

<Review>

양산단층 주단층핵 분포와 내부변형의 이해: 연구동향과 과제

천영범¹ · 최진혁¹ · 최이레¹ · 배한경¹ · 한기환² · 손 문³ · 최성자¹ · 류충렬^{1,*}

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²(주)서정엔지니어링

³부산대학교 지질환경과학과

요 약

양산단층은 남쪽에서부터 부산, 양산, 경주, 포항, 영덕을 가로질러 발달하는 북북동-남남서 방향의 대규모 지질구조로서 변화하는 지구조 환경의 영향으로 적어도 백악기말부터 운동하여 다중변형을 경험한 비교적 높은 성숙도를 보이는 단층이다. 또한 현재 지구조 환경이 지속되었던 제4기 동안에도 지표변형을 동반한 지진을 발생시켰다. 지난 수십여 년 동안 양산단층의 과거 운동이력을 포함한 지구조적 의미와 향후 지진 발생 가능성에 대한 학술적, 사회경제적 관심이 증가함에 따라 다양한 방법론을 통한 연구가 지속되어 왔다. 그 중에서도 단층대의 기하학적 특징, 내부변형 양상 및 구성 물질에 대한 정보는 단층의 역학적, 지진학적, 수리지질학적 특성을 밝히기 위해 기본적으로 요구되는 영역이다. 이 논평에서는 기존 보고된 단층핵 지점과 최근 추가적으로 확인된 단층핵 지점의 정보를 종합하고, 새롭게 확인된 네 지점의 상세 제반 사항을 표준 양식을 통해 제시한다. 이를 바탕으로 현재의 시점에서 제안 가능한 수준의 (1) 양산단층핵 분포와 자세, (2) 내부변형 양상, (3) 운동감각, (4) 제4기 운동특성을 정리한다. 양산단층대를 따라 현재까지 수행된 주요 연구 결과와 지속적으로 추가될 정보를 체계적으로 관리하는 시스템을 갖추고, 이를 바탕으로 판내부 환경에 적합한 단층의 구조적 분절 설정 및 고지진학적 해석 기술 향상 등 학술적인 노력이 더해진다면, 양산단층의 구간(분절)별 또는 단층대를 구성하는 단층핵과 단층손상대에서의 거동양상에 대한 이해도를 향상시킬 수 있을 것이다.

주요어: 양산단층, 단층핵, 내부변형, 거동양상

Youngbeom Cheon, Jin-Hyuck Choi, Yire Choi, Hankyung Bae, Ki-Hwan Han, Moon Son, Sung-Ja Choi and Chung-Ryul Ryoo, 2020, Understanding the distribution and internal structure of the main core of the Yangsan Fault Zone: Current trends and future work. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 5, p. 619-640

ABSTRACT: The NNE-SSW-striking Yangsan Fault, which can be traced through Busan, Yangsan, Gyeongju, Pohang, and Yeongdeok, is a mature fault with a multi-stage deformation history that has been active since at least the Late Cretaceous. The fault is also associated with Quaternary deformation features at the surface. In the last several decades, academic and socio-economic interest in the fault has motivated various studies focused on its movement history, wider tectonic implications, and the possibility of future earthquakes. A better understanding of the mechanical, seismological, and hydrological behavior of the fault requires a comprehensive description of the fault zone internal structure, fault rock materials, and geometric characteristics. Thus, we synthesize previously reported and newly acquired data regarding the fault core, and then use a standardized template to present detailed descriptions of the fault core where it is exposed at four recently identified localities. Based on the available data, we arrive at conclusions regarding the (1) distribution and orientation, (2) internal structure, (3) kinematics, and (4) Quaternary characteristics of the Yangsan Fault core. Understanding of behavioral patterns along each fault segment and/or within the fault core-damage zone could be improved by developing a fault data management system, and by further research on structural segmentation and paleoseismology within intraplate regions.

Key words: Yangsan Fault, fault core, internal structure, behavior pattern

* Corresponding author: +82-42-868-3347, E-mail: ryocr@kigam.re.kr

(Youngbeom Cheon, Jin-Hyuck Choi, Yire Choi, Hankyung Bae, Sung-Ja Choi and Chung-Ryul Ryoo, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Ki-Hwan Han, Sujung Engineering Co., Ltd., Anyang 14056, Republic of Korea; Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

1. 서 언

단층은 지각 내에 발달하는 평평하거나 약간 굽은(curved) 형태의 불연속면 또는 이러한 불연속면들의 집합체(zone)로서 이들 면구조를 따라 발생하는 미끌림(전단)에 의해 양쪽 암석이 서로 어긋나 변위(displacement)를 갖는 취성변형의 산물이다(e.g., Twiss and Moores, 2007; Fossen, 2010; Davis *et al.*, 2011). 단층을 따라 발생하는 순간적인 전단운동은 다양한 규모의 지진을 동반하며, 오랜 지질시대 동안 누적된 단층운동의 결과는 지각의 침강과 융기에 의한 퇴적분지와 조산대 등의 대규모 지질구조를 형성시키기도 한다(e.g., Sylvester, 1988; Moores and Twiss, 1995; Cunningham and Mann, 2007; Allen and Allen, 2013).

불연속면의 집합체인 단층대 내에는 전단이 집중된 부분과 상대적으로 전단을 덜 받은 부분으로 구분할 수 있다. 일반적으로 전단이 집중되면서 물리적으로 분쇄되고 화학적 변화를 겪으며 암석 원래의 흔적(조성과 조직)을 쉽게 인지할 수 없는 부분을 단층핵이라고 하며, 전단이 집중되지는 않았으나 인접한 전단운동에 의한 이차적인 변형구조(단열, 광맥, 습곡 등)가 발달하는 부분을 단층손상대라고 한다(e.g., Chester *et al.*, 1993; Caine *et al.*, 1996; Billi *et al.*, 2003; Wibberley *et al.*, 2008). 단층핵을 구성하는 단층암의 분류와 용어에 대한 정의는 연구자에 따라 달리 사용되며 여전히 통일되지 않은 상태이다. 이번 논평에서는 Twiss and Moores (2007)에서 제시된 기준을 바탕으로 엮리조직이 주로 보이는 '단층비지(gouge; matrix < 30%)' 및 '파쇄암(cataclasite; matrix > 30%)'과 특정 방향성이 대체로 보이지 않는 '단층각력(breccia; matrix < 30%)'으로 구분한다[See Table 3.1 in Twiss and Moores (2007)]. 이들 단층암은 개별적인 좁은 띠(band) 또는 대(zone)의 형태로 단층핵을 구성하기도 하지만 단층의 규모가 비교적 큰 경우 여러 개의 단층비지대, 파쇄암대, 단층각력대가 병치하고 이들에 의해 둘러싸인 렌즈(lens)

형태의 모암조각(silver)을 포함하기도 한다(e.g., Faulkner *et al.*, 2003, 2008, 2010). 또한 단층핵 내에는 수 mm 두께의 주변위대(principal displacement zone, PSZ)가 존재하기도 하는데, 이 영역은 지진성 전단변형이 가장 집중된 구간으로 알려져 있다(e.g., Sibson, 2003). 단층대의 내부구조는 운동감각, 변형 크기, 운동횟수뿐만 아니라 절단된 모암의 물리·화학적 특성, 형성 깊이, 유체의 흐름에 의해 좌우된다. 또한 단층대가 진화하는 동안의 기하학적 변화에 따라 각 단층별 또는 단층의 분절별로 다양하고 복잡한 형태를 보인다. 따라서 자연 노두에서 관찰되는 단층대는 하나의 단층핵과 양 옆으로 단층손상대가 위치하는 단순한 형태뿐만 아니라 여러 개의 단층핵과 단층손상대가 반복해서 나타나는 경우가 흔히 확인된다(e.g., Faulkner *et al.*, 2010). 이러한 경우 여러 단층핵 가지(strand)들이 3차원의 망상형 기하(anastomose geometry)를 보이기도 한다(e.g., Faulkner, 2003, 2008, 2010; Lee and Kim, 2005).

단층대 내부의 물질과 기하학적 복잡성에 대한 정보는 단층의 역학적, 지진학적, 수리지질학적 특성을 밝히기 위해 기본적으로 요구되는 사항이다(e.g., Caine, 1996; Rawling *et al.*, 2001; Wibberley *et al.*, 2008; Faulkner *et al.*, 2010). 단층에 의해 절단된 모암(또는 이로부터 기원된 단층물질)의 물리·화학적 및 광물학적 특징과 단층대의 복잡한 내부변형 특성은 주어진 응력 환경에서의 단층 거동양상(재활동 가능 여부, 지진성 거동 여부, 파열의 전파양상 등)에 중요한 영향을 미치기 때문에 주요 연구의 대상이 되어 왔다(e.g., Sibson, 1983; Faulkner, 2003, 2010; Han *et al.*, 2007, 2010; Wibberley *et al.*, 2008; Collettini *et al.*, 2009; Ikari *et al.*, 2009, 2011). 이와 함께 단층대의 특정 구간별로 유체의 이동통로가 되거나 유체의 흐름을 막는 장벽이 되며, 이는 특정 조건 하에서 광체의 형성 또는 탄화수소 이동 및 집적에 영향을 미칠 수 있어, 단층대 내부의 유체 흐름에 관한 연구도 지속적으로 수행되고 있다(e.g., Wibberley *et al.*, 2008; Faulkner *et al.*, 2010).

우리나라 남동부에 위치하는 양산단층은 한반도 내에 발달하는 대규모 단층들 중 하나로 지난 수십 년 동안 지질학적 및 지진학적 연구의 주요 대상이었다. 특히 2016 경주지진의 지진원단층이 양산단층 대 내에 위치하는 북북동-남남서 방향 부차단층으로 알려져 있어(e.g., Kim, Y.-S. *et al.*, 2017; Kim, K.-H. *et al.*, 2018; Son *et al.*, 2018), 양산단층의 오랜 지질 시대 동안의 운동 이력과 앞으로의 운동 가능성에 대한 관심이 증가하고 있다. 양산단층에 대한 연구는 구조요소(단층자취, 변위, 분절화), 지질시대 동안의 변형사, 제4기 동안의 운동, 퇴적분지 형성 시 역할, 지구구조적 의의 등 다양한 방면으로 수행되어 왔다(e.g., Lee and Kang, 1964; Chang *et al.*, 1990; Kim, 1992; Yoon and Chough, 1995; Chang and Chang, 1998; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b; Lee, B.J. *et al.*, 1999; Kyung and Chang, 2001; Chang, 2002; Kyung, 2003; Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b, 2008; Choi, 2006; Ryoo *et al.*, 2006, 2018; Choi *et al.*, 2009, 2017; Kang and Ryoo, 2009; Han, 2012; Lee, J. *et al.*, 2015; Cho *et al.*, 2016; Kim, C.-M. *et al.*, 2016, 2020; Kim, H.-J. *et al.* 2016; Cheon *et al.*, 2017, 2019a; Ryoo and Cheon, 2019; Kim, N. *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020). 하지만 주변에 비해 저지력을 이루는 양산단층곡을 따라 현생퇴적물이 수십 m 두께로 퇴적되어 있을 뿐만 아니라 도로, 농경지, 도심지 등이 위치하면서 단층대의 내부변형을 연속적이고 확실하게 보여주는 노두의 발견은 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 여러 연구자들의 노력으로 양산단층 주단층핵의 발견과 함께 이들의 내부변형에 대한 이해가 서서히 높아지고 있다.

