

## 도로하부 함수비 계측을 위한 TDR 방식 함수비 센서 온도 민감도 분석

조명환\* · 이윤한\*\* · 김낙석\*\*\* · 지기환\*\*\*\*

Cho, Myunghwan\*, Lee, Yoonhan\*\*, Kim, Nakseok\*\*\*, Jee, Keehwan\*\*\*\*

### Temperature Sensitivity Analysis of TDR Moisture Content Sensor for Road Pavement

**ABSTRACT :** The infrastructure of flexible pavement is composed of aggregate subbase, anti-frost layer, and subgrade. In particular, the subgrade performance is affected by climates such as frost action and precipitation. The method of TDR(Time Domain Reflectometry) sensors to measure moisture contents in subgrade layer has been used in the research. Due to the TDR method using dielectric permittivity of soil and water, the sensors can be affected by the low subgrade temperatures. The air temperatures frequently drops below  $-20^{\circ}\text{C}$  in the winter in Korea. As a result, it is necessary to estimate the accuracy of the TDR moisture sensors in the range of below zero temperatures. In this study, the subgrade temperatures of lower than  $-2^{\circ}\text{C}$  were extended to evaluate temperature sensitivity of the TDR moisture sensors. The test results revealed that the moisture contents around the sensors were reduced while those of the upper part of specimen showed a tendency to increase as the specimen surface temperature drops below zero under the volumetric moisture contents(VMC) of 20% and 30%. However, the impact of temperature on the function of the sensor at lower water contents was found to be negligible if any.

**Key words :** Road Pavement, Moisture Content, Temperature, Subgrade, TDR Sensor

**초록 :** 아스팔트 콘크리트 포장의 하부구조는 보조기층, 동상방지층 및 노상층으로 구성되어 있으며, 노상층의 경우 겨울철을 지나 봄이 되면 동상효과에 따른 포장 파손과 여름철 장마 기간 동안의 수분 침투로 인한 지지력 감소와 같은 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 도로 하부의 함수비를 계측하기 위하여 시간이력 반사방식(Time Domain Reflectometry, TDR)의 함수센서를 통하여 실시간 함수비를 계측하는 기술이 국내에 도입되었다. TDR 방식의 함수센서는 흙과 물의 유전율을 통하여 함수비를 측정하기 때문에 온도의 영향을 받을 수 있다. 특히 국내는 계절 영향을 받아서 겨울철 대기 온도가 지역적으로 영하  $20^{\circ}\text{C}$  보다 낮은 온도를 보여줄 수 있기 때문에 영하의 측정 온도 범위에 대한 함수센서의 정확도를 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 흙의 온도 범위를 영하  $2^{\circ}\text{C}$  미만까지 확장하여 TDR 방식의 함수비 센서에 대한 온도 민감도 시험을 수행하였다. 체적함수비 20%와 30%에 대한 시험 결과 공시체 표면 온도가 영하로 떨어지면서 센서부근의 수분이 감소하고, 공시체 상부의 함수비가 증가하는 경향을 보여주었다. 그러나 함수센서에 대한 온도의 영향은 함수비가 낮을 경우 미소한 것으로 나타났다.

**검색어 :** 도로 포장, 함수비, 온도, 노상, 함수센서

\* 정회원 · (주)도화엔지니어링 기술개발연구원 책임연구원 (dragonjo@dohwa.co.kr)

\*\* 정회원 · (주)도화엔지니어링 대표이사 (yhlee@dohwa.co.kr)

\*\*\* 정회원 · 경기대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyonggi University professor · nskim1@kyonggi.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · (주)케이엠티엘 기술연구소 연구소장 (dragon28@korea.com)

Received November 18 2011, Revised December 14 2011, Accepted May 28 2012

### 1. 서론

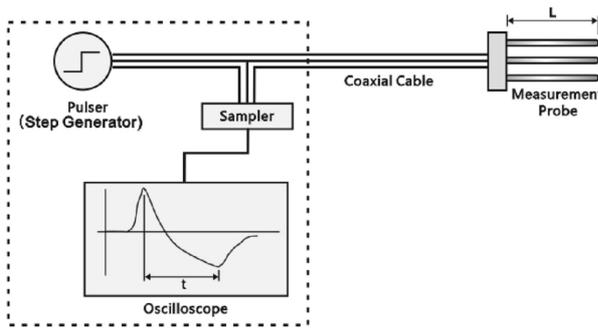
아스팔트 콘크리트 포장의 하부구조는 보조기층, 동상방지층 및 노상층으로 구성되어 있으며, 노상층은 겨울(12월-2월)을 지나 봄(3월-5월)이 되면 동상효과에 따른 포장 파손과 여름 장마 기간 동안의 수분 침투로 인한 지지력 감소와 같은 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 동상효과나 지지력 감소는 포장 하부 특히 노상토의 함수비 변화와 관련이 깊지만 노상의 함수비 변화를 실시간으로 계측하는 것은 어렵다. 따라서 이러한 계측상의 어려움을 해결하기 위하여 시간이력 반사방식(Time Domain Reflectometry, TDR)을 이용한 흙의 함수비를 측정하는 방법이 Topp and Davis(1985) 및 Dasberg and Dalton (1985)에 의해 시도되었으며, 최근 국내에서 토질 오염이나 함수비를 측정하기 위하여 적용되고 있다.

