

## 피에조 콘 시험을 이용한 점성토의 압밀계수 추정

### Estimating the Coefficient of Consolidation of Marine Clay Using Piezocone Penetration Tests

박 용 원\*<sup>1</sup> Park, Yong-Won

구 남 실\*<sup>2</sup> Gu, Nam-Sil

이 상 익\*<sup>3</sup> Lee, Sang-Ik

#### Abstract

The coefficient of consolidation of clay deposit is one of the most important properties in the design of ground improvement. The in-situ value of  $c_h$  is generally estimated by pore pressure dissipation using piezocone. Many researchers have suggested theoretical formula for its estimation. This study attempts to find out the validity of the existing theoretical formula in Korea and to find out the characteristics of  $c_h$  related to the mechanical properties of clay. Piezocone tests and laboratory tests were performed at the site of pilot project of ground improvement at Yangsan-Mulgeum, Gyeongnam. Comparison of the estimated values of  $c_h$  using piezocone tests results and those from laboratory consolidation tests are carried out. Results show that Torstensson(cylindrical cavity theory) and Teh & Houlsby solutions derive similar values of  $c_h$ . And  $c_h$  from oedometer test shows values similar to the above two methods. The value from either of the above two methods[Torstensson(cylindrical) or Teh & Houlsby] is recommended to be used as  $c_h$ .

#### 요 지

압밀계수는 지반과잉간극수압의 소산속도를 지배하므로 연약지반 개량공법 설계에 적용되는 매우 중요한 특성치의 하나로서 원위치의 압밀계수는 피에조 콘 소산시험을 통하여 추정된다. 간극수압 소산시험으로 추정되는 압밀계수 추정에 적용되는 기존의 이론해 들의 국내 해성점토 지반 적용성을 검토하고 점토 지반의 특성에 따른 압밀계수의 변화 특성을 파악하여 원위치 압밀계수에 대한 합리적 추정에 적합한 이론해를 선정하는 것이 이 연구의 목적이다. 이 연구에서는 경남 양산물금 지역의 해성 점성토층을 대상으로 피에조 콘 소산시험과 불교란 시료에 대한 실내시험(Rowe cell 등)을 실시하고 시험결과를 이론해에서 얻어진 수평압밀계수와 표준압밀시험(oedometer test), Rowe cell 시험결과와 비교하였다. 또한 점성토의 여러 지반 특성치(선형압밀압력 등)와 압밀계수의 관계를 고찰하여 합리적인 이론해 선정을 위한 기준을 마련하고자 하였다. 연구결과 Torstensson(원통형공동이론)해와 Teh & Houlsby의 해가 매우 유사한 값을 보이며, 표준압밀시험으로 추정한 수평압밀계수는 단계별 모두 Torstensson(원통형) 또는 Teh & Houlsby의 이론해와 유사하게 나타났다. 따라서, 피에조 콘 시험으로 수평압밀계수를 구하는 방법으로서 위의 이론해 들[Torstensson(원통형) or Teh & Houlsby]에 의한 산정치를 취하도록 추천되었다.

**Keywords :** Coefficient of consolidation, Dissipation test, Piezocone test

\*1 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myohgji Univ.)

\*2 정회원, 명지대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Myohgji Univ., Gooo@koland.co.kr)

\*3 정회원, 명지대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Myohgji Univ.)

## 1. 서론

압밀계수는 투수성이 낮은 포화 점토지반에서 발생하는 과잉간극수압의 소산속도를 지배한다. 간극수의 배수는 수평배수와 연직배수로서 두 경우를 비교할 때 압밀침하의 최종 크기는 거의 동일하나 침하속도는 압밀계수의 크기에 따라 달라지므로 압밀계수의 이방성은 압밀 속도에 대단히 중요한 영향을 미친다. 연직배수공법에 의한 지반개량에서는 수평방사방향으로 대부분의 배수가 이루어지므로 수평압밀계수가 적용된다. 원위치의 수평압밀계수를 추정하는 방법은 여러 가지가 있으나 현재 주로 사용되는 방법은 피에조 콘을 이용한 간극수압 소산시험법이다. 피에조 콘 소산시험 결과에서 정규화 과잉간극수압 소산곡선이 얻어지며 이 곡선을 이용하여 압밀계수를 추정할 때 강성지수에 따라 산정된 시간계수, 소산도, 초기 과잉간극수압의 크기 및 분포에 따른 소산시간은 압밀계수의 크기를 좌우하며, 이 중에서 강성지수와 초기 과잉간극수압의 크기 및 분포는 압밀계수 값에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 또한, 압밀계수 추정에 대한 모든 이론해는 정규압밀 또는 경과압밀(OCR<4)인 지반에서만 적용할 수 있도록 제안(Baligh & Levadoux, 1980)되었으므로 국내 점성토 지반은 과압밀비가 대부분 이 범위의 값을 가지고 있어서 지반조건에 따른 별다른 제약 없이 기존 이론해를 사용하여 압밀계수를 추정하고 있다. 이 연구의 대상 지반은 경남 양산물금 지역에 위치한 연직배수공법 시험시공 실시 지역이다. 압밀진행으로 비배수전단강도나 선행압밀압력 등이 증가됨에 따른 지반특성 변화가 압밀계수 추정 결과에 미치는 효과를 연구하기 위하여 피에조 콘 소산 시험과 동일 위치에서 채취한 불교란 시료로 실내압밀 시험을 실시하였다. 이 결과로부터 얻어진 점토의 수평 압밀계수와 기존 이론해인 Torstensson(1975, 1977), Levadoux & Baligh(1986), Teh & Houlsby(1991)의 방법으로 추정된 수평압밀계수를 비교하여 국내 해성점토 지반에 가장 적합한 이론해를 찾고, 이론해로 추정한 수평압밀계수와 실내시험 결과치의 관계를 고찰하였다.

