

## 모형 지반의 최대 전단탄성계수 평가를 위한 벤더 엘리먼트 시험의 적용 Application of Bender Element Tests for the Estimation of Maximum shear Modulus in Calibration Chamber

권형민<sup>1)</sup>, Hyung-Min Kwon, 고영주<sup>2)</sup>, Young-Ju Ko, 정충기<sup>3)</sup>, Choong-Ki Chung

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 박사후연구원, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> (주)포스코건설 토목환경사업본부

<sup>3)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Env. Eng., Seoul National University

**SYNOPSIS** : This study carried out bender element tests in a calibration chamber in order to estimate the characteristics of soil specimen prepared in a calibration chamber. Basically, the purpose of bender element test is to measure the shear wave velocity. Bender element test cannot only confirm the status of soil specimen deposited in a chamber, but also estimate the consolidation process indirectly. In order to carry out bender element test in a calibration chamber, a pair of bender elements was installed inside the chamber, using the 'ㄱ' shaped frame. For the sandy soils having various relative densities in various stress conditions, the maximum shear modulus was estimated. From the comparison with bender element test results in a triaxial testing device, testing device and procedure was validated.

**Key words** : bender element test, calibration chamber, maximum shear modulus, sand

### 1. 서론

지반 공학 분야에 있어서 압력 토조 (calibration chamber)는 각종 모형 시험의 수행 및 현장 시험의 새로운 해석 방법 개발을 위한 검증의 수단으로 널리 사용되고 있다. 시험이 수행되는 대상 지반의 공학적 특성 평가는 결과의 해석 및 검증에 필수적인 요인이다. 특히, 지반의 전단파 속도 및 최대 전단탄성계수는 지반 구조물의 동역학적 거동 및 미소변형상태에서의 탄성 거동을 결정짓는 주요한 지반공학적 특성 중의 하나이다. 이러한 모형 지반의 동적 물성치 평가는 주가 되는 실험과의 간접 문제 등으로 인하여, 주로 시료의 성형을 통한 실내시험 방법에 의존해 왔다.

벤더 엘리먼트 시험은 물리적 에너지와 전기적 에너지를 상호 변환 시킬 수 있는 압전 소자를 이용하여 매질의 전단파 속도를 측정하는 시험으로 시험 원리가 비교적 단순하고 시료의 이방성을 고려한 최대 전단탄성계수를 평가할 수 있는 있으며 장비를 소형화 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 벤더 엘리먼트 시험을 적용하여 압력 토조 내부에서 사질토의 상대밀도 및 구속응력 조건에 따른 최대 전단탄성계수의 변화를 평가하였다.

다양한 상대밀도를 가지는 모래지반에 대하여  $K_0$  압밀을 수행하면서 최대 전단탄성계수의 변화를 평가하였고, 삼축 시험 장비를 이용한 실내 벤더 엘리먼트 시험과의 비교를 통하여 시험 장비 및 해석 과정의 적절성을 확인하였다. 또한, 최대 전단탄성계수에 대한 기존의 경험식과의 비교를 통하여 간극비 및 응력조건에 의존적인 최대 전단탄성계수의 특성을 평가하였다.

## 2. 벤더 엘리먼트 시험 (Bender Element Test)

### 2.1 벤더 엘리먼트

전기적인 에너지와 역학적인 에너지를 상호 전환할 수 있는 압전소자로 구성된 벤더 엘리먼트는 삼축 시험기 및 공진주 시험기, 압밀 시험기 등 다양한 종류의 실내 시험용 실험 장치에 부착되어 시료의 전단파 속도 및 최대 전단탄성계수의 측정에 널리 사용되어 왔다 (Kawaguchi et al., 2001; Chaudhary et al., 2004; 정재우 등, 2005). 벤더 엘리먼트는 역학적 에너지 및 전기적 에너지가 가해지는 방식에 따라 재료의 전단파 속도 측정을 위한 발신기(source) 및 수신기(receiver)로 사용될 수 있다. 기본적으로 전단파의 이동 시간 및 쌍을 이루는 두 개의 엘리먼트 사이의 거리로부터 전단파의 속도를 측정하는 벤더 엘리먼트 시험은 파동 전파 이론 (Wave Propagation Theory)과 매질의 밀도를 이용하여 최대 전단탄성계수를 측정하는데 이용될 수 있다. 최대 전단탄성계수는 식 1과 같이 결정된다.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 매질의 밀도이다.

