



# LTPP 구간에서 TDR 방식 함수량계를 이용한 현장함수비 보정모델 개발과 함수비 분석 연구

## Development of Calibration Model and Analysis of Soil Water Content using Time-Domain Refelctometry Probe in LTPP Sections

김 부 일\*      전 성 일\*\*  
Kim, Booil      Jeon, Sung IL

### Abstract

Water content of sub-layer in pavement systems has a large effect on pavement performance. Many researchers lately make use of time-domain reflectometry(TDR) probes to measure the soil water content of sub-layer from field 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 performed the laboratory calibration test of TDR probe(CS616) with subgrade and subbase material in long term pavement performance(LTPP) sections. And the calibration equations of TDR probe(CS616) 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.

**Keywords :** *time-domain reflectometry(TDR), soil water content, long term pavement performance(LTPP)*

### 요 지

도로포장구조체에서 하부구조의 함수비는 포장공용성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 최근 들어 많은 연구자들이 현장 계측을 통한 포장하부구조의 함수비를 주기적으로 측정하기 위해서 TDR(Time-Domain Reflectometry) 함수량계를 사용하고 있다. 일반적으로 TDR 함수량계는 흙의 타입, 입도, 밀도, 온도 등에 의해 오차가 유발될 수 있기 때문에, 현장의 흙을 사용하여 TDR 함수량계의 실내보정실험을 반드시 수행해야 한다. 본 연구에서는 LTPP(Long Term Pavement Performance) 구간의 노상재료와 보조기층재료에 대하여 TDR 함수량계(CS616) 실내보정실험을 수행하였으며, 이 결과로부터 TDR 함수량계의 보정모델을 개발하였다. 또한 현장데이터의 분석을 통해, 함수량계가 동결의 발생여부, 부동수의 양, matric suction 등을 판단하는데 활용될 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어 :** TDR 함수량계, 흙의 함수비, 포장장기공용성연구

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원



## 1. 서론

도로포장구조체에서 하부구조의 함수비는 포장공 용성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 하부구조의 함 수비 증가는 흙의 체적팽창과 지지력의 저하를 가져 와 포장구조의 심각한 손상을 유발한다. 또한 겨울철 동상(frost heaving)의 발생과 해빙기의 지지력손실 에 따른 포장파손의 주요 인자 중 하나가 함수비이 다. 이에 최근 들어 많은 연구자들이 현장계측을 통 한 포장하부구조의 함수비를 주기적으로 측정하기 위해서 TDR(Time-Domain Reflectometry) 함수 량계를 사용하고 있다. TDR 함수량계는 1970년대 에 최초로 농업연구자들에 의해 용수로 설치와 관련 하여 흙의 함수비 측정을 목적으로 사용되었으며, 이 후 지질공학 분야에서, 최근 들어 도로포장관련 연구 에서 많이 사용이 되고 있다. 또한 이것은 다른 타입 에 비하여 정밀도가 우수하여, 포장하부구조의 함수 비를 측정하는데 유용하다는 것이 많은 연구에서 보 고되었다. 하지만 TDR 함수량계는 흙의 타입, 입도, 다짐밀도, 온도 등에 의해 오차가 발생하기 때문에, 이에 대한 보정실험(calibration test)이 필요한 실 정이다. 미국의 LTPP와 시험도로에서는 TDR 함수 량계의 실내보정실험과 현장검증을 통해 자체적인 보정방정식(calibration equation)을 개발하여 사용 하고 있다.

본 논문에서는 국내 LTPP 구간의 노상재료와 보 조기층재료를 이용하여 TDR 함수량계의 실내보정 실험을 수행하였고, 이 결과를 통해 보정방정식을 제 안하였다. 아울러 현장에서 함수량계의 매설시 함수 비를 체크하여 개발된 보정방정식에 대한 현장 검증을 수행하였다. 또한 공용중인 포장의 함수비 데이터 를 분석하여 동결발생 여부, 부동수의 양, matric suction의 현장상태변화를 분석하였다.

## 2. TDR 함수량계의 원리 및 연구동향

### 2.1. TDR 함수량계의 원리

절연체를 전기장 내에 놓았을 때 표면에 전하가 유 기되는 현상이 있는데, 이러한 관점에서 절연체를 다 를 때 이것을 유전체(dielectric material)라고 한 다. 유전체는 자유전자가 거의 없는 대신에 원자를 이루고 있는 양자와 전자가 외부의 전기에 의해 회전 궤도가 치우침에 따라서 약간의 극성을 나타내게 되 며, 이 극성의 정도는 전기쌍극자 모멘트에 의해 정 량화 된다.

