

<Technical Report>

X-선 전산화 단층촬영을 활용한 양산단층 중부 월산리 제4기 단층 지점 단층암의 미세구조 발달특성 분석

권세현^{1,*} · 조성일¹ · 박동희¹ · 최원학¹ · Ryusuke Nakao² · Takenobu Tanaka² · Daiei Inoue³

¹한국수력원자력(주) 중앙연구원 구조내진그룹

²일본 한신컨설턴트(주)

³(전)일본 전력중앙연구소

요 약

마지막 운동 시기를 비롯한 제4기 단층의 활동특성은 지진재해도 평가 및 사회기반시설의 내진설계에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 양산단층 중부인 경주시 월산리 지점에서 보고된 제4기 단층의 발달특성을 규명하기 위하여, 굴착 단면에서 채취한 단층암 시료에 대하여 X-선 전산화 단층촬영(X-ray computed tomography, CT)을 실시하고 박편 관찰을 통하여 단층암의 미세구조 분석을 실시하였다. 미세구조 분석 결과, CT 영상에서 단층의 주미끌림면은 전형적인 저밀도대로 나타났고, CT는 단층비지와 퇴적물의 혼입 양상, 단열간의 절단관계 등 단층암 내 발달하는 다양한 미세구조의 해석에 유용하였다. 이러한 미세구조 분석 기법은 고지진학적 단층활동성 평가의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 단층암에 대한 광물학적 분석 및 역학적 거동특성 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 제4기 단층, 양산단층, X-선 전산화 단층촬영, 주미끌림면, 단층암

Sehyeon Gwon, Sung-il Cho, Donghee Park, Weon-Hack Choi, Ryusuke Nakao, Takenobu Tanaka and Daiei Inoue, 2020, Microscopic analysis of fault rock using X-ray computed tomography from the Wolsan trench in the middle part of Yangsan fault, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 273-284

ABSTRACT: The characterization of Quaternary fault, such as age constraints on the timing of recent faulting and the intervals of fault reactivation, can be fundamental in assessing earthquake hazards and enhancing the seismic design of infrastructures. To characterize internal structures of fault rocks associated with Quaternary fault from the Wolsan trench in the middle part of the Yangsan fault, the microscopic analysis of the fault rock was performed by X-ray computed tomography (CT) and optical microscopy. The results showed that the principal slip zone associated with Quaternary fault was characterized by linear low-density zone in the CT images, and faulting-associated structural features, including sediment-fault gouge mixing and cross-cutting relationships between the fault gouge and fracture, can be identified. This analysis can contribute to improving the evaluation of fault activity, and further studies such as mineralogical analysis and mechanical behaviors of fault rocks are required for the characterization of Quaternary fault.

Key words: Quaternary fault, Yangsan fault, X-ray CT, principal slip zone, fault rock

(Sehyeon Gwon, Sung-il Cho, Donghee Park and Weon-Hack Choi, Structural & Seismic Engineering Group, Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Daejeon 34101, Republic of Korea; Ryusuke Nakao and Takenobu Tanaka, Hanshin Consultant Co. Ltd., Tokyo 101-0037, Japan; Daiei Inoue, (ex-)Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo 110-0015, Japan)

* Corresponding author: +82-42-870-5487, E-mail: sehyeon.gwon@khnp.co.kr

1. 서론

최근 지질시대에 발생한 지표파열 지진(surface rupture earthquake)의 활동특성(시기, 위치, 규모, 재래 주기, 변위량 등)에 대한 고지진학적 연구는 지진재해도 평가 및 사회기반시설의 내진설계를 위한 기초 자료로 중요하게 활용되고 있다(Yeats *et al.*, 1997). 고지진학적 단층활동성 평가를 위해서는 지질구조와 층서학적 절단관계, 지형학적 해석 및 신뢰도 높은 연대측정결과가 종합적으로 해석되어야 한다(McCalpin, 2009). 제4기 퇴적층의 시·공간적 분포가 제한적인 국내의 지질환경에서 단층의 활동성은 단층암에 대한 연대측정(Lee and Schwarcz, 2001; Yang and Lee, 2014)과 제4기층에 대한 연대측정 및 층서 대비(Ree

et al., 2003; Choi, J.-H. *et al.*, 2009; Choi, S.-J. *et al.*, 2010, 2014) 등으로 직·간접적으로 평가되고 있으나, 지표파열 지진의 연장성 및 변위량 등과 같은 단층활동성 평가요소의 불확실성은 여전히 크다. 이러한 단층 입력변수의 불확실성은 지진재해도 평가의 신뢰도에도 영향을 미칠 수밖에 없다. 따라서 제4기 단층의 활동성을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 단층활동성 평가 기술의 개발 및 도입이 시급하다.

양산단층대는 한반도 남동부에서 북북동-남남서 방향의 뚜렷한 선형구조로 인지되며(Chang *et al.*, 2003), 단층대의 기하학적 발달 양상에 따라 크게 북부, 중부, 남부의 3개의 기하학적 단층분절로 구분된다(그림 1; Choi *et al.*, 2017). 양산단층대는 후기 백악기 이래 다양한 지구조 응력체계 하에서의 누적

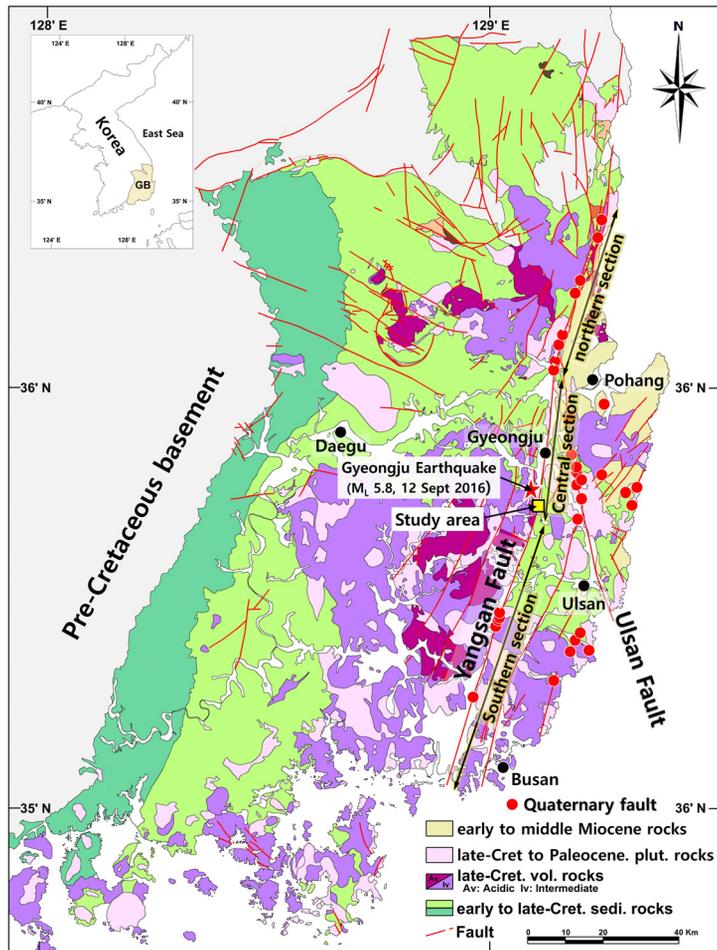


Fig. 1. Location of Quaternary faults around SE Korea and the Wolsan trench site. Fault segmentation of the Yangsan fault zone proposed by Choi *et al.* (2017).

