

## 누수유무에 따른 광산폐석의 링전단특성

정 승 원<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실

## Ring Shear Characteristics of Waste Rock Materials in Terms of Water Leakage

Sueng Won Jeong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Yuseong-gu, Gwahak-ro, Daejeon, Korea

Received 13 June 2016; received in revised form 30 August 2016; accepted 2 September 2016

흙의 전단특성을 조사하기 위하여 다양한 전단시험장치가 사용되고 있다. 특히 흙의 무한변형에 따른 잔류전단강도(residual shear strength)를 측정하고자 할 경우 링전단시험장치가 사용된다. 본 연구는 배수, 압밀 및 전단속도 제어가 가능한 비배수전단강도 측정용 링전단시험장치를 사용하여 전단동안 발생하는 누수현상(water leakage)이 전단특성에 미치는 영향성에 대하여 조사하였다. 실험은 비배수조건에서 동일한 수직응력(50 kPa)을 재하하고 전단속도(0.01, 0.1, 1 mm/sec)를 3단계로 구분하여 적용하였다. 실험결과에 따르면, 동일한 수직응력에서 비배수전단강도는 전단속도에 의존하는 것으로 나타났다. 하지만, 상대적으로 낮은 전단속도( $V = 0.01$  mm/sec)에서는 변형을 경화 거동(strain hardening behavior)을 보였고 상대적으로 높은 전단속도( $V \geq 0.1$  mm/sec)에서는 변형을 연화 거동(strain softening behavior)을 보였다. 시험기 성능평가를 통하여 누수가 발생할 경우 전단속도 크기에 관계없이 전단응력은 증가하는 것으로 나타났다. 누수가 크면 클수록 전단응력이 증가된다. 이러한 실험결과는 전단동안 발생하는 누수로 인한 흙 입자의 재배열과 다짐도의 증가에 따른 것으로 판단된다. 따라서 육안조사 및 반복적인 포화 와 압밀과정을 통하여 실험오차를 최소화할 수 있는 작업이 필요하다.

**주요어:** 링전단시험장치, 비배수전단강도, 누수, 변형을 경화 거동, 변형을 연화 거동

Shear characteristics of soils can be investigated using various types of shear stress measuring apparatus. Ring shear tests are often applied for examining the residual shear strength under the unlimited deformation. This paper presents drainage-consolidation-shear velocity dependent undrained shear strengths measured in terms of water leakage. A series of ring shear tests were performed under the constant normal stress (50 kPa) and controlled shear velocity ranging from 0.01~1 mm/sec under the undrained condition. As a result, undrained shear strengths are dependent on shear velocity. It exhibits that straining hardening behavior is observed for the shear velocity lower than 0.1 mm/sec; however, the strain softening behavior is observed for the shear velocity higher than 0.1 mm/sec. Water leakage can cause the increase in shear stress irrespective of shear velocity. Shear stress increases with increasing amount of water leakage. It is due to the fact that the small grains and water flow out through the rubble edge in the ring shear box. Repetitive saturation and consolidation processes may minimize the error.

**Key words:** ring shear apparatus, undrained shear strength, water leakage, strain hardening, strain Softening

\*Corresponding author: swjeong@kigam.re.kr

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

링전단시험장치는 산사태 재해를 평가하고자 할 때 필요한 입력매개변수 측정용으로 사용된다. 산사태 위험성 평가에는 현장의 지반조건을 고려하여 임의의 전단면을 통하여 발생하는 무한변형에 대한 토질의 전단강도 특성을 이해할 필요가 있다. 지질공학적 재해위험성 평가 수행시 요구되는 흙의 전단강도는 현장실험과 실내에서 수행되는 직접전단, 삼축실험 등을 통하여 배수조건을 고려한 다양한 실험을 통하여 가능하다. 하지만, 대부분의 시험장치는 사면을 따라 발생하는 전단과괴면에서 입자-입자 간 재배열상태(대변형)를 재현하기 힘들기 때문에 사면의 완전붕괴에서 토석류 발생과정에서 발생하는 전단특성을 규명하기 쉽지 않다. 이러한 산사태 발생관련 전단특성을 연구할 목적으로 1990년대 일본 교토대학교 방재연구팀(Disaster Prevention Research Institute)에서 비배수전단강도 측정용 링전단시험장치를 개발하였다(Sassa et al., 2003, 2004). 링전단시험장치는 사면 붕괴시 토질의 전단특성뿐만 아니라 토석류의 전단특성을 규명하기 위한 시험기로 활용되고 있다. 정적 및 동적 재하방법에 따라 링전단시험장치는 강우에 기인한 산사태와 지진에 기인한 산사태로 구분되며 지상과 해저환경에서 발생하는 산사태에 대해 포괄적인 산사태 연구가 수행되고 있다(Sassa, 2000; Sassa et al., 2012). 이러한 링전단시험장치는 산사태 발생시점에서 토석류 흐름까지 전주기적으로 발생하는 입자-입자 간 변형특성을 조사할 수 있는 장점을 가지고 있다(Okada et al., 2004; Wang et al., 2002; Wafid et al., 2004; Fukuoka et al., 2006, 2007; Li et al., 2013).

