

# 크로스홀 및 공진주 시험을 이용한 노상토의 현장 탄성계수 평가

## Evaluation in Situ Dynamic Modulus of Subgrade Soils Using Crosshole and Resonant Column Test

김동수\* · 서원석\*\* · 권기철\*\*\* · 김형배\*\*\*\*

Kim, Dong Soo · Seo, Won Seok · Kweon, Gi Chul · Kim, Hyung Bae

### 1. 서 론

과거의 포장 설계법에서는 포장 재료의 역학적 특성치를 상대적인 값으로 나타내는 경험적 방법(CBR, R 등)을 적용하여 평가하였다. 그러나 이와 같은 방법은 경험적 상관관계가 개발된 제반 조건이 유사한 경우에만 유효하다는 제약이 있으므로, 도로가 위치하는 지역의 기후, 환경, 지반조건 등이 다양한 경우 문제점이 발생하였다. 따라서, 보다 역학적인 설계법이 요구되었고, 현재에 이르러 회복탄성계수(Resilient Modulus ;  $M_R$ ) 값을 적용한 보다 역학적인 포장 설계법이 사용되고 있다. 그러나 현장의 지반, 기후, 환경 조건 등을 반영하는 현장탄성계수 산정방법은 아직 미비한 실정이고, 향후 보다 완전한 역학적 포장설계·해석뿐만 아니라 포장 평가, 유지관리 등을 위해서는 현장조건을 고려한 탄성계수 결정이 반드시 필요하다.

따라서, 현장조건을 반영한 노상토의 탄성계수를 결정하기 위해 본 논문에서는 크로스홀 시험을 시험도로 현장에서 실시하였다. 크로스홀 시험은 미소변형율 영역의 최대 탄성계수를 결정할 수 있는 현장 탄성과 시험방법이다. 시험도로 현장은 한국도로공사에서 건설중인 중부내륙고속도로 내에 위치한 곳으로, 기타 다른 연구기관에서 수행한 실험결과들과의 비교가 용이하고, 완공후에도 역학적 특성을 비롯한 다양한 시험 물성 값들을 얻고 비교할 수 있는 장점이 있다. 즉, 본 연구에서 확보하게 되는 시험도로 포장하부구조 재료의 역학적 특성은 시험도로에서 추진되고 있는 여러 다른 시험결과들(FWD, HFWD, DCPT 등)과 결합되어 역학적 설계법의 개발과 다짐공의 품질관리 기법 개발에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 노상토가 시공된 시점에서 동결·융해중의 노상토의 강성을 크로스홀 시험을 통해 산정하여 기후에 따른 강성변화를 살펴보았다. 또한, 비가 온 바로 직후에 노상토의 깊이에 따라 크로스홀 시험을 실시하여 함수비의 변화에 따른 탄성계수를 비교해 보았다. 아울러, 크로스홀 시험을 통해 P파와 S파의 속도를 구하여 현장 노상토의 동적 포아송 비를 시험적으로 추정하였고, S파 속도를 결정하는데 있어서 SH파(수평 전단파) 속도와 SV파(수직 전단파)의 속도를 별도로 구하여 노상토의 비등방성을 살펴보았다. 한편 현장 시험이 수행된 위치에서 교란 시료를 채취하여 실내에서 공진주시험을 통해 전체 변형율 영역에서의 탄성계수 값을 산정하여 현장시험 결과와 비교하였다.

### 2. 탄성계수 산정 시험

본 논문에서는 현장에서 탄성계수를 결정하는 시험으로 크로스홀 시험을, 실내에서 변형율에 따른 탄성계수 결정 시험으로 공진주시험을 수행하였다.

