

경주시 단구리 일원 굴착조사를 통한 양산단층의 제4기 지질구조 특성과 고지진 연구

송영석¹ · 하삼민¹ · 이성준¹ · 강희철¹ · 최정현² · 손 문^{1*}

¹부산대학교 지질환경과학과

²한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

요 약

경북 경주시 단구리 일원의 굴착조사를 통해 발견된 제4기 단층지점에 대한 상세 구조분석과 단층비지의 대자율이방성(AMS) 분석을 실시하고, 변위량과 고응력 그리고 제4기 퇴적층에 대한 OSL/IRSL 연대를 도출하였다. 이를 바탕으로 지진규모 산정을 포함한 고지진학 해석을 수행하여 제4기 단층운동 특성과 시기에 대해 규명하였다. 굴착지점은 기존 제4기 단층운동이 보고된 벽계지점의 1 km 북쪽연장에 위치하며, LiDAR 영상을 이용한 지형분석과 전기비저항탐사 결과를 통해 단층애로 추정되는 남-북 방향의 지형기복과 저비저항 이상대가 확인되어 굴착조사를 실시하였다. 굴착단면에서 관찰되는 동쪽으로 경사진 7매의 단층면들은 우수향 역이동성각각이 우세하며, 제4기 퇴적층과 단층들의 횡절관계는 제4기 동안 최소 3회 이상의 시기가 다른 단층운동이 발생하였음을 지시한다. 제4기 퇴적층은 입자크기, 역의 종류와 함량, 원마도, 분급, 색상 등을 기초로 상부로부터 9개의 단위층인 unit A~I로 구분하였다. 특히, 세립질-중립질 사암으로 구성된 미고결 퇴적층(unit E, G) 내에는 지진동에 의한 액상화와 유체화의 결과로 해석되는 지진성 연질퇴적변형구조가 뚜렷이 관찰된다. 또한 대자율이방성 분석결과, 단층핵 1은 우수향 역이동성 운동을 지시하는 자기미세구조가 발달한 반면, 그 동편의 단층핵 2는 우수향 주향이동운동을 지시하는 자기미세구조가 발달한다. 단층조선과 단층비지의 자기미세구조를 통해 확인된 우수향 역이동성 내지 주향이동각각은 현생 한반도 응력장인 동북동-서남서 방향의 최대수평응력(σ_{Hmax})과 부합한다. 절단된 퇴적층의 겉보기 수직변위와 단층조선을 근거로 얻어진 최후기 단층운동에 의한 변위량은 0.64~1.81 m로 산정되었으며, 이를 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식에 대입하여 얻어진 모멘트 지진규모(M_w)는 6.7~7.0이다. 단층의 운동시기를 규명하기 위해 단층에 절단된 제4기 퇴적층에 대한 OSL/IRSL 연대측정 수행결과, unit B의 연대에 근거할 때, 최후기 단층운동은 3.2±0.2 ka 이후에 발생한 것으로 판단된다.

주요어: 양산단층, 굴착조사, 제4기 단층, 우수향 역이동성 운동, 모멘트 규모

Youngseok Song, Sangmin Ha, Seongjun Lee, Hee-Cheol Kang, Jeong-Heon Choi and Moon Son, 2020, Quaternary structural characteristics and paleoseismic interpretation of the Yangsan Fault at Dangu-ri, Gyeongju-si, SE Korea, through trench survey. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 56, no. 2, p. 155-173

ABSTRACT: In this study, we conduct structural characterization and Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) analysis of the Quaternary fault, and the OSL/IRSL age dating for the Quaternary sediments to identify the characteristics and timing of the Quaternary faulting events for which the fault is found through trench survey at Dangu-ri, Gyeongju-si, SE Korea. Based on these, the study of paleoseismology, including the calculation of earthquake magnitude, was conducted to identify the characteristics and timing of the Quaternary faulting event. The trench site is located 1 km north from the Byeokgye site, where Quaternary slip has been reported by previous studies. We selected trench site location based on results of the geomorphic analysis through LiDAR image and resistivity survey. In the analysis, N-S-trending geomorphic relief estimated to fault line scarp, and low resistivity anomaly were found. In the trench section, seven fault surfaces with dextral reverse slip sense observed, and the cross-cutting relationship between the Quaternary sediments and fault surfaces indicates that at least three surface faulting events occurred during the Quaternary. The Quaternary sediments are subdivided into 9 unit layers, unit A~I from the top, based on grain size, type, content, roundness of gravel, degree of sorting, and color. In particular,

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

soft-sediment deformation structure (SSDS) interpreted as a result of liquefaction and fluidization due to seismic ground motion are clearly observed in the unconsolidated layers (unit E, G) composed of fine-medium sand. AMS analysis reveals that the fault core 1 in contact with the Quaternary layer shows magnetic fabrics indicating a dextral reverse slip sense, while fault core 2 shows magnetic fabrics indicating a dextral strike-slip sense. The paleostress reconstruction from slickenline on fault surfaces and the magnetic fabrics of fault gouge correspond with the maximum horizontal stress (σ_{Hmax}) in the ENE-WSW directions, which is consistent with the current stress field on the Korean Peninsula. The slickenline and vertical separation of the most recent event indicate 0.64~1.81 m of a true displacement. The estimated moment earthquake magnitude (M_w) using the empirical equation of maximum displacement - moment earthquake magnitude is 6.7~7.0. To determine the timing of the faulting event, OSL/IRSL dating was carried out on the Quaternary deposits cut by the fault. Based on the OSL ages of unit B, it is concluded that the timing of the most recent event is younger than 3.2 ± 0.2 ka.

Key words: Yangsan Fault, trench survey, Quaternary fault, dextral reverse slip, moment magnitude

(Youngseok Song, Sangmin Ha, Seongjun Lee, Hee-Cheol Kang and Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Jeong-Heon Choi, Research Center for Geochronology and Isotope Analysis, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea)

1. 서 언

대규모 지진이 빈번한 태평양 연안에 위치하는 일본, 북미와 중남미 서안, 알프스 조산대의 연장인 터키 등과 같은 판 경계 지역과는 달리 한반도는 비교적 지진으로부터 안전한 판 내부에 위치하여 대규모 지진발생 가능성이 낮은 것으로 인식되어 왔다. 그러나 최근 한반도 일대에서 중규모 이상 지진의 발생빈도가 증가하고 있으며, 특히 경주지진(2016년 9월 12일, M_w 5.5), 포항지진(2017년 11월 15일, M_w 5.4)이 발생하면서 국가 주요 시설물이 다수 밀집된 영남 지역에서 강한 지진동이 감지되었다. 이로 인해 한반도가 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 불안감이 고조되었으며, 지진재해 대비를 위한 활성단층 연구의 필요성이 부각되고 있다.

한반도의 제4기 단층운동의 증거는 양산단층계, 울산단층, 연일구조선과 같은 동남부의 대규모 기존 단층대들을 따라 주로 발견되었다(Okada *et al.*, 1994; Ryoo *et al.*, 1996, 1999, 2001, 2002, 2006; Kyung, 1997, 2003; Chwae *et al.*, 1998; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b; Lee, B.J. *et al.*, 1999; Chang, 2001; Kyung and Chang, 2001; Choi, W.-H., 2003; Im *et al.*, 2003; Lee, 2003; Kim, Y.-S. *et al.*, 2004, 2011; Choi, P., 2005; Kim and Jin, 2006; Kee *et al.*, 2007; Kang and Ryoo, 2009; Ryoo, 2009; Choi *et al.*, 2012; Jin *et al.*, 2013; Lee, J. *et al.*, 2015; Kim, M.-C. *et al.*, 2016; Lee, Y. *et al.*, 2017; 그림 1). 이들 제4기 단층 지점은 미래에 큰 지진을 발생시킬 수 있으므로, 이

를 과학적으로 평가하기 위해서는 상세한 구조분석과 고지진 연구를 통해 단층의 위치와 연장, 자세, 변위량, 단층암의 물성, 단층의 최대 잠재 지진규모, 지진재발주기를 포함한 기하와 물성 그리고 운동학적 특성들을 규명하는 것이 필요하다.

이번 연구는 경북 경주시 강동면 단구리의 굴착조사를 통해 제4기 단층운동 특성을 새롭게 보고하는데 목적이 있다(그림 1b, 2; N36° 04', E129° 15'). LiDAR (Light Detection and Ranging) 영상을 이용한 선형구조 분석과 전기비저항탐사를 통해 선정된 굴착 지점은 제4기 단층운동이 기 보고된 벽계지점(단층) (Ryoo *et al.*, 1999)으로부터 약 1 km 북쪽 연장선상에 위치한다. 굴착단면의 제4기 단층을 대상으로 상세 구조분석과 단층비지의 대자율방성(AMS) 분석을 실시하였으며, 단층조선과 운동감각을 이용하여 실제 총 변위량의 범위를 산출하고 단층운동을 발생시킨 고응력을 복원하였다. 또한 단층에 의해 절단된 제4기 퇴적층의 루미네선스(luminescence) 연대측정을 통해 운동시기를 밝히고자 하였으며, 최대 변위-모멘트 지진규모 경험식을 이용해 지진규모를 산정하였다. 이와 함께 연구결과를 종합하여 이곳 제4기 단층운동사에 대하여 토의하고 기존 연구에서 얻어진 제4기 단층지점들(벽계지점, 단구지점)의 특성 과도 비교하였다.

