

# 전단파, 전자기파 및 콘 관입저항력을 이용한 직접전단시험시 전단영역 특성 평가

## Evaluation of Shear Zone in Direct Shear Test Using Elastic, Electromagnetic Waves and Cone Tip Resistance

변 용 훈<sup>1</sup> Byun, Yong-Hoon

쥡 팡 흥<sup>2</sup> Truong, Q. Hung

짚 밍 콰<sup>3</sup> Tran, M. Khoa

이 중 섭<sup>4</sup> Lee, Jong-Sub

### Abstract

The characteristics of shear zone in granular soils largely affect the stability of geo-structures. The goal of this study is to evaluate shear zone in a direct shear test using shear wave, electrical resistivity, and cone tip resistance. Bender elements and electrical resistivity probe are embedded into the wall of a direct shear box made of transparent acrylic material to estimate the shear wave velocities and the electrical resistivity at shear and non-shear zones. At the point of peak and residual strength, micro cone penetration test which can be available to measure tip resistance has been performed. Experimental results show that the shear wave velocities at upper shear zone increase during shearing while the values remain constant at bottom and lower shear zone. Also, resistivities at lower shear zone depend on relative density while resistivities at bottom remain constant. The results of cone penetration test demonstrate the correlation of the cone tip resistance and small strain shear modulus at shear zone. This study suggests that the application of the modified direct shear box including shear wave, electrical resistivity and the micro cone tip resistance may become effective tools for analyzing the characteristics of a shear zone.

### 요 지

조립토로 구성된 지반구조물의 안정성은 전단변형에 따른 전단영역의 특성변화에 의해 영향을받는다. 본 연구의 목적은 전단파와 전기비저항 및 콘 선단저항력을 이용하여 직접전단시험시 발생하는 전단영역의 특성을 파악하는 것이다. 전단영역의 특성을 파악하기 위하여, 아크릴 재질로 직접전단상자를 제작하였으며, 직접전단상자의 벽면에는 전단파와 전기비저항의 측정을 위하여 벤더엘리먼트와 전기비저항 프로브를 설치하였다. 벤더엘리먼트와 전기비저항 프로브는 전단영역과 비전단영역에 각각 설치되어, 전단변형에 따른 조립토의 거동을 비교할 수 있도록 하였다. 또한, 콘 선단저항력을 측정할 수 있도록 개발한 마이크로 콘을 침투강도상태와 잔류강도상태에서 관입하여 깊이에 따른 시료의 강도분포를 관찰하였다. 실험결과, 바닥부근과 하부전단영역에서는 전단변형에 따른 전단파 속도는 일정하였지만, 상부전단영역에서의 전단파 속도는 증가하였다. 또한, 바닥부근의 전기비저항은 변화가 없는 반면, 하부전단영역에서 전기비저항은 상대밀도에 따라 수직변형률과 반비례관계로 나타났다. 콘 선단저항력의 변화도 전단파 속도의 변화와 유사하게 상부전단영역에서 큰 변화가 관찰되었다. 본 논문에서 제시한 직접전단시험시 전단파와 전기비저항을 관찰하는 것과 실험완료 후 콘 관입시험은 조립토의 전단영역 특성을 파악하기 위한 매우 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

**Keywords :** Direct shear test, Resistivity, Shear zone, Shear waves, Cone tip resistance

1 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 쌍용건설 해외토목부 사원 (Assistant Manager, Overseas Civil Engrg. and Construction Department, Ssangyong Engrg. and Construction Company)

3 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., jongsu@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

여러가지 목적으로 시공된 지반구조물은 대부분 흙의 응력상태에 따라 안정성을 평가할 수 있다. 모래와 같은 조립재로 구성된 지반의 경우에는 파괴모드가 전단파괴로 발생하기 때문에 흙의 전단강도 추정이 중요하다. 특히, 연속기초 및 옹벽, 그리고 댐과 같은 경우, 흙이 평면변형을 상태에서 거동하므로 이러한 평면변형률상태의 전단강도를 산정하기 위하여 직접전단실험을 사용한다. 직접전단실험은 파괴면이 결정되어 있고, 주응력의 변화가 불명확하다는 단점을 가지고 있으나, 실험 및 해석 과정이 단순하며, 전단면에서의 강도정수를 직접 구할 수 있다는 장점이 있다(김재영 등, 2004; 김종열 등, 2000; 정자영 등, 2001; Head, 1982). 또한, 삼축실험과 비교하여 평면변형률 상태의 전단강도를 산정할 수 있어, 삼축실험에 따른 과소평가된 전단강도로 인한 보수적 설계를 방지할 수 있다(Alshibli와 Sture, 2000).

직접전단실험시 시료내 전단변형률이 일정하지 않고, 국부변형이 집중되는 전단영역(shear zone)이 형성된다. 여기서, 전단영역이란 전단이 가해짐에 따라 시료내부에 변형이 집중되는 얇은 층을 일컫는다. 이러한 전단영역은 시료의 불안정한 거동과 관련되어 파괴모드에 핵심적인 역할을 하기 때문에 지반구조물의 설계시 평가되어야 할 필수요소이다. 이에 따라, 전단영역의 특성은 많은 연구자들에 의해서 이론 및 수치해석, 그리고 실험적 방법으로 연구되어왔다. Muhlhaus와 Vardoulakis(1987)는 Cosserat의 소성이론을 이용하여 조립토의 전단영역의 두께는 시료의 중간입경의 8~10배로 발생한다고 하였다. 반면, Bardet과 Proubet(1991)은 개별요소법을 이용하여 수치해석적으로 전단영역의 두께가 중간입경의 15~18배 범위로 발생함을 분석하였다. 실험적 연구로는 Oda와 Kazama(1998)가 X-ray 토모그래피와 현미경을 이용함으로써, 조밀한 시료의 다일러턴시(dilatancy)의 메커니즘과 전단영역의 미세구조의 관계를 설명하였다. 국내에서는 민덕기와 김치영(2006)이 DIP(digital image processing)기법을 이용하여 직접전단실험시 발생하는 조립토의 전단영역 크기는 상대밀도와 전단하중에 영향을 받는다고 설명하였다. 그러나, 아직까지 시료의 전단거동에 따른 국부적인 전단영역의 강성 및 간극변화, 그리고 강도분포는 측정된 바 없었다.

본 논문에서는 전단파와 전기비저항, 그리고 콘 선단저항력을 이용하여 직접전단실험시 형성되는 전단영역

의 특성을 파악해 보고자 하였다. 먼저, 본 연구에서 개발한 직접전단상자 및 마이크로 콘에 대한 장비특성을 설명하고, 포화된 흙에서의 전단파 속도와 전기비저항 및 콘 선단저항력을 측정하여 조립토의 전단거동 특성을 분석하는 방법을 기술하였다.

