

## 국내 점성토 지반의 피에조콘 계수

### Piezocone Factors of Korean Clayey Soils

장 인 성* <sup>1</sup>	Jang, In-Sung	이 선 재* <sup>2</sup>	Lee, Sun-Jae
정 충 기* <sup>3</sup>	Chung, Choong-Ki	김 명 모* <sup>4</sup>	Kim, Myoung-Mo

#### Abstract

In order to evaluate undrained shear strength of clayey soils using Piezocone Penetration Test (CPTu), piezocone factor is utilized. Commonly, piezocone factors determined by empirical basis were preferred, which were established by correlation between measurements of piezocone test and undrained strengths obtained from other shearing tests. However, previous studies on the empirical piezocone factors were site-specific and there have been no systematic investigations on the effect of both engineering characteristics of clayey soils and soil non-homogeneity on the piezocone factor. Accordingly, the direct application of the previous results to Korean clayey soils without verification may be inappropriate. In this study, empirical piezocone factors are evaluated by comparing 46 CPTu results of 10 test sites with undrained shear strength obtained from Field Vane Test (FVT) and laboratory triaxial tests. Their reliabilities are investigated by the comparison with the previous piezocone factors and the deviation of data distribution from the mean values. And the effects of referencing test methods and typical engineering characteristics of clayey soils such as overconsolidation ratio (*OCR*) and plastic Index (*I<sub>p</sub>*) are examined. Because piezocone factors obtained for various soil conditions are widely distributed, it is not appropriate to use the mean value as a representative. Instead, it is recommended to apply the piezocone factors with *OCR*, which is found to be a major factor in deriving piezocone factor. The necessitated piezocone factors are presented.

#### 요 지

피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test, CPTu)으로부터 점성토의 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 피에조콘 계수가 필요하다. 피에조콘 계수는 경험적 방법(기준 시험 방법에 의한 비배수 전단강도와 피에조콘 시험 결과와의 직접 비교에 의하여 결정)에 의해 결정된 값들이 일반적으로 사용된다. 그러나, 경험적인 피에조콘 계수와 관련한 기존의 연구들은 거의 대부분 특정 지역에 대한 값일 뿐 아니라 지반의 공학적 특성이나 지반의 불균질성 등과의 상관관계 분석이 아직까지 미흡하기 때문에 국내 지반에 그대로 적용하기에는 무리가 따를 수 있다. 본 연구에서는 10개 지역 총 46회의 피에조콘 관입시험 결과를 현장베인시험 및 실내삼축시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 비교하여 국내 점성토 지반의 경험적인 피에조콘 계수를 산정하였다. 기존 제시값들과 비교함과 아울러 그 신뢰성을 분석하고, 소성지수와 과압밀비와의 상관성 및 기준 전단시험 방법에 따른 영향에 대하여 연구하였다. 연구 결과, 다양한 지반 조건에 대하여 얻어진 피에조콘 계수는 평균값을 그대로 적용하기에는 값의 분포 범위가 너무 넓은 것으로 나타났다. 따라서 피에조콘 계수와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타난 과압밀비에 따라 구분하여 피에조콘 계수를 적용하는 것이 합리적이며, 이 때 필요한 피에조콘 계수를 제안하였다.

\*1 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 연수연구원 (Member, Postdoctoral fellow, Coastal & Harbor Engrg., Lab., Korea Ocean Research & Development Institute)  
\*2 정회원, 동부엔지니어링(주) 기술연구소 책임연구원 (Member, Manager, Dept. of Geotechnical Engrg., Dongbu Engrg., Co. Ltd.)  
\*3 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ.)  
\*4 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ.)

## 1. 서론

흙의 역학적 특성을 얻기 위하여 시행되는 현장시험은 결과를 신속하게 얻을 수 있고, 현장 조건이 최대한 반영된다는 장점 때문에 실용적 측면에서 그 중요성이 최근 크게 부각되고 있다. 피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test, CPTu)은 다양한 지반 특성들을 비교적 정확하게 구할 수 있을 뿐만 아니라 연속적인 측정으로 인하여 지층 구분을 원활하게 할 수 있고 다양한 결과를 심도에 따라서 일관되게 얻을 수 있기 때문에 국내외에서 크게 활용되고 있으며, 특히 점성토의 비배수 전단강도( $s_u$ ) 산정과 관련하여 많은 연구가 이루어져 왔다.

일반적으로 CPTu에서는 흙의 비배수 전단강도가 콘의 관입시 저항력 또는 발생 과잉간극수압의 크기와 밀접한 관계가 있다는 근거 하에서, 피에조콘 계수를 도입하여 비배수 전단강도를 결정하게 된다. 여기서, 피에조콘 계수는 극한 지지력 이론(Schmertmann, 1978), 공동 팽창 이론(Vesic, 1972; Chen과 Mayne, 1993) 또는 변형률 경로법(Baligh, 1975; Teh, 1987; Teh와 Houslyby, 1991)에 근거한 해석적 방법으로 구하거나, 다른 시험 결과에 따라 나타난 비배수 전단강도를 기준으로 하여 CPTu 결과와의 비교에 근거한 경험적인 방법으로 구하게 된다. 하지만, 해석적 방법의 경우 피에조콘의 관입을 정확하게 모사하기 어려울 뿐 아니라, 흙의 특성을 해석 과정에서 정확하게 반영하기 힘들기 때문에, 경험적 방법의 경우에는 연구 대상 지역에 따라 나타난 피에조콘 계수 값들을 조건에 따른 분류 없이 단순 제시하고 있기 때문에 실제적으로 활용하기에는 어려움이 있다. 특히 국내에서 주로 사용되는 경험적 방법에 의한 기존의 피에조콘 계수는 제안자 또는 대상 지역에 따라 값의 변화가 심하다. 이는 각 지역에 따라 소성지수( $I_p$ )나 과압밀비(OCR) 등 흙의 공학적 특성 차이 및 비교 비배수 전단강도 결정 방법의 다양성, 그리고 대상 지반의 불균질성이 원인이 되어 나타날 수 있다. 따라서, 신뢰성 있는 피에조콘 계수의 결정을 위해서는 대상 지반의 특성을 비롯하여 비교 대상 시험 방법들을 고려한 연구가 필요하며, 또한 국내에서의 활용을 위해서는 국내 지반에 대한 시험 결과를 직접적으로 이용하

여 피에조콘 계수를 결정할 필요가 있다.

