

## 지반의 미소변형특성 평가를 위한 실내시험기기 검증

### Calibration of Laboratory Testing Equipments for the Evaluation of Small-Strain Deformational Characteristics of Soils

김동수<sup>1)</sup>, Dong-Soo Kim, 권기철<sup>2)</sup>, Gi-Chul Kweon, 박재영<sup>3)</sup>, Jae-Young Park, 정순용<sup>3)</sup> Soon-Yong Jeong

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST

<sup>2)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST

<sup>3)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST

**SYNOPSIS** : Laboratory testing equipments such as resonant column / torsional shear (RC/TS), free-free resonant column (FF-RC), and local deformation transducer (LDT) systems were constructed and calibrated for the evaluation of deformational characteristics of soils at small to intermediate strains. Both calibrations of each load and displacement transducers and equipment compliance of entire system are very important for the reliable measurements of small strain behavior. Calibration specimens of stiffnesses ranging from 4.1 to 1346.4MPa were constructed and tested using RC/TS, FF-RC, and LDT testing systems. Test results obtained from each independent tests matched well if stiffness was adjusted considering the effects of loading frequency and strain amplitude, indicating that the developed testing equipments are well calibrated. Synthetic calibration specimen shows a great potential in calibrating a newly developed testing equipment, particularly for the measurements of deformational characteristics at small strains.

**Key words** : calibration, resonant column, torsional shear, free-free resonant column, local deformation transducer, synthetic specimen

## 1. 서 론

최근 들어 정적시험에서 계측의 정확도 증가로 인하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들고, 공용상태의 계측을 통하여 실제 구조물에서 지반이 거동하는 변형율의 범위가 0.1-1% 이하임이 밝혀지고 있다(J. B. Burland, 1989). 그러므로 정적 및 동적하중을 받는 토목구조물의 해석 및 설계를 위해 저변형율( $10^{-5}\% < \gamma < 10^{-3}\%$ ) 및 중간변형율( $10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$ ) 하에서 지반의 변형특성을 보다 신뢰성있게 규명하기 위한 실내시험법 정립은 지반구조물의 해석/설계에 필요한 합리적인 입력변수 제공을 위하여 매우 중요하다.

본 연구에서는 지반의 변형특성 평가를 위한 실내시험법 중 정적시험인 LDT(Local Deformation Transducer)를 사용한 삼축압축시험, 반복재하시험인 비틀전단시험(TS시험), 동적시험인 공진주시험(RC시험)과 현장공진주시험(FF-RC 시험) 기기를 제작하였으며, 각각의 시험법에 대한 검증을 실시하였다. 미소변형율 상태의 변형특성 결정을 위한 정적 및 동적시험을 위하여 하중 및 변형 측정용 계기의 일반적인 검증뿐만아니라, 전체 시스템의 역학적 순응성에 대한 검증이 매우 중요하고 시험결과에 큰 영향을 미치므로 시험기의 제작·사용시 반드시 검토하여야 한다. 공진주/비틀전단시험(RC/TS)기를 제작하여 간격측정기 검증, 가진시스템의 질량관성모멘트 검증, 비틀력 및 회전각 검증을 실시하였고, LDT를 사용한 삼축압축시험

에서는 제작된 LDT의 자체 검증, 현장공진주시험에서는 양단부의 Cap의 영향에 대한 검증을 실시하였다. 또한 전체 시스템의 역학적 순응성 검증을 위하여, 고유의 역학적 특성치를 알고있는 3종의 폴리아우레탄 시편 및 강성도가 서로다르게 제작된 5종(강성도 범위 : 4.1MPa - 1346.4MPa)의 검증시편(Calibration specimens)을 사용하여 각각의 시험법에 대하여 독립적으로 시험을 실시하였다.

## 2 시험장치의 제작 및 검증

### 2.1 공진주/비틀전단시험

#### 2.1.1 공진주/비틀전단시험기의 구성 및 시험원리

공진주/비틀전단 시험은 변형을 크기에 따른 지반의 동적물성치를 구하기 위하여 사용되어왔으며, 본 연구에서는 Stokoe식 고정단-자유단 방식의 공진주/비틀전단시험기를 제작하였다(그림 1).