2. 지질학적 배경

양산단층은 한반도 동남부에 발달하는 북북동-남

남서 방향 단층들 중 가장 규모가 큰 단층으로, 총 약 200 km의 연장과 수백 m 폭(일부 구간은 수 km 폭)의 단층대를 이루며 20 km 이상의 우수향 수평변위가 인지된다(Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980;

Um *et al.*, 1983; Chang *et al.*, 1990; Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b). Lee and Jin (1991)은 역사지진과 계기지진 자료를 근거로 양산단층을 3조의 분절로 구분하였으며, Chang (2002)은 선형구조 방향

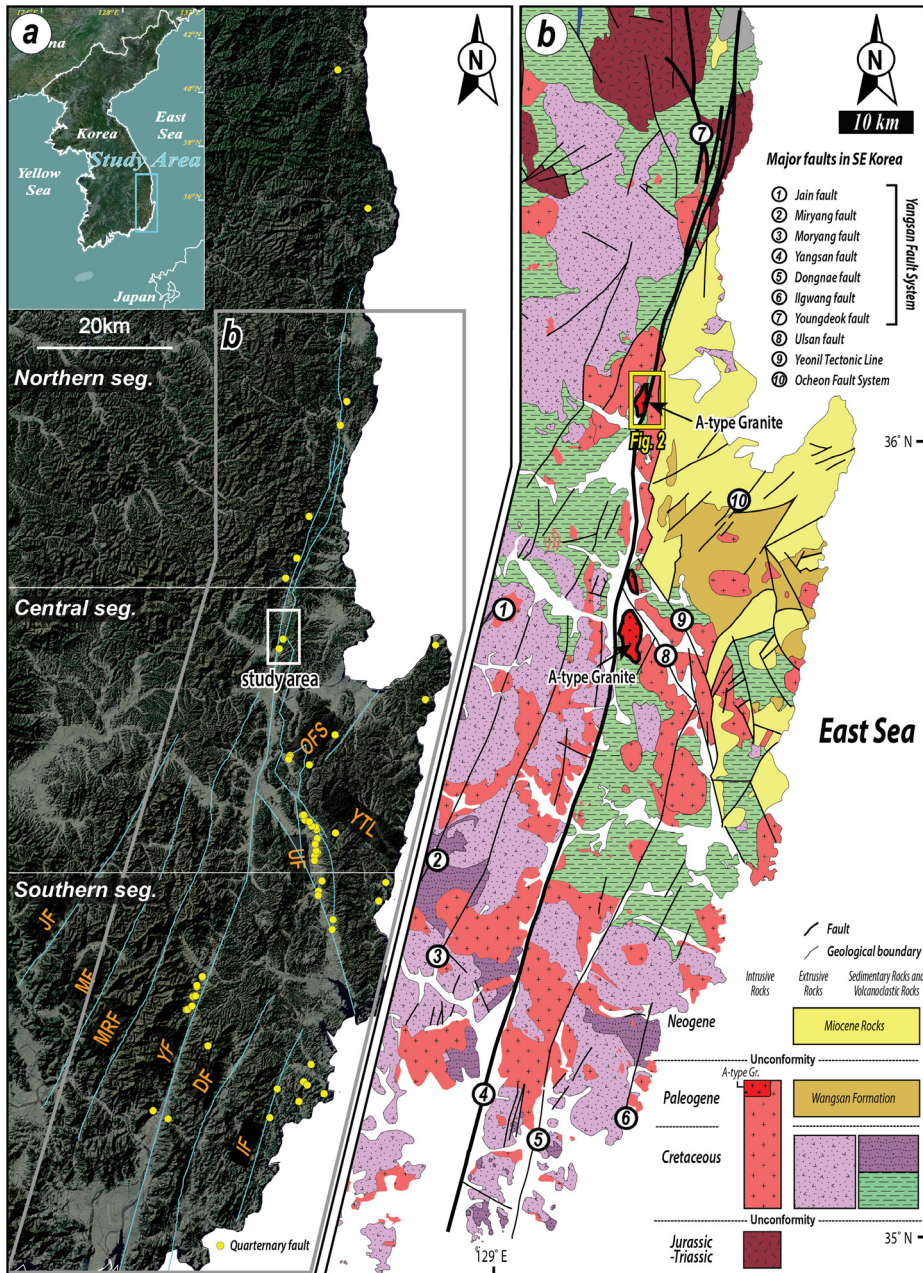


Fig. 1. (a) Distribution map of major inherited fault zones and observed locations of the Quaternary fault site in the southeastern part of the Korean Peninsula (modified from Kim *et al.*, 2016; Choi *et al.*, 2017). (b) Simplified geological map of the southeastern Korean Peninsula showing the distribution of the Cretaceous to Neogene rocks and major faults (modified from Cheon *et al.*, 2019a).

성과 단층대 폭의 변화, 부차단층과의 관계 등에 근거하여 약 80 km 구간을 5개의 분절로 구분하였다. 최근 Choi *et al.* (2017)은 구조지질학적 및 고지진학적 기존 자료와 위성영상에서 관찰되는 단층의 기하 특성을 바탕으로 앞선 연구(Lee and Jin, 1991; Chang, 2002)와는 다른 3조의 분절로 구성된 양산단층을 제안하였다. 이번 연구지역은 Choi *et al.* (2017)이 제안한 3조의 분절 중 중부 분절의 북부에 해당한다(그림 1a).

많은 기존 연구들은 양산단층이 백악기-신생대 동안 다양한 운동감각으로 다중변형을 겪었음을 보고하였다(Chang *et al.*, 1990; Kim, 1992; Chang and Chang, 1998; Chang, 2002; Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b, 2012; Choi *et al.*, 2009; Cheon *et al.*, 2017a, 2019a). 양산단층 동편과 서편의 서로 대비되는 암석들의 분포 특성에 근거하면 다중변형 과정에서 우수향 주향이동이 가장 우세하였으며, 백악기 경상분지 퇴적암의 분포를 근거로 하여 약 25 km (Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980; Um *et al.*, 1983)와 35 km (Chang *et al.*, 1990)의 우수향 변위가 보고된 바 있다. 또한 양산단층 양편의 약 50 Ma의 A-형 알칼리장석 화강암(남산화강암) 분포에 근거하면, 21.3 km의 우수향 수평변위가 인지된다(Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b; 그림 1b).

1990년대 이래로 굴착조사를 통해 양산단층의 제4기 단층운동에 관한 연구가 다수 수행되었으며, 동서 내지 동북동-서남서 방향의 현생 압축응력 하에서 양산단층이 주로 우수향 횡압축성 운동감각으로 재활동이 보고되었다(Okada *et al.*, 1994; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b, 2003; Ryoo *et al.*, 1999; Kyung and Chang, 2001; Kim and Jin, 2006; Kang and Ryoo, 2009; Kee *et al.*, 2009; Kim Y.-S. *et al.*, 2011; Choi *et al.*, 2012; Jin *et al.*, 2013; Yang and Lee, 2014; Lee *et al.*, 2015; Kim, M.-C. *et al.*, 2016). 양산단층의 중부 분절에서 기 보고된 제4기 단층지점으로는 노두상의 벽계지점(단층)(Ryoo *et al.*, 1999; Kee *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2012)과 굴착조사를 통한 단구지점(단층)(Lee *et al.*, 2015)이 있다.

벽계지점에는 백악기 산성질 암석과 제4기 퇴적층을 절단하는 N12°E/80°SE의 단층이 관찰된다. 두 종류의 단층비지에서 관찰되는 전단띠(shear band)와 단층 하반에 분포하는 퇴적층의 끌림습곡(drag fold) 그리고 단층면에서 관찰되는 수평에 가까운 단층조

선 등을 근거로 역이동성 단층운동 이후 주향이동성 단층운동이 발생한 것으로 해석하였다(Ryoo *et al.*, 1999). 또한 제4기 퇴적층의 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대는 75 ± 3 ka (Kee *et al.*, 2009)로, 이 지점의 최후기 단층운동 시기가 75 ± 3 ka 이후임을 지시한다. Lee *et al.* (2015)은 벽계지점의 북쪽 약 50 m 지점에서 굴착조사를 실시하였다. 2개의 동-서 방향 굴착단면에서 벽계지점의 기하와 운동학적 특성이 유사한 고지진 지표파열(단층면: N10~20°E/75~79°SE)을 보고하고 이 지점을 단구지점으로 명명하였다. 굴착단면에서 관찰되는 제4기 퇴적층의 끌림습곡과 단층조선 그리고 3조의 단층점토에 근거하여, 제4기 퇴적층의 퇴적 이후에 역이동 성분을 갖는 우수향 주향이동이 최소 3회 발생한 것으로 해석하였다(Lee *et al.*, 2015). 또한 제4기 퇴적층의 OSL 연대, 방사성탄소 연대, 고고학적 연대 결과를 종합한 단구지점의 최후기 운동시기는 7.5 ± 0.3 ka 이후이다.

3. 지형분석 및 전기비저항탐사

제4기 단층의 기하와 운동학적 특성을 분석하고 고지진학 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는 지진과 함께 지표변형이 발생한 지점에서의 굴착조사가 필수적이다. 이번 연구에서는 굴착지점을 선정하기 위해 LiDAR 영상을 이용한 선형구조분석과 지하시상대 파악을 위한 전기비저항탐사를 먼저 수행하였다.

선형구조분석은 제4기 단층 추적을 위한 가장 기초적인 작업으로, 지형 특성을 이용하여 단층에 관한 정보를 얻는 방법이다(O'Leary *et al.*, 1976). 우리나라는 판 경계부에 비해 단층활동도가 높지 않으며, 강우량이 많고 습도도 높아 침식작용이 활발하여 단층과 연관된 지형을 인지하기 쉽지 않다. 또한 지형이 비교적 험준하고 식생의 밀도가 높아 제4기 단층의 추적에 제약이 있으나, 최근 들어 과거 항공사진을 이용한 DEM 제작과 LiDAR 영상 기술이 국내로 도입되면서 식생 제거 효과를 포함한 공간해상도 0.5 m 자료를 통해 정밀한 지형분석이 가능해졌다(Kim *et al.*, 2014; Oh and Kim, 2019). 항공 LiDAR 영상을 이용하여 연구지역의 선형구조를 분석한 결과, 기존에 고지진 지표파열이 보고된 벽계지점에서부터 거의 남-북 방향으로 연장되는 뚜렷한 선형구조가 인지

되었다(그림 2b). 또한 이 선형구조에는 단층대로 추정되는 지형기복이 발달하며, 단구지점에서 관찰된 제4기 단층의 N10~20°E 주향과 거의 평행하다(Lee *et al.*, 2015).

