

# 모관흡수력 조절을 이용한 다짐 후 함수비 변화에 따른 노상토의 탄성계수 평가를 위한 시스템 개발

## Development of a New Testing System to Evaluate Modulus with Post-Compaction Variation in Soil Moisture using Suction Control

이세현\* · 서원석\*\* · 윤준웅\*\*\* · 김동수\*\*\*\*

Lee, Sei Hyun · Seo, Won Seok · Youn, Jun Ung · Kim, Dong Soo

### 1. 서 론

포장구조체는 공용기간중 다양한 환경변화를 경험하게 된다. 특히 노상토와 같은 포장 하부구조는 온도변화에 민감한 아스팔트 포장층과는 달리 함수비 변화에 민감한 반응을 보이게 된다. 따라서 현장 노상이 경험하는 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다.

새롭게 제안된 2002 AASHTO 설계법에서는 함수비에 따른 탄성계수 영향을 응력조건에 따른 탄성계수와는 별도로 독립적으로 평가하고 있다. 즉, 응력조건에 따른 탄성계수는 최적함수비 상태에서 결정하고 ( $E_{opt}$ ), 함수비에 따른 탄성계수 변화율에 대한 영향모델( $F(w)$ )을 결정하여 임의의 현장 함수비에 따른 탄성계수( $E$ )를 다음과 같이 평가하고 있다.

$$E = F(w) \cdot E_{opt} \quad (1)$$

이는 93 AASHTO 설계법에서의 유효회복탄성계수 개념보다는 진보적이고 역학적 설계법에 보다 합리적이다. 그러나 함수비에 대한 탄성계수의 변화를 평가하는데 있어서 대부분의 선행 연구들은 다짐함수비를 변화시켜가며 시료를 성형하여 탄성계수의 변화를 결정한다. 이와 같은 방법은 다짐시마다 입자 배열 등의 조건이 바뀌게 되므로 동일한 다짐조건 이후 함수비만 변하는 현장 상황과는 큰 차이를 나타낼 수 있다(Vinale 등, 1999 ; Kim 등, 2003). 실제 현장의 노상은 일정한 다짐함수비(최적함수비)와 밀도에서 다짐시공이 이루어진 후 시공 또는 공용기간 중에 강우나 증발에 의해 함수비가 변화하게 되는데, 설계단계에서 이와 같은 함수비 변화에 따른 탄성계수를 실내실험을 통해 평가하고 함수비 구성모델을 제안하는데 있어서 실제 포장이 경험하는 현장 상황을 고려한 다짐 후 과정(Post-Compaction)을 구현하는 것이 합리적이다(Witczak 등, 2000). 또한 포장체에서 노상층은 지하수위 위에 존재하여 불포화토의 특성을 나타내므로, 모관흡수력(Matric Suction)의 차이에 따라 노상토의 거동이 특성화 된다고 할 수 있다. 즉, 모관흡수력이 변화하면서 함수비 또한 변화하게 된다. 따라서 함수비에 대한 탄성계수의 변화를 예측하는데 있어 실내에서도 최적함수비로 시료를 성형한 후, 모관흡수력을 조절하여 함수비를 변화시켜 탄성계수를 평가한다면 매우 합리적인 방법이 될 것이다. 본 논문에서는 기존의 압력판 추출 시험기를 벤더엘리먼트 시험이 가능하도록 개선하여 노상토의 건조(Drying)과정과 습윤(Wetting)과정을 재현하였고, 각 과정에서 모관흡수력을 단계별로 변화시켜가며 함수비에 따른 탄성계수를 평가하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 함수비와 모관흡수력을 각각 변수로 함수비 영향모델을 제안하였다.

\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-3659 (E-mail : crazyisei@kaist.ac.kr)

\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후연구원 · 공학박사 · 042-869-8342 (E-mail : hemlock@kaist.ac.kr)

\*\*\* 비회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-5659 (E-mail : sayme43@kaist.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · 042-869-3619 (E-mail : dskim@kaist.ac.kr)

## 2. 새로운 시험 시스템의 개발

선행연구로 공진주/비틀전단 시험장비를 모관흡수력이 조절되도록 개조하여 모관흡수력 및 함수비 변화에 따른 지반의 동적물성치를 평가하였다(Kim 등, 2003). 하지만 공진주/비틀전단 시험의 경우 시료의 길이가 100mm 정도로 길기 때문에 각 모관흡수력 단계별로 안정화시켜 시험을 수행하는데 오랜 시간이 소요된다. 따라서 비교적 빠른 시간에 시험이 수행되어 건조과정과 습윤과정을 모두 재현할 수 있는 시험 방법이 요구되었다. 본 논문에서는 기존의 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)을 평가하는데 사용된 압력판 추출 시험기에 각 모관흡수력 단계별로 탄성계수를 동시에 측정할 수 있는 벤더엘리먼트 시험법을 결합하여 상대적으로 빠른 시간에 평가할 수 있는 시험 시스템을 개발하였다.

