



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 8월
석사학위논문

Flat TDR 시스템의 정밀도 분석

조선대학교 대학원

토목공학과

김완민

Flat TDR 시스템의 정밀도 분석

Accuracy Analysis of Flat TDR System

2017년 8월 25 일

조선대학교 대학원

토목공학과

김완민

Flat TDR 시스템의 정밀도 분석

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함.

2017년 4월

조선대학교 대학원

토목공학과

김 완 민

김완민의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김성홍 (인)

위원 조선대학교 교수 박상준 (인)

위원 조선대학교 교수 김대현 (인)

2017년 5월

조선대학교대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	01
1.1 연구배경	01
1.2 연구목적	02
1.3 연구동향	02
1.4 연구내용 및 방법	07
제2장 이론적 배경	08
2.1 MAXWELL 방정식	08
2.1.1 MAXWELL 방정식의 요약	08
2.1.2 매질의 전자기적 성질	09
2.2 자기량 및 자기 작용	10
2.2.1 자극의 세기	10
2.2.2 자장과 자속밀도	11
2.2.3 자화	16
2.3 주요 자성의 특징	18
2.4 전자기파 전송 특성	19
2.4.1 전송선을 통한 전파특성	19
2.4.2 전자기적 전파특성 모델	21

2.5 TDR 적용 이론	27
2.5.1 TDR 파형 분석	27
2.5.2 Purdue TDR 방법(ASTM D 6780-05)	29
제3장 Flat TDR 시스템 개발	35
3.1 TDR 시스템 구성	35
3.2 TDR 프로브 제작	40
3.2.1 Purdue TDR의 프로브	40
3.2.2 TDR 프로브 제작	41
3.3 개발한 Flat 프로브의 영향 범위	42
3.3.1 TDR 프로브의 영향 범위의 이론	42
3.3.2 Flat 프로브의 영향 범위	44
3.3.3 영향 범위에 대한 유한요소해석	44
3.3.3 영향 범위에 대한 파형분석	49
제4장 실내 및 현장 시험	53
4.1 Flat 프로브 보정 실험	53
4.2 실험 시료	56
4.3 실내 검증 실험	57
4.3.1 Flat TDR 실험	57
4.3.2 Purdue TDR과 Flat TDR의 비교 실험	61
4.4 현장 시험	64

제5장 실내 및 현장 시험 결과	69
5.1 시료별 특성상숏값 결정	69
5.2 실내 실험 결과	76
5.2.1 Flat TDR 시스템의 검증실험	76
5.2.2 Purdue TDR 시스템과 Flat TDR 시스템의 비교실험 ..	84
5.2.3 현장 검증시험	91
 제6장 결 론	 94
 참 고 문 헌	 96

표 목 차

표 3.1 TDR 100 사양	38
표 3.2 고정된 물성치	45
표 3.3 각 투자율별 지반의 물성치	45
표 3.4 파형분석의 실험조건	50
표 4.1 실험 시료의 물리적 특성	56
표 5.1 각 시료별 특성상수	74

그림 목 차

그림 2.1 서로 힘을 미치는 두 자극	11
그림 2.2 영구자석의 N, S 자극	12
그림 2.3 직선도체의 전류에 의한 자장 발생	12
그림 2.4 솔레노이드 코일에서의 자장 발생	13
그림 2.5 자극 p 로부터의 자속 발생과 자속밀도	15
그림 2.6 자극의 세기를 이용한 자화의 정의	16
그림 2.7 상자성에서의 자화와 자장	18
그림 2.8 반자성에서의 자화와 자장	19
그림 2.9 TDR 시스템 임피던스(Siddiqui 등, 2000)	21
그림 2.10 그림 2.10 입사파(V_i)의 두 전송선의 임피던스 차이로 인한 전송파(V_t) 및 반사파(V_r) 발생 현상(Drnevich 등, 2001a)	22
그림 2.11 균일한 전송선의 등가회로(Lin, 1999)	23
그림 2.12 불균일한 전송선의 등가회로(Drnevich 등, 2001a)	26
그림 2.13 일반적인 토양 함수비 측정 시스템(Drnevich 등, 2001a)	28
그림 2.14 TDR의 전형적인 파형(Yu 등, 2004)	28
그림 2.15 Purdue TDR 시스템(Yu 등, 2004)	30
그림 2.16 전기전도도 산정을 위한 TDR 파형(Yu 등, 2004)	33
그림 3.1 TDR100 장비(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.)	35
그림 3.2 TDR 측정시스템 내부 모습	36
그림 3.3 TDR Seismic Testing System 1.3	36
그림 3.4 소프트웨어로부터 측정된 TDR 파형	37
그림 3.5 TDR 측정시스템	39
그림 3.6 Purdue TDR 측정	40
그림 3.7 Flat 프로브	41
그림 3.8 프로브 연결부	41
그림 3.9 응답영역 해석(Ferre 등, 1998)	43
그림 3.10 유한요소 해석 결과(송민우, 2016)	44

그림 3.11	지반 및 Flat 프로브 모델링	46
그림 3.12	해석결과	47
그림 3.13	투자율 = 1	48
그림 3.14	투자율 = 0.9	48
그림 3.15	투자율 = 0.8	49
그림 3.16	주문진 표준사와 현장시료 (case 2)	50
그림 3.17	경주 현장 시료의 파형	51
그림 3.18	A 현장 시료의 파형	52
그림 4.1	전기전도도와 장주기 전압 레벨 측정	54
그림 4.2	소금물과 전기전도도의 관계	54
그림 4.3	소금물과 장주기 전압 레벨의 관계	55
그림 4.4	전기전도도와 장주기 전압 레벨의 관계	55
그림 4.5	실험 시료의 입도분포곡선	56
그림 4.6	제작한 몰드	58
그림 4.7	철판과 트리머	59
그림 4.8	다짐작업	59
그림 4.9	TDR 신호 측정	60
그림 4.10	시료무게 측정 및 함수비 측정	60
그림 4.11	제작한 몰드와 트리머	62
그림 4.12	원형철판을 깔고 다짐	62
그림 4.13	Flat TDR 시스템 측정	63
그림 4.14	Purdue TDR 시스템 측정	63
그림 4.15	Flat 프로브 접촉	65
그림 4.16	Flat TDR 시스템 신호 측정 (실내대형)	66
그림 4.17	TDR 신호 분석 (실내대형)	66
그림 4.18	Flat TDR 시스템 신호측정 (경주현장)	67
그림 4.19	TDR 신호 분석 (경주현장)	67
그림 4.20	현장 들밀도 시험	68
그림 4.21	현장 함수비 측정	68
그림 5.1	보정계수 a & b (주문진 표준사)	69

그림 5.2 보정계수 c & d (주문진 표준사)	70
그림 5.3 보정계수 a & b (원주시료)	70
그림 5.4 보정계수 c & d (원주시료)	71
그림 5.5 보정계수 a & b (섬진강시료)	71
그림 5.6 보정계수 c & d (섬진강시료)	72
그림 5.7 보정계수 a & b (옥과시료)	72
그림 5.8 보정계수 c & d (옥과시료)	73
그림 5.9 보정계수 a & b (경주현장시료)	73
그림 5.10 보정계수 c & d (경주현장시료)	74
그림 5.11 보정계수 a & b (A시료)	74
그림 5.12 보정계수 c & d (A시료)	75
그림 5.13 함수비 정밀도에 관한 기준	76
그림 5.14 주문진 표준사	77
그림 5.15 원주시료	77
그림 5.16 섬진강시료	78
그림 5.17 옥과시료	78
그림 5.18 경주현장시료	79
그림 5.19 A시료	79
그림 5.20 건조 단위중량 정밀도에 관한 기준	80
그림 5.21 주문진 표준사	81
그림 5.22 원주시료	81
그림 5.23 섬진강시료	82
그림 5.24 옥과시료	82
그림 5.25 경주현장시료	83
그림 5.26 A시료	83
그림 5.27 섬진강시료 (Flat TDR)	84
그림 5.28 섬진강시료 (Purdue TDR)	85
그림 5.29 원주시료 (Flat TDR)	85
그림 5.30 원주시료 (Purdue TDR)	86
그림 5.31 섬진강시료 (Flat TDR & Purdue TDR)	86

그림 5.32 원주시료 (Flat TDR & Purdue TDR)	87
그림 5.33 섬진강시료 (Flat TDR)	88
그림 5.34 섬진강시료 (Purdue TDR)	88
그림 5.35 원주시료 (Flat TDR)	89
그림 5.36 원주시료 (Purdue TDR)	89
그림 5.37 섬진강시료 (Flat TDR & Purdue TDR)	90
그림 5.38 원주시료 (Flat TDR & Purdue TDR)	90
그림 5.39 합수비 (경주현장)	91
그림 5.40 합수비 (A현장)	92
그림 5.41 건조단위중량 (경주현장)	92
그림 5.42 건조단위중량 (A현장)	93

ABSTRACT

Accuracy Analysis of Flat TDR System

Kim, Wan-Min

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph.D.

Department of Civil Engineering,

Graduate School of Chosun University

In this study, we attempted to solve the problems of the conventional compaction management method. We conducted a study to measure the water content and dry unit weight of soil using the Time Domain Reflectometry (TDR) method.

At Purdue University in the USA, they developed the ASTM D6780-05 method to measure the water content and dry unit weight of the site using the TDR system. The Purdue TDR system uses rod probes. The probes must be penetrated into the ground, and the site ground is difficult to penetrate because the ground is where the compaction is completed, and there can be a disturbance near the ground.

In this study, we developed a flat type probe which can be measured by contacting the surface of the rod with the rod type probe used in the existing Purdue TDR system. Through the experiments, the measured values of water content and dry unit weight were compared with measured values and the accuracy analysis was performed. In order to improve the reliability of the developed flat TDR system, the experimental conditions were the same as those of the verified Purdue TDR system. Field tests were carried out based on the results of laboratory experiments and finite element analysis was performed to confirm the influence range of TDR propagation signals.

As a result of the laboratory test, the water content of the flat TDR system showed an error of about 0.4% on the average compared with the measured value, and the measured value of the dry unit weight showed an error of about 1.6% on average. Field trials showed similar trends, and the influence range was confirmed through the finite element analysis. As a result, it was confirmed that the intensity of the magnetic field was about 10 cm.

The flat TDR system developed through this study is considered to be very useful for the compaction management in the field.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

다짐은 흙 속의 공기를 제거하여 흙의 강도 특성을 증가시켜 지반 위에 설치되는 기초의 안정성을 증대시킨다. 고속도로, 제방 및 댐 그 밖의 많은 흙 구조물 공사의 필수 공정이다. 또한 다짐은 구조물의 불필요한 침하량을 감소시키고 성토 사면의 안정성도 증대시킨다. 보통 토목공사 표준시방서의 다짐 기준은 노체의 경우 최대 건조단위중량의 90% 이상, 노상의 경우 최대 건조단위중량의 95% 이상을 기준으로 하고 있다. 이러한 다짐 기준을 만족시키기 위해서는 다짐시 품질관리가 매우 중요하다. 다짐 관리를 위해서 국내 현장에서는 모래 치환법(KS F 2311)과 평판재하시험(KS F 2310)을 이용한다.

모래 치환법(들밀도 시험)은 오랜 기간 동안 현장 적용을 통해 검증된 시험방법이지만, 시험시간이 길고 시험자에 따른 개인의 오차를 정량화하기 어려우며 다짐 관리 기준을 만족시키기 위해서 다짐을 반복하다가 과 다짐(Over compaction) 및 다짐 불량 이 발생할 수 있다. 과 다짐 및 다짐불량은 지반의 파괴 및 부등침하 등의 문제를 발생시킬 수 있으며, 이에 따른 보강, 보수 및 재시공으로 공기(Construction period)가 증가하여 공사비 증가를 유발할 수 있다(송민우, 2016).

도로 및 성토 지반의 설계는 흙의 역학적 특성인 강도와 변형 특성을 이용한다. 그러나 평판재하시험은 시험에 필요한 장비가 차지하는 공간이 크므로 현장 여건의 한계로 시험이 불가능한 경우가 생긴다. 이와 같은 경우 모래 치환법으로 다짐도를 평가하여 측정된 물리적 특성인 건조단위중량을 주로 사용하고 있어 설계와 시공의 다짐 관리 기준에서 개념적인 차이가 발생한다.

최근에는 설계와 시공단계에서 동일한 역학적 개념을 적용할 수 있는 간편하고 정확한 다짐 관리 기법에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있으며, 전통적인 다짐 품질관리 시험방법을 보완하기 위한 빠르고 경제적인 비파괴 시험법 및 지반 교란을 최소화할 수 있는 현장 관입시험의 수요가 점차 증가하고 있다(임남운, 2012).

1.2 연구목적

전통적인 다짐 관리 방법의 문제점을 최소화하여 지반의 다짐 상태를 평가하기 위해 국내·외적으로 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법으로 시간 영역 반사법(Time Domain Reflectometry, 이하 TDR)을 이용한 연구가 진행되고 있다. TDR 시스템은 1950년대 전력 및 통신 산업에서 전송선의 불연속 지점을 찾기 위하여 도입되었고, 이러한 기법을 Hugo Freller-Feldege(1969)가 액체의 유전율 측정에 사용하였으며, Topp 등(1980)에 의해 토양의 유전율은 토양 내에 포함된 물의 양에 의해서 강하게 의존한다는 것을 입증하였다. 또한 원위치 지반에 금속 봉을 통해 TDR 신호를 전송하여 흙의 체적 함수비를 측정하는 기법을 연구하였고, 최근 미국의 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진에 의해서 현장 지반의 함수비와 건조단위중량을 측정하는 ASTM D6780-05 방법이 개발되었다.

기존의 Purdue TDR 시스템은 지반에 관입이 필요한 봉형 프로브를 사용하며 몇 가지 문제점이 발생할 수 있다. 첫째, 봉형 프로브를 관입하기 위해 소정의 작업이 필요하며 지반의 다짐도가 약 90% 이상인 단단한 지반이므로 관입시 어려움을 겪는다. 또한 흙의 입경이 큰 지반에는 프로브 관입이 매우 어려운 점이 있다. 둘째, 봉형 프로브를 지반에 관입시킬 때 주변 지반에 교란이 발생하여 다짐도의 변화를 줄 수 있으며, 후속처리가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 채래식 다짐 관리 방법과 Purdue TDR 시스템에 사용되는 봉형 프로브의 문제점을 개선하고 보완하여 Flat 프로브를 제작하였다. Flat 프로브를 이용한 TDR 시스템을 실내 및 현장시험을 수행하여 정밀도를 분석 하였으며, 검증된 Purdue TDR 시스템의 측정값과 비교하였고, 영향범위 유한요소해석을 통해 영향범위를 확인하였다.

1.3 연구동향

국내·외에서 수행한 TDR 시스템의 연구를 조사하였다. 국외에서 TDR 시스템은 Topp 등(1980)이 흙의 유전율이 흙의 함수율에 강하게 의존하고 있다는 것을 입증하여 TDR 시스템을 지반공학의 추가 적용 가능성을 평가한 이후로 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되었다.

TDR에 관한 연구는 함수비 및 단위중량 측정, 지하수위 거동 및 포화도 계측, 그리고 TDR 시스템의 파형 분석 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

가. 함수비 및 단위중량 측정에 관한 연구

김동주 등(1999)은 TDR 시스템을 통하여 사질토의 자갈 함량 변화에 따른 포화 함수비의 변화를 조사하기 위해 일곱 가지 시료를 이용하여 분석하였고, 이를 통해 유전상수와 함수비간의 상관식을 도출하고 Topp 등(1980)이 제안한 이론식이 사력토에서의 적용성을 검토하였다. 그 결과 Topp 등(1980)의 제안식과의 오차가 3 ~ 8%까지 발생하여 사력토에 적용이 어려울 것이라고 판단하였으며, 연구 결과에서 얻을 수 있었던 토양의 수분함량 범위 내에서 TDR 기법이 적용될 수 있을 것이라고 하였다.

미국 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진에 의해서 중량 함수비 및 건조단위중량 측정에 관한 연구가 진행되고 있으며, White 등(2003)은 ASTM D6780-02 방법을 이용하여 흙의 중량 함수비와 건조단위중량을 측정하고, 노상토지지력 시험(California Bearing Ration Test)으로 CBR값과 TDR 프로브를 지반에 관입시키는데 필요한 타격 횟수를 평균화하여 관계식을 도출하였다. 또한 Yu 등(2004)은 기존의 체적 함수비를 측정하는 시스템이 실제 현장에 적용하기 힘든 점을 언급하고, TDR 시스템을 이용한 중량 함수비 및 건조단위중량을 측정하는 이론식을 제안하였다.

Yu 등(2006)은 다층토에 대하여 기존의 연구자들에 의해 제안된 체적 함수비, 중량 함수비 및 건조단위중량의 식을 적용시켜 연구를 수행하였다. 체적 함수비의 제안식은 중량 함수비의 제안식보다 더 나은 결과를 보였고, 이를 통해 중량 함수비 또는 건조단위중량의 제안식이 다층토에는 적합하지 않다고 하였다.

조명환 등(2010)은 TDR 시스템 방식의 함수센서(CS616)를 이용하여 아스팔트 콘크리트 포장 하부의 함수비 계측에 관하여 연구를 진행하였고, 올바른 보정 시험을 제안하기 위해 피복두께, 센서 간 간섭 영향, 온도의 영향 및 다짐률의 변화에 대하여 실험을 수행하였다. 그 결과 보정 시험시 정확한 체적 함수비 조건을 유지하는 것이 중요하다고 하였으며, 각각의 현장의 보정식을 사용하는 것이 보다 정확한 현장 계측자료를 얻을 수 있다고 하였다.

Jung 등(2013)은 기존의 Yu 등(2004)의 중량 함수비 및 건조단위중량 제안식이 세립분이 많이 함유된 흙이나 높은 함수비의 흙에서는 정확한 값을 도출하기 어렵다고 하여 새로운 중량 함수비 및 건조단위중량의 식을 제안하였고, 제안식에 대한 흙의 보정

상수 값을 유전상수 및 점토의 함유량에 대한 관계식을 통하여 자가 보정을 할 수 있는 시스템으로 정립하였다.

또한 Thring 등(2014)은 측정된 겉보기 유전을 값으로 도출한 체적 함수비와 건조단위중량으로부터 중량 함수비를 추정할 수 있는 비교적 간단한 세 가지 방법을 제안하였다.

김대성 등(2014)은 TDR 탐침기를 제작하여 국내의 대표적인 시료를 통해 실내실험을 수행하였다. 이를 통하여 함수비와 단위중량의 변화에 따른 TDR 신호의 변화를 측정하여 각각의 시료의 매개변수를 도출하였고, 도출한 매개변수를 이용하여 함수비와 단위중량을 구하여 제작한 탐침기를 검증하였다. 또한 실제 현장시험을 수행하여 측정된 TDR 신호와 실내실험의 결과를 토대로 현장의 단위중량과 함수비를 산정하여 전통적인 실험방법으로 얻은 값과 비교하여 TDR 시스템의 현장 적용성을 평가하였다.

홍원택 등(2015)은 불포화지반의 깊이에 따른 함수상태를 획득하기 위해 전극이 설치된 원추형 TDR 프로브(TDRP)를 개발하였고, 실내실험에서 체적함수비 변화에 따른 시료의 유전상수를 측정하고 현장적용을 수행하였다. 그 결과 개발한 TDRP는 관입심도에 따라 대상지반의 체적함수비를 효과적으로 평가할 수 있다고 판단하였다.

정영성 등(2015)은 압력판 추출시험기에 TDR측정 시스템을 도입하여 간극비 변화 및 다중 반복과정에 따른 함수특성을 파악하고, 뷰렛시스템을 통해 측정된 체적함수비 결과와 비교 분석하였으며, 그 결과 불포화토의 함수특성을 효율적으로 평가할 수 있는 방법이라고 하였다.

송민우(2016)는 Flat 프로브를 사용한 TDR 시스템을 이용하여 실내실험을 수행하였고, 그 결과 국내의 일반적인 흙의 건조단위중량과 함수비를 측정하는데 문제가 없을 것으로 판단하였다. 또한 지반의 강성을 측정하기 위해 Piezo-stack을 결합하였고, 개량토의 시간의 경과에 따른 탄성계수를 측정하였다. 그 결과 양생기간이 늘어남에 따라 압축탄성계수와 전단탄성계수가 증가하는 경향을 나타남을 확인하였고, Flat 프로브의 TDR 시스템을 이용하여 개량지반의 강도변화를 손쉽게 파악할 수 있다고 하였다.

나. 지하수위 거동 및 포화도 계측에 관한 연구

Peterson(1993)이 TDR을 경사계와 함께 매설하여 광산의 채굴시 발생하는 부산물인 잔석이 지반의 움직임에 어떠한 영향을 미치는지 연구하기 위하여 사면의 거동을 모니터링 하였으며, Dowding 등(1994)는 교각 기초에 TDR 센서를 설치하여 유수에 의해

세굴된 지점을 파악하기 위하여 지점의 전단변형에 의한 전압의 반사양상을 파악하였다. 또한 Kotdawala 등(1994)는 지반의 용해시 지하수위의 변화와 지반의 침하 등 동결·용해와 관련된 정보를 측정하기 위하여 TDR을 이용하였고, 이를 통해 동결되었던 지반이 용해되는 과정에서 일어나는 변화를 측정하였다.

이가영 등(2005)은 연구 대상지역에 트랜짓을 이용해 직접측량을 하여 1m 간격의 정밀 DEM을 구축하고, DEM을 흐름분배 알고리즘에 적용하여 TDR 센서를 매설하였다. 사면에서의 토양 수분 모니터링을 실시하고 감쇄곡선을 분석하였다.

Benson 등(2006)이 CS616프로브를 이용하여 흙의 종류에 따른 측정값을 시간의 흐름에 따른 모니터링을 실시하였으며, 1년 동안 겨울철과 봄철의 동결·용해로 인한 체적 함수비의 변화양상을 파악하였다. 또한 Scheuermann 등(2009)은 폴리에틸렌으로 피복된 세 개의 구리선으로 구성되어 있는 Flat-ribbon 케이블을 제작하여 실내 대형 모형 시험을 실시하였으며, 모형 제방은 0.2 ~ 2.0mm의 균질한 모래를 이용하여 약 40%의 간극률로 축조되었고, 독일 Karlsruhe 대학의 FWRI(Federal Waterways and Research Institute)에 설치되었다. 간극수압을 측정하기 위해 피에조미터를 설치하여 실제 간극수압과 TDR로 측정된 함수비를 이용하여 값을 비교하였다.

김기영 등(2011)은 TDR센서를 이용하여 지반 내 지하수의 거동을 계측하고 이를 이동 평균법과 푸리에 변환을 통한 필터링 기법으로 포화 및 불포화 영역의 구분 및 변화를 수치적으로 결정하였다. 먼저 실내실험을 통해 TDR 데이터를 포화도에 대한 함수로 만들고, 실내모형실험을 수행하여 현장 적용을 위한 계측자료 교정함수를 만들었으며, 현장 제방에 TDR 센서를 설치하고 지하수위를 변화시켜 지반의 지점별 포화도를 파악하여 지하수위 및 건조, 불포화영역을 결정하여 분석하였다. 그 결과 제방 안정 해석의 신뢰도를 높이고 경제적이며 합리적인 계측 설계가 가능하다고 하였다.

박민철 등(2012)은 철선 TDR 계측선의 문제점을 해결하기 위해서 스테인리스 스틸과 열수축튜브를 이용하여 개량된 TDR 계측선을 개발하였고, 실내실험과 아크릴모형 실험을 실시하였으며, 또한 대형 모형제방에 개량된 TDR 센서를 설치하여 침투실험을 수행하였다. 그 결과 실내시험과 같은 명확한 지하수 분포형태 파악이 가능하였고, 침투 시간경과에 따른 각 구간의 지하수 분포변화를 파악할 수 있었고 손쉽게 모형제방의 침윤선을 작도할 수 있었다고 하였다.

신은철 등(2013)은 상수도관의 동결과 용해에 따른 거동을 연구하기 위해서 매설관 채움재로 사용되고 있는 시료에 대한 함수비 보정실험을 수행하여 보정방정식을 제안하였고 실내실험을 수행하여 제안된 보정방정식에 대하여 검증하였다. 실내시험을 통

해 제안한 보정방정식과 현장에서 측정된 함수비를 비교하였고, 대체적으로 보정방정식에서 부합되는 것을 확인하였으며, 제안한 보정방정식이 실제 현장에서도 충분히 적용할 수 있다고 하였다.

다. 기타 TDR 연구

Feng 등(1999)이 다층토에 대한 TDR 시스템의 과형을 분석하기 위해 다중단면 전 송선 모델을 이용하여 시뮬레이션 하고 TDR 시스템으로 측정하여 두 과형을 비교하였다. Drnevich 등(2001b)은 온도 변화에 따른 과형의 변화를 분석하여 온도변화에 따른 유전상수 값의 보정계수를 제시하였다. 또한 Drnevich 등(2005)은 서로 비슷한 시료에 대하여 각각의 특성상수 값을 도출하였고, 동일한 에너지로 다짐을 하였을 때 시뮬레이션을 통해 얻어지는 특성상수 값과 실제 얻어지는 특성상수 값을 비교하였고, 이를 통하여 예측한 특성상수 값이 실제 특성상수 값과 유사한 값을 도출할 수 있다는 것을 확인하였다.

Zambrano 등(2006)은 측정하는 시료의 유전율에 따른 TDR 과형의 변화를 연구하였고, 건조된 시료에서는 TDR 과형의 변화가 거의 일어나지 않고, 함수비의 변화에 따른 과형의 변화가 크게 일어난다고 하였다. 이를 통하여 TDR 시스템의 과형으로 개략적인 분류를 할 수 있다고 하였다. 또한 Chen 등(2007)은 석회노분(Lime Kiln Dust, LKD)을 사용하여 지반을 개량하고 전도성이 높은 개량 혼합토의 TDR 신호를 측정하여 분석하였고, TDR 시스템이 안정화시킨 흙의 유용한 다짐관리 방법이 될 것 이라고 하였다.

Liu 등(2008)은 흙의 열용량에 관한 이론을 바탕으로 하는 Thermo-TDR 기술을 사용하여 TDR 센서의 치수를 변화시키며 지반의 함수비와 총 단위중량을 측정하였고, Thermo-TDR 기술로 흙의 물리적 성질 뿐만 아니라 열에 관한 성질도 빠르게 측정이 가능할 것이라고 하였다. 또한 Liu 등(2014)은 Thermo-TDR 기술을 이용하여 시간에 따른 총 단위중량을 모니터링하기 위해서 기존의 Thermo-TDR 시스템을 재설계하여 현장 모니터링을 실시하였다.

한아름(2015)은 TDR 센서를 차수막 접합부에 이용하여 오실로스코프를 통하여 물성에 따른 과형의 변화를 분석하고 누수 지점을 찾기 위해 연구를 수행하였고, 폐기물 매립지 내의 유기물 함량, 매립 후 경과시간, 수분함량, 수분저장능력, 다짐정도, 매립지의 형태, 토양의 성질 등에 따라 변하는 침출수의 성분을 모사하기 위하여 상이한

농도의 1가 양이온 NaCl을 제조하여 누수시 TDR 센서에 미치는 영향을 분석하였다.

이와 같이 국외에서는 TDR 시스템을 사용하여 지반의 조건 변화에 따른 TDR 시스템의 과형을 분석, TDR 프로브 개발과 새로운 이론식 개발 등의 연구가 진행되고 있는 반면 국내에서는 TDR 시스템을 활용한 연구는 흙의 포화도 및 동결상태 확인, 제방의 모니터링, 지하수위 거동 확인 등의 연구가 진행 되고 있어 지반의 특성평가를 위한 연구는 국외에 비하여 현저히 떨어지는 것으로 확인된다. 국내에서도 TDR 시스템을 통해 현장 다짐관리에 적용할 수 있도록 기준을 마련해야 한다고 판단된다.

1.4 연구내용 및 방법

본 연구에서는 기존의 Purdue TDR 시스템의 봉형 프로브의 문제점을 개선하고자 Flat 프로브를 개발하였다. 개발한 Flat 프로브를 이용한 TDR(이하 Flat TDR) 시스템을 통해 함수비 및 단위중량을 측정하기 위해서 실내실험을 수행하였고, 검증된 Purdue TDR 시스템의 측정값과 비교하였으며, 영향범위 유한요소해석을 통해 영향범위를 확인하였다. 또한 현장시험을 수행하여 국내 지반의 적용성을 검토하였다. 본 연구의 내용을 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 Purdue TDR 시스템의 봉형 프로브의 문제점을 보완하여 Flat 프로브를 개발하였고 Flat TDR 시스템을 구축하였다.
- (2) 개발한 Flat TDR 시스템을 이용하여 실내실험을 수행하였다. 총 여섯 가지의 시료를 사용하였으며, 노건조함수비 시험(KS F 2306)으로 함수비와 건조단위중량의 실측값과 Flat TDR 시스템의 측정값을 비교하여 정밀도를 분석하였다.
- (3) Flat TDR 시스템의 측정값의 신뢰도 향상을 위해 동일한 실내실험 조건을 조성하여 Purdue TDR 시스템과 비교실험을 통해 측정값을 비교하였다.
- (4) 실내실험 결과를 토대로 현장시험을 실시하였으며, 들밀도 시험을 통해 실측 함수비와 단위중량을 측정하여 Flat TDR 시스템으로 측정한 값과 비교하여 현장 적용성을 검토하였다.
- (5) Flat TDR 시스템의 신호의 영향범위를 확인하고자 유한요소해석을 하였고, 이에 따른 실내실험을 통해 영향범위를 확인하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 MAXWELL 방정식

2.1.1 MAXWELL 방정식의 요약

전기와 자기의 발생, 전기장과 자기장, 전하 밀도와 전류 밀도의 형성을 나타내는 네 개의 편미분 방정식이다. 제임스 클러크 맥스웰(James Clerk Maxell)이 패러데이 전자기 유도 법칙(식 (2.1)), 앙페르 회로 법칙(식 (2.2)), 가우스 법칙(식 (2.3), (2.4))을 묶어서 맥스웰 방정식이라고 한다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.4)$$

여기서, E : 전기 밀도(electric field density) ($Volt/m$)

B : 자속 밀도(magnetic flux density) ($Weber/m^2$)

H : 자기장 밀도(magnetic field density) ($Ampere/m$)

D : 전속 밀도(electric flux density) ($Coulomb/m^2$)

J : 전류 밀도(current density) ($Ampere/m^2$)

ρ : 양전하 밀도(volume charge density) ($Coulomb/m^3$)

t : 시간(time)

Maxwell 방정식과 관련하여, 기계적 현상과 전기 및 자기 현장을 함께 나타내는 Lorentz 힘의 방정식 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2.6)과 같이 연속 방정식 (즉 전하 보존 방정식)을 Maxwell 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$F = q(E + u \times B) \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.6)$$

2.1.2 매질의 전자기적 성질

식 (2.1) ~ 식 (2.4)의 Maxwell 방정식은 15개의 미지수 $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z, D_x, D_y, D_z, B_x, B_y, B_z, J_x, J_y, J_z$ 를 포함하고 있다. 매질의 구성 관계를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$D = f_D(E) \quad (2.7)$$

$$B = f_B(H) \quad (2.8)$$

$$J = f_J(E) \quad (2.9)$$

여기서, f_D : 유전율 특성 (properties of dielectric permittivity)
 f_B : 투자율 특성 (properties of magnetic permeability)
 f_J : 전기전도도 특성 (properties of electric conductivity)

선형, 균질, 등방성의 특징을 갖는 매질의 관계식은 다음과 같으며, 이런 관계식이 성립하는 매질을 단순 매질이라고 한다. 여기서 유전율 ϵ (dielectric permittivity), 투자율 μ (magnetic permeability) 및 전기전도도 σ (electric conductivity)는 모두 스칼라 상수로 가정한다.

$$D = \varepsilon E \quad (2.10)$$

$$B = \mu H \quad (2.11)$$

$$J = \sigma E \quad (2.12)$$

선형, 균질, 등방성 매질 속에 있는 필드가 주파수 f 의 정현 변동을 하는 경우, 위의 스칼라 상수들은 주파수 f 에 따라 변동 하므로 $\varepsilon(f)$, $\mu(f)$, $\sigma(f)$ 로 나타낸다.

단순 매질 속에서 성립하는 Maxwell 방정식은 식 (2.10) ~ 식 (2.12)를 식 (2.1) ~ 식 (2.4)에 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot E = \rho / \varepsilon \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (2.16)$$

Ampere 법칙 식 (2.14)에서, 값을 알고 있는 전류가 공급되고 있는 경우를 고려하기 위해, 인가 전류 밀도(Impressed Current Density) J 를 따로 표시 하였다.

2.2 자기량 및 자기 작용

2.2.1 자극의 세기

자극의 자기적 작용력을 자극의 세기(Pole strength)라 하고, 자극의 세기가 큰 자석은 외부에 대하여 큰 자력을 나타낸다. 식 (2.17)과 같이 나타낼 수 있으며 이와 같은 관계를 쿨롱의 법칙(Coulomb's law)이라고 한다. 이 법칙에 의해 물리량으로 나타나는

자극의 세기를 힘으로 알기 쉬운 양으로 나타나며, 자극에 작용하는 힘을 이용하여 자극의 세기를 계산할 수 있다.

