



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](#)

2016년 8월
석사학위논문

흙의 지반공학적 특성 평가를 위한 비파괴 측정 시스템 개발

조선대학교 대학원

토목공학과

송민우

흙의 지반공학적 특성 평가를 위한 비파괴 측정 시스템 개발

Development of Nondestructive Measurement System for Estimating
Geotechnical Properties of Soils

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

송민우

흙의 지반공학적 특성 평가를 위한 비파괴 측정 시스템 개발

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함.

2016년 6월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

송 민 우

송민우의 석사학위논문을 인준함

심사위원장 조선대학교 교수 박길현 (인)

심사위원 조선대학교 교수 김성홍 (인)

심사위원 조선대학교 교수 김대현 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

목차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 방법	3
1.3 연구동향	4
1.3.1 TDR 시스템을 이용한 연구	5
1.3.2 지반 강성 측정에 관한 연구	9
제 2 장 이론적 배경	14
2.1 전자기적 배경이론	14
2.1.1 전자기학의 지배방정식	14
2.1.2 전자기학의 구성방정식	15
2.1.3 전자기학의 스펙트럼 분석	16
2.2 흙의 유전특성 및 분극화 특성	17
2.2.1 정자장(Static Field)에서의 유전특성	17
2.2.2 분극현상 특성	20
2.2.3 계면분극 특성	22
2.3 전자기파 전송 특성	23
2.3.1 전송선을 통한 전파특성	23
2.3.2 전자기적 전파특성 모델	25
2.4 TDR 적용 이론	31
2.4.1 TDR 파형 분석	31
2.4.2 Purdue TDR 방법(ASTM D 6780-05)	34
2.5 탄성파의 전파특성	39

2.5.1	압축파 속도	40
2.5.2	전단파 속도	42
2.5.3	포아슨 비	43
2.5.4	전파속도 산정 방법	44
2.6	표면파 기법	47
제 3 장 비파괴 TDR 시스템 개발		51
3.1	TDR 측정 시스템 구성	51
3.2	TDR 프로브 제작	54
3.2.1	기존의 TDR 프로브	54
3.2.2	TDR 프로브 크기 및 측정범위 결정	55
3.2.3	TDR 프로브 제작	60
3.2.4	지반 강성 측정 장치 결합	62
제 4 장 실내 검증 실험		66
4.1	실험 시료	66
4.2	실험 조건 및 절차	67
4.2.1	함수비 및 건조밀도 측정	67
4.2.2	지반 강성 측정	72
4.3	TDR 프로브 보정	73
4.3.1	TDR 신호 분석	73
4.3.2	TDR 프로브 보정 실험	75
4.4	실내 검증 실험	78
4.4.1	조건 변화에 따른 TDR 신호 분석	78
4.4.2	시료별 특성상수 값 결정	85
4.4.3	시간 변화에 따른 탄성과 신호 측정	90

제 5 장 실내 검증 실험 결과 및 분석	96
5.1 실내 검증 실험 결과	96
5.1.1 함수비 측정 결과	96
5.1.2 건조밀도 측정 결과	99
5.1.3 시간 변화에 따른 강성 측정 결과	103
5.2 실내 검증 실험 결과 분석	105
 제 6 장 결론	 108

참고문헌

표 목차

표 3.1 유한요소해석 입력변수	58
표 3.2 Piezo-stack의 특성	64
표 4.1 실험 시료의 물리적 특성	67
표 4.2 실험 조건	68
표 4.3 각 시료별 특성상수	90
표 4.4 도달시간산정	95
표 5.1 시간경과에 따른 탄성계수 변화	103

그림목차

그림 1.1 연구수행 절차	4
그림 2.1 한 쌍의 동일한 양전하에 의한 유전체의 원자 분극화	18
그림 2.2 전기장 인가 전·후의 전자분극현상	21
그림 2.3 외부 전기장에 의한 이온분극현상	21
그림 2.4 외부 전기장에 의한 배향분극현상	22
그림 2.5 젖은 흙의 주파수 범위	23
그림 2.6 TDR 시스템 임피던스	25
그림 2.7 입사파(V_i)의 두 전송선의 임피던스 차이로 인한 전송파(V_t) 및 반사파(V_r) 발생 현상	26
그림 2.8 균일한 전송선의 등가회로	27
그림 2.9 불균일한 전송선의 등가회로	30
그림 2.10 일반적인 토양 함수비 측정 시스템	32
그림 2.11 TDR의 전형적인 파형	33
그림 2.12 Purdue TDR 시스템	34
그림 2.13 전기전도도 산정을 위한 TDR 파형	37
그림 2.14 탄성파의 전파 거동	40
그림 2.15 초동 추정방법	45
그림 2.16 극대점 이용방법	46
그림 2.17 상호상관법	47
그림 2.18 SASW의 개요도	48
그림 2.19 크로스 파워 스펙트럼	49
그림 3.1 TDR100 장비(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.)	51
그림 3.2 TDR 시스템 장치 구성	52
그림 3.3 TDR Seismic Testing System 소프트웨어	52
그림 3.4 TDR 소프트웨어 사용자 화면	53
그림 3.5 TDR 시스템	53
그림 3.6 응답영역 해석	57
그림 3.7 유한요소 해석 모델	58
그림 3.8 해석을 통한 전위분포	59

그림 3.9 90% 응답영역에 대한 유한요소 해석 결과	60
그림 3.10 판형 프로브	61
그림 3.11 판형 프로브 연결부	61
그림 3.12 Piezo-stack 결합 프로브	62
그림 3.13 TDR 시스템 개요도	63
그림 3.14 탄성과 측정 소프트웨어	65
그림 3.15 탄성계수 계산 소프트웨어	65
그림 4.1 실험 시료의 입도분포곡선	66
그림 4.2 실험에 사용한 시료	69
그림 4.3 몰드 무게 측정	70
그림 4.4 다짐 준비(시료)	70
그림 4.5 다짐 준비(나무판 + 추)	71
그림 4.6 다짐 작업	71
그림 4.7 TDR 신호 측정	72
그림 4.8 (몰드 + 젖은 시료)무게 및 함수비 측정	72
그림 4.9 지반 강성 측정 시험 절차	73
그림 4.10 개발 TDR 시스템 파형	74
그림 4.11 TDR 파형 비교	75
그림 4.12 소금물의 전기전도도 및 장주기전압레벨 측정	76
그림 4.13 소금물과 전기전도도의 관계	77
그림 4.14 소금물과 장주기전압레벨의 관계	77
그림 4.15 전기전도도와 장주기전압레벨의 관계	78
그림 4.16 TDR 파형 분석	79
그림 4.17 시료별 신호 변화 비교(함수비 2% - 총당 다짐횟수 8회)	80
그림 4.18 시료별 신호 변화 비교(함수비 4% - 총당 다짐횟수 8회)	80
그림 4.19 시료별 신호 변화 비교(함수비 6% - 총당 다짐횟수 8회)	81
그림 4.20 시료별 신호 변화 비교(함수비 8% - 총당 다짐횟수 8회)	81
그림 4.21 함수비 변화에 따른 신호 변화 비교(총당 타격횟수-8회)	82
그림 4.22 함수비 변화에 따른 신호 변화 비교(총당 타격횟수-12회)	82
그림 4.23 함수비 변화에 따른 신호 변화 비교(총당 타격횟수-16회)	82
그림 4.24 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-2%)	83
그림 4.25 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-4%)	84

그림 4.26 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-6%)	84
그림 4.27 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-8%)	84
그림 4.28 특성상수 값 a, b 결정(주문진 표준사)	86
그림 4.29 특성상수 값 a, b 결정(섬진강 채취시료)	86
그림 4.30 특성상수 값 a, b 결정(옥과 채취시료)	87
그림 4.31 특성상수 값 a, b 결정(원주 채취시료)	87
그림 4.32 특성상수 값 c, d 결정(주문진 표준사)	88
그림 4.33 특성상수 값 c, d 결정(섬진강 채취시료)	88
그림 4.34 특성상수 값 c, d 결정(옥과 채취시료)	89
그림 4.35 특성상수 값 c, d 결정(원주 채취시료)	89
그림 4.36 탄성과 신호 측정(압축과-1day)	91
그림 4.37 탄성과 신호 측정(압축과-3day)	91
그림 4.38 탄성과 신호 측정(압축과-7day)	92
그림 4.39 탄성과 신호 측정(압축과-14day)	92
그림 4.40 탄성과 신호 측정(전단과-1day)	93
그림 4.41 탄성과 신호 측정(전단과-3day)	93
그림 4.42 탄성과 신호 측정(전단과-7day)	94
그림 4.43 탄성과 신호 측정(전단과-14day)	94
그림 5.1 함수비 정확도에 관한 기준	96
그림 5.2 함수비 측정 값 비교(주문진 표준사)	97
그림 5.3 함수비 측정 값 비교(섬진강 채취시료)	98
그림 5.4 함수비 측정 값 비교(옥과 채취시료)	98
그림 5.5 함수비 측정 값 비교(원주 채취시료)	99
그림 5.6 건조밀도 정확도에 관한 기준	100
그림 5.7 건조밀도 측정 값 비교(주문진 표준사)	101
그림 5.8 건조밀도 측정 값 비교(섬진강 채취시료)	101
그림 5.9 건조밀도 측정 값 비교(옥과 채취시료)	102
그림 5.10 건조밀도 측정 값 비교(원주 채취시료)	102
그림 5.11 시간경과에 따른 압축탄성계수의 변화	104
그림 5.12 시간경과에 따른 전단탄성계수의 변화	104
그림 5.13 함수비 측정 값 비교(전체 시료)	105
그림 5.14 건조밀도 측정 값 비교(전체 시료)	106

그림 5.15 시간경과에 따른 탄성계수 변화 양상 107

ABSTRACT

Development of Nondestructive Measurement System for Estimating Geotechnical Properties of Soils

Song, Minwoo

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Soil compaction is very important in construction site of the road and railroad. Field compaction control is to check whether or not the geomaterials meet the minimum acceptable dry density, water content, and elastic modulus. Because of this, dry density, water content, and elastic modulus are important factors affecting the degree of soil compaction. Conventional method such as the sand cone test and the plate load test are used to measure those properties. However, this method may cause some errors depending on the operator, and was the destructive testing method at surface of the soil.

In order to solve this problem, the TDR(Time Domain Reflectometry) system was developed in abroad and has been studied continuously by foreign researchers. However, it requires driving the rod probes into the ground, and is still a destructive testing method. This study aims to develop a non-destructive TDR system that can measure the dry density, water content, and elastic modulus without disturbing and destruction the surface of the soil.

Therefore, in this study, a new TDR system equipped with a flat type probe has been developed to improve the currently used TDR system that measures

the dry density and water content. In order to verify the developed TDR system, TDR tests were conducted on Jumunjin sand and three typical sandy soils. Also, additional tests, to seek relational equation between electrical conductivity and long term voltage level, were performed to measure the correction value of the developed probe. Using the TDR signals, dielectric constant, electrical conductivity, and soil constants were derived. Therefore, the dry density and water content of the soils were determined through the TDR tests. Also, in this study, the Piezoelectric stack, which is an instrument for measuring the elastic modulus of soil, has been added to the TDR system with a flat type probe. And then, elastic modulus variation of reinforced soil with time was determined by using the TDR system.

The applicability of the TDR system was examined by comparison of the measured values by TDR and the real values. The values of dry density and water content were found to have about 2% and 0.5% error, respectively. Also, the values of compression and shear modulus increased from 198.65MPa to 541.80MPa and from 125.55MPa to 302.02MPa with time, respectively.

Based on the test results, it has been confirmed that the new TDR system can be used as an alternative to the previous TDR system as it can measure the dry density, the water content, and the elastic modulus with reasonable accuracy, leading to significant time and cost savings. Consequently, it appears that the developed TDR system will be very useful to advance the current practice of compaction control.

제 1 장 서 론

국가의 발전을 위해 철도, 도로 및 신도시의 개발은 지속적으로 계속되고 있다. 또한 이러한 발전을 위해서 기존의 구조물을 철거하고 재건설하는 과정을 거친다. 구조물을 건설하기 위해 가장 중요한 요소는 지반의 상태이다.

우리나라는 국토의 대부분이 산지로 이루어져 있고 최근까지의 개발을 통해 건설부지가 부족해져 새로운 건설부지 확보가 필요한 실정이며, 부족한 건설부지 확보를 위해 연안 해안을 중심으로 대규모 항만공사가 이루어지고 있다. 이러한 항만공사의 대부분은 연약지반 위에 시공하는 경우가 많고, 이러한 지반에 구조물을 건설하기 위해서는 구조물이 버틸 수 있는 강성 및 다짐도가 필요하다.

하지만 지반의 다짐도 측정을 위해 기존의 재래식 시험 방법을 이용하고 있고, 이는 시험자에 따라 오차가 발생할 수 있으며, 측정하는데 소요되는 시간에 비하여 원하는 정확도의 값을 얻기 어렵다. 또한 지반의 강성을 측정하기 위하여 평판재하시험을 주로 이용하고 있으며, 이러한 시험 방법은 현장 전체를 대표할 수 있는 값을 나타낸다고 보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 국내 건설 현장에서 구조물을 안전하게 지지할 수 있는 강성 및 다짐도 평가를 위한 함수비, 건조밀도 및 탄성계수를 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 이를 실제 현장에서 적용하기 위한 실내 검증을 실시하고자 한다.

1.1 연구배경 및 목적

철도 및 도로 시공 현장에서 다짐은 매우 중요한 요소 중 하나이다. 보통의 토목공사 표준시방서에서 다짐의 기준은 노체의 경우 최대건조밀도의 90% 이상, 노상의 경우 최대건조밀도의 95% 이상을 기준으로 하고 있다. 이러한 다짐도를 판단하기 위하여 국내의 현장에서는 모래치환법(KS F 2311)을 이용한다. 그리고 도로의 노상 및 노반의 지지력 계수를 구하여 지반의 강성을 평가하는 평판재하시험(KS F 2310)을 이용한다.

모래치환법을 이용한 현장 들밀도 시험방법은 오랜 기간 현장에서 적용하여 검

증된 시험방법이지만, 시험자에 따라 시험구멍의 크기 및 깊이가 다를 수 있어 측정값의 오차가 발생할 수 있다. 또한 시험자의 숙련도에 따라 결과 값의 오차가 발생할 수 있다. 이러한 재래식 시험 방법은 시험자 개인의 오차 및 시험기간 등의 문제가 발생하기 쉽고, 오차발생으로 인한 다짐불량 및 과다짐(Over compaction) 등이 발생할 수 있다. 다짐불량 및 과다짐은 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.

평판재하시험의 경우 시험에 필요한 장비(D/T 15ton 등)가 차지하는 공간이 크기 때문에 협소한 장소에서는 시험이 불가능 할 수 있다는 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 지역에서는 모래치환법으로 다짐도를 평가하여 강성을 평가하기도 하지만, 이는 교대 및 기타 구조물의 뒤채움 토사 및 골재의 경우 밀도를 이용한 다짐도 측정 방법의 한계가 있기 때문에 강성 부족 등으로 인한 부등침하가 발생할 수 있다.

모래치환법 등의 현장 들밀도 시험에서 발생할 수 있는 문제점을 보완하고 지반의 파괴와 변형을 최소화하여 지반의 상태를 평가하는 시간영역반사법(Time Domain Reflectometry, 이하 TDR)에 대한 연구는 국내·외적으로 연구가 꾸준히 진행되고 있다(송민우 등, 2016).

TDR 시스템은 1950년대 전력 및 통신 산업에서 전송선의 불연속 지점을 찾기 위하여 도입되었고, 그 후 여러 연구자들에 의하여 활발히 진행되었으며, Topp 등(1980)이 금속 봉을 이용하여 흙의 체적함수비를 측정하는 기법을 지반공학적으로 적용한 이후 현재 미국의 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진에 의해 개발된 현장 지반의 건조밀도와 중량함수비를 측정하는 ASTM D6780-05 기법까지 발달하였다(송민우 등, 2015).

하지만 Purdue TDR 등 기존의 TDR 시스템에서 사용하고 있는 봉형 프로브는 몇 가지 문제가 발생 할 수 있다. 첫째로, 프로브를 관입하기 위한 지반은 보통 다짐도가 90~95% 이상인 단단한 지반이며, 이러한 지반에 프로브를 관입시키기 위해서는 소정의 작업이 필요하다. 둘째로, 프로브를 지반에 관입시킬 때 프로브 주변 지반의 교란이 발생할 수 있다. 이는 흙과 프로브의 접촉이 잘 되지 않을 수 있고, 원지반을 교란시켜 다짐도의 변화를 줄 수 있어 원지반의 상태를 그대로 측

정하기 힘들다.

그리고 최근 건조밀도와 함수비만으로 다짐관리를 하는 방법 대신 지반의 전단 탄성계수 및 변형률계수 등의 지반의 강성을 측정하여 지반의 다짐도를 평가하는 방법에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 설계기준 등의 정립에 대한 노력이 꾸준히 진행되고 있다.

따라서 본 연구는 기존의 TDR 시스템에서 사용하고 있는 봉형 프로브를 이용한 흙의 함수비 및 건조밀도 측정 이론식의 문제점을 분석하고, 앞에서 기술한 것과 같이 재래식 다짐관리 방법을 이용하였을 때 발생할 수 있는 문제를 최소화 시키고, 상기 기술한 기존의 TDR 시스템의 문제점을 개선하기 위하여 판형 프로브를 제작하였으며, 개발한 판형 프로브를 이용한 새로운 TDR 시스템의 정밀도를 분석하고, 국내 지반에서의 적용성을 검토하였다. 또한 지반의 강성을 측정하기 위하여 표면의 전파속도를 측정하는 압전작동기(Piezoelectric Stack, 이하 Piezo-stack)를 결합하여 지반의 탄성계수를 측정하였다. 이를 기존의 상용화된 장비를 이용한 측정값과의 비교를 통해 개발 장비의 적용성을 검토하였다. 이를 통해 경제적이고 신속·정확한 다짐관리 기술을 확보하여 도로 및 철도의 다짐관리를 위한 방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구의 절차는 그림 1.1과 같으며, 첫째로 국내·외 문헌 및 선행연구 자료를 바탕으로 TDR 시스템의 기술동향과 연구동향을 분석하여 기존의 TDR 시스템의 문제점을 분석하였다. 둘째로 기존의 TDR 시스템의 문제점을 해결하기 위한 새로운 TDR 시스템을 위한 판형 프로브를 개발하였다. 셋째로 개발한 판형 프로브를 이용하여 실내 검증시험을 수행하였으며, 검증시험을 위하여 주문진 표준사를 포함하여 총 네 가지의 시료를 이용하였고, 노건조함수비시험(KS F 2306)을 이용한 함수비의 실측값과 습윤밀도를 이용한 실제 건조밀도 계산 값을 기준으로 하여 TDR 시스템을 이용한 함수비와 건조밀도 측정값을 비교하여 정밀도를 검토하였다.

또한 지반의 강성 측정을 위한 Piezo-stack을 결합하여 판형 프로브를 개선하였

으며, 이를 통해 지반의 탄성과 속도를 측정하였다. 이를 상용화된 측정 장치의 측정값과 비교하여 TDR 시스템을 이용한 측정값과의 상관성을 분석하였다.



그림 1.1 연구수행 절차

1.3 연구동향

본 연구에서는 지반의 함수비, 건조밀도 및 탄성계수 측정을 위한 TDR 시스템을 개발하기 위하여 기존의 TDR 시스템을 이용한 연구 및 지반의 강성 측정을 위한 연구들을 중심으로 관련 문헌을 조사하였다.

1.3.1 TDR 시스템을 이용한 연구

본 절에서는 기존의 TDR을 이용하여 국내·외에서 진행한 연구를 조사하였다. 국외에서 TDR 시스템은 Topp 등(1980)이 흙의 유전율이 흙 안에 포함된 물의 양에 강하게 의존하고 있다는 것을 입증하여 TDR의 지반공학적인 추가 적용 가능성을 평가한 이후로 많은 연구자들에 의하여 연구가 진행되었으며, 국내에서 TDR 시스템을 이용한 연구는 박재현 등(1997)이 비포화 흐름을 측정하는 장비인 Tensiometer를 사용할 때의 문제점을 통해 TDR 시스템을 이용한 함수비 측정방법을 소개하면서 시작되었다.

TDR에 관한 연구는 다음과 같이 함수비 및 밀도 측정에 관한 연구, 지하수 거동 및 포화도 계측에 관한 연구, 그리고 TDR 파형 분석 등을 포함한 다양한 연구가 진행되고 있다.

가. 함수비 및 밀도 측정에 관한 연구

김동주 등(1999)은 TDR 시스템을 이용하여 사질토의 자갈함량 변화에 따른 함수량의 변화를 7가지 시료를 이용해 분석하였고, 이를 통해 유전상수와 함수량간의 상관식을 도출하고 Topp 등(1980)이 제안한 이론식의 적용성을 검토하였다. 그 결과 Topp 등(1980)의 식과의 오차가 최대 8%까지 발생하여 사질토에 적용이 어려울 것이라고 하였고, 연구 결과에서 얻을 수 있었던 토양의 수분함량 범위 내에서 TDR 기법이 적용될 수 있을 것이라고 하였다.

또한 중량함수비 및 건조밀도 측정에 관한 연구가 미국 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진에 의해 연구가 꾸준히 진행되어오고 있으며, White 등(2003)은 ASTM D6780-02 방법을 이용하여 흙의 중량함수비와 건조밀도를 측정하고, 노상토 지지력비 시험(California Bearing Ration Test)으로 얻은 CBR값과 TDR 프로브를 관입시키는 데 평균적으로 관입시키는데 필요한 타격횟수를 이용하여 관계식을 도출하였다. 그리고 Yu 등(2004)은 기존의 체적함수비를 측정하는 시스템이 실제 현장에서 적용이 힘들다는 점을 언급하고, TDR 시스템을 이용한 중량함수비 및 건조밀도를 측정하는 이론식을 제안하였다.

Yu 등(2006)은 다층토에 대하여 기존의 연구자들에 의해 제안된 체적함수비, 중

량함수비 및 건조밀도의 식을 적용시켜 연구를 수행하였다. 체적함수비의 제안식은 중량함수비의 제안식보다 더 나은 결과를 보였고, 이를 통해 중량함수비 또는 건조밀도의 제안식이 다층토에는 적합하지 않다고 하였다.

조명환 등(2010)이 TDR 시스템을 이용해 아스팔트 포장 하부의 함수비 계측에 관한 연구를 진행하였고, 연구를 통하여 함수비 측정 센서(CS616)에 대한 보정시험을 제시하고, 피복두께, 센서 간 간섭 영향, 온도의 영향 및 다짐률의 변화에 대한 실험을 실시하였다. 그 결과 종합적인 보정식을 사용하는 것 보다 각각의 현장에 맞는 보정식을 사용하는 것이 정확한 현장 계측 자료를 얻을 수 있다고 하였다.

또한 Jung 등(2013)은 기존의 Yu 등(2004)의 중량함수비 및 건조밀도 제안식이 세립분이 많이 함유된 흙이나 높은 함수비의 흙에서는 정확한 값을 측정하기 어렵다고 하여 새로운 건조밀도 및 중량함수비의 식을 제안하였으며, 제안한 식에 대한 흙의 보정상수 값을 유전상수 및 점토의 함유량에 대한 관계식을 통해 자가보정(self-calibration) 할 수 있는 시스템으로 정립 하였다.

그리고 Thring 등(2014)은 측정된 걸보기 유전율 값으로부터 도출한 체적함수비와 건조밀도로부터 중량함수비를 추정할 수 있는 비교적 간단한 세 가지 방법을 제안하였다.

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 융해시 지하수위의 변화와 지반의 침하 등 동결·융해와 관련된 정보를 측정하기 위하여 TDR을 이용하였고, 이를 통해 동결되었던 지반이 융해되는 과정에서 일어나는 변화를 측정하였다.

이가영 등(2005)은 대상 연구 지역의 측량을 통해 1m 간격의 정밀 DEM을 구축, 분석하여 TDR 센서를 매설하였고, 사면에서의 토양 수분 모니터링을 실시하고, 이를 통해 감쇄곡선을 분석하였다.

Benson 등(2006)이 CS616프로브를 이용하여 흙의 종류에 따른 측정값을 시간의 흐름에 따른 모니터링을 실시하였으며, 1년간의 모니터링으로 겨울철과 봄철 동결·융해로 인한 체적함수비의 변화양상을 파악하였다. 그리고 Scheuermann 등(2009)은 폴리에틸렌으로 피복된 3개의 구리선으로 구성되어 있는 Flat-ribbon 케이블을 제작하여 실험용 모형실험을 진행하였으며, 모형 제방은 0.2~2.0mm의 균질한 모래를 이용하여 약 40%의 간극률로 축조되었고, 독일 Karlsruhe 대학의 FWRI(Federal Waterways and Research Institute)에 설치되었으며, 간극수압을 측정하기 위하여 피에조미터를 설치하여 실제 간극수압과 TDR로 측정된 함수비를 바탕으로 값을 비교하였다.

김기영 등(2011)은 TDR 센서를 이용하여 지반 내 지하수의 거동을 계측하고 이를 이동 평균법과 푸리에 변환을 통해 필터링 기법으로 포화 및 불포화 영역의 구분 및 변화를 수치적으로 결정하기 위하여 실내 및 현장실험을 진행하였다.

그리고 박민철 등(2012)은 열수축 튜브와 Flexible flat 케이블을 이용하여 제작한 함수비 측정용 TDR 계측선을 이용하여 사면경사 1:2로 높이 1.2m의 제방을 축조하여 수평방향으로 총 6개소에 TDR 계측선을 설치하여 제방의 침투거동을 파악하였으며, 유전상수와 함수비의 관계를 이용하여 TDR 파형을 역해석하였고, 이를 통해 함수비 분포를 측정하고 모형제방의 침투거동을 파악하였다.

신은철 등(2013)은 상수도관의 동결과 융해에 따른 거동을 연구하기 위하여 TDR 시스템을 이용하였으며, TDR 함수량계와 온도계의 데이터를 이용해 동결심도의 추정이 가능할 것이라고 하였고, 동결·비동결 상태를 확인하는데 사용할 수 있다고 하였다.

다. 기타 TDR 관련 연구

상기 언급한 TDR 시스템에 관련된 연구 이외에 박재현 등(1998a)은 TDR을 이용하여 비포화영역에서 용존 오염원의 농도 추정을 위해 TDR 기기의 검정실험을 수행하였고, 이를 통해 박재현 등(1998b)은 비포화 영역에서 용존오염원의 거동을 TDR을 이용하여 측정하는 연구를 진행하였고, 천이상태의 함수량과 오염원 농도를 측정하는데 전기전도도와 함수량의 관계에 대한 관계식을 제시하였고, 전기전도도와 토양수의 농도, 전기전도도와 함수량의 관계를 이용하여 천이상태의 오염

원 농도를 측정하는 방법을 개발하였다.

그리고 Feng 등(1999)이 다층토(젖은모래/마른모래)에 대한 TDR 파형을 분석하기 위해 다중단면 전송선 모델을 이용하여 시뮬레이션 하고, TDR을 이용하여 측정을 하여 두 파형을 비교하여 연구를 수행하였다. 그리고 Drnevich 등(2001b)은 온도 변화에 따른 파형의 변화를 분석하여 측정 시 온도에 따른 유전상수 값의 보정상수를 제시하였다. 또한 Drnevich 등(2005)은 서로 비슷한 흙 시료에 대하여 특성상수 값을 각각 도출하였고, 동일한 에너지로 다짐을 하였을 때 시뮬레이션을 통하여 얻어지는 특성상수 값과 실제 측정하였을 때 얻어지는 특성상수 값을 비교하였으며, 이를 통해 예측한 값이 실제 측정값과 비슷한 값을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

그리고 Zambrano 등(2006)은 측정하는 시료에 대한 유전율의 차이로 인한 TDR 파형의 변화를 주목하였고, 건조된 서로 다른 흙에 대해서는 TDR 파형의 큰 변화가 일어나지 않고, 함수비가 늘어남에 따라 파형의 변화가 확연히 드러난다고 하였다. 이를 통해 TDR 시스템을 이용해 측정된 파형으로 개략적인 분류를 할 수 있을 것이라고 하였다. 또한 Chen 등(2007)은 석회노분(Lime Kiln Dust, LKD)을 이용하여 지반을 개량하고 이러한 전도성이 높은 개량 혼합토에서 TDR 신호를 분석 하였고, 이를 통해 TDR 시스템이 안정화시킨 흙의 유용한 다짐관리 방법이 될 것 이라고 하였다.

또한 Liu 등(2008)은 흙의 열용량에 관한 이론을 바탕으로 하는 Thermo-TDR 기술을 이용하여 TDR 센서의 치수를 변화시켜 지반의 함수비와 총 밀도를 측정 하였고, 이를 통해 Thermo-TDR 기술로 흙의 물리적 성질 뿐만 아니라 열에 관한 성질도 빠르게 측정이 가능할 것이라고 하였고, 또한 Liu 등(2014)은 Thermo-TDR 기술을 이용해 시간에 따른 총 밀도를 모니터링 하기 위하여 기존의 Thermo-TDR 시스템을 재설계하였고, 이것을 이용하여 현장 모니터링을 실시하였다.

김대성 등(2014)은 TDR을 이용하여 현장 지반의 건조밀도와 중량함수비를 측정 하는 연구를 진행하였다. 미국의 CAMPBELL사에서 제작한 TDR100을 이용하여 실험을 수행하였고, 실내 및 현장 실험을 통해 국내 지반에서의 TDR 기법의 적용 성을 평가하였다.

그리고 한아름(2015)은 TDR 센서를 차수막 접합부에 설치하여 물성에 따른 파형의 분석, 누수 지점을 찾기 위하여 연구를 진행하였으며, 매립지의 경과시간, 매립된 쓰레기의 성장 등에 따라 바뀌는 침출수의 성분을 모사하기 위하여 서로 다른 농도의 1가 양이온인 NaCl을 제조하여 누수 시 영향을 분석하였다. 그 결과 TDR을 통해 분석된 파형의 변화와 실제 침출수성상이 유사한 거동을 한다는 것을 알 수 있었으며, 이를 향후 매립지에 적용 시 사용할 수 있을 것이라고 하였다.

이와 같이 국외에서는 TDR 시스템을 이용하여 지반 조건에 따른 TDR 파형의 변화를 분석하고, 이를 통해 TDR 센서의 개발, 시뮬레이션 기법, 중량함수비 예측, 새로운 이론식 개발 등의 많은 연구가 진행되고 있으며, 국내에서는 TDR 시스템을 이용한 연구는 대부분 흙의 포화도 및 동결상태 확인, 제방의 모니터링, 지하수위 거동 확인 등의 연구가 진행 중이며, 지반의 중량함수비, 건조밀도를 측정하여 도로 및 철도 등의 성토지반에서의 다짐관리를 위한 TDR 시스템 활용이 국외에 비하여 현저히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 국내에서 지반의 다짐도를 평가할 수 있는 기법으로 잘 알려지지 않은 TDR 시스템을 이용하여 지반의 상태를 평가하는 방법을 현장 다짐관리에 대한 기준으로 마련해야 한다.

1.3.2 지반 강성 측정에 관한 연구

본 절에서는 지반의 강성을 측정하기 위한 국내·외에서 진행한 연구에 대하여 조사하였으며, 현재 다양한 지반 강성 측정 방법에 대한 연구가 진행되고 있지만, 표면파 기법 및 탄성파측정을 통한 지반 강성 측정에 대한 연구를 위주로 조사하였다.

가. 벤더 엘리먼트를 이용한 탄성파 측정에 관한 연구

벤더 엘리먼트를 이용한 탄성파 측정 시험은 Shirley 등(1978)에 의해 카울리나이트 슬러리의 전단강성의 변화를 측정하는데 처음으로 사용되었으며, 카울리나이트 슬러리의 압밀 침하기간 중 전단파 속도를 계측하였다. 이를 통해 지반공학적으로 벤더 엘리먼트를 이용하는 연구가 지속적으로 진행되어오고 있다.

그리고 Dyvik 등(1985)는 벤더 엘리먼트와 공진주 시험을 이용하여 전단탄성계수를 구하고 그 값을 비교하였고, 구속압이 10~130MPa인 조건에서 공진주 시험을 실시하여 구한 전단탄성계수가 거의 비슷한 값을 갖는다는 것을 입증하였다.

또한 Dyvik 등(1987)과 Fam 등(1997)은 압밀시험장치에 벤더 엘리먼트를 설치하여 각각의 압밀하중에 따른 전단파 속도를 측정하였으며, Roberto 등(2001)은 삼축압축시험에서 벤더 엘리먼트 센서를 다방향으로 설치하여 모래의 이방성에 대하여 연구를 진행하였으며, 벤더 엘리먼트를 삼축압축셀의 상부 캡, 하부 받침, 시료 내부의 수평방향, 그리고 비스듬한 방향의 P파 와 S파의 측정이 가능하게 설치하였고, 이와 같이 새로운 방식으로 설치된 벤더 엘리먼트를 이용한 측정값은 기존의 값과 비교하였을 때, 같은 정도의 신뢰성을 보인다고 하였고, 벤더 엘리먼트를 추가적인 설치만으로 시료의 응력에 따른 이방성을 평가할 수 있다고 하였다.

이중섭 등(2006)은 흙의 전단파가 흙 입자의 강성과 밀도에 밀접하게 연관되어 있으며, 전단강성이 물의 존재 여부에 영향을 받지 않는다는 점을 언급하고, 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단탄성계수(G_{max})를 측정하는 방법과 시험 결과에 영향을 줄 수 있는 요인 등 측정에 관하여 요구되는 사항을 검토·진파 하기 위하여 연구를 수행하였다.