완성된 시료에 벤더 엘리먼트를 설치하는 실내시험과 달리, 토조 내부에 벤더 엘리먼트를 설치하는 경우에는 별도의 벤더 엘리먼트 거치 장치 및 설치 과정에 대한 세심한 주의가 필요하다. 벤더 엘리먼트 시험이 수행되는 토조는 직경 1.2m, 높이 1.2m의 원통형으로 연직방향으로 구속압을 가할 수 있는 방식이다. 토조의 바닥면으로부터 0.6m 되는 높이에 벤더 엘리먼트를 설치하기 위하여 본 연구에서는 그림 1에서와 같이 'ㄷ'형의 프레임을 제작하였다.

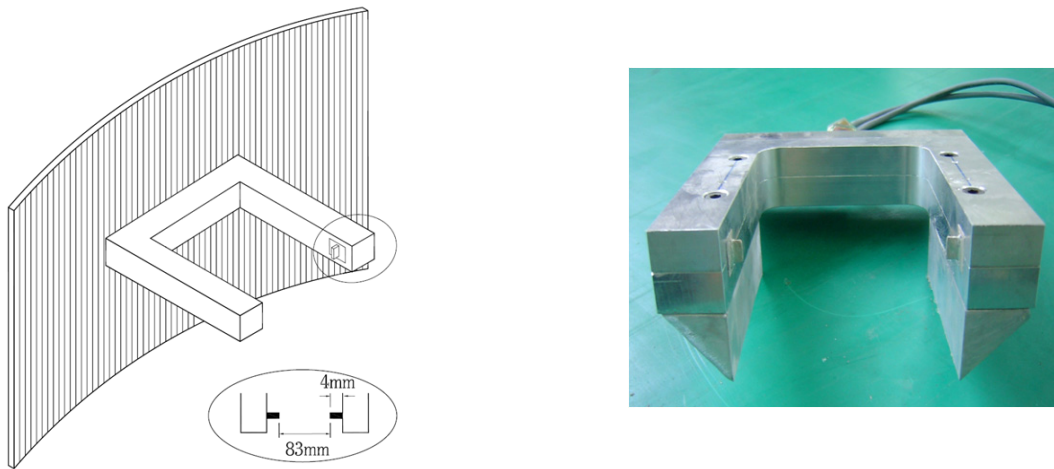


그림 1. 벤더 엘리먼트 거치대

본 연구에 사용된 벤더 엘리먼트는 직렬(series) 형태로 연결하여 제작하였으며, 길이 12.6mm, 폭 8.0mm, 두께 0.6mm의 크기를 갖는다. 제작된 벤더 엘리먼트는 경량 아세탈 몰드에 고정되어 그림 1과 같이 벤더 엘리먼트 거치대에 설치되었다. 발신 엘리먼트의 변형과 수신 엘리먼트의 휨에 따른 발생 전압은 장착 프레임으로부터 벤더 엘리먼트가 돌출된 길이에 영향을 받으며, 본 연구에서는 Lee and Santamarina (2005)의 연구 결과를 토대로 벤더 엘리먼트의 돌출 길이를 4mm로 정하였다. 벤더 엘리먼트 간의 거리는 83mm가 되도록 설치하였으며, 토조 벽면으로부터 100mm 떨어지도록 설치하였다.

