

소백산맥 남부 지역의 하천 하각률 분포

이광률¹ · 박충선^{2,‡}

¹경북대학교 사범대학 지리교육과

²경북대학교 사회과학대학 지리학과

Distribution of stream incision rate in the Southern Sobaek Mountain Range

Gwang-Ryul Lee¹ · Chung-Sun Park^{2,‡}

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

²Department of Geography, College of Social Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

요 약

본 연구에서는 소백산맥 남부 지역에 분포하고 있는 하안단구 및 선상지성 하안단구 퇴적층의 OSL 연대 측정과 지형 분석 통해, 이 지역의 하각률 분포와 이에 영향을 미친 요인을 검토해 보았다. 연구 지역 중 지리산(1,915 m) 북사면 지역이 가장 높은 하각률을 나타내었으며, 여기서 멀어질수록 하각률은 감소하는 경향을 보였다. 가상 용기 축과의 거리가 하각률 분포와 가장 높은 관련성을 나타내는 것으로 분석되었으며, 이는 연구 지역의 하각률 분포에 있어 지반 용기가 가장 중요한 요인임을 의미하는 것으로 생각된다. 동서 방향으로의 하각률 감소 정도는 서로 유사한 것으로 나타나, 연구 지역은 대칭적 용기를 경험한 것으로 판단된다. 또한 연구 지역은 태백산맥 북부 지역과 비슷하거나 약간 느린 용기를 그리고 소백산맥 북부 및 중부 지역보다는 빠른 용기를 경험한 것으로 생각된다.

주요어: 하안단구, 선상지성 하안단구, 하각, 용기, OSL 연대 측정

ABSTRACT: This study tried to reveal the distribution of incision rate and its causes in the Southern Sobaek Mountain Range, with OSL age dating and topographic analysis for fluvial terrace and fanlike terrace deposits. The northern slope of Jirisan (1,915 m) showed the highest incision rate and the incision rate decreased with distance from the northern slope. The incision rate indicated the most relevant with the distance from the inferred uplift axis, suggesting that ground uplift was the most important factor for the distribution of incision rate in the study area. The incision rates to the eastern and western directions showed similar decreasing patterns, indicating that the study area experienced the symmetric uplift. It was also suggested that the study area experienced similar or slightly lower uplift compared to that in the Northern Taebaek Mountain Range and higher uplift than the Northern and Middle Sobaek Mountain Ranges.

Key words: fluvial terrace, fanlike terrace, incision, uplift, OSL age dating

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

하천은 최종적인 침식 기준면(base level)인 해수면과의 고도 차이를 줄여 지형적으로 안정한 상태를

유지하기 위해서 하방 침식(downward erosion) 또는 하각(incision)을 진행한다(Lee, 2021). 하천이 아래로 고도를 낮추는 하방 침식 또는 하각은 지반 용기, 해수면 하강, 유량 증가, 지형 변위 등에 의해 발생한다(Schumm, 1999; Lee, 2021). 따라서 하각의 속

[‡]Corresponding author: +82-53-950-5227, E-mail: pcus96@hanmail.net

도인 하각률(incision rate)은 해당 지역의 암석과 지질 구조 특성, 용기 및 단층 등 지구조적 작용, 제4기 동안의 장기적인 기후 변화, 하천 유수의 작용과 하곡의 지형 변화 과정 등의 영향을 받는다(Pazzaglia *et al.*, 1998; Seong *et al.*, 2008; Cook *et al.*, 2009; Castillo *et al.*, 2014; Finnegan *et al.*, 2014; Fuchs *et al.*, 2014; Saillard *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2015; Lee, 2018a, 2018b, 2019; Su *et al.*, 2019; Lee and Park, 2020, 2021; Wu *et al.*, 2020).

하천의 하각률은 하안단구(fluvial terrace)에 대한 연대 측정과 지형 분석을 통해 산출할 수 있다. 대표적인 제4기 충적 지형 중 하나인 하안단구는 현재보다 고도가 높은 곳을 흘렀던 고하천(paleo-stream)에 의해 형성되었던 하도나 범람원이 기후 변화나 지반 용기에 의한 하천의 하각으로 현 하천보다 높은 고도에 남겨지게 된 지형이다(Leopold, 2000; Ritter *et al.*, 2011; Lee, 2021). 즉, 하안단구는 하천이 고도를 낮추는 하각 작용이 진행된 이후에도 남겨진 과거의 하도나 범람원이다. 따라서 하천이 지표를 좁고 깊게 아래로 침식하는 작용인 하각은 하안단구를 형성에 있어 가장 필수적인 작용이다(Lee, 2021).

우리나라에서 하안단구 및 이를 이용한 하각률 연구는 한반도의 용기 축으로 알려진 태백산맥(Lee, 2018b, 2019) 및 소백산맥(Lee and Park, 2020, 2021) 일대를 흐르는 하천을 대상으로 집중적으로 이루어졌다. 이러한 연구에 따르면 태백산맥과 소백산맥에서 멀어질수록 대체로 하각률이 낮아지는 경향을 보이고 있어, 국내 하천의 하각에 지반 용기가 큰 영향을 미친 것으로 생각되며, 소백산맥보다는 태백산맥이 더 큰 용기를 경험한 것으로 제시되었다. 또한 높은 하각률을 나타내는 지점이 특정 사면에만 분포하고 있어 태백산맥과 소백산맥 모두 비대칭적 용기를 경험한 것으로 보이지만, 소백산맥의 경우 지역에 따라 지반 용기 양상이 차이를 보일 가능성도 제기되었다.

본 연구는 우리나라에서도 하안단구 연구가 거의 이루어지지 않은 소백산맥 남부 지역 산지 하천의 하안단구를 대상으로 하천 하각률의 분포 특성에 대해 분석하였다. 덕유산(1,614 m)에서 지리산(1,915 m) 일대까지의 산지 하천 중 금강 및 섬진강 유역에 해당하는 영서 하천과 낙동강 유역에 해당하는 영동 하천으로 구분하여, 연대 측정 시료의 수집이 가능한 하

안단구 퇴적층이 확인된 총 21개 하안단구 지점을 대상으로 연대 측정 및 지형 분석을 실시하여 하각률을 산출하였다. 그리고 본 연구의 분석 결과와 우리나라 하안단구에 대한 선행 연구 결과를 종합하여, 소백산맥 남부 지역 하각률의 공간적 분포 특성과 이에 영향을 미친 요인에 대해 논의하였다.

1.2 연구 지역

연구 지역은 한반도 남부의 중앙에 위치한 북위 36° 이남의 소백산맥 남부 지역이다. 행정구역상으로는 소백산맥의 영서 지역인 전북 무주군, 진안군, 장수군, 남원시, 전남 구례군과 영동 지역인 경북 김천시 남부, 경남 거창군, 함양군, 사천군, 하동군에 위치한 하천의 하안단구를 대상으로 연구를 진행하였다(그림 1). 특히, 전북 남원시와 경남 함양군의 경계는 소백산맥 부근을 따라 이어지는 백두대간 분수계와 일치하지 않아, 남원시 아영면, 인월면, 운봉읍, 산내면에 해당하는 면적 254.1 km²의 지역은 행정구역상 전북이지만 지형적으로는 낙동강 유역에 해당한다(Lee, 2016).

금강 유역에서는 선행 연구 지역인 금강 상류와 구량천(Lee and Park, 2021)과 더불어 금강 최상류를 포함하여 총 2개 하천의 4개 지점에서, 섬진강 유역에서는 임실천, 요천, 옥률천, 서시천, 약양천, 횡천강 등 총 6개 하천의 7개 지점에서 연대 측정 및 지형 분석을 통한 하각률 산출이 이루어졌다. 낙동강 유역에서는 선행 연구 지역인 감천과 고견천(Lee and Park, 2021)에 더하여, 거창 위천, 황강 상류, 함양 위천, 랫천, 임천, 남강 상류가 추가되어 총 8개 하천의 10개 지점 하안단구에 대한 연대 측정 및 지형 분석이 이루어졌다.