### 2.1 벤더 엘리먼트(Bender Element, BE) 시험

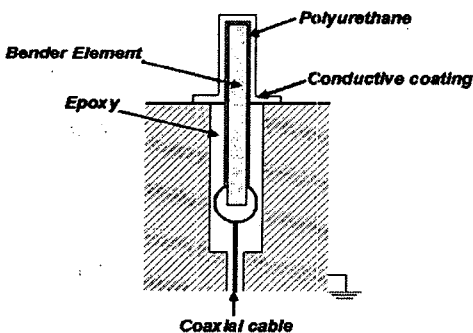
벤더엘리먼트 시험은 시험시편의 전단파 속도( $V_s$ )를 직접 측정함으로써 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )를 평가하기 위한 시험법으로, 다양한 실내시험장비에 간단히 부착되어 다양한 시험조건에서 시편의 최대전단탄성계수를 평가할 수 있는 유용한 시험기법으로 현재 널리 이용되고 있는 추세다. 벤더엘리먼트는 기계적 에너지와 역학적 에너지의 상호변환이 가능한 압전센서로서, 한 쌍의 벤더엘리먼트를 여러 실내시험 장비의 양단에 캔틸레버 형식으로 부착하여 전단파의 가진 및 도달의 측정이 가능하도록 함으로써, 시험시편의 전단파 속도를 측정하기 위해 이용되고 있다. 벤더엘리먼트 시험을 통하여 평가된 전단파 속도는 식(2)를 이용하여 최대전단탄성계수로 변환될 수 있다.

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

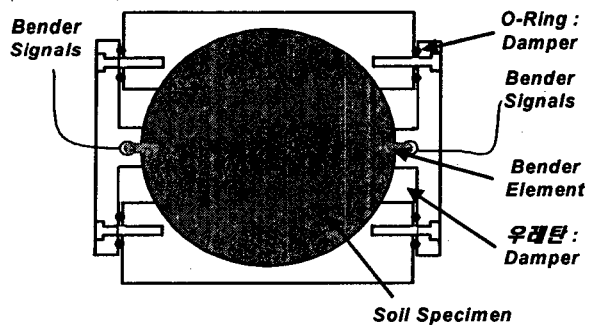
여기서,  $\rho$  = 질량 단위중량

벤더엘리먼트 시험은 전단파 속도가 전파거리와 측정된 전파시간으로부터 직접 결정되므로 삼축 시험, 압밀 시험 등 여러 시험기에 비교적 간단히 부착되어 시료의 교란 없이 반복적으로 시험시편의 최대전단탄성계수를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

사용된 벤더엘리먼트(PZT 5H, Morgan Matroc Inc., USA)는 가로 12.7mm, 세로 8mm, 두께 0.7mm를 가지며 절연을 위해 폴리우레탄으로 코팅 하였고, 에폭시를 이용하여 구속용 시편 링에 캔틸레버 형식으로 고정하였다. 또한 시료내의 물에 의한 cross-talk 현상을 해결하기 위해 전도성물질(silver conductor)을 폴리우레탄 코팅 위에 재코팅하고 이를 그라운드에 연결하였다(Soils and Waves, 2001)(그림 1(a)).



(a) 벤더엘리먼트 개요도



(b) 구속용 시편 링

그림 1. 벤더엘리먼트와 구속용 시편 링



기존의 구속용 시편 링(지름:50mm, 높이:15mm)은 벤더엘리먼트 설치하고 시험을 수행하기에 크기가 적당하지 않아 지름과 높이를 각각 90mm, 20mm로 증가시켜 새롭게 제작하였다. 또한 벤더엘리먼트의 가진시편을 매질로 수신 벤더엘리먼트에 신호가 전달되는 것을 차단하기 위해 연성(softness)이 좋은 우레탄을 링 중간에 설치하여 Damper 역할을 하도록 하였다.

본 연구에서 사용한 구속용 시편 링의 개략도를 그림 1(b)에 나타내었다.

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

압력판 추출 시험기는 압력셀 내에 시료를 놓고 공기압을 이용하여 다양한 모관흡수력을 적용하여 시료 내의 함수비 변화를 발생시켜 시료의 함수특성곡선을 구하기 위해 사용된다. 압력판 추출 시험기는 압력셀과 높은 공기 함입치(High Air Entry Value, HAEV)를 가지는 세라믹 디스크, 시료에서 나오고 들어가는 물의 양을 측정할 수 있는 뷰렛시스템으로 구성된다.

