

울산 언양 일대 선상지 단구의 형성과정과 제4기 단층 변위

이광률^{1,‡} · 김주연² · 이해빈¹ · 정지윤¹

¹경북대학교 사범대학 지리교육과

²서울대학교 사범대학 지리교육과

Geomorphological process and the Quaternary fault displacement of alluvial fan terraces in the Eonyang area, Ulsan

Gwang-Ryul Lee^{1,‡} · Ju-Yeon Kim² · Haebin Lee¹ · Ji Yun Jeong¹

¹Department of Geography Education, Teachers College, Kyungpook National University,
Daegu 41566, Republic of Korea

²Department of Geography Education, Teachers College, Seoul National University,
Seoul 08826, Republic of Korea

요 약

양산 단층곡의 곡저를 따라 연속적으로 발달한 선상지는 시간이 지나면서 개석 작용을 받아 선상지 단구로 변화하였다. 그리고 선상지 단구와 같은 제4기 충적 지형면의 형성 시기와 변위량을 파악하면, 지형 형성 이후 단층 운동에 의한 지표의 누적 변위율을 산출할 수 있다. 본 연구는 울산 언양 일대 선상지 단구의 형성과정을 파악하고, 단층 운동에 의한 변위량 및 누적 변위 속도를 산출하였다. 4개 지점 선상지 단구 퇴적층의 OSL 연대 측정 결과, 선상지 단구 3면은 약 115 ka, 4면은 약 155 ka에 형성된 것으로 분석되었다. 이 시기는 동아시아 여름 몬순의 강도 증가 시기와 관련성이 높을 것으로 추정된다. 단층선이 지나는 3개 선상지 단구 노두에서 분석한 지형면의 변위는 모두 우수향 역단층으로 확인되었다. 그리고 선상지 단구 형성 이후 수평 누적 변위율은 평균 0.087 m/ka, 수직 누적 변위율은 평균 0.006 m/ka로 산출되었다.

주요어: 양산 단층, 선상지, 선상지 단구, 단층곡, 여름 몬순, 변위율

ABSTRACT: The alluvial fans that formed continuously at the bottom of the Yangsan fault valley have experienced dissection over time, transforming into an alluvial fan terraces. By evaluating the formative age and displacement of Quaternary alluvial topographic surfaces such as fan terraces, the cumulative slip rate of the land surface influenced by fault movement after landform formation can be calculated. This study identified the geomorphological processes of the fan terrace in the Eonyang area of Ulsan and calculated the displacement and cumulative slip rate due to fault movement. Based on OSL age dating from sedimentary layers at four different fan terrace, it was suggested that the third and fourth fan terrace surfaces correspond to approximately 115 ka and 155 ka, respectively. This period is estimated to be highly related to the increased in the intensity of the East Asian summer monsoon. At the three alluvial terraces outcrops intersected by the fault line, the observed displacements of the topographic surfaces were consistently identified as characteristics of dextral strike-slip reverse faults. And after the formation of the fan terraces, the averaged horizontal and vertical cumulative slip rate was 0.087 m/ka and 0.006 m/ka, respectively.

Key words: Yangsan fault, alluvial fan, fan terrace, fault valley, summer monsoon, slip rate

[‡]Corresponding author: +82-53-950-5859, E-mail: georiver@knu.ac.kr

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

한반도 남동부에는 단층 작용에 의해 형성된 것으로 추정되는 북북동-남남서 주향을 갖는 여러 열의 선구조(lineament) 또는 선형곡(linear valley)이 발달해 있다. 그중 가장 대표적인 선형곡이 양산 단층에 의해 형성된 양산 단층곡(fault valley)이다. 양산 단층은 한반도 남동부를 북북동-남남서 방향으로 크게 가르는 대규모 단층 군집의 중심에 위치한 단층으로, 부산의 낙동강 하구에서 시작하여 양산, 울산 언양, 경주, 포항 신광을 지나 영덕 강구 부근까지 이어지는 수열의 단층이다(Jo *et al.*, 1994; Park and Lee, 2018). 양산 단층은 기반암이 제4기층을 올라타고 있는 역이동성 우수향 주향이동 단층으로 분류되며(Hwang *et al.*, 2004; Gwon *et al.*, 2020), 신생대 에오세 이후 북동-남서 압축 환경하에서 최소 2번 이상의 주향이동 운동과 경사이동 운동을 경험한 것으로 알려져 있다(Chae and Chang, 1994; Song *et al.*, 2016; Cheon *et al.*, 2017, 2019).

선상지(alluvial fan)는 유로가 제한되는 산지의 좁은 하곡에서 유로 변화가 자유로운 넓은 평지로 흘러나오는 하천이 유속과 유량 감소로 인해 곡구의 전면에 퇴적물을 쌓아서 형성한 지형이다(Hook, 1967; Summerfield, 1991; Ritter *et al.*, 2006; Stock *et al.*, 2008; Huggett, 2011; Lee and Cho, 2013). 경사이동 단층에 의해 형성된 단층애가 발달한 단층곡의 가장자리는 단층 운동에 의해 상승한 산지의 좁은 하

곡과 단층곡을 이룬 넓은 곡저가 접하는 지점이므로, 단층곡의 측면에서 유입하는 하천에 의해 단층곡의 가장자리를 따라 선상지가 연속적으로 발달하기 유리하다(Keller and Pinter, 2002; 그림 1). 그리고 선상지가 형성된 이후 시간이 경과하면, 선상지 지형면에 대한 하천의 하각 작용으로 지형면의 파괴와 하곡의 고도 저하가 발생하고, 하각으로 형성된 개석곡의 내부에서는 하천의 퇴적 작용으로 새로운 선상지 지형면이 형성된다. 그리고 이러한 과정이 반복되면서 선상지 원 지형면의 내부와 주변에는 하안단구와 같이 여러 단을 이룬 계단 모양의 선상지가 형성되기도 하는데, 이러한 단구화된 지형을 선상지 단구(fan terrace)라고 한다(Hsieh and Chyi, 2010; He *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; McClain *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2023). 양산 단층곡의 곡저를 따라서도 선상지나 선상지 단구가 연속적으로 잘 발달하고 있다. 그중 경주 시가지에 해당하는 경주 선상지는 우리나라에서 가장 규모가 큰 선상지이며, 경주시 안강읍의 안강 선상지, 울주군 삼남읍의 상천 선상지도 규모가 큰 편이다(Yoon and Hwang, 2004; Yoon *et al.*, 2005; Park and Lee, 2018).

신생대 제4기에 활동한 활성 단층인 양산 단층의 단층곡에 발달한 선상지나 하안단구 등의 제4기 층적 지형은 지형면이 형성된 이후에 단층 운동을 경험하였기 때문에, 퇴적층 내부에 단층 작용에 의한 변위의 흔적이 그대로 남겨져 있다. 지형면의 변위는 여러 차례의 단층 작용에 의해 계속 누적되므로, 형성 시기가 오래된 지형면은 최근에 형성된 지형면보다 단층에 의한 변위의 정도가 더 크게 나타난다(Keller and Pinter, 2002). 따라서 활성 단층 지역에 발달한 제4기 층적 지형면의 형성 시기와 변위의 정도를 파악하면, 지형 형성 이후 단층 작용에 의한 지표의 누적 변위 속도(변위율)를 계산할 수 있다.

본 연구는 양산 단층곡의 중남부인 울산 언양 일대에 발달한 선상지 단구의 지형 형성 시기와 형성 과정을 밝히고, 제4기 활성 단층에 의한 선상지 단구 지형면의 변위 속도를 분석하고자 한다. 이를 위해 울산광역시 울주군 두서면 및 두동면 남부에서 경남 양산시 하북면 북부까지의 울산 단층곡을 대상으로 선상지 단구 지형면을 분류하여 분포 특성을 분석하고, 선상지 단구 퇴적층 노두에서 수집된 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 절대 연대 측

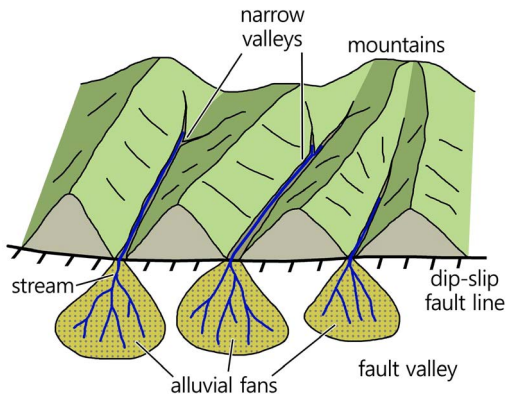


Fig. 1. Alluvial fans formed in dip-slip fault valley (modifying Keller and Pinter (2002)).

