

## 간극수압 소산경향을 고려한 자가굴착식 프레스미터로부터의 수평압밀계수 결정법

### Determination of Horizontal Coefficient of Consolidation from the Self-boring Pressuremeter Holding Test by Considering Pore Pressure Dissipation Trend

김 영 상<sup>1</sup> Kim, Young-Sang

#### Abstract

This paper describes a systematic way of identifying the horizontal coefficient of consolidation of clayey soil by applying an optimization technique to the early part of dissipation data measured from the self-boring pressuremeter strain holding test. An analytical solution developed by Randolph & Wroth (1979) was implemented in normalized form to express the build-up of excess pore pressures as a function of the rigidity index and subsequent dissipation of excess pore pressures around a pressuremeter. Horizontal coefficient of consolidation was determined by minimizing the differences between theoretical and measured excess pore pressure curves over 50% degree of dissipation range using optimization technique. The effectiveness of the proposed back-analysis method was examined against the real filed performances obtained from pressuremeter strain holding tests at Gimje and Yangsan site. It is shown that the proposed back-analysis method can evaluate the rational horizontal coefficient of consolidation, which is similar to those obtained from the piezocone dissipation test. Furthermore, proposed method can evaluate appropriate coefficient of consolidation for soil under partially drained condition.

#### 요 지

본 논문에서는 자가굴착식 프레스미터 시험의 변형을 유지시험(strain holding test)에서 관측된 소산시험 결과의 초기 소산경향으로부터 점성토 지반의 수평압밀계수를 추정하기 위한 최적화기법의 적용에 대하여 기술하였다. 프레스미터의 확장으로 인한 초기 과잉간극수압의 분포는 Randolph & Wroth(1979)의 해석적 해(analytical solution)를 이용하여 지반의 강성지수의 함수로 묘사되었으며 연속된 간극수압 소산과정까지 전과정이 묘사되었다. 제안된 기법에서는 이론 소산곡선과 정규화 된 관측 소산곡선이 초기 50% 범위에서 소산경향이 가장 일치하도록 하는 수평압밀계수를 최적화기법을 이용하여 결정하였다. 제안된 기법을 김제와 양산에서 수행된 기존의 자가굴착식 프레스미터 연구결과의 해석에 적용하였으며 제안된 방법으로 얻어진 수평압밀계수를 기존의 연구결과, 실내 및 원위치 시험결과와 비교하였다. 연구결과 제안된 방법은 피에조콘 소산시험과 매우 일관성있게 일치하는 수평압밀계수를 제공할 뿐 아니라 부분배수가 발생하는 지점에서도 간극수압 소산경향을 반영함으로써 보다 적절한 수평압밀계수를 결정할 수 있음을 알았다.

**Keywords :** Coefficient of consolidation, Optimization technique, Partial-drainage, Self-boring pressuremeter, Strain holding test

<sup>1</sup> 정회원, 국립 여수대학교 전임강사 (Member, Prof., Yosun National Univ., geoykim@yosu.ac.kr)

## 1. 서론

자가굴착식 프레스미터 시험(self-boring pressuremeter test, SBPT)은 지반의 교란을 최소화하면서 지중에 관입한 프레스미터 멤브레인을 질소가스를 이용하여 일정한 변형을 속도로 가압하여 팽창시키고 이때의 압력과 공동 반경을 측정하는 시험으로, 특정 프레스미터에는 멤브레인 중간에 간극수압을 측정할 수 있는 간극수압 셸이 설치되어 시간에 따른 간극수압의 변화를 관측함으로써 현장지반의 수평압밀계수를 추정할 수 있다. 현장지반의 수평압밀계수를 추정할 수 있는 원위치 관입시험으로는 프레스미터 이외에도 피에조콘 시험, 딜라토메터시험 등이 있으나 자가굴착식 프레스미터는 이들의 방법에 비해 최소한의 교란과 함께 명확한 경계조건을 이용한 해석기법 등으로 효과적으로 적용될 수 있다(장인성 등, 2002).

SBPT로부터 수평압밀계수를 추정할 수 있는 방법은 변형을 유지시험(strain holding test)과 응력 유지시험(stress holding test)의 두가지로 나누어 질 수 있다. 전자의 경우는 프레스미터의 멤브레인을 특정 변형율까지 재하한 후 일정하게 유지시킨 상태에서 시간에 따른 과잉간극수압의 소산을 관측하여 수평압밀계수를 추정하며 후자의 경우는 초기 멤브레인 팽창이후에 일정 변형율에 도달하였을 때 응력을 일정하게 유지시키면서 과잉간극수압의 소산을 관측하는 시험법이다.

Clarke 등(1979)은 Randolph & Wroth(1979)의 해석적 해를 이용하여 프레스미터 유지시험 결과로부터 간단히 수평압밀계수  $c_h$ 를 추정할 수 있는 식을 제안하였다.

$$c_h = \frac{T_{50} \cdot r_o^2}{t_{50}} \quad (1)$$

여기서,  $r_o$ 는 프레스미터 유지시험 시작 시 멤브레인의 공동반경,  $t_{50}$ 은 초기에 발생된 과잉간극수압의 50%가 소산될 때까지 소요시간,  $T_{50}$ 은 이론적으로 50% 소산이 유발되는 무차원 시간으로 Clarke 등(1979)은 실험에서 직접적으로 측정되는 최대 과잉간극수압  $\Delta u_{max}$  과 점성토지반의 비배수전단강도  $s_u$ 의 비로부터 결정할 수 있도록 그림 1을 제안하였다.

