

슈도타킬라이트와 지진성 단층 미끌림

한래희

경상대학교 지질학과 및 기초과학연구소

요 약

지진은 단층의 미끌림으로 발생하므로 단층 미끌림대를 이루는 물질에 대한 구조지질학적 연구는 지진발생 메커니즘을 이해하는데 있어 매우 중요하다. 지진을 동반하는 단층 미끌림은 빠르게 발생하기 때문에(~1 m/s), 급격한 마찰가열이 가능하고 그에 따라 종종 암석의 용융이 일어나기도 한다. 이와 같이 마찰용융에 의해 만들어진 단층암을 슈도타킬라이트라고 부른다. 슈도타킬라이트는 노두규모에서의 특징과 미구조적 특징을 관찰함으로써 식별한다. 슈도타킬라이트를 단층에서 확인하면 구조관찰, 물질분석 및 진단실험 등을 결합함으로써 그것으로부터 지진을 동반한 과거의 단층 미끌림에 관한 중요한 정보, 가령 단층에서의 온도상승, 단층 미끌림 방향, 단층변위, 전단응력, 단층 미끌림 속도, 단층 미끌림 깊이 등을 유추할 수도 있다. 슈도타킬라이트의 형성과 지진성 단층 미끌림에 대한 이해를 보다 진전시키기 위해서는 앞으로 유체압 하에서의 마찰용융에 관한 실험적 연구, 마찰용융 현상의 근본적인 특성을 규명하기 위한 연구, 마찰용융 시 미끌림대 주변에서 동반되는 물리·화학적 프로세스에 대한 연구 등이 필요하다. 아울러, 화산체 내 단층에서의 마찰용융 등도 새로이 주목할 만한 연구대상이다.

주요어: 슈도타킬라이트, 단층, 지진성 미끌림, 지진, 마찰용융

Raehee Han, 2017, Pseudotachylytes and seismic fault slip. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 1, p. 159-171

ABSTRACT: Earthquakes occur due to the slip of faults, and thus studies on the materials of fault slip zones are crucial to understanding earthquake generation mechanisms. When an earthquake occurs, a fault slides so fast (~1 m/s) that temperature rise due to frictional heating may be large enough to induce the melting of minerals in a slip zone. The fault rock generated by frictional melting during seismic fault slip is called 'pseudotachylyte'. To identify the pseudotachylyte correctly, detailed analysis of structural and material characteristics at the outcrop and microscopic scales is necessary. By conducting an integrated study of field observation, materials analysis and shear tests, some important information about the past seismic fault slip (e.g., temperature rise in the slip zone, coseismic slip direction, fault displacement, coseismic shear stress, slip rate, and the depth of seismic slip) may be drawn from the pseudotachylyte. For better understanding of frictional melting during seismic fault slip, some important issues, including frictional melting under fluid (or water) pressure, fundamental characteristics of frictional melting, physico-chemical processes that occur simultaneously with frictional melting, and frictional melting in volcano-tectonic faults should be explored.

Key words: pseudotachylyte, faults, seismic slip, earthquakes, frictional melting

(Raehee Han, Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea)

1. 서 론

인류가 지금까지 수많은 지진을 겪어왔지만, 1855년

뉴질랜드의 Wairarapa 지진(M~8.1; Sibson, 2006),
1872년 캘리포니아의 Owens Valley 지진(M7.8-7.9;
Hough and Hutton, 2008), 1891년 일본의 Nobi 지

‡ Corresponding author: +82-55-772-1471, E-mail: raeheehan@gnu.ac.kr

진(M8.0)등을 경험하고 나서야 비로소 단층의 미끌림으로 지진이 발생될 수 있다는 가설이 제기되었다(Koto, 1893; Yeats *et al.*, 1997). 실험적으로는 1960년대에 단층의 고착-미끌림 거동(stick-slip behavior)과 안정된 미끌림(stable sliding)이 확인되었고, 고착-미끌림이 지진 발생과 주기적인 재발의 메커니즘이라는 가설이 제기된 바 있다(Brace and Byerlee, 1966). 이렇듯 단층의 미끌림이 지진발생의 원인이고, 단층이 지진발생의 위치를 지시하기 때문에 구조지질학자들은 자연단층(지표파열 포함)에 대한 자세한 관찰과 분석으로부터 지진현상을 이해하려는 연구를 수행한다. 이는 지진파의 관측과 분석을 통한 지진학적 연구나 거리 및 고도 등의 정확한 측정을 통해 지각변형을 추적하는 측지학적 연구와 함께 지진 연구에서 가장 중요한 분야 중 하나라고 할 수 있다(e.g., Yeats *et al.*, 1997).

이러한 연구에도 불구하고 지진을 동반한 단층 미끌림이 어떠한 물리·화학적 프로세스와 관련되고, 어떠한 물질적, 미구조적 증거를 단층에 남길 수 있는지에 대해서는 아직도 알려지 바가 많지 않다. 가령, 어떠한 지표노두에서 확인되는 단층이나, 심지어 지진이 발생한 후 그 근원 단층을 대상으로 한 지하 수백 m에서 수 km 아래의 시추공에서 관찰되는 단층들을 대상으로 한 연구에서도, 어느 부분에서 지진성 미끌림의 흔적들이 관찰되는지, 그리고 흔적들이 발견된다면 그로부터 우리가 지진 또는 지진성 단층 미끌림에 대해 얻을 수 있는 정보가 무엇인지를 대답하는 것이 쉽지 않다(e.g., Cowan, 1999; Han *et al.*, 2007a; Rowe and Griffith, 2015). 수없이 많은 단층으로부터 안정한 미끌림(stable sliding)을 보이는 것으로 확실하게 보고된 예가 그리 많지 않다는 점은 아마도 단층은 대부분의 경우 크고 작은 지진을 동반하면서 미끌린다는 추정을 가능케 한다. 그러나, 특히 활성단층이 관찰되는 지표 그리고 지각의 가장 천부(가령 깊이 3-5 km 미만)에서 안정한 미끌림이 일어날 수도 있다는 것(e.g., Scholz, 1998, 2002; Lee *et al.*, 2003; Cashman *et al.*, 2007)은 우리가 지표단층에서 보는 전단변위의 전부가 지진성 미끌림의 결과는 아닐 수도 있다는 의심을 하게 한다. 이는 과거의 지진특성을 유추하는데 어려움을 야기한다.

그렇다면 무엇이 지진성 단층 미끌림을 지시하는가? 지금까지의 많은 지진학적 관찰에 따르면, 지진

성 단층 미끌림(seismic slip)은 ~1 m/s 정도의 매우 빠른 속도로 발생한다(e.g., Brune, 1968; Tullis, 2007). 미끌림 시 열발생률은 전단응력(shear stress)과 미끌림속도(slip rate)의 곱에 비례하므로, 지진성 미끌림의 경우, 그 빠른 속도로 인해 짧은 시간 내에 급격한 온도상승을 야기할 가능성이 크다. 가령, 단층 미끌림에 따른 역학적 에너지가 손실없이 열로 변환된다고 가정하면, 단층 주미끌림대(principal slip zone)에서의 온도 상승(ΔT)은 다음과 같은 식으로 대략적으로 계산될 수 있다.

$$\Delta T = \tau d / \rho c_p w \quad (\text{식 1})$$

예를 들어 단층 미끌림면에 작용하는 전단응력(τ)이 10 MPa (또는 100 bar), 밀도(ρ)가 2,700 kg/m³, 비열(specific heat capacity) c_p 는 800 J/(kg K)라고 하면, 두께(w) 1 mm의 미끌림대에서 0.2 m의 전단 변위(d) 시 발생하는 온도상승은 암석의 용융을 가능케 할 정도로 높은 926°C로 계산되며, 평균 미끌림속도를 1.0 m/s라고 한다면 0.2초만에 암석의 용융이 발생할 수 있음을 의미한다. 이처럼 지진성 단층 미끌림 동안 단층면 상에서 마찰가열에 의해 용융물(melt)이 형성되고, 그것이 빠르게 냉각되어 굳어진 단층암을 슈도타킬라이트(pseudotachylite)라고 부른다(e.g., Sibson, 1975). 급격한 마찰가열과 용융은 단층이 빠르게 미끌릴 경우에만 가능한 현상이므로 이의 산물인 슈도타킬라이트는 지금까지 제안된 것 중 가장 확실한 지진성 단층 미끌림의 지시자(seismic slip indicator)로 받아들여지고 있다(Cowan, 1999).