프레셔미터 시험으로부터 구해지는 전단탄성계수와 비교를 위하여 수신 엘리먼트와 발신 엘리먼트는 연직면에 평행한 방향으로 설치하여 전단파의 진행 방향과 진동 방향이 모두 시료의 방사 방향이 되도록 하였으며 최종적으로 시료의 밀도를 고려하여  $G_{\max}^{th}$  값을 측정할 수 있도록 하였다. 그림 2는 벤더 엘리먼트가 설치되어 가진기 및 오실로스코프와 연결된 압력토조의 단면을 보여주고 있다.

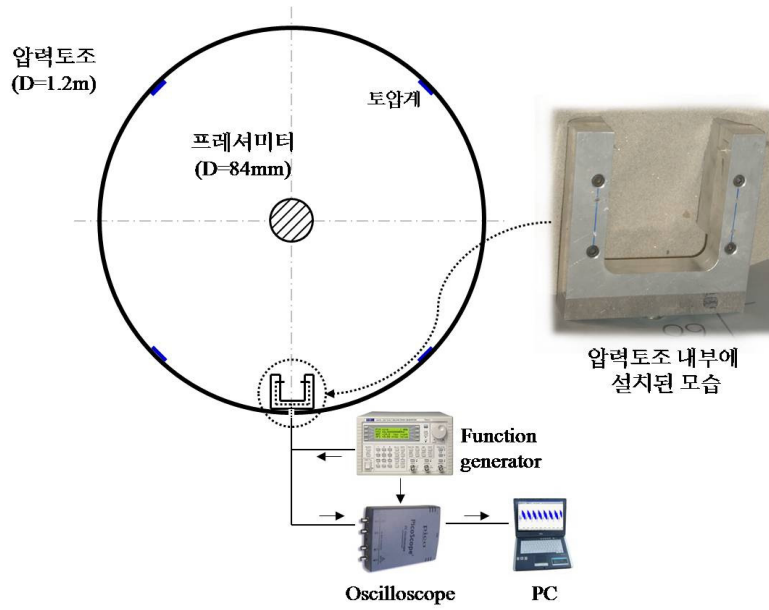


그림 2. 압력토조 내부에 설치된 벤더 엘리먼트

## 2.2 실험개요

### 2.2.1 대상 시료 및 시험 조건

시험에 사용된 대상 시료는 매우 균질한 입도를 가지는 주문진 표준사로 그림 3과 같은 입도분포 및 기본 물성치를 가진다. 다양한 상대밀도를 가지는 시료 조성을 위하여 본 연구에서는 모래 입자의 낙하 에너지를 이용하는 방법을 사용하였다 (Vaid 등, 1984). 그림 4에서와 같이 압력 토조 상부에 시료 조성 장치를 설치하여 개폐 장치로 단위 시간당 낙하하는 모래입자의 양을 조절하였고, 분산 장치를 설치하여 최종적인 낙하고를 결정하였다. 낙하높이를 모래입자의 중단 속도가 확보되는 이상으로 유지하기 위하여 시료의 조성은 4단계로 나누어 이루어 졌으며, 토조 바닥면으로부터 20cm, 100cm 높이에 각각 4개씩의 상대밀도 측정용 캔을 설치하였다. 표 1은 시료 조성 장치를 이용하여 조성된 시료의 상대 밀도 및 토조의 상하단에서 측정된 상대밀도의 차이를 보여주고 있다. 시료의 상대밀도는 측정된 8곳의 상대밀도 값의 평균을 사용하였으며, 상대밀도에 4개의 그룹으로 분류하였다. 시료 상하단의 상대밀도 차이는 10% 이내로 균질한 시료가 조성됨을 확인하였다.

