

# 피에조 콘 시험을 이용한 압밀계수 결정 시 최적화 기법의 적용

Application of Optimum Design Technique in Determining the Coefficient  
of Consolidation Using Piezocone Test

김 영 상\*<sup>1</sup>

Kim, Young-Sang

이 승 래\*<sup>2</sup>

Lee, Seung-Rae

김 윤 태\*<sup>3</sup>

Kim, Yun-Tae

---

## Abstract

For normally consolidated clay, several researchers have developed a number of theoretical time factors to determine the coefficient of consolidation. However, depending on the assumptions and analytical techniques, it could considerably vary even for a specific degree of consolidation. In this paper, a method is proposed to determine a consistent coefficient of consolidation over all ranges of degree of consolidation by applying the concept of the Optimum Design Technique. The initial excess pore pressure distribution is assumed to be obtainable by the successive spherical cavity expansion theory. The dissipation of pore pressure is simulated by means of two-dimensional linear-uncoupled axisymmetric consolidation analysis. The minimization of the differences between the measured and the predicted excess pore pressures was carried by BFGS - unconstrained optimum design algorithm with one-dimensional golden section search technique. By analyzing numerical and real field examples, it can be found that the adopted optimum technique gives a consistent and convergent results.

## 요 지

피에조 콘의 소산시험을 이용한 정규 압밀 지반의 압밀계수 추정은 그간 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔으나 각 연구자들의 가정 사항과 해석 방법에 따라 특정한 압밀도에 대해서도 매우 넓은 범위의 이론적인 해들이 제시되어 왔다. 본 연구에서는 보다 현실적이면서 전 범위의 압밀도에 걸쳐서 일관성 있는 압밀계수를 구할 수 있도록 최적화 기법을 적용하였다. 콘 관입효

---

\*<sup>1</sup> 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*<sup>2</sup> 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

\*<sup>3</sup> 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사 후 과정

과를 고려하기 위해 연속적인 구형 공동확장을 적용함으로써 이론적으로 얻어지는 간극수압의 분포와 관입 간극수압으로부터 초기 과잉간극수압의 분포를 결정하였으며 축대칭 선형 비혼합 압밀이론을 사용하여 유발된 과잉간극수압의 소산효과를 모사하였다. 이와 같이 계산된 소산곡선과 실제 측정된 소산곡선의 차이를 최소화시키기 위하여 비구속 최적화 알고리즘인 BFGS가 사용되었고 golden section 일차원 탐색법이 사용되었다. 검증 예제를 통하여 적용된 최적화 기법의 안정된 수렴성을 확인하였고 실제 예제에 적용함으로써 제안된 방법이 넓은 범위의 압밀도 범위에서 측정된 소산곡선과 잘 일치하는 압밀계수를 산정함으로써 매우 효과적임을 확인 할 수 있었다.

**Keywords :** Piezocone, Dissipation test, Coefficient of consolidation, Optimization Technique, BFGS, Golden section search

## 1. 서 론

피에조 콘을 이용한 현장 지반의 공학적인 물성치를 추정하는 기법에 관한 연구는 Schmertmann(1974)과 Janbu & Senneset(1974)가 처음으로 기존의 콘에 간극수압을 관측할 수 있는 장치를 부착하여 간극수압을 관측한 후로부터 시작되었다. 이후로 과잉간극수압의 소산시험을 이용하여 정규 압밀된 현장 지반의 압밀특성 및 투수특성을 규명하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되어 왔다. 이러한 방법들은 대부분 피에조 콘 실험으로부터 얻어진 표준화된 현장의 과잉간극수압 소산곡선으로부터 일정한 압밀도에 도달하는 시간을 결정하고 이론적으로 제안된 시간계수로부터 압밀계수를 구하는 방법[Torstensson(1975, 1977), Baligh와 Levadoux (1980), Levadoux와 Baligh(1986), Houlsby와 Teh (1988), Teh와 Houlsby(1991)]들이 주류를 이루어 왔다. 그 외에 Battaglio 등(1981)은 표준화된 소산곡선과 이론적인 곡선을 비교할 때 차이가 압밀도 10%에서 90%구간까지의 표준분산(standard deviation) 값이 가장 적도록 하는 압밀계수를 구하는 방법을 제시하였으며, Gupta(1983)와 Gupta와 Davidson(1986)은 실제 소산곡선과 해석 프로그램에서 모사한 간극수압 소산곡선이 50% 압밀도에서 일치하도록 하는 압밀계수 값을 구하는 방법을 제안하기도 하였다.

한편 위의 연구자들이 이론곡선을 제안하기 위해 적용한 방법은 크게 공동확장이론을 이용한 경우[Torstensson(1975,1977)]와 변형률 경로기법[Baligh와 Levadoux ; Teh와 Houlsby]을 이용한 경우로 나눌 수 있다. 이러한 방법들은 피에조 콘의 관입 초기에 유발되는 콘 주변의 초기 과잉간극수압의 분포를 모사하기 위한 것으로 공동확장이론을 적용한 경우에는 Vesic(1972)이 제안한 구형 공동과 실린더형 공동에 대한 간극수압 예측 방법을 이용하여 초기 과잉간극수압의 형태가 제시되었다. 반면 변형률 경로기법은 콘 관입 현상을 유사정적(quasi-static) 현상으로 고려하여 콘 주변에 유발되는 속도장으로부터 변형률장을 계산하고 구해진 변형률장을 적분하여 초기 과잉간극수압의 분포를 예측하는 기법이다. 이와 같은 방법들에 의해 주어진 초기 과잉간극수압을 초기조건으로 하여 일차원 또는 축대칭 비선형 비혼합(uncoupled) 압밀 방정식을 해석함으로써 이론 해가 제시되었다.