TDR 방식의 계측시스템은 계측센서의 임피던스 변화에 따른 반향점과 전자기파의 속도 및 유전율 변화의 관계를 이용하여 흙의 함수비를 계측한다(Park et al., 1997). 그러나 함수비를 측정하고자 하는 매질(도로 하부의 경우 흙과 물)의 유전율은 온도의 영향에 따라 변동 할 수 있으며, 따라서 TDR 방식의 함수센서로부터 계측되는 함수비도 영향을 받을 수 있다. 국내의 경우 Kim and Jeon(2005), Cho et al.(2010)이 TDR 방식의 CS616 함수센서에 대하여 민감도 분석을 수행하면서 온도의 영향을 검토하였다. 그러나 온도 민감도 분석 영역이 영상이라는 시험 조건이 제한적이다. 국내의 경우 겨울철 대기온도가 지역적으로 영하 20℃보다 낮을 수 있으며, 대기온도의 영향을 받아 TDR 방식의 함수센서를 설치한 위치의 온도도 영하보다 낮은 온도를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 TDR 센서가 매립된 흙의 온도를 영하 2℃ 보다 낮은 온도까지 확장하여 TDR 방식의 함수센서에 대한 온도 민감도 시험을 수행하고 TDR 함수 센서에 대한 온도의 영향을 분석하고자 한다.

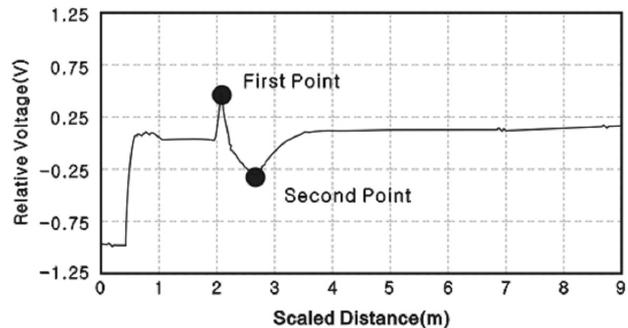
### 2. Time Domain Reflectometry 방식의 함수센서

본 연구에서는 포장 하부의 함수량을 측정하기 위하여 시간이력 반사방식(Time Domain Reflectometry, TDR)의 CS616 센서를 적용하고자 하며, TDR 방식의 함수비 측정 방법은 짧은 전자기 펄스를 우선 발사한 후 되돌아오는 반응을 계측하는 방식으로 레이더와 동일한 기술로 볼 수 있다. TDR 방식의 계측시스템은 Figure 1(a)와 같이 펄서, 샘플러, 오실로스코프, 동축케이블 및 계측프로브로 구성된다. TDR 펄서는 전자기적 단계 펄스를 발생시키며, 발생 단계 펄스는 동축선을 따라 이동하게 된다. 마이크로파의 펄스가 전송선을 따라 전달될 때, 여러 가지 면에서 빛과 비슷한 형태를 보여주게 된다. 그리고 펄스가 동축선을 따라 이동하는 동안, 동축선은 유전체(conductor) 사이에 전자기 영역을 발생시키며, Figure 1(b)와 같이 동축선의 내부와 외부 유전체 사이에는 포텐셜(potential) 차이가 발생하게 된다.

TDR 방식에서 전자기적 펄스(전송선을 따라 이동하는 에너지)의 속도는 접촉되어 있거나 전송선을 감싸고 있는 매질의 유전상수( $K_a$ )에 의존한다. 즉, 유전상수가 높을수록 속도는 더 느려지게 된다. 일반적으로 토양은 공기, 미네랄과 유기물 입자 그리고 물로 구성되는데 공기는 유전상수가 1정도이며, 미네랄 입자는 2에서 4사이 그리고 수분은 약 80 정도의 값을 갖는다(Kim and Jeon, 2005; Ekblad and Isacson, 2007; Lundberg, 1997). 이처럼 토양 내의 다른 물질들과 비교하였을 때, 수분이 가지고 있는 유전상수가 상대적으로 크기 때문에 토양 내에 평행하게 묻힌 전송선 내부를 따라 흐르는 에너지인 마이크로파 펄스의 이동 속도는 토양 내의 수분에 크게 의존하게 된다. TDR 방식의 함수센서로부터 얻어진 결과인 전송시간(전자기 펄스가 탐침길이를 따라 이동할 때 소요되는 시간)은 탐침길이와 전송시간과의 관계로부터 매질체의 유전상수는 식(1)과 같이 전송시간의 함수로 표현된다.