Clarke 등(1979)의 제안은 매우 간단하고 효율적이거나 사용된 Randolph & Wroth의 해석적 해에서 가정하고 있는 여러가지 가정사항들이 실제 상황을 모사하지 못한다는 한계를 극복하기 위하여 최근 유한요소법을 이용한 보완된 이론해의 개발이 장인성 등(2002)에 의하

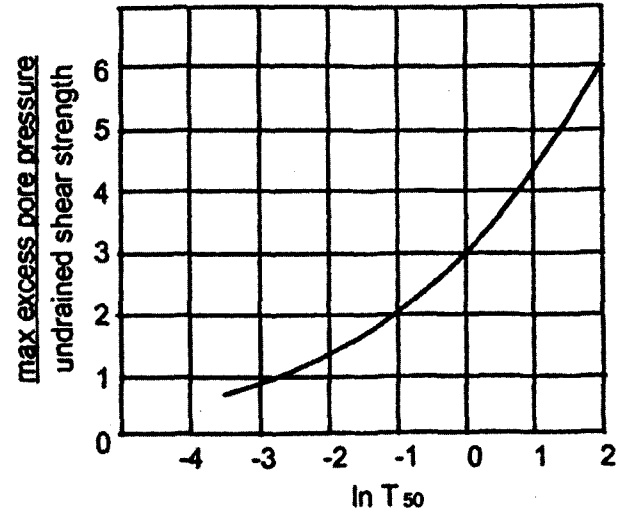


그림 1. 50% 소산도에 도달하는 이론적인 시간계수(Clarke 등, 1979)

여 국내에서 이루어진 바 있다. 장인성 등은 연구를 통하여 Randolph & Wroth의 해가 수평압밀계수를 과소평가 할 수 있다고 주장하였으며 유한요소법을 이용한 새로운 이론해를 제안하였다.

본 연구에서는 Clarke 등(1979), 장인성 등(2002)이 지반의 완전 비배수조건을 가정하고 특정 소산도 50%에서 수평압밀계수를 산정함으로써 발생하는 문제를 극복하기 위하여 자가굴착식 프레스미터에서 관측된 소산곡선과 Randolph & Wroth(1979)의 해석적 해를 이용하여 계산된 이론 소산곡선이 일정 소산도 범위에서 가장 일치하게 하는 수평압밀계수를 추정하는 기법을 제안하였다.

## 2. 해석적 해

Randolph & Wroth(1979)는 그림 2와 같이 실린더형 관입체의 관입 후 팽창으로 주변지반에 발생하는 과잉간극수압( $u_e$ )과 반경방향 변형(outward radial movement,  $\xi$ )을 예측하는 해석적인 해를 제안하였다. 이들은 무한영역을 대상으로 수행되던 기존의 해석과 달리 과잉간극수압의 소산과정 중 과잉간극수압이 도달할 때까지는 그 이상에 과잉간극수압이 존재하지 않는 특정 반경( $r^*$ )을 도입하였고 그 크기를 소성영역( $R$ )의 5~10배로 제안하였다. 소성영역 내에 로그분포로 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포식 (2)에 대하여 시간에 따른 과잉간극수압 소산의 해석적 해는 식 (3)과 같이 베셀함수(bessel function)로 표현되며 가정된 바식 (4)와 같이 특정반경  $r^*$  이상에는 과잉간극수압이 존재하지 않는다. 반경방향 변형  $\xi$ 에 대한 해는 Randolph & Wroth

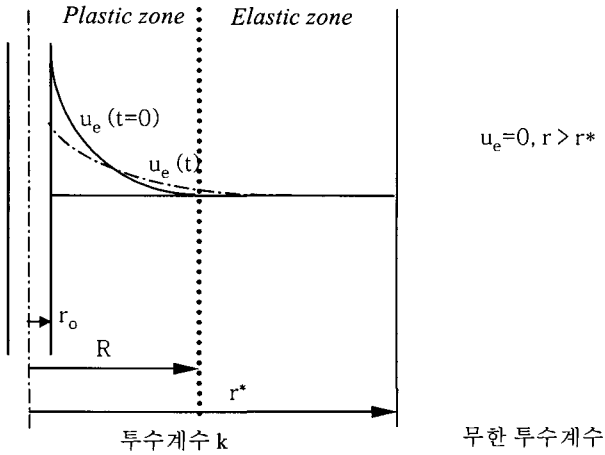


그림 2. 실린더형 관입체 주변의 초기 간극수압 분포(Randolph & Wroth, 1979)

(1979)에 설명되어 있다.

$$u_{ei} = 2s_u \ln(R/r), \quad t=0 \quad (2)$$

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 t} C_o(\lambda_n r), \quad r_o \leq r \leq r^* \quad (3)$$

$$u_e = 0, \quad r > r^* \quad (4)$$

여기서,  $B_n = \frac{4s_u}{\lambda_n^2} \frac{[C_o(\lambda_n r_o) - C_o(\lambda_n R)]}{[r^{*2} C_1^2(\lambda_n r^*) - r_o^2 C_o^2(\lambda_n R)]}$ ;  $C_i(\lambda_n r) = J_i(\lambda_n r) + \mu_n Y_i(\lambda_n r)$ ;  $J_i$ 와  $Y_i = 1, 2$ 종 베셀함수(bessel functions of first and second kind);  $\alpha_n = \lambda_n r_o$ ;  $r^* = 5 \sim 10 R$ ;  $R/r_o = \sqrt{G/s_u}$ ;  $r_o$  = 실린더형 관입체의 반경(여기서는, 프레스메터 반경);  $s_u$  = 비배수전단강도.

