



Water Content Reflectometer로 측정된 현장 노상토의 함수량에 대한 다짐도 영향 평가

Effect of Density on Water Content Reflectometer Measured Field Water Content in Pavement Subgrades

박 성 완* 이 치 현** 황 규 영***
Park, Seong Wan Lee, Chi Hun Hwang, Kyu Young

Abstract

The purpose of field monitoring system in KHC-Test Road is to provide the performance data for environmental loadings from pavement surface. Among them, water content reflectometer(WCR) are used for measuring the volumetric water content of pavement subgrades. However, WCRs are not well-calibrated based on the local field conditions. A need therefore exists for improving equations for predicting water content using the proper field and laboratory calibrations. Based on the study performed, calibrations based on various soil characteristics and density conditions are well fitted to the data from fields. So, it is recommended to use the suggested general calibration of WCR to the compacted subgrade soils in test road for predicting the volumetric water content.

Keywords : *field water content, water content reflectometer, pavement subgrades, calibration*

요 지

현재 중부내륙 고속도로 시험도로(test road)에는 환경하중에 대한 도로 포장체의 환경적인 거동 특성을 파악하기 위하여 다져진 노상토에 WCR형태의 함수량계로 측정되는 체적 함수량이 현장 밀도의 영향 등으로 부정확하게 예측되는 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 흙의 특성과 현장 밀도를 고려하여 현장에 적합한 함수량 보정을 실내 및 현장시험을 각각 실시하고 이를 토대로 보정방정식을 제안하였다. 연구 결과 보정된 함수량은 현장의 측정치에 근접하게 판명되었다. 따라서 WCR을 활용하여 다짐된 노상토 지반의 체적 함수량을 측정시 사용된 흙의 종류 및 다짐조건 등이 고려되어야 한다.

핵심용어 : *현장 함수량, water content reflectometer, 노상토, 보정*

* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수
** 비회원 · 단국대학교 토목환경공학과 석사과정
*** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정



1. 서론

도로의 포장시스템 해석 및 설계 시 온도와 함수량은 장기 공용성에 있어 가장 큰 영향을 미치는 환경적 인자이다. 특히 포장체 상부층 물성은 대기 온도에 의한 영향을 많이 받으며, 포장체 하부층의 지지력을 결정하는 원지반 등은 함수량의 영향을 많이 받는다. 따라서 사계절 기후를 가지는 국내 도로 포장체의 역학적인 설계를 위해서는 온도와 함수량에 대한 계절적인 영향과 변화의 적절한 반영이 필요하며 이를 합리적으로 반영하려면 계절적 함수량의 예측이 필수적이다.

이에 한국도로공사에서는 중부내륙 고속도로 7.7 Km 구간에 시험도로를 건설하여 포장 하부 노상도에 대한 계절적 함수량 변동을 측정하기 위하여 WCR(Water Content Reflectometer)방식의 함수량계를 설치 운용중에 있다. 그러나 WCR은 흙의 종류 및 밀도 등에 의한 영향과 저주파를 사용하는 장비의 특성으로 인하여 현장보정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상기 영향들을 반영한 다짐된 노상도에 대한 WCR의 함수량 예측을 위한 적합한 보정식을 제안하여 보다 정확한 계절적 체적함수량 예측이 가능하도록 하였다.

2. WCR의 원리 및 영향요소

현재 중부내륙고속도로 시험도로에 설치되어 있는 함수량계는 Campbell-Scientific사에서 제작된 CS-616 모델(그림 1)로서 데이터 로거(CR10X)와 연

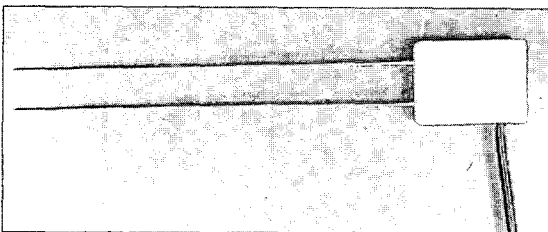


그림 1. WCR의 형상(30cm 탐침)

결되어, 실제 측정되는 함수량이나 주기 등을 Logger Net 프로그램에서 확인할 수 있다.

2.1 WCR의 원리

WCR은 일반적으로 TDR(Time Domain Reflectometry)방식을 이용하는 함수량계의 단점인 동축 복합단자와 동축 케이블 등의 장비 및 큰 대역폭의 고주파 발생기의 사용, 함수량 측정거리의 한계 등을 보완하기 위하여 개발된 새로운 방식의 측정기기이다. WCR의 기본원리는 TDR의 기본원리와 유사하지만, 함수량의 측정시 TDR은 출력값이 유전율 상수(K_a)와의 상관관계로 나타내어지는 것과는 달리 WCR은 출력값이 주기(T)와의 상관관계로서 표현되어지며, 주기(T)는 식 (1)과 같이 반향시간과 유전율 상수의 함수로서 표현되어진다(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 방전 현상에 의해 발생)에 대한 지체시간

L : 탐침봉의 길이

K_a : 유전율 상수

c : 자유공간에서의 전자기파의 전파속도 (3.0×10^8 %).

다음의 식 (2)와 (3)은 WCR의 출력값인 주기와 체적당 함수량과의 상관관계를 보정방정식의 형태로 제시한 것이고, 표 1은 일반적인 흙에서의 보정계수를 나타낸 것이다. 선형적인 관계식은 기존연구에서 검증된바 있으며 이는 김경철 외 2인의 연구(2005)와 Kim & Benson (2002)에 미국의 자료를 바탕으로 복토층 지반에서 WCR로 측정되는 주기와 흙의 체적함수량은 높은 선형성 상관관계를 보이고 있다고 보고된바 있다.



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

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

여기서, WVC : 체적당 함수량
(Volumetric Water Content)

C_0, C_1, C_2 : 보정계수

T : 주기(microseconds)

표 1. 일반적인 흙에서의 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

2.2 WCR측정시 영향요소

WCR을 이용하여 함수량 측정시 영향을 미치는 요소는 기계적인 원인과 흙의 특성에 대한 원인으로 나눌 수 있다. 기계적 원인에 대한 영향은 탐침간의 간섭으로서 WCR은 전기적 신호를 이용하여 함수량을 측정하는 방식이기 때문에 전자기파의 감소, 반향 시간 및 주기에 대한 정확한 측정을 위해서는 WCR 탐침의 간격이 최소한 23cm 이상이 되어야하며, 만약 최소 간격 이하가 된다면 전기적 신호가 산란되어 측정값의 오차가 발생할 수 있다.

