

태백산맥 남부 일대 산지 하천의 하각률*

이광률**

Incision Rates of Mountain Streams in the Southern Part of the Taebaek Mountain Ranges*

Gwang-Ryul Lee**

요약 : 본 연구는 경상북도와 충청북도에 위치한 태백산맥 남부 12개 산지 하천의 18개 하안단구 지점에 대한 지형 분석 및 연대 측정 결과를 통해 하각률을 산출하고, 하각률의 공간적 분포 특성을 토대로 하천의 하각과 태백산맥 및 소백산맥의 지반 융기를 검토하였다. 분석 결과, 하각률이 높은 곳은 태백산맥 남부의 중앙 및 서사면 지역과 소백산맥 서사면 지역이며, 하각률이 매우 낮은 곳은 태백산맥으로부터 최소 30km 이상, 소백산맥으로부터는 최소 20km 이상의 거리에 위치하는 지역이다. 따라서 태백산맥과 소백산맥은 하천 하각 작용에 가장 중요한 요인인 지반 융기가 활발한 한반도 남부의 융기축으로 판단되며, 융기량은 태백산맥이 소백산맥보다 더 컸던 것으로 추정된다. 또한 두 산맥 모두 동사면에 비해 서사면에서 융기가 더 활발한 비대칭적 융기를 경험하였을 가능성이 높다.

주요어 : 하안단구, 하각률, 융기, 태백산맥, 소백산맥, OSL 연대 측정

Abstract : This study tries to calculate incision rate by topographical analysis and age dating on 18 fluvial terrace sites in 12 mountain streams in the southern part of the Taebaek Mountain Range, Gyeongbuk and Chungbuk Provinces. Based on characteristics in spatial distribution of incision rate, stream incision and ground uplift of the Taebaek and Sobaek Mountain Ranges are also estimated. Higher incision rate areas are found in the central and western slopes in the southern part of the Taebaek Mountain Range as well as in the western slope of the Sobaek Mountain Range. Areas at least 30 km and 20 km away from the Taebaek and Sobaek Mountain Ranges, respectively, show lower incision rate. These results suggest that the Taebaek and Sobaek Mountain Ranges are uplift axes where have experienced active ground uplift, the most important factor in stream incision, in the southern part of the Korean Peninsula. Uplift rate in the Taebaek Mountain Range seems to be higher than that in the Sobaek Mountain Range. It is likely that both the Taebaek and Sobaek Mountain Ranges have experienced tilted uplift with more active uplift in the western slope than in the eastern slope.

Key Words : Fluvial terrace, Incision rate, Uplift, Taebaek Mountain Range, Sobaek Mountain Range, OSL age dating

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

하안단구(fluvial terrace)는 하곡 내에서 현 하천보다

높은 고도에 남겨진 과거의 범람원이다(Ritter *et al.*, 2011). 하안단구가 형성되기 위해서는 하천이 낮아진 침식기준면에 대응하여 지표를 좁고 깊게 아래로 파는 하각(incision) 작용이 발생하여야 한다(이광률, 2018a; 2018b). 하안단구에 대한 연구는 해당 지역에서 신생대

*이 논문은 2016년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016S1A5A2A01021945).

**경북대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Kyungpook National University, georiver@knu.ac.kr)

제4기 동안에 걸쳐 발생한 하천의 침식 및 퇴적작용에 의한 하도의 변화 과정을 파악할 수 있으며, 해당 하천 유역의 지반용기 및 지질 구조, 강수량 및 해수면 변화 특성과 지형 형성작용 사이의 관계를 파악하는 중요한 단서가 된다(이광률, 2014).

하안단구의 형성시기와 하천과의 고도차를 알면 하천이 고도를 낮추는 침식 속도인 하각률(incision rate)을 계산할 수 있다. 하천 하각률에 대한 분석은 해당 지역에서 발생한 기후, 암석, 지구조적 작용과 하도와 하천 유수의 시간적 변화까지도 이해할 수 있다(Finnegan *et al.*, 2014; Saillard *et al.*, 2014). 그러나 우리나라와 같이 기후 현상의 지역적 차이가 크지 않은 지역에서 하각률의 공간적 분포의 차이는 국지적인 기후 특성보다는 지구조적 특성과 관계가 깊다(이광률, 2018a).

국외에서는 1980년대 후반부터 현재까지 ^{14}C , OSL(Optically Stimulated Luminescence), 우주기원 동위원소(cosmogenic isotope) 등을 이용한 절대 연대 자료를 통하여 하각률을 측정하고 하안단구 형성에 영향을 미친 기후, 수문, 지질, 지형 요인에 대한 다양한 분석이 이루어져 왔다(Bull and Knuepfer, 1987; Sasowsky *et al.*, 1995; Dethier, 2001; Cyr and Granger, 2008; Cook *et al.*, 2009; Viveen *et al.*, 2012; Baotian *et al.*, 2013; Ferrier *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2013; Castillo *et al.*, 2014; Oskin *et al.*, 2014; Fox *et al.*, 2015; Faulkner *et al.*, 2016; Schaller *et al.*, 2016; Delmas *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018; Bender *et al.*, 2019; Štor *et al.*, 2019). 국외의 연구 중에서도 우리나라와 기후 및 지구조 조건이 유사한 조산대 주변에 위치한 중위도 습윤 지역 하천에 대한 하각률 산출 결과를 살펴보면, 미국에서 애팔래치아 산지 남부 일대의 하각률은 최대 0.06m/ka로 보고되었고(Sasowsky *et al.*, 1995), 워싱턴주 중부의 야키마(Yakima) 강의 하안단구에서는 하각률이 0.04~0.09m/ka의 범위로서 지질 구조에 따라 차이가 있다고 제시되었다(Bender *et al.*, 2017). 유럽 지역의 하안단구 연구에서는 이탈리아 북동부에서 0.20~0.58m/ka의 하각률이 보고되었고(Cyr and Granger, 2008), 헝가리의 다뉴브(Danube) 강 상류에서 얻어진 플라이스토세 말 이후의 하각률은 0.13~0.15m/ka로 제시되었으며(Ruszkiczay-Rüdiger *et al.*, 2016), 에스파냐 북서부 에브로(Ebro)강의 지류인 쾨카(Cinca)강의 저위 하안단구에서는 0.20~0.61m/ka의 하각률이 보고되었다(Lewis *et al.*, 2017).

우리나라를 대상으로 한 하각률 연구는 이광률(2009; 2014; 2018a; 2018b), Lee *et al.*(2011), 김준연·홍성찬(2014), 조영동 등(2017) 등 수 편의 논문이 발표되었다. 그 중에서도 이광률(2018b)은 태백산맥 북부 지역의 산지 하천의 총 23개 지점에 대한 하각률 자료를 종합하여 하각률의 분포 특성을 제시하였다. 그의 연구에 따르면, 태백 산지 북부 지역에서 하각률은 0.15~0.40m/ka의 범위를 보이고 있으며, 하각률이 가장 높은 지점은 내린천 중류와 옥동천 상류 지점으로, 모두 0.400m/ka의 하각률이 측정되었는데, 특히, 태백산맥에 인접한 소양강, 내린천, 오대천, 동강, 옥동천 상류에서 높은 하각률이 나타나며, 태백산맥으로부터 멀어질수록 하천의 하각률이 점차 낮아지는 경향이 뚜렷하다고 한다.

