

콘 선단부 뒤에서 관측된 간극수압 소산곡선을 이용한 수평 압밀계수 결정

Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation
by Using Pore Pressure Measurements behind the Cone Tip

김 영 상*¹

Kim, Young - Sang

이 승 래*²

Lee, Seung - Rae

Abstract

Based on the authors' previous research, we have conducted more researches on finding out the coefficient of consolidation from Piezocone dissipation test results, especially measured behind the cone tip which is mostly used in Korea, by adopting the optimization technique.

By analyzing numerical and real field examples, it can be found that the adopted optimum technique that minimizes the differences between the predicted dissipation curve and the measured one gives consistent and convergent results, irrespective of initial values. Such technique also provides horizontal coefficient of consolidation which is able to simulate real field consolidation behavior more effectively.

요 지

본 논문은 콘 선단부에서 간극수압을 관측하는 피에존 콘의 소산시험으로부터 현장 압밀계수 결정 시 최적화 기법의 적용에 관한 기존의 연구를 바탕으로 현재 우리나라에서 사용되고 있는 피에존 콘 관입기 - 콘 선단부 뒤에서의 간극수압 관측 - 의 경우에 대하여 최적화를 사용한 압밀계수 결정방법을 적용한 연구를 수행하였다.

수치 검증예제와 국내외의 실제예제를 통하여 적용된 최적화 기법의 안정성과 초기 입력 값에 영향을 받지 않는 수렴성을 확인하였으며 제안된 방법이 계측된 소산곡선과 프로그램으로 예측된 소산곡선의 차이를 최소화하는 수평 압밀계수를 산정함으로써 실제 현장의 압밀거동을 모사하기에 매우 효과적이라 사료된다.

Keywords : Piezocone, Dissipation test, Horizontal coefficient of consolidation, Optimization technique

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

1. 연구배경

현재 세계적으로 사용되는 전기식 피에조 콘은 1970년 초부터 계속적으로 개발되어 왔으며 관입기의 선단각은 60° , 단면적은 10cm^2 , 마찰부 면적은 150cm^2 로 그 형태와 기능에 대한 규준이 받아들여지고 있으나 간극수압 관측 지점에 대하여는 아직도 확정된 바가 없다. 간극수압 관측위치를 중심으로 사용되는 피에조 콘을 분류하면 콘 선단부(on the cone tip)에서 간극수압을 관측하는 경우와 콘 선단부 바로 뒤(behind the cone tip)에서 간극수압을 관측하는 경우, 그리고 마찰저항 관측부 뒤(above the friction sleeve)에서 관측하는 경우와 같이 크게 세 경우로 구분할 수 있다. 먼저, 콘 선단부에서 간극수압 관측이 이루어 지는 경우 소산시험 시 관측되는 간극수압은 그림 1에서 보는 것과 같이 지반의 과압밀에 상관없이 콘 선단부에서 최대 간극수압이 유발되므로 소산시험 시 간극수압이 시간에 따라 감소하는 형상을 보이므로 소산곡선으로부터 압밀계수를 추정하기 위하여 제안된 이론 해들을 큰 문제 없이 사용할 수 있다는 장점이 있다.

그러나, 현재 국내에서 사용되고 있는 대부분의 피에조 콘은 간극수압을 콘 선단부 바로 뒤에서 관측하는 콘이 주류를 이루고 있으며 이는 ISSMFE(1977)와 ASTM(1979)이 추천한 바와 같이 콘 선단부 바로 뒤 15mm 내의 실린더형 몸체 부분에 간극수압 관측 porous stone이 위치하는 것이다. Jamiolkowski 등(1985)에 따르면 이 위치에서 간극수압을 관측하는 경우에는 porous stone의 마멸(abrasion)이나 스미어(smear) 효과가 적으며 모래질 흙에 관입하는 경우에도 콘 선단부와 porous stone의 압축성에 의한 간극수압의 변화가 크지 않고 다음 식(1)과 같이 콘 선단부와 실린더형 본체와의 조립부에서 발생할 수 있는 불균등 면적비 보정 시 사용되는 간극수압을 직접 관측할 수 있다는 장점이 있다.

$$q_r = q_c + u_c(1 - a) \quad (1)$$

여기서, q_r 는 보정된 선단저항력, q_c 는 관측된 선단저항력, u_c 는 콘 선단부 바로 뒤에서 관측된 간극수압, a 는 불균등 면적 비(unequal end area ratio) 또는 부등 단면적 비이다.

