

1차압밀과정중의 크리프의 영향을 고려한 연약 점성토지반의 침하거동 해석

An Analysis of the Settlement Behavior of Soft Clayey Ground Considering the Effect of Creep during the Primary Consolidation

백 원 진¹ Baek, Won-Jin 松田 博² Matsuda, Hiroshi
최 우 정³ Choi, Woo-Jung 김 찬 기⁴ Kim, Chan-Kee
송 병 관⁵ Song, Byung-Gwan

Abstract

This paper is performed to examine the effect of creep during the primary consolidation and the applicability of the Yin's EVP (Elasto-Visco-Plastic) model. In ordinary consolidation theories using the elastic model, the primary consolidation process can be expressed but the secondary consolidation process cannot. It is due to the viscosity, which can express the secondary consolidation, and is sometimes related to the scale effect (difference of the thickness of clay layer between laboratory sample and field condition) such as hypotheses Type A and Type B shown by Ladd et al. (1977). Usually, the existence of the creep during the primary consolidation has been confirmed and the Type B is well accepted. On the other hand, from the large-scaled consolidation tests the intermediate characteristic between Type A and Type B was proposed as Type C by Aboshi (1973). In this study, to clarify the effect of creep on the settlement-time relation during the primary consolidation in detail, Type B consolidation tests were performed using the separate-type consolidation test apparatus for a peat and clay. Then the test results were analyzed by using Yin's EVP Model (Yin and Graham, 1994). In conclusion, followings were obtained. At the end of primary consolidation, the compression for the subspecimens should not be the same because of the difference of the excess pore water pressure dissipation rate. And the average settlement measured by the separate-type consolidometer coincides with the analyzed one using the Yin's EVP model. As for the dissipation of the excess pore water pressure, however, the measured excess pore water pressure dissipates faster compared with the Yin's model.

요 지

본 연구는 1차압밀 중의 크리프의 영향과 Yin이 제안한 탄-점-소성 모델에 대한 적용성을 검토하였다. 탄성모델을 이용한 일반적인 압밀이론은, 1차압밀 과정을 표현할 수 있으나 2차압밀을 표현할 수 없다. 이러한 결과는 2차압축을 표현할 수 있는 점성에 기인하며, 때로는 Ladd 등(1977)이 제안한 가정 A 및 B와 같은 스케일효과(실험실 공시체와 현장조건 사이의 점토층 두께의 차이)와 관련되어진다. 통상적으로 1차압밀 중의 크리프의 존재는 많은 연구자에 의해 확인되어졌으며, 가정 B가 잘 맞는 것으로 되어있다. 한편, 대형압밀시험을 통해 가정 A와 B의 중간적인 특성이

1 정회원, 전남대학교 생물산업공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Bio-Systems & Agriculture Eng., Chonnam National Univ., bwj215@jnu.ac.kr, 교신저자)

2 일본 지반공학회 정회원, 일본 야마구치대학교 사회건설공학과 교수 (JGSE Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Eng., Yamaguchi, Univ., Japan)

3 정회원, 원광대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Course, Dept. of Civil & Environmental Eng., Wonkwang Univ.)

4 정회원, 대진대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Dajin Univ.)

5 정회원, 전남대학교 지역바이오시스템 공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Course, Dept. of Regional & Bio-systems Eng.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Aboshi(1973)에 의한 가정 C로써 제안되어졌다. 본 연구에서는 1차압밀 중의 침하-시간관계에 대한 크리프의 영향을 명백히 하기 위해, peat와 점토에 대해 분할형 압밀시험기를 이용하여 가정 B의 압밀시험을 행하였다. 그리고 Yin의 탄-점-소성 모델을 이용하여 실험결과를 해석하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다. 1차압밀 종료시에 분할 공시체의 압축은 과잉간극수압 소산속도의 차이에 의해 동일하지 않았다. 또한 분할형 압밀시험기에 의해 측정된 평균변형률과 Yin의 EVP 모델을 이용한 해석치는 잘 일치하였다. 그러나 과잉간극수압의 소산에 대해서는 측정치가 Yin 모델에 비해 빨리 소산되었다.

Keywords : Creep, EVP model, Primary consolidation, Separate-type consolidometer

1. 서론

연약 점성토 지반 상에 구조물을 축조할 때, 시공기간 및 공용개시 후에 발생하는 잔류침하나 부등침하 등에 대한 정확한 예측 및 억제대책 등이 중요한 문제가 된다. 그러나 일반적으로 총침하량을 산정할 경우에 이용되어지는 Terzaghi의 탄성압밀이론은, 점성에 대한 영향을 고려할 수 없어 유효응력 일정하에서 발생하는 크리프에 의한 2차압밀을 고려할 수 없다(압밀현상은 점토 지반의 재하 후 상당한 시간적 지연을 두고 발생하는 것으로 이같은 시간적 지연은 수리학적 지연과 소성적 지연으로 나누어 생각할 수 있다. 그런데 수리학적 지연은 점토의 투수성, 압축성 및 배수거리에 관계되며, 점토의 소성적 지연은 일정한 유효응력하에서 변형이 시간과 함께 증가하는 성질(creep)과 관련되며, 실험실에서 얻어진 침하곡선 중에서 수리적 지연이 주요한 역할을 하는 1차압밀과 침하곡선상의 소성적 지연이 주요한 역할을 하는 2차압밀로 나타낸다). 이와 같은 2차압밀의 원인에 대해서는 미시적 관점에서 여러 가지가 고려되어지나, 거시적으로 토립자 구조골격의 시간의존성이라는 입장에서부터, 구조골격의 구성식에 유변학적 모델을 적용해서 2차압밀을 설명하고자 하는 시도는 Taylor(1948)에 의한 연구를 시작으로 많이 행하여 졌다. 특히, 연약층의 층두께에 따른 영향을 고려하지 않은 경우 압밀변형에 큰 차이를 나타내게 된다. Ladd(1977)는 이러한 점토의 2차압밀에 대한 견해를 가정 A와 B로 나타내었다. 가정 A는 1차압밀 중에 점성변형을 일으키지 않는 경우로, Terzaghi의 압밀이론과 같이 2차압밀이 발생하지 않는 경우를 나타내며, 가정 A를 지지하는 것은 압밀은 시료두께 H의 제곱에 비례해서 발생하므로 압밀침하 변형률-시간곡선은 그림 1에서처럼 층두께가 크게 되면, 오른쪽으로 평행 이동하는 형태를 취하게 된다. 가정