기존의 압력판 추출 시험기(Soil Moisture Equipment Corp., USA)는 세라믹 디스크의 최대 공기 함입치가 200kPa로 소성지수가 NP(Non-Plastic)인 노상토의 함수특성곡선을 평가하는 시험에서는 큰 무리가 없지만 소성지수와 세립분 함유율이 존재하는 노상토의 경우에는 200kPa까지 공기압을 가해도 최적함수비( $w_{opt}$ )보다 높은 습윤층에 머물렀다(서원석, 2005). 따라서 본 연구에서는 최대 공기 함입치가 500kPa인 세라믹 디스크를 사용하여 더 높은 모관흡수력을 시료에 가할 수 있도록 제작하였다. 또한 탄성계수 평가를 위한 벤더엘리먼트 시험시 전단파의 전파거리를 확보하기 위해 지름을 증가시킨 구속용 시편 링의 사용을 위해 압력판 추출 시험기의 지름을 기존 시험기(Soil Moisture Equipment Corp, USA)의 약 1.5배정도 증가시켰다.

본 연구에서 사용한 벤더엘리먼트 시험이 가능하도록 개선된 압력판 추출 시험기의 개요도와 실제 시험 시스템의 모습을 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

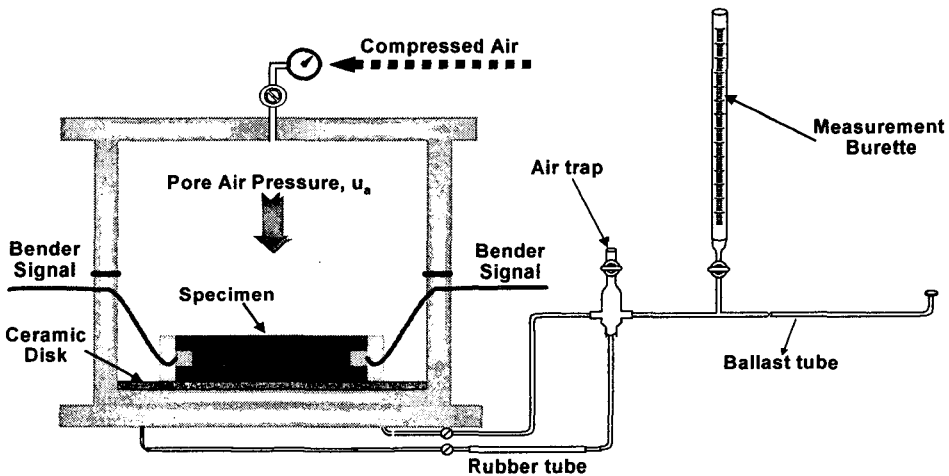
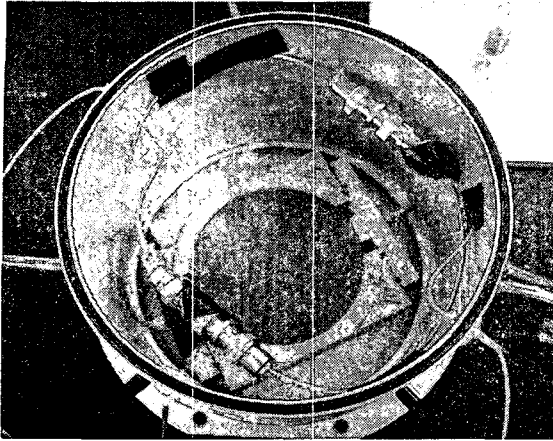
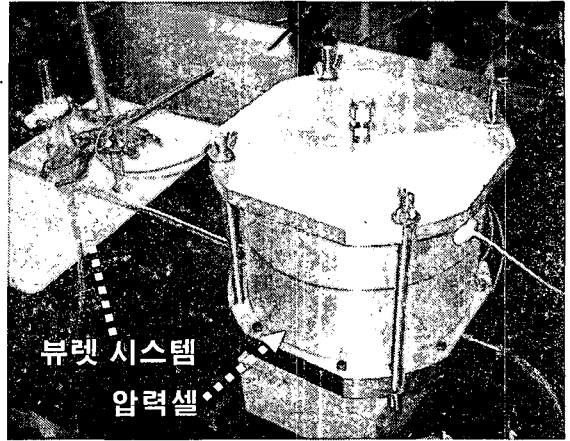


그림 2. 벤더엘리먼트를 결합한 압력판 추출 시험기 개요도

본 시험 시스템에서는 시료의 높이가 20mm로 짧고 부피가 작기 때문에 모관흡수력에 의해 함수비 평형화에 이르는 시간이 짧아 시료의 함수비가 감소하는 건조과정과 함수비가 증가하는 습윤과정을 모두 구현할 수 있으므로 이력현상에 의한 탄성계수 평가가 가능하다. 또한 압력판 추출 시험에서는 시료에 가해지는 유효구속압이 0이므로 구속용력의 영향을 받지 않고 오직 모관흡수력에 의해 변화된 함수비에 따른 탄성계수 변화 경향을 평가(Nazarian 등, 1998)할 수 있는 이점이 있다. 그리고 모관흡수력을 가한 후 미리 정해놓은 시간간격으로 벤더엘리먼트 시험을 수행하여 전단파 속도를 측정함으로써 함수비 평형화 시점을 정확하게 판단하게 된다.