변형작용의 산물로(Cheon *et al.*, 2019), 단층과쇄대는 다양한 폭과 규모로 발달한다(Choi *et al.*, 2009; Woo *et al.*, 2015; Kim, C.-M., 2016). 양산단층 남부에서 미소계기 지진의 관측 이래(Lee and Na, 1983), 고지진학적 연구(Okada *et al.*, 1994; Kyung *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 1999; Kyung, 2003, 2010; Kim and Jin, 2006; Kyung and Chang, 2011; Lee *et al.*, 2015)를 통해 양산단층대에서는 제4기 단층 지점이 다수 보고되었다. 또한, 2016 경주 지진(M_L 5.8) 이후, 양산단층대 일대에서 수행된 구조지질학적(Kim *et al.*, 2017), 지진학적(Kim, K.-H. *et al.*, 2016; Kim, Y. *et al.*, 2016), 고지진학적(Gwon *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2019) 연구 성과가 보고되고 있다. 이 지역에서 제4기 단층은 현생 지구조 응력체계 하에서 기반암 단층의 일부가 재활한 것으로, 주로 기반암이 제4기층을 올라타고 있는 역이동성 우수향 주향이동단층이다. 양산단층대에서는 단층암의 암석·광물학적 생성 및 발달특성(Chang and Cho, 1999; Kim, C.-M. *et al.*, 2016) 및 역학적 거동특성(Woo *et al.*, 2015, 2016), 단층손상대의 지질구조적 발달특성(Choi *et al.*, 2009; Cheon *et al.*, 2019) 및 단열구조의 기하분석을 통한 단층의 거동특성(Chang and Chang, 2009)에 대한 다양한 연구가 진행되었으나, 제4기 단층 주미끌림면의 발달특성에 대한 연구는 미진한 실정이다.

X-선 전산화 단층촬영(X-ray computed tomography, CT)은 피사체 내부 물질의 밀도차를 이용하여 피사체의 단면을 재구성하는 영상 처리 장비로, CT 장비의 발달과 더불어 다양한 지구과학 연구분야에 도입되고 있다(Cnudde and Boone, 2013). 최근 CT는 단층암에 대한 미세구조 분석에도 활용되었다(Hirono *et al.*, 2003a, 2003b, 2008; Kim, K.Y. *et al.*, 2016; Lin and Nishiwaki, 2019). Hirono *et al.* (2003a, 2003b)은 기반암 단층대 내 유체의 거동특성 해석에, Kim, K.Y. *et al.* (2016)은 단층암의 파쇄물질 형태와 암석 역학적 강도와의 상관관계 해석에 CT를 활용하였다. 시추코어에 대한 CT 영상분석을 통해, Hirono *et al.* (2008)은 대만 Chi-Chi 지진(1999년, Mw 7.6)에 대하여, Lin and Nishiwaki (2019)는 일본 Hyogo-ken Nanbu(1995년, Mw 6.9)과 관련된 유발 단층의 주미끌림면을 특성화하였다. 따라서 CT를 활용한 고지진학적 단층의 미세구조적 특성 해석은 제4기 단층 주미끌림면의 특성화에 유의미한 시도가 될 수

있다.

본 연구에서는 양산단층 중부지역 제4기 단층의 발달특성을 규명하기 위하여, CT를 활용하여 굴착 단면상에서 채취된 단층암 시료에 대한 미세구조 분석을 실시하였다. 단층암 시료에 대해 촬영한 CT 영상과 슬랩의 비교 분석 그리고 현미경 관찰을 통해 단층암 시료 내에서 단층활동에 수반된 미세구조적 발달특성 등을 해석하였다. 또한, 고지진학적 단층 조사에서 CT를 활용한 단층암 미세구조 분석기법의 활용가치를 검토하였다. 이에 앞서 양산단층 중부 경주시 월산리 지점의 굴착 단면 내에서 제4기 단층과 퇴적층의 발달특성을 살펴보았다.

2. 경주시 월산리 굴착지점

경주시 월산리 제4기 단층 지점은 경주 이남 양산단층의 중부지역에 속하며, 뚜렷하게 발달하는 선형구조 상에서 위치하여 신기 지구조적 단층활동성 평가를 위해 굴착조사를 실시하였다(그림 1; Gwon *et al.*, 2018). 굴착지점은 경부고속도로 동쪽의 구릉지 북쪽 사면에 노출된 안산암과 화강암의 단층경계 노두로부터 약 100 m 북쪽에 위치하며, 북북동 방향의 선형구조를 가로지르는 2개 지점에서 굴착하였다(그림 2). WS-1 지점에서 제4기 퇴적층을 절단하는 단층을 확인한 다음, 단층활동에 수반된 변위량 평가를 위해 WS-1 지점보다 약 10 m 북쪽의 WS-2 지점에서 굴착조사를 수행하였다.

월산리 지점의 굴착 단면에 노출된 단층은 동편의 안산암과 서편의 화강암 및 이를 부정합적으로 피복하는 제4기 퇴적층의 경계로, 단층의 주향과 경사는 $N20^{\circ}E$ 와 $80^{\circ}SE$ 이다(그림 3). 제4기층은 하상기원의 퇴적층으로, 주로 잔자갈을 포함하는 황갈색의 사질 내지 실트질층으로 구성되며 일부 청회색 실트층과 유기질 부식토를 포함한다(그림 3a, 3b). 퇴적층은 퇴적상과 압밀정도의 차이 등을 기준으로 상부에서 하부로 가면서 8개의 단위층(WA와 WB 그리고 WC1 ~ WC6)으로 구분된다. WA는 경작지층이고, WB는 퇴매움층이다. WC1은 굴착 단면 내 최상부의 제4기 퇴적층으로, 청회색의 실트질 내지 사질층으로 구성되어 있고 WC2의 상부에 얼음 썬기(ice wedge) 구조를 형성하고 있다. WC2는 황갈색의 기질지지역 실트층으로, 역은 주로 아각형 내지 아원형의 안

산암질 잔자갈로 구성되어 있으며 상향 세립화하고, WC3과 교호한다. WC3은 역질 실트층으로, 하부에는 부식질 토양층이 협재한다. WC4 ~ WC6은 각각 기질지 지 자갈, 역지 지 자갈 그리고 실트질 사질 퇴적물로 구성된 교호층으로, 화강암을 부정합적으로 피복한다. WS-1 굴착 단면에서 단층은 WC2를 절단하고 있으나, WS-2 굴착 단면에서는 WC2로 덮여 있으므로, 월산리 제4기 단층 지점에서 단층의 마지막 운동 시기는 WC2의 퇴적 중으로 해석된다.

