

## 단층암의 물질 변화와 역학적 거동특성 간의 관계

우상우<sup>1</sup> · 한래희<sup>1,\*</sup> · 김창민<sup>1</sup> · 정기영<sup>2</sup> · 정종욱<sup>3</sup> · 이희권<sup>4</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 지질학과 및 기초과학연구소

<sup>2</sup>안동대학교 지질환경과학과

<sup>3</sup>경상대학교 공동실험실습관

<sup>4</sup>한국지질자원연구원 CO<sub>2</sub>지중저장연구단

### 요 약

단층암을 구성하는 물질은 단층의 역학적 거동특성을 결정하는 본질적인 요인 중 하나이다. 우리는 단층암 물질 조성의 변화가 단층의 미끄러짐 거동의 변화를 가져오는 지를 확인하기 위하여, 자연 단층암의 모암과 단층 비지를 대상으로 물질 분석, 전단실험 및 미구조 분석을 결합하는 연구를 시도하였다. 본 연구는 포항시 보경사 인근에 위치한 양산단층의 손상대에서 발견되는 부차단층을 대상으로 수행한 것이다. 물질 분석 결과, 모암분말 시료에는 석영, 장석과 같은 비점토광물(>80 wt%)이 우세한 반면 단층비지 시료에는 점토광물(일라이트, 녹니석 등)의 함량(>50 wt%)이 우세하다. 전단실험 결과, 단층비지 시료는 낮은 마찰계수( $\mu \sim 0.27$ ), 안정한 미끄러짐을 지시하는 속도 강화 거동 그리고 낮은 마찰회복률이 특징적인 반면, 모암분말 시료로부터는 높은 마찰계수( $\mu \sim 0.70$ ), 불안정한 지진성 미끄러짐을 지시하는 속도 약화 거동 그리고 높은 마찰회복률이 관찰되었다. 미구조 관찰 결과, 단층비지 시료에서는 점토광물들이 정향배열하면서 연결되어 있는 구조가 잘 발달하는데 이것이 그 시료가 낮은 마찰강도를 갖는 이유인 것으로 보인다. 이상의 결과들은 단층 발달 초기에 모암의 단순 분쇄 물질로 존재하던 단층암이 점토질 비지로 바뀔 때 따라 단층의 역학적인 거동의 극적인 변화가 발생할 수 있음을 지시한다.

**주요어:** 양산단층, 단층암, 전단실험, 마찰특성, 미구조

Sangwoo Woo, Raehee Han, Chang-Min Kim, Gi Young Jeong, Jong Ok Jeong and Hikweon Lee, 2016, Relation between temporal change of fault rock materials and mechanical properties. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 52, no. 6, p. 847-861

**ABSTRACT:** Materials of fault rocks are a critical factor that may control the mechanical behavior of faults. To examine whether the change in mineral composition of fault rocks may result in the change in frictional behavior of faults, we conducted an integrated study on some subsidiary faults of the Yangsan fault, Bogyongsong area, Pohang, by combining field observation, materials and microstructure analyses and shear tests. From two fault outcrops, both fault gouges and fractured wall rocks were collected. Powders of the wall rocks were used to simulate gouges of immature faults. According to an analysis of the materials, the wall rock powders consist mainly of non-clay minerals (>80 wt%) such as quartz and feldspar; the fault gouges are rich in clay minerals (>50 wt%; illite and chlorite). Some shear tests on the materials at water-saturated conditions show that the gouges are weak (0.27 in terms of friction coefficient,  $\mu$ ) and velocity strengthening, and have a low frictional healing rate, while the wall rock powders are characterized by high frictional strength ( $\mu \sim 0.70$ ), velocity weakening behavior and a high frictional healing rate. Microstructural observations reveal that interconnected alignment of clay minerals with preferred orientation is developed in the fault gouges. The microstructure may be responsible for the weakness of the fault gouges. Given the results described above, it appears that the change in mineral composition from the gouges of immature faults (i.e., simply the product of crushing of wall rocks) to clay-rich gouges may be accompanied by the dramatic change in frictional properties of faults.

**Key words:** Yangsan Fault, fault rock, double direct shear test, frictional properties, microstructure

\* Corresponding author: +82-55-772-1471, E-mail: [raeheehan@gnu.ac.kr](mailto:raeheehan@gnu.ac.kr)

(Sangwoo Woo, Raehee Han and Chang-Min Kim, Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Gi Young Jeong, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Jong Ok Jeong, Center for Research Facilities, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Hikweon Lee, Center for CO<sub>2</sub> Geological Storage, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

## 1. 서 언

지각을 구성하는 다양한 암석을 대상으로 한 전단 실험을 통해 얻어진 마찰계수는 대개는 0.6-0.8의 범위로 나타나지만, 자연 단층암의 마찰계수는 이보다 훨씬 낮은 값을 갖는 경우도 많이 보고되었다(Byerlee, 1978; Bos and Spiers, 2002; Holdsworth, 2004). 가령 미국의 산안드레아스 단층을 대상으로 한 심부단층 관측소(SAFOD; San Andreas Fault Observation at Depth) 프로젝트의 결과에 따르면 지하 3-4 km 깊이에서 채취한 단층암은 실제 매우 약한 마찰강도를 가지는 것으로 보인다(Moore and Rymer, 2007; Carpenter *et al.*, 2011; Lockner *et al.*, 2011; Carpenter *et al.*, 2012). 또한 지각의 정단층(LANFs, Low Angle Normal Faults)을 대상으로 한 여러 연구들에서도 전단변형의 결과로 판상의 점토광물이 서로 연결된 엽리 구조가 발달함에 따라 단층의 마찰강도가 매우 낮아질 수 있음이 보고되었다(Collettini *et al.*, 2009; Smith and Faulkner, 2010; Haines *et al.*, 2014). 이상의 연구들을 종합해보면, 단층암을 구성하는 물질은 단층의 역학적 거동특성을 결정하는 본질적인 원인 중 하나이며, 특히 다량의 점토광물을 포함하는 단층비지는 매우 낮은 전단강도를 가짐을 알 수 있다(Morrow *et al.*, 2000; Numelin *et al.*, 2007; Ikari *et al.*, 2011; Ikari *et al.*, 2014). 한편, 위에서 언급한 판상광물과 같이 근원적으로 약한(intrinsically weak) 물질을 많이 포함하는 단층일지라도 그 단층의 발달 초기에는 현재와는 다른 물질과 역학적 특성을 가졌을 가능성이 있다(Chester and Logan, 1986). 즉, 단층이 최초로 만들어져서 미끌림 당시에는 단순히 모암이 분쇄된 단층암이 만들어질 것이지만, 그 이후에는 열수와 같은 유체와의 반응에 의해 이차적으로 점토광물이 형성되면서 단층암의 광물조성은 점차 변화할 수 있다. 따라서, 단층 형성 초기부터 현재까지 진화해 오는 동안 단층암은 어떠한 물질적 변화를 겪고 그에 따라 단층의 역학적 특성은 어떻게 변화할 수 있는지에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서 우리는 단층암 물질 조성의 변화가 단층의 미끌림 거동의 변화를 가져오는 지를 확인하기 위하여 세 가지 접근을 통해 모암과 단층비지를 비교하고 분석하는 연구를 실시하였다: 1) 물질 분석을 통해 모암과 단층비지의 광물조성을 비교하였다; 2) 전단실험을 통해 두 물질의 마찰강도, 마찰안정성 및 마찰회복과 관련한 특성들을 알아보았다; 3) 모암과 단층비지 그리고 자연 단층암과 실험 시료에서 관찰되는 미구조를 관찰하였다. 이상의 연구에서 나온 결과를 토대로 우리는 단층암의 물질 변화가 단층의 역학적 특성에 극적인 영향을 미칠 수 있음을 보고하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 야외 조사 및 시료 준비

본 연구의 대상은 보경사 지역에 위치한 양산단층의 손상대에 발달한 부차 단층(Kim *et al.*, 2016)으로, 퇴적암 내 발달한 고각의 단층(그림 1a, 1b; 이하 B16)과 퇴적암을 관입한 산성질 암맥 내에 발달한 고각의 단층(그림 1c, 1d; 이하 B18)이다. B16의 모암은 석영, 장석이 우세한 사암과 이암이 교호하는 퇴적암으로 약 1 cm 폭의 암녹색 단층비지가 발달하며, 단층의 자세는 N41°E/52°NW이다. B18의 모암은 주로 석영, 장석으로 이루어진 산성질 암맥으로 1 cm 이하의 폭을 갖는 암녹색의 단층비지가 발달하며, 단층의 자세는 N30°E/88°SE이다. 단층 주변의 퇴적암에는 전단변형을 받은 끌림습곡(drag fold)이 발달하고 있다(그림 1a, 1c).

자연 단층암의 미구조 분석을 위해 단층면을 포함하는 블록 샘플(그림 1b, 1d)을 채취하였고, 물질 분석 및 전단실험에 이용하기 위해 단층 주변의 신선한 모암(wall rock, 이하 W)과 단층비지(fault gouge, 이하 G)로부터 각각 시료를 채취하였다. 야외에서 채취한 모암 시료는 마이크로나징 밀(micronizing mill; McCrone Microscopes & Accessories)을 이용하여 10분 동안 분쇄하고, #60체를 이용한 체거름

(sieving)을 통해 250 μm 이하의 분말로 제작하였다. 단층비지 시료는 오븐에서 60°C로 건조시킨 후, 아게이트(agate-mortar and pestle)를 이용하여 분쇄하고, 체거름을 통해 250 μm 이하의 분말을 회수하였다. 이와 같이 준비한 모암분말 시료와 단층비지 시료를 X-선 회절(XRD) 정성 및 정량분석과 전단실험에 이용하였다.

