

# 남한강 하류의 하안단구 형성과정과 제4기 말기의 하천 발달

이광률

경북대학교 사범대학 지리교육과

## Process of fluvial terraces and evolution of stream during the late quaternary in the downstream of the Namhangang river

Gwang-Ryul Lee

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

### 요 약

본 연구는 남한강 하류를 대상으로 하안단구의 지형 분포와 형성 시기 및 과정을 분석하여, 제4기 말 남한강 하류의 하천 발달 과정을 추정하였다. 남한강 하류의 상류부는 한반도 중부의 융기축에 인접하여 제4기 말 동안 지반 융기의 영향을 주로 받아 하천의 하각 작용이 꾸준히 발생하였다. 이에 따라, 상류부에서는 MIS 5 또는 4에 형성된 하안단구 T2면과 MIS 3에 재동된 퇴적층인 하안단구 T2-r면이 높은 하상 비고를 이루며 하안에 연속적으로 분포한다. 반면, 남한강 하류의 하류부는 해발고도가 낮고 해안에 인접하여 해수면이 하강하는 MIS 5에서 4, MIS 3에서 2까지의 기간 동안 하곡에서 하천의 매적 작용이 발생하였다. 이로 인해, 하류부에는 하안단구 T2면이 범람원 하부에 매몰된 것으로 추정된다.

**주요어:** 하안단구, 하각, 곡 매적, 해수면 변화, 융기

**ABSTRACT:** This study estimated the stream evolution process during the Late Quaternary in the downstream of the Namhangang River by analyzing the geomorphological distribution, formation age and process of the fluvial terraces. Since the upper part of the downstream of the Namhangang River was mainly affected by ground uplifting adjacent to uplift axis of the central Korean Peninsula, stream incision has steadily occurred in the Late Quaternary. Therefore, fluvial terrace T2 formed in MIS 5 or 4 and fluvial terrace T2-r formed by reworking of deposits in MIS 3, have a high altitude above riverbed and are continuously distributed in the upper part. On the other hand, since the lower part of the downstream of the Namhangang River has a low altitude above sea level and is adjacent to coast, stream aggradation occurred in river valley during the periods of form MIS 5 to 4 and form MIS 3 to 2, when sea level had fallen. For this reason, it is estimated that the fluvial terrace T2 is buried under floodplain in the lower part.

**Key words:** fluvial terrace, incision, valley fill, sea level change, uplift

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 목적

하안단구(fluvial terrace)는 현재보다 고도가 높은 곳을 흘렀던 고하천(paleo-stream)에 의해 형성되었던 하도(channel)나 범람원(flood plain)이 하천의 하각(incision) 작용으로 인해 현 하천보다 높은 고도

에 남겨지게 된 층적 지형이다(Leopold, 2000; Ritter *et al.*, 2011; Lee, 2021). 따라서 하안단구 연구는 해당 지역에서 신생대 제4기 동안에 걸쳐 발생한 하천의 침식 및 퇴적 작용에 의한 하도의 변화 과정을 파악할 수 있으며, 해당 하천 유역의 지반 융기 및 지질 구조, 강수량 및 해수면 변화 특성과 지형 형성 작용 사이의 관계를 파악하는 중요한 단서가 된다

<sup>†</sup>Corresponding author: +82-53-950-5859, E-mail: georiver@knu.ac.kr

(Lee, 2014).

낮아진 침식기준면에 대응하여 하천이 지표를 잡고 깊게 아래로 파는 하각은 하안단구의 형성을 위한 가장 필수적인 작용이다. 하천의 하각 작용은 암석의 풍화 침식 저항력, 지반 용기 및 단층 운동 등의 지구조 작용, 곡류 절단이나 하천 쟁탈과 같은 지형 변위, 기후 변화에 따른 하천의 유량 증감, 하천 유수의 수력학적 변화 등에 의해 영향을 받는다(Schumm, 1999; Saillard *et al.*, 2014). 따라서 하천의 하각과 하안단구 분석을 통해, 신생대 제4기 말에 해당 지역에서 발생한 기후, 암석, 지구조적 작용과 하도와 하천 유수의 시간적 변화를 이해할 수 있다(Finnegan *et al.*, 2014; Saillard *et al.*, 2014). 특히, 우리나라와 같이 기후 현상의 지역적 차이가 크지 않은 지역에서 하각의 공간적 분포의 차이는 국지적인 기후 특성보다는 지구조적 특성과 관계가 깊다(Lee, 2018a). 그리고 해양에 유입하는 하천의 하류부에서는 하천의 궁극적인 침식기준면이 되는 해수면의 변화가 하천의 하각이나 매적 작용을 유발하여 하안단구 형성에 영향을 미친다(Litchfield, 2008; Robustelli *et al.*, 2009; Litchfield and Clark, 2015; Erturaç *et al.*, 2019).

우리나라의 하안단구 연구는 절대 연대 측정이 용이하지 않았던 2000년대 이전까지 하안단구의 분포와 고도 및 지형 특성을 중심으로 하안단구의 형성과정을 추정하는 방식으로 진행되어왔다. 그러나 지난 빙기와 간빙기를 포함한 시기인 현재부터 MIS (Marine Isotope Oxygen Stage) 5 무렵까지 형성된 하안단구 퇴적층에 대한 절대 연대 측정이 가능한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대 측정 기법이 2000년대부터 일반화되면서, 최근 국내외 모두의 하안단구 연구는 형성 시기와 형성과정 그리고 하각의 속도인 하각률(incision rate)을 중심으로 진행되고 있다(Lee, 2009, 2014, 2018a, 2018b, 2019; Cho and Lee, 2009; Lee *et al.*, 2011; Fuchs *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2014; Kim and Hong, 2014; Cho *et al.*, 2017; Berndt *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2018; Lee and Park, 2020, 2021; Yang *et al.*, 2020). 하천 유역 또는 지역적으로 보면, 북한강 상류와 지류, 남한강 상류와 지류, 낙동강 상류와 지류, 금강 상류와 지류 등 한반도 중·남부의 용기축으로 알려진 태백산맥과 소백산맥 일대를 흐르는 대하천 상류

부의 산지 하천에 발달한 구조 및 기후 단구를 중심으로 주로 연구가 진행되었다. 그러나 대하천 하류부에 발달한 하안단구는 구조 운동 및 기후 변화의 요인 뿐 아니라 해수면 변동의 영향까지 포함되어 있어서, 지형 형성과정에 대한 해석이 쉽지 않아 상대적으로 연구 성과가 미약한 편이다.

본 연구는 우리나라에서 하안단구 연구가 상대적으로 미약한 대하천 하류부 중에서도 경기도 양평군 및 여주시 일대의 남한강 하류에 발달한 하안단구를 대상으로 하였다. 남한강 하류 하안단구를 대상으로 한 선행 연구는 지형 분석 및 연대 측정을 통해서 3 단 내외로 나타나는 여주시 연양리 일대 하안단구가 지난 빙기의 범람원이 단구화된 것으로 추정하였던 Kim *et al.* (2006)의 논문이 유일하다. 그러나 Kim *et al.* (2006)의 연구는 각 하안단구에 대한 정밀한 지형 분석 및 연대 측정이 이루어지지 못했고, 연양리 일대만을 연구 대상으로 하여 주변의 하안단구 분포 및 형성과 관련한 자료가 부재하기 때문에, 남한강 하류의 하안단구 형성 시기와 형성과정 그리고 신생대 제4기 말에 남한강의 하도 변화 및 하각 작용을 이해하기에는 한계가 있다.

본 연구는 섬강 합류점부터 북한강 합류점까지 약 70 km 길이의 남한강 하류를 대상으로, 하안단구, 범람원 등의 제4기 층적 지형면을 분류하여 하안단구의 평면 및 종단면 분포 특성을 밝히고자 한다. 그리고 여러 하안단구 퇴적층을 대상으로 한 절대 연대 측정 결과를 토대로, 남한강 하류 하안단구의 형성 시기와 형성 과정을 분석하여 신생대 제4기 말 동안 남한강 하류의 하천 종단면 변화와 하천 발달 과정을 해석하고자 한다.

## 1.2 연구 지역 및 방법

연구 지역은 지류 하천인 섬강이 남한강에 합류하는 경기도 여주시 점동면 삼합리부터 북한강과의 합류점인 양평군 양서면 양수리까지의 남한강 하류로서, 하도 길이 약 70 km의 구간이다(그림 1). 연구 지역인 남한강 하류 구간은 약간 좁고 굽은 감입 곡류(incised meander) 하곡을 형성하면서 전체적으로 북서류하여 흐르며, 청미천, 복하천, 흑천 등의 중규모 지류 하천이 본류에 합류하고 있다. 유역 분지의 일반적인 지질은 화강암류와 편마암류로 크게 구분되어, 연구 지역 내에서도 상류부는 중생대 쥐

라기 흑운모 화강암이 분포하고, 중류부는 선캄브리아시대 편마암류에 속하는 양평 화성암 복합체가 관입해 있으며, 하류부는 편마암류로 이루어져 있다(Yeo and Lee, 1975; Won *et al.*, 1978; So *et al.*, 1989).

