

# 자가굴착식 프레스미터 시험을 이용한 비배수 전단강도 산정

## Determination of Undrained Shear Strength of Clayey Soils from Self-Boring Pressuremeter Test

장 인 성 <sup>*1</sup>	Jang, In-Sung	권 오 순 <sup>*2</sup>	Kwon, O-Soon
정 충 기 <sup>*3</sup>	Chung, Choong-Ki	김 명 모 <sup>*4</sup>	Kim, Myoung-Mo

### Abstract

It has been well known that self-boring pressuremeter test(SBPT) is a very effective in-situ test for determining the undrained strength( $s_u$ ) of clayey soils because of its advantage of minimizing soil disturbance. Many researchers have proposed its interpretation methods to derive  $s_u$  from SBPT. In this study, 33 self-boring pressuremeter tests were performed at 5 different sites in Korea and  $s_u$  values were determined by the existing interpretation methods. Applicability and reliability of each interpretation method on  $s_u$  from SBPT were examined by comparing  $s_u$  values for strain hardening soil of test results with  $s_u$  values from field vane tests. In addition, the effect of finite length of pressuremeter membrane on  $s_u$  was analysed based on numerical method, and its modified subtangent method was proposed. And the improved effects of the proposed method were confirmed by comparing  $s_u$  values after the modification with field vane test results.

### 요 지

자가굴착식 프레스미터 시험(Self-Boring Pressuremeter Test, SBPT)은 지반의 교란을 최소화할 수 있기 때문에 점성토의 비배수 전단강도( $s_u$ )를 비교적 정확하게 평가할 수 있는 방법 중의 하나로 알려져 있으며, 많은 연구자들에 의하여 SBPT 결과로부터  $s_u$ 를 산정하는 여러 가지 방법들이 제안되었다. 본 연구에서는 국내 5개 지역에서 총 33회의 SBPT를 수행한 후, 기존에 제안된 여러 가지 방법들을 이용하여  $s_u$ 를 산정하고, 그 중 변형률 경화 거동을 보이는 지반에서의  $s_u$ 를 동일 현장에서 수행한 현장베인시험 결과와 비교·분석하여 각 방법들의 적용성과 신뢰성을 분석하였다. 그리고,  $s_u$  산정 결과에 대한 프레스미터 멤브레인의 유한한 길이의 영향을 수치해석적으로 분석하였으며, 그 결과를 이용하여 기존의 접선영 방법(Subtangent method)을 보정하는 식을 제안하였다. 새로이 보정된 방법으로 산정한  $s_u$ 를 현장베인시험 결과와 비교하여 개선 효과를 확인하였다.

**Keywords :** Self-boring pressuremeter test(SBPT), Undrained shear strength, Strain hardening soil, Finite length of pressuremeter membrane, Numerical method, Subtangent method

### 1. 서론

자가굴착식 프레스미터 시험(Self-Boring Pressuremeter

Test, SBPT)은 점성토 지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 시험들 중 피에조콘 관입시험(Piezcone Penetration Test, CPTu)과 함께 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있

\*1 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정  
 \*2 정희원, 한국 해양연구소 선임연구원  
 \*3 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수  
 \*4 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

는 현장 지반조사 방법 중의 하나로서, 점성토 지반을 대상으로 비배수 전단강도와 변형계수, 현장수평응력, 응력-변형률 관계, 그리고 압밀 특성 등을 결정할 수 있는 시험법이다.

SBPT를 이용하여 비배수 전단강도( $s_u$ )를 산정하는 방법에 대한 이론적인 연구는 공동팽창이론을 이용하여 Gibson과 Anderson(1961), Palmer(1972), Windle과 Wroth(1977) 등에 의해 이루어졌다. 그리고 Baguelin 등(1986), Yeung과 Carter(1990), Houlsby와 Carter(1993) 등은 수치해석을 통해 비배수 전단강도의 산정에 영향을 미치는 요인에 대한 연구를 수행한 바 있다. 그러나, 이러한 연구들은 거의 대부분 멤브레인의 길이가 무한하다는 평면 변형률 조건이나 재하시(즉, 멤브레인의 팽창시) 완전 비배수 조건을 가정하는 등 실제 시험조건과 다른 이상화한 가정들에 근거하고 있고, 더욱이 다른 현장시험 또는 실내시험 결과와의 비교를 통한 각 산정방법의 신뢰성 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 국내 5개 지역에서 총 33회의 SBPT를 수행한 후, 기존에 제안된 여러 가지 방법들을 이용하여  $s_u$ 를 산정하였다. 특히, SBPT 결과 중 대부분을 차지하고 있는 변형률 경화거동을 보이는 지반에 대하여 구한  $s_u$ 를 동일한 시험 위치에서 구한 현장배인시험(Field Vane Test, FVT) 결과와 서로 비교·분석하여 각 방법들의 적용성과 신뢰성을 분석하였다. 그리고 SBPT를 모사한 유한요소 해석을 통하여 멤브레인의 유한한 길이가 점성토 지반의 비배수 전단강도에 미치는 영향을 분석하고, 이를 토대로 비배수 전단강도를 보정하는 식을 개발하였다.