본 연구는 한반도 중·남부의 용기 축으로 알려진 태백산맥 일대를 중심으로 한 우리나라 산지 하천 하각률 연구에 대한 후속 결과로서, 경상북도와 충청북도에 해당하는 태백산맥 남부의 산지 하천에 발달한 하안단구에 대한 지형 분석 및 연대 측정 결과를 통해 하각률을 산출하고 분포 특성을 고찰하였다. 강원도에 해당하는 태백산맥 북부 지역은 상대적으로 동고서저의 지형 기복 특성이 뚜렷하지만, 경상북도 일대의 태백산맥 남부 지역에서는 태백산맥의 서쪽에 소백산맥을 이루는 산지들이 형성되어 있어서 상대적으로 동고서저의 지형 특성이 덜하다. 본 연구에서는 태백산맥 남부 지역 일대의 이러한 광역적인 지표 기복의 특성과 하천의 하각 작용간의 관계를 중심으로, 신생대 제4기 플라이스토세 말 동안 하각률의 분포 특성과 지반 용기 사이의 관계를 검토하고자 한다.

2. 연구 지역 및 연구 방법

연구 지역은 한반도 중·남부의 용기 축으로 알려진 태백산맥의 남부 일대에 발달한 산지 하천을 주요 대상으로 하였으며, 태백산맥과 유사하게 경동성의 비대칭적 요곡 용기가 발생했을 가능성이 있는 소백산맥(조영동 등, 2017)과의 관계를 살펴보기 위해서 태백산맥과 접한 소백산맥 북부에 위치한 산지 하천도 연구 대상에 포함하였다. 따라서 연구 대상 지역은 태백산맥 남부와 소백산맥 북부 일대에 발달한 산지 하천으로, 행정구역 상으로 경상북도와 충청북도 북부에 해당하는 지역이다. 본 연구에서 야외 지형 조사와 퇴적층의 연대 측정

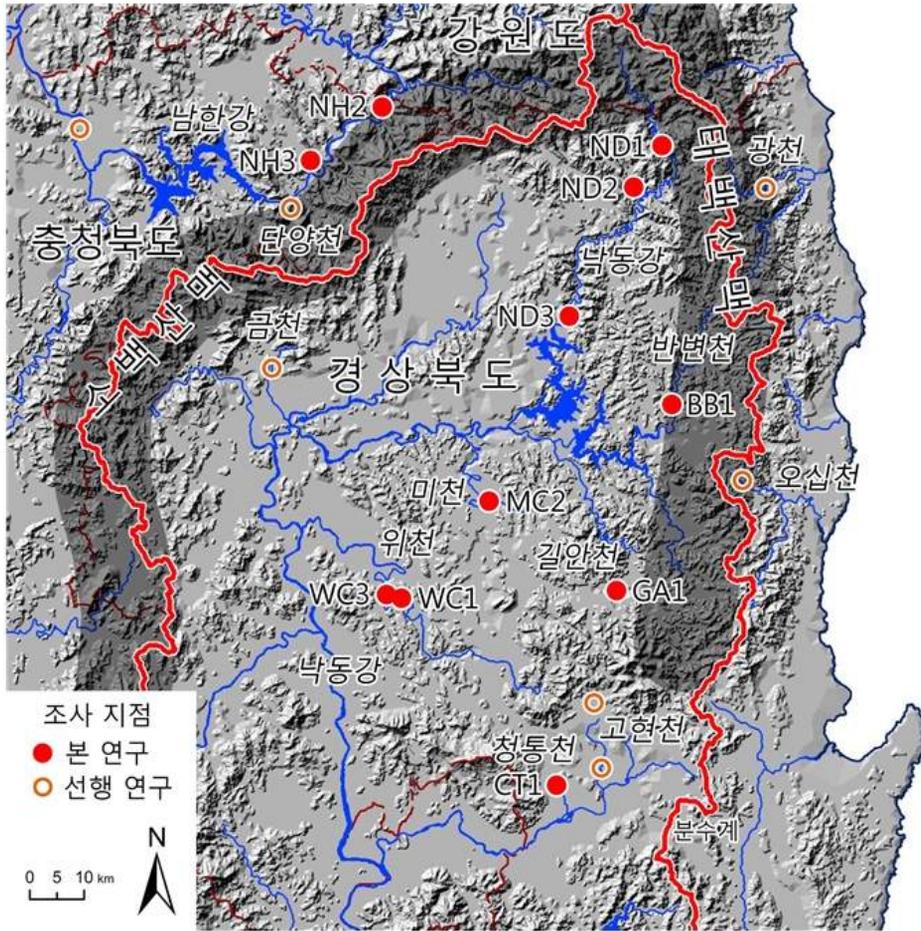


그림 1. 연구 대상 하천과 조사 지점

결과를 반영하여, 연구 대상이 된 하천과 하안단구는 총 7개 하천의 11개 지점으로, 한강 유역에서 남한강 본류의 2개 지점, 낙동강 유역에서 낙동강 본류의 상류부, 반변천, 미천, 길안천, 위천, 금계천, 청통천의 총 9개 지점이다(그림 1, 표 1). 그리고 여기에 선행 연구에서 제시된 6개 하천의 7개 지점에 대한 연구 결과를 추가하여, 최종적으로 총 12개 하천 18개 지점의 하안단구를 대상으로 태백산맥 남부 일대의 하각률 분포를 분석하였다.

하안단구 지형 분석을 위하여, 먼저 1:50,000 지질도, 1:5,000 및 1:25,000 지형도와 국내 포털사이트에서 제공하는 지도와 도로 주변 사진 등을 이용하여, 연구 대상 지역에 위치한 하천 유역의 지질 및 지형 개관을 파악하고, 하곡에 발달한 하안단구 지형을 동정하여 분포를 확인하였다. 그리고 태백산맥 남부의 산지 하천 중에서도

절대 연대 자료가 존재하지 않는 주요 하천을 대상으로 수회에 걸친 야외 조사를 통해 16개 지점의 하안단구에서 OSL 연대 측정을 위한 시료 수집이 가능한 퇴적층을 확인하였고, 절대 연대 측정 및 각종 퇴적물 분석을 위한 시료 수집과 정밀한 고도 측정을 실시하였다. OSL 연대 측정 시료는 하안단구 퇴적층 내에서도 모래층을 다량 포함한 층에서 금속관을 이용해 파이핑(piping)을 실시하여 시료를 수집하였다.

