

정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산시험을 이용한 수평압밀계수의 산정

Estimation of Coefficient of Consolidation Using Piezocone Dissipation Test in Normally Consolidated Clays

임 형 덕*¹ Lim, Hyung-Duk

이 우 진*² Lee, Woo-Jin

김 대 규*³ Kim, Dae-Kyu

Abstract

In this study, the variation in excess pore pressure during dissipation is estimated by using successive cavity expansion theory and finite difference technique based on axisymmetric uncoupled linear consolidation theory with separate consideration of magnitude and initial distribution Δu_{oct} induced by changes of octahedral normal stress, and Δu_{shear} induced by changes of octahedral shear stress. The coefficient of consolidation is also estimated by trial and error procedure until the predicted dissipation curve matches the measured curve at a typical degree of dissipation. The proposed method is applied to the results of miniature piezocone tests at Louisiana State University calibration chamber system. Based on the results of interpretation and the comparison with experimental measurements and those from other solutions, the prediction dissipation curves show a good match with those measured during dissipation tests and the values of coefficient of consolidation estimated by proposed method are more close to the range of laboratory measurements than those of other theories.

요 지

본 연구에서는 정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산시험시 측정된 초기 과잉간극수압을 팽면체 수직응력($\Delta\sigma_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{oct})과 팽면체 전단응력($\Delta\tau_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{shear})으로 구분할 수 있는 방법을 이용하여 초기 과잉간극수압 분포를 가정하고, 연속적인 구형 공동확장 이론과 축대칭 비혼합 선형 압밀이론에 근거한 유한차분법을 사용하여 과잉간극수압의 소산거동을 모사하였다. 이와 같은 방법에 의해 압밀계수를 가정하여 계산된 소산곡선이 실측된 소산곡선과 특정 소산도에서 일치하도록 반복 계산하는 시행착오법을 사용하여 압밀계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법과 기존의 이론해를 루이지애나 주립대학교 모형 토조에서 수행된 소형 피에조 콘의 시험결과에 적용한 결과에 의하면 제안된 방법에 의해 산정된 압밀계수가 다른 이론해보다도 실내시험치와 유사한 것으로 나타났으며, 예측된 소산곡선과도 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Keywords : Coefficient of consolidation, Dissipation test, Piezocone

*1 정회원, 대림산업(주) 토목사업부 대리 (Member, Deputy Section Chief, Civil Projects Dept. Daelim Industrial CO. LTD., limhyungduk@hotmail.com)

*2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Univ.)

*3 정회원, 상명대학교 토목환경공학과 전임강사 (Member, Instructor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., SangMyung Univ.)

1. 서론

일반적으로 연약지반의 압밀특성을 평가하는 방법으로는 실내 압밀시험 또는 현장에서의 계측에 의한 역해석 등이 있다. 보편적으로 이용되고 있는 이러한 방법은 시료 크기 및 교란 효과, 그리고 지반의 불균질성 등으로 인하여 압밀계수를 추정하는데 있어서 여러 단점이 있다. 이러한 실내시험의 단점을 극복하기 위하여 여러 현장시험이 개발 및 사용되고 있으며, 그 중에서도 피에조 콘 관입시험 및 소산시험은 압밀특성뿐만 아니라 토층 판별, 강도 및 변형 정수 등의 추정을 위한 현장시험으로 널리 이용되고 있는 실정이다. 국내에서도 피에조 콘 시험의 활용은 점차 증가하고 있으며, 동시에 피에조 콘을 이용한 강도 및 변형특성, 그리고 압밀특성의 추정에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(이선재 1997, 김영상 1999).

피에조 콘 소산시험은 특정 깊이에서 콘의 관입을 멈추고 시간의 경과에 따른 간극수압의 변화를 측정하는 시험으로, 소산시험을 이용하여 압밀계수를 추정하는 이론해들이 여러 학자들에 의해서 제안되었다. 이러한 방법은 공동확장모델(Vesic 1972; Torstensson 1975, 1977), 변형률 경로법(Baligh와 Levadoux 1980, Levadoux와 Baligh 1986, Houlby와 Teh 1988, Teh와 Houlby 1991), 경험적인 방법(Gupta와 Davidson 1986, Sully와 Campanella 1994), Modified Cam-Clay 모델(Burns와 Mayne, 1998), 그리고 유한요소해석(Abu-Farsakh 등, 1998) 등으로 구분될 수 있다. 공동확장이론은 콘 주변 지반의 복잡한 거동을 구형 또는 원통형 공동확장으로 가정하는 제한점에도 불구하고 상대적으로 사용이 간편한 점 때문에 널리 이용되고 있으며, 변형률 경로법은 3차원적인 콘 관입의 복잡한 과정을 실제와 근접하게 모사할 수 있는 반면에 그 사용이 어렵고 지반의 구성모델에 따라 그 결과가 매우 달라지는 단점이 있다. Gupta와 Davidson(1986)이 제안한 경험적인 방법은 콘의 관입에 따른 콘 상부지반의 부분적인 간극수압의 소산을 고려하고, 초기 과잉간극수압을 이론적으로 산정하지 않고 실제 측정된 간극수압을 기준으로 해석프로그램에서 산정된 소산곡선과 실측된 소산곡선이 50%의 압밀도에서 일치하도록 반복 계산하여 압밀계수를 추정하는 방법이다. Burns와 Mayne(1998)은 기존의 공동확장이론에 Modified Cam-Clay 모델을 접목하여 간극수압이 시간에 따라 감소하는 일반적인 소산곡선의 형태

뿐만 아니라 시간에 따라 간극수압이 증가하다가 감소하는 형태, 즉 일반적으로 과압밀점토에서 측정되는 소산곡선의 형태도 해석할 수 있는 방법을 제안하였다. 이론적 방법을 이용하여 추정된 초기 과잉간극수압 및 소산곡선은 일반적으로 초기 과잉간극수압 분포를 정확히 모사할 수 없는 이론적 한계, 콘 관입 중지에 따른 주변지반의 응력 이완, 일정한 압밀계수의 가정, 비배수 전단강도(s_u), 전단변형 계수(G)와 같은 지반물성치 산정의 불확실성 등으로 인하여 실측치와 일치하는 경우가 드물다. 특히 압밀계수를 산정하는데 있어서 초기 과잉간극수압의 크기 및 분포가 가장 큰 영향을 미치는데 기존의 공동확장 이론은 지반물성치(s_u 와 G)의 평가에 따라 매우 의존적이며, 비배수 전단강도와 전단변형계수는 변형률, 응력 경로, 변형률 속도, 과압밀 정도 등 여러 요소의 영향을 받으므로 정확한 값을 결정하기가 어렵다.

