

# 직접전단실험을 이용한 세립토의 전단강도 및 유변학적 정수 산정

## Estimation of Shear Strength and Rheological Parameters of Fine-Grained Soil Using Direct Shear Test

박근우<sup>1)</sup> · 홍원택<sup>1)</sup> · 이종섭<sup>†</sup>

Geun-Woo Park · Won-Taek Hong · Jong-Sub Lee

Received: October 19<sup>th</sup>, 2016; Revised: October 24<sup>th</sup>, 2016; Accepted: January 18<sup>th</sup>, 2017

**ABSTRACT** : As the behavior of the debris flow due to the torrential rains in mountain is affected by shear strength and rheological properties of the fine fraction in the ground, the evaluation of both properties is necessary to estimate the behavior of the debris flow. The objective of this study is to evaluate the shear strength and rheological properties using the direct shear apparatus. The direct shear tests are conducted for two kinds of fine-grained soil specimens, which are in dry state and liquid limit state. From the direct shear tests, shear strengths are measured according to the normal stresses applied on the specimens to evaluate the cohesion and internal friction angle. In addition, reversal shear tests are performed for the fine-grained soil specimens in liquid limit state according to the shear rate to evaluate the residual shear strength. The results of direct shear tests show that the specimen at the liquid limit state has lower internal friction angle and higher cohesion compared to the dry stated, and the residual friction angle and cohesion at the residual state are lower than those at the peak state. In the result of reversal shear test, the residual shear strength is directly proportional to the shear rate and viscosity is calculated as 73.60 Pa·s. This study demonstrates that the direct shear apparatus can be effectively used for the evaluation of the shear strength and rheological properties of the fine-grained soils related with the debris flow.

**Keywords** : Cohesion, Direct shear test, Internal friction angle, Rheology, Shear strength, Viscosity

**요 지** : 집중호우로 인하여 산악지반에 발생하는 토석류의 거동은 대상지반 세립분의 전단강도 및 유변학적 특성들에 의하여 영향을 받기 때문에, 두 특성에 대한 정수는 토석류 거동을 파악하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 직접전단 실험을 통하여 세립분의 전단강도 및 유변학적 정수를 평가하고자 하였다. 건조상태와 액성한계상태로 조성된 두 가지 세립분 시료에 대하여 직접전단실험을 수행하였으며, 연직응력에 따른 전단강도를 측정하여 점착력과 내부마찰각을 산정하였다. 또한 액성한계로 조성된 시료의 잔류전단강도를 획득하기 위하여 전단변형률속도와 전단방향을 변화시켜 반복전단실험을 수행하였다. 실험 결과, 액성한계상태의 시료는 건조 상태 시료에 비해 내부마찰각은 작지만 점착력은 더 큰 것으로 나타났으며, 잔류전단강도를 통해 산정한 내부마찰각과 점착력은 점두전단강도에 의해 산정된 결과보다 작은 것으로 나타났다. 반복전단 결과, 전단변형률속도와 잔류전단강도는 선형적인 관계를 보였으며, 전단변형률속도-잔류전단강도 관계의 기울기로서 결정되는 점성은 약 73.60Pa·s로 산정되었다. 본 연구는 직접전단 장비가 산악지반 토석류 거동과 관련된 세립분의 전단강도 및 유변학적 정수 산정에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

**주요어** : 점착력, 직접전단실험, 내부마찰각, 유변학, 전단강도, 점성

## 1. 서 론

우리나라에서 발생하는 토사재해는 하절기 집중호우로 지반의 함수비가 과도하게 증가하여 사면의 붕괴 후, 액성한계 이상의 토석류(또는 이류)가 발생하는 형태로 나타난다(Lee & Widjaja, 2013). 특히 도심지에서 토사재해가 발생할 경우, 토석류가 도시까지 도달하여 큰 인명피해와 재산피해를 야기하므로, 토사재해 피해방지대책은 도시설계에 있어서 중요한 요소이다. 토사재해에 의한 피해를 최소화

화하기 위하여, 토사재해 발생이 우려되는 지역에서는 사방댐과 같은 방재시설들을 구축하고 있다. 방재시설 구축 시 사방댐의 적절한 위치, 규모, 개수를 예측하기 위하여, 토사재해 발생 후 토석류의 규모 등 거동예측에 대한 연구가 요구되는 실정이다.

최근 국내적으로 토석류 이동 매커니즘과 거동을 예측하기 위하여, 시뮬레이션 프로그램을 개발하는 연구들이 활발히 진행되고 있다(Hendriks, 2009; Lee et al., 2015; Shin, 2014, 2015). 토석류 거동예측 시뮬레이션에서는 토석류의

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.

† School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ. (Corresponding Author : jongsub@korea.ac.kr)

전단강도 및 유변학적 특성을 고려하기 위하여 점착력, 내부마찰각 그리고 점성과 같은 공학정수들을 입력하여 결과를 도출하고 있다. 토석류의 전단강도 및 유변학적 정수들은 발생지역의 세립분 특성에 따라 변하므로, 지역에 따른 공학정수 산정은 해당 지역의 특성을 반영한 토석류 거동에 측을 가능케 한다.

