

Water Content Reflectometer(WCR)을 이용한 매립지반 최종 복토층의 체적 함수비 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Volumetric Water Content Using WCR in Final Cover Layer of Landfill

김 경 철 ¹	Kim, Kyung-Chul
황 규 호 ²	Hwang, Koou-Ho
이 송 ³	Lee, Song

Abstract

This study deals with the calibration of low-frequency water content reflectometer for measuring the volumetric water content of soils in landfill final cover layer, and the validity of calibrations was evaluated by electrical conductivity and index properties of the soils. Linear calibrations concerning volumetric water content to WCR period provided good agreement with the data. Analysis of the calibration data indicates that the slope of the calibration decreases as the electrical conductivity of the soil increases. Lower slopes correspond to soils with greater clay content, organic content, liquid limit, and plasticity index, which typically have higher electrical conductivity. It could be well explained that WCR can operate in a lower frequency range.

요 지

본 연구는 매립지 최종 복토층의 체적함수비 측정을 위한 저주파수 WCR(Water Content Reflectometer)의 Calibration에 관한 것이고, Calibration의 검증은 흙의 전기전도도와 물성치를 이용하여 평가하였다. WCR 주기에 대한 체적함수비의 선형 Calibration은 높은 상관성을 보였다. 흙의 전기전도도가 증가할수록 Calibration의 기울기가 감소하는 것으로 나타났다. Calibration의 기울기는 점토의 함유량, 유기질의 함유량, 액성한계, 소성한계가 높은 흙, 즉, 전기전도도가 전형적으로 높은 흙에서 낮은 값을 보였다. 낮은 주파수영역을 갖는 WCR을 활용하여 좋은 계측결과를 얻을 수 있다는 것이 본 연구를 통해 보여지고 있다.

Keywords : Dielectric constant, Soil electrical conductivity, Time domain reflectometry, Unsaturated soil, Water content reflectometer

1. 서 론

환경 매립지 시설 설계시 최종복토가 완료된 후의 침

출수의 유출속도와 유출량을 정확하게 계측하는 일은 환경매립 시설의 유지관리에 있어 무엇보다 중요하다. 이를 위해 복토층에 체적함수비를 측정할 수 있는 장

1 위스콘신주립대학교-메디슨 토목환경공학과 박사과정 (Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ., of Wisconsin-Madison, Doctoral course)
 2 정회원, 위스콘신주립대학교-메디슨 토목환경공학과 박사후 연구원 (Member, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ., of Wisconsin-Madison, Post-Doctoral Research Associate, kouuho@cae.wisc.edu)
 3 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수 (Member, Univ. of Seoul, Dept. of Civil Engrg.)

치를 시공하여 침출수의 유출속도 및 그 양을 측정할 수 있다.

흙의 체적함수비(θ)와 흙의 전기전도율(soil electrical conductivity, σ_e)을 측정하는데 보편적으로 간편 TDR (Time Domain Reflectometry)법이 이용되고 있다(Abu-Hassanein et al. 1996, Topp et al. 1988). 이 방법은 GHz 대의 진동 전자기 에너지를 발생시켜 흙의 함수에 따른 흙의 겔보기 유전 상수(dielectric constant, K_a)의 변화관계를 이용하여 흙의 체적함수비를 구하는 것이다. TDR은 전기신호의 감쇠효과의 발생을 막기 위해 선의 길이를 20~30m 정도로 제한하여 사용하고 있다(Jones et al. 2002). 그 결과 방대한 지역의 현장을 측정하기 위해서는 부가장치가 필요하고 이로 인해 추가 비용이 발생하는 단점이 있다(Whalley 1993).

이런 단점을 보완하여 고안된 Water Content Reflectometer(WCR)은 30-60MHz의 저진동 전자기 에너지를 이용하고 있으며 TDR에 비해 비교적 긴 거리(최대 100m)까지 선을 연장하여 사용할 수 있고 장치가 단순하여 TDR에 비해 경제적이다(CSI 1996). WCR에서는 저진동 전자기 에너지를 사용하고 있기 때문에 체적함수비와 주파수의 Calibration은 TDR에서 보다 토질의 특성 시험결과의 정확성에 더 큰 영향을 미친다(Giese et al. 1975, Ledieu et al 1986, Loot et al 1992, Nadler et al. 1991, Roth et al. 1992, Zegelin et al. 1989).

매립지반 최종복토재의 Water Balance 관측을 위하여 WCR을 이용한 체적함수비 변화의 측정이 활용되고 있으며 본 논문에서는 첫째, 다양한 흙에서 각각의 WCR Calibration 상수를 결정하고, 둘째, 토질의 특성이 WCR Calibration 상수에 미치는 영향을 평가하는 것이다.

2. WCR(Water Content Reflectometer) 장치개요 및 기본원리

본 연구에서 사용된 WCR은 CSI(Campbell Scientific, Inc.)사의 Campbell과 Anderson(1998)에 의해 개발된 Probe를 이용하고 있다. WCR은 사진 1과 같이 두 개의 스테인레스 스틸 로드(rod)로 구성되어 있고 각 로드 직경은 3.2mm, 간격은 32mm이고, 길이가 300mm이다.

