

## 비교란/재성형 사질토의 감쇠비

### Material Damping Ratio of Undisturbed and Remolded Sands

황선근<sup>1)</sup>, Seon Keun Hwang

1) 한국철도기술연구원 시설연구부 책임연구원, Chief Researcher, Civil Eng. & Env. Div.,  
Korea Railroad Research Institute

**SYNOPSIS:** Combined resonant column and torsional shear equipment was used to conduct a laboratory study of the shear modulus and material damping ratio of undisturbed and remolded sand specimens. The effects of confining pressure, excitation frequency, strain amplitude and number of loading cycles were evaluated. The remolded sand was a poorly graded sand which contained no fines and was tested dry. The undisturbed sand specimens were silty sands which had little to no cementation, contained less than about 20 % fines, and were tested at their natural water contents. A significant portion of the study was directed towards evaluation of material damping ratio because of the scarcity of this type of data. The results show the importance of excitation frequency on small-strain material damping ratio of undisturbed silty sands and the importance of number of loading cycles on material damping ratio measured at medium strains for both undisturbed and remolded sands.

**Keywords :** Combined resonant column and torsional shear equipment, undisturbed and remolded sand, shear modulus, material damping ratio, confining pressure, excitation frequency, strain amplitude, number of loading cycles

#### 1. 서론

전단탄성계수와 흙의 감쇠비는 지반공학적 재료의 거동과 지진시 지반거동의 심각성을 결정하는 중요한 매개변수이다. 전단탄성계수는 과거 수십 년간에 걸쳐 광범위한 실내 및 현장의 연구대상이었다. 이러한 노력으로 다양한 측정기술의 발전되어 중요한 변수의 확인, 아주 다양한 자연 및 실험조건하에서의 대표적인 값들을 충분히 축적해왔다. 다른 한편으로, 감쇠비에 영향을 주는 기본적인 메카니즘의 복잡성과 실내/현장에서의 정확한 측정의 어려움으로 인해, 흙의 감쇠비는 그다지 관심을 받지 못해왔다. 이 연구는 흙의 전단탄성계수와 감쇠비를 평가하기 위해서 재성형 및 비교란 사질토 시료를 공진주/비틀전단시험기를 사용하여 실내실험을 수행하였고 특히 감쇠비에 중점을 두었다. 재성형된 사질토시료는 세계 곳곳의 parametric 연구분야에서 광범위하게 사용되고 있기 때문에 시험용 시료로 사용하였고, 비교란 시료는 저변형률( $\gamma < 0.001\%$ )과 고변형률( $0.001\% < \gamma < 0.1\%$ )에서 감쇠비에 영향을 미치는 변수를 조사하기 위해서 시험용 시료로 하였다. 더욱이, 재성형된 시료의 동적특성이 비교란 시료의 특성을 얼마나 잘 표현하는 지를 결정하기 위해서 비교란시료를 시험시료로 하였다.

#### 2. 공진주와 비틀림 전단장치(RCTS)

토질의 동적특성을 조사하기 위하여 Texas at Austin 대학의 연구원들에 의해 지난 20년 동안 개발된 공진주/비틀전단시험기를 사용하였다(Isenhower et al., 1987 ; Ni, 1987; and Kim, 1991). 이 장비는 고정단-자유단 형태이다. 그림 1과 같이 공시체의 바닥은 강성받침대에 고정시키고, 상단은 비틀 자극장치(torsional excitation)을 적용하였다.

이 장비는 2가지 중요한 특성을 가지고 있다. 첫 번째는 공진주(RS)시험과 비틀(TS)시험을 같은 장

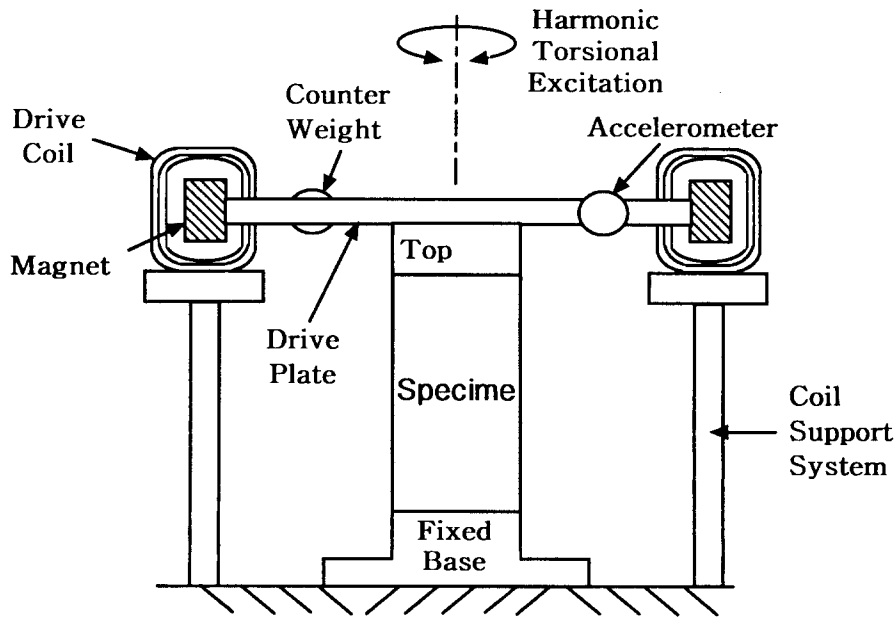


그림 1 공진주/비틀전단시험기의 개략도(Confining Chamber not Shown).