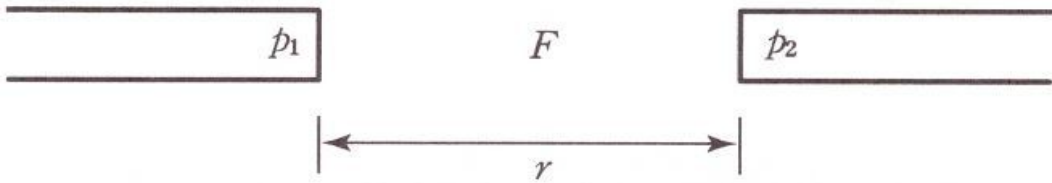


그림 2.1 서로 힘을 미치는 두 자극

그림 2.1과 같이 자극의 세기가 p_1 과 p_2 인 두 자극의 거리 r 만큼 떨어져 있을 경우, 그 사이에 작용하는 힘 F 의 크기는 식 (2.17)으로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{p_1 p_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.17)$$

2.2.2 자장과 자속밀도

다른 영구자석을 두면 힘을 받는 현상으로부터 자극 주위에는 자성체에 힘을 미칠 수 있는 어떤 특수 성격의 공간이 형성된다는 것을 알 수 있고, 이러한 공간을 자장 또는 자계(magnetic field)라고 한다. 일반적으로 자장을 표현하는 데는 자장의 세기 (magnetic field strength) H 와 자속밀도 (magnetic flux density) B 의 두 가지의 정의가 사용된다.

가. 자장의 세기

어떤 자극이 존재하면 그림 2.2와 같이 주위공간에 자장 H 를 형성하고 그 자장 내에 다른 자극 p 가 있으면 다음과 같은 크기의 힘이 작용한다.

$$F = pH \quad (2.18)$$

이를

$$H = \frac{F}{p} \quad (2.19)$$

로 고쳐 쓰고, 여기에 식 (2.17)을 대입한 뒤 $p_1 = p_2 = p$ 로 두면

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{p}{r^2} \quad (2.20)$$

가 되어, 자극 p 의 주위에 만들어지는 자장의 세기가 된다.

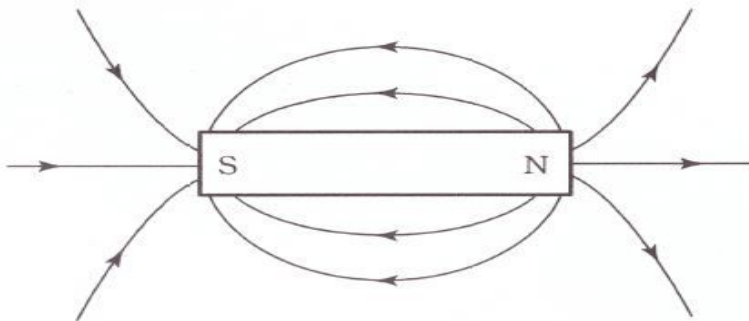


그림 2.2 영구자석의 N, S 자극

자극 주변뿐만 아니라 전류가 흐르는 도선의 주위에서도 항상 자장이 발생한다.

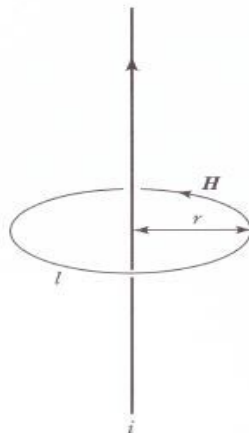


그림 2.3 직선도체의 전류에 의한 자장 발생

그림 2.3과 같이 직선도체에 전류 i 가 흐를 경우, Ampere의 회로법칙(Ampere's circuital law)에 의하면 도선 주위에 형성된 폐쇄자로(closed magnetic path) l 을 따라 적분된 자장의 전류의 크기에 비례하여 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\oint Hdl = k_2 i \quad (2.21)$$

따라서 도선으로부터 거리 r 이 되는 위치에서 얻어지는 자장의 크기는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (2.22)$$

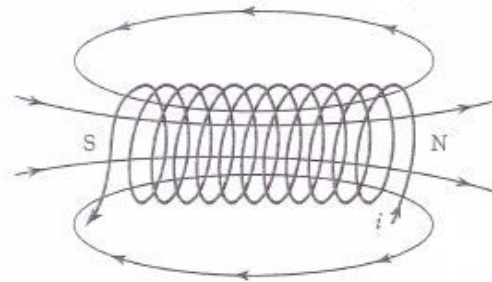


그림 2.4 솔레노이드 코일에서의 자장 발생

일정 크기의 자장을 얻는 수단으로는 그림 2.4와 같은 솔레노이드 코일을 사용하며 그 중심부에서는 다음과 같은 자장이 발생한다.

$$H = n_0 i \quad (2.23)$$

여기서, n_0 : 단위길이당 코일의 권선수

나. 자속밀도

자장의 상태를 표현하는 자속밀도(또는 자기유도) B 가 있다. 자성체가 힘을 받는 공간을 자장이라 하며, 이 자장이 존재하는 곳에 자력선이 존재한다. 이 자력선이 많이 분포한 곳이 자장이 강한 곳이므로 자속(magnetic flux)의 밀도는 자장과 비례한다고 볼 수 있다.

자속밀도는 자기유도라고도 하며, 이는 자속밀도 B 가 자장 H 의 존재에 대한 매체(자유공간이나 자성체)의 반응의 개념을 내포한다. 자속밀도를 형성하는 자력선은 N극에서 S극으로 향하는 것이며 공간 내에서 항상 연속된다.

어떤 자장 발생원으로부터 나오는 자속을 Φ 라 하고, 자속이 통과하는 면적을 A 라고 한다면, 단위면적당 존재하는 자속밀도 B 는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.24)$$

이에 따라 자속의 크기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = BA \quad (2.25)$$

그리고 자속밀도와 자장이 진공 공간 내에서 가지는 상호 비례관계는 다음과 같다.

$$B = \mu_0 H \quad (2.26)$$

여기서, μ_0 : 진공투자율

이 식을 이용하여 자극 p 로부터 발생하는 자속밀도의 크기는 $H = \frac{k_1 p}{r^2}$ 을 대입하여

$$B = k_1 \frac{\mu_0 p}{r^2} \quad (2.27)$$

으로 나타낼 수 있다.

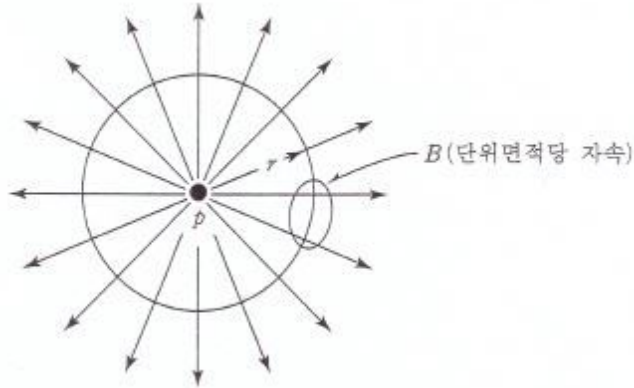


그림 2.5 자극 p 로부터의 자속 발생과 자속밀도

그림 2.5와 같이 자극 p 에서 모든 방향으로 균일하게 자속이 발생하고 있는 경우, 거리 r 만큼 떨어져 있는 곳에서의 전체 자속은 식 (2.25)와 식 (2.27)을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi = BA = k_1 \frac{\mu_0 p}{r^2} 4\pi r = k_1 4\pi \mu_0 p \quad (2.28)$$

표면적이 A 인 자극이 p 의 세기를 가진다면 표면에서의 자속밀도 및 자장의 세기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{4\pi k_1 \mu_0 p}{A} \quad (2.29)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{4\pi k_1 p}{A} \quad (2.30)$$

2.2.3 자화

가. 자화의 정의

자성체가 균일하게 자화(magnetization)되었을 때, 다음 식과 같은 단위체적당 자기 모멘트의 크기를 자기분극(magnetic polarization) 또는 자화의 세기(intensity of magnetization)라 하며 M 으로 표시한다.

$$M = \frac{m}{V} \quad (2.31)$$

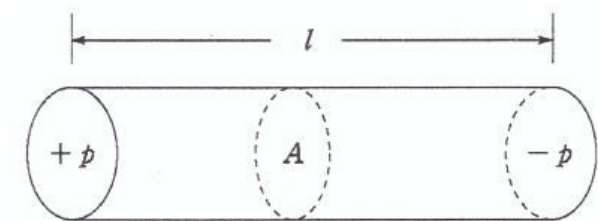


그림 2.6 자극의 세기를 이용한 자화의 정의

그림 2.6과 같은 자성체의 경우 체적이 V , 단면적 A , 길이 l 이면 식 (2.32)와 같이 나타낼 수 있으며, 자화방향에 수직인 단면의 단위면적당 자극의 세기로 정의될 수 있다.

$$M = \frac{m}{V} = \frac{pl}{Al} = \frac{p}{A} \quad (2.32)$$

나. 자화에 의한 자장과 자속밀도

자성체가 자기분극을 일으키면 표면자극이 생기면서 자장과 자속밀도가 발생한다. 이때의 H 와 B 는 식 (2.29)와 식 (2.30)에 식 (2.32)를 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H = \frac{4\pi k_1 p}{A} = 4\pi k_1 M \quad (2.33)$$

$$B = \frac{4\pi k_1 \mu_0 p}{A} = 4\pi k_1 \mu_0 M \quad (2.34)$$

또한 자성체에 외부자장이 인가될 때 자성체 내부에 존재하는 자속밀도는 외부자장에 의해 빈 공간상에 생긴 자속밀도와 자성체의 자화에 의한 자속밀도의 합으로 주어진다. 이를 식으로 표현하면 식 (2.26)과 식 (2.34)로부터

$$B = \mu_0 H + 4\pi k_1 \mu_0 M \quad (2.35)$$

이 되고, $k = \frac{1}{4\pi\mu_0}$ 를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$B = \mu_0 H + M \quad (2.36)$$

다. 자화율과 투자율

자화율(magnetic susceptibility) χ 는 자성체가 외부자장에 의해 자화되기 쉬운 정도를 나타내는 지수로서, 다음과 같이 인가자장과 자화의 비로 정의된다.

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.37)$$

또한 자화율을 진공투자율로 나눈 값을 비자화율(relative susceptibility)이라고 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\chi} = \frac{\chi}{\mu_0} \quad (2.38)$$

한편 인가자장 H 와 자성체 내에 유도된 전체 자속밀도 B 의 비를 투자율 (magnetic permeability)이라고 정의하고 다음과 같이 μ 로 표시한다.

$$B = \mu H \tag{2.39}$$

또한 진공투자율에 대한 투자율의 비를 비투자율(relative permeability, μ_r) 또는 상대투자율이라고 정의하며 다음과 같이 나타내어진다.

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2.40}$$

2.3 주요 자성의 특징

자성체 및 자성의 종류는 분류기준에 따라 다르나 크게 강자성, 상자성, 반자성으로 분류한다.

강자성(ferromagnetism)은 외부 자기장에 의해서 자화된 후 자기장을 없앤 후에도 일정 시간동안 자성을 유지하는 성질이며, 강자성을 띤 물질은 자석을 가까이 하면 인력이 작용한다.

상자성(paramagnetism)은 원자 자기모멘트간에 상호작용이 없는 스핀계에서의 자성으로 그림 2.7과 같이 자화는 자장에 비례하며, 반자성과 달리 자화율은 온도가 상승하면 스핀의 열진동이 심해져 자장방향으로 자화시키기 어렵게 되므로 자화율이 낮아진다(노태환, 2006).

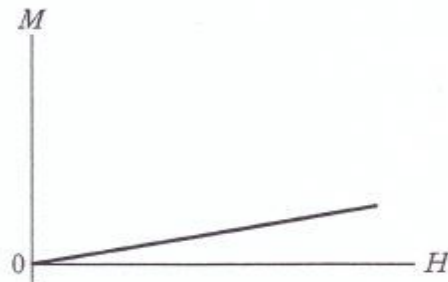


그림 2.7 상자성에서의 자화와 자장

반자성(diamagnetism)은 원자 자기모멘트, 스핀모멘트와는 무관하며 외부자장을 가하면 그 역방향으로 자화가 발생하므로 음의 자화율을 가지나 자화의 절대치는 그림 2.8과 같이 인가자장에 비례한다. 이 자성은 원자의 외각 전자구름에 자장이 가해지면 자장의 반대방향으로 자속이 생기게 전자가 가속되는 렌츠의 법칙(Lenz's law)에 기인하며, 일반적으로 닫힌 전자구조의 Cu, Ag, Au, Pb, 흑연, 유기물 등에서 나타난다.

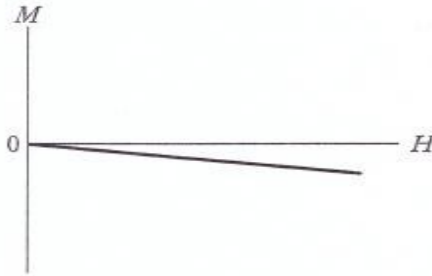


그림 2.8 반자성에서의 자화와 자장

2.4 전자기파 전송 특성

2.4.1 전송선을 통한 전파특성

일부 전도성 유체 또는 흠에서 전자기파의 전파에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \hat{E} = -j2\pi f \mu_o \hat{H} \quad (2.41)$$

$$\nabla \times \hat{H} = \sigma \hat{E} + j2\pi f \epsilon \hat{E} \quad (2.42)$$

전송선에서 횡전자기(transverse electromagnetic) 모드는 지배적이며, 식 (2.41)과 식 (2.42)와 같은 평면파 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다(Feng 등, 1998).

$$E = \hat{E} e^{j2\pi ft} = E_o e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.43)$$

$$H = \hat{H}e^{j2\pi ft} = \hat{H}_o e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.44)$$

여기서, E, H : 특정 주파수에서 시간에 대한 함수
 f, E_o, H_o : 경계조건에 의해 결정되는 상수
 t : 시간 변수
 α : 감쇠상수(attenuation constant)
 β : 위상상수(phase constant)

그리고 감쇠상수(α)와 위상상수(β)는 다음과 같이 정의된다(Ramo 등, 1994).

$$\alpha(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(f)}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''(f)}{\epsilon_r'(f)} \right)^2} - 1 \right]} \quad (2.45)$$

$$\beta(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(f)}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''(f)}{\epsilon_r'(f)} \right)^2} + 1 \right]} \quad (2.46)$$

여기서, c 는 자유공간에서의 빛의 속도를 나타내며, ϵ_r' 과 ϵ_r'' 는 식 (2.47)과 식 (2.48)에 의해 정의된다.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.47)$$

$$\epsilon_r^{eq} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' - j \left(\epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \epsilon_o} \right) \quad (2.48)$$

여기서, ϵ_r' : 상대유전율의 실수부
 ϵ_r'' : 상대유전율의 허수부
 ϵ_r^{eq} : 등가 복소유전율
 ϵ_r'' : 등가 복소유전율의 허수부

식 (2.43)과 식 (2.44)는 전압(V)과 전류(I)를 이용하여 다시 표현할 수 있으며, 다음과 같이 정의된다(Feng 등, 1999).

$$V(z) = V_o e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.49)$$

$$I(z) = \frac{V_o}{Z_c} e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.50)$$

여기서, V_o : 경계조건에 의해 결정되는 상수

z : 전파 경로의 길이

Z_c : 두 유전체 사이의 유전 특성에 의한 특성 임피던스

2.4.2 전자기적 전파특성 모델

TDR 시스템의 전자기파 전파는 Feng 등(1999)과 Lin(1999)에 의해 이론적으로 설계되었으며, Siddiqui 등(2000)에 의해 정립되었다. 그림 2.9는 TDR 시스템 임피던스에 대한 개략도를 보여준다.

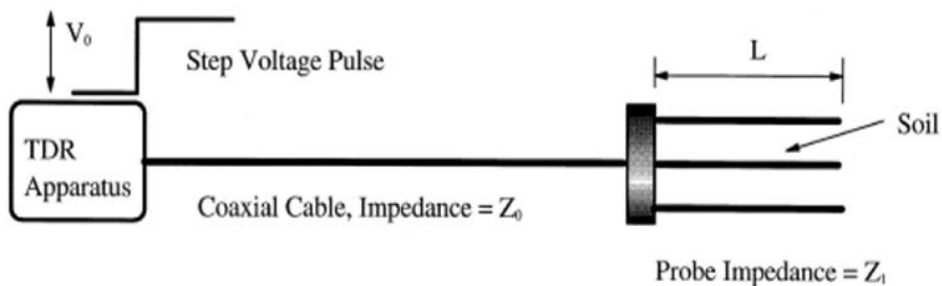


그림 2.9 TDR 시스템 임피던스(Siddiqui 등, 2000)

세 개의 프로브 사이의 공간에서 다중 전송 및 반사는 불균일한 전송선으로부터 전자기파의 전파에 의해 유도된다. 이러한 다중 전송 및 반사는 전자기파의 에너지를 감소시키고, 2차 및 고차 반사 성분이 신호의 후반부에 추가된다. 적절한 전파 모델은 불균일한 전송선의 복잡한 전파 특성을 설명하기 위해 필요하다.

Feng 등(1999)과 Lin(1999)은 균일한 전송선과 균일하지 않은 전송선의 전자기 전파 모델을 개발하였다. 이 모델은 Yanuka 등(1988)의 다중 반사 및 감쇠모델과 Heimovaara(1994)의 균일한 전송선의 전파모델을 조합하였다.

전송선의 종속주파수(frequency-dependent) 특성 임피던스(Z_c)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Z_c = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.51)$$

여기서, Z_p : 공기 중에서 측정된 전송선의 특성 임피던스

봉을 통한 기계적 전파의 경우와 유사하게 전자기파가 전송선의 끝단과 만나는 경우, 반사는 그림 2.10과 같이 임피던스의 불일치로 인해 발생한다.



그림 2.10 입사파(V_i)의 두 전송선의 임피던스 차이로 인한 전송파(V_t) 및 반사파(V_r) 발생 현상(Drnevich 등, 2001a)

기계적 경계 값의 문제 때문에 전압 및 전류의 호환방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(z) = V_i + V_r = V_t \quad (2.52)$$

$$I(z) = \frac{V_i}{Z_{c1}} - \frac{V_r}{Z_{c1}} = \frac{V_t}{Z_{c2}} \quad (2.53)$$

여기서, V_i , V_r , 그리고 V_t 는 각각 입사파, 반사파, 그리고 전송파를 표현하며, Z_{c1} 과 Z_{c2} 는 식 (2.44)와 같이 $Z_{c1} = Z_{p1}/\sqrt{\epsilon_{r1}}$ 과 $Z_{c2} = Z_{p2}/\sqrt{\epsilon_{r2}}$ 로 나타낼 수 있다.

스텝펄스는 신호발생기로부터 생성되고 동축케이블을 통해 이동한다. TDR 전송선의 다층 구성 때문에 다중 반사와 전송은 발생한다. 오실로스코프로 도달하는 반사파 신호는 인가된 펄스와 반사된 것의 선형 조합으로 표시되며, 식 (2.52)와 같이 표현한다.

Feng 등(1999)과 Lin(1999)은 그림 2.11과 같이 단일 TDR 전송선 모델과 같은 균일한 전송선의 등가회로를 개발하였다.

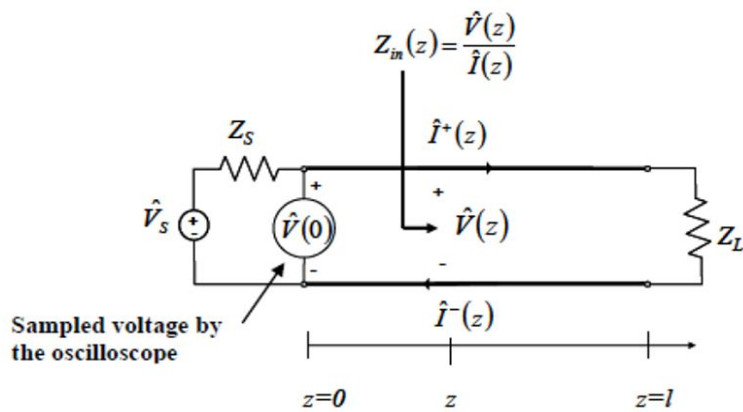


그림 2.11 균일한 전송선의 등가회로(Lin, 1999)

Kirchhoff의 전압 법칙은 다음과 같이 정의된다.

$$V_s = Z_s I(0) + V(0) \quad (2.54)$$

$$V(l) = Z_l I(l) \quad (2.55)$$

$$V(0) = V_s - Z_s I(0) \quad (2.56)$$

- 여기서, V_s : 소스 전압
 $I(z)$: z 점에서의 전류
 $V(z)$: z 점에서의 전압
 Z_s : 소스 임피던스
 Z_l : $z=l$ 에서의 로드 임피던스
 $V(0)$: 오실로스코프로 측정된 전압

식 (2.49)와 식 (2.50)과 같은 주파수 영역에서 균일한 전송선을 통한 전자기파의 전파는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$V(z) = V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{+\gamma z} \quad (2.57)$$

$$I(z) = I^+ e^{-\gamma z} + I^- e^{+\gamma z} = \frac{V^+}{Z_c} e^{-\gamma z} - \frac{V^-}{Z_c} e^{+\gamma z} \quad (2.58)$$

여기서, V^+ , V^- , I^+ , I^- 는 $+z$ 방향과 $-z$ 방향의 파의 전달 정수이며, 전파정수 (γ)는 유전 재료의 전자기 특성에 의존하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\gamma = j2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.59)$$

식 (2.57)과 식 (2.58)을 고려하면, $Z_{in}(z)$ 은 전체 회로의 등가 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in}(l) = \frac{V(z)}{I(z)} = Z_c \frac{V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{+\gamma z}}{V^+ e^{-\gamma z} - V^- e^{+\gamma z}} = Z_c \frac{1 + \rho_L e^{2\gamma(z-l)}}{1 - \rho_L e^{2\gamma(z-l)}} \quad (2.60)$$

여기서, ρ_L 은 $\frac{V^-}{V^+} e^{2\gamma l}$ 이며, 전송선의 끝에서 반사계수이다. 또한, $Z_{in}(l)$ 은 $z=l$ 일

때 로드 끝에서 임피던스이며, 이는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Z_{in}(l) = Z_c \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L} \quad (2.61)$$

그리고 식 (2.61)을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_L = \frac{Z_{in}(l) - Z_c}{Z_{in}(l) + Z_c} \quad (2.62)$$

식 (2.61)에 식 (2.62)를 대입하면,

$$\begin{aligned}
 Z_{in}(z) &= Z_c \frac{1 + \frac{Z_{in}(l) - Z_c}{Z_{in}(l) + Z_c} e^{2\gamma(z-l)}}{1 - \frac{Z_{in}(l) - Z_c}{Z_{in}(l) + Z_c} e^{2\gamma(z-l)}} \\
 &= \frac{Z_{in}(l) + Z_c + (Z_{in}(l) - Z_c) e^{2\gamma(z-l)}}{Z_{in}(l) + Z_c - (Z_{in}(l) - Z_c) e^{2\gamma(z-l)}}
 \end{aligned} \quad (2.63)$$

$z=0$ 에서 입력 임피던스는 $z=l$ 에서 그 함수로써 정의된다.

$$Z_{in}(0) = \frac{Z_{in}(l) + Z_c + (Z_{in}(l) - Z_c) e^{2l}}{Z_{in}(l) + Z_c - (Z_{in}(l) - Z_c) e^{2l}} \quad (2.64)$$

식 (2.56)으로부터의 오실로스코프로 측정된 전압은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V(0) = V_s - Z_s \frac{V(0)}{Z_{in}(0)} \quad (2.65)$$

식 (2.65)의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V(0) = V_s \frac{1}{1 + \frac{Z_s}{Z_{in}(0)}} = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s \quad (2.66)$$

다중 단면 TDR 전송선 모델 같은 불균일한 전송선으로 확장할 수 있으며, 그림 2.12와 같이 표현할 수 있다(Drnevich 등, 2001a).

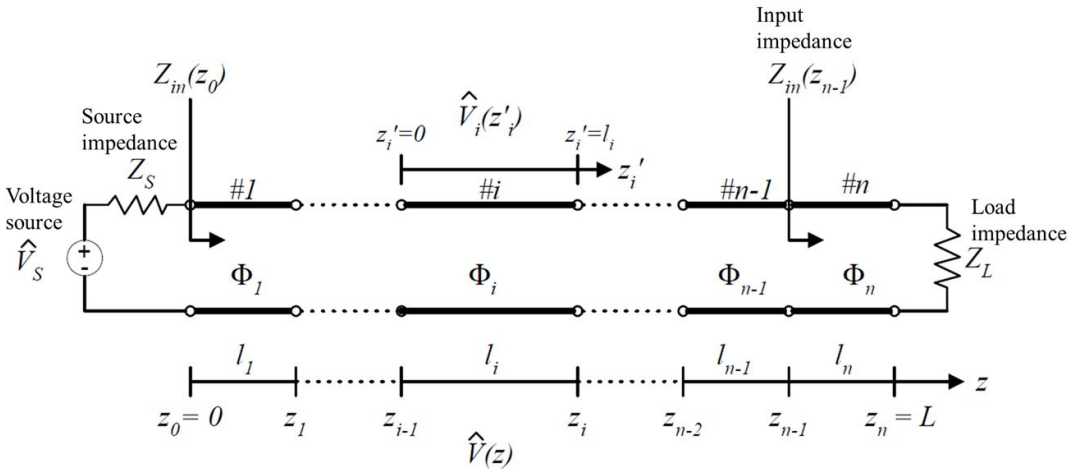


그림 2.12 불균일한 전송선의 등가회로(Drnevich 등, 2001a)

$$Z_{in}(z_n = L) = Z_L \quad (2.67)$$

$$Z_{in}(z_{n-1}) = Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} + (Z_L - Z_{c,n})e^{-2\gamma_n l_n}}{Z_L + Z_{c,n} - (Z_L - Z_{c,n})e^{-2\gamma_n l_n}} \quad (2.68)$$

$$Z_{in}(z_{n-2}) = Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} + (Z_{in}(z_{n-1}) - Z_{c,n-1})e^{-2\gamma_{n-1} l_{n-1}}}{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} - (Z_{in}(z_{n-1}) - Z_{c,n-1})e^{-2\gamma_{n-1} l_{n-1}}} \quad (2.69)$$

⋮

$$Z_{in}(0) = Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} + (Z_{in}(z_1) - Z_{c,1})e^{-2\gamma_1 l_1}}{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} - (Z_{in}(z_1) - Z_{c,1})e^{-2\gamma_1 l_1}} \quad (2.70)$$

여기서, $Z_{c,i}$, γ_i , 그리고 l_i 는 각각 특성 임피던스, 전파상수, 그리고 각각의 균일한 단면의 길이이다. 그리고 $Z_{in}(z_{n-i})$ 는 부분 n에서 전송선의 끝으로의 전체적인 입력 임피던스이다. 측정된 전압은 식 (2.67) ~ 식 (2.70)을 적용함으로써 얻을 수 있다.

이론적으로는 전송선의 특성 임피던스는 절연물질의 형상과 유전 매개변수로부터 계산할 수 있지만, Feng 등(1999)과 Lin(1999)에 의해 개발된 다중 단면 전송선은 TDR 시스템 응답을 시뮬레이션하기 위한 이상적인 모델이다. 이러한 수치 모델은 본질적으로 단면의 불균일한 형상과 동일한 단면 내에 가변 유전 특성의 오류가능성을 포함한다.

2.5 TDR 적용 이론

TDR 시스템은 신호발생기에서 발생한 전자기파가 흙 속에서 이동하고, 그 전도 특성을 이용하는 시스템이다. 이러한 특성을 이용해 흙 속에 관입된 프로브의 전자기파의 반향시간을 측정하고 반향특성을 이용하여 흙의 유전상수 및 전기전도도를 측정한다. 이와 같은 원리를 이용하여 TDR은 측정 범위에서의 매질의 특성 및 변형을 측정한다. 또한 프로브를 통하여 측정한 흙의 유전상수 및 전기전도도를 이용하여 함수비 및 밀도를 평가한다(임남운, 2012).

2.5.1 TDR 파형 분석

전자기파가 동축케이블(coaxial cable)을 따라 이동하고 동축케이블에 불연속이 발생하는 경우, 또는 케이블과 전도체 사이 매질이 변화하면 반사 신호의 변화가 뚜렷하게 발생한다. 그림 2.13과 같이 금속 봉을 이용하여 토양의 함수비를 측정하는 시스템이 지반공학적으로 주로 이용되고 있다.

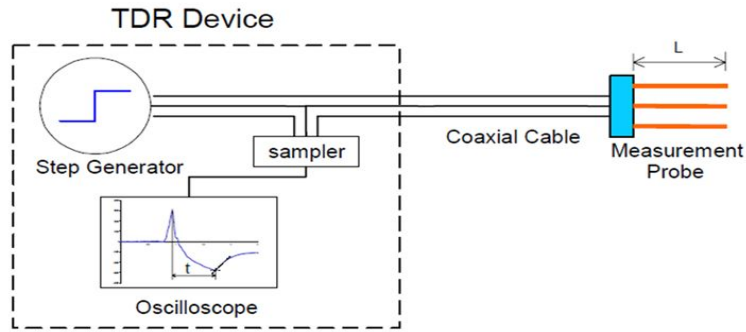


그림 2.13 일반적인 토양 함수비 측정 시스템(Drnevich 등, 2001a)

또한 이러한 함수비 측정 시스템을 이용하여 흙의 반사 신호를 측정하면 그림 2.14와 같은 신호를 얻을 수 있다.

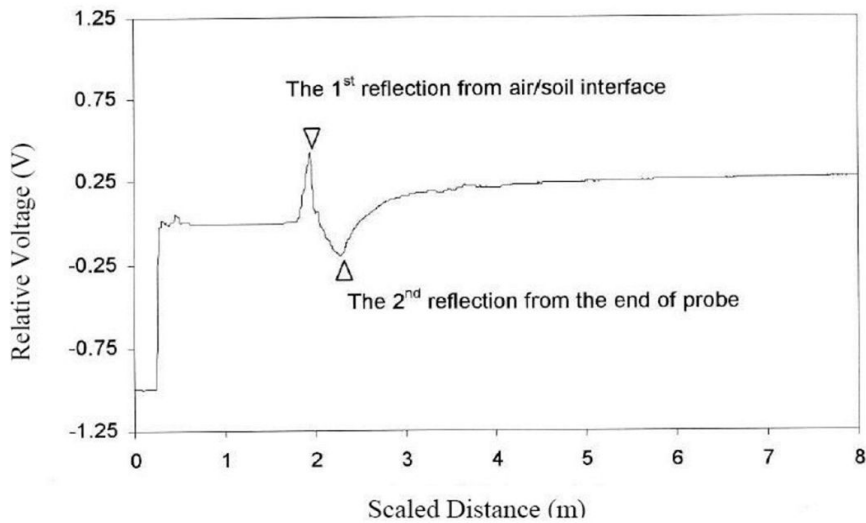


그림 2.14 TDR의 전형적인 파형(Yu 등, 2004)

전송선에서 전자기장의 전파는 Maxwell의 방정식에서 파생된 전파방정식에 의해 정의될 수 있고, Drnevich 등(2001a)은 전파방정식의 중요한 요소가 특성임피던스(Z)와 전파상수(γ)라고 하였다. 특성임피던스는 전송선을 따라 현재의 전파전압의 비율로 정의될 수 있다. 이것은 전송선 형상 및 절연 재료의 유전율의 함수이다. 이는 동축 전송선에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다(Drnevich 등, 2001a).

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \quad (2.71)$$

여기서, b 는 외부도체의 내부직경, a 는 내부도체의 외부직경, ϵ_0 은 진공유전율 ($8.854 \times 10^{-12} F/m$), μ_0 은 진공투과율($4\pi \times 10^{-7} H/m$), ϵ_r^* 은 등가유전율, 그리고 Z_p 는 동일한 한 전송선에 매체가 공기로 가득 찬 상태의 임피던스로 정의된다(Krauss, 1984). 특성임피던스는 전송선의 고유의 성질이다. 서로 다른 임피던스를 가진 전송선의 경우, 전파의 반사와 전송은 그 전송선의 경계면에서 발생할 수 있다.

전파상수는 전송선의 내부에서 파의 속도와 감쇠를 제어하는 또 다른 고유의 성질이며, 이것은 절연 재료의 유전율에 의한 함수이고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} = \alpha + j\beta \quad (2.72)$$

여기서, c 는 자유공간에서 전자기파의 속도, α 와 β 는 각각 전파상수의 실수부와 허수부이며, 이는 각각 외적 전자기장으로부터 얼마나 많은 에너지가 재료에 축적되는지와 감쇠하는지를 나타낸다.

TDR 파형은 다중반사 및 분산의 결과이며, 흙은 수분 함량, 전도성, 미네랄 함량, 밀도, 그리고 화학성분이 서로 다르기 때문에 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 성질 때문에 TDR 파형을 분석하여 흙의 특성을 결정하는데 사용할 수 있다(O'Conner 등, 1999).

