

봉길 슈도타킬라이트: 산상과 특성

강희철^{1,2} · 한래희³ · 김창민³ · 천영범¹ · 조형성¹ · 이기욱⁴ · 손 문¹ · 김종선^{1,*}

¹부산대학교 지질환경과학과

²부경대학교 지구환경과학과

³경상대학교 지질과학과 및 기초과학연구소

⁴한국기초과학지원연구원 환경·소재분석본부

요 약

한반도 남동부 경주시 양북면 봉길리 해안가에 노출된 슈도타킬라이트(PT)에 대하여 야외관찰, 구조지질학적 특성, 암석기체학적 및 지화학적 분석, 연대측정 연구를 수행하였다. 모암인 화강섬록암(SHRIMP U-Pb 저어콘 연대, 75.0 ± 1.5 Ma)과 흑운모화강암(SHRIMP U-Pb 저어콘 연대, 58.4 ± 1.1 Ma)을 절단하며 노출된 PT들은 두께와 산출 형태에 따라 단일암맥형, 단층세맥형, 주입세맥형 PT로 구분된다. 단일암맥형 PT는 단층의 주향을 따라 15~40 cm의 두께변화를 보이나, 평균 21 cm로 세계최대급에 속한다. 야외에서 일견 엽기성암맥처럼 인지되는 단일암맥형 PT는 모암인 화강섬록암의 화학조성과 거의 일치하며, 함유된 잔류광물들은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모로 아원형의 암편들과 함께 쇄설성 조직과 용식구조를 나타낸다. 또한 새롭게 결정화된 미립의 사장석, 알칼리장석, 석영, 흑운모 등이 관찰되며, 특히 장석과 흑운모는 자형의 형태로, 사장석은 누대구조를 보인다. 세계적으로 가장 많이 보고되며 연구지역에서도 다수 관찰되는 단층세맥형 PT는 판상의 얇은 두께(1 mm~2 cm)로 단층면을 따라 수십 cm~수십 m의 길이로 나타나며, 암맥형 PT와 거의 평행하게 분포한다. 단층세맥형 PT의 면상에는 단층의 모암과 용융물의 경계면을 따라 단층의 운동학적 특성을 지시하는 조선이 뚜렷하여 단층의 미끄럼 방향과 고응력장 분석에 유용한 자료를 제공한다. 소규모의 주입세맥형 PT는 암맥형 PT와 단층세맥형 PT로부터 용융물이 주변의 모암으로 주입되어 형성된 것으로 야외산상 및 지하에 따라 기포형, 렌즈형, S자형, 망상형, 각력형 등의 다양한 형태로 산출된다. 이상의 관찰과 분석은 연구지역 PT들의 형성이 고속으로 운동하는 단층활면에 발생한 마찰열로 인하여 모암이 선별적으로 용융 및 마모된 결과임을 지시한다. 여기서 연구자들은 암맥형의 PT를 기준에 보고된 지진성 단층작용에 의한 PT의 두께자료에 근거하여 세계최대급으로 추정하였으며, 이를 “봉길 슈도타킬라이트”로 명명하였다. 봉길 PT를 수반한 단층의 자세와 운동감각은 각각 $N54^{\circ}W/65-72^{\circ}NE$ 와 역이동성 좌수주향이동 운동을 나타내며, 봉길 PT는 야외에서 약 110 m 이상 연장된다. 봉길 PT에서 수행된 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 전암 연령은 47.3 ± 1.4 Ma이며 이로부터 봉길 PT는 신생대 중기 에오세 이후에 지진성 단층운동으로 생성된 것임을 제시한다. 한편 본 연구에서 완전히 규명하지 못한 PT의 역학적 측면과 봉길 PT를 수반한 단층의 운동학적 특성은 후속연구를 통하여 밝힐 예정이다.

주요어: 봉길 슈도타킬라이트, 단일암맥형, 단층세맥형, 주입세맥형, 지진성 단층운동

Hee-Cheol Kang, Raehee Han, Chang-Min Kim, Youngbeom Cheon, Hyeongseong Cho, Keewook Yi, Moon Son and Jong-Sun Kim, 2017, The Bonggil Pseudotachylyte, SE Korea: Its occurrence and characteristics. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 1, p. 173-191

ABSTRACT: Pseudotachylytes, i.e., solidified friction-induced melts, are strong evidence of seismic slip on faults. Here we report pseudotachylyte (PT)-bearing faults studied in outcrops of granodiorite (SHRIMP U-Pb zircon age, 75.0 ± 1.5 Ma) and biotite granite (SHRIMP U-Pb zircon age, 58.4 ± 1.1 Ma) on the coast of Bonggil-ri, Yangbuk-myeon, Gyeongju, SE Korea. Three types of pseudotachylyte are identified on the basis of thickness and morphology: Single dyke-, fault vein-, and injection vein-type PT. The single dyke-type PT shows a variation of thickness from 15~40 centimeters along its strike and has an average thickness of 21 cm, which is the largest in the world, as far as we know. The PT is dark gray and neighbors with several tens meters-thick cataclastic zone. At a first glance it looks like a mafic dike, but it has a chemical composition almost identical to the wall rock of

* Corresponding author: +82-51-510-2184, E-mail: kjsun@pusan.ac.kr

granodiorite. Also, it has many subrounded clasts which consist predominantly of quartz and feldspar and newly crystallized tiny grains (submicrometers to several micrometers in size) such as plagioclase, K-feldspar, quartz, biotite, and Fe-oxides. The feldspars and biotite are euhedral and some plagioclase grains show zoning. Flow structures and embayed clasts are also observed. A number of fault vein-type PTs occur as thin (as thick as 2 cm) layers generated on the fault plane, and striations, such as slickensides indicating slip direction, develop along the fault planes and formed during co-seismic slip at the interface between the wall rock and frictional melt. Smaller injection vein-type PTs are found along the single dyke-type PT and the fault vein-type PTs, and appear in a variety of shapes (bleb, lens, sigmoid, network, and breccia) based on field occurrence and vein geometry. All of these observations indicate the PT formed due to frictional melting of the wall rock minerals during fault slip. We propose to call the single dyke type-PT to "Bonggil Pseudotachylyte" considering the thickness of the PT and the locality of the study area. The Bonggil PT-bearing fault strikes N54°W, dips to NE with an angle of 65~72°, shows sinistral-reverse oblique-slip sense, and can be traced continuously over ~110 m. Since $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ whole rock age of the Bonggil PT is 47.3 ± 1.4 Ma, the age of seismic faulting which is responsible for the formation of the Bonggil PT should be younger than the Middle Eocene. Further work will be conducted to understand the mechanical aspect of the PT formation.

Key words: Bonggil pseudotachylyte, single dyke-type, fault vein-type, injection vein-type, seismic faulting

(Hee-Cheol Kang, Youngbeom Cheon, Hyeongseong Cho, Moon Son and Jong-Sun Kim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Hee-Cheol Kang, Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Raehee Han and Chang-Min Kim, Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Keewook Yi, Division of Environmental and Material Sciences, Korea Basic Science Institute, Cheongju 28119, Republic of Korea)

1. 서 론

지구조적 환경에서 기원된 슈도타킬라이트(pseudotachylyte, PT)의 산출은 단층대에서 지진발생의 직접적인 증거이며, 지진성 단층작용 동안 발생한 마찰열(McKenzie and Brune, 1972; Sibson, 1975; Spray, 1987, 1995; Lin, 1994a, 1994b; Lin and Shimamoto 1998)과 강한 마모에 의하여 단층대 내의 단층암들이 용융되어 유동성을 가지기 충분할 때 형성되는 것으로 알려져 있다(Lin 1996, 1997; Kano *et al.*, 2004). 특히 1970년대 이후, 단층과 관련된 PT는 지진 발생 시 일어난 고속 미끄러짐(slip)의 지시자로 폭 넓게 받아들여지고 있다(Passchier, 1982; Lin, 1994a, 1994b, 2008; Magloughlin, 1992; McNulty, 1995; Lin *et al.*, 2003, 2005).

지난 세기동안 PT의 특성과 중요성에 대하여 연구가 이루어지고 있으나 세계적으로 단층대를 따라 생성된 지진성 PT는 여전히 드물게 보고되고 있다. 이러한 희귀성의 이유가 실제로는 PT가 빈번히 만들어지나 단순히 걸보기에만 드물게 나타나는 것 때문인지, 아니면 단층면에서의 과도한 온도 상승을 억제하는 기작이 작동하여 마찰 용융이 효과적으로 발생하지 않기 때문인지는 확실치 않다. 비록 PT의 생

성은 운석충돌(Martini, 1978; Thompson and Spray, 1994; Spray *et al.*, 1995; Hisada, 2004), 화산함몰(Spray and Thompson, 1995; Spray, 1997; Kokelaar, 2007) 그리고 지표에 발달한 대규모 단층대에서 발생한 거대한 사태(Legros *et al.*, 2000; Lin, 2008)와 같은 작용에 의해서도 생성될 수 있지만, 본 연구에서는 조구조 기원의 지진성 단층운동에 의하여 생성된 PT와 관련하여 연구지역의 PT를 논의하고자 한다.

일반적으로 PT는 대부분 1 cm 미만의 폭을 가지며 상부지각에서 취성변형이 우세한 지진 파열과정으로 형성되나, 일부는 1 cm 이상의 두께를 가지는 세맥형(vein type)으로도 산출되며 상부 지각보다 깊은 곳인 외견상 백립암 또는 에크로자이트 변성상에서도 형성되는 것으로 보고되고 있다(Clarke and Norman, 1993; Austrheim and Boundy, 1994; Boundy and Austrheim, 1998). 야외노두 또는 박편에서 녹니석이나 전기석과 같은 광물들로 충전된 파쇄암(cataclasites)이나 세맥(vein)들이 PT로 오인되기도 하지만, 지금까지 보고된 여러 암석들과 구별되는 PT의 특징적인 증거는 다음과 같이 요약된다(Passchier and Trouw, 2005): 1) 모암과의 경계가 뚜렷하며, 2) 주 PT에서 분지되는 주입세맥형(injection vein type)이 산출되고, 3) PT 기질부에는 모암의 광물들이 거의 없거

나 PT 세맥의 접촉부를 따라 모암 광물에 용융의 증거인 용식구조가 있으며, 4) 구과(spherulites) 및 탈유리(devitrification) 구조가 존재하고, 5) 동시기에 생성된 석영 또는 방해석 세맥이 발달하지 않으며, 6) 대부분의 세맥형 PT는 모암의 화학성분과 거의 동일한 반면 PT 주변의 다른 세맥들과는 일반적으로 다른 화학조성을 나타낸다.

이를 바탕으로 현재 세계적으로 지진 기원의 PT에 대하여 연구가 지속되고 있으나, 국내에서는 PT 노두가 발견되지 않아 그 연구가 미비한 실정이다. 국내에서의 PT에 관한 연구는 Jin *et al.* (2012)에 의해 대흑산도 지역의 단층대에 발달한 PT 유사 암석에 대하여 보고된 것뿐이다. 따라서 본 연구는 국내 최초로 경북 경주시 양남면 봉길리 해안가의 화강섬록암 및 흑운모화강암에 발달한 PT를 대상으로 야외 산상과 구조지질학적 특성을 기재하고, 현재 진행 중인 암석 기재학적 및 지화학적 분석결과와 연대측정에 대한 일부 결과를 우선 보고하고자 한다. 또한 이들 자료를 기초로 단층 운동을 야기한 고응력장을 분석하였으며, 향후 연구과제와 관련하여 논의하였다.

