

# 현장 및 실내 시험을 이용한 함수비 변화에 따른 노상토의 동적변형특성 연구

## Dynamic Deformational Characteristics of Subgrade Soils with Variation of Water Content using Field and Laboratory Tests

김종태\* · 서원석\*\* · 김동수\*\*\*

Kim, Jong Tae · Seo, Won Seok · Kim, Dong Soo

### 1. 서론

근래에 들어 포장 설계법에서 하부구조(노상, 보조기층)의 설계입력 물성치를 변형특성 개념으로 정량화하는 방법이 중요하게 부각되고 있다. 이러한 지반의 변형특성은 저 변형률과 중간 변형률 영역에서 지반의 종류, 구속응력, aging, 교란상태, 입도분포 등 여러 요인에 따라 많은 차이를 보이게 되는데 특히 불포화토의 경우 함수비의 변화는 동적 물성치 변화에 큰 영향을 준다. 즉, 지반의 함수비 변화로 인해 발생하는 모세관 효과에 의해 지반의 동적 물성치는 매우 달라질 수 있다. 노상과 같은 다짐토는 실제 토목현장에서 쉽게 접하는 지반으로 대부분의 경우 불포화 상태로 존재하며 시공시 정해진 함수비로 다져진 후 공용상태에서 강우/ 증발/ 동결융해등 계절적 요인에 의해 함수비가 변화하게 된다. 이러한 함수비의 변화는 지반의 동적 물성치에 상당한 영향을 미치게 되는데 엄밀한 설계 및 유지 관리를 위해서는 이러한 변화를 파악하고 설계 및 유지보수에 적용하는 것이 타당하다. 도로 구조체의 응력을 지지하는 노상토의 경우 현장 구속압, 밀도, 다짐 방법 등 현장을 반영하는 조건으로 시료를 성형하게 되면 현장 값을 모사하는 반영하는 합리적인 실내 시험 결과를 얻을 수 있으며, 노상토 시료 역시 공용하중 하에서 함수비의 변화가 발생하며 도로의 설계 및 유지·보수시 함수비 변화에 따른 동적물성치가 필요하다. 지금까지의 실내 시험에서는 함수비의 변화를 반영하기 위하여 여러 다짐함수비로 시료를 성형하여 시험하였으나 이는 실제 현장의 함수비 변화를 합리적으로 반영하지 못하므로 본 연구에서는 모관흡수력을 이용하여 시험을 수행하였다. 계절적 영향을 받는 함수비에 따른 현장의 동적 물성치 변화를 규명하기 위해서는 모관흡수력을 알아야 하는데 실제 모관 흡수력을 현장에서 구하는 것은 매우 어려우므로 실내시험에서 모관 흡수력을 변화시키며 함수비를 조절하고 이 때의 동적 물성치 변화를 평가하였다. 이러한 과정을 통하여 현장 지반의 함수비 변화 거동을 실내 시험을 통해 보다 합리적으로 구현하도록 하였으며 함수비 뿐 만 아니라 모관 흡수력에 따른 변화 양상도 함께 평가 하였다. 또한 현장실험을 수행하고 실내시험 결과와 비교하여 현장적용에 대한 타당성을 확인하였다.

### 2. 모관흡수력에 따른 지반의 동적 물성치 변화

#### 2.1 불포화토의 기본 구조와 응력 변화

전통적인 토질역학에서 물과 흙 두가지의 상으로 이루어진 포화토에 대하여 연구하였으나 불포화토에서는 흙, 공기, 물 3가지의 상을 고려한다. 불포화토에서는 공기가 존재하므로 물-공기 경계에서 불분자의 인력으로 인해 물-공기 경계면(meniscus 또는 contractile skin) 이 생기게 되고 이 면을 따라 표면장력(  $T_s$  )

\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 042-869-5659 (E-mail : greatrok@kaist.ac.kr)

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

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



이 작용하게 되며, 이러한 물-공기 경계면을 흙의 거동에 영향을 미치는 하나의 구성요소로 본다. 이 경계면에서 공기압과 흙의 간극수압의 차( $\Delta u = u_a - u_w$ )는 모관흡수력(matric suction)으로 정의되며 이러한 모관흡수력은 흙의 평형에 의해 다음 관계를 가진다(식 1). 여기서  $R_s$ 는 물-공기 경계면의 곡률반경이다.

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s} \quad (\text{식 1})$$

그림 1에서 보는 바와 같이 물-공기 경계면에서 작용하는 표면장력의 반력의 수직성분은 유리관에 압축력으로 작용한다. 이는 물기둥의 높이만큼 해당하는 힘이 경계면에 작용하는 표면장력 반력의 수직성분을 통해 모세관에 압축력으로 작용함을 의미한다. 즉 불포화토에서는 물-공기 경계면에서 작용하는 표면장력은 흙입자에 압축력으로 작용하게 된다. 흙 내부의 간극의 크기가 일정하다고 가정하면 표면장력은 모관흡수력이 증가함에 비례하여 커지게 된다. 즉 불포화토에서 모관흡수력의 증가는 표면장력의 증가를 유발시키고 이는 흙의 압축력을 증가시켜 최종적으로 흙의 강도를 증가시키게 된다(Fredlund, 1995).