본 연구에서는 지난 수년간 국내의 여러 현장에서 체계적인 실험 계획과 함께 수행한 10개 지역 총 46회의 CPTu 결과를 이용하여 국내 지반에 적합한 피에조콘 계수에 대하여 알아보았다. 시험시 측정된 원추관입 저항력( $q_c$ )과 관입 간극수압( $u_{BT}$ )을 현장베인시험(Field Vane Test, FVT) 및 실내삼축시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 비교하여 피에조콘 계수를 구하고, 기존 비배수 전단강도 측정방법에 따른 피에조콘 계수의 비교와 함께 공학적 특성( $I_p$ , OCR)과 피에조콘 계수와의 상관 관계를 분석하였다.

## 2. 피에조콘 계수

### 2.1 피에조콘 계수의 정의

CPTu로부터 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 시험에서 측정되는 값( $q_c$ ,  $u_{BT}$ )과 점성토의 비배수 전단강도와의 상관 관계를 피에조콘 계수를 이용하여 설정하여야 한다. 피에조콘 계수는 적용 방법에 따라 크게 3가지( $N_{KT}$ ,  $N_{qs}$ ,  $N_{\Delta u}$ )로 구분된다.

#### (1) 전응력 개념의 원추관입 저항력을 이용하는 방법

Schmertmann (1978)은 말뚝의 관입이 콘의 관입과 유사하다고 생각하여 식 (1)과 같이 비배수 전단강도를 산정하는 방법을 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_k} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{vo}$ 는 연직 전응력, 그리고  $N_k$ 는 무차원 계수인 콘계수이다. 그러나, 간극수압을 측정하는 다공질 필터가 그림 1과 같이 원추 바로 뒷면에 위치한 피에조콘을 이용할 경우  $q_c$ 는 간극수압의 영향을 받기 때문에, Lunne 등 (1985)은 그림 1에 나타난 바와 같이 다공질 필터의 면적을 고려한  $q_T$ 를 이용하여 식 (2)와 같이  $s_u$ 를 산정할 것을 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{N_{kT}} \quad (2)$$

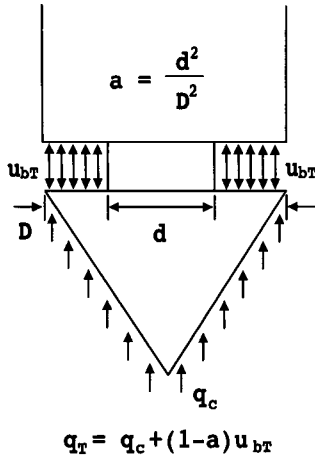


그림 1. 부등단면적 효과

여기서,  $q_T$ 는 피에조콘을 사용할 때 부등 단면적 효과를 고려한 원추관입 저항력이고,  $N_{kT}$ 는 수정 전응력 피에조콘 계수이다.

(2) 유효응력 개념의 원추관입 저항력을 이용하는 방법

Campanella 등(1982)은 식 (3)과 같이 원추관입 저항력에서 간극수압을 뺀 값, 즉 유효응력 개념으로 비배수 전단강도를 산정하는 방법을 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_T - u_{bt}}{N_{qu}} \quad (3)$$

여기서,  $N_{qu}$ 는 유효응력 피에조콘 계수이다.

(3) 과잉간극수압을 이용하는 방법

Vesić(1972), Randolph와 Wroth(1979), Campanella 등(1985)은 공동팽창이론을 이용하여 식 (4)와 같이 비배수 전단강도를 피에조콘 관입시험에서 측정된 과잉간극수압의 형태로 나타내었다.

$$s_u = \frac{u_{bt} - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (4)$$

표 1. 기존에 제안된 경험적인 피에조콘 계수 (modified from 이선재, 1997)

지역	기준 $s_u$ 측정방법	Cone factor	Reference
Norway	FVT	$N_k = 13 \sim 19$	Lunne et al. (1976)
North Sea	CIUC	$N_k = 17$	Kjekstad et al. (1978)
England(London)	PLT	$N_k = 10 \sim 30$	Marsland (1974) Marsland and Powell (1979)
England(North)	CIUC	$N_k = 12 \sim 20$	Nash and Duffin (1982)
Norway	FVT	$N_k = 12 \sim 19$	Lacasse and Lunne (1982)
Italy	FVT	$N_k = 8 \sim 16$	Jamiolkovski et al. (1982)
	CK <sub>0</sub> UC	$N_{kT} = 8 \sim 10$	
Canada (Vancouver)	FVT	$N_{kT} = 8 \sim 10$	Konrad et al. (1985)
	SBPT		
Brazil	FVT	$N_{kT} = 13.5 \sim 15.5$	Rocha-Filho and Alencar (1985)
	CIUC		
Singapore	FVT	$N_{kT} = 9 \sim 12$	Dobie (1988)
Australia	FVT	$N_{kT} = 13.7$	Jones (1995)
Malaysia	FVT	$N_{kT} = 5 \sim 13$	Wong (1995)
Japan	UCT	$N_{kT} = 8 \sim 16$	Tanaka (1995)
	FVT	$N_{kT} = 9 \sim 14$	
Canada	FVT	$N_{\Delta u} = 2 \sim 10$	Campanella et al. (1985)
Canada	FVT	$N_{\Delta u} = 6.2 \sim 7.0$	Konrad et al. (1985)
Singapore	UU	$N_{\Delta u} = 7 \sim 8$	Orihara et al. (1993)
Taiwan	CIUC	$N_{qu} = 5.0 \sim 6.8$	Chen and Mayne (1993)
	CAUC	$N_{qu} = 6.0 \sim 7.2$	
Korea	UU CIUC CAUC FVT	$N_{kT} = 10 \sim 25$ $N_{\Delta u} = 1.7 \sim 4.4$ $N_{qu} = 9.3 \sim 17.2$	이선재 (1997)

