



Article

한반도 남부의 제4기 말 선상지 형성 시기

이광률^{1,*}, 김진철²

¹경북대학교 지리교육과

²한국지질자원연구원 제4기지질연구센터

Formation ages of Late Quaternary alluvial fans in the southern Korean Peninsula

Gwang-Ryul Lee^{1,*}, Jin Cheul Kim²

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

²Quaternary Geological Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: May 24, 2025 / Revised: July 8, 2025 / Accepted: August 20, 2025

*Corresponding author: +82-53-950-5859 / E-mail: georiver@knu.ac.kr

요약: 한반도 남부에는 제4기 충적 지형인 선상지가 여러 지역에 다양한 규모로 발달해 있으며, 면적 2 km² 이상의 대형 선상지는 34개 지역에 분포하고 있다. 한반도 남부와 같은 중위도 습윤 기후 지역의 선상지는 집중호우나 태풍에 의한 돌발 홍수와 산사태로 인해 주로 발생한다. 한반도 남부에서 OSL 연대 측정이 이루어진 38개 선상지를 분석한 결과, 제4기 말 선상지의 주요 형성 기간은 28~32 ka (MIS 3 후반), 42~48 ka (MIS 3 초반), 66~74 ka (MIS 4 초반), 86~91 ka (MIS 5b), 110~117 ka (MIS 5d)이며, 다빈도 형성 시기는 28, 48, 70, 90, 114 ka로 나타났다. 이 시기는 대체로 서늘한 기온 하강기에 해당한다. 선상지의 다빈도 형성 시기는 20~24 ka의 주기를 가져서, 동아시아 여름 몬순 강도의 변화 주기인 23 ka와 일치한다. 또한 이 시기는 동아시아 여름 몬순 강도의 증가 시기와의 대체로 일치한다. 따라서 제4기 말 한반도 남부의 선상지 형성 시기는 강한 돌발 홍수와 산사태를 유발할 수 있는 동아시아 여름 몬순의 강도 증가와 깊은 관련이 있는 것으로 추정된다.

주요어: 선상지, 한반도, 동아시아 여름 몬순, 제4기 말, 기후 변동

ABSTRACT: The alluvial fans, Quaternary fluvial landforms, are formed on various scales in the southern Korean Peninsula, and large alluvial fans with an area of more than 2 km² are distributed at 34 sites. The alluvial fans in mid-latitude moist climate areas, such as the southern Korean Peninsula, are mainly caused by flash floods and landslides caused by heavy rains and typhoons. As a result of analyzing the formation period of the 38 sites where OSL (optically stimulated luminescence) age dating was performed in the southern Korean Peninsula, the main periods of the alluvial fan formation appeared in 28~32 (late MIS (marine oxygen isotope stage) 3), 42~48 (early MIS 3), 66~74 (early MIS 4), 86~91 (MIS 5b), and 110~117 (MIS 5d), and the peak ages were 28, 48, 70, 90, and 114 ka. This period generally corresponds to the period of cool and temperature drop. The time interval of the peak age of the alluvial fan formation has a 20~24 ka, which coincides with the fluctuation cycle of East Asia summer monsoon of 23 ka. In addition, peak ages generally coincide with the period of increase in the intensity of the East Asian summer monsoon. Therefore, it is estimated that the late Quaternary formation period of the alluvial fans in the southern Korean Peninsula is closely related to the increase in the intensity of the East Asian summer monsoon, which can cause strong flash floods and landslides.

Key words: alluvial fan, Korean Peninsula, East Asian summer monsoon, late Quaternary, climate fluctuation

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

선상지(alluvial fan)는 유로가 제한되는 산지의 좁은 하곡에서 유로 변화가 자유로운 넓은 평지로 흘러나오는 하천이 유속과 유량 감소로 인해 곡구 또는 산지의 전면에서 퇴적물을 쌓아서 형성한 지형으로(Hooke, 1967; Summerfield, 1991; Stock *et al.*, 2008; Huggett, 2011; Ritter *et al.*, 2011; Lee and Cho, 2013; Lee, 2025), 하안단구, 해안단구 등과 함께 대표적인 제4기 충적 지형 중 하나이다. 선상지는 다양한 기후 및 지형 조건에서 형성되며, 기후 및 지구조적 요인에 의한 영향을 받아 시공간적으로 복잡한 퇴적 과정을 거치게 된다(Harvey *et al.*, 1999a, 1999b; Owen *et al.*, 2014; Cesta and Ward, 2016). 선상지는 환경 변화에 매우 민감하며, 지역의 기후, 수문, 지질, 지형 등 여러 자연 조건에 중요한 정보를 제공한다(Harvey *et al.*, 1999a, 1999b; Sohn *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2010; Ritter *et al.*, 2011; Kober *et al.*, 2013; Owen *et al.*, 2014; Sarikaya *et al.*, 2015; Cesta and Ward, 2016; Mather *et al.*, 2017; Viveen *et al.*, 2024). 선상지가 형성된 이후에 시간이 경과하면, 선상지 지형면 내부에서 하천의 하각 및 매적 작용이 반복되어 원 지형면이 개석되고, 개석곡을 따라 계단 모양의 하안단구가 형성되면서 선상지 단구(fan terrace)로 변화한다(Hsieh and Chyi, 2010; He *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; McClain *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2023b).

선상지의 퇴적물은 암설류(debris flow)나 포상류(sheet flow) 등에 의한 사면 물질의 이동에서 기원하며, 퇴적 작용은 하천이 좁은 하곡을 벗어나 유수의 이동이 자유로워지면서 하곡의 증가와 유량 및 유속의 감소로 인해 급격하게 발생한다(Ritter *et al.*, 2011). 선상지는 퇴적물 공급 과정을 기준으로, 암설류에 의한 선상지와 하천류(stream flow)에 의한 선상지로 구분된다(Ritter *et al.*, 2011; Mather *et al.*, 2017). 암설류 선상지는 하천 유역 면적이 작고 경사가 급한 곳이나 세립 퇴적물이 풍부한 곳에서 간헐적인 돌발 홍수에 의해 주로 발생하지만, 하천류 선상지(충적 선상지)는 하천 유역 면적이 큰 습윤 기후 지역에서 잘 발달한다(Ritter *et al.*, 2011).

선상지의 형성 시기는 기후 조건에 따라 다르게 제시되고 있는데, 건조 및 반건조 기후 지역의 경우, 산악 빙하가 발달한 안데스 산맥 일대에서는 주로 습윤한 빙기에 퇴적 작용이 발생하며(Cesta and Ward, 2016; Terrizzano *et al.*, 2017; Bartz *et al.*, 2020; Peri *et al.*, 2022; Viveen *et al.*, 2024), 미국 남서부에서는 주로 습윤기에서 건조기로의 전환기에(Sohn *et al.*, 2007; Fenton and Pelletier, 2013; Owen *et al.*, 2014), 그리고 중국 서부에서는 빙기에서 간빙기로

의 전환기 또는 빙기에 주로 퇴적 작용이 발생한다고 제시되고 있다(Lu *et al.*, 2010; He *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2019; An *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2021). 그러나 중국 동부, 대만, 일본, 인도 북부 등 한반도와 같이 몬순의 영향을 받는 중위도 습윤 기후 지역의 연구들은 선상지와 선상지 단구의 형성 시기를 수천 년 주기의 여름 몬순 강도 증가에 따른 강수량 증가로 인해 유량과 퇴적물 공급량이 증가하는 시기로 제시하고 있다(Hsieh *et al.*, 2011, 2014; Kar *et al.*, 2014; Sewell *et al.*, 2015; Dey *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2021; Imsong *et al.*, 2023). 이러한 선행 연구를 종합하면, 한반도와 같이 몬순의 영향을 받는 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 돌발 홍수가 발생하는 상황에 해당한다고 볼 수 있다(Lee *et al.*, 2023a).

한반도 남부에는 대체로 면적이 좁은 소규모 선상지가 여러 곳에 발달하며(Yoon *et al.*, 2005), 대부분 선상지 단구의 형태로 나타난다(Lee *et al.*, 2023b). 퇴적 지형 연구가 활발하지 않았던 1980년대까지 한반도의 대부분 선상지는 침식 지형인 페디먼트(pediment)로 여겨졌으나, 1980년대 중반부터 제4기 충적 지형에 대한 연구가 활발해지면서 이전까지 페디먼트로 간주되던 다수의 지형면이 선상지나 단구로 인식되기 시작하였다(Yoon *et al.*, 2005). 그리고 제4기 충적 지형의 절대 연대 측정이 활발해진 2000년대 이후부터는 한반도 남부의 각 지역에 발달한 특정 선상지의 형성 시기를 제시하고 형성 과정을 추론하는 연구가 점차 증가하고 있다. 그러나 한반도 남부 전체를 대상으로 여러 선상지의 형성 시기를 종합하여 제시한 연구는 침식본지 내부의 12개 선상지를 분석한 Lee (2022b)의 논문 뿐이다. 본 연구는 한반도 남부의 여러 지역에 발달한 38개 선상지를 대상으로 선상지 지형면의 절대 연대를 종합하여, 한반도 남부에서 신생대 제4기 말의 기후 변동과 관련한 선상지의 주요 형성 시기를 분석하고 선상지 형성의 주기성과 형성 과정을 추론하고자 한다.

1.2. 연구 방법

본 연구에서는 한반도 남부에 분포하는 38개 선상지 퇴적층의 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 절대 연대를 토대로 선상지의 형성 시기를 분석하였다. 38개 지점 중 33개는 선행 연구에서 OSL 절대 연대가 제시된 곳이며, 5개 지점은 본 연구를 통해 지형 조사와 OSL 절대 연대가 측정되었다. 먼저, 한반도 남부에 발달한 선상지의 분포 특성을 확인하고 유형을 구분하기 위하여, 10 m 해상도의 DEM과 인터넷 포털사이트 지도 등을 토대로 한반도 남부

전역의 선상지 지형을 판독하고 형태적 특성을 분석하였다. 그리고 면적 2 km² 이상의 면적을 가진 대형 선상지의 분포를 확인하기 위하여, DEM을 이용하여 선상지 지형면을 동정하고, ESRI의 ArcGIS 10.8을 이용하여 선상지의 면적을 측정하였다.