\*정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · 042-869-3619 (E-mail : dskim@kaist.ac.kr)  
\*\*정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-3659 (E-mail : hemlock@kaist.ac.kr)  
\*\*\*정회원 · 동의대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 051-890-1617 (E-mail : gckweon@hyomin.donggeui.ac.kr)  
\*\*\*\*정회원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원 · 공학박사 · 02-2230-4851 (E-mail : kimhyun3@freeway.co.kr)

## 2.1 크로스홀 시험

크로스홀 시험은 두 개 이상의 시추공을 뚫어 한쪽은 발진자(source)로, 나머지 시추공은 감지기(receiver)로 구성된다. 발진자에서 유발되는 진동이 두 시추공 사이의 매체(포장체)를 통과하여 감지기까지 도달되는 체적파의 전파속도를 깊이별로 측정하여, 포장체의 최대탄성계수를 측정하는 시험기법이다. 본 시험에서는 포장체의 시공과정 또는 시공 후에 두 개의 시추공을 설치 후, 발진자와 감지기를 그림 1 (a)와 같이 시추공내에 공기압등을 이용하여 원하는 깊이에 밀착시킨다. 발진자에서는 기계적 장치를 이용하여 P파 또는, S파와 같은 탄성파를 발생시킨다.

감지기측 시추공에는 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 이동시간을 그림 1 (b)와 같이 측정할 수 있고, 시추공 사이의 거리와 측정된 파의 이동시간으로부터 압축파속도( $V_p$ ) 또는 전단파속도( $V_s$ )를 결정한다. 이때 저변형률 압축탄성계수(Young's modulus) 또는 전단탄성계수(Shear Modulus)를 압축파속도 또는 전단파속도와 현장지반의 질량밀도로부터 식 (1)을 사용하여 결정한다.

$$E = \rho V_p^2, \quad G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

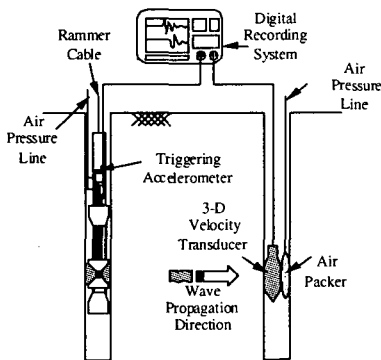
여기서, E = 저변형률 압축탄성계수

G = 저변형률 전단탄성계수

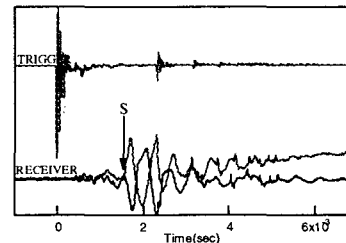
$\rho$  = 흙의 질량밀도

$V_p$  = 압축파속도

$V_s$  = 전단파속도



(a) 크로스홀 시험 개요



(b) 발진자와 감지기의 측정 신호

그림 1. 크로스홀 시험의 개요 및 측정 신호

## 2.2 공진주 시험

공진주 시험은 변형률 크기에 따른 전단탄성계수의 변화와 감쇠비를 검토할 수 있는 시험으로, 시편의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템(drive system)을 시편의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속감지기(accelerometer)로 가속도를 측정한다. 시험장비의 개요와 대표적 실험결과인 주파수반응곡선을 그림 2에 나타내었다. 공진주 시험의 기본원리는 원통형의 시편에 진동수를 바꿔가면서 비틀자



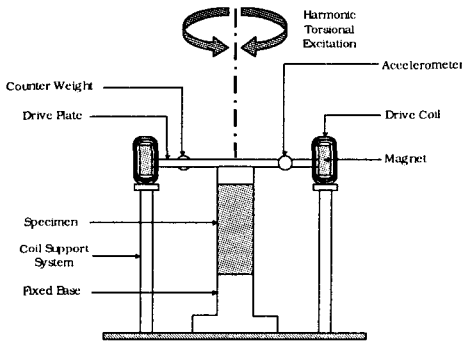
극(torsional excitation)을 가하여 그림 2 (b)에 나타난 바와 같이 1차 모드의 공진주파수( $f_0$ )와 진동의 크기( $A_r$ )를 구한 후, 실험기의 특성 및 시편의 크기와 무게를 이용하여 전단파속도( $V_s$ ), 전단탄성계수( $G$ ), 감쇠비( $D$ ) 및 전단변형율( $\nu$ )을 구하는 동적인 시험방법이다. 탄성과전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주시험의 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega l}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega l}{V_s}\right) \tag{2}$$