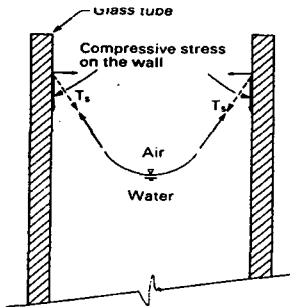


그림 1. 모세관에 작용하는 힘

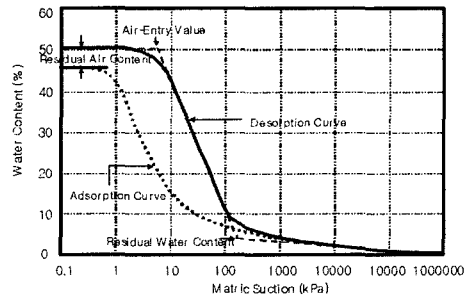


그림 2 전형적인 함수특성곡선

## 2.2 함수특성 곡선

흙의 함수비가 커지면 물-공기 경계면이 줄어들어 모관흡수력이 줄어들고 흙의 함수비가 작아지면 흙 내부의 부간극수압이 커지게 된다. 이와 같은 함수비와 모관흡수력의 관계를 나타내는 곡선이 함수특성곡선(Soil-water characteristic curve)이다. 이는 지반의 고유특성으로 불포화 특성을 결정하는 중요한 기본물성이다. 그림 2는 전형적인 함수특성곡선을 나타낸다. 전체적인 경향은 모관흡수력이 증가함에 따른 함수비의 감소이다. 포화된 간극은 모관흡수력이 공기함입치(air entry value)를 초과하기 전까지 물을 유출하지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 더 이상 물이 추출되지 않은 함수비를 잔류함수비(residual water content)라 하며 이 때 남아있는 물은 열에 의해서 제거 할 수 있다. 함수특성곡선은 물의 흡입과 방출 과정에서 이력현상을 보이는데 이러한 현상은 일반적으로 잉크병효과로 설명할 수 있다.

## 2.3 모관 흡수력의 변화에 따른 동적물성치의 변화

여러 연구자들에 의하여 모관흡수력 또는 함수비에 의한 흙의 동적물성치 변화에 관한 연구가 이루어졌다. 흙의 함수비 변화는 함수특성곡선을 이용해 모관흡수력의 변화와 연관시킬 수 있다.

Wu(1983)는 함수비를 제외한 다른 조건은 동일하게 한 후 함수비만 바꿔 시료를 성형하여 여러번의 공진주 시험을 시행하였다. 함수비 변화와 모세관 효과에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 구하였고 이를 이용해 포화도와 최대전단탄성계수의 관계를 도출하였다. 포화상태에서 포화도가 떨어짐에 따라 전단탄성계수는 증가하다 어느 포화도 값에 이르면 최대값을 가지게 되며 이 포화도를 지나면 다시 감소하게 된다. Wu는 최



대전단탄성계수가 최대가 되는 포화도를 최적포화도(optimum degree of saturation)라 정의하였다. Qian(1990)은 Wu 와 같은 방법으로 실험하였는데 간극비, 입자모양, 입도분포의 영향을 고려하여 포화도-최대전단탄성계수의 관계에 대하여 연구하였다. 권기철(1999)은 국내 노상토 시료의 함수비에 따른 동적물성치를 연구하였다. 시료를 최적함수비와 최적함수비의  $\pm 2\%$ 에서 성형하여 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다. 함수비가 감소함에 따라 최대 전단탄성계수는 증가하고 최적함수비에서  $\pm 2\%$  범위내의 함수비에서는 정규화 전단탄성계수가 변하지 않는 경향을 나타내었다.

그러나 함수비를 변화시켜가며 시료를 성형하게 될 경우 시료성형이 입자구조 및 응력 상태가 다르게 되고 물-공기 경계면의 불안정한 형성으로 인해 실제 현장의 상태를 잘 반영한다고 볼 수 없다

Wu, Quia, 권기철 등의 연구자들은 함수비의 변화를 표현하기 위하여 각각 다른 함수비로 여러 시료를 성형하여 그 영향을 살펴본 반면, Vinale 등 (1999)과 김민중(2002)은 일정한 함수비로 성형된 시료를 모관흡수력을 직접 조절해가며 시험을 수행하였다. 그림 3은 Vinale 등의 결과로 모관흡수력에 따른 최대 전단탄성계수 변화를 나타낸다. 최대전단탄성계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 증가하다가 어느 한계에서 수렴하는 경향을 보이게 된다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 모관흡수력에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선과 감쇠비 곡선으로 이들에 대한 모관흡수력의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다.