2.2 저속전단실험

저속전단실험은 이축전단시험(biaxial shear experiment)의 형태로 실시하였다(그림 2 삽도; Dieterich,

1972). 그림 2에 삽입된 시료 결합체(sample assembly)의 모식도와 같이, 측면블록(4×5×2 cm) 2개와 중앙블록(4×8×2 cm) 사이에 2 mm 두께로 분말 시료(이하 단층암 시료; 모암과 단층비지)를 샌드위치 형태로 채워 넣고 결합하여 전단실험을 실시하였다. 암석블록으로는 암석역학 시험에서 보편적으로 사용되는 표준시료인 Berea 사암을 이용하였다. 암석블록의 전단면(shear surface)은 결합에 앞서 실리콘 카바이드(#80)로 연마하였다. 이를 통해 전단면의 표면을 거칠게 만듦으로써 암석블록과 단층암 시료의 경계면을 따라서만 미끄러움이 발생하는 것을 방

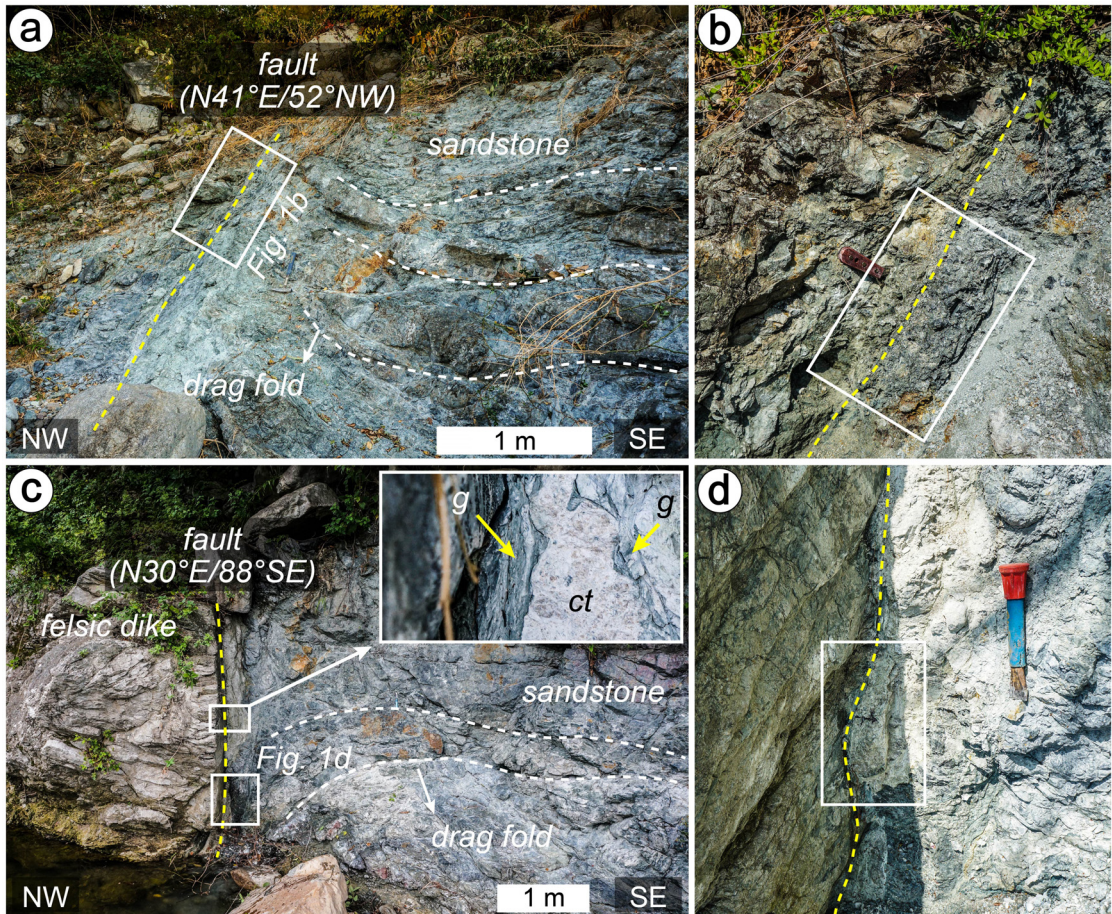


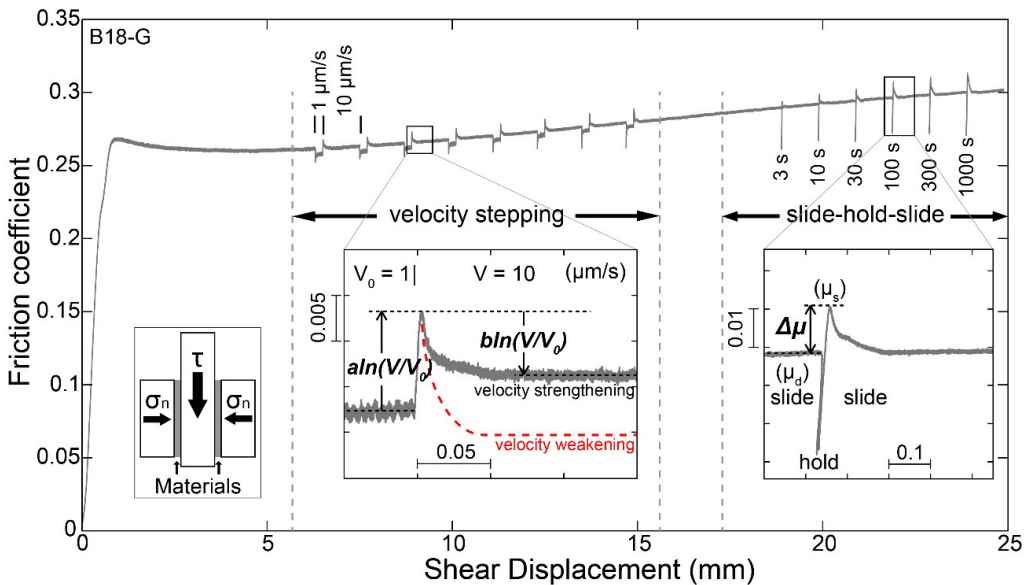
Fig. 1. Outcrop photographs of the NE-striking subsidiary faults within the damage zone of the Yangsan fault, Bogyongsan area. Yellow dashed lines are the traces of the fault surfaces and white ones are the traces of bedding. (a) Subsidiary fault and drag fold in the sedimentary rocks. (b) Close-up view of the boxed area in (a) where a block sample of the fault rock was taken (white rectangle). (c) High angle subsidiary fault in the felsic dike. The inset image shows a close-up view of the fault. g, fault gouge; ct, cataclasite. (d) Close-up view of the boxed area in (c) where a block sampling of the fault rock was conducted. The exact sampling location is marked with a white rectangle (modified from Kim *et al.*, 2016).

지하고 단층암 시료 내부에서의 미끄러움을 유도하였다(Marone *et al.*, 1990). 완성된 시료 결합체는 종이 테이프로 전체를 둘른 후 플라스틱 박스에 넣고 높이 1/3 지점까지 증류수를 부은 후 1시간 동안 방치함으로써 모세관 현상을 통해 단층암 시료가 물로 포화되도록 하였다. 포화된 시료 결합체를 이축전단 시험 장비에 장착한 후, 전단실험 동안 양 옆으로 단층암 시료가 새어 나오는 것을 최소화하기 위해, 마찰력에 영향을 주지 않는 알루미늄으로 제작한 덮개판을 부착하였다. 시료 결합체의 수직과 수평방향의 변위량은 변위계(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하여 측정하였다(Woo *et al.*, 2015 참조).

저속전단실험 절차는 다음과 같다. 먼저 전단면에 수직응력을 일정한 속도(0.05 MPa/s)로 증가시키고, 정해진 수직응력이 도달하면 실험을 마칠 때까지 일정하게 유지시킨다. 이후 전단면과 평행한 방향으로 일정한 속도(10  $\mu\text{m/s}$ )로 시료 결합체의 중

양블록을 밀어 전단응력을 가하고, 전단강도가 일정한 크기로 유지되는 정상상태(steady state)에 도달할 때까지 전단변위를 증가( $\sim 6 \text{ mm}$ )시킨다(그림 2).

