

프레셔미터 시험을 이용한 사질토 지반의 최대 전단탄성계수 결정

Determination of Maximum Shear Modulus of Sandy Soil Using Pressuremeter Tests

권형민* · 장순호** · 정충기***

Kwon, Hyung Min · Jang, Soon Ho · Chung, Choong Ki

Abstract

Pressuremeter test estimates the deformational properties of soil from the relationship between applied pressure and the displacement of cavity wall. It is general to utilize the reloading curve for the estimation of deformational properties of soil because the initial loading curve can be affected by the disturbance caused by boring. On the other hand, the instrumental resolution or the variation of measured data makes it hard to estimate the maximum shear modulus from pressuremeter test results. This study suggested the methodology estimating the maximum shear modulus from pressuremeter test directly, based on the curve fitting of reloading curve. In addition, the difference was taken into account between the stress state around the probe in reloading and that of the in-situ state. Pressuremeter tests were conducted for 15 cases using a large calibration chamber, together with a number of reference tests. The maximum shear moduli taken from suggested method were compared with those from empirical correlation and bender element test.

Keywords : pressuremeter, maximum shear modulus, calibration chamber, sand

요 지

프레셔미터 시험은 지중 내 설치된 프루브를 통해 지반에 압력을 가하여 지반의 변형특성을 평가하는 시험 방법으로, 주로 경험적인 상관관계를 통하여 지반의 변형계수를 평가하는 여타의 현장 시험방법들과 달리 하중에 따른 변위 곡선에 기초하여 지반의 변형특성을 직접적으로 평가할 수 있는 시험 방법이다. 그러나, 자가 굴착 방식을 사용하더라도 시험체의 관입에 따른 교란이 발생하기 때문에 초기 재하 시험곡선으로부터 지반의 변형특성을 평가하는 것은 부적절할 수 있으며, 이에 대한 대안으로 하중 재하-재제하 곡선을 이용하는 방법 등이 제안되어 사용되고 있다. 그러나, 공내 재하 압력 및 공벽의 변위 측정 시에 발생하는 데이터의 분산과 계측 장비의 해상도 문제로 인하여 하중 재하-재제하 곡선으로부터 최대 전단탄성계수와 같은 미소 변형 영역에서의 변형 특성을 평가하기에는 많은 제약이 따른다. 본 연구에서는 하중 재제하 곡선의 회귀분석 및 이를 바탕으로 한 외삽법을 사용하여 미소 변형 영역에서 지반의 최대 전단탄성계수를 직접적으로 평가할 수 있는 해석 방법을 제안하였다. 또한, 하중 재제하 시 원지반에 비하여 증가하는 응력 수준을 초기 응력 수준에 맞도록 고려할 수 있는 방법을 함께 제안하고 있다. 대형 압력 토조를 이용하여 다양한 상대밀도 및 응력 조건을 가지는 모래 지반을 조성한 뒤, 프레셔미터 시험 및 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였고, 제안된 해석 방법의 적절성을 기존의 경험식들 및 벤더 엘리먼트 시험에서 얻어진 값들과 비교, 검증하였다.

핵심용어 : 프레셔미터, 최대 전단탄성계수, 압력토조, 모래

1. 서 론

프레셔미터 시험은 지반의 응력, 변형에 관련한 공학적 특성을 평가하는 가장 이상적인 현장 시험 방법 중의 하나로 알려져 있다. 특히, 양질의 불교란 시료 채취가 힘든 모래지반에서 상대밀도 및 응력조건, 흙의 구조와 같은 현장의 지반공학적 특성을 그대로 유지한 채 흙의 변형 특성을 평가할 수 있는 장점을 지니고 있다. 자가 굴착식 프레셔미터 시험의 경우, 콘관입시험과 더불어 지반의 다양한 공학적 특

성들을 평가하는데 있어서 높은 신뢰성을 보여주고 있으며, 적용 가능한 지반의 범위 또한 매우 다양한 것으로 알려져 있다(Robertson, 1986).

표준관입시험 및 콘관입시험과 같이 시험체의 관입에 기반한 원위치 시험 방법들은 관입 시 지반의 저항값으로부터 얻어지는 시험 결과를 바탕으로 경험적인 상관관계를 이용하여 지반의 변형 계수를 평가한다. 한편 다운홀 시험이나 크로스홀 시험, SASW(spectral analysis of surface waves)와 같은 지구물리학적 시험들은 지반을 통하여 전달되는 전

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 토질 및 기초 연구실 박사후연구원 (E-mail : kkwonss@kict.re.kr)

**서울대학교 건설환경공학부 석사과정

***정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 정교수

단과 및 표면과의 속도를 이용하여 미소 변형 영역에서 지반의 최대 전단탄성계수를 평가하기 위한 용도로 사용되고 있다(김동수, 2006). 반면, 프레스미터 시험은 지반에 가해지는 하중에 따른 변위 관계를 직접적으로 평가하여 지반의 변형계수를 구하는 시험 방법으로, 다양한 변형률 수준에서 지반의 변형특성을 평가하는 것이 가능하다. 또한 여타의 시험 방법들에 비하여 상대적으로 명확한 경계조건을 가지고 있어, 해석상에 있어서도 장점을 지니고 있다.

최근 들어, 공내 재하 하중에 따른 지반의 변위를 정밀한 변형률계를 이용하여 프루브 벽체에서 직접적으로 측정할 수 있는 다양한 방식의 시험장비들이 사용되면서 지반 변형 특성을 더욱 작은 변형률에서 정밀하게 평가할 수 있게 되었다. 그러나, 시험 결과의 해석 및 이용은 여전히 시험곡선의 초기 재하 영역을 선형탄성구간으로 가정하여 반경험적인 상관관계를 바탕으로 지반의 변형계수를 평가하거나 이에 바탕한 기초의 지지력 문제를 해결하기 위한 경험식들에 주로 사용되고 있다.

자가 굴착 방법을 사용하여 프루브를 원하는 시험 심도에 위치 시킨다 하더라도 프레스미터 시험의 초기 재하 곡선은 교란의 영향으로부터 자유로울 수 없다. 이러한 지반 교란의 문제를 최소화하기 위한 방법으로 일정 하중 이상으로 재하한 후, 재하-재제하를 시행하고 이로부터 얻어진 곡선을 이용하여 지반의 변형 특성을 평가하는 방법이 사용되고 있다. 그러나, 하중 재하-재제하 과정은 원지반과 다른 응력상태에서 수행 되기 때문에 변화된 응력상태에 대한 고려가 필요하다. 한편, 시험 결과 얻어진 데이터의 분산이나 변형률 측정 장비의 해상도 문제는 작은 변형률 구간에서 변형 특성을 직접적으로 평가하기 어렵게 만드는 요인으로 작용한다.