정 결과를 통해 선상지 단구의 형성 시기를 파악한 후, 선상지 지구 지형면의 고도 및 분포 특성과 관련 선행 연구 결과를 종합하여 연구 지역의 선상지 지구 형성과정을 추정하였다. 그리고 단층 작용에 의해 선상지 지구 지형면이 변위된 형상을 분석하여 지형면의 수평 및 수직 변위량을 측정하였고, 이를 해당 지형면의 절대 연대로 나누어 선상지 지구 형성 이후의 제4기 단층 작용에 의한 누적 변위 속도를 산출하였다.

1.2 연구 방법

1:5,000 수치지형도와 1:50,000 지질도를 이용하여 양산 단층곡 일대의 개략적인 지형 및 지질 특성을 파악하고, 1:5,000 수치지형도를 토대로 연구 지역의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하여 선상지 단구의 발달에 영향을 미치는 하천 수계와 지형 기복을 파악하였다. 그리고 대규모의 인위적인 지형 변형이 이루어지기 이전의 시기인 1968년, 1977년에 촬영된 1:20,000 축척의 항공사진을 이용하여 DSM (Digital Surface Model)을 제작 및 분석하고 선상지 지구 지형면을 일차적으로 분류하였다. 다음으로 야외 조사를 통해 지형면을 확인한 후에, 최종 분류된 지형면을 대상으로, ArcGIS 프로그램 등을 이용하여 선상지 지구 분포도를 작성하였다.

연구 지역에 대한 야외 조사에서는 선상지 지구 지형과 퇴적층의 특성을 확인하고, 발견된 퇴적층 노두에 대한 절대 연대 측정 시료 수집과 정밀 지형 측량을 실시하였다. 총 4개 지점 노두의 퇴적층을 대상으로 OSL 절대 연대 측정을 진행하였다. OSL 연대 측정 시료는 퇴적층에 금속판을 삽입해 수집하였고, 이를 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 조립 (90~250 μm) 석영 입자의 절대 연대를 획득하였다. 그리고 연대 측정 지점과 선상지 지구 지형면의 해발고도는 최대 오차 1 cm인 Sokkia의 GNSS (Global Network Satellite System) 수신기 GRX1을 이용하여 정밀 측량하였다.

제4기 단층 작용에 의한 선상지 지구 지형면의 수평 및 수직적 변위량 측정은 Kim *et al.* (2020)이 사용하였던 방법인 지구 지형의 수직적 기복과 평면적 형상을 기준으로 수평 및 수직적으로 어긋난 거리와 높이를 통해 단층선이 지나가는 3개 노두의 지형면에서 파악하였다. 수평 변위량은 정사 보정된 항공사

진을 이용하여 단층선의 양측에서 관찰되는 변위된 선상지 지구에의 형상에 맞추어 추세선을 그은 후, 양측 추세선과 단층선이 만나는 두 교점 사이의 거리 차이로 측정하였다. 수직 변위량은 Hong and Shin (2021)에서 제시된 방법과 같이 단층선을 중심으로 양측 지형면에 종단선의 특성을 반영한 경사 추세선을 긋고, 양측 추세선과 단층선이 접하는 두 교점에서 나타나는 고도의 차이로 측정하였다. 그리고 측정된 선상지 단구의 변위량을 선상지 단구의 형성 연대로 나누어 선상지의 지구 형성 이후 단층 작용에 의한 지형면의 누적 변위 속도를 계산하고, 이 값을 양산 단층곡의 단층 변위를 주제로 한 선행 연구와 비교·분석하였다.

1.3 연구 지역

연구 지역은 양산 단층곡 중남부의 울산 언양 일대로서, 행정구역상으로는 울산광역시 울주군 두서면 및 두동면 남부에서 경남 양산시 하북면 북부까지 약 16 km 구간의 북북동-남남서 주향의 단층곡이다(그림 2). 단층곡의 서쪽 지괴에는 영축산(1,082 m), 신불산(1,159 m), 고현산(1,034 m) 등 고도가 높고 경사가 급한 산지가 분포하고, 동쪽 지괴에는 상대적으로 고도가 낮고 경사가 완만한 구릉과 낮은 산지가 주로 분포한다. 연구 지역의 지질은 경상계 신라층군 주산 안산암, 언양 화강암, 대구층 퇴적암으로 크게 구성된다. 대구층 퇴적암은 단층곡 동쪽 지괴에 분포하여 구릉이나 낮은 산지를 이루고 있다. 반면, 주산 안산암과 언양 화강암은 높은 고도의 급경사 산지가 발달한 단층곡의 서쪽 지괴에 주로 분포한다.

단층 파쇄대의 차별 풍화 침식 작용으로 형성된 단층곡은 양산 단층선과 같은 북북동-남남서 주향을 가진 폭 1~3 km의 넓은 선형곡을 이루고 있다. 그러나 태화강, 보은천, 반곡천, 상천천 등 연구 지역의 주요 하천은 단층곡을 따라 흐르지 않고 대부분 서에서 동으로 단층곡을 가로지르는 하계망을 이루고 있다. 이러한 이유로 이 지역 하천은 단층곡 형성 이전의 유로를 유지하고 있는 재충 또는 선행 하천으로 판단하고 있다(Park and Lee, 2018). 서쪽 지괴의 산지에서 발원한 여러 열의 지류 하천은 남류하여 낙동강에 유입하는 양산천을 제외하고는 대부분 태화강에 합류하며, 남동류 또는 동류하여 동해로

유입한다. 그리고 단층곡의 곡저에는 제4기 말 동안에 단층곡을 가로질러 유입하는 하천에 의해 형성된 여러 단의 선상지 단구 지형이 잘 발달하고 있다.

2. 선상지 단구의 분포와 퇴적층 특성

2.1 선상지 단구의 분포

연구 지역에는 고도가 높은 단층곡 서쪽 산지의 좁은 하곡을 흘러내린 많은 소하천이 단층곡의 곡저에 유입하면서 곡구에 퇴적물을 쌓아 형성한 선상지가 단층곡을 따라 합류 선상지(confluent fan)의 형태를 이루며 연속적으로 잘 발달해 있다. 이들 선상지는 시기를 달리하는 여러 지형면을 이루고 있으며, 하천에 의한 지형면의 개석 및 삭박과 매적 작용

이 반복된 결과, 현재는 고도를 달리하는 여러 단의 지형면을 이룬 선상지 단구로서 분포하고 있다(그림 3, 4). 선상지 단구는 하상 및 인접 지형면과의 고도차를 토대로, 가장 최근에 형성되어 하상 비고가가 가장 낮은 1면부터 가장 오래전에 형성되어 하상 비고가가 가장 높은 4면까지 총 4개의 지형면으로 구분되었다.

