

언양-경주 일원의 양산단층대 변형구조와 진화사

천영범 · 하상민 · 이성준 · 조형성 · 손 문[‡]
부산대학교 지질환경과학과

요 약

최근 경부고속도로 경주-언양 구간의 도로확장공사로 인해 새롭게 노출된 양산단층대의 주요 노두들을 바탕으로 단층대의 내부 구조와 다중변형사를 해석하였다. 노출된 양산단층대는 수십 m 폭으로 발달하는 단층핵/혼합대 그리고 수백 m 폭의 단층손상대로 구분된다. 단층핵 내에 북북동 방향으로 병치되어 분포하는 단층암은 백악기 퇴적암류(암회색 셰일, 자색 이암, 회백색 미사암) 기원과 안산암질 화산암류 기원으로 구분되며, 이들은 뚜렷한 변형의 차이를 보인다. 단층대 내의 퇴적암은 주 단층면에 가까워질수록 단층면의 자세와 거의 평행하게 고각으로 경동되는 경향을 보이며, 경동된 층간을 따라 전단이 집중되어 형성된 수 cm에서 수 m 폭의 단층비지대가 확인된다. 이들은 서로 연결되면서 망상으로 발달하여 렌즈상으로 남아있는 사암을 에워싸기도 한다. 이러한 단층암의 입자 또는 암편의 크기는 염층이 발달하는 세립질 퇴적암이 괴상의 조립질 퇴적암에 비해 기계적으로 쉽게 파쇄됨을 암시한다. 한편, 단층핵 내의 안산암류는 수 cm에서 수십 cm 직경의 단층각력 형태로 분포하며, 2 cm 이내 두께의 좁은 비지대를 가지는 단층들에 의해 절단되어 있다. 단층조건, S-C 조직, 평면에서 Z-형태 단층암의 분포, 입자들의 시계방향 회전, 북서 방향 축을 가지는 안행상 습곡 그리고 단층비지의 자기미세구조는 양산단층의 우수향 주향이동운동이 이전에 발생한 좌수향 주향이동운동에 의한 변형(북서 방향 공역상 정단층군)을 압도하였음을 지시한다. 이번 연구에서 확인된 변형양상과 이들의 선후관계 그리고 양산단층계 일원의 기존 연구들을 종합하면, 양산단층은 백악기말 북서-남동 압축환경 하에서 좌수향 주향이동운동을 겪었으며, 이후 43~25 Ma의 북동-남서 압축환경 하에서 광역적인 우수향 주향이동운동을 겪었던 것으로 추정된다. 또한 이러한 지구조적 사건의 사이 또는 이후에도 응력환경의 변화에 의해 비교적 작은 규모의 변형이 단층대를 따라 남겨져 있는 것으로 판단된다.

주요어: 양산단층, 단층암, 우수향 주향이동운동, 북서-남동 압축환경, 북동-남서 압축환경

Youngbeom Cheon, Sangmin Ha, Seongjun Lee, Hyeongseong Cho and Moon Son, 2017, Deformation features and history of the Yangsan Fault Zone in the Eonyang-Gyeongju area, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 1, p. 95-114

ABSTRACT: This study focuses on the internal structures and multi-stage deformation history of the Yangsan Fault Zone based on the newly exposed outcrops in Gyeongju-Eonyang area during the widening construction of Seoul-Busan highway. The fault zone is divided into fault core/mixed and damage zones of several tens of meters and of a few hundred meters in width, respectively. The fault rocks, juxtaposed along the NNE-striking fault, are derived from the Cretaceous sedimentary rocks (dark gray shale, purple mudstone, white sandstone) and andesitic rocks, each of which shows different deformation pattern. Bedding attitudes of the sedimentary rocks within the fault zone tend to be more parallel to the attitude of main fault surface close to the fault core, and interlayer shearing of them was developed as several centimeters to a few meters-thick clay-rich gouge zones, which anastomose and link up with each other. They also contain lenses of fractured sandstone protoliths. The size of breccia derived from the sedimentary rocks alludes that laminated and fine-grained sedimentary rocks are more easily crushed rather than massive and coarse-grained sedimentary rocks. Whereas andesitic rock-derived fault core is characterized by cataclastic rocks as well as individual, narrow localized faults (<2 cm-thick). Slickenside, S-C fabric, Z-shaped protolith, clockwise rotation of particle, en-echelon fold with NW-trending axis, and magnetic fabric on gouge zone consistently suggest that the dextral strike-slip faulting overwhelmingly overprinted preexisting sinistral deformations such as NW-striking conjugate normal faults. We compare the deformation features and their relative chronologies in this study with those of previous studies, and elucidate two main events of the Yangsan Fault; (1) sinistral strike-slip faulting during the Late Cretaceous under NW-SE compression, and then (2) dextral strike-slip

[‡] Corresponding author: +82-51-510-2248, E-mail: moonson@pusan.ac.kr

faulting between ca. 43 and 25 Ma under NE-SW compression, although relatively weak deformations along the Yangsan Fault with different senses might occur after or between the events.

Key words: Yangsan Fault, Fault rock, Dextral strike-slip faulting, NW-SE compression, NE-SW compression

(Youngbeom Cheon, Sangmin Ha, Seongjun Lee, Hyeongseong Cho and Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

1. 서 언

유라시아판 동부는 중국의 탄루단층(Tan-Lu Fault), 일본의 중앙지구조선(Median Tectonic Line)과 같은 북북동 내지 북동 방향의 대규모 단층계들이 분포하며(그림 1a), 한반도에도 추가령단층계, 공주-광주단층계, 양산단층계와 같은 주요 구조선과 함께 수많은 북북동 방향의 단층들이 발달한다(그림 1b). 이들은 중생대 이후로 지구조 환경의 변화에 따라 운동감각을 달리하며 여러 번 운동하였고, 대소규모 분지의 형성과도 밀접한 관련이 있다[e.g., 중국의 보하이분지(Bohai Basin), 한국의 음성분지와 영동분지, 일본의 이즈미분지(Izumi Basin) 등; e.g., Chough *et al.*, 2000; Ren *et al.*, 2002; Tokiwa, 2009; Cho *et al.*, 2016].

서쪽에서 동쪽으로 자인, 밀양, 모량, 양산, 동래, 일광단층으로 구성되는 양산단층계는 백악기 경상분지 퇴적암류와 백악기-고신생기 화성암류를 절단하고 있으며(그림 1c, 2a), 각 단층을 구성하는 일부 분절은 제4기층을 절단하기도 한다. 구조지질학, 지구물리학, 암석학, 자기이방성 연구들은 양산단층계가 백악기 이래로 유라시아판 아래로 섭입하는 고태평양판(이자나기 또는 쿨라 판)과 이후의 태평양판과 필리핀해판의 영향에 의해 수차례의 다중변형을 겪었음을 보고하고 있다(Chang *et al.*, 1990; Kim, 1992; Chang and Chang, 1998; Chang, 2002; Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b, 2012; Cho *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2009; Kang and Ryoo, 2009). 따라서 양산단층계에 대한 연구는 백악기 경상분지의 형성과 발달과정뿐만 아니라 동아시아의 백악기 이후 지구조 환경변화를 규명하는데 중요하며, 대규모 단층의 재활에 수반된 변형양상을 이해함에도 상당한 가치가 있다.

이번 연구는 양산단층의 다중운동에 수반된 단층대의 변형특성과 운동사를 이해하는데 궁극적인 목

적이 있다. 이를 위해 최근 경부고속도로의 경주-언양 구간 확장공사에 의해 새로 노출된 노두들을 상세 기재하고, 단층대의 기하와 운동학적 특성 그리고 운동을 야기한 고응력장을 해석하였다. 또한 주로 단층비지로 이루어진 단층암을 대상으로 대자율이 방성 방법을 적용하여 단층암의 미세구조 측정을 통한 운동감각을 분석하였다. 이러한 연구결과를 토대로 (1) 모암에 따라 차별적으로 나타나는 단층대의 내부 변형에 대해 토의하고, (2) 기존 연구결과들과 비교·종합하여 양산단층 다중변형의 선후관계와 시기를 해석하고자 하였다.

2. 지질학적 배경

한반도 남동부에 위치하는 경상분지는 한반도 내에 분포하는 백악기 퇴적분지 중 가장 규모가 큰 분지로서 하/호성 환경에서 퇴적된 이암, 사암, 역암, 탄산염암으로 구성되며, 상부로 갈수록 화산성 물질의 함량이 증가한다(Chang, 1975, 1977; Choi, 1986; Chang *et al.*, 2003; 그림 1c). Chang (1975)은 포함된 화산물질의 양에 따라 분지 충전물을 화산물질이 거의 포함되지 않은 신동층군, 화산물질이 부분적으로 포함된 하양층군, 화산물질이 다량 포함된 유천층군으로 구분하고 이를 관입한 산성질 화성암류를 불국사화강암류로 분대하였다. 최근 Chough and Sohn (2010)은 경상분지를 화산호와 배호분지로 이루어진 하나의 화산호시스템(Gyeongsang volcanic arc system)으로 새롭게 해석하고, 고태평양판이 유라시아판 아래로 사교 섭입하는 동안 두 판이 강하게 결합되지 못하여 작동된 인장 내지 횡인장 환경에서 분지가 형성되었음을 제안하였다.

경상분지 충전물의 대부분은 북북동 방향의 양산단층계와 서북서 방향의 가음단층계에 의해 각각 우수향과 좌수향의 변위를 보이며 절단되어 있다(그림 1c). 양산단층은 양산단층계를 구성하는 단층들 중