이 논문은 기존의 슈도타킬라이트를 대상으로 한 연구의 자세한 논평을 목적으로 쓰여진 것은 아니므로 그러한 논평은 Lin (2008)과 Spray (2010) 등을 참고하기 바란다. 대신 이 논문에서는 과거 지진의 지질학적 기록인 슈도타킬라이트에 대한 기본적인 내용을 기술한 다음, 단층 연구자에게 비교적 덜 알려진 부분, 가령 우리가 자연단층대에서 슈도타킬라이트를 관찰했을 때 어떻게 그로부터 과거 지진성 단층 미끌림 혹은 지진의 역학적 특성과 같은 중요한 정보를 얻어낼 것인가, 앞으로 어떠한 부분의 연구가 지속적으로 필요한가 등에 대해 논의하고자 하였다.

2. 슈도타킬라이트(Pseudotachylite)

슈도타킬라이트는 ‘마찰가열(frictional heating)에 의한 온도상승으로 암석이 용융(melting)된 후 굳어서 만들어진 단층암’으로 정의할 수 있다. 또는 ‘용융의 증거를 보여주는 단층암’(Magloughlin and Spray, 1992), ‘마찰용융(frictional melting)을 경험한 단층암’(Kirkpatrick and Rowe, 2013)이라고 말할 수 있다. 지금 우리가 슈도타킬라이트라고 알고 있는 단층암은 100여년전 Shand (1916)에 의해 처음으로 명명되었다. 그는 남아프리카의 Vredefort Dome 구조에서 ‘타킬라이트(tachylite; 현무암질 유리)와 매우 유사해 보이는 암석’이 상당히 많은 양으로 나타나는 것을 보고 그것을 슈도타킬라이트라고 이름을 붙여 기재하였다.

이와 같은 암석은 실제로는 그 이전에도 관찰되어 왔고 가령 ‘flinty crush rock’이라는 이름으로도 불렸었다(Clough *et al.*, 1909; Kokelaar, 2007; Spray 2010). 자연에서 관찰되는 사례를 보면 슈도타킬라이트는 매우 다양한 깊이 조건에서 형성되는 것으로 보인다. 가령, 지표에서 발생하는 사태(landslide)의 조건(Lin *et al.*, 2001)에서부터, 천부 지각(Kirkpatrick *et al.*, 2012), 심부 지각(Austrheim and Boundy, 1994), 그리고 맨틀에서 생성된 것(Obata and Karato, 1995)까지 보고된 바 있다. 사태 발생 시, 전단면에 작용하는 수직응력은 작지만 미끌림 속도가 매우 빠르기 때문에 마찰용융이 가능한 것으로 보인다. 이는 자연조건에 비해 훨씬 작은 수직응력 하에서의 전단실험에서도 미끌림 속도가 빠르면 용융이 가능

함이 확인되었다는 점과 잘 부합된다.

한편 McKenzie and Brune (1972)은 100 MPa 전 단응력조건에서는 1-3 mm의 작은 전단 변위에도 용융이 가능할 것으로 예측한 바 있고, Griffith *et al.* (2008)은 야외관찰을 통해 ~cm 정도의 전단변위에 의해 슈도타킬라이트가 만들어질 수 있음을 보고하였다. 아울러 최근 Brantut *et al.* (2016)은 전단 응력이 >100 MPa인 조건에서 수행된 고찰-미끌림(stick-slip) 실험을 통해 미끌림 속도가 >1 m/s이면 1 mm 보다 작은 미끌림으로도 국부적으로 용융이 가능할 수 있음을 보고한 바 있다. 깊이가 증가할수록 단층면에 작용하는 수직응력 및 전단응력이 증가하므로 이상의 결과는 미끌림 속도만 빠르다면 작은 변위로도 용융이 일어날 정도까지의 온도상승이 가능하다는 점을 보여준다.

슈도타킬라이트는 경험이 있는 연구자라 할지라도 야외에서의 관찰만으로 확실하게 식별하기는 쉽지 않다. 우리가 야외 및 실내 관찰을 통해 슈도타킬라이트를 식별할 때는 중규모의 특징과 미소규모의 특징을 모두 이용한다. 중규모 혹은 노두에서 봤을 때, 슈도타킬라이트는 흔히 단층 미끌림대(slip zone)를 따라 암석이 용융되어 만들어진 ‘단층세맥(fault vein) 구조’와 그 용융물이 주변암으로 주입되어 만들어진 ‘주입세맥(injection vein) 구조’를 갖는다(Sibson, 1975; 그림 1). 슈도타킬라이트는 흔히 짙은 회색 내지 검정색을 띠 정도로 어두우나 모양의 종류에 따라 그 색은 훨씬 더 옅은 색으로도 발달할 수 있다. 두께는 일반적으로 몇 mm 정도이지만, 드물게 몇 cm 또는 수십 cm (이것은 큰 암편을 포함하는 두께)



Fig. 1. Outcrop photograph of blackish pseudotachylite in granitic gneiss, Oshima Island, Yawatahama, Japan. Fault vein (FV) of the pseudotachylite is developed along the slip surface and is associated with several injection veins (IV) into the wall rock.

에 달하는 것(e.g., Sibson, 1975; Rowe *et al.*, 2005)과 1 mm 미만의 매우 얇은 것들(Griffith *et al.*, 2008)도 관찰된다.

이외의 중규모적 특징으로는 슈도타킬라이트의 경계부에서 나타나는 급냉구조(quenched texture), 유동띠구조(flow banding structure), 녹지 않고 남은 크고 작은 암편(survived clasts)을 포함한 구조 등을 들 수 있다(Lin, 2008). 중규모의 특징이 관찰된다고 해도 그것만으로는 슈도타킬라이트인지 판단하기 어려운 경우가 많은데 가령 급냉구조나 유동구조, 그리고 주입구조는 일반적인 화성기원 암맥에서도 나타날 수도 있기 때문이다. 또한 노두에서는 파쇄암(cataclastite)인지 슈도타킬라이트인지 구분하기 어려운 경우도 많다. 그럴 경우에는 박편을 제작한 후 광학현미경이나 전자현미경을 이용하여 미소규모의 구조와 물질적 특성을 자세히 관찰하고 분석할 필요가 있다.

미소규모에서의 특징으로는 자형의 미세결정 입자(microcrystalline grains; e.g., Kirkpatrick and Rowe, 2013), 수지상 혹은 구과상 미세결정(dendritic or spherulitic microlite) (e.g., Sibson, 1975; Lin, 1994), 암편(clasts), 황화물 혹은 산화물의 물방울모양구조(sulfide or oxide droplets; Magloughlin, 2005), 기공(vesicles), 행인상구조(amygdules; Maddock *et al.*, 1987), 만입경계를 보여주는 암편(embayed clasts; e.g., Sibson, 1975), 매우 높은 온도에서 결정화되는 광물들(예, mullite, Ca 함량이 높은 사장석이나 sanidine 등)의 존재(e.g., Lin, 1994; Moecher and Brearley, 2004), 급격한 냉각으로 형성된 유리(glass)의 존재(Lin, 1994), 유동구조, 모암보다 좀 더 고철질이면서 물을 더 포함하는 화학조성 등이 보고되었다(e.g., Lin, 2008 and references cited therein). 그림 2는 실험 및 자연의 슈도타킬라이트로부터 관찰된 미소규모의 특징에 대한 몇가지 예를 보여준다. 슈도타킬라이트를 식별하는데 유용한 기준에 대한 좀 더 상세한 토의는 Kirkpatrick *et al.* (2009)과 Kirkpatrick and Rowe (2013)에 의해 정리된 내용과 거기서 인용된 문헌들을 참고할 수 있다.