지하구조를 파악하기 위해 항공 LiDAR 기반 지형영상으로부터 분석된 선형구조와 거의 수직한 계곡부에서 전기비저항탐사를 수행하였다(그림 3a). 지하의 전기비저항은 암석의 종류, 공극률, 투수율 그리고 단층과 같은 불연속면의 유무에 따라 차이를 보이며(Telford *et al.*, 1990), 일반적으로 단층대는

주변에 비해 상대적으로 많은 불연속면과 높은 투수율로 낮은 전기비저항 값을 보이기 때문에 전기비저항탐사는 굴착지점 선정에 유용하게 활용될 수 있다. 이번 연구에서 수행된 전기비저항탐사는 측선 길이 200 m, 전극 간격 10 m, 탐사구간 50 m, 전극개수 21개, 전개개수 n=8로 수행되었으며(그림 3b), 측정된 비저항값은 16.6-502.5 Ω·m 범위를 보인다(그림 3c). 서편의 화강암이 동편의 퇴적암에 비해 상대적으로 높은 비저항값을 나타내고, 이들 기반암의 경계로 추정되는 구간에서 관찰되는 저비저항 이상대가

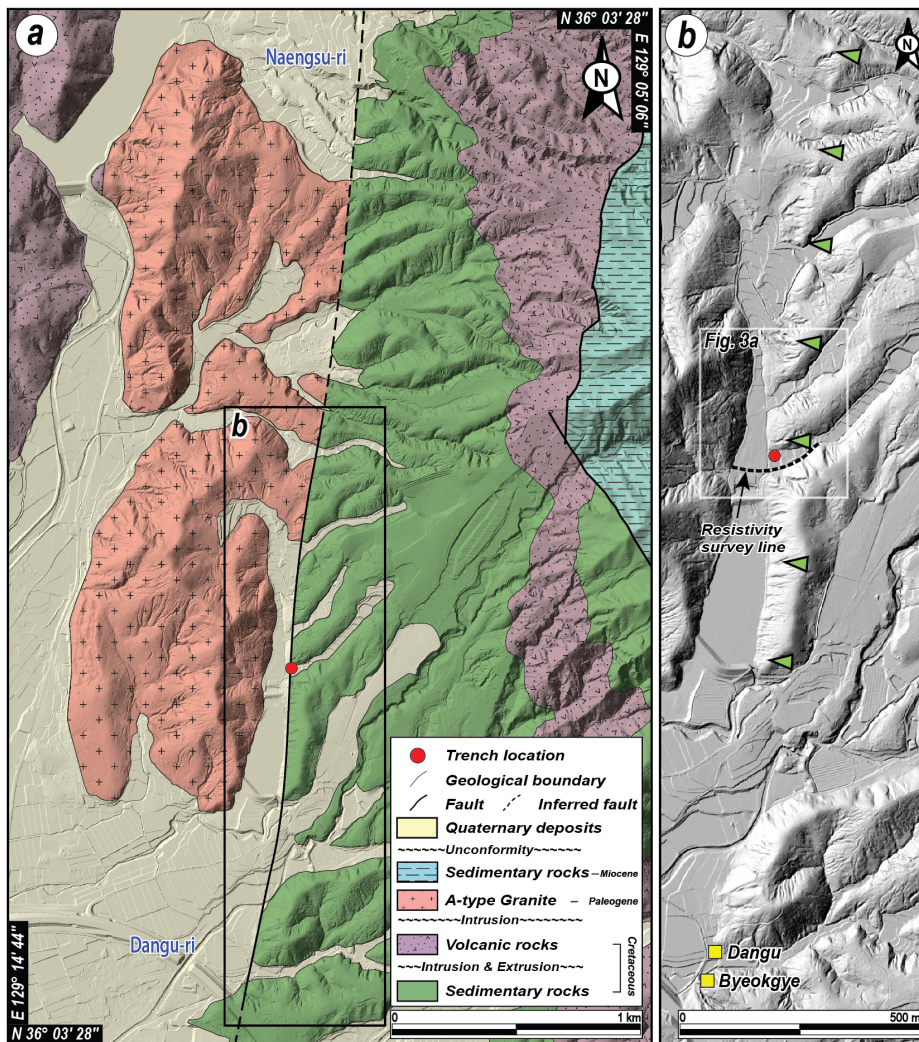


Fig. 2. (a) Detailed geological map of the study area (modified from Um *et al.*, 1964; Hwang *et al.*, 2007b; Song, 2015). (b) LiDAR image of the study area with the location of the trench site (red circle) and previously studied sites (yellow squares). LiDAR image showing a N-S-trending geomorphic relief (indicated by green triangles), which is estimated to be a fault line scarp.

상부지표까지 연장된다. 이 상부지표로 연장되는 저비저항 이상대와 LiDAR 영상에서 남-북 방향의 지형기복이 만나는 지점을 굴착지점으로 선정하였다(그림 3a). 굴착은 동-서 방향으로 길이 7 m, 높이 3.5 m로 토양층과 제4기 퇴적층 그리고 기반암(하반의 A-형 알칼리장석 화강암)이 나타나는 심도까지 실시하였다(그림 4).

4. 지질구조요소

4.1 굴착단면 기재학적 특성

동-서 굴착단면에는 모두 동쪽으로 경사진 7개의 단층들(F1~7)이 제4기 퇴적층을 절단하거나 제4기 퇴적층과 기존 단층암과의 경계를 이루고 있음이 관찰된다(그림 4). F6 단층을 경계로 동편의 상반은 제4기 이전에 형성된 것으로 판단되는 최소 2.5 m 폭의 단층핵으로 구성되는 반면, 서편 하반은 제4기 퇴적층으로 이루어져 있다. 동편 상반에서 관찰되는 단층핵은 기재적 특징에 따라 2개로 구분되며, 제4기 퇴적층을 절단하고 대부분 비지로 이루어진 청색의 단층핵 1은 약 40 cm의 폭을 가지고, 점토광물의 배열에 의한 전단엽리가 미약하게 발달하고 있다. 그 동편으로 제4기 퇴적층을 절단하지 못하고 단층

각력을 다수 포함하는 비지대로 이루어진 갈색 내지 암회색의 단층핵 2는 2 m 이상의 폭을 가지며, 단층 각력암 내에는 약 1~2 cm 폭의 백색 내지 연회색 그리고 암회색의 단층비지피가 교호하며 발달한다. 또한 단층각력암대와 단층비지대 경계에 우수향 주향 이동을 지시하는 단층조선이 미약하게 발달하는 양상을 보인다.

하반의 제4기 퇴적층은 구성입자의 크기, 역의 종류와 함량, 원마도, 분급, 색상 등을 근거로 상부로부터 unit A에서 I의 단위층들로 세분되며(그림 4b), 약 3.5 m 깊이의 굴착 바닥면에는 unit I 아래에서 A-형 알칼리장석 화강암도 관찰된다. unit B 내에 렌즈상으로 포함되어 있는 unit A는 역을 포함하지 않는 갈색의 세립질 사질 내지 니질 층인 반면, 굴착 단면에서 가장 두꺼운 층후를 보이는 unit B는 다양한 크기의 각력들을 포함한 흑갈색 함력 사질층이다. unit B는 상향 세립화되어 상부로 갈수록 역의 크기가 작아진다. F6 단층 상반의 단층핵을 피복하는 unit C는 갈색의 함력 사질층으로 unit B에 비해 밝은 기질 색상과 양호한 분급과 원마도를 보이며, 단층 하반에서 서쪽으로 멀어지며 얇아져 침멸된다. unit D는 보다 밝은 갈색 역층으로 단층 인접부임에도 불구하고 역의 원마도가 좋으며, 단층들로 경계

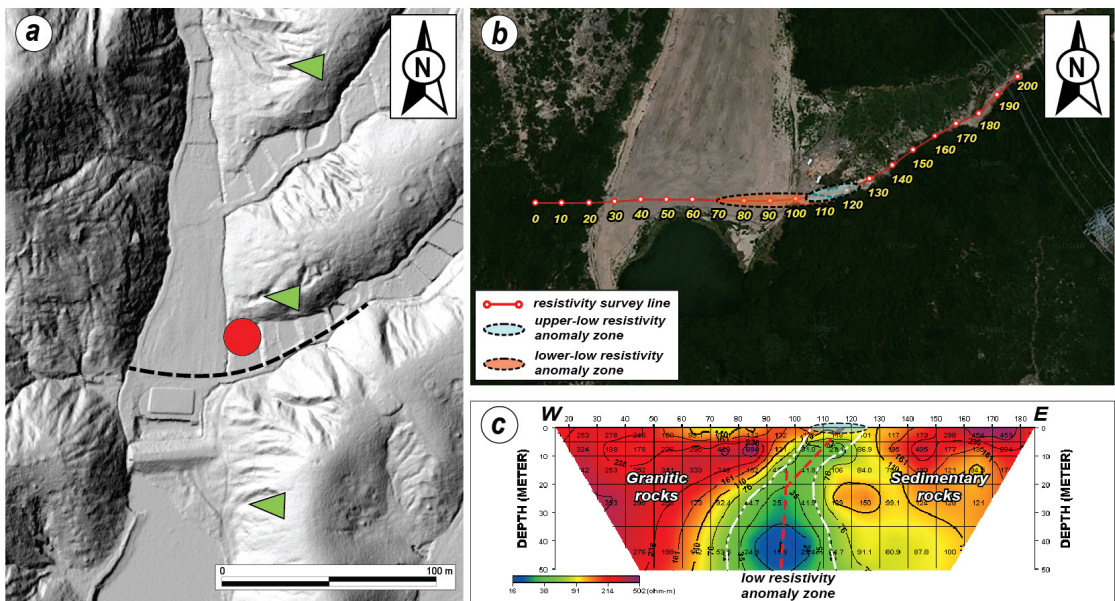


Fig. 3. (a) The resistivity survey line (black dotted line) located about 20 m south of the trench site (red circle). (b) Location of survey line and (c) result of subsurface 2-D electric resistivity structure.