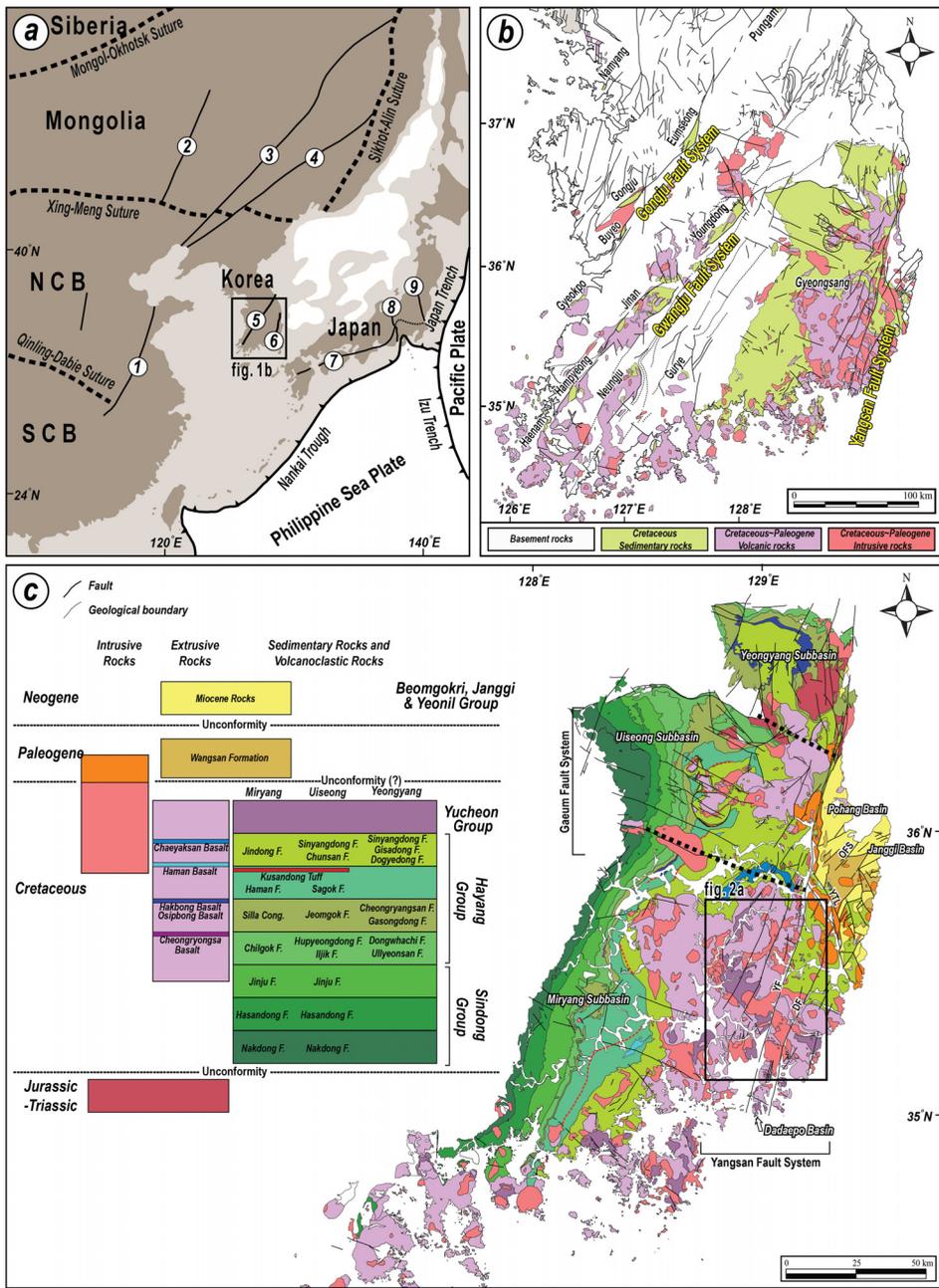


Fig. 1. (a) Tectonic outline of the eastern Eurasian margin (modified after Xu *et al.*, 1987; Ren *et al.*, 2002; Itoh *et al.*, 2006), ① Tan-Lu Fault, ② Nenjiang Fault, ③ Yilan-Yitong Fault Zone, ④ Fushan-Mishan Fault, ⑤ Gongju Fault System, ⑥ Yangsan Fault System, ⑦ Median Tectonic Line, ⑧ Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, ⑨ Tanakura Tectonic Line. (b) Distribution of the major faults and the Cretaceous-Paleogene rocks (modified from Korea Institute of Geology, Mining, and Materials, 1995). (c) Simplified geological map (modified from Hwang *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1998; Choi *et al.*, 2002) and key beds (modified from Jeong *et al.*, 2005; Jeon and Sohn, 2008; Hwang and Woo, 2009) of the Gyeongsang Basin and Miocene basins. Stratigraphic correlation of the Gyeongsang basin-fills is reconstructed from Chang *et al.* (2003), Chough and Sohn (2010), and Kang and Paik (2013). Distribution of Miocene basin-fills and faults are modified after Son *et al.* (2013, 2015). YF: Yangsan Fault, DF: Dongnae Fault, YTL: Yeonil Tectonic Line, OFS: Ocheon Fault System.

가장 연장성이 우세하고 단층대의 폭이 넓은 단층으로 육지에서 확인되는 선상구조의 길이만 170 km 이상이며, 수 km 폭의 단층대와 20 km 이상의 우수향 수평변위가 인지된다(e.g., Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980; Um *et al.*, 1983; Chang *et al.*, 1990; Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b). Chang (2002)은 주 단층의 주향 변화, 단층대폭의 변화, 고응력장의 지역적인 변화 그리고 주 단층과 부차 단층 간의 관계를 이용하여, 양산단층을 20~30 km의 길이를 가지는 5개의 분절로 구분하기도 하였다.

양산단층은 백악기 퇴적암의 암상분포에 근거하여 약 25 km (Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980; Um *et al.*, 1983) 또는 35 km (Chang *et al.*, 1990)의 우수향 수평변위를 가지는 것으로 해석되었으며, 이후 Hwang *et al.* (2004, 2007a, 2007b)은 A-형 알칼리장석화강암의 수평변위량과 절대연령에 근거하여 약 50 Ma 이후에 약 21 km의 우수향 주향이동운동이 있었음을 제안하였다. 이와 함께, Chang and Chang (1998)은 단층대에서 확인되는 단층조선에 근거하여, 북동-남서 방향의 압축환경 하에서 양산단층의 우수향 주향이동운동이 발생한 것으로 해석하였다.

과거 대다수의 연구들은 동해의 확장에 수반된 한반도 남동부 일원의 마이오세 퇴적분지들의 형성을 양산단층의 우수향 주향이동운동과 밀접한 연관이 있을 것으로 해석하였다. Han *et al.* (1987)은 마이오세 분지들의 형성기작을 양산단층과 울산단층의 우수향 주향이동운동에 의한 렌치단층지구조(wrench fault tectonics) 모델로 처음 제안하였다. 이후 Kim (1992)은 고자기 연구결과를 바탕으로, 동해의 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 확장에 수반되어 한반도 남동부 일원에 전단력이 가해져 양산단층이 우수향 주향이동단층으로 운동하고 지괴가 시계방향으로 수평회전하여 마이오세 분지들이 형성되었음을 제안하였다. Yoon and Chough (1995)는 동해 대륙 주변부의 탄성과 탐사자료에 근거하여 포항분지와 해저의 영덕분지가 양산단층과 해저 후포단층의 우수향 주향이동운동에 의해 형성된 당겨열림분지(pull-apart basin)로 보고하였다. 또한 Choi (2006)는 양산단층과 포항분지 내에 형성된 북북동 방향 장사단층의 우수향 주향이동운동에 의해 만들어진 퇴적동시성의 신평주향이동두플렉스(Singwang strike-slip duplex)가 존재함을 주장하였다. 이러한 연구들은 모두 마이오

세의 포항분지가 양산단층의 우수향 주향이동과 밀접히 관련됨을 지지하고 있다. 그러나 포항분지와 이남의 마이오세 분지들에 대한 최근의 구조지질학적 연구들(Son, 1998; Son *et al.*, 2000, 2005, 2013, 2015; Cheon *et al.*, 2012; Song, 2015; Song *et al.*, 2015)은 마이오세 분지들의 확장이 양산단층의 우수향 운동과는 무관하게 연일구조선을 포함하는 북북서 방향의 주변위대(Principal Displacement Zone)들의 우수향 주향이동운동에 의한 것으로 해석하였으며, 포항분지 서쪽경계부에 발달하는 선상지-삼각주계의 퇴적학적 연구결과들(Hong *et al.*, 1998; Sohn and Son, 2004) 역시 이러한 해석을 지지한다.

1980년대부터 한반도 남동부 일원에 원자력발전소와 방사능폐기물 처리장과 같은 국가주요시설이 위치함에 따라, 구조지질학적, 지진학적, 지질연대학적 연구를 바탕으로 해당 지역의 지진안정성과 단층의 활성화가능성이 지속적으로 평가되고 있다. 그 결과 동-서 내지 동북동-서남서 방향의 현상압축응력에 의해 양산단층의 일부 분절이 재활하였음이 보고되고 있다(Kyung *et al.*, 1999; Kyung and Chang, 2001; Kim and Jin, 2006; Yang and Lee, 2014). 또한 2016년 9월 12일 경주시 남남서쪽 8.7 km 지점에서 발생한 규모 5.8의 지진은 1978년 기상청의 계기 지진 관측 이래 역대 최대 규모의 지진으로서 진앙지 부근에는 최근까지 수백여 차례의 여진이 지속되었다(KMA, 2017). 국내외 구조지질학/지진학 전문가들은 해당 지진이 양산단층대의 운동과 밀접한 관련이 있음에 의견 일치를 이루고 있으며, 지속적인 연구들이 수행 중에 있다.

3. 지질구조요소

일반적으로 단층대는 변위가 집중되어 모암의 형태가 대부분 지워진 단층핵(fault core)과 단열, 소규모 단층, 습곡 등의 이차적인 변형이 수반되지만 모암의 형태는 보존된 단층손상대(fault damage zone)로 구분된다(e.g., Chester *et al.*, 1993; Caine *et al.*, 1996; Billi *et al.*, 2003). 이들의 경계부에서는 단층핵과 단층손상대의 특징이 점이적이고 반복적으로 발달하는 혼합대가 나타나기도 한다(Heynekamp *et al.*, 1999; Rawling and Goodwin, 2003).

이번 연구는 경부고속도로 연양-경주 간 확장공사

구간에 노출된 양산단층대 노두들 중 단층의 기하와 운동특성을 잘 보여주는 네 노두에 대해 상세하게 소개한다(그림 2b; Site-A, B, C, D). 가장 남쪽에 위

치하는 노두A는 양산단층의 주 단층핵과 혼합대가 함께 나타나는 노두로, 정밀 스케치, 비지대의 대자율이방성 측정, 구조요소들을 이용한 고응력 복원이

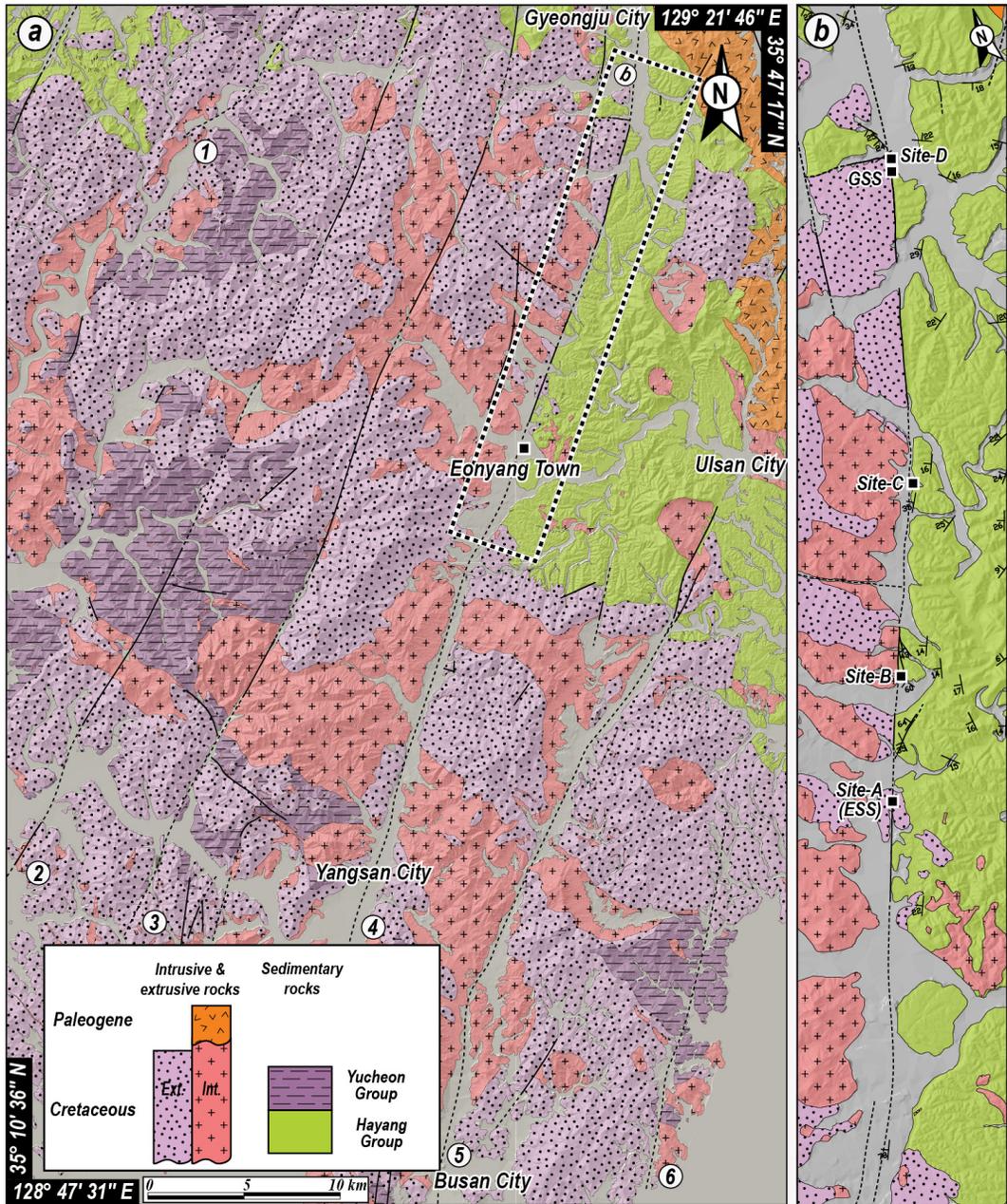


Fig. 2. (a) Geological map of the southeastern part of the Gyeongsang Basin, showing the distribution of basinfills and Yangsan Fault System. ① Jain Fault, ② Miryang Fault, ③ Moryang Fault, ④ Yangsan Fault, ⑤ Dongnae Fault, ⑥ Ilgwang Fault (modified after Lee and Kang, 1964; Kim and Jin, 1971; Lee and Lee, 1972). (b) Detailed geological map of the Eonyang-Gyeongju area with outcrop localities of the Yangsan Fault Zone. GSS: Gyeongju Service Station. ESS: Eonyang Service Station.