# 2. 실험 구성

## 2.1 직접전단상자

본 연구에서는 그림 1과 같이 직접전단실험동안 전단파와 전기비저항을 측정하기 위해, 새로운 직접전단상자를 설계 및 제작하였다. 전단상자는 전단파 및 전기비저항 측정시 상자벽면을 통해 전달될 수 있는 전류의 흐름을 방지하기 위하여 아크릴 재질로 제작되었다. 상자 단면의 형상은 내측의 가로 및 세로의 길이가 각각 70mm인 정사각형 모양으로 제작하였으며, 시료가 조성

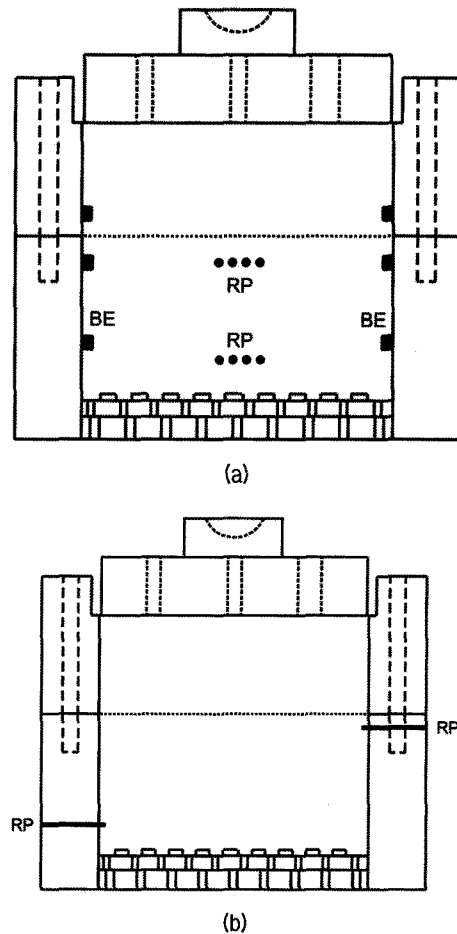


그림 1. 벤더엘리먼트와 전기비저항 프로브가 설치된 직접전단상자의 측면도: (a) 측면도(0°); (b) 측면도(90°). BE는 벤더엘리먼트, RP는 전기비저항 프로브 임.

되는 내부의 높이는 62mm로 구성되어 있다. 이러한 직접전단상자의 제원은 표준시험방법의 기준인 최소시료 길이(50mm이상), 최소초기시료두께(12mm이상), 그리고 최소길이 대 시료두께비(2:1이상)을 만족하고 있다 (ASTM D3080, 2004).

### 2.1.1 전단파 속도 측정

입상체의 상태를 평가하기 위해 이용되는 전단파의 속도는 파가 전달되는 전파방향과 입자가 움직이는 이동방향의 유효응력에 영향을 받는다(Yu와 Richart, 1984). 전단파 속도를 유효응력의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_o}{P_a} \right)^\beta = \alpha \left( \frac{\sigma'_w + \sigma'_m}{2P_a} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'_o = (\sigma'_w + \sigma'_m)/2$ 는 파의 전파방향과 입자의 이동방향에 대한 유효응력의 평균값이고,  $\sigma'_w$ 는 파가 전달되는 전파방향의 유효응력이며,  $\sigma'_m$ 은 입자가 움직이는 이동방향의 유효응력이다.  $P_a$ 는 유효응력과 단위가 같은 대기압이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 실험적으로 결정되는 값들이다 (Santamarina 등, 2001).

직접전단시험시 전단변형에 따라 시료에 전달되는 전단파를 측정하기 위하여 전단파 트랜스듀서인 벤더엘리먼트를 그림 1(a)와 같이 상자벽면에 마주 보도록 설치하였다. 3쌍의 벤더엘리먼트는 상부전단영역과 하부전단영역, 그리고 바닥부근에 각각 위치시켜, 전단영역과 비전단영역에서 흙의 거동차이를 분석하고자 하였다. 각 위치에 설치된 벤더엘리먼트에 의해 형성되는 근접장의 크기가 서로 간섭하지 않도록 벽면으로부터 3mm길이를 돌출시켰다. 상자벽면을 통해 직접적으로 전달되는 잡음을 제거하기 위해서, 아크릴 상자와 임피던스 차이가 큰 나일론 재질의 스크류와 실리콘을 이용하여 벤더엘리먼트를 고정시켰다.

### 2.1.2 전기비저항 측정

전기비저항  $\mu$  [ $\Omega \cdot m$ ]은 전기전도도  $\zeta$  [ $S/m = 1/\Omega \cdot m$ ]의 역수이며, 포화된 흙에서 전기전도도는 흙 입자의 전기전도도, 간극수의 전기전도도, 그리고 점토입자의 확산이중층수에 의한 전기전도도의 합으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Santamarina 등, 2001).

$$\zeta_{mix} = (1-n)\zeta_p + n\zeta_{el} + (1-n) \frac{\gamma_p}{g} \lambda_{ddl} S_a \quad (2)$$

여기서,  $\zeta_{mix}$ 는 포화된 흙의 전기전도도,  $\zeta_p$ 는 흙입자의 전기전도도,  $\zeta_{el}$ 는 간극수의 전기전도도,  $\gamma_p$ 는 흙입자의 단위중량,  $n$ 은 간극률,  $g$ 는 중력가속도,  $\lambda_{ddl}$ 는 흙입자 표면의 전기전도도,  $S_a$ 는 흙입자의 비표면적이다. 일반적으로 흙 입자의 전기전도도는 전해질을 포함한 간극수의 전기전도도보다 상당히 작다. 또한, 모래의 경우 점토입자의 확산이중층수로 인한 전기전도도의 영향은 없으므로, 포화된 흙의 전기전도도는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다(Lee 등, 2008).

$$\zeta_{mix} = n\zeta_{el} \quad (3)$$

위의 식 (2)와 (3)은 포화된 흙이 무한히 평행한 입자 구조를 가진다는 가정하에 유도된 것으로 실제 흙은 입자크기가 유한하고, 입자구조가 평행하지 않다. 따라서, 전기전도 경로(conduction path)는 휘어지고, 식 (3)은 Archie(1942)가 제안한 경험식으로 바꾸어 다음과 같이 전기비저항의 함수로 표시할 수 있다.

$$\mu_s = \mu_w n^{-m} \quad (4)$$

여기서,  $\mu_s$ 와  $\mu_w$ 는 흙입자와 간극수의 전기비저항이고,  $n$ 은 간극률이며,  $m$ 은 흙에 따른 상수이다.

전단변형에 따른 시료의 거동변화를 파악하기 위해, 그림 1(b)와 같이 전기비저항 프로브를 전단상자벽면에 설치하여 전기비저항을 측정하였다. 전기비저항 프로브는 하부전단상자의 전단영역과 바닥부근에 직경이 0.57mm인 4개의 전극을 3mm의 간격을 두어 각각 설치되었다. 이는 4전극 배열법 중 전극간격이 동일하게 일렬로 배열하는 웨너 배열을 적용함으로써 고해상도의 수직분해능을 구현하기 위한 것이다(김준한 등, 2009a).