본 연구에서는 정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산 시험시 측정된 초기 과잉간극수압을 팔면체 수직응력(octahedral normal stress, $\Delta\sigma_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{oct})과 팔면체 전단응력(octahedral shear stress, $\Delta\tau_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{shear})으로 구분할 수 있는 방법(임형덕 등, 2003)과 축대칭 비혼합 선형 압밀 이론을 이용하여 압밀계수를 추정하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 방법은 루이지애나 주립대학교 모형 토조에서 수행된 소형 피에조 콘의 시험결과(Lim, 1999)에 적용하였으며, 해석결과를 기존의 이론해와 비교하였다.

2. 피에조 콘 소산시험 해석이론

피에조 콘 소산시험을 통하여 수평압밀계수를 산정하는데 있어서 가장 중요한 요소는 콘 관입에 의해 발생하는 초기 과잉간극수압의 크기와 분포이다. 초기 과잉간극수압의 크기와 분포를 구하는 이론해로는 공동확장이론(Vesic 1972; Torstensson 1975, 1977)과 변형률 경로법(Baligh와 Levadoux 1980, Levadoux와 Baligh 1986, Houlby와 Teh 1988, Teh와 Houlby 1991), Modified Cam-Clay 모델(Burns와 Mayne, 1998) 등이 있으며, 임형덕 등(2003)은 정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산 시험시 측정된 초기 과잉간극수압을 팔면체 수직응력(octahedral normal stress, $\Delta\sigma_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{oct})과 팔면체 전단응력(octahedral

shear stress, $\Delta\tau_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{shear})으로 구분할 수 있는 방법을 제안하였다.

위와 같은 방법으로 산정된 초기 과잉간극수압을 이용하여 간극수압 소산곡선의 추정이 이루어지며, 주로 Terzaghi-Rendulic의 비혼합 압밀이론(uncoupled consolidation theory)이 이용되고 있다. 대부분의 이론해들이 시간에 따라 간극수압이 감소하는 형태의 소산곡선에 적용되나, 많은 연구자들에 의해서 간극수압이 시간에 따라 증가하다가 감소하는 현상이 보고 되었다. 이러한 과잉간극수압의 증가현상은 전단응력의 변화에 따른 흙의 팽창거동(dilatancy)과 관련이 있는 것으로 알려져 있으며, Burns와 Mayne(1998)은 Modified Cam-Clay 모델을 이용하여 전단응력의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압을 과압밀비의 함수로 나타내어 이를 해석할 수 있는 방법을 제안하였다. 과압밀비가 매우 큰 점토지반의 경우에는 초기 간극수압이 아주 작거나 심지어 부의 값을 나타내는 경우도 있으며, 현재까지 이론적으로

이러한 비표준 소산곡선(non-standard dissipation curve)을 해석할 수 있는 방법은 제시되지 않았다.

기존의 피에조 콘 소산시험 해석법의 이론적 배경과 가정사항 등은 표 1에 나타난 바와 같으며, 여러 해석법에 의해 제안된 소산도별 시간계수는 표 2와 같다. 표 2에서 시간계수는 지반의 강성지수(I_r)가 100이고, 간극수압 측정위치가 콘 선단부 바로 뒤(u_2)를 기준으로 선정된 값이다.

3. 압밀계수의 산정

3.1 초기 과잉간극수압의 산정

피에조 콘의 관입에 따라서 콘 주변의 흙 요소는 응력의 변화가 발생하며, 투수계수가 작은 포화된 점성토의 경우에는 비배수 상태가 된다. 일반적으로 콘의 관입에 의해 발생하는 과잉간극수압은 다음과 같이 팽면체 수직

표 1. 피에조 콘 소산시험 해석이론

참고문헌	가정사항 및 해석 모델
Torstensson (1977)	<ul style="list-style-type: none"> 구형 ($\Delta u_i = 4s_u \ln(r_p/r)$) 또는 원통형 ($\Delta u_i = 2s_u \ln(r_p/r)$) 공동확장이론 등방 탄성-완전 소성체 선형-비혼합 일차원 압밀이론
Levadoux와 Baligh (1986)	<ul style="list-style-type: none"> 변형률 경로법 선형등방 재료 비혼합 일차원 압밀이론
Gupta와 Davidson (1986)	<ul style="list-style-type: none"> 수정된 구형 공동확장이론 등방 또는 비등방 재료 축대칭 선형-비혼합 압밀이론
Houlsby와 Teh (1988)	<ul style="list-style-type: none"> 변형률 경로법 비혼합 일차원 압밀이론 강성지수를 고려한 시간계수 제안 $T^* = \frac{c_v t}{R^2 \sqrt{I_r}}$
Burns와 Mayne (1998)	<ul style="list-style-type: none"> 구형 공동확장이론 및 수정 Cam-Clay 모델 $\Delta u_{oct} = \frac{4}{3} [\sigma'_{vo} \frac{M}{2} (OCR/2)^A] \ln I_r$ $\Delta u_{shear} = \sigma'_{vo} (1 - (OCR/2)^A)$ 과압밀점토에서의 소산해석 모델

표 2. 각 이론해의 소산도에 따른 시간계수(박찬국 등, 2002) (u_2 형, $I_r=100$)

소산도 (%)	Torstensson (1977, 구형)	Torstensson (1977, 원통형)	Levadoux와 Baligh (1986)	Houlsby와 Teh (1988)
10	-	-	0.18	-
20	0.085	0.24	0.69	0.38
30	0.18	0.62	-	0.78
40	0.35	1.38	3.0	1.42
50	0.61	2.81	5.6	2.45
60	0.98	5.37	10.0	4.39
70	1.48	9.19	-	8.04
80	2.36	16.29	39.0	16.0
90	4.01	26.98	104.7	-

응력(octahedral normal stress, $\Delta\sigma_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{oct})과 팔면체 전단응력(octahedral shear stress, $\Delta\tau_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{shear})으로 구분할 수 있다.