B는 1차압밀 중에 점성변형이 발생하지만 최종적으로는 수렴하게 된다는 입장이다. 또한 Barden(1969)은 재료정수와 압밀하중 $\Delta p'$ 가 동일할 경우, 층두께의 차이에 의한 영향을 평균압밀도 U와 시간계수 T_v 의 관계로부터 층두께에 따라서 U- T_v 의 관계가 달라짐을 나타냈으며, 이는 그림 1의 가정 B를 지지하는 입장이다. 한편, Aboshi(1973)는 층두께가 다른 공시체를 이용한 1차원 압밀시험을 수행하고, 시료두께가 클수록 1차압밀의 침하변형률은 증가하지만, 가정 B와 같이 2차압밀이 중첩되지 않으며 동일 구배를 가진 평행한 곡선으로 되는 가정 A와 B의 중간형태를 나타내는 결과를 보고한 바 있다. Mesri(1994) 등은 자연퇴적토의 시료에 의한 압밀데이터를 조사하여 자연점토에 대해 이차압밀계수 $C_\alpha (\Delta e / \log t)$ 와 압축지수 C_c 사이에는 상관관계($C_\alpha / C_c = 0.025 \sim 0.10$ 의 범위)가 존재하며, 이들 관계로부터 다음과 같은 구성식을 제안하였다.

$$\int_0^t \frac{\partial e}{\partial t} dt = \int_0^{t_p} \left[\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right)_t \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} \right] dt + \int_{t_p}^t \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} dt \quad (1)$$

상기 식의 좌변은, 압밀개시로부터 시간 t까지의 전압축량이며, 우변의 제1항은 압밀개시로부터 시간 t_p 까지의 압축량 즉, 1차압밀량이고, 제2항은 시간 t_p 로부터 t까지의 압축량으로 2차압밀량이다. 그러나 1차압밀 중의 $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t \cdot (d\sigma'_v / dt)$ 와 $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ 를 분리할 수 있는 데이터는 아직까지 보고되지 않았으며 분리하는 것 또한 매우 어려운 실정이다.

또한, Yoshikuni(1994)는 1차원압밀조건에 대해 Maxwell 액체 모델을 이용한 탄-점성압밀모델을 제안하여 점성토의 정규압밀과 과압밀상태의 구별없이 압밀거동을 표현할 수 있다고 제안하였으나, 이 모델의 경우 압밀정수의 산정이 Yin의 모델에 비해 복잡하다.

따라서 본 연구에서는, 표준압밀시험에서 얻어진 압밀

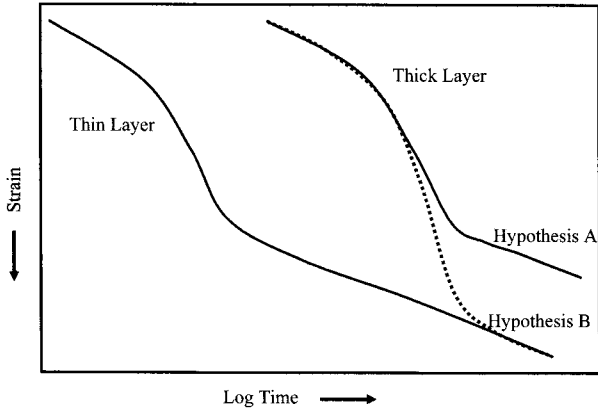


그림 1. 압밀곡선에 대한 점토층 두께의 영향(Ladd et. al., 1977)

정수를 이용하여 해석이 가능한 Yin and Graham(1994)이 제안한 탄-점-소성 압밀이론을 살펴보고, 1차압밀 중의 크리프가 2차압밀에 미치는 영향을 명확히 하기 위해 압밀과정 중에 큰 크리프변형을 나타내는 peat의 교란 및 불교란시료에 대해 층별계측형 압밀시험기를 이용하여 공시체내부의 침하변형률, 과잉간극수압과 시간관계를 조사하였다. 마지막으로 실내시험결과와 EVP 모델의 해석결과를 비교하여 적용성을 검토하고자 한다.

2. 등가시간개념을 이용한 Yin의 탄-점-소성 압밀 이론

연약점성토에 대한 압밀해석에 있어서, Terzaghi는 간극비와 재하이력과 과정에 의존하지 않는 연직유효응력 σ'_z 사이의 선형관계를 가정하였다. $e-\sigma'_z$ 관계를 체적압축계수를 이용하여 나타내었으며, 압밀속도를 정의하는 압밀계수가 압밀과정에서 일정이라고 가정하였다. 이러한 가정은 실제의 점토 거동에 대해 간극수압이 0일때 변형률이 발생하지 않음을 나타낸다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 Yin & Graham은 크리프를 포함한 재하증분에 의한 응력완화 및 변형률속도의 영향을 고려한 1차원 탄점소성(EVP) 구성모델을 제안하였다. 이 모델에서 정의한 등가시간 t_e 는, 해석결과로부터 결정된 기준시간선($t_e=0$)에서 현시점($\sigma'_z, \epsilon_z, t_e$)까지의 일정유효응력하에서의 변형률 증가시간을 나타낸다. 또한 한계시간선($t_e=\infty$)은, 크리프속도가 0이 되는 등가시간 $t_e=\infty$ 에서의 시간선으로 정의되어지며, 한계시간선보다 상부의 거동은 시간의존성을 가진 점탄소성을 나타내고 하부의 거동은 시간의존성을 가지지 않는다. 자세한 개념에 대해서는 참고문헌을 참조하기 바란다.

Yin & Graham에 의해 제안된 EVP 모델을 이용하여 점토층의 침하량과 과잉간극수압 소산과정을 계산하기 위한 기본식은 다음과 같다.