양산단층 주단층핵의 분포와 내부변형에 대한 연구는 높은 성숙도를 가지는 기존 구조가 현재 응력 환경에서 선택적으로 재활동하는 현상을 규명하는 실마리가 될 수 있다. 따라서 이번 논평에서는 여러 연구자들이 확인·보고한 양산단층 주단층핵의 제반 사항을 종합하고, 최근 새롭게 확인된 주단층핵의 내부변형양상을 Cheon *et al.* (2019b)에 의해 제안된 단층노두 기재 양식을 통해 제시한다. 이를 기반으로 현재 시점에서 이해할 수 있는 양산단층핵의 분포와 자세, 내부변형 양상, 운동감각, 제4기 운동 특성에 대해 서술하고, 단층·지진 관련 연구에 있어 향후 중점적으로 추진되어야 할 내용에 대해 토의한

다. 이 논평에서는 노두 규모에서부터 지질도 규모에 이르기까지의 양산단층핵을 종합하여 다루며, Chwae *et al.* (2000)과 Choi *et al.* (2012)에서 종합된 양산단층 주단층핵 노두들과 함께 Ryoo *et al.* (2006, 2019), Choi *et al.* (2009), Kang and Ryoo (2009), Lee *et al.* (2015), Kim, C.-M. *et al.* (2016, 2020), Cheon *et al.* (2017, 2019a), Ryoo and Cheon (2019), Song *et al.* (2020)의 연구결과를 바탕으로 분석되었다. 최근 지속적으로 제시되고 있는 양산단층대 내부변형의 미구조 및 역학적인 특성에 관한 연구결과들(e.g., Woo *et al.*, 2015, 2016; Woo and Han, 2019; Gwon *et al.*, 2020)은 이번 논평에서는 다루지 않는다.

2. 양산단층 개요

양산단층은 1:5만 경주도폭(Tateiwa, 1929)과 1:5만 영해도폭(Hatae, 1937)을 통해 지질구조로서의 실체가 보고된 이후, 1:5만 양산도폭(Lee and Kang, 1964)에서 단층명이 부여되었다. 이 단층은 남쪽에서부터 부산, 양산, 경주, 포항, 영덕을 따라 북북동-남남서 방향으로 발달하는 대규모 단층으로서(그림 1), 육상에서만 약 200 km의 연장을 보이고 단층핵의 폭은 최대 백여 m 이상에 달한다(e.g., Choi *et al.*, 2009; Cheon *et al.*, 2019a; Ryoo and Cheon, 2019). 지체구조적 관점에서 양산단층은 백악기 경상분지의 동편을 가로지르며, 마이오세 퇴적분지는 주로 양산단층의 동측에만 위치한다(그림 1b; Hwang *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1998; Son *et al.*, 2013, 2015; Cheon *et al.*, 2020b).

양산단층은 단층 양쪽의 백악기 퇴적암 및 화산암 분포 차이에 근거하여 우수향 감각의 단층으로 알려져 있다(e.g., Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980; Um *et al.*, 1983). Chang *et al.* (1990)은 경상분지 영양소분지 일대의 상세 지질도 작성을 통해 양산단층을 기준으로 양쪽에 서로 대비되는 지층과 지질구조가 우수향으로 최대 35 km 이격되어 있음을 보고하였다. 경상분지 남동부 화강암류의 분포를 통해서도 양산단층의 우수향 수평변위가 제안되었는데, Hwang *et al.* (2004, 2007a)은 경주-양산 일대에 위치하는 백악기말-고신기(Paleogene) 화강암류의 분포와 주성분원소의 특성 대비를 통해 양산단층이 21.3 km의 우수향 수평변위가 있음을 보고하였

다. 이후 Hwang *et al.* (2007b)은 경주시 배동과 동천동 일대의 고신기 A형 알칼리화강암과 포항시 북구 기계면 및 경주시 강동면 단구리에 위치하는 고

신기 A형 알칼리화강암이 양산단층에 의해 우수향 수평변위를 보이며 절단되어 있음을 제안하였다. 한편, Cho *et al.* (2007)은 양산단층과 동래단층 사이에

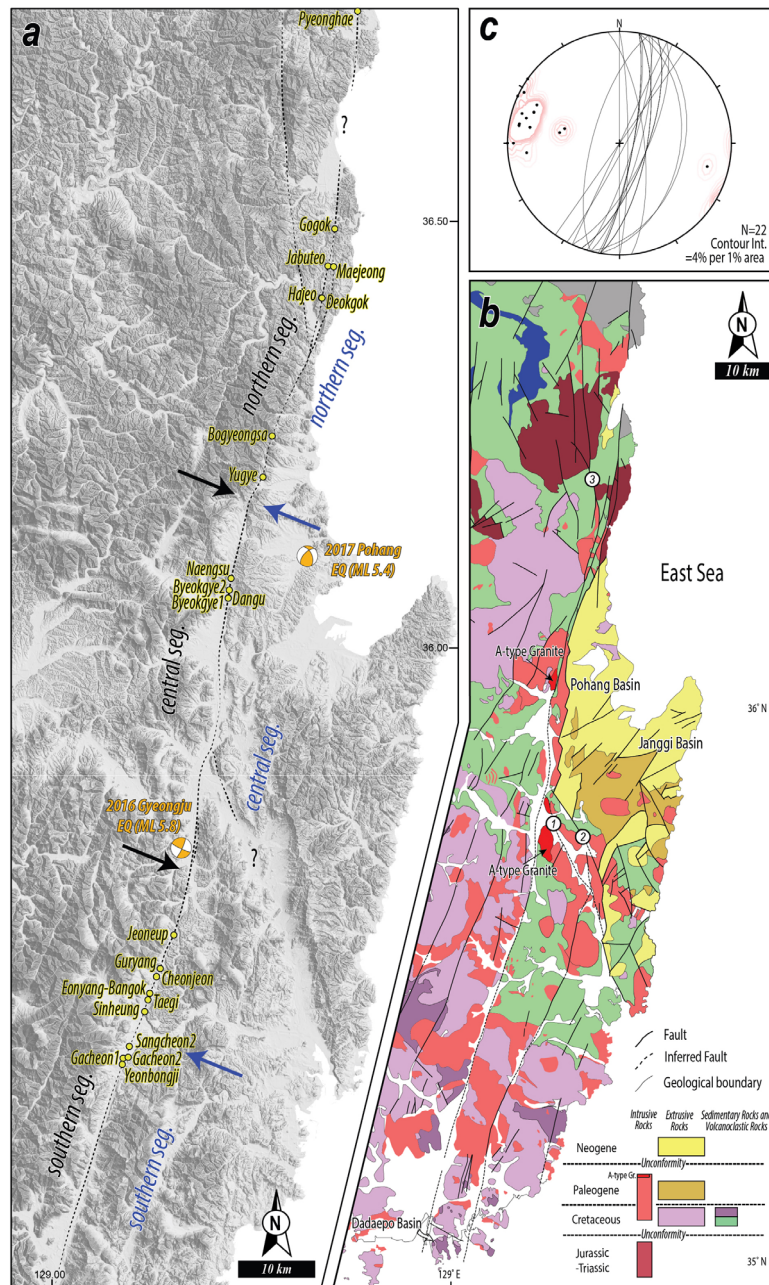


Fig. 1. (a) A digital elevation model showing the main fault core localities and the inferred trace of the Yangsan Fault. Black and blue arrows indicate geometrically defined (Choi *et al.*, 2017) and seismically defined (Lee and Jin, 1991) fault zone segmentation, respectively. (b) Regional geological map of the southeastern part of the Gyeongsang Basin (modified from Hwang *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1998; Son *et al.*, 2013, 2015). ① Ulsan Fault, ② Yeonil Tectonic Line, ③ Yeongdeok Fault. (c) Attitudes of the main fault plane from 22 outcrops along the Yangsan Fault.

위치하는 백악기말 화강암류의 대자율이방성 연구를 통해 암체 전반적으로 발달하는 북동-남서 방향의 자기미세구조가 마그마 정치 후 완전히 고화되기 전에 응력을 받아 형성된 일차 미세구조(primary magnetic foliation)로서 양산단층과 동래단층의 좌수향 운동과 관련이 있는 것으로 해석하였다. 또한 Cho *et al.* (2016)은 양산단층과 동래단층 사이에 형성된 다대포분지 내 북서-남동 방향으로 발달하는 인장성(extensional) 지질구조(정단층, 쇄설성 암맥 등)와 분지기반암 및 분지충전물의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대를 통해 다대포분지 역시 백악기말 동안 양산단층과 동래단층의 좌수향 운동에 의해 형성된 당겨열림분지로 해석하였다. 이후 Cheon *et al.* (2019a)는 양산단층 주변의 지질구조와 암석의 절단관계 및 기존 방사성 연대(저어콘 SHRIMP U-Pb, LA-ICP-MS U-Pb 등) 결과에 근거하여, 양산단층이 백악기 이후 변화하는 지판운동의 영향에 의해 (1) 백악기말 동안 좌수향 운동, (2) 고신기 동안 광역적인 우수향 운동, (3) 중기 마이오세 이후 좌수향 운동, (4) 제4기 동안 우수향 횡압축성 운동을 하였음을 제안하고, 중기 마이오세 이후에는 일부 구간을 따라 부분적으로 재활동하였을 가능성을 언급하였다. 이와 함께 양산단층대를 따라 확인되는 소규모 단층의 운동감각을 이용한 구조 지질학적 연구들(e.g., Chang and Chang, 1998; Chang, 2002) 역시 양산단층의 다중 변형을 제안하고 있다.

육상에서 인지되는 양산단층의 전 구간에 대한 분절화 연구가 몇몇 연구자들에 의해서 수행되었는데, 우선 Lee and Jin (1991)은 서기 2년부터 1989년까지의 126개 역사지진 및 14개의 계기지진 자료를 이용하여 양산단층을 지진학적으로 북부, 중부, 남부분절로 구분하였다. 이후 Chang (2002)는 포항시 신평면에서 양산시 사이의 약 80 km 구간에 대해 선형구조 방향, 단층곡 폭, 단층 선단부 발달형태, 주단층과 부차단층의 관계가 보이는 변화양상을 바탕으로 각각 약 20 km 길이를 갖는 5개 분절로 구분하였다. 최근 Choi *et al.* (2017)은 위성영상에서 인지되는 단층의 굴곡 및 계단식 분절과 가지단층의 분기점 등을 이용하여 양산단층이 3개의 기하학적 분절(북부, 중부, 남부)과 이들을 구성하는 9개의 세부분절로 구성되어 있음을 제안하였으며, 중부와 남부분절의 경계부가 앞선 Lee and Jin (1991)이 제안한 지진학적 분절에서의 경계와 다소 차이를 보인다.

3. 양산단층핵의 제반 특성

기존 연구결과와 최근 새롭게 획득된 조사결과들을 바탕으로 주단층핵 노두 지점별 위치, 자세, 규모, 주로 확인되는 운동감각, 제4기 운동 확인 여부를 표 1로 제시하였다. 또한 최근 지표지질조사를 통해 새롭게 또는 추가적으로 확인되어 양산단층핵의 내부 변형양상을 대표적으로 보여줄 수 있는 지점들[북에서부터 고곡지점(Gogok site), 천전지점(Cheonjeon site), 태기지점(Taegi site), 연봉지점(Yeonbongji site)]은 그림 2~5과 표 2~5로 나타내었다. 이렇게 제안된 노두 지점별 제반 사항을 바탕으로 요약된 양산단층핵의 분포와 자세, 규모, 내부변형, 운동감각, 제4기 운동 특성은 다음과 같다.