2.5.2 Purdue TDR 방법(ASTM D 6780-05)

본 절에서는 ASTM 국제 규격에 명시되어 있는 Purdue TDR 시스템을 이용한 흙의 특성 방법은 다음과 같다.

Purdue TDR 시스템은 다른 절연재료를 이용한 다중 전송선을 이용한 시스템이

다. TDR 전송선은 신호 발생기와 연결된 1.8m의 동축케이블, 동축헤드(coaxial head), 그리고 프로브로 구성되어있다(그림 2.15).

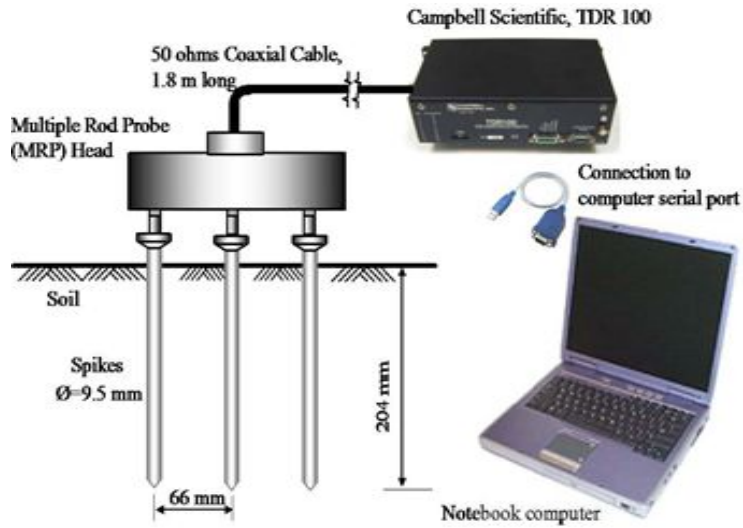


그림 2.15 Purdue TDR 시스템(Yu 등, 2004)

TDR 장치에서 프로브를 통해 전달되는 전파속도(v)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$v = \frac{2L_p}{t} = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.73)$$

여기서, L_p : 흙 속에 관입된 프로브의 길이

c_o : 진공상태에서의 전자기파의 속도($2.998 \times 10^8 m/s$)

t : 전파의 이동시간

식 (2.73)을 정리하면 전파의 이동시간은 다음과 같이 정의된다.

$$t = \frac{2L_p \sqrt{\epsilon_r}}{c_o} \quad (2.74)$$

Fellner-Feldegg(1969)는 상대유전율이 주파수가 약 1GHz일 때 전달시간 분석을 통해 정의될 수 있다고 하였고, Topp 등(1980)은 상대유전율을 걸보기 유전상수 (K_a)라고 정의 내렸고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_r = K_a = \left(\frac{c_o t}{2L_p} \right)^2 \quad (2.75)$$

전형적인 TDR 신호는 그림 2.14에서와 같이 출력되며, Barker 등(1989)은 $c_o t$ 를 걸보기 길이(L_a)라고 표현할 수 있다고 하였고, 이에 따라 유전상수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L_p} \right)^2 \quad (2.76)$$

여기서, L_a 는 TDR 파형을 통해 얻을 수 있는 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점 사이의 걸보기 길이이다(그림 2.14).

Drnevich 등(2001b)은 TDR을 이용하여 측정된 흙의 유전상수는 측정하는 흙의 온도의 영향을 받고, 사질토의 경우 온도가 증가함에 따라 유전상수가 감소하고, 점성토의 경우 온도가 증가함에 따라 유전상수가 증가한다고 하여 4°C와 40°C의 범위 사이에서 온도보정함수(temperature correction function, TFC)를 다음과 같이 제안하였다.

$$TCF_{\text{사질토}} = 0.97 + 0.0015T \quad (2.77)$$

$$TCF_{\text{점성토}} = 1.10 - 0.005T \quad (2.78)$$

여기서, T 는 실험 중 측정된 온도이며, 측정된 유전상수를 온도효과를 고려하여 보정하면 다음과 같이 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{a,20^{\circ}\text{C}} = K_{a,T^{\circ}\text{C}} \times TCF \quad (2.79)$$

Giese 등(1975)은 TDR 전압에서 전도성의 영향을 조사하였고, Clarkson 등(1977)은 흙의 총 전기전도도(EC_b)를 다음과 같이 정의하였다.

$$EC_b = \left(\frac{\epsilon_o c_o}{L_p} \right) \left(\frac{Z_p}{Z_l} \right) \left(\frac{1 - \rho(\infty)}{1 + \rho(\infty)} \right) \quad (2.80)$$

여기서, Z_p 는 동축케이블의 임피던스이고, 다음과 같이 표현할 수 있다(Ramo 등, 1994).

$$Z_p = \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi\epsilon_o c_o} \quad (2.81)$$

여기서, d_o 와 d_i 는 각각 외부 및 내부 도체의 직경이며, Kraus(1992)는 반사계수 ($\rho(t)$)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\rho(t) = \frac{V(t) - V_{in}}{V_{in}} \quad (2.82)$$

그리고 총전기전도도(EC_b)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$EC_b = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{V_f} - 1 \right) \quad (2.83)$$

여기서, V_s 는 스텝펄스의 두 배 크기의 전압이며, V_f 는 장주기 전압레벨이다(그림 2.16).

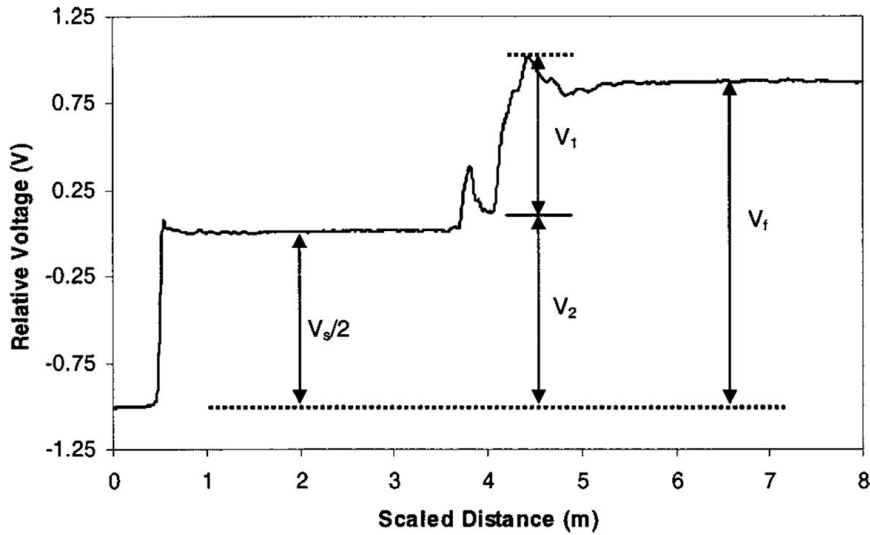


그림 2.16 전기전도도 산정을 위한 TDR 파형(Yu 등, 2004)

그리고 C 는 프로브의 구조에 관련된 상수이며, 다음과 같이 정의할 수 있다 (Giese 등, 1975; Yu 등, 2004). 여기서, R_s 는 TDR 신호 생성기의 내부저항(보통 50Ω)이다.

$$C = \frac{2\pi R_s L_p}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} \quad (2.84)$$

Siddiqui 등(1995)은 기존의 함수비 보정식들이 체적함수비로 표현되고, 밀도효

과를 포함하고 있어 복잡하고 현장에서 바로 적용하기 어렵다고 하여 증량함수비로 이루어진 식 (2.85)를 제안하였고, 이는 다양한 흙에 대하여 만족스러운 결과를 보여주었다(Sallam 등, 2004).

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (2.85)$$

여기서, ρ_w 는 물의 단위중량, ρ_d 는 흙의 건조단위중량, w 는 증량함수비, 그리고 a 와 b 는 흙의 특성상수 값이다.

또한 Yu 등(2004)은 기존의 전기전도도에 관한 식이 단위중량에 대한 고려가 없으며 체적함수비로 표현되어 있어 지반공학적으로 응용하는데 부족하고, 흙의 총 전기전도도의 지배요인은 간극유체의 전기전도도이기 때문에 간극유체의 양이 흙의 총 전기전도도를 지배한다고 보고 식 (2.86)을 제안하였다.

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw \quad (2.86)$$

여기서, c 와 d 는 흙의 특성상수 값이며, 식 (2.85)와 식 (2.86)을 이용하여 흙의 특성상수 값을 산정하고, 측정된 유전상수와 총 전기전도도를 이용하여 식 (2.87)과 식 (2.88)과 같이 현장지반의 건조단위중량과 함수비를 계산할 수 있다(Yu 등, 2004).

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (2.87)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (2.88)$$

제 3 장 Flat TDR 시스템 개발

3.1 TDR 시스템 구성

본 연구에서는 TDR 프로브를 통해 전파된 펄스가 지반에 접촉된 프로브를 따라 다시 반사되어 오는 것을 계측하기 위해 그림 3.1과 같이 CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.(USA)에서 제작한 TDR 측정 시스템을 사용하였다.

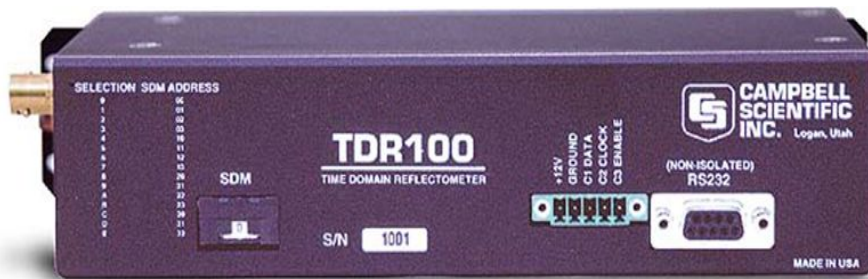


그림 3.1 TDR100 장비(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.)

TDR 측정 시스템을 살펴보면 그림 3.2와 같이 TDR 시스템에 전원을 공급하기 위한 12V 배터리, 탄성계수 예측을 위한 PC 오실로스코프, TDR 프로브에 신호를 보내 반사된 신호를 측정할 수 있는 TDR100으로 구성되어 있다. TDR100 측정 장비 내부에는 디스플레이 기능이 없어 PC와 연결하여 미국 Case Western Reserve Univ.의 Yu 교수가 제작한 TDR Seismic Testing System 1.3의 소프트웨어를 이용하여 TDR 파형을 분석하였다(그림 3.3). TDR Seismic Testing System 1.3은 RS-232통신으로 PC와 연결하며 TDR 시스템을 구동시키며 TDR 측정 장치에 펄스를 전파하고 반사 신호를 측정한다. 장비 보호와 휴대성을 위해 박스 형태로 케이스를 제작하였으며, 현장시험에 필요한 장비와 도구를 같이 운반하기 위해 캐리어를 제작하여 이동성과 편리성을 증대시켰다(그림 3.5). 표 3.1은 TDR 100에 대한 세부 사양을 보여주며, 그림 3.4는 소프트웨어로부터 측정된 TDR 파형을 보여주고 있다.



그림 3.2 TDR 측정시스템 내부 모습

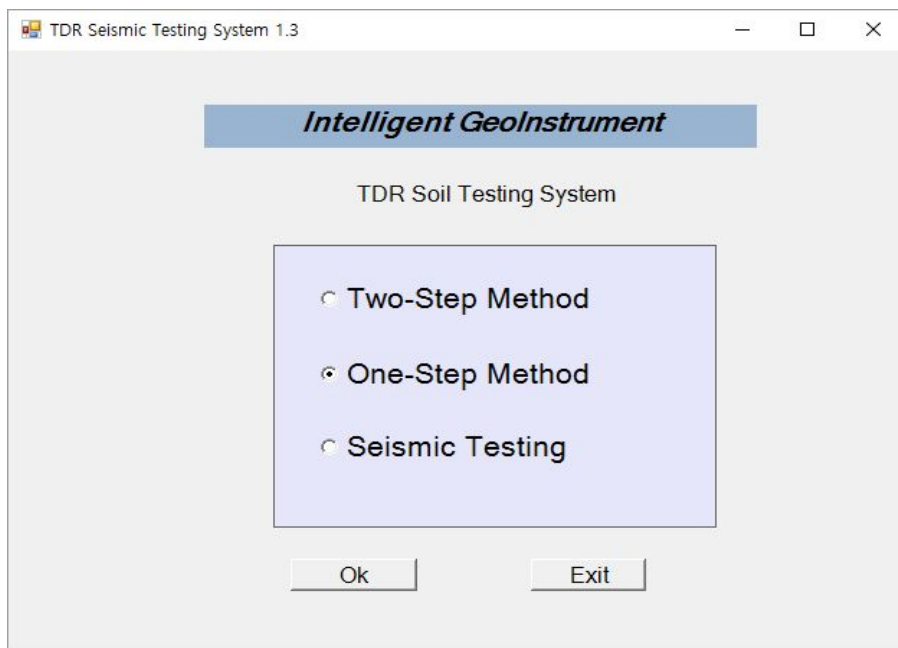


그림 3.3 TDR Seismic Testing System 1.3

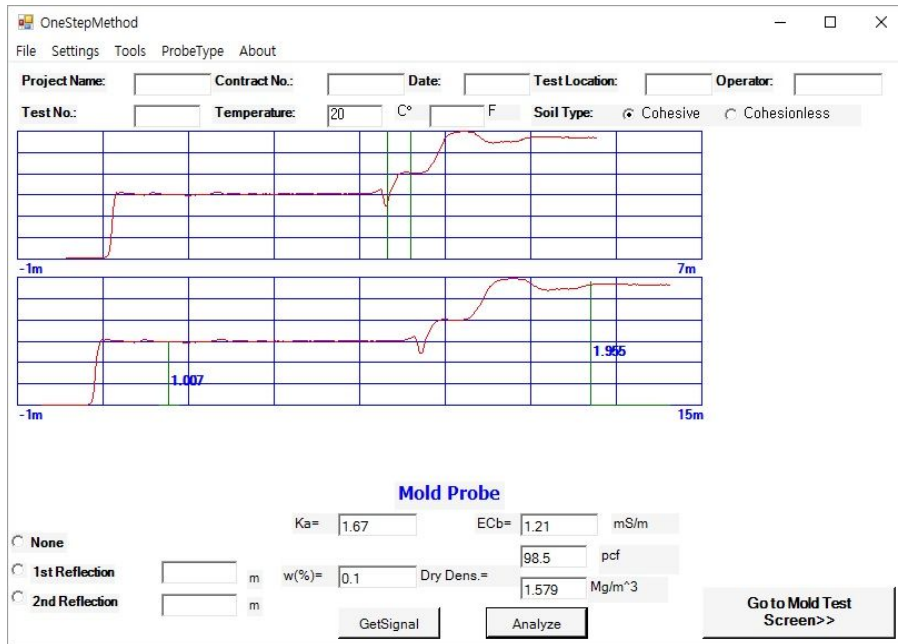


그림 3.4 소프트웨어로부터 측정된 TDR 파형

표 3.1 TDR 100 사양

TDR 100	Specifications
Pulse Generator Output	250mV into 50ohms
Output Impedance	50ohms \pm 1%
Time Response of Combined Pulse Generator and Sampling Circuit	\leq 300 picoseconds
Pulse Generator sberrations	\pm 5% within first 10 nanosec. \pm 0.5% after 10 nanosec.
Pulse Length	14 microseconds
Timing Resolution	12.2 picoseconds
Waveform Sampling	20 to 2048 waveform values over chosen length distance ($V_p = 1$) time (1 way travel)
Range	-2 to 2100 meters 0 to 7 microseconds
Resolution	1.8 millimeter 6.1 picoseconds
Waveform Averaging	1 to 128
Electrostatic Discharge Protection	Internal clamping
Power Supply	Unregulated 12volt (9.6V to 16V) 300milliamps maximum
Temperature Range	-40°C to 50°C
Dimensions	210mm×110mm×55mm
weight	700g



a. 케이스를 세웠을 때



b. 케이스를 눕혔을 때



c. 케이스를 열었을 때



d. 케이스의 내부모습

그림 3.5 TDR 측정시스템

3.2 TDR 프로브 제작

3.2.1 Purdue TDR의 프로브

기존의 Purdue TDR 시스템은 그림 3.6과 같이 본 연구에서 사용한 TDR100 장비를 사용하여 지반의 함수비와 건조단위중량을 측정한다. Purdue TDR 시스템의 Probe는 Multiple Rod Probe(MRP, 이하 봉형 프로브)를 사용하며, 이는 지반에 관입시켜 함수비와 건조단위중량을 측정한다. 본 연구에서는 기존의 Purdue TDR 시스템에서 사용하는 봉형 프로브에서 발생할 수 있는 문제점을 보완하여 신속하고 정확한 측정값을 도출하기 위해 Flat 프로브를 제작하였다.

기존의 TDR 시스템의 문제점은 첫 번째, 4개의 봉형 프로브를 측정하고자 하는 지반에 관입을 시켜야 한다. 현장에서의 다짐 관리를 하는 지반은 다짐이 대부분 완료된 상태이므로 매우 단단하고 입경이 큰 골재가 섞여 있어 프로브를 관입시키기에 다소 어려움이 있다. 두 번째로 봉형 프로브를 지반에 관입할 때 주변 지반의 교란의 문제점이 있다. 다짐이 완료된 상태의 지반에 봉형 프로브를 관입하므로 측정하고자 하는 부분에서 교란이 발생하고 측정이 끝난 뒤 후속처리가 필요하다.

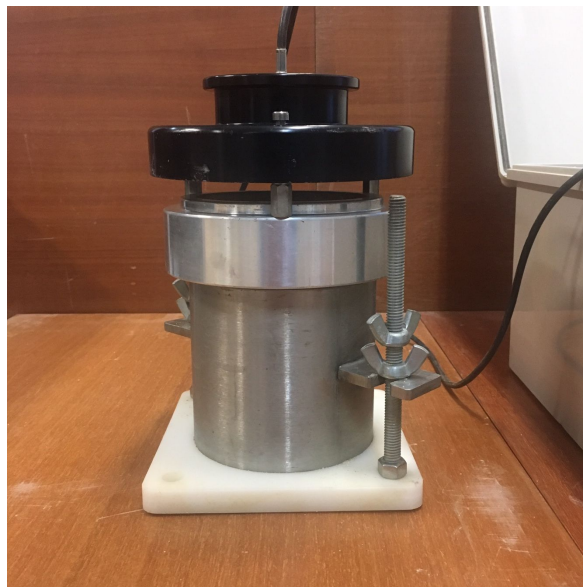


그림 3.6 Purdue TDR 측정

3.2.2 TDR 프로브 제작

기존의 Purdue TDR 시스템의 문제점을 보완하여 보다 신속하게 측정하기 위해 송민우 등(2016)과 같이 Flat 프로브를 제작하였다(그림 3.7).

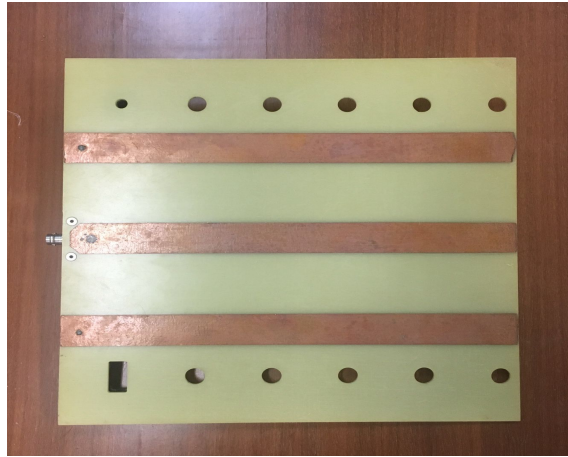


그림 3.7 Flat 프로브

본 연구에서 제작한 Flat 프로브의 크기는 30.5 * 30.5 cm의 폴리머 재질의 판에 폭 2.5cm의 구리 띠를 부착하였다. 구리 띠 사이의 간격은 5cm로 총 세 개를 부착하였으며, 기존 봉형 프로브와 달리 지반 표면에 접촉시켜 측정하는데 이때 매질 차이에 의한 전파 간섭 문제를 해결하기 위해서 폴리머 재질에 구리 띠를 부착하였다. 또한 그림 3.8과 같이 프로브의 연결부는 기존 봉형 프로브와 호환이 가능하도록 동일하게 제작하였다.



그림 3.8 프로브 연결부

3.3 개발한 Flat 프로브의 영향범위

3.3.1 TDR 프로브의 영향범위의 이론

Ferre 등(1998)은 TDR 프로브의 영향범위를 수치적으로 결정하기 위한 공간 가중함수에 기초를 둔 방법을 제시하였다. 이는 가장 높은 가중치에 대한 작은 요소의 가중함수와 면적의 곱의 합의 비율로 계산된다. 예를 들어 전체 계산 영역에 대한 합이 90%에 가까워질 때의 영역이 측정 범위를 나타낸다. 이러한 비율의 계산은 식 (3.1)과 같이 계산할 수 있다(Knight 등, 1997).

$$f = \frac{100 \times \sum w_i A_i}{\iint_{\Omega} w_i dA} \quad (3.1)$$

여기서,
 w_i : i 요소의 가중 함수
 A_i : i 요소의 면적
 f : 총 응답 비율

또한 2차원의 공간 함수는 식 (3.2)와 같이 정의될 수 있다.

$$w(x,y) = \frac{|E(x,y)|^2}{\iint_{\Omega} |E_o(x,y)|^2 dA} \quad (3.2)$$

여기서,
 $w(x,y)$: 공간 가중 함수
 $E(x,y)$: 전계강도 함수
 $E_o(x,y)$: 균질한 유전상수에 대한 전계강도 함수

이러한 공간 가중 함수는 전기적 에너지 밀도를 결정할 수 있고, 이것은 영향범위요소 해석 프로그램을 이용하여 결정할 수 있다.

공간 가중 함수에서 전체 영역은 프로브 응답에 기여하고, 프로브의 측정 범위를 산출하기 위하여 총 응답 비율을 선택하여야 한다. Ferre 등(1998)의 연구에서 50%, 70%, 그리고 90%의 응답 영역을 비교하였고, 그림 3.9는 코팅된 프로브에 대한 계산된 영역을 보여준다.

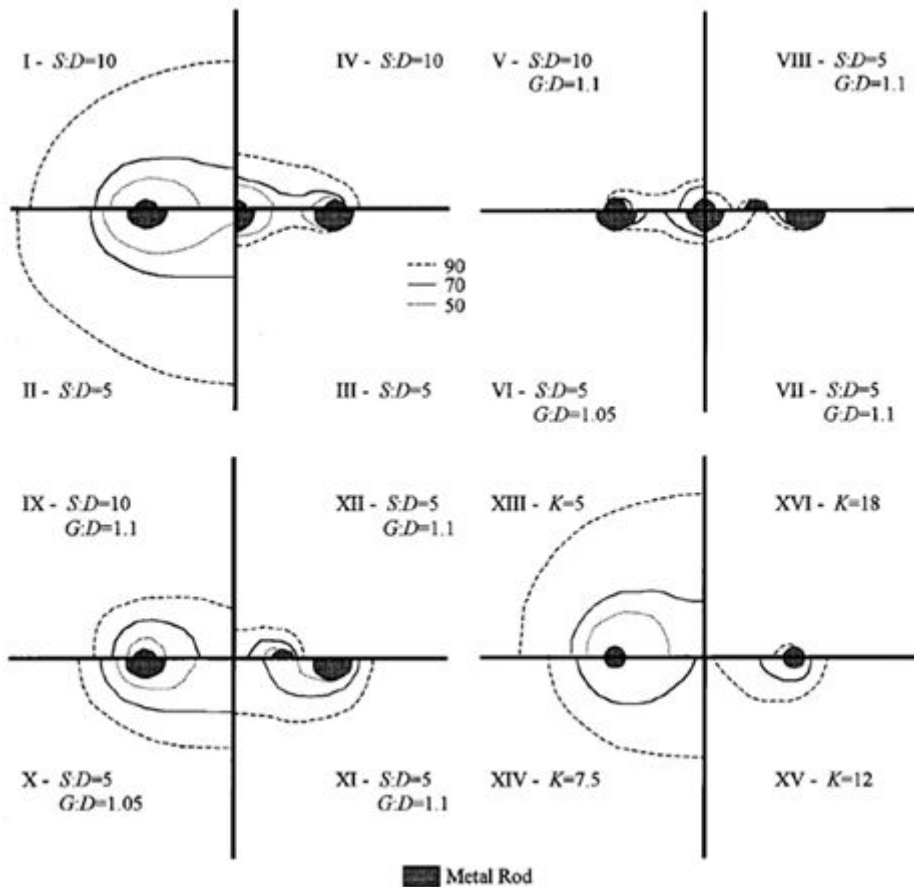


그림 3.9 응답영역 해석(Ferre 등, 1998)

3.3.2 Flat 프로브의 영향범위

본 연구에서는 Flat 프로브를 이용한 TDR 시스템의 영향범위를 영향범위 유한요소 해석을 통해 분석하였다. 기존 연구에서 진행된 영향범위 유한요소해석에서는 유전상수를 입력 변수로 하여 영향범위를 확인하였으며, Flat 프로브의 아래 방향으로 약 5cm로 산출하였다(송민우, 2016).

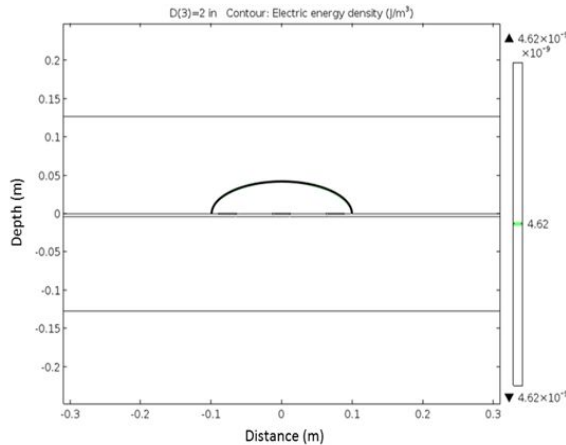


그림 3.10 영향범위 유한요소해석 결과(송민우, 2016)

3.3.3 영향범위에 대한 유한요소해석

본 연구에서는 투자율과 전기전도도를 변화시켜 영향범위를 분석하였으며, 유한요소 해석 프로그램 Abaqus 6.14의 Electromagnetic Model type을 이용하여 Flat TDR 시스템의 영향범위를 분석하였다. TDR 100의 출력 압력은 250mV이고 50ohms의 저항을 가지며, 전류는 5mA이다.

2장에 기술한 이론을 바탕으로 구리는 반자성체이므로 구리의 상대 투자율은 1을 사용하였고, 각 지반마다 특성이 다르므로 지반의 투자율을 1, 0.9, 0.8 세 개의 case로 분석하였다. 각 지반의 투자율마다 지반의 전기전도도를 0.12, 0.125, 0.13, 0.135, 0.14 다섯 가지로 0.005씩 증가시켜가며 분석하였고, 이 전기전도도의 값은 실제 Flat TDR 시스템으로 측정하였을 때 가장 대표적으로 나타나는 전기전도도 값을 사용하였다. 추

가적으로 지반의 단위중량, 유전율을 변화시켜가며 분석을 해보았으나 자기장의 값과 영향범위는 변화가 없어 투자율과 전기전도도를 변화시켜 분석하였다. 표 3.2는 고정된 물성치이며 표 3.3은 각 투자율별 지반의 물성치이다.

표 3.2 고정된 물성치

	단위중량 (g/cm^3)	온도(K)	유전율	전기전도도 (ms/m)
구리	8.92	293	.	580000
지반	1.8	293	5	.

표 3.3 각 투자율별 지반의 물성치

투자율	전기전도도 (ms/m)
1	1.2, 1.25, 1.3, 1.35, 1.4
0.9	
0.8	

지반은 40cm * 100cm의 크기로 모델링 하였으며, 그림 3.11과 같이 지반 상부에 30cm의 구리 띠를 접촉시켰고, 요소의 크기는 1.5cm * 1.5cm로 분석하였다. 그림 3.12는 해석결과이며 그림 3.13 ~ 그림 3.15는 각 투자율과 전기전도도에 대한 지반의 깊이 따른 자기장의 세기를 나타낸 그래프이다.

