

하안단구의 개념과 지형 특성

이 광 루

경북대학교 사범대학 지리교육과 조교수

Concepts and Geomorphic Properties on Fluvial Terraces

Gwang-Ryul Lee

Assistant Professor, Department of Geography Education, Teachers College, Kyungpook National University

요 약 : 본 연구는 제4기 연구에 있어 하안단구의 의미를 해석하기 위하여, 하안단구의 개념과 지형 특성에 대해 파악하였다. 하안단구는 현재보다 고도가 높은 곳을 흘렀던 고하천에 의해 형성되었던 하도나 범람원이 기 후 변화나 지반 융기에 의한 하천의 활발한 하방침식으로 인해, 현 하천보다 높은 고도에 남겨진 퇴적 지형이다. 하안단구는 하천의 하각 작용 이후에도 남겨진 퇴적층의 잔류물로서, 하각에 영향을 미치는 주요 요인으로 침식기준면의 하강, 하천 유량 증가, 하천의 특징적인 지형 현상 등이 있다. 일반적으로 대하천 중상류부의 하안단구 퇴적층은 빙기에 형성되는 것으로 알려져 있지만, 우리나라와 중국의 대하천 중상류에 발달한 하안단구는 절대연대가 간빙기를 지시하는 경우도 많아, 해당 하천의 다양한 자연환경 조건과 지형 특성에 따라 다양한 시기에 하안단구 퇴적층이 형성될 수 있는 것으로 판단된다.

주요어 : 하안단구, 하성단구, 기후변화, 지반융기, 하상비고, 형성시기, 하각

Abstract : To reinterpret the meaning of fluvial terraces in the Quaternary researches, the concepts and geomorphic properties of fluvial terraces are reviewed. Fluvial terraces are the alluvial landform that was once river channel or floodplain by paleochannel flowed in elevated areas from the current river by active incision of rivers due to the climatic changes and/or uplifts. As fluvial terraces are the remnants of alluviums after incisions of rivers, the major factors influencing on the incisions are the falling of erosion base, increase of river discharge and distinct geomorphic phenomenon of river. While it is generally known that fluvial terraces deposits in the upper or middle reaches of large rivers were formed during glacial periods, the deposits may be formed at the various periods due to the diverse natural environments and geomorphic properties of specific rivers, because there have been numerous cases that the ages of fluvial terraces in the upper or middle reaches of large rivers in Korea and China can be correlated to the interglacial periods.

Key Words : river terrace, fluvial terrace, climatic change, uplift, altitude from riverbed, formation age, incision

* corresponding author: 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)

1. 서론

지형학(地形學, geomorphology)은 지표의 기복을 기술하고 해석하는 과학이다. 지형학의 연구 대상 중 하천에 의한 충적지형(沖積地形, alluvial landform)은 우리나라와 같이 하계가 발달한 습윤한 기후 지역에서 인간 생활과 매우 밀접한 관련을 맺고 있다. 특히, 하안단구(河岸段丘, fluvial terrace)는 현재보다 고도가 높은 곳을 흘렸던 고하천(古河川, paleo-channel)에 의해 형성된 과거의 하성층이다. 그러므로 하안단구 지형은 신생대 제4기(Quaternary period) 동안의 하천의 역사적 발달 과정을 설명하고, 유역분지의 침식·운반·퇴적작용과 관련된 고지형환경에 대한 자료를 포함하고 있으며, 해당 지역의 기후 변화와 지반 용기나 단층 활동과 같은 구조운동의 과정을 설명해주는 열쇠가 될 수 있다.

하안단구 연구는 지형학 분야에서 1990년대에 가장 핵심적인 연구 대상으로 발전하여, 현재까지 지형학 내에서 해안단구, 해안사구 등과 함께 가장 많은 연구 성과가 축적된 연구 주제 중의 하나라고 할 수 있다. 본 연구는 제4기 연구에 있어 하안단구의 의미를 해석하기 위하여, 하안단구 지형의 기본 개념과 지형 특성에 대해 파악하고, 하안단구의 형성 요인과 유형을 정리하며, 우리나라의 하안단구 형성시기에 관해 논의해보고자 한다.

2. 하안단구의 정의와 특성

하안단구는 하성단구(河成段丘)로도 불리는데, 하성단구라는 용어는 지형 형성과정인 하천의 작용을 보다 강조하는 표현이고, 하안단구는 형태와 분포에 초점을 둔 표현이라고 할 수 있다(장호, 박희두, 2006). 형성과정의 입장에서 엄밀하게 정의하면, 하안단구는 현재보다 고도가 높은 곳을 흘렸던 고하천에 의해 형성되었던 하도나 범람원이 기후 변화나 지반 용기에 의한 하천의 활발한 하방침식으로 인해, 현 하천보다 높은 고도에 남겨진 충적지형이라고 할 수 있다(그림 1; Ritter *et al.*, 2006).

즉, 하안단구는 하천의 침식작용 이후에도 이전의 하천 지형이 남겨진 잔유물이다. 따라서 하안단구 형성 이후에 현 하천의 측방침식이 매우 활발한 곳은 하도 양안에 발달한 이전의 하천 지형이 쉽게 침식되어 사라질 수 있기 때문에, 하안단구가 잘 발견되지 않는다. 반면, 상대적으로 하방침식이 매우 활발한 곳에서는 하도 양안에 하안단구가 모두 잔존할 수 있으며, 하방침식과 측방침식이 동시에 발생하는 곳에서는 하도의 한쪽 편에서만 하안단구가 나타나는 경향이 있다.

하안단구와 범람원의 구분은 현 하천과의 고도차인 하상비고로써 판단하여야 한다. 해안단구의 경우 해수면과의 차이인 해발고도가 중요하지만, 하안단구는 하안단구의 형성과 분류의 지표가 되는 현 하천과의 고도 차이가 해발고도보다 더 중요하다.