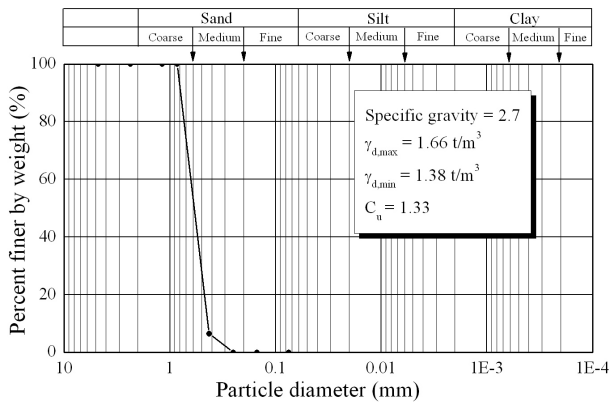


그림 3. 대상 시료 (주문진 표준사)의 입도분포 곡선 및 기본 물성치

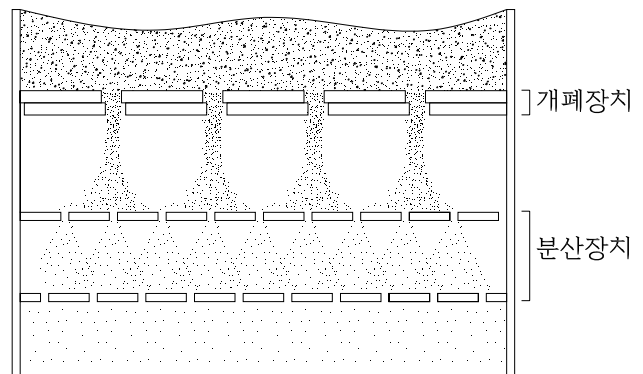


그림 4. 시료 조성 장치

표 1. 조성 시료의 상대 밀도 및 편차

시료 종류		상대밀도 (%)	편차 (%)
Group 1 (Loose)	L1	44	9.4
	L2	45	9.9
Group 2 (Medium)	M1	63	7.2
Group 3 (Dense)	D1	85	1.8
	D2	81	3.1
	D3	84	2.1
	D4	79	4.4
Group 4 (Very dense)	VD1	91	2.0
	VD2	97	0.0
	VD3	96	1.4
	VD4	92	1.4

### 2.2.2 시험 과정

압력 토조에 표 1과 같은 상대밀도를 갖도록 조성된 모래 시료에 대하여 토조의 바닥면에서 연직하중을 가하는 방식으로  $K_0$  압밀을 진행하면서 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였다. 벤더 엘리먼트 시험에 사용된 입력파의 형태는 진폭 20V의 단일 정현파 (single sine wave)이다. 입력파의 주파수는 시험 전 최적의 공진 주파수를 찾아 결정되어야 하지만, 응력 상태 변화에 따른 공진 주파수 변화를 고려하여 매 시험 시 5~10kHz의 범위에서 선택된 2가지 주파수로 실험을 진행하여 분석에 용이한 자료를 선택적으로 사용하였다.

압력 토조내에서 수행된 벤더 엘리먼트 시험 결과의 검증을 위하여 본 연구에서는 삼축 시험기를 이용한 동일 시료에 대해 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였다. 삼축 시험 시료는 상대밀도가 80%가 되도록 초기 함수비 10%의 모래를 다져서 성형하였고, 성형 후 시료의 크기는 직경 70mm, 높이 140mm가 되도록 하였다. 성형 후, 시료의 이방적 특성을 고려한 최대 전단탄성계수 비교를 위하여 3방향의 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 시료의 축방향 벤더 엘리먼트는 각각 상부 캡과 바닥판에 삽입되어 있으며, 수평방향 벤더 엘리먼트는 시료의 중앙부에 각도를 달리하여 두 쌍을 설치하였다. 삼축 시험기 내에서의 시험 진행은 250kPa까지 등방 압밀을 진행하면서 3방향 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였다.