그리고 목영진 등(2006)은 피에조미터를 이용한 개량 지반의 모니터링이 연속적인 모니터링은 가능하지만 기초 설계나 안정해석에 필요한 역학적 물성은 측정하지 못하고, 콘(cone)시험이나 베인(vane)시험으로 역학적 물성은 측정이 가능하지만 지속적인 모니터링이 불가능하다는 점을 언급하고, 벤더 엘리먼트를 이용하여 현장 계측을 하였으며, 크로스홀(crosshole)과 인홀(inhole) 탄성과 기법을 이용하여 2m깊이까지 현장에 관입하여 전단파 신호를 획득하여 계측 값의 정밀도 향상에 관한 연구를 진행하였다.

이러한 연구를 통해 박철수 등(2009a)은 철도 토공노반의 품질관리를 위해 평판재하시험에서 사용하고 있는 30cm의 평판을 사용하고 있고, 고속철도 노반에 주로 사용하고 있는 재료에 대한 신뢰성이 떨어진다는 점을 언급하였고, 이에 따라 계측이 간편하고 강성과 직접적인 연관성이 있는 탄성계수를 측정할 수 있는 벤더 엘리먼트를 이용하여 압축파를 계측하는 연구를 수행하였고, 이는 실내에서 측정 한 압축파속도와 현장 계측 결과를 비교하여 압축파 속도의 현장 적용 가능성을

확인하였고, 이어 박철수 등(2009b)은 앞선 연구를 바탕으로 시험성토 부지에서 현장 및 실내 동적 시험을 통하여 벤더 엘리먼트로 측정된 압축과 속도의 설계 적용성에 대한 타당성 검토를 하였고, 직접 도달 깊이가 약 30cm 정도로 일반적인 다짐층 두께를 충분히 만족시키고, 압축과의 속도가 시험자의 숙련도나 계측 반복횟수에 관계없이 일관된 결과를 보여주어 압축과 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방법이 실무에 적용이 가능할 것이라고 하였다.

그리고 변용훈 등(2012)은 탄성과 측정 센서인 벤더 엘리먼트를 이용하여 시료의 압축과 및 전단과 속도를 측정하여 불포화토의 간극비 산정에 관한 연구를 진행하였으며, 이는 주문진 표준사를 100kPa와 200kPa의 응력을 가하고, 실트를 20% 혼합한 주문진 표준사를 100kPa의 응력을 가하여 실험을 진행하였다. 불포화 과정이 진행되는 동안 단계별 포화도 및 탄성과 속도를 동시에 측정하였으며, 이를 통해 부피변화를 통한 간극비 값과 탄성과 속도를 이용한 간극비 값을 비교하였고, 탄성과 속도를 활용한 불포화 지반의 물성치 조사 시 유용하게 활용할 수 있을 것이라고 하였다.

여기서 탄성과 속도 측정은 시험자의 도달시간 산정 방법에 따라 달라질 수 있다. 여기서 탄성과 도달시간은 크게 초동 추정방법(First Arrival Picking Method), 극대점 이용방법(Peak to Peak Method)이 있으며, 각각에 대한 오차가 존재하기 때문에 연구자에 따라 서로 다른 방법에 의해 도달시간을 산정한다. 많은 연구자들이 서로 다른 도달시간 산정 방법에 대해 연구를 진행하였으며, 초동 추정방법은 입력전압이 시작되는 지점과 전단파 성분이 시작되는 지점까지의 도달 지점 사이의 거리를 시간으로 해석하여 도달시간을 구하는 방법이며, 이러한 방법은 시험자에 의해 전단파 성분이 시작되는 지점이 서로 다를 수 있다는 문제가 있다고 하였다. 그리고 극대점 이용방법은 입력파의 극대점과 전단파 성분의 극대점 사이의 거리를 이용하여 도달시간을 구하는 방법이며, 이는 기준점이 명확하기 때문에 결과가 객관적인 방법이고 현재 많은 연구자들이 이 방법을 이용하고 있다(Viggiani 등, 1995; Chan, 2006; Yamashita 등, 2009; Leong 등, 2009; Chan, 2010; 김종윤, 2013; 황세훈, 2014).

나. 표면파 측정에 관한 연구

표면파(surface wave) 기법은 1980년대 지각 구조 판명과 석유의 위치를 탐사하기 위하여 적용시키면서 지반공학적인 연구가 진행되었으며, Gucunski 등(1992)은 SASW 기법의 필터링 방법을 제안하기 위하여 지반의 조건을 변화시켜 수치해석을 실시하였고, 김성인(1996)은 기존의 표준관입시험, 콘관입시험이 시험 대상 지점의 관입저항치이기 때문에 과대평가 될 수 있다는 단점을 지적하고, 표면파 기법을 적용하여 지반의 전단파 속도를 측정하여 현장에서 실시한 표준관입시험 결과값과 비교하였다. 이를 통해 표면파 기법의 현장 적용성을 확인하였고, 다채널 표면파 기법을 개발하여 넓은 지역의 지반을 평가하여야 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있다고 하였다.

황진호(2001)는 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave) 기법의 분산곡선 결정에 대해 시간-주파수 해석을 이용하는 하모닉 웨이브릿 변환을 적용하였고, 이를 검증하기 위해 전단파 속도가 다른 두 층으로 모델링 하여 수치해석을 실시하였고, 이를 통해 적용된 하모닉 웨이브릿 변환 기법의 적용성을 검토하였다. 그리고 장대우(2004)는 수직 Rayleigh 파, 수평 Rayleigh 파와 Love 파의 분산특성을 수치해석을 통해 분산특성을 파악하기 위하여 연구를 진행하였고, 수치해석을 통한 결과와 현장 검증실험을 통해 실험의 신뢰성을 확인하였다.

Orozco(2004)는 SASW 현장 실험 데이터를 통해 얻어진 분산곡선으로부터 전단파 속도를 예측하기 위하여 연구를 수행하였고, 측정 지반의 두께, 깊이와 초기 전단파속도 등이 중요한 요소로 작용한다고 하였다. 그리고 Stokoe 등(2004)은 캘리포니아 현장에서 SASW 기법을 이용하여 현장 주변 주차장, 고속도로, 그리고 현장 지반의 전단파 속도를 측정하고 그 값들을 비교하여 현장지반의 강성을 평가하였다.

조성호 등(2004)은 CSW(Continuous Surface Wave) 기법이 내포하고 있는 문제점을 해결하기 위하여 파수복원 기법을 제안하였고, SASW와 CSW 기법을 이용하여 비교 실험을 수행하고, 제안한 파수복원 기법의 현장 적용성에 대한 연구를 진행하였다. 그리고 Li(2008)는 초기 영향인자를 파악하기 위하여 SASW 기법을 이용하여 깊이별 전단파 속도 단면도를 개발하였으며, 이론적인 모델과 실험 데이터와의 비교를 통해 분산곡선의 적합성을 분석하였다. 또한 Goh 등(2011)은 암질

판명에 SASW 기법을 적용하기 위하여 연구를 수행하였으며, 시추를 통해 얻은 암질지수(RQD)별 암반에 대하여 SASW 기법을 통해 얻은 전단파 속도의 관계식을 도출하였으며, SASW 기법을 이용하여 얻은 전단파 속도를 통해 암질을 판명할 수 있다고 하였다.

이와 같이 국내·외적으로 탄성파 측정으로 지반의 강성을 측정하는 연구는 지속적으로 진행 중이며, 이를 통해 TDR 시스템을 함수비, 건조밀도 뿐만 아니라 지반의 강성을 파악할 수 있는 탄성계수를 측정할 수 있는 시스템으로 개발한다면 다짐관리에 필요한 인력, 시간 등을 줄일 수 있을 것이다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 전자기적 배경이론

2.1.1 전자기학의 지배방정식

전기 및 자기장의 거시적(원자 크기에 비하여 큰) 현상은 Maxwell의 방정식에 적용되며, 본 연구에서는 Gauss의 법칙(식 (2.1), 식 (2.2)), Faraday의 법칙(식 (2.3)), 그리고 Ampere의 법칙(식 (2.4))을 적용한다.

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.4)$$

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

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

E : 전기장 밀도(electric field density) ($Volt/m$)

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

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

t : 시간(time)

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

연속성 또는 전하의 보존 방정식은 Maxwell의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.5)$$

2.1.2 전자기학의 구성방정식

식 (2.1) ~ 식 (2.4)의 Maxwell의 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 있지만, Faraday의 법칙과 Ampere의 법칙은 독립적인 식이며, 구성 방정식은 다음의 식들로 나타낼 수 있다.

$$D = f_D(E) \quad (2.6)$$

$$B = f_B(H) \quad (2.7)$$

$$J = f_J(E) \quad (2.8)$$

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)

균질, 선형, 그리고 등방성 매질의 경우 식 (2.6) ~ 식 (2.8)은 ϵ, μ, σ 의 스칼라 변수에 의해 다음의 식들과 같이 정의할 수 있다.

$$D = \epsilon E \quad (2.9)$$

$$B = \mu H \quad (2.10)$$

$$J = \sigma E \quad (2.11)$$

여기서, ϵ : 유전율 (dielectric permittivity)
 μ : 투자율 (magnetic permeability)
 σ : 전기전도도 (electric conductivity)

이러한 스칼라량(scalar quantity)은 그 영역의 주파수(f)에 의존하고, 식 (2.9) ~ 식 (2.11)은 스펙트럼 표현에서 그 영역 벡터에 관한 것이며, 이는 주파수-의존 변수를 사용하는 것이 적절하다.

2.1.3 전자기학의 스펙트럼 분석

전자기장의 수량(Electromagnetic field quantity)은 공간과 시간의 함수이며, 이것은 임의의 시간신호가 많은 정현파 성분의 중첩으로 생각할 수 있다고 알려져 왔다. 즉 이것은 구성요소의 분포와 스펙트럼을 갖는다. 주파수 영역 분석을 위해서 시간영역 방정식은 푸리에 변환으로 얻을 수 있는 주파수 영역 방정식(식 (2.12))으로 변환되어야 한다.

$$U(x, y, z, t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \hat{U}_k(x, y, z, f_k) e^{j2\pi f_k t} \quad (2.12)$$

여기서,

$$\hat{U}_k(x, y, z, t) = \frac{1}{T_p} \int_{T_p} U(x, y, z, t) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (2.13)$$

여기서, U : 전자기적 특성(식 (2.1) ~ 식 (2.4))
 \hat{U}_k : 공간의존 푸리에 계수 (spatially dependent Fourier coefficient)
 f_k : k 번째 계수의 주파수 (k/T_p)
 T_p : 주기 (fundamental period of the field quantity)

식 (2.12)와 식 (2.12)를 이용하면 지배방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla \cdot \hat{D} = \hat{\rho} \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \hat{B} = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \hat{E} = -j2\pi f \hat{B} \quad (2.16)$$

$$\nabla \times \hat{H} = \hat{J} + j2\pi f \hat{D} \quad (2.17)$$

첨자 k가 삭제된 식이지만, 상기 방정식들은 각각의 주파수 영역에서 정의되어야만 하고, 주파수-의존 구성방정식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\hat{D} = \varepsilon(f) \hat{E} \quad (2.18)$$

$$\hat{B} = \mu(f) \hat{H} \quad (2.19)$$

$$\hat{J} = \sigma(f) \hat{E} \quad (2.20)$$

2.2 흠의 유전특성 및 분극화 특성

2.2.1 정자장(Static Field)에서의 유전특성

원천전하(source charge)가 유전매체에 배치되면, 생성된 전기장(electric field)은 양극 현상에 의해 설명할 수 있다. 도체와 달리 유전체는 대부분 원자에 결합된 자유전하(free charge)를 가지고 있다. 외부전기장은 양전하와 음전하 중심 분리의 원인이 될 수 있다. 이러한 쌍극자에 의한 현상은 유전체의 분극으로 정의된다 (Kraus, 1992).

그림 2.1과 같이 유전물질을 포함하는 공간의 영역은 일부 자유전하 때문에 전기장을 형성한다.

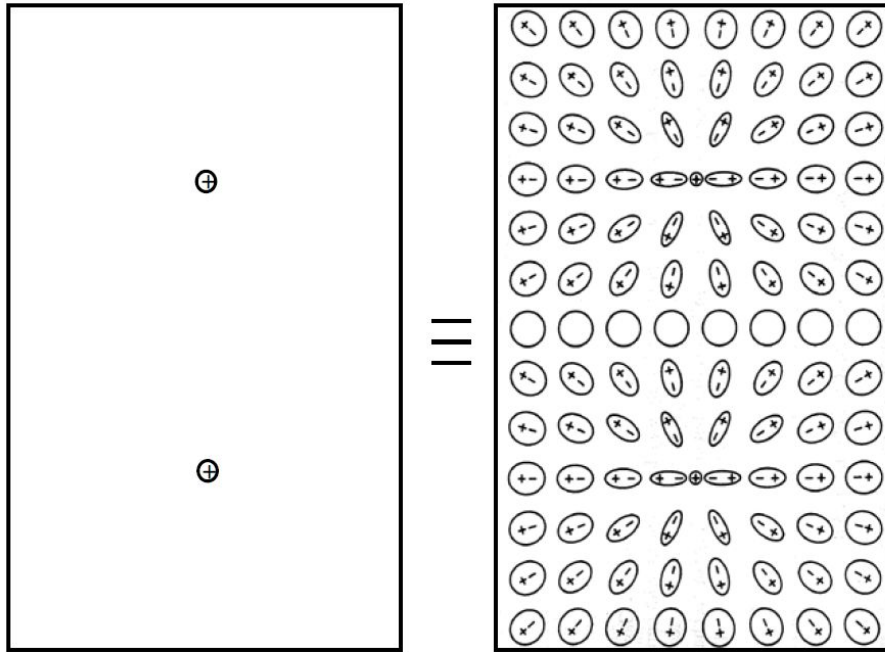


그림 2.1 한 쌍의 동일한 양전하에 의한 유전체의 원자 분극화(Ramo 등, 1994)

이러한 현상으로 식 (2.1)과 식 (2.9)는 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_o E) = \rho_f + \rho_b \quad (2.21)$$

$$\rho_b = -\nabla \cdot P \quad (2.22)$$

여기서, ϵ_o : 자유공간(진공상태)에서의 유전율

ρ_f : 자유전하 밀도

ρ_b : 구속전하 밀도

P : 분극벡터(polarization vector)

식 (2.22)에 식 (2.21)을 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_o E + P) = \rho_f \quad (2.23)$$

또한 전속밀도 D 는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \epsilon_o E + P \quad (2.24)$$

등방성 또는 선형재료에서 분극은 전기장도에 비례하고, 다음과 같이 표현할 수 있다(Ramo 등, 1994).

$$P \approx \chi \epsilon_o E \quad (2.25)$$

여기서, χ : 전기감수율(electric susceptibility)

식 (2.25)를 식 (2.24)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$D = \epsilon_o (1 + \chi) E = \epsilon E = \epsilon_r \epsilon_o E \quad (2.26)$$

여기서, χ 는 자유공간에서 구속전하가 존재하지 않아 분극벡터가 없기 때문에 ($P=0$) 0이 된다. 그렇기 때문에 $\epsilon = \epsilon_o$ 인 상태가 되고, 자유공간에서 상대유전율 (ϵ_r)은 공기에서 1이 되고, 증류수에서는 약 80이 된다.

상대유전율(ϵ_r)은 주파수의 함수이고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (2.27)$$

여기서, ϵ'_r : 상대유전율의 실수부
 ϵ''_r : 상대유전율의 허수부

상대유전율의 실수부(ϵ'_r)는 외부 전계로부터 얼마나 많은 에너지를 재료에 저장할 수 있는지에 대한 척도이고, 허수부(ϵ''_r)는 외부 전계로 얼마나 많은 에너지를 방출할 수 있는지의 척도이다. 에너지를 방출하는 재료는 손실재료(Lossy material)라고 한다. 흡에서 유전재료의 직류 전기전도도(σ_{dc})가 외부전기장의 손실을 더하기 때문에, 유전손실과 전도손실 항을 결합할 수 있고, 식 2.27은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\epsilon_r^{eq} = \epsilon'_r - j\epsilon_r^{ii} = \epsilon'_r - j\left(\epsilon''_r + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f\epsilon_0}\right) \quad (2.28)$$

여기서, ϵ_r^{eq} : 등가 복소유전율
 ϵ_r^{ii} : 등가 복소유전율의 허수부

2.2.2 분극현상 특성

외부 인가전계 때문에 유전체의 분극은 다음 세 가지의 영향으로 발생할 수 있다: (1) 전자분극 (2) 이온분극 (3) 배향분극(Santamarina 등, 2001).

전자분극은 원자수준에서 발생한다. 전기장이 외부에서 인가되는 경우, 전자구름(electron cloud)은 왜곡되고, 전하중심은 분리되며, 각각의 원자는 작은 전하 쌍극자(dipole)가 된다(그림 2.2).

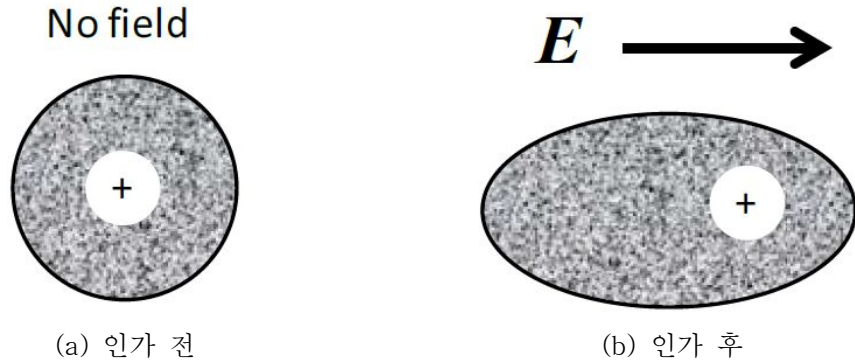


그림 2.2 전기장 인가 전 · 후의 전자분극현상(Jung, 2011)

이온분극은 이온들이 결합된 분자수준에서 발생한다. 외부에서 인가된 전기장은 양전하와 음전하의 이온결합으로 전하 중심의 미세한 분리를 유도한다(그림 2.3).

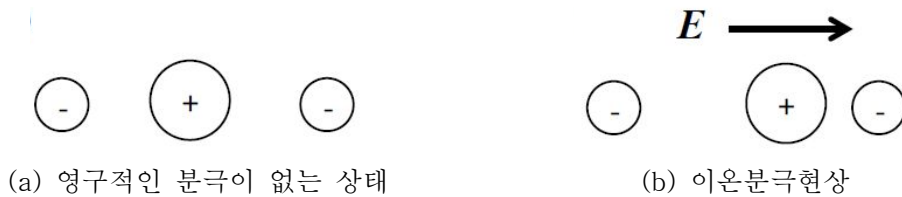


그림 2.3 외부 전기장에 의한 이온분극현상(Lin, 1999)

배향분극은 전하의 중심에서 연구적 간격을 갖는 분자에서 발생한다. 물은 이러한 분자의 대표적인 예이다. 물 분자(H_2O)는 이것의 구부러진 형상의 원인으로 영구적인 분극을 갖는다(그림 2.4(a)). 이러한 극성모듈(polar module)이 인가된 전기장이 없는 상태에서는 임의로 배향되지만(그림 2.4(b)), 인가된 전기장에서는 전기장의 방향으로 정렬된다(그림 2.4(c)).

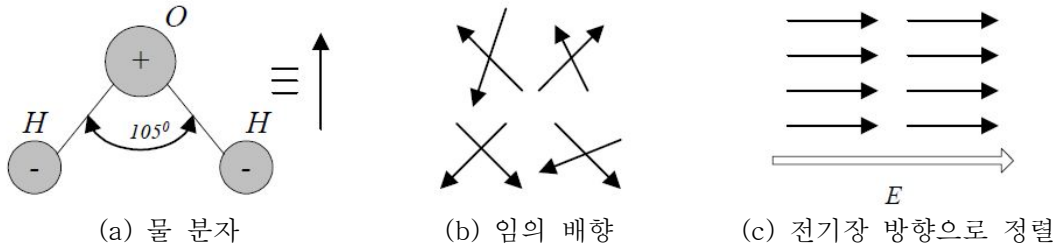


그림 2.4 외부 전기장에 의한 배향분극현상(Drnevich 등, 2001a)

2.2.3 계면분극 특성

흙의 특성은 앞 절에서 언급된 유전체에서의 분극현상의 특성으로 설명할 수 있다. 그러나 흙의 이질성은 액체와 고체사이의 상호작용 때문에 계면분극 특성에 대한 이해가 필요하다.

결합수(bound water)는 물이 토양 매트릭스(soil matrix)에 결합될 수 있기 때문에 발생한다. 결합의 정도는 매트릭스 표면으로부터 멀리 떨어져있는 비결합수(unbound water)와 자유수(free water)에 따라 다르다. 물이 토양 매트릭스에 결합한 경우 에너지를 잃을 수 있고, 이 때문에 결합수의 완화주파수(relaxation frequency)는 자유수보다 작다(Hilhorst, 1998).

이중층(double layer) 분극은 흙(주로 점토)의 이중층에서 양이온과 음이온의 상대변위 때문에 발생하며, 이러한 현상은 100kHz 이하의 주파수에서 지배적이다(Chew 등, 1982).

Maxwell-Wagner 효과는 흙의 전도 및 비전도 유전 특성의 차이에 따라 달라질 수 있고, 그림 2.5는 결합수 완화가 지배적인 효과를 주는 주파수 영역을 보여준다. 그리고 본 연구에서는 그림 2.5에 표시한 영역을 TDR의 주파수 범위로 하였다.

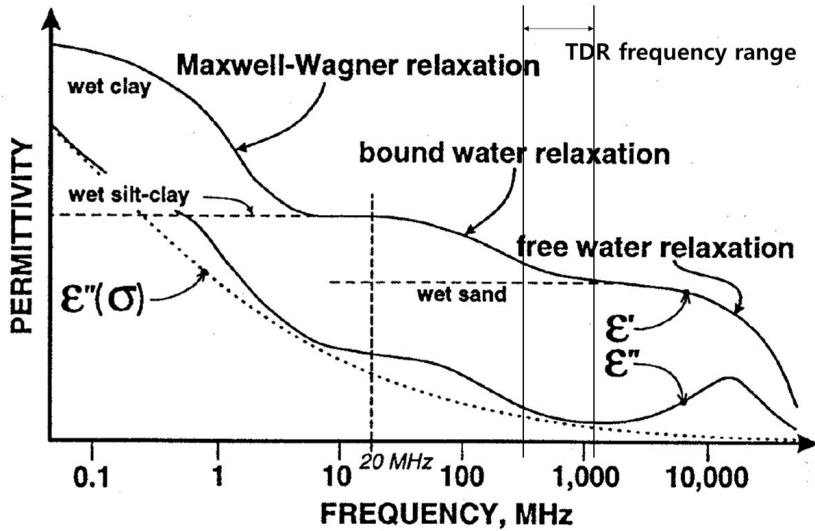


그림 2.5 젖은 흙의 주파수 범위(Hilhorst 등, 1994)

2.3 전자기파 전송 특성

2.3.1 전송선을 통한 전파특성

일부 전도성 유체 또는 흙에서 전자기파의 전파에 대한 식은 식 (2.16) ~ 식 (2.20)과 같이 정의될 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \hat{E} = -j2\pi f \mu_0 \hat{H} \quad (2.29)$$

$$\nabla \times \hat{H} = \sigma \hat{E} + j2\pi f \varepsilon \hat{E} \quad (2.30)$$

전송선에서 횡전자기(transverse electromagnetic) 모드는 지배적이며, 식 (2.29)와 식 (2.30)과 같은 평면파 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다(Feng 등, 1998).

$$E = \hat{E} e^{j2\pi f t} = E_0 e^{-\alpha z} e^{j(2\pi f t - \beta z)} \quad (2.31)$$

$$H = \hat{H}e^{j2\pi ft} = \hat{H}_o e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.32)$$

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).

$$\alpha(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(f)}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''(f)}{\epsilon_r'(f)} \right)^2} - 1 \right]} \quad (2.33)$$

$$\beta(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(f)}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''(f)}{\epsilon_r'(f)} \right)^2} + 1 \right]} \quad (2.34)$$

여기서, c 는 자유공간에서의 빛의 속도를 나타내며, ϵ_r' 과 ϵ_r'' 는 식 (2.27)과 식 (2.28)에 의해 정의된다.

식 (2.31)과 식 (2.32)는 전압(V)과 전류(I)를 이용하여 다시 표현할 수 있으며, 다음과 같이 정의된다(Feng 등, 1999).

$$V(z) = V_o e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.35)$$

$$I(z) = \frac{V_o}{Z_c} e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)} \quad (2.36)$$

여기서, V_o : 경계조건에 의해 결정되는 상수
 z : 전파 경로의 길이
 Z_c : 두 유전체 사이의 유전 특성에 의한 특성 임피던스

2.3.2 전자기적 전파특성 모델

TDR 시스템의 전자기파 전파는 Feng 등(1999)과 Lin(1999)에 의해 이론적으로 설계되었으며, Siddiqui 등(2000)에 의해 정립되었다. 그림 2.6은 TDR 시스템 임피던스에 대한 개략도를 보여준다.

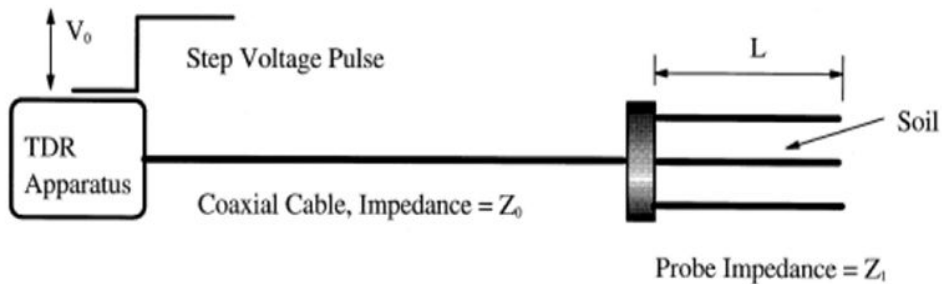


그림 2.6 TDR 시스템 임피던스(Siddiqui 등, 2000)

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.

$$Z_c = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.37)$$

여기서, Z_p : 공기 중에서 측정된 전송선의 특성 임피던스

봉을 통한 기계적 전파의 경우와 유사하게 전자기파가 전송선의 끝단과 만나는 경우, 반사는 그림 2.7과 같이 임피던스의 불일치로 인해 발생한다.

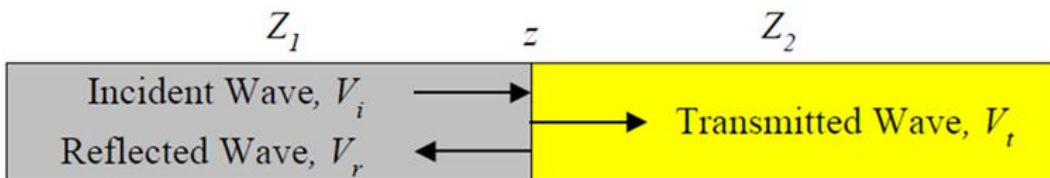


그림 2.7 입사파(V_i)의 두 전송선의 임피던스 차이로 인한 전송파(V_t) 및 반사파(V_r) 발생 현상(Drnevich 등, 2001a)

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

$$V(z) = V_i + V_r = V_t \quad (2.38)$$

$$I(z) = \frac{V_i}{Z_{c1}} - \frac{V_r}{Z_{c1}} = \frac{V_t}{Z_{c2}} \quad (2.39)$$

여기서, V_i , V_r , 그리고 V_t 는 각각 입사파, 반사파, 그리고 전송파를 표현하며, Z_{c1} 과 Z_{c2} 는 식 (2.37)과 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 다중 구성 때문에 다중 반사와 전송은 발생한다. 오실로스코프로 도달하는 반사파 신호는 인가된 펄스와 반사된 것의 선형 조합으로 표시되며, 식 (2.38)과 같이 표현한다.

Feng 등(1999)과 Lin(1999)은 그림 2.8과 같이 단일 TDR 전송선 모델과 같은 균

일한 전송선의 등가회로를 개발했다.

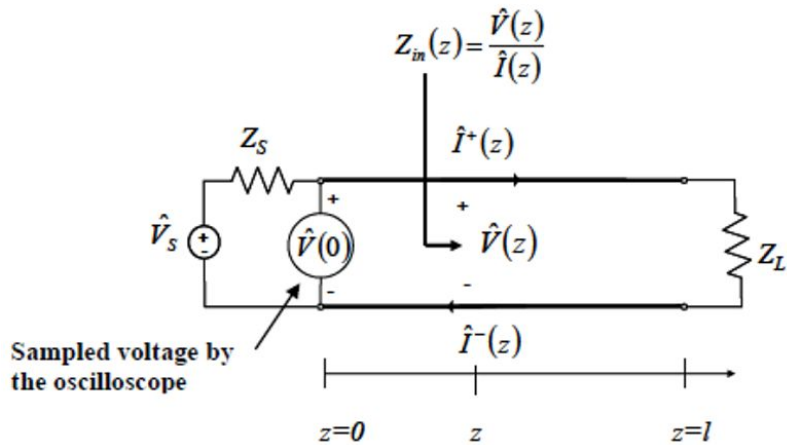


그림 2.8 균일한 전송선의 등가회로(Lin, 1999)

Kirchhoff의 전압 법칙은 다음과 같이 정의된다.

$$V_s = Z_s I(0) + V(0) \tag{2.40}$$

$$V(l) = Z_l I(l) \tag{2.41}$$

$$V(0) = V_s - Z_s I(0) \tag{2.42}$$

- 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 (2.35)와 식 (2.36)와 같은 주파수 영역에서 균일한 전송선을 통한 전자기파의 전파는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$V(z) = V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{+\gamma z} \quad (2.43)$$

$$I(z) = I^+ e^{-\gamma z} + I^- e^{+\gamma z} = \frac{V^+}{Z_c} e^{-\gamma z} - \frac{V^-}{Z_c} e^{+\gamma z} \quad (2.44)$$

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.

$$\gamma = j2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.45)$$

식 (2.43)과 식 (2.44)를 고려하면, $Z_{in}(z)$ 은 전체 회로의 등가 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in}(l) = \frac{V(z)}{I(z)} = Z_c \frac{V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{+\gamma z}}{V^+ e^{-\gamma z} - V^- e^{+\gamma z}} = Z_c \frac{1 + \rho_L e^{2\gamma(z-l)}}{1 - \rho_L e^{2\gamma(z-l)}} \quad (2.46)$$

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.

$$Z_{in}(l) = Z_c \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L} \quad (2.47)$$

그리고 식 (2.47)을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_L = \frac{Z_{in}(l) - Z_c}{Z_{in}(l) + Z_c} \quad (2.48)$$

식 (2.47)에 식 (2.48)을 대입하면,

$$\begin{aligned}
 Z_{in}(z) &= Z_c \frac{1 + \frac{Z_{in}(l) - Z_c}{Z_{in}(l) + Z_c} e^{2\gamma(z-l)}}{1 - \frac{Z_{in}(l) - Z_c}{Z_{in}(l) + Z_c} e^{2\gamma(z-l)}} \\
 &= \frac{Z_{in}(l) + Z_c + (Z_{in}(l) - Z_c)e^{2\gamma(z-l)}}{Z_{in}(l) + Z_c - (Z_{in}(l) - Z_c)e^{2\gamma(z-l)}}
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

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

$$Z_{in}(0) = \frac{Z_{in}(l) + Z_c + (Z_{in}(l) - Z_c)e^{2\gamma l}}{Z_{in}(l) + Z_c - (Z_{in}(l) - Z_c)e^{2\gamma l}} \tag{2.50}$$

식 (2.42)로부터의 오실로스코프로 측정된 전압은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V(0) = V_s - Z_s \frac{V(0)}{Z_{in}(0)} \tag{2.51}$$

식 (2.51)의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V(0) = V_s \frac{1}{1 + \frac{Z_s}{Z_{in}(0)}} = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s \tag{2.52}$$

다중 단면 TDR 전송선 모델 같은 불균일한 전송선으로 확장할 수 있으며, 그림 2.9와 같이 표현할 수 있다(Drnevich 등, 2001a).

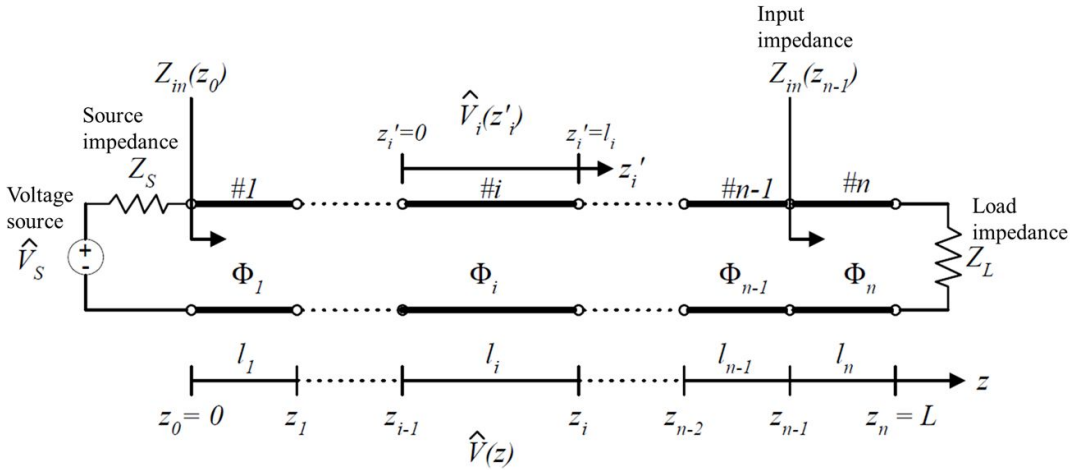


그림 2.9 불균일한 전송선의 등가회로(Drnevich 등, 2001a)

$$Z_{in}(z_n = L) = Z_L \quad (2.53)$$

$$Z_{in}(z_{n-1}) = Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} + (Z_L - Z_{c,n})e^{-2\gamma_n l_n}}{Z_L + Z_{c,n} - (Z_L - Z_{c,n})e^{-2\gamma_n l_n}} \quad (2.54)$$

$$Z_{in}(z_{n-2}) = Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} + (Z_{in}(z_{n-1}) - Z_{c,n-1})e^{-2\gamma_{n-1} l_{n-1}}}{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} - (Z_{in}(z_{n-1}) - Z_{c,n-1})e^{-2\gamma_{n-1} l_{n-1}}} \quad (2.55)$$

⋮

$$Z_{in}(0) = Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} + (Z_{in}(z_1) - Z_{c,1})e^{-2\gamma_1 l_1}}{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} - (Z_{in}(z_1) - Z_{c,1})e^{-2\gamma_1 l_1}} \quad (2.56)$$

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 (2.53) ~ 식 (2.56)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.

