

## 새로운 평면변형률 시험장비의 개발과 적용성 검증

### A Newly-developed Plane Strain Testing Device and Its Applicability

김 창 열<sup>1</sup> Kim, Chang-Youb  
이 용 선<sup>2</sup> Lee, Young-Sun  
정 충 기<sup>3</sup> Chung, Choong-Ki

#### Abstract

A simple and useful plane strain testing device was newly developed and its mechanical features were presented in this paper. The new testing device was designed to be capable of testing various stress paths expected under plane strain condition with only the conventional triaxial loading system. The applicability of the new testing device was systematically checked both by theoretical evaluation and by experiments. As a result, it was found that the new testing device has much wider range of application than the conventional plane strain testing devices.

#### 요 지

본 연구에서는 평면변형률조건하에서 발생가능한 다양한 응력조건을 보다 자유롭게 구현할 수 있는 간편한 형태의 평면변형률 시험장비를 새롭게 개발하였다. 개발된 시험장비의 적용성은 먼저 이상화된 가정조건하에서 이론적으로 검토되었으며, 실제 점성토시료에 대한 일련의 평면변형률시험을 통해 실험적으로 확인 검증되었다. 그 결과 개발된 시험장비는 기존의 평면변형률 시험장비들에 비해 광범위한 적용성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 개발된 시험장비는 일반적인 삼축시험용 재하장치만으로도 다양한 응력조건에 대한 평면변형률시험이 가능하므로, 향후 관련분야에서 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

**Keywords :** Plane strain test, Plane strain testing device, Stress path

#### 1. 서 론

평면변형률조건 또는 이로써 단순화될 수 있는 변형 조건은 옹벽, 성토, 기초, 굴착 등 다양한 지반구조물 시공현장에서 매우 빈번하게 나타나며, 이와 같은 구조물들에 대한 설계 및 해석은 평면변형률조건하에서 파악된 지반의 강도 및 변형특성을 입력값으로 하여 수행하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 지반의 강도 및 변형특성은 대부분 축대칭조건에서의 삼축시험을 활용하여

평가되고 있으며, 평면변형률시험은 일부 학문적인 목적을 제외한다면 거의 활용되지 못하고 있다. 평면변형률시험이 보편적으로 활용되지 못하는 데에는 여러 가지 이유가 있지만, 삼축시험에 비하여 시험이 어렵고 고가의 복잡한 장비가 필요하다는 점을 그 주된 원인으로 들 수 있다. 또한 기존 시험장비들(David와 Neil 1966; Barden 등 1969; Dresher 등 1990; Yasin 등 1999)의 경우 실제로 실험가능한 응력조건이 크게 제한된다는 점 역시 또 하나의 중요한 원인으로 들 수 있다.

1 정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부 항만·연안공간 연구사업단 박사후 연구연구원 (Member, Post Doc., Coastal Engrg Engrg. Research Department, KORDI, macy2000@snu.ac.kr)

2 정회원, 현대건설 기술개발원 사원 (Member, Staff Member, HDEC.)

3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

본 연구에서는 이와 같은 측면을 고려하여 평면변형률 조건하에서 발생가능한 다양한 응력조건을 보다 자유롭게 구현할 수 있으면서도, 상대적으로 간편한 평면변형률 시험장비를 새롭게 개발하였다. 개발된 시험장비의 적용성을 이상화된 가정조건하에서 이론적으로 검토하였으며, 실제 점성토시료에 대한 일련의 평면변형률시험을 통해 확인 검증하였다.

## 2. 기존의 평면변형률 시험장비

그림 1은 기존의 전형적인 평면변형률 시험장비의 개념도를 보여 주고 있으며, 그림 2는 그 예를 보여주고 있다. 기존 시험장비들의 경우, 멤브레인으로 둘러싸인 직육면체 시료의 연직하중은 상부재하판과 가압봉에 연결된 독립적인 재하장치를 통해 가해진다. 또한 횡방향의 구속압은 셀 내부에 작용하는 수압의 형태로 가해지며, 평면변형률조건은 시료의 한쪽방향 횡방향 팽창을 그 외부에 설치된 고정측면판을 통해 억제하는 방식으로 구현된다. 따라서 기존 시험장비에서는 연직방향의 응력을 증가시키는 조건과 같이 시료가 횡방향으로 팽창하려 하는 경우에는 평면변형률조건이 예외없이 유지된다. 그러나 연직방향의 응력을 감소시키는 조건과 같이 시료가 횡방향으로 수축하려 하는 경우에는 고정측면판과 시료가 분리되어 평면변형률조건이 유지되지 못한다.

기존 시험장비의 이러한 제한된 적용성은 근본적으로 고정측면판과 시료 간의 경계면이 수밀조건이 아니기 때문에 나타난다. 즉 기존 시험장비에서는 특정한 하중조합에 의해 수동적으로 결정되는 평면변형률방향의 응력(고정측면판과 시료 사이의 접촉압)이 횡방향의 구속압(셀 내부에 가해지는 수압)에 비해 작아지는 경우,

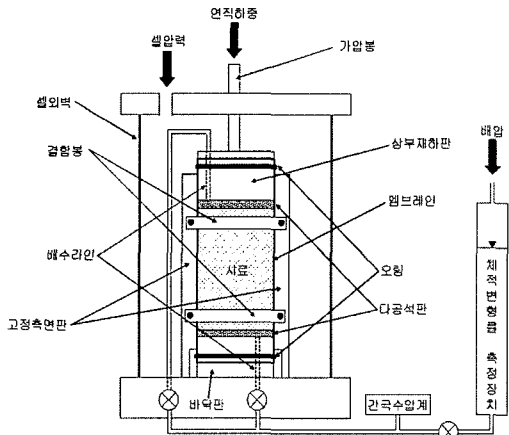


그림 1. 전형적인 기존 평면변형률 시험장비의 개념도

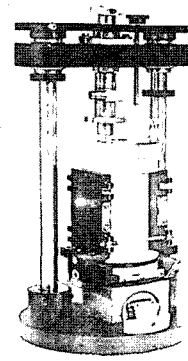


그림 2. 전형적인 기존 평면변형률 시험장비의 예(셀외벽이 설치되지 않은 상태)

접촉압에 비해 상대적으로 큰 수압이 수밀조건이 아닌 고정측면판과 시료 사이로 침투하게 되며, 그 결과 응력상태가 축대칭조건으로 변화하여 평면변형률조건이 유지되지 못하는 것이다. 기존 시험장비의 이와 같은 한계는 관련 연구자들에 의해 이미 널리 인식되어 온 바이며, 일부 연구자들은 연직방향과 유사한 형태의 독립적인 횡방향 재하장치를 추가함으로써 보다 다양한 응력조건에 대한 평면변형률시험이 가능하도록 하는 여러 형태의 이축시험장비들을 개발하였다(Duncan과 Seed 1966; Arthur와 Assadi 1977; Yasin 등 1999). 그러나 이러한 이축시험장비들은 추가적인 횡방향 재하장치 도입에 따른 장비의 대형화, 복잡화 및 비용증가 등의 현실적인 문제로 인해 그다지 널리 활용되지 못하고 있다.

