

## 피에조콘 소산시험을 이용한 평형간극수압과 강성지수의 역해석

### Identification of ambient pore pressure and rigidity index from piezocone dissipation test

김영상<sup>1)</sup> Kim, Young-Sang

<sup>1)</sup> 현대산업개발 토목설계팀 과장, Manager, Civil Engineering Team, Hyundai Development Company

**개요(SYNOPSIS)** : This paper describes a systematic way of simultaneously identifying the ambient pore pressure and the rigidity index ( $=G/s_u$ ) of soil by applying an optimization technique to the piezocone dissipation test result. An ambient pore pressure and optimal rigidity index were determined by minimizing the differences between theoretical excess pore pressures developed by Randolph & Wroth(1979) and measured excess pore pressures from piezocone using optimization technique. The effectiveness of the proposed back-analysis method was examined against the well-documented performance of piezocone dissipation tests (Tanaka & Sakagami, 1989), from the viewpoints of proper determination of selected target parameters and saving of test duration. It is shown that the proposed back-analysis method can evaluate properly the ambient pore pressure and the rigidity index by using only the early phase of the dissipation test data. Also, it is shown that with the optimized rigidity index and ambient pore pressure the proposed back-analysis method permits the horizontal coefficient of consolidation to be identified rationally.

**Key words** : piezocone, dissipation test, ambient pore pressure, rigidity index, coefficient of consolidation, back-analysis

## 1. 서론

피에조콘 소산시험으로부터 지반의 압밀특성을 추정하기 위해서는 시험위치의 정확한 정수압 상태와 지반의 적절한 강성지수가 요구된다. 그러나, 대상지반이 압밀 진행 중이거나 지형적인 원인에 의하여 피압수가 존재할 경우 정수압 이외에 추가적인 잔류간극수압이 존재하게 되어 평형간극수압은 정수압과 잔류간극수압의 합으로 나타나며, 피에조콘 해석 시 이를 무시할 경우 해석상 오류를 포함하게 된다 (Baligh & Levadoux, 1980). 이러한 경우 피에조콘을 이용하여 관입 시 발생된 과잉간극수압이 완전히 수렴할 때까지 소산시험을 수행함으로써 시험 위치의 평형간극수압을 확인할 수는 있으나 소산과정이 수렴될 때 까지 소요되는 시간이 매우 길고, 특히 투수계수가 작은 점토지반의 경우에는 며칠에 걸친 소산에도 불구하고 완전한 수렴 값에 도달되지 않는 경우도 있어 시간과 비용면에서 비효율적이다.

한편, 지반의 강성지수 ( $I_r=G/s_u$ )는 전단탄성계수와 비배수전단강도의 비로 정의되며 공동확장이론과 변형률경로법을 이용하는 해석분야에서 중요한 요소로 피에조콘을 이용한 압밀계수 및 비배수전단강도 해석 외에도 말뚝지력 산정 등 다양한 분야에 요구된다. 그러나, 알려진 바와 같이 콘 관입 시 주변 지반에 유발되는 다양한 수준의 변형률 분포와 전단탄성계수의 변형률의존성 (strain dependency)은 콘

해석 문제에 있어서 대표적인 전단탄성계수의 선택을 어렵게 한다. 또한 비배수전단강도 역시 지반의 고유한 값이 아니라 전단속도 (strain rate), 과압밀비, 그리고 변형률 연화 등에 영향을 받고 수행되는 시험법에 따라서 2배 이상 쉽게 변하는 값으로 이로 인해 강성지수의 결정은 더욱 어렵게 된다 (Baligh & Levadoux, 1980).

본 논문에서는 피에조콘 소산시험의 초기 소산곡선에 최적화기법을 적용함으로써 시험이 수행되는 위치의 평형간극수압과 지반의 강성지수를 동시에 역해석하는 기법을 제안하였다. 제안된 방법을 압밀 진행중인 연약지반 현장에서 수행된 피에조콘 소산시험 결과의 해석에 적용하였으며 역해석 된 평형간극수압과 현장에서 관측된 평형간극수압을 비교하였다. 또한 역해석 된 평형간극수압과 최적 강성지수를 바탕으로 수평압밀계수를 추정하였으며 그 결과를 일차원 압밀실험으로 얻어진 압밀계수 값과 비교하였다.