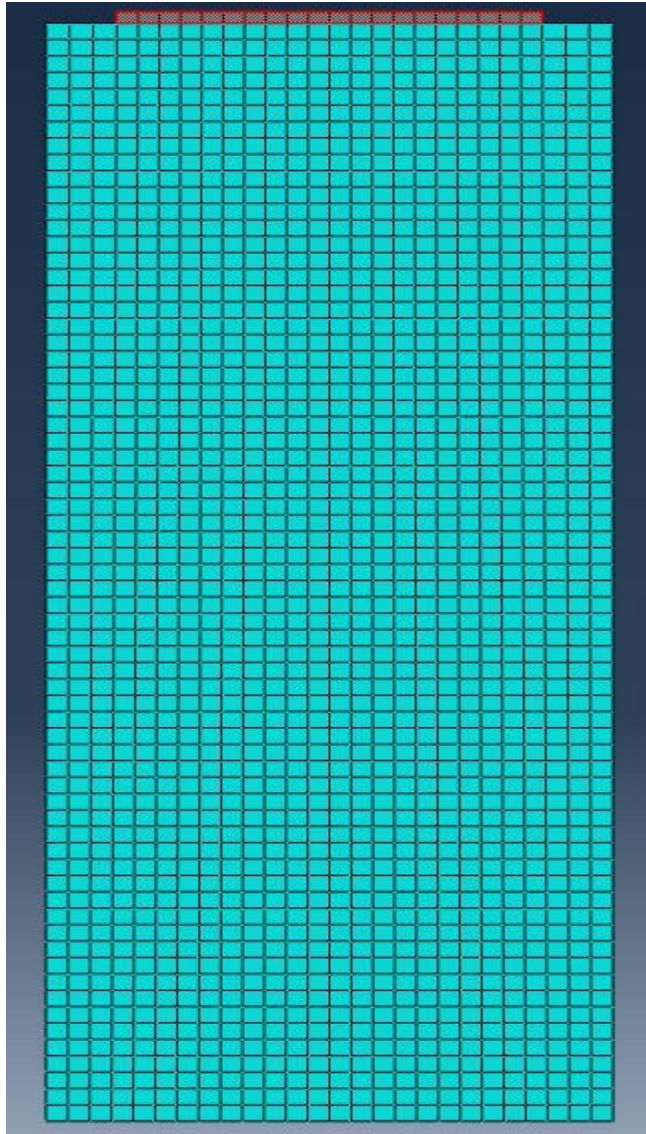


그림 3.11 지반 및 Flat 프로브 모델링

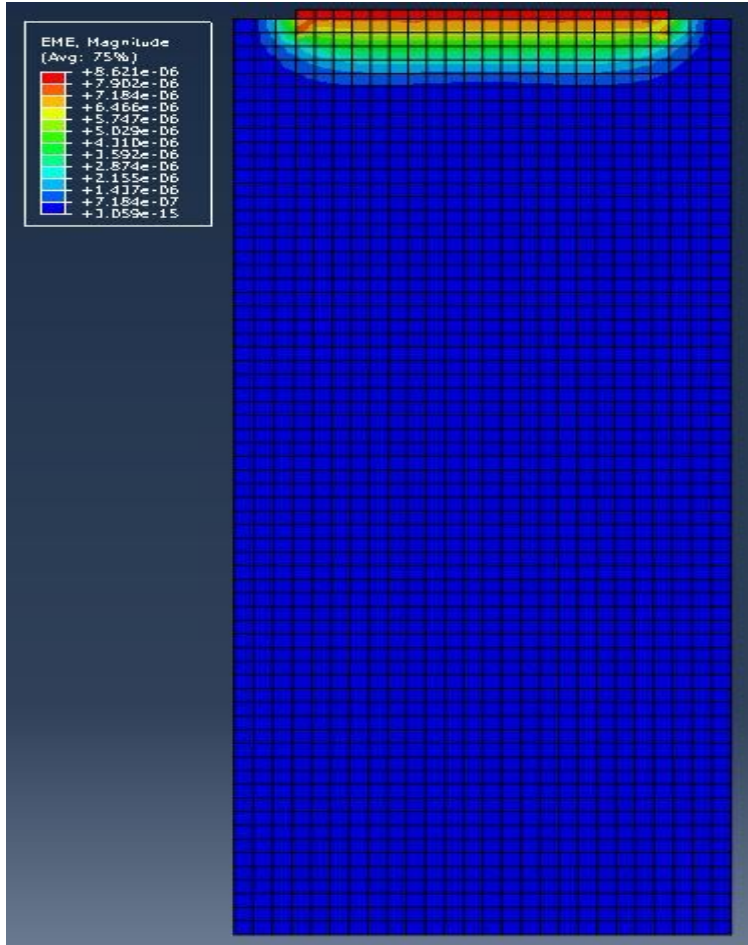


그림 3.12 해석 결과

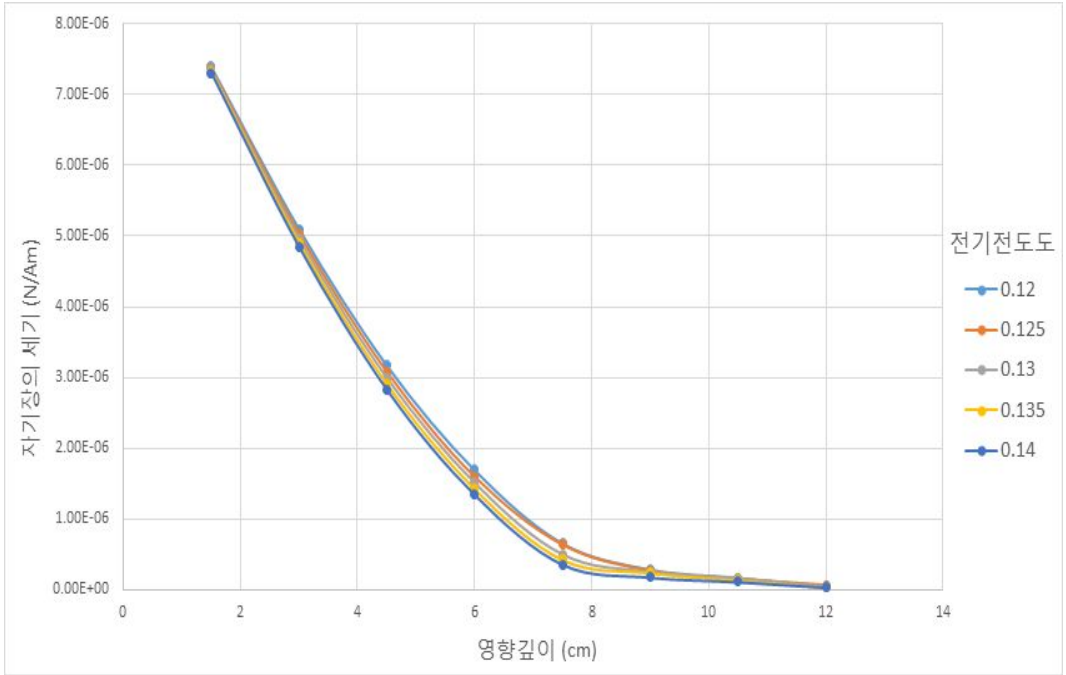


그림 3.13 투자율 = 1

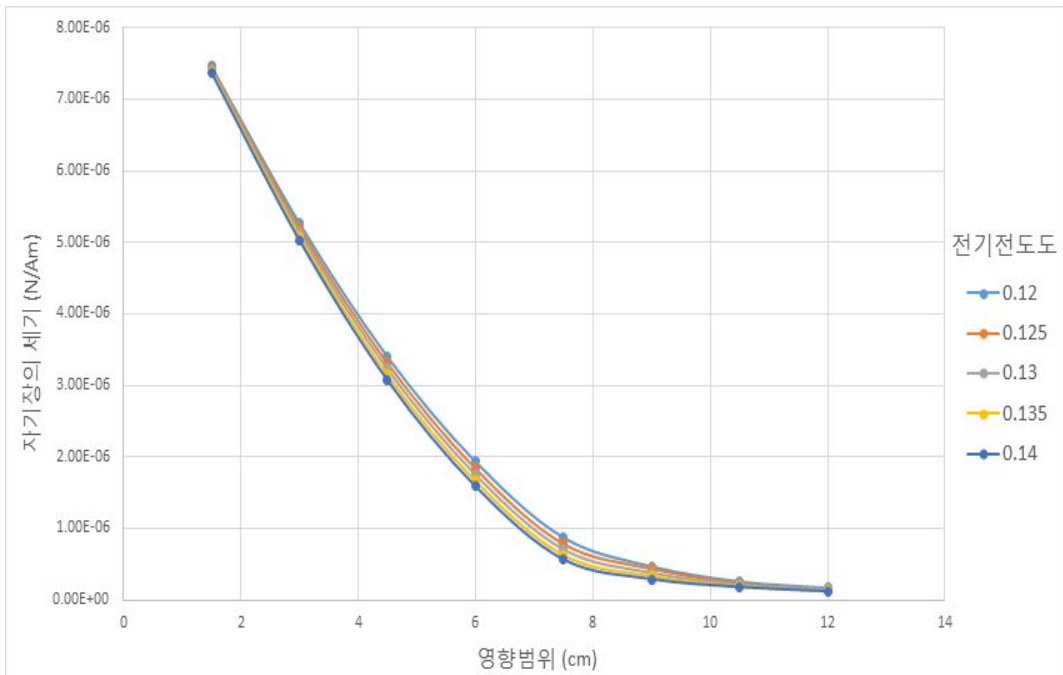


그림 3.14 투자율 = 0.9

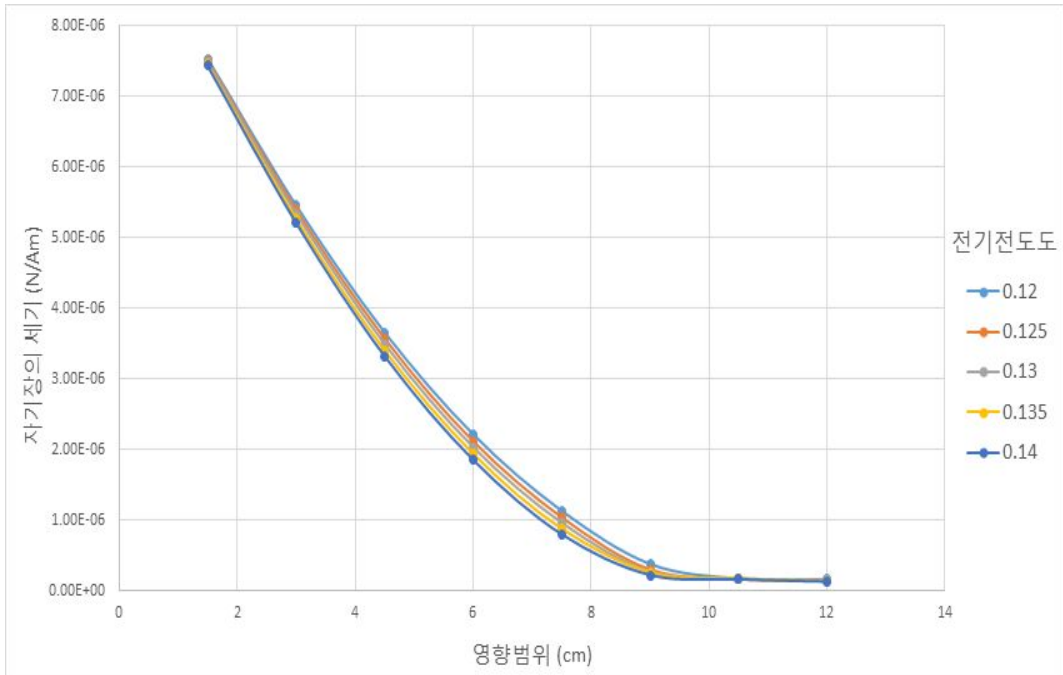


그림 3.15 투자율 = 0.8

유한요소해석 결과 투자율과 전기전도도가 증가할수록 자기장의 세기가 약해지는 경향을 보이며, 약해지는 정도는 매우 작아 그림 3.12와 같이 해석결과가 나타난다. 전류 밀도는 자기장의 세기와 전기전도도를 곱한 값이며, 투자율은 자기장의 세기에 반비례하고, 전류밀도는 250mV로 일정하다. 따라서 전기전도도와 투자율이 증가할수록 자기장의 세기는 감소한다.

유한요소해석을 통해 확인한 결과 TDR 시스템의 전파는 지반의 약 10cm까지 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 유전율은 함수비 및 건조단위중량을 도출하는데 중요한 요소이지만 전파의 영향범위에는 영향이 미치지 않는 것으로 확인되었다.

3.3.4 영향범위에 대한 파형분석

유한요소해석 결과를 바탕으로 TDR 시스템의 파형변화를 확인하고자 실내실험을 수행하였다. 경주현장시료와 A시료를 사용하였고, 표와 같이 각 시료에 대하여 두 가지 case의 조건으로 수행하였다.

표 3.1 실험시료의 물리적 특성

구 분	case 1	case 2
경주현장시료	경주현장시료 (10cm)	주문진 표준사 + 경주현장시료 (5cm + 5cm)
A 시료	A 시료 (10cm)	주문진 표준사 + A 시료 (5cm + 5cm)

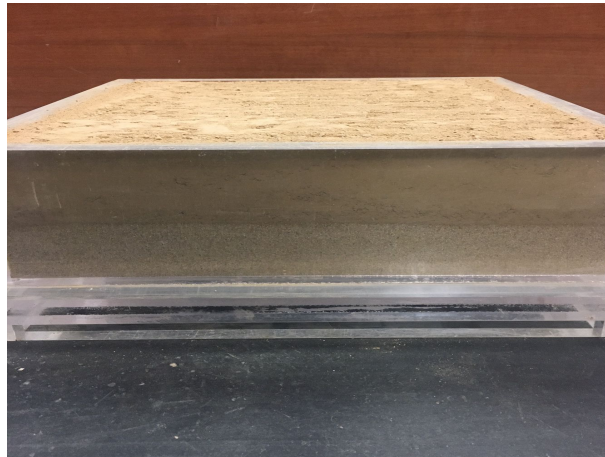
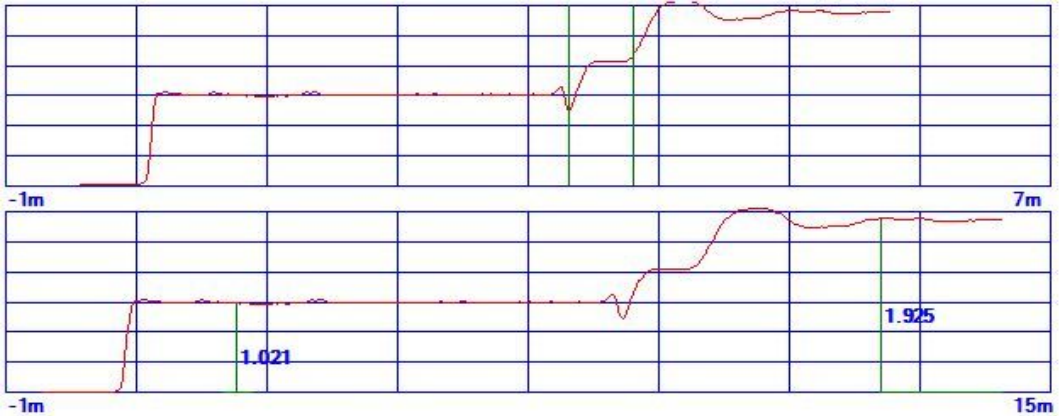
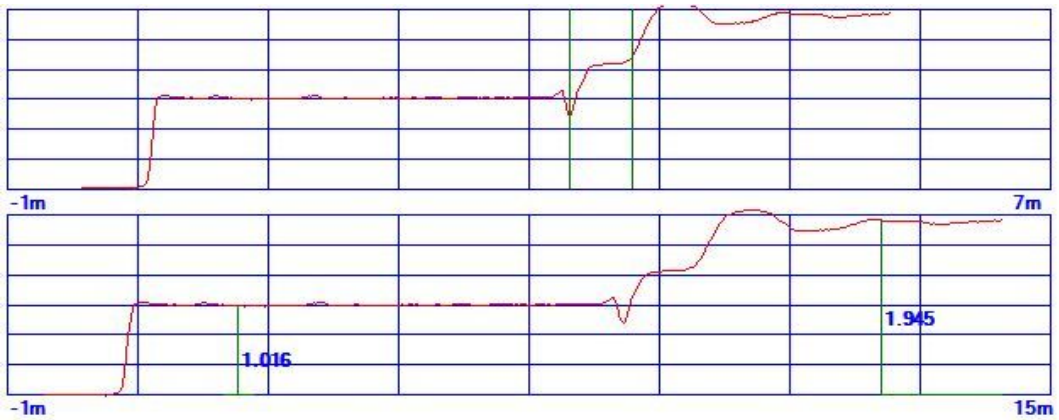


그림 3.16 주문진 표준사와 현장시료 (case 2)

각 시료를 높이 10cm몰드에 채워 파형을 측정한 뒤 그림 3.16과 같이 주문진 표준사를 사용하여 5cm 높이까지 주문진 표준사를 포설한 후 각각의 시료 5cm를 포설하고 파형을 측정하여 case 1의 파형과 case 2의 파형을 비교하였다. 그림 3.17 ~ 그림 3.18은 각각의 파형모습이다.



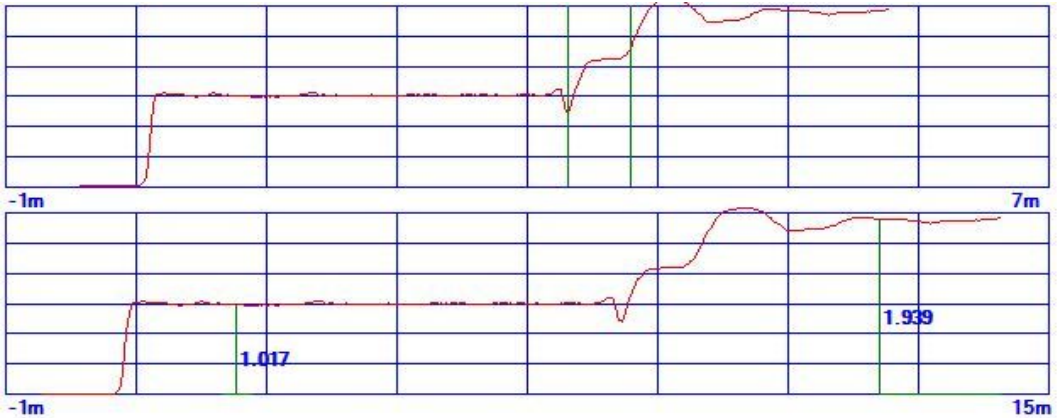
a. 순수 경주현장시료



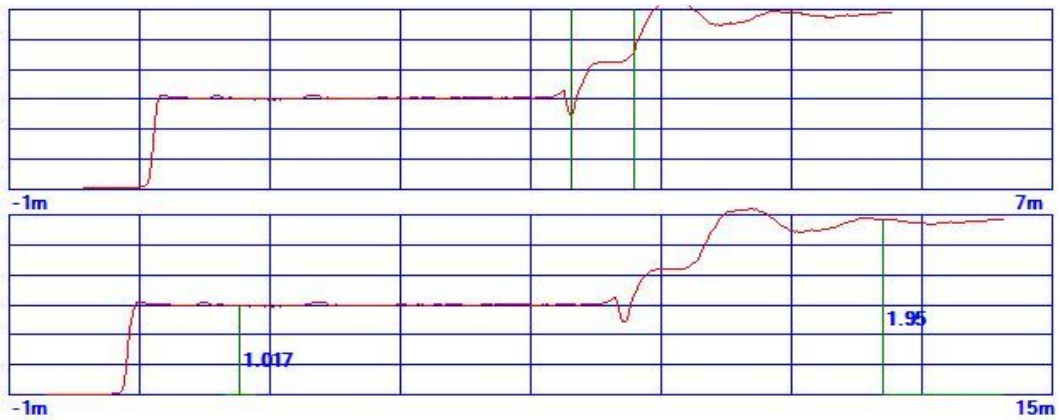
b. 주문진표준사와 경주현장시료

그림 3.17 경주 현장 시료의 파형

그림 3.17에서 a와 같이 경주현장시료의 장주기전압레벨은 1.925V이고, 주문진표준사와 경주현장시료의 장주기전압레벨은 1.945V로 0.02V의 차이를 보인다.



a. 순수 A 현장 시료



b. 주문진 표준사와 A 현장 시료

그림 3.18 A 현장 시료의 파형

그림 3.18에서 a와 같이 A 시료의 장주기전압레벨은 1.939V이고, 주문진표준사와 A 시료의 장주기전압레벨은 1.95V로 0.011V의 차이를 보인다. 각각의 두 파형을 분석한 결과 장주기전압레벨이 평균 약 0.015V 정도의 차이를 보이며 TDR 시스템의 영향범위는 실내실험을 통해 정확히 분석하기는 어렵지만 약 10cm까지 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

제 4 장 실내 및 현장시험

4.1 Flat 프로브 보정 실험

개발한 Flat 프로브로 측정하였을 때 측정되는 장주기 전압 레벨의 보정을 위해 전기전도도 측정기로 측정한 실제 전기전도도 값과 Flat TDR 시스템으로 측정한 장주기 전압 레벨과의 관계를 도출하였다.

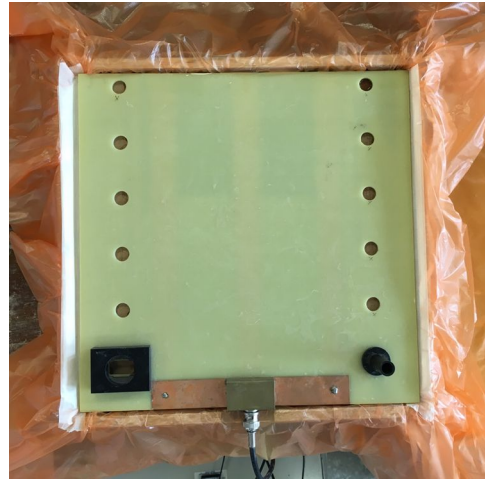
가. 실험 조건 및 절차

Flat 프로브 보정 실험은 증류수에 소금을 일정량 증가시켜가며 소금물의 농도를 변화시켜 측정하였다. 본 실험은 다음 순서에 따라 진행하였다.

- (1) 4L의 증류수를 담을 수 있는 몰드를 제작한다.
- (2) 증류수 4L를 몰드에 채운 뒤 전기전도도 측정기를 이용하여 순수 증류수의 전기전도도를 측정한다.
- (3) 소금물 농도를 100ppm을 만들기 위해 소금 0.4g을 첨가하여 잘 희석시킨다.
- (4) 전기전도도를 측정하고 Flat TDR 시스템을 이용하여 장주기 전압 레벨을 측정한다. (그림 4.2)
- (5) (3)~(4)의 절차를 소금물의 농도 1000ppm까지 100ppm씩 증가시키며 실험을 수행한다.
- (6) 총 3번의 실험을 수행한다.



(a) 전기전도도 측정



(b) 장주기전압레벨 측정

그림 4.1 전기전도도와 장주기 전압 레벨 측정

나. 실험 결과 및 관계식 도출

Flat 프로브 보정 실험 결과 그림 4.2와 같이 소금물의 농도가 증가할수록 전기전도도가 증가하는 것을 보이며 반대로 그림 4.3과 같이 소금물의 농도가 증가할수록 장주기 전압 레벨은 감소함을 알 수 있다.

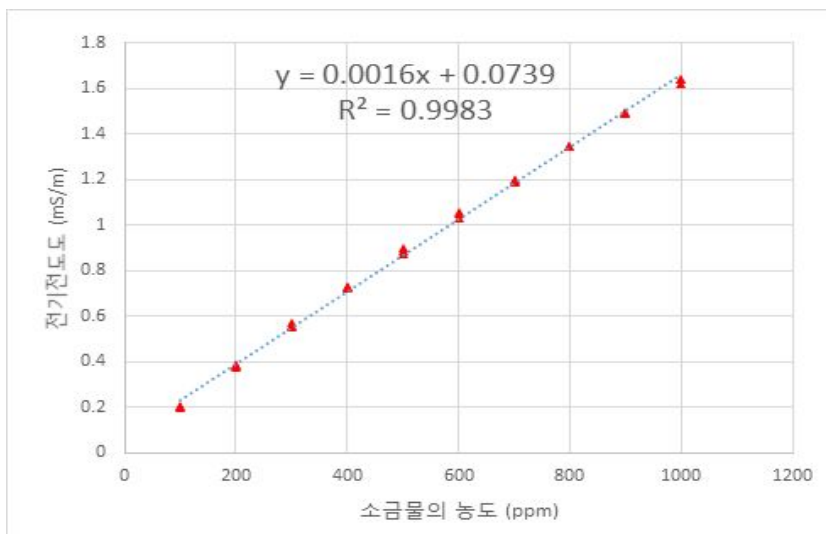


그림 4.2 소금물과 전기전도도의 관계

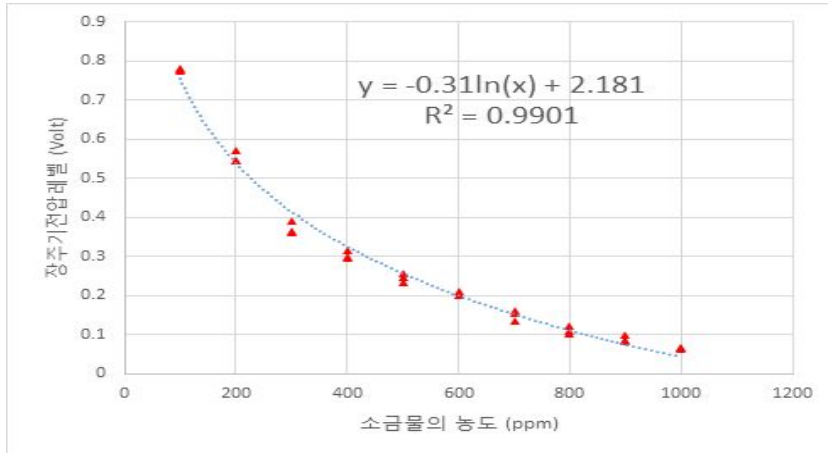


그림 4.3 소금물과 장주기 전압 레벨의 관계

소금물의 농도가 증가함에 따라 전기전도도는 증가하고, 장주기 전압 레벨은 감소하는 경향을 보이며 이를 전기전도도와 장주기 전압 레벨 사이의 관계를 그림 4.4와 같이 도출하였고, 식 (4.1)로 표현할 수 있다.

$$EC = 0.5921 \cdot \log(1/V_f) + 0.0387 \quad (4.1)$$

여기서,

EC : 전기전도도 (mS/m)

V_f : 장주기 전압 레벨 ($Volt$)

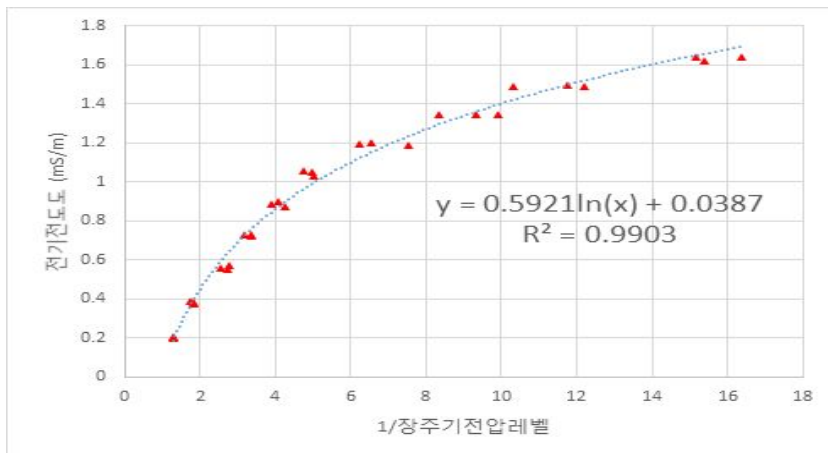


그림 4.4 전기전도도와 장주기 전압 레벨의 관계

4.2 실험 시료

본 연구에서는 각 시료에 따른 TDR 신호와 측정값에 대한 정밀도를 분석하기 위해 총 여섯 가지 시료를 사용하였으며, 사용한 시료는 주문진 표준사와 광주광역시 인근 지역 옥과, 섬진강에서 채취한 시료와, 원주 현장 시료, 경주 현장 시료, 실내 대형 시험에 사용된 A 시료를 사용하여 실험을 진행하였다.

사용된 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해서 흙의 비중 시험(KS F 2308), 액성·소성한계 시험(KS F 2303), 입도분포 시험(KS F 2312)을 수행하였으며, 주문진 표준사는 비점성토의 상대 밀도 시험(KS F 2345), 채취 시료는 다짐 시험(KS F 2312)을 수행하여 최대 건조단위중량을 산정하였다. 그림 4.5는 시료의 입도분포곡선을 나타내며, 표 4.1은 시료의 물리적 특성을 보여준다.

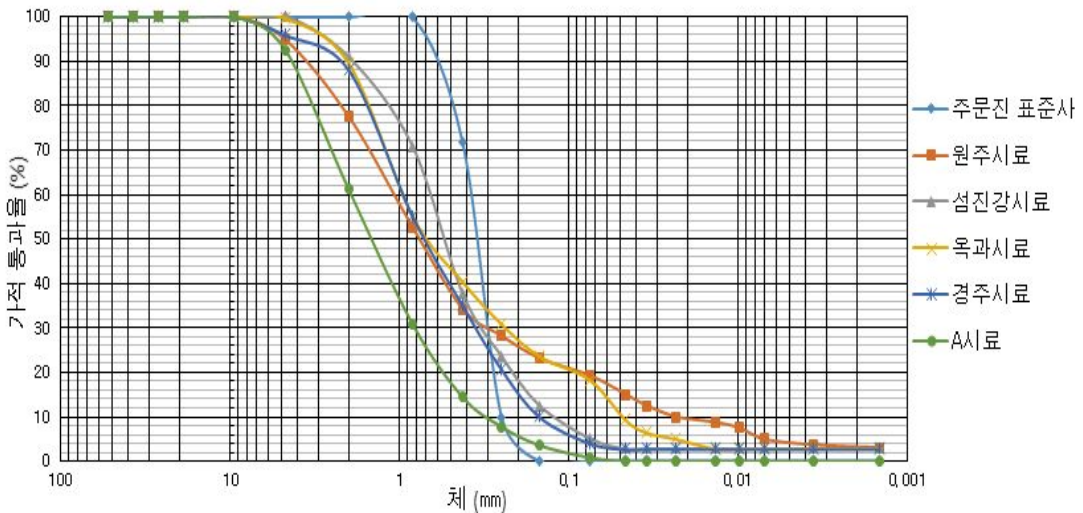


그림 4.5 실험 시료의 입도분포곡선

표 4.1 실험 시료의 물리적 특성

구 분	USCS	액성한계 (%)	소성한계 (%)	비중	P<#200 (%)	최적함수비 (%)	최대 건조밀도 (g/cm^3)
주문진 표준사	SP	N.P	N.P	2.65	0	-	1.568
원주시료	SM	N.P	N.P	2.58	20	10.9	1.669
섬진강시료	SP	N.P	N.P	2.64	5	8.4	1.592
옥과시료	SM	N.P	N.P	2.60	18	11.4	1.676
경주시료	SP	N.P	N.P	2.59	4	12.41	1.571
A시료	SW	N.P	N.P	2.63	1	11	2.062

4.3 실내검증실험

4.3.1 Flat TDR 실험

Flat TDR 시스템의 측정값에 대한 정밀도를 확인하기 위해 여섯 가지의 시료를 이용하여 함수비와 단위중량의 변화에 따른 TDR 파형을 측정하여, 각 시료에 따른 전기 전도도와 유전상수를 측정하였다. 함수비를 3% ~ 15%의 범위에서 3%씩 변화시켰으며 증류수를 사용하여 함수비를 조성하였다. 다짐은 A 다짐봉으로 3층 40회 다짐을 실시하였고 균일한 다짐을 위해 그림 4.7과 같은 철판을 제작하여 시료 위에 올려놓고 다짐봉으로 타격하였다.

실내실험을 위해 아크릴을 사용하여 33cm * 33cm * 10cm 크기의 몰드(그림 4.6)를 제작하였고, 실제 다짐 몰드와 유사하게 하기 위해 상단에 칼라를 삽입하여 다짐 후 트리머로 시료를 성형할 수 있게 제작하였다. 또한 기존의 트리머로 성형을 할 수 없어 몰드 크기에 맞게 철을 사용하여 트리머(그림 4.7)를 제작하였다. 여섯 가지 시료 25kg씩 24시간 노건조 시켜 준비하여 실험을 수행하였다. 실험절차는 다음과 같다.

- (1) 실험에 사용할 몰드의 무게 및 체적을 측정한다. 본 연구에서 아크릴로 제작한 몰드의 무게는 5790.5g, 체적은 10672.2cm^3 이다.
- (2) 노건조한 시료를 실험 조건에 맞추어 함수비를 조성하여 시료를 준비한다.
- (3) 제작한 몰드에 적당한 양의 시료를 넣고 철판을 올린 뒤 A 다짐봉으로 3층 40회 다짐을 한다.
- (4) 다짐 완료 후 몰드의 칼라를 제거한 뒤 트리머를 이용하여 시료를 제거한다. 시료의 성형이 완료되면 몰드와 함께 시료의 무게를 측정한다.
- (5) 다져진 시료 위에 Flat 프로브를 올려놓고 TDR 신호를 측정한다. 신호의 측정은 3회 실시한다.
- (6) TDR 신호 측정이 끝난 후 몰드의 중앙에서 시료를 채취하여 실측 함수비를 측정한다.
- (7) 함수비 측정까지 끝난 후 다시 함수비를 조성하여 3%씩 증가시키며 15%의 함수비까지 (3)~(6)을 반복하여 실시한다.

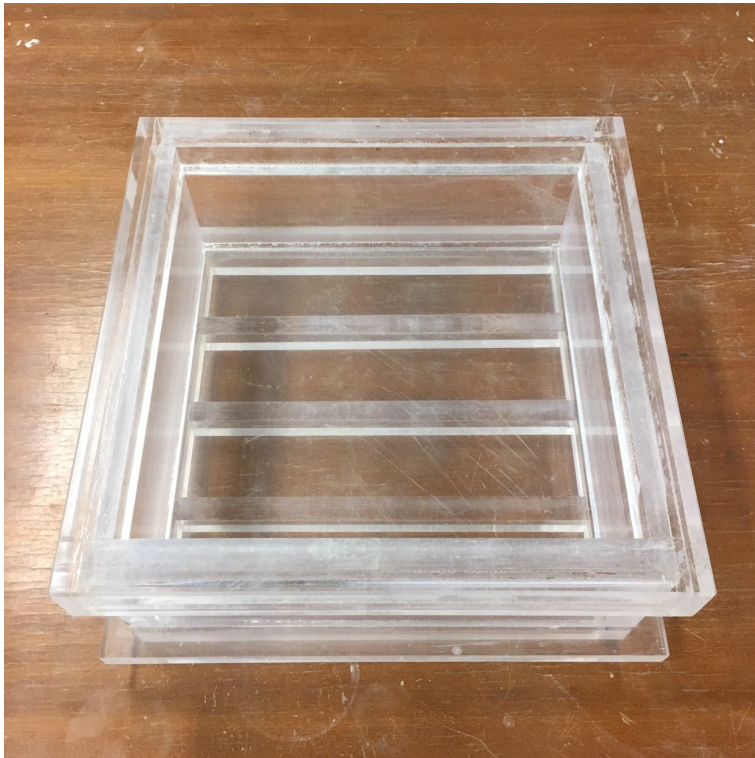


그림 4.6 제작한 몰드



그림 4.7 철판과 트리머

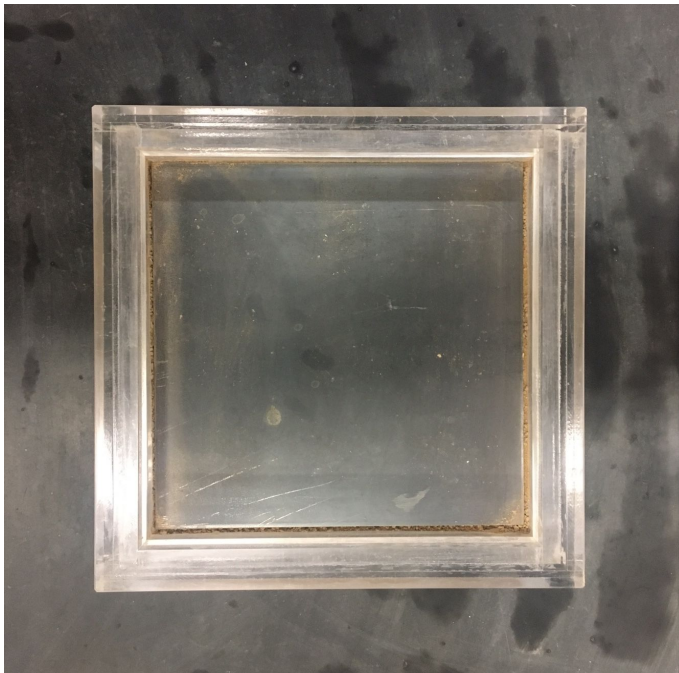


그림 4.8 다짐 작업

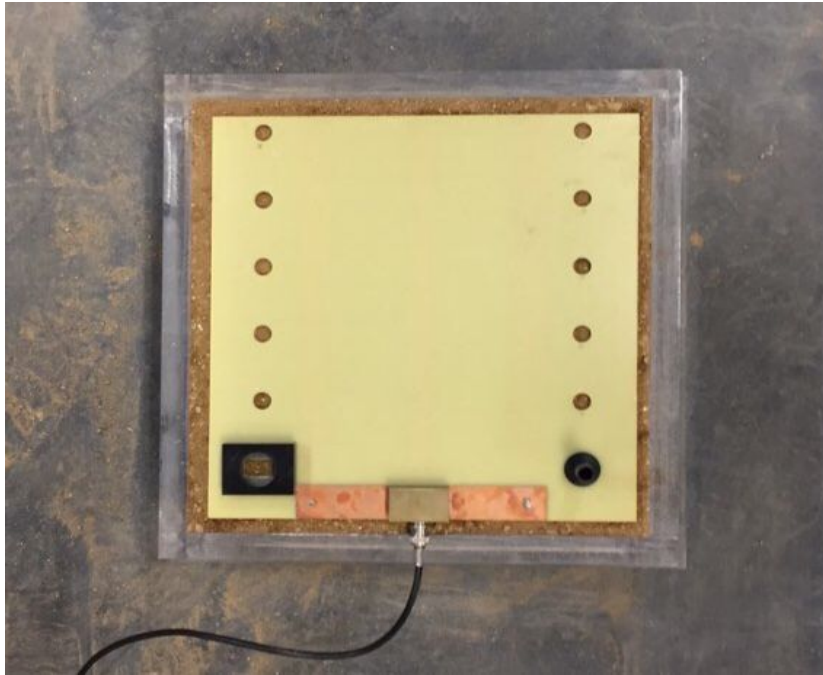


그림 4.9 TDR 신호 측정



a. 시료무게 측정



b. 함수비 측정

그림 4.10 시료무게 측정 및 함수비 측정

4.3.2 Purdue TDR과 Flat TDR의 비교실험

Flat TDR 시스템의 측정값에 대한 신뢰도를 얻기 위해 기존의 검증된 Purdue TDR 시스템과 비교실험을 수행하였다. 함수비 변화에 따른 유전상수와 전기전도도를 측정하여 함수비와 건조단위중량을 도출하였고, Purdue TDR 시스템의 측정값과 Flat TDR 시스템의 측정값을 비교하여 정밀도를 확인하였다. 함수비 조성은 증류수를 사용하여 3% ~ 15%까지 3%씩 증가시켰고, A 다짐봉을 사용하여 3층 50회 다짐을 실시하였으며, 각 함수비마다 3회씩 측정하였다. TDR 신호 측정은 Flat TDR 시스템을 먼저 측정 후 Purdue TDR 시스템으로 측정하였다. Purdue TDR 시스템은 봉형 프로브를 사용하여 시료에 교란이 발생하므로 보다 정확한 신호 측정을 위해 Flat TDR 시스템을 먼저 측정하였다.