## 2. 초기 과잉간극수압 분포

지반에 콘을 관입하면 콘 주변에는 공동이 형성되며, 형성된 공동의 형태는 콘 선단부에서 멀리 떨어진 곳에서는 원통형 공동, 선단부 주변에서는 구형과 원통형의

혼합된 공동이 형성된다. 그리고 공동이 형성될 때 콘 주변 흙 요소는 응력의 변화로 과잉간극수압이 발생하게 된다. 이때 발생하는 과잉간극수압은 식 (1)과 같이 팔면체 연직응력(octahedral normal stress,  $\Delta\sigma_{oct}$ )에 의한 과잉간극수압( $\Delta u_{oct}$ )과 팔면체 전단응력(octahedral shear stress,  $\Delta\tau_{oct}$ )에 의한 과잉간극수압( $\Delta u_{shear}$ )으로 구분할 수 있다. 과잉간극수압 발생량은 수직응력에 의한 과잉간극수압이 대부분을 차지하고, 나머지 전단응력에 의한 과잉간극수압의 비율은 약 20% 미만인 것으로 알려져 있다(Baligh, 1986). 팔면체 수직응력에 의한 과잉간극수압은 과압밀비와 관계없이 항상 양의 값이며, 팔면체 전단응력에 의한 과잉간극수압은 전단에 의한 체적변화(팽창 또는 압축)에 따라 양 또는 부의 값을 가진다. 이론적 과잉간극수압 산정법으로는 공동팽창이론(Vesic, 1972; Torstensson, 1977)이 가장 널리 사용되고 있으며, 식 (1)~(5)를 이용하여 소성영역에서 구형 또는 원통형 공동 형태의 과잉간극수압을 산정하고 있다. 식 (1)은 전체, (2), (3)은 구형공동, (4), (5)는 원통형 공동에서 과잉간극수압을 산정하는 식을 나타내며, 전체 과잉간극수압은 수직응력과 전단응력에 의한 산정량을 합한 값이 된다. 이 외에도 Burns & Mayne(1998)은 응력경로와 수정 Cam-clay 모델을 조합하여  $\Delta u_{shear}$ 를 산정하는 방법을 식 (6)과 같이 제안하였다. 제안된 식들을 보면 초기 과잉간극수압 분포와 크기가 강성지수와 비배수 전단강도 등의 함수이므로 피에조 콘 해석시 이러한 계수들을 결정할 때 포함되는 불확실성은 과잉간극수압 추정 결과에 영향을 미치게 된다.

$$\Delta u = \Delta u_{oct} + \Delta u_{shear} = \Delta\sigma_{oct} + \alpha_f \Delta\tau_{oct} \quad (1)$$

$$\Delta u_{oct} = \frac{4}{3} s_u \ln(I_r) \quad (\text{구형공동}) \quad (2)$$

$$\Delta u_{shear} = 0.943\alpha_f s_u \quad (\text{구형공동}) \quad (3)$$

$$\Delta u_{oct} = s_u \ln(I_r) \quad (\text{원통형공동}) \quad (4)$$

$$\Delta u_{shear} = 0.817\alpha_f s_u \quad (\text{원통형공동}) \quad (5)$$

$$\Delta u_{shear} = \sigma'_{v0} \left[ 1 - \left( \frac{OCR}{2} \right)^4 \right] \quad (6)$$

여기서,  $\Delta u$  ; 소성영역에서 발생하는 과잉간극수압,  $\Delta u_{oct}$  ; 팔면체 수직응력에 의하여 발생하는 과잉간극수압,  $\Delta u_{shear}$  ; 팔면체 전단응력에 의하여 발생하는 과잉간극수압,  $s_u$  ; 비배수전단강도,  $I_r$  ; 강성지수( $G/s_u$ ),  $G$  ; 전단탄성계수,  $\alpha_f$  ; Henkel의 파괴시 간극수압계수 [ $=0.707(3 A_f - 1)$ ,  $A_f$  ; Skempton의 파괴시 간극수압계

수,  $A = (1 - C_s/C_c)$ ,  $C_s$ ; 팽창지수,  $C_c$ ; 압축지수를 나타낸다.

### 3. 압밀계수 추정법

압밀계수를 추정하기 위하여 Torstensson(1975, 1977), Levadoux & Baligh(1986), Teh & Houlsby(1991) 등의 연구자들이 수치해석 기법으로 소산곡선을 모사하여 정규화된 소산도와 시간계수의 관계를 아래와 같이 제안하였다.

#### 3.1 Torstensson(1975, 1977)

지반을 등방응력 분포로 가정하고 탄성-소성재료에 발생하는 1차원 비배수 공동(구형 또는 원통형) 확장을 고려하여 초기 과잉간극수압을 가정한 후 Terzaghi-Rendulic의 선형-비혼합 압밀이론을 적용하여 유한차분법으로 구형공동과 원통형 공동 형태의 간극수압 소산과정을 각각 모사한 방법이며, 계측 소산곡선과 예측 소산곡선이 50% 소산도에서 만나는 경우를 가정하여 식 (7)과 같이 압밀계수를 추정할 것을 제안 하였다. 그러나 Torstensson의 해를 사용하기 위해서는 먼저 지반의 강성지수와 공동의 등가반경 및 공동의 형태를 선정하여야 한다.

$$c = \frac{T_{50}}{t_{50}} R^2 \quad (7)$$

여기서,  $c$ ; 압밀계수,  $T_{50}$ ; 압밀도 50%일 때의 시간계수,  $t_{50}$ ; 압밀도 50%까지의 소요시간,  $R$ ; 공동 등가반경이다.

#### 3.2 Baligh & Levadoux(1980), Levadoux & Baligh (1986)

변형률 경로법(strain path method)을 사용하여 초기 과잉간극수압 분포를 가정하고 선형-비혼합, 비선형-혼합 압밀이론을 적용하여 유한요소법을 이용, 간극수압 소산과정을 모사하여 식 (8)과 같이 압밀계수를 추정할 것을

제안하였다. 강성지수가 500인 Boston Blue Clay를 대상으로 제안되었으므로 강성지수가 이보다 작은 국내지반에 적용할 경우 압밀계수를 다소 과대 평가할 수 있다(김영상 등, 1999). 또한, 이들은 여러 연구자들이 제시한 이론에는 모두 정규압밀 또는 경과압밀( $OCR < 4$ )인 지반에 대하여만 적용할 수 있다고 하였다. 그리고 Levadoux & Baligh(1986)가 변형률 경로법을 사용하여 추정한 초기 간극수압 분포에 대하여 다공질 필터가 원추선단, 원추면, 원추 뒷면 및 마찰 슬리브 뒷면에 위치한 각각의 경우에 대하여 1980년도의 연구와 마찬가지로 시간계수가 다른 식 (8)과 같은 압밀계수 추정방법을 제안하였다.

$$c_h = \frac{T r_0^2}{t} \quad (8)$$

여기서,  $c_h$ ; 수평 압밀계수,  $T$ ; 시간계수,  $t$ ; 압밀 소요시간,  $r_0$ ; 콘의 반경이다.