선상지의 지형면 분석과 연대 측정을 위하여, DEM, 1:5,000 지형도, 1:50,000 지질도, 인터넷 포털사이트 지도 등을 활용하여, 선행 연구에서 조사되지 않았던 선상지 중에서도 퇴적층 노두가 존재할 것으로 예상되는 지점을 검토한 후, 야외 조사를 통해 선상지 퇴적층 노두의 존재 여부를 확인하였다. 선상지 퇴적층 노두가 존재하는 5개 선상지 지점에서는 OSL 연대 측정 시료를 수집하고, 퇴적층의 층서와 퇴적물 특성을 관찰하였으며, Sokkia의 GNSS (Global Network Satellite System) 수신기 GRX1을 이용해 선상지와 시료 수집 지점의 고도를 측량하였다. OSL 연대 측정 시료는 주로 모래질 자갈층을 이룬 선상지 퇴적층 노두 내에서도 상

대적으로 모래의 함량이 많은 층에서 금속관을 삽입해 수집하였다. 5개 선상지 퇴적층의 OSL 연대는 조립(90~250 μm) 석영 입자를 대상으로, 한국기초과학지원연구원과 한국지질자원연구원에서 각각 Risø TL/OSL (DA-20)으로 측정되었다.

2. 연구 지역

2.1. 연구 지역 개관

연구 지역인 우리나라가 위치한 한반도 남부는 필리핀판과 태평양판에 인접한 유라시아판의 동쪽 가장자리에 위치한다(그림 1). 한반도 남부는 선캄브리아시대부터 신생대에 이르기까지 모든 시대에 형성된 다양한 암석 유형이 분포하고 있다. 1:250,000 수치지질도를 토대로 GIS 프로그램을 이용하여 측정된 결과, 한반도 남부에서 분포 면적이 가장 넓은 암종은 중생대 쥐라기와 백악기에 대부분 생성

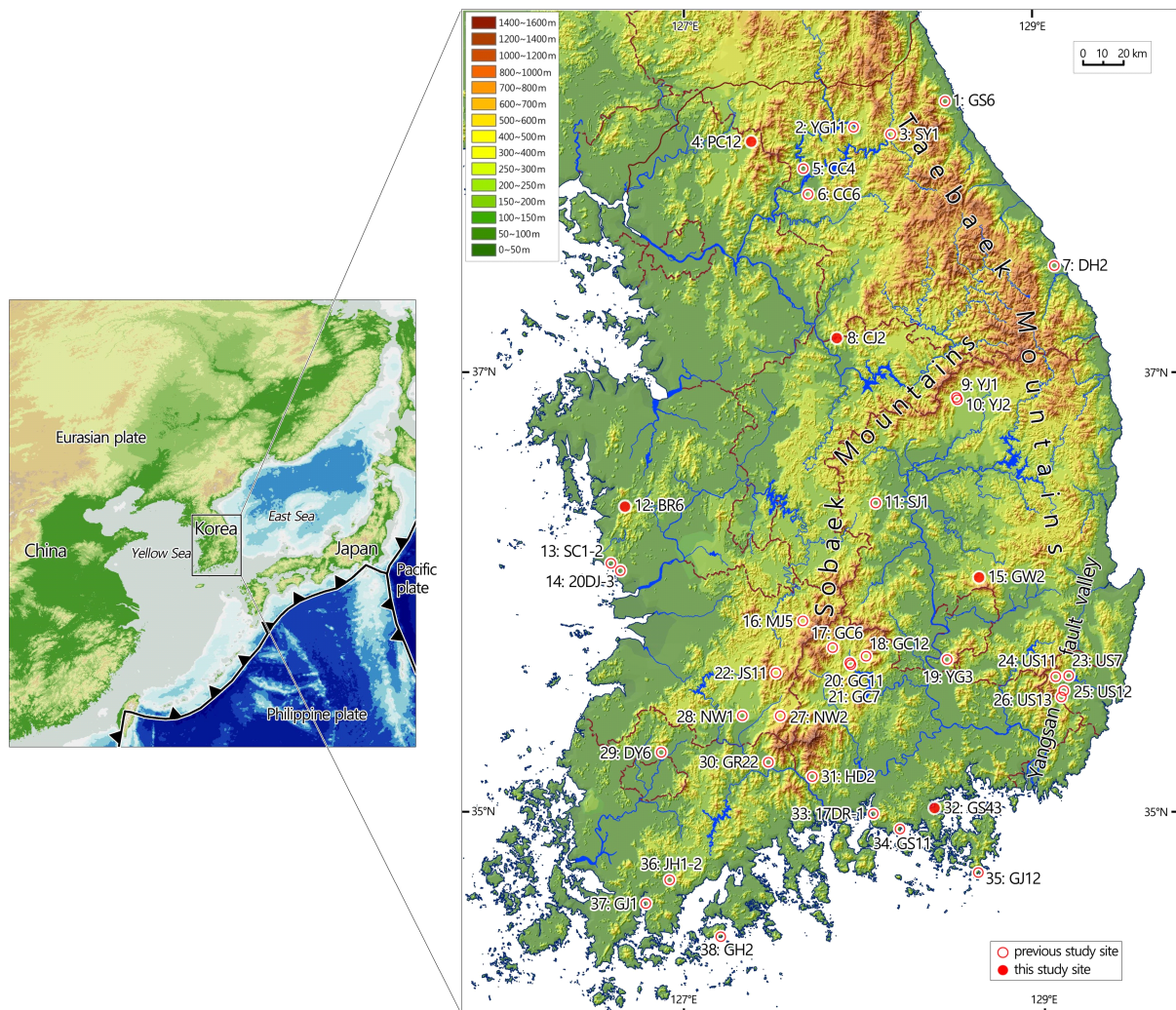


Fig. 1. Study area: 38 sites of alluvial fans in the southern Korean Peninsula.

Table 1. Location, elevation, and age date of 38 sites of alluvial fans in the southern Korean Peninsula.

No.	Sample name	Fan name	Latitude (°)	Longitude (°)	Fan type*	Elevation (m)	Age (ka)	Source
1	GS6	Goseong Cheonjin	38.2301	128.5086	AFT	120.9	66 ± 4	Lee, 2023
2	YG11	Yanggu	38.1196	127.9778	DFT	203.0	32 ± 6	Lee, 2022b
3	SY1	Inje Deoksan	38.0798	128.1874	FFT	207.3	36 ± 2	Lee, 2018
4	PC12	Pocheon Jangam	38.0339	127.3736	AFT	164.0	44 ± 4	this study
5	CC4	Chuncheon Seosang	37.9304	127.7018	FFT	87.2	88 ± 11	Lee, 2022b
6	CC6	Chuncheon Sindong	37.8156	127.7131	DFT	113.9	51 ± 3	Lee, 2022b
7	DH2	Donghae Bukpyeong	37.4741	129.1158	AFT	15.5	57 ± 3	Lee, 2023
8	CJ3	Chungju Juchi	37.1605	127.8676	DFT	128.9	48 ± 5	this study
9	YJ1	Yeongju Punggi	36.8751	128.5409	AFT	230.3	87 ± 8	Lee and Park, 2021
10	YJ2	Yeongju Punggi	36.8725	128.5414	AFT	218.5	28 ± 6	Lee, 2022b
11	SJ1	Sangju Naeseo	36.4072	128.0825	FFT	91.9	86 ± 16	Lee and Park, 2021
12	BR6	Boryeong Cheongra	36.3881	126.6681	FFT	72.1	82.1 ± 5.9	this study
13	SC1-2	Seocheon Seondo	36.1356	126.5984	DFT	16.6	99 ± 11	Lee and Park, 2019
14	DJ2-1	Seocheon Dangjeong	36.0981	126.6464	AFT	17.4	78.8 ± 9.6	Shin <i>et al.</i> , 2020
15	GW2	Gunwi Daeyul	36.0592	128.6580	DFT	226.4	42 ± 4	this study
16	MJ5	Muju Anseong	35.8693	127.6638	AFT	428.4	47 ± 7	Lee and Park, 2021
17	GC6	Geochang Wicheon	35.7436	127.8344	AF	291.8	30 ± 3	Lee, 2022b
18	GC12	Geochang Gajo	35.7036	128.0185	AF	273.5	74 ± 13	Lee and Park, 2021
19	YG3	Dalseong Yuga	35.6875	128.4700	AFT	86.5	110 ± 6	Lee and Cho, 2013
20	GC11	Geochang	35.6743	127.9332	AFT	197.9	28 ± 4	Lee and Park, 2021
21	GC7	Geochang	35.6723	127.9353	AFT	200.1	53 ± 4	Lee, 2022b
22	JS11	Jangsu	35.6354	127.5147	AFT	432.0	27 ± 3	Lee, 2022b
23	US7	Ulju Bangok	35.6004	129.1474	AFT	96.8	117 ± 7	Lee <i>et al.</i> , 2023a
24	US11	Ulju Geo	35.5984	129.0734	FFT	168.3	114 ± 11	Lee <i>et al.</i> , 2023a
25	US12	Ulju Sangcheon	35.5394	129.1128	AF	102.2	114 ± 8	Lee <i>et al.</i> , 2023a
26	US13	Ulju Joil	35.5060	129.0998	AFT	132.4	155 ± 9	Lee <i>et al.</i> , 2023a
27	NW2	Namwon Unbong	35.4354	127.5378	AFT	477.4	48 ± 6	Lee and Park, 2022
28	NW1	Namwon Daesan	35.4341	127.3264	FFT	107.1	36 ± 4	Lee and Park, 2022
29	DY6	Damyang Daejeon	35.2738	126.8759	AFT	60.4	91 ± 4	Lee <i>et al.</i> , 2023b
30	GR22	Gurye Masan	35.2247	127.4688	AF	43.0	70 ± 10	Lee and Park, 2022
31	HD2	Hadong Akyang	35.1634	127.7146	DFT	59.3	45 ± 8	Lee and Park, 2022
32	GS43	Goseong Gamseo	35.0151	128.3906	AF	6.2	142 ± 12	this study
33	17DR-1	Sacheon	34.9897	128.0458	AF	11.6	42.5 ± 5.9	Shin and Hong, 2018
34	GS11	Goseong Songcheon	34.9172	128.1987	FFT	8.1	77 ± 4	Lee and Park, 2019
35	GJ12	Geoje Dapo	34.7140	128.6267	DFT	12.5	151 ± 10	Lee, 2022a
36	JH1-2	Jangheung	34.6889	126.9170	AFT	42.4	89.6 ± 6.5	Lee <i>et al.</i> , 2023b
37	GJ1	Gangjin Chilryang	34.5858	126.7939	DFT	10.9	71 ± 4	Lee and Park, 2019
38	GH2	Goheung Ocheon	34.4324	127.2092	AF	15.5	71 ± 5	Lee and Park, 2019

* AF: alluvial fan, AFT: alluvial fan terrace, FFT: tributary junction fluvial fan terrace, DFT: debris flow fan terrace.