실시되었다. 노두B와 D는 단층손상대 노두로 두 지점에서 확인된 안행상 습곡과 동-서 방향의 부차 단층의 특징을 소개한다. 노두C는 양산단층 주 단층핵 노두로 약 0.5 m 폭의 자색 비지대만 노출되고 주변은 구조물과 층적층에 의해 이외의 구조요소를 인지할 수 없어, 단층비지 시료의 대자율이방성만을 측정하였다.

3.1 양산단층대의 야외지재학적 특성

3.1.1 단층핵과 혼합대 내에서 확인되는 구조

서울 방향 언양휴게소의 남쪽 절개사면과 바닥면에 노출된 노두A에서는 70 m 이상의 폭을 가지는 주 단층핵과 혼합대가 확인된다(그림 2b, 3, 4). 단층대를 구성하는 단층암의 모암(protolith)은 경상분지 하양층군 퇴적암류(암회색 셰일, 자색 이암, 회백색 사암)와 유천층군 안산암질 화산암류로 구분되며, 이들은 주 단층과 거의 평행한 북북동 방향으로 병치되어 분포한다. 주 단층면은 N10~20°E/70~80°SE의 자세로 암회색 셰일과 안산암질 화산암류를 경계

하고 있다(그림 3a).

단층핵 내의 암회색 셰일은 단층면의 자세와 거의 동일하게 경동되어 있는데 층간을 따라 전단된 흔적이 흔히 인지되며, 전단이 집중적으로 발생한 지점에서는 전단엽리와 함께 단층비지가 수 cm에서 수 m 폭으로 발달하고 이들이 연결되면서 망상(anastomosing)의 단층비지대를 형성한다(그림 3b). 자색 이암 기원의 단층비지와 단층각력은 고각으로 경동된 암회색 셰일 사이에 서로 연결되어 망상으로 분포하며, 회백색 사암 기원의 단층각력 또한 고각으로 경동된 암회색 셰일 사이에 발달하지만 일부 사암은 완전하게 각력화되지 못하고 수 m 폭을 가지는 렌즈상의 기하를 보인다(그림 3a, 3b). 수평면에서 확인되는 단층비지는 일부 지점에서 미약하게 Z-형의 분포를 보여 우수향 운동을 지시한다.

북북동 방향의 단층면에 의해 퇴적암과 경계지어지는 안산암질 화산암류는 대부분 각력화되어 있다(그림 4a). 이들 각력은 공역상으로 발달하는 북서 방향의 소규모 정단층들에 의해 1 m 미만의 수직 변위

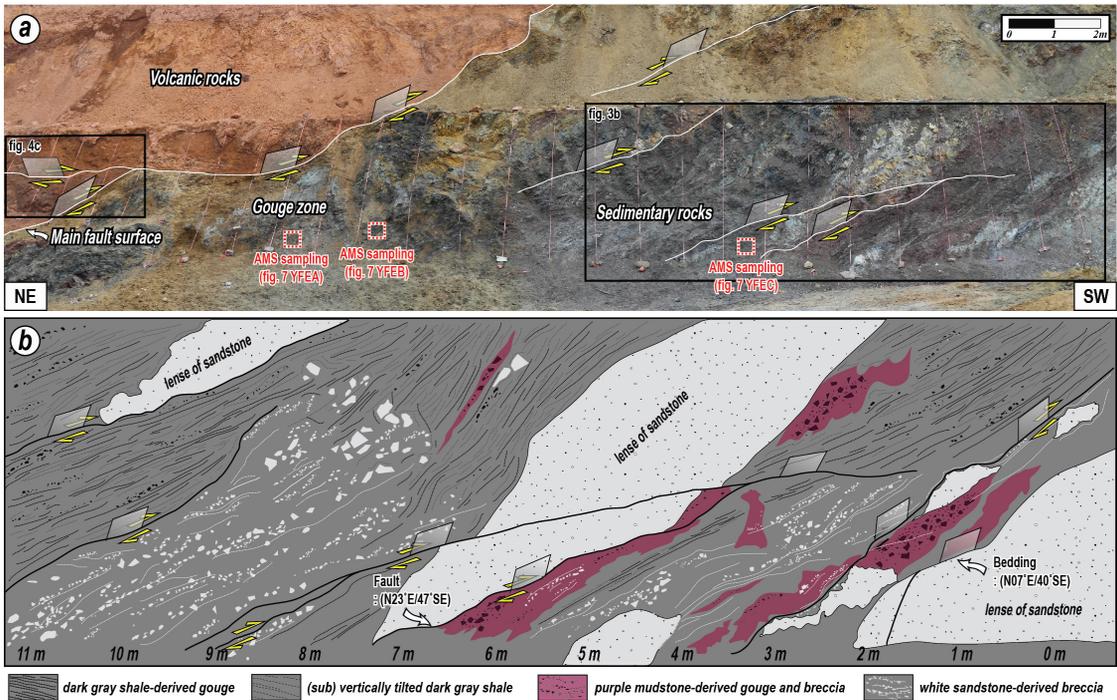


Fig. 3. Outcrop photographs showing the major features of the sedimentary rock-derived fault core (Site-A; Fig. 2b). (a) About 30 m-width section view of the Site-A showing fault core with AMS sample localities. (b) A sketch of highly deformed zone. Sedimentary strata were highly tilted similar with the fault attitude.

로 절단되고(그림 4b), 이 정단층들은 N37~47°E/60~75°SE의 자세를 가지는 단층들에 의해 우수향으로 절단되어(그림 4b, 4c), 상대적인 선후관계를 뚜렷하게 지시한다. 또한 북동 방향의 단층들 중 하나는 북북동 방향의 주 단층면을 우향 절단하는데, 이 영향으로 주 단층면을 따라 발달하는 북북동 방향의 전단엽리가 북동 방향으로 회전된 끌림 기하(drag geometry)를 보인다(그림 4c, 4d). 안산암질 화산암 내에서 인지되는 이러한 북서 내지 북동 방향의 단층들은 퇴적암에서 확인되는 수 cm에서 수 m 폭의 단층비지대가 망상으로 발달하는 것과는 달리 2 cm 이내의 비교적 좁은 단층비지대를 가지며 개별적으로 발달한다.

노출된 노두 도처에서 확인되는 수평변위(그림 3b), 끌림 기하(그림 4d), 단층활면에서 보이는 단층조선과 수다자국(chatter mark), 수평면에서 확인되는 Z-형태의 단층비지 내지 각력의 배열은 단층의 우수향 주향이동운동이 가장 우세하였음을 지시한다. 이와 함께 좌수향 횡압축성 주향이동감각을 가지는 서

북서 방향의 소규모 단층 내지 전단단열도 확인되어, 북동-남서 방향의 최대수평응력이 양산단층의 우수향 주향이동운동을 주도하였음을 지시한다.

3.1.2 단층손상대 내에서 확인되는 구조

양산단층 동편에 분포하는 퇴적암류(대구층)는 전반적으로 약 20° 내외의 각도로 서 내지 북서 방향으로 경사져 있지만, 양산단층의 인접부(경부고속도로 인근 사면)에서는 여러 방향으로 30° 이상 경동된 암회색 세일, 자색 이암, 회백색 사암이 호층을 이루며 분포하고 있다(그림 5a, 5c, 5d). 또한 일부 단층인접부에서 확인되는 습곡의 날개에 대한 극점들을 등적투영망에 도시한 결과, 북서 방향의 축(π -axis)을 가지는 하나의 대원(π -circle)으로 표현되는 원통형 습곡(cylindrical fold)이 인지되며(노두B; 그림 2, 5a, 5b), 이러한 습곡은 우수향 주향이동운동에 수반되어 형성된 안행상 습곡(en-echelon fold)으로 판단된다. 이들 지층은 북북동 내지 북동 방향의 소규모 단층들에 의해 수 m 변위를 가지며 우향 절단되어 있

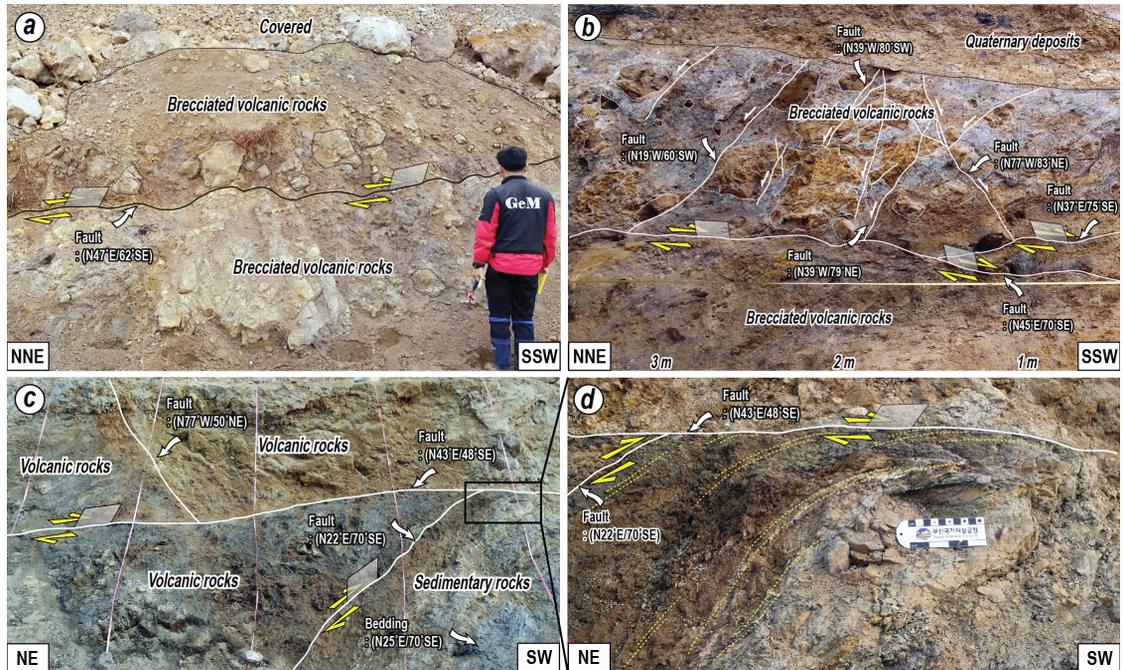


Fig. 4. Outcrop photographs showing the major features of the andesitic rock-derived fault core (Site-A of Fig. 2b). (a) Brecciated volcanic rocks transected by a NE-striking dextral strike-slip fault. (b) An exposure of brecciated volcanic rocks. Note that NW-striking conjugate fault system is cut by a NE-striking dextral strike-slip fault. (c) A NNE-striking fault contact between sedimentary rocks and volcanic rocks transected by subsequent NE-striking fault, and (d) dragging patterns indicating dextral movement of the NE-striking fault.