해발고도와 위경도 좌표는 수직 오차 5cm이하를 가진 D-GPS인 Sokkia사의 GRX-1을 이용하여 OSL 시료 수집 지점과 인접 하천의 하상에서 각각 측정하였고, 이 값을 토대로 해당 지점과 하상 사이의 고도차인 하상비고(a.a.r., altitude above riverbed)를 계산하였다. 그리고 홍수위 비고 측정을 위하여 시료가 수집된 하안단구면

표 1. 본 연구 11개 지점과 선행 연구 7개 지점 하안단구의 위치, 비교, 연대와 하각률

구분	하천	지점/출처	위치		비고(m)		OSL 연대 (ka)	하각률 (m/ka)
			위도	경도	시료지점 -하상	단구면 -홍수위		
본 연구	남한강 (본류)	NH2	37°05'04"N	128°29'56"E	38.1	29.4	99	0.297
		NH3	36°59'53"N	128°20'57"E	26.0	25.0	114	0.219
	낙동강 (본류)	ND1	37°00'44"N	129°04'31"E	33.0	31.0	91	0.341
		ND2	36°56'41"N	129°00'54"E	11.9	11.9	32	0.372
		ND3	36°44'02"N	128°52'37"E	19.0	18.4	94	0.196
	반변천	BB1	36°35'05"N	129°05'02"E	11.8	11.9	47	0.253
	미천	MC2	36°25'02"N	128°42'19"E	18.4	16.8	157	0.107
	길안천	GA1	36°16'46"N	128°57'46"E	8.9	11.4	39	0.292
		위천	WC1	36°16'24"N	128°31'21"E	11.0	5.5	96
	WC3		36°16'47"N	128°29'32"E	8.5	3.9	89	0.044
청통천	CT1	35°57'23"N	128°49'55"E	12.7	13.0	104	0.125	
선행 연구	남한강	이광률(2012)	37°03'18"N	127°52'21"E	9.0	0.5	10	0.050
	단양천	조영동 등 (2017)	36°55'09"N	128°18'24"E	8.5	5.0	18	0.278
			36°39'19"N	128°15'49"E	7.9	12.5	70	0.179
	광천	이광률(2014)	36°56'32"N	129°16'39"E	38.0	36.0	92	0.391
	영덕 오십천	이광률(2014)	36°27'21"N	129°13'30"E	8.0	8.0	49	0.163
	고현천	조영동 · 이광률 (2009)	36°05'40"N	128°54'41"E	7.0	7.5	42	0.179
35°59'13"N			128°55'27"E	18.0	15.0	113	0.133	

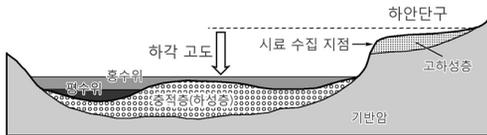


그림 2. 하안단구가 발달한 하곡의 횡단면에서 하각 고도의 측정

에서 고도가 가장 높은 지점에 대한 해발고도도 측정하였는데, 접근이 가능한 지점은 야외조사 시에 D-GPS를 이용하여 실측하였으며, 접근이 불가능한 지점은 1:5,000 수치지형도 상에서 해발고도를 추정하였다.

수집된 16개의 시료는 한국기초과학지원연구원에 OSL 연대 측정을 의뢰하여 절대 연대 결과를 얻었고, 이 값을 토대로 하각률을 계산하였다. 16개 시료 중 하각률 산출이 가능한 유의미한 연대 결과가 얻어진 것은 7개 하천의 11개 지점으로서, 본 논문에서는 이들 지점의 하각률 분석 결과만을 제시하였다. 나머지 5개 지점 중 4개 지점은 퇴적층의 형성시기가 홀로세로서 하안단구면 형성 이후의 시간이 너무 짧아서 하각률 계산이 불가능하며,

1개 지점은 단구면의 하상비고에 비해 퇴적층의 연대가 매우 짧게 측정되어 하안단구 퇴적물로서 신뢰도가 매우 낮아 하각률 계산을 부적합하다고 판단하였다.

하안단구를 이루는 퇴적층은 과거 홍수위 시에 퇴적된 것이기 때문에, 하천 하각률은 아래의 식과 같이 절대 연대 측정 시료가 수집된 하안단구면의 최고 고도와 현 하천 홍수위 간의 고도 차이인 홍수위 비고(a.a.f., altitude above flood level)에 대한 절대 연대로서 계산하였다(그림 2). 현 하천의 홍수위 정보는 각 하천에서 실시된 하천정비계획 보고서를 토대로 각 지점의 100년 빈도 계획 홍수위 고도를 확인하였다.

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

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

하안단구 퇴적층의 절대 연대가 제시된 6개 하천의 7개 지점에 대한 선행 연구 자료는 본 연구 방법에 맞추어 홍수위 비고로 재계산하였다. 이를 토대로, 본 연구에서

는 태백산맥 남부의 총 12개 하천 구간의 18개 지점에서 OSL 절대 연대와 D-GPS를 이용한 고도 측량을 통해 하천 하각률이 계산되었다. 그리고 이 값을 토대로 하각률 분포도를 제작하여, 태백산맥 남부의 산지 하천에 대한 하각률 분포 특성을 검토하였다.

II. 지점별 하안단구 지형 특성과 형성시기

1. 남한강 본류

연구 대상 지역 중에서도 한강 수계에 해당하는 충북 단양군의 남한강 본류 구간에서는 NH2와 NH3의 2개 지점 하안단구 퇴적층에서 고도 및 연대 측정이 실시되었다. NH2는 충북 단양군 영춘면 상리에서 남한강의 곡류

부의 안쪽 하안에 발달한 하안단구 2면으로서, 도로 건설로 인한 절개지에서 발견된 사력층이다(그림 3). NH2 노두 일대의 지질은 고생대 전기의 석회암이며, 퇴적층에서는 적갈색의 조립 모래를 기질(matrix)로 하여 아원~완원의 왕자갈(cobble)~거력(boulder)이 3m 이상의 두께로 나타난다. 이러한 하성 퇴적층 내에서도 수십 cm 내외의 모래층이 발달한 지점에서 OSL 연대 측정 시료를 수집하여 분석을 의뢰한 결과, OSL 연대는 $99 \pm 8ka$ (등가선량: $286 \pm 21Gy$)로 측정되었다. 그리고 지형 측량 결과, NH2 시료 수집 지점의 해발고도는 192.8m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 38.1m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 199.8m, 하안단구면의 홍수위 비고, 즉 하각 고도는 29.4m로 측정되어, NH2의 하각률은 $0.297m/ka$ 로 계산되었다(표 1).

