



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](#)

2022년 2월  
박사학위논문

# Flat TDR을 이용한 현장 지반의 물리적 특성 및 전단파속도 예측

조선대학교 대학원

토목공학과

이준성



# Flat TDR을 이용한 현장 지반의 물리적 특성 및 전단파속도 예측

Prediction of Physical Properties and Shear Wave Velocity of  
in-situ Ground Using the Flat TDR

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

이준성

# Flat TDR을 이용한 현장 지반의 물리적 특성 및 전단파속도 예측

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

토목공학과

이준성

이준성의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 金聖洪 (인)

위 원 조선대학교 교수 朴正雄 (인)

위 원 조선대학교 교수 朴祥濬 (인)

위 원 조선이공대학교 교수 朴炅浩 (인)

위 원 조선대학교 교수 金大賢 (인)

2022년 1월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

<b>제 1 장 서론</b> .....	1
1.1 연구배경과 목적 .....	1
1.2 연구동향 .....	3
1.2.1 TDR시스템을 이용한 연구 .....	3
1.2.2 전단파속도 측정에 관한 연구 .....	6
1.3 연구내용 및 방법 .....	9
<b>제 2 장 이론적 배경</b> .....	11
2.1 TDR 적용 이론 .....	11
2.1.1 TDR 파형 분석 .....	11
2.1.2 Purdue TDR 방법(ASTM D 6780-05) .....	14
2.2 전단파에 대한 고찰 .....	21
2.2.1 전단파의 전파특성 .....	22
2.2.2 전단파속도 .....	23
2.2.3 전단파속도 산정 방법 .....	24
2.3 Flat TDR에 대한 고찰 .....	28
2.3.1 Flat TDR 구성 .....	28
2.3.2 TDR 프로브 제작 .....	32
<b>제 3 장 실내 및 현장실험</b> .....	39

3.1 실험 개요 .....	39
3.2 실험 시료 .....	40
3.3 실내검증실험 .....	41
3.3.1. 실내 Flat TDR 실험 .....	41
3.3.2. 실내 진단파 측정 .....	43
3.4 현장검증실험 .....	45
3.4.1. 들밀도시험 .....	45
3.4.2. 동적콘관입시험 .....	46
3.4.3. 현장 Flat TDR 실험 .....	47
<b>제 4 장 실험결과</b> .....	<b>48</b>
4.1 실내검증실험 결과 .....	48
4.1.1. 실내 Flat TDR 실험 .....	48
4.1.2. 실내 진단파속도 측정 .....	65
4.2 현장검증실험 결과 .....	76
4.2.1. 들밀도시험 및 동적콘관입시험 결과 .....	76
4.2.2. 현장 함수비 및 건조밀도 측정 결과 .....	77
4.2.3. 현장 진단파속도 측정 결과 .....	79
4.2.4. 진단파 속도 측정 검증을 위한 비교 분석 .....	85
<b>제 5 장 결론</b> .....	<b>97</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>99</b>

## 표 목 차

표 2.1 TDR 100 사양 .....	31
표 2.2 Piezo-stack의 특성 .....	35
표 3.1 실험시료의 물성값 .....	40
표 3.2 시료 중량비에 따른 실험 배합비 .....	43
표 4.1 각 현장시료의 특정상수 측정값 및 물성치에 따른 분류 .....	55
표 4.2 각 현장시료의 특정상숫값, 최적함수비, 최대건조밀도의 평균값 .....	56
표 4.3 각 현장시료의 도달시간 .....	66
표 4.4 각 현장시료의 전단파속도 .....	66
표 4.5 재령일에 따른 시료별 도달시간 및 전단파 속도 .....	70
표 4.6 들밀도시험 및 동적콘관입시험을 이용한 현장지반의 다짐도 결과 .....	76
표 4.7 현장 전단파 도달시간 및 전단파속도 측정 결과 .....	79
표 4.8 함수비에 따른 실내 전단파속도 측정값 및 현장 전단파속도 측정값 .....	86
표 4.9 현장 전단파속도, $N_d$ 값, 상대다짐도 비교 .....	92
표 4.10 상대밀도에 따른 흙의 분류 .....	95
표 4.11 지반 상태에 따른 변형계수 및 포아송비 .....	95
표 4.12 현장 전단파속도 및 현장 지반 상대밀도 .....	96
표 4.13 전단탄성계수 비교 및 관련 계수 .....	96

## 그림 목 차

그림 1.1 Flat TDR 연구내용 및 방법 .....	10
그림 2.1 일반적인 흙의 함수비 측정 시스템 .....	12
그림 2.2 입사파( $V_i$ )의 두 전송선의 임피던스 차이로 인한 전송파( $V_t$ ) 및 반사파( $V_r$ ) 발생 현상.....	12
그림 2.3 TDR의 전형적인 파형 .....	13
그림 2.4 Purdue TDR 시스템 .....	14
그림 2.5 전기전도도 산정을 위한 TDR 파형 .....	17
그림 2.6 함수비 정밀도에 관한 기준 .....	19
그림 2.7 건조밀도 정밀도에 관한 기준 .....	20
그림 2.8 전단탄성계수-전단변형률의 관계 .....	22
그림 2.9 전단파의 전파 거동 .....	23
그림 2.10 초동 추정방법 .....	25
그림 2.11 극대점 이용방법 .....	26
그림 2.12 상호상관법 .....	27
그림 2.13 TDR100 장비(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.) .....	28
그림 2.14 Flat TDR 내부 모습 .....	29
그림 2.15 Flat TDR 외부 모습 .....	30
그림 2.16 Purdue TDR .....	32
그림 2.17 Flat 프로브 .....	33
그림 2.18 프로브 연결부 .....	33
그림 2.19 Piezo-stack을 결합한 Flat 프로브 .....	34
그림 2.20 TDR 시스템 개요도 .....	35
그림 2.21 영향범위 유한요소해석 결과 .....	36
그림 2.22 전기전도도 보정실험 결과 .....	38
그림 3.1 현장 위치도 .....	39
그림 3.2 현장시료의 입도분포 곡선 .....	40
그림 3.3 TDR실험 장비 및 실험 절차 .....	42
그림 3.4 재령일에 따른 실내 전단파 측정 실험 .....	44
그림 3.5 들밀도 시험 .....	45

그림 3.6 동적콘관입시험 전경 .....	46
그림 3.7 현장 TDR 실험 .....	47
그림 4.1 대상현장의 특정상습값 - 함평 .....	49
그림 4.2 대상현장의 특정상습값 - 담양 .....	50
그림 4.3 대상현장의 특정상습값 - 보성 .....	51
그림 4.4 대상현장의 특정상습값 - 나주1 .....	52
그림 4.5 대상현장의 특정상습값 - 나주2 .....	53
그림 4.6 대상현장의 특정상습값 - 해남 .....	54
그림 4.7 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - SP Sand .....	57
그림 4.8 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - SW Sand .....	58
그림 4.9 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - SM Sand .....	59
그림 4.10 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - 14개 시료 .....	60
그림 4.11 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - SP Sand .....	61
그림 4.12 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - SW Sand .....	62
그림 4.13 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - SM Sand .....	63
그림 4.14 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - 14개 시료 .....	64
그림 4.15 전단파 신호 분석 그래프 개형 .....	65
그림 4.16 함수비에 따른 전단파속도 (1) .....	67
그림 4.17 함수비에 따른 전단파속도 (2) .....	68
그림 4.18 재령일에 따른 시료별 전단파 속도 변화 비교 - SM시료 .....	71
그림 4.19 재령일에 따른 시료별 전단파 속도 변화 비교 - SP시료 .....	71
그림 4.20 재령일에 따른 전단파 신호 측정(Day 3) .....	72
그림 4.21 재령일에 따른 전단파 신호 측정(Day 7) .....	73
그림 4.22 재령일에 따른 전단파 신호 측정(Day 14) .....	74
그림 4.23 재령일에 따른 전단파 신호 측정(Day 28) .....	75
그림 4.24 Flat TDR을 이용한 현장에서의 함수비 측정 결과 - 10개 현장 .....	77
그림 4.25 Flat TDR을 이용한 현장에서의 건조밀도 측정 결과 - 10개 현장 .....	78
그림 4.26 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 함평 .....	80
그림 4.27 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 담양 .....	80
그림 4.28 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 보성 .....	81
그림 4.29 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 나주1 .....	81



그림 4.30 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 나주2 ..... 82  
 그림 4.31 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 해남 ..... 82  
 그림 4.32 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 원주 ..... 83  
 그림 4.33 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 섬진강 ..... 83  
 그림 4.34 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 경주 ..... 84  
 그림 4.35 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 일산 ..... 84  
 그림 4.36 실내 전단파속도 측정값 및 현장 전단파속도 측정값의 비교 ..... 86  
 그림 4.37 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 함평 ..... 87  
 그림 4.38 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 담양 ..... 87  
 그림 4.39 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 보성 ..... 88  
 그림 4.40 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 나주1 ..... 88  
 그림 4.41 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 나주2 ..... 89  
 그림 4.42 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 해남 ..... 89  
 그림 4.43 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 원주 ..... 90  
 그림 4.44 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 섬진강 ..... 90  
 그림 4.45 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 경주 ..... 91  
 그림 4.46 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 일산 ..... 91  
 그림 4.47 다짐도, 전단파속도,  $N_d$  값 비교 분석 ..... 93  
 그림 4.48 현장 전단파속도 및  $N_d$  값과의 상관성 분석 ..... 93

## ABSTRACT

### Prediction of Physical Properties and Shear Wave Velocity of in-situ Ground Using the Flat TDR

Lee, June-Sung

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, some studies using non-destructive testing, a fast and economical method to complement traditional quality control testing of compaction in the design using Time Domain Reflectometry (TDR) have been performed as a method to minimize ground disturbance. And it has been developed jointly the Flat TDR, an equipment, using a flat probe has been developed to measure quickly the natural water content and dry unit weight of the ground through the ground surface without disturbing the ground.

In addition, to improve the performance of the existing TDR equipment, which has been limited only to measurement of dry unit weight and natural water content, a study on ground stiffness measurement through shear wave signal analysis using the shear seismic wave measuring device mounted in the equipment was also conducted.

The sample ground was a total of six sites: one in Hampyeong, one in Damyang, one in Boseong, two in Naju, and one in Haenam. The Flat TDR results of eight sample sites previously performed in the laboratory were compared and analyzed with those of this study.

The laboratory tests such as TDR compaction test and water content measurement, and field tests such as TDR field measurement test, field density test, and dynamic cone penetration test were performed. The results of laboratory tests showed the error range of 0.3-1.0% for water content and 0.1-2.1% for dry unit weight, suggesting that water content and dry unit weight measured through TDR measurement management are reliable.

The results of field tests showed the error of 0.8% for water content and 2.5% for dry unit weight between real value measured through field density test and those measured by TDR system, suggesting that Flat TDR system may be used very usefully in managing the compaction management.

The results of the field density test and the dynamic cone penetration test show that a higher degree of compaction correlates with the higher values of shear modulus measured in the higher  $N_d$  and TDR systems in the dynamic cone penetration test, indicating that the shear modulus measured by the TDR system is a satisfactory index to evaluate the stiffness of the ground.

In addition, the shear modulus analysis result according to the arrival time of the shear elastic wave showed that the shortest arrival time (0.2914 msec) at the Naju#1 site was measured in the case with the highest shear wave velocity (171.59 m/s) and shear modulus (46.87 MPa) and that the longest arrival time (0.3814 msec) at the Hampyeong site was measured in the case with the lowest shear wave velocity (131.10 m/s) and shear modulus (26.60 MPa), indicating that the arrival time and shear wave velocity, shear modulus have negative relationship and that the shear wave velocity measurement of the TDR measuring equipment is sufficient to confirm the shear modulus.

In addition, the shear modulus tendency according to the water content of in six sites was compared and analyzed with the compaction curve. The results showed that the shear modulus according to the water content showed a similar pattern to that of the compaction curve, indicating that the higher degree of ground compaction is correlated with higher elastic modulus.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

도로, 제방, 매립, 철도 등의 토목에서의 지반 공사는 흙, 암석 등의 재료를 쌓아 시공되고, 95% 이상의 다짐도를 확보하도록 공사가 설계된다. 다짐(Compaction)은 성토재료를 최대건조밀도(이하  $\gamma_{dmax}$ )와 최적함수비(Optimum Water Content, 이하 *OMC*)에 가까운 상태로 실시하고, 현장에서 요구되는 다짐도 및 강성도를 확보하여 추후 공사 현장 및 공사 완료 후 침하 등의 불안정한 지반에 의한 피해를 방지하는 것이 목적이다.

지반의 다짐도를 확인하기 위해서 국내 현장에서는 들밀도시험(KS F 2311)을 이용하고 있다. 들밀도시험은 오랜 기간 현장에서 사용되어 검증된 방법이지만, 시험자의 차이에 따른 측정값의 오차를 정량화하기 어려우며, 측정하는 데 소요되는 시간에 비해 원하는 값을 얻기가 쉽지 않다. 또한, 지반의 강성도를 측정하기 위하여 평판재하시험(KS F 2310)을 주로 사용하고 있지만, 시험 장비의 부피 및 크기로 인하여 현장 여건이 협소한 경우 시험 진행이 어려운 경우가 발생하기도 한다.

이러한 전통적인 다짐관리 기법의 단점을 보완하고 효율적인 다짐관리를 위해 경제적이고 신속한 비파괴 시험법 및 지반의 교란을 최소화하는 현장시험의 수요가 점차 증가하고 있다. 설계와 시공단계에서 동일한 역학적 개념을 적용할 수 있는 간편하고 정확한 다짐 관리 기법에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(임남운, 2012).

그 중 대표적인 방법으로 시간 영역 반사법(Time Domain Reflectometry, 이하 TDR)을 이용한 연구가 진행되고 있다. TDR은 통신 및 전력 산업에서 전송선의 불연속 지점을 찾기 위하여 1950년대에 도입되었다. Fellner-Feldegg(1969)는 이러한 TDR을 액체의 유전율 측정에 사용하였으며, Topp 등(1980)은 흙의 유전율은 흙 속에 포함된 물의 양에 의해서 강하게 의존한다는 것을 입증하였다. 또한, 지반에 금속 봉을 관입하여 TDR 신호를 전송하여 흙의 체적 함수비를 측정하는 기법을 연구하였고, 미국의 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진은 현장 지반의 건조밀도와 함수비를 측정하는 Purdue TDR 시스템(ASTM D6780-05) 방법을 개발하였다.

최근 국내에서 지진의 발생 빈도가 늘어남에 따라 내진설계 및 노반 설계기준 등의 정립에 대한 노력이 꾸준히 진행 중이며, 기존 정립의 노력에 발맞춰 노반 및 구조물 설계 시에 다양한 계수들을 요구하고 있다. 이에 현장에서는 비파괴 시험법 중 하나인 지반 표면 전단파속도 측정을 통해 지반의 강성을 측정하여 전단탄성계수 및 현장다짐도를 도출하는 등 지반의 다짐도를 평가하는 다양한 방법에 대한 연구가 진행 중에 있다.

Purdue TDR은 봉형 프로브를 사용하기 때문에 지반에 관입을 해야하는 과정이 필요하다. 따라서, 흙의 입경이 큰 지반에는 프로브 관입 어렵고, 프로브를 지반에 관입시킬 때 주변에 교란이 발생하는 단점이 있다. 또한, 측정결과 활용이 다짐도에 국한되어 있어서 현장에서 지반설계에 요구하는 전단파속도, 전단탄성계수 등의 다양한 계수들을 제공하는 것에 제약이 있다. 이러한 기존 TDR 시스템의 단점을 보완하고 신속·정확한 다짐관리를 위하여 지반 표면에 올려놓는 형식의 Flat 프로브를 이용하는 Flat TDR이 조선대학교 김대현 교수 연구진과 한국철도기술연구원에 의해 개발되었다(송민우, 2016).

본 연구에서는 Flat TDR의 건조밀도와 함수비 측정값의 정밀도 분석과 더불어 전단파속도 측정값의 현장 적용성에 대한 검증을 하였다.

Flat TDR을 이용한 함수비와 건조밀도 측정값에 대해 실내 측정과 현장 측정을 통하여 측정값들을 비교·분석하였고, 현장 적용성에 대한 검증을 수행하였다. 또한 Flat 프로브에 결합되어 있는 Piezo-stack을 이용하여 실내와 현장에서의 전단파속도 측정값을 도출하였고, 도출한 값의 검증을 위해서 들밀도시험, 동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetrometer Test, 이하 DCPT), 문헌조사 등을 병행하여 현장 적용성에 대한 검정을 수행하였다.

해당 실험을 수행한 현장은 즉각적으로 실험 측정이 가능한 현장을 선택하였으며, 함평 1개소, 담양 1개소, 보성 1개소, 나주 2개소, 해남 1개소로 총 6개소이다. 또한 선행적으로 수행되었던 현장 대상지반 8개소의 Flat TDR 결과값을 본 연구에 함께 비교·분석하여 Flat TDR 측정값에 대한 정밀도와 신뢰성을 확인하였다. 마지막으로 Flat TDR의 건조밀도와 함수비값 결정에 영향을 미치는 특정상수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  값의 범위와 경향성을 분석하여 캘리브레이션 없이 현장 지반의 물리적 특성 예측을 위한 연구의 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

## 1.2 연구동향

### 1.2.1 TDR 시스템을 이용한 연구

국내·외에서 수행된 TDR 관련 연구를 조사하였다. TDR은 Topp 등(1980)이 흙의 유전율이 흙 속에 포함된 물의 양에 강하게 의존하고 있다는 것을 입증하였고, TDR을 지반공학에서의 적용 가능성을 평가한 이후로 많은 연구자들에 의해 TDR 관련 연구가 진행되었다.

김동주와 김정석(1999)은 TDR 시스템을 통하여 사질토의 자갈 함량 변화에 따른 포화 함수량의 변화를 조사하기 위해 일곱 가지 시료를 이용하여 분석하였다. 또한, 함수비와 유전상수 간의 상관식을 도출하여 Topp 등(1980)이 제안한 사력토(Sandy-gravelly soil)에 대한 적용성을 검토하였다. 그 결과 Topp 등(1980)의 제안식과의 오차가 3 ~ 8%까지 발생하여 사력토에서의 적용은 어려울 것으로 판단하였으며, 연구 결과에서 얻을 수 있었던 흙의 수분함량 범위 내에서 TDR이 적용될 수 있다고 하였다.

미국 Purdue 대학의 Drnevich 교수 연구진은 TDR을 이용한 중량 함수비 및 건조 밀도 측정에 관한 연구가 진행하였다. White 등(2003)은 ASTM D6780-02 방법을 이용하여 흙의 중량 함수비와 건조밀도를 측정하고, 노상토지지력 시험(California Bearing Ration Test, 이하 CBR)으로 CBR값과 TDR 프로브를 지반에 관입시키는데 필요한 타격 횟수를 구하고 이를 평균화하여 관계식을 도출하였다. 또한 Yu and Drnevich(2004)은 기존의 체적 함수비를 측정하는 시스템이 실제 현장에 적용하기 힘든 점을 언급하였고, TDR을 이용한 중량 함수비 및 건조밀도를 측정하는 이론식을 제안하였다.

Yu and Yu(2006)은 다층토에 대하여 기존의 연구자들에 의해 제안된 체적 함수비, 중량 함수비 및 건조밀도의 식을 적용시켜 연구를 수행하였다. 중량 함수비의 제안식 보다 체적 함수비의 제안식이 더 적합한 결과를 나타내었고, 이를 통해 다층토에는 중량 함수비 및 건조밀도의 제안식이 적합하지 않다는 결론을 도출하였다..

조명환 등(2010)은 TDR 방식의 함수량 센서를 이용하여 아스팔트 콘크리트 포장 하부의 함수비 계측에 관하여 연구를 진행하였고, 센서 간 간섭 영향, 피복두께, 다짐률 및 온도의 변화에 대하여 보정시험을 수행하였다. 그 결과, 보정시험 수행 시 정확한 체적 함수비 조건을 유지하는 것이 중요하다고 하였으며, 정확한 현장 계측

자료를 얻기 위하여 각각의 현장에 대한 보정식을 사용하여야 한다고 하였다.

Jung 등(2013)은 기존의 Yu and Drnevich(2004)의 중량 함수비 및 건조밀도 제안식이 세립분이 많이 함유된 흙이나 높은 함수비의 흙에서는 정확한 값을 도출하기 어려우므로 새로운 중량 함수비 및 건조밀도의 식을 제안하였다. 유전상수 및 점토의 함유량에 대한 관계식을 통하여 제안식에 대한 흙의 보정상수 값을 자가 보정을 할 수 있는 시스템을 고안하였다.

Thring 등(2014)은 겉보기 유전율 값으로부터 측정된 건조밀도와 체적 함수비를 통하여 중량 함수비를 추정할 수 있는 간단한 세 가지 방법을 제안하였다.

김대성과 유지형(2014)은 TDR 탐침기를 제작하였고 국내의 지반 시료를 이용하여 실내에서 실험을 수행하였다. 함수비와 밀도의 변화에 따른 TDR 신호를 측정하여 각 시료의 매개변수를 구하였고, 도출한 매개변수를 통하여 함수비와 밀도를 도출하여 제작한 TDR 탐침기 검증에 하였다. 또한, 실제 현장에서 실험을 진행하여 측정된 TDR신호 및 실내실험결과를 바탕으로 현장의 함수비와 건조밀도를 산정하였고, TDR의 현장적용성을 평가하기 위하여 전통적인 실험방법으로 얻은 값과도 비교하였다.

홍원택 등(2015)은 불포화지반의 깊이에 따른 함수상태를 획득하기 위해 원추형 TDR 프로브(Time Domain Reflectometry Probe, 이하 TDRP)를 개발하였고, 실내 실험에서 체적함수비 변화에 따른 시료의 유전상수를 측정하고 현장적용성을 확인하였다. 그 결과 체적함수비와 유전상수는 높은 상관성을 나타내었으며, 개발한 TDRP는 실험대상지반의 체적함수비를 관입심도에 따라 효과적으로 평가할 수 있다고 하였다.

정영석 등(2015)은 압력관 추출시험기에 TDR을 도입하여 흙의 간극비 변화 및 다중 반복과정에 따른 흙의 함수특성을 파악하고, 뷰렛시스템을 통해 측정된 체적함수비 결과와 비교 분석하여, TDR이 불포화토의 함수특성을 평가하는 효율적인 방법이라고 하였다.

송민우(2016)는 Flat 프로브를 사용한 TDR 시스템을 이용하여 실내실험을 수행하였고, 국내의 일반적인 흙의 건조밀도와 함수비를 측정하였다. 또한, 지반의 강성을 측정하기 위해 Piezo-stack을 결합하였고, 개량토의 시간의 경과에 따른 탄성계수를 측정하였고, 양생기간이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 이를 통해, Flat 프로브의 TDR을 이용하여 개량된 지반의 강도변화를 손쉽게 파악할 수 있다고 하였다.

김완민(2017)은 Flat TDR 시스템의 정밀도 분석을 위해 검증된 Purdue TDR 시스템의



측정값과 비교하였다. 영향범위 유한요소해석을 통해 Flat 프로브의 영향범위를 확인하였으며, 현장시험을 수행하여 국내지반의 적용성을 검토하였다.

Giulio 등(2018)은 지반 구조물을 지탱하고 있는 토질 상태를 장기적으로 모니터링 하고 이를 조기 경보 시스템으로 활용하기 위한 방법으로 TDR의 가능성을 제시 하였다. 지반에 부착된 TDR 센서를 통하여 지반 조건의 변화에 대한 자세한 정보를 제공받고, 측정된 데이터들의 상대적인 변화를 기반으로 지반의 급격한 변화를 사전에 감지하여 발생할 수 있는 문제들에 선제적으로 대응할 수 있는 조기 경보 시스템으로 가능하다고 하였다.

Bhuyan 등(2020)은 도로 포장 노반의 수분함량 모니터링의 방법으로 TDR을 제시 하였다. 주기적인 하중이 가해지는 상황에서 도로 노반의 수분함량에 따라 포장이 조기에 강도를 손실하고 손상되는 경우가 많은데, 노반 재료의 특성 및 유전 특성 정보를 기반으로 TDR 센서를 이용한 수분함량, 노반의 전기전도도 및 밀도를 측정 하고 지반 상태에 대한 정보를 분석하여 노반 표면 변형이나 부식과 같은 포장 관리에 개선해야 될 부분의 모니터링 방법으로 TDR을 제시하였다.

이렇듯 국내에서는 TDR을 이용하여 흙의 함수비와 밀도를 측정하고 지반에서의 다짐관리를 위한 기초 연구가 진행 중이며, 국외에서는 TDR을 이용한 센서개발을 통해 지반에 대한 정보획득 및 지반상태의 모니터링에 대한 연구가 진행 중이다. 이처럼 국내외에서 연구가 진행 중인 TDR은 지반의 상태 및 다짐관리 시에, 지반을 교란시키지 않고 건조밀도 및 함수비를 확인할 수 있으므로, 효율적이고 정확한 현장 지반 다짐관리방법으로 판단된다.



## 1.2.2 전단파속도 측정에 관한 연구

표면파 기법 등 전단파속도를 측정하기 위한 국내·외에서 진행된 연구에 대하여 조사하였으며, 측정된 전단파속도를 통한 지반 강성 측정에 대한 연구도 조사하였다.

표면파 기법은 지구의 지각구조의 판명과 석유 자원의 위치를 탐사하기 위해 해당 기법을 적용시키면서 공학적인 연구가 꾸준히 진행되었다. 김성인 등(1999)은 기존의 표준관입시험, 콘관입시험이 지반종류와 시험 숙련도에 따라 시험결과가 영향을 받기에 표면파시험과 공진주시험결과를 결합하여 전단파속도 주상도를 획득하고, 전단파속도와 밀도와의 관계를 결정하여 다짐 전·후의 지반 개량정도와 개량 깊이를 평가하는 방법을 제안하였다.

이종섭과 이창호(2006)는 벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항에 대한 연구를 통해 전단파의 기본원리와 전단파의 발생과 수신, 그리고 전단파를 이용한 지반의 동적 특성파악에 대한 실험을 진행하였다.

김동수(2007)는 지진 시 전단파속도를 이용하여 역학적 포장 설계 및 하부구조 평가, 내진설계와 관련된 지반 지진 공학 분야, 지반 개량 효과 평가, 지반 구조물의 정적 변형해석 등 여러 지반공학적 문제에 적용을 위한 연구를 수행하였다. 또한, 전단파속도를 이용한 지반공학 분야에서의 활용사례 및 지반의 비선형 변형특성과 평가 방법에 대하여 설명하였다.

오상훈(2008)은 전단파 속도 계측과 삼축압축시험을 이용한 정규압밀점성토의 강성도와 전단강도의 상관관계를 분석하기 위해 삼축압축장비에 벤더엘리먼트를 부착하여 전단파속도와 비배수 전단강도를 측정하여 강성의 회복에 관한 연구를 수행하였다.

목영진 등(2007)은 현장 탄성파시험의 대표적인 시험인 크로스홀 시험을 통해 강화노반의 물성치인 전단파속도 및 포아송비를 도출하였고, 기존의 표면파탐사 기법인 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves, 이하 SASW)의 결과와 비교하여 반복하중과 계절적 변화를 고려한 강화노반의 장기적인 내구성 변화를 연구하였다.

김종태 등(2008)은 제체의 내진설계를 위한 동적 물성치 산출을 위해 제체 사력부에 표면파 탐사 기법을 적용하여 락필댐 사력재의 전단파 속도를 도출하였다. 대표적인 표면파 기법인 SASW기법과 새롭게 개발된 HWAW(Harmonic wavelet analysis of wave, 이하 HWAW) 기법을 이용하여 2개 제체의 사력부에서 전단파 속도를 측정하여

향후 데이터베이스 제안의 가능성을 확인하였다.

박철수(2008)은 동적 물성치를 이용한 철도노반의 회복탄성계수 산정과 품질관리의 방안으로 현장의 탄성과 계측을 목적으로 철도 운행 환경에 적합한 검측공 탄성과 시험용 발전자를 개발하였다. 입경이 큰 재료의 탄성계수 감소곡선의 측정이 가능한 대형 공진주시험 장비를 개발하였고, 철도노반 설계에 필요한 회복탄성계수 결정과 더불어 철도노반의 일관되고 새로운 품질관리 기법의 제안하였다.

정재우(2009)는 벤더엘리먼트를 이용한 연약지반의 현장 전단탄성계수 측정 시스템 개발을 통해 압전소자를 이용하여 새로운 탄성과시험 기법을 통해 최적의 탄성과를 발생시킬 수 있는 벤더엘리먼트를 제작하였다. 벤더엘리먼트를 부착한 장치 통하여 실내시험을 수행하고, 연약지반에서 실제 관입시험을 수행하여 현장 적용성을 검토하였다.

변용훈 등(2012)은 벤더엘리먼트를 이용하여 시료의 탄성과 속도를 측정하여 불포화토의 간극비 산정에 관한 연구를 진행하였다. 탄성과 속도를 이용한 간극비 값과 부피 변화를 통한 간극비 값을 비교하였고, 이를 통해 불포화 지반의 물성치 조사 시 탄성과 속도를 활용할 수 있다고 하였다.

홍원택 등(2018)은 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기(Crosshole-Type Dynamic Cone Penetrometer, 이하 CDCP)를 열차의 하중을 지지하는 노반의 강성 평가 기법으로 적용하여 지반 심도에 따른 강성특성을 평가하였다. CDCP에서 측정된 심도에 따른 전단파속도 주상도와 들밀도시험으로부터 획득한 노반의 밀도를 통해 최대전단탄성계수를 평가하였고, 유효한 강성특성을 확인하였고, 노반의 강성평가에 효과적으로 이용될 가능성을 확인하였다.

김빛나래 등(2019)은 매질의 전단 속도분포를 파악하기 위해 수행하는 표면파탐사법을 능동표면 탐사법과 수동표면탐사법으로 나누었으며, 그 중 능동표면탐사 기법의 이론과 기술 보고를 통해 지반의 안정성을 평가하는데 능동표면탐사법을 활발히 이용할 수 있음을 확인하였다.

기성훈과 이진욱(2020)은 콘크리트의 정역학적 특성과 전단파속도의 상관관계를 실험적으로 평가하였다. 물-결합재 비율을 일정하게 변화시키고, 재령일에 따른 공진동 실험을 통해 콘크리트의 동적특성을 평가하였으며, 압축강도-전단파속, 정탄성계수-전단파속도도의 상관관계를 표현하는 근사식을 제안하였다.

박형춘과 오현주(2020)은 표면파 시험을 통해 국내 필댐 사력부와 심부에서 측정된 전단파 속도 주상도들에 대해 랜덤 전단파 속도 주상도 생성 기법을 적용하여

전단파 속도 주상도 600개를 도출하였다. 이에 대한 통계처리를 통하여 전단파 속도 변동계수를 필댐 사력부와 심부의 깊이별로 결정하였다.

이렇듯 전단파 측정에 대한 연구는 지진계측을 위한 연구와 지반의 표면 뿐만 아니라 지반 심부의 전단파속도를 측정하여 주상도를 생성하여 설계에 필요한 계수를 도출하는 등 다양한 분야에서 지속적으로 진행중이다. 이처럼 전단파 측정을 통해 지반의 강성을 파악할 수 있는 시스템과 함수비 및 건조밀도를 구할 수 있는 TDR을 결합하여, 효율적이고 체계적인 현장 지반 다짐관리를 위한 시스템으로 발전 시키기 위해서 지속적인 연구가 필요하다.

### 1.3 연구내용 및 방법

본 연구에서는 Flat TDR의 함수비·건조밀도 측정 검증과 전단파속도 측정 검증을 위하여 실내실험과 현장실험을 수행하여 그 결과값을 비교·분석을 수행하였다.

함수비와 건조밀도의 검증을 위하여 실내에서 다짐시험, 함수비시험, Flat TDR 측정실험을 수행하였다. 실내 다짐시험을 통해서 흙의 특정상수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ 를 도출하였고, 함수비 시험 결과값을 실측값, Flat TDR 측정값을 실험값으로 하여 비교·분석하였다. 또한, 현장에서의 함수비와 건조밀도의 검증을 위하여 들밀도시험과 Flat TDR실험을 수행하였으며, 들밀도시험 결과값을 실측값, Flat TDR 측정값을 실험값으로 비교·분석하였다.

전단파속도 측정 장치에 대한 검증을 위해 실내에서 시료의 함수비에 따른 전단파속도 경향성 분석을 수행하였고, 현장에서 측정한 전단파속도와 비교분석을 하였다. 또한, 현장에서 들밀도시험, DCPT을 수행하여 현장지반 다짐도와 전단파속도의 상관성 분석을 통해 측정값을 검증하였다. 마지막으로 전단파속도를 통해 도출한 전단탄성계수와 문헌자료에서 제시한 전단탄성계수를 비교·분석하여 전단파속도 측정 장치에 대한 검증을 진행하였다.

전단파속도 측정 장치의 추가 검증을 위해 실내에서 LW그라우트재를 사질도 시료의 중량비에 따라 공시체를 제작하여 재령일에 따라 전단파속도를 측정 및 결과값을 비교·분석을 하였다.

본 연구의 내용을 요약정리하면 그림 1.1과 같다.

**Flat TDR의 함수비·건조밀도·전단파속도 측정 검증**

<b>함수비·건조밀도 측정 검증</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 실내검증실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flat TDR 측정값과 실내실측값과 비교를 통한 정밀도 분석</li> </ul> </li>   <li>· 현장검증실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flat TDR 측정값과 들밀도시험 결과값의 비교를 통한 정밀도 분석</li> </ul> </li> </ul>

<b>전단파속도 측정 검증</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 실내검증실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 함수비에 따른 전단파속도 분석</li> <li>- 그라우트재 혼합토의 재령일에 따른 전단파 속도 분석</li> </ul> </li>   <li>· 현장검증실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현장 함수비에 대한 전단파속도 분석</li> <li>- 현장 전단파속도와 다짐도 비교분석</li> <li>- 현장 전단파속도와 문헌자료를 통한 전단탄성계수 분석</li> </ul> </li> </ul>

그림 1.1 Flat TDR 연구 내용 및 방법

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 TDR 적용 이론

TDR은 전기적신호의 전도특성을 이용하여 지반 내에 설치된 프로브의 전기적신호의 반향시간을 측정하는 장치이다. TDR은 크게 전자기파 발생기, 프로브, 수신기로 구성된다. 전자기파 발생기에서 생성된 전자기파가 동축케이블(Coaxial cable)과 지반에 설치된 프로브를 통하여 전파되는 과정에서 프로브와 동축케이블 주변 매질의 임피던스 변화에 따라 전자기파가 반향되는 특성을 이용하여 흙의 총전기전도도( $EC_b$ ) 및 유전상수( $K_d$ )를 측정하는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 TDR은 프로브를 통해 측정한 흙의 유전상수와 총 전기전도도의 관계를 이용하여 흙의 함수비 및 밀도를 평가하거나, 동축케이블의 공간적인 특성과 위치를 파악하여 매질의 변형을 측정한다 (임남운, 2012).

#### 2.1.1 TDR 파형 분석

전자기파가 동축케이블을 따라 이동하고 케이블과 전도체 사이 매질이 변화하거나 동축케이블에 불연속이 발생하는 경우, 전자기파의 반향 신호의 변화가 발생한다. 이런 특성을 이용하여 지반공학적으로 그림 2.1과 같이 금속 봉을 이용하여 흙의 함수비를 측정하는 방법이 주로 이용되고 있다. 그림 2.2는 전도체 사이의 매질이 변화할 때 발생하는 입사파와 반사파의 모식도를 나타낸 것이다.

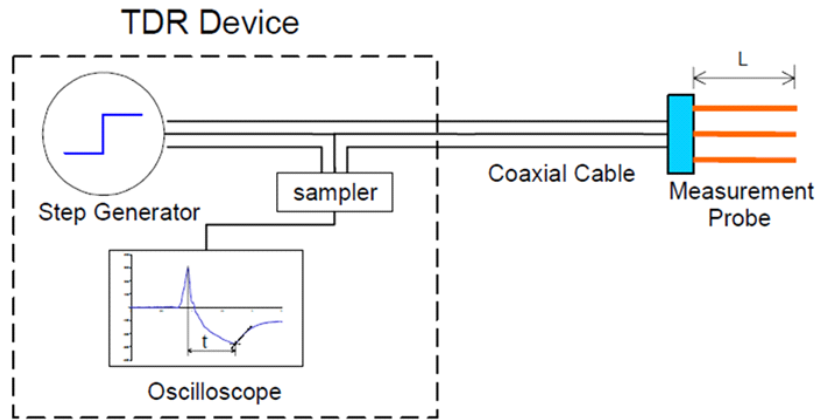


그림 2.1 일반적인 흙의 함수비 측정 시스템(Drnevich 등, 2001a)

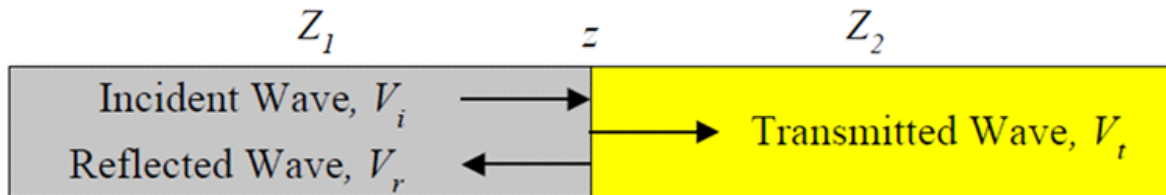


그림 2.2 입사파( $V_i$ )의 두 전송선의 임피던스 차이로 인한 전송파( $V_t$ ) 및 반사파( $V_r$ ) 발생 현상(Drnevich 등, 2001a)

또한, 이러한 함수비 측정 방법을 통하여 흙에서의 반향 신호를 측정하면 그림 2.3과 같은 신호를 얻을 수 있다.