3.1 단층핵의 분포와 자세

단층핵 노두의 분포 및 연장과 이들에 의해서 구분지어지는 모암의 분포에 근거할 때, 양산단층대 내부의 주단층핵 자취는 지질도 규모에서 하나로 연장되다가 두 개 이상으로 분기되고 다시 하나로 병합되는 경향을 보인다. 분기된 주단층핵 가지 사이에 위치하는 렌즈 형태 모암 조각의 폭은 수 m에서 최대 1 km 이상에 달하기도 한다(e.g., 영덕지역; 그림 1a; Kang *et al.*, 2018; Cheon *et al.*, 2019a). 분기 및 병합하는 기하의 주단층핵 가지들로 이루어진 양산단층대는 일부 구간에서는 직선형으로, 일부 구간에서는 굴곡하는 형태를 보이며 대체로 북북동-남남서 방향으로 연장되지만, 남-북 방향으로 발달하기도 한다. 단층곡이 수백여 m 또는 그 이상의 폭을 보이는 단층구간은 대부분이 시가지화 되어 있거나 농경지로 이용되고 있어 지표에서 단층대의 특징 파악이 쉽지 않다. 하지만 지질도 규모의 단층핵 분포와 노두 규모의 단층대 내부 기하학적 특징으로 미루어 짐작할 때, 넓은 단층곡부의 형성이 망상의 단층핵 가지들과 그 사이를 채우는 렌즈상의 모암 조각들로 특징지어지는 약한 강성(low-rigidity)의 단층대가 오랜 지질시대 동안 차별적으로 침식된 결과일 가능성이 크다. 이번 논평에서 정의하는 주단층핵 가지는 광역적인 변위에 수반되어 그 이전에는 떨어져 위치하였던 동측과 서측의 서로 다른 기반암을 구획하는 경계단층과 지질도 규모의 모암 조각을 구획하는 경계단층이다.

Table 1. Information on the main core outcrops of the Yangsan Fault.

No.	Investigation Name	Researcher or Reference	Administrative District	GPS coordinates (Latitude)	GPS coordinates (Longitude)	Fault Strike	Fault Dip	Fault Type	Fault Striation (trend)	Fault Striation (plunge)	Fault Core width (m)	Western block	Eastern block	Quaternary Movement
1	Pyeonghae	Chwae <i>et al.</i> (2000), Choi <i>et al.</i> (2012), Yang (2006)	Gyeongbuk Uljin-gun Pyonghae-eup Ogok-ri	36.74711	129.44433	0	90	RL	180	10	5	unconsolidated sediment	Precambrian gneiss, schist	✓
2	Gogok	Cheon <i>et al.</i> (2019a)	Gyeongbuk Yeongdeok-gun Chuksan-myeon Gogok-ri	36.49213	129.40973	10	70	RL, RL+R	073	69	22	Cretaceous (intermediate to mafic) volcanics	Cretaceous sedimentary rock	
3	Jabuteo	Chwae <i>et al.</i> (2000), Yang (2006), Choi <i>et al.</i> (2012)	Gyeongbuk Yeongdeok-gun Yeongdeok-eup Hwasu-ri	36.44856	129.39958	10	80	RL	190	20	15	Cretaceous sandstone	Jurassic granite	✓
4	Maejeong	Cheon <i>et al.</i> (2019a)	Gyeongbuk Yeongdeok-gun Yeongdeok-eup Maejeong-ri	36.44772	129.40783	0	84	RL, LL			0.2	Triassic granite	Jurassic granite	
5	Hajeo	Cheon <i>et al.</i> (2019a)	Gyeongbuk Yeongdeok-gun Ganggu-myeon Hajeo-ri	36.41131	129.39003	10	80	RL	013	18	20	Triassic granite	Miocene rhyolitic tuff	
6	Deokgok	Chwae <i>et al.</i> (2000), Choi <i>et al.</i> (2012)	Gyeongbuk Yeongdeok-gun Ganggu-myeon Hajeo-ri	36.40839	129.38919	354	72	RL	184	14		Miocene tuff	Cretaceous sedimentary rock	
7	Bogyeongsa	Chwae <i>et al.</i> (2000), Choi <i>et al.</i> (2012), Kim, C.-M. <i>et al.</i> (2016), Cheon <i>et al.</i> (2019a)	Gyeongbuk Pohang-si Buk-gu Songra-myeon Jungsan-ri	36.24953	129.31797	195	70	RL, LL, RL+R			10	Cretaceous dacitic tuff	Cretaceous sedimentary rock	
8	Yugye	Chwae <i>et al.</i> (2000), Kyung and Chang (2001), Kyung (2003), Lee and Yang (2007), Choi <i>et al.</i> (2012)	Gyeongbuk Pohang-si Buk-gu Cheongha-myeon Yugye-ri	36.20144	129.3045	10	45	RL+R	075	40	10	Cretaceous sedimentary rock, Quaternary sediment	Cretaceous sedimentary rock	✓
9	Naengsu	Kim, C.-M. <i>et al.</i> (2020)	Gyeongbuk Pohang-si Buk-gu Naengsu-ri	36.08909	129.25871	15	42	RL			>6	Quaternary sediment	Cretaceous sedimentary rock	✓
10	Byeokgye2	Song <i>et al.</i> (2020)	Gyeongbuk Gyeongsu-si Gangdong-myeon Dangu-ri	36.06908	129.25552	28	86	RL				Paleogene granite	felsic intrusion(?)	✓
11	Dangu	Lee <i>et al.</i> (2015)	Gyeongbuk Gyeongsu-si Gangdong-myeon Dangu-ri	36.05998	129.25403	15	75	RL	015	15		Quaternary sediment	granite	✓

Table 1. continued.

No.	Investigation Name	Researcher or Reference	Administrative District	GPS coordinates (Latitude)	GPS coordinates (Longitude)	Fault Strike	Fault Dip	Fault Type	Fault Striation (trend)	Fault Striation (plunge)	Fault Core width (m)	Western block	Eastern block	Quaternary Movement
12	Byeokgye1	Ryoo <i>et al.</i> (1999), Chwae <i>et al.</i> (2000), Choi <i>et al.</i> (2012)	Gyeongbuk Gyeongsu-si Gangdong-myeon Dangu-ri	36.05964	129.25389	11	80	RL	011	8	0.3	Quaternary sediment	Cretaceous volcanics	✓
13	Jeoneup	Cheon <i>et al.</i> (2017), Lee <i>et al.</i> (2020)	Ulsan-si Ulju-gun Duseo-myeon Jeoneup-ri	35.66481	129.1747	20	70	DL+R	200	45	>5	Cretaceous (felsic) tuff	Cretaceous sedimentary rock	
14	Guryang	Lee <i>et al.</i> (2020)	Ulsan-si Ulju-gun Duseo-myeon Guryang-ri	35.61608	129.14969	10	80				>30	Quartz porphyry	Cretaceous sedimentary rock	
15	Cheonjeon	Ryoo and Cheon (2019)	Ulsan-si Ulju-gun Dudong-myeon Cheonjeon-ri	35.61608	129.1497	10	70	RL	011	2	>100	Cretaceous (felsic) tuff	Cretaceous sedimentary rock	✓
16	Eonyang Bangkok	Cheon <i>et al.</i> (2017)	Ulsan-si Ulju-gun Eonyang-eup Bangkok-ri	35.59661	129.14005	20	70	RL	020	1	>70	Cretaceous (felsic) tuff	Cretaceous tuff	
17	Taegi	Lee <i>et al.</i> (2020)	Ulsan-si Ulju-gun Eonyang-eup Taegi-ri	35.589	129.13752	20	70	RL			>35	Cretaceous (felsic) tuff	Cretaceous sedimentary rock	
18	Sinheung	Ryoo <i>et al.</i> (2006), Kang and Ryoo (2009)	Ulsan-si Ulju-gun Eonyang-eup Jikdong-ri	35.57503	129.13274	25	70	RL			20	Cretaceous (felsic) tuff, Quaternary sediment	Cretaceous sedimentary rock	✓
19	Sangcheon2	Kyung <i>et al.</i> (1999a), Okada <i>et al.</i> (2001), Choi <i>et al.</i> (2012)	Ulsan-si Ulju-gun Samnam-myeon Sangcheon-ri	35.53436	129.10178	25	90	RL+R			30	Cretaceous granite, Quaternary sediment	Cretaceous sedimentary rock	✓
20	Gacheon1	Lim <i>et al.</i> (2003), Lee and Yang (2007), Choi <i>et al.</i> (2009), Choi <i>et al.</i> , (2012)	Ulsan-si Ulju-gun Samnam-myeon Sangcheon-ri	35.52056	129.10178	10	70	RL	010	70		Cretaceous granite, Quaternary sediment	Cretaceous sedimentary rock	✓
21	Gacheon2	Chwae <i>et al.</i> (2000), Lee and Yang (2007), Choi <i>et al.</i> (2012)	Ulsan-si Ulju-gun Samnam-myeon Sangcheon-ri	35.52163	129.10905	35	90	RL	033	20		Cretaceous granite, Quaternary sediment	Cretaceous sedimentary rock	✓
22	Yeonbongji	Ryoo (2019)	Ulsan-si Ulju-gun Samnam-myeon Sangcheon-ri	35.51331	129.10057	17	80	RL			>5	Cretaceous (felsic) tuff	felsic intrusion	✓

야외 노두에서 확인된 양산단층핵의 전반적인 주향 역시 지질도 규모에서와 같이 북북동-남남서 내지 남-북이며 70° 이상의 각도로 동쪽 경사하는 경우가 우세하다(그림 1c; 표 1). 하지만 양산단층 중북부 지역의 보경사지점(Bogyeongsa site)에서 확인된 주단층핵은 서쪽으로 고각 경사하고 있어(그림 1b, 1c; 표 1), 전반적인 경사방향과는 차이를 보인다.

3.2 단층핵 내부변형

주단층핵의 폭은 확인된 지점에 따라 수십 cm에서부터 비교적 노출이 넓게 나타나는 지점에서는 백여 m의 폭까지 확인된다(표 1). 단층핵이 수십 m 단위로 발달하는 지점에서는 서로 다른 모암에서 기원된 단층암이 단층비지대, 파쇄암대, 단층각력대의 형태로 병치하는 양상을 보인다(그림 2~5). 기원이 되는 모암의 종류에 따라 다른 내부변형 특성을 가

지는데, 예를 들면 퇴적암 기원의 단층암으로 구성된 단층핵의 폭이 비교적 넓다. 퇴적암 기원의 단층암으로 구성된 단층핵 인접부에서는 퇴적암이 경동 또는 습곡작용에 의해 단층의 자세와 거의 평행하게 배열되며, 층간전단(interlayer shearing)의 흔적이 쉽게 확인된다. 층간전단은 단층핵에 가까워질수록 강해지면서 엽리상의 단층비지 형태로 발달한다. 이러한 단층비지는 수 mm의 좁은 띠의 형태에서 수~수십 cm의 폭을 보이기도 하며, 규모가 비교적 큰 경우에는 수 cm에서부터 수 m의 다양한 폭을 보이는 각각의 단층비지대와 파쇄암대가 망상으로 발달한다. 단층비지대와 파쇄암대는 다양한 크기를 갖는 렌즈상의 기반암 조각을 에워싸며 발달하고, 각 기반암 조각들은 대부분 주단층면 또는 단층비지대-파쇄암대의 방향과 (아)평행하게 배열되어 있다. 수 m 폭의 기반암 조각과 단층비지대의 경계부에서는 수