그러나 공동확장이론의 경우에는 공동의 형태, 지반의 강성지수(rigidity index) 및 파괴시 간극수압계수( $A_v$ )를 알아야 하며 콘 주변에 발생하는 공동의 형태를 명확히 정의하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 변형률 경로기법은 보다 현실적인 초기 간극수압 분포 형태를 예측할 수는 있지만 해석이 복잡하고 사용된 지반의 모델에 의존적이라는 단점이 있다(Randol-

ph 등,1978; Carter 등,1978). 더욱이 주어진 이론 해 들은 완전 비배수 상태에 대한 가정을 바탕으로 초기 간극수압의 분포가 결정되었으나 실제 지반에서 관입될 때 유발되는 압밀효과를 무시할 수 없다는 연구 결과(Gupta와 Davidson,1986)를 바탕으로 보면 우리나라 지반과 같이 실트질 흙이 많이 포함된 경우에는 피에조 콘 관입 시 완전 비배수 상태 보다는 상당한 배수가 유발되므로 소산곡선에 영향을 주는 초기 간극수압의 분포 형태에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

이 외에도 이론 해의 유도 시 특정한 강성지수에 한정되어 이론 해가 개발되었을 뿐만 아니라 관측된 간극수압 소산곡선을 표준화 할 때 기준으로 삼아야 하는 수압(관입 간극수압 또는 소산시작 시 초기 간극수압)에 대한 논란이 있다. 뿐만 아니라 일정한 압밀도에서만 해를 주므로 서로 다른 압밀도에서는 구해진 압밀계수 값과는 차이가 있다는 점과 개발된 이론곡선과 실제 압밀곡선이 같은 형태를 갖는지 비교하여 같은 형태일 때만 초기 간극수압의 분포가 같은 것으로 가정할 수 있으므로 매번 이론곡선과 실제곡선을 비교해 보아야 한다는 불편함이 있다.

본 연구에서는 실제 관측된 간극수압 소산곡선을 표준화한 후 이론곡선과 일정한 범위에서 비교하거나(Battaglio 등,1981) 일정한 압밀도에서만 비교하여 압밀계수를 구하는 기존의 방법(Gupta와 Davidson,1986)을 개선하고자 콘관입을 모사하여 얻어지는 소산곡선과 실제 관측된 소산곡선을 전 압밀과정에서 비교하여 압밀계수를 추정하는 개선된 방법을 제안하였다. 이를 위해 해석 프로그램으로 모사된 소산곡선과 실제 관측된 소산곡선을 압밀도 전 범위에서 비교하여 그 차이를 목적함수로 정의하고 이 목적함수 값을 최소화하는 최적화 기법을 적용하였다. 최적화 기법으로는 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 방법을 사용하였으며 일차원 탐색방법으로 golden section 탐색법을 사용하였다.

## 2. 기존의 이론 해에 대한 고찰

현재까지 피에조 콘 소산시험으로부터 정규 압밀점토의 압밀계수를 예측하는 방법들 중 가장 많이 사용되고 있는 이론 해들의 가정 사항들을 살펴보면 표 1(Kabir와 Lutenegro, 1990)과 같으며 강성지수가 100인 경우로 가정

표 1. 시간계수 T를 결정하는 이론적인 해와 가정 사항들

연구자	사용한 모델
Torstensson(1977)	구형 또는 실린더형 공동확장이론 등방, 탄성-완전소성체 선형 비혼합 일차원 유한차분법
Levadoux와 Baligh(1986)	변형율 경로법(Strain Path Method) 선형 등방재료 비혼합 이차원 압밀 해(Terzaghi & Rendulic Theory)
Gupta와 Davidson(1986)	현장의 관입재측을 통한 보정된 공동확장이론 등방 또는 비등방 재료 선형 비혼합 축대칭 유한차분법
Houlsby와 Teh(1988)	변형율 경로법(Strain Path Method) 비혼합 일차원 유한차분 압밀 해(A.D.I FD Scheme) 강성지수( $I_r = G/S_v$ )를 고려한 시간계수 제안 $T^* = \frac{C_h \cdot t}{R^2 \sqrt{I_r}}$

하여 제안된 방법들에 의해 얻어지는 시간계수를 비교하여 나타내면 그림1과 같다. 그림 1에 의하면 특정한 강성지수에 대해서도 제안된 방법들이 가정한 사항들과 간극수압의 제측 위치, 해석 방법 등에 의해 이론적인 시간계수들 사이에도 10배까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 해들 중에서 가장 적절한 이론적인 해를 선택하는 것은 매우 어려운 문제

이고 사용된 이론 해에 따라 얻어지는 압밀계수 값의 차이가 큰 것은 당연한 결과라 할 수 있다. 한편, Kabir와 Lutenegro(1987)는 이러한 해들 중에서 Gupta와 Davidson(1986)에 의해 제안된 압밀계수 예측 방법이 다른 이론적인 해에 비하여 여러 압밀도에서도 비교적 일정한 압밀계수를 주며 실내 압밀실험 결과와도 잘 일치한다고 발표한 바 있다.

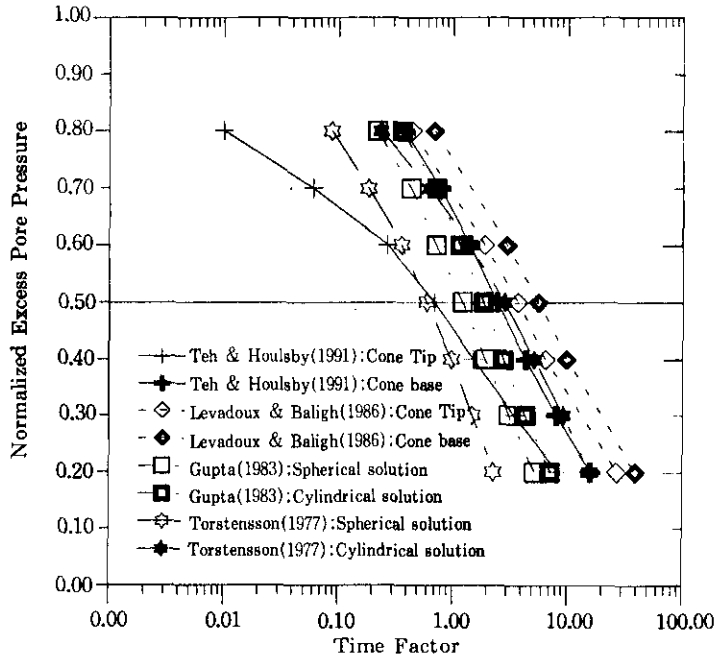


그림 1. 여러 연구자들에 의해 제안된 이론적인 소산곡선 ( $I_R = G / S_U = 100$ )

