지질학회지 제61권 제4호, p. 589-604 (2025년 12월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 61, no. 4, p. 589-604 (December 2025)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2025.032

Check for updates

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

Article

금왕단층 북부 홍천군 방내리 일대 고유로 지형 발달과 하각률

홍영민[1], 신재열[2,‡], 최정헌[1], 김석진[3], 원효정[1]

[1] 한국기초과학지원연구원 지구환경연구부
[2] 경상국립대학교 지리교육과 및 공학연구원
[3] 국립문화유산연구원 보존과학연구실

Development of paleo-channel and incision rates along the Northern Geumwang Fault, Bangnae-ri, Hongcheon-gun

Yeong-Min Hong[1], Jae-Ryul Shin[2,‡], Jeong-Heon Choi[1], Seok-Jin Kim[3], Hyo-Jeong Weon[1]

[1] *Research Center of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, Cheongju 28119, Republic of Korea*
[2] *Department of Geography Education and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea*
[3] *Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34112, Republic of Korea*

Received: August 8, 2025 / **Revised:** September 26, 2025 / **Accepted:** November 9, 2025
‡**Corresponding author:** +82-55-772-2187 / **E-mail:** jshin@gnu.ac.kr

요약: 이 연구는 금왕단층 북부에 위치한 강원도 홍천군 방내리 일대 고유로 지형의 발달 과정을 논의하고 지형 발달에 기여한 하각량 및 하각률을 규명하는 데 목적이 있다. 이를 위해 현지 조사 및 LiDAR 기반 DEM을 활용하여 지형 분석을 수행하고 석영 OSL 및 K-장석의 IRSL 연대 측정을 수행하여 퇴적층의 퇴적 시기를 추정하였다. 방내리 하곡의 규모 및 형태, 하각률의 수준 등을 고려할 때, 과거 수유동천의 유로였으나 현재는 하각 작용으로 인해 고유로화된 것으로 추정된다. 방내리 하곡의 고유로화에 기여한 하각량은 약 12 m, 하각량과 고유로 퇴적물의 퇴적 연대를 기반으로 산출되는 하각률은 지난 48 ka 동안 약 0.25 m/ka이다. 이 연구의 결과는 그간 보고된 적이 없었던 금왕단층 일대의 하각률을 보고하고 있다는 점에서 의의를 가지며, 향후 금왕단층 연구에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주요어: 고유로, 하각률, 금왕단층, 루미네선스 연대 측정, 지형 분석

ABSTRACT: This study aims to discuss the geomorphic development of the paleo-channel in the Bangnae-ri, located in the northern part of the Geumwang Fault, and to determine the incision depth and rate that contributed to its evolution. For this purpose, a geomorphic analysis was conducted using field surveys and LiDAR-based DEM, and quartz OSL and K-feldspar IRSL dating were performed to estimate the depositional age of the sediments. Considering scale, morphology and incision characteristics of the valley, it is inferred that the Bangnae-ri valley functioned as a paleo-channel of the Suyudong Stream but has become an abandoned channel due to incision. The incision depth that led to the valley's abandonment is estimated to be approximately 12 m, and the incision rate, calculated from the elevation difference between the paleo-channel bed and the present streambed along with the depositional age of the paleo-channel sediments, is about 0.25 m/ka since 48 ka. This study is significant in that it reports, for the first time, the incision rate around the Geumwang Fault and is expected to provide an important basis for future research on the tectonic activity and geomorphic response of the Geumwang Fault.

Key words: paleo-channel, incision rate, Geumwang Fault, luminescence dating, topographical analysis

Copyright © The Geological Society of Korea 2025

1. 서 론

층서학적 변위는 고지진학 연구에서 주로 활용되는 지표로 특정 단면에서 관찰되는 지층의 수직 또는 수평 이동을 의미한다(Leonard, 2010). 층서학적 변위를 분석하기 위해서는 변위량을 지시하는 변위지시자(marker layer) 또는 지층의 존재, 그리고 이를 추적하기 위한 지표 파열과 단층의 식별이 중요하며, 지층의 이동량과 퇴적(또는 형성) 연대를 통해 변위량 및 변위율을 산정할 수 있다(Weldon and Sieh, 1985; Zielke *et al*., 2015).

그러나, 판경계부와 같이 지구조 활동이 활발한 지역의 대규모 단층대에서도 지표 파열은 쉽게 관찰되지 않으며(Mencin *et al*., 2016), 은닉단층(blind fault)의 발달, 침식에 의한 퇴적물 제거, 두꺼운 퇴적층 및 식생의 피복 등은 단층의 식별을 어렵게 만든다. 또한, 재발 주기가 길거나 변형률이 낮은 단층 활동은 명확한 층서학적 변위를 수반하지 않을 수 있어, 이때 산정된 변위량은 최소 추정치만을 의미한다(Kirby *et al*., 2008; Morell *et al*., 2020). 이처럼 층서학적 변위가 가지는 제한점들로 인해 단층의 식별이 어려운 경우, 지형 분석을 통한 지구조 운동의 특성을 추정하는 방법이 유용하게 활용되어 왔다(Stein and Yeat, 1989; Burrato *et al*., 2012).

하각 작용(incision)은 하천의 침식과 퇴적 작용을 변화시키는 지구조 운동, 기후 변화, 하계망의 변화, 기반암 및 퇴적물 특성, 침식기준면의 변화 등 다양한 요소의 작용에 의해 발생하는데(Lee, 2018; Shin *et al*., 2023), 우리나라에서 하각 작용은 지구조 운동이 주요한 요인으로 알려져 있다(Cho *et al*., 2017; Lee and Park, 2022; Lee, 2023; Shin *et al*., 2023). 대규모 단층대 일대에 발달한 고하성 지형(paleo-fluvial landform)의 하각량은 지형면이 형성된 이후 경험한 단층 운동의 변위를 기록하고 있다는 점에서 이에 영향을 미친 요인을 파악하는 데 단서를 제공하며, 국내의 여러 단층대 일대에서 고하성 지형의 발달과 하각 작용에 대한 논의가 이루어져왔다(Jo, 1997; Lee and Lee, 2003; Lee *et al*., 2008, 2024; Kim *et al*., 2019; Shin *et al*., 2023; Shin and Kim, 2024). 다만, 대부분의 연구는 한반도 동남부에 위치한 양산단층대를 중심으로 이루어졌으며, 우리나라의 주요 단층대 중 하나이자 제4기 동안의 활동성이 보고된 금왕단층대 일대에서는 하각 작용에 대한 연구가 전무한 실정이다.

이 연구는 강원도 홍천군 방내리 일대 고유로 지형의 발달 과정을 논의하고 지형 발달에 기여한 하각량 및 하각률을 규명하는 데 목적이 있다. 강원도 홍천군 내면 방내리 일대에는 고유로 지형이 발달하며, 지형면과 퇴적층이 잘 보존되어있어 지형 발달 및 하각 작용을 논의하는데 적합한 지역이다. 특히, 금왕단층대에 인접하여 발달하고 있어 금왕단층대 일대의 지형 발달사와 하각 과정을 복원하는데 중요한 단서를 제공할 수 있다. 하각량 및 하각률을 규명하기 위해, 첫 번째로 지형 분석 및 현지 조사를 수행하였다. 지형 분석은 Hong *et al*. (2022)의 지형 분석 결과와 LiDAR 기반 DEM (Digital Elevation Model)을 활용하여 지형면 분류, 경사도 및 하천 종단 곡선 분석을 수행하고 연구 지역 일대의 지형 발달 특성을 파악하였다. 다음으로 지형 분석 결과를 바탕으로 현지 조사를 수행하고 현지 조사에서 확인된 고유로 퇴적층을 대상으로 석영 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 및 K-장석 IRSL (Infrared Stimulated Luminescence) 연대 측정을 수행하여 고유로 퇴적물의 퇴적 시기를 산정하였다. 마지막으로, 고유로 지형의 하각률을 산정하고 기존 연구 결과와의 비교를 통해 연구 지역의 하각률 특성을 고찰하였다.

2. 연구 지역 개관

연구 지역은 홍천군 방내리 일대의 하곡으로 금왕단층 북부에 위치한다(그림 1). 이 하곡은 특정 가능한 지명이 없고, 하곡 내를 흐르는 하천은 무명천이다. 따라서, 기술의 편의를 위해 “방내리 하곡”이라는 명칭을 임의로 부여하고 논의를 전개하고자 한다.

금왕단층은 음성분지 북서부 경계에서 인제군까지 약 170 km의 연장을 보이는 주향 이동 단층으로, Choi (1996)에 의해 처음 명명되었다. 금왕단층의 진화사 및 발달사, 활동 특성, 지형 발달사 등이 다양한 분야의 연구를 통해 규명되어 왔으며(e.g., Lee, 2010; Lee and Kim 2011; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Bae and Lee, 2014; Kim and Lee, 2016, 2017; Weon and Lee, 2018; Choi and Lee, 2020; Hong *et al*., 2022; Kim *et al*., 2024), 특히, Kim and Lee (2016)는 기존 연구를 종합하여 금왕단층의 운동을 변형 환경 및 시기, 기작에 따라 단계를 구별하였다. Kim and Lee (2016)가 제안한 단계 중 여섯 번째 단계는 제4기 동안 금왕단층이 약 76만 년 전, 약 50만 년 전, 약 35만 년 전, 약 22만 년 전, 약 15만 년 전, 그리고 약 11만 년 전에 걸쳐 재활동을 했던 시기이다. 이 가운데 약 35만 년 전은 금왕단층의 전 구간에 걸쳐 단층 운동이 가장 활발하게 일어났으며, 이 시기를 기점으로 이전에는 금왕단층의 남부 지역에서 단층 운동이 활발했고, 이후에는 금왕단층의 북부 지역에서 단층 운동이 활발했던 것으로 보고되었다. 이 연구에 따르면 연구 지역 일대는 최근까지 단층 운동이 활발했던 것으로 판단되며, 최근 보고된 Kim *et al*. (2024)의 연구 결과는 이를 뒷받침한다. Kim *et al*. (2024)은 본 연구 지역에서 남서쪽으로 약 4 km 떨어진

홍천군 서석면 수하리 일대에서 금왕단층의 제4기 활동을 보고하였다(그림 1). 북동-남서 방향 선형 구조를 따라 굴착 조사 결과, 폭 5 cm 미만의 단층대(N09°E/85°NW)가 기반암인 화강암과 제4기층을 절단하며, 약 1.5 m의 수직 변위를 동반한 우수향 운동이 발생했던 것으로 확인되었다. 절단된 제4기층의 OSL 연대 분석 결과를 통해 최후기 단층 운동은 약 47-24 ka에 발생했던 것으로 해석되었다.

