

오대천의 특성과 하안단구의 형성과정

이광률*

Properties of Channel and Evolutions of Fluvial Terraces in Odae River

Gwang-Ryul Lee*

요약 : 본 연구는 오대천 상·하류의 하천 지형 특성을 분석하고, 오대천의 하천 및 하안단구 지형 형성과정에 대해 검토하였다. 오대천은 상류 화강암 지역보다 하류 퇴적암 지역에서 풍화·침식에 대한 저항력이 크기 때문에, 상류보다 하류 유역분지에서 해발고도가 높고, 기복량은 크며, 경사도가 높게 나타난다. 또한 상류보다 하류에서 평균 하곡 폭이 1/3 정도로 좁고, 평균 하도 폭도 더 좁은 것으로 측정되었다. OSL 연대 측정 결과, 하안단구 1면의 형성시기는 최종 빙기 최성기인 MIS 2기말의 기온 상승기이며, 하안단구 2면은 최종 빙기 내의 아간빙기에 해당되는 MIS 3기 중반으로 측정되었다. 이를 토대로 하안단구 2면 형성 이후 현재까지 오대천의 평균 하각률은 상류 화강암 지역에서 0.205m/ka, 하류 퇴적암 지역에서 0.269m/ka로 계산되었다.

주요어 : 하안단구, 하각률, 기반암의 차이, 하곡 폭, 하상 구성물질

Abstract : This study analyzes the properties of fluvial landforms in the upper and lower reaches and investigates the evolutions of stream and fluvial terrace in the Odae river basin. The lower basin of the river that consist of sedimentary rocks resistant to weathering and erosion processes shows higher altitude, relief and slope than the upper basin that consist of granite less resistant to weathering and erosion processes. The average width of river valley at the lower reaches is one-third to the upper reaches and the average width of river channel at the lower reaches is narrower than at the upper reaches. Based on the OSL age dating, the fluvial terrace T1 formed at the temperature-rising period during the late MIS 2 and T2 formed at the middle MIS 3, interstadial period during the last glacial period. Based on the these results, the average incision rates of Odae river are calculated as 0.205m/ka and 0.269m/ka at the upper granite area and lower sedimentary rocks area, respectively.

Key Words : fluvial terrace, incision rate, difference of bedrocks, width of river valley, structure materials in riverbed

1. 연구 목적 및 방법

하천은 일정한 물길인 하도를 따라 흐르는 물을 말한다(권혁재, 2006). 하천은 하류로 갈수록 여러 지류

와 합류되어 집수구역이 넓어지면서 유량이 증가하고, 하폭 및 수심이 증대되는데, 수심의 증가보다 하폭의 증대 속도가 크므로, 일반적으로 하류로 갈수록 하폭은 넓어지게 되며(Leopold *et al.*, 1992; Charlton, 2008), 유량의 증가는 곡류 하천에서 곡류 파장의 증가

* 경북대학교 사범대학 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Teachers College, Kyungpook National University), georiver@knu.ac.kr

를 가져 와서, 하곡을 넓히고 평탄하게 만든다 (Summerfield, 1991; Strahler and Strahler, 2005). 즉 유량이 증가할수록 하천의 횡단면은 넓어지게 된다 (Ritter *et al.*, 2006). 또한 하천은 하류로 내려오면서 침식기준면에 근접하고, 측방침식과 퇴적이 활발해지면서 하곡을 넓히게 된다 (Plummer *et al.*, 2003; Strahler and Strahler, 2005; 권혁재, 2006). 따라서 일반적인 하천은 하류로 갈수록 여러 지류가 유입되어 유량이 증가하며, 침식기준면에 가까워지면서 하방침식보다는 측방침식이 보다 활발해져 하도와 하곡의 폭을 더욱 넓힌다.

하천의 이러한 일반적인 특성과는 달리, 우리나라에서 산지를 흐르는 일부 중·소 하천 중에서는 상류에서 하류로 가면서 하도와 하곡의 폭이 더 좁아지는 경우를 발견할 수 있는데, 그 대표적인 예로 강원도 평창군을 흐르는 오대천을 들 수 있다. 본 연구는 오대천의 상류와 하류 사이의 유역분지, 하곡, 하도, 하상의 형태 및 퇴적물 특성과 범람원과 하안단구 등 하천지형의 분포 특성 및 지형 발달에 영향을 미친 요인을 분석하고, 하천의 하각률, 하안단구 형성시기 등을 중심으로 하천의 발달과정에 대해 종합적으로 검토하고자 한다.

이를 위한 연구 방법으로 먼저, 오대천의 상류와 하류의 유역분지, 하곡, 하도의 형태적 특성을 파악하기 위해서, 1:5,000 및 1:25,000 지형도 및 수치지형도와 1:50,000 지질도(오대산, 하진부, 정선 도엽)를 대상으로, ArcGIS 프로그램을 이용하여, 각 지질별 유역분지의 고도, 경사도, 기복량 등을 분석하여 지도화 및 계량화하고, 하곡의 평면도 및 횡단면도를 작성하여, 하곡과 하도의 형태적 특성을 분석하였다. 또한 하도의 세부적인 단면과 홍수위 및 평수위를 확인하기 위해 '오대천 하천정비 기본계획(1996)'을 참고하였다.

다음으로, 1970년과 1972년 촬영된 1:37,500 축척의 오대천 일대의 항공사진과 1:5,000 지형도를 토대로 범람원과 하안단구 지형면을 1차적으로 분류하고, 이를 토대로 야외조사를 실시하여 원력의 유무와 퇴적층 노두 조사를 통해 지형면을 검증한 후 최종적인 지형 분류도, 하천지형 종단분포도, 하상비고 종단 분포도 등을 완성하여, 하안단구를 중심으로 한 하천 지형

의 분포 및 지형 특성을 분석하였다. 또한 야외조사 시에 발원지로부터 매 10km 지점마다 하곡의 경관 특성과 하도 표면을 이루는 구성물질의 유형 및 비율을 조사하고, 각 지점마다 하도 내에서 자갈 50개를 무작위로 수집한 후 장경을 측정하여 자갈 입경의 변화 양상을 분석하였다. 마지막으로 퇴적층이 잘 보존된 하안단구 1면과 2면을 대상으로 모래층에서 시료를 채취하여 OSL(Optical Simulated Luminescence) 절대 연대 측정을 실시하여, 하안단구면의 형성시기를 파악하고 오대천의 하각률을 계산하였다.

2. 연구 지역의 지질 및 지형 개관

오대천은 강원도 평창군, 홍천군, 강릉시의 경계인 두로봉(1,422m)에서 발원하여, 남류 및 남남서류하면서 평창군 진부면의 대부분 지역을 유역분지로 삼아 흐르다가, 남남동류하여 정선군 북평면 나전리에서 동강에 유입된다(그림 1). 오대천은 본류 길이 59.48km, 유역 면적 451.86km²로서, 유역 면적에 비해 본류의 길이가 긴, 남북으로 길쭉한 장방형의 유역분지를 지닌다.

오대천 유역분지를 구성하는 암석은 크게 3가지 종류로 구분되는데, 발원지로부터 약 8.5km 지점까지의 최상류에는 선캄브리아기 호상편마암이, 발원지로부터 약 8.5km 지점부터 약 27.5km 지점까지의 상류에는 중생대 쥐라기 대보화강암이, 그리고 27.5km 지점부터 하구까지의 하류에는 고생대 말기 퇴적암이 분포하고 있다(그림 2). 이러한 암석의 분포 특성은 오대천의 지형 패턴에 그대로 반영되는데, 유역분지 내에서 1,000m 이상의 고도를 갖는 산지는 호상편마암이 분포하는 최상류 지역과 퇴적암이 분포하는 하류지역에 집중되어 있다. 본 연구에서는 좁은 면적을 차지하는 최상류의 호상편마암 지역을 제외한, 상류의 화강암 지역과 하류의 퇴적암 지역에서 나타나는 하천 지형의 특성과 하천의 발달과정에 대해 논의하고자 한다.

