

TDR(Time Domain Reflectometry)에 의한 사력토(Sandy-Gravelly Soil)의 함수량 측정 Measurement of Water Content in Sandy-Gravelly Soils using Time Domain Reflectometry

김 동 주* / 김 정 석**

Kim, Dong-Ju / Kim, Joung-Souk

Abstract

Recently, measurement of soil moisture contents using TDR (time domain reflectometry) has been proven to be a viable technique. The first empirical model proposed by Topp et al. (1980) has been widely used to determine moisture contents of soils from the TDR-measured dielectric constants. However, application of the model was limited to medium-textured soils. In this study, we investigate the applicability of the model to sandy-gravelly soils. Calibration experiments consisted of measurement on travel time of electromagnetic waveform along the parallel TDR rods inserted into samples and gravimetric determination of soil moisture contents. The experiments are performed for two sets of samples different in the length and each set consisted of seven different particle size distributions with various gavel contents. The calibration results show that the Topp equation overestimated the measured moisture content for a given dielectric constant by 3 to 8%. We therefore propose new empirical relationships valid for sandy-gravelly soils.

Keyword: TDR, moisture content, dielectric constant, sandy-gravelly soil

요 지

최근, 국내외에서 TDR(Time Domain Reflectometry)기법을 이용한 토양 함수량 측정이 유용한 기술로써 받아들여져 오고 있다. Topp 등, (1980)에 의하여 최초로 제안된 경험식이 TDR에 의해 측정된 유전상수로부터 토양 함수량을 결정하는 데에 폭넓게 적용되어져 왔다. 그러나, 이 방법의 적용범위는 중간 입자 조성의 토양(Medium-textured soils)에 한해서 제한되어져 왔다. 본 연구에서는 Topp 모델이 사력토(Sandy-gravelly soils)에서도 적용가능한 지를 알아보고자 한다. 김정실험은 토양시료내에 설치된 2선 TDR 탐침을 따라 전송되는 광전자파의 전송시간 측정과 중력법에 따른 토양 함수량 결정의 두 부분으로 구성되었다. 실험에 사용된 토양시료는 2개의 다른 TDR 탐침길이에 대하여 중복시료로서 각 시료당 자갈의 질량 퍼센티지가 다른 7개의 입도 분포로 구성되었다. 계산 결과 Topp이 제안한 식은 주어진 유전상수에 대하여 3내지 8%정도 함수량을 과대 추정하고 있음을 알 수 있었으며, 본 연구에서 사력토에 대한 새로운 경험식을 제안하였다.

핵심용어 : TDR, 함수량, 유전상수, 사력토

* 고려대학교 지구환경과학과 부교수

Associate. Prof. Faculty of Science, Dept. of Earth and Environment Science

** 고려대학교 지구환경과학과 석사과정

Master Program. Faculty of Science, Dept. of Earth and Environment Science

1. 서론

토양 함수량은 지표수문학에서 중요하게 다루는 홍수량의 추정뿐만이 아니라 지하수문학에서도 아주 중요한 수리지질학적 인자중의 하나로서 이의 정확한 결정은 수문학자들의 관심의 대상이 되어왔다. 특히 지하수문학의 영역에서는 최근 문제시 되고있는 불포화 토양층에서의 오염물질발생과 그에 따른 여러가지 형태의 오염현상이 인지되고 있다. 그 구체적인 예로 쓰레기 매립장에서 발생하는 침출수의 지하수오염, 농업지역에서 살포되는 유독성 농약의 지하수계로의 이동, 지하유류 저장탱크로부터 누출되는 유류의 토양 및 지하수오염 등을 들 수 있다. 이와 같은 대부분의 독성 유기화합물들은 토양내에서 스스로 이동할 수 있는 능력이 없으며 물에 용해된 상태에서 이동하게 된다. 따라서 토양과 같은 다공성 매질체에서 공극사이로 유택하는 토양수의 공극유속은 토양 및 지하대수층에서의 독성 유기화합물의 이동 특성을 연구하는데 있어서 필수적인 요소가 된다. 특히 토양의 포화 함수량은 토양수의 공극유속을 결정하는 중요한 인자 중의 하나이며 그 측정방법은 지금까지 많이 연구되어 왔다.

