개선된 직접전단시험을 이용한 전단영역의 거동
Behavior of Shear Zone by Improved Direct Shear Test

변용훈[1], Yong-Hoon Byeon, 쭝꽝훙[2], Q. Hung Truong, 짠밍콰[1], M. Khoa Tran, 이종섭[3], Jong-Sub Lee.

[1] 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.
[2] 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후연구원, Post Doctoral Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.
[3] 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : Shear behavior of granular soils largely affects the safety and stability of underground and earth structures. This study presents the characteristics of shear zone in a direct shear test using shear wave and electrical resistivity measurements. An innovative direct shear box made of transparent acrylic material has been developed to prevent direct electric current. Bender elements and electrical resistivity probe are embedded in the wall of direct shear box to estimate the shear wave velocities and the electrical resistivity at the shear and non-shear zones. Experimental results show that the void ratio and shear wave velocity at shear zone increase during shearing while the values remain constant at non-shear zone. The results demonstrate correlation among the contact force, small strain shear modulus, and void ratio at shear zone. This study suggests that the application of the modified direct shear box including shear wave and electrical resistivity measurements may become an effective tool for analyzing soil behavior at shear zone.

Keywords : Direct shear test, Resistivity, Shear zone, Shear wave

1. 서 론

흙을 이용한 지반구조물의 안정성은 흙의 응력상태에 따라 판단된다. 즉, 흙이 받고 있는 전단응력이 전단강도를 넘게 되면 그 구조물은 파괴에 이르렀음을 예측할 수 있다. 점착력이 없는 모래와 같은 조립재료로 이루어진 지반의 경우, 그 입자들의 전단거동이 구조물의 안정성에 상당한 영향을 끼치게 된다. 따라서 일반적으로 흙의 전단강도를 결정하기 위해 이용되는 실내시험 중 하나가 직접전단시험이다. 직접전단시험은 파괴면이 미리 설정되어 있고, 응력변화를 정확히 알 수 없다는 단점이 있다. 하지만, 시험과정과 결과해석이 다른 시험에 비하여 간단하고, 단기간 배수가 가능할 뿐 아니라, 평면변형에서의 전단강도정수를 직접 구할 수 있다는 장점이 있어 실용적으로 많이 활용되고 있다.

이와 같은 이유로, 직접전단시험을 이용하여 조립토의 전단거동을 분석하기 위한 연구는 많은 연구자들에 의해서 수행되어 왔다. Digital Image Processing 기법을 이용하여 직접전단시험에서 발생하는 전단영역의 크기가 분석되었고(민덕기&김치영 2006), Distinct Element Simulation을 이용하여 직접전단시험시 전단영역에서의 상부상자와 시료 사이의 마찰력에 의한 영향도 분석되었다(S.H. Liu 2006). 그러나, 직접전단시험에서 전단거동시 변화하는 재료의 특성을 직접적으로 분석할 수는 없었다.

따라서 본 연구에서는 전단파와 전기비저항를 이용하여 전단거동시 미소변형률의 강성 및 간극비의

변화를 분석하고자 하였다. 전단파는 흙 입자의 강성과 밀도에 따라 전파양상이 달라진다(이종섭 등, 2006). 따라서 흙과 트랜스듀서 간의 결합력이 뛰어난 벤더 엘리먼트를 이용하여 상대밀도에 따른 전단파의 속도변화를 관측하고자 하였다. 또한, 전해질 이온의 운동으로 결정되는 전기비저항은 간극비의 함수이므로(Archie 1942), 전단거동에 따른 간극비의 변화를 측정하고자 하였다.

2. 실험적 연구

주문진 표준사를 이용하여 상대밀도에 따른 전단파 속도와 전기비저항을 측정하였다. 본 연구에 사용된 시료의 특성, 시료 조성 그리고 실험과정과 전단파 및 전기비저항 측정방법은 다음과 같다.