유전율(dielectric constant)은 두 전극사이에 유 전체를 넣었을 경우와 넣지 않은 경우(엄밀히 진공 상태의 경우)의 전기용량비이다. 물의 유전율은 대 약 80, 건조된 흙의 유전율은 흙의 전기전도율과 밀 도에 따라 일반적으로 3~8 사이의 값을 나타내고 있다. 이처럼 TDR 함수량계의 원리는 물과 흙의 유 전율이 크게 차이가 있다는 것에 기초하여 나온 것 이다.

TDR 함수량계의 원리는 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파(electromagnetic wave)의 이 동시간(travel time)을 측정하는 것을 바탕으로 하 고 있다. 유전율은 전자기파의 이동시간과 도파관 (waveguide)의 길이에 의해 계산된다. 도파관 주위 재료의 전기적 특성 변화에 의해 이동시간이 변화할 때, 유전율도 또한 변화할 것이다. 흙에서 도파관을 따라 이동하는 전자기파의 속도  $v$ 는 다음 <식 1>과 같이 나타낸다.

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

여기서,  $c$  = 진공상태에서의 빛의 속도( $3 \times 10^8 m/s$ )  
 $K_a$  = 유전율

<식 1>로부터 유전율은 다음 <식 2>와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $t$  = TDR에 의해 측정된 전자기파의 이동 시간(sec)

$L$  = TDR 도파관(waveguide)의 길이(m)

그림 1은 일반적인 TDR의 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 측정된 길이(apparent length)  $L_a$ 는 다음 <식 3>과 같다.

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

또한 전파속도(propagation velocity)는 다음 <식 4>와 같이 정의할 수 있다.

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

<식 3>, <식 4>를 이용하여 <식 2>를 다시 정리하면, <식 5>를 얻을 수 있다.

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

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 et al, 1999).

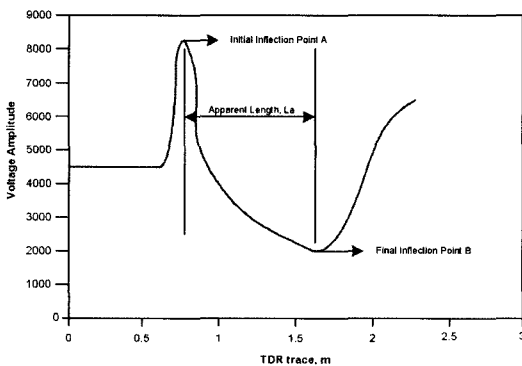


그림 1. TDR의 일반적 파형

## 2.2. 연구동향

Davis and Chudubiak(1975)은 TDR 기술을 이

용하여 최초로 흙의 유전율을 정확히 측정할 수 있는 방법을 개발하였다.

Topp et al.(1980)는 유전율  $K_a$ 의 측정을 통하여 부피함수비 VWC(Volumetric Water Content)를 결정할 수 있는 보편적인 관계식을 제안하였으나, 흙의 밀도, 특성, 염류함량 등을 고려하지 않은 한계가 있다. Topp et al이 제안한 관계식은 다음과 같다.

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

미국의 LTPP-SMP 연구(Jiang, 1999)에서는 3,000개의 LTPP구간 중 64개 구간에 포장체 환경 상태를 평가하기 위한 계측센서를 설치하여 관측하고 있다. 64개구간은 포장형식 및 두께, 노상타입, 기후조건 등을 고려하여 선정되었다. 특히 입상재료 층과 노상의 함수량을 관측하기 위하여 TDR 함수량계를 사용하였는데, TDR 함수량계를 이용하여 함수량 계산시 각각의 골재타입과 유전율에 따른 보정방정식을 제안하였다. 다음 두 식은 보정방정식의 형태를 나타내고 있다.

$$K_a \text{ Model : } WVC = a_0 + a_1 K_a + a_2 K_a^2 + a_3 K_a^3 \quad (7)$$

Fine-Gradation Model :

$$WVC = a_0 + a_1 K_a + a_2 K_a^2 + a_3 K_a^3 + a_4 G1I_2 + a_5 G1I_2 + a_6 No4 + a_7 No10 + a_8 No200 + a_9 PL + a_{10} LL \quad (8)$$

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 필요없으며 데이터 출력값이 주기(period)로 나오는 CS615를 추천하였다(Brian, 2000).