된 화강암으로 한반도 남부 면적의 약 34%를 차지하며, 다음으로 선캄브리아시대에 주로 생성된 편마암류가 약 25%의 면적을 차지한다.

한반도 남부의 기후는 동아시아 몬순의 영향을 받는 중위도 아열대습윤기후와 대륙성습윤기후에 해당한다. 온난

습윤한 북태평양 기단이 영향을 미치는 여름철에는 강수량이 많고, 한랭 건조한 시베리아 기단이 지배적인 겨울철에는 강수량이 적다. 그리고 한반도 남부의 연평균 기온은 7~16°C, 연 강수량은 1,200~1,600 mm이다. 장마전선, 태풍, 이동성 저기압 등이 영향을 미쳐 집중호우가 발생하는 여름 몬순

기간인 6월에서 9월까지의 강수량은 연 강수량의 약 2/3를 차지하여, 강수가 여름철에 집중되어 발생한다(Lee, 2024).

연구 대상 선상지는 한반도 남부의 북위 34.4°~38.3° 범위에 분포하는 다양한 크기와 형태를 가진 38개 선상지이다(그림 1; 표 1). 이 중 33개 선상지는 선행 연구를 통해 절대 연대가 제시된 곳이며, 본 연구에서는 포천 장암(4: PC12), 충주 주치(8: CJ2), 보령 청라(12: BR6), 군위 대울(15: GW2), 경남 고성 감서(32: GS43)의 5개 선상지에 대한 지형 및 퇴적층 분석과 OSL 절대 연대 측정이 실시되었다. 38개 선상지 중 22개는 한반도 남부의 용기 축으로 제시되는 태백산맥(8개)과 소백산맥(14개) 주변의 높은 산지와 접한 하곡과 분지에 위치하며, 6개는 영남 내륙과 양산 단층 주변 산지에, 7개는 남해안 일대 산지와 도서에, 나머지 3개는 서해안의 낮은 산지와 접한 하곡과 분지에 위치한다. 연구 대상인 38개 선상지 중에서 면적 2 km² 이상의 대형 선상지는 고성 천진, 무주 안성, 거창 위천, 거창 가조, 울주 상천, 구례 마산, 사천, 장흥으로 총 8개이다.

2.2. 한반도 남부의 선상지

한반도 남부의 선상지는 신생대 제4기에서도 강수량이 많아 하천 유량이 증가하고 산사태가 활발한 시기에 형성된 것으로 해석되고 있다(Lee, 2022b; Lee et al., 2023a). 선상지 형성 이후, 지형면의 내부에는 하천의 하각과 측방 침식에 의해 개석곡(dissection valley)이 형성되었고, 개석곡에서는 하천에 의한 퇴적물의 매적과 하각 작용이 반복되면서 현재에 이르고 있다(그림 2; Lee and Cho, 2013; Lee, 2022b; Lee et al., 2023a, 2023b). 그 결과, 선상지 지형면은 일반적으로 하도를 따라 평행한 좁고 긴 열을 이루며, 횡단면 상에서는 2~3단의 하안단구의 형태를 띠게 된다. 따라서, 한반도 남부의 선상지는 대부분 선상지 단구를 이루고 있으며(Lee et al., 2023a, 2023b), 일본과 대만의 선상지에

비해 면적이 작은 편이다(Yoon et al., 2005). 그렇지만, 지형 분석 결과, 한반도 남부에는 2 km² 이상의 면적을 갖는 대형 선상지가 총 34개 확인되어, 전체 면적 대비 선상지의 발달이 상당히 양호한 편이다(그림 3). 34개 대형 선상지 중 구례 마산(화엄사), 사천 등 20개는 부채꼴을 이루는 전형적인 충적 선상지의 형태를 띠고 있으며, 무주 안성, 담양 대전 등 나머지 14개의 선상지는 선상지 단구로 나타나고 있다.

지형 조건의 측면에서 보면, 한반도 남부의 34개 대형 선상지는 3가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫 번째 유형은 산지의 좁은 하곡에서 비교적 넓은 침식 분지의 분지저로 흐르는 소하천이 곡구에 퇴적물을 쌓아 형성한 선상지로서, 신북, 제천, 청도, 초계 선상지가 이에 해당한다. 두 번째 유형은 구례 광의(천은사), 구례 마산, 사천, 삼천포 선상지 등 넓은 범람원에 발달한 본류 하천을 향해 흐르는 지류 하천의 곡구에 발달한 선상지이다. 세 번째 유형은 선형의 단층곡 내부로 횡적으로 유입되는 소하천에 의해 형성된 것으로, 주변 소하천이 형성한 선상지와 연속적으로 이어진 합류 선상지(confluent fan)를 이루는 경우가 많으며, 양산 단층곡과 울산 단층곡에 발달한 경주, 안강, 입실, 상천 선상지가 대표적이다.

3. 연구 결과

3.1. 연구 대상 선상지의 유형

Mather et al. (2017)은 선상지를 시-공간 규모에 따라, 1) 길이 10 m 이하의 독립적인 소규모 암설류 로브(debris flow lobe), 2) 10~100 m의 지류 합류부 암설추(debris cone), 3) 10~1,000 m의 지류 합류부 하성 선상지(fluvial fan), 4) 1,000 m 이상의 충적 선상지(alluvial fan)로 구분하였다. 이러한 선상지 유형 구분에 착안하여, 본 연구에서는 선상

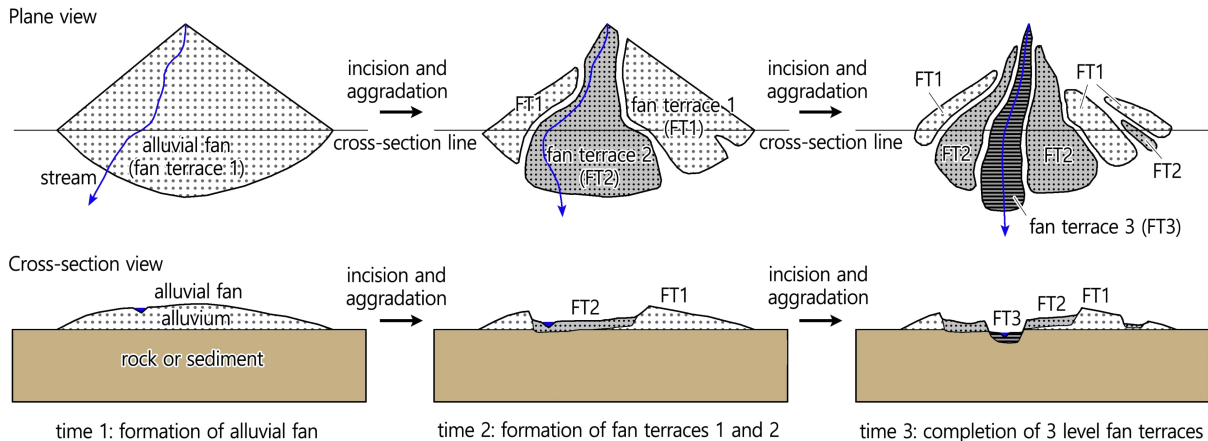


Fig. 2. Schematic diagram of fan terrace formation by time (Lee et al., 2023b).

지의 지형 조건과 규모에 따라 연구 대상인 38개 선상지를 1) 대체로 면적이 1 km² 이상으로 넓은 부채꼴의 충적 선상지(alluvial fan, AF), 2) 지형면이 단구화된 좁고 긴 형태의 선상지 단구(alluvial fan terrace, AFT), 3) 본류 하천에 합류하는 소규모 지류 하천이 넓은 본류 곡저의 측면에 형성한 긴 방사상 형태의 하성 선상지 단구(tributary junction fluvial fan terrace, FFT), 4) 면적 수백 m² 내외로 규모가 작은 암설류 선상지 단구(debris flow fan terrace, DFT)의 4개 유형으로 구분하였다(표 1). 38개 선상지 중 충적 선상지(AF)는 구례 마산(30: GR22; 그림 3b), 사천(33: 17DR-1; 그림

3c), 고성 감서(32: GS43) 등 7개 선상지이고, 선상지 단구(AFT)는 고성 천진(1: GS6), 포천 장암(4: PC12) 등을 포함한 16개 선상지가 이에 해당한다. 하성 선상지 단구(FFT)는 보령 청라(12: BR2)를 포함한 7개 선상지이며, 암설류 선상지 단구(DFT)는 충주 주치(8: CJ13), 군위 대울(15: GW2)을 포함한 8개 선상지이다.

