

실내모형실험을 통한 TDR 함수량계의 현장 함수비 보정

Water Content Calibration of Time-Domain Reflectometry Probe Using Laboratory Model Test

신은철¹, 류병현², 박정준^{3*}

Eun Chul Shin¹, Byung Hyun Ryu², Jeong Jun Park^{3*}

¹Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

²Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

³Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

ABSTRACT

Water content of subgrade soil in water supply systems has a large effect on performance. Many researchers lately make use of time-domain reflectometry (TDR) probes to measure the soil water content of subgrade soil from monitoring. The laboratory calibration test of TDR probe should be performed with soil field, because TDR probe can cause an error by type, gradation, density, and temperature of soil. This study shows the laboratory calibration test using TDR CS616, TDR-P3, TDR-T3. The calibration equations of TDR were then proposed. It was confirmed from the study that the data of TDR probe monitored in field could be used to estimate the freezing, unfrozen water content, and matric suction of soil.

요 지

지하매설구조물인 상수도관 주변 지반의 간극수 동결로 상수도관의 변형에 영향을 미칠 수 있다. 이에 최근에는 현장 계측을 통한 포장 하부구조체의 함수비를 주기적으로 측정하기 위해서 미국 Campbell사의 TDR(time domain reflectometry) CS616 함수량계와 독일의 IMKO사 제품의 TRIME FM를 이용한 수동 함수량계 TRIME P3, T3 Probe를 사용하고 있다. 일반적으로 TDR 함수량계와 TRIME 수동 함수량계는 흙의 종류, 입도, 다짐도, 온도 등에 의해 오차가 유발될 수 있기 때문에, 현장의 시료를 사용하여 TDR 함수량계의 실내보정실험을 반드시 수행해야 한다. 즉, TDR 함수량계의 매뉴얼에서는 일반적인 흙의 보정방정식을 제안하고 있지만 현장 적용시에는 반드시 보정실험을 수행하도록 권고하고 있다. 본 연구에서는 상수관 등 지하매설구조물의 주변의 다양한 채움재료를 사용하여 실내 보정 실험을 수행하였으며, 이 결과로부터 TDR 함수량계인 CS616, TRIME-T3, TRIME-P3의 보정모델식을 제안하였으며, 보정식에 대한 현장검증을 수행하였다.

Keywords : Water content calibration, Water supply line, Time-domain reflectometry (TDR), Volume water content, CS616

1. 서 론

포장하부구조내 지하매설구조물 주변 지반의 간극수

동결로 상부구조물 뿐만아니라 상수도관 등 토목구조물에 영향을 미친다. 즉, 하부구조체내의 함수비 증가는 겨울철 동결에 의한 체적팽창과 융해시 함수비 증가에 따른 지지력 저하를 초래하여 상수도관 등 매설구조물에 심각한 손상을 유발한다. 이러한 동상(frost heaving)과 지지력 감소는 포장 하부에 위치한 노상토의 함수비 변화와 관련이 깊지만 실시간 계측에 어려움이 있다. 이에 최근 들어 많은

Received 15 Mar. 2013, Revised 7 Apr. 2013, Accepted 9 Apr. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-32-835-4243; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: frostjun@incheon.ac.kr (J. J. Park)

연구자들이 현장계측을 통하여 함수비를 주기적으로 측정하기 위해서 TDR(time domain reflectometry) CS616 함수량계와 TDR-T3 Probe, TDR-P3MR를 사용하고 있다 (Kim and Jeon, 2005).

TDR 함수량계는 1970년대에 농업연구자들에 의해용으로 설치와 관련하여 흙의 함수비 측정을 목적으로 사용되었으나 최근 들어 지질공학 분야, 도로포장공학분야 연구에서 많이 사용되고 있다. 또한 타 함수비 측정기구보다 정밀도가 우수하여, 하부구조체의 함수비를 측정하는데 적용성이 우수함을 많은 연구에서 보고하고 있다(Hossain et al., 1997; Valdez, 1991). 그러나 TDR 함수량계는 흙의 종류, 입도, 다짐도, 온도 등에 의해 오차가 발생하기 때문에, 이에 대한 보정실험은 반드시 수반되어야 한다.

본 논문에서는 옥외 동상 테스트베드 구간의 매설관 채움재료에 대한 함수비 보정실험을 통하여 보정방정식을 제시하였다. 또한, 테스트베드 현장에 함수량계를 설치하여 직접 함수비를 측정함으로써 실내실험을 통해 제안된 보정방정식을 검증하였다.

2. TDR 함수량계의 원리 및 연구동향

2.1 TDR 함수량계의 원리

유전체(dielectric material)는 절연체를 전기장 내에 놓았을 때 표면에 전하가 유기되는 현상으로, 자유전자가 거의 없는 대신에 원자를 이루고 있는 양자와 전자가 외부의 전기에 의해 회전 궤도가 치우침에 따라서 양간의 극성을 나타내고, 이 극성의 정도는 전기쌍극자 모멘트에 의해 정량화 된다.

유전율(dielectric constant)은 두 전극사이에 유전체를 넣었을 경우와 넣지 않은 경우의 전기 용량비이다. 수분의 유전율은 대략 80, 건조된 흙의 유전율은 흙의 전기전도율과 밀도에 따라 일반적으로 3-8 사이의 값을 나타내고 있다. 이와 같이 TDR 함수량계의 원리는 물과 흙의 유전율이 크게 차이가 있다는 것에 기초하여 나온 것이다. TDR 함수량계의 원리는 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파(electromagnetic wave)의 이동시간(travel time)을 측정하는 것을 바탕으로 하고 있다. 유전율은 전자기파의 이동시간과 도파관(waveguide)의 길이에 의해 계산된다. 도파관 주변 재료의 전기적 특성 변화에 의해 이동시간과 함께 유전율도 변화할 것이다. 흙에서 도파관을 따라 이동

하는 전자기파의 속도 v 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Topp and Davis, 1985).

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad (1)$$

여기서, c 는 진공상태에서의 빛의 속도($3 \times 10^8 m/s$), K_a 는 유전율이다.

식 (1)로부터 유전율은 식 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_a = \left(\frac{ct}{L}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, t 는 TDR에 의해 측정된 전자기파의 이동 시간(sec)이고, L 은 TDR 도파관의 길이(m)이다.