최근에는 시간영역 광전자파 분석기 (Time Domain Reflectometry)를 이용하여 토양 함수량을 정확하게 측정하는 방법이 시도되었으며 (Topp 등, 1980; Topp 과 Davis, 1985; Dasberg 와 Dalton, 1985), 토양내 보존성 화학물질의 농도까지 측정할 수 있어 (Dalton 과 Van Genuchten, 1986) 환경분야에 까지 활용되고 있다. 이 기법의 장점은 비파괴적이고, 노동력이 적게 들며, 정확하고, 휴대가 간편하기 때문에 실내실험 및 현장실험에도 유용하게 사용될 수 있다. 또한 자동화가 가능하기 때문에 여러 지점에 대한 동시 측정 및 경시적 함수량 및 농도변화 모니터링에도 활용될 수 있다. 국내에서도 최근 사질토와 양질사토에 대한 함수량 측정에 TDR기법을 적용한 바 있다. (박재현과 윤성용, 1998).

이 기법의 토양 함수량 측정의 적용은 Topp 등, (1980)에 의하여 처음 시도되었으며 그에 앞서 Fellner-Feldegg (1969)에 의하여 TDR의 유기용질에의 적용가능성이 처음 시도되었다. TDR기법의 토양 함수량 측정의 적용은 광전자파의 물리학적 원리에 기초를 두고 있으며 개략적인 원리는 다음과 같이 요약된다. 케이블 시험기 (Cable Tester)에서 어떤 일정한 전압과 저항을 가진 광전자파 (Electromagnetic

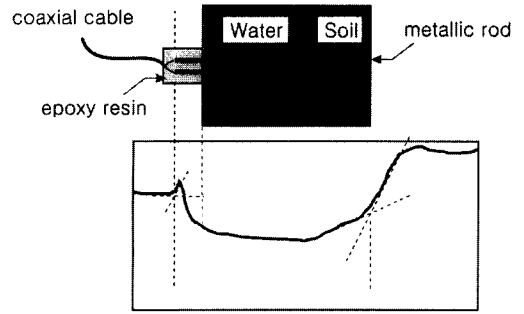


그림 1. 함수 토양에서 광전자파의 시간영역에 따른 파형

Wave)가 발생이 되어 동축 케이블 (Coaxial Cable)을 따라 전송될 때 케이블 선단부분에 연결된 탐침 (TDR metallic rods or probes)에서 파에너지의 감쇄가 일어나며 탐침의 말단 부분에 도달한 후 다시 되돌아 오게되는데, 이런 작용이 수없이 반복된다. 케이블 시험기의 왼쪽 상단 부분에는 CRT화면이 있어서 파가 탐침 길이를 왕복 이동할 때의 형태가 표시된다. 그림 1은 물과 토양입자로 구성된 이상적인 매질체에서 광전자파가 나타나는 파형을 파에너지와 시간영역에서 도식적으로 보여주고 있다. 여기서 파가 탐침길이를 따라 이동할 때 소요되는 전송시간 (Pulse Transit Time)은 탐침 주위에 있는 매질체의 유전상수에 의존하게 되며 Electrodynamic pulse velocity, V 는 다음과 같다.

$$V = C/K^{1/2} \quad (1)$$

여기서 C 는 진공상태에서의 빛의 속도 (3×10^8 m/sec)이며, K 는 매질체의 유전상수이다. 한편 Mechanical pulse velocity는 탐침길이와 전송시간과의 관계에서 다음과 같이 도출된다.

$$V = 2L/t \quad (2)$$

여기서 L 은 탐침의 길이, t 는 전송시간이다. 식 (1), (2)로부터 매질체의 유전상수는 다음과 같이 전송시간의 함수로 표현된다.

$$K = [Ct/2L]^2 \quad (3)$$

Topp 등, (1980)은 여러 종류의 중간 조성 토양 (Medium-Textured Soil)에 대하여 다양한 함수량

조건을 주면서 전송시간을 측정하여 식 (3)으로부터 유전상수를 구하였으며 토양 함수량 (θ) 과 유전상수 (K)에 대한 상관관계를 다음의 3차 다항식으로 제안하였다.