#### 3.3 Teh & Houlsby(1991)

변형률 경로법(strain path method)을 기본으로 대변형 유한요소법을 사용하여 초기 과잉간극수압 분포를 가정하였고, 이를 초기 조건으로 Terzaghi-Rendulic의 비혼합 압밀이론을 유한차분법으로 간극수압 측정 위치와 지반의 강성지수( $I_r$ )에 따라 압밀도-시간계수 관계를 제안하였다.

$$c_h = \frac{T^* r_0^2}{t} \sqrt{I_r} \quad (9)$$

여기서,  $c_h$ ; 수평 압밀계수,  $T^*$ ; 수정된 시간계수,  $t$ ; 압밀 소요시간,  $r_0$ ; 콘의 반경,  $I_r$ ; 강성지수이다.

#### 3.4 압밀계수 추정에 사용되는 시간계수

위에서 제시한 추정법에 사용되는 시간계수는 표 1과 같다.

표 1. 압밀계수 추정 방법별 시간계수

구분 소산도	Torstensson(1975, 1977)						Baligh & Levadoux (1980)	Levadoux & Baligh (1986)	Teh & Houlsby (1991)
	구형공동팽창이론			원통형공동팽창이론					
	$I_r=70$	$I_r=100$	$I_r=130$	$I_r=70$	$I_r=100$	$I_r=130$			
0.5	0.44	0.58	0.69	2.19	2.90	3.55	3.65	5.6	0.245

표 2. 원지반(단계 I) 토질시험결과

구분	$w_n(\%)$	$G_s$	$LL(\%)$	$PI(\%)$	#200번체 통과율(%)	$q_u(\%)$	$s_u(UU)$ ( $kg/cm^2$ )	USCS	OCR
결과	31.5~78.7	2.56~2.73	28.8~55.5	10~35	15.0~99.8	0.04~0.95	0.07~0.47	SM, CL, CH	0.1~1.71

#### 4. 현장 및 실내 시험

##### 4.1 지반 조건

연구대상 지반은 남해안의 양산물굽에 있으며 연직배수공법(팩드레인, 메나드 드레인, 페이퍼 드레인, 프리로딩)으로 지반개량공사를 수행하고 있는 해성점토 지반으로서 상부에 매립층, 하부에 점성토층 및 모래 섞인 자갈, 풍화암층으로 구성되어 있고, 점성토층은 해성 퇴적층으로서 매우 연약한 상태로서 색조는 짙은 암회색이며, 확인된 층후는 18.8~30m를 나타내고 있다. 그리고 실내시험은 개량공법 시공전(단계 I), 공법시공 5개월 후의 압밀 진행중(단계 II), 90%압밀 진행 후(단계 III)의 순으로 실시하였으며, 공법 시공전의 원지반 토질시험 결과는 표 2와 같다.

##### 4.2 피에조 콘 관입시험

피에조 콘 조사는 네덜란드 Fugro 사의 장비로 선단 면적  $10cm^2$ ,  $15cm^2$ , 슬리브 단면적  $150cm^2$ ,  $200cm^2$ , 선단각  $60^\circ$ , 로드셀 용량 50kN, 75kN인 2종류의 콘을 사용하여 ASTM(1979)에 따라 실시하였으며, 피에조 콘으로 선단 저항력( $q_c$ ), 주변마찰력( $f_s$ ) 및 간극수압( $\Delta u$ )을 측정하였다.

##### 4.3 피에조 콘 소산시험

피에조 콘 관입시험 중에는 콘 주변에 과잉간극수압

이 발생하며 임의 깊이에서 관입을 일시 중지하면 발생된 과잉간극수압이 소산되어 시간이 경과할수록 정수압에 수렴하게 된다. 이 결과를 이용하여 식 (10)으로 과잉간극수압을 시간(대수)에 대하여 정규화하여 수평 압밀계수를 추정한다.

$$u_i = \frac{u(t) - u_o}{u_i - u_o} = \frac{\Delta u(t)}{\Delta u_i} \quad (10)$$

여기서,  $u_i$  ; 정규화 과잉간극수압,  $u(t)$  ; 관입을 일시 정지한 후 임의 시간 t에서 측정된 간극수압,  $u_i$  ; 관입을 정지한 후 소산시험을 시작하는 시점(t=0)에서 측정된 간극수압,  $u_o$  ; 정수압이다.

##### 4.4 Rowe cell 압밀시험

Rowe cell 시험기는 현장 지반상태(연직방향, 수평방향 및 드레인 방향)에 따라 배수가 가능하고 셀압과 배압으로 시료를 포화 또는 압밀시키며, 자유변형률 또는 등변형률 방식으로 압밀 압력을 자유롭게 조절하여 시험을 실시한다. 내경 75mm 시험기를 사용하여 자유변형(free-strain) 방식에 외향 방사형으로 배수를 허용하여 시험을 실시하였으며, 연직응력은  $0.08 \sim 5.12kg/cm^2$ , 압력 비율 ( $\Delta p/p$ )은 1의 관계를 유지하였다. 시험결과에 의하여 수평 압밀계수는 식 (11)과 같이 산정하였다.

$$c_h = \frac{0.13 T_{ro} D^2}{t} \quad (11)$$

여기서,  $T_{ro}$  ; 시간계수,  $D$  ; 시료직경,  $t$  ; 과잉간극수압 소산시간이다.

##### 4.5 시험실시 수량

이 연구에서는 보링조사 및 피에조 콘 시험을 비롯하여 물성시험 등 실내시험을 실시하였으며, 조사 및 시험

표 3. 콘 관입시험 수량

공법명	단위	단계 I	단계 II-1	단계 II-2	단계 III
Pack Drain	회	1	1	1	1
Menard Drain	"	1	1	1	1
Paper Drain	"	1	1	1	1
Preloading	"	1	1	1	1

표 4. 조사 및 시험수량

구분	단위	보링조사	피에조콘 시험	물성시험	압밀시험	일축압축시험	삼축압축시험(UU)
수량	회	16	16	16	16	16	16

수량은 표 4에 나타난 바와 같다.