한국지질자원연구원에서 개발된 링전단시험장치는 국내에서 처음으로 배수, 압밀 및 전단속도를 사용자가 현장조건을 고려하여 제어할 수 있고 점토( $\leq 0.002$  mm)에서 자갈( $< 75$  mm)까지 다양한 입자크기를 가진 현장토의 전단강도 특성을 조사하기에 적합한 시험기기이다(Jeong et al., 2013). 본 연구에서는 세립토와 조립토 겸용 링전단시험장치를 사용하여 전단실험을 통하여 얻을 수 있는 전단강도의 신뢰성 확보와 정밀 잔류전단강도를 측정하고자 하는 목적

으로 누수유무에 따른 링전단특성을 비교분석하고자 한다. 또한 실험은 극한강우에 기인한 산사태 재해로 제한하여 비배수조건에서 사면의 안정성을 해석하고자 할 때 요구되는 전단강도 특성에 역점을 두고자 한다. 따라서 동일한 수직 응력에서 비배수조건에 따른 전단강도 특성, 전단시간에 따른 전단강도 특성, 전단속도에 따른 전단강도 특성에 대해 살펴보고자 한다.

## 대상 시료 및 실험방법

### 시험재료

본 연구에 사용된 흙 시료는 부산광역시 기장군 철마면 임기리에 위치한 임기광산에서 채취한 시료를 사용하였다. 임기광산은 1980년부터 12년간 가용되었고 현재 폐광된 폐광산지로 분류된다. 임기폐광산의 재해방지 및 유지관리를 위하여 다양한 광해방지대책이 조사되었다. 특히 황화광물이 공기 및 물에 노출되고 금속성분을 함유한 산성 침출수(산성광산배수, acid mine drainage) 발생하기 때문에 심각한 지화학적인 오염원으로 인식되고 있다(Cheong et al., 2004; Ji and Cheong, 2005). 현재까지 임기광산지역은 낮은 pH와 높은 금속농도를 나타내고 있으며(Jeong et al., 2014), 이러한 현상은 강우침투와 관련되는 것으로 조사되었다(KIGAM, 2012). 또한 임기광산 폐석적치장은 심한 침식작용으로 복수 개의 침식골이 발달한 곳으로 극한강우에 따른 얇은 원호형 산사태 발생이력이 수년간 보고되었다(KIGAM, 2012). 본 연구에서는 폐광산지역에서 하절기 극한강우와 관련하여 아주 느리게 또는 빠르게 움직일 수 있는 산사태 재해에 대한 이해를 돕고자 임기광산 폐석의 링전단실험을 수행하고자 한다. 실험에 사용된 광산폐기물 폐석시료는 임기광산 일대 폐석더미 적치사면에서 대표입경을 가진 시료( $< 4.75$  mm)를 채취한 것이다. Fig. 1은 본 시료를 채취한 폐석더미에서 채취한 흙 시료와 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 실험시료의 공학적 특성을 알아보기 위하여 기본물성실험인 단위중량, 비중, 입도분석, 액소성한계 등을 수행하였다(KIGAM, 2012). 실험결과에 따르면 대상 시료

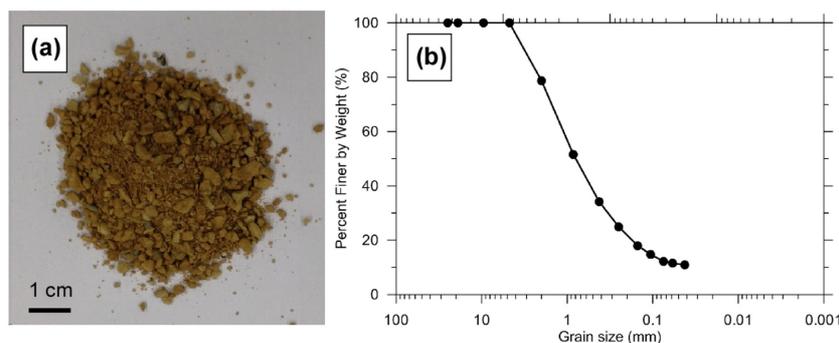
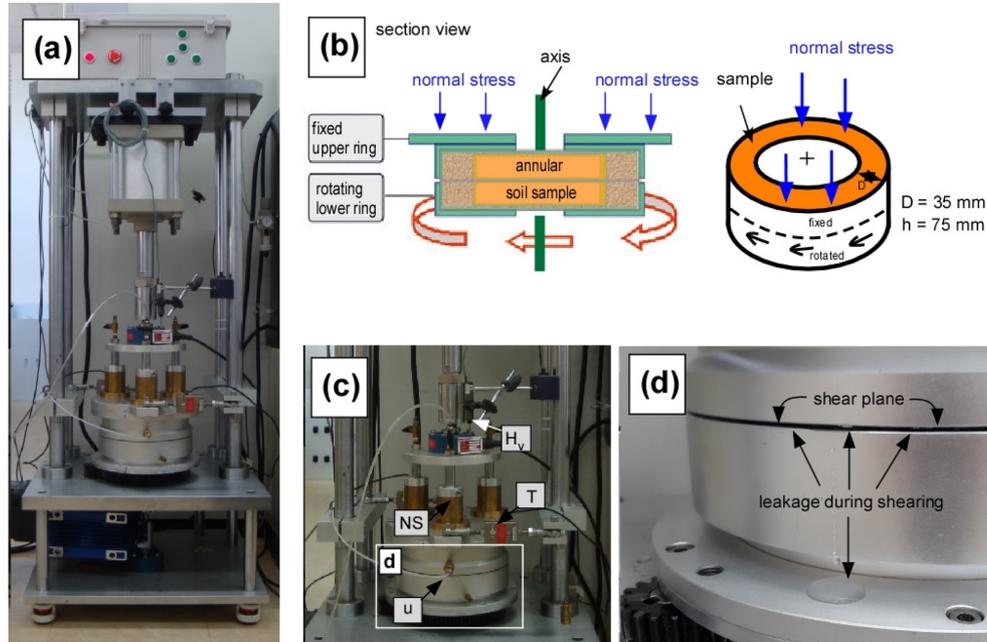