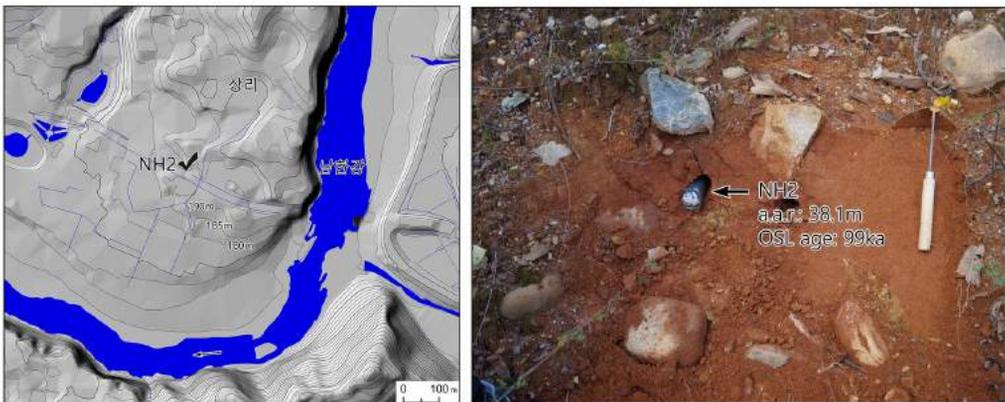


그림 3. 남한강 본류 NH2 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진



그림 4. 남한강 본류 NH3 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

NH2 지점에서 남한강을 따라 약 25km 하류 쪽에 위치한 NH3 지점은 충북 단양군 단양읍 도담리의 남한강 곡류부 안쪽 하안에 발달한 하안단구 2면이다(그림 4). NH3 지점 일대의 지질은 고생대 전기 대석회암층군의 백운암으로 이루어져 있다. 곡류부 안쪽의 하안에서는 원력을 다량 포함한 계단상의 농경지가 발달하며, 농경지와 소로의 경계를 따라 형성된 도랑의 자연 절개지에서는 황갈색의 실트를 기질로 하는 원-완원의 왕자갈~거력으로 이루어진 하성 퇴적층이 수십 cm 이상의 두께로 나타난다. 자갈층 상부의 실트층에서 수집한 NH3 시료의 OSL 연대는 $114 \pm 13 \text{ka}$ (등가선량: $347 \pm 37 \text{Gy}$)로 측정되었다. NH3 시료 수집 지점의 해발고도는 154.0m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 약 26.0m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 162.0m, 단구면의 홍수위 비교인 하각 고도는 약 25.0m로 측정되어, 하각률은 0.219m/ka로 계산되었다(표 1).

2. 낙동강 본류

남한강의 2개 지점을 제외한 나머지 9개 조사 지점은 모두 낙동강 수계에 해당하는 하천이다. 그중에서도 낙동강 본류의 하안단구는 3개 지점으로, 모두 낙동강 본류의 상류 구간에 위치한다. 3개 지점 중에서도 가장 상류에 위치한 ND1은 경북 봉화군 석포면 승부리의 도로 측면 절개지에서 발견한 4m 이상 두께의 하성 퇴적층 노두로, 주변의 지질은 선캄브리아기 화강암이다. 노두의 하부에는 모래를 기질로 한 아각~원의 잔자갈(pebble)~

왕자갈의 사력층이 3m 내외 두께로 나타나며, 상부 1m 내외에서는 실트가 혼합된 모래층이 나타난다(그림 5). 하부 사력층의 상부에 위치한 모래층에서 수집한 ND1 시료의 OSL 연대는 $91 \pm 5 \text{ka}$ (등가선량: $401 \pm 10 \text{Gy}$)로 측정되었다. ND1 시료 수집 지점의 해발고도는 약 455.0m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 약 32.0m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 460.0m, 단구면의 홍수위 비교인 하각 고도는 약 31.0m로 측정되어, 하각률은 0.341m/ka로 계산되었다(표 1).

낙동강 본류의 ND2 지점은 경북 봉화군 소천면 현동리에 위치한 낙동강의 곡류부 안쪽 하안에 발달한 하안단구의 말단부에 위치한다(그림 6). 주변의 지질은 선캄브리아기 화강편마암과 변성퇴적암이 혼재되어 있다. ND2는 소로 측면의 절개지에서 발견된 3m 이상 두께의 하성 퇴적층으로, 모래를 기질로 한 아각~원의 잔자갈~거력이 혼합된 자갈층을 이루고 있다. 자갈층 사이에 발달한 모래층에서 수집한 ND2 시료의 OSL 연대는 $32 \pm 4 \text{ka}$ (등가선량: $166 \pm 21 \text{Gy}$)로 측정되었다. ND2 시료 수집 지점의 해발고도는 303.0m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 11.9m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 307.0m, 단구면의 홍수위 비교인 하각 고도는 11.9m로 측정되어, 하각률은 0.372m/ka로 계산되었다(표 1).

ND3 지점은 안동호의 바로 상류부인 경북 안동시 도산면 원천리의 낙동강 하안에 위치한다. ND3는 원천리에서 낙동강 남쪽의 내살미 마을을 잇는 교량과 도로를 건설하는 과정에서 절개된 곡벽의 사면에서 드러난 하성 퇴적층으로, 주변의 지질은 중생대 백악기 낙동층군

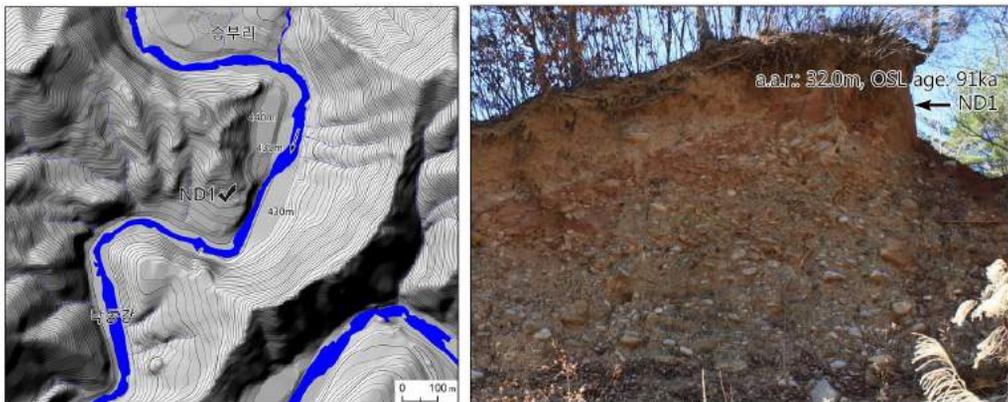


그림 5. 낙동강 본류 ND1 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진



그림 6. 낙동강 본류 ND2 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

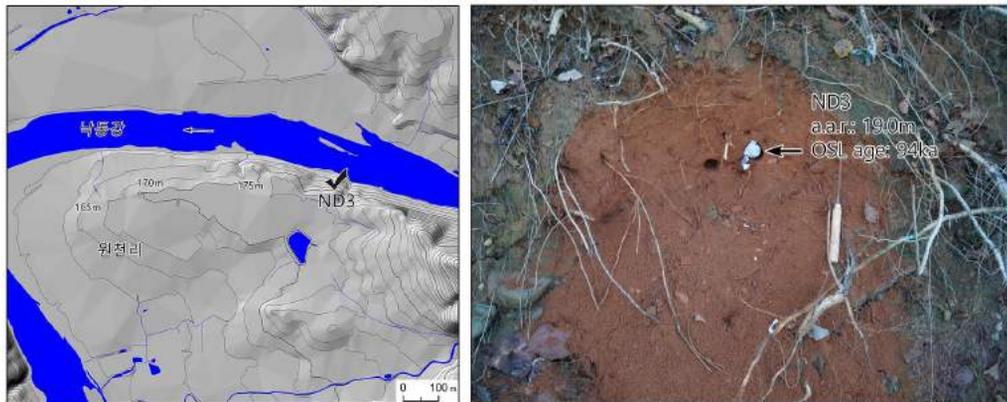


그림 7. 낙동강 본류 ND3 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

의 퇴적암이다(그림 7). ND3 노두에서는 적갈색의 모래를 기질로 한 아원~완원의 잔자갈~왕자갈로 이루어진 사력층이 기반암 상부에 약 2m 이상 나타난다. 기반암으로부터 약 1m 상부의 모래가 우세한 퇴적층에서 수집한 ND3 시료의 OSL 연대는 $94 \pm 9\text{ka}$ (등가선량: $335 \pm 29\text{Gy}$)로 측정되었다. ND3 시료 수집 지점의 해발고도는 170.8m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 19.0m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 180.5m, 단구면의 홍수위 비고인 하각 고도는 18.4m로 측정되어, 하각률은 0.196m/ka 로 계산되었다(표 1).

