지질학회지 제 56권 제 2호, p. 193-209, (2020년 4월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 56, no. 2, p. 193-209, (April 2020)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2020.56.2.193

Check for updates

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

# 울산단층 중부지역의 제4기 지형변형 특성

**김태형[1,2] · 신현조[2] · 김영석[1,2,‡]**
[1]부경대학교 지구환경과학부
[2]부경대학교 활성단층 및 지진재해저감연구소

## 요 약

한반도는 판의 경계에서는 벗어난 환경으로, 판의 경계에 위치하는 지역들 보다는 상대적으로 낮은 지체구조적 활동도를 보이며, 삭박율도 상대적으로 높은 편이기 때문에 직접적인 지표파열을 수반한 지진이 없다면 활성단층 추적연구에 어려움이 많다. 따라서 이러한 지역에서의 고지진학적 연구는 과거 발생한 지표변형의 기록을 바탕으로 다양한 접근법을 사용하여 분석할 수밖에 없다. 현대식 지진계가 설치된 이후 지금까지 지표파열을 수반한 대규모 지진이 한반도에 발생하였다는 기록은 없지만, 고지진학적/역사지진학적 자료에는 한반도에서 큰 규모의 지진발생 증거가 다수 보고되었다. 본 연구는 제4기 단층이 밀집되어 있는 울산단층 동편산지에 대한 지형조사를 통해 활성단층의 분포와 활동특성을 해석하고자 시도하였다. 연구지역의 기반암은 흑운모 화강암으로 구성되며, 남-북 방향으로는 충적선상지가 발달하고 있으며, 이들의 선정은 일정한 고도에 위치하고 있음을 보여준다. 이는 선상지를 발달시킨 원인이 단층임을 지시한다. 선상지면은 고도에 따라 3개로 대분되는데, 이러한 양상은 반복적인 조구조 활동의 영향으로 판단된다. 선상지면 내에서는 남북방향의 선형구조를 따라 일반적으로 동측이 융기한 양상이 관찰된다. 선형구조를 가로지르는 전기비저항탐사 결과는 전기비저항 이상대가 지형 이상대와 일치하며, 지표지질조사 결과에 의하면 지형 이상대에서 동쪽으로 경사하는 역단층이 제4기 선상지 퇴적층을 절단하는 것을 확인하였다. 따라서 이 지역의 선상지가 단층작용에 의해 절단되면서 지형 이상대를 형성한 것으로 판단된다.

**주요어:** 울산단층, 활성단층, 충적선상지, 스와스단면, 굴착조사

**Taehyung Kim, Hyeon-Cho Shin and Young-Seog Kim, 2020, Characteristics of the topographical deformation in the central part of the Ulsan fault. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 193-209**

**ABSTRACT:** The Korean peninsula with low tectonic activity and high denudation rate is located on the continental margin away from the plate boundary. If there is no earthquake involving surface rupture, it is much difficult to trace active faults in this area. Therefore, paleo-earthquake studies in this kind of tectonic setting have to rely on the synthetic method combining various approaches including topographical characteristics related with past surface deformations. Since the installation of modern seismographs, large earthquakes with surface rupture have not occurred on the Korean Peninsula. However, there are several reported evidences for paleoseismological and historical big earthquakes on the Korean peninsula. This study analyzed the distribution and activity characteristics of active faults, based on the topographic survey in the eastern part of the Ulsan fault zone, where several reported Quaternary faults are concentrated. The research area is a mountainous area on the eastern block of the Ulsan Fault. The basement of this area is composed of biotite granite. The topographic analysis revealed that the apex of alluvial fans along the western side of the ridge developed at a similar altitude. This indicates that the development of the fans is related with faulting. These alluvial fans are classified into three groups based on their elevations, indicating the effect of repetitive tectonic activities. The eastern blocks of the fan surfaces along the N-S trending lineament are commonly uplifted . The anomalies based on the electrical resistivity survey across the lineament are well consistent with the topographical anomalies. Also, the surface field survey supports east-dipping thrust faults, which cut the fan deposits at the same anomaly points. Therefore, the topographical anomaly zones across the fans in this area are considered to be formed as a result of fault activity.

**Key words:** Ulsan fault, active fault, alluvial fan, swath profile, trench survey

‡ Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

*(Taehyung Kim and Young-Seog Kim, Dept. of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Taehyung Kim, Hyeon-Cho Shin and Young-Seog Kim, Active Fault & Earthquake Mitigation Institute, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)*

## 1. 서 론

유라시아판의 가장자리에 위치한 한반도(그림 1a)는 판의 경계(interplate) 부분에 위치한 다른 지역들(e.g., 일본, 대만, 미국 캘리포니아)과 달리 지진의 발생빈도나 규모가 상대적으로 낮다. 그러나 Lee and Na (1983)는 미소지진의 연속적인 발생을 근거로 한반도 남동부에 발달한 양산단층이 활성단층일 가능성을 제시하였으며, 이후 Okada *et al*. (1994)가 양산단층 중남부의 월평지점에서 제4기 단층을 보고하였다. 또한 울산단층 중부의 말방지에서도 Okada *et al*. (1995)가 울산단층을 따라 발달하는 제4기층을 절단한 단층을 보고하였다. 이를 계기로 양산단층과 울산단층 주변에서의 고지진학적 연구(paleoseismology)가 활발히 진행되었으며(그림 1b; e.g., Kyung, 1997; Kyung *et al*., 1999a, 1999b; Yang, 2006; Kee *et al*., 2007; Choi *et al*., 2012, 2014; Lee *et al*., 2015), 특히 2016년 발생한 경주지진(Mw=5.5; Kim *et al*., 2017)과 2017년 포항지진(Mw=5.4; Kim *et al*., 2018)을 계기로 이러한 연구의 중요성이 더욱 부각되고 있다.

최근 한반도에서 활성도가 가장 높은 것으로 평가되는 양산단층과 울산단층을 중심으로 한 한반도 남동부에서 제4기 단층의 지질학적 및 지형학적 특징들이 다수 보고되고 있으며(e.g., Jeong *et al*., 2018; Choi *et al*., 2019; Ha *et al*., 2019; Kim *et al*., 2019a), 이러한 연구들을 토대로 제4기 단층의 선형적 분포를 해석하는 연구가 진행되고 있다(Kim *et al*., 2019c). 대규모 지진발생 특성과 제4기 단층의 공간적 분포를 이해하기 위해서는 먼저 기존에 보고된 제4기 단층에 대한 검토를 우선적으로 수행할 필요가 있다. 울산단층 중부에는 마동에서 진티마을에 이르는 북서-남동 방향의 구간에서 마동(Son and Ryoo, 1999; Chwae *et al*., 2000), 탑골(Ryoo *et al*., 2002, 2004), 진현(Choi *et al*., 2014), 진티(Yoon and Hwang, 1999; Lee *et al*., 2002) 지점 등 제4기층을 절단하는 역단층이 다수 보고되었으며, 또한 진티마을에서 다시 남-북 방향으로 신계(Chwae *et al*., 2000), 감산사(Chang, 2001; Choi, 2003; Kee *et al*., 2009), 활성리(Ryoo *et al*., 2001, 2004), 말방(Okada *et al*., 1994; Kyung, 1997; Okada *et al*., 1998; Choi *et al*., 2002) , 사곡지(Choi *et al*., 2012), 절골(Choi *et al*., 2012), 개곡지점(Ryoo *et al*., 2002; Ryoo, 2009) 등에서 제4기층을 절단하는 역단층 및 주향이동단층이 보고된 바 있다(그림 1c). 이 지점들에서 보고된 단층들의 공통적인 특징은 동측으로 경사하는 북서-남동 내지 남-북 주향을 가지는 역단층이 주를 이루며, 이들은 제4기의 미고결(unconsolidated) 퇴적층을 기반암인 화강암이 충상한다는 것이다.

본 연구는 울산단층 중부지역(경주시 외동읍)에 위치한 활성리지점을 중심으로 기존에 보고된 제4기 단층들의 발달특성과 연구결과(e.g., Ryoo *et al*., 2001, 2004; Lee *et al*., 2002)들을 검토하였다. 특히, 토함산 서측 산지에 대한 지형분석과 야외노두의 정밀관찰을 통해 이들의 분포와 제4기 활동특성을 해석하고자 하였다.

## 2. 지형 및 지질개요

### 2.1 지형특성

연구지역인 울산단층 중부 경주시 외동읍 일원은 지형적으로 동측의 토함산(해발고도 745 m)과 삼태봉(해발고도 629 m)을 비롯한 남-북 방향의 산맥이 발달하고 있다(그림 1c). 이 산맥은 대체로 해발고도 400-750 m를 가지며, 북쪽은 토함산에서 삼태봉으로 이어지는 고도 약 700 m에 달하는 험준한 지형임에 비해, 남쪽은 울산시 농소면에서부터 남쪽으로 갈수록 해발고도가 낮아지기 시작하여 기현(511.5 m), 동대산(443.9 m), 달령(347.1 m), 무룡산(452.3 m) 등을 포함하는 해발고도 400 m 내외의 상대적으로 낮은 산지가 발달한다(Hwang and Yoon, 2001). 주요한 수계는 크게 남천과 동천이 있는데, 경주시 외동읍 괘릉리를 중심으로 유수방향이 달라지는 분수계가 나타난다(그림 1c). 남천은 동측 산지에서 시작된 하천들이 합류되어 북쪽으로 흐르며, 형산강으로 합류되어 포항을 거쳐 동해로 흘러간다. 동천은

마찬가지로 동측산지에서 시작된 지류 하천들이 합류되어 흐르며 남쪽으로 흘러 태화강에 합류되어 울산을 거쳐 동해바다로 흘러간다.