이번 연구에서는 전단강도가 정상상태에 도달한 이후, 1) 속도 단계 실험(velocity stepping test)과 2) 슬라이드-홀드-슬라이드 실험(slide-hold-slide test)을 실시하였다(그림 2). 속도 단계 실험은 물질의 마찰안정성(frictional stability)을 이해하기 위한 실험으로 기존에 존재하던 단층이 재활되어 미끄러움이 개시된 후, 안정한 미끄러움(stable sliding) 거동을 보일 것인지 혹은 급격한 마찰강도의 약화로 불안정한 지진성 미끄러움(unstable sliding) 거동을 보일 것인지를 정량적으로 해석하기 위한 실험 방법이다. 전단속도 증가와 동시에 마찰계수도 상승(direct effect)한 후, 다시 원래의 상태를 유지하기 위해 감소(evolution effect)하는 물질의 마찰특성을 측정하며, RSF (rate and state friction) 법칙을 기초로 한다(Dieterich, 1979; Ruina, 1983; Marone, 1998a). 전자의 효과로 증가



**Fig. 2.** Representative data from velocity stepping and slide-hold-slide friction experiments on B18-G. After the friction reaches a steady state, a series of velocity stepping tests are conducted. “ $a \ln(V/V_0)$ ” represents the magnitude of the instantaneous increase in the friction coefficient due to the sudden velocity change and “ $b \ln(V/V_0)$ ” indicates the magnitude of subsequent decay following the peak in the friction coefficient. Solid line, our experimental data; dashed line, hypothetical curve showing velocity weakening behavior. After the velocity stepping tests, a series of slide-hold-slide tests are conducted. The frictional healing,  $\Delta\mu$ , is defined as the difference between the steady-state friction ( $\mu_d$ ) in the first slide and the newly reached static friction ( $\mu_s$ ) in the second slide after a period of hold. This tests show velocity strengthening ( $a-b > 0$ ) behavior and positive healing. The inset on the left shows the experimental sample configuration.

한 마찰계수의 환산계수(scale factor)를 “a”, 후자의 효과로 감소한 환산계수를 “b”로 나타내고, 산출된 “a”와 “b”의 차이는 마찰을 파라미터(friction rate parameter; a-b)로 정의되며, 다음의 식으로 표현된다.

$$(a-b) = \Delta\mu_{ss} / \Delta \ln(V)$$

$\mu_{ss}$ 는 정상상태의 마찰계수를 의미하고, V는 전단 속도를 의미한다. 양의 값을 갖는 마찰을 파라미터 ( $a-b > 0$ )는 전단속도가 증가함에 따라 마찰강도가 강해지는 속도 강화(velocity strengthening)를 지시하며, 안정한 미끄럼 거동을 보일 것을 나타낸다. 반면 음의 값( $a-b < 0$ )을 갖는 경우, 전단속도가 증가함에 따라 마찰강도가 감소하는 속도 약화(velocity weakening)를 지시하고, 잠정적(potential)으로 불안정한 지진성 미끄럼을 일으킬 수 있음을 의미한다. 잠정적이라는 표현을 사용한 것은 속도 약화 거동이 주변압(모암)의 강도(stiffness) 조건에 따라 불안정한 미끄럼 혹은 안정한 미끄럼 거동을 일으키기 때문이다.

슬라이드-홀드-슬라이드 실험은 물질의 마찰회복(frictional healing)을 이해하기 위한 실험으로, 단층에 축적되었던 응력이 지진 발생과 함께 해소된 후, 다시 응력이 축적되는 회복률을 실험실 규모에서 정량적으로 해석하기 위한 실험이다(Marone, 1998b; Richardson and Marone, 1999; Tesei *et al.*, 2012). 3 단계(슬라이드-홀드-슬라이드)로 진행되는 실험은 일정한 전단속도( $V = 10 \mu\text{m/s}$ )에서 전단을 멈추고( $V = 0 \mu\text{m/s}$ ), 다시 일정한 전단속도( $V = 10 \mu\text{m/s}$ )로 미끄럼을 진행시켜, 변화한 정마찰계수(static friction coefficient;  $\mu_s$ )와 기존에 유지하고 있던 동마찰계수(dynamic friction coefficient;  $\mu_d$ )의 차이( $\Delta\mu$ )를 측정한다(그림 2). 전단을 멈추는 시간이 길수록 회복되는 마찰계수의 크기가 커지는 경향을 갖는데(Marone, 1998b), 시간(t)에 따른 마찰회복률(frictional healing rate,  $\beta$ )은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta = \Delta\mu / \log_{10}(t)$$

마찰회복률이 클수록 응력 해소 이후, 다시 응력이 축적될 수 있는 크기가 커지기 때문에 큰 규모의 응력 방출의 가능성을 지시하는 반면, 마찰회복률이

0에 가깝거나 음의 값을 가지면 응력해소 이후, 거의 없거나 소규모의 응력 방출을 의미한다.

이번 연구에서 모든 시료는 물로 포화된 상태(wet or water-saturated condition)로 실험에 사용하였고, 실험 조건은 수직응력 10 MPa 하에서 전단변위 25 mm로 진행하였다. 시료의 마찰특성을 이해하기 위한 속도 단계 실험에서는 전단속도의 증가 폭을  $1 \rightarrow 10 \mu\text{m/s}$  조건으로 실시하였고, 슬라이드-홀드-슬라이드 실험에서는 미끄럼을 멈추는 시간을 3, 10, 30, 100, 300, 1000 초로 설정하였다(그림 2). 수직, 수평 방향의 응력과 변위를 측정하는 모든 실험 과정은 서보-컨트롤러(servo-controller)를 통해 100 Hz로 기록하였고, 속도 단계 실험에서 전단속도 변화 구간은 1,000 Hz로 기록하였다.

### 2.3 물질 및 미구조 분석

전처리 과정(분쇄와 체거름)을 통해 회수한 모암 분말과 단층비지 시료의 광물조성을 분석하기 위해 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 X-선 회절분석기(X-ray diffractometer; Bruker사 D8 Advance A25)를 이용하여 정성분석을 실시하였다. 분석조건은 니켈필터를 이용한 구리 파장의 X-선을 이용하여 40 kV, 40 mA,  $4-70^\circ$  2-theta 구간에서  $0.02^\circ/38 \text{ s}$ 로 분석하였다. 정량분석은 Siroquant 프로그램(version 4.0)을 사용하여 실시하였다.

야외에서 채취한 단층암 블록 시료와 전단실험 후 회수한 실험 시료의 연마박편(polished thin-section)을 제작하여 광학현미경을 통해 일차적으로 미구조 관찰을 실시하였다. 이후 경상대학교 공동실험실습관에 보유 중인 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM; Jeol사 JSM-7610F)과 X-선 에너지 분광기(EDS; Oxford사 X-Max 50)를 이용하여 보다 미소 규모에서의 조직관찰과 광물동정을 실시하였다. 분석 조건은 가속 전압 15 kV, 가속전류 1 nA, 작동거리 15 mm에서 실시하였다.

## 3. 결과

### 3.1 광물 조성

모암분말(B16-W와 B18-W)과 단층비지(B16-G와 B18-G) 시료는 크게 비점토광물과 점토광물의 함량으로 구분되고, 모암분말 시료는 대부분 석영과 사

장석 등의 광물과 소량의 점토광물이 확인되는 반면, 단층비지 시료는 상대적으로 점토광물 함량이 높다 (그림 3; 표 1). 점토광물의 총 함량은 모암분말과 단층비지 시료에서 각각 3.4-17.3 wt%와 58.9-61.0 wt%로 확인되고, 대부분 일라이트(일라이트-스멕타이트 혼합층)와 녹니석으로 구성되어 있으며, 일라이트 함량이 녹니석에 비해 더 우세하다. 특히 B18-G의 경우 점토광물의 대부분이 일라이트로 확인된다. 비점토광물이 우세한 모암분말 시료의 경우, B16-W는 석영(~18 wt%)에 비해 사장석(~77 wt%)의 함량이 압도적으로 우세하고 B18-W는 사장석(24 wt%)보

다 석영(~51 wt%)의 함량이 높다.

3.2 마찰특성

3.2.1 마찰강도

수직응력 10 MPa, 전단속도 10 μm/s, 총 전단변위 25 mm의 조건에서 물로 포화된 시료에 대해 실험을 실시한 결과, 그림 4의 마찰계수-전단변위 곡선에서 보이는 바와 같이 모암분말과 단층비지 시료의 마찰강도가 뚜렷한 차이를 보임을 확인하였다. 비점토광물이 우세한 모암분말 시료에서는 ~0.7의 최대마찰계수(peak friction coefficient)에 도달할 이

Table 1. Mineral compositions (wt%) of wallrock (W) and fault gouge (G).

Sample	Non-clay mineral					Clay mineral	
	Quartz	Plagioclase	K-feldspar	Calcite	Diaspore	Illite*	Chlorite
B16-W	18.1	76.9	1.6	0.0	0.0	0.0	3.4
B16-G	27.9	6.4	1.5	1.9	1.2	41.7	19.3
B18-W	50.9	24.0	7.8	0.0	0.0	17.3	0.0
B18-G	25.9	15.3	0.0	0.0	0.0	50.2	8.7

\*Including illite-smectite mixed layers of high illite proportion.

