한국농공학회논문집
제50권 제5호

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, SEP. 2008, pp. 63-72

체적함수비 및 주파수에 따른 풍화토의 전기비저항 특성

Characteristic of electrical resistivity against volumetric water content and frequency in weathered soil

손영환* · 봉태호** · 장병욱***†
Son, Young Hwan* · Bong, Tae Ho** · Chang, Pyoung Wuck***†

Abstract

This study was conducted to define a characteristics of Electrical Resistivity of weathered soil against volumetric water content and frequency. It is essential to analyze and understand a characteristics of the Electrical Resistivity for evaluation of soil as subsurface contaminant detection. Before the test, an effect of pore water and ion were checked using four liquids(distilled water, tap water, potassium chloride 1.8mM, and 3.7mM). As a result, the correlation between the volumetric water content and the Electrical Resistivity was estimated. The Electrical Resistivity decreases with increasing frequency and water content. Also, Electrical Resistivity could be described by an exponential function of volumetric water content with the constants.

Keywords : Electrical Resistivity, Volumetric Water Content, Weathered soil, Frequency

I. 서 론

지반의 오염도 측정과 같은 지반의 특성을 평가하는 경우, 전기적 특성을 이용할 수 있다. 이때, 많은 인자들이 전기적 특성에 영향을 준다. 특히, 전기적 특성을 이용한 전기비저항의 값을 측정하는 경우 측정값은 함수비와 밀도 등의 영향을 받게 되며 함수비는 보다 많은 영향을 미치게 된다. 또한 전기비저항의 값을 측정시 측정주파수에 따른 특성을 확인하기 위해 여러 가지 주파수를 적용해야 한다. 이는 하나의 특정주파수를 이용한 결과에 대한 분석의 한계와 신뢰를 개선하기 위함이다. 그러므로 전기적 특성을 이용하여 지반의 여러 가지 특성을 평가하기 이전에 반드시 선행되어 측정 결과에 대한 분석시 이를 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 일반적인 풍화토의 교란된 시료를 이용하여 지반의 함수비 조건 및 측정주파수에 따른 전기비저항의 특성을 파악하고자 하였으며, 함수비와 밀도변화에 따른 전기비저항의 특성을 동시에 파악하기 위해 체적함수비를 도입하였다.

* 위스콘신주립대학교 토목및환경공학과 연구원
** 서울대학교 지역시스템공학과 박사과정
*** 서울대학교 지역시스템공학과 교수
† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593
Fax: +82-2-873-2087
E-mail address: pwchang@snu.ac.kr
2008년 6월 5일 투고
2008년 9월 23일 심사완료
2008년 9월 24일 게재확정

II. 전기비저항

전기비저항은 전기장이 가해졌을 때, 전류흐름에 물

질이 저항하는 정도이며, 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, ρ ; 전기비저항 (Ωm)

이를 Ohm의 법칙에 따라 표현하면 다음과 같다.

$$\rho = R\frac{A}{d} = \frac{V}{I}\frac{A}{d} \quad (2)$$

여기서, R ; 저항, I ; 전류, V ; 전위차

전기비저항 대신 전기전도도(σ)가 사용되기도 하는데 Keller 등(1966)과 Santamarina (2001)는 물질 내 한 점에서의 전기장 세기(E)는 그 지점을 통과하는 전류밀도(J)와 비례하며 연속방정식 형태인 $E = \rho \cdot J$와 $J = \sigma \cdot E$로 정의하였다.

Smith 등(1981)과 Mitchell (1993)은 흙을 통한 전기전류의 흐름은 용액과 흙 입자를 통한 경로, 접촉하고 있는 흙 입자를 통한 경로, 용액을 통한 경로로 나눌 수 있다고 하였다. 건조한 흙에서는 이동성 전자의 수와 이온들의 이동도가 모두 매우 작으므로 건조된 흙의 전도도는 이온의 농도가 낮은 상태의 간극 유체의 전기전도도보다도 훨씬 작다. 그리고 흙 입자 표면의 흡착수 층을 통해 발생하는 전도를 표면전도라 하며, 습윤 상태 입자의 전기전도도는 건조된 흙 입자 자체의 전기전도도보다 매우 높기 때문에 습윤 상태로 변함에 따라 전기비저항은 급격히 감소하게 된다.

Yoon 등(2002)은 습윤상태 흙에서의 전도는 연결된 간극유체 안에서 발생하며 매우 큰 전도성을 가지며, 간극유체는 흙에서 발생하는 전도의 지배적인 경로라고 하였다. 간극유체만의 전도는 이온의 이동도에 의해 발생하며, 수용성 전해질에서의 전도와 일치한다. 그러나 흙에서 간극유체를 통한 전기적 흐름은 입자의 간극률과 골격 및 포화도 등에 영향을 받는다.

흙에서의 전기비저항에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있을 수 있으나 흙의 전기적 특성에 미치는 모든 인자를 고려한 일반적인 이론식은 아직 제안되지 않았다. 이는 흙과 물이 섞인 시스템의 복잡성과 입자의 크기와 모양 그리고 자연 상태에 존재하는 흙의 조합 등을 특정한 기준으로 특성화하기 어렵기 때문이다. 그러나 일부 연구자들은 경험식과 단순화된 모델을 기반으로 이론적 관계식들은 제시하고 있다.