연구 지역의 지질은 소백산맥의 중심부를 따라 선캠브리아기 변성암류가 북북동-남남서 주향의 대상 분포를 이룬다(그림 2). 연구 지역 북부에는 흑운모편마암, 화강암질편마암이 우세한 소백산 편마암 복합체가 다소 산발적인 대상으로 분포하며, 남부에는 변성도가 높은 미그마타이트질편마암과 반상변정질편마암이 지리산(1,915 m)을 중심으로 괴상으로 넓게 분포한다(Kim *et al.*, 1998). 그리고 연구 지역의 중부와 북부에는 중생대 주라기 및 백악기 화강암이 관입하여 변성암류 사이에 상당히 넓은 면적을 차지하고 있다. 이 밖에 연구 지역의 북서부에는

중생대 백악기 화산암류 및 퇴적암류가, 남동부에는 중생대 백악기 낙동층군의 퇴적암류가 넓은 면적을 나타내고 있다. 소백산맥의 중심을 이루는 편마암류는 화강암에 비해 풍화·침식에 대한 저항력이 강하여 상대적으로 높은 봉우리와 급경사의 산지를 이루고 있고, 풍화·침식에 대한 저항력이 상대적으로 약한 화강암 지역은 고도가 낮은 분지와 하곡 또는 완경사의 사면을 이루고 있다(Lee, 2007, 2014).

1.3 연구 방법

야외 조사와 하안단구 지형 분석을 위하여, 먼저 1:5,000 및 1:25,000 지형도와 1:50,000 지질도 그리고 항공사진을 이용하여, 연구 지역 내 여러 하천을 대상으로 하안단구의 분포 경향을 확인하였다. 그리고 하안단구가 분포할 것으로 예상되는 지역을 대상으로 야외 조사를 실시하고, 금강 유역, 섬진강 유역, 낙동

강 유역의 여러 하천에서 하안단구 퇴적층 노두를 확인하여, OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대 측정 시료를 수집하고 측량을 실시하였다. OSL 연대 측정 시료는 하안단구 퇴적층 내에서도 모래를 다량 포함한 층에서 금속관을 삽입해 수집하였다. 이중 퇴적층의 상태가 양호하며 의미 있는 연대가 얻어질 것으로 예상되는 금강 유역 하천에서 1개, 섬진강 유역 하천에서 7개, 낙동강 유역 하천에서 8개 지점의 시료에 대해 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 OSL 절대 연대를 획득하였다.

Sokkia의 GNSS (Global Network Satellite System) 수신기 GRX1을 이용해 시료 수집 지점, 해당 하안단구면에서 가장 높은 지점 그리고 인접한 하천의 하상에서 해발고도 및 위경도 좌표를 측량하였으며, 이 결과를 토대로 하상과의 고도차인 하상 비고(altitude above riverbed)를 계산하였다. 그리고 연대 측정 결

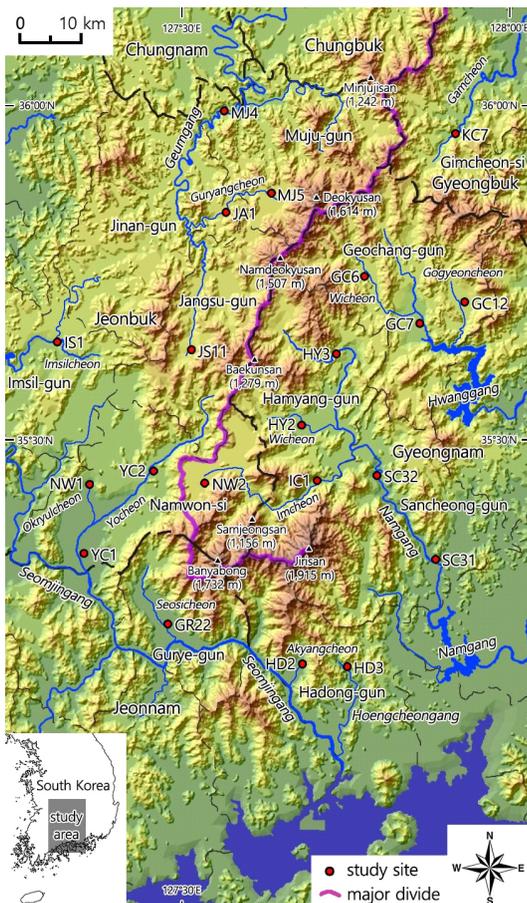


Fig. 1. Overview of the study area.

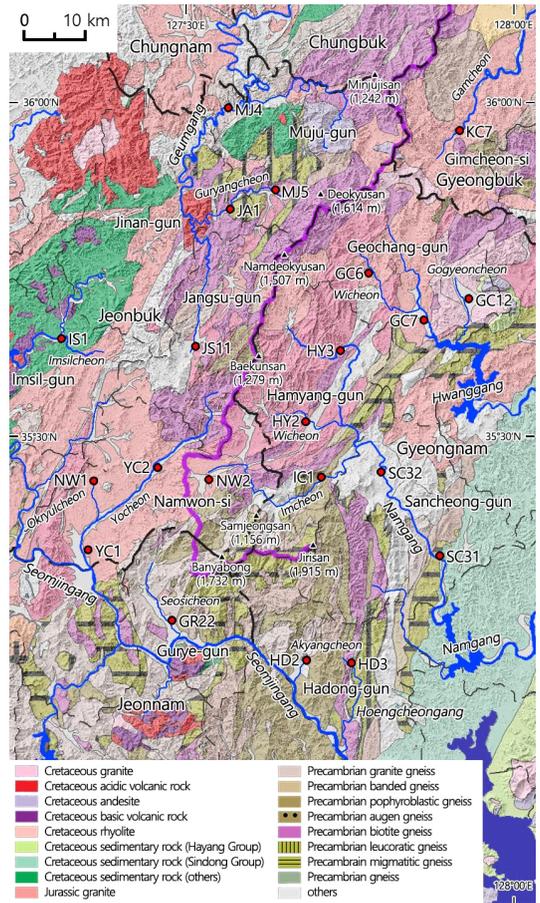


Fig. 2. Geological setting in the study area.

과와 측량 자료를 바탕으로 Lee (2018b, 2019)의 연구에서 제시한 아래와 같은 식을 통해 하각률을 산출하였다.

$$\text{하각률(m/ka)} = \frac{\text{하각 고도(m)}}{\text{연대(ka)}}$$

(하각 고도 = 해당 하안단구면의 최고 고도 - 현 하천 홍수위 고도)

하안단구를 이루고 있는 퇴적층은 과거 홍수위 시에 퇴적된 것이기 때문에, 절대 연대 측정 시료가 수집된 하안단구면의 최고 고도와 현 하천 홍수위 사이의 고도 차이인 홍수위 비고(altitude above flood level)를 하각 고도로 판단하여, 이를 절대 연대로 나누어 하천 하각률을 계산하였다(그림 3). 현 하천의 홍수위 정보는 각 하천에서 실시된 하천정비기본 계획 보고서를 토대로 각 지점의 100년 빈도 계획 홍수위 고도를 확인하였다. 한편, 조사 지점 중에는 본류 하천의 곡저에 발달해 있는 하안단구이지만, 본류 하천이 아닌 지류 하천에 의해 형성되어 선상지(alluvial fan)와 유사한 형태를 띠는 선상지성 하안단구(fanlike terrace)도 상당수 발달해 있다. 따라서 지류 하천의 퇴적 및 하각 작용을 통해 형성된 선상지성 하안단구는 본류 하천의 홍수위가 아닌 지류 하천의 홍수위 고도 및 곡저 고도로 하각 고도를 산출하였다.

총 21개 지점에 대한 하각률 자료를 바탕으로, 조사 지점을 점(point)으로 표현한 후 ESRI의 ArcGIS 10.8을 이용하여 자료의 공간적 경향성을 효과적으로 파악할 수 있는 spline 기법을 통해 공간 해상도가 200 m인 래스터(raster) 자료로 내삽(interpolation)한 후 0.05 m/ka 간격의 하각률 분포도를 제작하였고, 이를 토대로 소백산맥 남부에서 하천 하각률의 공간적 분포 특성을 파악하였다. 그리고 하각률의 지역적 차이를 유발하는 주요한 요인을 분석하고, 태백

산맥 북부(Lee, 2018b), 남부(Lee, 2019) 및 소백산맥 북부(Lee and Park, 2020), 중부(Lee and Park, 2021) 지역에서 이루어진 선행 연구와 비교하여, 소백산맥 남부 지역에서 하천 하각률의 공간적 분포와 이에 영향을 미친 요인 사이의 관계에 대해 검토하였다.