## 2. 시험장비 및 시험지반 개요

### 2.1 자가굴착식 프레스미터 시험의 개요

기존에 국내에 도입되어 있는 공내재하시험기의 대부분이 미리 형성되어 있는 시추공 내에 시험기를 설치하고 시험을 실시하는 선굴착식 프레스미터 시험기(Pre-Bored Pressuremeter, PBP)인 반면, 자가굴착식 프레스미터 시험기(SBP)는 그림 1에 나타난 바와 같이 시험기에 부착되어 있는 커터 비트를 이용하여 지반 내에 스스로 관입한 후 시험을 수행하기 때문에 지반의 교란을 최소화하여 시험을 수행할 수 있다.

본 연구에서 사용된 장비는 공벽의 변형을 유체의 유입량으로 측정하는 부피 변형 측정식(volume displacement type) 프레스미터로서, 재하용량은 0~10MPa이나 일반적으로 토사에서 시험을 행할 경우에는 0~2.5MPa 정도의 재하범위로 실시한다. 프레스미터 프루브의 중심이 시험심도에 도달하게 되면, 응력 제어시험(단계적인 재하) 또는 변형률 제어시험을 실시하여 각각의 재하압과 그때의 부피(또는 공동 변형률)를 측정하게 되고, 그림 2와 같이 재하압-부피에 대한 시험 곡선을 얻는다. 시험 곡선으로부터 직접적으로 얻을 수 있는 변수는 한계압( $p_l$ ), 현장수평응력( $\sigma_h$ ), 전단탄성계수( $G$ ) 등이다. 한계압은 초기 부피의 2배가 될 때까지 팽창하였을 때의 재하압으로 회귀 분석을 통한 외삽기법을 이용하여 구하고, 변형이 발생하기 시작하였을 때의 재하압으로부터 현장수평응력을 구할 수 있다. 그리고 초기 재하곡선이나 제하-재재하 곡선으로부터 전단탄성계수( $G_i$  또는  $G_{ur}$ )를 구할 수 있다.

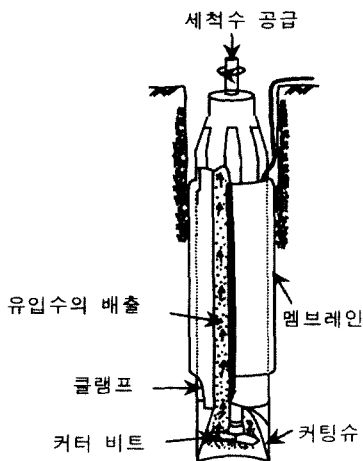


그림 1. SBP의 개략도

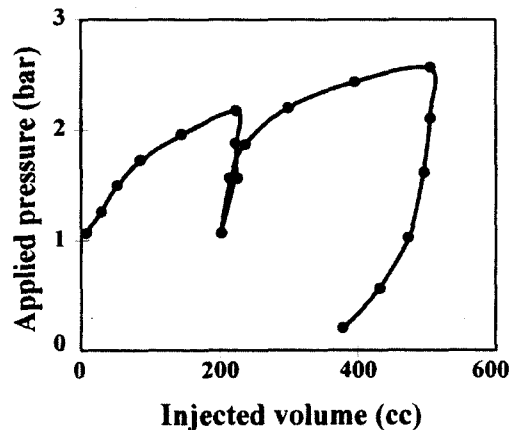


그림 2. 대표적인 시험 곡선

## 2.2 시험지반 개요

본 연구에서 현장시험을 실시한 시험지반의 위치는 인천광역시 영종도, 강원도 강릉, 경남 양산, 경남 하동 그리고 전남 광양 등으로, 국내에서 점성토 지반이 가장 발달되어 있는 지역에 해당하는 곳이다. 앞서 설명한 바와 같이 SBPT 이외에, 인접한 위치에서 FVT, 표준관입시험 등의 현장시험을 수행하였으며 불교란 시료를 채취하여 실내 시험도 함께 실시하였다. 표 1은 각 시험지반의 기본 물성치 및 점성토층의 두께를 나타낸 것이다.

표 1. 시험지반의 물성치

	영종도	강릉	양산	하동	광양
흙의 분류	CL	OH	CH	CL	CL
$v_i$ (t/m <sup>3</sup> )	1.83 ~1.85	1.38 ~1.4	1.56	1.61 ~1.63	1.64 ~1.66
$w_n$ (%)	25 ~35	51 ~65	25 ~44	57.1 ~60.9	57.1 ~61.3
PI (%)	6.1 ~28.5	27 ~41	20.5 ~25.9	20 ~30	23 ~34
OCR	1.0 ~2.0	2.1 ~2.4	1.1 ~1.7	1.0 ~1.5	1.0 ~2.0
점토층의 두께 (m)	16	8	28	16	12

## 3. 비배수 전단강도 산정에 대한 기존의 연구

### 3.1 접선영 방법(Subtangent method)

프레셔미터 시험시 전단응력( $\tau$ )은 아래의 식(1)과 같이 공동 변형률( $\epsilon_c$ )과 재하압( $p$ )과의 관계로 나타낸다(Palmer, 1972).

$$\tau = 0.5\epsilon_c(1 + \epsilon_c)(2 + \epsilon_c) \frac{dp}{d\epsilon_c} \quad (1)$$

식(1)에서 미소한 공동 변형률을 가정하면, 식(2)와 같이 간략하게 나타낼 수 있으며, 이를 체적 변형률( $\Delta V/V$ )에 대하여 나타내면 아래의 식(3)과 같이 표현된다.