공진주시험에서는 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템(drive system)을 공시체의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속감지기(accelerometer)로 가속도를 측정한다. 원통형의 공시체에 진동주과수를 바꾸어가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 그림 2-a에 나타난 바와 같이 1차 모드의 공진 주과수( $f_r$ )와 진동의 크기( $A_r$ )를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기를 이용하여 전단파 속도( $V_s$ ), 전단탄성계수( $G$ ) 및 전단변형율( $\gamma$ )을 구한다. 탄성파전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주시험의 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega l}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega l}{V_s}\right) \quad (1)$$

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

식(1)에 의해 전단파 속도( $V_s$ )가 구해지면 전단탄성계수( $G$ )를 다음 식으로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

여기서  $\rho$  는 질량밀도이다.

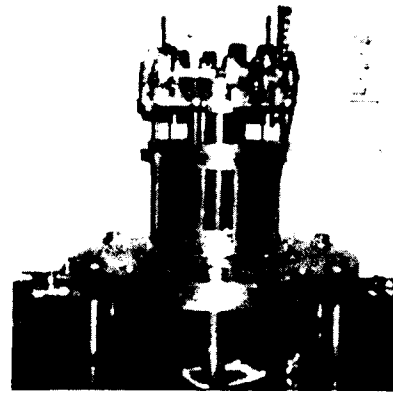


그림 1 공진주/비틀전단 시험기

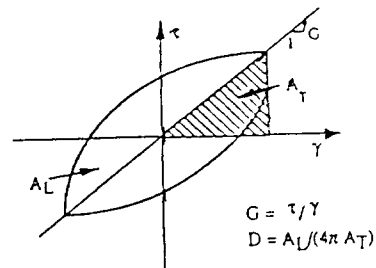
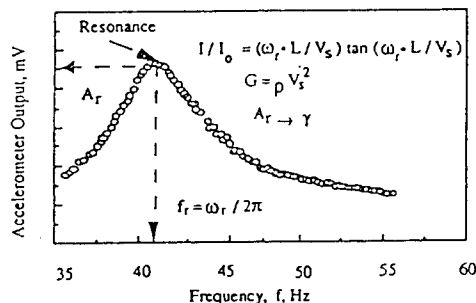


그림 2 공진주/비틀전단시험 결과 일례

비틀전단시험에서는 공진주 시험기와 동일한 시험기를 사용하고, 작동방법을 달리하여 지반의 변형특성을 구한다. 공시체를 바닥에 고정시키고 공시체 상부와 연결된 진동 시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 공진주파수를 구하는 대신 비틀력-비틀각(torque-twist) 관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선(hysteresis loop)을 구한다. 그림 2-b와 같이 이력곡선의 두 끝점을 연결한 직선의 기울기로 전단탄성계수를 구하고, 응력-변형 이력곡선 면적을 이용하여 감쇠비를 결정할 수 있다.

### 2.1.2 공진주/비틀전단시험기 자체 검증

공진주시험기를 사용하여 지반의 변형계수 결정을 위해서는 가진시스템의 질량관성모멘트( $I_0$ )를 알고 있어야 한다. 공진주시험기의 가진시스템은 기하학적으로 매우 복잡한 형상이어서 수식적으로 정확하게 결정하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 급속시료와 질량관성모멘트를 알고 있는 3개의 추가질량(added mass)을 사용하여 가진시스템의 질량관성모멘트와 급속시료의 강성도를 결정하였다.

급속시료에 추가질량이 설치된 공진주시험기에서는 식(3)의 관계가 성립된다. 그러므로 동일한 급속시편위에 질량관성모멘트가 서로다른 추가질량(added mass)을 설치하여 공진주파수를 측정함으로써 가진시스템의 질량관성모멘트와 급속시료의 강성도를 결정할 수 있다.

$$I_0 + I_{am} = \frac{k}{\omega_n^2} \quad (3)$$

여기서,  $I_0$  = 가진시스템의 질량관성모멘트

$I_{am}$  = 추가질량체의 질량관성모멘트(기지의 값)

$k$  = 급속시편의 강성도

$\omega_n$  = 공진주파수(시험으로 부터 측정)

$I_0$ 를 결정하기 위하여 입력전압을 100mV-1V 사이에서 변화시키며 공진주시험을 수행하였다. 시험결과 입력전압에 관계없이  $I_0$ 와 급속시료의 강성도는 일정하게 구해졌으며,  $I_0=2.943 \times 10^{-4} [\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2]$ , 급속시료의 강성도는 62.365[N·mm/rad]로 결정되었다.