## 3. 새로운 평면변형률 시험장비

본 연구에서는 전술한 기존 시험장비들의 한계성을 고려하여, 이를 극복할 수 있는 새로운 형태의 평면변형률 시험장비를 개발하였다. 개발된 시험장비는 그림 3

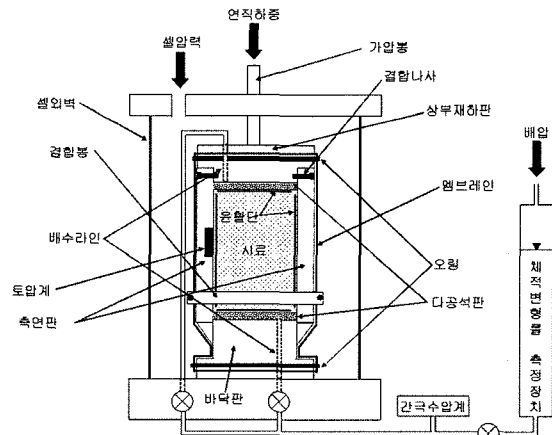
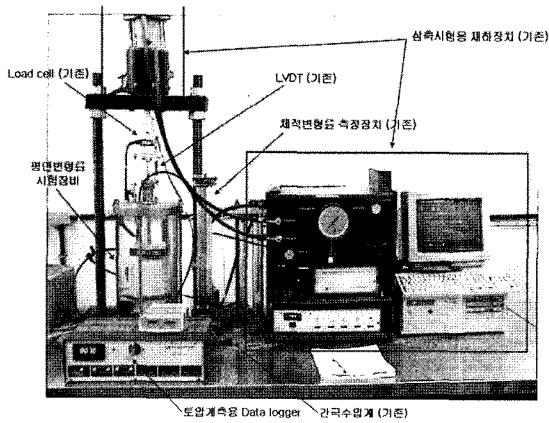


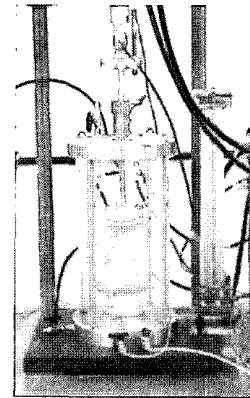
그림 3. 개발된 평면변형률 시험장비의 개념도

의 개념도와 그림 4의 사진에 제시한 바와 같이 상부재 하판과 측면판이 ㄷ자형으로 강결된 구조를 가지고 있다. 직육면체(길이 66mm×폭 45mm×높이 132mm) 형태의 시료는 측면판과 함께 멤브레인으로 둘러 싸여 상부재 하판과 하부판에서 오링으로 밀봉된다. 사용시료의 길이 대 높이비(1:2)는 삼축시험시 단부구속효과를 고려하여 일반적으로 이용되는 값으로 선택되었으며, 길이 대 폭비(약 1.5:1)는 기존의 시험장비들에서 채택하고 있는 일반적인 범위(1:1~1:2) 내에서 선택되었다.

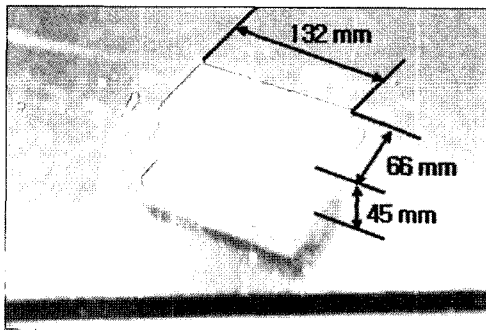
개발 시험장비의 측면판 중앙에는 평면변형방향의 응력을 직접 측정할 수 있도록 지름 4cm의 토압계가 설치되어 있으며, 그 하부에는 측면판의 휨변형을 억제하도록 결합봉이 연결된다. 또한 시료와 상부재 하판, 측면판, 하부판 사이에는 윤활단을 삽입하여 시료와 벽체 사이의 마찰을 최대한 감소시킬 수 있도록 하였다. 기존의 관련 연구에 따르면 개발된 시험장비에 채택된 그림 5와 같은 구조의 윤활단은 시료와 벽체사이의 마찰각을 1° 내외의 아주 작은 값으로 감소시키는 것으로 알려져



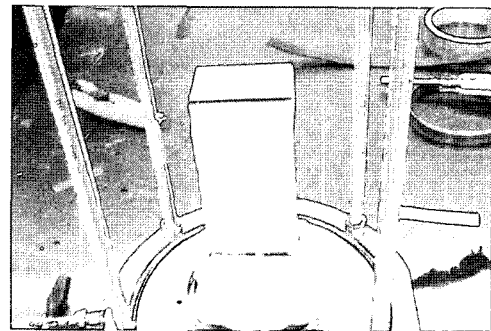
(a) 평면변형률 시험장비+삼축시험용 재하장치 및 계측장치



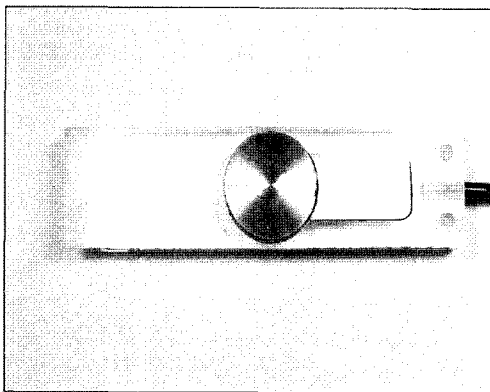
(b) 평면변형률 시험장비



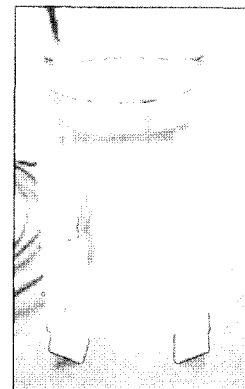
(c) 사용 시료



(d) 시료거치(바닥판+시료+side drain)