지역특성 외에도 조성된 시료의 크기 및 상태, 실험장비의 종류에 따라 각기 다른 결과가 도출된다. 그러므로, 객관적인 토석류 거동예측을 위하여 일관성 있는 전단강도 및 유변학적 정수 산정에 대한 연구는 매우 중요한 요소이다. 그러나 기존 연구에서는 전단강도 특성과 유변학적 특성을 평가하는 실험이 분리되어 진행되고 있다. 흙의 전단강도 특성을 평가하기 위한 방법으로써, 직접전단실험, 단순전단실험 등을 이용하여(Lee, 2007; Liu et al., 2005; Schneider, 1978; Stark & Eid, 1994; Stark, 1995; Stark & Hussain, 2010), 흙의 점착력, 내부마찰각 그리고 잔류전단강도 등을 평가하였다. 또한 흙의 유변학적 특성을 평가하기 위하여 링전단실험, 베인전단실험 그리고 회전형 점도계를 이용한 실험 등이 사용되었다(Alderman et al., 1991; Alfani & Guerrini, 2005; Coussot et al., 2002; Sassa et al., 2004; Tiwari & Marui, 2004). 특히 국내에서는 Jeong & Song(2013), Jeong et al.(2014) 그리고 Park et al.(2013) 등이 링전단실험장비를 통하여 토석류의 유변학적 특성을 연구하였으며, Kang & Kim(2013)은 회전형 점도계를 이용하여, 액성지수와 전단변형률속도에 따른 점성 변화 양상을 연구하였다.

기존연구사례에서 볼 수 있듯이 흙의 전단강도 및 유변학적 특성을 평가하는 실험들은 서로 분리되어 있으므로, 각 실험에 따라 시료의 크기 및 모양, 조건들이 달라지게 되어 일관적인 상태평가에 한계가 따른다. 링전단실험은 흙의 전단강도 특성과 유변학적 특성은 모두 평가하기에 적합한 실험장비이지만, 국내에서는 관련 연구사례가 부족하고 실험방법이 정립되지 않았지만, 직접전단실험은 관련 연구가 많이 진행되어 있어 실험방법이 상용화되어 있고, 선행연구가 많아 실험을 수행함에 있어 수월하다. 본 연구에서는 직접전단실험 장비를 이용하여 토사재해 발생 후 생성되는 토석류의 거동 예측 시뮬레이션에서 활용 가능한 전단강도 및 유변학적 정수를 동일한 시료에 대하여 산정하고자 한다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 토석류의 전단강도 및 유변학적 특성

사면의 파괴 및 파괴 이후 거동은 대상 지반의 전단강도

특성과 유변학적 특성에 따라 다르게 분석될 수 있으므로, 토사재해 발생 매커니즘을 이해하기 위해서는 두 특성에 대하여 정확한 이해가 필요하다. Fig. 1은 사면 붕괴 시 지반의 전단강도 특성을 나타낸다. 지반에 변형이 가해지면, 전단응력은 점두전단강도에 도달하게 되고, 이후 파괴가 일어나고 지속적인 변형으로 인하여 잔류전단강도에 도달하게 된다.

사면의 파괴 이후 발생하는 토석류는 유체와 같은 유동성을 보이며, 토석류에 포함되어 있는 세립분의 유변학적 특성은 토석류 거동특성을 대표한다고 간주할 수 있다(Jeong, 2014). 여러 입자들이 포함되어 있는 토석류 같은 경우 비뉴턴유체와 같은 거동을 보인다. 토석류와 같은 비뉴턴유체 거동에서 전단응력과 전단변형률속도의 관계는 다음과 같이 정의내릴 수 있다(Nguyen & Boger, 1992).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \quad (1)$$

여기서  $\tau$ [Pa]와  $\tau_y$ [Pa]은 각각 전단응력과 항복응력을 나타내며,  $\eta$ [Pa·s]은 점성(Viscosity),  $\dot{\gamma}$ [s<sup>-1</sup>]은 전단변형률속도(Shear rate)를 나타낸다. Sibuya et al.(1997)에 따르면 직접전단상자에서 전단을 발생시킬 경우, 전단면 부근에서 단순전단 형태로 변형이 발생한다. 따라서 직접전단실험에서 전단변형률은 ‘변위/변형범위의 높이’로 정의되며, 전단변형률속도는 ‘전단 속도/변형범위의 높이’로 정의할 수 있다(Ovarlez et al., 2013). 일반적인 직접전단실험의 경우 전체 시료높이의 절반이 변형범위로 알려져 있으며(Head, 2011), 전단변형률속도는 ‘변위/전체 시료높이의 절반’으로 정의될 수 있다.

토석류 거동 시 각 전단변형률속도에서의 전단응력은 동일속도로 전단 하는 경우, Fig. 1과 같이 산정된 전단응력-전단변형률 관계에서 잔류전단강도에 해당한다. 전단변형

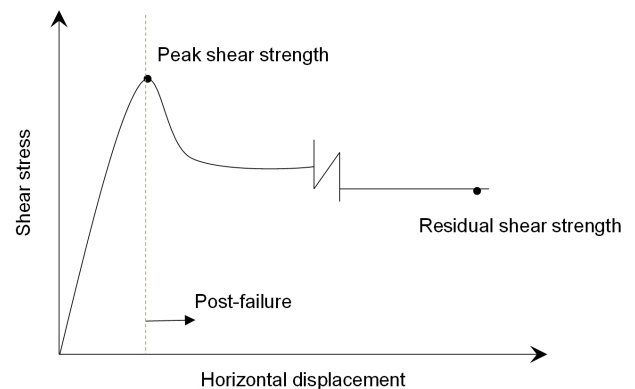


Fig. 1. Relationship between the horizontal displacement and shear stress during shearing

률속도를 달리하여 각각의 잔류전단강도를 산정할 수 있으며, 잔류전단강도와 전단변형률속도는 선형인 관계로 얻어진다. 이러한 선형 관계를 통하여 도출된 그래프는 흐름곡선이라 한다(Jeong, 2013). Fig. 2는 잔류전단강도와 전단변형률속도의 관계를 나타낸 흐름곡선이며, 여기서 기울기는 점성을 나타낸다. 시료의 상태에 따라 산정되는 점성은 흙의 유변학적 특성을 나타내며, 토석류의 거동에 직접적인 영향을 미친다.