되고 고립된 분포 특징을 보여주고 있어 수평변위가 수반된 단층운동에 의해 전단면을 따라 주변 퇴적물이 끌려왔을 가능성이 높다. unit E는 회색과 갈색의 세립질과 중립질 사질층의 교호대로 이루어져 있으며, 다양한 기하의 지진성 연결퇴적변형구조들(soft-sediment deformation structures)이 관찰된다(그림 5). 연결퇴적변형구조는 하중구조인 load casts, ball-and-pillow 구조, 미고결 퇴적물의 관입구조인 불꽃구조(flame structure), 기둥구조(pillar structure), 쇄설성 암맥, 미고결 퇴적층의 교란구조, 1차 퇴적구조가 사라진 무구조(structureless) 등으로 관찰된다. 하중구조는 주로 unit G(그림 5a), 관입구조는 주로 unit E(그림

5b, 5c)에서 관찰되며 이들 구조는 지진성 단층운동으로 인한 퇴적물의 액상화 혹은 유체화의 결과로 알려져 있다(Kang *et al.*, 2010). unit F는 측방연속성이 좋지 않고 분급이 불량하며 1~5 cm의 규장암, 화강암 역을 가지는 회백색 중립질 사질층이다. unit G는 회색의 세립질 사질층으로 최대 직경 약 10 cm의 이암 역이 관찰되며, 지진성 연결퇴적변형구조인 하중구조도 잘 관찰된다. unit H는 갈색의 함력 사질층으로 역으로는 자색 사암, 세립질 화강암 등이 관찰되고 최대 직경은 15 cm로 원마도와 분급은 중간 정도이며, 역들이 상부에 집중되는 경향이 있다. A-형 알칼리장석 화강암을 피복하는 unit I는 주로

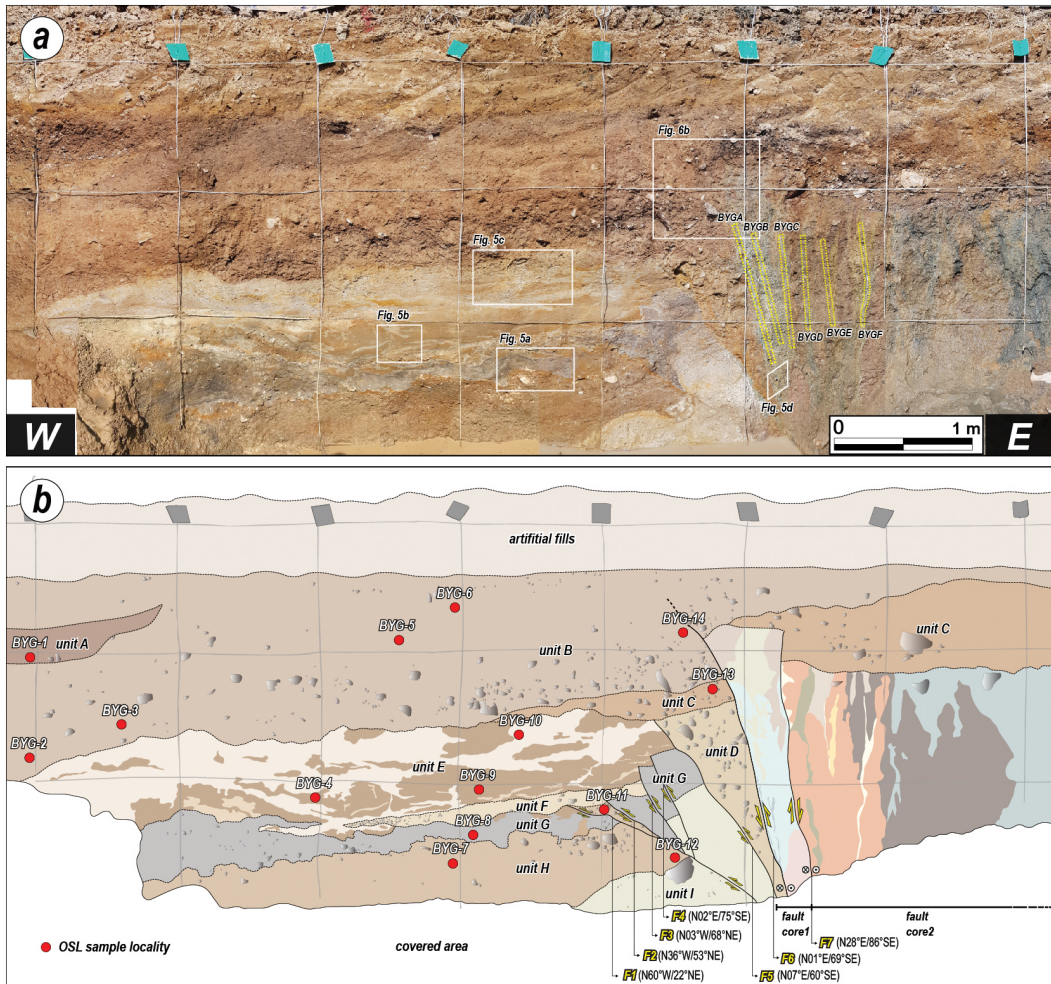


Fig. 4. (a) Photomosaic of the trench section of the northern wall. Yellow dotted lines indicate AMS (Anisotropy of Magnetic Susceptibility) sampling localities. (b) Detailed sketch of the trench section. Light grey lines indicate 1 m × 1 m grid.

규장암과 화강암 역을 함유한 회백색의 세립질 사질층으로 역의 크기는 최소 5 cm에서 최대 30 cm로 다양하며, 육안으로 기반암인 화강암과 유사하게 보인다.

굴착단면에서 관찰되는 7개의 단층면들의 주향은 N60°W~N28°E로 다양하며, 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 북서에서 북북동으로 변화되는 양상을 보인다. 제4기 단위층들 중 가장 젊은 층인 unit B까지 절단하는 F6 단층은 N01°E/69°SE의 자세를 가지며, LiDAR 영상에서 확인된 남-북 방향의 선형구조와 유사한 방향성을 가진다. 한편, F7은 상반의 unit C까지 절단하며, F3-5는 unit D, E, F까지 절단하고 unit C에 피복되는 반면, F1과 2는 unit G를 절단하나 unit F에 의해 피복된다. 단층조선은 F6 단층면에서만 관찰되었으며, 17°~56°N의 선주각으로 우수향 역이동성 운동감각을 보여준다(그림 5d).

4.2 제4기 단층운동의 변위량

가장 젊은 지층을 절단하는 F6 단층면에 발달하는 단층조선과 굴착단면에서 관찰된 제4기 퇴적층의 겹보기 수직변위(vertical separation)를 이용하여 최후기 단층운동의 실제 변위(true displacement)

를 산정하였다. 보통 노두 단면이 경사져 있거나 기준면(e.g., 부정합면 또는 열쇠층)이 경사진 경우 또는 순수한 경사이동이나 주향이동성 단층운동이 아닌 경우에는 단층의 실제 변위를 산정하는데 어려움이 있다. 따라서 단층의 실제 변위를 산정하기 위해서는 겹보기 수직변위와 기준면의 경사각, 노두 단면의 경사각, 단층의 경사각, 단층조선의 선주각 등의 정보를 바탕으로 상호 연관성을 구하는 것이 필요하다(Xu *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2017). 그러나 이번 굴착단면에서 제4기 퇴적층의 층리가 3차원적으로 거의 수평한 점에 근거하였을 때 기준이 되는 경계면이 거의 수평으로 놓여있음을 알 수 있다. 또한 굴착단면의 경사각(β)이 거의 수직이므로 굴착단면에서 측정된 겹보기 수직변위(S_{vm})와 실제 수직변위(vertical displacement; S_v)는 같다고 볼 수 있다. 그리고 단층면에서 우수향 역이동성 단층운동을 지시하는 단층조선이 관찰되므로 수직변위(S_v), 단층의 경사각(α), 단층조선의 선주각(γ)을 사용하면 비교적 간단하게 실제 변위(S_t)의 계산이 가능하다(그림 6). 한편, F6 단층면에서만 관찰되는 단층조선은 17°~56°N의 비교적 넓은 범위의 선주

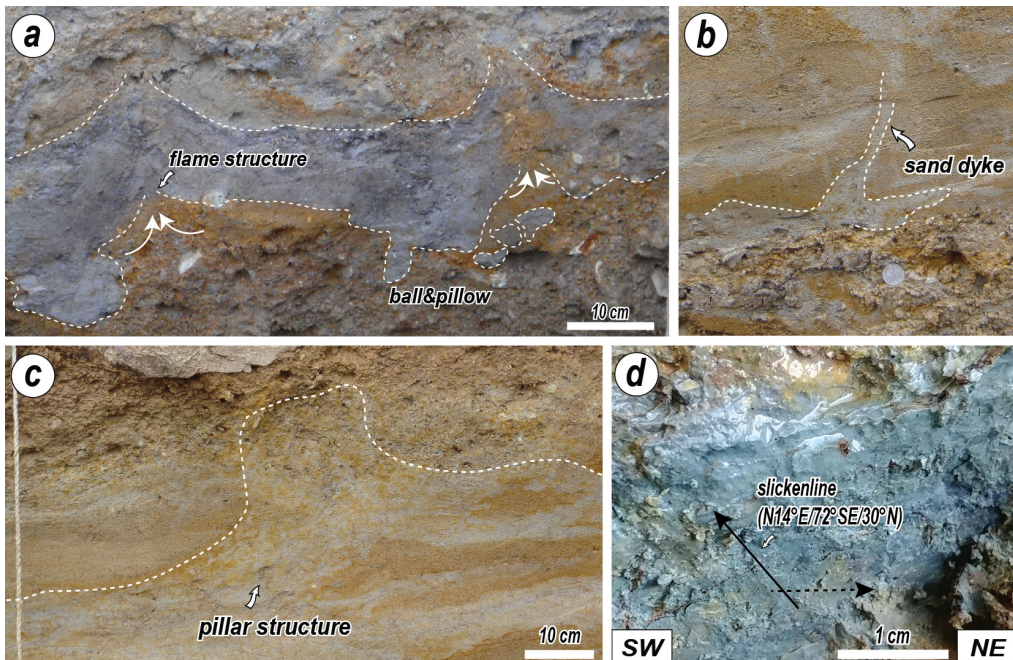


Fig. 5. Photographs showing the major features observed on the trench section. (a) Flame structure and ball & pillow observed in unit G. (b, c) Sand dyke and pillar structure observed in unit E. (d) Slickensite on the fault surface showing a dextral reverse slip sense.

각을 보인다. 따라서 단층조선의 선주각 최솟값(17°)과 최댓값(56°)을 사용하였으며, 이에 실제 변위(S_t)를 범위로 산출하였다. 더 나아가 F6 단층은 가장 젊은 제4기 퇴적층인 unit B를 절단하고 있어 계산된 변위는 이곳 단층의 최후기 운동의 결과로 해석될 수 있다.