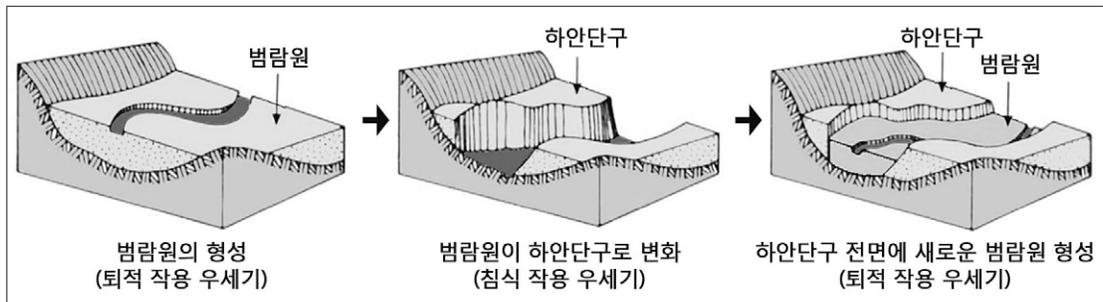


그림 1. 하안단구 형성과정의 모식도(Leopold, 2000)

약 200만년 전부터 현재까지의 신생대 제4기 동안에 기후 변화에 의해서 35~40회 이상의 빙기와 간빙기가 연속되었고, 이로 인해 하천의 궁극적인 침식기준면에 해당하는 해수면이 승강을 반복하였다. 또한 신생대 제4기 동안 우리나라는 융기축으로 추정되는 태백산맥 일대를 중심으로 지역별·시기별 속도의 차이는 있겠지만 지반 융기가 꾸준히 발생되어 왔다. 이러한 기후 변화와 지반 융기는 하천의 퇴적작용과 하방침식작용에 반복적인 변화를 일으켜 왔으며, 이에 따라 신생대 제4기 동안 하안단구는 꾸준히 반복적으로 형성되어 왔다. 따라서 하방침식을 통해 하상의 고도가 계속 낮아진 결과, 하안단구는 하곡 내에서 고도를 달리하는 여러 개의 단으로 존재한다(그림 2).

현 하상과의 고도 차이인 하상비고가 가장 낮은, 즉 범람원 바로 위에 해당하는 고도에 존재하는 하안단구는 가장 최근에 형성된 것이며, 하상비고가

가장 높은 하안단구는 가장 오래전에 형성된 것이다. 최근에 형성된 하안단구일수록 침식작용을 덜 받아서, 종단면 상에서 상·하류간 분포의 연속성이 높지만, 오래된 하안단구는 하천의 하각 과정에서 제거될 수 있고 오랫동안 침식작용을 받았기 때문에 분포의 연속성이 낮은 편이다. 따라서 하안단구 종단 분포도 상에서 하상비고가 높아질수록 하안단구의 수와 면적이 감소하고, 연속성도 낮아지게 된다.

실제 야외에서는 여러 단의 하안단구가 관찰되기 때문에, 각 단의 하안단구에 대하여 이름을 붙여 구분을 할 필요가 있다. 하안단구의 명명법은 2가지가 있는데, 전통적인 방법으로는 저위(L), 중위(M), 고위(H) 등의 높이를 나타내는 이름을 붙여 표현하는 방법이다. 이 방법은 하안단구의 고도와 형성시기를 고려한 것으로, 하안단구의 특성에 대한 이해가 쉽다는 장점이 있으나, 실제 야외에서

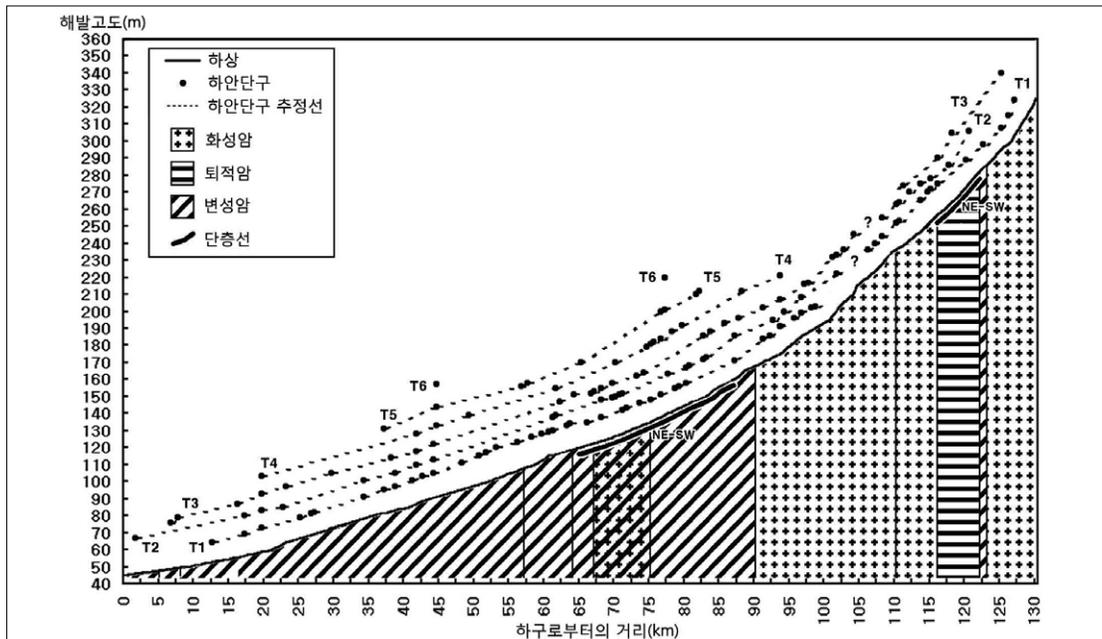


그림 2. 흥천강의 하안단구 종단 분포도(이광률, 2003)

하상 종단곡선의 아래에는 기반암의 유형이 표현되어 있으며, 하상 위의 T1이 가장 최근에 형성된 하안단구이고, T6이 가장 오래된 하안단구임

관찰되는 것처럼 하안단구가 여러 개일 경우(7개 이상), 고, 중, 저의 3개 용어를 사용하는 과정에서 표현이 중복되면서 오히려 혼란을 초래하는 경향이 있다. 이러한 단점으로 최근에는 1, 2, 3, 4 등의 숫자로 각 단의 하안단구를 표현하는 방법이 더 많이 사용된다. 이러한 숫자 표현에도 2가지 방식이 있는데, 하나는 가장 고도가 높은 것부터 차례대로 숫자를 붙이는 방법이다. 즉, 가장 오래된 것을 하안단구 1면, 그 다음 것을 하안단구 2면으로 붙이는 방법이다. 또 한 가지 방법은 반대로, 고도가 가장 낮은, 즉 범람원 바로 위의 것을 하안단구 1면, 그보다 오래된 것을 하안단구 2면으로 붙이는 방법이다. 원칙적으로 보면, 지형 형성시기에 따라 가장 오래된 것이 1이 되고, 가장 최근에 형성된 것이 숫자가 높은 하안단구가 되는 것이 타당하다. 그러나 이러한 경우에 한 가지 단점이 있는데, 이미 하안단구 1면으로 명명한 곳보다 더 높은 고도에서 하안단구가 발견될 경우, 이전에 표기했던 하안단구의 이름을 모두 수정해야 한다는 문제점이 있다.

