

# 다짐지반의 모관흡수력 변화에 따른 탄성계수 평가를 위한 VPPE-BE 시험 시스템 개발

## Development of VPPE-BE Testing System to Evaluate Modulus under Post-Compaction Variation in Matric Suction for Unsaturated Compacted Soils

이 세 현<sup>1</sup> Lee, Sei-Hyun                      서 원 석<sup>2</sup> Seo, Won-Seok  
추 연 옥<sup>3</sup> Choo, Yun-Wook                    김 동 수<sup>4</sup> Kim, Dong-Soo

### Abstract

The volumetric pressure plate extractor (*VPPE*) was modified for the measurement of shear wave velocity ( $V_s$ ) at various levels of matric suction as well as soil water characteristic curve (*SWCC*). A non-destructive technique with a pair of bender element (*BE*) was employed in order to measure the  $V_s$  and the corresponding maximum shear modulus ( $G_{max}$ ) of unsaturated soil specimens. Three types of soil were collected from different road construction sites in Korea. For all test soils, the variations in  $G_{max}$  with the various levels of water content and matric suction were investigated using the developed apparatus. Compared with the preceding results from the suction-controlled torsional shear (*TS*) testing system and in-situ seismic tests, the feasibility for evaluating modulus characteristics of unsaturated compacted soils with the developed VPPE-BE system was assessed. It was confirmed that the newly developed system would be potentially helpful in modeling seasonal variation of modulus.

### 요 지

본 논문에서는 불포화 상태로 존재하는 다짐 지반에 대하여 함수특성곡선의 획득뿐만 아니라 다양한 모관흡수력 변화에 따른 탄성계수 평가를 위해 종래의 압력판 추출 시험기(VPPE)를 개선하였다. 이를 위해, 비파괴 시험이 가능한 벤더엘리먼트(BE) 시험 시스템을 도입하여 전단파 속도와 최대 전단탄성계수를 평가하였다. 개발된 시험 시스템을 이용하여 시공 중인 국내 도로 현장에서 채취된 3종의 노상토에 대해 모관흡수력 및 함수비 변화에 따른 최대 전단탄성계수의 변화를 평가하였다. 또한 시험결과를 기존의 모관흡수력 조절 비틀전단시험 및 현장 탄성파 시험으로부터 획득한 결과와 비교함으로써 개발된 시험 시스템의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제안된 새로운 VPPE-BE 시스템은 향후, 탄성계수의 계절적 변화 모델 개발을 위한 도구로서의 효율적인 적용이 가능함을 확인하였다.

**Keywords :** Bender Element (*BE*), Matric Suction, Maximum Shear Modulus ( $G_{max}$ ), Unsaturated Compacted Soil, Volumetric Pressure Plate Extractor (*VPPE*), Water Content

1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)  
2 정회원, 미 텍사스 오스틴 주립대학교 연수연구원 (Member, Post-Doctoral Fellow, Dept. of Civil, Architectural and Environmental Engr., Univ. of Texas at Austin)  
3 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)  
4 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)  
\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지표에 노출된 사면과 더불어, 도로, 철도를 위해 조성된 다짐 지반의 경우, 일반적으로 불포화 상태로 존재한다. 지표 부근에 위치한 불포화 지반의 경우, 강우 및 건조와 같은 자연현상으로 인하여, 계절적인 함수비 변화를 경험한다. 계절적 함수비 변화는 일반적인 지반 거동에 영향을 줄뿐 아니라, 지반-구조물의 역학적 설계 및 내진 설계에서 중요한 요소인 전단탄성계수에도 큰 영향을 미친다(Kim 등, 2003; Kim 등, 2006; Vinale 등, 1999). 따라서 현장 지반이 경험하는 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화를 신뢰성 있게 예측하여 설계단계에서 미리 반영하고, 시공 후 다짐관리에 활용하는 것은 매우 중요하다.

최근 적용되고 있는 역학적경험적 설계개념(Mechanistic-Empirical Design)의 AASHTO 2002 포장설계법은 계절적 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화를 함수비 영향 모델을 통하여 고려한다(NCHRP, 2004). 이는 AASHTO 93 포장설계법에서 소개된 유효회복탄성계수 개념에 비하여 현장 지반이 경험하는 함수비 변화에 따른 회복탄성계수의 변화를 보다 엄밀히 예측할 수 있다는 점에서 진보적이고 합리적이다. 그러나 제안된 함수비 영향 모델은 다짐함수비를 조절하여 성형된 시편들의 탄성계수 측정 결과들을 기반으로 결정되었다(Witczak 등, 2000). 이는 다짐시마다 입자 배열 등과 같은 구조적 변화를 유발하므로, 다짐 후 계절적 영향에 의해 함수비가 변하는 현장 상황과는 큰 차이를 나타낼 수 있다(Vinale 등, 1999; Kim 등, 2003).

실제 현장 지반은 일정한 함수비와 밀도에서 다짐시공이 이루어진 후 시공 또는 시공 후 공용기간 중에 강우나 건조에 의해 함수비 변화가 발생하게 된다. 또한 포장 하부구조 노상층과 같은 지표 부근의 지반은 지하수위 위에 존재하여 불포화토의 특성을 나타내므로 모관흡수력(Matric Suction)의 차이에 따라 지반의 거동이 특성화된다. 따라서 실내시험에서도 실제 현장 상황과 같이 하나의 다짐함수비로 시편을 성형한 후, 모관흡수력을 조절하여 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화를 평가하는 다짐후 방법(post compaction method)이 보다 합리적인 평가 방법으로 인식되고 있다(Witczak 등, 2000; Kim 등, 2006).

전술된 인식과 함께, 노상토의 다짐후 함수비 변화에 따른 회복탄성계수의 변화를 평가하는 연구 결과가 발표되었다(Drumm 등, 1997; Ceratti 등, 2004; Houry 등, 2004). 이들 연구는 다짐후 시편의 함수비가 증가하는

습윤(wetting)과정을 모사하기 위해 배압을 이용하여 시편 바닥으로부터 물을 강제로 주입하거나, 자연적으로 물을 흡수시키는 방법을 사용하였고, 시편의 함수비가 감소하는 건조(drying)과정을 모사하기 위해서는 상온 건조 또는 오븐 건조 방법을 사용하였다. 그러나 이들은 불포화토의 핵심 특성인 모관흡수력과 함수비 사이의 관계를 체계적으로 고려하지 못하고 있다.

이와 같은 필요에 따라 Kim 등(2003)과 서원석 등(2007)은 지반의 동적물성치를 평가하는 대표적 실험인 공진주/비틀전단시험 시스템을 모관흡수력 조절이 가능하도록 개선하여 모관흡수력 및 함수비 변화에 따른 지반의 변형특성을 평가하였다. 하지만 공진주/비틀전단시험의 시험시편은 길이가 100mm로 비교적 길기 때문에 각 모관흡수력 단계에서 함수비 평형화에 도달하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. Leong 등(2006)은 점토질 모래 계열(SC)의 100mm 길이의 시편은 하나의 모관흡수력 단계에서 함수비 평형화를 위해 7일에서 12일 정도의 시간이 필요하다고 보고한 바 있다. 추후 다양한 지반에 대한 D/B를 구축하고, 이를 바탕으로 탄성계수에 대한 함수비 영향모델을 구성하기 위해서는, 빠른 시간에 효율적으로 신뢰성 있는 결과를 획득하는 시험 시스템이 필요하다.