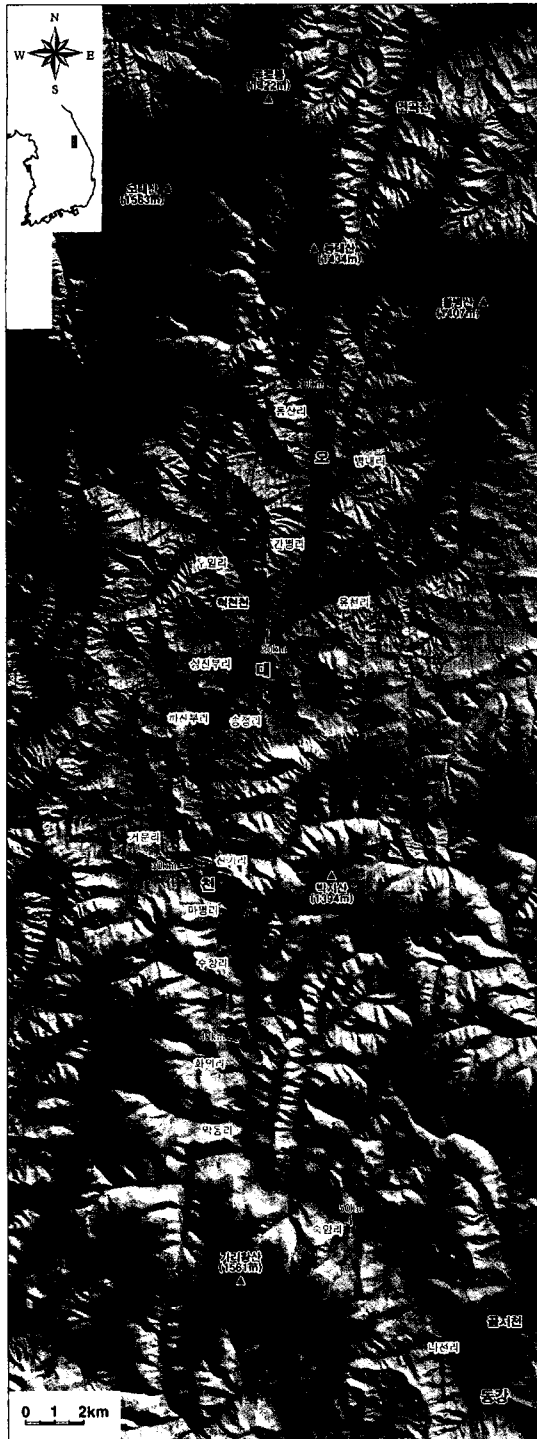


그림 1. 오대천 유역분지의 지형

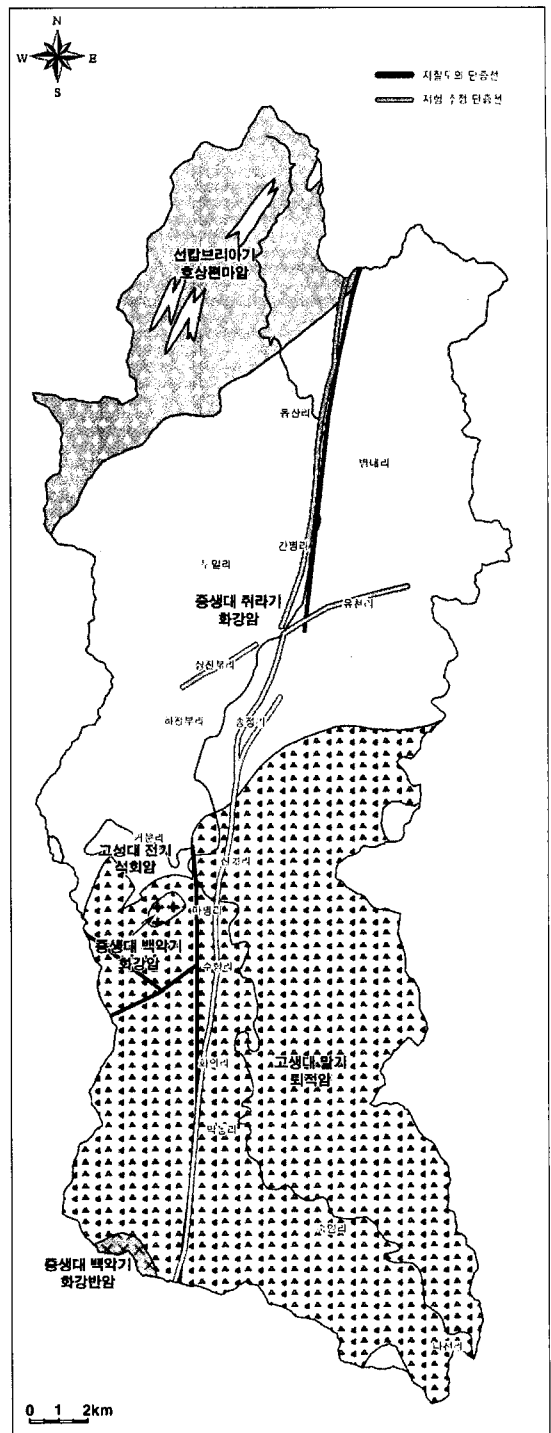


그림 2. 오대천 유역분지의 지질

3. 유역분지, 하곡, 하도, 하상의 특성

확인할 때, 상류의 화강암 지역은 상대적으로 해발고도가 낮고 기복이 완만하며, 하류의 퇴적암 지역은 해발고도가 높고 기복이 복잡한 것으로 나타난다.