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 결과의 해석

벤더 엘리먼트 시험 결과의 해석은 전단파의 전달 거리 및 전달 시간을 측정하는 과정으로 진행된다. 시료의 압밀 과정이 진행되어도 두 벤더 엘리먼트 사이의 거리는 일정하게 유지되므로, 전단파의 전달 거리가 벤더 엘리먼트 양단의 거리인 83mm로 일정하게 유지된다. 전단파의 전달 시간을 측정하는 방법은 입력파와 수신파의 파형 관찰을 통해 시간차를 구하여 결정하는 방법과 cross-correlation 함수, cross-power spectrum을 이용하는 방법 등, 다양한 방법으로 구해질 수 있다 (Viggiani와 Atkinson, 1995). 본 연구에서는 입력 및 수신 파형의 최대 전압치 간의 시간차를 통한 방법과 식 2의 cross-correlation 함수를 이용하여 전달 시간을 구하는 방법을 병행하여 그 평균값을 사용하였다.

$$CC_{xy}(t) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int X(T)Y(T+t)dT \quad (2)$$

여기서,  $T_r$ 은 기록된 시간이고  $t_s$ 는 신호들 간의 시간 이동이다. 그림 5는 두 가지 방법에 의해 구해진 전단파 도달 시간의 예를 보여준다.

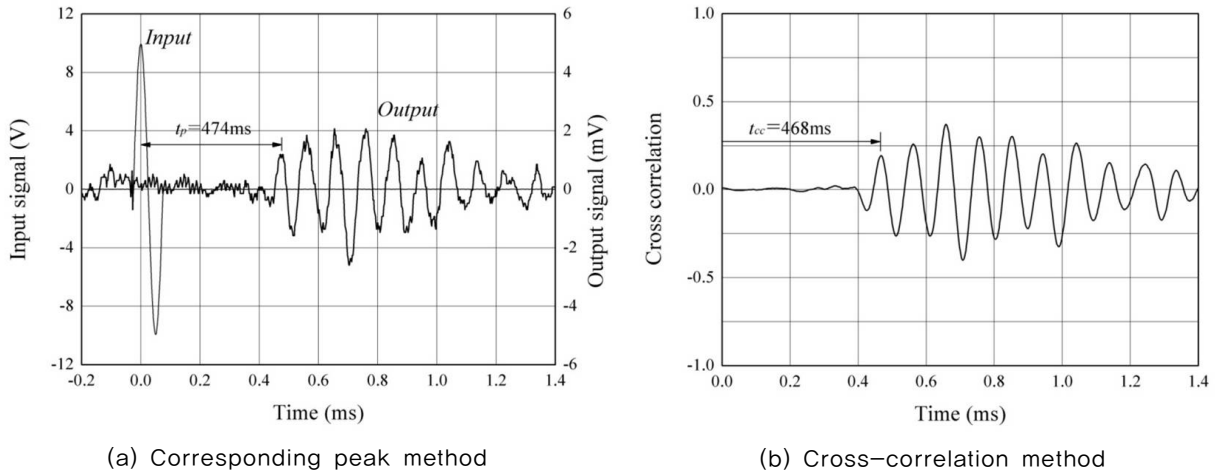


그림 5. 전단파 도달 시간의 분석 (Group4, VD3,  $\sigma_h=124\text{kPa}$ ,  $\sigma_v=124\text{kPa}$ )

전단파 속도 측정에 의해 구한 전단탄성계수는 간극비와 유효 응력의 함수로 알려져 있으며, 식 3의 형태로 경험적 상관관계가 제안되어 있다 (Hardin and Black, 1966).

$$G_{ij} = C_{ij} f(e) \left( \frac{\sigma'_i}{p_r} \right)^a \left( \frac{\sigma'_j}{p_r} \right)^b \quad (3)$$

여기서,  $C_{ij}$ ,  $a$ 와  $b$ 는 재료 상수,  $f(e)$ 는 간극비 함수,  $\sigma'_i$ 는 전단파 진행방향의 유효응력,  $\sigma'_j$ 는 전단파 진동방향의 유효응력,  $p_r$ 은 응력항의 정규화 상수이며 대기압을 사용한다. 수평면에 대한 전단탄성계수의  $G_{hh}$ 의 경우, 전단파의 진행방향과 진동 방향이 모두 시료의 방사 방향이므로 식 3의 유효 응력항이 모두  $\sigma'_r$ 이 되어  $G_{hh}$ 에 대한 경험식은 식 4와 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$G_{hh} = C_{hh} f(e) \left( \frac{\sigma'_r}{p_r} \right)^n \quad (4)$$

여기서,  $\sigma'_r$ 은 방사 방향 유효응력이다. 따라서, 토조 및 삼축 시험기에서 수행된 벤더 엘리먼트 시험으로부터 구한 최대 전단 탄성계수,  $G_{hh}^{max}$ 는 수평 방향 유효응력을 기준으로 분석하였다.