Fig. 1은 일반적인 TDR의 파형을 나타낸 것으로서 측정된 길이(apparent length) L_a 는 식 (3)과 같고, 전파속도(propagation velocity)는 식 (4)과 같이 정의하여 이를 정리하면 식 (5)을 얻을 수 있다.

$$L_a = \text{Inflection}_B - \text{Inflection}_A \quad (3)$$

$$V = \frac{L_a}{t} \quad (4)$$

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L \times V_p}\right)^2 \quad (5)$$

여기서, V_p 는 실제 전파속도와 빛의 속도에 대한 비($V_p = \frac{V}{c}$)인데, 0.99정도의 값을 나타내며, 일반적으로 무시하는 경우가 많다(Jiang and Tayabji, 1999).

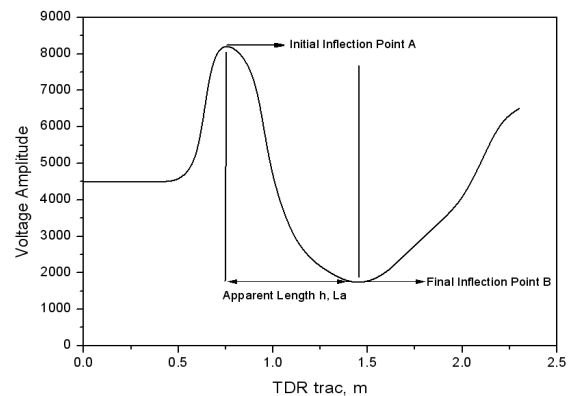


Fig. 1. TDR waveform

2.2 연구동향

Davis and Chudubiak(1975)은 TDR 기술을 이용하여 최초로 흙의 유전율을 정확히 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. Topp et al.(1980)은 유전율 K_a 의 측정을 통하여 체적함수비(volumetric water content)를 결정할 수 있는 보편적인 관계식을 식 (6)과 같이 제안하였으나, 흙의 밀도, 특성, 염류함량 등을 고려하지 않은 한계가 있다.

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

미국의 LTPP-SMP 연구(Jiang and Tayabji, 1999)에서는 재료층과 노상의 함수량을 관측하기 위하여 TDR 함수량계를 이용하여 함수량 계산시 각각의 골재차입과 유전율에 따른 보정방정식을 식 (7)과 식 (8)의 형태로 나타내었다.

Ka Model:

$$VWC = a_0 + a_1 K_a + a_2 K_a^2 + a_3 K_a^3 \quad (7)$$

Fine-Gradation Model :

$$VWC = a_0 + a_1 K_a + a_2 K_a^2 + a_3 K_a^3 + a_4 Gl_2 + a_5 Gl_2 + a_6 No_4 + a_7 No_{10} + a_8 No_{200} + a_9 PL + a_{10} LL \quad (8)$$

미국 Virginia Smart Road에서는 CS610과 CS615 TDR 함수량계를 설치하였으며, 실내보정실험을 통해 흙의 전기전도율에 따른 각각의 보정방정식을 제안하였다. CS610과 CS615의 데이터를 비교한 결과 크게 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이에 인터페이스 장치가 필요 없으며 데이터 출력값이 주기(period)로 나오는 CS615를 추천하였다 (Brian et al., 2000).

3. 사용재료 및 실험방법

Table 1은 본 연구에서 사용된 TDR 함수량계의 특징을 나타낸 것이다.

Table 1. Comparison of CS616, TDR-T3, TDR-P3

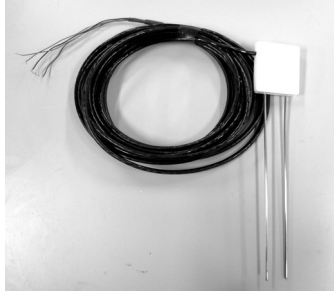

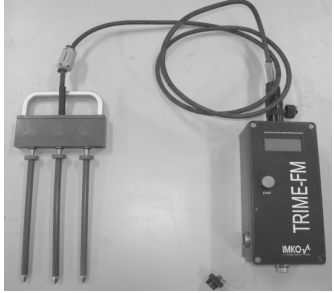
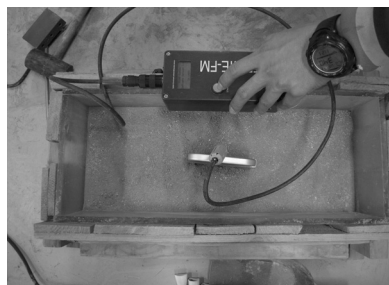
	CS616	TDR-T3 Probe	TDR-P3 Probe
Manufacturing company	Campbell	IMKO	IMKO
Measuring range	Calibration of 2.5% in 50% of the measuring range of 0% VWC	0 ~ 60% (volumetric moisture content)	0~70% (volumetric moisture content)
Electrical conductivity	The amplitude of 0.7volts square wave generation	0~2 dS/m bulk electrical conductivity	0~2 dS/m bulk electrical conductivity
Measurement accuracy	± 2.5% VWC using standard calibration	2% (0~40% moisture content) 3% (40~60% moisture content)	2% (0~40% moisture content) 3% (40~70% moisture content)
Length	300mm	220mm	160mm
Diameter	3,2mm	2,5mm	2,5mm
Product features	The RF emissions are below FCC and EU limits as specified in EN61326 if the CS616 is enabled less than 0,6 ms, and measurements are made no more frequently than once a second. External RF sources can also affect the CS616 operation. Consequently, the CS616 should be located away from significant sources of RF such as ac power lines and motors.	Electromagnetic wave is buried in the underground TECANAT Access Tube, were placed into the frozen ground the probe into the tube, generating electromagnetic waves by reciprocates along the length of the probe, to calculate the velocity of the electromagnetic wave, it becomes possible to measure the dielectric constant of the soil.	By reciprocates along the length of the probe, to calculate the velocity of electro-magnetic waves, electromagnetic waves were placed into the frozen ground the probe of the measurement, to generate an electromagnetic field in the tester measures the dielectric constant of the soil it is to be.
Relevant photo			

Table 2. Engineering properties of soils

Properties of soils	Section1,2 1Layer	Section3 1Layer	Section1,2 2Layer	Section3 2Layer	Section1 3Layer	Section2 3Layer	Section3 3Layer
	Granite soil	Clayey soil	Sandy soil	Sandy soil	Granite soil	Granite soil	Granite soil
Specific gravity (G_s)	2,65	2,73	2,66	2,64	2,69	2,66	2,66
Uniformity coefficient (Cu)	4,07	32,61	1,95	2,9	21,05	9,25	10
Coefficient of gradation (Cc)	1,81	1,68	1,02	1,38	0,74	0,61	1,233
#200 passing(%)	2,9	58,9	0,1	6,4	29,8	2,3	14,1
Compaction type	D	A	D	D	D	D	D
Maximum dry unit weight (γ_{dmax} , kN/m ³)	19,2	14,0	15,3	16,1	18,9	19,5	17,8
Optimum moisture content (%)	11,54	27	15,1	16,2	13,1	10,5	16,5
Liquid limit (LL, %)	NP	41,25	NP	NP	33,64	28,27	36,68
Plasticity index (PI)	NP	38,38	NP	NP	30,99	27,86	26,47
USCS (Unified Soil Classification System)	SP-SW	ML	SP	SP	SM	SW	SC



(a) CS616



(b) TDR-P3 Probe



(c) TDR-T3 prove

Fig. 2. Photo of laboratory calibration test

3.1 사용재료

본 연구에서 사용된 흙 시료는 3.3절에 제시된 옥외동상 테스트베드 구간 중 section1, section2, section3의 노상 재료를 이용하여 TDR 함수량계를 통한 보정실험을 수행하였으며, Table 2는 사용된 시료의 공학적 특성을 나타낸 것이다.