2. 지구조적 환경

연구지역은 지체구조 상으로 양산단층대와 연일 구조선의 동측에 분포하며, 백악기 경상분지와 마이오세 어일본지의 경계부에 위치하는 해안가 일원이다(그림 1). 역사적으로는 신라시대 문무대왕 수증릉에서 남쪽 해안을 따라 약 1 km 떨어진 곳에 연구 대상인 PT의 주 노두가 위치한다(그림 2). 이곳의 기반암인 백악기~고신생기의 퇴적암류 및 화강암류들은 백악기 이후 신생대 제4기에 이르기까지 아시아 일원에 발생한 일련의 주요 지구조적 사건들의 영향으로 지각변형 운동을 경험하였다(Kim and Kang, 1989; Moon *et al.*, 2000; Kim, J.-S. *et al.*, 2002; Kim, Y.S. *et al.*, 2004; Son *et al.*, 2007, 2015; Choi *et al.*, 2008; Yoon, *et al.*, 2014; Kim, M.-C. *et al.*, 2016).

대표적인 지구조적 사건(Son *et al.*, 2007, 2015 and references cited therein)으로는 우선적으로 고신생기 48 Ma 전후에 일어난 인도-아시아 대륙의 충돌과 태평양판 이동방향의 급변으로 인하여 한반도 남동부에 발생한 동-서 방향의 인장력에 기인한 암맥군들의 발달이다. 이후 고신생기말 25 Ma에서부터

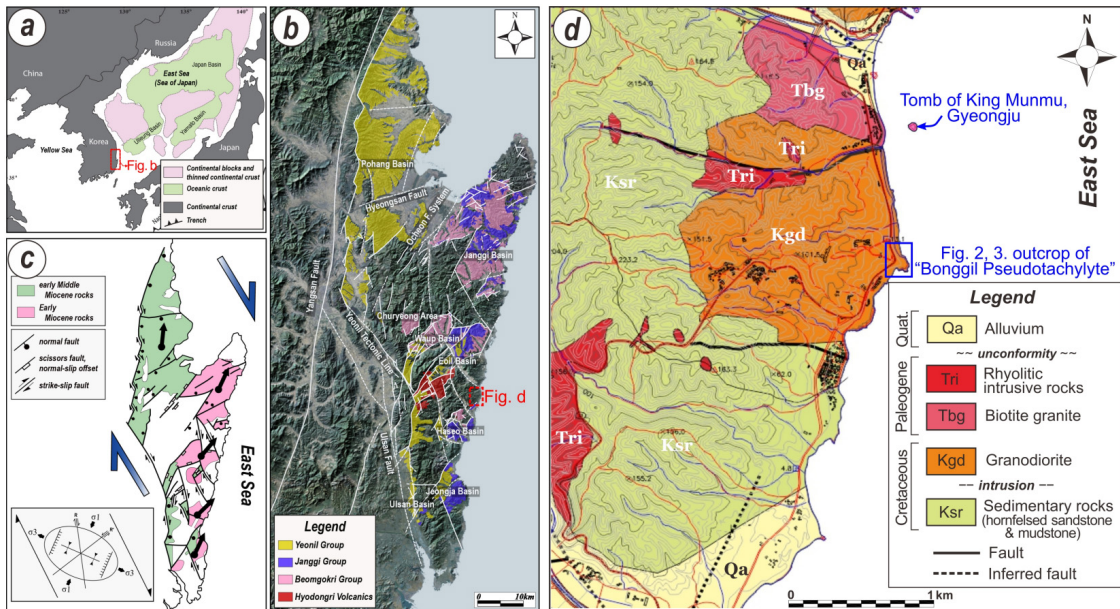


Fig. 1. (a) Simplified tectonic map of the East Sea, modified after Jolivet *et al.* (1991). (b) Landsat TM satellite image of the southeastern Korean peninsula, showing distribution of the Miocene sedimentary basins and major faults (from Son *et al.*, 2013). (c) Regional structural map of SE Korea with the Miocene stress regime. The thick black arrows indicate the mean declination directions of ChRMs (from Son *et al.*, 2013). (d) Geological map around the outcrop of the Bonggil Pseudotachylyte.

일본열도가 유라시아에서 급속히 분리되는 사건으로, 남-북 내지 북북서-남남동 방향으로 동해의 활발한 확장과 함께 한반도 동해안을 따라 우수향 전단력이 발생하며, 이로 인하여 한반도 남동부에는 북북서-남남동 방향의 우수향 주향이동단층이 발달하고 이들 단층대를 따라 당겨열림형(pull-apart) 퇴적분지가 형성되는 사건이다(Choi *et al.*, 2009; 그림 1a-1c). 나아가 약 15 Ma경에는 필리핀해판의 북상으로 이즈-보닌 아크와 일본 남서부가 충돌해 일본 남서부가 시계방향으로 회전운동을 하며, 이로 인하여 대한해협에는 북서 방향의 압축력이 가해지고, 한반도 남동부에는 응력반전으로 인하여 퇴적분지 확장의 종결과 함께 지괴의 용기와 국지적인 지괴의 반시계방향 수평회전운동이 발생하는 사건을 경험하게 된다(Choi *et al.*, 2009). 끝으로 약 5 Ma 이후부터 현재까지 태평양판의 섭입각도가 알아지고 아무르판이 동진함으로써 한반도 남동부 일원에는 동-서 방향의 압축응력이 작용하고, 이로 인하여 상반서향의 충상단층들이 형성되어 지괴가 용기하며, 최근 제4기에는 재활성 단층운동과 지진 진원기구(focal mechanism)에 의해 지시된 동북동-서남서 방향의 최대 수평 압축응력의 현생 지구조 환경이라고 할 수 있다(Ryoo *et al.*, 2002; Kee *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2016). 이와 같이 한반도 남동부는 신생대 신생기 마이오세 분지형성과 종결 이후 지금까지도 계속되는 지구조운동에 의한 지각변형에 노출되어 있다.

3. 지 질

연구지역에 분포하는 지층은 크게 백악기 퇴적암류와 이를 관입한 백악기 및 고신생기의 화강암류, 유문암질 관입암으로 구분할 수 있다(그림 1d). 퇴적암류는 경상누층군의 상부 하양층군에 대비되는 것으로 알려져 있으며, 주로 이암과 실트스톤 그리고 사암의 호층으로 구성되나 이들의 대부분은 혼펠스화 되어 있다.

화강암류는 백악기 퇴적암류를 관입하며 화강섬록암과 흑운모화강암으로 구분된다. PT가 발달한 해안가 및 내륙의 노두에서는 흑운모화강암이 화강섬록암을 관입한 후기 관입암체로 나타나며, 해안가 노두에서는 두 관입암체간의 경계가 관입이후 충상단층(thrust) 운동에 의하여 단층경계로 나타나기도 한다(그림 2, 3). 퇴적암류 및 화강암류 외에 조사지역에는 유문암질 관입암과 염기성~산성의 암맥들이 다수 나타난다. 유문암질 관입암은 연구지역 남서부에서 비교적 넓은 면적을 점하는 관입체의 양상을 보여주고 있다. 대부분 유백색의 괴상암체로서 반정을 포함하지 않지만 부분적으로는 세립의 장식반정이 관찰되기도 한다.

3.1 퇴적암류

한반도 경상분지의 백악기 퇴적암류는 일반적으로 N10°~20°E의 주향에 동남쪽으로 10°~20°로 경

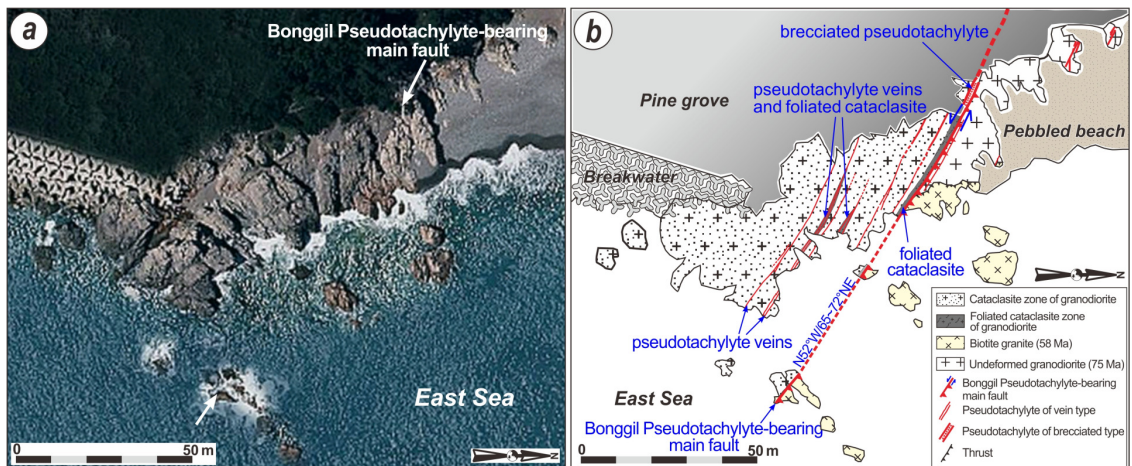


Fig. 2. (a) Aerial view (Daum) around the outcrop of the Bonggil Pseudotachylite. Arrows indicate the direction of the Bonggil Pseudotachylite-bearing main fault. (b) Detailed surface sketch of the Bonggil Pseudotachylite-bearing outcrop.