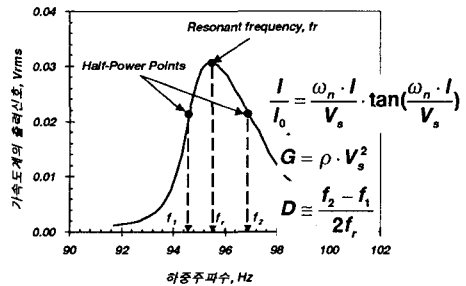
- 여기서,  $I$  = 공시체의 질량관성 모멘트
- $I_0$  = 진동시스템의 질량관성 모멘트
- $\omega$  = 공시체-진동시스템의 고유 진동수
- $l$  = 공시체의 길이
- $V_s$  = 전단파 속도

실제 공진주시험에서는 감쇠고유진동수( $\omega_r$  : damped natural frequency)가 얻어지나, 큰 오차 없이 고유진동수( $\omega_n$  : natural frequency)를 대신하여 사용할 수 있다. 식 (2)에 의해 전단파속도( $V_s$ )가 구해지면 전단탄성계수( $G$ )를 식 (1)로부터 구한다.

전단변형율은 가속도계 출력으로부터 결정된 변위와 시편 중심으로부터 가속도계가 설치된 거리, 그리고 시편의 높이로부터 결정한다. 이때 전단변형율이 시료전체에 걸쳐 일정하지 않는 점을 고려하여, 시편의 상부 중앙에서 반지름의 0.8배 되는 지점에서 결정되는 값을 시편이 경험하는 대표적 전단변형율로 결정한다.



(a) 공진주 시험기 개요도



(b) 공진주 시험의 대표적 주파수반응곡선

그림 2. 공진주 시험의 개요 및 대표적 실험결과

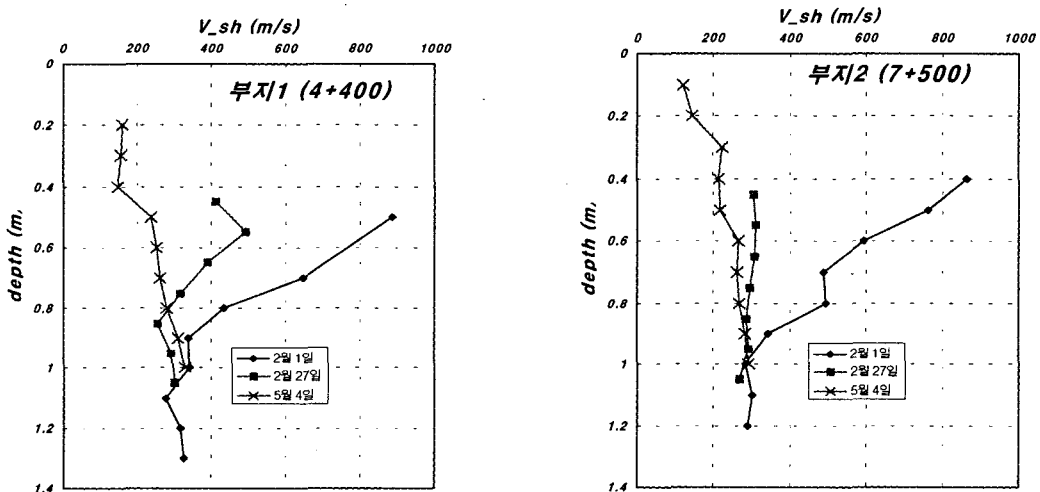
### 3. 시험도로 시험

#### 3.1 현장 크로스홀 시험

본 연구에서는 중부내륙고속도로에 건설중인 시험도로 노상에서 크로스홀 시험을 실시하였다. 현장조건에 따른 노상의 강성 변화를 관찰하기 위하여 시험도로 구간 2곳(부지 1, Station 4+400; 부지 2, Station 7+500)의 노상 현장에 각각 크로스홀 시험을 위한 2개의 시추공을 2.6m의 간격으로 설치하고, 동결중(2월 1일), 융해중(2월 27일), 완전 융해 후(5월 4일)의 3단계로 실험을 수행하였다. 또한, 비가 온 직후인 완전 융해 후 단계에서는 2개의 검측공 사이에서 크로스홀 시험과 동일한 깊이별로 시료를 채취하고 함수비를 측정하여 함수비에 따른 강성변화를 살펴보고, 압축파(P파) 속도와 수직방향 전단파(SV)와 수평방향 전단파(SH)의 속

도를 모두 측정하여 현장 노상의 포아송 비와 비등방성을 평가하였다.