2. 조사 지점의 지형과 하각률

연구 지역은 덕유산(1,614 m)을 중심으로 한 북부 구역과 지리산(1,915 m)을 중심으로 한 남부 구역으로 구분할 수 있다. 덕유산(1,614 m) 일대의 북부 구역 산지 하천에서는 총 10개 지점 그리고 지리산(1,915 m) 일대의 남부 구역 산지 하천에서는 총 11개 지점의 하안단구 또는 선상지성 하안단구 퇴적층에서 하각률 분석을 위한 OSL 연대 측정이 실시되었다(표 1). 본 연구에서는 본류 하곡 내에 본류 하천이 형성한 하안단구와 본류 하곡 내에 지류 하천에 의해 형성된 선상지성 하안단구로 크게 구분한 후, 형성 시기가 젊어 하상 비고가 낮은 1면과 상대적으로 형성 시기가 오래되어 하상 비고가 높은 2면으로 세분류하여 21개 지점의 지형 분류도를 표현하였다.

2.1 덕유산 일대(북부 구역)

연구 지역의 북부 구역인 덕유산(1,614 m) 일대의 산지 하천에서는 MJ4, KC7, MJ5, JA1, GC6, GC12, GC7, IS1, JS11, HY3 등 총 10개 지점 하안단구 및 선상지성 하안단구 퇴적층에서 연대 측정 및 지형 조사가 이루어졌다(표 2). MJ4는 소백산맥의 영서 하천인 금강의 상류부에 위치한 하안단구 2면 노두이다(그림 4a). 굽어진 좁고 깊은 하곡을 형성하며 감입 곡류(incised meander)하는 금강의 하도 우안 사면 말단부를 따라 길게 발달한 하안단구면의 절개

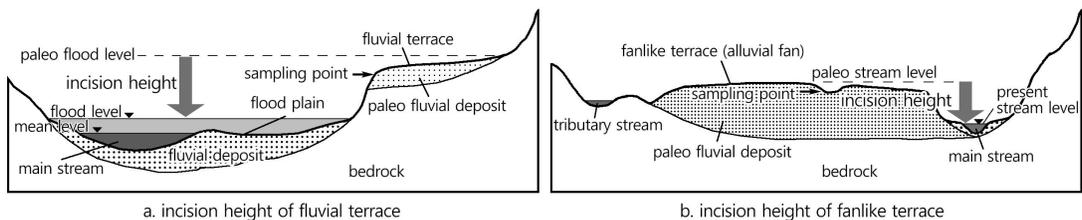


Fig. 3. Cross section of valley and incision height (edited from Lee and Park, 2020).

Table 1. Result for OSL age dating of 21 sites.

Sample	Dose rate (Gy/ka)	Water content (%)	Equivalent dose (Gy)	Aliquots used (n/N)	OSL age (ka, 1 σ SE)
MJ4	3.64±0.09 (3.59±0.09)	20.2 (21.7)	237±20	12/12	65±6* (66±6)
KC7	3.23±0.08 (3.13±0.08)	19.4 (22.9)	251±14	8/8	78±5* (80±5)
MJ5	3.55±0.09 (3.47±0.09)	27.6 (30.1)	168±23	12/12	47±7* (48±7)
JA1	3.42±0.09 (3.32±0.08)	21.1 (24.4)	440±45	12/12	129±14* (132±14)
GC6	4.10±0.10 (3.86±0.10)	10.3 (16.2)	122±11	6/16	30±3 (32±3)
GC12	4.65±0.12 (4.29±0.11)	8.2 (16.1)	342±60	8/8	74±13* (80±14)
GC7	4.56±0.11 (4.50±0.11)	16.5 (18.0)	243±18	8/16	53±4 (54±4)
IS1	3.57±0.10 (3.28±0.09)	15.4 (24.6)	315±37	11/16	88±11 (96±11)
JS11	5.34±0.16 (5.34±0.16)	17.9 (17.9)	142±17	15/16	27±3 (27±3)
HY3	3.52±0.08 (3.37±0.08)	18.2 (22.7)	57±3	15/16	16±1 (17±1)
HY2	5.23±0.13 (4.75±0.12)	5.7 (14.8)	217±36	7/16	42±7 (46±8)
YC2	3.91±0.11 (3.63±0.10)	11.5 (19.0)	263±33	13/16	67±9 (72±9)
SC32	3.29±0.09 (2.89±0.08)	4.5 (17.4)	179±27	16/16	54±8 (62±10)
IC1	4.50±0.12 (3.75±0.10)	3.3 (21.2)	76±11	15/16	17±2 (20±3)
NW2	4.09±0.10 (4.08±0.10)	23.7 (24.0)	198±24	13/16	48±6 (49±6)
NW1	5.72±0.15 (5.43±0.14)	11.9 (17.1)	204±23	12/16	36±4 (38±4)
YC1	3.59±0.10 (2.77±0.08)	8.9 (37.3)	176±34	14/16	49±9 (63±12)
SC31	3.33±0.09 (3.29±0.09)	12.8 (13.8)	312±19	15/16	94±6 (95±6)
GR22	3.30±0.09 (3.22±0.09)	10.5 (12.8)	232±33	11/16	70±10 (72±11)
HD2	3.98±0.09 (3.87±0.09)	17.9 (20.7)	181±30	8/16	45±8 (47±8)
HD3	4.31±0.09 (3.65±0.09)	6.4 (23.0)	143±6	8/16	33±2 (39±2)

*Lee and Park (2021)

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

Table 2. Location, topographic characteristics, OSL age and incision rate for 10 sites in the northern study area.

Stream	Site	Drainage basin*	Latitude longitude	Landform	Texture of sampling point	Altitude above sea level (m) Sampling point	Terrace tread	Flood level	Incision height (m)	OSL age (ka)	Incision rate (m/ka)
Geumgang	MJ4	G	35°59'34"N 127°34'39"E	fluvial terrace	gravelly silty sand	197.3	206.8	190.9	15.9	65±6**	0.245
Gamcheon	KC7	N	35°57'22"N 128°00'18"E	fluvial terrace	sand	169.0	174.7	163.3	11.4	78±5**	0.146
Guryangcheon	MJ5	G	35°52'10"N 127°39'50"E	fanlike terrace	silty sand	428.4	430.3	417.9	12.4	47±7**	0.264
Guryangcheon	JA1	G	35°50'27"N 127°34'47"E	fluvial terrace	sandy silt	343.1	350.1	320.0	30.1	129±14**	0.233
GC Wicheon	GC6	N	35°44'37"N 127°50'04"E	fanlike terrace	gravelly sandy silt	291.8	295.6	285.2	10.4	30±3	0.347
Gogyeoncheon	GC12	N	35°42'13"N 128°01'07"E	fanlike terrace	gravelly silty sand	273.5	282.1	268.9	13.2	74±13**	0.179
Hwanggang	GC7	N	35°40'20"N 127°56'07"E	fanlike terrace	sand	200.1	202.7	186.4	16.3	53±4	0.307
Imsilcheon	IS1	S	35°38'53"N 127°16'04"E	fluvial terrace	sandy silt	217.1	225.3	210.3	15.0	88±11	0.171
Geumgang	JS11	G	35°38'07"N 127°30'53"E	fluvial terrace	silty sand	432.0	434.3	424.7	9.6	27±3	0.354
Namgang	HY3	N	35°37'39"N 127°46'53"E	fluvial terrace	sandy silt	226.9	226.9	221.0	5.8	16±1	0.364

*G: Geumgang Basin, N: Nakdonggang Basin, S: Seomjingang Basin

**Lee and Park (2021)

지에서 하성 퇴적층 노두가 확인되었다. MJ4의 하안단구면 최고 고도는 206.8 m이고 홍수위 고도는 190.9 m로 하각 고도는 15.9 m이며, OSL 연대는 65±6 ka (Lee and Park, 2021)로 하각률은 0.245 m/ka로 계산되었다. KC7은 소백산맥의 영동 하천에 해당하는 낙동강의 지류 하천인 감천의 상류부에 위치하며, 감입 곡류하는 감천 좌안의 능선 말단부에 좁게 발달한 하안단구 1면을 이루고 있는 하성 퇴적층 노두이다(그림 4b). KC7의 하각 고도는 11.4 m, OSL 연대는 78±5 ka (Lee and Park, 2021), 하각률은 0.146 m/ka로 계산되었다. MJ5는 금강의 지류 하천인 구량천의 상류부에 발달한 안성 분지로 불리는 화강암 침식 분지 내에 형성된 선상지성 하안단구 2면의 말단부 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 4c). MJ5의 하각 고도는 12.4 m, OSL 연대는 47±7 ka (Lee and Park, 2021), 하각률은 0.264 m/ka로 계산되었다. JA1은 구량천 중류부 감입 곡류 하곡의 곡류부 안쪽을 따라 길게 발달한 하안단구 2면의 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두로(그림 4e), 하각 고도는 30.1 m, OSL 연대는 129±14 ka (Lee and Park, 2021), 하각률은 0.233 m/ka로 계산되었다.

