

고지진학적 방법을 이용한 울산단층 남부지역에서의 단층활동 특성 연구

권오상¹ · 박기웅¹ · Naik Sambit Prasanajit² · 신현조² · 김영석^{1,2,*}

¹부경대학교 지구환경과학부

²부경대학교 활성단층 및 지진재해저감연구소

요 약

역사지진과 고지진학적 자료에 기초하면 우리나라에서 대규모 지진발생 가능성이 가장 높은 단층대 중의 하나인 울산단층대에 대한 지진발생 특성을 이해하는 것은 지진재해의 저감에 매우 중요하다. 북북서 방향으로 발달하는 울산단층대는 역단층이 우세한 사교이동단층으로 알려져 왔으나, 울산단층 남부지역에서 단층을 따른 지진발생 특성을 이해할 수 있는 고지진학적 연구는 상대적으로 빈약한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 원격탐사와 야외조사를 통해 추적한 울산광역시 북구 창평동 일원에서 발견된 활성가능 단층에 대한 고지진학적 특성을 규명하고자 하였다. 먼저 LiDAR를 통해 획득된 영상, 항공사진, UAV 등을 활용하여 지형분석을 실시하였고, 전기비저항탐사 결과를 바탕으로 굴착조사를 실시하였다. 굴착단면에서 퇴적층을 입자크기, 역의 종류와 함량, 원마도, 분급, 색상 등을 기초로 상부로부터 5개의 단위층으로 구분하였다. 단층은 동쪽 경사를 보이는 2매를 관찰하였으며, 주 단층면에서 관찰되는 단층조선의 특성은 역이동성운동이 우세한 단층임을 지시한다. 절단된 퇴적층의 걸보기 수직변위와 단층조선을 근거로 계산된 최후기 단층운동에 의한 실제변위량은 1.41 m로 도출되었으며, 이를 최대변위-모멘트 지진규모 경험식에 대입하여 얻어진 모멘트 지진규모(M_w)는 약 6.6이다. 이 값은 1643년 07월 24일 울산연안에서 발생한 지진의 추정 모멘트 지진규모 약 6.5~6.6과 잘 일치한다. 추후 최후기 운동시기 및 변위율 등의 도출은 추가연구를 통해 수행할 예정이다.

주요어: 울산단층 남부지역, 굴착조사, 지진변위, 모멘트 규모, 역사지진

Ohsang Gwon, Kiwoong Park, Sambit Prasanajit Naik, Hyeon-Cho Shin and Young-Seog Kim, 2021, A study on the characteristics of fault activity in the southern part of the Ulsan fault using paleoseismic method. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 2, p. 109-121

ABSTRACT: Based on historical earthquakes and paleoseismical data, the Ulsan fault zone has a higher potential of large earthquakes in Korea. Thus, it is very important to understand the paleoseismic characteristics of the Ulsan fault in order to reduce future earthquake hazards. The NNW-trending Ulsan fault has been known as a reverse dominant fault. However, paleoseismic studies to understand the characteristics of earthquake occurrence pattern along the Ulsan fault have rarely been carried out, especially in the southern segment of the fault. In this study, we describe the paleoseismic characteristics of an active fault found in Changpyeong-dong, Buk-gu, Ulsan, which was traced through remote sensing and field surveys. First of all, we traced the lineament based on geomorphic analysis using LiDAR images, aerial photographs, and UAVs. Final excavation survey was conducted based on electrical resistivity survey results. In the trench section, the sediment stratigraphy was divided into 5 layers based on grain size, type, content, roundness of gravel, degree of sorting, and color. Two east dipping faults are developed and slickenlines observed on the main fault plane indicate predominantly reverse movement. The true displacement associated with the last faulting event is calculated from the apparent vertical displacement of the displaced sediment and unconformity (~ 1.41 m). The moment magnitude was estimated using the maximum displacement-moment magnitude empirical equation (~ M_w 6.6). The estimated magnitude is well consistent with the inferred magnitude (~ M_w 6.5~6.6) of the earthquake occurred around the Ulsan coast in 1643. The time of the latest faulting and slip rate of the fault could be verified from future further studies.

Key words: southern Ulsan fault, trench survey, seismic displacement, moment magnitude, historical earthquake

* Corresponding author: +82-51-629-7909, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

(Ohsang Gwon, Kiwoong Park and Young-Seog Kim, Dept. of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Sambit Prasanajit Naik, Hyeon-Cho Shin and Young-Seog Kim, Active Fault & Earthquake Mitigation Institute, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

1. 서론

1960년 칠레 발디비아 지진($M_w=9.5$), 1964년 알래스카 프린스 윌리엄사운드 지진($M_w=9.2$), 2004년 인도네시아 수마트라 지진($M_w=9.1$), 2011년 일본 토호쿠 지진($M_w=9.0$)과 같은 대규모 지진들을 통해 방출되는 에너지는 우리의 상상을 초월할 정도이기 때문에 그 피해는 매우 심각하다. 또한 현재의 기술로는 지진을 정확히 예측하는 것이 불가능하고, 현재의 내진설계 기술로는 이러한 큰 지진에 수반된 지표파열에 의한 지진재해를 극복하는 데에도 한계

가 있다. 대부분의 지진피해는 규모 6 이상의 큰 지진에 의해 발생하기 때문에 지진을 발생시키는 활성 단층을 추적하여 이들의 특성을 파악하고, 이에 대비하는 것은 지진방재에 매우 중요하다.

한반도는 유라시아판의 연변부에 위치하지만, 판의 경계부에서 다소 떨어져 있어(그림 1a) 대규모 지진이 일본, 대만 등의 국가에 비해 상대적으로 자주 발생하지는 않는다. 그러나 최근 한반도 일대에서 중규모 이상 지진의 발생빈도가 증가하고 있으며, 경주지진(그림 1b; 2016년 09월 12일, $M_w=5.5$; Kim et al., 2017)과 포항지진(2017년 11월 15일, $M_w=5.4$; Kim

