

## WCR을 이용한 노상토 함수량의 측정 및 밀도 영향 평가 Effect of Density on WCR Measurement of Water Content in Subgrade Soils

이치현<sup>1)</sup>, Chi-Hun Lee, 박성완<sup>2)</sup>, Seong-Wan Park, 정진훈<sup>3)</sup>, Jin-Hoon Jeong, 권순민<sup>4)</sup>, Soon-Min, Kwon

1) 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

3) 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Highway Corporation

4) 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, Researcher, Korea Highway Corporation

**SYNOPSIS** : The purpose of field monitoring system in KHC-Test Road located at Joongbu-Inland Highway, is to provide the performance data for traffic and environmental loadings from pavement surface. Among them, water content reflectometers(WCR) are used to measure the volumetric water content of subgrades soils used in test roads. However, most of the WCRs are not well-calibrated based on the field conditions. In this study, the laboratory based test is performed at various density conditions to evaluate the volumetric water content in subgrade Soils with a WCR. Based on the laboratory testings, the effect of density on WCR measurement are well evaluated for predicting the volumetric water content of subgrades soils in KHC-Test road.

**Key words** : water content, water content reflectometer, subgrades, density, compacted soils

### 1. 서 론

일반적으로 온도와 함수량은 포장체의 장기공용성(Long-Term Performance)에 많은 영향을 미치는 환경적인 인자들로 알려져 있다. 포장체 상부의 재료물성들은 대기 온도에 의한 영향을 많이 받으며, 포장체 하부층의 지지력은 원 지반 및 지반재료의 구성 등으로 함수량의 영향을 많이 받게 된다. 그러므로 우리나라와 같이 사계절기후에서는 노상토의 함수량에 대한 계절적인 영향과 변화에 따라 적절한 반영이 필요한 실정이다. 이러한 영향을 포장체 설계에 적절하게 고려하고 함수량의 계절적 변화를 주기적으로 측정하기 위해 한국도로공사에서는 중부내륙고속도로 시험도로(Test Road)내 포장하부 노상토에 WCR(Water Content Reflectometer)방식의 함수량계를 깊이별로 설치하여 운영하고 있다. 그러나 WCR은 저주파를 이용하여 측정을 하는 특성으로 인해 흙의 종류 및 밀도 등에 따라 측정치가 다소 달라지는 경향이 있다. 따라서 WCR을 이용한 함수량 계측시 현장밀도의 영향을 고려하는 것이 필수적이라고 할 수 있다.

## 2. Water Content Reflectometer(WCR)

WCR은 일반적인 TDR(Time Domain Reflectometry)방식을 이용하는 함수량계의 단점(동축복합단자와 동축케이블 등의 특수한 장비의 필요, 큰 대역폭의 고주파 발생기 사용, 측정거리의 한계 등)을 극복하기 위하여 개발된 새로운 방식의 측정기기로서, 그 기본원리는 TDR의 원리와 유사하나 함수량 추정시 TDR은 출력값이 유전율 상수( $K_a$ )로 나타내어지는 것과는 달리 WCR은 출력값이 주기(T)로서 표현된다. 여기서 유전율 상수란, 유전체와 같은 극성을 가지는 분자들이 자기장의 영역안에서 위치가 변화함에 따라 전자기파의 통하는 정도가 달라지는 것으로 정의되고, 주기는 함수량계의 탐침을 따라 흐르는 전자기파가 되돌아오는 시간을 의미하는 것이다. 유전율 상수는 물에서 약 79~81, 건조된 흙에서는 전기 전도도와 밀도에 따라 약간의 차이를 보이지만 약 3~8 사이의 값을 나타내게 되어 WCR의 원리는 물과 흙의 유전율 상수에 차이가 있다는 것에 기초를 두고 있다고 할 수 있다. 그림 1은 전자기장내에서의 전자와 양자의 움직임을 나타낸 것이다(Brian K. Diefenderfer et al, 2000)