비로 수행할 수 있다. 한 형태의 시험에서 다른 형태의 시험으로의 전환은 구속 Chamber 외부에서 단순히 다음과 같은 것의 변화를 주므로써 이루어진다. 1) 공시체를 구동하는 입력가진(excitation) 진동수 2) 공시체의 응답을 기록하는 운동모니터링 장치. 결과적으로 두가지 시험의 결과를 효과적으로 분석하기 위해서 동일한 시료를 준비하는데 있어서 생기는 오차의 가능성을 배제한다. 두 번째로 비틀시험에 있어서 재하진동수를 0.01Hz에서 약 10Hz까지 쉽게 변화시킬 수 있어서 토질의 변형특성에 대한 진동수의 영향을 이 장비를 이용하여 편리하게 파악할 수 있다.

공진주(RC)와 비틀(TS)시험의 주요 차이점은 가진(excitation)진동수, 운동 모니터링 장비, 데이터 해석에 있다. RC시험에서는 20Hz 이상의 진동수를 관례적으로 작용시키고 가속감지기로 공시체의 운동과 공시체의 관성을 모니터링하고 구동시스템으로 측정분석을 한다. 또 한편으로 TS 시험에서는 0.01Hz~10Hz 사이의 진동수로 저속 싸이클릭 재하를 실시한다. Proximator는 공시체의 변위를 측정하는데 쓰이며 관성력은 실험결과를 분석하는데 사용되지 않는다.

기본적으로 공진주(RC) 시험의 작동원리는 1차모드 torque motion 상태에서 원통형의 흙 공시체를 진동하는 것이다. 조화 비틀림 가진(Harmonic torsional excitation)을 공시체의 상단에 주어진 주파수 범위 안에서 진동을 가해 얻어진 결과로서 그림 2.(a)에 나타난 것과 같은 공시체 상단에서의 가속도 크기의 변화를 얻어냈다. 1차 모드 공진이 짧은 시간동안에 이루어지기 때문에 빠르고 정확하게 얻어질 수 있도록 모든 과정을 자동화하여 진행되었다(Ni, 1987). 공진주파수와 진동의 최대진폭의 결정은 주파수 응답곡선으로 결정된다. 이 값은 전단파속도( $V_s$ ), 전단탄성계수( $G$ ), 전단변형률( $\gamma$ )을 산정하기 위해 장비특성과 공시체의 크기와 연관되어 있다.

RC시험에서 재료감쇠비(D)는 자유진동감쇠곡선이나 1/2 파워밴드방법(half-power bandwidth method)을 이용하여 동적응답으로 산정한다. 공시체가 공진주파수에서 정적 운동을 한 후에 가진력을 갑자기 차단함으로써 자유진동감쇠곡선이 얻어진다. 그림 3은 이러한 과정의 예를 보여주고 있다. 감쇠곡선으로부터 대수감쇠,  $\delta$ ,는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta = \ln(z_1/z_2) \quad (1)$$

여기서  $Z_1$  과  $Z_2$ 는 연속된 두 싸이클의 진폭이다. 재료감쇠비는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (2)$$

half-power bandwidth 방법은 공진주파수 부근의 주파수 반응곡선의 폭을 측정하여 구한다. 만일 감

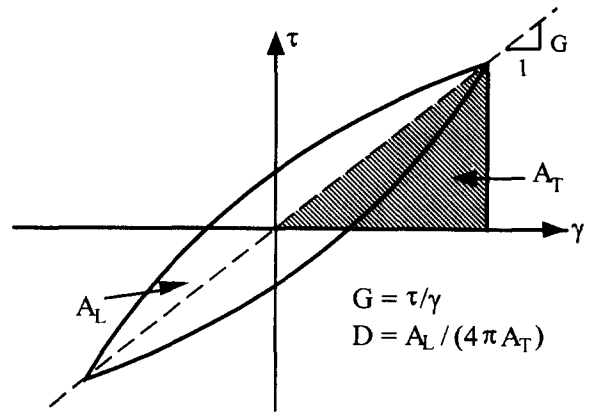
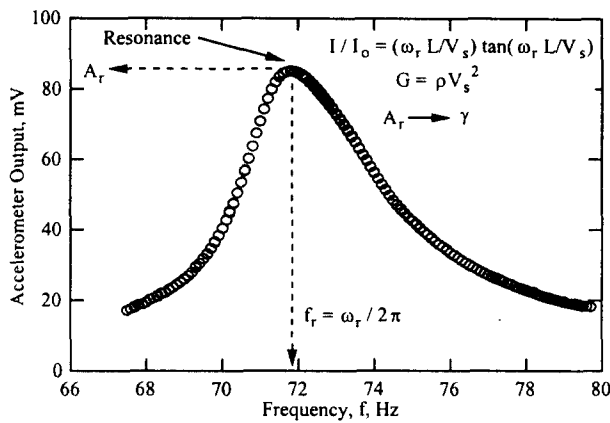