토함산의 서측 산사면은 동측 산지로부터 공급된 과거에 발달한 충적선상지(paleo-alluvial fans)가 남-북 방향으로 연속적으로 발달하는데, 이들은 고도를 바탕으로 총 세 개의 선상지 지형면으로 대분된다(그림 2; Hwang, 1998; Hwang and Yoon, 2001;

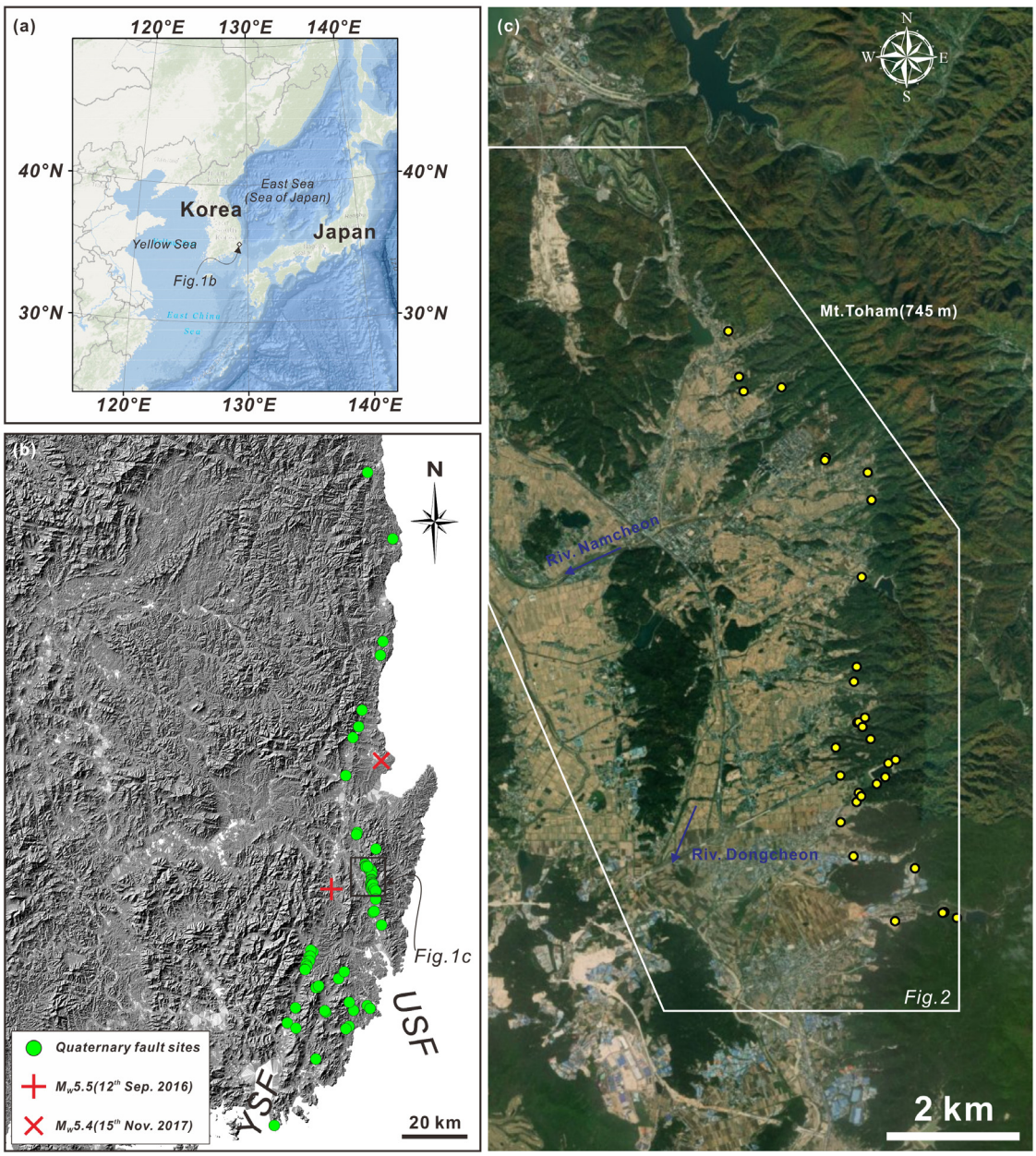


**Fig. 1.** (a) Tectonic map around the Korean peninsula. (b) Reported Quaternary fault sites along the Yangsan and Ulsan faults (green circles) and the epicenters for the Gyeongju earthquake (Mw5.5, 12th of September, 2016) and the Pohang earthquake (Mw5.4, 15th of Novemeber, 2017). (c) Topographic overview of the study area. Mountain ranges (including Mt. Toham) develop in the north-south direction, while two rivers (Namcheon and Dongcheon) change from east-west to north-south direction.

Yoon and Hwang, 2004). 선상지는 독립적으로는 부채꼴상으로 발달하나, 연구지역의 선상지들은 독립적인 선상지가 연속적으로 발달하면서 서로에 대한 간섭이 이루어지는 합류선상지(confluent fan)의 양상으로 발달한다. 연구지역 선상지의 고위면은 배후산지의 능선을 따라 산기슭에 주로 분포하며, 하천의 개석으로 인해 길고 좁은 완만한 능선상으로 잔존해 있다. 초기에는 선상지의 기하를 이루며 발달했을 것이지만, 하천에 의한 개석에 의해 잔존해 있는 양상은 종방향으로 길쭉한 특징을 보이는 것으

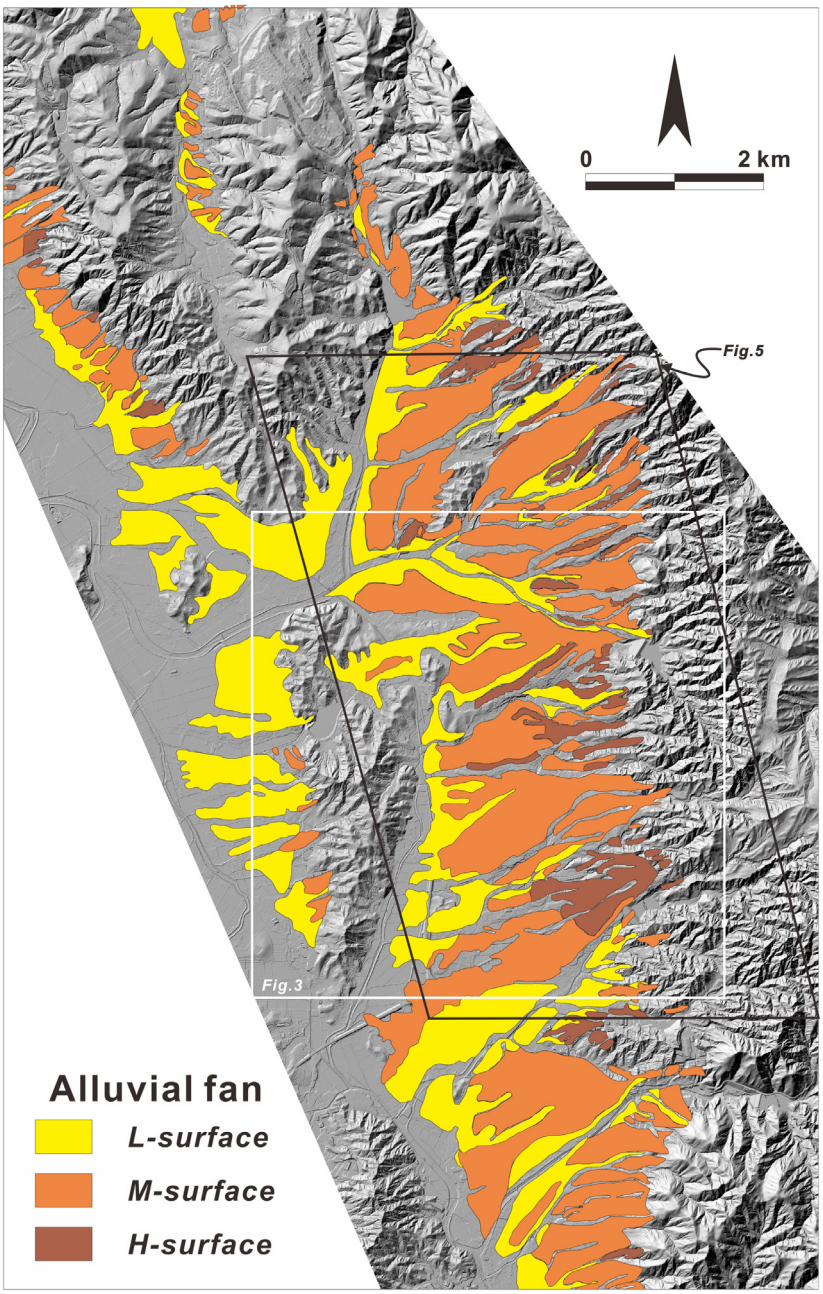


**Fig. 2.** Classifications of the Quaternary alluvial fan surfaces (modified from Hwang and Yoon, 2001). Three levels of surface were classified based on their elevation and shape.

로 판단된다. 말방 남쪽의 고위면을 제외하고는 대부분 개석에 의해 서로 연결되지 못해 단속적으로 분포하여 선상지의 형태를 판정하기 쉽지 않고, 오히려 하안단구의 형태를 보인다(Hwang and Yoon, 2001). 반면 중위면은 선정부에서 선단부까지 연속적이고 고위면에 비해 상대적으로 넓은 분포를 보여준다. 연구지역 대부분의 선상지면은 중위면으로, 현재 취락지, 과수원, 밭, 논 등으로 다양하게 토지가 이용되고 있어 원지형의 훼손이 심하다. 저위면은 중위면을 가로지르며 가장 낮은 고도를 보인다. 천군동 일원의 일부 산지에서는 고위면이나 중위면의 발달 없이 바로 저위면이 발달하기도 한다.

