

TDR의 함수비 예측을 위한 새로운 보정방정식

A New Calibration Equation for Predicting Water Contents With TDR

송민우¹, 김대현^{2*}, 최찬용³

Minwoo Song¹, Daehyeon Kim^{2*}, Chanyong Choi³

¹Nonmember, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309, Philmoondae-Ro, Dong-gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

²Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309, Philmoondae-Ro, Dong-gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

³Member, Senior Researcher, High Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437757, Republic of Korea

ABSTRACT

The objective of the study is to verify a new calibration equation of dry density and water contents with TDR. Since the traditional calibration equation was proposed, some research to develop a new calibration equation has been conducted by several researchers. As traditional calibration equation is difficult to be applied for loose soil and fine-grained soil at high water contents, this study developed a new calibration equation. Thus, this study introduces a new calibration equation and its applicability by comparing TDR test results with conventional test results. Based on the analyses, the calibration equation for water content has large error. A new calibration equation was proposed and it showed more than 95% accuracy for estimating water content of soil.

요 지

TDR

가

가

가

95%

Keywords : TDR, Calibration Equation, Dry Density, Water Contents

1. 서 론

흙의 함수비와 건조밀도는 일반적으로 다짐 품질관리를 위한 중요한 요소임에도 불구하고, 국내에서는 오랜 기간 현장에서의 적용을 통하여 검증되었지만 시험시간이 길고 시험 자에 의한 개인 오차 등으로 인한 신뢰성이 낮

은 재래식 다짐 평가방법인 들밀도 시험, 평판재하시험, 반복평판재하시험 등을 그대로 이용하고 있다. 이러한 재래식 다짐 품질관리는 비경제적일 뿐만 아니라 일련의 토목공사에서 다짐의 불균질로 인한 지지력 감소, 침하 및 균열 등의 문제가 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 미국 및 유럽 등에서 노반의 다짐관련 설계정수를 손쉽게 확보할 수 있는 방법을 연구하고 있으며, 본 연구에서 활용하고자 할 시간영역 반사법(Time Domain Reflectometry, 이하 TDR)의 활용

Received 12 Mar. 2015, Revised 24 Mar. 2015, Accepted 25 Mar. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-62-230-7607; Fax: +82-62-220-2687

E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D.H. Kim)

이 증가하고 있다.

TDR은 1950년대 전력 및 통신 산업에서 전송선의 불연속 지점을 찾기 위해 도입되었다. 이러한 기술을 Hugo Freller Feldege(1969)가 액체 유전율을 측정해 TDR의 사용을 확대하였으며, Topp 등(1980)은 토양의 유전율이 토양 내 포함된 물의 양에 강하게 의존한다는 것을 입증하였으며 TDR의 추가 적용 가능성을 평가하였다.

최근 미국의 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진에 의해 지반 공학적 특성을 고려한 ASTM TDR 방법이 개발되면서 현장 지반의 건조밀도와 중량함수비를 측정하는 TDR에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 연구를 바탕으로 본 연구에서는 Jung 등(2013)의 새로운 보정 방정식과 특성상수 결정방법에 대하여 소개하고 화강풍화토 및 주문진표준사를 이용하여 국내지반과의 적용성을 검토하고, 보정방정식을 개선하여 국내지반과 맞는 식을 개발하고자 한다.

2. TDR 적용이론

2.1 TDR의 측정 기본원리

TDR은 전기신호의 전도특성을 이용하여 흙 속에 설치된 프로브의 전기신호의 반향시간을 측정하는 전기적인 측정 장치이다. TDR은 펄스발생기, 프로브, 수신기로 구성되며 펄스발생기에서 생산된 전자기파가 동축케이블과 흙에 관입된 프로브를 통하여 전파되는 동안 동축케이블과 프로브 주변 매질의 임피던스 변화에 따라 전자기파가 반향되는 특성을 이용하여 흙의 유전상수(K_a)와 충전기전도도(EC_b)를 측정한다. 여기서 측정되는 유전상수는 측정하는 시료가 균질하지 않은 경우 측정하는 영역의 평균값이다.