이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 불포화 지반의 함수특성곡선을 획득하기 위해 사용되는 압력판 추출 시험기와 시편의 탄성계수를 간편하게 평가할 수 있는 벤틀리엘리먼트 시험을 결합하여 불포화 지반의 탄성계수를 비교적 빠른 시간에 효율적으로 평가할 수 있는 시험 시스템을 제안하였다. 개발된 시스템을 이용하여 3종의 노상토에 대해 모관흡수력 및 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화를 평가하였고, 이를 현장 탄성과 시험 및 기존 비틀전단시험으로부터 획득한 결과(서원석 등, 2007)와 비교하여 본 시험 시스템의 타당성을 검증하였다.

## 2. 모관흡수력 조절 탄성계수 평가 시스템

### 2.1 압력판 추출 시험기(Volumetric Pressure Plate Extractor, VPPE)의 개선

본 연구에서는 모관흡수력 조절을 통하여 함수비 변화 및 탄성계수 변화를 평가하기 위해, 함수특성곡선 획득에 많이 활용되는 기존의 압력판 추출 시험기를 전단파 속도( $V_s$ ) 측정이 가능하도록 개선하였다. 압력판 추출 시험기는 압력셀 내 시험 시편에 공기압을 이용하여 모

관흡수력을 조절하여, 발생하는 함수비 변화를 측정하여 시편의 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)을 평가하기 위해 사용된다. 이외에도 함수특성곡선을 구하기 위해 Tempe 압력셀, 데시케이터 등 여러 장비들이 개발되어 이용되고 있다. 각각의 시험 장비에 따라 적용범위와 장단점이 있으나, 강우로 인한 습윤과정 및 증발로 인한 건조과정을 반복하며 이에 따른 함수특성곡선과 탄성계수의 변화를 연구하기 위해서는 압력판 추출 시험기가 가장 적합하다.

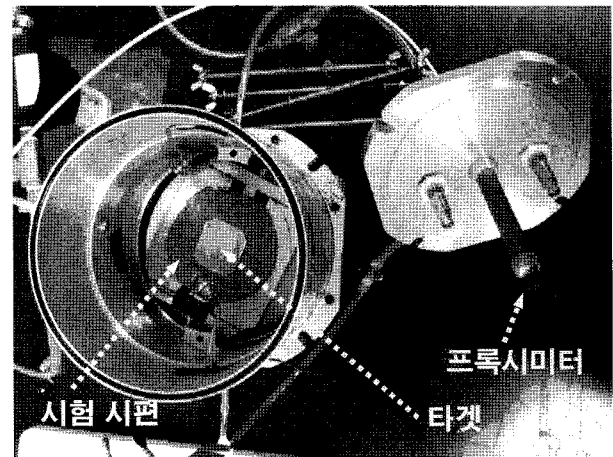
압력판 추출 시험기는 압력셀과 세라믹 디스크, 시편으로부터 나오고 들어가는 물의 양을 측정할 수 있는 뷰렛시스템으로 구성된다. Soilmoisture Equipment Corp.에서 개발하여 널리 사용되고 있는 압력판 추출 시험기는 세라믹 디스크의 최대 공기 함입치(High Air Entry Value)가 200kPa로, 다량의 세립분이 포함되어 있는 실트 및 점토 계열 시편에 대해서는 건조측으로의 함수비 조절 폭에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 최대 공기 함입치가 500kPa인 세라믹 디스크를 사용하여 보다 넓은 함수비 범위까지 시험을 수행할 수 있도록 시험 시스템을 개선하였다.  $V_s$ 를 측정하기 위하여 벤더엘리먼트를 그림 1과 같이 구속용 시편링의 양 끝단에 설치하여, 한쪽 단에서 가진되는 전단파가 시편을 통과하여 반대편 벤더엘리먼트에 도달하도록 하였다. 또한 벤더엘리먼트 시험을 위한 구속용 시편링의 사용에 따라 압력판 추출 시험기의 내경을 기존 시험기의 약 1.5배로 확대하였다. 시료의 기본 물성에 따라 정도의 차이는 있으나 건조와 습윤과정을 겪으면서 함수비 변화에 의해 시편의 부피 변화가 발생하게 되고, 이는 시편의 간극비 변화와 함께 단위중량을 변화시킨다. 벤더엘리먼트 시험으로부터 평가한 시편의  $V_s$ 를 보다 정확하게 최대 전단탄성계수( $G_{max}$ )로 변환하기 위해서는 시편의 부피 변화를 측정할 필요가 있다. 본 연구에서는 Bently Nevada

사의 비접촉식 트랜스듀서인 프록시미터(Proximitor)를 압력판 추출 시험기에 부착하여 시험 중 시편으로 물이 들어오고 나감에 따라 유발되는 부피변화를 측정하였다. 사용된 프록시미터는 모델명 3300XL 11mm로 선형 측정 범위는 4mm 이다.

본 연구에서 제작한 벤더엘리먼트 시험이 가능하도록 개선된 압력판 추출 시험기의 개요도와 실제 모습을 그림 1과 사진 1에 각각 나타내었다.

## 2.2 벤더엘리먼트(Bender Element, BE) 시험

시편의 탄성계수를 측정하기 위해 벤더엘리먼트(Bender Element)를 구속용 시편링에 설치하였다. 벤더엘리먼트는 기계적 에너지와 전기적 에너지의 상호변환이 가능한 압전센서로서, 삼축시험기, 압밀시험기 등 다양한 실내시험 장비에 부착되어 다양한 시험 조건에서 비교적 간단하게 시편의 전단파 속도( $V_s$ )를 측정하고 이를 바탕



(a) 시험 시편이 설치된 시험 시스템의 모습



(b) 시험 준비가 완료된 후의 모습

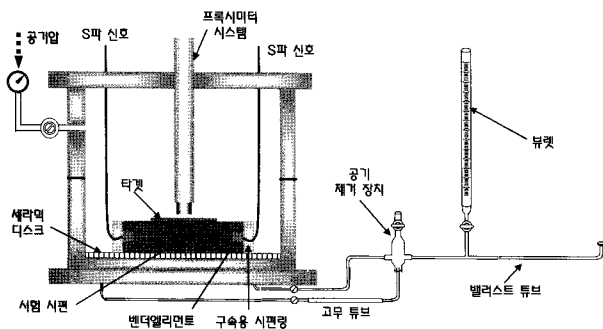


그림 1. 개선된 압력판 추출 시험기의 구성도

사진 1. 개선된 VPPE-BE 시험 시스템

으로 미소 변형률 영역( $\gamma < 10^{-4}\%$ )에서의 최대 전단탄성 계수( $G_{max}$ )를 평가하기 위해 사용된다. 측정된  $V_s$ 는 식 (1)을 이용하여  $G_{max}$ 로 변환된다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서,  $\rho$  = 단위 중량

본 연구에서 사용된 벤더엘리먼트(PZT 5H, Piezocrystal bender elements, Morgan Matroc Inc., Bedford, Ohio, USA)는 가로 12.7mm, 세로 8mm, 두께 0.7mm를 가지고, 절연을 위해 폴리우레탄으로 이중코팅하였으며 이후 에폭시를 이용하여 구속용 시편링에 약 4mm 정도 돌출된 상태에서 캔틸레버 형식으로 고정하였다. 또한 시편 내 물에 의한 수신 신호에서의 누화(cross-talk)현상을 방지하기 위해 전도성물질(silver conductor)을 폴리우레탄 코팅위에 재코팅하고 이를 그라운드에 연결하였다(Santamarina 등, 2001).