3.2. 5개 선상지의 지형과 연대

38개의 연구 대상 선상지 중에서 포천 장암(4: PC12), 충주 주치(8: CJ3), 보령 청라(12: BR6), 군위 대울(12: GW2),

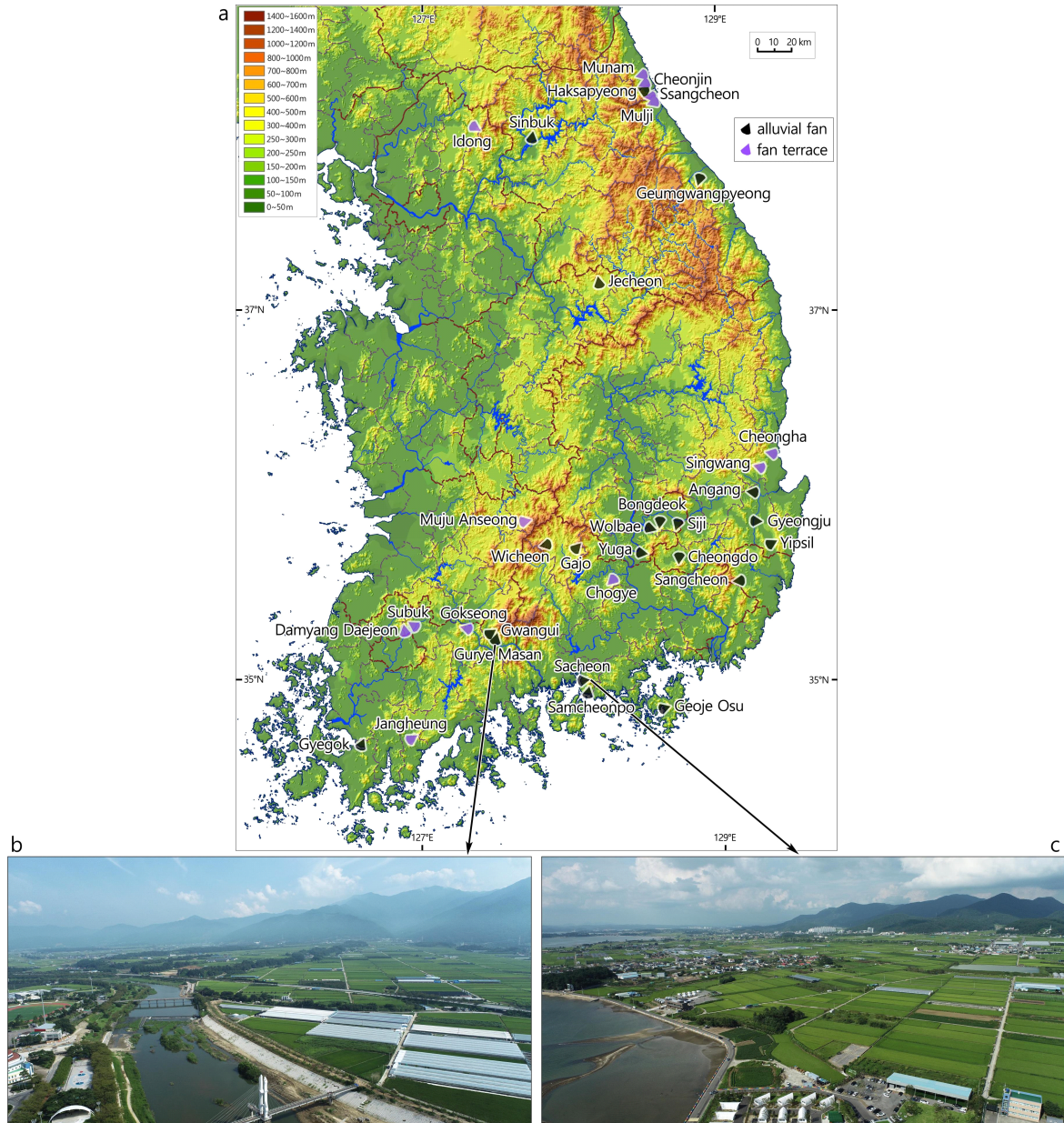


Fig. 3. Major alluvial fans in the southern Korean Peninsula. (a) Distribution of large (area > 2 km²) alluvial fans. (b) Photo of Gurye Masan (Hwaomsa) fan. (c) Photo of Sacheon fan.

고성 감서(32: GS43)의 5개 선상지는 본 연구를 통해 지형 및 퇴적층 특성이 분석되고 OSL 연대가 측정되었다. 경기 포천시 이동면 장암리 일대에 위치한 포천 장암 선상지(4: PC12)는 장암천의 양안에 2단의 선상지 단구가 길게 발달하고 있다(그림 4). 퇴적층 노두 PC12는 북위 38°02'02", 동경 127°22'25"E에 위치하며, 더 오래되어 고도가 높은 선상지 단구 2면의 단구에 절개지에서 확인된 노두이다(그림

4a). 노두 PC12는 기반암 위에 하성 퇴적층이 3 m 이상의 두께로 나타나며, 퇴적층은 모래와 실트로 이루어진 기질(matrix)에 아각(sub-angular)~아원(sub-rounded)의 원마도를 가진 왕자갈(cobble)에서 거력(boulder)으로 가득 차 있다. OSL 연대 측정이 이루어진 선상지 단구 2면의 해발고도는 168.4 m, 연대 측정 지점의 해발고도는 164.0 m이며, 장암천 하상과 선상지 단구면 사이의 고도 차이인 지형면 하상

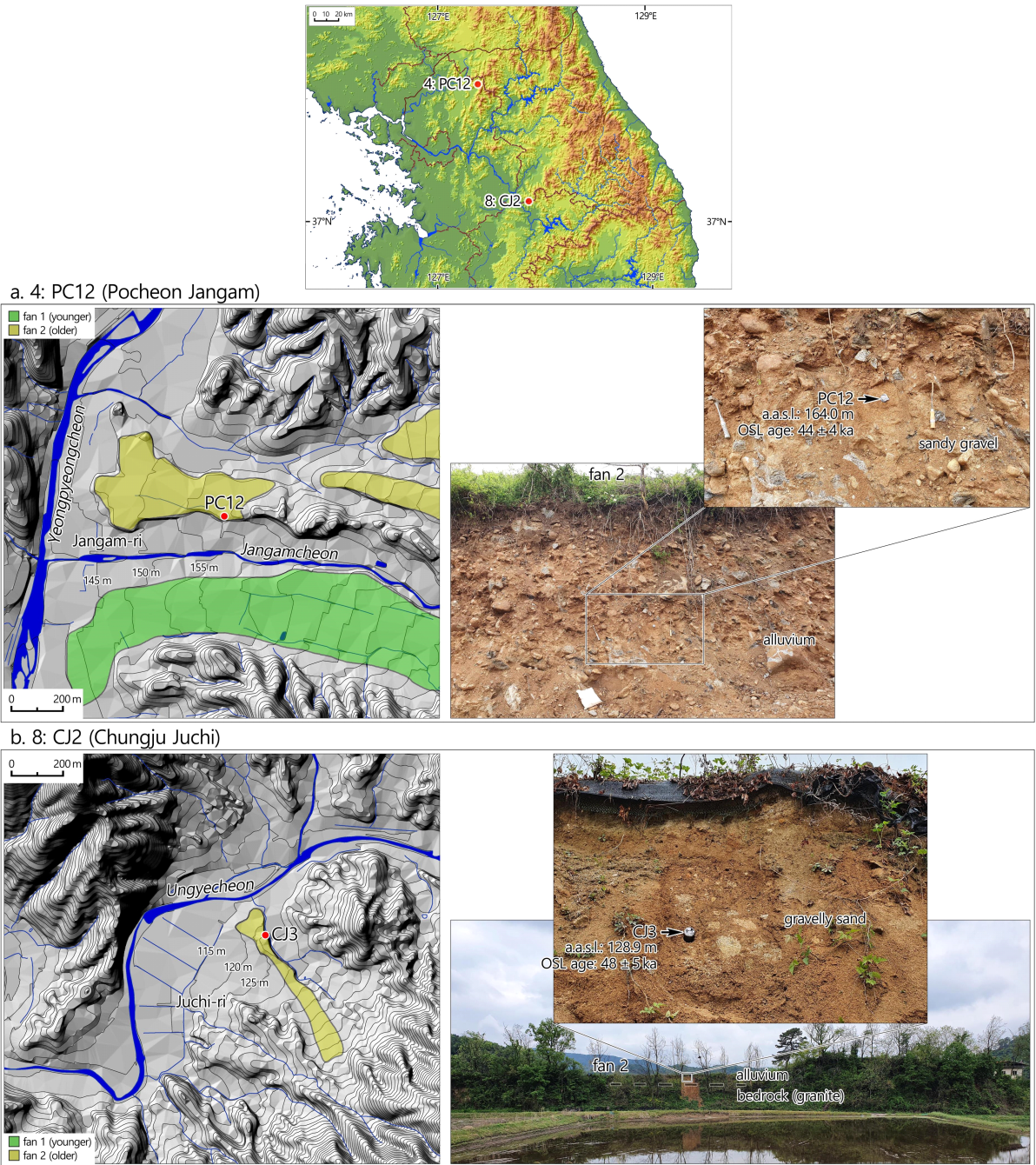


Fig. 4. Geomorphological map of alluvial fans and photographs of age dating points and outcrops at Pocheon Jangam fan (PC12) and Chungju Juchi fan (CJ2) sites surveyed in this study.

Table 2. Result for OSL age dating of 5 sites measured in this study.