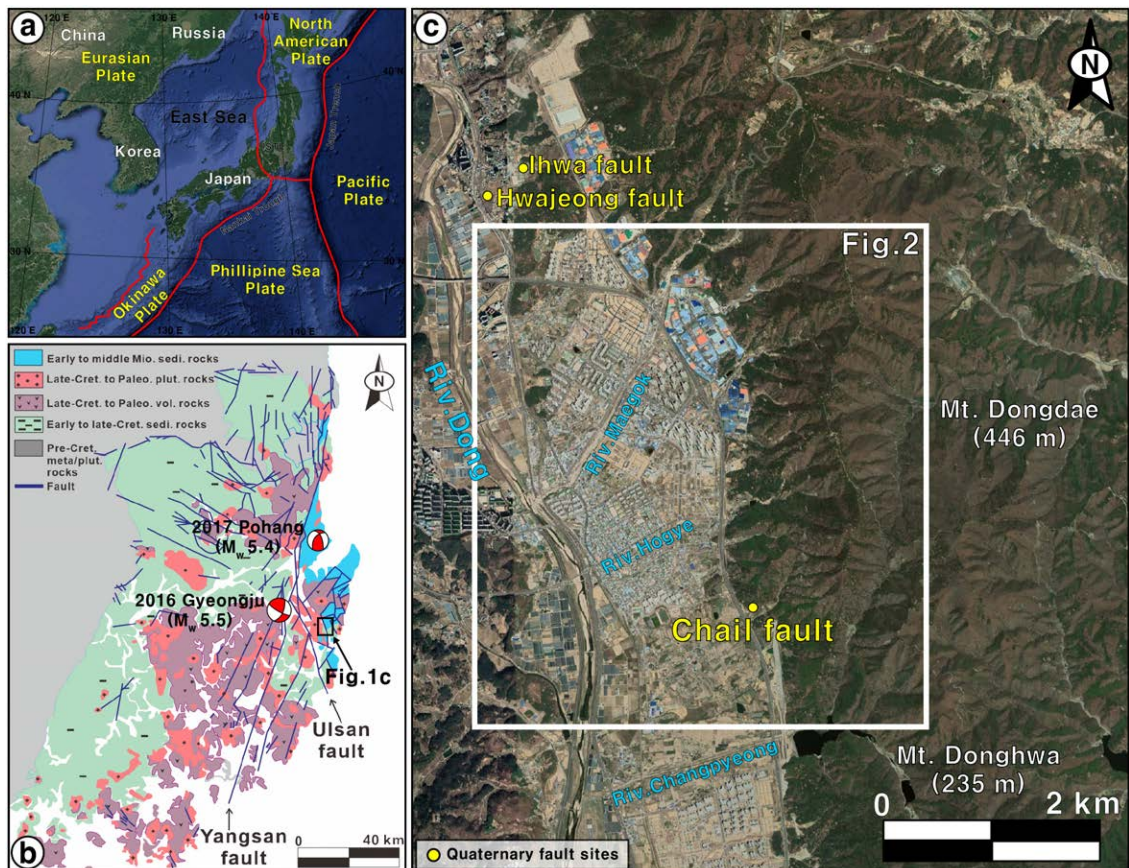


Fig. 1. (a) Tectonic map around the Korean Peninsula (modified from Schellart and Rawlinson, 2010). (b) Simplified geological map of the Gyeongsang Basin, SE Korea and major faults (modified from Chough and Shon, 2010; Son et al., 2013). Epicenters for the Gyeonju earthquake (M_w 5.5, 12th September 2016) and the Pohang earthquake (M_w 5.4, 15th November 2017). (c) Topographic overview of the study area.

et al., 2018)이 발생하면서 원전시설과 공업단지 등 국가 주요 시설물이 밀집해 있는 한반도 남동부의 지진 안전성에 대한 우려가 제기되었다. 따라서 한반도가 이제는 지진의 안전지대가 아니라는 인식을 바탕으로 판경계에 비해 상대적으로 긴 재발주기를 가진 우리나라에서도 중·대규모의 지진에 대한 고지진학적 정보를 획득하고 지진재해에 대비하기 위한 활성단층 연구의 필요성이 부각되었다.

한반도에서도 비록 그 주기는 길지만 지표파열을 수반한 규모 6 이상의 지진을 발생시킨 제4기 단층운동의 증거가 최근 한반도 남동부의 양산단층대(Okada et al., 1994; Kyung et al., 1999a, 1999b; Kim and Jin, 2006; Jin et al., 2013; Lee et al., 2015; Cheon et al., 2020; Song et al., 2020), 울산단층대(Ryoo et al., 1996, 2001; Kyung, 1997; Chang, 2001; Ryoo, 2009; Kim et al., 2020) 그리고 연일구조선(Kim et al., 1998; Son et al., 2002)을 중심으로 많이 보고되고 있다. 대규모의 지진들은 일반적으로 최근 지질시대에 활동하였던 활성단층들을 따라 반복적으로 발생하므로, 이들 단층의 위치, 단층면의 자세, 마지막 활동시기, 변위량, 지진재발주기, 최대 지진규모 등의 특성을 파악하고 규명하는 것이 지진재해에 대비하는 최선의 방법으로 알려져 있다.

역사지진과 고지진학적 자료에 기초한 대규모 지진 발생 가능성이 우리나라에서 가장 큰 단층대 중의 하나인 북북서 방향으로 발달하는 울산단층대는 역단층이 우세한 사교이동단층(Choi, 2003)으로 알려져 왔으나 이 단층을 따른 지진 발생 특성을 이해할 수 있는 고지진학적 연구는 상대적으로 빈약한 실정이다. 본 연구에서는 울산단층 남부지역(울산광역시 북구 창평동)에서의 굴착조사에서 관찰된 단층의 발달 특성에 대한 연구 결과를 보고하고자 한다. 먼저 선형구조 추출을 위해 LiDAR (Light Detection And Ranging)를 통해 획득된 영상, 항공사진, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 등을 활용한 지형분석과 전기비저항탐사를 실시하였고, 이를 기반으로 굴착조사를 실시하였다. 굴착단면에서 미고결 지층과 단층의 절단 관계에 대한 상세한 분석뿐만 아니라 겹보기 변위, 단층조선 등을 활용하여 실제 변위량을 도출하였으며, 이를 바탕으로 최대변위-모멘트 지진규모 경험식을 이용하여 이 단층운동에 수반된 최대 지진규모를 산정하였다.

2. 연구지역의 지질 및 기존 연구 결과

연구지역은 행정구역상 울산광역시 북구 창평동에 위치하는 지역으로 경상분지의 동부에 위치한다. 이 지역은 중생대 백악기 퇴적암과 안산암으로 주로 이루어져 있으며, 이를 중생대 백악기~신생대 고제 3기 화성암류들이 관입하고 있다(그림 2; Park and Yoon, 1968).

연구지역에서의 기존 단층연구는 차일지점에서 제 4기 단층운동이 보고되었다(그림 1c; Son et al., 2001). 차일지점은 울산광역시 북구 창평동 원지저수지에서 발원한 동-서 방향의 하천변 자연노두에서 발견되었으며, 단층은 노두에서 나타나는 퇴적층의 최하부를 절단하고 있다. 이 지점의 퇴적층은 최하부에 회색 내지 암회색의 각력과 담회색의 사암이, 퇴적층의 상위는 원마도와 분급이 불량한 자갈층이, 최상부는 적갈색 토양층이 분포한다. 약 1 cm의 단층점토를 포함한 주 단층은 N22°W/26°NE의 자세를 가진다. 주 단층 주변에서 최하부층의 층리 경사는 거의 수직이지만, 주 단층으로부터 약 250 m 서쪽에서는 층리 경사가 거의 수평에 가까워 Son et al. (2001)은 이를 역단층운동에 의한 끌림습곡작용으로 해석하였다. 기존 연구에서 절단된 층 내에 있는 탄화물의 ^{14}C 연대를 측정된 결과, 하부 지층에서는 측정한계인 5만 년을 벗어났으며, 상부 지층에서는 $47,363 \pm 12,535$ 년으로 보고되었다(Son et al., 2001). 그러나 이는 ^{14}C 연대의 신뢰한계를 넘는 오차범위로 신뢰할 만한 자료로 보기는 어려워 단층의 최후기 활동시기는 여전히 의문으로 남아 있다. 이번 연구에서는 차일지점의 연장을 추적하여 연구지역에서의 고지진학적 정보를 도출하여 이 단층활동에 수반된 지진규모를 추정하고자 하였다.