슈도타킬라이트의 기원과 관련하여서는 ‘용융기원(melting origin)’과 ‘갈림기원(crushing origin)’이라는 두 주장으로 오랫동안 논쟁이 지속되었으나 (Philpotts, 1964; Wenk, 1978; Spray, 1995), 갈림으

로 인한 극적인 입자크기 감소(comminution)가 일어난 후 용융이 뒤따르는 것이 실험을 통해 관찰됨에 따라(Spray, 1995), 현재는 용융으로 인해 슈도타킬라이트가 형성될 수 있다는 것에 대한 의문은 사라졌다고 할 수 있다. 다만, 극한의 갈림으로 형성된 슈도타킬라이트(갈림기원의 슈도타킬라이트)의 자연적인 사례가 존재하고(Ozawa and Takizawa, 2007; Janssen *et al.*, 2010) 심지어 저속의 미끌림 실험에서도 용융에 의한 슈도타킬라이트와 아주 유사해보이는 비정질 물질이 만들어질 수 있다는 보고도 있다(Pec *et al.*, 2012). 따라서 우리가 관찰하는 거의 대부분은 마찰용융의 결과라고 생각되지만 약간의 예외적인 경우도 있을 수 있다고 하겠다. 아울러, 쇄설성 주입물(cataclastic injection material)과 같은 단층대 물질을 대상으로도 ‘갈림기원’의 슈도타킬라이트라는 말을 쓰는 연구자도 있으나(Lin, 1996, 2008), 이와 같은 사용은 일반적이지 않다.

일단 용융물 띠가 단층면을 덮게 되면, 그 이후에는 단층의 전단강도가 고체-고체간 접촉에 의해 결정되는 것이 아니라 점성유체(viscous fluid)인 용융물의 전단강도에 의해 좌우되게 된다. 이와 관련하여, 자연관찰과 실험으로 결정된 전단강도에 기반하여 용융물은 단층의 전단강도를 감소시키는 윤활제(lubricant) 역할을 할 수 있다는 견해가 제안되었다(Di Toro *et al.*, 2006a). 다른 한편으로는 용융물이 오히려 단층강도를 증가시키는 역할을 할 수도 있다는 생각도 논의되었으며(Scholz, 2002; Koizumi *et al.*, 2004; Fialko and Khazan, 2005), 특히 하나의 연속적인 용융물 띠(melt layer)가 형성되기 이전의(온도가 단층면 전체적으로 충분히 상승하지 않은) 초기 미끌림 단계이거나 지각천부 조건에서는 단층의 강도상승을 야기할 수 있을 것으로 예측한 연구들도 있다(Kim *et al.*, 2008; Ujiie *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2014).

실제 자연단층을 대상으로 우리가 슈도타킬라이트를 빈번히 관찰하는 것은 아니다. 그렇다면 이는 마찰용융이 실제로 드물게 일어나는 프로세스일 가능성을 의미하거나 혹은 마찰용융은 흔하게 일어나나 생성물인 슈도타킬라이트가 잘 보존이 안된다던가 너무 얇게 발달하는 등의 이유로 노두에서 쉽게 발견이 안되는 것일 수 있다(Sibson and Toy, 2006; Kirkpatrick *et al.*, 2009; Kirkpatrick and Rowe, 2013).

3. 슈도타킬라이트를 이용한 단층 미끌림 특성 연구사례

3.1 온도상승(temperature rise)

식(1)을 통해서도 알 수 있듯이 단층 미끌림대(slip zone)에서의 온도상승은 단층에 작용한 전단응력이나 단층변위 등을 유추하는데 있어 결정적으로 중요한 요소(parameter)이다. 고속전단시험의 경우에는 시료의 미끌림대 근처에 열전대(thermocouple)를 설치하여 온도를 측정하거나 방사온도계(radiation thermometer)를 이용하여 용융물질이 존재하는 미끌림대의 온도를 알아내는 것이 가능하다(Tsutsumi and Shimamoto, 1997; Del Gaudio *et al.*, 2009). 그러나, 자연상태의 슈도타킬라이트는 단층 미끌림으로 인해 단층주변의 초기온도에서부터 어느 정도까

지 온도가 상승하였는지를 유추하는 것이 쉽지 않다. 아마도 대다수의 연구자에 의해 사용되는 방법은 슈도타킬라이트 내에 존재하는 암편(clasts)을 이루는 광물과 용융되어 기질을 구성하는 광물 각각의 평형용융점에 기반한 추정법이다.

가령 모암과 슈도타킬라이트의 광물조성을 X-선 회절분석(XRD)을 통해 알아내고, 슈도타킬라이트 기질의 화학조성을 전자탐침미세분석기(EPMA) 등으로 분석했을 때, 특정 광물 A (녹는점 800°C)와 B (녹는점 1,000°C)는 슈도타킬라이트에서 나타나지 않거나 그 양이 감소하고 광물 C (녹는점 1,400°C)가 주로 암편으로 나타나며 슈도타킬라이트 기질의 화학조성이 A, B로부터의 물질공급으로 설명될 수 있다면, 단층 미끌림대에서의 온도는 1,000°C 보다는 높고 1,400°C 보다는 낮았을 것이라고 추정하는

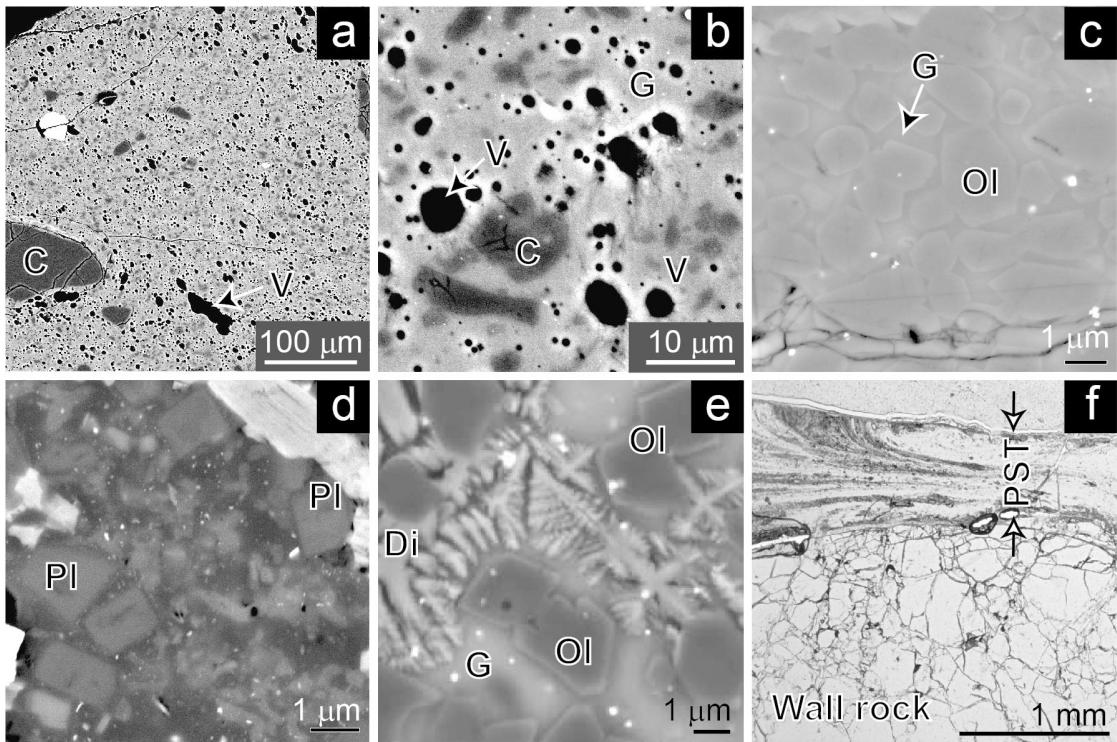


Fig. 2. Microstructural characteristics of pseudotachyrites. (a) Clasts (C) and vesicles (V) in experimental pseudotachylyte of granodiorite. (b) Close-up view of a part of (a) showing numerous clasts and vesicles in a glassy matrix (G). (c) Newly crystallized euhedral olivine crystals (Ol) and glass (G) in experimental pseudotachylyte of peridotite. (d) Euhedral plagioclase microlites in natural dacite pseudotachylyte (Han *et al.*, 2016). (e) Dendritic diopside (Di) with euhedral olivine and glass in experimental pseudotachylyte of peridotite (modified from Del Gaudio *et al.*, 2009). (f) Flow structure shown in experimental pseudotachylyte (PST) of quartzite. (a)-(e), Backscattered electron images (BSE); (f), Optical photomicrograph under plane polarized light (PPL).