흙의 특성에 대한 원인 중 가장 큰 영향을 끼치는

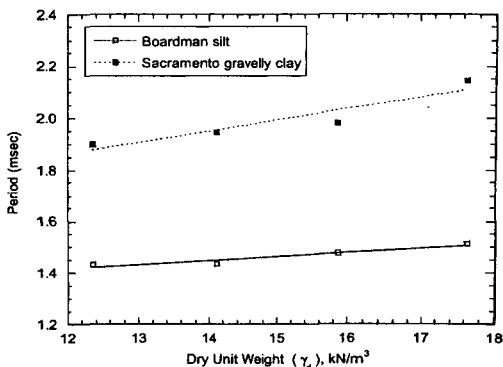


그림 2. 건조 단위 중량에 따른 주기의 변화(Kim & Benson, 2002)

것은 흙의 밀도이다. 다짐에 의해 흙의 단위중량이 커지면 흙속의 공극이 줄어들고, 그 공극은 흙 입자와 물 입자로 채워지게 된다. 일반적으로 공기의 유전을 상수보다 흙이나 물의 유전을 상수가 크기 때문에 WCR에서 발생된 전자기파의 감소가 증가하게 되고 그 결과, 반향시간이 길어져 주기가 증가하게 되는 것이다. 그림 2는 흙의 건조 단위 중량에 따른 주기와 체적당 함수량의 관계를 나타내는 것이다.

3. 시험도로 현황 및 함수량 측정결과

3.1 시험도로 현황

시험도로는 중부내륙고속도로 상에 위치하고 있으며 기상변화에 따른 포장하부의 함수량 자료를 연속적으로 획득하기 위하여 자동계측 시스템에 의해 데이터가 10분 간격으로 지속적으로 측정되며, 광통신망을 통해 계측실의 계측서버로 전송되어 저장되고 있다.

함수량계는 아스팔트 콘크리트 포장구간에 5개소(총 39개), 콘크리트 포장구간에 3개소(총 30개)씩 본선 2차로의 노상도 층에 15cm 간격으로 7개 또는 10개가 1조를 이루어 동시에 매설되어 있다. 그림 3은 WCR이 설치되어 있는 아스팔트 콘크리트 포장단면 중 대표적인 A3단면의 종단면도이다.

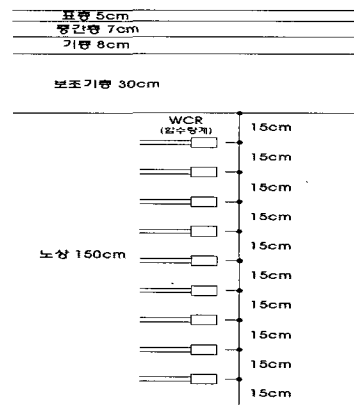


그림 3. WCR의 배치도(종단면도)



3.2 함수량 측정결과

그림 4(a)와 (b)는 2003년 7월부터 2004년 6월 까지 대표적인 날짜의 측정결과를 깊이별 일시별로 나타낸 것이다. 도로공사 공사시방서에서는 현장에서 흙쌓기 재료의 1층 다짐 완료 후의 노상토의 두께는 20cm가 될 수 있도록 시공하고 노상토의 상대 다짐도는 95%이상으로 시공하도록 제시되어 있으나, 시험도로의 WCR이 매설되어 있는 지점의 노상토는 매설 당시 WCR의 파손을 방지하기 위하여 7.5cm 마다 다짐을 실시하고 설치하여 각 다짐 층별로 상대 다짐도가 상이하다. 깊이별 함수량의 변화는 S자 형태로 나타나고 있는데, 이는 노상토층의 깊이별 함수량과 상대 다짐도가 다르기 때문으로 판단된다. 미국

Ohio주의 시험도로 노상토의 깊이별 함수량 변화 결과에서도 일정한 S자 형태의 경향을 나타내고 있어 흙의 다짐 밀도가 체적당 함수량의 변화에 많은 영향을 미친다는 사실을 확인 할 수 있다(Heydinger, 2003).

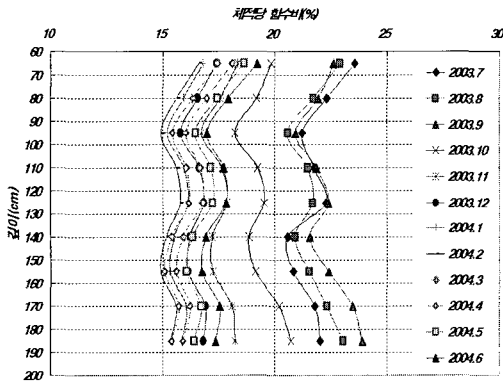
앞서 언급한 바와 같이 함수량계는 흙의 종류 및 밀도에 따라 함수량 측정값이 다르게 나타나는 특성이 있으나 현재 시험도로 노상토에 설치되어 있는 함수량계는 보정계수를 확립하지 않고 표 1에서 제시한 일반적인 흙의 대한 보정계수를 사용하고 있으므로 함수량 측정값에 오차가 있을 것으로 판단된다.

4. 현장실험 및 결과

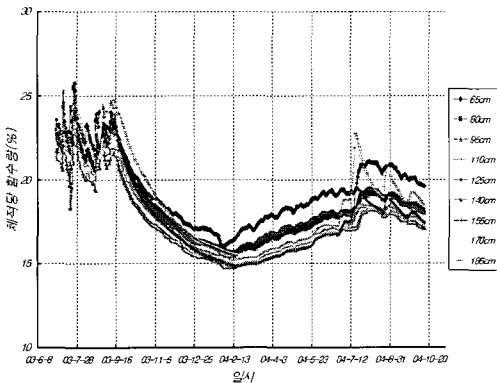
4.1 현장실험

본 연구에서 수행한 시험도로의 현장실험은 실제 깊이별 노상토의 함수량 측정을 목표로 하였다. 따라서 현재 WCR을 사용하여 측정하고 있는 A3단면을 선택하여 시추한 후 함수량을 측정하고, 그 결과를 실제 측정된 함수량과 비교·분석하였다.