3.2 함수량계의 실내보정실험 계획 및 방법

국내에서는 TDR 함수량계의 보정시험에 대한 실험규정이 없으며, 이에 본 연구에서는 외국의 사례를 조사하여 국내실정에 맞는 보정시험 절차를 수립하였다. Fig. 2는 각각 TDR 함수량계의 실내보정시험 전경을 나타낸 것이다.

실내보정시험절차는 테스트베드의 노상재료별로 중량함수비 2~20%까지 함수비를 변화시켜 TDR 함수량계의 실내 보정 실험을 수행하였다. 600mm×600mm×300mm 크기의 아크릴박스를 제작하고 각각의 중량함수비에 따라

물과 흙을 계량한 후 믹서기를 사용하여 혼합된 흙 시료를 아크릴박스에 3층으로 다짐한다. CS616은 두 번째 층 다짐 시 설치하고 TDR-P3는 다짐 완료 후 흙 채움이 끝나면 P3 Probe를 설치한다. 측정 오차를 최소화하기 위하여 CS616 함수량계는 3개 정도를 사용하고, TDR-P3는 3번 측정한다. 함수량계를 CS616은 데이터로거에 TDR-P3는 TRIME-FM에 연결하여 TDR 측정치를 구한다. 측정이 끝나면, 박스 상부의 흙을 제거하고 함수량계가 설치되어 있는 위치에서 흙 시료를 채취하여 함수비를 측정한다. 이를 통해 결정된 중량함수비와 TDR 측정치와의 관계를 회귀분석하여 보정방정식을 산정한다.

TDR-T3의 보정시험방법은 600mm×400mm×600mm 크기의 아크릴 박스를 사용하여 TDR tube가 아크릴박스 중앙에 위치하게 고정 한다. 혼합된 흙을 3층 다짐으로 해서 넣고 흙 채움이 끝나면, T3 Probe 함수량계를 TRIME-FM에 연결하여 상·하 TDR 측정치를 구한다. 흙을 샘플링 후에 샘플링 한 흙의 무게를 재고, 오븐에 넣어 완전 건조 시킨 후, 흙의 무게를 잰다(KS F 2306). 이를 통해 결

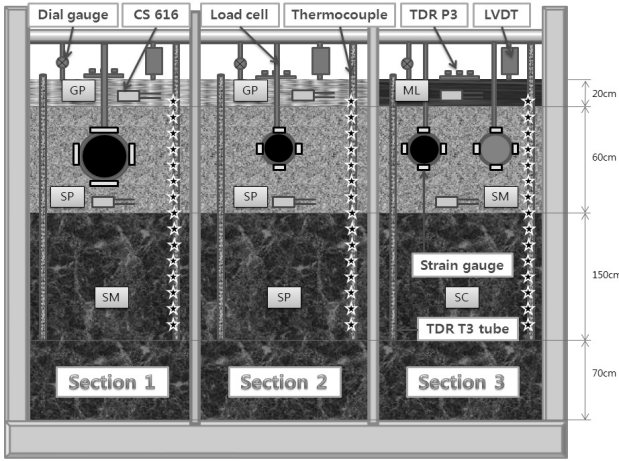


Fig. 3. Site schematic diagram

정된 중량함수비와 TDR 측정치와의 관계를 회귀분석하여 보정방정식을 산정한다.

3.3 옥외동상 테스트베드 구간내의 TDR 함수량계의 설치

○○대학교 부지내에 옥외동상 테스트베드 모형실험 구축 대상 부지를 선정하여 실내실험시 보정된 제안식과 본 현장에서 측정된 결과를 검증하였다. Fig. 3은 테스트베드 현장 모식도를 나타낸 것으로 계측 장비들의 위치를 보여 준다.

실험 현장 토조의 크기는 3m(B) × 6m(B) × 3m(H)이다. CS616 함수량계는 상수관 주변 상부 20cm, 하부 60cm에 위치하였고 Section 별로 6개가 설치되었다. TDR-T3는 TDR tube를 이용하여 계측한다. TDR tube의 직경은 외경 44.3mm, 내경 42mm로서 각 Section 별 2m 길이로 설치하였고, TDR-P3는 테스트베드의 상부에 탐침봉을 매설하여 계측을 수행하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 함수량계 실내보정실험

일반적으로 TDR 함수량계는 다짐밀도의 증가에 따라 그 값이 증가하는 경향을 보이는데 이는 흙의 공극이 감소하기 때문이다. 함수비가 증가함에 따라 비다짐상태와 다짐상태에서 함수량계 출력값의 차이가 더 크게 벌어지고 있는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 현상은 다져진 흙의 밀도에 따라 함수량계의

출력값이 영향을 받을 수 있다는 것이며, 함수량계의 보정 실험에서 각각의 중량함수비마다 흙의 밀도가 다르기 때문에 그 값이 영향을 받을 수 있다는 것이다. 이와 같이 흙의 밀도에 대한 보정을 위해서는 각각의 흙마다 다짐시험을 통해 중량함수비와 건조단위중량의 상관관계를 분석하고, 중량함수비를 체적함수비로 변화시켜 함수량계의 출력값과 비교하는 것이 합리적인 방법일 것으로 판단된다. 중량함수비는 흙 입자 무게에 대한 물 무게의 비를 말하며, 식 (9)과 같다.

$$w_g = \frac{m_{water}}{m_{soil}} = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \quad (9)$$

여기서, w_g 는 중량함수비이고, m_{water} 과 m_{soil} 은 각각 물과 흙의 무게(g), m_{wet} 과 m_{dry} 는 각각 젖은 흙과 건조된 흙의 무게(g)이다.