낙동강의 지류 하천인 황강의 상류부에서는 GC6, GC12, GC7 등 3개 지점에서 조사가 이루어졌다. GC6은 황강의 지류 하천인 거창 위천의 상류부에 발달한 화강암 침식 분지인 위천 분지 내에 형성된 선상지성 하안단구 2면의 말단부 개석곡에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 4d). GC6의 하각 고도는 10.4 m, OSL 연대는 30±3 ka, 하각률은 0.347 m/ka로 계산되었다. GC12는 황강의 지류 하천인 고견천의 중류부에 발달한 화강암 침식 분지인 가조 분지 내에 형성된 선상지성 하안단구 2면의 말단부 절개지에 위치한 하성 퇴적층 노두이다(그림 4f). GC12의 하각 고도는 13.2 m, OSL 연대는 74±13 ka (Lee and Park, 2021), 하각률은 0.179 m/ka로 계산되었다. GC7은 황강 상류의 화강암 침식 분지인 거창 분지 내에 형성된 선상지성 하안단구 2면의 절개지에 위치한 하성 퇴적층 노두로(그림 4h), 하각 고도는 16.3 m, OSL 연대는 53±4 ka, 하각률은 0.307 m/ka로 계산되었다.

IS1은 섬진강 상류부 지류 하천인 임실천의 하구부 좌안에 발달한 하안단구 1면을 이루고 있는 하성 퇴적층 노두이다(그림 4g). 섬진강의 상류부는 소백

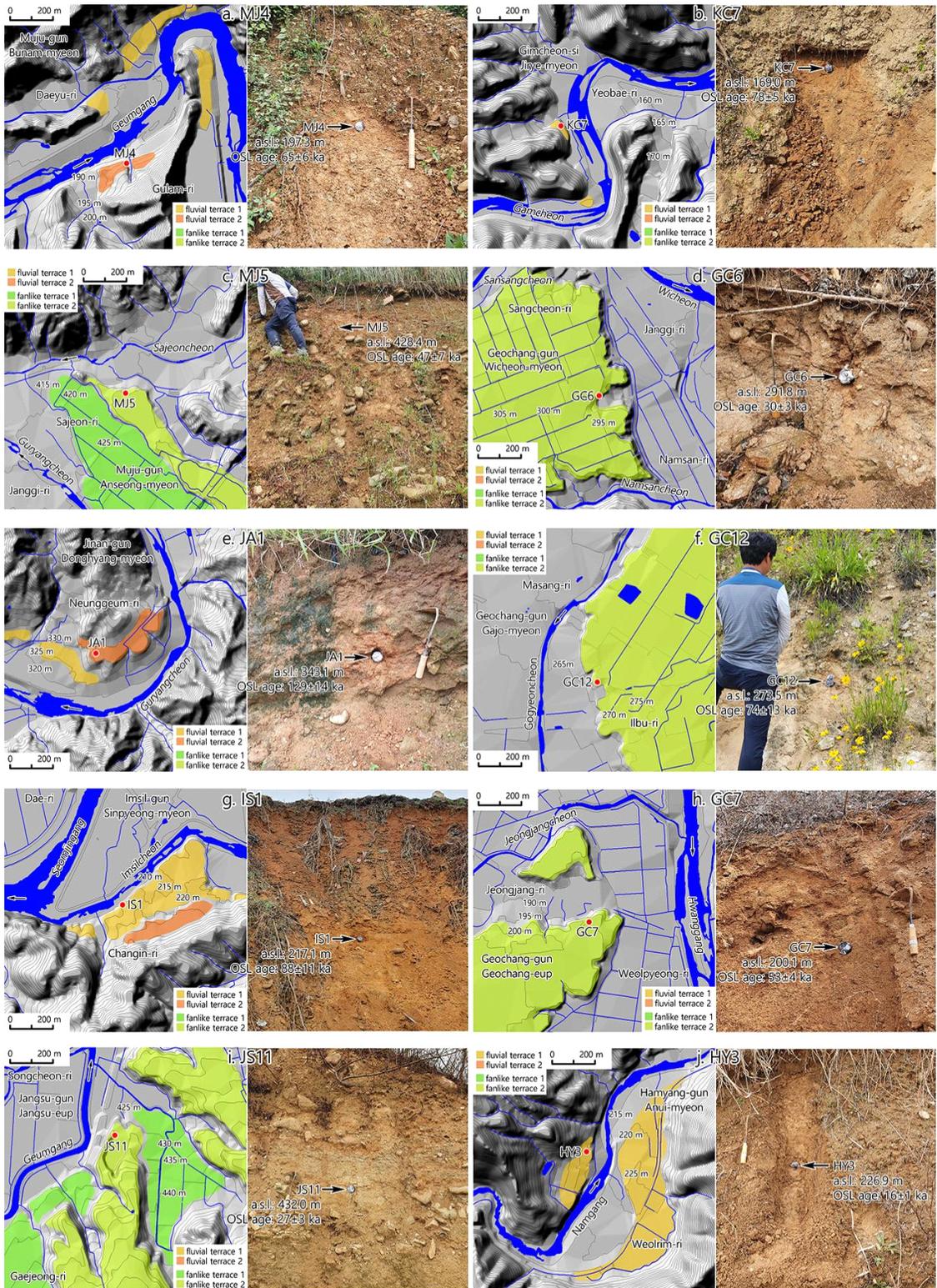


Fig. 4. Geomorphological map and photograph of 10 sites in the northern study area.

Table 3. Location, topographic characteristics, OSL age and incision rate for 11 sites in the southern study area.

Stream	Site	Drainage basin*	Latitude longitude	Landform	Texture of sampling point	Altitude above sea level (m)			Incision height (m)	OSL age (ka)	Incision rate (m/ka)
						Sampling point	Terrace tread	Flood level			
HY Wicheon	HY2	N	35°31'17"N 127°42'59"E	fluvial terrace	gravelly sand	184.2	187.7	172.2	15.5	42±7	0.370
Yocheon	YC2	S	35°27'14"N 127°26'38"E	fluvial terrace	silty sand	149.0	153.5	137.8	15.8	67±9	0.235
Namgang	SC32	N	35°26'42"N 127°51'16"E	fluvial terrace	sandy silt	117.1	118.0	102.6	15.4	54±8	0.284
Imcheon	IC1	N	35°26'17"N 127°44'39"E	fluvial terrace	gravelly sand	166.2	170.7	164.1	6.6	17±2	0.388
Ramcheon	NW2	N	35°26'08"N 127°32'16"E	fanlike terrace	silty sand	477.4	479.9	462.8	17.1	48±6	0.355
Okryulcheon	NW1	S	35°26'03"N 127°19'35"E	fanlike terrace	gravelly sand	107.1	109.7	102.5	7.3	36±4	0.202
Yocheon	YC1	S	35°19'52"N 127°18'55"E	fluvial terrace	sandy silt	64.5	66.7	58.3	8.4	49±9	0.172
Namgang	SC31	N	35°19'06"N 127°57'38"E	fanlike terrace	sandy silt	61.2	72.2	55.3	16.9	94±6	0.180
Seosicheon	GR22	S	35°13'29"N 127°28'08"E	alluvial fan	sand	43.0	53.9	37.2	16.8	70±10	0.239
Akyangcheon	HD2	S	35°09'48"N 127°42'53"E	fanlike terrace	gravelly sandy silt	59.3	61.4	48.2	13.2	45±8	0.294
Hoengcheongang	HD3	S	35°09'32"N 127°47'48"E	fluvial terrace	gravelly sandy silt	89.2	89.2	80.7	8.5	33±2	0.257

* N: Nakdonggang Basin, S: Seomjingang Basin

산맥의 서사면 따라 흐르지만, 하류부는 소백산맥의 남사면을 지나 남해로 유입한다. IS1의 하각 고도는 15.0 m, OSL 연대는 88±11 ka, 하각률은 0.171 m/ka로 계산되었다. JS11은 금강의 최상류부에 발달한 화강암 침식 분지인 장수 분지의 남부에 형성된 선상지성 하안단구 2면의 말단부 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 4i). JS11의 하각 고도는 9.6 m, OSL 연대는 27±3 ka, 하각률은 0.354 m/ka로 계산되었다. HY3은 낙동강의 지류 하천인 남강의 상류부에서 감입 곡류 하곡의 좌안에 발달한 하안단구 1면에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 4j). HY3의 하각 고도는 5.8 m, OSL 연대는 16±1 ka, 하각률은 0.364 m/ka로 계산되었다.