Fig. 1. Imgi Waste Rock Materials: (a) sample and (b) grain size distribution (from KIGAM, 2012).

**Table 1.** Physical properties of Imgi waste rock material (KIGAM, 2012).

$G_s$	$w$ (%)	$\gamma$ (t/m)	$\gamma_d$ (t/m)	$D_{10}$	$c_u$	LL (%)	PL
2.64	6.9	1.7	1.59	0.0064	406	24.5	-

Note:  $G_s$  = specific gravity,  $w$  = water content,  $\gamma$  = saturated unit weight,  $\gamma_d$  = dry unit weight,  $D_{10}$  = effective grain size,  $c_u$  = uniformity coefficient, LL = liquid limit and PL = plastic limit



**Fig. 2.** Ring shear apparatus: (a) KIGAM ring shear apparatus, (b) upper and lower rings, (c) set-up with normal stress (NS), u (pore water pressure), sample height ( $H_v$ ) and torque (T) and (d) water leakage during shearing.

는 통일분류법(USCS) 상에서 실트질 모래(SM)에 해당하며, 현장건조단위중량은  $1.6 \text{ t/m}^3$ 으로 조사되었다. Table 1은 광산폐기물 폐석미분 시료의 기본적인 물리적 특성을 측정된 결과이다.

**실험방법**

시험장치의 기본 구성은 상부 가압판, 시료틀(상부 링, 하부 링과 중앙 원통), 돌림판, 고무링, 간극수압 계측장치, 수평하중 계측장치, 수직변위 계측장치, 하부마찰 조정 나사, 고정나사, 스토퍼, 압력 판별, 가압판 고정 나사 등으로 구성된다(Fig. 2). 특히 Fig. 2c는 구체적으로 상하부링의 결합 모습, 수직응력, 간극수압, 토크, 수직변위 측정부에 대하여 자세히 보인 것이다. 본 시험장치는 일본 교토대학교 방재연구소에서 개발된 링전단시험장치를 개량한 것으로 정밀 잔류전단응력 측정기술을 가지고 있다. 하지만 본 시험장치는 일본의 것과 비교하여 기계적 구성에서 몇 가지 차이가 있다. 일본 방재연구소의 링 전단시험장치와 비교하여 KIGAM에서 개발된 링 전단시험장치의 특성은 아래 Table 2와 같다. 가장 큰 차이점은 마찰저항부 컨터롤과 거친면 부재의 사용여부이다. 마찰저항부 컨터롤은 시료틀을 구성하는 상하부링의 결합이 전단회전동안 일정한 간격을 유지하

는 기능이고, 거친면 부재는 전단회전에 따른 시료틀 내측에서 시료와 시료틀 간의 미끄러짐을 방지하는 기능이다.

시험방법은 전단상자(ring-shear box) 조립 후, 포화 → 배수 → 전단까지 3단계로 이루어져 있으며, 구체적인 시험장치 조작방법은 다음과 같다. 첫 번째 단계는 전단상자 결합단계이다. 전단상자는 상부 링과 하부 링으로 구성되어 있다. 링전단상자(강철소재 전단부) 중간의 이음부에는 누수 방지 및 윤활기능 강화를 위하여 고무밴드(O-ring 또는 rubber edge)을 사용한다(Fig. 2). 시료틀 결합과정은 누수방지 및 기계적 마찰저항에 대한 전단토크를 측정하고자 할 때 가장 핵심적인 단계이다. 본 연구에서 사용된 고무밴드는 전단시 마모를 최소화하고 전단상자 내 물이 밖으로 새어나오지 않도록 하기 위하여 테프론과 그리스를 사용하여 윤활성과 기밀성을 함께 고려하였다(Fig. 3). 복수의 고정나사를 사용하여 상부 링과 하부 링을 고정하고 시료틀을 완성한 후 건조시료를 넣고 시험자가 원하는 조건으로 성형한다. 시료성형이 완료된 시료틀은 링전단시험장치 돌림판과 결합시킨다. 이때 상부 링과 상부 가압판을 결합 후 최소 축하중 ( $\leq 1 \text{ kPa}$ )을 세팅한다. 초기에 고정나사를 제거하고 수직변위계와 수평압력 측정기를 위치시킨다. 두 번째 단계는 포화단계이다. 수직하중  $50 \text{ kPa}$ 을 설정하고 전단시험시 상