(a) 시료가 설치된 시험 시스템의 모습



(b) 셋팅이 완료된 후의 모습

그림 3. 시험 시스템의 모습

### 3. 시험시료 및 시험절차

본 연구에서는 대구-포항간 고속도로 현장의 노상토를 이용해 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료에 대한 입도분포시험(체가름 시험)과 다짐시험을 수행하였으며 그 결과와 주요 기본 물성치를 각각 그림 4와 표 1에 나타내었다.

표 1. 노상토의 기본 물성치

구분		대구-포항
입도시험 결과	$D_{95}$	7.2
	$D_{50}$	2.3
	$C_c$	1.1
	$C_u$	6.4
	#200 통과량	1.3
	#4 통과량	84.0
비중		2.67
소성지수 (PI,%)		NP
흙 분류	통일분류	SW
	AASHTO 분류	A-1-a
다짐시험 결과	OMC (%)	10.5
	$\gamma_{max}$ ( $t/m^3$ )	2.03

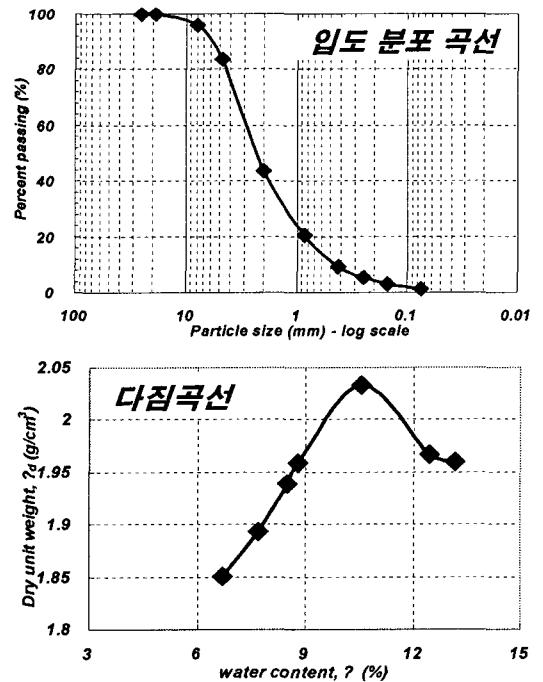


그림 4. 시험 시료의 입도분포곡선과 다짐곡선



시험 방법은 구속용 시편 링에 목표 함수비와 건조단위중량을 맞추어 유압을 이용한 정적인 방법으로 시료를 성형하여 세라믹 디스크 위에 올려놓는다. 구속셀을 설치한 후 내부에 공기압(모관흡수력)을 세라믹판의 최대 공기 함입치까지 증가시켜 평형화가 완료되면 뷰렛의 눈금을 읽어 빠진 물의 양을 체크한다. 이후 공기압을 단계별로 감소시키며(습윤과정) 미리 정해놓은 각 모관흡수력 단계마다 평형화가 이루어졌을 때 시료로 들어간 물의 양을 뷰렛으로부터 체크하고 벤더엘리먼트 시험을 수행하여 전단파 속도를 측정한다. 1차 습윤 과정이 완료되면 역으로 세라믹 디스크의 최대 공기 함입치까지 공기압을 단계별로 증가시키며(건조과정) 각 모관흡수력 단계마다 시료로부터 빠져나온 물의 양을 체크한 후 마찬가지로 전단파 속도를 측정한다. 이상과 같이 습윤과정과 건조과정을 반복하게 되면 시험 시료의 함수특성곡선은 이력현상을 나타내게 되고 이에 따른 탄성계수의 변화 경향을 평가할 수 있다.

#### 4. 시험 결과 및 함수비 영향모델 평가

##### 4.1 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

흙의 함수비가 증가하면 물-공기 경계면이 줄어들어 모관흡수력이 감소하고 역으로 흙의 함수비가 감소하면 흙 내부의 모관흡수력이 증가하게 된다. 이와 같은 함수비와 모관흡수력의 관계를 나타내는 곡선이 함수특성곡선이다. 이는 불포화 지반의 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이다.

본 연구에서 압력판 추출 시험의 1차 습윤과정과 2차 건조과정으로부터 획득한 함수특성곡선과 시험 시료의 최적포화도를 함께 그림 5(a) 나타내었다. 또한 선행연구로 이루어진 모관흡수력 조절이 가능한 공진주/비틀전단 시험기와 기존의 압력판 추출 시험기로부터 획득한 함수특성곡선을 함께 그림 5(b)에 나타내었다. 공진주/비틀전단 시험기로부터 얻은 함수특성곡선은 시험의 특성상 습윤과정은 수행하지 못하여 1차 건조과정에서의 값을 나타낸다. 시험 결과에서 알 수 있듯이 함수특성곡선은 물의 유입과 방출에 의해 이력현상을 보이는데 이러한 현상은 일반적으로 잉크병효과로 설명할 수 있다. 이러한 이력현상은 습윤과정과 건조과정을 반복할수록 하나의 함수특성곡선으로 수렴할 것으로 판단된다. 한편 그림 5(b)를 살펴보면 시험방법에 따라 같은 노상토일지라도 함수특성곡선에 차이가 있을 수 있음을 알 수 있다. 이는 시료높이/시료지름(h/d)의 영향이 가장 크다고 판단된다. 각 시험에서 사용한 시료의 크기를 정리하여 표 2에 나타내었다. 같은 압력판 추출 시험이라 해도 시료의 크기와 부피에는 차이가 있었지만 건조과정과 습윤과정에서 모두 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 반면 공진주/비틀전단 시험에서의 결과와 비교하면 낮은 모관흡수력 단계에서 잘 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 공진주/비틀전단 시험의 경우 시료의 길이가 100mm로 시료에 가해진 공기압이 골고루 분포되어 있더라도 낮은 공기압하에서는 물-공기 경계면이 덜 형성될 가능성이 높기 때문이라 판단된다.