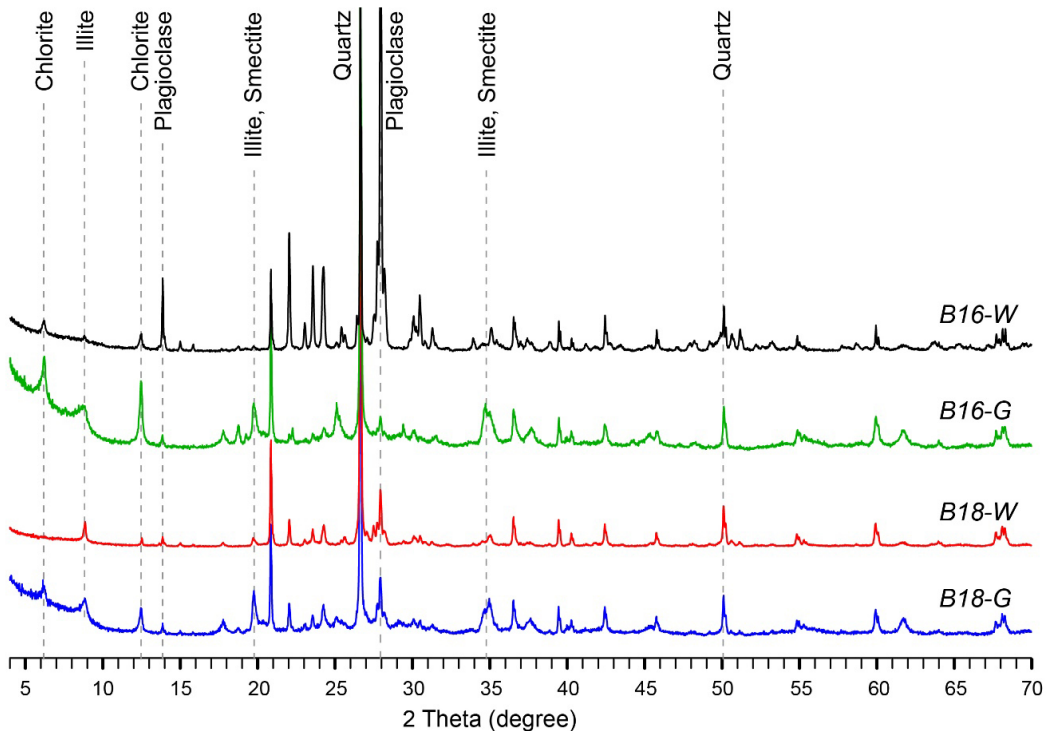
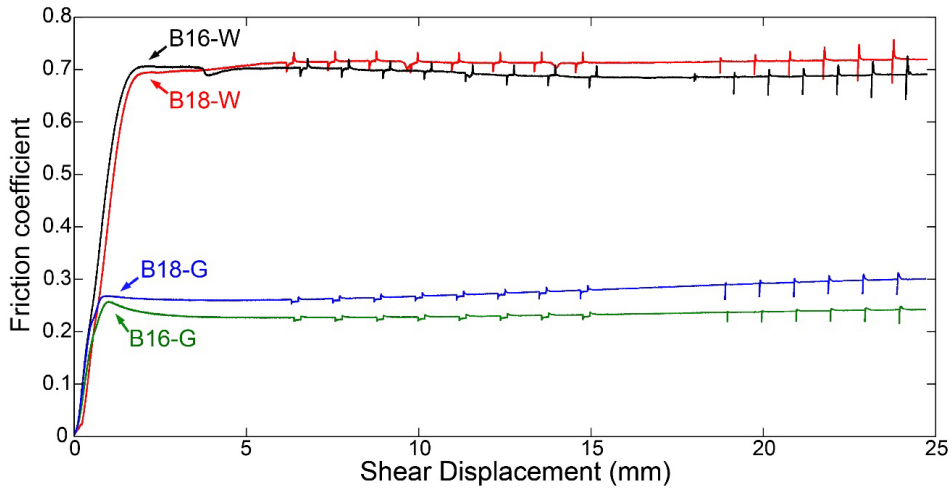
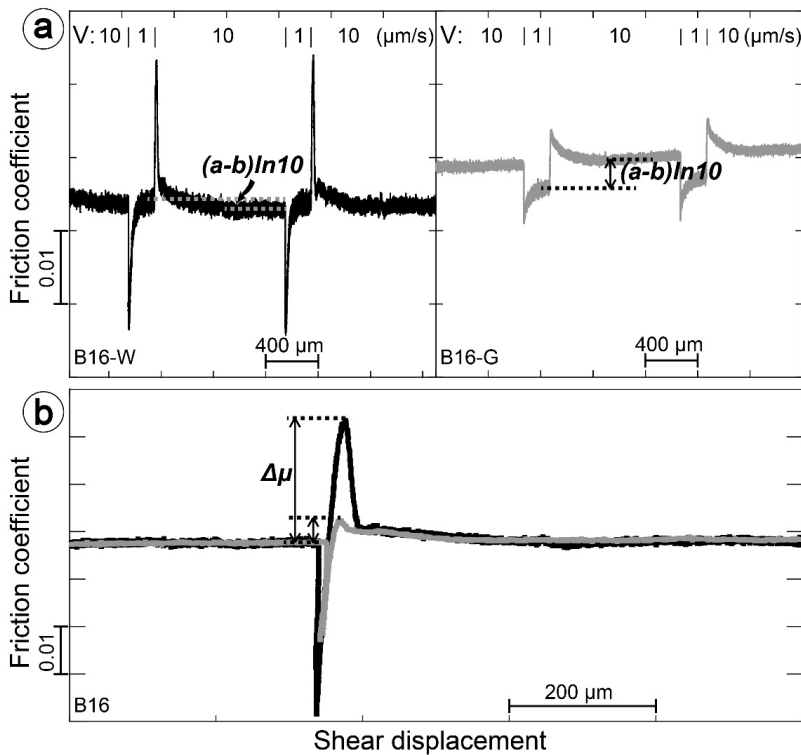


Fig. 3. XRD patterns of randomly oriented wall rock powder and fault gouges.



**Fig. 4.** Comparison of frictional behavior between wall rock powder (B16-W and B18-W) and fault gouge (B16-G and B18-G) samples. The friction coefficient is the ratio of shear stress to normal stress. The constant normal stress of 10 MPa was applied in all the tests. Note that the wall rock samples show much higher friction coefficient ( $\mu \sim 0.7$ ) than fault gouge samples ( $\mu \sim 0.27$ ).



**Fig. 5.** Comparison of frictional properties between wall rock powder (B16-W, black lines) and fault gouge (B16-G, gray lines) samples. (a) It is shown how the friction rate parameters ( $a-b$ ) were determined from B16-W and B16-G (see also Fig. 2). B16-W shows velocity weakening ( $a-b < 0$ ) behavior, while B16-G shows velocity strengthening ( $a-b > 0$ ) behavior. (b) Friction healing ( $\Delta\mu$ ) determined from B16-W and B16-G. The higher frictional healing is observed for B16-W. Although not shown here, almost the same results are also obtained from B18-W and B18-G.

후, 전단변위가 증가함에 따라 마찰강도가 거의 변화 없이 일정하게 유지되었다. 한편 점토광물이 우세한 단층비지 시료에서는 ~0.25-0.27의 최대마찰계수에 도달한 이후, 마찰강도의 변화가 거의 없거나 (B18-G), 변위량이 증가함에 따라 마찰강도가 다소 감소하여 ~0.23의 정상상태 마찰계수에 도달하였다 (B16-G). 사장석이 우세한 모암분말 시료(B16-W)와 석영이 우세한 모암분말 시료(B18-W)의 마찰계수는 거의 동일하게 측정되었고, 단층비지 시료에서도 점토광물의 종류별(일라이트와 녹니석) 함량 차이에 관계없이 거의 유사한 값이 측정되었다(그림 4; 표 1).

3.2.2 마찰안정성과 마찰회복 거동

물질의 마찰안정성과 회복 거동을 이해하기 위해 실시한 속도 단계 실험과 슬라이드-홀드-슬라이드 실험 결과는 그림 5와 같다. 단층 미끌림의 마찰안정성을 알아보기 위하여 전단속도 증가(1 μm/s → 10 μm/s)에 따라 변화한 마찰계수를 측정해본 결과, 모암분말과 단층비지 시료에서 서로 다른 특성이 관찰되었다. 즉, 모암분말 시료는 전단속도의 증가와 동시에 큰 폭으로 마찰계수가 증가한 후 서서히 감소하는 거동이 관찰되는 반면, 단층비지 시료는 전단속도 증가와 함께 작은 폭의 마찰계수 증가 이후, 서서

히 감소하는 거동이 관찰되었다(그림 5a). 모암분말 시료의 마찰을 파라미터(a-b)는 -0.0012-0.0004의 범위를 갖는데, 일부 양의 값은 단층 미끌림 초기 단계에서 나타나고 이후에는 대체로 속도 약화 거동을 보인다. 한편, 단층비지 시료에서는 0.0002-0.002의 마찰을 파라미터가 산출되었고 이는 속도 강화 거동을 지시한다. 한편, 단층비지 시료의 a-b값은 전단변위가 증가함에 따라 감소하는 경향이 확인된다(그림 6a).