하안단구를 이루고 있는 평탄면을 단구면(tread)이라고 하고, 단구면 아래에 하천의 침식작용으로 절단된 수직의 절벽을 단구애(scarp)라고 한다. 하안단구에는 단구면의 퇴적층 노두가 드러난 절벽을 이루는데, 최근에 형성된 하안단구일수

록 단구애가 급경사를 이루며, 오래된 하안단구의 단구애에는 시간이 흐를수록 사면운반작용의 영향으로 경사가 점차 완만해진다(그림 3). 또한 시간이 갈수록 단구애로부터 시작된 사면운반작용과 침식작용에 의한 개석곡이 단구면의 내부로 침입하면서, 단구면도 점차 원래의 형태를 잃어가면서 축소되고 지표면의 경사도 점점 커진다.

하안단구는 범람원과 단구애를 이루며 접하기 때문에, 일반적인 홍수 시에는 하천의 수위가 단구면의 고도까지 이르지 못한다. 즉, 홍수 시에 범람원은 침수될 수 있지만, 하안단구면은 거의 침수되지 않는다. 따라서 하안단구와 범람원을 구분하는데 있어 홍수 시에 침수 여부는 하나의 기준이 될 수 있다. 그러나 하안단구 지형을 분류함에 있어 홍수시의 침수 여부가 중요한 판단 기준이 되지 않는다. 즉, 하안단구는 고도가 높았던 과거 하천의 잔유물이기 때문에, 홍수 시와 같은 현 하천의 작용이 하안단구의 판단 기준이 될 수 없으며, 연구자에 따라서는 홍수 시 침수 여부에 관계없이 하곡 내에 나타나는 계단상의 하성 평탄지 또는 완경사지를 모두 하안단구로 분류하기도 한다.

하안단구면은 대체로 하천 퇴적작용에 의해 자갈, 모래 등이 두껍게 쌓인 하성 퇴적층을 형성하는 경우가 많지만, 침식작용이 우세한 곳에서는 기반암이 드러나 있거나, 기반암 위에 매우 얇은 퇴

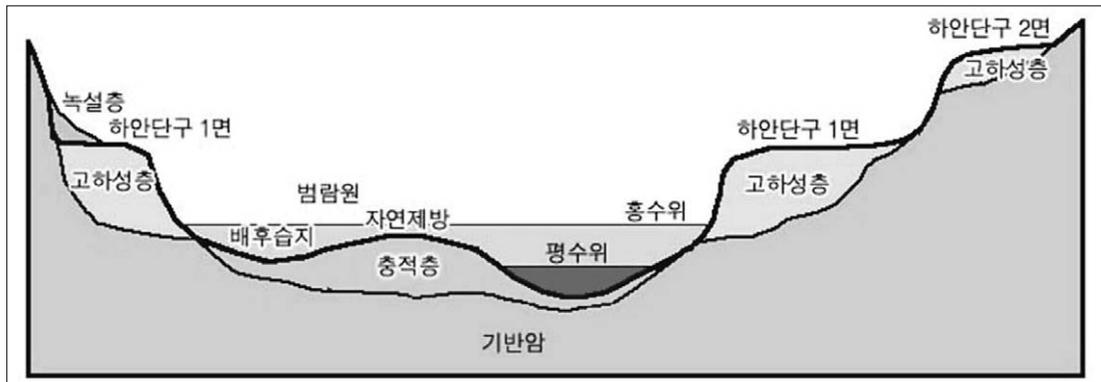


그림 3. 범람원과 하안단구가 발달한 하곡 횡단면의 모식도



그림 4. 오대천 상류의 하안단구 1면 퇴적층 노두의 모습(이광률, 2009)

적층이 나타날 수도 있다. 대하천의 상류부에 발달한 하안단구 퇴적층에는 자갈의 밀도가 매우 높은 역층이 우세한 반면, 하류로 갈수록 모래의 밀도가 증가하면서 사질층이 우세하게 나타난다. 또한 하천에서 운반되는 자갈은 하류로 가면서 모서리가 마모되는 원마 작용을 받기 때문에, 하안단구 퇴적층의 자갈도 하류로 갈수록 원마도가 커져 둥근 자갈이 우세하게 나타난다. 한편, 하천에 의해 운반되는 자갈들은 유수가 흐르는 방향에 비스듬하게 기울어진 채로 서로 겹겹이 쌓이는 경향이 있는데, 이를 복와 구조(비늘 구조, imbrication)라고 한

다. 이러한 복와 구조는 하안단구 퇴적층에서도 발견되며, 이를 통해 과거 하천의 유수 방향을 판단할 수 있다(그림 4).

오래된 하안단구 퇴적층은 지표에 노출된 채로 오랜 기간 대기 및 수분과 접촉하면서 풍화작용을 많이 받게 된다. 자갈이 풍화작용을 받게 되면, 대기와 접하는 자갈의 표면에 화학적 풍화에 의해 점토광물이 형성되고 집적되면서 황갈색의 변색대가 나타나는데, 이를 풍화테(풍화각, 풍화피막, weathering rind)라고 한다. 이러한 자갈의 풍화테는 최근에 형성된 하안단구 퇴적층에서는 거의 발견되지 않지만, 풍화작용을 오랫동안 받은 오래된 하안단구 퇴적층의 자갈일수록 더 두꺼워지는 경향이 있다(그림 5).

3. 하안단구의 형성 요인과 유형

하안단구는 하방침식 이후에 남겨진 과거 하도 또는 범람원이므로, 하안단구 형성에 있어 가장 중요한 작용은 하천이 하방침식을 통해 아래로 깊게 파면서 하상을 낮추는 현상인 하각(incision)이라고 할 수 있다. Schumm(1999)은 하각의 원인을 아래와 같이 정리하였다(표 1).