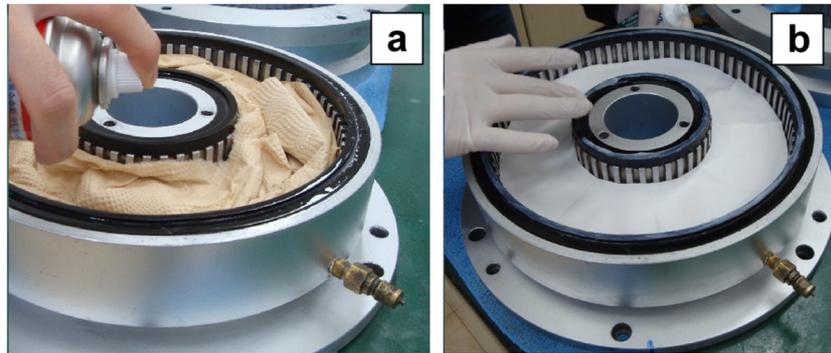


Fig. 3. Leakproof method in ring shear tests: (a) frictional free with Teflon coating and (b) sealing with Grease

Table 2. Comparison between KIGAM and DPRI in Ring shear apparatus.

	V	u	Friction	B-Roughness	Sample
KIGAM	0.01~180	< 100	not controlled	considered	clay~gravel
DPRI	0.01~3500	< 200	controlled	not considered	clay~gravel

Note: V = shear velocity (mm/sec), u = pore water pressure (kPa), Friction = friction controlled and B-Roughness = Roughness in shear plane.

하부 링의 시료들이 분리되지 않도록 하부판에 일정 하중으로 고정한다. 압력판넬의 수조 밸브와 연결된 하부 링 연결 밸브를 통해 일정한 속도로 물을 주입하고 링전단상자에 채워진 물이 상부 링에 연결된 밸브를 통해 밖으로 흘러나오는지 육안으로 확인한다. 동일한 방법으로 시험기 상부 가압관과 실린더 위 밸브 등 시료들에 설치된 유출밸브에서 물이 나오는지 확인한다. 1차적 포화단계는 시험자가 육안으로 누수여부를 확인한 후 최종적으로 간극수압 계측장치를 연결한다. 포화단계를 완성하기 위해  $B_D$ (간극수압과 수직응력 증분비)를 체크한다. 이때 비배수조건에서 임의의 수직하중 설정 후 압축을 시작한다. 응력변화와 간극수압 변화의 비를 통해 시료의 포화도를 확인하고  $B_D > 0.95$ 인 경우에 대하여 전단실험을 수행한다. 세 번째 단계는 배수조건 결정단계이다. 상부 링에 연결된 호스의 개폐여부에 따라 배수조건을 결정한다. 개폐부 밸브가 열린 경우 배수, 닫힌 경우 비배수 실험에 해당한다. 배수시험은 전단회전에 의한 물의 이동이외에 수두차에 따른 층류 또는 난류 발생을 최소화하기 위하여 시료들과 물공급부 수조의 위치를 동일하게 하였다. 마지막 단계는 전단이다. 시험자가 원하는 배수조건, 수직응력 및 전단속도 조건을 선택한다. 시료들을 하부판에 고정시키고 하부 링에 연결된 고정나사들을 제거하고 전단을 시작한다. 1차 실험은 주어진 실험조건에 따른 누수유무를 결정하고 전단시간에 따른 전단응력 측정하였다. 2차 실험은 전단속도 의존성 전단응력 특성( $V = 0.01 \sim 100$  mm/sec)을 조사하였다. 추가 시험자의 필요에 따라 마지막 실험으로 수직응력에 따른 파괴포락선(failure envelope)을 조사할 수 있다.

### 결 과

본 연구는 임기광산 폐석시료에 대해 전단실험 결과이며, 전단시간 및 전단속도에 따른 전단응력을 측정하였으며, 누수 유무에 따른 전단특성을 비교분석하였다.

#### 포화와 압밀과정을 통한 누수여부 확인

실험준비가 완료되면 전단을 시행하고 링전단상자 하부가 일방향으로 무한 회전하게 된다. 이때 임의의 전단면을 통하여 전단상자내 위치한 시료가 전단회전에 저항하는 값을 측정한다. 이러한 과정에 앞서 반드시 수행되어야 하는 것이 현장조건 또는 시험자가 원하는 조건에 대한 설정이다. 이러한 작업은 포화와 압밀을 통하여 일관성있는 시험조건을 설정하고 2차시험과 3차시험에서 동일하게 적용하기 위함이다. Fig. 4는 1차 포화과정이 끝나고 2차 압축과정이 시작한 경우의 실험결과이다. 그림은 상부 가압관을 통하여 3축 실린더(NS, Fig. 2)로부터 수직응력을 일정하게 증가시키고 흙 시료의 압축을 유도하며 이때 발현되는 간극수압을 측정하는 과정이다. 그림에서 보듯이, 전단응력의 측정과 관계없이 수직응력 재하를 통하여 수직응력의 변화를 300초까지 측정하였다. 수직응력은 시간에 따라 점진적으로 50 kPa의 값에 도달할 수 있도록 하였다. 이때 수직변위와 간극수압의 변화는 대략 0.7 mm와 23 kPa이다. 반복 실험결과에 따르면 낮은 수직응력 재하를 통하여 간극수압과 수직변위를 측정하여 시료교란을 최소화하는 작업이 필요하다. 다만 수직변위의 변화가 거의 없고 누수의 가능성이 없는 경우, 장시간 압밀을 통하여  $B_D$ 값은 1에 근접할 수 있다. 간극수압계수( $B_D$ )가 1에 미치지 못하게 된다. 모래와 자갈