동결·융해과정에서 실시한 크로스홀 시험으로부터 구한 시험도로 노상의 전단파 속도 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 살펴보면 부지 1과 부지 2 모두 깊이 1m 이내에서는 동결중(2월 1일) 전단파 속도가 증가하였다가, 부분 융해(2월 27일)시 급격히 감소하며 완전 융해(5월 4일)시 조금 더 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 이미 알려져 있는 동결·융해 중의 강성변화 경향과 일치하는 결과로서 현장 크로스홀 시험을 통하여 검토하였고, 아울러 대상 현장에서 강성변화의 정량적인 측정이 가능함을 알 수 있다. 한편, 깊이 1m 이상에서는 동결·융해에 따른 강성변화가 일어나지 않아 본 노상토의 동결깊이는 대략 1m 이내로 결정할 수 있다. 그러나 이와 같은 동결깊이는 노상 상부구조가 없는, 즉 노상만이 지표에 노출되었을 때의 동결깊이이고, 상부층의 시공과정이 완료되어 완전한 포장의 구조를 형성하면 노상토의 동결깊이는 상당히 얕아지거나 동결의 영향을 받지 않을 것이다. 따라서 향후 포장구조물이 완성된 이후에 포장구조물 내에 동결심도계, 온도측정계, 함수비측정계 등의 설치 이외에도, 크로스홀 시험과 같은 현장탄성파시험을 계절별로 실시하고 각 포장층의 계절적 강성변화를 장기적으로 측정하여 역학적 설계에 적용함이 바람직하다.



(a) 부지 1 (Station : 4+400)

(b) 부지 2 (Station: 7+500)

그림 3. 동결·융해 과정에서의 시험도로 노상토의 전단파 속도 변화

3단계 완전융해 후 과정에서는 부지 2에서 노상 상층부로부터 0.1m 간격으로 깊이 1m까지 크로스홀 시험을 수행하였는데, 실험 전날 강우의 영향으로 상층부는 함수비가 증가된 상태이고 깊이에 따라 함수비가 달라 다양한 함수비에 따른 탄성계수 변화를 알아보기에 적합하였다. 현장에서 함수비는 2개의 시추공 중간 위치에서 수동식 오거를 이용하여 크로스홀 시험이 수행된 깊이별로 노상토를 채취하여 측정하였고, 노상 상층부에서 현장들밀도 시험을 통하여 건조단위중량을 산정하였다. 시험결과 1.85t/m<sup>3</sup>의 건조단위중량을 얻었고, 깊이에 따른 함수비와 전단파속도 주상도, 최대전단탄성계수 주상도를 그림 4에 나타내었다. 최대전단탄성계수는 각 깊이에서의 전단파속도와 현장들밀도 시험으로부터 구한 건조단위중량 1.85t/m<sup>3</sup>를 이용하여 식 (1)로부터 산정하였다.

함수비(그림 4 (a))의 결과를 살펴보면 상부 40cm까지는 강우의 영향으로 함수비가 증가하였고, 50cm 이하로는 대략 8% 내외의 함수비로 현장에서의 다짐시 함수비로 추정할 수 있다. 크로스홀 시험의 결과인 전단파속도 주상도와 최대전단탄성계수 주상도(그림 4 (b), (c))를 살펴보면 깊이별로 함수비가 감소함에 따라 전단파속도 및 전단탄성계수가 증가함을 알 수 있다. 상부로부터 60cm 이후의 미소한 강성증가는 구속압의 증가 또는 층별 다짐정도의 차이로 인한 현상으로 판단된다.