2.2 지리산 일대(남부 구역)

연구 지역의 남부 구역인 지리산(1,915 m) 일대의 산지 하천에서는 HY2, YC2, SC32, IC1, NW2, NW1, YC1, SC31, GR22, HD2, HD3 등 총 11개 지점 하안단구 및 선상지성 하안단구 퇴적층에서 연대 측정 및 지형 조사가 이루어졌다(표 3). 지리산(1,915

m) 일대 산지의 북부 및 동부 지역을 흐르는 소백산맥의 영동 하천인 남강의 본류와 지류 하천에서는 HY2, SC32, IC1, NW2, SC31 등 총 5개 지점에서 조사가 이루어졌다. HY2는 남강의 지류 하천인 함양 위천의 중류부 우안에 형성된 하안단구 1면 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 5b). HY2의 하각 고도는 15.5 m, OSL 연대는 42±7 ka, 하각률은 0.370 m/ka로 계산되었다. SC32는 감입 곡류하는 남강 상류부 곡류부 안쪽 하안에 발달한 하안단구 2면의 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 15.4 m, OSL 연대는 54±8 ka, 하각률은 0.284 m/ka로 계산되었다(그림 5d). IC1은 남강의 지류 하천인 임천 중류부의 감입 곡류 하곡에 발달한 하안단구 1면의 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 6.6 m, OSL 연대는 17±2 ka, 하각률은 0.388 m/ka로 계산되었다(그림 5f). NW2는 임천의 최상류 지류 하천인 람천의 여러 지류 하천들이 운봉 분지의 내부를 흐르며 형성한 선상지성 하안단구의 2면 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 5c). NW2의 하각 고도는 17.1 m, OSL 연대는 48±6 ka, 하각률은 0.355 m/ka로 계산되었

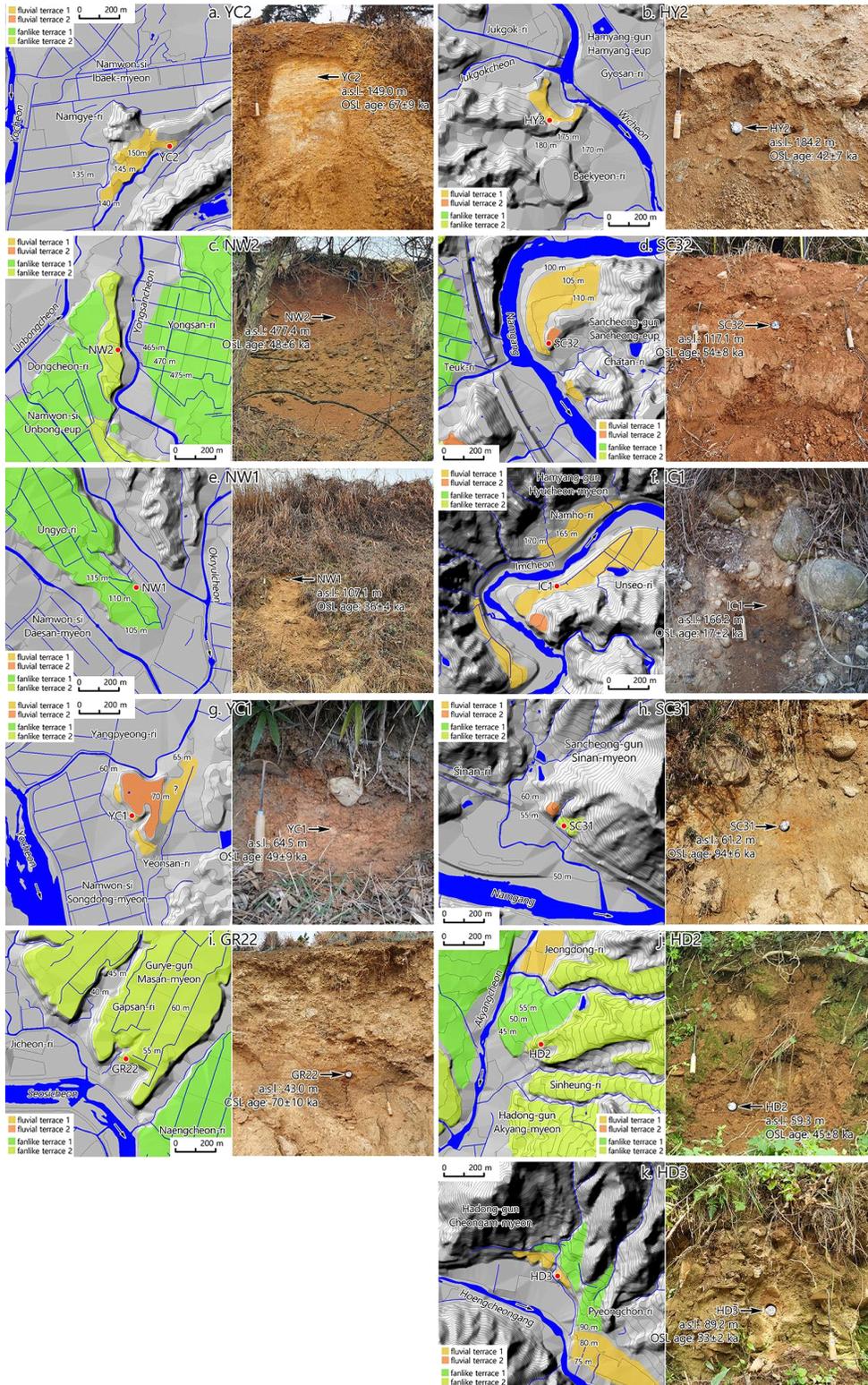


Fig. 5. Geomorphological map and photograph of 11 sites in the southern study area.

다. SC31은 남강 중류부의 하곡 좌안에 좁게 형성된 선상지성 하안단구 2면의 말단부 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 16.9 m, OSL 연대는 94 ± 6 ka, 하각률은 0.180 m/ka로 계산되었다(그림 5h).

지리산(1,915 m) 일대 산지의 서부 및 남부 지역을 흐르는 섬진강의 지류 하천에서는 YC2, NW1, YC1, GR22, HD2, HD3 등 총 6개 지점에서 조사가 이루어졌다. YC2는 섬진강의 지류 하천인 요천의 중류부 하곡에 발달한 하안단구 1면의 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 15.8 m, OSL 연대는 67 ± 9 ka, 하각률은 0.235 m/ka로 계산되었다(그림 5a). NW1은 요천의 지류 하천인 옥틀천의 하곡에 발달한 선상지성 하안단구 1면에서 확인된 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 7.3 m, OSL 연대는 36 ± 4 ka, 하각률은 0.202 m/ka로 계산되었다(그림 5e). YC1은 요천 하류부 하곡에 부분적으로 남겨진 하안단구 1면을 이루고 있는 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 8.4 m, OSL 연대는 49 ± 9 ka, 하각률은 0.172 m/ka로 계산되었다(그림 5g). GR22는 섬진강 중류부 좌안에 발달한 구례 화엄사 선상지 2면의 말단부 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두이다(그림 5i). GR22의 하각 고도는 16.8 m, OSL 연대는 70 ± 10 ka, 하각률은 0.239 m/ka로 계산되었다. HD2는 섬진강 하류부 지류 하천인 악양천이 흐르는 악양 분지 내에 발달해 있는 선상지성 하안단구 2면의 절개지에서 확인된 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 13.2 m, OSL 연대는 45 ± 8 ka, 하각률은 0.294 m/ka로 계산되었다(그림 5j). HD3은 섬진강 하류부 지류 하천인 횡천강의 상류부 하곡에 발달한 하안단구 1면을 이루고 있는 하성 퇴적층 노두로, 하각 고도는 8.5 m, OSL 연대는 33 ± 2 ka, 하각률은 0.257 m/ka로 계산되었다(그림 5k).