3. 반변천, 미천, 길안천

낙동강 상류부의 지류 하천에서는 반변천, 길안천, 미

천에서, 낙동강 중류부의 지류 하천에서는 위천과 금호강의 지류인 청통천에서 하안단구 노두를 확인하고 지형 및 연대 측정을 실시하였다. 낙동강 지류 중에서도 태백산맥에 가장 인접한 산지 하천인 반변천에서는 중류부에 해당하는 경북 영양군 입암면 삼산리의 농경지 가장자리 절개지에서 하안단구 퇴적층 노두 BB1을 발견하였다. 주변의 지질은 중생대 백악기 신라층군의 퇴적암이며, BB1 퇴적층은 모래를 기질로 한 아각~원의 잔자갈~왕자갈이 혼합된 1m 이상 두께의 자갈층을 이루고 있다(그림 8). 퇴적층 상부의 모래층에서 수집한 BB1 시료의 OSL 연대는 $47 \pm 7\text{ka}$ (등가선량: $133 \pm 20\text{Gy}$)로 측정되었다. BB1 시료 수집 지점의 해발고도는 187.0m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 11.8m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 192.0m, 단구면의 홍수위 비

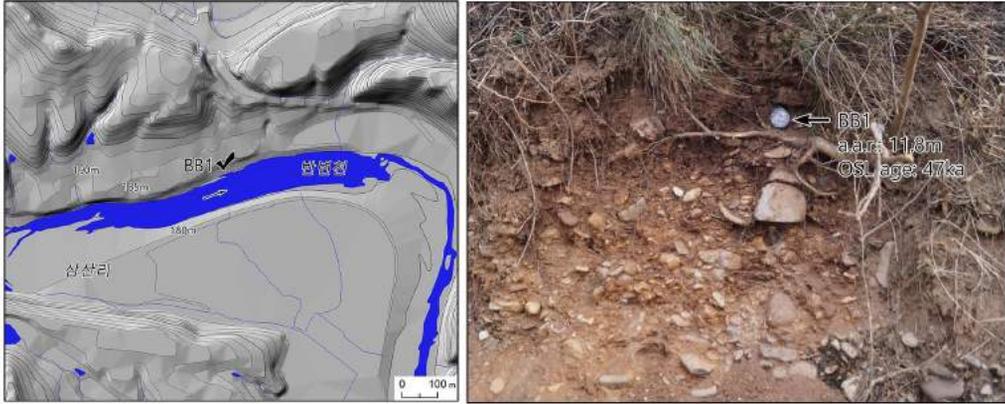


그림 8. 반변천 BB1 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진



그림 9. 미천 MC2 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

고인 하각 고도는 11.9m로 측정되어, 하각률은 0.253m/ka로 계산되었다(표 1).

태백산맥으로부터 20~30km 떨어진 거리에 위치한 미천에서는 경북 의성군 옥산면 입암리에서 퇴적층 노두 MC2를 확인하였다. 이 일대의 기반암은 중생대 백악기 하양층군의 퇴적암이며, 미천의 좌안에는 최대 폭이 600~700m에 달하는 하안단구면이 넓게 발달해 있다(그림 9). 하안단구면의 내부에 위치한 MC2 지점은 농경지의 확장 과정에서 만들어진 절개지로서, 조립 모래와 각-아원의 왕모래-잔자갈이 혼합된 3m 내외 두께의 풍화가 상당히 이루어진 사력층을 이루고 있다. 사력층 내부에서 수집한 MC2 시료의 OSL 연대는 $157 \pm 15 \text{ka}$ (등가선량: $466 \pm 44 \text{Gy}$)로 측정되었다. MC2 시료 수집 지점의 해발고도는 154.8m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 18.4m

이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 157.0m, 단구면의 홍수위 비고인 하각 고도는 16.8m로 측정되어, 하각률은 0.107m/ka로 계산되었다(표 1).

태백산맥의 최남단인 보현산(1,126m)의 북사면에서 발원하여 북북서류하다가 반변천에 유입하는 길안천에서는 상류부인 경북 청송군 안덕면 복리에서 하안단구 퇴적층 노두 GA1을 확인하였다. 이 일대의 기반암은 중생대 백악기 하양층군의 퇴적암이며, 길안천의 우안을 따라서는 단구면이 대부분 기반암으로 이루어진 침식 단구가 넓은 면적으로 발달해 있다(그림 10). 소로 측면의 절개지에서 확인한 GA1은 기반암 상부에 모래를 기질로 한 아각-아원의 잔자갈-왕자갈로 이루어진 1m 내외 두께의 하성 사력층을 이루고 있다. 사력층 상부의 모래가 조밀한 지점에서 수집한 GA1 시료의 OSL 연대는

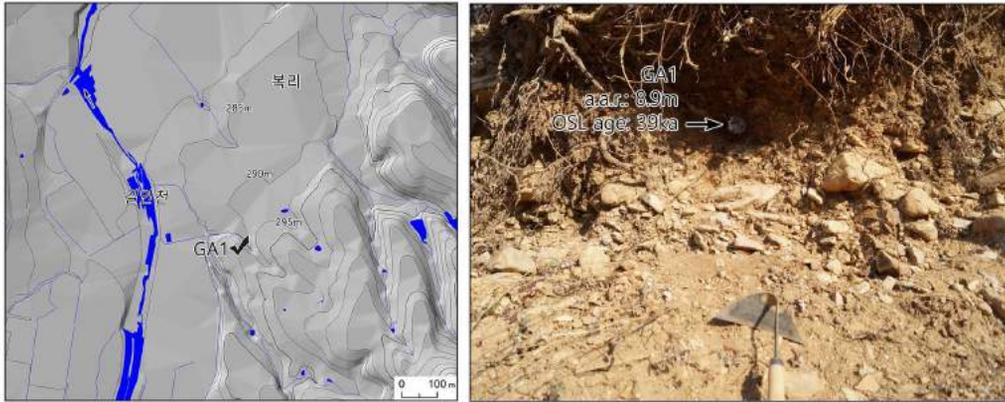


그림 10. 길안천 GA1 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진



그림 11. 위천 WC1 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

39±4ka(등가선량: 177±20Gy)로 측정되었다. GA1 시료 수집 지점의 해발고도는 287.7m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 8.9m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 292.0m, 단구면의 홍수위 비고인 하각 고도는 11.4m로 측정되어, 하각률은 0.292m/ka로 계산되었다(표 1).

4. 위천, 청통천

위천은 태백산맥 최남단 부근에서 북서류하여 흘러 상주에서 낙동강에 유입하며, 유역분지의 대부분은 태백산맥으로부터 수십 km 떨어져 있어 소백산맥과의 중간 지점에 위치한다고 볼 수 있다. 위천에서는 중류부 2개 지점에 발달한 하안단구에서 퇴적층 노두를 발견하여 지형 및 연대 측정을 실시하였다. 2개 지점 중 더 상

류 쪽에 위치한 WC1은 경북 군위군 소보면 봉소리의 하안을 따라 건설된 도로 측면의 절개지에서 확인된 퇴적층 노두이며, 주변의 지질은 중생대 백악기 신동층군 퇴적암이다. WC1은 최하단에 드러난 사력층의 상부에 모래층과 실트층이 3m 이상 두께를 이루며 반복적으로 나타난다(그림 11). 하부의 모래층에서 수집한 WC1 시료의 OSL 연대는 96±6ka(등가선량: 364±20Gy)로 측정되었다. WC1 시료 수집 지점의 해발고도는 77.0m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 11.0m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 78.5m, 단구면의 홍수위 비고인 하각 고도는 5.5m로 측정되어, 하각률은 0.057m/ka로 계산되었다(표 1).