2.2 TDR을 이용한 흙의 건조밀도와 함수비

Topp 등(1980)은 유전상수의 측정을 통하여 체적함수비(θ)를 측정할 수 있는 식 (1)을 제안하였다. Topp 등이 제안한 식은 일반적인 흙에서 오차가 허용범위 안에 들어오는 만족할 만한 체적함수량 값을 얻게 되었으나, 몇몇 연구자들에 의해 유기질토, 세립질토 및 점토 등에서 유전상수와 체적함수비의 관계에 많은 오차가 발생하여 적합하지 않다고 평가하였다(Roth 등, 1992; Dirksen 등, 1993).

이에 Malicki 등(1996)은 흙의 밀도 효과에 의한 관계식인 식 (2)를 제안하였다.

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{K_a^{0.5} - 0.819 - 0.618\rho_b + 0.159\rho_b^2}{7.17 + 1.18\rho_b} \quad (2)$$

여기서, K_a : 흙의 유전상수

ρ_b : 흙의 전용적밀도(g/cm^3)

Yu & Drnevich(2004)는 현장에서는 중량함수비를 이용하는데 반해 위의 보정방정식들은 체적함수비로 표현되고, 밀도 효과를 포함한 보정 방정식은 복잡하고 적용하기 어렵다고 하였다. 이에 Siddiqui & Drnevich(1995)는 중량함수비로 이루어진 식 (3)과 같은 선형 보정방정식을 제안하였고, 이는 다양한 흙에 대해 만족스러운 결과를 보여 주었다(Sallam 등, 2004).

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (3)$$

여기서, ρ_w : 물의 밀도(g/cm^3)

ρ_d : 흙의 건조밀도(g/cm^3)

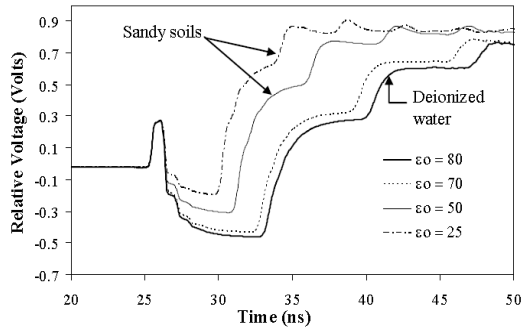
a, b : 흙의 특성 보정 상수

w : 중량함수비

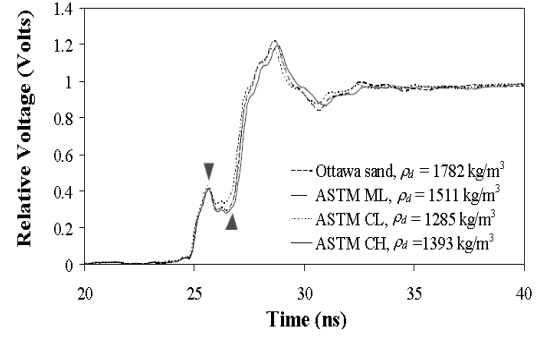
Rhoades 등(1976)은 간극유체의 전도도와 체적함수비, 흙의 표면전도성의 관계를 이용하여 총 전기전도도를 구하는 식을 다음 식 (4)와 같이 제안하였다. 이에 Yu & Drnevich(2004)는 제안식에 밀도에 대한 고려가 없으며 체적함수비로 표현된 전기전도도는 지반 공학적으로 응용하는데 부족하다고 주장하였고, 흙의 충전기전도도의 지배요인은 간극유체의 전기전도도이므로, 간극유체의 양은 흙의 충전기전도도를 지배한다고 보고 식 (5)와 같은 관계식을 제안하였다.

$$EC_b = a' EC_w \theta^2 + b' EC_w \theta + EC_s \quad (4)$$

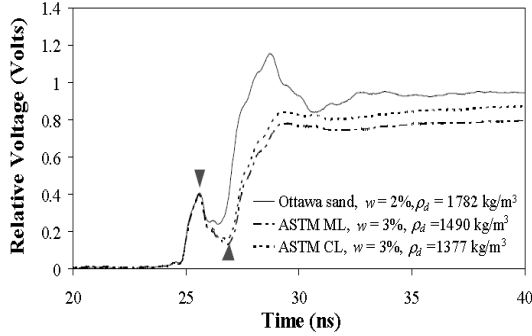
$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw \quad (5)$$