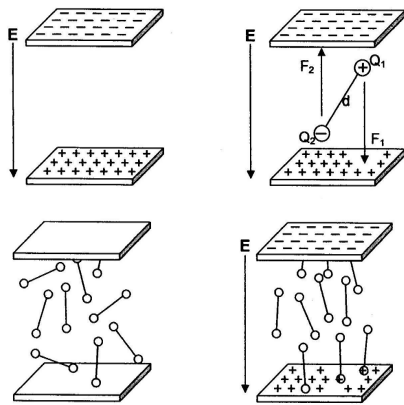


그림 1. 전자와 양자의 위치변화

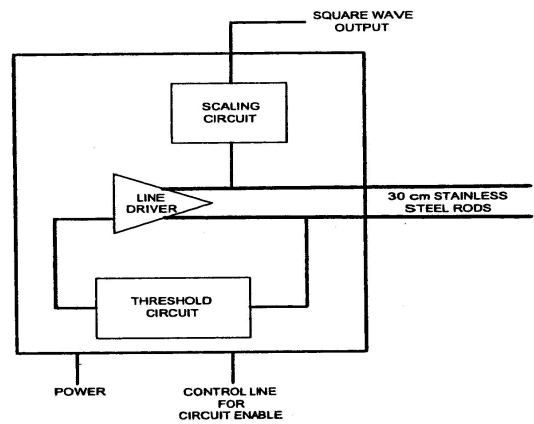


그림 2. WCR 탐침 헤드에 사용되는 회로의 개요도

그림 2는 WCR의 탐침에 부착되어 있는 탐침헤드 회로판으로, 드라이버 콘트롤의 출력신호는 두 가지의 역할을 수행하게 되는데, 회로의 스위치가 켜지면 발생된 전자기파를 탐침의 끝부분까지 보내게 되고, 반향되는 전자기파를 측정 후 다시 탐침의 끝부분으로 보내게 되며, 이 과정이 반복되면서 라인 드라이버의 상태에 주기적인 변화가 생기게 된다. 이 변화를 측정하여 라인 드라이버에서 발생시키는 전자기파의 주기적 변화를 알아낼 수 있게 되는 것이다. 여기서 주기(T)는 식 (1)로 표현된다.(Campbell & Anderson, 1998)

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

여기서, T : 주기

$t_{pd}$  : 증폭기의 지체시간

$t_c$  : 전기콘덴서의 공전(대기 속의 방전현상에 의해 발생)에 대한 지체시간

L : 탐침봉의 길이

$K_a$  : 유전율 상수

c : 자유공간에서의 전자기파의 전파속도( $3.0 \times 10^8$  m/s).

탐침의 마지막 출력값은 구형의 저주파 신호(600~1500Hz)를 나타내게 되어 데이터 로거에 함수량과 평균 주기를 기록하며, 측정된 주기로 함수량 추정방식을 활용하여 흙의 체적당 함수량을 예측할 수 있다.

식 (2)와 (3)은 1차식과 2차식으로 표현되는 체적당 함수량 추정방정식을 나타낸 것이고, 표 1은 일반적인 흙에서의 함수량 보정계수를 정리한 것이다.

$$VWC (\%) = C_0 + C_1 \times T \quad (2)$$

$$VWC (\%) = C_0 + (C_1 \times T) + (C_2 \times T^2) \quad (3)$$

여기서, VWC : 체적당 함수량 (Volumetric Water Content)

$C_0, C_1, C_2$  : 보정계수

T : 주기(microseconds)

표 1. 일반적인 흙의 함수량 보정계수

1차식 보정계수		2차식 보정계수		
$C_0$	$C_1$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
-0.4677	0.0283	-0.0663	-0.0063	0.0007

### 3. 실내시험

본 연구에서는 WCR(CS-616)이 설치되어있는 중부내륙시험도로의 노상토를 대상 지반으로 하였으며, 표 2는 노상토 시료의 기본 물성치를 나타낸 것이다. 또한, 그림 3과 그림 4는 각각 노상토의 입도 분포 곡선과 다짐곡선을 나타내고 있다.