시험도로 현장에 설치되어 있는 WCR의 정확한 매설위치의 판정이 어렵고, 기 설치된 WCR의 파손을 방지하기 위하여 가장 위치가 양호한 본선 2차로의 내측 지점에서 약 2m 간격으로 2개소에 시추를 실시하였다(그림 5). 보링공은 스플릿 스푼 샘플러(split spoon sampler)를 보링로드 하단에 장착한



(a) 깊이별 변화



(b) 일시별 변화

그림 4. 계절별 체적 함수량의 변화

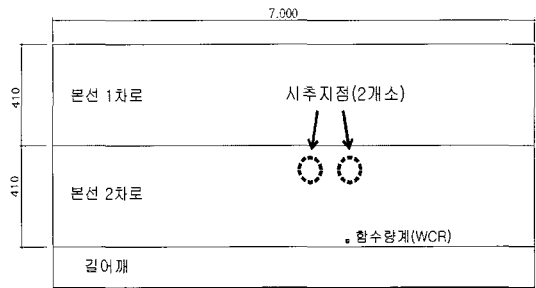


그림 5. 시추 위치 평면도



후 해머를 자유 낙하시켜 샘플러를 15cm씩 향타·관입 후 샘플러 내의 흙을 추출하는 과정을 WCR이 매설된 지점의 각층마다 실시하였다.

4.2 현장실험 결과

노상토의 중량당 함수량은 시료 채취 직후 현장에서 중량을 측정 후 다시 건조 후 함수량을 측정하였는데, 시험도로 현장에서 채취한 시료의 중량당 함수량도 그림 4에서와 같이 깊이별로 일정한 경향을 나타내지 않고 S자 형태를 나타냈다.

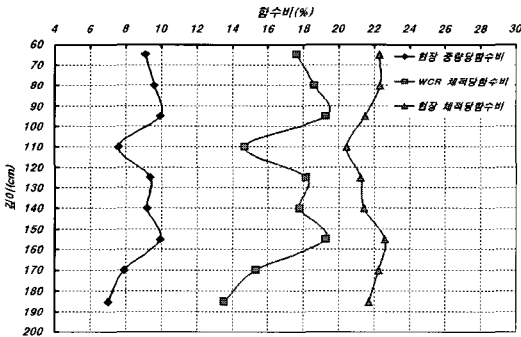
현장에서 시료채취를 실시한 시간의 함수량을 확인하여 동일시간대 WCR로 측정되고 있는 함수량 계측치와 비교는 그림 6과 같다. 측정된 값은 체적당 함수량으로 현장에서 측정된 중량당 함수량을 체적당 함수량으로 환산하여 비교하였으며, 중량당 함수량(ω)과 체적당 함수량(θ)은 식 (4)의 관계를 이용

하였다.

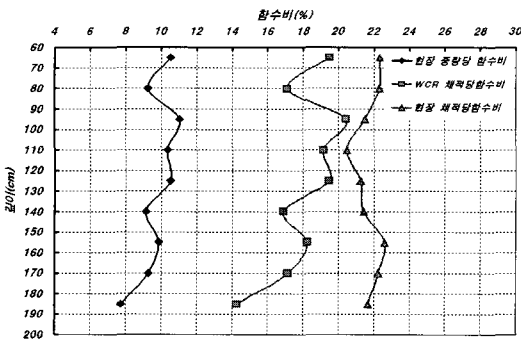
$$\omega = \theta \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \quad (4)$$

- 여기서, ω : 중량당 함수량
- θ : 체적당 함수량
- γ_w : 물의 단위중량
- γ_d : 흙의 건조단위중량

그림 7은 시험도로 현장에서 시료를 채취해 구한 현장 함수량과 동일 시간에 WCR로 측정된 계측 함수량을 비교한 것이다. 현재, 대부분의 WCR에서 측정되고 있는 함수량은 현장 함수량보다 다소 높게 나타나고 있는데 이는 다짐된 조립토의 특성과 밀도를 반영하지 못하는 데에서 기인한 것으로 판단된다.



(a) A3-(1) 단면



(b) A3-(2) 단면

그림 6. 깊이별 현장 함수량과 WCR 계측 함수량 비교

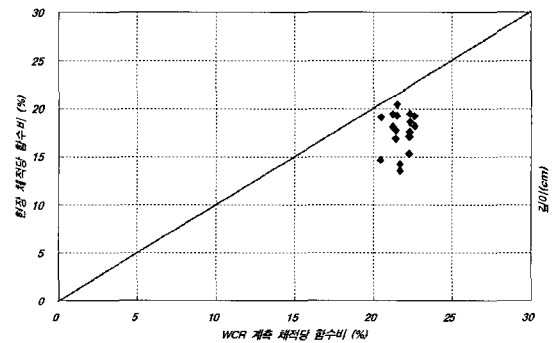


그림 7. WCR 계측 함수량과 현장 함수량의 비교

5. 실내실험

실내실험은 노상토에 대한 기본 물성과 토조 및 원형 셀 실험을 실시하였다. 현장과 유사한 조건을 고려하기 위해 토조 실험을, 그리고 적합한 함수량 예측을 위한 보정 및 산정을 위해서 상대적으로 실험이 용이한 원형 셀 실험을 각각 수행하였다.

5.1 흙의 물성

기본 물성치를 구하기 위해 교란상태의 노상토를



채취하여 비중 시험, 체가름 시험, 표준 다짐 시험을 수행하였다. 채취된 시료의 주요 물성치는 표 2와 같고 그림 8은 노상토 시료의 입도 분포 곡선이며, 그림 9는 다짐시험 결과를 나타낸 것이다.