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

여기서, α_f 는 Henkel의 파괴시 간극수압계수

식 (1)과 같이 측정된 과잉간극수압을 이론적으로 두 가지 요소로 구분할 수는 있지만, 실제적으로 피에조 콘 시험시에는 전체 과잉간극수압(Δu)의 변화만 측정할 수 있고 두 가지 요소를 분리하여 측정할 수 있는 방법은 현재까지는 없다.

임형덕 등(2003)은 피에조 콘의 관입에 따른 콘 선단부 주변의 흙 요소의 응력 경로는 삼축압축시험의 응력 경로로 모사할 수 있는 기존의 연구결과(Wroth, 1984)와 흙 요소를 탄성-완전 소성(elastic-perfectly plastic)체로 가정하여 정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산시험시 측정된 초기 과잉간극수압을 두 가지 요소(Δu_{oct} 와 Δu_{shear})로 분리하여 산정하는 방법을 제안하였다. 제안된 해석법에서는 콘의 관입에 따른 선단부 주변 흙의 응력 경로를 그림 1과 같다고 가정하고, 주변 흙의 연직 전응력과 과잉간극수압의 관계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 콘의 관입에 따른 연직전응력의 증가량은 간극수압계수(A_f)의 함수로 가정하면, 간극수압과 연직 응력의 관계로부터 측정된 과잉간극수압을 두 가지 요소로 분리하여 산정할 수 있다. 측정위치별 초기 과잉간극수압의 산정식은 다음과 같으며, 자세한 이론적 설명은 참고문헌(임형덕 등, 2003)에 나타나 있다.

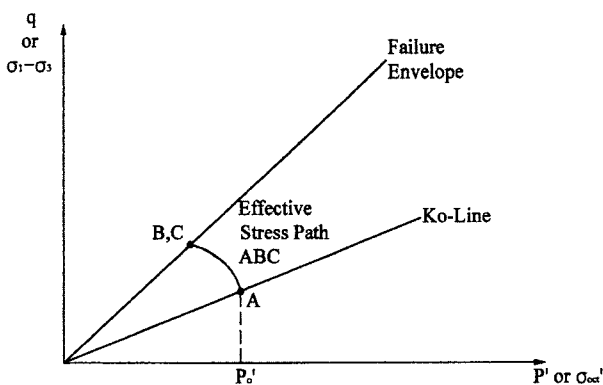


그림 1. 콘의 관입에 따른 선단부 주변 흙 요소의 응력 경로(Wroth, 1984)

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= \Delta u_{oct} + \Delta u_{shear} \\ &= \left(\frac{2}{3} \Delta\sigma_{VB} + \Delta\sigma_{VC}\right) + \left(\frac{1}{3\sqrt{2}} \alpha_f \Delta\sigma_{VB}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 &= \Delta u_{oct} + \Delta u_{shear} \\ &= \left[\frac{2}{3} \Delta\sigma_{VB} + \Delta\sigma_{VC} - (u_1 - u_2)\right] + \left(\frac{1}{3\sqrt{2}} \alpha_f \Delta\sigma_{VB}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, Δu_1 은 콘 선단부 중앙(mid-face of the cone)에서 측정된 과잉간극수압, Δu_2 는 콘 선단부 바로 뒤(behind the tip)에서 측정된 과잉간극수압이며, $\Delta\sigma_{VB}$ 와 $\Delta\sigma_{VC}$ 는 각각 그림 2에 나타난 바와 같이 $\sigma_{VB} - \sigma_{VO}$ 와 $\sigma_{VC} - \sigma_{VB}$ 이다.

콘의 관입에 따른 초기 과잉간극수압의 분포는 압밀계수를 산정하기 위한 소산곡선의 해석시 매우 중요한 인자이며, 본 연구에서는 측정된 과잉간극수압 요소중 Δu_{oct} 는 소성영역내에서 로그형태(Vesic 1972, Gupta와 Davidson 1986)로 분포하며, Δu_{shear} 는 전단영역내에서 콘 몸체에서 멀어질수록 선형적으로 감소(Burns와 Mayne, 1998)하는 것으로 가정하였다. 이와 같은 가정하에서 소성영역내의 임의의 점 A에서의 과잉간극수압의 크기는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta u_A = \Delta u_{oct} \ln(R_P/R_A) + \Delta u_{shear} (1 - R_A/R_S) \quad (4)$$

여기서, Δu_A 는 점 A에서의 과잉간극수압, R_P 는 소성영역의 반경 ($I_r^{1/3}$), R_A 는 콘 몸체로부터 점 A까지 반경, R_S 는 전단영역의 반경, 그리고 I_r 은 강성지수(G/S_u)이다.

3.2 수평압밀계수의 산정

피에조 콘 주변의 실제적인 간극수압 소산과정을 해석

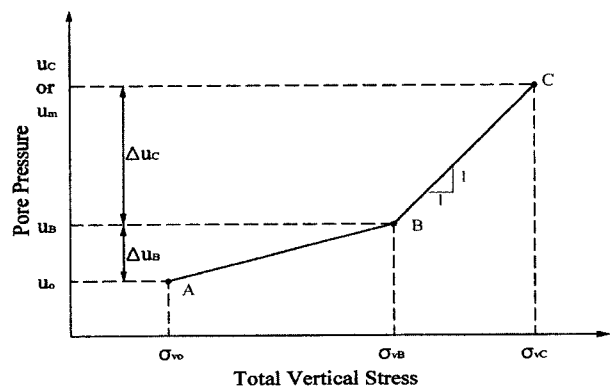


그림 2. 콘의 관입에 따른 과잉간극수압의 발생(Konrad와 Law, 1987)