이 지역은 선상지 퇴적물의 공급과 개석의 반복적인 작용으로 단구형태의 지형이 형성된 것으로 보이며, 이와 동시에 선상지면을 흐르는 유수에 의해 발달한 하안단구지형이 복합적으로 발달하고 있다. Yoon and Hwang (2004)은 연구지역을 포함한 경주지역에서 하상비고가 서로 다른 세 개의 선상지 지형면이 발달한 것을 빙기와 간빙기의 반복 및 지속적인 지반의 융기로 해석하였고, 이 선상지면들의 하상비고 및 지형면의 규모에 기초하여 고위면의 형성시기는 MIS 8(30-25만 년 전), 중위면은 MIS 6(20-14만 년 전), 그리고 저위면은 최종빙기인 MIS 3(3-5.7만 년 전)에 퇴적되었을 것으로 추정하였다.

### 2.2 지질

연구지역은 토함산지를 구성하는 백악기 또는 제3기 화강암 및 석영반암을 기반암으로 하며, 이들을 다수의 중성질 암맥이 관입하고 있다(Geological Survey of Korea, 1922; 그림 3). 안산암질 암맥류는 북북서-

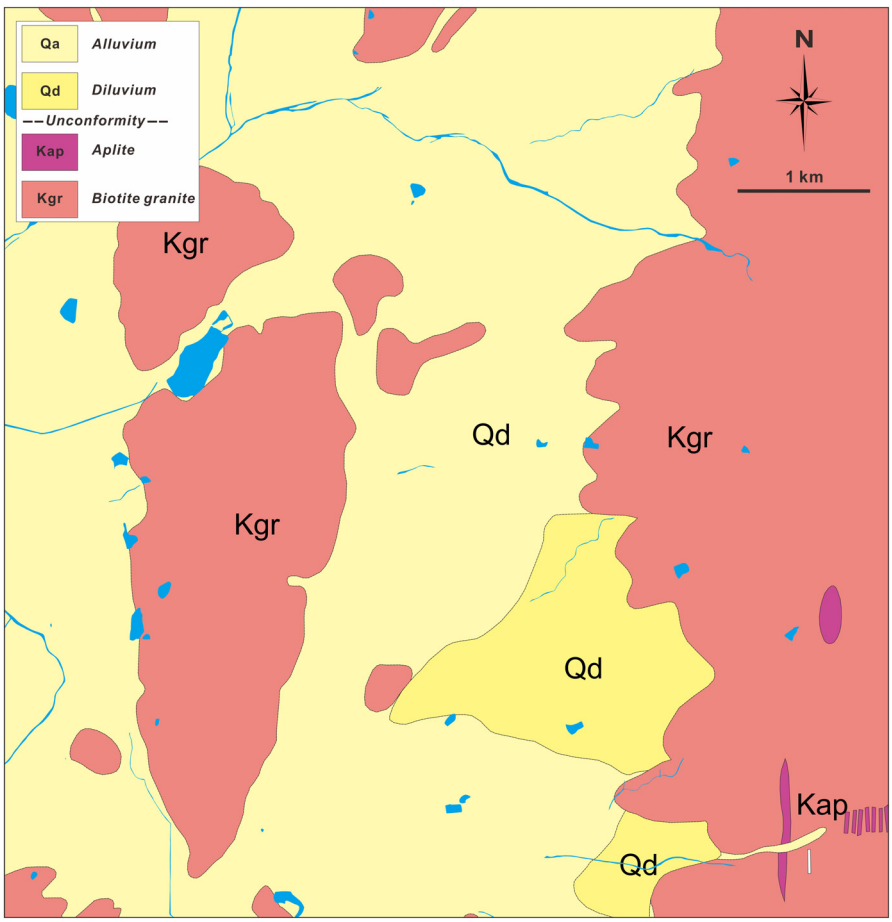


**Fig. 3.** Geological map of the study area (modified from Geological Survey of Korea, 1922). The study area is composed of mostly Cretaceous biotite granite with intrusive volcanic rocks underlying Quaternary deposits.

남남동, 남-북, 내지 북동-남서 방향으로 주향하며, 50-90°의 경사를 갖고 동쪽으로 경사하는 자세로 관입하고 있으며, 그 폭은 수 cm에서 넓게는 수 m 이상을 보인다. 이 화강암 및 관입암맥류는 제4기 충적선상지에 의해 피복되어 있다. 선상지 퇴적층은 고위면에서 저위면으로 갈수록 고결정도가 약해지며, 기질과 역의 비율과 역의 크기 및 풍화정도가 달라진다.

선상지 퇴적층은 모래에서 거력에 이르는 미고결 역층이 주를 이루며, 자갈은 각형(angular)에서 아원형(sub-rounded)의 원마도를 가진다. 역은 대부분이 동측산지의 기반암과 같은 흑운모화강암 기원의 자갈이며, 안산암질 역도 일부 관찰된다. 또한 기질 역시 풍화된 화강암질 모래로 구성되며, 대체적으로 선정에서 선단부로 갈수록 입도가 줄어드는 양상이 관찰되나, 세립질의 퇴적물 위에 다시 거력의 입도를 가지는 퇴적층이 발달하는 것으로 보아 반복적인 퇴적작용이 있었을 것으로 추정된다(그림 4). 역의 인편구조에 기초해 동에서 서쪽으로 고수류가 흘렀을 것으로 판단되며(그림 4), 제반의 특징을 종합했을 때, 동측산지에서 공급된 퇴적물이 반복적으로 쏟아져 내리며, 선상지를 형성한 것으로 판단된다.

선상지 고위면에 해당하는 퇴적층은 야외에서 호미로 역이 긁힐 정도로 풍화가 많이 진행되어 있으며, 일부 괴상(massive)에 교란이 심한 경우도 있지만, 대체적으로 층리가 양호하게 발달하고 있다. 중위면에 해당하는 퇴적층은 퇴적물의 특성이나 퇴적조직 등은 고위면의 것과 유사하나, 자갈의 풍화정도가 고위면의 것과는 달리 상대적으로 신선하다. 하지만 선상지를 구성하는 퇴적학적 특징에 대한 자

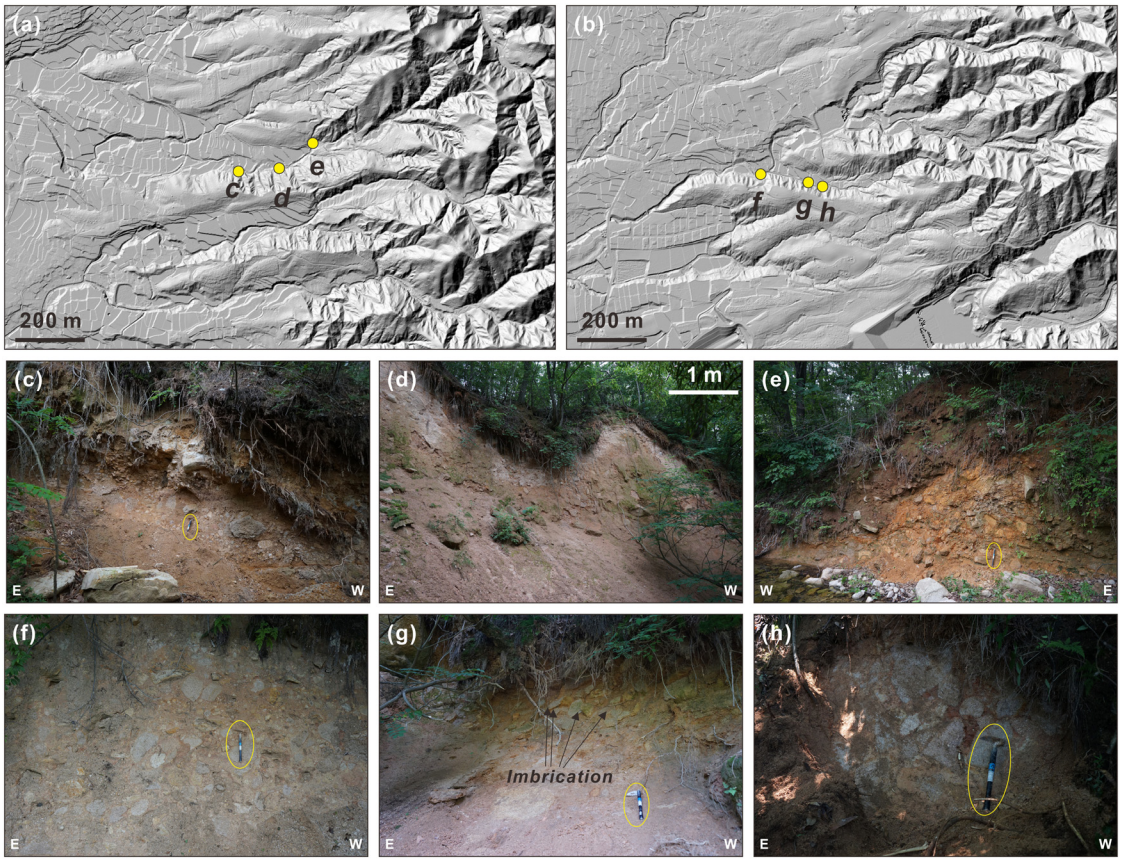


**Fig. 4.** Lithological characteristics of high-level alluvial fan deposits around the study area, mostly composed of granitic gravel and granite saprolite matrix(c-h). The ratio of a matrix is increased from upstream to downstream and downstream grain size is generally smaller than upstream. Pebble imbrications indicate that paleo-flow direction is from east to west.

세한 조사가 이루어져 있지 않아, 본 연구에서는 야외 발달 산상을 간단히 언급하고자 한다.