2.4 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. 이러한 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).

2.4.1 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 2.10과 같이 금속 봉을 이용하여 토양의 함수비를 측정하는 시스템이 지반공학적으로 주로 이용되고 있다.

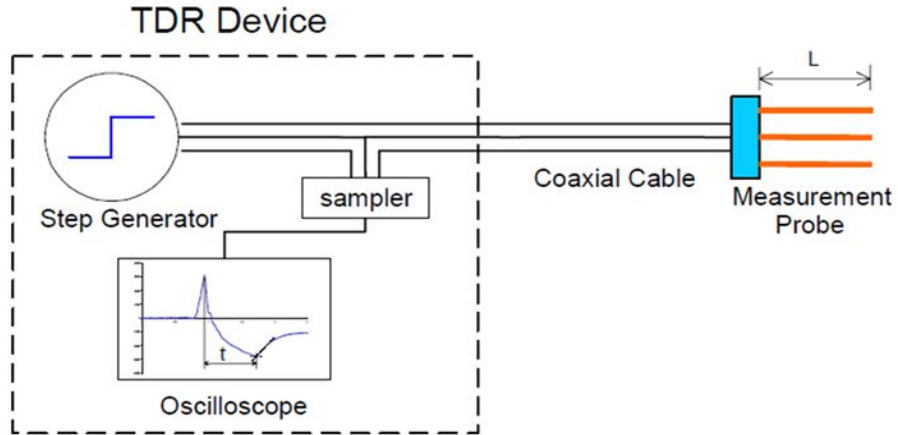


그림 2.10 일반적인 토양 함수비 측정 시스템(Drnevich 등, 2001a)

또한 이러한 함수비 측정 시스템을 이용하여 흙의 반사 신호를 측정하면 그림 2.11과 같은 신호를 얻을 수 있다.

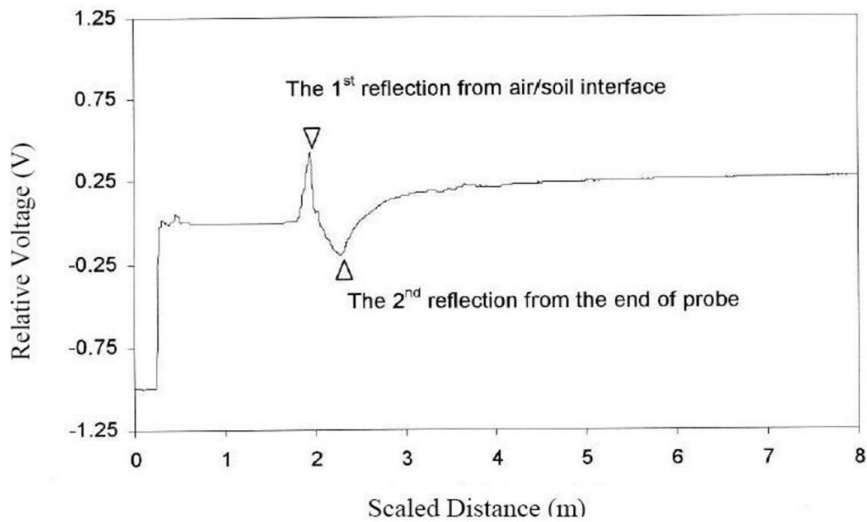


그림 2.11 TDR의 전형적인 파형(Yu 등, 2004)

전송선에서 전자기장의 전파는 Maxwell의 방정식에서 파생된 전파방정식에 의

해 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).

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \quad (2.57)$$

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.

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} = \alpha + j\beta \quad (2.58)$$

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).

2.4.2 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 시스템이다. TDR 전송선은 신호 발생기와 연결된 1.8m의 동축케이블, 동축헤드(coaxial head), 그리고 프로브로 구성되어있다(그림 2.12).

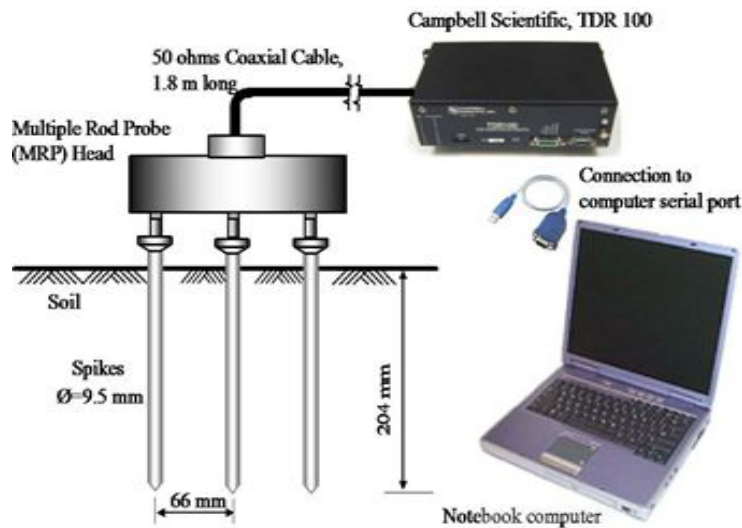


그림 2.12 Purdue TDR 시스템(Yu 등, 2004)

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

$$v = \frac{2L_p}{t} = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.59)$$

여기서, L_p : 흠 속에 관입된 프로브의 길이
 t : 전파의 이동시간
 c_o : 진공상태에서의 전자기파의 속도($2.998 \times 10^8 m/s$)

식 (2.59)를 정리하면 전파의 이동시간은 다음과 같이 정의된다.

$$t = \frac{2L_p \sqrt{\epsilon_r}}{c_o} \quad (2.60)$$

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.

$$\epsilon_r = K_a = \left(\frac{c_o t}{2L_p} \right)^2 \quad (2.61)$$

전형적인 TDR 신호는 그림 2.11에서와 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.

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L_p} \right)^2 \quad (2.62)$$

여기서, L_a 는 TDR 파형을 통해 얻을 수 있는 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점 사이의 걸보기 길이이다(그림 2.11).

Drnevich 등(2001b)은 TDR을 이용하여 측정한 흠의 유전상수는 측정하는 흠의

온도의 영향을 받고, 사질토의 경우 온도가 증가함에 따라 유전상수가 감소하고, 점성토의 경우 온도가 증가함에 따라 유전상수가 증가한다고 하여 4℃와 40℃의 범위 사이에서 온도보정함수(temperature correction function, TFC)를 다음과 같이 제안하였다.

$$TCF_{\text{사질토}} = 0.97 + 0.0015T \quad (2.63)$$

$$TCF_{\text{점성토}} = 1.10 - 0.005T \quad (2.64)$$

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

$$K_{a,20^\circ\text{C}} = K_{a,TC} \times TCF \quad (2.65)$$

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

$$EC_b = \left(\frac{\epsilon_o c_o}{L_p} \right) \left(\frac{Z_p}{Z_t} \right) \left(\frac{1 - \rho(\infty)}{1 + \rho(\infty)} \right) \quad (2.66)$$

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

$$Z_p = \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi\epsilon_o c_o} \quad (2.67)$$

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

$$\rho(t) = \frac{V(t) - V_{in}}{V_{in}} \quad (2.68)$$

그리고 충전기전도도(EC_b)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$EC_b = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{V_f} - 1 \right) \quad (2.69)$$

여기서, V_s 는 스텝펄스의 두 배 크기의 전압이며, V_f 는 장주기 전압레벨이다(그림 2.13).

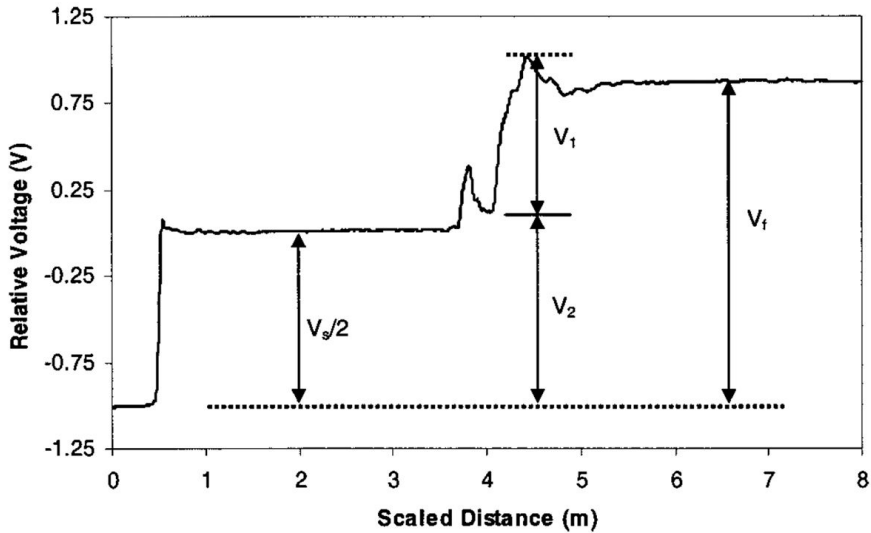


그림 2.13 전기전도도 산정을 위한 TDR 파형(Yu 등, 2004)

그리고 C 는 프로브의 구조에 관련된 상수이며, 다음과 같이 정의할 수 있다 (Giese 등, 1975; Yu 등, 2004).

$$C = \frac{2\pi R_s L_p}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} \quad (2.70)$$

여기서, R_s 는 TDR 신호 생성기의 내부저항(보통 50Ω)이다.

Siddiqui 등(1995)은 기존의 함수비 보정식들이 체적함수비로 표현되고, 밀도효과를 포함하고 있어 복잡하고 현장에서 바로 적용하기 어렵다고 하여 중량함수비로 이루어진 식 (2.71)을 제안하였고, 이는 다양한 흙에 대하여 만족스러운 결과를 보여주었다(Sallam 등, 2004).

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (2.71)$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_d 는 흙의 건조밀도, w 는 중량함수비, 그리고 a 와 b 는 흙의 특성상수 값이다.

또한 Yu 등(2004)은 기존의 전기전도도에 관한 식이 밀도에 대한 고려가 없으며 체적함수비로 표현되어 있어 지반공학적으로 응용하는데 부족하고, 흙의 총 전기전도도의 지배요인은 간극유체의 전기전도도이기 때문에 간극유체의 양이 흙의 총 전기전도도를 지배한다고 보고 식 (2.72)를 제안하였다.

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw \quad (2.72)$$

여기서, c 와 d 는 흙의 특성상수 값이며, 식 (2.71)과 식 (2.72)를 이용하여 흙의 특성상수 값을 산정하고, 측정된 유전상수와 총 전기전도도를 이용하여 식 (2.73)

과 식 (2.74)와 같이 현장지반의 건조밀도와 함수비를 계산할 수 있다(Yu 등, 2004).

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (2.73)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (2.74)$$

2.5 탄성파의 전파특성

본 절에서는 지반의 강성 측정을 위한 탄성파의 전파 특성 및 종류 등에 관하여 설명하고, 탄성파 속도를 통한 탄성계수 산정 방법에 대하여 설명하였다.

탄성파는 지반에 충격이 가해질 때 발생하고 충격원으로부터 모든 방향으로 전파되며, 이러한 탄성파는 소변형(Small strain) 영역 내의 변형특성을 지니며, 기본적으로 탄성파는 표면에서 전파되는 표면파(Surface wave)와 매질 내부에서 전파되는 체적파(Body wave)로 분류하고, 이와 같은 체적파는 압축파(Compression wave, P파)와 전단파(Shear wave, S파)로 구분할 수 있다(Molina, 2006).

그림 2.14는 압축파와 전단파의 거동을 나타낸다.

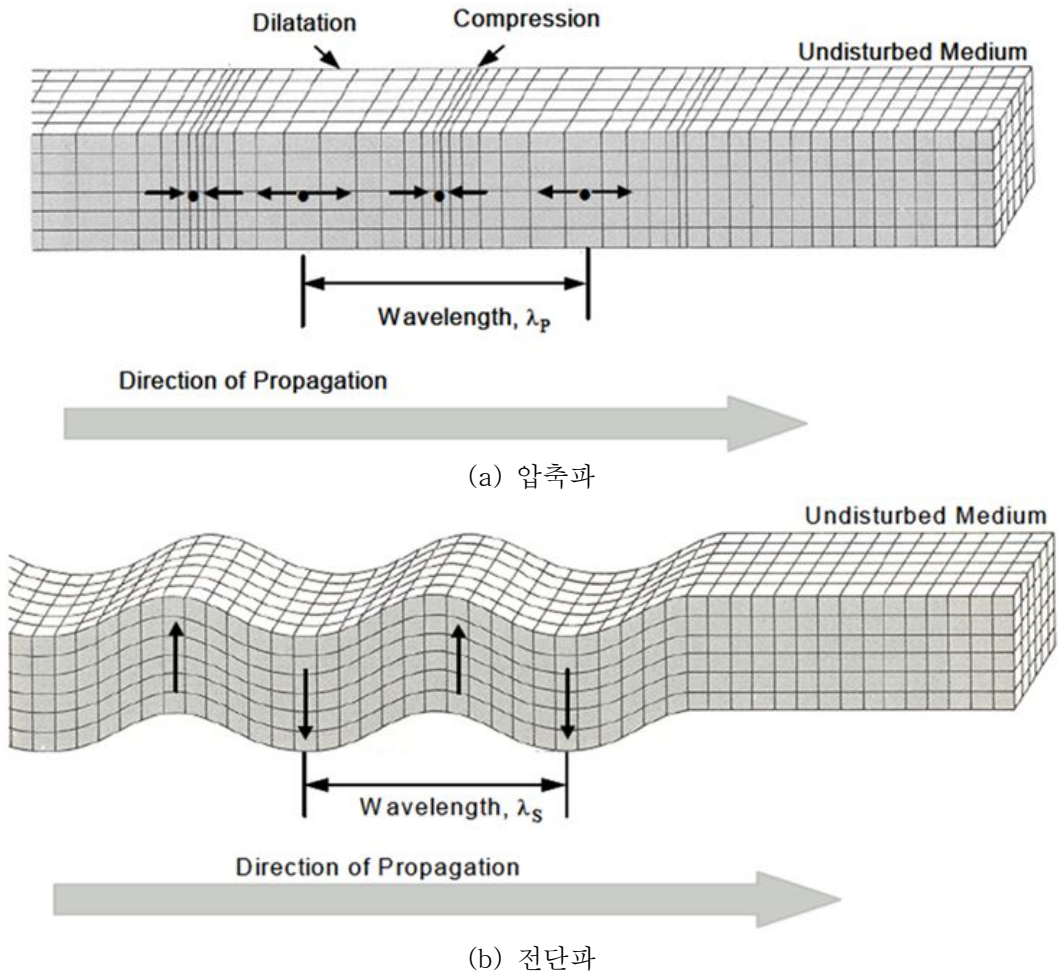


그림 2.14 탄성파의 전파 거동(Bolt, 1976)

2.5.1 압축파 속도

그림 2.14(a)와 같은 거동을 하는 탄성파는 압축파(P파)라고 하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (2.75)$$

여기서, u_x : x방향의 입자거동
 t : 시간
 M : 구속탄성계수
 ρ : 매질의 밀도

식 (2.75)의 해는 다음과 같다.

$$u_x = Ae^{i(\omega t \pm \kappa x)} \tag{2.76}$$

여기서, ω : 각주파수(=2 π /T)
 T : 주기
 κ : 파상수

식 (2.76)을 식 (2.75)에 대입하면 식 (2.77)과 같이 표현할 수 있으며, 구속 압축파 속도는 식 (2.78)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\omega}{\kappa} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \tag{2.77}$$

$$V_p = f\lambda = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \tag{2.78}$$

여기서, λ : 파장
 f : 주파수

구속되지 않은 매질에서는 횡방향 변위가 발생하게 되고, 횡방향 변위가 발생하는 경우의 탄성파의 속도는 비구속 압축파 속도이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c = f\lambda = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2.79}$$

여기서, E : 탄성계수 혹은 영계수

2.5.2 전단파 속도

그림 2.14(b)와 같은 거동을 하는 탄성파는 전단파(S파)라고 하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (2.80)$$

여기서, u_y : y방향의 입자거동
 G : 전단변형계수

식 (2.80)의 해는 다음과 같다.

$$u_y = Ae^{i(\omega t \pm \kappa x)} \quad (2.81)$$

식 (2.81)을 식 (2.80)에 대입하면 식 (2.82)와 같이 표현할 수 있으며, 전단파 속도는 구속상태와 비구속 상태의 속도가 동일하기 때문에 식 (2.83)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\omega}{\kappa} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.82)$$

$$V_s = f\lambda = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.83)$$

전단변형율이 0.001%보다 작은 미소변형률영역에서는 전단변형계수는 최대전단

변형계수(G_{\max}) 라고 볼 수 있어 식 (2.83)을 전단변형계수에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2.84)$$

2.5.3 포아슨 비

포아슨 비(ν)는 일축조건에서 수평방향과 수직방향의 변형율의 비를 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (2.85)$$

여기서, ϵ_x : 수평방향 변형율
 ϵ_y : 수직방향 변형율

포아슨 비는 압축과 속도와 전단과 속도를 이용하여 계산할 수 있으며, 체적탄성계수(K)와 전단변형계수(G)로 이루어진 식 (2.86)과 같이 표현할 수 있다.

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (2.86)$$

압축과 속도는 전단변형계수와 체적탄성계수의 항을 이용하여 식 (2.87)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2.87)$$

식 (2.83)과 식 (2.87)을 식 (2.86)에 대입하면 압축파 속도와 전단파 속도의 비를 다음과 같이 포아슨 비로 표현할 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2.88)$$

그리고 식 (2.88)을 포아슨 비에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 실내 및 현장 시험을 통해 포아슨 비를 산정할 때 유용하게 사용된다.

$$\nu = \frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2}{1 - \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2} \quad (2.89)$$

2.5.4 전파속도 산정 방법

본 절에서는 탄성과 측정 장치를 이용하여 전파속도를 산정하는 방법에 대하여 설명하였다.

전파속도는 측정 지점간의 거리와 도달시간으로 측정할 수 있으며, 다음과 같은 식에 의해 얻을 수 있다.

$$V_p = V_s = \frac{D}{T_r} \quad (2.90)$$

여기서, D : 측정 지점 사이의 거리
 T_r : 도달시간(Travel Time)

탄성파의 전파속도를 산정하기 위해서는 도달시간을 산정하는 것이 가장 중요하다. 도달시간을 결정하는 방법은 초동 추정방법(First arrival picking method), 극대점 이용방법(Peak to Peak Method), 상호상관법(Cross correlation Method) 등이 있다.

초동 추정방법은 입력 전압이 시작되는 지점과 출력 전압이 시작되는 지점 사이의 거리를 시간으로 해석하여 그림 2.15와 같이 도달시간으로 산정한다(Chan, 2010).

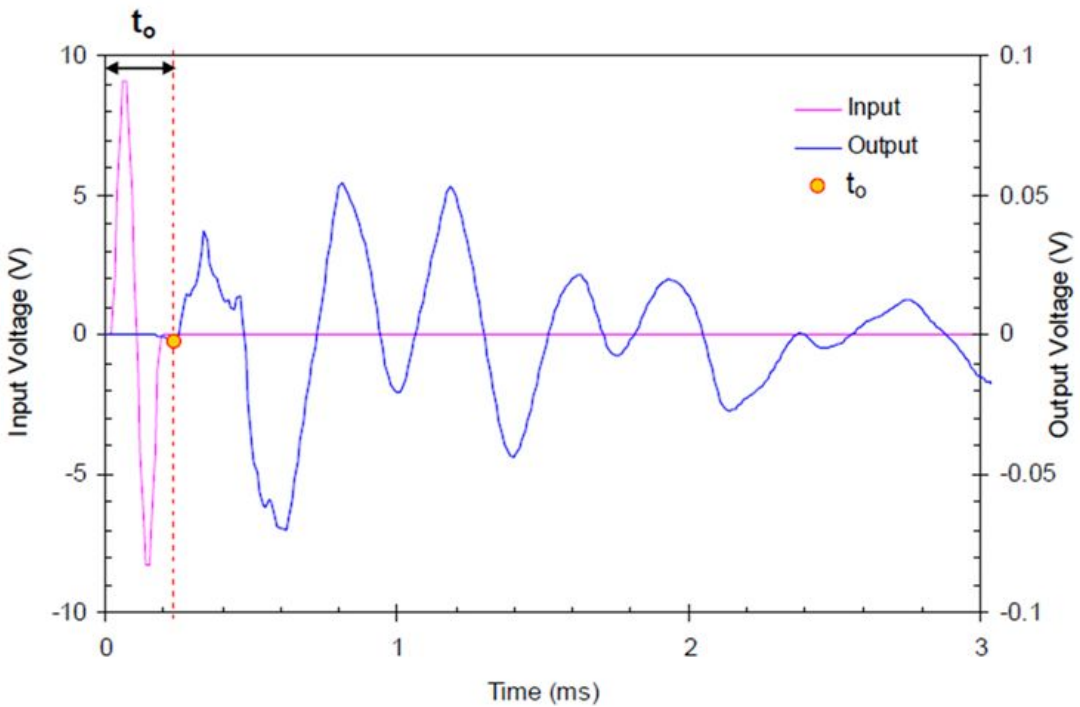


그림 2.15 초동 추정방법(Chan, 2010)

극대점 이용방법은 입력 신호의 극대값과 출력전압의 첫 극대값 사이의 거리를 시간으로 해석하여 그림 2.16과 같이 도달시간을 산정한다(Chan, 2010).

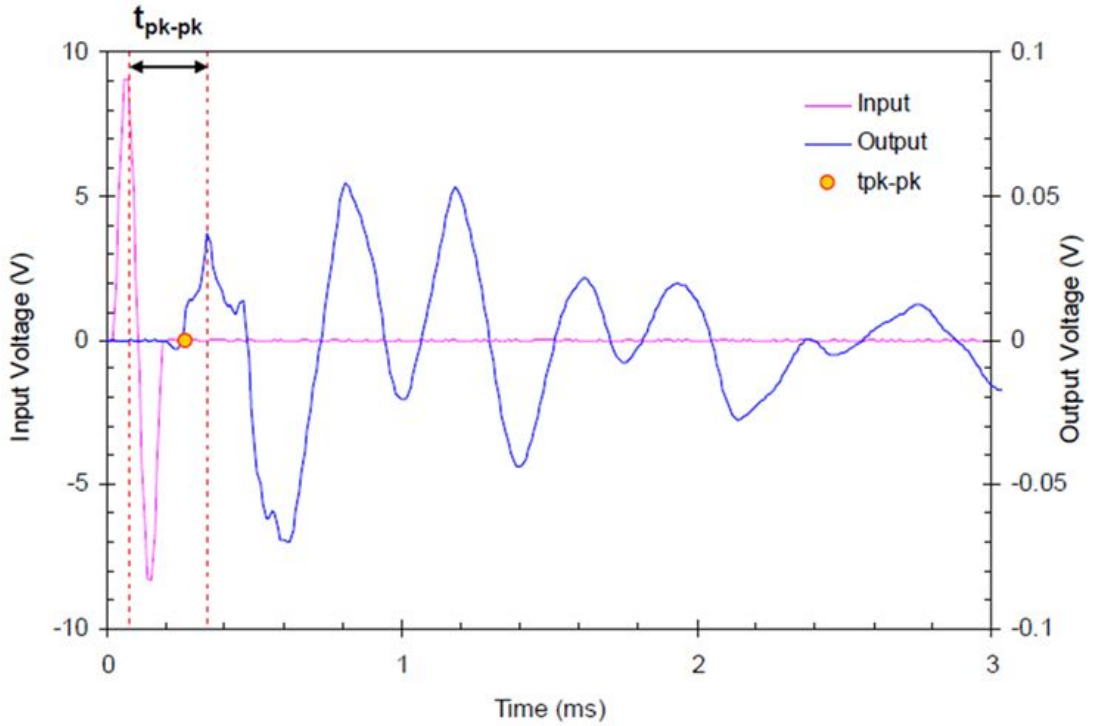


그림 2.16 극대점 이용방법(Chan, 2010)

상호상관법은 식 (2.91)과 같이 표현할 수 있으며 서로 다른 신호의 시간이동에 따른 상관성, 유사성을 뜻한다.

$$CC_{TR}(t_s) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int_{T_r} T(t+t_s)R(t)dt \quad (2.91)$$

여기서, t_s 는 전송시간($T(t)$)과 도달시간($R(t)$)의 차이이며, 그림 2.17과 같이 도달시간을 산정한다(Chan, 2010).

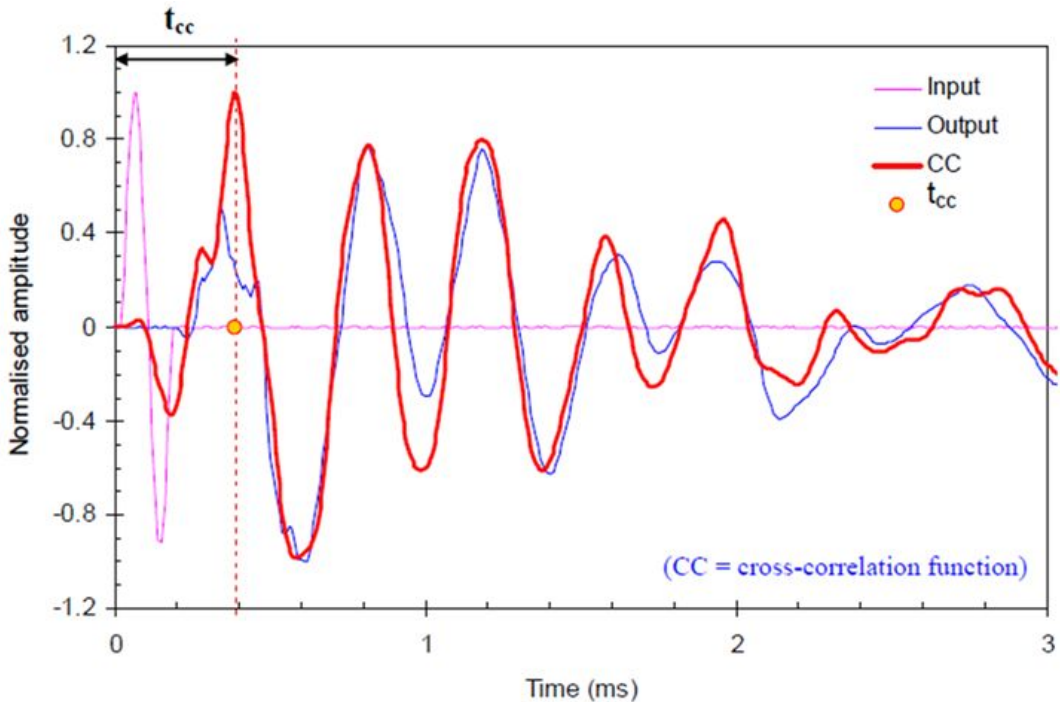


그림 2.17 상호상관법(Chan, 2010)

2.6 표면파 기법

본 절에서는 본 연구에서 지반의 강성을 측정하기 위하여 적용시킬 표면파 기법에 대하여 간략히 설명하였다.

표면파 기법(Spectral Analysis of Surface Wave, 이하 SASW)은 표면파의 분산 특성을 이용해 지반을 구성하고 있는 재료의 전파속도와 강성을 파악하는 현장시험방법이다. 표면파의 에너지는 깊이방향으로 표면으로부터 감쇠를 나타내며, 파의 에너지는 대부분 한 파장에 해당하는 깊이 안에 존재한다(신민균, 1999).

표면파 기법의 현장시험을 위한 장비는 진동원, 수신기 등이 필요하며, SASW의 개요도는 그림 2.18과 같다.

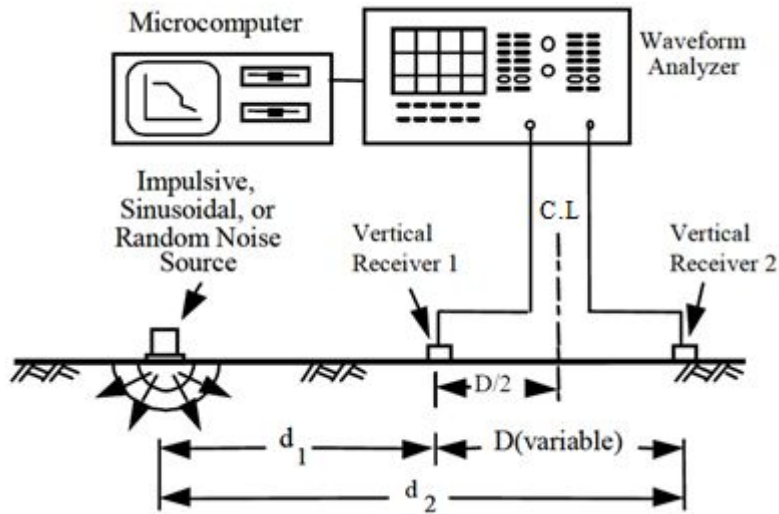


그림 2.18 SASW의 개요도(Stokoe 등, 1994)

진동원은 지반에 타격을 가하는 충격하중이나 연속적인 파를 발생시킬 수 있는 진동발생기를 사용할 수 있으며, 진동원은 측정대상의 깊이에 따라 파장의 길이가 변할수 있도록 주파수 특성이 다른 진동원을 사용하여야 한다. 수신기는 지오폰 및 가속도계를 사용한다. 지오폰의 측정가능 주파수는 2~400Hz이며, 가속도계는 0~1kHz이다.

SASW은 일정 거리의 두 수신기에서 기록된 표면파의 위상차이를 수신기 사이의 거리를 변화시키면서 측정하는 것이다. 현장에서 측정된 두 수신기의 각 주파수에 대한 위상차이로부터 해당하는 주파수에 대응하는 파장과 표면파의 위상속도를 결정한다. 이러한 파장에 대한 위상속도의 관계를 나타낸 곡선을 분산곡선이라고 한다(송명준 등, 1999).

그림 2.19와 같이 위상각 정보에서 임의의 주파수 f_1 에 대한 위상각 차를 ϕ , 주기를 T 라고 하면 파의 이동시간(t)는 식 (2.92)로 나타낼 수 있다.

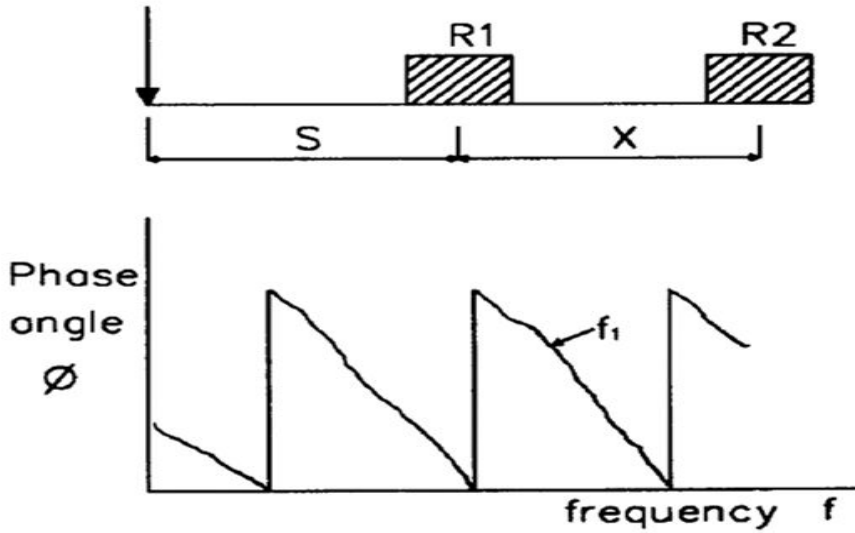


그림 2.19 크로스 파워 스펙트럼(김성인, 1996)

$$t = \frac{\phi}{360} T \quad (2.91)$$

이때 수진기의 간격을 X 라고 하면 위상각 속도(V_R)은 식 2.92와 같이 표현할 수 있으며, 파의 전파이론을 이용하여 식 (2.93)으로 나타낼 수 있다.

$$V_R = \frac{X}{t} \quad (2.92)$$

$$\lambda = \frac{V_R}{f} \quad (2.93)$$

식 2.93을 주파수를 변화시켜 위상각속도-파장의 관계를 구하여 분산곡선을 구하며, 이와 같은 분산곡선의 분석을 통하여 지반의 물리적 특성을 역추정 하는 역산 과정을 통해 지반에서의 전단파 속도를 추정하며, 추정하는 과정은 프로그램을 이용하여 수행하며 다음과 같은 방법을 따른다(김성인, 1999).

- (1) 대상물의 층상구조, 포아슨 비, 단위중량, 전단파 속도를 가정한다.
- (2) 가정된 값을 이용하여 이론적인 분산곡선을 구한다.
- (3) 이론적인 분산곡선과 실제 측정된 분산곡선을 비교한다.
- (4) 이론분산곡선과 실제분산곡선이 일치할 때까지 가정 값을 바꾸어가며 재계산한다.