그림 1, 2의 DEM 지형도와 지질도를 통해 육안으로

1:25,000 수치 지형도를 토대로 ArcGIS 프로그램을

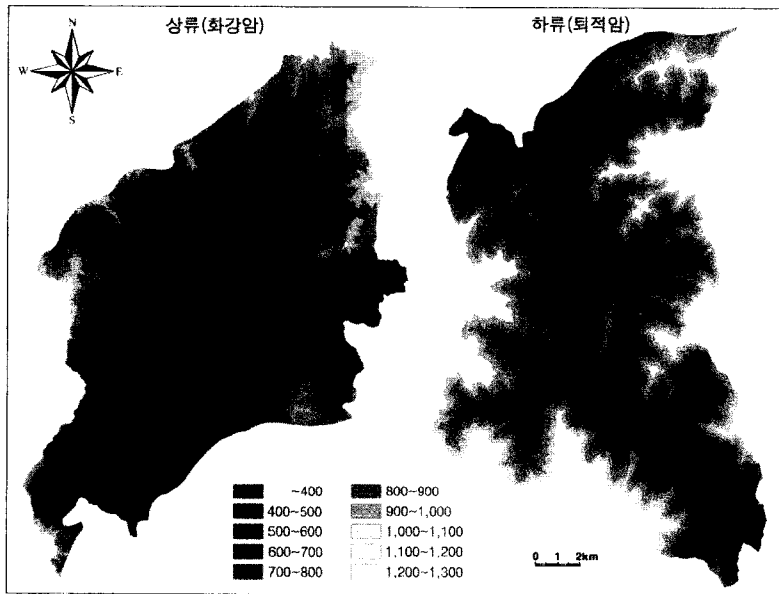


그림 3. 오대천 상류와 하류 유역분지의 고도 분포도

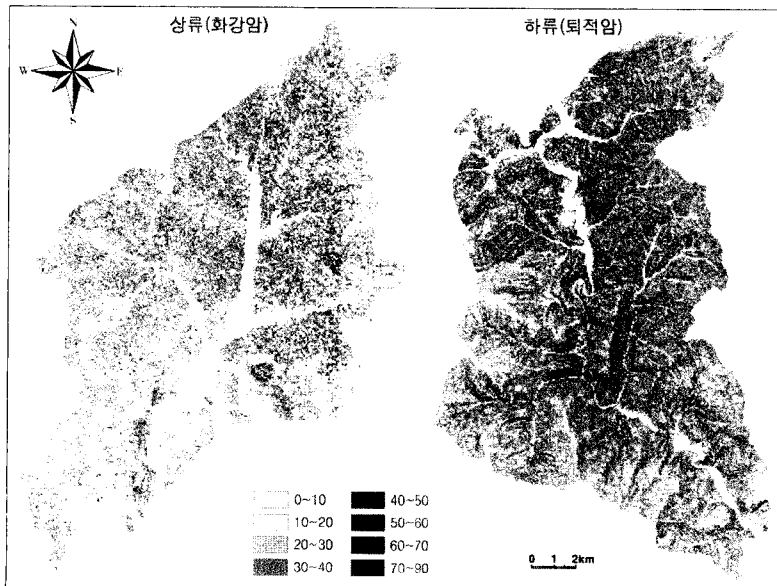


그림 4. 오대천 상류와 하류 유역분지의 경사도 분포도

표 1. 오대천 상류와 하류 유역분지의 기복량과 경사도

유역분지	평균 해발고도(m)	평균 기복량(m)	평균 경사도(°)
상류 - 화강암	767	156	19.7
하류 - 퇴적암	827	225	27.2

이용하여, 화강암으로 이루어진 상류 유역분지와 퇴적암으로 이루어진 하류 유역분지의 고도 및 경사도 분석을 실시한 결과(그림 3, 4, 표 1), 상류 유역분지는 평균 해발고도 767m, 평균 기복량 156m, 평균 경사도 19.7° 이고, 하류 유역분지는 평균 해발고도 827m, 평

균 기복량 225m, 평균 경사도 27.2°로서, 상류보다 하류 유역분지에서 해발고도가 높고, 기복량은 크며, 경사도가 높은 것으로 나타났다. 이는 상류의 화강암에 비해 하류의 퇴적암이 풍화·침식에 대한 보다 강한 저항력을 가지기 때문(이광률, 2007)으로 해석된다.

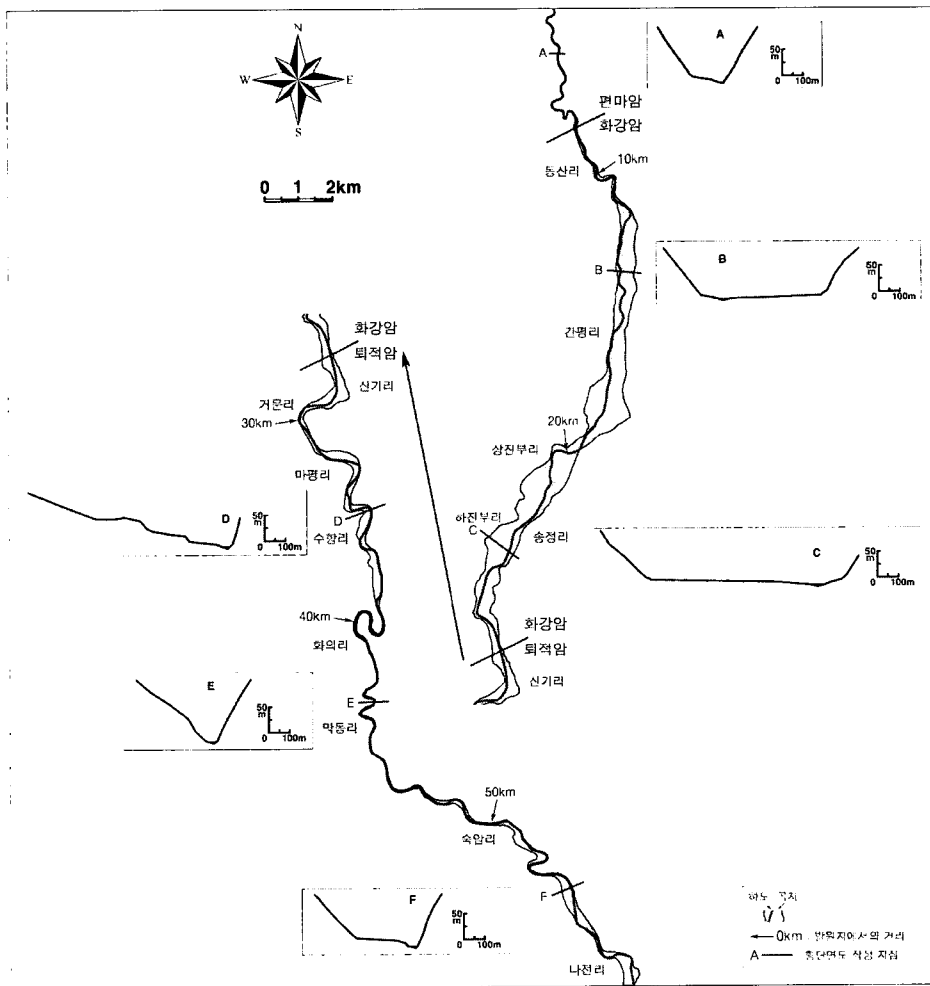


그림 5. 오대천 하곡의 평면도 및 횡단면도



그림 6. 상류 상진부리(21.5km)의 하곡 경관



그림 7. 하류 막동리(42.5km)의 하곡 경관

표 2. 오대천 상류와 하류의 하곡과 하도의 평균 폭

	하도 길이(m)	하곡 면적(m ²)	평균 하곡 폭(m)	평균 하도 폭(m)
상류 - 화강암	19,136	8,820,582	460.9	34.29
하류 - 퇴적암	31,085	4,652,294	149.7	32.08

수치지형도 상에서 오대천 본류 하곡의 곡저면을 추출해보면(그림 5), 상류는 하곡이 넓은데 비해, 하류는 하곡이 매우 좁은 것을 확인할 수 있다. 특히, 상류의 상진부리 일대는 곡저면의 폭이 약 1.2km에 달하는 곳도 있지만(그림 6), 하류의 막동리 일대는 하곡의 곡저면에 하도만 존재하여 폭이 약 20m에 불과한 지점도 나타난다(그림 7). 하도의 길이와 하곡의 면적을 토대로 상류와 하류의 평균 하곡 폭을 계산해보면(표 2), 화강암으로 이루어진 상류 지역은 평균 하곡 폭이 460.9m이고, 퇴적암으로 이루어진 하류 지역은 평균 하곡 폭이 149.7m로서, 오대천은 상류보다 하류에서

하곡의 폭이 평균 1/3 정도로 좁다.

1:5,000 지형도를 토대로, 발원지로부터 10km 거리 지점부터 55km 지점까지의 구간에서 각 2.5km 지점마다 하도의 폭을 측정된 결과(표 2), 평균 하도 폭은 상류의 화강암 지역에서 34.29m, 하류의 퇴적암 지역에서 32.08m로, 집수 구역이 넓어 유량이 많은 하류에서 오히려 유수가 흐르는 표면인 하도의 폭이 좁은 것으로 측정되었다.

하상 표면의 퇴적물 특성을 살펴보기 위해, 오대천의 발원지로부터 매 10km 지점 정도에 해당되는 교량이나 제방에서 하상을 대상으로 일반 촬영한 사진을

표 3. 오대천의 각 지점 별 하상 표면 물질 구성 비율과 자갈의 평균 장경

발원지로부터의 거리		10km	20km	30km	40km	50km	58km
하상의 물질 구성 비율	기반암	45%	25%	0%	29%	21%	15%
	자갈	50%	68%	34%	41%	60%	58%
	모래	5%	7%	66%	30%	19%	27%
하상 자갈의 평균 장경		86.9mm	72.3mm	66.9mm	74.8mm	66.2mm	68.5mm

바탕으로 그래픽 프로그램을 이용하여 사진의 주변부를 확대시켜서 사진의 왜곡을 어느 정도 보정한 후, 하상 표면을 이루는 물질의 구성 비율을 계측하였다. 그리고 하상의 포인트 바(point bar)에 퇴적되어 있는 자갈을 무작위로 50개 수집하여 장축의 지름을 측정하였다(표 3). 하상의 물질 구성 비율은 가장 상류인 10km 지점에서는 하상에서 기반암이 노출된 부분이 45%를 차지하지만, 하류로 갈수록 점점 감소하여, 30km 지점에서는 하상에서 기반암을 발견할 수 없으며, 대신 모래가 퇴적된 부분이 66%까지 증가한다. 그러나 30km보다 더 하류로 내려가면 모래가 퇴적된 부분의 비율은 더 이상 증가하지 않으며, 기반암이 노출된 곳들이 증가하기 시작하여, 40km 지점에서는 기반암의 비율이 29%로, 50km 지점에서는 21%로 나타나고 있다. 화강암과 퇴적암의 경계가 약 27.5km 지점인 것을 고려하면, 결국, 상대적으로 침식에 약한 화강암을 기반암으로 한 상류부의 하상에서는 하류로 갈수록 기반암의 비율은 급격히 줄고, 모래 퇴적층의 비율이 증가하지만, 상대적으로 침식에 강한 퇴적암으로 이루어진 하류부에서는 더딘 침식의 결과 하상에서 다시 기반암이 나타나고 있다.