### 3. 초기 과잉간극수압의 분포

콘 관입 시 콘 주변에 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포에 대한 이론적인 예측은 여러가지 어려움을 포함한 문제(Battaglio 등,1981)이며 아직도 이에 대한 명확한 방법이 제안되지는 않았다. 그러나 현재까지 제안된 방법으로부터 살펴볼 때 콘 선단 부의 상태는 이상화된 탄-소성 매질에서 형성되는 구형 공동확장이론으로부터 예측할 수 있으며[Vesic,1972; Baligh,1975] 콘 마찰부의 간극수압은 실린더

형 공동확장이론으로부터 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 반면 이러한 방법은 콘 주변에 발생하는 실제 변형률과 응력 상태를 구현하지 못하므로 Levadoux와 Baligh(1980)에 의하여 보다 실제적인 변형률 상태를 구현할 수 있는 변형률 경로기법이 제안되었으나 공동확장이론에 비하여 구현하기 복잡할 뿐만 아니라 구현된 변형률 장으로부터 응력 장을 구현할 때 사용되는 모델에 따라 큰 영향을 받는다(Randolph 등,1978; Carter 등,1978).

본 연구에서는 콘 관입 시 콘의 선단 부에는

구형 공동이 발생한다는 기존의 연구 결과를 바탕으로 콘 관입 효과를 관입 시 유발되는 연속적인 구형 공동의 형성으로 표현한 Gupta (1983) 및 Gupta와 Davidson(1986)의 보정된 공동확장이론을 사용하여 초기 과잉간극수압의 분포를 가정하였다. 특히, 이들의 방법에서는 관입 당시 발생하는 간극수압의 소산 효과를 고려함으로써 보다 현실적인 간극수압의 분

포를 가정할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 초기 과잉간극수압의 형성 과정은 그림2와 같이 간략하게 표현될 수 있고 이와 같이 얻어지는 과잉간극수압 값을 관입 시 관측된 관입간극수압에 대하여 보정하면 공동확장이론을 이용함으로써 콘 주변의 과잉간극수압 분포를 실제와 유사하게 추정할 수 있다.

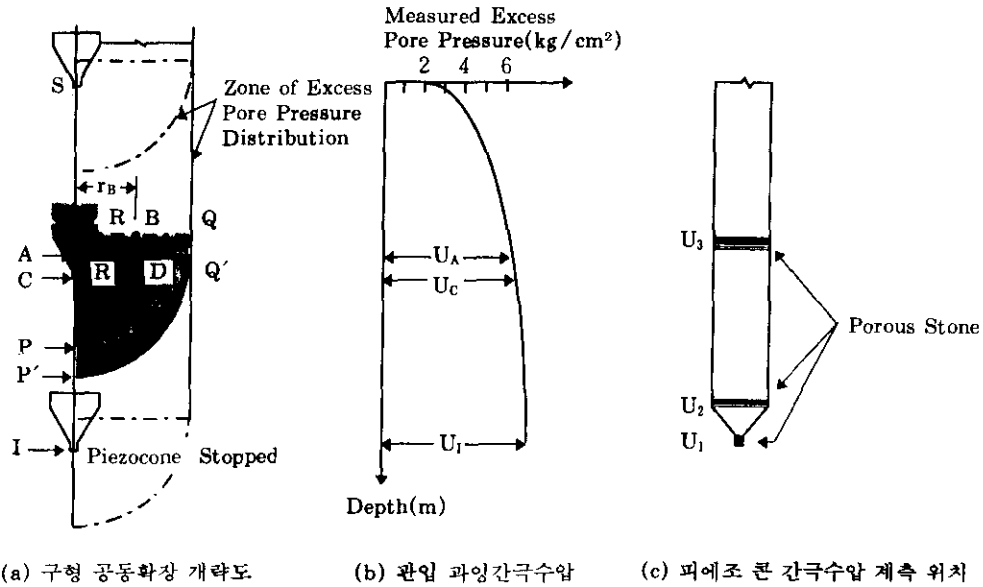


그림 2. 초기 과잉간극수압 분포 예측 방법(Gupta, 1983;Gupta와 Davidson, 1986)

Vesic(1972)이 제안한 구형 공동확장이론에 서와 같이 자연로그 형태의 분포를 사용하면 그림2의 APQR 영역 내의 임의의 점 B에서의 간극수압을 A점에서 측정된 관입 간극수압으로부터 아래 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta U_B = \frac{(U_A - U_{0A}) \left[ 0.943\alpha_r + 4 \ln \left( \frac{R_p}{r_B} \right) \right]}{\left[ 0.943\alpha_r + 4 \ln \left( \frac{R_p}{r_A} \right) \right]} \quad (1)$$

여기서,

$U_{0A}$  = A점에서의 정수압

$R_p$  = 소성 영역 반지름 =  $(G/S_u)^{1/3}$  (구형 공동확장의 경우)

$G$  = 전단변형계수

$S_u$  = 비배수 전단강도

$\alpha_r$  = Henkel의 파괴 시 간극수압 계수 = 0.707  $(3A_r - 1)$

$A_r$  = Skempton의 파괴 시 간극수압 계수

$r_A, r_B$  = 공동의 중심으로부터 각각 A 및 B 점까지의 반지름

계속적으로 관입이 진행되어 콘의 선단부가 C점에 도달하면 위에서와 같은 방법으로 주변 지반 내에 새로운 공동 CP'Q'R'이 형성되며 이 영역 내의 임의의 점 D에서의 간극수압 역

시 식(1)의 'A'를 'C'로, 'B'를 'D'로 바꾸어서 형성할 수 있다. 이때, 콘 선단부가 A점 깊이에 있을 때 형성되었던 간극수압 영역 중 C점에서 형성된 공동과 겹쳐지지 않는 영역의 간극수압들은 초기에 가정된 압밀계수를 바탕으로 소산되며 이와 같은 방법으로 I점까지 관입에 의한 간극수압을 형성하고 이 점에 도달하면 압밀이 진행된다.