(a) TDR soil moisture measurement system



(b) Interpretation of waveform measured by TDR System

Fig. 1. Configuration of TDR soil moisture content measurement

$$K_a = \left[ \frac{Ct}{2L} \right]^2 \quad (1)$$

여기서, C : 진공상태에서의 빛의 속도

t : 전자기파의 이동시간(sec)

L : 도파관의 길이(cm)

따라서 체적함수비(VMC, Volumetric Moisture Content)를 식 (1)의 유전상수로부터 계산할 수 있다. 또한 식 (2)와 같은 경험식을 통해 체적함수비와 중량함수비(GMC, Gravimetric Moisture Content)를 상호 변환할 수 있다(Sallam et al., 2004).

$$VMC = \frac{GMC \times \gamma_{d(흙)}}{\gamma_{물}} \quad (2)$$

여기서,  $\gamma_{d(흙)}$ : 흙의 건조단위중량( $g/cm^3$ )

$\gamma_{물}$  : 물의 단위중량( $g/cm^3$ )

### 3. 현장계측시스템

#### 3.1 계측위치 및 설계 정보

아스팔트 콘크리트 포장의 온도와 함수비 특성을 평가하기 위하여 Figure 2와 같이 한반도 남부(동결지수  $350^\circ C \cdot \text{일}$  미만)의 6개 지역에 현장계측시스템을 설치하였으며, 구축 단면의 설계정보를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서 구축된 현장계측시스템은 신설도로의 시공과 동시에 계측시스템을 구축하였으며, Table 1의 설계정보 중 안동, 김천, 부여 및 보성 현장계측시스템의 경우 실시설계보고서를 바탕으로 조사하였다. 그러나 합천과 장성의 경우 실제 계측시스템을 구축한 단면의 설계정보를 확보하지 못하여 거의 유사 설계를 적용한 옆 공구의 설계정보를 인용하였다.

#### 3.2 현장계측시스템 구성

현장계측시스템은 온도센서와 함수센서로 구성되어 있으며, Figure 3과 같이 단면별로 각각 26개와 15개씩을 적용하였다. 적용된 온도 센서는 일본 Yamari사의 Thermocouple K-type 이며, 함수센서는 미국 Campbell사에서 제작한 TDR 방식의 CS616 함수센서로 Figure 3과 같이 배치하였다. 온도 센서의 경우 대기, 아스팔트 콘크리트 층(표층 및 기층) 및 포장 하부(보조기층, 동상방지층 및 노상)에 대하여 설치하였다. 함수센서의 경우는 아스팔트 콘크리트 층을 불투수층으로 가정하고 포장 하부에만 적용하였으며, 체적함수비로 측정된다. 포장 하부에

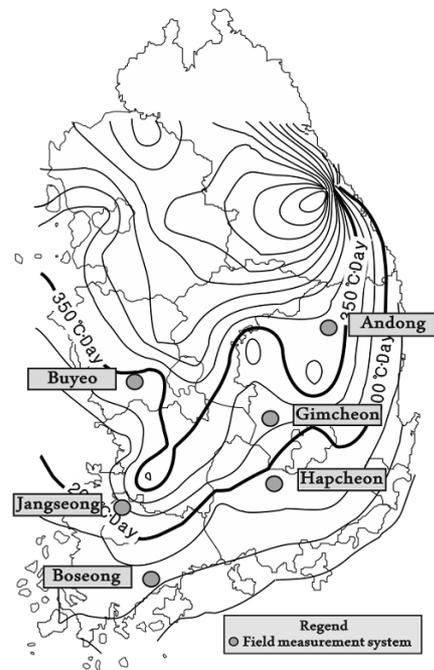


Fig. 2. Location of field measurement systems

Table 1. Pavement design input data at field measurement system

Location		Andong	Gimcheon	Hapcheon	Jangseong	Boseong	Buyeo
Depth (cm)	Surface layer	5	5	10	5	5	5
	Binder layer	7	-	-	6	7	6
	Base layer	18	20	15	10	18	14
	Subbase layer	20	25	20	20	37	20
	Anti-frost layer	30	20	25	30	-	30
Design input	Meteorological station	Andong	Gumi	Hapcheon	Jangseong	Jangheung	Buyeo
	Freezing Index(FI, $^\circ F \cdot \text{day}$ )	615	265	193	481	328	581
	Frost Period(day)	57	76	193	60	60	60
	Modified FI( $^\circ F \cdot \text{day}$ )	670	280	358	540	422	620
	Design FI(m)	85	70	60	75	62	75

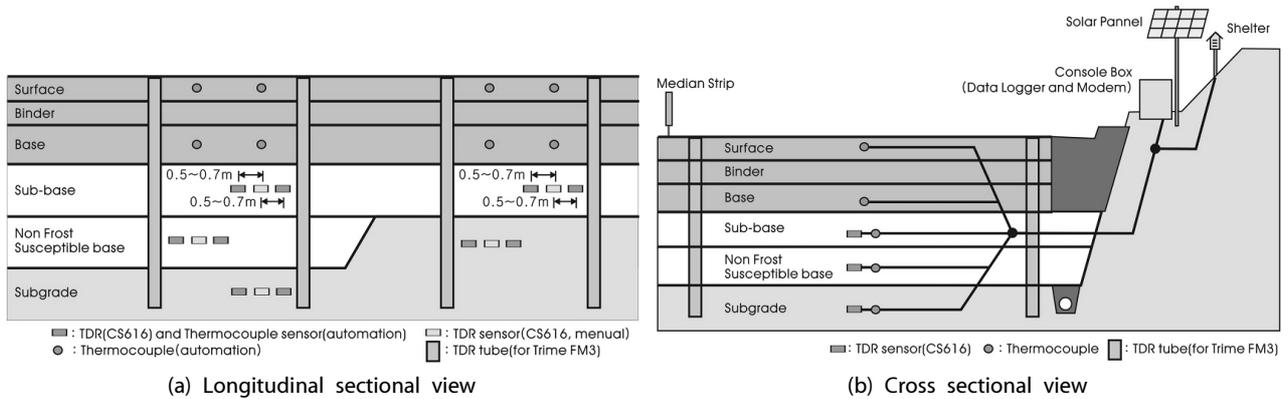


Fig. 3. Field measurement system lay-out

매설된 온도센서와 함수비 센서의 설치위치는 Figure 3과 같이 층 중앙부에 매설하였고, 노상층의 경우 노상층의 최종면으로부터 15cm 하부에 매설하였다. 현장계측시스템의 계측은 1시간마다 계측하고 있다(Cho et al., 2011)