그림 2 공진주/비틀전단시험의 측정 예

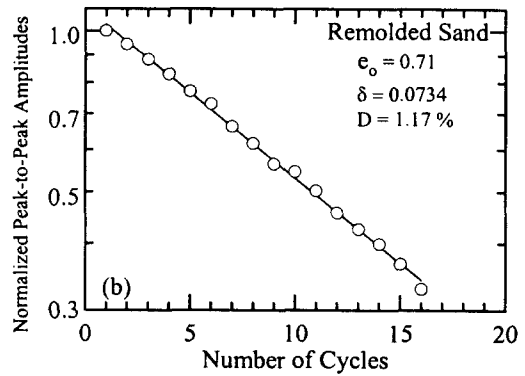
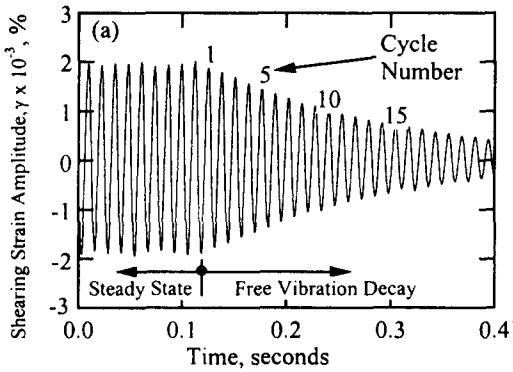


그림 3 자유진동감쇠곡선을 이용한 RC시험의 감쇠측정

쇠비가 작으면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D \cong \left( \frac{f_1 - f_2}{2f_r} \right) \quad (3)$$

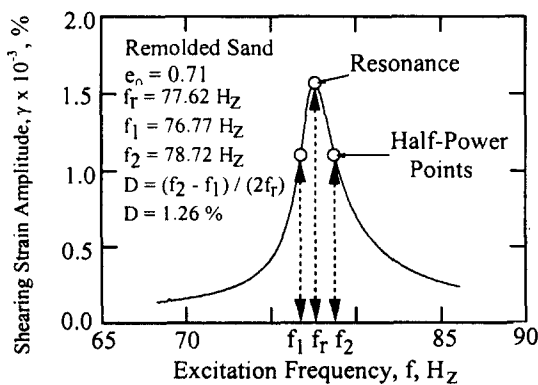


그림 4 Half-Power Bandwidth를 이용한 RC 시험의 감쇠측정(그림 3과 동일한 시료)

비틀전단시험(TS)은 다른 방법으로 작동하지만 같은 RCTS 장비를 이용하여 전단탄성계수와 전단상

태의 재료의 감쇠비를 결정하는 또 다른 방법이다. 일반적으로 10Hz 이하의 진동수로 저속도 반복비틀 (slow cyclic torsional loading)을 공시체의 상부에 가한다. 그림 2b에 보는 바와 같이 공시체의 torque-twist관계로부터 응력-변형을 이력loop를 결정한다. 코일의 가해지는 전압은 교정방법에 의하여 torque를 측정하는데 쓰이며 Proximitor는 비틀각을 측정하는데 이용된다. 이력곡선의 양단을 이은 직선의 기울기로부터 전단탄성계수를 구한다. 재료의 감쇠비는 응력곡선으로부터 한 사이클 동안에 저장된 peak 변형을 에너지( $A_T$ )에  $1/4\pi$ 을 곱한 값과 한 사이클 동안에 소산된 에너지( $A_L$ )의 비로써 구한다.

### 3. 사질토 공시체

RCTS장비를 이용하여 여섯 개의 재성형시료와 일곱 개의 비교란 사질토시료를 시험하였다. 재성형시료는 통일분류법(USCS)에서 SP에 해당하는 깨끗한 모래이다. 이 모래는 텍사스주 오스틴 시에서 채취한 것으로서 물세척된 몰탈 모래이다. 이 시료는 공시체로 쉽게 재현할 수 있는 특징이 있기 때문에 지난 20년 동안 UT에서 토질동역학 연구용으로 사용되어온 모래이다. 시료로 사용된 사질토의 입경가적곡선은 그림 5와 같다.