## 2.2 잔류전단강도 산정

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 흙에 지속적인 변형이 발생할 때, 수렴하는 전단응력의 값을 잔류전단강도라 한다. 일반적으로 전단 면을 설정한 후 전단을 진행하는 직접전단시험의 경우 변위가 한정되어 있어 한 번의 전단으로는 측정이 불가능하지만, 전단방향을 변경하며 반복 전단을 수행함으

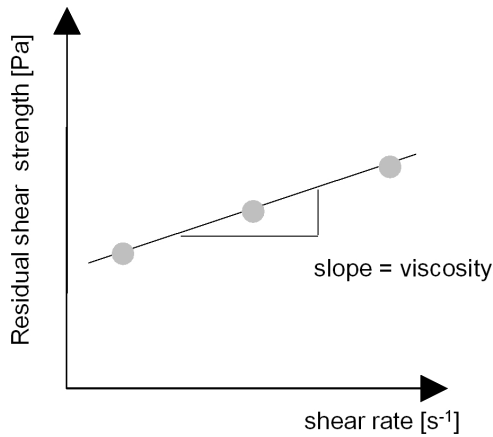


Fig. 2. Relationship between the shear rate and residual shear strength

로써 잔류전단강도를 산정할 수 있다(Head, 2011). 반복하여 전단을 진행할 경우 초기 전단 시 측정되는 침투전단강도가 감소하며, 결국 전단응력과 수평변위 관계는 Fig. 3과 같이 변화한다. Mesri & Cepeda-diaz(1986)에 따르면 일반적으로 시료에 누적수평변위가 50mm 이상 발생하였을 때, 수렴하는 전단응력으로부터 잔류전단강도로 산정할 수 있다. 반복하여 직접전단시험을 수행할 경우 전단변형률속도는 항상 일정해야 하며, 역방향으로 전단할 때에도 동일한 전단변형률속도를 적용해야 한다(Head, 2011).

## 3. 시료 및 실험구성

### 3.1 시료 조성

본 실험에서 사용된 시료는 Fig. 5와 같이 강원 화천 내 사방댐 설치 인근지역에서 채취되었다. 화천에서는 1969년 산사태가 발생하였고, 이 산사태로 인하여 인명피해가 보고된 바 있다(Seo & Kim, 1989).

채취된 시료는 노건조 후 체분석과 비중계 실험으로부터 입도분석을 실시하였으며(ASTM D422, 2007), 결과는 Fig. 5와 같다. 입도분석결과 200번체 통과량은 8.39%, 균등계수(CU)와 곡률계수(CC)는 각각 15.07, 2.41로 산정되었다. 또한, 건조된 시료 중 200번 체를 통과한 세립분(0.075mm 이하)에 대하여 기본물성실험을 수행하여 Table 1과 같은 결과를 획득하였다. 세립분의 비중은 2.71이며(ASTM D854, 2009), 최대간극비와 최소간극비는 각각 1.12, 0.81로 나타났다(ASTM D4253, 2006; ASTM D4254, 2006). 액소성 시험결과 화천시료 세립분의 액성한계는 69.73%, 소성한계는

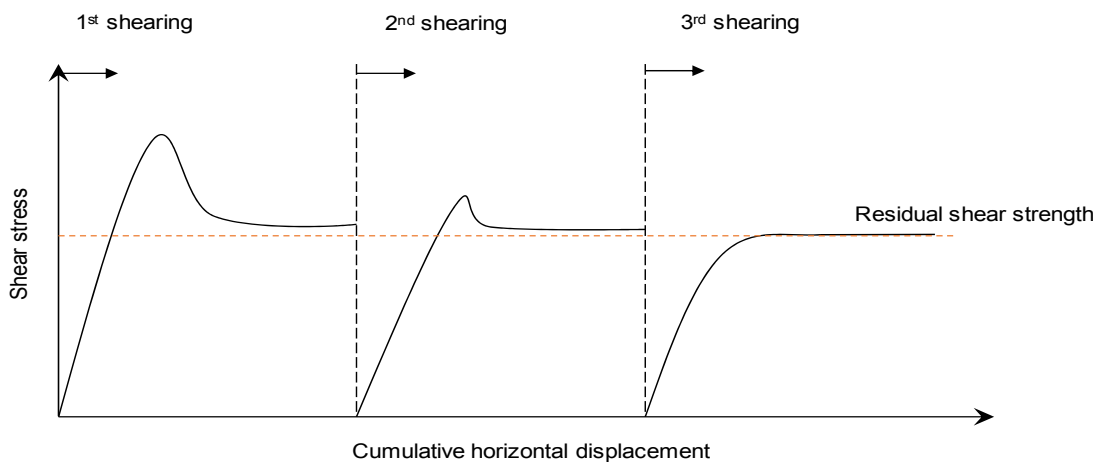


Fig. 3. Evaluation of the residual shear strength by results of reversal shear tests

49.75%로 나와 소성지수는 19.98%로 산정되었다(ASTM D4318, 2005).

토석류 거동특성에 직접적인 영향을 미치는 세립분의 전단특성 및 유변학적 특성을 평가하기 위하여 세립분만으로 구성된 시료를 직접전단 셀 내부에 조성하였다. 전단특성



Fig. 4. Photographic image of the debris barrier constructed in Hwacheon, Gangwon