표 2. 노상토 시료의 기본 물성치

구 분		시험도로 노상토
입도 시험 결과	Cc	1.3
	Cu	13.3
	#200 통과율	4.92
	#4 통과율	93.82
비 중		2.653
소성지수(PI. %)		NP
흙 분류	통일분류	SW
다짐시험결과	최적함수비(%)	9.42
	최대건조단위중량(t/m ³)	1.924

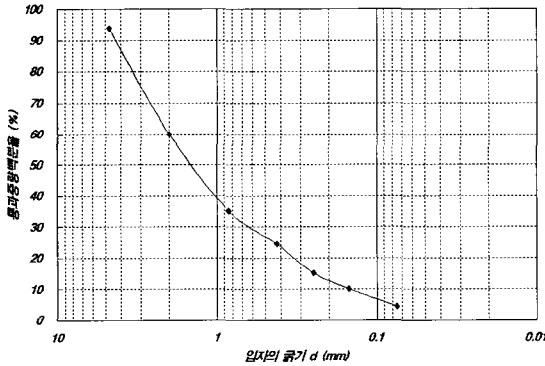


그림 8. 노상토 시료의 입도 분포

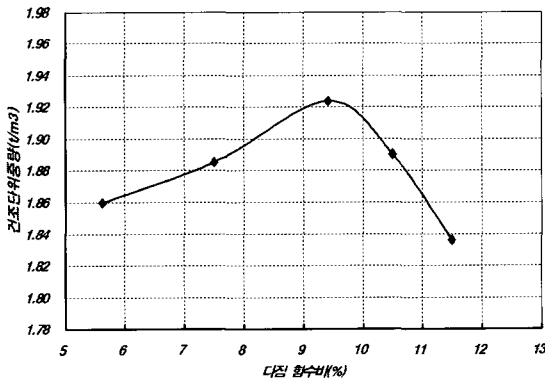


그림 9. 노상토 시료의 다짐시험 결과

5.2 실내보정실험

본 실험에 사용된 WCR은 시험도로에 설치되어있는 것과 동일한 CS-616 모델을 사용하였고, 데이터 로거 역시 현장과 동일한 CR10X를 사용하였다. 토조 실험은 Campbell-Scientific사에서 제시한 WCR 영향반경의 기준인 23cm와 시험도로 현장 매설 WCR 간격인 15cm를 고려하여 상호간섭 영향을 살펴보았다. 토조는 전기적인 영향을 고려하여 두께 18mm의 나무박스로 제작하였으며, 토조의 형상은 그림 10과 같다.

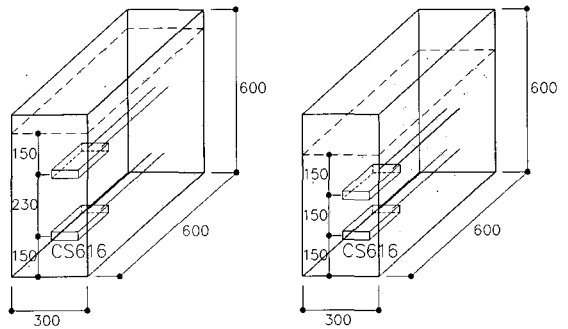


그림 10. 토조 형상 및 크기

또한, WCR 보정을 위하여 원형 셀(cell)을 제작하여 실험을 실시하였다. 원형 셀은 전자기파에 영향을 미치지 않는 재료를 사용하기 위해 아크릴로 제작하였으며, 셀 직경은 Suwansawat & Benson (1999) 그리고 Kim 과 Benson (2002)의 연구를 참고하여 결정하였다. 그림 11과 같이 셀 직경이 50mm에서 150mm로 증가할수록 WCR의 주기(period)가 증가하는 것으로 나타났으나, 셀의 직경

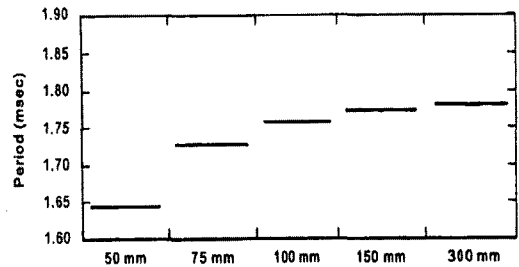


그림 11. 셀 직경에 따른 주기변화(Kim & Benson, 2002)



이 150mm에서 300mm로 증가 할 때는 주기의 변화가 0.3% 미만으로 나타났다. 따라서 본 시험에서는 가장 합리적인 크기라고 판단되는 직경이 150mm인 모형 셀을 그림 12와 같이 제작하여 실험을 수행하였다.

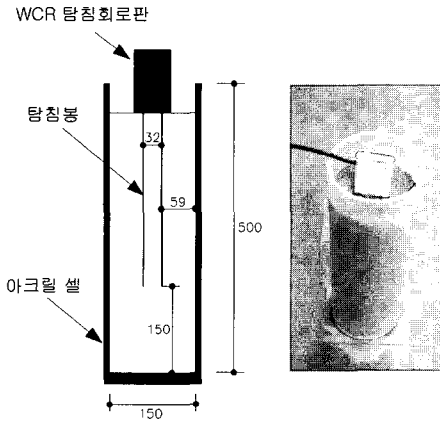


그림 12. 원형 셀 형상 및 크기

6. 실내실험결과

6.1 토조 실험결과

토조 실험은 표 3과 같이 함수량, 흙의 밀도, WCR 탐침간 상호 간섭영향에 따른 조건을 고려하여 실시하였다.

표 3. 토조 실험 조건

체적당 함수량	상대 다짐도	WCR간격
17.0 %	95% ($\gamma_d=1.825t/m^3$)	15cm
	98% ($\gamma_d=1.886t/m^3$)	
	100% ($\gamma_d=1.924t/m^3$)	23cm

시험도로 내 WCR 매설단면의 노상토는 WCR의 보존을 위해 7.5cm마다 다짐을 실시한 관계로 각층의 상대 다짐도는 도로공사 시방서에서 제시한 95% 이상으로 추정되며 그림 4와 같은 S자 형태의 측정

결과로 나타나 각 층별 상대 다짐도는 상이하다고 판단된다. 따라서 상대 다짐도를 95%, 98%, 100%로 설정하여 상대 다짐도에 따른 주기의 변화를 분석하였다.