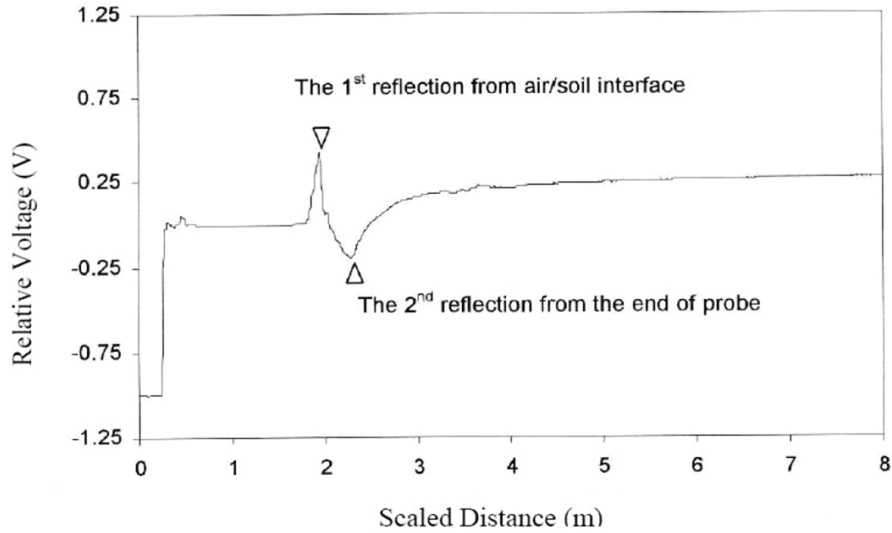


그림 2.3 TDR의 전형적인 파형(Yu and Drnevich, 2004)

전송선에서 전자기파는 Maxwell의 방정식에서 파생된 전파방정식에 의해 정의될 수 있고, Drnevich 등(2001a)은 전파상수( $\gamma$ )와 특성임피던스( $Z$ )가 전파방정식의 중요한 요소라고 하였다. 여기서 특성임피던스는 전송선 형상 및 절연 재료의 유전율의 함수로써, 전송선을 따른 현재의 전파전압의 비율로 다음과 같다

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \quad (2.1)$$

여기서,  $a$ 는 내부도체의 외부직경,  $b$ 는 외부도체의 내부직경,  $\epsilon_0$ 은 진공유전율 ( $8.854 \times 10^{-12} F/m$ ),  $\mu_0$ 은 진공투과율( $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ),  $\epsilon_r^*$ 은 등가유전율, 그리고  $Z_p$ 는 동일한 한 전송선에 매체가 공기로 가득 찬 상태의 임피던스로 정의된다(Kraus, 1992). 특성임피던스는 전송선의 고유 성질로써, 서로 다른 임피던스를 가진 전송선의 경우, 그 전송선의 경계면에서 전파의 반향 및 전송이 발생할 수 있다.

TDR 파형은 분산 및 다중반사의 결과이며, 흙은 전도성, 수분함량, 밀도, 화학성분, 미네랄 함량 등이 서로 다르기 때문에 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 특성 때문에 TDR 파형을 분석하여 흙의 특성을 결정하여 사용할 수 있다(O'Connor 등, 1999).



### 2.1.2 Purdue TDR 방법(ASTM D 6780-05)

본 절에서의 Purdue TDR은 ASTM 국제 규격에 명시되어 있는 방법으로, Purdue TDR을 이용한 흙의 특성 측정 방법은 다음과 같다.

Purdue TDR은 서로 다른 절연재료를 이용한 다중 전송선을 이용한 방법이다. 그림 2.4와 같이 TDR 전송선은 TDR신호 발생기와 연결된 1.8m의 동축케이블, 4개의 봉형 프로브, 동축헤드(Coaxial head)로 구성되어 있다.

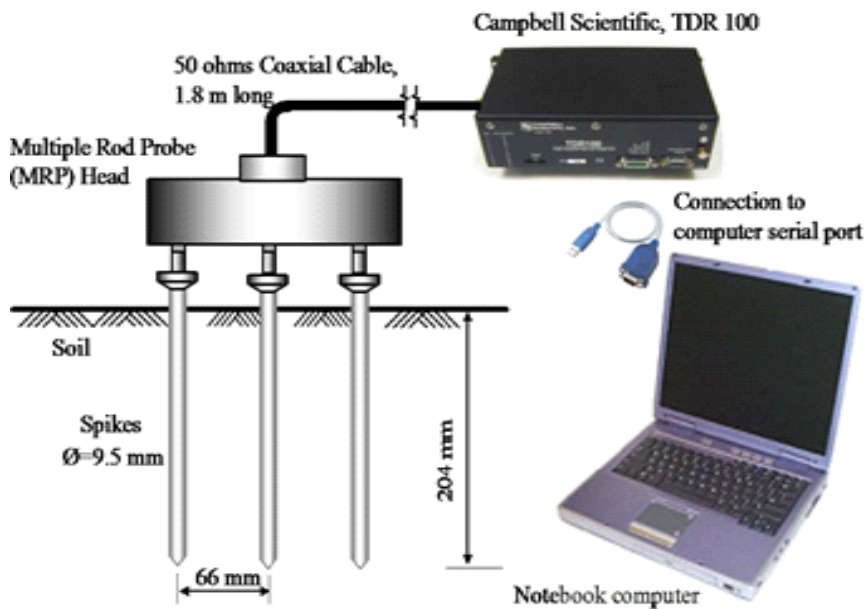


그림 2.4 Purdue TDR 시스템(Yu and Drnevich, 2004)

봉형프로브를 통해 전달되는 전자기파의 전파속도( $v$ )는 식 (2.2)와 같이 정의될 수 있다.

$$v = \frac{2L_p}{t} = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

여기서,  $L_p$  : 흙 속에 관입된 프로브의 길이(m)

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

$t$  : 전파의 이동시간 (msec;  $10^{-3}sec$ )

식 (2.2)를 정리하면 전파의 이동시간은 다음과 같이 정의된다.

$$t = \frac{2L_p \sqrt{\epsilon_r}}{c_o} \quad (2.3)$$

Fellner-Feldegg(1969)는 전파의 주파수가 약 1GHz일 때 전달시간 분석을 통해 상대유전율이 정의될 수 있고, Topp 등(1980)은 상대유전율을 걸보기 유전상수 ( $K_a$ )라고 정의하였다

$$\epsilon_r = K_a = \left( \frac{c_o t}{2L_p} \right)^2 \quad (2.4)$$

그림 2.3과 같이 전형적인 TDR 신호가 출력되며, Barker 등(1989)은  $c_o t$ 를 걸보기 길이( $L_a$ )라고 표현하였다. 이에 따라 유전상수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_a = \left( \frac{L_a}{L_p} \right)^2 \quad (2.5)$$

여기서,  $L_a$ 는 그림 2.3과 같이 TDR 파형을 통해 얻을 수 있는 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점 사이의 걸보기 길이이다.

Drnevich 등(2001b)은 TDR을 이용하여 측정한 흙의 유전상수는 흙의 온도의 영향을 받고, 특히 사질토의 경우 온도 증가에 따라 유전상수는 감소하고, 점성토의 경우 온도가 증가에 따라 유전상수는 증가한다고 하였다. 이에 식 (2.6), (2.7)과 같이 온도보정함수(Temperature Correction Function, 이하 TFC)를 제안하고, 해당 온도의

범위는 4°C와 40°C의 사이로 하였다.

$$TCF_{\text{사질토}} = 0.97 + 0.0015 T \quad (2.6)$$

$$TCF_{\text{점성토}} = 1.10 - 0.005 T \quad (2.7)$$

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

$$K_{a,20^\circ\text{C}} = K_{a,T^\circ\text{C}} \times TCF \quad (2.8)$$

Giese and Tiemann(1975)은 TDR에서 이용되는 전압 전도성의 영향을 조사하였고, Clarkson 등(1977)은 흙의 총 전기전도도( $EC_b$ )를 다음과 같이 정의하였다.

$$EC_b = \left( \frac{\epsilon_o c_o}{L_p} \right) \left( \frac{Z_p}{Z_l} \right) \left( \frac{1 - \rho(\infty)}{1 + \rho(\infty)} \right) \quad (2.9)$$

여기서,  $Z_p$ 는 동축케이블의 임피던스이고, Ramo 등(1994)은 다음과 같이 표현하였다.

$$Z_p = \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi\epsilon_o c_o} \quad (2.10)$$

여기서,  $d_o$ 는 외부도체의 직경이고  $d_i$ 는 내부 도체의 직경이며, 반사계수( $\rho(t)$ )를 Kraus(1992)는 다음과 같이 정의하였다.

$$\rho(t) = \frac{V(t) - V_{in}}{V_{in}} \quad (2.11)$$

그리고 총전기전도도( $EC_b$ )는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$EC_b = \frac{1}{C} \left( \frac{V_s}{V_f} - 1 \right) \quad (2.12)$$

여기서,  $V_f$ 는 장주기 전압 레벨이며,  $V_s$ 는 스텝펄스의 두 배 크기의 전압이다 (그림 2.5 참조).

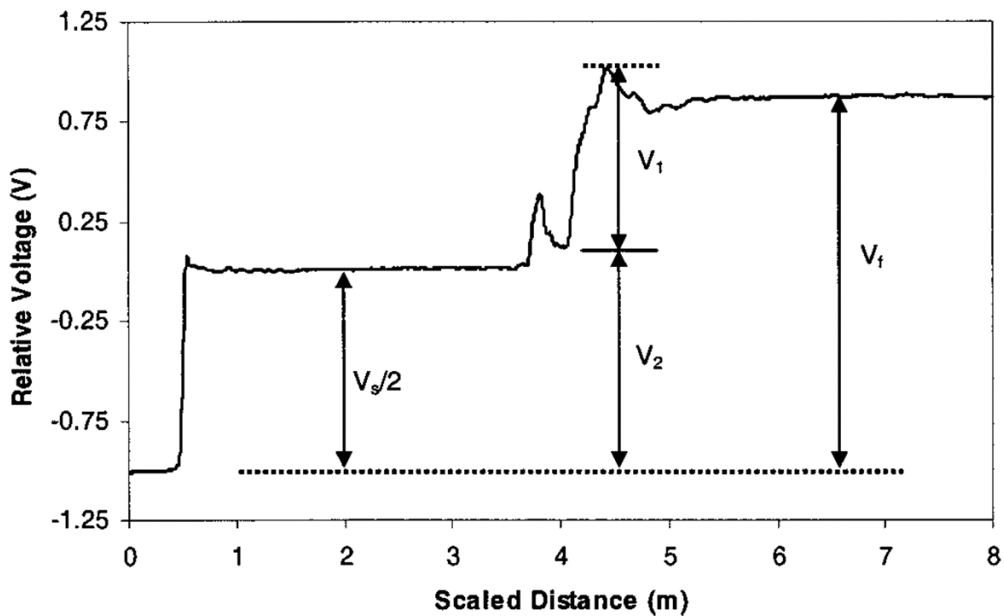


그림 2.5 전기전도도 산정을 위한 TDR 파형 (Yu and Drnevich, 2004)

$C$ 는 프로브 구조 관련 상수이며, 식 (2.13)과 같이 정의할 수 있다 (Giese and Tiemann, 1975; Yu and Drnevich, 2004).

$$C = \frac{2\pi R_s L_p}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} \quad (2.13)$$

여기서,  $R_s$ 는 TDR 신호 발생기의 내부저항(보통  $50\Omega$ )이다.

Siddiqui(1995)는 기존의 함수비 보정식들이 체적함수비로 표현되었고 밀도효과를 포함하고 있어 현장에서 바로 적용하기에 어렵고 복잡하다고 판단하여 중량함수비로 표현된 식 (2.14)를 제안하였다. 이 식은 다양한 흙에 만족스러운 결과를 보여주었고, 상대적으로 현장에 적용하기 용이하다고 판단되었다(White 등, 2003).

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (2.14)$$

여기서,  $\rho_d$ 는 흙의 건조밀도,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $a$ 와  $b$ 는 흙의 특성상수 값,  $w$ 는 중량함수비이다.

Yu and Drnevich(2004)은 기존의 전기전도도에 관련된 식이 체적함수비로 표현되었고 밀도에 대한 고려가 없어 지반공학적으로 적용하는데 한계가 있다고 판단하였고, 흙의 총 전기전도도의 지배요인은 간극유체의 전기전도도이기 때문에 간극유체의 양이 흙의 총 전기전도도를 지배한다고 보고 식 (2.15)을 제안하였다.

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw \quad (2.15)$$

여기서,  $c$ 와  $d$ 는 흙의 특성상수 값이며, 흙의 특성상수 값을 식 (2.14)와 식 (2.15)을 통하여 도출하고, 도출된 총 전기전도도와 유전상수를 이용하여 식 (2.16)과 식 (2.17)통해 현장 지반의 함수비와 건조밀도를 도출할 수 있다(Yu and Drnevich, 2004).

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (2.16)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (2.17)$$

그림 2.6과 그림 2.7은 실제 전통적인 다짐관리 방법으로 측정된 함수비와 건조 밀도를 측정된 값과 TDR을 이용하여 측정값을 비교하고 적용성을 검토하기 위해 Yu and Drnevich(2004)와 Jung 등(2013)이 연구에 이용한 오차범위를 나타낸 것이다.

함수비의 오차범위의 경우  $\pm 1\%$ 를 사용하였고, 건조밀도의 경우 오차범위  $\pm 5\%$ 를 사용하였으며, 측정된 값들이 각 오차범위 내에서 측정되면 그 값은 타당한 것으로 판단하였다.

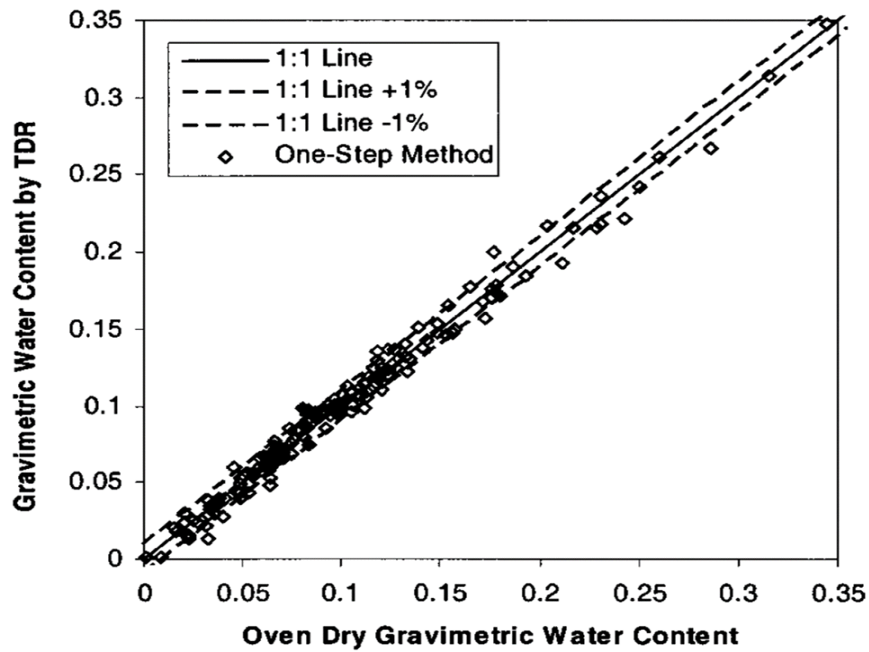


그림 2.6 함수비 정밀도에 관한 기준(Yu and Drnevich, 2004)

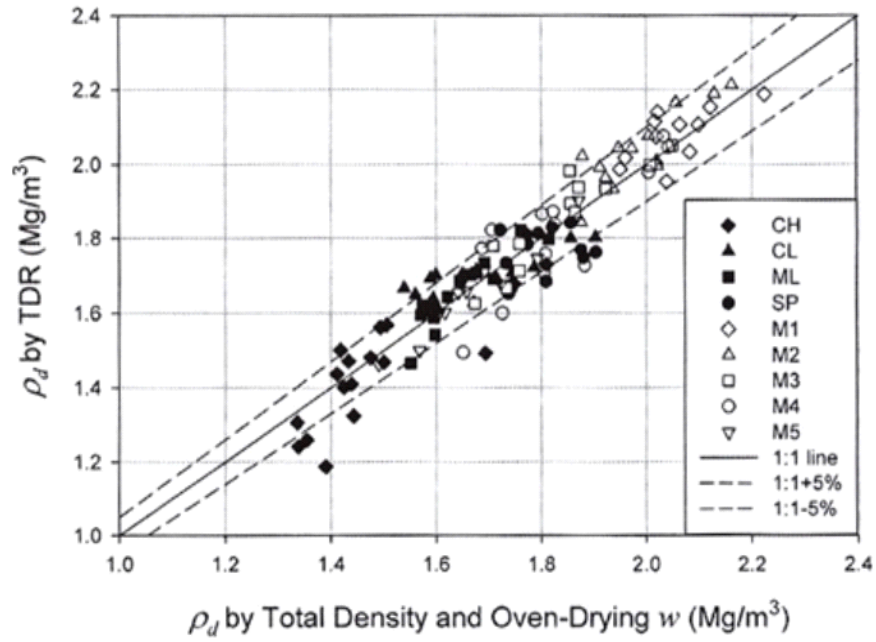


그림 2.7 건조밀도 정밀도에 관한 기준(Jung 등, 2013)

## 2.2 전단파에 대한 고찰

본 절에서는 지반의 강성 측정을 위한 전단파에 관하여 설명하고, 전단파를 통한 지반의 강성 측정 방법에 대해 설명하였다.

지반의 역학적 거동은 정적하중 및 동적하중 등 여러 가지 인자에 의해 매우 복잡하고 복합적으로 영향을 받는다. 지반은 응력-변형률 조건에 크게 구애받지 않는 거동을 하는 선형-탄성재료보다는 응력-변형률조건에 따라 거동을 달리하는 비선형 재료에 가깝다고 할 수 있다. 즉, 지반 내의 발생하는 응력 및 변형률의 크기, 지반에 작용하는 동적하중의 크기 등 여러 요인에 따라 지반의 탄성계수가 달라진다(박철수, 2008).

지반의 탄성계수는 각 시험재료에 가해지는 하중의 조건에 따라 크게 정적(Static) 탄성계수, 동적(Dynamic) 탄성계수 구분되어왔다. 삼축 시험과 같은 정적 시험에서는 시간에 따라 하중을 천천히 증가시키는 시험을 통해 정적탄성계수가 도출되지만, 동적시험에서는 관성효과를 무시할 수 없는 큰 변형률 속도로 시험을 수행하여 전단파속도를 측정하여 동적탄성계수를 도출하게 된다. 그 실험값의 차이로 인하여 보편적으로 정적 물성치과 동적 물성치 다른 물성치라고 인식되었으나, 최근 들어 정적시험의 결과 측정 결과값의 정확도 및 신뢰도 증가로 인하여 정적 물성치와 동적 물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들었다(김동수, 2007).

따라서 지반에 동적하중이 가해질 때, 지반의 적합한 동적 물성치를 사용하여 그에 따른 지반거동을 예측하고 평가하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 대표적인 노반의 동적물성치는 전단파속도( $V_s$ )와 전단탄성계수( $G$ , Shear modulus)이다. 현장탄성과 시험에서 얻은 전단파속도와 전단탄성계수도 지진과 같은 동적인 문제 해결만이 아니라 구조물의 정적인 변형해석에도 중요하게 작용된다(박철수, 2008).

동적 변형해석에서 가장 밀접한 관련이 있는 물성치는 전단탄성계수이며, 미소 변형율에서 전단탄성계수 즉, 최대전단탄성계수가 동적 변형해석에서 가장 밀접한 관련이 있는 물성치이다.



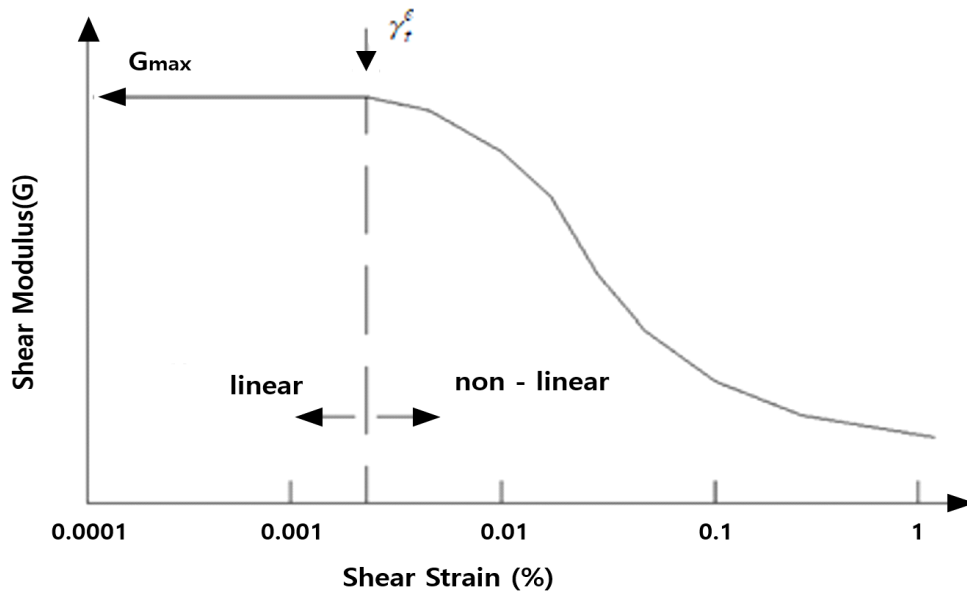


그림 2.8 전단탄성계수-전단변형률의 관계(최찬용 등, 2016)

그림 2.8은 전단탄성계수와 전단변형률의 관계를 나타낸 그래프이다. 일반적으로 흙과 같은 지반재료의 거동특성은 전단탄성계수( $G$ )- 변형률( $\gamma$ )의 관계로 나타내고 선형영역과 비선형영역으로 구분한다. 선형영역과 비선형영역으로 구분 짓는 변형률 크기를 선형한계변형률( $\gamma_i^e$ )이라 한다. 일반적으로 지반을 구성하는 흙의 선형한계 변형률은 0.001%~0.01% 범위에 존재하는 것으로 알려져 있다(최찬용 등, 2016).

### 2.2.1 전단파의 전파특성

전단파는 지반에 충격이 가해질 때 발생하고 충격원으로부터 모든 방향으로 전파되며, 이러한 전단파는 소변형(Small strain)영역 내의 변형특성을 지닌다. 기본적으로 탄성파는 매질 내부에서 전파되는 체적파(Body wave), 표면에서 전파되는 표면파(Surface wave)분류하고, 전단파(Shear wave)는 체적파의 한 종류이다(Molina, 2006).

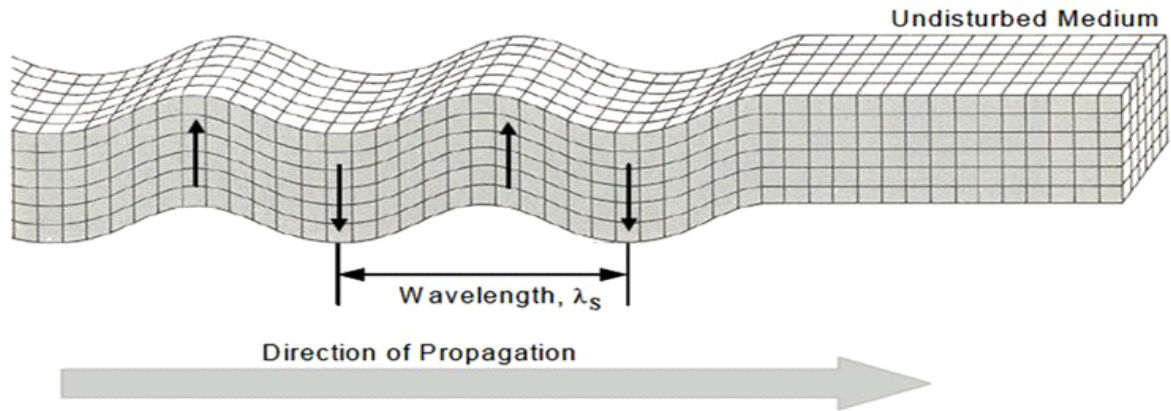


그림 2.9 전단파의 전파 거동(Bolt, 1976)

### 2.2.2 전단파 속도

그림 2.9과 같은 거동을 하는 탄성파는 전단파라고 하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

여기서,  $u_x$  :  $y$ 방향의 입자거동  
 $t$  : 시간(s)  
 $G$  : 구속탄성계수 (MPa)  
 $\rho$  : 매질의 밀도 ( $g/cm^3$ )

식 (2.18)의 해는 다음과 같다.

$$u_y = Ae^{i(\omega t \pm \kappa x)} \quad (2.19)$$

여기서,  $\omega$  : 각주파수 ( $= 2\pi/T$  ; rad/s)  
 $T$  : 주기(s)  
 $\kappa$  : 파상수

식 (2.19)을 식 (2.18)에 대입하면 식 (2.20)과 같이 표현할 수 있으며, 전단파속도는 식 (2.21)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\omega}{\kappa} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.20)$$

$$V_s = f\lambda = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.21)$$

여기서,  $\lambda$  : 파장  
 $f$  : 주파수

전단변형률이 0.001%보다 작은 미소변형률영역에서 전단탄성계수는 최대전단탄성계수( $G_{\max}$ )라고 볼 수 있으며, 식 (2.21)을 전단탄성계수에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = G_{\max} = \rho V_s^2 \text{ (MPa)} \quad (2.22)$$

### 2.2.3 전단파속도 산정 방법

전단파의 전파속도는 탄성과 측정장치를 이용하여 측정 지점간의 도달시간 및 거리로 측정할 수 있으며, 다음 식에 통해 도출할 수 있다.

$$V_s = \frac{D}{T_r} \quad (2.23)$$

여기서,  $D$  : 측정 지점 사이의 거리(m)  
 $T_r$  : 도달시간(msec)

여기서  $T_r$ 은 도달시간으로서 단위는 msec를 사용하며,  $10^{-3}$ sec를 의미한다. 전단파의 전파속도를 산정하기 위한 도달시간을 측정하는 방법은 초동추정방법(First arrival

picking method), 극대점 이용방법(Peak to peak method), 상호상관법(Cross correlation method) 등이 있다. 초동추정방법은 입력전압이 시작되는 지점과 출력 전압이 시작되는 지점 사이의 거리를 시간으로 해석하여 그림 2.10과 같이 도달 시간을 산정한다(Chan, 2010).

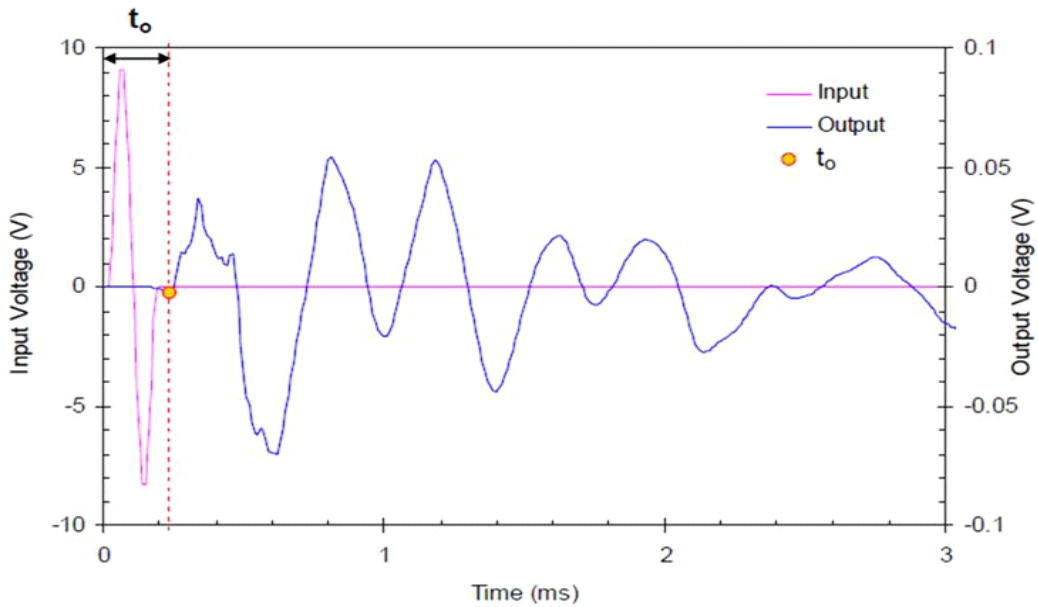


그림 2.10 초동 추정방법(Chan, 2010)

극대점 이용방법은 입력신호의 극대값과 출력전압의 첫 극대값 사이의 거리를 시간으로 해석하여 그림 2.11과 같이 도달시간을 산정한다(Chan, 2010).

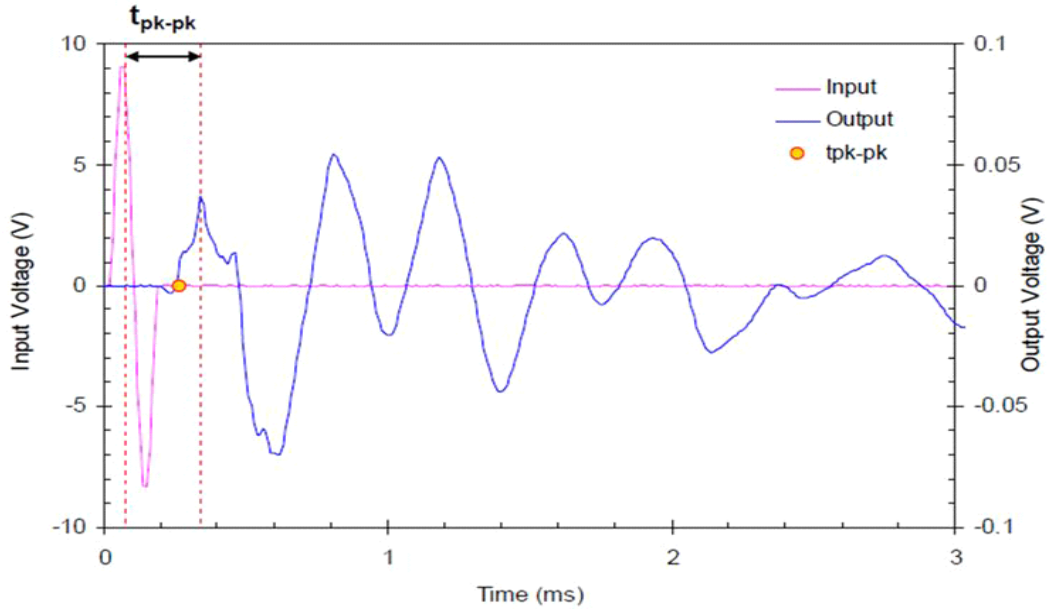


그림 2.11 극대점 이용방법(Chan, 2010)

상호상관법은 식 (2.24)과 같이 표현할 수 있으며 서로 다른 신호의 시간 이동에 따른 상관성, 유사성을 뜻한다.

$$CC_{TR}(t_s) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int_{T_r} T(t+t_s)R(t)dt \quad (2.24)$$

여기서,  $t_s$ 는 전송시간( $T(t)$ )과 도달시간( $R(t)$ )의 차이이며, 그림 2.12과 같이 도달시간을 산정한다(Chan, 2010).

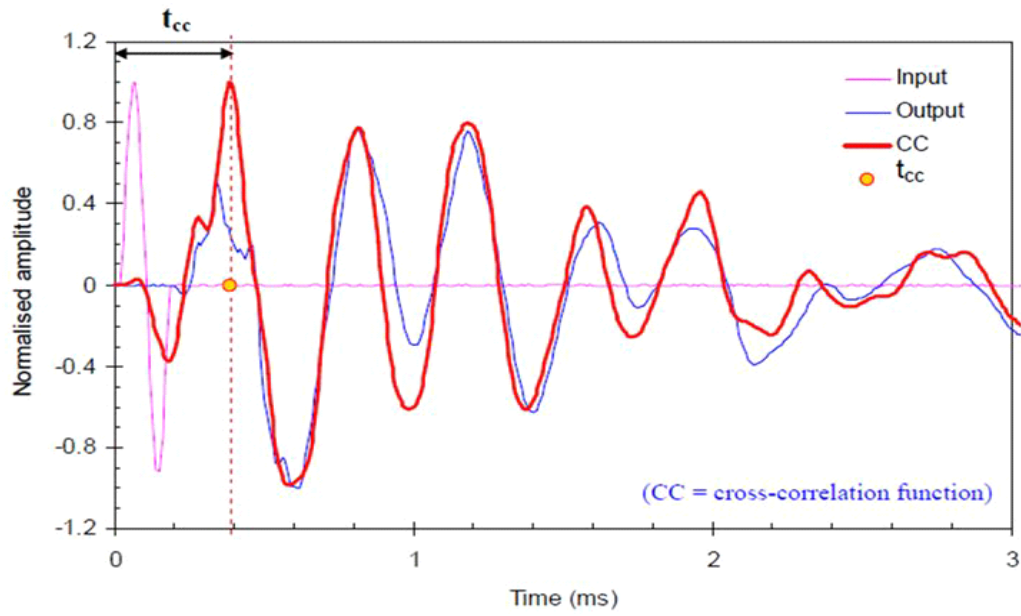


그림 2.12 상호상관법(Chan, 2010)

## 2.3 Flat TDR에 대한 고찰

### 2.3.1 Flat TDR 구성

본 연구에 사용된 Flat TDR은 전파 발생장치에서 발생된 전자기파를 지반에 접촉된 TDR 프로브의 구리선을 통해 전파를 전달하고, 다시 반사되어 오는 것을 측정하여 지반의 특성을 예측하기 위해 그림 2.13과 같이 CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.(USA)에서 제작한 TDR 측정시스템을 사용하였다(송민우, 2016).



그림 2.13 TDR100 장비(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.)

그림 2.14와 같이 TDR 측정 시스템을 살펴보면 TDR 프로브에 신호를 보내 반사된 신호를 측정할 수 있는 TDR100, TDR 시스템에 전원을 공급하기 위한 12V 배터리, 그리고 측정된 데이터를 컴퓨터로 전송하는 Picoscope라는 PC 오실로스코프로 구성되어 있다.



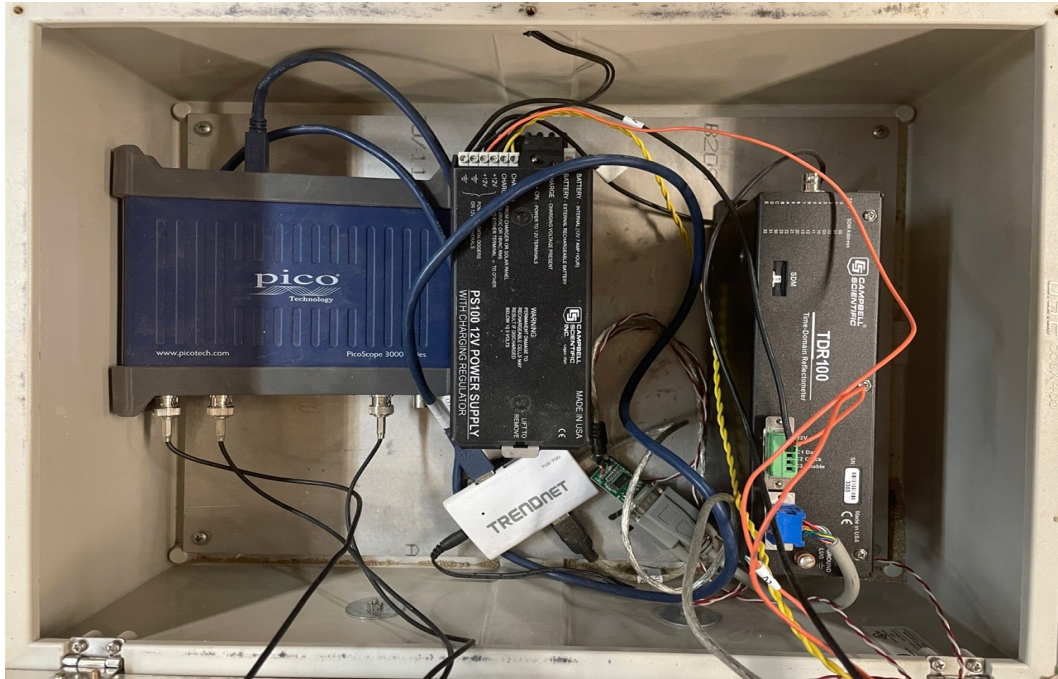


그림 2.14 Flat TDR 내부 모습

TDR100에서 발생시킨 전자기파를 프로브를 통해 보내고, 반사되어 오는 전자기 신호를 PC오실로스코프에서 컴퓨터의 데이터 분석 소프트웨어로 전송한다. TDR100 측정 장비에는 디스플레이 장치가 없고, 측정한 데이터의 확인 및 분석은 PC와 연결하여 수행한다. TDR 파형 분석은 미국 Case Western Reserve Univ.의 Yu 교수가 제작한 소프트웨어(TDR Seismic Testing System 1.3)를 이용하였다.