F6 단층에 의해 절단된 unit B와 C의 경계면을 기준으로 측정된 수직변위(S_v)는 0.49 m이며(그림 6), 단층면의 경사각(69°)을 이용하여 계산된 걸보기 경사변위(dip separation; S_m)는 0.53 m이다. 또한 걸보기 경사변위와 단층조선 선주각의 최댓값과 최솟값을 이용하여 실제 변위(S_t)의 범위를 산출하면 0.64~1.81 m이다(식 1과 2).

$$S_{vm} = S_v, S_m = \frac{S_v}{\sin\alpha} \quad (\text{식 1})$$

$$S_t = \frac{S_m}{\sin\gamma} \quad (\text{식 2})$$

4.3 단층암 대자율이방성 특성

이번 연구에서는 최근 국제적으로 연구가 활발한 단

층비지의 대자율이방성(Anisotropy Magnetic Susceptibility, AMS)을 적용하여 전단에 의해 배향된 단층암의 입자 배열을 밝히고 단층의 운동감각을 해석하고자 하였다(Hrouda, 1982; Rochette *et al.*, 1992; Astudillo *et al.*, 2008; Solum and van der Pluijm, 2009; Cho, 2014; Cho *et al.*, 2014; Ha *et al.*, 2016; Cheon *et al.*, 2017a, 2017b, 2019a, 2019b; Seo *et al.*, 2019). 다중변형을 겪은 단층비지대의 대자율이방성은 최후기 전단변형에 의해 생성된 미세구조에 의해 주로 지배되며, 대자율이방성 타원체의 세 주축(k_1, k_2, k_3)의 분포와 전단면의 자세를 이용하면 단층의 운동감각을 해석할 수 있다. 단층비지 시료들은 단층핵 1에서 3개(BYG-A~C), 단층핵 2(BYG-D~F)에서 3개로 총 6개 지점에서 53개의 무자성 정육면체 박스(2×2×2 cm)를 사용하여 채취하였다(그림 4a). 대자율이방성 분석은 부산대학교 공동실험실습관에 구축된 AGICO사의 Kappabridge KLY-4S를 이용하였으며, 결과는 표 1과 그림 7과 같다.

단층핵 1에서 채취한 BYG-A, B, C(단층면의 자세: N02°E/69°SE)의 대자율이방성 분석결과, k_1 과 k_2 가 이루는 대원이 단층면과 평행 내지 아평행한

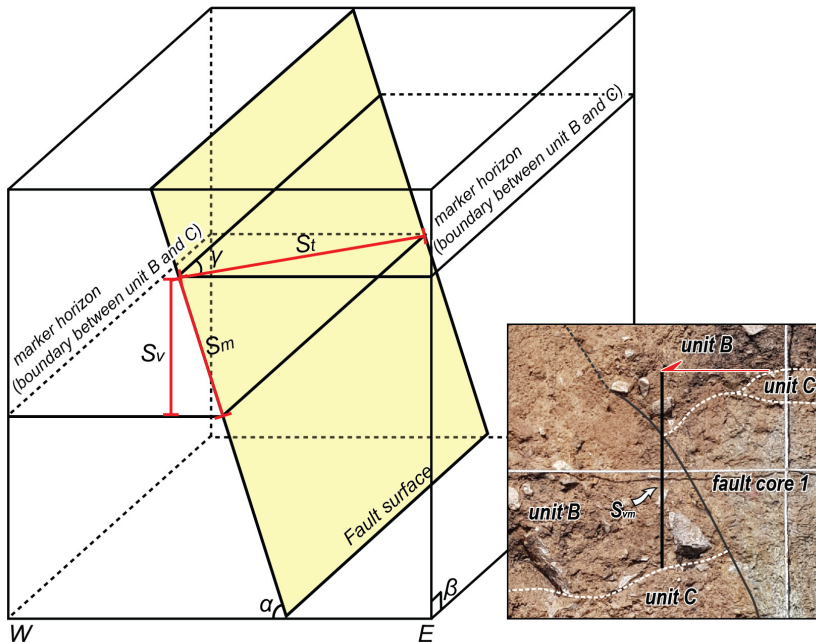


Fig. 6. Schematic diagram showing how to calculate true displacement. S_t : true displacement, S_v : vertical displacement, S_m : dip separation, α : dip of fault surface, β : dip of cut slope, γ : rake of the striation(modified from Xu *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2013). Inset: Photograph showing the measured vertical separation. S_{vm} : vertical separation.

Table 1. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data from the fault gouges in the trench section.

site	n	k _{mean} (μ SI)	Mean eigenvectors			AMS parameters				FSA
			k ₁	k ₂	k ₃	L	F	P _J	T	
Fault core 1										
BYGA	13	2221	008/23	143/60	269/19	1.005	1.013	1.019	0.484	002/69
BYGB	13	1312	354/04	110/81	263/08	1.004	1.008	1.012	0.347	002/69
BYGC	12	1705	355/04	136/85	265/03	1.003	1.014	1.019	0.668	002/69
Fault core 2										
BYGD	8	5211	349/13	192/76	080/05	1.006	1.034	1.043	0.715	028/86
BYGE	9	7729	003/01	095/78	273/11	1.008	1.032	1.043	0.615	028/86
BYGF	8	2798	168/04	004/86	258/01	1.006	1.013	1.020	0.376	028/86

n: number of specimens; k_{mean}: mean magnetic susceptibility, $(k_1+k_2+k_3)/3$; mean eigenvectors: site-mean directions, declination/inclination of k₁ (maximum), k₂ (intermediate), k₃ (minimum); L: lineation, k₁/k₂, after Balsley and Buddington (1960); F: foliation, k₂/k₃, after Stacey *et al.* (1960); P_J: corrected anisotropy degree, $\exp\{2\{(n_1-n_m)^2+(n_1-n_m)^2+(n_1-n_m)^2\}/1/2, n_1=\ln k_1, n_2=\ln k_2, n_3=\ln k_3, n_m=(n_1+n_2+n_3)/3\}$, 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.

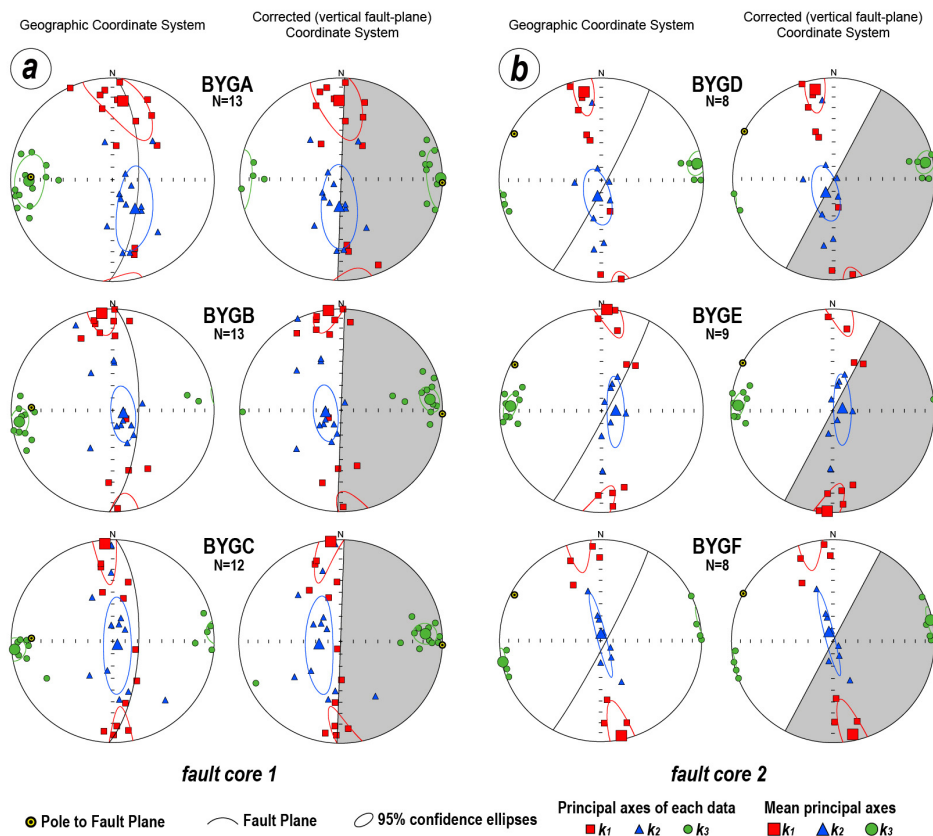


Fig. 7. AMS results from the fault gouges of (a) fault core 1 and (b) fault core 2. Left: equal-area lower hemisphere projection showing the AMS principal axes (k₁, k₂ and k₃), their 95 % confidence ellipses, and fault attitude. Right: equal-area projection, in which fault surface is corrected to be vertical for convenience of interpretation (Grey color area represents hanging wall).

분포를 보이며, k_3 는 저경사로 단층면에 거의 수직 한 방향으로 균집되는 양상을 보인다. 또한 단층면을 수직으로 보정하면, k_3 가 대부분 단층 상반 쪽인 동북동 방향으로 저각의 선경사를 가진다. 이러한 특징은 단층핵 1은 미약한 우수향 주향이동 성분을 포함한 역이동성 단층운동을 최후기에 겪었음을 지시한다(Fossen, 2010; Cho *et al.*, 2014; 그림 7a).

한편 단층핵 2에서 채취한 BYG-D, E, F(단층면의 자세: N28°E/86°SE)는 단층핵 1과 유사하게 k_1 과 k_2 가 북북서 내지 남-북 방향의 대원분포를 보이며 k_3 가 동-서 내지 동북동-서남서 방향으로 거의 수평으로 균집되는 양상을 보인다(그림 7b). 그러나 단층면은 k_1 과 k_2 의 대원과 약 30~40°로 사교하며, 단층면을 수직으로 보정하면 k_3 가 상반과 하반 두 쪽으로 고르게 저각으로 분포하는 특징을 보인다. 또한 k_1 과 k_2 가 이루는 대원은 야외에서 단층핵 2에서 관찰된 S-C 조직의 S면과 거의 평행하다. 이러한 점들은 단층핵 2를 따라 역이동 보다는 우수향 주향이동성의 단층운동이 보다 우세하였음을 지시한다. 결론적으로 단층핵 1과 2의 운동감각의 차이는 동일한 응력장 하에서도 기존 약대 또는 단층대의 자세가 달라짐에 따라 재할 양식이 달라짐을 보여준다. 실제 굴착단면에서 관찰된 단층면의 방향에 따라 단층조선이 17°~56°N의 비교적 넓은 범위의 선주각을 보여주고 있어 이러한 해석을 뒷받침해준다.

4.4 고응력 복원

단층의 운동감각을 결정하기 위해서 단층조선과 함께 운동감각 지시자인 결정섬유(crystal fiber), 수다자국(chatter mark), 단층홈(ridge and groove)과 단층면 인접부에 발달하는 끌림습곡, 전단띠 등을 이용한다. 이번 굴착단면의 제4기 단층운동을 야기한 고응력장 복원을 위해 총 7개의 단층면과 조선의 기하와 함께 운동학적 자료를 수집하고(그림 5d) Wintensor S/W (v.5.8.5)를 사용하여 분석하였다(Delvaux and Sperner, 2003). 분석결과 동북동-서남서 방향의 최대수평응력(σ_{Hmax})이 도출되었으며($R'=1.66$; Delvaux *et al.*, 1997; 그림 8), 이는 선행 연구에서 알려져 있는 한반도 현생 응력장과 잘 부합한다(Kim *et al.*, 2016). 복원된 고응력은 굴착단면의 제4기 단층에서 확인된 우수향 역이동성 운동이 동북동-서남서 방향의 압축응력환경에서 발생하였음을 지시하며 단층암의 대

자율이방성 결과와도 부합한다.