선상지를 덮고 있는 비교적 신기의 유기물이 포함되어 있는 신선한 자갈과 모래로 구성된 퇴적층이 관찰되는데, 특징적으로 분급이 불량하고, 자갈의 원마도는 각형 내지 아각형이 우세하다. 층리의 발달이 단속적이고, 렌즈상 혹은 패치상으로 발달하며, 자갈은 그래뉼(granule)에서 왕자갈(cobble)이 주를 이루고, 일부 거력들이 이들을 덮으며 발달한다. 이러한 특징은 산록에서 공급된 산록퇴적층을 지시하는 것으로 판단된다. 하지만 분급과 원마도가 양호한 하성퇴적물도 일부 관찰된다. 이를 모두 종합하면, 동측 산지에서 공급된 선상지 퇴적물이 수 회 반복적으로 쏟아져 내리며 선상지를 이루고, 일부 산록에서 쏟아진 붕적기원의 퇴적물과 하성퇴적물이 복합적으로 교호하며 발달하는 것으로 판단된다.

## 3. 연구방법

본 연구에서는 연구지역에서 기존 보고된 단층들의 특징을 종합적으로 검토하고, 이들 지역을 중심으로 지형분석을 실시하였다. 지형분석은 항공라이다(Light Detection and Ranging)를 이용해 획득된 고해상도(~1 m 분해능) DEM을 GIS프로그램을 통해 분석하였다. 지형단면도는 인공적 혹은 하천에 의한 지형단면의 오차를 줄이고자 스와스단면(swath profile)을 작도하였다. 스와스단면은 기준 단면선을 중심으로 일정 거리의 모든 지형고도를 측정하여 최대값과 최소값을 나타내는 방법으로, 수계 등에 의한 고도의 저평가를 보정할 수 있는 방법이다(Telbisz *et al*., 2013). 이를 통해 지형면의 천이점이 인지되는 구간을 추정하였으며, 인지된 선형구조에 기초하여 단층의 분포특성을 추정하였다.

또한 전기비저항탐사를 통한 이상대의 분포를 이용해 선형구조에 대한 신뢰도를 확보하였다. 전기비저항탐사는 쌍극자탐사법을 사용하였으며, 전극의 간격은 현장조건을 반영하여 4-10 m 내외로 설정하였다. 현재 자연상태로 남아있는 활성리 지점에 대한 사면 정리를 통해 단층의 활동 특성을 해석함으로서 단층의 선형적 분포를 제시하고자 하였다. 최종적으로 이들을 기존 연구결과와 비교하여 종합적으로 토의하였다.

## 4. 연구결과

### 4.1 지형분석결과

연구지역에 대한 광역적인 지형분포를 확인하고자 남-북 방향의 토함산을 포함한 산맥을 중심으로 동-서 방향으로 10개의 스와스단면을 도시하였다(그림 5, 6). 스와스단면은 약 4 km의 길이를 가지며, 폭은 200 m 로 실시하였다. 스와스단면을 통해 획득된 지형면은 하천에 의한 개석의 영향이 있을 수 있으므로, 기준사각형 내의 최대값을 활용하였다. 그 결과 남-북 방향의 분수령을 기준으로 전반적으로 동측보다 서측의 산사면이 더 급한 경사를 보이며, 산맥의 서측사면은 정상부에서 경사가 급하다가 점점 완만해지는 특징이 보인다(그림 6). 식생의 발달과 지형면의 삭박 등은 페디먼트(pediment) 형성작용에 의한 삭박지형일 가능성이 있지만, 선상지의 원형이 남아있는 부분이 인지되며, 야외에서도 선상지성 퇴적층이 관찰됨을 바탕으로 과거에 선상지의 퇴적작용으로 산 전면부의 경사가 완만해진 이후 현재는 페디먼트 형성작용에 의해 선상지의 원지형이 훼손된 것으로 판단된다.

급경사에서 완경사로 바뀌는 경사급변점이 남-북 방향으로 발달하며, 약 400 m 내외의 해발고도에서 일관되게 발달하는 특징이 인지된다(그림 6). 선상지에 의한 완경사가 일정한 방향성과 고도를 가지고 선형적으로 발달하는 것은 기후변화 외에도 지질구조의 규제에 영향을 받았음을 지시한다. 비록 토함산지 내에 분수령과 평행 내지 아평행한 방향으로 안산암질 암맥이 다수 관입하고 있지만, 산 전체에 안산암질 암맥이 관입함에도 불구하고 특정 고도에서 경사급변점이 발달하는 점, 단일암종(화강암)으로 구성되는 산체이기 때문에 암상차이에 의한 차별침식을 야기할 지질구조가 발달하지 않는 점, 경사급변점의 연장성과 연결성이 매우 좋은 특징에 기초해서 이러한 선형적인 합류선상지의 발달은 단층에 의해 발달했을 것으로 판단된다.

산맥의 급경사에 비해 완경사를 이루는(약 30°이내) 선상지는 남-북 내외의 방향성을 보이며 발달하는데, 선상지면의 고도에 기초해 3개의 면으로 구분된다(그림 2; Hwang and Yoon, 2001). 유사한 비고를 보이는 선상지면을 가로지르는 남-북 내외의 선형구조가 인지되는데, 이 선형구조를 따라 동측이 융

기한 양상으로 지형낙차가 인지된다(그림 7). 지형낙차를 파악하고자 Hwang and Yoon (2001)이 분류한 선상지면을 기준으로 선형구조에 대해 거의 수직한 방향으로 스와스단면을 작도하였다(그림 7a). 기준사각형의 폭은 60 m로 설정하였으며, 하천의 영향을 배제하고자 최대값을 선상지 지형면으로 활용하였다(그림 7b). 고위면과 중위면에서 각 10개씩의 단면을 작성하였고, 각각의 단면에서 인지되는 지형낙차를 그림 7c에 도시하였다. 스와스단면 분석결과, 고위면에서는 동측이 10 - 20 m 융기한 양상을 보이며, 중위면에서는 약 10 m 내외의 낙차가 관찰된다. 하지만 일부 선상지면에서는 지형낙차가 인지되지 않는다(M2, M10, H3, H9).

### 4.2 지구물리탐사결과

전기비저항탐사는 선형구조에 수직한 방향으로 총 6개 구간에서 실시하였다(그림 8; ERT_01-06). 기존 보고된 마동2-3 지점 사이에서 동북동-서남서 방향으로 4 m 간격의 폴을 설치하여 전기비저항탐사를 실시하였다. 그 결과(ERT_01), 지형낙차가 인지되는 지점에서 비저항이상대가 인지되었다. 이 지점은 지표로 연장되면 마동2지점과 마동3지점을 지나는 북서-남동 방향의 선형구조와 일치한다. 신계지점과 감산사지점이 보고된 신계리 일원의 충적선상지상에서 서북서-동남동 방향의 약 150 m 구간에 대한 전기비저항탐사 결과(ERT_02), 측선의 서쪽을 시작으로 약 60-80 m 구간에서 이상대가 발달한다. 이는 신계지점과 감산사지점을 연결하는 남북 내지 북북동-남남서 방향의 선형구조와 일치하는 결과이다. 이 선형구조는 신계지점에서부터 감산사지점을 지나 활성리, 말방 및 개곡지점에 이르는 남-북 방향 내외의 선형구조로, 이를 따라 활성리지점과 말방지

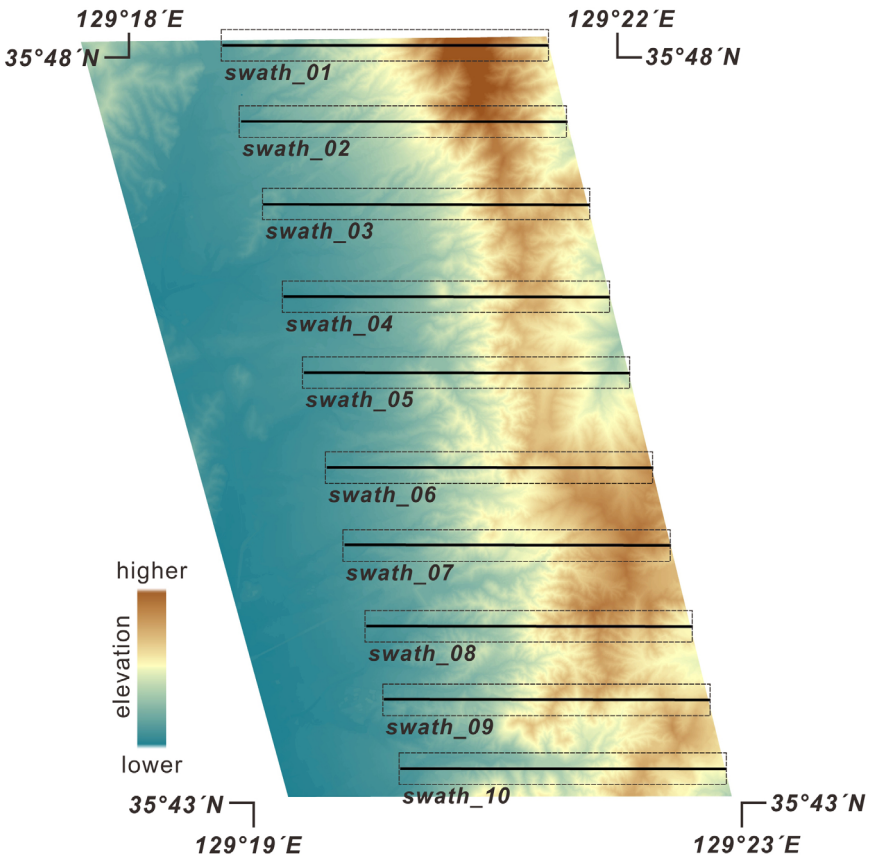


**Fig. 5.** Reference line and rectangles for the swath profile analysis in the study area. Lines were installed about 4 km long in the east-west direction, and the width of the rectangle was 200 m. The background image is the elevation map constructed from LiDAR DEM.