Sample	Dose Rate (Gy/ka)	Water Content (%)	Equivalent Dose (Gy)	OSL Age (ka, 1σSE)
PC12	5.19 ± 0.14	14.2	227 ± 19	44 ± 4
CJ3	4.16 ± 0.12	12.4	200 ± 22	48 ± 5
BR6	4.65 ± 0.33	11.0	382 ± 4	82 ± 6
GW2	4.80 ± 0.14	8.8	201 ± 16	42 ± 4
GS43	3.40 ± 0.09	28.9	484 ± 38	142 ± 12

비고는 11.0 m로 측정되었다. 퇴적층 중앙에서 수집된 PC12의 OSL 연대는 44 ± 4 ka로 측정되어(표 2), 지난 최종 빙기의 중반인 MIS (marine oxygen isotope stage) 3에 선상지 단구 지형면이 형성된 것으로 나타났다.

충주 주치 선상지(8: CJ3)는 충북 충주시 소태면 주치리에 위치하며, 운계천 곡저와 접한 산록에 좁고 길게 암설류 선상지 단구 2면이 발달해 있다(그림 4b). 소하천과 접하는 단구에에서 확인된 퇴적층 노두 CJ3의 위치는 북위 37°09'38", 동경 127°52'03"E이다. 높이 10 m에 가까운 단애를 이룬 노두의 상부에서는 아각~아원의 원마도를 가진 왕자갈~거력이 포함된 하성 자갈질 모래층이 3 m 이상의 두께로 확인된다. 노두 바로 위의 선상지 단구면의 해발고도는 129.6 m, 단구면의 하상비고는 7.7 m이다. OSL 연대 측정이 이루어진 지점의 해발고도는 128.9 m이고, OSL 연대는 48 ± 5 ka로 얻어져(표 2), 선상지는 지난 최종 빙기의 중반인 MIS 3에 형성되었다.

충남 보령시 청라면 의평리 일대에 발달한 보령 청라 선상지(12: BR6)는 의평천이 본류인 대천천에 합류하는 곡저부에 형성한 하성 선상지 단구이다(그림 5a). 선상지 단구 2면의 북측 선단부는 대천천의 측방 침식으로 높이 20 m에 달하는 단애를 이루고 있으며, 단애의 최상부에서 퇴적층 노두 BR6가 발견되었다. 북위 36°23'17", 동경 126°40'05"에 위치한 노두 BR6은 아원~원(rounded)의 왕자갈~거력이 조밀하게 채워져 있는 4 m 이상 두께의 하성 모래질 자갈층을 이루고 있다. 노두 바로 상부 선상지 단구 2면의 해발고도는 74.1 m이고 하상비고는 12.4 m이며, OSL 연대 측정 지점의 해발고도는 72.1 m이다. OSL 연대는 82 ± 6 ka로 얻어져(표 2), 지난 최종 간빙기인 MIS 5에 선상지가 형성된 것으로 나타났다.

군위 대울 선상지(12: GW2)는 대구 군위군 부계면 대울리에 위치하며, 화강암 산지인 팔공산으로부터 다량의 암설을 공급받아 흘러내리는 남천의 하곡을 따라 발달한 좁고 긴 2~3단의 암설류 선상지 단구를 이루고 있다(그림 5b). 선상지 단구 2면과 접하는 남천의 하안에서 확인된 퇴적층 노두 GW2는 북위 36°03'33", 동경 128°39'29"에 위치한다. 퇴적층 노두 GW2는 약간 풍화된 기반암 위에 두께 2 m 내외의 아각~아원의 왕자갈~거력을 포함한 자갈질 모래층을 이

루고 있으며, 퇴적층 하부의 모래층에서 OSL 연대 시료를 수집하였다. GW2가 위치한 선상지 단구 2면의 해발고도는 235.8 m이며, 하상비고는 9.6 m이고, OSL 연대 측정 지점의 해발고도는 226.4 m이다. OSL 연대는 42 ± 4 ka로서(표 2), MIS 3에 선상지가 형성된 것으로 나타났다.

경남 고성군 거류면 감서리 일대에 발달한 고성 감서 선상지(32: GS43)는 해안의 산록에 손가락을 펼친 듯한 형태를 이룬 충적 선상지이다(그림 5c). 선상지 지형면은 주변보다 고도가 높고 개석이 심하여 오래된 선상지 2면으로 구분되며, 퇴적층 노두 GS43은 북위 35°00'54", 동경 128°23'26"의 2차선 도로와 접한 선단의 단애면에서 발견되었다. 노두 GS43은 풍화가 상당히 진행된 기반암의 상부에 약 3 m 두께를 이룬 수평의 하성 퇴적층으로, 퇴적층 하부는 아원의 잔자갈(pebble)이 포함된 모래질 자갈층이 상부는 실트질 모래층이 발달해 있으며, OSL 시료는 상부 모래층에서 수집하였다. 노두 바로 상부 선상지 지형면의 해발고도는 11.1 m이고, 선상지면의 하상비고는 10.1 m이며, OSL 연대 측정 지점의 해발고도는 6.2 m이다. OSL 연대는 142 ± 12 ka로서(표 2), 지지난 빙기인 MIS 6에 선상지가 형성된 것으로 나타났다. GS43의 OSL 연대는 다른 시료들에 비하여 매우 높은 등가선량(Equivalent dose)값과 상대적으로 낮은 연간선량(Dose Rate)값을 갖는다. 이러한 등가선량 값은 선량 포화(signal saturation)에 가깝기 때문에 측정 가능한 최대값으로 여겨지는 반면, 낮은 연간선량 값은 높은 수분함량(Water Content)에 영향을 받은 것으로 생각된다. 종합적으로 해석할 때 산출된 연대 결과는 최소 연대(Minimum Age)로 해석된다.

4. 토론

4.1. 38개 선상지의 형성 시기

선상지 퇴적층을 대상으로 측정된 OSL 연대를 선상지의 형성 시기로 간주할 때, 연구 대상인 한반도 남부 38개 선상지의 형성 시기는 27 ka에서 155 ka까지로 나타났다(표 2). 그러나 한반도 남부에서 소규모 선상지 퇴적층의 절대 연대가 홀로세로 분석된 연구 결과도 있다는 점을 고려할 때(Park *et al.*, 2011; Lee, 2022b), 한반도 남부에서 선상지의 가장

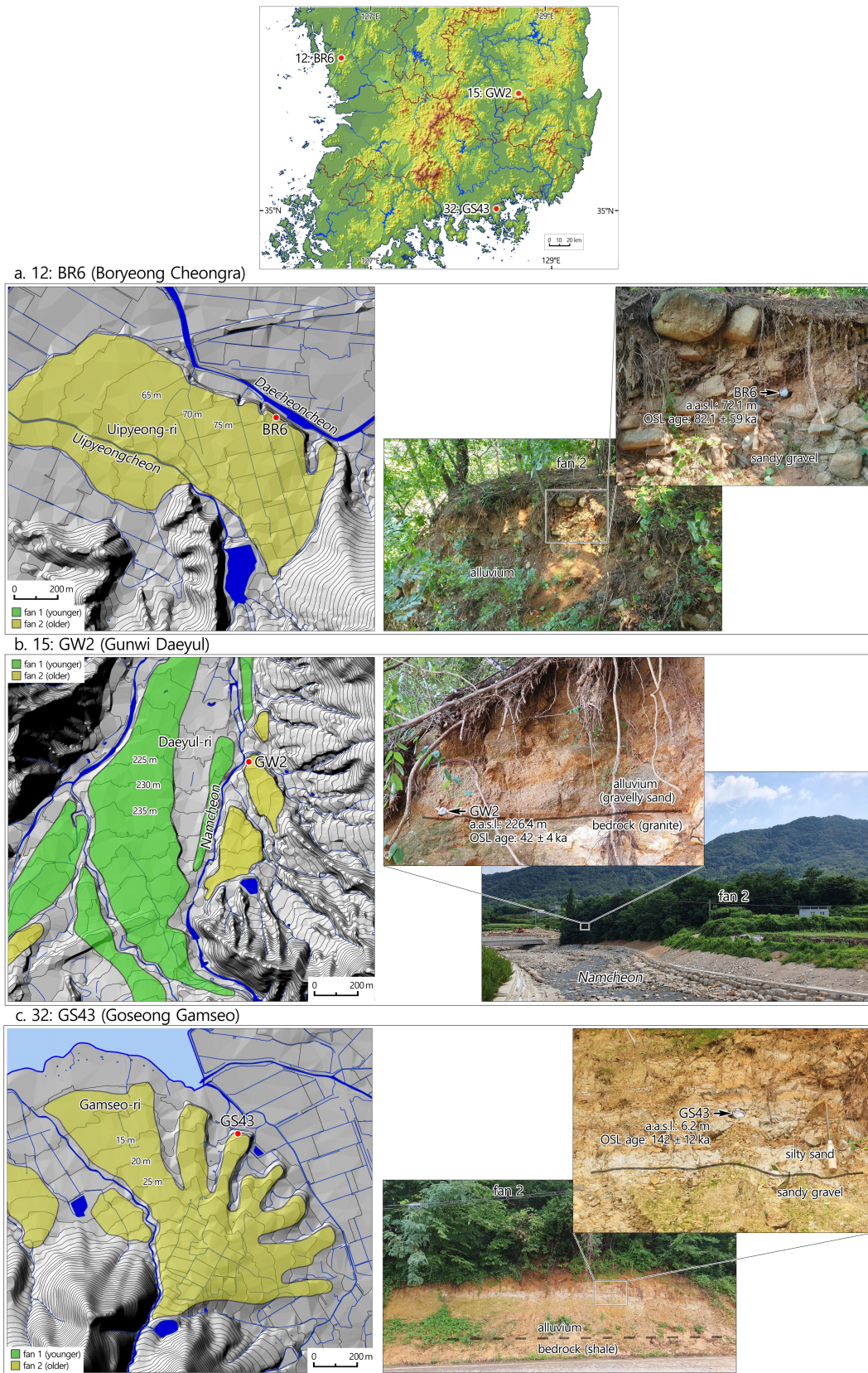


Fig. 5. Geomorphological map of alluvial fans and photographs of age dating points and outcrops at Boryeong Cheongra fan (BR6), Gunwi Daeyul fan (GW2), and Goseong Gamseo fan (GS43) sites surveyed in this study.