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

Topp의 상관식은 불과 2-3%의 오차범위내에서 정확하게 함수량을 추정하였으며 TDR기법의 토양 함수량 측정의 응용에 획기적인 전기가 되었다. 그러나 그 후 몇몇 학자들 (Herkelrath 등, 1991; Roth 등, 1992; Gray 와 Spies, 1995; Weitz 등, 1997; 김동주 등, 1998)에 의하여 Topp 상관식은 점토나 이탄토와 같은 fine-textured soil에 적용하였을 때 한계가 있음을 시사하였다. 사질토나 사력토와 같은 coarse-textured soil에의 적용도 의문시되며 Drungil 등, (1989)은 Topp 상관식의 sandy-gravelly soil에의 적용 가능성을 연구한 바 있으며 신뢰한계 95% 수준에서 Topp 식이 적합한 것으로 보고하였다.

본고에서는 하천주위의 자유면 대수층을 형성하고 있는 sandy-gravelly soil에 대한 오염물질의 2차원 실내 모형실험과 관련하여 sandy aquifer에서의 gravel함량에 따른 공극률 혹은 포화 함수량 변화를 TDR기법을 이용하여 측정하고자 하며 Topp 식의 유효성과 Drungil 등, (1989)의 연구결과에 대한 검증도

함께 하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 시료성형 및 함수량 결정

사질토의 자갈함량 변화에 따른 포화 함수량의 변화를 조사하기 위하여 7가지의 토성을 가진 시료를 준비하였으며 각각의 토성 분포도는 그림 2와 같다. 시료 No 1은 사질토 함량이 95% 그리고 자갈함량이 약 5%이며, 시료 번호가 증가할수록 자갈함량이 증가하여 시료 No 7은 약 75%의 자갈함량을 가지도록 하였다. 또한 TDR 탐침 길이 변화에 따른 θ -K의 관계를 알아보기 위하여 두 종류의 TDR 탐침(길이: 15cm, 25cm; 두께: 5mm; 간격: 2.5cm)을 준비하였으며 각 탐침을 내경 8cm, 길이가 다른 2개 (15cm, 25cm)의 아크릴 원통에 먼저 연직으로 설치한 후 준비된 7가지의 건조시료를 각 아크릴 원통에 균질하게 성형하여 토성과 탐침종류에 따라 총 14개의 토양시료를 준비하였다.

그림 3은 TDR 탐침과 토양시료가 설치된 아크릴 원통을 보여주고 있다. 원통 하부에는 나일론 천을 설치하여 미세 토립자의 유출을 방지하였으며 상하부 덮개에 각각 2개와 1개의 구멍을 뚫어 토양수 주입시 공극내 존재하는 공기가 상부구멍으로 원활하게 배출되도록 하였고 하부로부터 주사기로 수분을 주입하였다.