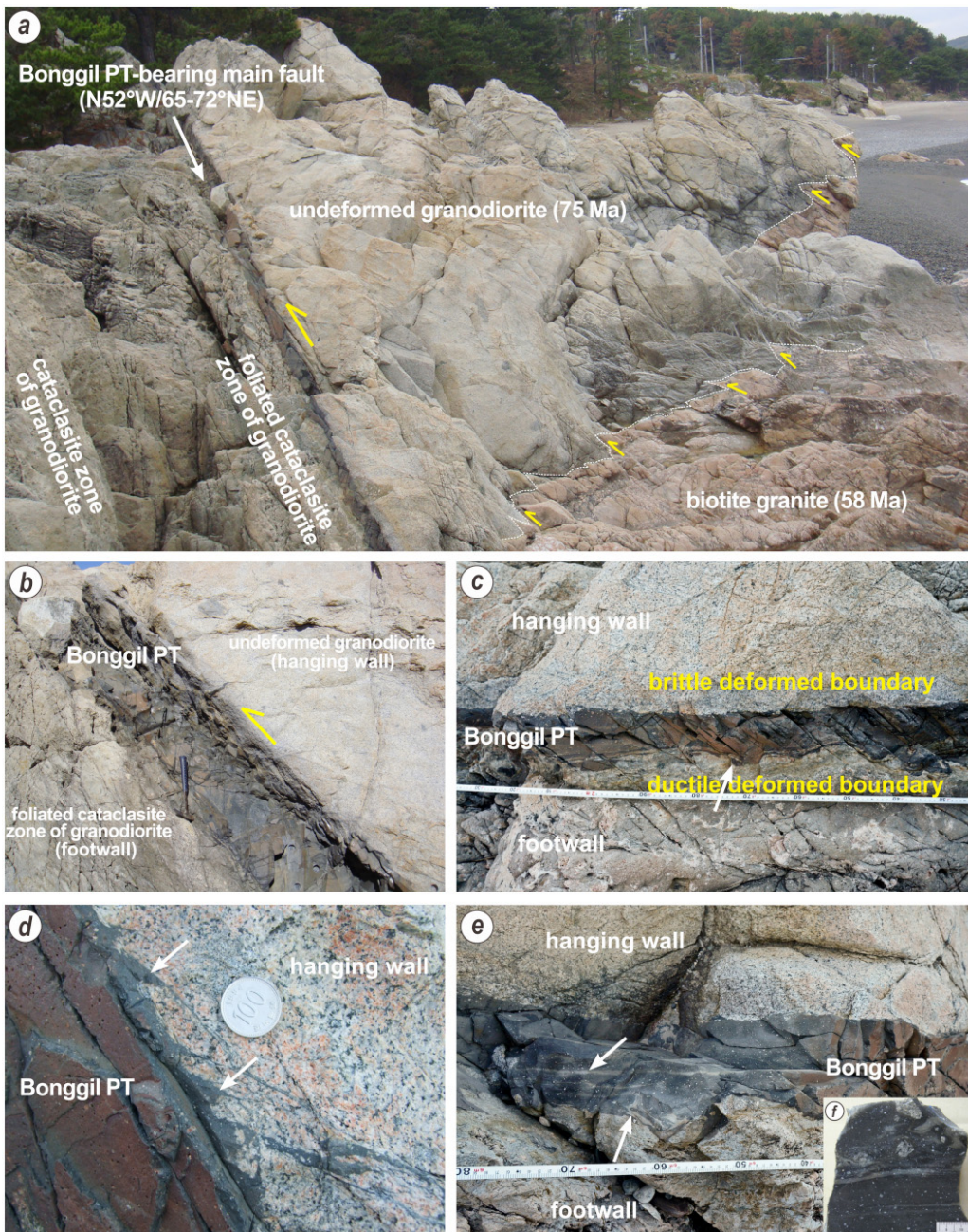


Fig. 3. (a) Outcrop photographs showing the major structural features and occurrence of the Bonggil Pseudotachylyte (PT) and basement rocks. Half headed arrows indicate reverse- to reverse sinistral senses of faults. (b) Close-up photo of the Bonggil PT truncating the foliated cataclasite of granodiorite and undeformed granodiorite. Note the Bonggil PT developed to a maximum thickness of 40 cm in cross section. (c) The Bonggil PT-bearing fault showing brittle deformation in hanging wall boundary and ductile deformation (indicated by the arrow) in footwall boundary. (d) Close-up photo showing injection veins (indicated by the arrows) of the Bonggil PT within granodiorite of hanging wall. The diameter of coin shown for scale is 2.4 cm long. (e, f) Close-up photos showing the clear banding are consistent with small differences in composition and the internal isoclinal folds with fault plane-parallel axial surfaces, suggesting more viscous flow in the footwall boundary than in the central part or hanging wall boundary of the Bonggil PT. Note the bands with the survived clasts of granodiorite in (f).

사하고 있으나, 이 지역에 분포하는 백악기 퇴적암류는 주향은 유사하나 서쪽으로 경사하고 있어 경상주분지의 백악기 퇴적암류와 반대 방향의 경사를 보이는 것이 특징이다. 조사지역에 분포하는 퇴적암류는 백악기 경상주분지의 퇴적암류들과는 격리되어 쉽게 대비할 수 없는 어려움이 있다. 이 퇴적암류는 울산도폭의 울산층(Park and Yoon, 1968) 혹은 모량도폭 대구층(Kim and Jin, 1971)에 대비되고, 장석을 다량 함유하는 응회질 사암과 호성기원의 암회색 이암으로 주로 구성되어 있는 점을 고려할 때, 하양층군의 상위 층군에 대비될 수 있을 것으로 알려져 있다(Chwae *et al.*, 1988).

주로 어두운 색의 이질암과 대부분 밝은 색을 띠고 있는 사암의 호층으로 구성되는 퇴적암류의 층리는 지역에 따라 다소 차이는 있으나, 주향은 대략 N10°~30°E 정도로 비교적 일정하며, 경사는 모두 45° 이상의 중고각으로 북서 내지 서쪽으로 경사하는 경향을 보인다. 특징적인 것은 조사지역에 발달한 동-서 방향의 단층과 화강섬록암 관입암체에 인접하여서는 층리의 주향이 동-서로 변하며 경사각은 25°~80°로 변화가 심하다.

전체적인 지층 구성상 이질암류가 우세하게 분포하며, 사암류는 두꺼운 이질암층 내에 수 십 cm 두께로 협재되는 양상이다. 사암들은 대부분이 세립질이며, 중립 내지 조립질의 사암은 일부 층군에만 국한되어 분포하고, 간혹 박층의 함력사암도 협재된다. 이질암은 암회색 내지 회색을 띠며, 대부분 규화되어 있거나 변질되어 층리면이 잘 보이지 않는 부분도 있다. 이와 같은 양상은 퇴적물의 공급물질이 화산성이 많고 후기에 화강암류의 관입에 따른 영향으로 판단된다.

3.2 관입암류

연구지역에 분포하는 본 암류는 백악기 퇴적암류를 관입하는데, 화강암류가 대표적이며 이외에도 퇴적암류와 화강암류를 도처에서 관입하고 있는 유문암질 관입암과 암맥류가 산재하고 있다. 화강암류는 실제로 다양한 성분의 변화를 나타내나 이들은 화강섬록암과 흑운모화강암으로 분류된다.

3.2.1 화강섬록암

화강섬록암은 연구지역에 분포하는 화강암류의

대부분을 차지하고 있으며, PT가 발달하고 있는 암체의 시료에서 분리된 저어콘으로부터 SHRIMP U-Pb 연대측정을 실시하여 구한 가중평균 연령이 75.0 ± 1.5 Ma로 나타나 후기 백악기로 판단된다(그림 2, 3, 10). 이 암체에서 전암을 이용한 K-Ar법에 의한 연대측정 결과는 59.8 ± 1.8 Ma의 연령으로 고신생기초로 보고된 바 있다(KOPEC, 2002; Kim and Park, 2006; Hwang *et al.*, 2007; Jin and Kim, 2007).

화강섬록암은 과상의 중립 내지 세립질 조직을 보이며, 주 구성광물들 중에서 흑운모는 파쇄된 조직을 나타낸다. 광물조성에 근거하여 QAP 삼각도 표에 나타내면 화강섬록암 영역에 도시되며, 화강섬록암의 단층암(PT가 발달한 단층의 하반 및 상반에 분포하는 파쇄암)은 화강암 영역에 도시된다. 특징적으로 각섬석이 부분적으로 흑운모로 교대되는 양상이 흔히 관찰되고, 알칼리장석과 석영은 공존하는 사장석과 유색광물을 포유하는 포이킬리틱 조직을 보인다. 일부 시료의 박편에서는 유리질에 가까운 지진성 단층암인 PT가 관찰되기도 한다.

3.2.2 흑운모화강암

흑운모화강암의 지표노두는 PT가 발달하고 있는 해안에서부터 북쪽으로 넓게 분포하며, 화강섬록암을 관입하는 후기 관입암체로 관찰되나 PT가 발달한 해안가 노두에서는 관입 및 층상단층 경계가 함께 나타난다(그림 2, 3). PT가 발달한 해안가 노두의 시료에서 분리된 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대가 58.4 ± 1.1 Ma로 밝혀져, 관입시기는 고신생기 팔레오세에 해당한다(그림 2, 3, 10). 이 연령은 기존에 보고된 이 암체의 Rb-Sr 전암연대 42.2 ± 0.1 Ma (Kim *et al.*, 1995) 보다 오래된 것이다.

흑운모화강암은 화강섬록암에 비해 알칼리장석과 석영의 양이 많으나 암석의 조직은 등립의 세립질인 경우가 대부분이다. 그러나 지역적으로 알칼리장석과 석영, 드물게는 사장석의 큰 입자와 작은 입자의 광물이 공존하는 세리에이트(seriate) 조직을 나타내는 경우도 있다.

3.2.3 유문암질 관입암

연구지역 남서쪽에 넓게 분포하는 유문암질관입암은 백악기 퇴적암류를 관입하며, 일부는 소규모의 암맥상으로 산재하여 분포한다(그림 1d). 관찰되는

유문암질 관입암은 장석반암 혹은 규장암으로 불리어 왔던 유백색의 괴상암체로서 반정을 포함하지 않지만 부분적으로 사장석과 침상의 각섬석 결정을 반정으로 함유하기도 한다. 본 암체로부터 구한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연령은 49.8 ± 0.4 Ma로 에오세에 속한다.

3.2.4 암맥류

지표 및 시추공의 여러 곳에는 폭 수 m 이내의 암맥이 분포하며, 이들 암맥의 대부분은 북북동 내지 북동 주향으로 발달하는 특징을 나타낸다. 이들 암맥들을 광물조성에 근거하여 분류하면, 산성암맥은 일부 벗어난 시료를 제외하고 대부분 유문암에, 중성암맥은 안산암에, 염기성암맥은 현무암 영역에 도시되었다. 특히 암맥들 중에서 산성암맥에 속하는 반화강암(aplite)은 세맥형으로 상기한 화강섬록암을 관입하고 있으며, 이들 두께는 대부분 5 cm 내외로 PT를 수반한 단층들에 의하여 절단되어 측방 연속성이 불규칙한 상태이다. 한편 이들 암맥들로부터 구한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 염기성암맥이 46.0 ± 4.0 Ma, 중성암맥이 42.2 ± 0.9 Ma, 산성암맥이 $49.5 \pm 0.9 \sim 48.6 \pm 1.1$ Ma로 측정되어 앞서 기술한 화강암류 및 유문암질 관입암체들보다 신기의 암체들이다.

4. 슈도타킬라이트의 산상과 특성

경북 경주시 양남면 봉길리 해안에 위치한 신라시대 30대 문무대왕의 바다무덤인 문무대왕릉과 그 남쪽으로는 화강섬록암과 흑운모화강암이 해안을 따라 노출되어 있다. 문무대왕릉의 남쪽 약 700 m 지점부터 1 km 지점까지는 이들 암체에 약 1~5 cm 폭의 담색 및 암회색의 세맥(vein)들이 발달하며, 담색의 세맥들은 암회색의 세맥들에 의해 절단되어 있다. 특히 가장 큰 규모로 노출된 지점(그림 2; 길이 140 m, 폭 30 m)에서의 흑운모화강암과 화강섬록암의 접촉관계는 일견 관입 양상으로 보이나, 접촉 경계를 따라 관찰되는 이들 관계는 흑운모화강암이 기존의 단열을 따라 화강섬록암을 역이동성으로 침상하고 있는 형태이다(그림 2, 3). 또한 본 노두에는 앞서 언급한 암회색의 세맥들과 동일한 성분으로 인지되는 암회색의 암맥(최대 폭 40 cm, 평균 폭 21 cm)이 1 매 발달하며, 주변에는 암회색의 세맥들이 상당수 분포하고 있다(그림 2-4). 암회색 암맥의 주향과 경사는

N54°W/65-72°NE이며, 기반암인 흑운모화강암과 화강섬록암을 모두 절단하고 있다. 이 암맥의 성분은 염기성 혹은 현무암질 안산암으로 보고된 바 있다(Kim and Park, 2006; Hwang *et al.*, 2007; Jin and Kim, 2007).

그러나 본 연구에서는 상기한 암회색의 세맥들과 암맥이 마그마의 관입에 의한 것이 아니라, 단층대에서 고속 미끌림으로 발생한 마찰열 및 마모에 의하여 단층대 내의 암석들이 용융되어 유동성 있는 단층암인 PT로 발달한 것으로 인지하고, 이에 대한 여러 근거자료들을 제시하였다.

4.1 단층암의 산출상태

연구지역에서 단층작용과 관련된 단층암은 슈도타킬라이트, 엽리상 파쇄암(foliated cataclasite), 파쇄암(cataclasite)으로 구분된다(그림 2, 3). 우선 노두에서 단층작용에 수반된 PT들의 산출은 다양한 형태로 크게 3가지로 구분되며(그림 2-4), 아래의 내용에서 사용되는 세맥(vein)과 암맥(dyke)에 대한 용어는 광상학 및 암석학적 의미와 달리 PT와 관련하여 선행 연구자들(Sibson, 1975; Spray, 1987; Magloughlin and Spray, 1992)에 의해 표현된 PT의 산출상태를 편의상 표현한 것임을 밝혀둔다.