위천 중류부에서도 WC1 지점보다 약간 더 하류 쪽에 위치한 WC3 지점은 경북 군위군 소보면 내의리의 곡류



그림 12. 위천 WC3 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

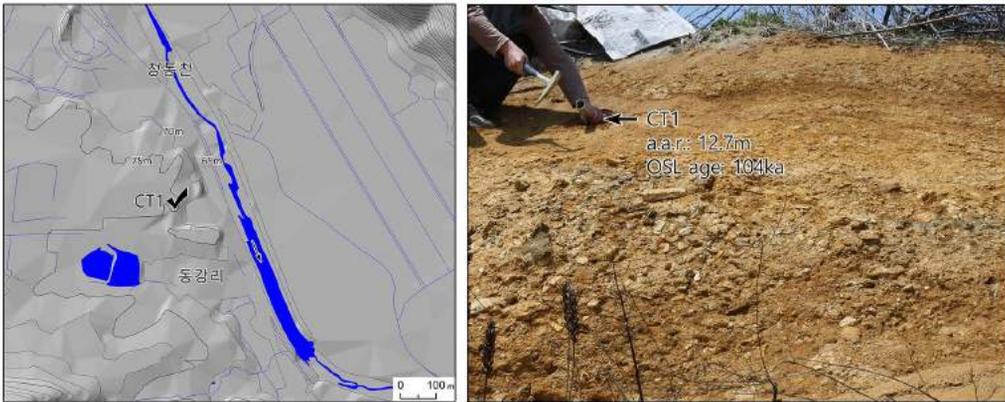


그림 13. 청통천 CT1 일대의 지형과 시료 수집 지점의 사진

부 안쪽에 발달한 하안단구에 위치하며, 이 일대의 지질은 중생대 백악기 신동층군의 퇴적암이다(그림 12). WC3 노두의 퇴적층은 단을 이룬 농경지의 가장자리에서 확인된 0.5m 이상 두께의 모래층으로서, OSL 연대는 $89 \pm 7\text{ka}$ (등가선량: $311 \pm 23\text{Gy}$)로 측정되었다. WC3의 해발고도는 68.5m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 8.5m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 70.0m, 단구면의 홍수위 비고인 하각 고도는 3.9m로 측정되어, 하각률은 0.044m/ka 로 계산되었다(표 1).

본 연구의 조사 지점 중 가장 남쪽에 위치한 하천인 청통천은 팔공산의 동사면에 발원하여 남류하여 흐르다가 낙동강의 지류인 금호강에 유입하는 하천이다. 청통

천의 하안에서도 경북 경산시 와촌면 박사리와 동강리 일대에는 대규모의 하안단구가 발달해 있는데, 청통천에 인접한 동강리의 신축 건물 배후 절개지에서 두께 약 5m, 폭 20m 이상의 대규모 하성 사력층 노두가 확인되었다(그림 13). 이 일대의 지질은 중생대 백악기 신라층군 퇴적암이다. 노두의 상부에 약 2m 내외의 두께로 발달한 모래 및 점토의 혼합층에서 수집한 CT1 시료의 OSL 연대는 $104 \pm 7\text{ka}$ (등가선량: $235 \pm 14\text{Gy}$)로 측정되었다. CT1의 해발고도는 74.8m, 시료 수집 지점의 하상 비고는 12.7m이며, 해당 하안단구면의 최고 해발고도는 약 77.8m, 단구면의 홍수위 비고인 하각 고도는 13.0m로 측정되어, 하각률은 0.125m/ka 로 계산되었다(표 1).

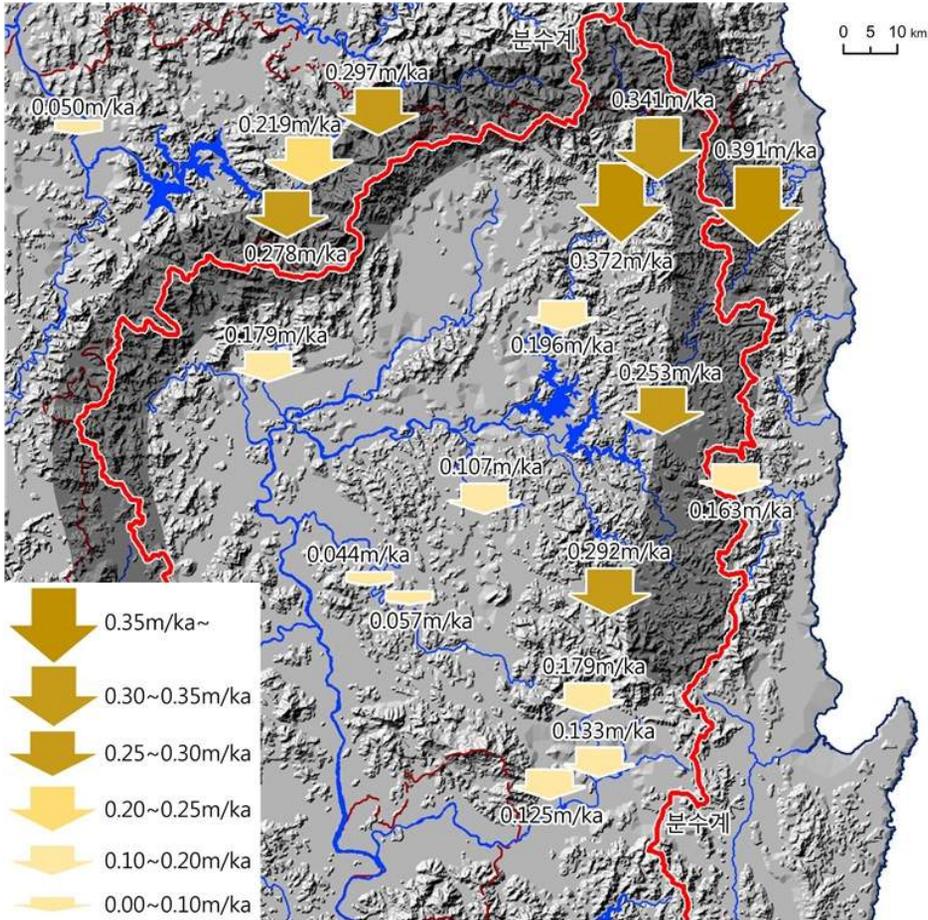


그림 14. 연구 대상 지역의 하각률 분포

III. 하각률 분포

본 연구에서 조사된 7개 하천 11개 지점의 하각률 자료에 선행 연구에서 제시된 6개 하천의 7개 지점에 대한 결과를 추가하여, 총 12개 하천 18개 지점의 하안단구를 대상으로 태백산맥 남부 일대의 하각률 분포도를 작성하였다(그림 14). 태백산맥 남부 일대의 총 18개 지점 중 하각률이 가장 높은 곳은 경북 울진군의 광천 상류로서 0.391m/ka로 계산되었으며, 하각률이 가장 낮은 곳은 경북 군위군의 위천 중류로 0.044m/ka이다.