5. OSL/IRSL 연대측정

제4기 단층운동 시기를 결정하기 위한 다양한 방법들(OSL/IRSL 연대측정법, ESR 연대측정법, 방사성탄소 연대측정법 등) 중, 이번 연구에서는 OSL (Optically Stimulated Luminescence, 석영)과 IRSL 연대측정법(Infrared Stimulated Luminescence, pIRIR₂₂₅, K-장석)을 이용하여 굴착단면에 노출된 제4기 퇴적층의 퇴적시기를 추정함으로써 단층의 운동시기를 규명하고자 하였다. OSL/IRSL 연대측정법은 퇴적층 내에 포함된 석영이나 K-장석 입자로부터 방출되는 루미네선스 신호(latent luminescence signal)를 이용하여 퇴적시기를 결정하는 연대측정법으로, 단일시료재현법(Single Aliquot Regenerative Dose; Murray and Wintle, 2000)이 개발된 이후 연대측정 결과의 신뢰도가 향상되어 최근 제4기 퇴적층의 연대측정에 널리 적용되고 있다. 퇴적층 내 석영 입자는 빛에 노출되면 수 초 내에 기존의 루미네선스 신호가 초기화되며, 퇴적과정의 진행에 따라 석영이나 K-장석 입자가 빛으로부터 차단된 후, 주변 토양으로부터 이온화 방사선 에너지를 흡수하여 루미네선스 신호가 축적되는데 이 석영 입자를 청색발광다이오드에 노출시켜 방출되는 루미네선스 신호를 측정하면 퇴적시기를 결정할 수 있다. 루미네선스 연대

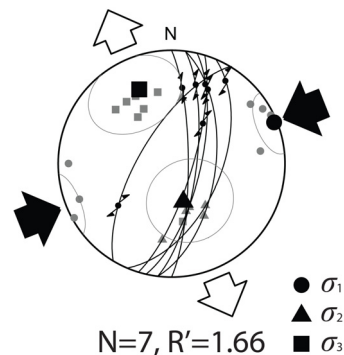


Fig. 8. Fault slip data in the fault zone (lower-hemisphere, equal-area projection). Convergent and divergent arrow heads represent contraction (σ_{Hmax}) and horizontal stretching (σ_{Hmin}) directions respectively. The principal stress axes σ_1 (circles), σ_2 (triangles), σ_3 (squares) are also projected. $R'=2-R$ (σ_2 is vertical) [Delvaux *et al.*, 1997; $R=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$]

Table 2. OSL/IRSL ages of the Quaternary sediment samples in the trench section.

Sample Code	Dating Method	Age (ka, 1σ SE)	Unit
BYG-01	OSL	1.2 ± 0.1	A
BYG-02	OSL	9.0 ± 1.0	B
BYG-03	OSL	10.0 ± 1.0	B
BYG-04	OSL	> 92.0 ± 4.0	E
	IRSL	146.0 ± 6.0	
BYG-05	OSL	4.9 ± 0.3	B
BYG-06	OSL	3.2 ± 0.2	B
BYG-07	OSL	> 68.0 ± 3.0 ¹⁾	H
	IRSL	149.0 ± 7.0	
BYG-08	OSL	> 77.0 ± 2.0	G
	IRSL	151.0 ± 4.0	
BYG-09	OSL	> 53.0 ± 10.0	E
	IRSL	143.0 ± 5.0	
BYG-10	OSL	> 85.0 ± 6.0	E
	IRSL	165.0 ± 6.0	
BYG-11	OSL	> 71.0 ± 3.0	H
	IRSL	155.0 ± 5.0	
BYG-12	OSL	> 70.0 ± 3.0	H
	IRSL	142.0 ± 4.0	
BYG-13	OSL	17.0 ± 1.0	C
BYG-14	OSL	8.1 ± 0.3	B

¹⁾The inequality sign indicates a minimum deposition age. For example, "> 68±3 ka" means that this sample was deposited before 68±3 ka.

측정 결과에 대해서는 별도의 논문에서 상세히 다룰 예정이다(Kim *et al.*, in preparation).

시료는 길이 30 cm, 직경 5 cm의 파이프를 사용하여 unit D, F, I를 제외한 제4기 퇴적층에서 총 14개 지점(BYG-1~14)에서 채취되었으며(그림 4b), OSL/IRSL 연대측정은 한국기초과학지원연구원 오창센터 소재 루미네선스 자동측정장치를 사용하였다. OSL/IRSL 연대측정결과는 표 2에 요약하였으며(Kim *et al.*, in preparation), 굴착지점의 제4기 단층운동 시기는 토의에서 자세히 기술하였다.

6. 토 의

6.1 제4기 단층 운동 횡수와 시기

전 세계 지진다발 지역에서는 굴착조사를 통해 고지진 단층운동의 특성과 운동시기에 대한 정보를

얻고자 하는 고지진 연구가 활발히 수행되고 있으며(McCalpin, 1996; Burbank and Anderson, 2001), 국내에서도 현재 고지진학 연구를 통한 제 4기 활성의 증거들이 보고되고 있다(Okada *et al.*, 1994; Ryoo *et al.*, 1996, 1999, 2001, 2002; Kyung, 1997, 2003; Chwae *et al.*, 1998; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b; Lee, B.J. *et al.*, 1999; Chang, 2001; Kyung and Chang, 2001; Choi, W.-H., 2003; Lee, Y.H., 2003; Kim *et al.*, 2004, 2011; Choi, P., 2005; Kim and Jin, 2006; Kee *et al.*, 2007; Kang and Ryoo, 2009; Jin *et al.*, 2013; Lee, J. *et al.*, 2015). 이번 연구 역시 경주시 강동면의 중부 양산단층을 대상으로 한 굴착조사를 실시하고, 이곳에서 확인된 단층의 기하와 운동학적 특성과 퇴적층의 연대자료 그리고 이들의 횡절관계를 종합하여 제4기 단층운동 특성에 관해 토의하고자 한다. 또한 이 결과를 이번 굴착지점의 남쪽 연장

부에 위치하는 벽계(Ryoo *et al.*, 1999)와 단구지점(Lee *et al.*, 2015)의 기존 연구결과와도 비교하였다.

굴착단면에서 확인되는 제4기 퇴적층과 7매 단층들의 기하와 횡절관계는 기반암 내에 기존에 존재하던 단층핵이 제4기 동안 재활되어 최소 3회 이상 시기가 다른 단층운동이 발생하였음을 지시한다(그림 9). 양산단층은 중생대 백악기와 신생대 동안 판구조 환경의 변화에 따라 운동감각을 달리하며 다중변형을 겪은 것으로 알려져 있어(Cheon *et al.*, 2019a), 연구지역에는 제4기 이전에 알갈리장석 화강암과 백악기 퇴적암을 경계(그림 2)하는 단층대가 이미 존

재하였을 것으로 판단된다. 이후 제4기에 지진 휴식기 동안 unit I, H, G층이 양산단층대와 기반암을 부정합으로 피복하였으며, 이후 기존 단층핵에서 분지된 7매의 우수향 역이동성 단층이 재활했는데 이를 첫 번째 단층운동으로 해석하였다(event I; 그림 9a, 9b). 첫 번째 단층운동으로 만들어진 지형 기복은 이후 지진 휴식기 동안 삭박작용으로 거의 평탄화되고 unit F와 E가 퇴적된 후 F3-7의 단층들이 다시 재활하는 두 번째 단층운동이 발생한 것으로 판단된다(event II; 그림 9c, 9d). F6 단층과 접하여 고립되어 나타나는 unit D는 원마도가 상당히 좋으며 주변 퇴

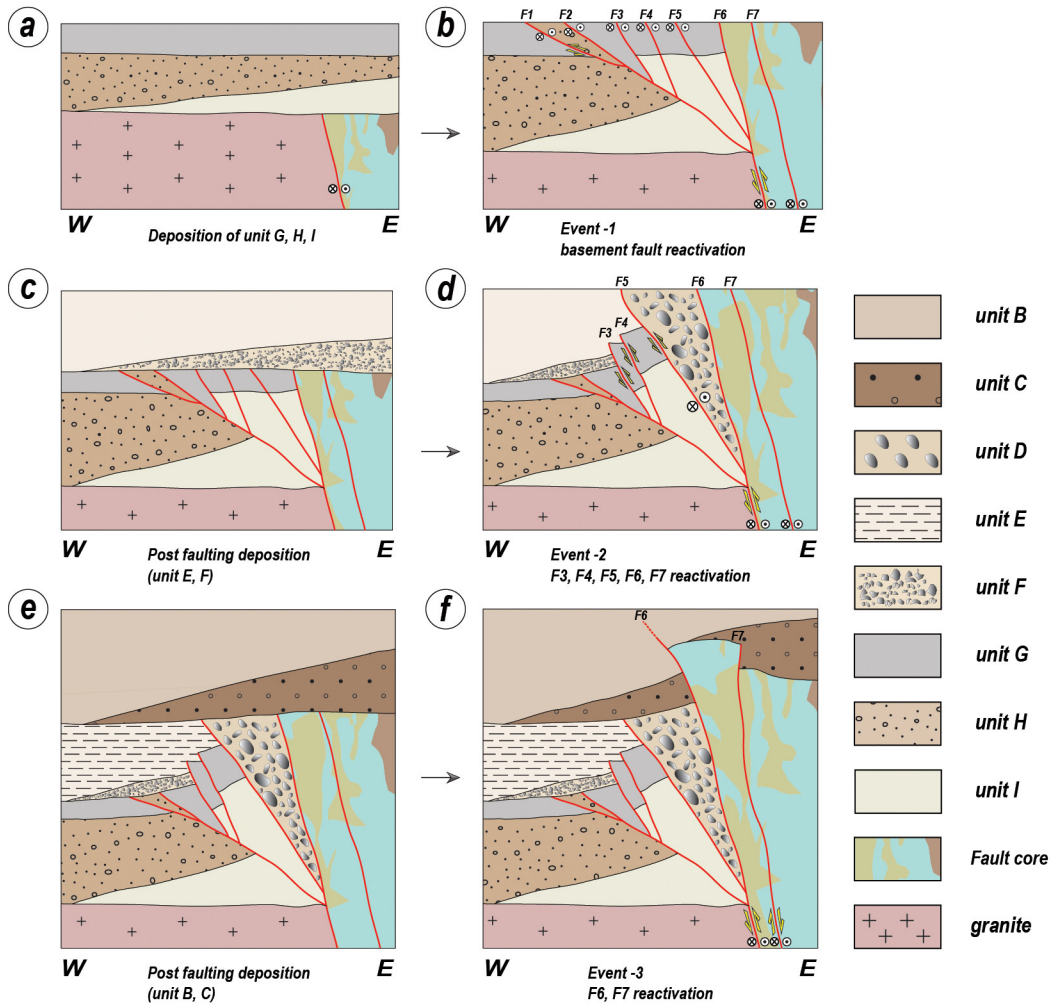


Fig. 9. Schematic diagrams of reconstruction of faulting events at the trench site, based on the cross-cutting relationships between the faults and unit layers, reveal at least three faulting events. The red lines indicate the Quaternary fault surfaces, named F1-7 from the west to the east.