첫째, 세계적으로 보고된 PT들의 경우, 대부분이 그 두께가 수 mm~수 cm 단위의 것들로 단층면을 따라 발달한 '단층세맥형(fault vein type)'으로 표현되나, 연구지역의 주 단층(main fault)에 수반된 PT는 평균 21 cm 두께로 단일 '암맥형(dyke type)'이며, 이는 몇 안 되는 세계 최대 규모급에 속한다(그림 3; Sibson and Toy, 2006). 노두에서 추적되는 PT의 연장은 해안에서 내륙으로 약 110 m이며, 단층의 주향을 따라 15~40 cm의 두께변화를 보인다. 앞서 이 암맥형의 PT를 현무암질 안산암의 암맥으로 보고한 Hwang *et al.* (2007)에 따르면 이 암맥이 해안에서 내륙으로 약 500 m 연장된다고 하였으나, 현재는 구조물과 층적층의 피복으로 인하여 확인할 수 없는 상태이다. 산출되는 암맥형 PT의 기하는 일련의 염기성 암맥처럼 암회색을 띠며 약간의 굴곡을 보이거나 거시적으로 판상의 단일암맥 형태로 기반암과 뚜렷한 경계를 나타낸다(그림 3a-3c). 국지적으로 굴곡진 부분에서는 기반암 쪽으로 각지거나 아크 모양으로 부풀어 오른 경계를 보이며(그림 3c), 때로는 기반암

쪽으로 가지를 치는 주입형의 소규모 PT 세맥이 발달하기도 한다(그림 3d). 단층면에 수직한 PT 단면에는 암회색의 기질부에 만입경계를 이루는 세립의

광물과 암편들(embayed phenocrysts and clasts)이 관찰되며, PT 상부 경계부와 달리 하부 경계부에는 점성유동(viscous flow)을 지시하는 유동 띠구조

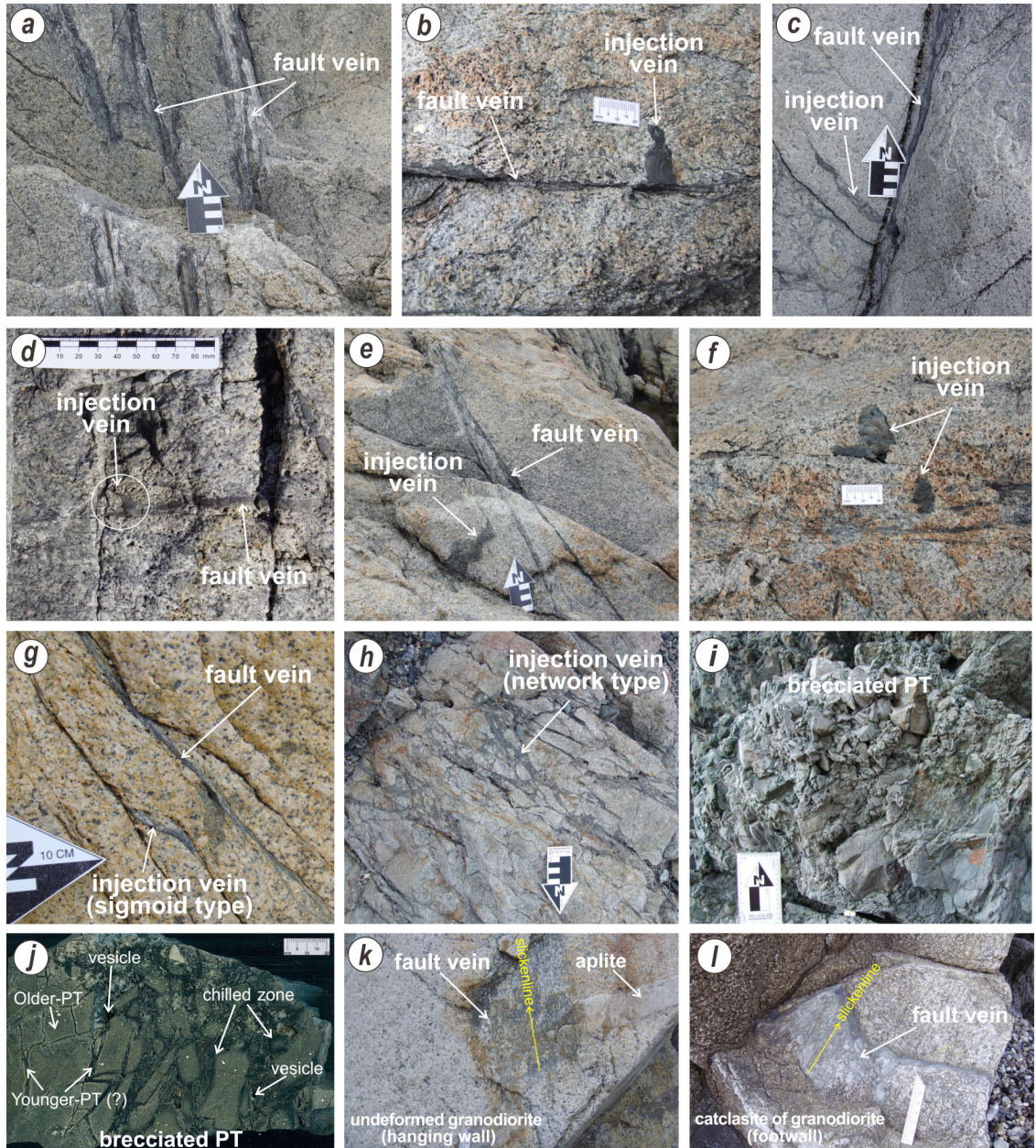


Fig. 4. (a-j) Photographs and classification of pseudotachylyte (PT) veins based on field occurrence and vein geometry. (k, l) Close-up photographs showing slip-sense indicators developed in the hanging wall and footwall of the Bonggil PT-bearing fault. Note PT veins developed in the footwall (a-f, h-j, l) and hanging wall (g, k) of the Bonggil PT-bearing main fault. (j) Polished hand specimen showing the brecciated PT. The source vein generated upon the fault plane is termed a fault vein, while individual veins within wall rocks are termed injection veins. The brecciated PT is only developed in the Bonggil PT-bearing main fault.

(flow banding structure)가 단층면에 평행하게 발달하고 있다(그림 3e, 3f). 비록 작은 성분 차이에 따른 띠구조가 용융물의 흐름에 의한 것인지 또는 여러 번에 걸친 지진성 단층운동을 반영하는지는 불분명하지만 이들 유동 띠구조 내부에는 단층면에 평행한 습곡측면을 가지는 소규모 습곡들과 다소 불규칙한 두께로 성분상 구별되는 층상구조들이 관찰되기도 한다(그림 3f). 또한 PT의 가장자리에서는 부분적으로 중심부와 달리 색상 차이와 함께 보다 치밀한 유리질 조직이 나타난다. 특히, 일반적으로 화성암류에서 발달하는 냉각단열(cooling fractures)과 유사하게 단층면(또는 기반암과의 경계면)에 수직한 단열들과 부분적으로 사교하는 단열들이 PT 내에만 제한되어 분포하며, 이들 단열들은 기반암으로 연장되지 않는 양상이다(그림 3b).

둘째는 앞서 언급한 세계적으로 가장 많이 보고되는 ‘단층 세맥형(fault vein type)’의 PT이다(그림 4). 상기한 암맥형 PT를 수반한 주 단층의 상반과 하반에서 얇은 두께(1 mm~2 cm)로 나타나며, 대부분 암맥형 PT와 거의 평행하게 발달하고 있다. 이들 단층세맥형의 PT들은 수십 cm~수십 m의 길이로 산재하며, 대부분 판상으로 하나의 세맥형이거나 여러 매가 평행 또는 사교하여 군집을 이루기도 한다(그림 2, 4). 여러 매가 평행하게 발달한 경우에는 PT 사이의 모암들이 전단에 의하여 대부분 심하게 파쇄되거나 또는 변형되어 있다. 이들 단층세맥형의 PT에는 공통적으로 아래에 기술한 소규모 주입형의 PT 세맥들이 발달하고 있으며, 경계부에서는 유동 띠구조와 용융되지 않고 남아 있는 작은 미립의 광물편 및 암편들이 관찰된다. 특히 단층세맥형 PT의 면상에는 단층의 모암과 용융물의 경계면을 따라 단층의 운동학적 특성을 지시하는 조선(striation)이 선명하게 만들어져 있어 단층의 미끌림 방향(Ferré *et al.*, 2016)과 고응력장 분석에 유용한 자료를 제공한다(그림 4k, 4l). 단층 세맥형의 PT를 수반한 단층의 자세와 운동감각은 각각 N50-58°W/63-72°NE와 역이동성 좌수주향이동 운동을 나타낸다.

셋째는 판상의 단층세맥형의 PT로부터 그 용융물이 주변암의 틈을 따라 또는 강력한 유체압에 의해 주입되어 형성된 ‘주입세맥형(injection vein type)’의 PT이다. 암회색의 주입 세맥형은 소규모의 기포형(bleb), 렌즈형(lens), S자형(sigmoid), 망상형(network),

각력형(breccia) 등 다양한 형태를 보인다(그림 4). 이들 세맥형은 모암에 발달한 구조와 조직에 조화되지 않는 세맥형(discordant vein type)에 속한다(Sibson, 1975). 특히 연구지역에 발달한 암맥형의 PT 북서 말단부에는 암맥형의 PT와 비교해 규모가 훨씬 큰 각력형의 PT (폭 1.2 m, 길이 >5 m)가 분포한다(그림 2, 4i). 이들 각력형에서 각력의 성분은 앞서 기술한 암맥형 및 세맥형의 PT와 동일하나, 기질부는 PT와 동일한 성분인지 아니면 후기에 생성된 다른 성분의 열수에 의한 것인지는 확실하지 않다. 그러나 본 노두와 주변에는 후기에 생성된 열수로 인한 변질대 혹은 파쇄대가 없는 것으로 보아 각력과 동일 성분으로 추정된다. 특징적으로 각력들의 가장자리에는 냉각연변(chilled margin)과 비슷한 조직이 대상(zone)으로 발달하고 있다(그림 4j). 이들 각력형 PT의 산상은 주 단층에 수반된 암맥형의 PT가 2차 인장단열 혹은 인장굴곡부(dilational jog)를 따라 집적된 이후, 단층세맥형의 PT 또는 열수의 강력한 주입으로 후기에 생성되었거나, 점성이 높은 용암류에서 종종 발달하는 자파쇄 각력암(autobrecciated rock)과 유사하게 동시기에 형성되었을 가능성도 있다. 이러한 각력형 PT에 대한 여러 의문점들은 후속 연구를 통하여 밝힐 예정이다.

PT와 더불어 연구지역에 발달한 단층암인 엽리상 파쇄암의 분포는 암맥형 및 단층세맥형 PT의 경계부에 수반되어 발달하며, 파쇄암에는 거의 나타나지 않는다(그림 3-5). 암맥형 PT를 수반한 주 단층의 경우에는 하반에만 한정되어 1 m 내외의 두께로 연장되며, 하반에 발달한 단층세맥형 PT에서는 비록 얇은 두께이나 양 측면 모두에 걸쳐 연장성 있게 발달한다(그림 4a, 4e). 엽리들은 암회색 및 담색 광물대의 교호와 광물 및 암편들의 신장구조로 구분되며, PT를 수반한 단층의 주방향을 따라 평행 내지 아평행하게 발달한다(그림 5a-5c). 특히 암맥형 PT의 하부에서는 PT와 엽리상의 파쇄암이 혼재되어 유동 띠 구조를 보인다.

항공사진 및 노두에서 색상 및 조직의 차이로 구분되는 파쇄암은 주 단층의 상반보다 변형정도가 심한 하반에 약 50 m의 폭으로 넓게 분포한다(그림 2, 3). 외견상 모암인 화강섬록암이기보다 래필리응회암에 가까운 암상으로 현재는 응집성을 가진 단층암으로 관찰된다(그림 3-5). 회색 내지 담회색의 기질

부와 아각 내지 아원형의 모암들 암편 및 광물편으로 구성된 파쇄암은 엽리상 파쇄암과는 점이적 변화를 보이거나 부분적으로 뚜렷한 경계를 나타내며 파쇄대에는 수 mm~수 cm 두께의 연성-취성 전단대들이 발달하기도 한다. 이들 전단대는 대부분 단층세맥형의 PT(수 mm~수 cm 두께)와 경계를 이루며 석영입자들은 강력하게 파쇄 및 변형되어 있거나 재결정되어 있다. 하반과 달리 상반은 변형정도가 아주 약하거나 변형을 받지 않은 원암의 상태를 유지하고 있다(그림 3).