금왕단층 북부 일대에는 선캄브리아기의 흑운모편마암, 고원생대 편마암 및 곰배령화강암, 중생대 흑운모화강암, 화강섬록암, 복운모화강암 등이 분포하며(Lee, 2010; Choi and Lee, 2020), 각 암석은 금왕단층을 중심으로 접촉 관계를 이룬다. 방내리 하곡 일대는 흑운모화강암과 복운모화강암 및 흑운모편마암이 금왕단층을 경계로 접하며, 방내리 하곡은 이 중 흑운모화강암으로 구성된 산지 내에 위치

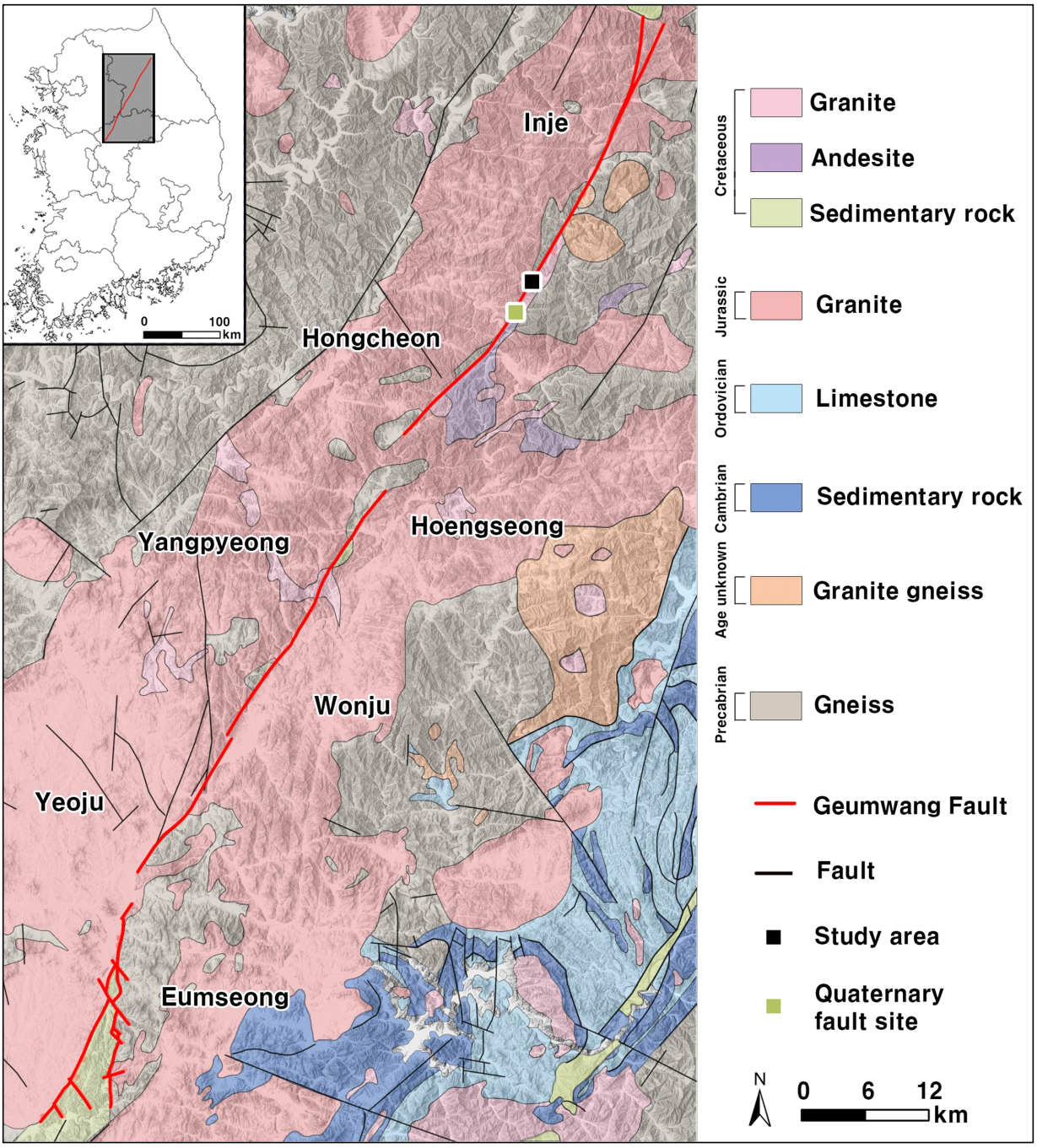

Fig. 1. Location of the Geumwang Fault and study area (Geumwang Fault modified from Lee (2010), Jang and Lee (2012), Kim and Lee (2016, 2017), Weon and Lee (2018) and Choi and Lee (2020)).

한다(그림 2a). Hong *et al.* (2022)은 금왕단층 반경 2 km 지역의 제4기 지형(선상지, 하안단구 등)을 분류하고 이에 근거해 금왕단층 전 구간을 10개의 지형 단위로 구분한 바 있다. 이를 통해 금왕단층 일대의 광역적 지형 정보를 제공하고 금왕단층의 제4기 운동과 지형 발달 간의 관련성을 논의하였다. 이 연구에 따르면 방내리 하곡 일대에는 주요 하천을 연하여 하안단구 1면과 2면이 발달하며, 선상지는 1면, 2면이 발달한다(그림 2a). 지형 분석 결과를 바탕으로 Hong *et al.* (2022)은 연구 지역 일대에서 주향이동 운동이 우세한 환경에서 함께 동반된 경사 운동이 지형 발달에 영향을 주었던 것으로 해석하고 방내리 하곡의 지형 발달이 금왕단층의 활동과 관련되었을 가능성을 제시한 바 있다.

3. 지형 발달 특성

3.1. 하천-지형 발달 체계

방내리 하곡 일대는 하천의 분수계 일대에 해당하는 지역으로 하곡 내에는 곡중 분수계(drainage divides)를 기점

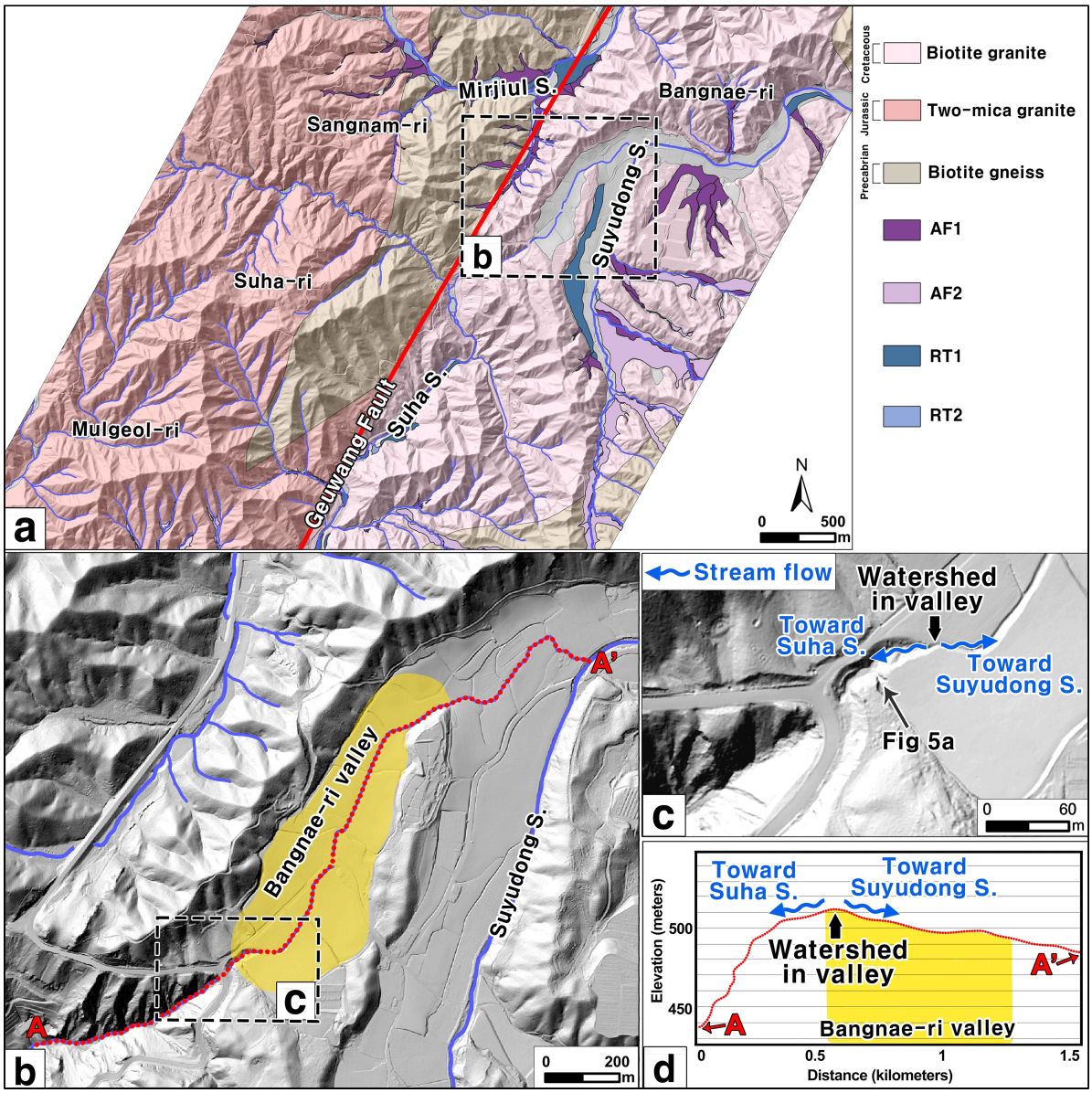

Fig. 2. Geomorphic and geological setting around the Bangnae-ri (geological setting modified from Kang and Jin (1972); Kim and Lee (2016)) (Geumwang Fault modified from Jang and Lee (2012); Kim and Lee (2016, 2017); Choi and Lee (2020)). "S." refers stream. AF and RT means alluvial fan and river terrace, respectively. The landforms were named such that the most recently formed landform was designated as number 1, and subsequent surfaces at progressively higher relative elevations were numbered in ascending order (e.g., AF 1 is youngest and AF 2 is oldest). Yellow boundary indicates Bangnae-ri valley.

으로 유로가 발달한다. 방내리 하곡은 금왕단층의 주향과 동일한 북동-남서 방향으로 발달하며, 북동쪽으로는 수유동천, 남서쪽으로는 수하천과 연결된다(그림 2a, 2c). 현재는 농수로로 이용되고 있는 하곡 내 무명천은 과거 항공사진 및 지형도에서도 관찰된다. 방내리 하곡의 길이는 약 800 m, 폭은 약 120-220 m 수준이다. 토지 개간을 목적으로 곡벽의 일부가 제거되어 하곡의 폭이 조금 확장되었지만, 이를 감안하더라도 분수계 일대 지역이며, 하곡의 길이가 짧음에도 하곡의 규모가 과도하게 넓은 모습이다(그림 2b). 이는 하곡의 규모에 비해 하천의 규모가 극히 작아 더 이상 하식 작용이 어려운 과소하천(underfit stream)의 특성으로 해석된다. 분수계를 기점으로 남서류하는 유로는 경사급변 구간을 따라 흐르며, 유로의 최상류에서는 북동 방향으로 두부 침식(headward erosion)이 진행되고 있다(그림 2c). 분수계를 기점으로 북동류하는 유로는 완경사의 방내리 하곡을 따라 흐르며, 분수계로부터 약 800 m 떨어진 지점에서 수유동천에 합류한다(그림 2d).