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{m_v} g(u, \epsilon_z) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon_z}{\partial t} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t} + g(u, \epsilon_z) \quad (3)$$

$$g(u, \epsilon_z) = \frac{\psi/V}{t_0} \left\{ \exp\left(-\epsilon_z \frac{V}{\psi}\right) \left(\frac{\sigma_z - u}{\sigma_{z0}} \right)^{\lambda/V} \right\} \quad (4)$$

여기서, 식 (4)는 EVP 모델의 크리프함수, m_v 는 체적압축계수, V 는 비체적, ψ 는 크리프 파라메타, t_0 는 기준시간선에 관한 파라메타, C_v 는 압밀계수를 나타낸다. 또한, 본 모델에서는 파라메타로서 $m_v = \partial \epsilon_z / \partial \sigma'_z = (\kappa/V) / (\sigma_z - u)$ 를 이용하며, 시간 t 및 심도 z 에 의존한다.

본 연구에서는 EVP 모델의 기본식을 유한차분법을 이용하여 해석을 수행하였다.

3. 실내시험 재료 및 방법

3.1 실험장치

점토층 내부의 변형거동 및 간극수압변화는 압밀거동을 파악하는데 중요하다. 본 연구에서 사용한 층별계측형 압밀시험장치는 Aboshi 등(1981)에 의해 고안된 시험기를 수정/보완한 것으로, 점토층을 몇 개의 층으로 분할(H=20mm, D=60mm)하여 각 층의 응력조건이나 배수조건이 분할하지 않은 경우와 동일하게 되도록 각 층을 연결하여 압밀을 행하는 장치이다(松田 등, 2006). 본 실험장치의 특징은, 각 층별로 상부에 침하측정장치

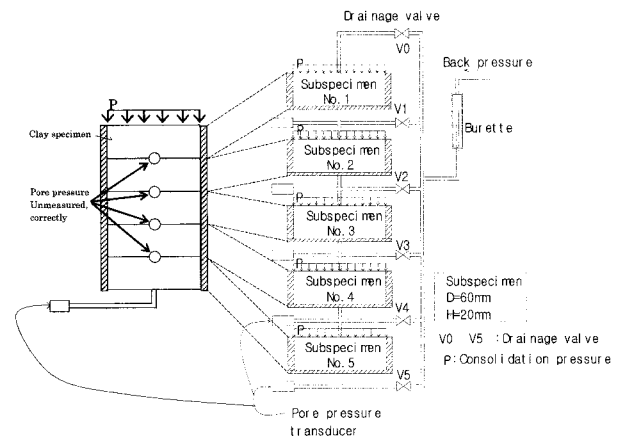


그림 2. 층별 계측형 압밀시험기

를 이용하여 분할된 각 공시체의 정확한 침하량을 측정 하므로써 압밀과정 중의 내부변형을 변화를 측정할 수 있다. 또한, 각 공시체의 하부에 설치한 간극수압계를 통해 내부에서의 간극수압 소산과정을 손쉽게 측정할 수 있으며, 각 층을 분할하여 압밀을 행하므로 전체적으로 비교적 큰 압밀층 두께에도 불구하고 각 층별로 하중을 재하하기 때문에 주면마찰에 의한 재하응력의 감소를 줄일 수 있다는 특징을 가지고 있다. 실험기의 개요를 그림 2에 나타낸다.

3.2 실내시험 재료 및 방법

본 연구에서 이용한 시료는, Yokohama 현에서 Thin wall sampler에 의해 채취한 Peat와 교란점토를 재성형한 점토이다. 표 1에 시료의 물리/역학적 성질을 나타내었으며, 그림 3에 입도분포곡선을 나타내었다. 또한, 표준압밀시험에서 얻어진 e - $\log p$ 곡선을 그림 4에 나타내

었다. 표와 그림에서 알 수 있는 것처럼, 불교란 Peat의 압축지수가 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 층적점성토층의 경우 일반적으로 불교란 시료의 압축지수는 교란시료의 압축지수보다 작다고 알려졌으나 본 연구에서 교란시료를 작성함에 있어서 불교란 시료를 함수비가 용탈되지 않도록 비닐봉지에 넣은 상태에서 강제적으로 교란시키는 과정에서 입자의 재배열 및 안정(입자간 결합)에 의해 교란 시료에서 더 작은 압축지수가 얻어진 것으로 판단된다.

본 연구에서는, 1차압밀 중의 크리프가 점성토의 압밀 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 층별계측형 압밀 시험기를 이용해서 순간재하압밀시험을 행하였다. 공시체 시료는 압밀중에 큰 크리프 특성을 나타내는 Yokohama peat의 교란시료(PBd-10)와 불교란시료(PBu-10) 및 일반적인 층적점토로서 Yokohama 점토(YB-10)를 이용하였다. 각 시료에 대해서 하중재하조건은 압밀압력 39.2kPa, 78.4kPa에서 각 분할층에 단면배수조건하에서 2단계의

표 1. 시료의 물리/역학적 특성

Samples	Condition	ρ_s (g/cm ³)	w_n (%)	w_L (%)	I_p	C_c	e_0
Yokohama Peat	Disturbed	2.16	365.3	245.1	167.2	3.40	8.41
	Undisturbed					4.13	
Yokohama Caly	Disturbed	2.69	95.6	113.3	69.1	0.77	3.02

표 2. 시료상태 및 하중재하조건

Test No.	Sample	Condition of samples	σ_0 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	H_0 (cm)	Subspecimens No.
PBd-10	Peat	Disturbed	78.4	78.4	10	5
PBu-10		Undisturbed				
YB-10	Clay	Disturbed	78.4	78.4	10	5

