

활석 분쇄에 따른 함수율 및 열적거동 변화: 단층의 반복되는 미끄럼이 단층 약화에 미치는 영향

Variation of Water Content and Thermal Behavior of Talc Upon Grinding: Effect of Repeated Slip on Fault Weakening

김민식(Min Sik Kim)¹ · 김진우(Jin Woo Kim)¹ · 강창두(Chang Du Kang)¹ · 소병달(Byung Dal So)² · 김현나(Hyun Na Kim)^{1*}

¹공주대학교 지질환경과학과

(Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea)

²강원대학교 지구물리학과

(Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

요약: 단층 비지는 단층의 미끄럼에 의해 입도와 결정도가 낮아지는 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 활석을 비롯한 층상 규산염 광물은 단층 비지에 존재하며 단층 약화에서 중요한 역할을 할 수 있는데, 특히 광물 표면에 흡착된 물분자의 존재 여부에 따라 마찰계수가 달라진다. 본 연구에서는 고에너지 볼 밀을 이용해 입도와 결정도를 체계적으로 변화시킨, 분쇄 전후 활석의 함수율과 탈수반응 거동의 변화를 통해 활석이 단층 약화에 미치는 영향에 대해 알아보려고 하였다. 적외선 분광분석 및 열분석 결과, 분쇄 전 활석은 소수성을 띠며 물분자가 거의 존재하지 않는다. 이후 최대 720분까지 진행된 분쇄를 통해 입도가 약 100~300 nm 내외까지 감소하고 비정질화가 진행된 활석에서는 물분자에 의한 함수량이 분쇄 전에 비하여 약 8 wt.% 증가하였다. 또한 분쇄된 시료를 가열할 경우, 분쇄 전에 비하여 기화되는 수증기의 양이 증가한다. 입도 및 결정도 감소에 따라 탈수반응 온도도 분쇄 전 약 900 °C에서 720분 분쇄 후 약 800 °C로 감소하였다. 이와 같이 분쇄된 활석의 입도 및 결정도 감소에 의해 소수성이 친수성으로 바뀌며 층상 규산염 광물의 마찰계수를 낮출 것으로 생각된다. 지진 사이클을 통해 반복되는 단층의 미끄럼은 지속적으로 단층 비지에 존재하는 활석의 마찰 계수를 낮출 것으로 생각되며, 오래된 단층이 점점 약화되는 원인에 대한 실마리를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 활석, 단층 비지, 단층 약화, 열분석, 함수량

ABSTRACT: The particle size and crystallinity of fault gouge generally decreases with slip. Phyllosilicates including talc are known to be present in fault gouge and play an important role in fault weakening. In particular, the coefficient of friction varies depending on the presence of a water molecule on the surface of mineral. The purpose of this study is to investigate the effect of talc on fault weakening by changing the water content and dehydration behavior of talc before and after grinding, which systematically varied particle size and crystallinity using high energy ball mill. Infrared spectroscopy and thermal analysis show that the as-received talc is hydrophobic before grinding and the water molecule is rarely present. After grinding up to 720 minutes, the particle size decreased to around 100~300 nm, and in talc, where amorphization proceeded, the water content increased by about 8 wt.%

*Corresponding author: +82-41-850-8513, E-mail: hnkim@kongju.ac.kr

and water molecule would be attached on the surface of talc. As a result, the amount of vaporized water by heating increased after grinding. The dihydroxylation temperature also decreased by ~ 750 °C after 720 minutes of grinding at ~ 950 °C before grinding due to the decrease of particle size and crystallinity. These results indicate that the hydrophobicity of talc is changed to hydrophilic by grinding, and water molecules attached on the surface, which is thought to lower the coefficient of friction of phyllosilicates. The repeated slip throughout the seismic cycle would consistently lower the coefficient of friction of talc present in fault gouge, which could provide the clue to the weakening of matured fault.

Key words : Talc, fault gouge, fault weakening, thermal analysis, water content

서 론

활석(Talc, $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)은 마그네슘 층상 규산염 광물로서, 경도가 낮은 대표적인 광물이다. 활석의 결정은 T-O-T (T는 사면체 층, O는 팔면체 층) 구조를 하고 있는데, Si 사면체 층이 Al로 거의 치환되지 않아 소수성을 띠는 특징이 있다(Brigatti *et al.*, 2006; Rotenberg *et al.*, 2011). 활석은 높은 안정성과 낮은 경도를 특징으로 다양한 산업분야에서 활용되고 있어, 산업광물의 측면에서 주목 받아왔다(Zazenski *et al.*, 1995). 또한 크고 작은 규모의 단층의 비지(fault gouge)에서 활석이 관찰됨에 따라 단층의 약화 과정에서 활석의 역할에 대한 관심이 증대하고 있다.

활석은 사문석(serpentine)이나 백운석(dolomite)과 같이 마그네슘이 많은 광물이 이산화탄소 또는 규산을 함유하고 있는 열수와 반응하여 형성된다. 따라서 초고철질(ultramafic) 암석이 많은 판 경계에서 활석이 종종 발견되며, 섭입대의 스러스트 단층(thrust fault)이나 해양의 단열대(fracture zone)에서도 활석이 관찰된다. 예를 들어, 미국 서부의 산 안드레아스 단층(San Andreas Fault) 중앙부에서 사문석의 열수 교대반응에 의해 형성된 활석이 관찰되었으며, 단층 포행(creep)의 원인으로 지목된 바 있다(Moore and Rymer, 2007). 또한 캘리포니아 트리티니 알프스 지역의 삭박된 섭입대 스러스트 단층에서 안티고라이트(antigorite)와 사문석의 약 30 modal%, 부분적으로 약 75 modal%가 활석으로 교대되었으며, 캘리포니아 프란치스코 멜란지(Franciscan mélange)의 맨틀 웨지에서 열수 교대작용을 통해 활석이 형성되었다(Peacock, 1987). 백운석의 규산 교대작용(silica metasomatism)에 의해 형성된 활석은 이탈리아의 저각 정단층(low-angle normal fault)에서 주로 관찰된다(Collettini *et al.*, 2009; Viti and Collettini, 2009).