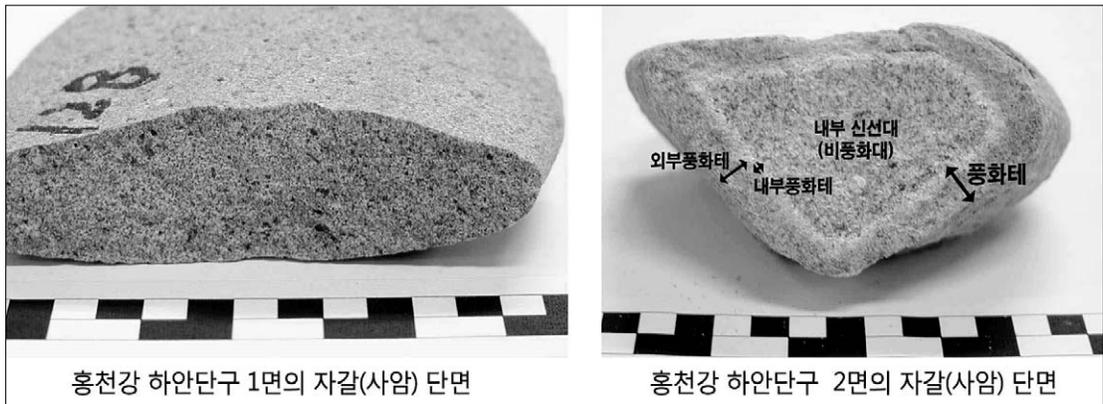


그림 5. 홍천강 하안단구의 퇴적층에서 채취한 사암 자갈의 단면 모습(이광률, 2003)

하안단구 1면이 가장 최근에 형성된 것임

표 1. 하각의 원인(Schumm, 1999)

유형	세부 요인
지질	용기, 침강, 단층 작용, 경동 운동
지형	하천 쟁탈, 침식기준면 하강, 곡류 절단, 지형 붕괴, 하도의 측방 이동, 단애의 후퇴, 경사도 증가, 사면운반 작용, 지하수의 침식 작용
기후	건조, 습윤, 기상 현상의 강도 증가
수문	유량 증가, 최대 유출량 증가, 퇴적물량 감소
동물	목축, 이동로
인간	댐 건설, 퇴적물 전환, 유량 전환, 도시화, 댐의 붕괴, 호수위의 저하, 인위적 곡류절단, 채굴, 지하수 사용, 사력 채취, 준설, 교통로, 하도 직강화, 유로 축소, 산림 제거, 화재

하각의 원인은 여러 가지가 있지만, 이 중에서도 하안단구를 형성할 만큼 큰 규모의 장기적인 영향을 미치는 요인은 지반 용기나 해수면 하강에 의한 침식기준면의 하강, 하천 유량 증가에 의한 침식작용 확대가 가장 대표적이다. 지반 용기는 상대적으로 하천과 해수면간의 고도차를 증가시켜 상대적인 침식기준면의 하강을 유발하기 때문에, 하천의 하각 작용을 활발하게 일으킨다. 또한 빙기 때 발생하는 해수면의 하강 현상도 침식기준면의 하강에 해당하므로 하천의 하각 작용을 초래한다.

하천의 하구는 침식기준면과 접해 있기 때문에, 침식기준면의 하강은 하천의 하구부에 바로 영향을 미쳐 하각 작용을 유발하며, 이렇게 새로운 침식기준면에 대응하기 위한 하각 작용은 하천의 상

류 쪽으로 점차 확대된다. 이러한 과정에서 하각이 진행되어 깊은 하곡이 파인 하천의 하류부와 아직 하각 작용이 진행되지 않은 상류부 사이에는 하도의 종단 경사가 급격히 변화하는 지점이 형성될 수 있다. 그리고 하각 이전에 형성되었던 범람원이 하각 이후에 하곡의 측사면에 하안단구로 남겨질 수 있다. 이러한 경우, 동일한 시기에 형성된 충적 지형일지라도, 하천의 하류부에서는 하안단구로 분류되지만, 상류부에서는 범람원으로 분류되는 특이한 상황이 나타날 수 있다(그림 6).

지반 용기와 해수면 하강은 하안단구의 종단 분포도에 있어 특징적인 형태를 만들어 내기도 한다. 그림 7의 A와 같이 상류로 갈수록 각 하안단구의 비고가 커지는 형태의 종단면은 지반 용기에 의한 영향이 크다. 상류로 갈수록 비고가 커진다는 것은 상류로 갈수록 하방침식이 활발하였음을 의미하며, 지질 및 수문 조건이 일정하다면, 하방침식에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 요인은 활발한 지반 용기로 볼 수 있다. 따라서 A와 같이 하류 수렴형의 하안단구 종단 분포는 상류부인 내륙 산지의 지반 용기가 주요한 요인이다. 반면, B와 같이 하류로 갈수록 각 하안단구의 비고가 커지는 형태인 하류 발산형의 하안단구 종단 분포는 하구쪽에서 발생하는 하방침식의 요인 때문이라고 할 수 있으며, 이는 해수면의 하강을 대표적인 원인으로 생각할 수 있다. 즉, B는 해수면의 하강에 의해 하류부에서 하방침식이 보다 활발하게 발생하는 과정을 통

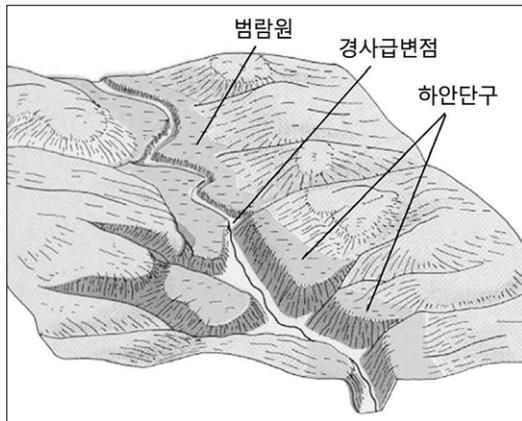


그림 6. 하천의 하각 작용에 의한 하안단구의 형성(권혁재, 2006)

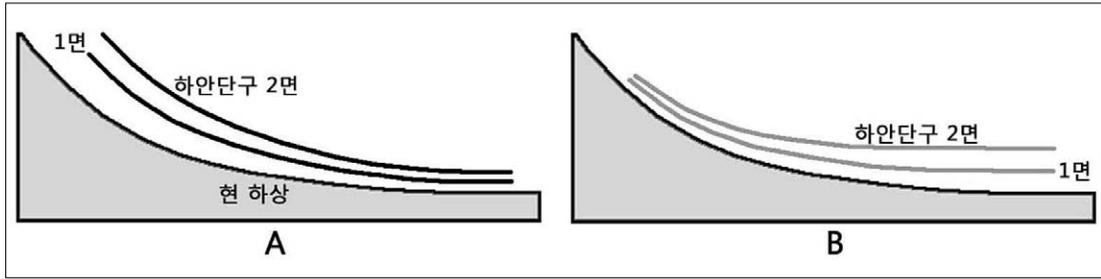


그림 7. 상류로 갈수록 비고가 커지는 하안단구 종단면(A)과 하류로 갈수록 비고가 커지는 하안단구 종단면(B)

해 나타나는 형태로 볼 수 있다.