또한, Wroth(1984)는 이론적인 고찰을 통하여 콘 선단부 뒤에서 간극수압을 관측하는 경우가 평균 주응력보다는 전단응력에 의한 간극수압 발생이 크고 그림 1에 보는 바와 같이 콘의 축 방향을 따라서 간극수압의 변화율(gradient)이 작다는 점, 그리고 실험 도중에 룯드(rod)교환이나 소산시험을 위해 관입을 중지함으로써 선단부에 가해지던 연직응력이 감소하여 발생할 수 있는 간극수압의 급격한 감소가 작다는 점 등을 들어 porous stone이 콘 선단부가 아닌 곳에 설치되어야 함을 주장함으로써 콘 선단부 뒤에서의 간극수압 관측을 지지하였다. 마지막으로 콘 마찰저항부 뒤에서 간극수압을 관측하는 경우도 있으나 이 경우에는 유발된 간극수압의 절대치가 작으므로 발생할 수 있는 오류의 가능성이 크다. 그러나, 이러한 세 경우 모두 한 곳에서 관측된 간극수압 만으로는 그림 1과 같이 콘 주변에 복잡하게 분포된 간극수압을 관측할 수 없으므로 자신의 해석에 필요한 간극수압 관측위치를 선정하거나 최근에 개발되어 사용되는 여러 곳에서 동시에 간극수압 관측이 가능한 피에조 콘을 사용하는 것이 바람직하다.

2. 연구목적

본 연구에서는 김영상 등(1997)과 김영상과 이승래(1998)가 간극수압 관측 porous stone이 선단부(on the cone tip)에 위치한 경우에 대해서 최적화 기법을 사용하여 소산도의 변화에 대하여 보다 일관성 있으며 현장의 소산거동을 실제에 가깝게 모사하는 압밀계수를 추정하고 이를 이용하여 80%이상의 고 소산도 간극수압 예측에 사용하였던 기법을 국내에서 주로 사용

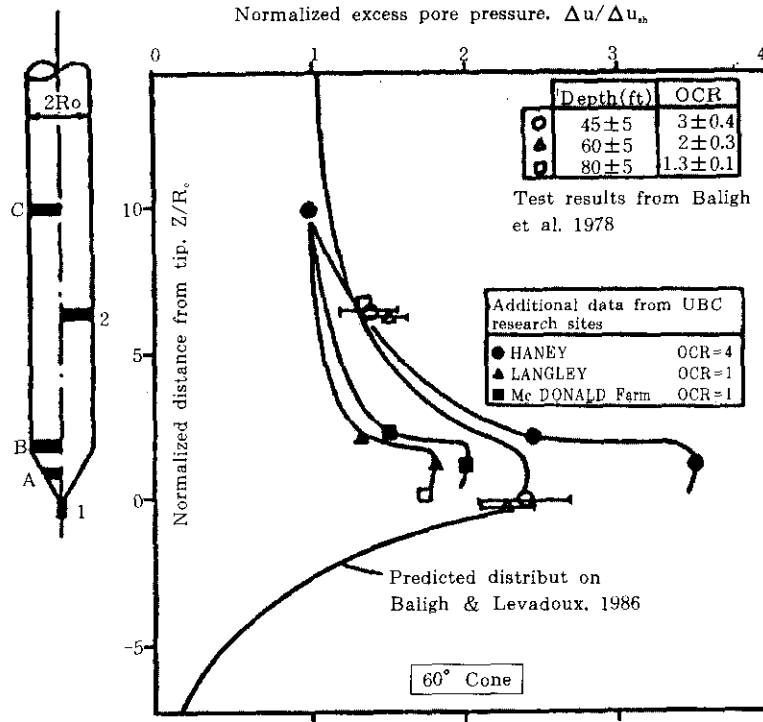


그림 1. 콘 주변에 유발되는 관측 및 예측 간극수압 분포(Baligh와 Levadoux, 1980)