본 연구는 대형 압력 토조를 이용한 프레스미터 시험 결과를 바탕으로 하중 재제하 곡선의 회귀분석 및 이를 통한 외삽법을 이용하여 지반의 최대 전단탄성계수를 평가하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해, 회귀분석 방법에 기반한 하중 재제하 곡선 분석 결과의 적절성을 기존의 이론식 및 프레스미터 시험과 동시에 수행된 벤더엘리먼트 시험결과로부터 평가한 최대 전단탄성계수와 비교를 통하여 검증하고, 원지반과 다른 응력조건에서 수행되는 하중 재제하 과정으로부터 원지반의 최대 전단탄성계수를 평가하는 방법을 제안하였다.

2. 변형계수의 산정

프레스미터 시험으로부터 지반의 변형계수를 구하는 과정은 시험 과정에 대한 몇 가지 가정조건으로부터 출발한다. 첫째, 프루브의 길이는 무한하고 수평 지표면에 연직하다고 가정한다. 이러한 가정 조건으로부터 프루브 주변의 토체는 오직 방사 방향으로만 변위가 발생하고 연직방향으로는 평면 변형률 상태에 놓이게 된다. 다음으로 프루브 주변의 토체는 등방적이고, 선형 탄성적인 재료로 가정한다.

그림 1은 공내 압력 재하에 따라 시험체 주변에서 발생하는 토체의 변형을 보여주고 있다. σ_r , σ_θ , σ_z 는 토체에 작용하는 주응력이고, p_0 , p_c 는 각각 초기 및 팽창 후의 공내 압력이며 ρ_0 , ρ 는 초기 및 팽창 후의 공벽의 반경이다. 또

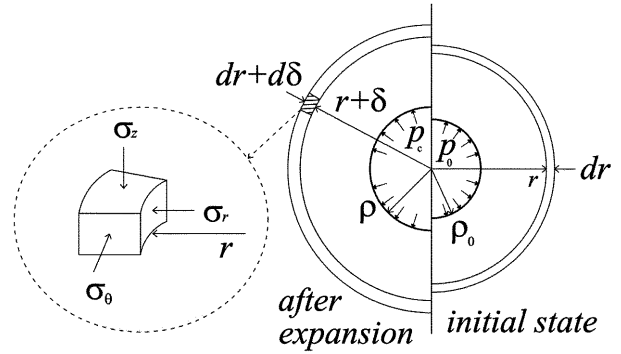


그림 1. 공내 압력 재하에 따른 토체의 변형 (Clarke, 1995)

한 재하 후 프루브의 중심으로부터 거리 r 에서 발생한 토체의 방사방향 변위는 δ 이다. 그림 1에서 거리 r 에 위치한 토체에 대한 평형 방정식을 유도하면 식 (1)과 같이 정리된다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \quad (1)$$

전술한 가정 조건을 바탕으로 프루브 주변 토체에 대한 평형 방정식에 Hooke의 법칙을 적용하면 식 (2)와 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$r^2 \frac{d^2 \delta}{dr^2} + r \frac{d\delta}{dr} - \delta = 0 \quad (2)$$

지배 방정식에 시험의 경계조건 ($r \rightarrow \infty$ 일 때 $\delta = 0$, $r = \rho$ 일 때 $\delta = \rho - \rho_0$)를 적용하면 식 (3)에서와 같이 시험 곡선의 기울기로부터 지반의 전단탄성계수를 평가할 수 있는 관계식을 유도할 수 있다.

$$p_c - \sigma_{h0} = 2G\varepsilon_c \quad (3)$$

여기서, σ_{h0} 는 초기 수평응력이고, ε_c 는 공동 변형률로 프루브의 초기 반경에 대한 공벽에서 발생하는 변형의 비로 정의된다.

흙의 변형계수는 현장 응력상태에서 시작되는 초기 재하 시의 프레스미터 시험 곡선을 토대로 식 (3)을 이용하여 산정하는 것이 적절하지만, 초기 재하 시에는 자가 굴착식 방법을 사용하더라도 굴착에 의한 교란이 발생할 수 있기 때문에 정확한 변형계수를 얻기 어렵다. Hugh(1982)는 프루브 관입에 따른 교란의 영향은 프레스미터 하중이 가해짐에 따라 줄어들고, 초기 재하에 의해 일정 하중이 가해 진 뒤 다음 이루어지는 제하-재제하 과정에서는 교란의 영향을 크게 줄일 수 있으며, 특히 공벽에 파괴가 일어나지 않는 탄성 구간 내로 하중 제하 영역이 한정된다면 변형계수는 프레스미터 관입에 의한 교란의 영향을 거의 받지 않는다는 연구 결과를 발표한 바 있다. 그러나, 하중 제하-재제하 시의 주변 지반의 응력 상태는 원지반의 응력 상태와 다르므로 이로부터 얻어지는 전단탄성계수는 실제 지반의 전단탄성계수와 다를 수 있다. Bellotti 등(1989)은 하중 제하-재제하 곡선의 양 끝점을 연결하는 할선으로부터 얻어지는 전단탄성계수인 G_{ur} 에 이러한 응력 차이를 고려하여 보정하는 식과 함께 hyperbolic model을 사용하여 지반의 최대 전단탄

성계수를 평가하는 방법을 제안하였다. 또한 Byrne 등(1990)은 하중 재하-재해하 과정이 이루어지는 응력상태 및 프루브 관입에 따른 교란의 영향을 고려하여 $G_{m,값}$ 으로부터 최대 전단탄성계수를 평가할 수 있는 상관관계를 제안하였다. 이러한 방법들은 재하-재해하의 과정의 활선으로부터 얻어지는 선형적 거동을 토대로 하고 있다. 그러나, 회귀분석을 통한 하중 재해하 곡선의 직접적인 분석으로부터 지반의 전단탄성계수를 평가하는 과정은 지반의 항복응력 산정 등의 지반의 조건에 따른 특수성을 배제할 수 있으며, 나아가 변형률 수준에 따라 변형특성이 변화하는 지반의 비선형적 변형특성을 평가하기 위한 방법으로 사용될 수 있다.