연구 지역 북동부의 반곡천과 구량천 일대에서는 4단의 선상지 단구 지형면이 분류되었다. 단층곡 내부에서 남동류하는 반곡천과 구량천에 의해 형성된 선상지 단구 1, 2, 3면은 하안을 따라 북서-남동 방향으로 긴 형태를 이룬다. 반곡리에 분포하는 가장 오래된 선상지 단구 4면은 개석이 많이 진행되어 현재는 파편적인 지형면을 나타내며, 반곡천과 구량천

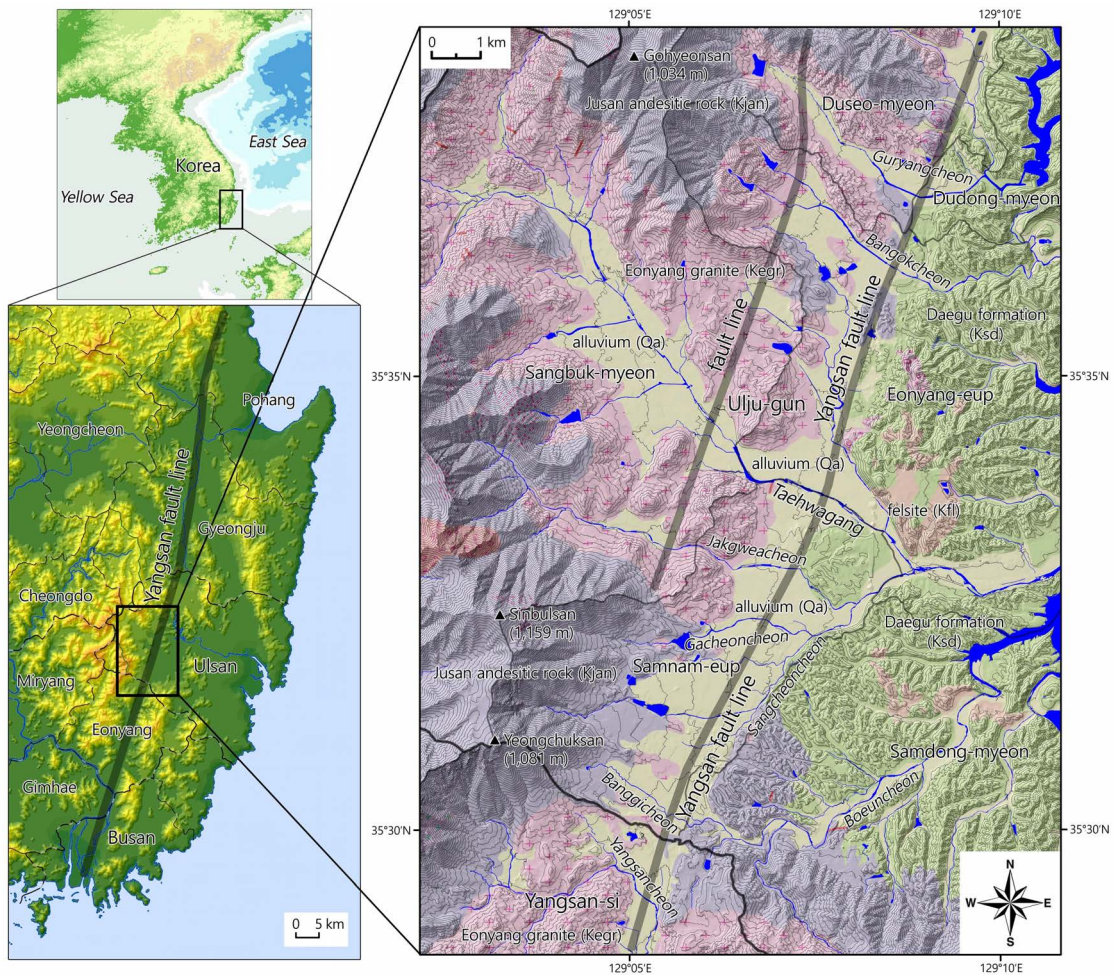


Fig. 2. Overview and geological setting in study area.

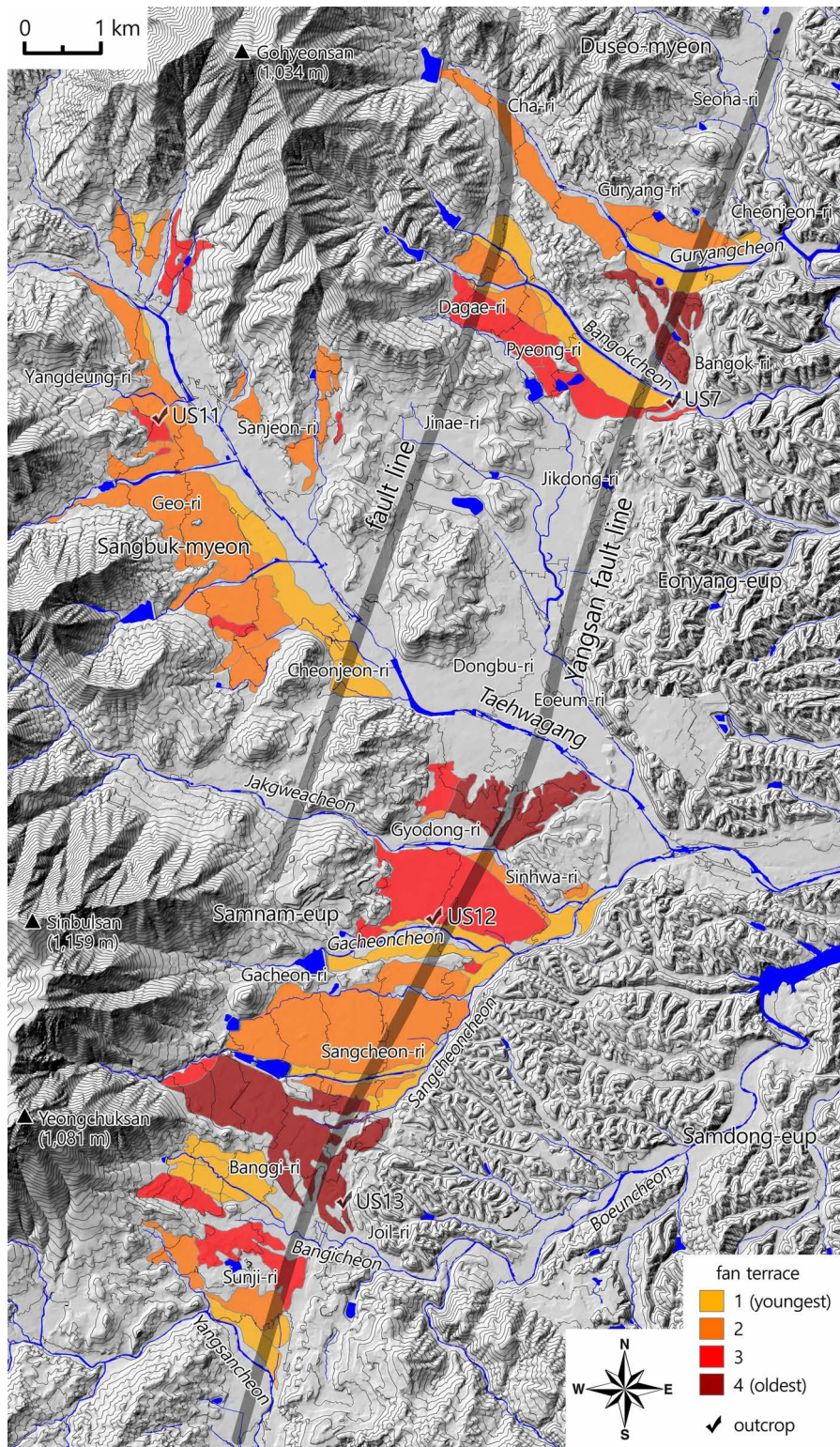


Fig. 3. Distribution of fan terraces and OSL sampling points in the Eonyang area of Yangsan fault valley.

사이의 분수계를 이루고 있다. 태화강의 상류부에 해당하는 연구 지역 북서부에는 3단의 선상지 단구가 발달해 있다. 선상지 단구 3면은 형성 이후 오랜 시간 동안 개석을 받은 결과, 일부 지역에만 좁은 면적으로 남겨져 있다. 이에 비해 선상지 단구 1면과 2면은 태화강에 유입하는 소하천의 양안을 따라 비교적 넓게 발달해 있다.

울주군 삼남읍 일대인 연구 지역 남부에서는 규모가 큰 4단의 선상지 단구가 단층곡을 따라 합류 선상지의 형태를 이루며 연속적으로 잘 발달한다. 삼남읍 일대는 단층곡 서부의 고도가 높고 경사가 급한 신불산, 영축산의 산지와 평탄하고 넓은 단층곡저가 연속적으로 접하고 있어서 선상지가 형성되기 유리한 지형 조건을 가지고 있다. 서부 산지의 협곡에서 단층 곡저로 유입된 작괘천, 가천천, 상천천, 방기천, 양산천의 하안에는 하류 방향으로 약간 펼쳐진 형태의 전형적인 선상지 지형면이 연속적으로 발달하고 있다(그림 4). 태화강과 작괘천 사이의 하안에는 선상지 단구 4면이, 작괘천과 가천천 사이에는 3면이, 가천천과 상천천 사이에는 2면이, 상천천과 방기천 사이에는 4면이 상대적으로 넓게 발달해 있다. 그리고 과거에 하천이 흘렀던 이들 선상지 단

구면은 하천의 하각 작용으로 하상 비고가 높아져 현재는 각 하천 유역을 가르는 분수계의 역할을 하고 있다. 한편, 양산 단층곡에서 경주 선상지, 안강 선상지와 더불어 규모가 큰 선상지로 알려져 있는 상천 선상지는 상천천이 상천리 일대에 형성한 선상지 단구 2면에 해당한다.