되고 있는 콘 선단부 바로 뒤(behind the cone tip)에서 간극수압을 관측하는 경우에 대하여도 적용할 수 있도록 하고자 하였다. 이를 위하여 콘 선단부 바로 뒤에서 간극수압을 관측하는 경우 콘 관입 시 유발되는 초기 간극수압 분포를 결정하는 방법에 대하여 연구를 수행하였으며 이를 바탕으로 관측된 소산곡선 거동을 보다 가깝게 모사하는 수평 압밀계수를 결정하였다. 이때, 기존의 연구에서 개발되었던 프로그램을 콘 선단부 뒤(behind the cone tip)에서 간극수압을 관측하는 경우에 적용할 수 있도록 수정, 보완하였으며 이 해석 프로그램으로 모사된 소산곡선과 실제 관측된 소산곡선을 입력 소산도 범위에서 비교하여 그 차이를 목적함수로 정의하고 이 목적함수 값을 최소화하는 최

적화 기법을 적용하였다.

3. 초기 과잉간극수압의 분포

초기 과잉간극수압의 크기와 공간적인 분포는 알려진 바와 같이 연속적으로 모사되는 소산과정과 소산곡선의 형상에 큰 영향을 미치며 결과적으로 얻어지는 압밀계수를 변화시키는 주요 원인이다. 본 연구에서는 Vesic(1972)이 제안한 구형 공동확장이론에서와 같이 자연로그 형태의 분포를 사용하여 그림 2(a)와 같이 관입 시 콘 선단부 주변에 발생하는 구형 공동 RPQ내의 임의의 점B에서의 간극수압을 콘 선단부 바로 뒤인 M점에서 계측된 관입 간극수압에 대하여 식(2)와 같이 표현하였다. 이어서

연속적으로 관입되어 형성된 새로운 구형공동 R' P' Q' 의 임의점 D에서의 간극수압은 식(2)에서 M을 C로, B를 D로 바꾸어 줌으로써 C점에서의 관측 관입간극수압 u_c 를 기준으로 공동 내의 각 점들의 간극수압 형성을 모사하였다(김영상 등, 1997).

$$\Delta u_B = \frac{(u_M - u_{OM}) \left[0.943\alpha_f + 4 \ln \left(\frac{R_P}{r_B} \right) \right]}{\left[0.943\alpha_f + 4 \ln \left(\frac{R_P}{r_M} \right) \right]} \quad (2)$$

여기서,

u_{OM} = M점에서의 정수압

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

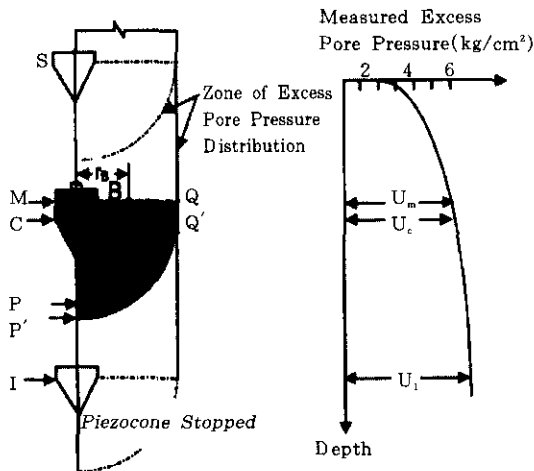
G = 전단변형계수

S_u = 비배수 전단강도

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

A_r = Skempton의 파괴 시 간극수압 계수

r_B, r_M = 공동의 중심으로부터 각각 B점 및 M점까지의 반지름



(a) 공동형성 개략도 (b) 관측 관입간극수압

그림 2. 피에조 콘 관입 시 공동형성의 개략도와 관측 관입간극수압

4. 소산과정 모사 및 최적화 과정

콘 주변에 형성된 초기 과잉 간극수압의 소산과정은 식(3)과 같이 축대칭 선형-압밀방정식을 사용하여 모사하였으며 유한차분법(FDM)의 A.D.I.(Alternating Direction Implicit)방법을 사용하여 해를 구하였다. 따라서, 본 연구를 통하여 얻어지는 소산곡선은 정규압밀 또는 미약하게 과압밀된 점토의 소산곡선과 같이 Mandel-Cryer효과를 보이지 않는 경우에만 적용이 가능하다.