그림 2.15는 Flat TDR의 전체적인 모습이다. 그림 2.15(a)는 TDR 본체의 뚜껑을 닫은 모습이며, 그림 2.15(b)는 TDR 본체의 뚜껑이 열린 모습이다. 장비 표면에는 데이터 측정을 위한 케이블을 연결할 수 있는 소켓과 전단과 입력 주파수를 조절할 수 있는 조절기 및 액정이 설치되어 있다. 또한, 그림 2.15(c)와 같이 장비 보호와 휴대성을 위해 캐리어 가방 형태의 운반구를 제작하여 운반 및 이동에 편리함을 도모하였다. 운반구 내부는 그림 2.15(d)와 같이 TDR을 구성하는 장비의 크기와 특성에 맞게 칸막이를 제작하고 스펀지를 설치하여 운반 중에 가해지는 외부 충격을 최소화 하였다.

표 2.1은 TDR100의 기계 사양을 나타낸 것이다.





(a) TDR 닫힌 모습



(b) TDR 열린 모습



(c) 케이스 외부 모습



(d) 케이스 내부 모습

그림 2.15 Flat TDR 외부 모습

표 2.1 TDR 100 사양

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

## 2.3.2 TDR 프로브 제작

### (1) 기존 TDR의 프로브(Purdue TDR)의 고찰

본 연구에서는 신속하고 정확한 측정값을 도출하고, 봉형 프로브를 사용하면서 발생할 수 있는 문제점을 최소화하기 위하여 Flat 프로브를 제작하였다.

기존의 Purdue TDR은 그림 2.16과 같이 본 연구에서 사용한 TDR100 장비를 사용하여 지반의 함수비와 건조밀도를 측정하며, 봉형 프로브(Multiple Rod Probe, 이하 MRP)를 사용하고, 이것을 지반에 관입시켜 함수비와 건조밀도를 측정한다.

하지만 기존 봉형 프로브를 사용하는 Purdue TDR은 크게 두 가지의 문제점이 있다.

첫째, 측정하고자 하는 지반에 4개의 봉형 프로브를 관입을 시켜야 하는 문제점이 있다. 도로공사 표준시방서에 따르면 노체 다짐의 경우  $\gamma_{dmax}$ 의 90% 이상, 노상 다짐의 경우  $\gamma_{dmax}$ 의 95% 이상을 요구 하고 있다. 이러한 다짐도가 높게 다짐이 이루어진 지반에 프로브를 관입시키기 위해서 망치로 봉형프로브를 타입을 하는 등 일련의 작업을 수행해야하는 문제점이 있다.

둘째, 봉형 프로브를 지반에 관입할 때 주변 지반을 교란시키는 문제점이 있다. 높은 다짐도로 다짐 수행된 상태의 지반에 봉형 프로브를 관입하므로 측정하고자 하는 부분에서 교란이 발생하면 측정하고자 하는 지반의 상태를 변화시키는 등의 문제점이 발생하여 측정값의 신뢰도가 감소할 우려가 있다(송민우, 2016).



그림 2.16 Purdue TDR

(2) Flat TDR 프로브 제작

기존의 Purdue TDR의 문제점을 보완하여 더욱 신속하게 측정하기 위해 그림 2.17과 같이 Flat 프로브를 제작하였다(송민우, 2016).

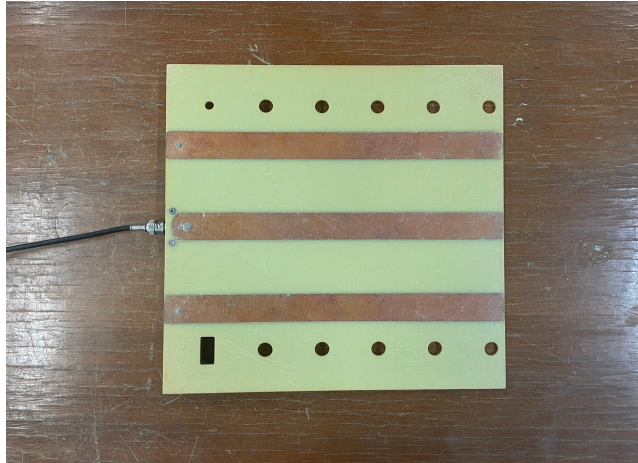


그림 2.17 Flat 프로브

본 연구에서 사용한 Flat 프로브의 제원은 폴리머 재질의 30.5 × 30.5 cm 판에 폭 2.5cm의 구리 띠를 5cm 간격으로 총 3개 부착하였다. 기존의 관입형 봉형 프로브와 달리 지반 표면과 접촉하여 측정하는데, 이때 표면과 접촉하는 부분에서 매질 차이로 인한 전파 간섭 문제를 해결하기 위해서 폴리머 재질의 판을 사용하였다. 그림 2.18과 같이 프로브의 연결부는 기존 봉형 프로브 연결 부분을 동일한 형태의 탈부착 형식으로 제작하여 호환성을 높였다.



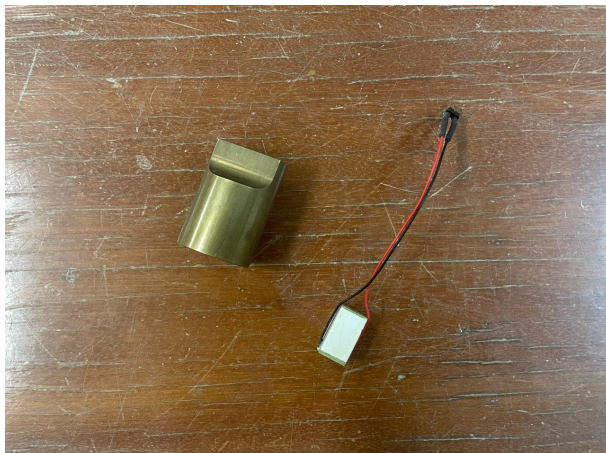
그림 2.18 프로브 연결부



(3) 전단파 측정 장치 결합

본 연구에서는 그림 2.19와 같이 전단파를 측정하는 장비로 TDR100이 작동하는 전압인 약 10V 내외에서 측정 가능한 Piezo-stack을 이용하였다. Piezo-stack은 전단파를 발생시키는 발생장치와 발생시킨 전단파를 수신할 수 있는 가속도계로 구성되어 있고, 이를 Flat TDR프로브에 결합하였다.

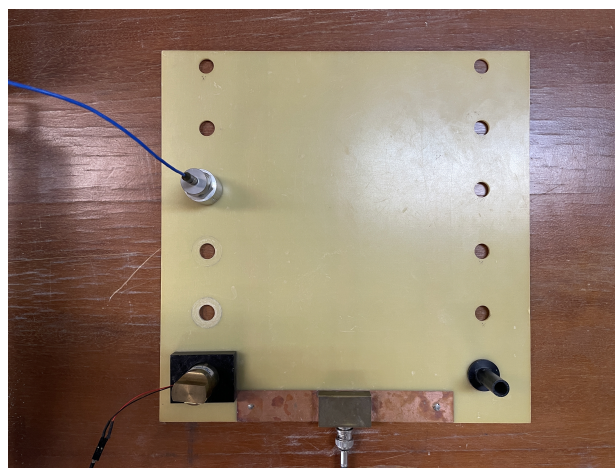
흙 표면과 전단파 발생장치의 접촉을 용이하게 하고 생성된 전단파를 흙으로 잘 전달하기 위해 추를 제작하여 Piezo-stack 위에 올려놓는 형태로 제작하였다. 또한, Flat 프로브에 약 5cm 간격으로 구멍을 뚫어 지반의 상태에 따라 전단파 수신기의 위치를 일정하게 변화시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서 이용된 Piezo-stack은 PIEZO SYSTEM INC.에서 제작한 장비이고, Piezo-stack의 특성은 표 2.2와 같다.



(a) 전단파 발생장치



(b) 전단파 수신기(가속도계)



(c) 프로브 결합

그림 2.19 Piezo-stack을 결합한 Flat 프로브

표 2.2 Piezo-stack의 특성

Piezo-stack	Specifications
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	7,900 kg/m <sup>3</sup>
Wires	Red positive, Black negative
Thermal Operation Range	-20 to 80°C
Thermal Storage Range	-20 to 85°C
Humidity	< 50 %

또한, 전단파 측정을 위하여 PicoScope 소프트웨어를 이용하였고, 이를 통해 전단파의 도달시간을 측정할 수 있으며, 그림 2.20과 같이 측정한 도달시간과 Piezo-stack과 전단파 수신기 거리 등의 값을 이용하여 전단파 속도 및 전단탄성계수를 얻을 수 있다.

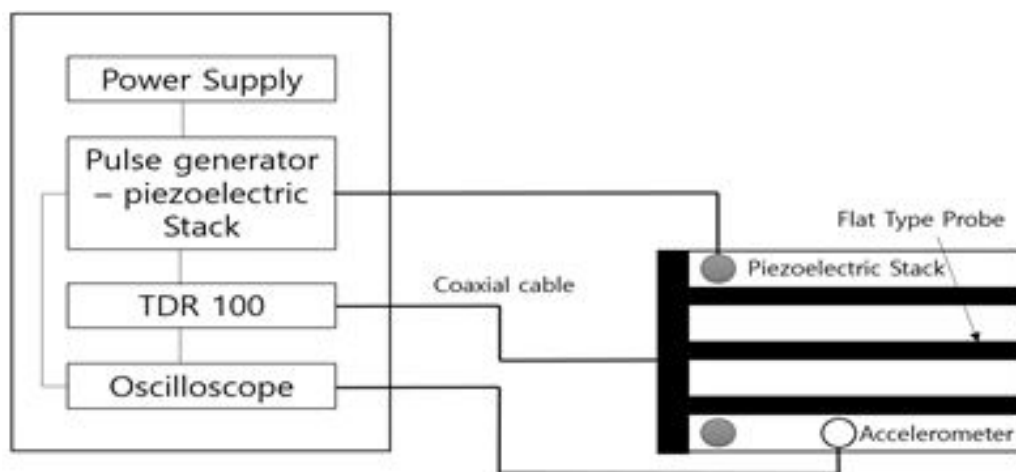


그림 2.20 TDR 시스템 개요도

#### (4) Flat 프로브의 영향범위

Flat 프로브를 이용한 TDR의 전파영향범위를 영향범위 유한요소해석을 통해 분석 결과를 나타내었다. 전기전도도와 투수율을 변화시켜 영향범위를 분석하였고, 유한요소해석 프로그램 Abaqus 6.14의 Electromagnetic Model type을 이용하여 Flat TDR의 영향범위를 분석하였다. 유한요소해석을 통해 확인한 결과, Flat TDR의 전자기파는 지반 표면에서 아래로 약 10cm까지 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한, 유전율은 함수비 및 건조밀도를 도출하는데 중요한 요소이지만 전파의 영향범위에는 영향이 미치지 않는 것으로 확인되었다(김완민, 2017).

그림 2.21은 Flat TDR의 영향범위에 대한 유한요소해석결과를 나타낸 것이다.

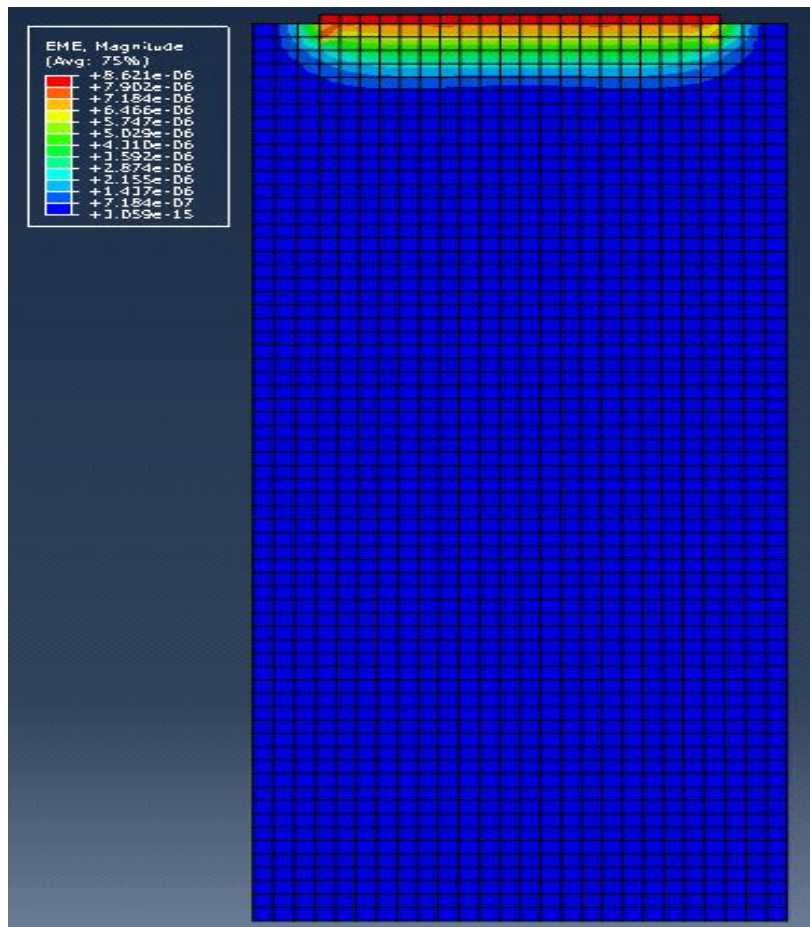


그림 2.21 영향범위 유한요소해석 결과(김완민, 2017)

(5) Flat TDR 프로브 보정 실험

Flat TDR을 이용하여 측정된 TDR 신호를 분석한 결과, 기존의 연구자들에 의한 TDR 파형과 달리 장주기 전압 레벨이 상당히 크다는 것을 확인하고, 이를 보정하기 위하여 실제 전기전도도 측정기로 전기전도도 값과 Flat TDR 시스템으로 측정한 장주기 전압 레벨과의 관계를 도출하였다.

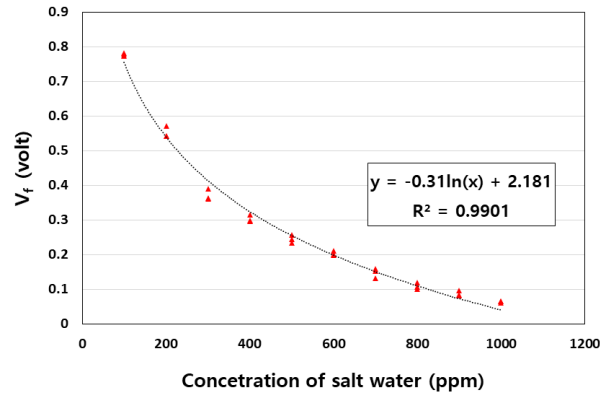
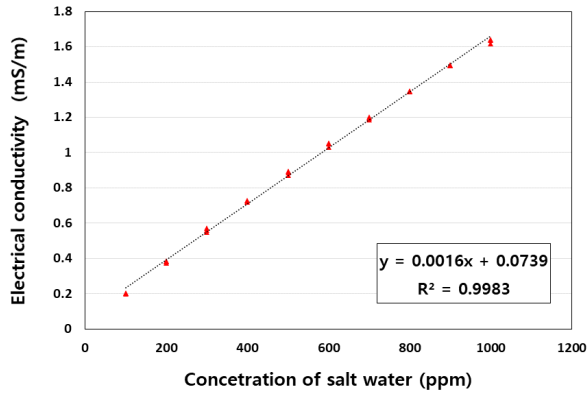
Flat 프로브 보정 실험 결과, 그림 2.22(a)과 같이 소금물의 농도가 증가할수록 전기 전도도가 증가하는 것을 보이며, 반대로 그림 2.22(b)과 같이 소금물의 농도가 증가할수록 장주기 전압 레벨은 감소하는 경향을 확인하였다. 이를 통해 전기전도도와 장주기 전압 레벨 사이의 관계를 그림 2.22(c)와 같이 도출하였고, 식 (2.25)로 표현할 수 있다(김완민, 2017).

$$EC = 0.5921 \times \log(1/V_f) + 0.0387 \quad (2.25)$$

여기서,  $EC$  : 전기전도도( $mS/m$ )

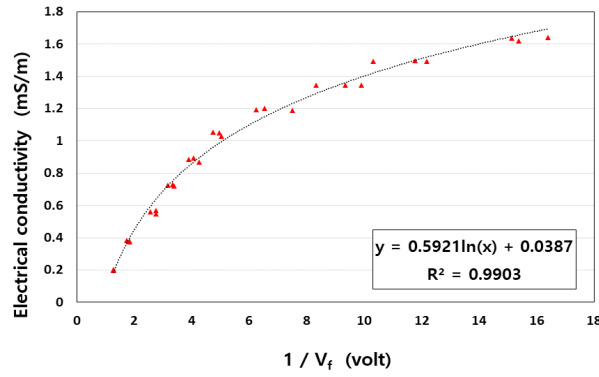
$V_f$  : 장주기 전압 레벨( $Volt$ )





(a) 소금물과 전기전도도의 관계

(b) 소금물과 장주기 전압 레벨의 관계



(c) 전기전도도와 장주기 전압 레벨의 관계

그림 2.22 전기전도도 보정실험 결과

## 제 3 장 실내 및 현장실험

### 3.1 실험 개요

본 연구에서는 Flat TDR을 이용하여 각 시료에 따라 측정된 함수비와 건조밀도, 전단파속도 값에 대한 정밀도를 분석하고 이에 대한 검증을 위해 현재 시공 중이며 즉시 장비투입이 가능한 건설현장 6개소에 대한 시료를 채취하여 사용하였다. 사용한 시료는 전라남도 내의 함평, 담양, 보성, 나주, 해남지역에서 채취한 시료를 이용하여 실험을 진행하였다.

함수비와 건조밀도 측정값에 대한 검증을 위하여 선행연구에서 수행되었던 8개소에 대한 시료에 대해 본 연구의 실험데이터와 비교하여 분석하고자 하였다. 추가적으로 비교·분석한 시료는 주문진 표준사, 원주, 섬진강, 옥과, 일산, 강진, 울주 이하 8개 현장에 대한 시료를 적용하였다.

또한, 전단파속도 측정값에 대한 검증을 위하여 본 연구의 실험데이터와 추가적으로 비교·분석한 선행연구 시료는 원주, 섬진강, 옥과, 일산 시료이다.

실험을 수행한 대상 시료들은 사질토이고, 각 시료의 입도분포 결과를 통해 통일분류법에 따라 입도분포가 불량한 모래(Poorly Graded Sand, 이하 SP), 입도분포가 양호한 모래(Well Graded Sand, 이하 SW), 실트질 모래(Silty Sand, 이하 SM)로 나누어 표기하였다. 그림 3.1은 현장대상지반의 위치를 나타낸 것이다.

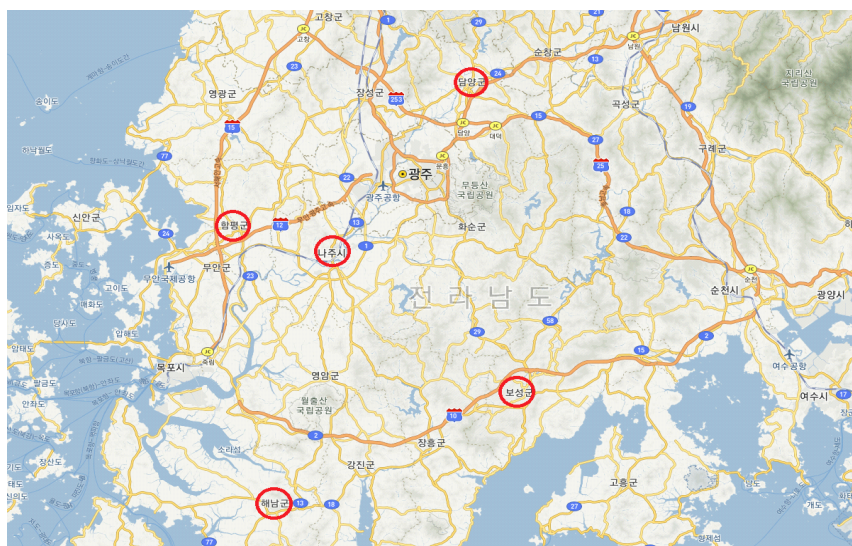
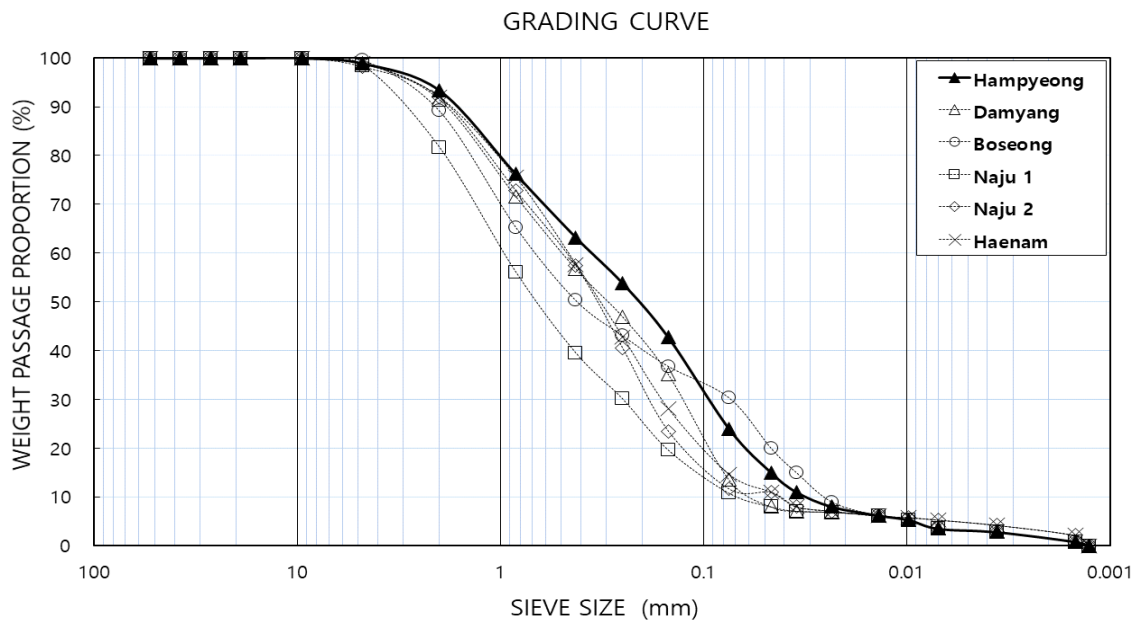


그림 3.1 현장 위치도

### 3.2 실험 시료

사용된 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해서 흙의 비중 시험(KS F 2308), 입도분포 시험(KS F 2312)을 수행하였으며, 채취 시료는 다짐 시험(KS F 2312)을 수행하여  $\gamma_{dmax}$ 를 산정하였다. 그림 3.2는 각 시료의 입도분포시험의 결과를 나타낸 것이고, 표 3.1은 실험에 사용된 시료의 물성값을 나타낸 것이다.



### 3.3 실내검증실험

#### 3.3.1 실내 Flat TDR 실험

Flat TDR을 이용한 함수비 및 건조밀도 측정값에 대한 정밀도를 검증하기 위해 여섯 가지의 시료를 이용하여 함수비와 건조밀도의 변화에 따른 TDR 파형을 측정하여, 각 시료의 유전상수와 전기전도도를 측정하였다.

실험방법은 각 시료의 *OMC*를 고려하여 함수비를 일정 비율씩 증가시키며 각 시료별 소정의 함수비를 변화시켰으며 증류수를 사용하여 함수비를 조성하였다. 다짐은 D 다짐봉으로 3층 40회 다짐을 실시하였고, 시료의 균일한 다짐을 위해 그림 3.3(b)과 같은 철판을 제작하여 시료 위에 올려놓고 다짐봉으로 타격하였다.

실내실험을 위해 그림 3.3(a)와 같이 아크릴을 사용하여 33cm × 33cm × 10cm 크기의 몰드를 제작하였고, 다짐시험을 진행한 후에 트리머로 시료를 성형할 수 있게 몰드 모양에 맞는 칼라를 제작하였다. 또한, 그림 3.3(b)와 같이 철판을 사용하여 몰드 크기에 맞게 트리머를 제작하였고. 채취한 여섯가지 시료 모두 각각 25kg씩 24시간 노건조시켜 준비하여 실험을 수행하였다.

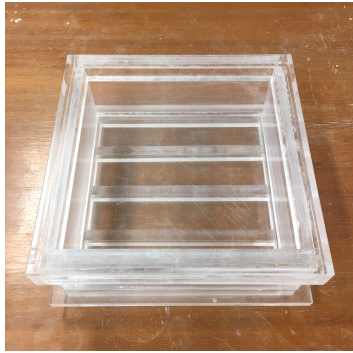
이렇게 측정한 전기전도도, 유전상수, 실내 함수비 측정시험으로 구한 시료의 함수비와 건조밀도의 결괏값으로 시료의 특정상수 값을 도출하여 현장 지반의 함수비와 건조밀도를 구하는데 사용하였다. 실험절차는 다음과 같다.

먼저, 실험에 사용할 몰드의 무게 및 체적을 측정한다. 본 연구에서 제작한 아크릴 몰드의 무게는 8,760g, 체적은  $10,890\text{cm}^3$  이다.

- (1) 실험 조건에 맞추어 노건조한 시료에 함수비를 조성하여 준비한다.
- (2) 몰드에 칼라를 씌운 후, 적당량의 시료를 넣고 철판을 올린 뒤 철판 표면을 D 다짐봉으로 층당 40회씩 3층으로 균일하게 다짐한다.
- (3) 다짐 완료 후, 몰드의 칼라를 제거한 뒤 트리머를 이용하여 시료를 몰드에 제거 및 성형한다. 시료의 성형이 완료되면 몰드와 함께 시료의 무게를 측정한다.
- (4) 다짐 및 성형이 완료된 시료 위에 Flat 프로브를 올려놓고 TDR 측정을 한다. TDR 측정은 3회 실시한다.
- (5) TDR 측정이 끝난 후 다짐 및 성형이 완료된 시료의 몰드 중앙에서 소량의

시료를 채취하여 실측 함수비를 측정한다.

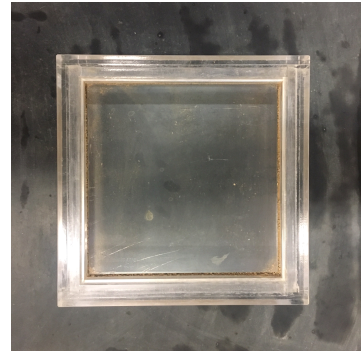
- (6) 함수비 측정까지 끝난 후 *OMC*를 고려하여 함수비를 일정 비율씩 증가시키며 각 시료별 소정의 함수비까지 (3)~(6)을 반복하여 실시한다.



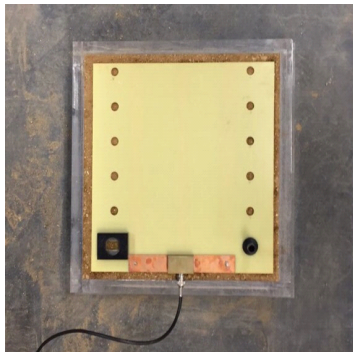
(a) 제작한 몰드



(b) 철판 + 트리머



(c) 다짐작업



(d) TDR 신호 측정



(e) 시료무게 측정



(f) 함수비 측정

그림 3.3 TDR실험 장비 및 실험 절차

### 3.3.2 실내 전단파 측정

Flat TDR에 Flat 프로브에 결합된 전단파 측정 장치인 Piezo-stack 측정값에 대한 정밀도를 검증하기 위해 함수비 및 재령일에 따라 전단파속도를 측정하고 변화 양상을 분석하였다.

함수비 변화에 따른 전단파속도 측정은 기존 선행연구 4개소와 현장에서 새롭게 측정한 6개소를 포함한 총 10개소의 시료를 대상으로 비교·분석하였다. 실험방법은 앞 절에서 수행한 TDR 시스템을 이용한 실내검증실험과 동일하게 진행하였고, 각 구간별 함수비에서 전단파 속도를 측정하였다.

재령일에 따른 전단파 측정은 SP시료, SM시료에 LW그라우트재를 혼합하였고, Flat TDR에서 사용하였던 몰드와 동일한 몰드를 각각의 혼합 비율에 따라 여섯개를 제작하였다. 혼합 비율은 시료 무게에 대한 중량비로 각각 10%, 20%, 30%로 하였으며, 공기 중에서 양생을 진행하였고 양생을 진행하는 동안 재령일(3일, 7일, 14일, 28일)에 전단파 속도를 측정하였다.

그림 3.4는 실내전단파 측정을 위해 공시체를 조성하는 과정을 나타낸 것이다. 또한, 표 3.2는 LW그라우트재를 혼합하여 제작한 공시체 중량비에 실험 배합비를 나타낸 것이다.

표 3.2 시료 중량비에 따른 실험 배합비

Total Weights (g)	Weights ratio (%)	LW grout materials				
		A liquid		B liquid		
		Water glass (ml)	Water (ml)	Cement (g)	Bentonite (g)	Water (ml)
16,733	10	509	218	291	29	625
	20	1,018	437	582	58	1,251
	30	1,528	655	873	87	1,877





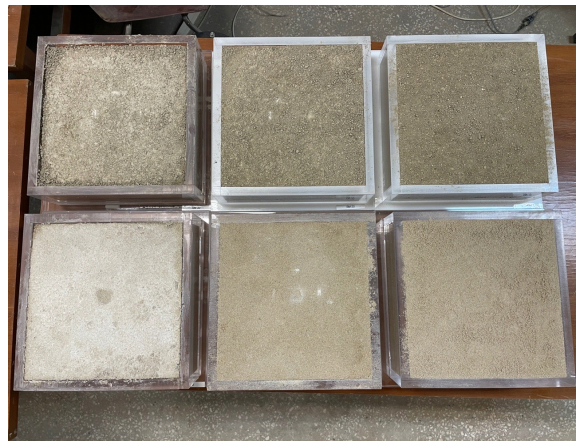
(a) 그라우트재 배합



(b) 시료 조성



(c) 성형몰드 조성



(d) 양생(3일~28일)

그림 3.4 재령일에 따른 실내 전단파 측정 실험

### 3.4 현장검증실험

#### 3.4.1 들밀도시험

본 연구에서는 Flat TDR을 이용한 대상 현장 함수비와 건조밀도 측정값의 확인을 위해 현장 들밀도시험을 수행하였다. 그림 3.5는 들밀도 시험 과정을 나타낸 것이다. 그림 3.5(a)와 같이 KS F 2311에 따라 6개 현장에 대하여 들밀도시험을 수행하였고, 그림 3.5(b)에서 들밀도시험 중 채취한 시료는 실험실에서 분석을 진행하였다.



(a) 들밀도시험 수행

(b) 현장시료 채취

그림 3.5 들밀도 시험



### 3.4.2 동적콘관입시험

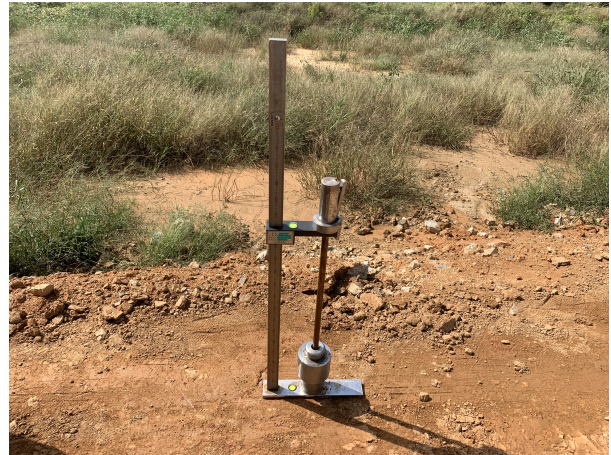
동적콘관입시험(DCPT)은 개략적인 토층 성상을 파악하고 지중의 동적응력 파악 및 원위치 전단강도의 측정용으로 사용된다. 국내 기준인 KS F는 정해져 있지 않으나, 미국 재료시험협회인 ASTM D 6951 과 일본의 JGS 1433기준을 참조하였다.

본 연구에서는 일본에서 개발한 간이 동적 콘 관입시험기를 이용하여 JGS 1433-1955 기준에 따라 질량 5kg의 해머를 50cm 높이에서 자유 낙하시켜 콘을 10cm 관입시키는데 필요한 타격 횟수  $N_d$  값을 측정하는 절차를 수행하였고, 그에 따른 지반의 다짐도 및 강성특성을 확인하였으며, 전단파속도와의 관계를 확인하고자 하였다.

그림 3.6은 동적콘관입시험의 전경이다.



(a) 콘관입시험 1



(b) 콘관입시험 2

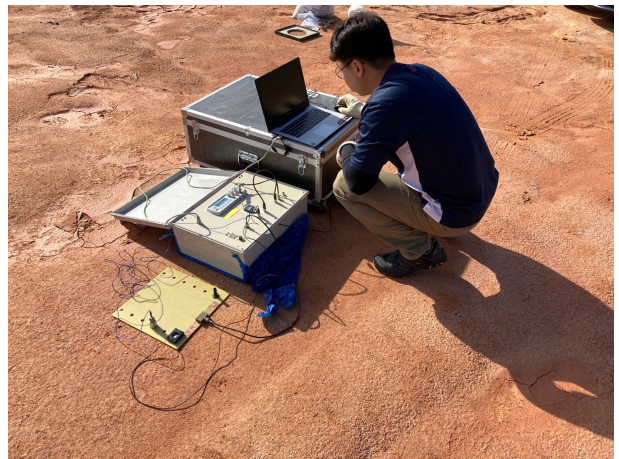
그림 3.6 동적콘관입시험 전경

### 3.4.3 현장 Flat TDR 실험

Flat TDR의 현장 함수비, 건조밀도, 전단파속도 측정값의 정밀도를 확인하기 위하여 현장에서의 TDR 측정을 수행하였다. 현장 Flat TDR 또한 6개 현장에 대한 측정을 수행하였으며, 그림 3.7과 같이 현장에서 Flat TDR 장비를 이용하여 현장 함수비, 현장 건조밀도, 현장 전단파속도 등 각 지반의 물리적 특성을 확인하였다.