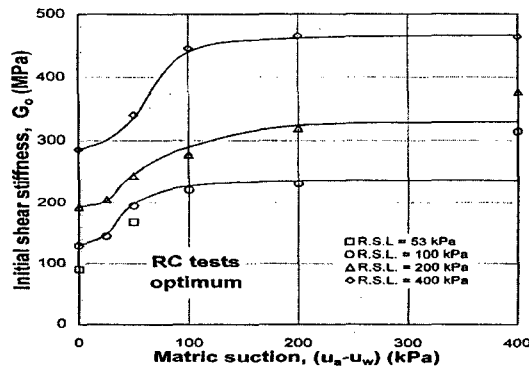


그림 3 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수(Vinale 등,1999)

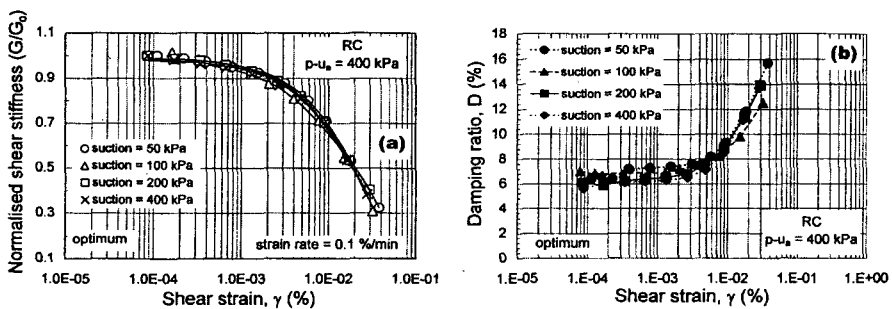


그림 4 모관흡수력에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선 (Vinale 등,1999)

김민중(2002)등은 함수비변화에 대한 실험을 모관흡수력 조절을 이용한 시험방법과 다짐함수비 조절을 이용한 시험을 이용하여 비교 분석하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 모관흡수력이 증가함에 따라, 즉 함수비가 감소함에 따라 최대 전단탄성계수는 증가하였다. 이와 마찬가지로 다짐함수비를 줄여 시료를 성형할 수록 최대 전단탄성계수는 증가하였다. 그러나 그림에서 보이는 바와 같이 모관흡수력 조절을 이용한 최대 전단탄성계수의 값이 크게 변화함을 알 수 있다. 이러한 두가지 시험방법의 차이를 규명하기 위하여 현장시험 결과와 비교를 통하여 각 방법의 타당성을 규명할 필요가 있다고 판단된다.

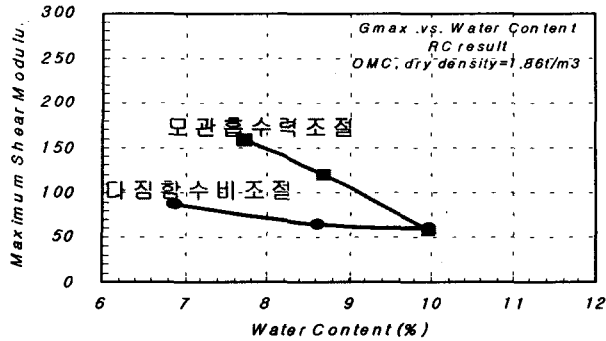


그림 5 함수비 조절방법에 따른 최대전단탄성계수 차이(김민중, 2002)

### 3. 시험장치 및 시험원리

#### 3.1 실내시험 장치 및 원리

본 연구에서는 코일-자석 시스템을 가진원으로 이용하여 시료에 반복 비틀력을 재하하는 공진주/비틀전단 시험기를 사용하여 변형률에 따른 전단탄성계수를 구하였다. 기존의 공진주/비틀전단 시험기에 모관흡수력을 가하여 함수비를 조절할 수 있게 모관흡수력 조절장치와 함수비 변화측정장치를 부착하여 시험을 수행하였다. 모관흡수력을 통하여 시료의 함수비를 조절하기 위해서는 공기압과 수압을 각각 독립적으로 조절해야 하며 모관흡수력 변화에 의한 시료의 부피변화를 측정해야 한다(Vinale 등, 1999). 공기압과 수압을 독립적으로 조절하기 위해서 본 연구에서는 세라믹 판을 이용하였으며 top cap과 시료거치대를 수정하여 기존 시스템에 장착하였다. 시료거치대에는 공기압입치 500kPa인 세라믹 판을 부착하였고, 시료거치대에는 세라믹 판이 부착되어질 홈을 만들었으며 이 홈 위에는 물과 세라믹 판의 접촉면적을 최대한 넓게 하기 위해서 Z 모양으로 조그만 수로를 만들었다. 세라믹 판은 이 홈 위에 부착되었으며 세라믹 판 옆 부분은 에폭시 수지를 이용하여 시료 거치대와 완전히 밀착하도록 하여 이 사이 틈으로 인한 공기와 물의 흐름을 차단하였다. Top cap 에는 가운데에 구멍을 뚫어 시료 상부에 공기압을 가할 수 있도록 하였으며 시료가 편심을 받지 않게 하였다. 또한 top cap 저면에는 넓은 Porous stone을 설치하여 공기압이 시료에 넓게 퍼지도록 하였다. 수정된 시료거치대와 Top Cap과 시료에 나오는 물의 양의 변화를 측정하기 위해 뷰렛 시스템을 제작하여 공진주/비틀전단 시험기에 연결하였다(그림 6). 본 뷰렛 시스템은 물의 양을 측정하기 위한 뷰렛(Burette)과, 관속에 있는 공기를 제거하기 위한 Air trap, 수압을 대기압 상태로 하기 위하여 시료와 같은 높이에 설치되어 있는 ballast tube 등으로 구성되어 있으며 이를 이용하여 시료에서 빠져나온 물을 정확히 측정하여 시료의 함수비 변화를 알 수 있다.