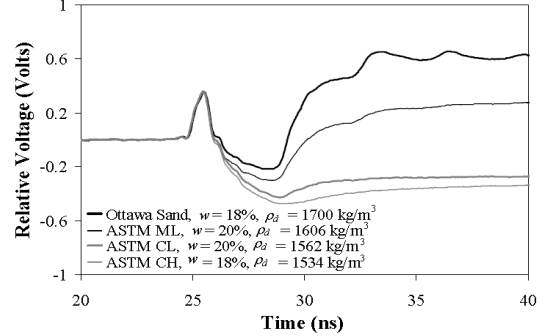
(a) Waveform changes according to the static permittivity (ϵ_0)



(b) Waveform of oven dry soils



(c) Waveform of soils at low water content



(d) Waveform of soils at high water content

Fig. 1. TDR waveform (Zambrano, 2006)

여기서, a', b', c, d : 흙의 특성 보정 상수

EC_w : 간극유체의 전도도

EC_s : 흙의 표면전도도

EC_b : 충전기전도도

현장에서 측정된 TDR신호를 이용하여 유전상수 보정 방정식 식 (3)과 충전기전도도 보정 방정식 식 (5)에서 구한 보정계수를 산정하고, 유전상수, 충전기전도도와 TDR 보정계수를 이용하여 다음의 식 (6)과 (7)을 이용해 현장 지반의 건조밀도와 함수비를 계산할 수 있다(Drnovich 등, 2005).

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (6)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (7)$$

3. 새로운 보정 방정식 제안

3.1 흙의 종류에 따른 TDR파형의 변화

상기 보정 방정식이 제안된 후 많은 연구자들이 제안식

을 검증하였다. 그 결과 Zambrano(2006)이 실험과 문헌조사를 통해 실트 및 점토 등의 세립토에서 흙의 함수비가 증가할수록 충전기전도도는 비선형거동을 한다고 하였고, 이와 같은 성질로 인해 TDR의 파형은 시료의 종류 및 함수비 등에 따라 달라질 수 있다고 하였다. 다음의 Fig. 1(a)는 시료의 유전율에 따른 TDR 파형을 보여주고 있다.

또한 세립토에서 함수비가 증가하면 TDR 신호로 얻어진 TDR 파형이 일반적인 TDR 파형과는 다른 결과를 나타내고 TDR 파형을 통해 모래, 실트 및 점토를 구별할 수 있다(Zambrano, 2006).

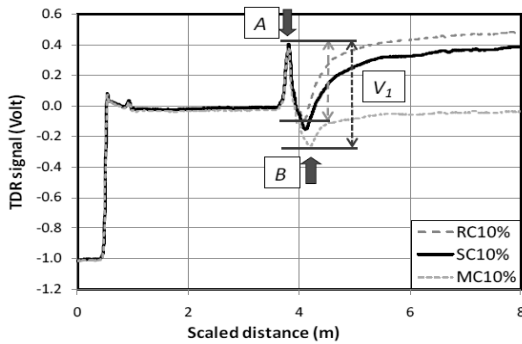
여기서 Fig. 1(b), (c), (d)는 함수비의 변화에 따른 TDR 파형의 변화를 보여주고, Table 1은 상기 보정 방정식과 그 이후 행해진 연구에서 사용한 시료의 물성이다.

3.2 건조밀도와 함수비의 새로운 보정방정식(Jung 등, 2013)

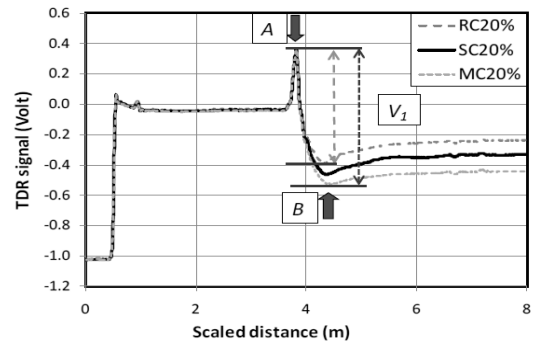
Jung 등(2013)은 기존의 TDR 장비를 이용한 흙의 건조 밀도 및 함수비의 측정 방법은 다양한 토질에 적용되지만 함수비가 적은 토질에 제한적으로 이용되었고, 느슨한 흙에서의 유전상수(K_a)를 얻는 것은 어렵고 실내실험에서의 특성상수 값 사용이 어려워 연구를 수행하였다.