(a) 현장TDR 측정 전경



(b) 현장TDR실험 1



(c) 현장TDR실험 2



(d) 현장TDR실험 3

그림 3.7 현장 TDR 실험



## 제 4 장 실험결과

### 4.1 실내검증실험 결과

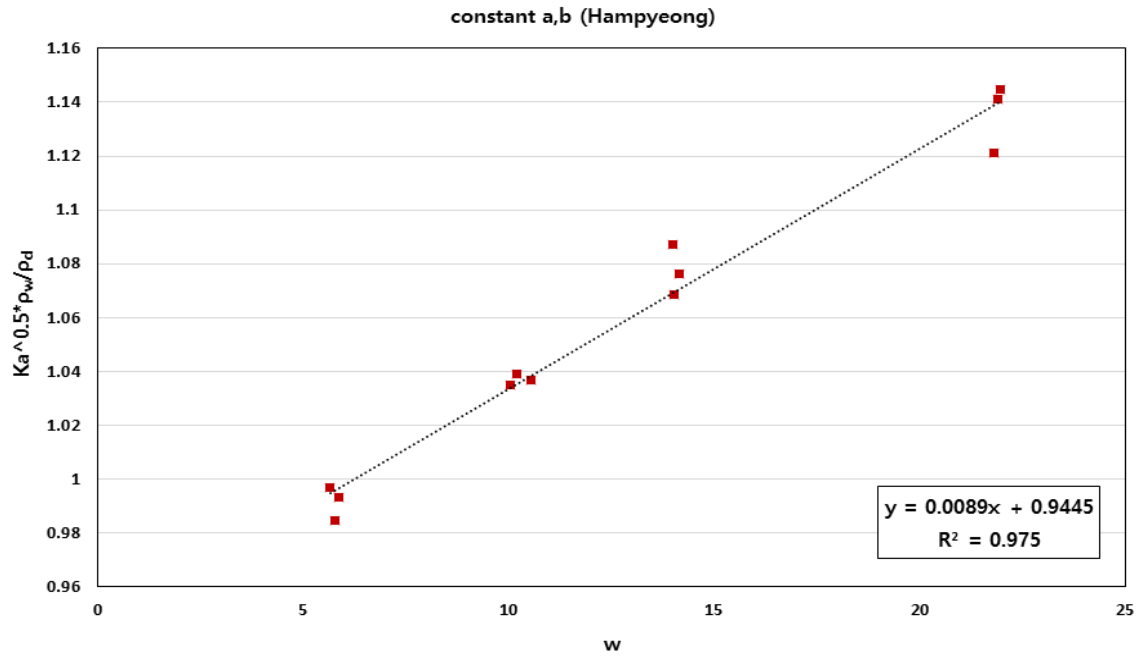
#### 4.1.1 실내 Flat TDR 실험

##### (1) 시료별 특정상숫값 결정

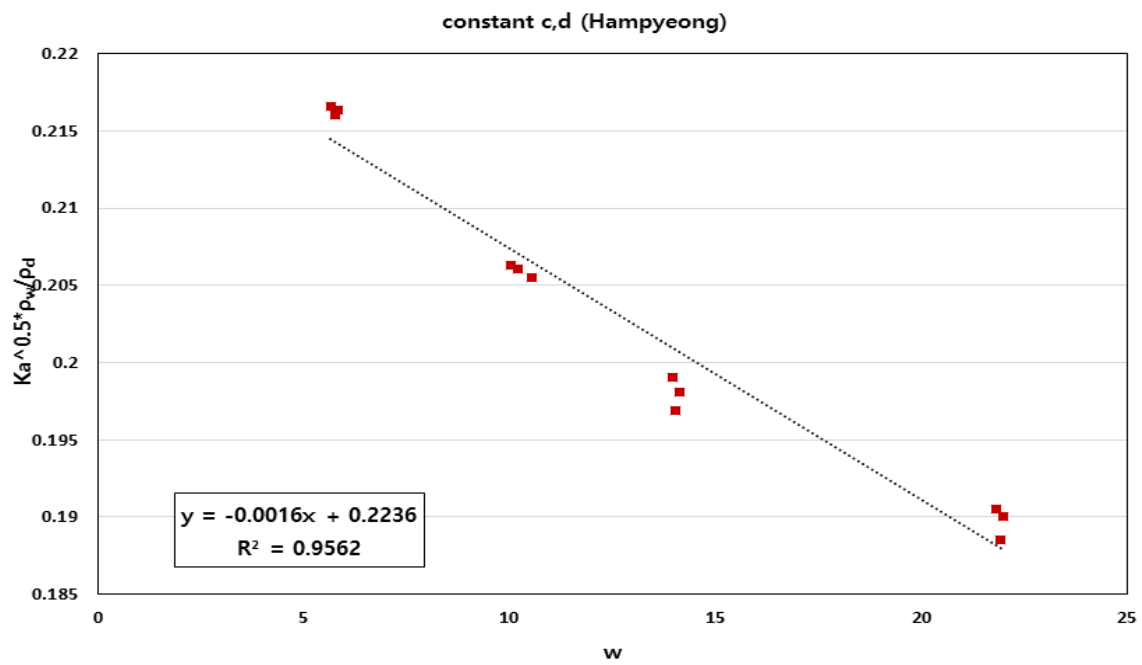
본 연구에서는 여섯 가지의 시료를 통해 함수비와 건조밀도의 변화에 따라 Flat TDR의 신호를 확인하였다. 시료별 유전상수와 전기전도도를 측정하여 도출하였으며, 유전상수는 식(2.5), 전기전도도는 전기전도도 보정실험을 통해 도출된 식(2.25)을 이용하였다.

각 시료의 유전상수 및 전기전도도와 함수비 관계에 따른 선형회귀분석을 수행하였으며, 이를 통해 현장 지반의 고유 특성을 나타낼 시료별 특정상수를 도출하였고, Flat TDR로 건조밀도 및 함수비를 산정하는 식 (2.16), 식 (2.17)에 사용하였다.

그림 4.1~4.6은 현장 대상지반 6개소의 특성 상숫값 a, b, c, d의 관계를 나타낸 것이다.

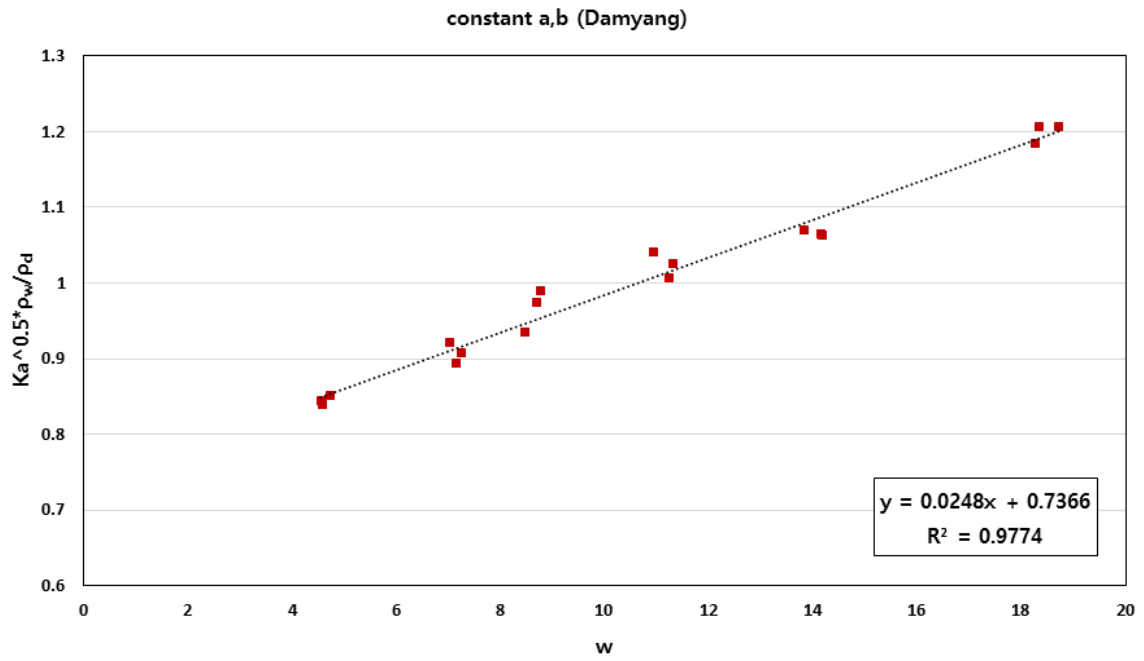


(a) 보정계수 a & b

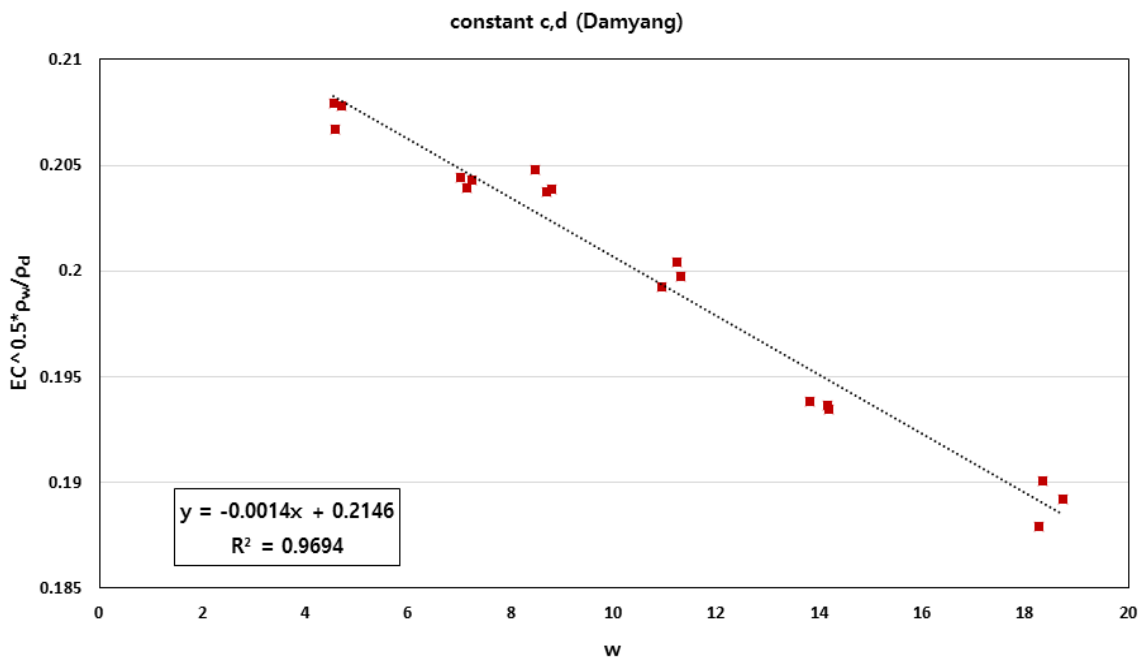


(b) 보정계수 c & d

그림 4.1 대상현장의 특정상숫값 - 함평

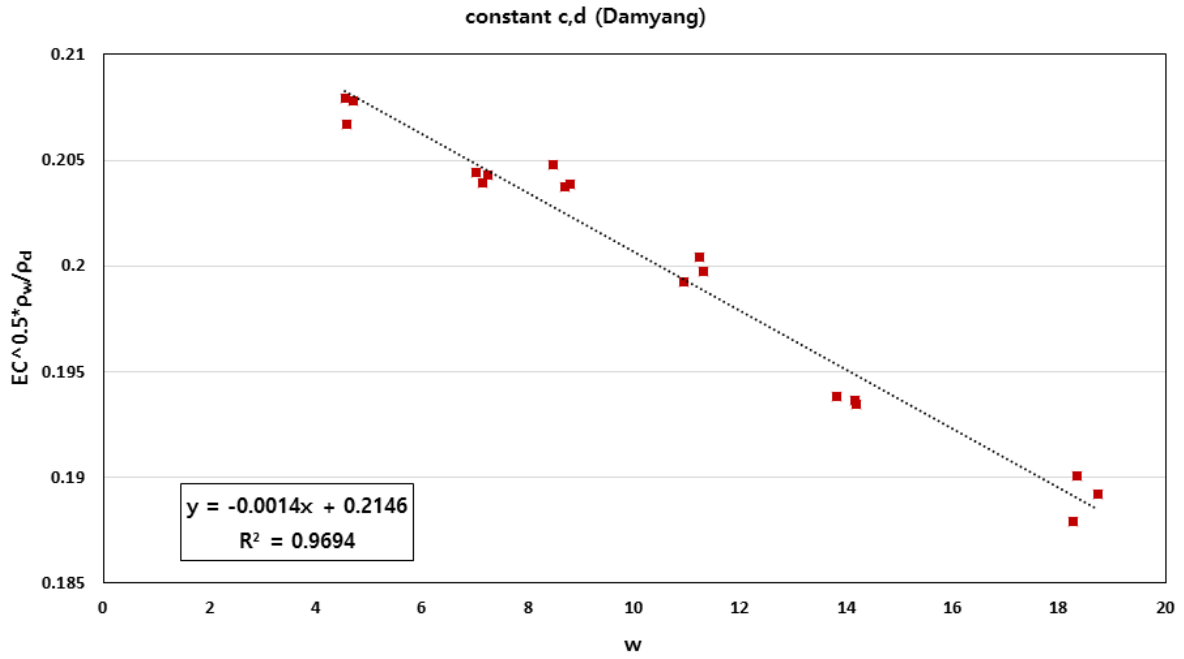


(a) 보정계수 a & b

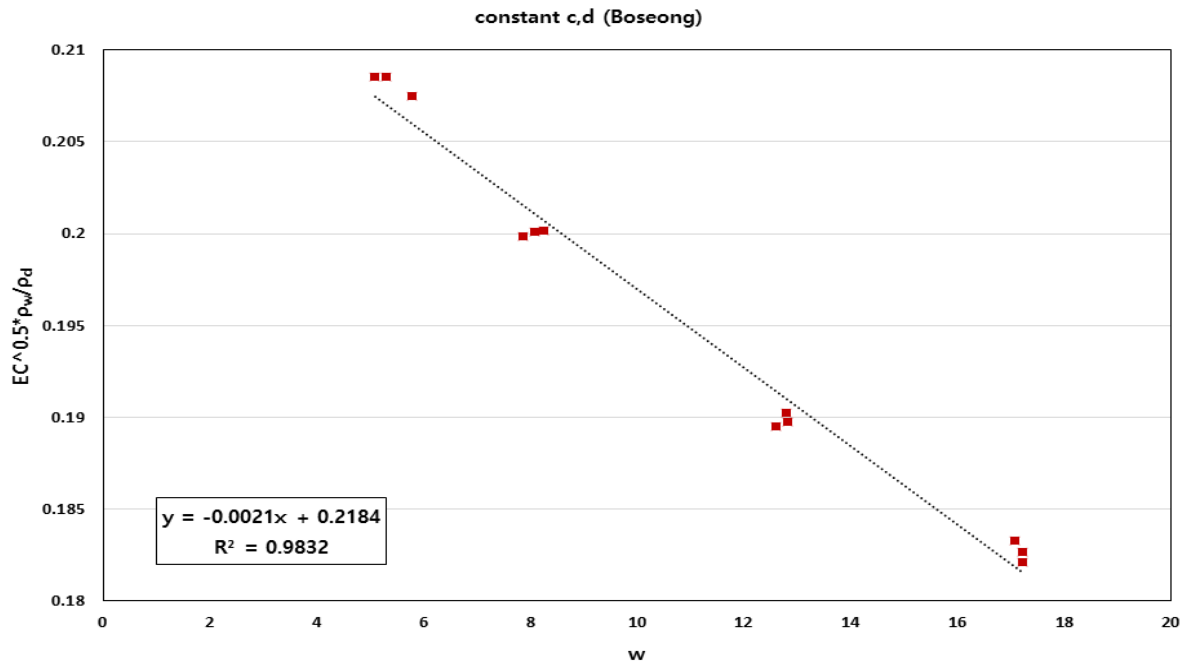


(b) 보정계수 c & d

그림 4.2 대상현장의 특정상숫값 - 담양

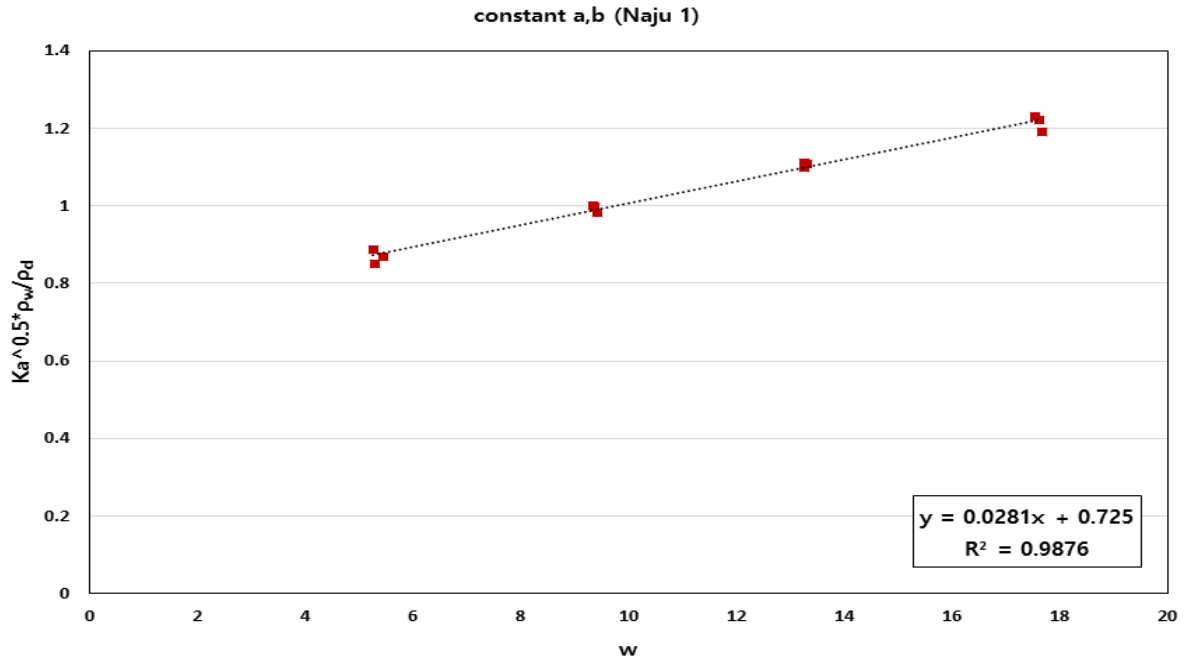


(a) 보정계수 a & b

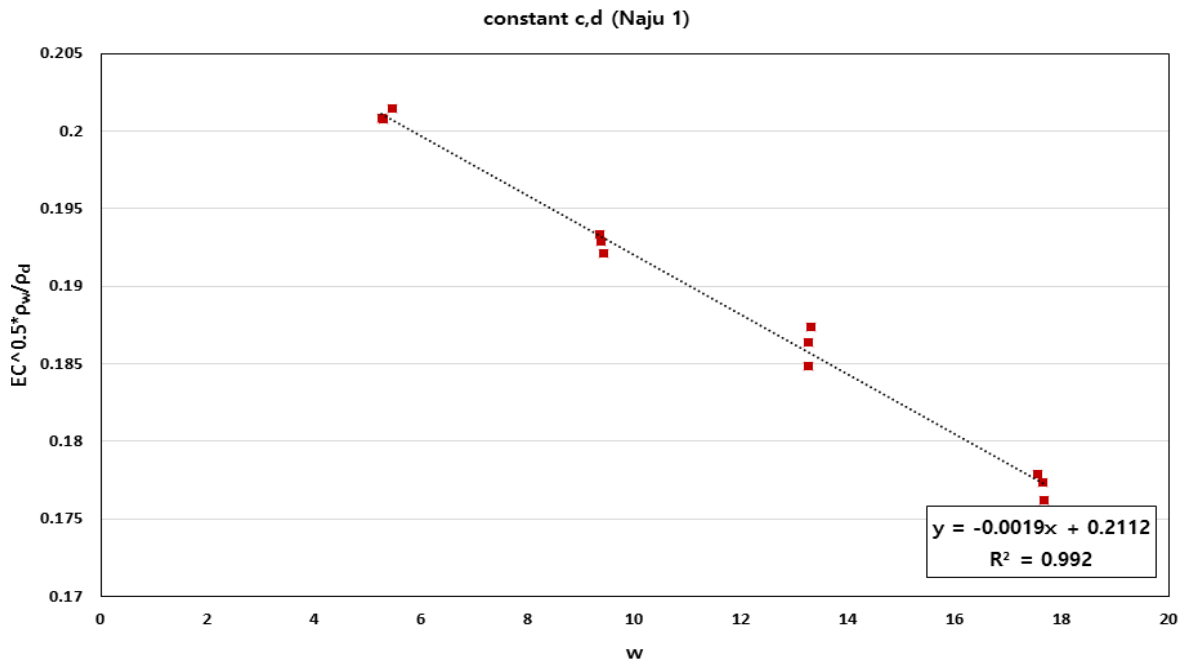


(b) 보정계수 c & d

그림 4.3 대상현장의 특정상숫값 - 보성

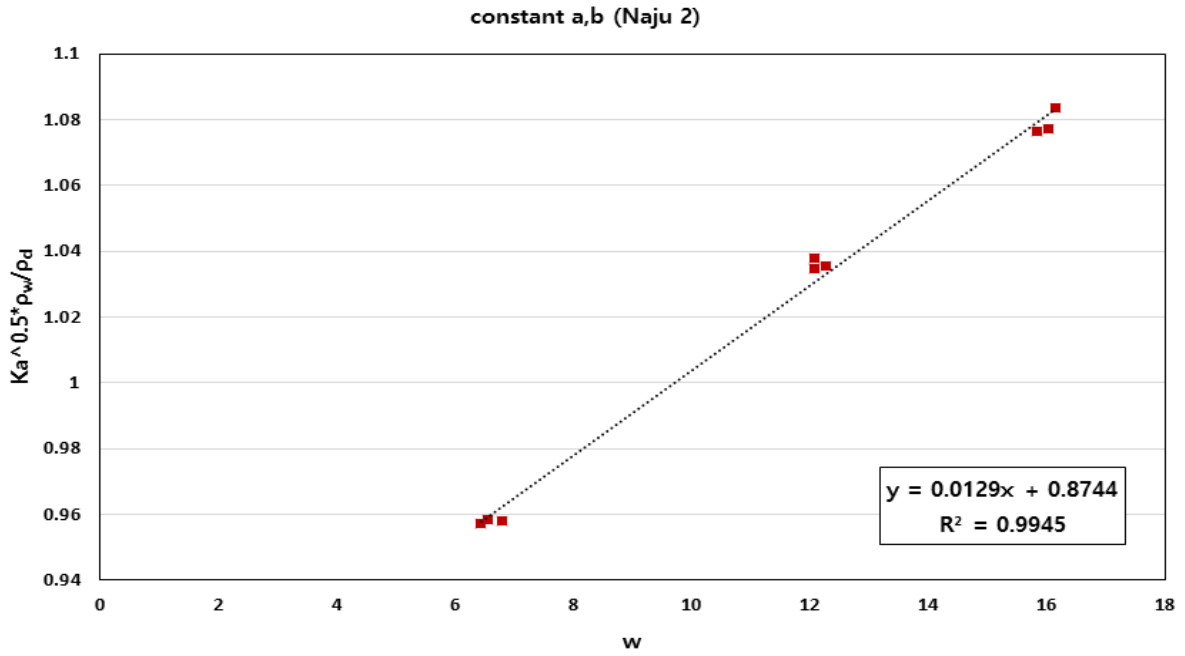


(a) 보정계수 a & b

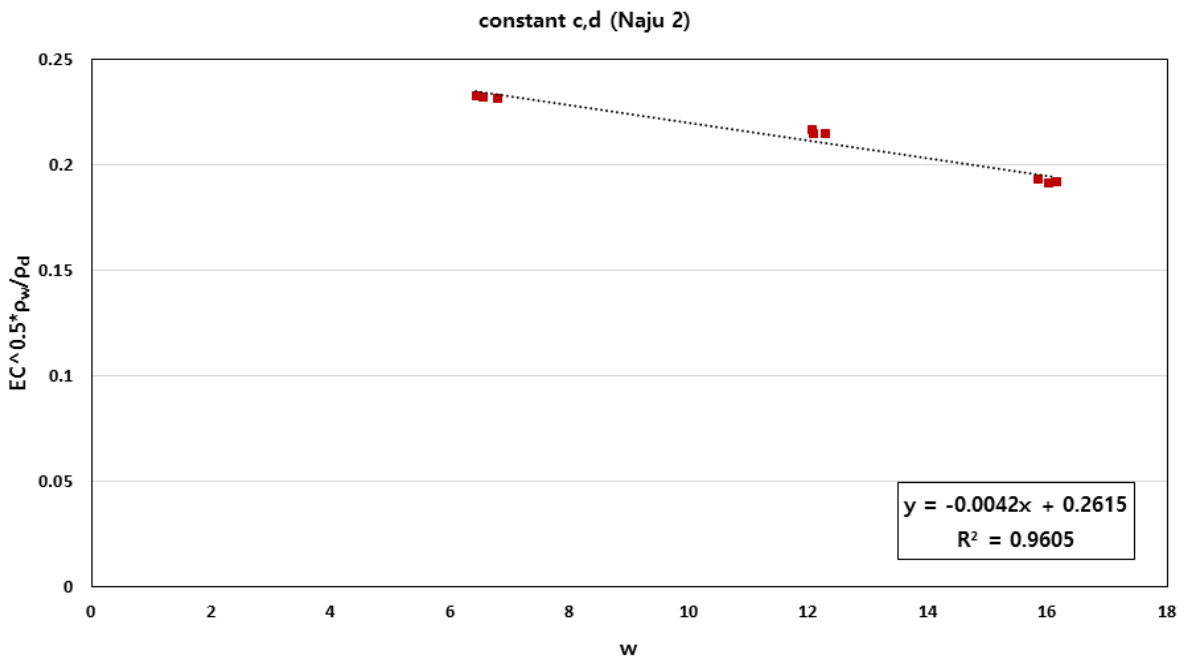


(b) 보정계수 c & d

그림 4.4 대상현장의 특정상숫값 - 나주1



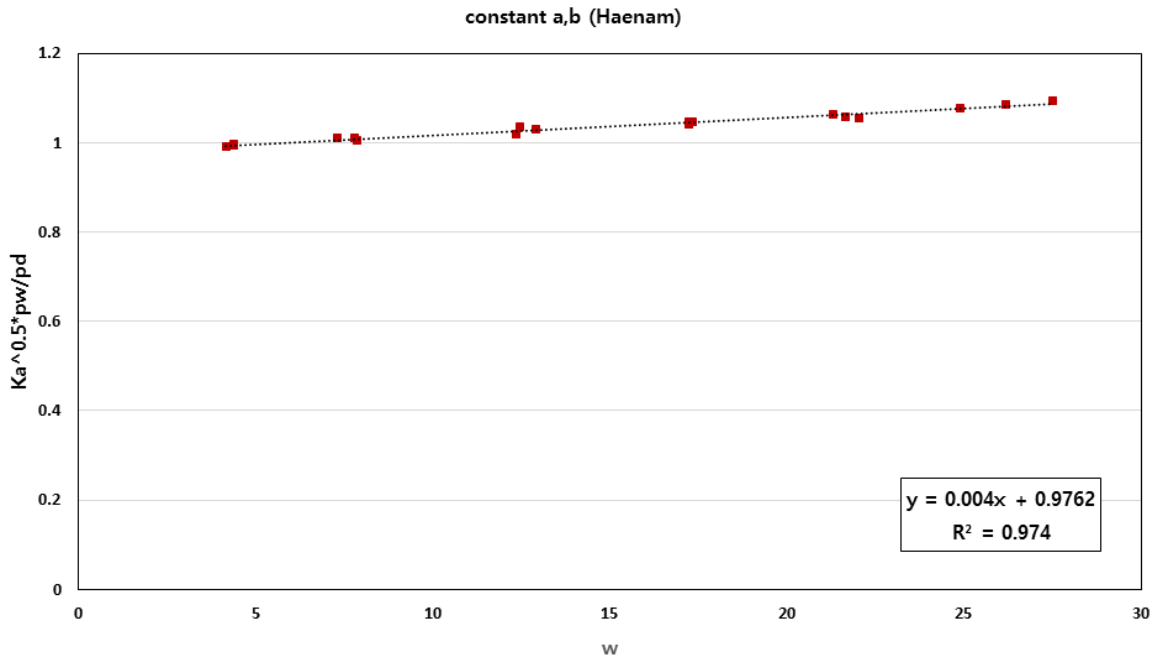
(a) 보정계수 a & b



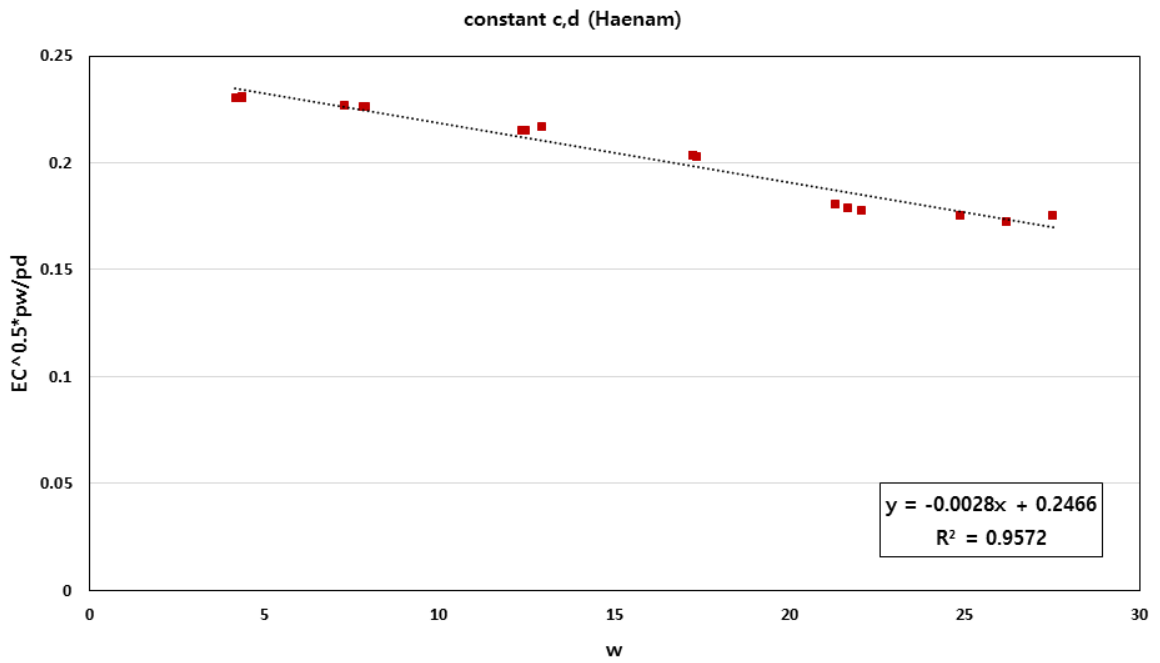
(b) 보정계수 c & d

그림 4.5 대상현장의 특정상숫값 - 나주2





(a) 보정계수 a & b



(b) 보정계수 c & d

그림 4.6 대상현장의 특정상숫값 - 해남

표 4.1은 본 연구에서 선정된 현장 대상지반 6개소와 기존 선행연구에서 수행된 현장 대상지반 8개소의 시료의 특정상숫값을 나타낸 것이다.

**표 4.1 각 현장시료의 특성상수 측정값 및 물성치에 따른 분류**

Classification	USCS	a	b	c	d	OMC (%)	$\gamma_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )
Joomoonjin	SP	1.03	0.0282	0.2511	-0.001	-	1.568
Seomjingang	SP	1.0437	0.0312	0.2403	-0.001	8.4	1.592
Gyeongju	SP	1.0964	0.0251	0.2673	-0.0005	12.4	1.571
Naju 1	SW	0.725	0.0281	0.2112	-0.0019	14.5	1.780
Naju 2	SW	0.8744	0.0129	0.2615	-0.0042	19.0	1.679
Ilsan	SW	0.7314	0.0184	0.1815	-0.0007	11.0	2.062
Hampyeong	SM	0.9445	0.0089	0.2236	-0.0016	14.4	1.791
Danyang	SM	0.7366	0.0248	0.2146	-0.0014	12.4	1.841
Boseong	SM	0.9371	0.0116	0.2184	-0.0021	14.8	1.794
Haenam	SM	0.9762	0.004	0.2466	-0.0028	19.2	1.681
Wonju	SM	1.0588	0.0256	0.2512	-0.0031	10.9	1.669
Okgwa	SM	1.0054	0.029	0.251	-0.0011	11.4	1.676
Gangjin	SM	0.818	0.0198	0.2466	-0.0039	10.1	1.862
Ulju	SM	0.594	0.0518	0.2143	-0.0009	12.5	1.863

총 14개소 현장시료에 대하여 통일분류법을 기준으로 흙을 분류하였고, 분석결과 SP시료 3개소, SW시료 3개소, SM시료 8개소로 분류하였다. 또한, 흙의 기본 물성값인 OMC와  $\gamma_{dmax}$ 와 비교·분석을 통해 특정상숫값의 범위를 확인하고 각 시료별 평균값을 도출하였다.

SP시료의 a값은 1.03~1.0964, b값은 0.0251~0.0312, c값은 0.2403~0.2673, d값은

- 0.001 ~ -0.0005로 확인되었고, 각 특정상수의 평균값은 a는 1.0567, b는 0.0282, c는 0.2529, d는 -0.0008로 도출되었다. 또한 *OMC*의 범위는 8.4~12.4%로 평균값은 6.97%,  $\gamma_{dmax}$ 의 범위는 1.568~1.592g/cm<sup>3</sup>으로 평균값은 1.577g/cm<sup>3</sup>임을 확인하였다.

SW시료의 경우 a값은 0.725~0.8744, b값은 0.0129~0.0281, c값은 0.1815~0.2615, d값은 -0.0042~-0.0007로 확인되었고, 각 특정상수의 평균값은 a는 0.7769, b는 0.0198, c는 0.2181, d는 -0.0023으로 도출되었다. 또한 *OMC*의 범위는 11~19%로 평균값은 14.8%을 나타냈고,  $\gamma_{dmax}$ 의 범위는 1.679~2.062g/cm<sup>3</sup>로 평균값은 1.840g/cm<sup>3</sup>임을 확인하였다.

SM시료의 경우 a값은 0.5940~0.10588, b값은 0.0040~0.0518, c값은 0.2143~0.2512, d값은 -0.0039~-0.0009로 확인되었고, 각 특정상수의 평균값은 a는 0.8838, b는 0.0219, c는 0.2333, d는 -0.0021으로 도출되었다. 또한 *OMC*의 범위는 10.1~30.4%로 평균값은 13.2%을 나타냈고,  $\gamma_{dmax}$ 의 범위는 1.669~1.863g/cm<sup>3</sup>로 평균값은 1.772g/cm<sup>3</sup>임을 확인하였다.

이 결과를 바탕으로 각 시료별 특정상수의 평균값과 *OMC* 및  $\gamma_{dmax}$  값을 비교·분석한 결과, *OMC*와  $\gamma_{dmax}$ 의 평균값이 가장 큰 SW시료가 *OMC*와  $\gamma_{dmax}$ 의 평균값이 가장 작은 SP시료보다 각각 53%, 14% 높게 나타났다. 또한 특정상수 a, b, c, d의 평균값이 가장 작은 SW시료는 특정상수 a, b, c, d의 평균값이 가장 큰 SP시료 보다 각각 26%, 30%, 14%, 65% 작은 값을 나타내었다.

이를 통해 *OMC*와  $\gamma_{dmax}$ 의 평균값이 클수록 특정상수 a, b, c, d가 작아짐을 확인할 수 있었으며, 흙의 기본 물성값이라고 할 수 있는 *OMC*와  $\gamma_{dmax}$  값이 시료 고유의 특성을 나타내는 특정상숫값 유추하는데 영향을 주는 것을 확인하였다.

표 4.2는 각 시료별 특정상숫값과 *OMC*,  $\gamma_{dmax}$ 의 평균값을 나타낸 것이다.

표 4.2 각 현장시료의 특정상숫값, *OMC*,  $\gamma_{dmax}$ 의 평균값

Classification	a	b	c	d	<i>OMC</i> (%)	$\gamma_{d,max}$ (g/cm <sup>3</sup> )
SP	1.0567	0.0282	0.2529	-0.0008	6.9	1.577
SW	0.7769	0.0198	0.2181	-0.0023	14.8	1.840
SM	0.8838	0.0219	0.2333	-0.0021	13.2	1.772

(2) 함수비 측정 검증 결과

본 연구에서는 Flat TDR을 이용하여 유전상수와 전기전도도, 각 시료의 특성상수 값을 도출하여 함수비를 측정하였으며, 실제 함수비 값을 측정하여 Flat TDR의 측정값과 비교하여 정밀도를 분석하였다.

함수비 측정결과는 총 14개소 시료에 대하여 분석하였으며, 본 연구에서는 통일분류법에 따라 흙을 분류하여 그 정밀도를 확인하였다. 14개소 지반의 시료 중 SP 시료는 3개소, SW시료는 3개소, SM시료는 8개소로 분류할 수 있다.

실내다짐시험과 동일한 조건으로 Flat TDR몰드에 다짐시험을 수행하고, 해당 함수비 구간마다 Flat TDR 측정하였으며, 그 결괏값 측정값으로 하였다. 또한, Flat TDR 몰드 다짐시험 후 몰드에서 채취한 시료의 함수비를 도출하여 각 시료별 함수비 실측값으로 하였다.

그림 4.7은 Flat TDR을 이용하여 14개소 현장시료 중 SW시료에 대한 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. 분석결과, 그림 4.7과 같이 실측값과 Flat TDR측정값이 약 0.6% 차이를 보였으며, 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 나타내었다.

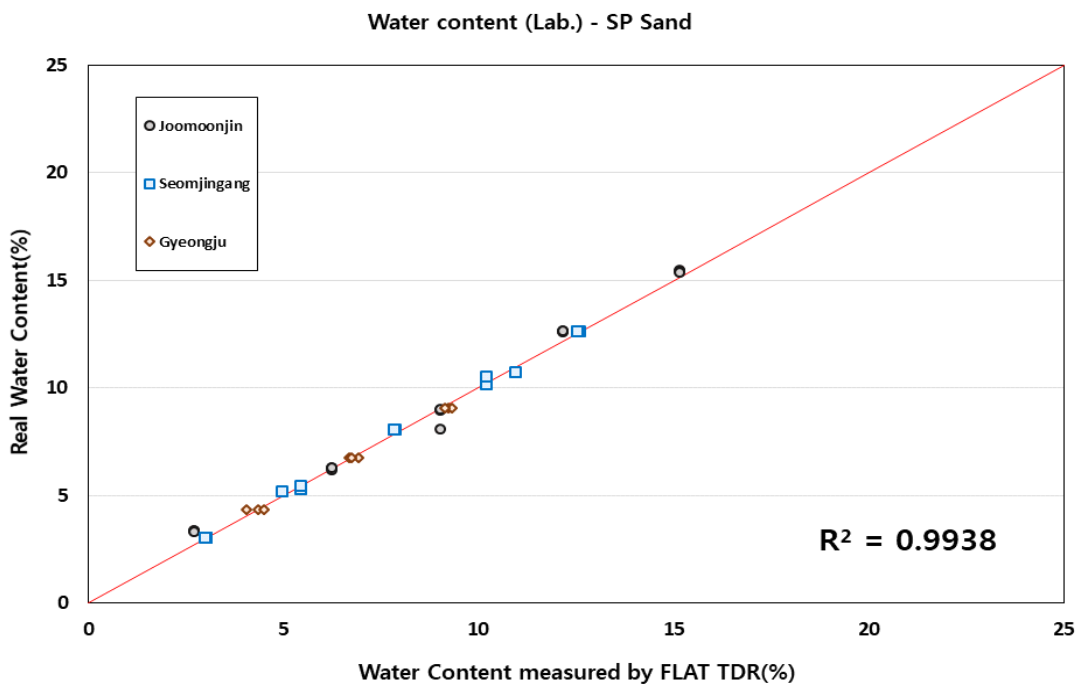


그림 4.7 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - SP Sand

그림 4.8은 Flat TDR을 이용하여 14개소 현장시료 중 SW시료에 대한 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다.