## 5. 피에조 콘 시험 결과 분석

기존 이론해에 의한 단계별 수평압밀계수와 Rowe cell 및 표준압밀시험에서 추정된 수평압밀계수와 비교하여 국내지반에서 간극수압 소산시험으로 압밀계수 추정시 가장 적합한 이론해를 검토하였다. 또한 기존 이론해에서 얻어진 압밀계수와 지반의 특성도 함께 고찰하였다.

### 5.1 시험결과

표 5는 위치별로 현장시험 및 실내시험결과를 나타낸 것으로 수평압밀계수( $c_h$ )에서 A~D방법은 소산도 50%의 결과이다. A는 Torstensson(구형공동 팽창이론), B는 Torstensson(원통형 공동팽창이론), C는 Levadoux & Baligh, D는 Teh & Houlsby, E는 Rowe cell, F는 표준압밀시험에 의한 추정치( $1.5 c_h$ )를 나타낸다.

### 5.2 지반 특성 분석

#### 5.2.1 수평압밀계수-소산도

(1) 이론해로 추정된 수평압밀계수

이 연구에서는 소산도 50%를 선정하여 기존에 제안된 이론해(Torstensson 등)와 수평압밀계수를 비교·분

석하였으며, 압밀계수를 추정하는 데 있어 시간계수는 남해안 지역의 연구 결과(서수봉 등, 2000)인 강성지수 33에 적합한 값을 산정하여 적용하였다. 그림 1에서 수평압밀계수는 이론해별로 다소 다르게 추정되었으며, 단계 I, II, III 모두 Torstensson(구형 공동팽창) 해가 가장 작게, Levadoux & Baligh 해가 가장 크게 추정되었으며, 단계 III에서는 단계 I보다 지반의 압밀로 선행압밀압력이 약간 증가( $0.9\text{kg/cm}^2 \rightarrow 2.0\text{kg/cm}^2$ )되었으나 이론해 별로 압밀계수의 분포는 단계 I과 거의 유사하여 미세한 양의 선행압밀압력 증가는 압밀계수 변화에 큰 영향이 없음을 보였다. 이는 표 5에 나타난 바와 같이 수평압밀계수는 단계 I에 비하여 단계 III에서의 감소율이 각 이론해 별로 매우 유사(약 89~95%)하기 때문이다. 또한 단계 I에서 수평압밀계수는 이미 알려진 바와 같이 원통형 공동팽창의 Torstensson 해와 강성지수를 고려한 Teh & Houlsby 해가 유사하게 나타났으며, 단계 III에서도 선행압밀압력이 약간 증가하였으나 경향은 동일하게 나타났다. 이와같이 단계 I, II, III 모두 두 이론으로 추정된 수평압밀계수가 유사하게 나타나는 원인은 Torstensson(원통형 공동팽창)이 제안한 시간계수(T)와 Teh & Houlsby가 제안한 시간계수 $[(T)^{1/2}]$ 가 서로 유사하기 때문이다.

(2) Rowe cell 시험으로 산정한 수평압밀계수

그림 1에서 Rowe Cell 압밀시험으로 얻어진 수평압밀계수는 단계 I 및 단계 II에서 Levadoux & Baligh 해와

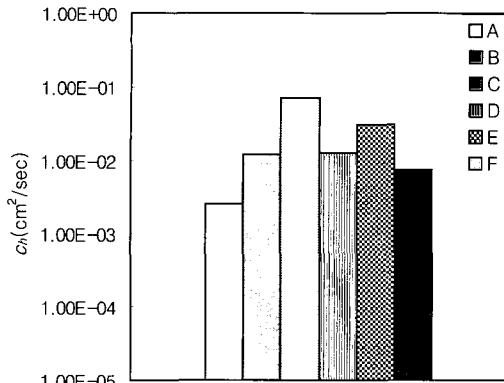
표 5. 현장 및 실내시험결과

위치	시험 단계	소산 시험 심도 (m)	점성 토층 깊이 (m)	$c_h$ (cm <sup>2</sup> /sec)						$c_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	OCR	$R_f$ (%)	$s_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
				A	B	C	D	E	F				
시험 시공 지반	단계 I	25.0	25	$2.58 \times 10^{-3}$	$1.21 \times 10^{-2}$	$7.16 \times 10^{-2}$	$1.25 \times 10^{-2}$	$3.10 \times 10^{-2}$	$7.54 \times 10^{-3}$	$3.51 \times 10^{-3}$	0.10	1.65	0.224
	단계 II	19.0	25	$3.73 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-3}$	$8.33 \times 10^{-3}$	$1.81 \times 10^{-3}$	$5.09 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$	$9.64 \times 10^{-4}$	0.65	1.00	0.425
26.6		25	$1.16 \times 10^{-3}$	$5.47 \times 10^{-3}$	$2.16 \times 10^{-2}$	$5.66 \times 10^{-3}$	$1.21 \times 10^{-2}$	$6.03 \times 10^{-3}$	$3.49 \times 10^{-3}$	0.71	0.85		
단계 III	20.4	25	$1.75 \times 10^{-4}$	$8.20 \times 10^{-4}$	$3.38 \times 10^{-3}$	$8.49 \times 10^{-4}$	$8.36 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-3}$	$8.86 \times 10^{-4}$	0.64	1.22	0.538	

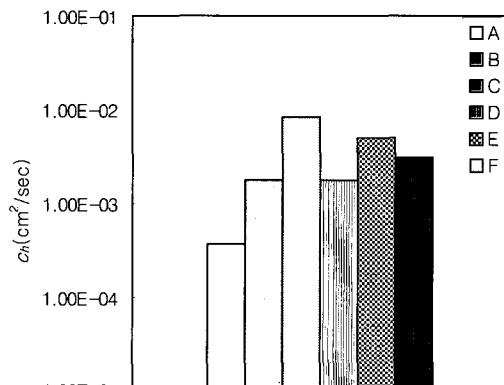
시험 단계	$p'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$e_0$	$C_c$	w (%)	간극수압 소산시험 위치에서 피에조 콘에 의하여 실측된 과잉간극수압 (kg/cm <sup>2</sup> )	구형공동팽창 이론으로 산정한 과잉간극수압 ( $\Delta u$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )			원통형공동팽창 이론으로 산정한 과잉간극수압 ( $\Delta u$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )		
						계	팔면체 수직응력	팔면체 전단응력	계	팔면체 수직응력	팔면체 전단응력
단계 I	0.880	1.529	0.459	52.50	3.61	1.35	1.06	0.30	1.05	0.79	0.26
단계 II	1.158	1.444	0.498	48.00	3.14	2.33	1.76	0.57	1.81	1.32	0.49
		1.460	0.438	48.92	3.86						
단계 III	1.988	1.220	0.349	44.28	4.27	3.0	2.29	0.72	2.34	1.72	0.62

각주 : 표에 나타난 결과는 평균값이고,  $s_u$ 는 과잉간극수압에 의하여 추정된 결과를 나타낸다. 구형공동이나 원통형공동에 의한 과잉간극수압 값 계산에서 정규압밀 점성토 지반이므로  $A_f$  값은 1.0을 적용하였다. 그리고  $c_v$ 는 선행압밀압력 전후의 평균치를 나타낸다.