여기서 연구자들은 주 단층을 따라 수반된 암맥형의 PT를 세계적으로 보고된 지진성 단층운동에 의한 PT의 두께 자료(Sibson and Toy, 2006)와 연구지역의 위치를 고려하여 “봉길 슈도타킬라이트(Bonggil Pseudotachylyte)”로 독립적으로 명명하였다.

4.2 슈도타킬라이트의 증거

다양한 산상을 보이며 일견해서는 엽기성암맥과 구별되지 않는 연구지역 PT들의 증거를 제시하면 다음과 같다. 1) 암맥형의 봉길 PT를 수반한 단층에서 상반경계는 취성변형을, 하반경계는 연성변형 양상을 나타냄으로 인하여 상·하반의 변형경계 조건

에 차이가 있다(그림 3). 엽기성암맥이라면 기반암(화강섬록암 및 흑운모화강암)의 고화 이후 관입되어 암맥 좌우 경계부의 산상이 동일할 것이다. 2) 봉길 PT를 수반한 단층의 하반은 대부분 응집력 있는 화강섬록암의 단층파쇄암(cataclasite)으로 이들 내에는 세계적으로 보고되는 전형적인 단층세맥형 및 주입형의 PT들과 동일한 형태의 PT들이 상당수 발달하고 있다(그림 4). 3) 단층 하반에 분포하는 화강섬록암의 엽리상 파쇄암에는 화강섬록암보다 신기의 흑운모화강암과 PT의 암편이 함유되어 나타난다(그림 5). 특히 불규칙한 포켓상의 포획체로 들어있는 PT들 중에는 화강섬록암의 파쇄암이 PT 내에 발달한 단열을 따라 주입되어 나타나기도 한다(그림 5e). 이 같은 현상은 이들 암편이 취성변형을 받지 않은 화강섬록암으로 포획될 수 있는 가능성은 없으며, 오로지 PT 생성당시 모암인 화강섬록암이 이미 변형을 받은 단층파쇄암으로 존재함에 따라 발생할 수 있는 현상으로 해석된다. 또한 암맥형의 봉길 PT가 엽기성암맥이라면 연구지역에 분포하는 암체들의 상호 상대연령 비교에 모순되는 것이다. 4) 봉길 PT의 박편관찰에서 나타나는 잔류광물의 조합은 석영, 알칼리장석, 사장석으로 흑운모를 제외한 엽기성 광물은 함유하지 않으며, 특히 쇄설성 조직을 보이고

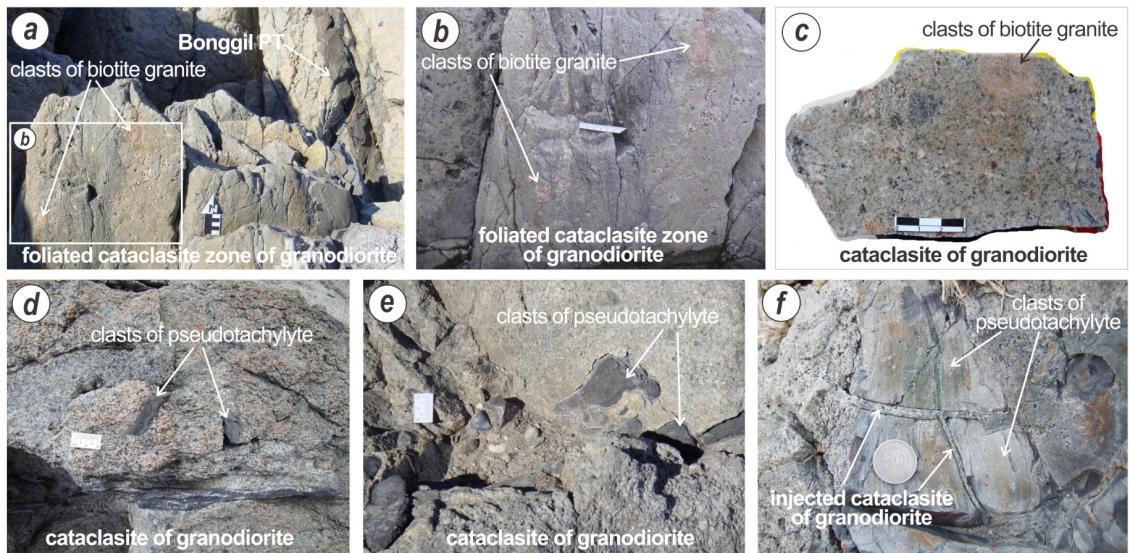


Fig. 5. (a-e) Photographs of the cataclasite zone of granodiorite that contains fragments of pseudotachylyte and biotite granite younger than granodiorite in the footwall of the Bonggil PT-bearing main fault. Note the numerous rounded pebble- to cobble-sized fragments of contrasting lithology to the wall rock. (f) The cataclasite of granodiorite is injected into PT contained in the cataclasite of granodiorite.

있다(그림 6). 5) 봉길 PT의 잔류광물들에는 용융의 증거를 지시하는 만입경계가 발달한 반정(embayed phenocryst), 반응연(reaction rim), 반정 내로 용융 물질의 주입(injection structure) 등의 구조가 관찰

된다(그림 7). 6) 특히 봉길 PT의 주성분과 미량성분의 조성이 일반적인 염기성암맥과 달리 모암인 화강섬록암의 조성과 거의 동일하게 나타난다(그림 8). 7) 전자현미경 관찰을 통해 봉길 PT 내에는 새롭게 결

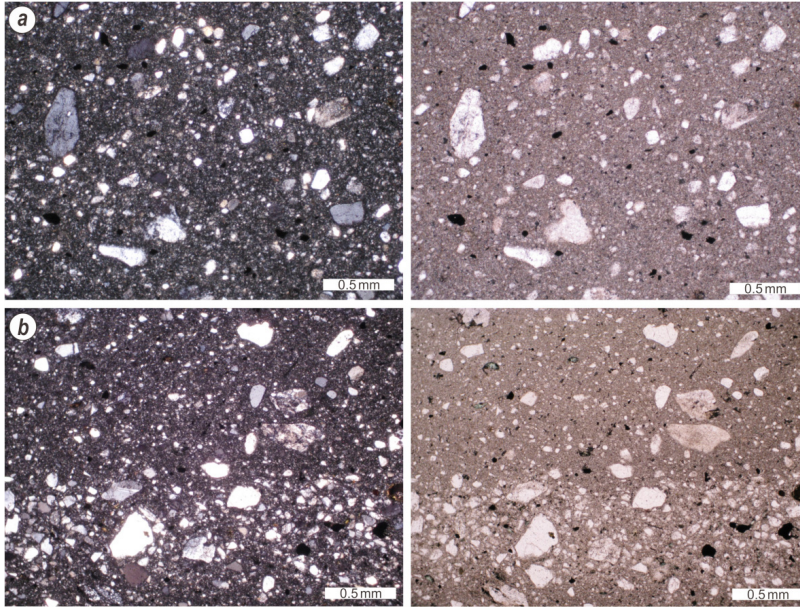


Fig. 6. Photomicrographs of the Bonggil PT. It has many subrounded clasts which consist predominantly of quartz, feldspar, and biotite unlike mineral assemblage of basic dyke, and shows clastic texture.

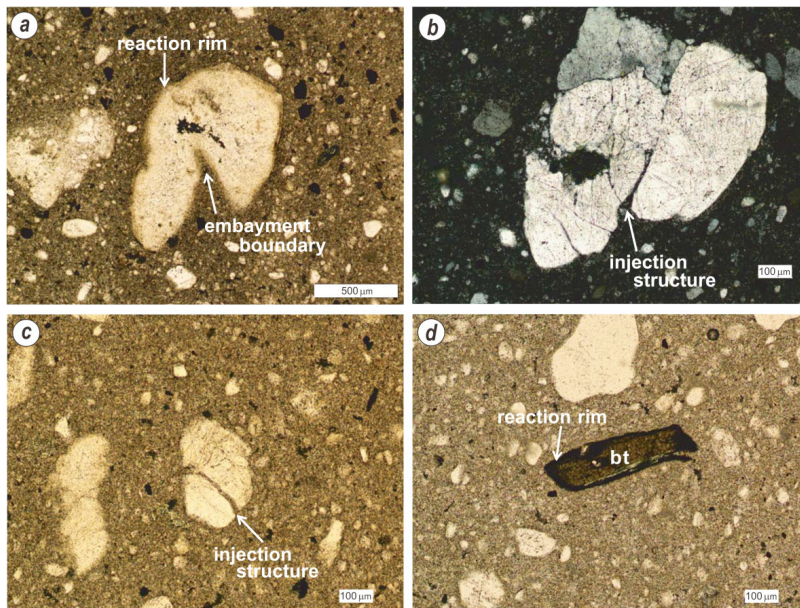


Fig. 7. Photomicrographs of embayed phenocryst, reaction rim, and injection structure indicated in residual minerals (quartz, feldspar, biotite) of the Bonggil PT, which show evidence of melting.

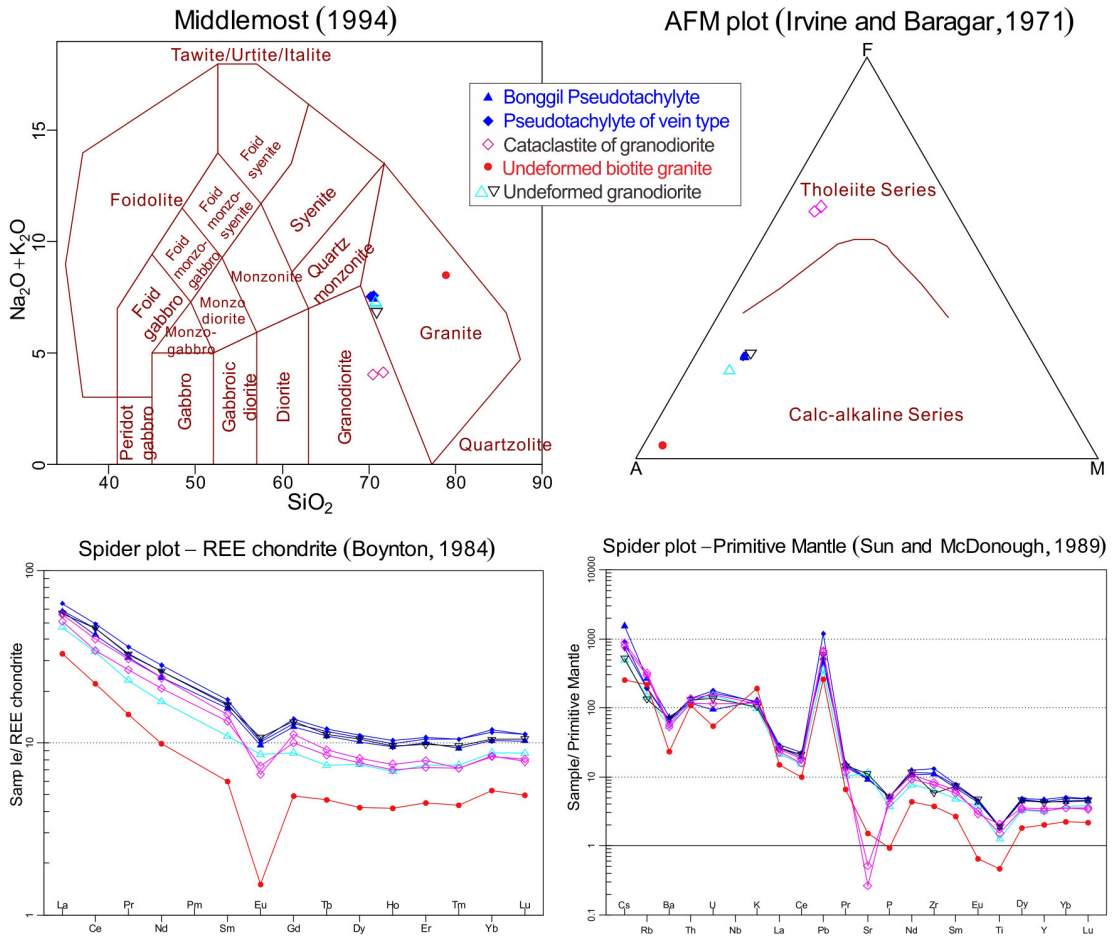


Fig. 8. Chemical analysis results for all lithologies sampled for this study. The Bonggil PT has very similar chemical composition to the felsic wall rocks (i.e., undeformed granodiorite).