식 (10)은 체적함수비를 나타낸 것으로 중량함수비에 흙의 건조단위 중량을 곱하여 결정할 수 있다.

$$w_v = \frac{V_{water}}{V_{soil}} = \frac{m_{water}/\gamma_{water}}{m_{soil}/\gamma_{d(soil)}} = \frac{w_g \times \gamma_{d(soil)}}{\gamma_{water}} \quad (10)$$

여기서, w_v 는 체적함수비, V_{water} 과 V_{soil} 은 각각 물과 흙의 부피(cm^3), γ_{water} 는 물의 단위중량($=1\text{g}/\text{cm}^3$), $\gamma_{d(soil)}$ 은 흙의 건조단위중량(g/cm^3)이다.

본 연구에서는 흙의 입도에 따라 TDR 함수량계의 출력값이 차이를 나타내고 있기 때문에 채움재료별 각각에 대하여 실내보정실험을 수행하였다. 함수량계 출력값은 중량함수비와 일정한 상관관계를 나타내고 있으나, 중량함수비별 흙의 밀도 차이 때문에 오차를 유발할 수 있기에, 본 데이터를 체적함수비로 변환하여 재분석하였다. Fig. 4에서 Fig. 6은 각각 TDR 함수량계 CS616, P3, T3에 대한 노상재료의 체적함수비와 함수량계 출력값에 대한 관계를 나타낸 것이다. 이에 따른 보정방정식을 각각 Table 3, Table 4, Table 5에 나타내었으며, 결과 Cambell사의 매뉴얼에서 제시하고 있는 제안식과 비교하였을 때 CS616의 경우 보정된 함수비의 값이 제안식보다 대략 1%~15% 정도 다소 작은 범위를 나타내었다.

P3와 T3의 경우 1%~3%의 다소 작은 오차가 발생하지만 현장 적용시 매뉴얼에서 제안한 보정방정식을 사용할 경우 오차를 유발할 수 있기 때문에 함수량계를 매설하는 구간의 재료에 대하여 실내보정실험을 수행하여야 한다.