Table 1. Engineering characteristics of the soils used in previous research

Soil	Classification	sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Gs	P<#200 (%)	LL (%)	PI	Researcher
M1	SM-SC	55	35	10	2,76	41,3	-	-	Lin (1999)
M2	ML	37,5	40	17,5	2,77	52,4	16,2	10,5	Lin (1999)
M3	CL	20	55	25	2,83	72,9	28,5	12,3	Lin (1999)
M4	CL	12,5	47,5	40	2,83	78,6	33,7	18,9	Lin (1999)
M5	CL	5	40	55	2,82	84,4	41	19,9	Lin (1999)
Jasper	CL	11	60	29	*	*	47	26	Daita (2005)
Jascrete	CL	50	35	15	*	50,5	24	9	Daita (2005)
Orchard	CL	28	47	25	*	72,2	35	19	Daita (2005)
Salisbury	CL	10	48	42	*	91	48	29	Daita (2005)
Grundite	CL	23	51	25	2,73	76	46,7	26	Daita (2005)
Florida sand	SP	*	*	0	2,65	*	-	-	Drnevich et al. (2005)
Ottawa sand	SP	100	0	0	2,65	0	-	-	Zambrano (2006)
ASTM CH	CH	16,8	35,8	47,3	2,72	98,8	60	40	Zambrano (2006)
ASTM CL	CL	42,3	27,7	30	2,67	88,5	33,2	13,4	Zambrano (2006)
ASTM ML	ML	1	94	5	2,72	99	29	8	Zambrano (2006)



(a) Waveform at water contents of 10% for ASTM CH soil



(b) Waveform at water contents of 20% for ASTM CH soil

Fig. 2. Waveform at changing water contents (Jung et al., 2013)

다짐에너지가 TDR 파형에 미치는 영향을 알아보기 위해 Reduced Compaction(RC), Standard Compaction(SC), Modified Compaction(MC)의 에너지 수준을 가지고 시험을 진행하였다. 또한 ASTM CH 시료의 경우 공극수 전도도의 영향을 알아보기 위해 탈이온수(DI) 및 염수(SAL)를 가지고 시험을 진행하였다.

다음의 Fig. 2는 ASTM CH 시료의 함수비에 따라 변화하는 TDR 파형 형상을 나타내었다.

Fig. 2에서 나타난 것과 같이 첫 번째 반사지점(A)에서 두 번째 반사지점(B)까지의 전압강하량(V_1)이 함수비에 따라 변화하는 것을 확인하여 새로운 TDR 측정 지표로서 도입하였고, 다음의 식 (8)과 (9)를 제안하였다.

$$\rho_d = \frac{V_1}{V_f} \rho_w \frac{1}{c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)]} \quad (8)$$

$$w = \frac{1}{b} \left(\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} - a \right) \quad (9)$$

여기서, V_f : 장주기 전압레벨

a, b, c_1, d_1, f_1 : 흙의 특성 보정 상수

3.3 새로운 보정방정식의 적용성 검토

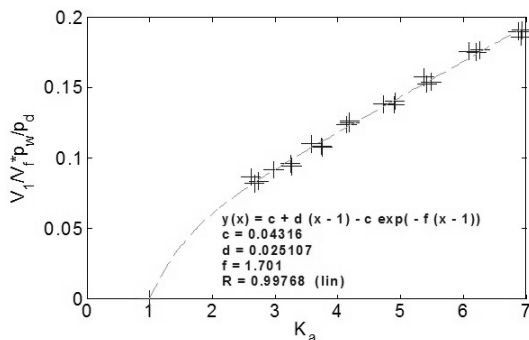
화강풍화토 및 주문진표준사를 대상으로 Jung 등(2013)의 제안식의 검증실험을 실시하였다. 건조밀도는 일정하게 유지하고, 함수비를 0~10%로 변화시켜 실험을 진행하