3. 지형분석 및 전기비저항탐사 결과

3.1 지형특성

연구지역 일원은 지형적으로 동측의 동대산(해발고도 446 m)과 동화산(해발고도 235 m)을 포함하는 북서-남동 방향의 산맥이 발달해 있다(그림 1c). 수계로는 동측 산지에서 시작된 하천인 창평천, 호계천, 매곡천이 동천에 합류되어 흐르며, 동천은 남쪽으로 흘러 태화강에 합류된다. 이 지역 일원에는 하안단

구 지형이 발달해 있는데 이는 동측 산지에서 발원한 하천에 의해 공급된 퇴적물에 의해 형성된 것으로 보인다.

지형분석은 항공 LiDAR, UAV, 과거 항공사진, 위성영상 등을 활용해 실시하였다. 특히, LiDAR는 우리나라와 같이 식생 밀도가 높은 지역에서의 정밀한 지형분석에 적합한 방법이다(Oh and Kim, 2019). 항공 LiDAR를 이용해 획득된 고해상도(1 m 공간해상도) 수치표고모델(Digital Elevation Model; DEM)을 GIS 프로그램을 활용해 분석하였다. 항공 LiDAR를 통해 획득된 영상을 활용하여 선형구조를 분석한 결과, 연구지역 주변에서는 매우 뚜렷한 수조의 선형구조들이 발달한다. 그 중 가장 뚜렷한 선형구조의 방향은 남-북 내지 북북서-남남동 방향의 선형구조이다. 수치표고모델을 활용하여 제작한 경사도 영상에서 경사가 급격하게 변하는 천이점(knick point)을 인지하였다(그림 3c, 3d). 과거 항공사진 분석에

는 1954년에 촬영된 항공사진을 활용하였다. 항공사진을 분석한 결과 우수향 주향이동에 의해 형성된 굴절하도(deflected stream)를 인지하였으며, 이는 단층운동에 의해 형성된 지형으로 해석된다(그림 4a). 이를 통해 인지된 선형구조에 기초하여 단층의 분포 특성을 추정하였다(그림 3).

3.2 전기비저항탐사

전기비저항탐사법은 전류의 흐름을 이용하는 방법으로, 이는 지하매질의 종류, 밀도, 투수율 등에 영향을 받아 전기비저항값의 차이를 보인다(Telford et al., 1990). 단층대 주변은 불연속면에 의해 전기비저항값이 낮기 때문에, 굴착조사 전에 전기비저항탐사를 이용하여 지하구조를 파악하기에 용이하다. 선형구조 분석 결과를 바탕으로 전기비저항탐사는 선형구조에 수직 방향으로 측선을 설계하여 총 2개 구간에서 실시하였다(그림 4a; ERT_01, 02).

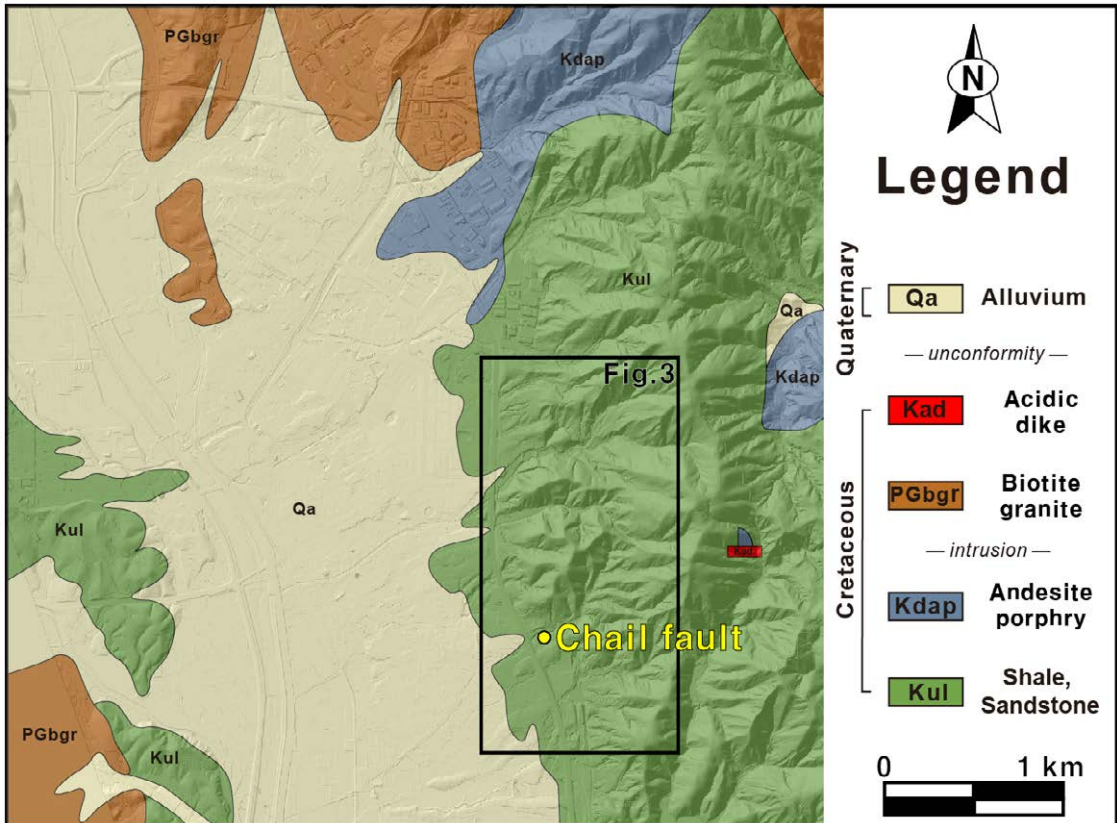


Fig. 2. Geological map of the study area (modified from Park and Yoon, 1968). The study area is composed of mostly Cretaceous shale and sandstone underlying Quaternary deposits.

ERT_01은 기존 보고된 차일지점 남쪽에서 동북-서남서 방향으로 측선 길이 110 m, 전극 간격 5 m, 전극개수 23개, 전개개수 n=8로 수행하였으며, 쌍극자 배열법을 사용하여 측정된 비저항 값은 13~336 Ω·m 범위를 보인다. 그 결과 동측이 서측에 비해 상대적으로 높은 비저항값을 보이며, 이들 경계(55~65

m 구간)에서 저비저항 이상대가 인지되었다(그림 4c). 이 지점은 지표로 연장되며 북북서-남남동 방향의 선형구조와 일치한다. ERT_02는 ERT_01의 남동쪽 약 250 m 지점에서 실시하였으며, 동북동-서남서 방향으로 측선 길이 120 m, 전극 간격 5 m, 전극개수 25 개, 전개개수 n=8로 수행되었으며, 쌍극자 배열법을