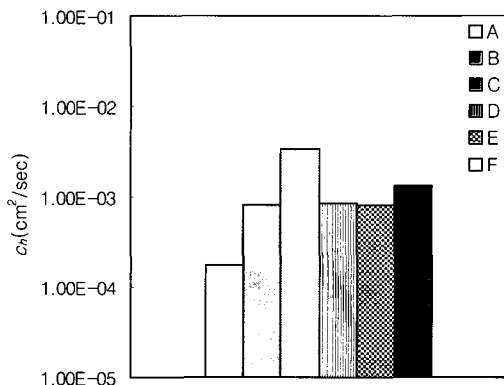
Torstensson(원통형) 또는 Teh & Houlsby 해의 사이에 나타났고, 단계 III에서는 Torstensson(원통형) 또는 Teh & Houlsby 해와 동일한 경향을 보였다. 단계 III에서는 단계 I에 비하여 압밀계수 감소율이 약 97%로 이론해에서 나타난 감소율(약 89~95%)보다 약간 크게 나타났다.



(a) 단계 I



(b) 단계 II



(c) 단계 III

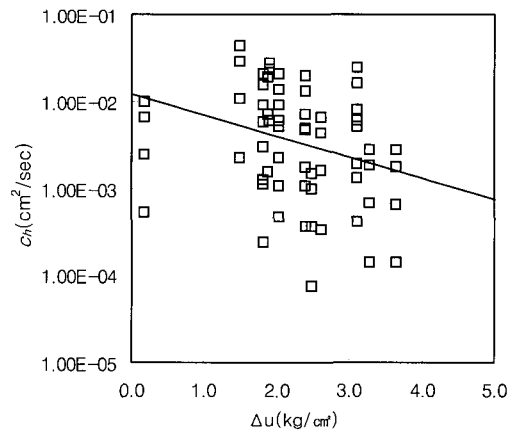
그림 1. 50% 소산도를 기준으로 할 때의 압밀계수

(3) Oedometer로 구한 수평압밀계수

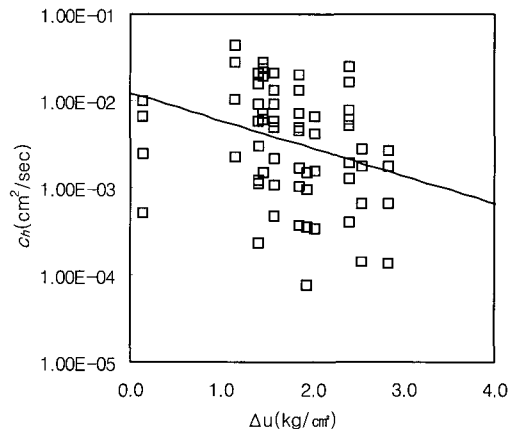
그림 1에서 Oedometer로부터 구한 수평압밀계수는 단계 I, II, III 모두 Torstensson(원통형) 또는 Teh & Houlsby 해와 유사하게 나타났다. 단계 III에서는 단계 I에 비하여 압밀계수 감소율이 이론해에 비하면 비교적 작게(약 82%) 나타났다. 이는 기존 이론해로 얻어진 수평압밀계수에 비하여 선행압밀압력 증가 등 지반특성 변화에 영향을 작게 받음을 알 수 있다. 여기서, Oedometer로 구한 수평압밀계수는 균질한 지층의 경우 수평압밀계수/연직압밀계수의 비가  $1.2 \pm 0.3$ 으로 제안한 Baligh & Levadoux(1980) 이론을 적용한 것이다.

5.2.2 공동팽창 이론의 과잉간극수압과  $c_h$ 의 관계

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 이 지반은 미압밀지반으로서 공동팽창이론에 의하여 산정된 과잉간극수압



(a) 구형 공동팽창



(b) 원통형 공동팽창

그림 2. 공동팽창의 과잉간극수압 vs.  $c_h$

각주 : 수평압밀계수는 Torstensson(구형공동 팽창이론), Torstensson(원통형공동 팽창이론), Baligh & Levadoux, Levadoux & Baligh 및 Teh & Houlsby의 해를 통합하여 나타냈다.

과  $c_h$ 의 관계에서는 과잉간극수압이 증가하면서 수평 압밀계수는 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 현상은 구형공동 팽창이론과 원통형 공동팽창이론 모두 과잉 간극수압이 증가하는 경향은 유사하며, 일반적으로 알려진 바와는 다르게 과잉간극수압이 증가하면서 압밀 계수가 감소하여 나타난 현상은 비배수 전단강도의 증가에 주로 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 표 5에 나타낸 바와 같이 이론적으로 산정된 과잉간극수압 크기는 구형공동 팽창이론이 원통형 공동팽창이론 보다 다소 크게 산정되어 구형공동의 결과는 피에조 콘으로 소산시험 위치와 동일지점에서 측정된 과잉간극수압에 접근하는 양상을 보이고 있다. 또한, 구형과 원통형 공동팽창이론의 팔면체 전단응력에서 발생된 과잉간극수압은 각 공동 형식별 산정된 총량의 약 20~30% 정도에 불과하며, 나머지 약 70~80%는 팔면체 수직응력에 의하여 산정된 과잉간극수압이다. 이와 같이, 콘 관입시 발생하는 과잉간극수압은 구형공동 팽창이론에서 산정한 이론적인 과잉간극수압이 대부분을 차지하고 있어 콘 관입시 공동은 구형에 가까운 형태를 보이고 있음을 추정할 수 있다. 따라서, 피에조 콘 관입시의 공동의 형태는 수평압밀계수 추정결과에서는 원통형 이론과 과잉간극수압 추정결과에서는 구형 공동이론이 유사하게 나타나 콘 관입에 따른 공동의 형태를 정확하게 나타내기 어려우므로 국내 지반에 적용할 수 있는 공동팽창이론을 정립하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