작동원리는 그림 1(a)의 회로에서 전원이 연결되면 일정한 진동수대의 전자기 Pulse가 발생하고 이 Pulse가 Rod를 따라 이동한다. 이 Pulse는 Rod의 끝에서 Line Driver 회로 방향으로 반사되는데 Threshold 회로가 되

돌아오는 신호의 일부를 감지하고 Line Driver를 통해서 Pulse를 Rod로 내보낸다. 이때 주기변화가 발생하고 주기 T는 Probe에서 Rod를 따라 이동하는 Pulse의 시간과 회로에서의 시간 Delay, 지반의 유전율상수의 조합으로 식 (1)에 의해 구해진다(Bilskie 1997, Campbell and Anderson 1998, Paul et al. 1998).

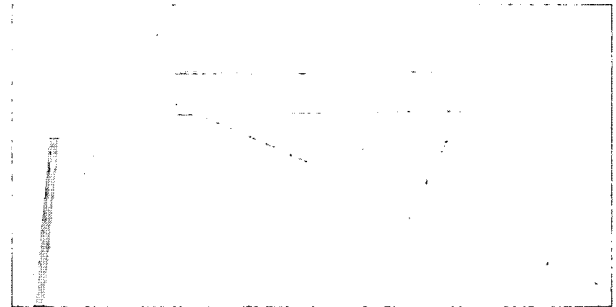
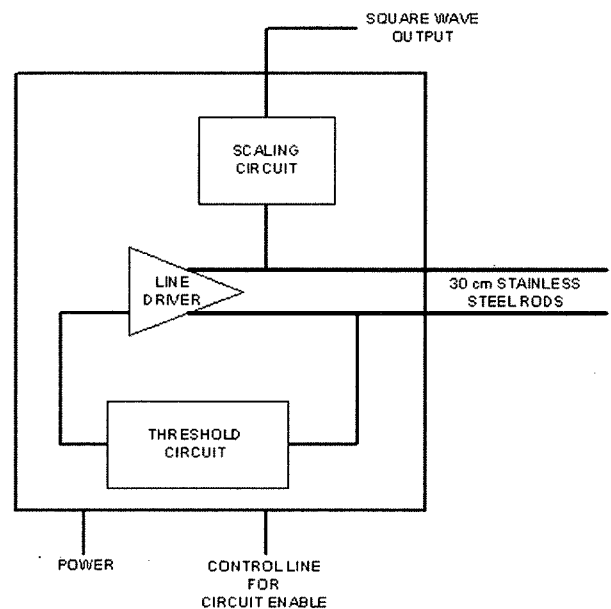
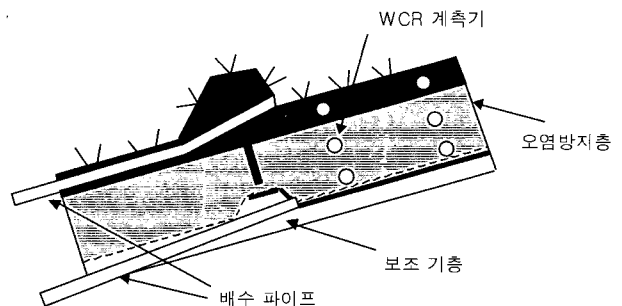


사진 1. WCR probe(CS 615)



(a) WCR 장치 개요도



(b) 현장 시공 개략도(Non-scale)

그림 1. WCR의 장치개요(Bilskie 1997) 및 현장 시공 개략도

$$T = 2 \left[(t_{pd} + t_c) + 2 \frac{L \sqrt{K_a}}{c} \right] \quad (1)$$

여기서, t_{pd} : Amplifier의 Propagation Delay

t_c : stray capacitance 를 위한 충전시간

L : Probe Rod의 길이

K_a : 유전상수

c : 전자기파의 속도(3×10^8 m/s)

계측장치의 현장시공 개략도는 그림 1(b)와 같이 식생층과 오염방지층으로 구성된 최종 복토층에 설치되어 있고 일정한 주기로 데이터를 수집하였다.

2.1 흙의 전기전도율(Electrical Conductivity)에 따른 영향

흙의 유기성분과 점토의 함량은 흙의 전기 전도율 σ_e 을 증가시킨다(CSI 1996, Suwansawat et al 1999).

WCR에서 감지되는 Pulse의 감쇠도(the Degree of Attenuation)는 흙의 전기 전도율이 증가함에 따라 증가하고, 진폭은 감쇠도가 증가함에 따라 감소한다. 따라서, 흙의 전기 전도율 σ_e 이 증가함에 따라 진동수는 감소하고 주기는 증가한다(Dasberg 1992, Fellner-Feldegg

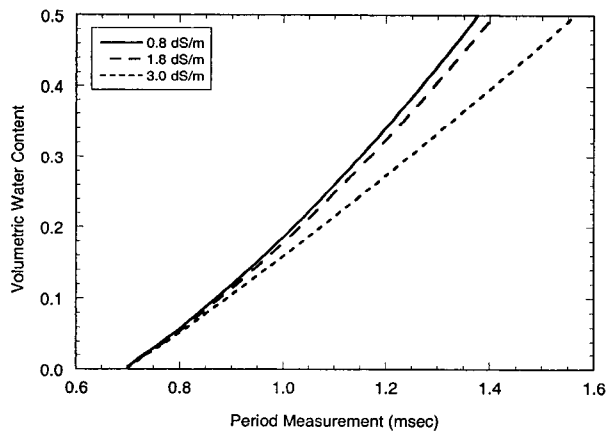


그림 2. 전기 전도율에 따른 주기-체적함수비 곡선

1969).