$$\tau = \epsilon_c \frac{dp}{d\epsilon_c} \quad (2)$$

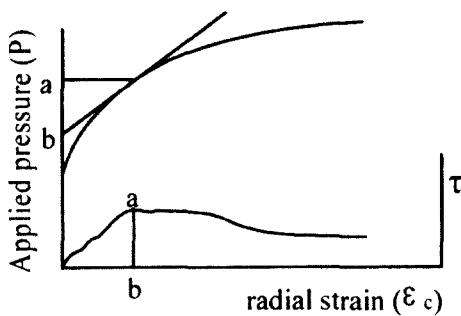
$$\tau = \frac{dp}{d(\ln(\Delta V/V))} \quad (3)$$

그림 3은 재하압-공동 변형률(혹은 체적 변형률) 곡선

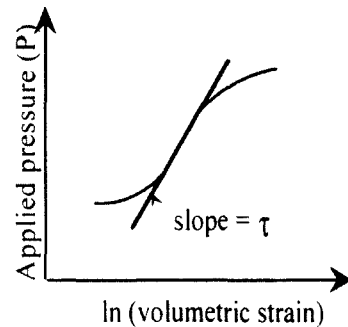
으로부터 전단응력을 추정하는 방법을 나타낸 것으로서, 식(2)를 이용하면 그림 3(a)에서의 선분 ab의 길이가, 식(3)을 이용하면 그림 3(b)에서의 접선의 기울기가 각 변형률에서의 전단응력이 된다. 여기서 변형률 연화거동을 보이는 지반의 경우, 일반적으로 항복 이후의 잔류상태의 전단응력을 비배수 전단강도로 정의하며(Burland, 1990), 변형률 경화거동을 보이는 지반의 경우 특정 변형률 영역(기준 변형률)을 선택함으로써 비배수 전단강도를 결정한다.

### 3.2 도해적 방법(Graphical method)

Gibson과 Anderson(1961), Windle과 Wroth(1977)는 지반을 선형 탄성-완전 소성이라 가정하고 그림 4와 같이 재하압-체적 변형률 곡선을 반대수지 상에 도시하였을 때, 공동팽창(원통형 공동의 비배수 상태 하에서의 팽창)이론으로부터 비배수 전단강도는 한계상태(공동의 부피가 초기 공동의 2배가 될 때의 상태)에 이르렀을 때의 직선의 기울기로 유도된다고 주장하였다.



(a) 공동 변형률-재하압 곡선



(b) 체적 변형률-재하압 곡선

그림 3. 프레셔미터 시험곡선으로부터 전단응력을 유도하는 방법

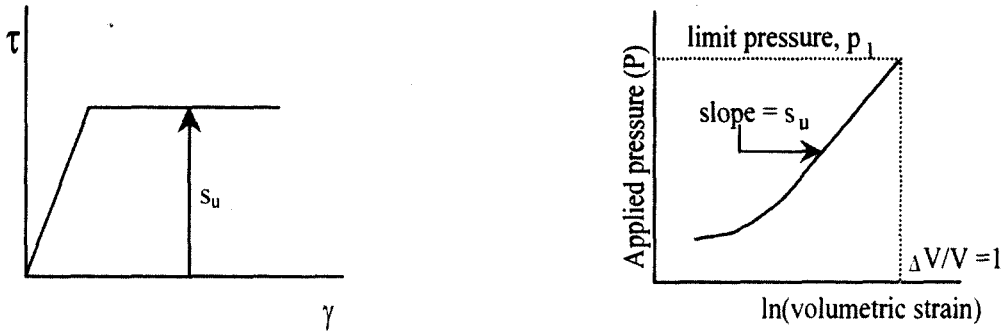


그림 4. 탄소성모델의 응력-변형률 거동 특성

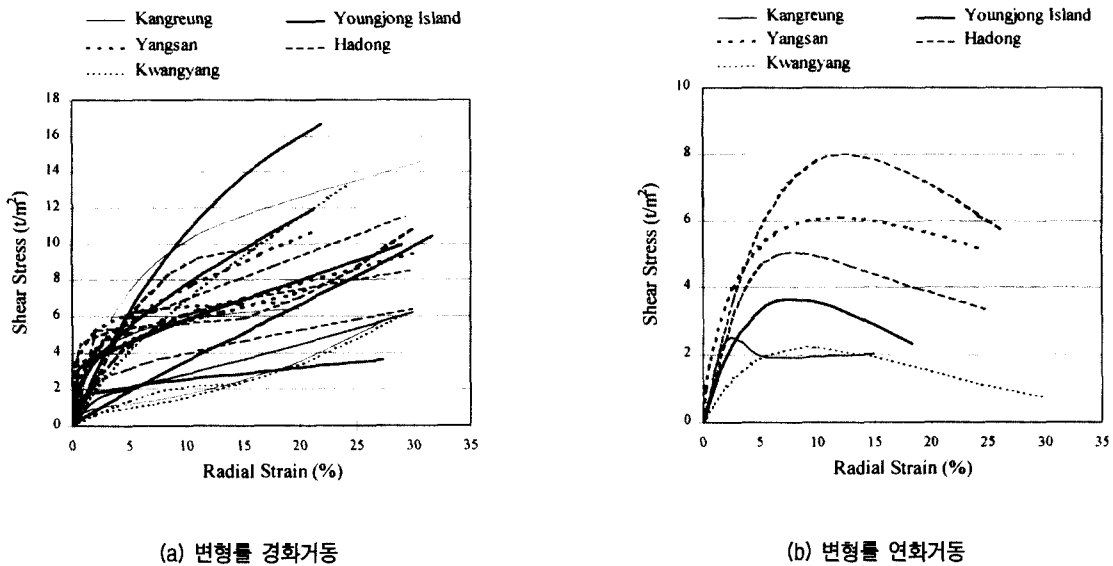


그림 5. 전단응력-공동 변형률 곡선(접선영 방법을 사용)