#### 4. CS616 함수 센서의 온도 민감도 분석

##### 4.1 토질 물성 시험 결과

현장의 도로하부 함수비를 측정하기 위하여 TDR 방식의 CS616 함수 센서를 6개 지역에 매설하였으며, 계측 온도(흙의 온도)가 함수비 계측 결과에 미치는 영향을 확인하기 위하여 온도 민감도 시험을 수행하고자 한다. 민감도 시험은 구축된 현장계측시스템에서 채취된 흙에 대하여 수행하고자 하며, 민감도 시험에 앞서 골재의 입도, 다짐 및 액·소성 한계에 대한 실내 시험을 수행하였으며, 시험 결과를 Figure 4 및 Table 2에 나타내었다. 실내 시험 결과 채취된 흙은 양호한 노상토이며, USCS 흙의 분류상 SW-SC에 해당하는 것으로 나타났다.

##### 4.2 CS616 함수센서 보정시험 결과

TDR 함수센서인 CS616은 1회 측정으로부터 주기(period)를 측정하고, 제조사에서 제안한 식 (3)을 통해 주기를 체적함수비로 변환한다. 그러나 식 (3)은 계측하는 토질 특성에 따라 수정 또는 보정이 필요하기 때문에 본 연구에서도 온도 민감도 분석을 수행하기 전 보정시험을 수행하였다.

$$VMC = 0.0007(\text{period})^2 - 0.0063(\text{period}) - 0.0663 \quad (3)$$

여기서, period: 계측값,  
보정 시험은 선행 연구인 Cho et al.(2010)의 연구에서 사용

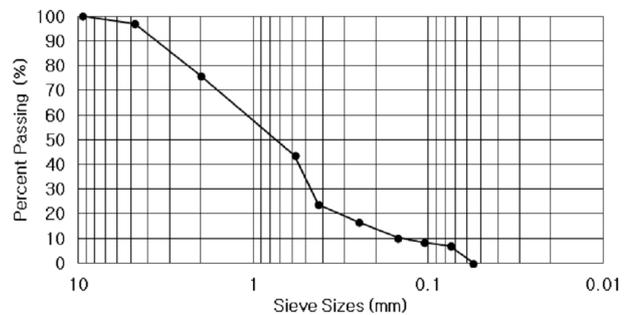


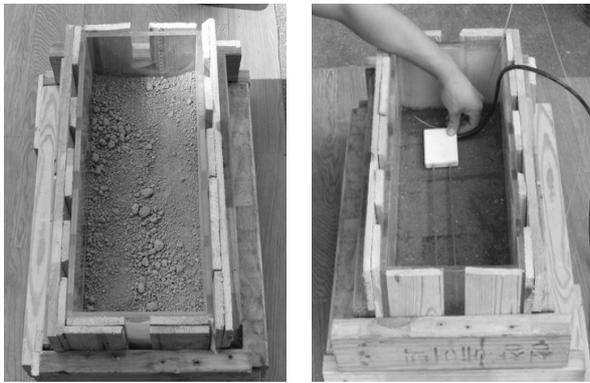
Fig. 4. Particle size distribution graph

Table 2. Soil properties test results

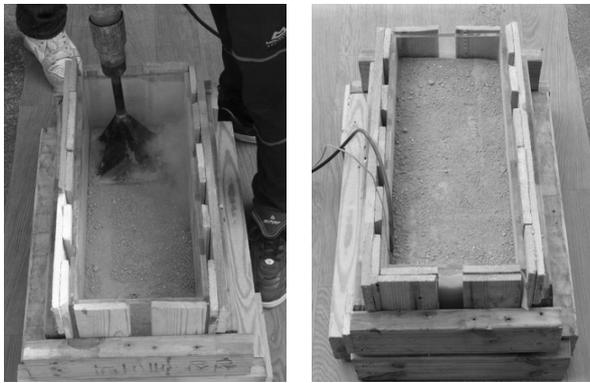
Property	Andong
Specific gravity	2.72
Maximum dry unit weight	2.08 t/m <sup>3</sup>
OMC	9.9%
Plastic index	N.P.
Cu	7.27
Cc	1.35
USCS	SW-SC

된 50cm×20cm×25cm 크기의 아크릴 재질 시험 몰드를 사용하였으며, 시험 공시체의 다짐 작업시 시험 몰드의 파손을 방지하기 위하여 Figure 5(a)와 같이 나무 블록을 적용하였다. Ekblad and Isacsson(2007)은 초기 체적함수비를 측정하고, 다짐이 완료된 공시체에 대하여 스프링클러를 활용하여 여러 함수비 조건에 대하여 시험을 수행하였다. 그러나 이러한 방법은 보정식을 제안하기 위한 계측시점의 정확한 함수비 데이터를 확보하기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 시험시 목표로 하는 체적함수비를 목표체적함수비로 결정하고, 0%, 10%, 20%, 30%, 40% 그리