그러나, 하중 재해하 곡선으로부터 지반의 응력-변형률 관계를 도출하여 지반의 변형특성을 직접적으로 평가하기에는 몇 가지 문제점이 지적되고 있다. Jardine(1992)은 측정 장비의 해상도 및 시험과정에서의 문제로 인하여 미소 변형 영역에서 평가된 지반의 변형계수는 신뢰성이 떨어짐을 지적하였다. 이는 재료가 선형 탄성 거동을 보이는 한계 변형률이 0.001% 내외인 반면, 공내의 변형을 스트레인 게이지를 이용하여 직접적으로 평가하는 Camkometer와 같은 정밀한 장비들이 측정할 수 있는 최소 측정 범위가 $2.5 \times 10^{-3}\%$ 정도인 점에서 확인할 수 있다. 또한 하중 재하-재해하 과정에서 발생할 수 있는 크립이나 응력 이완 등의 문제도 정밀한 측정을 방해하는 요인으로 작용하고 있다.

3. 대형 압력 토조(Calibration chamber)를 이용한 프레셔미터 시험

3.1 시험 장비

현장 시험 방법의 특성 평가는 주로 응력 조건 및 경계 조건이 명확히 조절되는 압력 토조를 이용하여 이루어진다. 압력 토조는 하중 재하 조건 및 경계 조건에 따라 연성벽체 방식과 강성벽체 방식으로 분류된다. 연성벽체 방식은 다양

한 응력조건 및 경계조건의 구현이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 토조의 크기가 동일한 경우, 강성 벽체 방식에 비하여 연성 벽체 방식은 경계 조건의 영향을 덜 받는 것으로 알려져 있다(Sweeney 등, 1990). 강성 벽체 방식은 K_0 조건의 응력 상태 구현만이 가능하다는 단점이 있지만, 대부분의 현장 시험이 K_0 상태인 지중 응력 조건에서 이루어진다는 점과 시험의 간편성 및 경제성을 이유로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 다양한 응력 조건 및 상대밀도를 가지는 모래 지반에서 프레셔미터시험을 수행하기 위하여 직경 1.2m, 높이 1.2m인 실린더형의 강성 벽체 압력 토조를 제작하였다. 그림 2는 제작된 압력 토조의 개략도를 보여주고 있다. 압력 토조는 시료 조성 장치, 토조 및 하중 재하 장치로 구성되어 있다.

압력 토조를 이용한 현장 시험 방법의 특성 평가에 있어서 가장 중요한 고려 요소 중 하나는 경계 조건의 문제이다. 일반적으로 축대칭 조건에서 이루어지는 현장시험의 경계 효과는 시험 장비 반경에 대한 모형 토조의 비(R_d)와 밀접한 관계를 갖는다. Sweeney 등(1990)은 콘관입시험 결과에 기초하여 느슨한 모래의 경우 R_d 값이 18 이상, 조밀한 모래일 경우 60 이상이면 경계 효과가 사라지고 만무한한 지반을 모사할 수 있는 것으로 보고하였다. 콘관입시험은 단면적 10cm^2 의 콘을 지반에 관입하는 시험 방법으로 토조 내에 콘이 관입될 때, 토조의 중심으로부터 17.8mm의 방사방향 변위가 발생한다. 반면 시료 조성 전 프루브를 위치시킨 프레셔미터 시험의 경우 공동 변형률 10%까지 시험이 진행된다면 4mm가량의 변위가 발생한다. 따라서 프레셔미터 시험의 경계 효과를 평가할 때, R_d 값이 아닌 방사방향 최대 변위에 대한 압력 토조 반경의 비(D_d)로 정의하는 것이 합리적이다. 이런 관점에서 볼 때, 본 연구에서 제작된 압력 토조의 D_d 값은 프레셔미터 시험에 대하여 140, 콘관입시험에 대하여 34로 압력 토조의 측벽에 의한 경계 효과는 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

모래 입자의 낙하 에너지를 이용하는 시료 조성 장치는 단위 시간당 시료의 낙하량을 조절할 수 있는 개폐 장치와 입자의 낙하 높이 조절 및 분산도 조절을 위한 분산 장치로 구성되어 있다. 구속압은 시료 하부에 위치한 유압 장치를 이용하여 연직압의 형태로 시료에 가해지며, 토조의 측벽 및

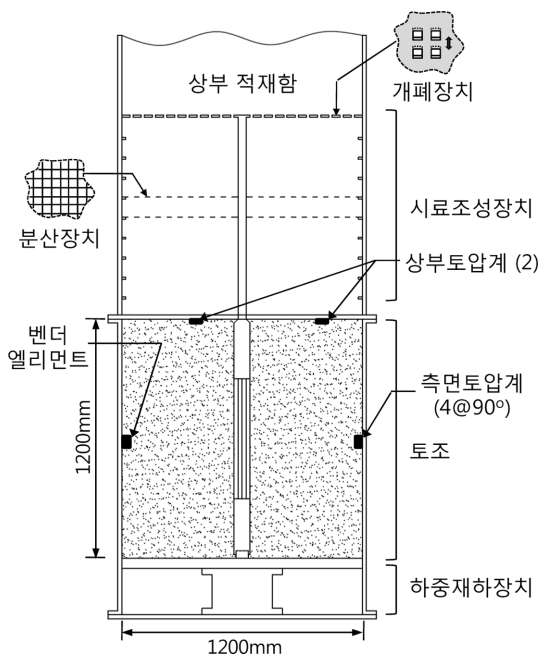


그림 2. 압력 토조의 개략도

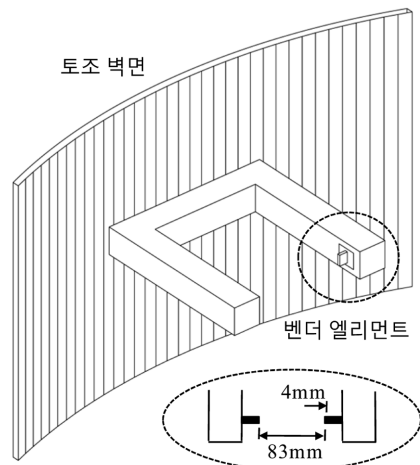


그림 3. 벤더 엘리먼트 시험 장치

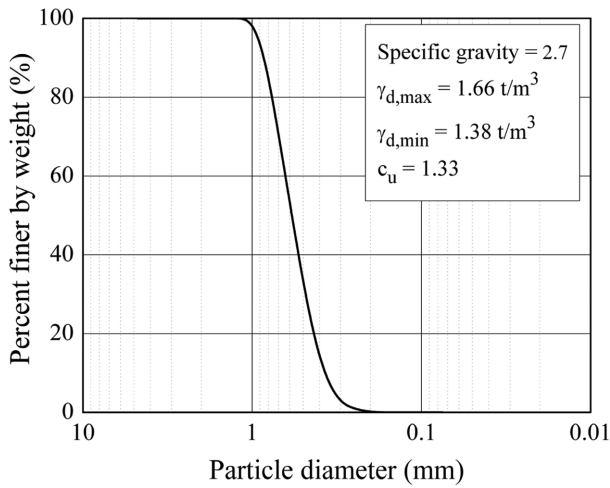


그림 4. 시료의 기본 물성

상판에 설치된 6개의 토압계를 이용하여 시료에 가해지는 압력을 측정하여 가해진 압력을 확인할 수 있다. 또한, 연구에 사용된 압력 토조는 조성된 모래 시료를 대상으로 전단과 속도를 측정할 수 있는 벤더 엘리먼트 시험 장치를 갖추고 있다. 시료 조성 과정 중, 토조의 측벽에 ‘c’형의 프레임을 이용하여 연직면과 수평 방향으로 벤더 엘리먼트를 설치하여 수평면에서의 지반의 최대 전단탄성계수(G_{max}^{hh})를 측정할 수 있다(그림 3). 벤더 엘리먼트 시험용 프레임은 토조 바닥면으로부터 60cm 되는 높이에 설치되어 프루브의 중앙부와 동일면 상에 위치 한다.