위 변수들 중  $\lambda_n$ 와  $\mu_n$ 는 다음의 경계조건(5), (6)으로부터 결정될 수 있으며 베셀함수의 특성 상 무한히 많은 해가 존재하나 Randolph & Wroth(1979)에 의하여 처음 50개의 해만을 이용함으로써도 충분한 정도(accuracy)를 얻을 수 있음이 증명되었다.

$$\xi = 0 \text{ at } r = r_o \text{ for } t \geq 0 \quad (5)$$

$$u_e = 0 \text{ at } r = r^* \quad (6)$$

그러나, 이들 50개의  $\lambda_n$ 와  $\mu_n$  값 중에 중복된 해가 존재하거나 빠지는 경우가 발생하지 않도록 주의하여야 하며 본 연구에서는 newton 반복법을 사용하여 초기 50개의 해를 효율적이고 정확히 산출하도록 하였다. 식 (3)에 포함된 시간  $t$ 를 식 (7)과 같이 정의되는 정규화된 무차원 시간  $T$ 로 대체하고 시간계수  $T=0$ 에서의 초기 과잉간극수압( $u_{ei}$ )으로 과잉간극수압( $u_e$ )을 정규화 함으로써 이론시간계수와 정규화 된 과잉간극수압  $T-U_T$

관계가 간단히 유도될 수 있다.

$$T = \frac{c_h \cdot t}{r_o^2} \quad (7)$$

$$U_T = \frac{u_e}{u_{ei}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 T} C_o(\lambda_n r)}{\sum_{n=1}^{\infty} B_n C_o(\lambda_n r)} \quad (8)$$

여기서,  $c_h$  = 수평압밀계수;  $C_o(\lambda_n r) = J_o(\lambda_n r) + \mu_n Y_o(\lambda_n r)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots, 50$ .

이때, 식 (8)에 포함된 변수  $\lambda_n$ 와  $\mu_n$ 는 특정반경  $r=r^*$ 에서의 경계조건[식 (6)]에 관련되어 결정되며, 특정반경  $r^*$ 의 크기는 강성지수에 따른 소성영역의 5~10배이므로 정규화 된 이론소산곡선[식 (8)]은 결국 지반의 강성지수  $I_R$ 에 의존된다. 대표적인 강성지수들에 대한 이론해는 그림 3과 같다. 강성지수의 산정에 요구되는 전단탄성계수와 비배수전단강도는 프레스메터 시험으로부터 결정할 수 있으나 관입 시 발생하는 지반의 교란효과를 배제하기 위하여 제하 및 재하곡선으로부터 전단탄성계수  $G$  값을 결정할 경우 상대적으로 적은 변형상태만을 대표하는 큰 전단탄성계수 값을 제공하게 된다. 최근 박용원 등(2003)은 국내 해안 점성토 지반에서 채취된 다수의 불교란시료로부터 삼축 및 일축실험을 수행하여 강성지수 산정에 관한 연구를 수행하였으며 각 지역별, 해안별 점성토 지반의 대표적인 강성지수를 제안한 바 있다. 이들의 연구는 신뢰할 만한 실내실험이 동반되지 못한 경우에 해석에 사용될 수 있는 강성지수를 제안한 것으로 파괴 시 50%의 변형상태에 해당하는 탄성계수  $E_{50}$ 을 기준으로 강성지수를 결정하였으므로 관입 전부터 관입 및 멤브레인의 팽창으로 인해 지반이 경험하는 다양한 변형을 범위의 전단탄성계수의 평균

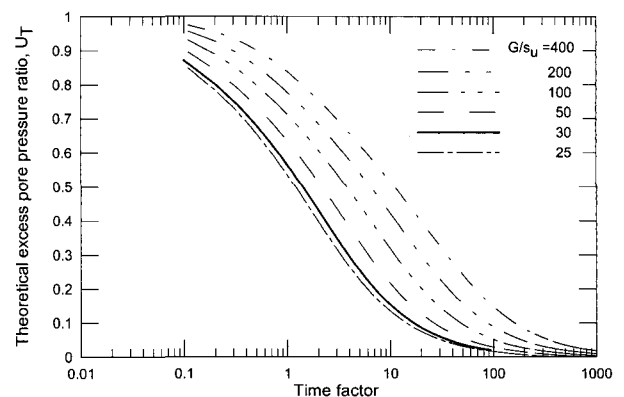


그림 3. 강성지수에 따른 이론적인 과잉간극수압 소산곡선

적인 값으로 생각할 수 있다. 이들의 연구결과 국내 점성토 지반의 강성지수값은 국외 지반과 달리 강성지수 값이 크지 않은 것으로 나타났으며 본 연구에서도 박용원 등(2003)의 연구를 바탕으로 국내 서남해안 점성토 지반의 대표적 강성지수인 30을 이용하여 그림 3에 실선으로 표시된 이론곡선을 사용하였다.

### 3. 최적화 문제로의 정식화와 수평압밀계수 추정

Kim 등(1997), 김영상(2001)은 피에조콘 및 딜라토메터 소산시험 해석에 최적화기법을 적용함으로써 발생된 과잉간극수압의 전체 소산도 범위에서 보다 신뢰성 있는 현장 수평압밀계수를 추정할 수 있음을 보였다. 또한 Kim & Lee(2000)에 의하면 최적화기법을 통해 얻어진 수평압밀계수는 기존의 방법들을 통하여 얻어진 값과 비교해 수평압밀계수를 결정하는 소산도에 영향을 받지 않고 매우 일관성이 있으며, 특정 소산도가 아닌 소산경향(dissipation trend)을 반영하기 때문에 고 소산도에서의 간극수압의 거동 예측에 적합하다.