0.25m/ka 이상의 상대적으로 높은 하각률을 보이는 지점은 모두 7곳으로, 경북 봉화군, 울진군, 영양군, 청송군 일대에 해당하는 태백산맥 남부의 중앙 및 서사면 지역과 충북 단양군 일대의 소백산맥 서사면 지역에서

나타난다. 기후 및 수문 환경의 지역적 차이가 크지 않은 우리나라에서 하각률의 공간적 분포는 해당 지역의 지반 용기 및 기반암 특성, 유역의 지형 및 하도 특성의 차이에 의한 영향이 중요한 것으로 알려져 있다(이광률, 2018a; 2018b). 이들 고-하각률 지점의 기반암은 편마암, 석회암, 퇴적암, 화강암 등 다양하며, 대하천 분류 3개 지점, 대하천의 지류 3개 지점, 동해안 하천 1개 지점으로서, 하천의 유역과 하도의 규모도 다양하다. 따라서 이러한 하각률 분포에 영향을 미친 가장 중요한 요인은 기반암이나 하천의 특성보다는 지반 용기에 의한 영향으로 추정된다. 그리고 실제 고-하각률 지역이 한반도 남부의 용기 축으로 추정되는 태백산맥과 소백산맥을 따라 분포한다는 점에서 하천의 하각 작용에 있어 지반 용기가 가장 중요한 영향을 미치는 요인임을 증명하고

있다. 또한 고-하각률 7개 지점 중 광천 상류를 제외한 나머지 6개 지점은 모두 태백산맥과 소백산맥의 서사면에 위치한다. 따라서 태백산맥과 소백산맥에서도 상대적으로 서사면 쪽에서 지반 용기가 더 활발하게 발생하는 비대칭적 용기의 결과로 인해, 하천의 하각 작용도 두 산맥의 동사면보다 서사면에서 더 빠르게 진행되었던 것으로 추정된다.

0.15m/ka 미만의 상대적으로 낮은 하각률이 나타나는 지점은 미천, 위천, 고현천, 청통천, 남한강 중류의 5곳에서 나타난다. 이들 5개 지점은 대하천인 남한강 중류부터 소하천인 청통천까지 하천의 규모와 하곡의 지형에서 차이가 크다. 그렇지만, 이들 지역은 모두 태백산맥과 소백산맥의 중앙부로부터 약 20km 이상 떨어진 거리에 위치하며, 미천(해발고도 154.8m)을 제외하면 해발고도가 100m 이내로 매우 낮은 편이라는 공통점을 가진다. 특히, 하각률이 0.05m/ka 내외로 매우 낮은 위천과 남한강 중류 지점은 태백산맥으로부터 최소 30km 이상, 소백산맥으로부터는 최소 20km 이상의 거리에 위치하고 있다. 따라서 태백산맥과 소백산맥으로부터 거리가 멀어질수록 하천의 하각률이 낮게 나타난다는 점으로 판단할 때, 태백산맥과 소백산맥은 이 일대 하천의 하각 작용에 큰 영향을 미친 한반도 남부의 용기축출 가능성이 높다. 또한 태백산맥이 소백산맥에 비해 거리 당 하각률 감소의 정도가 더 작다는 점에서, 태백산맥이 소백산맥에 비해 더 활발한 지반 용기를 경험하였을 가능성이 높다. 그리고 이러한 결과는 태백산맥 북부 지역의 하각률에 대한 선행 연구(이광률, 2018b)와도 일치한다.

IV. 결론

본 연구는 경상북도와 충청북도에 해당하는 태백산맥 남부에 발달한 산지 하천의 하안단구에 대한 지형 분석 및 연대 측정 결과를 통해 하각률을 산출하고, 하각률의 공간적 분포 특성을 토대로 하천의 하각과 태백산맥 및 소백산맥의 지반 용기를 검토하였다. 하각률 분석은 본 연구에서 실시된 7개 하천의 11개 지점에 선행 연구에서 제시된 6개 하천의 7개 지점의 결과를 추가하여, 총 12개 하천 18개 지점의 하안단구를 대상으로 이루어졌다.

분석 결과, 태백산맥 남부 일대의 총 18개 지점 중 하각률이 가장 높은 곳은 경북 울진군의 광천 상류로서

0.391m/ka로 계산되었으며, 하각률이 가장 낮은 곳은 경북 군위군의 위천 중류로 0.044m/ka로 산출되었다. 하각률이 0.25m/ka 이상으로 높게 나타나는 곳은 경북 봉화군, 울진군, 영양군, 청송군 일대에 해당하는 태백산맥 남부의 중앙 및 서사면 지역과 충북 단양군 일대의 소백산맥 서사면 지역에 해당하는 7개 지점이다. 따라서 태백산맥과 소백산맥은 이 일대 하천의 하각 작용에 가장 큰 영향을 미친 한반도 남부의 용기축출 가능성이 높은 것으로 판단된다. 또한 높은 하각률을 보이는 지점이 대부분 태백산맥과 소백산맥의 서사면에 위치한다는 점에서, 태백산맥과 소백산맥 모두 용기축출 중심으로 서사면 쪽에서 상대적으로 지반 용기가 더 활발하게 발생하는 비대칭적 용기를 경험하였을 가능성이 높은 것으로 추정된다. 그리고 0.05m/ka 내외로 매우 낮은 하각률이 나타나는 지역은 태백산맥으로부터 최소 30km 이상, 소백산맥으로부터는 최소 20km 이상의 거리에 위치하고 있다. 따라서 소백산맥에 비해 태백산맥에서 보다 활발한 지반 용기가 발생하였을 가능성이 높다.

본 연구는 태백산맥 남부 지역 일대에 발달한 하안단구를 대상으로, 신생대 제4기 플라이스토세 말 동안에 발생한 하천의 하각률을 계산하고, 태백산맥과 소백산맥의 지반 용기를 추정하였다. 본 논문에서 보다 많은 하각률 자료를 제시하지 못한 아쉬움은 있지만, 본 연구 결과는 신생대 제4기 동안 한반도의 하천 지형 발달과 지반 운동 양식을 밝히기 위한 양질의 자료가 될 것으로 기대한다.