#### 4. 선형-비혼합 압밀방정식

압밀이론은 크게 압밀과정동안 총응력이 변하지 않는 비혼합 압밀이론인 Terzaghi-Rendulic이론과 흙 입자와 간극수압의 상호 연관성을 포함한 혼합이론인 Biot의 이론(1941)으로 나눌 수 있다. 콘 주변의 보다 실제적인 압밀과정을 해석하기 위해서는 비선형-혼합 압밀이론을 이용한 해석이 이루어지는 것이 바람직하나 실제로 비선형성의 경우는 복잡한 초기 입력 자료를 구하기 어려우므로 해석 시 적용이 쉽지 않다. 또한 혼합 압밀이론과 비혼합 압밀이론에 대한 비교연구에서 혼합성이 압밀계수 값 결정에 크게 영향을 미치지 않는다는 연구결과(Levadoux 와 Baligh,1980)가 발표된 바 있으며 혼합 압밀이론은 특정한 경우에 대해서는 비혼합 압밀이론과 동일한 지배 방정식이 도출되므로(Sills,1975) 대부분 선형-비혼합 압밀이론이 이용되어 왔다. 본 연구에서는 다음 식(2)와 같은 축대칭 선형-비혼합 지배 방정식을 식(3)과 같은 유한 차분 형태의 압밀방정식으로 간략화 한 후 A.D.I 방법(Alternating Direction Implicit Method)을 사용하여 해석하였다.

$$C_v \frac{\partial^2 U_e}{\partial z^2} + C_b \frac{\partial^2 U_e}{\partial r^2} + \frac{C_b}{r} \frac{\partial U_e}{\partial r} = \frac{\partial U_e}{\partial t} \quad (2)$$

여기서,

$C_v, C_b$  = 연직, 수평방향 압밀계수

$U_e$  = 과잉간극수압

$t$  = 시간

$r$  = 콘 중심축으로부터 반경

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} C_b \delta_r^2 (U_{i,j,n+1} + U_{i,j,n}) \\ & + \frac{1}{2} \frac{C_b}{r} \delta_r (U_{i,j,n+1} + U_{i,j,n}) \\ & + C_v \delta_z^2 U_{i,j,n} \\ = & (U_{i,j,n+1} - U_{i,j,n}) / \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\delta_r, \delta_z$  = 반경과 깊이 방향의 중앙 미분 연산자(central differential operator)

A.D.I기법은 항상 안정된 해를 주며 (n+1/2)단계에서는 먼저 반경(r) 방향으로 식(3)에 의하여 n+1단계의 간극수압을  $u_{n+1}$ 로 근사화하고 다음 z방향으로 아래식(4)를 이용하여 n+1단계의 간극수압  $u_{n+1}$ 을 구하는 방법이다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} C_b \delta_r^2 (U_{i,j,n+1} + U_{i,j,n}) \\ & + \frac{1}{2} \frac{C_b}{r} \delta_r (U_{i,j,n+1} + U_{i,j,n}) \\ & + \frac{1}{2} C_v \delta_z^2 (U_{i,j,n+1} + U_{i,j,n}) \\ = & (U_{i,j,n+1} - U_{i,j,n}) / \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

이와 같은 두 식을 연속적으로 풀게 되면 삼각형의 대수적인 형태의 식들이 형성되며 Gupta(1983)의 해석 프로그램인 PIEZ에 도입한 Thomas Algorithm(Bruce등, 1953; Douglas, 1962)을 이용하여 그 해를 쉽게 구할 수 있다.

#### 5. 최적화 방법

그간 여러 지반공학적인 문제의 해결을 위하여 최적화 기법들이 터널이나 지하 공동의 안정성 해석을 위하여 많이 적용되어 왔으며 최근에는 국내에서도 연약 지반의 압밀해석에 필요한 투수계수나 압축지수 또는 초기 간극비를 구하기 위하여 최적화 기법이 적용되었다(김윤태와 이승래,1996). 본 연구에서는 미지의 설계변수에 대한 목적함수를 줄여가는 방향으로 반복적으로 최소화하는 직접법이 이용되었으며 최소화해야 하는 목적함수는 다음 식(5)와 같이 여러 단계에서 관측된 간극수압과 프로그램에서 예측한 간극수압의 차에 대한 제곱의

합으로 정의되었다.

$$F(\underline{x}) = \sum_{n=1}^{n_{time}} (u^n - U)^2$$

여기서,

$n_{time}$  = 계측이 이루어진 시간 단계의 개수  
 $u = n$  시간 단계에서 프로그램에서 예측한 간극수압

$U = n$  시간 단계에서 계측된 간극수압  
 $\underline{x}$  = 설계변수 = ( $C_v, C_h$ )

일반적인 피에조 콘의 경우 간극수압 계측점은 그림 2(c)와 같이 콘 선단부( $u_1$ )나 선단부 바로 뒤( $u_2$ ) 또는 마찰저항부 뒤( $u_3$ )에서 계측되며 특수한 목적의 콘인 경우 두세 곳에서 동시에 계측되는 경우도 있으나 본 연구에서는 콘 선단부( $u_1$ )에서 간극수압을 관측하는 경우에 대하여만 최적화였다. 설계 변수로는 간극수압의 형성 단계에 영향을 미치는 다른 요소들(강성지수,  $A_r$  등)의 변화가 목적함수에 큰 영향을 주지 않는다는 민감도 해석 결과와 이러한 요소들이 압밀계수를 예측하는데 큰 영향을 주지 않는다는 기존의 연구 결과(Gupta와 Davidson, 1986; Robertson과 Campanella, 1983)를 바탕으로 수평 압밀계수와 연직 압밀계수가 선택되었다. 본 연구에서 사용된 최적화 알고리즘은 비구속 최적화 문제를 해석하는데 가장 효율적으로 알려진 BFGS 방법(김운

태와 이승래, 1996 참조)을 사용하였으며 일차원 탐색방법으로는 golden section 방법을 사용하였다(Arora, 1989; 김운태와 이승래, 1996).