수평압밀계수의 역해석을 위한 최적화문제의 정식화는 다음 식 (9)와 같이 정의되는 목적함수를 최소화하는 문제로 표현될 수 있다.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^{N_t} (U_T^n - U^n)^2 \rightarrow \text{최소화} \quad (9)$$

여기서,  $f(\mathbf{x})$  : 목적함수,  $\mathbf{x} = (c_h)$  : 설계변수,  $N_t$  : 과잉간극수압 비를 비교하는 총 시간단계의 수,  $U^n$  : 정규화된 관측 과잉간극수압 ;  $U_T^n$  : 정규화된 이론 과잉간극수압.

식 (9)의 최적화 문제로 정식화 된 수평압밀계수의 역 해석 문제는 비구속 최적화 문제에 가장 효율적인 것으로 알려진 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법을 이용하여 효율적으로 해결될 수 있다. 이 기법에서는 설계변수로 선정된 수평압밀계수를 목적함수가 감소하는 방향으로 최소화 될 때까지 연속적으로 변화시키며 최적의 해를 찾는다. 프레스메터로부터 관측된 과잉간극수압은 초기 과잉간극수압으로 정규화된 과잉간극수압 비  $U$ 의 형태로 표현된다. 한편, 그림 3의 실선으로 표현된 강성지수 30에 대해서 이론적으로 계산된 과잉간극수압 비  $U_T$ 와의 차이가 최소화 될 때까지 최적화기법에 의하여 수평압밀계수가 연속적으로 개선되며 일정한 수렴 조건을 만족하는 수평압밀계수가 최적의 값으로 결정된다. 최적화의 반복과정에서 가정된 수평압밀계수에 대한 무차원 시간계수와 이때의 시간계수에 해당하는 이론적인 과잉간극수압 비를 재 계산하여야 하나 본 연구에서는 Randolph & Wroth의 식 (8)과 같이 closed-form 형태로 제시된 해석적 해를 사용함으로써 계산 시간이 수 초 (few seconds)에 불과해 매우 효율적이다.

### 4. 제안된 기법의 적용

본 연구에서 제안된 방법을 장인성 등(2002)에 의해 국내 양산 및 김제지역에서 수행된 자가굴착식 프레스메터 소산시험 해석에 적용하였다. 김제현장의 경우, 지표로부터 13m 깊이까지는 약간 과압밀상태( $OCR=2\sim 4$ )이며 비배수전단강도가  $80\sim 120kPa$ 로 비교적 균질하다. 양산현장의 경우, 지표로부터 10m까지는 실트질 점토와 모래로 이루어져 있으며 그 하부에는 비배수전단

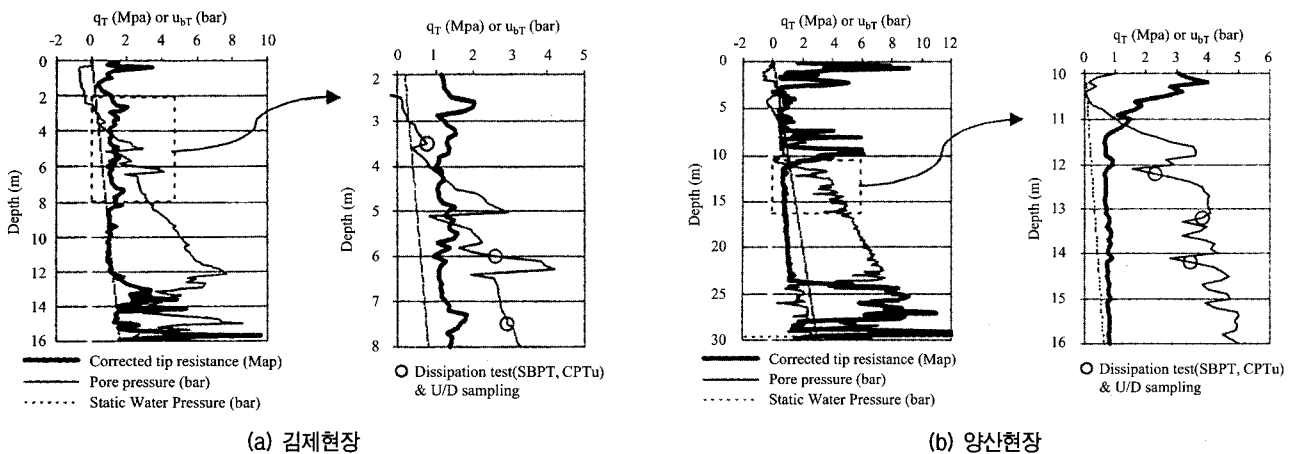


그림 4. 김제 및 양산현장의 피에조콘 관입시험 결과 및 소산시험 위치(장인성, 2001)