FVT : 현장베인시험  
 PLT : 평판재하시험  
 SBPT : 자가굴착식 프레스미터 시험  
 UU : 비압밀 비배수 삼축압축시험

CIUC : 등방압밀 비배수 삼축압축시험  
 CAUC : 이방압밀 비배수 삼축압축시험  
 UCT : 일축압축시험  
 CK<sub>0</sub>UC : K<sub>0</sub> 압밀 비배수 삼축압축시험

여기서,  $u_0$ 는 정수압, 그리고  $N_{du}$ 는 간극수압 피에조콘 계수이다.

## 2.2 기존에 제안된 피에조콘 계수

표 1은 기존의 여러 연구자들이 다양한 지반조건에 대한 시험 결과로부터 경험적 방법을 사용하여 제안한 피에조콘 계수들을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 세계 각지에서 경험적 방법으로 결정된 피에조콘 계수들은 지역에 따라 다른 값을 가지며, 또한 같은 지역이라 하더라도 차이를 보여 주고 있다. 이는 부분적으로 시험 기기 또는 시험 조건에서 기인한 문제도 있겠지만, 시험 지역마다 흙의 특성이 다르고 같은 지역이라 하더라도 지반이 불균질할 수 있을 뿐만 아니라, 피에조콘 계수의 결정을 위하여 사용된 기준 비배수 전단강도 산정 방법이 서로 다르기 때문이다.

피에조콘 계수가 이렇듯 일정하지 않고 큰 차이를 보이며, 흙의 특성에 따른 경향성도 충분하게 연구된 바가 없기 때문에 국내 지반에 적절한 피에조콘 계수를 설정하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 국내 점성토 지반의 비배수 전단강도를 산정하는데 CPTu를 적용하기 위해서는 국내에서 수행한 시험 결과로부터 구한 피에조콘 계수를 이용하는 것이 가장 합리적이다. 아울러 국내 지반 특성의 다양성을 반영하기 위해서 흙의 공학적 특성 등에 따른 영향을 정량적으로 평가하는 것이 필요할 것이다.

## 3. 실험계획 및 연구수행지반의 특성

표 2는 각 시험 지반에 대한 공학적 특성 및 기준 비배수 전단강도 측정 방법을 나타낸 것이다. 본 연구에서

표 2. 각 현장의 지반 특성 및 기준 비배수 전단강도 측정방법

현장	소성지수 (%)	과압밀비	점토층의 두께 (m)	통일분류기호	기준 비배수 전단강도 측정방법
영종도	6~29	1.0~2.3	10~16	CL	FVT, 실내시험
강릉	18~41	1.0~2.4	8	CL, OH	FVT, 실내시험
서천	11~26	1.0~1.7	10~20	CL	FVT, 실내시험
영암	27~35	1.0~4.5	15	CH	FVT, 실내시험
광양	10~32	1.0~2.0	12	CL	FVT, 실내시험
양산	8~32	1.0~2.3	21~24	CL, CH	FVT, 실내시험
하동	18~33	1.0~1.5	16	CL	FVT, 실내시험
김제	10~30	1.5~4.7	15	CH, CL	실내시험
평택	17~26	1.0~3.8	9	CL	FVT, 실내시험
아산	17~22	1.1~1.6	3	CL	FVT, 실내시험

는 표에 나타난 바와 같이 국내 10개 지역에서 총 46회의 CPTu를 실시하였으며, 점성토 지반을 대상으로 하였기 때문에 대부분 해안 인근에 위치하고 있다.

CPTu와 함께 현장배인시험(FVT)을 실시하였으며, 채취한 불교란 시료를 이용하여 다양한 삼축압축시험 즉 등방압밀 비배수삼축압축(CIU-TXC),  $K_0$ 압밀 비배수삼축압축( $CK_0U$ -TXC) 그리고 이방압밀 삼축압축(CAU-TXC)을 실시하였으며, 이와 함께 기본 물성치 시험과 압밀시험도 실시하였다.

실내시험을 통하여 나타난 대상 지반은 소성지수( $I_p$ )가 대부분 40% 미만인 저소성 점성토로서 통일분류법에 따르면 주로 CL로 분류되며, 과압밀비(OCR)는 5.0 미만이고 대부분 3.0 미만으로서 정규압밀 또는 약간 과압밀되어 있는 것으로 나타났다.

그림 2는 CPTu 결과를 바탕으로 한 시험지반의 대표적인 주상도를 나타낸 것으로, 각 현장마다 원추관입 저항력( $q_T$ )과 관입 간극수압( $u_{br}$ )을 비롯하여 현장 정수압( $u_0$ )을 함께 도시하였다. 그림을 보면, 강릉, 서천, 영암, 광양, 양산, 하동 현장은  $q_T \leq 0.5\text{MPa}$ 인 매우 연약한 점성토 지반이 균질한 상태로 두껍게 존재한다. 한편, 평택 현장은 6m까지 연약한 점성토층이 균질하게 분포하지만 6~9m에서는 불균질한 지층이 존재하고, 영종도 현장은 2~8m까지의 상부 해성층과 14m 이후의 하부 해성층 중간에 8~14m의 불균질한 지층이 존재하고 있으며, 아산 현장은 비교적 불균질한 점성토 지반으로 이루어져 있는 것으로 나타났다. 그리고 김제 현장은  $q_T$ 가 1~2MPa 내외의 약간 과압밀된 지층이 두껍게 분포한다.