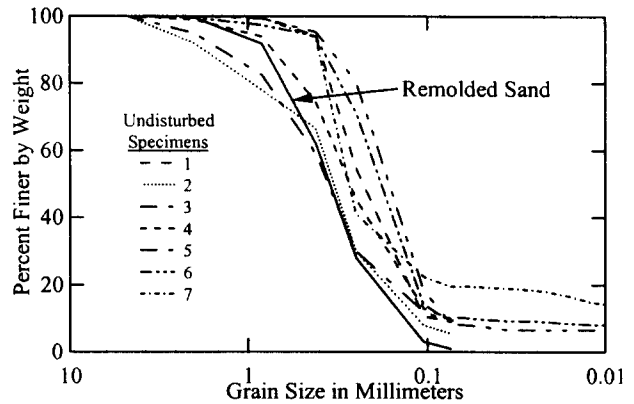


그림 5 시료의 입경가적곡선

일곱 개의 비교란 공시체는 그림 5에 보여진 것과 같이 5~22%의 세립분을 함유하고 있다. 이 시료는 모두 미국(캘리포니아에서 두 지역, 남부 캘리포니아에서 한 지역)의 서로 다른 세 지역에서 7.5cm thin-walled sample tube를 사용해서 채취하였다. 시료는 UT까지 자동차를 이용하여 운반하였다. 각 시료는 압출성형 후 핸드트리밍 하였다. 각 공시체의 형상은 대략 직경 5cm, 높이 10cm이다. 비교란 사질토는 통일분류법으로 비소성이고 SP-SM 또는 SM으로 분류되었다. 동적시험의 초기단계에서 공시체의 초기물성치는 표 1과 같다. 자연함수비는 14~26%이고 포화도는 52~96%이다.

표 1 비교란 사질토 시료의 초기 물성치

공시체 번호	깊이(m)	구속압 $\sigma'_m$ (kpa)	USCS분류	$R_{200}^b$ (%)	자연함수비 (%)	전체단위중량 ( $g/cm^3$ )	간극비	포화도 (%)
1	9.1	69	SP-SM	91	21.3	1.92	0.67	85
2	33.5	221	SP-SM	95	21.8	1.83	0.76	76
3	49.4	621	SP-SM	91	14.0	1.77	0.72	52
4	110	1379	SP-SM	91	17.4	1.78	0.75	62
5	47.2	407	SP-SM	91	26.4	1.94	0.73	96
6	57.2	469	SP-SM	89	24.2	1.94	0.69	92
7	80.1	600	SM	80	24.1	1.77	0.86	75

### 4. 재성형 시료

재성형된 시료의 저변형율에서의 전단탄성계수,  $G_{max}$ 와 감쇠비,  $D_{min}$ 에 대한 등방구속압력,  $\sigma'_o$ 의 영향은 그림 6에 나타냈다. 이 경우에 약 30~3400kpa사이의 구속압에서 등방구속압력이 증가함에 따라  $G_{max}$ 가 증가하면서  $\log G_{max}-\log \sigma'_o$ 의 관계는 선형으로 존재한다. 또한 같은 구속압 범위에서 등방구속압력이 증가함에 따라  $D_{min}$ 이 감소하면서  $\log D_{min}-\log \sigma'_o$ 의 관계는 거의 선형으로 존재한다. 최고구속압은 약 500m 깊이의 충적토에 해당하는 압력이라는 것을 주시할 필요가 있다.

$\gamma < 0.002\%$ 에서 전단탄성계수와 감쇠비에 미치는 가진주파수의 영향은 그림 7a와 7b에 각각 나타냈다. 0.05~100Hz범위의 가진주파수는 이 변형율에서 전단탄성계수와 감쇠비에 아무런 영향을 끼치지 않는다. 이러한 결과는 감쇠비는 재하주파수와 무관하기 때문에 재료감쇠비의 특성이 hysteretic하다고 규정하는