### 3.2 시험 결과

그림 6은 시료의 밀도 및 전단파 속도로부터 식 1을 이용하여 구한 최대 전단탄성계수의 변화를 보여 주고 있다. 전단탄성계수의 변화는 식 4와 같이 벤더 엘리먼트 시험으로부터 구해지는  $G_{hh}$ 가 수평방향의 유효응력에만 영향을 받는다는 가정 아래 수평 방향 유효응력의 변화에 따라 도시 하였다. 수평 유효응력은 토조 내에서 연속하중을 가하면서  $K_0$  압밀을 수행하는 과정의 수평응력으로 벤더 엘리먼트와 동일 평면상에 설치한 4개의 토압계를 이용하여 측정하였다.

Kohata 등 (1997)에 따르면 주문진 표준사와 같이 부착력이 없는 모래는 식 4의 지수항인  $n$ 값이 약 0.5이다. 또한, 식 4의 간극비 함수인  $f(e)$ 는 초기 간극비에는 영향을 받을 수 있지만,  $K_0$ 값이 0.4~0.5를 갖는 상대적으로 낮은 응력비의 시료에서는 압밀과정에 간극비의 변화가 크지 않고 전단탄성계수에

미치는 영향은 미미하다. 따라서 식 4의  $C_{hh}f(e)$  항을 초기 간극비가 일정한 경우 상수로 하여 회귀분석을 수행하면 표 2와 같은 경험식의 물질상수 및 지수를 얻을 수 있다.

표 2. 초기 간극비에 따른 최대 전단탄성계수 경험식의 물질상수 및 지수

시료 종류	평균상대밀도 (%)	초기 간극비, $e_0$	$C_{hh}f(e)$	$n$
Group 1 (Loose)	44.5	0.8099	35.9	0.5
Group 2 (Medium)	63	0.7487	42.1	0.5
Group 3 (Dense)	82.3	0.6850	60.6	0.5
Group 4 (Very dense)	94	0.6463	76.0	0.5

그림 7은 Group 3의 조밀한 시료에 대하여 삼축 시험기를 이용한 벤더 엘리먼트 시험을 수행한 결과와의 비교이다. 삼축 시험기를 이용한 벤더 엘리먼트 시험의 경우, 이방성을 고려하여 세 가지 최대 전단탄성계수( $G_{vh}$ ,  $G_{hv}$ ,  $G_{hh}$ )를 평가하였고, 표 2의 물질상수 및 지수를 사용한 경험식으로부터 구한 최대 전단탄성계수와 함께 표기 하였다. 압력 토조에서 수행된 벤더 엘리먼트 시험은 삼축 시험기를 이용하여 구한 수평면에 대한 전단탄성계수( $G_{hh}$ )에 비하여 수평 유효응력의 증가에 따라 증가하는 경향이 다소 적으나 전반적으로 유사한 결과를 보여 주었다.