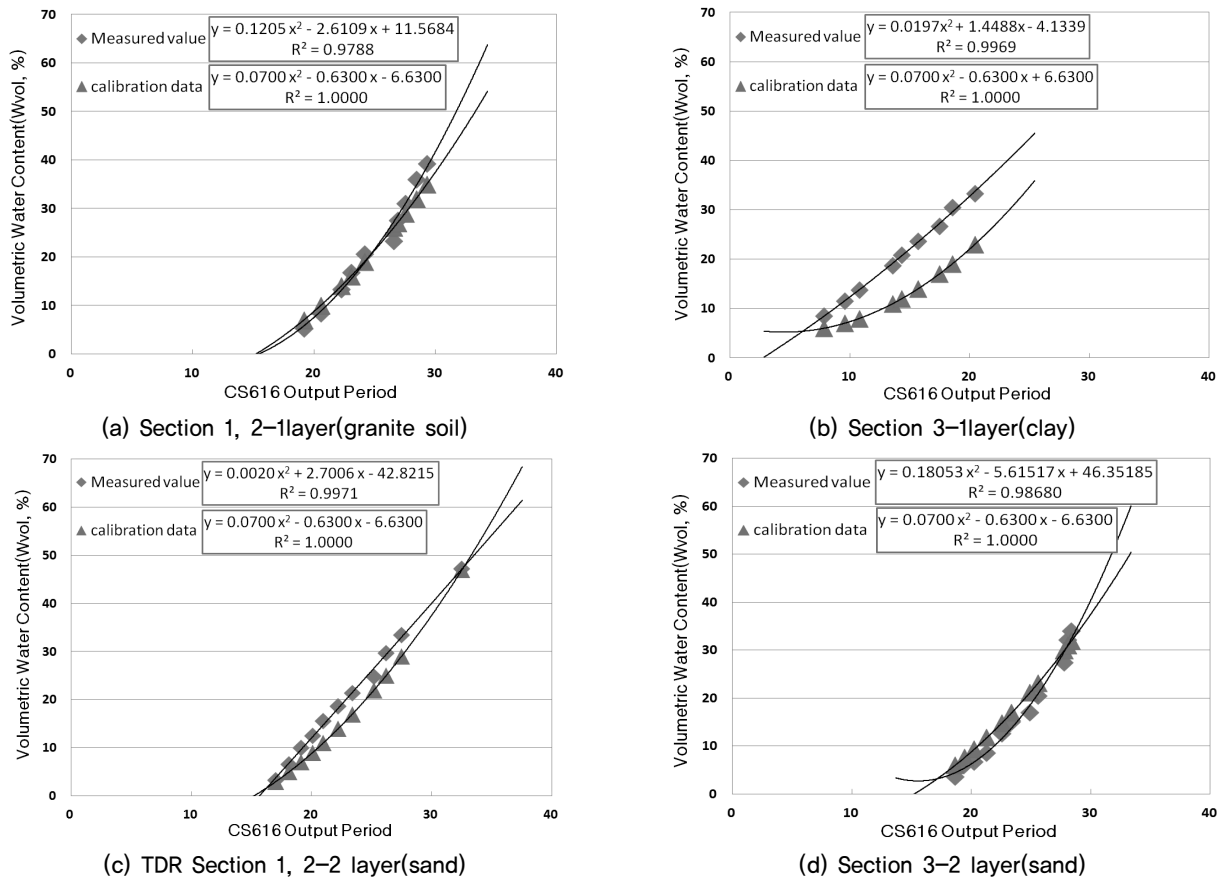


Fig. 4. Calibration Test Equation of TDR CS616

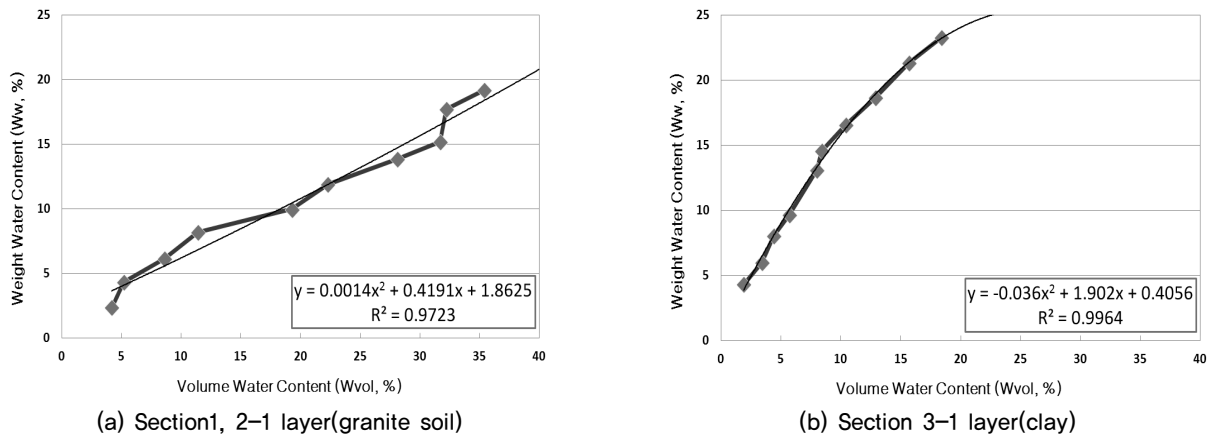
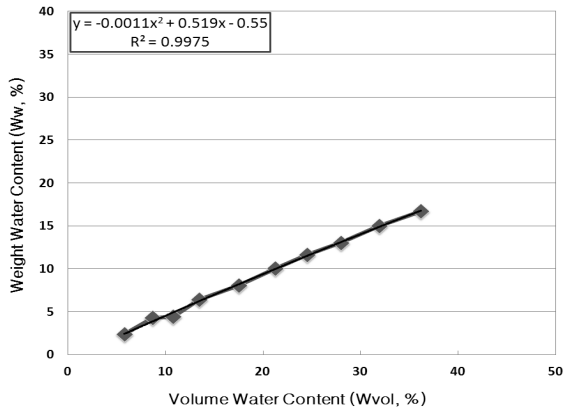


Fig. 5. Calibration test equation of TDR-P3

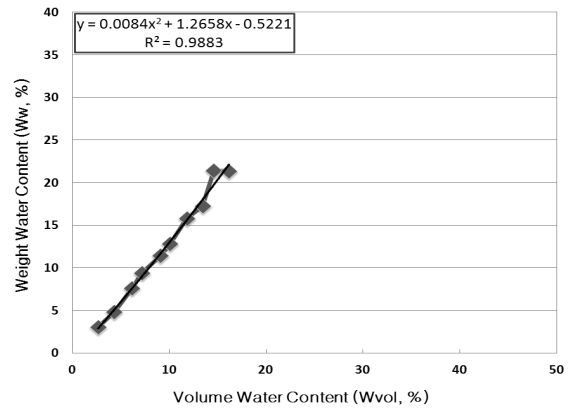
Table 3. CS616 laboratory calibration equation

Site No.	Calibration test equation	
	CS616	R^2
Manual expression	$y = 0.0700x^2 - 0.6300x - 6.6300$	1.0000
Section 1, 2-1 Layer (Granite soil)	$y = 0.1205x^2 - 2.6109x + 11.5684$	0.9788
Section 3-1 Layer (Clayey soil)	$y = 0.0197x^2 + 1.4488x - 4.1339$	0.9969
Section 1, 2-2 Layer (Sandy soil)	$y = 0.0020x^2 + 2.7006x - 42.8215$	0.9971
Section 3-2 Layer (Sandy soil)	$y = 0.1805x^2 - 5.6152x + 46.3518$	0.9868

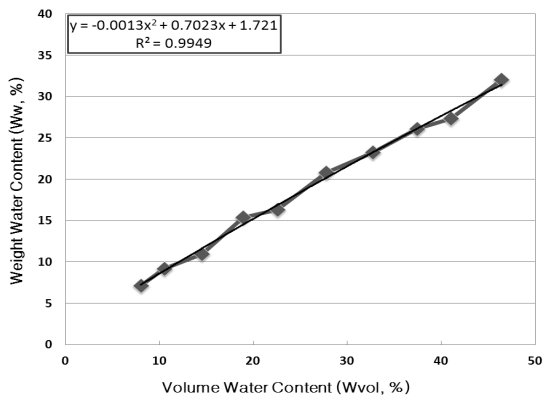
$WVC = (\text{Volumetric Water Content})$, $X = \text{CS616 TDR (Period)}$



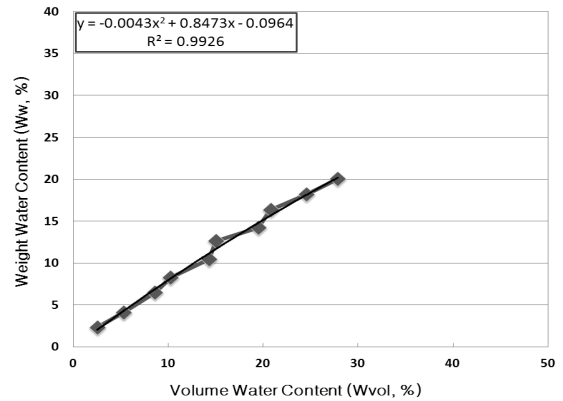
(a) Section 1, 2-1 layer (granite soil)



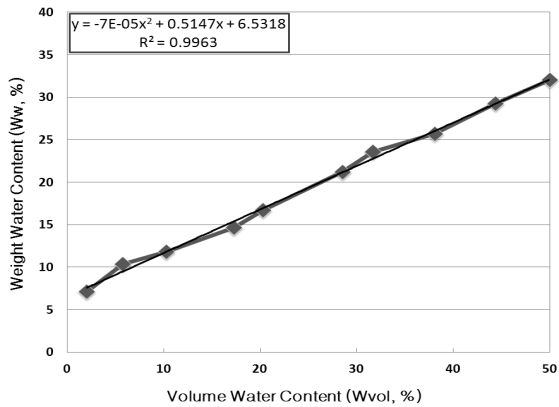
(b) Section 3-1 layer (clay)



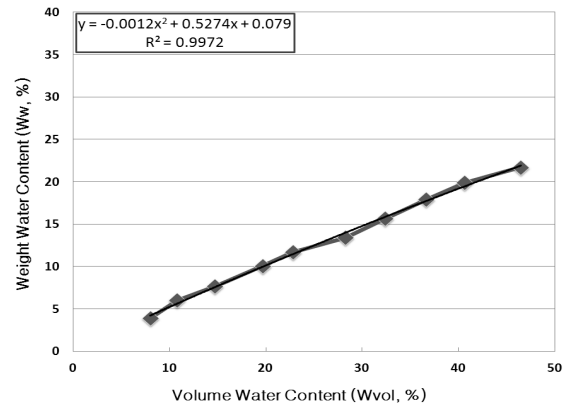
(c) Section 1, 2-2 layer (sandy soil)