WS-1 굴착 단면에서 단층비지대는 괴상의 암회색 단층비지대(약 40 cm 폭)와 이를 절단하는 회백색 단층비지대(약 10 cm 폭)로 구성된다(그림 3a, 3c). 암회색 단층비지는 주로 기반암 내 단층대에 한정되어 분포하고, 일부 단층비지 물질은 제4기 퇴적층(WC4) 내부에 재퇴적된 양상을 보인다. 반면, 회백색 단층비지대는 암회색 단층비지대를 절단하고 제4기 퇴적층을 교란시키고 있다. 또한, 단층대 내에서 암회

색 단층비지대와 석영질 파쇄암편의 분포 그리고 기반암과 일부 퇴적층의 산화 특성의 분포는 회백색 단층비지대로 구획되어 있다. 회백색과 암회색 단층비지대의 서쪽 경계부에는 퇴적물(WC2), 단층비지 물질 그리고 석영질 암편의 혼합대가 분포하고, 이는 회백색 단층비지대와 관련된 단층의 전단작용으로 형성된 것으로 해석된다. 이러한 WS-1 굴착 단면 내 단층대의 산상으로 미루어 보아, 암회색 단층비지의 형성은 기반암 내 단층활동과 관련된 것으로 해석되고 암회색과 회백색 단층비지의 형성과 관련된 단층의 활동 시기 사이에는 어느 정도의 지질학적 시간 차이가 존재할 것으로 추론된다.

WS-2 굴착 단면에서 단층비지대는 약 10-15 cm 폭으로 발달하며, 그 구성물질의 발달특성에 따라 육안상 3개의 불연속면으로 구분된다(그림 3d, 3e). 불연속면 A와 B는 각각 제4기 퇴적층(WC4)과 단층비지대의 경계부 그리고 암회색 단층비지대 내부에서 발달하는 회백색의 단층비지대이다. 불연속면 C는 안산암과 암회색 단층비지대의 경계이다. 특히 불연속면 B는 약 1 cm 폭의 회백색 단층비지로 구성되고, 단층대 내에서 매우 직선적인 형태로 발달한다. 불연속면 A와 B 사이에서 회백색 단층비지는 상호 교차하며 망상구조(anastomosing structure)를 이루고 있다. 단층비지대 내에 발달한 전단띠(shear band)와 저각의 단층조선(10° - 15° N), 그리고 굴착 단면에서 안산암이 퇴적층을 층상하는 양상은 역이동성 우수향 주향이동단층을 지시한다. WS-1 굴착단면에서와 유사하게 안산암과 암회색 단층비지의 경계부(불연속면 C) 주변에서 석영광맥은 파쇄작용을 받아 암회색 단층비지대 내부로 혼입된 양상이 관찰된다.



Fig. 2. Annotated aerial photograph (a) and overview (b) of the Wolsan trench site.

3. 연구방법

3.1 단층암 시료의 채집

본 연구에서 단층암 시료는 단층비지대의 연속성을 잘 보여주는 WS-2 지점에서 채집하였다. 단층암 시료는 단층암에 대한 미세구조 분석의 정밀도를 높이기 위해 가능한 단층면에 수직하고 단층조선에 평행한 방향의 직육면체 형태로 채취하였다(그림 3e, 4). 단층암 시료의 방향성은 오른손 좌표계(Cartesian coordinate system)로 정의하고, 3차원 공간상에서 X, Y, Z축의 양의 방향은 각각 단층면 주향의 북쪽