## 6. 예제해석

피에조 콘을 이용한 압밀계수를 추정하기 위해 본 연구에서 적용된 최적화 알고리즘의 안정성을 입증하기 위하여 먼저 수치예제 해석으로부터 구현된 간극수압을 입력 변수로 가정하여 검증 예제 해석을 수행하였다. 그리고 그 결과를 바탕으로 문헌에 발표된 실제 현장에서 관측된 간극수압 소산곡선을 사용하여 압밀계수를 최적화하였고 그 결과를 실내 실험결과나 다른 연구자들에 의한 압밀계수 예측 결과와 비교하였다.

### 6.1 검증 예제 해석

본 연구에서 개발한 프로그램은 간극수압이 콘 선단부에서 관측되는 경우에 대하여 최적화 과정이 수행되며 관입에 의하여 유발된 간극수압은 콘 선단부의 경우 2차원적인 압밀과정( $C_v, C_h$ )이 이루어진다고 알려져 있으므로 등방 및 비등방 조건에 대하여 모두 검증 예제를 수행하였다. 간극수압 결과를 얻기 위하여 아래 표2와 같은 입력 물성치가 사용되었다.

표2. 검증 예제 해석을 위한 지반의 입력 물성값

입력물성		입력값
비배수 전단강도( $S_u$ )		58.84kPa
탄성계수( $E$ )		23.54MPa
Skempton의 파괴 시 간극수압계수( $A_r$ )		0.9
포아송 비( $\nu$ )		0.5
압밀계수( $c$ )	등방( $C_{avg} = C_v = C_h$ )의 경우	0.0046 cm <sup>2</sup> /sec
	비등방( $C_v \neq C_h$ )의 경우	(0.0013, 0.0046) cm <sup>2</sup> /sec

#### 6.1.1 등방( $C_h = C_v$ )인 경우

최적화를 위하여 시간에 따라 입력된 간극수압은 표2와 같은 입력 물성값을 바탕으로 결정

되었으며 입력된 간극수압에 대하여 수평 압밀계수와 연직 압밀계수를 서로 다른 초기조건인 두 설계 변수로 가정하여 최적화한 결과는 표3

과 같다. 초기값 선정에 따라 최적화된 해가 영향을 받는지 검토하기 위하여 여러 가지 다른 초기값의 경우에 대하여 최적화를 실행하였으며 그 결과로 볼 때 개발된 최적화 프로그램은 초기값의 변화에 거의 무관하게 정해에 잘 수렴하는 것을 볼 수 있다.

### 6.1.2 비등방인 경우

비등방인 경우도 표2와 같은 입력 물성값을 바탕으로 간극수압이 결정되었으며 수평 및 연직 압밀계수를 비등방의 경우로, 즉, 서로 다른 변수로 가정하여 최적화한 결과는 표4와 같다. 해석 결과 개발된 최적화 프로그램이 정해에 잘 수렴하는 것을 볼 수 있었으며 반복적인 작

업에 의하여 초기값이 정해보다 9배 적은 범위에서부터 8배 큰 범위 내에서 주어진 경우 정해에 매우 가깝게 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 현장의 경우, 선행된 실내 압밀실험으로부터 초기값이 선택되면 공학적으로 비교적 적절한 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료되어 최적화 문제에 대한 초기값 선정 문제들이 어느 정도 극복할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 비등방 지반의 경우에는 먼저 낮은 수렴 수준으로부터 개선된 설계 변수값을 찾고 그 후에 보다 높은 수렴 수준을 적용함으로써 보다 효율적인 최적화 과정이 수행되도록 최적화 과정을 두 단계로 나누어 수행함으로써 정해에 빠르게 수렴하도록 하는 방법을 적용하였다.

표 3. 등방조건에 대한 최적화 결과

초기값		최적화된 결과		
$C_h$	$C_v$	$C_h$	$C_v$	목적함수 값
0.0075	0.0015	0.00459	0.00461	$1.55 \times 10^{-8}$
0.0010	0.0090	0.00456	0.00465	$9.49 \times 10^{-8}$
0.0030	0.0030	0.00468	0.00441	$9.87 \times 10^{-7}$
0.0015	0.0015	0.0046	0.00456	$6.26 \times 10^{-7}$

표 4. 비등방 조건에 대한 최적화 결과

초기값		최적화된 결과		
$C_h$	$C_v$	$C_h$	$C_v$	목적함수 값
0.0025	0.0065	0.00455	0.00136	$5.76 \times 10^{-8}$
0.0010	0.0090	0.00455	0.00137	$8.05 \times 10^{-8}$
0.00092	0.0065	0.00455	0.00137	$6.68 \times 10^{-8}$
0.0276	0.0078	0.00454	0.00136	$7.28 \times 10^{-8}$

## 6.2 실제 예제 해석

검증 예제로부터 개발된 최적화 프로그램은 등방 및 비등방 지반의 압밀계수 값들을 적절하게 예측함을 알 수 있었으며 이 절에서는 기존의 논문에 발표된 소산곡선을 대상으로 개발된 프로그램을 이용하여 압밀계수를 최적화하였고 이를 실내 압밀실험 결과나 다른 연구자들에 의한 연구 결과와 비교하였다.