표 2. 시험방법에 따른 시료 크기

시험방법	지름, d (mm)	높이, h (mm)	높이/지름(h/d)
압력판 추출 시험(본 연구)	90	20	0.22
압력판 추출 시험(선행연구)	50	15	0.3
공진주/비틀전단 시험(선행연구)	50	100	2

##### 4.2 벤더엘리먼트 시험을 통한 탄성계수 평가

일반적으로 함수비가 감소하면 흙의 탄성계수는 증가하는 것으로 알려져 있다. 함수비가 감소하면 모관흡수력이 증가하게 되고 이는 흙 입자 사이의 유효응력을 증가시키기 때문이다. 본 연구에서는 이와 같은 불포화토의 특성을 벤더엘리먼트 시험을 통해 규명하였다.

벤더엘리먼트를 이용하여 획득한 전단파의 가진 및 도달 신호의 대표적인 예를 그림 6에 나타내었다. 또한 기존의 시험법에서는 각 모관흡수력 단계에서 뷰렛 시스템을 통해 유출되는 물의 양을 체크하여 함수비의 변화량이 0.04%/day 이내가 되면 평형화가 이루어졌다고 판단하였다. 그러나 본 연구에서는 미리 정해놓은 시간 간격마다 벤더엘리먼트 시험을 수행하여 전단파 속도로부터 이를 판단하였다. 그림 7을 보면 건조과정에서는 물이 방출되면서 전단파 속도가 점차적으로 증가하고, 습윤과정에서의 물의 유입으로 전단파 속도

가 점차적으로 감소하면서 평형화에 이르는 것을 알 수 있다. 시료의 종류에 따라 다르겠지만 본 연구에서 사용한 시험 시료의 경우 24시간 이내에 각 모관흡수력 단계마다 평형화가 이루어지는 것을 알 수 있다.