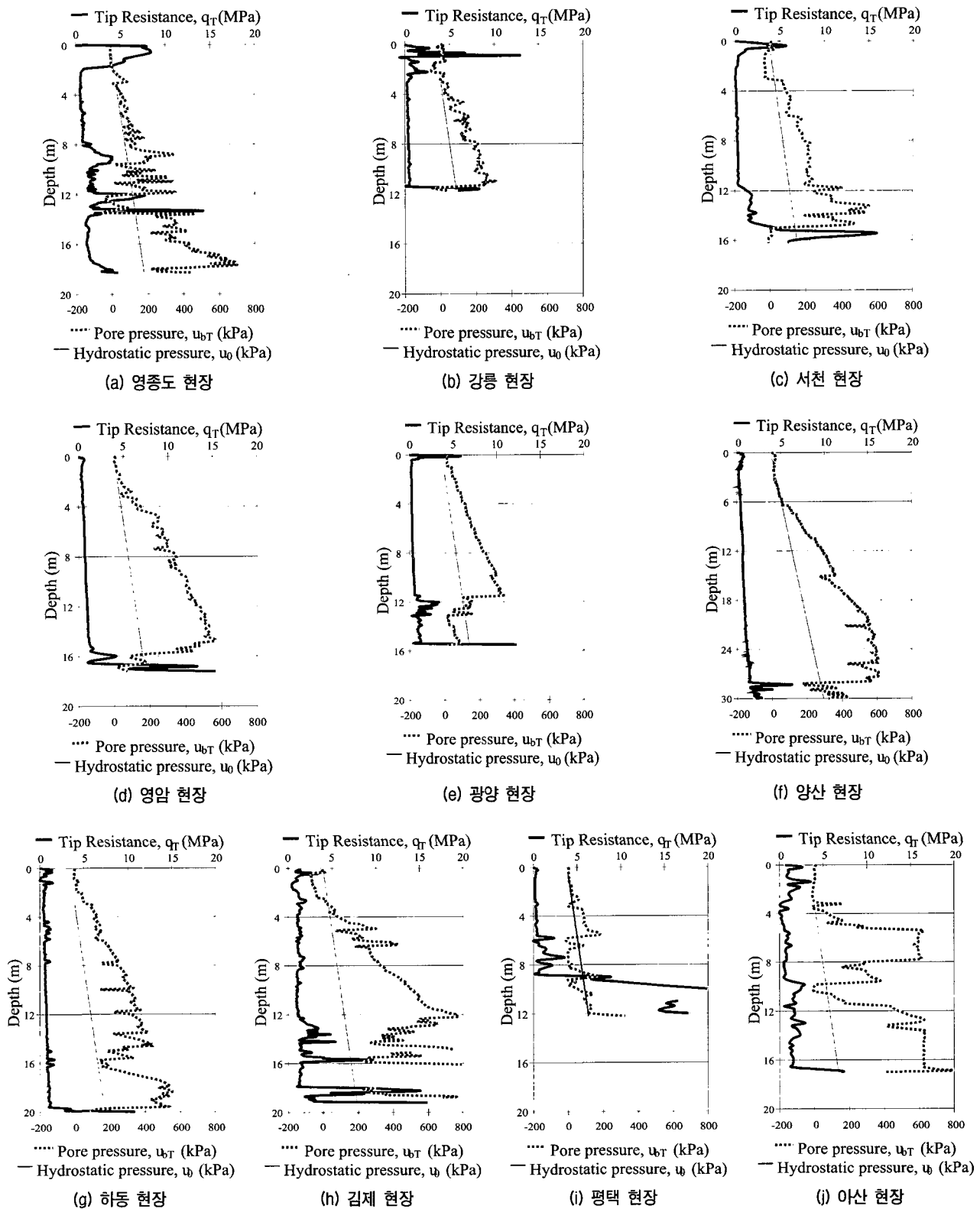


그림 2. 시험지반의 주상도

#### 4. 해석 결과 및 분석

본 연구에서는 다양한 지반 특성을 갖는 국내 여러 지역에서 CPTu를 실시하였으며, 이와 함께 비교 기준이

되는 비배수 전단강도의 결정을 위하여 FVT 및 채취된 불교란 시료를 이용한 실내삼축시험을 실시하였다. 각각의 시험에서 얻어진 CPTu 결과와 기준  $s_u$ 의 상관관계를 식 (2)~식 (4)에서 정의한 3가지 방법을 토대로 그림