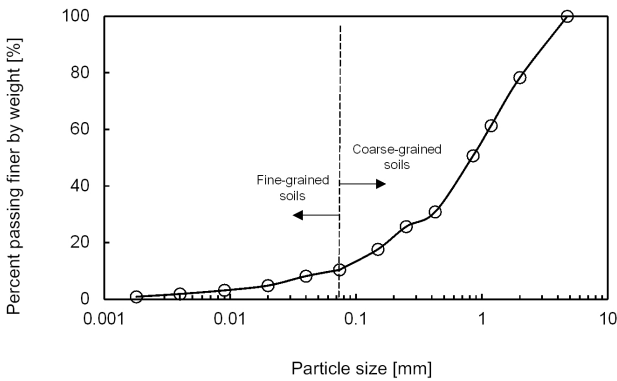


Fig. 5. Grain size distribution of Hwacheon soil

Table 1. Index properties of Hwacheon fine-grained soil

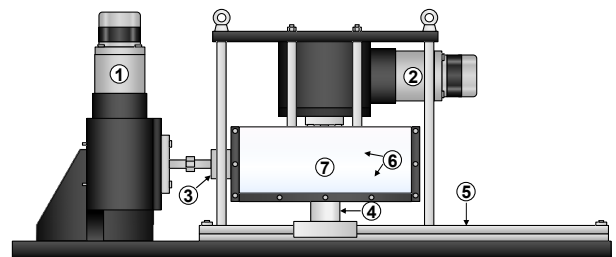
Property	Value
Liquid limit, LL [%]	69.73
Plastic limit, PL [%]	49.75
Plasticity index, PI [%]	19.98
Specific gravity, $G_s$ [-]	2.71
Maximum void ratio, $e_{max}$ [-]	1.12
Minimum void ratio, $e_{min}$ [-]	0.81

평가 시 상대밀도 60%로 조성된 건조시료와 액성한계상태로 조성한 시료에 대하여 실험하였으며, 유변학적 특성 평가를 위한 반복직접전단 실험은 액성한계상태로 조성한 시료에 대하여 수행하였다.

### 3.2 측정 시스템 구성

본 연구에서 전단특성을 평가하기 위하여 구성한 측정 시스템은 Fig. 6과 같다. 직접전단실험 장치에는 정밀한 응력의 산정을 위하여 수직방향과 수평방향에 로드셀이 각각 1개씩 설치되어 있다. 전단상자와 수직, 수평방향으로 설치된 로드셀의 최대측정하중은 각각 3kN, 0.5kN며 분해능은 1/2000로 동일하여 실험 시 전단응력에 더 민감하게 반응할 수 있도록 구성하였다. 각각의 로드셀은 컨트롤 박스에 설치되어 있는 인디케이터와 RS232로 연결하여 로드셀의 출력값을 인디케이터를 통하여 수집할 수 있으며, 인디케이터는 컴퓨터와 연결하여 로드셀에서 측정되는 값을 자동으로 저장 가능하도록 구성하였다. 또한, 전단변형률속도 조절이 가능한 스텝핑모터(Stepping motor)가 연직방향과 전단방향에 각각 1개씩 설치되어있어 프로그램을 통하여 연직응력 및 전단변형률속도를 조절할 수 있도록 하였다.

전단상자의 가로와 세로의 길이는 동일하게 8cm이며, 높이는 7cm이다. 전단실험 수행 시 상부전단상자는 실험장비의 상판과 기둥으로 고정되며, 실험장비의 하부판과 고정되어있는 하부전단상자를 이동시키는 방식으로 상부전단상자와 고정되어있는 기둥에 격자의 높이를 조절하여 상부와 하부 전단상자의 이격을 조절할 수 있다. 본 실험에서는 입자의 이탈을 최소화하기 위하여 상하부 전단상자의 이격을 0.05mm 이하로 조절하여 실험을 수행하였다.



- ① Motor for horizontal loading
- ② Motor for vertical loading
- ③ Loadcell for horizontal loading
- ④ Loadcell for vertical loading
- ⑤ Roller way
- ⑥ Upper and lower shear box
- ⑦ Soil specimen

Fig. 6. Schematic drawing of direct shear apparatus

### 3.3 직접전단실험

세립분의 전단특성을 평가하기 위하여 상대밀도 60%의 건조 시료를 대상으로 연직응력을 변화시키며 직접전단실험을 수행하였다. 각 연직응력에 대한 직접전단 수행 시, 수평변위에 따른 시료의 전단응력 변화를 측정하였다. 수평변위는 최대 11mm까지 발생시켰으며, 전단변형률속도를  $0.043s^{-1}$ 로 설정하여 실험을 진행하였다. 그리고 액성한계상태로 조성된 시료를 대상으로 건조 시료와 동일한 방법으로 직접전단실험을 수행하였으며, 대상시료의 유변학적 특성을 평가하기 위하여 전단변형률속도를  $0.011s^{-1} \sim 0.075s^{-1}$ 로 변화시키며 실험을 수행하였다. 유변학적 특성을 평가할 때는 정방향-역방향-정방향-역방향-정방향 순으로 전단을 진행하여 총 5회에 걸쳐 반복전단하였으며, 한 번의 전단에서 최대 수평변위는 11mm로 설정하였다. 그리고 반복전단 시 역방향에 대한 전단은 정방향 전단 시 적용한 동일한 전단변형률속도에서 수행되었으며, 연직응력을 포함한 모든 조건도 동일하게 유지하였다.

## 4. 실험결과

### 4.1 점착력 및 내부마찰각 산정

화천시료 세립분의 건조시료와 함수비를 액성한계로 조성한 시료에 대하여 직접전단실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전단변형률속도는 모두  $0.043s^{-1}$ 로 설정하였고, 연직응력은 5.1kPa, 10.3kPa, 15.1kPa, 25.6kPa로 설정하여 실험을 진행하였다. Fig. 7(a)는 수평변위에 따른 전단응력의 변화를 나타낸 그래프이다. 건조시료와 액성한계상태의 시료 모두 가해진 연직응력에 대하여 전단 후 수평변위 1mm 내외에서 침두전단강도가 발생하였으며, 연직응력이 증가할수록 침두전단강도가 증가하는 경향을 보였다. 건조시료의 침두전단강도는 각 연직응력에 대하여 2.20kPa, 3.08kPa, 5.59kPa, 9.12kPa로 측정되었고, 액성한계상태의 시료에서는 각각 298Pa, 431Pa, 514Pa, 781Pa로 측정되었다. 또한 각 연직응력에 대하여 수평변위가 11mm 발생하였을 때를 잔류전단강도로 산정하였으며, 결과는 건조시료에