2.2 선상지 단구의 퇴적층 특성

연구 지역에서는 US7, 11, 12, 13의 총 4개 지점에서 선상지 단구 퇴적층 노두가 확인되었다(그림 3, 4). 이중 US7, 12, 13은 양산 단층곡에 발달한 선상지 단구 3면과 4면의 노두이며, US11은 양산 단층곡에서 서쪽으로 떨어진 태화강 상류부 하곡에 위치한 노두이다.

US7은 울주군 언양읍 반곡리의 양산 단층곡 내에 위치해 있으며, 지형면의 바로 북쪽에 위치한 반곡천에 의해 형성된 선상지 단구 3면의 노두이다(그림 4a). 고속철도 선로 측면에 드러난 절개지에서는 모래질 실트를 기질로 한 아각~아원의 원마도를 가진 잔자갈(pebble) 및 왕자갈(cobble)급 자갈층이 2 m 이상의 두께로 확인된다(그림 5a). OSL 연대 측정 시료는 퇴적층 내에서도 상대적으로 기질의 함량

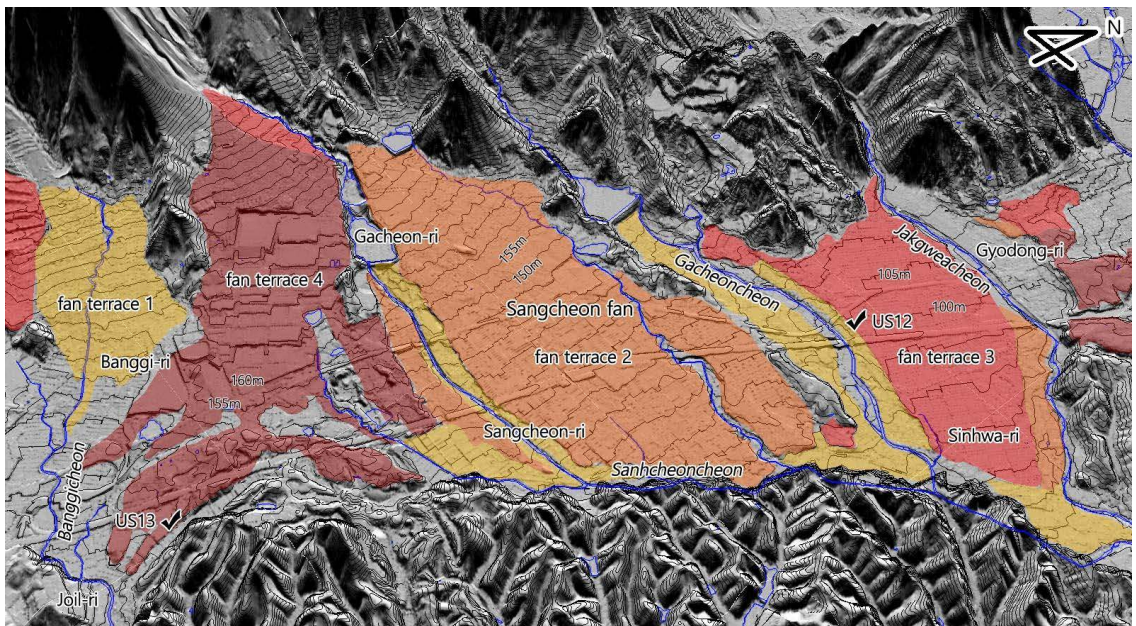


Fig. 4. 3D map of fan terraces around Sancheon fan(Gyodong-ri~Banggi-ri) in the Eonyang area of Yangsan fault valley.

이 많은 곳에서 수집하였으며, OSL 연대는 117 ± 7 ka로 획득되어 MIS (Marine Oxygen Isotope Stage)

5에 형성된 하성층으로 분석되었다(표 1). 시료 수집 지점의 해발고도는 96.8 m, 시료 수집 지점 바로

a. outcrop US7 of fan terrace 3 in Bangok-ri



b. outcrop US11 of fan terrace 3 in Geo-ri



c. outcrop US12 of fan terrace 3 in Sinhwa-ri



d. outcrop US13 of fan terrace 4 in Joil-ri

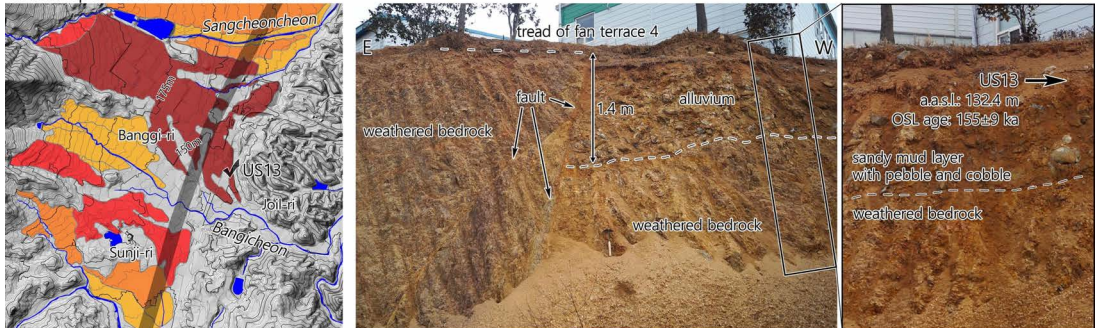


Fig. 5. Geomorphological maps and photograph of OSL sampling points in the Eonyang area of Yangsan fault valley.

Table 1. Result for OSL age dating samples in the Eonyang area of Yangsan fault valley.

Sample	Dose Rate (Gy/ka)	Water content (%)	Equivalent Dose (Gy)	Aliquots used (n/N)	OSL age (ka, 1 σ SE)
US7	3.04 \pm 0.08 (2.88 \pm 0.08)	26.0 (32.5)	356 \pm 20	12/12	117 \pm 7 (124 \pm 8)
US11	2.27 \pm 0.06 (2.20 \pm 0.06)	21.4 (25.0)	260 \pm 25	12/16	114 \pm 11 (118 \pm 12)
US12	3.16 \pm 0.08 (2.83 \pm 0.08)	11.3 (22.7)	361 \pm 25	16/16	114 \pm 8 (128 \pm 9)
US13	2.12 \pm 0.06 (2.03 \pm 0.06)	30.8 (36.2)	327 \pm 17	10/12	155 \pm 9 (161 \pm 9)

Numbers in parentheses are those calculated based on saturated water contents.

Table 2. Location and topographic characteristics for 4 outcrops in the study area.

Site	Location		Valley type	Level of fan terrace	Texture of sampling point	Altitude above sea level (m)	
	administrative district	latitude, longitude				sampling point	terrace tread
US7	Ulju Eonyang Bangok	35°36'01"N, 129°08'51"E	fault valley	3	gravelly sandy mud	96.8	102.0
US11	Ulju Sangbuk Geo	35°35'54"N, 129°04'24"E	river valley	3	gravelly muddy sand	168.3	171.7
US12	Ulju Samnam Sinhwa	35°32'22"N, 129°06'46"E	fault valley	3	gravelly sandy mud	102.2	104.0
US13	Ulju Samdong Joil	35°30'22"N, 129°05'59"E	fault valley	4	gravelly sandy mud	132.4	134.9

상부의 단구면 최고 고도는 102.0 m로 측정되었다(표 2).