SP시료와 마찬가지로 실내다짐시험과 동일한 조건으로 Flat TDR몰드에 다짐시험을 수행하고, 해당 함수비 구간마다 Flat TDR 측정하였으며, 그 결과값 측정값으로 하였다. 또한, Flat TDR몰드 다짐시험 후 몰드에서 채취한 시료의 함수비를 도출하여 각 시료별 함수비 실측값으로 하였다.

분석결과, 그림 4.8과 같이 실측값과 Flat TDR측정값이 약 0.7%차이를 보였으며, 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 나타내었다.

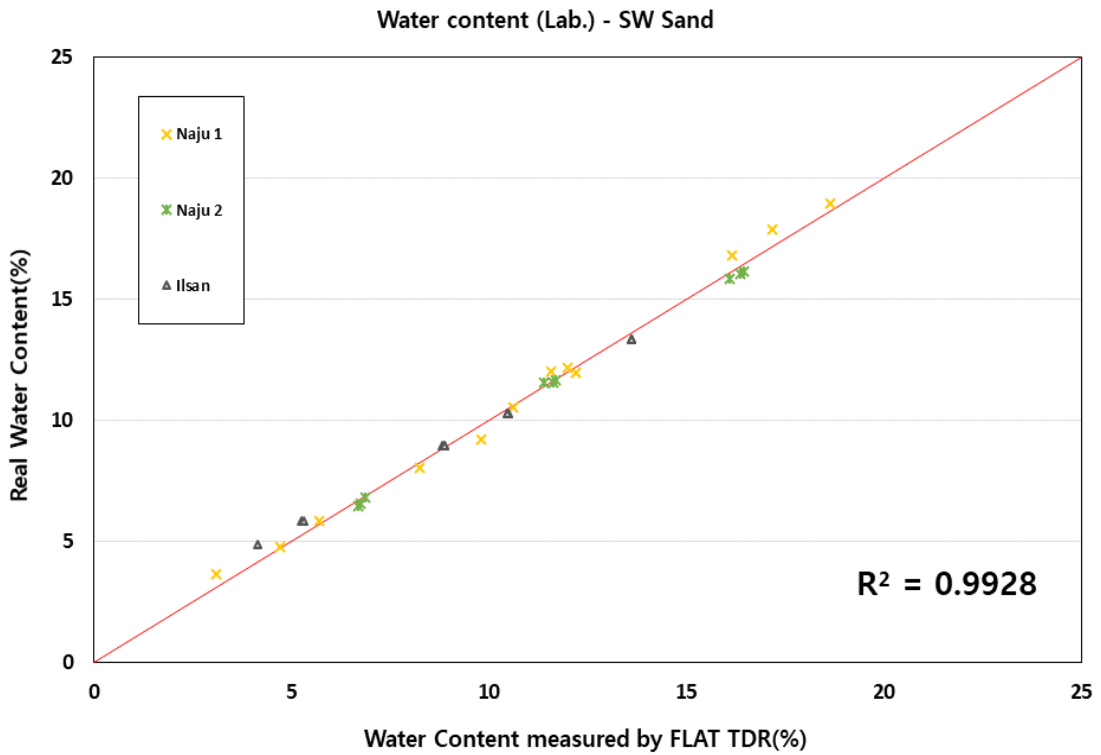


그림 4.8 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - SW Sand

그림 4.9는 Flat TDR을 이용하여 14개소 현장시료 중 SM시료에 대한 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다.

앞선 두 개의 시료와 마찬가지로 SM시료에 대한 실내다짐시험과 동일한 조건으로 Flat TDR몰드에 다짐시험을 수행하였다. 해당 함수비 구간마다 Flat TDR 측정하였으며, 그 결과값 측정값으로 하였다. 또한, Flat TDR몰드 다짐시험 후 몰드에서 채취한 시료의 함수비를 도출하여 각 시료별 함수비 실측값으로 하였다.

분석결과, 그림 4.9과 같이 실측값과 Flat TDR측정값이 약 0.9%차이를 보였으며, 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 나타내었고, SM시료 또한 앞의 두 시료와 비슷한 오차범위를 보였다.

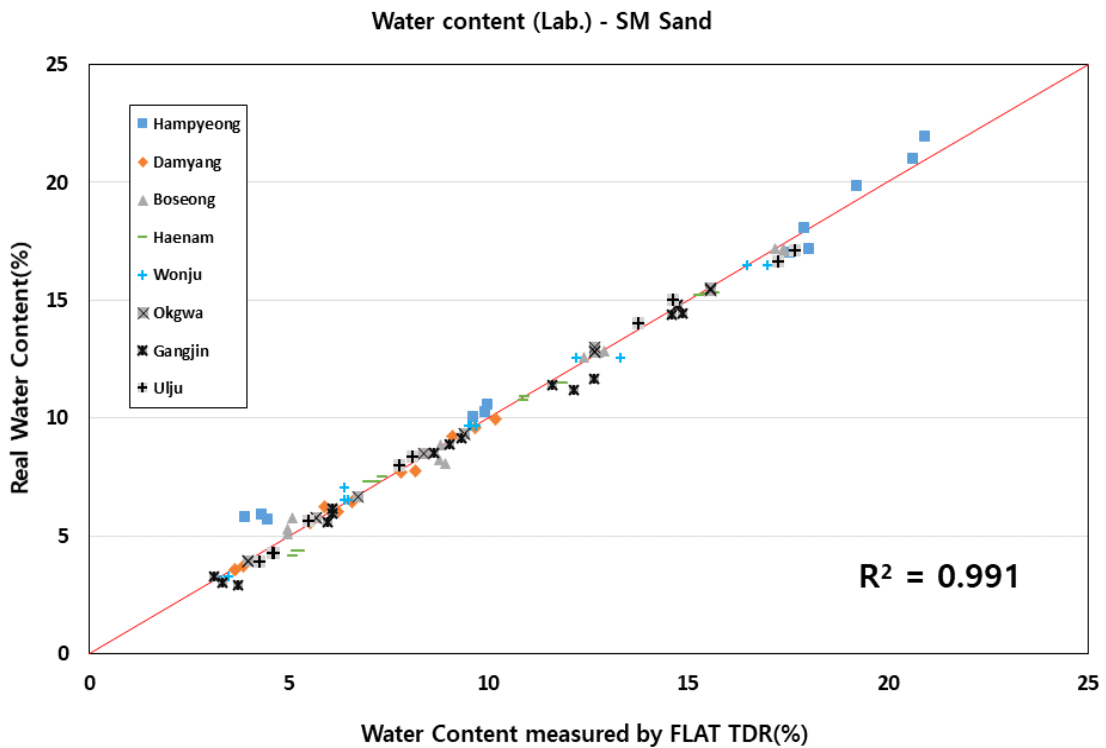


그림 4.9 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - SM Sand

그림 4.10은 Flat TDR을 이용한 14개소 현장시료의 함수비 측정 결과를 하나의 그래프 상에 나타낸 것이다.

SP, SW, SM시료의 분석 결과, 실험을 수행한 함수비의 구간은 약 3~25%로 나타났다. 이 구간에서 각 시료의 실측값과 Flat TDR측정값의 차이는 약 0.6~0.9%의 차이를 보였고, 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 띄었다.

14개소 현장 시료의 실내실험결과를 종합적으로 검토한 결과, 앞선 분석 결과와 마찬가지로 실측값과 Flat TDR측정값은 그래프 1:1선에 벗어나지 않는 형태를 나타내었으며, 약 0.8%의 차이를 보였다. 이는 기존 선행연구결과들의 오차범위와 크게 차이나지 않는 결과이며, 실측값과 TDR측정값은 큰 차이를 나타내지 않는 것을 의미하므로 실내실험에서의 함수비 측정은 검증되었다고 할 수 있다.

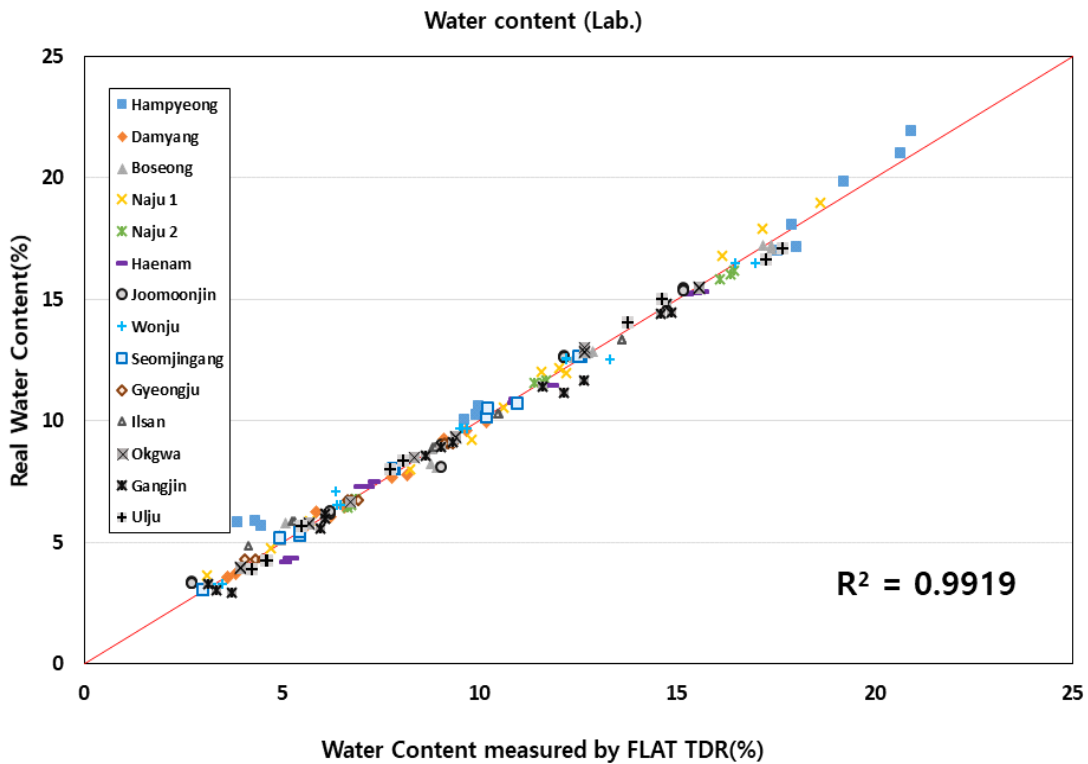


그림 4.10 Flat TDR을 이용한 함수비 측정 결과 - 14개 시료

(3) 건조밀도 측정 결과

Flat TDR으로 측정한 유전상수와 전기전도도를 이용해 건조밀도를 도출하였고 실제 습윤밀도를 측정한 값과 함수비 시험을 통해 얻은 함수비를 통해 건조밀도를 도출하여 Flat TDR의 측정값과 실측값을 비교하였다.

건조밀도 또한 측정결과는 총 14개소 시료에 대하여 분석하고자 본 연구에서는 통일분류법에 따라 14개소 지반의 시료를 SP 시료는 3개소, SW시료는 3개소, SM 시료는 8개소로 분류하여 그 정밀도를 분석하였다.

함수비 측정 실험과 마찬가지로, 실내다짐시험과 동일한 조건으로 Flat TDR몰드에 다짐시험을 수행하고, 해당 함수비 구간마다 Flat TDR의 건조밀도 값을 측정하였으며 그 결괏값 측정값으로 하였다. 또한, Flat TDR몰드 다짐시험 후, 몰드의 무게를 측정하여 몰드의 부피와 함께 습윤밀도를 도출하였고, 함수비시험을 통해 얻은 함수비를 통해 건조밀도를 구하여 각 시료별 건조밀도 실측값으로 하였다.

그림 4.11은 Flat TDR을 이용하여 14개소 현장시료 중 SP시료에 대한 건조밀도 측정 결과를 나타낸 것이다. 분석결과, 실측값과 Flat TDR측정값이 약 1.2% 차이를 보였으며, 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 나타내었다.

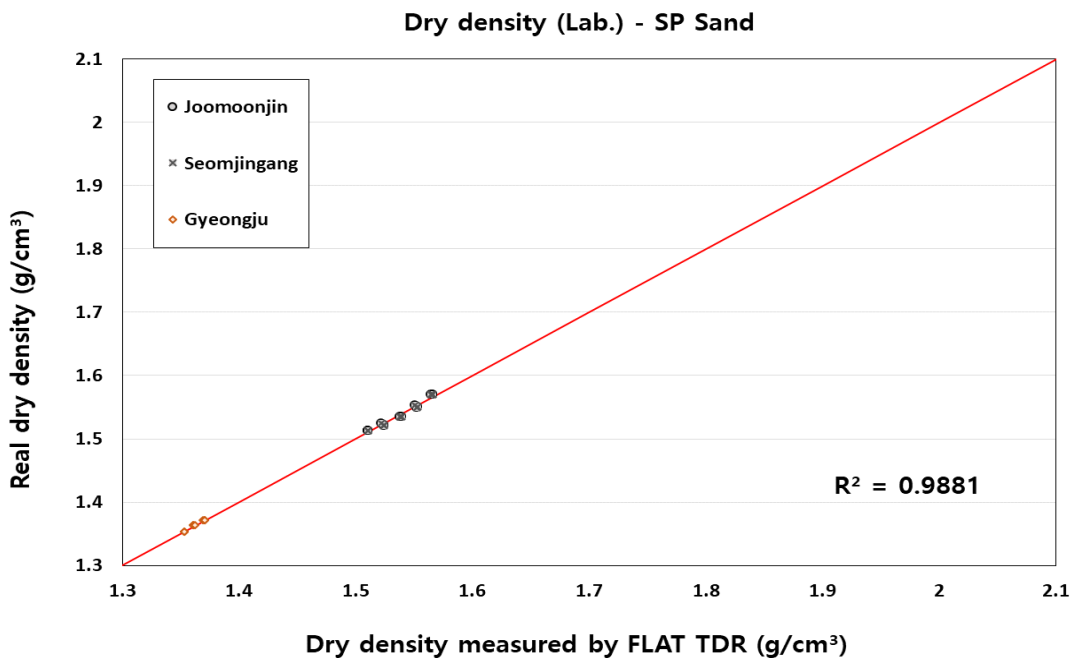


그림 4.11 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - SP Sand



그림 4.12는 Flat TDR을 이용하여 14개소 현장시료 중 SW시료에 대한 건조밀도 측정 결과를 나타낸 것이다.

SP시료와 마찬가지로 실내다짐시험과 동일한 조건으로 Flat TDR몰드에 다짐시험을 수행하였으며, 해당 함수비 구간마다 Flat TDR의 건조밀도 값을 측정하여 그 결괏값을 측정값으로 하였다. 또한, Flat TDR몰드 다짐시험 후 몰드의 무게를 측정하여 몰드의 부피와 함께 습윤밀도를 도출하였고, 함수비시험을 통해 얻은 함수비를 통해 건조밀도를 구하여 각 시료별 건조밀도 실측값으로 하였다.

분석 결과, SW시료의 경우 실측값과 Flat TDR측정값이 약 1.3% 차이를 보였으며, 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 나타내었다.

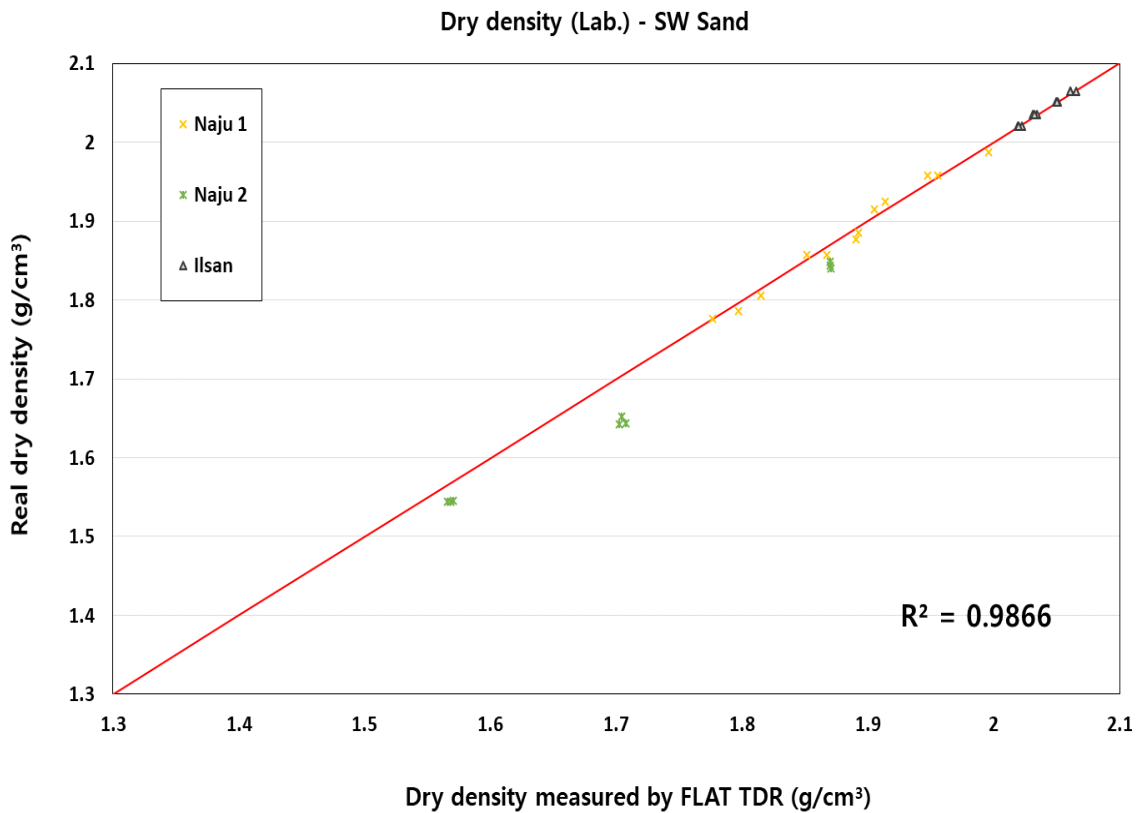


그림 4.12 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - SW Sand

그림 4.13은 Flat TDR을 이용하여 14개소 현장시료 중 SM시료에 대한 건조밀도 측정 결과를 나타낸 것이다.

앞선 두 시료와 마찬가지로, 실내다짐시험과 동일한 조건으로 Flat TDR몰드에 다짐시험을 수행하였으며, 해당 함수비 구간마다 Flat TDR의 건조밀도 값을 측정하여 그 결괏값을 측정값으로 하였다. 또한, Flat TDR몰드 다짐시험 후 몰드의 무게를 측정하여 몰드의 부피와 함께 습윤밀도를 도출하였으며, 함수비시험을 통해 얻은 함수비를 통해 건조밀도를 구하여 각 시료별 건조밀도 실측값으로 하였다.

분석 결과, SM시료의 경우 실측값과 Flat TDR측정값이 약 1.6% 차이를 보였으며, 앞선 두 시료와 마찬가지로 1:1 그래프 상에 고루 분포하는 형태를 나타내었다.

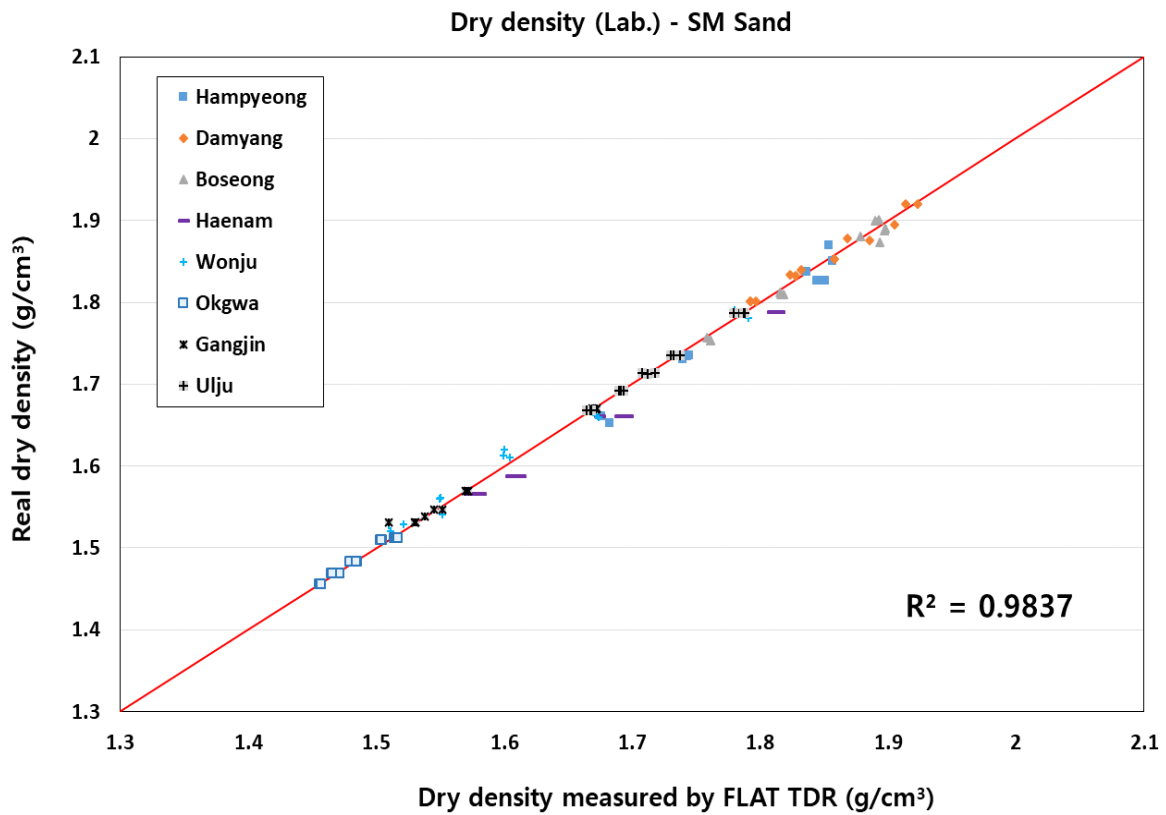


그림 4.13 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - SM Sand

그림 4.14는 Flat TDR을 이용한 14개소 현장시료의 건조밀도 측정 결과를 하나의 그래프상에 나타낸 것이다.

SP, SW, SM시료의 분석 결과, 실험을 수행한 건조밀도의 구간은 약 1.3~2.1g/cm<sup>3</sup>로 나타났다. 이 구간에서 각 시료의 실측값과 Flat TDR 측정값의 차이는 약 1.2~1.6%의 차이를 보였고, 1:1 그래프상에 고루 분포하는 형태로 분석되었다.

14개소 현장 시료의 건조밀도 실내실험결과를 종합적으로 검토한 결과, 실측값과 Flat TDR 측정값은 그래프 1:1선에 벗어나지 않는 형태를 나타내었으며, 약 1.2%의 차이를 보였다. 이는 기존 선행연구결과들의 오차범위보다 작은 결과이며, 실측값과 TDR측정값은 큰 차이를 나타내지 않는 것을 의미하므로 실내실험에서의 건조밀도 측정은 함수비와 마찬가지로 검증되었다고 할 수 있다.

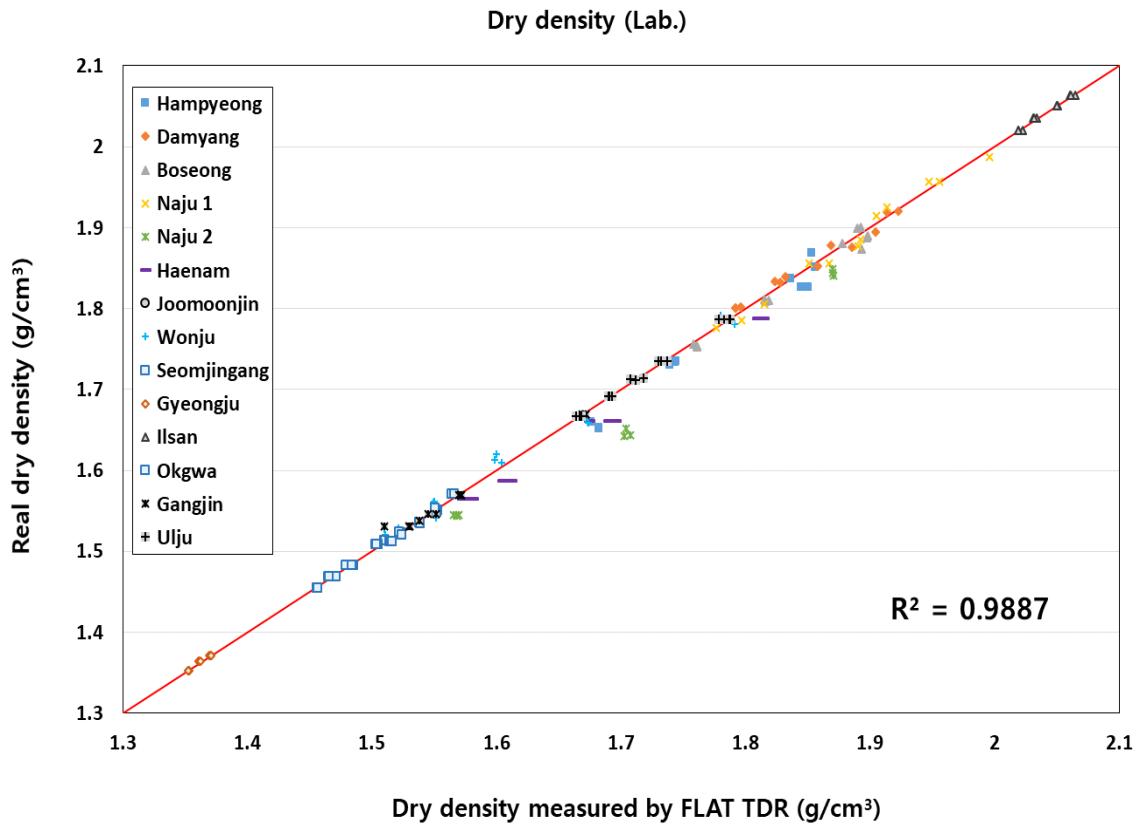


그림 4.14 Flat TDR을 이용한 건조밀도 측정 결과 - 14개 시료

### 4.1.2 실내 전단파속도 측정

#### (1) 함수비에 따른 전단파속도 분석

본 연구에서는 Flat TDR에 결합된 전단파 측정 장치인 Piezo-stack의 측정값을 확인하기 위해 10개 현장시료에 대해 함수비에 따른 전단파속도를 측정하였다.

실험시료는 6개 현장시료에 대해 실험을 수행하였으며, 기존에 연구되었던 4개 현장시료의 결과값을 추가로 비교·분석하였다.

주파수 0.01kHz로 전단파를 입력하였고, 그에 따른 출력신호를 확인하여 도달시간을 산정하였다. 도달시간은 초동추정방법을 이용하였고, 전단파 발생장치와 수신기 사이의 거리는 5cm로 하여 전단파속도를 산정하였다.

그림 4.15는 실험을 통하여 얻은 전단파 신호 그래프 개형이며, 표 4.3과 표 4.4는 실내 실험에서 도출된 각 시료별 도달시간 및 전단파속도이다. 또한, 그림 4.16~4.17은 함수비에 따른 각 시료별 전단파 속도를 나타낸 그래프이다

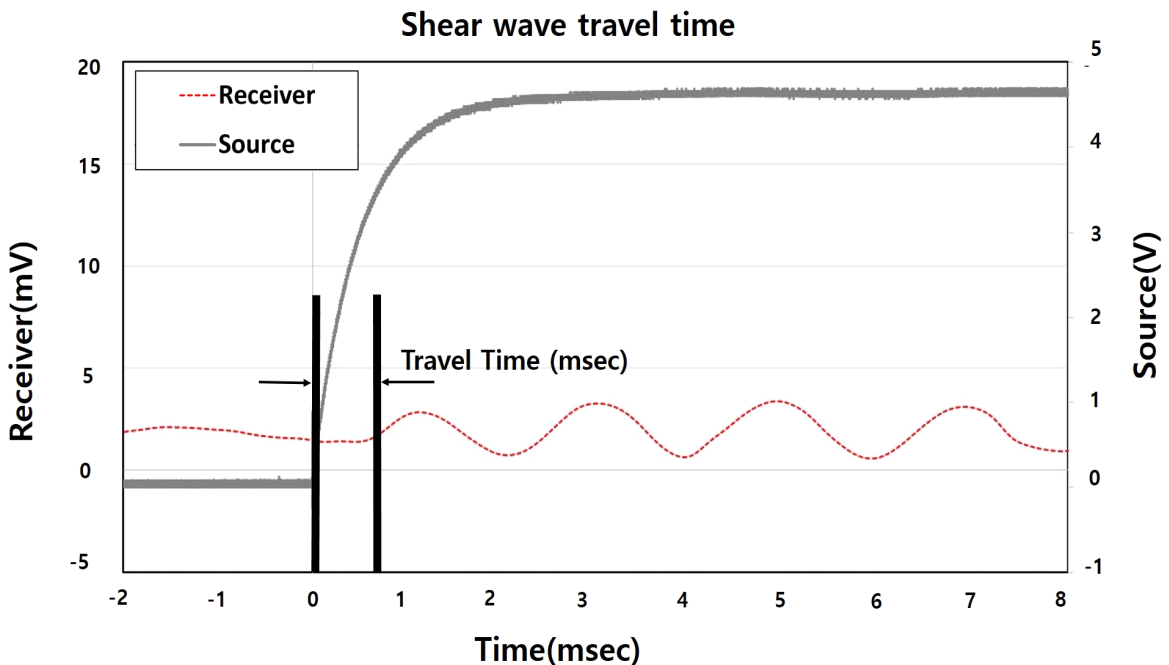


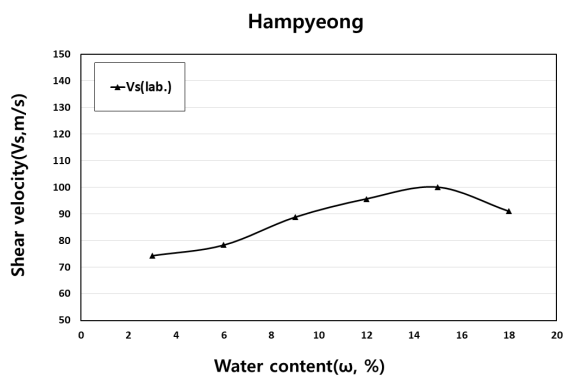
그림 4.15 전단파 신호 분석 그래프 개형

표 4.3 각 현장시료의 도달시간

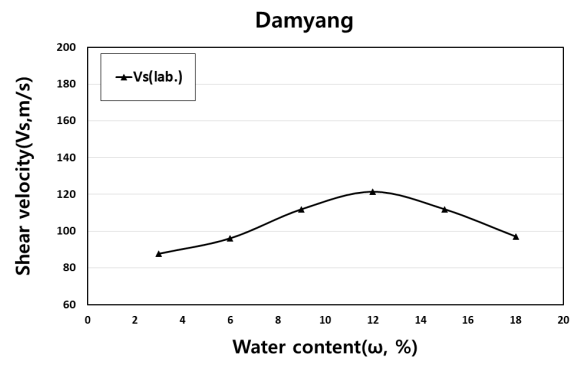
$T_r$ (msec)		3%	6%	9%	12%	15%	18%
This Study	Hampyeong	0.6719	0.6379	0.563	0.5227	0.4998	0.5493
	Damyang	0.5693	0.5199	0.4468	0.4121	0.4468	0.5149
	Boseong	0.5157	0.4479	0.3659	0.3577	0.4190	-
	Naju 1	0.5257	0.4804	0.4168	0.4092	0.4713	-
	Naju 2	0.6344	0.5374	0.483	0.4503	0.3890	0.4349
	Haenam	0.5596	0.4768	0.4501	0.4276	0.4223	0.4496
Previous Studies	Wonju	0.4054	0.2782	0.2646	0.3046	0.3326	-
	Seomjingang	0.2798	0.2220	0.2410	0.2746	0.2866	-
	Gyeongju	0.4076	0.333	0.2668	0.2785	0.3193	-
	Ilsan	0.5176	0.3204	0.2796	0.3689	0.4974	-

표 4.4 각 현장시료의 전단파 속도

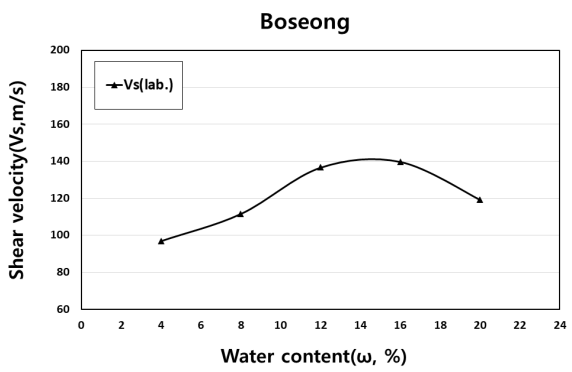
$V_s$ (m/s)		3%	6%	9%	12%	15%	18%
This Study	Hampyeong	74.42	78.38	88.81	95.66	100.04	91.02
	Damyang	87.83	96.17	111.91	121.33	111.91	97.11
	Boseong	96.96	111.63	136.65	139.78	119.33	-
	Naju 1	95.11	104.08	119.96	122.19	106.09	-
	Naju 2	78.81	93.04	103.52	111.04	128.53	114.97
	Haenam	89.35	104.87	111.09	116.93	118.40	111.21
Previous Studies	Wonju	123.33	179.73	188.96	164.15	150.33	-
	Seomjingang	178.70	225.23	207.47	182.08	174.46	-
	Gyeongju	122.67	150.15	187.41	179.53	156.59	-
	Ilsan	96.60	156.05	178.83	135.54	100.52	-



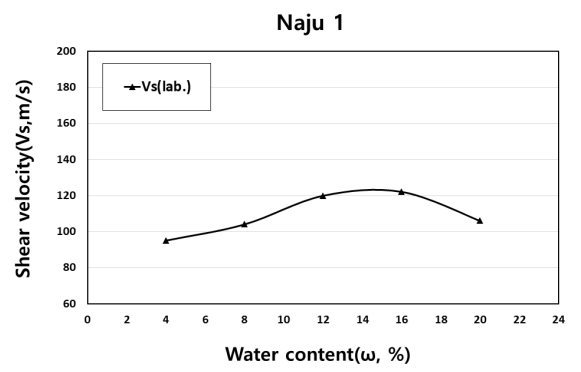
함평



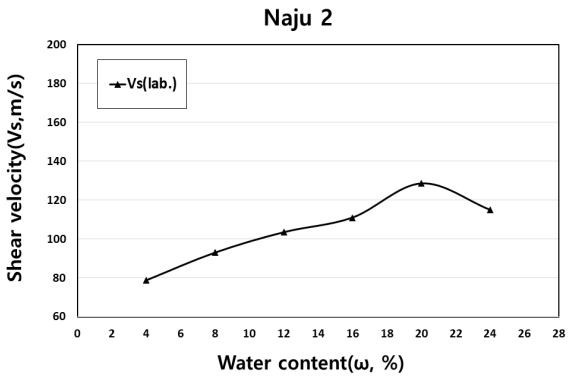
담양



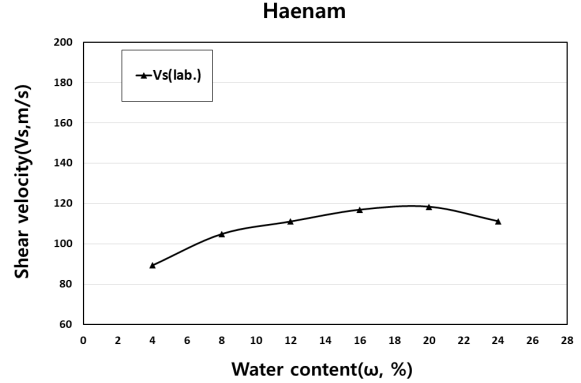
보성



나주1

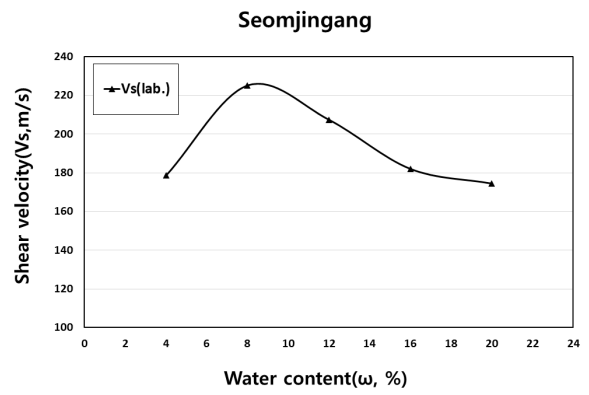
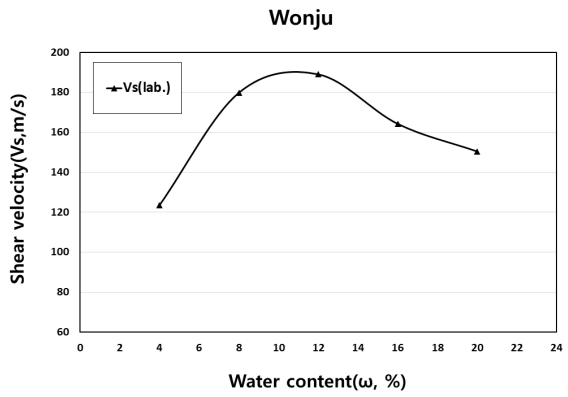


나주2



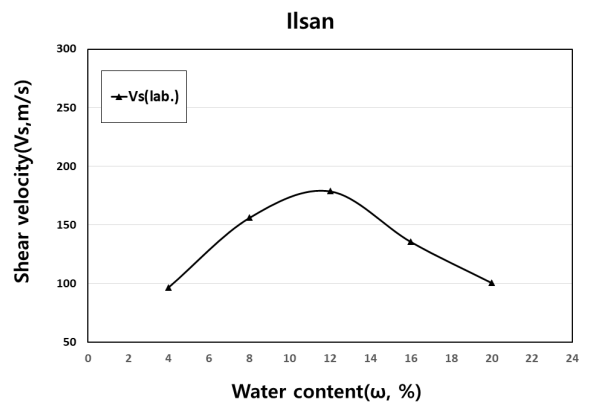
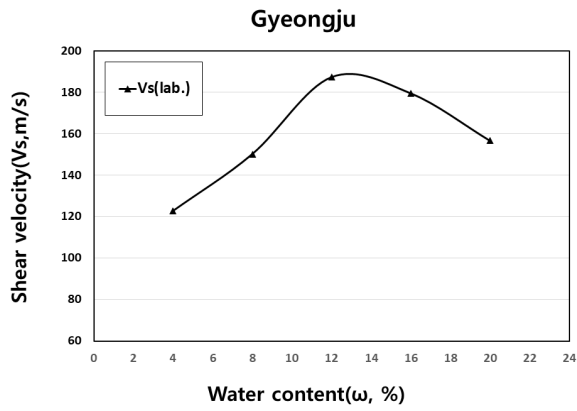
해남

그림 4.16 함수비에 따른 전단파속도 (1)



원주

섬진강



경주

일산

그림 4.17 함수비에 따른 전단파속도 (2)

(2) 재령일에 따른 전단파속도 분석

사질토 시료(SP,SM)에 LW그라우트재를 혼합하여 양생시키고, 재령일에 따라 전단파를 측정함으로써 전단파속도 변화 양상을 도출하였다.