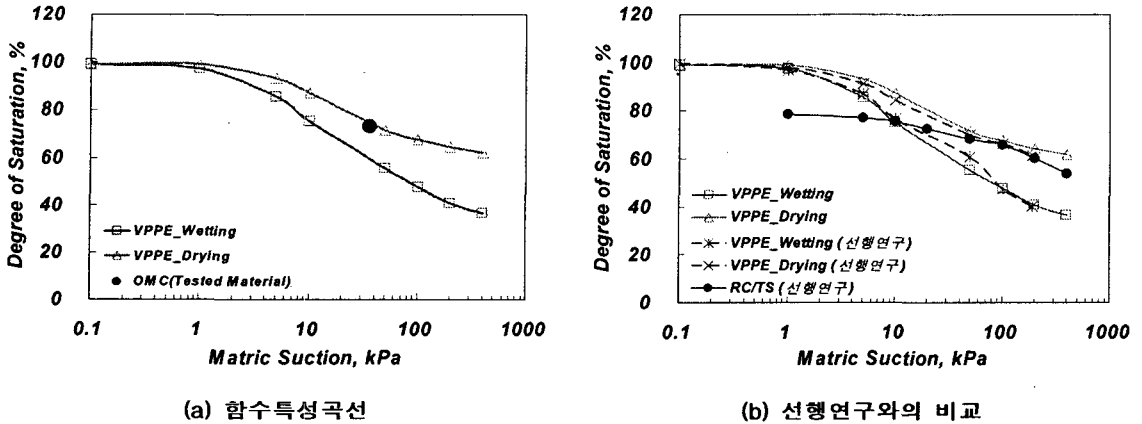


그림 5. 시험 시료의 함수특성곡선

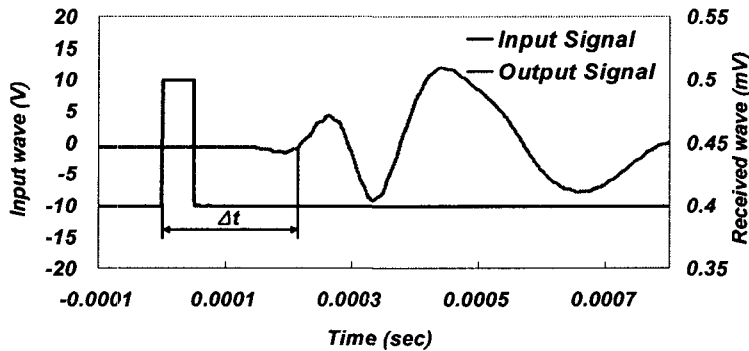


그림 6. 벤더엘리먼트 시험시 가진 및 수신 신호의 전형적인 예

각 모관흡수력 단계별로 그림 7에서와 같이 시편의 함수비 평형이 이루어진 후 측정된 전단파 속도를 식 (2)에 의해 최대전단탄성계수로 변환하여 각각의 중량함수비와 모관흡수력 변화에 따른 결과를 그림 8에 나타내었다. 결과를 살펴보면 함수비가 감소함에 따라 그리고 모관흡수력이 증가함에 따라 전단탄성계수는 증가함을 알 수 있다. 그림 8(a)에서 보듯이 시료내로 물이 유입되는 습윤과정인지, 아니면 방출되는 건조과정인지에 따라 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수 값이 큰 차이를 보이지 않지만 그림 8(b)에서는 시편의 건조측에서 함수비에 따라 최대전단탄성계수 값이 큰 차이를 보이고 있다. 이는 앞에서 설명한 함수특성곡선의 이력현상 때문이다. 건조과정과 습윤과정을 반복하게 되면 그림 8(b)에서 나타나는 함수비 변화에 따른 최대전단탄성계수의 이력현상이 수렴할 것으로 판단된다. 또한 OMC line을 경계로 시편의 습윤측과 건조측에서 각 모관흡수력과 함수비 변화에 따른 최대전단탄성계수 변화 경향이 상이함을 알 수 있다. 즉, 습윤측에서는 함수비가 감소함에 따라, 모관흡수력이 증가함에 따라 최대전단탄성계수의 증가율이 크지 않은데 반해, 건조측에서는 급격한 증가를 보였다. Khoury 등(2004)의 연구결과는 이를 뒷받침 해준다. 비록 모관흡수력 조절 시험은 아니지만, 최적함수비로 시료를 성형하여 오븐에 넣어 건조측을 재현하여 얻은 회복탄성계수의 증가율이 배압으로 시료에 물을 주어 습윤측에서 얻은 회복탄성계수 증가율보다 크게 나타났다(Khoury 등,



2004). 즉, 함수비 변화에 따른 탄성계수의 영향을 엄밀히 평가하고자 한다면 최적함수비를 기준으로 습윤측과 건조측으로 구분하여 평가함이 바람직할 것이다.

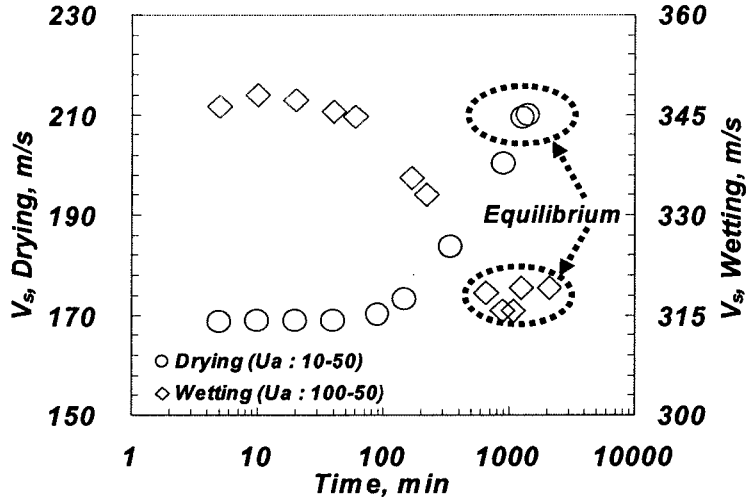
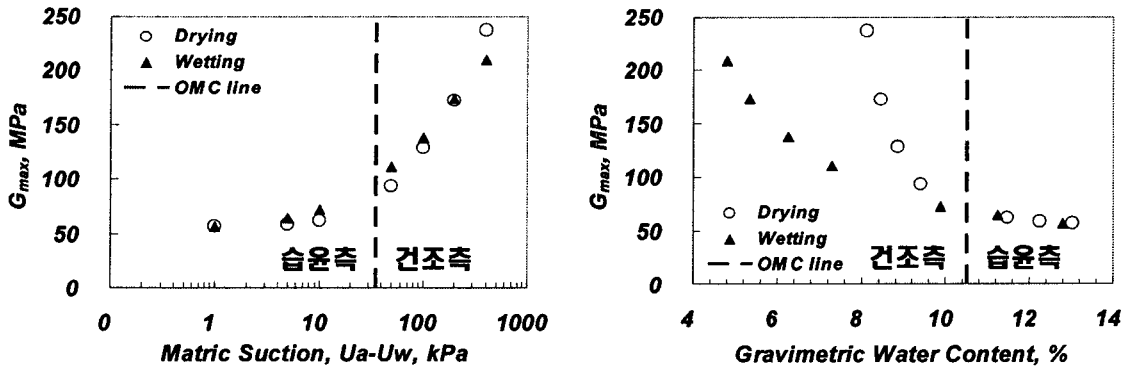