## 2. 피에조콘 소산시험에 대한 해석적 해

Randolph & Wroth (1979)는 그림 1과 같이 실린더형 관입체의 관입으로 주변지반에 발생하는 과잉간극수압( $u_e$ )과 반경방향 변형(outward radial movement,  $\xi$ )을 예측하는 해석적인 해를 제안하였다. 소성영역 내에 로그분포로 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포[식 (1)]에 대하여 시간에 따른 과잉간극수압 소산의 해석적 해는 식 (2)와 같이 베셀함수(Bessel function)로 표현되며 가정된 바[식(3)]와 같이 특정 반경  $r^*$  이상에는 과잉간극수압이 존재하지 않는다.

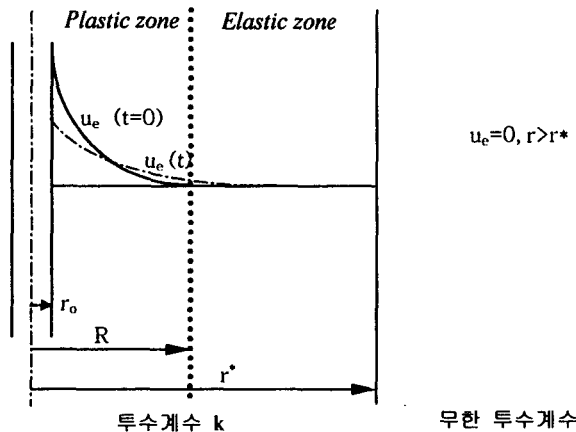


그림 1. 실린더형 관입체 주변의 초기 간극수압 분포 (Randolph & Wroth, 1979)

$$u_{ei} = 2s_u \ln(R/r), \quad t=0 \quad (1)$$

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 t} C_0(\lambda_n r), \quad r_0 \leq r \leq r^* \quad (2)$$

$$u_e = 0, \quad r > r^* \quad (3)$$

여기서,  $B_n = \frac{4s_u}{\lambda_n^2} \frac{[C_0(\lambda_n r_0) - C_0(\lambda_n R)]}{[r^2 C_1^2(\lambda_n r^*) - r_0^2 C_1^2(\lambda_n R)]}$ ;  $C_i(\lambda_n r) = J_i(\lambda_n r) + \mu_n Y_i(\lambda_n r)$ ;  $J_i$  와  $Y_i=1, 2$ 종 베셀함수(Bessel functions of first and second kind);  $\alpha_n = \lambda_n r_0$ ;  $r^* = 5 \sim 10R$ ;  $R/r_0 = \sqrt{G/s_u}$ ;  $r_0$ = 실린더형 관입체의 반경(여기서는, 피에조콘 반경);  $s_u$ =비배수전단강도.

식 (2)에 포함된 시간  $t$ 를 식(4)와 같이 정의되는 정규화 된 무차원 시간  $T$ 로 대체하고 시간계수  $T=0$ 에서의 초기 과잉간극수압( $u_{ei}$ )으로 과잉간극수압( $u_e$ )을 정규화 함으로써 이론시간계수와 정규화 된 과잉

간극수압 T-U<sub>r</sub> 관계가 간단히 유도될 수 있다.

$$T = \frac{c \cdot t}{r_o^2} \quad (4)$$

$$U_r = \frac{u_e}{u_{ci}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 T} C_o(\lambda_n r)}{\sum_{n=1}^{\infty} B_n C_o(\lambda_n r)} \quad (5)$$

이때, 식(5)에 포함된 변수  $\mu$ 와  $\lambda$ 는 특정반경  $r=r^*$ 에서의 경계조건에 관련되어 결정되므로 정규화 된 이론소산곡선[식(5)]은 결국 강성지수  $I_R$ 에 의존되며 대표적인 강성지수에 대한 이론해는 그림 2와 같다.