3. 하각률 분포와 요인

총 21개 지점 하안단구 및 선상지성 하안단구 퇴적층에서 산출된 하각률을 토대로 제작한 소백산맥 남부 지역의 하천 하각률 분포는 그림 6과 같다. 소백산맥 남부 지역에서 하각률이 0.40 m/ka 이상으로 가장 큰 지역은 경남 함양군과 전북 남원시의 경계인 삼정산(1,156 m)을 중심으로 한 지리산(1,915

m) 북사면 일대로 나타났다. 0.30 m/ka 이상의 대체로 큰 하각률이 나타나는 지역은 덕유산(1,614 m)에서 지리산(1,915 m) 남사면까지를 중심으로 한 동서 방향 30 km, 남북 방향 70 km의 소백산맥과 일치하는 남북 방향의 장방형 지역인 것으로 분석되었다.

연구 지역과 같이 공간적으로 좁은 범위에서 하각률의 지역적 차이를 유발하는 요인을 살펴보기 위하여, 21개 지점의 하각률과 하안단구면의 해발고도, 암종, 단층선, 하천의 하도 폭, 해안선으로부터의 하천 거리, 분수계와의 직선거리, 가상 용기 축과의 직선거리를 산출하여 관련성을 파악하였다(표 4).

먼저, 하각률과 하안단구면의 해발고도 사이에는 뚜렷한 선형의 관계는 나타나지 않지만, 해발고도가 높을수록 하각률은 커지는 경향을 보인다(그림 7a). 이는 해발고도가 높아질수록 하천의 침식 기준면인 해수면과의 고도차가 커지기 때문에 하천의 하각 작용도 활발해진다는 것을 의미한다. 다음으로, 하각률과 시료 수집 지점 일대에 분포하고 있는 암종 사이의 관계에서는 화강암의 하각률 평균 및 중앙값이 편마암에 비해 더 큰 것으로 나타났지만, 두 암종 모두 하각률 범위가 넓어 특별한 관련성을 확인하기 어렵다(그림 7b). 따라서 우리나라에서 풍화·침식에 대한 저항력이 상대적으로 약한 암석으로 알려진 화강암과 풍화·침식에 대한 저항력이 상대적으로 강한 암석으로 알려진 편마암의 하각률은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 생각된다. 그리고 하각률과 시료 수집 지점 일대의 단층선 존재 유무 사이에서도 뚜렷한 관련성은 없는 것으로 보인다(그림 7c). 하각률이 가장 높은 IC1, HY2의 하곡 내에 북동-남서 주향의 단층선이 존재하지만, YC2는 북동-남서 주향의 단층선에 형성된 하곡에 위치하고 있음에도 낮은 하각률을 보이고 있다. 따라서 암종 및 단층선과 같은 지질 특성은 소백산맥 남부 지역의 하각률과는 뚜렷한 관련성을 나타내지 않는 것으로 생각된다.

하천의 규모가 커져 유량이 증가하면 하천의 침식 능력도 증가한다(Lee, 2021). 본 연구에서는 해당 지점의 하천 유량 자료를 획득하기 불가능하여 해당 지점 하곡을 토대로 하각률과의 관계를 살펴보았으나, 하각률과 하곡 사이에는 관련성이 거의 없는 것으로 나타났다(그림 7d). 그리고 바다와 접하는 하천 하구에서 해당 지점까지의 하천 길이와 하

각률 사이의 관계에서도 뚜렷한 관련성을 확인하기 어렵다(그림 7e). 다음으로, 백두대간에 해당하는 한반도의 중심 분수계와 해당 지점 사이의 직선거리와 하각률 사이의 관계에서는 약간의 관련성이 나타나고 있다(그림 7f). 분수계로부터 동쪽 15 km까지의 범위에서 가장 높은 하각률이 나타나며, 여기에서 동서 방향으로 멀어질수록 하각률은 대체로 감소하는 경향을 보인다.

하각률과 가장 높은 관련성을 나타내는 요인은

소백산맥의 가상 용기 축과 해당 지점 사이의 직선 거리이다(그림 7g). 소백산맥은 태백산맥과 함께 한반도 남부의 용기 축으로 추정되고 있으며, 소백산맥의 용기 축은 대체로 백두대간 분수계 부근과 유사할 가능성이 제시되고 있다(Lee, 2019; Lee and Park, 2020, 2021). 본 연구에서는 소백산맥 남부에서 남북 방향의 최고봉인 민주지산(1,242 m)에서 시작해 덕유산(1,614 m), 남덕유산(1,507 m), 백운산(1,279 m)을 지나 반야봉(1,732 m)과 지리산(1,915 m)의

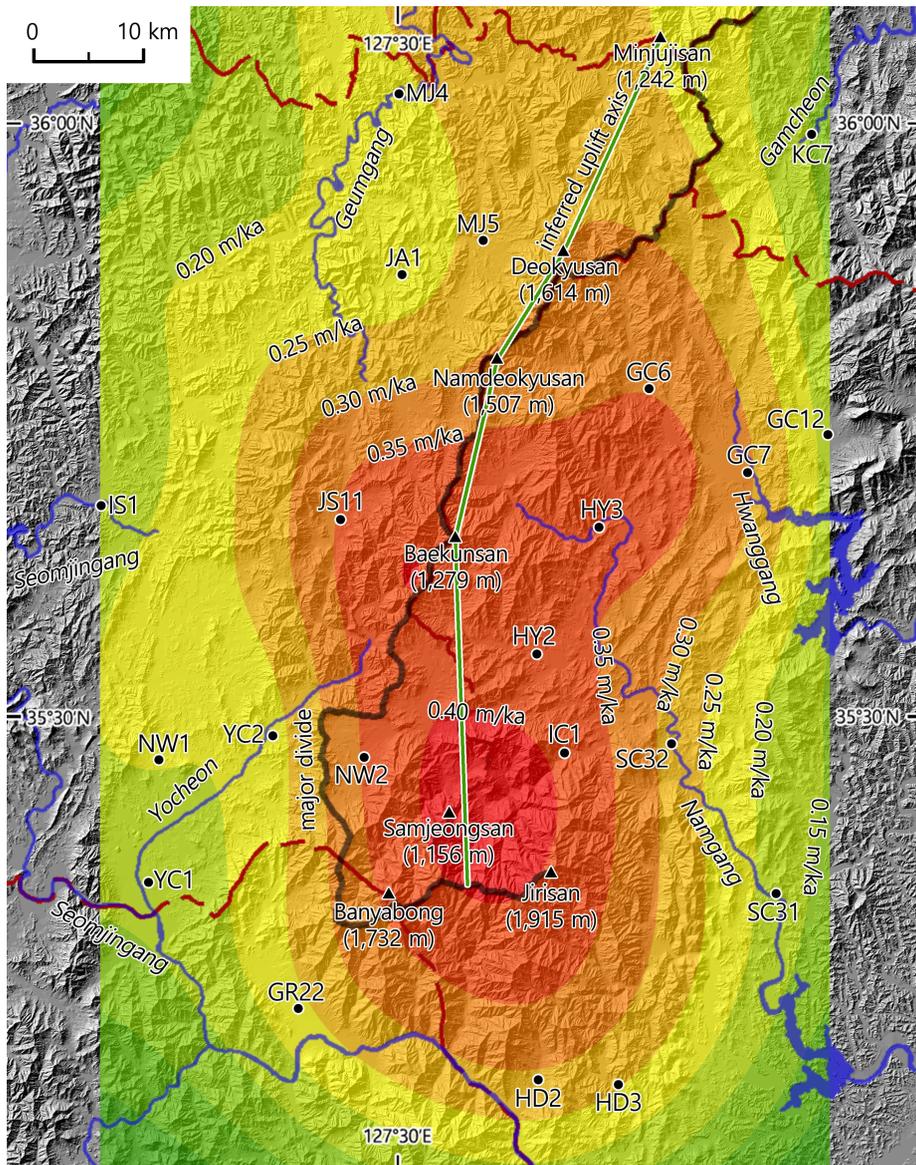


Fig. 6. Distribution of incision rate in the Southern Sobaek Mountain Range.

Table 4. Incision rate and topographic characteristics of 21 sites in the Southern Sobaek Mountain Range.