제 3 장 비파괴 TDR 시스템 개발

3.1 TDR 측정 시스템 구성

본 연구는 그림 3.1과 같이 미국 CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.에서 제작한 TDR100 장비를 이용하였고, 본 장비에서 전파를 생성하여 프로브를 통하여 전파를 전달하고, 전파가 반사되어 오는 특징을 이용하여 지반의 특성을 예측한다.

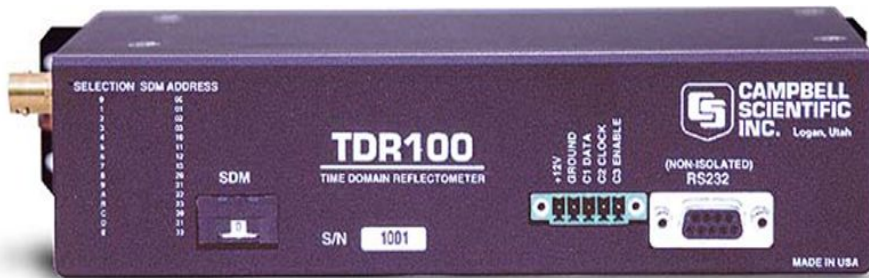


그림 3.1 TDR100 장비(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.)

본 장비의 구성은 그림 3.2와 같이 상기 TDR100 장비, TDR100을 구동시키기 위한 12V 배터리(PS100), 그리고 데이터를 컴퓨터로 내보낼 수 있는 PC 오실로스코프로 구성되어 있다. TDR100으로 생성한 전파를 프로브를 통해 내보내고, 반사되어 오는 신호는 PC 오실로스코프에서 컴퓨터의 소프트웨어로 전송한다. 컴퓨터 소프트웨어는 미국 Case Western Reserve Univ.의 Yu교수를 통해 제작된 프로그램(TDR Seismic Testing System 1.3)을 이용하였다(그림 3.3). 또한 본 프로그램을 이용하여 측정된 신호는 그림 3.4와 같다. 이동성을 증대시키기 위하여 박스 형태로 케이스를 제작하였으며, 장비에 먼지투입을 방지하고 장비들을 한꺼번에 조정할 수 있도록 뚜껑을 제작하였다(그림 3.5).

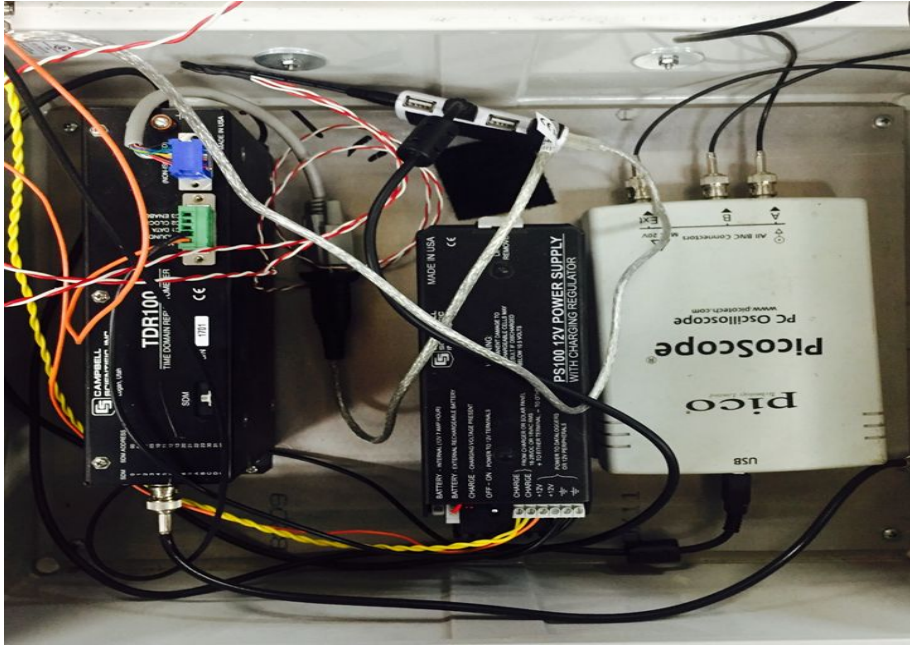


그림 3.2 TDR 시스템 장치 구성

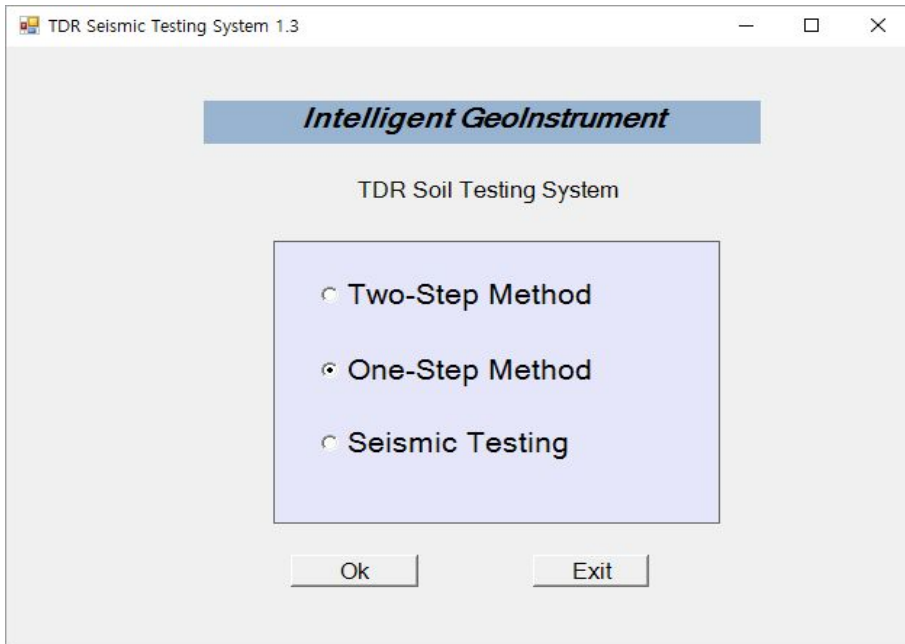


그림 3.3 TDR Seismic Testing System 소프트웨어

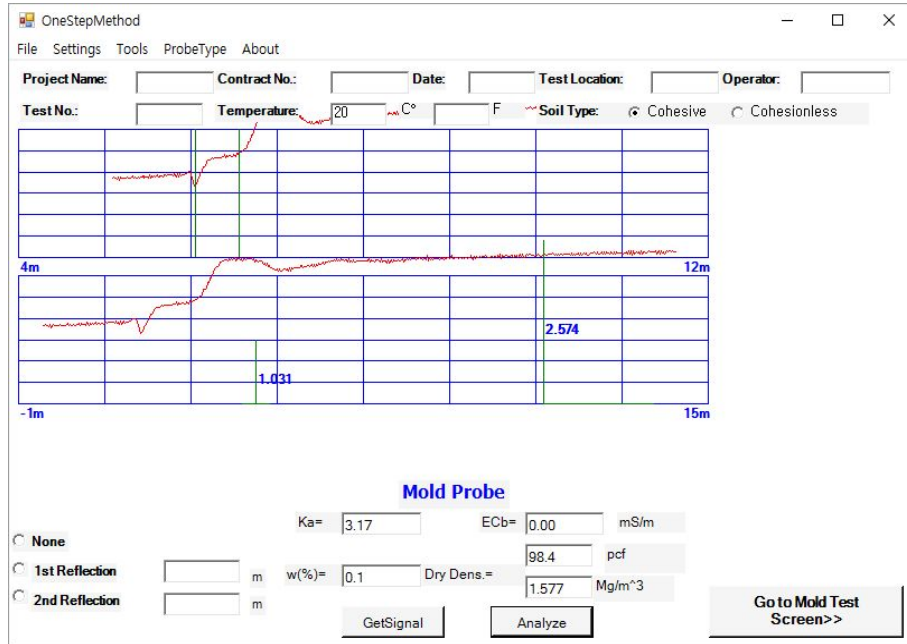


그림 3.4 TDR 소프트웨어 사용자 화면



(a) 닫힌 모습



(b) 열린 모습

그림 3.5 TDR 시스템

3.2 TDR 프로브 제작

3.2.1 기존의 TDR 프로브

기존의 TDR 시스템은 그림 2.12와 같이 본 연구에서 사용한 장치(TDR100)를 사용하여 지반의 함수비와 건조밀도를 측정한다. 하지만 프로브는 Multiple Rod Probe(MRP, 이하 봉형 프로브)를 사용하고, 이는 지반에 관입하여 함수비와 건조밀도를 측정한다.

본 연구에서는 기존의 TDR 시스템에서 사용하고 있는 봉형 프로브에서 발생할 수 있는 문제를 최소화하고, 신속하고 정확한 측정값을 얻기 위하여 관형 프로브를 제작하였다. 먼저 기존의 봉형 프로브를 사용할 때 발생할 수 있는 문제점은 다음과 같다.

가. 지반관입

TDR 시스템을 이용하여 함수비와 건조밀도를 측정하는 지반은 보통 다짐이 잘 되어있는 상태이다. 일반적으로 도로공사 표준시방서에 따르면 노체의 경우 최대 건조밀도의 90%이상, 노상의 경우 최대건조밀도의 95%이상을 표준으로 하고 있다. 이와 같은 지반은 차량이 지나가도 문제가 없을 정도의 단단한 지반이다. 이러한 다짐이 잘된 지반에 프로브를 관입시키기 위해서는 일련의 작업이 필요하다. 프로브를 관입시키고자 하는 지점의 위치에 프로브를 망치로 타격하여 관입시킨다. 점토 지반의 경우는 관입시키고자 하는 지점에 손으로 관입시켜도 관입이 쉬울 수 있으나, 보통 이와 같은 시스템을 이용하는 지반은 단단한 지반이 대부분이기 때문에 이러한 작업이 불가피하다.

나. 지반교란

위에 기술한 바와 같이 지반에 프로브를 관입시키기 위해서는 망치 등의 도구를 이용하고 이와 같이 관입을 할 때 지반의 상태를 측정하고자 하는 부분에서 교란이 발생할 수 있다. 이러한 지반 교란은 프로브와 흙의 접촉을 원활히 하지 않을 수 있고, 측정하고자 하는 지반의 상태를 변화시켜 측정값의 정확도가 감소할 수

있다.

3.2.2 TDR 프로브 크기 및 측정범위 결정

TDR은 시료에서의 전파속도를 측정함으로써 유전상수를 결정한다. 프로브 주변의 시료가 균질하면, 결정된 유전상수는 참값으로 볼 수 있다. 하지만 시료의 유전상수가 전파 이동방향을 따라 변하는 경우에는 측정하는 부피에서 측정되는 유전상수의 평균값을 사용한다. 또한 시료의 유전상수가 전파 방향에 수직인 면에서 변화한다면 측정되는 유효 유전상수는 측정하는 부피에서 유전상수의 공간분포에 의존한다(Yu 등, 2013).

본 연구에서 제작한 프로브의 측정범위는 Knight 등(1997)과 Ferre 등(1998)이 제안한 유한요소해석을 통하여 결정하였다.

가. TDR 프로브 크기 제한사항

TDR 프로브의 크기는 본 연구의 취지에 맞게 이동이 편리하고 신속한 측정을 할 수 있게 제작하였다. 프로브의 크기가 커지면 이동하면서 지반의 상태를 측정하는 것이 어려워질 수 있기 때문에 프로브의 크기는 30cm * 30cm 정도의 크기로 제한하였다.

나. TDR 프로브의 측정범위 결정을 위한 이론사항

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

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

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

또한 2차원의 공간함수는 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 공간가중함수는 전기적 에너지 밀도를 결정할 수 있고, 이것은 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 결정할 수 있다.

공간가중함수에서 전체 영역은 프로브 응답에 기여하고, 프로브의 측정범위를 산출하기 위하여 총 응답 비율을 선택하여야 한다. Ferre 등(1998)의 연구에서 50%, 70%, 그리고 90%의 응답 영역을 비교하였고, 그림 3.6은 코팅된 프로브에 대한 계산된 영역을 보여준다.

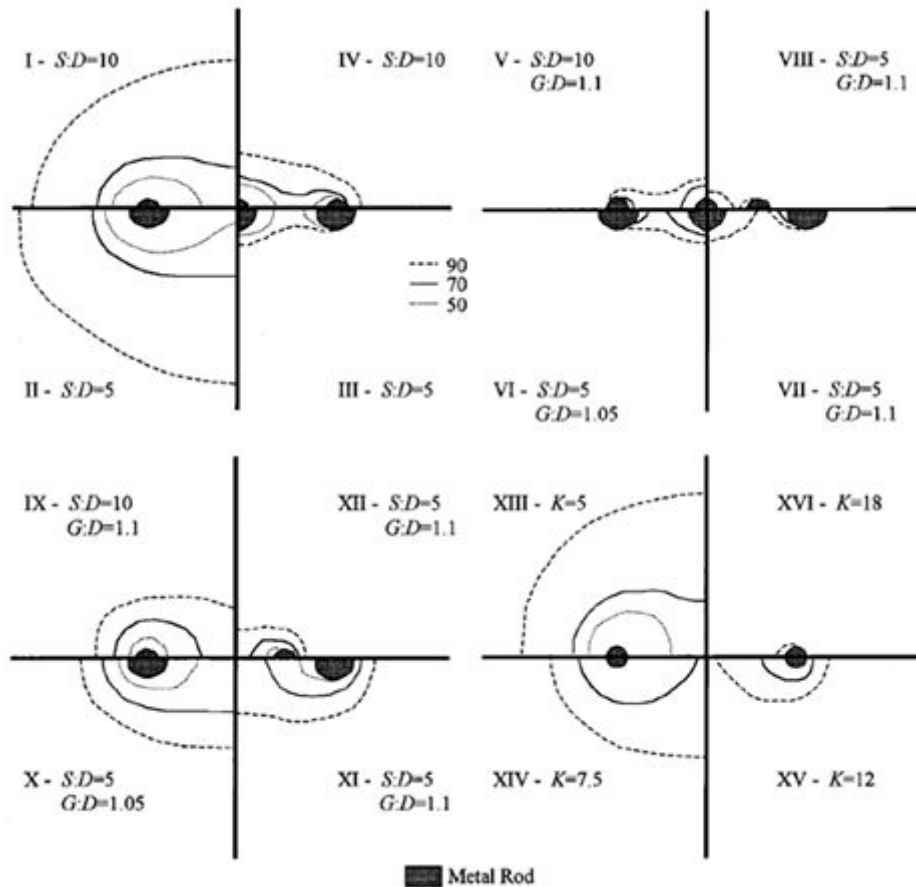


그림 3.6 응답영역 해석(Ferre 등, 1998)

다. 판형 프로브 측정범위 결정

Ferre 등(1998)의 연구에서는 50%, 70%, 그리고 90%에 해당하는 응답영역에 대한 측정범위를 해석하였지만, 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 90%에 해당하는 응답영역에 대한 측정범위를 이용해 개발한 판형 프로브의 측정범위를 결정하였다.

본 연구에서 이용한 유한요소해석 모델은 그림 3.7과 같고, 각각의 재료에 대한 유전상수를 입력변수로 입력하였고, 공기의 유전상수는 1, 판의 유전상수는 전기절연용으로 사용하고 있는 E-glass의 유전상수 4.2를 입력하였고, 측정하는 젯은 홀의 유전상수는 10으로 가정하여 입력하였다. 본 연구에서 측정범위를 결정하기 위

한 유한요소해석에 입력한 변수는 표 3.1과 같다. 또한 해석을 통한 전위분포는 그림 3.8과 같다.

표 3.1 유한요소해석 입력변수

구 분	유전상수
공 기	1
E-glass	4.2
젖은 흙 시료	10

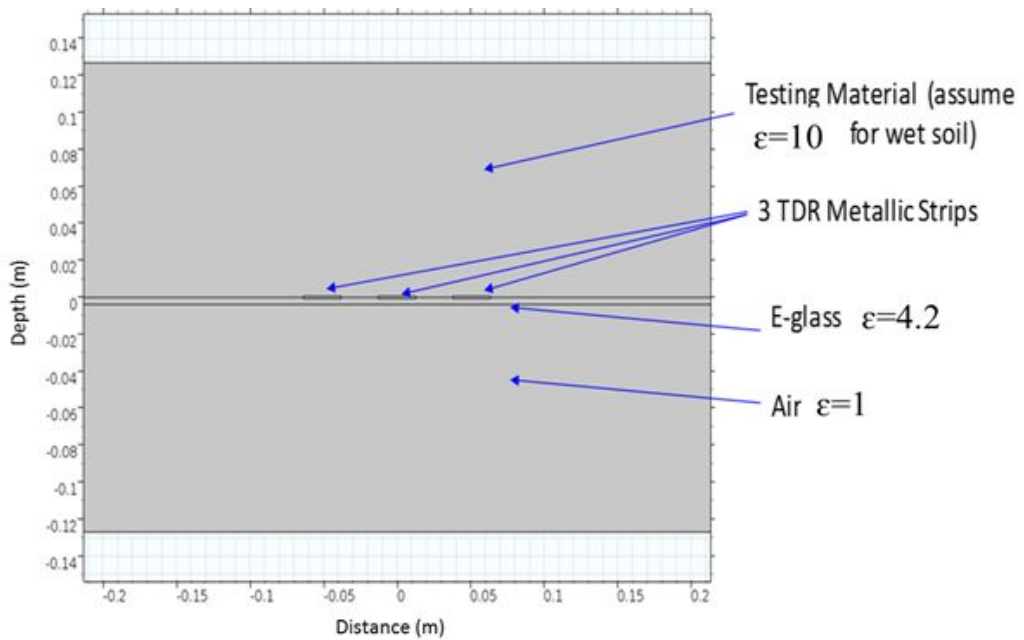


그림 3.7 유한요소 해석 모델

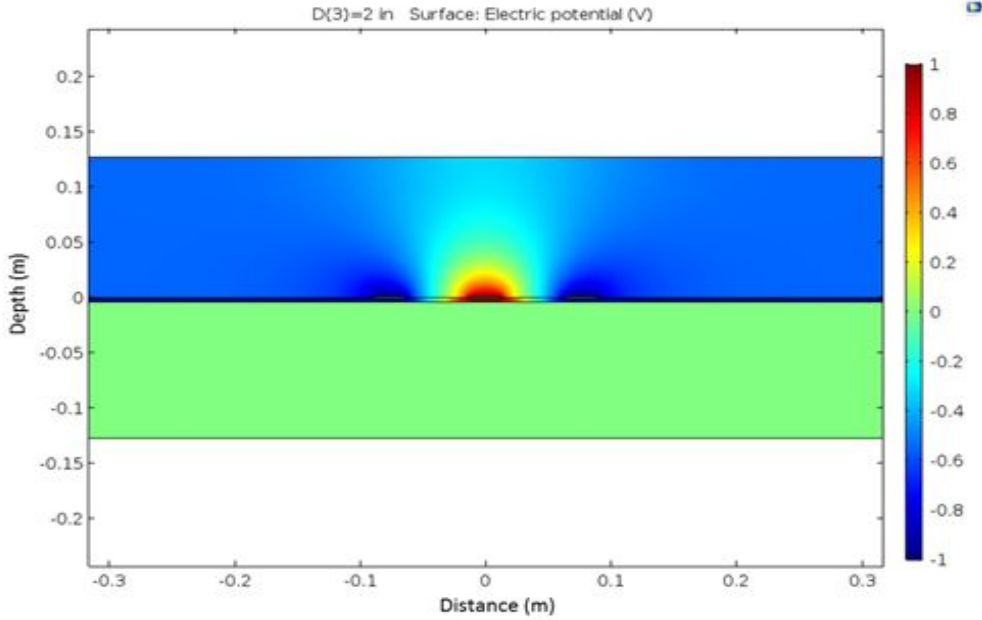


그림 3.8 해석을 통한 전위분포

전위분포로부터 효과적인 측정범위는 그림 3.9와 같이 결정되었고, 이는 판형 프로브에 대한 90% 응답 영역에 대한 범위이다. 측정범위는 판 아래 깊이방향으로 약 5cm로 산출되었다. 공기의 유전상수가 매우 낮다. 공기의 영향으로 측정범위는 작은 것으로 판단된다.

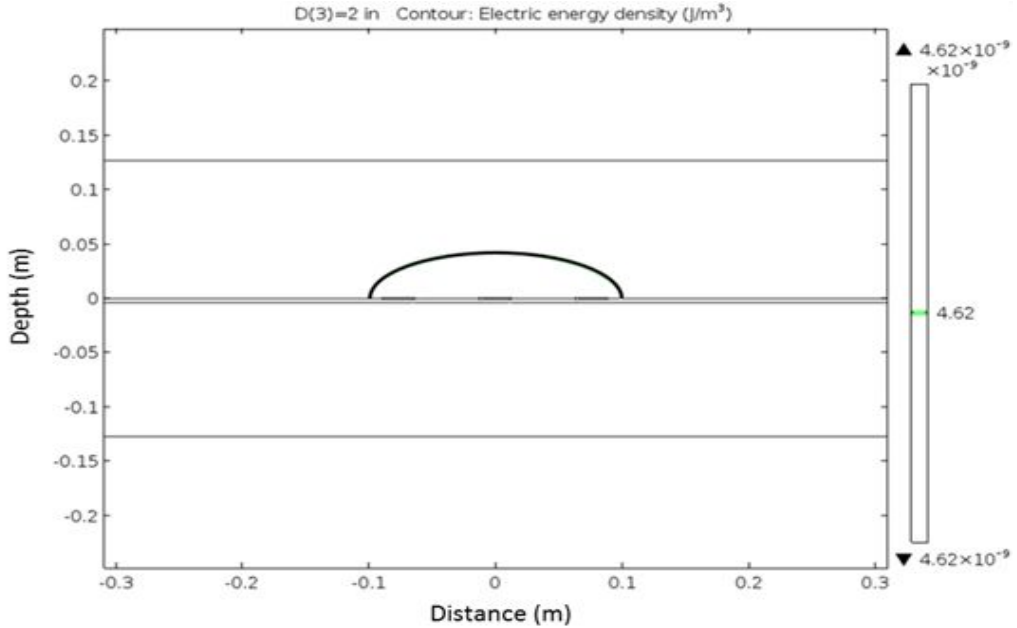


그림 3.9 90% 응답영역에 대한 유한요소 해석 결과

또한 본 연구를 통해 결정된 측정범위는 보통 다짐관리에 필요한 범위(20cm)에 비하여 상당히 작은 수치이지만, 측정가능범위는 20cm 정도로 하기 위한 프로브의 크기는 당초 제한한 프로브의 크기보다 5배 정도 커져야 한다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이는 현장에서 지반의 상태를 신속하게 평가하는데 문제가 발생할 수 있으며, 프로브와 지반의 접촉이 어려울 것으로 판단하였다.

하지만 현장에서 성토는 단계별로 진행되며, 층당 성토 높이는 20 ~ 30cm로 제한하고 있기 때문에 단계별 성토를 진행할 때 바로 측정할 수 있다는 점에서 본 연구에서 개발한 TDR 시스템이 효과적인 것으로 판단된다.

3.2.3 TDR 프로브 제작

앞 절에서 기술한 기존의 TDR 시스템에서 발생할 수 있는 문제를 최소화 시키고, 신속하게 지반의 상태를 파악하기 위하여 그림 3.10과 같은 프로브를 제작하였다.

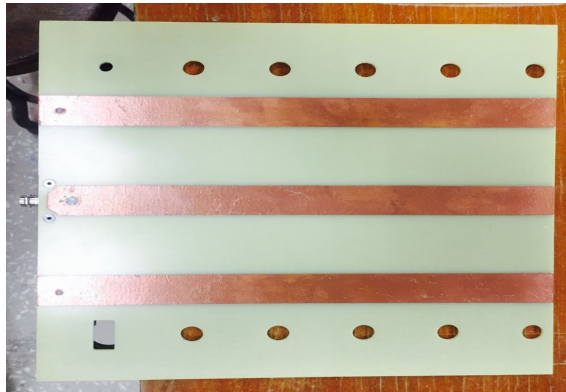


그림 3.10 판형 프로브

본 연구에서 제작한 프로브의 크기는 앞 절에서 기술한 것과 같이 연구의 목표와 부합되도록 결정하였고, 30.5cm * 30.5cm의 폴리머 재질의 판에 폭 2.5cm의 구리 띠를 부착하였다. 구리 띠는 총 3개를 사용하였으며, 구리 띠 사이의 간격은 5cm로 총 폭은 17.5cm이다. 본 연구에서 폴리머 재질의 판을 사용한 이유는 기존의 봉형 프로브와 다르게 지반위에 얹어서 측정하기 때문에 흙 표면에 닿는 부분과 공기에 닿는 부분, 이러한 공기와 흙과의 매질차이로 인한 전파 간섭문제를 해결하기 위함이다. 또한 본 연구에서 제작한 판형 프로브는 기존의 봉형 프로브와 호환이 가능하게 연결부를 교체 가능한 형태로 제작하였다(그림 3.11).



그림 3.11 판형 프로브 연결부

3.2.4 지반 강성 측정 장치 결합

본 연구에서 당초 지반 강성을 측정하기 위해 벤더 엘리먼트를 이용하려고 하였으나, TDR100이 작동하는 전압이 약 10Volt 정도 이지만 벤더 엘리먼트는 10배 이상의 전압을 필요로 하여 10Volt 내외에서 작동하는 Piezo-stack을 이용하였다.

Piezo-stack을 개발한 관형 프로브에 결합하였으며, Piezo-stack은 압축파를 발생시키는 압축파 발생장치와 전단파를 발생시키는 전단파 발생장치와 발생시킨 탄성파를 수신할수 있는 가속도계를 포함한다(그림 3.12).



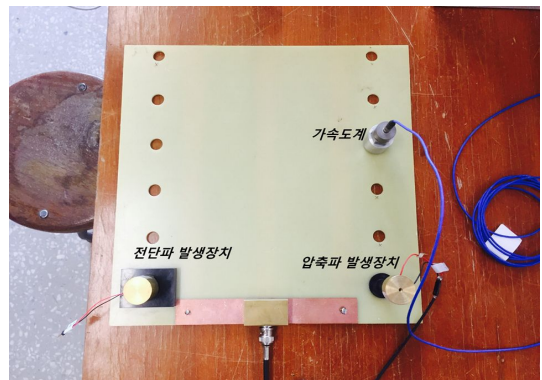
(a) 압축파 발생장치



(b) 전단파 발생장치



(c) 가속도계



(d) 결합 모습

그림 3.12 Piezo-stack 결합 프로브

흙 표면과 압축과 및 전단과 발생장치의 접촉을 용이하게 하기 위하여 추가로 추를 제작하여 Piezo-stack 위에 올려놓는 형태로 제작하였고, 이는 Piezo-stack이 흙에 진동을 전달하는데 위에 올려놓은 추로 인해 생성된 진동이 흙으로 잘 전달 될 수 있도록 하기 위함이다. 그리고 그림 3.12(d)는 전파 발생장치와 개발한 판형 프로브를 결합한 모습이며, 지반의 상태에 따라 가속도계의 위치를 변화시키기 위하여 약 5cm 간격으로 구멍을 뚫어 프로브를 제작하였다. 그림 3.13은 본 연구에서 지반의 함수비, 건조밀도 및 탄성계수 측정을 위하여 개발한 TDR 시스템의 개요도를 보여준다.

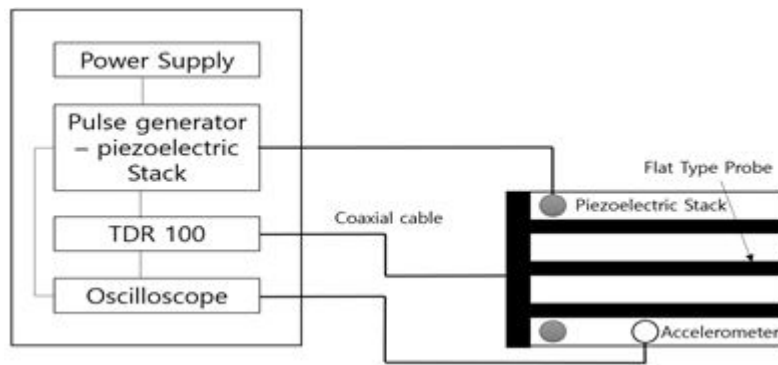


그림 3.13 TDR 시스템 개요도

Piezo-stack은 PIEZO SYSTEM INC.에서 제작한 것을 사용하였고, Piezo-stack의 특성은 표 3.2와 같다.

표 3.2 Piezo-stack의 특성

구 분	특성 값
Compressive Strength	$8.8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Tensile Strength	$4.4 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
Young's Modulus	$4.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Poisson's Ration	0.34
Density	7900 Kg/m^3
Wires	Red positive, Black negative
Thermal Operation Range	-20 to 80 °C
Thermal Storage Range	-30 to 85 °C
Humidity	<50%

그리고 탄성과 측정을 위하여 그림 3.14와 같이 PicoScope 소프트웨어를 이용하였고, 이를 통해 탄성파의 도착시간을 취득할 수 있다. 그리고 취득한 도착시간과 Piezo-stack과 가속도계의 거리, 기본 물리적 성질 값을 넣어주면 그림 3.15와 같이 압축파 속도, 전단파 속도, 포아슨 비를 얻을 수 있다.

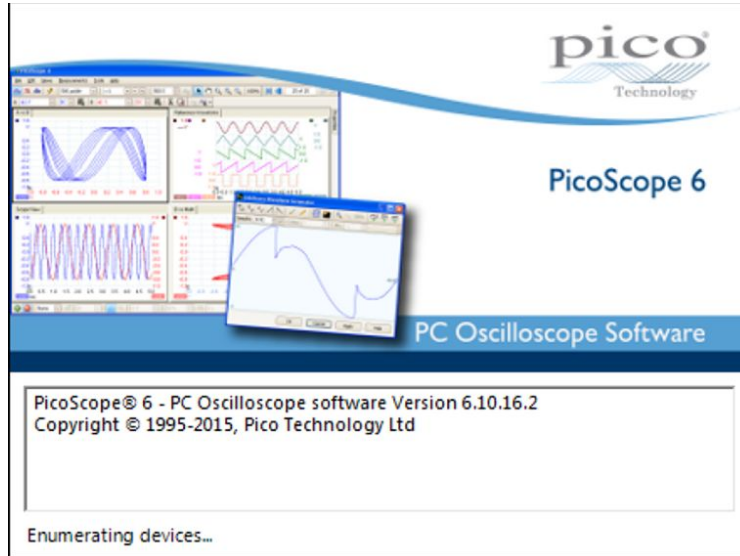


그림 3.14 탄성파 측정 소프트웨어

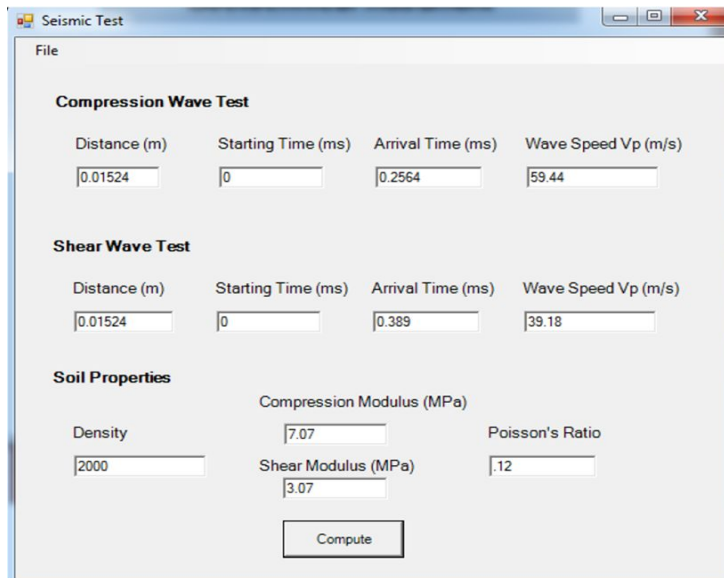


그림 3.15 탄성계수 계산 소프트웨어

제 4 장 실내 검증 실험

4.1 실험 시료

본 연구에서는 각각의 다른 시료에 대한 TDR 신호의 변화 및 흙의 종류에 따른 실제 측정값의 정밀도를 알아보기 위하여 총 네 가지 시료를 이용하였으며, 사용한 시료는 국내에서 시험용 모래로 사용하고 있는 주문진 표준사와 전라남도 인근 지역(옥과, 섬진강)에서 채취한 시료와, 강원도 원주에서 채취한 시료를 사용하여 실험을 진행하였다.

흙의 물리적 특성을 파악하기 위하여 흙의 비중시험(KS F 2308), 흙의 액성한계·소성한계 시험(KS F 2303), 흙의 입도분포시험(KS F 2309), 비점성토의 상대밀도 시험(KS F 2345) 및 흙의 다짐시험(KS F 2312)을 수행하였다. 실험에 사용한 시료의 물리적 특성을 파악한 결과, 주문진 표준사와 섬진강 채취시료는 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 판명되었고, 원주 채취시료와 옥과 채취시료는 실트질 모래(SM)로 판명되었다.

실험 시료의 입도분포곡선은 그림 4.1과 같으며, 표 4.1은 실험 시료의 물리적 특성을 보여준다.