이성진(2004)은 국내 화강풍화토의 함수특성곡선을 획득하기 위해, 내경 50mm, 높이 15mm의 구속용 시편링을 사용하였다. 본 연구에서는 벤더엘리먼트의 설치 및 벤더엘리먼트 시험시 발생하는 근접장 영향을 최소화하기 위해, 구속용 시편링의 내경을 85mm, 높이를 20mm로 증가시켰다. 또한 벤더엘리먼트 시험시 구속링을 매질로 하여 신호가 전달되는 것을 차단하기 위해 연성이 좋은 우레탄을 구속링 부품들 사이에 설치하여 흡진기(damper) 역할을 하도록 하였다.

벤더엘리먼트가 설치된 구속용 시편링은 그림 2에 나타내었다.

### 2.3 제안된 시험 시스템의 장점

본 시험 시스템에서 사용하는 시험 시편의 높이는

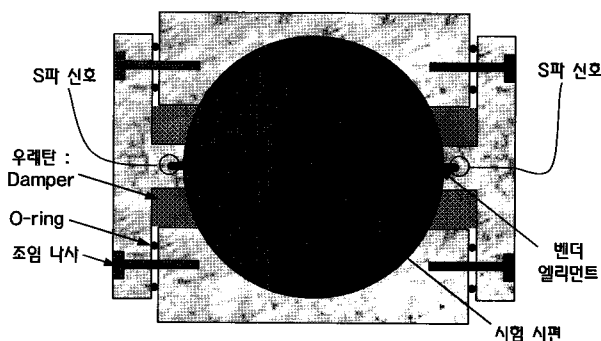


그림 2. 벤더엘리먼트가 설치된 구속용 시편링

20mm로 공진주/비틀전단시험 또는 삼축압축시험에서 사용하는 시편의 높이인 100mm 또는 150mm보다 월등히 작다. 일반적으로 시편에 모관흡수력을 가한 후 함수비 평형화에 이르는 시간은 시편 높이의 제곱에 비례한다(Soilmoisture Equipment Corporation). 이와 같이 본 시험 시스템은 기존 시험 시스템과 비교하여 상당히 빠른 시간 안에 시험을 완료할 수 있어, 다양한 종류의 흙을 대상으로 실험을 수행하여 D/B를 구축하고, 이를 바탕으로 탄성계수에 대한 함수비 영향모형을 구성하는데 있어서 매우 효율적이다. 또한 시편으로부터 물이 나오는 건조과정뿐만 아니라, 물이 침투해 들어가는 습윤과정까지 간편하게 구현이 가능하므로 시험과정에 따른 탄성계수의 이력현상을 평가하는 것이 가능하다.

공진주/비틀전단시험, 삼축압축시험과 달리 압력판 추출 시험에서는 시험 시편에 가해지는 수직 순응력(net stress)의 값은 0이다. 따라서 구속응력의 영향을 받지 않고, 오직 모관흡수력에 의한 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화 경향을 평가할 수 있는 이점이 있다. 이는 AASHTO 2002 설계법과 같이 응력에 따른 영향과 함수비 변화에 따른 영향을 독립적으로 고려하는 모델식을 구성할 경우, 합리적인 시험 방법이 될 것이다.

또한 불포화토의 함수특성곡선, 전단강도, 탄성계수 등의 물성을 평가할 때, 각각의 모관흡수력 단계에서의 함수비 평형화 시점을 정확하게 결정하여야 한다. Sivakumar(1993)는 연구 결과에서 함수비 변화량이 0.04%/일 이내가 되는 시간을 평형화 시점으로 발표하였고, 많은 선행연구자들도 뷰렛 시스템으로 시편으로부터 나오고 들어가는 물의 양을 측정하여 평형화 시점을 결정하였다(Vinale 등, 1999; Kim 등, 2003; 이성진, 2004). 본 시험 시스템에서는 뷰렛 시스템 뿐 아니라, 프록시미터를 이용하여 물의 유입과 방출로 인한 시편의 부피 변화율을 측정하고, 동시에 벤더엘리먼트 시험으로부터 시편의  $V_s$  변화율을 함께 평가함으로써 평형화 시점을 보다 정확하게 결정할 수 있다.

## 3. 시험시료와 시험절차

### 3.1 시험시료

본 연구를 통해 개발된 시험 시스템을 검증하기 위해, 3곳의 다짐 현장에서 채취한 교란시료를 이용하였다.

각 시험 시료에 대해 입도분포시험(체가름 시험)과 다짐시험(수정 Proctor 다짐, D 다짐)을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다. 이 중 2종(UCS-1, UCS-2)은 낮은 소성지수 및 세립분 함유량이 1% 내외이고 통일분류법으로 SW, SP에 해당하는 모래 계열 다짐 지반이지만, 나머지 1종(UCS-3)은 14.2%의

높은 소성지수 및 세립분 함유량이 33.9%, SC로 분류되는 점토 성분을 다량 함유한 흙으로 나타났다. 또한 다짐곡선에서도 UCS-3의 최적함수비와 최대 건조단위중량이 나머지 2종의 시료와 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이상과 같은 각 시험 시료의 주요 기본물성치를 표 1에 정리하였다.