적층과도 확연히 다른 암상을 보여준다. 또한, Unit D의 양쪽 경계에서 단층비지가 관찰되며, 이러한 증거들은 두 번째 단층운동의 주향이동으로 인해 인근 퇴적물이 단층면을 따라 횡적으로 끌려왔음을 지시한다. 이후 지진 휴식기 동안 침식으로 인한 평탄화가 다시 진행된다 상대적으로 고지인 동쪽에서 유래된 unit C와 B가 퇴적된 후 F6, F7 단층이 마지막으로 재활하였는데, 이를 최후기 단층운동으로 해석하였다(event III; 그림 9e, 9f).

야외의 횡절관계와 제4기 퇴적층에서 얻은 OSL 및 IRSL 연대(표 2)를 이용하여 복원된 세 번의 단층운동 시기를 추정하면 다음과 같다. 첫 번째 단층운동은 unit I, H, G를 절단하고 unit F, E에 의해 피복되므로, unit G와 E의 연대를 통해 운동시기를 결정하여야 한다. 또한 두 번째 단층운동은 unit F와 E를 절단하고 unit C에 의해 피복되므로, unit E와 C의 연대를 이용하여야 한다. unit G의 한 지점에서 얻은 IRSL 연대는 151 ± 4 ka (BYG-08)인 반면, unit E의 세 지점 연대는 146 ± 6 ka (BYG-04), 143 ± 5 ka (BYG-09), 165 ± 6 ka (BYG-10)로 두 층의 연대는 구분되지 않는다. 굴착단면에서 unit E와 G는 특징적으로 연결 퇴적변형구조가 발달하고 있음을 감안하면, 이들 두 층에서 얻어진 연대는 지진동으로 인한 액상화 또는 유체화로 내부 변형과 함께 외부물질이 주입되어 교란된 겉보기 연대일 가능성이 높다. 액상화에 의한 퇴적층의 겉보기 연대 사례는 2017년 발생한 포항지진에서도 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2018; Gahng, 2019). 한편, unit G 바로 아래의 unit H의 두 지점에서 149 ± 7 ka (BYG-07)와 142 ± 4 ka (BYG-12)의 유사한 IRSL 연대가 도출되었다. 또한 unit C에서는 17 ± 1 ka (BYG-13)의 OSL 연대를 얻었다. 따라서 첫 번째 단층운동은 교란 흔적이 없는 unit H의 연대 중 젊은 연대인 142 ± 4 ka (BYG-12) 이후에 발생하였으며, 두 번째 단층운동은 unit C의 연대인 17 ± 1 ka 이전에 발생한 것으로 해석된다. 한편, 최후기인 세 번째 단층운동은 unit B를 절단하고 있어, 운동시기는 이 층에서 얻어진 연대들 중 가장 젊은 연대인 3.2 ± 0.2 ka 이후로 해석하였다(표 2).

이번 굴착지점에서 남쪽으로 약 1 km 떨어진 지점에 위치하는 단구지점에서도 총 3회의 제4기 단층운동이 인지되었으며, OSL, 탄소동위원소, 고고학적 연대를 근거로 최후기 운동시기가 7.5 ± 0.3 ka 이

후인 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2015). 단구지점에서 최후기 단층운동의 하한 연대(7.5 ± 0.3 ka)는 이번 굴착지점에서 최후기 단층운동에 의해 절단된 unit B에서 얻은 연대 범위(표 2; 3.2 ± 0.2 ka~ 10 ± 1 ka) 내에 있어 두 지점의 단층운동은 대비될 수 있다. 한편, 벽계지점에서 보고된 최후기 단층운동의 시기는 75 ± 3 ka 이후(Kee *et al.*, 2009)로 단구지점과 이번 굴착지점의 최후기 운동시기의 하한과는 차이가 커 직접적인 대비가 쉽지 않다. Lee *et al.* (2015)은 이러한 차이가 단구지점은 구릉에 위치한 벽계지점보다 저지에 위치하고 있어 젊은 퇴적층이 지속적으로 퇴적될 조건을 갖추고 있기 때문인 것으로 해석하였다. 실제로 이번 연구의 굴착지점도 지속적인 퇴적 가능성이 높은 계곡부에 위치한다(그림 2b). 이상의 연구결과와 LiDAR 영상에서 분석된 남-북 방향 선형구조의 연속성 그리고 유사한 우수향 역이동성 운동감각을 고려하면, 이번 굴착지점과 기보고된 벽계와 단구지점의 단층들은 하나의 기하학적 분절을 이루고 있으며 운동학적 측면에서도 동일한 역사를 가질 가능성이 높은 것으로 판단된다.

6.2 변위량을 통한 지진규모 산정

지진규모 산정을 위해 사용되는 변수들은 평균변위(Kanamori, 1977), 최대변위(Bonilla *et al.*, 1984; Wells and Coppersmith, 1994), 지표파열길이(Slemmons, 1982; Bonilla *et al.*, 1984; Khromovskikh, 1989; Wells and Coppersmith, 1994), 파열면적(Wells and Coppersmith, 1994), 지표파열면적 × 최대변위(Slemmons, 1982; Bonilla *et al.*, 1984; Mason, 1992) 등이 있다. 이들 중 지표파열길이나 파열면적을 이용하는 방법은 우리나라에서 적지 않은 불확실성이 존재하여 노두와 굴착조사를 통해 구할 수 있는 최대변위를 대부분 이용하며 Wells and Coppersmith (1994)에 의해 제시된 최대변위-모멘트 지진규모 경험식을 많이 적용한다(Kyung, 2010; Kim and Jin, 2006; Jin *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2017). 이번 연구에서도 굴착단면에서 얻은 최후기 단층운동에 의한 변위($0.64 \sim 1.81$ m; 4.2절 참조)를 최대변위-모멘트 지진규모 경험식에 적용하여 지진규모를 구하였으며, 지진성 연결퇴적변형구조(그림 5a-c)로부터 추정되는 지진규모와 비교하였다.

굴착단면에서 관찰된 제4기 단층운동을 겪은 단

층면의 단층조선 선주각은 평균 30° 내외로 주향이동이 우세하므로 여러 경험식 중 주향이동단층에 적용하는 식 $M_w = 6.81 + 0.78 \log D(m)$ 을 사용하였으며, 이를 통해 구한 최후기 단층운동에 의한 모멘트 지진규모(M_w)의 범위는 약 6.7~7.0이다. 또한 unit E와 G에서 관찰된 지진성 연질퇴적변형구조로부터 모멘트 지진규모를 추정할 수 있다. unit E에서 쇄설성 암맥은 굴착단면에서 약 20~50 cm 크기로 다양하게 관찰되며, unit G에서는 30 cm 이상의 ball-and-pillow 구조가 관찰되었다(그림 5a-c). Atkinson *et al.* (1984)은 얇은 호수 내지 하성 기원의 퇴적층에서 일정 크기 이상의 연질퇴적변형구조 등을 포함한 액상화 현상은 최소 모멘트 지진규모가 5.5 이상일 때 발생한다고 보고하였다. 이에 근거하여, 굴착단면에서 관찰된 이러한 구조들로 추정되는 모멘트 지진규모는 퇴적환경과 기질 특성 등에 따라 달라질 수 있으나 최소 5.5 이상으로 추정되며, 최대변위-모멘트 지진규모 경험식으로 구한 규모와 부합된다.

고지진의 규모를 결정하는 여러 변수들 중에 단층의 변위와 모멘트 지진규모는 상관관계가 상대적으로 좋은 것으로 알려져 있다(Hyndman and Hyndman, 2006). 그러나 양산단층에서 발생한 보다 정확한 고지진 규모를 결정하기 위해서는 이번 굴착지점에서부터 연장되는 선형구조를 계속 추적하고 추가적인 제4기 단층지점으로부터 기하와 운동학적 특성 자료들을 수집하여 보다 많은 변수들을 이용한 통계적인 연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

7. 결론

경주시 단구리에서 양산단층을 따라 발생한 제4기 단층운동을 확인하기 위해 선형구조분석과 전기비저항탐사를 실시하여 굴착지점을 선정하였다. 굴착단면에서 관찰된 제4기 단층을 대상으로 상세 구조분석과 단층비지의 대자율이방성 분석을 실시하고, 변위량과 고응력 복원 그리고 제4기 퇴적층에 대한 루미네선스 연대를 도출하였다. 이를 바탕으로 단층 운동 횟수와 시기 그리고 지진규모 산정을 포함한 고지진학 해석을 수행하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) LiDAR 영상을 이용한 선형구조분석에서 제4기 단층운동이 보고된 벽계지점에서부터 거의

남-북 방향으로 연장되는 뚜렷한 선형구조를 따라 단층애로 추정되는 지형기복이 관찰되었다. 선형구조에 수직인 방향으로 실시된 전기비저항탐사에서 지표로 연장되는 저비저항 이상대가 확인되어 길이 7 m, 깊이 3.5 m의 굴착조사를 실시하고 양산단층의 제4기 단층운동을 확인하였다.