기후 변화도 하안단구 형성에 영향을 미치는데, 기후 변화에 의해 어떤 지역의 강수량이 증가한다면 하천의 유량은 증가할 것이고, 이에 따라 하천의 유속도 증가하여 하천의 침식작용이 더욱 활발해질 것이다. 이러한 유량 증가에 의한 하각 작용은 침식기준면의 변화를 거의 유발하지 않기 때문에, 침식기준면 하강에 의한 하안단구에 비해 하상 비고가 작은, 즉 범람원과의 고도차가 뚜렷하지 않은 하안단구를 형성할 수 있다.

한편, 하천 쟁탈(stream piracy)이나 곡류 절단(meander cutoff)과 같은 특이한 지형 현상에 의해서도 하안단구가 형성될 수 있다. 하천 쟁탈이 발생되면, 고도가 낮은 지역을 흐르는 하천이 고도가 높은 곳을 흐르는 하천의 하곡을 쟁취하는 과정에서 원래의 하곡과 새로운 하곡 사이에 급격한 고도차가 발생하면서 침식기준면이 급격히 낮아져, 급격한 하각 작용을 수반한다. 따라서 쟁탈 이전의 하곡 내에 형성된 범람원은 쟁탈 이후 하도와 고도차가 크게 나는 하안단구로 변화될 수 있다. 또한 곡류 절단이 발생되면, 절단부의 상류와 하류간의 급격한 고도차를 유발하므로(그림 8), 침식기준면의 급격한 저하로 인한 하각 작용을 발생시켜, 곡류 절단에 의해 형성된 구하도가 하안단구로 변화할 수 있다.

하안단구의 유형은 형성 과정, 횡단면 형태, 형성 원인에 따라 여러 가지로 분류할 수 있다. 먼저,

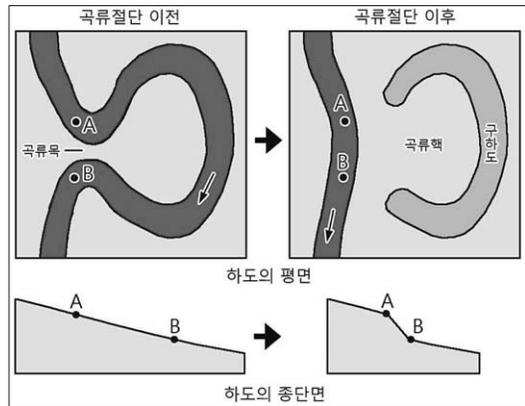


그림 8. 곡류절단에 의한 하도의 평면 및 종단면 변화

형성 과정을 기준으로 하면, 침식작용에 의한 영향이 강한 침식단구(erosional terrace)와 퇴적작용의 영향이 강한 퇴적단구(depositional terrace)로 구분할 수 있다. 침식단구는 주로 측방침식에 의해 평탄하게 침식된 과거 하상의 기반암으로 이루어진 단구(strath terrace, rock-cut terrace)로, 기반암이 지표에 노출될 수도 있고, 기반암 위에 얇은 층적층이 쌓여 있을 수도 있다. 퇴적단구는 오랜 퇴적 기간 동안 하천에 의해 형성된 두꺼운 퇴적층이 이후 침식 기간 동안의 하방침식과 측방침식에도 층적층이 남겨진 단구로, 퇴적 기간에 형성된 층적층이 그대로 남아 있을(fill terrace) 수도 있고, 층적층의 표면이 측방침식에 의해 어느 정도 제거되었을(fill-cut terrace) 수도 있다. 그러나 침식단구와 퇴적단구는 실제 야외에서 잘 구분되지 않는다. 왜냐하면, 두 단구 모두 대체로 지

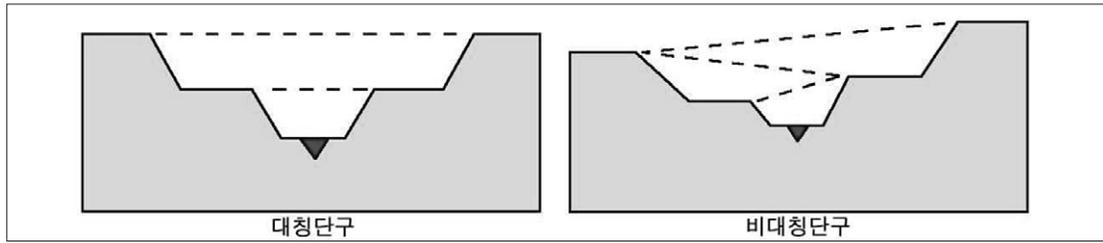


그림 9. 대칭단구와 비대칭단구의 횡단면 형태(Ritter *et al.*, 2006)

표는 충적층으로 덮여 있고, 깊이가 어떻든지 충적층의 아래에는 기반암이 위치하기 때문이다 (Ritter *et al.*, 2006).

하안단구는 횡단면의 형태에 따라, 하곡 양안의 동일한 고도에서 단구면이 나타나는 대칭단구 (paired terrace)와 하곡 양안의 서로 다른 고도에서 단구면이 나타나는 비대칭단구 (unpaired terrace)로 구분된다(그림 9). 대칭단구는 하도의 측방 이동보다 하방침식이 더 빠른 곳에서 잘 발달하며, 비대칭단구는 하도의 하방침식보다 측방 이동이 더 빠른 곳에서 잘 발달한다.

하안단구의 유형은 형성 원인에 따라, 지반 융기와 같은 지구조적 작용에 의해 형성된 구조단구 (tectonic terrace), 기후변화에 의한 기후단구 (climatic terrace), 해수면 변동에 의한 해면변동단구 (thalassostatic terrace)로 분류한다. 구조단구는 지반 융기가 활발한 지역에서 계속 하강하는 침식기준면의 변화에 평형을 이루기 위해 하천이 끊임없이 하방침식을 진행하면서 형성된 하안단구로서, 우리나라는 태백산맥과 같은 융기 축 부근의 산지 하천에서 잘 나타나는 것으로 설명된다.