경사도 분석 결과에서도 방내리 하곡의 지형 발달 특성이 잘 관찰된다. 연구 지역 일대는 해발고도 500 m 이상의 산지가 주로 분포하며, 이들 산지는 주로 약 21° 이상의 경사를 이룬다(그림 3). 완경사지는 밀지울천과 수유동천, 방내리 하곡 등을 따라 국지적으로 분포한다. 밀지울천의 유로 연장은 약 8 km, 수유동천의 유로 연장은 8.5 km이다. 연구 지역 일대는 밀지울천과 수유동천이 분수계로부터 각각 약 4 km, 3.5 km 떨어진 지점으로 중류부에 해당하며, 하폭은 밀지울천이 약 120-140 m, 수유동천은 약 100-180 m 규모로 발달한다. 수하천의 경우도 방내리 하곡과 인접한 구간에서는 좁은 협곡의 형태로 하곡이 발달하지만, 분수계로부터 약 4.3 km 떨어진 중류부(방내리 하곡에서 약 2.6 km 떨어진 지점)에 이르러서야 하곡이 약 120-210 m

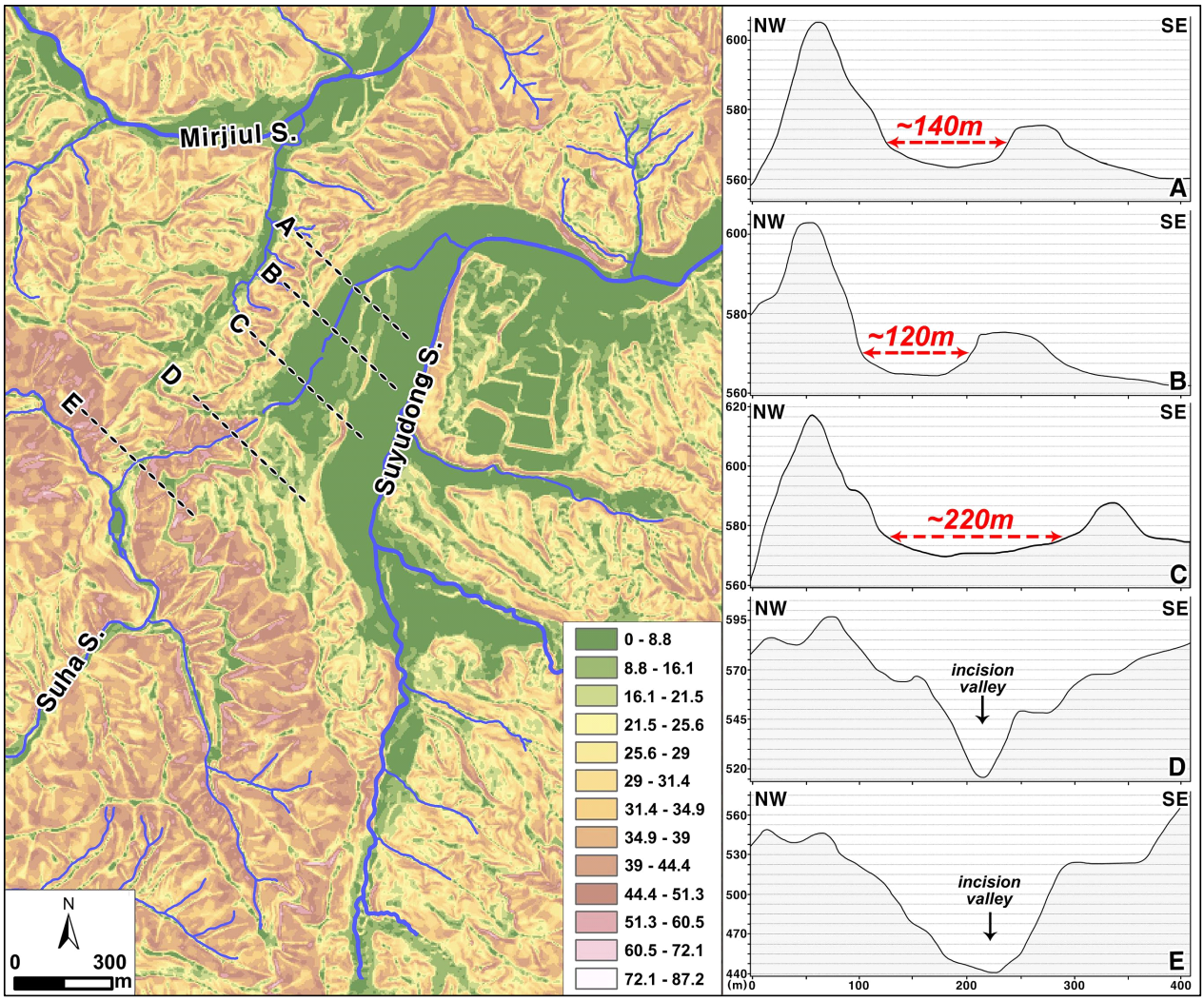

Fig. 3. Slope-distribution map and cross-section profiles of the Bangnae-ri valley. The slope classes were classified using the Jenks natural breaks method.

규모로 넓고 평탄하게 발달한다(그림 4).

하곡의 폭은 유량과 밀접하게 관계된다. 유량이 증가함에 따라 하천의 침식력은 증가하기 때문에 유량이 많아질수록 하곡의 폭이 넓어지며, 하천의 하류로 갈수록 하도의 폭이 넓어지고 깊어진다(Yoon *et al*., 2007; Lee and Park, 2022). 즉, 하천의 분수계 일대는 유량이 적고 침식력이 약해 하곡의 폭이 넓게 발달하기 어려운 환경이며, 주로 협곡의 형태로 발달하는 것이 일반적이다. 그러나, 방내리 하곡은 분수계 일대에 해당하며 유로의 길이도 짧지만 인접한 하천들의 중류부와 유사한 규모의 넓고 평탄한 하곡으로 발달한다. 이는 일반적인 하천의 발달 양상과는 구별되는 특성이며, 방내리 하곡의 발달에 지표 요인 외에 또 다른 요인이 작용했을 가능성을 시사한다.

3.2. 방내리 하곡의 퇴적상

방내리 하곡의 노두는 곡중 분수계 인근 개석곡에서 관찰된다(그림 2c). 개석곡의 남서쪽 곡벽을 따라 약 3 m 높이로 노출된 노두는 상부로부터 식생 피복층, Unit A, Unit B 그리고 최하부의 심층 풍화된 흑운모화강암으로 구성된다(그림 5a).

Unit A는 잔자갈급(pebble) 각력을 일부 포함하는 사력층으로 황갈색의 조립질 모래가 기질을 이룬다. 왕자갈(cobble) 및 왕모래급(granule)의 각력도 관찰된다. Unit A에 포함된 각력은 풍화각이 수 mm 발달한 것에서부터 해머로 타격해도 쉽게 부서지지 않는 것까지 다양하며, 흑운모화강암류의 단일 암종으로 구성된다. 노두에 노출된 Unit A의 층후는 70 cm 내외지만, 상부를 피복하고 있는 식생을 고려한다면 실제는 그 이상일 것으로 판단된다(그림 5b).

Unit B는 왕자갈 및 잔자갈급 아각력과 원마도가 좋은 잔자갈급 아원력 및 원력을 일부 포함하는 사력층이다. 노출된 퇴적층의 층후는 50-70 cm 내외이다. 조립질 모래가 기질을 이루며, 퇴적물의 고결도는 높고 치밀하여 쉽게 분리되지 않는다. 역은 풍화가 매우 진전된 상태로 산출되며, Unit A와 달리, 다양한 암종으로 구성되어 있다(그림 5c).

노두 전면의 개석곡 하상에는 곡벽의 침식으로 유입된 많은 양의 퇴적물이 퇴적되어 있다(그림 5d). 이 퇴적물들은 Unit A와 Unit B에서 관찰되는 다양한 역들이 혼재되어 있다. 개석곡의 대부분은 식생과 무너진 퇴적물로 피복되

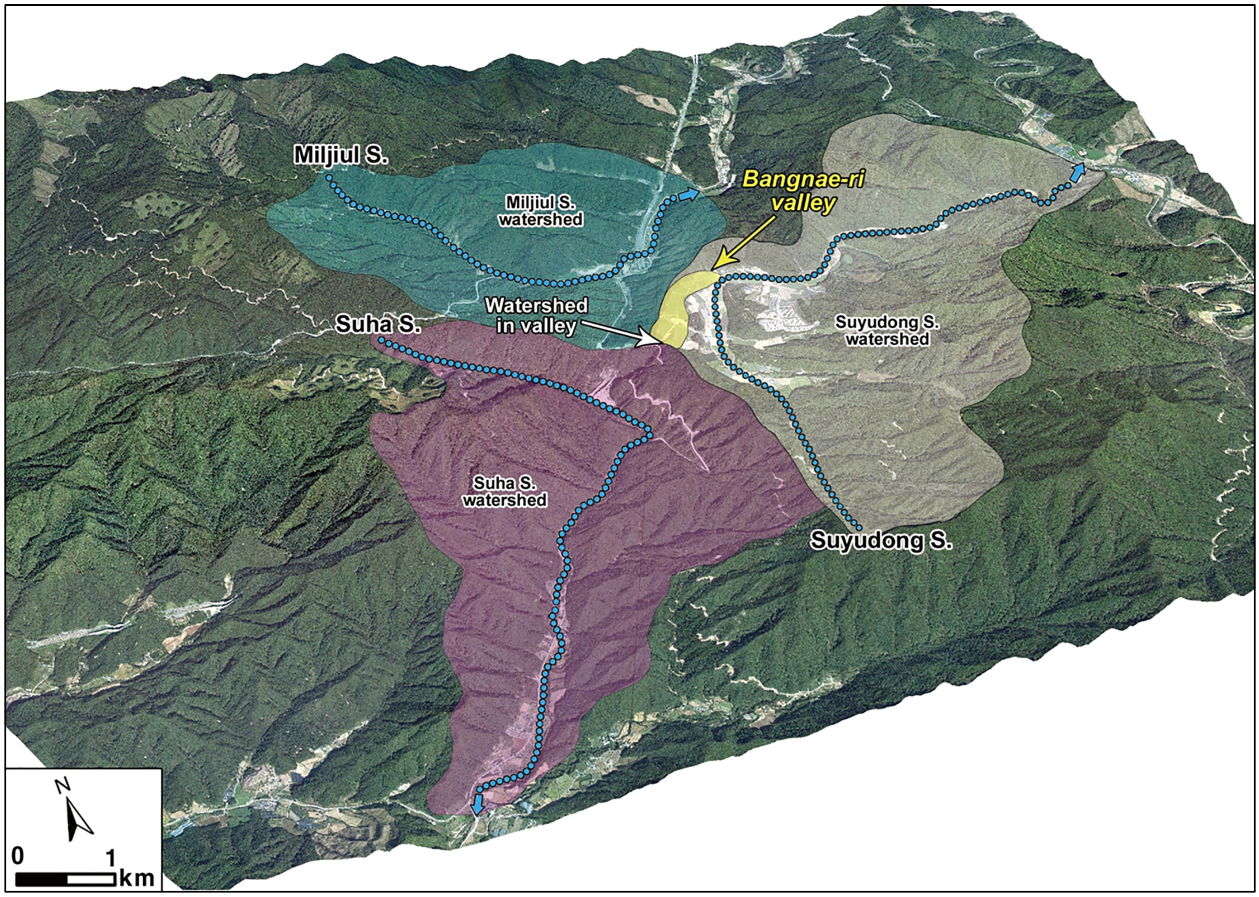

Fig. 4. Watershed and fluvial development around the study area. The Bangnae-ri valley is located in the upstream near the drainage divide, but is similar in developmental characteristics to the middle reaches of other streams.