(e) 측면판+토압계



(f) 상부재하판+측면판

그림 4. 개발된 평면변형률 시험장비

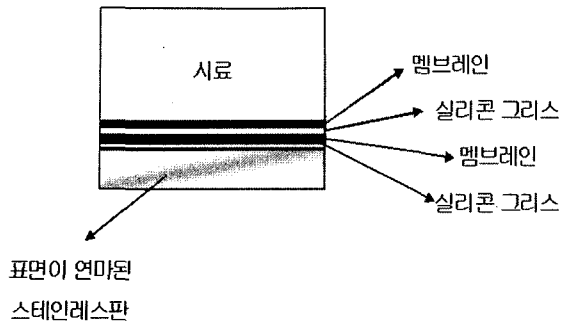


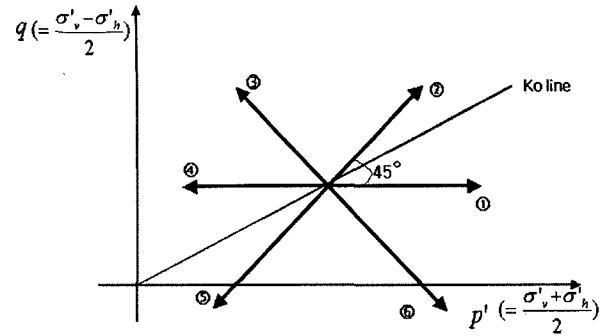
그림 5. 개발된 시험장비에 이용된 윤활단(시료하부)

있다(Tatsuoka 등 1984; Tatsuoka와 Haibara 1985). 윤활단의 삽입은 그에 동반되는 부수적인 효과로 시료의 응력-변형거동에 다소간의 영향을 미칠 가능성이 있으나, 개발된 시험장비에 이용된 윤활단은 시료의 폭이나 높이에 비해 그 두께가 매우 얇으며(약 350 $\mu$ m), 상대적으로 큰 압축응력을 받는 경우에도 50 $\mu$ m 미만의 아주 작은 압축변형만이 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 극히 미소한 변형률수준의 응력-변형거동에 대해 관심을 가지는 경우가 아니라면 윤활단 삽입에 따른 응력-변형률 거동상의 오차는 미미할 것으로 예상된다.

개발 시험장비는 기본적으로 시료가 측면판과 함께 밀봉되는 구조를 가지고 있다. 따라서 기존의 평면변형률 시험장비들과 달리 수압의 형태로 가해지는 구속압이 측면판과 시료 사이로 침투할 수 없으며, 그 결과 연직방향 하중과 셀압력만을 조절하는 일반적인 삼축시험용 재하장치만으로도 이축시험장비 같이 보다 다양한 응력조건에 대한 평면변형률시험이 가능하다. 또한 추가적인 횡방향 재하장치가 필요한 기존의 이축시험장비들에 비해서는 상대적으로 매우 간편하고 경제적이라는 특징을 가진다.

#### 4. 개발 시험장비의 적용성에 대한 이론적 검토

본 연구에서는 개발된 시험장비에 대한 실험적인 검증에 앞서 그 적용성을 이상화된 가정조건하에서 이론적으로 검토하였다. 적용성 검토대상이 된 대표적인 시험조건들은 다음의 그림 6에 요약한 바와 같이 연직방향 유효응력( $\sigma'_v$ )과 횡방향 유효응력( $\sigma'_h$ )을 독립적으로 제어하여 나타나는 6가지 대표적인 배수응력경로이다. 그림 6에 채택된  $p'-q$  응력좌표계는 평면변형방향과 횡방향의 유효응력이 상이한 평면변형률조건의 일반적인 응력상태를 완벽하게 표현하기에는 다소 부족한 측



	시험명	시험조건
①	$K^*=1$ compression test(IC)	$\Delta\sigma'_v = \sigma'_h > 0$
②	Plane strain active test(PSA)	$\Delta\sigma'_v > 0, \sigma'_h = 0$
③	Reduced plane active test (RPSA)	$\Delta\sigma'_v = 0, \sigma'_h < 0$
④	$K^*=1$ expansion test(IE)	$\Delta\sigma'_v = \sigma'_h < 0$
⑤	Reduced plane strain passive test(RPSP)	$\Delta\sigma'_v < 0, \sigma'_h = 0$
⑥	Plane strain passive test(PSP)	$\Delta\sigma'_v = 0, \sigma'_h > 0$

여기서,  $\sigma'_v$  : 연직방향 유효응력증분,  $\sigma'_h$  : 횡방향 유효응력증분,  
 $K^*$  : 응력증분비(=  $\Delta\sigma'_h / \Delta\sigma'_v$ )

그림 6. 적용성 검토대상이 된 평면변형률시험의 조건

면이 있지만, 시험조건 즉 실제 시험과정에서 능동적으로 제어하게 되는 연직방향과 횡방향 유효응력의 변화를 보다 효과적으로 표현하기 위해 사용되었다.

#### 4.1 개발 시험장비의 평면변형방향 응력전달 특성

개발 시험장비의 경우, 측면판에 직각한 방향 즉 평면변형방향으로 작용하는 유효응력( $\sigma'_p$ )은 측면판과 시료 사이의 접촉압( $\sigma_{contact}$ )으로 전달된다. 따라서 개발 시험장비를 활용한 실제 시험과정에서 평면변형률조건이 유지되지 않는 경우가 발생한다면, 즉 평면변형방향으로 압축변형이 발생하여 시료와 측면판이 분리된다면,  $\sigma'_p$ 은 0으로 나타날 것이다. 반면  $\sigma'_p$ 이 양의 값을 유지한다면, 이는 시료와 측면판이 계속해서 접촉하고 있음을 즉 평면변형률조건이 유지되고 있음을 의미하게 된다. 이와 같이 개발 시험장비에서 평면변형률조건의 유지 여부를 판단하는 기준이 되는  $\sigma'_p$ 의 크기는 측면판에 설치된 토압계를 통해 측정되는 평면변형방향 전응력( $\sigma_p$ )에서 시료 내의 간극수압을 뺀 값으로 정확하게 평가될 수 있다.