기후단구는 일반적으로 빙기와 간빙기 사이의 기후 변화에 의해 형성된다. 빙기에는 우리나라와 같은 중위도에 위치한 산지 지역에서 기계적 풍화 작용이 활발하여 사면운반작용에 의해 다량의 암석이 하곡으로 공급되지만, 강수량이 적어 유량이 많지 않을 가능성이 높기 때문에 퇴적물이 하천의 중·상류 하곡에 그대로 쌓이는 퇴적작용이 우세

할 수 있다. 반면, 간빙기에는 기온이 상승하고 식생 피복이 양호해져, 하천의 중·상류에 기계적 풍화에 의한 퇴적물 공급의 감소와 강수량 증가로 인한 유량 증가의 가능성이 높기 때문에 하천의 침식 작용이 우세할 수 있다. 따라서 하천의 중·상류에서는 빙기에 두꺼운 충적층이 형성되고, 간빙기에는 이러한 충적층이 하각되고 남겨져 하안단구로 변화하게 될 가능성이 높다. 결국, 우리나라와 같은 중위도 지역의 대하천 중·상류 유역에 위치한 산지 하천에서는 빙기에 하안단구 퇴적층이 형성될 가능성이 높다는 것이다. 그런데, 우리나라의 주요 산지 지역은 신생대 제4기 동안 기후 변화 뿐 아니라 지반 융기의 영향도 동시에 받았기 때문에, 이러한 산지 하천에 발달한 하안단구들을 구조단구와 기후단구 중 어느 하나로 구분하는 것은 매우 어렵고 큰 의미를 갖지 못하는 작업이다.

기후 단구의 형성은 빙기 및 간빙기와 같은 장기간의 기후 변동과 관계없이 나타날 수도 있다. 기후 변화에 의한 강수량의 변화는 하천의 유량 변화를 발생시켜 하천 에너지의 변화를 유발하므로, 소우기 동안에는 하천의 유량 감소로 하곡 내에 퇴적 작용이 활발하다면, 다우기 동안에는 유량 증가로 침식작용이 활발해져, 이전의 범람원 충적층이 하안단구로 변화될 수 있다. 이러한 과정은 침식기준면의 변화를 동반하지 않기 때문에 하안단구와 범람원의 고도차가 크지 않을 가능성이 높으며, 시간에 따라 유량과 퇴적물량의 변화를 심하게 경험하는 충적층의 규모가 크며 유량이 많은 대하천의

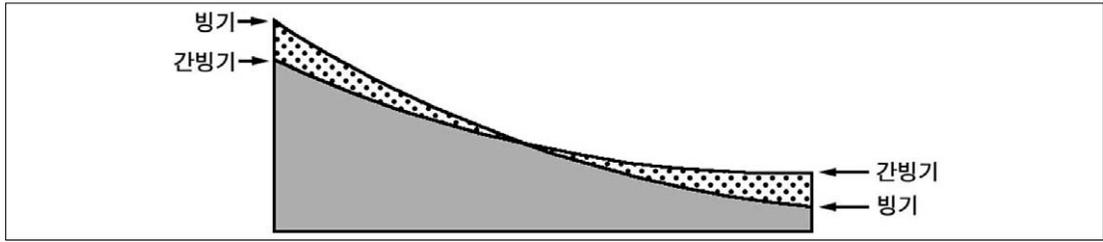


그림 10. 빙기와 간빙기에 하천 종단면의 모식적인 변화

중·하류부에서 잘 나타나는 경향이 있다. 이렇게 충적층의 규모가 크고, 범람원과의 비고가 상대적으로 작은 하안단구를 충적단구(alluvial terrace)라고 부르기도 한다(권혁재, 2006).

해면변동단구는 해수면 변동의 영향을 직접적으로 받는 대하천의 하류부에서 잘 나타난다. 간빙기에는 해수면이 상승하여 침식기준면이 높아져 대하천의 하곡은 퇴적물로 두껍게 매적된다. 그러나 빙기가 되면, 해수면이 하강하여 침식기준면이 낮아져 하각이 활발해지면서 하곡이 깊게 파이게 되고, 이전 간빙기에 형성된 충적층은 하안단구로 변하게 된다.

이러한 하안단구의 형성과정을 대하천을 대상으로 단순화하면 그림 10과 같다. 즉, 대하천의 상류는 퇴적물 공급이 많은 빙기에 하안단구 충적층이 형성되고, 대하천의 하류는 침식기준면이 상승한 간빙기에 하안단구 충적층이 형성될 가능성이 높다.

4. 하안단구의 형성시기

우리나라와 같은 중위도 지역의 대하천 상류부에 해당하는 산지 하천에서는 일반적으로 빙기에 형성된 퇴적층이 하안단구면을 형성하는 것으로 알려져 있다. 빙기에는 결빙에 의한 기계적 풍화작용이 활발하여 사면에서 다량의 암석이 생산되어 하곡에 공급되지만, 하천은 유량이 줄어들고 결빙기간이 길어져서, 이를 효율적으로 운반·제거할

수 없게 된다(권혁재, 2006). 따라서 빙기에는 하곡 내에 퇴적 작용이 우세한 시기가 되며, 반면, 간빙기에는 기계적 풍화작용이 덜하여 사면으로부터 암석의 생산량이 줄며, 식생 피복이 양호해져 사면 운반작용도 제한되면서 하곡으로 암석의 공급이 감소하는 동시에, 유량이 증가하면서 하천의 침식작용이 활발해지게 되어 침식 작용이 우세한 시기가 된다. 따라서 간빙기에는 이전의 빙기에 형성되었던 범람원이 하안단구로 변하게 된다.

우리나라에서 절대연대 측정 기법이 거의 발달하지 않았던 1990년대까지는 이러한 기후단구 형성 모델을 근거로 하여 대하천 상류부 하천의 하안단구 형성시기를 추정하였다. 또한 우리나라에서는 1990년대까지 제4기의 기후 변화 체계는 20세기 초 펜크(A. Penck)에 의해 알프스 산지에서 연구된 결과를 인용한, 오래된 순서대로 쿼츠, 민텔, 리스, 뷔름 빙기로 명명된 4회의 빙기 체계를 그대로 사용하였다. 따라서 이러한 학문적 배경으로 인해, 1990년대까지 가장 최근에 형성된 하안단구 1면(저위면)이 뷔름 빙기에, 그 이전에 형성된 2면(중위면)이 리스 빙기, 그 이전에 형성된 3면(고위면)이 민텔 빙기에 형성된 것으로 하안단구의 형성시기가 일반화되었다.