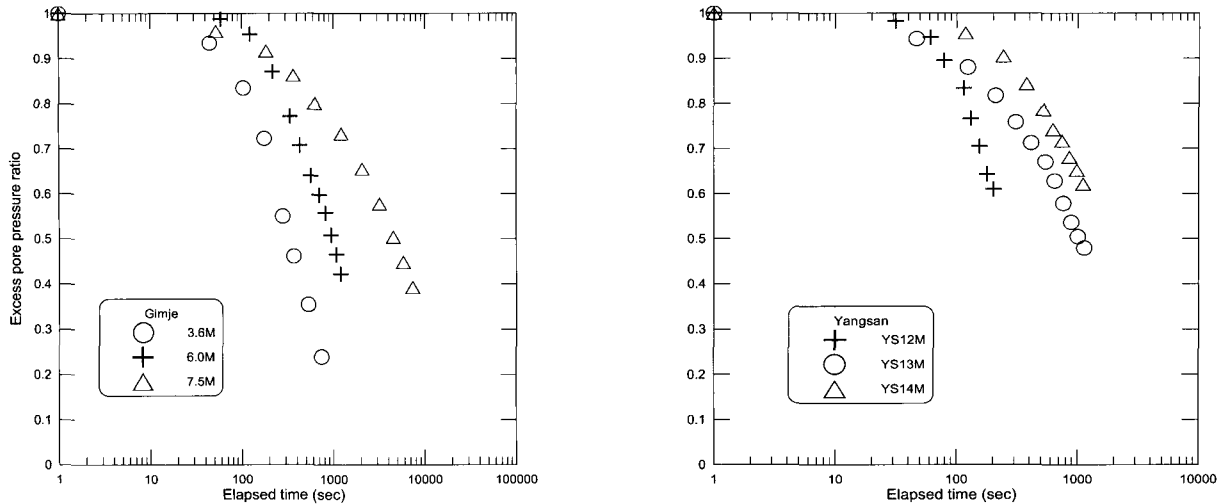


그림 5. 김제 및 양산현장에서 수행된 프레스메터 간극수압 소산곡선(장인성, 2001)

강도가 100kPa 정도인 정규압밀점토(OCR=1.5)로 이루어져 있다. 각 현장의 상세한 설명과 SBPT 시험과 관련된 자세한 사항은 장인성(2001)을 참고하라. 본 논문에서는 추후 얻어진 수평압밀계수 값의 적절성 검토를 위하여 두 현장에서 장인성(2001)에 의해 수행된 피에조콘 관입시험 결과를 그림 4에 나타냈다.

그림 5에는 김제 및 양산현장에서 장인성(2001)에 의해 수행된 변형을 유지시험의 정규화된 관측 소산곡선이 나타나 있다. 관측된 과잉간극수압 소산곡선을 Lunne 등(1997)의 제안에 따라 과잉간극수압- $\sqrt{t}$ 의 관계에 그리고 초기 직선부분을 연장하여 초기 과잉간극수압(즉,  $t=0$ )을 결정하였으며 이를 사용하여 관측 간극수압을 정규화하였다.

#### 4.1 역해석 결과 및 수평압밀계수

표 1에는 본 연구에서 제안된 방법에 의하여 계산된 수평압밀계수와 함께 기존의 연구 - Clarke 등, 장인성

등 - 방법에 의한 수평압밀계수가 비교되어 있다. 또한 장인성(2001)에 의해 수행된 rowcell 및 피에조콘 소산 시험에 의한 수평압밀계수, 표준압밀시험결과에 의한 연직방향 압밀계수가 함께 비교되어 있다.

장인성 등(2002)은 김제현장의 경우 rowcell에 의한 수평압밀계수가 매우 작게 나타났으며 이는 실험시료의 교란효과, 현장지반의 균열, 현장 점성도에 존재하는 실트의 영향으로 지적하였다. 따라서 피에조콘 소산시험으로 얻어진 수평압밀계수가 보다 현장 수평압밀계수에 가까울 것으로 사료된다. 본 연구에서 얻어진 수평압밀계수는 김제 3.6m를 제외하고는 대부분 위치에서 Clarke 등(1979), 장인성 등(2002)이 제안한 이론해를 이용한 경우보다 피에조콘 소산시험 결과와 훨씬 유사하게 나타났다. 특히, 양산현장의 경우 장인성 등(2002)은 지반의 투수성이 커서 자료들의 분산이 크고 제안된 방법에 의한 결과에 일관된 경향성을 찾을 수 없다고 기술한 점을 고려한다면 본 연구에서 제안된 방법은 일관성있게 두 현장에서 피에조콘 결과와 유사한 수평압밀계수를 추정하

표 1. 각 방법 및 실험법에 의한 압밀계수( $\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ )의 비교

site	깊이(m)	변형을 유지시험 (SHT)			Rowcell	CPTU+	Oedometer*
		Clarke 등	장인성 등	본 연구			
김제	3.6	3.2	12.5	81.8	2.7	15.13	3.9
	6	0.9	3.8	24.3	2.6	20.94	2
	7.5	3.7	7.6	6.4	3.7	4.03	-
양산	12	14.6	38.8	49.2	30.7	55.5	8.6
	13	2.3	6.8	24.1	9.5	28.9	4.7
	14	1.1	3.6	10.9	16.3	14.7	4

\* 표준압밀시험 결과는 연직방향압밀계수  $c_v \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 임

+ 장인성(2001) 피에조콘 분석 중 Teh & Houlsby의 이론해를 이용한 결과

여 제안된 방법이 매우 신뢰성 있는 것으로 사료된다.

#### 4.2 50% 소산도까지의 관측 소산곡선과 예측소산곡선의 비교

그림 6에는 프레스메터 변형을 유지시험에서 관측된 과잉간극수압 소산곡선과 제안된 방법으로 예측된 이론 과잉간극수압 소산곡선을 비교한 것으로 관측곡선과 이론곡선이 가장 근접한 경우의 것이며 이와 같은 상태에서 결정된 수평압밀계수가 표 1에 정리되어 있다. 기존의 Clarke 등(1979), 장인성 등(2002)의 연구에서는 관측소산곡선의 50% 소산도에서 일치하도록 수평압밀계수를 결정하는 것과 달리 제안된 방법에서는 0~50% 소산범위의 관측 소산곡선의 경향(trend)을 가장 잘 표현하는 수평압밀계수를 결정하므로 항상 50% 소산도에서 일치하지는 않는다.

김제 3.6m와 양산 12m의 경우 이론 소산곡선과 관측 소산곡선의 형태가 다른 위치의 곡선과 비교해 비교적 불일치 하는 경향을 보이며 이는 이론 소산곡선에서 가정하고 있는 완전 배수상태와 달리 현장의 배수상태가 이와 상이하여 나타난 것으로 판단된다. 이에 대해서

는 다음 절에서 자세히 토론했다.