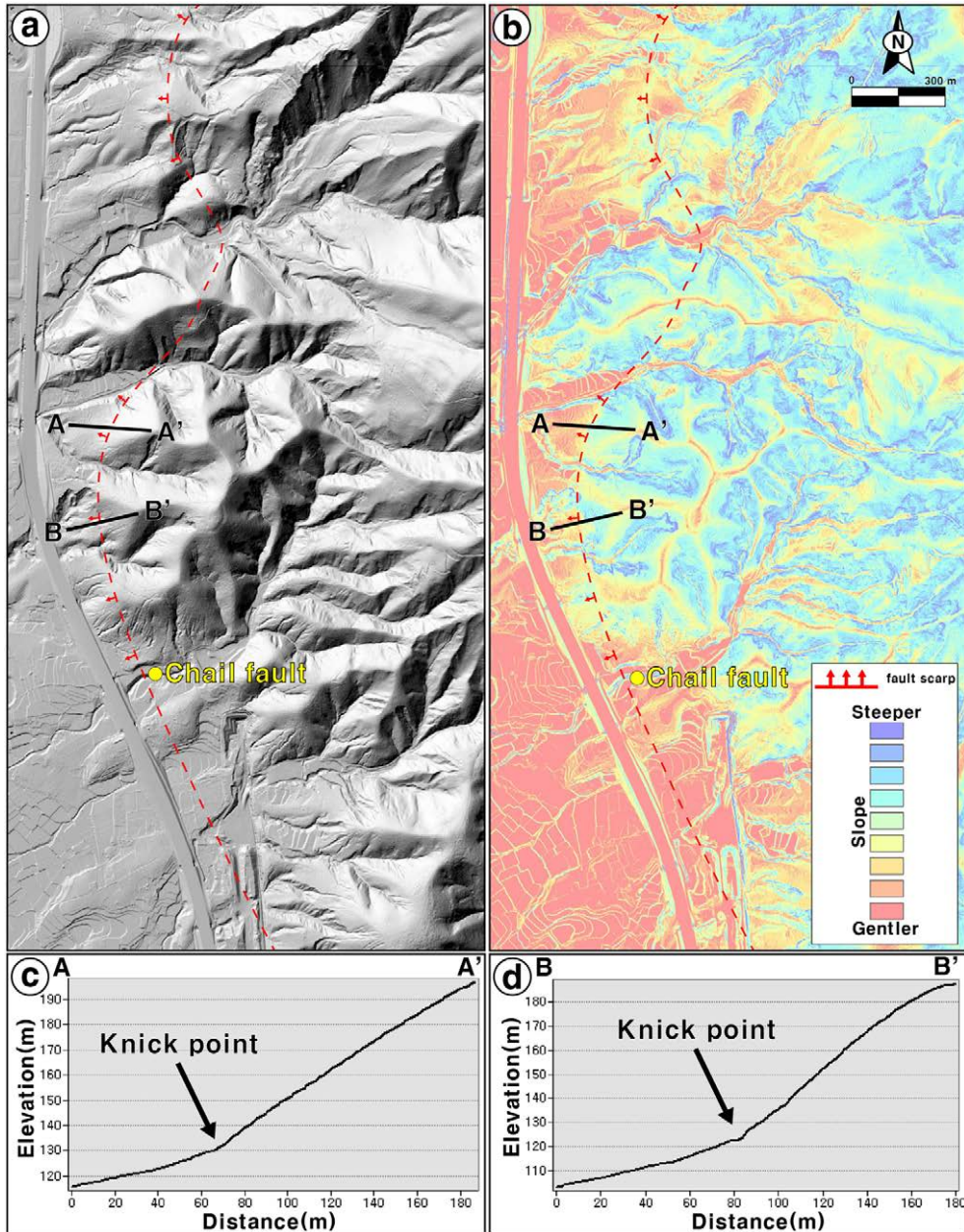


Fig. 3. (a) LiDAR image (taken in 2017) showing a lineament. (b) DEM derived slope image showing lineament. (c) Topographic profile of A-A'. (d) Topographic profile of B-B'.

사용하여 측정된 비저항 값은 13~428 Ω·m 범위를 보인다. 그 결과 60~75 m 구간에 하부 저비저항 이상대가 인지되며, 상부 연장은 55~80 m 구간에 해당한다(그림 4e). 이 이상대 역시 북북서-남남동 방향의 선형구조와 일치한다. 2개의 구간에서 실시한 전기비저항탐사의 결과를 종합하면, 저비저항 이상대는 선형구조와 잘 일치하며 기존 보고된 차일지점의 연장지점에 발달해 있다. 이러한 결과를 바탕으로 기반암까지 지질구조적 불연속면(단층 등)이 연장되는 것으로 해석하였다.

4. 차일2지점에서의 굴착조사 결과

기존의 차일지점에서 보고된 단층(Son *et al.*, 2001)은 본 연구에서 실시한 지형분석 결과 및 전기비저항탐사의 비저항이상대와 잘 일치한다. 그러나 기존

보고된 연구에서는 이 단층에 의한 퇴적층의 절단여부만 보고하였고, 단층작용에 수반된 변위나 영향을 받은 퇴적층의 연대를 명확히 도출하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 상대적으로 젊은 제4기 퇴적층을 확인할 수 있고 단층활동에 수반된 변위도 도출할 수 있는 새로운 위치를 선정하여 굴착조사를 실시하였으며, 이를 기존 차일지점과 구분하기 위하여 차일2지점으로 명명하였다. 굴착은 동북동-서남서 방향으로 길이 약 15 m, 깊이 약 6 m, 폭 약 3 m로 실시하였다(그림 5).

굴착단면에는 동쪽으로 경사진 2매의 단층들(F1, F2)이 기반암과 퇴적층을 절단하고 있음이 관찰된다(그림 5b). F1 단층을 경계로 동측의 상반은 해양성으로 추정되는 고화가 덜 된 사질의 퇴적암으로 구성되는 반면, 서측의 하반은 신생대 신제3기로 추정되는 퇴적층과 제4기로 추정되는 미고결 퇴적층