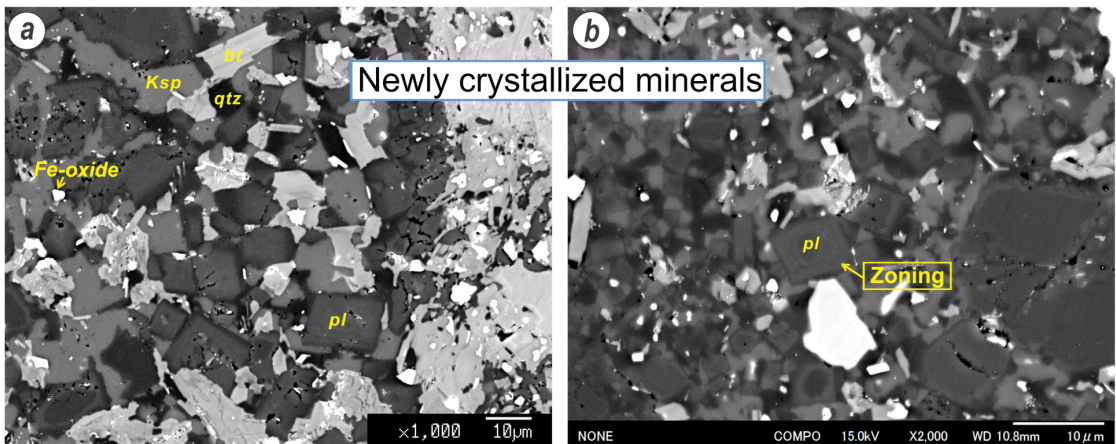


Fig. 9. (a) SEM photographs showing newly crystallized tiny grains (sub-micrometers to several micrometers in size) such as plagioclase (pl), K-feldspar (ksp), quartz (qtz), biotite (bt), and Fe-oxides in the Bonggil PT. The feldspar and biotite are euhedral and some plagioclase grains show zoning.

정화된 미립의 사장석, 알칼리장석, 석영, 흑운모, 철산화물(Fe-Oxide) 등이 관찰되며, 특히 장석과 흑운모는 자형의 형태로, 사장석은 누대구조를 보인다

(그림 9). 8) 봉길 PT에 함유된 저어콘의 형태와 절대연령이 모암인 화강섬록암과 흑운모화강암의 것과 각각 일치한다(그림 10). 이는 모암이 지진성 단

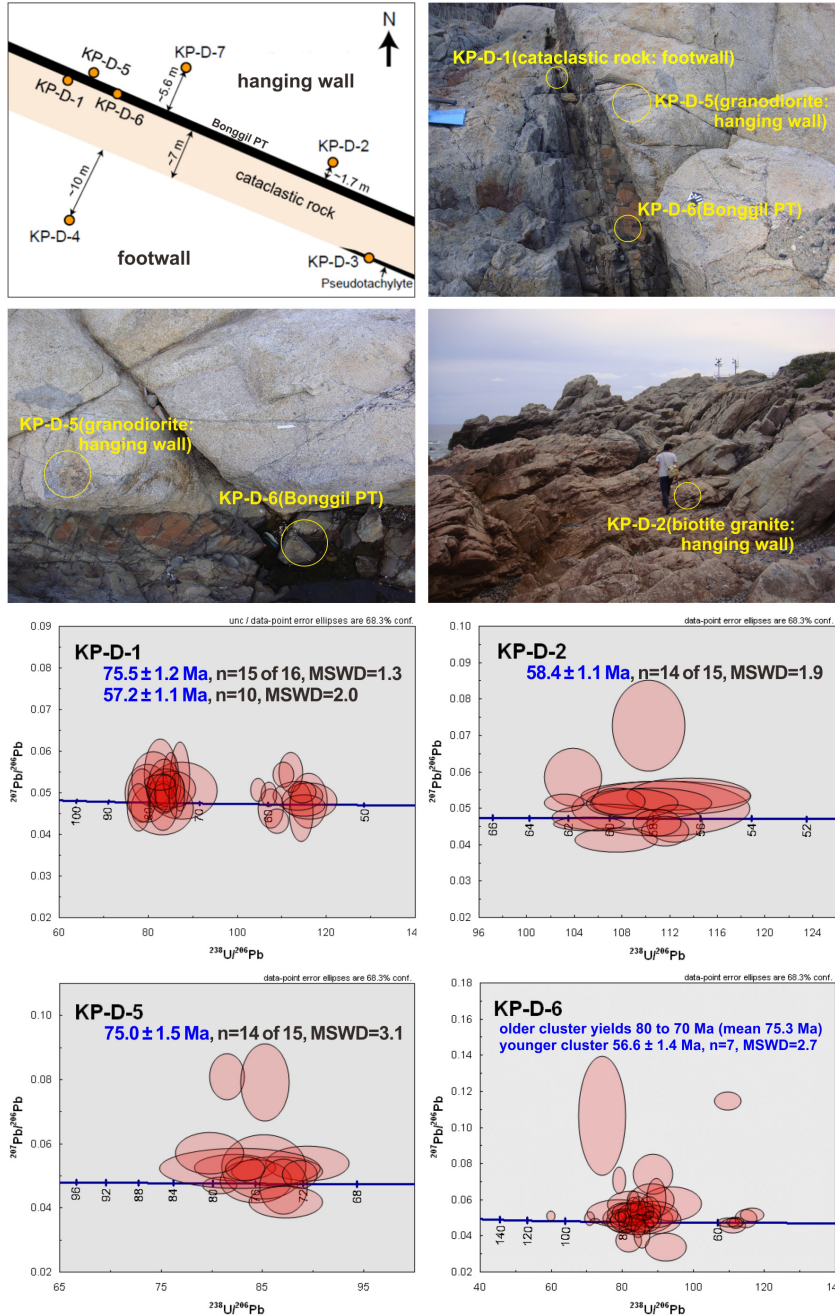


Fig. 10. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Bonggil PT, the cataclasite of footwall, and the deformed wall rocks. Ages of the Bonggil PT and the cataclasite of footwall are consistent with those of the wall rocks of undeformed granodiorite and biotite granite. The age of seismic faulting which is responsible for the formation of the Bonggil PT should be younger than about 58 Ma.

층운동에 의해 용융 및 마모된 것으로 모암들의 저어콘이 봉길 PT에 잔존된 결과로 해석된다.

이상의 관찰과 분석은 봉길 PT를 비롯한 연구지역의 다양한 형태의 PT들이 염기성암맥이기보다는 단층활면에서 고속으로 미끄러지며 발생한 마찰열로부터 모암의 광물들이 선별적으로 용융되어 형성된 것임을 지시한다.

4.3 봉길 슈도타킬라이트의 생성시기와 고응력장

봉길 PT의 생성시기를 밝히기 위하여 모암인 화강섬록암과 흑운모화강암, 엽리상 파쇄암, 그리고 봉길 PT에서 각각 저어콘을 분리하여 SHRIMP U-Pb 연대를 측정하였다. 이들 시료의 채취위치와 결과는 그림 10에 도시하였다.

우선 봉길 PT에서 분리된 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대는 75.3 Ma 및 56.6 Ma이며, 봉길 PT 하반에 발달한 엽리상 파쇄암에서 분리된 저어콘의 연대는 75.5 Ma 및 57.2 Ma로서 두 시료는 동일한 결과를 보여준다(그림 10). 또한 이들 연대는 봉길 PT의 상반에 분포하는 화강섬록암과 흑운모화강암에서 분리된 저어콘의 연대인 75.0 Ma 및 58.4 Ma와 각각 일치하여 봉길 PT에는 모암들의 저어콘이 잔존하고 있음을 알 수 있다. 따라서 봉길 PT는 흑운모화강암의 정치연대보다는 젊은 신생대 팔레오세 이후에 생

성된 것임을 지시한다. 한편 봉길 PT와 단층세맥형의 PT에 의하여 절단된 반화강암(aplite)의 세맥(그림 4k)의 시료들에 대하여 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 전암 연대를 측정한 결과, 봉길 PT는 47.3 ± 1.4 Ma를, 반화강암의 세맥은 48.6 ± 1.1 Ma의 연령을 나타내었다. 이로부터 봉길 PT는 신생대 중기 에오세 이후에 단층운동으로 생성된 것임을 지시한다. 그러나 봉길 PT에 모암의 저어콘이 함유되어 있듯이 모암의 잔존물질이 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 전암 연대측정에도 영향을 줌으로 인하여 봉길 PT의 생성연대가 측정된 값보다 더 오래된 결과를 보일 수도 있다. 따라서 연구자들은 새로이 생성된 광물들에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정법과 저어콘 및 인회석에 대한 피션 트랙(fission track) 및 (U-Th)/He 연대측정법 등의 다양한 방법을 추진하고 있다.

앞서 기술한 단층세맥형 PT에는 모암과 PT의 경계면을 따라 단층 미끌림 방향을 지시하는 조선들이 발달하며, 이들은 대부분 역이동성 좌수주향이동 운동감각을 나타내었다(그림 4k, 4l). 이와 같은 단층의 운동감각을 지시하는 자료들의 분석은 단층운동을 발생시킨 고응력장 복원에 유용하다. 이를 위해 봉길 PT를 수반한 주 단층의 상반과 하반에서 각각 20개 및 11개의 운동학적 자료를 수집하여 단층지구조해석법(Choi, 1995)으로 분석하였다(그림 11). 봉길 PT를 수반한 단층을 경계로 상반에서 측정된 운

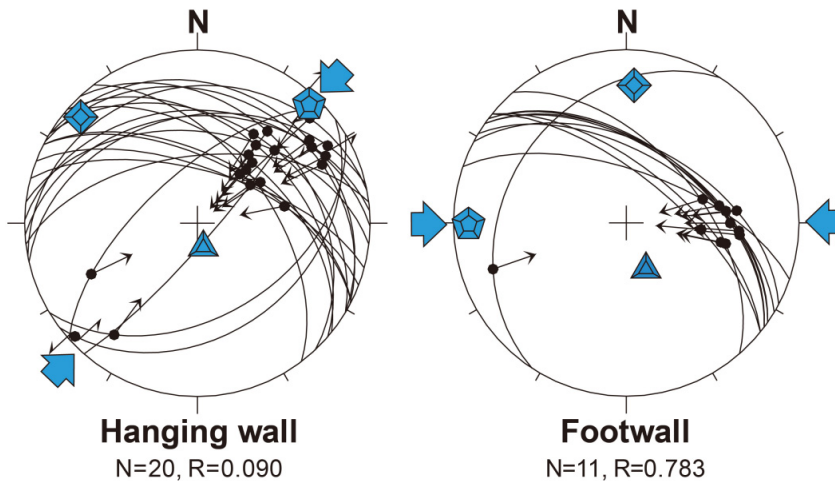


Fig. 11. Fault-slip data indicating reverse and transpressional slip senses within the fault veins of the hanging wall and footwall of the Bonggil PT-bearing fault (lower-hemisphere, equal-area projection). Convergent arrows represent horizontal compressional paleo-stress field (σ_{Hmax}) calculated by the method of Choi (1995). The principal stress axes σ_1 (filled pentagons), σ_2 (filled squares), and σ_3 (filled triangles) are also projected. N: number of data, R: $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$.