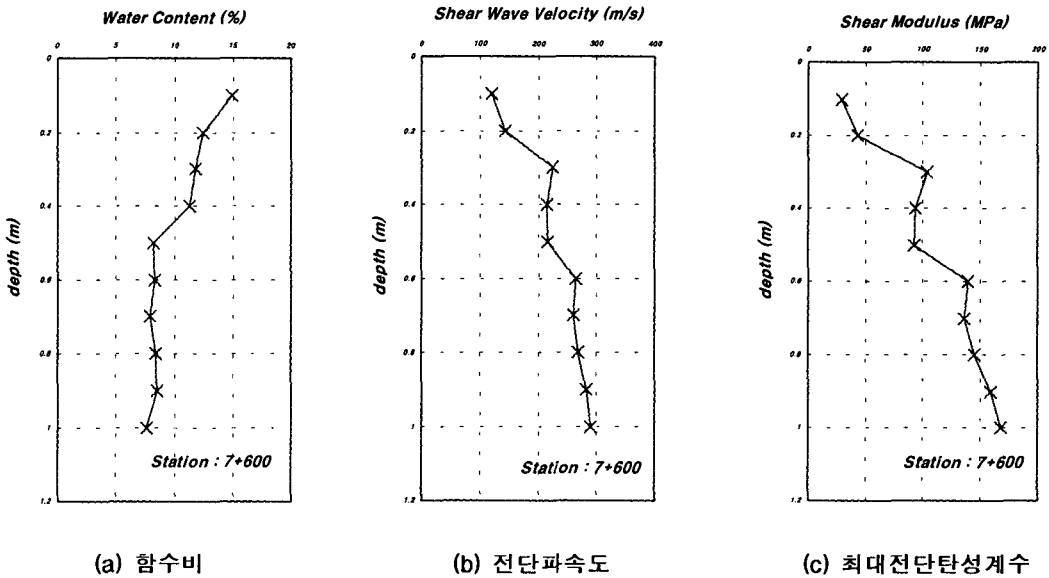


그림 4. 현장 함수비와 현장 크로스홀 시험 결과

한편, 본 크로스홀 시험에서는 함수비에 따른 강성변화 뿐만 아니라 전단파 속도 측정 이외에 압축파(P파) 속도를 측정하여 현장 노상토의 포아송 비를 추정해보았다. 포장 구조체의 포아송 비는 여러 포장 해석에서 입력물성치로 사용되는데, 대부분 해석에서 포아송 비를 가정하는 현실을 감안하면 현장에서 신뢰성 있는 포아송 비 추정은 보다 완성도 높은 해석 및 설계에 있어서 필요하다. 또한 전단파 속도를 수평성분( $V_{SH}$ )과 수직성분( $V_{SV}$ )으로 나누어 측정하여 깊이별로 성분의 비( $V_{SH}/V_{SV}$ )를 산정하여 비등방성을 살펴보았다. 크로스홀 시험은 발진자와 감지기 사이에서의 도달시간 차이를 이용하여 대상 매체의 파속도를 측정하는데, 발진기에서 압축파가 주된 진동을 유발시킬 때는 감지기에서 압축파 도달시간을 결정하고, 전단파 진동을 유발시킬 경우 수평력이 위주일 때는 감지기에서 도달한 전단파는 수평성분 전단파가, 수직력이 위주일 때는 감지기에서 수직성분 전단파가 도달한다. 따라서, 본 시험에서는 이와 같은 탄성파의 특성을 이용하여 압축파 및 수평성분·수직성분 전단파 속도를 산정하였다. 이와 같은 실험결과를 표 1에 나타내었다.

표 1에 나타난 각 깊이에서의 포아송 비는 해당 깊이의 압축파 속도와 전단파 속도를 이용하여 구할 수 있다. 즉, 영계수와 전단탄성계수 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3}$$

여기서, E = 영계수 (Young's modulus)  
 G = 전단탄성계수 (Shear modulus)  
 $\nu$  = 포아송비

따라서, 식 (1)과 식 (3)을 이용하면 다음 식과 같이 포아송 비를 압축파속도( $V_p$ )와 전단파속도( $V_s$ )의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{V_p^2}{V_s^2} - 1 \tag{4}$$