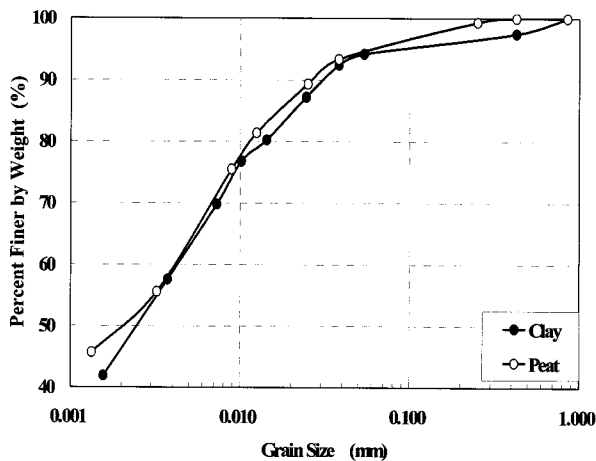


그림 3. 입도분포곡선

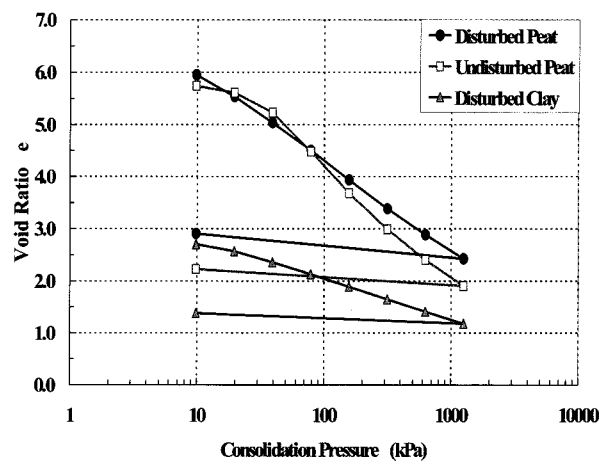


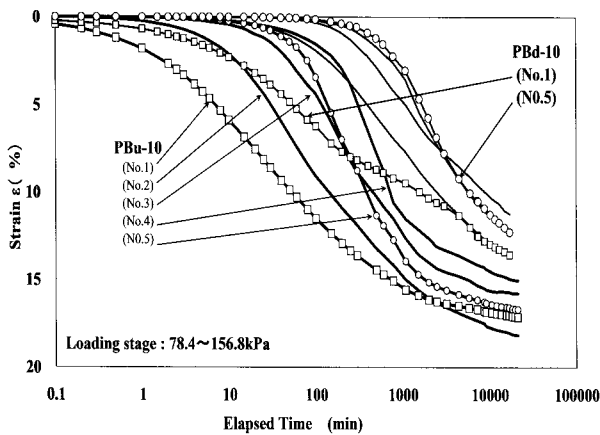
그림 4. 시료의 e-logp곡선

예압밀을 수행하고, 그 후 소정의 압밀압력하에서 순간 재하압밀시험을 행하였다. 표 2에 재하형태 및 실험조건을 나타낸다.

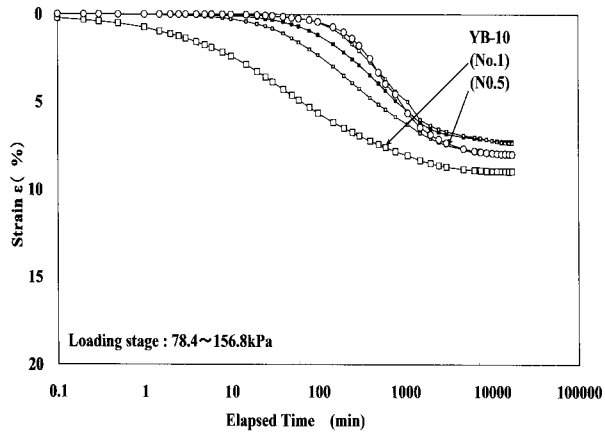
4. 실내시험 결과와 수치해석결과의 비교

4.1 실내시험결과

층별계측형 압밀시험기를 이용하여 압밀증가하중 $\Delta\sigma = 78.4\text{kPa}$ 에서 수행한 각 공시체에 대한 변형률-시간관계곡선을 나타낸 것이 그림 5(a), (b)이다. 그림에서 No.1은 배수층을, No.5는 비배수층의 실험결과를 나타낸다. 압밀은 배수면측이 빠르게 진행되고 비배수면측에 비해 최종압밀침하량이 크게 됨을 알 수 있다. 또한 1차압밀 종료시의 각 분할공시체의 침하변형률은 각각 다르며 심도방향으로 침하변형률이 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 이것은 순간재하와 같이 재하속도가 빠른 경우, 간극수압 소산속도의 차이로 인해 비배수



(a) Peat



(b) Clay

그림 5. 각 분할공시체의 변형률-시간곡선

면측(No.5)에서 잔류하는 과잉간극수압이 크기 때문에 배수면측(No.1)에서 과잉간극수압이 소산된 이후에도 비배수면측에서 간극수압이 완전히 소산되기까지 시간이 필요하며, 점토층의 두께 증가로 인한 scale effect의 영향(Ladd의 가정 A와 유사한 결과)으로 판단된다. 1차압밀 종료후에는 각 분할공시체에서 거의 동시에 침하곡선이 직선적으로 되는 2차압밀이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 동일 유효응력하에서는 2차압밀곡선의 구배가 동일하다고 하는 Aboshi 등의 연구결과와 일치하는 결과이다. 또한, 층 전체의 평균변형률로 정리한 것이 그림 6이다. 그림에서 압밀초기에는 동일 시간에서의 PBd-10과 YB-10은 거의 동일크기의 침하변형률이 발생하고 있으나 압밀 중반에서 PBd-10의 침하변형률이 크게 됨을 알 수 있으며, PBu-10의 불교란 Peat에서는 전체적으로 큰 침하가 발생하였다.

본 연구에서 수행한 층별계측형 압밀시험에서는 각 분할 공시체의 저부($Z/H=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$)에서의 과잉간극수압을 측정하여 공시체내부의 간극수압변화를 정확히 측정할 수 있다. 그림 7은 정규화된 과잉간극수압의 시간변화를 나타낸 것이다. 재하직후, 모든 시료에서 하중증분과 동일한 과잉간극수압이 발생하여 시간경과와 더불어 배수면에 가까운 층으로부터 간극수압의 소산이 발생하였다. 앞에서 얻어진 침하변형률-시간관계와 간극수압 소산과정에 대한 결과로부터 peat가 교란되었을 때, 간극수압의 소산이 늦어지며 침하변형률도 장기간에 걸쳐서 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 小林(1999)가 보고한 결과와 동일한 결과를 나타낸다.