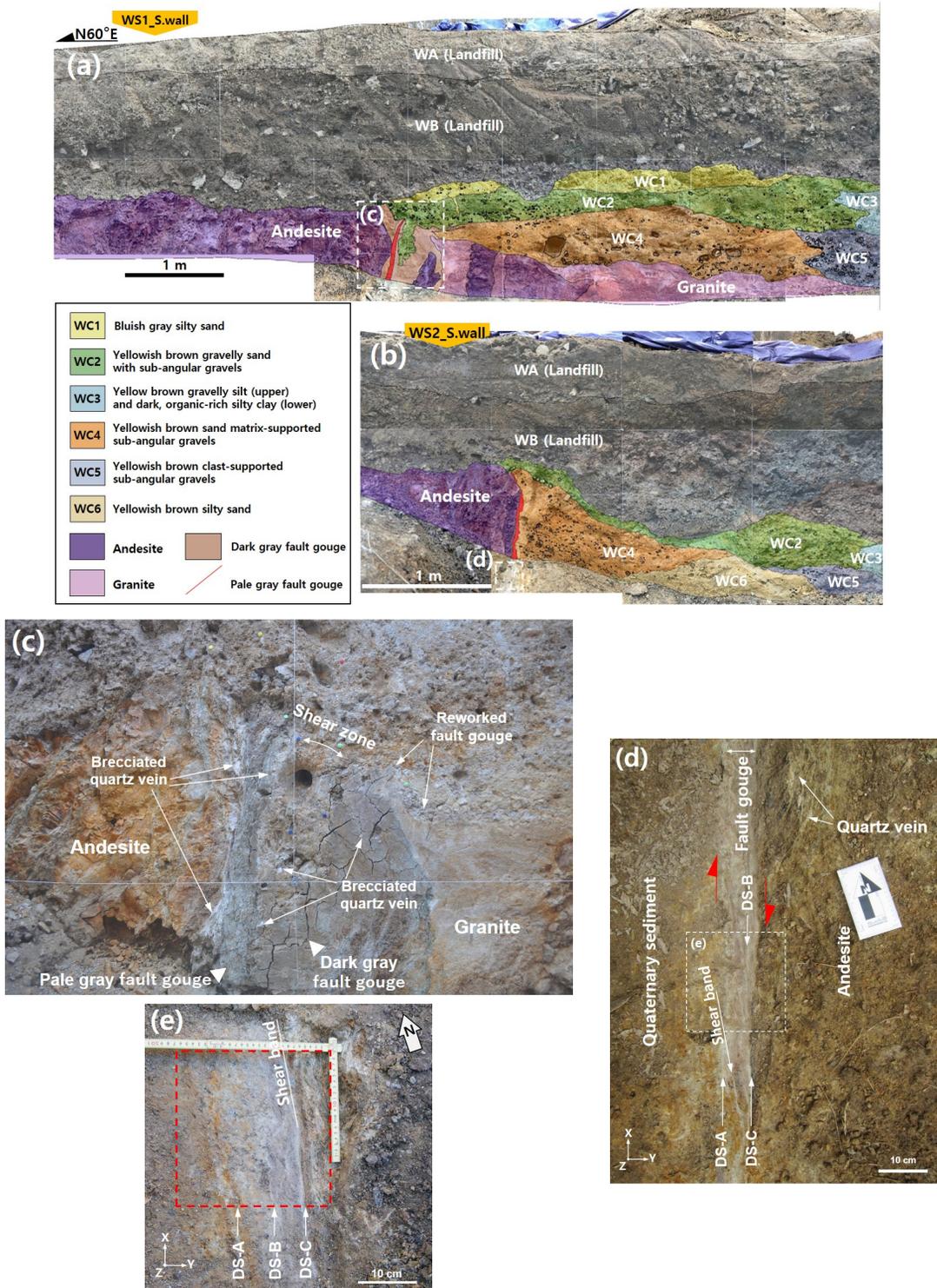


Fig. 3. Fig. 3. Log of the southern walls of the trench WS-1 (a) and WS-2 (b) modified from Gwon *et al.* (2018). Photographs of fault zone within the trench WS-1 (S. wall) (c) and the floor of trench WS-2 (d). (e) Close-up view of the fault-related rocks and sampling location (dashed red square) within trench WS-2. DS: discontinuity surface.

방향, 단층면의 경사 방향과 연직 방향을 가리킨다. 즉 단층암 시료의 X-Y 절면은 단층의 전단이동면을 포함하고, Y-Z 절면은 단층의 전단이동면에 수직인 단면이다. 단층암 시료의 크기는 약 $35 \times 35 \times 15$ cm (X × Y × Z)이다. 채취한 단층암 시료는 제4기 퇴적층과 단층비지대 그리고 안산암의 일부를 포함한다. 시료채취 과정 중 시료는 두 조각으로 분리되었다. 불연속면 A와 B를 포함하는 시료는 K-1 시료로, 불연속면 C를 포함하는 시료는 K-2 시료로 표기하여 미세구조 분석을 실시하였다.

3.2 CT 영상분석

CT는 스캐너를 활용한 전산화 단층촬영법으로, 회전하는 X-선관(X-ray tube)과 검출기(detector)를 이용하여 피사체 내부의 단면을 재구성하는 영상 처리 장치이다(그림 4a). 즉 CT는 X-선을 여러 각도에서 피사체에 투영하여, 피사체 내부 물질의 밀도의 차이(X-선 투과도의 차이)를 이용하여 피사체 내부 단면의 모습을 영상으로 재구성한다. CT 영상은 삼차원적인 입체 구성요소를 가지므로, 이차원적인 화소(pixel)가 아니라 삼차원적인 화소(voxel)로 정의된다. 음영 처리된 CT 영상에서는 피사체 내부 물질의 밀도가 상대적으로 작은 물질은 어둡게 나타나는 반면, 상대적으로 밀도가 큰 물질은 밝게 표현된다.

이번 연구에서는 일본 전력중앙연구소에 설치된 CT (Aquilion TSX-101A, Canon Medical Systems, Tokyo, Japan)를 활용하여 단층암 시료에 대한 CT 영상을 취득하였다(그림 4b). 측정 시 가속전압은 135 kV, 전류는 340 mA이다. CT 영상은 시료의 X-Y 절편과 Y-Z 절편 방향에서 1 mm 간격으로 각각 64장씩 촬영하였으며, 0.5 mm 두께의 절편 영상(image slice)으로 재구성하였다. 재구성한 CT 영상의 2차원 화소는 0.35×0.35 mm이고, 3차원적 화소는 $0.35 \times 0.35 \times 0.5$ mm이다. CT 영상은 DICOM-형식의 디지털 영상 파일로 출력하여, 음영 처리된 CT 영상을 제작하였다. 음영 처리된 X-Y와 Y-Z 절편의 CT 영상을 활용하여 단층암의 미세구조 분석을 실시하였다.

3.3 슬랩 및 광학 현미경

슬랩 제작을 위해 건조한 단층암 시료는 X-Y와 Y-Z 절편 방향으로 절단하여 연마한 다음, 에폭시로 충전하여 고형화 처리하였다. CT 영상에서 확인된

저밀도대의 특성을 슬랩과 비교·분석하였다. 슬랩 제작 시 단층암 시료는 약 $15 \times 35 \times 10$ cm (X × Y × Z)의 크기로 재단하여 CT 영상과의 비교·분석의 용이성을 높였다. 또한 CT 영상에서 확인된 불연속면에 대한 박편을 제작하여, 광학 현미경 하에서 미세구조적 발달특성을 기재하였다.

4. 단층암의 미세구조 발달특성

4.1 CT 영상과 슬랩 비교·분석

CT 영상에서 나타나는 저밀도대의 특성을 슬랩

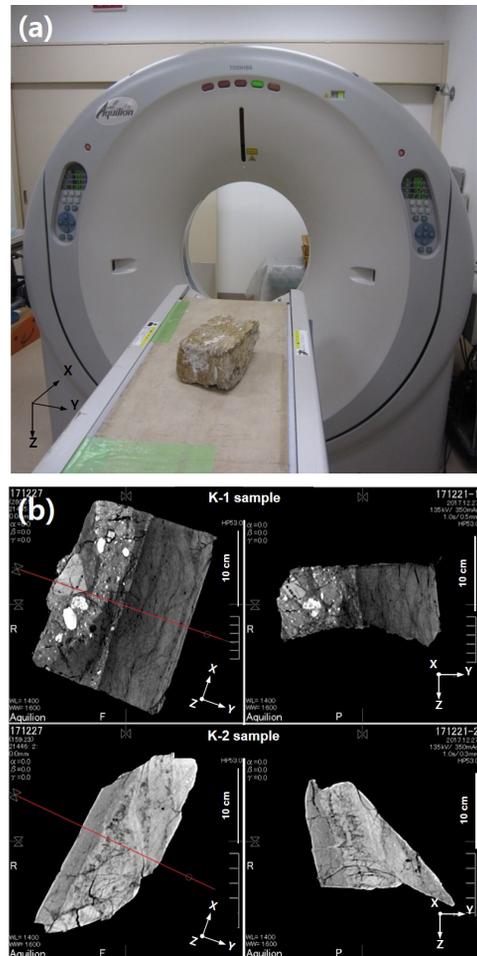


Fig. 4. (a) Medical X-ray computed tomography scanner settled in Central Research Institute Electric Power Industry (CRIPEI), Japan. (b) Fault rock sample collected from the trench WS-2. (c) A set of shaded CT image slices for sample-1 and -2. Red line is guide for Y-Z section.