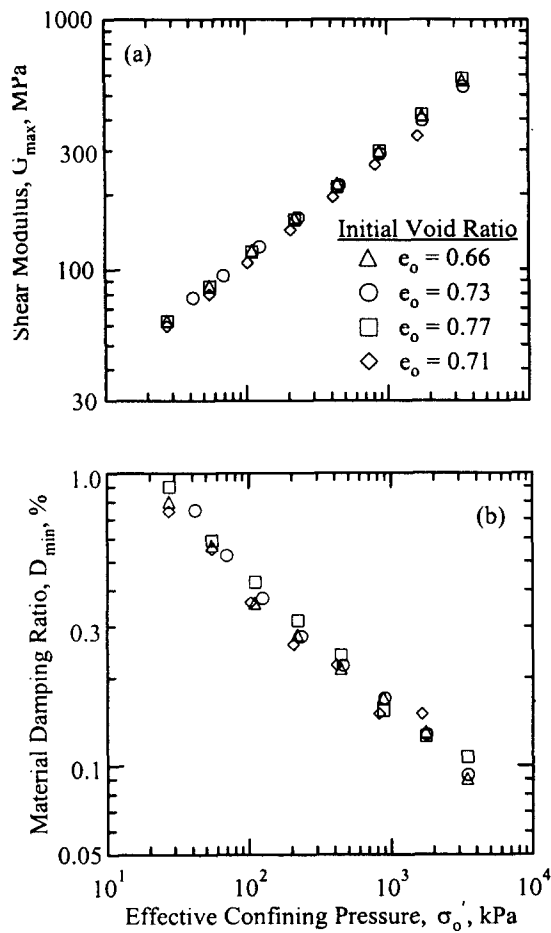


그림 6 건조 재성형시료의  $\sigma'_o$ 에 따른  $G_{max}$ (a)와  $D_{min}$ (b)의 변화

따라 전단탄성계수는 감소하지만 재하사이클의 횟수가 반복한계변형률,  $\gamma_{lc}$  이하에서 전단탄성계수에 미치는 영향은 명확하지 않다. 이 한계변형률은 그 때의 등방구속압력에서 약 0.007%이다.  $\gamma_{lc}$  이상에서는 일정한 변형율 크기 하에서, 재하사이클의 횟수가 증가함에 따라 전단탄성계수는 첫 번째 10사이클 동안 커다란 변화를 수반하며 증가한다.

감쇠비에 미치는 변형율 크기와 재하사이클의 횟수의 영향은 그림 8b에 나타났다. 감쇠비는 선형탄성 한계변형률  $\gamma_{lc}$  이하에서는 일정하게  $D_{min}$ 과 일치한다. 이 등방구속압력에서 전단탄성계수와 같이  $\gamma_{lc}$ 는 약 0.001%이다.(전단탄성계수와 감쇠비에 대해서 등방구속압력이 증가함에 따라  $\gamma_{lc}$ 는 어느 정도 증가한다.)  $\gamma_{lc}$  이상에서 변형율 크기가 증가함에 따라 감쇠비는 명확하게 증가한다. 변형율 크기의 영향은 전단탄성계수에서 보다는 감쇠비에 좀 더 확실하게 나타났다. 더욱이, 일정한 변형율 크기에서 재하사이클의 횟수가 증가함에 따라 감쇠비가 감소하면서 첫 10사이클에서의 감쇠비에 미치는 재하사이클의 횟수의 영향은 약 0.0025%의 반복한계변형률,  $\gamma_{lc}$  이상에서는 매우 중요시된다. 변형율 크기가 증가함에 따라 재하사이클의 횟수와 감쇠비의 변화는 전단탄성계수에서와 같이 매우 중요시된다. 하지만 재하사이클의 횟수의 변화가 좀 더 명확하고  $\gamma_{lc}$ 는 전단탄성계수보다 감쇠비에 대해서 작은 값을 갖는다

## 5. 비교란 실토질모래의 공시체

비교란 사질토 공시체에 대한  $G_{max}$ 와  $D_{min}$ 에 미치는 등방구속압력의 영향에 대한 전형적인 결과를 그림 9a와 9b에 각각 나타내었다.  $\log G_{max} - \log \sigma'_o$ 와  $\log D_{min} - \log \sigma'_o$ 의 관계는 두 부분의 선형구간으로

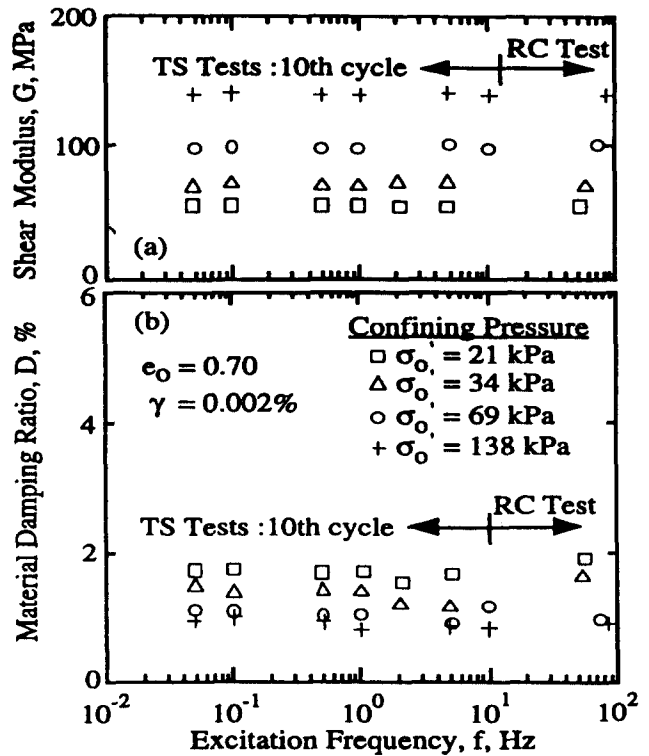


그림 7 주파수와  $\sigma'_o$ 에 따른 건조 재성형시료의 전단탄성계수(a)와 감쇠비(b)의 변화

것은 매우 타당한 것이다.