하기 위해서는 비선형-혼합 압밀이론(nonlinear-coupled consolidation)을 이용한 해석법이 요구되지만, 소산 직전의 간극수압 및 전응력에 대한 초기 조건과 흙 요소의 비선형 거동에 대한 자료를 구하기 어려워 실제 적용에 한계가 있다. 선형압밀 이론의 경우에는 압밀과정에 관계없이 압밀계수는 일정하다고 가정하며, 정규압밀 상태 또는 선형압밀하중에 비해 상대적으로 미소의 응력증분의 상태에 있는 과압밀 상태의 경우에는 압밀과정에서의 투수성과 압축성의 비가 상호보완 관계로 인하여 압밀계수는 일정하게 된다(Levadoux와 Baligh, 1986). 또한 혼합 압밀이론과 비혼합 압밀이론에 대한 비교연구에서 혼합성이 압밀계수의 산정에 크게 영향을 미치지 않는다는 연구결과(Levadoux와 Baligh, 1980)가 발표된 바 있으며, 대부분의 콘 주변 간극수압 소산과정의 해석법은 간편성과 적용성을 고려하여 선형-비혼합 압밀이론이 사용되고 있다. 본 연구에서는 식 (4)으로 표현된 초기 과잉간극수압을 가지고 식 (5)와 같은 축대칭 선형-비혼합 지배방정식을 식 (6)과 같은 유한 차분 형태로 간략화 한 후 A.D.I 기법(Alternative Direction Implicit Scheme)을 사용하여 소산과정을 해석하였다.

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{c_h}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (5)$$

여기서, C_v 와 C_h 는 연직, 수평방향의 압밀계수, u_e 는 과잉간극수압, t 는 시간, 그리고 r 은 콘 중심축으로부터의 반경이다.

A.D.I 기법에서 $(n+1/2)$ 단계에서는 먼저 반경(r)방향으로 식 (6)에 의하여 $n+1$ 단계의 간극수압을 u_{n+1}^* 로 근사화하고,

$$\frac{1}{2} c_h \delta_r^2 (u_{i,j,n+1}^* + u_{i,j,n}) + \frac{1}{2} \frac{c_h}{r} \delta_r (u_{i,j,n+1}^* + u_{i,j,n}) + c_v \delta_z^2 u_{i,j,n} = \frac{u_{i,j,n+1}^* - u_{i,j,n}}{\Delta t} \quad (6)$$

여기서, δ 는 중앙 미분 연산자(central differential operator)

다음 연직(z)방향으로 식 (7)을 이용하여 $n+1$ 단계의 간극수압 u_{n+1} 을 구하게 된다.

$$\frac{1}{2} c_h \delta_r^2 (u_{i,j,n+1}^* + u_{i,j,n}) + \frac{1}{2} c_h \delta_z^2 (u_{i,j,n+1} + u_{i,j,n}) + \frac{1}{2} \frac{c_h}{r} \delta_r (u_{i,j,n+1}^* + u_{i,j,n}) = \frac{u_{i,j,n+1} - u_{i,j,n}}{\Delta t} \quad (7)$$

위의 식 (6)과 (7)의 해는 Thomas Algorithm(Ames, 1977; Bruce 등, 1953)을 이용하여 얻을 수 있으며, 자세한 전개 과정은 참고문헌(Gupta, 1983)에 나타나 있다.

본 연구에서는 위와 같은 방식에 의해 콘 주변의 과잉간극수압의 소산과정을 해석하였으며, 콘의 연속적인 관입에 따른 소산효과를 고려하기 위하여 Gupta와 Davidson(1986)이 제안한 연속적인 공동확장 이론을 도입하였으며, 영향범위를 고려하여 배수 경계조건이 횡방향은 콘 반경의 100배, 콘 선단부 하방향은 45배 이상이 되도록 확보하였다.

4. 실내 토조에서의 소형 콘 시험

피에조 콘 시험 결과의 해석은 콘의 크기 및 형태, 시험 방법 및 지반 특성의 영향을 받기 때문에 보다 정확한 해석을 위해서는 현장 또는 실내 보정시험(calibration test)을 필요로 한다. 현장 시험은 여러 제약조건과 지반의 불균질성 등의 단점이 있는 반면에, 실내 보정시험은 시료의 응력 상태를 특정 조건으로 조절할 수 있고, 균질한 시료 및 동일한 조건의 시료를 연속적으로 만들 수 있으며, 계측 기기를 설치하기가 용이하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 제안된 해석법을 루이지애나 주립대학교에서 수행한 실내 토조에서의 소형 콘 시험 결과(Lim, 1999)에 적용하여 기존의 이론적 해석법과 비교, 분석하였다.

시료 준비는 kaolin과 고운 모래를 혼합하여 슬러리 압밀기(slurry consolidometer)에서 자립할 수 있는 강도를 얻을 수 있도록 압밀을 시킨 후 모형 토조(calibration chamber)에서 원하는 특정 조건의 응력상태가 되도록 재압밀시켰다. 루이지애나 주립대학교의 모형 토조는 직경 525 mm, 높이 815 mm의 시료를 만들 수 있으며, 경계면은 이중 연성 구조로(flexible double wall) K_0 조건을 포함한 다양한 응력 경로로 시료를 압밀시킬 수 있는 장비이다. 소형 콘은 순단면적이 100 mm^2 , 선단각이 60° 이며, 간극수압의 측정 위치에 따라 u_1 과 u_2 두 가지 형태로 구분된다(그림 3). 표 3은 각 시료의 응력 조건을 나타내고 있으며, 실내 시험에 의해 산정된 각 시료의 물성치는 표 4에 나타난 바와 같다. 표 4에서 등방시료(시료 1과 3)의 경우 비배수 전단강도(S_u), 파괴시 간극수압 계수(A_f) 그리고 전단탄성계수(G_{50})는 등방압밀 삼축압축시험(CIUC)에 의해 산정되었으며, K_0 조건의 시료(시료 2와 4)의 경우에는 CK_0UC 시험을 수행하