Archie (1942)는 다양한 조건의 포화된 사질토에 대하여 전기비저항을 측정하고 포화된 흙의 전기비저항은 간극수의 전기비저항에 비례한다는 관계를 제시한 바 있으며, Abu-Hassanein 등(1996)과 Yoon 등(2001)은 흙에서의 전기비저항은 간극률, 간극유체의 전기비저항, 흙의 구성성분, 포화도, 입자모양과 방향성, 간극의 구조에 영향을 받는다고 하였다.

일반적으로 수용성 전해질의 전도도는 온도가 올라갈수록 물의 점성이 감소하여 이온의 이동도가 증가한다. Heimovaara 등(1995)은 전기전도도와 흙의 온도와의 관계 곡선의 기울기는 전기전도도와 간극수의 관계 곡선의 기울기와 거의 같다고 하였다. 또한, Keller 등(1966)은 온도가 0℃ 이상의 특정 온도에서 흙의 전기비저항은 18℃에서 측정된 값을 기준으로 하여 식(3)을 이용하여 보정할 수 있다고 하였다.

$$\rho_{T_c} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_t (T_c - 18)} \quad (3)$$

여기서, T_c ; 온도(℃), α_t ; 비저항 온도계수(약 $0.025℃^{-1}$)

또한, Abu-hassanein 등(1996)과 Heigold 등(1979)은 여러 가지 흙에 대하여 투수계수와 전기비저항과의 관계를 검토한 바 있다. 그리고 Mazac 등(1990)은 조밀한 모래는 느슨한 모래보다 더 큰 전기비저항을 나타내고, 조립질 흙은 세립질 흙에 비해 매우 높은 전기비저항과 투수계수를 나타낸다고 하였다.

III. 재료 및 실험방법

1. 재료

본 연구에 사용한 시료의 물리적 특성은 Table 1

Table 1 Physical properties of soils

Soils	γ_{field}^{*} (kN/m^3)	W_{field}^{*} (%)	Specific Gravity(Gs)	USCS	LL(%)	PL(%)
H-1	15.90	35.5	2.75	SM	NP	NP
H-2	15.22	18.0	2.73	SM	NP	NP
H-3	15.60	20.9	2.72	SM	NP	NP
H-4	16.44	18.6	2.68	SM	NP	NP

* ; 현장 단위중량 및 함수비

과 같다. 또한, 통일분류법상 실트질모래(SM)로 분류되어 모래의 비중보다 약간 큰 2.68～2.75의 범위로 구해졌다. KS F 2308에 명기하고 있듯이 주로 석영으로 구성되어 있는 밝은 색깔의 모래의 비중은 대략 2.65이고, 점토질과 실트질의 흙에서는 대략 2.6～2.9이다. 사용시료는 경기도 화성지역에서 채취된 교란시료이며, 채취 위치별로 각각 H-1, H-2, H-3, H-4로 명기하였다. 채취심도는 1.0～3.0m이다.

2. 실험방법

본 연구에서는 각 시료에 대해서 측정 주파수와 함수비의 변화에 따른 측정을 실시하였다. 각각의 시료에 적용된 함수비는 0, 5, 10, 15, 20, 25%이며, 적용된 각각의 함수비별로 측정된 주파수는 100Hz～10MHz 범위에서 이루어졌다. 측정시 사용된 장비는 HP4285A Precision LCR meter와 Agilent 4263B LCR meter이다. Photo. 1(a)의 HP4285A LCR meter는 75kHz～30MHz 범위의 주파수에서 저항의 측정이 가능하며, Photo. 1(b)의 Agilent 4263B LCR meter는 100Hz～100kHz 범위의 주파수에서 저항의 측정이 가능하다. 또한, 측정시 시료의 성형은 Fig. 1(c)의 mold를 사용하였으며, mold의 규격은 가로 15cm, 세로 2cm, 높이 20cm이다. 그러나 동일한 조건에서 실험하기 위하여 시료는 15cm 높이까지 채워서 실험하였으며, 저항값을 측정하기 위한 장비와 mold의 전극은 Agilent 16089A Kelvin clip leads를 사용하였다.

IV. 결과 및 고찰

측정 주파수와 함수비의 변화에 따른 풍화토의 전기적 특성을 확인하기 위하여 각 시료에 대해서 측정 주파수와 함수비 조건을 달리하여 측정을 실시하였으며, 함수비 변화와 밀도의 영향을 동시에 고려하기 위하여 체적함수비를 도입하여 적용하였다.

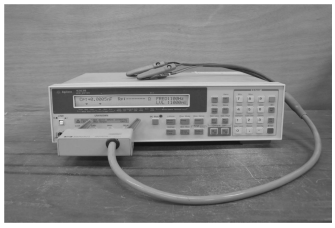
1. 간극수와 이온의 영향

흙의 전기적 특성에 영향을 주는 간극수와 이온의 영향을 확인하기 위하여 본 실험에 앞서 흙과 혼합하지 않은 4종류의 용액에 대한 전기비저항을 확인하였다.