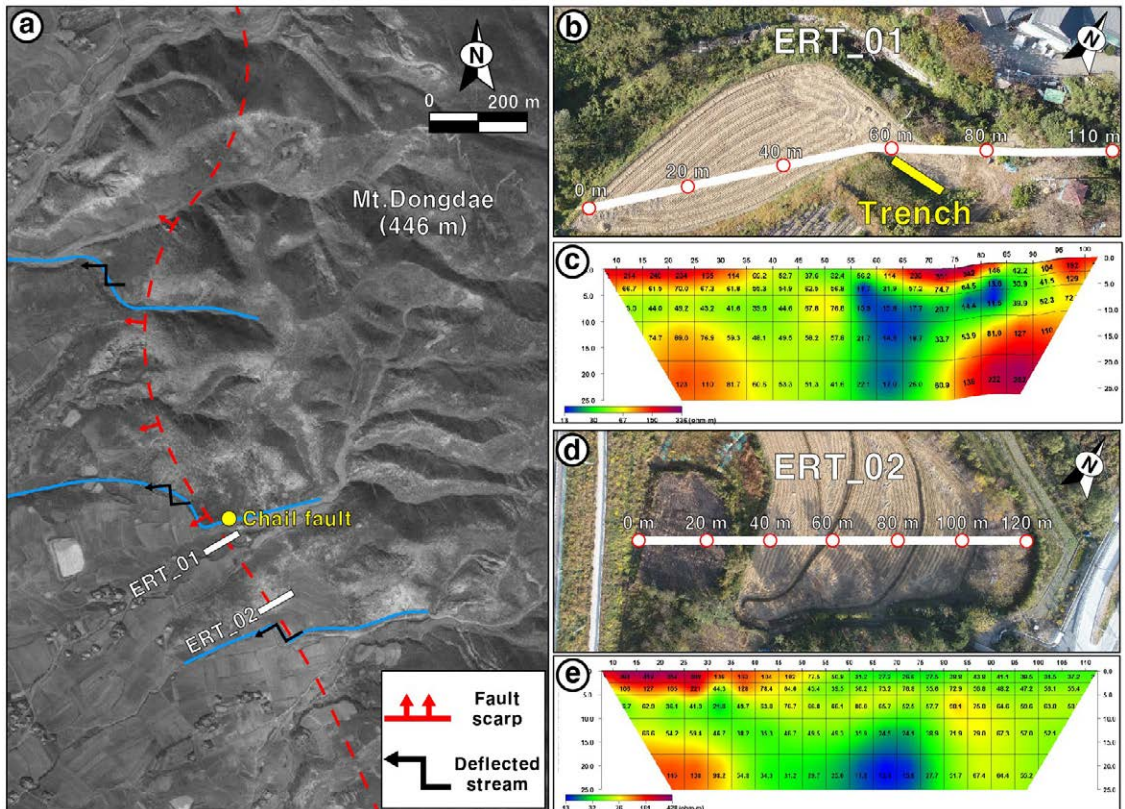


Fig. 4. (a) Aerial photograph (taken in 1954) showing lineament. Note that small streams (blue lines) are deflected across the inferred fault scarp. (b) Location of the electrical resistivity tomography survey (ERT_01). (c) Result of subsurface 2-D electric resistivity structure (ERT_01). (d) Location of the electrical resistivity tomography survey (ERT_02). (e) Result of subsurface 2-D electric resistivity structure (ERT_02).

으로 이루어져 있다. 하반의 퇴적층을 구성 입자의 크기, 역의 종류 및 함량, 분급, 색상 등을 근거로 상부로부터 Unit A에서 Unit D-2까지의 단위층들로 세분하였다(그림 5b). Unit A는 신생대 제4기에 퇴적된 산록퇴적물로 추정되며 거력으로 구성되어 있으며 결합력이 약하여 쉽게 부서지는 특징을 보인다. 거력은 원마도와 분급이 불량하고, 흑갈색의 모래 내지 실트가 이들 사이를 채우고 있다. Unit A의 역들은 삼각전단대(trishear zone)를 따라 장축이 배열되어 있다. Unit B는 신생대 제4기 퇴적층으로 추정되며, 역지성으로 원마도와 분급도가 불량한 자갈 내지 왕자갈들 사이를 황색인 모래 내지 세립질 모래의 기질이 채우고 있다. Unit B와 Unit C의

부정합면은 단층대에 가까워질수록 상부로 끌림속곡 작용을 받아 변형되어 있다. Unit C는 신생대 신제3기 퇴적층으로 추정되며, 역지성으로 원마도와 분급도가 보통인 자갈 내지 왕자갈들 사이를 갈색인 모래 내지 실트의 기질이 채우고 있다. Unit D도 신생대 신제3기 퇴적층으로 추정되며, 이들의 구성성분은 유사하나 색상이 다른 층이 발달하여 색상에 따라 2개의 층으로 세분하였다. Unit D-1은 기질지성으로 청색인 모래 내지 실트의 기질부와 원마도 및 분급도가 보통인 잔자갈 내지 자갈로 구성되어 있으며 실트 함량이 Unit C 보다 높다. Unit D-2는 Unit D-1과 구성은 거의 동일하지만 갈색을 띠고 있어 이들을 구분하였다. Unit D-2에 협재되어 있는

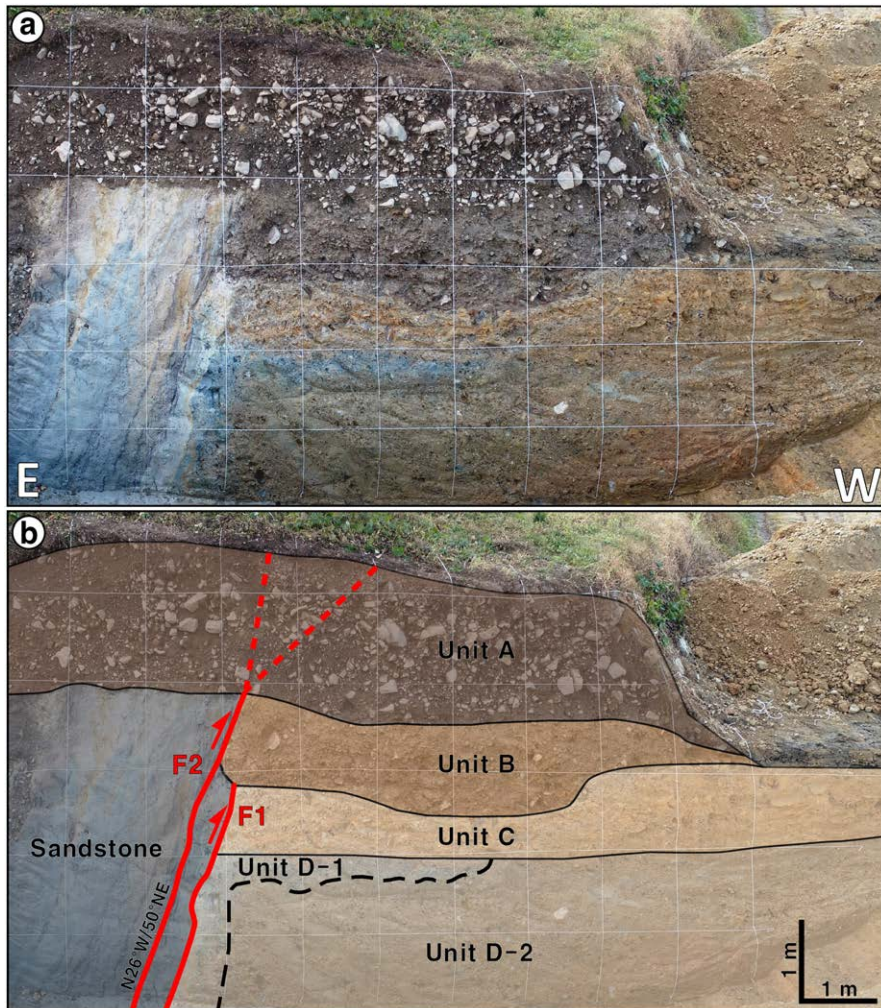


Fig. 5. (a) Photomosaic of the trench section on the southern wall. (b) Detailed sketch of the trench section.

모래층 층리의 자세는 $N10^{\circ}W/50^{\circ}SW$ 로 측정되었으며, 이는 단층면 하반에 위치한 Unit D-2가 단층운동 시 끌림습곡 작용에 의해 고각으로 변형되었음을 보여준다. 상반의 퇴적암은 청색의 세립질 사암이다. 퇴적암 내에 발달해 있는 층리의 자세는 $N24^{\circ}E/60^{\circ}SE$ 로 측정되었으며, 이 지층이 주변의 다른 지역에 비해 고각을 보이는 것은 단층면 상반에 위치한 퇴적암이 단층활동에 의해 고각으로 경동되었음을 지시한다.