하천 퇴적물은 하류로 운반되는 과정에서 하상의 기반암 및 다른 퇴적물들과 접촉하면서 마모되고 분쇄되는 과정을 거치기 때문에, 하류로 갈수록 퇴적물의 평균 입경이 작아지는 것이 일반적이다. 오대천에서도 가장 상류에 해당되는 10km 지점에서 자갈의 평균 입경이 가장 크고, 가장 하류인 50km 지점에서 평균 입경이 가장 작았다. 그러나 각 지점별 평균 입경의 변화를 보면, 상류에서 30km 지점까지는 평균 입경이 감소하다가, 40km 지점에서는 평균 입경이 다시 증가한다. 이러한 결과는 오대천이 상대적으로 풍화·침식에 약한 화강암 지역에서 풍화·침식에 강한 퇴적암 지역으로 유입되면서, 하상에서 기반암이 차지하는 비율이 일시적으로 증가하게 되고, 하상의 기반암과 주변의 급경사 산지로부터 퇴적물을 공급받음으로써, 자갈을 비롯한 퇴적물의 크기도 일시적으로 증가된 것으로 해석된다.

4. 하천 지형의 특성

1) 하천 지형의 분포

오대천에서는 범람원과 하안단구 등의 하천지형들이 관찰된다. 하안단구는 최근에 형성되어 고도가 낮은 1면(T1)부터 가장 오래되어 고도가 가장 높은 9면(T9)까지 모두 9단이 발견되었다(그림 8, 9). 가장 최근에 형성된 지형인 범람원과 하안단구 1면은 다른 지형면에 비하여 상류에서 하류로의 종단면적 연속성이 비교적 높은 편이다. 그러나 최상류부인 발원지에서 약 10km 지점까지와 하류부인 37km 지점부터 하구까지는 측방침식 및 퇴적에 의한 하곡의 확장이 용이하지 않아 하곡이 매우 좁고 깊게 나타나면서 범람원의 분포 밀도가 상대적으로 낮다. 이에 반해 하안단구 1면은 하곡이 좁은 발원지에서 약 10km 지점까지에서 뿐만 아니라, 하곡이 급격하게 넓어져 넓은 범람원이 발달하며 과거 자연 상태의 하도가 넓게 퍼져 여러 갈래로 흐르는 망류 하도를 유지하였던 14~30km 구간에서도 지형면이 관찰되지 않는다.

하안단구 2면은 13km, 16km, 17km, 20~22km, 29km, 32~34km, 57km 지점에서 상·하류 구분 없이 고르게 불연속적으로 분포하고 있다. 하안단구 3면은 약 15km, 20~21km, 34km의 세 지점에서만, 4면은 21km, 49km 지점에서, 5면은 20~21km, 31~34km, 49km 지점에서, 6면은 31~34km와 49km 지점에서, 7면은 31km 지점에서만 확인되었다. 8면은 34.5km 지점에 위치한 곡류절단에 의해 남겨진 구유로면이며, 9면은 32.5km 지점에서 발견된 하안단구로 추정되는 평탄면이다.

상류의 화강암 지역에서는 상대적으로 범람원의 발달이 탁월하지만, 하안단구의 분포는 상대적으로 빈약한 편이다. 특히, 오대천에서 하곡이 가장 넓게 나타나는 약 15~25km 구간에 해당되는 상진부리와 하진부리 일대에서는 하안단구 1면이 전혀 발견되지 않는다. 이는 하안단구 1면 형성 이후 현재에 이르기까지 이 구간에서 하도의 유로 변화에 의한 측방침식이 매우 활발하게 발생하여 하곡이 넓어지는 과정에서 하안단구

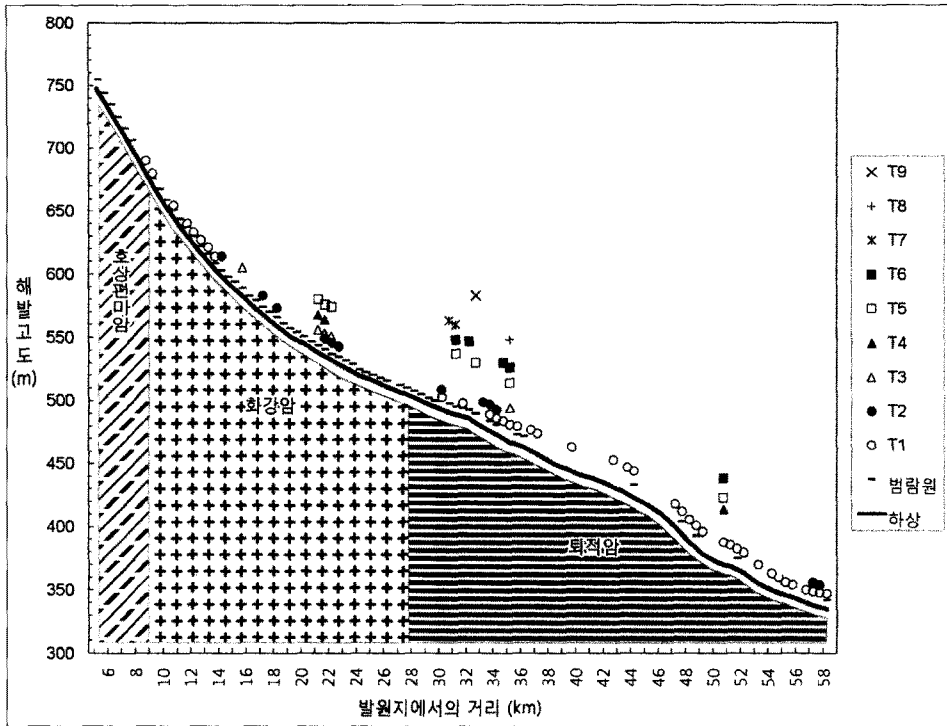


그림 8. 오대천의 하상 및 하안단구 종단 분포도

1면이 모두 침식되어 사라졌기 때문에 추정된다. 반면, 하류의 퇴적암 지역에서는 범람원의 분포는 미약하지만, 하안단구는 1면의 분포 밀도가 매우 높고, 2면 이상의 하안단구면들은 30~35km 구간에서 고루 분포하고 있다.