#### 4.2 평면변형조건에 대한 적용성 검토

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 평면변형방향의 응력전달 특성을 근거로 그림 6에 제시된 6가지 대표적인 응력경로에 대해 개발 시험장비의 적용성을 이론적으로 검토하였다. 이러한 검토과정에는 수학적인 귀류법의 개념이 활용되었으며, 시료는 이상적인 등방탄성체 ( $E=constant, 0<\nu<0.5, c=0, \phi' < 90^\circ$ )로 가정되었다. 한 예로 기존 시험장비로는 시험이 불가능한 RPSP 시험에 대한 구체적인 적용성 검토과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

##### ① 초기 $K_o$ 응력상태

시료의 초기  $K_o$  응력상태는 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma'_v &= \sigma'_{vi} \\ \sigma'_h &= \sigma'_{hi} = K_o \sigma'_{vi} \\ \sigma'_p &= \sigma'_{hi} = K_o \sigma'_{vi} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'_{vi}$  : 초기 연직방향 유효응력,  $\sigma'_{hi}$  : 초기 횡방향 유효응력,  $K_o$  : 정지토압계수( $=\frac{\nu}{1-\nu}$ )

##### ② RPSP 시험의 재하조건

횡방향의 응력을 일정하게 유지하면서 연직방향의 응력을 감소시키는 RPSP 시험의 재하조건은 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다. 아래의 식에서  $\Delta\sigma'_v > -\sigma'_{vi}$  라는 추가적인 재하조건은 가정된 등방탄성체 시료에 대해 RPSP 시험을 수행할 때 나타날 수 있는 한계조건을 의미한다. 즉  $c=0, \phi' < 90^\circ$  시료에 대한 RPSP 시험의 경우, 시료는 파괴시 최소주응력이 되는 연직방향 유효응력( $\sigma'_v = \sigma'_{vi} + \Delta\sigma'_v$ )이 0이 되기 이전에 파괴되므로  $\Delta\sigma'_v > -\sigma'_{vi}$  라는 재하조건이 추가된 것이다.

$$\begin{aligned} 0 &> \Delta\sigma'_v > -\sigma'_{vi} \\ \Delta\sigma'_h &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

##### ③ 귀류법에 의한 적용성 검토

RPSP 시험과정에서 평면변형률조건이 유지되지 않는 경우가 즉 평면변형방향의 변형률  $\epsilon_p > 0$ 이 되는 경우가 발생한다고 임의로 가정한다면, 이 경우 시료의

$\sigma'_p = 0$ 이 될 것이며 이때의 평면변형방향 유효응력의 변화량( $\Delta\sigma'_p$ )은 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma'_p = 0 - \sigma'_{hi} = -\sigma'_{hi} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에 나타난 각 방향 유효응력의 변화를 등방탄성체의 구성방정식에 대입하면, 평면변형방향의 변형률( $\epsilon_p$ )의 크기와 부호는 다음의 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= -\frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_v + \frac{1}{E}\Delta\sigma'_p - \frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_h \\ &= -\frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_v + \frac{1}{E}\Delta\sigma'_p \\ &= -\frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_v + \frac{1}{E}(-\sigma'_{hi}) \\ &= -\frac{\nu}{E}(\nu\Delta\sigma'_v + K_o\sigma'_{vi}) \\ &< -\frac{1}{E}(-\nu\sigma'_{vi} + \frac{\nu}{1-\nu}\sigma'_{vi}) = -\frac{1}{E}(\frac{\nu^2}{1-\nu}\sigma'_{vi}) < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식 (4)는 평면변형률조건이 유지되지 않는다는 즉  $\epsilon_p > 0$ 이라는 초기 가정에 위배되며, 이는 논증과정에서 임의로 부여된 위의 초기 가정에 오류가 포함되어 있음을 의미한다. 따라서 개발 시험장비를 활용한 RPSP 시험에서는 평면변형률조건이 계속해서 유지됨을 확인할 수 있다.

##### ④ 평면변형방향의 유효응력 변화

RPSP 시험과정에서 나타나는 평면변형방향의 유효응력 변화는 평면변형률조건이 유지된다는 즉  $\epsilon_p = 0$ 이라는 적용성 검토결과와 등방탄성탄성체의 구성방정식으로부터 다음의 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= -\frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_v + \frac{1}{E}\Delta\sigma'_p - \frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_h \\ &= -\frac{\nu}{E}\Delta\sigma'_v + \frac{1}{E}\Delta\sigma'_p = 0 \\ &\leftrightarrow \Delta\sigma'_p = \nu\Delta\sigma'_v \end{aligned} \quad (5)$$

#### 4.3 적용성 검토결과 요약 및 분석

본 연구에서는 4.2절과 유사한 적용성 검토과정을 그림 6에 제시된 6가지 응력경로 모두에 대해 적용하였으며, 그 결과 개발 시험장비를 활용하는 경우 검토대상

이 된 모든 응력경로에 대해 평면변형률조건이 예외없이 유지됨을 확인할 수 있었다. 표 1에는 이와 같은 검토과정에서 고려된 시험조건들을 다시 한번 요약하였으며, 표 2에는 각 시험조건에서 파악된 평면변형방향 유효응력의 크기와 그 변화양상을 요약하여 제시하였다.