남한강 하류의 하안단구 및 범람원 지형을 분류하고 지형 분포도를 작성하기 위해, 먼저, 1:5,000 및 1:25,000 지형도, 1:50,000 지질도를 토대로 남한강 하류부 하곡의 지형 및 지질 특성을 개략적으로 살펴보았다. 그리고 1969년, 1974년, 1993년 등의 시기에 촬영된 항공사진을 판독하고, 1:5,000 지형도를 이용해 제작한 DEM (digital elevation model)을 분석하여, 하안단구 및 범람원 지형면을 일차적으로 분류하였다. 다음으로 야외 조사를 통해 지형면을 확인한 후에, 최종 분류된 지형면을 대상으로, ArcGIS

프로그램 등을 이용하여 하안단구 지형면 분포도 및 종단 분포도를 작성하였다.

연구 지역에 대한 야외 조사에서는 하안단구 및 범람원 지형과 퇴적층의 특성을 확인하고, 발견된 퇴적층 노두에 대한 절대 연대 측정 시료 수집과 정밀 지형 측량을 실시하였다. 총 5개 지점 하안단구 노두의 퇴적층을 대상으로 OSL 절대 연대 측정을 진행하였다. OSL 연대 측정 시료는 퇴적층에 금속관을 삽입해 수집하였고, 이를 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 조립(90~250 μm) 석영 입자의 절대 연대를 획득하였다. 그리고 연대 측정 지점과 하안단구 지형면의 해발고도는 최대 오차 1 cm인 Sokkia의 GNSS (GlobalNetwork Satellite System) 수신기 GRX1을 이용하여 정밀 측량하였다. 남한강과

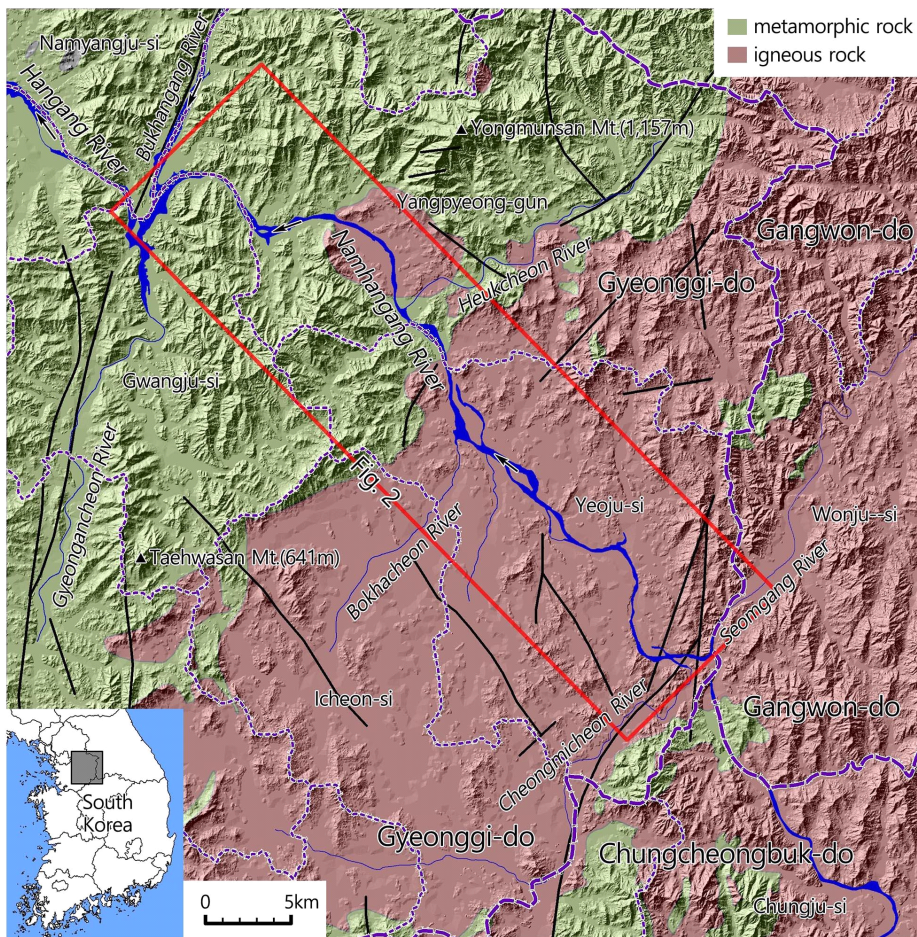


Fig. 1. Topography and geology in the study area (downstream of Namhangang River)(geology data sources: Yeo and Lee, 1975; Won *et al.*, 1978; So *et al.*, 1989).

각 하안단구면의 고도 차이 및 종단면 변화를 파악하기 위해, 남한강의 하상 고도 및 홍수위 고도는 1992년에 발간된 한강수계 치수기본계획(하천정비

기본계획) 보고서(Ministry of Construction, 1992)를 토대로 각 지점의 최심 하상고, 평형 하상고, 200년 빈도 홍수위를 적용하였다.

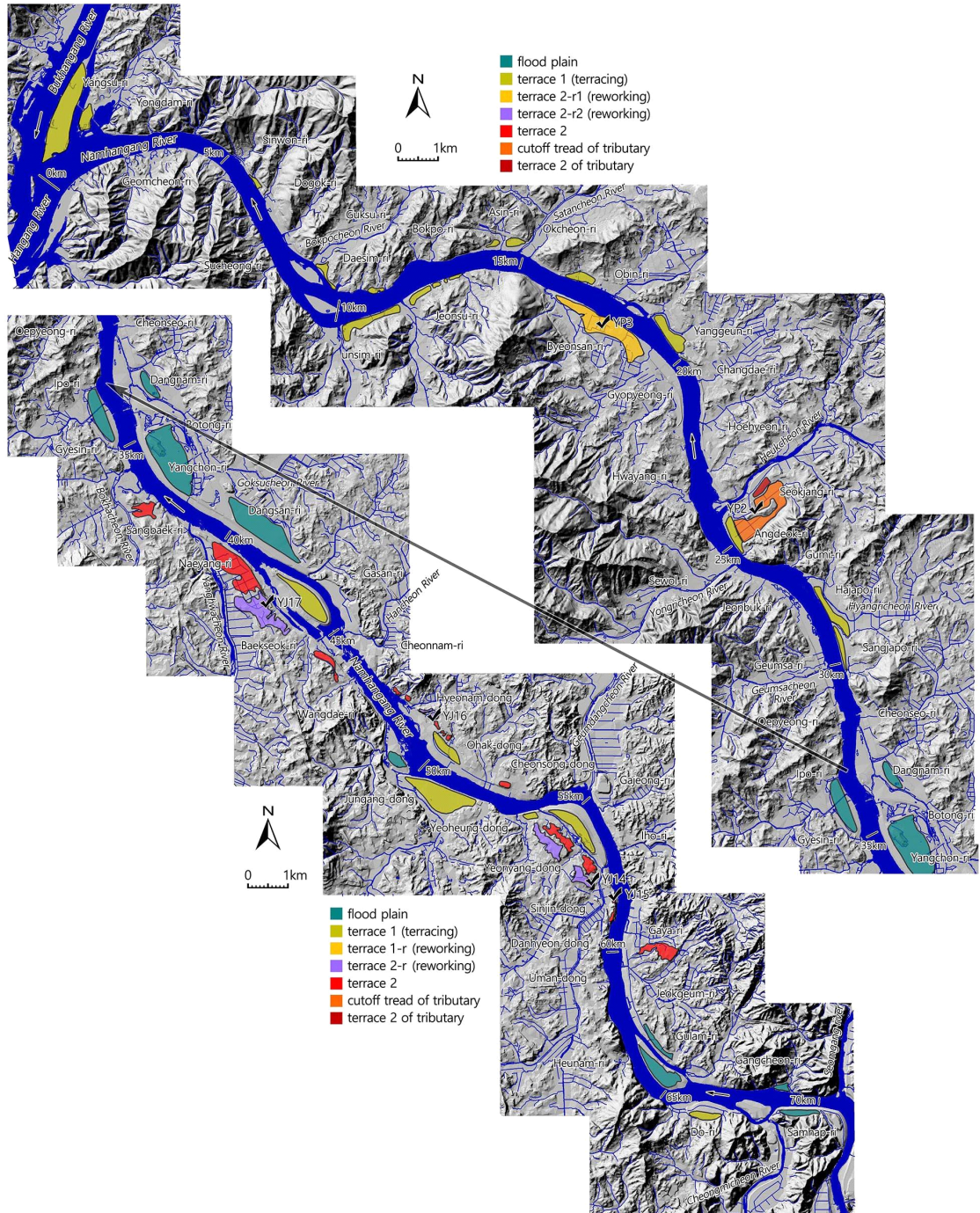


Fig. 2. Distribution of flood plains and fluvial terraces in downstream of Namhangan River.