### 3.3 변수간 상관관계를 이용한 방법(Correlation method)

지반을 탄소성 재료로 가정할 때, 재하압이 한계 상태에 이르면 비배수 전단강도는 식(4)와 같이 현장수평응력( $\sigma_h$ ), 전단탄성계수( $G$ ), 한계압( $p_l$ ) 등의 함수로 나타나는데, 프레스미터 시험곡선으로부터  $\sigma_h$ ,  $G$  그리고  $p_l$ 을 구한다면 시행착오법을 이용하여 비배수 전단강도를 추정할 수 있다.

$$p_l - \sigma_h = s_u \left[ 1 + \ln \left( \frac{G}{s_u} \right) \right] \quad (4)$$

## 4. 해석 결과 및 분석

### 4.1 산정방법에 따른 비배수 전단강도의 비교

그림 5는 국내 점성토 지반에서 수행한 33회의 SBPT 결과를 식 (1)에 나타난 Palmer(1972)의 접선영 방법(Subtangent method)에 적용하여 전단응력을 구한 것으로서, 변형률 경화거동과 변형률 연화거동을 보이는 지반으로 각각 구분하여 나타내었다. 대부분의 시험결과(약 82%)가 그림 5(a)와 같이 변형률 경화거동을 보이고, 그림 5(b)에 나타난 바와 같이 변형률 연화거동을 보이는 경우는 드물게 나타났다. 변형률 경화거동을 보이는 지반의 경우, 전단응력이 변형률에 따라 다르게 나타나고, 따라서 비배수 전단강도의 결정에 있어서 기준 변형률의 선택이 매우 중요하다. 기준 변형률과 관련한 기존 문헌들을 살펴보면, Hously와 Carter(1993)가 수치해석으로 모사한 프레스미터 시험의 결과 해석시 기준 변형률을 2~5%로 둔 반면, Clarke와 Sadeeq(1996)는 기준 변형률이 최소 6% 이상, 최대 10% 정도가 되어야 한다고 주장한 바 있다.

한편, Gibson과 Anderson(1961), Windle과 Wroth(1977)의 도해적 방법은 지반이 선형탄성-완전소성으로 거동한다는 가정에 근거하여 한계상태에 이르렀을 때의 변형률을 기준 변형률로 두고 비배수 전단강도를 산정하기 때문에 변형률 경화 거동을 보이는 지반에서는 실제 비배수 전단강도를 지나치게 과대평가할 수 있다는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 변형률 경화 거동을 보이는 지반의 비배수 전단강도를 산정하는 방법에 대하여 중점적으로 알아보았다.

그림 6은 변형률 경화 거동을 보이는 지반에서, SBPT의 여러 가지 산정방법으로 구한 비배수 전단강도를 동일한 현장 및 심도에서 수행한 FVT(총 16회)로부터 구한 비배수 전단강도와 비교한 것이다. 여기서 SBPT로부터 비배수 전단강도를 산정하기 위하여 접선영 방법 뿐 아니라 도해적 방법, 그리고 변수들간의 상관관계를 이용한 방법 등을 이용하였다. 접선영 방법의 경우, 식(1)과 식(2)를 모두 사용하였고, 기준 변형률에 따른 결과의 차이를 알아보기 위해 기준 변형률을 2~5%, 6~10% 등으로 구분하여 비배수 전단강도를 산정하였다. 시험 위치나 심도에 따른 영향

을 배제하기 위하여 각 비배수 전단강도를 그 위치에서의 현장 유효연직응력( $\sigma'_{v0}$ )으로 정규화하여 나타내었고, 결과의 상관도를 알아보기 위하여 각 산정방법 별로 결정계수( $r^2$ )를 함께 표시하였다.

이 그림을 보면, 모든 SBPT의 산정방법이 기준 시험(FVT) 결과보다 비배수 전단강도를 대체로 크게 산정하고 기준 변형률이 커짐에 따라 비배수 전단강도가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바대로 본 연구에서 시험을 수행하였던 점성토 지반이 변형률 경화 거동을 보이기 때문이다. 그리고 같은 기준 변형률이라 하더라도 식(2)가 식(1)보다 비배수 전단강도를 작게 산정하고 기준 시험 결과와 보다 더 비슷한 값을 보이고 있다. 이와 같이 동일한 변형률 하에서도 사용하는 식에 따라서 값의 차이를 보이는 것은 식(1)의 경우 실제 공동 변형률의 크기가 포함된 반면, 식(2)에서는 미소한 변형률을 가정하여 전단응력 산정식을 단순화하였기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 각 회귀곡선의 결정계수는 산정방법에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

여러 가지 산정방법들 중 접선영 방법에서 기준 변형률을 2~5%로 가정하고 비배수 전단강도를 산정하는 방법이 기준 시험 결과와 비교적 유사한 분포를 보이는 반면, 변수간 상관관계를 이용하는 방법이나 도해적 방법 또는 접선영 방법에서 6~10%의 기준 변형률로 산정한 비배수 전단강도는 기준 시험 결과보다 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 한편, Eden과 Law(1980), Houlsby와 Carter(1993) 등이 제시한 바와 같이, SBPT로 구한 비배수 전단강도는 프레스미터 멤브레인의 유한한 길이, 재하시 발생하는 부분 배수 등의 원인으로 인해 일반적으로 실내시험이나 FVT 결과에 비해 크게 나타나기 때문에 이들 요인들을 감안하여 비배수 전단강도를 산정한다면 상이한 결과가 나타날 수 있다.