최근 형성 시기는 21 ka가 아닌 현재까지로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한 제4기 충적층을 대상으로 한 OSL 연대 측정은 OSL 연대의 상한이 약 150 ka라는 점을 고려하면, 본 연구의 38개 선상지 중 가장 오래된 연대인 155 ka 이전의 시기에도 한반도 남부에서는 여러 곳에서 다수

의 선상지 지형면이 형성되었을 것으로 추정된다.

38개 선상지 퇴적층에서 측정된 OSL 연대, 즉, 38개 선상지의 형성 시기를 종합해보면 2 ka의 시간 범위 내에서 2개 지점 이상에서 선상지가 형성된 시기는 28, 36, 42, 45, 48, 71, 87, 90, 114 ka로 정리된다(그림 6a의 진한 회색 세로선).

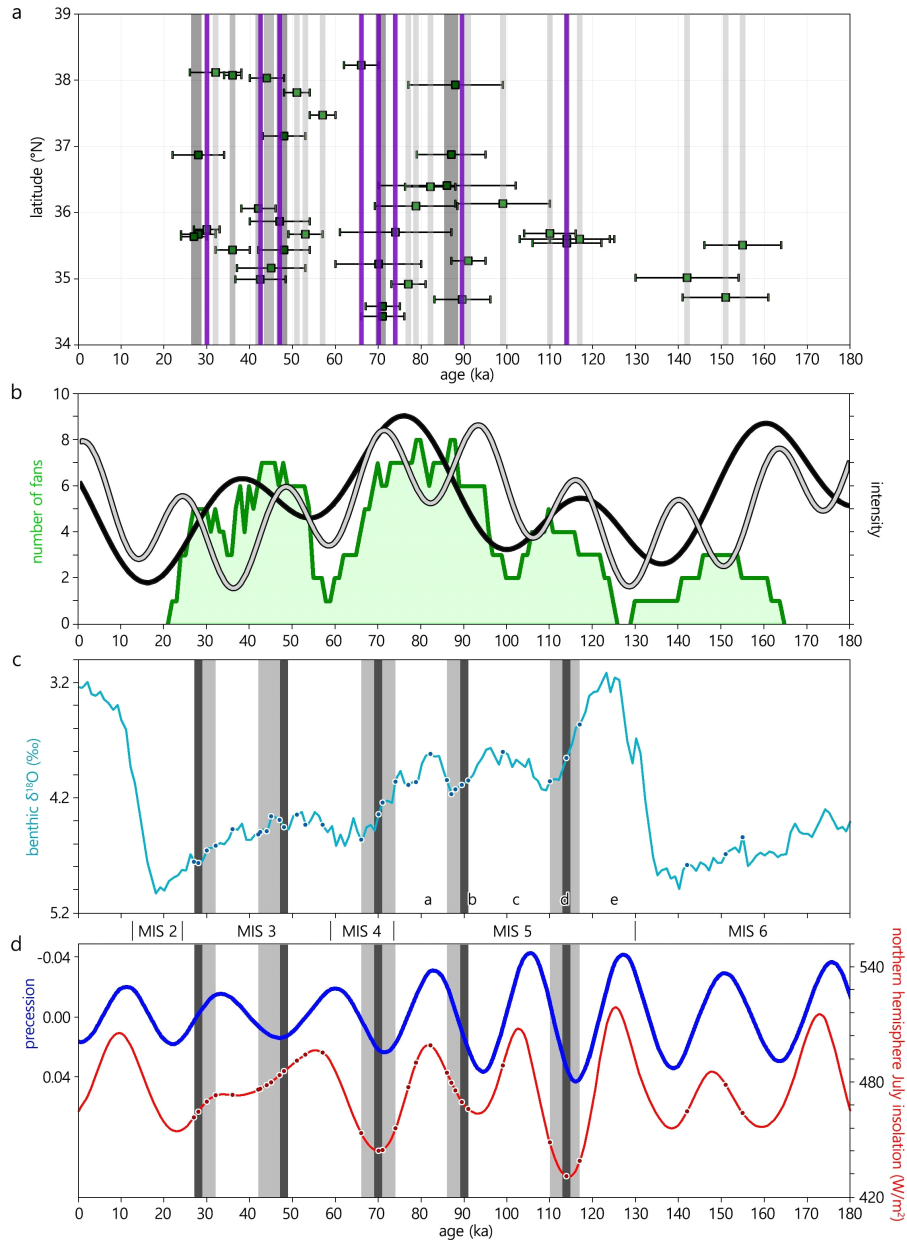


Fig. 6. Comparison of formation ages of fans in the southern Korean Peninsula with climate change data. (a) Formation ages and error ranges of alluvial fans in the southern Korean Peninsula. The gray part represents the formation period of the alluvial fans. The darker the gray, the more alluvial fans were formed. The gray lines are the formation ages of the alluvial fans (the darker the color, the greater the number of fans), and the purple lines are the formation ages of the large size alluvial fans. (b) Number of the alluvial fans (green line) and 2 best matching curves: the gray line is 23+100 ka cycle and the black line is 41+100 ka cycle. (c) Ice volume and insolation proxies: marine benthic $\delta^{18}\text{O}$ stack (sky blue). The gray areas are the main formation period, and the black thick lines are the peak age in c and d. (d) Changes in precession (blue) (Cheng *et al.*, 2016) and Northern Hemisphere July insolation (red) (Zhisheng *et al.*, 2015).

Table 3. Main formation periods and formation areas of alluvial fans in the southern Korean Peninsula.

Main Formation Period (ka)	Peak Age (ka)	Age Interval (ka)	MIS	Major Location
28~32	28	-	late 3	whole region
42~48	48	20	middle 3	whole region
66~74	70	22	early 4	southern coast area, northern part of the east coast
86~91	90	20	5b	whole region
110~117	114	24	5d	southeastern area

따라서 이들 연대는 한반도 남부에서 선상지의 형성에 유리한 기후 조건이 빈번하게 나타났던 시기로 볼 수 있다. 또한, 면적이 2 km² 이상인 8개 대형 선상지의 형성 연대는 30, 42.5, 47, 66, 70, 74, 89.6, 114 ka로 나타나서, 이 시기에는 면적이 넓은 대형 선상지의 형성이 가능하도록 다량의 암설과 퇴적물이 하도를 따라 공급되어 쌓일 수 있는 매우 강력한 집중호우와 산사태가 일부 지역에서 발생했던 것으로 추정된다. 그리고 2개 이상 지역에서 선상지가 형성된 연대와 대형 선상지가 형성된 연대가 서로 중첩되는 시기는 30, 42, 48, 70, 90, 115 ka 무렵으로 정리할 수 있다(그림 6a의 보라색 세로선). 이 시기는 선상지 형성의 빈도와 강도를 모두 만족하는 기후 조건을 가진 시기로, 한반도 남부에서 선상지 형성에 유리한 기후 조건인 매우 강한 집중호우와 태풍 등에 의한 돌발 홍수와 산사태가 발생하였던 시기로 볼 수 있다.

38개 선상지에 대해 OSL 연대의 오차 범위 기간을 모두 포함하여 선상지 형성 시기로 산정할 경우, 제4기 말 선상지 형성 시기의 빈도는 그림 6b의 녹색선과 같다. 선상지 개수가 최대를 나타내는 약 28~32, 44~48, 70, 79~80, 87~88, 110, 147~154 ka는 선상지 형성이 가장 빈번했던 것으로 보이며, 이 시기는 앞서 제시한 선상지 형성에 유리한 시기 와도 대체로 유사한 경향을 가진다. 반대로, 선상지의 형성이 가장 드물었던 시기는 약 21, 59, 102, 128 ka로서, 이 시기에는 한반도 남부에서 집중호우나 태풍의 강도와 빈도가 약해지는 등의 선상지 형성에 불리한 기후 조건이 나타났던 것으로 추정된다.

38개 선상지 연대의 빈도, 강도, 연대 범위 등을 모두 고려하여, 한반도 남부의 주요 선상지 형성 시기를 정리해 보면 표 3과 같다. 제4기 말 한반도 남부에서 선상지의 주요 형성 시기는 28~32, 42~48, 66~74, 86~91, 110~117, 147~154 ka로 정리되어, 이 시기가 선상지 형성에 유리한 기후 조건을 가졌던 것으로 추정된다. 이 시기에서도 최대 빈도를 나타내는 28, 48, 70, 90, 114 ka는 선상지 형성이 가장 활발했던 최대 빈발기로, 선상지가 형성될 수 있는 원인을 제공한 주요 기후 사건이 집중적으로 발생하였던 시기로 판단된다. 특히, 이 최대 빈발기는 20~24 ka의 일정한 시간 간

격을 이루고 있어서, 20~24 ka는 한반도 남부 선상지 형성에 유리한 기후 사건의 발생 주기일 가능성이 높다.