$$c_v \frac{\partial^2 u_c}{\partial z^2} + c_n \frac{\partial^2 u_c}{\partial z^2} + \frac{c_h}{r} \frac{\partial u_c}{\partial r} = \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, C_v, C_h = 연직, 수평방향 압밀계수, U_c = 과잉간극수압, r = 콘 중심 축으로부터 반경

또한, 사용된 최적화 기법은 식(4)와 같이 각 시간단계에서 관측 간극수압과 예측 간극수압의 차이로 정의된 목적함수가 최소화될 때까지 반복적으로 설계변수를 보정하는 직접법이 사용되었으며 선택된 설계변수는 수평 압밀계수이다. 사용된 최적화 알고리즘은 비구속 최적화 문제를 해석하는데 가장 효율적으로 알려진 BFGS 방법을 사용하였고 일차원 탐색방법으로는 golden section 방법을 사용하였다(김영상 등, 1997; 김윤태와 이승래, 1996).

$$F(x) = \sum_{n=1}^{ntime} (u^n - U^n)^2 \quad (4)$$

여기서, ntime = 계측이 이루어진 시간 단계의 개수, $u = n$ 시간 단계에서 프로그램에서 예측한 간극수압, $U = n$ 시간 단계에서 계측된 간극수압, x = 설계변수 = (c_h)

5. 예제해석

수정된 프로그램과 기법의 검증용 위하여 알고 있는 지반물성(압밀계수)을 대입하여 얻어진 간극수압을 입력 변수로 가정하여 적용된 기법이 안정되게 정해에 도달하는지 수치적인

검증 예제 해석을 수행하였다. 또한 실제문제로 Battaglio 등(1981)에 발표된 이태리 Porto Tolle 현장과 국내 아산현장에서 관측된 간극수압 소산곡선을 사용하여 수평 압밀계수를 최적화하였고 그 결과를 실내,외 실험결과와 비교하였다.

5.1 검증 예제 해석

이 연구에서는 간극수압이 큰 선단부 뒤에서 관측되는 경우에 대하여 최적화 과정이 수행되었으며 관입에 의하여 유발된 간극수압은

표 1. 검증 예제 해석을 위한 지반의 입력 물성 값

입력물성		입력 값
비배수 전단강도(S_u)		58.84kPa
탄성계수(E)		23.54MPa
Skempton의 파괴 시 간극수압계수(A_v)		0.9
포아송 비(ν)		0.5
압밀계수(c_v)	등방($C_{v,v} = C_v = C_h$)의 경우	0.0046cm ² /sec
	비등방($C_v \neq C_h$)의 경우	0.0013, 0.0046)cm ² /sec

5.1.1 등방인 경우

이미 기술한 바와 같이 이 위치에서는 수평 압밀이 주도적으로 일어나는 것으로 알려져 있으며 이러한 조건에 맞도록 연직 압밀계수를 $c_v = 0.0046$ 으로 고정하고 수평 압밀계수만을 설계변수로 선택하여 최적화 하였다. 최적화 결과가 표2에 주어져 있으며 초기 값의 영향을 살펴보기 위하여 정해 cm²/sec를 중심으로 10배 작거나 10배 크게 초기 값을 선정하여도 매우 정확하게 수렴하는 것을 알 수 있어 압밀계수를 추정하기 위하여 본 논문에서 개발

표 2. 등방조건에 대한 콘 선단부 바로 뒤에서의 최적화 결과

초기값		최적화된 결과		
C_h	C_v	C_h	C_v	목적함수 값
0.0075	0.0046	0.0046	0.0046	2.56×10^{-12}
0.0010	0.0046	0.0046	0.0046	1.16×10^{-11}
0.00046	0.0046	0.0046	0.0046	1.47×10^{-11}
0.046	0.046	0.00459	0.0046	6.21×10^{-10}

콘 선단부 뒤에서는 수평압밀과정(c_h)이 주도적으로 이루어 진다고 알려져 있으므로(Baligh 와 Levadoux, 1980) 본 논문에서는 수평 압밀계수만을 최적화하였다. 이때, 연직 방향의 압밀계수는 정해를 알고있는 경우와 현장의 상황을 가정하여 정해를 모르는 경우에 대하여는 연직 압밀계수를 충분히 작게 하고 수평 압밀계수만을 최적화함으로써 현장 적용성에 대하여 논의하였다.