이와 같은 내용들을 종합해 보면, 변형률 경화 거동을 보이는 지반의 경우, 비배수 전단강도를 지나치게 과대평가할 수 있는 도해적 방법이나,  $G$ ,  $\sigma_b$ ,  $p_t$  등을 정확하게 알고 있어야 하는 변수간 상관관계를 이용하는 방법보다는 접선영 방법을 사용하는 것이 보다 타당할 것으로 보인다. 그리고, 접선영 방법 중에서는 해석의 편의성이나 기준 시험 결과와의 상관성을 고려해 볼 때, 식(2)을 이용하여 비배수 전단강도를 산정하는 것이 유리하다고 판단하였으며, 이를 보다 신뢰성 있게 사용하기 위해서 두가지 기준 변형률에 대하여 멤브레인의 유한한 길이와 재하시 부분 배수 등의 영향을 고려한 보정을 실시하였다.

Data	Regression	$r^2$
◇ 2~5%(Eq.1)	..... 2~5%(Eq.1)	0.49
◆ 2~5%(Eq.2)	----- 2~5%(Eq.2)	0.44
△ 6~10%(Eq.1)	——— 6~10%(Eq.1)	0.45
▲ 6~10%(Eq.2)	———— 6~10%(Eq.2)	0.44
○ Graphical method	- - - Graphical method	0.42
□ Correlation	----- Correlation	0.46

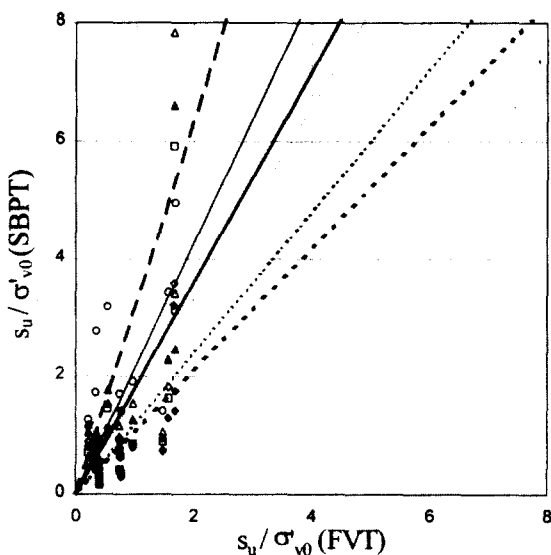


그림 6. SBPT의 산정방법에 따른 비교

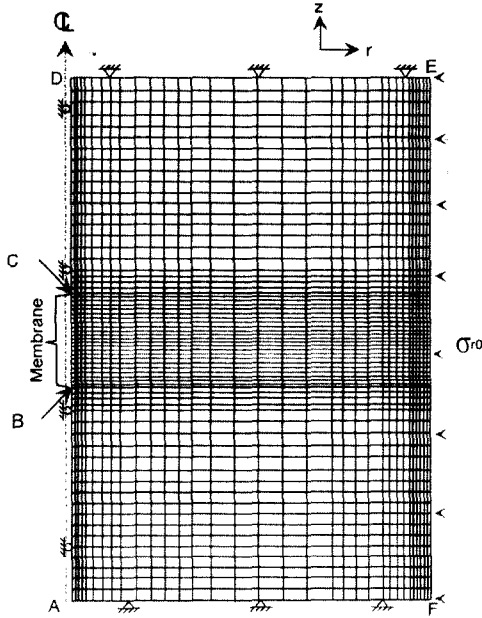


그림 7. 격자요소로 모델링한 단면도

## 4.2. 비배수 전단강도에 미치는 멤브레인의 유한한 길이의 영향

### 4.2.1 개요

SBPT로부터 구한 비배수 전단강도에 영향을 미치는 요인들에 대한 연구는 수치해석을 통하여 여러 학자들에 의해 이루어져 왔다. Baguelin 등(1986)은 재하시 부분배수의 영향에 대하여, Yeung과 Carter(1990), Houlby와 Carter(1993) 등은 프레셔미터 멤브레인의 유한한 길이의 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 하지만, 이러한 연구들은 지반을 Tresca 모델 등의 단순한 구성모델로 모델링하거나, 멤브레인의 유한한 길이의 영향과 재하시 부분배수의 영향을 동시에 고려한 것이 아니라는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 멤브레인의 유한한 길이가 지반의 비배수 전단강도에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위해서 SBPT를 모사한 유한요소해석을 수행하였다.