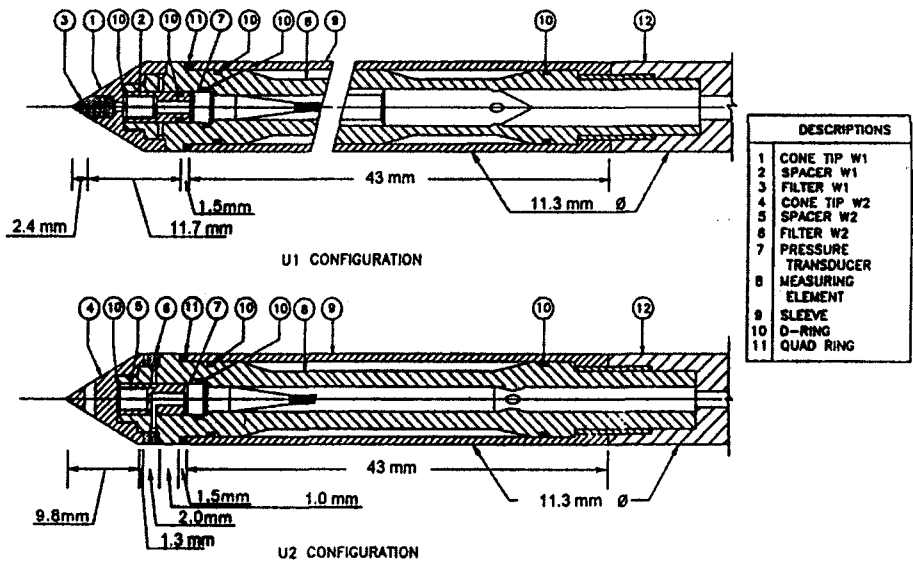


그림 3. 소형 피에조 콘의 제원(Lim, 1999)

여 물성치를 산정하였다.

루이지애나 주립대학교 수행한 소형 콘 시험 중 본 연구에서는 총 11개의 시험 결과를 이용하였다. 시험은 관입 속도 2 cm/sec로 수행되었고 깊이별로 선단저항치 (q_c)와 간극수압(u_1 또는 u_2)을 측정하였으며, 특정 깊이에서 관입을 멈추고 소산시험을 수행하여 시간에 따른 간극수압의 변화를 측정하였다. 시험결과 간극수압에 의해 보정된 선단저항력(q_r)은 대부분 낮은 관입 심도, 즉 관입 초기에 일정한 값에 수렴하였으나, 간극수압의 경우에는 몇몇 시험에서 일정한 값에 수렴하지 않고 관입 심도에 따라 계속 증가하는 경향을 보였다. 각각의 시료에서 수행된 소형 콘 시험결과(q_r 와 Δu)중 수렴된 값 또는 최대 값을 산정하여 정리한 결과는 표 5에 나타난

바와 같다. 표 5에서 알 수 있듯이 선단저항치와 간극수압은 초기 상재하중이 클수록 증가하게 되며, 동일한 연직하중조건에서는 K_0 조건(시료 2와 4)인 경우보다 등방상태(isotropic condition)의 시료(시료 1과 3)에서 측정된 선단저항치와 간극수압이 큰 것으로 나타났다. 기존의 시험 및 연구결과에 의하면 선단부(u_1)에서 측정된 간극수압이 선단부 뒤(u_2)에서 측정된 간극수압보다 큰 것이 일반적이나 소형 콘의 시험결과에서는 u_1 과 u_2 가 비슷한 것으로 나타났다. 즉 필터의 위치에 따른 영향이 거의 미미한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 콘의 크기와 관련된 것으로 사료되며 정확한 원인은 추정할 수 없었다. 시험결과중 PCPT11의 경우에는 소산시험 결과의 신뢰도가 떨어진다고 판단하여 해석에서는 제외하였으며, 각 시험기기와 시험과정에 관련된 자세한 사항은 참고문헌(Lim, 1999)에 나타나 있으므로 이를 참조하기 바란다.

표 3. 각 시료의 응력 조건(Lim, 1999)

시료 번호	OCR	배압(B.P.) u_0 (kPa)	최종 유효 응력 (kPa)		정지 토압 계수 (K_0)
			연 직	수 평	
1	1.0	138	207	207	1.0
2	1.0	138	207	86.2	0.42
3	1.0	193	262.2	262.2	1.0
4	1.0	193	262.2	104.8	0.40

표 4. 각 시료의 실내시험 결과(Lim, 1999)

시료 번호	함수비 (%)	비배수 전단강도 S_u (kPa)	간극수압 계수 A_r	강성 지수 $I_r = G_{50}/S_u$
1	17.36	80	0.49	100
2	19.43	85	0.37	333
3	17.22	98	0.71	167
4	17.54	121	0.25	400

표 5. 소형 콘 관입시험 결과(Lim, 1999)

시료 번호	시험 ID	필터 위치	관입 깊이 (cm)	순 선단저항력 $q_r - u_0$ (kPa)	과잉간극수압 (Δu) (kPa)
1	PCPT1	u_1	66.5	1512.0	722.0
	PCPT2	u_1	67.2	1462.0	667.0
	PCPT3	u_1	63.9	1442.0	657.0
2	PCPT4	u_1	54.2	1192.0	472.0
	PCPT5	u_2	58.0	1122.0	480.0
	PCPT6	u_2	64.0	1337.0	477.0
3	PCPT7	u_1	55.4	1542.0	792.0
	PCPT8	u_2	59.1	1527.0	787.0
4	PCPT9	u_1	60.0	1337.0	527.0
	PCPT10	u_2	60.0	1377.0	597.0
	PCPT11	u_2	55.4	1357.0	527.0

5. 시험해석 결과 및 분석

일반적으로 피에조 콘 소산시험을 통하여 압밀계수를 산정하는 방법은 시간에 따른 정규화 과잉간극수압 곡선에서 50% 소산도일 때의 시간(t_{50})을 산정한 후 기존의 연구자들에 의해 제안된 시간계수(T_{50})를 이용하여 압밀계수를 산정하는 것이다. Gupta와 Davidson(1986)은 다른 연구자들과는 달리 소산도에 따른 시간계수를 제안하지 않는 대신, 현장실측치와 압밀계수를 가정하여 컴퓨터 프로그램에서 계산된 소산곡선이 50% 소산도에서 일치하도록 반복 계산하는 방법(trial error method)을 제안하였다. 김영상(1999), Burns와 Mayne(1998) 등은 특정 소산도를 기준으로 하지 않고 최적화 기법을 적용하여 실측된 간극수압과 프로그램에 의해 산정된 간극수압의 차에 대한 제곱의 합이 최소화시키는 압밀계수 산정법을 사용하였다.