2.1 시료의 기본특성

본 연구에 사용된 주문진 표준사는 그림 1과 같으며, 기본 물성치는 표 1에 나타내었다. 시료는 증류수로 세척 후 건조하였으며, 입자의 크기에 대한 영향을 최소화하기 위해 체분석을 실시하여, 40번체(0.425mm)를 통과하고 50번체(0.3mm)에 잔류하는 균등한 시료를 사용하였다. 따라서 그림 1에서 보는 바와 같이, 사용된 모래는 모나고 균질하다. 또한 표 1에, 유효입경(D_{50}=0.36mm)과 최대간극비(e_{max}=1.04)와 최소간극비(e_{min}=0.62)를 나타내었다.

표 1. 주문진 표준사의 기본 물성치

특 성	모래 (40/50 sand)
비중	2.62
전단탄성계수[MPa]	100
포아송비	0.3
입경D_{50}[mm]	0.36
최대간극비(e_{max})	1.04
최소간극비(e_{min})	0.62

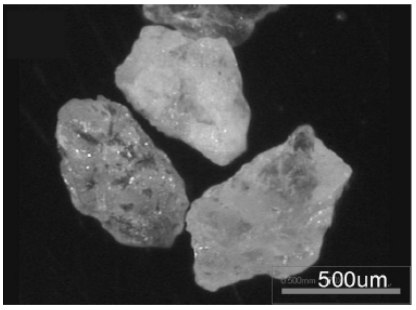


그림 1. 주문진 표준사의 입자 형상

2.2 시료조성

상대밀도에 따른 전단거동을 보기 위해, #40~#50체 사이의 주문진사를 상대밀도 20%, 80%로 조성하였다. 각 상대밀도를 조성하기 위하여, 먼저 최대 간극비와 최소 간극비를 이용해 상대밀도에 따른 필요한 시료의 간극비를 계산하였다. 다음으로 일정한 전단상자의 부피를 측정한 후, 각 상대밀도에 따른 건조시료의 중량을 계산하여 시료를 조성하였다. 시료조성시 시료의 균질성을 확보하기 위해 각 층의 다짐 횟수, 각 층의 두께, 낙사 높이, 낙사 속도를 동일하게 고려해 주었다. 상대밀도 20%일 때는 다짐 없이 3층으로 4cm 높이에서 낙사하여 느슨한 시료를 조성하였다. 한편, 조밀한 시료를 형성하기 위해서 10층으로 나누어 많은 다짐횟수(12번)와 낙사높이(10cm)를 높게 설정하여 상대밀도 80%의 시료를 조성하였다. 시료조성이 완료된 후, 시료내부의 전기비저항을 측정하기 위하여 0.1M의 소금물을 가하여 시료가 포화되도록 하였다.

2.3 개선된 전단상자

전단파와 전기비저항을 이용한 직접전단시험은 그림 2와 같이 벤더 엘리먼트와 전기비저항 프로브가 장착된 전단상자를 이용하여 수행되었다. 개선된 전단상자는 기본적으로 투명 아크릴 재질로 제작되어, 시료의 거동변화 관찰 및 상자벽면을 통한 전류의 흐름을 방지할 수 있게 하였다. 또한 그림 2에 나타낸 바와 같이, 전단면 근처의 전단거동이 발생하는 부분과 비전단영역인 하부에는 벤더 엘리먼트(Bender Elements)와 전기비저항 프로브(Electrical Probe)를 설치하여, 두 영역에서의 거동차이를 분석할 수 있게 하였다. 전단상자는 내부의 가로, 세로길이가 70mm인 정사각형 모양으로, 시료가 조성되는 내부의 높이는 59.59mm 이며, 전체높이는 73.3mm로 구성되어 있다.