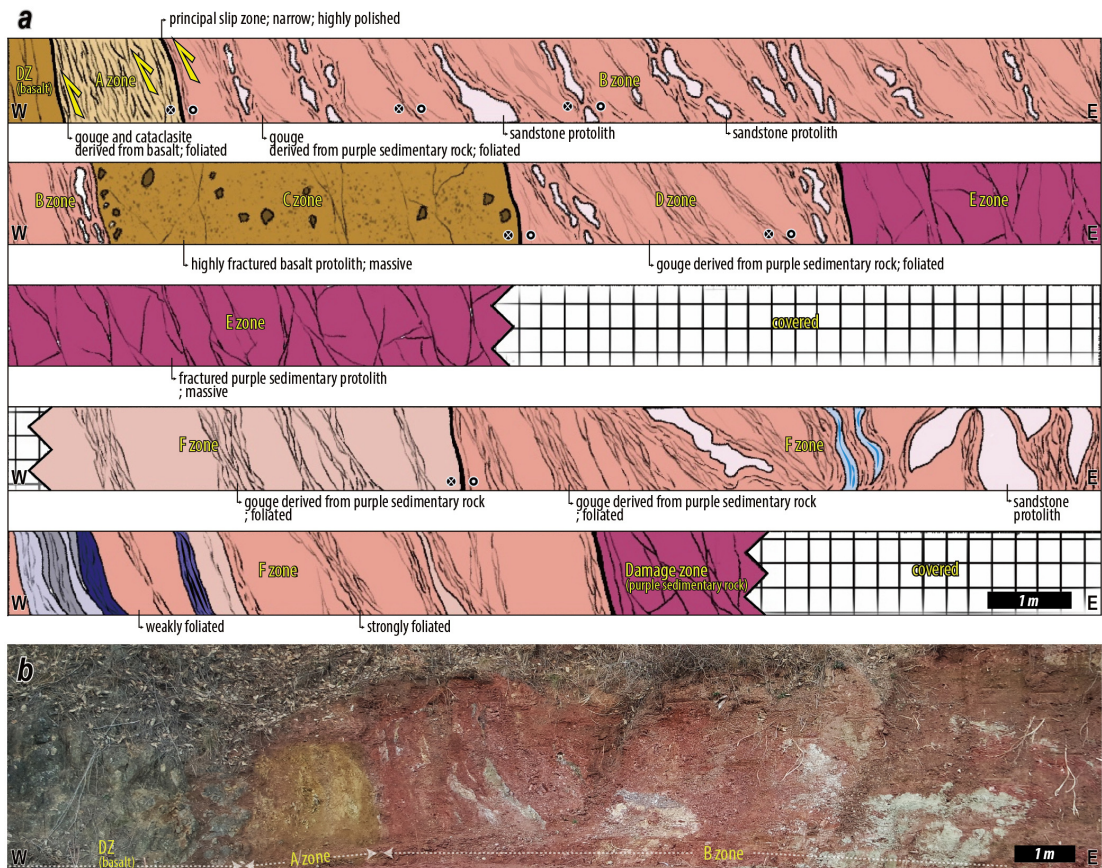


Fig. 2. (a) Schematic illustration and (b) photograph showing the internal structure of the Yangsan Fault core at the Gogok site.

mm 두께의 주변위대가 확인되기도 한다. 대체로 엽층(lamination)이 발달하는 세립질의 퇴적암들이 전단작용을 받은 경우 지층의 급격한 휘어짐 또는 습곡화와 함께 수 cm에서 넓게는 수십 m 두께에 이르는 단층비지대-파쇄암대를 형성하지만 괴상의 조립질 퇴적암의 경우에는 주로 단층각력대 또는 불연속적인 렌즈로 남겨지는 특징을 보인다. 화산암류에서 기원된 단층암은 일부 단층비지대 또는 파쇄암대의 형태로 남아있기도 하지만 퇴적암에서 기원된 부분에 비해 단층각력대의 분포가 우세하고, 렌즈상으로 남겨진 모암 조각의 크기도 크다. 한편 영덕 하저지점(Hajeo site)에서는 단층핵 서편과 동편 기반암이 각각 트라이아스기 화강암과 마이오세 유문암질 응회암임에도 불구하고 단층핵을 구성하는 단층암은 주로 백악기 퇴적암 기원의 단층비지대가 발달하는 양상도 확인되고, 이외 화강암류와 접하는 지점

에서의 단층핵 내에서도 화강암 기원의 단층암을 육안으로 인지하기 쉽지 않다. 또한 영덕 매정지점(Maejeong site)에서 서편의 트라이아스기 화강암(영덕화강암)과 동편의 주라기 화강암을 경계하는 남-북 방향의 단층핵은 폭이 20 cm 내외에 불과하다(표 1). 이러한 경향은 화강암류를 절단하는 전단작용이 비교적 좁은 구간을 따라 집중되었을 가능성을 지시한다.

Cheon *et al.* (2017, 2019a)는 양산단층핵을 따라 이러한 변형 양상을 발생시키는 원인을 모암의 구성광물, 입자크기 및 이방성으로 제안하였다. 오랜 지질시대 동안 양산단층을 따라 발생한 반복적인 전단운동이 퇴적암을 절단하는 부분에서는 하나의 단층비지대에서 모든 응력을 해소하지 않고, 고각으로 경동된 지층의 층간에서 새로운 미끌림이 발생하면서 수 cm에서 수 m 폭의 엽리상 단층비지대가 망상

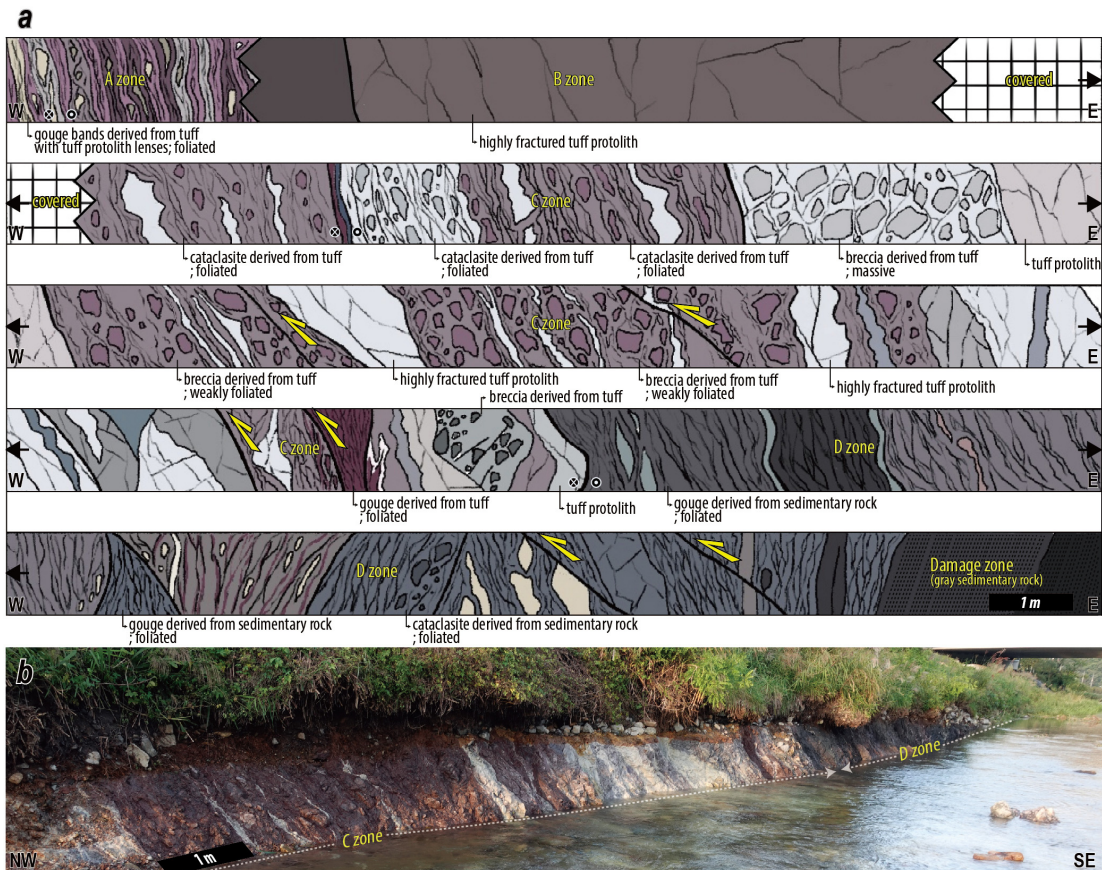


Fig. 3. (a) Schematic illustration and (b) photograph showing the internal structure of the Yangsan Fault core at the Cheonjeon site.

의 기하로 형성되어 주어진 응력을 해소한다는 것이다. 이와 함께 특히 세립질이고 엽층이 발달하는 퇴적암이 조립질이고 괴상인 퇴적암에 비해 물리적으로 쉽게 미립의 입자 크기로 분쇄될 가능성이 높을 것으로 해석하였다. 즉, 비교적 이방성이 우세한 퇴적암 및 응회암과 이에 비해 괴상인 화산암류 및 화강암류 간의 상대적인 강도(relative strength)는 서로 다른 특성을 보이는 단층대를 형성시킬 수 있다. 이러한 역학적 특성은 다른 대규모 단층대의 내부변형 연구에서도 수차례 제안된 바 있다. Faulkner *et al.* (2010)은 약 40 km의 변위를 가지는 2조의 대규모 주향이동단층에 대한 비교를 통해 50 cm 폭의 좁은 단층핵으로 대표되는 Punchbowl 단층대와 다중 단층핵으로 이루어진 1 km 폭의 Carboneras 단층대가 각각 절단하고 있는 모암(Punchbowl 단층이 절단하는 화강암 또는 낮은 공극률의 사암, Carboneras 단층이 절단하는 흑운모 편암)의 광물학적 특성(주로 석영과 장석으로 구성된 화강암 내지 사암, 충상 규산염광물로 구성된 편암)과 역학적 강도에 의해 변형 특성을 달리하였음을 보고하였다. 또한 Lee and Kim (2005)는 한반도 중부를 북북동-남남서 방향으로 가로지르는 금강단층대의 내부 변형 양상 연구를 통해 단층이 결정질 암석을 지나는 부분에서는 전단변형이 좁은 단층핵을 따라 집중되는 반면, 이암을 지나는 부분에서는 상대적으로 분산됨을 보고하였다.

3.3 단층핵 운동감각

대부분의 단층핵 노두에서 확인되는 운동감각 지시자(단층조선, 북북서-남남동 내지 남-북 방향 S-엽리, 절단된 지층의 끌림기하, 단층핵 내부 물질의 시계방향 회전양상)들은 우수향 주향이동운동에 수반된 변형이 양산단층핵 내에 가장 우세하게 남겨져 있음을 지시한다. 단층핵 내에서 부수적으로 관찰되는 운동감각은 구간에 따라 다른 특징을 보이는데, 영덕 매정지점(Maejeong site)과 포항 보경사지점(Bogyeongsa site)의 단층핵 내에서는 좌수향 주향이동감각이, 영덕 고곡지점(Gogok site)과 울산 천전지점(Cheonjeon site)의 단층핵 내에서는 역이동성 감각이 우세하게 관찰된다(그림 2, 3). 특히 이들 역이동성 감각의 경우, 중각으로 동쪽 경사하는 소규모 단층 또는 전단단열들의 상반 서향하는 경향이

주로 확인되며(e.g., Cheon *et al.*, 2019a; Ryoo and Cheon, 2019), 이는 양산단층대 내에서 제4기 지층을 절단하는 단층면의 기하 및 운동감각과 유사하다(Kyung, 2003; Choi *et al.*, 2012; Cheon *et al.*, 2020a). 단층손상대 내에도 우수향 주향이동에 수반된 변형이 가장 우세하게 나타나지만, 보경사지점의 단층손상대 내에서는 특징적으로 역이동성 감각의 소규모 단층과 전단단열이 잘 발달한다. 우수향 주향이동의 증거를 제외하고, 양산단층대의 일부 구간별로 차별적으로 남겨져 있는 다른 감각의 전단운동 증거들은 이들 운동이 양산단층대의 전 구간에 걸쳐 발생하지 않았거나, 또는 광역적인 양산단층의 우수향 운동에 의해 상당 부분 지워졌음을 짐작하게 한다.