그러나 1930년대 이후 세계적으로 제4기학, 해양학, 지질학, 지구물리학 분야의 연구가 활발해지고, 고 기후를 지시하는 세계의 많은 자료들이 축적되면서 제4기의 기후 변화에 대한 보다 과학적이고 구체적인 내용들이 새롭게 제시되고 있다. 특

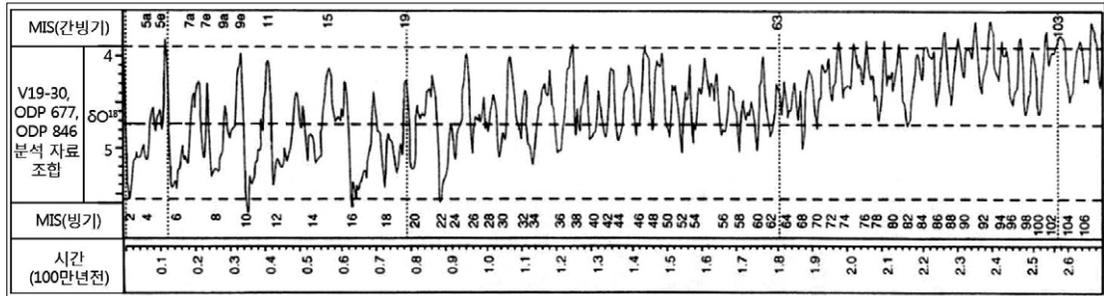


그림 11. 해양 시추 코어에 기초한 신생대 제4기의 해양 산소 동위체 시기(MIS)(Walker, 2005)

히, 세계의 대양에서 실시된 해양 시추 프로그램(ODP, Ocean Drilling Program)을 통해 해양저에서 채취된 시추 코어 퇴적물의 산소 동위원소인 ^{16}O 과 ^{18}O 의 비율에 대한 분석 결과가 1970년 후반부터 소개되면서, 신생대 동안 빙기와 간빙기가 여러 차례 반복되었음이 밝혀졌다. 상대적으로 증발이 활발한 ^{16}O 은 해양에서 증발하여 강수를 통해 지표에 도달하고 다시 하천을 통해 해양에 유입되어 일정한 양이 유지되지만, 빙기가 되면 ^{16}O 은 고위도와 고산 지역에 발달한 거대한 빙하에 저장되어 해양으로 되돌아가지 못하기 때문에, 해양에서는 상대적으로 ^{16}O 은 감소하고 ^{18}O 은 증가하게 된다.

최근 세계의 제4기 연구자들은 해양 퇴적물 내에 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 의 비율을 토대로, 고 기후 변화 체계를 해양 산소 동위체 시기(MIS, Marine Oxygen Isotope Stage)로 구분하였는데, 기온이 상승한 후빙기인 현재를 1로 하여, 기온의 하강기와 상승기에 따라 하나씩 숫자를 더하여 명명하였다(그림 11). 따라서 해양 퇴적물이나 해양 생물 내에 상대적으로 ^{18}O 의 비율이 증가하는 빙기에 대해서는 짝수 번호가, ^{18}O 의 비율이 감소하는 간빙기에 대해서는 홀수 번호가 부여되었다. 그리고 최근의 분석 결과를 통해 볼 때 연구자에 따라 차이는 있지만, 신생대 제4기의 시작인 지난 200만년 전은 대체로 MIS 75~81에 해당하므로, 결과적으로 신생대 제4기 동안에는 빙기와 간빙기가 35~40회 이상 반복되었던 것으로 추정된다.

이러한 해양 산소 동위체 시기는 지형을 포함한 신생대 제4기의 자연 환경을 언급함에 있어서, 현재 세계적으로 매우 보편적인 시간 단위로 사용되고 있다. 따라서 우리나라의 하안단구 형성시기를 논함에 있어서도 이러한 시간 단위를 기준으로 연대를 분석하고 결과를 비교할 필요성이 있다.

한편, 절대연대 측정 기법이 발달하지 않았던 과거에는 지형면의 형태, 하상비고, 퇴적물의 풍화 정도 등을 통해 상대 연대를 추정하였지만, 1990년대 이후 우리나라에서도 14C와 OSL(Optically Simulated Luminescence) 기법을 이용한 절대연대 측정이 가능해지면서, 하안단구 퇴적층의 절대연대가 제시되기 시작하였다(표 2).

현재 우리나라의 대하천 중·상류에 발달한 하안단구를 대상으로 OSL 절대연대 측정이 실시된 연구와 우리나라와 하안단구 형성 조건이 유사한 중국의 황하 및 양쯔강 종류의 하안단구 절대연대 측정(OSL, TL(Thermo Luminescence), ESR(Electron Spin Resonance)) 자료를 살펴보면 표 5와 같다. 상당수 지역은 앞서 살펴본 유형화된 산지 하천의 하안단구 형성시기와 상당한 차이를 보인다. 특히 금호강의 지류인 고현천과 청통천의 경우 하안단구 2면은 MIS 5, 1면은 MIS 3으로, 모두 상대적으로 기온이 높은 간빙기 또는 아간빙기에 형성된 것으로 나타났다. 또한 평창 오대천의 하안단구 2면과 태백 황지천의 2면도 MIS 3과 5로 각각 간빙기를 지시하고 있다. 한편 우리나라와

표 2. 우리나라와 중국의 대하천 중·상류 하안단구 절대연대 측정 자료

국 가	지역(하천)	연구자	단구면	하상비고(m)	연대(ka)	시기(MIS)	주 요인
한 국	평창 수항리 (오대천)	이광률 (2009)	1면	13	14	2	기후, 구조
			2면	15	42	3	기후, 구조
	영천 오미동 (고현천)	조영동, 이광률 (2009)	1면	7	42	3	기후
			2면	18	113	5.4	기후
	태백 구문소동 (황지천)	이광률 (미발표)	2면	17	76	5.1	기후, 구조
	경산 동강리 (청통천)		2면	14	104	5.3	기후
울진 구산리 (왕피천)	곡류절단면		15	26	3	기후, 구조	
중 국	산시성 (황하 중류)	Zhang <i>et al.</i> (2009)	4면	80	90	5.2	기후, 구조
			3면	25	31	3	기후, 구조
			2면	16	25	3	기후, 구조
			1면	11	7	1	기후, 구조
	후난성 (양쯔강 중류)	Yang <i>et al.</i> (2011)	5면	83	689	17	기후, 구조
			4면	57	347	10	기후, 구조
			3면	41	201	7	기후, 구조
			2면	28	61	4	기후, 구조

거의 같은 위도대에 위치한 중국 산시성의 황하 중류부에서도 하안단구 2면과 3면은 MIS 3, 하안단구 4면은 MIS 5로 모두 간빙기에 형성되었다고 제시되고 있다.