상대적으로 풍화·침식에 약한 화강암 지역에서는 하방침식에 의해 국지적 침식기준면에 쉽게 도달하고, 활발한 측방침식 작용으로 하곡의 폭은 더욱 넓어지게 됨으로써, 하곡 양안의 사면이 후퇴되는 과정에서 범람원에 보다 인접한 하안단구 1면을 시작으로 여러 단의 단구면들이 개석되어 사라지고, 하곡에는 넓은 범람원이 형성되었다. 그러나 풍화·침식에 강한 퇴적암 지역에서는 하천의 침식작용이 상대적으로 어려워 하상은 침식기준면에 도달하기 위해 지속적으로 하방침식만을 꾸준히 진행하고 측방침식은 거의 이루어지지 않음으로써, 매우 좁고 깊은 하곡을 형성하기 때문에 범람원의 발달은 미비하며, 하곡 양안의 사면이 급

경사를 이루면서도 사면의 후퇴를 통한 개석작용은 더디어, 하안단구면의 면적은 협소하지만 고도가 높은 하안단구면들이 일부 잔존하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 여러 단의 하안단구가 조밀하게 나타나는 상류의 21~22km 구간과 하류의 30~35km 구간은 하안의 산록 하단부를 따라 단층선이 지나는 구간이라는 공통점을 가지고 있다(그림 2). 단층선 지역은 파쇄대로서 하천의 침식작용이 상대적으로 우수하기 때문에 단층선이 존재하지 않는 주변 지역에 비해 하곡의 수평적인 확장과 수직적인 하카이 상대적으로 용이하여 하천지형의 발달이 활발할 수 있다. 또한 위 구간과 같이 단층선을 가로질러 하천의 유로가 형성되어 있는 경우에는 하천의 유로 내에서 침식작용이 유리한 지점과 불리한 지점이 반복적으로 나타남으로서, 하방침식과 측방침식의 상호작용에 따른 하천의 수평적인 유로 변화가 활발해지게 되고, 이로 인해 곡류부 활주사면에서는 다양한 하안단구면들이 형성될 수 있다. 따라

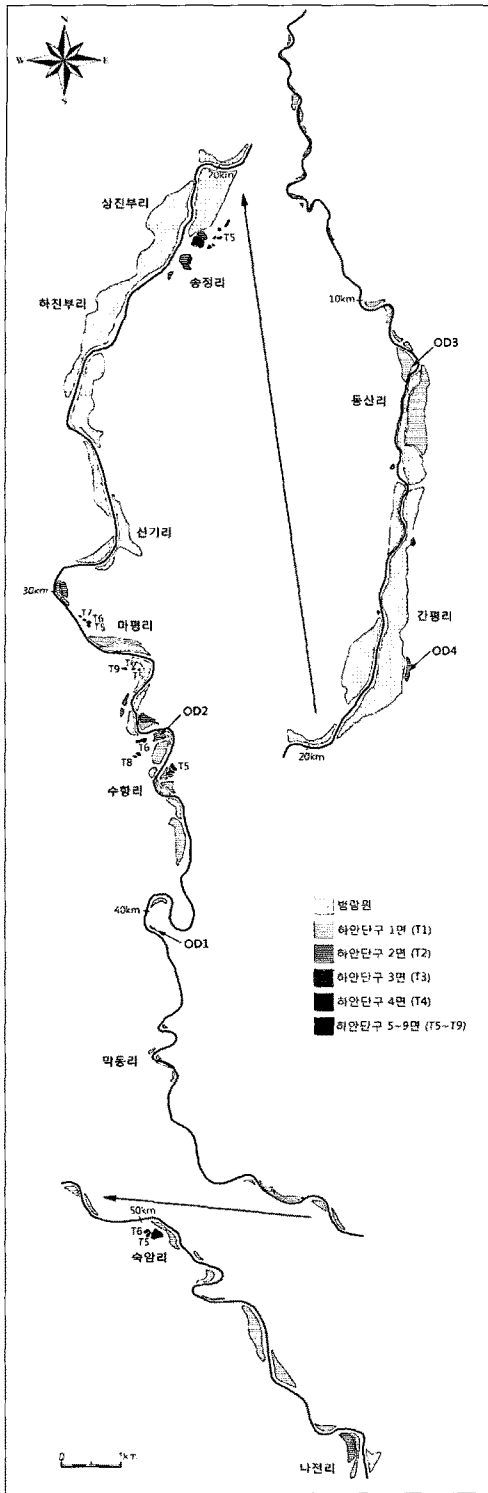


그림 9. 오대천의 하천 지형 분류도

서 하안단구의 형성과 보존에 있어 단층선의 존재는 매우 긍정적인 역할을 담당하고 있는 것으로 파악된다.

각각의 범람원 및 하안단구면의 최고 고도와 현 하상과의 고도차인 하상비고를 살펴보면(그림 10), 범람원은 하상으로부터 5~10m의 범위에 분포하며, 평균 6.4m의 하상비고를 이루고 있다. 하안단구 1면의 하상비고는 10~21m의 범위에서 평균 14.0m로 나타나며, 2면은 14~21m의 범위에서 평균 16.6m로 나타난다. 하안단구 3면의 평균 하상비고는 20.9m, 4면은 34.0m, 5면은 45.6m, 6면은 61.2m, 7면은 71.5m, 8면은 81.0m, 9면은 100.5m로 계산되었다.

하상비고의 종단 분포를 살펴보면, 상·하류 구간 모두에서 범람원과 하안단구의 하상비고가 일정한 특징을 가지며 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 종단면 상에서 지형면의 분포 밀도가 높은 범람원과 하안단구 1면, 2면을 토대로 볼 때, 발원지에서 약 20km 지점까지는 지형면의 고도가 대체로 일정하게 유지되다가, 20~32km 구간에서는 고도가 다소 낮아지고, 다시 32~54km 구간에서는 상대적으로 매우 높아지며, 54~57km 구간에서는 다시 낮아지다가 하구인 57~58km 지점에서는 다시 높아지는 경향을 보인다.

범람원과 하안단구 1면의 하상비고가 두드러지게 높은 32~54km 구간은 하류의 퇴적암 지역으로, 암석의 풍화·침식에 대한 저항력이 상대적으로 커서 유량이 많은 하류 구간임에도 불구하고 상류에 비해 하곡이 더 좁다. 특히 하안단구 1면의 비고가 가장 높게 나타나는 42~45km 구간은 하곡이 가장 좁으며, 하상 종단면이 볼록형(convex)을 나타내고 있어, 하류에서 이 구간이 가장 경암부에 해당하는 것으로 판단된다.

따라서 이러한 하곡의 지형 특성이 범람원과 하안단구의 고도 분포에 영향을 미칠 수 있다. '오대천 하천 정비 기본계획'을 참고하여 각 지점별 평수위에 대한 홍수위의 고도차와 하안단구 1면의 하상비고의 변화를 살펴보면(그림 11), 모든 구간에서 대체로 홍수위와 하안단구 1면 및 2면의 비고 변화가 매우 유사하게 나타나고 있다. 이는 하도의 폭과 형태의 차이에 의해 발생하는 홍수위가 범람원과 하안단구의 발달과정에 주요한 영향을 미치고 있음을 의미한다. 즉, 하류 구간에서

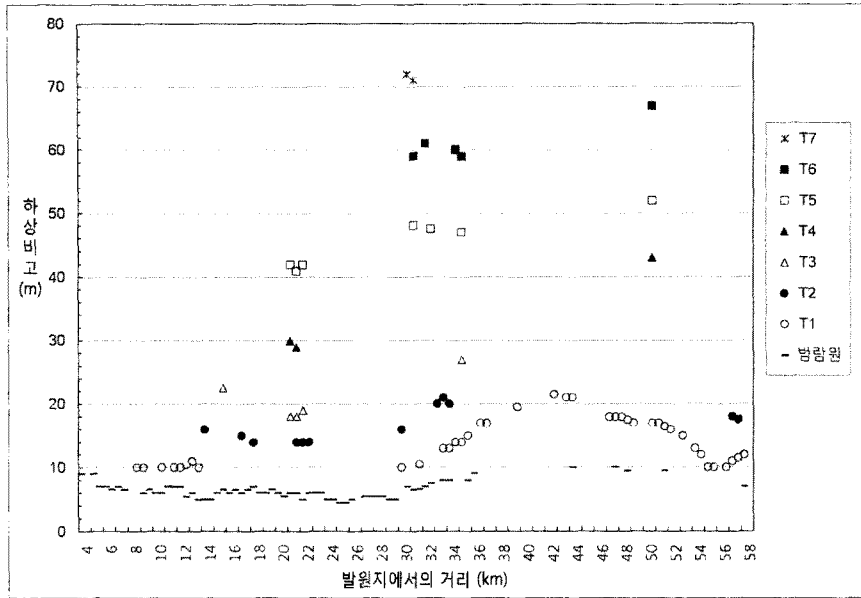


그림 10. 오대천의 범람원과 하안단구의 하상비고 종단 분포도

도 풍화·침식력에 대한 저항력이 강하여 상대적으로 침식작용이 더딘 지역은 하곡의 폭이 매우 좁기 때문에, 하도의 통수 단면적이 작아 홍수 시에 다른 구간에 비해 하천의 수위가 높으며, 이로 인해 현재의 범람원과 과거 홍수 시에 형성된 고범람원인 하안단구 모두 다른 구간에 비해 상대적으로 높은 고도에서 형성되었던 것으로 판단된다.