주파수 0.01kHz로 전단파를 입력하였고, 그에 따른 출력 신호를 확인하여 도달시간을 산정하였다. 도달시간은 초동추정방법을 이용하였고, 전단파 발생장치와 수신기 사이의 거리는 5cm로 하여 전단파속도를 산정하였다.

도출된 도달시간과 식 (2.23)을 이용하여 전단파속도를 산출하였고, 결과분석을 통해 재령일이 증가할수록 두 시료 모두 전단파 속도가 증가하는 경향성을 확인할 수 있었다. 특히, 재령 초기의 3~7일사이의 전단파속도 변화의 평균값은 10.16m/s이고, 7일~14일차 이후의 전단파속도 변화의 평균값은 66.00m/s로, 7~14일 차 이후의 전단파속도의 변화가 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

이는 그라우트재를 이용하여 양생한 시료의 전단파 속도가 재령일에 따라 빠르게 측정되는 결과를 보인 연구 결과(박경호, 2015)와, 저수지 제체에 그라우팅 주입 후 전단파속도가 증가하는 양상을 보인 연구 결과(김형신 등, 2021)와 유사한 경향을 보였다.

또한, 전단파 속도와 압축강도의 관계는 지수함수 특성으로 상관성이 매우 높게 나타났다(안지환 등, 2008). LW그라우트재를 혼합한 공시체의 일축압축강도가 초기 재령보다 장기 재령으로 갈수록 편차가 크게 측정되는 선행 연구 결과(최용성 등, 2016)를 통하여, 7일 차 이후 전단파속도가 빠르게 측정되는 것이 타당한 결과로 여겨짐과 동시에 Flat TDR의 전단파속도 측정값의 신뢰성을 확인하였다고 볼 수 있다.

표 4.5는 재령일에 따라 측정한 전단파를 통해 도출한 시료별 도달시간과 전단파속도를 나타낸 것이다.



**표 4.5 재령일에 따른 시료별 도달시간 및 전단파속도**

Classification		Day 3	Day 7	Day 14	Day 28
$T_r$ (msec)	SM90 : LW10	0.8094	0.6672	0.4112	0.2941
	SM80 : LW20	0.6187	0.6264	0.3377	0.2698
	SM70 : LW30	0.5643	0.585	0.3159	0.2560
	SP90 : LW10	0.7004	0.5719	0.3268	0.2832
	SP80 : LW20	0.6051	0.5310	0.2996	0.2723
	SP70 : LW30	0.5447	0.4766	0.2859	0.2669
$V_s$ (m/s)	SM90 : LW10	61.77	74.94	121.60	170.01
	SM80 : LW20	80.81	79.82	148.06	185.32
	SM70 : LW30	88.61	85.47	158.28	195.31
	SP90 : LW10	71.39	87.43	153.00	176.55
	SP80 : LW20	82.63	94.16	166.89	183.62
	SP70 : LW30	91.79	104.91	174.89	187.34

그림 4.18은 재령일에 따른 SM시료의 전단파속도 변화를 나타낸 것이고, 그림 4.19는 SP시료의 전단파속도 변화를 나타낸 것이다.

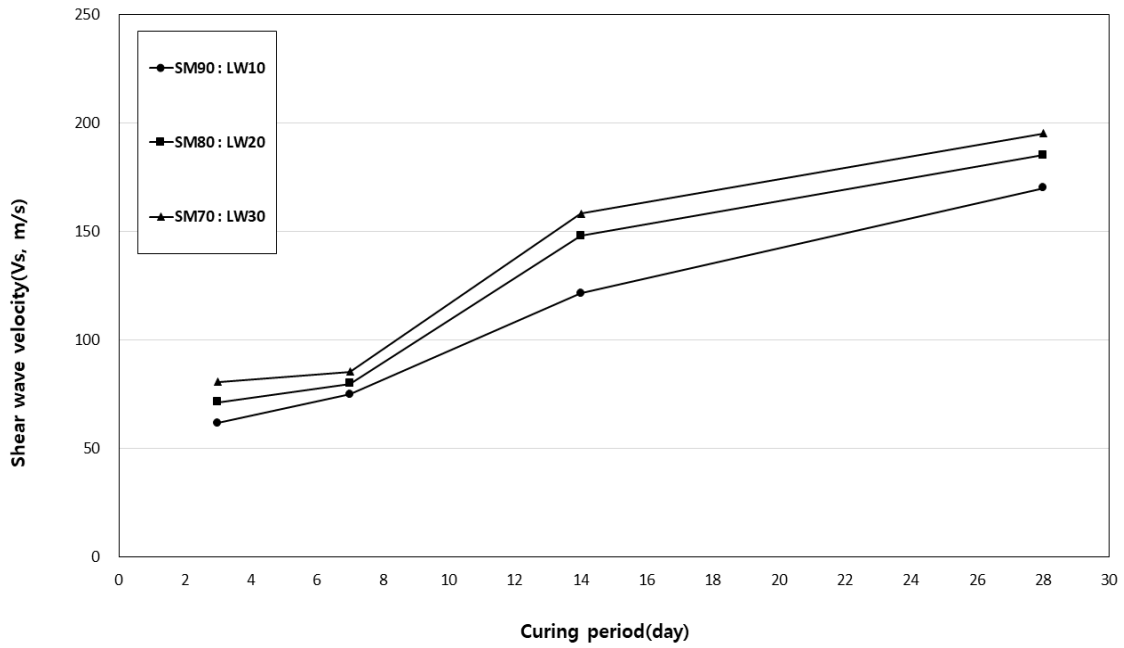


그림 4.18 재령일에 따른 시료별 전단파 속도 변화 비교 -SM시료

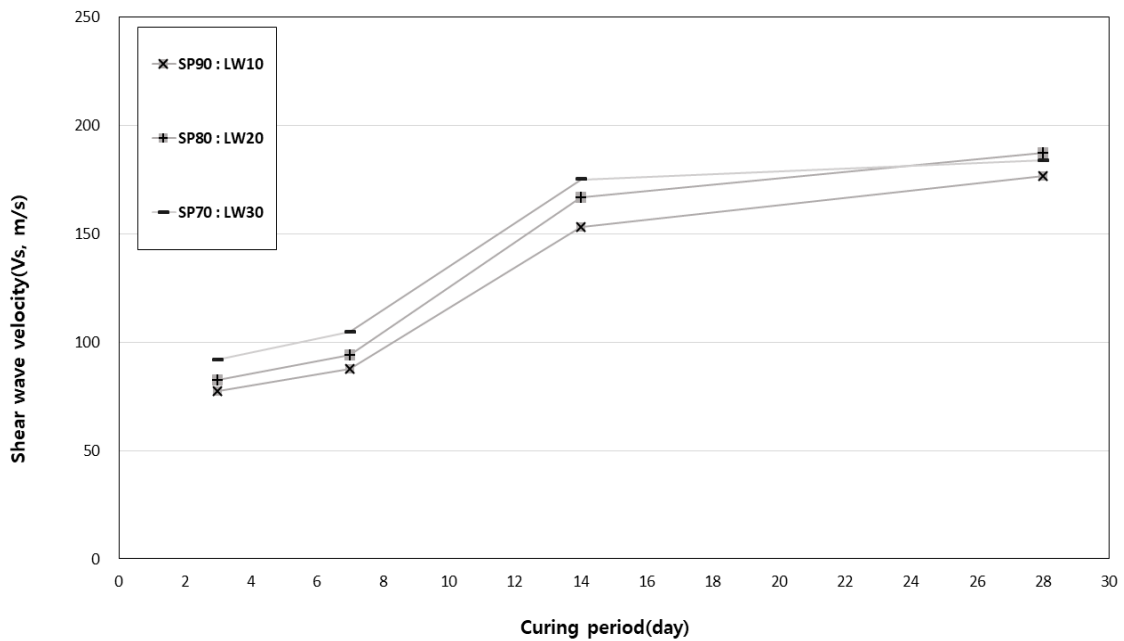
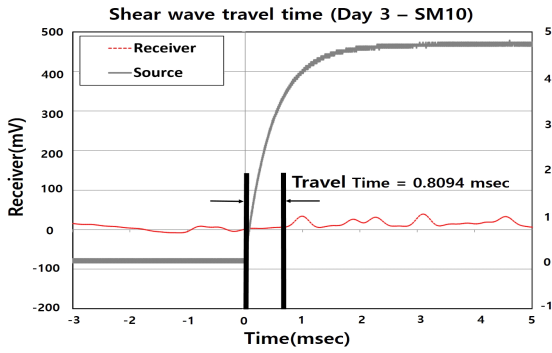
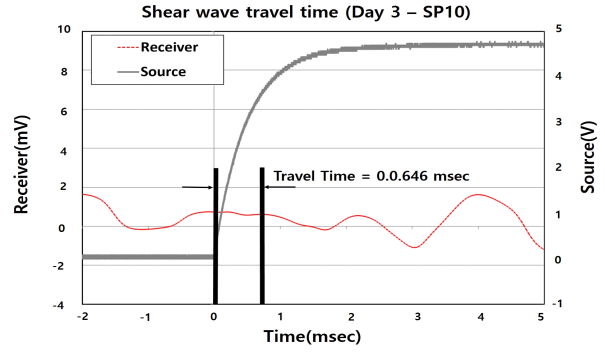


그림 4.19 재령일에 따른 시료별 전단파 속도 변화 비교 - SP시료

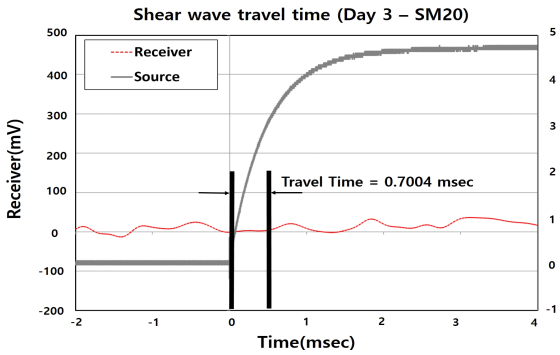
그림 4.20~4.23은 실내실험을 통하여 얻은 전단파 도달시간 그래프이다.



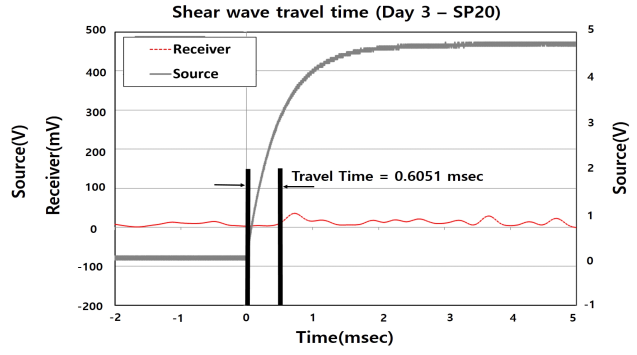
SM 10



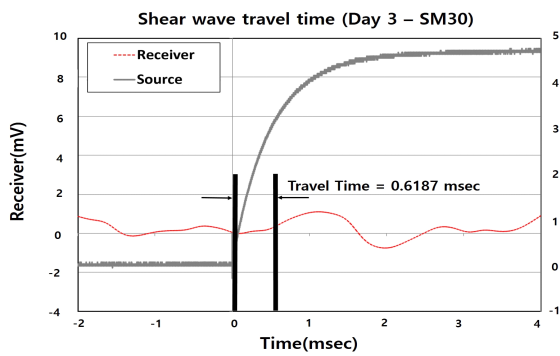
SP 10



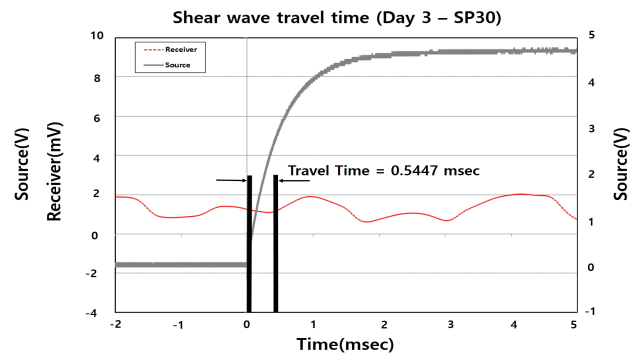
SM20



SP 20

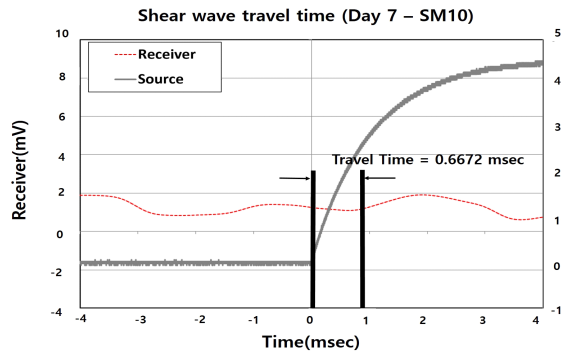


SM30

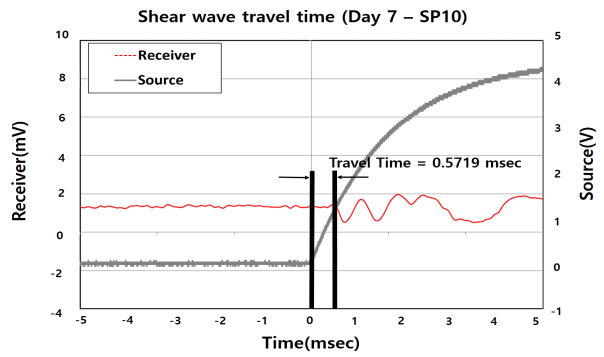


SP 30

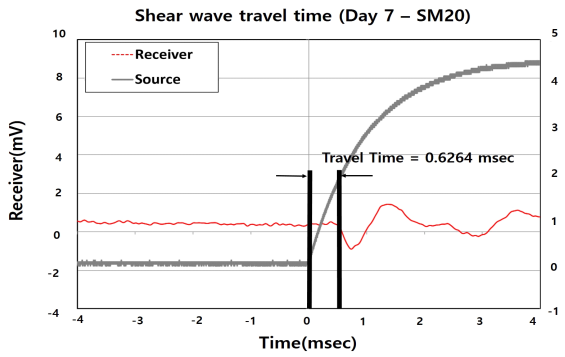
그림 4.20 재령일에 따른 전단파 신호 측정 (Day 3)



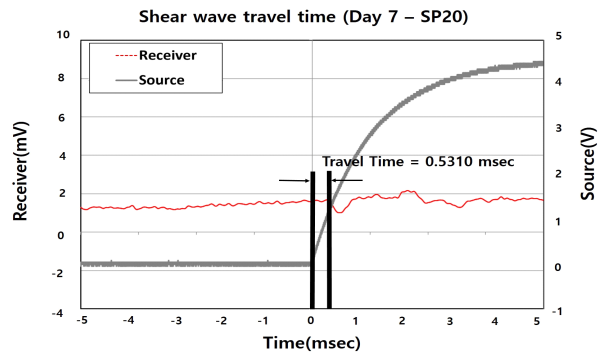
SM 10



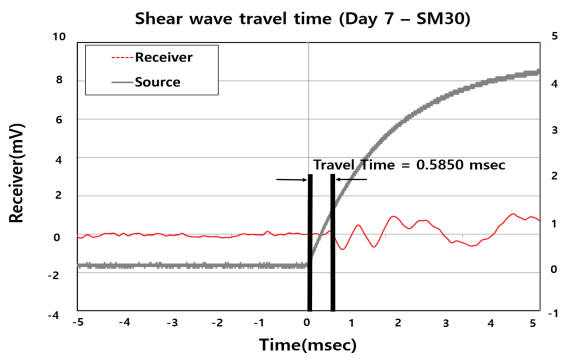
SP 10



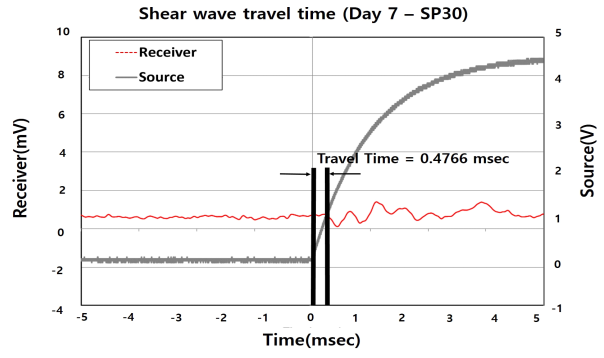
SM20



SP 20

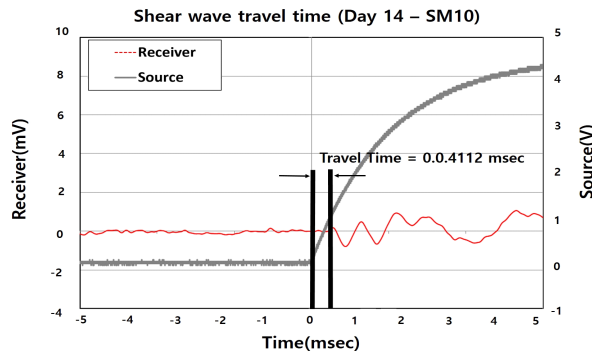


SM30

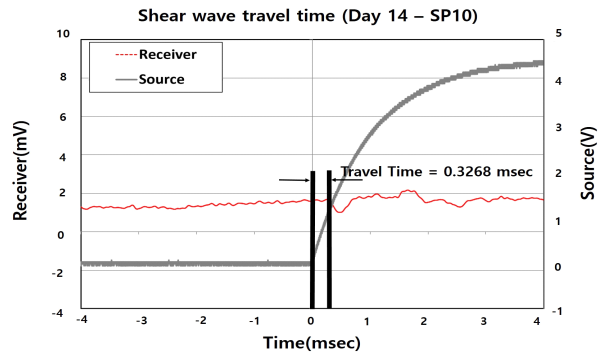


SP 30

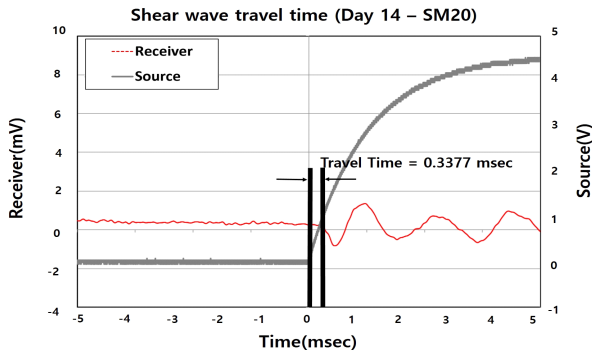
그림 4.21 재령일에 따른 전단파 신호 측정 (Day 7)



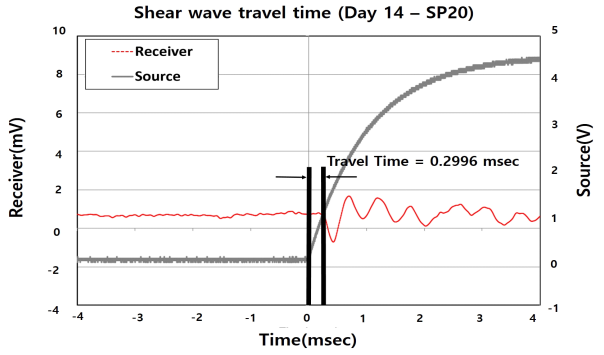
SM 10



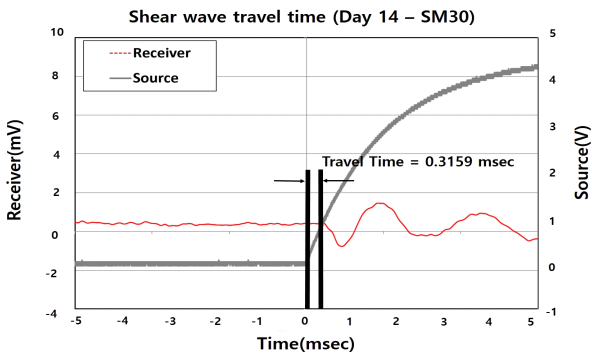
SP 10



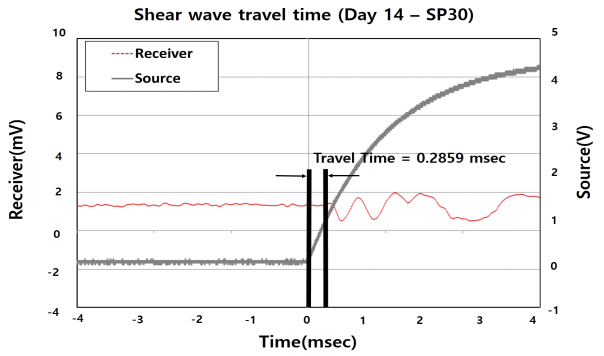
SM20



SP 20

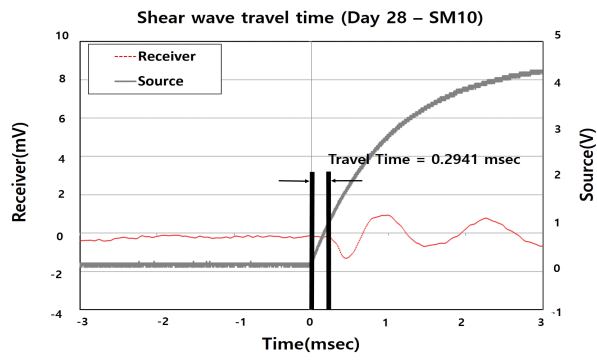


SM30

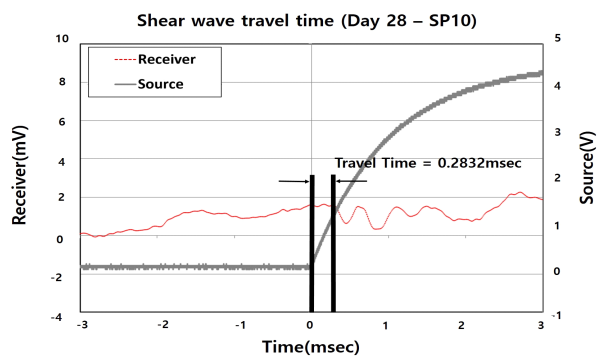


SP 30

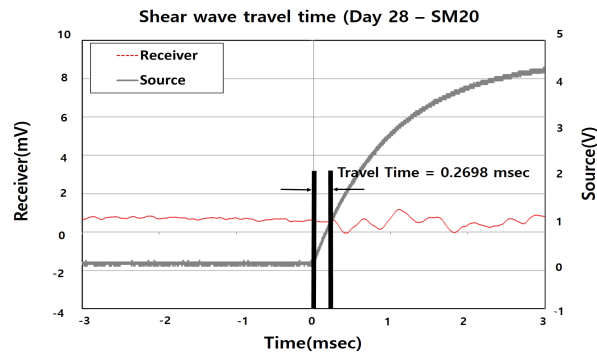
그림 4.22 재령일에 따른 전단파 신호 측정 (Day 14)



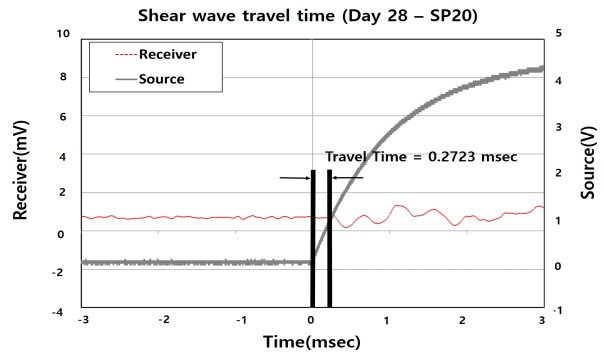
SM 10



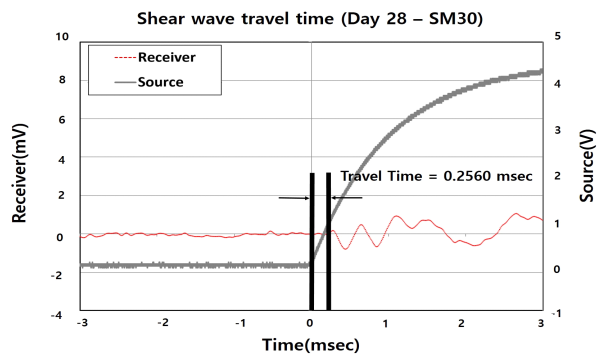
SP 10



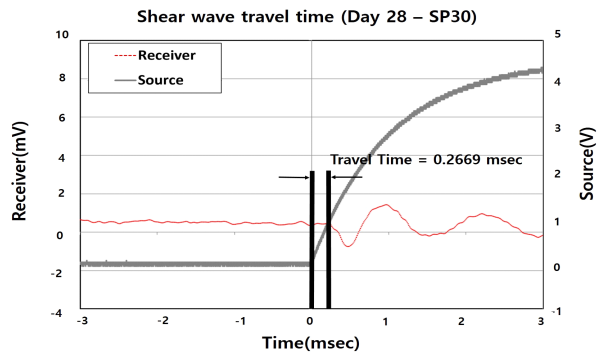
SM20



SP 20



SM30



SP 30

그림 4.23 재령일에 따른 전단파 신호 측정 (Day 28)

## 4.2 현장검증시험 결과

### 4.2.1 들밀도시험 및 동적콘관입시험 결과

Flat TDR의 측정값(함수비, 건조밀도, 전단파속도)에 대한 정밀도를 비교·확인하기 위하여 들밀도 시험을 수행하였다. 들밀도시험으로 현장의 함수비 및 건조밀도를 측정하였으며, 이를 바탕으로 현장다짐도(Relative Compaction,  $R_c$ )를 도출하였다. 각 현장다짐도는 최소 94.3%에서 최대 98.0%까지 확인되었고, 이는 현장에서 요구하는 다짐도(95%)에 가까운 상태로서 조밀한 상태의 지반이라고 확인할 수 있다.

또한, 동적콘관입시험을 수행한 결과, 각 현장에서 콘을 10cm 관입시키는데 필요한 타격횟수  $N_d$ 값은 최소 5.3 ~ 최대 11.3까지 확인하였고,  $R_c$ 값이 클수록  $N_d$ 값이 커지는 상관성을 확인할 수 있었다.

표 4.6은 현장대상지반의 들밀도시험와 동적콘관입시험의 결과를 나타낸 것이다.

표 4.6 들밀도시험 및 동적콘관입시험을 이용한 현장지반의 다짐도 결과

Classification		$w$ (%)	$\gamma_{d,max}$ ( $g/cm^3$ )	$R_c$ (%)	$N_d$
This Study	Hampyeong	16.27	1.791	94.3	5.3
	Damyang	9.37	1.841	96.0	11.3
	Boseong	6.82	1.794	95.7	8.8
	Naju 1	10.71	1.780	96.2	12.0
	Naju 2	15.76	1.679	94.6	6.3
	Haenam	9.50	1.681	94.5	5.7
Previous Studies	Wonju	13.40	1.669	98.7	-
	Seomjingang	10.89	1.592	97.3	-
	Gyeongju	15.75	1.571	98.0	-
	Ilsan	11.60	2.062	95.9	-



## 4.2.2 현장 함수비 및 건조밀도 측정 결과

### (1) 함수비 측정 결과

그림 4.24는 Flat TDR을 이용한 10개소 현장에서의 함수비 측정결과를 나타낸 것이다. 각 시료별 실측 함수비를 측정값을 기준으로 Flat TDR 시스템의 측정값과 비교하였고, 실측값으로 사용된 함수비 결과는 현장 들밀도시험을 통해 도출하였다.

분석결과, Flat TDR측정값과 현장 실측값은 약 0.7% 차이를 보이고, 그래프 상에서 측정값들이 1:1선상에 고르게 분포되어 있으며, 선행연구에서 나타낸 오차범위와 비슷한 값을 보임에 따라 TDR 측정값의 높은 현장 측정 신뢰도를 확인할 수 있다.

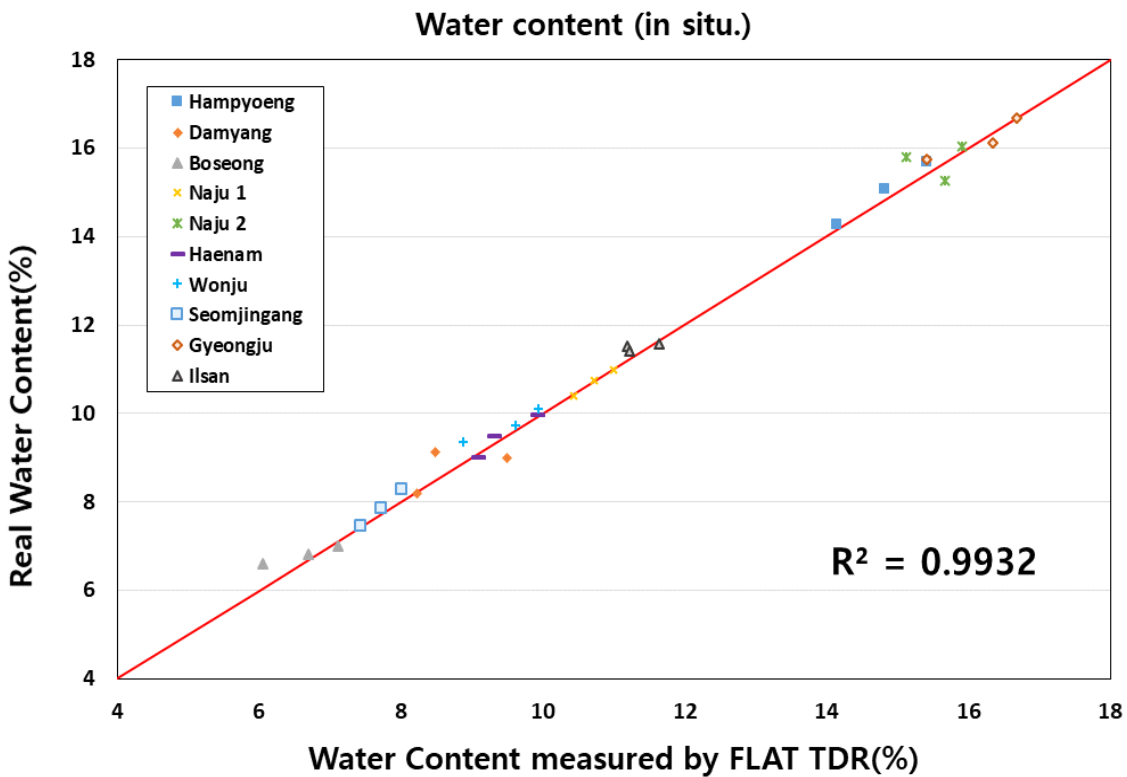


그림 4.24 Flat TDR을 이용한 현장에서의 함수비 측정 결과 - 10개 현장

(2) 건조밀도 측정 결과

그림 4.25는 Flat TDR을 이용한 10개소 현장의 현장에서의 건조밀도 측정결과를 나타낸 것이다. 각 시료별 실측 함수비를 측정값을 기준으로 Flat TDR 시스템의 측정값과 비교하였다. 실측값으로 사용된 건조밀도의 결과는 현장 들밀도시험을 통해 도출하였다.

분석결과, Flat TDR 측정값과 현장 실측값이 약 1.5%의 차이를 보이며, Yu and Drnevich(2004)가 사용한 건조밀도 오차범위와 비슷한 오차범위를 보였다. 또한 대부분의 측정값이 1:1선상에 위치함에 따라 높은 측정 신뢰도를 확인할 수 있다.

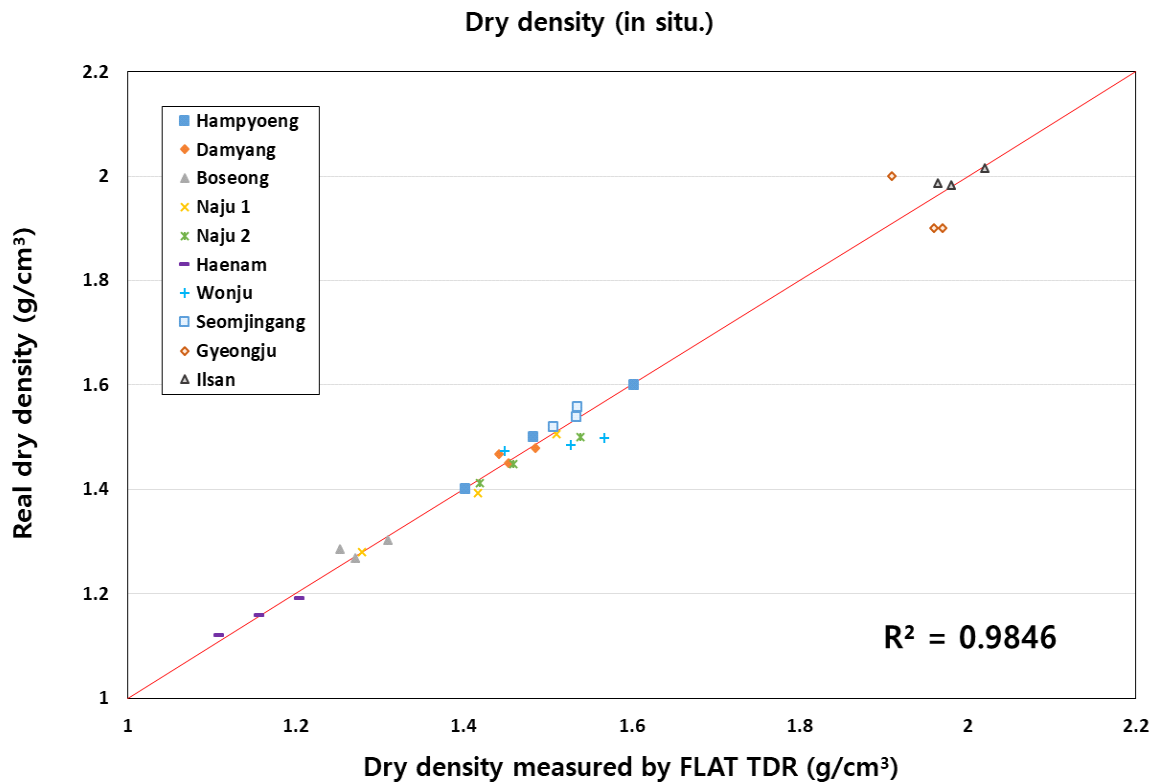


그림 4.25 Flat TDR을 이용한 현장에서의 건조밀도 측정 결과 - 10개 현장

### 4.2.3 현장 전단파속도 측정 결과

전단파속도 측정을 위해 초동추정방법을 통한 전단파 도달시간을 측정하였고, 이를 통해 전단파속도를 산출하였다. 전단파를 발생시키는 Piezo-stack과 수신기 사이를 5cm로 하여 전단파속도를 분석한 결과, 10개 현장에서의 전단파 도달시간이 0.22~0.53msec 범위 내로 확인이 되었고, 전단파속도는 94.04~225.94m/s로 확인되었다.