비틀전단시험에서 시료의 회전각은 두 개의 간격측정기를 일정한 원주방향의 거리에 설치하여 probe와 target 사이의 간격 변화로 부터 측정한다. 간격측정기는 시험체와 접촉없이 변위를 측정할 수 있는 장치로서 target의 사용 재질에 따라 간격변화량-전기적신호변화량의 비(proximometer calibration factor)가 매우 큰 차이를 보이게된다. 그러므로 시험기기에 적용된 target의 재질에 따른 검증을 반드시 실시하여야 한다. 또한 시험시 시료에 발생하는 굽힘(bending)에 의한 영향을 제거하고 순수전단에 의한 회전량을 도출하기 위하여 두개의 간격측정기에서 측정된 신호를 Operational Amplifier(OP-Amp)의 subtraction 회로를 제작하여 통과시켰다. 간격측정기 검증은 LVDT(측정범위 10mm)를 기준으로 거리 변화에 대한 간격측정기의 출력전압의 변화를 측정하여 수행하였다. 간격측정기의 검증계수는 간격이 벌어지는 방향과 줄어드는 방향의 경우에 같은 값을 갖는 것으로 나타났고, 간격 0.1mm~1.8mm사이(출력전압 3~20V사이)에서 적용해야 안정된 검증계수를 사용할 수 있다. 제작된 시험기기의 간격측정기의 검증계수는 OP-Amp 설치시에는 10.123 Volt/mm, 설치전에는 10.172 Volt/mm로 구해졌다.

비틀력 검증은 신호발생기(function generator)에서 가해지는 입력전압에 의해 코일-자석에서 유발되는 비틀력의 관계를 검증하는 것이다. 강성도를 알고 있는 급속시료를 사용하여 비틀전단시험을 수행한다. 이때 위치가 서로다른 4개의 지점에서 간격측정기를 사용하여 회전각을 독립적으로 측정한다. 측정된 결과로부터 신호발생기의 입력전압과 급속시료에서 발생하는 회전각의 관계를 찾을 수 있다. 마지막으로 급속시료의 강성도를 알고 있으므로 회전각과 급속시료의 강성도로부터 코일-자석에 유발된 비틀력의 크기를 알 수 있다. 본 연구에서는 하중주파수 0.5Hz와 1.0Hz에서의 검증을 실시하였다. 비틀력 검증계수( $K_T$ )는 하중주파수에 따른 차이는 없는 것으로 나타났으며,  $K_T=0.01672 [\text{N} \cdot \text{m}/\text{volt}]$ 로 결정되었다(그림 3).

회전각 검증은 회전각과 특정 위치에 설치된 간격측정기의 출력전압과의 상관관계를 검증하는 것이

다. 신호발생기에서 서로다른 입력하중을 가하여 금속시료에 대한 비틀전단시험을 수행하여, 간격측정기의 출력값과 신호발생기의 입력전압과의 관계를 얻는다. 회전력 검증을 통하여 결정된  $K_T$ 를 사용하여 신호발생기의 입력전압과 금속시료의 강성도로 부터 회전각을 얻을 수 있고, 따라서 간격측정기의 출력전압과 회전각 사이의 관계를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용된 TS힘기기의 표준 target(중심거리 : 34.85mm)에 대한 회전각 검증계수( $K_p$ )는 0.002611[rad/volt]로 결정되었다(그림 4).