## 2. 하안단구의 분포와 형성 과정

### 2.1 하안단구의 분포

항공사진 판독, 1:5,000 지형도 및 DEM 분석, 야외 조사를 통한 지형면 동정 및 퇴적층 확인 결과, 연구 지역의 총적 지형은 범람원과 4단의 하안단구면으로 구분되었다(그림 2, 3). 현 남한강 하상으로 부터의 고도 차이인 하상 비고 또는 남한강 홍수위 고도와와의 차이인 홍수위 비고가 가장 높은 지형면은 T2-r (terrace 2-r)로 명명한 하안단구면으로, 여주시 연양동 및 신진동 일대, 현양동 일대, 세종대왕면 백석리 일대에 현 홍수위로부터 15~23 m 비고에서 완경사 구릉의 능선이나 사면을 따라 분포하고 있다. T2-r면의 바로 아래에 발달한 하안단구 T2면은 여주시 강천면 가야리에서 흥천면 상백리까지의 하안을 따라 연속적으로 분포하며, 상류 쪽에서는 홍수위 비고가 13 m 내외를 이루지만, 하류로 가면서 비고가 점점 낮아져서 상백리에서는 홍수위 비고가 2~3 m에 불과하다. 다음으로 비고가 낮은 하안단구면은 T1-r로서, 홍수위 비고 2~3 m 고도를 이루며 양평군 강상면 병산리 일대에서만 분포한다.

가장 비고가 낮은 하안단구면인 T1면은 연구 지역 전체 구간에서 연속적으로 분포하며, 양평군 오빈리 부근을 기준으로 상류 쪽에서는 현 홍수위보다 0~2 m 정도 더 높지만, 하류 쪽에서는 현 홍수위보다 낮은 고도에 위치한다. 이는 1973년 팔당댐이 건설되면서 홍수위 고도가 인위적으로 상승한 결과, 남한강 최하류부의 하안단구 최저위면인 T1면이 현 하천의 홍수위보다 낮은 고도에 위치하게 된 것으로 보인다. 그리고 여주시 당남리 부근보다 상류 쪽에 해당하는 연구 지역의 상류 구간에서는 현 홍수위 고도 부근에 자연제방(natural levee)의 형태를 띠는 범람원의 최상부 지형면이 가장 낮은 하상 비고에서 나타난다. 한편, 지류인 흑천이 합류하는 석장리 일대에는 흑천이 형성한 하안단구 2면과 흑천의 하도가 감입 곡류 절단(incised meander cutoff)되어 남겨진 구하도(abandoned channel) 지형면이 발달해 있다(그림 2, 5).

### 2.2 하안단구의 형성 시기와 형성 과정

연구 지역에서는 총 6개 지점의 하안단구 퇴적층 노두에서 OSL 절대 연대 측정이 이루어졌다(표 1,

2). 그중 가장 하류 쪽인 양평군 강상면 병산리의 YP3 지점은 하안단구 T1-r면 내부에 약간 경사진 사면이 절개되어 매우 작은 독립 구릉의 형태로 남겨진 곳이다(그림 4). YP3 노두 주변은 뚜렷한 계단상의 단구애와 단구면을 이루고 있는 전형적인 하안단구 1면의 지형 특성을 보이고 있다. 약 2 m 이상의 높이로 나타나는 YP3 노두에서는 기반암이나 사력층이 확인되지 않으며, 실트(silt)와 점토(clay)를 포함한 머드(mud)층으로 이루어져 있다.

하천의 하각으로 범람원이 하안단구가 되는 데에는 수만~수십만 년이 필요하다. 이 시간 동안 범람원의 표층에서는 우곡(gully)이나 소규모 지류 하도의 형성과 유로 변화에 의해 퇴적층이 침식되고 원지형면의 형태가 변화하는 개석(dissection) 작용이 발생한다(O'Connor *et al.*, 2003; Evans *et al.*, 2004; Stinchcomb *et al.*, 2012; Elznicová *et al.*, 2021). 그리고 넓은 지형면에서는 주로 빙기 동안 바람에 의해 운반된 풍성(aeolian) 퇴적물이 층적층의 표면에 두껍게 퇴적되기도 하고, 배후 산지와 접해 있는 지형면에서는 사면 운반(mass movement) 작용에 의해 공급된 사면 물질이 퇴적되기도 하며, 경사진 지형면에서는 호우 시에 발생한 지표류(overland flow)에 의한 침식 작용인 우세(rain wash)에 의해 지형면 표층의 퇴적 물질이 재동(reworking)하여 다시 퇴적되기도 한다(Gong *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015; Klinge *et al.*, 2017; Morriss and Wegmann, 2017; Guo *et al.*, 2018; Antoine *et al.*, 2021).

노두 YP3에서는 하성 자갈이나 사력층이 발견되지 않으며, 노두 부근은 넓은 하안단구면 내에서도 약간 경사진 사면을 이루고 있다는 점에서, YP3의 퇴적층은 남한강의 퇴적 작용에 의해 층적 지형면이 형성된 다음에 시간이 흐르면서 하천의 하각 작용으로 하안단구면과 하천 사이의 고도 차이가 커져 단구면의 표면이 건록화 되었고, 이후 단구면의 표층 세립 물질이 바람이나 지표류에 의해 재동(reworking)되어 쌓인 퇴적층으로 추정된다. YP3 노두의 가장 아래 지점에서 OSL 연대 측정 시료를 수집하였으며, 시료 수집 지점의 해발고도는 38.1 m, 하안단구면의 최고 고도는 40.1 m로 측정되었다. 그리고 OSL 연대는 22±4 ka로 획득되어 MIS 2에 퇴적이 발생한 것으로 나타났다(표 2). 따라서 T1-r면은 MIS 2 이전에 형성된 하안단구 퇴적물이 MIS 2 무렵에 재

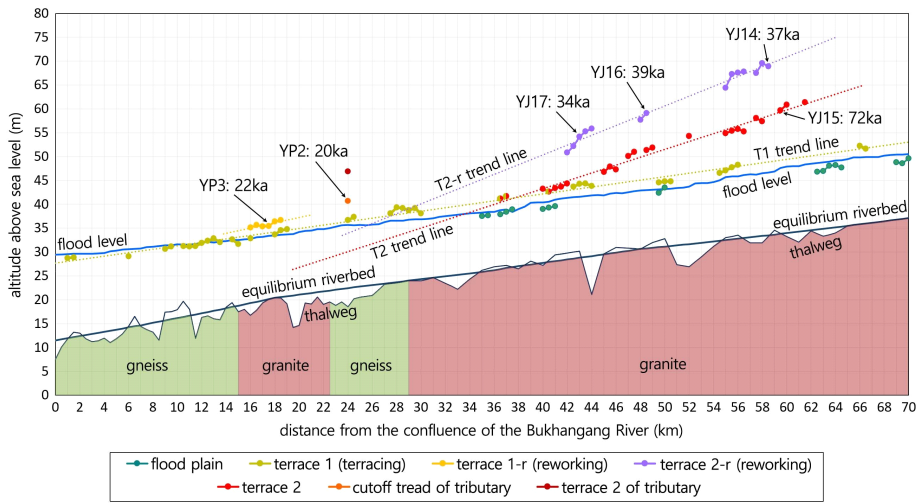


Fig. 3. Longitudinal profile of flood plains and fluvial terraces in downstream of Namhangang River.

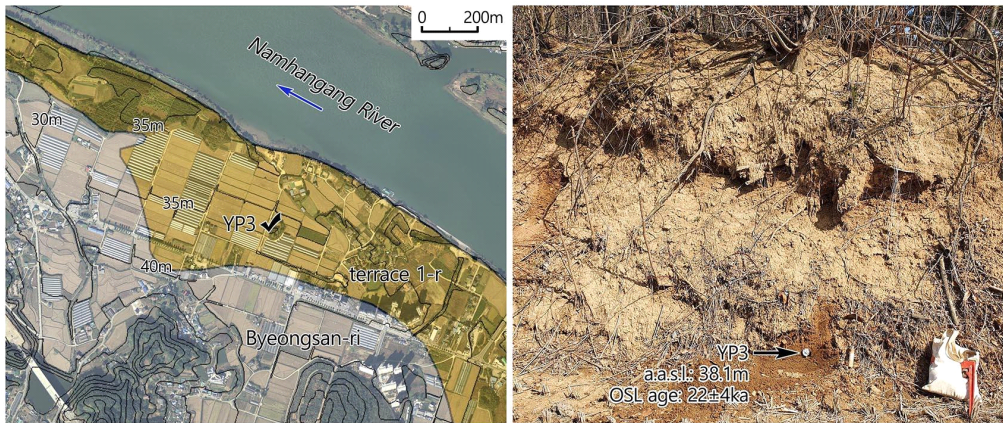


Fig. 4. Geomorphological distribution and photograph of outcrop YP3.