US11은 양산 단층곡으로부터 서쪽으로 약 5 km 떨어진 태화강 상류부 하곡에 위치하며, 행정구역은 울주군 상북면 거리이다. 이곳에는 양동리와 거리의 서쪽 산지에서 발원하여 태화강에 유입하는 소하천에 의해 형성된 선상지 단구가 발달해 있으며, US11은 양동리 소하천에 의해 형성된 선상지 단구 3면이 택지 개발 공사 중에 절개되어 드러난 4~5 m 두께의 퇴적층 노두이다(그림 4b, 5b). 퇴적층의 하부는 아각~아원의 잔자갈과 왕자갈을 포함한 실트질 모래층을 이루며, 상부로 갈수록 자갈의 입도와 밀도가 작아지는 경향을 보인다. OSL 연대 측정 시료는 자갈 사이의 모래층에서 수집하였으며, OSL 연대는 114 \pm 11 ka로 획득되어 MIS 5에 형성된 하성층으로 분석되었다(표 1). 시료 수집 지점의 해발고도는 168.3 m, 시료 수집 지점 바로 상부의 단구면 최

고 고도는 171.7 m이다(표 2).

US12는 울주군 삼남읍 신화리의 양산 단층곡 내에 위치해 있으며, 지형면의 바로 남쪽에 위치한 가천천에 의해 형성된 선상지 단구 3면의 노두이다(그림 4c). 농경지로 이용되는 단구면의 하부에 드러난 절개지에는 모래질 실트를 기질로 한 아각~아원의 원마도를 가진 잔자갈과 왕자갈로 이루어진 자갈층이 2.5 m 내외의 두께로 나타난다(그림 5c). OSL 연대 측정 시료는 퇴적층 내에서도 상대적으로 기질의 함량이 많은 곳에서 수집하였으며, OSL 연대는 114 \pm 8 ka로 획득되어 MIS 5에 형성된 하성층으로 분석되었다(표 1). 시료 수집 지점의 해발고도는 102.2 m, 시료 수집 지점 상부의 단구면 최고 고도는 104.0 m이다(표 2).

US13은 울주군 삼동면 조일리의 양산 단층곡 내에 위치해 있다. 지형면은 선상지 단구 4면의 말단부에 위치하며 남쪽에 인접한 방기천이 아닌 북쪽의

상천천에 의해 형성된 것으로 추정된다(그림 3, 4d). 선상지 단구 지형면의 형태와 분포 특성으로 볼 때, 형성 당시의 상천천은 북동류하는 현재 유로와는 달리 남동류하여 현재의 방기천 하류부 하곡을 흘러 보은천에 유입하였을 가능성이 높다. 노두는 공장 부지의 확장 과정에서 드러난 절개지로서, 선상지 단구 퇴적층을 변위시킨 제4기 역단층 구조가 확인된다(그림 5d). 기반암으로 이루어진 동쪽 지괴가 선상지 단구 4면 퇴적층으로 이루어진 서쪽 지괴를 타고 오르면서, 서쪽 지괴 상부의 단구면은 약 1.4 m의 수직 변위량을 나타내고 있다. 단층면 서쪽에 위치한 퇴적층은 모래질 실트를 기질로 한 아각~아원의 원마도를 가진 잔자갈과 왕자갈로 이루어진 자갈층을 이룬다. OSL 연대 측정 시료는 기질의 함량이 많은 곳에서 수집하였으며, OSL 연대는 155±9 ka로 획득되어 MIS 6에 형성된 하성층으로 분석되었다(표 1). 시료 수집 지점의 해발고도는 132.4 m, 시료 수집 지점 바로 상부의 단구면 최고 고도는 134.9 m이다(표 2).

3. 선상지 단구의 형성 시기 및 형성과정

언양 일대에 발달한 선상지 단구 중 가장 오래된 선상지 단구 4면인 US13의 OSL 연대는 MIS 6인 155 ka로 나타났다. 그리고 4면보다 덜 오래된 선상지 단구 3면은 US7이 117 ka, US11과 US12는 모두 MIS 5인 약 114 ka로 측정되어, 언양 일대의 선상지 단구 3면은 115 ka 무렵에 형성되었다고 볼 수 있다. 1면과 2면, 2면과 3면 사이에 지형면의 비고(고도 차이)는 3~6 m 내외이며, 3면과 4면 사이의 비고는 4면의 연대가 측정된 방기리 일대에서 4~7 m의 범위로 나타나고 있다. 따라서 하천이 고도를 낮추는 하각 속도가 대체로 일정하였다고 가정하면, 선상지 단구 3면과 2면, 그리고 2면과 1면의 연대 차이는 선상지 단구 3면과 4면의 연대 차이와 크게 다르지 않을 것으로 추정된다. 한편, Lee (2022)는 우리나라 침식분지 내에 발달한 12개 지점 선상지의 절대 연대를 토대로 우리나라 선상지 1~3면의 형성 시기가 약 10 ka 이내, 30 ka 내외, 50 ka 내외, 75 ka 내외, 90 ka 내외로 수렴된다고 제시하였다. 따라서 선상지 단구의 지형 비고와 선행 연구 결과를 종합할 때, 언양 일대 선상지 단구 2면의 형성 시

기는 75 ka 무렵, 1면의 형성 시기는 30 ka 무렵일 가능성이 높다.

지형에 대한 절대 연대 측정이 활발하게 이루어지기 전인 2000년대 초반까지, 우리나라 산지 하천에 발달한 단구는 신생대 제4기 동안의 장기적 기후 변동에 따른 빙기-매적, 간빙기-하각의 과정을 통해 형성된 기후 단구로서, 빙기에 단구 퇴적층이 형성되는 것으로 설명되어왔다. 그러나 우리나라와 같은 중위도 습윤 기후 지역에서 선상지가 형성되기 위해서는 사면의 대규모 산사태와 하천의 폭발적 유량 증가가 동시에 발생할 수 있는 조건이 필요하고, 이는 집중호우나 태풍에 의한 수천 년 주기의 돌발성 홍수가 발생하는 상황에 해당한다(Ritter *et al.*, 2011). 그리고 절대 연대 측정이 이루어진 2000년대 중반 이후의 우리나라 선상지나 하안단구에 대한 대부분의 선행 연구에서 단구 퇴적층의 형성 시기는 빙기와 간빙기를 모두 지시하고 있으며, 우리나라와 같은 중위도 몬순 기후 지역에서는 4만 1천 년의 중주기나 2만 3천 년의 단주기를 갖는 여름 몬순의 강도 변화가 여름철 강수량에 크게 영향을 미쳐 선상지나 하안단구와 같은 하천의 매적과 하각 작용에 의한 지형 형성을 유발하는 것으로 알려져 있다(Yu *et al.*, 2006; Li, F. *et al.*, 2008; Tachikawa *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017; Li, Y. *et al.*, 2018; Lee, 2019, 2022; Lee *et al.*, 2023). 언양 일대 선상지 단구의 연대도 4면은 빙기인 MIS 6으로, 3면은 간빙기인 MIS 5로 나타나서, 빙기-간빙기의 장주기 기후 변동보다는 중-단기적인 기후 변화나 사건에 의한 영향으로 선상지 단구가 형성되었다고 볼 수 있다. 그리고 4개 지점 노두의 퇴적층 모두에서 실트부터 왕자갈까지 다양한 크기의 입자가 층리와 분급이 매우 불량한 상태로 퇴적되어 있으며, 자갈의 원마도가 아각~아원으로 양호하지 않다. 따라서 선상지 단구 퇴적층은 수천~수만 년 주기의 대규모 돌발 홍수로 인해 하천의 유량이 폭발적으로 증가할 때, 산사태가 발생한 배후 산지로부터 공급된 우수 퇴적물이 하곡을 따라 짧은 거리를 이동한 후 단층곡에 유입되면서 하도의 분류에 따른 유량과 유속의 급격한 감소로 인해 일시적으로 퇴적된 층적 지형으로 볼 수 있다.