서 1.97kPa, 2.81kPa, 5.33kPa, 8.34kPa, 액성한계시료에서 259Pa, 389Pa, 484Pa, 635Pa로 나타났으며,

Fig. 7(b)는 측정된 연직응력에 대하여 각각의 침두전단강도와의 관계를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 나타낸 그림이다. Mohr-Coulomb 파괴기준에 의하여 두 시료에 대하여 점착력과 내부마찰각을 산정하였으며, 산정된 점착력과 내부마찰각은 Table 2에 나타내었다. 건조시료의 점착력은 60.4Pa, 내부마찰각은  $19.39^\circ$ 로 산정되었으며, 액성한계상태의 시료는 점착력이 179.2Pa, 내부마찰각은  $1.33^\circ$ 로 산정되었다. 시료가 건조상태일 때보다 액성한계상태일 때 점착력이 더 크게 산정되었으며, 내부마찰각은 더 작게 산정되었다.

### 4.2 점성 산정

전단변형률속도에 대한 잔류전단강도를 획득하기 위하여, 4.1절에서 사용한 시료와 동일한 시료에 대하여 전단변형률속도를  $0.011s^{-1}$ ,  $0.043s^{-1}$ ,  $0.075s^{-1}$ 로 설정하여 실험을 수행하였다. 액성한계상태에서의 침두전단강도 변화를 명확히 관찰할 수 있도록, 연직응력을 25.6kPa로 설정하여 동일하게 시료에 가해주었다. 시료를 액성한계상태로 조성한 후 세 가지 전단변형률속도에 대하여 반복전단실험을 진행하였다. 정방향으로 세 번 전단하였고, 역방향으로 두 번 전단 하여 총 5회 전단하였으며, 정방향으로 전단 수행 시 획득한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 잔류전단강도는 마지막 전단에서 일정하게 수렴되는 값을 잔류전단강도로 산정하였고, 각 전단변형률속도에 대하여 산정된 잔류전단강도는 618.37Pa, 621.28Pa, 623.08Pa로 나타났으며, 이 값이 Eq. (1)과 같이 표현되는 유변학적 거동 시 전단응력에 해당된다.

반복전단실험 결과에서 설정한 전단변형률속도에 대하여 산정된 잔류전단강도, 즉 Eq. (1)의 전단응력에 해당하는 값을 입력하여 Fig. 9와 같은 선형관계의 그래프를 획득하였다. 전단변형률과 전단응력과의 관계에서 기울기에 해당하는 시료의 점성은  $73.60Pa \cdot s$ 로 산정되었다. 산정된 점성은 시료의 유변학적 특성을 나타내며, 토석류 거동예측 시 물레이션에서 공학정수로써 활용될 수 있다.

Table 2. Cohesion and internal friction angle for fine-grained soil of dry and liquid limit states

		Internal friction angle [°]	Cohesion [Pa]
Peak	Dry condition	19.39	60
	Liquid limit state	1.33	179
Residual	Dry condition	17.99	53
	Liquid limit state	1.08	174