### 4.2.2 해석 조건 및 구성모델

본 연구에서는 유한요소해석 범용 프로그램인 ABAQUS(1998)를 사용하여 프레셔미터 시험을 모사하였는데, 그림 7은 본 해석에 사용된 격자모양의 단면도를 나타낸 것이다. 프레셔미터 프루브의 직경(D)에 대한 멤브레

표 2. 유한요소해석에 사용한 경계조건

경계	응력조건	변위조건	간극수압 조건
AB, CD	$\sigma_{r0} = \sigma_{\theta0} = K_0 \sigma_{z0}$	$u_r = 0$	impermeable
BC	Applied Pressure	-	impermeable
AF, DE	-	$u_z = 0$	impermeable
EF	$\sigma_{r0} = \sigma_{\theta0} = K_0 \sigma_{z0}$	-	$u_e = 0$ (측면배수 허용)

표 3. 유한요소해석에 사용한 점성토 지반의 입력 변수값

입력 변수	G (kPa)	$\lambda$	$x$	$e_0$	M	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$K_0$	k (m/sec)
값	2,500	0.165	0.0134	1.4	1.2	1.083	0.44	$1 \times 10^{-9}$

인의 길이(L)의 비가 일반적인 시험기에 해당되는 값인 6일 때를 포함하여 L/D가 4, 5, 8, 10일 때의 해석을 실시하였고, 비교를 위한 목적으로 멤브레인의 길이가 무한한 경우(평면 변형률 조건)에 대한 해석도 함께 수행하였다. 8절점 축대칭 4각형 요소를 사용하였으며, 절점의 수는 7646개이고 요소의 수는 2479개이다. 또한 방사방향으로는 50R(R:프루브의 반경)을, 그리고 연직방향으로는 37R만큼의 충분한 거리를 두고 해석을 함으로써 경계부분의 구속여부에 따른 영향을 배제하였다. 표 2는 각 경계부에서의 경계조건을 나타낸 것이다.

SBPT의 설치시 교란이 거의 발생하지 않기 때문에 시험기가 지반 속에 이미 관입되어 있는 상태에서 지반의 초기 응력 상태를 구현한 이후 변형률 제어시험을 모사하였고, 변형률 속도는 실제 시험에서 가장 많이 사용하고 있는 1%/min로 하여 10%의 변형률까지 재하하였다. 그리고 재하/재해하 시험이 비배수 전단강도의 산정에 미치는 영향을 배제하기 위해서 단순 재하만을 실시하였다. 한편, 일반적인 점성토에 해당하는 투수계수( $k=1 \times 10^{-9}$  m/sec)를 가정(Lambe과 Whitman, 1979)하여 재하시 발생할 수 있는 부분배수의 영향을 고려하였다.

본 유한요소해석에서는 지반의 구성모델로 등방 변형률 경화 모델인 MCC 모델을 사용하였다. MCC 모델을 유한요소해석에 적용시키기 위해서는 5개의 입력변수(G,  $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $e_0$ , M)를 필요로 하는데, 이 값들을 포함하여 본 수치해석에 입력값으로 사용한 지반의 물성치는 표 3에 나타나 있다. 방향성에 관계없이 등방의 값을 가정하여 입력한 지반의 투수계수를 제외하고, 나머지 값들은 국내의 저소성 불교란 점성토 시료에 대한 실내시험 및 현장시험 결과

(Jang, 2001)로부터 결정한 것이다.

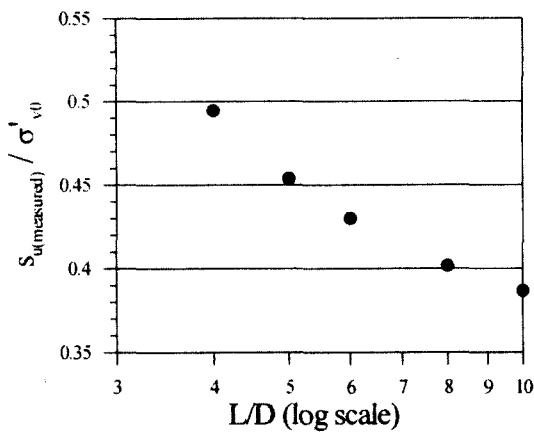
#### 4.2.3 멤브레인의 유한한 길이의 영향

멤브레인의 유한한 길이가 SBPT를 이용하여 산정한 비배수 전단강도에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위해서 지반의 강성지수( $I_p = G/s_u$ )가 120일 때,  $L/D=4, 5, 6, 8, 10$  등 여러 가지  $L/D$ 에 대하여 수치해석을 실시하였다. 여기서 비배수 전단강도는 식 (3)으로부터 산정하였으며, 기준 변형률은 2~5%와 6~10%로 구분하였다.

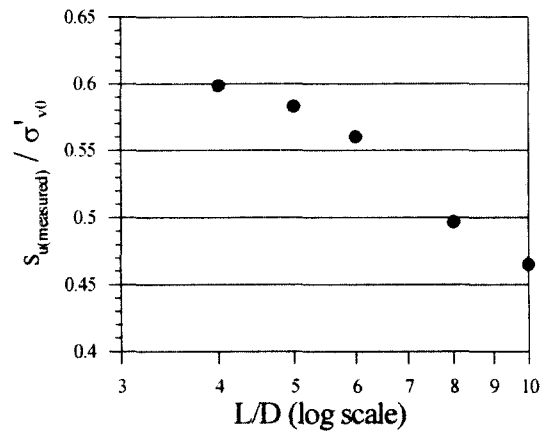
그림 8은 상기의 두가지 기준 변형률에 대하여 비배수 전단강도를 유효연직응력으로 정규화시켜  $L/D$ 에 대하여 나타낸 것이다. 그림을 보면, 기준 변형률에 관계없이 멤

브레인의 길이가 길어짐에 따라, 즉 평면 변형률 조건에 가까워짐에 따라 비배수 전단강도가 점차적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 Baguelin 등(1986), Housby와 Carter (1993) 등의 연구 결과와 일치하는 것으로, 멤브레인의 유한한 길이가 실제 지반의 비배수 전단강도를 과대평가하기 때문에 이에 대하여 보정할 필요가 있음을 보여주고 있다.