(a) First layer soil preparation (c) Sensor installation



(b) First layer Compaction (d) Second layer compaction

Fig. 5. Measurement in the mold for TDR sensor verification

고 50%로 매 10%마다 함수비를 조정하여 보정시험을 수행하였다. 각각의 목표함수비에 대한 시험 절차는 Figure 5와 같으며, 최대건조밀도의 90% - 95% 다짐이 이루어지도록 하였다. 또한 각 함수비 조건마다 2개의 시료를 채취하여 중량함수비를 측정하였다. 센서부의 온도는 현장계측시스템에 적용된 온도센서와 동일한 K-type 써모커플을 적용하여 측정온도도 동시에 확인하였다.

보정시험 결과를 Figure 6에 Campbell사의 제안식(2차 다항식)과 Kim and Jeon(2005)이 제안한 보정식과 함께 나타내었다. Sallam et al.(2004)는 2차식보다 3차식 형태의 보정식이 정확하다고 발표하였다. 그러나 본 연구에서는 현재 운용중인 현장계측시스템에 적용하고 있는 2차식 형태로 회귀분석을 수행하였으며, 회귀분석 수행결과 보정식은 식 (4)와 같으며, R<sup>2</sup> 값은 0.99를 보여주었다.

$$VMC = 0.002x^2 - 0.0662x + 0.5381 \quad (4)$$

여기서, VMC: 체적함수비(%)  
 x : 계측값, period

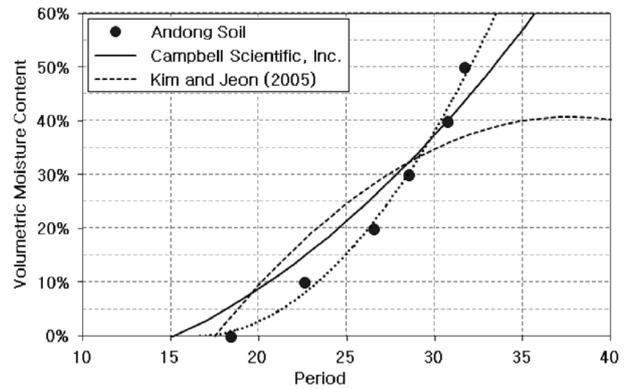


Fig. 6. Test result of TDR sensor verification

### 4.3 온도 민감도 시험 결과

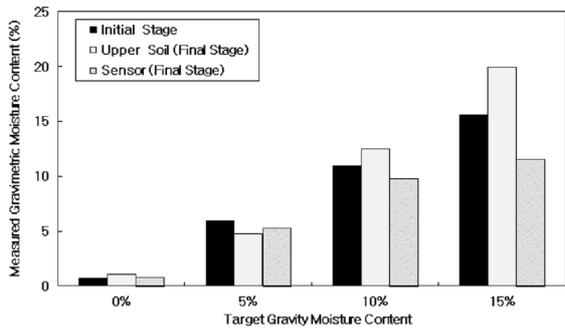
온도 민감도 시험은 함수비를 측정하는 센서부의 온도가 영하 2℃ 미만일 수 있도록 대형 냉동고에서 수행하였다. 시험 조건은 냉동고의 온도를 영하 10℃로 맞추고 센서부의 온도가 영하로 떨어지고 함수비로부터 측정되는 주기가 안정화 되는 시점에 시험을 종료하였다. 이때 CS616 함수센서는 전기 저항을 이용하여 함수비를 측정하기 때문에 함수비보다 온도의 영향이 다를 수 있다. 따라서 온도 민감도 시험도 보정시험에서와 같이 4종류의 목표 체적함수비(0%, 10%, 20% 및 30%)에 대하여 수행하였으며, 시험 종료시 센서부의 평균 온도는 영하 4.83℃를 보여주었다. 또한 센서를 정치시킨 후 센서부의 초기 중량함수비를 측정하였으며, 시험이 종료된 후 센서부와 2층 다짐이 이루어진 층(센서 상부의 층) 상부 지점에 대하여 각각 2개 시료를 채취하고 건조로에 의한 중량함수비를 측정하였다.

온도 민감도 시험 결과를 Table 3과 Figure 7에 중량함수비와 계측주기로 구분하여 나타내었다. 중량함수비 측정결과를 나타낸 Table 3 및 Figure 7(a)를 살펴보면 중량함수비 0%의 경우 초기에 측정된 함수비보다 시험 종료 후 중량함수비가 미소하게 증가하는 것으로 나타났으며, 증가한 함수비는 온도 민감도 시험이 진행되는 동안 시험 시료가 대기 중의 수분을 흡수한 것으로 사료된다. 그러나 중량함수비 10%와 15%의 시험 결과를 살펴보면 센서부는 중량함수비가 감소하고, 센서 상부는 감소한 중량함수비에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 중량함수비 증가(변동)량은 체적함수비가 10%인 경우보다 15%인 경우에서 더 크게 나타났으며, 이러한 경향은 Figure 7(a)와 같이 센서 상부의 흡이 동결하면서 센서부의 수분이 모세관 현상에 의하여 상부로 이동하여 센서부의 중량함수비는 감소하고 상부의 함수비는 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