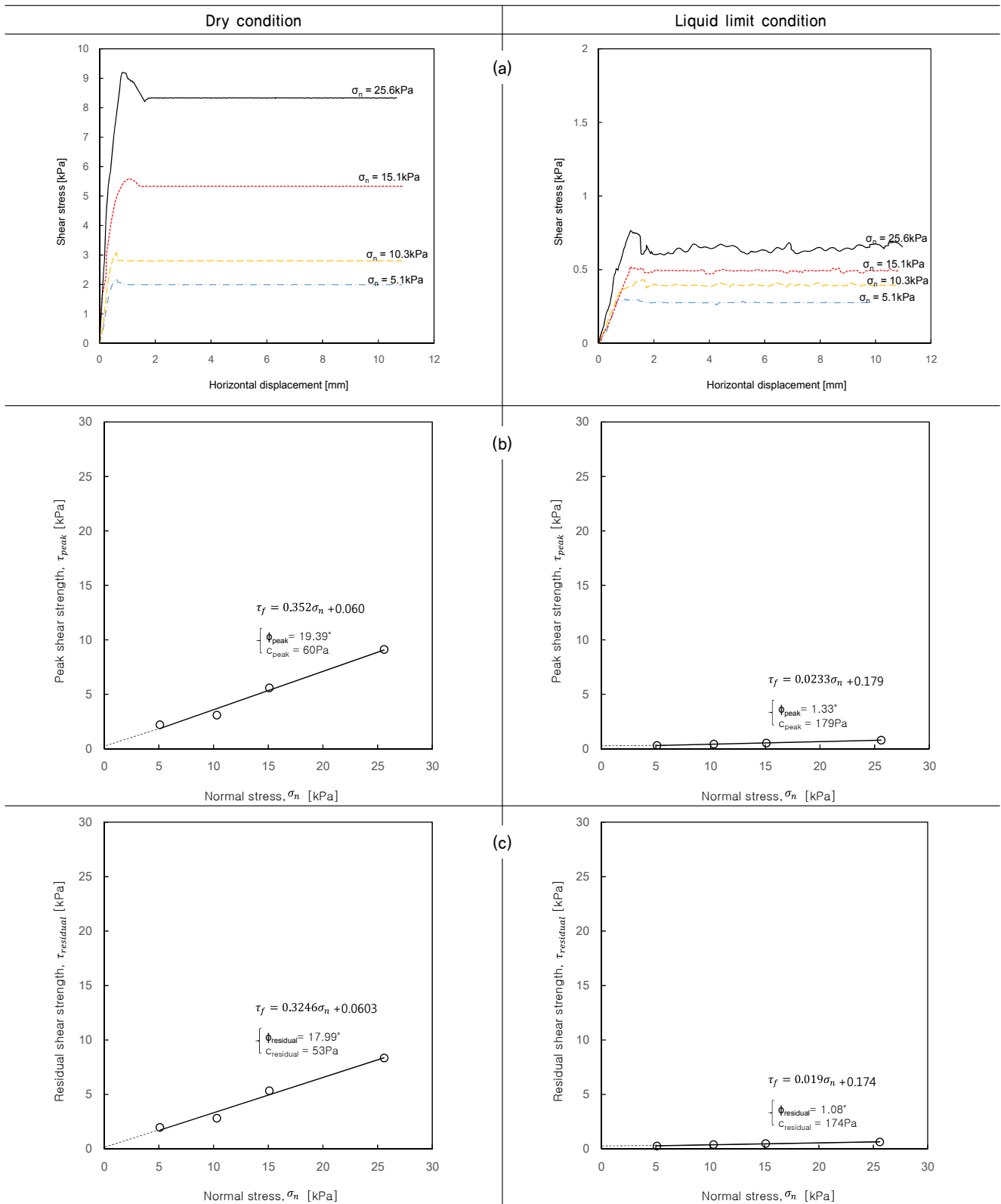


Fig. 7. Results of direct shear tests for fine-grained soil at dry and liquid limit states: (a) shear stress vs. horizontal displacement; (b) peak shear strength vs. normal stress; (c) residual shear strength (11 mm) vs. normal stress

### 4.3 결과 토의

본 연구에서는 직접전단실험 장비를 이용하여 세립분의 전단강도 및 유변학적 특성을 나타내는 공학정수들을 산정

하였다. 전단강도 정수산정 결과, 점착력은 건조상태에서 60.4Pa로 산정되어 액성한계상태에서의 결과인 179.2Pa보다 작게 평가되었다. 건조상태의 내부마찰각은 19.39°로 산

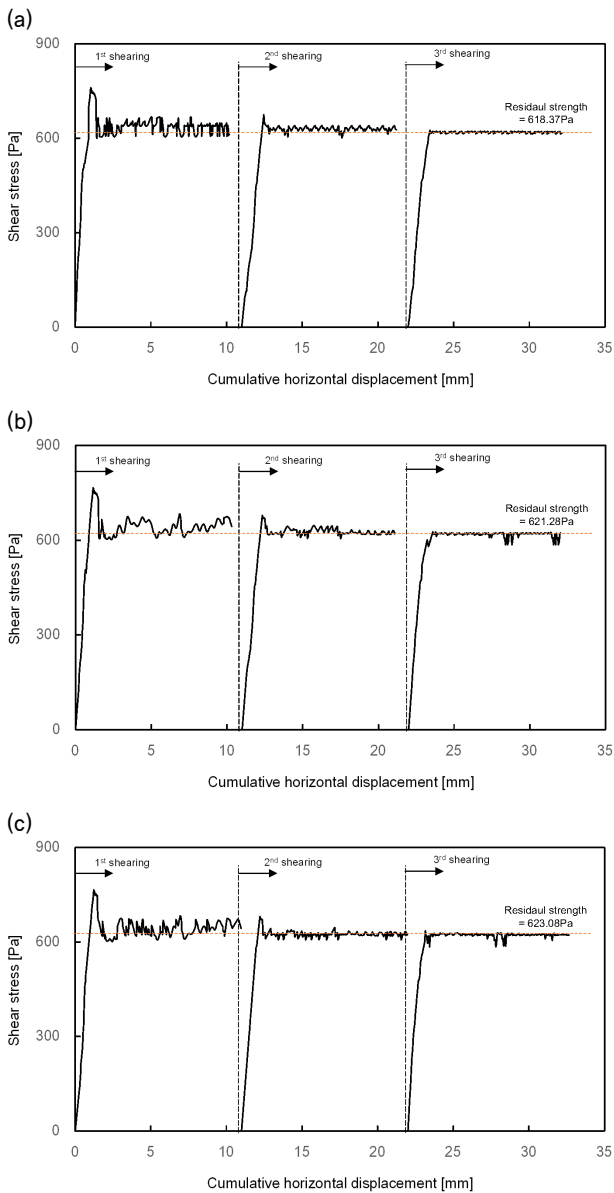


Fig. 8. Results of reversal shear tests under liquid limit state at different shear rate: (a) shear rate =  $0.011\text{s}^{-1}$ ; (b) shear rate =  $0.043\text{s}^{-1}$ ; (c) shear rate =  $0.075\text{s}^{-1}$

정되었으며, 액성한계상태 시료에서는 내부마찰각이  $1.33^\circ$ 로 산정되어 액성한계상태에서는 매우 작은 내부마찰각을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과는 세립분이 건조상태에서 액성한계상태로 변하면서 점착력은 증가하고, 내부마찰각은 감소한다는 것을 보여준다. 액성한계는 흙의 액성거동을 나타낼 때의 함수비로 액성한계로 조성된 흙은 액체와 같은 거동을 보인다(ASTM D4318, 2005). 이러한 거동에서는 내부마찰각을 갖지 못하므로, 본 실험에서 액성한계로 조성된 시료는 매우 작은 내부마찰각을 갖는 것이다.