단층면에서 관찰되는 활석은 단층의 마찰이 감소하는 단층 약화의 원인 중 하나로 지목되고 있다. 지진성 미끌림은 얇은 전단대를 따라 일어나며 결정도가 낮은 세립질의 파쇄암, 즉 단층 비지를 형성한다(Viti, 2011). 단층 비지에는 단층암과 유체의 상호작용에 의해 형성된 점토, 즉 층상 규산염 광물이 다량 존재한다(Wu *et al.*, 1975). 층상 규산염 광물의 함수량, 결정구조의 변화, 층간 결합 에너지, 실질적인 수직 응력 및 소수성 등 다양한 원인이 마찰계수에 영향을 주지만, 그 중에서도 입자 표면을 덮고 있는 수막(water film)의 존재 여부에 따라 층상규산염 광물의 마찰계수는 크게 달라지며, 이를 물에 의한 윤활작용(water lubrication)이라 한다(Chen *et al.*, 2017; Morrow *et al.*, 2000). 거의 모든 층상 규산염 광물에서 함수량이 증가할수록 마찰계수가 감소하였다(Moore and Lockner, 2004). 물을 포함하지 않은 건조시킨 활석의 경우 마찰계수 μ 는 0.24~0.36이지만, 물로 포화시킨 활석의 경우 μ 는 0.02 이하로 감소한다(Moore and Lockner, 2004; Moore and Lockner, 2008; Moore and Lockner, 2011).

단층 비지는 지진성 미끌림 과정에서 좁은 접촉면의 마찰에 의한 순간적인 가열(flash heating)을 가져와 단층을 약화시킬 수 있다. 초미세 입도의 단층 비지는 단층면에서 산업용 윤활 파우더와 비슷하게 작용하며 분말 윤활작용(powder lubrication)을 가져온다. 또한 단층면의 마찰에 의해 순간적으로 단층면의 온도가 수백도 이상 증가하면, 층상 규산염 광물에 존재하는 물과 수산기는 탈수/탈수 산기 반응을 통해 기화된다. 기화된 수증기는 광물 입자 사이의 공극압을 증가시켜 단층면에 작용하는 실질적인 수직 응력의 세기를 감소시키며 단층 약화를 가져올 수 있다(Hirose and Bystricky, 2007; Rice, 2006). 이러한 단층 약화 매커니즘을 열에 의한 가압(thermal pressurization)이라 한다. 단층 미

끌림에 의한 순간적인 가열을 통해 용융이 발생하며 마찰계수 자체가 감소하기도 한다. 이외에도 실리카겔(silica gel)의 형성, 탄산염 광물의 탈탄산화 등 다양한 단층 약화 매커니즘이 알려져 있지만, 층상 규산염 광물에 의한 단층 약화는 물과 수산기의 양, 그리고 순간적인 가열에 의한 탈수 반응이 중요한 역할을 한다(Han *et al.*, 2007; Hirose and Bystricky, 2007; Lee *et al.*, 2017).

활석은 층상 규산염 광물 중 상부지각의 온도에서 열역학적으로 안정할 뿐만 아니라, 경도가 낮아 소량만 존재하여도 전단이 집중되며 단층의 역학적 특성에 많은 영향을 준다(Giorgetti *et al.*, 2015; Hirauchi *et al.*, 2013; Moore and Lockner, 2008). 따라서 온도와 압력, 함수량 등이 다양한 환경에서 활석의 마찰계수 변화 및 단층 약화에 미치는 영향에 대한 연구가 계속되고 있다(Boutareaud *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2017; Moore and Lockner, 2004; Moore and Lockner, 2008; Moore and Lockner, 2011). 몬토릴로나이트, 흑운모, 백운모와 같은 대부분의 층상 규산염 광물들의 경우, 수직 응력이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 경향이 있지만, 활석의 경우 큰 변화를 보이지 않는다(Moore and Lockner, 2008). 그 원인으로 활석은 친수성 성질을 보이는 다른 층상 규산염 광물과 달리 소수성을 가지기 때문에 입자 표면에 수막이 존재하지 않기 때문으로 생각되고 있다. 또한 활석은 함수율에 따라 서로 다른 단층 약화 매커니즘을 가지는 것으로 알려져 있다. 건조한 환경에서는 활석의 박막(lamellae)에 의한 고체 윤활작용(solid lubrication), 나노 입자 응집체에 의한 분말 윤활작용 등의 조합에 의하여 장기적인 단층 약화가 나타나는 반면, 습한 환경에서는 온도 상승에 따른 수막의 팽창이 단층 약화를 가져올 수 있다(Boutareaud *et al.*, 2012).

이와 같이 단층 약화에서 단층 비지의 중요한 역할에도 불구하고, 단층 비지의 결정도와 입도 변화가 단층 약화에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 많이 진행되지 않았다. 특히, 지진 사이클이 반복되고, 단층이 오래되어 갈수록 단층 비지는 반복적인 마찰을 통해 입도와 결정도의 지속적인 변화가 일어날 수 있다. 따라서 결정도와 입도의 지속적인 변화에 따른 단층 비지 광물의 특성 변화가 단층의 강도에 미칠 수 있는 영향에 대한 고찰이 필요하다.

지금까지 연구된 활석의 마찰계수 및 단층 약화에 미치는 영향은 활석이 단층 미끌림에 의해 변형

을 받기 전, 즉 높은 결정도와 소수성을 가진 활석의 특성에 대한 연구가 대부분이다. 단층 비지에서 나타나는 광물의 특징인 결정도 및 입도 감소에 따라서도 활석의 성질이 그대로 유지될 수 있는지에 대한 연구는 많지 않은 실정이다. 본 연구 그룹은 고에너지 불 밀을 통해 분쇄한 활석이 단층 비지에서 관찰되는 광물들의 특징과 같이 입도 및 결정도 감소가 나타남을 보인 바 있다(Kim *et al.*, 2018). 고에너지 불 밀을 이용하여 분쇄한 활석의 X-선 회절 분석 및 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)의 제한시야 전자회절(selected area electron diffraction, SAED) 패턴 결과는 분쇄시간의 증가에 따른 활석의 결정도 감소 및 비정질화가 일어남을 보여준다(Kim *et al.*, 2018). 또한 BET 비표면적 및 레이저회절 입도분석의 결과는 고에너지 불 밀 분쇄를 통해 약 100~300 nm 내외 초미세 활석이 형성됨을 보여준다(Kim *et al.*, 2018). 이와 같이 기계적인 분쇄를 통해 입도와 결정도가 감소하는 현상은 단층 비지에서 공통적으로 관찰되는 광물학적 특징이다(Viti, 2011). 따라서 고에너지 불 밀을 이용해 분쇄한 활석을 이용하면, 단층 비지에서 광물의 마찰에 의한 변형을 실험적으로 유사하게 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 고에너지 불 밀을 이용해 활석을 분쇄하여 단층 비지 형성을 모사하고, 반복되는 단층의 미끌림에 따른 활석의 특성 변화에 대해 알아보고자 한다. 특히, Kim *et al.* (2018)에서 보고된 활석의 분쇄에 따른 입도 및 결정도 변화가 활석의 함수율 및 온도 증가에 따른 탈수 반응에 가져오는 변화를 열분석을 통해 알아보고, 이와 같은 변화가 단층의 강도에 미칠 수 있는 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