며(그림 5c, 5d, 5e), 각 단층면에서 확인되는 단층조 선 역시 우수향 주향이동감각을 지시한다(그림 5f). 또한 서북서 방향의 소규모 단층들은 주로 정이동성 감각을 가지는 것과 좌수향 주향이동감각(그림 5g)을 가지는 것으로 구분된다.

경부고속도로 서편 사면(양산단층의 서편)에서 확인되는 안산암질 화산암류 내에는 (1) 북북동 내지 북동 방향의 전단단열과 (2) 동-서 내지 서북서 방향의 전단단열이 우세하게 확인되며, 이러한 여러 방향의 전단단열 면에는 우수향 주향이동감각 또는 좌수향 주향이동감각의 단층조선이 모두 인지되어 응력환경의 변화에 따른 두 번 이상의 운동을 지시한다. 한편 여러 지점에서 열수로 인한 심한 풍화·변질

의 특징이 확인되고 망상의 광맥도 다수 발달하고 있어, 단층운동 당시 또는 전후로 상당한 열수작용을 겪었을 것으로 판단된다. 부산 방향 경주휴게소에서 북쪽으로 약 500 m에 위치한 노두D에서는 퇴적암과 안산암질 응회암을 절단하고 있는 동-서 방향의 고각 단층이 확인되는데(그림 2b, 6a), 약 5 cm 내외 폭을 가지는 단층핵은 대부분 단층비지로 구성되고(그림 6b), 단층활면에는 우수향 주향이동감각의 단층조선이 인지된다. 이 단층의 북쪽 지괴에 분포하는 퇴적암은 남서쪽으로 25° 내외의 각도로 경사진 자세를 보이지만 단층인접부에서는 고각으로 남 내지 남동쪽으로 경사진 자세를 보인다(그림 2b, 6a). 이 동-서 방향의 단층과 남쪽지괴의 안산암질 응회

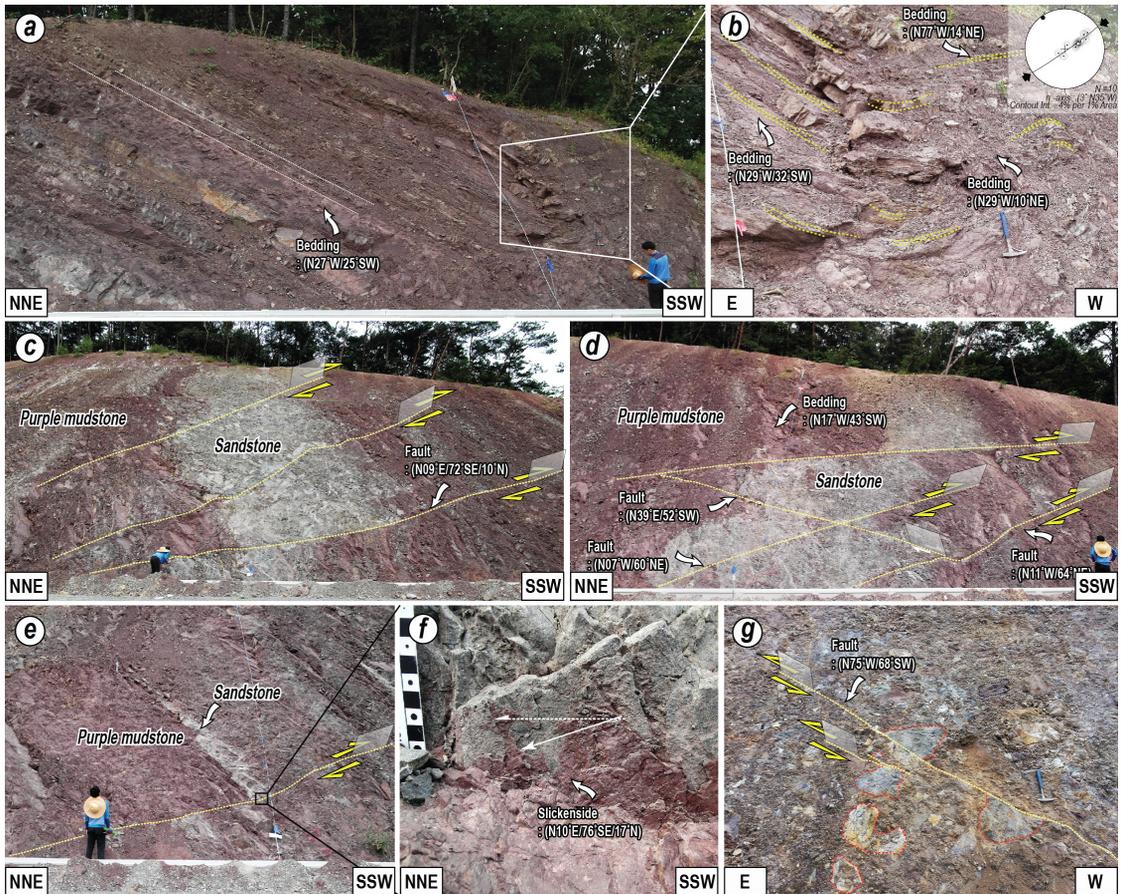


Fig. 5. Outcrop photographs showing the major features of the damage zone (*Site-B* of Fig. 2b). (a) Folded sedimentary strata in the damage zone. (b) A close-up photograph of the fold with NW-fold axis. Inset shows the π -diagram by fitting a great circle to the poles of fold limbs. (c, d, e) Tilted and deformed sedimentary strata dextrally cut by NNE or NE-striking faults. (f) Dextral reverse oblique-slip sense on the subsidiary NNE-striking fault surface. (g) Conglomerate sinistrally transected by WNW-striking faults.

암(그림 6c)이 양산단층의 서편에서만 확인되고 동편에서는 전혀 인지할 수 없었기에 근거할 때, 양산단층의 우수향 주향이동운동 이전 운동임을 유추할 수 있다.

3.2 대자율이방성

대자율이방성은 암석을 구성하는 개별 입자(혹은 광물)와 관련된 것으로, 입자의 모양과 관련된 형태이방성(shape anisotropy) 및 결정학적 특징과 관련된 결정이방성(crystalline anisotropy)으로 발견된다(Hrouda, 1982; Borradaile, 1988; Rochette *et al.*, 1992; Cho, 2014). 이 방법으로 도출된 자기미세구조는 타원체를 복원할 수 있으므로($k_1 > k_2 > k_3$), 이번 연구에서는 단층비지의 대자율이방성을 이용하여 단층의 운동감각을 밝히고자 하였다(Cho, 2014; Cho *et al.*, 2014). 시료들은 무자성 플라스틱 큐빅 박스를 이용하여 단층비지가 확인되는 두 노두의 4지점에서 총 48개를 채취하였으며(노두A: YFEA~C, 노두-C: YFED; 그림 2b), 대자율이방성의 측정은 AGICO사의 Kappabridge KLY-4S를 사용하였다.

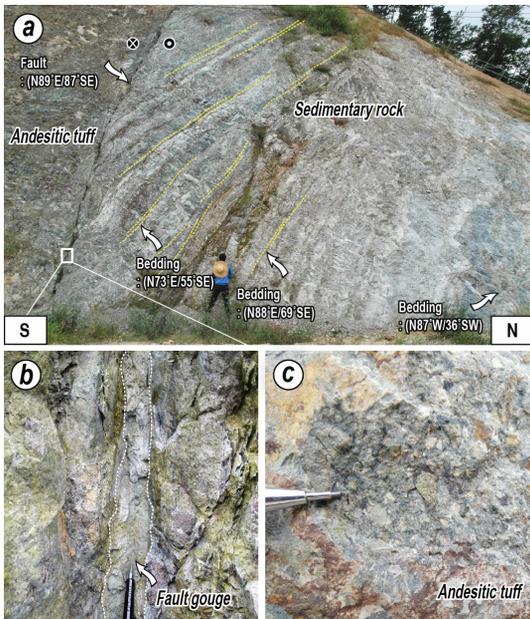


Fig. 6. Outcrop photographs showing the major features of the E-W-striking fault (Site-D of Fig. 2b). (a) An exposure of the E-W-striking dextral strike-slip fault. (b) A fault core composed of 5 cm-thick clay-rich gouge. (c) Andesitic tuff in the southern block of the fault.

노두A (그림 2b, 3a)의 단층핵 구간에서 제일 동쪽에 위치한 북북동 방향의 암회색 단층비지대에서 채취한 시료를 YFEA로 설정하고, 상대적으로 서쪽

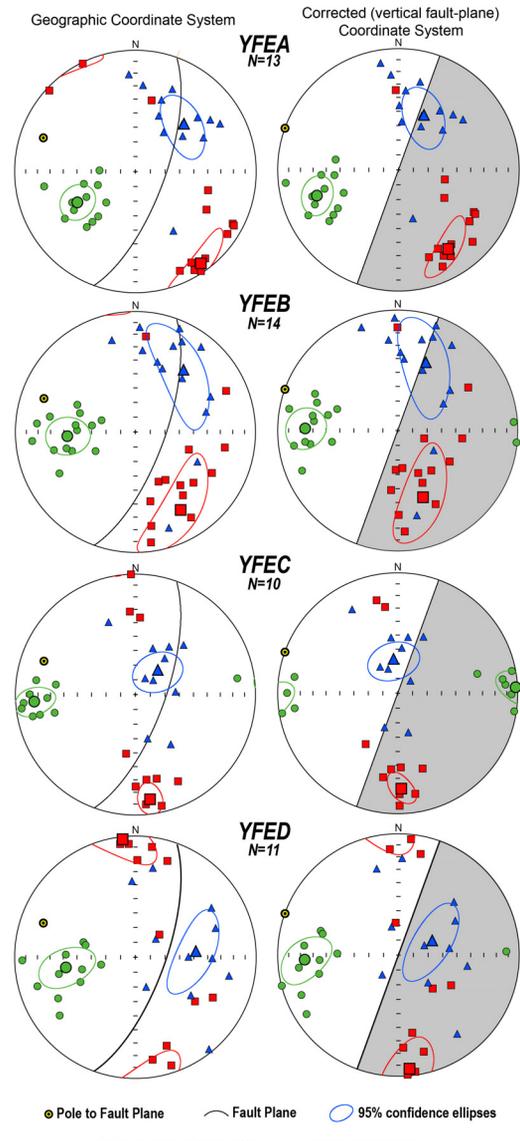


Fig. 7. AMS results from the fault gouge of Site-A (YFEA~C) and Site-C (YFED). Left equal-area lower hemisphere projections show the AMS principal axes (k_1 , k_2 and k_3), their 95% confidence ellipse and fault attitude. Right equal-area projections show that fault surfaces are corrected to be vertical dip for convenience of interpretation (Gray color area represents hanging walls). The AMS ellipsoids are overall oblate and can be described as “dextral strike-slip movement”.

Table 1. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data from the Yangsan Fault gouges.