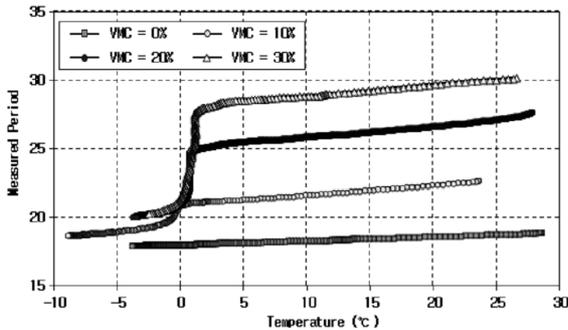
또한 온도 민감도 시험으로부터 계측된 주기를 나타낸 Figure 7(b)를 살펴보면 온도가 감소하면서 계측된 주기도 감소하는

Table 3. Temperature sensitivity test result of TDR sensor

Temperature (°C)	Air		-5.78	-9.52	-9.86	-9.05
	Sensor		-4.91	-7.50	-4.40	-2.52
Gravimetric Moisture Content (GMC, %)	Initial stage	Target GMC	0.00	5.00	10.00	15.00
		Measured GMC	0.69	5.95	10.91	15.62
	Final stage	Upper Soil	1.03	4.72	12.48	19.97
		Sensor	0.83	5.31	9.83	11.58



(a) Comparison of weight moisture content variation



(b) Temperature variation graph of measured period

Fig. 7. Temperature sensitivity test

것을 확인 할 수 있다. 시험 결과 5°C 이상 영역에서 주기 감소량은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 0°C 부근에서는 공시체에 함수비가 존재할 경우 계측 주기가 크게 변화하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 중량함수비 10%와 15%의 경우 영상 2°C 부근에서 주기가 큰 폭으로 감소하여 영하 3°C 부근에서 다시 안정화 하는 모습을 확인 할 수 있다. 이러한 주기의 변화는 Table 3 및 Figure 7(a)에서와 같이 시험 공시체 상부의 온도가 영하로 떨어지며, 함수 센서부의 수분이 이동하기 때문인 것으로 사료되며, 이에 대한 추가 시험 및 분석 연구를 추후 수행할 계획이다.

#### 4.4 함수센서의 온도 민감도 분석

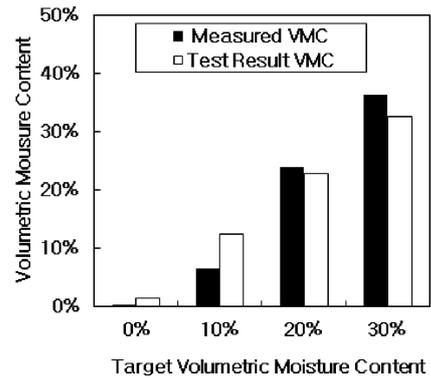
TDR 방식의 CS616 함수센서에 대한 온도 민감도를 확인하

Table 4. Comparison of period and volumetric moisture content(VMC)

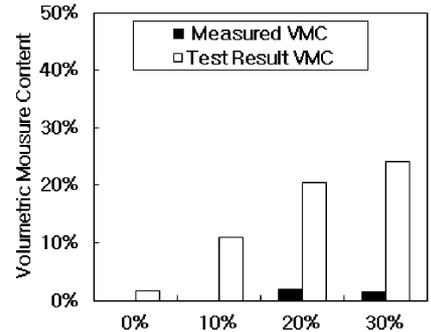
Target VMC	5°C		20°C		
	Period	Measured VMC	Period	Measured VMC	Test Result VMC
0%	18.100	0.0%	18.666	0.0%	1.4%
10%	21.381	3.7%	22.408	5.9%	12.4%
20%	25.560	15.3%	26.684	19.6%	22.7%
30%	28.627	28.2%	29.756	33.9%	32.5%

Target VMC	- 1 °C		- 4 °C		
	Period	Measured VMC	Period	Measured VMC	Test Result VMC
0%	18.048	0.0%	17.990	1.4%	1.7%
10%	19.829	1.2%	19.162	0.4%	11.0%
20%	20.557	2.2%	20.106	1.6%	20.4%
30%	20.734	2.5%	-	-	24.1%



(a) Test result at 20°C



(b) Test result at -4°C

Fig. 8. Comparison of dry oven test and TDR sensor measured volumetric moisture content

기 위하여 온도별 주기 및 체적함수비 변화를 Table 4와 Figure 8에 나타내었다. Table 4 및 Figure 8에서 VMC 측정값은 TDR 센서로부터 측정된 주기와 보정식 (3)으로부터 계산된 체적함수비를 의미하며, VMC 실험값은 온도 민감도 시험 시료를 오븐

건조로 방법으로 측정된 중량함수비로부터 계산된 체적함수비를 의미한다. 시험 조건인 온도는 TDR 센서위치에서 측정된 흙의 온도를 의미한다.