연구의 중심이 되는 프루브는 영국 Cambridge insitu사의 ‘Mark Xd’ 타입 자가 굴착식 프레스미터로 팽창부의 길이와 직경은 각각 493mm, 83mm이다. 프루브의 팽창은 질소 가스의 주입에 의해 이루어지며, 60° 간격으로 설치된 6개의 ‘Strain arm’을 이용하여 공벽의 변위를 측정하며, 최소 측정 범위는 10^{-3} mm이고, 공동 변형률로 환산 시 $2 \times 10^{-3}\%$ 내외이다. 시험은 그림 4와 같은 입도 분포 및 기본 물성을 갖는 주문진 표준사를 대상으로 수행하였다.

3.2 시험 과정 및 결과

3.3.1 시료 조성 및 압밀 과정

균질한 모래 시료의 반복적 조성을 위하여 모래 입자의 낙하에너지를 이용하는 시료 조성 방법을 사용하였다. 입자의 낙하에너지는 낙하하는 모래 입자의 속도에 따라 결정되는 값으로 입자의 낙하고에 의해 주로 영향을 받는다. 낙하하는 입자는 공기 저항에 의해 종단속도 이상으로 가속되지 않으므로, 입자의 낙하고가 종단속도까지 가속될 수 있는 이상으로 확보되면 낙하고는 조성되는 시료의 상대밀도에 크게 영향을 끼치지 않는다(Vaid et al., 1984). 주문진 표준사의 경우, 입자의 낙하고가 80cm 이상이면 낙하고가 시료의 상대밀도에 크게 영향을 주지 않음을 확인하였고, 이를 바탕으로 80cm이상의 낙하고를 확보하여 단위 시간당 낙하량의 조절만으로 시료의 상대밀도를 조절하였다. 또한 시료 조성 시, 분산 장치의 높이를 3단계로 조절하면서 수행하여 낙하고의 차이를 최소화하였다. 단위 시간당 시료의 낙하량은 개폐 장치의 개폐율을 조절하고 분산 장치에 사용된 체 눈의 크기를 달리하여 결정하였다. 조성시료의 상대밀도 측정을

표 1. 실험조건

Test name	R_d (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)	No. of UR cycle
L ¹⁾ 57	41	112	57	4
L105	44	184	105	5
L144	45	254	144	5
ML ²⁾ 47	57	93	47	4
ML108	56	200	108	4
ML144	63	270	144	4
ML170	61	314	170	4
MD ³⁾ 51	85	106	51	5
MD101	81	193	101	4
MD147	84	269	147	4
MD172	79	324	172	4
D ⁴⁾ 54	91	107	54	6
D102	97	176	102	4
D150	96	253	150	4
D173	92	301	173	4

L¹⁾: loose, ML²⁾: medium loose, MD³⁾: medium dense, D⁴⁾: dense.

위하여 토조의 바닥면으로부터 20cm, 100cm 되는 곳에 2층으로 캔을 설치하여 시험 후 시료의 밀도를 측정하였다. 또한 시험기의 굴착에 의한 교란 효과를 배제하기 위하여 시료 조성 전, 프루브를 설치한 후 시료를 조성하는 방식을 사용하였다.

시료 조성 후, 시료의 상부면을 트리밍한 후 강성 재질의 상판으로 밀폐하였으며, 시료 하부에 위치한 유압 실린더를 이용하여 K_0 조건으로 압밀을 수행하였다. 연직 구속압은 시료와 토조 벽면의 마찰을 고려하여 상부 및 하부에서 측정된 압력의 평균값으로 평가하였고 수평 구속압은 토조 바닥면으로부터 60cm 높이에 90° 간격으로 설치된 토압계로 평가하였다.

시료의 상대밀도는 40, 60, 80, 95%를 기준으로 총 4가지로 조성하였다. 시험 종료 후 평가한 시료의 상대밀도는 시료의 상부로 갈수록 약간 감소하는 경향을 보였으며, 시료 상단과 하단의 상대밀도 차이는 느슨한 지반에서 최대 10% 정도 발생하였다. 전체 시료의 압밀 과정에서 평가된 K_0 값의 범위는 0.5~0.6 이다. 표 1은 각 실험의 상대밀도 및 구속압 등을 포함한 실험 조건에 대한 요약을 보여주고 있다.

3.3.2 프레스미터 시험 및 벤더 엘리먼트 시험

하중 재재하 곡선의 특성을 분석하기 위하여, 상대밀도 및 응력 조건을 달리하는 15가지의 지반 조건에서 프레스미터 시험을 수행하였다. 각각의 시험에서 4~6회의 하중 재재하 과정을 수행하여 총 64개의 하중 재재하 곡선을 얻었다. 모든 실험은 공동 변형률 속도를 분당 0.2%로 일정하게 유지하는 변형률 제어 방식을 적용하였다.

하중 재하-재재하 과정에서 얻어지는 전단탄성계수 및 응력-변형률 관계는 하중 재하-재재하 과정이 수행되는 응력 상태 및 하중 재하량에 영향을 받는다. 하중 재하량에 대한

국내외의 명확한 기준은 없지만, 공벽에 인장에 의한 균열이 발생하지 않는 하중 제하 범위에 대한 기준은 몇몇 연구자들에 의해 제안되었다. Wroth(1982)는 공벽에서 인장에 의한 파괴가 일어나지 않도록 하기 위하여 하중 제하량이 식 (4)에서 정의된 $\Delta p'$ 을 넘지 않아야 한다고 하였다.

$$\Delta p' < \left(\frac{2 \sin \phi_{ps}}{1 + \sin \phi_{ps}} \right) p_u' \quad (4)$$

여기서, ϕ_{ps} 는 평면 변형률 조건에서의 내부 마찰각이고, p_u' 는 하중 제하 시작 시의 공내 압력이다.