그림 9는 평면 변형률 조건 하에서 산정한 비배수 전단강도를 다양한  $L/D$ 에 대하여 산정한 비배수 전단강도로 나누어 도시한 것이다. 먼저 기준 변형률이 2~5%일 경우를 보면, 여러 가지  $L/D$ 에 대하여 구한 비배수 전단강도가 실제 비배수 전단강도에 가까운 평면 변형률 조건에서의 값보다 4%~34% 정도( $L/D=6$ 일 경우, 16%) 크게 나타났다. 반면, 기준 변형률이 6~10%일 경우에는 여러 가지

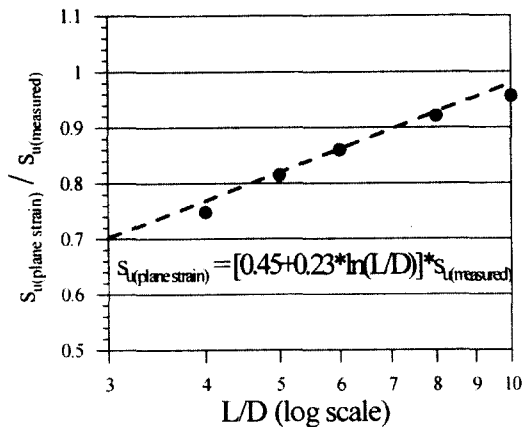


(a) 기준 변형률 : 2~5%

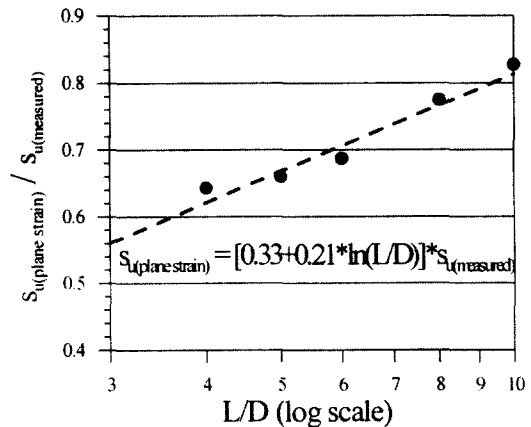


(b) 기준 변형률 : 6~10%

그림 8. 다양한  $L/D$ 에 따른  $s_u / \sigma'_{v0}$



(a) 기준 변형률 : 2~5%



(b) 기준 변형률 : 6~10%

그림 9.  $L/D$ 가  $s_u$ 에 미치는 영향

L/D에 대한 비배수 전단강도가 평면 변형률 조건에 비해 21~55% 정도(L/D=6일 경우, 45%) 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서 기준 변형률이 커짐에 따라, 멤브레인의 유한한 길이의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 9에서의 각 점들을 선형 회귀분석함으로써 2~5% 및 6~10%의 기준 변형률에서 멤브레인의 길이의 영향을 보정하여 비배수 전단강도를 산정하는 관계식을 식 (5)와 식 (6)으로 나타내었다.

$$s_u = [0.45 + 0.23 \ln(L/D)] \times s_{u(\text{measured})} \quad (5)$$

$$s_u = [0.33 + 0.21 \ln(L/D)] \times s_{u(\text{measured})} \quad (6)$$

여기서,  $s_u$ 는 L/D에 대하여 보정한 이후의 비배수 전단강도이고,  $s_{u(\text{measured})}$ 는 식 (3)에서 기준 변형률을 2~5% 및 6~10%로 두고 각각 산정한 비배수 전단강도를 나타낸다.

#### 4.3 멤브레인의 유한한 길이에 따른 보정 후의 결과

그림 10은 멤브레인의 길이에 대하여 보정하기 전·후의 결과를 서로 비교하기 위한 것으로서, 5개 현장에서 수행한 SBPT로부터 식 (3)을 사용하여 2~5% 및 6~10%의 기준 변형률로 비배수 전단강도를 구한 후, 식 (5)와 식 (6)의 보정식을 이용하여 각각 보정한 결과를 보정하기 전과 비교하여 나타낸 것이다.