전단탄성계수에 영향을 미치는 변형율 크기와 재하사이클의 횟수의 영향은 그림 8a에 나타났다. 전단탄성계수는 약 0.001%의 선형탄성 한계변형률,  $\gamma_{lc}$  이하에서는 일정하게  $G_{max}$ 에 일치한다. 변형율 크기가 증가함에

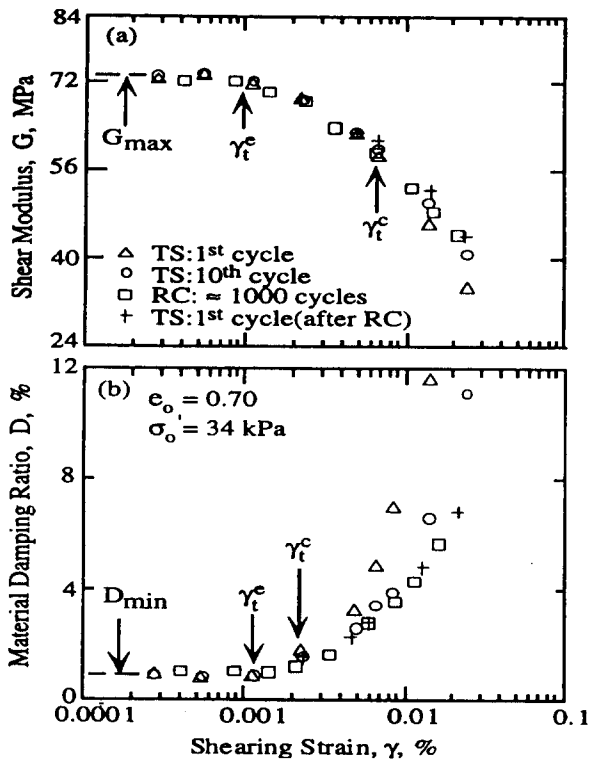


그림 8 변형율크기, 재하사이클의 횟수에 따른 건조 재성형시료의 전단탄성계수 (a)와 감쇠비 (b)의 변화

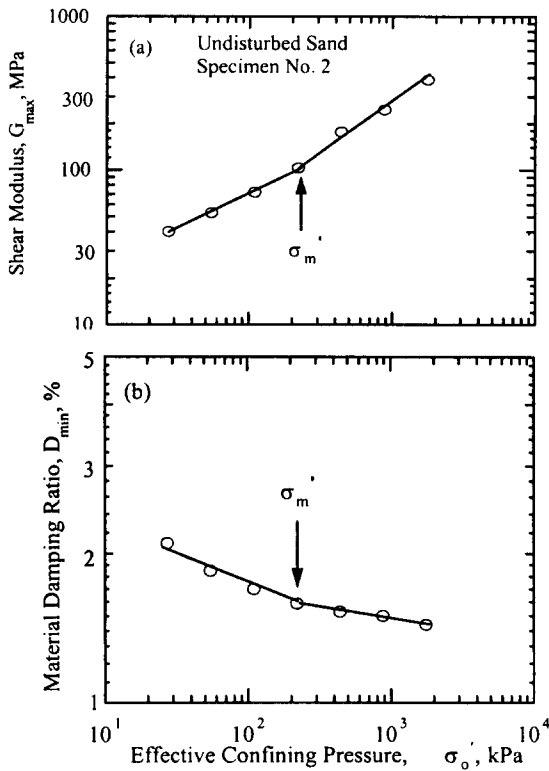


그림 9. 불교란모래시료의 구속압력의 변화에 따른  $G_{max}$ (a)와  $D_{min}$ (b)의 변화

구성되며, 처음의 선형구간의 최대 현장 평균유효응력에서 교점이 발생한다. 이 비교란 시료(다른 시료와 마찬가지로)에 대해서, 이 값은 0.5의 정지토압계수를 이용하여 현장평균유효응력,  $\sigma'_m$ 으로 측정된 현재값과 동일하다. 따라서 모든 비교란 공시체는 본질적으로 정규압밀된 상태이다.