### 5.2.3 수평압밀계수 vs. 지반특성

그림 3을 통하여 수평압밀계수와 지반특성과의 관계를 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (a) 동일한 위치 및 심도에서의 표준압밀시험으로 얻어진 연직압밀계수와 피에조 콘에 의한  $c_h$ 를 비교한 결과, 뚜렷한 연관성은 보이지 않았으며,
- (b) 콘 주변 마찰력과 선단저항력의 비로 나타내는 피에조 콘 주변 마찰비와 이론해를 회귀 분석한 결과  $R_f$ 가 약 1.0 이상일 때 부터  $c_h$ 와  $R_f$ 가 대략적으로 비례 관계를 나타내고 있어, 수평압밀계수와 마찰비와의 연구에서 서로 연관성이 있다고 제안한 Ramiro Gomez Escoubes(1995)의 연구결과와 유사한 양상을 나타내고 있다.
- (c) 한편, 비배수 전단강도와  $c_h$ 관계를 분석한 결과 시험시공 지반의 단계별 성토로 압밀이 이루어짐에 따

- 라 강도가 증가하여  $c_h$ 는 감소하는 경향을 나타냈으나, 상관계수( $R^2$ )는 0.13으로 매우 낮게 나타났고,
- (d) 비배수 전단강도와 유사한 선형압밀압력과  $c_h$ 를 비교한 결과는 시험시공 지반의 압밀이 이루어짐에 따라 선형압밀압력은 증가하였고, 수평압밀계수는 감소하는 경향을 나타냈다. 단계별 성토로 인한 원지반 선형압밀압력의 증가는 지반강도 변화를 평가하는 한 요소라고 할 수 있으나 상관계수( $R^2$ )는 비배수 전단강도와  $c_h$ 를 비교한 부분과 비슷하게 나타나 수평압밀계수는 비배수 전단강도 및 선형압밀압력과 유사한 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다.
- (e) 또다른 지반강도를 평가하는 요소인 콘 선단저항치( $q_d$ )에서 관입간극수압( $u_2$ )을 제외한 유효응력 개념과의 분석결과는  $q_f u_2$ 값의 증·감에 따라 수평압밀계수도 같은 변화를 보여 이를 다음과 같은 지수함수 관계식으로 나타낼 수 있으며, 상관계수( $R^2$ )는 0.4386~0.5027로 비교적 작게 나타났다.

$$\text{Torstensson(구형 공동), } c_h = 0.0035 e^{-4.10(q_f - u_2)} \quad (R^2 : 0.4386) \quad (12)$$

$$\text{Torstensson(원통형 공동), } c_h = 0.0165 e^{-4.10(q_f - u_2)} \quad (R^2 : 0.4386) \quad (13)$$

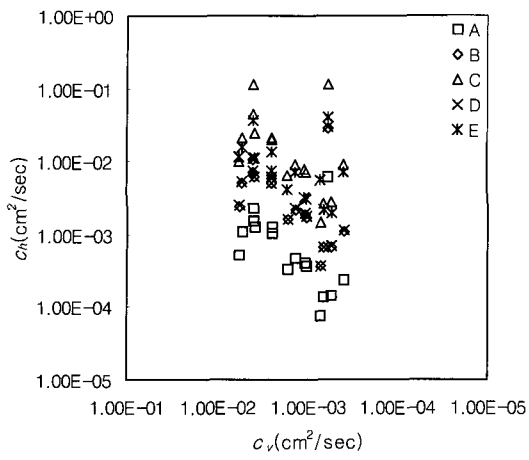
$$\text{Levadoux \& Baligh, } c_h = 0.1016 e^{-4.75(q_f - u_2)} \quad (R^2 : 0.5027) \quad (14)$$

$$\text{Teh \& Houlsby, } c_h = 0.0171 e^{-4.10(q_f - u_2)} \quad (R^2 : 0.4386) \quad (15)$$

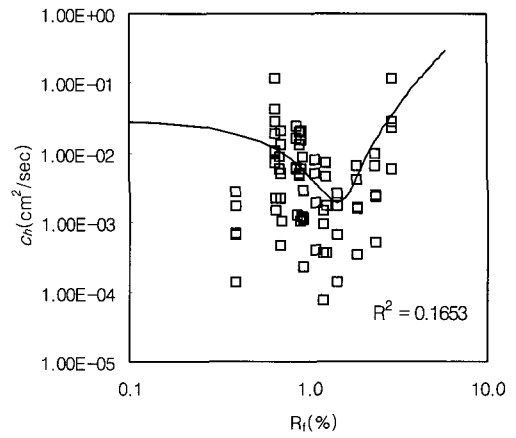
- (f) 마찬가지로 콘 선단저항치( $q_d$ )에서 유효연직압력( $\sigma_{vo}$ )을 제외한 순수한 콘이 받은 저항치와의 분석결과는  $q_f \sigma_{vo}$ 값의 증·감에 따라 수평압밀계수도 같은 변화를 보여 이를 다음과 같은 지수함수 관계식으로 나타낼 수 있으며,  $q_f u_2$ 값을 이용한 분석결과와 유사한 경향을 나타냈으며, 상관계수( $R^2$ )는 0.568~0.63으로  $q_f u_2$ 를 사용한 분석 결과보다 비교적 크게 나타났으나 적용하기에는 무리가 있어 보이므로 향후 추가적인 연구를 통하여 지반상태에 따라 적용성을 검증하여야 할 것이다.

$$\text{Torstensson(구형 공동), } c_h = 0.0073 e^{-4.25(q_f - \sigma_{vo})} \quad (R^2 : 0.5683) \quad (16)$$