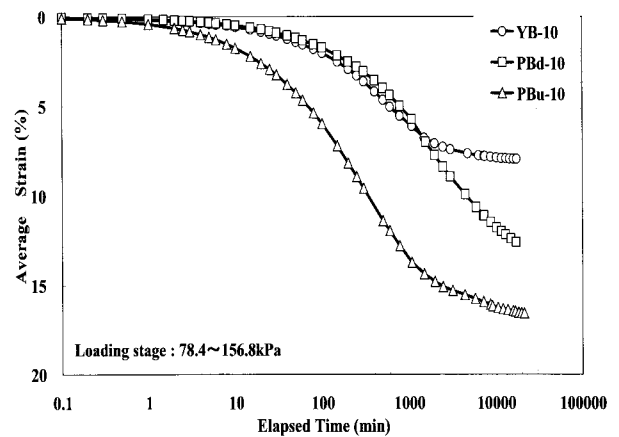
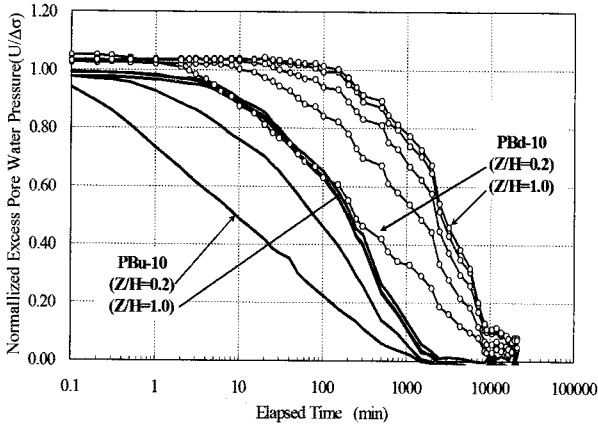
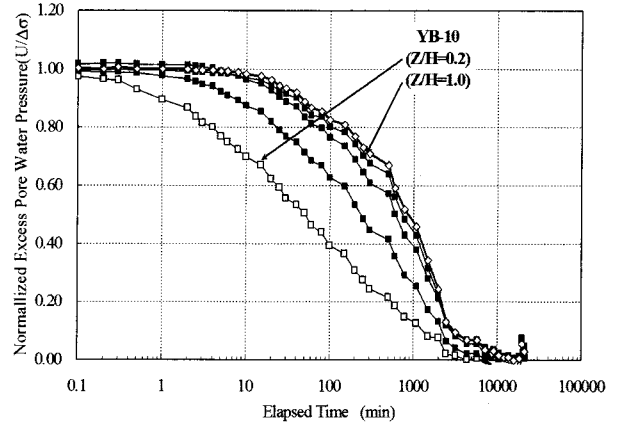


그림 6. 평균변형률-시간곡선

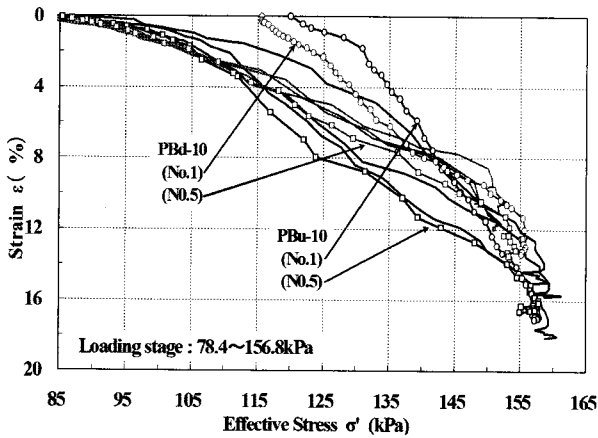


(a) Peat

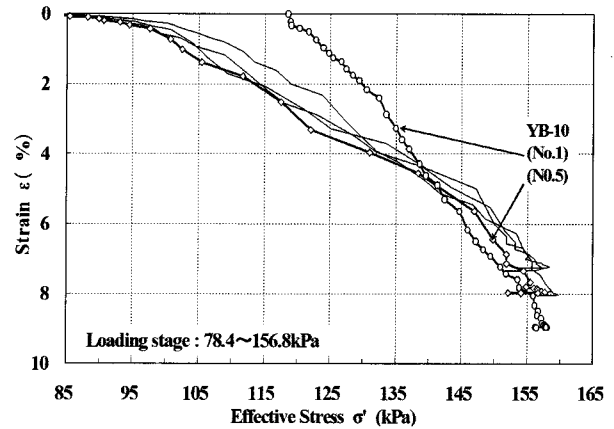


(b) Clay

그림 7. 정규화된 과잉간극수압 소산과정



(a) Peat



(b) Clay

그림 8. 변형률과 유효응력 관계

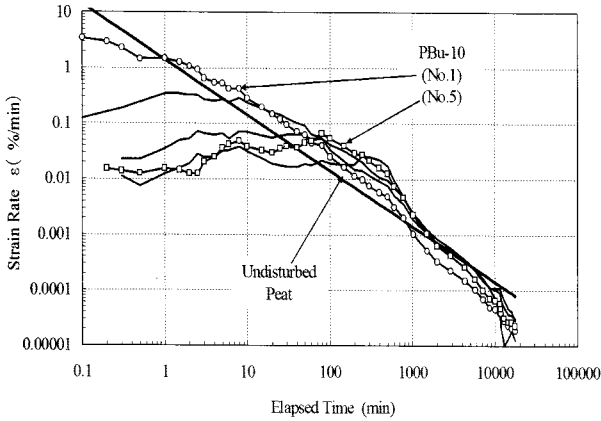
4.3 1차압밀 중의 점성변형

각 분할공시체의 상태경로를 표현하기 위해 변형률과 σ' 의 관계를 나타낸 것이 그림 8이다. 그림으로부터 $\epsilon - \sigma'$ 관계가 각 분할 공시체별로 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 각 분할공시체에서 상태경로가 다른 것은 배수면층의 No.1의 상태점이 비배수면층의 No.5보다 빠르게 이동하므로 동일 유효응력 σ' 점을 통과할 때의 변형률 속도는 No.5보다 No.1이 크기 때문이다. 이것은 Taylor and Merchant(1940)가 제안한 다음 식 (6)을 이용하여 설명이 가능하다. 즉, 우변 제2항은 1차 압밀중에도 유효응력의 변화와 더불어 발생하므로 점토골격이 점성을 나타냄을 의미한다. 즉, 각 분할공시체의 상태경로가 다르다는 것은 1차압밀중에도 점토골격이 점성에 의한 압축성분을 가지고 있음을 의미한다. 또한, 동일 유효응력하에서는 배수면층보다 비배수면층의