Fahey(1992)는 하중 제하-재제하 과정이 탄성 영역 내에 존재하기 위해서는 Wroth가 제안한 값의 50% 이내에서 하중 제하압을 결정할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 평면 변형률 실험을 통하여 ϕ_{ps} 값이 45° 내외인 점을 확인하였고, Fahey의 제안을 바탕으로 하중 제하압을 하중 제하 시작시의 공내 압력의 40% 이내로 일정하게 유지 하였다. 또한 creep이나 응력 이완이 하중 제하-재제하 과정에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 하중 제하 시작 전, 이들에 의한 변형이 충분히 발현될 때까지 시간을 둔 후, 하중 제하를 수행하였다.

벤더 엘리먼트 시험은 시료를 통과하는 전단파 속도(V_s)를 측정하여 다음의 식 (5)을 이용해 지반의 최대 전단탄성계수를 평가하는 시험 방법 이다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (5)$$

여기서, ρ 는 시료의 밀도이다.

프레셔미터 시험이 수행되는 시료의 최대 전단탄성계수 측정을 위하여 시료 조성 후, 압밀 과정 및 시험 수행과정의 하중 제하, 재제하 시점에 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로 다양한 상대밀도를 가지는 모래지반에 대하여 구속압 변화에 따른 전단파 속도의 변화를 측정하여 상대밀도 및 응력 조건에 따른 시료의 최대 전단탄성계수를 측정하였다.

그림 5는 벤더 엘리먼트 시험을 통하여 얻어진 각 상대밀도에 대한 구속압과 최대 전단탄성계수의 관계를 보여주고 있다. 입력파로는 주파수 10Hz, 진폭 10V의 sine파를 이용

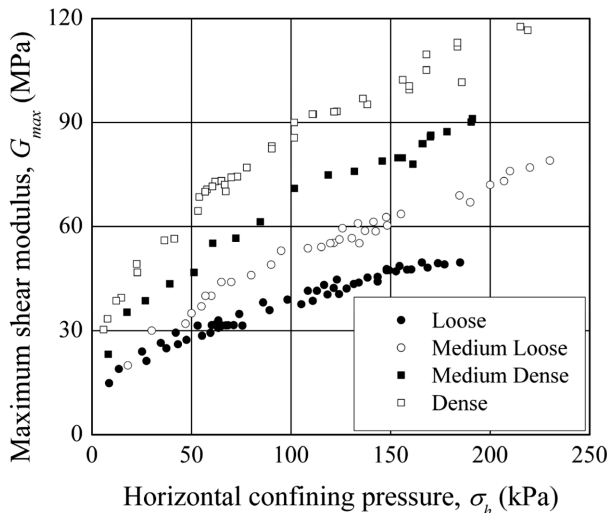


그림 5. 벤더 엘리먼트 시험으로 평가한 최대 전단탄성계수

하였으며, 전단파 도달 시간은 입력파와 출력파의 'peak' 간의 시간차를 측정하는 방법을 기본으로 하되 'cross correlation' 방법을 보조적인 수단으로 병행하여 사용하였다.

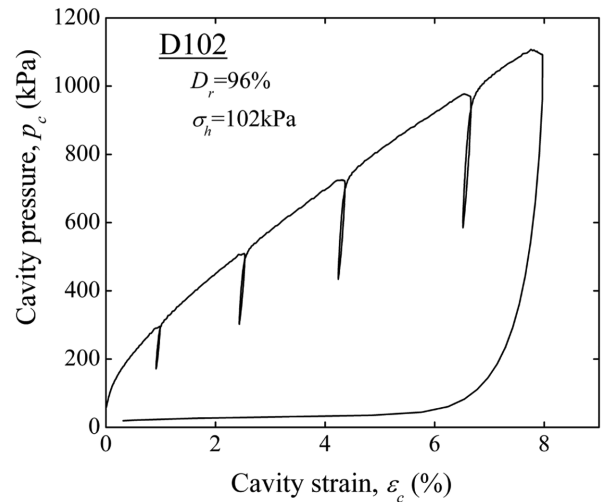
4. 최대 전단탄성계수의 산정

4.1 회귀분석을 통한 하중 재제하 곡선의 분석

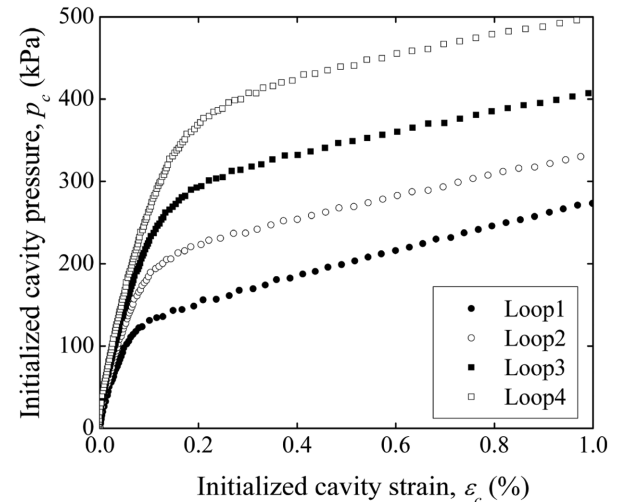
그림 6(a)는 시험 D102로부터 얻어진 프레셔미터 시험 곡선을 보여주고 있다. 공동 변형률 8%까지 시험을 진행하였으며, 총 4회의 하중 제하-재제하 과정을 포함하고 있다. 회귀분석 및 이를 바탕으로 하는 외삽법을 통한 하중 재제하 곡선 해석의 첫 번째 단계는 하중 재제하 곡선의 초기화 과정이다. 하중 재제하 곡선의 시작점으로 응력과 변형률을 초기화하면, 그림 6(b)와 같이 초기화된 재제하 곡선들을 얻을 수 있다. 초기화된 하중 재제하 곡선의 회귀분석에 적합한 함수로 본 연구에서는 식 (6)과 같이 지수함수의 형태로 표현되는 회귀분석식을 제안하였다.

$$p_c = A_1(1 - e^{-\epsilon/t_1}) + A_2(1 - e^{-\epsilon/t_2}) \quad (6)$$

여기서, A_1 , A_2 , t_1 , t_2 는 회귀분석 파라미터 이고, p_c , ϵ_c 는



(a)



(b)

그림 6. (a) 프레셔미터 시험 곡선 (D102), (b) 초기화된 하중 재제하 곡선

각각 공내 재하 압력 및 공동 변형률 이다. 식 (3)과 (6)을 이용하면 변형률에 따른 접선 전단탄성계수를 식 (7)과 같이 수식의 형태로 표현할 수 있다.