#### 3.2 현장시험 장치 및 원리

크로스홀 시험은 지반에 두 개 이상의 시추공을 뚫어 한쪽은 발진자(source)로, 나머지 시추공은 감지기(receiver)로 구성하여, 발진자에서 유발되는 진동이 지반을 통과하여 감지장치까지 도달되는 파의 전파속도를 깊이별로 측정하여, 깊이별 지반의 최대탄성계수를 측정하는 시험기법이다. 따라서 포장 구조체에서도 지반에서와 마찬가지로 적용할 수 있다. 본 시험은 발진자와 감지기를 시추공내에 설치하여야 하므로, 포장체의 시공과정 또는 시공 후에 두 개의 시추공을 설치하여 그림 7과 같이 기계적으로 타격하는 방법으로 탄성파를 발생시킨다.

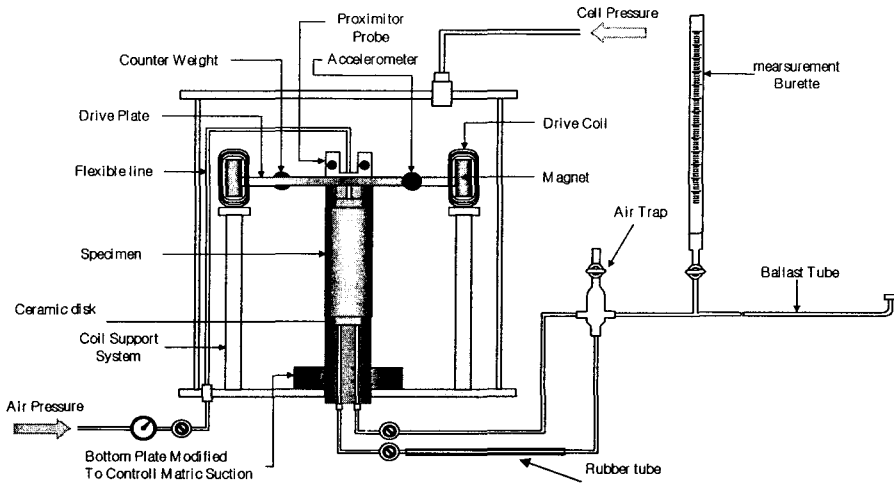


그림 6. 모관흡수력 조절 및 함수비변화 측정이 가능한 공진주/비틀전단 시험기

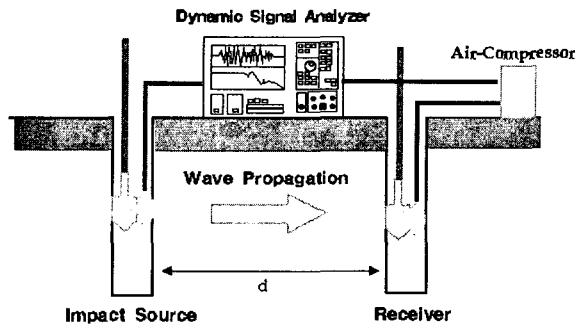


그림 7 크로스홀 시험 개념도

두 개의 감지기측 시추공에 발진자와 같은 깊이로 고정된 진동감지장치(3방향 진동감지기)를 설치하여 발진자에서 발생된 탄성파를 측정한다. 발진자와 감지기에서의 신호를 동시에 신호획득장치(signal analyzer)로 측정하면 시추공과 시추공 사이의 파의 도달시간을 측정할 수 있고, 시추공 사이의 거리와 측정된 전단파 도달시간으로부터 전단파속도( $V_s$ )를 결정한다. 이때 저변형율 전단탄성계수를 전단파속도와 현장지반의 질량밀도로부터 식 2를 사용하여 결정한다.