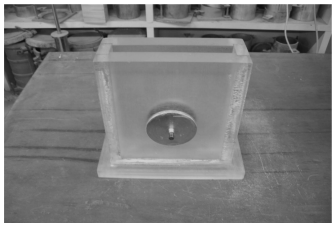
Fig. 2의 결과에서 확인할 수 있듯이 증류수나 수돗물에 비해 1.8mM, 3.7mM 농도의 염화칼륨(KCl) 용액은 전기비저항 값이 상대적으로 작게 나타났다. 이는 상대적으로 전기전도도가 높다는 것을 의미하며, 특히 동일한 염화칼륨 용액에서도 농도가 높아질수록 전기비저항 값은 더 작아지는 것으로 확인되었다.

이에 본 연구에서는 간극수의 이온에 의한 전기비저항 값의 영향을 최대한 줄이기 위하여 모든 실험에 대하여 증류수를 사용하였다.

(a) HP4285A



(b) Agilent 4263B



(c) Testing mold

Fig. 1 Equipments for Measurement of Electrical Resistivity

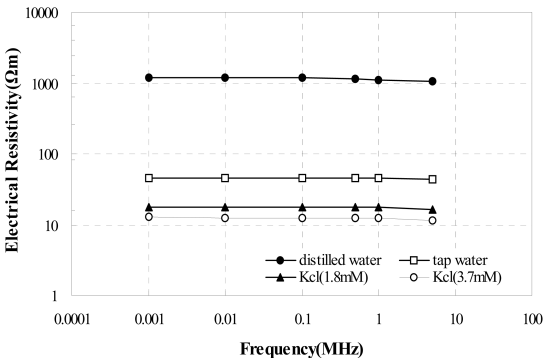


Fig. 2 Electrical resistivity of Liquids

2. 측정 주파수 및 함수비에 따른 측정 결과

측정 주파수의 변화에 따른 전기비저항 값의 특성을 확인하기 위하여 H-1～H-4의 각 시료에 대해서 측정을 실시하였다. 이때 각 시료에서 함수비 조건을 달리하였으며, 동일한 함수비에서 주파수별 측정값의 변화를 확인하였다. 결과는 Table 2와 같다.

Table 2의 결과에서와 같이 모든 시료에서 동일한 함수비 조건에서는 측정 주파수가 증가할수록 전기비저항의 측정값은 감소하는 경향을 보였다.

또한, 각 시료의 함수비가 0%인 경우에는 100Hz, 1kHz, 10MHz의 주파수에서 측정되는 값이 불안정하여 정확한 측정값을 얻을 수 없었으며, 함수비가 존재하는 시료에 비해 상대적으로 상당히 큰 값의 전기비저항이 측정되었다.

측정 주파수와 전기비저항과의 관계를 구하기 위하여 각 시료에 대해서 함수비 0%에 대한 결과를

Table 2 Results of Electrical resistivity against frequency and water content

Sample	w (%)	γ_d (kN/m^3)	Frequency							
			100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	500kHz	1MHz	5MHz	10MHz
H-1	0	11.07	-	-	961625	203864	57120	34906	13020	-
	5	12.05	637.77	597.84	559.86	500.24	421.77	372.92	234.64	223.10
	10	11.96	182.86	169.15	157.27	141.83	125.90	116.99	89.82	80.12
	15	12.15	94.46	87.78	81.70	73.82	65.92	61.69	48.98	42.88
	20	12.64	60.25	55.76	51.89	46.97	42.16	39.60	31.73	27.11
	25	13.13	44.61	41.14	38.26	34.71	31.27	29.48	23.61	19.51
H-2	0	11.07	-	-	1442437	182708	48081	28848	9260	-
	5	11.86	737.37	687.95	643.71	583.13	495.81	438.12	271.95	266.56
	10	11.76	219.04	203.62	188.45	168.23	148.19	136.94	102.19	93.21
	15	11.66	132.66	123.21	113.66	101.39	89.95	83.74	64.63	58.12
	20	11.76	82.70	76.49	70.55	63.07	56.33	52.75	41.21	35.81
	25	12.45	57.44	53.03	48.91	43.81	39.29	36.91	28.74	23.90
H-3	0	11.86	-	-	769300	192325	51350	30772	10193	-
	5	12.35	491.31	467.35	443.31	406.77	355.03	320.80	215.98	207.90
	10	12.45	152.24	144.24	135.99	124.85	113.26	106.59	84.91	78.51
	15	12.54	94.93	89.05	83.71	76.98	70.32	66.63	54.99	50.20
	20	13.03	66.13	61.81	58.12	53.55	49.17	46.78	39.02	34.70
	25	13.62	43.43	40.54	38.12	35.19	32.40	30.89	25.64	21.64
H-4	0	10.68	-	-	1057787	173092	46196	27810	9404	-
	5	11.56	911.04	840.84	772.76	676.98	559.67	488.51	293.49	294.45
	10	11.86	255.22	238.10	219.64	194.63	170.48	156.88	114.57	106.30
	15	12.05	170.86	158.65	145.63	128.95	113.97	105.80	80.28	73.35
	20	12.54	105.15	97.21	89.22	79.17	70.49	65.89	50.69	44.51
	25	12.94	70.27	64.92	59.57	52.91	47.31	44.33	33.86	28.29