$$G^{\tan} = \frac{1}{2} \frac{dp_c}{d\varepsilon_c} = \frac{1}{2} \left(\frac{A_1}{t_1} e^{-\varepsilon_c/t_1} + \frac{A_2}{t_2} e^{-\varepsilon_c/t_2} \right) \quad (7)$$

그림 7은 그림 6(b)의 초기화된 하중 재재하 곡선으로부터 식 (7)을 이용하여 구한 변형률에 따른 접선 전단탄성계수를 보여주고 있다. 프레셔미터 시험 장비를 이용하여 측정하는 지반의 최소 변형률은 0.002% 이상이지만, 회귀분석 곡선을 통한 외삽법에 의해 지반의 선형 탄성 거동을 나타내는 최대 전단탄성계수를 결정할 수 있다. 그림 8에서 보여지는 바와 같이 변형률 수준 10^{-4} % 이후로 탄성계수의 감소가 발생하여 선형 탄성 거동의 경계가 되는 엄밀한 의미의 탄성한계 변형률을 결정하기는 힘들지만, 변형률 수준 0.001% 이내에서의 탄성계수의 변화는 $G_{0.001\%}$ 의 0.1% 미만으로 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 변형률 수준 0.001%에서의 전단탄성계수를 최대 전단탄성계수로 간주하였다.

4.2 회귀분석 함수의 적절성 검토

회귀분석 과정의 수학적 적절성을 검토하는데 있어서 기본이 되는 것은 측정 데이터와 회귀분석 곡선 간의 상관관계를 나타내는 결정계수(R^2 , coefficient of determination)이다. 총 64개의 하중 재재하 곡선에 대하여 식 (6)을 이용하여 회귀분석 작업을 수행한 결과, 모든 경우 0.998 이상의 R^2 값을 보여주었다. 이는 식 (6)으로 표현되는 회귀분석 함수의 수학적 적절성을 보여주고 있다. 본 연구에서는 수학적 적절성이 확인된 회귀분석 함수에 기초한 외삽법으로 구한 지반의 최대 전단탄성계수의 공학적 적절성을 확인하기 위하여 식 (7)을 이용하여 구한 최대 전단탄성계수와 최대 전단탄성계수에 대한 기존의 경험식 및 벤더 엘리먼트 시험 결과와 비교, 분석하였다.

모래 지반의 최대 전단탄성계수는 간극비 및 응력상태와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. Hardin 등 (1963)은 구형 입자 형상의 모래 시료에 대하여 최대 전단

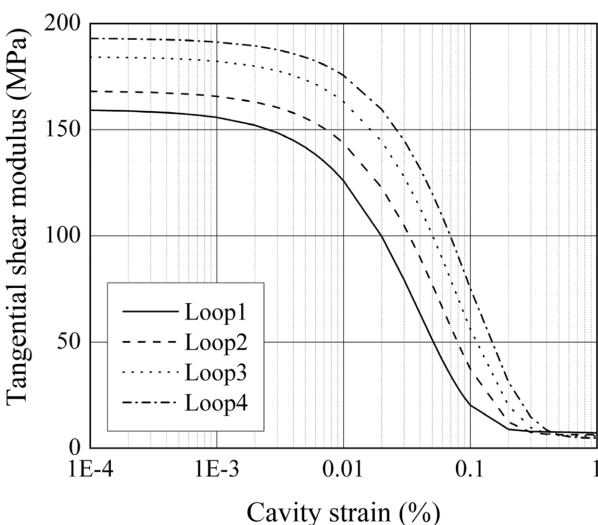


그림 7. 하중 재재하 곡선에 대한 회귀분석 및 외삽법을 이용하여 구한 접선 전단탄성계수

탄성계수를 간극비 및 응력 상태의 함수로 식 (8)과 같이 나타내었다. 또한, 모래시료에 대하여 Seed 등(1970)이 제안한 바에 따르면 최대 전단탄성계수와 상대밀도, 응력 상태와의 상관 관계를 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$G_{\max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma'_m)^{1/2} \quad (8)$$

$$G_{\max} = 219(0.6D_r + 16) (\sigma'_m)^{1/2} \quad (9)$$

여기서, σ'_m 은 지중에 작용하는 평균 유효 응력이며, $D_r(\%)$ 및 e 는 각각 모래 지반의 상대밀도와 간극비이다.

하중 재하-재재하 과정의 시작을 보다 큰 공동 변형률 단계에서 수행할 수록, 즉 그림 6(a)에서 하중 재하-재재하 루프가 원점에서 멀어질수록 하중 재하-재재하 과정은 보다 큰 수평응력 상태에서 수행된다. 따라서 이로부터 평가되는 최대 전단탄성계수는 그림 7에서와 같이 하중 재하-재재하 과정이 수행되는 응력 상태가 증가함에 따라 함께 증가한다. Bellotti 등(1989)에 의하면 하중 재하-재재하 곡선으로부터 구해지는 지반의 변형계수는 하중 재하 시작시의 공내 압력과 관련 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 하중 재하 시작시의 공내 압력, p_u 를 이용하여 하중 재하-재재하 과정이 수행되는 평균 응력인 $\sigma'_m (= (\sigma_v + 2p'_u)/3)$ 를 산정하였고, 지반의 평균 간극비 및 상대밀도를 평가하여 각 하중 재재하 곡선에 대응하는 최대 전단탄성계수를 식 (8), (9)를 통해 산정하였다. 그림 8은 각각의 하중 재재하 회귀곡선을 이용하여 평가한 G_{\max} 와 식 (8), (9)를 이용하여 구한 G_{\max} 와의 비교를 보여주고 있다.