그림 9에 보인 것처럼 과압밀 영역의 정규압밀 영역으로의 이행을 보여주는 동적특성은 전형적인 high quality의 비교란 공시체의 거동을 나타낸다. 재성형 시료와 비교하기 위해서 단지 정규압밀영역의 비교란 공시체의 거동을 제시했다.  $G_{max}$ 와  $D_{min}$ 에 대한 등방구속압력의 영향은 그림 10a와 10b에 제시했다.  $\log G_{max} - \log \sigma'_o$ 관계에서는 비교가 매우 잘 되어있다. 이 비교를 통해서 비교란 공시체가 본질적으로 교결되지 않는다는 것을 면밀히 보여준다. 한편,  $\log D_{min} - \log \sigma'_o$ 관계의 비교는 명확하지 않다. 비교란 공시체의  $D_{min}$ 값은 재성형 시료에 대한 측정값의 4~20배 정도의 범위이다. 하지만 재성형 시료의  $D_{min}$ 값은 매우 작은 반면(0.5%이하), 비교란 시료의  $D_{min}$ 은 0.5~2.0%정도이다.

$G_{max}$ 와  $D_{min}$ 에 대한 진동수의 영향을 그림 11a와 11b에 각각 나타냈다. 그림 11에서, 모든 주파수에서 측정된  $G_{max}$ 와  $D_{min}$ 은 0.1Hz에서 측정된 각각의 값으

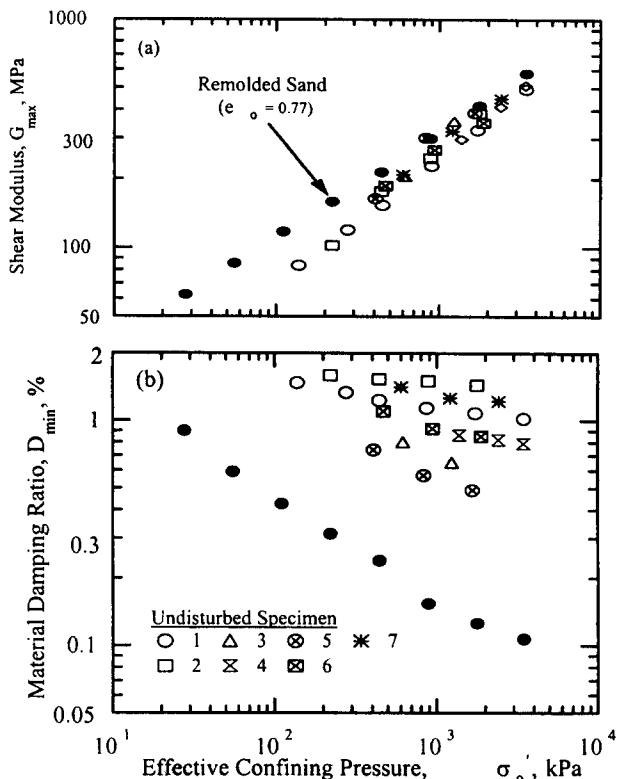


그림 10 예상  $\sigma'_m$ 이상에서  $\sigma'_o$ 에 따른 비교란 시료의  $G_{max}$  (a)와  $D_{min}$  (b)의 변화

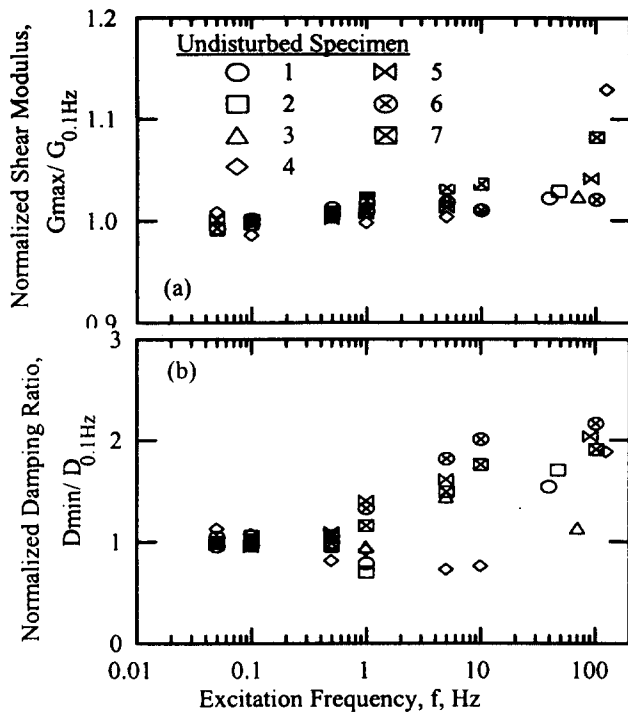


그림 11 예상  $\sigma'_m$ 에서의 가진주파수에 따른 비교란 시료의 정규화된  $G_{max}$  (a)와  $D_{min}$  (b)의 변화

실험으로 구한 값보다 훨씬 큰 값을 보여주는 것으로 더욱 확실하게 알 수 있다. 또한 이러한 거동은 hysteretic model이 비교란 공시체의 감쇠비에 대한 주파수 의존성을 나타낼 수 없다는 것을 보여준다. 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 변형률크기와 재하사이클의 횟수의 영향을 그림 13a와 13b에 나타냈다. 이 경우 일반적으로 그림 8의 재성형 시료에서 보여진 것과 유사한 거동을 보인다.