Unit D-1은 청색을 띠지만 이들이 단층대 주변과 Unit C의 하위에만 일부 분포하는 것으로 보아 이는 단층대를 따라 유입된 유체에 의한 변질작용의 영향으로 해석된다. 전술한 바와 같이, Unit D에서 역의 함량은 Unit C 보다 적으며 입도는 Unit C 보다 작다. 따라서 Unit C가 퇴적된 이후, 강우로 공급된 유체가 단층손상대를 따라 지하로 침투할 때 구성 입자가 상대적으로 굵은 Unit C는 잘 통과하지만 입자가 상대적으로 가는 Unit D-1의 경계에 도달해서는 유체가 비교적 오래 머물면서 Unit D-1이 변질되었을 것으로 판단된다. 이는 Unit D-1이 단층대의 주위와 Unit C의 하부에만 부분적으로 발달하는 것을 통해 유추할 수 있다. 단층대는 유체의 이동에 중요한 역할을 하는 지질구조이며(e.g., López and Smith, 1995; Lee *et al.*, 2009), 특히 단층손상대는 단층대의 유체유동을 제어하는 중요한 요소임이 잘 알려져 있다(e.g., Caine *et al.*, 1996; Faulkner *et al.*, 2010; Bense *et al.*, 2013).

굴착단면에서 수조의 단층면이 관찰되지만 매우 뚜렷한 단층면은 2개로 Unit B까지 절단하는 F2 단층은 $N26^{\circ}W/50^{\circ}NE$ 의 자세를 가지며, LiDAR를 통해 획득된 영상에서 확인된 북서-남동 방향의 선형구조와 유사한 방향성을 가진다. F1 단층은 Unit C, Unit D까지 절단하고 Unit B에 의해 피복된다. 단층대를 따른 열수와 지하수에 의한 변질로 단층대와 퇴적층의 경계를 명확하게 구분하기는 어렵지만, 단층들 주변에는 색상을 달리하는 수조의 단층비지가 단층의 상하반에 약 0.5~1 m의 폭으로 발달하고 있다. 대부분 열수변질을 받은 단층비지들로 구성되며 단층대를 따라 수차례에 걸쳐 주입된 양상을 보인다. 특히 동편 상반에서 관찰되는 단층대에는 폭이 약 2~3 cm 인 청회색 단층비지가 수조 관찰되고 이들이 Unit B까지 절단하고 있는 것으로 보아 이들

이 거의 최후기 단층운동에 수반된 단층비지로 해석된다. 단층조선은 F2 단층면에서 관찰되었으며, $72^{\circ}N$ 의 선주각으로 역이동성이 우세한 우수향 주향이동 운동감을 보여준다.

5. 토 론

5.1 차일2지점에서의 단층운동사

울산단층대 중부지역에서는 상대적으로 많은 제4기 단층 지점이 보고되었지만(Okada, 1998; Choi, P.-Y. *et al.*, 2002; Kyung, 2010; Choi, S.-J. *et al.*, 2014), 울산단층대 남부지역에서의 보고(Son *et al.*, 2001)는 빈약한 실정이다. 따라서 본 연구는 울산단층대 남부의 운동특성 파악을 위해 울산단층대 남부를 중심으로 추적조사를 실시하였다. 아래에서는 이번 굴착단면에서 관찰되는 미고결 퇴적층과 단층과의 상관관계 분석에 기초하여 단층운동의 횡수와 운동사에 대해 토의하고자 한다.

이를 위해 노출된 굴착단면(그림 5)의 분석 결과를 바탕으로 차일2지점에서의 단층운동 진화사를 수립하여 이를 진화모델로 도시하였다(그림 6). 최

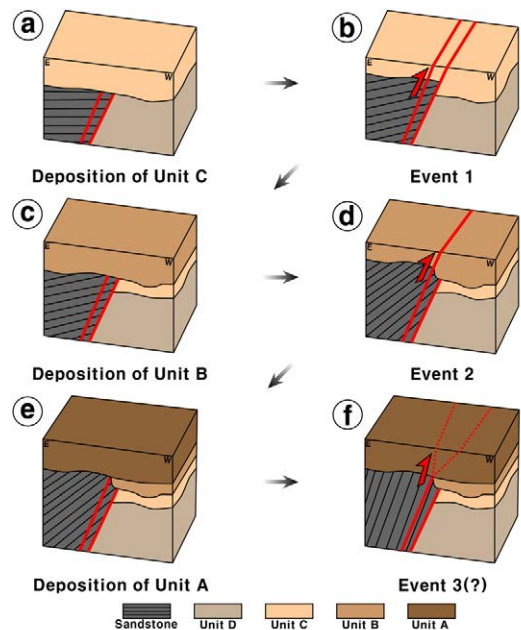


Fig. 6. Schematic diagrams for reconstruction of faulting events at the trench site. Based on the cross-cutting relationships between the faults and unit layers, at least two faulting events are recognized.

초에 제4기 이전에 기반암 내에 기존에 발달한 단층들(F1, F2)이 존재하였으며, 지진 휴지기 동안 Unit C가 기반암과 Unit D를 부정합으로 피복하며 퇴적되었다(그림 6a). 이후 첫 번째 단층운동으로 F1, F2 단층이 역단층 운동을 하며 재활하여 Unit C를 절단하였다(Event 1; 그림 6b). 첫 번째 단층운동으로 만들어진 지형 기복과 상반에서의 Unit C는 이후 지진 휴지기 동안 삭박작용으로 거의 평탄화되었으며 Unit B가 퇴적되었다(그림 6c). 이후 F2 단층이 재활하는 두 번째 단층운동이 발생하여 Unit B를 절단하였다(Event 2; 그림 6d). 두 번째 단층운동으로 만들어진 지형 기복은 이후 지진 휴지기 동안 Unit A의 퇴적 및 삭박작용으로 거의 평탄화 되었다(그림 6e).

이 두 번째의 지진사건 이후 퇴적된 Unit A의 절단 여부와 단층에 의한 변형은 명확하게 인지되지 않아 실질적으로 Unit A가 이후의 단층운동에 의해 영향을 받았는지는 판단하기 어렵다. 그러나 Unit A 내에서 단층대에서 멀어질수록 역의 장축은 대부분 수평하게 배열되어 있지만, F2 단층 부근에서는 역들의 장축 배열이 삼각전단대(trishear zone)를 형성하고 있음이 관찰된다. 이는 Unit A가 퇴적된 이후에 추가적인 단층활동(Event 3; 그림 6f)이 있었을 가능성을 지시한다. 하지만 Unit A는 미고결 퇴적물로 단층점토와 같은 단층활동의 직접적인 증거가 없으며, Unit A의 하부경계가 단층대를 중심으로 확실한 변위를 기록하고 있지 않기 때문에 정확한 단층활동의 증거 확인을 위해 미구조 분석 등의 정밀한 추가조사가 필요하다. 이상의 연구 결과를 종합하면, 본 굴착지점에서의 제4기 이후 단층활동은 최소 2회 이상으로 해석된다.