시료 준비 및 실험 방법

시료 준비

본 연구에서는 중국 선양에서 채취된 산업용 활석 분말(STA-400)을 사용하였고, 시료에서는 활석 이외에 소량의 녹니석과 석영이 함께 나타난다. 분쇄 전 활석분말의 평균 입도는 약 12 μm 이다. 시료의 분쇄는 고에너지 불 밀(Restch, E_{max})을 이용하여 10분에서 720분까지 분쇄시간을 증가시켜가며 2,000 rpm의 빠른 회전 속도에서 습식으로 진행하였다. 보다 자세한 분쇄 조건은 Kim *et al.* (2018)에 기

재되어 있다. 분쇄 중 빠른 회전 및 마찰에 의해 발생할 수 있는 열은 고에너지 볼 밑에 탑재되어 있는 냉각시스템을 이용하여 약 50 °C 내외로 유지시켜 열에 의해 발생할 수 있는 시료의 열손상을 방지하였다. 분쇄한 습식 시료는 60 °C에서 10시간 동안 건조시킨 후, 열분석까지 습도 20~30 %의 데시케이터에 보관하였다. 분쇄한 시료의 일부는 X-선 회절 분석 실험을 위하여, 수직형 전기로에서 850 °C에서 30분, 850 °C와 1,000 °C에서 120분 동안 각각 가열하였다.

분석 방법

분쇄 전·후 활석의 입도 및 형태를 관찰하기 위해 전계방사형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM; TESCAN MIRA3) 분석을 진행하여 활석 입자의 사진을 획득하였다. 시료는 백금(Pt) 코팅 후, 가속전압 10 kV, 작동거리 약 10 mm 내외에서 실험을 진행하였다. 분쇄시간에 따른 활석의 구조변화를 알아보기 위해 적외선 분광 분석(fourier-transform infrared, FT-IR; PerkinElmer Frontier)을 진행하였고, 측정 범위는 400~4,000 cm^{-1} , KBr과 활석 분말을 혼합하여 펠렛(pellet) 제작 후 분석을 진행하였다. 분쇄에 따른 활석을 열적 거동 변화를 알아보기 위해 열중량 분석(thermogravimetry, TG; TA Instruments SDT Q600) 및 시차열분석(differential thermal analysis, DTA; TA Instruments SDT Q600)을 진행하였다. 열분석은 질소 가스를 100 mL/min으로 흘려주며, 승온 속도를 10 K/min으로 설정 후 1,000 °C까지 분석을 진행하였다. 분쇄 후 가열한 활석 시료의 상전이를 확인하기 위하여 X-선 회절 분석을 실시하였다. X-선 회절 분석기(X-ray diffractometer, XRD; Rigaku Smartlab)의 전압 40 kV, 전류 30 mA 조건에서 방출된 $\text{Cu K}\alpha$ X-선을 사용하였으며, 2theta 스캔 범위는 3~90 °로, 스캔 간격은 0.02 °로 설정하였다. 스캔 속도는 분당 20 °이며, 고속검출기(D/teX Ultra)를 사용하여 측정하였다.

결과 및 토의

분쇄에 따른 활석의 입도 및 결정도 변화

Fig. 1은 주사전자현미경 사진으로, 분쇄 시간에 따른 활석의 입도 및 형태의 변화를 보여준다. 분

쇄 전 시료에서는 층상구조가 잘 보존되고, 날카로운 모서리를 가진 약 10~20 μm 내외의 활석 입자들이 관찰되나, 분쇄시간이 증가할수록 입도가 지속적으로 감소하고 층상구조도 점점 붕괴되는 것을 볼 수 있다. 30분 분쇄 후에 수 μm 크기의 입자가 관찰되기 시작하며 분쇄 4시간과 12시간 후에는 각각 약 500, 200 nm 크기의 입자들이 응집된 상태로 존재한다. 이러한 이유는 앞선 연구에서 보고된 바와 같이 비표면적이 증가함에 따라 함께 증가하는 표면 에너지를 감소시키고, 입자 간 안정도를 높이기 위한 결과로 생각된다(Kim *et al.*, 2018).

적외선 분광 분석 결과

Fig. 2는 활석의 적외선 분광 분석 스펙트럼으로 분쇄에 따른 결정 구조의 변화 및 흡수량의 변화를 보여준다. 분쇄 전 활석의 IR 스펙트럼에서는 1,015 cm^{-1} 에서 Si-O 신축(stretching) 진동 모드, 669 cm^{-1} 에서 Mg-OH의 굽힘(bending) 진동 모드, 534 cm^{-1} 에서 Si-O-Mg 진동 모드, 450 cm^{-1} 에서 Si-O 굽힘 진동 모드가 관찰되었다. 또한 3,676 cm^{-1} 에서 수산기(OH)에 의한 신축 진동 모드에 의한 흡수 밴드가 좁은 폭으로 관찰되었는데, 이는 팔면체 층에 연결된 Mg-OH로 생각된다(Liao and Senna, 1992; Pérez-Maqueda *et al.*, 2005). 층상 규산염 광물에서 일반적으로 관찰되는 물분자에 의한 흡수 밴드는 뚜렷하게 관찰되지 않았는데, 이는 소수성을 띠는 활석의 층간에 물분자가 거의 없기 때문으로 생각된다. 반면, 분쇄된 활석의 적외선 분광 분석 스펙트럼에서는 분쇄 시간이 증가할수록 기존의 흡수 밴드 외에 3,200~3,800 cm^{-1} 영역에 걸쳐 넓은 폭을 가지는 물분자의 진동에 의한 흡수 밴드가 추가로 관찰된다. 물분자의 흡수 밴드는 분쇄 30분 후부터 뚜렷하게 관찰되기 시작하며, 분쇄 시간이 증가함에 따라 그 세기가 점차 증가한다. 또한 분쇄 시간이 증가함에 따라 Si-O, Mg-OH, OH의 진동 모드에 의한 흡수 밴드는 그 폭이 점진적으로 증가한다.

