity with 5mg/L



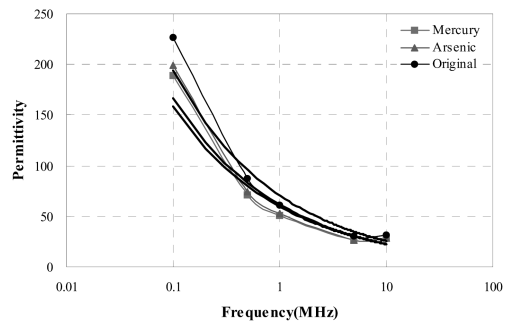
(c) Electrical Resistivity with 20mg/L



(d) Permittivity with 20mg/L



(e) Electrical Resistivity with 30mg/L



(f) Permittivity with 30mg/L

Fig. 4 Average values of Electrical Resistivity and Permittivity for samples mixed with different concentration of Hg and As aqueous solutions

정주파수의 영향을 받는 것으로 확인되었다.

(3) 오염시료에서 측정된 전기비저항과 유전상수는 주파수에 관한 함수로 표현할 수 있었다. 이때, 계수  $\alpha$ 의 절대값과  $\beta$  값은 오염농도가 증가하면서 감소하는 경향을 보였으며, 계수  $\gamma$  값과  $\delta$ 의 절대값은 증가하는 경향을 보였다.

(4) 오염되지 않은 시료와 수은과 비소로 오염된 동일 시료에 대한 전기적 특성을 이용하여 시료의

오염여부를 판정할 수 있었으며, 주파수에 관한 함수를 이용하여 증감속별 오염정도의 측정이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해서 오염되지 않은 시료의 전기적 특성에 관한 시험을 선행해서 실시해야 될 것으로 판단된다.

(5) 일부 시료에서 농도에 따른 정확한 경향을 보여주지 못한 것은 증감속 용액과 혼 합전의 원시료에 적용한 함수비의 영향으로 판단된다. 그러므로 증



**Table 5** Regressive equations of E.R.(Electrical Resistivity) & Perm.(Permittivity) vs. Frequency for samples mixed with different Con.(concentration) of Hg and As aqueous solution

Items	Con. (mg/L)	Mercury(Hg)		Arsenic(As)	
		Regressive Equation	R <sup>2</sup>	Regressive Equation	R <sup>2</sup>
E.R. (ρ)	0	$\rho = -4.81 \cdot \ln(f) + 67.72$	0.9510	$\rho = -4.81 \cdot \ln(f) + 67.72$	0.9562
	5	$\rho = -3.77 \cdot \ln(f) + 63.04$	0.9626	$\rho = -3.80 \cdot \ln(f) + 61.68$	0.9718
	20	$\rho = -3.27 \cdot \ln(f) + 55.81$	0.9664	$\rho = -3.21 \cdot \ln(f) + 55.57$	0.9696
	30	$\rho = -3.18 \cdot \ln(f) + 54.35$	0.9657	$\rho = -3.06 \cdot \ln(f) + 52.20$	0.9710
Perm. (K')	0	$K' = 70.67 \cdot f^{-0.440}$	0.9584	$K' = 70.67 \cdot f^{-0.440}$	0.9605
	5	$K' = 55.45 \cdot f^{-0.403}$	0.9437	$K' = 57.17 \cdot f^{-0.416}$	0.9455
	20	$K' = 58.79 \cdot f^{-0.420}$	0.9446	$K' = 58.61 \cdot f^{-0.427}$	0.9452
	30	$K' = 59.54 \cdot f^{-0.424}$	0.9437	$K' = 61.61 \cdot f^{-0.433}$	0.9468

금속으로 오염된 지반의 전기적 특성 평가시 함수비에 의한 선행실험을 실시하여야 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

**References**

1. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H. and Blotz, L. R., 1996, "Electrical resistivity of compacted clays", J. Geotech. Engrg., ASCE, 122(5), 397-406
2. Archie, G., 1942, "Electrical-resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics." Trans. Am. Inst. of Min. Engrg., 146, 318-319
3. Arulanandan, K., and Muraleetharan, K., 1988, "Level ground soil-liquefaction analysis using in-situ properties: I", J. Geotech. Engrg., ASCE, 114(7), 753-770
4. ASTM D150, 1994, "Standard test methods for AC loss characteristics and permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulation", ASTM D150-94, Philadelphia
5. Fam, M. and Santamarina, J. C., 1995, "Study of Geoprocesses with complementary mechanical and electromagnetic wave measurements in an oedometer", Geotechnical Testing Journal, ASTM, 18(3), 307-314
6. Francisca, F. M. and Rinaldi, V. A., 2003, "Complex dielectric permittivity of soil-organic mixtures(20MHz - 1.3GHz)", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 129(4), 347-357
7. Harrison R. M. and Wilson S. J., 1985, "The Chemical Composition of Highway Drainage water:II. Chemical Associations of Metals in the Suspended Sediment", The Science of Total Environment, V.43, 79~ 87
8. Heigold, P., Gilkeson, R., Cartwright, K. and Verstraten, J., 1979, "Aquifer transmissivity from surficial electrical methods", Ground Water, 17(4), 338-345
9. Lars J., 2003, "Hazards of heavy metal contamination", British Medical Bulletin, 68, 167-182
10. Keller, G. V., and Frischknecht, F. C., 1966, "Electrical methods in Geophysical Prospecting", Pergamon Press, New York, N.Y.
11. Mazac, O., Milena, C., Kelley, W. and Landa, I., 1990 "Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectric methods", Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2, 125-131
12. Mitchell, J. K., 1993, Fundamentals of Soil Behavior, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc

13. Parkhomenko, E., 1967, "Electrical properties of rocks, G. V. Keller, translator, ed., Plenum Press, New York, N.Y.
14. Santamarina, J. C., 2001, Soils and Waves, John Wiley & Sons
15. Selig, E. T. and Mansukhani, S., 1975, "Relationship of soil moisture to the dielectric property", J. Geotech. Engrg., ASCE, 101 (GT8), 755-770
16. Smith, S. S. and Arulanandan, K., 1981, "Relationship of electrical dispersion to soil properties", J. of the Geotech. Engrg., ASCE, 107(GT5), 591-604
17. Thevanayagam, S., 1993, "Electrical response of two-phase soil: Theory and applications.", J. of Geotech. Engrg., ASCE, 119(8), 1250-1275
18. Ward, S., 1990, "Resistivity and induced-polarization methods.", Geotech. and Envir. Geophysics, Vol. 1, S. Ward, ed., 147-190
19. Yoon, G. L. and Park, J. B., 2001, "Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soil", Journal of Hazardous Materials B84, 147-161
20. Yoon, G. L., Oh, M. H. and Park, J. B., 2002, "Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer", Environmental Geology, 43(1-2), 18-28