크로스홀 시험으로부터 식 (4)를 이용하여 구한 포아송 비는 몇 개의 위치를 제외하고 대략 0.3 내외의 비교적 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있었다. 몇몇의 위치에서 신뢰도가 떨어지는 포아송 비 값은 파속도를 구하는데 있어서 발생하는 오차 때문이다. 크로스홀 시험에서 산정하는 파속도는 감지기의 도달시간 결정에 크게 의존한다. 전단파는 극성(polarity) 특성이 있어 타격방향에 따라 도달되는 파의 형상이 반대가 되고, 압축파(P파)에 비해 기하학적 감쇠가 적어 상대적으로 큰 에너지가 전달되어 도달시간 결정이 용이한 반면에, 압축파는 그렇지 못하여 도달시간 결정에 오차가 포함될 수 있다. 따라서 압축파속도 산정에 오차가 발생할 수 있고, 이로부터 포아송 비 결정에도 오차가 발생된다. 향후, 보다 신뢰성 있는 파의 도달시간 결정이 이루어지면 본 크로스홀 시험을 이용하여 현장에서의 신뢰도 높은 포아송 비 산정이 가능할 것이다.

표 1 크로스홀 시험 결과 (부지 2, 2002년 5월 4일)

Depth (m)	함수비 (%)	Vp (m/s)	Vsh (m/s)	Vsv (m/s)	포아송비 (Vp : Vsh)	포아송비 (Vp : Vsv)	Vsh/Vsv
0.1	14.92	225.4	119.1	-	0.306	-	-
0.2	12.5	285.0	144.0	232.0	0.328	-	0.621
0.3	11.79	371.4	223.9	228.1	0.214	0.197	0.982
0.4	11.33	404.3	213.9	238.0	0.305	0.234	0.899
0.5	8.2	404.0	215.5	240.8	0.301	0.224	0.895
0.6	8.31	383.4	264.2	254.1	0.048	0.108	1.040
0.7	7.87	361.2	261.3	255.5	-	-	1.023
0.8	8.43	486.6	269.1	264.9	0.280	0.289	1.016
0.9	8.45	470.8	282.0	280.7	0.220	0.224	1.004
1.0	7.61	503.7	291.0	271.1	0.249	0.296	1.073

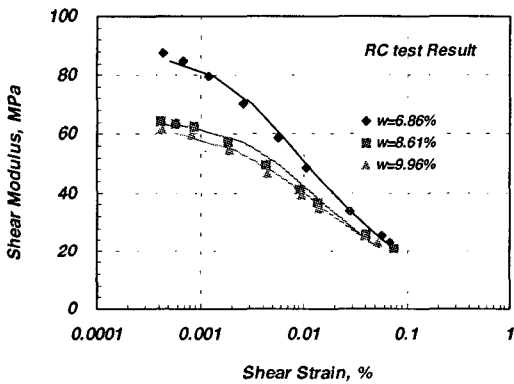
한편, 전단파 속도를 수평성분( $V_{SH}$ )과 수직성분( $V_{SV}$ )으로 나누어 측정하여 깊이별로 성분의 비( $V_{SH}/V_{SV}$ )를 산정하였다. 표 1에 나타난 결과를 살펴보면 상층부로부터 0.5m 까지는 수직성분의 파속도가 수평성분의 파속도보다 크고 즉, 수직성분의 강성이 더 크고, 0.6m 이상되는 깊이에서는 두 성분의 파속도가 거의 같게 나타남을 알 수 있다. 현장에서 상층부 30cm는 다짐이 미비한 상태임을 고려할 때, 전단파속도의 수평성분과 수직성분의 비로 나타나는 비등방성 평가로부터 다짐효과를 대략적으로 확인할 수 있으리라 판단된다. 이는 향후 보다 많은 실험과, 다른 실험과의 비교를 통해 다짐도의 평가에 유효하게 사용할 수 있을 것이다. 본 실험의 경우, 현장에서 대략적인 검토 결과 전단파속도 성분비( $V_{SH}/V_{SV}$ )가 클수록 다짐상태가 양호하게 나타났다.