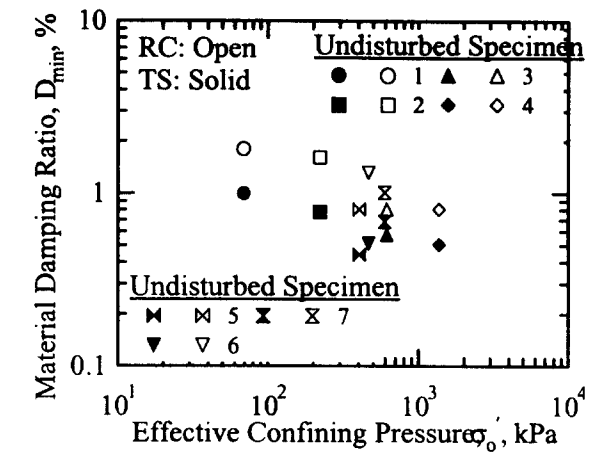
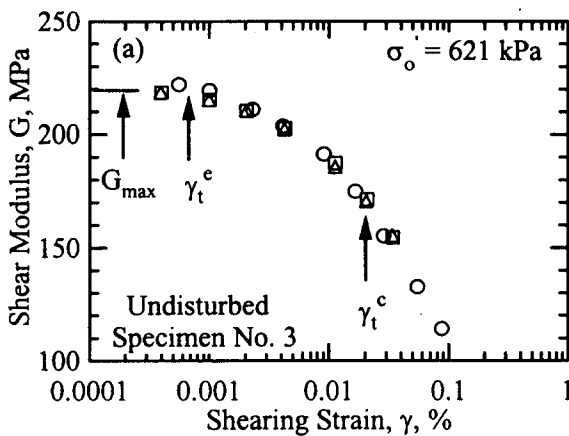


그림 12 RC와 TS(0.5Hz)시험에 의해 결정된  $\sigma'_m$ 에서의 비교란 시료의  $D_{min}$ 의 변화로 나눔으로써 정규화된다.  $G_{max}$ 에 대한 재하주파수의 영향은 작아서 재하주파수가 0.1~100Hz 범위에서 변화함에 따라 평균 5%정도이다. 한편,  $D_{min}$ 에 대한 주파수의 영향은 0.5~100Hz의 범위에서 약 100%정도의 증가를 나타낼 정도로 현저하다. 이러한 경향은 그림 12에서 보듯이 RC 실험에서 구한  $D_{min}$  값이 모두 TS

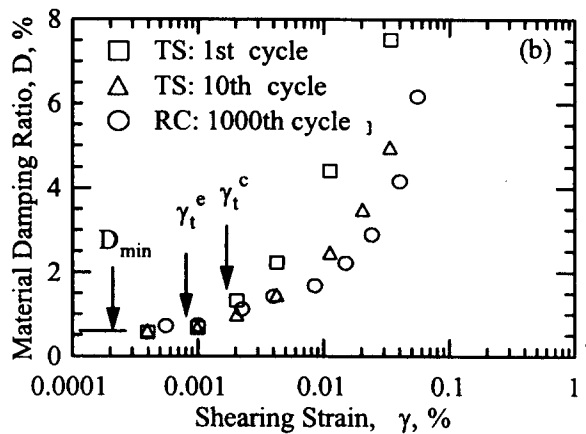


그림 13 예상  $\sigma'_m$ 에서 수행된 시험을 위한 변형률크기와 재하사이클의 횟수에 따른 비교란 시료의 전단탄성계수 (a)와 감쇠비 (b)의 변화

## 6. 결론

재성형 시료와 비교란 실트질 모래 공시체의 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 등방구속압력, 재하주파

수, 변형율크기와 재하사이클의 횟수의 영향을 실험을 통해서 조사했다. 정규압밀 영역에서의 재성형/비교란 공시체사이의 주된 차이점은 비교란시료의 경우 : 1.  $D_{min}$ 의 가진주파수에 의존성 2.  $D_{min}$ 에 대한 훨씬 큰 값(4~20배)을 갖고 있다. 두 재료는 고변형율 진폭에서 감쇠비에 대한 재하사이클의 횟수의 영향은 명확했다.

## 7. 참고문헌

Isenhower, W.M., Stoke, K.H., II and Allen, J.C. (1987), "Instrumentation for Torsional Shear/Resonant Column Measurements Under Anisotropic Stress," Geotechnical Testing Journal, ASTM, Dec., pp.183-191

Kim, D.S., (1991), "Deformational Characteristics of Soils at Small and Intermediate Strains from Cyclic Tests," Ph.D. Thesis, Univ. of Texas

Ni, S. H. (1987), "Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/Torsional Shear Tests," Ph.D. Thesis, Univ. of Texas