어 있어 전체적인 퇴적상을 확인하기 어렵다. 다만, 개석곡의 하상 퇴적물에 포함된 많은 원력은 방내리 하곡의 퇴적층에 원력이 다수 포함되어 있음을 보여준다.

하천의 분수계 및 최상류부 일대의 퇴적물에 포함된 역은 원마도가 불량한 각력으로 구성된다. 역이 단거리 이동하는 경우, 원래의 암석으로부터 분리되어 나올 때의 형상

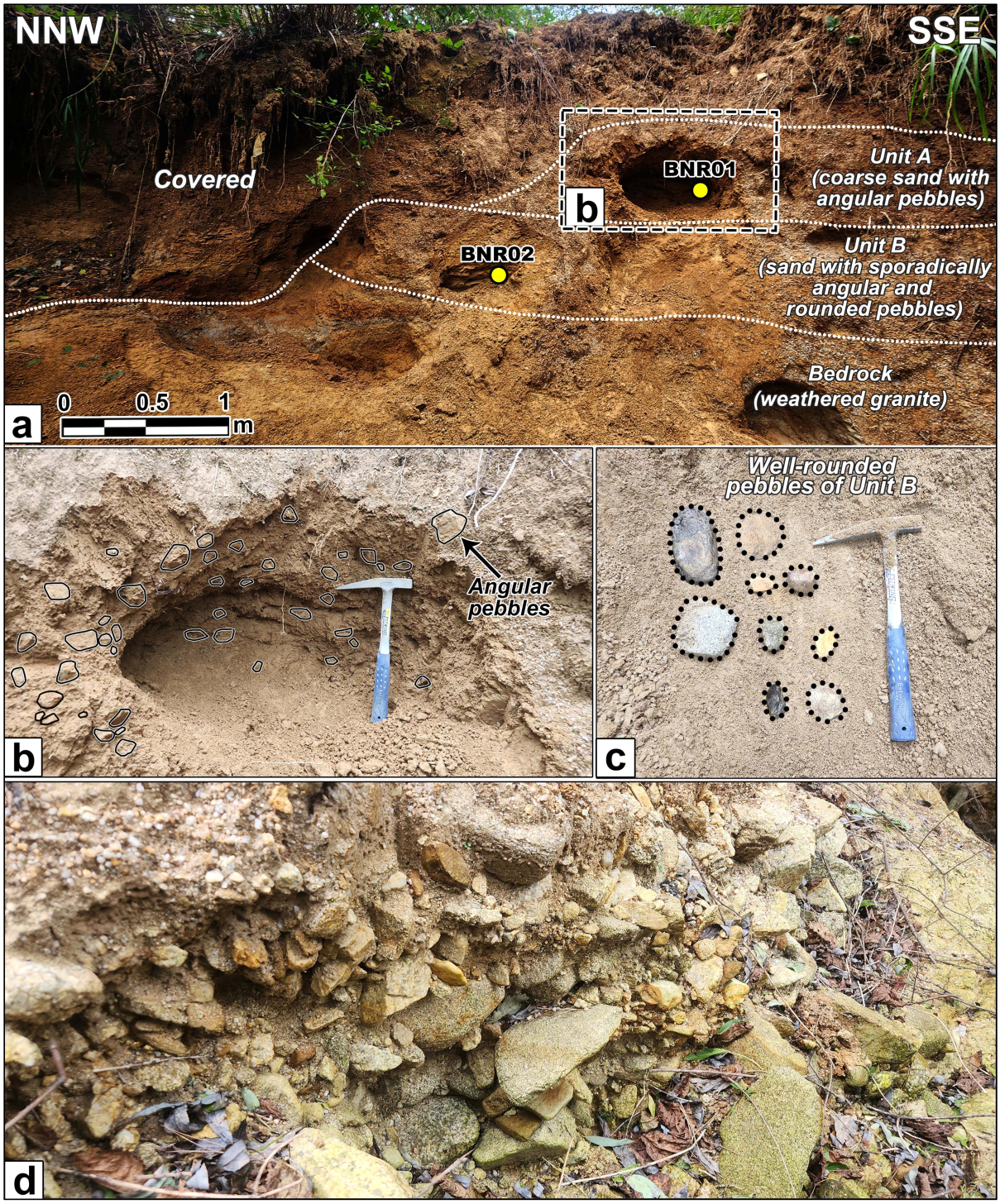

Fig. 5. Outcrop photographs. (a) Outcrop photograph of the Bangnae-ri valley and sampling points (yellow circles). (b) Detailed view of Unit A. (c) Well-rounded pebbles from the Unit B. No distinct stratigraphic features such as sorting, stratification, imbrication and others observed in the unit B. Nevertheless, sporadically presence of the well-rounded gravels indicates that the Unit B is fluvial deposit. (d) Collapsed deposits of lower part of the outcrop. It also consists of angular gravels and rounded gravels.

Table 1. The Single-Aliquot Regenerative-Dose protocol for quartz OSL D_e estimation.

Step	Treatment	Observed
1	Give dose, D_i	
2	Preheat, 260℃ for 10 s	
3	Blue Stimulation, 40 s at 125℃	L_i
4	Give test dose, D_t	
5	Cut-heat, 220℃ for 0 s	
6	Blue Stimulation, 40 s at 125℃	T_i
7	Return to step 1	

Table 2. The Single-Aliquot Regenerative-Dose protocol for K-feldspar $pIRIR_{225}$ D_e estimation.

Step	Treatment	Observed
1	Give dose, D_i	
2	Preheat, 250℃ for 60 s	
3	IRSL, Stimulation for 100 s at 50℃	IR_{50}
4	IRSL, Stimulation for 100 s at 225℃	$pIRIR_{225}$
5	Test dose, T_i	
6	Preheat, 250℃ for 60 s	
7	IRSL, Stimulation for 100 s at 50℃	IR_{50}
8	IRSL, Stimulation for 100 s at 225℃	$pIRIR_{225}$
9	IRSL, Stimulation for 40 s at 290℃	
10	Return to step 1	

을 유지하거나 모서리 일부만 부분적으로만 마식이 발생하기 때문이다. 따라서, 퇴적물이 하천을 따라 장거리를 이동하게 되면 마식 작용이 더 오랜시간에 걸쳐 발생하므로 하류로 갈수록 역의 원마도는 증가하는 경향을 보인다(Kim *et al*., 2012). 방내리 하곡 유역은 유로 연장이 짧아 퇴적물이 양호한 원마도를 가질만큼의 충분한 이동 거리를 갖지 못하며, 분수계 일대에 해당하므로 Unit A에 포함된 역과 같이 원마도가 아주 불량한 각력으로 구성되어야 한다. 그러나, Unit B에서는 원마도가 매우 양호한 잔자갈급 원력이 관찰되는데(그림 5c), 이는 Unit B의 퇴적물이 하성 기원이며, 역들은 양호한 원마도를 가질만큼 충분히 이동 후에 퇴적되었음을 보여준다. 또한, Unit A 포함된 역들은 화강암질의 단일 암종으로 구성되는 반면, Unit B의 역들은 다양한 암종으로 구성되어 있어 Unit B 퇴적 당시 여러 유역에서 기원한 역들이 유입되었을 것으로 해석된다.

4. 연대 측정

4.1. 시료 채취 및 실험 방법

방내리 하곡의 노두에서 관찰된 퇴적층의 퇴적 연대를 측정하기 위해 Unit A와 Unit B에서 각각 1개씩(BNR01, BNR02) 연대 측정용 시료를 채취하였다(그림 5a). 시료의 전처리는 Choi *et al*. (2004) 및 Hong *et al*. (2013)에서 제시된 방법에 따라 수행하였다.

등가선량(equivalent dose)은 단일 시료 재현법(Single-Aliquot Regenerative-Dose protocol; SAR protocol)을 이용해 측정하였으며, 실험 조건은 표 1, 2와 같다. 등가선량의 측정 장비는 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute; KBSI)의 OSL/TL 장비(Risø TL/OSL-DA-20)를 이용하였다. 여기광원은 다입자 시료를 분석하기 위한 blue LEDs (470 nm, ~80 mW/cm^2), IR LEDs (875 nm, ~135 mW/cm^2)를 사용하였으며, 시료의 방사선 조사(irradiation)는 측정 장비에 부착된 ^{90}Sr/^{90}Y 베타선원을 이용하였다. 루미네선스 신호는 광전자 증폭관(photomultiplier tube; PM-Tube)을 통해 측정되었다. 석영 OSL 연대 측정에는 7.5 mm Hoya U-340 필터를 통과한 자외선 영역의 신호가 이용되었다. K-장석 IRSL 연대 측정에는 blue filter pack (4 mm Corning 7-59와 2 mm Schott BG 39)을 통과한 청색 파장 영역의 신호가 이용되었다.

연간선량은 KBSI의 감마선 검출기(HPGe Gamma-ray detector)를 이용하여 시료 내 방사성 동위원소(U, Th, K)의 함량을 측정하고 Liritzis *et al*. (2013)이 제시한 식을 통해 계산하였다. 퇴적물 내 수분함량의 영향은 Zimmerman (1971)이 제시한 자료를 통해 보정하였으며, 우주선에 의

한 영향은 시료를 채취한 위도, 경도, 깊이 등을 고려하여 Prescott and Hutton (1994)이 제안한 식을 이용해 계산하였다.