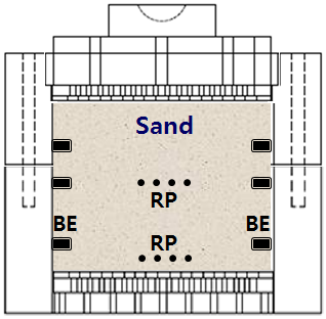


그림 2. 개선된 전단상자

2.4 실험과정

건조된 주문진사를 계산된 상대밀도로 전단상자에 조성한 뒤, 각 수직하중에 따른 직접전단을 실시하여 전단파와 전기비저항을 함께 측정하였다. 느슨한 시료의 경우, 시료에 가해지는 충격에 민감하게 반응하게 된다. 따라서, 시료조성 후 전단상자를 전단시험기에 장착할 때 발생하게 되는 충격을 방지하기 위하여 전단시험기와 전단상자를 결합한 상태에서 시료를 조성하였다. 또한 가압판이 시험중에 편심이 가해지지 않도록, 시료표면을 평평하게 다진 후 가압판을 설치한 후 하중틀을 연결하였다. 각 상대밀도에서 수직하중을 세 단계로 나누어 시험을 실시하였으며, 전단상자의 단면의 크기를 측정하여 시료에 작용하는 단계별 수직응력(0.58, 1.15, 1.73kg/cm^2)을 구하였다. 전단을 가하기 전, 0.1M의 소금물을 이용하여 시료를 포화시켰고, 수직하중을 가하여 초기의 침하량이 수렴하도록 약 20분간 압밀하였다.

전단파와 전기비저항을 측정하기 위한 벤더 엘리먼트와 전기비저항 프로브를 측정시스템에 연결한 뒤 전단시험을 수행하였다. 시험시작과 함께 10초마다 측정한 전단파는 오실로스코프를 통해 컴퓨터에 저장되고, 시료의 수직 및 수평변형과 전단력은 차동변압기(LVDT)를 통해 컴퓨터에 자동으로 저장된다. 전단시험은 시료의 수평변형률이 15%가 되는 순간까지 수행되었다.

2.5 전단파 측정

직접전단시험에 따른 전단거동을 평가하기 위하여 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 그림 3과 같이 전단상자의 양쪽 벽면에 설치하였다. 벤더 엘리먼트는 시료와 접촉하는 면적을 증가시켜 전달에너지를 충분히 발현하기 위해 캔틸레버 형태로 돌출하여 설치하였다. 하지만, 캔틸레버의 길이가 길어질 경우 벤더 엘리먼트의 공진주파수가 작아짐으로써, 근접장의 크기가 벤더 엘리먼트에서 발생한 진동이 아크릴재질의 상자벽면을 통해 전달되는 것을 방지하기 위해, 나일론재질의 스크류와 실리콘을 이용하여 설치하였다. 이에 따라, 벤더 엘리먼트와 상자벽면간의 임피던스가 차이나도록 하여 직접파로 인한 잡음을 제거하였다. 또한 전도성 페인트를 이용함으로써 발신 및 수신 벤더 엘리먼트 사이의 전기적 간섭현상을 차폐시켰다.

그림 3과 같이 발신 벤더 엘리먼트는 신호발생기(Agilent 33220A)에서 보내온 20Hz의 구형파의 전기적 신호를 물리적 신호로 바꾸어 시료를 통해 수신 벤더엘리먼트에 전달하게 된다. 이 물리적 신호는 수신 벤더 엘리먼트를 통해 다시 전기적 신호로 변환된다. 변환된 신호는 필터(Krohn-Hite 3364)를 이용하여 증폭되고, 잡음이 제거된다. 이 과정에서 Nyquist 이론을 만족시키기 위해 로우패스 필터링은 항상 공진주파수의 10배 이상을 적용하였다. 필터링 과정을 거친 신호는 오실로스코프로 전달되고, 신호의 불규칙한 잡음제거를 위해 신호들을 평균하여 획득한다. 그러나, 전단시험시 빠르게 변화하는 시료의 특성을 정확하게 평가하기 위해, 16개의 신호만을 평균하여 저장하였다.