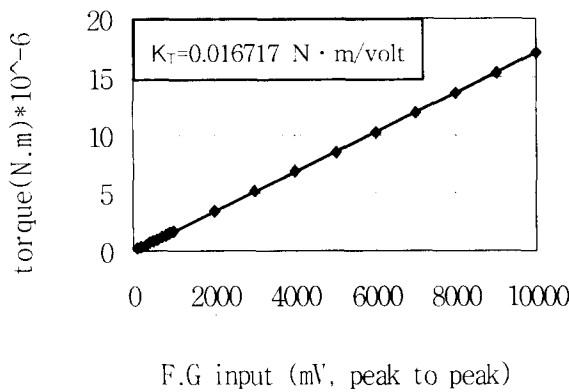


그림 3 비틀력 검증 결과

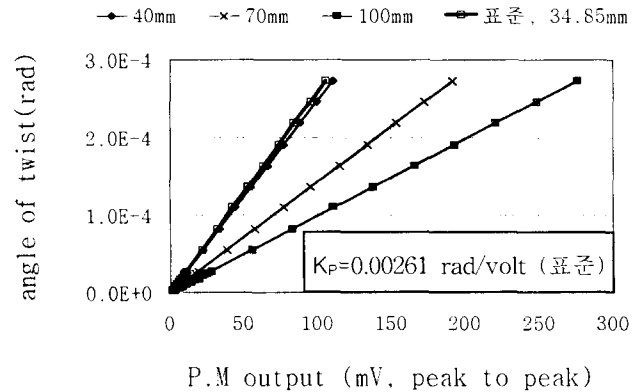


그림 4 회전각 검증

## 2.2 현장공진주시험

현장공진주시험은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 조건에서의 탄성파진달이론에 근거하여, 시편에 유발되는 파(P파 또는 S파)의 공진특성으로부터 시료의 Young 계수, 전단탄성계수를 결정할 수 있고, 아울러 포아송비도 결정할 수 있는 동적인 시험방법이다. 시험기의 개요도 및 대표적 시험결과를 그림 5에 나타내었다. 미소변형을 영역에서의 탄성계수를 신뢰성 있고, 간편하게 결정할 수 있을 뿐 아니라 직경 152mm 이상의 공시체에 대하여도 간편한 시험이 가능하여 보조기층재료의 시험에도 합당하게 적용될 수 있다(Sun, 1993 ; Vaghela and Stokoe, 1995).

시험을 위해 가진장치, 감지장치(Accelerometer) 및 구속압력 재하를 위한 멤브레인, O-ring, 양단부에 Cap 등이 설치되므로 양단자유-추가질량 경계조건이 성립된다. 양단자유-추가질량 조건에서 공진주파수로부터 시료에 전파되는 파의 속도(V)는 식 (4)와 같이 계산된다.

$$V = 2\pi f_1 \times L / \beta \quad (4)$$

여기서  $f_1$  = 1차모드 공진 주파수,  $L$  = 시료길이, 단부조건에 대한 보정계수  $\beta$ 는 식(5)과 같이 나타내어 진다.

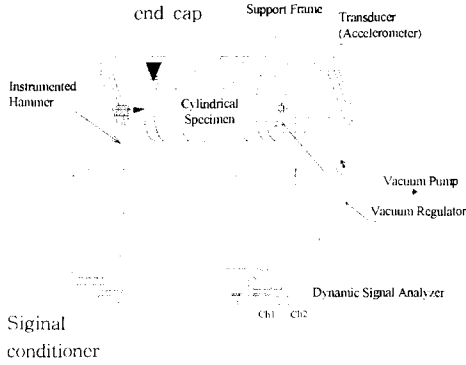
$$\tan \beta = \frac{(\mu_1 + \mu_2) \beta}{\mu_1 \mu_2 \beta^2 - 1} \quad (5)$$

여기서  $\mu_1$  과  $\mu_2$ 는 압축파인 경우는 시료와 양쪽 단부 Cap과의 무게비, 전단파인 경우는 시료와 양쪽 단부 Cap과의 질량관성모멘트비로 결정된다. 압축파와 전단파속도로 부터 미소변형을 영역의 Young 계수와 전단탄성계수를 식 (6)과 같이 결정할 수 있다.