점 사이에서 3개의 전기비저항탐사를 추가적으로 실시하였다(ERT_03-05). 이 선형구조가 지나가는 지점에서 세 측선 모두 비저항이상대가 인지되었다. 개곡1지점과 개곡6지점을 지나는 구간에서 실시한 전탐결과 역시 비저항이상대가 선형구조와 일치함을 확인하였다. 전기비저항탐사의 결과를 종합할 때, 연구지역에서 지형낙차 혹은 기존 보고된 단층의 사이 구간에서 비저항이상대가 발달하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 기반암까지 연장되는 지질구조적 약대(단층?)가 존재함을 지시한다.

### 4.3 야외조사결과

경주시 외동읍 활성리에서 동-서 방향으로 흐르는 하천변 자연노두에서 기존 Ryoo *et al.* (2001)에 의해 최초 보고된 역단층 노두의 재조사를 실시하였다. 이 단층의 기존연구결과를 종합하면 화강암질의 미고결 퇴적층(사질, 사력질, 역질)과 기반암인 흑운모화강암이 단층에 의해 여러 번 교호하는 양상으로, 단층의 주향은 북서-남동에서 북동-남서에 이르며, 수 mm에서 수 cm에 이르는 단층점토가 관찰된다고 보고하였다(Lee *et al.*, 2002). 단층면과 기반암과의 관계에 기초하여 역단층으로 해석되었으나, 단층면상에서 수평의 단층조선과 역이동성 운동감각을 지시하는 단층조선이 함께 관찰됨을 기초하여 역단층 작용 이후, 좌수향 주향이동 운동도 있었던 것으로 해석하였다(Ryoo *et al.*, 2004). 단층점토의 대자율이방성을 이용한 단층의 운동감각 연구결과 역시 이 단층에 대한 최후기 운동은 좌수향운동으로 보고된 바 있다(Kang *et al.*, 2019). 활성리지점은 여러 조의 단층이 화강암과 화강암질 사력층을 절단하며,

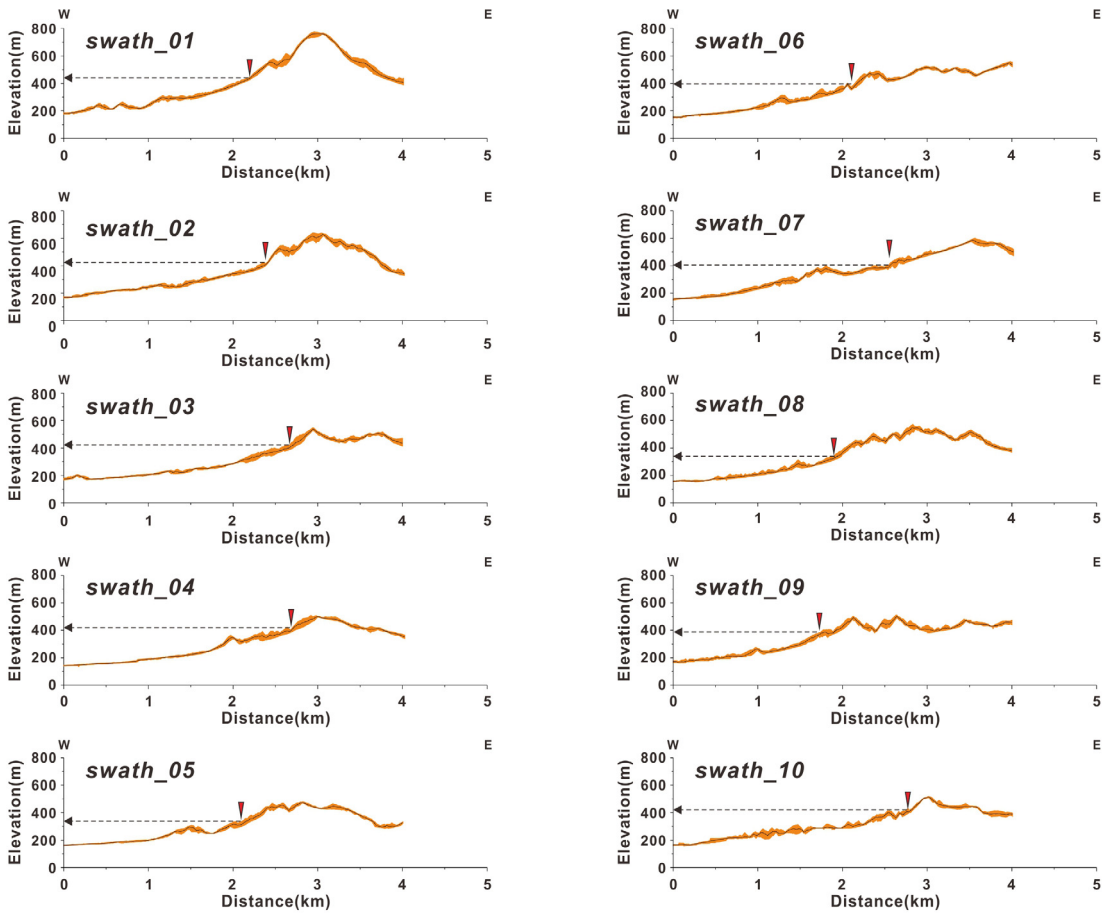


**Fig. 6.** Results of the swath profile analysis in Fig.5. Knick points were developed around 400 m elevation from the sea level.

이들을 상대적으로 신선한 자갈을 포함한 선상지 퇴적층이 부정합으로 덮고 있다. 이들을 다시 유기물이 풍부한 하성역층이 덮고 있으나 이 최신기 하성퇴적역층의 변형여부는 현재까지 보고된 바 없다. 절단된 층의 직접적인 절대연대는 보고된 바 없으나, 인접한 지역의 유사한 퇴적층에서 극저온구조(cryogenic structure)가 관찰되어 인접한 말방지점에서 굴착조사로 관찰된 동결기원의 쐐기구조가 발달한 층(Kyung, 1997)과 대비될 것으로 해석하였다. 단층점토에서 실시한 ESR 연대측정이 포화되어 단층의 최후기 활동시기와 퇴적층의 연대는 아직 의문으로 남아 있다.

활성리지점에서 보고된 역단층은 지형분석결과와 물리탐사이상대가 잘 일치하는 지점이며, 기존 보고된 제4기 단층노두가 유실되지 않고 보존되어 있는 지점으로 본 연구의 지형분석결과를 야기한 지질구조적 특성을 해석하기에 적합한 지점으로 판단하였다. 기존 연구결과는 단층작용에 의해 변형된 퇴적층의 연대가 불분명하고, 표토층 및 상부 하성자갈층이 식생에 의한 교란이 심해 단층의 기하학적 발달특성을 이해하기에 부적합하여, 본 연구를 위해 장비와 인력으로 사면을 정리하였다(그림 9).

조사 결과, N07°W/65°NE의 자세를 가지는 단층을 따라 기반암인 화강암이 제4기 선상지 퇴적층을 충상하고 있으며, 단층 상하반의 부정합면을 기

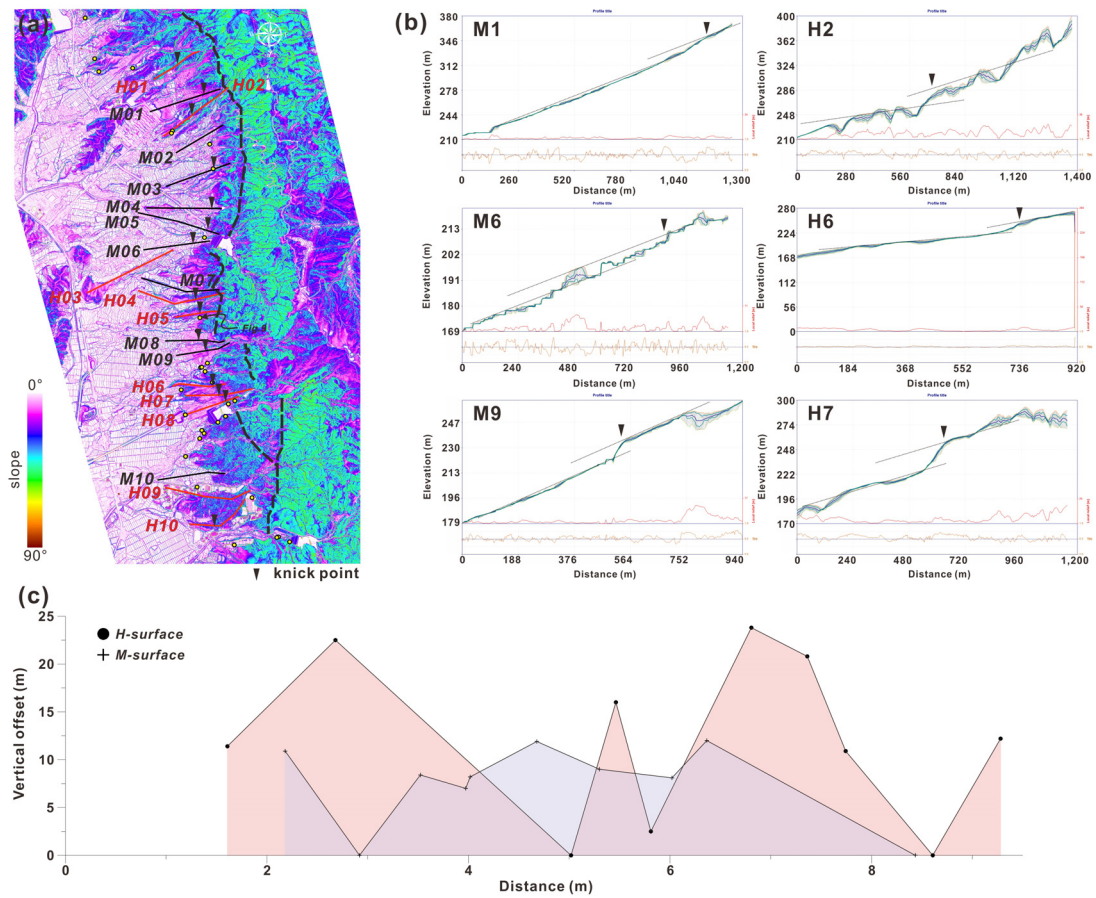


**Fig. 7.** Results of the swath profile analysis within alluvial fan surfaces. (a) Reference lines for swath profiles (Black solid lines were installed for mid-level fan surfaces, and red solid lines were installed for high-level fan surfaces). The background image is the slope map, which is constructed from LiDAR DEM. The slope was classified 1-degree interval. The apex of the fan initiated between blue and green areas(black dashed line; yellow circles indicate the reported Quaternary fault sites; black triangles indicate the knick point from swath profiles). (b) Uplifted eastern part of the fan surfaces. (c) Vertical offset of the fan surfaces. The higher level of fans may record the cumulative displacement of the surfaces compared with the lower surfaces.