Table 4로부터 체적함수비의 측정값과 실험값을 비교하기 위하여 20℃와 영하 4℃ 조건에 대한 시험 결과를 Figure 8에 나타내었다. 영상 20℃ 조건에 대한 시험 결과를 살펴보면 대체로 VMC 측정값 보다 VMC 실험값이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 목표체적함수비에 대한 오차범위는 목표체적함수비±3%의 오차를 보여주었으며, 10%의 경우 목표체적함수비와 최대 6%의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 영하 4℃ 시험 결과는 TDR 센서로부터 측정된 체적함수비(VMC 측정)와 오븐 건조 시험으로부터 얻어진 체적함수비(VMC 실험) 결과의 차이가 크게 나타났으며, 목표체적함수비 10%와 20%에 대하여 각각 10.6%와 18.8%의 차이를 보여주었다. TDR 센서에 대한 온도 민감도 시험 결과 영상 조건에서 측정되는 현장 체적함수비는 일반적으로 ±3%의 오차를 가지며, 최대 ±6%의 오차가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 측정 온도가 영하의 경우에는 TDR 함수 센서로부터 측정되는 체적함수비가 온도의 영향을 받을 수 있어 측정결과 활용시 주의가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 온도 민감도 시험 결과로부터 영하 온도에 대한 TDR 함수센서의 보정식을 영하 2.5℃ 실험 결과를 바탕으로 식 (4)와 같이 구하였으며, Figure 9에 센서부의 온도가 5℃ 이상에 대하여 적용할 수 있는 보정식과 센서부의 온도가 영하 2℃ 미만에 대한 보정식을 비교하였다. Figure 9를 살펴보면 CS616 함수센서로부터 측정되는 주기로부터 결정되는 체적함수비가 측정조건이 영상과 영하에 대하여 큰 차이를 보여주는 것을 알 수 있다. 그러나 TDR 방식의 함수센서는 토질에 따라 보정식의 상수값에 차이가 있기 때문에 정확한 온도 보정을 위해서는 센서가 매립되는 토질에 따라 재산정할 필요가 있다.

$$VMC = 0.0397x^2 - 1.4117x + 12.551 \quad (4)$$

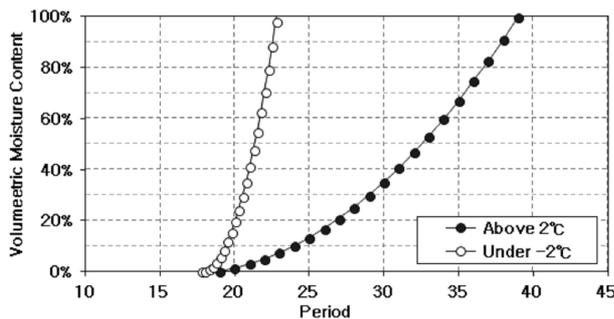


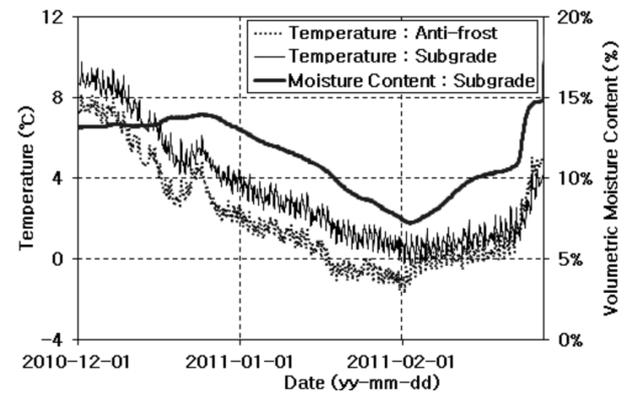
Fig. 9. Comparison of verification

## 5. 현장 측정 결과에 대한 온도 민감도 검토

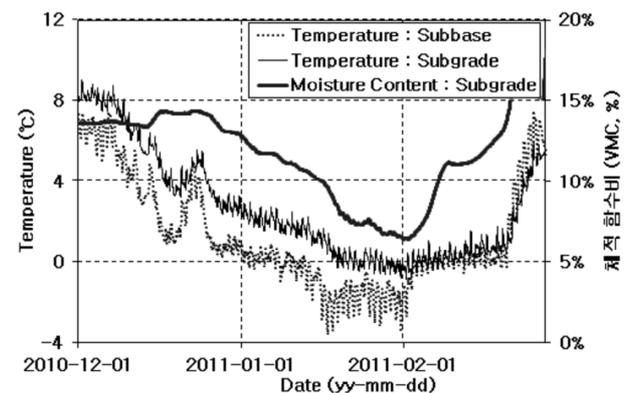
본 연구에서 구축된 6개 지역의 측정 데이터 검토 결과 겨울철 노상 온도가 영하로 낮아지는 경우는 안동 시스템에서만 나타났다. 2010-2011 겨울에 해당하는 2010년 12월 1일에서 2011년 2월 28일까지 안동 시스템의 최저 온도와 최저 함수비는 Table 5와 같다. 또한 Figure 10에 측정 결과를 온도와 함수비로 구분하여 시간이력 그래프로 나타내었다. Figure 10(a)는 동상방지층이 없는 구간으로 노상의 온도와 함수비 및 노상 위에 위치하고 있는 보조기층의 온도를 포함하고 있으며, 동상방지층이 있는 경우인 Figure 10(b)는 보조기층 대신 동상방지층의 온도를 나타내었다.