본 연구에서는 Purdue TDR 시스템과 Flat TDR 시스템의 비교실험이 정확하고 신뢰성 향상을 위해 그림 4.11과 같이 아크릴 재질의 몰드(직경 50cm, 높이 23cm)를 제작하여 동일한 실험 조건을 조성하였다. 또한 균질한 다짐을 위해서 10kg의 원형 철판을 제작하였다. 심진강 시료와 원주 시료를 사용하였으며, 두 가지 시료 75kg씩 24시간 노건조 시켜 준비하여 실험을 수행하였다. 실험절차는 다음과 같다.

- (1) 실험에 사용할 몰드의 무게 및 체적을 측정한다. 본 연구에서 아크릴로 제작한 몰드의 무게는 6940.5g, 체적은 36191.14cm^3 이다.
- (2) 노건조한 시료를 실험 조건에 맞추어 함수비를 조성하여 시료를 준비한다.
- (3) 제작한 몰드에 적당한 양의 시료를 넣고 철판을 올린 뒤 A 다짐봉으로 3층 50회 다짐을 한다.
- (4) 다짐 완료 후 몰드의 칼라를 제거한 뒤 트리머를 이용하여 시료를 제거한다. 시료의 성형이 완료되면 몰드와 함께 시료의 무게를 측정한다.
- (5) 다져진 시료 위에 Flat 프로브를 올려놓고 TDR 신호를 측정한다. 신호의 측정은 3회 실시한다.
- (6) Flat TDR 시스템의 신호 측정이 끝난 뒤 봉형 프로브를 관입을 위한 가이드 플레이트를 시료 위에 고정시킨 후 내부 도체를 관입시켜 Purdue TDR 시스템의 신호를 측정한다. 신호의 측정은 3회 실시한다.
- (7) TDR 신호 측정이 끝난 후 몰드의 중앙에서 시료를 채취하여 실측 함수비를 측정

한다.

- (8) 함수비 측정까지 끝난 후 다시 함수비를 조성하여 3%씩 증가시키며 15%의 함수비까지 (3)~(7)을 반복하여 실시한다.



그림 4.11 제작한 몰드와 트리머

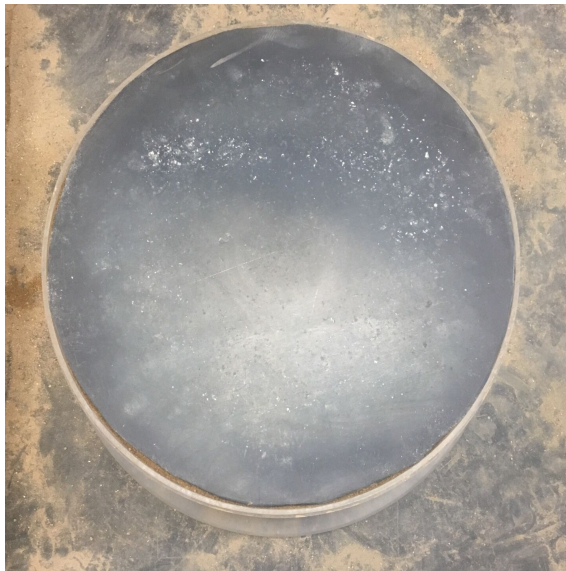


그림 4.12 원형철판을 깔고 다짐

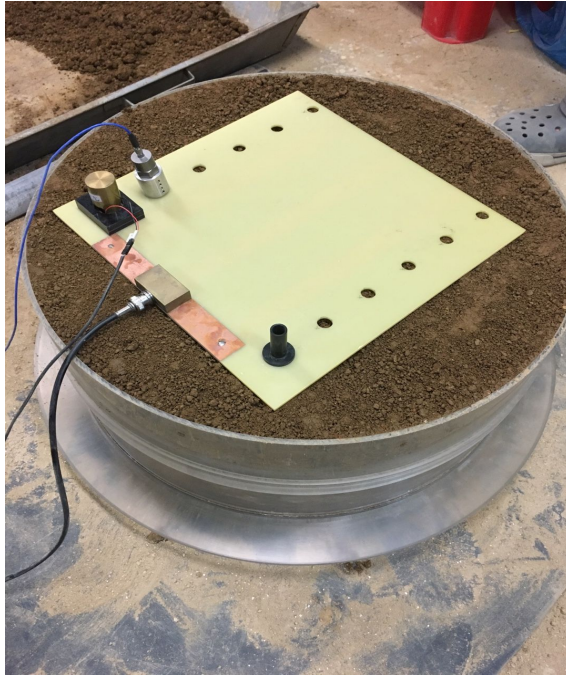


그림 4.13 Flat TDR 시스템 측정



그림 4.14 Purdue TDR 시스템 측정

4.4 현장시험

본 연구에서는 Flat TDR 시스템을 이용한 현장에서의 함수비와 건조단위중량을 측정하기 위해 실내 대형 시험에 사용한 A 시료와 경주 시료를 채취하여 실내실험을 수행하였고 각 시료의 유전상수와 총 전기전도도, 보정 계수를 도출하였다. 실내실험의 결과를 토대로 현장시험을 실시하였고, Flat TDR 시스템을 이용한 현장 지반의 함수비와 단위중량을 측정하여 현장 적용성을 검토하였다.

현장시험이 실시된 곳은 영남본부 울산~포항 4공구 화곡교~화천 터널 구간 경주 현장과 한국철도기술연구원에서 실시한 실내 대형 시험 현장(A 시료)이다. 두 현장 모두 다짐이 완료된 상태이다.

시험항목은 Flat TDR 시스템을 이용한 TDR 신호 측정과 현장 들밀도 시험, 실측 함수비를 측정하기 위해서 TDR 시스템의 신호를 측정한 위치에서 소량의 시료를 채취하였다. 각 현장에서 세 곳을 선정하여 현장시험을 수행하였으며 3번씩 측정하였다. 그림 4.15부터 그림 4.21까지는 현장시험의 과정을 나타내며 다음은 현장시험의 순서를 나타낸다.

- (1) 시험장소를 선정한다.
- (2) 선정한 시험장소 지반의 수평 확인 후 Flat 프로브를 지반 표면에 접촉시킨다.
- (3) TDR 신호를 측정하여 전기전도도와 장주기 전압 레벨을 측정한다.
- (4) 측정된 신호를 확인하여 안정적인 신호로 판단시 3회 반복하여 측정한다.
- (5) 시험 종료 후 들밀도 시험을 실시하고 소량의 시료를 채취한다.



a. 경주 현장



b. 실내 대형 현장

그림 4.15 Flat 프로브 접촉



그림 4.16 Flat TDR 시스템 신호 측정 (실내 대형)

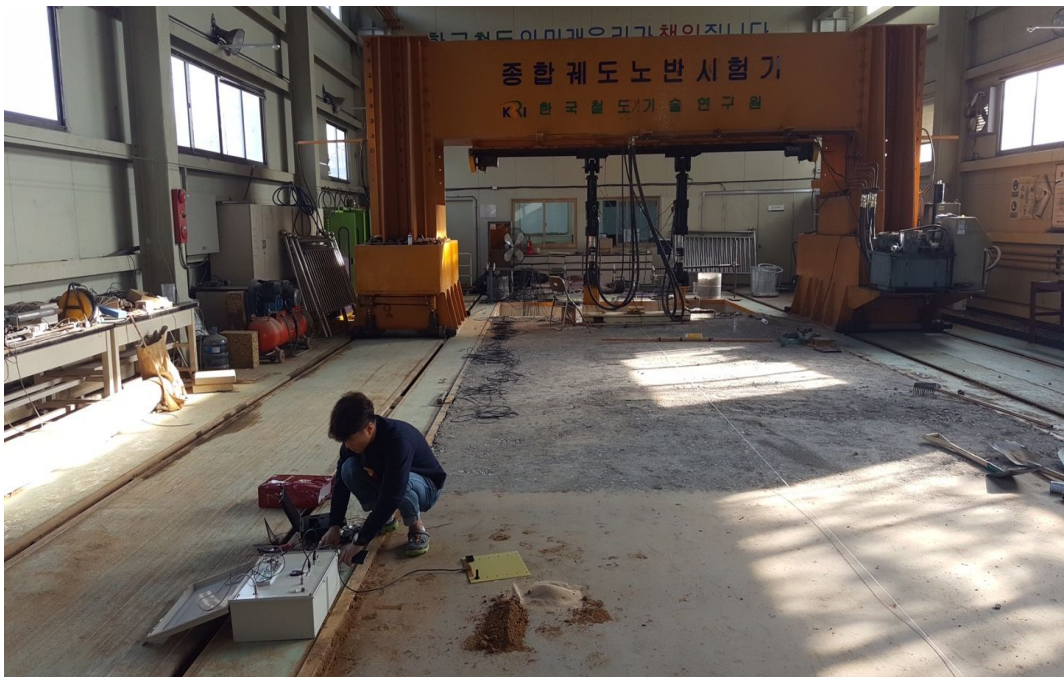


그림 4.17 TDR 신호 분석 (실내 대형)



그림 4.18 Flat TDR 시스템 신호측정 (경주 현장)



그림 4.19 TDR 신호 분석 (경주 현장)



그림 4.20 현장 들밀도 시험



그림 4.21 현장 함수비 측정

제 5 장 실내 및 현장시험 결과

5.1 시료별 특성상숫값 결정

여섯 가지의 시료를 통해 함수비와 단위중량의 변화에 따라 Flat TDR 시스템의 신호를 2장에서 기술한 이론을 바탕으로 분석하였고, 각 시료의 유전상수 및 전기전도도를 측정하여 보정 계수를 산출하였다. 함수비와 유전상수 및 전기전도도와 관계에 대해 선형회귀분석을 수행하였고, 각각의 시료에 대한 특성 상숫값 a, b, c, d의 관계는 그림 5.1 ~ 5.10과 같다.

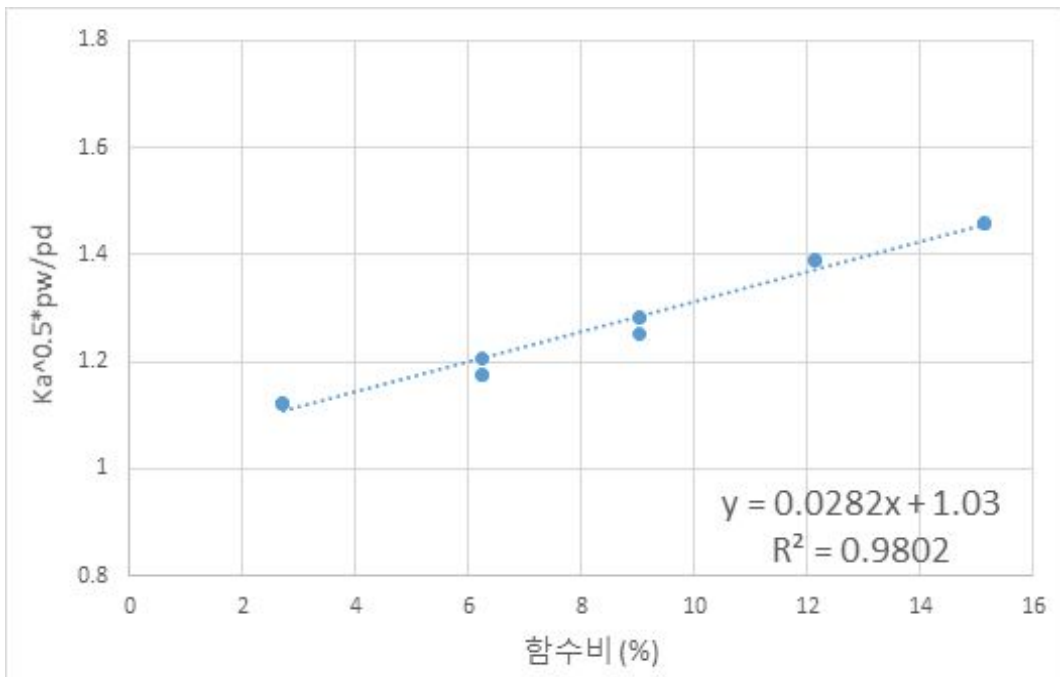


그림 5.1 보정계수 a & b (주문진 표준사)

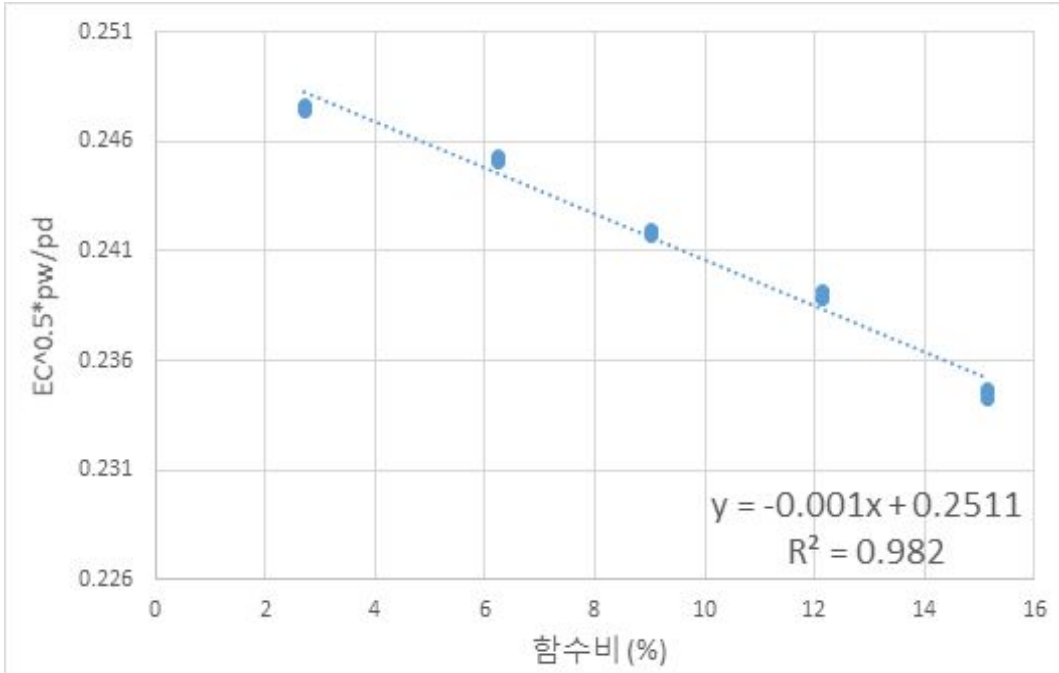


그림 5.2 보정계수 c & d (주문진 표준사)

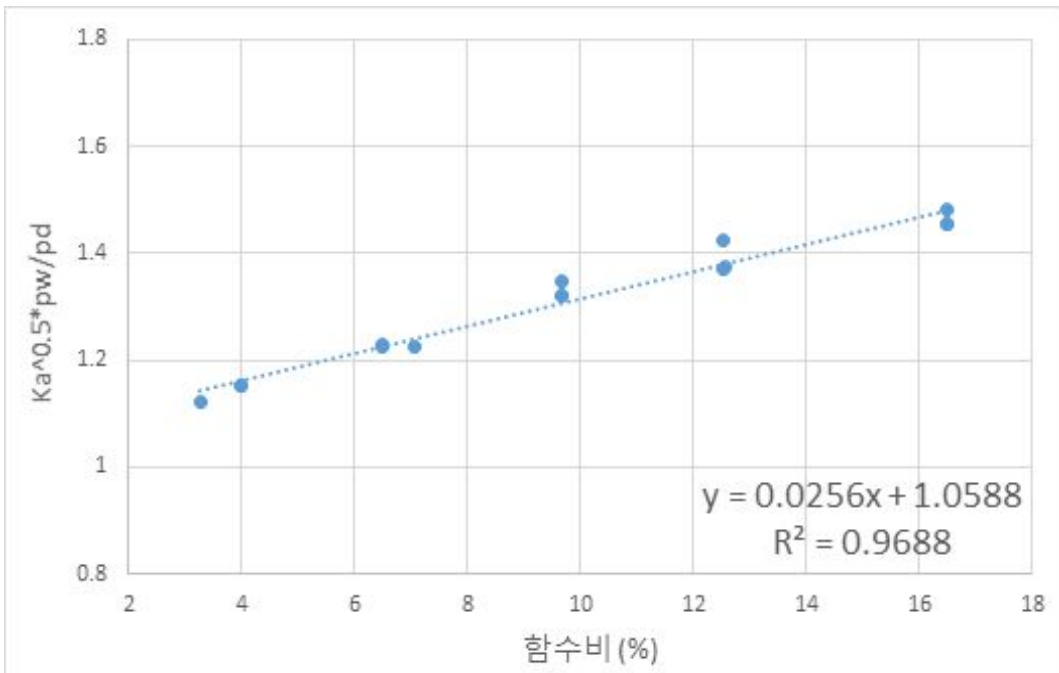


그림 5.3 보정계수 a & b (원주 시료)

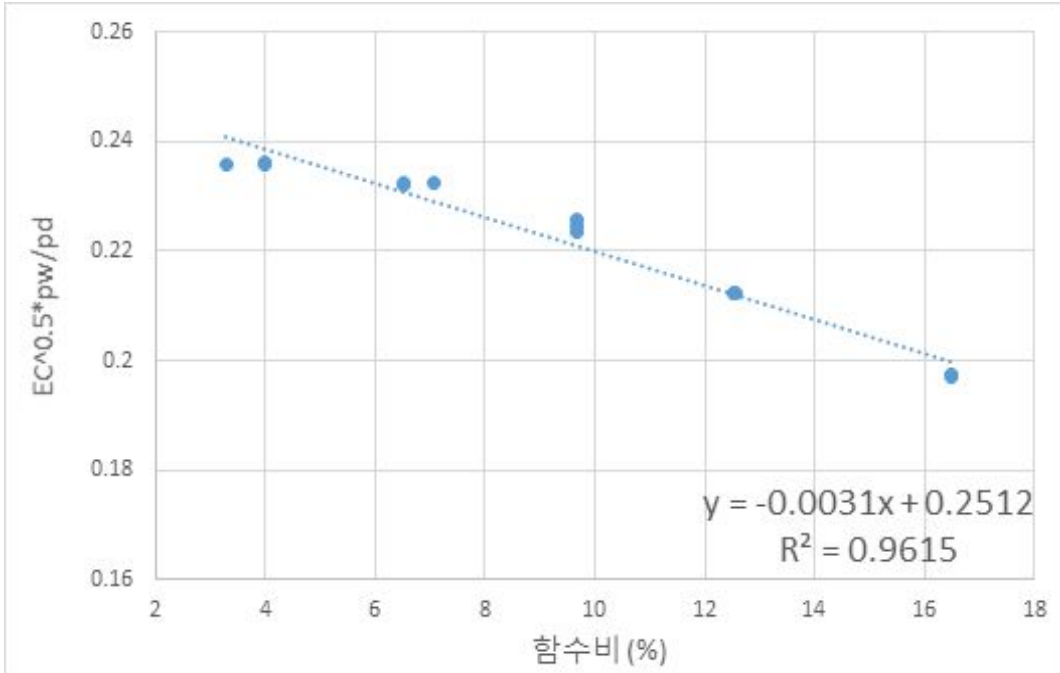


그림 5.4 보정계수 c & d (원주 시료)

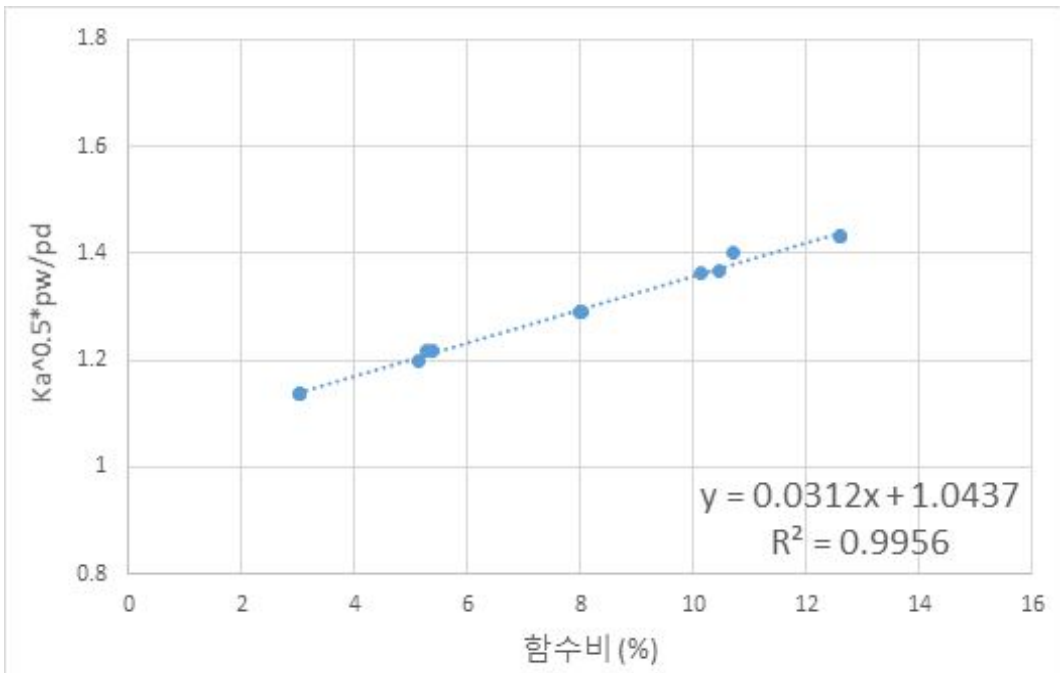


그림 5.5 보정계수 a & b (섬진강 시료)

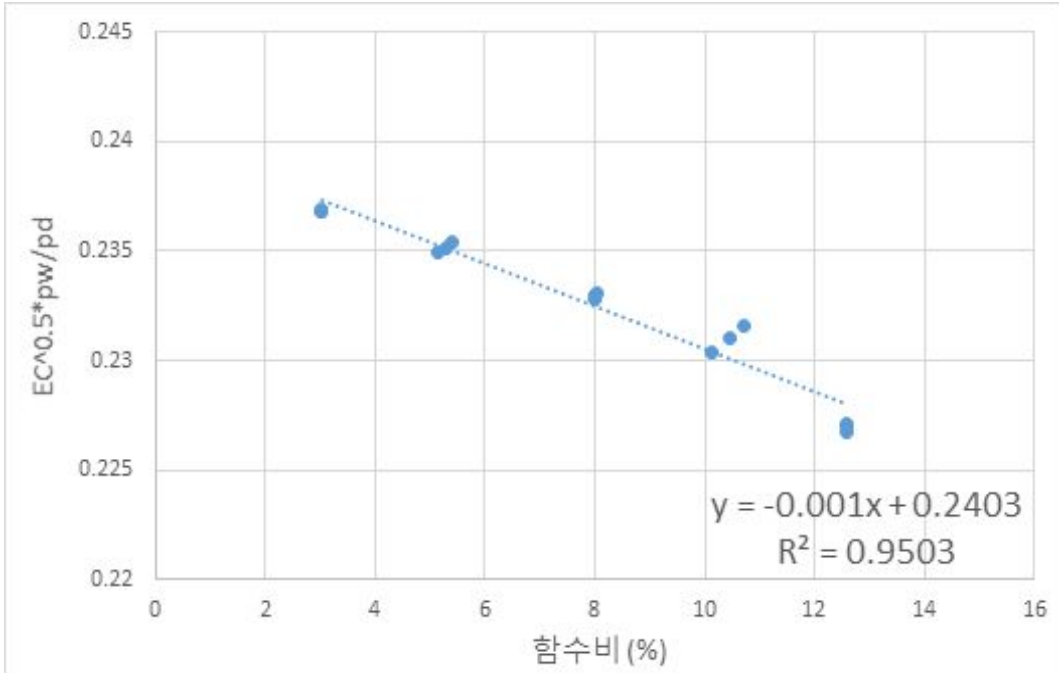


그림 5.6 보정계수 c & d (섬진강 시료)

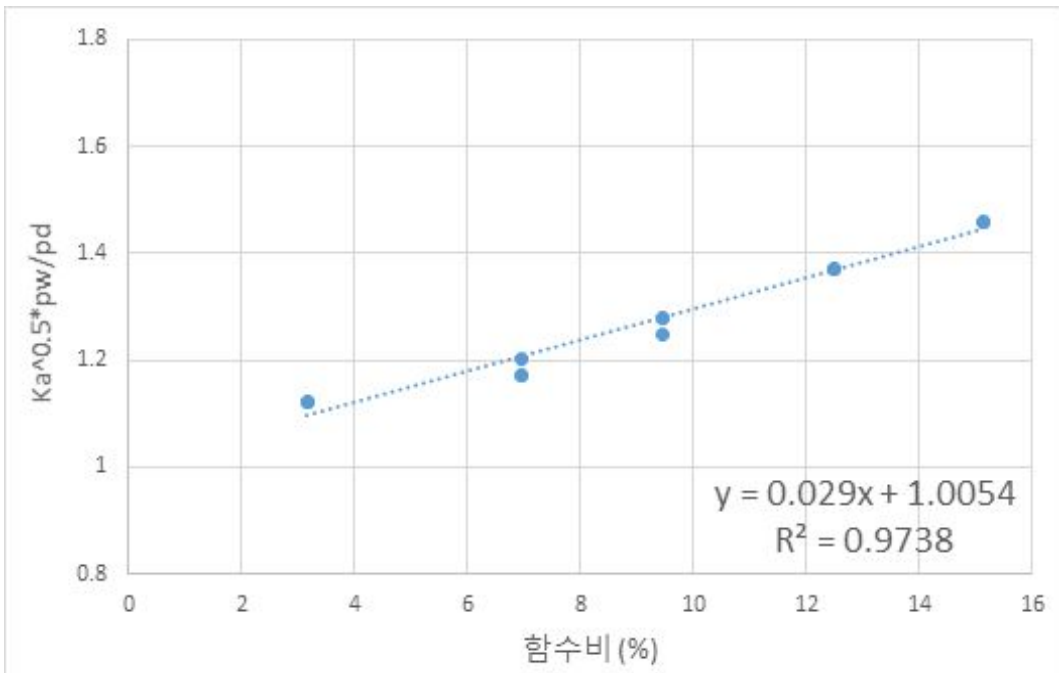


그림 5.7 보정계수 a & b (옥과 시료)

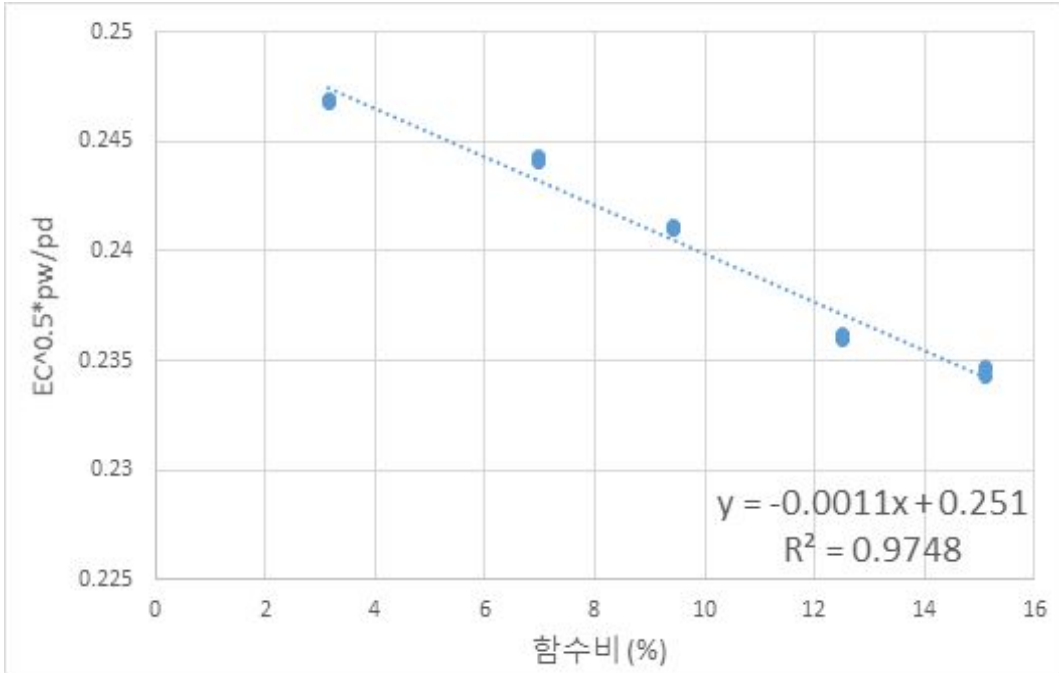


그림 5.8 보정계수 c & d (옥과 시료)

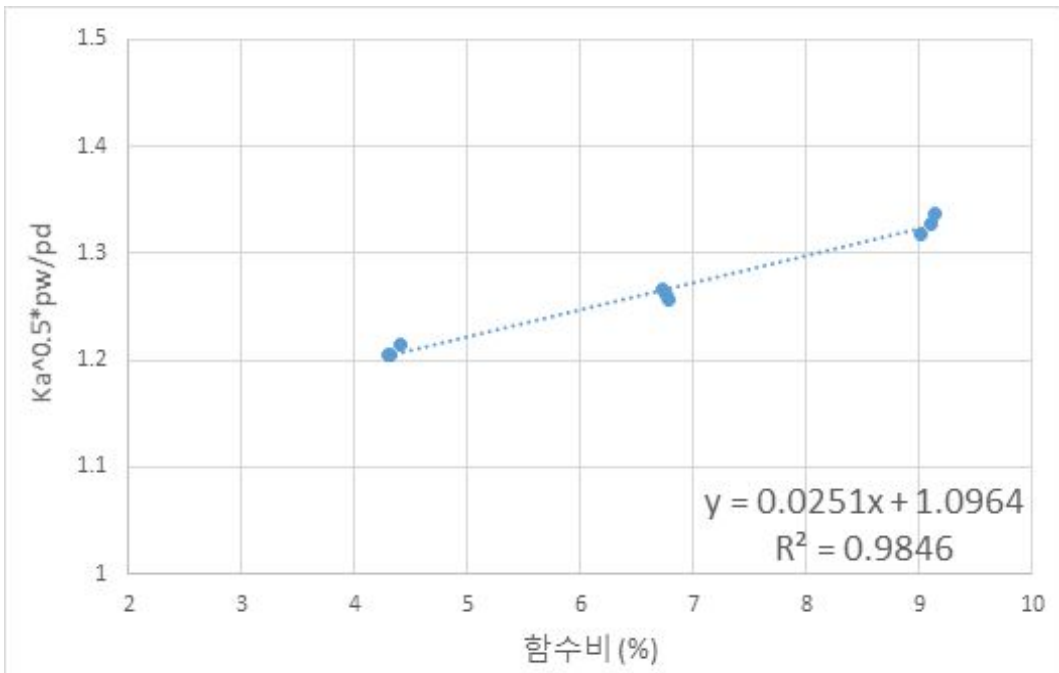


그림 5.9 보정계수 a & b (경주현장 시료)