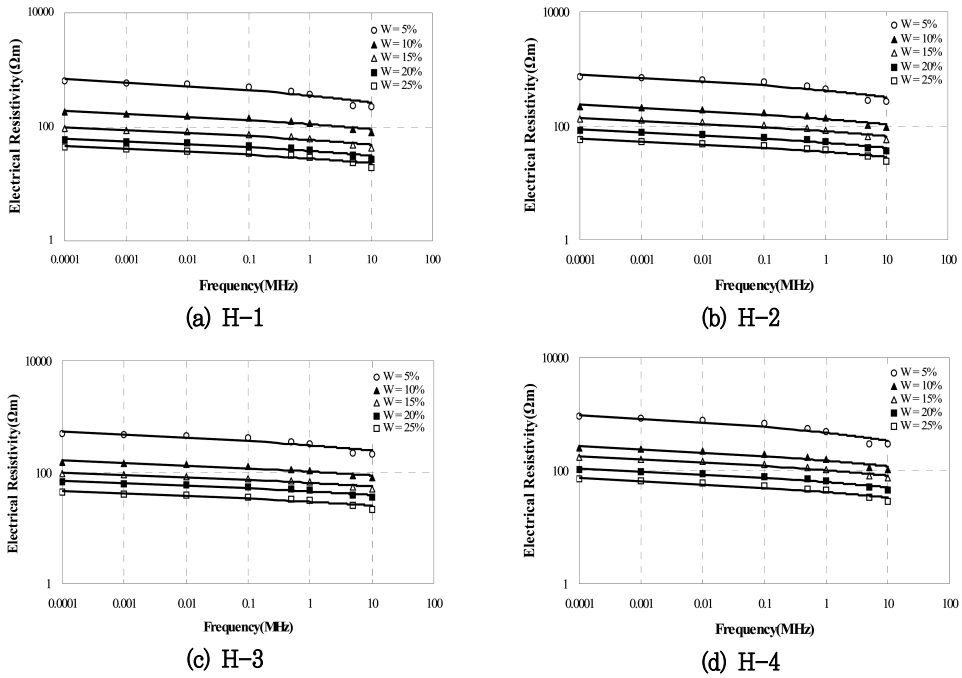


Fig. 3 Trend lines of relationship between frequency and electrical resistivity

Table 3 Regressive equations of Electrical resistivity vs. Frequency

Sample	Water Content(%)	Regressive Equation	R^2	Remarks
H-1	5	$\rho = -36.75 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 352.54$	0.9083	f : Frequency(MHz) ρ : Electrical Resistivity(Ωm)
	10	$\rho = -8.68 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 111.50$	0.9460	
	15	$\rho = -4.32 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 58.97$	0.9477	
	20	$\rho = -2.73 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 37.68$	0.9462	
	25	$\rho = -2.03 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 27.81$	0.9396	
H-2	5	$\rho = -41.65 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 412.45$	0.9022	
	10	$\rho = -10.84 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 130.64$	0.9474	
	15	$\rho = -6.37 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 80.14$	0.9556	
	20	$\rho = -3.93 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 50.14$	0.9541	
	25	$\rho = -2.75 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 34.70$	0.9454	
H-3	5	$\rho = -24.92 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 301.85$	0.8834	
	10	$\rho = -6.29 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 102.0$	0.9297	
	15	$\rho = -3.75 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 64.07$	0.9461	
	20	$\rho = -2.58 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 44.78$	0.9435	
	25	$\rho = -1.73 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 29.20$	0.9257	
H-4	5	$\rho = -55.55 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 467.18$	0.9327	
	10	$\rho = -13.0 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 149.78$	0.9478	
	15	$\rho = -8.43 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 101.32$	0.9590	
	20	$\rho = -5.12 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 62.61$	0.9579	
	25	$\rho = -3.47 \cdot \mathrm{Ln}(f) + 41.59$	0.9484	

제외한 함수비별 측정 주파수와 전기비저항 값의 관계를 추세선으로 표현하여 회귀식을 유도하였으며, 이를 Fig. 3에 도시하였다.

모든 시료에서 주파수가 증가함에 따라 전기비저항 값은 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 회귀식과 상관도를 정리하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3과 같이 측정 주파수와 전기비저항 값의 관계는 로그함수로 표현되었다. 즉, 전기비저항(ρ)을 주파수(f)의 함수로 식(4)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$Electrical\ resistivity(\rho) = \alpha \cdot \mathrm{Ln}(f) + \beta \quad (4)$$

여기서, α, β ; 계수

식(4)의 계수 α의 절대값과 β 값은 함수비가 증가할 때 감소하는 경향을 보였으며, 감소되는 정도는 함수비가 10% 이상으로 증가하면서 상대적으로 작게 나타났다.