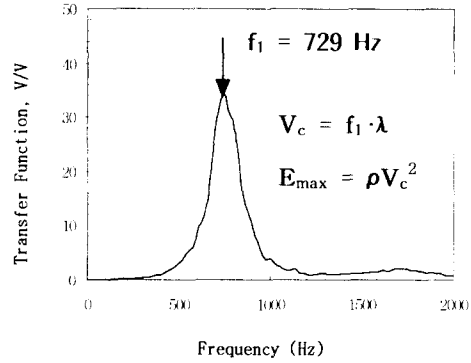
$$E = \rho V_c^2, \quad G = \rho V_s^2 \quad (6)$$

시료의 포아송비( $\nu$ )는 하중주파수의 영향을 고려하여, 동일한 하중 주파수에서의 압축파속도( $V_c$ )와 전단파속도( $V_s$ )를 결정한 후 식(7)로 결정한다.

$$\nu = (V_c / V_s)^2 / 2 - 1 \quad (7)$$



a) 현장공진주시험기 개요도



b) 주파수영역 시험결과 일례

그림 5 현장공진주시험기 개요도 및 시험결과 일례

### 2.3 LDT를 사용한 삼축압축시험

외부변형측정장치를 이용한 일반적인 삼축압축시험에서는 시료의 양쪽 단부에서 발생하는 단부효과 (bedding error) 때문에 미소변형율 영역의 탄성계수 측정이 어려워, LDT(Local Deformation Transducer)를 이용한 삼축셀 내부에서의 신뢰성있는 미소변형 측정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim Y. S. et.al 1994).

LDT는 얇은 인칭동판(본 연구에서는 길이:120mm, 폭:4mm, 두께:0.3mm 사용)의 중앙에 4개의 strain gauge(Kyowa사 KFG-2N-C1-16I.3M2R 사용)를 full-bridge 형태로 부착하여 제작하였다(그림 6). 시료의 수직변위는 LDT를 그림 7과 같이 시료의 양쪽에 양단힌지(hinge) 조건으로 설치하여 LDT의 인칭동판에 발생하는 변형율(출력신호)로부터 측정할 수 있다. 본 연구에서는 UCAM-70A(data logger)을 사용하여 LDT의 출력신호를 획득하였고, 삼축셀 외부에 설치된 load cell을 사용하여 하중을 측정하였다.

LDT 제작 후 수직변위-LDT출력신호 관계 검증결과, 변위의 증가 및 감소 방향에 무관하게 2차다항식의 형태로 나타났으며(그림 8), 회귀분석으로 결정된 상관식을 사용하였다.

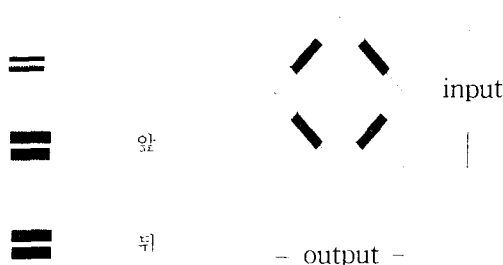


그림 6 strain gauge 연결

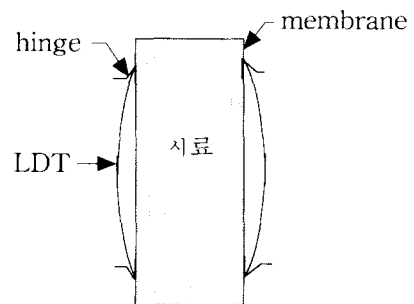


그림 7 LDT 부착방법

### 3 검증시편을 이용한 시험시스템 검증

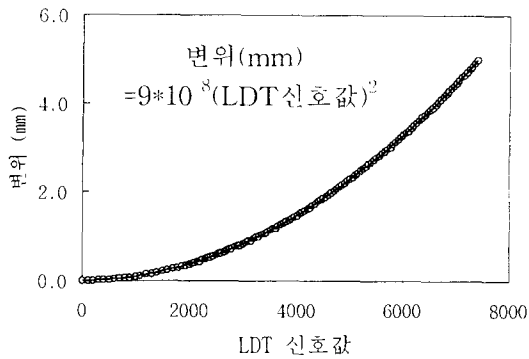


그림 8 LDT 신호값과 변위와의 관계

시험기의 검증은 하중 및 변형 측정용 계기의 검증과 시험기의 역학적 순응성에 대한 전체 검증이 필요하다. 공진주/비틀전단시험 및 현장공진주시험과 같은 동적시험에서는 후자의 경우가 매우 중요하므로, 고유의 역학적 특성치(변형계수)를 알고있는 검증시편을 사용하여 검증치와 일치하는 측정결과를 얻을 수 있도록 시험장치의 하중 및 변형을 측정하는 시스템의 제반 요소를 점검·보완하여야 한다. 본 연구에서는 강성도가 서로 다른 8종의 검증시편을 사용하여, 제작·개발한 시험기에 대하여 독립적으로 시험을 수

행하여 결정된 강성도를 하중주파수의 영향을 고려하여 비교하는 방법을 적용하였다.