### 3.2 실내시험 결과와의 연계

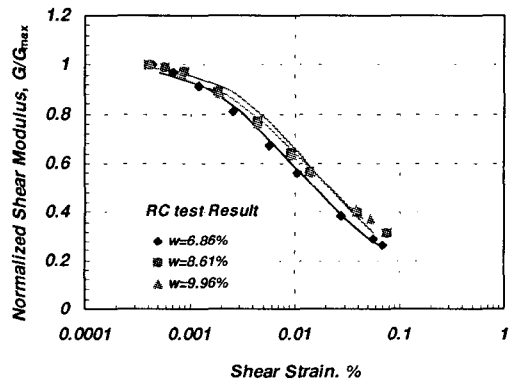
현장에서 크로스홀 시험으로부터 얻는 탄성계수는 일반적으로 저변형율( $< 10^{-3}\%$ )에서의 최대탄성계수를 나타낸다. 그러나, 실제 포장구조체가 경험하는 변형율은 중간변형율 영역( $10^{-3} \sim 10^{-1}\%$ )에 속하므로 크로스홀 시험결과를 포장의 역학적 설계에 직접적으로 이용하기에는 한계가 있다. 따라서, 변형율 크기에 따른 탄성계수 차이를 합리적으로 보정하기 위하여 저변형율에서 중간변형율 크기를 포함하는 범위에서 변형율 크기에 따른 노상토의 정규화탄성계수 감소곡선을 공진주 시험을 통하여 평가하였다.



시험도로 현장의 노상토를 교란시료로 채취하여 실내에서 현장다짐조건(최적함수비, 최대건조단위중량의 95%)에 맞추어 제성형 후, 유효구속압 41kPa로 공진주 시험을 수행하였고, 결과를 그림 5에 나타내었다. 최적함수비(9.96%) 이외에도 다짐함수비에 따른 영향을 살펴보기 위해 건조축(w=8.61%, 6.86%)에서 시료를 성형하여 결과를 비교하였다. 그림 5 (a)에 나타난 결과를 살펴보면 함수비가 감소할수록 전단탄성계수가 감소하는 경향을 나타내며, 감소하는 비율은 저변형율일수록 커짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 다짐함수비만을 영향요소로 설정하였는데, 기존의 연구에 의하면 변형을 크기에 따른 탄성계수 변화는 시료의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수 등 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 그러나 탄성계수를 최대탄성계수로 정규화하여 나타내면 시료의 교란, 하중주파수, 함수비 등에 무관하게 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다 (Seed 등, 1984). 따라서, 그림 5 (a)에 나타난 변형을 크기에 따른 탄성계수를 최대탄성계수로 정규화하면 그림 5(b)와 같이 다짐함수비에 거의 영향이 없는 정규화전단탄성계수 감소곡선을 얻을 수 있다.



(a) 다짐함수비에 따른 전단탄성계수 감소곡선



(b) 정규화전단탄성계수 감소곡선

그림 5. 시험도로 노상토의 공진주 시험 결과

정규화탄성계수 감소곡선은 여러 영향요소에 무관하게 변형을 크기에 따른 탄성계수 감소 경향을 나타내기 때문에 현장에서 구한 최대탄성계수를 정규화탄성계수 감소곡선에 결합하면 전체 변형을 영역에서 현장조건이 고려된 탄성계수 결정이 가능하다. 즉, 예를들어 그림 5 (b)에 나타난 정규화전단탄성계수 감소곡선에 표 1에 나타난 시험도로 노상 깊이 0.8m의 결과( $V_p=486.6\text{m/s}$ ,  $V_s=269.1\text{m/s}$ ,  $\nu=0.280$ )를 이용하면 그림 6과 같은 노상 0.8m 깊이의 변형을 크기에 따른 탄성계수를 얻을 수 있다. 그림 6 (a)의 전단탄성계수는 그림 5 (b)에 나타난 정규화전단탄성계수에 현장크로스홀 시험으로부터 얻은 최대전단탄성계수를 직접 결합하여 구할 수 있는 반면에, 그림 6 (b)의 압축탄성계수는 미소변형 삼축시험을 통해 얻은 결과를 이용해야 한다. 그러나 식 (3)에 나타난 전단탄성계수와 압축탄성계수 사이의 관계 및 전단변형율과 축변형율 사이의 관계 ( $\gamma=(1+\nu)\epsilon_a$ )는 포아송 비만의 함수이므로 크로스홀 시험으로부터 얻은 포아송 비를 이용하면 정규화전단탄성계수 감소곡선으로부터 정규화압축탄성계수 감소곡선을 얻을 수 있고, 크로스홀 시험으로부터 얻은 최대 압축탄성계수를 결합하면 그림 6 (b)에 나타난 변형을 크기에 따른 압축탄성계수를 얻을 수 있다. 이와 같이 현장시험과 실내시험을 합리적으로 결합하면 각각의 시험결과를 독립적으로 해석할 때보다 더 많은 물성치의 획득이 가능하고, 포장의 역학적 설계·해석에서 현장조건을 합리적으로 반영할 수 있는 입력 물성치의 획득이 가능하리라 판단된다.