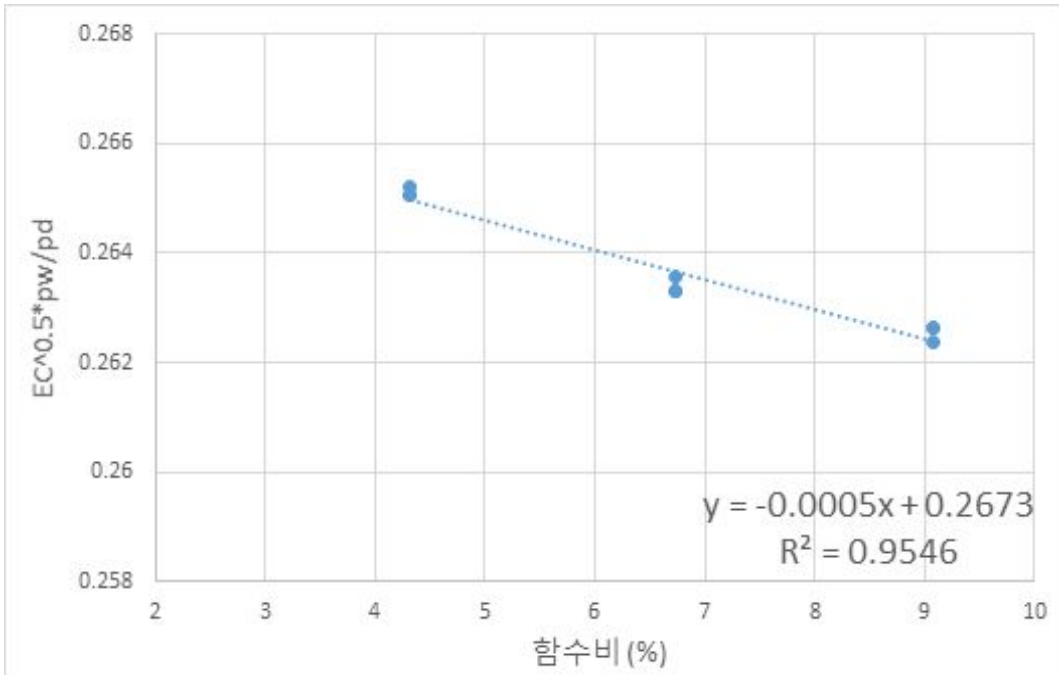


그림 5.10 보정계수 c & d (경주현장 시료)

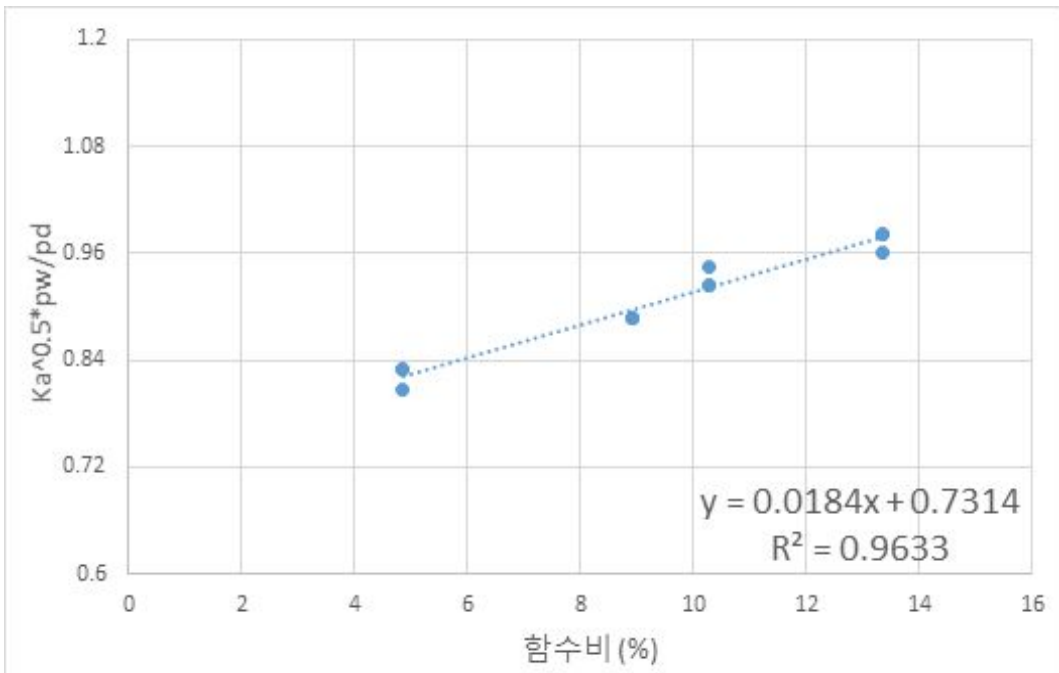


그림 5.11 보정계수 a & b (A 시료)

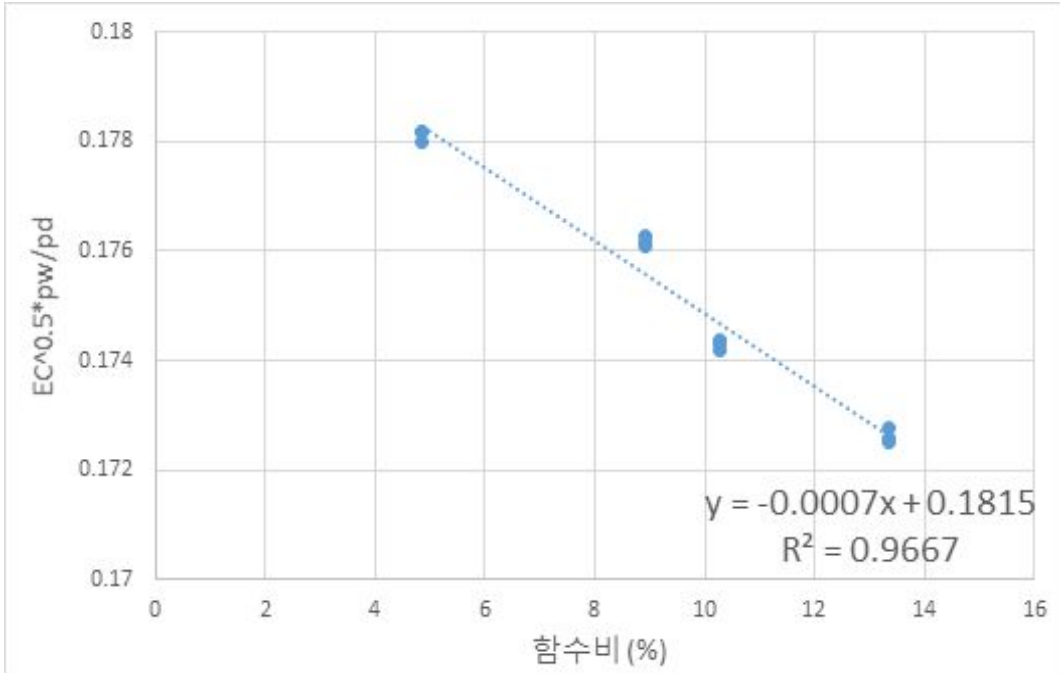


그림 5.12 보정계수 c & d (A 시료)

실내실험을 통한 각 시료의 대한 유전상수와 전기전도도를 측정하여 산정한 특성 상숫값은 다음 표 5.1과 같다.

표 5.1 각 시료별 특성상수

구 분	a	b	c	d
주문진 표준사	1.03	0.0282	0.2511	-0.001
원주시료	1.0588	0.0256	0.2512	-0.0031
섬진강시료	1.0437	0.0312	0.2403	-0.001
옥과시료	1.0054	0.029	0.251	-0.0011
경주현장시료	1.0964	0.0251	0.2673	-0.0005
A시료	0.7314	0.0184	0.1815	-0.0007

5.2 실내실험 결과

5.2.1 Flat TDR 시스템의 검증실험

가. 함수비 측정 결과

본 연구에서 Flat TDR 시스템을 이용하여 유전상수와 전기전도도, 각 시료의 특성 상습값을 도출하여 함수비를 측정하였으며, 실제 함수비 값을 측정하여 Flat TDR 시스템의 측정값과 비교하여 정밀도를 분석하였다.

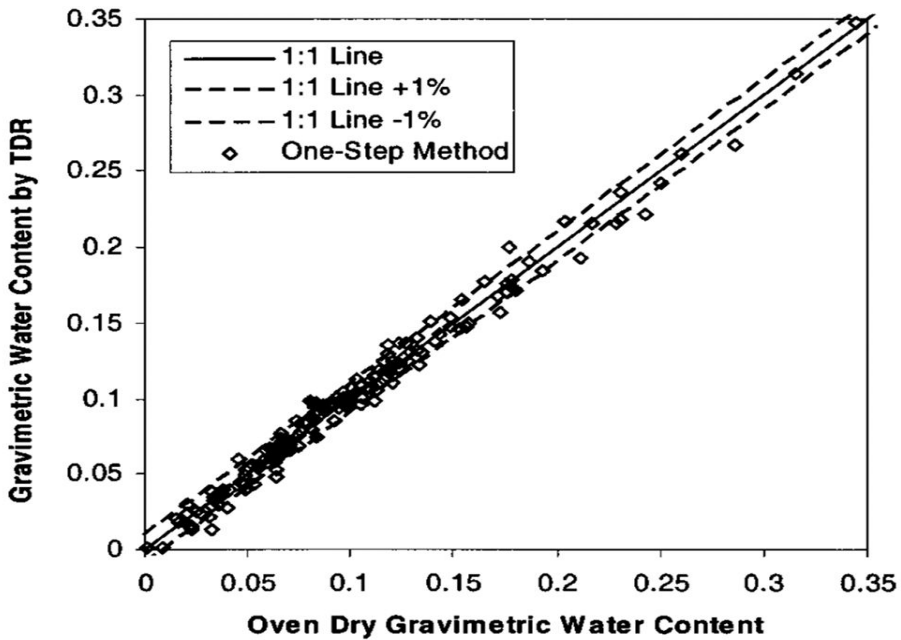


그림 5.13 함수비 정밀도에 관한 기준(Yu 등, 2004)

그림 5.13과 같이 Yu 등(2004)은 함수비 오차범위 $\pm 1\%$ 를 사용하였으며 이를 토대로 Flat TDR 시스템의 측정값과 실제 측정값을 비교하여 정밀도를 검토하였다.

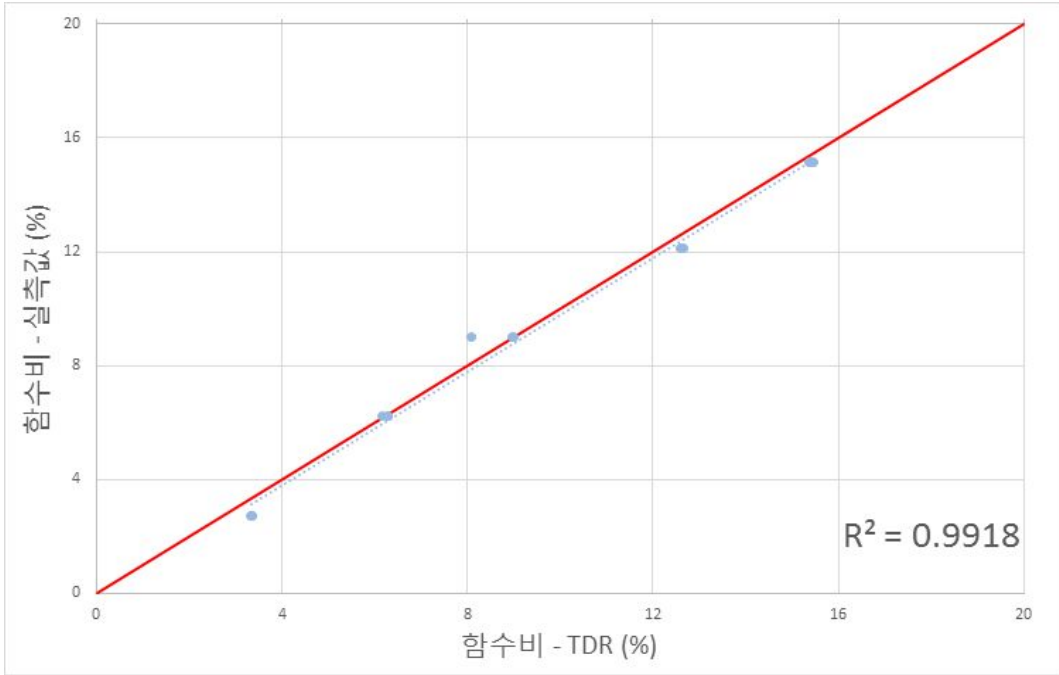


그림 5.14 주문진 표준사

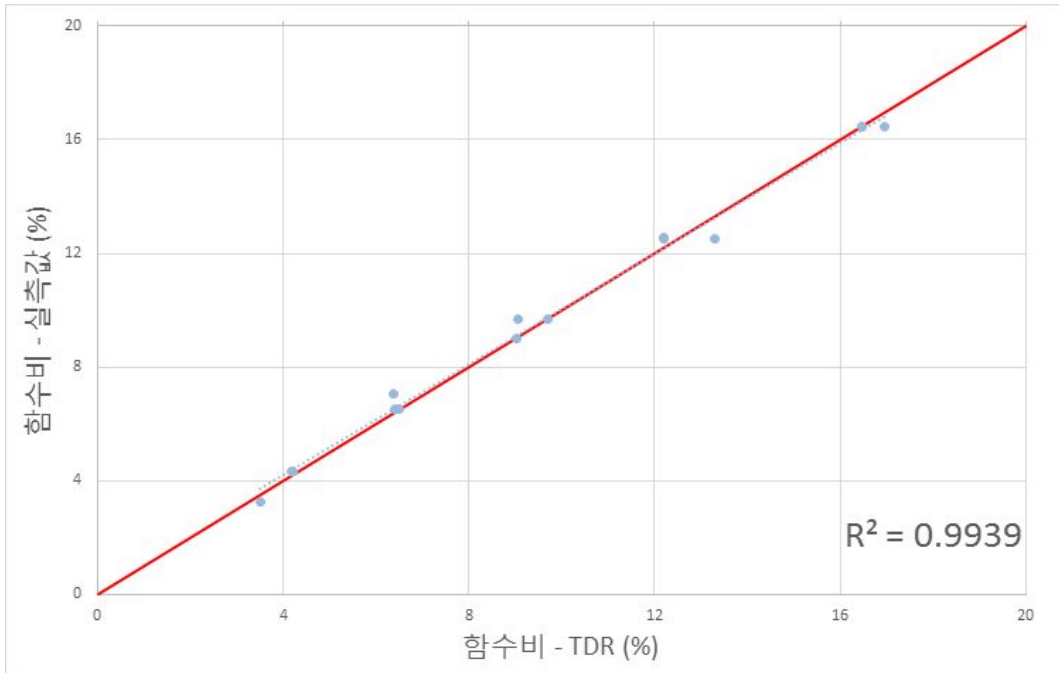


그림 5.15 원주 시료

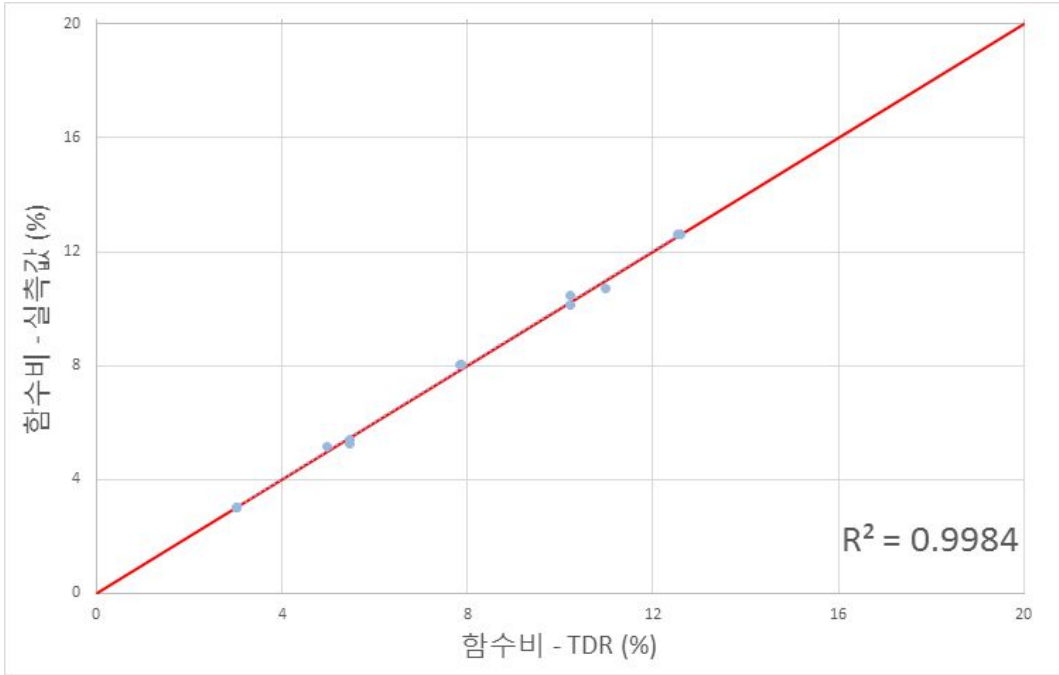


그림 5.16 섬진강 시료

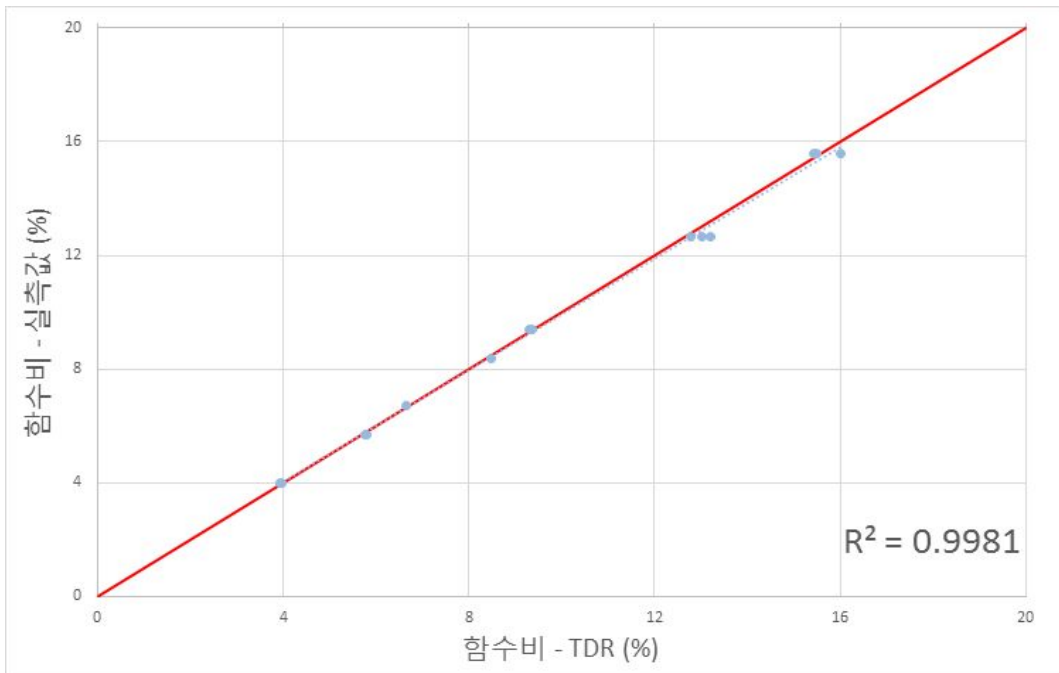


그림 5.17 옥과 시료

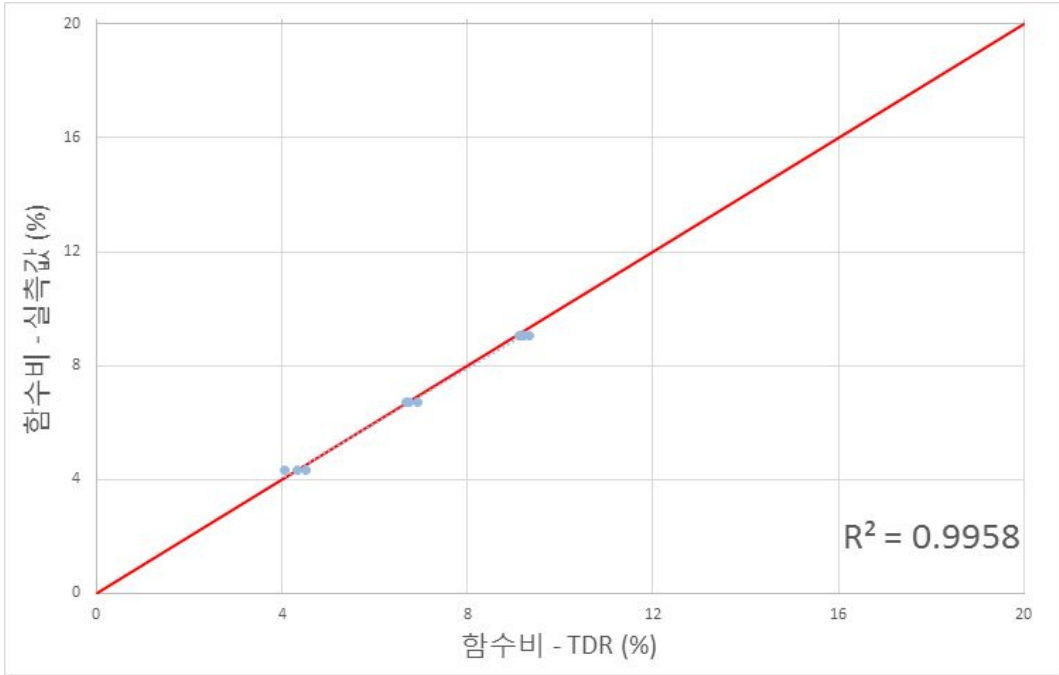


그림 5.18 경주 현장 시료

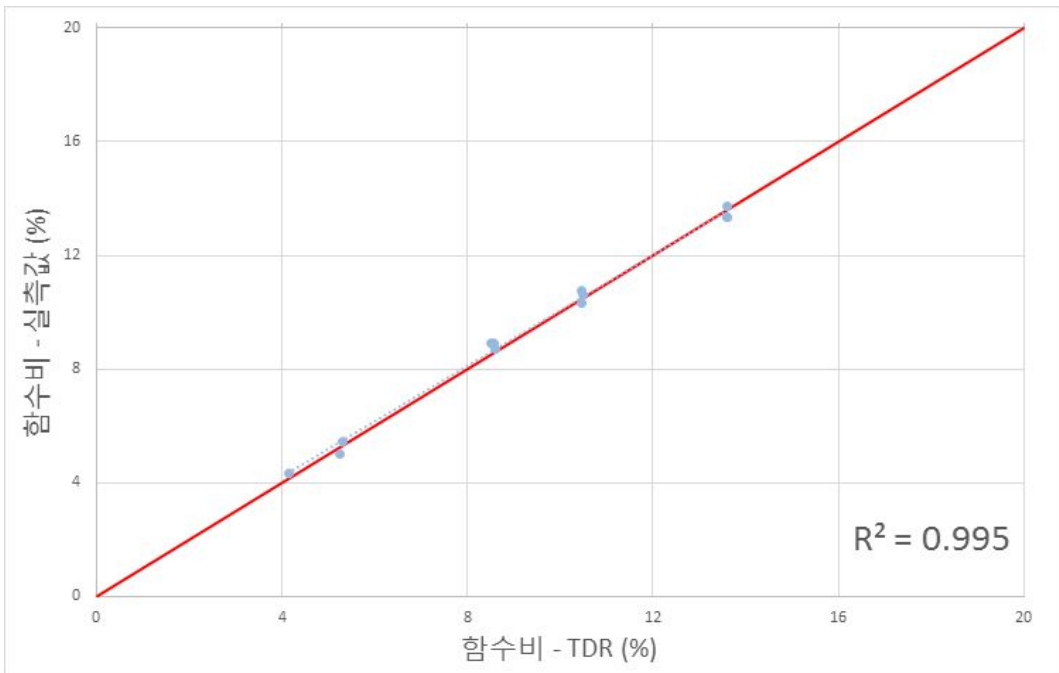


그림 5.19 A 시료

각 시료별 실측 함수비를 측정값을 기준으로 Flat TDR 시스템의 측정값과 비교하였다. 그림 5.14 ~ 그림 5.19는 실측값과 측정값을 비교한 그래프이며 측정값이 실측값에 비해 약 0.2% ~ 0.8%의 차이를 보이고 있다. Yu 등이 사용한 함수비 오차범위와 비슷한 오차범위를 보였다.

나. 건조단위중량 측정 결과

Flat TDR 시스템으로 측정한 유전상수와 전기전도도를 이용해 건조단위중량을 도출하였고 실제 습윤 단위중량을 측정하여 함수비 시험을 통해 얻은 함수비를 통해 건조단위중량을 도출하여 Flat TDR 시스템의 측정값과 실측값을 비교하였다.

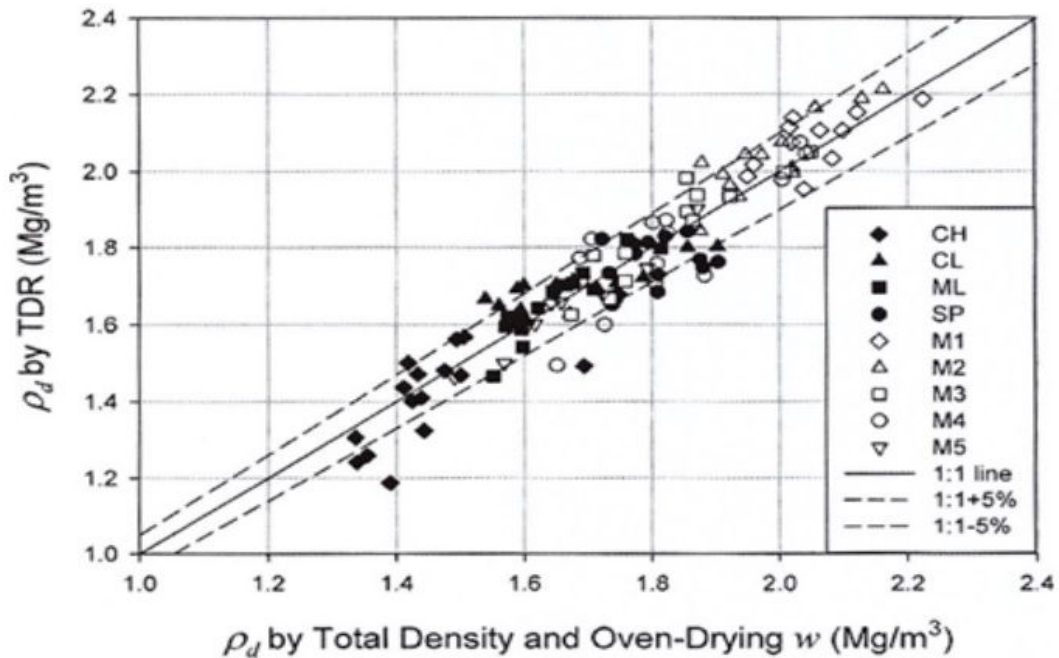


그림 5.20 건조단위중량 정밀도에 관한 기준(Jung 등, 2013)

그림 5.20과 같이 Jung 등(2013)은 건조단위중량 오차 범위 ±5%를 사용하였고, 이를 토대로 측정값과 실측값을 비교하고 정밀도를 검토하였다.