### 6.2.1 실내 모형 토조에서 실시된 피에조 콘

#### 실험 결과 (Kurup 등, 1994)

본 예제로 이용된 실험에서는 서로 다른 응력조건 및 응력이력에 따라 네 가지 시료에 대하여 모형 피에조 콘 실험이 실시되었고 이 중 정규 압밀점도에서 실시된 시료1에 대한 소산 시험 결과를 대상으로 압밀계수를 최적화하였다. 시료1은 다음 표 5와 같은 조건 하에서 2단



표 5. 시료 1의 물성값

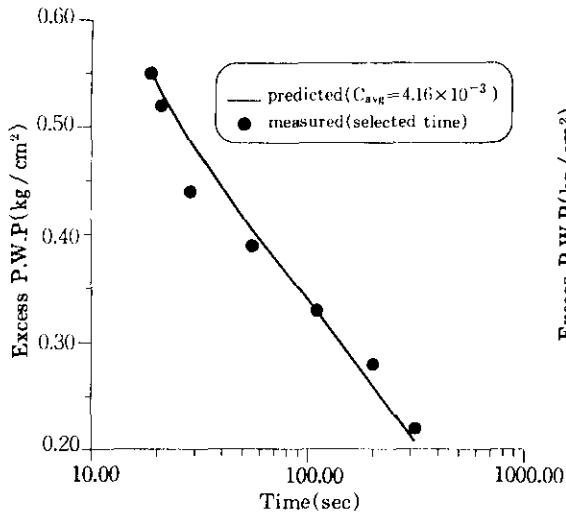
성질	물성값
성분(중량 비)	Kaolinite(50%)+모래(50%)
압밀 응력	138kPa(슬러리 단계) 207kPa(재 압밀 단계)
과압밀 비	1
비배수 전단강도	60kPa
$A_f$	1.1
강성지수( $I_R$ )	267
실내 실험 결과	$14.1 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ (처너 압축) $78.8 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ (재 압축)

계 압밀과정을 통하여 형성된 점토 지반이다.

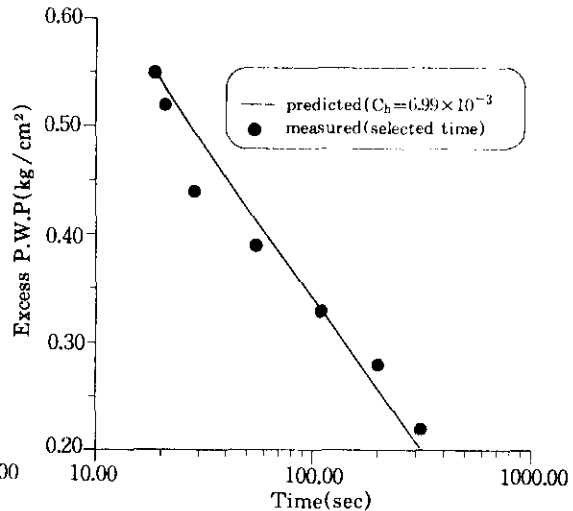
설계 변수 결정은 시료1의 경우 2단계의 압밀과정을 거친 재성형 시료이므로 먼저 등방( $C_{avg}=C_v=c_h$ )의 경우로 가정하여 한 개의 설계 변수를 최적화하면 그 결과는 표6.(3)과 같으며 예측된 소산곡선과 최적화된 압밀계수에 의한 소산곡선은 그림3(a)과 같다. 또한 다른 연구자들에 의해 제안된 이론 해들은 수평 압밀계수만을 예측하므로 비교를 목적으로 본 연구에서도 연직 압밀계수를 충분히 작게 하여 수평 압밀계수만을 최적화하면 표6.(5)와 같으며 소산곡선의 형상은 그림3(b)과 같다.

표 6. 시료 1에 대한 최적화 결과( $C_h \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ )

실내 압밀실험 결과 (1)	초기 값	최적화된 결과			
	$C_{avg}=C_h=C_b$ (2)	$C_{avg}=C_h=C_b$ (3)	목적함수 값 (4)	$C_h$ (5)	목적함수 값 (6)
14.1 (처너 압축의 경우)	10	4.16	$2.99 \times 10^{-3}$	6.99	$4.47 \times 10^{-3}$



(a) 평균압밀계수



(b) 수평압밀계수

그림 3. 시료 1 소산곡선의 비교

그림3에서 보는 바와 같이 최적화된 압밀계수에 의한 소산곡선은 예측된 소산곡선과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며 다른 연구

자들의 방법에 의한 수평 압밀계수와 비교하면 표 7과 같다.

표 7. 제안된 방법과 여러 연구자들에 의해 추정된 압밀계수( $C_h \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ ) 비교

실내 압밀실험 결과	추정된 압밀계수 결과				
	본 연구		Torstensson	Levadoux와 Baligh	Teh와 Houlby
	$C_{avg}$	$C_h$	(1977)	(1986)	(1991)
14.1	4.16	6.99	5.82	7.18	2.18

표7에서 보는 바와 같이 처녀 압축의 경우, 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 추정된 압밀계수는 등방조건인 경우 Torstensson(1977)과 비슷하며, 수평 압밀계수만을 최적화한 경우 Levadoux와 Baligh(1986)의 결과와 근접한 것을 알 수 있다. 그러나 다른 연구자들의 이론해를 이용하는 경우에는 50% 압밀도에 대해서만 잘 일치하는 압밀계수를 주는 반면 본 연구에서 제안한 방법은 그림3에서 보는 바와 같이 전 범위에 걸쳐 고르게 일치하는 압밀계수를 제안하므로 선형 압밀해석을 사용하는 현장 지반에서의 압밀해석 시 압밀도에 따른 큰 차이 없이 보다 바람직한 결과를 도출할 것으로 사료된다.