표 2에 제시된 바와 같이, 개발 시험장비를 활용하는 경우 연직 또는 횡방향의 응력을 증가시키는 IC, PSA, PSP 시험에서는 평면변형방향의  $\sigma'_p$  역시 일관되게 증가하는 것으로 나타났다( $\Delta\sigma'_p > 0$ ). 반면 연직 또는 횡방향의 응력을 감소시키는 IE, RPSA, RPSP 시험에서는  $\sigma'_p$  역시 일관되게 감소하는 것으로 나타났다( $\Delta\sigma'_p < 0$ ). 그러나 전자는 물론 후자의 시험조건에서도 가정된 파괴상태( $c=0, \phi < 90^\circ$ ) 도달할 때까지는 시료와 측면판 간의 접촉압 즉  $\sigma'_p$ 는 항상 양의 값을 유지하여 평면변형률조건이 계속해서 만족되는 것으로 나타났다. 이와 같은 평면변형방향 유효응력의 변화양상은 비록 이상화된 등방탄성체에 대해 이론적으로 유도된 것이지만, 실

제 후에 대해서도 그 경향은 대체로 일치할 것으로 예상된다.

표 2의 마지막 열에는 각 시험조건에서 파악된 평면변형방향 유효응력  $\sigma'_p$ 과 횡방향 유효응력  $\sigma'_h$ 간의 크기 관계를 제시하였다. 제시된 결과에 따르면, 응력경로가  $K_0$ 선 위쪽에 존재하는 PSA, RPSA, IE 시험에서는 시험과정 전체에 걸쳐  $\sigma'_p$ 이  $\sigma'_h$ 에 비해 큰 값을 유지하는 것으로 나타났다. 반면 응력경로가  $K_0$ 선 아래쪽에 존재하는 PSP, RPSP, IC 시험에서는  $\sigma'_p$ 이  $\sigma'_h$ 에 비해 항상 작은 값을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은  $\sigma'_p$ 과  $\sigma'_h$ 간의 크기 관계는 평면변형률조건이 유지된다는 점이 확인된 각 시험조건에 대하여 파악된 관계이다. 따라서 기존 시험장비를 활용하여 동일한 시험을 수행하는 경우에도, 평면변형률조건이 유지되기 위해서는 이와 같은 크기 관계가 만족되어야만 함은 자명하다. 그러나 후자의 3가지 시험조건(PSP, RPSP, IC)에서는 횡방향의 유효응력이 평면변형방향에 비해 더 큰 상태가 나타나야만 하므로, 기존 시험장비의 경우 수압의 형태로 가해

표 1. 이론적인 적용성 검토과정에서 고려된 시험조건

시험명	초기조건			재하조건		
	$\sigma'_v$	$\sigma'_h$	$\sigma'_p$	$\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h$	
IC	$\sigma'_{vi}$	$\sigma'_{hi}$ ( $=K_0\sigma'_{vi}$ )	$\sigma'_{hi}$ ( $=K_0\sigma'_{vi}$ )	$\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma'_h = \Delta\sigma'_i$ 라 두면		
PSA				$\Delta\sigma'_v > 0$	$\Delta\sigma'_i > 0$	
RPSA				0	$-\sigma'_{hi} < \Delta\sigma'_h < 0^{(*)}$	
IE				$\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma'_h = \Delta\sigma'_i$ 라 두면		$-\sigma'_{hi} < \Delta\sigma'_i < 0^{(*)}$
RPSP				$-\sigma'_{vi} < \Delta\sigma'_v < 0^{(*)}$	0	
PSP				0	$\Delta\sigma'_h > 0$	

\*)  $-\sigma'_{hi}$  및  $-\sigma'_{vi}$ 와 관련된 추가적인 재하조건은 각 시험을 수행할 때 나타날 수 있는 한계조건을 나타냄

표 2. 이론적인 적용성 검토과정에서 파악된 평면변형방향 유효응력의 크기와 변화양상

시험명	$\sigma'_p$		$\sigma'_p$		$\sigma'_p - \sigma'_h = \Delta\sigma'_p - \Delta\sigma'_h$	
	크기	부호	크기	부호	크기	부호
IC	$2\nu\Delta\sigma'_i$	$> 0$	$\sigma'_{hi} + 2\nu\Delta\sigma'_i$	$> 0$	$(2\nu - 1)\Delta\sigma'_i$	$< 0$
PSA	$\nu\Delta\sigma'_v$	$> 0$	$\sigma'_{hi} + \nu\Delta\sigma'_v$	$> 0$	$\nu\Delta\sigma'_v$	$> 0$
RPSA	$\nu\Delta\sigma'_h$	$< 0$	$\sigma'_{hi} + \nu\Delta\sigma'_h$	$> (1 - \nu)\Delta\sigma'_{hi} > 0$	$(\nu - 1)\Delta\sigma'_h$	$> 0$
IE	$2\nu\Delta\sigma'_i$	$< 0$	$\sigma'_{hi} + 2\nu\Delta\sigma'_i$	$> (1 - 2\nu)\Delta\sigma'_{hi} > 0$	$(2\nu - 1)\Delta\sigma'_i$	$> 0$
RPSP	$\nu\Delta\sigma'_v$	$< 0$	$\sigma'_{hi} + \nu\Delta\sigma'_v$	$> \frac{\nu}{1 - \nu}\sigma'_{vi} - \nu\sigma'_{vi} = \frac{\nu^2}{1 - \nu}\sigma'_{vi} > 0$	$\nu\Delta\sigma'_v$	$< 0$
PSP	$\nu\Delta\sigma'_h$	$> 0$	$\sigma'_{hi} + \nu\Delta\sigma'_h$	$> 0$	$(\nu - 1)\Delta\sigma'_h$	$< 0$

지는 횡방향 구속압이 상대적으로 접촉압이 낮은 측면 판과 시료 사이로 침투하여 평면변형률조건이 유지되지 못할 가능성이 있다. 따라서 표 2에 제시된 결과는 검토대상 응력경로 모두에 대해 평면변형률시험이 가능한 개발 시험장비에 비해 기존 시험장비의 적용성이 크게 제한된다는 점을 명확히 보여 주는 이론적인 검토 결과라 할 수 있다.

