

# 북한강 하안단구 퇴적층의 풍화 특성

이 광 루\*

## Weathering Properties in Deposits of Fluvial Terrace at Bukhan River, Central Korea

Gwang-Ryul Lee\*

**요약** : 한반도의 중부에 위치한 북한강에는 하안단구의 발달이 대체로 빈약하며, 하상비고 18~29m의 T1면과 하상비고 25~39m의 T2면이 분포한다. 하안단구 퇴적층의 적색화 지수는 T2면이 평균 0.66, T1면이 0.54이며, 역의 풍화각 두께는 T2면의 편마암이 14.0mm, 화강암은 ∞이고, T1면에서는 편마암이 5.0mm, 화강암은 8.0mm로 측정되어, 형성시기가 오래된 T2면 퇴적층이 T1면에 비해 상대적으로 더 강한 풍화작용을 받았다. 규반비(SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)와 규철반비(SiO<sub>2</sub>/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)는 T2면이 각각 3.32, 2.64, T1면이 각각 4.06, 3.19이고, CIA(Chemical Index of Alteration)는 T2면이 87.85%, T1면이 85.88%로서, 더 오래된 T2면에서 풍화작용이 더 활발한 것으로 나타났다. 그리고 하안단구 T2면 퇴적층에서는 높은 풍화 정도를 의미하는 kaolinite와 halloysite가 발견되고, kaolinite의 용탈에 의해 형성되는 gibbsite도 확인되었다. 그러나 하안단구 T1면에서는 kaolinite가 발견되지 않으며, 풍화에 약한 사장석이 발견되기도 하였다. 하안단구의 하상비고, 퇴적층의 적색화 지수, 역의 풍화각 두께, 원소 함량 및 광물 조성을 토대로 할 때, 북한강 하안단구 T2면의 형성시기는 MIS 6시기(130~190ka), T1면의 형성시기는 MIS 4시기(59~74ka)일 가능성이 높다.

**주요어** : 하안단구, 퇴적층의 풍화, 퇴적층 단면, 적색화, 역 풍화각, 풍화 지수, 광물 분석

**Abstract** : Fluvial terraces is poorly developed along Bukhan River in Central Korea. Altitude from riverbed of T1 terraces are 18~29m, T2 terraces 25~39m, respectively. Rubification index of T2 is 0.66, T1 is 0.54, and thickness of gravel weathering rind on gneiss of T2 are 14.0mm, granites of T2 are ∞, gneiss of T1 are 5.0mm and granites of T2 are 8.0mm, because weathering in deposits of T2 terraces, older than T1, is severer than T1 terraces. Since deposits in T2 have more active and longer weathering than T1, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is 3.32 in T2 and 4.06 in T1, and SiO<sub>2</sub>/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is 2.64 in T2 and 3.19 in T1. CIA(Chemical Index of Alteration) is 87.85% in T2 and 85.88% in T1. Kaolinite and halloysite are founded in deposits of T2 indicating high weathering, and are founded gibbsite made by eluviation of kaolinite. However, deposits of T1 have no kaolinite, and are found plagioclase, weak mineral in weathering process. Comparing to previous researches by estimated age as altitude from riverbed, rubification index, thickness of gravel weathering rind, element contents and mineral composition, forming age of T2 terraces in Bukhan River are estimated in marine oxygen isotope stage 6 (130~190ka), and T1 terraces are marine oxygen isotope stage 4(59~74ka).

**Key Words** : fluvial terrace, weathering in deposits, profile of deposits, rubification, gravel weathering rind, weathering index, mineral analysis

### 1. 서론

하안단구(fluvial terrace)는 형성과정에 따라서 퇴적단구와 침식단구로 구별하는데, 퇴적단구에는 상

류의 기반암 및 토양으로부터 기원된 쇄설물인 mud, sand(모래), gravel(자갈) 등이 수~수십m 두께로 퇴적되어 있으며, 침식단구에도 기존의 기복을 반영하는 얇은 두께의 퇴적층이 나타난다. 이러

\* 경희대학교 이과대학 지리학과 시간강사(Part-time Lecturer, Department of Geography, College of Science, Kyung-Hee University), georiver@khu.ac.kr

한 하안단구 퇴적층은 시간이 지남에 따라 풍화 및 토양생성작용을 통해 토양으로 변화한다. 하안단구 퇴적층과 같이, 기반암의 파편이나 광물 입자 등으로 구성되어 있고, 시간이 지나면 토양으로 변하는 것을 모재(parent material)라 한다. 이러한 모재에는 하천, 파랑, 바람, 빙하 등에 의해 운반·퇴적된 퇴적층과 기반암의 풍화층(regolith)이 포함된다.

하안단구는 제4기 플라이스토세에 형성된 퇴적층으로 현재에 이르는 시간 동안 기후, 수문, 지형, 식생, 지질 등에 좌우되어 풍화 및 토양생성작용을 받으므로 퇴적층의 구성 물질은 이화학적으로 변화한다. 따라서 현재 하안단구 퇴적층을 구성하는 퇴적물의 이화학적 특성은 시간을 비롯한 여러 가지 풍화 및 토양생성 인자들의 복합적 작용의 결과이다. 특히, 각 하안단구 퇴적층 사이에 지질, 기후, 지형, 수문, 식생 등의 조건이 거의 유사하다면, 하안단구 퇴적층의 특징을 구분하는 가장 큰 요인은 시간과 퇴적층의 내부구조가 될 수 있다.