그림 13은 체적당 함수량이 17.0%로 동일한 조건에서 상대 다짐도를 변화시킨 후 결과로 다짐도가 증가할수록 WCR의 주기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 상대 다짐도가 증가할수록 흙 속의 공극이 줄고, 그 공극이 흙 입자 또는 물 입자로 채워지게 되기 때문이며, 즉 공극의 유전을 상수보다 흙이나 물의 유전을 상수가 크기 때문에 발생된 전자기파의 감소가 커지게 되고, 그 결과 전자기파의 반향시간이 길어져 측정되는 주기 값이 커지게 되는 것이다. 따라서, WCR의 특성상 동일한 흙과 함수량의 조건하에서 다짐도가 다르면 함수량 측정결과에 영향을 주었다.

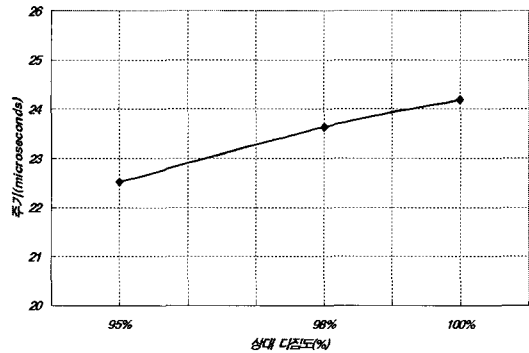


그림 13. 상대 다짐도에 따른 주기의 변화

또한, 시험도로 현장에는 WCR의 최소 간격 23cm 이하인 15cm간격으로 설치된 관계로 탐침간 상호 간섭에 대한 영향 평가를 위해 15cm와 23cm간격으로 실험을 실시하였다. 그 결과, 그림 14와 같이 상부층 WCR의 주기값과 하부층 WCR의 주기값은 각각 다른 간격에서도 0.2%의 오차를 나타내어 거의 동일하게 나타났으며, 각 층의 WCR간격에 따른 주기값도 0.3%의 오차가 발생하여 풍화계열 노상토의 경우 설치 간격에 따른 간섭의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 흙의 종류가 다르고 세립분이 많이 함유된 경우는 그 결과가 상이할 것으로 판단된다.

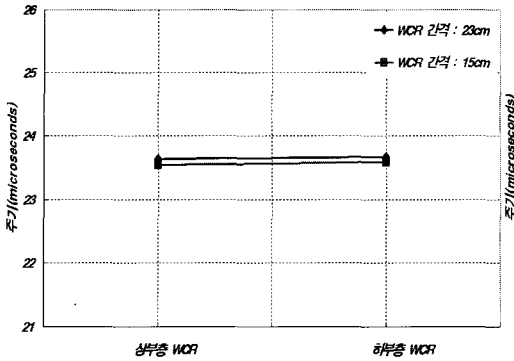


그림 14. WCR 상호 간섭영향

6.2 원형 셀 실험결과

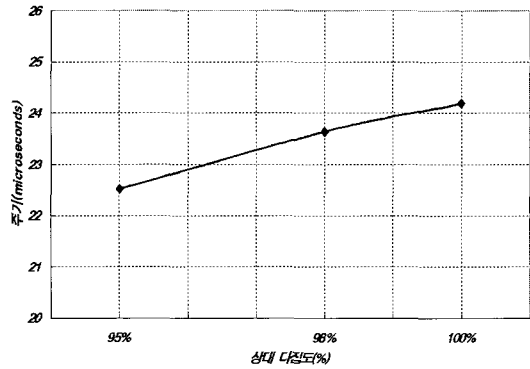
동일한 조건에서 토조와 원형 셀 실험의 결과 값에 대한 차이를 분석하기 위해 흙의 밀도와 함수량을 동일하게 하여 토조와 원형 셀 실험을 수행하였고, 그 결과 주기값의 오차가 0.38%로 미소한 차이를 보였다. 그러므로 동일한 조건하에서의 토조와 원형 셀 실험의 결과는 같다고 판단할 수 있기 때문에, 토조 실험보다 실험이 용이한 원형 셀을 이용한 실험을 실시하여 보정 방정식을 제안하였다.

원형 셀 실험은 표 4와 같이 WCR 측정값에 가장 큰 영향을 미치고 있는 함수량과 흙의 밀도를 변수로 하여 실시하였다. 상대 다짐도는 토조실험과 마찬가지로 3가지 경우로 설정하였고, 그림 4에서 현재계 측기간 동안 변화한 체적함수량의 변동폭이 14%~23%로 이를 토대로 하여 원형 셀 실험을 위한 체적함수량의 범위를 각각 결정하였다.

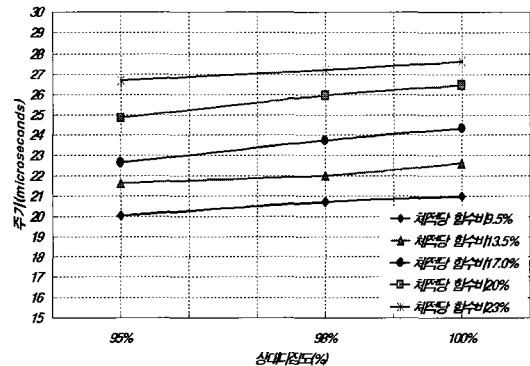
표 4. 원형 셀 시험조건

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

표 4에서 제시한 각 조건별 실험 결과는 그림 15(a)와 같다. 여기서, 체적함수량은 WCR을 이용하여 계측된 자료가 아니며, 원형 셀 실험 후 직접 측정된 체적당 함수량을 사용하여 분석한 결과로서 동일한 상대 다짐도일 때 주기가 증가할수록 체적당 함수량은 증가하는 결과를 보이고 있다. 주기는 전자기파(electromagnetic wave)의 이동시간(travel time)을 의미하므로, 물이 가지는 높은 유전율 때문에 함수량이 커지면 전자기파의 반향시간이 지체되어 주기가 증가하는 것이다. 상대 다짐도 95%와 100%에서 주기가 22.6microseconds로 동일한 경우에 체적함수량은 13.5%, 17.0%로 동일한 주기에서 상대 다짐도의 차이에 따라 체적함수량 3.5%의 차이가 있었고, 상대 다짐도 98%와 100%에서 주기