양산단층이 백악기말부터 이후 동안 지판환경의 변화에 수반하여 수직이동성분이 포함된 좌수향 및 우수향 운동을 반복하였다 할지라도(e.g., Chang, 2002; Cho *et al.*, 2016; Cheon *et al.*, 2019a), 현재 확인되는 최종 수평변위는 고신기 동아시아 일대의 광역적인 지구조 사건 변화에 수반된 우수향 운동의 결과가 가장 우세하게 반영된 것으로 해석 가능하다(Cheon *et al.*, 2019a). 다만 양산단층의 우수향 수평변위를 지시하는 각 암상 경계 및 지질구조 간의 다소 차이를 보이는 간격은 (1) 동일 지질시대의 우수향 운동 동안 분기단층이나 가지단층 발달에 수반된 총 변위 분산 또는 굴곡(bending)되는 부분에서의 변형집중(용기 또는 침강)에 의한 응력해소 등의 단층분절별(또는 분절 경계별) 차별적 운동 결과일 뿐만 아니라 (2) 다중변형 동안의 단층분절별 선택적 재활동에 수반되어 서로 다른 양의 변위 중첩에 의한 결과일 수 있다. 또한 단층의 오랜 진화 과정동안 단층대를 따라 관입한 화강암류는 변위 지시자로서의 불확실성도 가지고 있기 때문에 보다 신중한 접근이 필요하다.

3.4 단층핵 내부 제4기 운동 특성

양산단층대를 따라 확인되는 제4기 운동은 현재까지 약 30여 지점에서 확인되는데, 북에서부터 평해지점, 자부터지점, 덕곡지점, 보경사지점, 유계지점, 신평반곡지점, 냉수지점, 벽계지점, 월산지점, 신우지점, 인보지점, 신흥지점, 신화지점, 상천1, 2지점, 가천1, 2지점, 연봉지점, 조일지점, 월평지점 등으로, 제4기 지층을 절단하고 있는 양상 및 절단된 지층의 OSL/¹⁴C 연대 또는 단층비지의 ESR 연대를

통해 규명되었다(e.g., Chwae *et al.*, 2000; Okada, 2001; Kyung, 2003; Ryoo *et al.*, 2006; Yang, 2006; Choi *et al.*, 2012, 2019; Kim, M.-C. *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2020). 특히 제4기 지층의 절단이 확인되는 지점 중에서 유계, 냉수, 벽계, 천전, 신흥, 상천2, 가천 등의 지점은 양산단층핵의 일부분이 재활동한 반면, 월산, 신우, 인보, 상천1 등의 지점(e.g., Kyung *et al.*, 1999b; Choi *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2020)은 단층선상대 내의 부차단층들이 재활동하였다.

양산단층대의 일부 구간을 대상으로 지형분석 및

굴착조사를 통해 제4기 지층이 절단된 지점에서의 구조분석 및 제4기 지층 연대분석을 실시하고 이를 바탕으로 제4기 동안의 단층운동 정보가 제안되었다. 우선 Kyung (2003)은 절단된 제4기 지층의 연대에 근거하여 유계지점의 최후기 단층운동을 1,314 B.P 이후로 보고하고, 유계지점(Yugye site)을 포함하는 양산단층 북부의 수직변위율이 < 0.1 mm/yr이며 언양-통도사 일대의 양산단층 남부는 0.02~0.07 mm/yr의 수직변위율과 수배에 이르는 수평변위율을 제시하였다. Lee *et al.* (2015)는 포항 북부 단구지

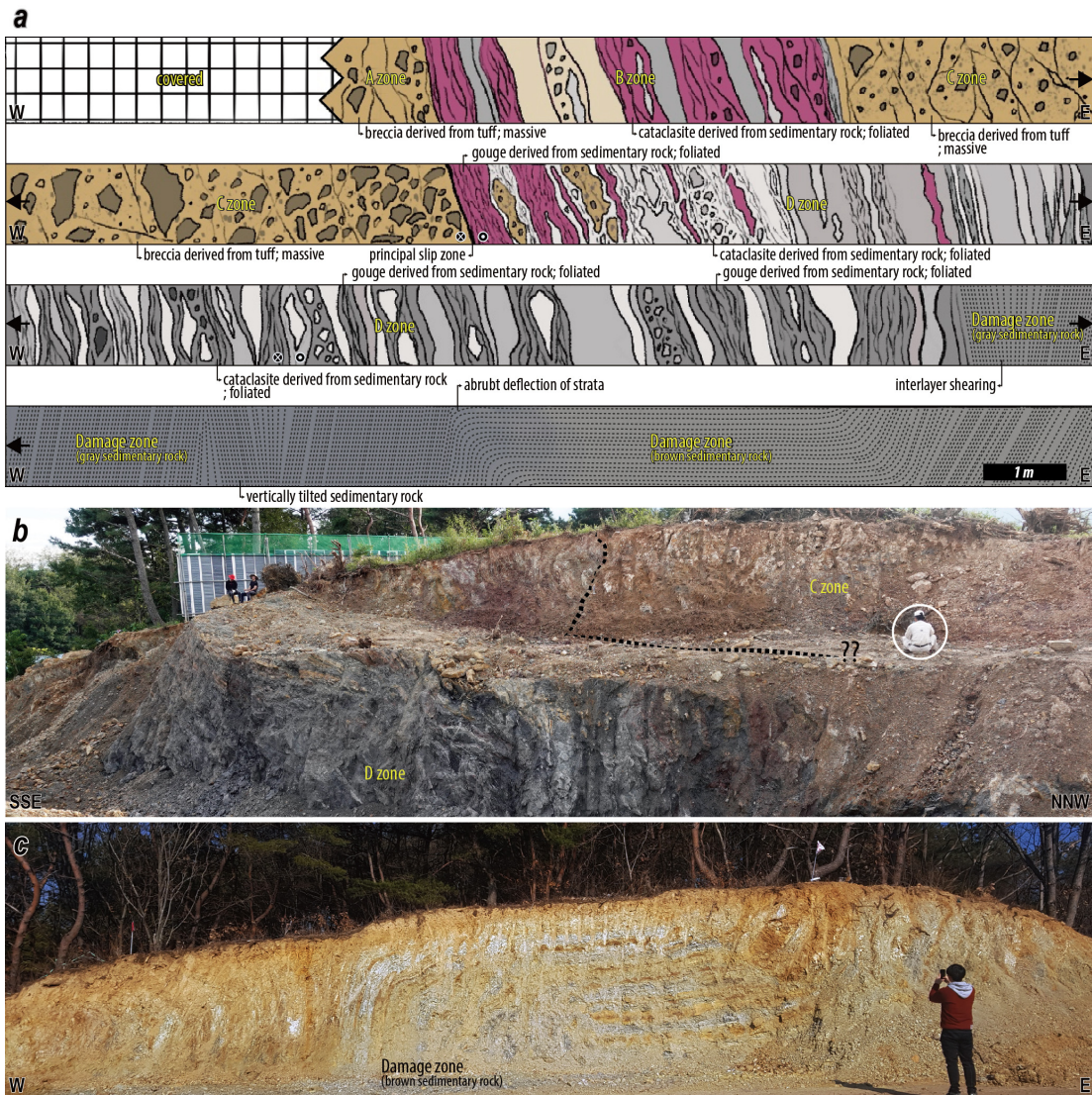


Fig. 4. (a) Schematic illustration (a) and (b, c) photographs showing the internal structure of the Yangsan Fault core and the eastern damage zone at the Taegi site.

점의 굴착조사와 절단된 지층의 OSL 연대를 기반으로 최후기 운동이 7.5 ka 이후임을 보고하였으며, 이후 Song *et al.* (2020)은 단구지점 북쪽 1 km에 위치하는 벽계2지점의 고지진학적 접근을 통해 제4기 동안 최소 4회 이상 운동과 3.2 ka 이후의 최후기 운동을 보고하였다. 최근 Kim, N. *et al.* (2020)은 경주-양산 일대에서 양산단층과 교차하는 제4기 하안단구에 대한 지형변위 분석을 통해 총 4개 지점에서 최소 10 m 이상의 다양한 제4기 수평변위를 제안하고, 수직변위는 수평변위의 약 10% 정도인 것으로 해석하였다. 한편 평해(Pyeonghae), 자부터(Jabuteo), 덕곡(Deokgok), 산광반곡(Singwang-Bangok), 가천(Gacheon) 지점 등에서의 단층암 ESR 연대측정 결과는 전기~중기 플라이스토세 동안의 전단운동시기(약 85만 년 전, 약 78만 년 전, 약 66만 년 전, 약 60만 년 전, 약 51만 년 전, 약 39만 년 전, 약 32만 년 전, 약 18만 년 전)를 제안한다(e.g., Yang, 2006; Choi *et al.*, 2012; Yang and Lee, 2012, 2014; Kim and Lee, 2020). 양산단층대를 따라 확인되는 제4기 운동의 기하학적, 운동학적 특성은 상반 서향하는 횡압축성 우수향 감각으로 대표되며, 이는 양산단층대를 따라 주로 확인되는 동쪽 경사의 기존 단층대가 재활된 결과로 해석된다(그림 1c; Cheon *et al.*, 2020a).

양산단층대의 전체 구간이 노출되어 있지 않을 뿐만 아니라 제4기 운동 여부를 명확하게 증명하기 위해서는 제4기 지층의 절단 유무를 주로 굴착을 통해

서만 밝혀내야 한다는 한계에 의해 현재의 시점에서는 단층핵과 단층손상대 내에서의 제4기 거동양상 특성을 차별화하기는 어렵다. 하지만 추가 연구 결과가 지속적으로 집적된다면 양산단층대 내부에서의 제4기 동안 시공간별 거동양상을 구체화할 수 있을 것이다.

4. 향후 연구과제

양산단층은 오랜 지질시대 동안의 지구조 진화와 활성 여부 등의 관심에 의해 한반도 내 주요 단층들 중에서도 특히 많은 연구가 수행된 곳이다. 그럼에도 불구하고 단층구간(분절)별 또는 단층대를 구성하는 단층핵과 단층손상대에서의 향후 거동양상에 대한 이해도를 높이기 위해서는 여전히 극복해야 할 부분이 남겨져 있으며, 이러한 부분은 나아가 국내 단층·지진 연구를 수행함에 있어 기본적으로 고려해야 할 영역이기도 하다.