표 2. 시료의 기본 물성치

구 분		시험값
입도 시험 결과	D <sub>10</sub>	0.15
	D <sub>30</sub>	0.63
	D <sub>60</sub>	2
	C <sub>c</sub>	1.3
	C <sub>u</sub>	13.3
	#200 통과율	4.92
	#4 통과율	93.82
비 중		2.65
소성지수(PI, %)		NP
흙 분류	통일분류	SW
다짐시험결과	최적함수비(%)	9.42
	최대건조단위중량(t/m <sup>3</sup> )	1.924

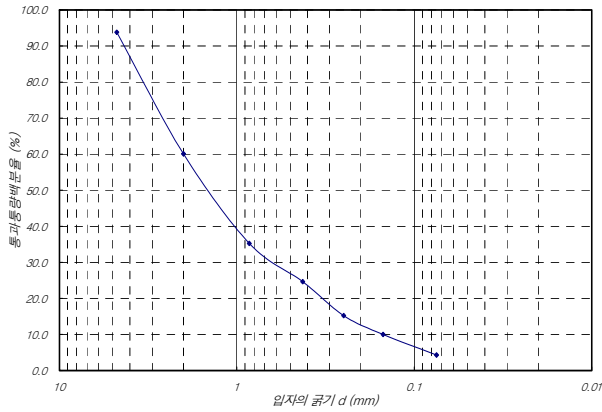


그림 3. 노상토 시료의 입도분포

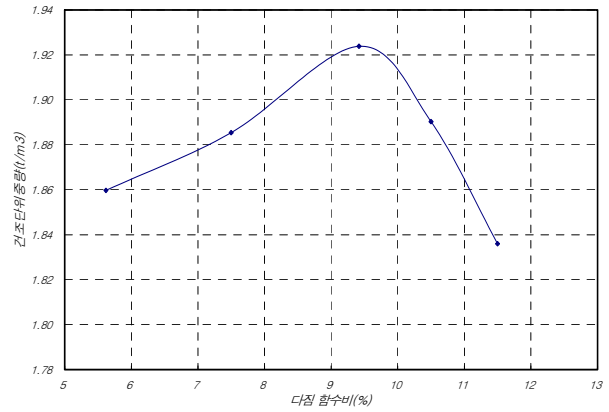


그림 4. 노상토 시료의 다짐 시험 결과

한국도로공사 공사시방서는 현장에서 흙쌓기 재료의 1층 다짐 완료 후의 노상토의 두께는 20cm가 될 수 있도록 시공하고, 노상토의 상대 다짐도는 95%이상으로 시공하도록 제시되어 있다. 따라서 각 층의 상대 다짐도는 95%이상으로 추정되나, 각 다짐 층별로 다짐도가 상이할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 상대 다짐도를 95%, 98%, 100%로 설정하여 3가지 경우를 고려한 다짐도에 따른 주기의 변화를 분석하였다. 또한, 18개월 동안의 시험도로 현장계측 결과를 토대로 실내실험 시 체적당 함수량 조건을 9%~23%의 범위로 설정하였다. 본 실내 실험에서 설정한 시험조건은 표 3과 같다.

표 3. 실내 실험조건

상대 다짐도	흙의 밀도	체적당 함수량
95%	1.828 t/m <sup>3</sup>	9.5%
		13.5%
		17.0%
		20.0%
		23.0%
98%	1.886 t/m <sup>3</sup>	9.5%
		13.5%
		17.0%
		20.0%
		23.0%
100%	1.924 t/m <sup>3</sup>	9.5%
		13.5%
		17.0%
		20.0%
		23.0%

WCR의 밀도 영향을 분석을 위하여 아크릴로 원형 셀(Cell)을 제작후 실내실험을 실시하였다. 셀의 직경에 따라 WCR의 주기(T)가 달라지는데 직경이 50mm에서 150mm로 증가할수록 WCR의 주기(T)가 증가하는 것으로 나타났으나, 150mm에서 300mm로 증가 할 때는 주기의 변화가 0.3%미만으로 나타났다 (Kim & Benson, 2002). 따라서 본 연구에서는 그림 5와 같이 셀의 직경을 150mm로 선택하였으며, 그림 6은 실험에 사용된 WCR(CS-616)의 형상이다. 본 실험에서는 외국의 사례들을 참조하여 자체적인 실험방법을 수립하여 실내실험을 수행하였다.