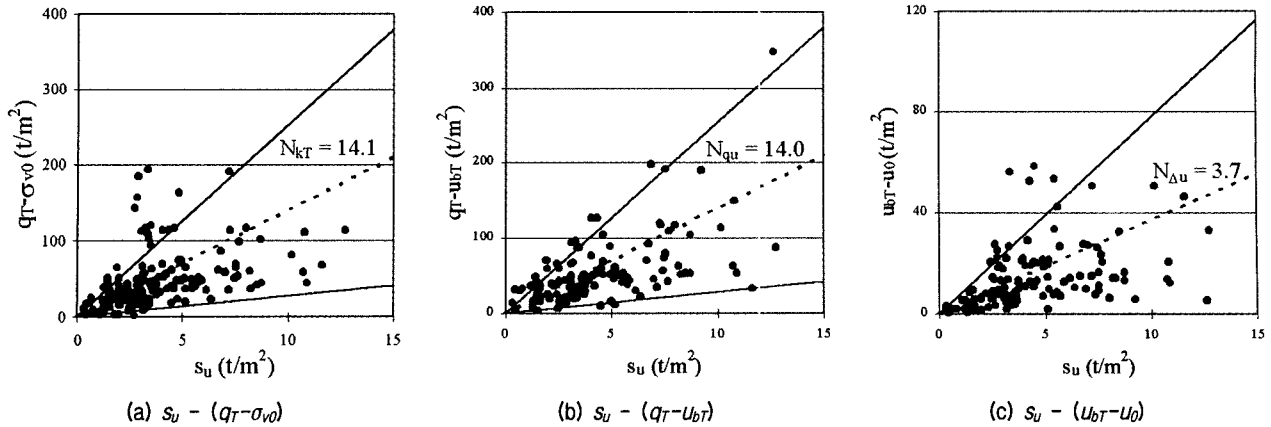


그림 3. CPTu 결과와 기준 비배수 전단강도와의 관계

3에 나타내었다. 피에조콘 계수의 평균값 이외에도 70% 신뢰도 범위를 각각 나타내었는데, 표 2에 나타낸 바와 같이 본 연구의 대상 지반이  $OCR$ 과  $I_p$  등 지반 특성의 변화가 다소 심하기 때문에 각 그림의 기울기로 나타나는 피에조콘 계수의 변화의 폭이 크다. 이는 또한 기준 대상이 되는 시험의 종류가 다양한 것에서 비롯된 것이라 볼 수 있으며, 동일 지역이라도 일부 현장에서 나타난 바와 같은 불균질성이 그 원인이라고 할 수 있다.

효율적인 결과 해석을 위해서 통계적 방법을 사용하여 신뢰도 70% 구간으로 구분한 뒤, 평균 피에조콘 계수와 신뢰도 70%에 근거한 오차 범위를 구한 결과를 표 3에 나타내었다. 여기서  $\bar{X}$ 는 평균 피에조콘 계수를,  $r_{70}$ 은 70% 신뢰도에서 오차 범위를 나타낸다. 이 표에 제시된 평균 피에조콘 계수들은 소성지수가 40%보다 작고,  $OCR$ 이 5.0 미만의 국내 점성토에 대한 값으로서 표 1의 기준에 제안된 값들의 범위와 전체적으로 비교할 때  $N_{kr}$ 의 경우에는 그 평균값이 14.1로 비교적 잘 일치하는 것으로 나타난 반면,  $N_{qu}(=14.0)$ 는 대면에서 제시된 값보다 2배 정도 크게 나타났으며,  $N_{du}(=3.7)$ 는 상대적으로 작게 나타난다.

한편, 각 피에조콘 계수의 오차 범위가 매우 넓어서

표 3. 피에조콘 계수  $N_{kr}$ ,  $N_{qu}$ ,  $N_{du}$

$N_{kr}$		$N_{qu}$		$N_{du}$	
$\bar{X}$	$r_{70}$	$\bar{X}$	$r_{70}$	$\bar{X}$	$r_{70}$
14.1	$\pm 11.3$	14.0	$\pm 10.6$	3.7	$\pm 2.7$

표 4. 피에조콘 계수  $N_{kr}$ ,  $N_{qu}$ ,  $N_{du}$  (균질한 지반에서의 결과만을 이용)

$N_{kr}$		$N_{qu}$		$N_{du}$	
$\bar{X}$	$r_{70}$	$\bar{X}$	$r_{70}$	$\bar{X}$	$r_{70}$
12.5	$\pm 8.3$	14.1	$\pm 10.7$	3.6	$\pm 2.9$

평균값을 모든 경우의 대표값으로 적용하기 어려울 수 있다. 이는 기준  $s_u$  측정 방법이나 지반 특성의 다양성 이외에도 지반의 불균질성에서 기인할 수 있다.  $q_T$ 와  $u_{bT}$  등의 CPTu 측정치가 지반 내에 부분적으로 존재하는 조립토층 등에 영향을 받을 수 있을 뿐만 아니라 기준 시험의 평면적 위치 및 심도에서의 차이에 따라 지반 특성이 크게 다를 수 있고 이에 따라 적절치 못한 피에조콘 계수가 결정될 수 있다. 따라서, 이러한 불균질성의 영향을 최소화하기 위하여 연구 수행 지반 중 균질한 지층에서의 시험 결과만을 이용하여 피에조콘 계수를 새로이 산정하고, 그 결과를 표 4에 정리하여 나타내었다. 여기서, 지반의 균질성을 정량적으로 규정하기 위해서 그림 2에 나타난 주상도로부터 비교적 균질한 지층으로 판단되는 부분에 대하여, 1m 심도 변화에서 측정  $q_T$  값의 편차가 30% 이내인 지반을 균질한 지반으로 설정하였다. 표 4를 보면,  $N_{qu}$ 나  $N_{du}$ 의 경우, 모든 결과를 이용하여 산정한 값과 차이를 보이지 않지만,  $N_{kr}$ 는 평균값 뿐 아니라 오차도 크게(약 18% 정도) 줄어드는 결과를 보이고 있다. 이는 지반의 불균질성의 영향을 배제함으로써 그만큼 결과의 신뢰성이 높아진 것으로 판단되고, 따라서 균질한 지반의 경우 보다 더 합리적이고 정확한 피에조콘 계수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.1 각 지역에 대한 피에조콘 계수

동일 지역의 지반은 동일한 지질 역사와 형성과정을 통하여 이루어지기 때문에 그 공학적 특성은 지역별로 유사하게 나타날 수 있다. 따라서, 피에조콘 계수도 지역별로 다르게 나타날 수 있으며, 비록 수행된 시험의 지반이 대상 지역 전체의 지반을 대표한다고 하기에 무리