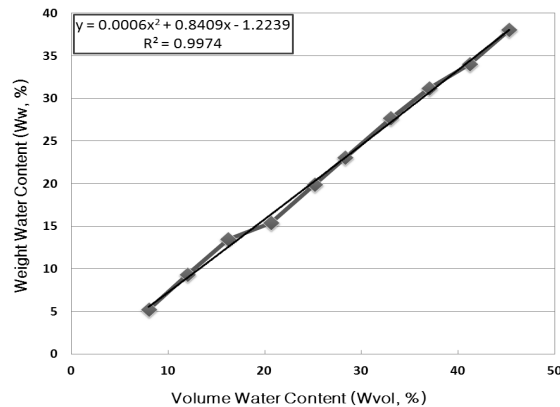
(d) Section 3-2 layer (sandy soil)



(e) Section 1-3 layer (granite soil)



(f) Section 2-3 layer (granite soil)



(g) Section 3-3 layer (granite soil)

Fig. 6. Calibration test equation of TDR-T3

Table 4. TDR-P3 laboratory calibration equation

Site No.	Calibration test equation	
	TRIME-P3 Probe	R ²
Section 1, 2-1 Layer (Granite soil)	$y = 0.0014x^2 + 0.419x + 1.8625$	0.9723
Section 3-1 Layer (Clayey soil)	$y = -0.036x^2 + 1.902x + 0.4056$	0.9964

$VWC = (\text{Volumetric Water Content}), X = \text{CS616 TDR}(\text{Period})$

Table 5. TDR-T3 laboratory calibration equation

Site No.	Calibration test equation	
	TRIME-T3 Probe	R ²
Section 1, 2-1 Layer (Granite soil)	$y = -0.0011x^2 + 0.519x - 0.55$	0.9975
Section 3-1 Layer (Clayey soil)	$y = 0.0084x^2 + 1.2658x - 0.5221$	0.9883
Section 1, 2-2 Layer (Sandy soil)	$y = -0.0013x^2 + 0.7023x + 1.721$	0.9949
Section 3-2 Layer (Sandy soil)	$y = -0.0043x^2 + 0.8473x - 0.0964$	0.9926
Section 1-3 Layer (Granite soil)	$y = -0.00007x^2 + 0.5147x + 6.5318$	0.9963
Section 2-3 Layer (Granite soil)	$y = -0.0012x^2 + 0.5274x + 0.079$	0.9972
Section 3-3 Layer (Granite soil)	$y = 0.0006x^2 + 0.8409x - 1.2239$	0.9974

$VWC = (\text{Volumetric Water Content}), X = \text{CS616 TDR}(\text{Period})$

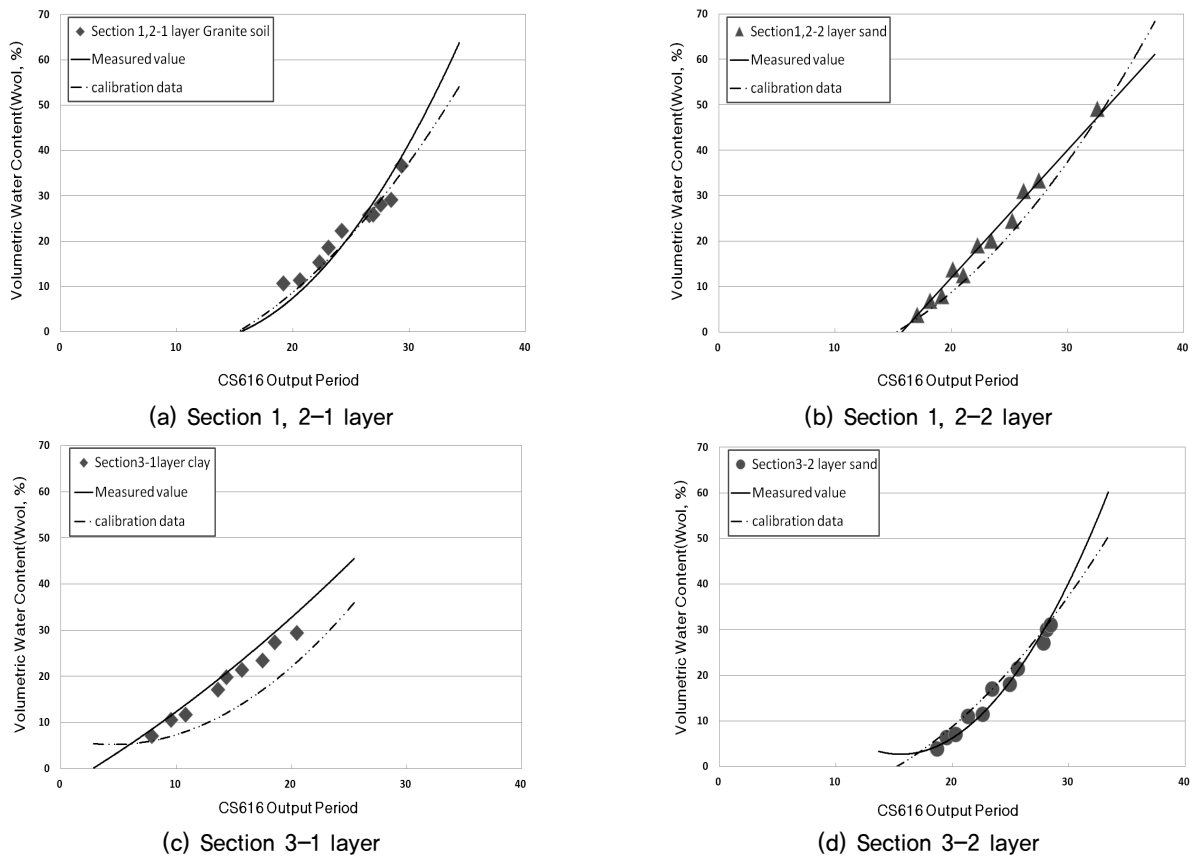
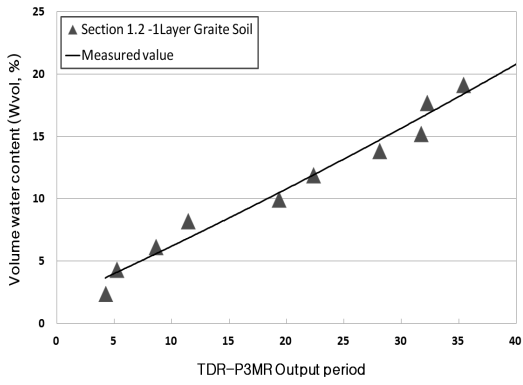