준으로 약 110 cm의 수직낙차가 관찰된다. 절단된 제4기층은 황갈색의 기질을 가지며, 층리를 관찰하기 어려운 괴상이고, 분급과 원마도가 불량하다. 이러한 특징에 기초해 암설류(debris flow)와 같은 사태성 퇴적의 결과로 해석된다. 절단된 자갈층 상위에는 유기물이 풍부한 기질과 신선한 자갈로 구성된 자갈층이 덮고 있는데, 이 자갈층은 분급과 원마도가 양호하고 패치상으로 분급이 좋은 조립질의 사질 퇴적물이 부분적으로 협제하고 있다. 이 퇴적층은 하천에 의한 퇴적층으로 판단된다. 이 하성퇴적층은 단층에 의한 교란이 관찰되지 않는다. 따라서 종합적으로 판단했을 때, 이 단층은 미고결상태의 사태성 퇴적층을 역단층으로 절단하고, 이후 하성퇴적층에 의해 피복된 것으로 판단된다.

제4기층을 절단한 역단층의 활동시기를 규명하고, 변위율 등 단층변수를 도출하고자 OSL, $^{14}C$ 등의 연대측정을 실시하였다. 단층에 의해 절단되지 않은 퇴적층에서 획득한 유기물과 목탄시료의 방사성탄소연대를 측정한 결과, 5,800년 이전에 퇴적된 것으로 판단된다(표 1). 이 퇴적층은 가장 신기에 활동한 역단층을 침식하므로, 하성퇴적층의 퇴적시기보다 더 이전인 약 6,000년 이전에 마지막 운동이 있었던 것으로 해석된다. 하지만, 직접적으로 절단된 퇴적층의 OSL연대는 분석 중에 있으며, 그 결과가 도출

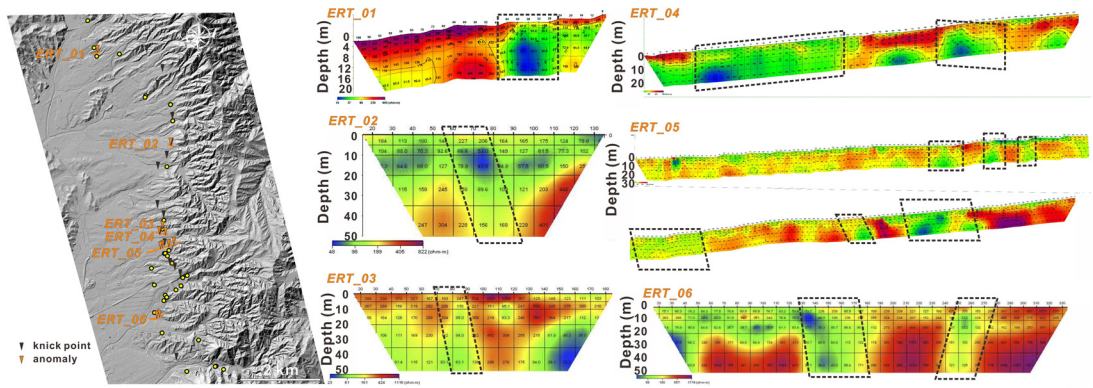


**Fig. 8.** Results and locations of the electrical resistivity tomography (ERT) survey in the study area. Most of the anomalies(orange triangles) were developed around the topographically uplifted points in Fig.7.

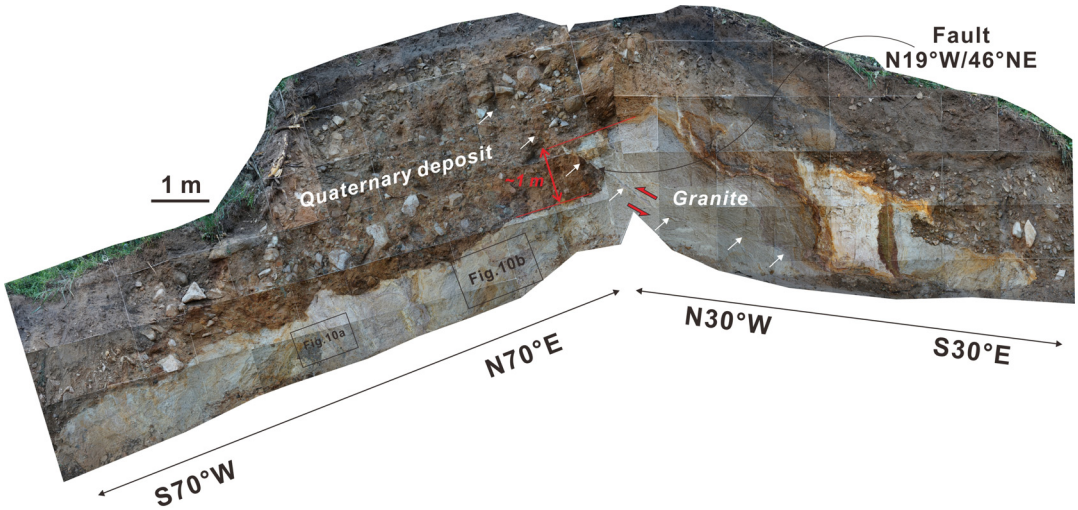


**Fig. 9.** Panoramic view and detailed sketch of the main outcrop of the Hwalseong-ri site. Quaternary alluvial fan deposits overlying the basement rocks were offset by thrust fault (N19°W/46°NE; white arrows). Around one-meter vertical offset was measured based on the unconformity level.

**Table 1.** Results of the $^{14}C$ age dating of the Hwalseongri fault site in the layer of Fig. 9.

| Sample | Analyzed material | Conventional Radiocarbon age(BP) | Percent Modern Carbon(pMC) and Stable Isoptopes | Calendar Calibrated Results: 95.4% Probability High Probability Density Range Method (HPD) |
|---|---|---|---|---|
| 1909HSR-1-C | Organic sediment | 3,530±30 | IRMS δ13C: -23.5 o/oo | 3,891 – 3,712 cal BP |
| 1909HSR-2-C | Organic sediment | 5,050±30 | IRMS δ13C: -28.3 o/oo | 5,901 – 5,726 cal BP |

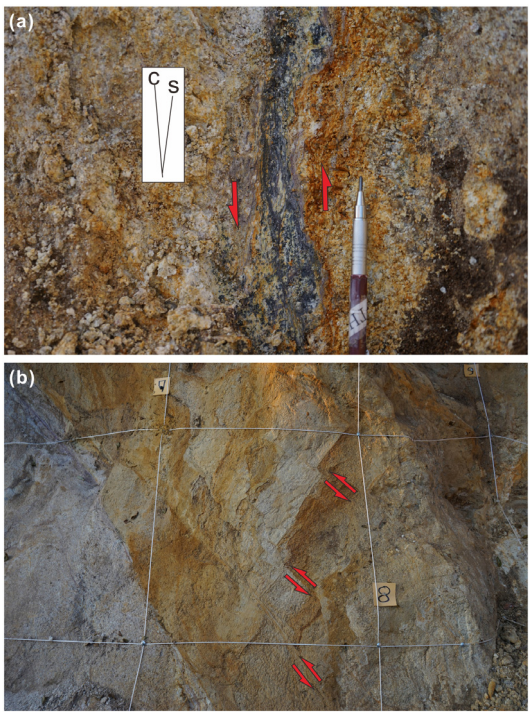


**Fig. 10.** (a) Shear fabrics (S-C fabrics) in the Hwanlseong-ri fault site indicating thrust movement. (b) Displaced beddings associated with reverse shear deformation bands in the high-level fan deposits.

되어야 명확한 단층활동시기를 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

### 4.4 종합해석

연구지역은 토함산을 포함한 남-북 방향의 산지에서 공급된 선상지가 산지의 서편에 연속적으로 발달하고 있으며, 이들을 절단하는 수 매의 남-북 방향 선형구조는 지형적으로 10-20 m 내외의 수직낙차를 가지며 동쪽이 융기한 양상을 보여준다. 이 선형구조를 따라 전기비저항 이상대가 일관되게 인지되고, 이상대는 수직 내지 동쪽으로 경사하는 양상을 보여준다. 또한 기존 보고된 제4기 단층들이 선형구조상에서 다수 보고되었으며, 이들 역시 동쪽으로 경사하는 역단층의 특징을 보인다. 특히 이번 조사에서 실시한 활성리 지점의 사면 재정리 및 조사결과, 저각의 역단층이 선상지 퇴적층을 절단하는 것을 명확하게 인지하였다. 따라서 울산단층의 동편은 남-북 주향의 제4기 역단층 활동에 의한 결과가 반영되어 지형과 지질이 발달하였음을 확인하였다.

## 5. 토 의

### 5.1 지형낙차와 단층활동

충적선상지면에서 실시한 스와스단면의 작도 결과, 고위면에서는 10-20 m의 수직 지형낙차가 인지되었으며, 중위면에서는 약 10 m 내외의 낙차가 인지되었다(그림 7c). 동측이 융기한 것은 앞서 언급한 대로 동쪽으로 경사하는 역단층성 활동에 기인한 동측 상반의 상승이 지형에 반영된 것으로 판단된다. 이러한 양상은 히말라야충돌대에서 발달하는 역단층에 의한 선상지면의 융기양상과 유사하다(e.g. Goswami *et al.*, 2009).