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

여기서,  $G_{\max}$  = 저변형율 전단탄성계수,  $\rho$  = 흙의 질량밀도,  $V_s$  = 전단파속도

#### 4. 시험시료 및 시험절차

대구-포항간 고속도로 현장의 노상토를 이용해 시험을 수행하였으며 시료채취와 동일한 위치에서 크로스홀 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료에 대한 다짐시험, 비중시험 및 입도시험(체가름시험)을 수행하였으며 표 1은 노상토 시료의 주요 물성치이다. 입도분포시험 결과를 이용하여 통일분류법으로는 SW,



AASHTO 분류법으로는 A-1-a로 분류되었다.

표 1 노상토 시료의 기초 물성치

구분		대구-포항간 고속도로 현장 노상토
입도시험 결과	$D_{95}(mm)$	7.2
	$D_{50}(mm)$	2.3
	$D_{10}(mm)$	0.45
	$C_c$	1.1
	$C_u$	6.4
	#200 통과량	1.3
	#4 통과량	84
비중		2.67
소성지수(PI,%)		NP
다짐시험 결과	최대건조단위중량( $t/m^3$ )	2.03
	최적함수비(%)	10.5

본 연구에서는 건조단위중량을 최대건조단위중량  $\gamma_{d,max}$  의 95%인  $1.93 \text{ g/cm}^3$  으로 고정시키고 다짐함수비와 모관흡수력을 변화시켜가며 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다. 모관흡수력 조절 시험과 다짐함수비 변화 시험에서의 구속압은 41kPa로 주었는데 이는 도로의 공용하중 상태에서 노상토 시료가 받는 유효 구속응력이다.

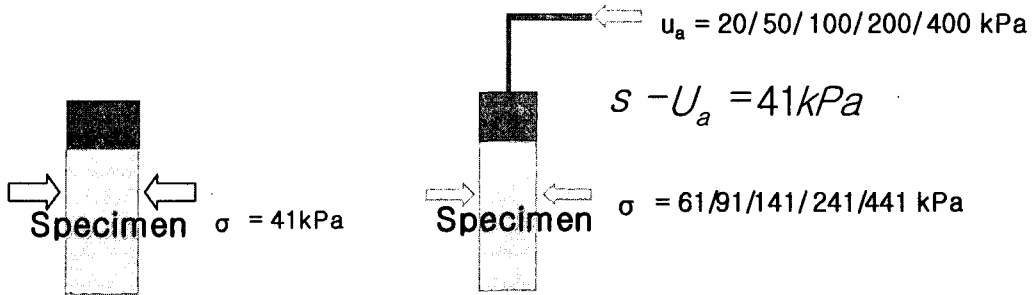
현장의 함수비 변화를 반영하기 위한 기존의 방법으로 다짐함수비를 바꿔가며 시료를 성형하여 각각의 시료에 대해 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다. 함수비는 최적함수비 전후로 다양한 함수비에서 시험을 수행하였고, 이 때 구속압은 41kPa로 동일하게 재하하였다.

모관흡수력을 조절한 공진주/비틀전단 시험은 두 가지 과정(A, B)을 거쳐 시험을 수행하였다. 하나(A)는 시료를 최적함수비로 성형하고 물을 시료에 임의로 추가하여 함수비 증가를 시킨 후 모관흡수력을 증가시켜가며 시험을 수행하였다. 스플릿 몰드에 성형된 시료에 top cap을 씌우기 전에 물을 넣고 물이 시료에 스며들 때까지 약 24시간 기다린 후 top cap을 씌우고 시험을 실시하였다. 모관흡수력 단계는 20, 50, 100, 200, 400 kPa이고, 유효 구속압을 41kPa로 유지시키기 위하여 셀압력을 61, 91, 141, 241, 441kPa로 같이 증가시켰다. 다른 시험과정(B)으로는 최적함수비로 성형하고 바로 모관흡수력을 증가시켜가며 시험을 수행하였다. 모관흡수력 단계와 셀압력 단계는 과정 A와 같다.

표 2와 그림 8은 각 시험에서의 구속압과 모관흡수력 단계, 시료의 성형조건에 대해 나타낸 것이다.

표 2 각 시험의 구성

시험분류	성형조건			응력조건	
	다짐함수비 (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	간극비 (e)	유효구속압(kPa)	모관흡수력단계 (kPa)
다짐함수비 조절	5.9, 7.4, 8.5, 10.3, 12.7	1.93	0.38	41	-
모관흡수력조절	10.5	1.93	0.38	41	20/50/100 /200/400



(a) 다짐함수비변화에 의한 시험 (b) 모관흡수력 조절 시험(A,B)  
그림 8 각 시험단계에서 구속압 및 모관흡수력 단계

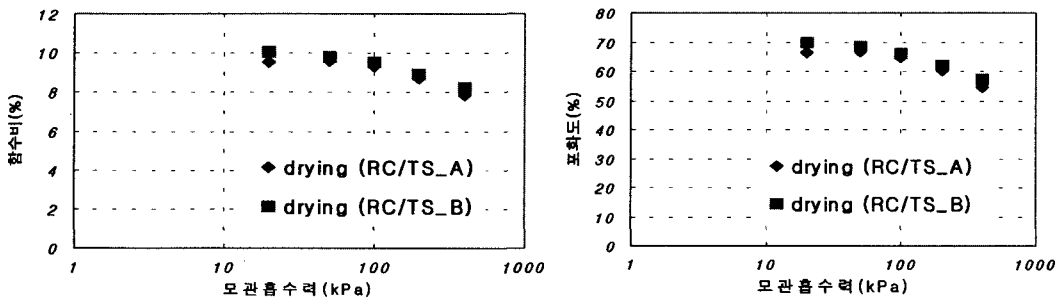
현장 크로스홀 시험은 현장에서 다져진 노상토의 전단파 속도를 구하기 위하여 수행하였다. 현장의 노상토가 완전히 다져진 후 시험을 수행하였다.