과 비교·분석하였다(그림 5). 단층암 시료에 대한 CT 영상분석 결과, 불연속면 A, B와 C를 따라 상대적으로 어두운 음영색을 띠는 저밀도대가 선형적으로 나타났다. CT 영상에서 단층면이 어두운 음영영역으로 나타나는 것은 단층을 구성하는 단층비지의 밀도가 주변 암석보다 상대적으로 낮기 때문으로 해석된다. 또한, CT 영상에서는 암석 경계부와 시료의 건조 과정 중 발생한 균열도 저밀도대로 나타났다.

4.1.1 X-Y 절편

X-Y 절편의 CT 영상에서 불연속면 A와 B는 불연속면 C에 비해 상대적으로 어둡고 음영색의 차이가 뚜렷한 저밀도대로 나타났다(그림 5a). CT 영상에서 불연속면 A는 수 mm 이내의 선형적인 음영 영역으로 나타났고, 저밀도대의 경계에는 퇴적물 입자들이 배열되어 있다. 슬랩 상에서 불연속면 A는 회백색의 단층비지로 구성되고, 제4기 퇴적층과의 단층 경계

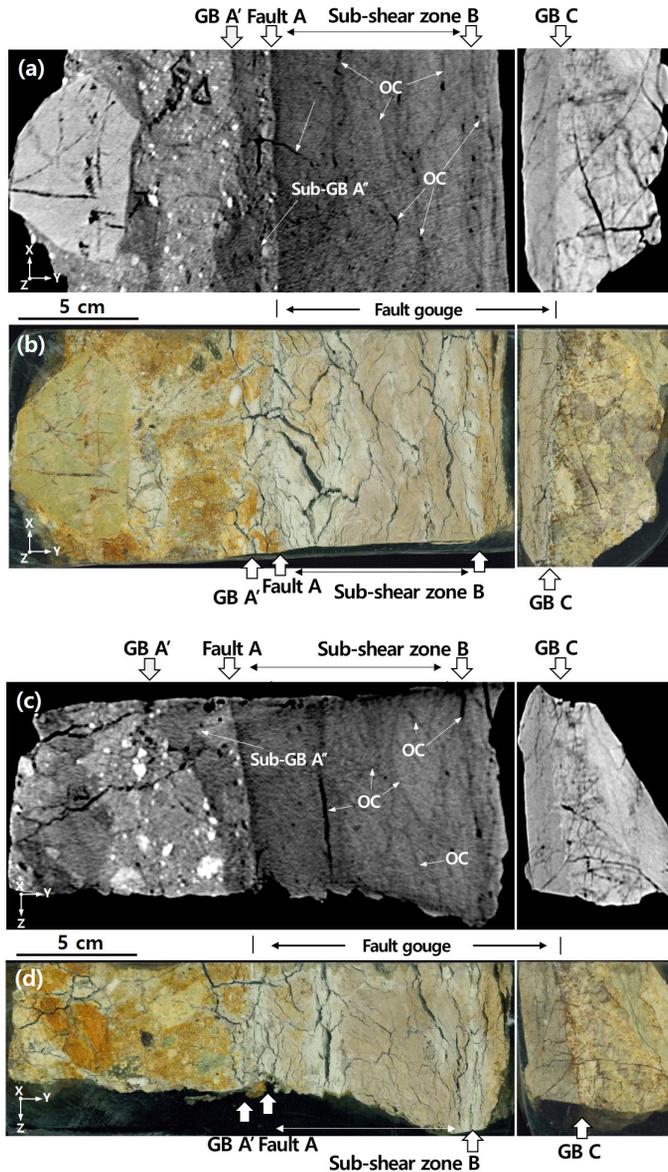


Fig. 5. A set CT of image (up) and corresponding slab (bottom) in views of X-Y plane (a, b) and Y-Z section (c, d). GB: geological boundary, OC: open crack.

로 해석된다(그림 5b). CT 영상에서 단층면 A의 약 2-3 cm 서편에는 파형의 저밀도대가 나타났다. 이 파형은 CT의 음영 영역과 퇴적물 입자의 경계(A')로 해석되고, 단층활동에 수반된 퇴적물과 단층비지의 혼합대의 암질 경계로 정의하였다.

흥미롭게도 CT 영상에서 단층면 A와 암질 경계 A' 사이 구간에서는 음영 영역과 퇴적물 입자의 배열 특성이 반복된다(그림 5a). 병치된 음영 영역과 퇴적물의 경계에서 희미하게 파형의 저밀도대가 하나 더 해석되고, 이 파형은 단층면 A의 전단작용으로 암회색 단층비지와 퇴적물의 혼합대의 내부에 형성된 부분적인 암질 경계(A'')로 해석된다. 단층면 A에 비해, 암질 경계 A'과 A''는 CT 영상에서 희미한 파형으로 나타났고, 슬랩 상에서도 그 경계를 명확히 구분해 내기 어려운 특징이 있다(그림 5b). 이러한 퇴적물과 단층비지의 반복 양상은 단층면 A의 수반된 전단 작용에 의한 단층비지와 퇴적물의 혼합에 의한 것으로 해석된다.

불연속면 B는 CT 영상에서 선형적인 저밀도대로 나타났으나, 단층면 A에 비해 다소 밝은 음영 영역으로 나타났고(그림 5a). 저밀도대 A와 B 사이 구간에서는 단층면 A에 아평행한 저밀도대가 약 10 cm의 폭으로 나타났다. 슬랩 상에서 CT의 저밀도대는 암회색 단층비지 내에 발달하는 회백색 단층비지의 분포와 유사해 보이나, 시료의 건조과정 중 단층암 내 불균질면에 발생한 균열과도 그 분포가 유사하다(그림 5b). 굴착 단면에서 불연속면 B는 망상의 회백색 단층비지로 구성된 전단띠로 해석되는데(그림 3d), CT 영상에서는 단층면 A에 비해 희미한 저밀도대로 나타났다. 이러한 CT 특성은 불연속면 B가 단층면 A에 수반된 부수적인 전단면으로 해석되나, 부분적으로는 불연속면 주변에 침전된 적갈색 산화물질의 영향도 있을 수 있다. 따라서 회백색 단층비지로 구성된 망상구조는 부수 전단대와 전단띠(혹은 전단면)이며, 불연속면 B는 부수 전단대의 동쪽 경계로 판단된다.