### 3. 재료 및 실험

#### 3.1. 사용재료

건설교통부 연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 LTPP 구간 중 A, B, C 세 개 구간의 노상토와 보조기층 재료를 이용하여, TDR 함수량계의 보정실험을 수행하였다. 본 재료의 기본적인 토질시험결과는 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1. 노상재료의 토질시험 결과

구분	A 구간	B 구간	C 구간
흙의 밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.747	2.656	2.635
최대입경(mm)	19	19	19
통일분류	SM	SW	SW
최적함수비(%)	12.1	11.38	9.23
최대전조단위중량(g/cm <sup>3</sup> )	1.971	1.926	1.910
수정CBR(%)	14.4	9.23	12.06

표 2. 보조기층재료의 토질시험 결과

구분	A 구간	B 구간	C 구간
흙의 밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.640	2.701	2.740
최대입경(mm)	37.5	37.5	37.5
통일분류	GW	GW	GW
최적함수비(%)	6.3	6.3	5.25
최대전조단위중량(g/cm <sup>3</sup> )	2.181	2.208	2.146
수정CBR(%)	43	38	35

#### 3.2. CS616 TDR 함수량계

본 연구에서는 LTPP 구간에 매설되고 있는 CS616 TDR 함수량계를 사용하여 실험을 수행하였다. CS616 TDR 함수량계는 Campbell사에서 제조한 것으로 미국의 LTPP와 시험도로 연구에서 많이 사용되었던 CS610, CS615에 이어 최근에 업그레이드된 제품이다.

그림 2는 CS616 TDR 함수량계의 형상을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 CS616 TDR

함수량계는 회로기판(circuit board)과 여기에 연결되어 있는 두 개의 스테인레스 강 재질의 로드(rod)로 구성되어 있다. 회로기판의 고속 전자기 구성요소들은 쌍안정 다조파발전기로 배열되어 있다. 다조파발전기의 출력신호는 도파관(waveguide)으로 이용되는 로드(rod)에 연결되어 있다. 로드를 따라 움직이는 신호의 이동시간(travel time)은 로드 주위를 둘러싸고 있는 재료의 유전율(dielectric constant)에 좌우되며, 유전율은 재료의 함수비에 좌우된다.

CS616 TDR 함수량계의 출력신호는  $\pm 0.7$ volts의 진폭인 직사각형파(square wave)로 발생하며, 출력값은 주기(period)로 나오는데, 대기중에서 주기값은 15 microseconds, 물에서 주기값은 41 microseconds로 나타난다. 이와 같은 차이를 이용하여, 주기값과 함수비의 경험적 관계식을 수립하게 되며, 이를 통해 흙의 함수비를 추정하게 된다. CS616 TDR 함수량계의 매뉴얼에서는 일반적인 흙의 보정방정식(calibration equation)을 제안하고 있지만, 실제 현장에 적용시 반드시 보정실험(calibration test)을 수행하도록 권고하고 있다. 이는 CS616 TDR 함수량계가 재료적 특성에 의해 크게 영향을 받기 때문이다.

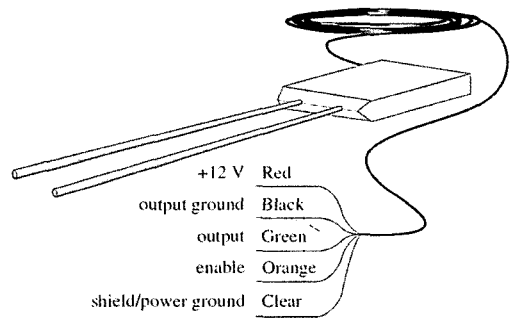


그림 2. CS616 TDR 함수량계의 형상

#### 3.3. 함수량계의 실내보정실험 계획 및 방법

국내에서는 TDR 함수량계의 보정실험에 대한 실험규정이 없으며, 이에 본 연구에서는 외국의 사례를



조사하여 국내실정에 맞는 보정실험 절차를 수립하였다. 실내보정실험절차는 다음과 같다. 그림 3은 TDR 함수량계의 실내보정실험 전경을 나타내고 있다.

- ① 0.60m×0.60m×0.30m 크기의 박스를 제작한다. (박스는 금속을 사용하지 않고 나무로 제작해야 한다. 이는 TDR 함수량계의 로드(rod)가 안테나의 역할을 하기 때문에 주변에 금속류의 재료가 존재할 경우 TDR 함수량계의 데이터에 영향을 미칠 수 있다.)
- ② 각각의 중량함수비에 따라 물과 흙을 계량하고, 믹서기를 사용하여 혼합을 실시한다.
- ③ 나무박스에 혼합된 흙을 다짐판을 이용하여 3층 다짐으로 넣는다.
- ④ 두 번째 층 다짐시 함수량계를 설치한다. 함수량계는 2~3개 정도를 사용하며, 이는 측정의 오차를 최대한 없애기 위해서이다.
- ⑤ 흙 채움이 끝나면, 함수량계를 데이터로거에 연결하여 TDR Output을 측정한다.
- ⑥ 측정이 끝나면, 박스 상부의 흙을 제거하고 함수량계가 설치되어 있는 위치에서 흙을 샘플링한다.
- ⑦ 샘플링한 흙의 무게를 재고, 오븐에 넣어 완전건조시킨 후, 다시 흙의 무게를 재다. 이는 KS F 2306에 준하여 수행한다.