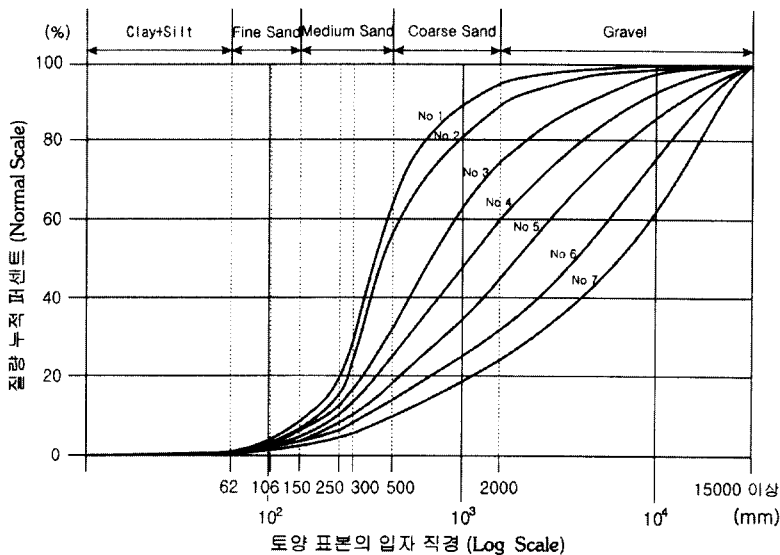


그림 2. 토양 시료별 입도 누적 퍼센트

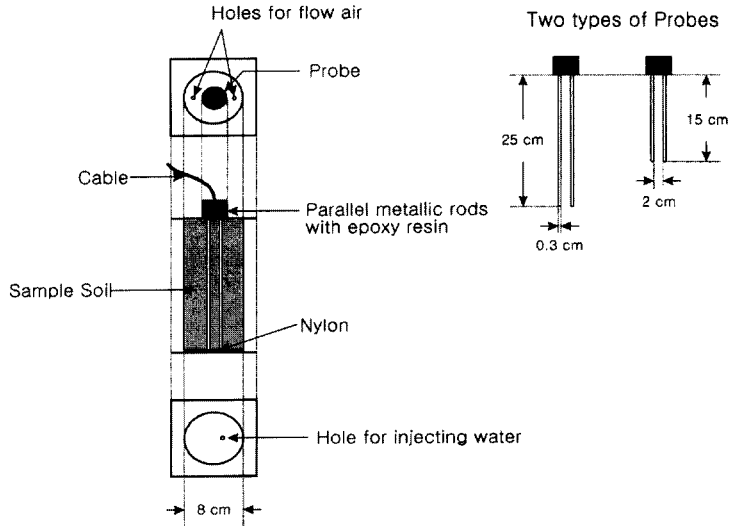


그림 3. 토양 시료 모형과 TDR 탐침

함수량 변화는 건조상태에서부터 시작하여 길이 15cm와 25cm의 시료에 대하여 각각 함수를 3%와 2%로 증가시켜 포화상태에까지 도달하게 하였으며 각 단계별 함수량 주입시 질량 측정도 함께 하여 용적 함수량의 측정에 정확도를 기하였다.

2.2 TDR 탐침 파라미터 검정 및 유전상수 결정

각 시료별 함수량 변화에 따른 광전자파의 전송시간은 그림 1에 표시한 바와 같이 TDR 탐침에 연결된 동축케이블을 상품화된 케이블 시험기 Tektronix 1502B에 연결하였을 때 표시되는 파형으로부터 첫 번째 변곡점과 두 번째 변곡점 사이의 구간으로 측정되었다.

그림 4는 수분을 함유한 정상적인 토양에서 본 연구의 실험에 사용된 탐침을 설치하였을 때 나타나는 광전자파의 파형과 탐침의 각 구성요소에 해당되는 파의 전송시간을 도식적으로 나타내주고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 두 개의 변곡점으로 확인된 전송시간은 총 전송시간, t_t 로 거기에는 Epoxy resin에 포획된 탐침을 따라 이동한 전송시간, t_o 와 토양 매질체에 포획된 탐침부분에 따른 전송시간, t_s 로 구성된다. 여기서 우리가 필요로 하는 전송시간은 t_s 로서 이의 결정은 동일 탐침에 대하여 유전상수가 알려진 공기와 물에서의 총 전송시간을 결정함으로써 간접적으로 구할 수 있다. 즉 공기와 물에서의 총 전송시간을 각각

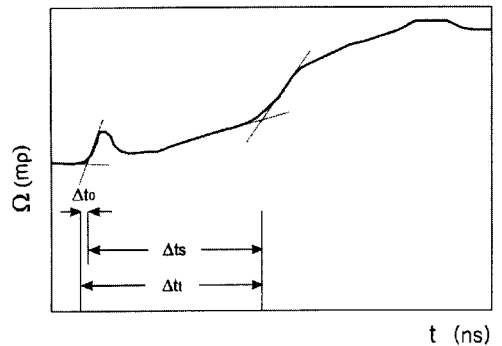


그림 4. 광전자파 파형과 전송시간 구성 요소

t_{ta} , t_{tw} 라고 하면,

$$t_{ta} = t_o + t_s = t_o + L n_{aa} / C \quad (5)$$

$$t_{tw} = t_o + t_s = t_o + L n_{aw} / C \quad (6)$$

여기서, L 은 토양에 매설된 탐침길이, C 는 진공상태에서의 빛의 속도, n_{aa} , n_{aw} 는 각각 공기와 물에 대한 Refraction index이며 유전상수, K 의 제곱근으로서 각각 약 1과 9의 수치를 가진다. 물에서의 유전상수, K_{aw} 와 n_{aw} 는 물의 온도에 따라 달라지며 다음과 같은 함수로 표현된다.