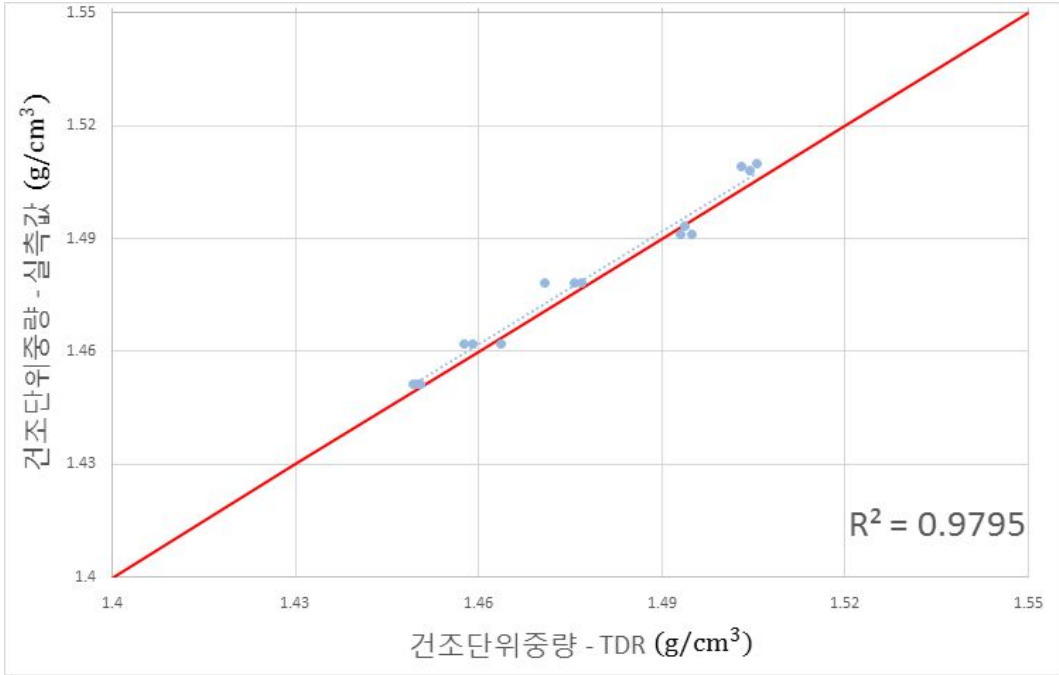


그림 5.21 주문진 표준사

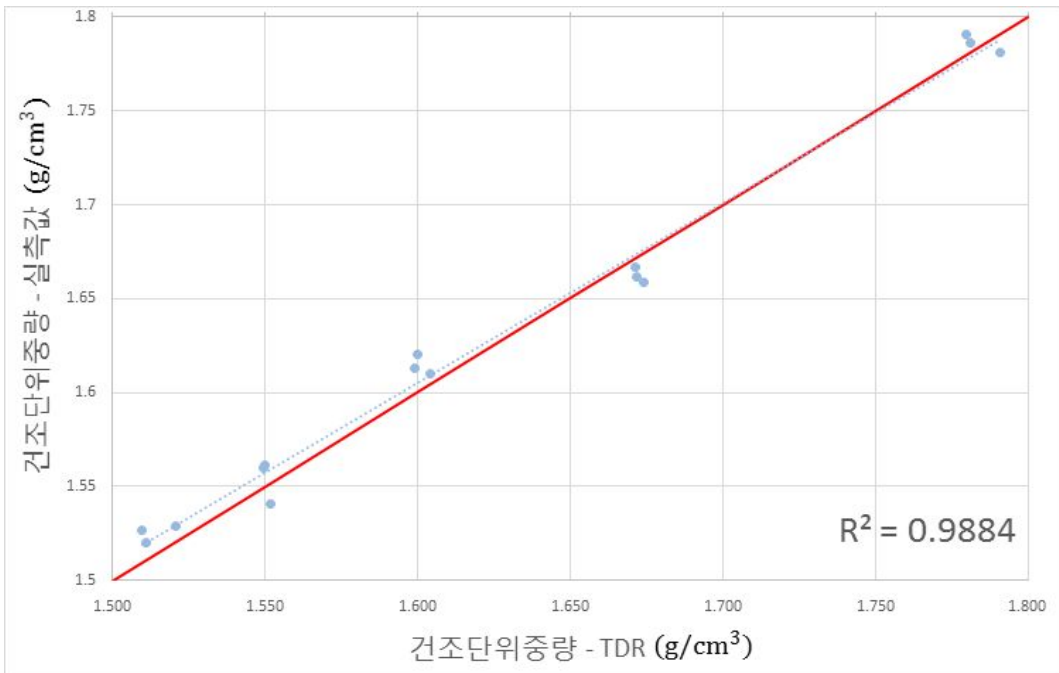


그림 5.22 원주 시료

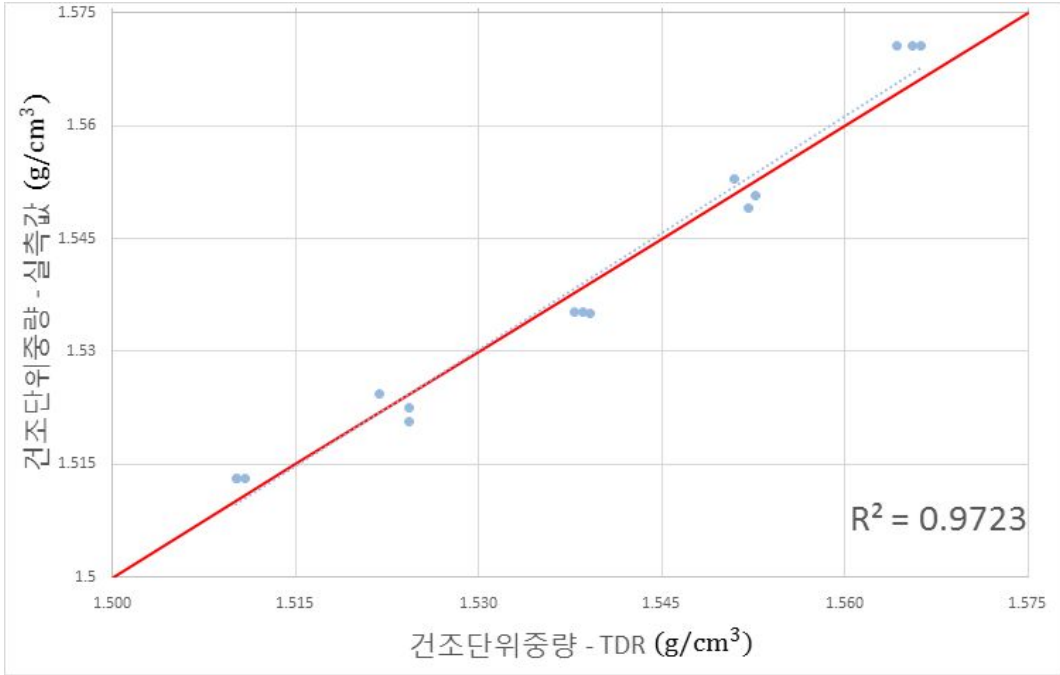


그림 5.23 섬진강 시료

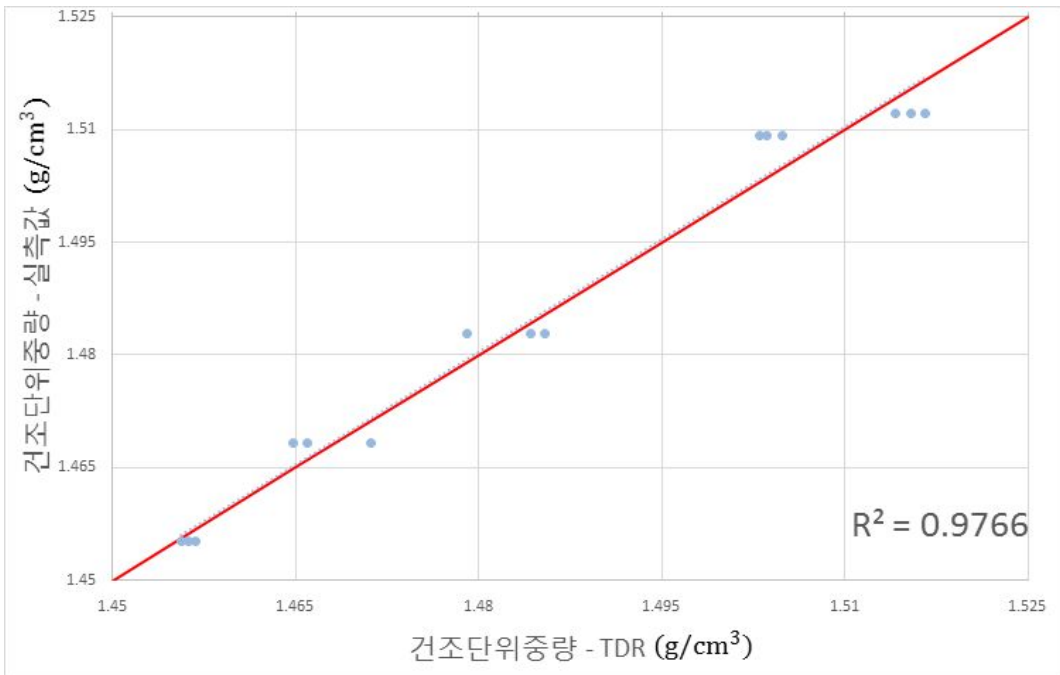


그림 5.24 옥과 시료

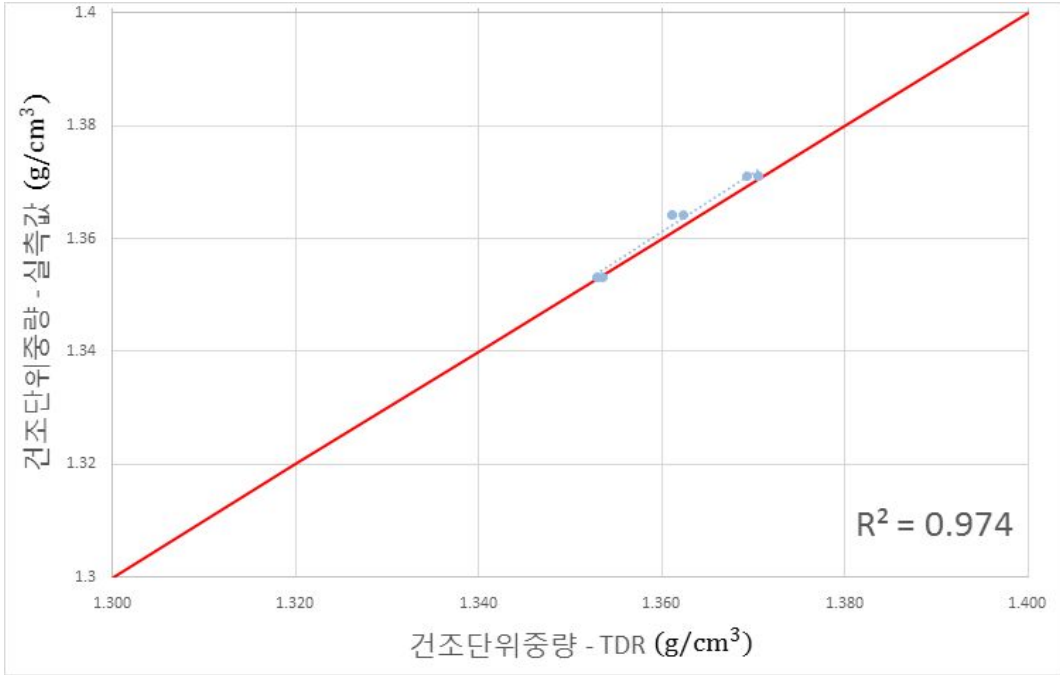


그림 5.25 경주 시료

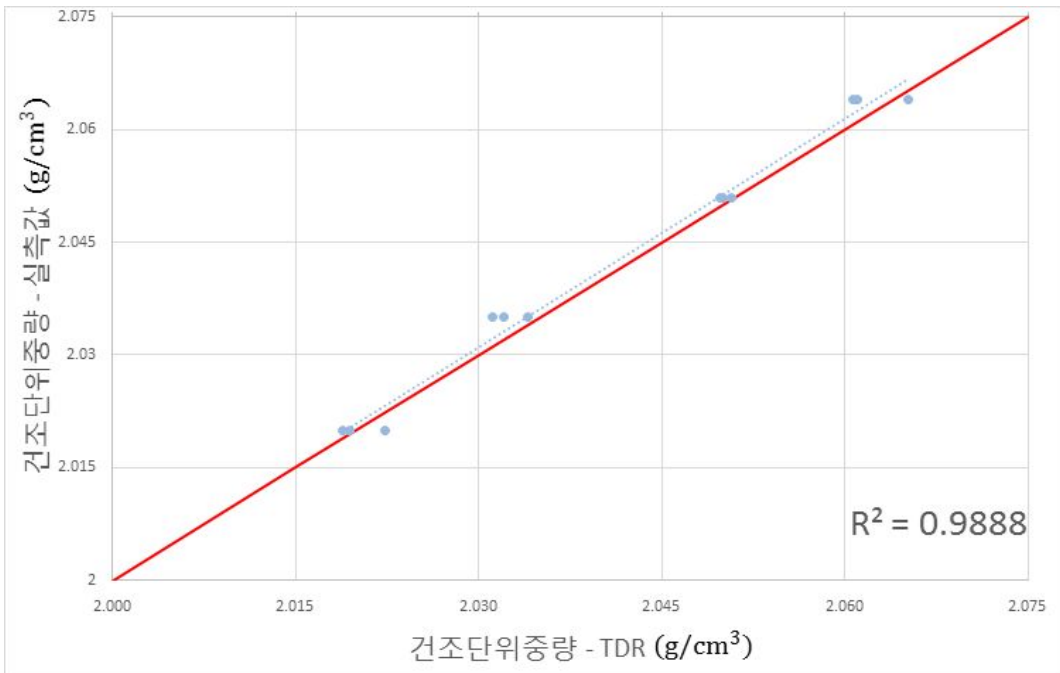


그림 5.26 A 시료

각 시료별 실제 건조단위중량을 기준의 Flat TDR 시스템의 측정값을 비교하였다. 그림 5.21 ~ 그림 5.26은 실측값과 측정값을 비교한 그래프이며, 각 실측값에 비해 약 2% ~ 3%의 차이를 보이고 있다. Jung 등이 사용한 오차범위보다 더 작은 오차를 보인다.

5.2.2 Purdue TDR 시스템과 Flat TDR 시스템의 비교실험

가. 함수비 측정 결과

본 연구에서 Flat TDR 시스템을 이용한 함수비 측정값에 대한 정밀도와 신뢰도 향상을 위해 기존의 검증된 Purdue TDR 시스템과 비교실험을 진행하여 Flat TDR 시스템의 측정값과 Purdue TDR 시스템의 측정값을 비교 분석하였다.

섬진강 시료와 원주 시료를 이용하여 실험을 수행하였으며, 실측 함수비를 기준으로 하여 각각의 측정값을 비교하였다.

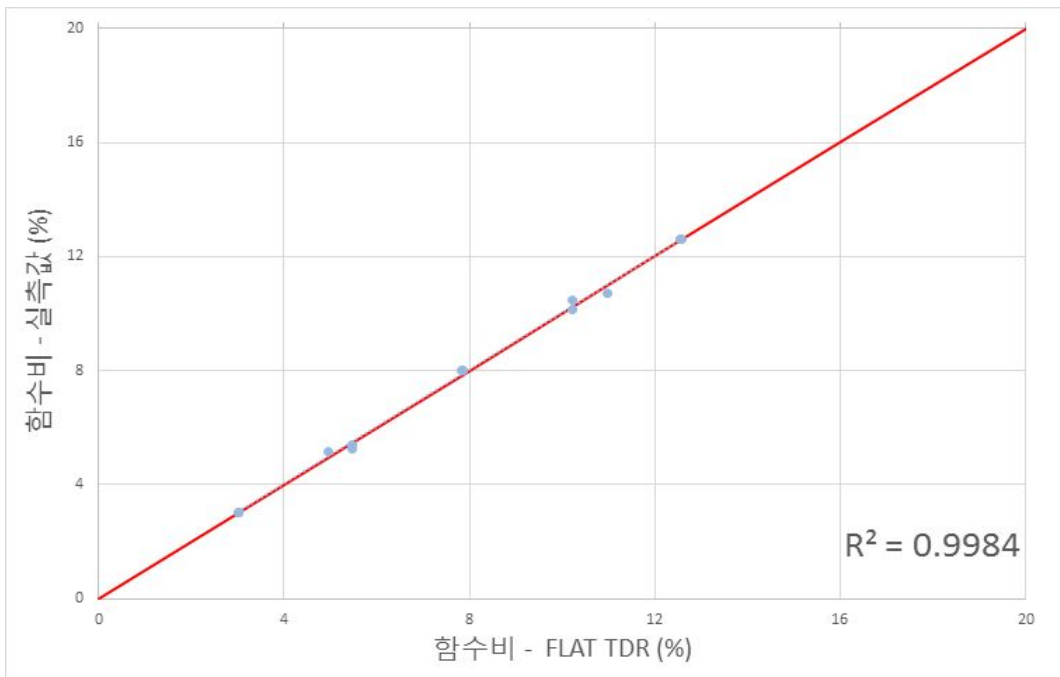


그림 5.27 섬진강 시료 (Flat TDR)

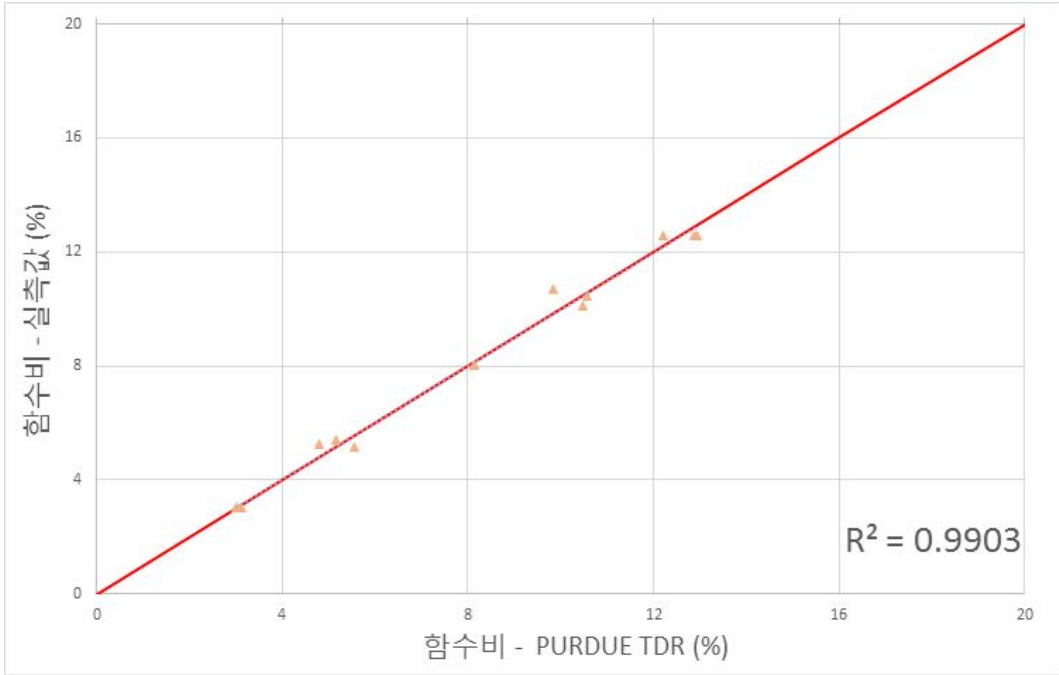


그림 5.28 섬진강 시료 (Purdue TDR)

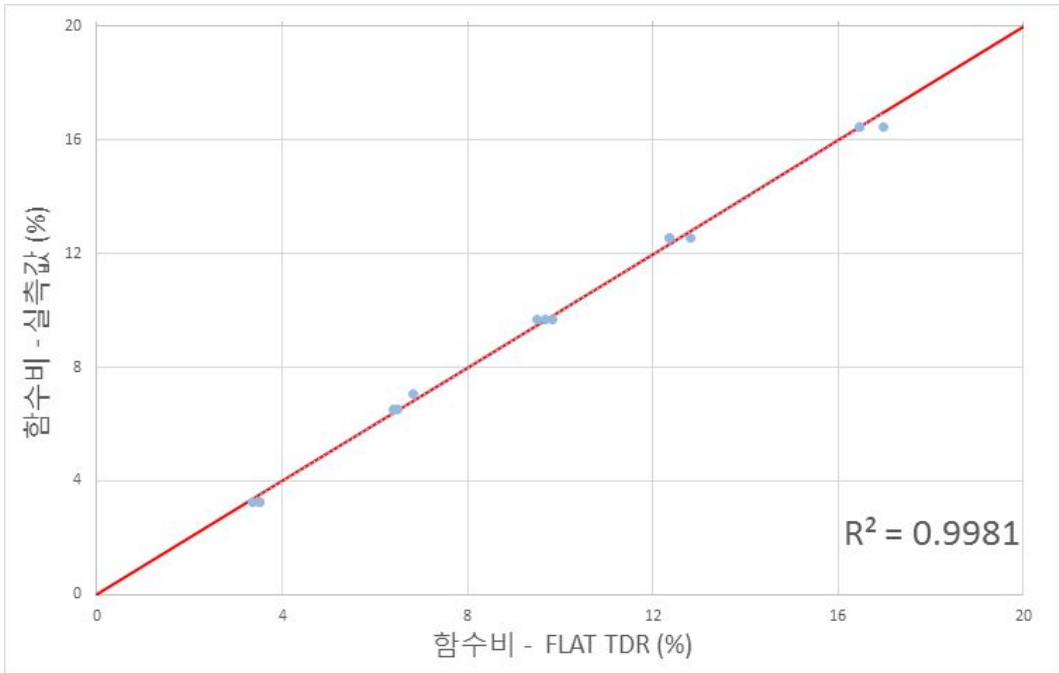


그림 5.29 원주 시료 (Flat TDR)

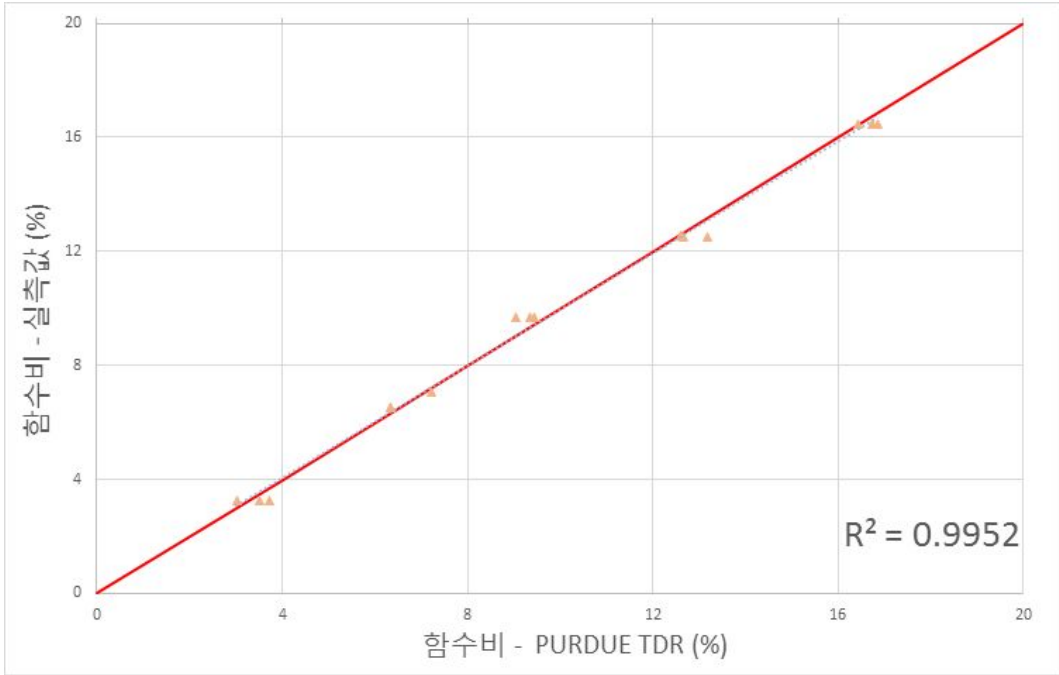


그림 5.30 원주 시료 (Purdue TDR)

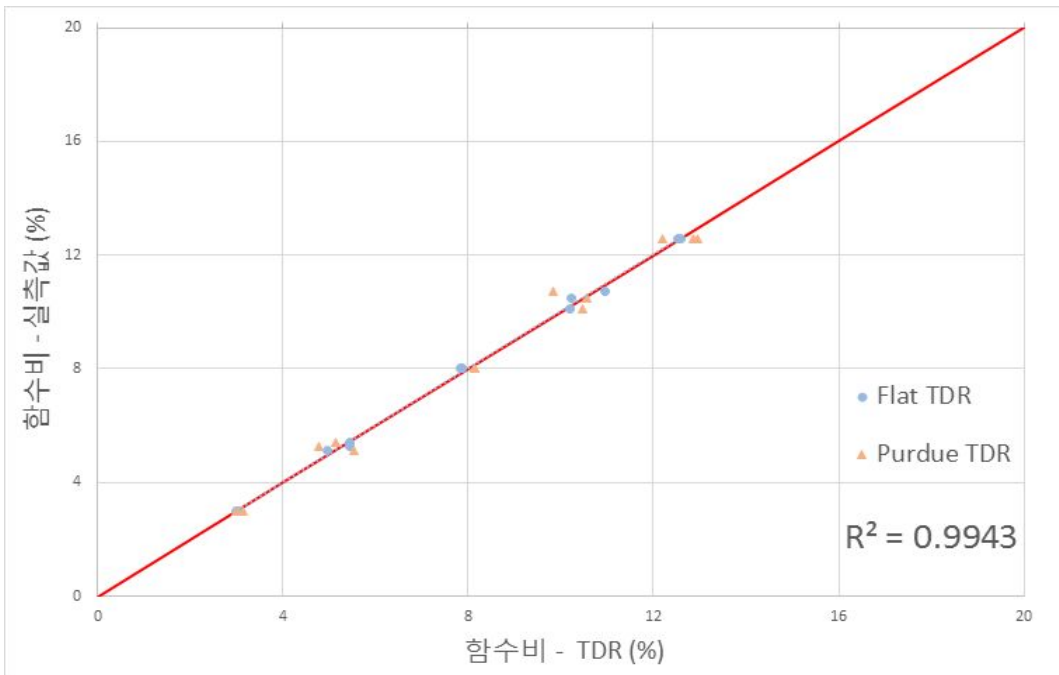


그림 5.31 섬진강 시료 (Flat TDR & Purdue TDR)

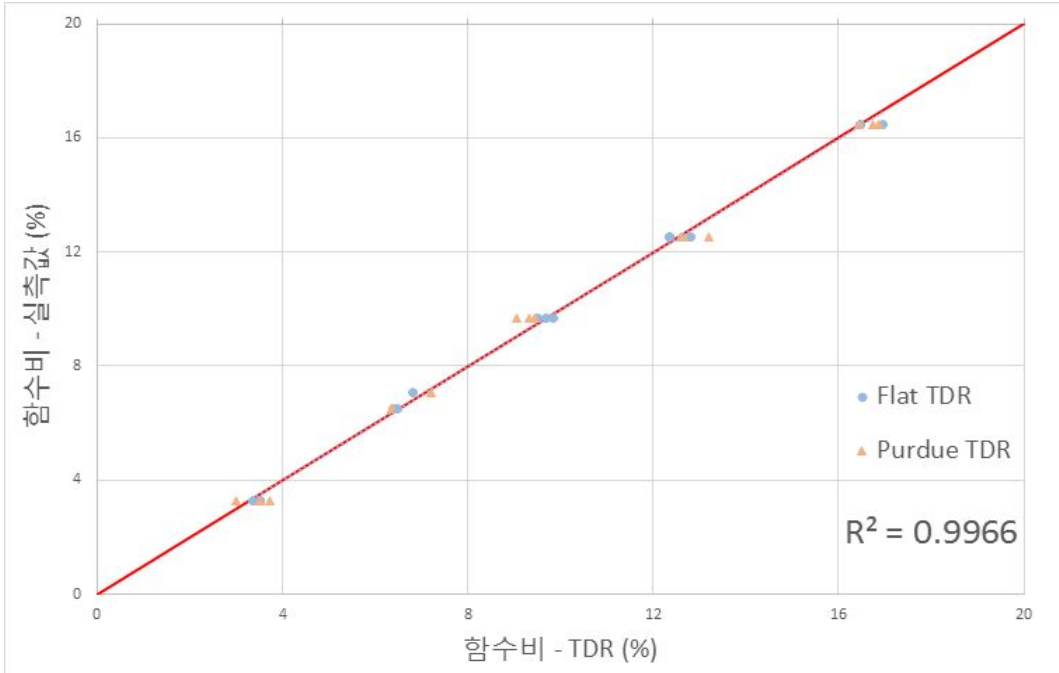


그림 5.32 원주 시료 (Flat TDR & Purdue TDR)

그림 5.27 ~ 그림 5.30은 각 시스템의 측정값과 실측값을 비교하였으며 그림 5.31 ~ 그림 5.32는 두 시스템의 측정값을 동시에 비교하였다. Flat TDR 시스템의 측정값은 실측값에 0.2%의 오차를 보이고, Purdue TDR 시스템의 측정값은 0.4%의 오차를 보인다.

나. 건조단위중량 측정 결과

실제 습윤 단위중량을 측정하여 실측 함수비를 이용하여 도출한 건조단위중량 실측값을 기준으로 하여 Flat TDR 시스템의 측정값과 Purdue TDR 시스템의 측정값을 비교하였다.

섬진강 시료와 원주 시료를 이용하여 실험을 수행하였으며, 실측 건조단위중량을 기준으로 하여 각각의 측정값을 비교하였다.

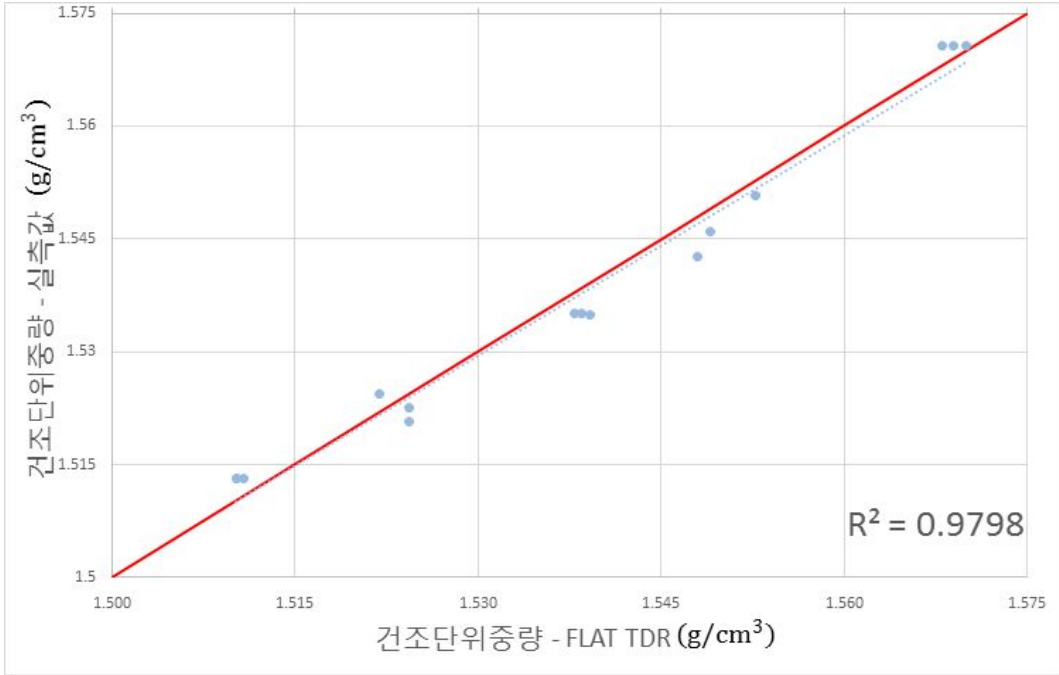


그림 5.33 삼진강 시료 (Flat TDR)

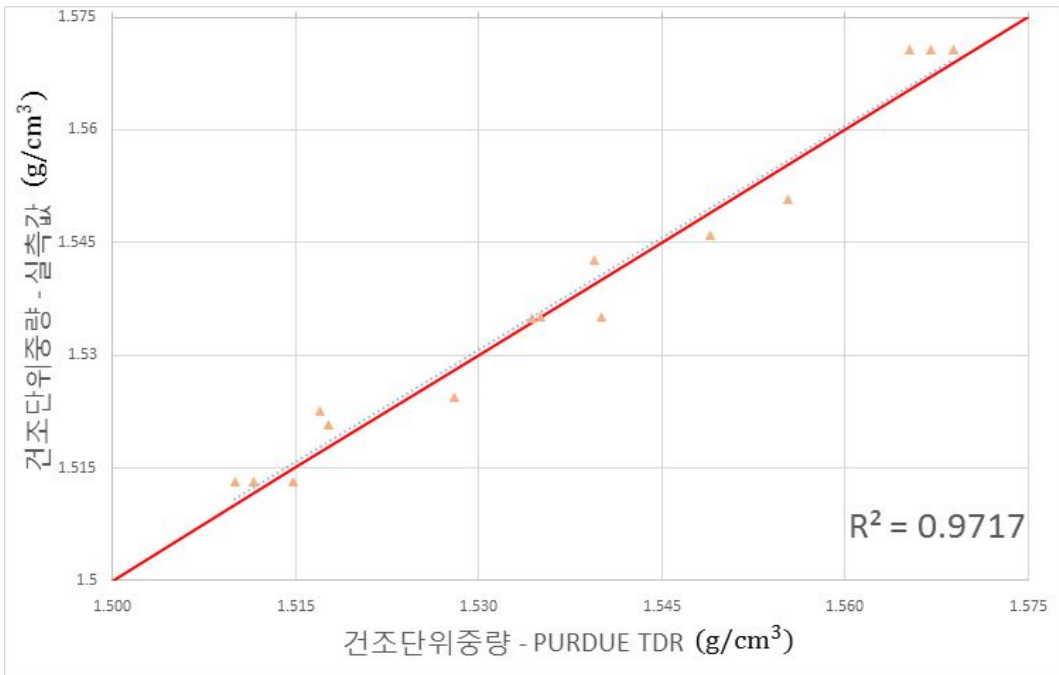


그림 5.34 삼진강 시료 (Purdue TDR)

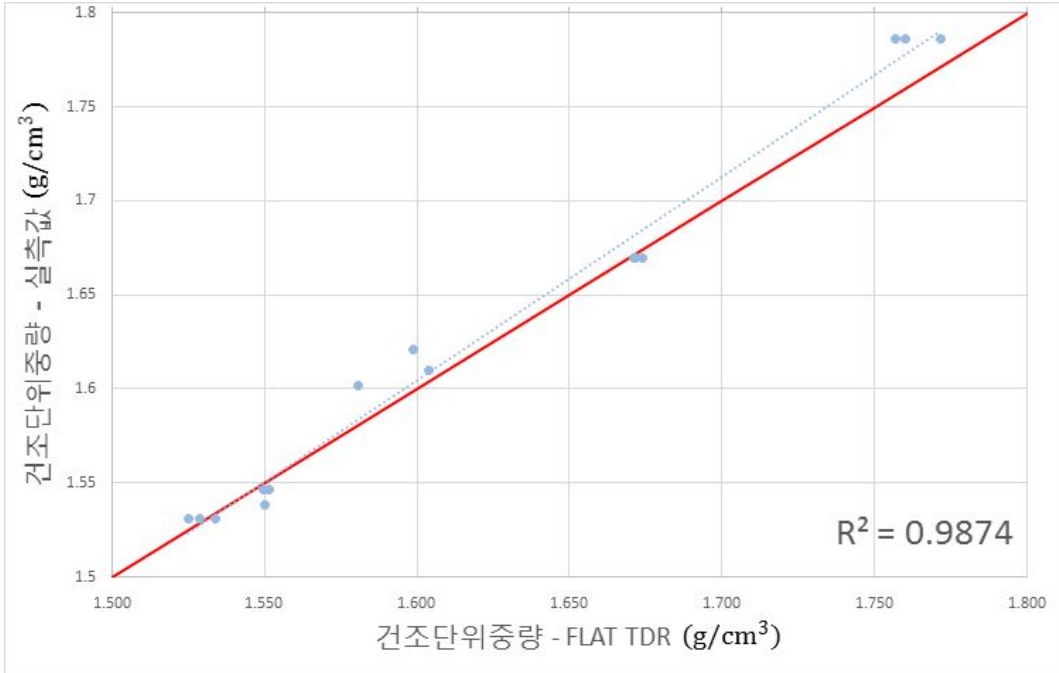


그림 5.35 원주 시료 (Flat TDR)

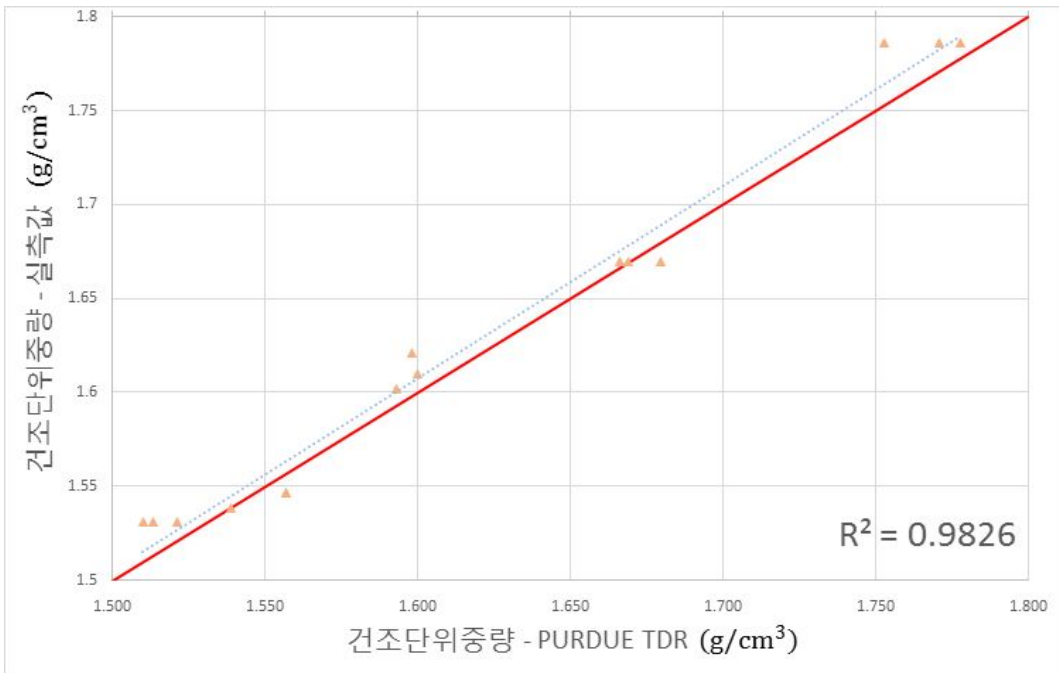


그림 5.36 원주 시료 (Purdue TDR)