그림 2는 흙의 전기 전도율 σ_e 이 0.8dS/m~3.0dS/m의 값을 가질 때 Calibration 곡선을 나타낸 것이다. Calibration 곡선의 기울기는 전기 전도율이 감소함에 따라 증가한다(CSI 1996).

2.2 흙의 체적 함수비 Calibration 곡선

WCR을 이용하여 미국 Rocky Mountain Arsenal의 복토재에 대한 체적 함수비를 측정하였다. WCR의 Probe를 설치한 곳의 복토재는 4종류의 다른 흙의 범위를 갖는다. 흙의 물성은 표 1과 같고 흙에 대한 Calibration 곡선은 그림 3과 같다(RVO, 1997).

그림 3에서 Rocky Mountain Arsenal의 복토재에 대한 Calibration 곡선들은 CSI(Campbell Scientific Inc.)에서 제시하는 곡선보다 기울기가 낮은 것으로 나타났다. 이는 그림 2에 나타난 전도율(σ_e)과 체적함수비(θ), 주기(T)의 관계에서 Rocky Mountain Arsenal의 복토재가 CSI에서 시험한 흙보다 높은 전기 전도율을 갖고 있고 이 결과 주어진 체적함수비에 대하여 더 긴 주기를 보이고 있다.

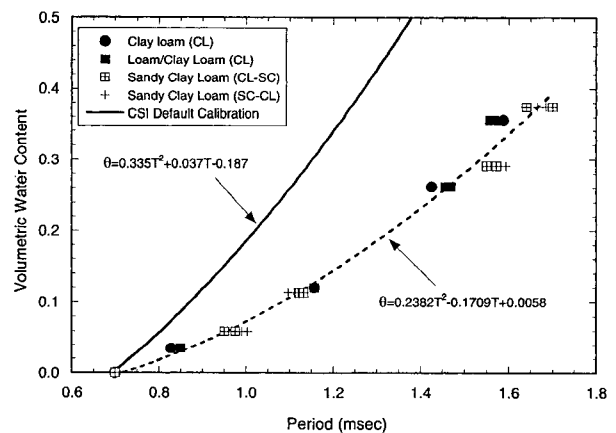


그림 3. Rocky Mountain Arsenal에서 이용된 복토재에 대한 WCR Calibration 곡선

표 1. Rocky Mountain Arsenal의 복토재의 물성값

Layer Description ¹	Dry Density(t/m ³)	Sandy(%)	Silt(%)	Clay(%)	USCS ²
Clay loam	1.43	27	41	32	CL
Loam/Clay loam	1.45	36	37	27	CL
Sandy clay loam	1.45	51	21	28	CL-SC
Sandy clay loam	1.41	60	18	22	SC-CL

¹USDA : United States Department of Agriculture textural classification system

²USCS : Unified Soil Classification System

3. 실험재료 및 방법

3.1 흙의 물성

본 연구에서는 Montana 주의 Helena와 Nebraska 주의 Omaha 흙이 사용되었다. 흙의 토질 정수와 LOI(Loss on Ignition), 흙의 분류 등은 표 2와 같다.

3.2 실험방법

WCR을 이용하여 각각의 흙에 대한 Calibration을 구하기 위해 약 10kg의 흙을 공기중에 건조한 후 분쇄하여 US No.4 sieve(4.75mm openings)로 체가름 하였다. 준비된 흙에 목표 체적 함수비를 설정하여 스프레이를 이용해 균일하게 물을 뿌려 함수비를 맞추었다. 체적 함수비를 조절된 시료는 직경 150mm, 길이 500mm의 PVC Cell에 넣고 표준다짐 해머로 다짐 에너지를 가하였다. 다짐층의 두께는 30mm로 하고 목표 건조단위중량을 정하여 15회에서 20사이의 다짐을 실시하였다. 목표 건조단위중량은 표 2에 제시된 평균 현장 건조 단위중량 γ_{dr} 으로 하였고, 목표 체적함수비(θ)는 0.00, 0.08, 0.16, 0.24, 0.32, 0.40으로 설정하였다.

WCR Probe를 설치한 Calibration Cell의 개요도는 그림 4와 같고 Calibration Cell의 상단은 다짐 후에 비닐 캡을 씌워 흙 속의 수분의 증발을 방지하였다. WCR의 Rod를 흙 속에 삽입하는 동안 Rod와 흙 사이의 공기로 인한 공극의 발생을 방지하기 위하여 Rod의 움직임을 최소화하였다. Rod 설치 후 시험 전에 흙 속의 체적 함수비가 평형이 되도록 24시간 동안 방치하였다.