### 5. 개발 시험장비의 적용성에 대한 실험적 확인

본 연구에서는 이론적인 적용성 검토가 수행된 6가지 대표적인 응력경로에 대해 정규압밀상태의 성형 카울리나이트 시료를 이용하여 실제로 평면변형률시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 개발 시험장비의 적용성을 실험적으로 확인 검증하였다. 사용 시료는 초기 함수비 75%의 카울리나이트 슬러리를 대형 1차원 시료성형기(직경 350mm, 높이 600mm) 내에서 압밀하여 제작하였다. 성형과정에서는 140kPa의 연직 압밀압을 1주일에 걸쳐 단계적으로 재하 하였으며, 이를 통해 도달된 최종적인 하중상태를 이후 약 4주일간 유지하였다. 시험에 사용된 시료의 기본적인 물성치 및 압밀특성은 다음의 표 3에 요약하였다. 표 3에 제시된 바와 같이 표준압밀 시험을 통해 파악된 사용 시료들의 선행압밀하중( $p_o$ )은

98~116kPa의 범위로 성형과정에서 가해진 연직압밀압 140kPa에 비해 다소 작게 나타났으며, 이러한 차이는 시료성형기 내의 벽면마찰에 의한 것으로 판단된다.

수행된 각각의 평면변형률시험에서는 해당 응력경로의 재현에 앞서 시료를 250kPa의 배압을 가하여 포화시켰으며, 선행압밀하중의 약 2배에 해당하는 200kPa의 연직 유효응력과 100kPa의 횡방향 유효응력으로 이방압 밀함으로써 각 시료의 초기응력상태를 동일한 정규압 밀상태로 구현하였다. 사용 시료가 투수계수가 낮은 점 성토시료임을 고려하여 그림 4(d)에 나타낸 바와 같이 Side drain을 이용하여 배수거리를 단축시켰으며, 이에 더해 과잉간극수압의 발생을 무시할 수 있을 정도로 충분히 느린 하중재하속도(단위시간당 평균유효응력 증가량  $d\sigma'_m/dt = 0.8kPa/hour$ )를 적용하였다. 본 연구에서 적용된 이와 같은 하중재하속도의 결과와 검증과정은 선행연구(김창엽 2004)에 자세히 기술되어 있다.

다음의 그림 7~12는 각각의 평면변형률시험에서 측정된 응력-변형률 거동과 각 방향 유효응력의 변화양상을 나타내고 있다. 제시된 결과에 따르면, 실제 시험과정에서 측정된 평면변형방향 유효응력의 변화는 이론적인 검토를 통해 파악된 바와 그 경향이 완벽하게 일치하는 것으로 나타났다. 즉 연직 또는 횡방향의 응력을 증가시키는 IC, PSA, PSP 시험에서는  $\sigma'_p$  역시 일관되게

표 3. 사용 시료의 기본적인 물성치 및 압밀특성

비중 $G_s$	2.59	전체 단위중량 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	1.71~1.76
액성한계 $LL$	44.4	함수비 $w_o$ (%)	37.6~40.2
소성한계 $PL$	21.1	선행압밀하중 $p_o$ (kPa)	98~116
소성지수 $PI$	23.3	압축지수 $C_c$	0.253~0.286
200번체 통과률 (%)	98.0	재압축지수 $C_r$	0.110~0.126
통일분류	CL	정지토압계수 $K_o$	0.5

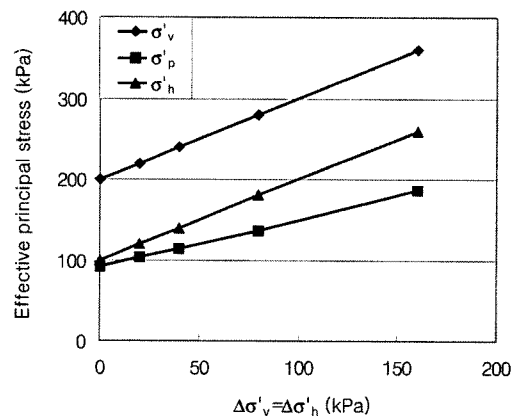
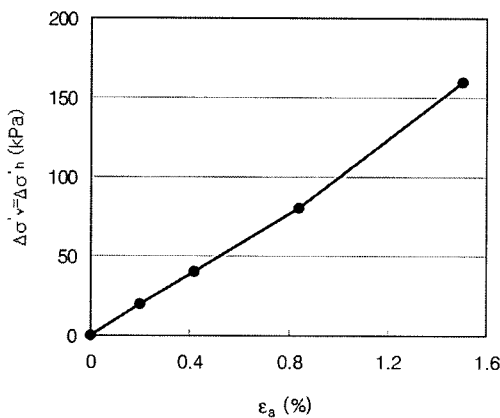


그림 7.  $K^*=1$  compression(IC) test results

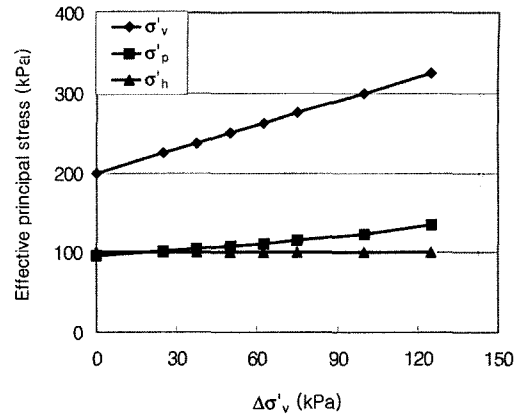
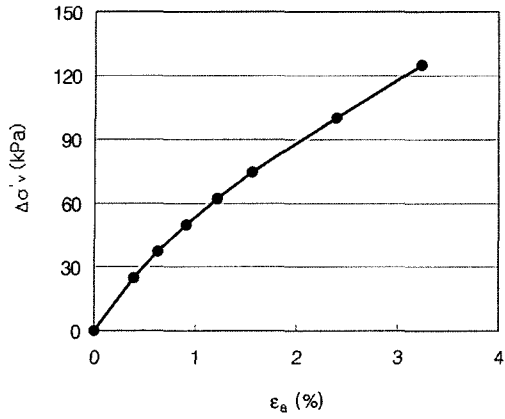