Site	n	k_{mean} (μ SI)	Mean	Eigenvectors		AMS	Parameters			FSA
			k_1	k_2	k_3	L	F	P_j	T	
Outcrop-A										
YFEA	13	68	144/08	047/44	242/45	1.003	1.014	1.018	0.587	020/70
YFEB	14	68	150/26	039/36	267/43	1.001	1.011	1.013	0.808	020/70
YFEC	10	63	172/13	045/69	266/17	1.004	1.009	1.013	0.377	020/70
Outcrop-B										
YFED	11	93	354/02	086/49	262/41	1.004	1.010	1.015	0.405	020/70

n: number of specimens; k_{mean} : mean magnetic susceptibility, $(k_1+k_2+k_3)/3$; mean eigenvectors: site-mean directions, declination/inclination of k_1 (maximum), k_2 (intermediate), k_3 (minimum) corrected to be vertical fault surface; L: lineation, k_1/k_2 , after Balsley and Buddington (1960); F: foliation, k_2/k_3 , after Stacey *et al.* (1960); P_j : corrected anisotropy degree, $\exp[2\{(n_1-n_m)^2+(n_2-n_m)^2+(n_3-n_m)^2\}]^{1/2}$, $n_1=\ln k_1$, $n_2=\ln k_2$, $n_3=\ln k_3$, $n_m=(n_1+n_2+n_3)/3$, after Jelínek (1981); T: shape parameter, $[(2\ln(k_2/k_3)/\ln(k_1/k_3))-1]$, after Jelínek (1981) and Hrouda (1982). FSA: Fault Surface Attitude.

에 분포하는 각각의 북북동 방향 압회색 단층비지대에서 YFEB와 YFEC으로 구분하여 시료를 채취하였다. 또한 노두C에서 0.5 m 폭으로 노출된 자색 단층비지대에서도 시료(YFED)를 채취하였다(그림 2b). 두 노두에서 주 단층면은 전반적으로 N20°E/70°SE의 자세를 가진다(표 1). 네 지점의 대자율이방성 세 주축 방향들은 각각 상당히 양호한 균집도를 보이며, 확인되는 대자율이방성 타원체들은 모두 편평형의 영역($T>0.377$)에 분포한다(그림 7; 표 1). 단층면 수직보정 후의 k_1 의 방향과 k_2 의 방향은 고각의 남북 방향 면을 따라 뚜렷한 대원을 이루고, 입자들의 단축 방향을 지시하는 k_3 는 저각의 선경사와 동-서 내지 서남서 방향의 선주향을 보이며 해당 단층면의 극에서 반시계방향으로 약 15°이상 회전되어 균집된 양상이다(그림 7). 한편, 미세구조의 발달정도를 가늠하는 P_j 값은 대부분 시료들이 1.018 미만으로 나타난다(표 1). 이상의 특징들은 양산단층의 우수향 주향이동운동에 의해 남-북 방향의 면구조들이 S-C 조직에서 S-조직의 특징으로 단층비지대 내에 미세구조의 발달을 보이는 것으로 해석된다.

3.3 고응력장 복원과 상대적 운동시기

양산단층의 움직임에 주도하였던 고응력을 복원하기 위해 단층대 내에서 수집한 소규모 단층과 전단 단열자료를 활용하였으며, 해당자료의 처리는 Delvaux and Sperner (2003)에 의해 제공된 Wintensor S/W (v.5.8.5)가 사용되었다. 주향이동단층 운동이 우세한

지구조적 환경에서는 σ_1 과 σ_2 의 크기가 거의 동일하여 지표에 수직하게 배열되는 σ_1 과 σ_2 의 방향이 서로 쉽게 바뀔 수 있으므로(Ring *et al.*, 1992), σ_1 과 σ_2 의 방향에 관계없이 σ_3 의 방향이 거의 일치할 경우에는 동일한 응력환경으로 판단하여 분류하였다.

양산단층의 Y-전단면에서 확인되는 다양한 운동 감각의 단층조선들은 양산단층대가 다른 감각으로 여러 번 운동하였음을 지시하지만, 이번 연구에서는 단층의 운동을 주도한 고응력장을 크게 북서-남동 압축(또는 북동-남서 인장)과 북동-남서 압축(또는 북서-남동 인장)의 두 사건으로 구분하였다(그림 8). 노두A에서 확인되는 단층들의 상대적인 절단관계는 두 사건의 선후관계를 밝히는데 결정적인 역할을 한다. 안산암질 단층각력암을 절단하고 있는 북서 방향의 소규모 정단층들은 북동 내지 북북동 방향의 우수향 주향이동단층에 의해서 절단되는데(그림 4b, 4c), 이는 북서-남동 압축(또는 북동-남서 인장)이 북동-남서 압축 이전의 사건임을 지시한다. 즉 전자의 응력환경 하에서는 양산단층의 좌수향 운동이, 후자의 응력환경 하에서는 양산단층의 우수향 운동이 발생하였을 것으로 판단된다. 또한 양산단층의 좌수향 운동과 관련된 변형에 비해 우수향 주향이동운동과 관련된 변형은 단층핵뿐만 아니라 단층손상대 전반에 걸쳐 인지되므로 후기의 강력한 우수향 주향이동 운동이 앞선 좌수향 주향이동운동에 수반된 변형을 압도하며 지웠음을 지시한다. 한편 일부 노두에서는 남-북~북북동 방향의 단열들이 주로 정이동성 감각

으로 운동하여 서북서-동남동 방향의 인장응력을 지시하고 있으나(그림 8), 앞서 제시한 두 응력환경에서 형성된 변형들과의 선후관계는 인지하지 못하였다.

양산단층대의 동쪽 인접부에는 단층의 영향에 의한 지층의 경동 내지 휘어짐이 흔하게 인지된다. 습곡이 확인되는 지점에서의 향사 및 배사의 날개 지층자세를 측정하여 습곡축을 복원한 결과, N35°W의 선주향에 3°의 선경사를 가지는 π -축을 지시한다(그림 8). Choi *et al.* (2009)는 상천리 신북마을에서 확인되는 N20~40°W의 주향에 고각의 습곡축면을 가지는 습곡의 형성이 양산단층의 우수향 주향이동 운동에 수반된 안행상 습곡 또는 제4기 동북동-서남서 방향의 압축력에 의해 기존의 단층이 재활용하면서 형성된 구조로 가능성을 열어두었다. 이번 연구에서는 습곡축의 전반적인 방향(북서 방향)과 현생 응력 방향과의 관계(동-서 내지 동북동-서남서 압축 응력)에 근거할 때, 제4기 응력환경보다는 이전의 북동-남서 방향의 압축환경에서의 양산단층의 광역적인 우수향 주향이동운동과 관계되어 형성된 안행상 습곡에 무게를 실는다.

4. 토 의

4.1 양산단층대의 내부 구조

양산단층은 20 km 이상의 우수향 수평변위를 가지면서 퇴적암, 화산암, 화강암을 절단하고 있어 단층대가 노출된 지점에서는 다양한 암석에서 기원된 단층암이 병치되어 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 노두A의 단층대는 노출된 단층핵과 혼합대가 약 70 m 이상에 달하며, 퇴적암(암회색 셰일, 자색 이암, 회백색 사암) 기원의 단층암과 안산암 기원의 단층암이 북북동 방향으로 나란히 발달한다(그림 3).

대규모 주향이동단층에 대한 몇몇 연구들은 절단된 모암의 종류에 따라 차별적인 변형양상을 가지는 단층대를 보고하고 있다. Faulkner *et al.* (2003, 2008)의 야외지질학적 연구에서는 층상규산염광물이 풍부한 모암(phyllosilicate-rich protolith)을 절단하는 단층은 변형강화(strain hardening)를 겪어(Morrow *et al.*, 2000) 망상의 단층비지대를 형성하며 단층대의 폭이 넓어지는 경향을 보고하고, 이러한 특징을 가지는 단층은 주로 포행(creep)을 하여 지진활동이 활발하지 않는 것으로 해석하였다. 반면,

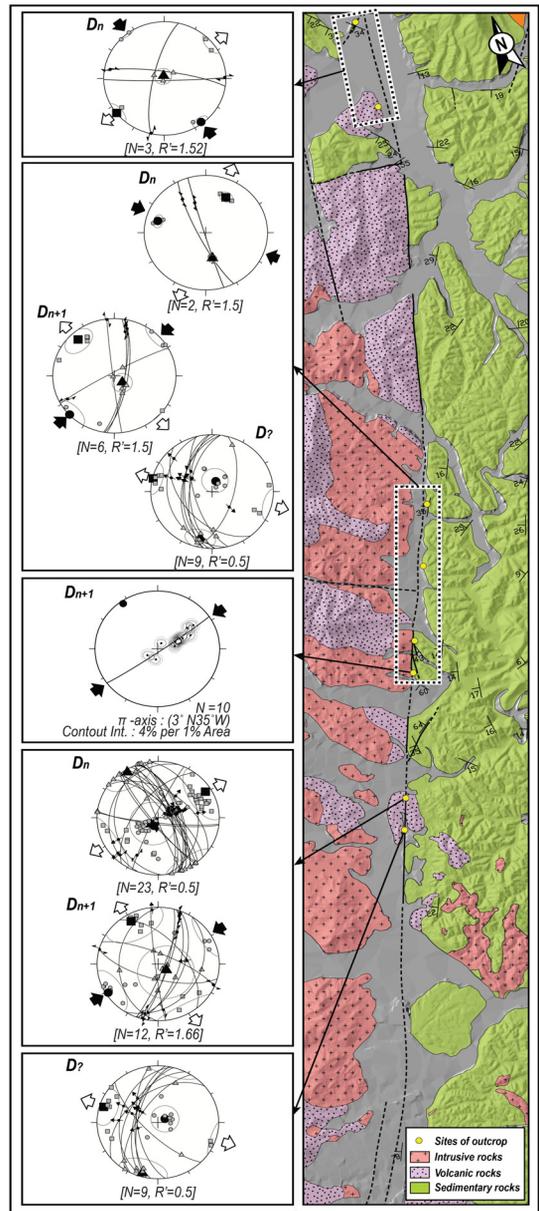


Fig. 8. Slip data in the fault zone (lower-hemisphere, equal-area projection) and fold axes estimated from best-fitting π -circles of various attitudes of fold limbs. Convergent and divergent arrow heads represent contraction (σ_{Hmax}) and horizontal stretching (σ_{Hmin}) direction, respectively. When determined, the principal stress axes σ_1 (circles), σ_2 (triangles), σ_3 (squares) are also projected. Based on relative chronologies at the outcrops, reconstructed paleostress regimes are roughly divide into (1) earlier NW-SE compression (or NE-SW tension) and (2) later NE-SW compression (or NW-SE tension). $R^? = R(\sigma_1 \text{ is vertical})$, $2-R$ (σ_2 is vertical), or $2+R$ (σ_3 is vertical) [Delvaux *et al.* 1997; R: $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$].

결정질 암석(crystalline rocks)을 절단하는 단층은 변형약화(strain weakening)를 겪으며 주로 하나의 길고 좁은 단층비지대로 발달하며 지진활동과 관련이 있음을 보고하였다. Lee and Kim (2005)은 한반도 금왕단층대의 연구를 통해 화강암질 편마암 내에서의 전단변형은 전단면 또는 얇은 단층비지대에 집중되어 나타나거나 입자유동(particulate flow)의 특징을 보이는 반면, 이암 내에서의 전단변형은 상대적으로 분산되어 망상의 엽리 형성을 보고한 바 있다.