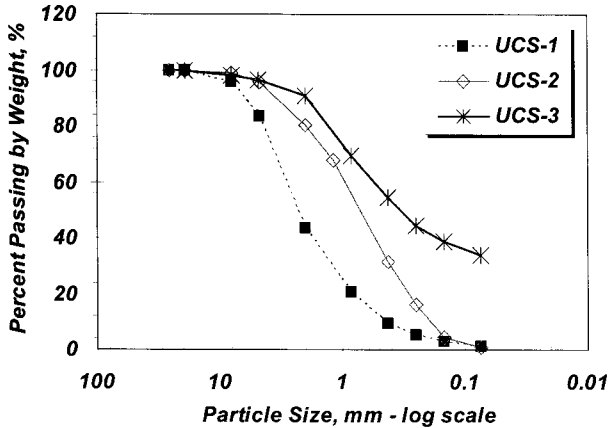


그림 3. 시험 시료의 입도분포곡선

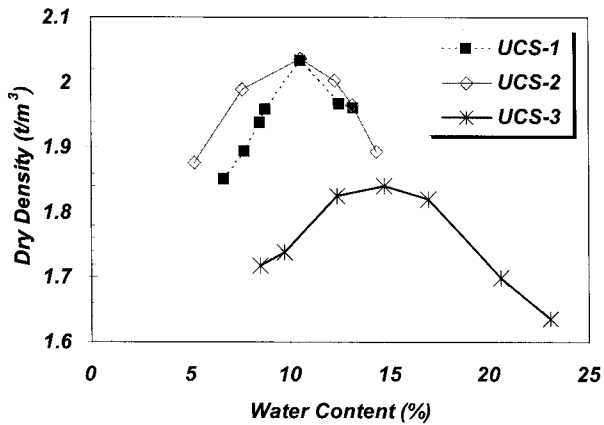


그림 4. 시험 시료의 다짐곡선

표 1. 시험 시료의 주요 기본물성치

구분		UCS-1	UCS-2	UCS-3
입도분포 시험	D <sub>95</sub> (mm)	7.8	4.1	4.0
	D <sub>50</sub> (mm)	2.4	0.8	0.34
	C <sub>c</sub>	1.2	0.8	-
	C <sub>u</sub>	6.9	5.1	-
	#200 통과량 (%)	1.3	0.9	33.9
	#4 통과량 (%)	83.7	95.7	96.6
비중 (G <sub>s</sub> )		2.65	2.67	2.71
소성지수 (PI, %)		NP	4.9	14.2
흙 분류	통일 분류	SW	SP	SC
	AASHTO 분류	A-1-a	A-1-b	A-2-6
다짐시험	OMC (%)	10.5	10.6	14.8
	γ <sub>d,max</sub> (t/m <sup>3</sup> )	2.03	2.04	1.84

### 3.2 시험 절차

각각의 시험 시료를 다짐시험으로부터 획득한 최적함수비와 최대건조단위중량의 95%로 맞추어 그림 1과 같이 구속용 시편링에 성형하였고, 이를 압력판 추출 시험기의 세라믹 디스크 위에 올려놓는다. 이 때 세라믹 디스크는 사전에 충분히 물에 적셔 포화된 상태로 준비한다. 이후, 세라믹 디스크의 가장자리에 물을 붓고 시편이 물을 빨아드려 포화될 때 까지 기다린다. 포화가 완료되면 세라믹 디스크 위의 물을 화장지로 제거하고, 구속셀을 설치한 후, 공기압을 이용하여 시편에 모관흡수력을 가하게 된다. 세라믹 디스크의 공기함입치(Air-Entry Value)를 고려하여 0.1, 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 400kPa와 같이 9단계로 모관흡수력을 변화시켜가며 시험 시편의 함수비와  $V_s$ 를 평가하였다.

시편의 포화 후 모관흡수력을 0.1kPa에서 400kPa까지 단계별로 증가시키며 첫 번째 건조과정(1<sup>st</sup> Drying Process)을 구현하였다. 각 모관흡수력 단계에서 시료 내부에 모관흡수력이 균등하게 발현되어 함수비 평형화가 이루어지면, 프록시미터를 이용하여 시편의 높이 변화를 측정하고, 함수비 변화를 평가하기 위해 시편으로부터 유출된 물의 양을 뷰렛 시스템으로 측정한다. 마지막으로 벤더엘리먼트 시험을 수행하여 시편의  $V_s$ 를 측정 후, 다음 모관흡수력 단계로 넘어간다. 시료의 세립분 함유량, 소성지수 등 기본물성에 따라 다르지만, 각 모관흡수력 단계에서 24시간 이내에 대부분의 시료가 함수비 평형화에 도달하는 것을 확인하였다.

1차 건조과정이 완료되면, 셀 내부의 공기압을 단계별로 감소시키며 1차 습윤과정(1<sup>st</sup> Wetting Process)을 수행하게 된다. 이 과정 중에는 물이 시편 내부로 들어가면서 시편의 함수비 및 부피가 증가하게 된다. 이를 건조과정과 마찬가지로 뷰렛 시스템과 프록시미터를 이용하여 측정하고, 벤더엘리먼트 시험을 통해  $V_s$ 를 평가한다.

이후 같은 방법으로 3종의 시험 시료에 대해 2차 건

조과정(2<sup>nd</sup> Drying Process)을 수행하였고, UCS-2 시료에 대해서는 2차 습윤과정(2<sup>nd</sup> Wetting Process)까지 시험을 수행하였다.

#### 4. 시험결과 및 분석

##### 4.1 모관흡수력 및 함수비에 따른 $G_{max}$ 의 변화

본 연구에서 벤더엘리먼트 시험을 통해 획득한 전단파의 가진 및 수신 신호의 대표적인 예를 그림 5에 나타내었다. 신호발생기(HP 33120A)에서 하중주파수 5kHz의 정현파를 발생시켜 가진 신호로 이용하였고, 고분해능 오실로스코프(HP 54624A)에서 128번 신호평균(Signal Averaging)을 수행하여 획득한 가진 및 수신 신호는 2MHz 샘플주파수로 플로피 디스크 내에 저장하여 분석을 수행하였다.

벤더엘리먼트 시험에서  $V_s$  측정은 전단파의 전파거리와 전파시간의 결정이 중요하다. 많은 선행 연구들에 따르면 가진 및 수신 벤더엘리먼트의 끝단 사이의 거리(tip-to-tip)가 전파거리로 고려된다(Dyvik 등, 1995; Viggiani 등, 1995). 본 연구의 시험시스템에서는 전파거리가 78mm로 측정되었다. 전파시간의 결정은 그림 5에 나타낸 바와 같이 가진 신호의 가진 시점과 수신 신호의 전단파 도달 시점의 차이를 이용하는 Start-to-Start 방법을 적용하였다. 전단파의 최초 도달 시점은 수신 신호에서 P파 및 근접장 효과에 따른 신호를 고려하여 주요한 전단파의 도달을 확인한 후, 전단파 도달 이전에 이들의 영향을 받지 않는 부분의 평균 전압값(DC)과 첫 번째 전단파의 측정 전압값이 일치하는 시점(그림 5, "Arrival")으로 결정하였다(김동수 등, 2005).

시험 시료 UCS-2에 대해 1차 건조과정, 습윤과정, 2차 건조과정, 습윤과정을 순차적으로 수행하면서 획득한 파형을 그림 6에 나타내었으며 위에서 언급한 Start-to-Start

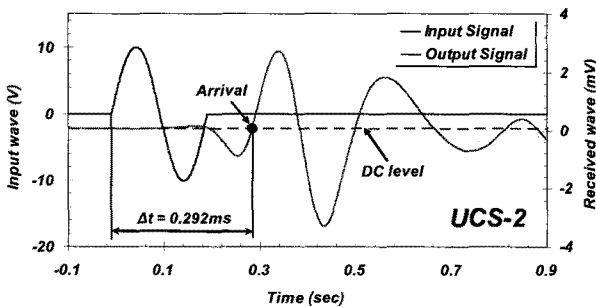


그림 5. 벤더엘리먼트 시험시 전형적인 신호 및 전단파 수신 시간 결정 예

방법으로 추정된 전단파 성분의 도달시점을 하향 화살표로 표기하였다. 그림 6에서 신호와 함께 표기된 각 신호의 이름은 각 과정의 모관흡수력 단계를 의미한다. 예를 들어, "1D-20"은 1차 건조과정의 모관흡수력 20kPa에서 획득한 신호를, "2W-50"은 2차 습윤과정의 모관흡수력 50kPa에서 획득한 신호를 의미한다. 모관흡수력이 증가함에 따라 시편의 함수비가 감소하는 건조과정에서는 전단파의 도달시점이 점차적으로 빨라지고, 모관흡수력이 감소함에 따라 시편의 함수비가 증가하는 습윤과정에서는 전단파의 도달시점이 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 같은 모관흡수력에서의 신호라 할지라도 건조과정인지, 습윤과정인지에 따라, 또한 1차 과정인지 2차 과정인지에 따라 전단파의 도달시점이 조