분쇄가 진행됨에 따라 Si-O 및 Si-O-Mg와 같이 활석 격자의 진동에 의한 흡수 밴드의 폭이 증가하는 것은 비정질화가 진행된 결과로 생각되며, 이전 연구에서 보고한 X-선 회절 분석 결과와 일치한다(Kim *et al.*, 2018). 분쇄 시간 증가에 따른 물분자의 흡수 밴드 증가는 활석 고유의 소수성이 점차 약해지고, 층간 혹은 입자의 표면에 물분자가 흡착

활석 분쇄에 따른 함수율 및 열적거동 변화: 단층의 반복되는 미끌림이 단층 약화에 미치는 영향

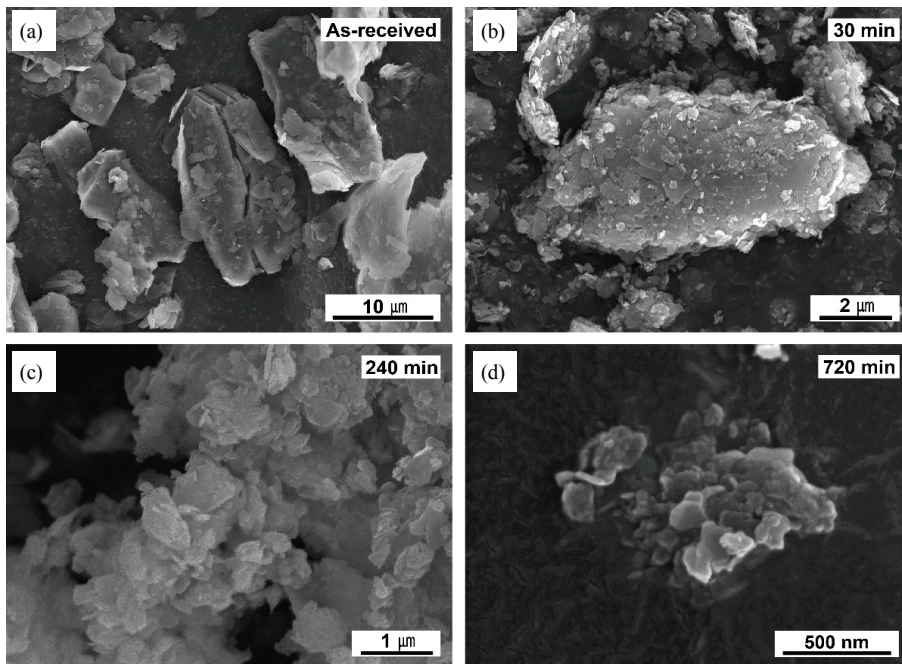


Fig. 1. Scanning electron microscope images of talc (a) before and after grinding for (b) 30 min, (c) 240 min, and (d) 720 min.

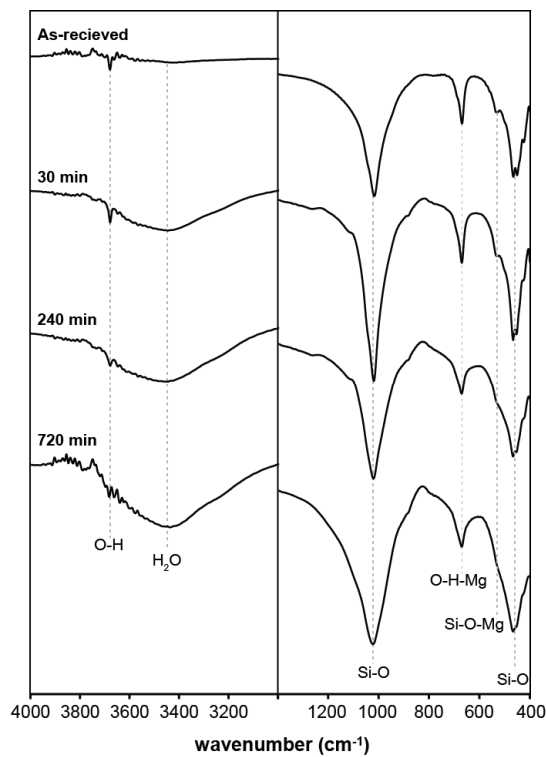


Fig. 2. FT-IR spectra of talc with increasing grinding times up to 720 minutes.

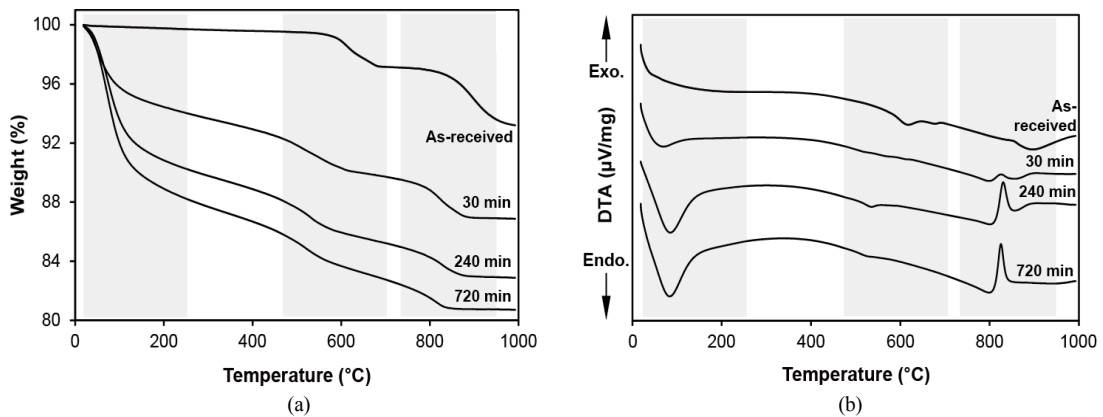


Fig. 3. (a) TG and (b) DTA curve of talc with varying grinding times up to 720 minutes.

할 수 있게 되었음을 지시한다. 활석의 소수성은 T-O-T 층상구조에서 사면체 층의 양이온이 모두 Si²⁺로 구성되고, Al³⁺으로의 치환이 거의 일어나지 않은 결과이다. 하지만 기계적 분쇄에 의해 층상구조가 깨지고, 팔면체 층에 존재하는 수산기가 노출됨에 따라 소수성이 감소한 것으로 생각된다. 또는 층상구조가 붕괴되지 않더라도, 분쇄를 통해 활석 T-O-T 층상구조의 측면(broken edge)이 노출되어 팔면체의 수산기가 더 많이 드러나며 친수성이 증가했을 수 있다. 일반적으로 입자의 크기가 큰 경우, 층상형 광물에서 T-O-T 측면의 성질은 무시될 수 있으나, 초미세 입자에서는 측면의 성질 역시 활석 전체의 표면 성질에 영향을 줄 수 있을 것이다. 이와 같이 기계적 분쇄에 의해 발생한 활석 결정구조의 붕괴, 또는 T-O-T 구조 측면의 노출은 소수성을 띠는 활석의 표면성질을 친수성으로 변화시킬 수 있다. 또한 분쇄가 진행되며 비표면적이 증가함에 따라 흡착할 수 있는 물분자의 양 역시 함께 증가하였을 것으로 생각된다.