것이다. 이와 같은 논의에 이용되는 몇 가지 조암광물의 용융점 정보는 Spray (1992, 2010)의 논문을 참고할 수 있다. 구성광물들의 녹거나 녹지 않음에 대한 자세한 관찰이 이루어지면 미끌림대에서 도달한 최대온도를 비교적 좁은 범위로 한정할 수 있다. 그럼에도 이 방법이 신뢰성 높은 온도정보를 제공하는 것인지는 추가적인 연구를 통해 좀 더 확인할 필요가 있다. 가령, 암편으로 존재하는 광물은 정말로 녹지 않은 것인지를 확인하기가 힘들다는 점이다. 거의 석영으로만 구성된 암석(99% 석영)을 대상으로 한 최근의 마찰용융 실험연구에 따르면, 실험으로 만들어진 용융물 시료는 전자현미경 관찰결과 매우 많은 석영암편과 실리카유리(silica glass)로 구성되어 있음이 확인되었다. 실리카유리는 석영의 용융을 지시하므로, 이 결과는 암편으로 석영이 존재한다는 것이 석영의 녹지 않음을 항상 지시하는 것은 아님을 의미한다(Lee, S.K. *et al.*, submitted). 결국 암편으로 존재하는 광물의 부분적인 용융에 대한 가능성 여부를 밝히는 것이 쉽지 않다는 점이 이러한 방식의 온도추정에서 가장 어려운 점이 된다.

이와 같은 온도추정법 이외에도, 새롭게 만들어진 미세결정(microlites)의 형성조건을 통해 온도상승을 유추하는 연구도 이루어진 바 있다(Austrheim and Boundy, 1994; Camacho *et al.*, 1995; Moecher and Brearley, 2004). 한편, 암편이 슈도타킬라이트에서 차지하는 부피비(이차원에서는 면적비; clast fraction)와 방사온도계를 통해 마찰용융실험 중 측정된 용융물 띠(melt layer) 내부의 최대온도를 비교하면 그들 사이에 경험적 상관관계가 존재하는 것이 확인되는데, 이를 용융실험과 결합하면 자연의 슈도타킬라이트를 대상으로한 암편비율측정을 통해 그것이 형성될 당시의 최대온도를 유추하는 것이 가능할 수 있을 것으로 보인다(Otsuki *et al.*, 2003; Han *et al.*, 2016).

3.2 단층 미끌림 방향(slip direction)

지진성 단층 미끌림의 운동학적 해석(전단변위량 산정, 전단감각 결정 등)을 위해서는 단층 미끌림 방향에 대한 정확한 정보가 필요하다. 슈도타킬라이트에서 유동구조(flow structures)는 흔히 나타나는 특징들 중 하나인데, 슈도타킬라이트 중심부와 가장자리 사이의 전단변형을 혹은 유동속도 구배로 인해

때때로 칼집형습곡 모양의 유동구조가 관찰되기도 한다(Berlenbach and Roering, 1992; Lin, 2008). 이러한 구조의 삼차원적 관찰을 통해 지진발생 당시의 단층 미끌림 방향을 유추하는 것이 가능할 수 있다.

한편, 슈도타킬라이트에 대한 대자율 이방성 측정을 통해서 용융물의 유동조각이 정의될 수 있다면 이것도 지진성 단층 미끌림 방향을 유추하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다(Craddock and Magloughlin, 2005; Ferré *et al.*, 2016a). 최근에는 지진성 미끌림 시 단층의 모암과 용융물의 경계면을 따라 마치 브러쉬에 의해 쓸리는 것처럼 단층 미끌림 방향과 나란한 조선(striation)이 만들어질 수 있으며, 그것의 관찰을 통해 과거 지진단층의 미끌림 방향을 유추하는 것이 가능하다는 제안이 보고되었다(Ferré *et al.*, 2016b).

3.3 단층변위(fault displacement)

슈도타킬라이트에 의해 어긋난 표지(marker; 가령 화강암체 내의 고철질 포획암이나 암맥 등)가 있다면 그것을 이용하여 지진성 단층 미끌림 당시의 겉보기변위(apparent displacement)를 측정할 수 있다. 정확한 미끌림 방향을 알 수 있다면 단층변위를 결정하는 것이 가능하겠지만 슈도타킬라이트가 나타나는 단층노두에서 적당한 표지가 존재할 뿐만 아니라 미끌림 방향도 알 수 있는 상황은 흔하지 않다. 따라서, 직접적인 관찰에 의한 단층변위 결정이 가장 확실한 방법임에는 틀림없지만 현실적인 어려움이 존재하는 것도 사실이다.

다수의 슈도타킬라이트 관찰을 통해 변위와 슈도타킬라이트 두께 사이의 상관관계를 도출하고, 이를 이용하여 두께로부터 단층변위 정보를 얻으려는 노력이 있었다(Sibson, 1975; Ray, 1999; Di Toro *et al.*, 2005, 2006b). 그러나 미끌림 방향을 모름으로 인한 단층변위의 불확실성, 현재 관찰되는 슈도타킬라이트의 변위가 한번의 미끌림에 의한 것인지의 불확실성(가령 파쇄암을 포함한 단층으로 존재할 당시의 미끌림을 포함한 복수의 미끌림 가능성), 주입세맥의 존재로 인한 슈도타킬라이트 두께측정에서의 불확실성 등으로 인해 신뢰할만한 다수의 측정값을 얻기 힘들어 따라 슈도타킬라이트의 두께측정을 통해 변위를 유추하는 방법의 적용 가능성은 아직까지는 그리 높지 않다고 할 수 있다.

3.4 전단응력(shear stress)

지진을 동반하는 단층 미끌림 시의 전단강도는 지진의 역학적 이해에 있어 매우 중요한 요소이지만 지진학적인 방법을 통해 그 절대값을 결정하기가 어려운 것으로 알려져 있다. 마찰용융의 결과물인 슈도타킬라이트는 지진성 단층 미끌림 시 만들어지는 것이 확실하므로 슈도타킬라이트에 대한 자세한 관찰로부터 지진성 단층 미끌림 시의 전단응력 정보를 유추하는 것은 오랫동안 중요한 문제로 여겨졌다. 이 논문의 서론에서 사용한 식(1)을 암석의 용융이 일어나는 온도까지 확장하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다(Di Toro *et al.*, 2005, 2006a, 2009):

$$\tau = \rho[(1 - \phi)H + c_p(T_M - T_{amb})]w/d \quad (\text{식 2})$$

여기서 ϕ 는 슈도타킬라이트 내에 존재하는 압편의 함량비, H 는 용융잠열(latent heat of fusion), c_p 는 비열, T_M 은 용융물 띠 내에서 도달된 최고온도, T_{amb} 는 모암의 초기 주변온도이다. 따라서, 슈도타킬라이트의 두께(혹은 폭, w)와 전단변위(d)를 측정하고 슈도타킬라이트가 경험한 최고온도를 미구조 관찰 등에 기반한 추정을 통해 한정할 수 있다면 위 식을 이용하여 지진성 미끌림 시 단층면에 작용한 전단응력을 유추해 볼 수 있다(Di Toro *et al.*, 2005, 2006a).

이와 달리, 용융물의 점성도(η), 두께(w) 및 단층 미끌림속도(V)를 이용하여 전단응력을 계산해 볼 수도 있다: $\tau = \eta(V/w)$. 우리가 슈도타킬라이트의 분석으로부터 용융물의 화학조성, 압편의 함량비, 온도 등에 관한 정보를 얻어내어 점성도를 계산할 수 있고, 미끌림속도를 가정하거나(~ 1 m/s) 계산에 근거해 추정할 수 있다면, 노두에서 측정된 슈도타킬라이트의 두께와 함께 위 식에 대입하여 전단응력을 대략적으로 추정해 보는 것이 가능하다. 한편, 이런 식으로 산출된 전단응력(τ)과 더불어 온도상승(ΔT) 및 슈도타킬라이트의 두께(w) 측정치를 이용하면 식(2)로부터 그 두께의 슈도타킬라이트 형성을 가능케한 단층의 변위(d)를 추정하는 것이 가능할 수 있다(e.g., Han *et al.*, 2016).