본 연구에서는 A, B, C 구간의 노상재료에 대하여 중량함수비 0%~18%까지, 보조기층재료에 대하여 0%~8%까지 변화시켜 TDR 함수량계의 실내보정 실험을 수행하였다.

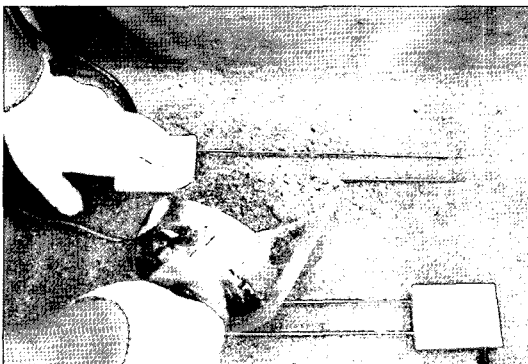


그림 3. TDR 함수량계의 실내보정실험 전경

### 3.4. LTPP 구간의 TDR 함수량계 매설현황

C구간은 LTPP 예비시험시공구간으로 시공완료 후 현재까지 약 2년정도 운영되어 오고 있으며, 나머지 구간은 현재 시공중에 있다.

그림 4는 C구간에 함수량계와 온도계 매설위치를 나타내고 있으며, 그림 5는 함수량계, 온도계, 계측 시스템의 형상을 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 온도계는 노상에 15cm 간격으로 9개가 매설되었고 보조기층과 동상방지층에 각각 1개씩 매설되었으며, 함수량계는 보조기층과 동상방지층 각각 중앙에 하나씩, 노상에서 깊이방향 30cm 간격으로 5개가 매설되었다. 데이터 수집은 전화선통신을 이용하여 이루어졌으며, 데이터로거는 CR-10X, 전원 공급은 태양열전열판을 이용하여 운영되고 있다.

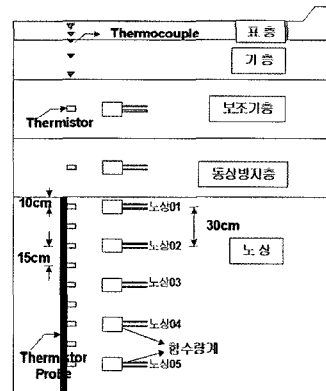
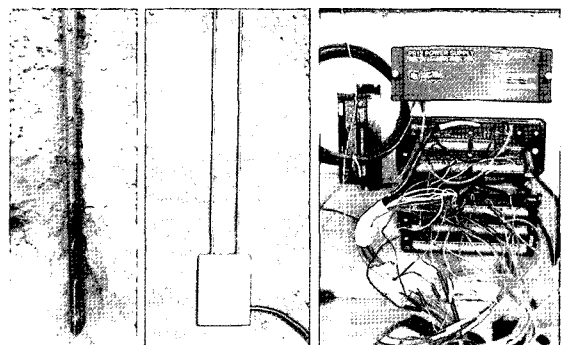


그림 4. 함수량계와 온도계 매설위치(C구간)



온도 Probe CS616 TDR 함수량계 계측시스템

그림 5. 계측센서와 계측시스템 형상



## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1. 함수량계 실내보정실험

일반적으로 TDR 함수량계는 다짐밀도의 증가에 따라 그 값이 증가하는 경향을 보이는데, 이는 흙의 공극이 감소하기 때문이다. 그림 6은 다짐도에 따른 함수량계의 출력값의 추이를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 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 보정실험에서 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, 다음과 같이 표시된다.

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

여기서,  $\omega_g$  = 중량함수비

(Gravimetric Water Content)

$m_{water}, m_{soil}$  = 물의 무게, 흙의 무게(g)

$m_{wet}, m_{dry}$  = 젖은 흙의 무게, 건조된 흙의 무게(g)

체적함수비는 중량함수비에 흙의 건조단위중량을 곱하여 결정할 수 있으며, 다음과 같이 표시된다.