4.1 양산단층대 정보의 체계화

양산단층대 내부변형을 연구하는 주요 목적 중 하나는 단층대의 오랜 지질시대동안 거동을 이해함으로써 미래의 거동 양상에 대한 조금의 실마리라도 찾는 것이다. 대부분의 제4기 단층운동은 적절하게 배향된 기존 불연속면이 현재 작동하는 응력에 의해 다시 미끄러진 결과이다(e.g., Scholz, 2002; Wibberley

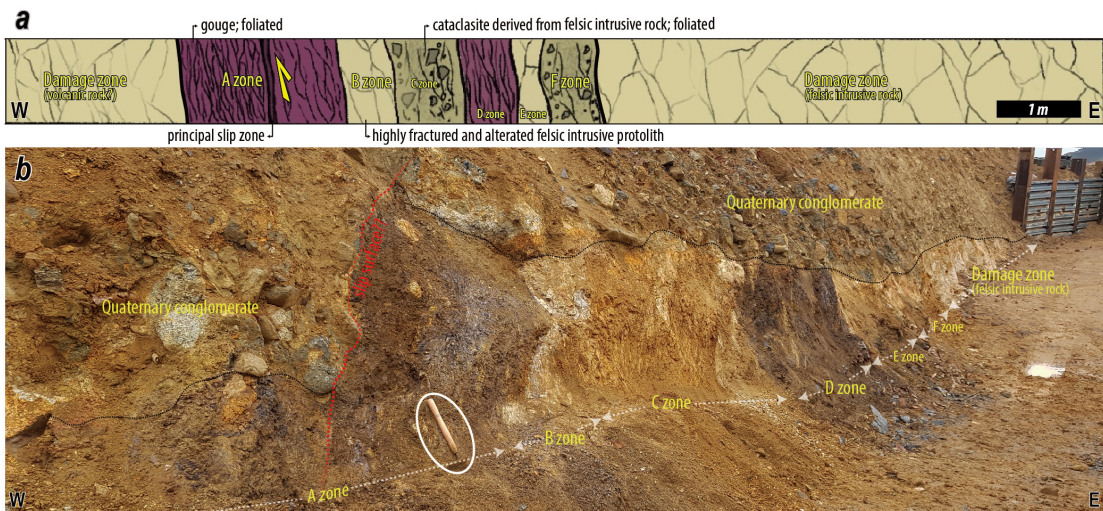


Fig. 5. (a) Schematic illustration and (b) photograph showing the internal structure of the Yangsan Fault core at the Yeonbongji site.

Table 2. Information on the Yangsan Fault core at the Gogok site (modified after Cheon *et al.*, 2019b).

Investigation Name ⁽¹⁾	Researcher or Reference ⁽²⁾	Investigation Locality ⁽³⁾		Fault Strike ⁽⁴⁾	Fault Dip ⁽⁵⁾	Fault Type ⁽⁶⁾	Fault Striation ⁽⁷⁾
		Administrative District	GPS coordinates				
Gogok	Cheon <i>et al.</i> (2019a)	Gyeongbuk Yeongdeok-gun Chuksan-myeon Gogok-ri	N36.49213	010	70	RL	
			E129.40973			RL+R	073/68
Internal Structure ⁽⁸⁾							
Width (m)			Kinematic Indicator	Deformation Characteristics			
Fault Core	60		■ Magnetic anisotropy of fault gouge (RL) ■ Slickenline (RL+R)	■ Comprises alternating zones of fault gouge and cataclasite, which contain host-rock lenses. ■ Divided into (from west to east): (1) basalt-derived gouge-cataclasite zone (ca. 2 m-wide; section A); (2) purple mudstone-derived gouge zone (ca. 12 m-wide; section B); (3) basalt protolith (ca. 5 m-wide; section C); (4) purple mudstone-derived gouge zone (ca. 4 m-wide; section D), (5) purple mudstone protolith (over 10 m-wide; section E), (6) purple mudstone-derived gouge zone (ca. 20 m-wide; section F). - section A: mainly composed of brown gouge layers and intercalated cataclasite layers; reverse-dominated striations with a small dextral component (rake angle: 100°) observed on slip surfaces, which are anastomosing and link up with each other. - sections B and D: mainly composed of purple gouge layers intercalated with NNE-SSW-striking light gray sandstone protolith (a few cm to several tens of centimeters wide); NNW-SSE-striking magnetic fabrics within section B indicate dextral movement. - section C: highly fractured basalt derived from western body. - section E: highly fractured purple mudstone derived from eastern body. - section F: mainly composed of purple gouge layers; infrequently observed blue and gray gouge layers. ■ Thin (~2 cm), highly polished bands of gouge along the boundaries between the sections. ■ Mainly eastward-dipping geometry.			
Fault Damage zone	Hanging wall	Several tens of meters		■ Shear fractures with similar strikes frequently observed within western basaltic body.			
	Footwall	Several tens of meters					
Basement Rocks Information ⁽⁹⁾					Remark		
	Lithology	Stratigraphy	Radiometric Age (Ma)		■ Multiple fault core is composed of several individual fault core strands (sections A, B, D, and F) and sections of protolith (sections C and E). ■ Detrital zircon from the Ullyeonsan Formation sandstone has U-Pb SHRIMP age of <108 Ma (Kang <i>et al.</i>, 2018). ■ E-W maximum horizontal compression is reconstructed from striations in section A.		
			Method	Age			
Hanging wall	Purple mudstone	Hayang Group Ullyeonsan Formation	U-Pb	< 108 Ma			
Footwall	Basalt	Yucheon Group					

et al., 2008; Kim *et al.*, 2011). 이때 주어지는 응력의 방향과 크기, 단층의 기하학적 특성, 단층물질의 특성, 유체의 역할 등 다양한 인자들이 단층이 주어진 응력을 견디지 못하고 다시 움직이게 되는 주요 원인이 된다(e.g., Barka and Kadinsky-Cade, 1988; Sibson,

1995; Kelly *et al.*, 1999). 이와 함께 현재 응력환경에서 움직이기 힘든 방향에 놓인 단층(unfavorably oriented fault)이라고 할지라도 광역적으로 주어지는 응력의 방향이 단층손상대에서 국부적으로 변화하면서 단층의 재활동에 중요한 영향을 미칠 수 있다

[illegible]

Table 4. Information on the Yangsan Fault core at the Taegi site.

Investigation Name ⁽¹⁾	Researcher or Reference ⁽²⁾	Investigation Locality ⁽³⁾		Fault Strike ⁽⁴⁾	Fault Dip ⁽⁵⁾	Fault Type ⁽⁶⁾	Fault Striation ⁽⁷⁾
		Administrative District	GPS coordinates				
Taegi	Lee <i>et al.</i> (2020)	Ulsan-si Ulju-gun Eonyang-eup Taegi-ri	N35.589002	020~ 030	>70	RL	
			E129.137525				
Internal Structure ⁽⁸⁾							
Width (m)			Kinematic Indicator	Deformation Characteristics			
Fault Core	>25		■ Slickenline (RL) ■ S-C fabric of foliated gouge (RL)	■ Comprises alternating zones of fault gouge and cataclasite, which contain host-rock lenses. ■ Divided into (from west to east): (1) tuff-derived breccia (ca. 3 m-wide; section A); (2) sediment-derived gouge and cataclasite zone (ca. 5 m-wide; section B); (3) tuff-derived breccia zone (ca. 8 m-wide; section C); (4) sediment-derived gouge and cataclasite zone (ca. 19 m-wide; section D). - Sections A and C: composed of tuff-derived breccia with brownish matrix and no preferred orientations. - Sections B and D: composed of purple to dark gray, sediment-derived gouge and cataclasite layers, but also including sandstone lenses. ■ Principal slip zones a few cm wide located along the boundaries between sections. ■ Striations indicating dextral slip on the slip surfaces. ■ General orientation of foliated gouges shows NNE-SSW strike and steep eastward dip (>70°).			
Fault Damage zone	Hanging wall	Several tens of meters		■ Orientation of sedimentary rocks in the eastern damage zone becomes highly deflected close to fault core; the general westward dip changes to a steep eastward dip near the fault core. ■ Some minor folds in highly fissile materials observed in the eastern damage zone.			
	Footwall	Unknown					
Basement Rocks Information ⁽⁹⁾					Remark		
	Lithology	Stratigraphy	Radiometric Age (Ma)		■ This outcrop is interpreted as the eastern margin of the main fault core. The western margin of the main fault core is now buried under Gyeongbu expressway.		
			Method	Age			
Hanging wall	Sandstone	Hayang Group					
Footwall	Tuff	Yucheon Group					

(Faulkner *et al.*, 2006). 우리나라와 같이 상대적으로 판경계에서 벗어나 위치하는 지역은 지판운동에 의해 주어지는 응력을 해소하는 단층운동이 판경계 부에서와 같이 특정 활성단층에 집중되지 않아, 상대적으로 분산되어 분포하는 복잡한 기하의 단층들이 선택적으로 재활동하면서 응력을 해소하게 된다 (Liu *et al.*, 2011). 따라서 판내부 단층·지진에 대한 시공간적 이해도는 판경계부에 비해 부족할 수밖에 없으며 이는 지진 발생 시 더 큰 피해를 가져올 수 있는 요인이 되기도 한다(England and Jackson, 2011). 판내부 지진환경의 불규칙성과 단층의 미끌림 및 파열 전파 등의 현상을 보다 잘 이해하기 위해서는 기

존 불연속면에 대한 명확한 분포 및 기하학적/운동학적 특성, 단층물질의 광물학적, 역학적 특성 대한 접근이 우선적으로 이루어져야 하며, 앞서 제시된 단층 모두 지점별 관련 정보들에 대한 생산, 처리, 관리 시스템이 구축될 필요가 있다(Cheon *et al.*, 2019b). 해당 정보들은 판내부 환경에 적합한 단층의 구조적 분절 설정하는데 기초 자료로 활용될 수 있다.

4.2 대규모 연결단층과의 관계

단층의 구조적 분절을 설정함에 있어 또 다른 중요한 요소는 주단층과 접하지만 주단층의 방향과는 다른 방향으로 발달하는 단층들의 분포와 특성이다.

Table 5. Information on the Yangsan Fault core at the Yeonbongji site.

Investigation Name ⁽¹⁾	Researcher or Reference ⁽²⁾	Investigation Locality ⁽³⁾		Fault Strike ⁽⁴⁾	Fault Dip ⁽⁵⁾	Fault Type ⁽⁶⁾	Fault Striation ⁽⁷⁾
		Administrative District	GPS coordinates				
Yeonbongji	Ryoo (2019)	Ulsan-si Ulju-gun Samnam-myeon Sangcheon-ri	N35.51331	017	80		
			E129.10057				
Internal Structure ⁽⁸⁾							
Width (m)			Kinematic Indicator	Deformation Characteristics			
Fault Core	>5			■ Comprises alternating zones of fault gouge and cataclasite, which contain host-rock lenses. ■ Divided into: (1) purple gouge zone (ca. 2 m-wide; section A); (2) protolith (ca. 0.5 m-wide; section B); (3) brown cataclasite (ca. 1 m-wide; section C); (4) purple gouge (ca. 0.5 m-width; section D); (5) protolith (ca. 0.3 m-wide; section E); (6) brown cataclasite (ca. 0.7 m; section F).			
Fault Damage zone	Hanging wall	Several tens of meters		■ Highly fractured and hydrothermally altered.			
	Footwall	Several tens of meters					
Basement Rocks Information ⁽⁹⁾				Remark			
	Lithology	Stratigraphy	Radiometric Age (Ma)		■ This site is interpreted as one individual fault core strand within the multiple-core fault zone, based on the Yeonbong site ca. 370 meters southwest of this site (Choi <i>et al.</i>, 2012).		
			Method	Age			
Hanging wall	Felsic intrusion						
Footwall	Volcanics	Hayang Group					
Quaternary Movement Information							
Quaternary Movement Type ⁽¹⁰⁾	Quaternary offset Indicator ⁽¹¹⁾					Slip Rate ⁽¹²⁾ (mm/yr)	Age of Last Movement ⁽¹³⁾ (ky BP)
	Marker	offset (m)		Formation Age (ka)			
R	Quaternary conglomerate	Horizontal	Vertical	Method	Age		
			0.6				
Remark							
■ A highly polished thin band in the central part of Section A is interpreted as a Quaternary fault splay based on transected Quaternary strata showing several tens of centimeters of offset. ■ Although this could also be interpreted as the result of relative erosion within a weak fault zone, the relatively sharp nature of the inferred surface, combined with its eastward dip direction, suggests that it is reasonable to interpret it as a splay fault rather than an erosional surface.							