이러한 다양한 고도를 갖는 선상지면의 형성과정은 다음과 같이 해석된다. 현재의 고위면이 형성될 당시에 기후적 요인 또는 지질학적 요인(단층활동)에 기인하여 퇴적물이 산사면을 따라 쏟아지면서 선상지를 형성한다(그림 11a). 이때의 선상지면의 경사는 일정하고 완만한 경사를 가지며 발달할 것이다. 남-북 주향의 동쪽으로 경사하는 역단층이 활동하면서 선상지를 절단하며 지표파열을 형성한다면, 선상지면은 동측이 상대적으로 융기하는 양상을 보일 것이다(그림 11b). 이러한 가운데, 새로운 사태성 퇴적물이 개석된 선상지면을 가로질러 쏟아지면서

낮은 고도의 선상지면을 형성할 수 있다. 실제 연구지역 주변의 선상지면이 다양한 지형면을 가지는 원인이 이러한 기작에 의한 것으로 판단된다(그림 11c). 새롭게 형성된 선상지면에서는 단층에 의한 지형기복이 인지되지 않지만, 기존에 발달하고 있던 선상지면에는 여전히 지형낙차가 인지된다(그림 11c; 단면). 이 후 선상지면을 절단했던 단층의 재활로 지형변화가 발달한다면, 새롭게 발달한 선상지면은 단일 변위량만을 기록하겠지만, 기존에 발달했던 선상지는 누적된 변위량을 반영하며 지형낙차를 형성할 것이다(그림 11d). 이러한 과정이 반복되며 연구지역의 다양한 선상지면이 형성되고, 따라서 이 선상지면에서의 지형낙차(단층변위?)가 중위면보다 고위면에서 높게 나타나는 것으로 해석할 수 있다(그림 7c).

일부 구간에서 지형낙차가 인지되지 않는 이유는 1) 단층이 선상지를 절단하지 않았거나, 2) 인간 활동 혹은 지표작용(유수, 강우 등)의 영향으로 원지형이 훼손되었을 가능성이 있다. 전자는 비록 선형구조가 남-북 방향으로 연결되기는 하지만, 일부 구간에서는 단층의 기하학적 특성(e.g., jog, step-over) 또는 분절화(segmentation)의 영향으로 변형이 수용되지 않았을 가능성이 있다. 후자의 경우는 자연적인 지표작용이 지형기복을 모두 삭박하였다면, 현재 남아 있는 다른 선상지의 지형기복은 논리적으로 설명하기 어렵다. 하지만 이 지역은 공단, 농경활동 및 주택단지 개발 등 인간의 활동이 왕성하여 부지조성을 위한 평탄화 작업이 진행되었을 가능성도 있다.

결론적으로 이러한 일련의 가능성을 판단하기에는 현재의 자료가 부족하고, 고위면의 경우 개석이 심해 단속적이고 지엽적인 분포를 보이며, 지형단면

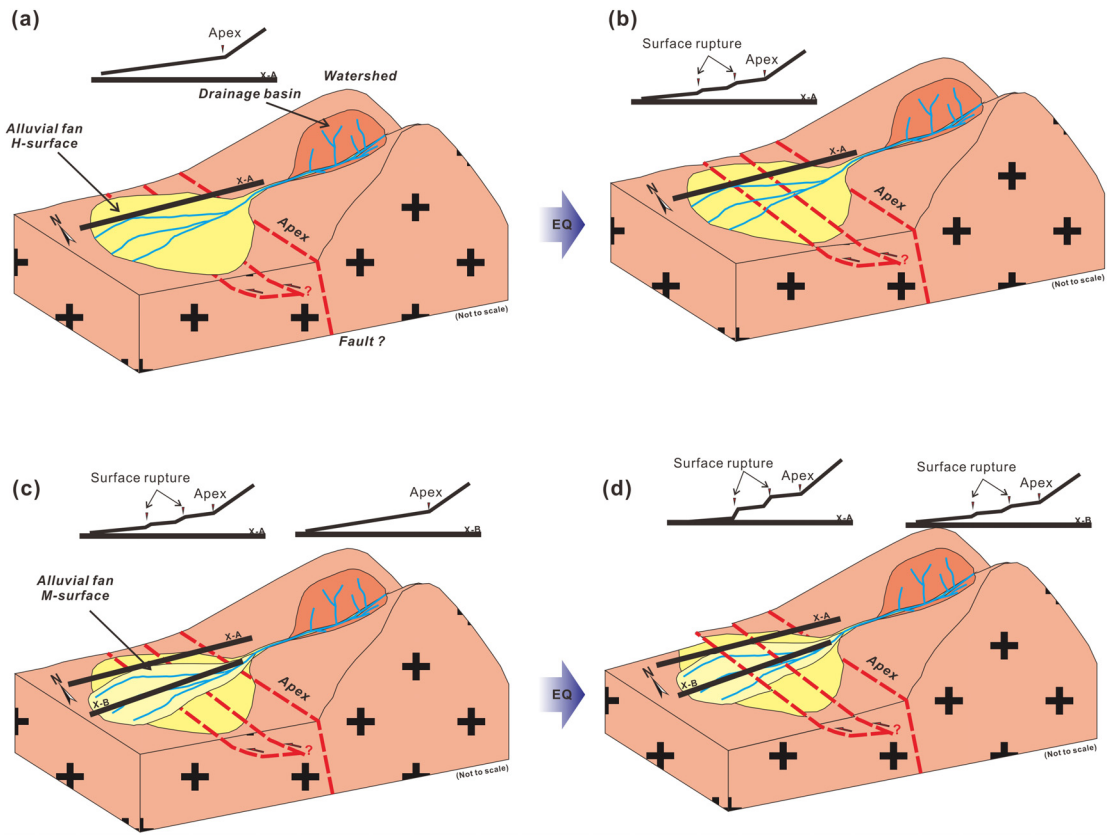


**Fig. 11.** Conceptual models for cumulative geomorphic displacement caused by N-S thrust faults in the study area. (a) Relatively older fan materials supplied from the eastern mountain. (b) N-S trending thrust fault cut the old fan surface. The cross-section profile shows that eastern fan surfaces were uplifted by fault. (c) Younger fan deposit between older fans. (d) Cross-sectional profiles showing different uplift amounts; older fan surfaces show more uplifts due to cumulative displacement.

을 작도하기에 충분한 자료를 획득하지는 못하였다. 중위면은 고위면에 비해 상대적으로 많은 분포를 보이기는 하나, 면이 평탄하고 넓게 발달하고 있어, 농경지 혹은 개발로 인한 원지형 훼손이 심하다(Ji *et al*., 2008). 이를 보완하기 위해 보다 조밀한 지형낙차 조사 및 야외에서의 정밀한 측량이 병행된다면 향후 단층활동 해석에 도움을 줄 수 있는 보다 신뢰도 높은 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

### 5.2 단층활동시기와 변위율(slip-rate)

고지진학적 연구의 주요한 목적은 과거 발생한 지진의 특성해석 뿐만 아니라 미래의 지진예측에 도움을 줄 정보를 획득하는데 있다(McCalpin, 1996). 특히, 단층의 변위율과 재발주기는 지진재해도 및 부지안전성 평가분야에 매우 중요한 자료로 활용된다(e.g., Valentini *et al*., 2019). 하지만 뚜렷한 활성단층과 동지진성 지표파열(coseismic surface rupture)이 발달하지 않는다면 이러한 정보를 획득하기란 쉽지 않다. 또한 건조하고 활동도가 높은 지역에서는 지형적인 특성을 이용해 신뢰도 높은 변위분포 및 단층추적, 분절화 연구가 가능한데 비해(e.g., Klinger, 2010), 한반도와 같이 수목이 많고, 강수량이 높고, 조구조적인 활동도가 낮은 지역에서는 원지형의 훼손이 심해 고지진학적 조사에 어려움이 많다(Kim *et al*., 2019b).

변위율을 구하기 위해서는 정확한 지층연대의 측정이 매우 중요한데 본 연구에서는 상대적으로 명확한 변위를 보이는 단층노두를 관찰하였음에도 불구하고, 화강암질 풍화토의 특성상 유기물을 통한 방사성탄소연대를 제외하고는 신뢰도 있는 신기의 연대정보를 획득하기 어려운 상황이다. 따라서 지형학적 발달특성과 고도에 기초한 다른 지역 선상지와의 대비를 통해 추정한 지형면 발달시기를 바탕으로 변위율을 산정하고자 하였다(Yoon and Hwang, 2004).

고위면의 변위량은 약 20 m 내외로 이를 고위면이 발달한 것으로 추정되는 MIS 8(30만-25만년 내외)의 연대를 통해 변위율을 계산하면 약 0.07-0.08 mm/yr의 변위율이 산정된다. 또한 중위면의 지형낙차인 10 m 내외를 역단층의 수직변위량으로 판단하고, 이를 중위면의 발달추정시기인 MIS 6(20만-14만년 내외)의 시기로 계산한다면, 약 0.05-0.07 mm/yr의 변위율이 계산된다. 하지만 이 결과는 지표삭박율이 고려되지 않은 단편적인 계산결과로, 침식삭박과정을 함께 고려한다면 결과는 달라질 수 있다. 향후 지형낙차에 영향을 미치는 다양한 요소를 함께 고려하고, 직접적인 절대연령이 도출된다면, 울산단층 중부의 활동도를 평가하는데 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 또한 활성리지점에서 인지된 약 110 cm 내외의 단일변위량과 절단된 퇴적층의 연대가 신뢰도 있게 확보된다면, 지형적 특성을 이용해 산출한 변위량과 비교할 수 있을 것으로 기대한다.