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

여기서,  $\omega_v$  = 체적함수비

(Volumetric Water Content)

$V_{water}, V_{soil}$  = 물의 부피, 흙의 부피( $\text{cm}^3$ )

$\gamma_{water}$  = 물의 단위중량(=  $1 \text{ g/cm}^3$ )

$\gamma_{d(soil)}$  = 흙의 건조단위중량( $\text{g/cm}^3$ )

<식 10>에서 체적함수비를 산정하기 위해서는 흙의 다짐실험데이터가 요구되는데, 이에 본 연구에서는 각 구간별 흙의 다짐실험을 수행하였다. 그림 7은 B구간 노상토 다짐실험결과를 나타내고 있다.

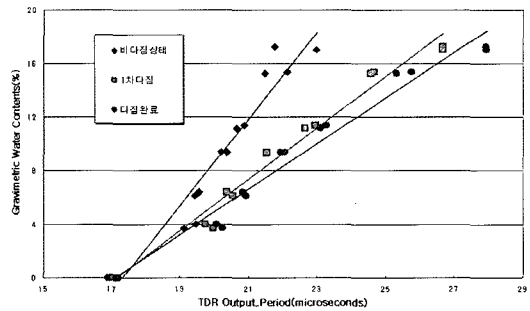


그림 6. 다짐도에 따른 TDR 출력값과 중량함수비의 관계

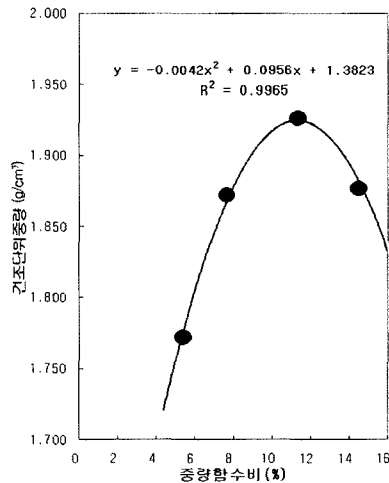


그림 7. B구간 노상토의 다짐실험 결과

본 연구에서는 흙의 입도에 따라 TDR 함수량계의 출력값이 차이를 나타내고 있기 때문에 노상재료와 보조기층재료 각각에 대하여 실내보정실험을 수행하였다. 그림 8과 그림 9는 노상재료와 보조기층재료에 대한 실내보정실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 중량함수비와 함수량계 출력값

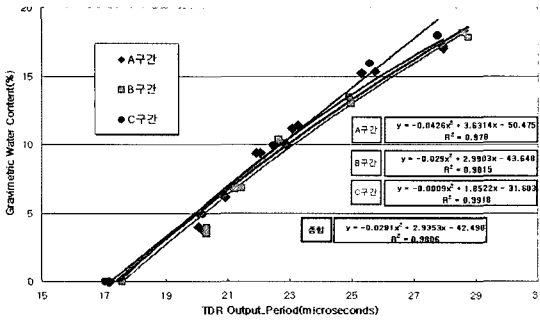


그림 8. 함수량계 출력값과 중량함수비와의 관계(노상재료)

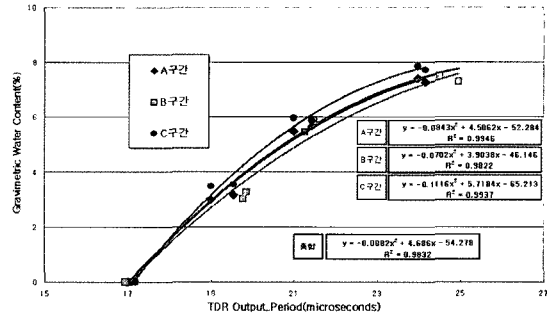


그림 9. 함수량계 출력값과 중량함수비와의 관계(보조기층재료)

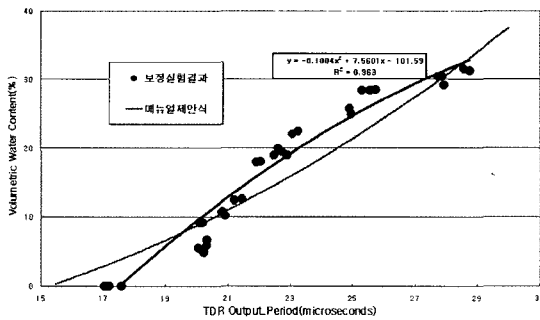


그림 10. 함수량계 출력값과 체적함수비와의 관계(노상재료)

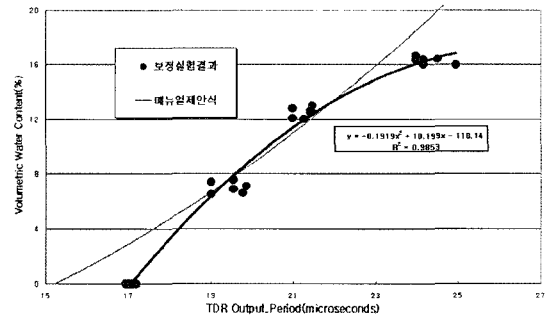


그림 11. 함수량계 출력값과 체적함수비와의 관계(보조기층재료)

과의 일정한 상관관계를 나타내고 있으나, 중량함수비별 흙의 밀도 차이 때문에 오차를 유발할 수 있기에, 본 데이터를 체적함수비로 변환하여 다시 분석하였다.