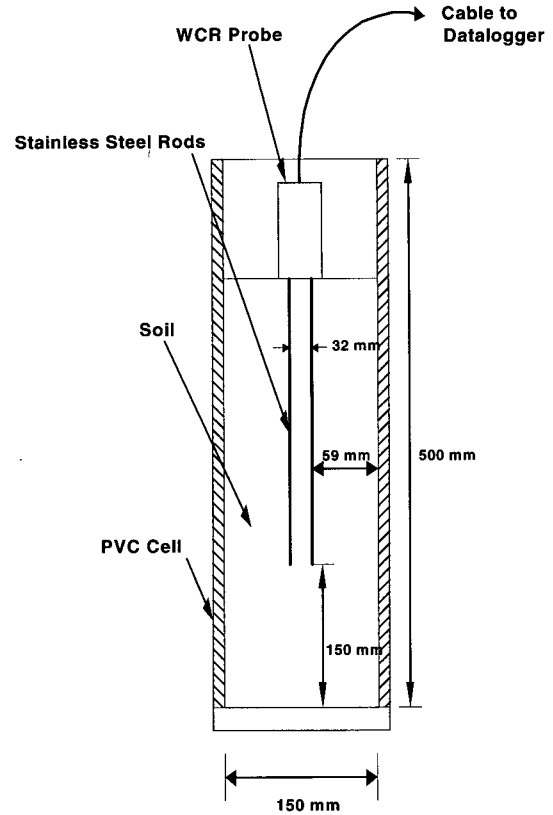


그림 4. WCR Probe를 설치한 Calibration Cell의 개요도

체적 함수비를 변화시킨 각각의 Calibration Cell에 대해 흙의 전기 전도율을 3회에서 4회 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Soil Specific Calibrations

체적함수비(θ)와 주기(T)의 관계는 선형식과 비선형

표 2. 흙의 물성값 및 흙의 분류

Location	Description	γ_{dr}^1 (kN/m ³)	γ_{dm}^1 (kN/m ³)	W_{opt}^1 (%)	LL ² (%)	PI ² (%)	G_s^2	Gravel ³ (%)	Sand ³ (%)	Silt ³ (%)	Clay ³ (%)	LOI ² (%)	USDA ² (%)	USCS ² (%)
Omaha, Nebraska	Silty Clay	15.4	16.4	19.2	44	25	2.60	0.0	5.1	61.1	33.8	0.00	Silty Clay Loam	CL
	Sand	15.8	N/A	N/A	NP	NP	2.64	0.0	100	0.0	0.0	0.00	Sand	SP
	Clayey Sand	14.7	16.2	19.2	45	27	2.59	0.0	1.2	63.6	35.2	0.88	Silty Clay Loam	CL
Helena, Montana	Clayey Sand	15.1	15.5	23.2	72	49	2.54	2.6	50.3	16.6	30.5	0.79	Sandy Clay Loam	SC
	Silty Sand	16.4	18.5	12.2	32	14	2.60	21.3	51.8	16.0	10.9	0.79	Sandy Loam	SC

¹ γ_{dr} = field dry unit weight, γ_{dm} = maximum dry unit weight, W_{opt} = optimum water content

²LL = liquid limit, PI = plastic index, G_s = specific gravity of solids, USDA = United States Department of Agriculture textural classification system, USCS = Unified Soil Classification System, LOI = loss on ignition, N/A = not available

³Based on size definitions in Unified Soil Classification System.

표 3. 선형식 및 다항식의 상수 및 통계 정수

Location	Description	Linear Calibration				Polynomial Calibration				
		$\alpha(\text{ms}^{-1})$	$T_{\min}(\text{ms})$	R^2	편의(Bias)	a	b	c	R^2	편의(Bias)
Omaha, Nebraska	Silty Clay	0.2970	0.810	0.9668	-0.0001	0.142	-0.127	0.042	0.9799	0.000
	Sand	0.9413	0.804	0.9995	0.0000	0.129	0.679	-0.626	0.9996	0.000
	Clayey Sand	0.2616	0.750	0.9901	0.0000	0.026	0.180	-0.141	0.9908	0.000
Helena, Montana	Clayey Sand	0.2159	0.610	0.9908	-0.0008	-0.023	0.288	-0.180	0.9919	0.000
	Silty Sand	0.2898	0.751	0.9926	0.0000	-0.098	0.566	-0.396	0.9984	0.000

표 4. 전기전도율 방정식의 정수 및 상관계수

Location	Description	Linear Calibration		
		B	$\sigma_{e,s}(\text{dS/m})$	R^2
Omaha, Nebraska	Silty Clay	1.58	1.30	0.93
	Sand	N/A	0.05	N/A
	Clayey Sand	2.57	1.17	0.96
Helena, Montana	Clayey Sand	2.16	2.48	0.86
	Silty Sand	0.96	0.71	0.95

식으로 나타낼 수 있다. 선형식의 함수는

$$\theta = \alpha(T - T_{\min}) \quad (2)$$

비선형식을 표현하는 다항식의 함수는

$$\theta = aT^2 + bT + c \quad (3)$$

식 (2)에서 α 는 상수, T_{\min} 은 $\theta = 0$ 에 해당하는 주기이고 식 (3)에서 a, b, c는 상수이고, 식 (2)와 식 (3)은 $T > T_{\min}$ 일 때 성립한다.