입력 간극수압 결과를 얻기 위하여 아래 표1와 같은 입력 물성치가 사용되었다.

된 최적화 알고리즘이 매우 안정된 것임을 알 수 있다.

5.1.2 비등방인 경우

등방인 경우와 마찬가지로 연직 압밀계수는 $c_v = 0.0013$ cm²/sec로 고정하였으며 오직 수평 압밀계수만을 최적화 하였다. 표3에 그 결과를 정리하였으며 최적화 결과 초기 값을 정해를 중심으로 10배 작거나 크게 변화시켜서 선정하여도 정해에 수렴함을 알 수 있다.

표 3. 비등방 조건에 대한 콘 선단부 바로 뒤에서의 최적화 결과

초기값		최적화된 결과		
C_h	C_v	C_h	C_v	목적함수 값
0.0075	0.0013	0.00459	0.0013	7.54×10^{-9}
0.001	0.0013	0.046	0.0013	1.35×10^{-11}
0.00046	0.0013	0.0046	0.0013	1.76×10^{-11}
0.046	0.0013	0.00459	0.0013	3.03×10^{-12}

5.1.3 현장지반의 경우($c_v = 0.1c_{v, exact}$)

이 절에서는 5.1.2절에서 다룬 비등방 검증 문제가 실제 현장에서는 연직 압밀계수를 정확하게 파악하여 최적화를 수행할 수 없다는 가정하에서 정해보다 10배 작은 압밀계수 ($c_v = 0.00013 \text{ cm}^2/\text{sec}$)를 입력하였을 때, 즉 충분히 작은 연직 압밀계수를 가정하여 수평 압밀계수만을 최적화 할 때 얻어지는 결과를 정해와 비교해 보았다. 압밀계수 최적화 결과 표4와 같이 수평 압밀계수가 일정한 값($0.00512 \text{ cm}^2/\text{sec}$)에 수렴함을 알 수 있었으며 정해 ($0.0046 \text{ cm}^2/\text{sec}$)에 비하여 일정하게 11.3% 증가된 값을 보였다.

또한 이와 같이 얻어진 수평 압밀계수를 입력했을 때의 소산곡선을 정해를 입력했을 때와 비교하면 그림 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 감소된 연직 압밀계수를 입력하여 얻어진 수평 압밀계수는 정해를 입력하여 얻어진 간극수압 소산곡선과 거의 일치하여 현장에서 얻어진 간극수압 소산곡선으로부터 압밀계수를 최적화하기 위해서는 불확실한 연직 압밀계수를 가정하여 입력하는 것 보다 이 값을 충분

히 작게 하여 수평 압밀계수만을 추정하는 것이 보다 바람직하며 그 결과가 현장 거동을 모사하기에 충분히 신뢰성이 있다고 판단된다.

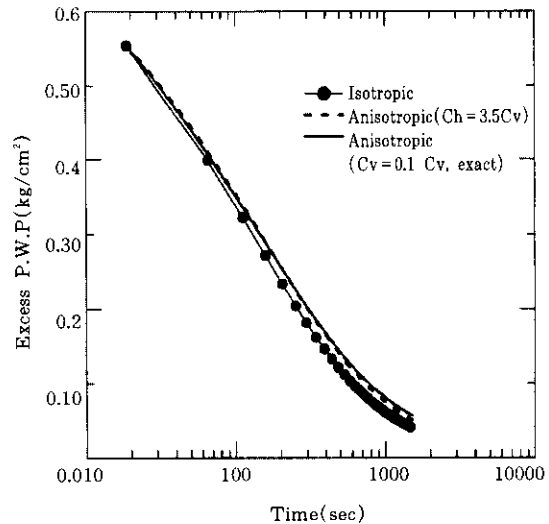


그림 3. 검증예제(등방, 비등방: C_v 와 $0.1C_v$)의 소산곡선의 비교

표 4. 비등방 조건에 대한 콘 선단부 바로 뒤에서의 최적화 결과

초기값		최적화된 결과		
C_h	C_v	C_h	C_v	목적함수 값
0.0075	0.0013	0.00512	0.0013	5.15×10^{-5}
0.001	0.0013	0.00512	0.0013	5.15×10^{-5}
0.00046	0.0013	0.005112	0.0013	5.176×10^{-5}
0.046	0.0013	0.00512	0.0013	5.158×10^{-5}