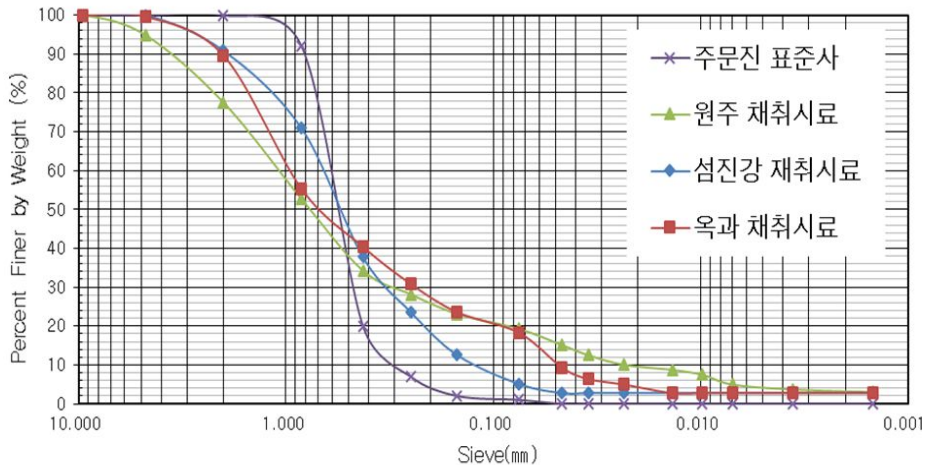


그림 4.1 실험 시료의 입도분포곡선

표 4.1 실험 시료의 물리적 특성

구 분	USCS	액성한계 (%)	소성한계 (%)	비중	P<#200 (%)	최적 함수비 (%)	최대 건조밀도 (g/cm^3)
주문진 표준사	SP	N.P	N.P	2.65	0	-	1.568
섬진강 채취시료	SP	N.P	N.P	2.64	5	8.4	1.592
옥과 채취시료	SM	N.P	N.P	2.60	18	11.4	1.676
원주 채취시료	SM	N.P	N.P	2.58	20	10.9	1.669

4.2 실험 조건 및 절차

4.2.1 함수비 및 건조밀도 측정

본 연구는 흙의 함수비와 다짐도의 변화에 따른 TDR 파형의 변화를 알아보기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 함수비를 0~10%에서 2%씩 변화시켰으며, 다짐도는 층당 다짐횟수를 8회, 12회, 16회로 증가시켜 실험을 수행하였다. 또한 온도는 20°C로 유지하였으며, 사용한 물은 증류수를 사용하였고, 실험조건을 정리하면 표 4.2와 같다.

표 4.2 실험 조건

구 분	함수비 (%)	다짐도 (층당다짐횟수)	온도 (°C)	간극유체
주문진 표준사	2, 4, 6, 8	8, 12, 16	20	증류수
섬진강 채취시료	2, 4, 6, 8	8, 12, 16	20	증류수
옥과 채취시료	2, 4, 6, 8	8, 12, 16	20	증류수
원주 채취시료	2, 4, 6, 8	8, 12, 16	20	증류수

실험을 위하여 주문진 표준사, 원주 채취시료, 섬진강 채취시료, 그리고 옥과 채취시료 네 가지 시료 25kg을 24시간 노건조 시켜 그림 4.2와 같이 준비하고, 실내 실험을 위한 몰드는 35.5cm × 35.5cm × 7.5cm 의 크기로 제작하였으며, 함수비와 다짐도에 따른 TDR 신호의 변화 및 함수비, 건조밀도 측정을 위하여 다음과 같은 절차로 수행되었다.

- (1) 실험을 수행하기 전 몰드의 무게 및 체적을 측정한다(그림 4.3). 본 연구에서 제작한 몰드의 무게는 2982.1g이며, 몰드의 체적은 9451.9cm³ 으로 측정되었다.
- (2) 준비된 시료에 증류수 500g을 첨가하여 골고루 혼합한다.
- (3) 물을 첨가한 시료를 준비된 몰드에 3층으로 나누어 다질 수 있을 정도의 양을 담는다(그림 4.4).
- (4) 몰드에 담긴 시료를 다지기 위하여 몰드의 단면적 크기로 제작된 나무판을 시료 위에 얹고, 그 위에 4kg추 2개를 엇갈려 위치시켜 올려놓는다(그림 4.5).
- (5) 추의 상단을 각 2회 타격한 뒤 타격하지 않은 위치에 추를 다시 엇갈려 위치시킨 뒤 같은 횟수로 추의 상단을 타격한다(그림 4.6).
- (6) (5)의 절차를 3층에 걸쳐 실시하고, 다져진 흙의 표면을 고르게 하고 프로브를 올려놓고 TDR 신호를 측정한다(그림 4.7).
- (7) 흙의 실제 건조밀도를 측정하기 위하여 측정이 끝난 몰드의 무게를 측정하고, 몰드 중앙의 시료를 채취하여 함수비 시험을 진행한다(그림 4.8).

(8) 다짐도를 변화시키기 위하여 (5)의 절차에서 추의 상단을 3회, 4회로 차례로 늘려서 실험을 진행한다.

(9) (3) ~ (8)의 절차가 끝나면 시료에 증류수 500g을 첨가하여 함수비가 10%가 될 때 까지 같은 절차를 반복하고, 같은 함수비 및 다짐도 조건에 대하여 신호를 각 3번씩 측정한다.

(3) ~ (9)의 절차를 3회 반복하여 실시하였다.

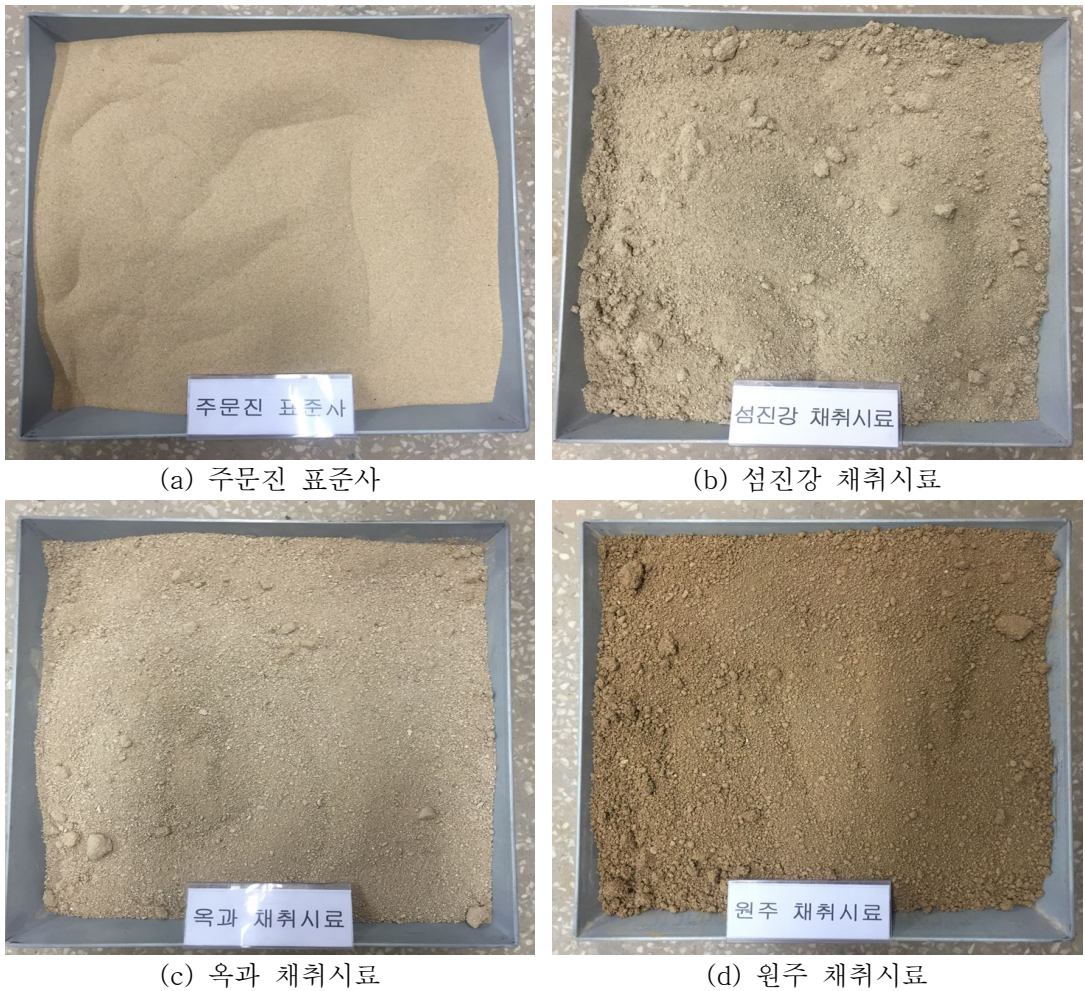


그림 4.2 실험에 사용한 시료



그림 4.3 몰드 무게 측정

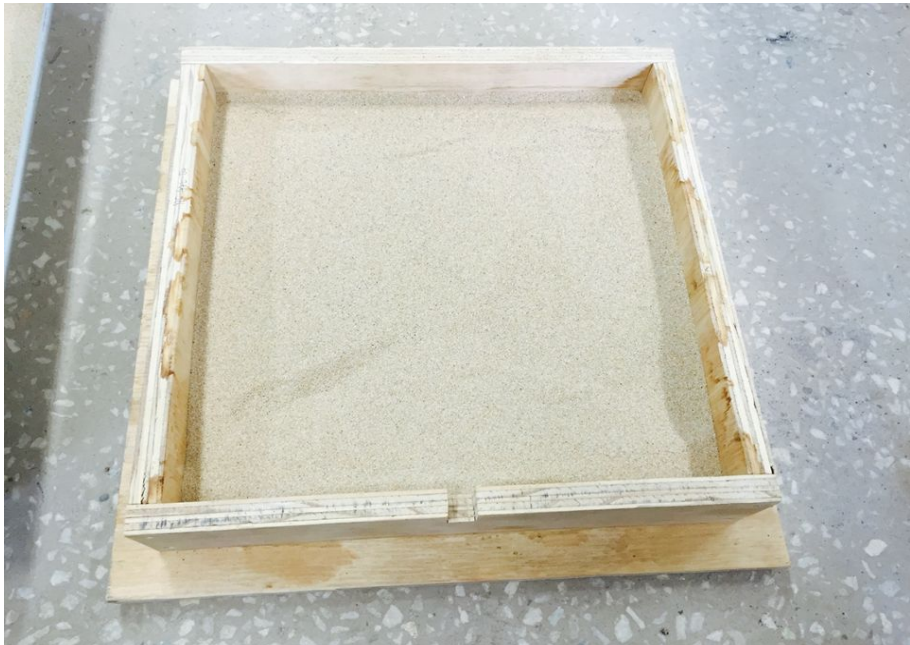


그림 4.4 다짐 준비(시료)



그림 4.5 다짐 준비(나무판 + 추)



그림 4.6 다짐 작업

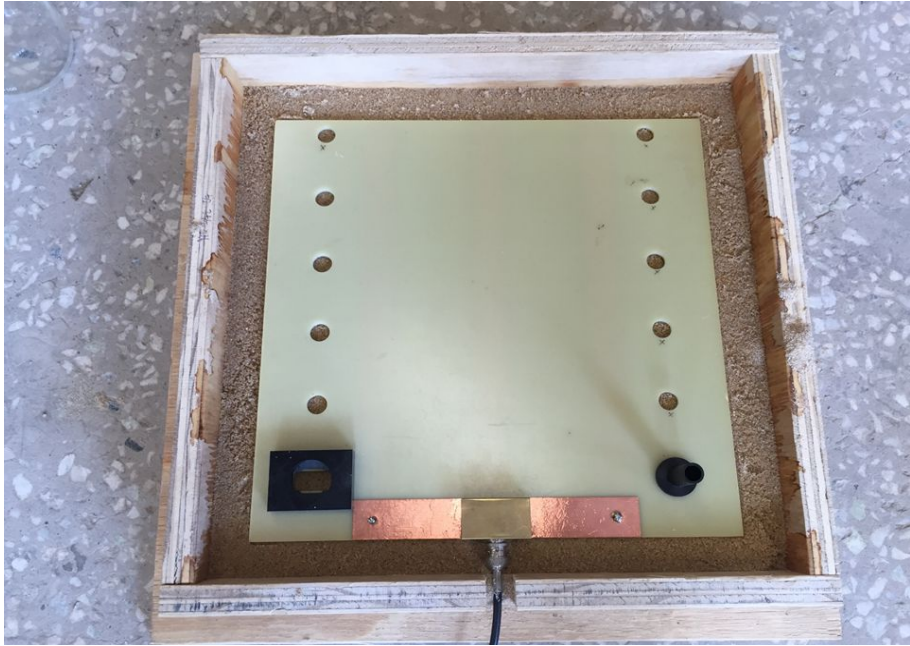


그림 4.7 TDR 신호 측정



(a) (몰드 + 젖은시료) 무게 측정



(b) 함수비 측정

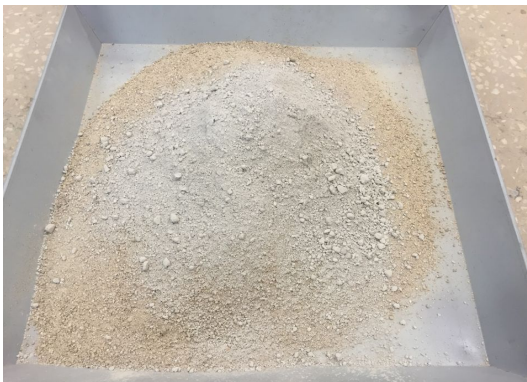
그림 4.8 (몰드 + 젖은 시료)무게 및 함수비 측정

4.2.2 지반 강성 측정

본 연구는 Piezo-stack과 결합한 TDR 시스템을 이용하여 지반 개량 후 지반 개량 효과를 분석하기 위하여 진행하였다. 심진강 채취시료에 그라우팅용 마이크로

시멘트를 시료 무게에 대한 중량비 10%로 첨가하여 함수비 5%조건으로 혼합하였으며, 공기 중에 방치시켜 양생시켰다. 이를 시간 경과(시작, 1일, 3일, 7일, 14일, 28일)에 따라 탄성과 속도를 측정함으로써 강도 변화 양상을 측정하였고, 시험의 절차는 다음과 같다.

- (1) 준비된 시료(10kg)에 마이크로 시멘트를 중량비 10%로 첨가하여 골고루 혼합한다(그림 4.9(a)).
- (2) 준비된 시료에 증류수 500g을 첨가하여 골고루 혼합한다.
- (3) 물을 첨가한 시료를 준비된 몰드에 담고 다짐을 실시한다.
- (4) 다져진 시료의 표면을 고르게 하고 프로브를 올려놓고 탄성과 신호를 측정한다(그림 4.9(b)).



(a) 시료 혼합



(b) 탄성과 신호 측정

그림 4.9 지반 강성 측정 시험 절차

4.3 TDR 프로브 보정

4.3.1 TDR 신호 분석

가. 개발 TDR 신호 측정

TDR 시스템에서 흙의 함수비와 건조밀도를 측정하기 위해서는 그림 2.1과 같이

측정된 파형을 분석하여 흙의 유전상수와 전기전도도를 도출하여야한다. 본 연구에서 흙의 함수비와 건조밀도를 개발한 TDR 시스템을 이용하여 측정하기 위하여 주문진 표준사(함수비 4% - 총당 다짐횟수 12회)에서의 신호를 측정하였다.

그 결과 그림 4.10과 같은 파형을 얻을 수 있었다.

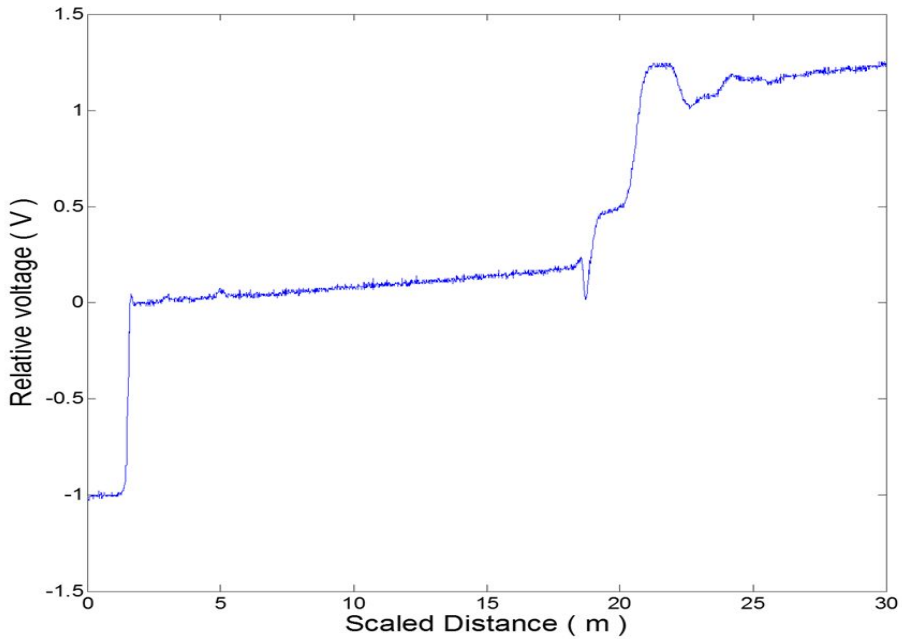


그림 4.10 개발 TDR 시스템 파형

나. 개발 TDR 신호 분석

개발한 TDR 시스템을 이용하여 측정된 신호를 분석한 결과, 그림 4.11에 나타난 기존의 연구자들(Jung 등, 2013)에 의한 TDR 파형과 달리 장주기전압레벨이 상당히 크다는 것을 확인할 수 있었다.

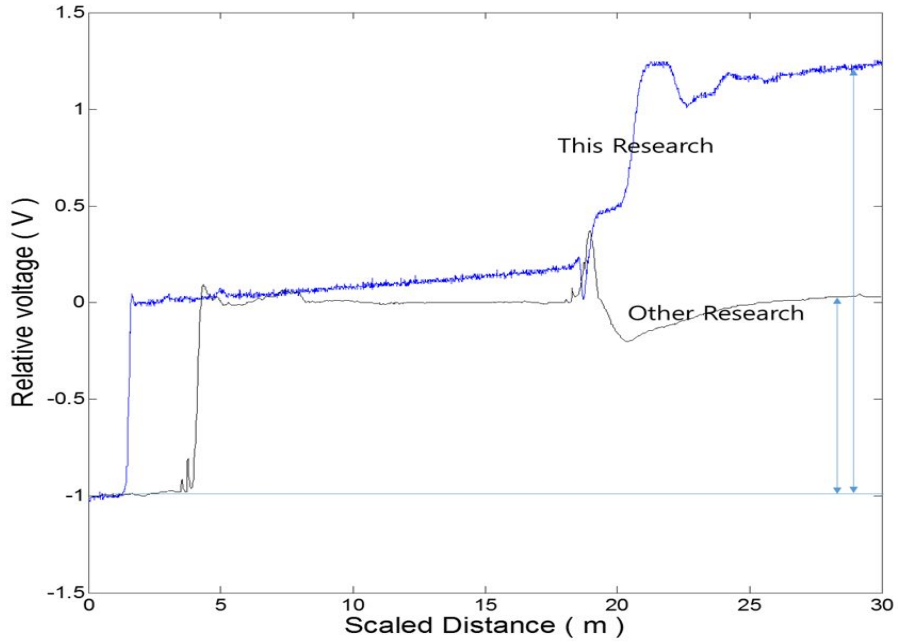


그림 4.11 TDR 파형 비교

또한 장주기전압레벨의 값이 2보다 큰 값으로 측정된다는 것을 알 수 있는데, 이를 식 (2.69)에 대입하면 음의 전기전도도 값을 얻을 수 있다. 전기전도도 값은 음의 값을 가질 수 없을 뿐만 아니라 계산된 전기전도도 값을 이용하여 함수비와 건조밀도를 도출하기 위하여 식 (2.73)과 식 (2.74)에 대입하면 음수의 제곱근을 계산하여야 하고 이는 허수가 되기 때문에 함수비와 건조밀도를 측정할 수 없게 된다.

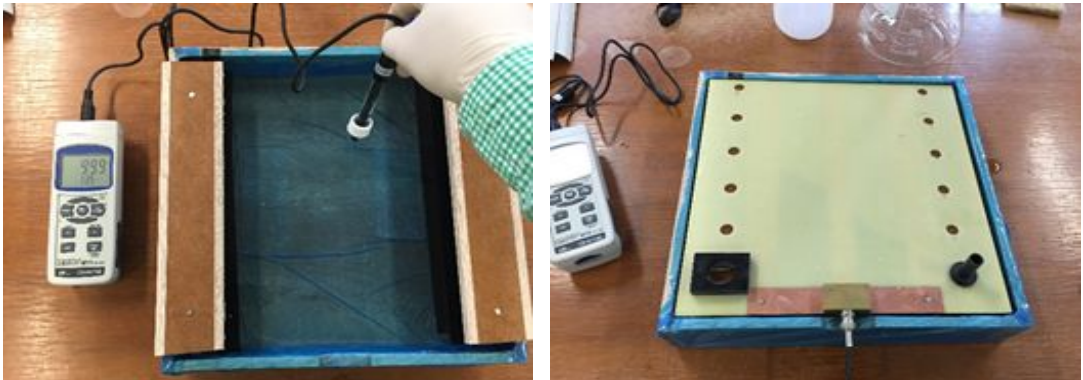
4.3.2 TDR 프로브 보정 실험

개발한 관형 프로브로 측정하였을 때 측정되는 장주기전압레벨의 보정을 위하여 전기전도도 측정기로 측정한 실제 전기전도도 값과 TDR 시스템으로 측정한 장주기전압레벨의 값의 관계를 도출하였다.

가. 실험 조건 및 절차

프로브 보정 실험은 소금물의 농도를 변화시키면서 측정하였다. 소금물을 첨가하지 않은 증류수에 소금을 일정 양 첨가하면서 실험을 진행하였다. 본 실험은 다음의 절차에 따라 진행하였다.

- (1) 물을 담을 수 있는 몰드(31cm * 31cm * 5cm)를 제작한다.
 - (2) 증류수 4L를 몰드에 채우고 증류수의 전기전도도 값을 전기전도도 측정기를 이용하여 측정하고, TDR 시스템을 이용하여 장주기전압레벨을 측정한다(그림 4.11).
 - (3) 소금을 0.4g를 첨가하여 소금물의 농도를 100ppm으로 조정하고 (2)의 절차와 같이 실험을 진행한다.
 - (4) 소금물의 농도를 1000ppm까지 100ppm씩 증가시키면서 실험을 진행한다.
- (2) ~ (4)의 절차를 3번 반복하여 실시하였다.



(a) 전기전도도

(b) 장주기 전압레벨

그림 4.12 소금물의 전기전도도 및 장주기전압레벨 측정

나. 실험 결과 및 관계식 도출

Probe를 보정하기 위한 실험을 실시한 결과, 그림 4.13과 같이 소금물의 농도가 증가 할수록 전기전도도의 값이 증가함을 알 수 있었으며, 그림 4.14와 같이 소금물의 농도가 증가할수록 장주기전압레벨은 감소함을 알 수 있었다.

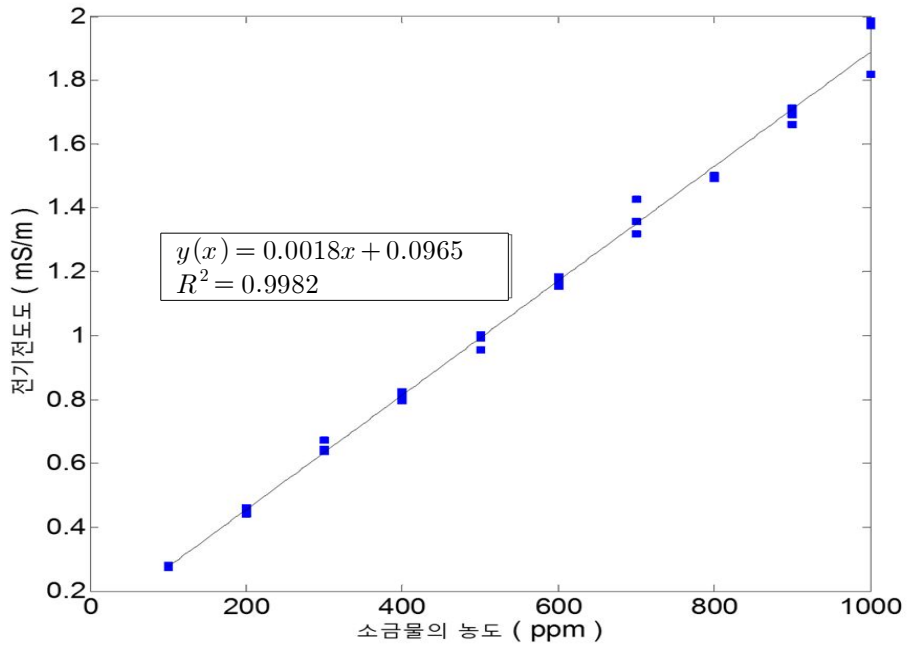


그림 4.13 소금물과 전기전도도의 관계

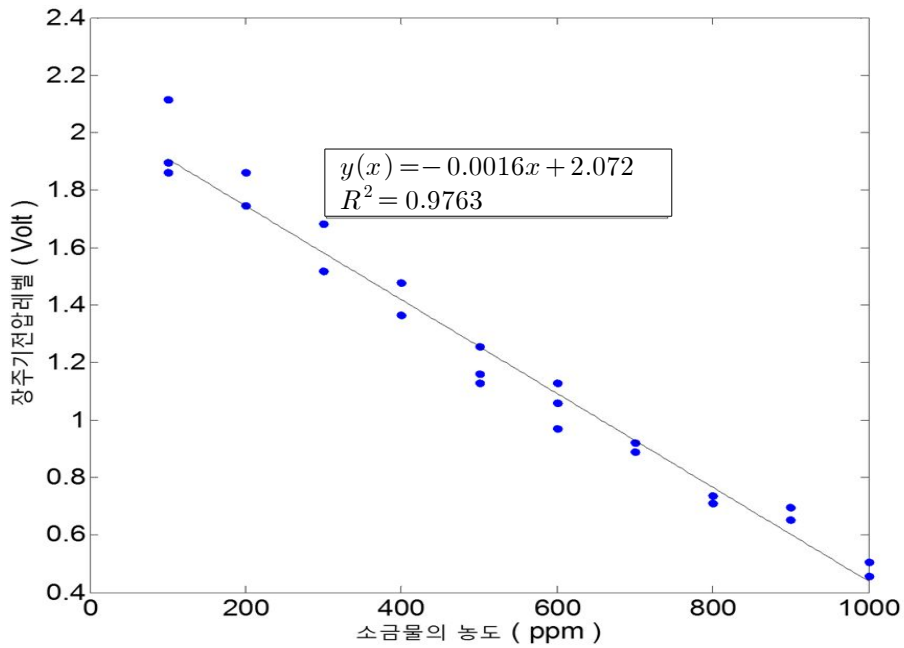


그림 4.14 소금물과 장주기전압레벨의 관계

소금물의 농도에 따라 전기전도도가 증가하고, 장주기전압레벨이 감소하는 경향을 보임에 따라 전기전도도와 장주기전압레벨사이의 관계를 그림 4.15와 같이 도출할 수 있었고, 이를 식 (4.1)로 표현할 수 있다.

$$EC = 1.1864 \cdot \log(1/V_f) + 1.1696 \quad (4.1)$$

여기서, EC : 전기전도도(mS/m)
 V_f : 장주기전압레벨($Volt$)

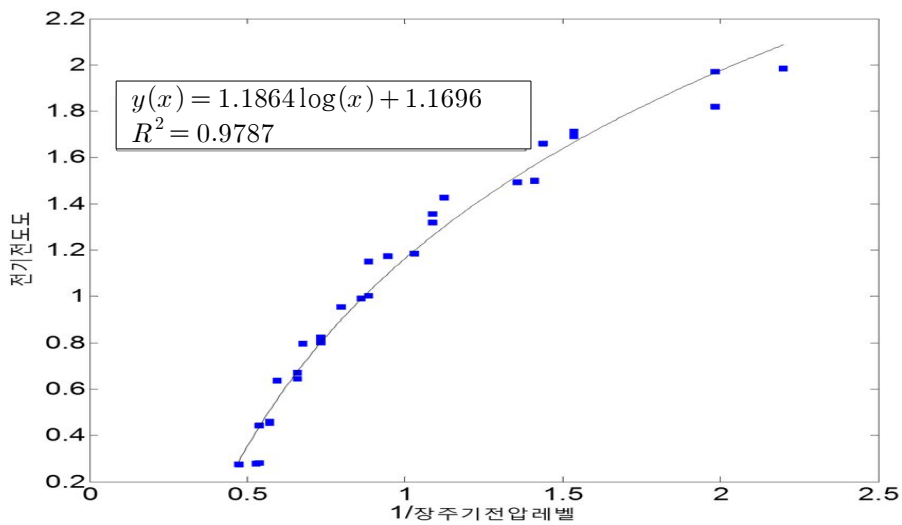


그림 4.14 전기전도도와 장주기전압레벨의 관계

4.4 실내 검증 실험

4.4.1 조건 변화에 따른 TDR 신호 분석

본 절에서는 실험 조건의 변화에 따라 TDR 신호에서 어떠한 변화가 가장 큰 영향을 끼치는지 확인하기 위하여 실험 조건을 달리하여 각각의 신호를 분석하였다.

TDR 신호는 흙의 종류, 함수비, 그리고 다짐도에 따라 얻어지는 신호가 다르며, 흙 속에 포함된 세립분의 양과 함수비에 따라 신호의 변화는 가장 확연하게 나타난다(Zambrano, 2006).

이러한 변화가 판형 TDR 시스템에서도 동일하게 작용하는지 확인하기 위하여 본 실험을 진행하였으며, 실험 조건에 따라 변화하는 요소는 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점 사이의 거리와 장주기 전압레벨 이므로 본 연구에서는 이를 확인하였으며, 그림 4.16은 본 연구를 통해 얻을 수 있는 파형에서 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점, 장주기 전압레벨의 측정 위치를 보여준다.

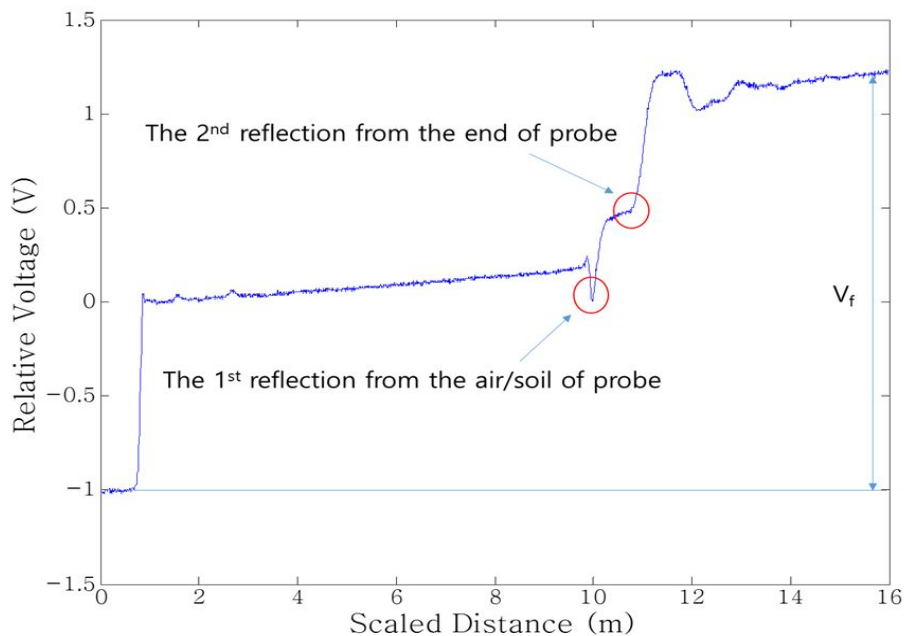


그림 4.16 TDR 파형 분석

가. 흙의 종류에 따른 TDR 신호의 변화

본 연구에서는 서로 다른 네 가지의 시료를 사용하여 실험을 실시하였고, 이에 따른 TDR 신호의 변화를 분석하였다. 네 가지 시료에 대하여 동일한 함수비, 다짐도의 조건에서의 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점의 거리와 장주기 전압레벨을 비교하였다.