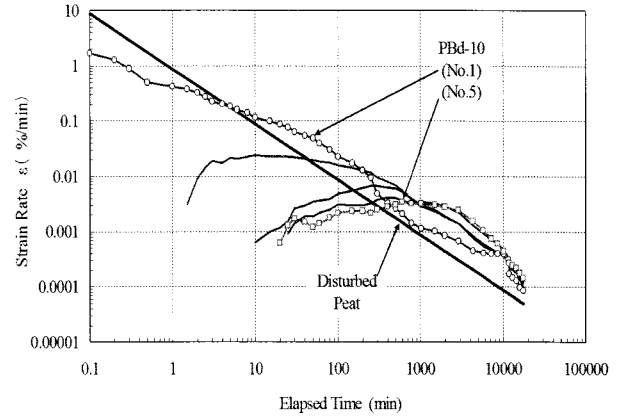
변형률이 큰 원인은 임의의 유효응력에 도달하기까지의 시간에 관계되어 있으며, 장기간 압밀을 받은 비배수면층에서 동일 유효응력하에서의 점성변형(시간의존성 압축)이 크기 때문이다. 각 시료별로는 점토에 비해 Peat가 압밀의 전과정에서 큰 변형률을 나타내고 있다. 이것은 임의의 동일 유효응력에 도달하기까지의 압밀시간이 길어서 동일 유효응력하에서의 크리프변형이 크기 때문이다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \cdot \frac{d\sigma'}{dt} \right)_t + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'} \quad (6)$$

그림 9는 Peat에 대한 각 분할공시체의 변형률속도의 정시변화를 나타낸 것으로, 그림에 병기한 직선은 다음의 방법으로 구하였다. 통상의 일차원 압밀에서의 2차 압밀계수 ϵ_a 는 다음 식 (7)과 같이 정의되어진다.



(a) Undisturbed



(b) Disturbed

그림 9. Peat에 대한 변형률속도-시간곡선

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{d\epsilon}{d\log t} = \frac{1}{1+e} \frac{de}{d\log t} \quad (7)$$

식 (7)을 정리하면 다음의 관계가 얻어진다.

$$\log(\dot{\epsilon}) = \log(0.434\epsilon_{\alpha}) - \log t \quad (8)$$

여기서, ϵ_{α} 는 표준압밀시험에서 하중단계별 변형률-시간곡선에서 간극수압 소산후의 직선부분의 기울기로 식 (7)을 이용하여 구해진 값이며, PBd-10($\epsilon_{\alpha}=3.264$), PBu-10($\epsilon_{\alpha}=2.018$)이다. 식 (8)에서 알 수 있는 것처럼, 변형률 속도는 Mesri(1994)가 제안한 일정유효응력하에서의 간극비의 변화에 대응하며, ϵ_{α} 와 경과시간 t에 의해서 계산되어진다.

그림으로부터 변형률 속도의 변화는 각 시료에 따라 상이한 결과를 나타내며, 압밀초기에 배수면측에서 크게 되며 압밀진행과 더불어 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 양 시료 모두 임의시간에서 배수면측과 비배수면측의 변형률 속도의 크기가 역전되는 경향을 보인다. 이것은 과잉간극수압의 소산이 배수면측에서 빠르게 진행된 결과라고 판단된다. 또한, 그림에서 직선보다 상부의 부분은 $(\partial e / \partial \sigma')_t$ 에 대응하는 변형률로서 1차압밀 중에도 크리프 변형이 존재함을 알 수 있다.

그림 5와 그림 7로부터 변형률과 유효응력관계를 도출할 수 있으며, 특정의 유효응력 σ' (=80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150kPa)에 도달하는데 소요된 시간을 구하면 그 시간까지 발생된 침하변형률을 유효응력의 관계로부터 계산하여 일정 유효응력하에서 경시변화를 구할 수 있다. Peat의 교란 및 불교란 시료에 대한 결과를 나타낸 것이 그림 10이다. 그림에 나타난 직선은 각

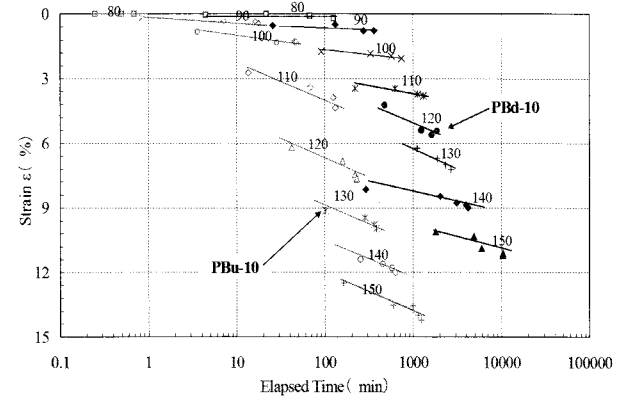


그림 10. Strain-time curves on primary consolidation

각 일정 유효응력하에서 얻어진 변형률-시간관계를 직선으로 근사시킨 것으로 그 경사는 $\dot{\epsilon}_{\alpha}$ 를 나타내며, $\dot{\epsilon}_{\alpha}$ 는 유효응력 증가와 더불어 크게 되는 경향을 나타낸다. 즉, 일차압밀중의 일정 유효응력하에서 발생하는 변형률(2차압밀계수)은 일정하지 않으며, 유효응력 증가와 더불어 크게 됨을 나타낸다.