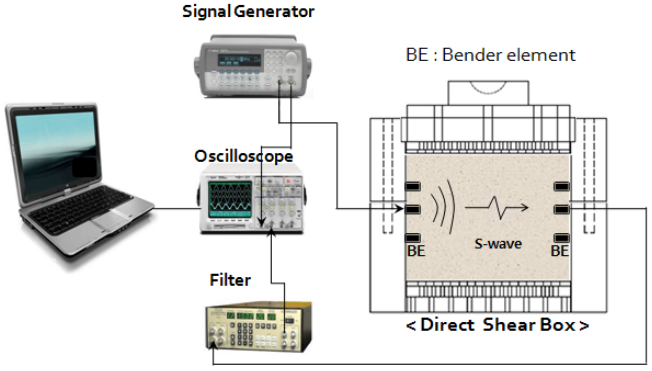
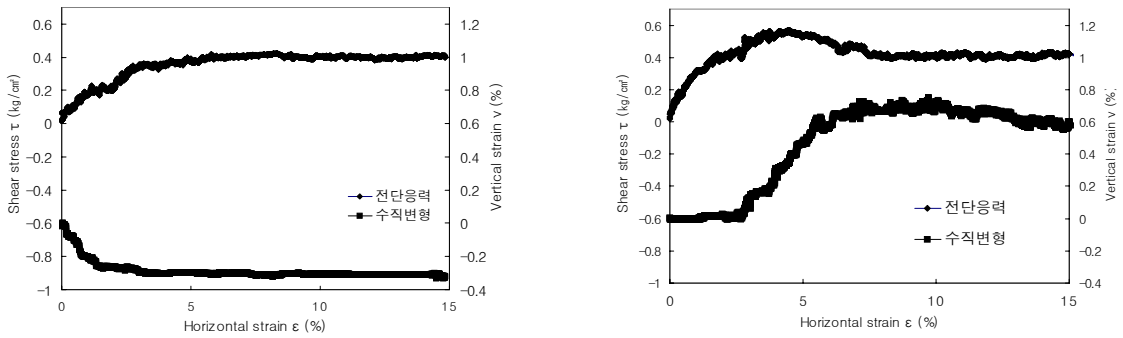


그림 3. 측정장비 구성

3. 실험결과

3.1 직접전단시험의 결과

개선된 직접전단상자를 사용하여 직접전단시험을 상대밀도에 따라 수행해 본 결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 보면, 수평변형률에 대한 전단응력 및 수직변형률의 그래프는 지금까지 알려진 직접전단시험의 결과와 일치하였다. 느슨한 상태의 상대밀도 20%에서는 수평변형률이 증가함에 따라, 전단응력 곡선이 첨두전단강도 없이 극한전단강도로 수렴하였다. 수직변형률은 느슨한 시료의 특성에 따라, 전단을 가하는 동안 수직변형률이 음의 값을 보이며 수축하였다. 이와 달리, 조밀한 상태의 상대밀도 80%에서 전단응력은 수평변형률이 증가함에 따라 첨두전단강도에 도달한 후, 극한전단강도로 수렴한다. 또한, 수직변형률은 초기에 약간의 수축을 보인 후, 팽창하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과로부터, 본 연구에서 적용한 개선된 직접전단상자는 기존의 직접전단시험과 동일한 경향을 보여줌으로써, 합리적인 결과를 획득할 수 있음을 확인되었다.