열중량 및 시차열 분석 결과

Fig. 3는 분쇄시간에 따른 활석의 열중량 및 시차열 분석 결과로서, 분쇄 전·후 시료의 열적 거동의 변화를 보여준다. 분쇄 전 시료의 경우, 2단계의 중량 감소와 흡열 반응이 관찰된다. 약 600 °C 내외에서 약 4 wt.% 정도의 첫 번째 중량 감소와 흡열 반응이 나타난다. 이는 기저면에 정전기적으로 흡착된 물분자의 증발에 또는 시료의 불순물로 존재하는 녹니석의 탈수산기(dehydroxylation) 반응에 기인할 수 있다(Ersoy *et al.*, 2013; Shirozu *et*

al., 1975; Wesolowski, 1984). 본 연구에서는 분쇄 전 활석의 적외선 분광 분석에서 물분자의 진동 피크가 관찰되지 않는 것으로 보아, 첫 번째 중량 감소 및 흡열 반응은 녹니석의 탈수산기 반응에 의한 것으로 해석된다. 약 845 °C 내외에서 관찰되는 두 번째 중량 감소와 흡열 반응은 마그네슘 팔면체에 결합되어 있던 수산기의 탈수산기 반응에서 기인한다(Wesolowski, 1984). 탈수산기 반응이 끝난 1,000 °C에서의 중량 감소는 가열 전 시료를 기준으로 7 wt.% 정도 일어났다. 분쇄 전 시료의 가열에 따른 중량 감소는 600 °C와 845 °C 내외에서만 계단 형태로 일어나며, 그 외의 온도에서는 중량 감소가 거의 일어나지 않았다.

분쇄된 활석 시료의 경우, 3단계의 중량 감소와 흡열 또는 발열 반응이 관찰된다. 분쇄 전에 비하여 가장 뚜렷한 차이는 약 100 °C 내외에서 관찰되는 중량 감소 및 흡열 반응과 827 °C에서 관찰되는 발열 반응이다. 분쇄된 모든 시료의 열분석 결과, 약 100 °C 내외에서 급격한 중량 감소 및 흡열 반응이 관찰되었으며, 중량 감소량이나 흡열량은 분쇄가 진행될수록 증가하였다. 이는 활석입자 표면에 흡착되어 있는 물분자의 증발에 의한 것으로, 분쇄 시간이 증가할수록 물분자의 양이 증가하는 적외선 분광 분석 결과와 일치하는 경향을 보여준다. 또한 계단식으로 중량 감소가 일어나는 분쇄 전 활석과는 달리, 분쇄 후에는 약 100 °C에서 900 °C에 걸쳐 점진적인 중량 감소가 일어난다. 분쇄 전에 중량 감소가 뚜렷하게 일어난던 약 600 °C와 810 °C 내외에서는 중량 감소 속도가 더 빠르게 일어나긴 하지만, 그 외의 온도에서도 중량 감소는 지속적으로 일어난다. 이와 같이 넓은 온도 영역에 걸친 중

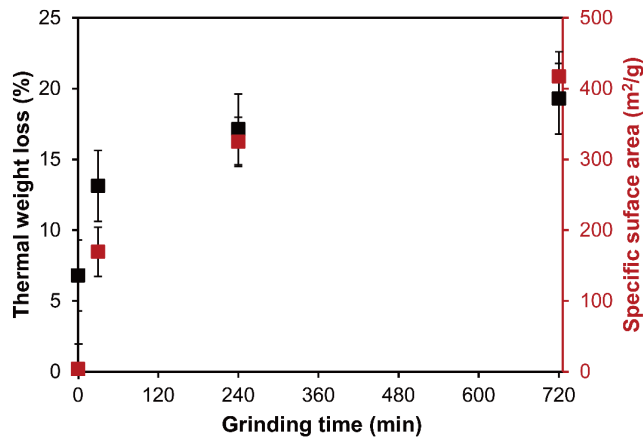


Fig. 4. Comparison of thermal weight loss (black) and specific surface area (red) of ground talc with increasing grinding times. The data for specific surface area is used from Kim *et al.* (2018).

량 감소는 활석의 비정질화에 의한 것으로 생각된다. 활석의 결정도가 낮아지면서 활석과 물분자(또는 수산기) 사이의 다양한 원자 단위의 배열(configuration)이 가능해지고, 각각 서로 다른 결합 에너지를 가지게 된 결과, 넓은 온도 범위에서 탈수 반응이 일어난 것으로 생각된다. 분쇄된 활석의 DTA 결과를 살펴보면, 약 810 °C 내외에서 탈수산기 반응에 의한 중량 감소와 흡열 반응이 일어난 직후 약 827 °C에서 좁은 폭의 발열 피크가 관찰된다. 분쇄되지 않은 활석의 상전이에겐 뚜렷한 발열 반응이 관찰되지 않지만, 분쇄된 활석에서만 발열 피크가 뚜렷하게 관찰되며 분쇄 시간이 길수록 피크의 세기가 점차 증가한다. 이는 분쇄를 통해 비정질화 된 활석의 결정화가 상전이 과정에서 함께 일어난 결과로 생각된다(Bošković *et al.*, 1968).

Fig. 4는 분쇄 시간 증가에 따른 활석의 열중량 감소와 비표면적의 변화를 비교하여 보여준다. 활석의 열중량 감소는 물과 수산기의 탈수 반응에 의해 일어나므로, 열중량 감소의 변화를 통해 활석의 분쇄 정도에 따른 함수율의 변화를 알 수 있다. 분쇄 초기에 열중량 감소량이 급격하게 증가하며, 증가 정도는 점점 둔화된다. 열중량 감소를 시료의 함수율로 해석하면, 분쇄하기 전 시료의 수산기를 포함한 함수율은 약 7 wt.%에서, 분쇄 30분 만에 약 13 wt.%로 2배가량 증가하였다. 분쇄 720분 후에는 함수율이 약 21 wt.%에 도달한다. 시료의 분쇄에 따른 열중량 감소의 변화를 비표면적의 변화와 비교해 보면 거의 유사한 경향을 보여준다. 즉, 비표면적의 증가에 따라 활석의 함수율이 증가함을 알

수 있으며, 활석의 표면에 물분자가 흡착되어 있음을 지시한다.

일반적으로 규산염 광물에 존재할 수 있는 다양한 물과 수산기의 종류 중, 광물의 표면에 존재하는 흡착수의 경우 약 110 °C 내외에서 증발하므로, 탈수 반응이 일어나는 온도를 통해 광물의 결정 구조 안에 들어있는 결정수나 수산기와 구분할 수 있다(Wesołowski, 1984). 따라서 본 연구에서는 약 200 °C의 온도를 기준으로 하여 수산기의 양과 흡착수의 양을 구분하고자 하였다. Fig. 5는 분쇄 시간 증가에 따라 200 °C 이하와 이상에서 발생한 열중량 감소의 변화를 보여준다. 200 °C 이하에서 발생하는 열중량 감소량은 분쇄를 진행함에 따라 증가하는 반면, 200 °C 이상에서 발생하는 열중량 감소량은 뚜렷한 변화가 나타나지 않는다. 이와 같은 결과는 활석의 분쇄에 따른 함수율의 증가는 대부분 200 °C 이하에서 증발되는 흡착수의 증가에 기인함을 지시한다.