4.4 EVP 모델에 의한 수치해석결과

Yin and Graham(1994)에 의해 제안된 EVP 모델은 표준압밀시험에서 구해진 3개의 파라메타를 이용하며 가정 A에서 이용하는 파라메타의 수와 거의 동일하다. 표 3에 본 연구에서 이용한 각 시료의 토질정수를 나타낸다. 표에서 κ/V 는 팽창지수 C_{γ} 와 유사하며, 과압밀영역의 재하-제하-재하 곡선으로부터 추정할 수 있다. 여기서 V 는 체적비($1+e_0$)이다. 또한, λ/V 는 압축지수 C_c 와 유사하며, 정규압밀영역의 탄소성 거동을 나타내는데 이용되는

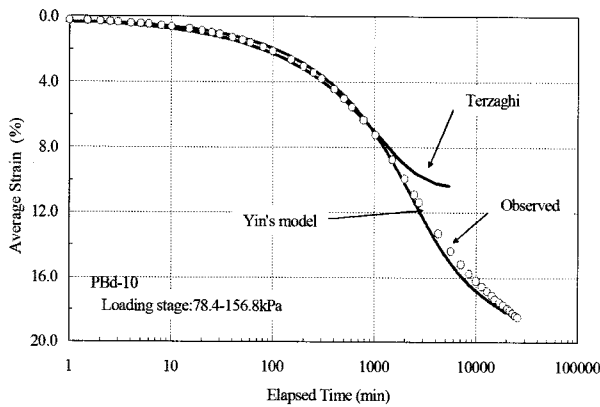
정수이다. ψ 는 정규압밀상태에 대해 $\Delta\epsilon/\ln[(t_0+t_e)/t_0]$ 로 정의되어지는 값이다. 본 연구에서 사용한 t_0 는 압밀정수의 적용의 편의성을 위하여 Yin이 제안한 t_0 를 사용하지 않고 표준압밀시험에서 얻어진 S-logt 곡선에서 logt법에 의해 계산된 1차압밀 종료시간을 이용하여 계산된 값이다.

본 연구에서는 Yin에 의해 제안된 EVP 모델의 수치해석은 유한차분법을 이용하여 수행하였다(Matsuda et al., 2007). 그림 11(a)는 PBd-10의 교란 Peat의 평균변형률에 대한 Terzaghi 모델과 EVP 모델에 의한 해석결과

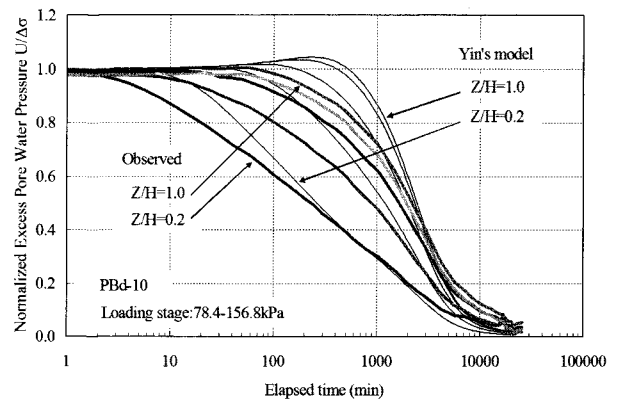
를 나타낸다. 그림에서 탄성이론을 이용한 Terzaghi 모델에 의한 해석결과는 점성에 의한 2차압밀과정을 표현할 수 없기 때문에 1차압밀과정은 잘 일치하고 있으나 전체적으로 과소평가하고 있음을 알 수 있으며, EVP 모델에 의한 해석결과는 전 압밀과정에 대해 실험치와 잘 일치한 결과를 얻었다. 또한 그림 11(b)는 과잉간극수압-시간관계를 EVP 모델에 의한 결과와 실험결과의 비교를 나타낸 것이다. 해석결과가 압밀초기에 비배수면에서 실험치보다 약간 큰 값을 나타내지만 압밀후반에는 잘 일치한 결과를 나타냈다. 하중재하 직후의 정규화된 과잉간극

표 3. EVP 모델에 이용한 수치해석 파라메타

Soil	Conditions	V ($1+e_0$)	κ	λ	ψ	k (cm/s)	t_0 (day)	H_0 (mm)	σ_0 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)
Peat	Disturbed	7.9	0.7	1.552	0.1	2.12E-08	0.125	63.7	78.4	78.4
	Undisturbed	5.7	1.0	1.07	0.06	2.98E-07	0.280	85.0		
Clay	Disturbed	3.15	0.04	0.33	0.02	1.0E-07	6.940	86.0		

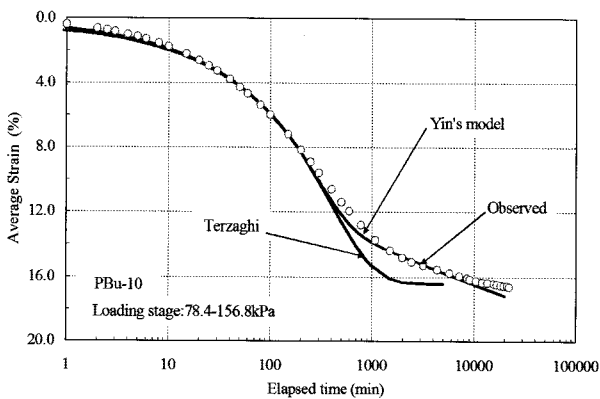


(a) 평균변형률-시간곡선

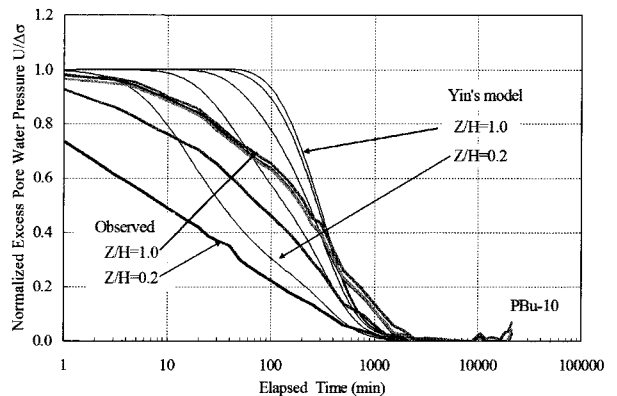


(b) 정규화된 과잉간극수압 소산

그림 11. 교란 Peat에 대한 수치해석결과 비교



(a) 평균변형률-시간곡선



(b) 정규화된 과잉간극수압 소산

그림 12. 불교란 Peat에 대한 수치해석결과 비교

극수압이 1보다 큰 값을 나타내는 것은 비배수면의 압밀 속도 지연에 의한 부의 과잉간극수압에 기인한다(Baek et. al., 2006). 이러한 결과는 Yin and Graham(1996)도 점토층의 두께가 일정범위를 초과하였을 때 부의 과잉간극수압이 발생함을 나타내었다.