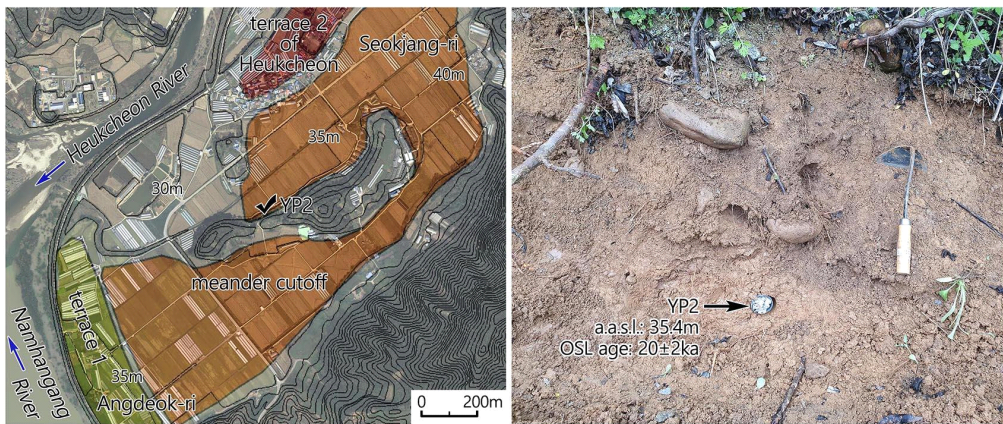


Fig. 5. Geomorphological distribution and photograph of outcrop YP2.

**Table 1.** Location, topographic characteristics, OSL age for 6 sites in study area.

Site	Classification of tread	Latitude (N)	Longitude (E)	Sediment texture of sampling point	Elevation (a.a.s.l.) (m)		OSL age (ka)
					Sampling point	Surface of tread	
YP3	T1-r	37°29'34.0"	127°28'10.5"	mud	38.1	40.1	22±4
YP2	cutoff	37°27'02.2"	127°30'48.7"	gravely sandy mud	35.4	36.7	20±2
YJ17	T2-r	37°20'22.5"	127°35'06.0"	sandy mud	51.5	55.2	34±4
YJ16	T2-r	37°18'53.1"	127°37'51.3"	sandy mud	52.4	56.1	39±3
YJ14	T2-r	37°16'38.5"	127°40'32.4"	sandy mud	66.3	71.8	37±3
YJ15	T2	37°16'23.2"	127°40'57.8"	sand	58.4	59.7	72±4

**Table 2.** Result for OSL age dating of 6 sites.

Sample	Dose rate* (Gy/ka)	Water content* (%)	Equivalent dose (Gy)	Aliquots used (n/N)	OSL age* (ka, 1σSE)
YP3	4.00±0.10 (3.98±0.10)	19.8 (20.4)	89±17	11/16	22±4 (22±4)
YP2	3.64±0.10 (3.60±0.09)	23.1 (24.4)	74±8	14/16	20±2 (20±2)
YJ17	4.37±0.11 (4.34±0.11)	15.9 (16.6)	148±16	10/16	34±4 (34±4)
YJ16	3.51±0.09 (3.39±0.09)	12.1 (15.5)	136±11	12/16	39±3 (40±3)
YJ14	4.18±0.10 (3.75±0.09)	9.2 (20.0)	154±14	6/16	37±3 (41±4)
YJ15	4.45±0.11 (3.80±0.09)	14.9 (32.3)	318±14	15/16	72±4 (84±4)

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

동된 지형면으로 추정된다.

YP2는 양평군 개군면 석장리에 위치하며 남한강의 지류인 흑천의 감입 곡류 절단면에서 발견된 하성 퇴적층 노두이다(그림 5). 곡류 절단면에서는 하성 퇴적 작용의 증거인 완원(well rounded)의 왕자갈(cobble)이 쉽게 관찰된다. 곡류 절단면과 곡류 핵(meander core)의 사면에 접하는 지점에 위치한 노두 YP2는 머드 및 모래를 기질(matrix)로 한 완원의 잔자갈(pebble) 및 왕자갈이 분급과 층리가 다소 불량한 상태로 협재한 사력층을 이루고 있다. OSL 연대 측정 시료는 해발고도 35.4 m인 사력층 하부의 모래질 머드층에서 수집하였으며, 곡류 절단면의 최고 고도는 36.7 m로 측정되었고, OSL 연대는 20±2 ka로 획득되었다(표 1, 2). 노두 YP2의 퇴적상으로 보아, 층적층 형성 후에 퇴적물의 재동이 발생한 것으로 추정되므로, 석장리 일대에서 남한강에 합류하는 흑천의 하구부에서 감입 곡류 절단이 발생한 시기는 20 ka 이전으로 추정된다.

YJ17은 여주시 세종대왕면 백석리에 위치한 T2-r 하안단구면의 절개지에서 확인된 노두이다(그림 6).

노두에서는 기반암이 확인되지 않으며, 적황색의 실트 및 세립 모래로만 이루어진 두께 3 m 이상의 퇴적층이다. 백석리 T2-r면에서는 풍성 작용을 통해 퇴적된 것으로 추정되는 2~3 m 이상 두께의 치밀하지 않은 세립 모래 및 실트층이 여러 지점의 표층에서는 확인된다. OSL 연대 측정 시료는 해발고도 51.5 m인 노두 최하부의 모래질 실트층에서 수집하였으며, 하안단구면의 최고 고도는 55.2 m로 측정되었고, OSL 연대는 34±4 ka로 획득되었다(표 1, 2).

여주시 현암동에 위치한 YJ16은 구룡의 형태를 띤 T2-r면의 절개지에서 확인된 노두이다(그림 7). 노두는 3 m 이상 두께의 적황색 모래질 실트층을 이루고 있으며, 중부와 하부에서는 완원의 잔자갈이 실트층 사이에 포함되어 있으며, 상부는 실트층으로만 이루어져 있다. 현암동 일대의 하안단구면은 배후 구룡의 남한강 쪽인 서사면을 따라 분포하고 있으며, 노두 YJ16 일대도 다소 경사가 급한 사면에 걸쳐진 퇴적층을 이루고 있다. OSL 연대 측정 시료는 잔자갈이 없는 상부 실트층의 최하부 지점에서 수집하였으며, OSL 연대는 39±3 ka로 획득되었다

(표 1, 2). 시료 수집 지점의 해발고도는 52.4 m, 하안단구면의 최고 고도는 56.1 m로 측정되었다.

YJ14는 여주시 신진동에서 구릉의 남한강 쪽 사면을 따라 발달한 T2-r면의 절개지에서 확인된 노두이다(그림 8). 다소 경사진 사면에 위치한 약 1.5 m 두께의 노두는 완원의 잔자갈에서 점토까지의 다양한 입자가 층리와 분급이 불량한 상태로 혼합되어 있는 원력층을 이루고 있다. OSL 연대 측정 시료는 원력층 내에서도 기질인 머드가 많은 지점에서 수집하였으며, OSL 연대는  $37 \pm 3$  ka로 획득되었다(표 1, 2). 시료 수집 지점의 해발고도는 66.3 m, 하안단구면의 최고 고도는 71.8 m로 측정되었다.

YJ14에서 남동쪽으로 약 700 m 떨어진 YJ15는 여주시 단현동의 T2면 절개지에서 확인된 노두이다

(그림 8). 노두의 하부에는 화강암 풍화층이 나타나며, 그 상부에는 층리와 분급이 양호하고 남한강의 하천 방향을 따라 자갈의 인편구조(imbrication)가 잘 발달한 두께 약 3 m의 하성 퇴적층이 나타나는데, 퇴적층에서도 하부 약 2 m는 완원의 잔자갈을 포함한 적황색 모래층이, 최상부 약 1 m는 적황색 모래층으로만 이루어져 있다. OSL 연대 측정 시료는 상부 모래층의 최하부 지점에서 수집하였으며, OSL 연대는  $72 \pm 4$  ka로 획득되어 MIS 5와 4의 경계 시기에 형성된 하성층으로 분석되었다(표 1, 2). 시료 수집 지점의 해발고도는 58.4 m, 하안단구면의 최고 고도는 59.7 m로 측정되었다.