마찰회복 거동은 미끌림을 멈추기 전에 측정된 정상상태의 동마찰계수와 다시 재전단(reshear)을 가했을 때 측정된 정마찰계수의 차이(Δμ)를 산출하여 살펴보았다(그림 5b). 모암분말과 단층비지 시료 모두에서 재전단 후 마찰계수가 증가하는, 양(positive)의 마찰회복 값이 측정되었으나 모암분말 시료에서 단층비지 시료에서보다 더 높은 값을 보인다. 이번 연구 결과를 기존의 마찰회복 자료들과 비교하면 그림 6b와 같다. 미끌림을 멈추는 시간(hold time)에 따른 Δμ의 변화를 나타낸 직선의 기울기는 마찰회복률(β)을 의미한다. 모암분말 시료의 마찰회복률은 0.0044-0.0054로 석영 시료와 유사한 경향을 보이고, 점토광물이 우세한 단층비지 시료는 0.0007-0.0013의 마찰회복률이 산출되어 마찰강도가 약한 물질로 알려진 시료의

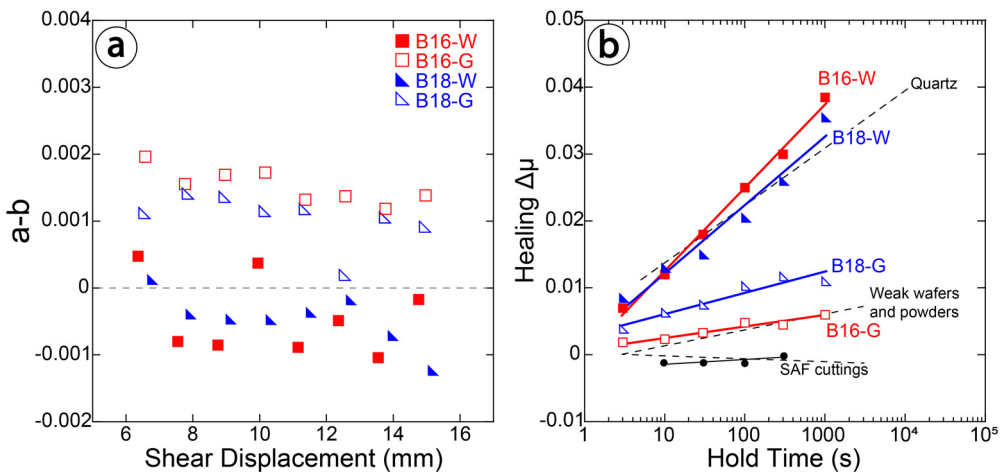


Fig. 6. (a) Friction rate parameter (a-b) plotted against shear displacement. The wall rock powders mainly show velocity weakening behavior (a-b < 0), whereas, the fault gouges show velocity strengthening behavior (a-b > 0). (b) Comparison of frictional healing data from this study with those from previous work on quartz gouge [Marone, 1998b], clay-rich cutting from the San Andreas Fault (SAF cutting) [Carpenter *et al.*, 2011] and weak wafers and powders [Tesei *et al.*, 2012]. The wall rock powders show high frictional healing rate as shown in quartz gouge, while the fault gouges show much lower frictional healing rates which are similar to that reported from the weak wafers and powders.



그것과 유사한 경향을 보여준다.

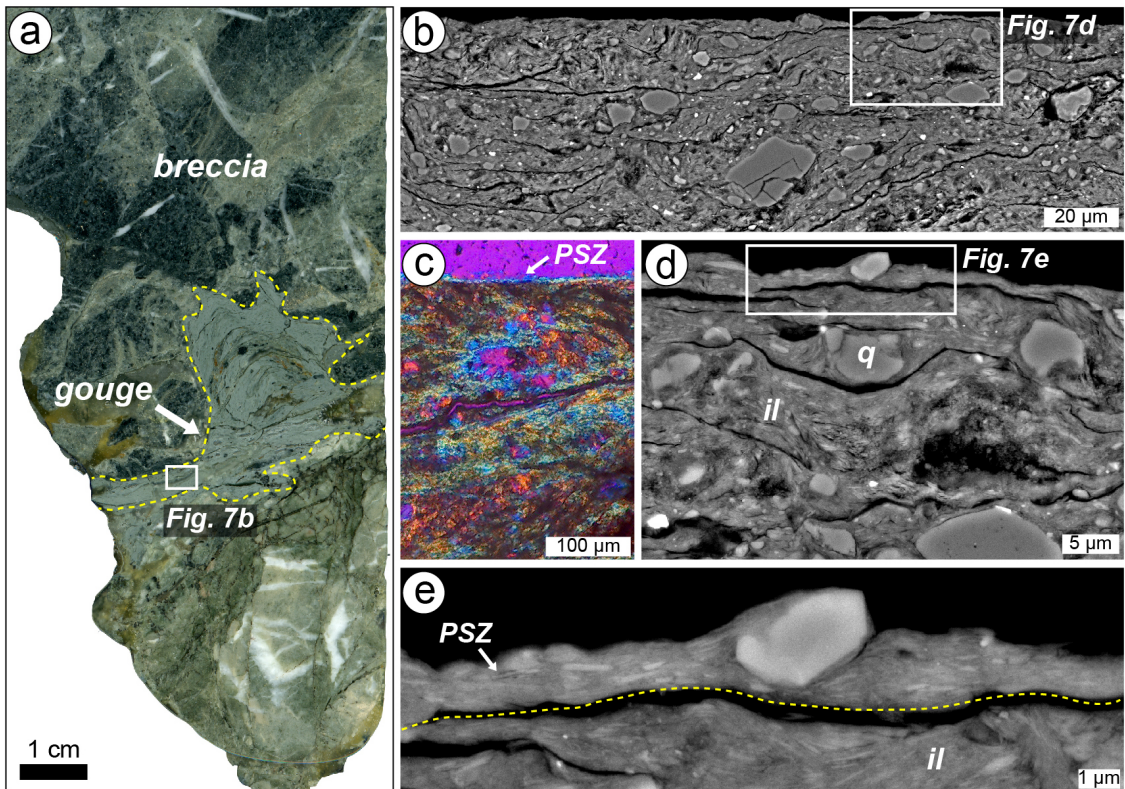
### 3.3 미구조 분석

#### 3.3.1 자연 단층암

그림 7은 퇴적암에 발달한 부차단층(B16) 시료의 슬랩(slab) 규모 구조(그림 7a)와 광학현미경 및 전자현미경으로 관찰되는 미구조(그림 7b-e)를 보여준다. 슬랩 상에서는 0.5 cm 폭의 단층비지, 퇴적암이 파쇄된 각력 그리고 그 각력으로 주입된 U-모양의 단층비지가 관찰된다(그림 7a). 단층비지 내부에는 단층의 미끌림에 의한 전단변형의 결과로 형성된 점토광물의 엮리 구조가 전체적으로 발달한다(그림 7b). 엮리 구조는 수  $\mu\text{m}$  크기의 일라이트 입자들의 정향 배열에 의해 정의된다(그림 7d). 한편 단층비지 내부 일부에서는 수  $\mu\text{m}$  정도의 매우 좁은 폭과 점토광물

의 강한 정향배열이 특징적인 주미끌림대(이하 PSZs; principal slip zones)가 관찰되는데, 여기에서는 1  $\mu\text{m}$ 이하의 크기를 갖는 일라이트 입자들이 전단면과 평행한 방향으로 강하게 배열된 것이 확인된다(그림 7c, 7e).

산성질 암맥 내에 발달한 부차단층(B18)의 슬랩에서는 약 0.8 cm 폭의 암녹색 단층비지가 확인된다(그림 8a). 단층비지 영역을 확대해보면, 주변 각력과 구분되어 약 40  $\mu\text{m}$  폭으로 점토광물 입자들이 잘 배열되어 있는 대상 구조가 관찰된다(그림 8b). 이 구조와 각력과의 경계부에서는 수  $\mu\text{m}$  크기의 점토광물 입자들이 전단면과 평행한 방향으로 배열된 것이 특징적인 PSZs가 관찰되고(그림 8c, 8d), 점토광물이 암편(clasts) 주변을 둘러싸면서 연결되어 배열된 것도 관찰된다(그림 8e). 반면, 암편들이 다량으



**Fig. 7.** (a) Polished rock slab image of B16 showing the dark green gouge and its injection into the breccia. (b) Backscattered electron (BSE) image of the boxed area in (a) showing the distributed foliation fabric over the gouge zone. (c) Optical photomicrograph of a part of the gouge showing one of the principle slip zone (PSZ) that are characterized by a thin layer of strong foliation of clay minerals (crossed polarized light; gypsum plate inserted). (d) BSE image showing interconnected and foliated clay minerals (il, illite; q, quartz). (e) Close-up view of the PSZ boundary (boxed area in (d)). Ultrafine grains of clay minerals are strongly aligned parallel to the PSZ boundary.

로 존재하는 영역에서는 점토광물의 정향배열이 확인되지 않는다(그림 8f).