### 6.2.2 Lake Alice Site의 경우(Gupta,1983)

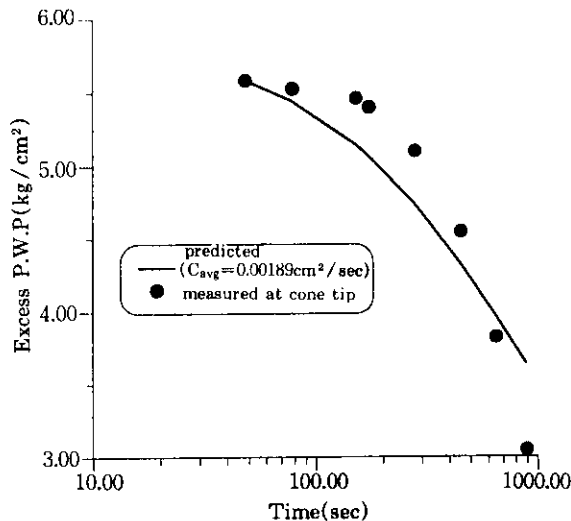
본 예제는 Florida 대학 교정의 근교인 Cory village에 위치한 Lake Alice에서 실시된 피

에조 콘 실험 결과로 1차와 2차 실험으로 나누어 실시되었다. 이 지역의 지하 수위는 지표면으로부터 70cm 아래에 위치하고 지표면으로부터 약2m까지는 실트와 모래 질 흙으로 덮여있다. 4~8m사이에 소성이 큰 점토층이 존재하고 8~11m 사이에는 점토질 모래로 구성되어 있다. 강성지수( $G/S_u$ )와  $A_r$ 는 삼축시험 결과로부터 선택되었으며 표8에 정리되어 있다.

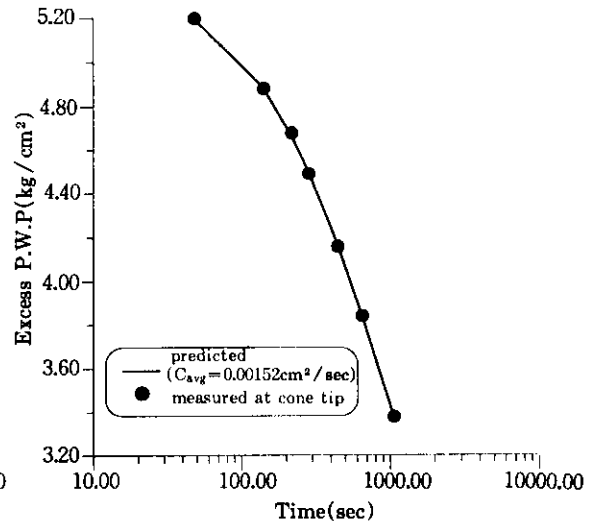
표 8. Lake Alice 지역 1,2차 시험 불성값

차수	깊이(m)	강성지수( $G/S_u$ )	$A_r$
1	6.90	93.33	0.58
2	7.05	93.33	0.58

제안된 최적화기법을 이용하여 추정된 압밀계수는 표9와 같으며 추정된 압밀계수에 의한 소산곡선과 계측된 소산곡선이 그림 4에 비교되어 있다.



(a) 1차 소산실험 결과



(b) 2차 소산실험 결과

그림 4. Lake Alice Site 소산곡선의 비교

표 9. Lake Alice Site에 대한 최적화 결과  
( $C_h \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ )

차수	초기값	최적화된 결과	
	$C_{avg}$	$C_{avg}$	목적함수 값
1	1.0	1.83	$77.2 \times 10^{-2}$
2	1.0	1.52	$3.42 \times 10^{-3}$

그림4에서 보는 바와 같이 최적화된 압밀계수에 의한 소산곡선은 1차 실험의 경우에는 초기 압밀과정에서는 약간 빠르게 예측하며 후반 압밀과정에서는 약간 느리게 예측하는 것을 알 수 있으며 2차 소산 실험의 경우에는 예측된 소산곡선과 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이 실험 결과를 여러 연구자들이 제안한 방법에 의하여 예측한 압밀계수와 비교하면 표 10과 같다.

이번 예제의 경우 제안된 방법에 의하여 추정된 압밀계수는 기존의 연구자들에 의한 방법과 비교해 볼 때 특정 연구자의 해와 일치하지는 않으나 Torstensson(1977)과 Teh와 Houlby(1991)의 해에 대략적으로 일치하는 것을 알 수 있다.

## 7. 결론 및 토의

본 연구에서는 피에조 콘 소산 실험을 통해 얻어진 간극수압 소산곡선으로부터 압밀계수를 추정하기 위하여 예측된 간극수압 소산곡선과 해석과정에서 계산된 간극수압 소산곡선의 차이를 목적함수로 정의하고, 정의된 목적함수를 최소화하기 위해 최적화 기법을 도입함으로

써 압밀계수를 추정하는 방법을 제안하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구에서 개발한 최적화 프로그램은 간극수압이 콘 선단부에서 관측되는 경우에 대하여 최적화 과정을 수행하며 관입에 의하여 유발된 간극수압은 콘 선단부의 경우 2차원적인 압밀과정( $C_v$ ,  $C_h$ )이 이루어진다고 알려져 있으므로 등방 및 비등방인 지반 조건에 대하여 모두 검증예제를 수행하였고 예제 수행 결과 개발된 프로그램이 안정된 수렴성을 보이는 것으로 평가된다.
- 2) 제안된 방법은 기존의 방법에서 특정 압밀도에 도달하기 위한 시간-예를 들면,  $t_{50}$ -을 구하기 위해 간극수압을 표준화할 때 생기는 기준수압에 대한 논란의 여지가 없고 특정한 강성지수의 해로부터 개략적인 이론적 시간계수를 구해야 하는 어려움이 없다.
- 3) 기존의 연구자들에 의해 제안된 이론 해를 이용하는 경우에는 50% 압밀도와 같은 특정한 압밀도에서만 일치하는 압밀계수를 제시하는 반면 본 연구에서 제안한 방법은 전 압밀도 범위에 걸쳐 고르게 일치하는 압밀계수를 추정하므로 선형 압밀 해석을 사용하는 현장의 경우에는 압밀도에 따른 큰 변화 없이 보다 바람직한 결과를 도출할 것으로 사료된다.