5.2 실제 예제 해석

검증 예제로부터 개발된 최적화 프로그램은 등방 및 비등방 지반뿐 아니라 연직 압밀계수를 정확히 알 수 없는 현장지반의 경우에도 수평압밀계수 값들을 적절하게 예측함을 알 수 있었으며 이 절에서는 Battaglio 등(1981)의 논문에 발표된 Porto Tolle현장과 국내의 아산현장의 소산곡선을 대상으로 개발된 프로그램을 이용하여 수평 압밀계수를 최적화하였다.

5.2.1 Porto Tolle 점토지반에서 행해진 실험 결과(Battaglio 등, 1981)

본 예제 지반은 최근에 형성된 정규압밀된 실트질 점토 지반으로서 다양한 실내실험을 통하여 적절한 입력 물성의 선택을 위한 비배수 상태에서의 거동 특성을 살펴보았으며 그 결과를 표5와 같이 정리할 수 있다. Battaglio 등은 이 물성치 중에서 현장에서 관측된 간극수압 발생량과의 비교를 통하여 직접전단 시험(DSS-CKoU)에서 결정된 전단강도와 강성지수가 가장 근접한 결과를 줌을 보고하였으며 이를 근거로 하여 본 논문에서는 표6과 같은 입력 물성을 사용하였다. 이때, 전단실험을 통하여는 Skempton의 파괴 시 간극수압 계수를 얻을 수 없었기 때문에 삼축압축 시험을 통하여 얻은 값과 같다는 가정을 사용하였다. 입력된 물성 값들과 50% 입력 소산도로부터 수평

압밀계수를 최적화하였으며 그 결과는 표7에, 입력 소산도까지의 소산곡선은 그림 4에 나타난 것과 같다.

최적화 결과 얻어진 압밀계수가 입력 소산도까지 매우 잘 일치하는 결과를 제시하여 이 지역에서 행해진 피에조 콘 실험 시 콘 주변에 분포된 초기 과잉 간극수압이 본 연구의 프로그램으로 잘 모사되었음을 알 수 있다.

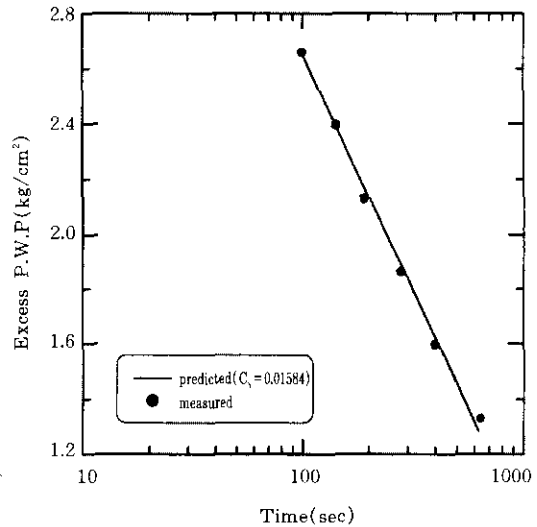


그림 4. Porto Tolle 지반의 입력 소산도까지 소산곡선

표 5. Porto Tolle 점토의 실험 형태에 따른 비배수 거동(Battaglio 등, 1981)

실험의 형태	$C_u/\bar{\sigma}_{vo}$	$E_u/\bar{\sigma}_{vo}$	I_R^*	A_t
TX-CKoU-CL	0.31 ± 0.03	89.4 ± 37.4	96	1.11 ± 0.19
DSS-CKoU	0.26 ± 0.02	86.6	110	N.A.
PSD-CKoU-CL	0.39 ± 0.03	209.8	179	0.92