3.5 단층 미끌림속도(slip velocity)

지진을 동반한 단층 미끌림이 대략 0.1 m/s에서 수 m/s(대표적으로 ~ 1 m/s)의 속도로 발생한다는

것은 잘 알려진 바이지만, 특정 슈도타킬라이트와 같은 단층암으로부터 미끌림 속도를 바로 유추하는 것은 쉽지 않다. 이와 관련된 최근 연구에서, 여러 광물로 이루어진 암석이 용융될 때, 용융물 띠의 두께(melt layer thickness)와 용융이 시작되는 경계면(melting surface)의 거칠기(굴곡; roughness) 비(ratio)는 미끌림속도에 의존하므로 이 둘 사이의 비를 슈도타킬라이트를 대상으로 측정한다면 과거 지진성 단층 미끌림의 속도를 유추해 볼 수 있다는 주장이 제기되었다(Nielsen *et al.*, 2010). 두께와 굴곡이 슈도타킬라이트의 주향을 따라 어디서나 일정한 것이 아니므로 결과의 대표성에 의문이 있을 수 있어 이와 같은 방법을 이용하기 위해서는 주향을 따라 다수의 지점에서 시료를 채취하여 분석할 필요가 있다.

슈도타킬라이트의 모양을 채취하여 이를 대상으로 고속전단시험(high-velocity shear tests)이 가능한 경우라면 전단시험 결과와 실험 후 시료의 관찰과 분석에 기반한 암석용융점(T_m) 및 최대온도(T_M) 산출, 그리고 용융물의 전단강도에 대한 이론식(식 3)을 이용하여 슈도타킬라이트의 미끌림속도(V) 추정을 시도해 볼 수 있다.

$$V = W \sqrt{\left(\frac{1}{\exp((T_m - T_M)/T_c)} - 1 \right)} \quad (\text{식 3})$$

여기서 T_c 와 W 는 특성온도(characteristic temperature)와 특성속도(characteristic velocity)라고 불리는 매개변수이고, W 는 다시 다음의 식으로 표현될 수 있다(Nielsen *et al.*, 2008): $W = \sqrt{8T_c K / \eta_c}$, 여기서 K 와 η_c 는 각각 열전도도와 특성점성도(characteristic viscosity)이다. 온도에 따른 용융물의 점성도 변화를 나타내는 관계식에서 사용되는 매개변수인 특성점성도 η_c 와 특성속도 W 는 서로 다른 미끌림속도에서의 고속전단시험을 통해 전단응력과 용융물 띠의 두께를 측정하여 산출할 수 있다.

따라서, 전단시험 중 온도측정을 실시하고 T_m 과 T_M 을 좁게 제한할 수 있다면 식(3)을 통한 미끌림속도 계산이 가능할 수 있다(Han *et al.*, 2016). 그러나, 고속전단시험 및 다양한 물질분석을 통해야만 식(3)의 매개변수 값을 얻어낼 수 있기 때문에 자연단층대의 연구자에 의해 쉽게 활용될 수 있는 방법은 아니라는 단점이 있다.

3.6 단층 미끌림의 깊이(슈도타킬라이트의 형성깊이)

천부지각에서 만들어진 슈도타킬라이트의 경우 종종 기공이나 행인상구조가 관찰된다. 고속전단시험을 통해 만들어진 슈도타킬라이트에서도 이러한 구조는 매우 흔하게 나타난다(그림 2a, 2b). 이것들은 용융물 내에 존재하던 유체가 빠져나가는 것 때문에 생기므로 슈도타킬라이트 형성 시의 압력과 밀접한 관련이 있다. 따라서, 슈도타킬라이트에서 관찰되는 기공과 행인상구조의 부피를 이용하거나 (Maddock *et al.*, 1987) 슈도타킬라이트 내의 물함량을 통해(Lin, 1994) 정압압(lithostatic pressure)을 구하려는 시도들이 있었고, 그렇게 결정된 압력으로부터 슈도타킬라이트의 형성깊이가 계산되었다(자세한 내용은 Lin (2008)의 5.4.3절 참조). 이러한 연구를 통해 얻어진 깊이는 <2 km 정도로 매우 작으므로 이 방법을 통한 깊이추정은 그 적용에 한계가 있다. 그럼에도 기공이나 행인상구조는 슈도타킬라이트가 매우 천부에서 형성됐음을 나타내는 강력한 지시자로 쓰일 수 있다.

한편, 우리가 슈도타킬라이트에 대한 연대측정을 통해 그 형성시기를 알 수 있고, 다양한 폐쇄온도를 갖는 연대측정 방법을 동원하여 주변암의 온도-시간 경로(T-t path)를 알 수 있다면, 온도-시간 경로와 슈도타킬라이트의 연대 교차점으로부터 슈도타킬라이트 형성 시의 주변암 온도를 결정할 수 있다. 당시의 지온구배를 가정하면 그 주변암 온도로부터 슈도타킬라이트의 형성깊이를 한정하는 것이 가능하다.

Kirkpatrick *et al.* (2012)은 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 통해 슈도타킬라이트의 형성시기를 얻어내고 주변암의 인회석과 저어콘에 대해서 피션트랙(fission track) 및 (U-Th)/He 연대측정법을, 흑운모와 각섬석에 대해서는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정법을 적용하여 온도-시간 경로를 구함으로써 이로부터 슈도타킬라이트 형성 시의 주변암 온도와 깊이를 추정할 수 있음을 보여줬다. 이렇게 제한된 깊이정보는 단층 미끌림의 역학적 해석에 필요한 수직응력이나 유체압, 온도 등을 산정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

4. 앞으로 더 연구되어야 할 문제들

4.1 유체압 하에서의 마찰용융

슈도타킬라이트 내에서 때때로 기공이나 행인상

구조가 발달하고, 함수광물(hydrous minerals)들이 새로 생긴 미세결정으로 존재하는 것이 관찰된다. 이로부터 마찰용융이 일어날 때 이미 단층 미끌림대에 물이 존재했거나 모암 내에 유체포유물로 있던 것이 공급되었거나 모암내 함수광물의 탈수(혹은 용융)가 일어나면서 새로이 물이 공급되었을 가능성 등을 생각할 수 있다. 따라서, 엄밀하게 말하자면 대부분의 마찰용융이 건조조건(dry condition)에서 발생한다고 말하기는 어렵다. 특히, 단층의 미끌림대가 물로 포화되어 있었을 것으로 생각되는 경우에서도 슈도타킬라이트가 만들어진 것이 보고되므로(Rowe *et al.*, 2005; Mukoyoshi *et al.*, 2006; Ujiie *et al.*, 2007), 미끌림대에 물이 존재할 경우 열적압력상승(thermal pressurization) 현상의 작동으로 온도상승이 억제되어 용융이 일어나기 힘들 것이라는 기존의 추측(e.g., Sibson, 1973)은 수정 보완될 필요가 있다.

지금까지 주로 실험실 건조 조건(room-dry condition)에서 마찰용융 연구를 수행하여 왔기 때문에 앞으로는 이와 더불어 물에 의한 유체압이 가해지는 상태의 실험으로 확장하려는 노력이 요구된다. 실제로 현재 이와 같은 문제의식 하에서 유체압을 가하고 그 변화를 측정할 수 있는 시료홀더를 이용한 고속전단실험들이 시작되어 그 초기 연구결과가 나오고 있다(e.g., Violay *et al.*, 2015). 이를 통해 단순히 물에 의한 광물의 용융점강화 가능성(Kennedy *et al.*, 1962) 수준의 논의 뿐 아니라 물이 단층의 강도와 단층대의 물리·화학적 프로세스에 미치는 영향에 대한 보다 깊이 있는 이해가 가능할 것으로 기대한다.