양산 단층곡의 언양 일대 선상지 단구의 형성 시기와 과정을 정리하면 그림 6과 같다. 선상지 단구 4

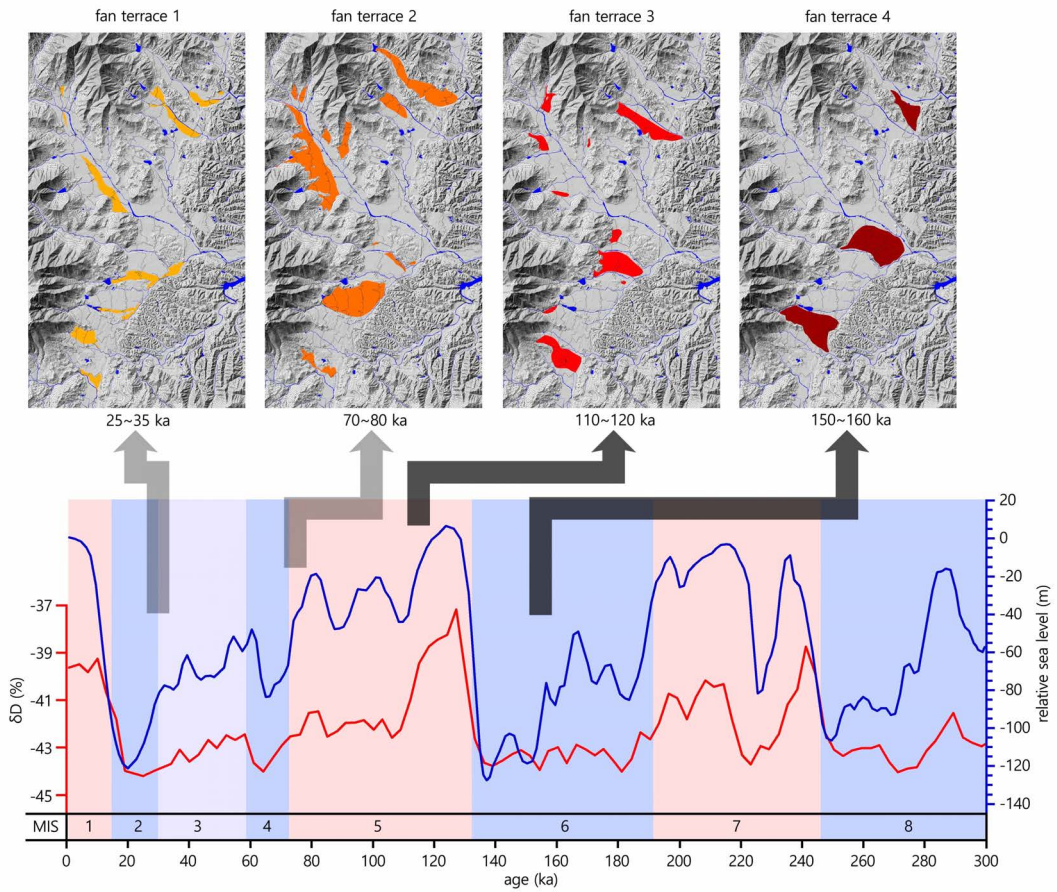
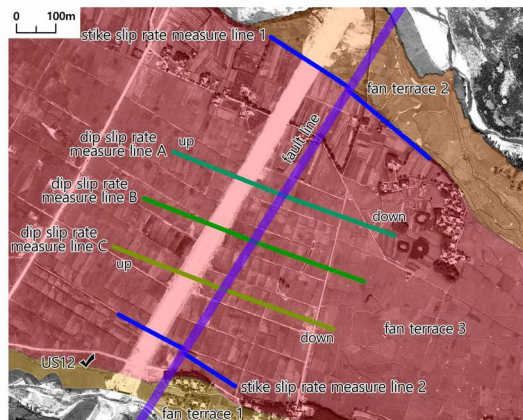
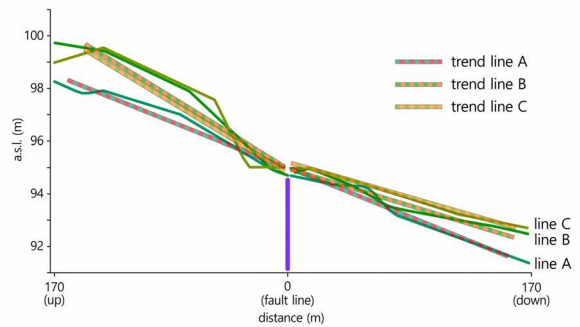


Fig. 6. Formation ages of fan terrace 1~4 in the Eonyang area of Yangsan fault valley. Red line and blue line of the graph below indicates δD as a function of CO_2 from the Vostok (Siegenthaler *et al.*, 2005) and relative sea level change (Waelbroeck *et al.*, 2002), respectively.



a. slip rate measure line for fan terrace of outcrop US12



b. dip slip rate measure result for fan terrace of outcrop US12

Fig. 7. Measurement lines and results of horizontal and vertical slip rates for fan terrace of outcrop US12 in the Eonyang area of Yangsan fault valley.

면은 150~160 ka 무렵에 강수량 및 유량 증가로 언양 일대 소하천에서 호우로 인해 대규모 홍수가 발생하였고, 그로 인해, 구량천, 작괘천, 상천천에서는 서쪽 산지에서 단층곡의 곡저로 유입하는 곡구를 중심으로 하도의 분류와 산지 공급 물질의 퇴적이 집중적으로 발생하면서 선상지가 형성되었을 것이다. 초기의 선상지 지형면은 하류를 향해 넓게 펼쳐진 형태를 이루었지만, 시간이 지나면서 지형면 내에서는 원지형이 파괴되는 개석 작용으로 개석곡이 형성되었고, 선상지를 형성한 하천은 고도를 낮추는 하각 작용을 통해 단구 주변에 낮고 넓은 곡저를 형성한 결과, 선상지는 단구화되어 현재와 같은 선상지 단구로 변화되었을 것이다. 110~120 ka 무렵에는 반곡천, 작괘천, 가천천, 방기천 등에서 대규모 홍수가 발생하면서 하천의 하각 작용을 통해 형성된 넓은 곡저에 선상지 3면이, 70~80 ka 무렵에는 구량천, 반곡천, 태화강 상류 소하천, 상천천 등의 곡저에 선상지 2면이 형성되었으며, 이들 지형면도 시간이 지나면서 개석과 하각 작용으로 지형면 내부에 개석곡이 형성되고 하천과의 고도 차이가 커지면서 현재는 선상지 단구 3면과 2면으로 변화하였다. 그리고 25~35 ka 무렵에도 언양 일대 대부분 소하천에서 호우로 인해 유량과 퇴적물 공급이 증가하면서 개석곡 내부를 따라 좁고 긴 형태의 충적 지형을 형성하였을 것으로 추정되며, 이 지형면 또한 시간이 가면서 단구화되어 현재는 선상지 단구 1면이 되었다.

4. 선상지 단구의 단층 변위

신생대 제4기에 발생한 대규모 단층 운동은 제4기에 형성된 충적 지형의 고도와 형태를 변위시킬 수 있다. 단층선이 제4기 충적 지형면을 가로지르는 경우, 단층에 의한 충적 지형면의 변위는 제4기 단층 또는 활성 단층의 가장 뚜렷한 증거로 간주된다. 단층 작용은 일회성의 운동이 아니라 오랜 기간에 여러 차례 발생하며 단층에 의한 지형면의 변위는 계속 누적되므로, 지형면의 형성 시기와 변위의 정도를 파악할 수 있다면, 지형 형성 이후 단층 작용에 의한 지표의 누적 변위 속도를 계산할 수 있다. 양산 단층곡의 언양 지역 일대에서는 다수의 제4기 단층이 확인되었으며, 이들 중 일부에 대해 수직 및 수평 변위율이 산출되었다(표 3). Okada *et al.* (1994), Choi

et al. (1998), Kyung *et al.* (1999a, 1999b), Cheon *et al.* (2020)에 의해 단층 노두와 트렌치 조사를 통해 측정된 수직 변위율은 0.015~0.04 m/ka의 범위에서 나타나며, Okada *et al.* (1994)의 트렌치 조사와 Kim and Seong (2021)의 항공사진을 이용한 지형 분석을 통해 측정된 수평 변위율은 각각 0.05~0.1 m/ka, 1.6~2 m/ka의 범위로 제시되고 있다.