그림 10과 그림 11은 노상재료와 보조기층재료에 대한 체적함수비와 함수량계 출력값에 대한 관계를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 Cambell사의 매뉴얼에서 제시하고 있는 제안식과 비교하였을 때 함수비가 낮은 경우와 높은 경우에 큰 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 매뉴얼에서 제안한 보정방정식을 사용할 경우 현장계측에서 큰 오차를 유발할 수 있다는 것과 함수량계를 매설하는 구간의 재료에 대하여 실내보정실험을 반드시 수행해야 한다는 것을 보여주는 것이다.

위 결과를 바탕으로 본 연구에서는 노상재료와 보조기층재료에 대하여 다음과 같이 CS616 TDR 함수량계의 보정방정식을 제안하였다.

$$\text{노상재료 : } \text{VWC}(\%) = -0.1004T^2 + 7.5601T - 101.59 \quad (11)$$

$$\text{보조기층재료 : } \text{VWC}(\%) = -0.1919T^2 + 10.199T - 118.14 \quad (12)$$

여기서, VWC = 체적함수비(Volumetric Water Content)

T = CS616 TDR 함수량계의 출력값, 주기(Period)

일반적으로 TDR 함수량계는 유기질과 점토의 함유량에 영향을 받기 때문에 본 연구에서 제안한 보정방정식은 유기질과 점토의 함유량이 많은 흙의 경우는 적합하지 않으며, 또한 적용한 흙의 수가 제한적이기 때문에, 모든 LTPP구간의 재료에 대하여 연구를 진행하고 통합적 보정방정식을 개발해야 될 것으로 판단된다.

본 보정방정식에 대한 검증을 위해, A구간과 B구간의 노상에서 함수량계 매설시 매 위치마다 재료의 함수비를 체크하고 함수량계 데이터를 측정하였다. 그림 12는 본 연구에서 실내실험을 통해 제안한 보정방정식과 현장에서 측정한 실험결과를 비교한 차

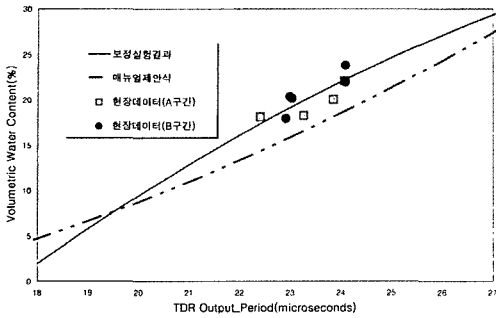
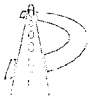


그림 12. 실내보정실험결과와 현장데이터와의 비교

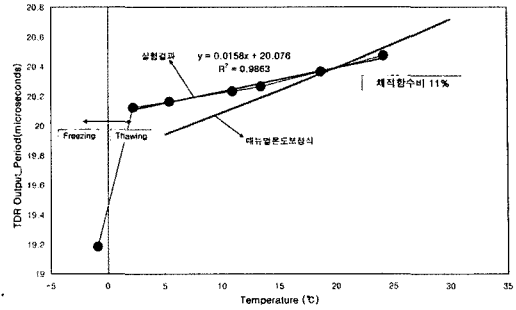


그림 13. TDR 함수량계 출력값과 온도와의 관계

트이다. 그림에서 알 수 있듯이, 약간의 편차가 존재 하지만 대체적으로 보정방정식에 부합되는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같은 결과는 실내보정실험으로부터 제안한 보정방정식이 실제 현장에서도 충분히 적용 가능함을 보여주고 있는 것이다.