4.2 마찰용융 현상의 특성

슈도타킬라이트의 기질(matrix)과 모암의 화학조성을 비교해보면 보통 슈도타킬라이트의 기질부가 모암보다 고철질 성분이 더 많음을 확인할 수 있다. 이는 마찰용융 실험으로 얻어진 슈도타킬라이트에서도 잘 확인된다. 한편, 석영과 같이 용융점(1,726°C)이 높은 광물은 슈도타킬라이트에서 보통 압편의 형태로 존재한다. 이와 같은 관찰에 근거하여, 슈도타킬라이트를 연구해 온 많은 연구자들이 지난 20여년 동안 마찰용융은 용융점이 낮은 광물(이는 일반적으로 고철질 광물임)이 선택적으로 녹는 '비평형 용융(disequilibrium melting)'이라고 생각해 왔다(e.g., Lin, 2008). 그러나, 최근의 마찰용융실험 연구결과

는 단층의 빠른 미끌림과 그에 따른 마찰용융은 녹는점이 서로 다른 광물들이 단지 정적으로 가열되는 현상이 아니라 기계적 혹은 열적파쇄(mechanical or thermal fragmentation)에 의해 입자크기도 극적으로 감소하고, 준안정적(metastable) 물질로의 상변이도 일어나는 등의 동적인 과정이 수반되는 현상이므로 지금까지 널리 받아들여져 온 비평형용융만으로는 설명이 안되는 부분이 있음을 보여준다(Lee, S.K. *et al.*, submitted).

예를 들어 소량의 백운모를 포함하는 규암의 마찰용융에 대한 기존의 비평형 용융모델에 따르면 ~1,400-1,500°C의 온도에서는 백운모만 녹고 석영은 녹지 않은 채 압편으로 존재해야 하지만 실제로는 이 온도에서 석영이 녹은 후 굳어 실리카유리가 만들어지는 것이 실험적으로 확인되었다(Lee, S.K. *et al.*, submitted). 이는 기존 비평형 용융모델의 수정이 필요함과 더불어 광물의 용융점에 대한 우리의 사고도 전환되어야 함을 의미한다. 즉 극한의 마찰 미끌림과 같은 상황에서는 정적인 가열조건에서와는 달리 용융점이 훨씬 낮을 수 있음을 지시한다. 이러한 결과는 현재까지는 규암에 대한 실험적 연구에서만 확인되었으나, 다양한 암석에서 일반적으로 적용될 가능성이 있으므로 이와 관련한 추가적인 연구가 반드시 필요하다.

4.3 마찰용융 시 주변에서 동반되는 프로세스

슈도타킬라이트에 대한 최근의 연구에서 가장 눈에 띄는 결과 중 하나는 압쇄암 조직과 슈도타킬라이트가 지진성 단층 미끌림에 의해 지각천부의 온도-압력 조건에서 동시에 만들어 질 수 있다는 보고이다(Kim *et al.*, 2010; Bestmann *et al.*, 2011, 2012). 이는 주변온도가 충분히 높은 지각 중하부의 소성변형영역(plastic deformation regime)에서 매우 느린 속도로 발생하는 것으로만 알려졌던 변형이 천부지각의 단층에서 빠른 미끌림으로 인해 온도가 급격히 상승할 때에도 수 초 이내의 매우 짧은 시간에 일어날 수 있음을 보여준다. 흥미롭게도, 마찰용융은 아니지만 지진성 단층 미끌림 시 광물의 열분해(thermal decomposition; Han *et al.*, 2007b)가 발생하는 탄산염암 단층에서도 미끌림대 주변으로 결정소성 변형 메커니즘(crystal-plastic deformation mechanism)의 작동으로 인한 압쇄암 조직이 만들어질 수 있음

이 확인되었다(Smith *et al.*, 2013; Ree *et al.*, 2014).

그러나, 자연의 단층대에서 슈도타킬라이트는 파쇄암과 같이 나오는 것이 훨씬 흔해 보이므로, 이러한 슈도타킬라이트와 압쇄암 조직이 좁은 영역에서 동시에 형성되는 프로세스가 일반적인지 아니면 어떤 특정조건(예를 들어, 봉압이나 광물의 상당온도(homologous temperature) 등)에서만 발생하는 것인지는 좀 더 자세히 이해할 필요가 있다. 슈도타킬라이트 주변으로 관찰되는 국부적인 압쇄암 조직은 슈도타킬라이트의 특성이 변질 등의 과정을 통해 지워진 경우에도 과거 거기에 슈도타킬라이트가 존재했음을 알려주는 지시자일 수도 있을 것이다. 슈도타킬라이트 주변에서는 압쇄암 조직의 발달 뿐 아니라 다양한 물리·화학적 프로세스(탈수반응, 고온에서 새로운 광물의 형성 등)와 그에 따른 지질학적 변화도 예상되므로 그에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4.4 화산체에서 발달하는 단층에서의 마찰용융

우리가 지금까지 다룬 조구조단층(tectonic faults)에서 뿐 아니라 운석충돌이나 대규모 산사태 발생 시에도 슈도타킬라이트가 생성될 수 있다. 가령, Shand (1916)에 의해 보고된 슈도타킬라이트는 운석충돌에 의한 결과물로 알려져 있다(Martini, 1978; Reimold and Colliston, 1994). 한편, 화산학자들 사이에 오랫동안 논란의 대상이었던 ‘flinty crush rock’의 기원에 대해 칼데라 경계단층에서 급격한 미끌림이 발생함에 따라 마찰용융으로 생긴 암석이라는 주장이 Kokelaar (2007)에 의해 제기되었다. 보다 최근에는 마그마 유동학(rheology)을 주로 연구하는 유럽의 화산학자들에 의해 화산활동과 관련한 마찰용융과 화산성 슈도타킬라이트가 보고된 바 있다(e.g., Kendrick *et al.*, 2012, 2014; Lavallée *et al.*, 2012). 화산체에서의 단층 연구는 전세계적으로도 아직 초기단계이므로 화도벽면이나 칼데라 경계단층 등에서의 미끌림 과정과 더불어 이것이 화산의 여러 지질학적 프로세스와 어떤 관련이 있는지를 이해하기 위한 많은 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공분

야 기초연구사업(2016R1A2B4009599)의 연구결과이다. 심사과정에서 투고된 원고를 세심하게 검토하시고 유익한 조언을 해주신 이희권 교수님, 강희철 박사님, 특별호 편집위원 김영석 교수님께 깊이 감사드린다.