본 연구 지역에서 연대 측정이 이루어진 4개 지점 중 US7, 12, 13의 3개 지점은 양산 단층곡의 곡저에 발달한 선상지 단구로서, 여러 선행 연구(Jo *et al.*, 1994; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b; Chwa *et al.*, 2000; Kyung, 2003; Cheon *et al.*, 2017)에서 확인된 제4기 충적층을 변위시킨 단층선이 지형면을 가로질러 지나고 있다. 이들 3개 지점의 선상지 단구 지형면을 대상으로 단층선 양측 지형면의 고도와 형태적 차이를 토대로, 지형면의 수평 및 수직 변위량을 측정하였다. 수평 변위량은 단층선 양측 선상지 단구애를 따라 추세선을 그은 후, 양측 추세선이 단층선과 만나는 교점에서 두 추세선 간의 거리 차이로 측정하였으며, 3개 지형면 모두에서 원 지형면의 형태가 가장 잘 유지되어 있는 단구애를 따라 각각 2개의 추세선을 그어 측정된 값을 평균하여 해당 지형면의 값으로 사용하였다(그림 7a). 수직 변위량은 단층선 양측의 지형면에 경사 추세선을 긋고, 양측 추세선이 단층선과 접하는 교점에서의 고도 차이로 측정하였다. US7과 US12 지점에서는 지형면 내에서 원 지형면의 지표 기복이 가장 잘 유지된 3개 지점을 따라서 단층선에서 양측으로 150 m, 160 m, 170 m 길이로 그은 3개 추세선 값을 평균하였으며(그림 7b), US13은 노두에서 확인되는 충적층의 수직 변위량인 1.41 m를 그대로 적용하였다.

연구 지역 3개 지점 선상지 단구의 수평 및 수직 변위량과 누적 변위율은 표 4와 같다. 평리-반곡리에 발달한 선상지 단구 3면인 US7 지점은 우수향의 수평 변위를 나타내며, 변위량은 12.65 m, 117 ka에 지형면이 형성된 이후 현재까지의 누적 변위율은 0.108 m/ka로 계산되었다. 교리-신화리에 발달한 선상지 단구 3면인 US12 지점도 우수향의 수평 변위를 나타내며, 변위량은 8.32 m, 지형면 형성된 이후 현재까지의 누적 변위율은 0.073 m/ka로 계산되었다. 방기리-조일리에 발달한 선상지 단구 4면인 US13 지점도 우수향으로 나타났으며, 변위량은 12.47 m, 누

Table 3. Horizontal and vertical slip rates of Yangsan fault presented in previous studies.

Slip type	Site	Slip rate (m/ka)	Reference
Horizontal	Southern part of Yangsan fault zone	0.05~0.1	Okada <i>et al.</i> (1994)
	Southern and central part of Yangsan fault zone	1.6~2	Kim and Seong (2021)
Vertical	Southern part of Yangsan fault zone	0.02~0.03	Okada <i>et al.</i> (1994)
	Sangcheon 1 Fault	0.015~0.03	Chwae <i>et al.</i> (1998)
	Sangcheon 2 Fault	0.02~0.04	Kyung <i>et al.</i> (1999a, 1999b)
	Shinhwa Fault	0.02~0.04	Kyung <i>et al.</i> (1999a)
	Inbo trench site	0.11	Cheon <i>et al.</i> (2020)

Table 4. Horizontal and vertical slip rates in the Eonyang area of Yangsan fault valley.

Site	Fan terrace	Offset (m)	Slip type	Age (ka)	Slip rate (m/ka)
strike slip rate					
US7 (Pyeong-Bangok)	3	12.65	dextral	117	0.108
US12 (Gyo-Sinhwa)	3	8.32	dextral	114	0.073
US13 (Banggi-Joil)	4	12.47	dextral	155	0.080
average					0.087
dip slip rate					
US7 (Pyeong-Bangok)	3	0.81	reverse	117	0.007
US12 (Gyo-Sinhwa)	3	0.18	reverse	114	0.002
US13 (Banggi-Joil)	4	1.41	reverse	155	0.009
average					0.006

적 변위율은 0.080 m/ka로 계산되었다. 그리고 양산 단층곡 언양 일대 3개 지점의 누적 수평 변위율 값은 평균 0.087 m/ka이다. 이는 양산 단층 남부 구역에서 이루어진 선행 연구와 비교할 때, Okada *et al.* (1994)이 제시한 수평 변위율 0.05~0.1 m/ka와 일치하는 결과이다(표 4).

연구 지역 3개 지점 선상지 단구의 수직 변위는 모두 역단층 운동으로 확인되었다. US7 지점은 수직 변위량 0.81 m로, 지형면 형성 이후 누적 변위율은 0.007 m/ka로 계산되었다. US12 지점은 수직 변위량 0.18 m, 누적 변위율 0.002 m/ka로 계산되었으며, US13 지점은 수직 변위량 1.41 m, 누적 변위율 0.009 m/ka로 계산되었다. 그리고 3개 지점의 평균 누적 변위율은 0.006 m/ka이다. 양산 단층 남부 구역에서 이루어진 다수의 선행 연구에서 수직 변위율은 0.015~0.04 m/ka의 범위로 제시되고 있지만,

본 연구 결과는 선행 연구보다 더 작은 수직 변위율이 산출되었다.

본 연구 결과가 선행 연구와 비교해서 수평 변위율에 비해 수직 변위율 값이 작게 산출된 이유는 단층 노두가 아닌 충적 지형의 지표면을 대상으로 변위량을 측정하였기 때문으로 보인다. 충적 지형면의 수직적 변위, 즉 지표 고도의 변화는 형태의 변화를 유발하는 수평적 변위에 비해 중력에 의한 지표 물질의 침식, 운반, 퇴적 작용에 훨씬 더 민감하다. 따라서, 시간이 경과할수록 지표에서 발생하는 사면운반(mass movement) 작용이나 지표류(overland flow)의 작용에 의해, 단층선 양측 지표면의 고도 차이가 완화되고 지형 기복이 단순해질 가능성이 크다. 그리고 이는 노두의 충적층 변위량을 적용한 US13이 지표면의 변위로 계산한 US7, 12에 비해 더 큰 값으로 측정된 연구 결과에서도 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 울산 언양 일대의 양산 단층곡 중 남부 지역을 대상으로 선상지 단구의 지형면 분류, OSL 연대 측정 및 정밀 측량을 통해 선상지 단구의 형성 시기를 파악하고 형성과정을 추론하였다. 그리고 선상지 단구가 형성된 이후 발생한 단층 운동에 의한 변위량 및 누적 변위 속도를 산출하였다.

양산 단층곡 중남부에 분포하는 선상지 단구는 단층곡을 따라 합류 선상지의 형태를 이루며, 4단의 지형면으로 분류되었다. 선상지 단구 퇴적층 노두에서 실시한 절대 연대 측정 결과, 선상지 단구 3면의 형성 시기는 약 115 ka, 선상지 단구 4면의 형성 시기는 약 155 ka로 나타났다. 그리고 선상지 단구 지형면 간의 고도 차이와 관련 선행 연구를 종합할 때, 선상지 단구 1면과 2면은 각각 25~35 ka, 70~80 ka 무렵에 형성된 것으로 추정된다. 우리나라와 같은 중위도 몬순 기후 지역에서는 여름 몬순의 강도 변화가 여름철 강수량에 영향을 미쳐 선상지나 하안단구의 지형 형성을 유발하므로, 언양 일대 선상지 단구의 형성 시기도 동아시아 여름 몬순의 강도 증가 시기와 관련성이 높을 것으로 추정된다.

연대 측정이 이루어진 4개 지점 중 단층선이 지나 는 3개 노두의 선상지 단구 지형면을 대상으로 단층 선 양측 지형면의 고도와 형태적 차이를 토대로, 지형면의 수평 및 수직 변위량을 측정하고 누적 변위 속도를 산출하였다. 3개 지점 모두에서 수평 변위는 우수향 단층, 수직 변위는 역단층 운동을 지지하였다. 연구 지역 3개 지점의 수평 누적 변위율은 평균 0.087 m/ka로서, 선행 연구에서 제시된 0.05~0.1 m/ka와 일치하였다. 반면, 수직 누적 변위율은 평균 0.006 m/ka로서, 선행 연구에서 제시된 0.015~0.04 m/ka보다 더 작게 나타났는데, 이는 단층 변위 이후 선상지 단구 지표 물질의 침식 및 퇴적 작용에 의해 단층선 양측 지표면의 고도 차이가 완화되고 지형 기복이 단순해진 결과로 해석된다.