함수비의 변화에 따른 전기비저항 값의 변화를 확

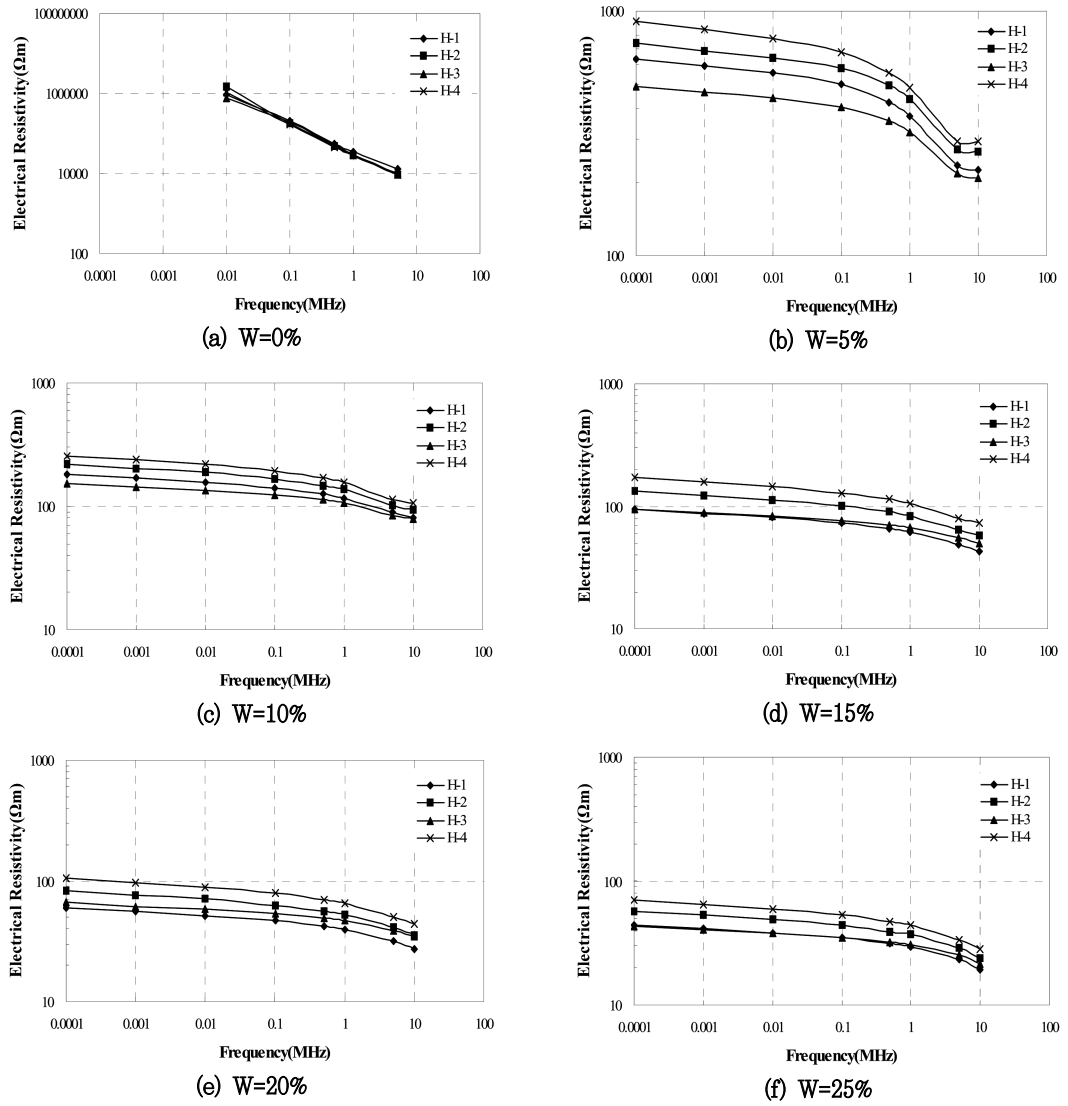


Fig. 4 Relationship between frequency and electrical resistivity against water content