양산단층의 주 단층핵 역시 모암에 따라 변형양상이 뚜렷한 차이를 가진다. 퇴적암 기원의 단층암으로 구성된 단층핵은 수 cm에서 수 m 이내의 폭을 가지는 단층비지대가 주 단층면의 자세와 유사하게 경동된 지층들 사이에서 망상으로 발달한다. 단층비지대는 암회색과 자색으로 구분되어 모암이 되는 퇴적암을 분별 가능한데, 암회색 단층비지대는 주로 순수한 단층비지로 구성되고 자색 단층비지대는 단층각력도 상당량 포함한다. 반면 회백색 사암은 단층각력의 형태로 분포하거나 완전히 각력화되지 않은 수 m 폭의 렌즈상의 기하로 암회색 내지 자색 단층비지대에 에워싸여 있다. 이러한 특징은 단층운동 시, 하나의 단층비지대에서 모든 응력을 해소하지 못하고, 고각으로 경동된 지층의 층간에서 새로운 전단이 발생하면서 전단엽리와 수 cm에서 수 m 폭의 단층비지대가 망상으로 형성되어 응력을 해소하였음을 암시하며(strain hardening; Faulkner *et al.*, 2003, 2008), 특히 세립질이고 엽층이 발달하는 퇴적암이 조립질이고 괴상인 퇴적암에 비해 물리적으로 쉽게 미립의 입자 크기로 분쇄될 가능성이 높음을 지시한다. 이러한 모암의 물성은 단층의 다중변형과 더불어 단층핵이 보다 넓게 발달하는데 중요한 역할을 했을 가능성이 높다(Faulkner *et al.*, 2003, 2008). 안산암 기원의 단층암으로 구성된 단층핵은 수 cm에서 수십 cm 직경을 가진 단층각력들로 주로 구성된다. 단층각력들은 1~2 cm 폭의 단층비지를 가지는 소규모 부차 단층(localized fault)들에 의해 절단되어 있으며, 이러한 단층들은 상호절단관계가 인지된다. 즉, 안산암류를 절단하는 소규모 단층들은 주로 개별적으로 좁은 전단면 또는 얇은 비지대에 전단이 집중된 단층으로 운동하여, 분산된 변형특징을 보이는 퇴적암 기원의 단층핵과 상당한 변형차이를 보인다.

양산단층 동편의 단층손상대 내에는 자색 이암과 회백색 사암이 단층운동에 의해 50° 이내로 경사져 있는데, 이들은 북동 내지 북북동 방향 부차 단층들의 우수향 주향이동운동에 의해 절단되어 있다. 부차 단층들은 ~2 cm 두께의 단층비지 또는 우수향 주향이동단층조선과 수 m의 수평변위를 가진다. 한편, 단층핵에 가까이 갈수록 모든 지층의 경동은 뚜렷하게 인지가 되지만, 습곡은 엽층이 발달하는 지층에서만 주로 확인된다.

양산단층대에서 확인되는 이러한 변형특징들은 절단된 암석의 상대적인 연성(ductility)에 따라 변형양상이 차별적으로 나타남을 지시한다. Faulkner *et al.* (2008)은 일반적으로 모암의 연성이 높을수록 모암과 단층암 간의 상대적 강도(strength)가 비슷하여 변형강화에 의해 변형이 분산되어 나타나며, 모암의 연성이 낮을수록 모암과 단층암 간의 강도 차이가 커지며 변형약화가 발생함을 제시하였다. 즉, 퇴적암과 화산암 간의 상이한 연성도는 퇴적암이 수 cm에서 수 m 두께의 단층비지대를 망상으로 분산시켜 넓게 형성시키는 반면, 화산암이 2 cm 이내 두께의 좁고 개별적으로 발달하는 단층비지대 또는 단층각력을 형성시키는데 주요한 역할을 한 것으로 판단된다. 또한 퇴적암 중에서도 상대적으로 연성도가 우세한 셰일이 사암에 비해 단층핵에서는 망상의 단층비지대를, 단층손상대에서는 습곡을 형성하는데 주된 역할을 한 암상으로 판단된다.

4.2 양산단층의 진화사

이번 토의에서는 본 연구결과와 기존 양산단층계에 대한 연구들을 종합하여 앞서 구분한 두 번의 주요 사건시기를 규명하고자 한다. 종합된 백악기말부터 제4기까지 한반도 남동부 일원의 고응력장과 동아시아 일원의 광역적인 지구조 사건들은 그림 9에 도시하였다.

4.2.1 양산단층의 좌수향 운동과 시기

언양휴계소(노두A)에서 확인되는 북서 방향의 정이동성 단층들은 단층운동에 의해 각력화된 안산암질 화산암류를 약 1 m 이내의 수직변위로 절단하고 있으며, 이는 안산암질 단층각력암의 형성이 북서 방향의 정이동성 단층의 운동 이전 또는 동시임을 지시한다. 이러한 북서 방향의 정단층들은 북북동 내지

북동 방향의 우수향 주향이동단층들에 의해 절단되어 있다. Cho *et al.* (2007)은 양산단층과 동래단층 사이에 분포하는 화강암류(60~70 Ma)에서 확인된 북동-남서 방향의 자기적 열리구조가 양산단층계의 좌수향 주향이동운동에 수반된 북서-남동 방향 압축력에 의한 결과로 해석하였다. 이후 Cho *et al.* (2016)은 양산단층과 동래단층 사이에 형성된 다대포분지의 구조지질학적인 특징(북동 방향 지층경동, 북서 방향 쉘설성 암맥과 마그마성 암맥, 북서 방향 퇴적 동시성 단층)과 기반암 및 분지 충전물의 절대연령에 근거하여, 다대포분지가 백악기말에 북북동 방향

양산단층과 동래단층의 좌수향 주향이동운동에 의해 형성된 당겨열림분지(pull-apart basin)임을 제안하였다. 이러한 기존 연구결과들은 연구지역 단층 손상대 내에서 확인되는 북서 방향의 정이동성 단층들이 백악기말 양산단층의 좌수향 주향이동운동에 수반된 정이동성 단층임을 암시한다.

4.2.2 양산단층의 우수향 운동과 시기

양산단층의 우수향 주향이동운동은 양산단층계의 진화를 이해하는데 있어 단층의 가장 주요한 운동으로 평가되어 왔다. 지층의 변위와 단층대 내에서 확

	Series / Epoch	Stage / Age (Ma)	Published Paleo-stress regime in and around SE Korea	Regional tectonic event in East Asia
Quaternary	Holocene	0-0.017	 Focal mechanisms (e.g., Park <i>et al.</i> , 2007; Hoe and Kyung, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> Change of the movement direction and subduction angle of Pacific plate (5-3.2 Ma) (e.g., Kim <i>et al.</i>, 2016) Initiation of the eastward movement of the Amur plate (~4-3 Ma) (e.g., Taira, 2001; Fournier <i>et al.</i>, 2004)
		Upper Pleistocene		
	Pleistocene	Middle Pleistocene	 Quaternary fault slip data (e.g., Moon <i>et al.</i> , 2000; Chang, 2001; Kyung and Chang, 2001; Lee, 2003)	
		Calabrian		
		Gelasian		
Neogene	Pliocene	Piacenzian	 Seismic data (Yoon and Chough, 1995; Yoon <i>et al.</i> , 2014)	
		Zanclean		
		Messinian		
	Miocene	Tortonian	 Folds, slip data, veins (Kim <i>et al.</i> , 2008)	<ul style="list-style-type: none"> Collision of Philippine Sea plate and southwesternmost part of Japanese Islands (ca. 16 Ma) (e.g., Kimura <i>et al.</i>, 1991; Otofujii <i>et al.</i>, 1991; Kim, 1992; Jolivet <i>et al.</i>, 1995; Hall, 2002)
		Serravallian		
		Langhian		
		Burdigalian		
		Aquitainian		
	Oligocene	Chattian	 Fault slip data (Chang and Chang, 1998; Ha <i>et al.</i> , 2016; This study)	<ul style="list-style-type: none"> East Sea opening (~25 Ma) (e.g., Otofujii <i>et al.</i>, 1985; Tamaki, 1995; Jolivet <i>et al.</i>, 1994, 1995; Son <i>et al.</i>, 2015)
		Rupelian		
Paleogene	Eocene	Priabonian	 Dike swarms (Kim <i>et al.</i> , 2005; Son <i>et al.</i> , 2007)	<ul style="list-style-type: none"> Regional Uplift, Exhumation Amalgam between the Pacific and Kula plates (Engelbreton <i>et al.</i>, 1985; Lonsdale, 1988) Movement direction change of merged Pacific plate from NNW to WNW (ca. 43 Ma) (e.g., Engelbreton <i>et al.</i>, 1985; Lithgow-Bertelloni and Richards, 1998; Koppers <i>et al.</i>, 2001) Collision of India and Eurasia plates (~50 Ma) (e.g., Patriat and Achaache, 1984; Besse and Courtillot, 1988; Rowley, 1996; Hall, 2002)
		Bartonian		
		Lutetian		
	Paleocene	Ypresian		
		Thanetian		
		Selandian		
Cretaceous	Maastrichtian	Danian	 Magnetic fabrics in the granite between NNE-striking faults (Cho <i>et al.</i> , 2007)	<ul style="list-style-type: none"> Movement direction change of the Pacific plate (ca. 74 Ma) (Orthogonal subduction to oblique subduction beneath Eurasia Plate) (e.g., Engelbreton <i>et al.</i>, 1985; Lithgow-Bertelloni and Richards, 1998) Regional Uplift, exhumation Movement direction change of the Izanagi plate (ca. 84 Ma) (Oblique subduction to orthogonal subduction beneath Eurasia Plate) (e.g., Engelbreton <i>et al.</i>, 1985; Lithgow-Bertelloni and Richards, 1998) Subduction of Izanagi-Pacific ridge (90-80 Ma) (e.g., Engelbreton <i>et al.</i>, 1985; Maruyama <i>et al.</i>, 1997)
		Campanian		
		Santonian		
	Cenomanian	Coniacian	 Syn-depositional normal faults, clastic and magmatic dikes between the NNE-striking faults (Cho <i>et al.</i> , 2016)	
		Turonian		
		Cenomanian		

Fig. 9. Summary of the paleostress history in SE Korea and regional tectonic events in East Asia.

인되는 다양한 운동감각 지시자들(단층조선, S-C 조직, 단층암의 Z-형태 배열, 암편의 시계방향 회전, 북서 방향의 습곡축을 가지는 안행상 습곡 등)은 양산 단층의 우수향 주향이동운동을 절대적으로 지지하고 있으며(그림 2, 3, 4, 5), 단층암의 자기미세구조도 단층의 우수향 주향이동운동을 지지하고 있다(그림 7). 또한 단층대 내에서 확인되는 북북동 내지 북동 방향의 우수향 주향이동단층들은 대부분의 구조를 우향 절단하고 있는데, 특히 북동 방향의 부차 단층들은 북북동 방향 양산단층(Y-shear)이 우수향 주향이동운동을 하는 동안 동일한 감각으로 운동한 리델 전단(Riedel-shear)으로 해석된다. 한편, 단층대 내외에는 서북서 방향의 단층 또는 전단단열들이 흔하게 관찰되며, 이들의 단층활면에서 확인되는 운동감각 지시자들은 좌수향 횡압축성 주향이동운동이 압도적으로 우세하였음을 지시한다. 이는 기존 서북서 방향의 단열이 북동-남서 압축환경 하에서 북북동 방향의 단열과 함께 공액상으로 활동한 결과로 해석된다.