함수비 2%, 총당 타격횟수 8회의 조건에서 두 반사지점 사이의 거리는 각각의 시료에 대해 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 장주기 전압레벨의 경우는 세립분의 함유량이 많은 시료에 대하여 높은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있었다(그림 4.17). 함수비 4%, 총당 타격횟수 8회의 조건에서도 두 반사지점 사이의 거리는 시료별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 장주기 전압레벨은 세립분의 함유량이 많은 흙에서 높은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있었다(그림 4.18). 또한 이와 마찬가지로 그림 4.19와 그림 4.20에서 확인할 수 있듯 다른 조건에서도 두 반사지점 사이의 거리는 각 시료에 대하여 뚜렷한 차이점을 나타내지 않았고, 장주기 전압레벨은 세립분이 많은 흙에서 높은 값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

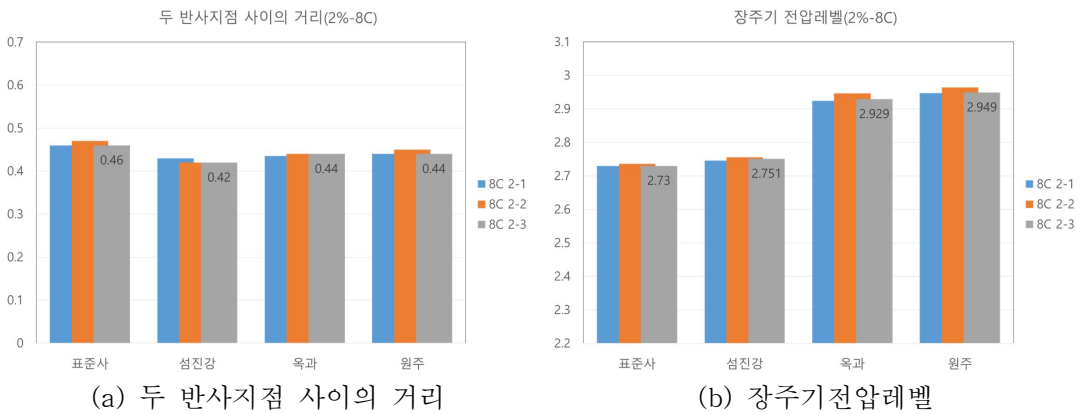


그림 4.17 시료별 신호 변화 비교(함수비 2% - 총당 다짐횟수 8회)

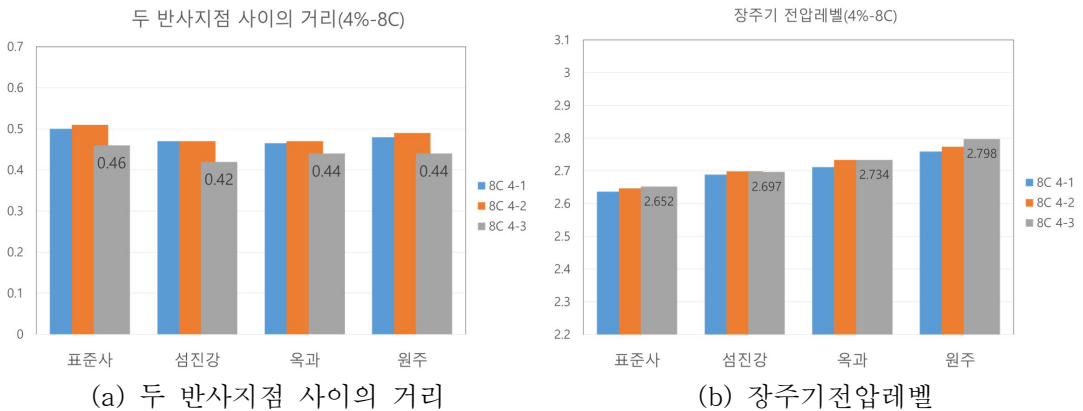


그림 4.18 시료별 신호 변화 비교(함수비 4% - 총당 다짐횟수 8회)

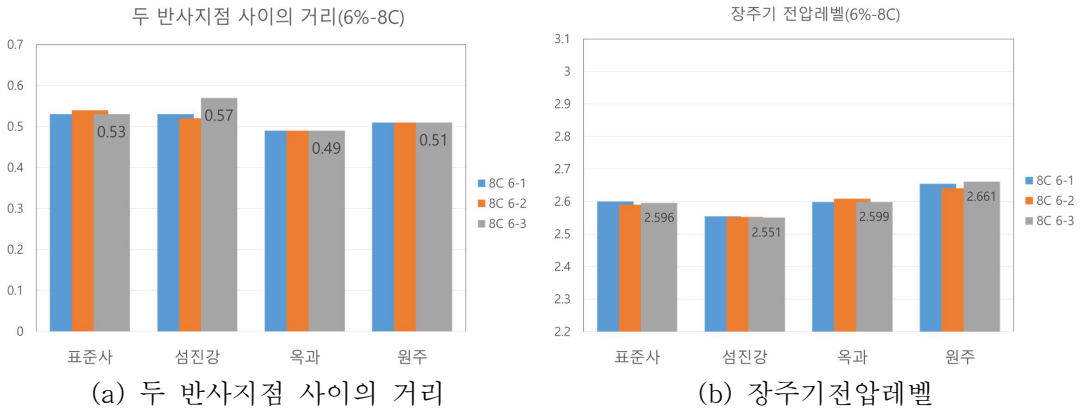


그림 4.19 시료별 신호 변화 비교(흡수비 6% - 총당 다짐횟수 8회)

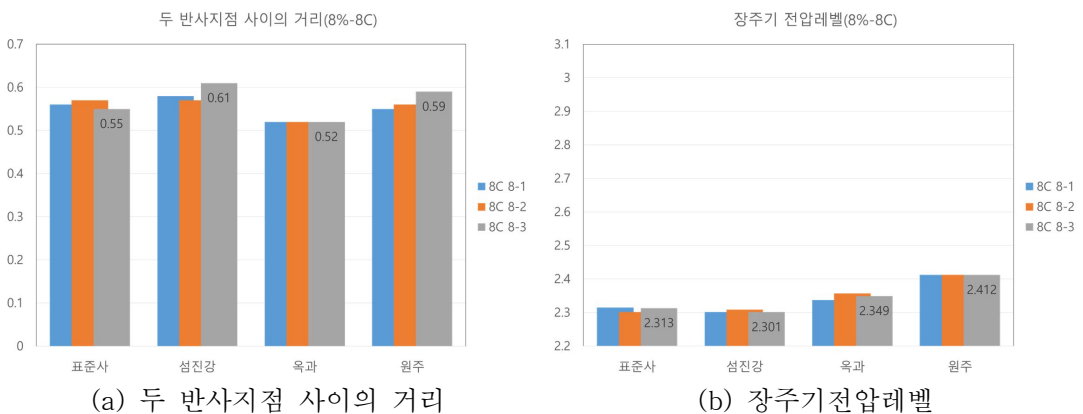
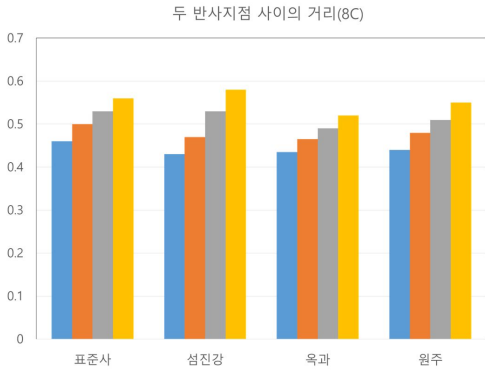


그림 4.20 시료별 신호 변화 비교(흡수비 8% - 총당 다짐횟수 8회)

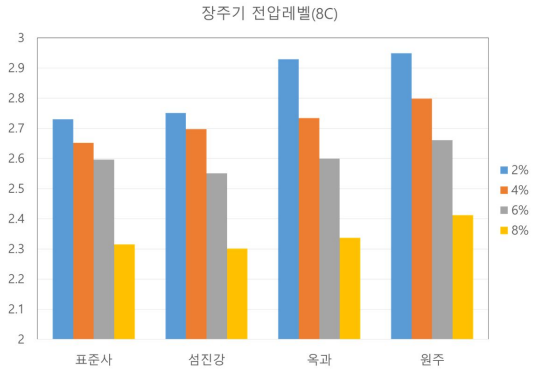
나. 흡수비에 따른 TDR 신호의 변화

흡수비가 2%씩 추가될 때 마다 TDR 신호의 변화를 분석하였으며, 동일한 시료에 대하여 흡수비가 변화할 때 마다 두 반사지점 사이의 거리와 장주기 전압레벨을 비교하였다.

각 시료별로 흡수비가 2%씩 추가될 때 마다 두 반사지점 사이의 거리는 증가하고, 장주기 전압레벨은 감소함을 나타내었으며, 그림 4.21 ~ 그림 4.23에 각 시료별 흡수비 변화에 따른 두 반사지점 사이의 거리와 장주기 전압레벨의 변화를 도시하였다.

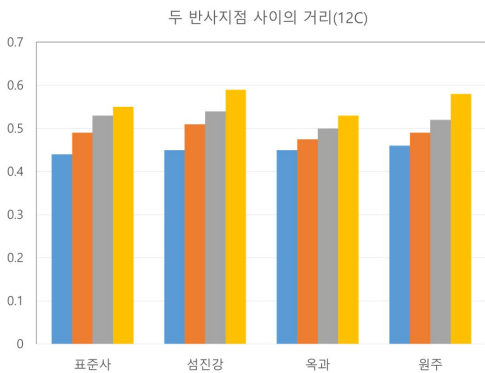


(a) 두 반사지점 사이의 거리

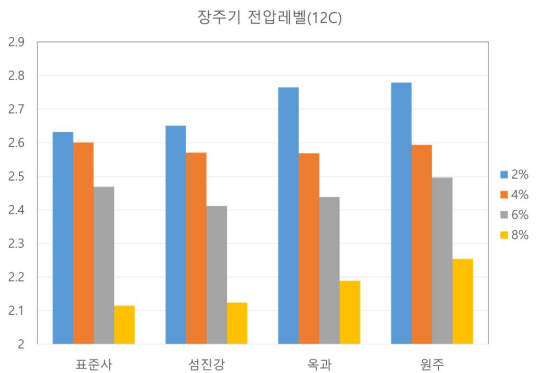


(b) 장주기전압레벨

그림 4.21 함수비 변화에 따른 신호 변화 비교(총당 타격횟수-8회)

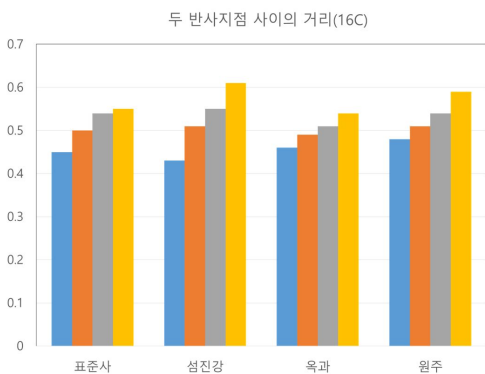


(a) 두 반사지점 사이의 거리

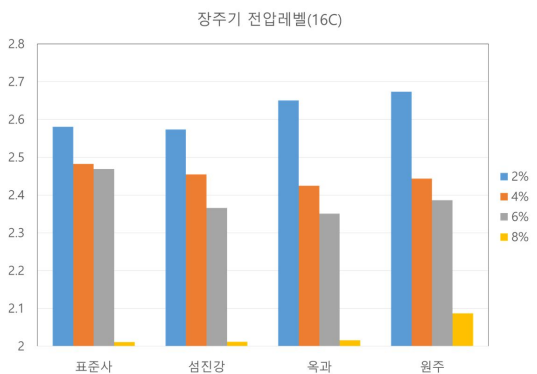


(b) 장주기전압레벨

그림 4.22 함수비 변화에 따른 신호 변화 비교(총당 타격횟수-12회)



(a) 두 반사지점 사이의 거리



(b) 장주기전압레벨

그림 4.23 함수비 변화에 따른 신호 변화 비교(총당 타격횟수-16회)

다. 다짐도에 따른 TDR 신호의 변화

본 연구에서는 층당 다짐횟수를 변화시킴으로써 다짐도의 변화를 주었고, 다짐횟수를 8회, 12회, 16회로 증가할 때 마다 TDR 신호의 변화를 분석하였으며, 함수비와 시료의 종류가 동일한 조건에서 다짐도의 변화에 대한 두 반사지점 사이의 거리와 장주기 전압레벨을 비교하였다.

다짐도가 증가함에 따라 두 반사지점 사이의 거리는 각 시료별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며(그림 4.24(a), 4.25(a), 4.26(a), 4.27(a)), 장주기 전압레벨은 다짐도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 함수비에 변화에 장주기 전압레벨의 감소폭보다 적은 것을 확인할 수 있었다(그림 4.24(b), 4.25(b), 4.26(b), 4.27(b)).

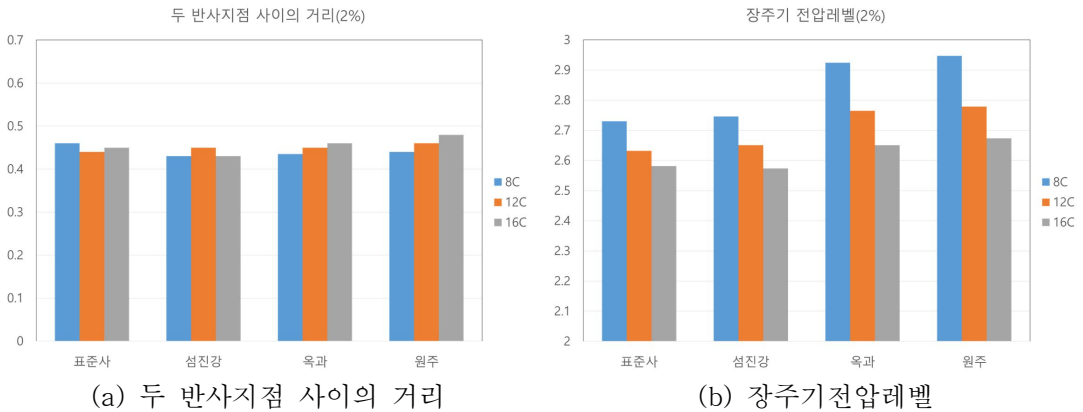
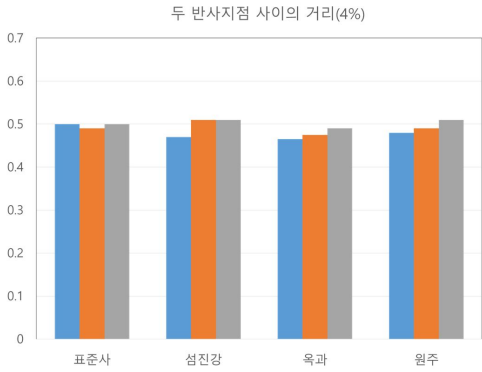
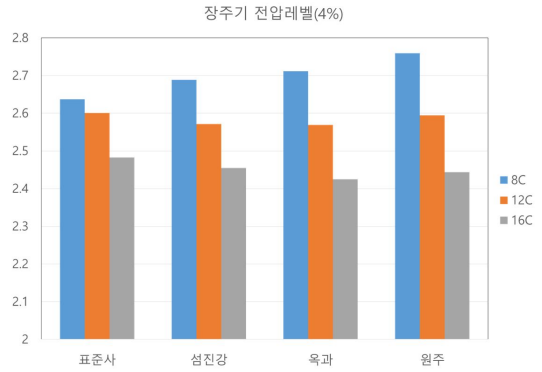


그림 4.24 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-2%)

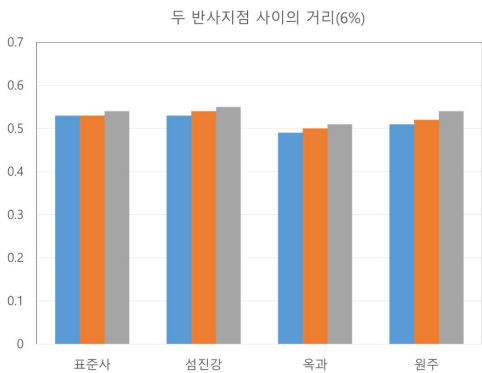


(a) 두 반사지점 사이의 거리

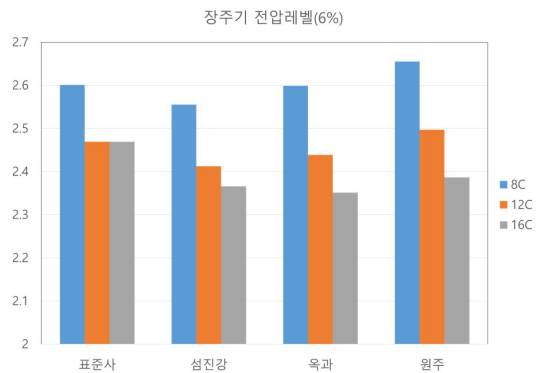


(b) 장주기전압레벨

그림 4.25 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-4%)

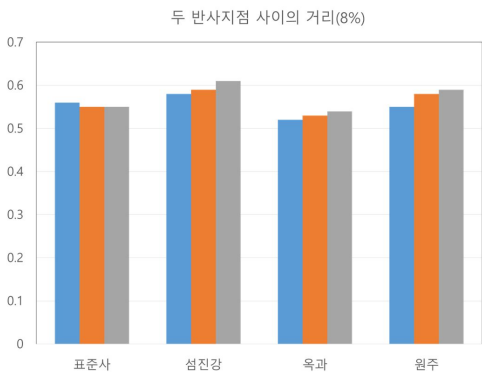


(a) 두 반사지점 사이의 거리

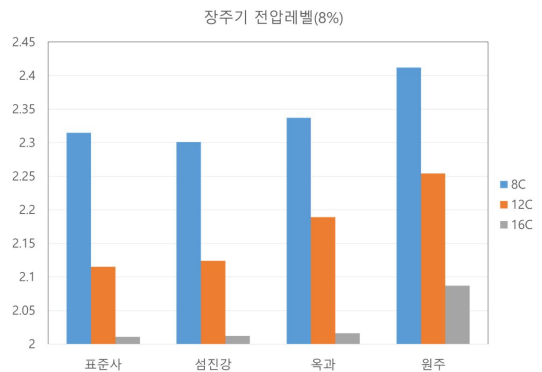


(b) 장주기전압레벨

그림 4.26 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-6%)



(a) 두 반사지점 사이의 거리



(b) 장주기전압레벨

그림 4.27 다짐도 변화에 따른 신호 변화 비교(함수비-8%)

시료의 종류, 함수비의 변화, 그리고 다짐도의 변화에 따른 TDR 신호의 변화를 네 가지의 사질토를 대상으로 분석하였으며, 그 결과, 사질토에서 흙 시료에 포함되어 있는 세립분의 양에 따라 두 반사지점 사이의 거리는 큰 영향을 받지 않는 것으로 확인되었고, 장주기 전압레벨은 세립분의 양이 증가함에 따라 증가하는 것으로 확인되었다. 그리고 다짐도가 증가함에 따라 두 반사지점 사이의 거리는 큰 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으며, 장주기 전압레벨은 감소함을 확인할 수 있었으며, 흙 시료 안에 포함되어 있는 물의 양이 증가할수록 두 반사지점 사이의 거리는 멀어지고, 장주기 전압레벨은 감소함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 TDR 신호는 물의 양에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

4.4.2 시료별 특성상수 값 결정

본 절에서는 시료별 유전상수와 전기전도도를 2장과 앞 절에서 기술한 내용을 바탕으로 도출하였다. 유전상수는 식 (2.62)를 통하여 도출하였고, 전기전도도는 본 연구에서 구한 관계식을 통하여 도출하였다.

유전상수 및 전기전도도와 함수비의 관계에 대하여 선형회귀분석을 실시하였고, 각각의 시료에 대한 유전상수와 함수비의 관계는 그림 4.28 ~ 그림 4.31과 같으며, 전기전도도와 함수비의 관계는 그림 4.32 ~ 그림 4.35와 같다.

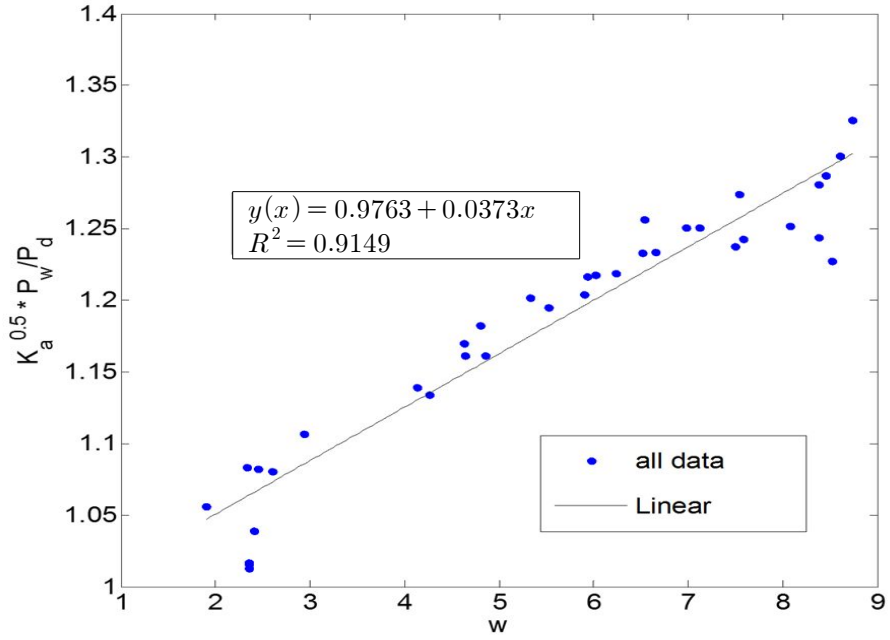


그림 4.28 특성상수 값 a, b 결정(주문진 표준사)

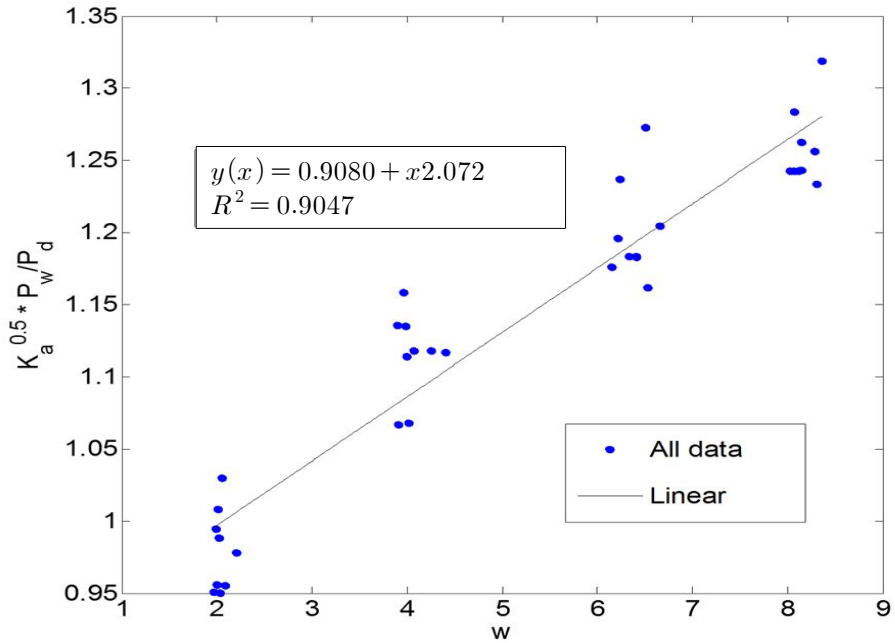


그림 4.29 특성상수 값 a, b 결정(섬진강 채취시료)

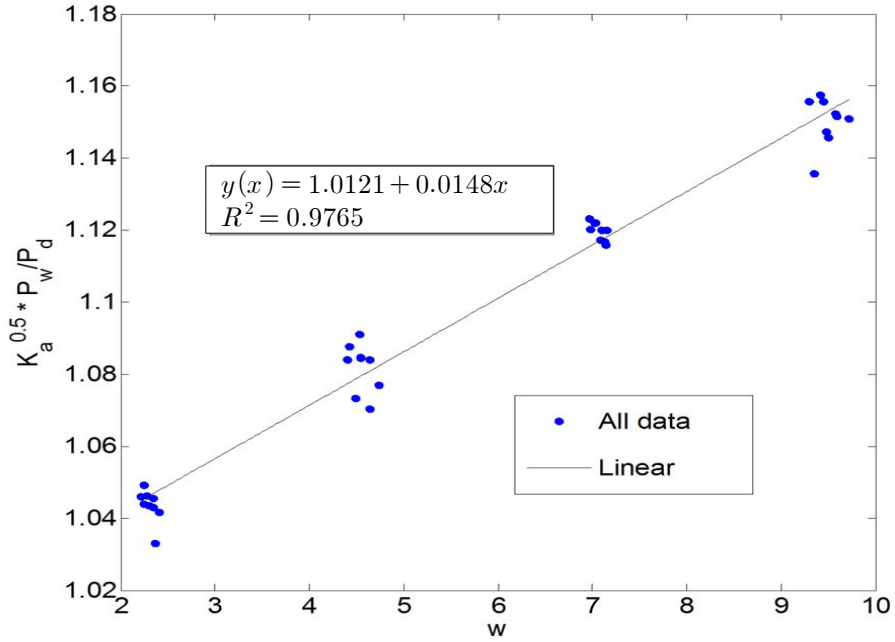


그림 4.30 특성상수 값 a, b 결정(옥과 채취시료)

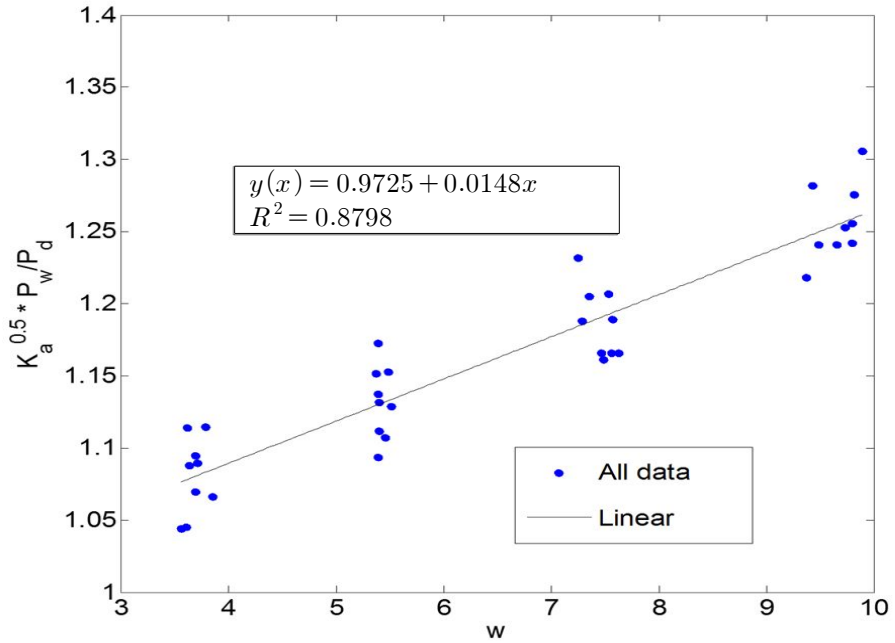


그림 4.31 특성상수 값 a, b 결정(원주 채취시료)

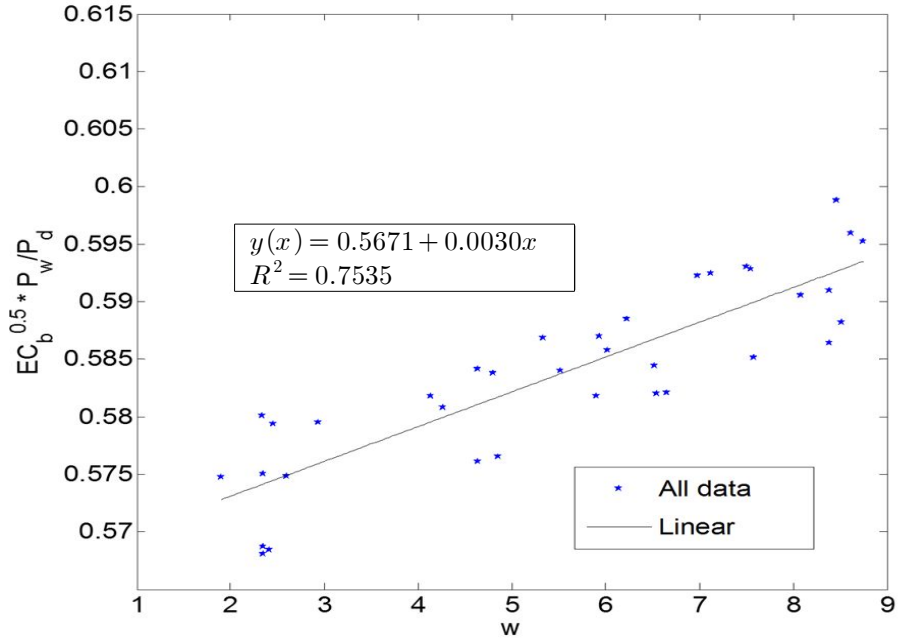


그림 4.32 특성상수 값 c, d 결정(주문진 표준사)

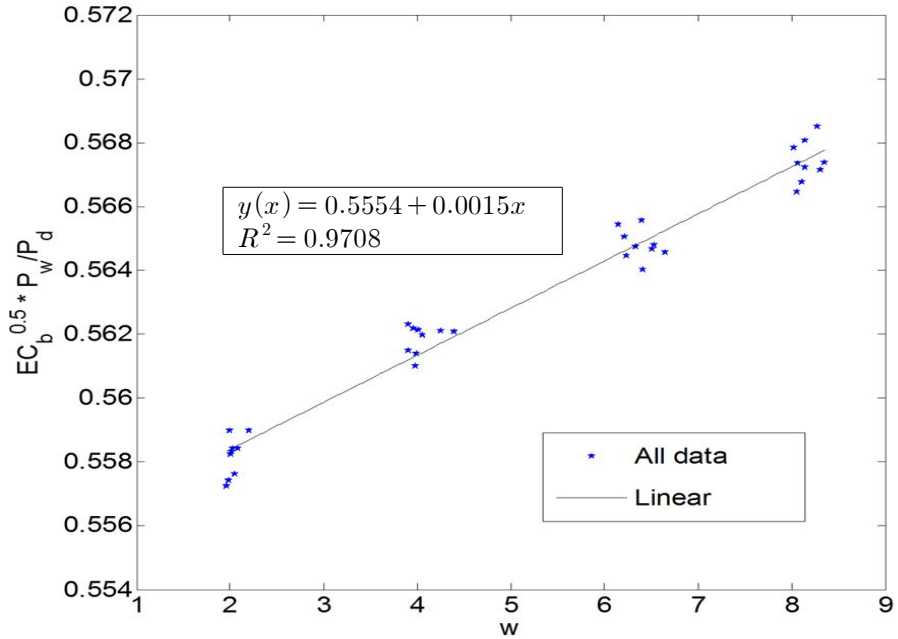


그림 4.33 특성상수 값 c, d 결정(섬진강 채취시료)

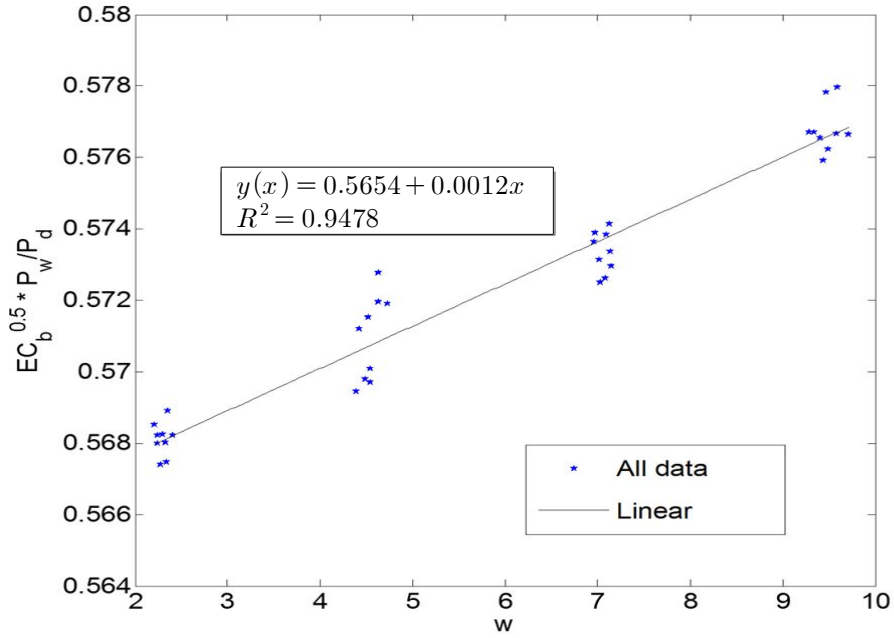


그림 4.34 특성상수 값 c, d 결정(옥과 채취시료)

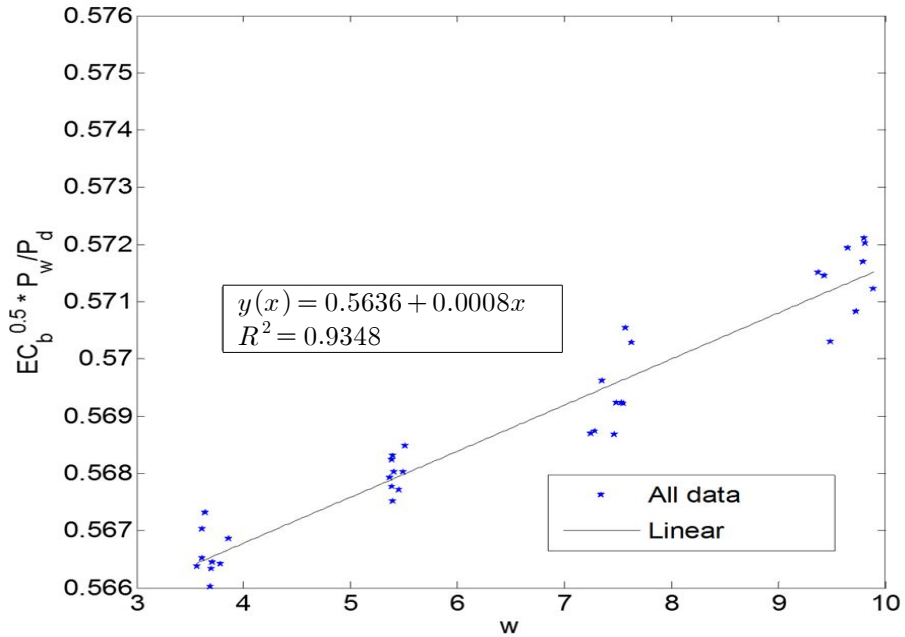


그림 4.35 특성상수 값 c, d 결정(원주 채취시료)

실내실험을 통하여 각 시료에 대한 유전상수와 전기전도도를 통해 산정한 특성상수 값은 다음 표 4.3과 같다.