본 실험에서는 직접전단장비를 이용하여 액성한계상태의 시료에 대하여 전단강도 정수들을 산정하였다. 직접전단 장비는 장비의 한계성으로 인하여 간극수압의 크기를 측정

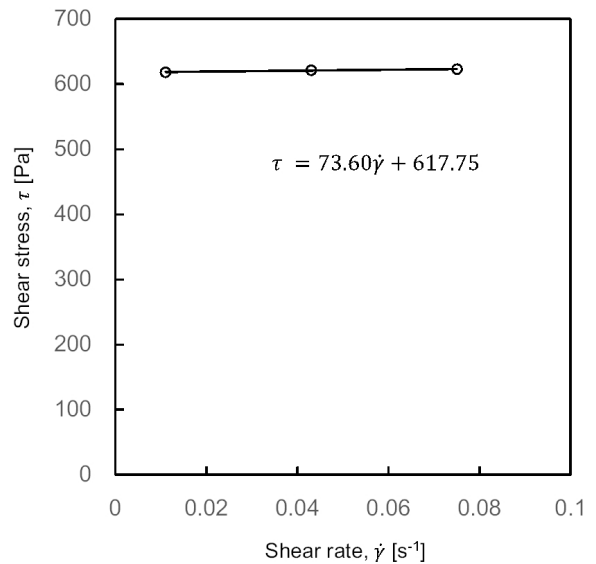


Fig. 9. Relationship between the shear rate and residual shear strength based on the reversal shear tests

할 수 없기 때문에, 간극수압의 영향에 대하여 명확하게 규명하는 데 한계가 있다. 본 실험에서는 전단상자 상하부로의 배수를 차단하였지만, 전단상자 간의 이격에서는 배수를 차단하지 못하여, 부분배수 조건상태에서 실험을 수행하였다. 하지만 실험에서 사용된 시료는 세립분으로 투수성이 낮아 배수가 활발히 일어나지 않는다. 따라서 본 실험은 비배수에 가까운 상태에서 수행된 것으로 판단된다.

또한 두 시료 모두에서 수평변위 11mm에서 산정된 잔류전단강도에서 구해진 내부마찰각과 점착력은 침투전단강도에서 산정한 내부마찰각과 점착력보다 작게 나타났다. 한편 잔류점착력의 경우 잔류특성을 나타내는 수평변위인 50mm (Mesri & Cepeda-diaz, 1986)보다 작은 11mm에서 산정되었기 때문에 과대평가 되었다. 실제 잔류점착력은 본 연구에서 산정한 값보다 작을 것으로 예상되며, 침투점착력과 차이는 실제로 더 클 것으로 판단된다.

반복전단실험을 통하여 화천시료 세립분의 점성은 액성한계 상태에서  $73.60\text{Pa}\cdot\text{s}$ 로 산정되었다. 본 실험에서는 전단변형률속도의 범위가  $0.011\sim 0.075\text{s}^{-1}$ 로 매우 작은 범위에 속한다. 산정된 화천시료 세립분의 점성은 기존 연구사례들의 작은 전단변형률속도에서 측정된 초기 점성과 비교될 수 있다. 참고문헌조사를 통하여, 다른 실험방법을 이용하여 산정된 초기 점성들과 본 실험에서 산정된 점성을 비교하였다(Table 3). Lee & Widjaja(2013)는 Flow box test (FBT)를 이용하여 마오콩 세립분 시료와 카올리나이트의 액성지수 변화에 따른 초기 점성을 산정하였으며, 다른 연구결과와 비교하였다. 마오콩 시료의 초기 점성은 액성한계 상태에서  $0.05\text{Pa}\cdot\text{s}$ 로 산정되었으며, 카올리나이트는  $2.5\text{Pa}\cdot\text{s}$

Table 3. Viscosity for fine-grained soil of liquid limit state in other researches

Test method	Specimen	Viscosity (w=LL)	Remarks
Transparent plexiglass channel	Kaolinite	$4.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Vallejo & Scovacco (2003)
Fall cone	Kaolinite	$735.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Mahajan & Budhu (2006)
Fall cone	Kaolinite	$196.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Mahajan & Budhu (2008)
Flow box test	Fine-grained soil of Maokong, Kaolinite	$0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , $2.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Lee & Widjaja (2013)
Reverse shear test	Fine-grained soil of Hwacheon	$73.60 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	This study

로 산정되었다. 다른 연구에서 액성한계상태에서의 초기 점성 산정값을 보면, Vallejo & Scovacco(2003)은 Transparent plexiglass channel 실험을 통하여 카올리나이트의 점성을  $4.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 산정하였으며, Mahajan & Budhu(2006, 2008)는 Fall cone 실험으로 각각  $735.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $196.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 산정하였다. 즉 기존 연구에서는 액성지수 1에서 세립분의 점성이  $0.05 \sim 4.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 산정되었으며, 본 연구에서 산정한 시료의 점성은 기존연구와 비교하였을 때 중간 범위에 속하는 값으로 나타났다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 화천 지역에서 획득한 시료의 세립분에 대하여 함수비를 액성한계로 조성한 후 직접전단실험 장비를 이용하여 세립분의 전단강도 및 유변학적 정수를 산정하는 실험을 진행하였다. 동일한 실험장비를 이용하여 전단실험을 진행하였고, 동일한 시료에 대하여 점착력, 내부마찰각 그리고 점성을 산정하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 화천시료 세립분은 건조상태에서 점착력은  $60.4 \text{ Pa}$ , 내부마찰각은  $19.39^\circ$ 로 산정되었으며, 액성한계 상태에서는 각각  $179.2 \text{ Pa}$ ,  $1.33^\circ$ 로 산정되었다. 액성한계상태의 세립분은 조립질이거나 건조한 상태의 시료에 비해 매우 작은 내부마찰각을 갖지만, 점착력은 증가함을 알 수 있다. 또한, 두 시료 모두에서 잔류내부마찰각 및 잔류점착력이 침투내부마찰각 및 침투점착력보다 작게 나타났다.
- (2) 화천시료 세립분은 액성한계상태에서 총 5회 전단으로 잔류전단강도를 산정하였으며, 본 실험에서 측정된 잔류전단강도의 값은 전단변형률속도에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 측정된 잔류전단강도와 전단변형률속도의 관계에서 화천시료 세립분의 점성은  $73.60 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 얻어졌으며, 기존 다른 실험방법으로 산정된 세립분의 점성과 비교하였을 때, 중간 범위의 값을 나타냈다.