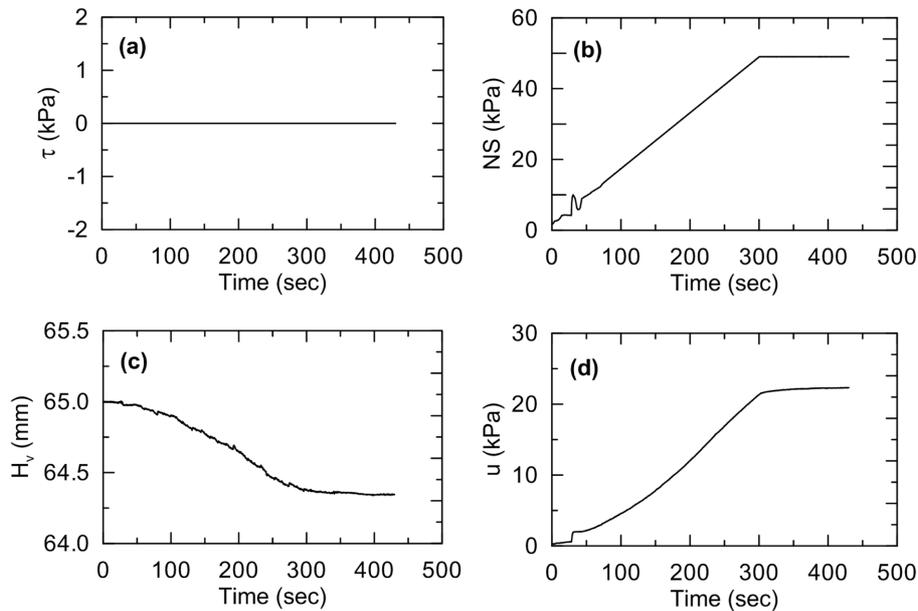


Fig. 4. Consolidation process in ring shear tests: (a) shear stress, (b) normal stress (NS) with time, (c) sample height with time and (d) pore water pressure with time.

의 경우 대략 1일 이내의 포화를 통하여 시료의 압밀을 완성할 수 있다. 하지만 세립토 함량이 높은 흙 시료의 경우 1일 이상의 시간이 소요된다. 특히 점토의 경우, 대략 1주일의 시간이 필요하다(Sassa et al., 2004). 시료포화를 위하여 증류수를 사용하여 최대 1일까지 포화시간을 가하는 것으로 하였다. 여기서 중요한 영향인자는 점토의 함량과 종류이다. 점토함량과 팽윤성이 높을수록 점도(viscosity)가 크고 장시간의 포화시간이 요구되기 때문이다. 따라서 세립토의 경우, 점토함량이며 팽윤성(swelling) 정도를 확인하여 포화와 압밀시간을 설정해야할 것으로 판단된다. 실험동안 극소량의 물이 유출될 경우도 시험을 중지해야 한다. 누수가 발생하면 링전단상자 내 미소 토립자들(예를 들어, 모래 크기의 알갱이들)이 물과 함께 전단상자 밖으로 유출된다. 이러한 경우 2차시험과 3차시험을 통하여 지속적인 소량의 물이 유출된다면 링전단상자에 고정된 누수방지 및 유통기능 강화용 고무밴드의 사용연한을 줄이는 원인이 되기도 한다. 중요한 점은 미소량의 누수시 육안조사로는 상당히 어렵기 때문에 2차 포화와 압밀과정(간극수압의 변화)이 반드시 필요하다.

**누수 유무에 따른 전단응력 특성**

포화와 압밀과정이 끝나면, 주어진 전단속도에 따라 전단 실험을 수행한다. Fig. 5는 시험자가 선택한 전단속도 0.01, 0.1, 1 mm/sec에 대한 실험결과이다. 동일한 전단속도가 가해진 경우, 누수유무에 따라 전단응력, 간극수압과 수직변위에 대한 결과를 비교분석하였다. 누수유무에 관계없이 전단속도가 높아질수록 최대 및 최소 전단응력은 모두 증가한

다. 본 연구에서는 최대값과 최소값을 각각 최대전단강도와 잔류전단강도로 표기한다. 만약 전단동안 누수가 발생하면 (Fig. 2d), 최대 및 잔류전단강도는 누수가 발생하지 않은 경우(실선)에 비하여 훨씬 큰 전단저항을 가진다. 예를 들어, 누수발생시 전단속도 0.01 → 0.1 → 1 mm/sec로 높아질 때 측정된 최대전단강도는 0 → 34.9 → 48.1 kPa이며, 최소전단응력은 0 → 32.0 → 32.1 kPa로 누수방지보다 각각 13~18 kPa과 10~12 kPa까지 증가하였다. 누수여부에 따라 최대값과 최소값의 차이(≤6 kPa)가 크지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 실험결과는 전단상자 내 물이 외부로 유출되는 과정에서 시료의 체적감소와 다짐도 증가가 주요한 원인인 것으로 판단된다. 또한 점착성이 낮은 토립자들이 알갱이 형태로 물과 함께 실린더 외부로 흘러나가면 고무링의 파손을 초래하는 것으로 나타났다. 누수로 인하여 시료를 지탱하는 시료상자 내 물이 외부로 유출되면 간극수압과 수직변위는 급감하는 것을 확인할 수 있다(Figs. 5b-c, 5e-f, 5h-i). 이러한 현상은 전단속도가 가장 작은 0.01 mm/sec에서도 관측되었다(Fig. 5b-c). 하지만, Fig. 5a에서 얻어진 전단응력-전단시간 곡선에서는 누수 발생시 전단응력이 대략 0.15 kPa 정도 크게 관측되었다. 전단속도 0.1 mm/sec와 1 mm/sec에 대한 실험결과와 비교하여 대략 200~300배 차이가 나는 것을 알 수 있다. 전단속도 0.01 mm/sec에 대한 실험결과를 바탕으로 잔류전단강도를 토석류 해석에서 사용할 경우, 누수유무에 관계없이 거의 동일한 토석류 확산성이 나타날 것으로 예측할 수 있다.