4.2. 적외선 실험 및 선량재현실험

채취된 시료의 특성이 석영 OSL 연대 측정에 적합한지 확인하기 위해 적외선실험(IR test)과 선량재현실험(Dose Recovery Test)을 실시하였다. 적외선실험은 연대 측정 대상 시료의 IRSL 신호(K-장석을 IR LEDs로 여기하면 발생하는 신호)와 OSL 신호(석영을 blue LEDs로 여기하면 발생하는 신호)를 비교하여 K-장석이 충분히 제거되었는지 확인하는 실험이다. 만일 IRSL 신호와 OSL 신호를 비교했을 때(IR/Blue), 높은 비율(10% 이상)로 확인된다면, 시료 전처리 과정에서 K-장석이 충분히 제거되지 않았고, 석영 OSL 신호 측정 과정에서 K-장석의 루미네선스 신호가 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. BNR01, BNR02의 석영 시료에 대해 적외선실험을 진행하였고, 두 시료 모두 IR/Blue 값이 10% 미만으로 측정되어 전처리 과정 동안 K-장석 오염이 효과적으로 제거되었음을 확인하였다(그림 6a).

선량재현실험은 석영 시료가 SAR protocol을 이용한 OSL 연대 측정에 적합한지를 평가하는 실험이다. 선량재현실험은 전처리가 완료된 석영 시료가 기존에 흡수한 자연선량(natural dose)을 모두 제거한 후 실험실선량(given dose)을 조사하고, SAR protocol을 이용해 측정한 선량(measured dose)이 조사된 실험실 선량을 잘 회복하는지를 평가하는 과정을 거친다. 시료 당 6개의 부시료(aliquot)를 대상으로 실험을 진행하였으며, 실험실 선량은 적외선실험 결과를 바탕으로 100 Gy의 실험실 선량을 조사하였다. 실험 결과, 두 시료 모두에서 실험실 선량과 측정 선량의 비가 1.0 ± 0.1 범위에서 측정되었다(그림 6b). 이는 연구 지역의 시료가 SAR protocol을 이용한 석영 OSL 연대 측정에 적합하다는 것을 의미한다.

4.3. 연대 측정 결과

BNR01 시료의 분석 결과, 석영 OSL 신호는 여기를 시작하고 약 1.8초 이후 초기 신호의 10% 수준에 도달한 것으로 관찰되었다. 이는 시료의 OSL 신호가 fast component에 의해 지배된다는 것을 간접적으로 보여주며(그림 7), 적

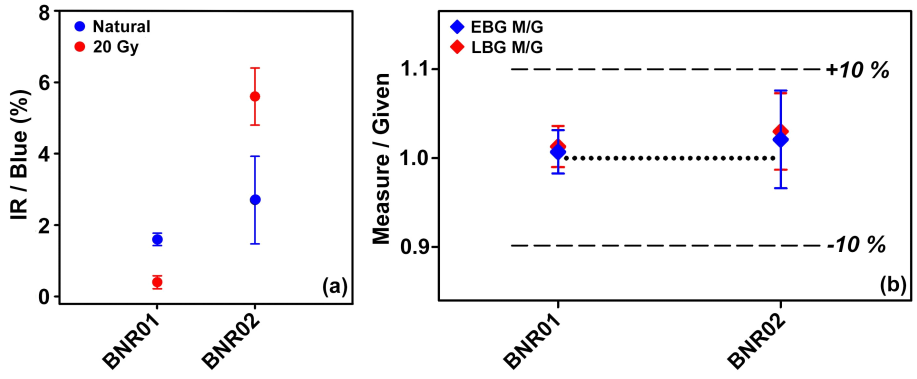

Fig. 6. The results of IR test on sample grains (a) and DRT results of quartz (b) from BNR01 and BNR02.

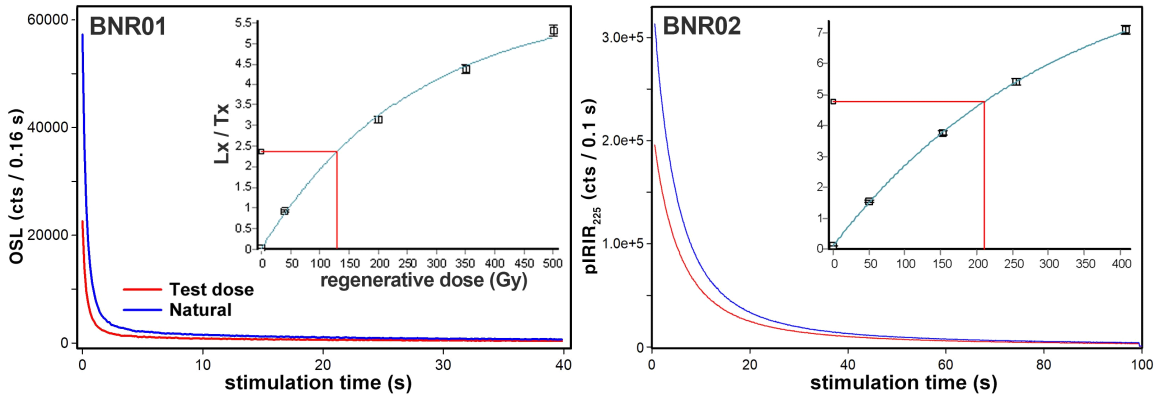

Fig. 7. Dose response growth curve (in the inset to each figure) using the SAR procedure and decay curves of BNR01 (quartz OSL) and BNR02 (K-feldspar $pIRIR_{225}$).

Table 3. Equivalent doses, dosimetry and ages of the samples.

Sample	Method	D_e (Gy)	Dose rate (Gy·ka^{-1})*	Fading rate (%/dec)	Age (ka)**	n***
BNR01	quartz OSL	134 ± 8	5.30 ± 0.13	-	25 ± 2	24
BNR02	quartz OSL	N.D.****	4.31 ± 0.10	-	> 47*****	24
	K-feldspar $pIRIR_{225}$	223 ± 8	5.12 ± 0.11	1.4	48 ± 1	12

* Data from high-resolution low level gamma spectrometer were converted to infinite matrix dose rates using the conversion factors given in Olley *et al*. (1996).
** Central age ± 1σ standard error.
*** Number of aliquots used for statistical analysis.
**** N.D. indicates that D_e values could not be derived because the natural quartz OSL signals were in dose saturation level.
***** Estimated minimum deposition age from characteristic dose ($2D_0$).

외선실험 및 선량재현실험 결과와 함께 BNR01 시료가 SAR protocol을 이용한 석영 OSL 연대 측정에 적합하다는 것을 지시한다.

BNR02 시료의 경우, BNR01 시료와 비슷한 수준으로 석영 OSL 신호가 약 1.5초 이후 초기 신호의 10%에 도달하여 시료가 SAR protocol을 이용한 연대 측정에 적합함을 확인하였다. 다만, 부시료의 등가선량 대부분이 특성선량(characteristic dose, $2D_0$)보다 큰 값을 보였다. 이 경우, 석영 OSL 신호가 선량 포화 상태(dose saturation level)에 근접하였기 때문에 실제 퇴적 연대보다 과소 평가된 연대 결과가 도출될 수 있다(Murray and Funder, 2003). 따라서, 특성선량 값을 이용하여 퇴적 연대 하한(Lower limit of depositional age)을 도출하고 K-장석을 이용한 pIRIR 연대 측정을 추가로 수행하였다(그림 7).

K-장석의 IRSL 신호는 석영의 OSL 신호보다 높은 포화선량값을 가지므로 더 오래된 퇴적물의 연대 측정이 가능하다는 장점이 있다. 다만, K-장석 입자는 외부에너지를 가하지 않아도 루미네선스 신호가 상온에서 자연적으로 감소하는 비이상적 감쇠현상(anomalous fading)이 발생하기 때문에 IRSL 신호 감쇠율(IRSL fading rate)을 구하고 이를 통해 연대 결과를 보정하는 작업이 필요하다(Hong *et al*., 2013). 이 연구에서는 Huntley and Lamothe (2001)에 제시된 방법을 통해 K-장석 $pIRIR_{225}$ 신호의 비이상적 감쇠현상을 보정하여 최종 연대 결과를 도출하였다..

BNR01 (Unit A)의 석영 OSL 연대 측정 결과는 25 ± 2 ka로 계산되었다. 석영 OSL 연대 측정을 통해 도출된 BNR02 (Unit B)의 퇴적 연대 하한은 > 47 ka, K-장석 IRSL 연대 측정 결과는 48 ± 1 ka로 계산되었다(표 3).

5. 토 의

5.1. 방내리 하곡의 지형 발달 모델과 하각률

방내리 하곡은 일반적인 하천의 분수계 일대에서 관찰되는 지형의 특성과는 상이한 특징을 보인다. 일반적으로 하천의 분수계는 유량이 적고 침식력이 낮아 협곡의 형태로 발달하지만, 방내리 하곡은 120-220 m 규모로 넓고 평탄한 것이 특징이다(그림 3). 이는 여타 하천의 중류부와 유사한 양상이다. 또한, 하곡 내 하성 기원 퇴적층(Unit B)은 양호한 원마도를 보이는 다양한 암종의 자갈을 포함하는데(그림 5), 이는 여러 유역에서 기원한 역들이 하천을 따라 장거리 운반된 후 퇴적되었음을 의미한다. 이러한 사실들은 방내리 하곡이 과거 활발한 유수가 작용하던 하천 구간이었으나, 현재는 지형 변화에 의해 분수계로 변화되었을 가능성을 시사한다.

방내리 하곡에서 발원한 소규모 하천의 유로는 수하천 및 수유동천과 연결된다. 분수계로부터 각 하천이 방내리 하곡과 연결되는 지점은 수하천이 약 3.7 km, 수유동천이 약 4.0 km로, 두 하천의 중류부에 해당하는 구간이다(그림 4). 방내리 하곡의 특성이 인접 하천들의 중류부와 유사하다는 점에서 잘 일치한다. 하천의 분수계 일대는 유역 내에서 하상 고도가 가장 높은 구간이므로, 하천의 중류부가 분수계로 변화되기 위해서는 유로의 수직적인 고도 변화가 수반되어야 한다. 이러한 관점에서 각 하천의 하상 비고와 Unit B의 퇴적 연대를 통해 방내리 하곡의 고유로화에 기여한 하각량과 하각률을 산정할 수 있다. 하각량 및 하각률 계산에 사용되는 고도 값은 비교 대상이 되는 하성지형면의 하상 고도 차이를 이용하거나(Shin *et al*., 2023), 또는 고하성퇴적물의 절대 연대 측정 지점과 현 하천의 홍수위 간의 고도차를 이용하기도 한다(Lee, 2014). 후자의 경우 동일한 퇴적층 내에서도 절대 연대 측정 지점에 따라 큰 고도 차가 발생할 수 있다. 또한, 연구 지역의 수유동천은 홍수위 고도 정보가 부재하므로 지형면 간 동일한 기준을 적용하기 위해 이 연구에서는 비교 대상이 되는 하성지형면의 하상 고도를 이용하여 하각량 및 하각률을 계산하였다.