그림 12(a)는 PBu-10의 불교란 Peat의 평균변형률에 대한 Terzaghi 모델과 EVP 모델에 의한 해석결과를 나타낸다. 그림에서 탄성이론을 이용한 Terzaghi 모델에 의한 해석결과는 점성에 의한 2차압밀과정을 표현할 수 없으며, EVP 모델에 의한 해석결과는 실험치와 잘 일치한 결과를 나타냈다. 또한 그림 12(b)는 과잉간극수압-시간관계를 EVP 모델에 의한 결과와 실험결과의 비교를 나타낸 것이다. 해석결과보다 실험결과가 약간 빠른 소산을 나타내고 있으며, 이는 불교란 상태의 Peat가 압밀 중에도 안정된 점토골격을 유지하여 큰 투수계수를 나타내기 때문이다.

점토에 대한 실험결과도 EVP 모델에 의한 평균변형률에 대한 해석결과가 실험치와 잘 일치한 결과를 나타내었다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 1차압밀과정중의 크리프변형이 침하-시간관계에 미치는 영향을 명확히 하기 위하여 상대적으로 크리프변형이 큰 Peat와 점성토를 이용하여 실험을 수행하고, Yin and Graham에 의해 제안된 EVP 모델을 이용하여 수치해석을 행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 순간재하와 같은 재하속도가 빠른 경우, 비배수면 층의 잔류간극수압에 의한 소산속도의 차이로부터 각 분할 공시체의 침하변형률은 심도에 따라 다르게 분포하고 있다.
- (2) 각 분할공시체의 상태경로는 차이를 나타내며, 1차 압밀중의 점토골격이 가진 점성의 영향에 의해 동일 유효응력하에서는 배수면층보다 비배수면층의 변형률이 크게 된다.
- (3) 1차압밀중의 일정 유효응력하에서 발생하는 변형률은 일정이 아니며, 유효응력 증가와 더불어 증가하는 경향을 나타낸다.
- (4) Yin의 EVP 모델에 의한 평균변형률에 대한 해석결과는 실험결과와 잘 일치하였으며, 비배수면층에서 하중재하초기에 발생된 부의 과잉간극수압에 대한 초기상승현상을 재현할 수 있었다.
- (5) 압밀과정중의 점토골격의 유지에 의해 불교란 Peat

에 대한 과잉간극수압 소산과정에 있어서는, 실험 결과가 해석결과보다 빠르게 소산되었다.

감사의 글

이 논문은 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업 친환경 지능형 도로설계 기술개발 연구단('05~'10)의 친환경 지능형 도로설계 및 평가시스템 개발(제1세부과제) 연구결과의 일부분입니다.

참고 문헌

1. 小林正一 (1999), “層別計測による泥炭の圧密特性に関する基礎的研究”, 修士論文, 山口大学理工学研究所.
2. 松田 博, 白 元珍, 白 宗和 (2006), “一次圧密中の粘土のクリープに関する一考察”, 日本土木学会中国支部 第58回研究発表会論文集, pp.876-878.
3. Aboshi, H. (1973), “An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary creep settlement”, *8th ICSMFE*, 8.
4. Aboshi, H., Matsuda, H. and Okuda, M. (1981), “Preconsolidation by separate-type consolidometer”, *Proceedings of 11th ICSMFE*, 3, pp.577-580.
5. Baek, W., Moriwaki, T. and Sasaki, Y. (2006), “Numerical analyses on consolidation of clayey ground improved by vertical drain system based on 3-D Elasto-Viscous model”, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp.159-172.
6. Barden, L. and Younan, N. A. (1969), “Consolidation of layered clays”, *Canadian Geotechnique Journal*, Vol.6, pp.413-429.
7. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schosser, F. and Poulos, H. J. (1977), “Stress-deformation and strength characteristics”, *Proc. 9th ICSMFE, Tokyo 2*, State of the art report, pp.421-494.
8. Matsuda, H., Baek, WJ, Baek, JH, Sutou, Y. and Sato, H. (2007), “Effect of creep on the settlement-time relation during primary consolidation of clay”, *Int. Workshop on Constitutive Modelling-Development, Implementation, Evaluation & Application*.
9. Mesri, G., Lo, D.O.K and Feng, T. W. (1994), “Settlement of embankment on soft clays”, *Proc. of Settlement 94*, Vol.1, pp.8-56.
10. Taylor, D. W. and Merchant W. (1940), “A theory of clay consolidation accounting for secondary compression”, *Journal of Mathematics and Physics*, Vol.19, pp.167-185.
11. Taylor, D. W. (1948), “Fundamentals of soil mechanics”, John Wiley & Sons, pp.208-249.
12. Yin, J. H. and Graham, J. (1994), “Equivalent times and one-dimensional elastic visco-plastic modeling of time-dependent stress-strain behavior of clays”, *Canadian Geotechnique Journal*, Vol.31, pp.42-52.
13. Yin, J. H. and Graham, J. (1996), “Elastic visco-plastic modeling of one-dimensional consolidation”, *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.515-527.
14. Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Hirao, T. and Ikegami, S. (1994), “Elasto-Viscous modeling of time-dependent behavior of clay”, *Proc. of the 13th ICSMFE, New Delhi, India*, Vol.1, pp.417-420.

(접수일자 2008. 2. 27, 심사완료일 2008. 5. 19)