연구 지역의 상류부에 위치한 YJ14, YJ16, YJ17의 OSL 연대 결과를 토대로 T2-r면의 형성 시기는



Fig. 6. Geomorphological distribution and photograph of outcrop YJ17.

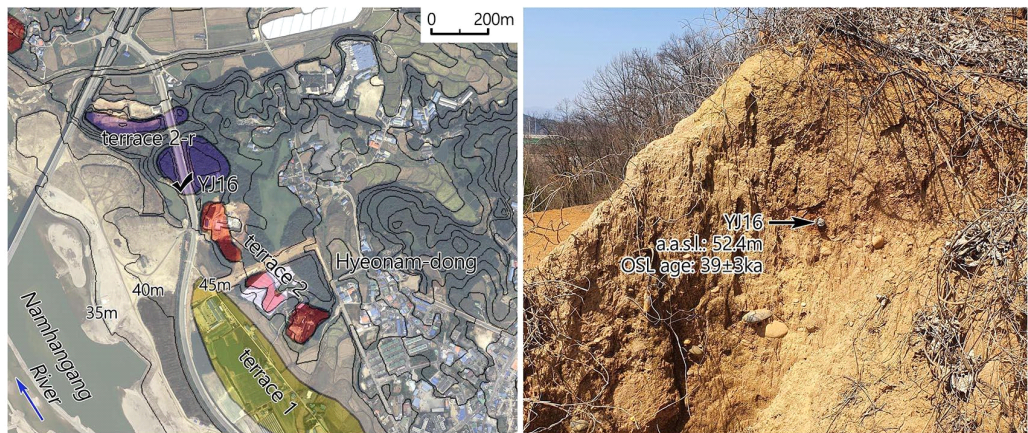


Fig. 7. Geomorphological distribution and photograph of outcrop YJ16.



34~39 ka에 해당하는 MIS 3으로 판단되며, YJ15의 OSL 연대에 따라 T2면의 형성 시기는 72 ka인 MIS 5와 4의 경계 시기로 판단된다. 하안단구는 하천의 하각에 의해 형성되므로 일반적으로 형성 시기가 오래될수록 더 높은 고도에서 나타나는데, 연구 지역의 상류부에서는 연대가 될 오래된 T2-r면이 더 오래된 T2면보다 높은 고도에 위치하고 있다. 이렇게 하안단구의 고도 역전이 나타나게 되는 조건은 다음과 같은 두 가지의 경우로 생각해 볼 수 있다.

첫째, T2면 형성 이후 홍수위가 상승하면서 하곡에서 퇴적물의 매적이 대규모로 발생하면서 T2-r면이 형성되고, T2면은 그 아래에 매몰되었을 가능성이 있다. 그러나 해당 지역과 같이 한반도 중·남부의 용기축으로 알려진 태백산맥과 소백산맥에 가까운 대하천에서는 매적보다는 지반 용기에 의한 삭박 또는

하각 작용이 우세한 지역이라는 점, 우리나라에서 해당 지역과 같이 해발고도 50 m 이상이며 계단상의 하안단구가 발달한 대하천 중류부에서 매몰 단구가 보고된 사례가 없다는 점, 홍수위 상승으로 하곡에 대규모 매적이 발생하였다면 인근의 여러 지점에서 T2-r면이 다수 확인되어야 하지만 그렇지 않다는 점, 그리고 당시 범람원 아래에 매몰되었던 T2면이 하천의 하각 이후에 평탄한 지형면을 이루며 하안단구의 형태로 남겨질 가능성은 매우 희박하다는 점 등으로 인해, 하곡의 대규모 매적에 의한 상황으로 T2면과 T2-r면의 형성 과정을 설명하기에는 무리가 따른다.

둘째, T2면 이전에 더 높은 고도에 형성된 T3면 또는 T2면에서도 당시에 자연제방이었던 고도가 높은 충적 지형면에서 MIS 3 동안에 풍성, 사면 운반,

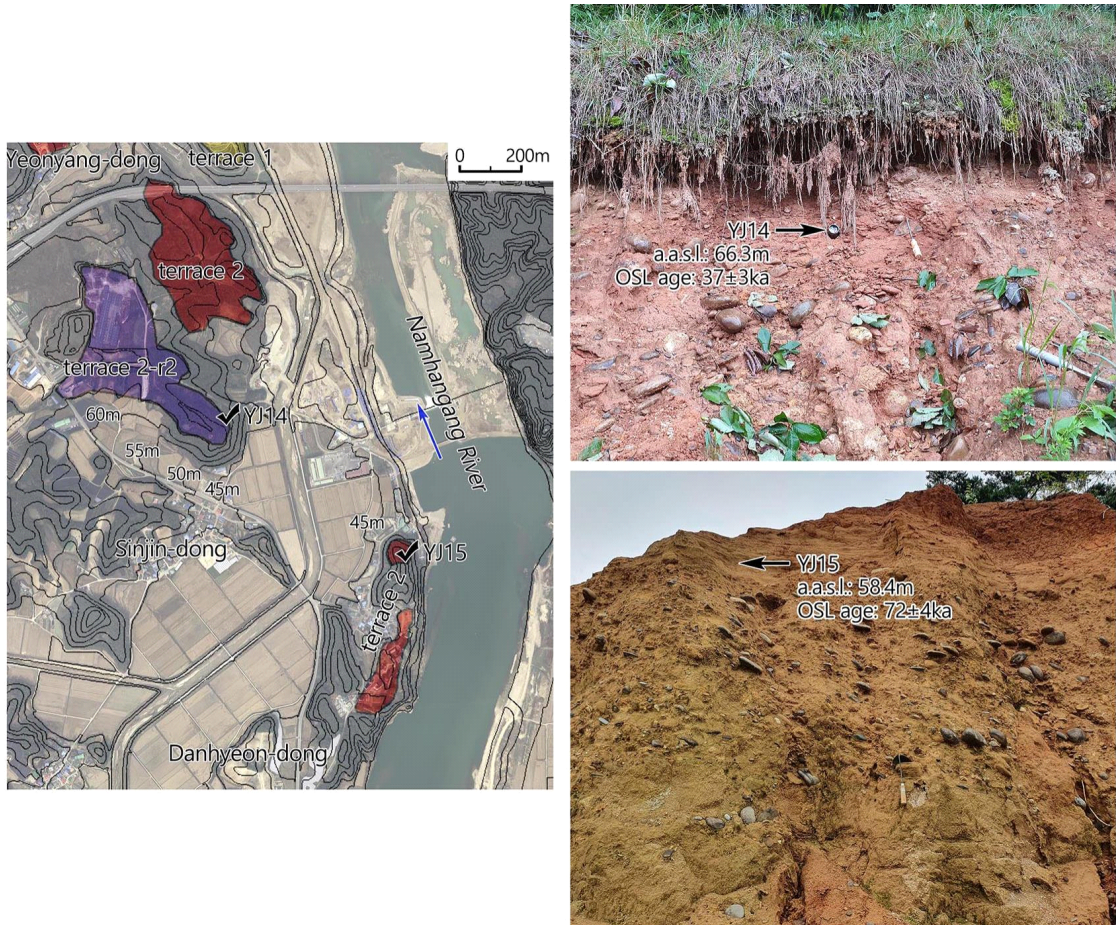


Fig. 8. Geomorphological distribution and photograph of outcrop YJ14, YJ15.

지표류 등의 작용으로 퇴적물이 재동되어 T2-r면이 형성되었을 가능성이 있다. T2-r면은 모두 T2면과 인접한 지역에서 공간적으로 연속적인 형태를 띠며, 계단 모양을 이룬 고도가 높은 지점이나 배후 산지 쪽에 발달해 있다는 점에서, MIS 5 또는 4에 T2면은 하도 또는 하도와 인접한 고도가 낮은 범람원이고, T2-r면은 하도로부터 거리가 먼 자연제방 형태의 고도가 높은 범람원이었을 가능성이 높다. 또한, T2-r면의 연대 측정 지점인 YJ17와 YJ16은 자갈이 전혀 없는 모래층이거나 사력층 상부에 발달한 실트층이며, YJ14와 YJ16은 배후 구릉의 남한강 쪽 사면에 발달한 경사가 다소 급한 하안단구면에 위치한다는 점에서, 남한강의 퇴적 작용으로 형성된 층적 지형면 표층의 세립 물질이 바람, 지표류 등 다른 지형 형성 기구에 의해 재동된 퇴적층일 가능성이 높다. 즉, T2-r면은 MIS 5 또는 4에 형성된 T2면에서도 고도가 높은 층적 지형면이 MIS 4와 3에 해당하는 약 3~4만 년을 거치는 동안에 하천의 하각 작용으로 하도와의 고도 차이가 커져 지표가 진륙화된 이후, 바람, 지표류, 사면 운반 작용 등에 의해 표층의 세립 퇴적물이 재이동되어 형성된 지형면으로 판단된다.