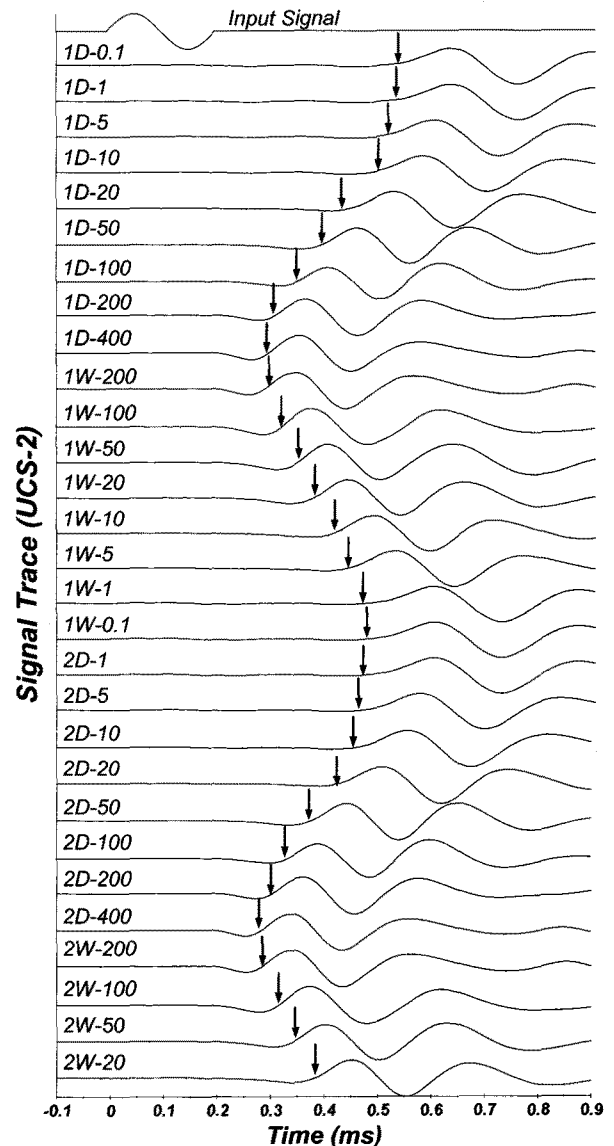
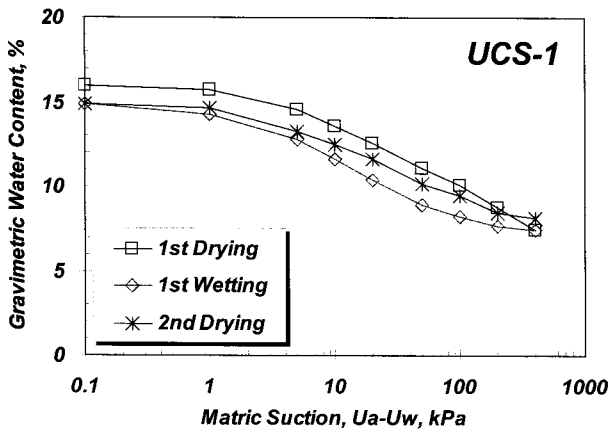


그림 6. 건조 및 습윤과정을 반복하며 획득한 파형(UCS-2)

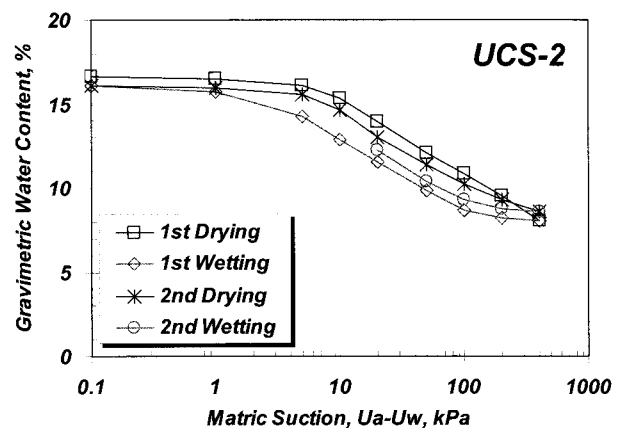
급씩 다른 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 이력현상 (Hysteresis)은 탄성계수 뿐 아니라 함수특성곡선, 불포화 전단강도, 불포화 투수계수 등 많은 불포화 지반 설계 정수에서 관찰된다(박성완 등, 2006; 이성진, 2004; Nishimura와 Fredlund, 2002).

본 연구에서 개발된 시험 시스템을 이용하여 수행된 UCS-1, UCS-2, UCS-3에 대한 시험결과를 그림 7~9에

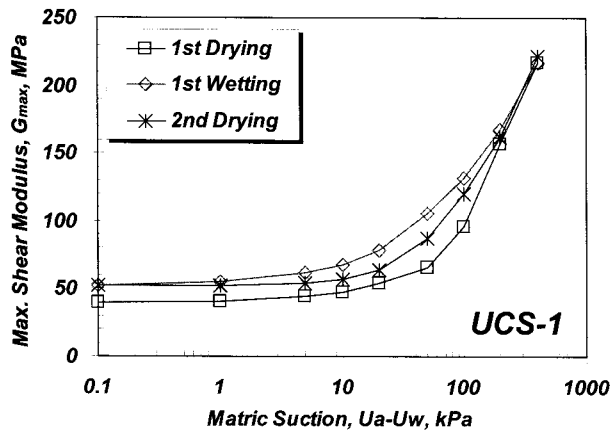
나타내었다. 건조/습윤 과정에서 나타나는 함수특성곡선 및 모관흡수력에 따른 전단탄성계수의 변화를 각 그림의 (a), (b)에 나타내었고, 이를 조합하여 획득한 함수비에 따른 전단탄성계수의 변화를 (c)에 나타내었다. 건조과정에서는 모관흡수력이 0.1kPa에서 400kPa로 증가함에 따라 흙 입자사이의 접촉응력 증가로 인한 전단탄성계수의 증가가 관찰되었다. 반면, 습윤과정에서는 모