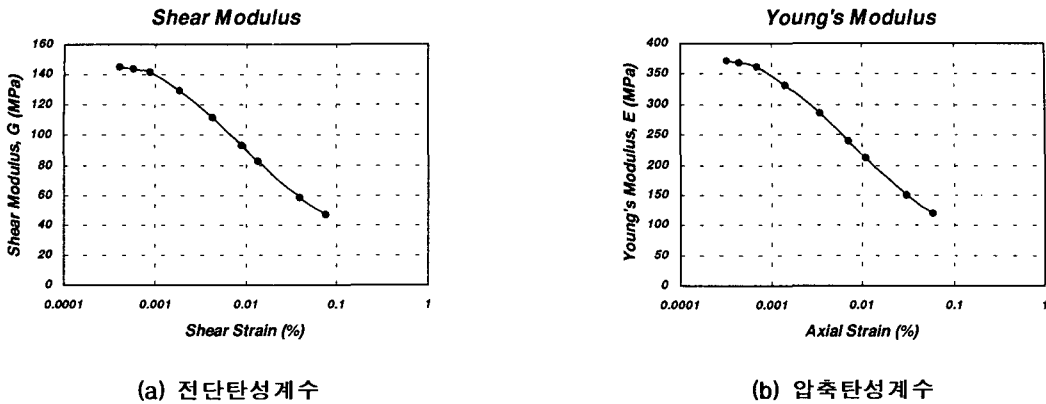


그림 6. 현장조건이 고려된 변형률 크기에 따른 탄성계수 곡선의 일례

#### 4. 결론

현장 노상에서 크로스홀 시험을 통해 동결·융해중의 탄성계수 변화를 살펴본 결과 동결이 일어난 노상 상층부에서 동결시 탄성계수가 증가하였다가, 융해시 급격히 감소하는 경향을 알 수 있었다. 또한, 크로스홀 시험으로 강우에 의한 함수비 변화에 따른 탄성계수 차이를 산정하였는데, 함수비가 증가할수록 탄성계수가 감소하는 경향을 얻었다. 아울러 압축과 속도와 전단과 속도를 각각 노상의 깊이별로 구하여 이로부터 포아송 비를 추정하였으며, 수평성분 전단과 속도와 수직성분 전단과 속도의 비교를 통해 비등방성을 포함한 노상의 다짐 평가의 가능성을 확인하였다.

실내 공진주 시험으로부터 노상에 대한 변형률 크기에 따른 정규화탄성계수 감소곡선을 얻었고, 이로부터 현장시험과 실내시험의 합리적인 결합을 통해 현장조건이 반영된 변형률 크기에 따른 탄성계수의 획득이 가능함을 확인하였다. 이는 향후 포장의 역학적 설계·해석에서 현장조건을 합리적으로 반영할 수 있는 입력 물성치의 획득이 가능하리라 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국도로공사 연구비 지원으로 수행된 '동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구' 결과의 일부로 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

1. 권기철, 변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체  $M_R$  시험법, 한국과학기술원, 박사학위논문, 1994.
2. Lee, N. J., Stokoe II, K.H., McNerney, M. T., and McCullough, B. F., In Situ Evaluation of Layer Stiffnesses of Airport Pavements by Crosshole Seismic Tests, Transportation Research Record No. 1639, 1998 Annual Meeting, Washington. D.C., pp.62-72, 1998
3. Richart, F. E. Jr., Hall, J. R. Jr., and Woods, R. D., *Vibrations of Soil and Foundation*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp.60-120, 1970.
4. Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. H., and Tokimatsu, K. *Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils*, Earthquake Eng. Research Center, UCB/EERC-84/14, 1984.