그림 8. Plane strain active(PSA) test results

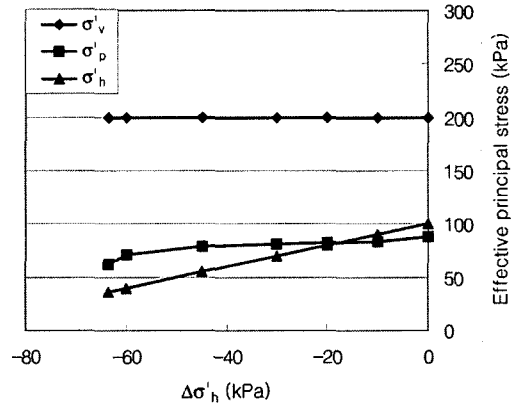
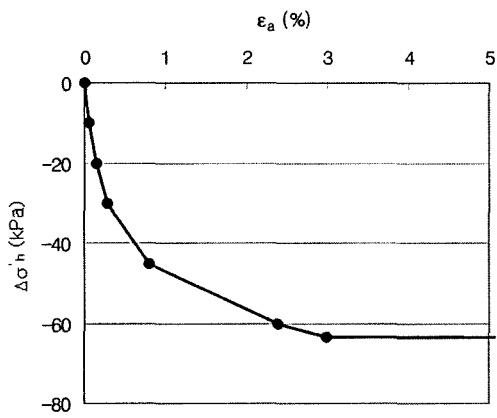


그림 9. Reduced plane strain active(RPSA) test results

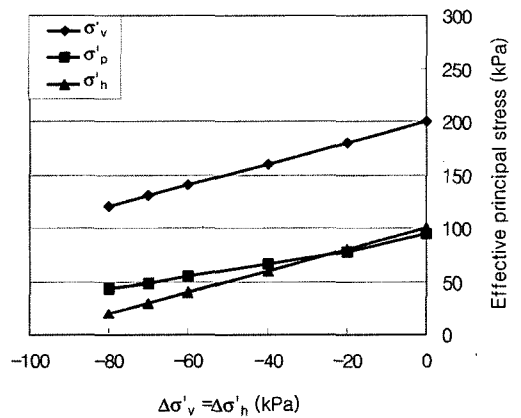
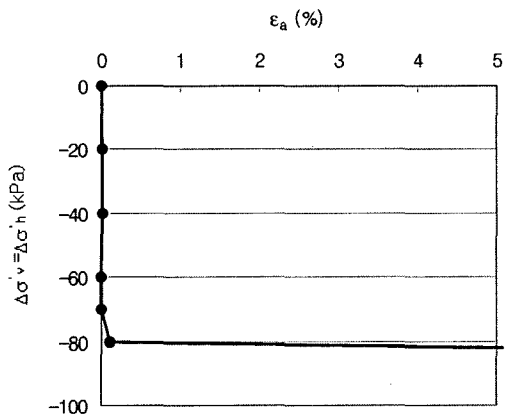


그림 10. K=1 expansion(IE) test results

증가하여 계속해서 양의 값을 유지하는 것으로 나타났으며, 연직 또는 횡방향의 응력을 감소시키는 IE, RPSA, RPSP 시험에서는  $\sigma'_p$  역시 일관되게 감소하지만 이 경

우에도 파괴상태에 도달할 때까지는 그 크기가 항상 양의 값을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 시험결과는 이론적인 검토결과와 마찬가지로 개발 시험장비의



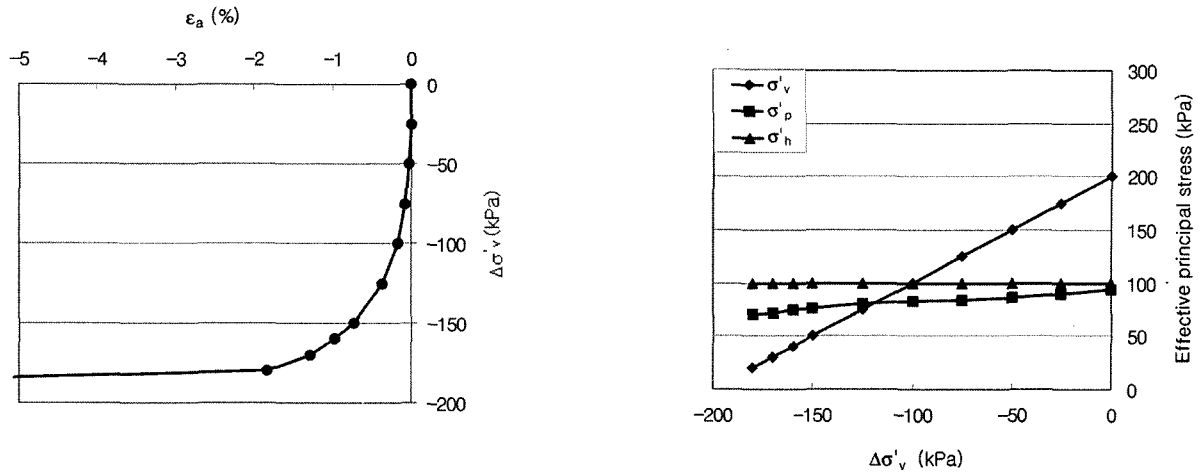


그림 11. Reduced plane strain passive(RPSP) test results

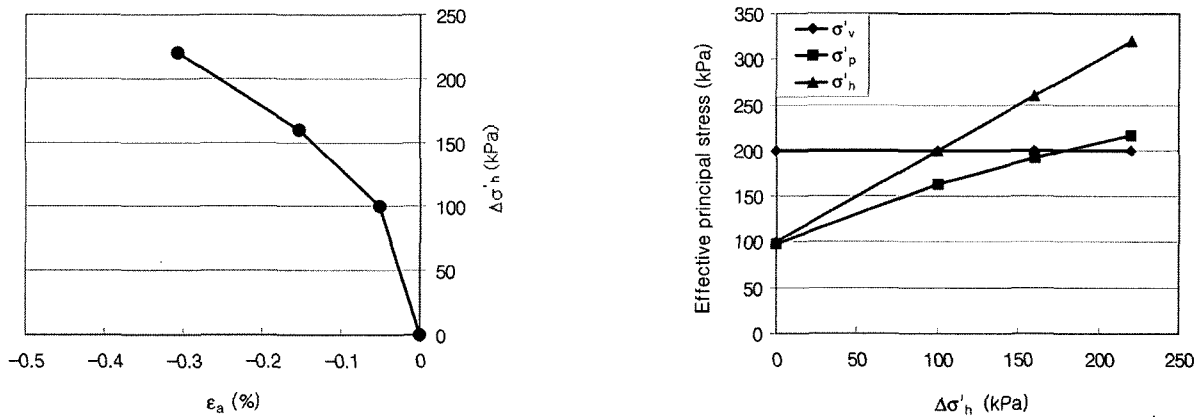


그림 12. Plane strain passive(PSP) test results

경우 검토대상 응력경로 모두에 대해 시료와 측면판 간의 접촉이 계속해서 유지됨을 즉 평면변형률조건이 완벽하게 유지됨을 명확히 보여 준다.