Site	Incision rate (m/ka)	a.a.s.l. of terrace tread (m)	Bedrock type	Fault line	Channel width (m)	Distance from shoreline (km)	Distance from major divide (km)	Distance from inferred uplift axis (km)
IC1	0.388	170.7	gneiss	NE-SW	120	281	11.3	9.2
HY2	0.370	187.7	granite	NE-SW	60	284	11.9	6.9
HY3	0.364	226.9	granite	-	70	294	13.3	12.7
NW2	0.355	479.9	granite	-	20	338	3.5	-9.7
JS11	0.354	434.3	granite	-	10	437	-9.4	-11.1
GC6	0.347	295.6	granite	-	40	243	12.0	13.4
GC7	0.307	202.7	granite	-	20	226	22.9	25.1
HD2	0.294	61.4	diorite	-	10	28	-17.0	19.1
SC32	0.284	118.0	anorthosite	-	170	259	16.4	19.1
MJ5	0.264	430.3	granite	-	60	420	-7.7	-6.9
HD3	0.257	89.2	gneiss	-	50	28	-19.5	22.9
MJ4	0.245	206.8	gneiss	-	170	352	-22.4	-20.0
GR22	0.239	53.9	gneiss	-	10	51	-8.9	-20.0
YC2	0.235	153.5	granite	NE-SW	160	101	-4.1	-18.1
JA1	0.233	350.1	gneiss	-	100	407	-11.1	-11.9
NW1	0.202	109.7	granite	-	20	95	-14.9	-28.8
SC31	0.180	72.2	gneiss	-	10	239	21.0	28.3
GC12	0.179	282.1	granite	-	40	228	24.2	30.0
YC1	0.172	66.7	granite	-	290	82	-18.0	-30.4
IS1	0.171	225.3	sedimentary rock	NW-SE	50	228	-30.4	-33.5
KC7	0.146	174.7	granite	-	100	303	8.5	16.7

중간 지역을 직선으로 연결한 선을 가상 용기 축으로 설정하였다. 가상 용기 축과의 거리와 하각률 사이에서는 0.530의 상대적으로 큰 상관계수가 산출되었다. 가상 용기 축에서 동쪽 10 km까지의 지역에서 0.35 m/ka 이상의 가장 높은 하각률이 나타나며, 여기에서 동서 방향으로 멀어질수록 하각률이 점차 감소한다.

가상 용기 축으로부터 멀어질수록 발생하는 하각률의 감소 정도는 가상 용기 축에서 서쪽으로는 100 km당 -0.83 m/ka로 계산되며, 동쪽으로는 100 km당 -1.00 m/ka로 계산된다. 따라서 소백산맥 일대 가상 용기 축의 동사면과 서사면 사이에 하각률의

공간적 변화 정도는 큰 차이를 나타내지 않는다. 경동성 요곡 용기에 의해 형성된 것으로 알려진 태백산맥은 용기 축의 서부에 비해 동부에서 더 크게 발생한 비대칭적 용기에 의해 동해안 쪽으로 치우쳐 남북으로 발달해 있다. 이로 인해, 태백산맥에서는 용기 축을 중심으로 서쪽에 비해 동쪽으로 갈수록 하각률의 감소 정도가 매우 크게 나타난다(Lee, 2018a, 2018b, 2019). 그러나 소백산맥 남부에서는 가상 용기 축을 기준으로 동서 간에 하각률 감소 정도가 거의 유사하게 나타나고 있으므로, 소백산맥 남부 지역은 태백산맥과는 달리 동서 간에 용기량의 차이가 크지 않은 대칭적 용기가 발생하였을 가능성이 높다.

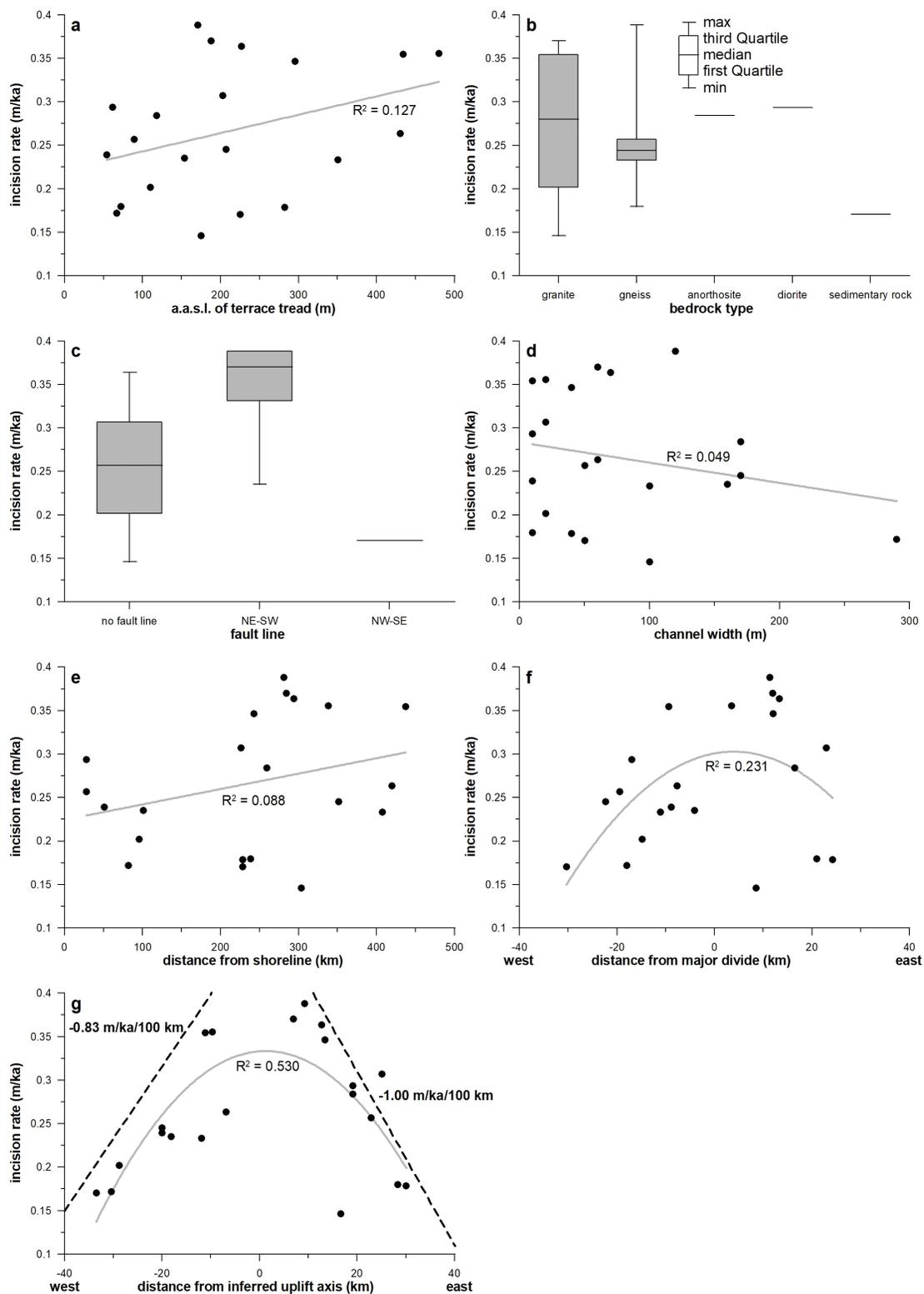


Fig. 7. Relationship for incision rate and topographic characteristics of 21 sites in the Southern Sobaek Mountain Range.

하천의 하각 작용은 지반 용기, 해수면 하강, 유량 증가, 지형 변위 등 다양한 요인에 의해 발생하지만, 많은 선행 연구들은 하각률의 공간적 차이를 유발하는 가장 중요한 요인으로 지반 용기를 제시하고 있다 (Montgomery, 1994; Seong *et al.*, 2008; Lee, 2018a, 2018b, 2019; Lee and Park, 2020, 2021). 또한 본 연구에서도 하각률 분포와 가장 뚜렷한 관련성을 보이는 요인은 지반 용기로 나타났다. 따라서 하각률이 가장 높은 지리산(1,915 m) 북사면 일대는 소백산맥 남부 지역에서 지반 용기가 가장 크게 발생하는 지역으로 볼 수 있으며, 덕유산(1,614 m)에서 지리산(1,915 m)에 이르는 소백산맥 남부의 중심 지역도 지반 용기가 활발하게 발생하는 지역으로 판단된다. 그리고 소백산맥 남부 지역은 동서 간 비대칭적 용기가 발생한 태백산맥과 달리, 남북 방향의 축을 중심으로 동서 간의 용기 정도가 거의 유사한 대칭적 지반 운동이 발생하고 있을 가능성이 높다.