불연속면 C는 CT 영상에서 상대적으로 밝은 음영 영역의 저밀도대로 나타났고, 안산암의 단층파쇄대 내에 발달한 단열구조와 교차하며 불규칙한 경계를 이루고 있다(그림 5a). CT 영상에서 불연속면 C를 포함하는 시료가 상대적으로 밝은 음영 영역으로 나타나는 것은 안산암의 밀도와 관련된 것으로 해석

된다. 불연속면 C 주변으로 암회색 단층비지대는 안산암 내에 발달하는 다양한 단열구조와 상호 절단하는 양상을 보인다. 슬랩 상에서 안산암과 암회색 단층비지의 경계는 불규칙하면서도 점이적이고, 경계면에는 석영질 파쇄물질이 혼입되어 있다(그림 5b). 안산암과 암회색 단층비지 내부에는 미세한 단열구조를 따라 적갈색 산화물질이 침전되어 있다. 불연속면 C는 암회색 단층비지대와 안산암의 단층파쇄대의 경계로 해석된다.

4.1.2 Y-Z 절편

Y-Z 절편의 CT 영상에서 불연속면들의 발달특성은 X-Y 절편의 분석결과와 유사하였다(그림 5c). 단층면 A는 X-Y 절편 영상에서 보다 Y-Z 절편 영상에서 더욱 뚜렷한 직선상의 저밀도대로 나타났다. X-Y 절편에서와 유사하게 단층면 A와 암질 경계 A' 사이의 구역에서는 단층비지와 퇴적물의 반복 양상이 나타났으며, 불연속면 A''의 파형은 X-Y 절편의 것보다 더 흐릿하고 구별이 쉽지 않다. 슬랩 상에서 단층면 A는 회백색의 단층비지 구성되어 있고, 퇴적물과 단층비지의 직선적인 경계로 나타났다(그림 5d). 슬랩에서 암질 경계 A'과 A''의 연장부는 육안 관찰로는 구분이 쉽지 않다.

불연속면 B는 단층면 A에 비해 다소 꺾인 직선상의 저밀도대로 나타났으며, 단층면 A와 불연속면 B의 사이 구역 내에서는 망상의 저밀도대가 나타났다(그림 5c). 슬랩에서 단층면 B는 암회색 단층비지 내부에 발달한 회백색의 단층비지이고, 단층면 A와 불연속면 B의 사이 구간에는 두 불연속면에 아평행한 회백색 단층비지가 발달한다(그림 5d). 그러나, CT 영상에서 저밀도대의 분포는 단층암 시료 내 갈라진 틈의 분포와도 상당 부분 유사하므로, CT 특성 해석 시 유의점으로 판단된다.

불연속면 C는 상대적으로 밝은 음영 영역의 저밀도대로 나타났고(그림 5c). X-Y 절편에서와 유사하게 불연속면 C는 매우 불규칙한 불연속면으로 나타날 뿐만 아니라 안산암 내부 단열구조와 교차하는 양상을 보였다. 슬랩 상에서도 불연속면 C는 안산암 내부의 단열구조와 교차하면서 매우 불규칙하고 계단상의 경계를 이루고, 적갈색의 산화물질이 불연속면 C와 암회색 단층비지 내에 형성된 단열구조에 침전되어 있다(그림 5d). 따라서 불연속면 C는 암회색

단층비지와 안산암 단층파쇄대의 점이적인 암질 경계로 해석된다.

4.2 박편 관찰

X-Y 절편 상에서 단층면에 대한 박편을 제작하여 광학현미경 하에서 단층면의 미세구조 발달특성을 분석하였다(그림 6). 제4기 퇴적층과 회백색 단층비지의 경계부 주변에는 석영, 사장석 등의 매우 작은 광물과 아원형 내지 원형의 퇴적물 입자들이 분포한다(그림 6a). CT 영상 분석에서와 유사하게 퇴적물과 단층비지는 불규칙한 파형으로 접하고 서로 교호하고 있어, 단층의 전단작용에 수반된 취성의 전단대로 해석된다. 단층비지대 내에 발달한 전단띠는 단층의 우수향 운동감각을 지시한다.

부수 전단대 B 주변에 분포하는 암회색 단층비지대에는 소량의 석영질 암편이 분포한다(그림 6b). 특히 단층비지대 경계부에는 우수향 이동감각을 지시하는 전단띠가 발달해 있고, 적갈색의 산화물질이 침전되어 있다. 한편, 암회색 단층비지와 안산암 단층파쇄대의 경계부(암질 경계 C)에는 석영질의 파쇄암편이 단층비지 내부에 혼입되어 있으며, 점이적인 경계를 이루고 있다(그림 6c). 암질 경계 C는 안산암 내에 발달한 단열구조에 의해 우수향 감각으로 변위되어 있고, 단층면을 절단하는 단열구조 내부는 적갈색의 산화물질로 채워져 있다.

5. CT를 활용한 단층암 미세구조 분석기법의 활용

본 연구에서는 제4기 단층 주미끌림면의 발달특성을 규명하기 위하여, CT를 활용하여 양산단층 중부 월산리 지점에서 수집한 단층암에 대한 미세구조 분석을 실시하였다. CT는 피사체 내부 물질의 밀도의 차이를 이용하여 피사체 내부 단면의 모습을 영상으로 재구성하는 영상처리 기법으로, 음영 처리된 CT 영상에서 상대적으로 밀도가 낮은 물질은 어두운 음영 영역으로 나타난다(Hirono *et al.*, 2003a). 이번 연구에서 단층의 주미끌림면을 구성하고 있는 회백색의 단층비지는 CT 영상에서 저밀도대로 나타나는 반면에, 산화물질이 침전된 암회색 단층비지대는 상대적으로 고밀도대로 나타났다. 단층암을 구성하는 물질의 밀도 분포는 단층암을 구성하는 입자의

분포와 구조지질학적, 암석광물학적 발달특성에 따라 달라질 수 있다(Hirono, 2003b; Kim, K.Y. *et al.*, 2016). 이번 연구와 유사한 단층암의 CT 특성은 대만 Chi-Chi (1999년, M_w 7.6)의 유발 단층인 Chelungpu 단층대(Hirono *et al.*, 2008)와 일본 Hyogo-ken Nanbu (1995년, M_w 6.9)의 유발 단층인 Nojima 단층대(Lin and Nishiwaki, 2019)에서 보고되었다. Hirono *et al.* (2008)는 단층암의 밀도 분포는 지진활동에 수반