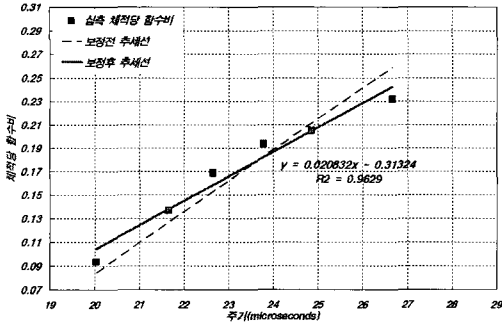


(a) 상대다짐도에 따른 주기와 함수량 변화

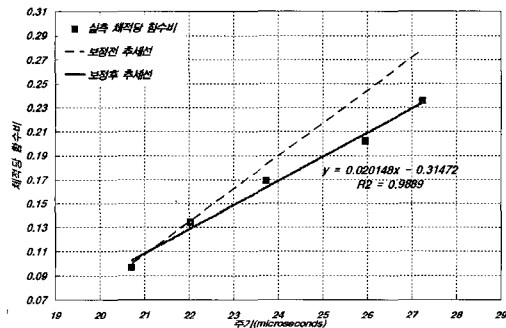


(b) 함수량에 따른 상대 다짐도와 주기 변화

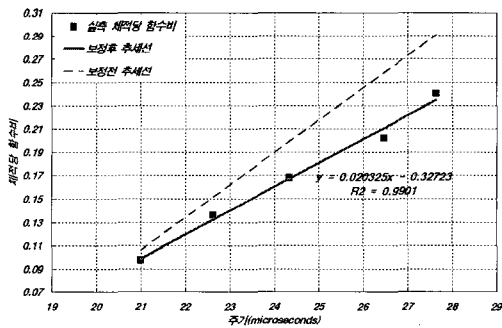
그림 15. 실험조건에 따른 함수량 변화



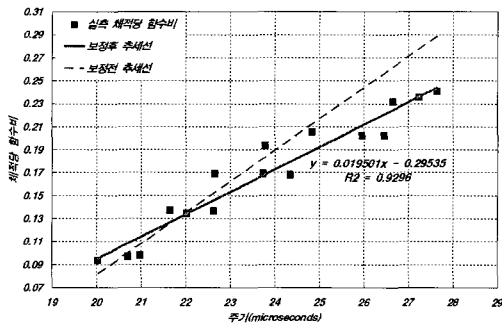
(a) 상대 다짐도 95%



(b) 상대 다짐도 98% 이상



(c) 상대 다짐도 100%



(d) 상대 다짐도 95% 이상

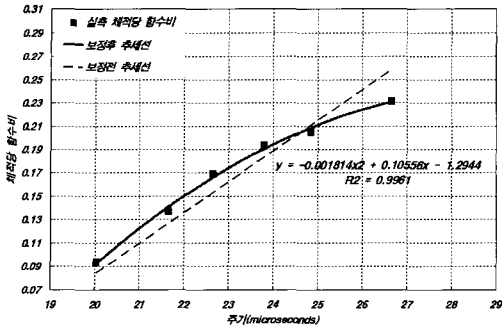
그림 16. 주기와 체적당 함수량 관계(1차 회귀 분석 결과)

가 23.8microseconds로 동일한 경우에 체적함수량은 17.0%, 19.4%로 동일한 주기에서 상대 다짐도의 차이에 따라 체적당 함수량이 2.4%의 차이를 나타내었다.

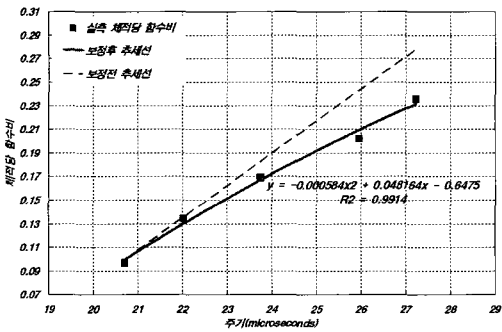
그림 15(b)는 동일한 체적함수량일 때 상대 다짐도와 주기와와의 관계를 나타낸 것으로서, 현장의 노상토가 동일한 상태로 상대 다짐도가 증가하면 체적함수량도 증가한다는 것을 의미한다. 체적함수량이 9.5%, 13.5%로 상대적으로 작은 경우에는 상대 다짐도에 따른 주기의 증가가 크지 않았으나, 체적함수량이 17.0%, 20.0%, 23.0%로 증가할수록 상대 다짐도에 따른 주기의 증가가 상대적으로 크게 나타나 체적당 함수량의 변화는 상대 다짐도에 따라 많은 변화가 발생하는 것으로 판단된다.

현재 시험도료에는 표 1에서 제시한 일반적인 흙에 대한 보정계수를 사용하고 있어 시험도로 노상토의 조건에는 적합하지 않으므로 본 연구에서는 실제 노상토의 체적당 함수량을 정확히 측정할 수 있도록 그림 16, 그림 17과 같이 1차 및 2차 회귀 분석을 상대 다짐도별로 실시하여 노상토에 적합한 보정계수를 제시하였다. 여기서, 점선은 표 1에서 제시한 계수를 사용하여 WCR로 측정된 체적당 함수량의 추세선이고, 실선은 실측한 체적당 함수량의 추세선으로서 상대 다짐도가 증가할수록 보정계측 함수량과 실측 함수량의 차이는 커지는 경향을 보였다.

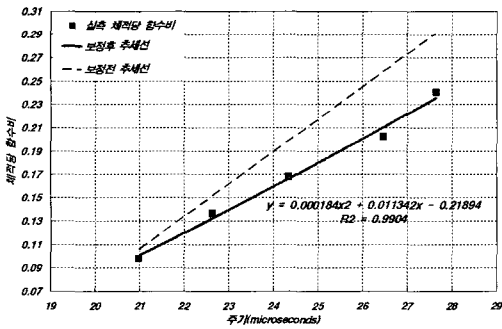
회귀분석 결과, 2차식이 1차식보다 결정계수가 높으므로 본 연구에서는 2차식의 결과를 사용하는 것으로 결정하였으며, 표 5는 회귀분석을 통한 보정계수를 정리한 것이다. 현재 시험도로 현장은 노상토의 층 다짐도가 상이하므로 일반적인 보정계수를 산출하기 위해서는 상대 다짐도가 95%이상일 경우의 결과를 통한 2차 회귀분석 결과를 이용하는 것이 적합하다고 판단된다.