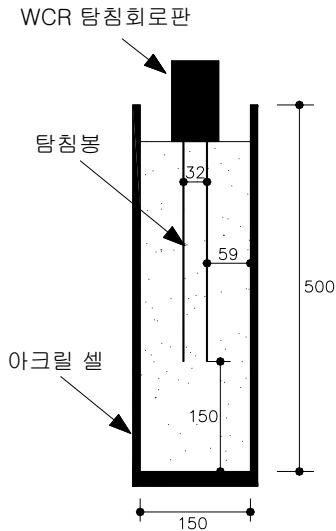


그림 5. 원형 셀 크기



그림 6. WCR(CS-616)의 형상

#### 4. 실험 결과

그림 7은 상대 다짐도와 체적당 함수량의 변화에 따른 주기의 변화를 나타낸 것이다. 동일한 상대 다짐도일 때 체적당 함수량이 증가할수록 주기도 증가하는 결과를 나타내었다. 주기는 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파의 이동시간을 의미하는 것으로서, 물의 높은 유전율 상수로 인하여 함수량이 커지면 전자기파가 되돌아오는 시간이 지체되므로 주기가 증가한다.

또한, 동일한 체적당 함수량에서는 상대 다짐도가 커질수록 주기가 증가하는 경향을 나타내었다. 상대 다짐도가 커지면 흙 속의 공극이 줄어들고 그 공극은 흙 입자 또는 물 입자로 채워지게 되는데, 일반적으로 공기의 유전율 상수보다 흙이나 물의 유전율 상수가 크기 때문에 WCR에서 발생된 전자기파의 감쇠가 크게 나타나게 되고, 그로 인해 반향시간이 길어져 측정되는 주기 값이 커지게 되는 결과가 나타나게 되는 것이다.