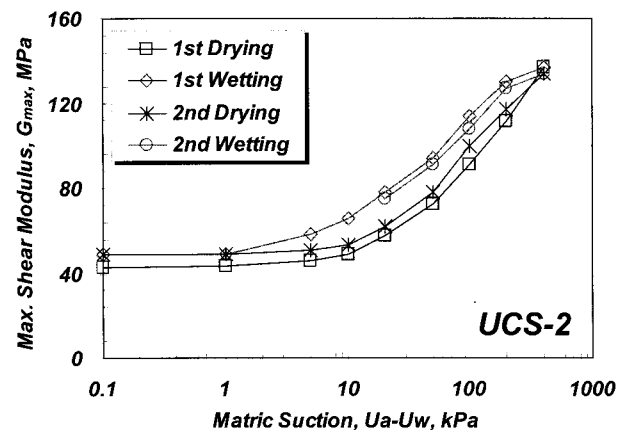
(a) 함수특성곡선



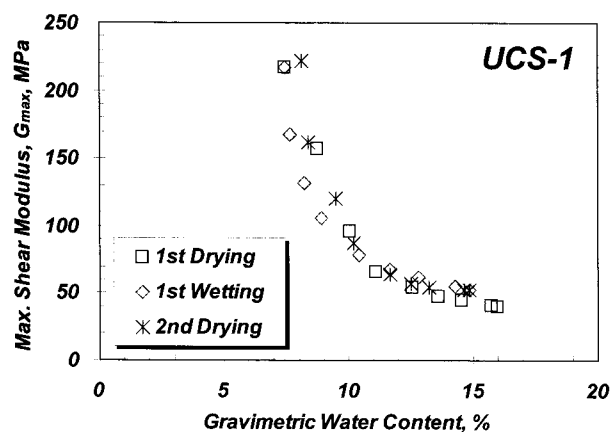
(a) 함수특성곡선



(b) 모관흡수력에 따른  $G_{max}$  평가

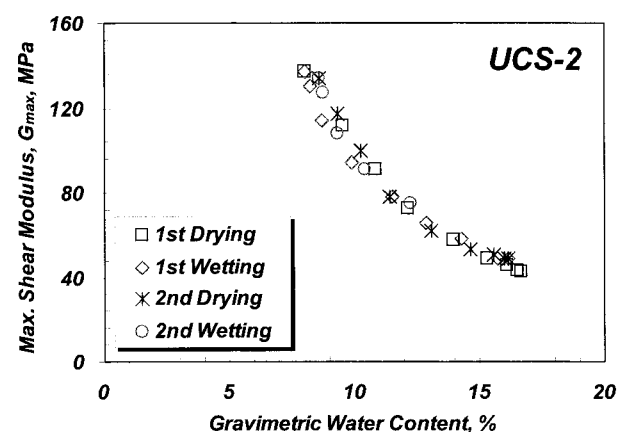


(b) 모관흡수력에 따른  $G_{max}$  평가



(c) 함수비에 따른  $G_{max}$  평가

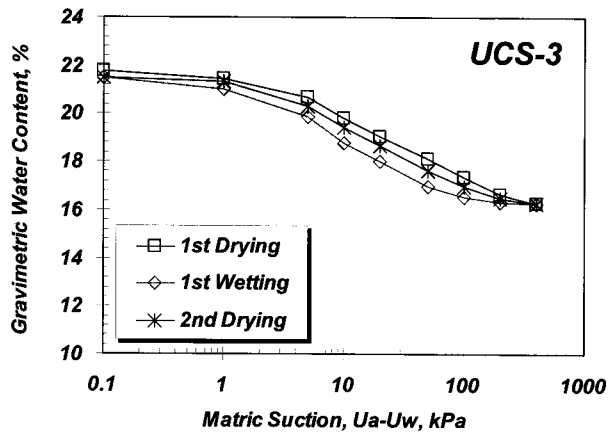
그림 7. UCS-1에 대한 시험 결과



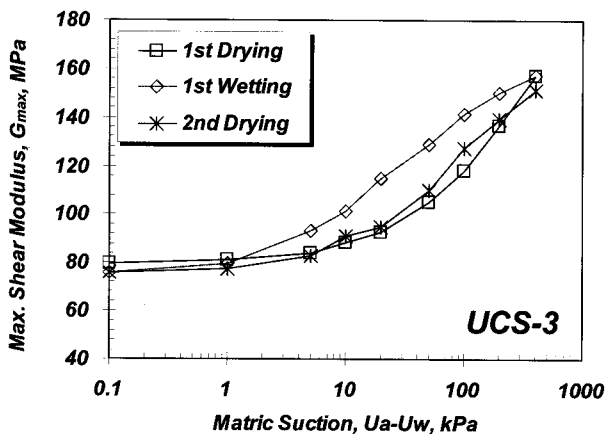
(c) 함수비에 따른  $G_{max}$  평가

그림 8. UCS-2에 대한 시험 결과

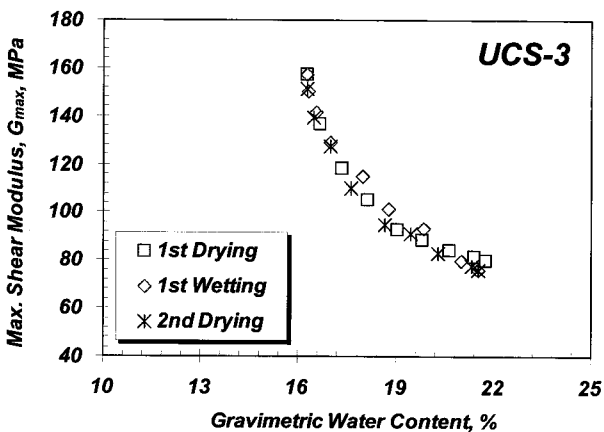
관흡수력이 감소함에 따라 함수비의 증가와 전단탄성계수의 감소가 나타났다. 또한 0.1kPa~400kPa의 범위 내에서 건조 및 습윤과정을 반복하는 동안 함수특성곡선과 모관흡수력에 따른 전단탄성계수 변화에서 이력 현상이 관찰되었다. 함수특성곡선의 결정에 있어서는 이력이 진행될수록 건조과정과 습윤과정의 결과가 수



(a) 함수특성곡선



(b) 모관흡수력에 따른  $G_{max}$  평가



(c) 함수비에 따른  $G_{max}$  평가

그림 9. UCS-3에 대한 시험 결과

렴하는 경향을 나타낸다(그림 7(a), 8(a), 9(a)). 이는 기존의 국내 화강풍화토에 대한 연구결과(이성진, 2004)와 비슷한 경향으로, 시험의 효율성을 고려하여 2차 건조과정의 함수특성곡선을 시료의 대표적인 함수특성곡선으로 결정함이 합리적이다. 동일한 모관흡수력 조건에서 건조과정의 함수비( $w_{c,drying}$ )는 습윤과정의 함수비( $w_{c,wetting}$ )보다 큰 값을 보이는 반면, 건조과정의 전단탄성계수( $G_{max,drying}$ )는 습윤과정의 전단탄성계수( $G_{max,wetting}$ )보다 작은 값을 보인다. 건조과정을 모관흡수력에 의한 하중 재하(Loading) 단계, 습윤과정을 하중 제하(Unloading) 단계로 생각하면, 건조과정 중 가해진 선형 하중에 의한 잔류 응력이 습윤과정의 모관흡수력에 더해져 보다 큰 전단탄성계수를 나타내는 것으로 판단된다. 이는 압밀 시험 중 수직하중의 제하 단계에서 과압밀에 의한 잔류 수평하중의 영향에 의해 하중 재하 단계보다 큰 전단파속도를 보이는 Fam과 Santamarina(1997)의 연구 결과와 유사하다.

그러나 특이할 만한 점은, 같은 시험결과를 함수비와 전단탄성계수의 관계로 나타내어 보면, 이력현상이 현저히 사라지고 하나의 경향성을 가지는 곡선으로 수렴하고 있다(그림 7(c), 8(c), 9(c)). 이는 매우 유용한 현상으로, 모관흡수력에 따른 전단탄성계수의 변화를 건조과정과 습윤과정으로 구분하여 평가하여야 하는 불편함을 극복할 수 있다. 즉, 탄성계수의 계절적 변화를 모관흡수력-탄성계수의 관계보다는 함수비-탄성계수의 관계로 설정함이 보다 적용성에 있어 합리적이며 편리하다고 판단된다.