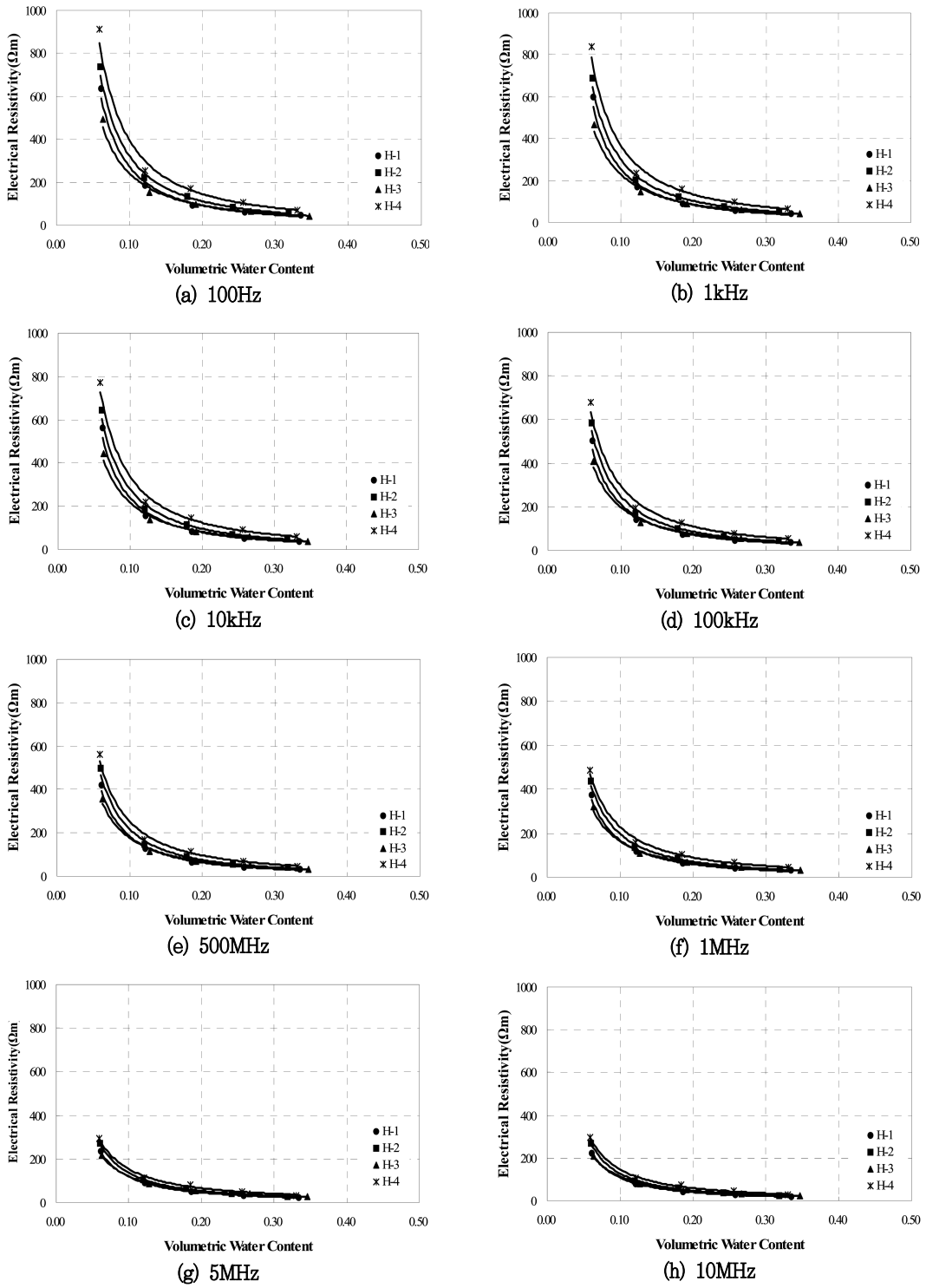


Fig. 5 Trend lines of relationship between volumetric water content and electrical resistivity

인하기 위하여 각 시료별로 동일한 함수비 상태에서 측정된 전기비저항 값을 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4에서 함수비가 증가하면서 모든 시료에서 측정값이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 함수비(W)=0%인 경우 시료별 측정값의 차이는 거의 없었으며, 이러한 차이는 시료별 밀도 차에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 그러나 함수비(W)= 5% 이상에서는 건조한 시료에 비해 전기비저항의 값이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 간극수에 의한 영향으로 판단된다. W=5%와 W=10%의 경우는 시료에 따라 측정값이 차이가 있었으며, W=15% 이상에서는 H-1과 H-3시료의 경우 그 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 또한, 함수비 10% 이상의 조건에서 함수비가 증가하면 즉, 함수비 10%에서 15%, 15%에서 20%, 20%에서 25%로 변하면서 측정된 값은 함수비가 5%에서 함수비 10%로 변하면서 측정된 값보다 함수비 변화에 따른 측정값의 변화가 상대적으로 작게 나타났다. 이때, 측정 주파수의 변화에 따른 측정값의 차이는 함수비의 변화에 따른 전기비저항의 측정값의 차이보다는 상대적으로 작았다.

상기 결과와 같이 전기비저항의 경우 간극수의 영향이 측정 주파수의 영향보다 크다는 것을 확인할 수 있었지만, 밀도에 의한 영향도 고려하는 것이 타당하므로 체적함수비를 도입하여 간극수의 영향 뿐 아니라 밀도의 영향도 같이 고려하였다.

3. 체적함수비에 따른 측정 결과

체적함수비(volumetric water content)는 흙의 전체 부피(V)에 대한 간극수의 부피(Vw)의 비로 정의할 수 있으며, 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_v = \frac{V_w}{V} = \frac{V_w}{W_w} \cdot \frac{W_w}{W_s} \cdot \frac{W_s}{V} = \frac{w \cdot \gamma_d}{\gamma_w} \qquad (5)$$

여기서, γ_d : 흙의 건조단위중량, γ_w : 물의 단위중량

식(5)와 같이 체적함수비는 함수비와 건조단위중량 중 하나의 인자가 변화가 없다면, 함수비나 건조단위중량의 증가는 체적함수비의 증가로 나타나므로 두 인자에 의한 변화를 동시에 반영할 수 있다.

주파수별로 체적함수비에 대한 전기비저항 값의 관계를 추세선으로 표현하여 회귀식을 유도하였으며, 이를 Fig. 5에 도시하였다. 또한, 회귀식과 상관도를 정리하여 Table 4에 나타내었다.

Fig. 5에서와 같이 체적함수비가 증가할수록 전기비저항은 감소하는 경향을 보였다. 특히 모든 시료

Table 4 Regressive equations of Electrical resistivity vs. Volumetric water content