그림 7. 시간에 따른 전단파 속도 측정을 통한 시편의 함수비 평형



(a) 모관흡수력 변화에 따른 최대전단탄성계수

(b) 함수비 변화에 따른 최대전단탄성계수

그림 8. 함수비 및 모관흡수력 변화에 따른 최대전단탄성계수

### 4.3 함수비 영향모델 ( $F(w)$ ) 평가

노상토의 함수비 변화에 따른 탄성계수를 예측하는 모델은 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 먼저 회복탄성계수 구성모델을 산정할 때 응력조건과 함수비를 함께 변수로 삼아 모델식 결정하는 방법이 하나이고, 두 번째로 2002 AASHTO 설계법에서도 채택하고 있는 방법으로 최적함수비 상태에서 응력조건에 대한 구성모델을 산정한 후, 함수비 변화에 대한 탄성계수의 변화를 이와 독립적으로 고려해주는 방법이다. 본 연구에서는 후자와 같은 방법으로 함수비 영향모델을 평가하고자 한다. 이 방법의 장점은 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화율이 시험기법에 따라 차이가 크지 않기 때문에 복잡한 반복재하시식  $M_R$  시험이 아닌 본 연구에서와 같이 간편한 벤더엘리먼트 시험을 통해서도 평가가 가능하다는 것이다.

서원석(2005)은 국내 노상토 3종에 대해 모관흡수력 조절이 가능한 공진주/비틀전단 시험 시스템을 이용



하여 함수비 변화에 따른 탄성계수를 평가하고 이를 바탕으로 선형모델, 포물선모델, 지수모델 등의 함수비 영향모델을 검토한 결과 식 (3)과 같은 지수형태의 모델이 넓은 함수비 범위에서 합리적으로 적용할 수 있리라 판단하였다. 또한 함수비 대신 모관흡수력을 변수로 한 모델식도 함께 검토하여 식 (4)와 같은 대수 모델을 제안하였다.

$$\frac{G}{G_{opt}} = 10^{k_1(w-w_{opt})} \tag{3}$$

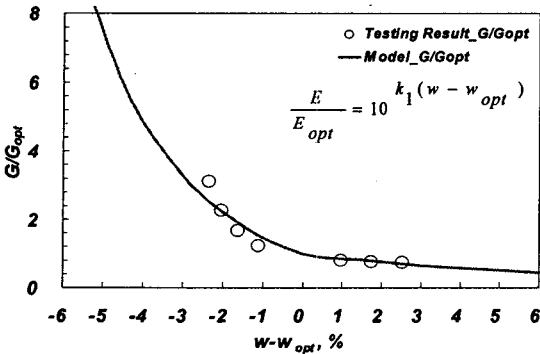
$$\frac{G}{G_{opt}} = k_1 \left( \frac{suction}{suction_{opt}} \right)^{k_2} \tag{4}$$

여기서,  $k_1, k_2$ 는 모델변수이다.

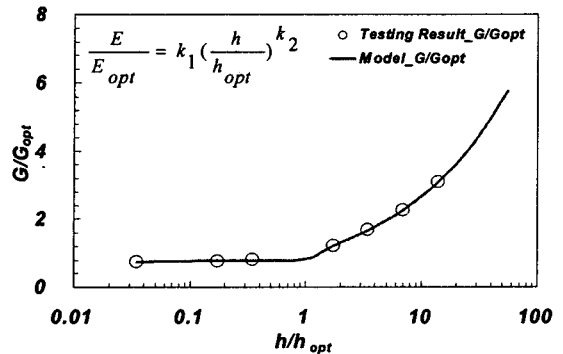
본 연구에서는 그림 8에 나타나있는 시험결과를 이용하여 이미 검증된 두 영향모델을 평가하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 함수비 변화에 따른 탄성계수의 영향을 엄밀히 평가하기 위해 함수비 영향모델의 계수들을 습윤측과 건조측으로 나누어 회귀분석을 통해 산정하였고 각 모델들의 결정계수는 모두 0.9 이상으로 상당히 높은 상관성을 나타내고 있다. 각 모델의 습윤측, 건조측 모델 계수와 결정계수를 표 3에 나타내었고, 시험 결과를 포함하여 모델계수에 의해 결정된 영향모델을 그림 9에 나타내었고 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

표 3. 회귀분석 모형에 따른 함수비 영향모델 계수

구분	모델 계수	건조측(Dry Side)	습윤측(Wet Side)
함수비 모델	$k_1$	-0.1719	-0.0592
	$R^2$	0.9499	0.9593
모관흡수력 모델	$k_1$	0.9535	0.8274
	$k_2$	0.4471	0.0331
	$R^2$	0.9997	0.9692