동감각은 북동-남서 방향의 최대수평주응력(σ_{Hmax})을 지시하는 반면, 하반에서 측정된 운동감각은 동서 방향의 최대수평 주응력을 나타내어 서로 상이한 결과를 보여준다. 우선 봉길 PT에서 구한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연령인 47 Ma를 기준으로 하여 주 단층 상반에서 도출된 북동-남서 방향의 최대수평주응력을 한반도 경상분지 일원에서 복원된 고응력장과 비교하면, 중기 에오세(약 44 Ma)부터 후기 올리고세(약 25 Ma)에 광역적으로 작용한 북동-남서 방향의 압축응력과 일치한다(Chang and Chang, 1998; Chang, 2002; Ha *et al.*, 2016; Cheon *et al.*, 2017). 하지만 하반에서 구한 동서 방향의 최대수평응력은 마이오세 말(약 7 Ma)부터 현재까지 한반도를 비롯한 동아시아 일원에서 광역적으로 작용하고 있는 동북동-서남서 내지 동서 방향의 압축응력과 일치하는 것이다(Yoon and Chough, 1995; Kyung and Chang, 2001; Park *et al.*, 2007; Yoon *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016). 좁은 연구지역에서 이 같은 고응력장의 방향 차이가 봉길 PT 생성이후, 단층의 하반에서만 지괴회전 운동이 발생한 결과인지 아니면 또 다른 운동기작에 의한 것인지는 추후 밝혀야할 연구과제로, 현재 본 연구자들은 추가 노두 조사를 비롯한 고자기학적 방법을 적용한 편각 방향의 편향 여부를 통하여 단층 상·하반의 고응력장의 방향 차이를 확인하고자 수행 중에 있다.

4.4 슈도타킬라이트의 지속적인 연구과제와 보전

봉길 PT의 연대를 동위원소 연대측정 결과를 이용하여 추정해보았지만 녹지 않은 암편(가령, K-장석)의 존재로 인해 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 전암 연대가 실제보다 높은 연대를 지시할 가능성이 있으므로, PT의 기질부를 대상으로 한 *in situ* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정(e.g., Sherlock *et al.*, 2008)으로부터 봉길 PT의 연대를 보다 확실히 제한하는 연구가 필요하다. 봉길 PT 형성 깊이의 경우, 그 모암의 정치깊이로부터 간접적으로 추정하는 것이 가능하지만 모암 정치깊이의 불확실성을 감안할 때 이를 대체할 보다 신뢰성 높은 연구 결과가 필요하다. 가령, 다양한 폐쇄온도를 갖는 연대측정법으로부터 모암의 온도-시간 경로를 얻고 이를 PT의 연대와 비교함으로써(e.g., Kirkpatrick *et al.*, 2012) PT 형성 시 모암의 온도를 추정하고, 이와 함께 지온구배를 이용하여 PT 형성깊이를 추정하는

연구를 시도해볼 만하다. 이와 같은 연구로 봉길 PT의 형성연대와 형성깊이가 얻어지면 그 결과는 봉길 PT의 조구조적 의미를 해석하는데 있어서 그리고 PT 형성을 역학적으로 이해하는데 있어서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

지금까지의 노두관찰 결과, 암맥형 봉길 PT가 여러 번의 반복적인 마찰용융으로 인해 두꺼워졌다는 증거는 발견되지 않았다. 아울러 자연 PT의 강도는 모암의 강도와 유사하거나 더 커서 이후에 단층 미끌림이 재발한다고 해도 기존 PT를 따라 일어날 가능성은 낮다는 것을 보여준 최근의 연구결과 등(Mitchell *et al.*, 2016; Proctor and Lockner, 2016)을 토대로 고려할 때, 평균두께가 21 cm인 암맥형 봉길 PT는 한 번의 미끌림으로 인한 것일 수 있으며, 이는 극히 예외적으로 두껍다고 할 수 있다. 단층 미끌림 시 역학적 에너지로부터 변환되는 열로 인해 암석이 녹게 되므로 봉길 PT가 비정상적으로 두껍다는 것은 그만큼 큰 열이 가해졌다는 것이다. 이는 상당한 변위의 단층 미끌림, 즉 큰 규모의 지진을 동반한 단층운동으로 인해 봉길 PT가 만들어졌을 가능성을 시사한다. 가령 Sibson (1975)과 Di Toro *et al.* (2005, 2006)은 10 m의 단층 변위로 인해 두께 2~3 cm의 균일한 PT 용융층이 만들어졌다고 보고한 바 있다. 아울러 PT의 두께와 변위 그리고 지진규모와 관련해서는 규모 7 보다 큰 대규모의 지진으로 인한 변위량은 일반적으로 10 m 이하이고 이로 인한 균일한 PT 용융물의 생성두께는 2 cm 미만으로 보고된 바 있다(Lin, 2005 and references cited therein). 이와 같은 연구결과들로 미루어 볼 때, 봉길 PT 형성 시 규모 7 이상의 대규모 지진이 발생했었을 것으로 추정할 수 있다. 따라서 우리는 그 단층암을 통하여 지각에서 대규모 지진이 발생할 때 단층대 내부에서의 온도상승, 전단강도, 미끌림 속도, 단층의 변위량, 지진규모 등과 같은 중요한 역학적 특성에 대해 연구하는 것이 가능할 것으로 보인다. 아울러, 대규모 지진 시 단층암의 물리적 화학적 변화에 대한 체계적인 연구도 시도될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 노두에서의 자세한 관찰 뿐 아니라, 미세구조 분석, 물질의 물리적 화학적 특성 분석, 고속전단시험 등의 통합적 수행이 요구된다.

봉길 PT를 수반한 주 단층의 길이와 관련해서는 현재까지 연구지역 노두에서 확인된 110 m의 연장

과 Hwang *et al.* (2007)에 의해 현무암질 안산암의 암맥으로 보고된 약 500 m의 길이, 그리고 봉길 PT의 두께 등을 고려하면 암맥형 봉길 PT를 포함하는 단층대는 내륙 혹은 해상으로 보다 길게 연장될 것으로 예상되며, 실제로 봉길 PT로부터 북서쪽 1.5 km 지점의 하상에는 단층세맥형의 PT들이 일부 노출되어 있음이 확인된다. 비록 암맥형 봉길 PT와 단층세맥형 PT들 모두가 오랜 과거에 형성되어 냉각·고화되면서 변형을 받지 않은 모암의 강도로 회복되어 있지만, 연구지역 일원은 국가 주요기반 시설의 인접지역으로 상당수의 단층들이 발달하고 있음이 알려져 있기 때문에 이들 단층들과 PT를 수반한 단층들 사이의 기하학적 분포 및 운동학적 관련 여부는 지반 및 구조물의 안정성 확보에 중요한 요소로서 우선적인 조사가 요구된다.

마지막으로 본 연구자들은 연구지역의 노두가 세계최대급의 두께로 형성된 단일암맥형의 봉길 PT를 비롯하여 다양한 형태의 단층세맥형 PT와 주입세맥형 PT를 한 곳에서 모두 보여주는 지질학적으로 매우 중요한 장소라는 점을 강조하고자 한다. 아울러 이와 같은 중요한 지질 구조에 대해 지속적인 연구가 가능하고 교육적 장소로도 활용될 수 있도록 하기 위하여 천연기념물과 같은 국가보호대상 지역으로 우선 보전될 수 있기를 희망한다.

5. 결 언

경상북도 경주시 양남면 봉길리 해안가의 화강섬록암 및 흑운모화강암 노두에서 약 47 Ma 이후에 형성된 단일 암맥형의 봉길 PT를 비롯한 다양한 형태의 PT를 대상으로 야외산상과 구조지질학적 특성, 암석기재학적 및 지화학적 분석, 연대측정, 고온력장 분석 등을 수행하였다.

연구지역 노두에서 동일한 전단영역에 발달한 취성변형작용의 산물인 단층암은 PT, 엽리상 파쇄암, 파쇄암으로 분류된다. 이들 중에서 단층작용에 수반된 암회색 PT들의 산출형태는 평균 21 cm 두께로 세계 최대급에 속하는 단일 '암맥형(dyke type)'의 봉길 PT, 수 mm~수 cm 단위의 두께로 단층면을 따라 발달한 '단층세맥형(fault vein type)', 그리고 단층세맥형의 PT로부터 그 용융물이 주변암에 주입되어 형성된 '주입세맥형(injection vein type)'으로 구분된다.

이들 PT의 박편 및 전자현미경 관찰에서는 유리질 내지 탈유리화된 기질부에 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모 등 잔류광물들의 쇄설성 조직, 만입경계가 발달한 반정(embayed phenocryst), 반응연(reaction rim), 반정 내로 용융물질의 주입구조(injection structure), 새롭게 결정화된 자형의 미립결정들과 사장석의 누대구조가 발달한다. 또한 봉길 PT의 주성분과 미량성분의 조성은 일반적인 염기성암맥과 달리 모암인 화강섬록암의 조성과의 거의 동일하게 나타나며, 봉길 PT에 함유된 저어콘의 형태와 절대연령이 모암인 화강섬록암과 흑운모화강암의 것과 각각 일치됨이 확인된다. 이상의 자료와 함께 야외산상에서 관찰되는 모암과 봉길 PT의 상호관계 그리고 다양한 형태의 PT들은 기 보고된 염기성암맥 혹은 화산활동의 산물이 아니라 단층활동에서 고속 미끌림으로 발생한 마찰열로부터 모암의 선별적인 용융과 마모의 결과로 생성된 것임을 지시한다.

그러나 본 연구에서 완전히 규명하지 못한 각력형 PT의 형성기작, 봉길 PT의 보다 정확한 생성연대, 주 단층 상·하반에서 분석된 고온력장의 차이, 단일암맥형으로 발달한 봉길 PT의 형성 온도와 깊이, 마찰용융과 대자율 변화의 특성, 운동학적 특성과 관련한 단층의 변위와 길이, 단층 미끌림 속도 등에 관해서는 후속연구를 통하여 밝힐 것이며, 다양한 형태와 함께 희소성, 높은 교육적 가치 그리고 지속적인 연구가 요구되는 연구지역의 노두가 훼손 없이 보전되길 기대한다.

사 사

이 논문은 기상청 "지진기술개발사업"(KMIPA2015-7050)의 지원과 2014년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2014R1A2A1A11053102)의 연구결과이다. 아울러 원고에 대한 세심한 검토를 바탕으로 이 논문의 개선을 위해 유용한 도움말을 주신 장천중 박사 및 익명 심사자께도 감사드리며, 편집 과정에 도움을 주신 김영석 교수(편집위원)께도 감사를 드린다.