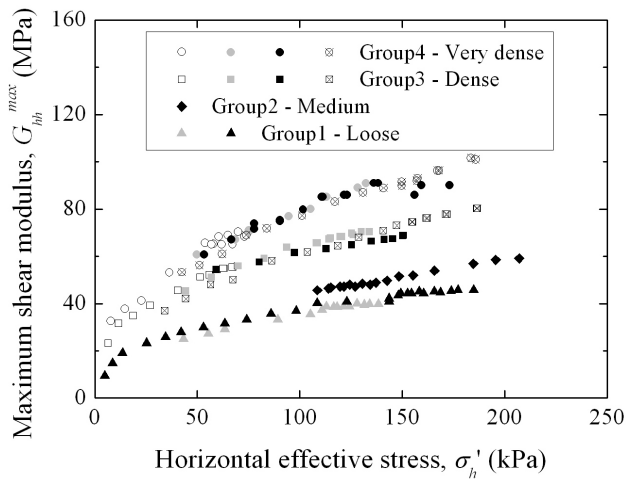


그림 6. 수평방향 유효응력에 따른 최대 전단탄성계수의 변화

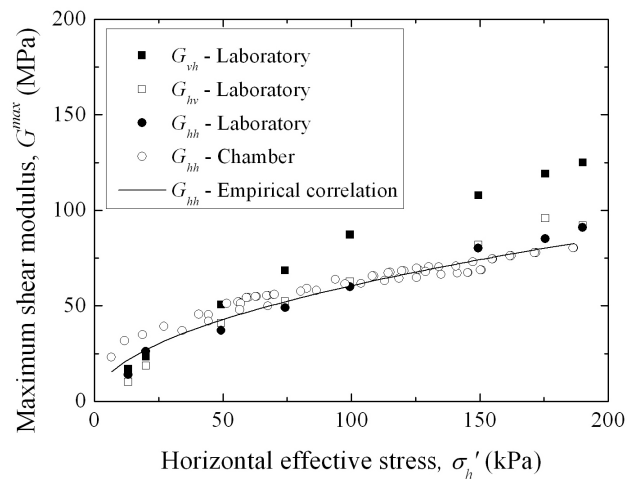


그림 7. 벤더 엘리먼트 시험 결과의 비교

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 현장 시험 장비에 대한 연구를 수행할 수 있는 압력 토조를 제작하였고, 토조 실험을 위한 시료 조성 및 압밀과정의 검증을 위하여 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였다. 다양한 상대밀도를 가지는 모래 지반에 대하여 벤더 엘리먼트 시험을 수행한 결과 벤더 엘리먼트 거치대를 이용한 벤

더 엘리먼트 시험의 수행이 토조 내부에 조성된 시료의 최대 전단탄성계수를 적절히 평가하는 것으로 나타났다. 이는 동일 시료를 이용하여 삼축 시험기에서 수행된 시험 결과를 통하여 검증하였다. 연구의 특성상 수평면에서의 최대 전단탄성계수 평가를 위한 벤더 엘리먼트만을 사용하였으나, 시험의 목적에 따라 벤더 엘리먼트의 설치 방향을 변경하여 이방적인 특성을 고려할 수 있는 다양한 방식으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 정재우, 장인성, 목영진 (2005) “현장 토목 계측을 위한 벤더 엘리먼트의 적용성 연구”, 한국지반공학 회논문집, Vol.21, No.5, pp.215~223.
2. Chaudhary, S.K., Kuwano, J, and Hayano, Y. (2004) "Measurement of Quasi-Elastic Stiffness Parameter of Dense Toyoura Sand in Hollow Cylinder Apparatus and Triaxial Apparatus with Bender Elements", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.1, pp.1~13.
3. Hardin, B.O. and Black, W.L. (1966) "Sand Stiffness under Various Triaxial Stress", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineerins Division*, ASCE, Vol.92, No.2, pp.27~42.
4. Kawaguchi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S. (2001) "Evaluation of Shear Wave Travel Time in Laboratory Bender Element Test", *Proc of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul. Balkema, pp.155~158.
5. Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G.L., Hoque, E., and Kodaka, T. (1997) "Modelling the Non-linear Deformation Properties of Stiff Geomaterials", *Geotechnique* 47, No.3, pp.563~580.
6. Lee, J.S., and Santamarina, J.C. (2005) "Bender Elements: Performance and Signal Interpretation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.9, pp.1063~1070.
7. Vaid, Y. and Negussey, K. (1984) "Relative Density of Pluviated Sand Samples", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.101~105.
8. Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995) "Interpretation of Bender Element Tests", *Geotechnique* 45, No.1, pp.149~154.