표 1. 탐침에 대한 검정 자료

Medium	Probe	(1st - 2nd) I.P. (m)	Δt_p (ns)	Length (cm)	Δt_0 (ns)
Air	No 1	0.335	1.118	24.63	0.2966
	No 2	0.335	1.118	24.55	0.2992
	No 3	0.335	1.118	24.08	0.3149
	No 4	0.329	1.097	24.32	0.2867
	No 5	0.329	1.097	24.55	0.2789
Water	No 1	2.249	7.498	average probe length : 24.43 cm average t_0 : 0.2953 ns	
	No 2	2.243	7.478		
	No 3	2.207	7.356		
	No 4	2.219	7.396		
	No 5	2.237	7.457		

Temperature : 27 °C

The velocity of light in vacuum : 3.0×10^8 m/sec

Dielectric constant in air & water : $K_{air}=1$, $K_{aw}=76.939$

Refraction index in air & water : $n_{air}=1$, $n_{aw}=8.771$

$$K_{aw} = 87.740 - 0.40008 T + 0.398 \times 10^{-4} T^2 - 1.410 \times 10^{-6} T^3 \quad (7)$$

식 (5), (6), (7)로부터 주어진 탐침에 대하여 공기와 물에서의 총전송시간을 측정함으로써 t_0 와 L 을 구할 수 있게 된다. 표 1은 각 탐침길이별 t_0 와 L 에 관한 검정자료이다.

순수한 토양에서만 전송시간과 길이가 정해지면 식 (3)을 이용하여 유전상수, K 를 결정할 수 있다. 탐침 길이별, 토성별, 함수율 변화에 따른 유전상수를 결정하고 그에 따른 용적함수량을 측정한 후 Topp이 제안한 다음과 같은 3차 다항식을 적용하여 최소자승법(Least Squares Optimization Method)에 의하여 각 상수치를 결정하였다.

$$\theta = A + B \times K + C \times K^2 + D \times K^3 \quad (8)$$

여기서, θ 는 용적 함수량, A, B, C, D는 각각 상수이다.

3. 연구결과

탐침 길이별 각 토성에 따른 유전상수와 체적 함수량의 관계를 그림 5에 도시하였다. 본 연구에 사용된 사력토의 유전상수는 건조상태에서 포화상태에 이르기 까지 두 종류의 탐침에 대하여 약 3에서 18까지 변화하였으며 포화함수량은 최대 약 28%까지 나타났다.

최대포화함수량이나 최대유전상수는 자갈함량이 적은 토성에서 나타났다. 주어진 유전상수에 대하여 토성별 자갈함량에 따른 $K-\theta$ 변화는 15cm 탐침에서 두드러지게 나타났으나 두 종류의 탐침 모두 자갈함량 증가에 따른 $K-\theta$ 의 일관적이고 뚜렷한 변화는 미약하였으며 이러한 현상은 특히 25cm 탐침에 더욱 두드러지게 나타났다. 자갈함량이 $K-\theta$ 관계에 미치는 영향은 Drungil 등, (1989)에 의한 연구결과와 잘 일치한다고 볼 수 있다.

Topp의 상관식을 적용하여 측정된 유전상수로 부터 체적함수량을 구한 결과를 실제로 측정된 체적함수량과 비교하였을 때 (그림 6) 두 종류의 탐침 모두 Topp 식이 약 3-8%정도 과대평가 한다는 것을 알 수 있다. 이러한 과대평가는 25cm 탐침에 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 Drungil 등, (1989)의 연구결과와 배치되며 그 이유는 토양의 체적함수량 결정시 실험방법상의 차이에 기인한다고 판단된다. 본 연구에서는 주어진 토양체적에 대하여 주입 수분량을 주사기의 체적과 무게중량으로 동시에 측정함으로써 정확도를 기하였으나 그들은 61cm×61cm×30cm 나무상자에 토양시료를 성형한 후 TDR 측정은 높이 30cm의 중간지점인 15cm에서 측정된 반면 체적 함수량 측정은 표면에서 5cm 깊이에 위치한 토양 시료를 50cc 용적의 토양채취기를 이용하여 결정하였으며 자갈이 함유된 경우 이러한 방법은 아주 큰 측정오차를 가져올 수 있기 때문이다. 특히 자갈함량이 증가할