### 3.3.2 전단실험 시료

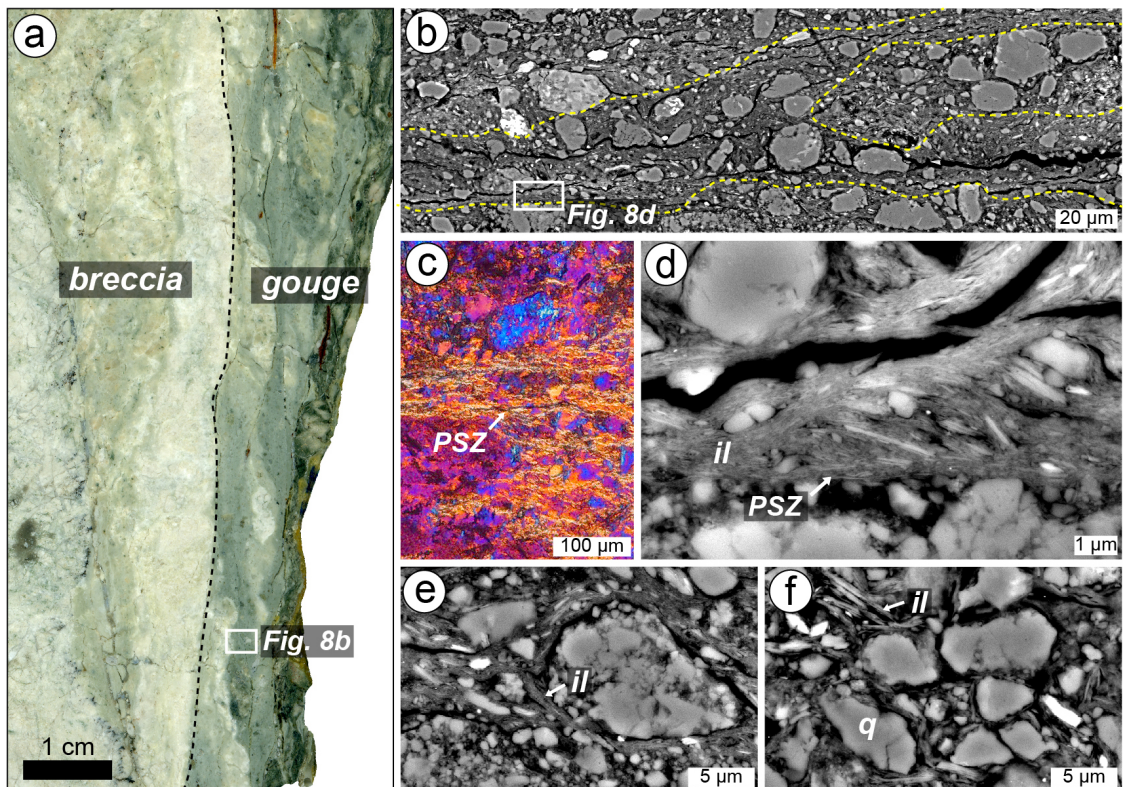
전단실험 후 회수한 모암분말과 단층비지 시료의 미구조 분석 결과는 그림 9와 그림 10에 제시된 바와 같다. B16-W에서는 파쇄된 석영과 장석의 비교적 큰 입자들이 모여있는 부분(오른쪽)과 상대적으로 작은 입자들이 밀집되어 있는 부분(왼쪽)의 대상 구조가 확인된다(그림 9a). 직교니콜 하에서 석고판을 삽입하고 관찰하면 입자들의 정향배열은 관찰되지 않는다(그림 9b). 더 고배율에서 관찰하면 점토광물 입자들이 상대적으로 큰 입자들 사이에서 서로 연결되지 않은 채 분포하는 것이 관찰된다(그림 9c). 반면, 점토광물 함량이 우세한 단층비지 시료인 B16-G

에서는 비지 전체에 걸쳐 점토광물의 배열에 따른 엮리 구조가 잘 관찰된다(그림 9d, 9e), 아울러 점토광물(주로 일라이트) 입자들이 서로 연결성을 유지한 채 배열한 것도 확인된다(그림 9f).

B18-W에서는 점토광물들의 정향배열과 R-방향의 전단구조가 나타나는 부분(그림 10a, 10b)과 점토광물의 배열이 발달하지 않는 부분(그림 10c)이 함께 관찰된다. 한편 B18-G의 경우, 점토광물들이 소위 P-전단 방향으로 배열되어 엮리를 형성하고 있는 것이 관찰되고(그림 10d, 10e), 일라이트와 녹니석 입자들이 서로 연결되어 있음이 확인된다(그림 10f).

## 4. 토 의

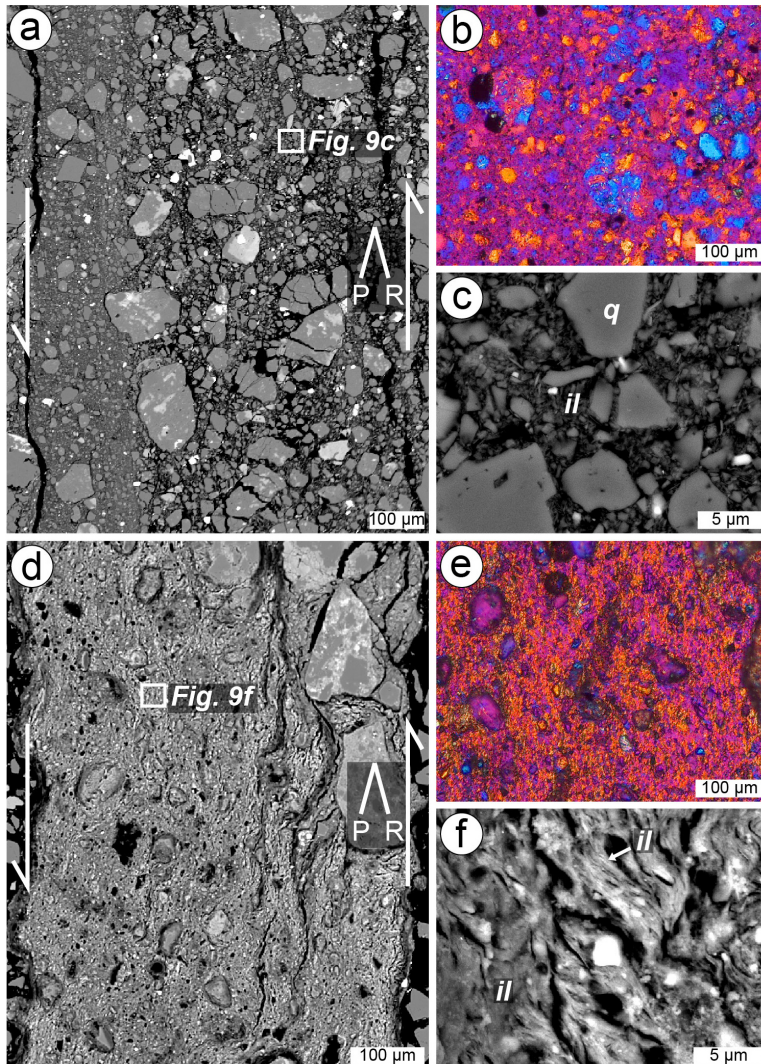
본 연구는 단층 발달 초기로부터 시간이 지남에



**Fig. 8.** (a) Polished rock slab image of B18 showing the dark green gouge and breccia. (b) BSE image taken in the boxed area in (a) showing a narrow, highly sheared zone (~40  $\mu\text{m}$ -thick) developed between clast-dominant zones. (c) Strong foliation defined by the preferred orientation of clay minerals in a part of the zone (crossed polarized light; gypsum plate inserted). (d) BSE image showing a PSZ that is characterized by thin layer of strong foliation of clay minerals (mostly illite, il). (e) Close-up view of interconnected clay minerals wrapping around the clasts. (f) Close-up view of the clast-dominant zone (b) showing randomly orientated clay minerals between the clasts. q, quartz.

따라 단층 물질이 변화하게 되면서 마찰 특성이 어떻게 달라질 수 있는가를 확인하기 위하여 수행되었다. 동일한 조건(수직응력, 전단속도, 시료의 포화상태 등)에서 실험을 실시한 결과, 단층 발달 초기 단계 물질을 모의한 모암분말 시료(B16-W와 B18-W)에 비해 일라이트와 녹니석 등의 점토광물을 다량으로 포함한 단층비지 시료(B16-G와 B18-G)의 마찰강

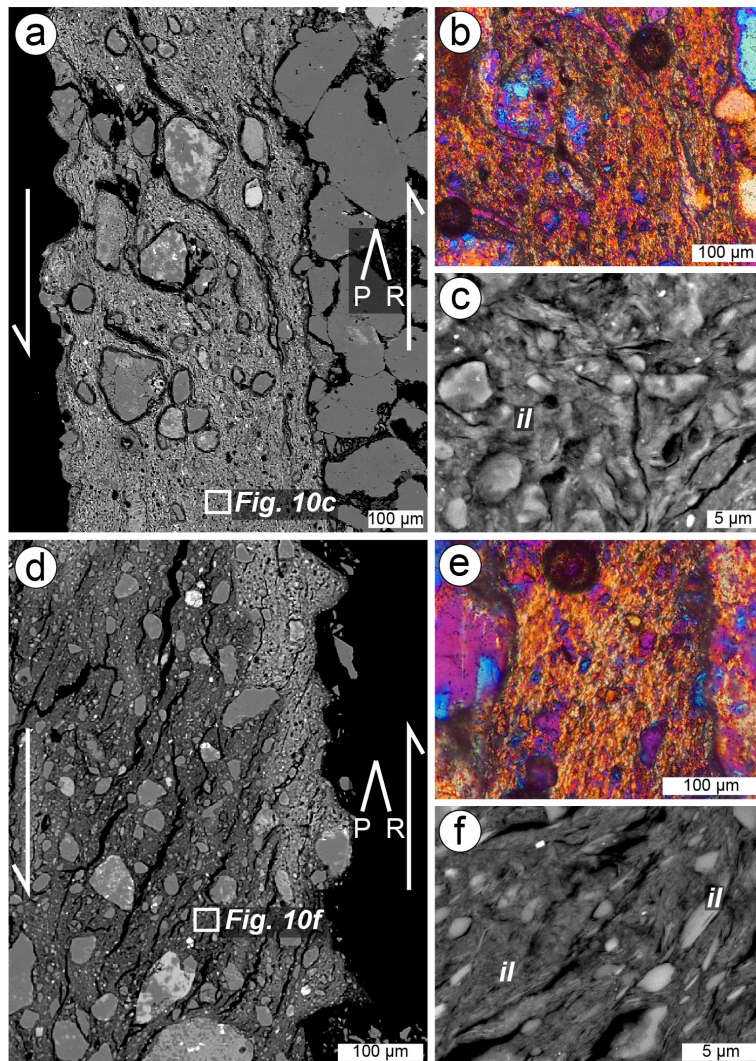
도가 현저히 낮음이 관찰되었다. 이는 그 시료들의 차이, 즉 비점토광물과 점토광물의 함량의 차이에 기인한 것으로 보인다(그림 3; 표 1). 기존 연구들에 따르면 층상 규산염광물인 점토광물은 석영, 장석과 같은 비점토광물에 비해 마찰강도가 낮아서(Morrow *et al.*, 2000; Ikari *et al.*, 2011), 그 함량이 높을수록 단층비지의 마찰강도를 떨어뜨리는 역할을 하는 것