Fig. 7. Field calibration test of CS616

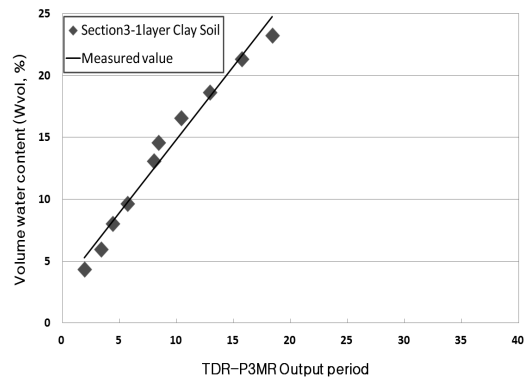
4.2 현장 검증

상기 보정방정식에 대한 검증을 위해 Section 1, 2, 3구

간의 채움재료에서 함수량계 매설 위치마다 재료의 함수비를 측정하고 함수량계 데이터를 획득하였다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 CS616, TDR-P3, TDR-T3 함수량계에 대

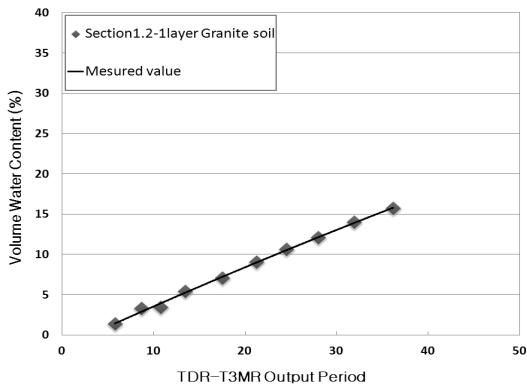


(a) Section 1, 2-1 layer

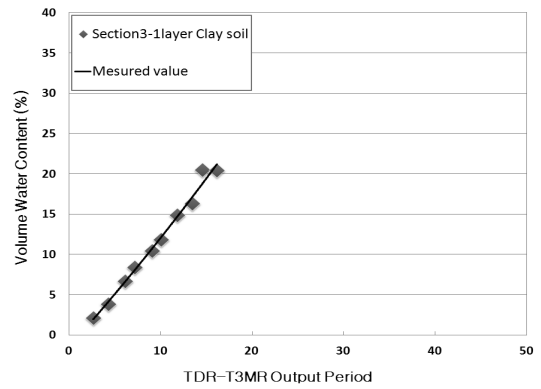


(b) Section 3-1 layer

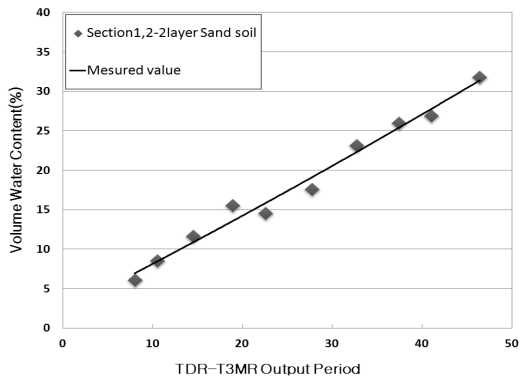
Fig. 8. Field calibration test of TDR-P3MR



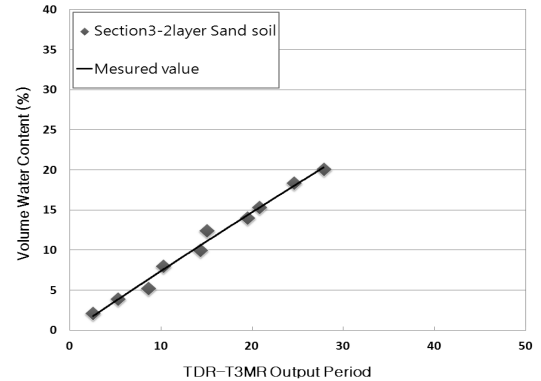
(a) Section 1, 2-1 layer



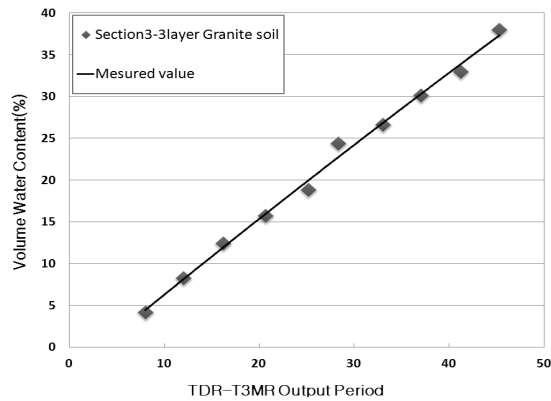
(b) Section 3-1 layer



(c) Section 1, 2-2 layer



(d) Section 3-2 layer



(g) Section 3-3 layer

Fig. 9. Field calibration test of TDR-T3

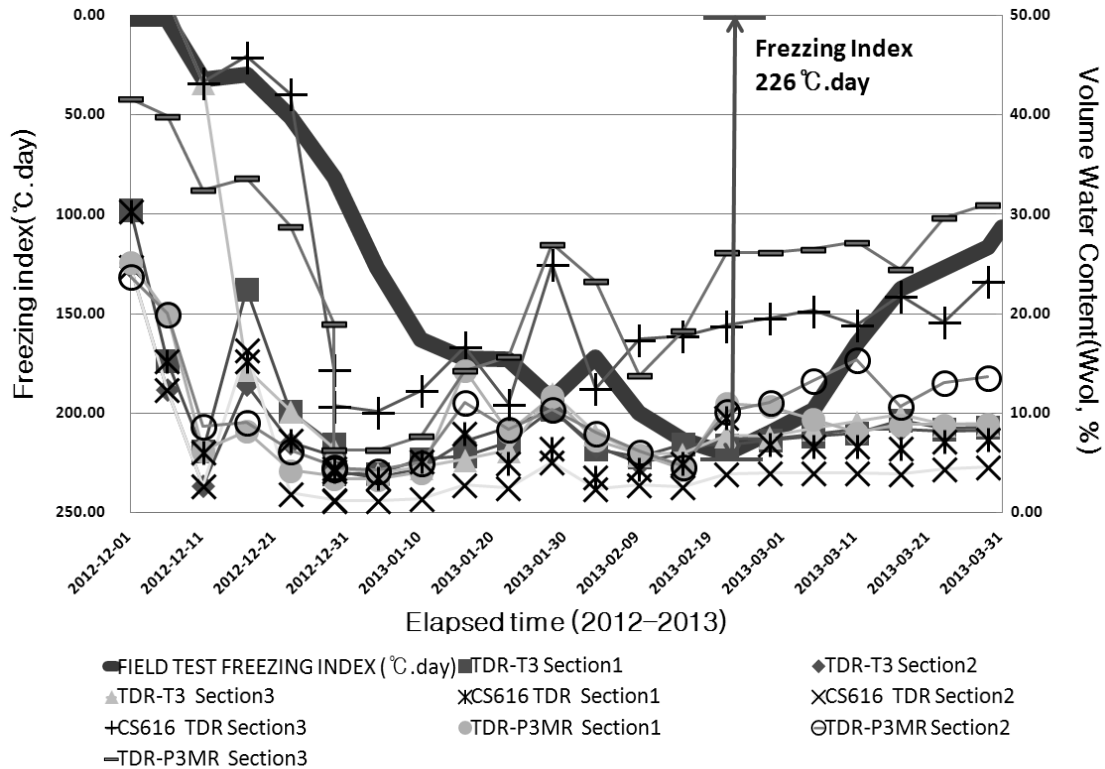


Fig. 10. Relationship of between volumetric water content and the freezing index curve