표 4.3 각 시료별 특성상수

구 분	a	b	c	d
주문진 표준사	0.9763	0.0373	0.5671	0.0030
섬진강 채취시료	0.9080	0.0446	0.5554	0.0015
옥과 채취시료	1.0121	0.0148	0.5654	0.0012
원주 채취시료	0.9725	0.0292	0.5636	0.0008

4.4.3 시간 변화에 따른 탄성과 신호 측정

본 절에서는 시간의 변화에 따른 탄성과 신호의 변화를 분석하였다. 입력파는 구형파(Square wave)를 주파수 0.01kHz로 입력하였고, 그에 따른 출력신호를 이용하였다. 도달시간은 그림 2.15와 같이 초동 추정방법을 이용하여 산정하였으며, 실험을 통하여 얻은 탄성과 신호는 그림 4.36 ~ 4.43과 같고, 표 4.4와 같이 도달시간을 얻을 수 있었다.

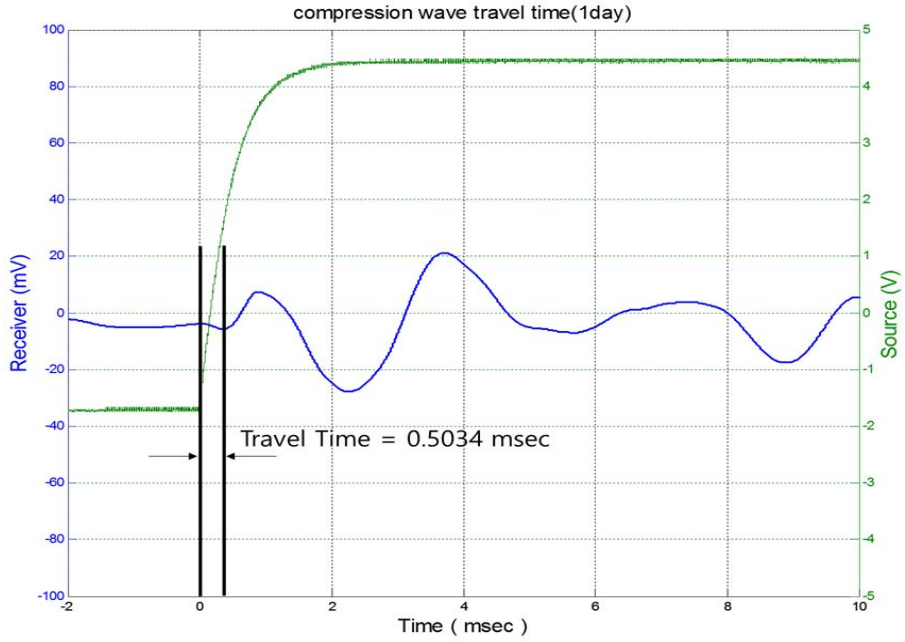


그림 4.36 탄성파 신호 측정(압축파-1day)

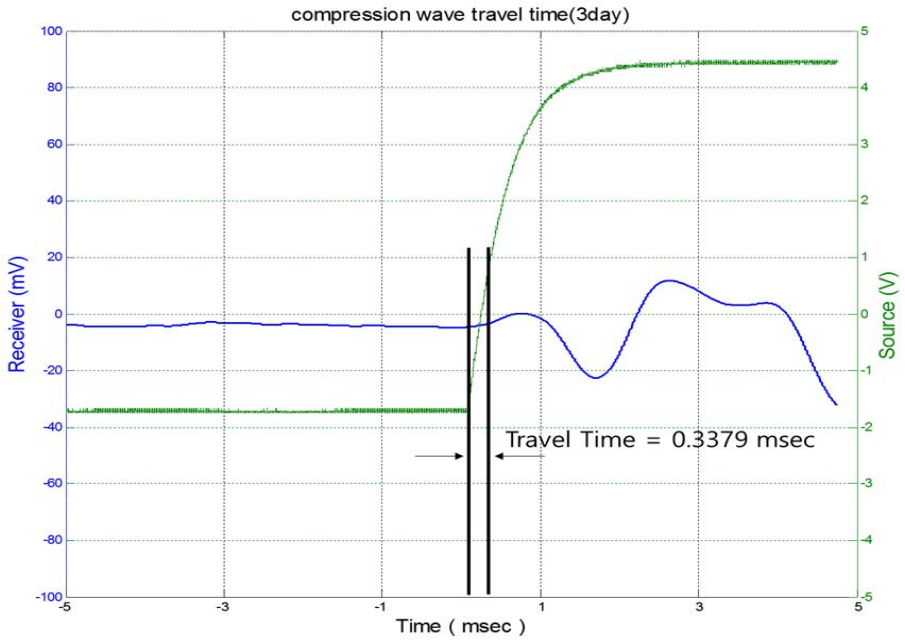


그림 4.37 탄성파 신호 측정(압축파-3day)

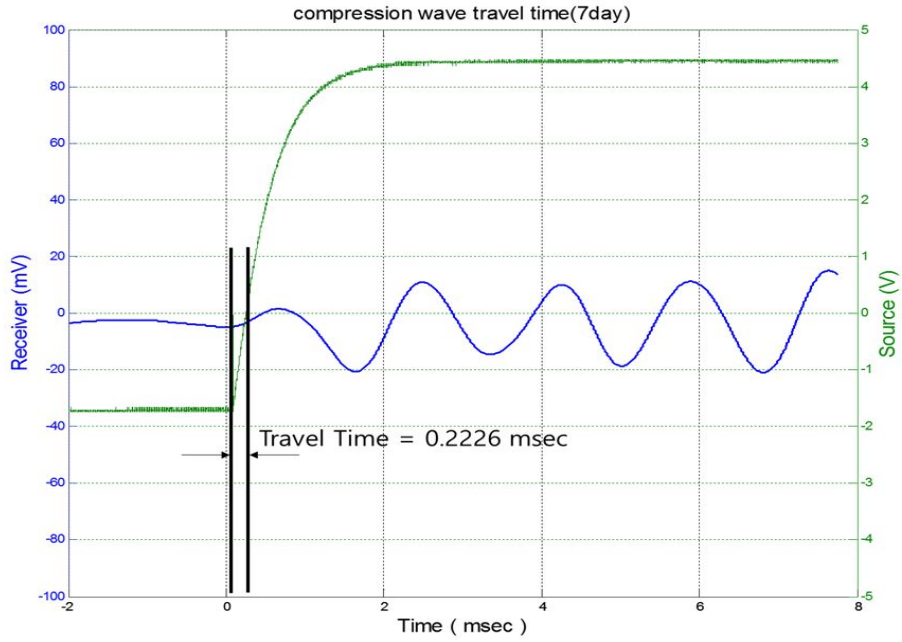


그림 4.38 탄성과 신호 측정(압축파-7day)

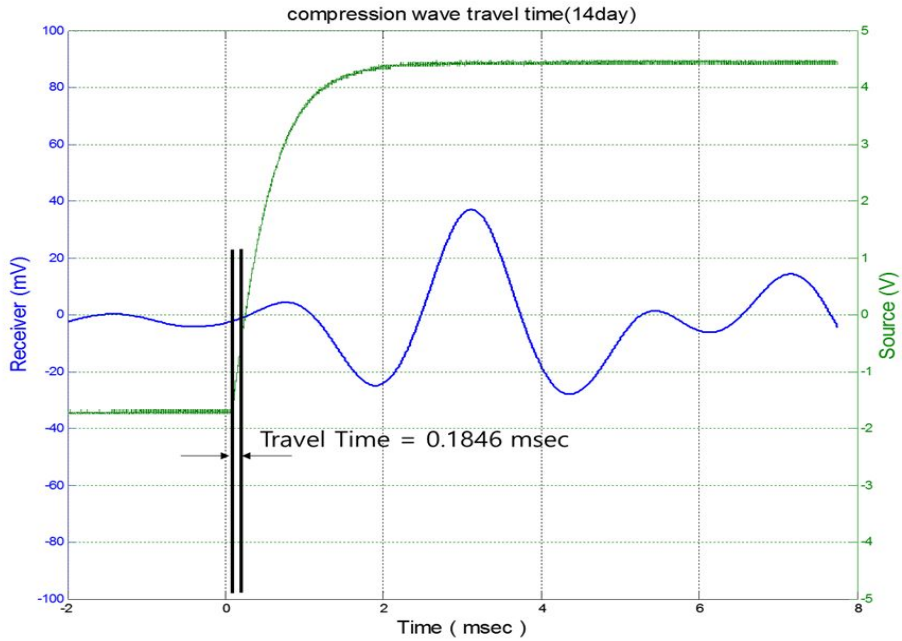


그림 4.39 탄성과 신호 측정(압축파-14day)

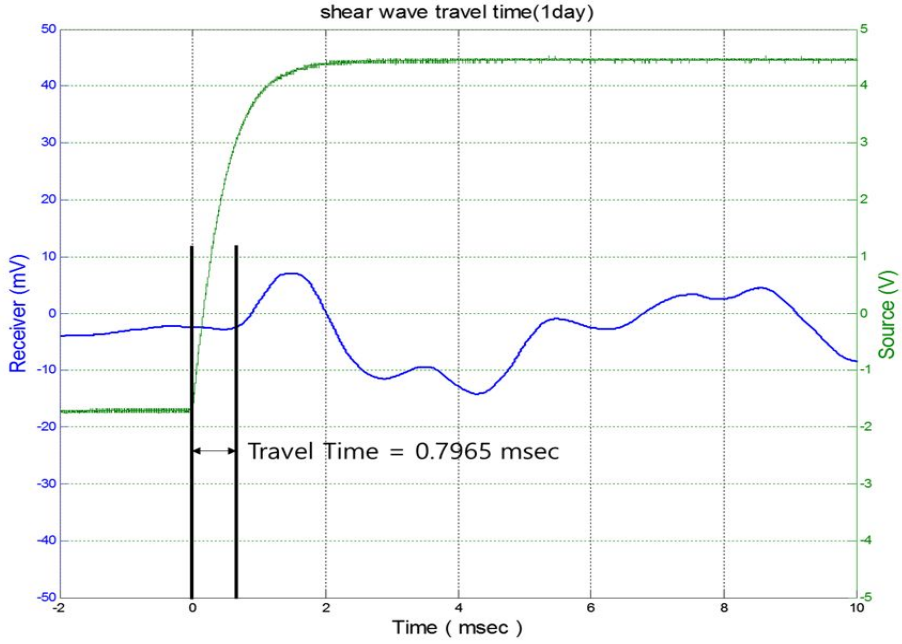


그림 4.40 탄성파 신호 측정(전단파-1day)

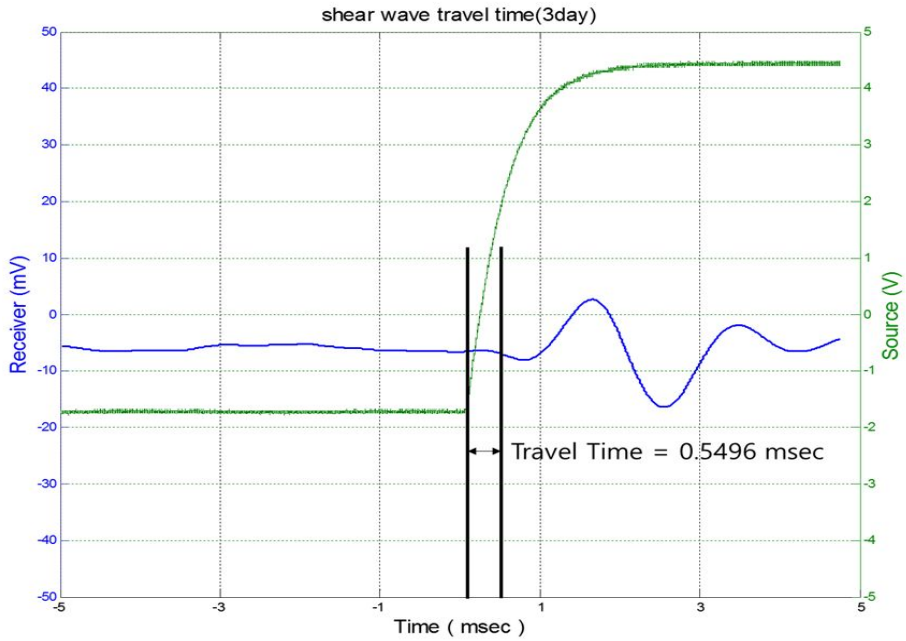


그림 4.41 탄성파 신호 측정(전단파-3day)

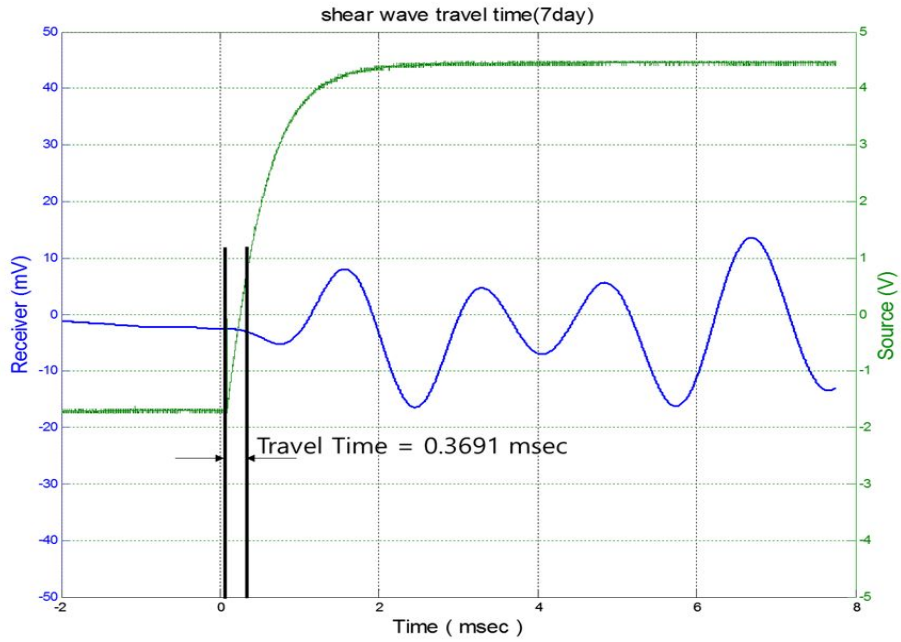


그림 4.42 탄성파 신호 측정(전단파-7day)

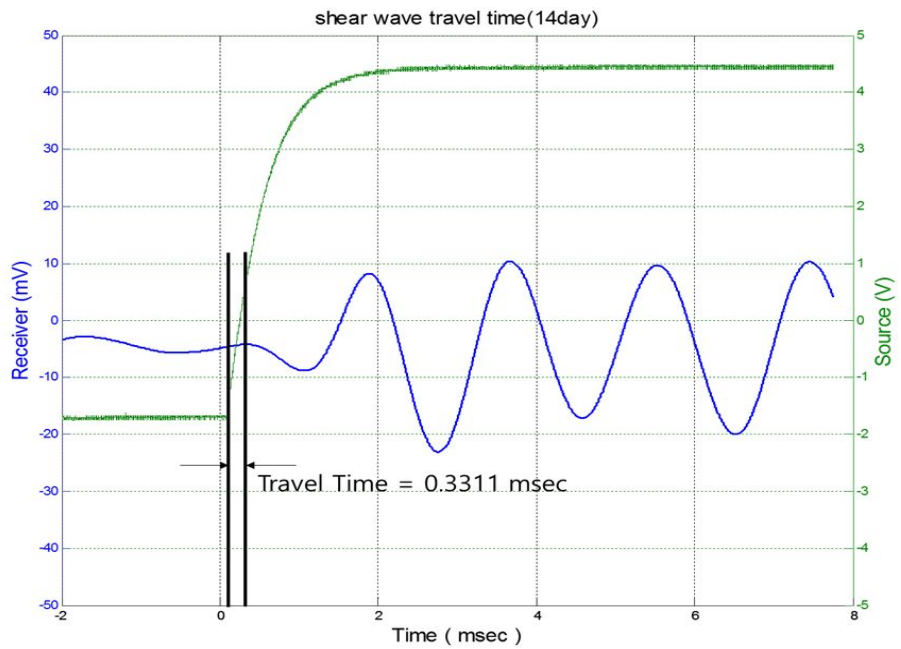


그림 4.43 탄성파 신호 측정(전단파-14day)

표 4.4 도달시간산정

<단위 : msec>

구 분 \ 양생 기간	1 일	3 일	7 일	14 일
압축과 도달시간	0.5034	0.3379	0.2226	0.1846
전단파 도달시간	0.7965	0.5496	0.3691	0.3311

제 5 장 실내 검증 실험 결과 및 분석

5.1 실내 검증 실험 결과

5.1.1 함수비 측정 결과

본 연구를 통하여 개발한 프로브를 이용하여 도출한 유전상수, 전기전도도, 그리고 특성상수 값을 이용하여 시료별 함수비를 측정하였고, 실제 노건조 함수비 시험을 통하여 얻은 함수비 값을 참 값으로 하여 TDR 시스템으로 측정한 함수비 값을 비교하였다.

실제 측정한 값과 TDR 시스템을 이용한 측정값을 비교하고 적용성을 검토하기 위하여 그림 5.1과 같이 Yu 등(2004)에서 사용한 함수비 오차범위인 $\pm 1\%$ 를 사용하였다.

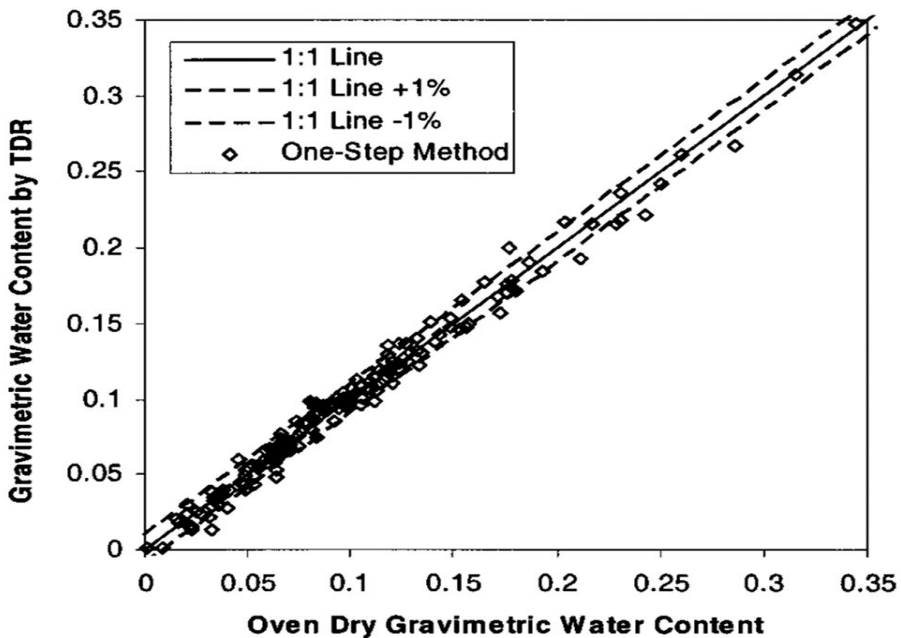


그림 5.1 함수비 정확도에 관한 기준(Yu 등, 2004)

시료별 실제 노건조 함수비 시험을 이용해 측정된 함수비 값을 기준으로 TDR 시스템을 이용한 측정값을 비교하였다. 그 결과, 주문진 표준사, 섬진강 채취시료, 옥과 채취시료, 그리고 원주 채취시료에 대하여 각각 그림 5.2, 그림 5.3, 그림 5.4, 그림 5.5와 같이 평균적으로 약 0.5%, 0.7%, 0.5%, 0.5%의 차이를 보이고 있다.

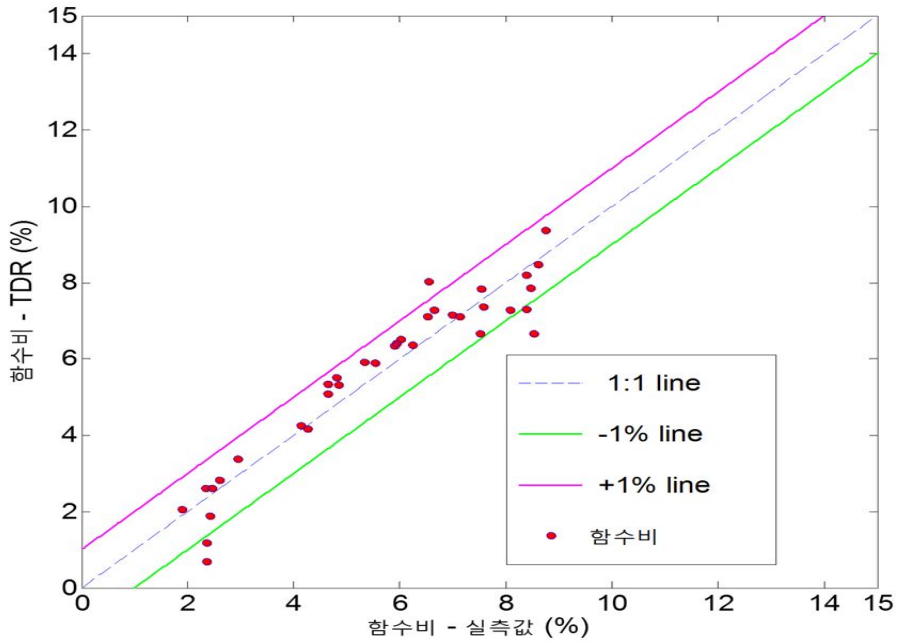


그림 5.2 함수비 측정 값 비교(주문진 표준사)

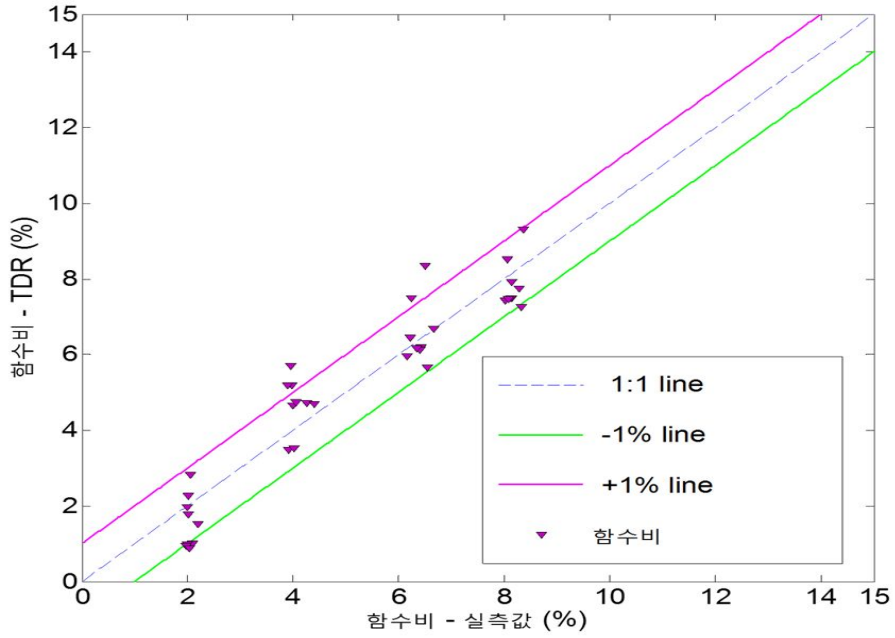


그림 5.3 함수비 측정 값 비교(섬진강 채취시료)

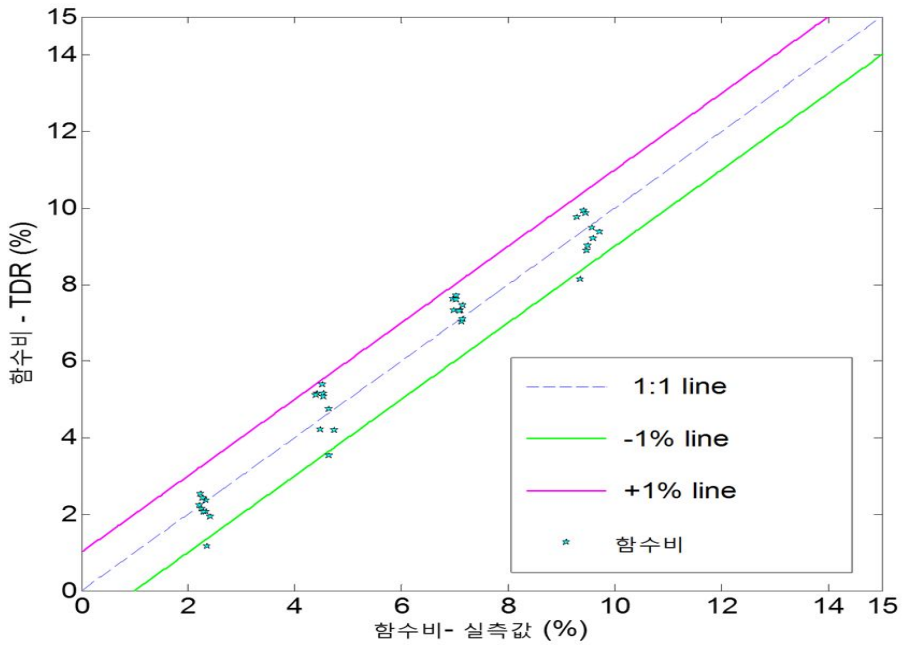


그림 5.4 함수비 측정 값 비교(옥과 채취시료)

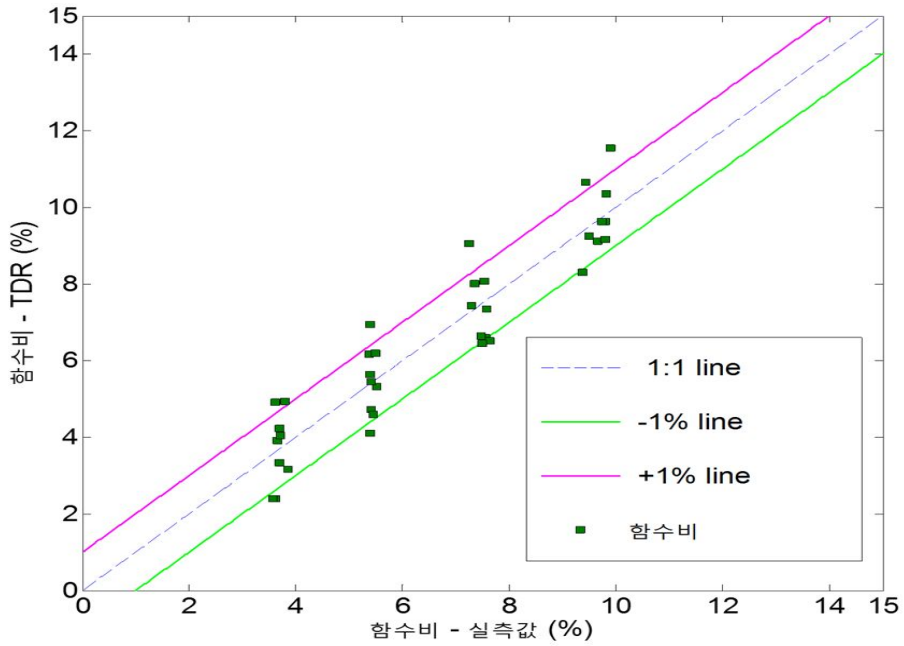


그림 5.5 함수비 측정 값 비교(원주 채취시료)

5.1.2 건조밀도 측정 결과

본 절에서는 실제 젖은 시료의 무게를 측정하여 얻은 습윤밀도와 노건조 함수비 시험을 통해 얻은 함수비를 통하여 구한 실제 건조밀도 값을 참 값으로 하여 TDR 시스템으로 측정한 건조밀도 값을 비교하였다.

실제 측정한 값과 TDR 시스템을 이용한 측정값을 비교하고 적용성을 검토하기 위하여 그림 5.6과 같이 Jung 등(2013)에서 사용한 건조밀도 오차범위인 $\pm 5\%$ 를 사용하였다.

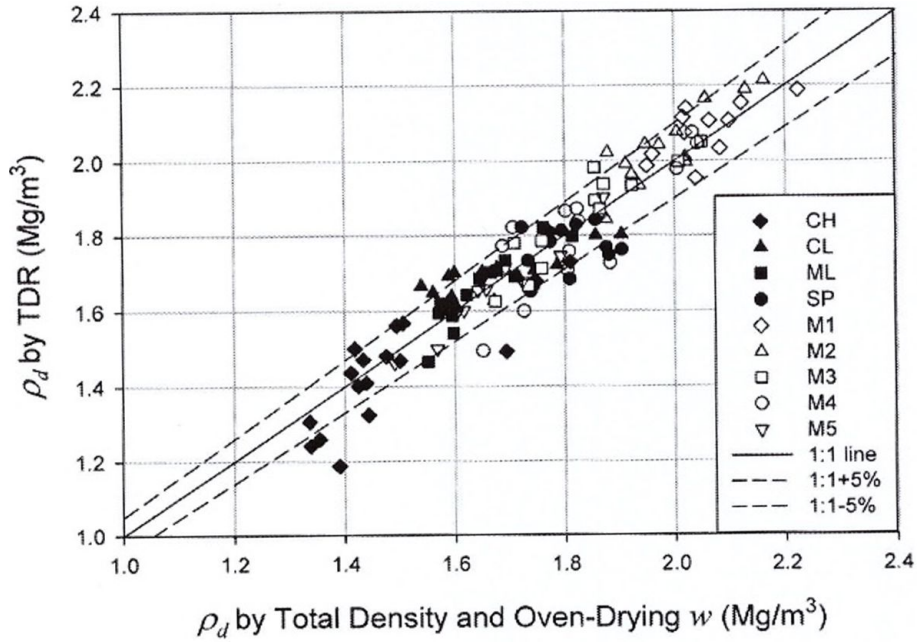


그림 5.6 건조밀도 정확도에 관한 기준(Jung 등, 2013)

시료별 실제 건조밀도 값을 기준으로 TDR 시스템을 이용한 측정값을 비교하였다. 그 결과, 주문진 표준사, 심진강 채취시료, 옥과 채취시료, 그리고 원주 채취시료에 대하여 각각 그림 5.7, 그림 5.8, 그림 5.9, 그림 5.10과 같이 평균적으로 약 3%, 2%, 1.5%, 2%의 차이를 보이고 있다.