**Fig. 9.** Photomicrographs of experimental samples, B16-W (9a–9c) and B16-G (9d–9f). (a) BSE image showing the development of two different gouge zones; one is characterized by loosely packed large clasts (on the right) and the other is by smaller clasts and fine particles (on the left). Many of the large clasts were fractured. (b) Preferred orientation of clay minerals is not observed (crossed polarized light; gypsum plate inserted). (c) BSE image showing randomly oriented clay minerals between the large clasts. (d) BSE image showing well developed foliation over the whole gouge layer in P- and R-direction. (e) Optical photomicrograph of interconnected clay minerals (crossed polarized light; gypsum plate inserted). (f) BSE image showing interconnected and foliated clay minerals (mostly illite, il).

으로 알려져 있다(Takahashi *et al.*, 2007; Tembe *et al.*, 2010). 이는 단층비지 내에 판상의 점토광물이 많으면 비점토광물들로 이루어진 암편들간에 응력이 집중되어 파쇄가 발생하며 미끄러지기보다는 점토광물들이 특정 방향으로 정향배열하고 서로 연결되어 미끄러지게 되는 것과 관련이 있어 보인다. 이러한 해석은 전단실험 후 회수한 모암분말과 단층비지 시료의 미구조를 비교했을 때, 단층비지 시료에서만

엽리 구조가 현저하게 발달함이 관찰된다는 점에 근거한다. 이는 또한 엽리 구조가 잘 연결된 상태로 발달한 자연 단층암이 매우 낮은 마찰강도를 갖는다는 기존 연구 결과와도 부합된다(Collettini *et al.*, 2009). 반면, 석영과 장석 등의 비점토광물 함량이 우세한 모암분말 시료인 B16-W의 경우, 실험 중 상당한 입자 파쇄가 일어났음을 지시하는 구조가 관찰된다(그림 9a). 이 시료의 경우 점토광물의 함량은 3.4 wt%



**Fig. 10.** Photomicrographs of experimental samples, B18-W (10a-10c) and B18-G (10d-10f). (a) BSE image showing the clay minerals that are locally foliated in R-direction. (b) Locally interconnected clay minerals are observed (crossed polarized light; gypsum plate inserted). (c) BSE image showing weakly oriented clay minerals between the clasts. (d) BSE image showing well developed foliation and the alignment of clasts in P-direction. (e) Strong foliation is defined by the preferred orientation of clay minerals (crossed polarized light; gypsum plate inserted). (f) BSE image showing strong foliation network defined by the alignment of clay minerals in P-direction.

에 불과하므로 점토광물들이 잘 연결된 정향배열 구조를 만들기 보다는 비점토광물 암편들 간의 접촉이 훨씬 우세한 상태에서 파쇄 유동(cataclastic flow)을 동반한 미끌림이 발생한 것으로 해석할 수 있다. Takahashi *et al.* (2007)에 따르면, 단층비지 내 점토광물의 함량이 ~20 wt% 이하의 경우는 마찰강도에 큰 영향을 주지 않지만, 50 wt% 이상부터는 상당한 마찰강도의 감소를 유발할 수 있는 것으로 보인다. 따라서 모암분말 시료인 B16-W와 B18-W의 경우, 점토광물이 각각 ~3 wt%와 ~17 wt%인 점으로 볼 때 점토광물의 존재가 단층비지의 미끌림에 큰 기여를 하지 못한 반면, 석영, 장석과 같은 비점토광물로 이루어진 암편들의 파쇄 및 미끌림이 주로 발생하면서 높은 마찰강도( $\mu \sim 0.7$ )를 갖게 된 것으로 보인다.

마찰안정성과 마찰회복률의 측면에서 볼 때, 모암분말 시료의 경우 지진성 단층 미끌림의 발생을 지시하는 속도 약화(velocity weakening;  $a-b < 0$ ) 거동과 함께 높은 마찰회복률을 보이는 반면, 점토광물을 다량 포함하는 단층비지 시료는 지진을 동반하지 않는 안정한 미끌림과 낮은 마찰회복률을 보일 것을 지시한다. 다시 말하면 점토질 단층비지가 미끌릴 경우 마찰강도가 낮기 때문에 작은 전단응력에도 쉽게 미끌림이 개시될 수 있지만, 단층의 미끌림이 개시된 후에는 안정한 미끌림 거동을 보일 것이고, 마찰회복률도 낮기 때문에 응력의 큰 상승과 해방의 가능성은 높지 않을 것으로 해석된다. 반면 점토광물의 함량이 미미한 발달 초기 단계의 단층의 경우 미끌림이 개시되기 위해서는 상대적으로 큰 전단응력이 필요하지만, 일단 미끌림이 개시되면 지진성 미끌림의 발생으로 이어질 수 있으며 높은 마찰회복률로 인해 응력의 빠른 재상승이 가능할 것으로 예측할 수 있다. 이는 산안드레아스 심부단층 관측소 프로젝트를 통해 회수된 지하 3-4 km에서 채취한 파쇄암과 단층비지 시료로부터 얻은 마찰안정성 및 마찰회복 실험 결과와 유사하며, 점토광물과 같은 판상광물을 다량 포함하는 단층핵의 비지에서는 안정한 미끌림 거동(creep)이 관측되고, 지진은 주변 손상대 내 물질에서 발생된다는 관측 결과와도 부합한다(Carpenter *et al.*, 2012).

이번 연구 결과는 시간에 따라 단층 물질이 변화함으로 인해 단층의 역학적인 거동이 완전히 바뀔 수 있다는 점을 보여준다. 점토광물의 발달이 미약

한 단층에서는 불안정한 미끌림 거동이 예상되지만 점토광물을 다량으로 포함하는 단층비지로 변한 경우에는 안정한 미끌림 거동을 보일 것으로 예측할 수 있다. 아울러 현재의 점토질 단층비지도 이후 유체로부터의 광물침전 등으로 고결되거나 광물조성이 바뀌는 등의 변화를 겪으면 현재와는 다른 마찰 특성을 보일 수 있음을 예상할 수 있다.

그렇다면 점토질 단층비지가 발달하는 지각 천부의 단층에서는 항상 안정한 미끌림만 발생하는 것인가? 이와 관련하여 최근의 Tanikawa and Shimamoto (2009)와 Noda and Lapusta (2013)의 연구 결과는 주목할 만 하다. 그들은 1999년 대만의 치치(Chi-Chi) 지진( $M_w$  7.6)과 2011년 일본의 도호쿠-오키(Tohoku-Oki) 지진( $M_w$  9.0)의 사례를 분석하여, 깊은 곳에서 개시된 단층 파열과 미끌림이 점토질 단층비지가 발달한 지각 천부 단층으로 전파될 경우, 점토질 단층비지가 저속의 전단실험에서는 안정한 미끌림을 지시하는 속도 강화(velocity strengthening,  $a-b > 0$ ) 거동 특성을 보임에도 불구하고 그 영역을 따라서 빠르고 큰 변위가 발생할 수도 있음을 제안하였다. 이는 저속에서는 안정한 미끌림을 보이는 물질이라 하더라도 고속으로 미끌릴 경우 동적단층강도약화(dynamic fault weakening) 메커니즘(Rice, 2006; Di Toro *et al.*, 2011)의 작동으로 인해 마찰강도가 급격히 감소하여 단층의 미끌림이 매우 불안정해질 수 있음을 의미한다. 실험 단층에서와는 달리 자연의 단층비지에서 잘 관찰되는 PSZs는 이와 같이 고속 미끌림이 점토질 단층비지를 따라 발생하는 과정에서 형성되었을 가능성이 있다. 이를 확인하기 위해서는 이번 연구에서 사용된 시료를 대상으로 ~1 m/s의 고속 미끌림 속도에서의 전단실험을 실시하고 실험 후 시료의 미구조를 자연 단층비지의 그것과 비교하는 연구가 필요하다.