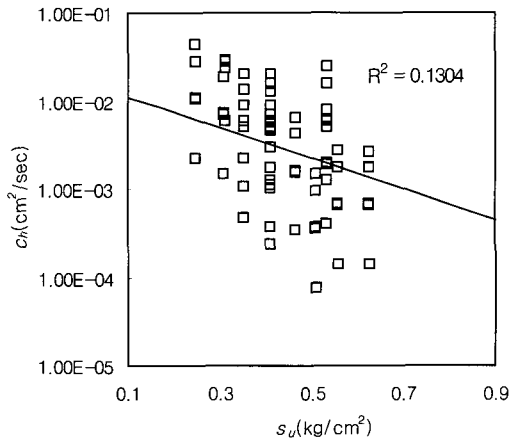
$$\text{Torstensson(원통형 공동), } c_h = 0.0341 e^{-4.25(q_f - \sigma_{vo})} \quad (R^2 : 0.5683) \quad (17)$$



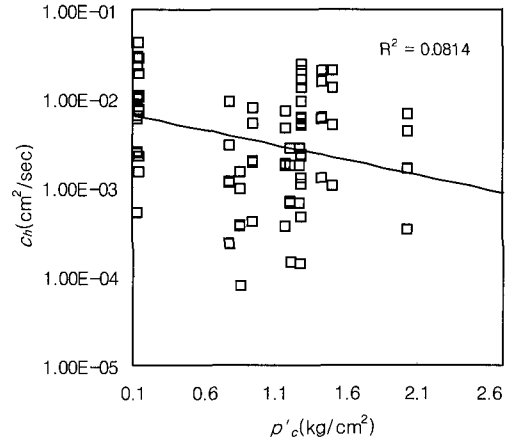
(a) 표준압밀시험을 통한  $c_v$  vs.  $c_h$



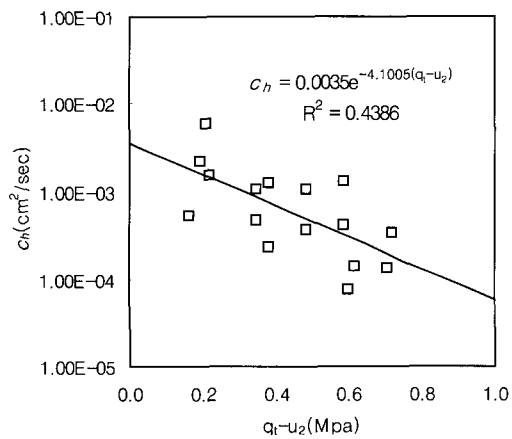
(b) 마찰비( $R_h$ ) vs.  $c_h$



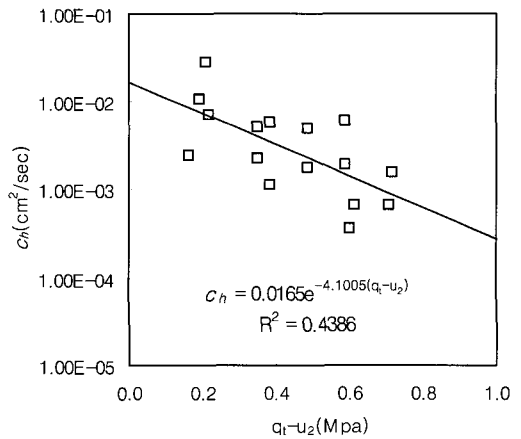
(c) 비배수 전단강도( $s_u$ ) vs.  $c_h$



(d) 선행압밀압력( $p'_c$ ) vs.  $c_h$



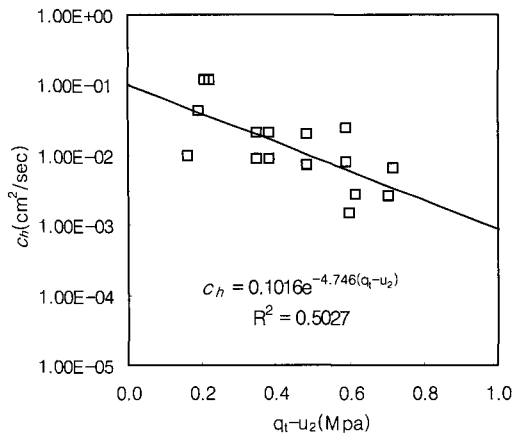
① Torstensson(구형 공동)



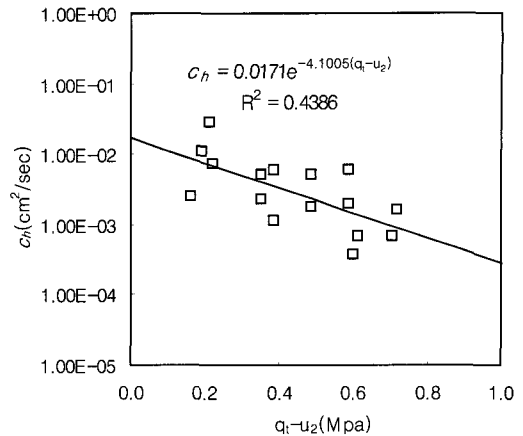
② Torstensson(원통형 공동)