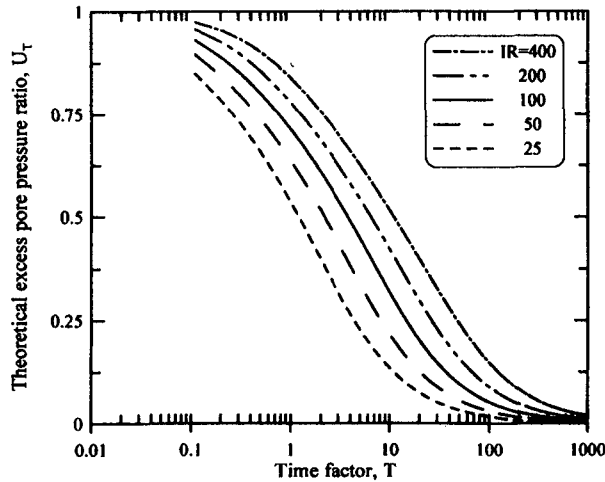


그림 2. 강성지수  $I_R$ 에 따른 이론적인 과잉간극수압 소산곡선

### 3. 피에조콘 소산시험에서 관측된 간극수압 해석법

$u(t)$ 를 현장 피에조콘 소산시험으로부터 관측된 시간  $t$ 에서의 관측 간극수압이라 하고  $u_o$ 를 그 위치에서의 정수압이라 하면 일반적으로 피에조콘 해석 시 이용되는 정규화된 과잉간극수압  $U$ 은 초기 과잉간극수압에 대한 시간  $t$ 에서의 과잉간극수압의 비로 다음 식 (6)과 같이 정의된다.

$$U = \frac{u_e(t)}{u_{ci}} = \frac{u(t) - u_o}{u_i - u_o} \quad (6)$$

### 4. 최적화문제로의 정식화와 수평압밀계수 추정

평형간극수압과 강성지수의 역해석을 위한 최적화문제의 정식화는 다음 식(7)과 같이 정의되는 목적함수를 최소화하는 문제로 표현될 수 있다.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{N_t} (U_T^n - U^n)^2 \quad (7)$$

여기서,  $f(x)$  : 목적함수,  $x = (u_o, I_R)$  : 설계변수,  $N_t$  : 과잉간극수압 비를 비교하는 총 시간단계의 수,  $U^n$  : 피에조콘에서 관측된 과잉간극수압 비 [식(6)];  $U_T^n$  : 이론적인 과잉간극수압 비[식(5)].

식(7)의 최적화문제로 정식화 된 평형간극수압과 강성지수의 역해석 문제는 비구속 최적화 문제에 가장 효율적인 것으로 알려진 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법을 이용하여 해결될 수 있다. 이 기법에서는 설계변수로 선정된 평형간극수압 ( $u_0$ )과 강성지수 ( $I_R$ )를 목적함수가 감소하는 방향으로 최소화 될 때까지 반복적으로 변화시키며 최적의 해를 찾는다. 평형간극수압과 최적의 강성지수에 도달되면 프로그램은 반복작업을 마치게 되며 최적 해로 결정된 평형간극수압  $u_{0,opt}$ 으로 정규화 된 관측 간극수압 곡선으로부터 50% 도달시간  $t_{50}$ 이 결정되고 최적 강성지수  $I_{R,opt}$ 를 이용한 해석적 해로부터 50% 소산도에서의 이론시간계수  $T_{50}$ 값이 결정되어 다음의 식 (8)로 최적의 수평압밀계수가 계산된다.

$$c_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} \cdot r_0^2 \quad (8)$$

여기서,  $T_{50}$ : 최적화 된 강성지수  $I_{R,opt}$ 에 대한 50% 소산도에서의 이론시간계수;  $t_{50}$ : 최적화된 평형간극수압  $u_{0,opt}$ 에 대한 50% 소산도에 도달 소요시간;  $r_0$ : 피에조콘 반경(=1.785cm).

## 5. 제안된 역해석 기법의 적용

### 5.1 역해석 결과 및 수평압밀계수

제안된 역해석기법을 Tanaka & Sakagami (1989)에 의해 압밀진행 중인 오사카해안의 해성점토 지반에서 수행된 피에조콘 소산시험 해석에 적용하였다. 피에조콘 관입 및 소산시험이 실시된 대상지역은 오사카해안 복단에 위치한 고베항 (kobe port)으로 그림 3에 나타난 바와 같이 소성이 상대적으로 낮은 상하단의 일부분을 제외하고는 대상지역의 17~30m 깊이에 균질하고 연약한 해성점토가 위치해 있다. 그림 3에는 대상지반의 액소성 한계와 자연함수비, 일차원 압밀시험결과로 얻어진 선형압밀하중과 유효상재하중  $p_c$ -관계, 그리고 피에조콘 관측값이 나타나 있다.  $p_c - \sigma'_{vo}$  관계로부터 대상지반 점토층의 선형 압밀하중이 재하된 유효상재하중에 미치지 않아 압밀 진행중임을 알 수 있다. 점토층 내에서 소산시험이 실시된 곳은 총 4개소로 E.L. 20.1, -23.2, -27.2, -30m이나 이중 E.L. 30m에서 수행된 소산시험은 모래층에서 수행된 것으로 해석에서 제외되었다. 그림 4는 E.L. 30m 깊이를 제외한 나머지 깊이에서의 간극수압 소산곡선들로 모두 24시간이상 관측된 결과들이다.