본 연구는 양산 단층곡에 분포하는 4단의 선상지 단구에 대한 형성 시기와 형성과정을 유추하고, 선상지 지형면에 대한 연대 측정과 지형 분석을 통해 제4기 단층의 누적 변위율을 산출하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 선상지 단구 퇴적층과 제4기 단층에 대한 분석 자료는 선상지 단구의 형성 요인과 제

4기 지형면의 단층 변위를 심층적이고 실증적으로 증명하기에 다소 부족한 점이 있다. 그렇지만, 본 연구는 양산 단층 지역의 제4기 지형 발달사를 설명하고 양산 단층의 활동성을 평가하는 데 있어 상당한 기여를 할 것으로 기대한다.

REFERENCES

- Chae, B.G. and Chang, T.W., 1994, Movement history of Yangsan Fault and its related fractures at Chonha-Yongdok area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 379-394 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Cho, H., Ha, S., Kang, H.C., Kim, J.S. and Son, M., 2019, Tectonically controlled multiple stages of deformation along the Yangsan Fault Zone, SE Korea, since Late Cretaceous. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170, 188-207.
- Cheon, Y., Choi, J.H., Kim, N., Lee, H., Choi, I., Bae, H., Rockwell, T., Lee, S., Ryoo, C., 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.
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S., Cho, H. and Son, M., 2017, Deformation features and history of the Yangsan Fault Zone in the Eonyang-Gyeongju area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 95-114 (in Korean with English abstract).
- Chwae, U., Choi, S.J., Cho, D.L., Lee, Y.J., Ryoo, C.R., Ko, I.S. and Song, M.J., 2000, Neotectonics. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, N2-01-02-A-01, Ministry of Science and Technology (in Korean).
- Chwae, U., Lee, D.Y., Lee, B.J., Ryoo, C.R., Choi, P.Y., Choi, S.J., Cho, D.L., Kim, J.Y., Lee, C.B., Kee, W.S., Yang, D.Y., Kim, I.J., Kim, Y., Yoo, J.H., Chae, B.G., Kim, W., Kang, P.J., Yu, I.H. and Lee, H.K., 1998, An Investigation and Evaluation of Capable Fault -Southeastern Part of the Korean Peninsula-. KR-98(C)-22, KIGAM, 301 p.
- Gwon, S., Cho, S.I., Park, D., Choi, W.H., Nakao, R., Tanaka, T. and Inoue, D., 2020, Microscopic analysis of fault rock using X-ray computed tomography from the Wolsan trench in the middle part of Yangsan fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 273-284 (in Korean with English abstract).
- He, X., Zhang, X., He, Z., Jia, L., Ye, P. and Zhao, J., 2017, Late Quaternary alluvial fan terraces: Langshan, Inner Mongolia, China. *Geomorphology*, 286, 34-44.
- Hong, Y.M. and Shin, J.R., 2021, The Quaternary Activity and Cumulative Offset of the Mogok Fault in the Central Part of Jangdae Fault, Mogok-ri, Haman-gun, South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 56,

- 449-459 (in Korean with English abstract).
- Hooke, R.L., 1967, Processes on Arid-Region Alluvial Fans. *The Journal of Geology*, 75, 438-460.
- Hsieh, M.L. and Chyi, S.J., 2010, Late Quaternary mass-wasting records and formation of fan terraces in the Chen-yeo-lan and Lao-nung catchments, central-southern Taiwan. *Quaternary Science Reviews*, 29, 1399-1418.
- Huggett, R.J., 2011, *Fundamentals of Geomorphology*, Third Edition, Routledge, New York, USA, 516 p.
- 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).
- Jo, W.R., Okada, A., Jun, M.S., Kim, S.K., Watanabe, M., Sato, H., 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 The Geomorphological Association of Korea*, 1, 67-83 (in Korean with English abstract).
- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002, *Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA, 362 p.
- Kim, D.-E. and Seong, Y.B., 2021, Cumulative Slip Rate of the Southern Yangsan Fault from Geomorphic Indicator and Numerical Dating. *Journal of the Korean Geographical Society*, 56, 201-213 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Choi, J.H., Park, S.I., Lee, T.H. and Choi, Y., 2020, Cumulative offset analysis of the Central-Southern Yangsan Fault based on topography of Quaternary fluvial terrace. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 135-154 (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., Lee, K. and Okada, A., 1999a, A Paleoseismological Study of the Yangsan Fault-Analysis of Deformed Topography and Trench Survey. *Journal of 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, G.R., 2019, Did Fluvial Terrace of Mountain Streams in Korea Form in Each Glacial Stage?. *Journal of The Geomorphological Association of Korea*, 26, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2022, Formation Ages of Alluvial Fans in Granite Erosional Basins, South Korea. *Journal of The Geomorphological Association of Korea*, 29, 21-34 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Cho, Y.D., 2013, Geomorphological Processes of Yuga Alluvial Fan in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 48, 204-217 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., Park, C.S., Kim, J.C. and Nahm, W.H., 2023, Geomorphological Process and Change of Fan Terraces in Jeonnam, Korea - A Case Study of the Damyang Daejeon and Jangheung Fan Terraces -. *Journal of The Geomorphological Association of Korea*, 30, 69-81 (in Korean with English abstract).
- Li, F., Rousseau, D.D., Wu, N., Hao, Q. and Pei, Y., 2008, Late Neogene evolution of the East Asian monsoon revealed by terrestrial mollusk record in Western Chinese Loess Plateau: From winter to summer dominated sub-regime. *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 439-447.
- Li, Y., Armitage, S.J., Stevens, T. and Meng, X., 2018, Alluvial fan aggradation/incision history of the eastern Tibetan plateau margin and implications for debris flow/debris-charged flood hazard. *Geomorphology*, 318, 203-216.
- McClain, K.P., Yıldırım, C., Çiner, A., Sarıkaya, M.A., Özcan, O., Görüm, T., Köse, O., Şahin, S., Kıyak, N.G. and Öztürk, T., 2021, River, alluvial fan and landslide interactions in a tributary junction setting: Implications for tectonic controls on Quaternary fluvial landscape development (Central Anatolian Plateau northern margin, Turkey). *Geomorphology*, 376, 107567.
- 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, south Korea. *Journal of Geography*, 103, 111-126 (in Japanese with English abstract).
- Park, C.S. and Lee, G.R., 2018, Analysis on Fault-Related Landforms in the Gyeongju Area of the Yangsan Fault Valley. *Journal of The Geomorphological Association of Korea*, 25, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Ritter, D.F., Kochel, R.C. and Miller, J.R., 2011, *Process Geomorphology*. McGraw-Hill, Boston, USA, 560 p.
- Shi, Z., Liu, X. and Cheng, X., 2012, Anti-phased response of northern and southern East Asian summer precipitation to ENSO modulation of orbital forcing. *Quaternary Science Reviews*, 40, 30-38.
- Siegenthaler, U., Stocker, T.F., Monnin, E., Lüthi, D., Schwander, J., Stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J.M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V. and Jouzel, J., 2005, Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene. *Science*, 310, 1313-1317.
- Song, Y., Park, C., Sim, H., Choi, W., Son, M. and Khulganaakhuu, C., 2016, Reactivated Timings of Yangsan Fault in the Sangcheon-ri Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 49, 97-104 (in Korean with English abstract).

- English abstract).
- Stock, J.D., Schmidt, K.M. and Miller, D.M., 2008, Controls on alluvial fan long-profiles. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 619-640.
- Summerfield, M.A., 1991, *Global Geomorphology*. Prentice Hall, Harlow, England, 537 p.
- Tachikawa, K., Cartapanis, O., Vidal, L., Beaufort, L., Barlyaeva, T. and Bard, E., 2011, The precession phase of hydrological variability in the Western Pacific Warm Pool during the past 400 ka. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3716-3727.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E. and Labracheri, M., 2002, Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21, 295-305.
- Wang, Z., Meyer, M.C., Gliganic, L.A., Hoffmann, D.L. and May, J.H., 2017, Timing of fluvial terrace formation and concomitant travertine deposition in the upper Sutlej River (Tirthapuri, southwestern Tibet) and paleoclimatic implications. *Quaternary Science Reviews*, 169, 357-377.
- 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).
- Yu, P.S., Huang, C.C., Chin, Y., Mii, H.S. and Chen, M.T., 2006, Late Quaternary East Asian Monsoon variability in the South China Sea: Evidence from planktonic foraminifera faunal and hydrographic gradient records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 236, 74-90.
-
- Received : October 20, 2023
Revised : November 13, 2023
Accepted : November 21, 2023