- 2) 굴착단면에는 기존 양산단층대의 단층핵으로부터 분지된 동쪽으로 경사진 7매의 단층이 관찰되며, 이들 단층은 제4기 동안 양산단층대가 우수향 역이동성 운동감각으로 최소 3 회 이상 다른 시기에 재활된 결과로 해석된다. 단층에 의해 절단된 제4기 퇴적층은 암상 특징에 따라 9개로 단위층으로 구분되며, 이들 중 2개 사질층에서 모멘트 규모 최소 5.5 이상의 지진에 의한 액상화와 유체화로 만들어진 연질퇴적변형 구조들이 관찰된다.
- 3) 단층비지의 대자율이방성(자기미세구조분석)과 야외에서 관찰된 단층이동자료를 이용한 고응력 복원결과, 굴착지점의 고지진 파열은 한반도의 현생 응력장인 동북동-서남서 방향의 최대수평응력(σ_{Hmax}) 하에서 발생한 것으로 해석된다.
- 4) 야외 횡절관계와 제4기 퇴적층에 대한 총 14개 지점의 OSL/IRSL 연대 결과는 제4기 동안 양산단층을 따라 첫 번째 단층운동은 142 ± 4 ka 이후, 두 번째 단층운동은 17 ± 1 ka 이전, 그리고 최후기 단층운동은 3.2 ± 0.2 ka 이후에 발생하였음을 지시한다.
- 5) 제4기 퇴적층의 겹보기 수직변위와 단층면과 조선의 자세를 이용하여 최후기 단층운동에 의해 발생한 총 변위를 0.64~1.81 m로 산출하였다. 이를 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식에 적용하면 발생한 지진규모(M_w)는 6.7~7.0이다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 지진방재인력양성사업과 극한재난대응기반기술개발사업(2017-MOIS31-006)의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 건설적이고 유익한 심사를 주신 익명의 심사위원분들께 감사드린다.

REFERENCES

- Astudillo, N., Roperch, P., Townely, B., Arriagada, C. and MaksaeV, V., 2008, Importance of small-block rotations in damage zones along transcurrent faults. Evidence from the Chuquicamata open pit, Northern Chile. *Tectonophysics*, 450, 1-20.
- Atkinson, G.M., Finn, W.D.L. and Charlwood, R.G., 1984, Simple computation of liquefaction probability for seismic hazard applications. *Earthquake Spectra*, 1, 107-123.
- 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.
- Bonilla, M.G., Mark, R.K. and Lienkaemper, J.J., 1984, Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 74, 2379-2411.
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S., 2001, *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, Massachusetts, 274 p.
- 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 evolution 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.
- Chang, T.W., 2001, Quaternary tectonic activity at the eastern block of the Ulsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 431-444 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Cho, H., Ha, S., Kang, H.-C., Kim, J.-S. and Son, M., 2019a, Tectonically controlled multiple stages of deformation along the Yangsan Fault Zone, SE Korea, since Late Cretaceous. *Journal of Asian Sciences*, 170, 188-207.
- Cheon, Y., Cho, H., Song, C.W. and Son, M., 2019b, Development of the intracontinental, continuous, narrow transpressional zone along the Sinnyeong Fault in the Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea. *Geosciences Journal*, 23, 21-36.
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S., Cho, H. and Son, M., 2017a, 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. and Song, M., 2017b, Geometry and kinematics of fault systems in the Uiseong block of the Gyeongsang Basin, and their roles on the basin evolution. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 241-264 (in Korean with English abstract).
- 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 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., Kim, Y.-S. and Y. 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, P., 2005, Geometric analysis of the Quaternary Eupchon Fault: An interpretation of trench sections. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 129-140 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Song, K.-Y., Kim, H.-C., Kim, Y.-H., Choi, P.-Y., Chwae, U.C., Han, J.-G., Ryoo, C.-R., Sun, C.-G., Jeon, M.S., Kim, G.-Y., Kim, Y.-B., Lee, H.-J., Shin, J.S., Lee, Y.-S. and Kee, W.-S., 2012, Active faults and seismic hazard map. NEMA, Seoul, 882 p.
- Choi, W.-H., 2003, Neotectonics of the Gyeongju-Ulsan area in the southeastern part of Korean Peninsula. Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea, 205 p (in Korean with English abstract).
- Chwae, U. and 57 *et al.*, 1998, Final report of the re-evaluation to the design base earthquake considering the Yangsan Fault. Technical Note of Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Korea Electric Power Corporation, KR-B-255~7-1998, 1694 p (in Korean).
- 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.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*. Cambridge University Press, New York, 463 p.
- Gahng, G., 2019, Characteristics of liquefaction phenomena induced by 11.15 Pohang earthquake. Master thesis, Pusan National University, Korea, 46 p (in Korean with English abstract).
- 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).
- 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, Gyeongju 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.
- Hyndman, D. and Hyndman, D., 2006, *Natural hazards and disasters*. Thomson Brooks/Cole, Belmont, 490 p.
- Im, C.B. and 150 *et al.*, 2003, Development of technology and background for seismic safety evaluation. Report KINS/GR-255, KINS (Korea Institute of Nuclear Safety), Daejeon, 1433 p (in Korean with English abstract).
- Jelinek, V., 1981, Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 63-67.
- Jin, K., Kim, Y.-S., Kang, H.C. and Shin, H.C., 2013, Study on developing characteristics of the Quaternary Gusan Fault in Uljin, Gyeongbuk, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 197-207 (in Korean with English abstract).
- Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82, 2981-2987.
- Kang, H.-C., Paik, I.S., Lee, H.I., Lee, J.E. and Chun, J.H., 2010, Soft-sediment deformation structures in Cretaceous non-marine deposits of southeastern Gyeongsang Basin, Korea: Occurrences and origin. *Island Arc*, 19, 628-646.
- 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).
- Kee, W.-S., Kim, B.C., Hwang, J.H., Song, K.-Y. and Kim, Y.-H., 2007, Structural characteristics of Quaternary reverse faulting on the Eupcheon Fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 311-333 (in Korean with English abstract).
- Kee, W.-S., Kim, Y.-H., Lee, H.-J., Choi, D.-L., Kim, B.-C., Song, K.-Y., Koh, H.-J., Lee, S.R., Gwang, Y.Y., Hwang, S.-H., Park, K.-G. and Sung, N.-H., 2009, South eastern fault variable research and DB construction, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 327 p (in Korean with English abstract).
- Khromovskikh, V.S., 1989, Determination of magnitudes of ancient earthquakes from dimensions of observed seismodislocations. In: D. Denham (Editor), *Quantification of Earthquakes and the Determination of Source Parameters*. *Tectonophysics*, 166, 269-280.
- Kim, H.T., Kim, Y.-S. and We, K.-J. 2014, Basic Concepts and Geological Applications of LiDAR. *Journal of Engineering Geology*, 24, 123-135 (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, 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, 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).
- Kim, Y.-S., Park, J.Y., Kim, J.H., Shin, H.C. and Sanderson, D.J., 2004, Thrust geometries in unconsolidated Quaternary sediments and evolution of the Eupchon Fault, southeast Korea. *The Island Arc*, 13, 403-415.
- Kyung, J.B., 1997, Paleoseismological study on the mid-northern part of Ulsan Fault by trench method. *The Journal of Engineering Geology*, 7, 81-90 (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., 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., 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., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Takemura, K., 1999b, 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., Ryoo, C.-R. and Chwae, U., 1999, Quaternary faults in the Yangnam area, Kyongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 1-14 (in Korean with English abstract).
- 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, Gyungju-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, T.-H., Choi, J.H., Son, M. and Gahng, G., 2018, Quartz OSL dating of core samples from sand volcano sites, induced by Pohang Earthquake in 2017. 2018 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), 334 p (in Korean).
- Lee, Y., Cheon, Y., Ha, S., Kang, H.-C., Choi, J.-H. and Son, M., 2017, Geometric and kinematic characteristics of the Quaternary fault at Seoee site, in Goseong-gun, Gyeongsangnam-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 115-127 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.H., 2003, Quaternary faults in the eastern area of the Ulsan fault (Korea). Master thesis, Pusan National University, Korea, 74 p (in Korean with English abstract).
- Mason, D.B., 1992, Earthquake magnitude potential of active faults in the Intermountain Seismic Belt from surface parameter scaling. Master thesis, University of Utah, Salt Lake City, U.S.A.
- McCalpin, J.P., 1996, *Paleoseismology*. Academic Press, San Diego, 588 p.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Oh, J.-S. and Kim, D.E., 2019, Lineament extraction and its comparison using DEMs based on LiDAR, digital topographic map, and aerial photo in the central segment of Yangsan Fault. *Journal of the Korean Geographical Society*, 54, 507-525 (in Korean with English abstract).
- 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).
- O'Leary, D.W., Friedman, J.D., and Pohn, H.A., 1976, Lineament, linear, lineation, some proposed new standards for old terms *Geological Society of America*, 87, 1463-1469.
- Reedman, A.J., and Um, S.H., 1975, *The geology of Korea: Seoul, Korea*. Geological and Mining Institute of Korea, 139 p.
- Rochette, P., Jackson, M. and Aubourg, C., 1992, Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Review of Geophysics*, 30, 209-226.
- Ryoo, C.-R., 2009, A report for the Quaternary Gaegok 6 Fault developed in the mid-eastern part of Ulsan Fault

- Zone, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 42, 635-643 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Chwae, U., Choi, S.-J. and Son, M., 2001, Quaternary faults in Hwalseong-ri, Oedong-up, Gyeongju, Korea. *KIGAM Bulletin*, 5, 24-33 (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, U., 2002, Quaternary faults in Gaekok-ri, Oedongup, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 309-323 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Yang, K., Lee, S.-W. and Kim, I.-S., 1996, Quaternary fault in the vicinity of the Ulsan fault. *The Journal, College of Education, Pusan National University, Pusan, Korea*, 33, 311-327 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Slemmons, D.B., 1982, Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. In *proceeding International Earthquake Microzonation, Conference, Seattle, WA, Earthquake Engineering Research Institute*, 1, 110-130.
- Solum, J.G. and van der Pluijm, B.A., 2009, Quantification of fabrics in clay gouge from the Carboneras fault, Spain and implications for fault behaviour. *Tectonophysics*, 475, 554-562.
- 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).
- 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.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics (second edition)*. Cambridge University Press, 770 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).
- Um, S.H., Lee, D.W. and Park, B.S., 1964, Geological map of Korea, Pohang Sheet, 1:50,000. *Geological Survey of Korea*, 19 p (in Korean with English abstract).
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Xu, S., Nieto-Samaniego, A.F. and Alaniz-Álvarez, S.A., 2009, Quantification of true displacement using apparent displacement along an arbitrary line on a fault plane. *Tectonophysics*, 467, 107-118.
- 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).

Received : February 28, 2020

Revised : April 22, 2020

Accepted : April 27, 2020