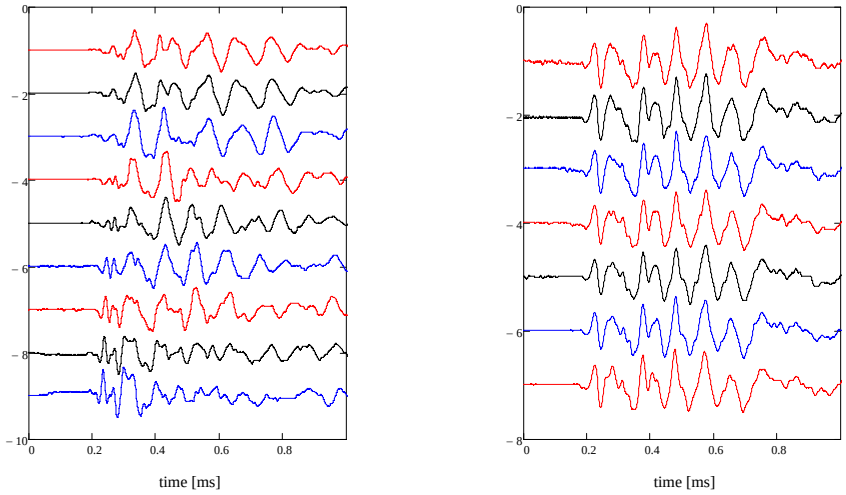


(a) 상대밀도 20%　　(b) 상대밀도 80%

그림 4. 직접전단시험 결과

3.2 전단파

조성된 각 시료에 대하여 직접전단시험을 시작한 시점부터 수평변형률이 15%에 도달할 때까지 전단파 신호를 매 10초마다 측정하여 저장하였다. 벤더 엘리먼트는 상부상자 및 하부상자의 전단영역 부근과 바닥 부근에 설치되어 각 위치에서의 전단파를 측정하였다. 상부상자 전단영역에서의 상대밀도 80%인 시료에 1.15kg/cm^{2}의 수직응력을 주었을 때의 전단파 신호를 나타내면 그림 5와 같다.



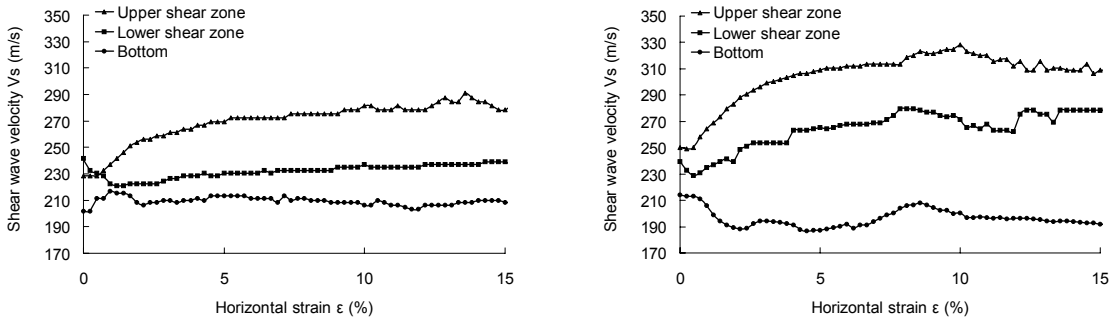
(a) 초기단계 (b) 마지막 단계

그림 5. 상대밀도 80%, 1.15kg/cm^{2}일 때 전단파 신호

전단파의 속도는 획득한 신호를 이용하여 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$V_s = \frac{L_{tip}}{t_s} \qquad (1)$$

여기서, L_{tip}은 발신 및 수신 벤더 엘리먼트의 끝단거리를 말하며, t_s는 전단파의 초기도달시간을 의미한다. 그림 5의 전단파 신호에서 초기도달시간을 결정한 후, 식 (1)을 이용하여 전단파 속도를 산정하여 모든 시료에 대하여 수평변형률에 따른 변화를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서, 전반적으로 상대밀도가 증가함에 따라 전단파 속도가 증가하고, 전단영역과 비전단영역의 속도변화가 다른 것이 확인되었다.



(a) 상대밀도 20% (b) 상대밀도 80%

그림 6. 전단파 속도(수직응력, 1.15kg/cm^2)

3.3 전기비저항

포화된 흙의 전기전도도는 흙 입자자체의 전기전도도, 간극수의 전기전도도, 점토입자의 이중층수 전기전전도도의 함수이다(Santamarina et al. 2001). 여기서 흙 입자자체의 전기전도도는 간극수의 전기전도도보다 상당히 작아 그 영향을 무시할 수 있다. 특히, 모래의 경우 이중층수로 인한 전기전도도는 존재하지 않으므로, 포화된 흙의 전기전도도는 다음과 같이 표현할 수 있다(Lee et al. 2008).

$$\zeta_{mix} = n\zeta_{el} \qquad (2)$$

위와 같은 관계는 Archie(1942)에 의하여 전기비저항의 항으로 다음과 같은 경험식이 제안된 바 있다.

$$\rho_s = \rho_w n^{-m} \qquad (3)$$

여기서, ρ_s와 ρ_w는 각각 흙과 간극수의 전기비저항, n은 간극률, m은 흙에 따라 주어지는 상수이다. 식(3)에 따르면, 흙의 전기비저항과 간극수의 전기비저항을 측정하여, 포화된 흙의 간극률을 산정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 간극률을 산정하기 위한 전기비저항 프로브를 이용하여 흙의 전기비저항을 측정하였다. 먼저, 실험을 통하여 얻은 전기저항을 시료고유의 전기비저항 값으로 환산하기 위하여 다음과 같이 프로브를 보정한다.

$$\rho = \alpha R \qquad (4)$$

여기서, ρ는 전기비저항, R은 전기저항, α는 프로브 고유특성 상수이다. 서로 다른 농도의 소금물에서 프로브로 측정한 전기저항과 측정된 전기전도도의 역수인 전기비저항의 관계는 다음과 같이 나타났다.