REFERENCES

- Austrheim, H. and Boundy, T.M., 1994, Pseudotachylytes generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust. *Science*, 265, 82-83.
- Berlenbach, J.W. and Roering, C., 1992, Sheath-fold-like structures in pseudotachylytes. *Journal of Structural Geology*, 14, 847-856.
- Bestmann, M., Pennacchioni, G., Frank, G., Goken, M. and de Wall, H., 2011, Pseudotachylyte in muscovite-bearing quartzite: Coseismic friction-induced melting and plastic deformation of quartz. *Journal of Structural Geology*, 33, 169-186, doi:10.1016/j.jsg.2010.10.009.
- Bestmann, M., Pennacchioni, G., Nielsen, S., Goken, M. and de Wall, H., 2012, Deformation and ultrafine dynamic recrystallization of quartz in pseudotachylyte-bearing brittle faults: A matter of a few seconds. *Journal of Structural Geology*, 38, 21-38, doi:10.1016/j.jsg.2011.10.001.
- Brace, W.F. and Byerlee, J.D., 1966, Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153, 990-992, doi: 10.1126/science.153.3739.990.
- Brantut, N., Passelègue, F.X., Deldicque, D., Rouzaud, J.-N. and Schubnel, A., 2016, Dynamic weakening and amorphization in serpentinite during laboratory earthquakes. *Geology*, doi:10.1130/G37932.1.
- Brune, J.N., 1968, Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 73, 777-784, doi:10.1029/JB073i002p00777.
- Camacho, A., Vernon, R.H. and Fitz Gerald, J.D., 1995, Large volumes of anhydrous pseudotachylyte in the Woodroffe Thrust, eastern Musgrave Ranges, Australia. *Journal of Structural Geology*, 17, 371-383.
- Cashman, S.M., Baldwin, J.N., Casman, K.V., Swanson, K. and Crawford, R., 2007, Microstructures developed by coseismic and aseismic faulting in near-surface sediments, San Andreas fault, California. *Geology*, 35, 611-614.
- Clough, C.T., Maufe, H.B. and Bailey, E.B., 1909, The cauldron-subsidence of Glen Coe, and the associated igneous phenomena. *Journal of the Geological Society of London*, 65, 611-678.
- Cowan, D.S., 1999, Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion. *Journal of Structural Geology*, 21, 995-1001, doi: 10.1016/S0191-8141(99)00046-2.
- Craddock, J.P. and Magloughlin, J.F., 2005, Calcite strains, kinematic indicators, and magnetic flow fabric of a Proterozoic pseudotachylyte swarm, Minnesota River valley, USA. *Tectonophysics*, 402, 153-168.
- Del Gaudio, P., Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., Nielsen, S., Shimamoto, T. and Cavallo, A., 2009, Frictional melting of peridotite and seismic slip. *Journal of Geophysical Research*, 114, B06306, doi:10.1029/2008JB005990.
- Di Toro, G., Hirose, T., Nielsen, S., Pennacchioni, G. and Shimamoto, T., 2006a, Natural and experimental evidence of melt lubrication of faults during earthquakes. *Science*, 311, 647-649.
- Di Toro, G., Hirose, T., Nielsen, S. and Shimamoto, T., 2006b, Relating high-velocity rock friction experiments to coseismic slip in the presence of melts. In: Abercrombie, R., McGarr, A., Kanamori, H. and Di Toro, G. (eds.), *Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting*. Geophysical Monograph Series, 170, American Geophysical Union, Washington, D.C., 121-134.
- Di Toro, G., Pennacchioni, G. and Nielsen, S., 2009, Pseudotachylytes and earthquake source mechanics. In: Fukuyama, E. (ed.), *Fault-Zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics*. International Geophysics Series, 94, 87-133.
- Di Toro, G., Pennacchioni, G. and Teza, G., 2005, Can pseudotachylytes be used to infer earthquake source parameters? An example of limitations in the study of exhumed faults. *Tectonophysics*, 402, 3-20.
- Ferré, E.C., Chou, Y.M., Kuo, R.L., Yeh, E.C., Leibovitz, N.R., Meado, A.L., Campbell, L. and Geissman, J.W., 2016a, Deciphering viscous flow of frictional melts with the mini-AMS method. *Journal of Structural Geology*, 90, 15-26.
- Ferré, E.C., Yeh, E.C., Chou, Y.M., Kuo, R.L., Chu, H.T. and Korren, C.S., 2016b, Brushlines in fault pseudotachylytes: A new criterion for coseismic slip direction. *Geology*, 44, 395-398, doi: 10.1130/G37751.1.
- Fialko, Y. and Khazan, Y., 2005, Fusion by earthquake fault friction: Stick or slip? *Journal of Geophysical Research*, 110, B12407, doi:10.1029/2005JB003869.
- Griffith, W.A., Di Toro, G., Pennacchioni, G. and Pollard, D.D., 2008, Thin pseudotachylytes in Faults of the Mt. Abbot Quadrangle, Sierra Nevada: physical constraints for small seismic slip events. *Journal of Structural Geology*, 30, 1086-1094.
- Han, R., Hirose, T., Jeong, G.Y., Ando, J. and Mukoyoshi, H., 2014, Frictional melting of clayey gouge during seismic fault slip: experimental observation and implications.

- Geophysical Research Letters, 41, 5457-5466, doi:10.1002/2014GL061246.
- Han, R., Kim, C.-M., Kim, J.-S., Sohn, Y.K., Jeong, J.O., Jeong, G.Y. and Woo, S., 2016, Frictional melting and superfaulting during caldera collapse: An insight from volcanotectonic pseudotachylyte, South Korea. AOGS 2016, abstract SE10-A046.
- Han, R., Shimamoto, T., Ando, J. and Ree, J.-H., 2007a, Seismic slip record in carbonate-bearing fault zones: An insight from high-velocity friction experiments on siderite gouge. *Geology*, 35, 1131-1134, doi: 10.1130/G24106A.1.
- Han, R., Shimamoto, T., Hirose, T., Ree, J.-H. and Ando, J., 2007b, Ultralow friction of carbonate faults caused by thermal decomposition. *Science*, 316, 878-881, doi: 10.1126/science.1139763.
- Hough, S.E. and Hutton, K., 2008, Revisiting the 1872 Owens Valley, California, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 931-949.
- Janssen, C., Wirth, R., Rybaoki, E., Naumann, R., Lemnitz, H., Wenk, H.-R. and Dresen, G., 2010, Amorphous material in SAFOD core samples (San Andreas Fault): Evidence for crush-origin pseudotachylyte. *Geophysical Research Letters*, 37, L01303, doi:10.1029/2009GL040993.
- Kendrick, J.E., Lavallée, Y., Ferk, A., Perugini, D., Leonhardt, R. and Dingwell, D.B., 2012, Extreme frictional processes in the volcanic conduit of Mount St. Helens (USA) during the 2004-2008 eruption. *Journal of Structural Geology*, 38, 61-76.
- Kendrick, J.E., Lavallée, Y., Hirose, T., Di Toro, G., Hornby, A., De Angelis, S. and Dingwell, D.B., 2014, Volcanic drumbeat seismicity caused by stick-slip motion and magmatic frictional melting. *Nature Geoscience*, 7, 438-442.
- Kennedy, G.C., Wasserburg, G.J., Heard, H.C. and Newton, R.C., 1962, The upper three-phase region in the system SiO₂-H₂O. *American Journal of Science*, 260, 501-521.
- Kim, J.-W., Ree, J.-H., Han, R. and Shimamoto, T., 2008, Frictional melt: Fault lubrication or brake? *Eos Transactions, AGU*, 89(53), Fall Meeting Supplement, Abstract T13A-1921.
- Kim, J.-W., Ree, J.-H., Han, R. and Shimamoto, T., 2010, Experimental evidence for the simultaneous formation of pseudotachylyte and mylonite in the brittle regime. *Geology*, 38, 1143-1146, doi:10.1130/G31593.1.
- Kirkpatrick, J.D., Dobson, K.J., Mark, D.F., Shipton, Z.K., Brodsky, E.E. and Stuart, F.M., 2012, The depth of pseudotachylyte formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability. *Journal of Geophysical Research*, 117, B06406, doi: 10.1029/2011JB008846.
- Kirkpatrick, J.D. and Rowe, C.D., 2013, Disappearing ink: How pseudotachylytes are lost from the rock record. *Journal of Structural Geology*, 52, 183-198, doi:10.1016/j.jsg.2013.03.003.
- Kirkpatrick, J.D., Shipton, Z.K. and Persano, C., 2009, Pseudotachylytes: rarely generated, rarely preserved or rarely reported? *Bulletin of Seismological Society of America*, 99, 382-388, doi:10.1785/0120080114.
- Kokelaar, P., 2007, Friction melting, catastrophic dilation and breccia formation along caldera superfaults. *Journal of the Geological Society of London*, 164, 751-54.
- Koizumi, Y., Otsuki, K., Takeuchi, A. and Nagahama, H., 2004, Frictional melting can terminate seismic slips: Experimental results of stick-slips. *Geophysical Research Letters*, 31, L21605, doi:10.1029/2004GL020642.
- Koto, B., 1893, On the cause of the great earthquake in central Japan, 1891. *The Journal of the College of Science, Imperial University, Japan*, 5, 295-353.
- Lavallée, Y., Mitchell, T.M., Heap, M.J., Vasseur, J., Hess, K.-U., Hirose, T. and Dingwell, D.B., 2012, Experimental generation of volcanic pseudotachylytes: constraining rheology. *Journal of Structural Geology*, 38, 222-233.
- Lee, J.-C., Angelier, J., Chu, H.-T., Hu, J.-C., Jeng, F.-S. and Rau, R.-J., 2003, Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998-2001. *Journal of Geophysical Research*, 108, 2528, doi:10.1029/2003JB002394.
- Lin, A., 1994, Microlite morphology and chemistry in pseudotachylite, from the Fuyun fault zone, China. *The Journal of Geology*, 102, 317-329.
- Lin, A., 1996, Injection veins of crushing-originated pseudotachylyte and fault gouge formed during seismic faulting. *Engineering Geology*, 43, 213-224.
- Lin, A., 2008, Fossil earthquakes: The Formation and Preservation of Pseudotachylytes. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 111, Springer, Berlin, 349 p.
- Lin, A., Chen, A., Liao, C.-F., Lee, C.-T., Lin, C.-C., Lin, P.-S., Wen, S.-C. and Ouchi, T., 2001, Frictional fusion due to coseismic landsliding during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) M_L 7.3 Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28, 4011-4014, doi:10.1029/2001GL013253.
- Maddock, R.H., Grocott, J. and van Nes, M., 1987, Vesicles, amygdaloids and similar structures in fault-generated pseudotachylytes. *Lithos*, 20, 419-432.
- Magloughlin, J.F., 2005, Immiscible sulfide droplets in pseudotachylyte: Evidence for high temperature (> 1,200°C) melts. *Tectonophysics*, 402, 81-91.
- Magloughlin, J.F. and Spray, J.G., 1992, Frictional melting processes and products in geological materials: introduction and discussion. *Tectonophysics* 204, 197-206.
- Martini, J.E.J., 1978, Coesite and stishovite in the Vredefort