## 6. 결 론

한반도 동남부에는 양산단층과 울산단층을 따라 지표파열을 수반한 지진활동이 과거제4기 동안에 존재한 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 지표변형이 정확히 보고된 것이 현재까지 없기 때문에 지형학적/고지진학적 연구를 통해 간접적으로 추정하고자 하였다. 울산단층 중부지역을 연구지역으로 선정한 이유는 이 지역에서 고지진학적 연구가 많이 도출되었으며, 지질학적으로 단순한 암종으로 구성되어 지형학적 해석에 유용할 것으로 판단하였기 때문이다.

이를 위해 먼저 고해상도 원격탐사자료를 활용하여 이들의 공간적 분포를 추적하였고, 그 결과 해발고도 400 m 내외에서 선상지가 발견되었다. 일정한 고도에서 선상지들이 남-북 방향으로 연속적인 발달특성을 보이기 때문에 이러한 지형발달은 단층에 의한 결과로 해석되며, 이는 바하다 지형(Bajada)으로 해석할 수 있다. 선상지면에서는 남북방향의 선형구조를 따라 동측이 융기한 양상이 관찰되는데, 고위면에서는 약 10-20 m, 중위면에서는 약 10 m 내외의 지형낙차가 인지된다. 또한 지형낙차가 발생하는 지점에서 지구물리탐사 이상대가 분포하며, 야외조사 및 기존 연구결과 동측으로 경사하는 제4기 역단층이 지형낙차가 인지되는 지점에서 보고되었다. 이를 종합하면 이 선형구조를 따라 발달하는 지형낙차는 동측으로 경사하는 역단층에 의한 결과일 가능성이 높을 것으로 판단된다. 따라서 고기에 형성된 고도가 높은 선상지면을 따라 발생하는 지형기복이 상대적으로 신기에 형성된 낮은 고도의 선상지면에 발달하는 지형기복보다 높은 이유는 단층의 반복적 활동기록이 누적된 결과인 것으로 해석된다. 향후 신뢰

도 높은 연대결과와 보다 조밀하고 정밀한 지형분석이 병행된다면, 판구조적으로 판의 가장자리에 위치하여 활동도가 상대적으로 낮은 한반도에서의 고지진학 연구에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국수력원자력(주) 중앙연구원의 "월성부지 인근 단층조사 및 확률론적 지진재해도 평가(A16IP55)" 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 더불어 꼼꼼하게 이 논문을 검토해주시고 유익한 조언을 해주신 편집위원장님과 익명의 심사위원분들께도 감사드립니다.

## REFERENCES

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).

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., 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. Journal of Economic and Environmental Geology, 52, 251-258 (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, 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 (in Korean with English abstract).

Choi, W.-H., 2003, Neotectonics of the Gyeongju-Ulsan area in the southeastern part of Korean Peninsula. Thesis of Ph.D., Seoul National University, Seoul, 205 p (in Korean with English abstract).

Chwae, U., Choi, S.-J., Lee, B., Lee, Y., Ryoo, C.-R. and Song, M., 2000, Final report for Neotectonics research. Ministry of Science and ICT, N2-01-02-A-01, 590.

Geological survey of Korea, 1922, 1/50,000 geological map CHOYO sheet.

Goswami, P.K., Pant, C.C. and Pandey, S., 2009, Tectonic controls on the geomorphic evolution of alluvial fans in the Piedmont Zone of Ganga Plain, Uttarakhand, India. Journal of Earth System Science, 118, 245-259.

Ha, S., Lee, S., Song, Y., Kang, H.-C., Oh, J.-S., Seong, Y.B., Choi, J.-H. and Son, M., 2019, Paleoseismic features and Quaternary kinematics of the middle part of the Yangsan Fault, newly found. The 74th Annual Meeting of the Geological Society of Korea and 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Jeju, October 23-26, 17 p (in Korean).

Hwang, S.-I., 1998, The geomorphic development of alluvial fans and tectonic movements at Ha-Dong, Kyungju-City. Journal of the geomorphological association of Korea, 5, 189-200 (in Korean with English abstract).

Hwang, S.-I. and Yoon, S.-O., 2001, The Distribution and Geomorphic Development of Alluvial Fans along the Bulguksa Fault System in Gyeongju and Ulsan city, Southeastern Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 36, 217-232 (In Korean with English abstract).

Jeong, S.H., Naik, S., Rockwell, T.K. and Kim, Y.-S., 2018, EstiMation of horizontal displacement by 3D-trench investigation on the northern part of the Yangsan fault at Dangu-ri, Gyeongju, SE Korea. In AGU Fall Meeting (Abstracts), Washington, December 10-14.

Ji, G., Jang, D., Park, J. and Lee, S., 2008, Fluvial geomorphology of Korea under the satellite imagery. KIGAM, 198 (in Korean).

Kang, D.-H., Ha, S., Lee, S., Kang, H.-C. and Son, M., 2019, Characteristics of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and microstructure for the fault rock of the Quaternary faults in the major structural lines, SE Korea, 2019 Joint Conference of the Geological Science and Techonology of Korea (Abstract), Jeju, April 17-19, 79.

Kee, W.-S., Kim, B.C., Hwang, J.H., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-H., 2007, Structural characteristics of Quaternary reverse faulting on the Eapcheon 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, KIGAM, Daejeon, 327.

Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y.H., 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, 1-7, doi: 10.1126/science.aat6081

Kim, T., Kim, Y.-S., Shin, H.-C., Naik, S.P. and Adam, M.S.M., 2019a, Estimation of the tectonic activity for the central part of the Ulsan fault based on geomorphic/geologic analysis. The 74th Annual Meeting of the Geological Society of Korea and 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Jeju, October 23-26, 18 p (in Korean).

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., Kim, T. and Shin, H.-C., 2019b, Deduction methods and uncertainty of earthquake parameters based on paleoseismic concepts. The 74th Annual Meeting of the Geological Society of Korea and 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Jeju, October 23-26, 136 p (in Korean).

Kim, Y.-S., Kyung, J.B., Son, M., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Lee, J. and Kim, T., 2019c, Plan, problems and challenges for Korean Active Faults Map. The 74th Annual Meeting of the Geological Society of Korea and 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Jeju, October 23-26, 14 p (in Korean).

Klinger, Y., 2010, Relation between continental strike-slip earthquake segmentation and thickness of the crust. Journal of Geophysical Research, 115, B07306, doi: 10.1029/2009JB006550.

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., 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, Gyungjusi, Gyeongsanbuk-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 along the Yangsan fault. Journal of Geological Society of Korea, 19, 127-135.

Lee, Y.-H., Son, M., Ryu, C.-R., Kim, I.-S. and Choe, W.-C., 2002, Quaternary faults along the Ulsan fault: Gaegok, Hwalseongri, and Jinti. Proceedings of the Korean Earth Science Society spring meetings, 36 (in Korean).

McCalpin, J.P., 1996, Paleoseismology, Academic Press, San Diego, 588.

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. and Oike, K., 1995, Active fault topography and fault outcrops in the central part of Ulsan fault system, southeastern Korea (in Japanese abstract). Proceedings of 1995 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, A31-R22.

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 (in Japanese with English abstract).

Ryoo, 2009, A Report for the Quaternary Gaegok 6 Fault Developed in the Mid-eastern Part of Ulsan Fault Zone, Korea. Journal of Economic and Environmental Geology, 42, 635-643 (in Korean with English abstract).

Ryoo, C.-R., Chwae, U., Choi, S.-J. and Son, M., 2001, Discussion of the newly reported Quaternary fault at Singye and Hwalseonri, Oedong-eup, Gyeongju, Eastern part of the Ulsan fault. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstract) Daegu, 2 p (in Korean).

Ryoo, C.-R., Lee, B.J., Son, M., Lee, Y.H., Choi, S.-J. and Chwae, U., 2002, Quaternary faults in Gaegok-ri, Oedong-eup, Gyeongju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 38, 309-323 (in Korean with English abstract).

Ryoo, C.-R., Son, M., Lee, Y.H., Choi, S.-J. and Chwae, U., 2004, Quaternary faults around Bulguk-sa, Gyeongju, Korea. KIGAM Bulletin, 8, 3-17.

Son, M. and Ryoo, C.-R., 1999, Quaternary faults in the northeastern part of the Ulsan Fault zone, Korea. Journal of the Korean Geomorphological Association, 6, 81.

Telbisz, T., Kovacs, G., Szekely, B. and Szabo, J., 2013, Topographic swath profile analysis: a generalization

and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. Zeitschrift fur Geomorphologie, 57, 485-513.

Valentini, A., Pace, B., Boncio, P., Visini, F., Pagliaroli, A. and Pergalani, F., 2019, Definition of Seismic Input From Fault-Based PSHA: Remarks After the 2016 Central Italy Earthquake Sequence. Tectonics, 38, 595-620, https:// doi.org/ 10.1029/2018TC005086.

Yang, J.S., 2006, Quaternary fault activity in the southeastern part of the Korean Peninsula. Ph.D., thesis Kangwon National University, Chuncheon, 382 p (in Korean with English abstract).

Yoon, S.-O. and Hwang, S.I., 1999, The Active Fault Topography of the Northern Part of the Bulguksa Fault System in Kyungju City , Southeastern Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 34, 231-246 (in Korean with English abstract).

Yoon, S.-O. and Hwang, S.-I., 2004, The Geomorphic Development of Alluvial Fans in the Gyeongju City and Cheonbuk area, Southeastern Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 39, 56-69 (in Korean with English abstract).

Yoon, S.-O., Saito, K., Hwang, S.I., Tanaka, Y. and Oguchi, T., 2005, The Theoretical study and distributional characteristics of alluvial fans in Korean Peninsula. Journal of the Korean Geographical Society, 40, 335-352 (in Korean with English abstract).

Received : Janurary 10, 2020
Revised : February 18, 2020
Accepted : February 21, 2020