임기광산의 폐석더미는 여름철 집중호우시 물리화학적 지질재해에 취약한 것으로 알려져있다(KIGAM, 2012). 산사

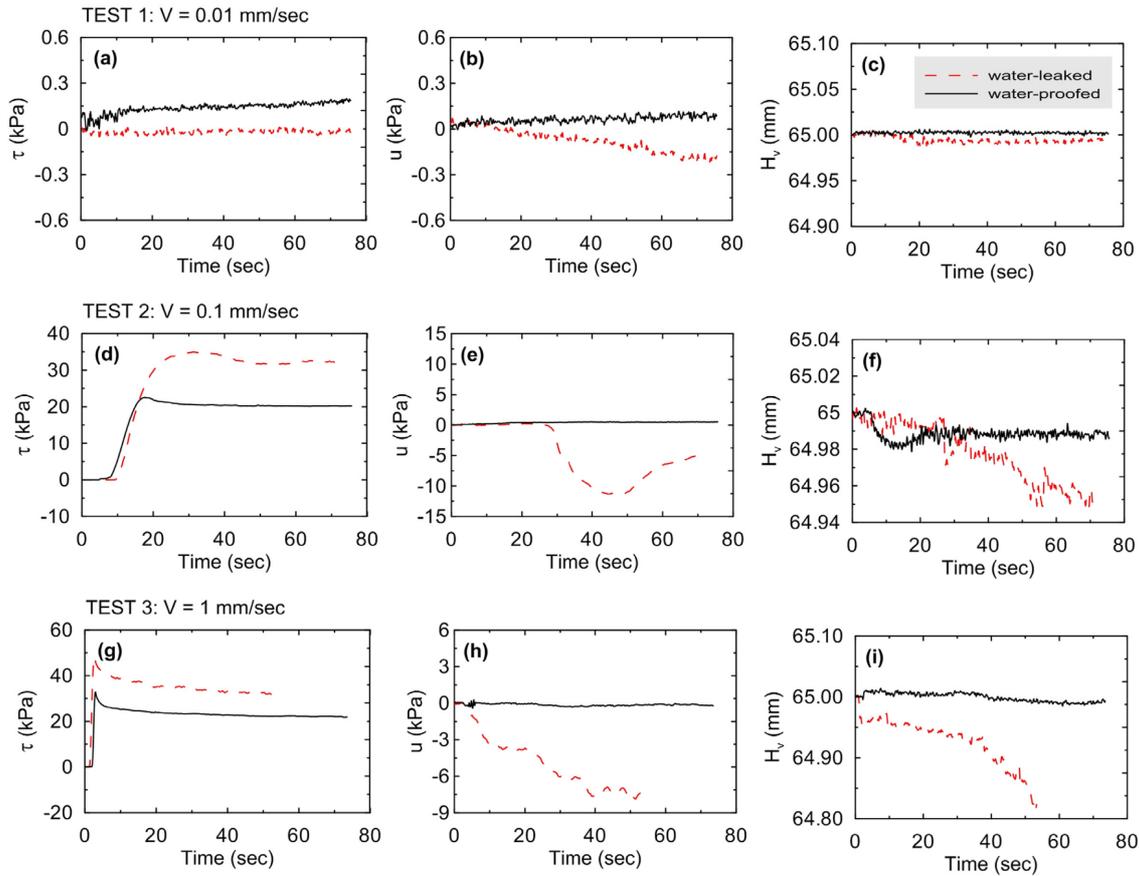


Fig. 5. Ring shear characteristics of Imgi pyrophyllite mineral at different shear velocity in terms of shear stress, pore water pressure and sample height: (a-c)  $V = 0.01$  mm/sec, (d-f)  $V = 0.1$  mm/sec and (g-i)  $V = 1$  mm/sec.