기존 연구들을 통해 밝혀진 단층 물질의 마찰특성은 단층의 역학적 거동을 정량적으로 해석하고, 이해하는데 있어 중요한 결과이다. 산안드레아스 심부단층 관측소 프로젝트와 같은 육상 시추을 통해 얻은 단층 물질을 보면, 적어도 우리가 지표 노두에서 관찰하는 단층 물질이 지하 3-4 km까지는 거의 동일하게 존재하기 때문에 그 정도의 깊이에 존재하는 단층(혹은 보다 심부까지 연장되는 대규모 단층의 일부분으로서 그 정도의 깊이에 해당하는 부분)

에 대해서는 지표 단층 물질을 이용하여 실험한 결과를 자연 단층의 이해를 위해 이용할 수 있다고 볼 수 있다. 이런 측면에서 볼 때, 이번 연구의 결과는 대규모 지진이 발생하는 깊이(~5-15 km)에서의 단층 미끌림의 시작 과정을 이해하는 데에는 한계가 있지만 지각의 가장 천부(>5 km) 단층의 거동을 이해하는 데 있어서는 의미 있는 정보를 제공한다.

## 5. 결론

- 1) 물질분석 결과, 모암분말 시료에는 석영, 장석과 같은 비점토광물이 우세하고 점토 광물(일라이트, 녹니석)의 함량이 3.4-17.3 wt%인 반면, 단층비지 시료는 점토광물의 함량이 약 60 wt%로 모암분말 시료에 비해 단층비지 시료에서 점토광물의 함량이 우세하게 나타났다.
- 2) 모암분말 시료(B16-W와 B18-W)의 마찰계수는 약 0.7인 반면, 단층비지 시료(B16-G와 B18-G)의 마찰계수는 모암분말 시료보다 훨씬 낮은 ~0.23-0.27로 측정되었다.
- 3) 마찰안정성과 마찰회복 실험에서 모암분말 시료는 속도 약화 거동( $a-b < 0$ )과 높은 마찰회복률을, 단층비지 시료는 속도 강화 거동( $a-b > 0$ )과 낮은 마찰회복률을 보였다.
- 4) 자연 단층암과 전단 실험 후 회수된 시료의 미구조 분석결과, 점토광물의 함량이 높을수록 그것들이 정향배열하고 잘 연결된 구조가 현저히 발달하는데 이것이 점토질 단층비지 시료의 마찰강도가 낮은 이유인 것으로 보인다.
- 5) 이상의 결과는 시간에 따라 단층 물질이 변화하면 단층의 역학적 거동특성이 극적으로 바뀔 수 있음을 지시한다. 모암의 단순 분쇄 물질로 이루어진 초기 단층이 높은 마찰강도를 갖고 불안정한 미끌림 거동을 보이는 것과 달리 점토질 단층비지 발달한 단층은 낮은 마찰강도를 가지며 안정한 미끌림 거동과 함께 낮은 마찰강도 회복 특성을 보일 수 있다.

## 사 사

이 연구는 기상청 “지진기술개발사업”(KMIPA2015-7050)의 지원으로 수행되었다. 심사과정에서 세심하

고 발전적인 조언을 주신 충남대학교 장찬동 교수님과 강원대학교 이희권 교수님께 감사 드린다. 전단실험 결과의 해석에 사용된 Matlab 코드를 제공한 일본 교토대학의 Hiroyuki Noda 박사께 감사를 표한다.

## REFERENCES

- Bos, B. and Spiers, C.J., 2002, Frictional-viscous flow of phyllosilicate-bearing fault rock: Microphysical model and implications for crustal strength profiles. *Journal of Geophysical Research*, 107, ECV 1-1-ECV 1-13, <http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000301>.
- Byerlee, J., 1978, Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 615-626, <http://dx.doi.org/10.1007/bf00876528>.
- Carpenter, B.M., Marone, C. and Saffer, D.M., 2011, Weakness of the San Andreas Fault revealed by samples from the active fault zone. *Nature Geoscience*, 4, 251-254, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1089>.
- Carpenter, B.M., Saffer, D.M. and Marone, C., 2012, Frictional properties and sliding stability of the San Andreas fault from deep drill core. *Geology*, 40, 759-762, <http://dx.doi.org/10.1130/g33007.1>.
- Chester, F.M. and Logan, J.M., 1986, Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 79-106, <http://dx.doi.org/10.1007/bf00875720>.
- Colletini, C., Niemeijer, A., Viti, C. and Marone, C., 2009, Fault zone fabric and fault weakness. *Nature*, 462, 907-910, <http://dx.doi.org/10.1038/nature08585>.
- Dieterich, J.H., 1972, Time-dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77, 3690-3697, <http://dx.doi.org/10.1029/JB077i020p03690>.
- Dieterich, J.H., 1979, Modeling of Rock Friction 1. Experimental Results and Constitutive Equations. *Journal of Geophysical Research*, 84, 2161-2168, <http://dx.doi.org/10.1029/JB084iB05p02161>.
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M. and Shimamoto, T., 2011, Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, 471, 494-498, <http://dx.doi.org/10.1038/nature09838>.
- Haines, S., Marone, C. and Saffer, D., 2014, Frictional properties of low-angle normal fault gouges and implications for low-angle normal fault slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 408, 57-65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.034>.
- Holdsworth, R.E., 2004, Weak Faults-Rotten Cores. *Science*, 303, 181-182, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1092491>.

- Ikari, M.J., Carpenter, B.M., Kopf, A.J. and Marone, C., 2014, Frictional strength, rate-dependence, and healing in DFD-1 borehole samples from the Alpine Fault, New Zealand. *Tectonophysics*, 630, 1-8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.005>.
- Ikari, M.J., Marone, C. and Saffer, D.M., 2011, On the relation between fault strength and frictional stability. *Geology*, 39, 83-86, <http://dx.doi.org/10.1130/g31416.1>.
- Kim, C.-M., Han, R., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Son, M., 2016, Internal structure and materials of the Yangsan fault, Bogyongsan area, Pohang, South Korea. *Geosciences Journal*, 20, 759-773, <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-016-0019-8>.
- Lockner, D.A., Morrow, C., Moore, D. and Hickman, S., 2011, Low strength of deep San Andreas fault gouge from SAFOD core. *Nature*, 472, 82-85, <http://dx.doi.org/10.1038/nature09927>.
- Marone, C., 1998a, Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26, 643-696, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.643>.
- Marone, C., 1998b, The effect of loading rate on static friction and the rate of fault healing during the earthquake cycle. *Nature*, 391, 69-72, <http://dx.doi.org/10.1038/34157>.
- Marone, C., Raleigh, C.B. and Scholz, C.H., 1990, Frictional Behavior and Constitutive Modeling of Simulated Fault Gouge. *Journal of Geophysical Research*, 95, 7007-7025, <http://dx.doi.org/10.1029/JB095iB05p07007>.
- Moore, D.E. and Rymer, M.J., 2007, Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault. *Nature*, 448, 795-797, <http://dx.doi.org/10.1038/nature06064>.
- Morrow, C.A., Moore, D.E. and Lockner, D.A., 2000, The effect of mineral bond strength and adsorbed water on fault gouge frictional strength. *Geophysical Research Letters*, 27, 815-818, <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL008401>.
- Noda, H. and Lapusta, N., 2013, Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening. *Nature*, 493, 518-521, <http://dx.doi.org/10.1038/nature11703>.
- Numelin, T., Marone, C. and Kirby, E., 2007, Frictional properties of natural fault gouge from a low-angle normal fault, Panamint Valley, California. *Tectonics*, 26, TC2004, <http://dx.doi.org/10.1029/2005TC001916>.
- Rice, J.R., 2006, Heating and weakening of faults during earthquake slip. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05311, <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB004006>.
- Richardson, E. and Marone, C., 1999, Effects of normal stress vibrations on frictional healing. *Journal of Geophysical Research*, 104, 28859-28878, <http://dx.doi.org/10.1029/1999JB900320>.
- Ruina, A., 1983, Slip Instability and State Variable Friction Laws. *Journal of Geophysical Research*, 88, 10359-10370, <http://dx.doi.org/10.1029/JB088iB12p10359>.
- Smith, S.A.F. and Faulkner, D.R., 2010, Laboratory measurements of the frictional properties of the Zuccale low-angle normal fault, Elba Island, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 115, B02407, <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB006274>.
- Takahashi, M., Mizoguchi, K., Kitamura, K. and Masuda, K., 2007, Effects of clay content on the frictional strength and fluid transport property of faults. *Journal of Geophysical Research*, 112, B08206, <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004678>.
- Tanikawa, W. and Shimamoto, T., 2009, Frictional and transport properties of the Chelungpu fault from shallow borehole data and their correlation with seismic behavior during the 1999 Chi-Chi earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01402, <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB005750>.
- Tembe, S., Lockner, D.A. and Wong, T.-F., 2010, Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite. *Journal of Geophysical Research*, 115, B03416, <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006383>.
- Tesei, T., Collettini, C., Carpenter, B.M., Viti, C. and Marone, C., 2012, Frictional strength and healing behavior of phyllosilicate-rich faults. *Journal of Geophysical Research*, 117, B09402, <http://dx.doi.org/10.1029/2012JB009204>.
- Woo, S., Lee, H., Han, R., Chon, C.-M., Son, M. and Song, I., 2015, Frictional properties of gouges collected from the Yangsang Fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 569-584, <http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2015.51.6.569> (in Korean with English abstract).

---

Received : October 17, 2016

Revised : November 28, 2016

Accepted : November 29, 2016