#### 3.1 검증시편

본 연구에서는 Texas Austin 대학에서 제작된 강성도를 알고 있는 3종의 검증시편과 본 연구에서 제작한 폴리우레탄 재질 4종, 폴리에틸렌 1종으로, 총 8종의 검증시편을 사용하여 시험기기를 검증하였다. 검증시편 제작시 시편의 경도(hardness)를 조절하여 강성도를 서로 다르도록 고려하였고, 직경 71.0mm, 높이 300mm의 몰드에서 성형한 후, 시편제작시 공기방울의 함유 등으로 시료가 균일하지 못함 가능성이 큰 시료의 양단부를 제거하여, 직경 71.0mm 높이 150mm의 시편을 시험에 사용하였다.

Stokoe 등,(1990)의 연구 성과에 의하면 우레탄으로 제작된 검증시편은 점탄성(viscoelastic) 때문에 강성도가 하중속도(주파수)와 온도에 영향을 받는 단점이 있으나, 다음과 같은 우수한 장점을 가지고 있다. i) 0.1% 미만의 변형을 범위에서 선형거동을 나타낸다. ii) 강성도가 구속압이나 응력이력에 영향을 받지 않는다. iii) 다양한 강성도의 제품을 제작·구매 할 수 있으며 내구성이 좋아 반복사용에 따른 특성치 변화가 없고 취급이 용이하다. 이상과 같은 장점으로 새로운 시험기기의 전체 검증에 매우 유용하게 적용될 수 있다.

#### 3.2 시험절차

모든 시험에서 검증시편의 양단부를 석고로 처리하여 시험에서 유발되는 단부오차(bedding error)를 제거하였으며, 검증시편의 강성도는 구속응력에 영향을 받지 않으므로(Stokoe 등, 1990) 대기압 상태에서 시험을 실시하였다. 공진주/비틀전단시험에서는 0.5Hz의 하중주파수에서 변형을 크기를 증가시키며 비틀전단시험을 수행하고, 입력하중이 일정한 상태에서 하중 주파수를 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10Hz로 변화시키면서 하중주파수의 영향을 검토하였다. 비틀전단시험이 완료되면 변형을 크기를 증가시키면서 공진주시험을 실시하였다. 현장공진주시험에서는 그림 5와 같이 시료를 거치하고, 전단파(S-wave) 및 압축파(P-wave)를 유발시키며, 각각의 경우의 공진 주파수를 결정하였다. LDT를 사용한 삼축압축시험에서는 LDT 설치용 hinge를 검증시편의 표면에 설치한 후 24시간 동안 방치하여 LDT 설치용 hinge 를 완전히 고정하고, 하중을 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100Kgf로 증가시킨 후 재하시의 역순으로 하중을 제하 하였다. 변형량은 각각의 하중단계마다 하중재하 후 5분에 측정하였다.

### 3.3 시험결과

검증시편의 Young계수는 0.5Hz 에서 4.1MPa-1346.4MPa으로 연약한 다짐 노상토에서 입상기층 재료에 해당하는 값이다. LDT를 사용한 삼축압축시험에서의 Young 계수(E)와 변형율( $\epsilon_a$ )을 공진주/비틀전단시험에서 구한 G 및  $\gamma$ 와 비교하기 위하여 다음과 같은 표준 방법을 사용하였다(Silver and Park, 1975).

$$E = 2 G(1 + \nu) \quad (3)$$

$$\epsilon_a = \gamma / (1 + \nu) \quad (4)$$

여기서  $\nu$ 는 포아송비로, 현장공진주 시험에서 결정된 포아송비를 적용하였다.