다항식의 Calibration에서 상관계수의 제곱 R^2 의 범위는 0.9799~0.9996이고, 선형식에서는 0.9668~0.9995로 나왔다. 이들 데이터에 강한 상관성이 있음을 알 수 있고 다항식의 R^2 이 선형식보다 약간 높은 상관성이 있으나 선형식을 이용하는 것이 사용이 용이하고 신뢰성 면에서도 이용이 적합하므로 WCR의 Calibration에서

선형식을 채택하였다(Ang et al. 1975).

선형식에서 상수 α 는 0.2159~0.9413의 범위를 보이고, T_{\min} 은 0.610~0.810msec의 범위를 보이고 있다.

각각의 체적함수비에서의 전기전도율(σ_e)은 간편 TDR (rod 길이 100mm)을 이용하여 구하였다. 불포화토의 전기전도율 방정식은 식 (4)에서 포화도의 함수로 구하였다(Abu-Hassanein et al. 1996).

$$\sigma_e = \sigma_{e,s} S^B \quad (4)$$

여기서, $\sigma_{e,s}$: 포화시 전기전도율

S : 포화도($S = \theta/n$)

B : 실험정수

전기 전도율 방정식의 정수 및 상관계수는 표 4와 같고 점토를 함유하지 않은 모래를 제외한 포화시의 전기전도율은 0.71~2.48dS/m의 범위를 나타내고 있다.

4.2 흙의 물성값과 WCR Calibration 직선 기울기(α)와의 관계

흙종류별 WCR Calibration 직선 기울기(α)와 물성값과의 관계를 구하는 실험을 위해 이용된 흙의 종류와 물성은 표 5와 같다. 이 흙 미립자가 WCR의 Calibration 인자에 미치는 영향을 알아보기 위하여 $2\mu\text{m}$ 이하 점토

표 5. 시료의 물리적 특성

Property USCS	LL(%)	PI(%)	G_s	Gravel(%)	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	LOI ¹ (%)	Number of Sample
CH	50~61	22~29	2.60~2.69	0.0	15.1~20.1	44.9~51.9	28.0~40.0	1.13	2
CL	33~45	19~27	2.59~2.72	0.0~1.6	1.2~45.7	32.2~63.6	18.1~35.9	0.00~3.93	7
SC	28~72	14~49	2.54~2.72	2.6~21.3	50.3~56.1	16.0~22.3	10.9~30.5	0.79~1.13	3
SM	NP~47	NP~19	2.63~2.66	2.2~10.6	48.5~54.6	31.4~37.4	5.8~9.5	0.96~1.88	4
SP	-	-	2.64~2.67	0.0	91.7~100.0	0.0~3.5	0	0.00	2
SW	-	-	2.68	30.0~36.6	58.1~65.0	3.3~3.7	1.3~2.00	0.52~1.33	2
Organic Soil	27~43	14~25	2.59~2.65	1.3~2.5	40.8~64.4	8.1~32.2	25.0~25.7	3.93~6.90	3

¹LOI : Loss on Ignition

입자의 함유율 변화에 따른 곡선기율기와 전기전도율의 변화를 알아보았다.

4.2.1 2 μm 이하 점토입자의 영향

2 μm 이하의 점토입자가 Calibration 기율기에 미치는 영향을 알아보기 위해서 α 와 2 μm 이하의 점토입자 함유율을 변화시켜 토질 종류별로 실험하였다. 데이터를 최소자승법으로 최적화하여 얻은 결과는 그림 5와 같다. 2 μm 이하 점토입자의 함유율이 높을수록 α 는 작아지는 경향을 나타내고 있으며 사질토가 점토에 비해 높