Table 2. Engineering characteristics of the soils used in this research

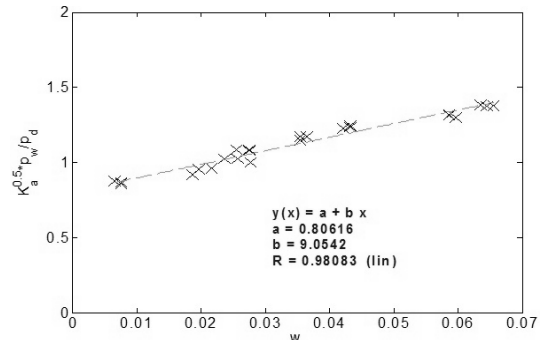
Soil	Classification	sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Gs	P<#200 (%)	LL (%)	PI
Weathered Granite Soil	SW	90	8	2	2,65	10	–	–
Jumunjin sand	SP	100	0	0	2,58	0	–	–

Table 3. A set of experimental data obtained using TDR

Soil	Water content (%)	Dry density (g/cm ³)	V ₁	V _f	K _a
Weathered Granite Soil	1.66	1,511	0.20013	1,93446	1,853
	2.60	1,507	0.23336	1,92075	2,192
	3.56	1,506	0.26672	1,90704	2,560
	4.98	1,499	0.30009	1,89334	2,957
	5.52	1,517	0.33345	1,87963	3,381
	6.01	1,515	0.36681	1,86592	3,835
	8.05	1,513	0.40017	1,85221	4,317
	8.89	1,503	0.43354	1,83850	4,827
Jumunjin sand	0.76	1,885	0.29232	1,88812	2,673
	1.97	1,883	0.32930	1,83385	3,246
	2.57	1,887	0.36628	1,77957	3,745
	2.75	1,887	0.40326	1,72530	4,187
	3.65	1,89	0.44024	1,67103	4,892
	4.32	1,884	0.47722	1,61675	5,484
	5.97	1,897	0.51420	1,56248	6,091
	6.55	1,904	0.55118	1,50820	6,913



(a) Calibration Equation 10 from test data, Plotting with data for weathered granite soil



(b) Calibration Equation 10 from test data, Plotting with data for weathered granite soil

Fig. 3. Determine calibration coefficients from plotting test data

였고, 함수비를 변화시킬 때 마다 3번씩의 실험을 진행하였다. Table 2는 실험에 사용된 시료의 물성 값이다.

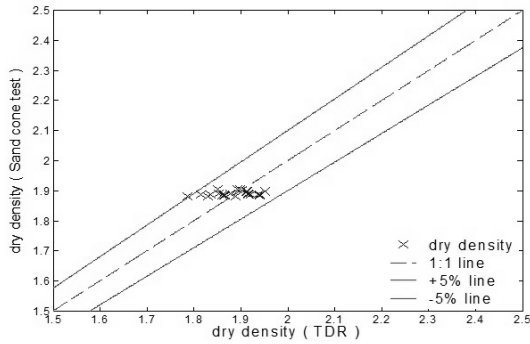
3.3.1 특성상수 값 결정

일반적으로 특성상수 값 결정은 회귀분석을 통해 이루어진다. 유전상수가 1일 때, 즉 진공상태일 때 전자기파의 반사가 이루어지지 않기 때문에 V₁이 0이 되므로 위의 식 (8)의 특성상수 값(c₁, d₁, f₁)을 결정하기 위해서는 비선형 회귀분석을 이용해야 한다. 비선형회귀분석의 방법에는 여러 가지 방법이 있지만 본 연구에서 특성상수 값을 결정

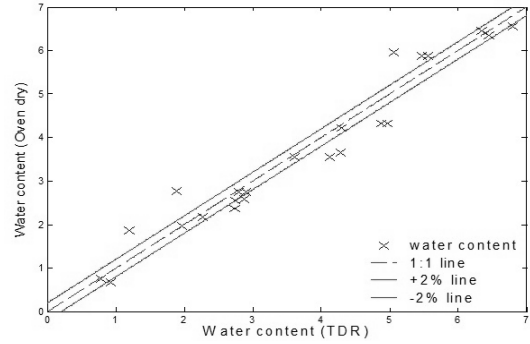
하기 위한 프로그램으로 MATLAB을 이용하였다. 화강풍화토 및 주문진표준사의 시료에 대하여 각 세트의 TDR 실험데이터를 가지고 보정방정식의 특성상수 값을 결정하기 위한 검증을 수행하였다.

Table 3은 화강풍화토와 주문진표준사의 실험을 통해 얻어진 대표적인 1세트의 함수비와 건조밀도, V₁, V_f, K_a 값 이다.