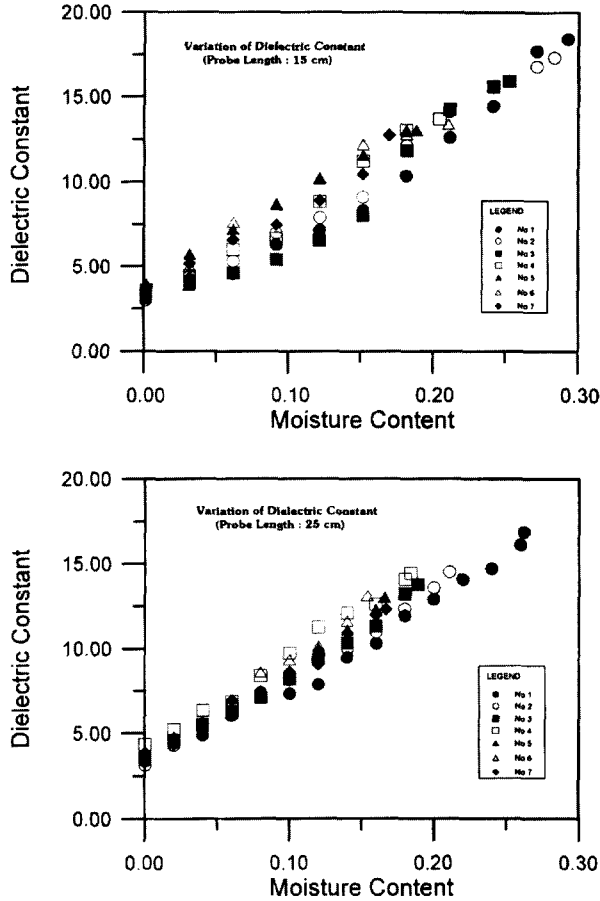


그림 5. 탐침길이별 함수량에 따른 유전상수의 변화

수목 포화에 가까운 함수량조건인 경우 중력에 의하여 수분이 아래로 이동하게 되며 그럴 경우 TDR 측정치인 유전상수는 비교적 높은 습윤상태를 대표하게 되고 토양채취기에 의한 체적 함수량은 비교적 건조상태의 함수량을 대표하게 되므로 그 결과 K- θ 곡선은 주어진 유전상수에 대한 체적함수량을 과소평가할 수 있다. 그러나 Drungil 등, (1989)의 실험결과는 Topp의 결과와 유사하게 나타났으며 본 연구결과보다 주어진 유전상수에 대하여 높게 나타났다.

측정 K- θ 자료에 대한 비선형 회귀분석에 의한 최적함수 도출결과 (그림 7) 두 종류의 탐침은 거의 같은 곡선형태를 보였으며 각각 주어진 유전상수에 대하여 Topp의 결과와 약 3-8%의 차이를 보였다. 두 탐침 모두 건조상태에서 적은 차이를 그리고 습윤상태에서 점점 큰 차이를 보였으며 포화에 근접한 함수량에

서는 fitting함수의 특성으로 그 차이는 미미하게 나타났다. (표 2)

그림 8은 두 탐침에 대한 자료를 개별적으로 회귀분석한 곡선과 병합하여 K- θ 에 대한 회귀분석 곡선을 Topp 식과 비교한 결과이다. 모든 자료에 대한 fitting결과 역시 비슷한 결과를 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 sandy-gravelly soil에 TDR 기법을 적용하였을 경우 탐침 길이나 시료의 장단에 관계없이 Topp 식은 약 3에서 8% 가량의 체적 함수량 오차를 보이며 이는 각 경험식의 도출에 사용된 토양시료의 상이성과 토성의 변화에 따른 비표면적 등의 물리적 특성의 변화에 의한 결과라고 판단된다. 결론적으로 Topp 식이 사력토에 적용되기 위해서는 각별한 주의가 요구되며 본 연구에서 제안된 경험식은 다양한 자갈을 함유한 사질토에 대하여 자료에 제시된 수분함