또한 각 구간별 하천지형면의 하상비고 종단 분포의 차이는 하곡의 형태적 특성에 의한 수위 상승의 영향 뿐 아니라, 상대적인 지반 상승과의 관련성에서도 검토될 수 있다. 즉, 상대적으로 하상비고가 높게 나타나는 발원지에서 약 20km 지점까지의 구간과 32~54km 구간 지역에서 상대적으로 지반 융기가 활발할 가능성이 있다. 발원지로부터 11km 지점까지 오대천은 하곡의 폭이 매우 좁은 최상류의 산지 소하천을 이루기 때문에, 이러한 하곡의 특성에 의한 영향이 하상비고 변화의 주요 요인이라고 할 수 있으나, 11~20km 구간은 하곡의 폭이 넓음에도 불구하고 지형면의 고도가 미약하나마 다소 높게 나타나고 있다. 이에 대해 이광률 등(2008)은 단층 지형의 분포와 하안단구 종단 분포의 고도 변화를 통해 진부 단층선의 동쪽 지괴가 상대적으로

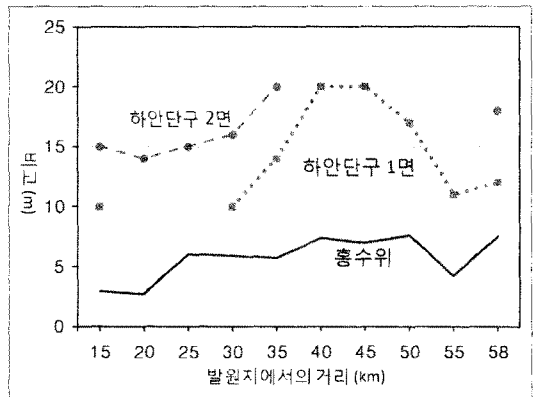


그림 11. 오대천의 지점별 홍수위와 하안단구 1, 2면의 하상비고 변화

로 상승하였을 가능성을 제시한바 있다. 실제로 하천 지형면의 하상비고가 상대적으로 높게 나타나는 상류의 11~20km 구간과 하류의 32~54km 구간이 모두 단층선의 동쪽에 위치한 구간이라는 점에서, 구간별 하천 지형면의 하상비고 차이는 하곡의 형태에 의한 영향 뿐 아니라, 단층선 동·서측 지괴간의 지반 상승의 차이에 의한 영향도 존재하였을 것으로 판단된다.

2) 하안단구 퇴적층의 특성

하안단구 1면의 퇴적층에서는 cobble급의 원력~완원력이 우세하며, 기계적 및 화학적 풍화작용을 거의 받지 않았거나 표면이 황색으로 약간 변색된 정도인 풍화 1~2단계에 해당되는 자갈이 매우 특징적으로 나타나고 있다(그림 12). 자갈 이외의 기질(matrix)은 실트보다는 모래가 우세하며, 상류보다는 하류에서는 입도가 보다 큰 경향을 보인다. OSL 연대측정이 이루어진 OD1 노두는 하류 수항리와 동막리의 경계에 위치한 화의교의 북안에 발달한 하안단구 1면으로서, 단구면의 동쪽 가장자리에서 나타나는 원력층 상부에 위치한 두께 약 1.5m의 모래층 중앙에서 시료를 채취하여

연대측정을 실시하였다(그림 13).

하안단구 2면의 퇴적층에서도 cobble급의 자갈이 우세하나, 하안단구 1면에 비해서는 pebble급의 자갈의 비율이 상대적으로 높은 편이며, 상류에서는 하안단구 1면과 마찬가지로 원력~완원력이 우세하나, 하류에서는 아원~원력이 보다 우세하게 나타난다(그림 14, 15). 대체로 자갈의 표면에는 황갈색의 산화 피막이 형성되어 있어 변색은 심하지만, 광물의 절반 이하가 분해 또는 붕괴된 정도를 보이는 풍화 2~3단계에 해당된다. 기질은 하안단구 1면에 비하여 모래보다는 실트의 비율이 높은 편이다. OSL 연대측정을 실시한 OD2 노두는 하류 수항리의 절터교 남안에 위치한 단구면으로, 퇴적층의 두께가 약 6m로서 역층 사이의 중

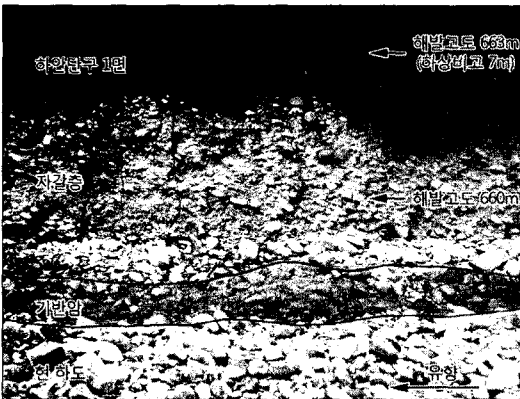


그림 12. 노두 OD3(하안단구 1면)의 퇴적층



그림 13. 노두 OD1(하안단구 1면)의 경관



그림 14. 노두 OD4(하안단구 2면)의 퇴적층

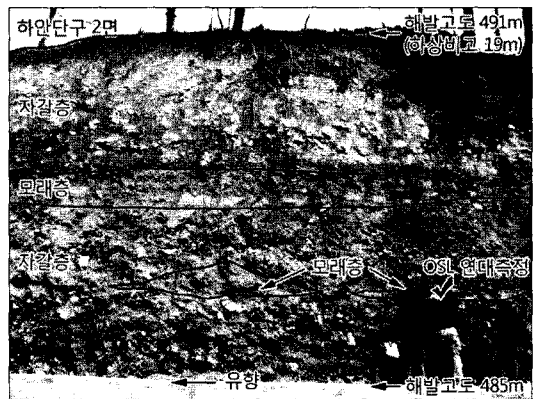


그림 15. 노두 OD2(하안단구 2면)의 퇴적층

부와 하부에 모래층이 존재하는데, 하부에 렌즈상으로 퇴적된 모래층에서 시료를 채취하여 연대측정을 실시하였다(그림 15).

하안단구 3면 이상은 지형면이 하곡의 측사면에 협소하게 나타나고, 대부분 농경지, 묘지 등으로 사용되거나 식생 피복이 매우 양호한 산림으로 조성되어 있어, 뚜렷한 퇴적층 노두를 확인할 수 없었다. 그러나 모든 단구면의 지표에서는 pebble급의 아각력~원력들이 관찰되었으며, 토양은 황적색 또는 황갈색을 띠고, 자갈의 풍화 정도는 풍화가 크게 진전되지 않은 2단계에서 절반 이상의 광물 구조가 분해 또는 붕괴된 4단계까지 다양하게 나타나고 있다.

5. 하천의 하각률과 하안단구 형성시기

1) 하천의 하각률

한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 OSL 연대측정을 실시한 결과, 하안단구 1면의 퇴적층인 OD1은 14,000년 전, 하안단구 2면인 OD2는 42,000년 전에 퇴적된 것으로 측정되었다. 즉, 하안단구 1면 퇴적층의 형성시기는 최종 빙기의 최성기인 MIS 2기이며, 하안단구 2면 퇴적층은 최종 빙기 내의 아간빙기에 해당되는 MIS 3기 중반에 형성된 것으로 판단된다.