그림 13은 온도의 변화에 따른 TDR 함수량계 출력값의 추이를 분석한 것이다. 본 실험결과에서 흙 온도 5°C~25°C로 변화할 때 함수량계는 약 0.3 microseconds 정도 변하고 있으며, 매뉴얼에서 제시한 온도보정식의 추이에서는 약 0.5 microseconds 정도 변하는 것으로 나타나 약간의 차이를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 온도의 변화가 함수비의 변동성에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단할 수 있으나, 단지 체적함수비 11%에 대한 결과이며 체적함수비가 증가함에 따라 함수량계 출력값의 변화폭이 더 커질 것으로 예상되기 때문에, 좀 더 정밀한 계측을 위하여 추가적인 실험을 통해 온도변화에 따른 분석이 요망된다. 또한 온도가 감소함에 따라 함수량계

출력값이 일정한 폭으로 감소하고, 흙의 온도가 0°C 이하로 떨어질 때 함수량계 출력값이 큰 폭으로 감소하는데, 이는 흙에 있는 수분이 빙정으로 변화하면서 나타나는 현상이며, 이와 같은 결과는 TDR 함수량계가 흙의 함수비 측정 외에 동결상태를 판단하는데도 활용될 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4.2. LTPP 현장분석

그림 14와 그림 15는 LTPP C구간에서 매시간별 측정된 함수비와 온도데이터를 보여주고 있다. 여기서 측정된 함수비는 위에서 제안한 보정방정식을 이용하여 산정된 것이다. 그림 14에서 나타난 것과 같이 ㉓와 ㉔구간에서 겨울철 대기온도의 저하로 보조기층, 동상방지층에서 수분이 빙정(ice)으로 변화하여 함수비 데이터가 급격하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 동결(freezing)이 발생하여도 부동수(unfrozen water)가 존재하게 되며, 함수량계는 이

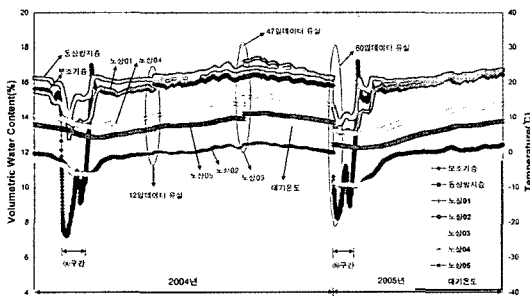


그림 14. C구간에서의 대기온도와 포장 깊이별 함수비 데이터 추이

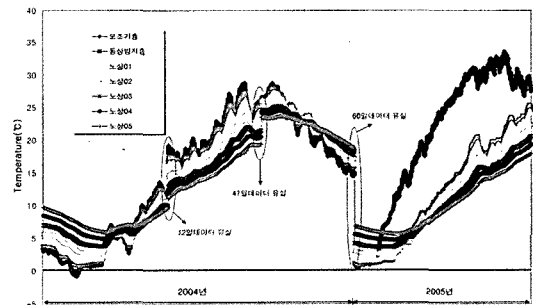


그림 15. C구간의 포장 깊이별 온도데이터 추이



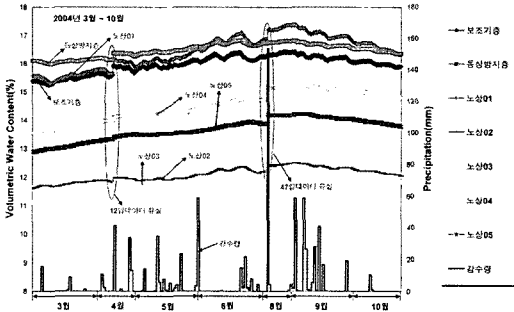


그림 16. C구간의 포장 깊이별 함수비와 강수량 데이터 비교

부동수의 영향으로 보조기층의 경우 약 7%정도의 함수비를 보여주고 있다. 또 하나의 중요한 특징은 ㉠와 ㉡구간에서 노상층의 온도는 0℃ 이상으로 계속 유지되고 있는데, 노상함수비는 약간씩 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이는 상부층에서 물이 빙정(ice)으로 변할 때, matric suction(공극공기압과 공극수압간의 차)이 증가하여 그 하부층에 존재하는 수분을 끌어당겨 함수비가 감소되는 것으로 판단된다.

그림 16은 LTPP C구간에서 2004년 3월~10월 사이에 강수량과 함수비 데이터를 비교한 것이며, 전반적으로 여름철 집중호우 시기까지 함수비가 점차 증가하고 여름이후 감소하는 경향을 보이고 있으나, 뚜렷한 상관성을 찾기는 힘들 것으로 판단된다. 과거 많은 연구자들은 강수량과 노상 함수비의 변동성 사이의 상호관계를 규명하고자 했으며, 또한 이 사이의 상호관계 계수를 직접 계산한 연구자도 있었으나 (Valdez 1991 ; Hossain et al.1997), 결국 이들은 강수량과 노상함수비의 변동성 사이에 상관성이 낮다는 결론을 내렸다. 이는 일반적으로 흙의 함수비 변동성이 흙의 타입, 강수량, 지하수위, 태양복사에너지, 지형과 같은 많은 인자들에 의해 영향을 받아 매우 복잡하며 한 가지 인자에 대한 상관성을 분석하는 것은 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 최근 연구동향을 보면 위에서 언급한 다양한 영향인자들과 흙의 타입과 같은 재료특성 그리고 포장의 공용성과 함수비, 온도, 지하수위 등 관계를 분석하기 위해 실제 현장계측을 통한 연구가 활발히