흙의 함수비가 증가함에 따라 유전상수가 증가하며, 또한 V₁/V_f도 증가함을 알 수 있다. 화강풍화토에 대하여 MATLAB을 이용하여 다음 Fig. 3의 그래프를 도시하여



(a) Comparisons of dry density by TDR and sand cone test for weathered granite soil



(b) Comparisons of water content by TDR and oven drying for weathered granite soil

Fig. 4. Comparisons of dry density and water content by TDR and direct measurements

특성상수 값을 결정하였다.

3.3.2 건조밀도와 함수비의 측정 값 비교

결정한 특성상수 값을 바탕으로 식 (8)과 (9)에 대입하여 TDR 실험을 통한 건조밀도 및 함수비를 측정하였고, 기존시험방법인 모래치환법(KS F 2311) 및 노건조 함수비시험(KS F 2306)을 진행하여 두 실험을 비교한 결과 새로운 보정방정식이 Fig. 4(a)와 같이 건조밀도의 경우 대부분 오차범위 5%이내의 값을 가진다는 것을 알 수 있었고, Fig. 4(b)와 같이 함수비의 경우는 다소 부정확하지만 오차범위 10%이내의 값을 가진다는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 Jung 등(2013)의 건조밀도의 보정방정식과 화강풍화토 및 주문진표준사의 적용성을 확인하였고, 함수비의 보정방정식에 대한 오류를 확인할 수 있었다. 건조밀도의 보정방정식의 경우 다양한 토질에 대한 추가적인 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단되며, 함수비의 보정방정식에 대한 수정 및 보완을 통해 새로운 보정방정식의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

3.4 함수비의 새로운 보정방정식 개발

Jung 등(2013)이 제안한 함수비의 보정방정식이 건조밀도의 경우 95%이상의 확실한 데이터를 얻을 수 있는 반면 함수비의 경우 함수비가 낮은 흙에서 정확도가 현저히 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 TDR로 측정한 건조밀도 값이 추가되어 건조밀도의 오차가 함수비의 방정식에 포함되어 정확한 값을 얻기 힘들기 때문이다. 이에 따라, 본 연구에서는 Jung 등(2013)이 제안한 건조밀도의 보정방정식에서 새로운 지표로 제안한 V_1 을 활용하여 이론식을 개발하였다. 함수비가 증가함에 따라 V_1/V_f 값이 증가함을 확인하

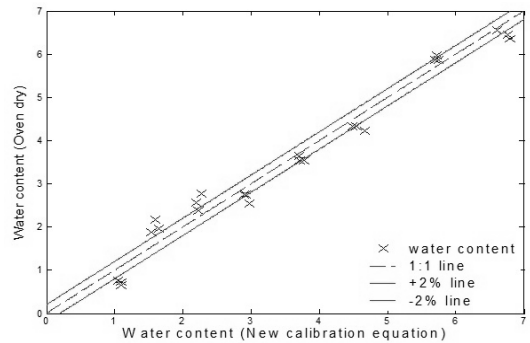


Fig. 5. Comparisons of water content by using TDR New Calibration Equation and direct measurements

였고, 이를 토대로 식 (10)과 같은 함수비 예측을 위한 새로운 보정방정식을 개발하였다. Fig. 5는 개발한 함수비의 이론식과 노건조 함수비 시험의 측정값을 비교한 그래프이다. Fig. 4(b)와 Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 화강풍화토에 대해 Jung 등(2013)이 제안한 보정식보다 훨씬 정확도가 높게 함수비를 예측할 수 있었다.

$$w = \frac{1}{b} \left(\sqrt{K_a} \frac{V_1}{V_f} - a \right) \quad (10)$$

본 연구를 통해 기존의 함수비의 보정방정식 보다 높은 정확도를 가진 식을 개발하였고, 본 연구에서 사용된 화강풍화토, 주문진표준사를 포함한 다양한 흙을 이용해 검증을 거쳐 더욱 정확도가 높은 식으로 개선해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