검증시편에 대한 각각 시험법에서 결정된 시험결과를 표 1에 정리하였다. 하중주파수에 대한 영향은, 그림 9에서 보는 바와 같이 하중주파수의 대수적 변화에 선형적으로 나타났으며, 각각의 시편에 대한 영향정도는 표 1에 나타내었다. 각 시험의 하중주파수 차이를 고려하여, 하중주파수 0.5Hz에서 변형율 크기에 따른 검증시편의 탄성계수의 변화는 그림 10에서 보는 바와 같이 일정한 것으로 나타났으며, 또한 시험종류에 관계없이 동일한 값을 얻어냄을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제작된 시험기기 모두는, 변위 및 하중측정 장치 뿐 아니라 시험기 시스템의 역학적 순응성의 검증이 성공적으로 이루어져 시험이 신뢰성있게 수행됨을 알 수 있다. 아울러 시험방법이 동적이든 정적이든, 변형율의 크기, 하중주파

표 1 검증시편 시험결과

시료	시험법	하중 주파수 (Hz)	Young 계수 (MPa)	하중 주파수 영향 (%)
70A	LDT	정적	17.6	8.2
	TS	0.5	21.1	
	RC	34	30.2	
	FF-RC	192	35.5	
90A	LDT	정적	56.9	2.5
	TS	0.5	58.8	
	RC	56	80.7	
	FF-RC	300	82.7	
60D	LDT	정적	220.0	4.8
	TS	0.5	237.4	
	RC	127	430.2	
	FF-RC	836	672.60	
60K	LDT	정적	3.3	10.5
	TS	0.5	4.1	
	RC	13.8	4.4	
	FF-RC	80	5.3	
80K	LDT	정적	23.4	3.8
	TS	0.5	26.9	
	RC	37	31.0	
	FF-RC	224	41.01	
90K	LDT	정적	43.0	6.5
	TS	0.5	58.2	
	RC	62	87.6	
	FF-RC	400	127.8	
97K	LDT	정적	119.8	7.0
	TS	0.5	197.1	
	RC	133	399.3	
	FF-RC	770	473.1	
PP	LDT	정적	1434.8	1.3
	TS	0.5	1346.4	
	RC	278.5	1717.5	
	FF-RC	1660	2051.10	

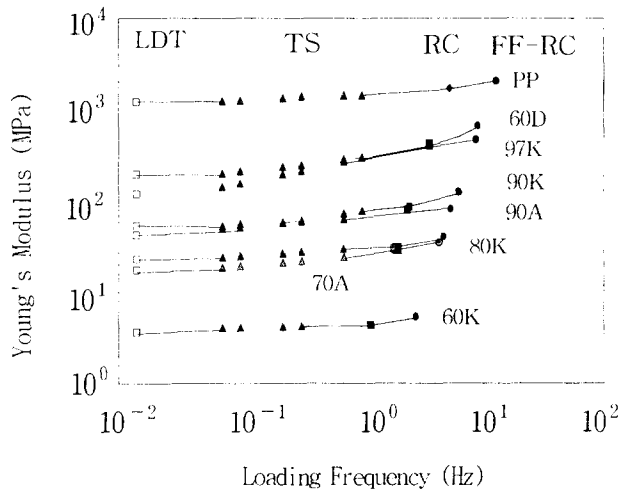


그림 9 하중주파수-Young 계수

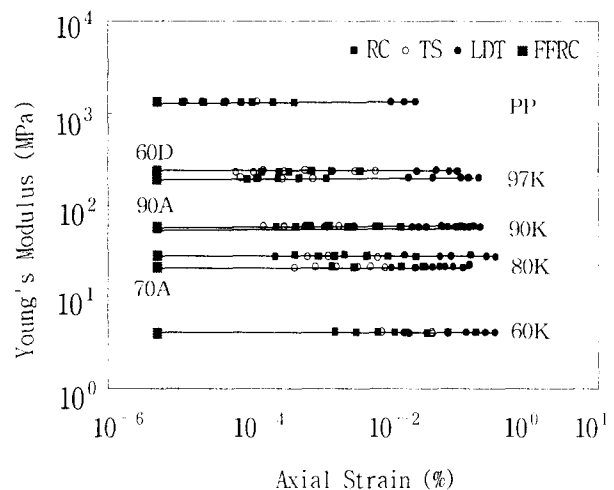


그림 10 각 시험법에서 결정된 탄성계수(0.5Hz)