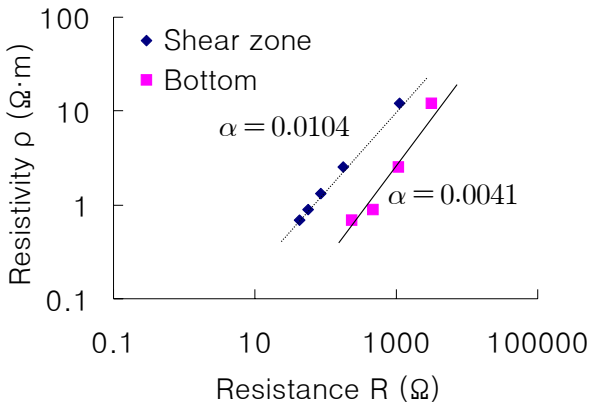
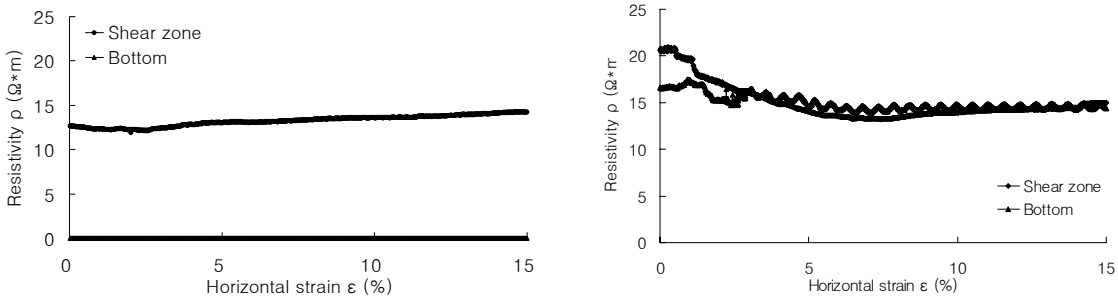


그림 7. 전기비저항 프로브의 보정(INTEC LCR-819, 0.6V, 100kHz, 15℃)

보정실험결과, 전단영역에 설치된 전기비저항 프로브의 α는 0.0104m, 바닥부근에 설치된 전기비저항 프로브의 α는 0.0041m로 나타났다. 이와 같이, 프로브의 고유특성으로 인한 보정을 통하여 직접전단시험에서 얻은 각 영역의 전기비저항은 다음 그림에 나타내었다.



(a) 상대밀도 20%　　(b) 상대밀도 80%

그림 8. 수평변형률에 따른 전기비저항(수직응력, 1.15kg/cm^2)

그림 8에서, 전기비저항은 시료의 상대밀도에 따라 다른 경향을 보여준다. 전단영역에서의 전기비저항은 상대밀도 20%의 경우 점차 증가함을 보이나, 상대밀도 80%의 경우 점점 줄어드는 것이 확인되었다. 그에 비해, 바닥에서의 전기비저항은 두 경우 모두 별다른 변화를 보이지 않았다.