### 3. 남한강 하류의 하천 발달 과정

하안단구의 평면 및 종단면 분포 특성을 종합할 때(그림 2, 3), 남한강 하류의 하안단구는 MIS 4에 형성된 하안단구 T2면의 종단 추세선이 홍수위 아래로 교차하는 지점인, 북한강 합류점으로부터 거리 33 km 부근의 여주시 대신면 천서리와 금사면 이포리 일대를 기준으로 연구 지역의 상류부와 하류부의 하천 발달이 상이한 것으로 보인다. 연구 지역의 상류부에서는 T2면의 종단 추세선이 범람원 고도보다 높으며 고도와 시기를 달리하는 3단 이상의 층적 지형이 나타나는 것으로 볼 때, 남한강은 꾸준히 하각을 진행하여 현재의 상태에 이른 것으로 보인다(그림 3). 그러나 연구 지역의 하류부에서는 T2면의 종단 추세선이 범람원 고도보다 낮고 사력층으로 이루어진 전형적인 하안단구 지형면이 확인되지 않는 것으로 볼 때, 최종빙기 최성기 이후 해수면 상승에 따른 침식기준면의 상승으로 하천의 퇴적 작용이 우세하여, 침수된 하각 곡이 매적되는 과정에 의해 하안

단구가 범람원 아래에 매몰되었을 가능성이 높아 보인다(Ishihara *et al.*, 2012; Amorosi *et al.*, 2016).

특히, 하상의 해발고도가 25 m 이하인 연구 지역의 하류부는 해수면 고도와 인접하여 제4기 말 기후 변동에 의한 해수면 변동의 영향을 크게 받을 수밖에 없다. 남한강은 최심 하상 고도 약 7.5 m인 양수리 부근에서 북한강과 합류하여 한강이 되어 약 90 km를 흘러서 황해의 경기만으로 유입한다. 경기만의 평균 대조차는 8 m 내외로서 대조 시에는 평균적으로 해발고도 약 4 m까지 해수면이 상승한다. 그리고 한강이 개발되기 이전에 남한강과 북한강의 합류점으로부터 약 20 km 떨어진 서울 강동구 부근 한강의 최심 하상 고도는 0 m 내외에 불과하고(Ministry of Construction, 1978), 합류점으로부터 약 9 km 떨어진 팔당댐 부근 한강의 최심 하상 고도는 약 2.0 m에 불과하다(Ministry of Construction, 1992).

일반적으로, 해수면이 상승하면 침식기준면의 상승으로 바다에 유입하는 하천의 하류부에서는 매적 작용이 발생하고, 해수면이 하강하면 침식기준면의 하강으로 하천 하류부에서는 하각 작용이 발생하는 것으로 알려져 있다(Lee, 2021). 그러나 Pinter *et al.* (2018)은 해수면 상승에 의한 하천의 작용이 하천과 대륙붕 해저의 경사도 차이에 의해 좌우된다고 주장하였다. 지형도와 수심도의 분석 결과, 현재 한강 하구를 기준으로 한강과 남한강의 하천 경사는 약 52 m/100 km, 대륙붕인 경기만 해저곡의 경사는 약 44 m/100 km로서, 하천보다 대륙붕의 경사도가 더 완만하다. Pinter *et al.* (2018)에 따르면, 한강과 같이 대륙붕 해저의 경사가 하천 경사보다 완만할 경우, 해수면 하강 시에는 하천의 경사가 완만해져야 하므로 하강 전 해수면 부근의 하천 하류부에서 매적이 발생하고, 해수면 상승 시에는 하천의 경사가 급해져야 하므로 하천 하류부에서 하각이 발생한다고 한다(그림 9). 즉, 기존에 알려진 모델과는 달리, 해수면 변화의 영향을 받는 연구 지역의 하류부를 포함한 한강 하류부에서는 해수면이 하강하는 시기에는 매적 작용이 우세해지고, 해수면 상승하는 시기에는 하각 작용이 우세해진다.

반면, 해발고도가 높고 상대적으로 내륙에 위치한 연구 지역의 상류부는 한반도 남부 용기축으로 알려진 태백산맥과는 100 km 내외, 소백산맥과는 70~80 km 정도의 거리에 위치한다. 최근 연구에 따르

면, 한반도 남부에서 서해안의 용기율은 동해안의 1/3~1/4 수준으로 알려져 있으며, 강원 남부 동해안의 평균 용기율은 0.26 m/ka로 제시되고 있다(Lee

and Park, 2019). 그리고 동서간 용기율의 변화는 태백산맥 북부의 용기축에서 서쪽으로 갈수록 5~6 m/km의 비율로 저하되어, 약 100~120 km 떨어진

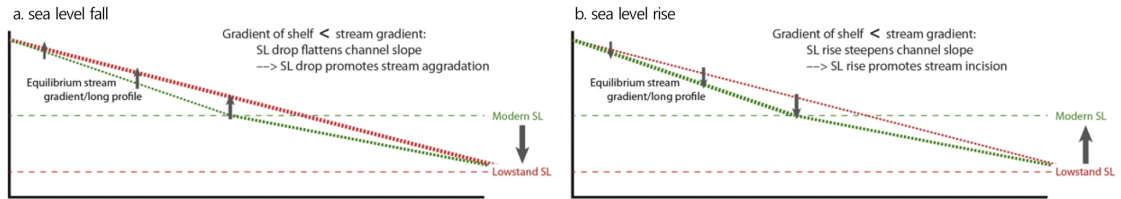


Fig. 9. Illustration of the potential impact of offshore topography on fluvial response to sea-level change (Pinter *et al.*, 2018).

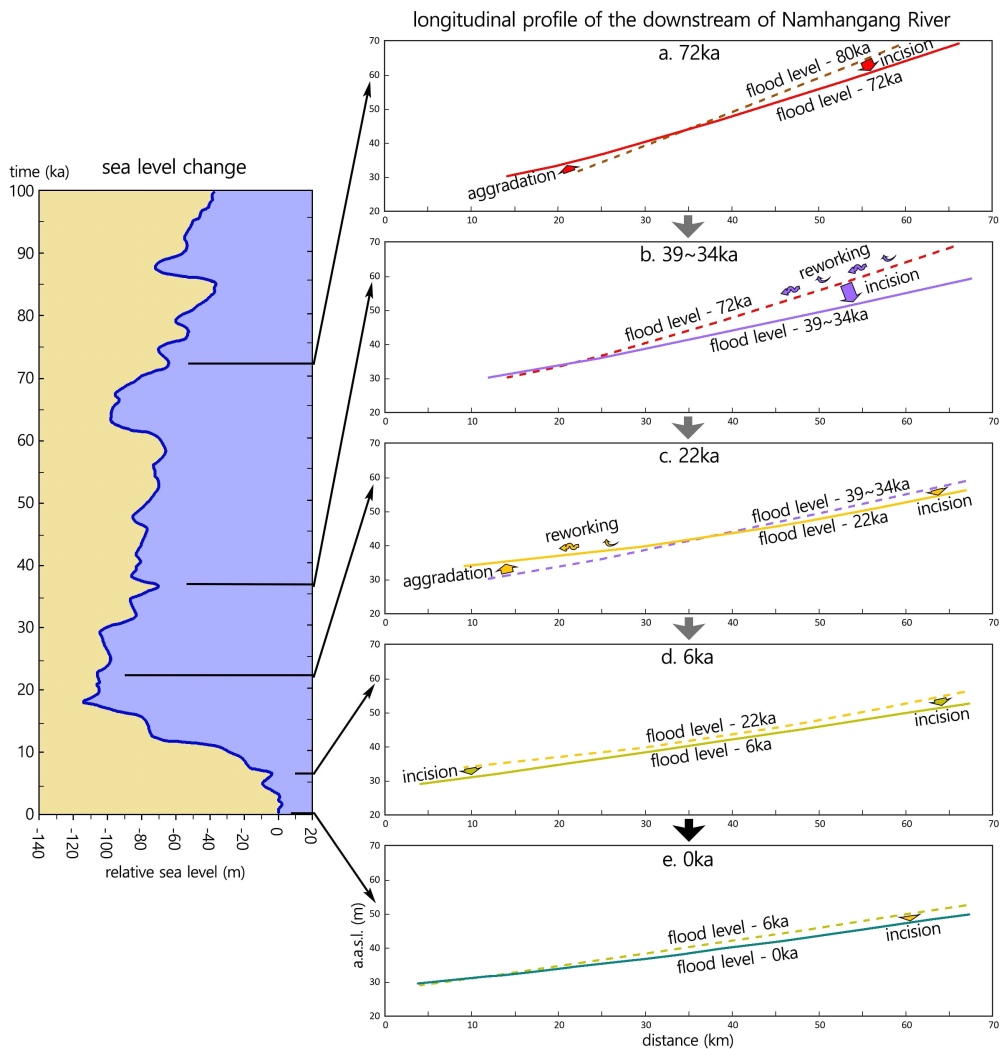


Fig. 10. The global sea level changes (left, data source: Grant *et al.*, 2012) and longitudinal profiles of the downstream of Namhangang River (right) at the Late Quaternary.