열중량 감소 이외에, 탈수산기 반응 온도 또한 분쇄가 진행됨에 따라 감소한다. 분쇄 전, 약 618 °C에서 관찰되던 녹니석의 탈수산기 반응은 30분 분쇄 후에는 약 540 °C에서 일어나며, 분쇄 360분 후에는 약 520 °C까지 감소하였다. 활석의 탈수산기 반응 온도는 분쇄 전 약 895 °C에서 분쇄 30분 후에 약 825 °C로 감소하였다. 탈수산기 반응 온도와 활석 결정도의 상관관계를 알아보기 위하여 분쇄에 의한 탈수산기 반응 온도를 X-선 회절 패턴의 (001) 피크 세기에 따라 도시하였다(Fig. 6). 분쇄가 진행됨에 따른 (001) 피크 세기의 변화는 Kim *et*

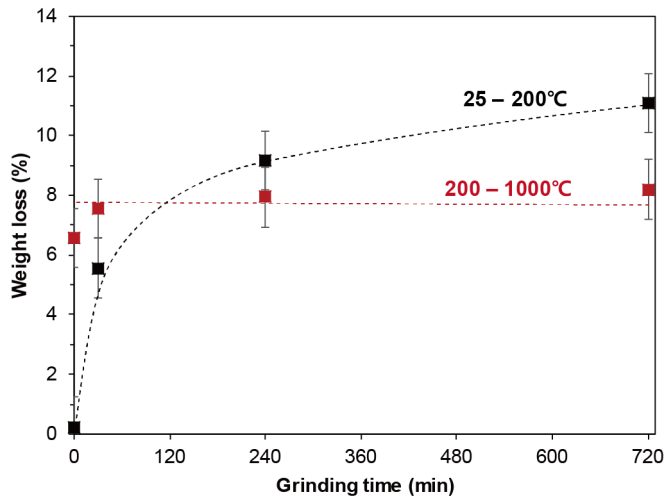


Fig. 5. Thermal weight loss of ground talc in the temperature range from room temperature to 200 °C (black) and from 200 °C to 1,000 °C (red).

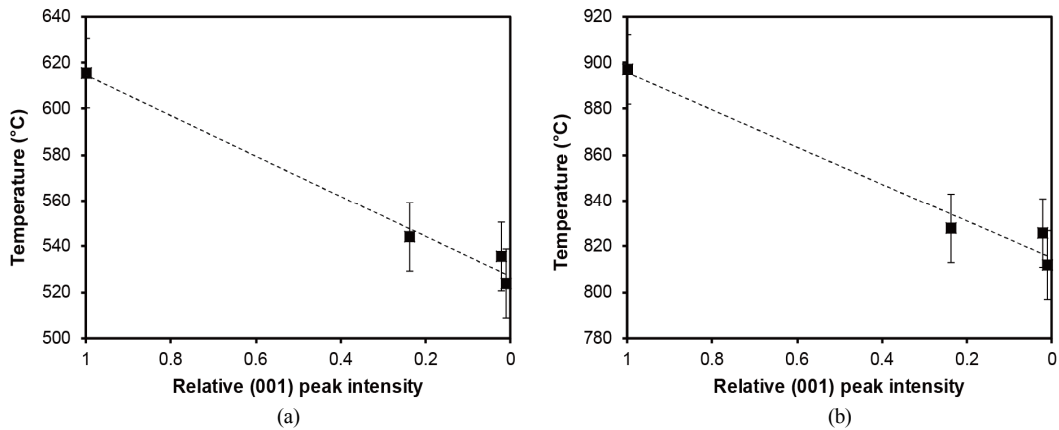


Fig. 6. Variation of dehydroxylation temperature of (a) chlorite and (b) talc with increasing grinding times up to 720 minutes.

al. (2018)에 제시된 데이터를 사용하였다. 분쇄 전 활석의 (001) 피크 세기를 1이라 하고, 완전한 비정질 상이 되어 회절 패턴이 관찰되지 않는 경우를 0으로 하여, 분쇄된 활석의 상대적인 결정도를 나타내고자 하였다. 그 결과, 탈수산기 반응 온도 감소는 (001) 피크 세기의 감소와 거의 선형에 가까운 상관관계를 보여준다. 이와 같은 결과는 분쇄 시간에 비례하여 발생하는 결정구조의 붕괴에 의해 마그네슘 팔면체와 수산기 간의 결합이 끊어지거나, 느슨해져 보다 낮은 온도에서 탈수산기 반응이 발생하였기 때문으로 생각된다. 다만, 활석은 뚜렷한 판상의 입자형태를 가지고 있어 X-선 회절 분석에

서 (001) 피크 세기가 다른 회절 피크보다 강하게 나타날 수 있어, 분쇄에 따른 비정질화의 정도가 실제보다 과장되어 나타날 수 있음을 밝혀두는 바이다.

분쇄된 활석의 가열 및 X-선 회절 분석 결과

분쇄된 활석의 가열을 통해 형성되는 광물의 상을 확인하기 위해, 활석 시료를 850 °C에서 30분, 120분 1,000 °C에서 120분 동안 각각 가열 후 X-선 회절 분석을 실시하였다(Fig. 7). 활석은 일반적으로 800~950 °C의 고온에서 가열할 경우 팔면체