포항시 기계면(양산단층 서편)과 경주시 배동/남산동 일원(양산단층 동편)에 분리되어 위치하는 남산화강암은 A-형 알칼리장석화강암이라는 뚜렷한 암석학적 특징을 가지고 있어, 이 화강암의 분리는 양산단층의 약 21.3 km 우수향 수평변위를 평가하는 주요 지시자로 활용된 바 있다(Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b). 특히 이 화강암의 절대연령은 양산단층 우수향 주향이동운동이 약 50 Ma 이후에 발생하였음을 지시한다. 한편 경상도 일원에 광역적으로 분포하는 남-북 내지 북북동 방향의 염기성 암맥군의 Ar^{40}/Ar^{39} 절대연령은 51~44 Ma로 보고되어, 해당 시기에 한반도 일원에 광역적인 동-서 내지 서북서-동남동 방향의 인장응력이 작동하였음을 지시한다(Kim *et al.*, 2005; Son *et al.*, 2007). 이러한 한반도 남동부 일원의 시기별 변형특징들은 간접적으로나마 양산단층계의 우수향 주향이동운동을 주도한 북동-남서 방향의 압축응력이 약 44 Ma 이후에 작동되었음을 알려준다. 한편, 최근의 구조지질학적, 퇴적학적 연구들은 양산단층의 우수향 주향이동운동이 마이오세 분지의 형성과는 관련이 없으며, 이들 분지가 양산단층과 울산단층의 2~5 km 동쪽에 위치하는 북북동 방향의 정단층과 북북서 방향의 우수향 주향이동단층(연일구조선)에 의해 구획되어 분포함을 보고하였다(Son, 1998; Son *et al.*, 2000, 2005, 2013, 2015; Cheon *et*

al., 2012; Song, 2015; Song *et al.*, 2015). 특히, 이러한 북북서 방향 우수향 단순전단(simple shear) 환경 하에서 분지의 확장을 주도한 북북동 방향의 정단층들은 점진변형(progressive deformation)으로 시계 방향으로 회전되면서 운동감각이 좌수향 횡인장성 사교이동으로 변화되었다(Cheon *et al.*, 2012). 이러한 직·간접적인 연구결과들에 근거할 때, 마이오세 분지 형성시기에는 북북동 방향의 양산단층이 우수향 주향이동운동보다는 정단층으로 운동하여야 했음이 타당하나 양산단층 인접부에는 마이오세 분지 충전물이 전혀 분포하고 있지 않은 것으로 미루어 판단하면 이 시기에는 양산단층의 활동이 미미했을 것으로 추정된다. 따라서 양산단층은 43~25 Ma 사이에 북동-남서 방향의 광역적인 압축응력 하에서 우수향 주향이동으로 재활동한 것으로 해석된다.

4.2.3 중기 마이오세 이후의 운동

야외에서 확인되는 양산단층대의 운동감각 대부분이 우수향 주향이동감각을 지시하며, 이러한 감각은 이전에 발생한 좌수향 주향이동운동에 의한 변형 특징을 지운 양상이다. 하지만 약 16 Ma에 북상하는 필리핀해판과 일본열도 남서부의 충돌은 북북서-남남동 방향의 압축응력을 한반도 전반에 작동시켜, 마이오세 분지의 확장을 종결시켰을 뿐 아니라 양산단층의 일부 분절들을 좌수향 주향이동감각으로 운동시켰을 가능성이 여러 연구들에서 제시되고 있으며(Kim *et al.*, 2008; Son *et al.*, 2013, 2015), 양산단층대 일원의 구조지질학적 연구에서도 우수향 주향이동운동 이후의 좌수향 주향이동운동이 보고되고 있다(Chang and Chang, 1998; Chang, 2002). 또한 마이오세 장기분지 오천지괴 내에 분포하고 있는 약 18 Ma의 현무암질 안산암(Lee *et al.*, 1992)은 북북동 내지 북동 방향의 좌수향 횡압축성 주향이동단층에 의해 절단되어 있어(Cheon *et al.*, 2012), 마이오세 분지의 확장 이후에 한반도 남동부 일원에 북북서-남남동 방향의 최대수평응력이 작동하였음을 지시한다. 하지만 후기 좌수향 주향이동운동에 의한 변형은 앞선 우수향 주향이동운동에 의한 변형을 압도하지 못하고 양산단층계를 구성하는 단층들 중 일부 분절들에서만 확인된다.

한편, 신기 지구조 환경에 해당하는 동북동-서남서 내지 동-서 방향의 최대수평응력환경에서도 양산

단층계의 일부 분절들이 우수향 횡압축성 감각으로 재활된 양상이 보고된 바 있다(e.g., Kim, Y.-S. *et al.*, 2011; Kim, M.-C. *et al.*, 2016). 또한 최근 발생한 9.12 경주 지진은 양산단층을 구성하는 일부 분절들의 재활이 현생 응력환경 하에서도 가능함을 증명하는 계기가 되었으며, 양산단층에 대한 국민적 관심을 고취시켰다. 이번 연구를 통해 새롭게 보고된 언양-경주 일원의 양산단층대 변형특성과 진화사는 양산단층의 제반특성에 대한 보다 진일묘한 정보를 제공해 주리라 기대한다. 하지만 양산단층대의 재활에 의한 예상 지진규모, 예상 피해지역 등을 구체적으로 이해하기 위해서는 양산단층대의 정확한 분절특성과 주 단층 및 부차 단층의 분포에 대한 체계적이고 면밀한 야외조사와 함께 지하 심부에서 단층암의 역학적 특성에 따른 거동 양상에 대한 연구(Woo *et al.*, 2015, 2016)도 지속적으로 수행되어야 한다.

5. 결론

이번 연구는 경부고속도로 언양-경주 구간 확장공사에 의해 노출된 노두들을 상세 조사하여 양산단층대의 내부 변형특성과 구조운동사를 이해하고자 하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 노출된 노두에서 확인되는 양산단층대는 수십 m 폭의 단층핵/혼합대와 수백 m의 단층손상대로 구분된다. 단층암은 퇴적암류와 안산암질 화산암류에서 기원되어 단층핵 내에 북북동 방향으로 병치되어 분포하며, 모암에 따라 변형양상의 차이를 보인다. 엽층이 발달하는 세립질 퇴적암은 주 단층면의 자세와 유사하게 경동되며, 층간의 전단이 집중된 구간에는 전단엽리 내지 수 cm에서 수 m 이내의 폭을 가지는 단층비지대가 망상으로 발달한다. 반면 괴상의 조립질 퇴적암은 단층각력의 형태로 분포하거나 완전히 각력화되지 않은 수 m 폭의 렌즈상으로 남아 단층비지대에 에워싸여 있다. 단층핵 내에 분포하는 안산암류는 주로 수 cm에서 수십 cm 직경을 가진 단층각력들로 이루어져 있거나 좁은 전단면 또는 얇은 비지대에 전단이 집중된 단층에 의해 절단되어 있어, 넓게 분산된 변형양상을 보이는 퇴적암 기원의 단층핵과 상당한 변형의 차이를 보인다. 이러한 변형

의 차이는 각 암상별 상대적인 연성에 기인한 결과로 판단된다.

- 2) 단층대 내에서 확인되는 다양한 운동감각 지시자들(지층의 변위, 단층조선, S-C 조직, 단층암의 Z-형태 배열, 암편의 시계방향 회전, 북서방향의 습곡축을 가지는 안행상 습곡)과 단층암의 자기미세구조 측정 결과는 양산단층의 우수향 주향이동운동이 압도적으로 우세하였음을 지시한다. 이러한 우수향 주향이동 운동에 의한 변형은 좌수향 주향이동운동에 의한 변형(e.g., 북서방향 공액상 정단층군)을 지우거나 절단하고 있다. 이번 연구결과와 기존 연구결과들을 종합하여 양산단층계의 운동사를 설정하면, 양산단층은 백악기말 북서-남동 압축환경에서의 좌수향 주향이동운동 이후 약 43~25 Ma 사이에 북동-남서 압축환경에서 우수향 주향이동운동을 겪었던 것으로 판단된다. 또한 이러한 응력환경 사이 또는 이후에도 응력환경의 변화에 따라 비교적 작은 규모의 운동을 여러 번 겪었을 것으로 추정된다.

사 사

이 논문은 2014년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2014R1A2A1A11053102)의 연구결과이다. 심사과정에서 건설적이고 유익한 조언과 비평을 해주신 익명의 두 심사위원과 편집위원이신 김영석 교수님께 감사드린다.

REFERENCES

Balsley, J.R. and Buddington, A.F., 1960, Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and ortho-gneisses. *American Journal of Science*, 258-A, 6-20.

Besse, J. and Courtillot, V., 1988, Paleogeographic maps of the continents bordering the Indian Ocean since the Upper Jurassic. *Journal of Geophysical Research*, 93, 11791-11808.

Billi, A., Salvini, F. and Storti, F., 2003, The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology*, 25, 1779-1794.

- Borradaile, G.J., 1988, Magnetic susceptibility, petrofabric and strain. *Tectonophysics*, 206, 203-218.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
- 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 Engineering Geology*, 8, 35-49 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1977, Late Mesozoic Stratigraphy, Sedimentation and Tectonics of Southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 13, 76-90 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.-H., Suzukib, K., Park, S.-O., Ishida, K. and Uno, K., 2003, Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 937-948.
- Chang, K.-H., Woo, B.-G., Lee, J.-H., Park, S.-O. and Yao, A., 1990, Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, S. Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 471-487.
- Chang, T.W., 2001, Quaternary Tectonic Activity at the Eastern Block of the Ulsan Fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 3, 421-444 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Son, M., Song, C.W., Kim, J.-S. and Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the Ocheon Fault System along the boundary between the Miocene Pohang and Janggi basins, SE Korea, and its tectonic implications. *Geosciences Journal*, 16, 253-273.
- Chester, F.M., Evans, J.P. and Biegel, R.L., 1993, Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research*, 98, 771-786.
- Cho, H., 2014, Application of AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) method to various geological settings. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 503 p (in Korean with English abstract).
- Cho, H., Kim, M.-C., Kim, H. and Son, M., 2014, Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) of the Quaternary Faults, SE Korea: Application to the Determination of Fault Slip Sense and Paleo-stress Field. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 75-103 (in English with Korean abstract).
- Cho, H., Son, M., Cheon, Y., Sohn, Y.K., Kim, J.-S. and Kang, H.-C., 2016, Evolution of the Late Cretaceous Dadepo Basin, SE Korea, in response to oblique subduction of the proto-Pacific (Izanagi/Kula) or Pacific plate. *Gondwana Research*, 39, 145-164.
- Cho, H., Son, M. and Kim, I.-S., 2007, Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the granitic rocks in the Eastern Region of the Yangsan Fault. *Economic and Environmental Geology*, 40, 171-189 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *Journal of the Geological Society*, 143, 29-40.
- Choi, H.I., Oh, J.H., Shin, S.C. and Yang, M.Y., 1980, Geology and geochemistry of the Gyeongsang strata in Ulsan area. *Korea Institute of Energy and Resources Bulletin*, 20, 33 p.
- 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., 2006, 'Singwang strike-slip duplex' around the Pohang basin, SE Korea: Its structural evolution and role in opening and fill of the Miocene basin. *Geoscience Journal*, 10, 145-157.
- Choi, P.Y., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kee, W.S., Ko, H.J., Kim, Y.B., Lee, B.J., Song, K.Y., Kim, J.C. and Choi, Y.S., 2002, Explanatory Note of the Mokpo and Yeosu Sheets, 1:250,000. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 45 p.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonics and sedimentary evolution of the Korean peninsula: A review and new review. *Earth Science Reviews*, 52, 175-235.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. and San'kov, V., 1997, Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1-38.
- Delvaux, D. and Sperner, B., 2003, New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* (Nieuwland, D.A. Ed.). Geological Society, London, Special Publications, 212, 75-100.
- Engelbreton, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geological Society of America*, special