본 연구에서는 임형덕 등(2003)이 제안한 정규압밀점토에서의 콘 관입에 따른 초기 과잉간극수압 산정법을 이용하여 소산시험 초기 과잉간극수압을 팔면체 수직응력(octahedral normal stress)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{oct})과 팔면체 전단응력(octahedral shear stress)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{shear})으로 구분하여 산정하고, Δu_{oct} 는 소성영역내에서 로그 형태로 감소하고, Δu_{shear} 는 콘 몸체에서 거리에 따라 선형적으로 감소한다고 가정하였다. 그리고 전단영역의 크기(R_s)는 공동확장에 따른 소성영역의 크기($R_p = I_r^{1/3}$)와 같다고 가정하였다. 이러한 초기 과잉간극수압 조건

(식 (4))을 이용하고 축대칭 선형-비혼합 압밀이론을 이용하여 실측된 소산곡선과 압밀계수를 가정하여 프로그램에 의해 산정된 소산곡선이 소산도 50%에서 일치하도록 반복 계산하는 시행착오법을 이용하여 압밀계수를 산정하였다. 압밀계수 산정시 가장 중요한 요소인 강성지수(I_r)는 소성영역의 크기와 관계가 있으며, 표 4에 나타난 실내시험결과를 이용하였다. 초기 과잉간극수압의 크기에 영향을 미치는 간극수압계수(A_0)는 일반적으로 정규압밀점토에서의 간극수압계수는 0.5~1.0의 분포를 보이는데 반해, 실내시험치가 0.25~0.71의 값을 나타내 실내시험치가 과소평가되었다고 판단하여, 등방압밀시료와 K_0 압밀시료의 간극수압계수를 각각 0.85와 0.75를 사용하였다. 각 시료에 따른 간극수압계수는 본 시료의 Δu_{shear} 에 대한 연구결과(임형덕 등, 2003)와 Burns와 Mayne(1998)이 제안한 방법을 비교하여 산정하였다.

각 시료에서 수행된 피에조 콘 소산시험에서 측정된 실측된 소산곡선과 압밀계수를 가정하여 프로그램에 의해 계산된 소산곡선은 그림 4~7에 나타난 바와 같다. 계산된 소산곡선이 50% 소산도에서 실측치와 일치하도록 시행착오법을 이용하여 압밀계수를 산정하였으며, 압밀계수 산정시 이방성은 무시하였다($c_v = c_h = c$). 콘 선단부에서 간극수압(u_1)을 측정할 경우에는 소산도에 따른 비교를 위하여 70% 소산도에서 실측치와 계산된 소산곡선이 일치하는 압밀계수를 산정하였다. PCPT1의 경우에는 70% 소산곡선이 생략되었는데, 이는 그림 4에 나타난 바와 같이 50% 소산도일 때와 70% 소산도일 때의 계산된 소산곡선이 일치하기 때문이다.

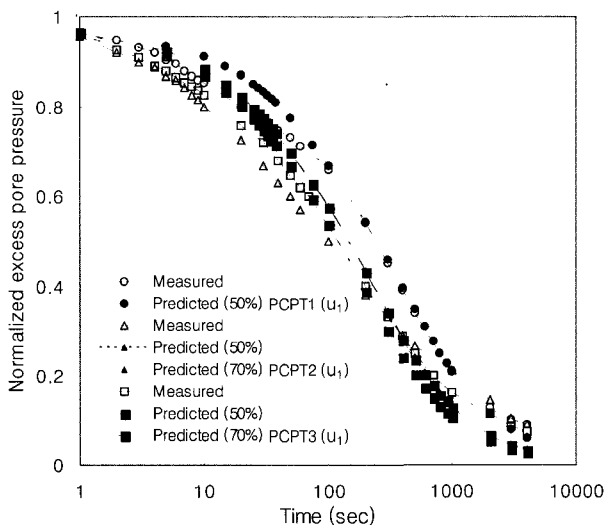


그림 4. 실측치와 계산된 소산곡선의 비교 (시료 1)

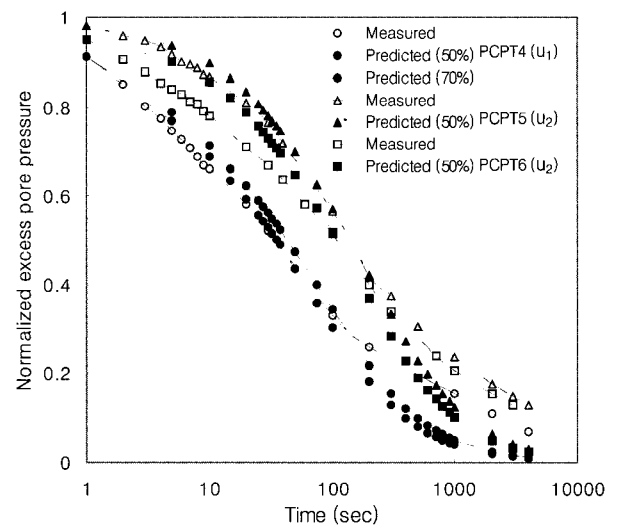


그림 5. 실측치와 계산된 소산곡선의 비교 (시료 2)

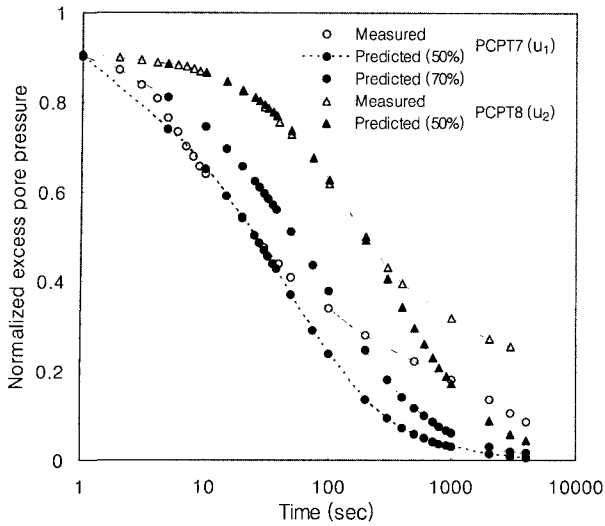


그림 6. 실측치와 계산된 소산곡선의 비교 (시료 3)