5.2 차일2지점에서의 단층변위

지진활동에 수반된 지표변형에 의한 변위는 지진 규모와 매우 밀접한 관련이 있음이 잘 알려져 왔다(e.g., Wells and Coppersmith, 1994). 따라서 굴착조사를 통한 고지진학적 연구에서 지진규모를 추정하기에 가장 용이한 방법은 한 번의 지진활동에 수반된 변위를 도출하는 것이다. 이러한 변위는 절단된 동일한 지층을 단층의 상하반에서 인지할 수 있다면 상대적으로 쉽게 도출할 수 있으나, 실질적으로 이번 경우와 같이 대부분 상반의 퇴적층은 이후의 침식삭박 작용으로 대부분 유실되기 때문에 이를

추적하기 어렵다. 따라서 이러한 경우는 하반에 발달하는 퇴적층이나 봉적쇄기층의 두께 등을 이용하여 한 번의 지진활동에 수반된 변위를 대략적으로 추정할 수 있다. 그러나 일반적으로 굴착단면은 단층의 주향에 정확히 수직하기 어렵고, 단층의 운동벡터도 경사에 평행하지 않기 때문에 굴착단면에서 직접 실제변위(true displacement)를 도출할 수 있는 경우는 많지 않다. 그러나 단면에서 한 번의 단층활동에 수반된 겉보기변위(apparent displacement)를 구할 수 있다면 최후기 단층운동의 실제변위는 겉보기 변위, 기준면의 경사각, 단층조선의 선주각 등의 정보를 활용하여 계산할 수 있다(e.g., Xu *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2020).

단층 상반에서는 Unit A와 기반암을 구분하는 부정합면, 단층 하반에서는 Unit B와 Unit C를 구분하는 부정합면을 기준면으로 설정하였다. Unit A가 Unit B 위에 퇴적된 이후 지진 휴지기에 침식삭박에 의해 퇴적된 것으로 가정하여 단층의 최소변위량을 계산하고자 한다. 단면이 단층주향과 정확히 수직으로 굴착되지 않았기 때문에 겉보기 수직변위(apparent vertical displacement; S_{vm}), 사면의 경사각(α), 단층의 경사각(β) 그리고 단층조선의 선주각(γ)을 이용하여 실제변위(true displacement; S_t)를 산정하였다(그림 7). F2 단층면의 자세는 N26°W/50°NE, 단층조선의 선주각은 72°로 측정되어 이를 활용하였다.

굴착단면에서 측정된 겉보기 수직변위는 110 cm, 사면의 경사각은 70°이며 이를 통해 계산된 수직변위(vertical displacement; S_v)는 103 cm, 수직변위

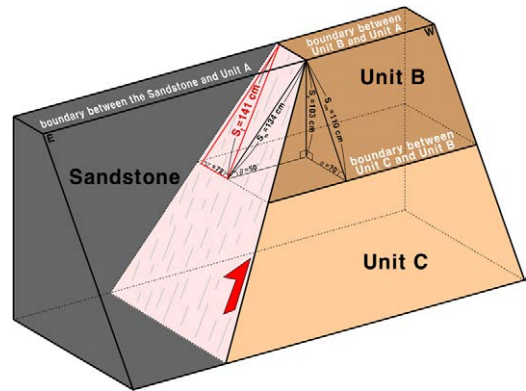


Fig. 7. Schematic diagram showing the deduction of the true displacement (modified from Xu *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2017).

와 단층의 경사각을 이용하여 계산된 경사분리(dip separation; S_m)는 134 cm이다(식 1). 그리고 경사분리와 단층조선의 선주각을 이용하여 계산된 실제 변위(S_t)는 141 cm이다(그림 7; 식 2).

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

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

5.3 추정변위로부터 산정되는 최대지진규모와 역사지진기록의 비교

현대적인 지진계가 19세기 말 미국에서 처음 개발되고 1905년에 우리나라에 도입되어 설치된 것은 불과 100여 년 밖에 되지 않는다. 따라서 지진계 개발 이전의 지진규모는 고지진학적으로 도출된 지진 변수들을 경험식에 대입하여 추정하거나 역사기록에 보고된 피해의 정도를 진도로 평가하고 이를 규모로 변환하여 추정할 수 있다. 본 연구에서는 경험식을 통해 위에서 계산된 변위를 활용하여 최대지진 규모를 산정하고 연구지역 주변에서 보고된 역사기록을 통해 도출된 지진규모들과 비교하고자 한다.

고지진학적 방법을 통해 도출한 지진변수들 간의 경험적 관계를 활용한 지진규모의 산정을 위해서 다양한 방법들이 제안됐다. 최대지진규모를 산정하기 위해 일반적으로 이용되는 신뢰할만한 변수들은 지표파열길이(Slemmons, 1982; Bonilla *et al.*, 1984; Khromovskikh, 1989; Wells and Coppersmith, 1994), 지표파열면적 \times 최대변위(Slemmons, 1982; Bonilla *et al.*, 1984; Mason, 1992), 파열면적(Wells and Coppersmith, 1994), 평균변위량(Kanamori, 1977), 최대변위량(Bonilla *et al.*, 1984; Wells and Coppersmith, 1994) 등이 있다.

위의 변수들 중 지표파열 길이나 파열면적을 활용한 최대지진규모 추정에는 수많은 불확실성이 포함되고 최근의 지진이 아닌 경우 이러한 자료를 획득하기도 어려우므로 우리나라에서는 최대변위량을 이용하는 것이 현실적으로 가장 적절하다(Kyung, 2010). Wells and Coppersmith (1994)에 의해 제시된 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식에 굴착조사와 노두에서 측정된 최대변위량을 대입하여 모멘트 지진규모를 도출할 수 있다. Kim and Jin (2006), Jin *et al.* (2013), Song *et al.* (2020)은 양산단층대, Kyung

(2010)은 울산단층대, Lee *et al.* (2017)은 경남 고성에서 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식을 활용하여 최대지진규모를 도출하였다. 차일2지점의 주 단층면에서 관찰된 단층조선 선주각은 72° 내외로 측정되었으며, 이는 역이동성이 우세한 사교이동 감각의 단층운동이므로 여러 경험식 중 역단층에 적용하는 경험식 $M_w = 6.52 + 0.44 \log D(m)$ 을 사용하였다. 이를 위해 위에서 계산된 1.41 m를 최대변위량으로 사용하였으며, 이를 통해 도출된 최후기 단층운동에 의한 최대 모멘트 지진규모(M_w)는 약 6.6 정도이다.

우리나라에서도 상대적으로 큰 규모의 지진들이 경주와 울산지역을 중심으로 발생한 기록이 다수 존재하고 있다. 특히 1643년 07월 24일에는 울산연안에서 지진이 발생하였으며, 이 지진으로 인해 2일 동안 울산에서 지표면 균열, 건담 무너짐, 용수·모래 분출 등의 지진피해가 있었음이 역사기록을 통해 확인되었다(Kyung, 2010). Lee and Yang (2006)은 역사 지진 기록을 활용하여 이 지진의 규모를 리히터 지진규모(M_L) 약 6.7로 평가하였다. 경험식을 통해 도출된 모멘트 지진규모(M_w)와의 비교를 위해 Sheen *et al.* (2018)에 의해 제시된 식을 활용하여 리히터 지진규모를 모멘트 지진규모로 변환하였으며, 그 결과 모멘트 지진규모는 약 6.5~6.6으로 계산되었다. 이 값은 이번 굴착단면에서 고지진학적 조사를 통해 도출된 최대 모멘트 지진규모와 오차범위 내에서 일치하므로 울산단층에서 발생가능한 지진의 규모는 최소 약 6.5~6.6 정도로 추정할 수 있을 것이다. 그러나 이 단층에서 확인된 최후기의 단층운동이 1643년의 지진활동과 연관이 있는지를 정확하게 확인하기 위해서는 추후 ^{14}C , OSL 등의 연대측정을 통해 퇴적층과 이들을 절단한 단층의 활동이력에 대한 더욱 정밀한 연구와 해석이 수행되어야 할 것이다.