전단파속도는 식 (2.23)을 이용하여 산출하였으며, 도달시간이 빠를수록 전단파속도는 크게 측정됨을 확인할 수 있었다.

표 4.7은 Flat TDR을 이용한 전단파의 도달시간 및 전단파속도를 나타낸 것이다.

**표 4.7 현장 전단파 도달시간 및 전단파속도 측정 결과**

Classification		$T_r$ (msec)	$V_s$ (m/s)
This Study	Hampyeong	0.5317	94.04
	Damyang	0.4199	119.08
	Boseong	0.4486	111.46
	Naju 1	0.4104	121.83
	Naju 2	0.4717	106.00
	Haenam	0.4856	102.97
Previous Studies	Wonju	0.2617	191.06
	Seomjingang	0.2213	222.92
	Gyeongju	0.2569	187.34
	Ilsan	0.2588	193.20

그림 4.26은 함평 현장의 전단파속도 측정결과 이며, 대상 현장 중에 도달시간이 가장 긴 0.5317msec이고, 이때 전단파속도는 94.04m/s를 확인할 수 있다.

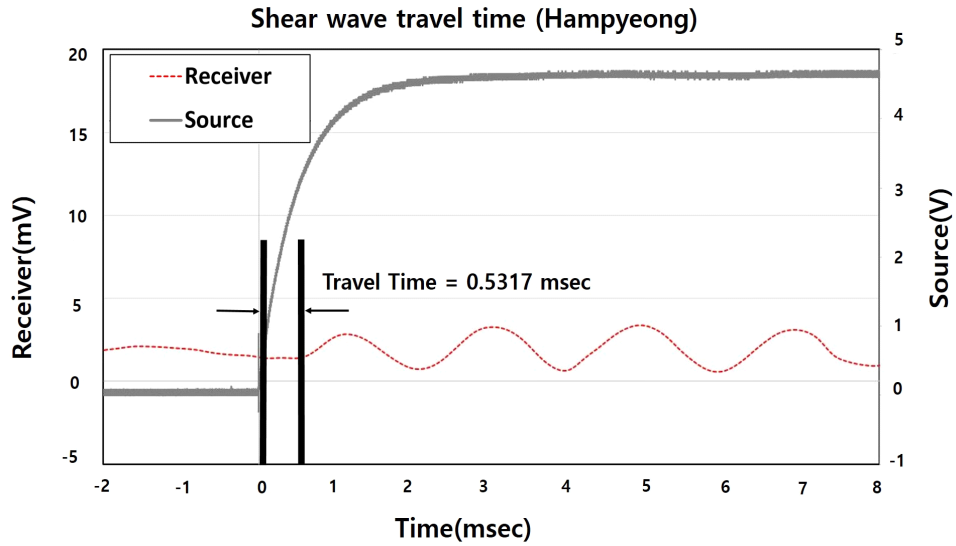


그림 4.26 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 함평

그림 4.27은 담양 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.4199msec일 때 전단파속도를 119.08m/s를 확인할 수 있다.

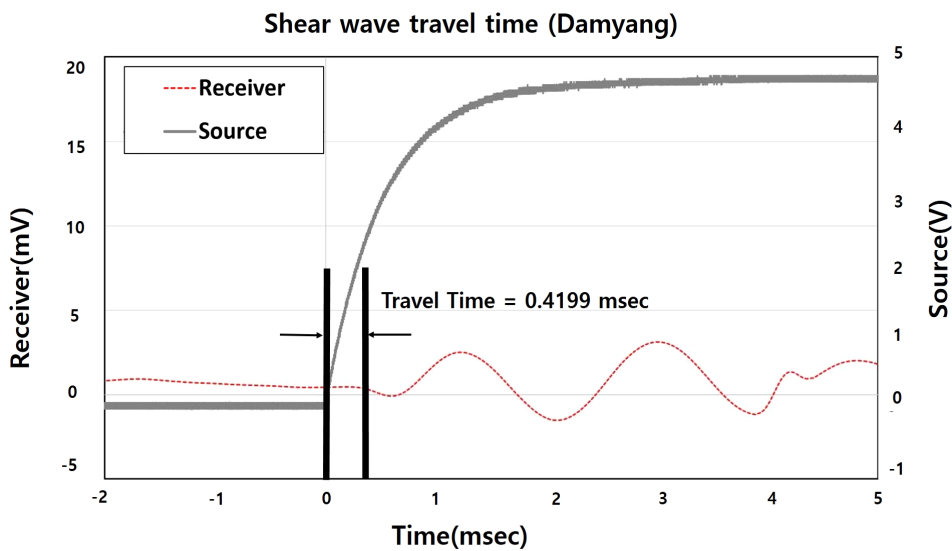


그림 4.27 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파 속도 측정결과 - 담양

그림 4.28은 보성 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.4486msec일 때 전단파속도는 111.46m/s를 나타낸다.

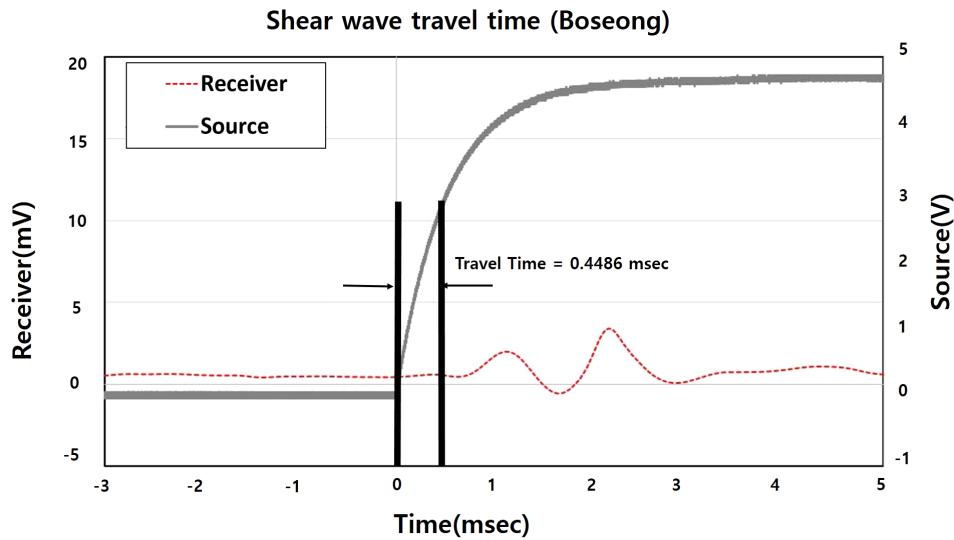


그림 4.28 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 보성

그림 4.29는 나주1 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.4104msec일 때 전단파속도는 121.83m/s를 확인할 수 있다.

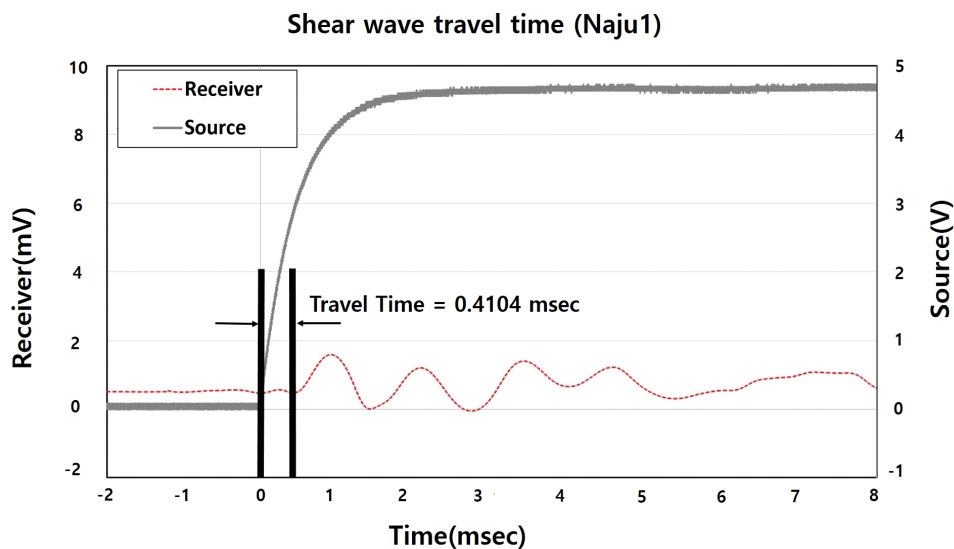


그림 4.29 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 나주1

그림 4.30은 나주2 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.4717msec일 때 전단파속도를 106.00m/s를 확인할 수 있다.

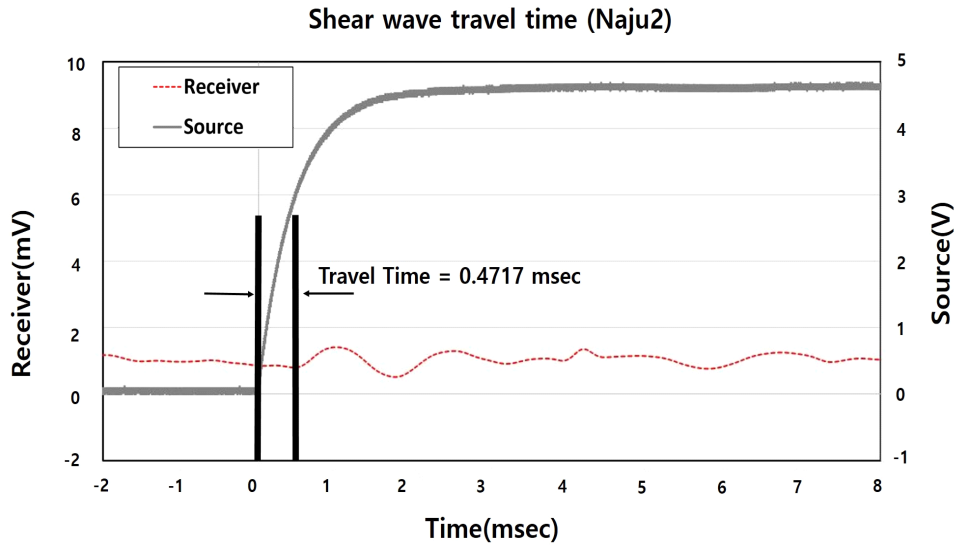


그림 4.30 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 나주2

그림 4.31은 해남 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.4856msec일 때 전단파속도를 102.97m/s를 확인할 수 있다.

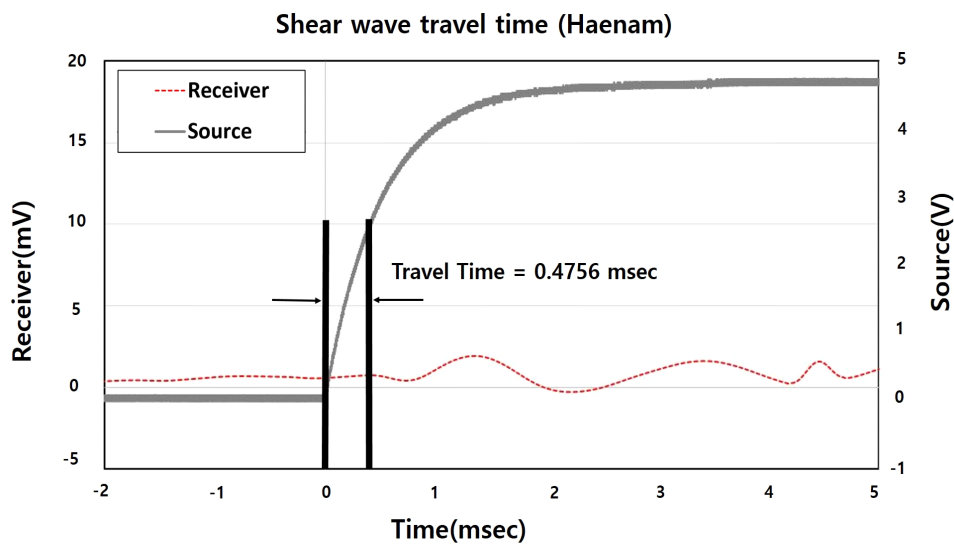


그림 4.31 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 해남

그림 4.32는 원주 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.2617msec일 때 전단파속도를 191.06m/s를 확인할 수 있다.

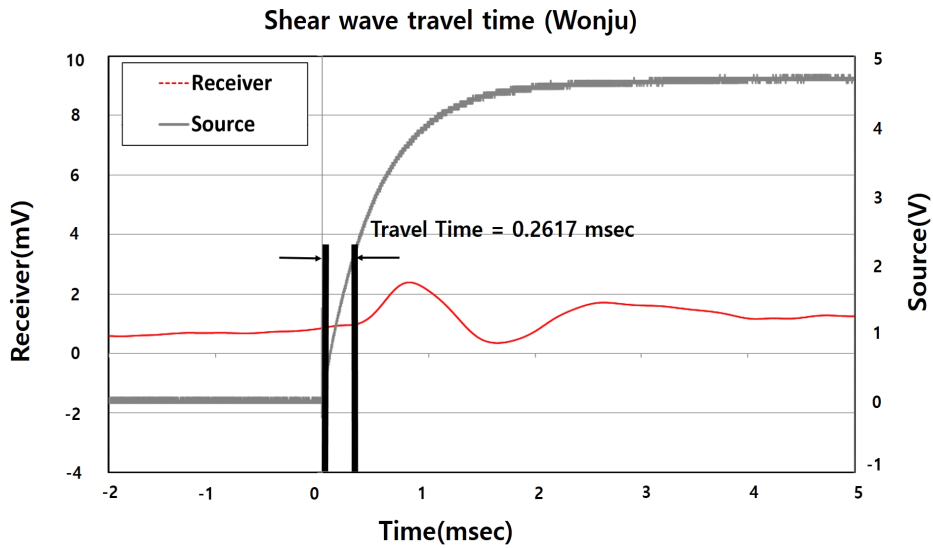


그림 4.32 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 원주

그림 4.33은 섬진강 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간이 가장 짧은 0.2213msec로 나타났고, 이때 전단파 속도는 대상 현장 중에 가장 빠른 222.92m/s이다.

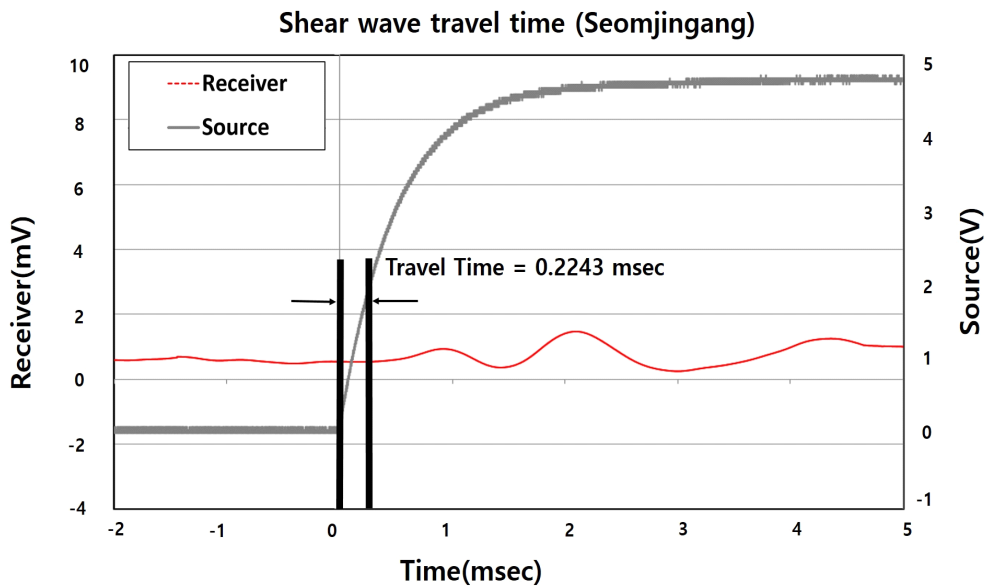


그림 4.33 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 섬진강



그림 4.34는 경주 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.2569msec일 때 전단파속도를 187.34m/s를 확인할 수 있다.

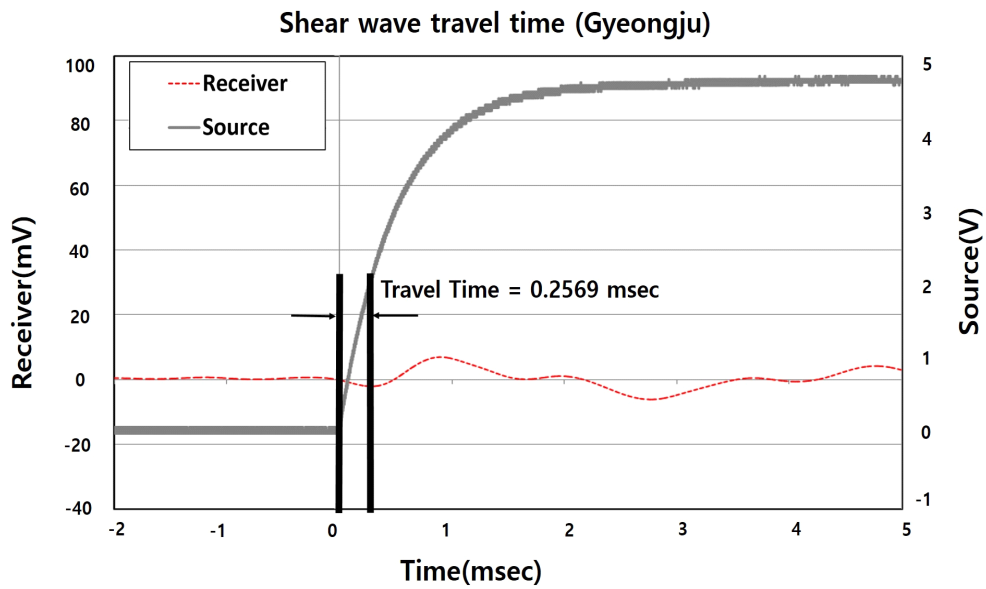


그림 4.34 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파속도 측정결과 - 경주

그림 4.35는 일산 현장의 전단파속도 측정결과이며, 도달시간 0.2588msec일 때 전단파속도를 193.20m/s를 확인할 수 있다.

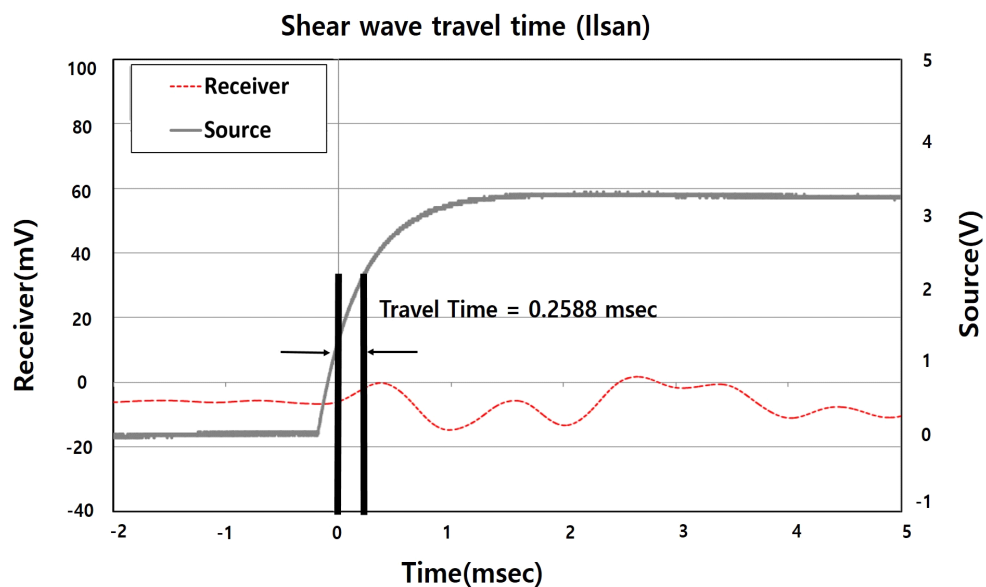


그림 4.35 Flat TDR을 이용한 현장에서의 전단파 속도 측정결과 - 일산

#### 4.2.4 전단파 속도 측정 검증을 위한 비교 분석

##### (1) 함수비에 따른 전단파속도와 건조밀도 비교

본 연구에서는 Flat TDR에 결합 되어있는 전단파 측정 장치의 현장 적용성 및 신뢰도를 확인하고자 함수비에 따른 전단파속도 측정 결과와 건조밀도 측정 결과를 비교·분석하였다.

김학성 등(2013)은 함수비에 따른 전단파속도 곡선은 함수비에 따른 건조밀도 곡선 즉, 다짐곡선과 유사한 경향을 보이는데 건조 측에서는 함수비가 증가할수록 전단파속도가 증가하고, 습윤 측에서는 함수비가 증가 할수록 전단파속도가 감소하는 경향을 파악할 수 있다고 하였다.

본 연구에서 각 시료별로 도출한 함수비에 따른 전단파속도 그래프와 다짐곡선을 분석한 결과, 각 시료의 *OMC*에서 건조밀도 및 전단파 속도가 최대값을 갖는 경향을 보였다. 또한, *OMC*를 기준으로 건조 측에서는 측정값이 증가하고 습윤 측에서는 측정값이 감소하는 경향성을 나타내었으며, 이는 지반의 강성도와 전단파속도가 관련이 있음을 나타낸다.

실내에서 측정한 전단파속도와 현장에서 측정한 전단파속도를 비교·분석하기 위해 함수비에 따른 전단파속도 그래프와 현장에서 측정한 전단파 속도를 그래프를 분석하였다. 그 결과, 실내에서 도출한 전단파속도는 97.21~218.44m/s로 나타났고, 현장에서 측정한 전단파속도는 94.04~222.92m/s로 나타났다. 또한, 두 값들의 사이의 관계식은  $y = 1.0913x - 9.2011$ 로 도출되었고, 차이는 약 0.7%로 매우 유사한 값을 나타내었으며, 이는 Flat TDR의 전단파속도 측정값의 높은 신뢰도를 나타낸다.

표 4.8과 같이 함수비에 따른 실내 전단파속도 측정값 및 현장 전단파속도 측정값을 나타내었으며, 그림 4.36은 실내 전단파속도 측정값 및 현장 전단파속도 측정값의 비교를 그래프로 나타낸 것이다. 또한, 그림 4.37~4.46은 실내 실험에서 측정한 함수비에 따른 건조밀도의 경향성과 현장 지반에서 측정한 전단파속도를 비교 분석한 것이다.

표 4.8 함수비에 따른 실내 전단파속도 측정값 및 현장 전단파속도 측정값

Classification		$w$ (%)	$V_s$ (lab., m/s)	$V_s$ (in situ., m/s)
This Study	Hampyeong	16.27	97.21	94.04
	Damyang	9.37	116.35	119.08
	Boseong	6.82	106.93	111.46
	Naju 1	10.71	117.07	121.83
	Naju 2	15.76	109.97	106.00
	Haenam	9.50	105.40	102.97
Previous Studies	Wonju	13.40	183.82	191.06
	Seomjingang	10.89	217.44	222.92
	Gyeongju	15.75	180.06	187.34
	Ilsan	11.60	178.71	193.20