또한 시추공 설치시 핸드오거를 이용하여 채취된 흙으로 현장의 함수비를 측정하였다. 시험은 깊이 10cm 간격으로 지표로부터 15, 25, 35, 45, 55cm 깊이에서 시험을 수행하였다. 현장 지반의 함수비 변화에 의한 전단파 속도의 변화를 측정하기 위하여 비가 내린 후 같은 공에서 크로스홀 시험을 다시 수행하였고, 역시 같은 깊이에서 함수비를 핸드오거를 이용해 채취한 흙으로 측정하였다.

## 5. 시험결과

### 5.1 실내시험 결과

모관흡수력을 조절하여 수행한 시험에 대하여 모관흡수력에 따른 함수비를 그림 9에 정리하였다. 모관흡수력 단계 20~400kPa에서 함수비는 7.85~10.04 % 범위 내에서 변화하였고 포화도는 약 70~54% 범위 내에서 변화하였다.



(a) 모관흡수력 - 함수비 관계 (b) 모관흡수력 - 포화도 관계

그림 9 모관흡수력 조절 공진주/비틀전단 시험기로 구한 노상토의 함수특성 곡선

그림 10은 모관흡수력의 변화에 따른 전체변형률영역에서의 전단탄성계수의 변화이다. 모관흡수력이 증가함에 따라 전단탄성계수는 증가하며 이는 모관흡수력 증가에 의한 흙입자의 유효응력변화에 따른 것이라 판단된다.

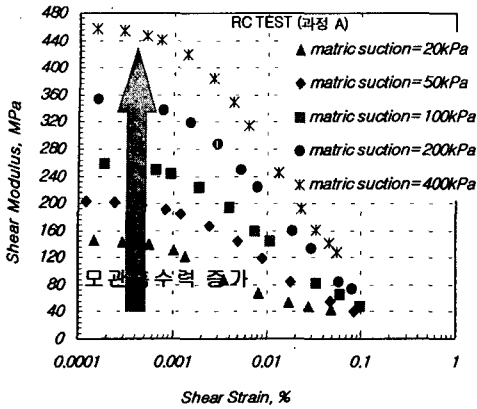


그림 10 모관흡수력과 전단탄성계수 관계

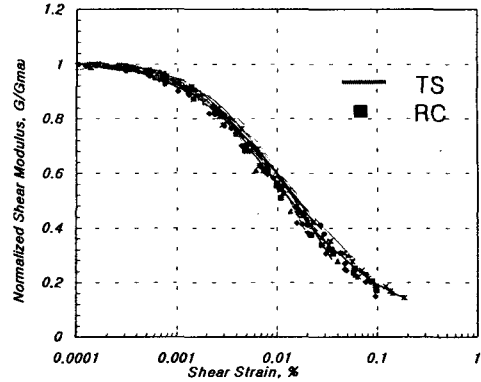


그림 11 모관흡수력과 정규화전단탄성계수 감소곡선 관계

변형률에 따른 전단탄성계수를 최대전단탄성계수로 정규화시킨 정규화전단탄성계수 감소곡선은 그림 11과 같다. 전단탄성계수의 증가에 영향을 미치는 함수비와 모관흡수력은 모관흡수력 20~400kPa, 함수비 12.45~5.88%에서 정규화전단탄성계수 감소곡선에 무관하다고 생각할 수 있다. 이는 Vinale등(1999)의 시험결과와 일치하는 현상이다. 따라서 최대전단탄성계수를 정확히 측정하면 변형률에 따른 비선형 탄성계수를 효율적으로 예측할 수 있다.