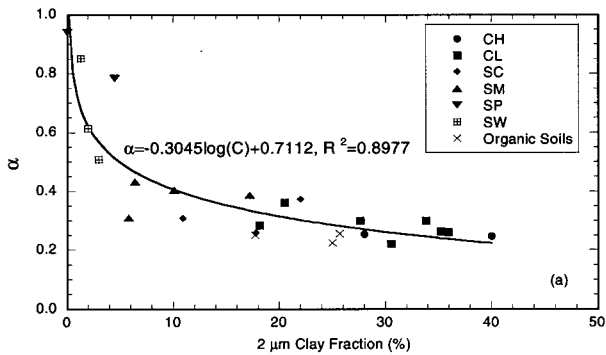


그림 5. 2 μm 이하의 점토입자 함유율과 WCR 기율기(α)의 관계

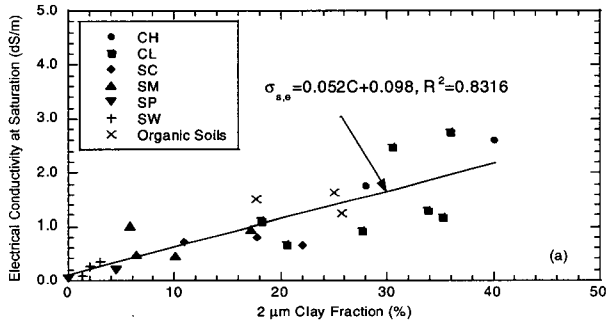


그림 6. 2 μm 이하의 점토입자 함유율과 포화시 전기전도율(σ_e)과의 관계

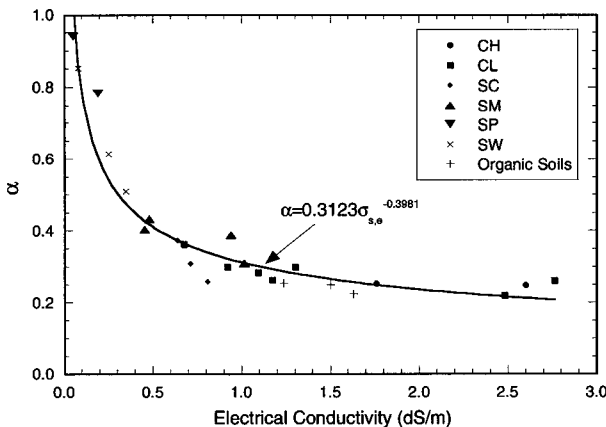


그림 7. 포화시 α 와 전기전도율의 관계 곡선

은 값을 보이고 있다. 세립분을 많이 함유하고 있는 유기질토 역시 낮은 α 값을 보이고 있다.

포화시 전기전도율(σ_e)과 2 μm 이하의 점토입자 함유율과의 관계를 최소자승법으로 구한 결과는 그림 6과 같다.

2 μm 이하의 점토입자 함유율이 높을수록 전기전도율이 커지는 경향을 보이고 토질 종류별로는 사질토보다 점토, 유기질토 순으로 높은 값을 나타내고 있다.

포화된 흙의 WCR Calibration 기율기(α)와 전기전도율(σ_e)의 관계는 최소자승법으로 구한 결과 그림 7과 같이 전기전도율이 증가할수록 WCR Calibration 기율기는 작아지는 경향을 보였고, 최소자승법을 이용하여 구한 함수식은 식 (5)와 같고 상관계수 R^2 은 0.9636으로 실험 자료와 분석항목간에 강한 상관관계를 나타내고 있다.

$$\alpha = 0.3123\sigma_{e,s}^{-0.3981} \quad (5)$$

여기서, $\sigma_{e,s}$: 포화시 전기전도율

4.2.2 Atterberg 한계의 영향

Atterberg 한계에는 흙의 구성과 광물성분이 반영되어 있으므로 WCR Calibration 기율기(α)에 영향을 미치리라고 예상하여 액성한계 및 소성한계 값에 따른 WCR Calibration 기율기의 변화를 실험 결과를 통하여 알아보았다. 그림 8에서와 같이 액성한계와 WCR Calibration 기율기의 함수식은 최소자승법에 의해

$$\alpha = 1.772(LL)^{-0.4915} \quad (6)$$

이고, 소성지수와 WCR Calibration 기율기의 함수식은 최소자승법에 의해

$$\alpha = 7.9 \times 10^{-5}(II)^2 - 0.008(II) + 0.423 \quad (7)$$

을 얻었다.

WCR Calibration 기율기는 대체로 액성한계와 소성한계가 클수록 작아지는 것으로 경향을 나타내고 있다.

그림 8에서 SC의 액성한계와 소성지수의 변화에 따라 0.22~0.40의 범위에서 비선형적으로 반비례하는 경향을 보이고 있다. SC의 WCR Calibration 기율기의 값은 다른 종류의 흙들에 비해 상대적으로 편차가 크나 상관곡선의 상관계수는 각각 0.971과 0.854인 값을 나타내고 있어 강한 상관관계를 보이고 있다.

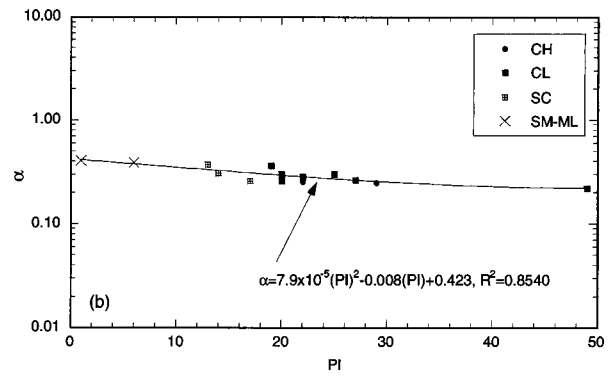
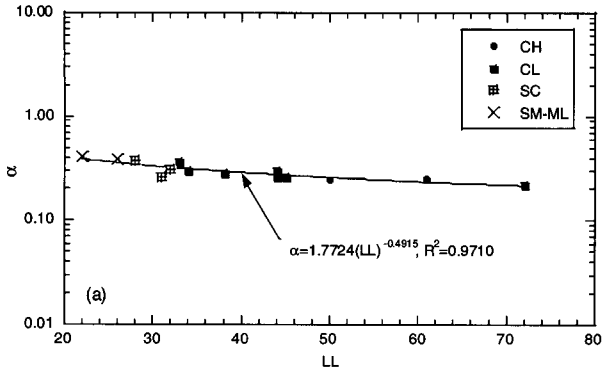