또한 제시된 결과는 응력경로가  $K_0$ 선 위쪽에 존재하는 PSA, RPSA, IE 시험에서는  $\sigma'_p$ 이  $\sigma'_h$ 에 비해 항상 크게 나타나며,  $K_0$ 선 아래쪽에 존재하는 PSP, RPSP, IC 시험에서는  $\sigma'_p$ 이  $\sigma'_h$ 에 비해 항상 작게 나타나는 일관된 경향을 보여 주고 있다. 이러한  $\sigma'_p$ 과  $\sigma'_h$ 간의 크기 관계 또한 이론적인 검토를 통해 파악된 경향과 매우 잘 일치하는 것이며, 이는 횡방향 유효응력이 평면변형방향 유효응력에 비해 커지는 후자의 3가지 시험조건(PSP, RPSP, IC)에 대해서는 기존 시험장비를 활용한 평면변형률시험이 불가능함을 명확히 보여 주는 실험적인 증거라 할 수 있다. 즉 본 연구에서 개발된 시험장비가 기존 시험장비에 비해 훨씬 광범위한 적용성을 가지고 있음을 명확히 보여 주는 실험적 증거라 할 수 있다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 평면변형률조건하에서 발생가능한 다양한 응력조건을 보다 자유롭게 구현할 수 있는 간편한 형태의 평면변형률 시험장비를 새롭게 고안하였다. 이상화된 등방탄성체 시료에 대한 이론적인 검토와 실제 점성토시료에 대한 실험적인 검증의 결과, 개발 시험장비는 검토대상이 된 대표적인 시험조건(IC, PSA, RPSA, IE, RPSP, PSP 시험조건) 모두에 대해 평면변형률조건을 완벽하게 유지하는 것으로 확인되었다. 반면 기존 시험장비의 경우, 응력경로가  $K_0$ 선 아래쪽에 위치하는 IC, PSP, RPSP 시험조건에서는 수압으로 가해지는 상대적으로 큰 횡방향 구속압이 수밀조건이 아닌 시료와 측면판 사이로 침투하여 평면변형률조건이 유지되지 않을 가능성이 있는 것으로 확인되었다.

이와 같은 결과를 종합해 볼 때, 개발된 시험장비는 기존의 평면변형률 시험장비에 비해 훨씬 광범위한 적

용성을 가지고 있음이 분명하다. 또한 추가적인 횡방향 재하장치가 필수적인 기존의 이축시험장비들에 비해서는 일반적인 삼축시험용 재하장치만으로도 다양한 응력조건에 대한 평면변형률시험이 가능하다는 추가적인 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 평면변형률 시험장비는 향후 관련분야에서 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

## 기호

$\gamma_t$	: 전체 단위중량
$\Delta\sigma'_h$	: 횡방향 유효응력증분
$\Delta\sigma'_p$	: 평면변형방향 유효응력증분
$\Delta\sigma'_v$	: 연직방향 유효응력증분
$\epsilon_a$	: 연직방향 변형률
$\epsilon_p$	: 평면변형방향 변형률
$\sigma_{contact}$	: 시료와 측면판 간의 접촉압
$\sigma_p$	: 평면변형방향 전응력
$\sigma'_h$	: 횡방향 유효응력
$\sigma'_{hi}$	: 초기 횡방향 유효응력
$\sigma'_p$	: 평면변형방향 유효응력
$\sigma'_v$	: 연직방향 유효응력
$\sigma'_{vi}$	: 초기 연직방향 유효응력
$\nu$	: 포아송비
$\phi$	: 마찰각
$c$	: 점착력
$C_c$	: 압축지수
$C_r$	: 재압축지수
$E$	: 탄성계수
$G_s$	: 비중
$K_o$	: 정지토압계수
$K^*$	: 응력증분비(= $\Delta\sigma'_h / \Delta\sigma'_v$ )
$LL$	: 액성한계

$PI$	: 소성지수
$PL$	: 소성한계
$p$	: $\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2}$
$p_c$	: 선형압밀하중
$q$	: $\frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$
$w_o$	: 초기 함수비

## 감사의 글

본 논문에 대한 서울대학교 공학연구소의 각종 지원에 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김창엽 (2004), “포화 점성토지반 침하량의 합리적 평가를 위한 새로운 응력경로법 적용”, 박사학위논문, 서울대학교.
2. Arthur, J. R. and Assadi, A. (1977), “Ruptured Sand Sheared in Plane Strain”, Proceedings, 10th ICSMFE, Tokyo, Japan, Vol.1, pp. 19-22.
3. Barden, L., Ismail, H., and Tong, P. (1969), “Plane Strain Deformation of Granular Material at Low and High Pressure”, *Geotechnique* 19, No.4, pp.441-452.
4. David, J. H. and Neil, H. W. (1966), “Plane Strain Tests on a Saturated Remolded clay”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.92, SM6, pp.67-80.
5. Dresler, A., Vardoulakis, I., and Han, C. (1990), “A Biaxial Apparatus for Testing Soils”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.13, No.3, pp.226-234.
6. Duncan, J. M., and Seed, H. B. (1966), “Strength Variation Along Failure Surfaces in Clay”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.92, SM6, pp.81-103.
7. Tatsuoka, F., Molenkamp, F., Torii, T., and Hino, T. (1984), “Behavior of Lubrication Layers of Platens in Element Tests”, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.1, pp.113-128.
8. Tatsuoka, F. and Haibara, O. (1985), “Shear Resistance Between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces”, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.1, pp.89-98.
9. Yasin, S. J. M., Umetsu, K., Tatsuoka, F., Arthur, J. R. F., and Dunstan, T. (1999), “Plane Strain Strength and Deformation of Sands Affected by Batch Variations and Different Apparatus Type”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.22, pp.80-100.

(접수일자 2005. 1. 13, 심사완료일 2006. 1. 25)