- papers, 206, 1-49.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C. and Rutter, E.H., 2003, On the Internal Structure and Mechanics of Large Strike-Slip Fault Zones: Field Observations of the Carboneras Fault in Southeastern Spain. *Tectonophysics*, 367, 235-251.
- Faulkner, D.R., Mitchell, T.M., Rutter, E.H. and Cembrano, J., 2008, On the Structure and Mechanical Properties of Large Strike-Slip Faults. In: Wibberley, C.A.J., Kurz, W., Imber, J., Holdsworth, R.E. and Collettini, C. (eds) *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties*. Geological Society of London Special Publication, 299, 139-150.
- Fournier, M., Jolivet, L., Davy, P. and Thoma, J.-C., 2004, Backarc extension and collision: an experimental approach to the tectonics of Asia. *Geophysical Journal International*, 157, 871-889.
- 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).
- Hall, R., 2002, Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 353-431.
- Han, J.K., Kwak, Y.H., Son, J.D. and Son, B.K., 1987, Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea. Report KR-86-2-(B)-4, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, 109 p.
- Heynekamp, M.R., Goodwin, L.B., Mozely, P.S. and Haneberg, W.C., 1999, Controls on fault-zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, New Mexico: implications for fault-zone permeability and fluid flow. In: Haneberg, W.C., Mozley, P.S., Moore, J.C., and Goodwin, L.B. (Eds.), *Faults and Subsurface Union Geophysical Monograph*, 113, 27-49.
- Hoe, S.Y. and Kyung, J.B., 2008, Fault Plane Solutions for the Recent Earthquakes in the Central Region of South Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 29, 437-445 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.W., Chough, S.K. and Hwang, I.G., 1998, Provenance of coarse-grained detritus in fan-delta systems, Miocene Pohang basin, SE Korea: implications for boundary fault movements. *Geoscience Journal*, 2, 46-58.
- Hrouda, F., 1982, Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys*, 5, 37-82.
- Hwang, B.-H., Ernst, W.G., McWilliams, M. and Yang, K., 2008a, Geometric model of conjugate faulting in the Gyeongsang Basin, southeast Korea. *Tectonics*, 27, TC6015.
- Hwang, B.-H., Lee, J.-D. and Yang, K., 2004, Petrological study of the granitic rocks around the Yangsan fault: Lateral displacement of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 161-178 (in Korean with English abstract).
- Hwang, B.-H., Lee, J.-D., Yang, K. and McWilliams, M., 2007a, Cenozoic strike-slip displacement along the Yangsan fault, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 768-775.
- Hwang, B.-H., McWilliams, M., Son, M. and Yang, K., 2007b, Tectonic implication of A-type granites across the Yangsan fault, Gige and Gyeongju areas, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 1094-1102.
- Hwang, B.-H., Son, M., Kim, J.-S., Yang, K. and Kim, J.-S., 2012, Cenozoic wrench tectonics and oroclinal bending in SE Korea. *International Geology Review*, 54, 642-653.
- Hwang, B.-H., Son, M., Yang, K., Yoon, J. and Ernst, W.G., 2008b, Tectonic evolution of the Gyeongsang Basin, southeastern Korea from 140 Ma to the present, based on a strike-slip and block-rotation tectonic model. *International Geology Review*, 50, 343-363.
- Hwang, J.H., Kim, D.H., Cho, D.R. and Song, K.Y., 1996, Explanatory Note of The 1:1:250,000 Andong Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 67 p.
- Hwang, S.K. and Woo, B.G., 2009, Role of the Cheongryangsan Conglomerate and the Osipbong Basalt in Classifying Stratigraphy of the Hayang Group, Yeongyang Subbasin. *Journal of Petrological Society of Korea*, 18, 181-194 (in Korean with English abstract).
- Itoh, Y., Uno, K. and Arato, H., 2006, Seismic evidence of divergent rifting and subsequent deformation in the southern Japan Sea, and a Cenozoic tectonic synthesis of the eastern Eurasian margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, 933-943.
- Jelinek, V., 1981, Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 63-67.
- Jeon, Y.M. and Sohn, Y.K., 2008, Characteristics, emplacement processes, and stratigraphic implications of the basaltic intercalated in the Hayang Group, Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 707-727 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.O., Jeon, Y.M. and Sohn, Y.K., 2005, Petrography and modal compositional variations of the Cretaceous Kusandong Tuff, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 73-90 (in Korean with English abstract).
- Jolivet, L., Shibuya, H. and Fournier, M., 1995, Paleomagnetic

- Rotations and the Japan Sea Opening. In: Natland, J. (ed.) *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*. American Geophysical Union, Washington, DC, 355-369.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *Journal of Geophysical Research*, 99, 22237-22259.
- Kang, H.-C. and Paik, I.S., 2013, Review on the geological ages of the formations in the Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 17-29 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H. and Ryoo, C.-R., 2009, The movement history of the southern part of the Yangsan Fault Zone interpreted from the geometric and kinematic characteristics of the Sinheung Fault, Eonyang, Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, K.H. and Song, K.Y., 1998, Explanatory Text of 1:250,000 Pusan Sheet. Korea Institute of Energy and Resources, 62 p.
- Kim, H., Song, C.-W., Kim, J.-S., Son, M. and Kim, I.-S., 2008, Tertiary Geological Structures and Deformation History of the Southern Tsushima Island, Japan. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 175-198 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S., 1992, Origin and tectonic evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan fault system: a new synthetic interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 84-109 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-S., Son, M., Kim, J.-S. and Kim, J., 2005, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Tertiary dike swarm and volcanic rocks, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 93-107 (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 Jin, K., 2006, Estimated earthquake magnitude from the Yugye Fault displacement on a trench section in Pohang, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 79-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Jin, K., Choi, W.-H. and Kee, W.-S., 2011, Understanding of active faults: A review for recent researches. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 723-752 (in Korean with English abstract).
- Kimura, T., Hayami, E. and Yoshida, S., 1991, *Geology of Japan*. University of Tokyo Press, 287 p.
- KMA, 2017, Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/> (January 20, 2017).
- Koppers, A.A.P., Morgan, J.P., Morgan, J.W. and Staudigel, H., 2001, Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 237-252.
- Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 1995, *Geologic Map of Korea (1:1,000,000)*.
- 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).
- Kyung, J.B., Lee, K. and Okada, A., 1999, A Paleoseismological Study of the Yangsan Fault - Analysis of Deformed Topography and Trench survey. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 2, 155-168 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-K. and Kim, H.S., 2005, Comparison of Structural Features of the Fault Zone Developed at Different Protoliths: Crystalline Rocks and Mudrocks. *Journal of Structural Geology*, 27, 2099-2112.
- Lee, H.K., Moon, H.-S., Min, K.D., Kim, I.-S., Yun, H. and Itaya, T., 1992, Paleomagnetism, stratigraphy and geologic structure of the Tertiary Pohang and Changgi basins: K-Ar ages for the volcanic rocks. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 25, 337-349.
- Lee, M.S. and Kang, P.C., 1964, Explanatory Text of the Geological Map of 1:50,000 Yangsan Sheet. Geological Survey of Korea, 27 p.
- Lee, Y.H., 2003, Quaternary faults in the eastern area of the Ulsan fault. Master Thesis, Pusan National University, Busan, 74 p (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.J. and Lee, I.K., 1972, Explanatory Text of the Geological Map of 1:50,000 Eonyang Sheet. Geological Survey of Korea, 22 p.
- Lithgow-Bertelloni, C. and Richards, M.A., 1998, The Dynamic of Cenozoic and Mesozoic Plate Motions. *Review of Geophysics*, 36, 27-78.
- Lonsdale, P., 1988, Paleogene history of the Kula plate: Offshore evidence and onshore implications. *The Geological Society of America*, 100, 733-754.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6, 121-142.
- Moon, T., Son, M., Chang, T.-W. and Kim, I.-S., 2000, Paleostress Reconstruction in the Tertiary Basin Areas

- in Southeastern Korea. *Journal of Korean Earth Science society*, 21, 230-249 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Otofujii, Y., Itaya, T. and Matsuda, T., 1991, Rapid rotation of Southwest Japan: Paleomagnetism and K-Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. *Geophysical Journal International*, 105, 397-405.
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, 317, 603-604.
- 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.
- Patriat, P. and Achaiche, J., 1984, India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 311, 615-621.
- Rawling, G.C. and Goodwin, L.B., 2003, Cataclasis and particulate flow in faulted, poorly lithified sediments. *Journal of Structural Geology*, 25, 317-331.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, The geology of Korea: Seoul, Korea. Geological and Mining Institute of Korea, 139 p.
- Ren, J., Tamaki, K., Li, S. and Junxia, Z., 2002, Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344, 175-205.
- Ring, W., Betzler, C. and Delvaux, D., 1992, Normal vs. strike-slip faulting during rift development in East Africa: The Malawi rift. *Geology*, 20, 1015-1018.
- Rochette, P., Jackson, M. and Aubourg, C., 1992, Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Review of Geophysics*, 30, 209-226.
- Rowley, D., 1996, Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data. *Earth and Planetary Science Letters*, 145, 1-13.
- Sohn, Y.K. and Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang basin, SE Korea. *Sedimentology*, 51, 1387-1408.
- Son, M., 1998, Formation and evolution of the Tertiary Miocene basins in southeastern Korea: Structural and paleomagnetic approaches. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 233 p (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S. and Sohn, Y.K., 2005, Evolution of the Miocene Waup basin, SE Korea, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 529-544.
- Son, M., Kim, J.-S., Hwang, B.-H., Lee, I.-H., Kim, J., Song, C.W. and Kim, I.-S., 2007, Paleogene dyke swarms in the eastern Geoje Island, Korea: their absolute ages and tectonic implications. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 16, 82-99 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Seo, H.J. and Kim, I.-S., 2000, Geological structures and evolution of the Miocene Eoil basin, southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 73-88.
- 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, C.W., 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).
- Song, C.W., 2015, Study on the Evolution of the Miocene Pohang Basin Based on its Structural Characteristics. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 146 p (in Korean with English abstract).
- Song, C.W., Son, M., Sohn, Y.K., Han, R., Shinn, Y.J. and Kim, J.C., 2015, A study on potential geologic facility sites for carbon dioxide storage in the Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 53-66 (in Korean with English abstract).
- Stacey, F.D., Joplin, G. and Lindsay, J., 1960, Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from S.E. Australia. *Geofisica Pura Applicata*, 47, 30-40.
- Taira, A., 2001, Tectonic evolution of the Japanese island arc system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 109-134.
- Tamaki, K., 1995, Opening Tectonics of the Japan Sea. In Taylor (ed.), *Backarc Basins: Tectonics and Magmatism*, 407-420.
- Tokiwa, T., 2009, Timing of dextral oblique subduction along the eastern margin of the Asian continent in the Late Cretaceous: Evidence from the accretionary complex of the Shimanto Belt in the Kii Peninsula, Southwest Japan. *Island Arc*, 18, 306-319.
- Um, S.H., Choi, H.I., Son, J.D., Oh, J.H., Shin, S.C. and Yun, H.S., 1983, Geology and geochemical study of Gyeongsang super group in the Gyeongsang Basin. Korea Institute of Geology, Mining, and Minerals (KIGAM), Research Report, no. 36, 118 p.
- Xu, J.W., Zhu, G., Tong, W.X., Cui, K.R. and Lin, Q., 1987,

- Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the north-west of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134, 273-310.
- Yang, J.-S. and Lee, H.-K., 2014, Quaternary Fault Activity of the Yangsan Fault Zone in the Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 47, 17-27 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Woo, S., Lee, H., Han, R., Chon, C.-M., Son, M. and Song, I., 2015, Frictional properties of gouges collected from the Yangsan Fault, SE Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 51, 569-584 (in Korean with English abstract).
- Woo, S., Han, R., Kim, C.-M., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Lee, H., 2016, Relation between temporal change of fault rock materials and mechanical properties. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 847-861 (in Korean with English abstract).

Received : January 31, 2017

Revised : February 21, 2017

Accepted : February 28, 2017