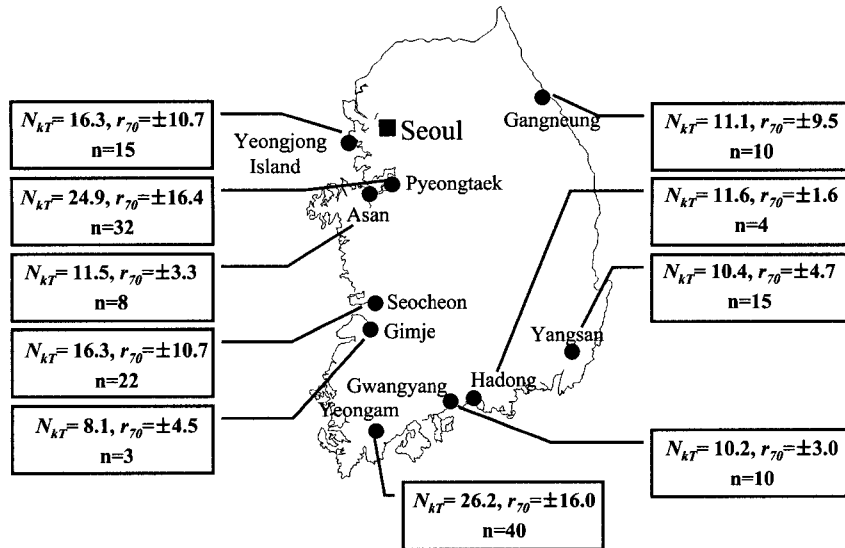


그림 4. 각 지역별 피에조콘 계수

가 있을 수 있지만, 그 지역의 대표적 연약지반을 대상으로 하였기 때문에 지역별 피에조콘 계수의 제시는 향후 활용적 측면에서도 큰 의미를 가질 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 각 지역별로 평균 피에조콘 계수( $N_{kT}$ ) 및 70% 신뢰도에서의 오차 범위, 그리고 시험 횟수를 그림 4와 같이 지도상에 나타내었다. 각 지역에 따라 선정되는 피에조콘 계수는 8.1에서 26.2 사이에 분포하며, 영호남의 남부지역은 11.6 이하의 작은 값을 갖는 반면에 중부지역은 11.9 이상의 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 그림 2에서 알 수 있듯이, 남부 지역의 경우 대부분 연약하고 균질한 지층이 상대적으로 두껍게 분포하는 반면에 중부 지역의 경우 균질한 지층의 두께가 상대적으로 얇은 것이 하나의 원인으로 추정된다. 이러한 층후 및 균질성의 차이는 근본적으로 지반 형성시의 조건 그리고 대상 지역의 지질학적인 역사와도 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되며, 남부 지역의 경우 대부분 대형 하천의 하류에 위치하는 반면에 중부 지역의 경우 작은 규모의 하천 하류 지역 또는 도서 지역에 위치함으로써 나타난 결과로 추론될 수도 있다.

#### 4.2 기준 비배수 전단강도의 측정 방법의 영향

경험적인 피에조콘 계수는 식 (2)~식 (4)에서 보는 바와 같이 기준  $s_u$ 의 측정 방법에 따라 다르게 산정되기 때문에 기준  $s_u$ 의 명확한 설정이 필요하다. 본 연구에서는 등방압밀 삼축압축시험,  $K_0$ 압밀 삼축압축시험, 그리고 이방압밀 삼축압축시험 등의 실내삼축시험과 현장 배인시험을 기준  $s_u$  측정방법으로 사용하였다. 표 5는 기준  $s_u$  측정 방법을 실내삼축시험과 현장배인시험으로 구분하여 피에조콘 계수의 변화를 나타낸 것이다. 표를 보면, 측정 방법에 따른 평균 피에조콘 계수(특히,  $N_{kT}$  및  $N_{qu}$ )와 70% 신뢰도에서의 오차 범위가 매우 유사하게 나타났다. 즉, 본 연구에서 수행된 결과의 경우, 기준  $s_u$  측정방법에 따른 영향이 매우 미소하다는 사실을 알 수 있다.

#### 4.3 흙의 공학적 특성 변화의 영향

앞서 설명한 바와 같이, 같은 기준 시험 방법을 적용한 균질한 지반이라 하더라도 지반의 공학적 특성이 다를 경우, 피에조콘 계수 또한 달라지게 되기 때문에 그 영향에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 실제 지반에의 원활한 적용을 위하여 지반의 대표적인 공학적 특성인  $I_p$  및  $OCR$ 과 피에조콘 계수와의 상관 관계를 분석함으로써 다양한 지반을 대변할 수 있는 피에조콘 계수에 대하여 살펴보았다.

먼저, 점성토의 공학적 특성 중 소성지수( $I_p$ )와 피에

표 5. 기준 비배수 전단강도 측정 방법에 따른 피에조콘 계수  $N_{kT}$ ,  $N_{qu}$ ,  $N_{du}$

시험방법	콘계수		$N_{qu}$		$N_{du}$	
	$\bar{X}$	$r_{70}$	$\bar{X}$	$r_{70}$	$\bar{X}$	$r_{70}$
실내삼축시험	12.1	$\pm 7.3$	13.8	$\pm 8.5$	3.0	$\pm 2.9$
현장배인시험	12.8	$\pm 8.9$	14.4	$\pm 12.1$	3.9	$\pm 2.9$