REFERENCES

Austrheim, H. and Boundy, T.M., 1994, Pseudotachylytes

- generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust. *Science*, 265, 82-83.
- Boundy, T.M. and Austrheim, H., 1998, Deep crustal eclogite-facies pseudo-tachylytes. In: Snoke, A.W., Tullis, J. and Todd, V.R. (eds.). *Fault-related rocks-a photographic atlas*. Princeton, New Jersey, 126 p.
- Boynton, W.V., 1984, Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In *Rare Earth Element Geochemistry* (eds. Henderson, P.), Elsevier, 63-114.
- Chang, C.-J., 2002, Structural characteristics and evolution of the Yangsan fault, SE Korea. Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Daegu, 259 p (in Korean with English abstract).
- Chang, C.J. and Chang, T.-W., 1998, Movement history of the Yangsan Fault based on paleostress analysis. *The Journal of the Engineering Geology*, 8, 35-49 (in Korean with English abstract).
- Chang, C.-J. and Chang, T.W., 2009, Behavioral characteristics of the Yangsan fault based on geometric analysis of fault slip. *The Journal of Engineering Geology*, 19, 277-285 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S.J., Cho, H. and Son, M., 2017, Deformation features and history of the Yangsan fault zone in the Eonyang-Gyeongju area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 95-114 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.-H., Yang, S.-J. and Kim, Y.-S., 2009, Fault zone classification and structural characteristics of the southern Yangsan fault in the Sangcheon-ri area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 9-28 (in Korean with English abstract).
- Choi, P.Y., 1995, Aspects of stress inversion methods in fault tectonic analysis. *Annales Tectonicae*, 9, 22-38.
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Song, K.-Y., Kim, H.-C., Kim, Y.-H., Choi, P.-Y., Chwae, U.C., Han, J.-G., Ryoo, C.-R., Sun, C.-G., Jeon, M.S., Kim, G.-Y., Kim, Y.-B., Lee, H.-J., Shin, J.S., Lee, Y.-S. and Kee, W.-S., 2012, Active faults and seismic hazard map. NEMA, Seoul, 882 p.
- Choi, S.-J., Merritts, D.J. and Ota, Y., 2008, Elevation and ages of marine terraces and late Quaternary rock uplift in southeastern Korea. *Journal of Geophysical Research*, 113, B10403, 1-15.
- Chwae, W., Hwang, J.H., Yoon, W. and Kim, D.H., 1988, Explanatory Note of the Geological Map of 1: 25,000 Eoil Sheet. Korea Institute of Energy and Resources, 42 p.
- Clarke, G.L. and Norman, A.R., 1993, Generation of pseudotachylite under granulite facies conditions, and its preservation during cooling. *Journal of Metamorphic Geology*, 11, 319-335.
- Di Toro, G., Hirose, T., Nielsen, S. and Shimamoto, T., 2006, 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 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., Yeh, E.C., Chou, Y.M., Kuo, R.L., Chu, H.T. and Korren, C.S., 2016, Brushlines in fault pseudotachylytes: A new criterion for coseismic slip direction. *Geology*, 44, 395-398.
- Ha, S., Cheon, Y., Kang, H.-C., Kim, J.-S., Lee, S.-K. and Son, M., 2016, Geometry and kinematics of the subsidiary faults of the Ilgwang fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 31-50 (in Korean with English abstract).
- Hisada, E., 2004, Clast-size analysis of impact-generated pseudotachylite from Vredefort Dome, South Africa. *Journal of Structural Geology*, 26, 1419-1424.
- Hwang, J.H., Kihm, Y.H., Kim, Y.B. and Song, K.Y., 2007, Tertiary hydroexplosion at Bonggil-ri, Yangbuk-myeon, Gyeongju. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 453-462 (in Korean with English abstract).
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 532-548.
- Jin, K. and Kim, Y.-S., 2007, Fracture developing history and density analysis based on grid-mapping in Bonggil-ri, Gyeongju, SE Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 17, 455-469 (in Korean with English abstract).
- Jin, W., Choi, J.-H., Edwards, P. and Kim, Y.-S., 2012, Preliminary study on pseudotachylite-like rock injected along a fault zone in Daeheuksan island. *Proceedings of KSEG 2012 Spring Conference*, 101-105 (extended abstract).
- Jolivet, L., Huchon, P. and Brun, J.P., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96, 4367-4384.
- Kano, K., Lin, A., Fukui, A. and Tanaka, H., 2004, Pseudotachylytes of crushing origin from the Shimotsuburai fault of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line active fault system, central Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 110, 779-790 (in Japanese with English abstract).
- Kee, W.-S., Kim, B.C., Hwang, J.H., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-H., 2007, Structural Characteristics of Quaternary reverse faulting on the Eupcheon Fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 311-333 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.-S., Kim, J.-Y., Jung, K.K., Hwang, J.-Y. and Lee, J.-D.,

- 1995, Rb-Sr whole rock geochronology of the granitic rocks in the Kyeongju-Gampo area, Kyeongsangbugdo, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 16, 272-279 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S. and Kang, H.-C., 1989, Palaeomagnetism of Tertiary rocks in the Eoil basin and its vicinities, south-east Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 273-293 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-S., Son, M., Kim, J.S. and Kim, I.-S., 2002, Tertiary dyke swarms and their tectonic importance in the south-eastern part of the Korean peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 169-181 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-C., Jung, S., Yoon, S., Jeong, R.-Y., Song, C.W. and Son, M., 2016, Neotectonic crustal deformation and current stress field in the Korean peninsula and their tectonic implications: A Review. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 169-193 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.J. and Jin, M.S., 1971, Explanatory Text of the Geological Map of 1: 50,000 Moryang Sheet. Geological Survey of Korea, 19 p.
- Kim, Y.-S. and Park, J.-Y., 2006, Cenozoic deformation history of the area around Yangnam-Yangbuk, SE Korea and its tectonic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 1-20.
- Kim, Y.-S., Park, J.-Y., Kim, J.H., Shin, H.C. and Sanderson, D.J., 2004, Thrust geometries in unconsolidated Quaternary sediments and evolution of the Eupchon Fault, south-east Korea. *The Island Arc*, 13, 403-415.
- 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.
- Kokelaar, P., 2007, Friction melting, catastrophic dilation and breccia formation along caldera superfaults. *Journal of the Geological Society*, 164, 751-754.
- KOPEC (Korea Power Engineering Company), 2002, Preliminary Site Assessment Report for the New Site of the Wolsung Power Plant (unpublished report). 2.5-1 ~2.5-281 p.
- Kyung, J.B. and Chang, T.W., 2001, The latest fault movement on the northern Yangsan fault zone around the Yugye-ri area, southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 563-577 (in Korean with English abstract).
- Legros, F., Cantagrel, J.-M. and Devouard, B., 2000, Pseudotachylyte (frictionite) at the base of the Arequipa volcanic landslide deposit (Peru): Implications for emplacement mechanisms. *The Journal of Geology*, 108, 601-611.
- Lin, A., 1994a, Glassy pseudotachylyte veins from the Fuyun fault zone, northwest China. *Journal of Structural Geology*, 16, 71-83.
- Lin, A., 1994b, 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., 1997, Fluidization and rapid injection of crushed fine-grained materials in fault zones during episodes of seismic faulting. In: Zheng, Y, Davis, G.A., Yin, A. (eds.), *Proceedings of the 30th International Geological Congress*, 14, 27-40.
- Lin, A., 2008, Fossil earthquakes: The Formation and Preservation of Pseudotachylytes. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 111, Springer, Berlin, 349 p.
- Lin, A., Maruyama, T., Stallard, A., Michibayashi, K., Camacho, A. and Kano, K., 2005, Propagation of seismic slip from brittle to ductile regimes: Evidence from the pseudotachylyte of Woodroffe thrust, central Australia. *Tectonophysics*, 402, 21-35.
- Lin, A. and Shimamoto, T., 1998, Selective melting processes as inferred from experimentally generated pseudotachylytes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16, 533-545.
- Lin, A., Sun, Z. and Yang, Z., 2003, Multiple generations of pseudotachylyte in the brittle to ductile regimes, Qinling-Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic complex, central China. *The Island Arc*, 12, 423-435.
- Magloughlin, J.F., 1992, Microstructural and chemical changes associated with cataclasis and frictional melting at shallow crust levels: the cataclasis- pseudotachylyte connection. *Tectonophysics*, 204, 243-260.
- Magloughlin, J.F. and Spray, J.G., 1992, Frictional melting process 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.
- McNulty, B.A., 1995, Pseudotachylyte generated in semi-brittle and brittle regimes, Bench Canyon shear zone, central Sierra Nevada. *Journal of Structural Geology*, 11, 1507-1521.
- Middlemost, E.A.K., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37, 215-224.
- Mitchell, T.M., Toy, V., Di Toro, G., Renner, J. and Sibson,

- R.H., 2016, Fault welding by pseudotachylyte formation. *Geology*, 44, 1059-1062.
- Moon, T.-H., Son, M., Chang, T.-W. and Kim, I.-S., 2000, Paleostress reconstruction in the Tertiary basin areas in southeastern Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 21, 230-249 (in Korean with English abstract).
- Park, J.C., Kim, W., Chung, T.W., Baag, C.E. and Ree, J.H., 2007, Focal mechanism of recent earthquakes in the Southern Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 169, 1103-1114.
- Park, Y.D. and Yoon, H.D., 1968, Explanatory Text of the Geological Map of 1: 50,000 Ulsan Sheet. Geological Survey of Korea, 20 p.
- Passchier, C.W., 1982, Pseudotachylyte and the development of ultramylonite bands in the Saint-Barth'elemy Massif, French Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 4, 69-79.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 2005, *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin, 366 p.
- Proctor, B. and Lockner, D.A., 2016, Pseudotachylyte increases the post-slip strength of faults. *Geology*, 44, 1003-1006, doi:10.1130/G38349.1.
- Ryoo, C.-R., Lee, B.J., Son, M., Lee, Y.H., Choi, S.-J. and Chwae, W.C., 2002, Quaternary faults in Gaegok-ri, Oedong-eup, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 309-323 (in Korean with English abstract).
- Sherlock, S.C., Jones, K.A. and Park, R.G., 2008, Grenville-age pseudotachylite in the Lewisian: Laserprobe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Gairloch region of Scotland (UK). *Journal of the Geological Society*, 165, 73-83, doi:10.1144/0016-76492006-134.
- Sibson, R.H., 1975, Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 43, 775-43,794.
- Sibson, R.H. and Toy, V.G., 2006, The habit of fault-generated pseudotachylyte: presence vs. absence of friction-melt. In: Abercrombie, R.A., McGarr, A., DiToro, G., Kanamori, H. (eds.), *Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting: Geophysical Monograph Series*, 170, 153-166.
- Son, M., Kim, J.-S., Cheong, H.-Y., Lee, Y.H. and Kim, I.-S., 2007, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 13, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2015, Miocene tectonic evolution of the basins and fault systems, SE Korea: Dextral, simple shear during the East Sea (Sea of Japan) opening. *Journal of the Geological Society*, 172, 664-680.
- Son, M., Song, W.S., Kim, M.-C., Cheon, Y., Jung, S., Cho, H., Kim, H.-G., Kim, J.S. and Sohn, Y.K., 2013, Miocene Crustal Deformation, Basin Development, and Tectonic Implication in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 93-118 (in Korean with English abstract).
- Spray, J.G., 1987, Artificial generation of pseudotachylyte using friction welding apparatus: Simulation of melting on a fault plane. *Journal of Structural Geology*, 9, 49-60.
- Spray, J.G., 1995, Pseudotachylyte controversy: Fact or friction? *Geology*, 23, 1119-1122.
- Spray, J.G., 1997, Superfaults. *Geology*, 25, 579-582.
- Spray, J.G., Kelly, S.P. and Reimold, W.U., 1995, Laser probe argon-40/argon-39 dating of coesite- and stishovite-bearing pseudotachylytes and the age of the Vredefort impact event. *Meteoritics*, 30, 335-343.
- Spray, J.G. and Thompson, L.M., 1995, Friction melt distribution in a multiring impact basin. *Nature*, 373, 130-132.
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magmatism in Ocean Basins* (eds. Saunders, A.D. and Norry, M.J.), Geological Society of London, Special Publications, 42, 313-345.
- Thompson, L.M. and Spray, J.G., 1994, Pseudotachylitic rock distribution and genesis within the Sudbury impact structure. In *Large meteorite impacts and planetary evolution*, edited by Dressler, B.O., Grieve, R.A.F. and Sharpton, V.L., *GSA Special Paper*, 293. Boulder: Geological Society of America, 275-288.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.
- Yoon, S.H., Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 2014, Tectonic, sedimentary, and volcanic evolution of a back-arc basin in the East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 352, 70-88.
- Yoon, S.W., Kim, M.-C., Song, C.W. and Son, M., 2014, Basin-fill lithostratigraphy of the Early Miocene Haseo basin in SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 193-214 (in Korean with English abstract).

Received : January 31, 2017

Revised : February 20, 2017

Accepted : February 28, 2017