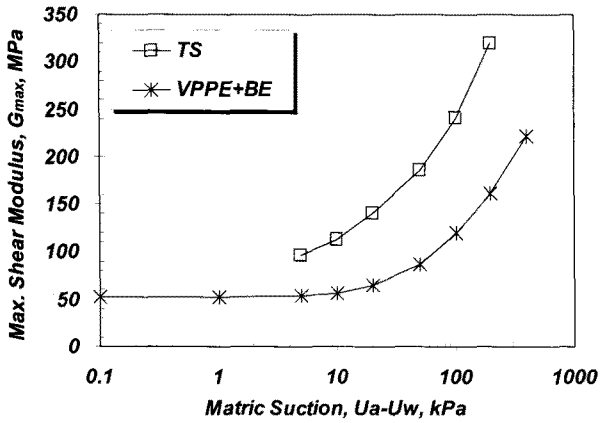
#### 4.2 모관흡수력 조절 비틀전단시험 및 현장 탄성과 시험 결과와의 비교

본 연구에서 개발된 시험 시스템을 통해 획득한 시험 결과의 검증을 위해, 시료가 채취된 각 현장에서 표 2에 정리되어 있는 바와 같이 현장 탄성과 시험을 수행하고, 본 연구에서 획득한 시험 결과와 비교하였다. 건기와 우기에 현장을 방문하여 현장 탄성과 시험과 현장함수비 측정을 수행하였고, 현장에서의 함수비 변화에 따른 탄성과 속도를 평가하였다. 또한, 동일 시료에 대해 수행된 서원석 등(2007)의 비틀전단시험 결과를 이용하여 단계별 모관흡수력 및 함수비에 따른 전단탄성계수 평가 결과를 비교하였다. 이를 위해, 그림 7~9에 나타난 시험 결과 중 2차 건조과정에서 획득한 전단탄성계수를

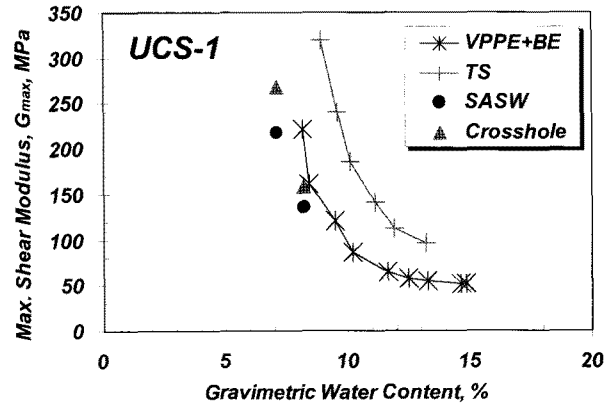


표 2. 비교된 현장 탄성과 시험과 모관흡수력 조절 비틀전단시험

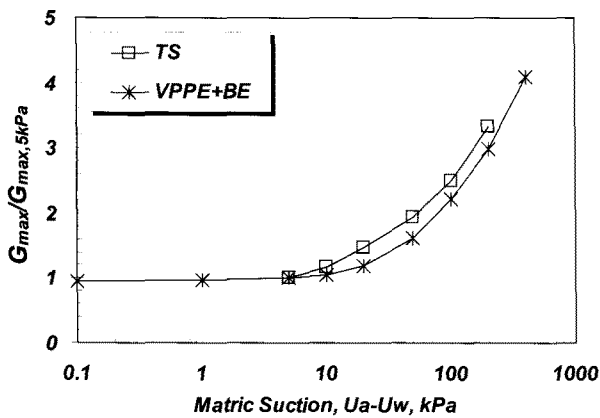
	UCS-1	UCS-2	UCS-3
현장 탄성과 시험	크로스홀 시험, SASW	SASW	크로스홀 시험, SASW
비틀전단시험 (서원석 등, 2007)	모관흡수력 조절 5/10/20/50/100/200kPa	-	모관흡수력 조절 20/50/100/150/200/300/400kPa



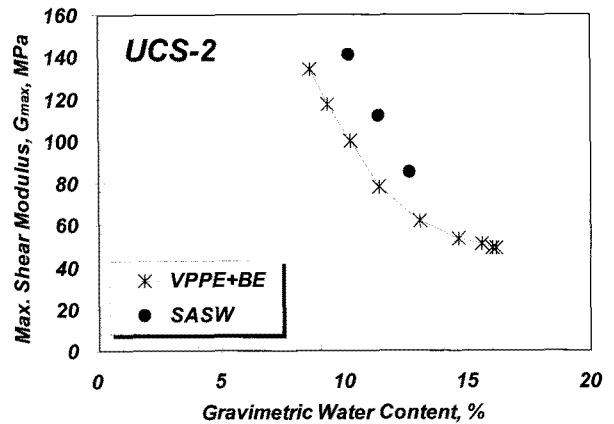
(a) 최대 전단탄성계수의 절대값 비교



(a) UCS-1



(b) 최대 전단탄성계수의 변화율 비교

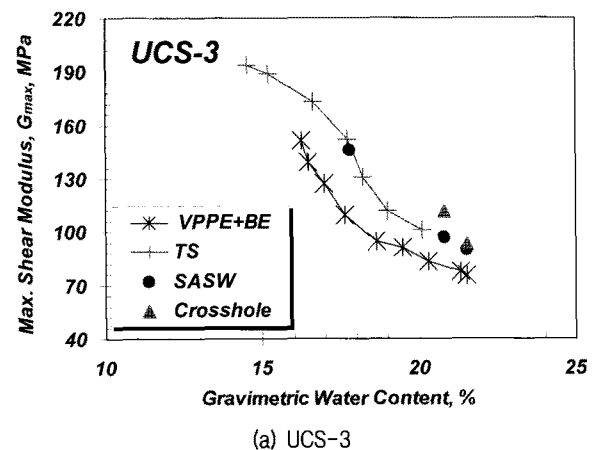


(a) UCS-2

그림 10. 모관흡수력 조절 비틀전단시험 결과와의 비교(UCS-1)

대표 전단탄성계수로 이용하였다.

본 연구에서 획득한 시험 결과와 비틀전단시험 결과의 단계별 모관흡수력에 따른 전단탄성계수의 변화를 비교하여 그림 10에 나타내었다. 본 연구에서 벤더엘리먼트를 통해 획득한 전단탄성계수 값은 동일한 모관흡수력에서 비틀전단시험을 이용하여 획득한 결과보다 작게 평가되고 있는데(그림 10(a)), 이는 시험시편의 구속조건에서 기인한다고 판단된다. 비틀전단시험의 경우 41kPa의 등방 구속압이 주어진 상태에서 시험이 수행되었고, 본 연구에서는 시편의 수직 순응력이 0인 압력판 추출 시험기 내에서 시험이 수행되므로 구속응력 조건에서 차이를 보이고 있다. 그러나 각 모관흡수력에서의 전단탄성계수 값을 비틀전단시험의 최소 모관흡수력



(a) UCS-3

그림 11. 현장 탄성과 시험 및 모관흡수력 조절 비틀전단시험 결과와의 비교

단계인 5kPa에서의 전단탄성계수 값으로 정규화하면 두 시험을 통해 획득한 전단탄성계수의 변화율이 모관

흡수력에 따라 매우 유사한 비율로 증가함을 확인할 수 있다(그림 10(b)). 5kPa이 아닌 다른 모관흡수력에서의 전단탄성계수로 정규화 하여도 그 경향은 유사할 것으로 판단된다.