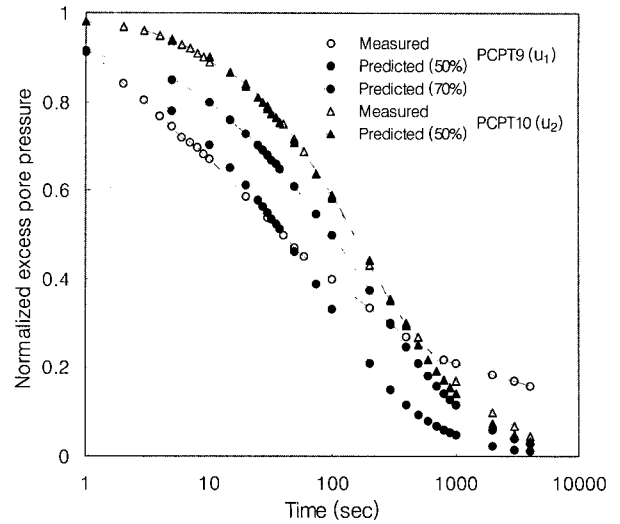


그림 7. 실측치와 계산된 소산곡선의 비교 (시료 4)

그림 4~7에 나타난 해석결과에서 알 수 있듯이 큰 선단부 바로 뒤(u_2)에서 측정된 간극수압 소산곡선과 프로그램에 의해 계산된 소산곡선이 특정 소산도뿐만 아니라 전 소산도에 걸쳐 비교적 잘 일치하는 것으로 나타난 반면에, 큰 선단부 중간(u_1)에서 측정된 소산곡선의 경우에는 특정된 소산도에서만 일치할 뿐 전 소산도에 걸쳐 일치하는 결과가 없었다. 이는 큰 선단부에서는 소산시험을 위하여 관입이 중지되는 순간에 응력 경감이 발생하고, 응력 경감은 순간적으로 과잉간극수압을 감소시키고 선단부 주변에서는 응력 재분배가 발생하여 초기 소산도에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 응력 경감의 대한 영향은 u_2 보다는 u_1 의 경우가 훨씬 큰 것으로 관측되었으며, 따라서 u_1 의 경우에는 초기 소산거동을 정확히 모사하기가 어려운 것으로 알려져 있다(Lim, 1999).

각 시료에서 수행한 소산시험에서 실측치와 계산된

소산곡선이 50% 또는 70% 소산도에서 일치하도록 추정된 압밀계수, 기존의 이론해를 이용하여 산정된 압밀계수, 그리고 각 시료에 대한 실내압밀시험에 의해 산정된 압밀계수 결과는 표 6에 나타난 바와 같다. 표 6에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 방법에 의해 산정된 압밀계수가 실내 시험치와 유사하며, 다른 이론해로부터 산정된 압밀계수보다는 적은 것으로 나타났다. Levadoux와 Baligh(1986)가 제안한 이론해는 다른 해들에 비해 큰 압밀계수를 주며, 이는 강성지수가 500으로 매우 큰 Boston Blue Clay(BBC)의 연구결과를 기초로 하기 때문이다.

모든 이론해의 해석결과에서 u_1 에서 측정된 소산시험으로부터 산정된 압밀계수가 동일한 시료에서 u_2 에서 측정된 시험결과로부터 산정된 압밀계수보다 큰 것으로 나타났으며, 70% 소산도를 기준으로 산정된 압밀계

표 6. 제안된 방법과 여러 이론해에 의해 50% 소산도에서 산정된 수평압밀계수의 비교

시료 번호	시험 ID	필터 위치	c_h (10^{-3} cm ² /sec)			
			본 연구	Levadoux와 Baligh (1986)	Houlsby와 Teh (1988)	실내 압밀시험 (Lim, 1999)
1	PCPT1	u_1	1.0 / 1.0'	4.1	1.0	1.9
	PCPT2	u_1	2.4 / 1.7'	10.5	2.0	
	PCPT3	u_1	2.1 / 1.7'	9.7	2.0	
2	PCPT4	u_1	11.0 / 9.0'	33.1	11.3	4.2
	PCPT5	u_2	4.5	16.0	12.7	
	PCPT6	u_2	5.4	13.5	10.8	
3	PCPT7	u_1	11.0 / 5.0'	44.6	10.7	2.2
	PCPT8	u_2	2.05	8.8	5.0	
4	PCPT9	u_1	10.5 / 4.2'	29.0	11.0	4.2
	PCPT10	u_2	3.6	11.7	10.2	

70% 소산도에서 산정된 압밀계수

수가 50% 소산도를 기준으로 산정된 압밀계수보다는 작으로 상대적으로 실내시험치에 근접하는 것으로 나타났다. 해석결과로 볼 때, u_1 에서 간극수압을 측정하는 경우에는 콘의 관입 중지에 의해 발생하는 응력 경감과 이로 인한 간극수압의 감소 및 응력재분배를 충분히 고려해야 한다. 이러한 응력 경감에 대한 영향검토는 일반적인 시험에서는 관측하기가 쉽지 않으며, 매우 작은 미소단위의 시간에서 데이터를 측정할 수 있는 계측장비를 이용해야 한다. 따라서 일반적으로 50% 소산도를 기준으로 압밀계수를 산정하는데 반해 u_1 의 경우에는 50% 압밀도보다는 큰 소산도(본 연구에서는 70%를 고려)에서 압밀계수를 산정하는 것이 신뢰성 있는 해석결과를 주는 것으로 보이며, 이에 대한 체계적이고 종합적인 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산 시험시 측정된 초기 과잉간극수압을 팽만체 수직응력 ($\Delta\sigma_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{oct})과 팽만체 전단응력($\Delta\tau_{oct}$)의 변화에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{shear})으로 구분할 수 있는 방법과 연속적인 공동확장이론을 이용하여 초기 간극수압 분포를 가정하고, 축대칭 비혼합 선형 압밀이론에 근거한 유한차분법을 사용하여 실측된 소산곡선과 압밀계수를 가정하여 프로그램에 의해 산정된 소산곡선이 특정 소산도에서 일치하도록 반복 계산하는 시행착오법을 이용하여 압밀계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 이론해와 더불어 모형 토조에서의 소형 콘 시험에 적용하여 그 결과를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제안한 방법에 의해 산정된 소산곡선은 u_2 의 경우에는 실측곡선과 특정 소산도 뿐만 아니라 전 소산도에 걸쳐 비교적 잘 일치하는 것으로 나타난 반면에 u_1 의 경우에는 특정된 소산도에서만 일치할 뿐 전 소산도에 걸쳐 일치하는 결과가 없었다. 이는 소산시험을 위해 콘의 관입중지에 따라 선단부 주변 흙에서 발생한 응력 경감에 의해 초기 과잉간극수압이 순간적으로 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 응력 경감은 초기 과잉간극수압의 순간적인 감소와 재분배를 유발하며, 초기 소산도의 특성에

큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, u_2 에서는 상대적으로 응력 경감의 영향을 덜 받는 것으로 알려져 있다.