4. 분석 및 고찰

4.1 전단거동에 따른 전단파의 속도변화

직접전단이 발생함에 따라, 각 위치의 전단파 속도를 그림 6에 나타내었다. 시료조성 시, 동일한 다짐조건을 통해 시료의 균질성을 유지하였으나, 각 위치에서의 초기속도가 다름을 관찰할 수 있다. 이는 조성된 시료에 수직하중 재하 시, 재하방향의 반대방향으로 발생하는 벽 내부마찰로 인하여, 측정위치가 깊어질수록 시료에 작용되는 응력이 작아지기 때문이다. 상대밀도 20%인 경우, 하부상자의 전단영역과 바닥부근에서 전단파의 속도는 일정한 값을 유지하는 반면, 상부상자의 전단영역에서는 점점 속도가 증가하여 일정한 값으로 수렴하는 것으로 관찰되었다. 이를 전단응력의 변화와 비교하면, 전단이 가해짐에 따라 전단응력이 점점 증가하는 것은 상부상자 전단영역의 강성증가에 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. 상대밀도 80%인 경우, 상부상자뿐 아니라 하부상자의 전단영역의 강성도 크게 증가하는 것이 확인되었다. 이를 통해, 상대밀도가 증가함에 따라 흙의 전단거동이 발생하는 영역이 넓어지고 있으며, 전단강도 산정에 주는 영향이 더 커짐을 확인하였다.

4.2 전단거동에 따른 전기비저항의 변화

0.1M의 소금물로 포화된 시료가 전단됨에 따라, 전단영역과 바닥부근에서 측정한 전기비저항의 변화를 그림 8에 나타내었다. 그림 8은 시료의 상대밀도에 따라, 전단영역에서 전기비저항의 다른 경향을 보여주었다. 상대밀도 20%인 경우, 전단이 발생하는 동안 전기비저항은 점점 커졌다. 일반적으로, 전기비저항이 커짐은 간극이 감소하여 전해질 이온의 흐름이 어려움을 의미한다. 이를 전단응력의 결과와 비교해 보면, 느슨한 시료가 전단이 발생하는 동안 수축하며, 그 결과로서 전단영역의 간극률이 작아짐을 판단할 수 있다. 반대로, 상대밀도 80%인 경우 전단응력의 결과와 비교하면, 조밀한 시료는 전단발생 동안 팽창하여, 간극률이 커지는 즉, 전기비저항이 작아지는 것으로 확인되었다. 이를 통해, 직접전단시험시 시료의 팽창 및 수축은 전단영역의 간극비 변화로 인한 것이었음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 직접전단시험 시 전단영역과 비전단영역에서 발생하는 흙 입자의 거동을 분석하고

자, 주문진 표준사로 상대밀도 20, 80 %인 시료를 조성한 뒤, 전단파와 전기비저항을 측정하여 직접전단 시험을 수행하였다. 시험은 개선된 전단상자를 이용하였으며, 전단파와 전기비저항은 각각 벤더 엘리먼트와 전기비저항 프로브를 이용하여 측정하였다.

실험 결과, 직접전단에 따른 전단응력의 변화는 전단파 속도의 변화를 통해 설명할 수 있었다. 전단영역에서의 전단파 속도의 증가양상에 따라, 전단응력의 증가를 설명할 수 있었다. 또한, 상대밀도가 커짐에 따라, 전단영역의 크기가 확대됨도 확인되었다. 한편, 직접전단에 따른 전단영역에서의 수직변형은 전기비저항의 변화를 통하여 설명되었다. 전단영역에서, 상대밀도가 낮은 경우 전기비저항은 점점 증가하고(즉, 간극률은 감소), 상대밀도가 높은 경우 전기비저항은 점점 낮아져(즉, 간극률은 증가) 일정함값에 수렴하였다. 반면 상대밀도에 상관없이, 비 전단영역에서는 전기비저항의 변화가 거의 없으므로, 전단영역에서의 간극률의 변화가 수직변형에 주로 영향을 끼치는 것이 확인되었다. 본 연구의 결과는, 전단파와 전기비저항을 이용한 직접전단시험이 전단영역에서 조립토의 거동을 분석할 수 있는 좋은 방법임을 보여준다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2009-0075809)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 민덕기, 김치영 (2006), “DIP 기법을 이용한 조립토의 전단영역 크기 분석” 한국지반공학회논문집, 제22권, 8호, pp.89-97.
2. 이종섭, 이창호 (2006), “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, 한국지반공학회논문집, 제22권, 5호, pp.47-57.
3. 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.
4. 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.
5. Liu, S. H. (2006). “Simulating a direct shear box test by DEM”, Can. Geotech. J. 43: 155-168
6. 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.