이러한 본 연구의 하각률을 태백산맥 북부(Lee, 2018b) 및 남부(Lee, 2019) 지역과 비교해 보면, 북부 지역의 경우 0.35 m/ka 이상의 하각률을 보인 지점은 태백산맥으로부터 25 km 이내에 분포하고 있으며, 남부 지역의 경우 낙동강 상류부 및 경북 울진군 광천 등 2개 지점에서만 확인되었고, 태백산맥과는 25 km 이내에 분포하고 있다. 소백산맥 북부(Lee and Park, 2020) 및 중부(Lee and Park, 2021) 지역의 경우, 모두 0.30 m/ka 이하의 하각률이 산출되었다. 이러한 하각률 분포는 결국 본 연구 지역인 소백산맥 남부의 중심 지역이 소백산맥 북부나 중부 지역에 비해 빠른 용기를 그리고 태백산맥 북부 지역과는 유사하거나 약간 느린 용기를 경험하고 있음을 의미하는 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 소백산맥 남부 지역 일대를 흐르고 있는 금강 유역, 섬진강 유역, 낙동강 유역에 발달해 있는 하안단구의 OSL 연대 측정 및 지형 분석을 시도해, 하각률을 산출하고 소백산맥 남부 지역 하각률의 공간적 분포 특성과 이러한 분포에 영향을 미친 요인을 검토해 보았다. 총 21개 지점에서 확인된 하안단구 및 선상지성 하안단구 퇴적층을 조사한 결과, 남강의 지류 하천인 임천에서 0.388 m/ka의

가장 높은 하각률이 그리고 낙동강의 지류 하천인 감천 상류부에서 0.146 m/ka의 가장 낮은 하각률이 산출되었다. 21개 지점에서 확인된 하각률을 공간적으로 내삽한 결과, 지리산(1,915 m) 북사면 일대가 0.40 m/ka 이상의 가장 높은 하각률을 나타내었으며, 덕유산(1,614 m)에서 남덕유산(1,507 m), 백운산(1,279 m)을 거쳐 지리산(1,915 m) 남사면에 이르는 지역이 0.30 m/ka 이상의 대체로 높은 하각률을 보이는 것으로 분석되었다. 하안단구면의 해발고도, 암종, 단층선, 하폭, 해안선으로부터의 하천거리, 분수계와의 거리 및 가상 용기 축과의 거리 등과 같은 하각률 분포에 영향을 미칠 수 있는 요인과 하각률 분포를 확인해 본 결과, 가상 용기 축과의 거리가 가장 높은 관련성을 나타내었다. 이러한 결과는 결국 소백산맥 남부 지역의 하각률 분포에 있어 지반 용기가 가장 중요한 요인임을 의미하는 것으로 생각된다. 또한 가상 용기 축을 기준으로 동서 방향으로 갈수록 하각률은 감소하는 경향을 보이고, 그 감소 정도는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으며, 이를 통해 소백산맥 남부 지역이 태백산맥이나 소백산맥 북부 및 중부 지역과 달리 대칭적 용기를 경험하였음을 확인하였다. 또한 태백산맥 및 소백산맥 북부, 중부 지역과 비교하였을 때 소백산맥 남부 지역은 태백산맥 북부 지역과 유사하였거나 약간 느린 용기를 그리고 소백산맥 북부 및 중부 지역보다는 빠른 용기를 경험한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 “HLW 지층처분 후보부지 선정을 위한 전국규모 지질환경정보도 작성” 사업에서 지원받았습니다. 본 논문에 건설적인 조언을 해주신 두 분의 심사위원님과 편집위원님, 편집위원장님께 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Castillo, M., Muñoz-Salinas, E. and Ferrari, L., 2014, Response of a landscape to tectonics using channel steepness indices (k_{sn}) and OSL: A case of study from the Jalisco Block, Western Mexico. *Geomorphology*, 221, 204-214.
- Cook, K.L., Whipple, K.X., Heimsath, A.M. and Hanks,

- T.C., 2009, Rapid incision of the Colorado River in Glen Canyon - insights from channel profiles, local incision rates, and modeling of lithologic controls. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 994-1010.
- Finnegan, N.J., Schumer, R. and Finnegan, S., 2014, A signature of transience in bedrock river incision rates over timescales of 10^4 - 10^7 years. *Nature*, 505, 391-394.
- Fuchs, M.C., Gloaguen, R., Krbetschek, M. and Szulc, A., 2014, Rates of river incision across the main tectonic units of the Pamir identified using optically stimulated luminescence dating of fluvial terraces. *Geomorphology*, 216, 79-92.
- Jia, L., Zhang, X., He, Z., He, X., Wu, F., Zhou, Y., Fu, L. and Zhao, J., 2015, Late Quaternary climatic and tectonic mechanisms driving river terrace development in an area of mountain uplift: A case study in the Langshan area, Inner Mongolia, northern China. *Geomorphology*, 234, 109-121.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, G.H. and Song, G.Y., 1998, Explanatory text of the geological map of Pusan sheet (1:250,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 62 p (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2007, Analysis on channel morphology and rock resistance by difference of bedrock types between upper and lower reach. *Journal of the Korean Geographical Society*, 42, 27-40 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2014, Characteristics and classification of landform relieves on mountains and valleys with bedrock types. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 21, 1-17 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2016, Landscape features on mismatch areas between natural boundaries and artificial boundaries in South Korea: A case study on Baekdudaegan and provincial boundary. *Journal of the Association of Korean Geographers*, 5, 23-33 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2018a, Characteristics in spatial distribution of incision and uplift based on the highest level terraces around the Taebaek Mountains. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 25, 31-42 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2018b, 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., 2019, Incision rates of mountain streams in the southern part of the Taebaek Mountain Ranges. *Journal of the Association of Korean Geographers*, 8, 155-168 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R., 2021, *Geomorphology to understand with images*. Guardian Book, Daegu, 585 p (in Korean).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 2020, Incision rate distribution of streams on the northern part of the Sobaek Mountain Range. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 27, 41-51 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 2021, Fluvial terrace and incision rate in the Middle Sobaek Mountain Rang. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 28, 15-30 (in Korean with English abstract).
- Leopold, L.B., 2000, *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, 320 p.
- Montgomery, D.R., 1994, Valley incision and uplift of mountain peaks. *Journal of Geophysical Research*, 99, 13913-13921.
- Pazzaglia, F.J., Gardner, T.W. and Merritts, D.J., 1998, Bedrock fluvial incision and longitudinal profile development over geologic time scales determined by fluvial terraces. In: Tinkler, J. and Wohl, E. (eds.), *Fluvial processes in bedrock channels*. Geophysical Monograph Series American Geophysical Union, Washington, D.C., 207-305.
- Ritter, D.F., Kochel, R.C. and Miller, J.R., 2011, *Process Geomorphology*. McGraw-Hill, Boston, 560 p.
- Saillard, M., Petit, C., Rolland, Y., Braucher, R., Bourlès, D.L., Zerathe, S., Revel, M. and Jourdon, A., 2014, Late Quaternary incision rates in the Vésudie catchment area (Southern French Alps) from in situ-produced ^{36}Cl cosmogenic nuclide dating: Tectonic and climatic implications. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119, 1121-1135.
- Schumm, S.A., 1999, Cause and controls of channel incision, In: Darby, S. and Simon, A. (eds.), *Incised river channels: Processes, forms, engineering and management*. John Willey & Sons, New York, 19-33.
- Seong, Y.B., Owen, L.A., Bishop, M.P., Bush, A., Clendon, P., Copland, L., Finkel, R.C., Kamp, U. and Shroder Jr., J.F., 2008, Rates of fluvial bedrock incision within an actively uplifting orogen: Central Karakoram Mountains, northern Pakistan. *Geomorphology*, 97, 274-286.
- Su, Q., Ren, Z., Zhang, H., Zhang, P. and Manopkawe, P., 2019, The role of the Haiyuan Fault in accelerating incision rate of the Yellow River at the Mijia Shan Area, northeastern Tibetan Plateau, as revealed by in-situ ^{10}Be dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 179, 276-286.
- Wu, D., Li, B., Lu, H., Zhao, J., Zheng, X. and Li, Y., 2020, Spatial variations of river incision rate in the northern Chinese Tian Shan range derived from late Quaternary fluvial terraces. *Global and Planetary Change*, 185, 103082.

Received : May 18, 2022

Revised : May 27, 2022

Accepted : May 27, 2022