진행되고 있으며, 국내에서도 LTPP구간을 통해 이와 같은 연구가 수행되고 있다. 향후 이를 이용한다면 포장공용성과 다양한 환경인자들간의 상관성 규명이 가능할 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현장함수비 보정모델 개발을 위하여 LTPP 일부 구간에 노상재료와 보조기층재료를 이용하여 CS616 TDR 함수량계의 실내보정실험을 수행하였으며, 실제 현장에서 약 2년정도 측정된 함수비와 온도 및 강수량 데이터를 분석하였다.

1. 본 연구에서는 노상재료와 보조기층재료에 대하여 다음과 같은 CS616 TDR 함수량계의 보정방정식을 제안하였다.

- 노상재료 :

$$WVC(\%) = -0.1004T^2 + 7.5601T - 101.59$$

- 보조기층재료 :

$$WVC(\%) = -0.1919T^2 + 10.199T - 118.14$$

2. 실내실험을 통해 제안한 보정방정식과 현장에서 측정된 실험결과를 비교한 결과, 약간의 편차가 존재하지만 대체적으로 보정방정식에 부합되는 것을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 결과는 실내보정실험으로부터 제안한 보정방정식이 실제 현장에서도 충분히 적용 가능함을 나타내는 것이다. 하지만 적용한 흙의 수가 제한적이기 때문에, 모든 LTPP구간의 재료에 대하여 연구를 진행하고 통합적 보정방정식을 개발해야 될 것으로 판단된다.
3. 함수량계의 온도 민감성 실험결과 매뉴얼에서 제안한 온도보정으로 계산한 결과와 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 본 실험결과 온도 변화에 따른 함수량계 출력값의 변화폭이 작아서, 온도의 변화가 함수비 변동성에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단할 수 있으나, 단지 체적함수비 11%에 대한 결과이며 체적함수비가 증가함에



따라 함수량계 출력값의 변화폭이 증가할 것으로 예상되기 때문에 추가적인 실험을 통해 온도변화에 대한 분석이 요망된다.

4. 현장데이터 분석에서 함수비와 온도 데이터를 비교·분석함으로써 각 층별 동결상태를 판단할 수 있었으며, 부동수의 양도 평가가 가능함을 확인하였다. 또한 상부층의 빙정발생으로 matric suction(공극공기압과 공극수압간의 차)이 증가하고 그 하부층에 존재하는 수분을 끌어당겨 함수비가 동반적으로 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 강수량과 함수비 데이터를 비교한 결과 뚜렷한 상관관계를 확인할 수 없었으며, 이는 흙의 함수비 변동성이 흙의 타입, 강수량, 지하수위, 태양복사에너지, 지형과 같은 많은 인자들에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부의 연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 결과로서, 본 연구가 성공적으로 수행되도록 지원하여준 건설교통부에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 전성일, 권수안, 김도완 (2003), “포장하부구조의 함수비 측정을 위한 TDR 방식 함수량계의 실내보정실험,” 대한토목학회 정기학술대회 논문집.
2. Baker, J. M. (1990), “Measurement of Soil water content,” *Remote Sensing Reviews*, Vol. 5, No.1, pp.263-279.

3. 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.
4. 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.
5. Jiang, Y. J. and S. D. Tayabji. (1999), “Evaluation of In-Situ Moisture Content at LTPP Seasonal Monitoring Program Sites,” *TRB 78th Annual Meeting*, No. 990395
6. Ruth L. Roberson. and John Siekmeier. (2000), “Determining Frost Depth in Pavement Systems Using a Mult-Segment Time Domain Reflectometry Probe,” *TRB 79th Annual Meeting*, No. 001316.
7. Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. (1980), “Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines,” *Water Resources Research*, Vol. 16, No.3, June, pp.574-582.
8. S. F. Valdez(1991), “Subgrade Resilient Modulus Evaluation,” *FHWA-GA -91-8801*
9. M. Hossain, S. J. Kotdwala, B. Long and A. J. Gisi(1997), “Subgrade Moisture Monitoring Using Time Domain Reflectometry,” *Washington, D. C. Transportation Research Board 76th Annual Meeting*

(접수 : 2005. 8. 12)