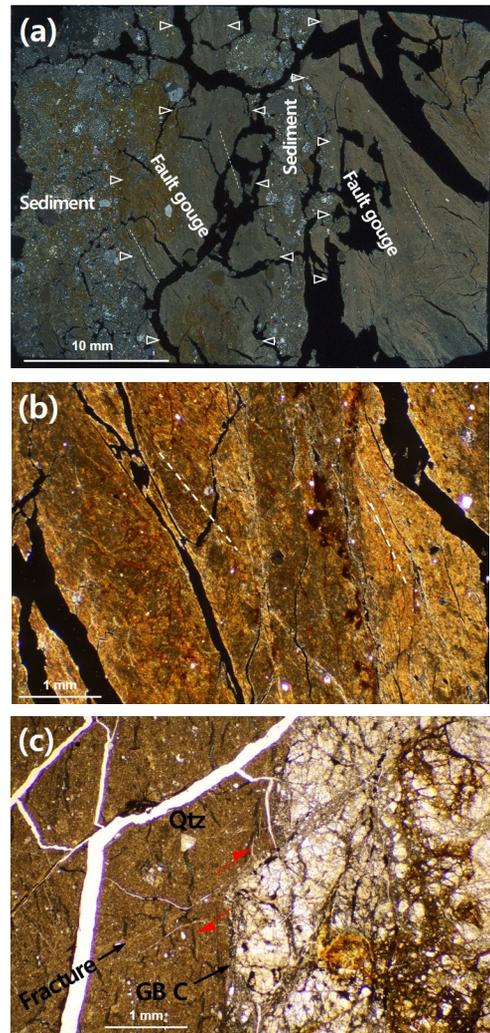


Fig. 6. Optical microscope images of the boundary between sediments and fault gouges around fault A (a), oxidized dark gray fault gouges around sub-shear zone B (b) and the boundary between fault gouge zone and andesite breccia zone (c). Dashed line and open triangle indicate the trend of shear bands and the boundary between sediments and fault gouges.

된 단층의 역학적 거동 특성 및 광맥물질의 침전 여부와 관련된 것으로 해석하였다.

본 연구에서 CT는 단층암 내 다양한 미세한 변형 구조의 발달특성 해석에 활용 가능함을 보였다. CT를 활용한 미세구조 분석의 장점 중 하나는 시료의 외형적인 훼손 없이 내부 구성물질의 특성을 해석할 수 있다는 것이다. 회백색 단층비지대와 제4기 퇴적층의 단층 경계부(단층면 A) 주변에서 관찰되는 단층비지 물질과 퇴적물 입자 배열의 반복 현상은 단층의 전단작용에 수반된 단층비지 물질과 퇴적물의 혼합에 의한 것으로 해석하였다(그림 5, 6a). 이러한 퇴적물과 단층비지의 혼합작용은 육안 관찰에 의존한 고지진학적 단층의 활동성 해석에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 암회색 단층비지대 내부에 발달한 전단면(부수 전단대 B)는 CT에서 단층면 A에 비해 다소 밝은 영역으로 나타났고, 단층의 전단작용에 수반되어 형성된 변형구조로 해석된다(그림 5, 6b). 단층암 내부의 불균질성은 시료의 CT 특성 차이를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 그러나 시료의 건조 과정 중 발생 가능한 균열도 CT 영상에서는 저밀도대로 나타날 수 있으므로, CT 특성을 바탕으로 단층활동과 관련된 단열구조의 해석에 유의점으로 판단된다. 불연속면 C의 경우, 슬랩과 CT 영상에서 상대적으로 밝은 영역의 불규칙한 계단상의 경계로 나타났으며(그림 5). 박편 상에서 적갈색의 산화물질이 불연속면 C와 암회색 단층비지 내에 형성된 단열구조에 침전된 암회색 단층비지와 안산암 단층파쇄대의 점이적인 압질 경계로 해석되었다(그림 5d). 이러한 CT 특성 해석 결과는 굴착 단면에서 기반암 단층대 내에서 암회색 단층비지대와 석영질 파쇄암편의 분포, 적갈색 산화 물질의 분포 특성 그리고 제4기 퇴적층을 절단하는 회백색 단층비지대의 발달특성에 대한 해석 결과와 유사하다(그림 3). 특히, 퇴적물과 단층비지대의 혼합대의 발달 양상과 같이 단층작용에 수반된 미세한 지질구조적 발달 특성 해석이 가능하였다. 따라서 CT를 활용한 미세구조 분석 기법은 굴착 단면 내 발달하는 제4기 단층의 주미끌림면의 위치 결정 그리고 단층의 전단작용에 형성된 변형구조를 비롯한 단층대 내 다양한 미세구조의 발달특성 해석에 활용 가능할 것으로 판단된다.

CT를 활용한 단층암 미세구조 분석기법은 단층

의 재할 특성 해석에도 그 활용 가능성이 제안되기도 하였다(Lin and Nishiwaki, 2019). Lin and Nishiwaki (2019)은 시추코어 정밀 분석을 통해 기반암 단층대 내에 발달하는 주미끌림면과 다양한 색상의 단층비지 그리고 광맥의 상호 절단관계를 비롯한 미세구조적 특성 차이를 단층의 재발 횟수와 연계하여 해석하면서, 최근 발생한 지표파열 지진에 대한 노두 조사 결과에서도 이와 유사한 단층파쇄대의 발달특성이 나타남을 그 근거로 삼았다. 그러나 본 연구에서 굴착 단면 내 단층대는 암회색과 회백색의 단층비지로 구성되어 있었으나, 암회색 단층비지는 기반암 내 단층활동으로 회백색 단층비지는 제4기 단층 활동과 관련된 것으로 해석되었다(그림 3a; Gwon *et al.*, 2018). 단층대는 기반암 내 누적된 단층활동의 산물로, 그 구성 입자의 크기, 입자와 기질의 함량비에 따라 분대할 수 있고(Chester and Logan, 1987; Kim, C.-M. *et al.*, 2016), 파쇄물질의 색상과 구성하는 광물의 조성은 모암의 특성 차이(Chester and Chester, 1998)를 반영할 수 있다. 따라서, CT를 활용하여 제4기 단층과 관련된 다양한 미세구조적 발달특성을 해석하고자 할 때에는 기반암 단층파쇄대와 제4기 퇴적층을 절단하는 단층의 발달특성에 대한 정밀한 야외 조사결과가 뒷받침되어 할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 단층암을 구성하는 파쇄물질의 특성은 단층 재할 시 지진성 미끌림(seismic slip) 혹은 비지진성 미끌림(aseismic slip)의 단층 거동특성(Woo *et al.*, 2015, 2016) 및 물리적 강도특성(Kim, K.Y. *et al.*, 2016)과 밀접한 관련이 있으므로, 제4기 단층의 발달 특성을 규명하기 위해서는 단층암에 대한 구조지질학적, 암석학적, 광물학적, 역학적 특성 해석이 종합적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 CT를 활용한 단층암 미세구조 분석 기법은 단층의 주미끌림면의 발달특성 등 제4기 단층활동에 수반된 다양한 미세구조적 변형구조의 해석에 활용될 수 있음을 보였으나, 보다 정밀한 제4기 단층 주미끌림면의 특성화를 위해서는 단층암의 광물학적, 역학적 거동 특성 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구 결과, CT를 활용한 단층암의 미세구조 분