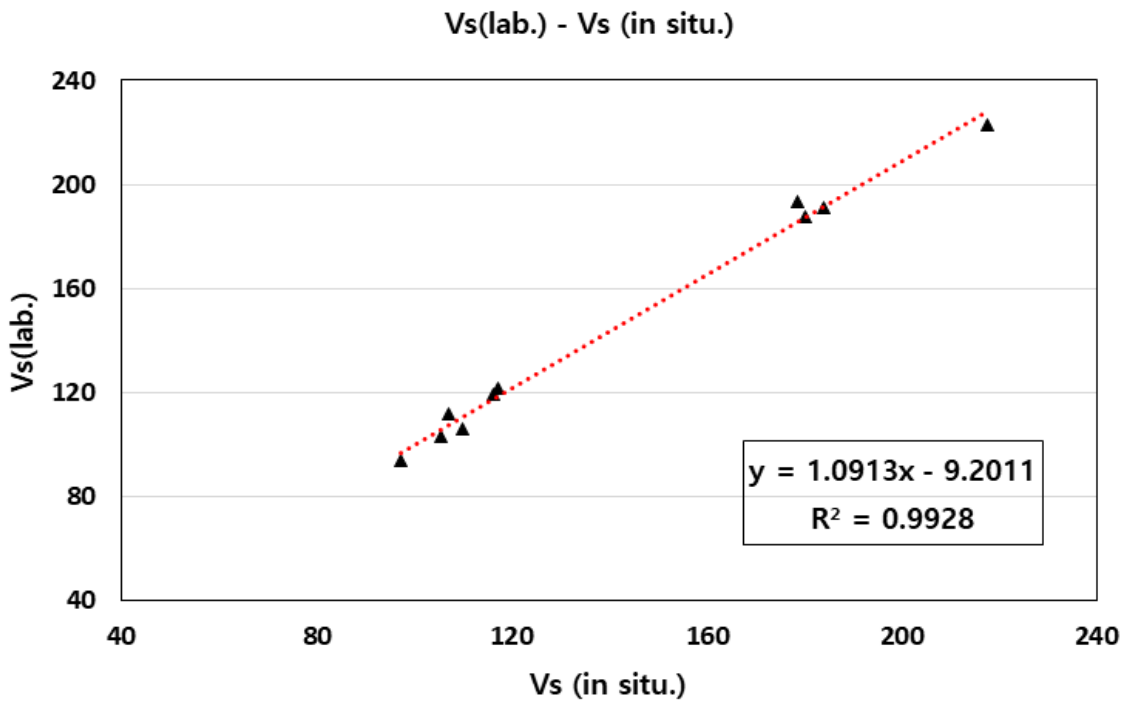


그림 4.36 실내 전단파속도 측정값 및 현장 전단파속도 측정값의 비교

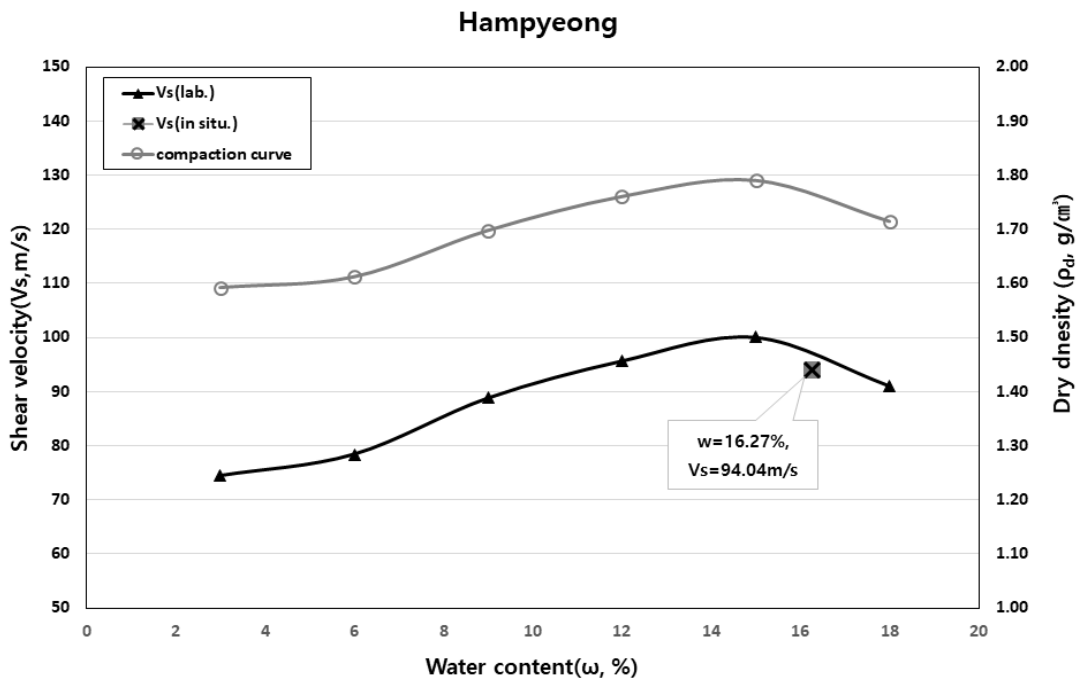


그림 4.37 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 함평

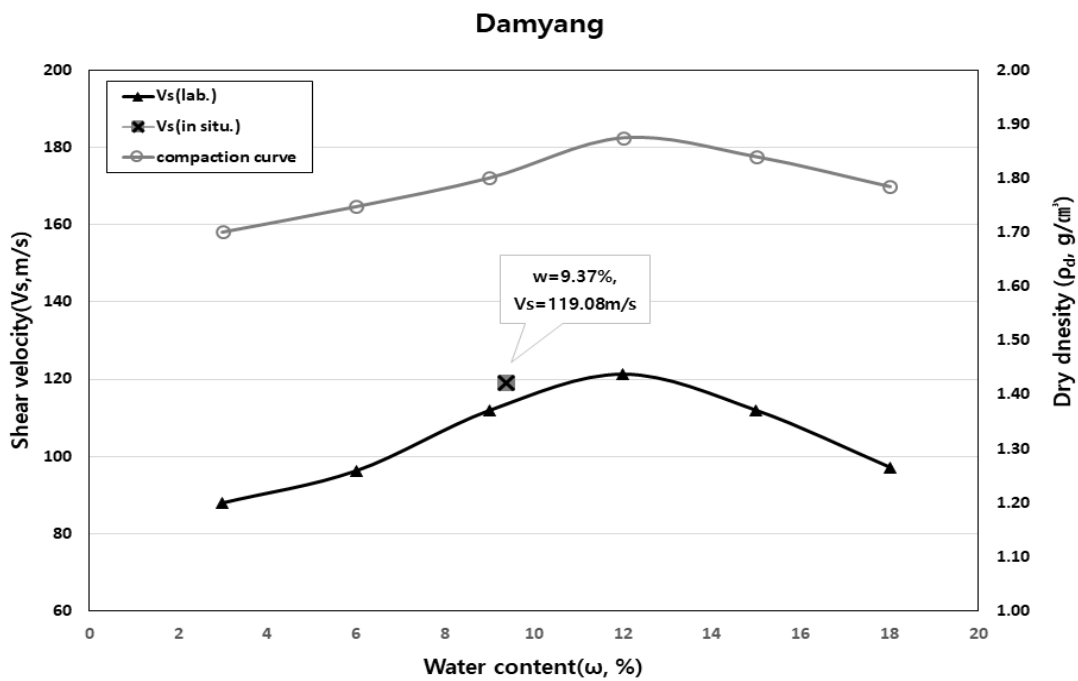


그림 4.38 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 담양

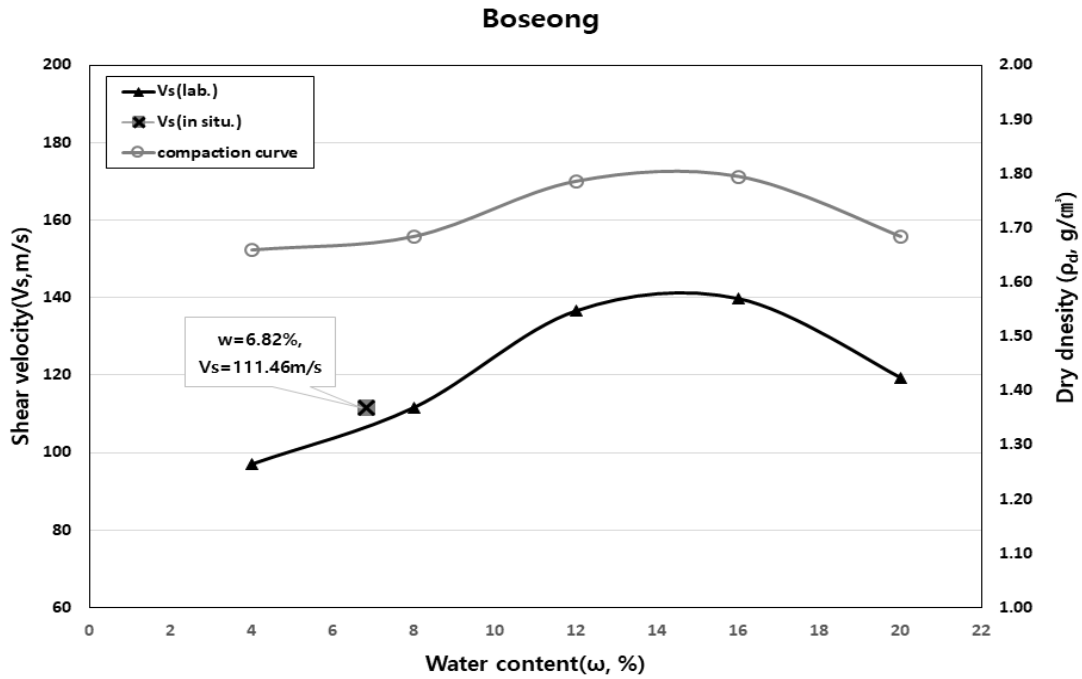


그림 4.39 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 보성

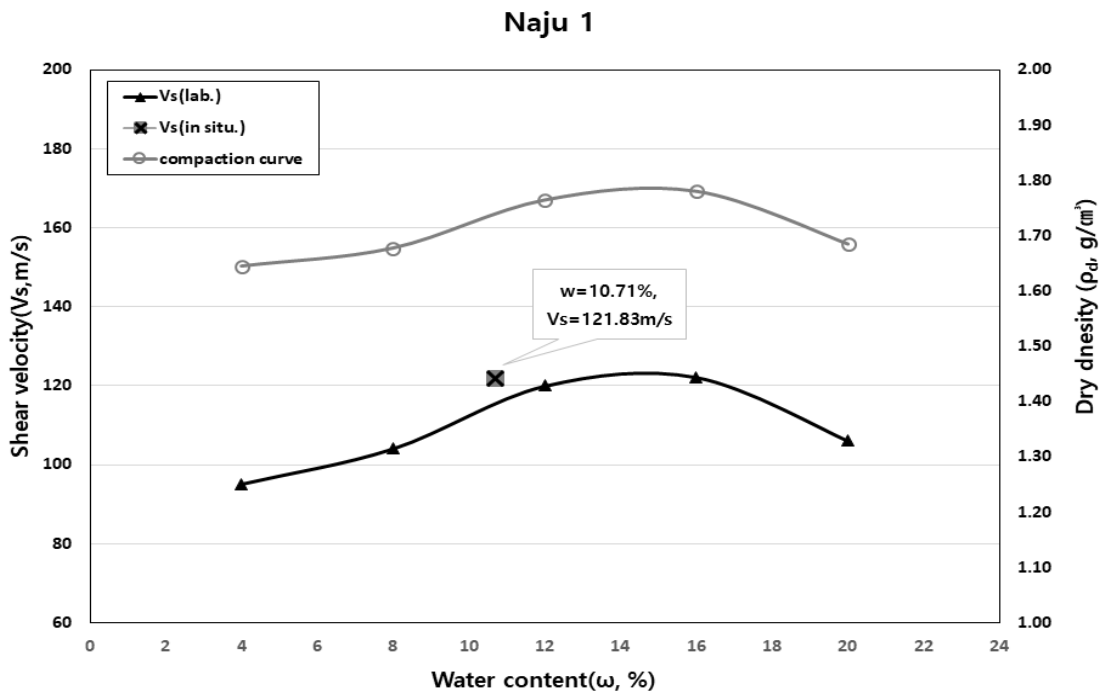


그림 4.40 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 나주1

### Naju 2

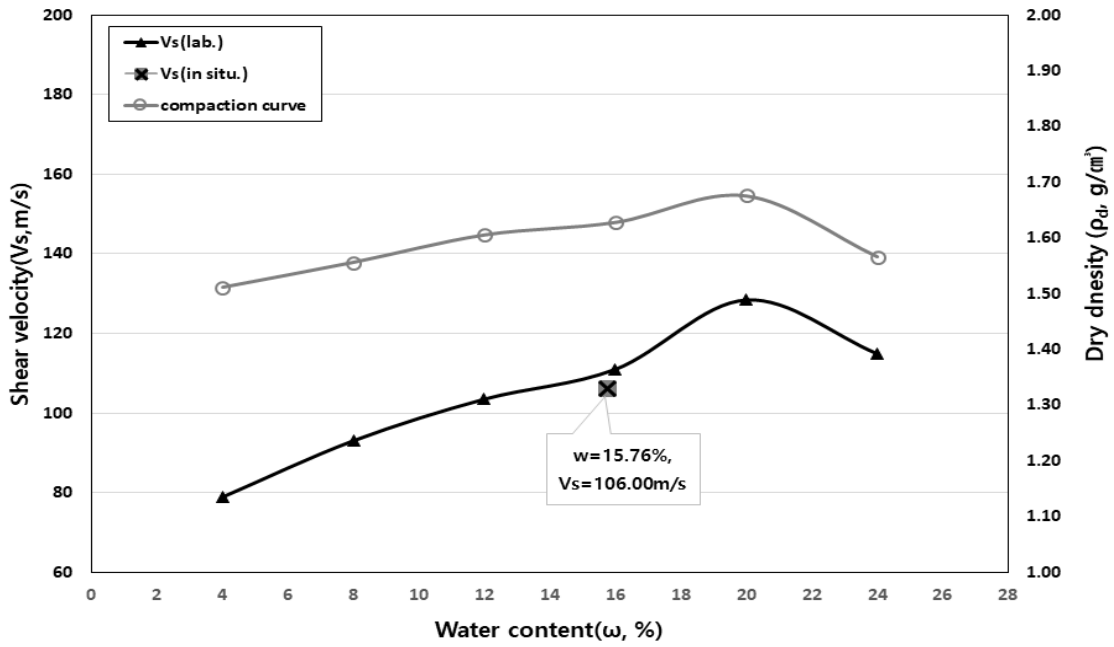


그림 4.41 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 나주2

### Haenam

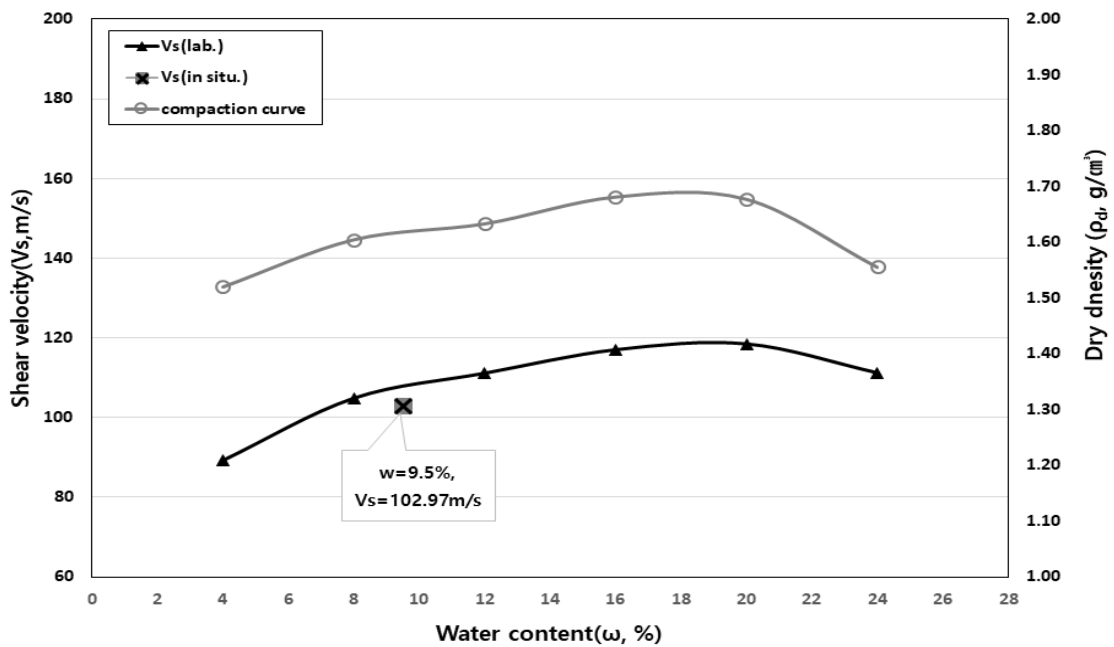


그림 4.42 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 해남

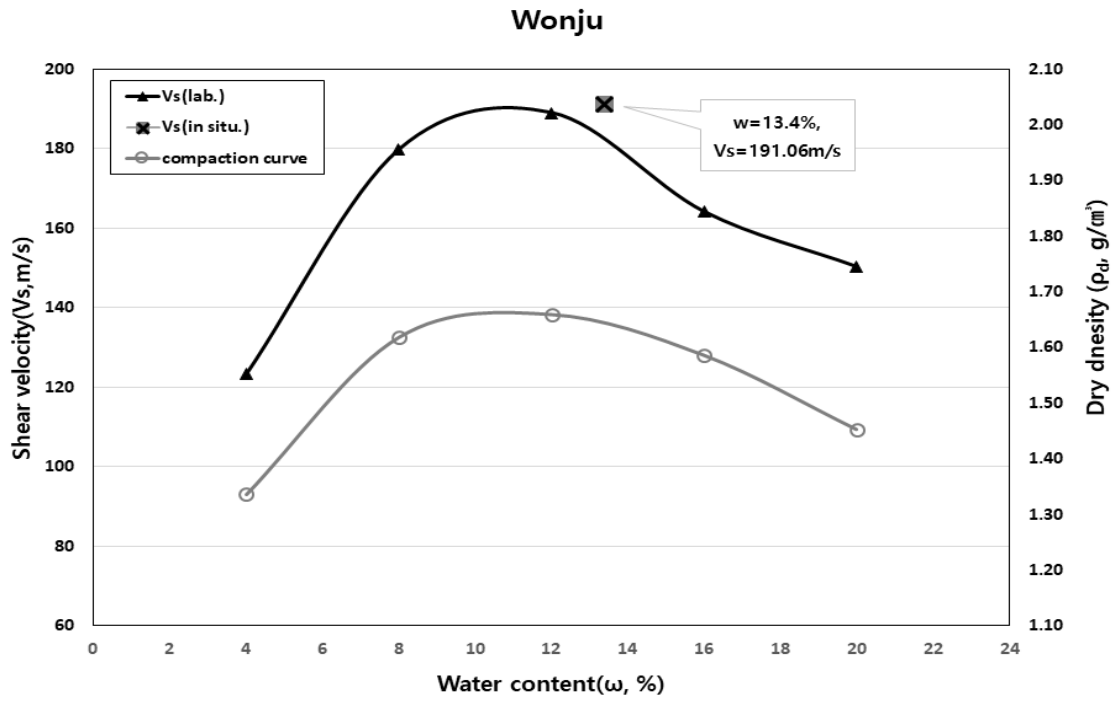


그림 4.43 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 원주

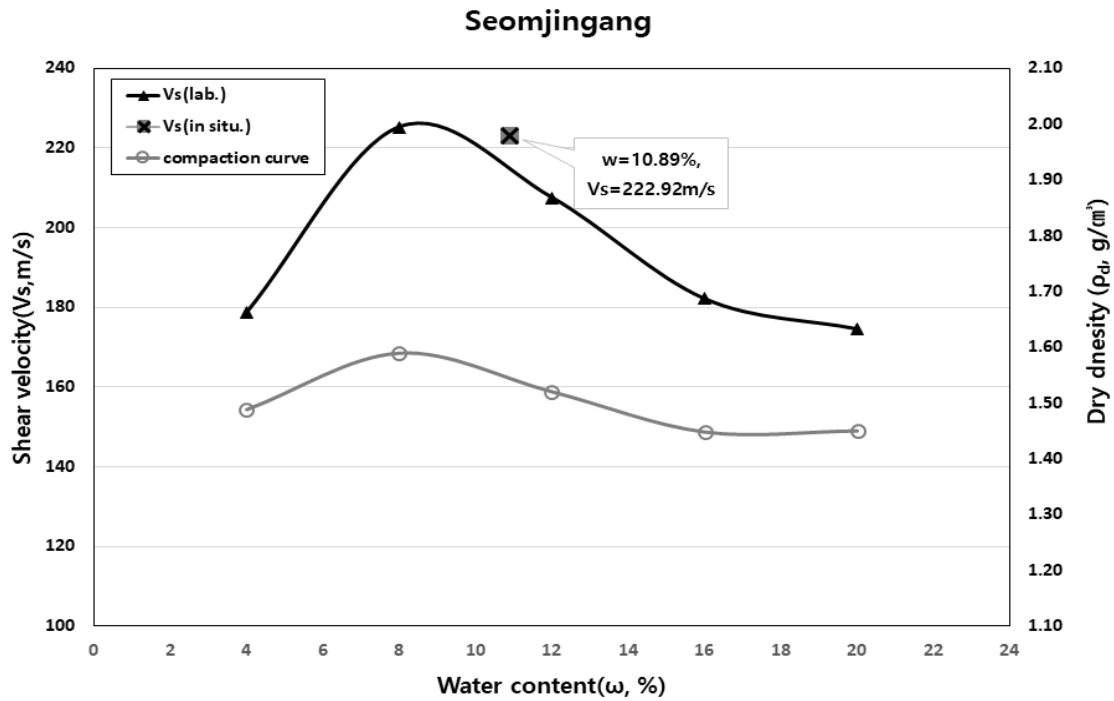


그림 4.44 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 섬진강



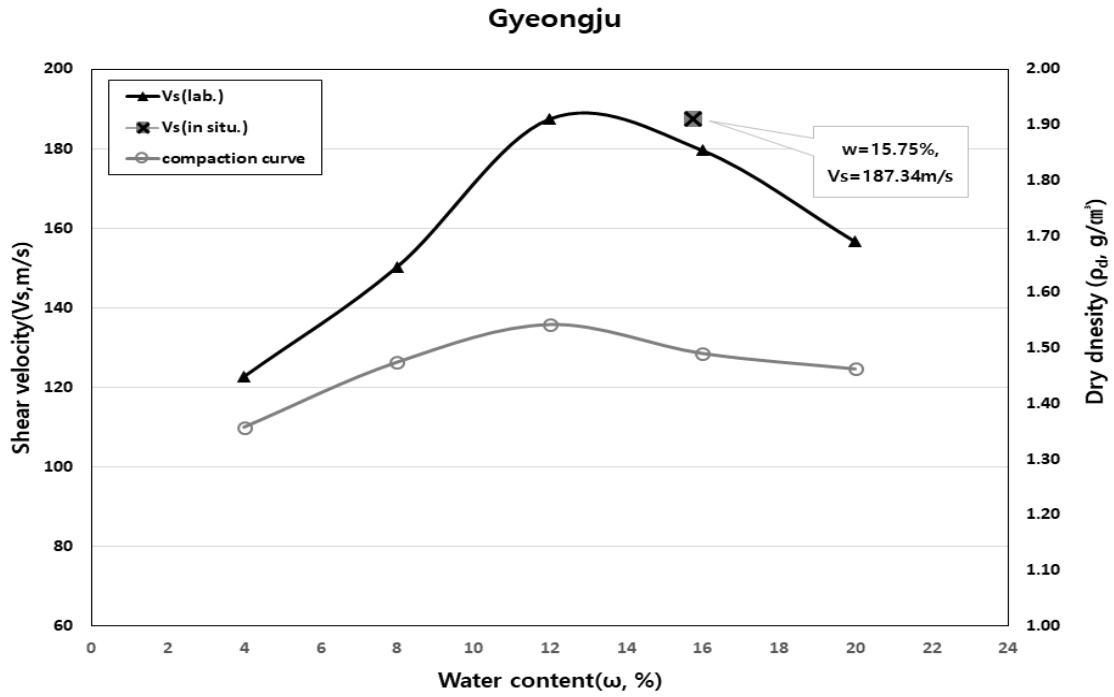


그림 4.45 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 경주

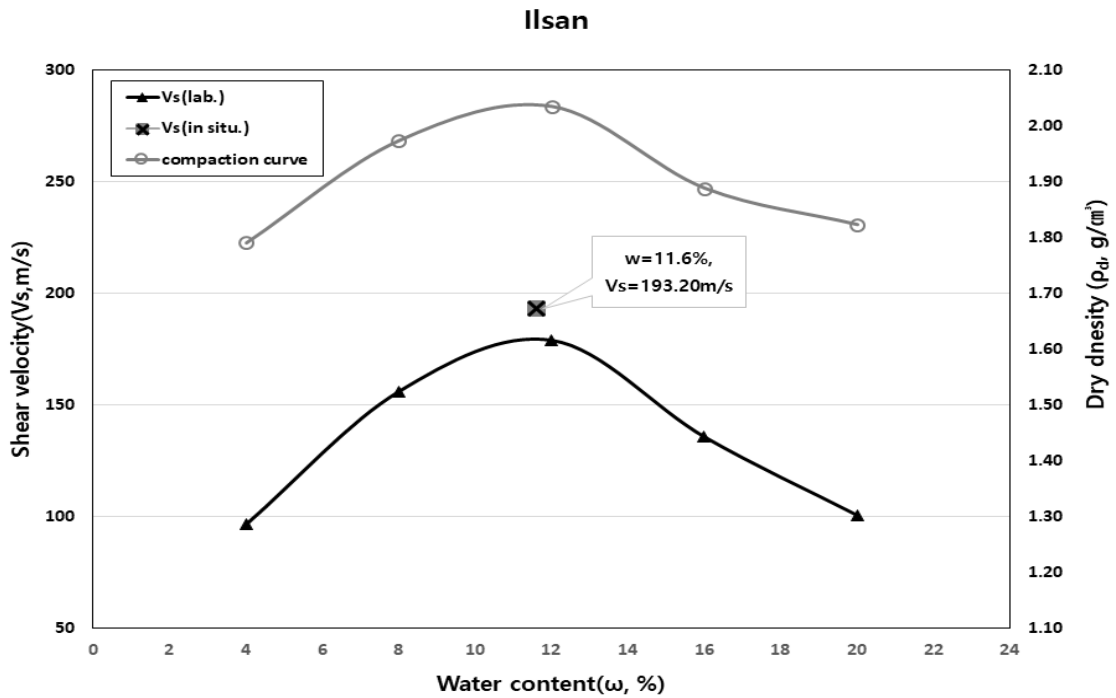


그림 4.46 함수비에 따른 건조밀도 및 전단파속도 분석 결과 - 일산

(2) 현장 전단파속도 및 현장 다짐도 비교

본 연구에서는 6개 현장에서 수행된 Flat TDR의 전단파속도 측정에 대한 신뢰도를 검증하고자 들밀도시험 및 동적콘관입시험을 수행하여 현장 지반의 다짐도를 도출하여 Flat TDR로 측정된 전단파속도와 비교·분석하였다.

각각의 시험결과를 통한 현장다짐도에 대한 경향을 확인하고자 현장다짐도가 가장 낮은 함평 시료부터 다짐도가 가장 높은 나주1 시료의 순으로 나열하였다. 다짐도 및 동적콘관입시험에서의  $N_d$ 값이 증가함에 따라 Flat TDR에서의 전단파속도 측정값이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

또한, 동적콘관입시험  $N_d$ 값과 현장에서 측정된 전단파 속도의 상관성 분석을 통해 다짐도 증가 경향에 대해 관계식을 도출하여 Flat TDR의 전단파속도 측정과 관련된 신뢰성을 검증하였다.

분석결과, 다짐도가 가장 낮은 함평 현장의 경우  $N_d=5.3$ 일 때  $V_s=94.04\text{m/s}$ 이고, 다짐도가 가장 높은 나주1 현장의 경우  $N_d=12.0$ 일 때  $V_s=121.83\text{m/s}$ 으로 나타났다. 또한 그림 4.48과 같이  $N_d$ 값과 전단파속도 값의 관계식은  $y = 28.438\ln(x) + 50.768$ 로 도출되었으며, 두 값의 경향성 차이는 약 7%로 확인되었다.

이는 앞선 그라우트재 혼합 공시체의 재령일에 따른 전단파속도 관계에서처럼 지반의 강성도 및 다짐도가 증가할수록 Flat TDR의 전단파속도가 증가함을 나타내며, Flat TDR의 전단파속도 측정값의 신뢰성을 확인하였다고 볼 수 있다.

그림 4.47은 현장 다짐도와  $N_d$ 값, 전단파속도를 비교한 그래프이고, 표 4.9는 전단파속도,  $N_d$ 값, 다짐도 비교를 위해 도출한 값이다.

표 4.9 현장 전단파속도,  $N_d$ 값, 현장 다짐도 비교

Classification	$V_s$ (m/s)	$R_c$ (%)	$N_d$
Hampyeong	94.04	94.3	5.3
Damyang	119.08	96.0	11.3
Boseong	111.46	95.7	8.8
Naju 1	121.83	96.2	12.0
Naju 2	106.00	94.6	6.3
Haenam	102.97	94.5	5.7

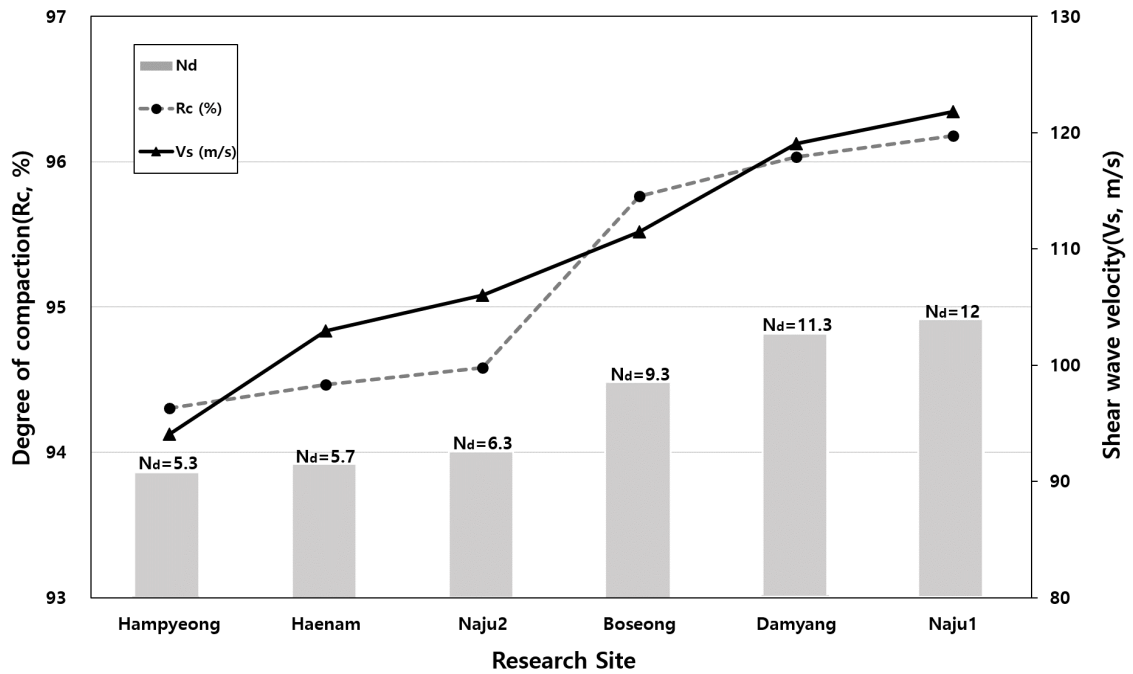


그림 4.47 다짐도, 전단파속도, N<sub>d</sub>값 비교 분석

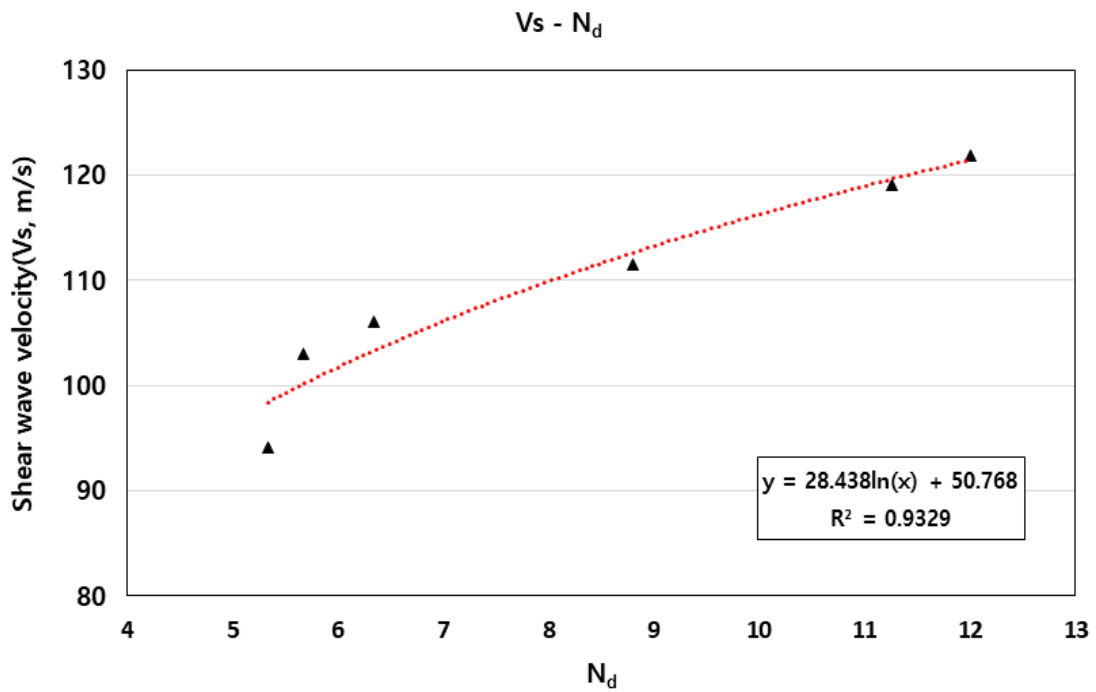


그림 4.48 현장 전단파속도 및 N<sub>d</sub>값과의 상관성 분석

(3) 현장 전단파속도 통한 전단탄성계수 비교 분석

본 연구에서는 Flat TDR을 이용하여 현장에서 각 시료에 대한 전단파속도를 측정하였고, 도출된 전단파속도를 식 (2.22)을 이용하여 전단탄성계수 값을 확인하였다. 전단탄성계수 결괏값의 신뢰도를 확인하고자 Hunt(1984)가 제안한 지반 상태에 따른 탄성계수와 포아송비를 통해 비교·분석하였다.

해당 지반의 상대밀도를 파악하기 위하여 Lee and Singh(1971)이 제안한 식 (4.1)를 이용하여, 표 4.10과 같이 상대밀도를 71.4~80.8%로 조밀한 상태의 지반임을 확인하였다.

$$R_c = 80 + 0.2D_r \quad (4.1)$$

여기서,  $R_c$  : 현장다짐도(%)

$D_r$  : 상대밀도(%)

전단파속도를 측정한 지반은 사질토이며, 조밀한 지반상태로 표 4.11에서 제시한 분류기준에 따라 탄성계수는 50~80MPa를 사용하였으며, 포아송비는 0.2~0.35범위의 값인 0.31을 사용하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.2)$$

여기서,  $E$  : 지반의 탄성계수(MPa)

$\nu$  : 포아송비

문헌자료를 통해서 전단탄성계수를 도출한 결과, 표 4.12와 같이 전단탄성계수의 범위는 19.1~30.5MPa로 나타났고, 표 4.13과 같이 현장에서 측정한 전단파속도를 식 (4.2)를 이용하여 도출한 전단탄성계수는 함평 17.36MPa, 담양 27.41MPa, 보성 22.79MPa, 나주1 28.13MPa, 나주2 20.65MPa, 해남 18.43MPa로 나타났다. 이를 통해 시료에서 도출한 전단탄성계수 값이 문헌에서 제시한 값의 범위와 유사함을 알 수 있었다.

이는 Flat TDR을 이용하여 측정된 전단파속도와 전단탄성계수가 현장 지반의 다짐 관리를 효과적으로 수행하고, 지반을 설계하는데 필요한 계수로서 역할을 할 수 있음을 의미한다. 또한, Flat TDR에서 측정된 전단파속도 값이 신뢰성이 있다는 것을 보여주고, 현장 적용성에 대해 검증하였다고 할 수 있다.

**표 4.10 상대밀도에 따른 흙의 상태 분류 (Das, 2016)**

$D_r$ (%)	Description of soil deposit
0 ~ 15	very loose
15 ~ 50	loose
50 ~ 70	medium
70 ~ 85	dense
85 ~ 100	very dense

**표 4.11 지반 상태에 따른 탄성계수 및 포아송비(Hunt, 1984)**

Classification		$E$ (MPa)	$\nu$
Clay	soft	2~4	0.4~0.5
	firm to stiff	4~8	
	very stiff	8~20	
Sand	loose	10~30	0.25~0.35
	medium loose	30~50	
	dense	50~80	
Gravel	loose	30~80	0.3~0.4
	medium loose	80~100	
	dense	100~200	

**표 4.12 현장 전단파속도 및 현장 지반 상대밀도**

Classification	USCS	$V_s$ (m/s)	$D_r$ (%)
Hampyeong	SM	94.04	71.4
Damyang	SM	119.08	80.1
Boseong	SM	111.46	78.7
Naju 1	SW	121.83	80.8
Naju 2	SW	106.00	72.9
Haenam	SM	102.97	72.3

**표 4.13 전단탄성계수 비교 및 관련 계수**

Classification	USCS	$E$ (MPa)	$\nu$	$G$ (MPa)	
				Hunt(1984)	in situ.
Hampyeong	SM	50~80	0.31	19.1~30.5	17.36
Damyang	SM	50~80	0.31	19.1~30.5	27.41
Boseong	SM	50~80	0.31	19.1~30.5	22.79
Naju 1	SW	50~80	0.31	19.1~30.5	28.13
Naju 2	SW	50~80	0.31	19.1~30.5	20.65
Haenam	SM	50~80	0.31	19.1~30.5	18.43

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 Flat TDR을 이용한 함수비와 건조밀도, 전단파속도 측정값의 정밀도 분석과 더불어 측정값의 현장 적용성에 대한 검증을 하였다. Flat TDR을 이용한 함수비와 건조밀도 측정값에 대해 추가적인 실내 측정과 현장 측정을 통해 측정값들의 비교·분석하였고, 현장 적용성에 대한 검증을 수행하였다. 또한, Flat 프로브에 결합되어 있는 Piezo-stack을 이용하여 실내와 현장에서의 전단파속도 측정값을 도출하였고, 도출한 값의 검증을 위해서 들밀도시험, 동적콘관입시험(DCPT), 문헌조사 등을 병행하여 비교·분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 실내에서 Flat TDR을 이용하여 14개소의 함수비와 건조밀도 실측값을 검증한 결과, 함수비는 약 0.8%의 오차를 보였고, 건조밀도는 약 1.2%의 오차를 보였다. 또한, 현장에서 측정된 10개소의 함수비와 건조밀도의 실측값을 검증한 결과, 함수비는 약 0.7%의 오차를 보였고, 건조밀도는 약 1.5%의 오차를 보였다. 이는 Flat TDR이 신뢰성 있는 함수비와 건조밀도를 측정할 수 있는 것으로 판단된다.
2. 총 14개소 시료의  $OMC$  및  $\gamma_{dmax}$ 의 비교·분석을 통해 특정상숫값의 범위를 분석한 결과,  $OMC$ 와  $\gamma_{dmax}$ 의 값이 크면 특정상수 a, b, c, d가 작게 나타나는 경향을 확인하였다. 이를 통해  $OMC$ 와  $\gamma_{dmax}$ 의 값이 시료 고유의 특성을 나타내는 특정상숫값 유추하는데 영향을 주는 것으로 판단된다.
3. Flat TDR의 전단파속도 측정 검증을 위하여, SP, SM시료의 중량비에 따라 LW그라우트재를 혼합하여 공시체를 만들어 그라우트재 함유량에 따른 전단파속도를 측정하였다. 재령 초기 전단파속도 변화의 평균값은 10.15m/s이며, 7일~14일차 이후의 전단파속도 변화의 평균값은 65.99m/s로 재령일 증가에 따라 전단파속도의 변화가 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 재령일에 따른 공시체 강도가 증가하여 전단파속도가 증가한 것으로 판단된다.
4. Flat TDR을 이용해 함수비에 따른 전단파속도를 측정하여 도출한 그래프와 함수비에 따른 건조밀도 그래프를 비교·분석한 결과,  $OMC$ 를 기준으로 건



조 측에서는 함수비가 증가할수록 건조밀도와 전단파속도가 증가하고, 습윤 측에서는 함수비가 증가할수록 건조밀도와 전단파속도가 감소하였다.

5. 실내시험과 현장시험을 통한 전단파속도의 비교·분석 결과, 실내에서 도출한 전단파속도는 97.21~218.44m/s로 나타났고, 현장에서 측정한 전단파속도는 94.04~222.92m/s로 두 값들의 오차는 약 0.7%로 매우 유사한 값을 나타내었다. 이는 지반의 강도 및 다짐도가 증가할수록 Flat TDR의 전단파속도가 증가함을 나타내며, Flat TDR의 현장측정 결과, 전단파속도 측정값의 신뢰성이 높음을 확인하였다.
  
6. 현장에서 측정한 전단파속도를 통하여 전단탄성계수를 도출하였고 이를 문헌자료와 비교·분석하였다. 그 결과, 현장에서 도출된 전단탄성계수 값이 최소 17.36MPa에서 최대 28.13MPa로 확인되어 참고문헌 값과 유사한 측정값을 확인하였다. 이를 통해 Flat TDR을 이용하여 측정한 전단탄성계수의 신뢰성이 높음을 확인하였으며, 현장 지반의 다짐관리를 효과적으로 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 기성훈, 이진욱(2020) “전단파 속도 측정을 통한 콘크리트 강도 및 탄성계수 평가: 재령 3일에서 28일 실험결과”, 한국철도학회 논문집 제 23권, 2호, pp. 120-134.
2. 김동수(2007), “지반공학 분야에서의 전단파속도의 활용”, 한국지구물리탐사학회 2007년도 공동학술대회 논문집, pp. 7-23.
3. 김동주, 김정석(1999), “TDR(Time Domain Reflectometry)에 의한 사력토 (Sandy-Gravelly Soil)의 함수량 측정”, 한국수자원학회 논문집, 제 32권, 3호, pp. 215-233.
4. 김대성, 유지형(2014), “시간영역반사법을 이용한 현장함수비와 건조밀도 측정”, 한국방재학회 논문집, 제 14권, 5호, pp. 101-108.
5. 김빛나래, 조아현, 조성오, 남명진, 편석준, Koich Hayashi(2019), “표면파 탐사 : 능동 탐사법을 중심으로“, 한국지구물리·물리탐사회 지구물리와 물리탐사, 제 22 권, 4호, pp. 210-224.
6. 김성인, 박형준, 김동수(1999), “표면파시험과 공진주시험을 이용한 사질토지반 개량평가 시스템의 개발”, 한국지반공학회 논문집, 제 15권 1호, pp. 41-52.
7. 김완민(2017), Flat TDR 시스템의 정밀도 분석, 석사학위논문, 조선대학교
8. 김종태, 박현준, 김경섭, 김동수(2008), “표면파 탐사 기법을 이용한 락필댐 사력재의 전단파 속도 획득”, 한국지구물리탐사학회 2008년도 공동학술대회 논문집, pp. 101-106.
9. 김학성, 정영훈, 목영진, 이진욱(2013), “다짐에너지를 고려한 노반 성토재료의 탄성과 속도변화의 실험적 분석”. 대한토목학회 논문집, 제 33권, 3호, pp. 1037-1047
10. 김형신, 문성우, 임국묵, 서용석(2021), “농업용 저수지 제체에서의 그라우팅 주입효과 확인방법의 검증”, 대한지질공학회 지질공학 31권 3호, pp. 381-393.
11. 목영진, 박철수, 임정열, 최충락(2007), “현장탄성파시험을 이용한 강화노반의 시간적 강성변화”, 한국철도학회 학술대회논문집, pp. 36-43.
12. 박경호(2015), 친환경 바이오그라우팅공법에 대한 모래지반에서의 적용성 평가, 박사학위논문, 조선대학교

13. 박철수(2008), 동적물성치를 이용한 철도노반의 회복탄성계수 산정과 품질관리 방안, 박사학위논문, 경희대학교
14. 박형춘, 오현주(2020), “신뢰성 기반 해석을 위한 국내 필댐 구성 재료의 전단파 속도 변동계수 결정”, 한국지반공학회논문집, 제 36권, 4호, pp. 31-39.
15. 변용훈, 조세현, 윤형구, 추연욱, 김동수, 이종섭(2012), “압축파와 전단파를 이용한 불포화토의 간극비 산정”, 한국지반공학회논문집, 제 28권, 12호, pp. 41-51.
16. 송민우(2016), 흙의 지반공학적 특성 평가를 위한 비파괴 측정 시스템 개발, 석사학위논문, 조선대학교.
17. 안지환, 남정희, 권수안, 조성호(2008), “전단파속도를 이용한 콘크리트의 압축강도 추정연구”, 한국도로학회 논문집, 제 10권, 3호, pp. 171-178.
18. 오상훈(2008), 삼축압축시험과 전단파 속도 계측을 이용한 정규압밀 점성토의 강성도와 전단강도의 상관관계, 석사학위논문, 경희대학교
19. 이종섭, 이창호(2006), “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, 한국지반공학회 논문집, 제 22권, 5호, pp. 47-57.
20. 임남운(2012), 시간영역반사법을 이용한 성토지반 함수비 및 밀도 측정에 관한 연구, 박사학위논문, 경일대학교
21. 정영석, 사회동, 강성훈, 오세봉, 이종섭(2015), “TDR 측정시스템이 도입된 압력판 추출 시험기를 이용한 흙-함수특성곡선 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 31권, 8호, pp.17-28
22. 정재우(2009), 벤더 엘리먼트를 이용한 연약지반의 현장 전단탄성계수 측정 시스템 개발, 박사학위논문, 경희대학교
23. 조명환, 이운한, 김낙석, 박주영(2010), “Time Domain Reflectometry 방식을 이용한 도로 하부의 함수비 계측 및 보정 방안에 관한 연구”, 한국방재학회 논문집, 제 10권, 2호, pp. 23-30.
24. 최용성, 김병일, 문인중, 허준(2016) “양생조건에 따른 SSG공법의 일축압축강도 평가”, 한국산학기술학회 논문집, 제 17권, 2호, pp. 15-20.
25. 최찬용, 박재범, 임상진, 지상현, 임유진(2016), “국내 철도레도 흙노반 재료의 회복탄성계수(MSUBRSUB)-전단탄성계수(G) 상관성 분석”, 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 964-968.
26. 홍원택, 정영석, 이종섭, 변용훈(2015), “지반의 함수비 평가를 위한 관입형 TDR 프로브의 개발 및 적용”, 한국지반공학회 논문집, 제 31권, 2호, pp.

- 39-46.
27. 홍원택, 최찬용, 임유진, 이종섭(2018), “크로스홀 형태의 동적 콘 관입기를 이용한 노반의 강성특성 평가”, 한국지반공학회논문집, 제 34권, 2호, pp. 55-63
  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. Bolt, B.A.(1976), Nuclear Explosions and Earthquakes, W.H. Freeman and Company.
  30. Barker J. M., Lascano, R. J. (1989), “The Spatial Sensitivity of Time-Domain Reflectometry”, Soil Science, Vol. 147, No. 5, pp. 378-384.
  31. Das, B.(2016), Principles of Geotechnical Engineering, Cengage Learning
  32. Chan, C.M.(2010), “Bender Element Test in Soil Specimens: Identifying the Shear Wave Arrival Time”, EJGE, Vol. 15, No. 2010, pp. 1263-1276.
  33. Clarkson, T.S., Glasser, L, Tuxworth, R.W. and 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.
  34. Drnevich, V., Lin, C., Yi, O. and Lovell, J.(2001a), “Real-time Determination of Soil Type, Water Content, and Density using Electromagnetics”, Joint Transportation Research Program, pp. 177.
  35. Drnevich, V. P., Yu, X., Lovell, J. and Tishmack, J.(2001b), “Temperature Effects on Dielectric Constant Determined by Time Domain Reflectometry”, Proc. TDR, Purdue University, pp. 1-10.
  36. Fellner-Feldegg, H.(1969), “The Measurement of Dielectrics in the Time Domain”, The Journal of Physical Chemistry, Vol. 73, No. 3, pp. 616-623.
  37. Giese, K. and 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.
  38. Giulio, C., Chapman, D.N. and Royal, A.C.D.(2018), “Time Domain Reflectometry (TDR) Potential for Soil Condition Monitoring of Geotechnical

- Assets,” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 56, No. 7, pp. 942–955.
39. JGS 1433–1955, Method for Portable Dynamic Cone Penetration Test, 地盤工學會基準
  40. Jung, S., Drnevich, V. and 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.
  41. Lee. K.W. and Singh, A.(1971). “Relative Density and Relative Compaction”, Journal of The Soil Mechnics and Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM7, pp. 1049–1052.
  42. Kraus, J.D.(1992), Eletromagnetics, McGraw–Hill, Inc., New York.
  43. Bhuyan, M. H., Islam, S., Grobler, J. and Lee, J.(2020), “Application of Time Domain Reflectometry Method in Monitoring State Parameters of Subgrade Soil in Pavement”, Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, Vol. 146, No.2, pp. 1–9.
  44. 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
  45. O’Connor, K.M. and Dowding, C.H.(1999), Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes, CRC Press.
  46. Ramo, S., Whinnery, J.R. and Van Duzer, T.(1994), Fields and Waves in Communication Electronics, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley, New York.
  47. Hunt, R.E.(1984), Geotechnical Engineering Investigation Manual, McGraw–Hill Book Company.
  48. 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.
  49. Thring, L.M., Boddice, D., Metje, N., Curioni, G., Chapman, D.N. and 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.

50. Topp, G.C. Davis, J.L. and 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.
51. White, N.K., Sallam, A.M., Ashmawy, A.K. and 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
52. Yu, X., and 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.
53. Yu, X. and Yu, X.(2006), "Time Domain Reflectometry Tests of Multilayered Soils", TDR 2006 Purdue University, pp. 1-16.