TDR을 이용하여 흙의 건조밀도와 함수비를 측정하는

연구는 Yu & Drnevich(2004)의 보정방정식을 통해 이루어졌으며, 적용 토질이나 함수비는 극히 제한적이었다. 이러한 연구를 바탕으로 Jung 등(2013)은 흙의 건조밀도 및 함수비에 대한 보정방정식을 개발하였고, Jung 등(2013)이 제안한 보정방정식은 다양한 토질이나 넓은 범위의 함수비에 적용성이 높다는 연구결과를 바탕으로 화강풍화토 및 주문진표준사를 대상으로 검증실험을 진행하였으며, Jung 등(2013)의 함수비의 보정방정식에 대한 문제점을 도출하였고, 그 결과 함수비 예측을 위한 새로운 보정방정식을 개발하였다. 이를 통해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 함수비를 0~10% 범위에서 변화시켜 검증실험을 실시한 결과 Jung 등(2013)의 건조밀도의 보정방정식은 오차범위 5%이내의 값을 측정할 수 있었고, 함수비의 경우 오차범위 5%를 벗어나는 경향을 보였다. 함수비의 오차가 발생하는 것은 함수비의 보정방정식에 TDR로 측정된 건조밀도의 항이 있어 건조밀도를 측정할 때 생긴 오차를 함수비의 측정값에 포함되었기 때문이다.
- (2) 함수비가 증가함에 따라 V_1/V_f 의 값이 증가함을 확인하였고, 함수비에 대한 보정방정식을 개발하였고, 개발한 함수비에 대한 보정방정식을 화강풍화토 및 주문진표준사를 대상으로 검증실험을 진행하였고, 정확도 95%이상의 함수비 측정값을 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 함수비 예측을 위한 새로운 보정방정식을 개발하였고, 추후 화강풍화토 및 주문진표준사를 포함한 다양한 흙으로 검증을 거쳐 정확도 높은 함수비의 보정방정식으로 개선이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (14RTRP-B067919-02) from Railroad Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Daita, R K. (2005). "Family of Compaction Curves for Chemically Modified Soils", *Thesis in partial fulfillment of the Requirements for the Master of Science, Purdue University*, p.50.
2. Dirksen, C. and Dasberg, S. (1993), "Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.57, pp.660-667.
3. Drnevich, V. P., Ashmawy, A. K., Yu, X., and Sallam, A. M. (2005). "Time Domain Reflectometry for water content and density of soils: study of soildependent calibration constants" *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42.
4. Fellner-Fedegg, H. (1969), "The Measurement of dielectrics in the time domain." *J. Phys. Chem.*, Vol.73, No.3, pp.616-623.
5. Jung, S., Drnevich, V., and Abou Najm, M. (2013). "New Methodology for Density and Water Content by Time Domain Reflectometry", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.139, No.5, pp.659-670.
6. Lin, C. P. (1999). "Time Domain Reflectometry for Soil Properties", *Dissertation in partial fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, Purdue University*, p.226.
7. Malicki, M. A., Plagge, R. and Roth, C. H. (1996), "Improving the Calibration of Dielectric TDR Soil Moisture Determination Taking into Account the Solid Soil", *European Journal of Soil Science*, Vol.47, pp.357-366.
8. Rhoades, J. D. and J. van Schifgaarde. (1976), "An Electrical Conductivity Probe for Determining Soil Salinity", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.40, pp.647-651.
9. Roth, C. H., Malicki, M. A. and Plagge, R. (1992), "Empirical Evaluation of the Relationship Between Soil Dielectric Constant and Volumetric Water Content as the Basis for Calibrating Soil Moisture Measurements by TDR" *Journal of Soil Science*, Vol.43, pp.1-13.
10. Sallam, Amr M., White, Newel K. and Ashmawy, Alaa K. (2004), "Evaluation of the Purdue TDR Method for Soil Water Content and Density Measurement", Final Report the the Florida Department of Transportation, Contract No. BC 353 30. April 2004.
11. Siddiqui, S. I., and Drnevich, V. P. (1995), "Use of Time Domain Reflectometry for determination of water content and density of soil", FHWA/IN/JHRP-95-9, Purdue University, West Lafayette, IN.
12. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines." *Water Resour. Res.*, Vol.16, No.3, pp.574-582.
13. Yu, X., and Drnevich, V. P. (2004), "Soil water content and dry density by Time Domain Reflectometry", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.9, pp.922-934.
14. Zambrano, C. E. (2006), "Soil type identification using Time Domain Reflectometry", MS thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.