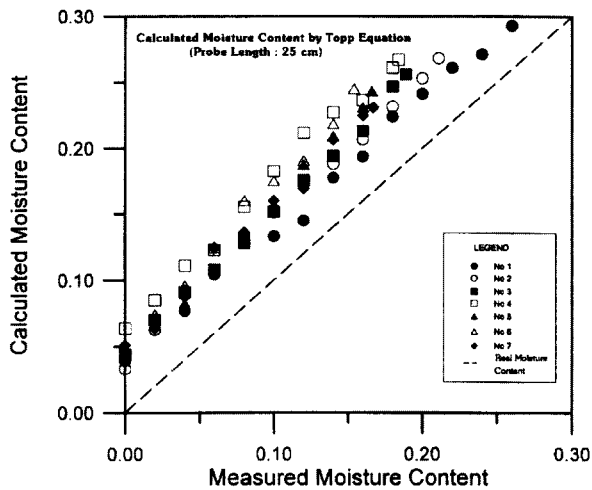
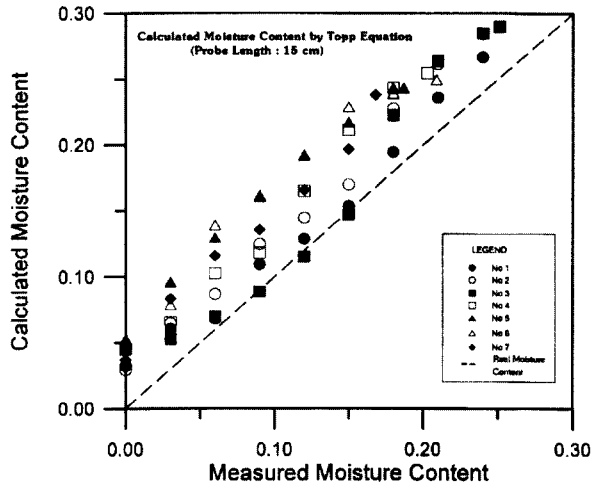


그림 6. 측정 함수량과 Topp 상관식에 의한 결과 비교

표 2. K- θ 다항식에서의 상수값 비교

$$\theta = A + B \times K + C \times K^2 + D \times K^3$$

Empirical Equation	A	B	C	D
Topp Equation	-0.53×10^{-1}	2.92×10^{-2}	-0.55×10^{-3}	0.43×10^{-5}
This Study (15cm Sample)	-0.63×10^{-1}	3.14×10^{-2}	-1.40×10^{-3}	4.98×10^{-5}
This Study (25cm Sample)	-1.30×10^{-1}	4.55×10^{-2}	-2.92×10^{-3}	10.2×10^{-5}
This Study (15cm+25cm Sample)	-0.68×10^{-1}	2.96×10^{-2}	-1.39×10^{-3}	5.58×10^{-5}

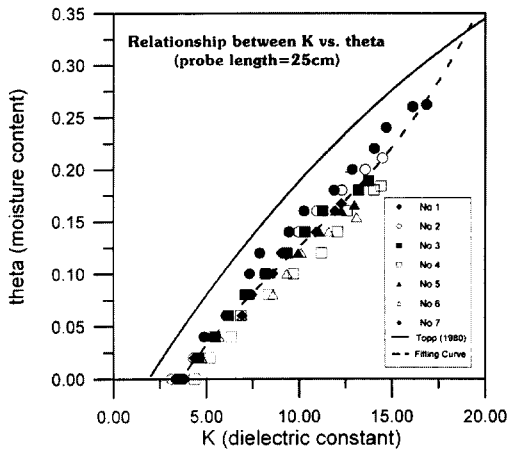
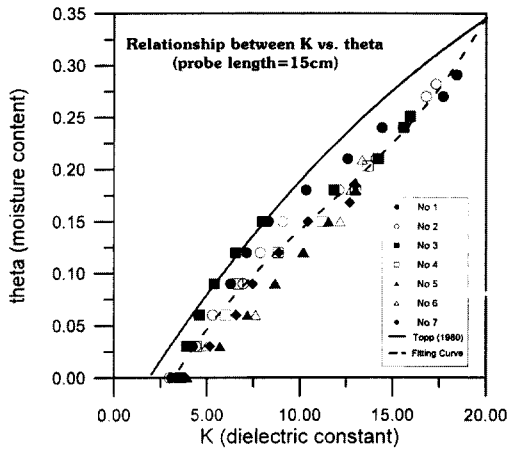


그림 7. 측정 함수량과 유전상수의 관계

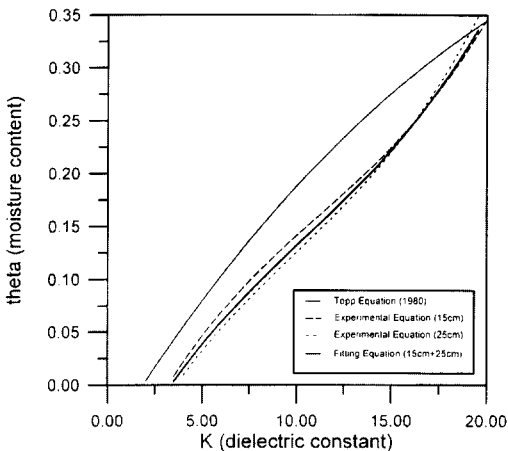


그림 8. 실험에 의한 K- θ 곡선과 Topp의 곡선과의 비교

량 범위 내에서 TDR 측정 유전상수로부터 체적함수량 산정에 유효하게 사용되리라 사료된다.