먼저, 방내리 하곡이 수하천의 유로였다면, 수하천의 과

거 유로는 남동류하다가 현재 방내리 하곡과 수하천 합류부 일대에서 유로가 곡류하여 북동류하는 양상이었을 것이다(즉, 수하천의 원유로는 방내리 하곡 내부로 북동류)(그림 8a). 이후 하각 작용이 누적되면서 경사급변구간이 형성되었고 수하천의 유로는 방내리 하곡 내부로 북동류하지 못하고 남서류하게 된 것으로 해석할 수 있다(그림 8b). 이때, 경사급변구간의 비고는 방내리 하곡의 고유로화에 기여한 하각량을 의미한다. Unit B와 하부 기반암의 경계는 방내리 하곡의 하상에 해당하며, Unit B의 하부 경계의 고도(약 515 m)와 방내리 하곡의 유로와 수하천이 합류하는 지점 고도(약 410 m) 간의 비고를 경사급변구간의 비고로 판단할 수 있다. 이에 근거한다면 경사급변구간의 비고는 약 105 m이며(그림 10), 이 경우 방내리 하곡의 지난 48 ka 동안의 하각률은 식 1과 같이 계산된다.

$$\frac{105\ m(\text{방내리 하곡의 하각량})}{48\ ka(Unit\ B\text{의 퇴적 연대})} \fallingdotseq 2.2\ m/ka \quad (1)$$

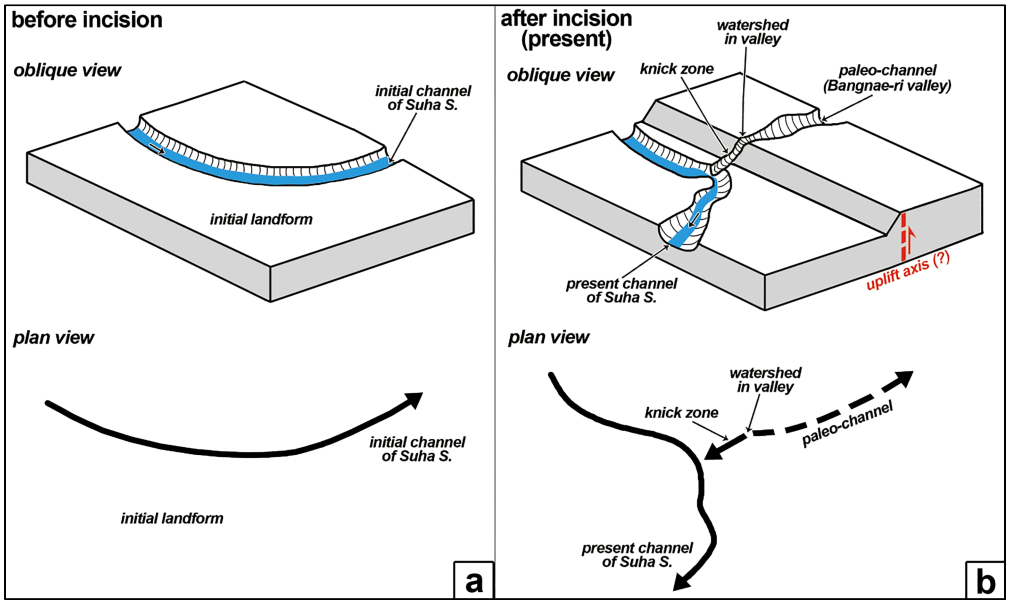

Fig. 8. Schematic block-diagrams showing geomorphic setting of before and after incision in the case of paleo-channel of Suha stream.

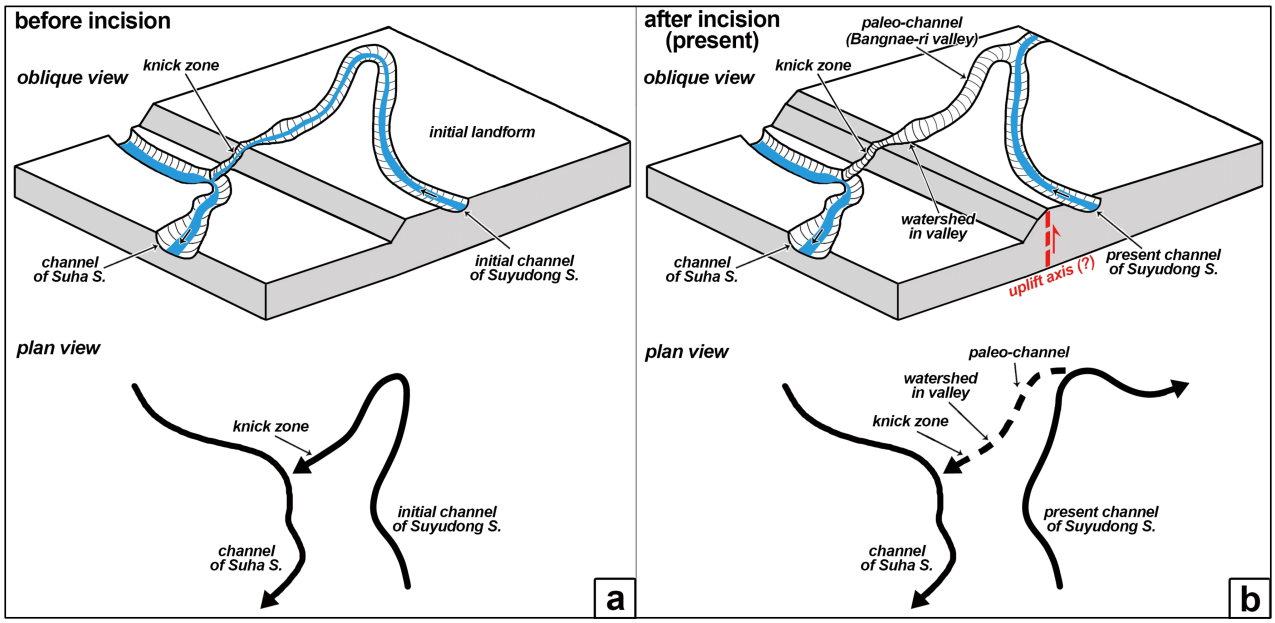

Fig. 9. Schematic block-diagrams showing geomorphic setting of before and after incision in the case of paleo-channel of Suyudong stream.

반면, 방내리 하곡이 수유동천의 유로였던 경우, 수유동천의 원유로는 북동류하다가 현재 방내리 하곡과 합류부 일대에서 유로가 남서쪽 방향으로 크게 곡류하는 양상이었을 것이다(그림 9a). 수유동천의 하각 작용이 진행되면서 방내리 하곡 일대의 상대적 상승이 발생했고 수유동천은 방내리 하곡으로 더 이상 유입되지 못한 채, 현재와 같은 유로를 형성한 것으로 추정할 수 있다(그림 9b). 수유동천의 유수가 방내리 하곡 내부로 흐르기 위해서는 방내리 하곡과 수유동천 합류 지점의 하상 고도보다 방내리 하곡의 하상 고도가 더 낮아야 한다. 합류 지점의 하상 고도(503 m)와 곡중 분수계에 위치한 Unit B의 하부 경계 고도의(그림 5a) 비고는 약 12 m이다(그림 10). 이는 방내리 하곡의 고유로화에 기여한 최소 하각량으로 판단할 수 있으며, 이때 방내리 하곡의 48 ka 동안의 하각률은 식 2와 같이 계산된다.

$$\frac{12\ m(\text{방내리 하곡의 하각량})}{48\ ka(Unit\ B\text{의 퇴적 연대})} \fallingdotseq 0.25\ m/ka \quad (2)$$

5.2. 방내리 일대 제4기 후기 하각률의 고찰

앞서 제시한 바와 같이, 방내리 하곡이 수하천의 고유로

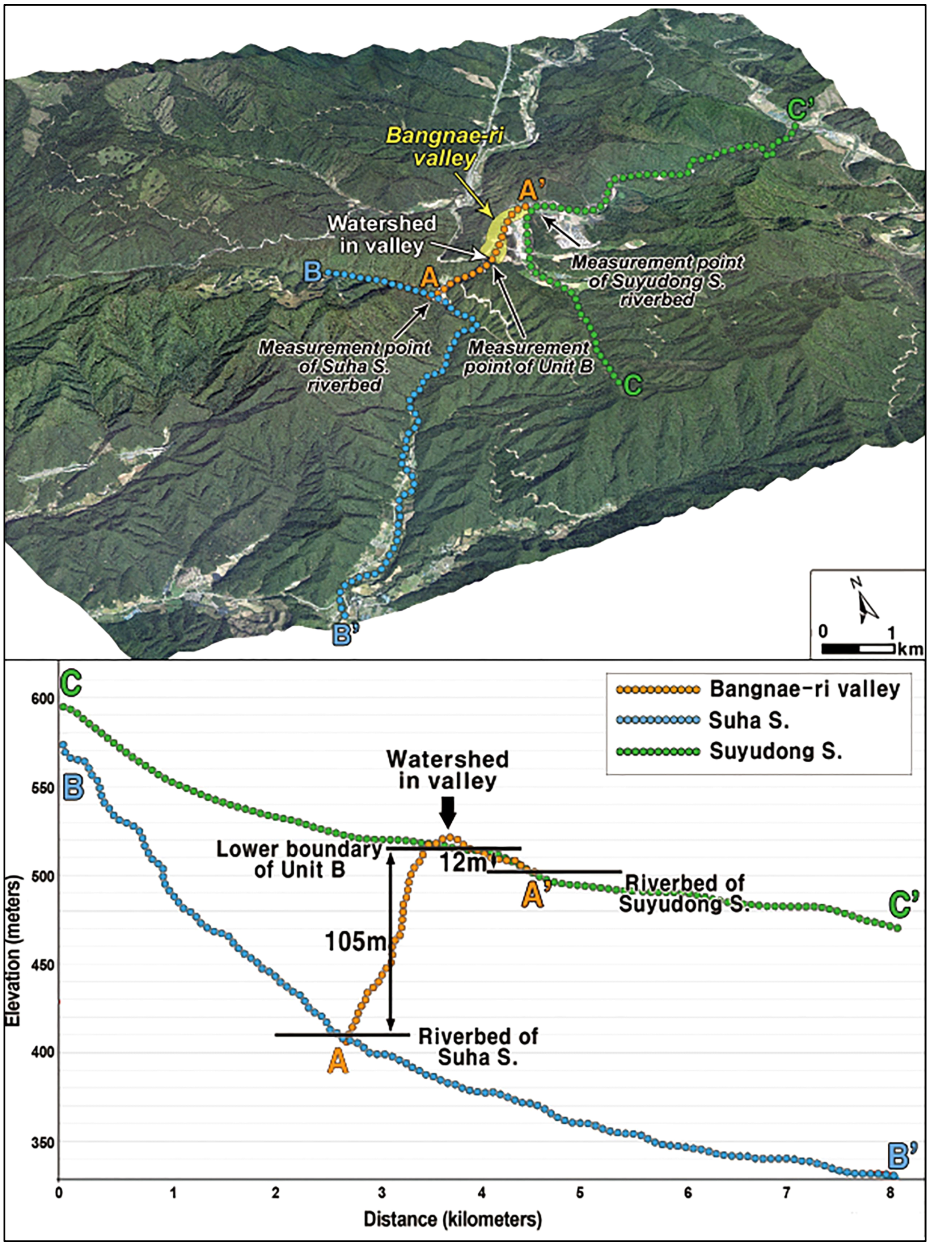

Fig. 10. Elevation profiles and incision depth. The relative elevation difference between the riverbed of the Suyudong Stream and that of the Suha Stream was calculated based on the lower boundary of Unit B.