그림 3.  $c_h$  vs. 지반특성



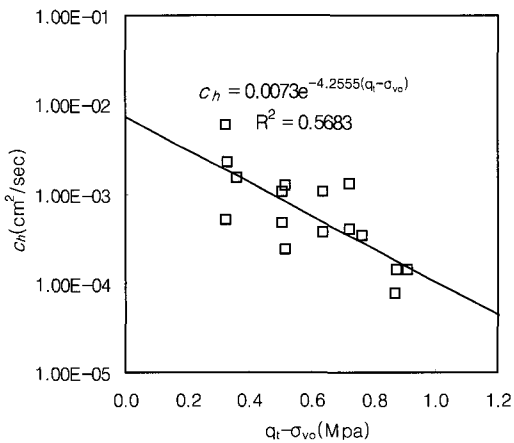


③ Levadoux & Baligh

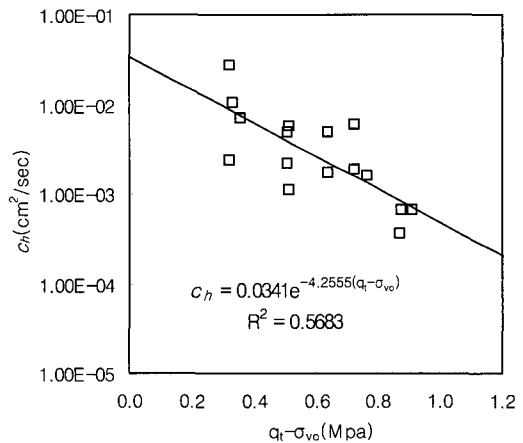


④ Teh & Houlsby

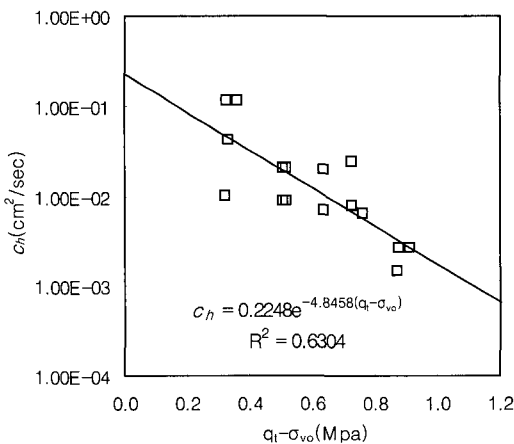
(e)  $q_t - u_2$  vs.  $c_h$



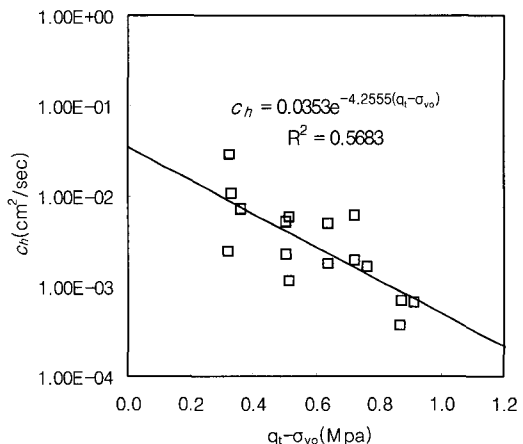
① Torstensson(구형 공동)



② Torstensson(원통형 공동)



③ Levadoux & Baligh



④ Teh & Houlsby

(f)  $q_t - \sigma_{vo}$  vs.  $c_h$

그림 3. (계속)  $c_h$  vs. 지반특성

각주: 수평압밀계수가 통합된 해는 Torstensson(구형공동 팽창이론), Torstensson(원통형공동 팽창이론), Baligh & Levadoux, Levadoux & Baligh 및 Teh & Houlsby의 결과를 나타낸다.

Levadoux & Baligh,  $c_h = 0.2248 e^{-4.84(q_f - \sigma_{vo})}$   
 $(R^2 : 0.6304)$  (18)

Teh & Houlsby,  $c_h = 0.0353 e^{-4.25(q_f - \sigma_{vo})}$   
 $(R^2 : 0.5683)$  (19)

## 6. 결론

경남 양산물금 지역의 해성 점성토로 이루어진 연약 지반처리공법 시험시공지반을 대상으로 피에조 콘 소산시험 결과를 이용하여 수평압밀계수 추정을 위한 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피에조 콘 소산시험 결과 수평압밀계수는 Torstensson 이 제안한 구형공동 팽창이론이 가장 작게 [실험치 보다 훨씬 작은 (1/10 정도) 값], Levadoux & Baligh 가 제안한 이론이 가장 크게 추정되었다. Tostensson 의 원통형공동 팽창이론해와 Teh & Houlsby의 이론해는 매우 유사한 수평압밀계수 값으로 추정되었다. 표준압밀시험으로 추정한 수평압밀계수는 단계(I, II, III)별 모두 Torstensson(원통형) 또는 Teh & Houlsby의 이론해와 유사하게 나타났다. 따라서, 국내의 연약 점성토 지반에서 피에조 콘 소산시험에 의하여 수평압밀계수를 추정할 때는 Torstensson(원통형) 또는 Teh & Houlsby 이론해를 적용하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단된다.
- (2) 이론해를 통한 수평압밀계수와 소성영역에서 공동 팽창이론으로 구한 과잉간극수압을 분석한 결과에 의하면 과잉간극수압이 증가(감소)함에 따라 수평 압밀계수는 감소(증가)하는 양상을 나타냈다.
- (3) 수평압밀계수와 지반 특성치의 관계를 비교한 결과 상관도가 대체적으로 낮았으나, 비배수 전단강도,

선형압밀압력,  $q_f u_2$ ,  $q_f \sigma_{vo}$ 값과 상관관계를 나타냈고, 이 중에서  $q_f \sigma_{vo}$ 값과 가장 큰 상관성을 보였다.

## 참고 문헌

1. 김영상(1999), "피에조 콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성 있는 압밀특성 추정", 박사학위논문, 한국과학기술원, pp.48-56
2. 서수봉 등(2000), "국내 연약지반의 강성지수( $I_r$ )에 관한 연구", 한국지반공학회 가을학술발표회, pp.49-54.
3. ASTM(1979), Standard Method for Deep Quastic-Static Cone and Friction Penetration Tests of Soils, D3441, *American Society of Testing Materials*.
4. Baligh, M. M.(1986), "Undrained Deep Penetration, II: Pore Pressure", *Geotechnique*, Vol.36, No.4, pp.487-501.
5. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N.(1980), "Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration", MIT Dept. of Civil Engineering, Report No. R80-115, Cambridge, MA, pp.02-139.
6. Burns, S. E. and Mayne, P. W. (1998), "Monotonic and Dilatory Pore Pressure Decay during Piezocone Tests in Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, pp.1063-1073.
7. Levadoux, J. N. and Baligh, M. M.(1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration I : Prediction", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.GT7, pp.707-726.
8. Ramiro Gomez Escoubes(1995), "Settlements Evolution Forecasting for a future Coal Stock Piling on Guadarranque Industrial Area, Cadiz", *International Symposium on Cone Penetration Testing*. Volume 3, pp.169-178.
9. Teh, C. I. and Houlsby, G. T.(1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Tests in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.
10. Torstensson, B.A.(1975), "The Pore Pressure Sounding Equipment", Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, North Carolina, *American Society of Engineers(ASCE)*, pp.48-55.
11. Torstensson, B.A.(1977), "The Pore Pressure Probe". *Proceedings. Geoteknikkdagen*, Tapir Foreleg, Oslo, No.34, pp.1-15.
12. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, No.SM3, pp.265-290.

(접수일자 2003. 7. 18, 심사완료일 2003. 8. 16)