하안단구의 형성은 하천이 침식기준면을 향한 하각(incision) 작용의 결과로서, 하각은 지질, 지형, 기후, 수문, 인간 활동 등에 의해 발생하므로(Schumm, 1999), 하천의 형성 및 변화 과정을 이해하는데 많은 정보를 제공한다. 오대천 상·하류 구간에서 각 하안

단구면의 고도와 홍수위, 즉 범람원 고도와와의 차이(범람원 비고)를 하안단구 형성 연대로 나누어 하각률을 계산해보면 표 4와 같다. 상류의 화강암 지역에서 하안단구 1면의 하각률은 0.307m/ka, 하안단구 2면은 0.205m/ka로 계산되었으며, 하류의 퇴적암 지역에서 하안단구 1면은 0.536m/ka, 하안단구 2면은 0.269m/ka로 나타났다. 따라서 상류의 화강암 지역에 비해 하안단구의 비고가 상대적으로 높은 하류의 퇴적암 지역에서 하각률이 높게 측정되었다. 또한 하안단구 2면부터 현재까지에 비해, 하안단구 1면부터 현재까지의 시기 동안 하각률이 높은 것으로 나타났다. 이는 하안단구 2면 형성시기부터 현재까지의 대부분의 시기는 현재보다 기온이 낮은 빙기에 속하므로, 상대적으로 작은 강수량과 하천 유량으로 하천의 침식력이 작아 하각률이 크지 않았던 것으로 추정되며, 최종 빙기 말인 하안단구 1면 형성시기에서 현재까지의 기간은 대부분 홀로세 동안의 온난기에 해당하므로, 많은 강수량으로부터 공급되는 하천 유량에 의해 하각률이 높게 나타나고 있다.

하안단구 2면 형성 이후부터 현재까지 오대천의 주변에 위치한 내린천이 0.15~0.17m/ka, 골지천이 0.17m/ka, 오십천이 0.17~0.23m/ka인 것(윤순옥 등, 2007)과 비교할 때, 오대천의 하각률은 주변 태백 산지를 흐르는 하천에 비해 다소 높은 하각률을 가진다(표 5). 그러나 울산 단층대의 동쪽 융기 지괴에 해당되는 경주시 동해안의 하서천에서 하안단구 2면(저위 1면) 형성 이후의 하각률이 0.3~0.5m/ka로 계산된 것과 비교해보면(장호 등, 2007), 오대천은 하서천보다는 낮은 하각률을 갖는다. 하서천의 유역 면적과 유량이 오대천에 비해 매우 적음을 고려하면, 오대천은 하서천 유역에 비해 용기량이 보다 작고, 기반암이 침식에 강한

표 4. 하안단구 1면(OD1)과 2면(OD2)의 OSL 연대와 하각률

지형 구분	노두명	OSL 연대	상류 - 화강암		하류 - 퇴적암	
			범람원 비고	하각률	범람원 비고	하각률
하안단구 1면	OD1	14 ± 1ka	4.3m	0.307m/ka	7.5m	0.536m/ka
하안단구 2면	OD2	42 ± 3ka	8.6m	0.205m/ka	11.3m	0.269m/ka

표 5. 오대천을 포함한 국내·외의 하각률에 대한 연구

지역	기후	지질	유역 면적(km ²)	하각 기간	하각률(m/ka)
오대천 상류	습윤	화강암	249	제4기 말	0.205
오대천 하류	습윤	퇴적암	452	제4기 말	0.269
내린천	습윤	변성암	401	제4기 말	0.15~0.17
골지천	습윤	퇴적암, 변성암	543	제4기 말	0.17
오십천	습윤	퇴적암, 화산암	391	제4기 말	0.17~0.23
하서천	습윤	퇴적암, 화산암	43	제4기 말	0.3~0.5
미국 North California	지중해성	퇴적암	655	홀로세	0.7~1.8
미국 Central California	지중해성	퇴적암, 관입암	10~20	제4기	0.25 미만
미국 Montana	습윤	퇴적암	1,420	제4기	0.5~6.9
일본 남부 지역	습윤	퇴적암	0.15~0.4	제4기	10 이하

* 국내 지역은 윤순옥 등(2007)과 장호 등(2007)에서, 국외 지역은 Wohl(1999)에서 인용

것으로 추정된다. 반면, 미국 서부 지역이나 일본 남부 지역과 같이 용기가 활발한 지역의 하천 하각률과 비교하면, 오대천의 하각률은 상대적으로 낮은 값을 보인다.

2) 하안단구 형성시기

OSL 연대 측정 결과, 하안단구 1면의 형성시기는 14,000년 전으로, 최후 빙기 최성기인 MIS 2기의 후반으로서, 빙기 내에서도 기온 상승기에 해당된다. 하안단구 2면의 형성시기는 42,000년 전으로, 최후 빙기 내의 아간빙기인 MIS 3기의 중반에 해당된다. 따라서 절대연대가 계산된 하안단구 1, 2면의 형성시기는 모두 빙기에 속하지만 상대적으로 기온이 다소 높았던 시기에 해당된다. 이러한 시기는 빙기에 해당하므로 기계적 풍화에 의해 산지 사면으로부터 암설의 공급이 꾸준히 유지되면서도, 이전보다 상대적으로 기온이 높아져 일시적 또는 국지적으로 증가한 강수량에 의해 하천 유량이 확보되어 하도 내에서 침식·운반·퇴적 작용의 발생이 가능하게 됨으로써, 하안단구를 이루는 퇴적층이 형성되었을 것으로 추정된다.

앞서 계산된 오대천의 하각률을 토대로 하안단구 3면 이상의 지형면에 대한 형성시기를 추정하였다. 상대적으로 간빙기를 오래 거친 하안단구 1면의 하각률이 높고, 빙기를 오래 거친 2면의 하각률이 낮음을 고려하여, 하안단구 1면 및 2면 형성 이후의 하각률이 위의 결과와 같이 계산되도록, 평균 하각률을 0.26m/ka으로 가정하고, δ¹⁸O의 비율이 높은 간빙기의 최대 하각률을 0.46m/ka, δ¹⁸O의 비율이 낮은 빙기의 최소 하각률을 0.06m/ka로 추정하여, 제4기 말의 오대천의 하각률 곡선을 작성하였다(그림 16).

이러한 하각률 곡선을 토대로, OSL 연대 측정이 실시된 하류 퇴적암 구간에서의 각 하안단구면의 하상비고를 적용하여 하안단구의 형성시기를 추정해보면, 하안단구 3면의 형성시기는 빙기인 MIS 4기 초, 하안단구 4면의 형성시기는 빙기인 MIS 6기 말, 하안단구 5면은 MIS 6기 초, 하안단구 6면은 간빙기인 MIS 7기 초의 한랭기, 7면은 빙기인 MIS 8기 말로 추정된다.

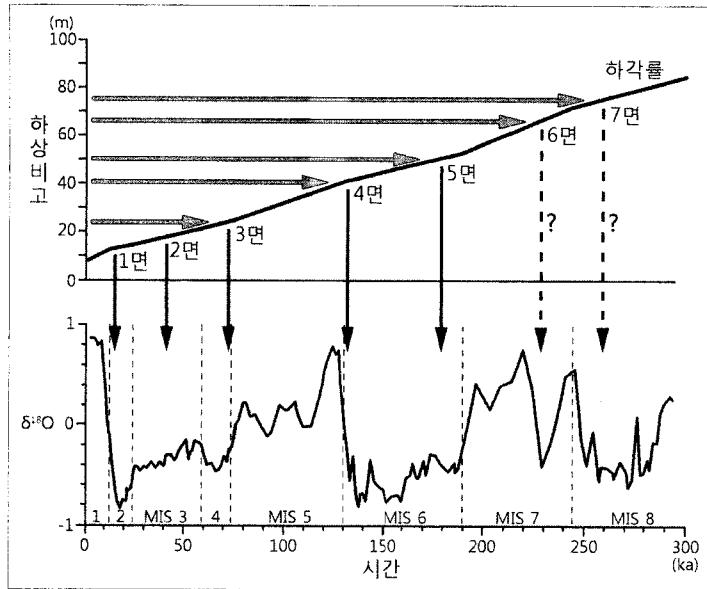


그림 16. 오대천의 하각률 곡선과 각 하안단구면의 형성시기
 $\delta^{18}O$ 값에 따른 MIS를 구분한 아래 그림은 Bradley(1999)에서 인용