Table 4. Reported incision rates in South Korea.

River	Terrace level	Altitude from the riverbed or incision height (m)	Age (ka)	Incision rate (m/ka)*	Reference
Kohyun stream	1st	7 ~ 13.5	37 ± 3	0.28	Cho and Lee, 2009
	2nd	16 ~ 32	113 ± 9	0.18	
Odae stream	1st	10 ~ 21	14 ± 1	1.11	Lee, 2009
	2nd	14 ~ 21	42 ± 3	0.07	
Gwang stream (Uljin-gun)	1st	9 ~ 12	10 ± 1	1.05	Lee, 2014
	2nd	18 ~ 19	61 ± 4	0.16	
	3rd	30 ~ 45	92 ± 5	0.61	
Osip stream	1st	7 ~ 10	49 ± 6	0.17	
Danyang stream	1st	3.5	18 ± 1	0.19	Cho *et al*., 2017
Wi stream,	-	15.5	42 ± 7	0.37	Lee and Park, 2022
Yo stream	-	15.8	67 ± 9	0.24	
Nam river	-	15.4	54 ± 8	0.28	
Im stream	-	6.6	17 ± 2	0.39	
Hoengcheon river	-	8.5	33 ± 2	0.26	
Gwang stream (Pohang-si)	1st	5	39 ± 2	0.13	Shin *et al*., 2023
	2nd	10	67 ± 7	0.18	
Bulgap stream	-	6.59	67 ± 4	0.1	Lee *et al*., 2024

* Incision rates were calculated using the method of Shin *et al*. (2023) based on reported river-bed elevations or incision depths and the ages of fluvial deposits, when not explicitly presented in research. Mean values were used when data were provided as ranges.

였다고 가정한다면 약 2.2 m/ka의 하각률이 계산된다. 이는 현재까지 국내에서 보고된 하각률과 비교해 매우 높은 수준이다. 국내 여러 하천에서 산정된 하각률은 대체로 0.1-0.3 m/ka 범위에 분포하며, 1 m/ka를 초과하는 사례는 일부 지역에 국한된다(표 4). 방내리 하곡이 수하천의 고유로였을 경우 하각량은 경사급변구간의 비고와 관련된다. 경사급변구간은 서로 다른 암석 간의 경계, 침식 기준면의 변화, 퇴적물 공급에 의한 하천 종단곡선의 교란, 구조 운동 등의 이유로 형성된다(Lee *et al*., 2019 and references therein). 연구 지역은 해안가에서 멀리 떨어진 내륙에 위치한다. 방내리 하곡은 백악기 흑운모 화강암 내에 위치하며(그림 2a), 기반암이 경사급변구간 전체적으로 노출되어 있어 퇴적물 공급으로 인한 형성을 추정하기도 어렵다. 더욱이, 약 105 m의 비고는 암석 간의 경계, 침식 기준면의 변화 등의 요인만으로 형성되기는 어려울 것으로 판단되며, 경사급변구간의 비고(하각량)는 금왕단층의 수직 운동이 크게 영향을 미쳤을 가능성을 추정해 볼 수 있다. 다만, 수하천이 고유로였을 경우 가정되는 높은 하각률에 근거한다면, 고하성층(Unit B)의 퇴적 시기와는 무관할 것으로 판단된다. 지형 발달 측면에서도 방내리 하곡과 연결되는 구간에서 수하천의 폭은 수 십 m 내외로 방내리 하곡과 큰 차이를 보인다. 이는 동일 유로의 연속적인 발달 과정으로 보기에 부자연스럽다.

반면, 지형 발달 측면에서 수유동천의 중상류부 일대 하폭은 180-270 m 수준으로 방내리 하곡과 유사하다. 하상의 경사도 8.8° 이하로 수유동천의 중상류부와 방내리 하곡은 유사한 하도 특성을 보이고 있어(그림 3), 방내리 하곡과 수유동천이 하나의 연결된 유로를 구성했을 가능성을 시사한다. 방내리 하곡이 수유동천의 고유로였을 경우 계산된 하각률은 0.25 m/ka로 국내에서 보고된 다른 사례들과 비슷한 수준이다(표 4). 국내 여러 사례 중 Shin *et al*. (2023)이 보고한 포항 광천의 하각률은 연구 지역과 같이 대규모 단층대와 인접한 지역에서 산출되었다는 점에서 비교할만하다. 양산단층 북부 지역에서 양산단층대의 주단층은 광천 중·하류부를 가로질러 북북동 주향으로 발달하는 것으로 추정되며, 광천 일대에서 추정 단층선을 따라 여러 단층이 보고된 바 있다(Chae and Jang, 1994; Moon *et al*., 2015; Woo *et al*., 2015; Kim *et al*., 2016; Song *et al*., 2019; Yun *et al*., 2000). Shin *et al*. (2023)은 광천과 인접한 흥해읍 일대의 해안단구 연구 결과와 비교를 통해 광천 유역의 하각의 주요 요인이 지각 운동(융기)인 것으로 보고하였다. 하안단구 분석을 통해 제시된 광천 유역의 하각률은 지난 67 ± 7 ka 동안 0.13-0.18 m/ka으로 방내리 하곡이

수유동천의 고유로였을 경우 계산된 하각률의 약 1/2 수준이다. 이는 방내리 하곡이 위치한 금왕단층 북부 일대에서는 양산단층 북부 지역 보다 큰 규모의 금왕단층의 수직 운동 또는 광역적 지각 운동(융기)가 발생했거나, 기후 조건에 의한 침식 조건이 더 유리했을 가능성, 연구 지역의 하각량이 과대 평가되었을 가능성을 고려해볼 수 있다. 하각률에 영향을 미치는 여러 요인들은 복합적으로 작용하며, 이들 각 요인이 어느 지역의 하각 작용에 영향을 미친 정도의 차이를 구분하는 것은 어렵다. 또한, 각 연구에서 하각량 및 하각률의 측정과 확정이 동일한 기준에서 이루어진 것이 아니며, 형성 시기에 관한 연대자료 역시 시료의 적합성 여부와 연대 오류의 가능성을 포함하여 공간적 규모에 비교해 수치 연대 자료의 수가 절대적으로 부족하다는 점 등이 함께 고려되어야 한다. 이러한 점에서 하각률 추정값은 불확실성을 내포한다. 현재로선, 양산단층은 한반도에서 가장 활성도가 높은 단층이며, 기후적 요인이 연구 지역에서 양산단층 일대의 2배에 달하는 하각 작용을 유도할 만큼 선택적으로 작용했을 가능성은 낮을 것으로 판단되어 하각률이 과대 평가되었을 가능성이 우선 고려된다. 이와 관련하여 금왕단층의 여러 지역에서 제4기 수직 변위율이 추후 보고된다면 보다 구체적으로 논의할 수 있을 것으로 생각된다. 한편으로, 현재의 지형 발달 모델은 기존에 보고된 금왕단층의 분포를 고려했을 때(그림 2a), 금왕단층의 남동 지괴의 상승이 하각 작용에 영향을 미쳤을 가능성을 보여준다. 다만, 이 가정을 구체적으로 논의하기 위해서는 광역적인 지형 고도, 지층의 층서 관계 등 더 많은 정보가 필요하며, 금왕단층의 제4기 수직 변위율과 함께 금왕단층의 제4기 운동 특성을 파악하기 위한 중요한 정보가 될 것으로 생각된다.

이상의 결과들을 종합하면, 하곡의 발달 특성, 지형 발달, 높은 하각률 등을 고려할 때, 방내리 하곡이 수하천의 고유로였을 가능성은 낮을 것으로 생각된다. 반면, 수유동천의 고유로였을 가능성은 하곡의 규모 및 형태, 하각률의 수준 등의 측면에서 일관된 해석을 제공하며, 방내리 하곡의 형성 과정을 설명하는 데 보다 합리적인 해석으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구는 강원도 홍천군 방내리 일대의 방내리 하곡을 대상으로 지형 발달 과정을 논의하고 이에 기여한 하각량 및 하각률을 분석하는 데 목적이 있다. 분석 결과, 방내리 하곡은 과거 수유동천의 유로였으나 현재는 하각 작용으로 인해 고유로화된 것으로 추정된다. 방내리 하곡의 고유로화에 기여한 하각량과 고유로 퇴적물의 퇴적 연대를 통해 산출되는 하각률은 지난 48 ka 동안 약 0.25 m/ka이다.

지형학을 포함하여 많은 연구 분야는 정량적인 수치들을 산출하는데 있어 각각의 불확실성과 한계점들을 수반하며, 이는 정확한 정보를 구현하는데 어려움을 가중하는 요소이다. 따라서, 상황과 환경에 적합한 방법의 채택과 여러 연구 방법의 장점을 결합한 종합적인 해석이 필요하며, 지속적으로 많은 연구와 자료의 축적이 이루어져야 한다.

이러한 관점에서, 금왕단층 일대의 하각률을 파악하기 위해서는 많은 지점에서 지형 분석과 연대 측정을 통해 다양한 시공간 범위에 걸친 조사와 연구가 필요하며, 여러 연구 방법의 종합적인 해석이 이루어져야 한다.

이 연구에서 제시된 지형 발달 모델과 수치 연대 측정 결과 등은 그간 보고된 바가 없었던 금왕단층 일대의 지형 정보 및 하각 작용에 대한 보고이며, 향후 금왕단층 연구에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

원고의 발전을 위해 세심한 검토를 해주시고 중요한 의견을 주신 편집위원과 심사위원 분들께 감사드립니다. 이 논문은 제1 저자의 박사학위 논문 중 일부 내용을 포함하고 있습니다.

REFERENCES

Bae, H.K. and Lee, H.K., 2014, Space-Time Patterns of Fault activity of the Keumwang Fault Developed in the Jincheon-Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 735-752 (in Korean with English abstract).

Burrato, P., Vannoli, P., Fracassi, U., Basili, R. and Valensise, G. 2012, Is Blind Faulting Truly Invisible? Tectonic-Controlled Drainage Evolution in the Epicentral Area of the May 2012, Emilia-Romagna Earthquake Sequence (Northern Italy). Annals of Geophysics, 55, https://doi.org/10.4401/ag-6182.

Chae, B.-G. and Jang, T.-W., 1994, Movement history of Yangsan Fault and its related fractures at Chongha-Yongdeok area, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 379-394 (in Korean with English abstract).

Cho, Y.D. and Lee, G.R., 2009, Analysis of fluvial terraces at Kohyun River in Youngcheon City. Journal of the Korean Geographical Society, 44, 447-462 (in Korean with English abstract).

Cho, Y.D., Park, C.S. and Lee, G.R., 2017, Incision and Geomorphic Development of Rivers on Eatern and Western Sides of the Northern Sobaek Mountains. Journal of the Geomorphological Association of Korea, 24, 27-40 (in Korean with English abstract).