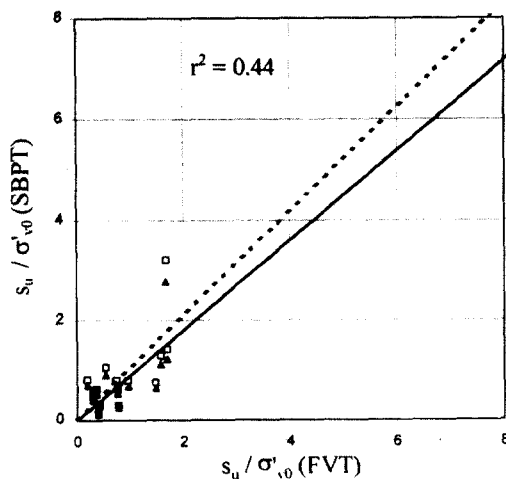
이 그림에서 보면, 기준 변형률에 관계없이 보정 이후의 결과가 보정 이전에 비해 FVT로부터 구한 비배수 전단강

도와 유사해짐을 알 수 있다. 그러나, 보정 이후의 결과만을 비교해 볼 때, 기준 변형률이 2~5%일 경우에는 기준 시험 결과보다 12% 정도 작게 평가하는 반면, 6~10%일 경우에는 27% 정도 과대평가하는 것으로 나타나 2~5%의 기준 변형률에서 구한 비배수 전단강도가 기준 시험결과와 보다 유사해짐과 동시에 안전측의 결과를 제시하고 있다. 따라서 식 (2)로부터 2~5%의 기준 변형률에 대한 비배수 전단강도를 구하고, 식 (5)를 이용하여 멤브레인의 유한한 길이에 대한 보정을 하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다.

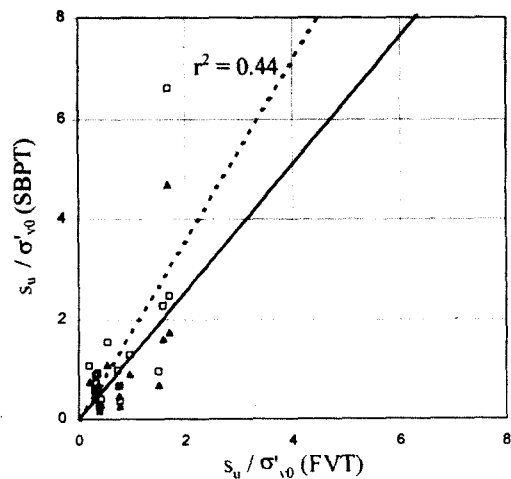
#### 5. 결론

SBPT를 이용하여 비배수 전단강도를 산정하는 기존의 방법들에 대한 적용성을 국내 점성토 지반에서 수행한 시험 결과를 이용하여 평가하고, 수치해석적 방법으로부터 그 개선 방향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 국내 지반의 SBPT 결과에 따른 전단응력-변형률 곡선을 구한 결과, 대부분의 시험결과(약 82%)가 변형률 경화 거동을 보이는 것으로 나타났다.
- (2) SBPT 결과 중 변형률 경화 거동을 보이는 지반에 대해서, 여러 가지 산정방법으로 구한 비배수 전단강도는 적용되는 기준 변형률이 클수록 기준 시험인 FVT 결과보다 크게 평가하고, 점선영방법에서 2~5%의 기준 변형률을 적용할 때 기준 시험 결과와 가장 유사한 값을 산정하는 것으로 나타났다.



(a) 기준 변형률: 2~5%



(b) 기준 변형률: 6~10%

그림 10. L/D에 따른 보정 전·후의 결과 비교



(3) SBPT에 대한 수치해석 결과, 멤브레인의 유한한 길이로 인해 비배수 전단강도가 과대평가되는 것으로 나타났다. 또한, 기준 시험 결과와의 상관성을 고려하여 보정 이후의 결과를 비교한 결과, 2~5%의 기준 변형률을 이용하여 비배수 전단강도를 산정한 후, 제안된 식에 따라 멤브레인의 길이에 대한 보정을 할 경우 가장 합리적인 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

1. ABAQUS manual (1998), Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC.
2. Baguelin, F., Frank, R. A. and Nagra, R. (1986), "A theoretical study of pore pressure generation and dissipation around the pressuremeter," Proc. 2nd Int. Symp. Pressuremeter Marine Appl., Texam, USA, ASTM STP950, pp. 169-186
3. Burland, J. B. (1990), "Thirtieth Rankine Lecture: On the compressibility and shear strength of natural clays," Geotechnique, 40(3), pp. 327-378
4. Clarke, B. G. and Sadeeq, J. A. (1996), "A practical guide to the derivation of undrained shear strength from pressuremeter tests," Advances in site investigation practice, Thomas Telford, London, pp. 559-570
5. Eden, W. J. and Law, K. T. (1980), "Comparison of undrained shear strength results obtained by different test methods in soft clays," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp. 369-381
6. Gibson, R.E. and Anderson, W.F. (1961), "In situ measurements of soil properties with the pressuremeter," Civ. Engrg Public Wks. Rev., 56, pp. 615-618
7. Houslyby, G. T. and Carter, J. P. (1993), "The effect of pressuremeter geometry on the results of tests in clay," Geotechnique, 43(4), pp. 567-576
8. Jang, I. S. (2001), Evaluation of strength and consolidation characteristics of clayey soils using CPTu and SBPT, Ph. D thesis, Seoul National University, South Korea, In print
9. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons
10. Palmer, A. C. (1972), "Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test," Geotechnique, 22(3), pp. 451-457.
11. Windle, D. and Wroth, C. P. (1977), "Use of self-boring pressuremeter to determine the undrained properties of clays," Ground Engineering, 10(6), pp. 37-46
12. Yeung, S. K. and Carter, J. P. (1990), "Interpretation of the pressuremeter test in clay allowing for membrane end effects and material non-homogeneity," Proc. 3rd Int. Symp. Pressuremeters, Oxford, pp. 199-208

(접수일자 2000. 8. 18)