수의 영향을 고려하는 경우 동일한 결과를 얻을 수 있어, 정적물성치와 동적물성치는 서로다른 것으로 인식되던 기존의 통념적인 개념의 차이는 무의미함을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서 제작한 LDT를 적용한 삼축압축시험은 data 획득의 한계로 0.01% 변형율 크기 이하에서는 신뢰성 있는 결과 획득이 어려워 추가적인 연구보완이 필요한 것으로 나타났다.

## 4 결론

- 1) 정적시험인 LDT(Local Deformation Transducer)를 사용한 삼축압축시험, 반복재하시험인 비틀전단 시험(TS시험), 동적시험인 공진주시험(RC 시험)과 현장공진주시험(FF-RC 시험) 기기를 제작하였으며, 각각의 시험법에 대한 검증을 실시하였다.
- 2) 공진주/비틀전단시험(RC/TS)기기의 간격측정기 검증, 가진시스템의 질량관성모멘트 검증, 비틀력 및 회전 각 검증을 실시하였고, 삼축압축시험을 위하여 제작된 LDT의 자체 검증을 실시하였으며, 현장공진주시험에서는 양단부의 Cap의 영향에 대한 검증을 실시하였다.
- 3) 시험기의 역학적 순응성 검증을 위하여 제작된 강성도가 서로 다른(1.3MPa - 450MPa, 8종) 검증시편을 사용하여 각각의 시험법에 대하여 독립적으로 시험한 결과, 하중주파수의 영향을 고려하여 비교하면 각각의 시험에서 얻은 결과가 서로 잘 일치하는 것으로 나타나, 모든 시험이 신뢰성있게 수행될 수 있음을 확인하고, 시험기기의 전체 시스템의 역학적 순응성에 대한 검증을 완료하였다.
- 4) 새로운 시험기 시스템 검증에 검증시편을 매우 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**감사의 글** : 본 논문은 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행된 “대형복합역사 구조물의 건설 및 열차 운행에 관한 지반-구조물복합계의 해석기술개발(95-0600-01-03-3)” 연구과제 수행결과의 일부로 감사를 포함합니다. 또한 검증시편 사용에 협조하여주신 건설기술연구원 지반연구실과, RC/TS시험기기 제작에 협조하여주신 삼보control 이종일사장님 외 관계자 여러분께도 감사를 포함합니다.

## 참고문헌

1. Burland, J. B.(1989), "Ninth Lauritis bjerrum Mwmorial Lecture : Small is Beautiful - The Stiffness of Soils at Small Strains", *Canadian Geotechnical Journal*, 26, pp.499-516.
2. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990), "Development of Synthetic Specimens for Calibration and Evaluation of MR Equipment", In *Transportation Research Record 1278*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.63-71.
3. Kim, D. S. and Drabkin, S.(1994), "Accuracy Improvement of External Resilient Modulus Measurements Using Specimen Grouting to End Platens", In *Transportation Research Record 1462*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.65-71.
4. Kim, D. S. and Stokoe II, K. H.(1992), "Characterization of Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Resonant Column and Torsional Shear Tests", In *Transportation Research Record 1369*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.83-91.
5. Sun, C. W.(1993), "Stiffness and Damping from the Frequency Response of a Free-Free Specimen", Master's Thesis GT93-8, University of Texas at Austin.
6. Vaghela, J. G. and Stokoe II, K. H.(1995), "Small-Strain Dynamic Properties of Dry Sand from the Free-Free Resonant Column", Geotechnical Engineering Report GT95-1, Geotechnical Engineering Center, University of Texas at Austin.
7. Kim Y. S., Tatsuoka, F., and Ochi, K. S. Shibuya, S. Goto(1994), "Deformational Characteristics at Small Strains of Sedimentary Soft Rocks by Triaxial Compression Tests", *Geotechnique* 44., No. 3, pp461-478.