## 2.2 콘 관입저항력 측정

본 연구에서는 그림 2와 같이 전단시료의 강도분포를 파악하기 위해 콘 선단저항력을 측정할 수 있는 마이크로 콘을 개발하였다. 마이크로 콘은 프로브와 연결로드로 구성되어 있다. 실제적으로 시료내부에 관입되는 프로브는 직경이 2mm이며, 길이가 75mm로 제작되었다. 관입 프로브와 연결되어 있는 로드에는 4개의 변형률계가 설치되었고, 로드 내 전선의 위치확보를 위하여 외경 10mm, 내경 7mm의 스테인레스 강으로 중공관을 가공하여 제작하였다. 콘 선단저항력을 측정하기 위해 부착

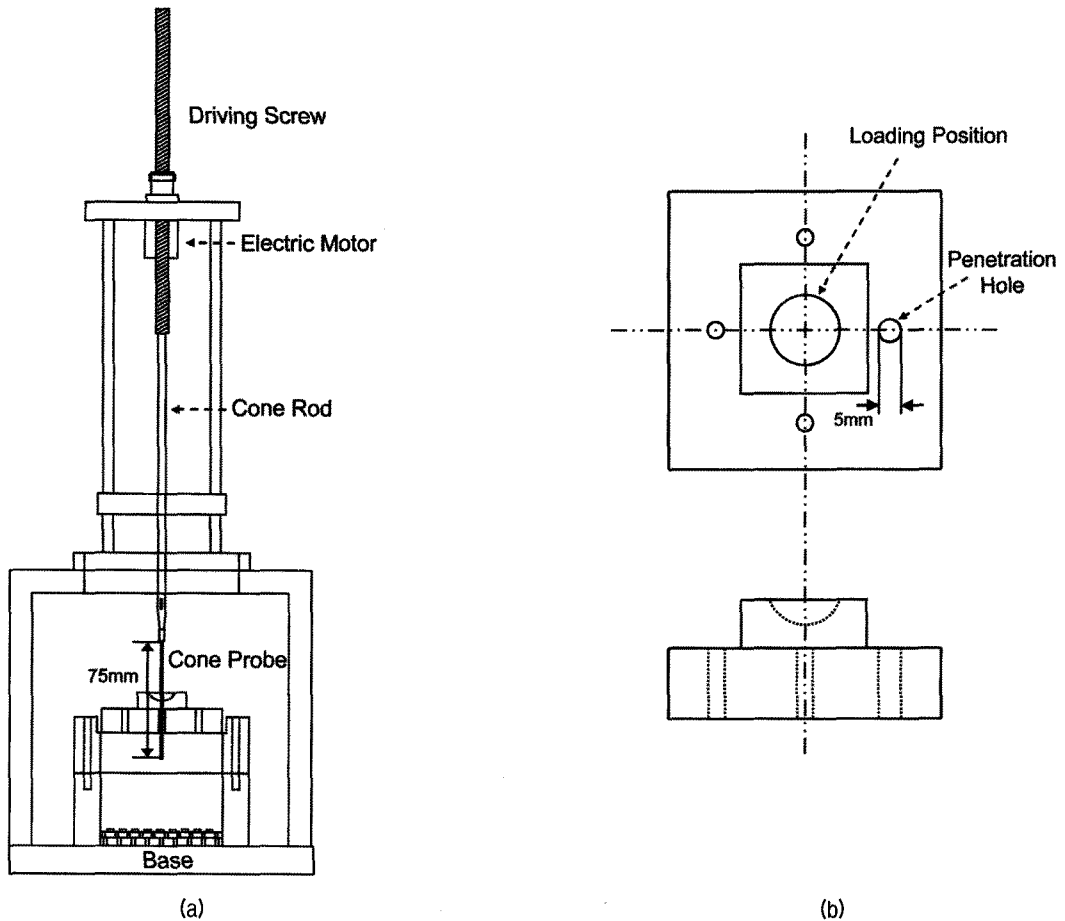


그림 2. 마이크로 콘 관입실험 구성: (a) 마이크로 콘과 관입장치의 배치 측면도; (b) 하중 가압판 평면도

된 4개의 변형틀계는 휘트스톤 브릿지 회로로 구성하여 콘 관입에 따른 전기적 신호를 증폭시키도록 하였다(이종섭 등, 2008). 한편, 상부가압판에 하중이 가해져 있는 상태에서 콘을 관입시키기 위하여, 상부가압판에 존재하는 4개의 배수공 중 하나의 직경을 5mm로 확장시켰다. 또한, 개발된 마이크로 콘을 직접전단상자의 시료에 관입하기 위한 관입시험기도 제작되었다. 관입시 프로브에 전달되는 콘 선단저항력과 주면마찰력의 합력에서 추출시 프로브에 남아있는 주면마찰력을 감하면 콘 선단저항력을 구할 수 있다(Liu 등, 2006). 그러나 실험 결과, 콘 추출에 따른 주면마찰력의 크기가 콘 관입시 콘 선단저항력의 2.5%정도로 미소하여 마이크로 콘의 추출실험을 생략하였다.

### 2.3 보정

프로브의 모양, 길이 및 재질에 따라 측정되는 저항값이 달라지므로, 전기비저항 프로브와 마이크로 콘은 실험전 보정과정이 필요하게 된다(김준한 등, 2009b). 먼

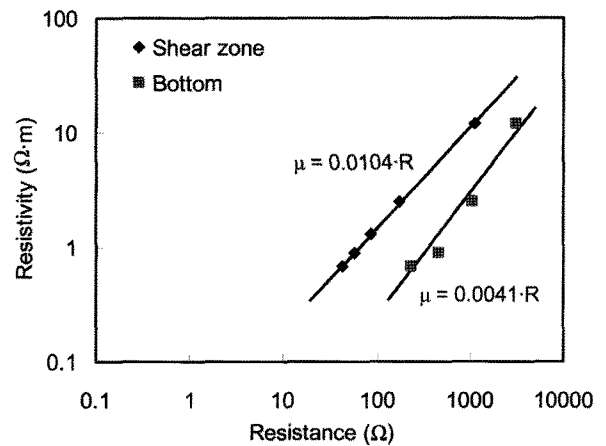


그림 3. 전기비저항 프로브의 보정

저, 전기비저항 프로브는 실험을 통해 얻은 전기저항을 시료의 고유 저항인 전기비저항으로 환산시켜야 한다. 여러가지 농도의 소금물에서 전기비저항 프로브로 측정된 전기저항과 전기전도도 측정기(conductivity meter: OMEGA, CDB387)로 산정한 전기비저항의 관계를 그림 3과 같이 산정하였다. 그림 3의 그래프에서 알 수 있

듯이, 전기저항은 전기비저항과 다음과 같은 선형관계를 가진다.

$$\mu = \alpha R \quad (5)$$

여기서,  $\mu$ 는 전기비저항,  $R$ 은 전기저항, 그리고  $\alpha$ 는 전기비저항과 전기저항 그래프의 기울기이다. 보정결과, 전단영역에 설치된 전기비저항 프로브의  $\alpha$ 계수는 0.0104m 이고, 바닥부근에서  $\alpha$ 계수는 0.0041m로 나타났다.