6. 결론

태백 산지의 강원도 평창군 진부면과 정선군 북평면을 흐르는 오대천은 일반적인 하천과는 달리 상류에서 하류로 가면서 좁은 하곡의 경관이 나타난다. 본 연구는 오대천 상류의 화강암 지역과 하류의 퇴적암 지역에서 나타나는 이러한 하천 지형의 특성과 하천의 발달과정에 대해 분석하였다. 오대천은 상류보다 하류 유역분지에서 해발고도가 높고, 기복량은 크며, 경사도가 높은 지형 특성을 갖는다. 그리고 평균 하곡 폭은 상류 지역에서 460.9m, 하류 지역에서 149.7m로서, 상류보다 하류에서 하곡의 폭이 1/3 정도로 좁아진다. 또한 평균 하도 폭도 상류 지역에서 34.29m, 하류 지역에서 32.08m로, 상류보다 하류에서 더 좁은 것으로 측정되었다. 하상의 구성물질도 상류 지역에서는 하류로 갈수록 기반암의 비율은 급격히 줄고 모래 퇴적층의 비율이 증가하지만, 하류 지역에서는 하상에서 기반암이 또 다시 나타나고 있다. 이러한 유역분지, 하곡, 하도, 하상의 지형 특성은 상류 지역을 구성하는

기반암인 화강암에 비해 하류 지역의 기반암인 퇴적암이 풍화·침식에 대한 보다 강한 저항력을 가지기 때문으로 해석된다.

오대천의 하안에서는 범람원과 하안단구 1면에서 9면까지의 하천 지형면이 확인되었는데, 하천 종단면 상에서 범람원과 하안단구 1면은 전체적으로 분포의 연속성이 높은 편이다. 그러나 특징적으로 하안단구 1면은 오대천에서 하곡이 가장 넓게 나타나는 약 15~25km 구간에서 전혀 발견되지 않는데, 이는 하안단구 형성 이후 현재까지 하도의 유로 변화에 의한 측방침식이 매우 활발하게 발생하여 하곡이 넓어지는 과정에서 하안단구 1면이 모두 침식되어 사라졌기 때문으로 추정된다. 반면, 하류의 퇴적암 지역에서는 종단면상의 연속성은 낮지만, 여러 단의 하안단구가 고루 분포하는데, 이는 기반암인 퇴적암이 풍화·침식에 강하므로 하천의 침식작용이 상대적으로 어려워져 측방침식에 이르지 못하고 하방침식만을 꾸준히 진행하였고, 하곡 양안의 사면이 급경사를 이루면서도 사면의 후퇴를 통한 개석작용은 더디어, 면적은 작지만 고도가 높

은 여러 단의 하안단구면이 잔존하고 있는 것으로 판단된다. 특히, 여러 단의 하안단구가 집중된 상류의 21~22km 구간과 하류의 30~35km 구간은 모두 단층선이 지나는 구간이라는 점에서 하안단구의 형성과 보존에 있어 단층선의 존재가 매우 중요한 역할을 하는 것으로 파악된다.

하천중단면 상에서 각 하안단구의 하상비고는 하류 지역의 32~54km 구간에서 상대적으로 매우 높아지는 경향을 보인다. 이는 이 구간에서 좁은 하곡 및 하도 폭으로 인해 통수 단면적이 작아 홍수 시에 하천의 수위가 높아지는 결과 때문으로 판단된다. 또한 하상비고가 상대적으로 높게 나타나는 상류의 11~20km 구간과 하류의 32~54km 구간이 모두 단층선의 동쪽에 위치한 구간이라는 점에서, 단층선 동·서측 지괴간의 지반 상승의 차이에 의한 영향도 존재하였을 것으로 판단된다.

OSL 연대 측정 결과, 하안단구 1면의 형성시기는 최종 빙기의 최성기인 MIS 2기말의 기온 상승기이며, 하안단구 2면은 최종 빙기 내의 아간빙기에 해당되는 MIS 3기 중반으로 측정되었다. 이를 토대로 오대천의 하각률을 계산하면, 상류의 화강암 지역에서 하안단구 1면 형성 이후 현재까지는 0.307m/ka, 하안단구 2면 형성 이후 현재까지는 0.205m/ka로, 하류의 퇴적암 지역에서 하안단구 1면은 0.536m/ka, 하안단구 2면은 0.269m/ka로 나타났다. 하안단구 1, 2면의 OSL 연대와 하각률 곡선을 토대로 할 때, 하안단구 3면의 형성시기는 빙기인 MIS 4기 초, 하안단구 4면의 형성시기는 빙기인 MIS 6기 말, 하안단구 5면은 MIS 6기 초로 추정된다.

본 논문은 오대천의 상류와 하류 간의 하도, 하곡, 유역분지의 지형 특성을 비교·분석하고, 범람원과 하안단구의 분포, 고도 변화, 형성 시기를 분석하여, 오대천의 특성과 지형 형성과정에 대해 고찰하고자 하였다. 그러나 하상 퇴적물 분석에 있어, 자갈 표본의 개수가 많지 않음에서 발생하는 결과의 신뢰성 문제, 사진 촬영을 통한 하상 표면 물질 분석에 있어서 사진의 왜곡을 보정하는 문제 등에서 한계를 지니고 있다. 또한 OSL 연대측정을 위한 시료 채취가 가능한 모식적인 모래질 퇴적층 노두가 몇몇 곳에서만 발견되었고, 분

석 과정에서 발생하는 경제적인 문제로 인해, 두 지점만을 대상으로 OSL 연대 측정을 실시한 점도 아쉬움으로 남는다.

참고문헌

- 강원도, 1996, 오대천 하천정비 기본계획, 건설교통부.
- 국립지질광물연구소, 1975, 1:50,000 지질 도폭 설명서-오대산.
- 국립지질조사소, 1962, 1:50,000 지질도 정선 도엽.
- 국립지질조사소, 1962, 1:50,000 지질도 하진부 도엽.
- 권혁재, 2006, 지형학, 법문사, 서울.
- 윤순옥·황상일·이광률, 2007, “강원도 영동·영서 하천의 하안단구 지형 발달 - 내린천, 연곡천, 골지천, 오십천을 사례로,” 대한지리학회지, 42(3), 388-404.
- 이광률, 2007, “상·하류의 기반암 차이에 따른 하천의 형태와 암석의 저항력 분석,” 대한지리학회지, 42(1), 27-40.
- 이광률·조영동·김대식, 2008, “강원도 평창군 진부 단층의 지형 및 활동성,” 대한지리학회지, 43(6), 775-790.
- 장호·최성길·김주용·신현조, 2007, “한반도 남동부 하서천 유역의 하성단구 분포와 형성연대,” 한국지형학회지, 14(1), 1-15.
- Bradley, R. S., 1999, *Paleoclimatology*, Harcourt/Academic Press.
- Charlton, R., 2008, *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, Routledge.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., and Miller, J. P., 1992, *Fluvial Processes in Geomorphology*, Dover Publication.
- Plummer, C. C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2003, *Physical Geology*, McGraw-Hill, Boston.
- Ritter, D. F., Kochel, R. C., and Miller, J. R., 2006, *Process Geomorphology*, Wm. C. Brown.
- Schumm, S. A., 1999, Cause and controls of channel incision, in Darby, S. E. and Simon, A.(eds.), *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*, John Willey &

Sons.

Strahler, A. and Strahler, A., 2005, *Physical Geography*, John Willey & Sons.

Summerfield, M. A., 1991, *Global Geomorphology*, Prentice Hall, London.

Wohl, E. E., 1999, "Incised bedrock channels, in Darby, S. E. and Simon, A.(eds.), *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*, John Willey & Sons.

교신: 이광률, 702-701, 대구광역시 북구 산격동 경북대학교 사범대학 지리교육과(이메일: georiver@knu.ac.kr, 전화: 053-950-5859)

Correspondence: Gwang-Ryul Lee, Department of Geography Education, Teachers College, Kyungpook National University, Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu, 702-701, Korea (e-mail: georiver@knu.ac.kr, phone: +82-53-950-5859)

최초투고일 09. 05. 11

수정일 09. 05. 25

최종접수일 09. 05. 27