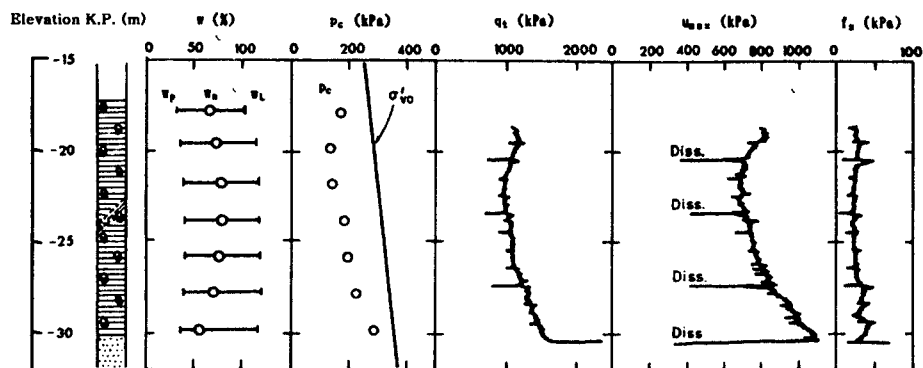


그림 3. 고베항 피에조콘 관입시험 결과와 기초물성 값 (Tanaka & Sakagami, 1989).

역해석 된 평형간극수압과 강성지수 값이 관측된 평형간극수압 및 강성지수 값과 함께 표 1에 정리되어 있다. 관측 평형간극수압 값은 Tanaka & Sakagami (1989)가 수행한 피에조콘 수렴값이며, 관측 강성지수는 동일한 고베항의 전단탄성계수와 비배수전단강도 관계로부터 추정된 값이다.

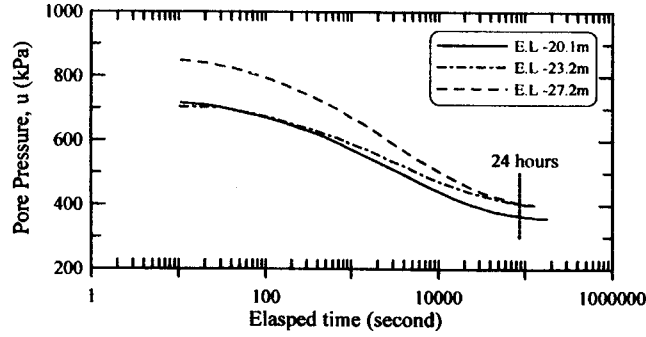


그림 4. 고베항에서 수행된 소산시험 결과 (Tanaka & Sakagami, 1989)

표 1. 역해석 결과와 관측값의 비교

Elevation (m)	평형간극수압 $u_0$ (kPa)		강성지수 $I_R$		목적함수 값
	본 연구	관측값*	본 연구	관측값**	
-20.1	375	358	273	400	$5.75 \times 10^{-4}$
-23.2	388	398	276		$8.96 \times 10^{-4}$
-27.2	414	399	268		$9.74 \times 10^{-4}$

\*  $u_0$  : Tanaka & Sakagami (1989), \*\* 海底地盤(일본지반공학회, 1995)  $G_0-s_u$  자료로부터 결정된 값

역해석 결과 얻어진 평형간극수압 값들은 피에조콘 관측결과와 2.5~4.7%의 미미한 차이만을 보이며 매우 일치하는 결과를 주고있다. 역해석 된 강성지수 값들은 268~276 사이의 좁은 범위에 일관성 있게 추정되었으며  $G_0-s_u$  관계로부터 결정된 값 400에 비해서는 67~69% 수준에 해당하는 값들이다. 이러한 차이의 원인은 지반이 가지고 있는 변형계수의 비선형성을 들 수 있는데, 관측 강성지수 결정에 사용된 전단탄성계수가 seismic-콘 결과로부터 얻어진 값으로  $10^6$  정도의 저변형 상태에서의 최대 전단탄성계수  $G_{max}$  값이므로 계산된 강성지수 400 역시 최대 강성지수 값이며 큰 관입에 의한 지반의 변형정도가 이보다는 훨씬 크다는 사실을 염두에 두면 변형을 증가에 따른 전단탄성계의 감소가 반영된 것으로 판단된다. 표 2에는 역해석을 위해 입력된 간극수압의 관측시간과 현장에서 수렴된 평형간극수압 값을 얻기 위하여 실제로 소요된 관측시간들이 비교되어 있다.