마이크로 콘의 경우 관입에 의해 측정된 선단저항력은 변형률계를 통해 얻은 전압의 변화량과의 관계로부터 계산할 수 있다. 여기서 주의해야할 점은 변형률계의 저항이 관입에 따른 변형에 의해 변화될 뿐만 아니라 입력전압의 크기에도 영향을 받는다는 것이다. 그림 4는 일정한 온도(20°C)에서 입력전압의 크기를 다르게 하였을 때 하중증가에 따른 측정전압을 도시한 것이다. 그림 4에서 입력전압을 2V로 하였을 경우, 하중증가와

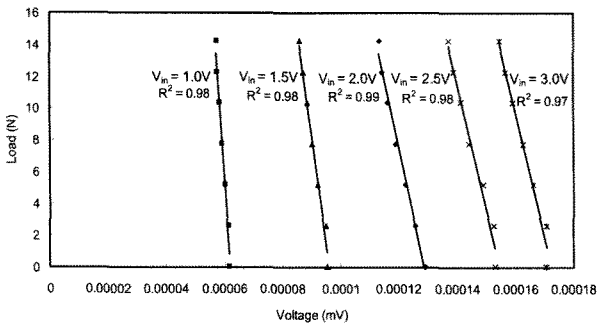


그림 4. 마이크로 콘의 보정.  $V_{in}$ 은 입력전압,  $R^2$ 은 결정계수 임

전압변화의 관계가 선형에 가장 근접하였기 때문에 관입실험시 입력전압을 2V로 선택하였다.

## 2.4 측정시스템 구성

직접전단실험 동안 이용한 전단파 측정시스템과 전기비저항 측정시스템을 그림 5와 같이 구성하였다. 먼저, 시료를 통과하는 전단파를 송·수신하기 위해 신호발생기(Agilent 33220A), 필터(Krohn-Hite 3364), 오실로스코프(Agilent 54624A)가 사용되었다. 입력신호로 20Hz의 구형파를 선택하였으며, Nyquist 이론을 충족시키기 위해 로우패스 필터링은 공진주파수의 10배이상을 적용하였다. 불규칙한 잡음을 제거하기 위해 신호를 평균하여 얻었으나, 전단변형이 연속적으로 이루어지므로 순간의 시료특성을 정확히 평가하기 위해 16개의 신호만을 평균하여 저장하였다.

전단파 측정과 동시에 시료의 각 영역에서의 전기저항은 LCR미터(Instek LCR-819)를 이용하여 컴퓨터에 자동으로 저장되었다. 여기서 LCR미터는 임피던스 애널리라이저(HP 4192A)를 통하여 안정적인 주파수로 선정된 100kHz를 작동주파수로 사용하였고, 입력전압은 1.275V를 사용하였다.

직접전단실험을 멈춘 후 사용된 콘 선단저항력 측정시스템은 그림 2에 나타났다. 앞절의 보정결과에 따라, 직류전원공급장치(Agilent E3620A)의 입력전압을 2V로 선택하여 변형률계의 휘트스톤 브릿지 회로에 전위

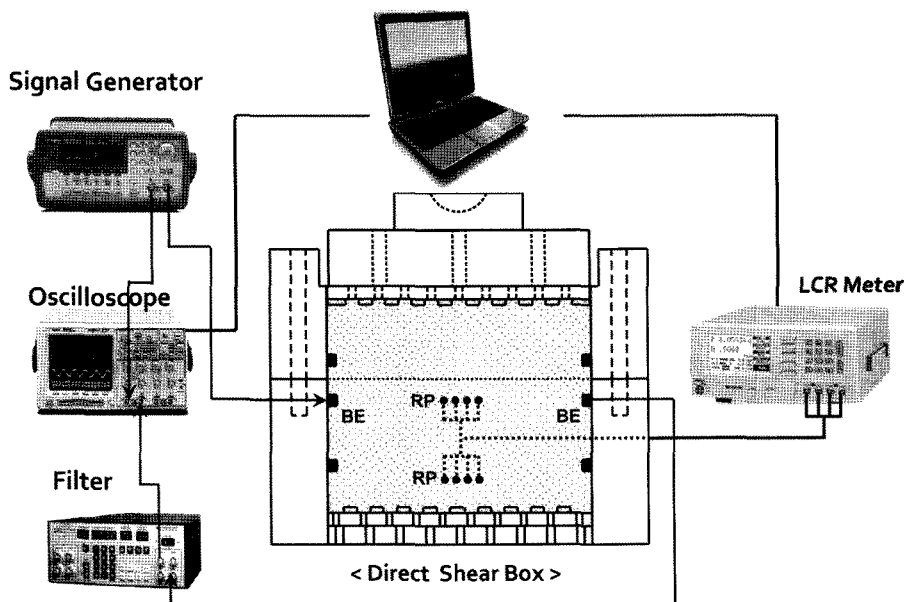


그림 5. 벤더엘리먼트와 전기비저항 프로브가 설치된 전단상자와 측정시스템 구성. BE는 벤더엘리먼트, RP는 전기비저항 프로브 임.

차를 발생시켰다. 마이크로 콘이 관입함에 따라 변형률계의 변화하는 저항으로 인한 전압의 변화량은 멀티미터(Agilent 34401A)를 통해 컴퓨터로 저장되었다.

### 3. 실험적 연구

실험에 사용된 시료는 주문진 표준사를 이용하여 다양한 상대밀도로 조성되었다. 전단변형중 전단파와 전기비저항을 측정하였고, 침투강도상태와 잔류강도상태에서 마이크로 콘을 관입하여 콘 선단저항력을 획득하였다. 본 장에서는 연구에 사용된 시료의 특성과 실험과정을 설명한 후, 실험결과에 대하여 기술하였다.

#### 3.1 시료조성

본 연구에서는 입자의 크기에 대한 영향을 최소화하기 위하여 체분석을 통해 40번체와 50번체 사이에 잔류하는 주문진 표준사를 이용하였다. 본 연구에 적용된 주문진 표준사의 평균입경은 0.36mm이며, 그 밖의 물성치를 표 1에 나타내었다. 주문진 표준사는 모난 형상을 가지고 있어 둥근입자보다 상대적으로 상대밀도의 조절이 쉬운 장점을 가지고 있다.