석 기법은 제4기 단층 주미끌림면의 발달특성 해석에 중요하게 활용할 수 있는 정밀 단층조사 분석기법으로 판단된다. CT 영상에서 단층의 주미끌림면은 선형적인 저밀도대로, 산화물질이 침전된 단층비지대는 고밀도대로 나타났다. CT는 단층비지와 퇴적물의 혼입 양상 등 제4기 단층활동에 수반된 전단 변형 구조를 비롯한 단층암 내 발달하는 다양한 미세구조의 특성 해석에 유용하였다. 또한, CT는 최근 활동한 단층의 주미끌림면의 위치 결정과 육안적 관찰에 의존한 고지진학적 굴착 단면 해석의 신뢰도 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 보다 정밀한 제4기 단층 주미끌림면의 특성화를 위해서는 단층암의 광물학적 특성 및 역학적 거동특성 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국수력원자력(주)의 “월성부지 인근 단층조사 및 확률론적 지진재해도 평가(A16IP55)” 사업의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문의 심사 과정에서 건설적인 지적과 조언을 하여 주신 익명의 두 심사위원님과 편집위원이신 김영석 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Chang, C.-J. and Chang, T.W., 2009, Behavioral characteristics of the Yangsan fault based on geometric analysis of fault slip. *Journal of Engineering Geology*, 19, 277-285 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.-W. and Cho, C.-O., 1999, Faulting processes and K-Ar ages of fault gouges in the Yangsan fault zone. *Journal of Korean Earth Science Society*, 20, 25-37 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.-W., Kim, C.S. and Bae, D.S., 2003, Characteristics of fracture systems in Southern Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 13, 207-225 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Cho, H., Ha, S., Kang, H.-C., Kim, J.-S. and Son, M., 2019, Tectonically controlled multiple stages of deformation along the Yangsan fault zone, SE Korea, since Late Cretaceous. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170, 188-207.
- Chester, F.M. and Chest, J.S., 1998, Ultracataclastic structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California. *Tectonophysics*, 295, 199-221.
- Chester, F.M. and Logan, J.M., 1987, Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault, California. *Journal of Structural Geology*, 9, 621-634.
- Choi, J.-H., Kim, J.W., Murray, A.S., Hong, D.G., Chang, H.W. and Cheong, C.-S., 2009, OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics. *Quaternary International*, 199, 3-14.
- Choi, J.-H., Kim, Y.-S. and Yann Klinger, 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, S.-J., Ghim, Y.S., Cheon, Y. and Ko, K., 2019, The first discovery of Quaternary fault in the western part of the south Yangsan fault - Sinwoo site. *Economic and Environmental Geology*, 52, 251-258 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Hong, D.-G., Chwae, U., Song, Y.G., Kim, C. and Shim, T., 2010, Retrodeformation analysis of the Quaternary fault in the southeastern Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 17, 116-124.
- Choi, S.-J., Jeon, J.S., Choi, J.-H., Kim, B., Ryoo, C.-R., Hong, D.-G. and Chwae, U., 2014, Estimation of Possible Maximum Earthquake Magnitudes of Quaternary Faults in the Southern Korean Peninsula. *Quaternary International*, 344, 53-63.
- Cnudde, V. and Boone, M.N., 2013, High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123, 1-17.
- Gwon, S., Cho, S.-I., Choi, W.-H. and Inoue, D., 2018, Preliminary analysis of a trench investigation in the central Yangsan Fault, SE Korea, 9th international INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA) (Abstract), Possidi, May 25-27, 95-97 p.
- Hirono, T., Sakaguchi, N., Otsuki, K., Sone, H., Fujimoto, K., Mishima, T., Lin, W., Tanikawa, W., Tanimizu, M., Soh, W., Yeh, E.-C. and Song, S.-R., 2008, Characterization of slip zone associated with the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: X-ray CT image analyses and microstructural observations of the Taiwan Chelungpu fault. *Tectonophysics*, 449, 63-84.
- Hirono, T., Takahashi, M. and Nakashima, S., 2003a, Direct imaging of fluid flow in geomaterials by X-ray CT. *Geological Society of London Special Publication*, 215, 107-115.

- Hirono, T., Takahashi, M. and Nakashima, S., 2003b, In-situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT. *Engineering Geology*, 70, 37-46.
- 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, K.-H., Kang, Tae.-S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kang, S.Y., Han, M., Park, J., Kim, M., Kong, C.H., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U., Lee, S.-H and Kim, J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks *Geosciences Journal*, 20, 753-757.
- Kim, K.Y., Suh, H.S., Yun, T.S., Moon, S.-W. and Seo, Y.-S., 2016, Effect of particle shape on the shear strength of fault gouge. *Geosciences Journal*, 20, 351-359.
- Kim, Y., Rhie, J., Kang, Tae.-S., Kim, K.-H., Kim, M. and Lee, S.-J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 1. Observation and remaining questions. *Geosciences Journal*, 20, 747-752.
- 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, 79-97 (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).
- Kyung, J.B., 2003, Paleoseismology of the Yangsan fault, southeastern part of Korean peninsula. *Annals of Geophysics*, 46, 983-996.
- Kyung, J.B., 2010, Paleoseismological study and evaluation of maximum earthquake magnitude along the Yangsan and Ulsan fault zones in the southeastern part of Korea. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 13, 187-197 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B. and Chang, T.-W., 2011, 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., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Takemura, K., 1999, Study of fault characteristics by trench survey in the Sangchon-ri area in the southern part of Yangsan fault, southeastern Korea. *Journal of 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, S.E. Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 179-188 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-K. and Schwarcz, H.P., 2001, ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. *Quaternary Science Reviews*, 20, 999-1003.
- Lee, J., Rezaei, S., Hong, Y., 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 Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 127-135.
- Lin, A. and Nishiwaki, T., 2019, Repeated seismic slipping events recorded in a fault gouge zone: Evidence from the Nojima fault drill holes, SW Japan. *Geophysics Research Letters*, 46, 1276-1283.
- McCulpin, J.P., 2009, *Paleoseismology* (2nd edition). Academic Press.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C. and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, southeast Korea. *Journal of Geography*, 103, 111-126 (in Japanese with English abstract).
- Ree, J.-H., Lee, Y.-J., Rhodes, E.J., Park, Y., Kwon, S.-T., Chwae, U., Jeon, J.-S. and Lee, B., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean Peninsula: Age constraint by optically stimulated luminescence dating. *Island Arc*, 12, 1-12.
- 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).
- 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, 569-584 (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. *Economic and Environmental Geology*, 47, 17-27 (in Korean with English abstract).
- Yeats, R.S., Sieh, K.E. and Allen, C.R., 1997, *The Geology of Earthquakes*, Oxford University Press, New York, 568 p.

Received : December 10, 2019

Revised : January 17, 2020

Accepted : February 27, 2020