- (2) 본 연구에서 제안한 방법에 의해 산정된 압밀계수는 다른 이론해와 비교해 볼 때 실내시험치와 유사한 것으로 나타났으며, 본 방법은 검토된 방법중 가장 적은 값의 압밀계수를 주는 것으로 나타났다. Levadoux와 Baligh(1986)에 의해 제안된 이론해를 통해 산정된 압밀계수는 다른 이론해와 비교해 볼 때 매우 큰 값을 나타내며, 실내시험치와도 상당한 차이를 보였다. 이는 강성지수가 500으로 매우 큰 Boston Blue Clay(BBC)연구결과를 기초로 하기 때문이며, 따라서 Levadoux와 Baligh 방법은(1986) 강성지수가 작은 지반에서는 적용하기가 어려울 것으로 판단된다.
- (3) 콘 선단부(u_1)에서의 소산해석의 경우에는 70% 소산도에서의 산정된 압밀계수가 50% 소산도에서 산정된 값보다 적은 것으로 나타났으며, 상대적으로 실내시험치에 근접하는 것으로 나타났다. 해석결과로 볼 때, u_1 에서 간극수압을 측정하는 경우에는 콘의 관입 중지에 의해 발생하는 응력 경감과 이로 인한 간극수압의 감소 및 응력재분배를 충분히 고려해야 한다. 따라서 일반적으로 u_2 의 경우에는 50% 소산도를 기준으로 압밀계수를 산정하는데 반해 u_1 의 경우에는 50% 압밀도 보다는 큰 소산도(본 연구에서는 70%를 고려)에서 압밀계수를 산정하는 것이 신뢰성 있는 해석결과를 주는 것으로 사료된다.
- (4) 본 연구는 실내 모형토조에서의 소형 콘 시험결과에 근거하였으므로, 실제 지반 및 표준콘에서 보다 자세하고 체계적인 검증이 필요하며, 특히 콘 선단부(u_1)에서 간극수압을 측정하는 경우 응력 경감이 소산과정에 미치는 영향과 이를 고려한 해석법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 2000년 목적기초연구지원사업(과제번호:R01-2000-000-00374-0)에 의해 이루어진 것으로 이에 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김영상 (1999), 피에조 콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성

- 있는 압밀특성 추정, 박사학위 논문, 한국과학기술원.
2. 박찬국, 송정락, 김수일 (2002), "피에조콘 소산시험을 통한 해상 연약지반의 압밀특성에 대한 실험적 연구", 한국지반공학회 논문집, 제 18권 2호, pp.137-146.
 3. 이선재 (1997), 피에조 콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구, 박사학위 논문, 서울대학교.
 4. 임형덕, 이우진, 김대규 (2003), "정규압밀점토에서의 피에조 콘 관입에 의한 과잉간극수압에 대한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제19권 1호, pp.151-161.
 5. Abu-Farsakh, M. Y., Voyiadjis, G. Z. and Tumay, M. T. (1998), "Numerical Analysis of the Miniature Piezocone Penetration Tests (PCPT) in Cohesive Soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods on Geomechanics*, Vol.22, pp.791-818.
 6. Ames, A. F. (1977), *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, Second Edition, Academic Press, New York.
 7. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N. (1980), "Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Mass., Report R80-115.
 8. Bruce, G. H., Peaceman, D. W., Rachford, H. H., and Rice, J. D. (1953), "Calculation of Unsteady-State Gas Flow Through porous Media", *Trans. American Institute Mining and Met. Engineers*, 198, p.79
 9. 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.
 10. Gupta, R. C. (1983), Determination of In-situ Coefficient of Consolidation and Permeability of Submerged Soils Using Electrical Piezocone Soundings, Ph. D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florida.
 11. Gupta, R. C. and Davidson, J. L. (1986), "Piezoprobe Determined Coefficient of Consolidation", *Soils and Foundation*, Vol.26, No.3, pp.12-22
 12. Houlsby, G. T. and Teh, C. I. (1988), "An Analytical Study of the Cone Penetrometer Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-348.
 13. Konrad, J. M., Law, K. T. (1987), "Preconsolidation Pressure from Piezocone Tests of Marine Clays", *Geotechnique*, Vol.37, No.2, pp.177-190.
 14. Levadoux, J. N. and Baligh, M. M. (1980), "Pore Pressure during Cone Penetration in Clays", MIT, Dept. of Civil Engineering, Report No.R.80-15, 310pp.
 15. Levadoux, J. N. and Baligh, M. M. (1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. I: Prediction", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.GT7, July, pp.707-726.
 16. Lim, B. S. (1999), Determination of Consolidation Characteristics in Fine Grained Soils Evaluated by Piezocone Tests, Ph. D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, LSU.
 17. Sully, J. P. and Campanella, R. G. (1994), "Evaluation of Field CPTU Dissipation Data in Overconsolidated Fine-Grained Soils", XIII ICSMFE, pp.201-204.
 18. Teh, C. I. and Houlsby, G. T. (1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.
 19. Torstensson, B. A. (1975), "Pore Pressure Sounding Instrument", Proceedings, ASCE Spec. Conf. On In-situ Measurement of Soil Properties, Vol.II, Raleigh, NC, pp.48-54.
 20. Torstensson, B. A. (1977), "The Pore Pressure Probe", Geotechnical Meeting, Norwegian Geotechnical Society, Oslo, Paper 34, pp.34.1-34.15.
 21. 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.
 22. Wroth, C. P. (1984), "The Interpretation of In Situ Soil Tests", *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.449-489.

(접수일자 2003. 4. 22, 심사완료일 2003. 10. 15)