*여기서, $I_R = G/S_u$

표 6. Porto Tolle 점토의 해석을 위한 선택된 입력 물성

$C_u/\bar{\sigma}_{vo}$	$E_u/\bar{\sigma}_{vo}$	I_R	A_t
0.26	86.6	110	1.11

표 7. Porto Tolle 점토의 최적화 결과($c \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)

초기 값	최적화 결과	
10	C_t	목적함수 값
	15.84	7.145×10^{-3}

또한 본 논문에서 얻어진 최적화된 수평 압밀계수와 동일 현장에서 다른 방법으로 추정된 수평 압밀계수를 비교하면 표8과 같다. 여러 가지 방법으로 얻어진 압밀계수들이 매우 큰 범위를 형성하고 있기 때문에 해당 지반의 정확한 압밀계수를 알 수는 없으나 실내압밀시험 보다는 훨씬 큰 값을 보이고 self boring permeability나 현장에서 행해진 실험 결과로부터 역해석 된 값의 상한계와 비슷함을 보여 현장 피에조 콘 소산실험을 통해 얻은 수평 압밀계수가 현장에 발생한 전체적인 투수 특성을 반영하는 것으로 사료된다.

표 8. Proto Tolle 지반에서 구해진 여러 방법과 본 연구결과에 의한 수평 압밀계수와의 비교

Source	$ch \cdot 10^{-3}(\text{cm}^2/\text{sec})$
IL Oedometer Test	1.7~2.5
Piezometer probe dissipation tests(Battaglio의 결과)	8($I_a=100$)
Constant head permeability tests	$\cong 9.7$
Self boring permeability	1.86~14.8
Back analyses of trial embankment with vertical drains	6~21
This study	15.84

5.2.2 국내 아산지반에서 행해진 실험 결과

본 예제는 국내 서해안 아산지역에서 행해진 현장 소산시험 결과로부터 압밀계수를 추정한 것이다. 이 지반의 해석을 위하여 압밀-비배수(CU) 삼축압축시험을 수행하였으며 초기 접선전단탄성계수(G_0)를 사용하여 강성지수를 산정하였고 최적화를 위한 입력 소산도는 50% 이고 정리하면 표9와 같다. 최적화를 통하여 얻어진 수평 압밀계수는 표 10과 같으며 실내에서 이루어진 압밀시험 결과를 본 연구와 비교하기 위하여 현장의 불교란 시료를 채취하여 얻어진 $c_v/c_v \approx 2.39$ 관계를 적용하여 수평방향의 압밀계수를 산정하였다. 입력 소산도까지의 소산곡선 결과는 그림 5와 같다.

표 9. 아산 지반의 소산시험 해석을 위해 선택된 입력 물성

s_v	E_v	I_R	A_r	입력소산도(%)
0.67	140	69.65	0.95	50.0(%)

표 10. 아산 지반의 압밀계수 최적화 결과 ($C_v \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$) 및 압밀실험 결과

초기 값	수평 압밀계수(oedometer)	
	C_v	목적함수 값
10		$c_v/c_v \approx 2.39$
	15.984	9.764×10^{-3}
		9.897

표 10에 나타난 바와 같이 최적화를 통하여 얻어진 수평 압밀계수는 Oedometer 실험으로부터 관측된 값보다는 약간 큰 값을 가지나 그림 5의 소산곡선을 바탕으로 비교해보면 전체적으로 입력 소산도까지 그 경향을 잘 반영하여 얻어진 수평 압밀계수가 신뢰할 만한 결과를 주는 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내에서 주로 사용되고 있는 콘 선단부 바로 뒤에서 간극수압을 관측하