- (3) 본 논문에서는 동일한 직접전단 실험장비를 통하여 세립분의 전단강도와 유변학적 특성을 모두 평가할 수 있음을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업(13SCIPS04)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. ASTM D422 (2007), "Standard test method for particle-size analysis of soils", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
2. ASTM D854 (2009), "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
3. ASTM D4318 (2005), "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
4. ASTM D4253 (2006), "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
5. ASTM D4254 (2006), "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
6. Alderman, N. J., Meeten, G. H. and Sherwood, J. D. (1991), "Vane rheometry of bentonite gels", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, No. 39(3), pp. 291~310.
7. Alfani, R. and Guerrini, G. L. (2005), "Rheological test methods for the characterization of extrudable cement-based materials—a review", Materials and Structures, No. 38(2), pp. 239~247.
8. Coussot, P., Nguyen, Q. D., Huynh, H. T. and Bonn, D. (2002), "Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids", Journal of Rheology (1978-present), No. 46(3), pp. 573~589.
9. Head, K. H. (2011), Manual of Soil Laboratory Testing: Volume Two: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, John Wiley and Sons, New York-Toronto, pp. 440.



10. Hendriks, F. (2009), "Rheological parameters and numerical analysis of cohesive soils for the Maokong landslide", Master Degree Dissertation, National Taiwan University of Science and Technology, pp. 129.
11. Jeong, S. W. (2013), "Debris flow Mobility: A comparison of weathered soils and clay-rich soils", Journal of the Korean Geotechnical Society, No. 29(1), pp. 23~27.
12. Jeong, S. W. and Song, Y. S. (2013), "Ring-shear apparatus for estimating the mobility of debris flow and its application", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, No. 33(1), pp. 181~194.
13. Jeong, S. W. (2014), "Rheological characteristics and debris flow simulation of waste materials", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, No. 34(4), pp. 1227~1240.
14. Jeong, S. W., Ji, S. W. and Yim, G. J. (2014), "Shear-rate dependent ring-shear characteristics of the waste materials of the Imgi mine in Busan", Journal of the Korean Geotechnical Society, No. 30(7), pp. 5~15.
15. Kang, H. S. and Kim, Y. T. (2013), "Yield stress and viscosity characteristics of soils with liquidity index", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, No. 13(1), pp. 169~175.
16. Lee, G. C. (2007), "Study on rheological properties of suspension by shear box test", Journal of the Architectural Institute of Korea, No. 23(8), pp. 149~156
17. Lee, J. S., Song, C. G., Kim, H. T. and Lee, S. O. (2015), "Risk analysis considering the topography characteristics of debris flow occurrence area", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, No. 15(3), pp. 75~82.
18. Lee, S. H. H. and Widjaja, B. (2013), Phase concept for mudflow based on the influence of viscosity, Soils and Foundations, No. 53(1), pp. 77~90.
19. Liu, S. H., Sun, D. A. and Matsuoka, H. (2005), "On the interface friction in direct shear test", Computers and Geotechnics, No. 32(5), pp. 317~325.
20. Mahajan, S. P. and Budhu, M. (2006), "Viscous effects on penetrating shafts in clays", Acta Geotechnica, No. 1(3), pp. 157~165.
21. Mahajan, S. P. and Budhu, M. (2008), "Shear viscosity of clays to compute viscous resistance", In Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
22. Mesri, G. and Cepeda-Diaz, A. F. (1986), "Residual shear strength of clays and shales", Geotechnique, No. 36(2), pp. 269~274.
23. Nguyen, Q. D. and Boger, D. V. (1992), "Measuring the flow properties of yield stress fluids", Annual Review of Fluid Mechanics, No. 24(1), pp. 47~88.
24. Ovarlez, G., Cohen-Addad, S., Krishan, K., Goyon, J. and Coussot, P. (2013), "On the existence of a simple yield stress fluid behavior", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, No. 193, pp. 68~79.
25. Park, S. S., Jeong, S. W., Yoon, J. H. and Chae, B. G. (2013), "Ring shear characteristics of two different soils", Journal of the Korean Geotechnical Society, No. 29(5), pp. 39~52.
26. Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G. and Ishikawa, N. (2004), "Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics", Landslides, No. 1(1), pp. 7~19.
27. Schneider, H. H. (1978), "The laboratory direct shear test—an analysis and geotechnical evaluation", Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, No. 18(1), pp. 121~126.
28. Seo, B. H. and Kim, N. W. (1989), "Analysis of Temporal Variations for Determining the Local Design Storms", Korea Institute of Construction Technology, pp. 394.
29. Shin, H. (2014), "FEM numerical formulation for debris flow", Journal of the Korean Geotechnical Society, No. 30(10), pp. 55~65.
30. Shin, H. (2015), "Evaluation of debris properties using numerical analysis for USGS debris flume tests", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, No. 15(3), pp. 215~221.
31. Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S. (1997), "Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear", Geotechnique, No. 47(4), pp. 769~790.
32. Stark, T. D. and Eid, H. T. (1994), "Drained residual strength of cohesive soils", Journal of Geotechnical Engineering, No. 120(5), pp. 856~871.
33. Stark, T. D. (1995), "Measurement of drained residual strength of overconsolidated clays", Transportation Research Record, No. 1479, pp. 26~34.
34. Stark, T. D. and Hussain, M. (2010), "Drained residual strength for landslides", GeoFlorida, pp. 3217~3226.
35. Tiwari, B. and Marui, H. (2004), "Objective oriented multistage ring shear test for shear strength of landslide soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, No. 130(2), pp. 217~222.
36. Vallejo, L. E. and Scovazzo, V. A. (2003), "Determination of the shear strength parameters associated with mudflows", The Japanese Geotechnical Society, No. 43(2), pp. 129~133.