Choi, J.H., Cheong, C.S. and Chang, H.W., 2004, Principles of Quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) Fating and Its Geological Applications. Journal of the Geological Society of Korea, 40, 567-583 (in Korean with English abstract).

Choi, J.M. and Lee, H.K., 2020, Evolution and Space-Time Activity

Patterns of the Keumwang Fault at Girin-myeon, Inje-gun, Gangwon-Do. Journal of the Geological Society of Korea, 56, 425-452 (in Korean with English abstract).

Choi, Y.S., 1996, Structural evolution of the cretaceous Eumseong basin, Korea. Ph D. thesis, Seoul National University, Seoul (in Korean with English abstract).

Hong, N.R. and Lee, H.K., 2012, Structural Features and ESR Dating of the Keumwang Fault at Eumseong-gun, Chungcheongbuk-Do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 473-489 (in Korean with English abstract).

Hong, S.C., Choi, J.H., Yeo, E.Y. and Kim, J.W., 2013, Principles of K-Feldspar IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) Dating and Its Applications. Journal of the Geological Society of Korea, 49, 305-324 (in Korean with English abstract).

Hong, Y.M., Choi, J.H., Ryu, H.G. and Shin, J.R., 2022, Geomorphological Development and Neotectonic Crustal Deformation along the Geumwang Fault (I): Developmental Characteristics and Distribution of the Quaternary Landforms. Journal of the Korean Geographical Society, 57, 81-95 (in Korean with English abstract).

Huntley, D.J. and Lamoth, M., 2001, Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. Canadian Journal of Earth Sciences, 38, 1093-1106, https://doi.org/10.1139/e01-013.

Jang, B.G. and Lee, H.K., 2012, Structural Features of Fault Rocks Developed in the Keumwang Fault at Hakgok-ri, Hoengseong-gun, Ganwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 11-26 (in Korean with English abstract).

Jo, W.R., 1997, The Geomorphic Analysis of the Yangsan Fault Area. Journal of the Korean Geographical Society, 32, 1-14 (in Korean with English abstract).

Kang, P.C. and Jin, M.S., 1972, Geological Report of the Pungam Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea (in Korean with English abstract).

Kim, C.M., Han, R., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Son, M., 2016, Internal structure and materials of the Yangsan fault, Bogyeongsa area, Pohang, South Korea. Geosciences Journal, 20, 759-773, https://doi.org/10.1007/s12303-016-0019-8.

Kim, C.M., Lee, T.H., Choi, J.H., Lee, H. and Kim, D.E., 2024, Multi-scale analysis and paleoseismic investigations along the Geumwang Fault: an example of integrated approach in paleoseismology in slow tectonic region. Geosciences Journal, 28, 565-582, https://doi.org/10.1007/s12303-024-0029-x.

Kim, D.E., Soeng, Y.B. and Kim, J.G., 2019, Cosmogenic ^{10}Be Depth Profile Dating of Strath Terrace Abandonment using Monte Carlo Simulation. Journal of Geomorphological Association, 26, 29-31 (in Korean with English abstract).

Kim, J.Y., Yi, S.H. and Kim, J.W., 2012, A study on Mountain Stream Type Deposit at Suhang Valley in Odaecheon. Journal of the Association of Korean Geographers, 1, 75-90 (in Korean with English abstract).

Kim, M.J. and Lee, H.K., 2016, Internal Structure and Movement History of the Keumwang Fault. The Journal of the Petrological Society of Korea, 25, 211-230 (in Korean with English abstract).

Kim, M.J. and Lee, H.K., 2017, Quaternary Activity Patterns of the Keumwang Fault in the Wonju-si Area. Journal of the Geological Society of Korea, 53, 79-94 (in Korean with English abstract).

Kirby, E., Whipple, K. and Harkins, N., 2008, Topography Reveals Seismic Hazard. Nature Geoscience, 1, 485-487, https://doi.org/10.1038/ngeo265.

Lee, C.H., Seong, Y.B., Oh, J.S. and Kim, D.E., 2019, Tectonic Geomorphology on Yugye-Bogyeongsa Area of Yangsan Fault Zone. Journal of the Korean Geomorphological Association, 26, 93-106 (in Korean with English abstract).

Lee, G.R., 2009, Properties of Channel and Evolutions of Fluvial Terraces in Odae River. Journal of the Korean Geographical Society, 44, 224-239 (in Korean with English abstract).

Lee, G.R., 2014, Geomorphological Processes of Fluvial Terraces at the River Basins in the East Coast in the Southern Taebaek Mountain Range. Journal of the Korean Geographical Society, 49, 1-17 (in Korean with English abstract).

Lee, G.R., 2018, 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., 2023, Process of fluvial terraces and evolution of stream during the late quaternary in the downstream of the Namhangang river. Journal of the Geological Society of Korea, 59, 203-217 (in Korean with English abstract).

Lee, G.R., Cho, Y.D. and Kim, D.S., 2008, A study on the Geomorphology and Activity of Jinbu Fault in Pyeongcahng-gun, Gangwon Province. Journal of the Korean Geographical Society, 43, 775-790 (in Korean with English abstract).

Lee, G.R., Nahm, W.H., Kim, J.C. and Han, M., 2024, Uplift and Incision Rates After the Last Interglacial Stage in the Estuary Coast of Bulgapcheon River, Yeonggwang. Journal of the Korean Geomorphological Association, 31, 27-38 (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, H.K., 2010, Structural Features of the Keumwang Fault Zone at Sangnam-myeon, Inje-gun, Gangwon-Do. Journal of the Geological Society of Korea, 46, 561-576 (in Korean with English abstract).

Lee, H.K. and Kim, J.Y., 2011, Microstructural Features within the Fault Rocks in the Keumwang Fault Zone at Sangsam-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 395-409 (in Korean with English abstract).

Lee, M.B. and Lee, G.R., 2003, Geomorphological Analysis of the Fluvial Terraces in the Chugaryeon Rift Valley, Central Korea. Journal of the Korean Geomorphological Association, 10, 157-173 (in Korean with English abstract).

Leonard, M., 2010, Earthquake Fault Scaling: Self-consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. Bulletin of the Seismological Society of America, 100, 1971-1988.

Liritzis, I., Stamoulis, K., Papachristodoulou, C. and Ioannides, K., 2013, A re-evaluation of radiation dose-rate conversion factors. Mediterranean Archaeology and Archaeometry, 13,

1-15.

Mencin, D., Bendick, R., Upreti, B.N., Adhikari, D.P., Gajurel, A.P., Bhattarai, R.R., Shrestha, H.R., Bhattarai, T.N., Manadhar, N., Galetzka, J., Knappe, E., Pratt-Sitaula, B., Aoudia, A. and Bilham, R., 2016, Himalayan Strain Reservoir Inferred form Limited Afterslip Following the Gorkha earthquake. Nature Geoscience, 9, 533-537.

Moon, S.-W., Yoon, H.-S., Chu, C.-O., Kim, W.-S. and Seo, Y.-S., 2015, A study on mineralogical and basic mechanical properties of fault gouges in 16 faults, Korea. Journal of the Korean Mineralogical Society, 28, 109-126 (in Korean with English abstract).

Morell, K., Styron, R., Stirling, M., Grifiin, J., Archuleta, R. and Onur, T., 2020, Seismic Hazard Analyses from Geologic and Geomorphic Data: Current and Future Challenges. American Geophysical Union, 39, https://doi.org/10.1029/2018TC005365.

Murray, A.S. and Funder, S., 2003, OSL dating of a Danish Coastal Marine Deposit: a Test of Accuracy. Quaternary Science Reviews, 22, 1177-1183.

Olley, J.M., Murray, A.S. and Robets, R.G., 1996, The Effect of Disequilibrium in the Uranium and Thorium Decay Chains on Burial Dose Rates in Fluvial Sediments. Quaternary Science Reviews, 15, 751-760.

Park, J.R. and Lee, H.K., 2012, Internal Structure and Microstructural Features of Keumwang Fault Zone at Jwaun-ri, Hongcheon-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 27-47 (in Korean with English abstract).

Prescott, J.R. and Hutton, J.T., 1994, Cosmic Ray Contributions to Dose Rates for Luminescence and ESR dating: Large Depths and Long-term Time Variation. Radiation Measurements, 23, 497-500.

Shin, J.R., Oh, J.S., Hong, S.C., Choi, J.H. and Hong, Y.M., 2023, Development of the Late Quaternary River Terraces along the Gwang stream, Pohang-si: Implications for Neotectonic Crustal Strain Rate of Incision Rates. Journal of the Korean Geographical Society, 58, 1-10 (in Korean with English abstract).

Shin, W.J. and Kim, J.Y., 2024, Study of Fluvial Geomorphic Development of the Middle and Upper Reaches of Yeongdeok Songcheon River. Journal of the Korean Geomorphological Association, 31, 59-79 (in Korean with English abstract).

Song, Y., Sim, H., Hong, S. and Son, M., 2019, K-Ar age-dating results of some major faults in the Gyeongsang Basin: Spatio-temporal variability of fault activations during the Cenozoic Era. Economic and Environmental Geology, 52, 449-457 (in Korean with English abstract).

Stein, R.S. and Yeats, R.S., 1989, Hidden Earthquakes. Scientific American, 260, 48-59.

Weldon, R.J. and Sieh, K.E., 1985, Holocene Rate of Slip and Tentative Recurrence Interval for Large Earthquakes on the San Andreas Fault, Cajon Pass, Southern California. GSA Bulletin, 96, 793-812.

Weon, H.J. and Lee, H.K., 2018, ESR age and Characteristic Features of the Keumwang Fault Developed in the Ssangjeong-ri, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 54, 335-357 (in Korean with English abstract).

Woo, S., Lee, H., Han, R., Chon, C.M., Son, M. and Song, I., 2015, Frictional properties of gouges collected from the Yangsan Fault, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 51, 569-584 (in Korean with English abstract).

Yoon, S.O., Hwang, S. and Lee, G.R., 2007, Geomorphic Evolution of Fluvial Terraces at Yeongdong·Yeongseo Streams in Gangwon Province, Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 42, 388-404 (in Korean with English abstract).

Yun, S.-H., Lee, M.-W., Ko, J.-S., Kim, Y.-R. and Han, M.-G., 2000, Petrology of the Bokyeongsa Volcanics in the northeast Gyeongsang Basin. Journal of the Korean Earth Science Society, 21, 595-610 (in Korean with English abstract).

Zielke, O., Klinger, Y. and Arrowsmith, J.R., 2015, Fault Slip and Earthquake Recurrence along Strike-slip Faults — Contributions of High-resolution Geomorphic Data. Tectonophysics, 638, 43-62.

Zimmerman, J., 1971, The Radiation-induced Increase of the 100 C Thermoluminescence Sensitivity of Fired Quartz. Journal of Physics C: Solid State Physics, 4, 3265, doi: 10.1088/0022-3719/4/18/032.