균등한 크기를 나타내는 주문진 표준사는 0.1M의 소금물에 상대밀도를 20%, 40%, 60%, 80%로 조성되었다. 시료는 100% 포화상태에서 각 상대밀도로 조성하기 위해 수중탐핑방법을 사용하였다.

#### 3.2 실험절차

본 연구에서는 다양한 상대밀도로 조성된 시료의 전단영역의 특성을 파악하기 위하여 직접전단실험동안 전단파와 전기비저항 및 콘 선단저항력을 측정하였다. 시료이동에 따른 충격을 방지하기 위해, 먼저 직접전단시험기 위에 수침상자를 설치하고 전단상자를 수침상

표 1. 주문진 표준사의 기본 물성치

특 성	모래 (40/50 sand)
비중	2.62
원형도	0.30
구형도	0.45
입경 $D_{50}$ [mm]	0.36
최대간극비 $e_{max}$	1.04
최소간극비 $e_{min}$	0.62

자 안에 조립하였다. 시료내 전기비저항이 측정되도록 수침상자에 0.1M의 소금물을 채운 후, 시료를 각 상대밀도에 맞추어 조성하였다. 가압판을 수직하중로드에 볼트로 고정연결을 한 후, 28kPa의 수직응력을 재하시켰다. 초기침하량이 수렴하게 되면, 1mm/min의 속도로 전단을 시작하였다. 시료의 전단변형이 진행되는 동안 수직 및 수평변위, 그리고 전단력은 직선형 가변 차동변압기(LVDT: Senstech LPS-10S)를 통해 자동으로 기록되었다. 또한, 전단파와 전기비저항은 벤더엘리먼트와 전기비저항 프로브를 각 측정시스템에 연결하여 저장하였다. 직접전단실험은 시료의 전단변형률이 15%에 이를 때까지 수행되었다. 한편, 마이크로 콘의 관입실험은 전단변형을 멈춘 후 침투강도상태와 잔류강도상태에서 실시되었으며, 배수조건을 고려하여 약 0.19mm/sec의 속도로 진행되었다. 상부가압판의 확장된 배수공을 통하여 관입시, 마이크로 콘이 가압판에 접촉하지 않도록 콘을 배수공 중앙에 위치시켰다. 또한, 관입에 따른 시료교란효과를 방지하기 위하여 침투강도상태에서 관입실험을 실시한 경우 콘 관입실험후 직접전단실험을 완료하였다. 즉, 잔류강도상태에서의 관입실험은 동일한 조건에서 조성된 시료를 이용하여 전단변형률이 15%에 도달하였을 때 전단을 멈추고 관입실험을 수행하였다.

#### 3.3 실험결과

상대밀도를 달리한 시료에서 전단변형에 따른 수직변형률, 전단응력, 전단파 속도, 전기비저항, 그리고 콘 선단저항력의 변화과정을 관찰하였다.

##### 3.3.1 수직변형률 및 전단응력

소금물로 포화된 시료를 수직응력 28kPa하에서 전단변형률이 15%가 될 때까지 직접전단실험을 수행하여 수직변형률과 전단응력을 측정하였다. 상대밀도( $D_r$ ) 20%, 40%, 60%, 80%인 경우의 수직변형률과 전단응력의 그래프를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)의 그래프에서 최대전단강도는 상대밀도가 커짐에 따라 21kPa, 25kPa, 26kPa, 30kPa로 증가하였다.  $D_r = 20\%$ 와 40%의 경우, 전단응력은 전단변형이 증가함에 따라 침투강도상태 없이 잔류강도상태로 수렴하였다. 반면,  $D_r = 60\%$ 와 80%의 경우 전단응력은 전단변형에 따라 침투강도상태에 도달한 후 잔류강도상태로 수렴하였다.

수직변형률의 변화는 상대밀도에 따라 그림 6(b)와

같이 나타났다.  $D_r = 20\%$ 의 경우, 시료는 전단변형에 따라 수축하다가 일정한 값에서 수렴하였다. 그러나,  $D_r = 40\%$ 의 경우에는 초기에 수축한 후 전단변형률이 3%가 되는 지점을 지나고부터 팽창하였다.  $D_r = 60\%$ 인 경우에는 전단변형 초기에 약간 수축하는 경향을 보인 뒤 전단변형률이 6%가 되는 지점까지 팽창하였다. 수직변형률은 전단변형률이 10%되는 부근에서 다시 증가하였는데, 이는 전단이 진행됨에 따라 시료위에 놓여진 가압

판이 수직하중로드와 함께 약간 기울었기(tilting) 때문인 것으로 판단된다. 한편,  $D_r = 80\%$ 인 경우 수축하는 경향없이 시료는  $D_r = 60\%$ 일 때보다 더 팽창하였다.

### 3.3.2 전단파 속도

직접전단실험시 획득한 전단파 신호에서 초기도달시간을 취하여 계산한 전단파 속도를 그림 7에 도시하였다. 전단파는 상부전단영역과 하부전단영역, 그리고 바닥부