지점인 연천-포천-남양주-양평-여주-충주를 잇는 지역에서는 용기 고도가 해수면 고도와 유사할 가능성이 제기되고 있다(Lee, 2018a). 이 지점은 본 연구 지역에서 상류부와 하류부의 경계와 대체로 일치한다. 따라서 연구 지역의 상류부에서 하천의 작용은 해수면 변화보다는 지반 용기에 의한 영향이 더 우세하였을 가능성이 크다.

우리나라의 하안단구 연구(Lee, 2009, 2014, 2018a, 2018b, 2019; Lee and Park, 2020, 2021, 2022), 지반 용기 연구(Shin and Hwang, 2014; Lee, 2018a; Lee and Park, 2019), Pinter *et al.* (2018)의 모형, Grant *et al.* (2012)의 해수면 변동 곡선을 토대로, MIS 5 이후 남한강 하류의 연구 지역에서 발생한 하천의 종단 변화 과정을 추론하면 다음과 같다. MIS 5a에 해당하는 80 ka 무렵에 현재보다 약간 낮았던 해수면 고도는 T2 퇴적층이 형성된 72 ka 무렵에 약 -70 m 내외로 하강하면서, 하강하는 해수면에 인접한 연구 지역의 하류부에서는 하천에 의한 하곡의 매적 작용이 발생하였고, 한반도 남부의 용기축인 태백산맥 및 소백산맥과 인접한 연구 지역의 상류부에서는 지반 용기의 영향으로 하천의 하각 작용이 꾸준히 진행되어 하상의 고도가 낮아졌을 것으로 추정된다(그림 10a). 그리고 72 ka 무렵에 대규모 홍수로 인해 남한강의 수위가 크게 상승하면서 남한강 하안의 범람원에는 다량의 하성 퇴적물이 쌓여 범람원의 고도가 높아졌을 것이다.

T2-r 퇴적층이 형성된 39~34 ka에 해수면 고도는 -80~-65 m 내외로 72 ka와 큰 변화가 거의 없다. 따라서 해수면 고도의 변화가 거의 없는 연구 지역의 하류부에서는 하천의 고도 변화도 거의 없었을 것이며, 연구 지역의 상류부에서는 지반 용기에 의한 하천의 하각 작용이 꾸준히 발생하였을 것으로 추정된다(그림 10b). 그리고 이러한 하각 작용에 의해 남한강의 고도가 낮아지면서 72 ka에 형성된 범람원이 하안단구로 변화하여 T2면이 형성되었으며, 하안단구면 내에서도 고도가 높은 능선부에서는 강한 바람에 의해 모래, 실트, 점토 등의 세립 퇴적물이 이동하거나 집중 호우 시에는 지표류와 사면 운반 작용에 의해 퇴적물이 사면을 따라 이동하여 퇴적되면서 재동 퇴적층인 T2-r 지형면이 형성된 것으로 보인다.

T1-r 퇴적층이 형성된 22 ka에는 해수면 고도가 -110 m까지 하강하였기 때문에 연구 지역의 하류부

에서는 해수면 하강에 의해 하도 경사가 완만해지면서 하곡이 퇴적물로 메워지는 매적 작용이 발생하였을 것이다(그림 10c). 그러나 해수면 변화보다는 지반 용기의 영향이 우세한 연구 지역의 상류부에서는 이전과 거의 같은 속도의 하각 작용이 계속해서 발생하였을 것이다. 이에 따라, 연구 지역의 상류부 하천 고도는 약간 하강하고, 하류부 하천 고도는 약간 상승하였으며, 하곡이 퇴적물로 메워지면서 넓고 평탄한 범람원 내에서는 바람과 지표류에 의한 하성 퇴적물의 재동이 발생하면서 T1-r 지형면이 형성된 것으로 판단된다.

22 ka 무렵부터 현재와 해수면이 유사했던 6 ka까지는 해수면이 급격하게 상승하였다. 이에 따라 연구 지역의 하류부에서는 하도 경사가 급해지면서 하천의 고도가 낮아지는 하각 작용이 발생하였고, 연구 지역의 상류부에서도 지반 용기의 영향으로 계속해서 하각 작용이 발생하였을 것이다(그림 10d). 이러한 남한강 하류의 전반적인 하각 작용으로 인해 22 ka에 형성되었던 범람원은 하천과의 고도 차이가 커지면서 하안단구 T1 지형면으로 변화하게 되었을 것이다. 마지막으로 6 ka에서 현재인 0 ka가 되면서는 해수면이 현 고도 부근에서 미미하게 변화하였다. 따라서 남한강 하류에서는 짧은 시기 동안에 매우 미약한 하각 작용이 발생하면서 6 ka에 형성된 범람원의 자연제방이 하안단구로 점차 변화해가고 있는 것으로 추정된다(그림 10e).

#### 4. 결론

본 연구는 경기도 여주시와 양평군에 해당하는 남한강 하류를 대상으로 하안단구 및 범람원의 지형면 분포와 지형 및 퇴적층 특성을 분석하여 하안단구의 형성 시기와 형성과정을 파악하고, 신생대 제4기 말에 남한강의 하도 변화 및 하각 및 매적 작용에 의한 하천의 발달 과정을 추정하였다. 지형 분석 결과, 남한강 하류에서는 범람원과 4단의 하안단구면이 확인되었다. 하안단구면 중 하상 비고가 가장 높고 오래된 T2-r면은 연구 지역의 상류부에 분포하며, MIS 5 또는 4에 형성된 범람원 지형면 중에서도 고도가 높은 자연제방이나 능선부가 MIS 4와 3을 거치는 동안 하천의 하각으로 하상 비고가 커져 지표가 건록화된 이후, 바람, 지표류, 사면 운반 작용

등에 의해 표층의 세립 퇴적물이 재이동하여 형성되었다. 하안단구 T2-r면보다 하상 비고가 낮은 하안단구 T2면도 연구 지역의 상류부에 분포하며, MIS 5 또는 4에 형성되었던 범람원이 이후 남한강의 하각 작용으로 하안단구로 변화한 지형면이다. 연구 지역 하류부에서만 확인되는 하안단구 T1-r면은 MIS 2 이전에 형성된 하안단구 퇴적물이 MIS 2에 재동된 지형면으로 추정된다. 하안단구 중 하상 비고가 가장 낮아 가장 최근에 형성된 T1면은 연구 지역 전체에 분포하며 MIS 2 무렵에 형성된 하성 퇴적층으로 판단된다.

하안단구의 분포와 지형면 형성 시기를 종합할 때, 남한강 하류에서는 북한강 합류점으로부터 거리 33 km 부근인 여주시 천서리 및 이포리 일대를 기준으로 연구 지역의 상류부와 하류부의 하천 발달이 상이한 것으로 판단된다. 연구 지역의 상류부에서는 여러 단의 하안단구면이 분포하는 것으로 보아, 남한강은 제4기 말에 꾸준히 하각을 진행하여 현재의 상태에 이른 것으로 보인다. 그러나 연구 지역의 하류부에서는 하안단구 T2와 T2-r면이 범람원 아래에 매몰되었을 가능성이 크다는 점에서, 제4기 말의 일정 기간에 하천의 매적 작용이 우세하게 발생하였을 가능성이 크다. 남한강 하류의 이러한 하천 발달의 차이는 제4기 말 동안에 해수면 변화에 의한 영향으로 추정된다. 남한강 하류에서도 상류부는 한반도 중·남부의 용기 축인 태백산맥과 소백산맥에 인접하여 제4기 말 동안 지반 용기에 의한 하천의 하각 작용이 꾸준히 발생하였다. 그러나 하천의 침식기준면에 해당하는 해수면 고도에 인접한 남한강 하류의 하류부에서는 제4기 말 해수면 변화의 영향으로 해수면이 하강하는 MIS 5에서 4, MIS 3에서 2까지의 기간 동안에 하도 경사가 완만해지면서 하천의 매적 작용이 우세해진 결과, 이전에 형성되었던 하안단구면이 범람원 아래에 매몰된 것으로 판단된다.