양산단층과 접하고 있는 대규모 단층은 북부에서 북북서-남남동 내지 남-북 방향으로 연장되는 영덕단층과 중부 일대에서 북북서-남남동 방향으로 연장되는 울산단층으로 대표할 수 있다. 최근 Seo *et al.* (2019)는 영덕단층 주단층핵의 내부변형 특성과 변형사 연구를 통해 약 8 km의 우수향 변위를 보이는 영덕단층이 양산단층과 유사한 운동 이력을 경험한 것으로 해석하였다. 한편 경주시 일대에서 양산단층과 접하

는 울산단층은 북북서-남남동 방향의 비교적 선형의 곡부를 따라 단층이 추정된 이후(e.g., Kim, 1973), 탄성과 반사법 및 굴절법과 중력탐사 결과를 통해 지하 단층대의 존재가 제안되었다(Kim *et al.*, 2008). 특히 울산단층대의 동편을 따라 제4기 단층운동의 증거가 다수 보고된 바 있고(e.g., Chwae *et al.*, 2000; Ryoo *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2012; Kim, M.-C. *et al.*, 2016), 보다 2~5 km 동편에는 유사한 방향성을

보이며 마이오세 지각변형을 규제하는 연일구조선이 발달하고 있어(e.g., Son *et al.*, 2013, 2015), 울산 단층대가 특정 지질 시대 동안에 지각변형을 제어하며 성장하였을 가능성이 있다. 양산단층과 울산단층의 기하학적 관계에 대한 연구들은 제안된 바 있으나(e.g., Han *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2016), 두 단층이 접하는 경주시 일대는 상대적으로 넓은 단층곡을 형성하고 있어 두 단층의 정확한 기하학적 관계와 지질시대 동안의 진화사에 대한 이해는 여전히 부족한 실정이다. 따라서 정밀 중력탐사를 비롯한 천부 지구물리탐사를 적극적으로 활용한 두 단층 간 지하 분포특성에 대한 연구가 수행될 필요가 있다.

4.3 제4기 지층 연대측정

최근 지질시대 동안 단층의 운동횟수와 시기, 변위를 등을 규명하기 위한 고지진학적 접근법은 대규모 지진의 재발주기가 수천 년에서 수만 년에 이르는 우리나라에서 가장 현실적으로 미래의 단층 운동 가능성을 평가하는 방법이다(Kim, Y.-S. *et al.*, 2011, 2020). 이때 단층에 의해 절단되었거나 절단되지 않은 제4기 지층의 연대는 단층의 시간적 거동양상을 이해하는 기본적인 정보이다. OSL 연대측정법은 일반적으로 수 년~수십 년 단위의 매우 짧은 퇴적층부터 수십만 년의 퇴적층의 연대측정에도 적용이 가능하여 현재 고지진학적 연구에 가장 널리 활용되고 있다(e.g., Choi *et al.*, 2004; Kim, Y.-S. *et al.*, 2020). 양산단층의 제4기 운동 시기를 한정할 수 있는 지층들의 OSL 연대 결과는 지속적으로 도출되고 있음에도 불구하고 재발주기가 비교적 긴 양산단층의 고지진학적 거동을 보다 명확하게 이해하기 위해서는 수십만 년에서 수백만 년의 연대를 가지는 지층의 연대를 알기 위한 다양한 방법론의 적용이 필수적이다. 이러한 요구를 충족하기 위해서 단층비지의 연대 측정에만 적용되었던 석영 ESR 신호를 제4기 퇴적층의 퇴적연대 측정에도 적용하는 방법이 최근 제안되어 국내 환경에서의 활용 가능성이 검토되고 있다(Weon *et al.*, 2020). 이와 함께, 우주선유발 동위원소 연대측정법은 우주선(Cosmic-ray)에 의해 암석 내 석영에서 현장 생성(In-situ)되는 단반감기의 방사성탄소(^{14}C)와 장반감기의 베릴륨(^{10}Be , 반감기: 138만년) 및 알루미늄(^{26}Al , 반감기: 70만년) 동위원소 등을 활용하는 방법이다. 이 연대측정법은 이론

적으로 수천 년에서부터 수백만 년까지의 침식률 또는 노출연대를 도출해 낼 수 있으며, 현재 국내에서는 하안단구, 해안단구, 선상지 등의 퇴적층과 암설지형, 화산지형, 구조지형(단층애) 및 고고학 유물층에 적용되고 있다(Kim, 2005; Kim *et al.*, 2007; Seong and Yu, 2014; Shin, 2015). 한반도와 같은 습윤한 기후에서 우주선유발 동위원소 연대측정법을 성공적으로 적용하기 위해서는 복잡한 노출 환경을 고려하여 적합한 연구지역의 선정과 시료 확보가 우선적으로 진행되어야 한다. 또한 우주선유발 동위원소 연대측정법이 널리 통용되고 있는 OSL 연대측정법 등 다양한 연대측정법과 교차검증이 이루어진다면 연대 측정 결과의 신뢰도를 높여 재발주기가 비교적 긴 양산단층의 시간적 거동 양상을 이해하는데 한걸음 다가갈 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 2020년에 수행하는 주요사업인 ‘판내부 활성지구조특성 연구 및 단층분절모델 개발(GP2020-014)’의 결과물이다. 심사과정에서 건설적이고 유익한 조언과 비평을 해주신 익명의 두 심사위원과 편집위원에게 감사드린다.

REFERENCES

- Allen, P.A. and Allen, J.R., 2013, Basin analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment, 2nd Edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 619 p.
- Barka, A.A. and Kadinsky-cade, K., 1988, Strike-slip Fault Geometry in Turkey and its Influence on Earthquake Activity. *Tectonics*, 7, 663-684.
- 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.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
- 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, C.-J., 2002, Structural characteristics and evolu-

- tion of the Yangsan fault, SE Korea. Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Daegu, 259 p (in Korean with English abstract).
- 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 Geological Society of Korea*, 26, 471-487.
- Cheon, Y., Cho, H., Ha, S., Kang, H., Kim, J.-S. and Son, M., 2019a, Tectonically controlled multiple deformations along the Yangsan Fault Zone, SE Korea, since Late Cretaceous. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170, 188-207.
- Cheon, Y., Choi, J.-H., Kim, N., Lee, H., Choi, I., Rockwell, T.K., Lee, S.R., Ryoo, C.-R., Bae, H., Choi, H. and Lee, T., 2020a, Late Quaternary transpressional earthquakes on a long-lived intraplate fault: A case study of the Southern Yangsan Fault, SE Korea. *Quaternary International*, 553, 132-143.
- Cheon, Y., Choi, J.-H. and Lee, S.R., 2019b, A proposal for a Standardized Fault Description Format to Study Active Intraplate Tectonics in the Korean Peninsula. *Geo Data*, 1, 56-64.
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S., 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*, 53, 95-114 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S. and Son, M., 2020b, Tectonic evolution of the Cretaceous Gyeongsang Back-arc Basin, SE Korea: Transition from sinistral transtension to strike-slip kinematics. *Gondwana Research*, 83, 16-35.
- 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., Son, M., Cheon, Y., Sohn, Y.K., Kim, J.-S. and Kang, H.-C., 2016, Evolution of the Late Cretaceous Dadaepo 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., 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 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.H., Cheong, C.-S. and Chang, H.-W., 2004, Principles of quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating and its geological applications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 567-583 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.-H., Kim, Y.-S. and Klinger, Y., 2017, Recent progress in studies on the characteristics of surface rupture associated with large earthquakes. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 129-157 (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., 2006, 'Singwang strike-slip duplex' around the Pohang basin, SE Korea: its structural evolution and role in opening and fill of the Miocene basin. *Geosciences Journal*, 10, 145-157.
- Choi, S.-J., Ghim, Y.S., Cheon, Y. and Ko, J., 2019, The First Discovery of Quaternary Fault in the Western Part of the South Yangsan Fault - Sinwoo Site. *Economy and Environmental Geology*, 52, 251-258 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Jeon, J.S., Song, G.Y., Kim, H.C., Kim, Y.H., Choi, B.Y., Chwae, W.C., Han, J.G., Ryoo, C.R., Seon, C.G., Cho, M.S., Kim, K.Y., Kim, Y.B., Lee, H.J., Shin, J.S., Lee, Y.S., Kee, W.S., Lee, H.K., Song, Y.G., Kim, Y.S., Kang, T.S., Hong, D.G. and Kim, S.G., 2012, Active Fault Map and Seismic Hazard Map. Natural emergency Management Agency, Seoul, 939 p (in Korean).
- Chwae, U. *et al.*, 2000, Neotectonics. Ministry of Science and Technology, Seoul, 258 p (in Korean).
- Collettini, C., Viti, C., Smith, S.A.F. and Holdsworth, R.E., 2009, Development of interconnected talc networks and weakening of continental low-angle normal faults. *Geology*, 37, 567-570.
- Cunningham, W.D. and Mann, P., 2007, Tectonic of strike-slip restraining and releasing bends. Cunningham, In: W.D. and Mann, P., 2007, (eds.) *Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends*. Geological Society, London, Special Publications, 290, 1-12.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, C.F., 2011, *Structural Geology of Rocks and Regions*, 3rd. John Wiley & Sons, Inc., New York, 864 p.
- England, P. and Jackson, J., 2011, Uncharted seismic risk. *Nature Geoscience*, 4, 348-349.
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K. and Wibberley, C.A.J., 2010, A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, 1557-1575.