#### 4.3 부분배수(partial-drainage)가 수평압밀계수 결정에 미치는 영향

그림 7에는 김제 및 양산현장에서 프레스메터 변형을 유지시험으로 추정된 수평압밀계수가 깊이에 따라 도시되어 있다. 김제현장의 경우 원으로 표시된 김제 3.6m 지점의 수평압밀계수 추정결과를 제외하고는 본 연구에서 제안된 방법에 의한 수평압밀계수가 깊이에 따른 경향이 피에조콘 소산결과와 매우 일치하고 있다. 또한 양산현장의 경우에는 본 연구에서 제안된 방법이 rowcell과 피에조콘 소산시험에 의한 수평압밀계수 사이에 위치하는 수평압밀계수 값을 주고 있으며 깊이에 따라서 피에조콘 결과와 매우 일관성이 있게 일치하는 경향을 보이고 있다.

김제 3.5m 깊이에서 결정된 수평압밀계수의 경우, 본 연구에서 제안된 방법이 다른 방법들에 비해 매우 큰 값을 주는 것으로 나타나 이에 대한 원인을 검토하였다. 4.2절의 관측소산곡선과 예측소산곡선의 비교에서 나타난 바와 같이 김제 3.6m의 경우 이론 소산곡선

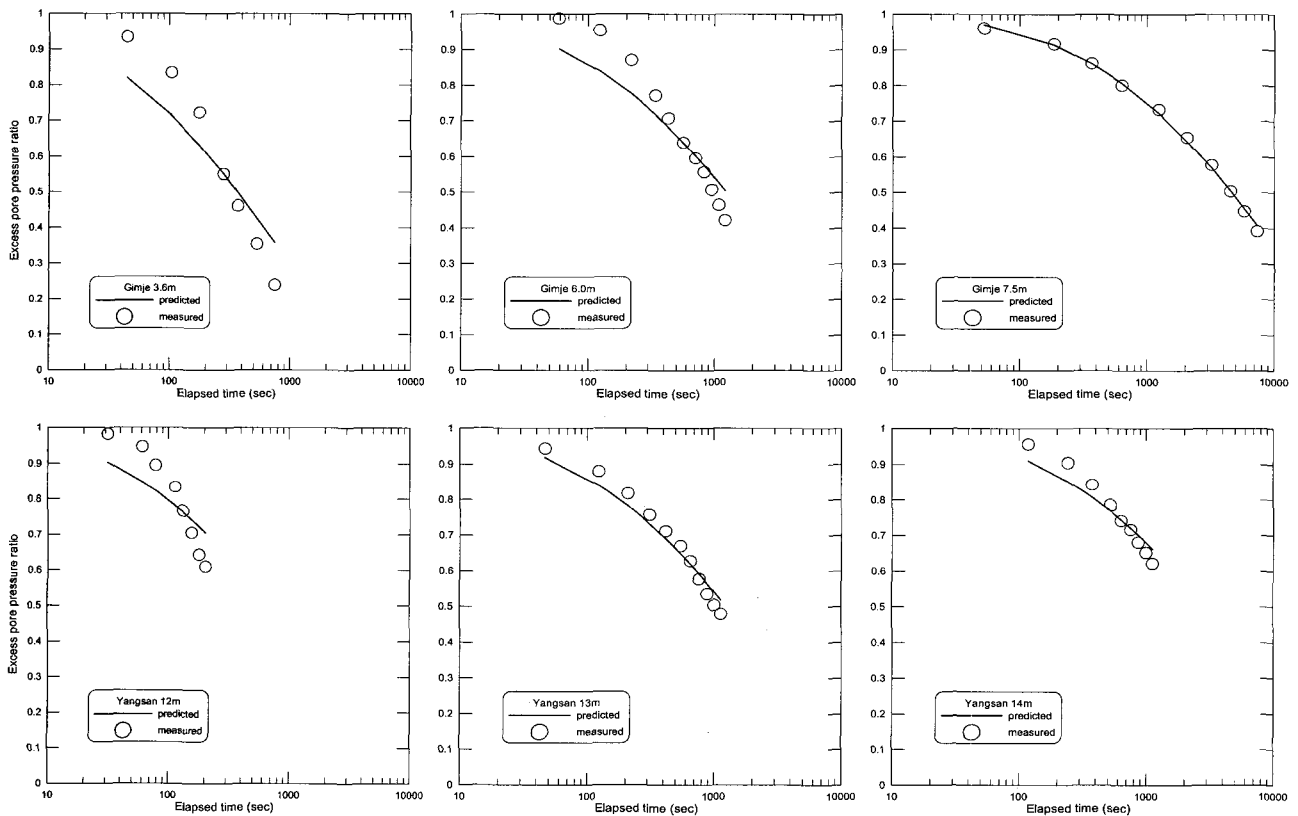
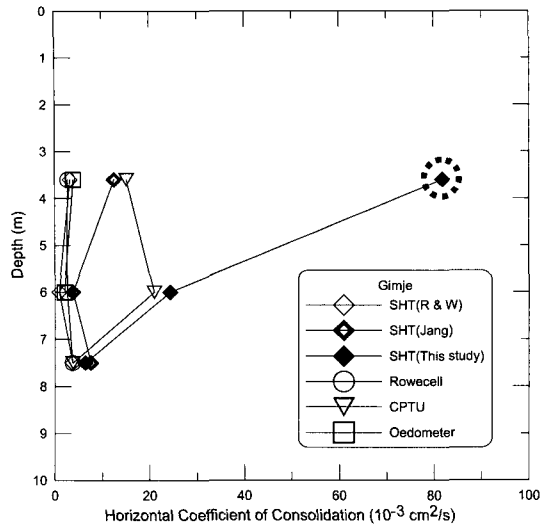
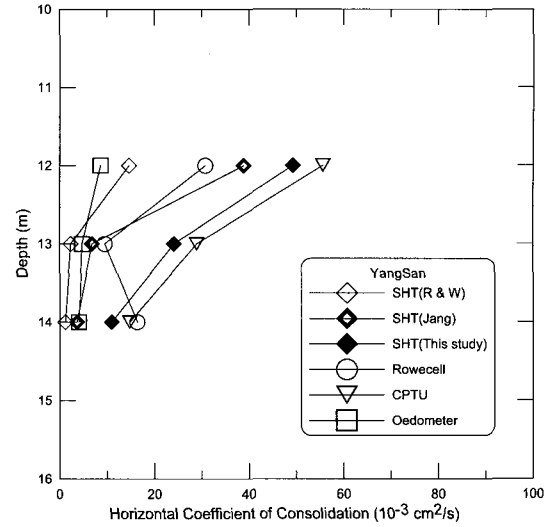