재재하 회귀곡선을 이용하여 구해진 G_{\max} 는 기존의 경험식들로부터 평가한 G_{\max} 에 비하여 20~30% 작은 값을 보여주고 있다. 이러한 차이는 흙의 이방성 특성으로부터 설명될 수 있다. 지반의 G_{\max} 와 간극비 및 응력조건과의 상관관계를 결정짓는 식 (8), (9)는 공진주 시험결과를 바탕으로 제안되었다. 지반의 이방성을 고려하면 공진주 시험으로부터 평가되는 G_{\max} 는 하중이 가해지는 평면과 변위가 발생하는 평면이 서로 직각을 이루는 G^{vh}_{\max} 이고 프레셔미터 시험으로부터

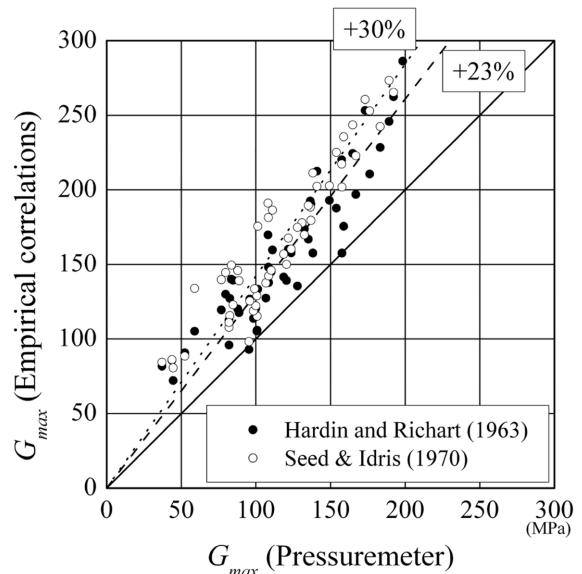


그림 8. 프레셔미터 시험으로 구한 최대 전단탄성계수와 경험식과의 비교

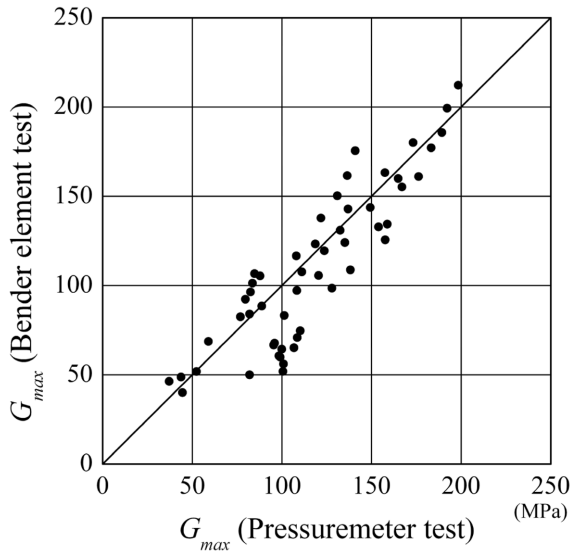


그림 9. 프레셔미터 시험으로 구한 최대 전단탄성계수와 벤더 엘리먼트 시험 결과와의 비교

구해진 G_{max} 는 하중과 변위가 모두 수평면에서 발생하는 G_{max}^{hh} 이다. 동일한 주문진 표준사 시료의 응력상태에 따른 초기 이방성비($G_{max}^{vh}/G_{max}^{hh}$)에 대하여 실험적 연구를 수행한 고영주(2007)에 따르면 주문진 표준사의 초기 이방성비는 응력조건에 무관하게 1.2~1.3 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 이방성비를 기준으로 판단할 때, 회귀분석 방법에 의한 최대 전단탄성계수 평가 과정은 적절한 것으로 평가할 수 있다.

그림 9는 각 하중 재재하 곡선에 해당하는 응력조건, 즉 하중 제하-재재하 과정 시작시의 응력조건에서 수행된 벤더 엘리먼트 시험 결과로부터 평가한 G_{max} 와 회귀분석 결과와의 비교를 보여주고 있다. 벤더 엘리먼트 시험은 두 엘리먼트의 배치가 연직면에 평행한 방향으로 설치되었기 때문에 프레셔미터 시험과 마찬가지로 지반의 G_{max}^{hh} 를 평가한다. 그림에 나타난 바와 같이 두 방법은 매우 유사한 결과를 보여 주고 있으며, $G_{max}^{PMT}/G_{max}^{BET}$ 값은 평균 1.13, 표준편차 0.28의 분포를 보이고 있다. 따라서 동적인 시험 방법에 의해 구한 지반의 최대 전단탄성계수가 정적인 시험에서 구해진 값과 동일하다는 가정을 전제로 할 때 제안된 프레셔미터 시험을 이용한 최대 전단탄성계수 결정 방법은 매우 적절한 것으로 판단된다(Tatsuoka et al., 1991; Kim et al., 1994).

4.3 원지반의 최대 전단탄성계수 평가

회귀분석 및 외삽법을 이용하여 하중 재재하 곡선으로부터 결정된 G_{max} 는 원지반과는 다른 프루브 주변 지반의 응력상태로 인하여 원지반의 G_{max} 와 다를 수 있다. 모래 지반의 경우, 시험의 진행에 따라 간극비의 변화가 크지 않으므로 식 (8)에서 간극비 항을 상수화하면 각 하중 재재하 곡선에서 구해지는 G_{max} 를 식 (10)과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$G_{max} = C(\sigma'_m)^{0.5} \quad (10)$$

여기서, σ'_m 은 하중 제하-재재하 과정을 수행하는 하중 제하

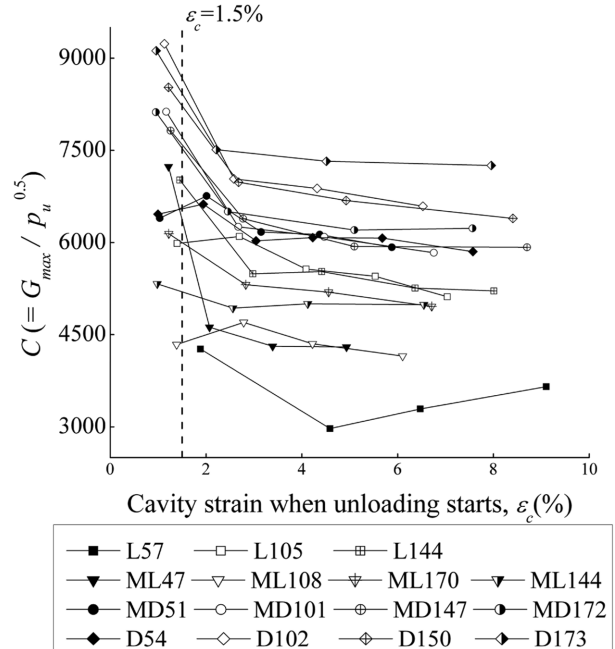


그림 10. 하중 제하-재재하 과정이 수행되는 공동 변형률에 따른 C값의 분포

시작 시의 평균 유효응력이다.

그림 10은 각 시험 조건에 따른 하중 재재하 곡선들로부터 구한 C값의 분포를 보여주고 있다. C값은 전체적으로 시료의 상대밀도 및 초기 수평응력이 증가할 수록 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며, 프루브 주변의 흡입자들이 완전히 소성 상태에 이르지 못한 초기 하중 단계에서 수행한 하중 재재하 곡선으로부터 평가한 C값은 이후의 값들에 비하여 상당히 큰 결과를 보여주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 공동 변형률 1.5% 이후에서 수행된 하중 재재하 곡선들로부터 구한 C값의 평균 및 지반의 초기 응력조건으로부터 식 (11)을 이용하여 원지반의 G_{max} 를 산정하였다.

$$G_{max} = C_{av}(\sigma_{m0})^{0.5} \quad (11)$$

여기서, C_{av} 는 하중 재재하 곡선들로부터 평가한 C값의 평균이고, $\sigma_{m0}=(\sigma_{0'}+2\sigma_{h0'})/3$ 는 초기 평균 유효수평응력이다.