활석 분쇄에 따른 함수물 및 열적거동 변화: 단층의 반복되는 미끌림이 단층 약화에 미치는 영향

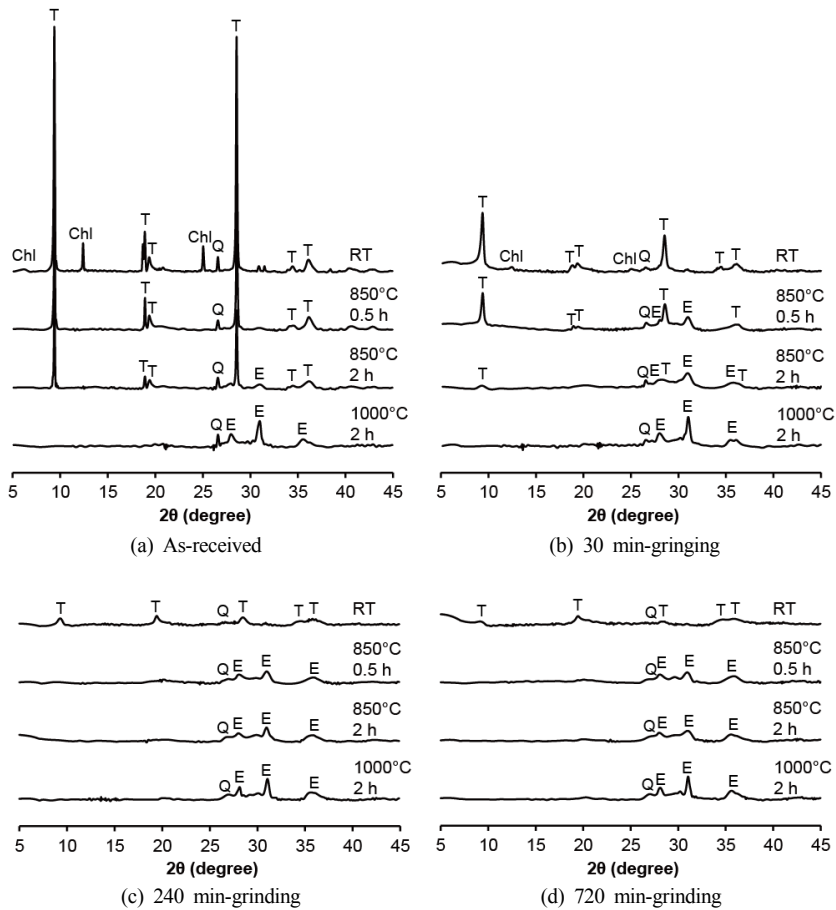


Fig. 7. XRD patterns for heated talc powder (a) before and after grinding for (b) 30 min, (c) 240 min, and (d) 720 min. The sample is heated for 0.5 h at 850 °C, 2 h at 850 °C, and 2 h at 1,000 °C. Chl: chlorite, T: talc, Q: quartz, E: enstatite.

에 연결된 수산기의 탈수 반응과 함께 완화회석 및 석영으로 상전이가 일어나는 것으로 알려져 있다 (Wesołowski, 1984). 분쇄 전 활석의 경우, 850 °C에서 30분 가열했을 때 활석의 회절 피크는 거의 변화가 없으나, 2시간 가열 후에는 활석 피크 세기가 감소하고 완화회석의 회절 피크가 관찰되기 시작한다. 1,000 °C에서 2시간 가열 후에는 완화회석과 석영의 회절 패턴만 관찰되고, 활석의 회절 패턴은 전혀 나타나지 않는다. 녹니석 피크는 850 °C에서 30분 가열한 후에 완전히 사라졌다. 분쇄된 활석을 가열한 후 얻은 X-선 회절 분석 결과는 분쇄 전에 비하여 더 낮은 온도에서 완화회석이 나타나기 시작한다. 30분 동안 분쇄한 활석을 850 °C에서 30분 가열한 결과, 완화회석의 피크가 관찰되

기 시작하였다. 활석 피크는 850 °C에서 2시간 가열할 때까지는 소량 남아있었으나 1,000 °C에서 2시간 가열한 후에는 완화회석과 석영 피크만 관찰되었다. 240분 동안 분쇄한 활석의 경우, 가열하기 전에 낮은 높이로 관찰되던 활석의 회절 패턴이 850 °C에서 30분만 가열하여도 더 이상 나타나지 않았으며, 완화회석과 석영의 피크만 관찰된다. 가열 온도와 시간을 850 °C에서 2시간, 1,000 °C에서 2시간으로 증가시킴에 따라, 완화회석의 X-선 회절 피크 폭이 다소 좁아지는데 이는 가열에 의해 완화회석의 결정화가 더 진행되었음을 지시한다. 720분 동안 분쇄한 활석의 X-선 회절 분석 패턴은 240분 분쇄한 경우와 거의 유사하게 나타났다. 이와 같은 X-선 회절 분석 결과는 기계적 마찰을 거

친 활석은 입도 및 결정도가 감소하고, 그 결과 탈수산기 반응으로 완화회석과 석영으로의 상전이 온도가 감소함을 지시한다.

활석의 입도 및 결정도 감소가 단층 약화에 미치는 영향

고에너지 불 밀을 이용한 기계적 분쇄는 활석의 입도 및 결정도 감소를 발생시켜 활석의 소수성이 감소하고, 활석 표면에 물분자가 흡착되어 수막을 형성할 수 있다. 분쇄가 진행될수록 함수량은 증가하며, 따라서 가열할 경우 증발하는 수증기의 양도 증가하게 된다. 이와 같은 변화는 반복적인 단층의 미끄럼에 의해 결정도가 감소한 활석이 단층 약화를 가져올 수 있음을 지시한다. 우선 단층 비지의 입도 감소는 기존에 잘 알려진 분말 유희작용을 가져올 수 있다. 또한 층상 규산염 광물의 경우, 단층의 전단이 수막에 집중되기 때문에 수막이 존재하면 마찰계수가 감소하여(Moore and Lockner, 2004) 물에 의한 유희작용과 열에 의한 가압이 단층 약화를 가속화 할 수 있다. 단층의 습도가 비슷한 경우, 지진 사이클이 반복될수록 단층 비지에서 활석의 결정도는 지속적으로 감소하며, 함수량의 증가를 가져올 수 있다. 증가된 함수량은 거의 대부분 표면에 존재하는 흡착수로서 물에 의한 유희작용을 가져올 수 있고, 이는 마찰계수의 감소로 이어질 것으로 생각된다. 또한 활석의 함수량 증가는 마찰 열에 의해 증발할 수증기가 증가함을 지시하며, 미끄럼 과정에서 수증기에 의한 실질적인 공극압이 증가할 것이다. 이는 기존에 알려진 순간적인 가열에 의해 단층 약화가 더 가속화 될 수 있음을 지시한다(Hirose and Bystricky, 2007; Rice, 2006). 일반적으로 단층이 오래될수록 약화되는 경향이 알려져 있는데, 그 원인에 대해서는 아직 정확히 규명되지 못했다(Niemeijer *et al.*, 2010). 본 연구와 같이 단층의 반복적인 미끄럼이 야기하는 단층 비지의 입도 및 결정도 감소가 오래된 단층의 약화에 대한 실마리를 제시할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구는 단층 비지에서 지속적으로 발생하는 광물의 특성 변화가 단층 약화에 미치는 영향에 대한 보다 체계적인 연구의 필요성을 보여준다.