Sample	Frequency	Regressive Equation	R^2	Remarks
H-1	100Hz	$\rho = 7.18 \cdot \theta^{-1.579}$	0.9934	ρ : Electrical Resistivity (Ωm) θ : Volumetric Water Content
	1kHz	$\rho = 6.57 \cdot \theta^{-1.587}$	0.9933	
	10kHz	$\rho = 6.08 \cdot \theta^{-1.591}$	0.9931	
	100kHz	$\rho = 5.57 \cdot \theta^{-1.582}$	0.9932	
	500kHz	$\rho = 5.27 \cdot \theta^{-1.545}$	0.9943	
	1MHz	$\rho = 5.21 \cdot \theta^{-1.508}$	0.9954	
	5.0MHz	$\rho = 5.07 \cdot \theta^{-1.368}$	0.9990	
	10.0MHz	$\rho = 3.87 \cdot \theta^{-1.446}$	0.9993	
H-2	100Hz	$\rho = 9.54 \cdot \theta^{-1.527}$	0.9958	
	1kHz	$\rho = 8.75 \cdot \theta^{-1.534}$	0.9959	
	10kHz	$\rho = 7.97 \cdot \theta^{-1.542}$	0.9957	
	100kHz	$\rho = 7.05 \cdot \theta^{-1.549}$	0.9952	
	500kHz	$\rho = 6.59 \cdot \theta^{-1.518}$	0.9957	
	1MHz	$\rho = 6.50 \cdot \theta^{-1.481}$	0.9965	
	5.0MHz	$\rho = 6.17 \cdot \theta^{-1.345}$	0.9990	
	10.0MHz	$\rho = 4.66 \cdot \theta^{-1.437}$	0.9985	
H-3	100Hz	$\rho = 9.82 \cdot \theta^{-1.390}$	0.9926	
	1kHz	$\rho = 9.04 \cdot \theta^{-1.402}$	0.9930	
	10kHz	$\rho = 8.44 \cdot \theta^{-1.407}$	0.9929	
	100kHz	$\rho = 7.82 \cdot \theta^{-1.404}$	0.9928	
	500kHz	$\rho = 7.48 \cdot \theta^{-1.373}$	0.9935	
	1MHz	$\rho = 7.42 \cdot \theta^{-1.342}$	0.9944	
	5.0MHz	$\rho = 7.29 \cdot \theta^{-1.219}$	0.9967	
	10.0MHz	$\rho = 5.84 \cdot \theta^{-1.288}$	0.9958	
H-4	100Hz	$\rho = 14.13 \cdot \theta^{-1.446}$	0.9911	
	1kHz	$\rho = 13.08 \cdot \theta^{-1.447}$	0.9918	
	10kHz	$\rho = 11.98 \cdot \theta^{-1.448}$	0.9922	
	100kHz	$\rho = 10.75 \cdot \theta^{-1.441}$	0.9925	
	500kHz	$\rho = 10.18 \cdot \theta^{-1.396}$	0.9933	
	1MHz	$\rho = 10.07 \cdot \theta^{-1.356}$	0.9940	
	5.0MHz	$\rho = 9.37 \cdot \theta^{-1.216}$	0.9936	
	10.0MHz	$\rho = 7.13 \cdot \theta^{-1.314}$	0.9922	

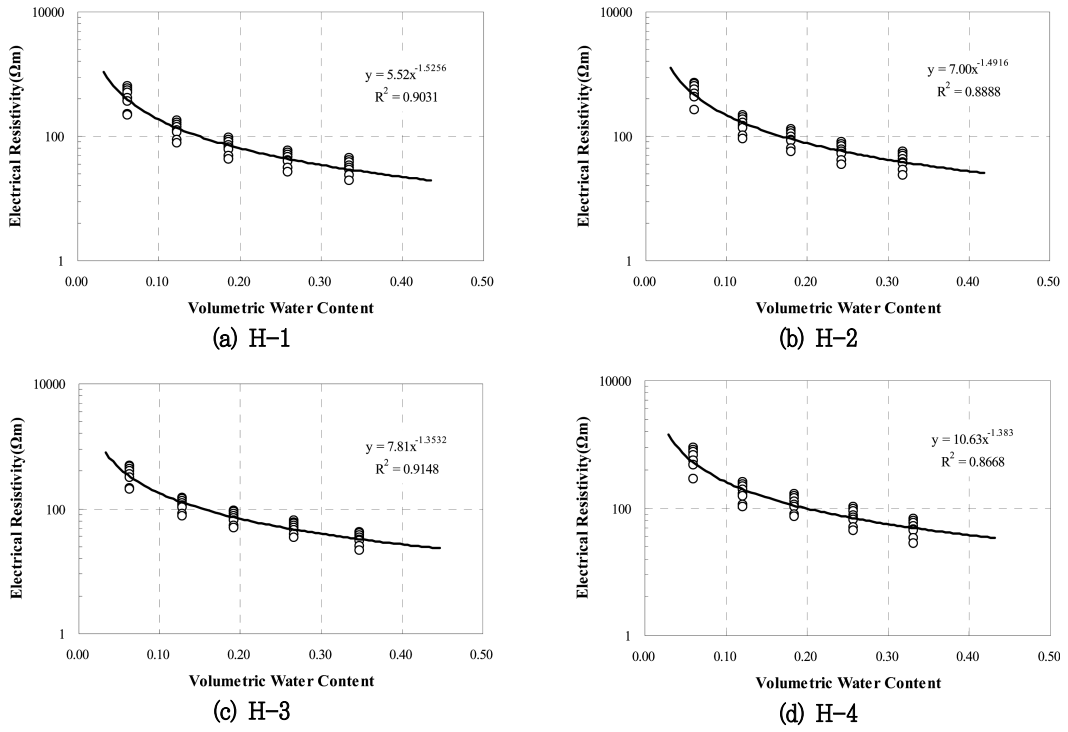


Fig. 6 Relationship between volumetric water content and electrical resistivity of all samples