Table 3. Ring shear tests for Imgi waste materials.

		water-leaked		water-protected	
NS	V	$\tau_p$	$\tau_r$	$\tau_p$	$\tau_r$
50	0.01	-	-	-	0.2
	0.1	34.9	32.0	21.8	19.9
	1	48.1	32.1	30.5	21.9

Note: NS = normal stress (kPa), V = shearing speed (mm/sec),  $\tau_p$  = peak shear stress (kPa) and  $\tau_r$  = residual shear stress (kPa)

태 재해관리의 관점에서 강우강도에 따른 지반의 전단특성 평가는 중요하다. 특히 전단강도는 전단속도의 함수이다. 본 연구에서는 임기광산 폐석시료에 대하여 비배수전단실험을 수행하였으며, 느린 전단속도(0.01 mm/sec)와 상대적으로 빠른 전단속도(0.1~1 mm/sec)로 구분하여 전단강도 특성을 살펴보고자 한다. 여기서, 상대적으로 느린 전단속도(0.01 mm/sec)는 느리게 움직이는 산사태 거동을 설명하기 위함이며, 상대적으로 빠른 전단속도(1 mm/sec)는 빠르게 움직이는 산사태 거동을 나타내기 위함이다. 또한 전단응력은 전단시간의 함수이다. Fig. 5는 주어진 배수조건에 대해 전단 시간과 전단속도에 따른 전단응력 특성을 총괄적으로 나타낸 그래프이다. 일반적으로 전단속도가 증가하면 전단저항

은 증가한다(Wang et al., 2002, 2010). Jeong et al. (2014)에 따르면, 낮은 수직응력(25 kPa)에 대하여 비배수전단강도가 조금 더 크게 나타났고, 높은 수직응력(100 kPa)에 대하여 배수전단강도가 조금 더 크게 나타났다. 하지만, 전단속도가 커질수록(즉,  $\geq 100$  mm/sec) 배수조건에 관계없이 최대 및 잔류전단응력은 큰 차이를 보이지 않는다. 본 연구는 최대 전단속도가 0.01~1 mm/sec인 경우에 대한 결과이며, 이보다 큰 전단속도에 따른 배수와 비배수조건별 전단응력 특성은 본 연구에서 다루지 않는 것으로 한다.

토석류 위험성 평가에 필요한 중요한 또 다른 입력매개 변수는 항복응력과 소성점도이다. 일반적으로 항복응력은 현장 또는 실내에서 얻어진 실험값을 취하고 소성점도는 산사

태 위험 대상시료에 대한 항복응력과 소성점도 간 상관관계를 통하여 경험적으로 결정한다(Locat and Demers, 1988; Locat, 1997; Jeong et al., 2010). Jeong et al. (2013)에 따르면, 전단응력-전단속도 곡선상 기울기는 소성점도로 정의하고, y-절편을 항복응력으로 정의하여 토석류 흐름곡선을 제안한 바 있다. 토석류 이동거리를 평가하고자 할 때 지반강도 입력변수로서 가장 중요한 영향인자는 항복응력 또는 비배수전단강도이다. 이때 링전단실험을 통해 얻어진 최대전단강도와 잔류전단강도는 산사태 예상지역의 산사태 위험성을 평가하고자 할 때 중요한 입력변수로서 사용할 수 있다. 예를 들어 아주 느리게 또는 느리게 움직이는 산사태 거동을 해석(배수조건)하고자 할 때 현장에서 사면의 움직임을 실시간 관측하고 이를 통해 전단속도를 결정할 수 있다. 만약 현장에서 얻어진 토체의 이동속도가 0.01 mm/sec 일 경우, 해석상 대입되는 전단강도는  $\leq 1$  kPa 값을 사용할 수 있다(Fig. 5). 반대로 아주 빠르게 또는 빠르게 움직이는 산사태 거동(비배수조건)을 해석하고자 할 때 현장의 산사태 이동속도를 예측하여 비배수전단강도( $S_u$ )를 추정할 수 있다. 만약 비배수조건에서 전단속도가 0.1~1 mm/sec에 해당하는 경우, 최대전단속도와 잔류전단강도는 대략 20~30 kPa의 범위로 결정할 수 있다. 토석류 흐름곡선(Jeong et al., 2013)을 이용하여 주어진 전단속도 범위 밖의 전단속도에 대해 전단강도 값을 결정할 수 있다. 이러한 역해석 방법은 산사태 위험성 조기탐지와 평가방법으로 현장 실무자가 예비 조사차원에서 활용하기 위함이다. 또한 이와 같은 간편법은 체계적 연구가 수행되기 힘든 현장에서 불안정 사면의 안정성(slope stability)과 확산성(debris flow mobility)을 검토하기 위해 활용할 수 있을 것이다. 하지만 제안된 해석방법은 극한강우시 해당 사면이 완전 포화된 것으로 가정하는 것이므로 산사태 확산에 영향을 미치는 토사부상량(entrainment)과 수막현상(hydroplaning) 등을 고려하지 않았으며, 불포화 특성과 관련된 최대전단강도와 잔류전단강도 연구가 추가적으로 필요하다.

## 결 론

산사태 위험성 평가에는 토질의 전단특성이 필요하다. 링전단시험장치를 사용하여 임기광산에서 채취된 광산폐석시료에 대해 비배수조건하에서 전단속도에 따른 전단특성을 조사하였다. 누수방지 유무에 따른 실험결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 산사태 위험성을 사전조사하거나 경감대책을 수립하고자 할 경우 산사태 발생과 관련된 지반반응 인자들을 고려하여야 한다. 예상치 못한 강우조건에 대하여 산사태 활동면에 영향을 미치는 간극수압, 수직변위와 전단응력의 변화를 측정하고자 할 때 링전단시험장치가 추천된다. 신뢰성

있는 지반반응 인자를 결정하기 위해서는 현장조건을 재현하는 것 이외에 실험적으로 발생할 수 있는 오차를 최소화하여야 한다. 링전단실험의 경우 전단상자 중간부에 위치한 전단부에서 발생가능한 누수문제가 가장 큰 고민거리이다. 소량의 누수현상과 관련하여 누수방지를 위하여 반복적인 포화와 압밀과정이 필요한 것으로 나타났다.