4. 결 론

자갈이 함유된 사질토에 대하여 TDR기법을 이용한 함수량 측정시 필요한 유전상수와 함수량의 상관식 도출과 양토와 같은 일반 토양에 적합한 Topp의 상관식의 사력토에의 적용 가능성을 알아보기 위하여, 탐침 길이 (15, 25cm)와 7가지의 자갈함량 (0 - 70%)에 따라 14개의 토양시료에 대하여 건조상태에서 포화상태에 이르기까지 다양한 수분조건하에서 2선탐침에 의한 전송시간의 결정과 그에 의한 유전상수의 도출, 그리고 부피에 의한 용적함수량을 결정하였다. 실험결과에 의한 유전상수와 함수량과의 상관식은 기존의 Topp식과는 약 3-8%의 오차를 보였으며 비슷한 토양시료에 대하여 연구한 Drungil 등, (1989)의 연구결과와도 배치되는 결과를 나타내었다. 이러한 연구결과와 상이성은 두 연구자 그룹간의 탐침과 관련된 자료 (탐침의 길이, 두께, 간격)와 실험방법상의 상이성때문이라 판단된다. 따라서, Topp식의 사력토에의 적용가능성은 현실적으로 어려우며 본연구에서 도출한 경험식이 자료에 제시된 토양 수분 함량 범위 내에서 사질토나 혹은 자갈이 함유된 사력토에서의 TDR기법에 의한 함수량 도출에 긴요하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단(Korea Research Foundation) 1998년도 신진교수 연구과제 연구비와 고려대학교 부설 전략광물자원연구센터의 1998년도 연구비 지원으로 수행되었음을 알려드립니다.

참 고 문 헌

박재현, 윤성용 (1998). "TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수분도 측정에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제2호, pp. 123-132.

Drungil, C.E.C., Abt., K., and Gish, T. J. (1989). "Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry." ASAE. pp. 177-180.

Dasberg, S. and Dalton, F. N. (1985). "Time domain reflectometry field measurements of

- soil water content and electrical conductivity." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, pp. 293-297.
- Fellner-Feldegg, J. (1969). "The measurement of dielectrics in the time domain." *J. Phys. Chem.*, 73, pp.616-623.
- Dalton, F. N. and Van Genuchten, M. Th. (1986). "The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity." *Geoderma*, 38, pp. 237-250.
- Dalton, F. N. (1992). "Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity." *SSSA Special Publication no. 30*.
- Topp, G. C. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines." *Water Resour. Res.*, VOL. 16, NO. 3, pp. 574-582.
- Gray, A. N. and Spies, T. A.. (1995) "Water content measurement in forest soils and decayed wood using time domain reflectometry." *Can. J. For. Res.*, 25, pp. 376-385
- Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P. and Murphy, F. (1991). "Automatic, realtime monitoring of soil moisture in a remote field area with time-domain reflectometry." *Water Resour. Res.*, VOL. 27, pp. 857-864.
- Kim, Dong-Ju. (1996). "Application of an automated time domain reflectometry to solute transport study at field scale: experimental methodology and calibration of TDR." *Econ. Environ. Geol.* Vol. 29, No 6, pp. 699-712.
- Kim, Dong-Ju. (1996). "Application of an automated time domain reflectometry to solute transport study at field scale: transport concept." *Econ. Environ. Geol.*, 29(6), pp. 713-724.
- Kim, D. J., Vanclooster, M., Feyen, J. and Vereecken, H. (1998). "Simple linear model for calibration of time domain reflectometry measurements on solute concentration." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, pp. 83-89.
- Roth, C. H., Malicki, M. A., and Plagge, R. (1992). "Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR." *J. Soil Sci.*, 43, pp. 1-3.
- Topp, G. C. and Davis, J. L. (1985). "Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, pp. 19-24.
- Weitz, A. M., Grauel, W. T., Keller, M., and Veldkemp, E. (1997). "Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin." *Water Resour. Res.*, Vol. 33, No 6, pp. 1241-1249.

(논문번호:98-077/접수:1998.12.18/심사완료:1999.03.11)