결 론

본 연구에서는 고에너지 불 밀을 이용해 단층 비지에서 단층암의 미끄럼에 의한 활석의 결정도 및 입도 감소에 따른 함수율과 탈수 반응 거동의 변화를 알아보고자 하였다. 분쇄 전, 높은 결정도를 가진 활석은 표면에 흡착된 물분자가 거의 존재하지 않아, 소수성의 띠고 있음을 확인할 수 있다. 분쇄가 진행됨에 따라 입도와 결정도가 감소한 활석에서 표면에 흡착된 물분자 양의 급격한 증가가 관찰되었다. 이는 소수성의 활석이 분쇄에 의해 친수성으로 바뀌며, 표면에 물분자가 흡착되었음을 지시한다. 표면의 물분자는 가열을 통해 쉽게 기화되며, 탈수산기 반응이 일어나는 온도 역시 감소하였다. 이와 같은 결과는, 지진 사이클에서 미끄러짐이 반복될수록 미끄럼 마찰에 의해 활석의 결정구조가 붕괴되고, 물에 의한 유희작용 및 분말 유희작용에 의한 단층 약화가 발생하기 쉬운 환경이 될 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(NRF-2019R1F1A1061301)과 기상청 기상지진 See-At 기술개발 사업(KMI2018-02110)의 지원을 받아 수행되었습니다. X-선 회절 분석 실험에 도움을 주신 한국지질자원연구원원의 이범한 박사님께 감사드립니다. 안동대학교 정기영 교수님과 익명의 심사위원님의 사독에 감사드립니다.

REFERENCES

- Bošković, S., Gašić, M., Nikolić, V., and Ristić, M. (1968) The structural changes of talc during heating. *Proceedings of the British Ceramic Society*, 10, 1-12.
- Boutareaud, S., Hirose, T., Andréani, M., Pec, M., Calugaru, D.-G., Boullier, A.-M., and Doan, M.-L. (2012) On the role of phyllosilicates on fault lubrication: Insight from micro- and nanostructural investigations on talc friction experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B8).
- Brigatti, M.F., Galan, E., and Theng, B.K.G. (2006) Structures and mineralogy of clay minerals. In: Bergaya, F., Theng, B.K.G. and Lagaly, G. (eds.), *Developments in Clay Science*, 1, Elsevier, 19-86.
- Chen, X., Elwood Madden, A.S., and Reches, Z.E. (2017) The frictional strength of talc gouge in

- high-velocity shear experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 3661-3676.
- Colletini, C., Viti, C., Smith, S.A., and Holdsworth, R.E. (2009) Development of interconnected talc networks and weakening of continental low-angle normal faults. *Geology*, 37, 567-570.
- Ersoy, B., Dikmen, S., Yildiz, A., Gören, R., and Elitok, Ö. (2013) Mineralogical and physicochemical properties of talc from Emirdağ, Afyonkarahisar, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22, 632-644.
- Giorgetti, C., Carpenter, B.M., and Colletini, C. (2015) Frictional behavior of talc-calcite mixtures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 6614-6633.
- Han, R., Shimamoto, T., Hirose, T., Ree, J.H., and Ando, J. (2007) Ultralow friction of carbonate faults caused by thermal decomposition. *Science*, 316, 878-881
- Hirauchi, K.-i., den Hartog, S.A.M., and Spiers, C.J. (2013) Weakening of the slab-mantle wedge interface induced by metasomatic growth of talc. *Geology*, 41, 75-78.
- Hirose, T. and Bystricky, M. (2007) Extreme dynamic weakening of faults during dehydration by coseismic shear heating. *Geophysical Research Letters*, 34(14).
- Kim, J.W., Lee, B.H., Kim, J.C., and Kim, H.N. (2018) Particle size analysis of nano-sized talc prepared by mechanical milling using high-energy ball mill. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 31, 47-55 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.K., Han, R., Kim, E.J., Jeong, G.Y., Khim, H., and Hirose, T. (2017) Quasi-equilibrium melting of quartzite upon extreme friction. *Nature Geoscience*, 10, 436.
- Liao, J. and Senna, M. (1992) Thermal behavior of mechanically amorphized talc. *Thermochimica Acta*, 197, 295-306.
- Moore, D.E. and Lockner, D.A. (2004) Crystallographic controls on the frictional behavior of dry and water-saturated sheet structure minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3).
- Moore, D.E. and Lockner, D.A. (2008) Talc friction in the temperature range 25~400°C: Relevance for Fault-Zone Weakening. *Tectonophysics*, 449, 120-132.
- Moore, D.E. and Lockner, D.A. (2011) Frictional strengths of talc-serpentine and talc-quartz mixtures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116 (B1).
- Moore, D.E. and Rymer, M.J. (2007) Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault. *Nature*, 448, 795.
- 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.
- Niemeijer, A., Marone, C., and Elsworth, D. (2010) Fabric induced weakness of tectonic faults. *Geophysical Research Letters*, 37(3).
- Pérez-Maqueda, L.A., Duran, A., and Pérez-Rodríguez, J.L. (2005) Preparation of submicron talc particles by sonication. *Applied Clay Science*, 28, 245-255.
- Peacock, S.M. (1987) Serpentinization and infiltration metasomatism in the Trinity peridotite, Klamath province, northern California: Implications for subduction zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 55-70.
- Rice, J.R. (2006) Heating and weakening of faults during earthquake slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5).
- Rotenberg, B., Patel, A.J., and Chandler, D. (2011) Molecular explanation for why talc surfaces can be both hydrophilic and hydrophobic. *Journal of the American Chemical Society*, 133, 20521-20527.
- Shirozu, H., Sakasegawa, T., Katsumoto, N., and Ozaki, M. (1975) Mg-chlorite and interstratified Mg-chlorite/saponite associated with kuroko deposits. *Clay Science*, 4, 305-321.
- Viti, C. (2011) Exploring fault rocks at the nanoscale. *Journal of Structural Geology*, 33, 1715-1727.
- Viti, C. and Colletini, C. (2009) Growth and deformation mechanisms of talc along a natural fault: A micro/nanostructural investigation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158, 529.
- Wesołowski, M. (1984) Thermal decomposition of talc: A review. *Thermochimica Acta*, 78, 395-421.
- Wu, F.T., Blatter, L., and Roberson, H. (1975) Clay gouges in the San Andreas fault system and their possible implications. In: Wyss, M., (ed.), *Earthquake Prediction and Rock Mechanics*, Birkhäuser Basel, 87-95pp.
- Zazenski, R., Ashton, W.H., Briggs, D., Chudkowski, M., Kelse, J.W., Maceachern, L., McCarthy, E.F., Nordhauser, M.A., Roddy, M.T., Teetsel, N.M., Wells, A.B., and Gettings, S.D. (1995) Talc: Occurrence, characterization, and consumer applications. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 21, 218-229.

Received September 2, 2019, Revised September 17, 2019, Accepted September 20, 2019, Associate Editor: Sun Young Park