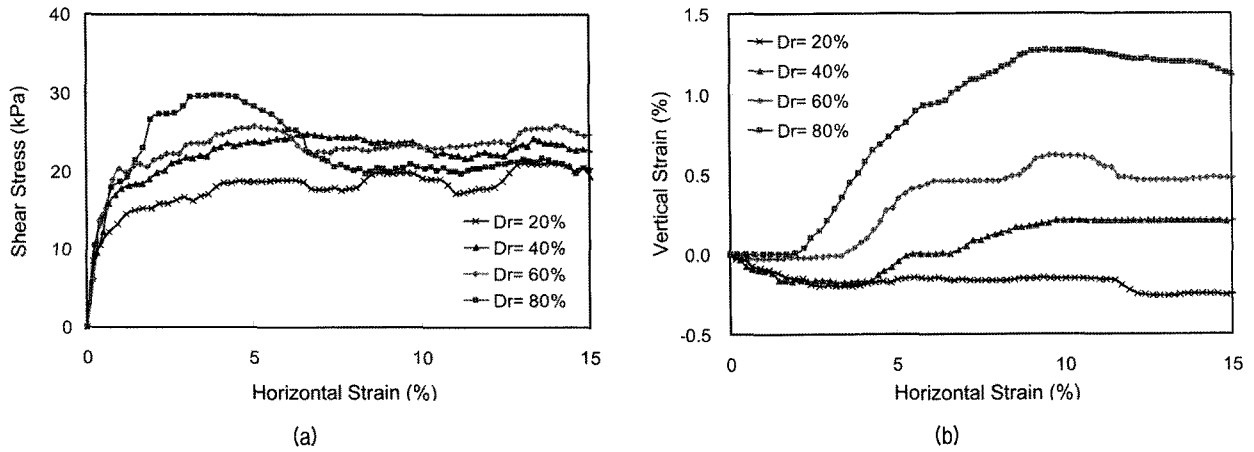


그림 6. 전단변형에 따른 직접전단실험 결과: (a) 전단응력; (b) 수직변형률

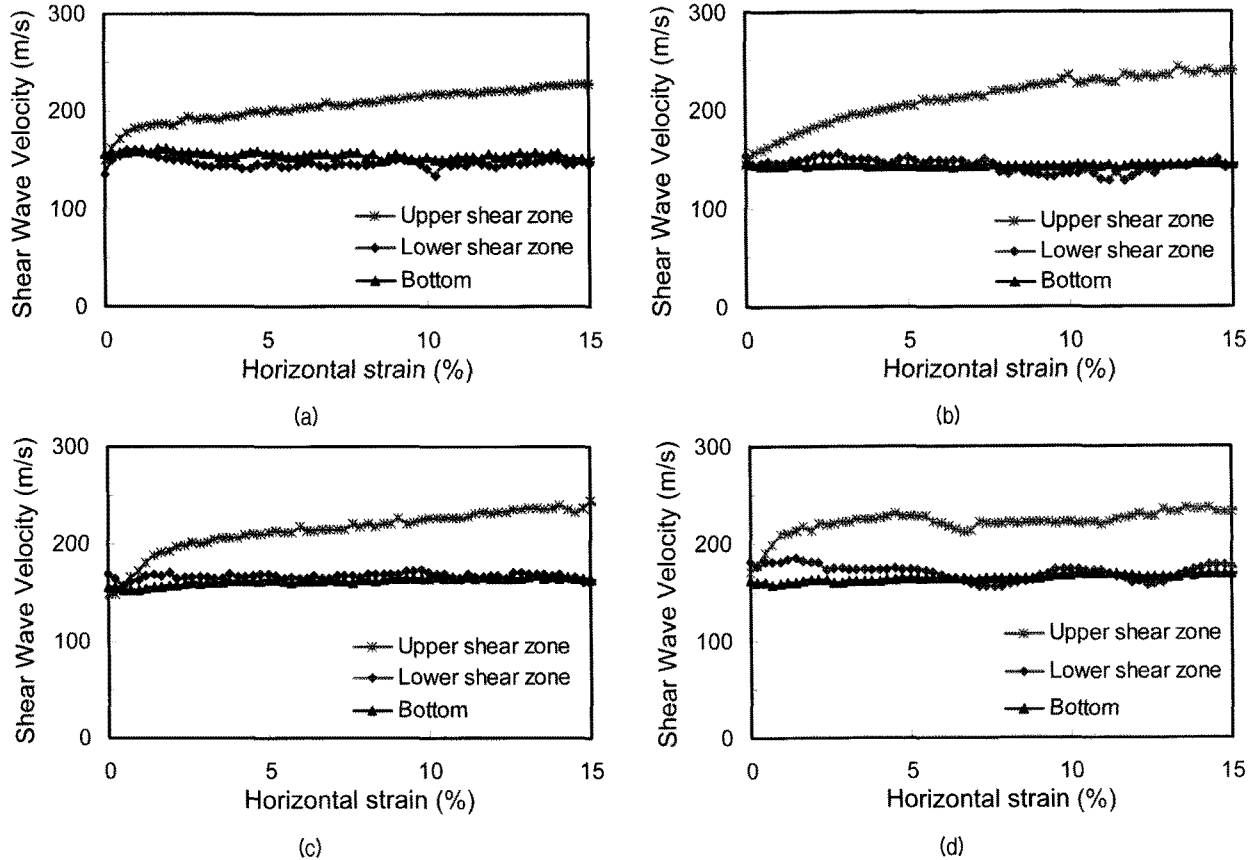


그림 7. 전단변형에 따른 각 위치별 전단파 속도: (a) 상대밀도 20%; (b) 상대밀도 40%; (c) 상대밀도 60%; (d) 상대밀도 80%

근에 설치된 벤더엘리먼트를 통해 얻어졌다. 전체적으로 전단파 속도는 전단변형이 진행됨에 따라 상부전단영역에서 증가하였고, 하부전단영역 및 바닥부근에서 일정한 값을 유지하였다. 전단시작 전 시료의 전단파 속도는 상대밀도가 증가함에 따라 평균적으로 약간 증가하였을 뿐 큰 차이는 없었다. 본 연구에서 획득한 전단파 속도를 변용훈 등(2009)의 수직응력(112kPa)하에서 수행된 실험결과와 비교하면, 전단파 속도에 영향을 미치는 인자인 상대밀도와 유효응력 중 유효응력이 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 상부전단영역에서 전단파 속도는 상대밀도가 증가함에 따라 전단초기에 더 큰 증가량을 보이고, 변형률이 커지면 상대밀도와 상관없이 최종 전단파 속도는 비슷해진다. 이는 전단응력이 상대밀도가 증가할수록 전단초기에 증가량이 크고, 잔류강도상태에서는 상대밀도에 상관없이 수렴하는 것과 유사함을 알 수 있다.