그러나 압밀계수 값은 하중 변화 크기에 따라서 변화되는 설계 변수이므로 피에조 콘 관입 시험으로부터 얻어진 압밀계수 값을 실제

표 10. 제안된 방법과 여러 연구자들의 방법에 의해 추정된 압밀계수( $C_h \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ )비교

차수	본 연구	Torstensson* (1977)	Levadoux와 Baligh (1986)	Teh와 Houlby* (1991)	Gupta (1983)
	$C_{avg}$				
1	1.83	1.91	11.7	2.2	3.3
2	1.52	0.98	6.1	1.13	1.8

\*  $I_R=100$ 으로 가정한 경우

설계에 적절히 고려하기 위해서는 콘 관입으로부터 얻어지는 소산곡선이 콘 관입 시 지반 내에서 어느 정도의 하중 변화에 의해 구해진 것인가를 확인할 필요가 있다. 이를 위해서는 콘 관입에 의한 지반 내에서의 하중 변화에 대한 연구가 보완되어져야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 김윤태, 이승래, 1996, 축대칭 비선형 압밀해석을 위한 지반 정수 값의 최적화 기법, 한국지반공학회지, 12권 4호, pp.131~143.
2. Arora, J.S., 1989, Introduction of Optimum Design, McGraw-Hill Series.
3. 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.
4. Baligh, M.M., 1973, Theory of Deep Site Static Cone Penetration Resistance, Dept. of Civil Engineering, Report R.75-56 No.517, Cambridge, MA.
5. Battaglio, M., M. Jamiolkowski, R. Lancellotta, & R. Maniscalco, 1983, Piezometer Probe Test in Cohesive Deposits, ESOPT, 264~, 1981.
6. Biot, M.A., 1941, General Theory of Three Dimensional Consolidation, J. of Applied Physics, Vol.12, pp.155~164.
7. Bruce, G.H., Peacemen, D.W., Rachford, H.H., & Rice, J.D., 1953, Calculation of Unsteady-State Gas Flow through Porous Media, Trans. of American Institute Mining and Met. Engineers 198, p.79.
8. Carter, J.P., Randolph, M.F., & Wroth, C.P., 1978, Stress and Pore Pressure Changes in Clay during and after the Expansion of a Cylindrical Cavity, Report No. TR51, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Cambridge, England.
9. Douglas, J., 1962, Alternating Direction Methods for Three Space Variables, Numerische Mathematik 4, pp.41~63.
10. Gupta, R.C. & J.L. Davidson., 1986, Piezoprobe Determination Coefficient of Consolidation, Soil and Foundations, Vol.26, No.3, pp.12~22, September.
11. Gupta, R.C., 1983, Determination of the In situ Coefficient of Consolidation and Permeability of Submerged Soil using Electrical Piezoprobe Sounding. Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida.
12. Houlsby, G.T. & Teh, C.I., 1988, Analysis of the Piezocone in Clay, ISOPT I, Orlando, Florida, Vol.2, pp.777~783.
13. Janbu, I. & Senneset, K., 1974, Effective Stress Interpretation of In-situ Static Penetration Tests, ESOPT-I, Stockholm, Sweden, Vol.2.2, pp.181~195.
14. Kabir, M.G. & A.J. Lutenegeger., 1987, Discussion on Piezoprobe Determined Coefficient of Consolidation, Soils and Foundation, 27(2): 70~72.
15. Kabir, M.G. & A.J. Lutenegeger., 1990, In situ Estimation of the Coefficient of Consolidation in Clays. Can. Geotech. J. 27.58~67.
16. Kurup, P.U., G.Z. Voyiadjis, & M.T. Tumay, 1994, Calibration Chamber Studies of Piezocone Test In Cohesive Soils, J. of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 120, No.1, January.
17. Levadoux, J.N. and Baligh, M.M., 1986. Consolidation after Undrained Piezocone penetration II: Interpretation. J. of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 112, No.7, July.
18. Randolph, M.F., Carter, J.P., Wroth, C.P., 1978, Driven Piles in Clay (1) Installation, Modeled as the Expansion of a Cylindrical Cavity, Univ. of Cambridge, Dept. of Civil Engineering, Soils/TR 53.
19. Robertson et al., 1992, Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Test. Can. Geot. J. 29 539-550
20. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D.G. and Greig, J. 1986. Use of Piezometer Cone Data. Proceedings of In-situ '86, ASCE, Specialty Conference, Blacksburg, Vir-

- ginia.
21. Robertson.P.K. & R.G.Campanella.,1983, Interpretation of Cone Penetration Tests : Clay, Can. Geotech. J. 20. 734~745.
  22. Schmertmann,J.H.,1974, Penetration Pore Pressure Effects on Quasi-static Cone Bearing qc, ESOPT, Stockholm, Vol.2.2, pp.345~351.
  23. Sills,G.C., 1975, Some Conditions under which Biot's Equations of Consolidation Reduce to Terzaghi's Equation, Geotechnique, London, England, Vol.25, No.1, pp.129~132.
  24. Sully.J.P. & R.G. Campanella.,1994, Evaluation of Field CPTU Dissipation Data in Overconsolidated Fine-Grained Soils, XIII ICSMFE, India. study of Cone Penetrometer Test in Clay, Geotechnique, Vol.41,No.1, pp. 17~34.
  26. Torstensson, B. -A. 1975. The Pore Pressure Sounding Equipment. ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, NC, pp.48~55.
  27. Torstensson, B. -A. 1977. The pore pressure Probe. Proceeding. Geoteknikkdagen, Tapir Forlag, Oslo.
  28. Vesic,A.S., 1972, Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, J. of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 98, No. SM3, March, pp. 265~290.

(접수일자 1997. 3. 19)