6. 결론

울산광역시 북구 창평동에서 울산단층을 따라 발생한 단층운동을 확인하기 위해 지형분석과 전기비저항탐사를 실시하였고, 이를 기반으로 고지진학적 굴착조사를 실시하였다. 굴착단면에서 관찰된 퇴적층과 단층에 대한 운동학적·기하학적 분석을 실시하고, 변위량을 도출하였다. 이를 바탕으로 단층운동 횟수와 지진규모를 산정하였다. 연구결과를 정리

하면 다음과 같다.

- 1) 항공사진, LiDAR를 통해 획득된 영상, UAV 등을 활용한 지형분석에서 뚜렷한 선형구조를 따라 단층애, 굴절하도 등의 단층활동의 증거인 지형학적 지시자들을 인지하였다. 선형구조를 가로질러 실시한 전기비저항탐사에서 지표로 연장되는 저비저항 이상대가 인지되어 굴착조사를 실시하였고 울산단층 남부지역에서의 제4기 단층운동을 확인하였다.
- 2) 굴착단면에서는 단층면을 기준으로 상반은 사암과 최상위의 퇴적층만이 분포하는 반면, 하반에는 크게 절단이 명확하지 않은 최상위 퇴적층을 포함하여 5개의 퇴적층이 관찰된다. 단층은 동쪽으로 경사진 2개의 단층이 관찰되며, 이들의 절단관계를 바탕으로 단층운동을 복원하였고 이 단층은 최소 2회 이상 재활동한 것으로 해석된다.
- 3) 제4기 퇴적층의 겹보기 수직변위와 단층면과 단층조선의 자세를 이용하여 최후기 단층운동에 의해 발생한 최소 실제변위를 1.41 m로 산출하였다. 이를 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식에 적용하면 발생한 지진규모(M_w)는 약 6.6로 산출된다. 역사지진기록을 바탕으로 추정된 1643년의 지진규모(M_w)는 약 6.5~6.6로 오차범위 내에서 일치하여 이 단층을 따른 지진규모에 대한 대략적인 추정이 가능하다. 하지만 이 지진이 이 단층에서의 최후기 운동과 직접 연관된 것인지는 명확하지 않으며, 추가적인 연구를 통해 Unit B를 절단한 단층의 활동시기를 밝힐 필요가 있다.
- 4) 추후 추가적인 연구를 통하여 단층에 의해 절단된 퇴적층과 절단되지 않은 지층에 대한 정밀한 연대측정을 수행하고, 단층활동과의 관계를 명확히 규명하면 최후기 운동시기와 변위를 등을 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20201510100020). 심사과정에서 세심한 검토와 건설적인 조언을 해 주신 강희철 박사

님과 조형성 교수님, 편집위원님 그리고 편집위원장님 께도 진심으로 감사를 드린다. 연구를 도와주신 부경대학교 지질구조해연구실원분들에게 감사드린다.

REFERENCES

- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O. and Scibek, J., 2013, Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171-192.
- 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.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028, 1996.
- 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., Choi, J.-H., Kim, N., Lee, H., Choi, I., Bae, H., Rockwell, T.K., Lee, S.-R., Ryoo, C.-R., Choi, H. and Lee, T.-H., 2020, 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.
- Choi, P.-Y., Lee, C.-B., Ryoo, C.-R., Choi, Y.S., Kim, J.-Y., Hyun, H.-J., Kim, Y.-S., Kim, J.-Y. and Chwae, U., 2002, Geometric analysis of the Quaternary Malbang Fault: Interpretation of Borehole and Surface data. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 163-174 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Choi, W.-H., 2003, Neotectonics of the Gyeongju-Ulsan area in the southeastern part of Korean Peninsula. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, 6 p (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korea peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. and Withjack, M.O., 2010, A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of

- fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, 1557-1575.
- Geological survey of Korea, 1968, 1:50,000 geological map ULSAN sheet.
- 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.
- 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, I.-S., Son, M., Jung, H.-J., Lee, J.-D., Kim, J.-J. and Paik, I.S., 1998, Geological characteristics of Kyongju-Ulsan area: Palaeomagnetism and magnetic susceptibility of the granite rocks in the Ulsan fault area. *Economic and Environmental Geology*, 31, 31-43 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y., Kim, S., Kang, S.Y. and Seo, W., 2018, Assessing whether the 2017, M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360, 1007-1009, doi: 10.1126/science.aat6081.
- Kim, T., Shin, H.-C. and Kim, Y.-S., 2020, Characteristics of the topographical deformation in the central part of the Ulsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 193-209 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.H., He, W.H., Ni, S.D., Lim, H. and Park, S.-C., 2017, Earthquake Source Mechanism and Rupture Directivity of the 12 September 2016 M_w 5.5 Gyeongju, South Korea, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107, 2525-2531.
- 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).
- 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., 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., 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, 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 Yang, W.-S., 2006, Historical Seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 846-855.
- 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., Kim, J., Koo, M.-H. and Keehm, Y., 2009, Thermo-hydraulic Modeling in Fault Zones. *Economic and Environmental Geology*, 42, 609-618 (in Korean with English abstract).
- López, D.L. and Smith, L., 1995, Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow. *Water Resources Research*, 31, 1489-1503.
- 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.
- 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., Choi, 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.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J.B., Jo, W.R., Kim, S.K., Oike, K. and Nakamura, T., 1998, Active Fault Topography and Fault Outcrops in the Central Part of the Ulsan Fault System, Southeast Korea. *Journal of Geography*, 107, 644-658.

- Park, Y.D. and Yoon, H.D., 1968, 1:50,000 geological map and explanatory text of ULSAN sheet. Geological survey of Korea, 20 p.
- 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., 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).
- Schellart, W.P. and Rawlinson, N., 2010, Convergent plate margin dynamics: New perspectives from structural geology, geophysics and geodynamic modelling. *Tectonophysics*, 483, 4-19.
- Sheen, D.-H., Kang, T.-S. and Rhie, J., 2018, A Local Magnitude Scale for South Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 2748-2755.
- Slemmons, D.B., 1982, Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. In proceeding of the Second International Earthquake Microzonation, Seattle, WA, Earthquake Engineering Research Institute, 1, 110-130.
- Son, M., Chong, H.-Y. and Kim, I.-S., 2002, Geology and geological structures in the vicinities of the southern part of the Yonil Tectonic Line, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 175-197 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Lee, Y.H., Kim, I.-S. and Chang, T.W., 2001, A quaternary reverse fault (chail fault) in the Chail vilage, Nongso 1-dong, Buk-gu, Ulsan, Korea. 2001 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), 65 p (in Korean).
- 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, 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*, 56, 155-173 (in Korean with English abstract).
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics* (second edition). Cambridge University Press, 770 p.
- 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.

Received : February 2, 2021

Revised : March 9, 2021

Accepted : March 25, 2021