표 2. 평형간극수압을 결정에 요구되는 관측시간 비교

Elevation (m)	현장관측 (Seconds)	역해석을 위해 입력된 관측시간 (Seconds)
- 20.1	175,992	1,931
- 23.2	124,777	2,724
- 27.2	127,017	2,724

피에조콘을 통한 압밀특성 추정 시 통상 요구되는 관측 소산도가 50%이고 Kim & Lee (2000)에 의하면 50% 소산도까지의 입력만으로도 역해석을 통한 신뢰성있는 수평압밀계수의 예측이 가능하기 때문에, 본 연구에서도 역해석에 필요한 입력 소산자료의 관측시간은 초기 과잉간극수압의 50% 소산도까지가 이용되었다. 표 2에서 현장관측을 통하여 평형간극수압의 확인까지 걸리는 시간이 1.5~2일임에 비하여 역해석에 요구되는 관측시간은 32~45분으로 표 1에 나타난 바와 같이 정확한 평형간극수압을 예측하면서도 요구되는 관측시간이 매우 짧아 시간적인 면에서 매우 효율적임을 알 수 있다.

표 3에는 역해석으로 얻어진 평형간극수압과 최적의 강성지수를 바탕으로 식(8)로 계산된 수평압밀계수를 나타내고 있다.

표 3. 압밀계수 비교

Elevation (m)	본 연구 $c_h$ ( $cm^2/s$ )	$c_v$ (海底地盤, 1995) ( $cm^2/s$ )
-20.1	0.016	0.001 (정규압밀영역 평균값) 0.01 (과압밀영역 평균값)
-23.2	0.011	
-27.2	0.014	

본 연구에서 역해석 된 평형간극수압과 최적 강성지수를 바탕으로 얻어진 수평압밀계수는 정규압밀 영역보다는 과압밀 영역의 평균 연직압밀계수에 가까우며 평균값보다 1.1~1.6배 (평균 1.36배) 정도 큰 것으로 추정되었다. 그러나, 연직방향과 수평방향 압밀특성의 이방성을 고려한다면 역해석으로 추정된 물성을 이용한 수평압밀계수 추정이 매우 정확한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 최적화기법을 적용함으로써 50% 소산도까지의 피에조콘 소산시험 결과를 바탕으로 현장의 평형간극수압과 최적의 강성지수를 역해석 할 수 있는 기법이 제안되었다. 본 연구를 통하여 얻어진 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 제안된 역해석기법은 50%의 초기 소산자료만을 바탕으로 장시간 관측되어야 하는 현장지반의 평형간극수압을 매우 정확하며 효율적으로 예측할 수 있다.
- 2) 제안된 역해석기법은 평형간극수압과 함께 지반의 최적 강성지수  $I_R$ 를 예측할 수 있다. 역해석된 강성지수와 현장에서 관측된 최대 강성지수의 비교결과, 역해석 된 강성지수는 미소변형상태에서 계산된 최대 강성지수의 67~69% 수준에 해당하는 것으로 나타나 변형계수의 변형율의존 비선형성이 반영된 것으로 평가된다.
- 3) 역해석 된 평형간극수압과 최적 강성지수를 바탕으로 계산된 수평압밀계수는 실내 일차원 압밀시험에서 얻어진 결과와 비교할 때, 제하영역(unloading stage)의 평균적인 압밀계수에 보다 가까운 값으로 지반의 이방성을 고려한다면 매우 정확한 예측이 이루어짐을 알 수 있었다.

## 8. 참고문헌

1. 海底地盤(1995), 日本地盤工學會 關西支部, 101~181. (in Japanese)
2. Baligh, M. M., Levadoux, J. N.(1980) Pore pressure dissipation after cone penetration, MIT. Dept. of Civil Engineering, *Report R.80-1*, Cambridge, MA, 367 pp.
3. 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.
4. 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, 217~229.
5. Rust, E., Clayton, C. R. I.(1999), Interpretation of Incomplete Dissipation Data from Piezocone Tests, *Proceedings of Institutions of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol. 137, April, 97~103.
6. Tanaka, Y., Sakagami, T.(1989), Piezocone testing in underconsolidation clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 563~567.