그림 6. 관측 소산곡선과 제안된 방법에서 예측된 소산곡선의 비교



(a) 김제현장



(b) 양산현장

그림 7. 깊이에 따른 수평압밀계수 비교

과 관측 소산곡선의 형태가 매우 일치하지 않으며 소산 시작 후 1000초 정도에 80%의 초기 과잉간극수압이 소산되는데 반해 6m와 7.5m 깊이의 경우 같은 경과시간에서 대략 50%와 25% 정도의 소산이 진행되어 3.6m 위치에서 상대적으로 매우 빠른 배수가 진행되고 있음에도 불구하고 기존의 연구들과 실험결과에서는 세 위치의 압밀계수가 유사하게 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 3.6m에서 제안된 방법이 수평압밀계수를 과대평가하는 것이 아니라 기존의 방법들과 각종 시험결과가 수평압밀계수를 상대적으로 과소평가한 것으로 판단되며 그 원인으로는 기존 이론해의 경우는 부분배수가, 실험에서는 시료 채취 시 발생된 교란효과 등이 주된 것으로 사료된다. 이러한 현상은 그림 4(a)를 참고하면 보다 명확하게 이해될 수 있다. 피에조콘 관입 시 관측된 간극수압은 3m에서 정수압 이상의 과잉간극수압이 유발되기 시작하나 3.6m 깊이에 도달해서도 과잉간극수압이 크게 유발되지 않으며 오히려 3.6m 근처에서 다시 정수압으로 급격히 감소하는 현상을 보이고 있다. 이상의 정황을 종합할 때 김제 3.6m 지점은 부분적으로 실트 또는 모래질 seam이 존재할 가능성이 큰 것으로 사료되며 이는 완전 비배수 조건이라 보기 어려울 것으로 판단된다. 또한 양산현장의 경우도 유사하게 13m, 14m의 경우 40% 소산도에 도달하는 데에 소요되는 시간이 대략 1000초 전후인데 비해 12m의 경우 200초 정도로 매우 빠르게 소산되었음을 알 수 있다. 또한 그림 4(b)에 나타난 피에조콘 관입 시 발생된 간극수압 결과

도 13m, 14m의 경우 비교적 안정된 과잉간극수압 관측 결과를 보이거나 12m의 경우 소산시험 전에 매우 급하게 감소된 부분이 있으며 과잉간극수압이 완전히 회복되지 않은 지점임을 알 수 있다. 이는 대략 11~12m 정도부터 점토지반이 형성된 것으로 판단할 때 12m 지점에서 완전한 비배수조건이 형성되지 않았을 것으로 사료된다.

이상의 김제 3.6m와 양산 12m 지점의 경우와 같이 부분적으로 배수가 발생할 경우 프로브의 팽창으로 인해 SBPT 주변에 발생하는 초기 간극수압의 분포가 완전 비배수 조건을 가정하여 유도된 초기 과잉간극수압의 분포와 현저히 다르다(Jang 등, 2003). 그러나 Clarke 등(1979)의 제안은 완전 비배수조건을 전제로 한 Randolph & Wroth의 해석적 이론해를 바탕으로 하였으며 장인성 등(2002)의 제안 역시 지반의 투수계수  $k \leq 10^{-10} \text{ m/s}$  인 경우로 완전 비배수조건에 해당된다. 한편 최초로 발생한 과잉간극수압 크기와 분포는 소산과정에도 지대한 영향을 미치는 것은 잘 알려진 사실이다(Baligh & Levadoux, 1980). 따라서 이러한 조건에서 기존의 이론해에서 제시된 방법을 따라 특정 소산도 50%에서 추정된 수평압밀계수는 실제 현장의 압밀계수와 매우 다르게 추정될 수 있다. 이는 피에조콘 소산시험 해석의 경우에도 동일한 사항으로 이를 위하여 이론적 소산곡선과 관측된 소산곡선의 형태 비교가 해석전에 선행되어야 하는 것이며 이는 초기 간극수압 분포가 다른 경우에는 이론해로부터 추정된 압밀계수가 실제와 다를 수

있기 때문이다.

물론 본 연구에서 제안된 방법에서도 초기 간극수압의 분포는 완전 비배수 조건을 가정한 Randolph & Wroth의 해석적 해를 사용하였으나 기존의 방법과 달리 특정 소산도에서 수평압밀계수를 산정하지 않고 일정 소산도 범위(0~50%)에서 관측 소산곡선의 소산경향(dissipation trend)과 이론 소산곡선의 소산경향이 가장 일치하도록 수평압밀계수를 산정하므로 초기 간극수압의 차이가 있더라도 특정 소산도에서 수평압밀계수를 결정함으로써 인해 발생하는 오류를 최소화할 수 있다.