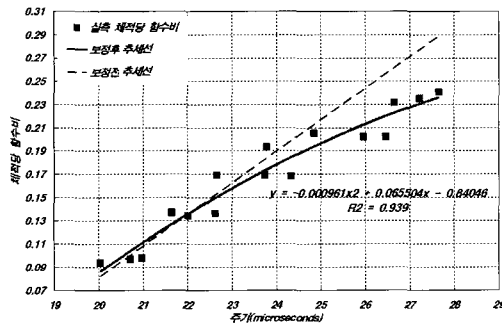
(a) 상대 다짐도 95%



(b) 상대 다짐도 98% 이상



(c) 상대 다짐도 100%



(d) 상대 다짐도 95% 이상

그림 17. 주기와 체적당 함수량 관계(2차 회귀 분석 결과)

표 5. 회귀분석에 의한 보정계수

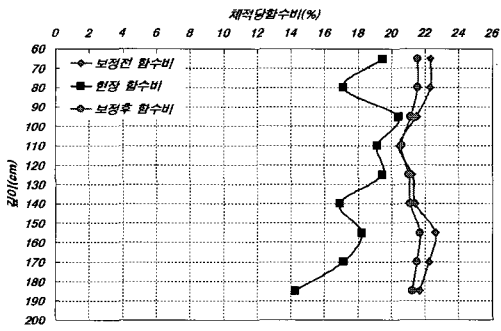
구 분		상대다짐도95%	상대다짐도98%	상대다짐도100%	상대다짐도95%이상
1차 분석식	C_0	-0.31324	-0.31472	-0.32723	-0.29535
	C_1	0.020832	0.020148	0.020325	0.019501
	R^2	0.9629	0.9889	0.9901	0.9296
2차 분석식	C_0	-1.2944	-0.6475	-0.21894	-0.84046
	C_1	0.10556	0.048164	0.011342	0.065504
	C_2	-0.001814	-0.000584	0.000184	-0.000961
	R^2	0.9961	0.9914	0.9904	0.939

7. 현장 검증

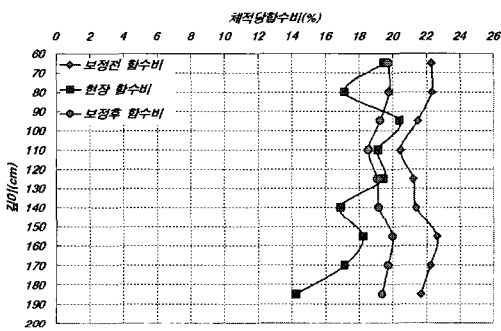
현장실험을 통한 실측 결과와 당시의 현장 계측 결과, 그리고 실내실험을 통하여 결정된 보정 방정식을 활용하여 제시된 결과를 상호 비교함으로써, 본 연구에서 제시한 보정 방정식을 검증하였다. 실내실험에서 상대 다짐도에 따라 보정 방정식을 제시하였으므로, 각각의 상대 다짐도에 따른 보정 방정식을 사용하여 현장실험 결과와 비교 검토하였다.

그림 18에서 시험도로 현장에서 계측된 함수량이 현장함수량보다 전반적으로 크게 측정되고 있음을 알 수 있다. 그림 18(a)는 상대 다짐도 95%로 실내 실험한 결과를 활용하여 이용한 것으로, 보정후 함수량은 보정전과 유사하여 현장 함수량보다 약간 과대하게 추정되었으며 그림 18(b)는 상대 다짐도 98%의 보정 방정식을 이용하여 비교한 것으로 깊이별로 상이하지만 보정전 함수량보다는 현장 함수량에 근접하였다.

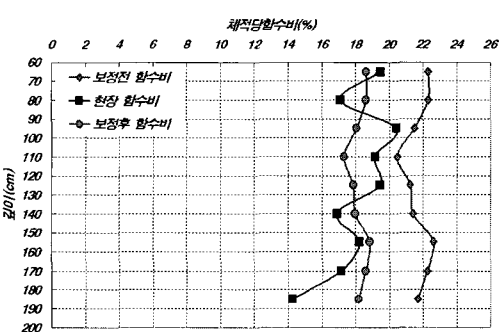
깊이별로 95cm, 110cm, 125cm 지점에서 제안된 보정 방정식을 이용한 보정후 함수량이 현장 함수량보다 적은 결과를 보이고, 나머지 지점에서는 현장 함수량보다 과대한 결과를 나타내었다. 그림 18(c)는 상대 다짐도 100%의 보정 방정식을 이용하여 비교한 것으로서 보정전 함수량보다 약 3.7%가 작게 나타났다. 깊이별 현장 함수량은 분산이 많아 보정후



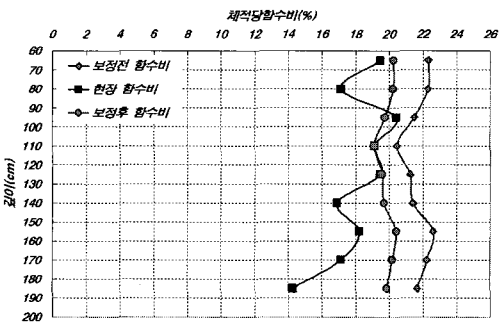
(a) 상대 다짐도 95%의 보정계수 사용



(b) 상대 다짐도 98%의 보정계수 사용



(c) 상대 다짐도 100%의 보정계수 사용



(d) 상대 다짐도 95% 이상의 보정계수 사용

그림 18. A3-(1) 단면의 실험결과 비교

계측된 함수량과는 직접적으로 비교는 가능하지 않으나, 전체적으로 보정후 계측 함수량이 현장 함수량보다 과소하게 나타났다.

그림 18(d)는 상대 다짐도 95%이상의 일반화된 경우로, 시험결과 제시된 보정 방정식을 사용하여 비교 시 그림 18(a), (c)의 경우보다 현장 실측값에 근접하였다. 그러나 각 층의 상대 다짐도가 다르고 현장의 시추지점이 WCR 매설위치와 상이하므로 보정한 결과가 현장 실측값과는 일치한다고는 볼 수 없다. 이를 고려한다면 보정된 결과는 적정하다고 추정된다. 또한 그림 18(b), (c)의 결과를 토대로 추정해보면, A3-(1)단면의 상대 다짐도는 약 98%~100% 사이라고 판단할 수 있다. 그러나 각 단면, 각 층마다 다짐도가 다르며 각각의 다짐도를 현재 시험도로의 상황에서 판단할 수가 없는 관계로 상대 다짐도 95%, 98%, 100%의 실내 시험 결과를 통합하여 일반화된 보정 방정식을 사용하는 것이 현재의 상황으로서는 가장 적합하다고 판단된다.