함수비 변화에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 알기 위하여 두가지 방법으로 시료를 성형하여 실험한 결과를 그림 12에 나타내었다. 함수비가 감소함에 따라 최대 전단탄성계수는 증가하는 경향을 보인다. 그러나 다짐함수비로 조절한 시험의 경우 모관흡수력으로 조절한 시료의 최대 전단탄성계수보다 작은 최대 전단탄성계수를 가지며, 이 차이는 함수비가 작아질수록 증가한다. 한편, 두 가지 모관흡수력 조절에 의한 시험 결과(A,B)가 비슷하게 나오는 현상은 같은 건조단위중량, 최적함수비로 다져서 유사한 간극비와 입자구조를 가지기 때문이라 생각된다. 다짐함수비 조절에 의해 성형된 시료의 경우, 건조단위중량은 같아서 같은 간극비를 가지지만 다짐시 함수비 차이에 의해 입자 구조가 달라지게 되고, 함수비가 작고 건조단위중량이 큰 경우(다짐곡선 위에 존재하는 상황)에서 다짐 경우 더 많은 하중을 가하여 다지게 되어 시료에 가해진 응력수준이 달라진다. 또한 낮은 함수비에서 시료를 성형하게 될 경우 흩내 물의 양이 물-공기 경계면이 잘 형성될 정도로 많지 않기 때문에 물-공기 경계면이 작아 모관흡수력이 제대로 역할을 하지 못한다. 이러한 이유로 최대전단탄성계수의 증가 경향이 달라진다고 판단된다.

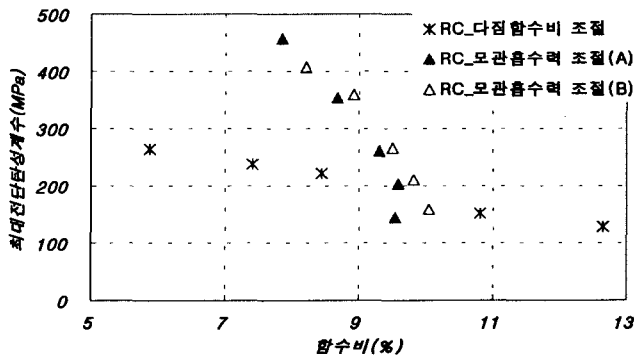


그림 12 함수비 변화에 따른 최대전단탄성계수의 변화





5.2 현장 시험결과와 비교

앞서 설명한 각 실내시험 방법의 현장 상황모사에 대한 타당성을 검토하기 위하여 현장에서 함수비 변화에 따른 크로스홀 시험을 수행하였다. 그림 13은 크로스홀 시험을 통해 구한 지반의 깊이별 함수비, 전단파 속도, 전단탄성계수이다. 강우 전후에 시험을 수행하여 함수비 변화에 대한 고려를 하였으며 일정깊이 이상으로는 함수비 변화가 크게 발생하지 않았다.

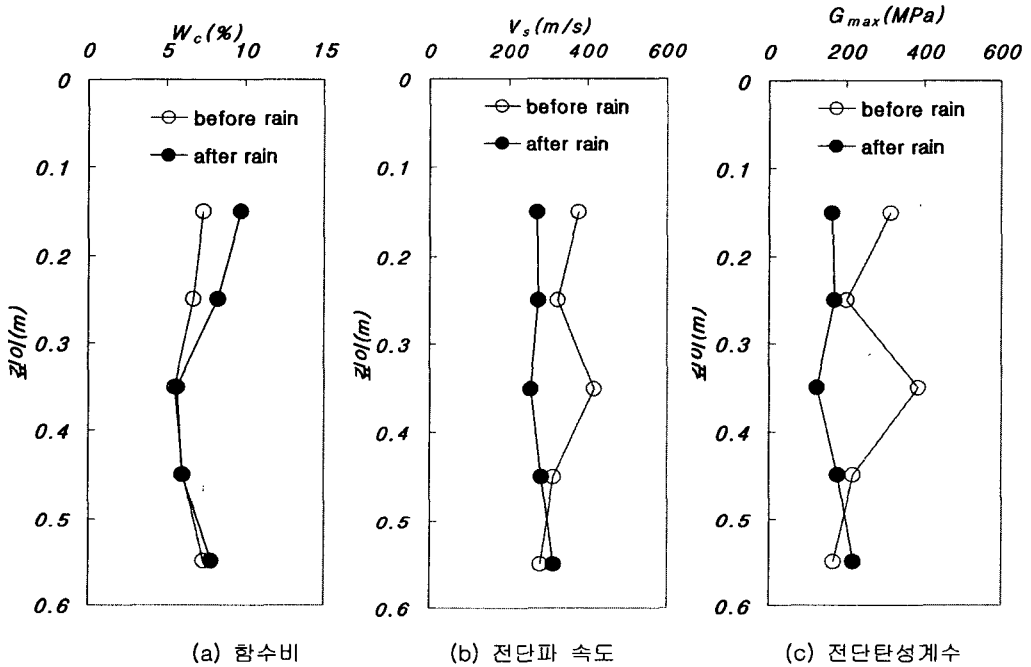
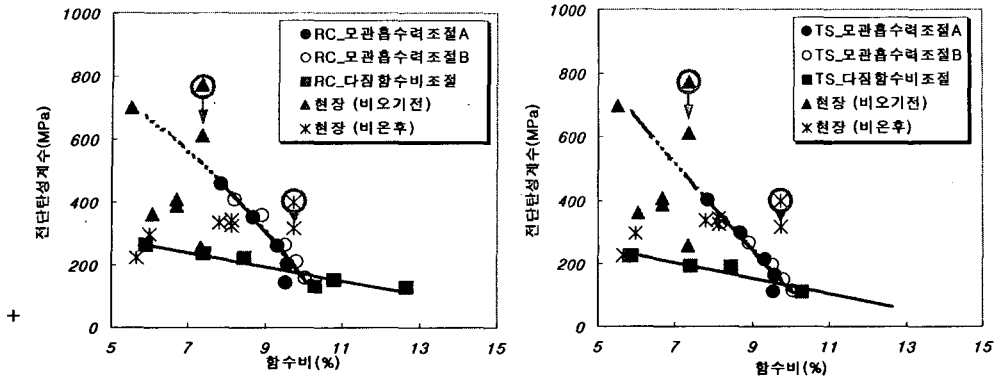