이는 결국, 이론화된 빙기-간빙기의 하안단구 형성 모델과 실제 하안단구 형성 시기와는 다소 차이가 있을 수 있음을 반증하는 것이다. 하안단구를 형성하는 주변 자연 환경 조건이 지질학적 시간 규모로 볼 때 모두 일정하게 지속적으로 작용한다면, 이러한 빙기-간빙기의 하안단구 형성 모델이 실제 자연계와 그대로 부합할 것이다. 그러나 공간 규모와 시간 규모를 축소해서 구체적으로 살펴보면, 각 하천마다 가지는 수문 및 지형적 특성이 매우 다양하고, 유역분지 내에서도 지질(암석, 지질구조, 지반응기), 기후, 수문, 지형, 식생, 토양 등의 여러 가지 조건들이 빙기 또는 간빙기 내에서도 계속적으로 변하므로, 실제 하안단구 형성과정은 매우 복잡한 양상을 띠는 것으로 보인다. 따라서 동일한 산지 하천임에도 불구하고 어느 지역은 기후, 수

문, 식생 등에 의한 영향이 커서, 빙기에는 암설 공급에 따른 매적 작용이 간빙기에는 유량 증가에 따른 하각 작용이 활발하지만, 반대로 어느 지역에서는 국지적인 조건으로 인해, 오히려 간빙기에 강수와 유량 증가에 따른 대규모 범람이 발생하면서 하안의 높은 고도에 하성 퇴적층이 형성되고, 이것이 이후 꾸준한 하각 작용을 통해 하안단구로 변화될 수 있다. 또 어떤 지역에서는 지질 및 지형적인 원인이 크게 작용하여, 빙기-간빙기의 기후 변동과 무관하게 구조적인 작용이나 지형의 급격한 변화가 나타나는 어느 시점에서 하안단구가 형성되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

하안단구는 현재보다 고도가 높은 곳을 흘렀던 고하천에 의해 형성되었던 하도나 범람원이 기후 변화나 지반 용기에 의한 하천의 활발한 하방침식

으로 인해, 현 하천보다 높은 고도에 남게 된 충적 지형이다. 하안단구를 구분함에 있어서는 현 하천과 하안단구 지표면과의 고도차인 하상비고가 중요한 지표가 된다. 하상비고가 가장 낮은 하안단구는 가장 최근에 형성된 것으로, 침식작용을 덜 받아서 종단면 상에서 상·하류간 분포의 연속성이 높지만, 하상비고가 높은 오래된 하안단구 일수록, 오랫동안 침식작용을 받아서 분포의 연속성이 낮고 지형면의 면적이 작으며 경사가 급해진다. 대하천의 상류부에 발달한 하안단구 퇴적층에는 자갈의 밀도가 매우 높은 역층이 우세한 반면, 하류로 갈수록 모래의 밀도가 증가하면서 사질층이 우세하게 나타난다. 한편, 오래된 하안단구 퇴적층의 자갈에서는 화학적 풍화작용에 의해 풍화테가 두껍게 나타난다.

하안단구는 하천의 하각 작용 이후에도 남겨진 충적층의 잔류물로서, 이러한 하각에 영향으로 미치는 중요한 요인으로는 지반 용기나 해수면 하강에 의한 침식기준면의 하강, 하천 유량 증가에 의한 침식작용 확대가 대표적이다. 또한 하천 쟁탈이나 곡류 절단과 같은 하천의 특징적인 현상에 의해서도 하안단구가 형성될 수 있다. 하안단구의 유형은 형성 과정에 따라 퇴적단구와 침식단구로, 하곡 횡단면의 형태에 따라 대칭단구와 비대칭단구로, 형성 원인에 따라, 구조단구, 기후단구, 해면변동 단구로도 분류할 수 있다.

일반적으로 대하천 중상류부의 하안단구는 퇴적물 공급이 활발한 빙기에 형성된 충적층이 유량이 많아 침식작용이 활발한 간빙기를 거치면서 하안단구로 변화되고, 대하천 하류부의 하안단구는 침식기준면인 해수면이 상승한 간빙기에 퇴적된 충적층이 해수면이 하강한 빙기를 거치면서 하안단구로 변화된다고 알려져 있다. 그러나 우리나라와 중국의 대하천 중상류에 발달한 하안단구 퇴적층의 절대연대를 분석해보면, 퇴적층의 연대가 빙기가 아닌 간빙기로 나타나는 경우가 상당수여서, 해

당 하천의 다양한 자연환경 조건과 지형 특성에 따라 다양한 시기에 하안단구 퇴적층이 형성될 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 권혁재, 2006, 지형학. 범문사, 서울 498p.
- 이광률, 2003, 북한강 유역분지 하안단구의 퇴적물 특성과 지형 발달. 경희대학교 대학원 박사 학위논문, 313p.
- 이광률, 2009, 오대천의 특성과 하안단구의 형성과정. 대한지리학회지, 44, 224-239.
- 장호, 박희두, 2001, 한국의 하안단구, 한국의 제4기 환경, 서울대학교 출판부, 193-235.
- 조영동, 이광률, 2009, 경북 영천시 고현천의 하안단구 지형 분석, 대한지리학회지, 44, 447-462.
- Leopold, L. B., 2000, A view of the River, Harvard University Press, Cambridge, 298p.
- Ritter, D. F., Kochel, R. C. and Miller, J. R., 2006, Process Geomorphology, McGraw-Hill, Boston, 560p.
- Schumm, S. A., 1999, Cause and Controls of Channel Incision. In: Darby, S. E. and Simon, A.(ed.), Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management, John Willey & Sons, New York, 19-33.
- Walker, M., 2005, Quaternary Dating Methods, John Wiley & Sons, England, 286p.
- Yang, G., Zhang, X., Tan, M., Brierley, G., Chen, A., Ping, Y., Ge, Z., Ni, Z. and Yang, Z., 2011, Alluvial terrace systems in Zhangjiajie of northwest Huan, China: Implications for climatic change, tectonic uplift and geomorphic evolution, Quaternary International, 233, 27-39.

Zhang, J., Qiu W., Li, R. and Zhou, L., 2009, The evolution of terrace sequence along the Yellow River(HuangHe) in Hequ, Shanxi, China, as inferred from optical dating,

Geomorphology, 109, 54-65.

투 고 일 2011. 3. 20

심 사 일 2011. 3. 23

심사완료일 2011. 4. 15