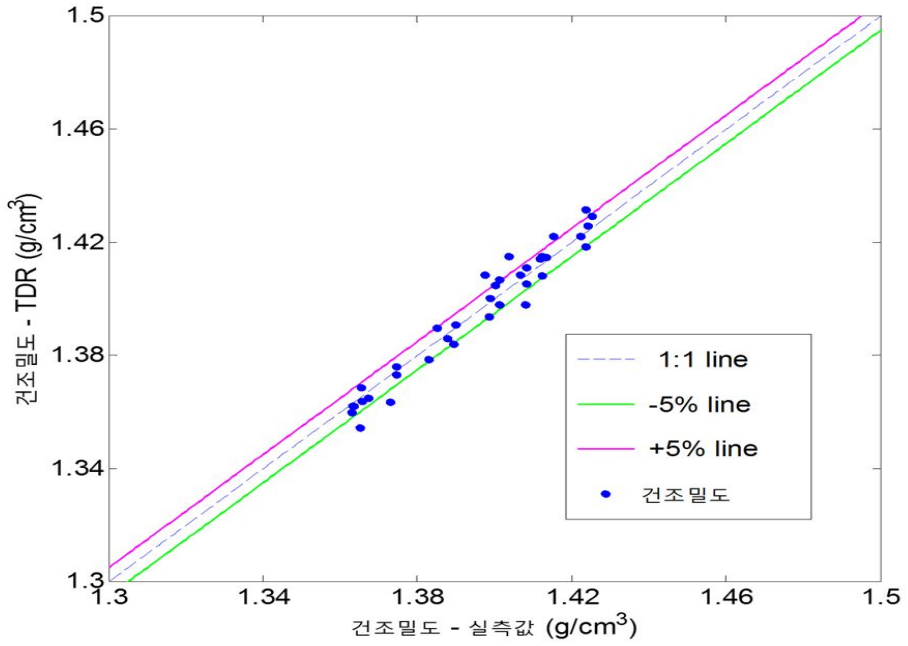


그림 5.7 건조밀도 측정 값 비교(주문진 표준사)

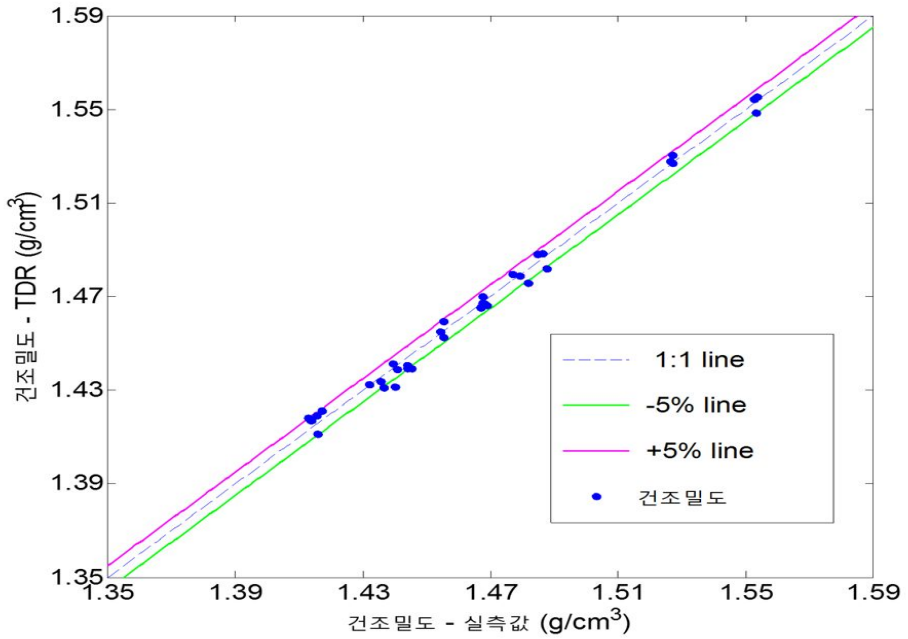


그림 5.8 건조밀도 측정 값 비교(섬진강 채취시료)

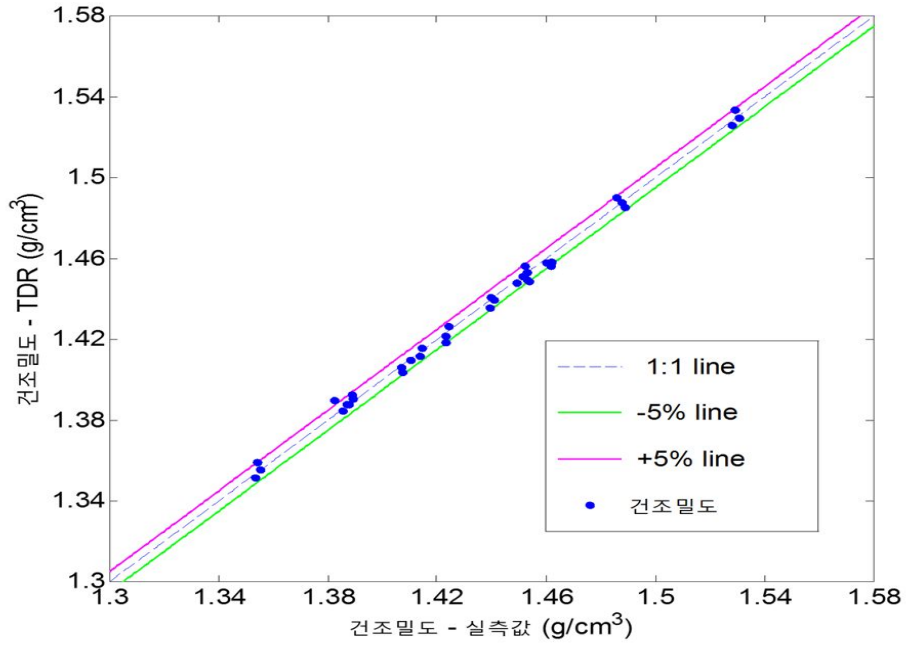


그림 5.9 건조밀도 측정 값 비교(옥과 채취시료)

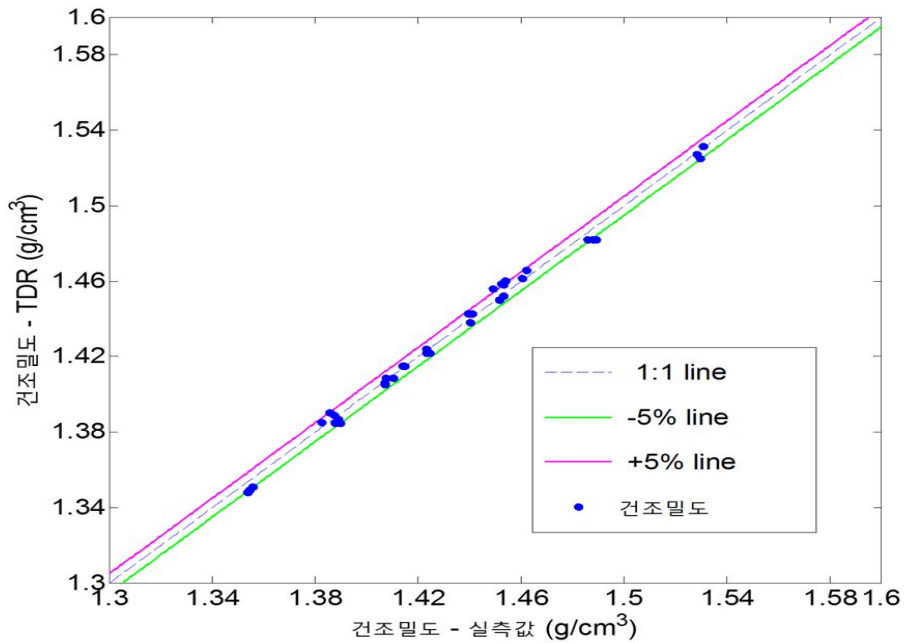


그림 5.10 건조밀도 측정 값 비교(원주 채취시료)

5.1.3 시간 변화에 따른 강성 측정 결과

본 절에서는 지반 개량 후 시간의 경과에 따른 강성 변화를 탄성과 신호를 통해 분석하였다. 4.4.3 절과 같이 탄성파의 도달시간을 산정하여 식 2.90을 이용하여 압축파 및 전단파 속도를 산정하였고, 이를 통해 압축탄성계수 및 전단탄성계수를 계산하여 시간의 경과에 따라 변화양상을 분석하였다.

시간의 경과에 따라 표 5.1과 같이 압축파 속도의 경우 198.65MPa에서 541.80MPa 로 점차 증가하는 경향을 보였으며, 전단파 속도의 경우 125.55MPa에서 302.02MPa로 점차 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 이를 그림 5.11과 5.12에 나타내었다.

표 5.1 시간경과에 따른 탄성계수 변화 <단위 : MPa>

구 분 \ 양생 기간	1 일	3 일	7 일	14 일
압축탄성계수	198.65	295.95	383.73	541.80
전단탄성계수	125.55	181.95	270.93	302.02

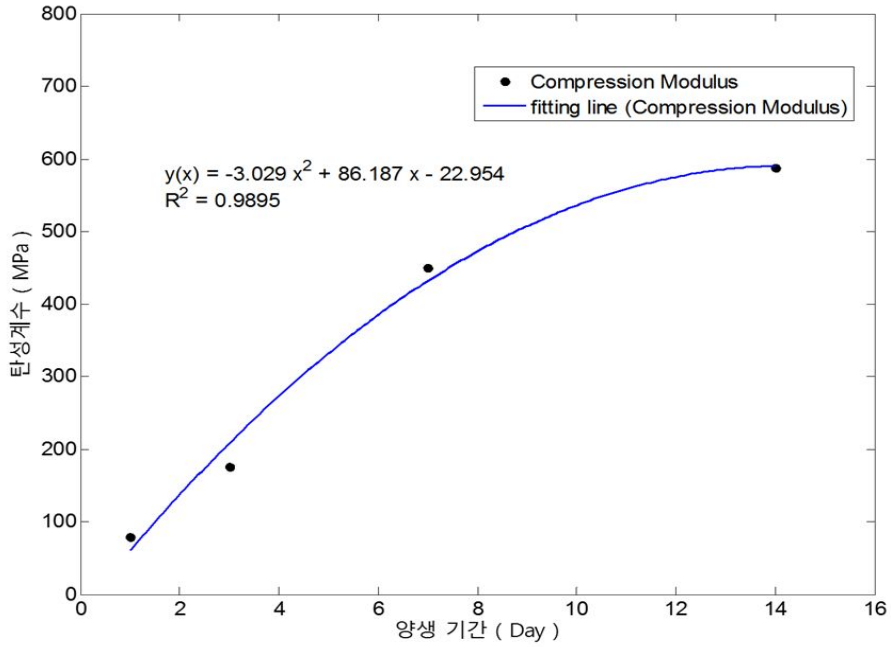


그림 5.11 시간경과에 따른 압축탄성계수의 변화

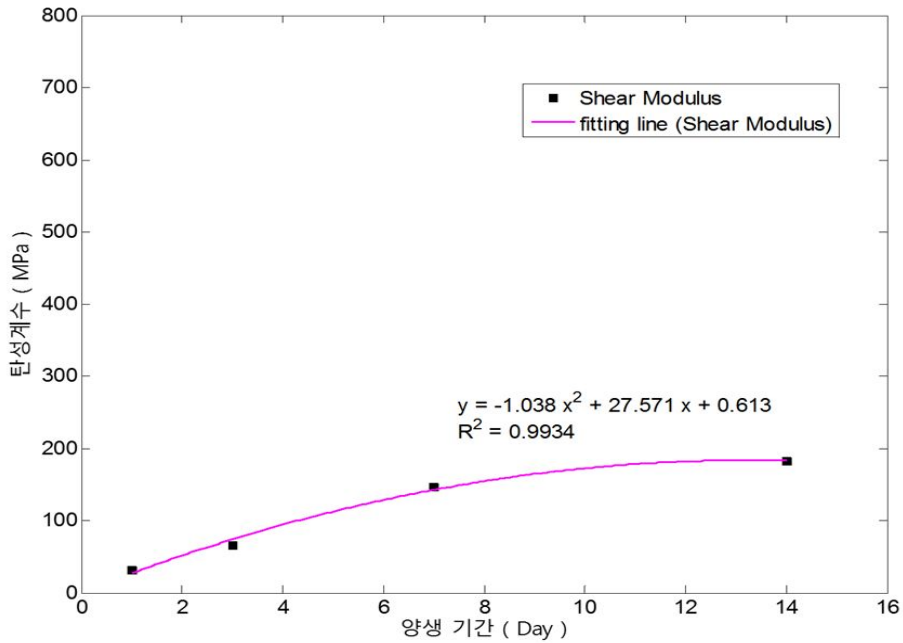


그림 5.12 시간경과에 따른 전단탄성계수의 변화

5.2 실내 검증 실험 결과 분석

본 연구를 통하여 개발한 TDR 시스템을 이용하여 건조밀도 및 함수비를 측정하고, 실제 측정된 값과의 비교를 통하여 국내에서 사용하고 있는 실험재료 및 성토재료의 적용성을 검토하였다. 또한 개발한 TDR 시스템을 이용하여 개량토의 강도변화를 탄성과 속도의 변화양상을 통하여 분석하였다.

본 연구를 통하여 개발한 TDR 시스템을 이용하여 측정된 함수비 값을 비교한 실제 측정값과 비교한 결과, 네 가지의 흙의 함수비 측정값의 오차는 평균적으로 약 0.5%를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 건조밀도의 측정값의 오차는 평균적으로 약 2%를 보이는 것을 확인할 수 있었고, 그림 5.13과 5.14에 네 가지 시료에 대해 함수비와 건조밀도의 측정값을 비교한 데이터를 도시하였다.

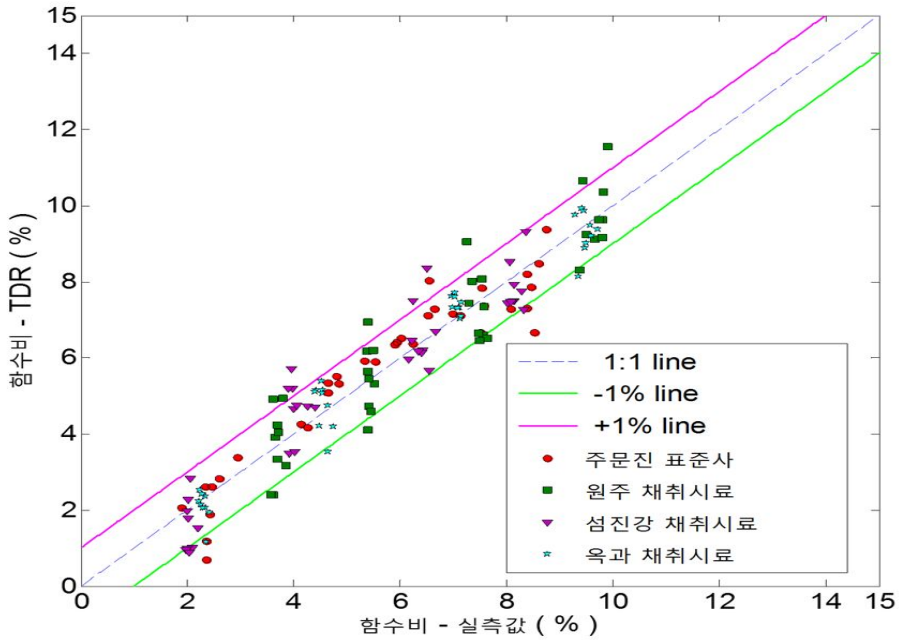


그림 5.13 함수비 측정 값 비교(전체 시료)

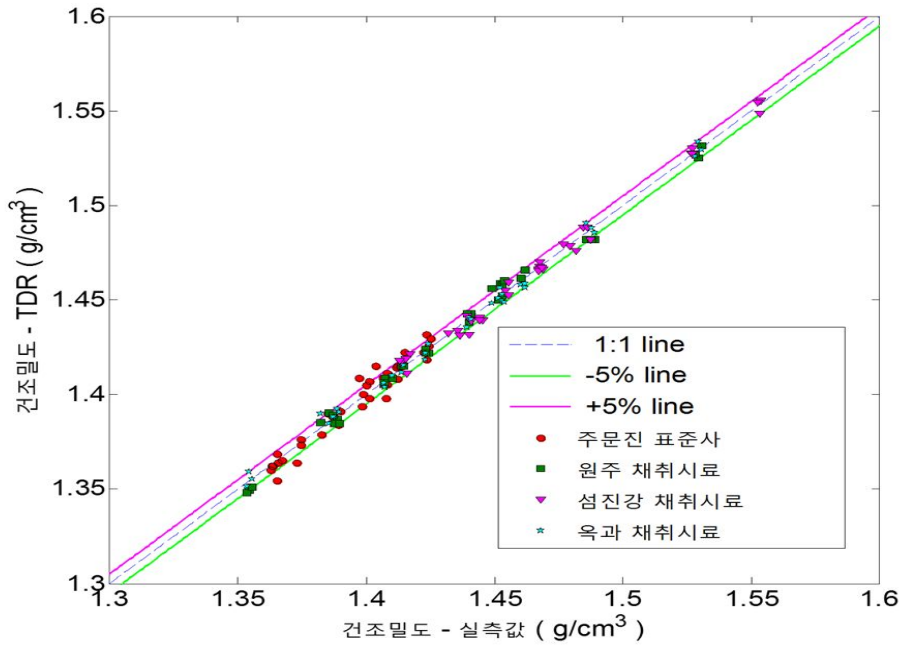


그림 5.14 건조밀도 측정 값 비교(전체 시료)

그리고 개량토의 시간 변화에 따른 강도변화를 분석한 결과, 시간의 경과에 따라 압축탄성계수 및 전단탄성계수가 증가함을 확인할 수 있었고, 그림 5.15에 시간의 경과에 따른 탄성계수 변화양상을 도시하였다.

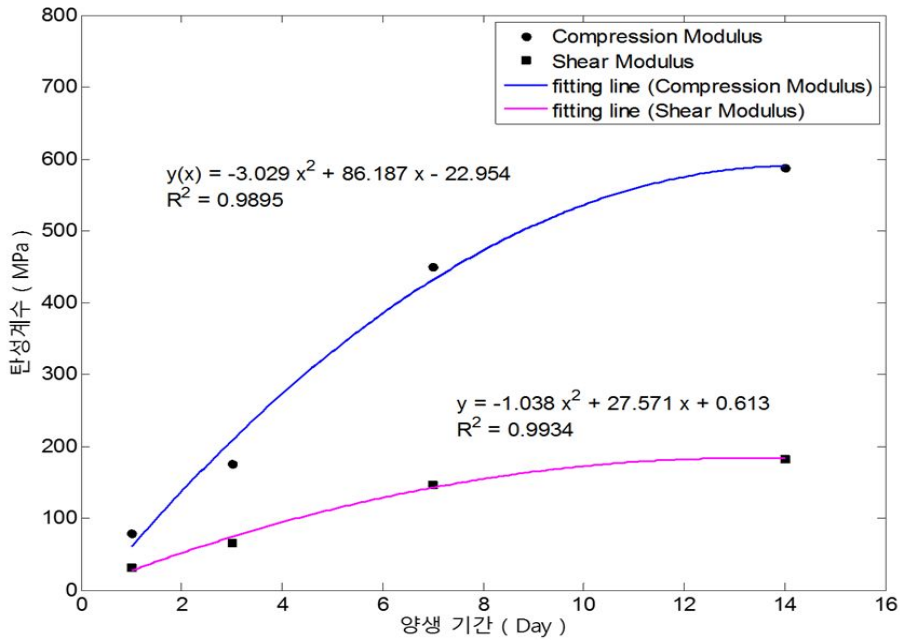


그림 5.15 시간 경과에 따른 탄성계수 변화 양상

본 연구를 통하여 개발한 TDR 시스템을 이용하여 측정된 함수비와 건조밀도의 정확도는 국외의 TDR 시스템을 이용하였을 때 제시하였던 정확도와 유사한 수준으로 확인할 수 있었으며, 개량토의 탄성계수 측정을 통해 시간의 경과에 따른 강도 변화를 파악할 수 있었으며, 본 연구에서 개발한 TDR 시스템을 이용하여 국내의 일반적인 현장 흙의 함수비와 건조밀도를 측정하는데 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 현장 지반 개량 후의 강도 변화를 파악하는데 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 기존의 TDR 방법은 현장에서 바로 적용하기 위해서 흙의 보정상수를 취득하여야 하는 절차를 거쳐야 하지만, Jung 등(2013)이 제안한 식과 자가보정 방법을 적용하기 위하여 국내의 여러 가지 흙에 대한 실험을 진행하여 국내에서도 실험의 절차를 최소화하는 노력을 함께 진행 하여야 할 것으로 판단된다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 기존의 Purdue TDR 시스템 등에서 사용하고 있는 봉형 프로브의 문제점을 개선하고 신속한 다짐관리를 위한 TDR 시스템을 개발하기 위하여 수행되었다. 지반 파괴 및 변형이 문제를 해결하기 위하여 지반을 파괴시키지 않고 흙 위에 올려놓고 측정할 수 있는 판형 프로브를 제작하였고, 개발한 판형 프로브에 Piezo-stack을 결합하여 지반의 강성을 측정할 수 있는 시스템으로 개선하였다. 개발한 TDR 시스템을 검증하기 위하여 네 가지 시료를 이용하여 지반의 함수비 및 건조밀도를 측정하는 실험을 진행하였고, 지반의 강성을 측정하기 위하여 개량 지반을 대상으로 시간 변화에 따른 탄성계수를 측정하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내 검증실험을 실시한 결과, 흙에 포함된 세립분의 함유량에 따라 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점 사이의 거리는 뚜렷한 변화를 보이지 않았지만, 장주기 전압레벨이 세립분의 함유량이 증가함에 따라 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 함수비가 변함에 따라 두 반사지점 사이의 거리가 증가함을 확인할 수 있었고, 장주기 전압레벨이 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 다짐도가 증가함에 따라 두 반사지점 사이의 거리는 뚜렷한 변화를 보이지 않지만, 장주기 전압레벨이 함수비가 증가할 때만큼은 아니지만 감소함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 TDR 신호의 변화는 흙 속에 포함되어있는 세립분의 양과 물의 양이 중요한 요소인 것으로 확인되었고, 다짐도도 신호의 변화에 영향을 미치지만 큰 영향은 아닌 것으로 확인할 수 있었다.
2. 개발한 TDR 시스템의 판형 프로브를 통하여 측정된 장주기 전압레벨이 기존의 연구자들에 의해 측정된 장주기 전압레벨보다 다소 크게 측정되어 기존의 함수비 및 건조밀도의 이론식을 사용할 수 없음을 확인할 수 있었고, 전기전도도측정기와 개발한 TDR 시스템의 판형 프로브를 이용하여 전기전도도 값을 보정하기 위한 실험을 진행하였고, 이를 통해 전기전도도와 장주기 전압레벨 사이의 관계식을 도출하였다. 이 관계식을 이용하여 전기전도도를 산정하

였으며, 측정된 TDR 신호를 분석하여 유전상수를 산정하여 흙의 특성상수 값을 도출하였다.

3. 흙의 유전상수, 충전기전도도, 특성상수 값을 바탕으로 함수비와 건조밀도를 산정하였고, TDR로 측정된 함수비와 건조밀도를 실제 측정된 값과 비교한 결과, 건조밀도의 경우 평균적으로 약 2%의 오차를 보였으며, 함수비의 경우 평균적으로 약 0.5%의 오차를 보임을 확인할 수 있었다. 이는 국외의 TDR 시스템의 정밀도와 유사한 수준으로 확인되었으며, 이를 통해 본 연구를 통하여 개발된 TDR 시스템을 국내의 일반적인 흙의 건조밀도와 함수비를 측정하는데 문제가 없을 것으로 판단되었다.
4. 지반의 강성을 측정하기 위한 Piezo-stack을 결합한 TDR 시스템을 이용하여 개량토의 시간의 경과에 따른 탄성계수를 측정한 결과, 양생기간이 늘어남에 따라 압축탄성계수와 전단탄성계수가 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었고, 이를 통해 개발한 TDR 시스템을 이용하여 개량지반의 강도변화를 손쉽게 파악할 수 있었다.

본 연구를 통하여 개발한 TDR 시스템을 현장에 바로 적용하기 위해서는 현장의 상황에 맞춰 유연하게 측정할 수 있을 정도의 정밀도를 가질 수 있도록 정밀도 향상의 노력이 필요하지만, 본 연구를 통해 현재 국내·외에서 활발하게 진행되고 있지 않은 비파괴 TDR 시스템의 지반공학적으로 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 비파괴 시스템을 개발하기 위한 기초 연구 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 고태승 (2003), 연속표면파(CSW) 실험에서 위상속도 분산곡선의 자동화 결정을 위한 파수복원 기법, 중앙대학교 대학원, 석사학위논문
2. 김기영, 한희수, 이재호, 박민철. (2011), “TDR 센서를 이용한 제방의 포화도 및 지하수위 해석”, *한국지반공학회 논문집*, 제 27권, 2호, pp. 63-72.
3. 김대성, 유지형. (2014), “시간영역반사법을 이용한 현장함수비와 건조밀도 측정”, *한국방재학회 논문집*, 제 14권, 5호, pp. 101-108.
4. 김동주, 김정석. (1999), “TDR(Time Domain Reflectometry)에 의한 사력토(Sandy-Gravelly Soil)의 함수량 측정”, *한국수자원학회 논문집*, 제 32권, 3호, pp. 215-233.
5. 김성인 (1996), 표면파기법을 이용한 동다짐 지반개량효과 평가방법에 관한 연구, 한국과학기술원, 석사학위논문
6. 김종윤 (2013), 오염물 함유량에 따른 지반에서의 전단파속도와 전기비저항의 영향, 울산대학교 대학원, 석사학위논문
7. 목영진, 정재우, 한만진, (2006), “연약지반의 강성 측정을 위한 벤더 엘리먼트의 현장 적용성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권, 11호, pp. 37-45.
8. 박민철, 이종욱, 김유석, 한희수, (2012), “개량된 TDR 센서를 이용한 대형 모형제방의 침투 해석”, *한국지반공학회 논문집*, 제 28권, 11호, pp. 53-67.
9. 박재현, 윤성용. (1998a), “TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수농도 측정에 관한 연구”, *한국수자원학회 논문집*, 제 31권, 2호, pp. 123-132
10. 박재현, 서일원, 선우중호, (1998b), “TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 비포화영역에서 용존오염원의 거동에 관한 실험적 연구”, *한국수자원학회 학술대회*. pp. 395-403.
11. 박철수, 목영진, 최찬용, 이태희, (2009a), “압축과 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안:I. 예비연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제 25권, 9호, pp. 45-55.
12. 박철수, 목영진, 황성근, 박인범, (2009b), “압축과 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안:II. 적용성 검증”, *한국지반공학회 논문집*, 제 25권, 9호, pp. 57-66.
13. 변용훈, 조세현, 윤형구, 추연욱, 김동수, 이종섭, (2012), “압축과와 전단파를 이용한 불포화토의 간극비 산정”, *한국지반공학회 논문집*, 제 28권, 12호, pp. 41-51.
14. 송명준, 정연문, 이영남. (1999), “토목 공학에서의 SASW 기법의 활용”, *지구물리와 물리탐사*, 제 2권, 4호, pp. 174-179.
15. 송민우, 김대현, 최찬용. (2015), “TDR의 함수비 예측을 위한 새로운 보정방정식”, *한국*

- 토목섬유학회 논문집, 제 14권, 1호, pp. 59-65.
16. 송민우, 최찬용, 김대현. (2016), “다짐관리를 위한 판형 TDR 시스템 개발”, *한국지반공학회 논문집*, 제 32권, 4호, pp. 51-61.
 17. 신민균. (1999), *표면파기법을 이용한 층다짐 공법에서의 각 층의 밀도 평가 시스템 개발*, 한국과학기술원, 석사학위논문
 18. 신은철, 류병현, 박정준. (2013), “실내모형실험을 통한 TDR 함수량계의 현장 함수비 보정”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제 12권, 2호, pp. 1-11.
 19. 이가영, 김상현, 김기훈, 이혜선. (2005), “산지사면에서의 TDR 을 이용한 토양수분 집중모니터링을 통한 토양수분 감쇄특성 분석”, *한국농림기상학회지*, 제 7권, 1호, pp. 79-91.
 20. 이종섭, 이창호, (2006), “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권, 5호, pp. 47-57.
 21. 임남운 (2012), *시간영역반사법을 이용한 성토지반 함수비 및 밀도 측정에 관한 연구*, 경일대학교 대학원, 박사학위논문
 22. 장대우 (2004), *SASW 실험의 수치모델링에 의한 Rayleigh 파와 Love 파의 분산특성 평가*, 중앙대학교 대학원, 석사학위논문
 23. 조명환, 이윤한, 김낙석, 박주영. (2010), “Time Domain Reflectometry 방식을 이용 한 도로 하부의 함수비 계측 및 보정 방안에 관한 연구”, *한국방재학회 논문집*, 제 10권, 2호, pp. 23-30.
 24. 조성호, 고태송, 강태호, (2004), “연속표면파(CSW) 실험에서 위상속도 분산곡선의 자동화 결정을 위한 파수복원 기법”, *대한토목학회 논문집*, 제 24권, 1C호, pp. 35-47.
 25. 한아름 (2015), *TDR 기법을 이용한 매립지 차수층의 물성 거동 분석*, 경북대학교 대학원, 석사학위논문
 26. 황세훈 (2014), *고결모래의 일축압축강도와 전단파속도의 상관관계*, 경북대학교 대학원, 석사학위논문
 27. 황진호 (2001), *SASW 기법에 대한 웨이브릿 해석의 적용성 연구*, 동의대학교 대학원, 석사학위논문
 28. 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*.
 29. Baker, J. M., Lascano, R. J. (1989), “The Spatial Sensitivity of Time-Domain Reflectometry”, *Soil Science*, Vol. 147, No. 5, pp. 378-384.

30. Benson, C. H., Wang, X. (2006), "Temperature-Compensating Calibration Procedure for Water Content Reflectometers", *Proc. TDR*, Purdue University, pp. 1-16.
31. Bolt, B. A., (1976), *Nuclear Explosions and Earthquakes*, W.H. Freeman and Company.
32. Chan, C. M. (2006). "Relationship between shear wave velocity and undrained shear strength of stabilised natural clays", *In Proceedings of the 2nd International Conference on Problematic Soils*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 117-124.
33. Chan, C. M. (2010). "Bender element test in soil specimens: identifying the shear wave arrival time", *EJGE*, Vol. 15, No. 2010, pp. 1263-1276.
34. 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.
35. Chew, W. C., Sen, P. N. (1982), "Dielectric enhancement due to electrochemical double layer: thin double layer approximation", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 77, No. 9, pp. 4683-4693.
36. 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.
37. 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.
38. 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*, 177.
39. 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.
40. 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.

41. Dyvik, R Madshus, C (1985). "Lab measurements of Gmax using bender elements", *Proceedings of the Conference on the Advances in the Art of Testing Soil under Cyclic Conditions*. ASCE Geotechnical Engineering Division, New York, pp. 186-196.
42. Dyvik, R., Olsen, T. S. (1987). "Gmax Measurements in Oedometer and DSS using Bender Elements". *In Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, pp. 39-42.
43. Fam, M., Santhamarian, J. C. (1997). "A study of consolidation using mechanical and electromagnetic waves". *Geotechnique*, Vol. 47, No. 2, pp. 203-219.
44. Fellner-Feldegg, H. (1969), "The measurement of dielectrics in the time domain", *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 73, No. 3, pp. 616-623.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Goh, T. L., Samsudin, A. R., Rafek, A. G. M. (2011). "Application of spectral analysis of surface waves (SASW) method", *Sains Malaysiana*, Vol. 40, No. 5, pp. 425-430.
50. Gucunski, N., Woods, R. D. (1992). "Numerical simulation of the SASW test", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 213-227.
51. 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.

52. Hilhorst, M. A. (1998), *Dielectric Characterization of Soil*, Wageningen, Netherlands.
53. 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.
54. Jung, S. (2011), *New methodology for soil characterization using time domain reflectometry (TDR)*, Purdue University, Ph. D. Thesis.
55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. Kraus, J. D. (1992), *Electromagnetics*, McGraw-Hill, Inc., New York.
59. Leong, E. C., Cahyadi, J., Rahardjo, H. (2009). "Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 7, pp. 792-812.
60. Li, J. (2008). *Study of surface wave methods for deep shear wave velocity profiling applied to the deep sediments of the Mississippi embayment*, University of Missouri, Ph. D. Thesis.
61. Lin, C. P. (1999), *Time Domain Reflectometry for Soil Properties*, Purdue University, Ph. D. Thesis.
62. 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.
63. 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.
64. Molina, V., (2006), *Measurement of V_p and V_s in dry, unsaturated and saturated sand specimens with piezoelectric transducers*, University of Texas, Ph. D. Thesis.
 65. O'Connor, K. M., Dowding, C. H. (1999), *Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes*. CRC Press.
 66. Orozco, M. C. (2004). *Inversion method for spectral analysis of surface waves (SASW)*. Georgia Institute of Technology, Ph. D. Thesis.
 67. Peterson, D. B. (1993). "Measuring change: A psychometric approach to evaluating individual coaching outcomes", *In Annual Conference of the Society for Industrial and Organizational Psychology*, San Francisco, CA.
 68. Ramo, S., Whinnery, J. R., Van Duzer, T. (1994), *Fields and Waves in Communication Electronics*, 3rd edition, John Wiley, New York.
 69. Roberto, C., Vincenzo, F. (2001). "On the use of multi-directional piezoelectric transducers in triaxial testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 243-255.
 70. 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.
 71. Santamarina, J. C., Klein, K. A., Fam, M. A. (2001), *Soils and waves*, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, U.K.
 72. Scheuermann, G. M., Rumi, L., Steurer, P., Bannwarth, W., Mülhaupt, R. (2009). "Palladium nanoparticles on graphite oxide and its functionalized graphene derivatives as highly active catalysts for the Suzuki–Miyaura coupling reaction". *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 131, No. 23, pp. 8262-8270.
 73. Shirley, D. J., Hampton, L. D. (1978). "Shear wave measurements in laboratory sediments", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp. 607-613.
 74. 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.
 75. 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.

76. Stoke, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A., Roesset, J. M., (1994), "Characterization of geotechnical sites by SASW method", *Geophysical characterization of sites*, Vol. 10, pp. 15-25.
77. Stokoe, K. H., Jennie, C., Milton, T., Asli Kurtulus, M. S., Menq, F. Y. (2004). "SASW measurements at the NEES garner valley test site, California", *Data report*. University of Texas-Austin, Austin, TX.
78. 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.
79. 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.
80. Viggiani, G., Atkinson, J. H. (1995). "Interpretation of bender element tests", *In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 8, No. 32, pp. 149-154.
81. 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.
82. Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T., Shibuya, S. (2009). "Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements", *Soils and foundations*, Vol. 49, No. 4, pp. 631-650.
83. 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.
84. 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.
85. Yu, Xinbao, Yu, Xiong, "Time Domain Reflectometry Tests of Multilayered Soils", *Proc. TDR*, Purdue University, pp. 1-16.
86. 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

87. Zambrano, C. E. (2006), *Soil type identification using Time Domain Reflectometry*, M.S thesis, Purdue University.

88. Zambrano, C. E., Drnevich, V. P., Yu, Xiong, (2006), “Soil Texture Characterization from TDR Waveform Analysis”, *Proc. TDR*, Purdue University, pp. 1-21.

감사의 글

학문의 길을 조금 더 가보자고 시작했던 대학원 생활이 어느덧 2년이 흘렀습니다. 최근 몇 년간 가장 바쁘게 지나갔던 2년이 아닌가 싶습니다. 그 간의 대학원 생활은 지금까지의 무엇과도 바꿀 수 없는 소중한 경험이었고, 잊지 못할 추억이었습니다.

주변의 격려와 도움이 없었다면 여기까지 올 수 없었을 것입니다. 부족한 저를 학문의 길로 이끌어 주시고 세심하고 아낌없는 지도와 격려를 하여주신 지도교수 김대현 교수님께 먼저 감사의 말을 드리고 싶습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문이 완성될 수 있도록 논문심사에 참여해 주신 박길현 교수님과 김성홍 교수님께 깊은 감사를 드리고, 완성도 있는 연구를 위하여 정성으로 지도하여 주신 김운중 교수님, 박정웅 교수님, 박상준 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

바쁜 와중에도 논문을 완성하는데 많은 도움을 주신 토질연구실의 김현태 회장을 비롯한 토질연구실 회원 여러분께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 연구실에서 동거동락하고 이번에 같이 좋은 논문을 가지고 졸업하게 된 민석이, 까칠한 나 때문에 고생이 많았을 후배 열호, 승주, 완민, 경업, 혁이 모두에게 감사를 전합니다.

그리고 오늘이 있기까지 항상 변함없이 저를 믿어주시고 힘이 되어주신 아버지, 아주 먼 곳에서 응원해주시고 계신 어머니의 은혜에 깊이 감사드립니다.

앞으로도 더욱 정진하여 지금까지 도와주신 모든 분들에게 보답하고 기쁨을 드릴 수 있도록 항상 최선의 노력을 다하겠습니다.

2016년 8월

송민우 올림