- 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. and Heap, M.J., 2006, Slip on 'weak' faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone. *Nature*, 444, 922-925.
- 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, London, Special Publication, 299, 139-150.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*. Cambridge University Press, New York, 463 p.
- Gwon, S., Cho, S., Park, D., Choi, W.-H., Nakao, R., Tanaka, T. and Inoue, D., 2020, Microscopic analysis of fault rock using X-ray computed tomography from the Wolsan trench in the middle part of the Yangsan fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 273-284 (in Korean with English abstract).
- Han, K., 2012, Geophysical study for structural characteristics and changes of Yangsan fault zone in the Eonyang-Gyeongju area. Ph.D. Thesis, Andong National University, Andong, 221 p (in Korean with English abstract).
- Han, R., Hirose, T. and Shimamoto, T., 2010, Strong velocity weakening and powder lubrication of simulated carbonate faults at seismic slip rates. *Journal of Geophysical Research*, 115(B3), B03412.
- Han, R., Shimamoto, T., Ando, J. and Ree, J.-H., 2007, Seismic slip record in carbonate-bearing fault zones: An insight from high-velocity friction experiments on siderite gouge. *Geology*, 35, 1131-1134.
- Han, S.-R., Park, J. and Kim, Y.-S., 2009, Evolution modeling of the Yangsan-Ulsan fault system with stress changes. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 361-377 (in Korean with English abstract).
- Hatae, N., 1937, *Geological Atlas of Korea*, no. 18, Yanghae and Yongdok Sheets (scale 1:50,000). Geological Survey of Korea (in Japanese with English abstract).
- 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, Gyeong and Gyeongju areas, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 1094-1102.
- Hwang, B.H., Son, M., Yang, K., Yoon, J. and Ernst, W.G., 2008, 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 Andong Sheet, 1:250,000. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 67 p.
- Ikari, M., Marone, C. and Saffer, D.M., 2011, On the relation between fault strength and frictional stability. *Geology*, 39, 83-86.
- Ikari, M.J., Saffer, D.M. and Marone, C., 2009, Frictional and hydrologic properties of clay-rich fault gouge. *Journal of Geophysical Research*, 114, B05409.
- Kang, H.-C., Cheon, Y., Ha, S., Seo, K., Kim, J.-S., Shin, H.C. and Son, M., 2018, Geology and U-Pb Age in the Eastern Part of Yeongdeok-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 27, 153-171 (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 kinematics characteristics of the Sinheung Fault, Eonyang, Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 18, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Kelly, P.G., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J. and McGurk, A.C., 1999, Selective reverse-reactivation of normal faults, and deformation around reverse-reactivated faults in the Mesozoic of the Somerset coast. *Journal of Structural Geology*, 21, 496-509.
- Kim, C.-M., Ha, S. and Son, M., 2020, Evidence of co-seismic slip recorded by Quaternary fault materials and microstructures, Naengsuri, Pohang. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 175-192 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.-M., Han, R., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Son, M., 2016, Internal structure and materials of the Yangsan fault, Bogyongsan area, Pohang, South Korea. *Geosciences Journal*, 20, 759-773.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, K.H. and Song, K.Y., 1998, Explanatory Note of the Pusan Sheet, 1:250,000. Korea Institute of Energy and Resources, 62 p.
- Kim, H.-J., Moon, S., Jou, H.-T., Lee, G.H., Yoo, D.G., Lee, S.H. and Kim, K.H., 2016, The offshore Yangsan fault activity in the Quaternary, SE Korea: Analysis of high-

- resolution seismic profiles. *Tectonophysics*, 693, 85-95.
- 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.Y., 2005, Possibilities and prospective of the study on landforms in Korea using cosmogenic isotope analysis. *Journal of the Geomorphological association of Korea*, 12, 117-132.
- Kim, K.-H., Kim, J., Han, M., Kang, S.Y., Son, M., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kim, H.-J., You, Q. and Hao, T., 2018, Deep Fault Plane Revealed by High-Precision Locations of Early Aftershocks Following the 12 September 2016 M_L 5.8 Gyeongju, Korea, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 517-523.
- Kim, K.J., Jull, A.J.T. and Woo, H.J., 2007, Long-lived cosmogenic nuclide, Beryllium-10 and its application. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 20, 30-50 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.Y., Kim, D.H. and Lee, S.Y., 2008, Near-surface geophysical studies in the Ulsan Fault Zone of Korea. *Exploration Geophysics*, 39, 78-84.
- 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 Petrological Society of Korea*, 3, 169-193 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-J. and Lee, H.-K., 2020, ESR dating of fault gouge-review. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 211-234 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Choi, J.-H., Park, S.-I., Lee, T.-H. and Choi, Y., 2020, Cumulative displacement of the Central-Southern Yangsan Fault based on topography of Quaternary fluvial terrace. *Journal of Geological Society of Korea*, 56, 135-154 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., 1973, A study on the Terraces along the south-eastern coast (Bangeojin-Pohang) of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 9, 47-88 (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).
- Kim, Y.-S., Kim, T., Kyung, J.B., Cho, C.S., Choi, J.-H. and Choi, C.U., 2017, Preliminary study on rupture mechanism of the 9.12 Gyeongju Earthquake. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 407-422 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Son, M., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Seong, Y.B. and Lee, J., 2020, Processes and Challenges for the production of Korean active faults map. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 113-134 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B., 2003, Paleoseismology of the Yangsan Fault, southeastern part of the Korean Peninsula. *Annals of Geophysics*, 46, 983-996.
- 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., 1999a, 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).
- Kyung, J.B., Lee, K.H., Okada, A., Watanabe, M. and Suzuki, Y., 1999b, Study of Fault Characteristics by Trench Survey in the Sangcheon-ri Area in the Southern Part of Yangsan Fault, Southeastern Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 20, 101-110 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J., Choi, S.-J., Chwae, U.-C. and Ryoo, C.-R., 1999, Characteristics of the Quaternary faulting of the Wolpyeong, Yangsan, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 179-188 (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. and Yang, J.-S., 2007, Temporal and spatial patterns of Quaternary fault activity in the Southeastern part of the Korean peninsula. *The 5th Symposium on the Geology of Korea Special Publication 3*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 45-55 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Gwon, S. and Kim, Y.-S., 2016, Research on Earthquake Occurrence Characteristics Through the Comparison of the Yangsan-Ulsan Fault System and the Futagawa-Hinagu Fault System. *Journal of Petrological Society of Korea*, 25, 195-209 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Rezaei, S., Hong, Y., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Choi, W.-H., Rhee, K.-W. and Kim, Y.-S., 2015, Quaternary fault analysis through a trench investigation on the northern extension of the Yangsan fault at Dangu-ri, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 471-485 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan

- Fault System: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 434-449.
- 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, S.R. *et al.*, 2020, Research on geologic hazard assessment of large fault system - focusing on central region of the Yangsan fault. Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, NP-2018-17, Daejeon, 503 p (in Korean).
- Lim, C.B. *et al.*, 2003, Development of Technology and Background for Seismic Safety Evaluation. Technical Note of the Ministry of Science and Technology of Korea, KINS/GR-255, Daejeon, 1433 p (in Korean with English abstract).
- Liu, M., Stein, S. and Wang, H., 2011, 2000 years of migrating earthquakes in North China: How earthquakes in midcontinents differ from those at plate boundaries. *Geological Society of America*, 3, 128-132.
- Moore, E.M. and Twiss, R.J., 1995, *Tectonics*. Freeman, New York, 415 p.
- Okada, A., Takemura, K., Watanabe, W., Suzuki, Y. and Kyung, J.-B., 2001, Trench Excavation Surveys across the Yangsan and Ulsan Active Fault Systems in the Southeastern Part of Korea Peninsula. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 22, 287-306.
- Rawling, G.C., Goodwin, L.B. and Wilson, J.L., 2001, Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types. *Geology*, 29, 43-46.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, *The geology of Korea*: Seoul, Korea. Geological and Mining Institute of Korea, 139 p.
- Ryoo, C.-R., 2019, Quaternary faulting and compressive arc-shaped lineaments developed around Yangsan Fault Zone on the southern boundary between Samnam-myeon and Samdong-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. *Proceedings of the Annual Joint Conference, the Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea*, May 30-31, 2019, Chuncheon, Korea, 48-52 (in Korean).
- Ryoo, C.-R. and Cheon, Y., 2019, Characteristics of the Main Fault Zone Developed Along Yangsan Fault: On the Outcrop of Cheonjeon-ri, Dudong-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. *Journal of the Petrology of the Society of Korea*, 28, 347-357 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Kang, J.-H. and Kang, H.-C., 2018, On the Latest Tectonic Environment Around Northern Part of the Yangsan Fault, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 27, 173-184 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Kang, J.-H., Son, M., Choi, S.-J. and Chwae, U., 2006, Geological Structure of the Quaternary Sinheung Fault Developed along Yangsan Fault in the Northern Eonyang, Ulsan, Korea. *KIGAM Bulletin*, 10, 3-17 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Lee, B.-J., Cho, D.-L., Chwae, U.-C., Choi, S.-J. and Kim, J.-Y., 1999, Quaternary fault of Dangu-ri in Gyeongju Gangdong-myeon: Byeokgye Fault. *The Korean Society of Economic and Environmental Geology/The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers/Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, Spring Joint Conference on East-North Asia Ore Deposit of Cause of Formation*, (Abstract), 334 p (in Korean).
- 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).
- Scholz, C.H., 2002, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, 471 p.
- Seo, K., Ha, S., Lee, S., Kang, H.-C. and Son, M., 2019, Geometry and Kinematics of the Yeongdeok Fault in the Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 28, 171-193 (in Korean with English abstract).
- Seong, Y.B. and Yu, B.Y., 2014, Cosmogenic Nuclides Dating of the Earth Surface: Focusing on Korean Cases. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 261-272 (in Korean with English abstract).
- Shin, J.R., 2015, Application of ^{10}Be Dating Technique for Marine Terrace Studies and Its Limitations. *Journal of Korean Earth Science Society*, 36, 512-519 (in Korean with English abstract).
- Sibson, R.H., 1983, Continental fault structure and the shallow earthquake source. *Journal of the Geological Society, London*, 140, 741-767.
- Sibson, R.H., 1995, Selective fault reactivation during basin inversion: potential for fluid redistribution through fault-valve action. *Geological Society, London, Special Publication*, 88, 3-19.
- Sibson, R.H., 2003, Thickness of the seismic slip zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1169-1178.
- Son, M., Cho, C.S., Shin, J.S., Rhee, H.-M. and Sheen, D.-H., 2018, Spatiotemporal Distribution of Events during the First Three Months of the 2016 Gyeongju, Korea, Earthquake Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 210-217.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2015, Miocene tectonic evolution of the ba-

- sins 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, Y., Ha, S., Lee, S., Kang, H.-C., Choi, J.-H. and Son, M., 2020, Newly identified characteristics of the Quaternary faulting on Central Yangsan Fault through structural analysis and paleoseismological interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 155-173 (in Korean with English abstract).
- Sylvester, A.G., 1988, Strike-slip faults. *Bulletin of the Geological Society of America*, 100, 1666-1703.
- Tateiwa, I., 1929, Geological atlas of Korea, no. 10, Kyongju, Yongchon, Daegu and Waegwan sheets (scale 1:50,000). Geological Survey of Korea (in Japanese with English abstract).
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 2007, *Structural Geology*, 2nd. W.H. Freeman and Company, New York, 736 p.
- 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, 36, 118 p (in Korean with English abstract).
- Weon, H.-J., Choi, J.-H. and Lee, H.-K., 2020, Investigations on the applicability of quartz ESR signals to dating Quaternary sediments. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 235-249 (in Korean with English abstract).
- Wibberley, C.A.J., Yielding, G. and Toro, G.D., 2008, Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. In: Wibberley, C.A.J., Kurz, W., Imber, J., Holdsworth, R.E., Colletini, C. (eds.) *The internal structure of fault zones: Implications for mechanical and fluid flow properties*. Geological Society, London, Special Publication, 299, 5-33.
- Woo, S. and Han, R., 2019, Shear tests on intact fault gouges preserving natural deformation fabrics. *Journal of Geological Society of Korea*, 55, 131-139 (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.
- 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 the Geological Society of Korea*, 51, 569-587 (in Korean with English abstract).
- Yang, J.-S., 2006, Quaternary fault activity in the southeastern part of Korean Peninsula. Ph.D. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 382 p (in Korean with English abstract).
- Yang, J.-S. and Lee, H.-K., 2012, ESR dating of fault gouge from the Gacheon 1 site on the Yangsan fault zone. *Journal of Geological Society of Korea*, 48, 459-472 (in Korean with English abstract).
- Yang, J.-S. and Lee, H.-K., 2014, Quaternary Fault Activity of the Yangsan Fault Zone in the Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. *Economy 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.

Received : July 13, 2020

Revised : August 12, 2020

Accepted : August 17, 2020