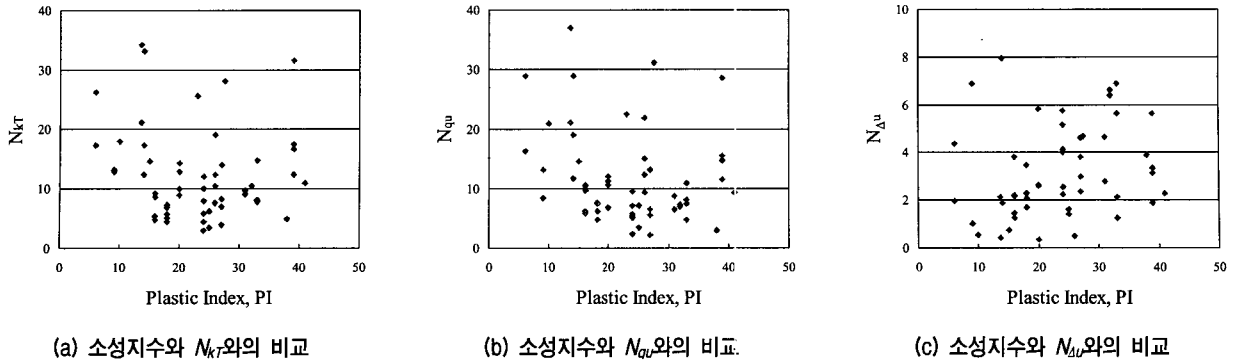


그림 5. 소성지수에 따른 피에조콘 계수의 변화

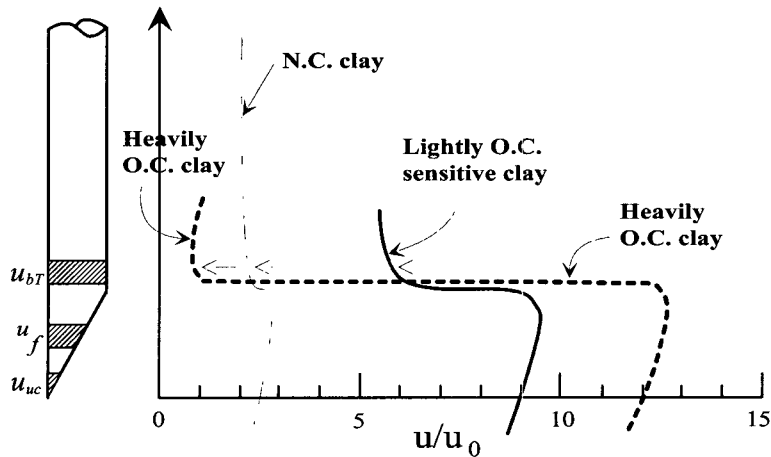


그림 6. 포화된 점성토에서의 간극수압 분포 (after Sully 등, 1988)

조콘 계수와 상관을 알아보았다. 그림 5는  $I_p$ 에 따른 피에조콘 계수의 변화를 나타낸 것으로,  $N_{kT}$ 를 비롯하여  $N_{qu}$ ,  $N_{du}$  등 세 피에조콘 계수 모두 소성지수의 변화에 따른 경향성이 뚜렷이 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이는  $I_p$ 가 피에조콘 계수에 미치는 영향에 대해서 뚜렷한 결과를 찾기가 어렵다고 주장한 La Rochelle 등(1988)의 연구 결과와 일치하는 반면, 3~50 정도의  $I_p$ 를 가진 지반에 대한 해석 결과로부터  $I_p$ 에 따라  $N_{kT}$ 가 증가한다는 Aas 등(1988)의 연구결과와는 다른 것이다.

소성지수 외에도 과압밀비(OCR)와 피에조콘 계수와 상관을 분석하였다. 표 6은 OCR에 따른  $N_{kT}$ ,  $N_{qu}$ ,  $N_{du}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 표를 보면,  $OCR < 1.5$ ,  $1.5 \leq OCR < 2.5$ , 그리고  $2.5 \leq OCR < 4$ 로 구분할 때 OCR의 증가와 함께  $N_{kT}$ ,  $N_{qu}$ 는 증가하는 반면  $N_{du}$ 는 감소하는 것으로 나타났으며,  $N_{kT}$ 보다는  $N_{qu}$ 가 더욱 커지는 결과를 보이고 있다. 여기서, OCR이 커짐에 따라  $N_{kT}$ 가 커진다는 사실은 Kjekstad 등(1982) 및 De Ruiter(1982)의 연구 내용과 일치하고 있다. 그리고, OCR에 따른  $N_{qu}$

의 증가 및  $N_{du}$ 의 감소, 그리고  $N_{qu}$ 가  $N_{kT}$ 보다 더욱 크게 증가하는 현상은 Campanella 등(1985)과 Sully 등(1988)이 포화된 점성토에서 피에조콘의 관입시 관입 간극수압의 분포에 대한 연구를 수행한 결과(그림 6)로부터 예측할 수 있다. 그림 6을 보면, 정규압밀 점성토의 경우에는 다공질 필터의 위치, 즉 콘의 선단부( $u_{uc}$ ), 원추면( $u$ ), 원추 뒷면( $u_{bt}$ ) 등과 관계없이 간극수압의 변화가 거의 없다. 하지만, OCR이 큰 지반에서의 피에조콘 관입시험의 경우, 다공질 필터의 위치에 따라서 관입 간극수압이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, 본 연구에서 사용한 콘과 같이 다공질 필터가 콘의 원추 뒷면에 위치하고 과압밀 정도가 큰 경우, OCR이 커짐에 따라  $u_{bt}$ 가 작아질 수 있다는(정수압보다 작아지는 경우도 발생) 사실을 알 수 있다. 이는 OCR이 큰 지반에서의 피에조콘 관입시 콘의 원추 뒷면이나 주면부에서 공동이 발생하고, 이러한 공동으로 인해 간극수압의 동수경사가 크게 발생하기 때문이다. 이러한 사실을 비롯하여 식 (2), (3), (4)로부터 판단해 볼 때, OCR이 커짐에 따라



표 6. OCR에 따른 피에조콘 계수  $N_{kt}$ ,  $N_{qu}$ ,  $N_{du}$

과압밀비	관계수		$N_{kt}$		$N_{qu}$		$N_{du}$	
	$X$	$r_{70}$	$X$	$r_{70}$	$X$	$r_{70}$	$X$	$r_{70}$
$OCR < 1.5$	9.7	$\pm 4.2$	9.3	$\pm 4.9$	4.0	$\pm 2.9$		
$1.5 \leq OCR < 2.5$	12.9	$\pm 8.2$	14.8	$\pm 9.2$	3.5	$\pm 3.0$		
$2.5 \leq OCR < 4$	14.3	$\pm 10.6$	19.4	$\pm 14.5$	3.2	$\pm 2.9$		

$N_{qu}$ 가 증가하는 반면  $N_{du}$ 가 감소한다는 사실과 함께 OCR이 커질수록  $N_{kt}$ 에 비해  $N_{qu}$ 가 더욱 크게 증가한다는 사실을 추정할 수 있다.