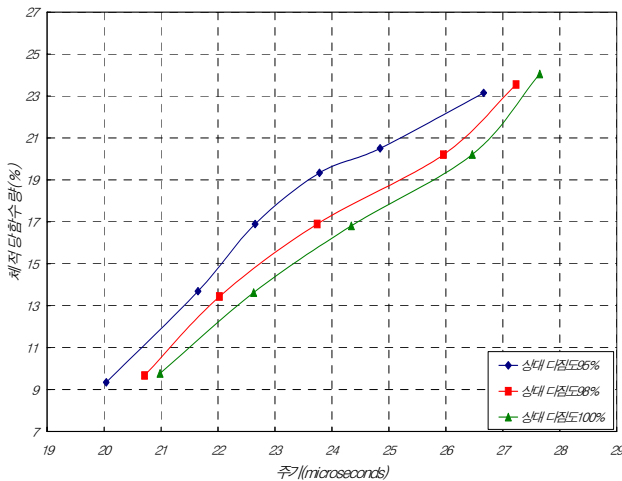


그림 7. 주기와 체적당 함수량 변화

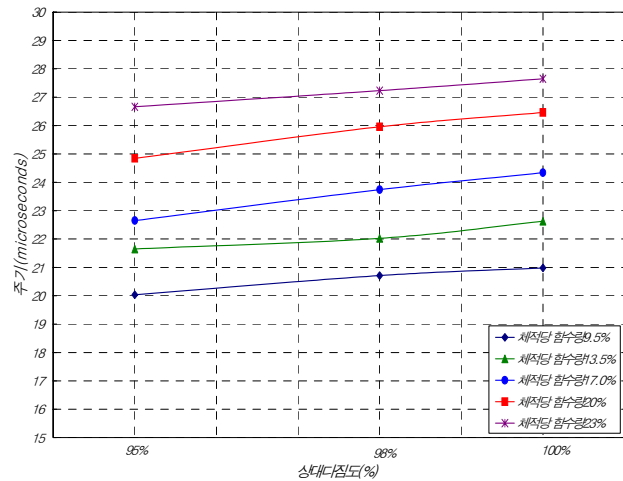


그림 8. 상대 다짐도와 주기 변화

상대 다짐도 95%와 100%에서 주기가 22.6microseconds로 동일한 경우에 체적당 함수량은 13.5%, 17.0%로 동일한 주기에서 상대 다짐도의 차이에 따라 체적당 함수량이 3.5%의 차이가 나타났고, 상대

다짐도 98%와 100%에서 주기가 23.8microseconds로 동일한 경우에 체적당 함수량은 17.0%, 19.4%로 동일한 주기에서 상대 다짐도의 차이에 따라 체적당 함수량이 2.4%정도의 차이를 나타내었다.

그림 8은 동일한 체적당 함수량인 경우, 상대 다짐도와 주기와의 관계를 나타낸 것으로 현장의 노상토가 동일한 체적당 함수량이어도 상대 다짐도가 커지면 주기가 증가하여 WCR은 체적당 함수량을 높은 값으로 측정한다는 것을 의미한다. 체적당 함수량이 9.5%, 13.5%로 상대적으로 적은 경우에는 상대 다짐도에 다른 주기의 증가가 크지 않았으나, 체적당 함수량이 17.0%, 20.0%, 23.0%로 커질수록 상대 다짐도에 따른 주기의 증가가 크게 나타났다. 따라서, 체적당 함수량의 변화는 상대 다짐도에 따라 많은 변화가 발생한다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 중부내륙고속도로 시험도로 노상토에 설치된 WCR방식의 함수량계의 밀도에 대한 보정을 위해 원형 셀 실험을 실시하여 다음과 같은 결론은 도출하였다.

1. 동일한 상대다짐도에서 체적당 함수량이 증가할수록 주기도 증가하는데 이는 함수량이 커지면 전자기파가 되돌아오는 시간이 지체되는 현상이다.
2. 동일한 체적당 함수량에서 상대다짐도가 증가할수록 주기도 증가하였다. 이는 상대다짐도가 커지면 흡속의 공극이 줄어들어 그 공극은 흙 입자 또는 물 입자로 채워지게 되고, 공기의 유전율 상수 보다 흙이나 물의 유전율 상수가 크기 때문에 발생된 전자기파가 감소하여 측정되는 주기가 증가한 것으로 추정된다. 따라서, 현장의 노상토가 동일한 함수량이어도 상대다짐도 및 밀도에 따라 다른 함수량 측정 결과가 도출될 수 있다.
3. 추후 지반조건에 적합한 보정방정식 및 현장 함수량과의 현장검증 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 논문은 한국도로공사에서 지원하는 시험도로 관련 연구의 일부로, 연구를 가능케 한 한국도로공사에 감사드립니다. 아울러 논문의 내용은 한국도로공사의 공식적인 내용이나 정책이 포함되어 있지 않음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. Brian K. Diefenderfer, Imad L. Al-qadi, Amara Loulizi(2000), "Laboratory calibration and field verification of soil moisture content using two types of time-domain reflectometry probes". Ph.D. Dissertation, Virginia Tech.
2. Gaylon S. Campbell and Russell Y. Anderson(1998), "Evaluation of simple transmission line oscillatros for soil moisture measurement", Computers and electronics in agriculture, Vol. 20, No. 1, pp 31-44.
3. K. C. Kim and Craig H. Benson(2002), "Water content reflectometer calibrations for final cover soils". Geo Engineering Report No. 02-12, University of Wisconsin at Madison.