그림 18(d)에서 보정 후 함수량의 변화를 살펴보면 깊이별로 체적함수량의 변화는 약 1%정도로 나타나 깊이별 함수량을 기하학적인 평균으로 해당단면의 대표 함수량으로 판단해도 무리가 없을 것으로 보인다. 따라서 계절별 함수량 변동폭을 고려하기 위하여 1개월의 함수량을 평균 내어 2003년 9월부터 2004년 10월까지 보정된 함수량의 변화를 살펴본 결과는 그림 19와 같다.

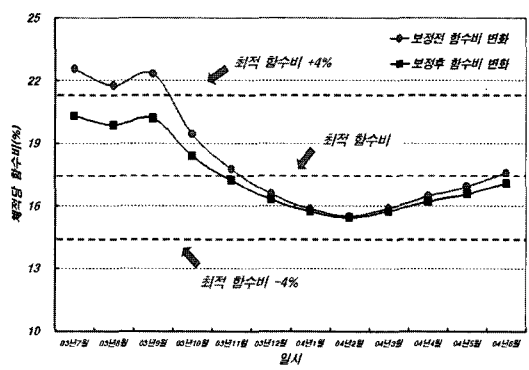


그림 19. 시험도로 노상토의 연간 함수량 변화



최적함수량을 기준으로 강수량이 많은 여름철에는 높은 함수량을 나타내고 있으며 건기인 겨울철에는 낮은 함수량을 나타내어 일반적인 경향과 유사한 결과를 나타내었다. 연간 함수량의 변화는 최적함수비를 기준으로 $\pm 4\%$ 이내의 체적함수량 변화를 나타내어 중량함수량으로 환산 경우 약 $\pm 2\%$ 내에서 변동하고 있는 것으로 확인 되었다.

따라서 포장하부의 거동 해석시 노상토의 함수량 변화 및 건조 습윤 함수상태에 기인한 역학적 물성 변화를 고려할 수 있으며 이를 바탕으로 향후 계절적인 변화를 고려한 회복적인 탄성계수의 영향을 정량화 할 수 있다.

8. 결 론

본 연구에서는 WCR로 계측된 시험도로의 다져진 풍화계열 노상토의 체적함수량에 대하여 국내 현장 조건에 적합한 예측식과 시험 절차를 제시하였고 이에 따른 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험도로 노상토의 함수량 변동 분석 결과, WCR은 실제보다 다소 크게 함수량을 측정하고 있으며 깊이별 함수량 변동은 일정한 경향을 나타내고 있지 않다. 또한 다짐된 노상토에 매설된 WCR은 간섭 영향반경 15cm간격으로 설치되어 있으나 상호간섭 영향은 없는 것으로 나타났다.
- (2) 보정을 위한 실험 결과 값에 대한 오차가 매우 작게 나타나 보정 실험시 간편한 원형 셀을 이용한 실험이 합리적이라고 판단된다.
- (3) 동일한 체적함수량에서 다짐도가 증가할수록 주기도 증가하였으며 이는 다짐도가 커지면 발생된 전자기파의 감소가 커짐에 따른 현상이다. 따라서, 시험도로 현장의 다짐된 노상토가 동일한 함수량에도 다짐도에 따라 다른 함수량 측정 결과가 도출될 수 있다.

- (4) WCR은 흙의 밀도에 따라 함수량 측정값이 다르므로 실내 실험을 통한 상대 다짐도별 주기와 함수량의 관계를 구하여 회귀 분석을 통하여 보정계수를 제시하였으며 현장검증 결과, 체적당 함수량이 7~25% 범위 내에서 보정 후 함수량이 현장 함수량에 근접한 결과를 나타내었다.
- (5) 시험도로 현장의 다짐된 풍화계열 노상토는 층별로 상대 다짐도가 상이하나 그 폭이 크지 않았으며 보정 후 체적함수량의 계절적 변화는 최적 함수량을 기준으로 건조 습윤 측 각각 4%이내에서 변동하고 있는 것을 확인되었다.

감사의 글

본 논문은 한국도로공사 도로교통기술원에서 지원하는 연구의 일부로서, 연구를 가능케 한 한국도로공사 관계자 여러분께 감사드립니다. 아울러 본 논문의 내용은 한국도로공사의 공식적인 내용이나 정책이 포함되어 있지 않음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구", 1단계 3차년도 최종보고서.
2. 김경철, 황규호, 이송(2005), "Water Content Reflectometer(WCR)을 이용한 매립지반 최종 복토층의 체적 함수비 측정에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제21권, 6호, pp147-154.
3. 박성완, 황규영(2004), "노상토 함수량의 계절적 변화 예측을 위한 간편 모형", 한국도로학회 학술발표회 논문집.
4. 한국도로공사(1993), "노상토의 계절별 함수량 변화 측정에 관한 연구", 연구보고서.
5. 한국도로공사 도로교통기술원(2004), "시험도로 노상의 함수량 계측 결과 보정", 연구보고서.
6. Campbell, G. and Anderson, R.(1998), "Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.20, No.1, pp31-44



7. Heydinger, A. G.(2003), "Monitoring Seasonal Instrumentation and Modeling Climatic Effects on Pavements at the Ohio/SHRP Test Road", *The Ohio Department of Transportation Office of Research & Development Executive Summary Report No14704*, FHWA/OH-2003/018
8. Kim, C. and Benson, C. H.(2002), "Water content reflectometer calibrations for final cover soils", *Geo Engineering Report No. 02-12*, University of Wisconsin at Madison.
9. Suwanasawat, S. and Benson, C. H.(1999), "Cell Size for Water Content-Dielectric Constant Calibrations for Time Domain Reflectometry", *Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.22, No.3*, pp3-12

접 수 일: 2006. 6. 1
심 사 일: 2006. 6. 14
심사완료일: 2006. 9. 7