그림 11은 식 (11)에 의해 평가된 원지반의 G_{max} 와 벤더 엘리먼트 시험으로 구한 원지반의 G_{max} 의 비교로 하중 재재하 곡선의 회귀분석 및 응력 조건 변화에 대한 고려를 통하여 지반의 G_{max} 를 적절히 평가할 수 있음을 보여주고 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 프레셔미터 시험으로부터 측정되는 공내 압력 - 공동 변형률의 비선형적 관계로부터 흙의 최대 전단탄성계수를 결정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해서 대형 압력 토조를 이용하여 다양한 응력 조건 및 상대밀도를 가지는 모래 지반에 대하여 프레셔미터 시험을 수행하였으며, 더불어 각 조건에서 벤더 엘리먼트 시험을 수행하였다.

제안된 방법에서는 지반의 교란 효과를 배제하기 위하여 재재하 시험 결과를 이용하며, 시험 결과를 회귀분석, 외삽하여 최대 전단탄성계수를 평가한다. 재재하 시험을 위한 제

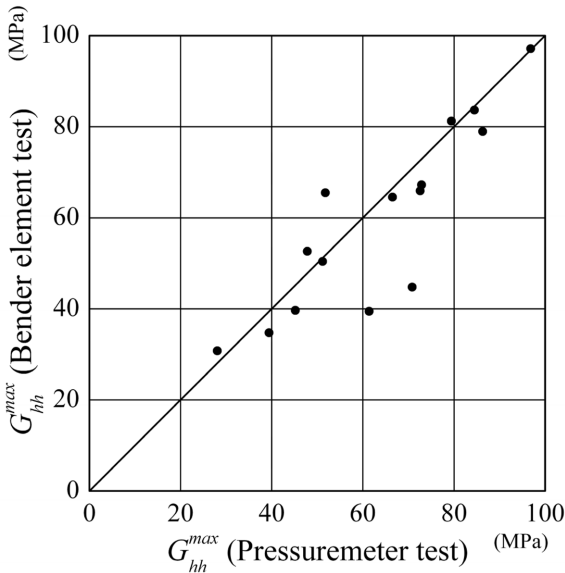


그림 11. 응력 조건 변화를 고려하여 프레스미터 시험으로 평가한 원지반의 G_{max} 와 벤더 엘리먼트 시험으로부터 평가한 원지반의 G_{max} 의 비교

하압은 기존 문헌 연구 결과를 토대로 제하 시작 시 압력의 40%로 일정하게 하여 제하가 미치는 영향을 배제하였다. 그리고 원지반 보다 큰 재재하 시 초기응력의 효과를 변형계수와 구속압과의 상관성을 이용하여 해석 방법에 반영하였다. 제안된 방법의 신뢰성은 프레스미터 시험과 동시에 실시한 벤더 엘리먼트 시험 결과 그리고 기존 경험식에 의한 결과와의 비교를 통해서 확인하였다.

본 연구에서는 현장에서 최대 전단탄성계수를 결정하기 위해서는 전단과 속도를 이용한 동적인 방법에 의존하던 것에서 벗어나, 시추공을 이용한 프레스미터 시험을 통해서 결정할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 이미 제시된 비선형 영역의 전단탄성계수 결정 방법과 연계할 경우 미소 변형 영역 전체의 전단계수 결정이 프레스미터 시험을 통해서 가능할 것으로 예상된다. 따라서, 불교란 시료 채취의 어려움이 있는 사질토의 미소변형 특성 파악에 본 연구의 결과가 크게 이용될 것으로 기대된다.

참고문헌

고영주(2007) Experimental Study on the Small Strain Stiffness and Nonlinear Deformation Characteristics of Sands,

석사학위논문, 서울대학교.
 김동수(2006) 국내 지반동역학 분야의 현재와 미래, 한국지반공학회 2006 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 89-149.
 Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P. K., and Peterson, R. W. (1989) Interpretation of moduli from self-boring pressuremeter tests in sands, *Geotechnique*, Vol. 39, No. 2, pp. 269-292.
 Byrne, P.M., Salgado, F.M., and Howie, J.A. (1990) Relationship between the unload shear modulus from pressuremeter tests and the maximum shear moduli for sand, *Proc. 3rd Int. Symp. Pressuremeters, Oxford*, pp. 231-242.
 Clarke, B.G. (1995) Pressuremeters in geotechnical design, Blackie Academic and Professional.
 Fahey, M. and Carter, J.P. (1993) A finite element study of the pressuremeter test in sand using a nonlinear elastic plastic model, *Can. Geotech. J.*, Vol. 30, No. 2, pp. 348-362.
 Hardin, B. O. and Richart, F. E. J. (1963) Elastic wave velocities in granular soils, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, Vol. 89, No. 1, pp. 33-65.
 Hughes, J.M.O. (1982) Interpretation of pressuremeter tests for the determination of the elastic shear modulus, *Proc. Conf. Updating Subsurface Sampling of Soils and Rocks and their In Situ Testing, Santa Barbara*, pp. 279-290.
 Jardine, R.J. (1992) Nonlinear stiffness parameters from undrained pressuremeter tests, *Can. Geotech. J.*, Vol. 29, No. 3, pp. 436-447.
 Kim, D.S. and Stokoe, K.H. (1994) Torsional motion monitoring system for small-strain ($10^{-5}\%$ to $10^{-3}\%$) soil testing, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 17-21.
 Robertson, P.K. (1986) In situ testing and its application to foundation engineering. *Can. Geotech. J.*, Vol. 23, No. 4, pp. 573-594.
 Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, *Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California*
 Sweeney, B.P. and Clough, G.W. (1990) Design of large calibration chamber, *Geotech. Testing J.*, Vol. 13, No. 1, pp. 36-44.
 Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991) Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests, Key Note Lecture for Session No. 1, The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, pp. 101-170.
 Vaid, Y. and Negussey, K. (1984) Relative density of pluviated sand samples, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 2, pp. 101-105.
 Wroth, C.P. (1982) British experience with the self-boring pressuremeter, *Proceeding of International Symposium. Pressuremeter and its Marine Application, Paris*, pp. 143-164.

(접수일: 2008.2.18/심사일: 2008.4.22/심사완료일: 2008.4.22)