하여 실내 보정실험을 통해 제안한 보정 방정식과 적용된 현장시험 결과를 비교한 것이다. CS616의 경우, 보정방정식은 매뉴얼 제안식, 현장 함수비와 유사한 결과를 나타내어 각각의 실내보정실험으로부터 제안한 보정방정식을 사용하는 것이 보다 정확한 현장계측자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

TDR-P3MR은 보정 제안식과 보정된 현장 함수비가 1% ~ 3%의 차이로 거의 일치하였고, TDR-T3의 경우도 약간의 차이는 있지만 보정 제안식과 보정된 현장 함수비가 1% 이내로 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 대체로 TDR-P3와 TDR-T3의 경우, 보정된 현장 방정식과 제안된 보정방정식은 대체로 부합되는 것을 확인 할 수 있었다.

4.3 TDR 함수량계의 현장 데이터 비교 및 동결지수와의 상관관계

옥외동상 테스트베드 구간 지중 10cm에서 계측한 TDR의 함수비 계측 데이터를 실내 실험을 통해 얻어낸 보정 방정식에 적용하여 나타내었고, 현장 온도 데이터를 이용하여 동결깊이를 추정한 결과 동결지수가 226°C·day에 해당하였다. Fig. 10에서와 같이 2012년 12월 6일에 최대 동결지수, 2013년 2월 21일에 최소동결지수를 나타내어

약 80일 동안 0°이하로 온도가 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 0°이하 구간에서 대기온도의 저하로 수분이 얼음(ice)으로 변화하여 함수비 데이터가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. TDR 함수량계의 CS616, P3, T3의 현장 검증 결과 체적당 함수량이 함수량계별 2%~25% 범위 내에서 보정 후 함수량이 현장 함수량에 근접한 결과로 나타나고 있다. 보정함수비 분포를 볼 때 약간의 차이는 있었지만 함수량계의 계측 결과가 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

동결이 발생하여도 부동수가 존재하게 되며, 함수량계는 이 부동수의 영향으로 약 3%~6% 정도의 함수비를 나타내었다. 함수비의 감소는 물이 얼음으로 상변환 될 때, 흡인력이 증가하여 수분을 끌어당겨 함수비가 감소되는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 상수도관의 동결과 용해에 따른 거동을 연구하기 위해 설치된 옥외 동상 테스트베드 구간에 매설관 채움재로 사용되고 있는 다양한 흙 시료에 대하여 함수비 보정실험을 수행하여 보정방정식을 제안하였다. 또한, 테스트베드 현장에 함수량계를 매설하여 직접 함수비를 측정함으로써 실내실험을 통해 제안된 보정방정식에 대해

여 검증을 수행하였다. 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

실내실험을 통해 제안한 보정방정식과 현장에서 측정된 함수비를 비교한 결과, 대체적으로 보정방정식에서 부합되는 것을 확인 할 수 있었으며, 이와 같은 결과는 실내 보정실험으로부터 제안한 보정방정식이 실제 현장에서도 충분히 적용할 수 있음을 나타낸 것이다.

즉, CS616의 경우, 보정방정식은 매뉴얼 제안식, 현장 함수비와 유사한 결과를 나타내었고, TDR-P3MR은 보정 제안식과 보정된 현장 함수비가 1%~3%, TDR-T3는 보정 제안식과 보정된 현장 함수비가 1%이내로 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서, 각각의 실내보정실험으로부터 제안한 보정방정식을 사용하는 것이 보다 정확한 현장계측자료를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 재료의 보정식을 통해 함수비를 계측함으로써 겨울철 동상 발생과 해빙기의 지지력 손실에 따른 구조물의 파손을 미연에 방지 할 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같이 TDR 방식 함수량계는 흙의 동결/비동결상태를 확인하는데 사용될 수 있으며, 실제 현장에 깊이별로 매설된 TDR방식 함수량계와 온도계의 데이터를 이용해 동결심도의 추정도 가능할 것으로 판단된다. 또한, 현장데이터 분석에서 함수비와 동결지수 데이터를 비교 분석함으로써 재료별 동결상태를 판단할 수 있었으며, 부동수분량의 평가가 가능함을 확인하였다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (11 Technology

Innovation F01) from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

References

1. Kim, B. I. and Jeon S. I. (2005), "Development of Calibration Model and Analysis of Soil Water Content using Time - Domain Reflectometry Probe in LTPP Sections", *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 7, No. 4, pp.103-112.
2. Brian, K. D., Imad, L. A., and Amara Loulizi (2000), "Laboratory Calibration and Field Verification of Soil Moisture Content Using Two Types of Time-Domain Reflectometry Probes", *TRB 79th Annual Meeting*, No. 001027.
3. Davis, J. L. and Chudobiak, W. J. (1975), "In-Situ Meter for Measuring Relative Permittivity of Soil," *Geol. Surv. Can. Pap*, Vol 75-1A, 75-79.
4. Hossain, M., Kotdwala, S. J., Long, B. and Gisi, A. J. (1997), "Subgrade Moisture Monitoring Using Time Domain Reflectometry," *Transportation Research Board 76th Annual Meeting*.
5. Jiang, Y. J. and Tayabji, S. D. (1999), "Evaluation of In-Situ Moisture Content at LTPP Seasonal Monitoring Program Sites," *TRB 78th Annual Meeting*, No. 990395.
6. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines," *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp.574-582.
7. Topp, G. C. and Davis, J. L. (1985), *Time Domain Reflectometry (TDR) and Its Application to Irrigation Scheduling*, In *Advances in Irrigation*, Vol. 3, Daniel Hilled(ed), Academic.
8. Valdez, S. F. (1991), *Subgrade Resilient Modulus Evaluation*, FHWA-GA-91-8801.