- Dome, South Africa. *Nature*, 277, 495-96.
- McKenzie, D. and Brune, J.N., 1972, Melting on Fault Planes During Large Earthquakes. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 29, 65-78, doi:10.1111/j.1365-246X.1972.tb06152.x.
- Moecher, D.P. and Brearley, A.J., 2004, Mineralogy and petrology of a mullite-bearing pseudotachylyte: Constraints on the temperature of coseismic frictional fusion. *American Mineralogist*, 89, 1485-1496.
- Mukoyoshi, H., Sakagushi, A., Otsuki, K., Hirono, T. and Soh, W., 2006, Co-seismic frictional melting along an out-of-sequence thrust in the Shimanto accretionary complex. Implications on the tsunamigenic potential of splay fault in modern subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 330-343.
- Nielsen, S., Di Toro, G. and Griffith, W.A., 2010, Friction and roughness of a melting rock surface. *Geophysical Journal International*, 182, 299-310.
- Nielsen, S., Di Toro, G., Hirose, T. and Shimamoto, T., 2008, Frictional melt and seismic slip. *Journal of Geophysical Research*, 113, B01308.
- Obata, M. and Karato, S., 1995, Ultramafic pseudotachylyte from the Balmuccia peridotite, Ivrea Verbano Zone, northern Italy. *Tectonophysics*, 242, 313-328, doi:10.1016/0040-1951(94)00228-2.
- Otsuki, K., Monzawa, N. and Nagase, T., 2003, Fluidization and melting of fault gouge during seismic slip: Identification in the Nojima fault zone and implications for focal earthquake mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, 108, 2192, doi:10.1029/2001JB001711.
- Ozawa, K. and Takizawa, S., 2007, Amorphous material formed by the mechanochemical effect in natural pseudotachylyte of crushing origin: A case study of the Iida-Matsukawa Fault, Nagano Prefecture, Central Japan. *Journal of Structural Geology*, 29, 1855-1869.
- Pec, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Drury, M. and de Capitani, C., 2012, Origin of pseudotachylites in slow creep experiments. *Earth and Planetary Science Letters*, 355, 299-310.
- Philpotts, A.R., 1964, Origin of pseudotachylites. *American Journal of Science*, 262, 1008-1035, doi:10.2475/ajs.262.8.1008.
- Ray, S.K., 1999, Transformation of cataclastically deformed rocks to pseudotachylyte by pervasion of frictional melt: Inferences from clast size analysis. *Tectonophysics*, 301, 283-304.
- Ree, J.-H., Ando, J., Han, R. and Shimamoto, T., 2014, Coseismic microstructures of experimental fault zones in Carrara marble. *Journal of Structural Geology*, 66, 75-83, doi:10.1016/j.jsg.2014.05.012.
- Reimold, W.U. and Colliston, W.P., 1994, Pseudotachylites of the Vredefort Dome and the surrounding Witwatersrand Basin, South Africa. In: Dressler, B.O. and Grieve, R.A.F. (eds.), *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution*. Geological Society of America Special Papers, 293, 177-196.
- Rowe, C.D. and Griffith, W.A., 2015, Do faults preserve a record of seismic slip: A second opinion. *Journal of Structural Geology*, 78, 1-26.
- Rowe, C.D., Moore, J.C., Meneghini, F. and McKeirnan, A.W., 2005, Large-scale pseudotachylytes and fluidized cataclasites from an ancient subduction thrust fault. *Geology*, 33, 937-940.
- Scholz, C.H., 1998, Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391, 37-42, doi:10.1038/34097.
- Scholz, C.H., 2002, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd edition). Cambridge University Press, New York, 504 p.
- Shand, S.J., 1916, The pseudotachylyte of Parijs (Orange Free State) and its relation to 'trap-shotten gneiss' and 'flinty crush-rock'. *The Quarterly journal of the Geological Society of London*, 72, 198-221.
- Sibson, R.H., 1973, Interactions between temperature and pore fluid pressure during earthquake faulting—a mechanism for partial or total stress relief. *Nature*, 243, 66-68.
- Sibson, R.H., 1975, Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 43, 775-794.
- Sibson, R.H., 2006, Charles Lyell and the 1855 Wairarapa earthquake in New Zealand: Recognition of fault rupture accompanying an earthquake. *Seismological Research Letters*, 77, 358-363.
- Sibson, R.H. and Toy, V., 2006, The habitat of fault-generated pseudotachylyte: presence vs. absence of friction-melt. In: Abercrombie, R., McGarr, A., Kanamori, H. and G. Di Toro (eds), *Radiated Energy and the Physics of Faulting*. Geophysical Monograph Series, 170, American Geophysical Union, Washington, D.C., 153-166.
- Smith, S.A.F., Di Toro, G., Kim, S., Ree, J.-H., Nielsen, S., Billi, A. and Spiess, R., 2013, Coseismic recrystallization during shallow earthquake slip. *Geology*, 41, 63-66, doi:10.1130/G33588.1.
- Spray, J.G., 1992, A physical basis for the frictional melting of some rock-forming minerals. *Tectonophysics*, 204, 205-21.
- Spray, J.G., 1995, Pseudotachylyte controversy: Fact or friction? *Geology*, 23, 1119-1122.
- Spray, J.G., 2010, Frictional melting processes in planetary materials: From hypervelocity impact to earthquakes. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 38, 221-254.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T., 1997, High-velocity fric-

- tional properties of gabbro. *Geophysical Research Letters*, 24, 699-702.
- Tullis, T.E., 2007, Friction of rock at earthquake slip rates. *Treatise on geophysics*, 4, 131-152.
- Ujiiie, K., Tsutsumi, A., Fialko, Y. and Yamaguchi, H., 2009, Experimental investigation of frictional melting of argillite at high slip rates: Implications for seismic slip in subduction-accretion complexes. *Journal of Geophysical Research*, 114, B04308, doi:10.1029/2008JB006165.
- Ujiiie, K., Yamaguchi, H., Sakaguchi, A. and Shoichi, T., 2007, Pseudotachylites in an ancient accretionary complex and implications for melt lubrication during subduction zone earthquakes. *Journal of Structural Geology*, 29, 599-613.
- Violay, M., Di Toro, G., Nielsen, S., Spagnuolo, E. and Burg, J.P., 2015, Thermo-mechanical pressurization of experimental faults in cohesive rocks during seismic slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 429, 1-10.
- Wenk, H.R., 1978, Are pseudotachylites products of fracture or fusion? *Geology*, 6, 507-511.
- Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen, C.R., 1997, *The Geology of Earthquakes*. Oxford University Press, New York, 568 p.
-
- Received : October 11, 2016
Revised : November 4, 2016
Accepted : February 1, 2017