그림 8. 액성한계(LL)와 소성한계(PI)에 대한 α와의 관계 곡선

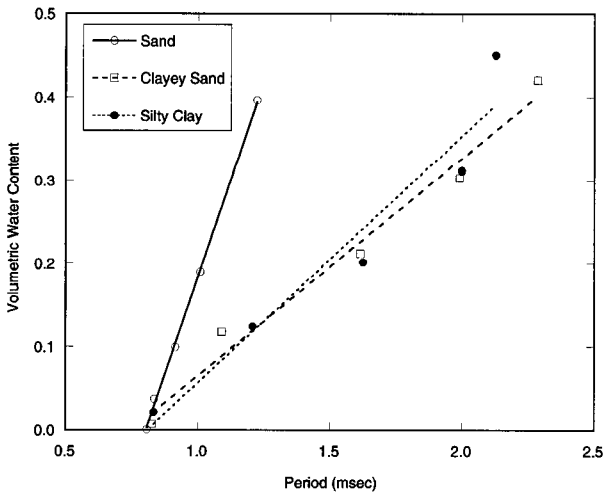
4.3 WCR을 이용한 체적함수비 측정 결과

WCR을 이용하여 체적함수비를 Calibration한 결과 그림 9와 표 6에서와 같이 점토가 함유된 흙에 대해서는 기울기 값이 0.22~0.31의 범위를 갖는 것으로 나타났고, 사질토에 대해서는 0.96으로 점토에 비해 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 여러 종류의 흙을 이용하여 Atterberg 한계 값에 대해 기울기를 추정한 식 (6)과 식 (7)을 적용

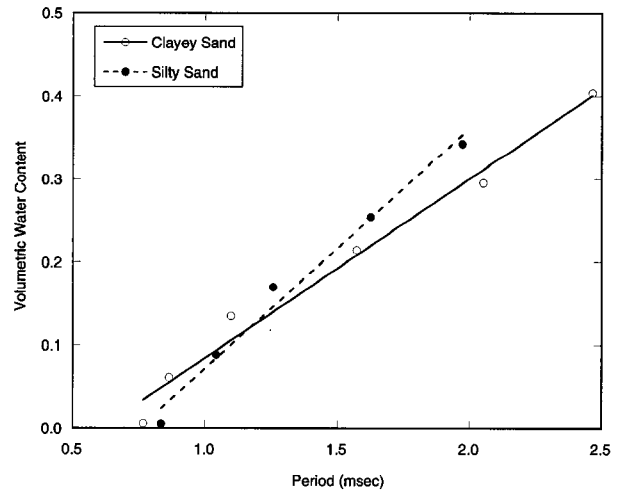
하여 기울기를 구한 결과 표 6에서와 같이 상대오차는 각각 0.0~3.2(%)와 0.0~3.3(%)로 최대값 3.3%로 나타났다.

5. 결론

WCR을 이용하여 체적함수비와 흙의 Electrical Conductivity를 구하기 위한 본 연구에서 여러 종류의 흙에



(a) Omaha, Nebraska Soils



(b) Helena, Montana Soils

그림 9. WCR 측정 결과

표 6. WCR에 의한 Calibration 기울기(α) 산정 및 추정식에 의한 산정

Location	Description	Linear Calibration			Estimation				USCS
		α (msec ⁻¹)	θ_{min}	R ²	$\alpha = f(LL)^1$	상대오차 ¹ (%)	$\alpha = f(PI)^2$	상대오차 ² (%)	
Omaha, Nebraska	Silty Clay	0.28	0.83	0.98	0.28	0.0	0.27	3.6	CL
	Sand	0.96	0.81	0.98	-	-	-	-	SP
	Clayey Sand	0.26	0.83	0.92	0.27	3.8	0.26	0.0	CL
Helena, Montana	Clayey Sand	0.22	0.77	0.98	0.22	0.0	0.22	0.0	SC
	Silty Sand	0.31	0.83	0.98	0.32	3.2	0.33	6.5	SC

¹식 (6)의 함수를 이용한 기울기의 계산

²식 (7)의 함수를 이용한 기울기의 계산

대하여 WCR Calibration 상수를 결정하는 시험을 실시하였고, 토질의 특성이 WCR Calibration 상수에 미치는 영향을 실험을 통하여 알아보았다.