(2) 실험결과에 따르면, 전단응력은 전단시간과 전단속도의 함수이다. 전단시간에 따라 변형률 연화 거동과 변형률 경화 거동을 달리 나타낸다. 전단속도가 증가하면 전단응력은 증가한다. 전단속도가 0.01 mm/sec일 때 누수유무에 관계없이 전단응력은 큰 차이가 없게 나타났다. 하지만 전단속도를 높일수록(0.1~1 mm/sec) 누수유무에 따른 전단응력의 차이는 커지는 것으로 나타났다. 또한 최대전단강도와 잔류전단강도는 모두 누수 여부에 민감한 것으로 나타났다.

(3) 누수유무는 1차적으로 육안조사가 필요하다. 하지만 육안조사가 불가능한 소량의 물이 누수될 경우에 대비하여 포화와 압밀과정에 대한 추가적 시험이 필요하다. 간극수압과 수직변위의 변화를 조사하는 것이 방법이 될 수 있다. 시험장치의 사용연한 유지와 정밀 전단강도를 측정하고자 할 때 시험동안 누수여부를 확인이 필요하다. 특히 링전단상자에 탑재된 고무밴드는 오링정보다는 밴드형 부재가 누수방지와 마찰력 감소에 효과적인 것으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “실시간 모니터링 기반의 산사태 신속탐지기술 개발(16-3413)” 과제에 의해 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Cheong, Y. W., Ji, S. W., and Yim, G. J., 2004, The acid rock drainage and hydraulic characteristics of the waste rock dump, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 5(4), 13-24. (in Korean)
- Fukuoka, H., Sassa, K., Wang, G., and Sasaki, R., 2006, Observation of shear zone development in ring-shear apparatus with a transparent shear box, Landslides, 3, 239-251.
- Fukuoka, H., Sassa, K., and Wang, G., 2007, Influence of shear speed and normal stress on the shear behavior and shear zone structure of granular materials in naturally drained ring shear tests, Landslides, 4, 63-74.
- Jeong, S. W., Fukuoka, H., 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, 33(1), 181-194. (in Korean)
- Jeong, S. W., Locat, J., Leroueil, S., and Malet, J.-P., 2010,

- Rheological properties of fine-grained sediments: the roles of texture and mineralogy, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(10), 1085-1100.
- Jeong, S. W., Park, S. S., and Fukuoka, H., 2014, Shear behavior of waste rock materials in drained and undrained ring shear tests, *Geosciences Journal*, 18(4), 459-468.
- Ji, S. W. and Cheong, Y. W., 2005, Experiment of reactive media selection for the permeable reactive barrier treating groundwater contaminated by acid mine drainage, *Economic and Environmental Geology*, 38(3), 237-245. (in Korean)
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2012, Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2012-022-2012(1), 375p. (in Korean)
- Li, Y. R., Wen, B. P., Aydin, A., and Ju, N. P., 2013, Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in Three Gorges Project area, *Engineering Geology*, 154, 106-115.
- Locat, J., 1997, Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime, Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, San Francisco, ASCE, New York, pp. 260-269.
- Locat, J. and Demers, D., 1988, Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 25, 799-806.
- Okada, Y., Sassa, K., and Fukuoka, H., 2004, Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests, *Engineering Geology*, 75, 325-343.
- Sassa, K., 2000, Mechanism of flows in granular soils. In: Proceedings of the International Conference of Geotechnical and Geological Engineering, GEOENG2000, Vol. 1, Melbourne, Australia.
- Sassa, K., Wang, G., and Fukuoka, H., 2003, Performing Undrained shear tests on saturated sands in a new intelligent type of ring shear apparatus, *Geotechnical Testing Journal*, 26(3), 1-9.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., and Ishikawa N., 2004, Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, *Landslides*, 1, 7-19.
- Sassa, K., He, B., Miyagi, T., Strasser, M., Konagai, K., Ostric, M., Setiawan, H., Takara, K., Nagai, O., Yamashiki, Y., and Tutumi, S., 2012, A hypothesis of the Senoumi submarine megaslide in Suruga Bay in Japan - based on the undrained dynamic-loading ring shear tests and computer simulation, *Landslides*, 9(4), 439-455.
- Wafid, M. A., Sassa, K., Fukuoka, H., and Wang, G., 2004, Evolution of shear-zone structure in undrained ring-shear tests, *Landslides*, 1(2), 101-112.
- Wang, F. W., Sassa, K., and Wang, G., 2002, Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan, *Engineering Geology*, 63, 169-185.
- Wang, G., Suemine A., and Schulz, W.H., 2010, Shear-rate-dependent strength control on the dynamics of rainfall-triggered landslides, Tokushima Prefecture, Japan, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(4), 407-416.

#### 정승원

한국지질자원연구원 지구환경연구본부  
34132 대전광역시 유성구 과학로 124  
Tel: 042-868-3911  
Fax: 042-868-3414  
E-mail: swjeong@kigam.re.kr