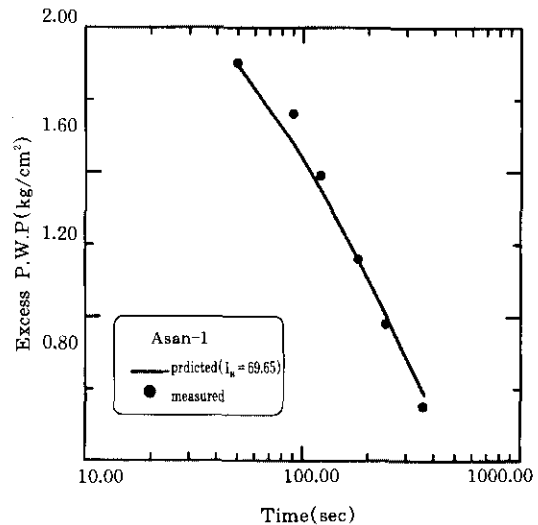


그림 5. 아산지역의 입력 소산도까지 소산곡선

는 피에조 콘 소산 실험결과 얻어진 간극수압 소산곡선으로부터 수평 압밀계수를 추정하는데 최적화 기법을 적용하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서는 국내에서 사용되는 피에조 콘에 적용하기 위하여 수정, 보완한 피에조 콘 최적화 프로그램에 대하여 수평 압밀계수만을 설계변수로 선택해 등방 및 비등방 뿐 아니라 연직 압밀계수를 모르는 현장지반 조건에 대하여 모두 검증 예제를 수행하였고 수행 결과 프로그램이 초기 값에 큰 영향을 받지 않고 안정된 수렴성을 보이는 것으로 평가된다.

2) 특히 연직 압밀계수를 충분히 작게 하여 수평 압밀계수만을 최적화한 경우, 수평 압밀계수가 초기값의 변화에 민감하지 않게 일관성 있는 값($0.00512\text{cm}^2/\text{sec}$)에 수렴함을 알 수 있었으며 정해($0.0046\text{cm}^2/\text{sec}$)에 비하여 약 11.3% 증가된 값을 보였다. 그러나 소산거동에 있어서는 정해의 경우와 거의 일치함을 알 수 있어 이와 같은 방법으로 얻어진 수평 압밀계수가 현장의 2차원적인 압밀거동을 고려하면서 연직 압밀계수를 정확히 모르는 상황에서 현장지반의 거동을 표현하기에 적절할 것으로 사료된다.

3) 수정, 보완된 프로그램을 제한 된 수의 국내의 현장에서 관측된 실제 예제에 적용한 결과 실내에서 이루어진 Oedometer 실험 결과 보다는 다소 크지만 현장에서 실시된 다양한 투수시험과 근접한 결과를 줄을 알 수 있어 본 연구를 통하여 얻어진 수평 압밀계수가 현장에서 유발되는 간극수압 소산거동을 보다 유사하게 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김윤태, 이승래, (1996), "축대칭 비선형 압밀 해석을 위한 지반정수값의 최적화기법", 한국지반공학회지, 제 12권 4호, pp. 131-143.
2. 김영상, 이승래, 김윤태, (1997), "피에조 콘 소산시험을 이용한 압밀계수 결정 시 최적화 기법의 적용", 한국지반공학회지, 제13권 4호, 95-107.
3. 김영상, 이승래, (1998), "피에조 콘 소산시험을 이용한 현장 간극수압 소산거동 예측", 대한토목학회 논문집, 게재승인.
4. ASTM D3441-79. *Deep, Quasi-static, Cone and Friction-cone Penetration Tests of Soil.*
5. Battaglio, M., M. Jamiolkowski, R. Lancellotta, & R. Maniscalco, (1981), "Piezometer Probe Test in Cohesive Deposits, *Proceedings of Cone Penetration Testing and Experience*", St. Louis, Missouri, October, 264~296.
6. 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.
7. Wroth, C. P., (1984), "The Interpretation of Insitu Soil Tests", *Geotechnique*, Vol.34, No.4, 449-489.
8. ISSMFE, (1977), "Report of the Subcommittee on Standardization of Penetration Testing in Europe", *Proc. of ICSMFE*, Tokyo, V. 3.
9. Jamiolkowski, M., C. C. Ladd, J. T. Germaine, R. Lancellotta, (1985), "New Developments in Field and Laboratory testing of Soils", *11th ISSMFE*, San Francisco, 57~153p.
10. Vesic, A. S., (1972), *Expansion of Cavities in Infinte Soil Mass*, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, No. SM3.
(접수일자 1998. 4. 20)