본 연구는 지반 용기와 해수면 변화의 영향을 동시에 받는 남한강 하류를 대상으로 신생대 제4기 말에 하천 지형 및 하도 발달 과정을 분석하였다. 남한강 하류의 지형 발달 과정을 완전하게 이해하기에는 지형면 해석 및 퇴적층의 층서 분석 자료가 다소 부족하고, 다양한 층적 지형면에 대한 절대 연대 자료를 충분히 제시하지 못했다는 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 하천 종단면상에서의 하각과 매

적 과정에 대한 가설은 하안단구가 전혀 확인되지 않는 우리나라 대하천 하류의 하천 지형 특성을 이해하고 하천 발달 과정을 해석하는 데에 있어 유용한 자료가 될 것으로 기대한다.

## 감사의 글

야외 조사에 도움을 준 박충선 박사와 심사 과정에서 좋은 의견을 주신 심사위원님 및 편집위원님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Amorosi, A., Bracone, V., Campo, B., D'Amico, C., Rossi, V. and Roszkopf, C.M., 2016, A late Quaternary multiple paleovalley system from the Adriatic coastal plain (Biferno River, Southern Italy). *Geomorphology*, 254, 146-159.
- Antoine, P., Coutard, S., Bahain, J.J., Loch, J.L., Hérissou, D. and Gonal, E., 2021, The last 750 ka in loess-palaeosol sequences from northern France: environmental background and dating of the western European Palaeolithic. *Journal of Quaternary Science*, 36, 1293-1310.
- Berndt, C., Yıldırım, C., Çiner, A., Strecker, M.R., Ertunç, G., Sarıkaya, M.A., Özcan, O., Ozturk, T. and Kiyak, N.G., 2018, Quaternary uplift of the northern margin of the Central Anatolian Plateau: New OSL dates of fluvial and delta-terrace deposits of the Kızılırmak River, Black Sea coast, Turkey. *Quaternary Science Reviews*, 201, 446-469.
- 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 eastern and western sides of the northern Sobaek Mountains. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 24, 27-40 (in Korean with English abstract).
- Elznicová, J., Kiss, T., Sipos, G., Faměra, M., Štojdil, J., Váchová, V. and Grygar, T.M., 2021, A central European alluvial river under anthropogenic pressure: The Ohře River, Czechia. *Catena*, 201, 105218.
- Erturaç, M.K., Şahiner, E., Zabc, C., Okur, H., Polymeris, G.S., Meric, N. and İkiel, C., 2019, Fluvial response to rising levels of the Black Sea and to climate changes during the Holocene: Luminescence geochronology of the Sakarya terraces. *The Holocene*, 29, 941-952.
- Evans, D.J.A., Campbell, I.A. and Lemmen, D.S., 2004, *Holocene Alluvial Chronology of One Tree Creek, Southern*

- Alberta, Canada. *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*, 86, 117-130.
- 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.
- Gong, Z., Li, S.H. and Li, B., 2014, The evolution of a terrace sequence along the Manas River in the northern foreland basin of Tian Shan, China, as inferred from optical dating. *Geomorphology*, 213, 201-212.
- Grant, K.M., Rohling, E.J., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Medina-Elizalde, M., Bronk Ramsey, C., Satow, C. and Roberts, A.P., 2012, Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years. *Nature*, 491, 744-747.
- Guo, X., Forman, S.L., Marin, L. and Li, X., 2018, Assessing tectonic and climatic controls for Late Quaternary fluvial terraces in Guide, Jianzha, and Xunhua Basins along the Yellow River on the northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 195, 109-121.
- Ishihara, T., Sugai, T. and Hachinohe, S., 2012, Fluvial response to sea-level changes since the latest Pleistocene in the near-coastal lowland, central Kanto Plain, Japan. *Geomorphology*, 147-148, 49-60.
- Kim, J.Y. and Hong, S.C., 2014, A study on the landscape evolution of Suip river, Yanggu - based on age estimation using rock surface k-feldspar IRSL -. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 21, 37-57 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Kim, J.Y., Lee, J.C. and Kim, J.K., 2006, Fluvial landforms and terrace formations in Yeongyangri, Yeosu (Korea). *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 13, 71-84 (in Korean with English abstract).
- Klinge, M., Lehmkühl, F., Schulte, P., Hülle, D. and Nottebaum, V., 2017, Implications of (reworked) aeolian sediments and paleosols for Holocene environmental change in Western Mongolia. *Geomorphology*, 292, 59-71.
- 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., 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., 2019, Comparison of Uplift Rate in the Southern Coast of the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 26, 55-67 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 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 Range. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 28, 15-30 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.R. and Park, C.S., 2022, Distribution of stream incision rate in the Southern Sobaek Mountain Range. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 151-165 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.Y., Seong, Y.B., Shin, Y.K., Choi, K.H., Kang, H.C. and Choi, J.H., 2011, Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and OSL dating of fluvial strath terraces along the Osip-cheon River, Korea: tectonic implications. *Geosciences Journal*, 15, 359-378.
- Leopold, L.B., 2000, *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, 320 p.
- Litchfield, N.J., 2008, Using fluvial terraces to determine Holocene coastal erosion and Late Pleistocene uplift rates: An example from northwestern Hawke Bay, New Zealand. *Geomorphology*, 99, 369-386.
- Litchfield, N.J. and Clark, K.J., 2015, Fluvial terrace formation in the lower Awheia and Pahaoa River valleys, New Zealand: implications for tectonic and sea-level controls. *Geomorphology*, 231, 212-228.
- Ministry of Construction, 1978, *Basic Plan for Hangang River Maintenance*. 432 p (in Korean).
- Ministry of Construction, 1992, *Basic Plan for Water System Dimensions of Hangang River*. 684 p (in Korean).
- Morriss, M.C. and Wegmann, K.W., 2017, *Geomorphology of the Burnt River, eastern Oregon, USA: Topographic adjustments to tectonic and dynamic deformation*. *Geomorphology*, 278, 43-59.
- O'Connor, J.E., Jones, M.A. and Halusk, T.L., 2003, *Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA*. *Geomorphology*, 51, 31-59.

- Pinter, N., Hardiman, M., Scott, A.C. and Anderson, R.S., 2018, Discussion of "Fluvial system response to late Pleistocene-Holocene sealevel change on Santa Rosa Island, Channel Islands National Park, California" (Schumann *et al.*, 2016. *Geomorphology*, 268: 322-340). *Geomorphology*, 301, 141-143.
- Ritter, D.F., Kochel, R.C. and Miller, J.R., 2011, *Process Geomorphology*. McGraw-Hill, Boston, 560 p.
- Robustelli, G., Lucà, F., Corbi, F., Pelle, T., Dramis, F., Fubelli, G., Scarciglia, F., Muto, F. and Cugliari, D., 2009, Alluvial terraces on the Ionian coast of northern Calabria, southern Italy: Implications for tectonic and sea level controls. *Geomorphology*, 106, 165-179.
- 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 Vésubie catchment area (Southern French Alps) from in situ-produced  $^{36}\text{Cl}$  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.
- Shin, J.R. and Hwang, S.I., 2014, A critical review on setting up the concept, timing and mechanism of Tertiary tilted flexural mode of the Korean Peninsula: A new hypothesis derived from plate tectonics. *Journal of the Korean Geographical Society*, 49, 200-220 (in Korean with English abstract).
- So, C.S., Na, K.C. and Park, M.E., 1989, Geological report of the Ipo sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 51 p (in Korean with English abstract).
- Stinchcomb, G.E., Driese, S.G., Nordt, L.C. and Allen, P.M., 2012, A mid to late Holocene history of floodplain and terrace reworking along the middle Delaware River valley, USA. *Geomorphology*, 169-170, 123-141.
- Wang, X., Vandenberghe, J., Yi, S., Van Balen, R. and Lu, H., 2015, Climate-dependent fluvial architecture and processes on a suborbital timescale in areas of rapid tectonic uplift: An example from the NE Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 133, 318-329.
- Won, J.G., Chi, J.M., Kim, S.J., Yun, S., So, C.S. and Kim, H.S., 1978, Geological report of the Yangpyeong sheet (1:50,000). Korea Research Institute Geoscience and Material Resources, 41 p (in Korean with English abstract).
- Yang, H., Yang, X., Huang, W., Li, A., Hu, Z., Huang, X. and Yang, H., 2020,  $^{10}\text{Be}$  and OSL dating of Pleistocene fluvial terraces along the Hongshuibai River: Constraints on tectonic and climatic drivers for fluvial downcutting across the NE Tibetan Plateau margin, China. *Geomorphology*, 348, 106884.
- Yeo, S.C. and Lee, I.K., 1975, Geological report of the Yeosu sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea, 29 p (in Korean with English abstract).

---

Received : December 12, 2022

Revised : January 2, 2023

Accepted : January 10, 2023