한편, 표 6을 보면 OCR이 커짐에 따라 오차 범위도 함께 증가하는 것으로 나타나 OCR이 클수록 그 신뢰성이 작아지는 것으로 분석된다. 특히,  $N_{du}$ 는 OCR과 관계없이 신뢰성이 상당히 떨어지고, OCR이 2.5보다 클 때에는 오차 범위가 가장 작은  $N_{kt}$ 에서도 피에조콘 계수의 오차 범위 내에서 비배수 전단강도가 7배 정도의 차이를 나타낼 수 있으므로 유의할 필요가 있다. 그러나, OCR이 1.5보다 작은 정규압밀 또는 약간 과압밀된 경우에는 응력이력을 제외한 지반 특성의 다양성의 영향에도 불구하고 신뢰성이 높은 결과를 주는 것으로 나타났다.

결론적으로 CPTu를 이용하여 점성토의 비배수 전단강도를 구하고자 할 경우에는 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반( $OCR < 2.5$ )의 경우에 한정하여  $N_{kt}$ 와  $N_{qu}$ 를 이용하고, OCR에 따라 구분하여 나타낸 표 6의 값들을 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

### 5. 결론 및 향후 연구 방향

피에조콘 관입시험을 이용하여 점성토 지반의 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 피에조콘 계수가 필요하다. 국내 10개 현장에서 총 46회의 CPTu 및 현장베인시험, 그리고 실내삼축시험을 수행한 결과를 바탕으로 국내 점성토 지반의 피에조콘 계수를 경험적인 방법을 이용하여 산정하고, 기준 비배수 전단강도 측정방법 및 여러 가지 공학적 특성 등과의 상관관계를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 국내의 다양한 지반 조건에 대하여 얻어진 피에조콘 계수들을 평균값으로 기존 연구 결과들과 비교할 때  $N_{kt}(=14.1)$ 는 비슷한 값을 나타냈으나,  $N_{qu}(=14.0)$ 와  $N_{du}(=3.7)$ 는 큰 차이를 나타냈으며, 신뢰도 관점에서

볼 때 오차 범위가 너무 넓기 때문에 바로 적용하기에는 무리가 따를 수 있다.

- (2) 피에조콘 계수( $N_{kt}$ ,  $N_{qu}$ )는 소성지수와 무관한 반면, 과압밀비(OCR)와 밀접한 관계가 있으며, OCR이 커짐에 따라 증가한다. 또한, 오차 범위에 따른 신뢰성은 OCR의 증가와 함께 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 CPTu를 통해 비배수 전단강도를 산정할 경우, 정규압밀 또는 약간 과압밀된 영역( $OCR < 2.5$ )에 한정하여  $N_{kt}$ 와  $N_{qu}$ 를 이용하고, OCR에 따라 구분하여 나타낸 표 6의 값들을 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.
- (3) 조사가 수행된 국내 대표적 연약지반 10개 지역의 피에조콘 지수  $N_{kt}$ 를 제시하였다. 지반 형성시 조건의 차이로 인하여 중부지역은 11.9 이상의 상대적으로 큰 값을 갖는 반면에 남부 지역은 11.6 이하의 작은 값을 갖는 것으로 나타났고, 이 값들은 향후 대상지역에 바로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. 이선재 (1997), 피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교.
2. Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Høeg, K. (1986), "Use of in situ tests for foundation design on clay," Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, pp.1~30, ASCE.
3. Baligh, M. M. (1975), "Theory of deep site static cone penetration resistance," Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass., Publication No.R75~56.
4. Campanella, R. G., Gillespie, D. G. and Robertson, P. K. (1982), "Pore pressure during cone penetration testing," Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol.2, pp.507~512.
5. Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespie, D. G. and Greig, J. (1985), "Recent developments in insitu testing of soils," Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol.2, pp.849~854.
6. Chen, B. S. and Mayne, P. W. (1993), "Piezocone evaluation of undrained shear strength in clays," Proceedings of 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, pp.91~98.
7. De Ruiter, J. (1982), "The static cone penetration test, State-of-the-Art Report," Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol.2, pp.389~405.
8. Kjekstad, O., Lunne, T. and Clausen, C. J. F. (1978), "Comparison between insitu cone resistance and laboratory strength for overconsolidated North Sea clays," Marine Geotechnolgy, Vol.3, No.1, pp.23~36.
9. La Rochelle, P., Zedbi, P. M., Leroueil, S., Tavenas, F. and Virely, D. (1988), "Piezocone tests in sensitive clays of eastern Canada", Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing,

ISOPT-1, Orlando, Balkema Pub., pp.831~841.

10. Lunne, T., Christoffersen, H. P. and Tjelta, T. I. (1985), "Engineering use of piezocone data in North Sea Clays," Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sanfrancisco, Vol.2, pp.907~912.
11. Schmertmann, J. H. (1978), "Guidelines for cone penetration test, Performance and Design," Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, Washington, July, 145p.
12. Sully, J. P., Campanella, R. G. and Robertson, P. K. (1988), "Overconsolidation ratio of clays from penetration pore water pressures," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.114, No.2, pp.209~215.
13. Teh, C. I. (1987), An analytical study of the cone penetration test, D. Phil. thesis, Oxford University.
14. Teh, C. I. and Housby, G. T. (1991), "An analytical study of the cone penetration test in clay," Geotechnique, No.41, Vol.1, pp.17~34.
15. Vesić, A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil masses," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, SM3, pp.265~290.

(접수일자 2001. 4. 3, 심사완료일 2001. 12. 14)