현실적으로 프레스미터나 피에조콘 등과 같이 관입도중 일시적으로 관입을 중지하고 발생된 과잉간극수압을 소산시킴으로써 압밀계수를 추정하는 방법들에서 시험당시에 프로브(probe)가 위치하고 있는 지점의 지반의 배수조건을 완벽히 파악한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 기존의 이론적인 방법 -Clarke 등 (1979), 장인성 등(2002)- 을 따라 수평압밀계수를 결정할 때는 관측된 소산곡선의 형태와 이론곡선의 형상이 다르지 않은지 해석에 앞서 반드시 확인하는 것이 필요하며 그 형태가 상이할 경우 얻어지 수평압밀계수의 신뢰성에 의문을 가지고 다른 실험결과들과 비교하여 검증하여야 한다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법과 같이 부분배수가 발생하여 초기 간극수압의 형태가 실제와 완전히 일치하지는 않더라도 특정 소산도에서 압밀계수를 추정하지 않고 일정 소산도 범위에서 간극수압의 소산경향(dissipation trend)을 가장 잘 표현하는 압밀계수를 추정함으로써 압밀계수의 신뢰성을 확보하는 것이 바람직하다. 추가적으로 제안된 방법으로는 이론 소산곡선과 관측 소산곡선의 비교가 가능해 설계자로 하여금 얻어진 압밀계수의 신뢰성에 관한 정보를 제공할 수 있어 보다 유용할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 자가 굴착 식 프레스미터 변형을 유지 시험에서 관측된 간극수압 소산곡선을 보다 신뢰성 있게 해석할 수 있도록 기존의 해석적 해와 최적화 이론을 통합함으로써 소산경향을 반영한 수평압밀계수 추정법을 제안하였으며 연구를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안된 방법에 따라 실제 현장에서 관측된 변형을 유지시험 간극수압 소산곡선을 해석한 결과, 인접한 지점에서 수행된 피에조콘 소산시험 해석결과와 유사한 수평압밀계수를 일관성 있게 추정하며 따라서 제안된 방법이 매우 신뢰성 있는 것으로 사료된다.
- (2) 프레스미터 변형을 유지시험에 의한 수평압밀계수 산정 시 부분배수가 유발된 지반의 경우 최초로 형성된 과잉간극수압의 크기와 분포형태가 완전배수 조건을 가정하고 있는 이론해를 이용하여 산정한 경우와 매우 상이하고 또한 연속된 소산과정에도 영향을 미치므로 특정 소산도에서만 일치하는 압밀계수를 추정할 경우 실제와 다른 압밀계수를 추정할 가능성이 높다.
- (3) 본 연구에서 제안된 방법은 완전 비배수 조건을 가정한 이론해를 사용하고 있으나 특정 소산도에서 압밀계수를 결정하지 않고 일정 소산도 범위에서 간극수압의 소산경향(dissipation trend)을 반영할 수 있도록 이론 소산곡선과 관측 소산곡선이 가장 잘 일치하는 압밀계수를 제공하므로 기존의 방법들에서 발생하는 문제를 최소화할 수 있다. 또한 제안된 기법에서는 이론 소산곡선과 관측 소산곡선의 비교가 가능하여 설계자로 하여금 시험 위치의 배수조건에 대한 간접적인 정보를 제공할 수 있으며 얻어진 압밀계수의 신뢰성에 관한 정보를 제공할 수 있어 매우 유용할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. 김영상 (2001), “등가반경과 최적화기법을 이용한 딜라토미터 소산시험 해석법”, *한국지반공학회논문집*, 제17권 5호, pp.43-50.
2. 박용원, 구남실, 김영상 (2003), “피에조콘 시험을 위한 국내 연약지반의 대표적 강성지수 도출과 수평압밀계수 산정에의 적용”, *대한토목학회논문집*, 제23권 6C호, pp.389-398.
3. 장인성, 정충기, 김명모, 조성민 (2002), “자가굴착식 프레스미터를 이용한 점성토의 압밀특성 산정”, *한국지반공학회논문집*, 18권 제2호, pp.87-96.
4. 장인성 (2001), *CPTu와 SBPT로부터 구한 점성토의 강도 및 압밀 특성*, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, p.128. (in English)
5. Baligh, M. M. & Levadoux, J. N. (1980), “Pore Pressure Dissipation after cone penetration”, MIT. Dept. of Civil Engineering, Report R.80-1, Cambridge, MA, p.367.
6. Clarke, B. G., Carter, J. P. and Wroth, C. P. (1979), “In situ determination of the consolidation characteristics of saturated clay”, *Proceedings of Seventh European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.207-213.



7. Jang, I. S., Chung, C.K., Kim, M.M., and Cho, S.M. (2003), "Numerical assessment on the consolidation characteristics of clays from strain holding, self-boring pressuremeter test", *Computers and Geotechnics*, Vol.30, No.2, pp.121-140.
8. Kim, Y. S., Lee, S. R., and Kim, Y. T. (1997), "Application of an Optimization Design Technique for Determining the Coefficient of Consolidation by Using Piezocone Test Data", *Computers and Geotechnics*, Vol.21, No.4, pp.277-293.
9. Kim, Y. S., Lee, S. R. (2000), "Prediction of long-term pore pressure dissipation behavior by short-term piezocone dissipation test", *Computers and Geotechnics*, Vol.27, No.4, pp.273-287
10. Lunne, T, Robertson, P.K, Powell, J. J. M. (1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academy & Professional, p.312
11. Randolph, M. F., Wroth, C. P. (1979), "An Analytical Solution for the Consolidation around a Driven Pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, pp.217-229.

(접수일자 2004. 1. 26, 심사완료일 2004. 3. 20)