- (1) WCR의 Calibration을 위해 선형식을 이용한 결과 다항식과 큰 차이를 보이지 않았고 체적함수비(θ)와 주기(T)사이에는 상관성이 높은 선형성을 보였다.
- (2) 이 특성을 이용하여 여러 종류의 흙에 대하여 WCR Calibration 곡선기울기를 구한 결과 대체로 전기전도도가 낮은 사질토에서는 기울기가 크게 나왔고, 전기전도도가 높은 유기질토와 점토에 대해서는 기울기가 작은 경향을 보였다.
- (3) 2 μ m이하의 점토입자 함유율과 포화토의 전기전도도의 관계에서는 선형적인 비례관계를 보였고 미립자 점토입자의 함유가 적은 사질토에서는 낮은 값을 보였다. 점토함유율이 높은 CL과 CH 등의 점토에서는 높은 전기전도도의 값을 나타냈다.
- (4) Atterberg 한계값과 WCR Calibration 곡선기울기와 의 관계에서는 높은 상관성을 보였고, Atterberg 한계값으로 유도된 함수식을 이용하여 곡선기울기를 산정한 결과 실측에 의해 구한 값과의 상대오차가 액성한계 함수식의 경우 최대 4%미만, 소성지수 함수식의 경우 7% 미만으로 산정되어 신뢰성을 보여 주었다.

향후 매립지의 복토재에 대한 장기적인 안정성 평가의 일환으로 최종 복토층에 대한 water balance의 계측이 지속적으로 이루어져야하며, 본 연구를 더욱 발전시켜 사공 현장의 기후 조건에 따라 매립지 복토층의 설계에 활용될 수 있도록 계측치와 실측치를 장시간 비교하여 data base를 구축하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Abu-Hassanein, Z., Benson, C., and Blotz, L. (1996), "Electrical Resistivity of Compacted Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.3, pp.397-407.
2. Ang, A. and Tang, W. (1975), "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", John Wiley and Sons, USA, pp.286-319.
3. Bilskie, J. (1997), "Using Dielectric Properties to Measure Soil Water Content", *Sensors*, Vol.14, No.7, pp.26-32.
4. Campbell, G. and Anderson, R. (1998), "Evaluation of Simple Transmission Line Oscillators for Soil Moisture Measurement", *Comput. Electron. Agric.*, Vol.20, No.1, pp.31-44.
5. CSI (1996), CS615 Water Content Reflectometer: Service Manual, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT.
6. Dasberg, S. and Hopmans, J. (1992), "Time Domain Reflectometry Calibration for Uniformly and Non uniformly Wetted Sandy and Clayey Loam Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.56, No.5, pp.1341-1345.
7. Fellner-Feldegg, H. (1969), "The Measurement of Dielectrics in The Time Domain", *The Journal of Physical Chemistry*, Vol.73, No.3, pp.616-623.
8. Giese, K. and Tiemann, R. (1975), "Determination of the Complex Permittivity from Thin-sample Time Domain Reflectometry Improved Analysis of the Step Response Waveform", *Advances Molecular Relaxation Process*, Vol.7, No.1, pp.45-59.
9. Jones, S., Wraith, J., and Or, D. (2002), "Time Domain Reflectometry Measurement Principles and Applications", *Hydrological Process*, Vol.16, No.1, pp.141-153.
10. Ledieu, J., De Ridder, P., and Dautrebande, A. (1986), "A Method for Measuring Soil Moisture by Time-Domain Reflectometry", *Journal of Hydrology*, Vol.88, No.3-4, pp.319-328.
11. Look, B. and Reeves, I. (1992), "The Application of Time Domain Reflectometry in Geotechnical Instrumentation", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.15, No.3, pp.277-283.
12. Nadler, A., Dasberg, S., and Lapid, I. (1991), "Time Domain Reflectometry Measurements of Water Content and Electrical Conductivity of Layered Soil Columns", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.55, No.4, pp.938-943.
13. Paul, C., Whites, K., and Nasar, S. (1998), "Introduction to Electromagnetic Fields", McGraw-Hill, USA, pp.126-136.
14. RVO (1997), RCRA-Equivalent Cover Demonstration Project Comparative Analysis and Field Demonstration Design Scope of Work, Rocky Mountain Arsenal Remediation Venture Office, Adams County, Colorado.
15. Roth, C. H., Malicki, M. A., and Plagge, R. (1992), "Empirical Evaluation of the Relationship Between Soil Dielectric Constant and Volumetric Water Content as a Basis for Calibrating Soil Moisture Content", *Journal of Soil Science*, Vol.43, No.1, pp.1-13.
16. Suwansawat, S. and Benson, C. (1999), "Cell Size for Water Content-Dielectric Constant Calibration for Time Domain Reflectometry", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.22, No.1, pp.3-12.
17. Topp, G. C., Yanuka, M., Zebchuk, W. D., and Zegelin, S. J. (1988), "The Determination of Electrical Conductivity Using TDR: Soil and Water Experiments in Coaxial Lines", *Water Resources Research*, Vol.24, No.7, pp.945-952.
18. Whalley, W. R. (1993), "Considerations on the Use of Time-Domain Reflectometry (TDR) for Measuring Soil Water Content", *Journal of Soil Science*, Vol.44, No.1, pp.1-9.
19. Zegelin, S., White, I., and Jenkins, D. (1989), "Improved Field Probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry", *Water Resources Research*, Vol.25, No.11, pp.2367-2376.

(접수일자 2004. 9. 20, 심사완료일 2005. 8. 16)