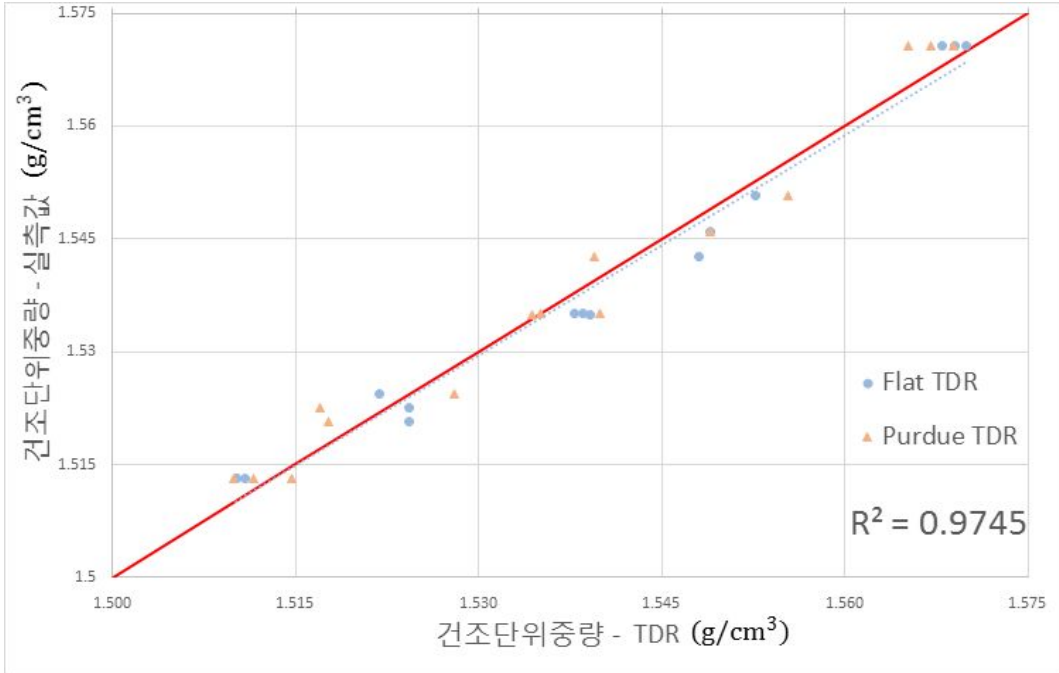


그림 5.37 섬진강 시료 (Flat TDR & Purdue TDR)

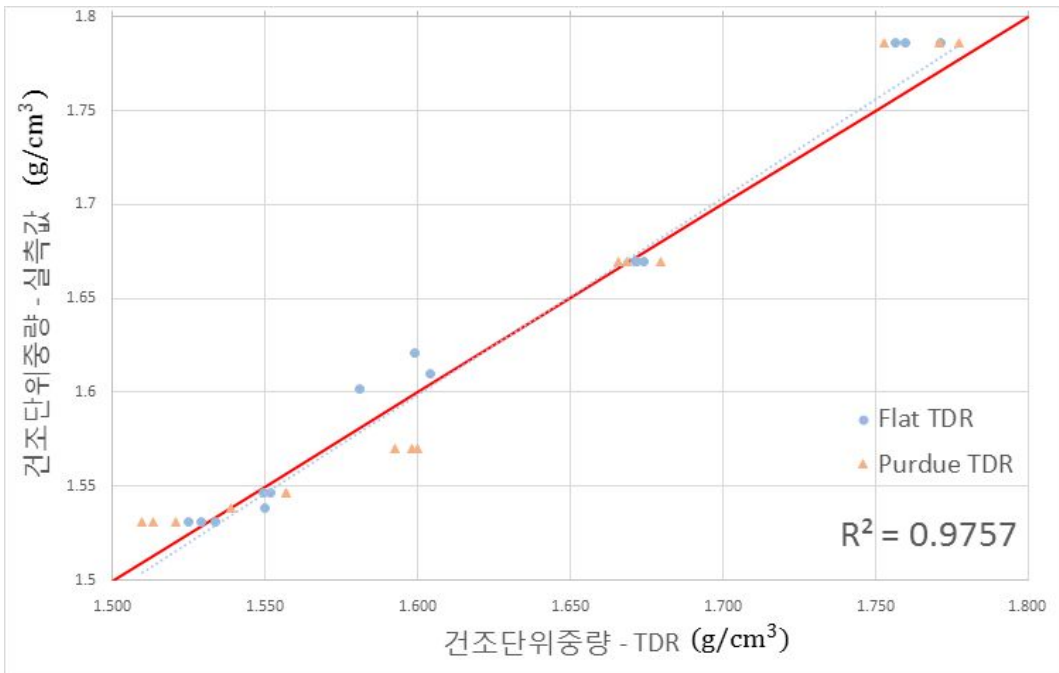


그림 5.38 원주 시료 (Flat TDR & Purdue TDR)

그림 5.33 ~ 그림 5.36은 각 시스템의 측정값과 실측값을 비교하였으며 그림 5.37 ~ 그림 5.38은 두 시스템의 측정값을 동시에 비교하였다. Flat TDR 시스템의 측정값은 실측값에 0.2%의 오차를 보이고, Purdue TDR 시스템의 측정값은 0.4%의 오차를 보인다.

5.2.3 현장 검증시험

Flat TDR 시스템의 현장 적용성 평가를 위해 경주 현장과 실내 대형 시험 장소에서 현장시험을 수행하였다. TDR 신호 측정한 위치에서 소량의 시료를 채취하여 실측 함수비를 측정하였고, 들밀도 시험을 통해 실측 건조단위중량을 도출하였다.

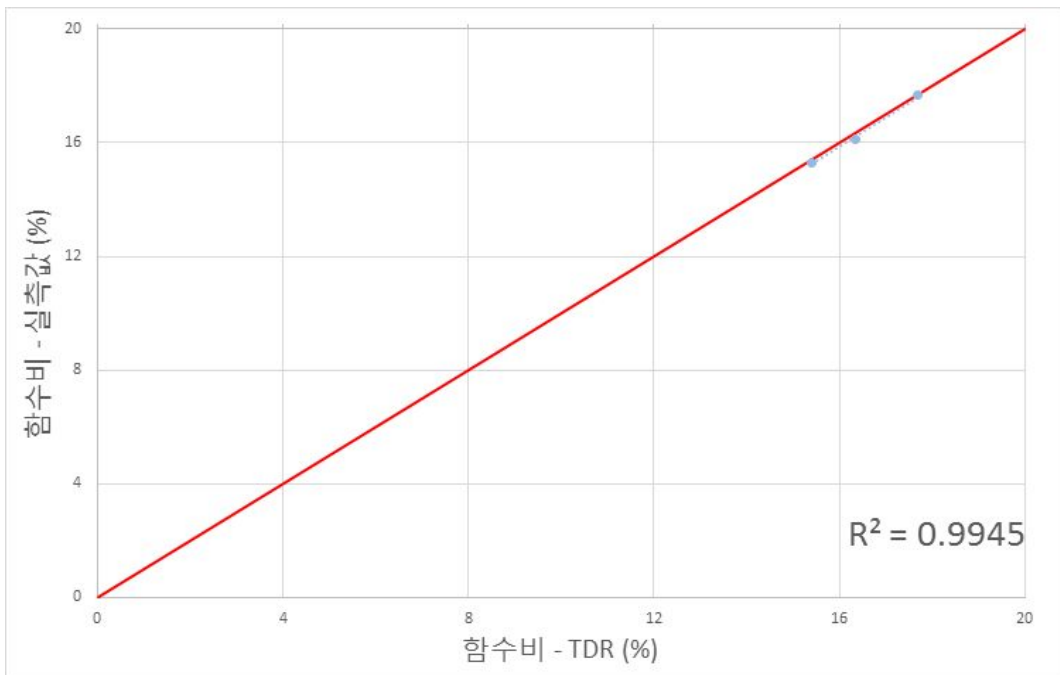


그림 5.39 함수비 (경주 현장)

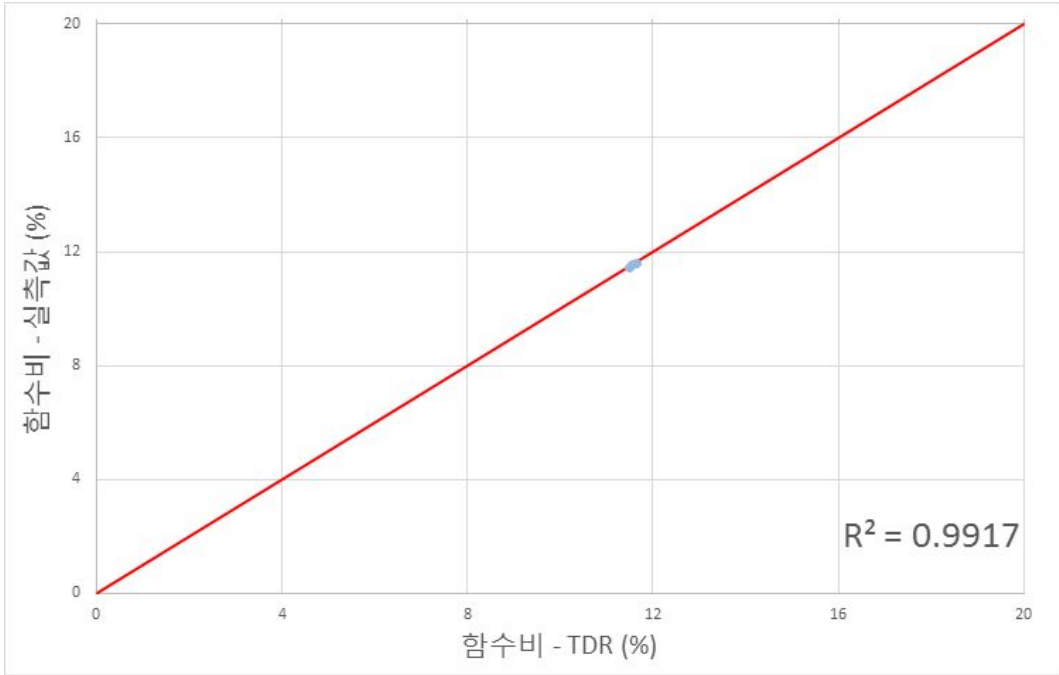


그림 5.40 함수비 (A 현장)

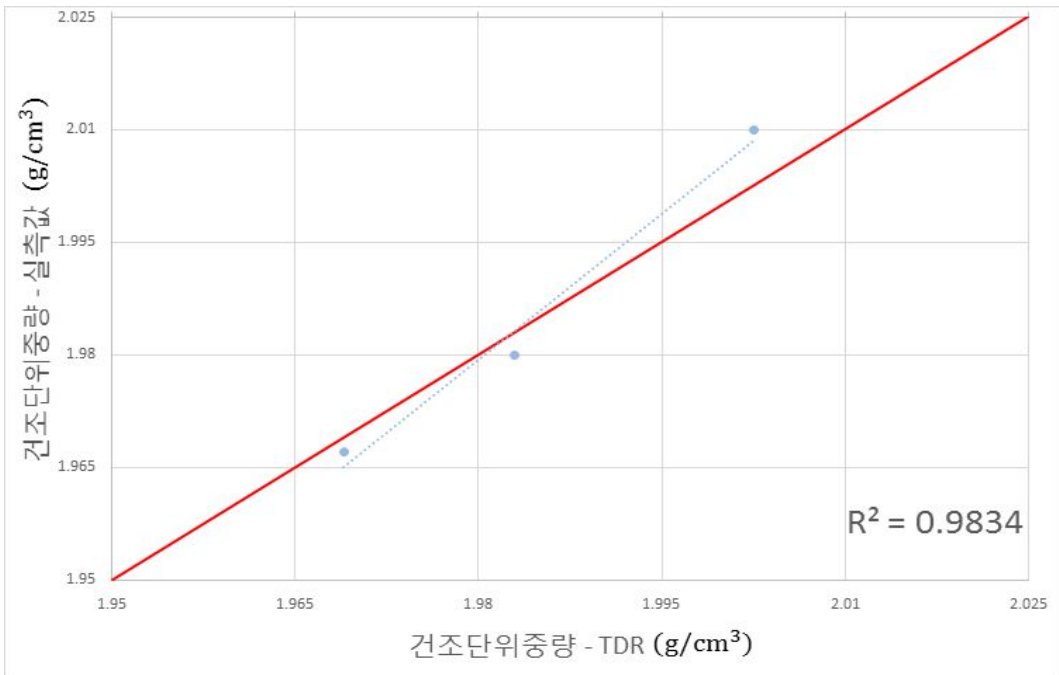


그림 5.41 건조단위중량 (경주 현장)

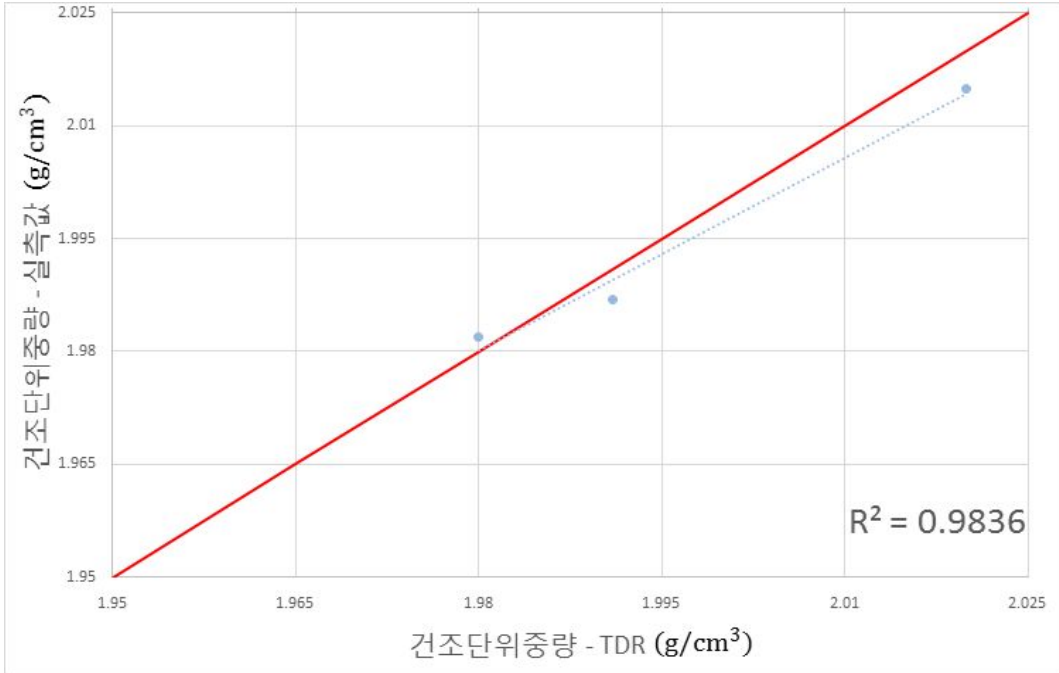


그림 5.42 건조단위중량 (A 현장)

그림 5.39 ~ 그림 5.40은 실측 함수비와 측정값의 비교를 나타내며, 그림 5.41 ~ 그림 5.42는 실측 건조단위중량과 측정값을 비교하였다. 함수비는 측정값이 실측값에 비해 0.5 ~ 0.9%의 오차를 보이며 건조단위중량은 1.7%의 오차를 보인다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 기존의 Purdue TDR 시스템에서 사용되고 있는 봉형 프로브의 문제점을 개선하고 신속한 다짐 관리를 위해 Flat Type의 프로브를 제작하였다. 개발한 Flat 프로브는 지반 표면에서 측정하기 때문에 기존의 봉형 프로브의 문제점인 지반에 교란을 시키지 않으며 추가적인 소정의 작업이 없어 보다 신속하다. 개발한 Flat TDR 시스템을 검증하기 위해 여섯 가지의 시료를 사용하여 Flat TDR 시스템으로 함수비와 건조단위중량을 측정하고, 실측값과 비교하는 실내실험을 수행하였다. 또한 측정값의 신뢰성과 정밀도를 확인하기 위해서 검증된 기존의 Purdue TDR 시스템과 동일한 실험조건을 조성하여 각각의 측정값을 비교하여 정밀도를 확인하였다. 또한 실내실험 결과를 토대로 현장시험을 실시하였고, 실측값과 측정값을 비교분석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내실험을 수행한 결과, 함수비가 증가함에 따라 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점의 사이의 거리가 증가함을 확인할 수 있었고, 장주기 전압레벨은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 TDR 반사 신호의 변화는 흙 속에 포함되어 있는 물의 양이 중요한 요소인 것으로 확인되었다.
2. 유한요소해석을 통해 Flat TDR 시스템의 영향범위를 확인하였고, 이를 바탕으로 실내실험을 수행하여 파형의 변화를 확인하였다. 투자율과 전기전도도를 변화시켜가며 확인하였으며, 그 결과 약 10cm의 영향깊이를 보였다. 또한 유전율을 변화시켜 해석을 해보았으나, 자기장의 세기는 일정한 크기를 보였다. 이를 통해 유전율은 함수비와 건조단위중량을 도출하는데 중요한 요소이지만 TDR 시스템의 전파에는 영향을 미치지 않은 것으로 확인되었다.
3. Flat TDR 시스템으로 각각 시료의 특성상수와 유전상수, 충전기전도도의 값을 도출하였고, 도출된 값을 바탕으로 하여 함수비와 건조단위중량을 산정하였다. 실측값에 비해 측정된 함수비는 평균적으로 약 0.4%의 오차를 보였으며, 건조단위중량의 경우 평균적으로 약 2%의 오차를 보였다. 이를 통해 개발한 Flat TDR 시스템의 정밀도를 확인할 수 있었다. 함수비의 오차범위는 $\pm 0.5\%$ 를 보이며 건조단위중량은 $\pm 2\%$

를 보이는 것을 확인하였다. Yu 등과 Jung 등이 사용한 오차보다 더 작은 오차를 보이므로 보다 더 정확한 값을 도출하는 것을 확인하였다.

4. Flat TDR 시스템과 Purdue TDR 시스템의 정밀도를 비교하기 위하여 동일한 실험 조건을 조성하고 두 가지 시료를 사용하여 실내실험을 수행하였다. 지름 500mm, 높이 200mm의 물드를 제작하였고, 시료에 교란을 주지 않는 Flat TDR 시스템으로 측정 후 Purdue TDR 시스템을 측정하였다. 함수비와 건조단위중량을 실측값과 비교한 결과 Flat TDR 시스템은 함수비의 경우 약 0.2%의 오차를 보였고, 건조단위중량의 경우 평균 약 1.6%의 오차를 확인하였으며, Purdue TDR 시스템은 함수비의 경우 0.7%, 건조단위중량의 경우 약 2.5%로 Flat TDR 시스템이 보다 정확한 값을 도출하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 봉형 프로브는 약 12cm 관입되므로, Flat TDR 시스템의 영향범위가 유한요소해석결과와 마찬가지로 약 10cm인 것을 확인할 수 있었다.
5. 현장시험의 결과, 실측 함수비와 건조단위중량에 대하여 Flat TDR 시스템의 측정값은 함수비의 경우 약 0.8%의 오차를 보이며, 건조단위중량의 경우 약 2.5%의 오차를 보인다. 이는 실내실험의 결과와 매우 유사한 오차를 보이며 Flat TDR 시스템은 현장지반의 다짐관리에 있어서 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 개발한 Flat TDR 시스템의 현장적용을 위해서는 현장 시료를 채취하여 실내실험을 먼저 수행해야 하는 단점이 있지만, 기존의 채래식 다짐관리 방법보다 누구나 손쉽게 작동할 수 있으며 신속하고 보다 정확한 함수비와 건조단위중량을 도출할 수 있다. 본 연구는 추후 여러 가지 종류의 흙에 대하여 추가적인 연구를 통해 TDR 시스템의 정밀도와 신뢰도를 더욱더 높이고 현장 적용의 실용화를 위한 기초 연구 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김기영, 한희수, 이재호, 박민철(2011), “TDR 센서를 이용한 제방의 포하도 및 지하수위 해석”, 한국지반공학회 논문집, 제 27권, 2호, pp. 63 ~ 72.
2. 김대성, 유지형(2014), “시간영역반사법을 이용한 현장함수비와 건조밀도 측정”, 한국방재학회 논문집, 제 14권, 5호, pp. 101 ~ 108.
3. 김동주, 김정석(1999), “TDR(Time Domain Reflectometry)에 의한 사력토(Sandy-Gravelly Soil)의 함수량 측정”, 한국수자원학회 논문집, 제 32권, 3호, pp. 215 ~ 233.
4. 김종윤(2013), “오염물 함유량에 따른 지반에서의 전단파속도와 전기비저항의 영향”, 울산대학교 석사학위논문.
5. 김재식(2011), “사면안정성 분석을 위한 TDR센서의 적용성에 관한 연구”, 경일대학교 박사학위논문.
6. 노태환, 「자성재료학」, 두양사(2006).
7. 박민철, 이종욱, 김유석, 한희수(2012), “개량된 TDR 센서를 이용한 대형 모형제방의 침투 해석”, 한국지반공학회 논문집, 제 28권, 11호, pp. 53 ~ 67.
8. 박재현, 윤성용(1998a), “TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수농도 측정에 관한 연구”, 한국수자원학회 논문집, 제 31권, 2호, pp. 123 ~ 132.
9. 송민우, 김대현, 최찬용(2015), “TDR의 함수비 예측을 위한 새로운 보정방정식”, 한국토목섬유학회 논문집, 제 14권, 1호, pp. 59 ~ 65.
10. 송민우, 최찬용, 김대현(2016), “다짐관리를 위한 판형 TDR 시스템 개발”, 한국지반공학회 논문집, 제 32권, 4호, pp. 51 ~ 61.
11. 송민우(2016), “흙의 지반공학적 특성 평가를 위한 비파괴 측정 시스템 개발”, 조선대학교 석사학위논문.
12. 송민우, 김완민, 김대현, 최찬용(2016), “판형 TDR 시스템을 이용한 개량지반의 탄성계수 예측”, 한국지반신소재학회 논문집, 제 15권, 3호, pp. 77 ~ 85.
13. 신민균(1999), “표면파기법을 이용한 층다짐 공법에서의 각 층의 밀도 평가 시스템 보정” 한국과학기술원 석사학위논문.
14. 신은철, 류병현, 박정준(2013), “실내모형실험을 통한 TDR 함수량계의 현장 함수비 보정”, 한국토목섬유학회 논문집, 제 12권, 2호, pp. 1 ~ 11.

15. 이가영, 김상현, 김기훈, 이혜선(2005), “산지사면에서의 TDR을 이용한 토양수분 집중 모니터링을 통한 토양수분 감쇄특성 분석”, 한국농림기상학회지, 제 7권, 1호, pp. 79 ~ 91.
16. 이익효, 김완민, 김대현(2016), “Flat TDR과 Purdue TDR의 비교실험”, 공학기술논문지, 제 9권, 4호, pp. 289 ~ 295.
17. 임남운(2012), “시간영역반사법을 이용한 성토지반 함수비 및 밀도 측정에 관한 연구”, 경일대학교 박사학위논문.
18. 정영석, 사회동, 강성훈, 오세봉, 이종섭(2015), “TDR 측정시스템이 도입된 압력관 추출 시험기를 이용한 흙-함수특성곡선 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제 31권, 8호, pp. 17 ~ 28.
19. 조명환, 이윤환, 김낙석, 박주영(2010), “Time Domain Reflectometry 방식을 이용한 도로 하부의 함수비 계측 및 보정 방안에 관한 연구”, 한국방재학회 논문집, 제 10권, 2호, pp. 23 ~ 30.
20. 한아름(2015), “TDR 기법을 이용한 매립지 차수층의 물성 거동 분석”, 경북대학교 석사학위논문.
21. 홍원택, 정영석, 이종섭, 변용훈(2015), “지반의 함수비 평가를 위한 관입형 TDR 프로브의 개발 및 적용”, 한국지반공학회 논문집, 제 31권, 2호, pp. 39 ~ 46.
22. ASTM D 6780-05 (2005), “Standard test method for water content and density of soil in place by Time Domain Reflectometry(TDR)”, Annual Book of ASTM Standards.
23. Baker, J. M., Lascano, R. J.(1989), “The Spatial Sensitivity of Time-Domain Reflectometry”, Soil Science, Vol. 147, No. 5, pp. 378 ~ 384.
24. Benson, C. H., Wang, X.(2006), “Temperature-Compensating Calibration Procedure for Water Content Reflectometry”, Proc. TDR, Purdue University, pp. 1 ~ 16.
25. Bolt, B. A.(1976), Nuclear Explosions and Earthquakes, W.H. Freeman and Company.
26. C. Paul, Keith W. Whites, Sted A. Nasar, 「Introduction to Electromagnetic Fields, 3th Edition」, McGraw-Hill(2001).
27. Chen, R., Drnevich, V. P., Yu, X., Nowack, R. L., Chen, Y.(2007), “Time domain reflectometry surface reflections for dielectric constant in highly conductive

- soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 1597 ~ 1608.
28. Clarkson, T. S., Glasser, L., Tuxworth, R. W., Williams, G.(1977), “An Appreciation of Experimental Factors in Time-Domain Spectroscopy”, *Advances in Molecular Relaxation and Interaction Processes*, Vol. 10, No. 3, pp. 173 ~ 202.
 29. Dowding, C. H., Pierce, C. E.(1994), “Use of time domain reflectometry to detect bridge scour and monitor pier movement”, In *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, Sept, pp. 7 ~ 9.
 30. Drnevich, V., Lin, C., Yi, O., Lovell, J.(2001a), “Real-time determination of soil type, water content, and density using electromagnetics”, *Joint Transportation Research Program*, pp. 177.
 31. Drnevich, V. P., Yu, X., Lovell, J., Tishmack, J.(2001b), “Temperature effects on dielectric constant determined by time domain reflectometry”, *Proc. TDR*, Purdue University, pp. 1 ~ 10.
 32. Drnevich, V. P., Ashmawy, A. K., Yu, X., Sallam, A. M.(2005), “Time domain reflectometry for water content and density of soils: study of soil-dependent calibration constants”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 1053 ~ 1065.
 33. Fam, M., Santhamarian, J. C.(1997), “A study of consolidation using mechanical and electromagnetic waves”. *Geotechnique*, Vol. 47, No. 2, pp. 203 ~ 219.
 34. Fellner-Feldegg, H.(1969), “The measurement of dielectrics in the time domain”, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 73, No. 3, pp. 616 ~ 623.
 35. Feng, W., Lin, C.-P., Drnevich, V. P., Deschamps, R. J.(1998), “Automation and standardization of measuring moisture content and density using Time Domain Reflectometry.” No. FHWA/IN/JTRP-98/4, Purdue University, West Lafayette, IN.
 36. Feng, W., Lin, C. P., Deschamps, R. J., Drnevich, V. P.(1999), “Theoretical model of a multisection time domain reflectometry measurement system”, *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 2321 ~ 2331.
 37. Ferré, P.A., Knight, J. H., Rudolph, D.L., and Kachanoski, R. G.(1998), “The

- sample areas of conventional and alternative time domain reflectometry probes." Water Resources Research, Vol. 34, No. 11, pp. 2971 ~ 2979.
38. Giese, K., Tiemann, R.(1975), "Determination of the Complex Permittivity from Thin- Sample Time Domain Reflectometry: Improved Analysis of the Step Response Wave form" Advances in Molecular Relaxation and Interaction Processes, Vol. 7, No. 1, pp. 45 ~ 59.
 39. Heimovaara, T. J., Bouten, W., Verstraten, J. M.(1994), "Frequency Domain Analysis of Time Domain Reflectometry Waveforms: 2. A Four-component Complex Dielectric Mixing Model for Soils," Water Resources Research, Vol. 30, No. 2, pp. 201 ~ 209.
 40. Hilhorst, M. A.(1998), Dielectric Characterization of Soil, Wageningen, Netherlands.
 41. Hilhorst, M. A., Dirkson, C.(1994), "Dielectric Water Content Sensors: Time Domain Versus Frequency Domain," Symposium and Workshop on Time domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston, IL., Spec. Publ. SP 19 ~ 94, pp. 23 ~ 33.
 42. Jung, S.(2011), New methodology for soil characterization using time domain reflectometry (TDR), Purdue University, Ph. D. Thesis.
 43. Jung, S., Drnevich, V., Abou Najm, M.(2013), "New Methodology for Density and Water Content by Time Domain Reflectometry", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No .5, pp. 659 ~ 670.
 44. Knight, J. H., Ferré, P. A., Rudolph, D .L., Kachanoski, R. G.(1997), "A numerical analysis of the effects of coatings and gaps upon relative dielectric permittivity measurement with time domain reflectometry", Water resources research, Vol. 33, No. 6, pp. 1455 ~ 1460.
 45. Kotdawala, S. J., Hossain, M., Gisi, A. J. (1994), "Monitoring of moisture changes in pavement subgrades using time-domain reflectometry (TDR)", In Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, pp. 349 ~ 356.
 46. Lin, C. P.(1999), Time Domain Reflectometry for Soil Properties, Purdue University, Ph. D. Thesis.

47. Liu, X., Ren, T., Horton, R.(2008), "Determination of soil bulk density with thermo-time domain reflectometry sensors", Soil Science Society of America Journal, Vol. 72, No. 4, pp. 1000 ~ 1005.
48. Liu, X., Lu, S., Horton, R., Ren, T.(2014), "In situ monitoring of soil bulk density with a thermo-TDR sensor", Soil Science Society of America Journal, Vol. 78, No. 2, pp. 400 ~ 407.
49. O'Connor, K. M., Dowding, C. H.(1999), Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes. CRC Press.
50. Sallam, A. M., White, N. K., Ashmawy, A. K.(2004), "Evaluation of the Purdue TDR Method for Soil Water Content and Density Measurement", No. BC-353-30.
51. Santamarina, J. C., Klein, K. A., Fam, M. A.(2001), Soils and waves, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, U.K.
52. Siddiqui, S.I.(1995), A New Method of Measuring Density and Moisture Content of Soil Using the Technique of Time Domain Reflectometry, Purdue University, Ph. D. Thesis.
53. Siddiqui, S. I., Drnevich, V. P., Deschamps, R. J.(2000), "Time Domain Reflectometry development for use in geotechnical engineering", Geotechnical Testing Journal, Vol. 23, No. 1, pp. 9 ~ 20.
54. Thring, L.M., Boddice, D., Metje, N., Curioni, G., Chapman, D.N., Pring, L.(2014), "Factors affecting soil permittivity and proposals to obtain gravimetric water content from time domain reflectometry measurements", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 51, No. 11, pp. 1303 ~ 1317.
55. Topp, G.C. Davis, J.L., Annan, A.P.(1980), "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines", Water resources research, Vol. 16, No. 3, pp. 574 ~ 582.
56. White, N. K., Sallam, A. M., Ashmawy, A. K., Horhota, D. J.(2003), "Evaluation of ASTM Time Domain Reflectometry Method for Soil Water Content and In-Place Density", In 3rd International Conference on Applied Geophysics, Hotel Royal Plaza, Orlando, Fla.
57. Yanuka, M., Topp, G. C., Zegelin, S. J., Zebchuk, W. D.(1988), "Multiple

- reflection and attenuation of Time Domain Reflectometry pulses: Theoretical considerations for applications to soil and water”, *Water Resources Research*, Vol. 24No. 7, pp. 939 ~ 944.
58. Yu, X., Drnevich, V.P.(2004), “Soil water content and dry density by time domain reflectometry”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 9, pp. 922 ~ 934.
59. Xinbao Yu, Xiong Yu,(2006), “Time Domain Reflectometry Tests of Multilayered Soils”, *Proc. TDR, Purdue University*, pp. 1 ~ 16.
60. Yu, X.B., Zhang, B., Tao, J.L., Yu, X.(2013), “A new time-domain reflectometry bridge scour sensor”, *Structural Health Monitoring*, Vol. 12, No. 2, pp. 99 ~ 113.
61. Zambrano, C. E.(2006), *Soil type identification using Time Domain Reflectometry*, M.S thesis, Purdue University.
62. Zambrano, C. E., Drnevich, V. P., Yu, Xiong,(2006), “Soil Texture Characterization from TDR Waveform Analysis”, *Proc. TDR, Purdue University*, pp. 1 ~ 21.