(a) 함수비를 변수로 한 함수비 영향모델



(b) 모관흡수력을 변수로 한 함수비 영향모델

그림 9. 함수비 영향모델 ( $G/G_{opt}$ )

시험시료의 최종적인 함수비 영향모델을 표 4에 나타내었다. 매우 중요한 도로의 설계에서는 실제 시공에





사용되는 노상토 시료에 대해 시험을 수행하여 함수비 영향모델을 결정하는 것이 바람직하지만 일반적인 도로에 대해서는 경제성과 편의성을 고려하여 시료의 기본물성치(입도분포, 소성지수 등)로부터 모델계수들을 예측하여 설계에 적용하는 것이 합리적이다. 이를 위해 향후, 다양한 국내 노상토 시료에 대해 데이터베이스를 확보하는 것이 요구된다.

표 4. 함수비 영향모델

구분	건조측(Dry Side)	습윤측(Wet Side)
함수비 모델	$\frac{G}{G_{opt}} = 10^{-0.1719(w-10.5)}$	$\frac{G}{G_{opt}} = 10^{-0.0592(w-10.5)}$
모관흡수력 모델	$\frac{G}{G_{opt}} = 0.9593 \left( \frac{suction}{35} \right)^{0.4471}$	$\frac{G}{G_{opt}} = 0.8274 \left( \frac{suction}{35} \right)^{0.0331}$

5. 결론

- 1) 압력판 추출 시험기와 벤더엘리먼트를 결합하여 비교적 빠른 시간 안에 노상토의 함수특성곡선과 함수비 변화에 따른 최대전단탄성계수의 측정이 가능하도록 하였다. 새롭게 제작된 구속용 시편 링은 벤더엘리먼트의 설치와 진단과 전파거리의 확보를 위해 높이를 크게 하였다. 또한 좀 더 높은 모관흡수력을 시료에 가하기 위해 최대 공기 함입치가 500kPa인 세라믹 디스크를 압력판 추출 시험기에 설치하였다.
- 2) 물이 유입되는 습윤과정과 물이 방출되는 건조과정에서 얻은 함수특성곡선은 상이함을 알 수 있다. 이는 잉크병 효과로 설명할 수 있다. 또한 선행 연구 결과들과 비교했을 때 함수특성곡선은 시료높이(h)/시료지름(d)에 영향을 받는다고 판단된다. 이는 h/d값이 유사한 시편으로 얻은 두 압력판 추출 시험의 결과들은 잘 일치하는데 반해, 공진주/비틀전단 시험으로부터 얻은 결과와 비교했을 때, 낮은 모관흡수력 단계에서 큰 차이를 나타내었다.
- 3) 모관흡수력을 가한 후 미리 정해놓은 시간 간격별로 진단과 속도를 측정하여 함수비 평형화를 판단할 수 있다. 본 시험시료의 경우 각 모관흡수력 단계별로 24시간 이내에 대부분 평형화가 이루어졌다. 또한 습윤과정인지, 아니면 건조과정인지에 따라 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수 값은 큰 차이를 보이지 않았지만 함수비에 따른 최대전단탄성계수 값은 시편의 건조측에서 큰 차이를 나타내었다.
- 4) 미리 검증된 함수비와 모관흡수력을 각각 변수로 하는 두 가지 함수비 영향모델에 대한 검토가 이루어졌고, 최적함수비를 경계로 시편의 습윤측에서는 함수비가 감소함에 따라, 모관흡수력이 증가함에 따라 최대전단탄성계수의 증가율이 크지 않은데 반해, 건조측에서는 급격한 증가를 보인 결과를 바탕으로 함수비 영향모델은 습윤측과 건조측으로 나누어 회귀분석을 통해 산정하였고, 시험 결과와 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원에서 주관하는 건설핵심기술연구개발사업의 수탁과제인 “불포화 사면 및 다짐지반 최적화 표준설계를 위한 지반정수 산정기술(04핵심기술A01-08)”과 건설교통부 수탁과제인 한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능 개선 방안 연구”의 일부 성과물로 이에 감사를 포함합니다.



## 참고문헌

1. 서원석 (2005), "현장·함수비 변화를 고려한 노상토의 실내 및 현장 변형계수 평가기법 개발", 한국과학기술원, 박사 학위 논문
2. Khoury, N. N., Zaman, M. M. (2004), "Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils," *Transportation Research Record*, Vol. 1874, 99-107.
3. 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.
4. Picornell, M., and Nazarian, S. (1998), "Effects of Soil Suction on the Low-strain Shear Modulus of Soils," In *UNSAT '98, Proceedings of the 2nd International conference on Unsaturated Soils*, Beijing, China, Vol. 2, pp. 102-107.
5. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, LTD, pp. 238-282.
6. 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.
7. Witczak M.W., Houston W.N., Zapata, C.E., Ritcher C., Larson G. and Walsh K. (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 1-37 A, Inter Team Technical Report (Seasonal 1).