참고문헌

김종연·홍성찬 2014, “양구 수입천 하류부의 지형 발달-암석 표면 K-장석 IRSL 매몰연대측정 결과를 기반으로” 한국지형학회지, 21(2), 37-57.
 이광률 2009, “오대천의 특성과 하안단구의 형성과정” 대한지리학회지, 44(3), 224-239.
 이광률 2012, “우리나라 자연 구하도의 유형별 형성시기와 형성과정” 한국지형학회지, 19(2), 1-15.
 이광률 2014, “태백산맥 남부 동해안 하천 유역의 하안단구 지형 형성” 대한지리학회지, 49(1), 1-17.
 이광률 2018a, “하안단구 최고위면에 기초한 태백 산지 일대의 하각과 용기의 공간 분포 특성” 한국지형학회지,

- 25(2), 31-42.
- 이광률, 2018b, “태백 산지 북부의 하천 하각률 분포” 한국지형학회지, 25(4), 1-19.
- 조영동·박충선·이광률, 2017, “소백산맥 북부 영동영서 하천의 하각과 지형 발달” 한국지형학회지, 24(2), 27-40.
- Baotian, P., Xiaofei, H., Hongshan, G., Zhenbo, H., Bo, C., Haopeng, G., and Qingyang, L., 2013, Late Quaternary river incision rates and rock uplift pattern of the eastern Qilian Shan Mountain, China, *Geomorphology*, 184, 84-97.
- Bender, A.M., Amos, C.B., Bierman, P., Rood, D.H., Staisch, L., Kelsey, H., and Sherrod, B., 2016, Differential uplift and incision of the Yakima River terraces, central Washington State, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(1), 365-384.
- Bender, A.M., Lease, R.O., Haeussler, P.J., Rittenour, T., Corbett, L.B., Bierman, P.R., and Caffee, M.W., 2019, Pace and process of active folding and fluvial incision across the Kantishna Hills anticline, Central Alaska, *Geophysical Research Letters*, 46(6), 3235-3244.
- Bull, W.L. and Knuepfer, P.L.K., 1987, Adjustments by the Charwell River, New Zealand, to uplift and climatic changes, *Geomorphology*, 1(1), 15-32.
- Castillo, M., Munoz-Salinas, E., and Ferrari, L., 2014, Response of a landscape to tectonics using channel steepness indices (ksn) 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, Group 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(7), 994-1010.
- Cyr, A.J. and Granger, D.E., 2008, Dynamic equilibrium among erosion, river incision, and coastal uplift in the northern and central Apennines, Italy, *Geology*, 36(2), 103-106.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Voinchet, P., Manel, C., Braucher, R., Tissoux, H., Bahain, J.-J., Perrenoud, C., Saos, T., and ASTER Team, 2018, Terrestrial ^{10}Be and electron spin resonance dating of fluvial terraces quantifies quaternary tectonic uplift gradients in the eastern Pyrenees, *Quaternary Science Reviews*, 193, 188-211.
- Dethier, D.P., 2001, Pleistocene incision rates in the western United States calibrated using Lava Creek B tephra, *Geology*, 29(9), 783-786.
- Faulkner, D.J., Larson, P.H., Jol, H.M., Running, G.L., Loope, H.M., and Goble, R.J., 2016, Autogenic incision and terrace formation resulting from abrupt late-glacial base-level fall, lower Chippewa River, Wisconsin, USA, *Geomorphology*, 266, 75-95.
- Ferrier, K.L., Huppert, K.L., and Perron, J.T., 2013, Climatic control of bedrock river incision, *Nature*, 496(7444), 206-211.
- Finnegan, N.J., Schumer, R., and Finnegan, S., 2014, A signature of transience in bedrock river incision rates over timescales of 104-107 years, *Nature*, 505(7483), 391-396.
- Fox, M., Leith, K., Bodin, T., Balco, G., and Shuster, D.L., 2015, Rate of fluvial incision in the Central Alps constrained through joint inversion of detrital ^{10}Be and thermochronometric data, *Earth and Planetary Science Letters*, 411, 27-36.
- Huang, M.W., Pan, Y.W., and Liao, J.J., 2013, A case of rapid rock riverbed incision in a coseismic uplift reach and its implications, *Geomorphology*, 184, 98-110.
- Lee, S.Y., Seong, Y.B., Shin, Y.K., Choi, K.H., Kang, H.C., and Choi, J.H., 2011, Cosmogenic ^{10}Be and OSL dating of fluvial strath terraces along the Osipcheon River, Korea: Tectonic implications, *Geoscience Journal*, 15(4), 359-378.
- Lewis, C.J., Sancho, C., McDonald, E.V., Peña-Monné, J.L., Pueyo, E.L., Rhodes, E., Calle, M., and Soto, R., 2017, Post-tectonic landscape evolution in NE Iberia using staircase terraces: Combined effects of uplift and climate, *Geomorphology*, 292, 85-103.
- Oskin, M.E., Burbank, D.W., Phillips, F.M., Marrero, S.M., Bookhagen, B., and Selander, J.A., 2014,

- Relationship of channel steepness to channel incision rate from a tilted and progressively exposed unconformity surface, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(2), 366-384.
- Ritter, D.F., Kochel, R.C., and Miller, J.R., 2011, *Process Geomorphology*, Long Grove: Waveland Press.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Braucher, R., Novothny, A., Csillag, G., Fodor, L., Molnar, G., Madarasz, B., and ASTER Team, 2016, Tectonic and climatic control on terrace formation: Coupling in situ produced ¹⁰Be depth profiles and luminescence approach, Danube River, Hungary, Central Europe, *Quaternary Science Reviews*, 131, 127-147.
- Saillard, M., Petit, C., Rolland, Y., Braucher, R., Bourles, D.L., Zerathe, S., Revel, M., and Jourdon, A., 2014, Late Quaternary incision rates in the Vesubie catchment area (Southern French Alps) from in situ-produced ³⁶Cl cosmogenic nuclide dating: Tectonic and climatic implications, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5), 1121-1135.
- Sasowsky, I.D., White, W.B., and Schmidt, V.A., 1995, Determination of stream-incision rate in the Appalachian plateaus by using caved sediment magnetostratigraphy, *Geology*, 23(5), 415-418.
- Schaller, M., Ehlers, T.A., Stor, T., Torrent, J., Lobato, L., Christl, M., and Vockenhuber, C., 2016, Timing of European fluvial terrace formation and incision rates constrained by cosmogenic nuclide dating, *Earth and Planetary Science Letters*, 451, 221-231.
- Štor, T., Schaller, M., Merchel, S., Martínek, K., Rittenour, T., Rugel, G., and Scharf, A., 2019, Quaternary evolution of the Ploučnice River system (Bohemian Massif) based on fluvial deposits dated with optically stimulated luminescence and in situ produced cosmogenic nuclides, *Geomorphology*, 329, 152-169.
- Viveen, W., Braucher, R., Bourles, D., School, J.M., Veldkamp, A., van Balen, R.T., Wallinga, J., Fernandez-Mosquera, D., Vidal-Romani, J.R., and Sanjurjo-Sanchez, J., 2012, A 0.65 Ma chronology and incision rate assessment of the NW Iberian Mino River terraces based on ¹⁰Be and luminescence dating, *Global and Planetary Change*, 94-95, 82-100.
- Zhang, J.-Y., Liu-Zeng, J., Scherler, D., Yin, A., Wang, W., Tang, M.-Y., and Li, Z.-F., 2018, Spatiotemporal variation of late Quaternary river incision rates in southeast Tibet, constrained by dating fluvial terraces, *Lithosphere*, 10(5), 662-676.
- 교신 : 이광률, 41566, 대구광역시 북구 대학로 80, 경북대학교 사범대학 지리교육과(이메일: georiver@knu.ac.kr)
- Correspondence : Gwang-Ryul Lee, 41566, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, Korea, Department of Geography Education, College of Education, Kyungpook National University (Email: georiver@knu.ac.kr)
- 투 고 일: 2019년 6월 17일
 심사완료일: 2019년 7월 3일
 투고확정일: 2019년 7월 5일