및 전 주파수에서 함수비가 10%인 두 번째 값까지의 체적함수비의 변화가 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 주파수가 증가하면서 측정되는 전기비저항의 값이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

Table 4와 같이 체적함수비와 전기비저항의 상관관계는 지수함수로 표현할 수 있었다. 즉, 전기비저항(ρ)의 측정값은 체적함수비(θ)를 이용하여 구할 수 있으며, 이를 다음 식(6)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$Electrical\ resistivity(\rho) = a \cdot Volumetric\ water\ content(\theta)^{-b}(\Omega m) \quad (6)$$

여기서, a, b ; 계수

식(6)과 Table 4를 기준으로 하여 각 시료별로 동일한 체적함수비에서 측정주파수의 변화에 따라 구한 전기비저항의 값을 표현한 것이 Fig. 6이며, 이들 관계를 하나의 식으로 구하여 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Regressive equations of Electrical resistivity vs. Volumetric water content of H-1～H-4

Sample	Regressive Equation	R^2	Remarks
H-1	$\rho = 5.52 \cdot \theta^{-1.5256}$	0.9030	ρ : Electrical Resistivity(Ωm) θ : Volumetric Water Content
H-2	$\rho = 7.00 \cdot \theta^{-1.4916}$	0.8888	
H-3	$\rho = 7.81 \cdot \theta^{-1.3532}$	0.9148	
H-4	$\rho = 10.63 \cdot \theta^{-1.3830}$	0.8668	

Table 5와 같이 각 시료에 대한 전기비저항 값은 체적함수비를 이용하여 지수함수로 표현할 수 있었으며, 각 시료별로 모든 주파수에 대해 적용이 가능한 대표식으로 표현할 수 있었다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 일반적인 풍화토의 교란된 시료를 이용하여 측정 주파수와 체적함수비의 변화에 따른 전기비저항의 특성을 파악하고자 하였다. 이에 대한

결론은 다음과 같다.

1. 측정 주파수가 커질수록 풍화토의 전기비저항 값은 감소하는 경향을 보였다. 동일 한 함수비에서 10MHz의 측정값은 100Hz의 측정값을 기준으로 47～68% 만큼 감소하였으며, 동일한 주파수에서 함수비 25%의 측정값은 함수비 5%인 경우의 측정값을 기준으로 88～93% 만큼 감소하였다. 즉, 동일 함수비에서 측정 주파수 에 따른 전기비저항 값의 감소정도는 동일 주파수에서 함수비 변화에 따른 감소 정도에 비해 상대적으로 작았다.
2. 본 연구에 적용한 풍화토에서 측정 주파수(f)와 전기비저항(ρ) 값의 관계는 $\rho = \alpha \cdot \mathrm{Ln}(f) + \beta$와 같이 로그함수로 표현할 수 있었으며, 함수비가 증가하면서 계수 α의 절대값과 β 값은 감소하는 경향을 보였다.
3. 체적함수비가 증가할수록 전기비저항의 값은 감소하는 경향을 보였다. 특히, 함 수비 5% 이상에서는 건조한 시료에 비해 전기비저항의 측정값이 급격하게 감소 하는 것으로 나타났다. 함수비가 10%보다 클 경우에 측정된 전기비저항 값은 함수비 5% 증가시마다 26～48% 만큼 감소하며, 함수비 10% 이하인 경우에는 61～ 72% 만큼 감소하였다. 즉, 함수비가 10%보다 클 경우에는 함수비 변화에 따른 측정값의 변화가 함수비 10% 이하일 경우보다 상대적으로 작게 나타났다.
4. 체적함수비(θ)와 전기비저항(ρ)의 상관관계는 $\rho = a \cdot \theta^{-b}$와 같이 지수함수로 표 현할 수 있었으며, 시료별로 모든 주파수에 대해 적용이 가능한 대표식으로 표현 할 수 있었다. 또한, 측정주파수가 증가하면서 계수 a의 값은 감소하는 경향을 보였다.

References

1. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H. and Blotz, L. R., 1996, "Electrical resistivity of compacted clays", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,* 122(5), pp.397-406
2. Archie, G. E., 1942, "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Trans. AIME,* 146, pp.54-62
3. Heigold, P., Gilkeson, R., Cartwright, K. and Verstraten, J., 1979, "Aquifer transmissivity from surficial electrical methods", *Ground Water,* 17(4), pp.338-345
4. Heimovaara, T., Focke, A., Bouten, W. and Verstraten, J., 1995, "Assessing temporal variations in soil-water composition with time-domain reflectometry", *Soil Science Society of American Journal,* 59, pp.689-698
5. Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966, Electrical methods in Geophysical Prospecting, Pergamon Press
6. Mazac, O., Milena, C., Kelley, W. and Landa, I., 1990 "Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectric methods", *Geotechnical and Environmental Geophysics,* 2, pp.125-131
7. Mitchell, J. K., 1993, Fundamentals of Soil Behavior, 2ndEd., John Wiley & Sons, Inc
8. Santamarina, J. C., 2001, Soils and Waves, John Wiley & Sons
9. Smith, S. S. and Arulanandan, K., 1981, "Relationship of electrical dispersion to soil properties", *Journal of the Geotechnical Engineering,* ASCE, 107(GT5), pp.591-604
10. 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,* pp.147-161
11. 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), pp.18-28