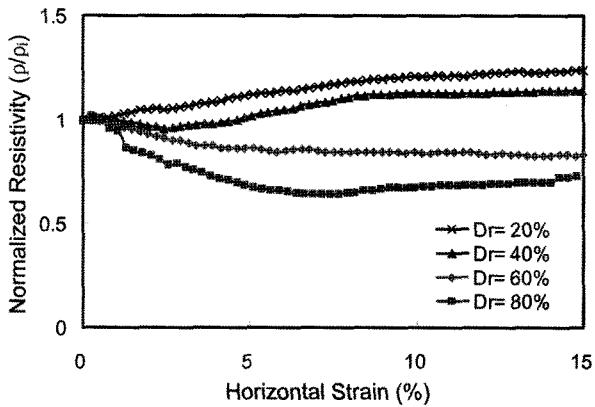
### 3.3.3 전기비저항

하부전단상자의 전단영역과 바닥부근에 설치된 전기

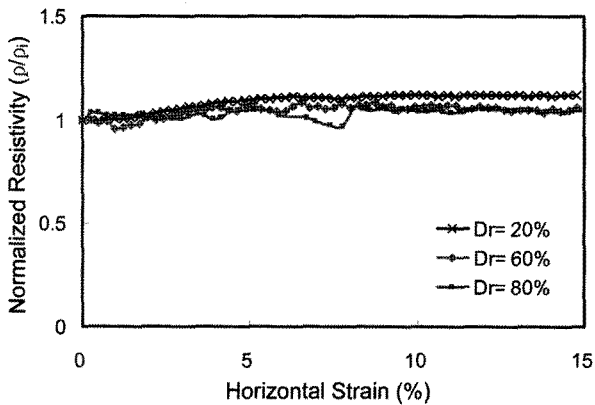
비저항 프로브로부터 획득한 전기비저항을 초기 전기비저항으로 정규화하여 그림 8에 나타내었다. 전단영역에서 측정된 전기비저항의 변화는 각 상대밀도에 따라 다르게 나타났다.  $D_r = 20\%$ 의 경우 전단변형이 진행됨에 따라 증가하였고,  $D_r = 40\%$ 에서는 전단변형률 3%까지 약간 감소한 후 증가하여 일정한 값에 수렴하였다. 또한,  $D_r = 60\%$ 의 경우 전단변형의 증가에 따라 전기비저항은 감소하였으며,  $D_r = 80\%$ 에서는  $D_r = 60\%$ 일 때보다 더 큰 감소를 보였다. 전기비저항 프로브로부터 측정된 전기비저항의 변화는 계산된 간극률의 변화와 반대경향을 나타낸다(김준한 등, 2009a). 따라서, 전단영역에서 전기비저항의 변화가 수직변형률의 변화와 유사함을 알 수 있다. 즉, 상대밀도가 낮은 시료의 경우 전단진행시 시료가 수축하는 경향이 있으므로 전기비저항이 증가하며, 상대밀도가 높은 시료의 경우 팽창하게 되므로 전기비저항이 감소하게 된다. 반면, 바닥부근에서 전기비저항은  $D_r = 20\%$ 에서만 약간 증가하였고, 전단영역과 비교하여 전반적으로 변화가 없음이 관찰되었다.

### 3.3.4 콘 선단저항력

다양한 상대밀도로 조성된 시료의 침두강도상태와 잔류강도상태에서 마이크로 콘을 관입한 결과를 그림 9에 나타내었다. 마이크로 콘은 시료상부에서 시작하여 깊이 60mm까지 관입되었다. 먼저, 침두강도상태에서 측정된 콘 선단저항력을 그림 9(a)에 나타내었다. 침두강도상태는  $D_r = 60\%$ 와  $80\%$ 의 경우에서만 나타났고, 콘 선단저항력은 다음과 같은 유사한 경향을 보여주었다. 콘 선단저항력은 시료상부로부터 깊이 10mm까지 증가하였고, 전단면(깊이 25mm)까지는 약간 감소한 후 깊이에 따라 다시 증가하였다. 잔류강도상태에서 측정된 콘 선단저항력을 그림 9(b)에 나타내었다.  $D_r = 20\%$ 와  $40\%$ 의 경우, 콘 선단저항력은 상부전단상자에서 증가한 후 감소하여 전단면(깊이 25mm) 아래에서는 일정한 값을 보였다. 반면,  $D_r = 60\%$ 와  $80\%$ 에서는 깊이 약 10mm까지 콘 선단저항력이 크게 증가한 후 감소하여 전단면을 지나면서 다시 증가하였다. 여기서, 상부전단시료(깊이 25mm미만)의 콘 선단저항력이 큰 이유는 직접전단시험의 특성상 시료내 접촉력분포(contact force network)의 주방향이 기울어져 있기 때문으로 판단된다(Masson와 Martinez, 2001).



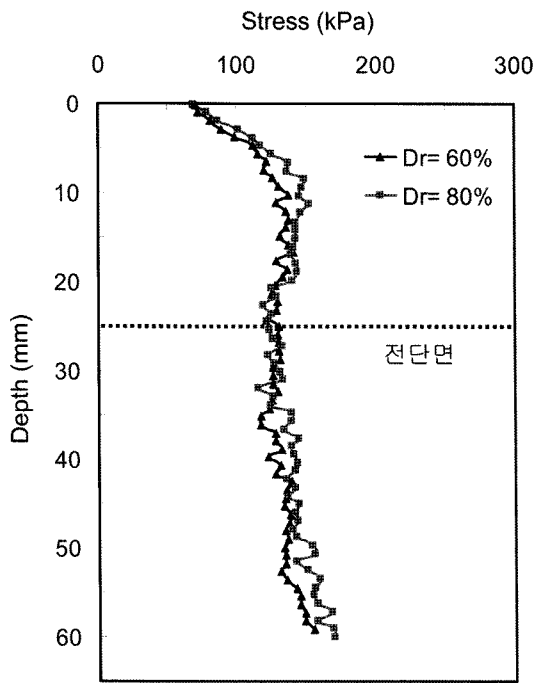
(a)



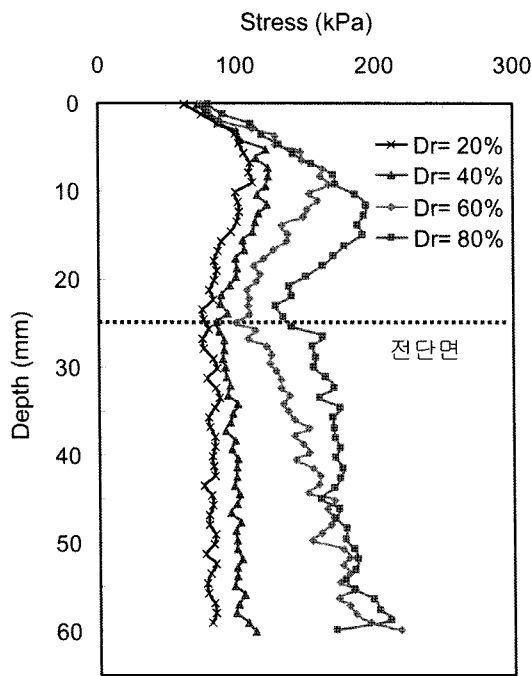
(b)

그림 8. 전단변형에 따른 전기비저항: (a) 전단영역; (b) 바닥부근





(a)



(b)

그림 9. 마이크로 콘의 전단저항력: (a) 침투강도상태; (b) 잔류강도상태

#### 4. 분석 및 고찰

실험결과로부터 시료내 전단영역의 특성은 전단파 속도와 전기비저항, 그리고 콘 선단저항력의 측정에 의해 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인하였다. 벤더엘리먼트로부터 측정된 전단파 속도는 시료의 위치별 미소변형강성을 나타낸다. 하부전단영역 및 바닥부근의 전단

파 속도는 증가하지 않고, 상부전단영역의 전단파속도만 큰 변화를 보인다. 특히, 상대밀도가 증가할수록 전단파 속도의 최대값에 도달하는 전단변형률이 작아지는 점과 상대밀도에 상관없이 최종 전단파속도가 수렴하는 것은 전단응력의 변화와 유사하다. 이에 근거하여, 전단변형에 따른 상부전단영역의 강성증가는 시료의 전단응력변화에 반영된 것으로 판단된다. 한편, 전단파 속도와 관련하여 종광홍 등(2009)은 전단파 속도의 감소가 간극비의 증가와 연관됨을 연구한 적이 있다. 본 연구에서 얻게 된 전단파 속도를 전기비저항 및 콘 선단저항력의 결과와 고려하면, 하부전단영역의 전단파 속도가 크게 변화하지 않는 것은 하부전단영역의 강도는 증가하였으나, 동시에 간극도 증가하여 서로 상쇄역할을 한 것으로 보인다.