Table 5. Field measured VMC of subgrade at Andong systems (with anti-frost layer)

Measured Data		Andong	Date
Lowest Temperature(℃)		-0.34	2011. 2. 2
Moisture Content(%)	VMC	7.24	
	GMC	3.48	



(a) Section without anti-frost layer



(b) Section with anti-frost layer

Fig. 10. Field result at Andong

안동 시스템의 계측결과 노상의 온도는 보조기층 또는 동상방지층의 온도가 감소하는 영향을 받아 2011년 1월 말까지 지속적으로 감소하였다. 동상방지층이 없는 경우 2011년 1월 중순에 부분적으로 0℃ 보다 낮은 노상의 온도를 보여주었으며, 함수비도 온도가 감소함에 따라 지속적으로 감소하였다. 동상방지층이 있는 경우도 노상 함수비가 지속적으로 감소하였으며, 체적함수비의 감소량은 두 구간 모두 약 6% 정도 감소한 것으로 나타났다. 그러나 온도 민감도 시험결과에서 ±1℃ 구간은 주기 변동구간으로 확인되었기 때문에, 체적함수비 감소는 노상 상부의 동상 가능성과 일부 온도에 의한 계측오차를 내포하고 있는 것으로 사료된다. 따라서 이러한 계측 자료를 도로 하부의 함수비 변동 파악을 위한 수치해석이나 수분 이동과 관련된 시험 결과의 검증 자료로 활용하기 위해서는 추가적으로 영하의 온도에 대한 보정이 필요한 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 Time Domain Reflectometry 방식의 함수비 센서인 CS616에 대하여 온도 민감도 시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 온도 민감도 시험으로부터 계측된 주기는 센서부 흡의 온도 변화에 따라 변동하며, 영상 2℃ 부근에서 주기가 큰 폭으로 감소하여 영하 3℃ 부근에서 다시 안정화 하는 것으로 나타났다. 함수비 변동량은 체적함수비 0%의 경우는 온도의 영향을 거의 받지 않지만 체적함수비가 증가함에 따라 변동량도 커지는 것으로 나타났다.
- (2) 온도 민감도 시험 결과 20℃ 온도 조건에서 목표체적함수비 ±3%의 오차를 보여주었으며, 최대 6%의 차이가 나는 것으로 나타났다. 영하 4℃ 온도 조건의 경우 TDR 센서로부터 측정된 체적함수비와 드라이 오븐으로부터 측정된 체적함수비의 차이가 10% 이상 큰 것으로 나타났으며, 측정결과 활용시 주의가 필요할 것으로 사료된다. 영하 2℃ 미만에 대하여 적용할 수 있는 보정식을 제안하였다.
- (3) 2010-2011 겨울 안동 현장 계측 결과 노상 센서부의 최저온도는 영하 0.34℃로 실내 온도 민감도 시험결과와 같이 일부 노상 상부에서 동결 작용이 발생 할 수 있으며, 계측 결과를 바탕으로 도로 하부의 함수비에 대한 수치해석 등을 위해서는 계측 결과의 온도에 대한 보정이 필요할 것으로 사료된다.

그러나 본 연구는 남부지역에 구축된 현장계측시스템에 대한 온도 민감도 시험을 수행하였기 때문에 모든 흡 또는 토질

조건에 대한 온도 보정을 하는데 제한적이며 추후 다양한 토질에 대한 시험을 보완 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설교통R&D 정책 인프라사업의 일환인 “남부지역 도로의 포장 구조체 현장계측 시스템 구축 및 계측결과 분석(08-기술혁신-C01)” 연구결과와 일부입니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

- Cho, M.H, Lee, Y.H, Kim, N. Park, J.(2010) “A Study on Measuring and Calibration Method using Time Domain Reflectometry Sensor under Road Pavement”, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation Vol. 10, No. 2, pp. 23-30.
- Cho, M.H, Kim, N., Shim, J.(2011), “Computing Procedure of Daily Average Air Temperature using Field Data and Frost Index Calibration for Anti-Frost Heave Layer Design”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers Vol. 31, No. 3D, pp. 433-439.
- Dasberg, S., and Dalton, F.N.(1985), “Time Domain Reflectometry Field Measurements of Soil Water Content and Electrical Conductivity”, Soil Science Society of America Journal, Vol. 49, No.2, pp. 293-297.
- Ekblad, J. and Isacson, U.(2007), “Time-domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in road pavements”. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, No. 7, pp. 858-872.
- Kim, B. 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 Korean Society of Road Engineers Vol. 7, No. 4, pp. 103-112.
- Lundberg, A.(1997), “Laboratory Calibration of TDR-probes for snow wetness measurements”, Cold Regions Science and Technology Journal, Vol. 25, Issue 2.
- Park, J.H., Yun, S.Y., Kim, S.J. and Sonu, J.H.(1997), “Measurement of Soil Water Content by Time Domain Reflectometry”, Journal of Korea Water Resources Association Vol. 30, No. 6, pp. 587-595.
- Park, J.H. and Yun, S.Y.(1998), “A study on the Measurement of Soil Water Concentration by Time Domain Reflectometry”, Journal of Korea Water Resources Association Vol. 31, No. 2, pp. 123-132.
- Sallam, A.M., White, N.K., Ashmawy, A.K.(2004), “Evaluation of the Purdue TDR Method for Soil Water Content and Density Measurement”, Florida Department of Transportation.
- 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, pp. 107-127.