그림 13 크로스홀 시험을 통한 깊이별 함수비, 전단파 속도, 전단탄성계수

현장 크로스홀 시험의 결과와 실내 시험의 결과를 구속압 41kPa로 보정시켜 함수비 변화에 따른 전단탄성계수 변화를 구하여 그림 14에 나타내었다. 현장의 전단탄성계수는 분산정도가 심하지만 대체적으로 함수비가 감소함에 따라 전단탄성계수가 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 현장 시험과 실내 시험의 결과는 상당한 분산정도를 가지고 있으며 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다. 이는 현장 시험과 실내시험의 시료의 조건이 다르기 때문이라 판단된다. 현장에서는 다짐롤러를 이용한 진동압착다짐을 하고 실내에서는 과소다짐법을 이용하며 실내와 현장시험에 사용된 시료의 최대 입자크기 역시 큰 차이를 보이게 된다. 또한 현장 노상토의 경우 비교적 균질한 지반이라 가정하였지만 실제 층을 나누어 다짐을 수행하기 때문에 다짐층 간 불균질성이 존재하게 된다. 이러한 조건들의 차이는 추후 연구를 통해 규명하고 줄여나가야 한다.

위와 같은 차이점에도 불구하고 실내시험을 통하여 현장 동적물성치의 예측은 수행되고 있다. 그림 14를 살펴보면 기존의 다짐함수비로 조절한 시험의 결과는 함수비의 감소에 대하여 전단탄성계수의 증가가 비교적 적고 현장의 경향을 따라가지 못함을 알 수 있다. 그에 반해 본 연구에서 수행한 모관흡수력 조절 시스템의 경우 현장의 함수비 변화에 따른 전단탄성계수의 변화에 좀더 유사한 경향을 보인다. 따라서 현장의 함수비 변화에 따른 동적물성치를 구하고자 할 때는 주어진 함수비로 시료를 성형하고 모관흡수력을 이용하여 함수비를 변화시키는 방법이 타당하다고 판단된다.



(a) 공진주 시험결과와 비교

(b) 비틀전단 시험결과와 비교

그림 14 현장시험 결과와 실내시험 결과의 비교

## 6. 결론

본 연구에서는 노상토 시료에 대한 함수비변화에 따른 전단탄성계수의 변화를 구하기 위하여 다짐함수비를 조절하여 시험을 수행하는 방법과 모관흡수력을 통하여 함수비를 조절하여 시험을 수행하는 방법을 이용하였다. 그 결과 모관흡수력이 증가함에 따라, 즉 함수비가 감소함에 따라 전체변형률 영역에서 전단탄성계수는 증가하였다. 또한 정규화전단탄성계수 감소곡선은 함수비에 무관하게 나타나 최대 전단탄성계수를 합리적으로 구하면 지반의 변형률에 따른 전단탄성계수를 구할 수 있음을 알 수 있다. 한편 현장 크로스홀 시험결과와 비교해 본 결과 모관흡수력을 이용하여 함수비를 조절하는 방법이 다짐함수비를 통해 함수비를 조절하는 방법보다 현장 상황을 잘 모사하고 현장값에 유사하는 경향을 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구비 지원으로 수행된 '한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구' 결과의 일부로 감사를 표합니다.

## 참고문헌

1. 권기철 (1999), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR시험법", 한국과학기술원, 박사 학위 논문
2. 김민종(2002), "공진주/비틀전단 시험을 이용한 모관흡수력 및 함수비에 따른 노상토의 동적변형특성 연구", 한국과학기술원, 석사학위 논문
3. 김동수, 서원석, 권기철, 김형배, (2002), "크로스홀 및 공진주 시험을 이용한 노상토의 현장 탄성계수 평가", 한국도로포장공학회 2002 학술발표논문집, pp. 248-254.
4. ASTM (1992), "Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method," ASTM
5. Fredlund, D.G. (1995), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", Wiley-Interscience Publication, pp. 20 ~ 70, pp. 260 ~ 280
6. Vinale F., d'Onofrio A., Mancuso C., Santucci de Magistris, F., Tatsuoka F.(1999), " The Prefailure Behaviour of Soils as Construction Materials", 2ndInternational Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, 26-29 September 1999