전기비저항의 측정결과, 전단영역의 전기비저항은 수직변형률의 변화와 반비례 관계를 가짐을 알 수 있다. 즉, 상대밀도가 큰 경우 수직방향의 팽창은 전단영역에서 전기비저항의 감소로 나타나고, 상대밀도가 작은 경우 시료의 수축이 전단영역에서 전기비저항의 증가로 나타난다. 전단영역과 달리, 바닥부근의 전기비저항은 상대밀도가 작은 경우 시료가 전체적으로 수축되어 약간 증가하지만, 상대밀도가 큰 경우 변화가 없다. 따라서, 시료의 전체적인 수직변형은 전단영역의 전기비저항 변화, 즉 전단영역의 국부간극 변화에 영향받는 것으로 판단된다.

마이크로 콘의 관입에 의해 측정된 콘 선단저항력은 시료의 깊이별 강도분포를 보여준다. 잔류강도상태에서 상대밀도가 증가할수록 상부전단영역의 콘 선단저항력이 뚜렷하게 증가한다. 전단파 속도의 결과와 동일하게 상부전단영역의 강성이 시료전체의 전단응력증가에 기여하고 있음을 알 수 있다. 침투강도상태에서 전단영역(깊이 25mm부근)의 강도감소는 작은 반면, 잔류강도상태에서는 크게 나타난다. 전단이 진행됨에 따라 전단영역의 간극률은 증가하고, 접촉력분포는 더욱 기울어지기 때문에 잔류강도상태에서 전단영역의 강도감소가 크게 발생한 것으로 판단된다(민택기와 김치영, 2006; Masson와 Martinez, 2001).

#### 5. 결론

본 연구에서는 전단파와 전기비저항, 그리고 마이크로 콘을 이용한 직접전단실험을 통해 전단영역의 특성

을 분석하였다. 주문진 표준사를 상대밀도 20%, 40%, 60%, 80%로 조성하여, 전단변형에 따라 시료내 각 위치별 전단파와 전기비저항을 측정하였다. 또한, 침투강도상태와 잔류강도상태에서 마이크로 콘 관입실험을 수행하여 콘 선단저항력의 분포를 파악하였다. 본 연구를 통해 제시된 결론은 다음과 같다.

- (1) 전단변형에 따른 전단파 속도는 상부전단영역에서 증가하고, 하부전단영역 및 바닥부근에서는 일정하다. 여기서, 상부전단영역의 강성증가는 전단응력의 변화와 연관됨을 보여준다.
- (2) 바닥부근의 전기비저항은 변화가 없는 반면, 하부전단영역에서 측정한 전기비저항은 수직변형률의 변화와 반비례 관계로 나타난다. 이로부터, 수직변형률의 변화는 전단영역의 국부간극 변화를 반영하고 있음을 알 수 있다.
- (3) 깊이에 따른 콘 선단저항은 상대밀도가 증가할수록 상부전단영역의 강도증가가 크며, 이는 전단파 속도의 결과와 일치한다. 또한, 침투강도상태보다 잔류강도상태에서 전단영역의 강도감소가 뚜렷이 나타났는데, 전단영역에서 전단변형단계에 따른 간극증가의 영향을 받은 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(2010-0016605)을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김재영, 류동훈, 이재성, 大島昭彦 (2004), “개량형 일면직접전단 시험기의 제작과 정체적·정압조건 전단시험에 대하여”, *한국지반공학회지*, 제20권, 제5호, pp.58-65.
2. 김종열, 최용환, 정자영, 강권수 (2000), “직접전단시험 형태에 따른 주문진 표준사의 전단정수 고찰”, *2000 대한토목학회 가을 학술발표회*, pp.439-442.
3. 김준현, 윤형구, 정순혁, 이종섭 (2009a), “4전극 전기비저항 탐사 장비의 개발 및 검증”, *대한토목학회 논문집*, 제29권, 3C호, pp. 127-136.
4. 김준현, 윤형구, 정순혁, 이종섭 (2009b), “전기비저항 콘 프로브

를 이용한 해안 연약 지반의 간극률 산정”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 2호, pp.45-54.

5. 민덕기, 김치영 (2006), “DIP 기법을 이용한 조립토의 전단영역 크기 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제22권, 8호, pp.89-97.
6. 변용훈, 종광홍, 판명파, 이종섭 (2010), “개선된 직접전단시험을 이용한 전단영역의 거동”, *2010 한국지반공학회 봄학술발표회*, pp.607-614.
7. 이종섭, 신동현, 윤형구, 이우진 (2008), “초소형 마이크로콘 관입시험기의 개발 및 적용”, *한국지반공학회 논문집*, 제 24권 2호, pp.77-86.
8. 정자영, 김종열, 최용환, 강희복 (2001), “직접전단시험기의 메카니즘에 따른 전단강도정수 비교”, *2001 대한토목학회 봄학술발표회*, pp.1-4.
9. 종광홍, 변용훈, 엄용훈, 심영중, 이종섭 (2009), “지반 소실 혼합재의 용해과정 모니터링”, *한국지반공학회 논문집*, 제 25권 10호, pp.111-122.
10. ASTM D 3080 (2004), “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
11. Alshibli, K. and Sture, S. (2000), “Shear Band Formation in Plane Strain Experiments of Sand”, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, Vol.126, No.6, pp.495-503.
12. Archie, G. E. (1942), “The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics”, *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 146, pp.54-62.
13. Bardet, J. P. and Proubet, J. (1991), “A numerical investigation of the structure of persistent shear bands in granular media”, *Géotechnique*, Vol.41, No.4, pp.599-613.
14. Head, K. H. (1982), *Manual of soil laboratory testing. Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests*, London: Pentech Press.
15. Lee, C., Lee, J. S., Lee, W., and Cho, T. H. (2008), “Experiment setup for shear wave and electrical resistance measurements in an oedometer”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 31(2), pp.149-156.
16. Liu, Z., Shi, B., and Sheng, D. (2006), “A micropenetrometer for detecting structural strength inside soft soils”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 29(6), pp.443-450.
17. Masson, S. and Martinez, J. (2001), “Micromechanical analysis of the shear behavior of a granular material”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.127, No.10, pp.1007-1016.
18. Mühlhaus, H. B. and Vardoulakis, I. (1987), “The thickness of shear bands in granular materials”, *Géotechnique*, Vol.37, No.3, pp.271-283.
19. Oda, M. and Kazama, H. (1998), “Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils”, *Géotechnique*, Vol.48, No.4, pp.465-481.
20. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley and Sons, New York.
21. Yu, P. and Richart, F. E. Jr. (1984), “Stress Ratio Effects on Shear Modulus of Dry Sands”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.3, pp.331-345.

(접수일자 2010. 9. 4, 심사완료일 2010. 12. 28)