38개 선상지의 형성 시기 빈도 곡선(그림 6b의 녹색선)에 가장 부합하는 추세 곡선(fitting curve)을 작성해 본 결과, 23 ka와 100 ka 주기를 혼합한 곡선(그림 6b의 회색선)과 41 ka와 100 ka 주기를 혼합한 곡선(그림 6b의 검은색선)이 가장 유사한 추세로 표현되고 있다. 23, 41, 100 ka는 지구의 공전 및 자전과 관련한 궤도 주기(orbital cycle)로서, 23 ka는 세차운동, 41 ka는 자전축 기울기 변화, 100 ka는 공전궤도 변화 주기이다(Hays *et al.*, 1976; Berger, 1977). 이 3가지 궤도 주기는 앞서 제시한 38개 선상지의 발생 주기인 20~24 ka와 일치하거나 배수에 해당하여, 한반도 남부의 선상지 형성 주기는 궤도 주기와 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 특히, 한반도가 위치한 동아시아 지역에서 궤도 주기는 여름철 강수량 증가를 유발하는 여름 몬순의 강도 변화와 매우 밀접한 관련을 가진다. Sun *et al.* (2022)은 동아시아에서 제4기 동안의 여름 몬순 변동은 지구 궤도 변화, 빙하의 확장 축소, 온실가스 강제력이 결합된 효과에 의해 23, 41, 100 ka 주기로 나타난다고 주장하였다. 또한, Zhisheng *et al.* (2015)도 중국 황토 고원 퇴적물과 남중국해 퇴적층 분석 결과를 토대로 동아시아 몬순은 23, 41, 100 ka의 주기를 가진다고 제시하였다.

4.2. 한반도 남부의 제4기 말 기후 변동과 선상지 형성

한반도 남부에 발달한 38개 선상지를 대상으로 제4기 말 선상지의 주요 형성 기간은 28~32, 42~48, 66~74, 86~91, 110~117, 147~154 ka로, 최고 형성 시기는 28, 48, 70, 90, 114 ka로 분석되었다(표 3). 이들 시기는 산소 동위체 시기로 보면, MIS 3 후반, MIS 3 전반, MIS 4 전반, MIS 5b, MIS 5d에 해당한다. 그리고 각 시기에 형성된 선상지의 분포 위치를 고려하면, MIS 3 후반, MIS 3 전반, MIS 5b에는 한반도 남부의 전역에서 선상지가 형성되었지만, MIS 4 전반에는 주로 남해안 일대와 동해안 북부 지역에서 선상지가 형성되었고, MIS 5d에는 주로 한반도 남동부 지역에서 선상지가 형성된 것으로 분석되었다.

해양 산소 동위체 ¹⁸O와 ¹⁶O의 비율로 추정된 고기후 대

리 자료인 $\delta^{18}\text{O}$ (그림 6c)을 토대로 하여, 제4기 말 동안 한반도 남부 선상지 주요 형성 시기의 기온을 살펴보면, MIS 5d와 5b는 온난한 간빙기 내에서도 상대적으로 기온이 낮은 시기이며, MIS 4 전반과 3은 빙기 내에서도 상대적으로 기온이 높은 시기이다. 또한, 최고 형성 시기인 28, 48, 70, 90, 114 ka는 대부분 일사량의 감소로 기온이 낮아지고 있는 기온 하강기에 해당한다. 따라서 제4기 말 동안 한반도 남부에서는 현재보다 기온이 매우 낮지만, 장기적 기후 변동의 측면에서 기온이 매우 높지도 않고 낮지도 않은 시기이자 온난기에서 한랭기로 전환되는 기온 하강기에 선상지가 주로 형성되었다. 즉, 한반도 남부에서 제4기 말 동안 빙기와 간빙기 정점의 중간 상태에서 나타난 기온 하강기는 선상지의 형성에 매우 유리한 조건을 제공하는 돌발 홍수와 산사태를 유발할 수 있는 여름철 집중호우나 태풍의 강도 및 빈도를 급격하게 증가시킨 시기로 추정해 볼 수 있다.

한반도 남부의 결과와 유사하게 중국 서부의 연구 결과에서도 빙기를 중심으로 한 기온 하강기에 주로 선상지나 하안단구의 퇴적 작용이 발생한다고 제시되고 있다(Lu *et al.*, 2010; He *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2019; An *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2021). 중위도 건조 및 반건조 기후 후에 해당하는 중국 서부와 대체로 온난 습윤한 한반도는 현재의 기후 상태가 상당히 다르지만, 현재를 포함하여 제4기 말 동안 동아시아 몬순의 영향을 매우 강하게 받는 지역이라는 점에서 기후의 유사성을 가진다. 또한 동아시아 지역에서 선상지나 하안단구와 같은 제4기 충적 지형의 형성은 동아시아 여름 몬순의 강도 변화와 관련이 깊다(Hsieh *et al.*, 2014; Sewell *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2021; Lee, 2022b).

한반도 남부에서 선상지 형성의 최대 빈발 주기는 동아시아 여름 몬순의 강도 변화를 유발하는 궤도 주기인 23, 41, 100 ka와 거의 일치한다. 또한 한반도 남부 선상지의 최고 형성 시기인 28, 48, 70, 90, 114 ka는 20~24 ka 주기로 나타나며, 이는 세차운동(그림 6d의 파란선)과 북위 65°의 7월 일사량(그림 6d의 빨간선) 주기인 23 ka와도 일치한다. 한반도 남부와 기후 유형이 같은 중국 중부의 산바오(Shanbao) 동굴(북위 31°40', 동경 110°26', 해발고도 1,900 m)의 연구에서 동아시아 몬순의 강도 변화는 북위 65°의 7월 일사량 변화 주기와 같은 23 ka라고 제시하고 있다(Wang *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2009). 따라서 제4기 말 동안 한반도 남부의 선상지 형성 주기는 동아시아 여름 몬순의 변동 주기와 일치한다. 한편, 중국 산바오 동굴의 연구 결과에서는 동아시아 몬순 강도의 증가가 일사량의 최저기에서 시작되는 경향이 있다고 제시하고 있다(Cheng *et al.*, 2016). 그리고 본 연구 결과에서도 한반도 남부 선상지의 최고 형성 시기인 28, 48, 70, 90, 114 ka는 세차운동과 북반구 여름철 일사량 주기에서 대체로 최저기 부근에 해당한다(그

림 6d). 따라서, 제4기 말 한반도 남부의 선상지는 동아시아 여름 몬순의 강도 변화에 의한 영향으로 주기성을 띠고 있으며, 선상지의 주요 형성 시기와 과정은 북반구 여름철 일사량 최저기에 여름 몬순의 강도가 증가하면서 여름철 강우 강도 증가에 따른 활발해진 돌발 홍수와 산사태에 기인한 것일 가능성이 큰 것으로 추정된다.

5. 결론

선상지는 하천이 유속과 유량 감소로 인해 산지의 전면에 퇴적물을 쌓아서 형성한 대표적인 제4기 충적 지형 중 하나이다. 한반도 남부와 같은 중위도 습윤 기후 지역의 선상지는 집중호우나 태풍에 의한 수천 년 주기의 돌발 홍수로 인해 주로 발생한다. 본 연구는 한반도 남부의 선상지를 대상으로, 제4기 말의 선상지 형성 시기와 기후 변화 사이의 관계를 파악하고자, 한반도 남부에 발달한 38개 선상지의 OSL 절대 연대를 종합하여, 한반도 남부에서 제4기 말의 선상지 형성 시기와 주기성을 분석하였다. 연구 대상인 38개 선상지는 충적 선상지 7개, 선상지 단구 16개, 하성 선상지 단구 7개, 암설류 선상지 단구 8개로 유형이 구분되었다. 38개 선상지의 형성 연대는 27~155 ka의 범위이며, 제4기 말 선상지의 주요 형성 기간은 28~32 ka (MIS 3 후반), 42~48 ka (MIS 3 초반), 66~74 ka (MIS 4 초반), 86~91 ka (MIS 5b), 110~117 ka (MIS 5d)이며, 최고 형성 시기는 28, 48, 70, 90, 114 ka로 분석되었다. 이 시기는 현재보다 기온이 낮으며, 대체로 빙기와 간빙기의 중간 상태에서 나타나는 기온 하강기에 해당한다. 따라서 한반도 남부에서는 약간 한랭한 기온 하강기에 여름철 집중호우나 태풍의 증가로 선상지 형성에 유리한 조건을 제공하는 돌발 홍수와 산사태의 발생이 증가하였을 가능성이 높다.

동아시아 지역에서 선상지나 하안단구와 같은 제4기 충적 지형의 형성은 여름 몬순의 강도 변화와 관련이 깊다. 그리고 한반도 남부 선상지의 최고 형성 시기의 연대 간격은 20~24 ka로서, 동아시아 여름 몬순 강도의 변화를 유발하는 세차운동과 북위 65°의 7월 일사량 변화 주기인 23 ka와 일치한다. 또한 한반도 남부 선상지의 최고 형성 시기는 선행 연구에서 동아시아 여름 몬순 강도의 증가 시기로 제시된 북반구 일사량의 최저기와 대체로 일치한다. 결국, 제4기 말 한반도 남부의 선상지의 형성 시기는 여름철 강우 강도의 증가에 따라 강력한 돌발 홍수와 산사태를 유발할 수 있는 동아시아 여름 몬순의 강도 변화와 깊은 관련이 있는 것으로 추정된다. 따라서 한반도에서 제4기 충적 지형의 형성 과정과 요인을 심층적으로 해석하기 위해서는 제4기에 동아시아 여름 몬순의 강도 변화에 따른 한반도의 고기후 변화를 이해할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본 사업으로 수행한 “지질기록체를 활용한 인간간섭의 기후환경변화 영향연구 (25-3413)” 과제의 지원으로 수행된 연구입니다. 논문 작성에 많은 도움을 주신 심사위원분들과 편집위원님들께 감사드립니다.