또한 각 시험 방법에 의해 획득한 함수비에 따른 전단탄성계수의 변화를 그림 11에 나타내었다. 그림 10에서 나타난 현상과 마찬가지로 구속응력 조건에 의해 본 연구에서 획득한 전단탄성계수 값은 동일한 함수비에서 비틀전단시험으로부터 획득한 결과보다 작게 평가되었다. 현장 탄성파 시험 결과 역시, 절대값에서 다소 차이를 보이고 있으나, 이는 현장의 조성조건 및 다짐관리가 실내의 시료조성과 차이가 있기 때문으로 판단된다. 그러나 현장 지반의 조성 후 계절적 변화를 나타내는 함수비 변화에 따른 전단탄성계수 값이 선행 연구 결과들과 비교하여 유사한 경향성을 보이며 변화하고 있음을 확인하였다. 특히, 함수비 변화에 따른 전단탄성계수의 변화율 및 경향이 매우 흡사하여, 추후 계절적 함수비 변화 및 모관흡수력에 따른 탄성계수 평가 및 D/B 구축에 있어 본 연구에서 개발한 VPPE-BE 시스템이 적합한 시험 기법임을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 불포화 다짐 지반의 계절적 함수비 변화에 따른 탄성계수를 평가하기 위해, 불포화 지반의 함수특성곡선 평가에 널리 사용되는 압력관 추출 시험기와 시핀의 전단파 속도를 평가할 수 있는 벤더엘리먼트 시험을 결합하여 불포화 지반의 탄성계수를 빠른 시간에 효율적으로 평가할 수 있는 시험 시스템을 제안하였다.

개발된 시험 시스템을 이용하여 국내 3곳의 도로 현장에서 채취된 시료에 대하여 건조 및 습윤과정을 반복 하면서 함수특성곡선과 모관흡수력에 따른 전단탄성계수의 변화를 평가하였다. 모관흡수력이 증가하는 건조 과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 전단탄성계수가 증가하였고, 모관흡수력이 감소하는 습윤과정에서는 전단탄성계수가 감소하였다. 또한 건조 및 습윤과정을 거치면서 함수특성곡선과 모관흡수력에 따른 전단탄성계수 변화에서 이력현상이 관측되었으나, 함수비-전단탄성계수 관계로 변환하면서 이력현상이 현저히 사라지고, 시험 과정에 상관없이 하나의 경향성을 가지는 곡선으로 수렴하였다.

본 연구에서 개발된 시험 시스템 및 이를 통해 획득

한 시험결과의 검증을 위해, 시료가 채취된 각 현장에서 건기와 우기에 수행된 현장 탄성파 시험 결과와 선행 연구에서 수행된 모관흡수력 조절 비틀전단시험 결과와 비교하였다. 시험 방법 및 구속응력의 차이에 의해 전단탄성계수 절대값의 차이는 존재하나 모관흡수력 및 함수비의 변화에 따른 전단탄성계수의 변화율은 매우 유사한 경향을 보이고 있어, 추후, 불포화 지반의 모관흡수력에 따른 탄성계수 평가 및 D/B 구축 연구를 위한 활용 가능성 및 적합성을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC) 및 2006년도 2단계 두뇌한국21(BK21)사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 김동수, 윤준용, 이세현, 추연옥 (2005), “공진주/비틀전단 시험 및 벤더엘리먼트 시험을 이용한 사질토 지반의 최대전단탄성계수 평가”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 제10호, pp.17-25.
2. 박성완, 신길호, 김병수 (2006), “시험도로 노상토의 불포화 함수 특성 및 이력현상”, *한국도로학회논문집*, 제8권, 제2호, pp.95-104.
3. 서원석, 이세현, 김동수 (2007), “다짐후의 흡수력 조절 시험을 이용한 노상토의 함수비에 따른 변형특성 평가 : I. 거동”, *대한토목학회 논문집*, 제27권, 제1D호, pp.89-99.
4. 이성진 (2004), “화강풍화토의 불포화 전단강도 및 함수특성곡선 산정에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원.
5. Ceratti, J.A., Gehling, W.Y.Y. and Nunez, W.P. (2004), “Seasonal Variations of a Subgrade Soil Resilient Modulus in Southern Brazil”, *Transportation Research Record*, No. 1874, pp.165-173.
6. Drumm, E.C., Reeves, J.S., Madgett, M.R. and Trolinger, W.D. (1997), “Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.7, pp.663-671.
7. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), “Lab Measurements of Gmax using Bender Element”, *Proc. ASCE convention on Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, pp.186-196.
8. Fam, M. and Santamarina, J. C. (1997), “A Study of Consolidation Using Mechanical and Electromagnetic Waves”, *Geotechnique*, Vol.47, No.2, pp.203-219.
9. Leong, E.C., J. Cahyadi and H. Rahardjo (2006), “Stiffness of a Compacted Residual Soil”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Unsaturated Soils 2006 (ASCE GSP 147)*, pp.1169-1180.
10. Khoury, N.N. and Zaman M.M. (2004), “Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation and Soil Suction for Subgrade Soil”, *Transportation Research Record*, No. 1874, pp. 99-107.
11. Kim, D.S., Seo, W.S. and Kim, M.J. (2003), “Deformational Characteristics of Soils with Variations of Capillary Pressure and Water Content”, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.4, pp.71-79.

12. Kim, D.S., Seo, W.S. and Lee, S.H. (2006), "Development of Modulus-Soil Moisture Model for Subgrade Soils Using Suction Control Testing System", *ASCE Geotechnical Special Publication-Pavement Mechanics and Performance*, No. 154, pp.256-263.
13. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (2004), "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", NCHRP 1-37A Final Report.
14. Nishimura, T. and Fredlund, D.G. (2002), "Hysteresis Effects Resulting from Drying and Wetting under Relatively Dry Conditions", *Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils*, Unsat 2002, Brazil, pp.301-305.
15. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, LTD, pp.238-282.
16. Sivakumar, V. (1993), "A Critical State Framework for Unsaturated Soils", Ph.D. Thesis, University of Sheffield.
17. Soilmoisture Equipment Corporation, "Volumetric Pressure Plate Extractor and Hysteresis Attachments", Operating Instructions: Model 1250, Santa Barbara, CA, USA.
18. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), "Interpretation of bender element tests", *Géotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.
19. Vinale F., d'Onofrio A., Mancuso C., Santucci de Magistris, F., Tatsuoka F. (1999), "The Prefailure Behaviour of Soils as Construction Materials", *2nd International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Torino, Italy, 26-29 September 1999, Keynote and Theme Lectures, pp.1-141.
20. Witczak M.W., Andrei D. and Houston W.N. (2000), "Resilient Modulus as Function of Soil Moisture - Summary of Predictive Models", Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A, Inter Team Technical Report (Seasonal 1).

(접수일자 2008. 3. 7, 심사완료일 2008. 5. 19)