REFERENCES

- An, F., Chen, T., Li, X., Liu, X., Wang, Y., Chen, Z. and Chongyi, E., 2021, Formation, mechanism and significance of alluvial-dammed lakes in Golmud River catchment, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46, 2421-2436.
- Bartz, M., Walkb, J., Binnic, S.A., Brilla, D., Stauchb, G., Lehmkuhlb, F., Hoffmeistera, D. and Brücknera, H., 2020, Late Pleistocene alluvial fan evolution along the coastal Atacama Desert (N Chile). *Global and Planetary Change*, 190, 103091.
- Berger, A., 1977, Support for the astronomical theory of climatic change. *Nature*, 269, 44-45.
- Cesta, J.M. and Ward, D.J., 2016, Timing and nature of alluvial fan development along the Chajnantor Plateau, northern Chile. *Geomorphology*, 273, 412-427.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Broecker, W.S., Denton, G.H., Kong, X., Wang, Y., Zhang, R. and Wang, X., 2009, Ice Age Terminations. *Science*, 326, 248-252.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Sinha, A., Spötl, C., Yi, L., Chen, S., Kelly, M., Kathayat, G., Wang, X., Li, X., Kong, X., Wang, Y., Ning, Y. and Zhang, H., 2016, The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 534, 640-646.
- Dey, S., Thiede, R.C., Schildgen, T.F., Wittmann, H., Bookhagen, B., Scherler, D., Jain, V. and Strecker, M.R., 2016, Climate-driven sediment aggradation and incision since the late Pleistocene in the NW Himalaya, India. *Earth and Planetary Science Letters*, 449, 321-331.
- Fenton, C.R. and Pelletier, J.D., 2013, Cosmogenic ³He age estimates of Plio-Pleistocene alluvial-fan surfaces in the Lower Colorado River Corridor, Arizona, USA. *Quaternary Research*, 79, 86-99.
- Harvey, A.M., Silva, P.G., Mather, A.E., Goy, J.L., Stokes, M. and Zazo, C., 1999a, The impact of Quaternary sea-level and climatic change on coastal alluvial fans in the Cabo de Gata ranges, southeast Spain. *Geomorphology*, 28, 1-22.
- Harvey, A.M., Wigand, P.E. and Wells, S.G., 1999b, Response of alluvial fan systems to the late Pleistocene to Holocene climatic transition: contrasts between the margins of pluvial Lakes Lahontan and Mojave, Nevada and California, USA. *Catena*, 36, 255-281.
- Hays, J.D., Imbrie, J. and Shackleton, N.J., 1976, Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194, 1121-1132.
- 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.
- Hooke, R.L., 1967, Processes on Arid-Region Alluvial Fans. *The Journal of Geology*, 75, 438-460.
- Hsieh, M.L., Ching, K.E., Chyi, S.J., Kang, S.C. and Chou, C.Y., 2014, Late Quaternary mass-wasting records in the actively uplifting Pa-chang catchment, southwestern Taiwan. *Geomorphology*, 216, 125-140.
- 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.
- Hsieh, M.L., Liew, P.M. and Chen, H.W., 2011, Early Holocene catastrophic mass-wasting event and fan-delta development on the Hua-tung coast, eastern Taiwan. *Geomorphology*, 134, 378-393.
- Hu, X., Li, Y., Lu, S., Wang, Y. and Xiong, J., 2021, Climatically- and tectonically-controlled development of the late quaternary alluvial fan in the north piedmont of Zhongtiao Shan (ZTS), north China. *Quaternary International*, 604, 51-59.
- Huggett, R.J., 2011, *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge, New York, USA, 516 p.
- Imsong, W., Thon, G.T. and Sharma, S., 2023, Causes of pulsating evolution of fluvial landforms since the marine isotopic stage-2 in the belt of Schuppen, Nagaland, NE India. *Physical Geography*, 44, 381-404.
- Kar, R., Chakraborty, T., Chakraborty, C., Ghosh, P., Tyagi, A.K. and Singhvi, A.K., 2014, Morpho-sedimentary characteristics of the Quaternary Matiali fan and associated river terraces, Jalpaiguri, India: Implications for climatic controls. *Geomorphology*, 227, 137-152.
- Kober, F., Zeilinger, G., Ivy-Ochs, S., Dolati, A., Smit, J. and Kubik, P.W., 2013, Climatic and tectonic control on fluvial and alluvial fan sequence formation in the Central Makran Range, SE-Iran. *Global and Planetary Change*, 111, 133-149.
- Lee, G.R., 2018, Distribution of Stream Incision Rates in the Northern Part of the Taebaek Mountains. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 25, 1-19 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2022a, Geomorphic Process of Quaternary Depositional Landforms in Yeocha Coast, Geoje Island. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 29, 55-64 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2022b, Formation Ages of Alluvial Fans in Granite Erosional Basins, South Korea. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 29, 21-34 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2023, Distribution and Influencing Factors of Stream Incision Rates in the Eastern Slope Basins of the Taebaek Mountains, Gangwon. *Journal of the Korean Geographical Society*, 58, 274-286 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2024, *Climatology to Understand by Principles*. Guardian Book, Daegu, Korea, 363 p (in Korean).
- Lee, G.R., 2025, *Geomorphology to Understand with Images*. Guardian Book, Daegu, Korea, 660 p (in Korean).
- 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., Kim, J.Y., Lee, H. and Jeong, J.Y., 2023a, Geomorphological process and the Quaternary fault displacement of allu-

- vial fan terraces in the Eonyang area, Ulsan. *Journal of the Geological Society of Korea*, 59, 535-549 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 2019, Comparison of Uplift Rate in the Southern Coast of the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 26, 55-67 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 2021, Fluvial Terrace and Incision Rate in the Middle Sobaek Mountain Range. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 28, 15-30 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 2022, Distribution of stream incision rate in the Southern Sobaek Mountain Range. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 151-165 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., Park, C.S., Kim, J.C. and Nahm, W.H., 2023b, Geomorphological Process and Change of Fan Terraces in Jeonnam, Korea - A Case Study of the Damyang Daejeon and Jangheung Fan Terraces. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 30, 69-81 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Lu, H., Burbank, D.W. and Li, Y., 2010, Alluvial sequence in the north piedmont of the Chinese Tian Shan over the past 550 kyr and its relationship to climate change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 285, 343-353.
- Mather, A.E., Stokes, M. and Whitfield, E., 2017, River terraces and alluvial fans: The case for an integrated Quaternary fluvial archive. *Quaternary Science Reviews*, 166, 74-90.
- 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.
- Owen, L.A., Clemmens, S.J., Finkel, R.C. and Gray, H., 2014, Late Quaternary alluvial fans at the eastern end of the San Bernardino Mountains, Southern California. *Quaternary Science Reviews*, 87, 114-134.
- Park, J.H., Kim, C. and Jang, D.H., 2011, Mass-Movement of Slope Material During the Holocen Period on the Southern Slope of Geumseong Mountain in Buyeo, Chungnam Province. *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 21, 81-94 (in Korean with English abstract).
- Peri, V.G., Haghipour, N., Christl, M., Terrizzano, C., Kaveh-Firouz, A., Leiva, M.F., Pérez, P., Yamin, M., Barcelona, H. and Burg, J.P., 2022, Quaternary landscape evolution in the Western Argentine Precordillera constrained by ¹⁰Be cosmogenic dating. *Geomorphology*, 396, 107984.
- Ritter, D.F., Kochel, R.C. and Miller, J.R., 2011, *Process Geomorphology*. Waveland Press, Long Grove, USA, 652 p.
- Sarıkaya, M.A., Yıldırım, C. and Çiner, A., 2015, Late Quaternary alluvial fans of Emli Valley in the Ecemiş Fault Zone, south central Turkey: Insights from cosmogenic nuclides. *Geomorphology*, 228, 512-525.
- Sewell, R.J., Parry, S., Millis, S.W., Wang, N., Rieser, U. and DeWitt, R., 2015, Dating of debris flow fan complexes from Lantau Island, Hong Kong, China: The potential relationship between landslide activity and climate change. *Geomorphology*, 248, 205-227.
- Shin, J.R. and Hong, S., 2018, The Formative Processes and Ages of Paleo-coastal Sediments in Daepo-dong Sacheon-si in the Southern Coast, South Korea: Evaluation of the Mode and Rate of the Late Quaternary Tectonism (II). *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 25, 57-70 (in Korean with English abstract).
- Shin, J.R., Hong, Y.M. and Hong, S., 2020, The Formative Processes and Ages of Paleo-coastal Sediments in Dangjeong-ri, Seocheon-gun in the Western Coast, South Korea: Evaluation of the Mode and Strain Rate of the Late Quaternary Tectonism (III). *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 27, 33-45 (in Korean with English abstract).
- Sohn, M.F., Mahan, S.A., Knott, J.R. and Bowman, D.D., 2007, Luminescence ages for alluvial-fan deposits in Southern Death Valley: Implications for climate-driven sedimentation along a tectonically active mountain front. *Quaternary International*, 166, 49-60.
- 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, Essex, England, 537 p.
- Sun, Y., Wang, T., Yin, Q., Lyu, A., Crucifix, M., Cai, Y., Ai, L., Clemens, S. and An, Z., 2022, A review of orbital-scale monsoon variability and dynamics in East Asia during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 288, 107593.
- Terrizzano, C.M., Morabito, E.G., Christl, M., Likerman, J., Tobal, J., Yamin, M. and Zech, R., 2017, Climatic and Tectonic forcing on alluvial fans in the Southern Central Andes. *Quaternary Science Reviews*, 172, 131-141.
- Viveen, W., Sanjurjo-Sanchez, J., Bravo-Lembcke, G. and Uribe-Ventura, R., 2024, A 121-ka record of Western Andean fluvial response to suborbital climate cycles recorded by rhythmic grain size variations of the Lima fluvial fan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49, 2326-2347.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jiang, X., Wang, X. and An, Z., 2008, Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 451, 1090-1093.
- 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, S.Y., Du, J., Hou, Z., Shen, J. and Colman, S.M., 2019, Late-Quaternary dynamics and palaeoclimatic implications of an alluvial fan-lake system on the southern Alxa Plateau, NW China. *Geomorphology*, 327, 1-13.
- Zhisheng, A., Guoxiong, W., Jianping, L., Youbin, S., Yimin, L., Weijian, Z., Yanjun, C., Anmin, D., Li, L., Jianguy, M., Hai, C., Zhengguo, S., Liangcheng, T., Hong, Y., Hong, A., Hong, C. and Juan, F., 2015, *Global Monsoon Dynamics and Climate Change*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43, 29-77.