본 연구는 형성시기와 하상비고가 다른 북한강의 하안단구 T1면과 T2면을 대상으로, 하안단구 퇴적층의 구조, 퇴적물 입도, 역의 풍화각 두께, 습도, pH, 적색화지수, 흑색화지수 등의 이화학적 특성과, XRD, XRF 분석 자료를 통해, 각 퇴적 층준의 광물 조성, 원소 함량, 분자 몰비의 변화 등 원소 및 광물학적 특성과 풍화 지수를 분석하여, 형성시기에 따른 하안단구 퇴적층의 풍화 특성을 설명하고자 한다.

하안단구 퇴적층을 대상으로 광물 및 원소 분석을 실시한 선행 연구로, 이의한(1998)은 미호천의 충적단구에서 퇴적물의 입경 비율, 토색, 원마도 등을 설명하고, X선 회절분석을 통해 석영에 대한 장석의 회절강도비는 단구 퇴적물이 범람원보다 낮다고 하였다. 또한 이의한(1999)은 안성천 중류의 충적단구에서 퇴적물의 X선 형광분석을 실시하여, 규반비( $SiO_2/Al_2O_3$ )가 5.60~7.02, 규철반비( $SiO_2/R_2O_3$ )가 4.34~5.65로 대체로 높게 나타난다는 점에서, 충적단구의 형성시기를 최후간빙기 이후로 추정하였다.

강영복·박종원(2000)은 쌍천의 하성단구 토양 특성을 분석하여, A층에서 B층으로 갈수록 점토의 함량이 증가하며, 규반비와 규철반비는 각각 4.17~9.86, 3.52~8.06이고, 고위면에는 kaolinite가 중

위면에는 장석과 백운모가 검출된다고 하였다. 최한성(2002)은 거창 분지에서 하천 퇴적물이 나타나는 단구에서 입도의 수직적 분포를 제시하였고, 점토광물로는 kaolinite, illite, chlorite, smectite 등이 출현한다고 하였다.

이광률·윤순옥(2003b)은 홍천강의 하상과 하안단구 T1면에서 T6면까지의 퇴적층 역을 대상으로 풍화 특성을 분석하여, 하안단구의 형성시기가 오래될수록 풍화각의 두께와 함수량은 증가하고, 밀도와 반발도는 감소하며, T1면과 T2면 사이에서 풍화가 가장 크게 진전되는 것으로 보아, 퇴적층의 역은 첫 번째 간빙기를 거치는 동안 가장 풍화가 활발하게 일어난다고 하였다. 그리고 화강암과 편마암 역의 풍화각 두께, 역의 강도, 풍화대에서 사장석과 침철석의 유무 등의 자료는 퇴적층의 형성시기를 추정하는 보조자료로서 유용하다고 하였다.

기반암으로부터 유래한 풍화층에 대한 이화학적 분석을 실시한 선행 연구로, 황진연 외(2000)는 우리나라의 황토(풍화토)를 대상으로 구성광물 및 화학성분을 분석하여, 구성광물로는 점토광물이 40~80%를 차지하며, 석영, 장석과 점토광물인 kaolinite, halloysite, illite, 수산화층간 vermiculite 등이 주로 포함된다고 하였으며, 모암과 비교할 때 주화학적 성분은  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $H_2O$  등이 많아지고, Ca, Mg, Na 등이 다소 적어지는 경향을 보인다고 하였다.

김의선 외(2001)는 부산 지역의 다양한 기반암으로부터 유래한 토양을 조사하여, 화강암 토양은 석영이, 안산암 토양에는 점토광물의 함량이 높게 나타났으며, 모든 토양의 점토광물로는 kaolinite, illite, 수산화층간 vermiculite, mica/vermiculite 혼합층광물, chlorite 등이 주로 포함하는데, 이 중 illite는 풍화가 덜된 풍화토에 비교적 많다고 하였다. 그리고 주화학적 성분으로 화강암 토양에서는 Si, K가, 안산암에서는 Fe, Al이 다소 많이 함량을 보이며, 모든 토양에서 모암에 비하여 Ca, Mg, Na가 감소한다고 하였다.

전서령·이정후(2002)는 화강암의 풍화에 의해 생성된 토양 단면에서 기반암에 대하여 Si, Na, Ca, K는 함량이 감소하며, Al, Ti, Fe, Mn, Mg, P는 함량이 증가하여 이들 원소가 토양 내에서 유통성이 적다고 하였으며, 특히 Ca, Na는 함량 감소율이 가

장 높아서, 사장석이 화학적 풍화에 약한 특성을 반영한다고 하였다. 또한 토양 단면에서 원소의 분포로서, Si, P, Ca, Na는 토양층 내에서 불규칙한 함량 변화를 보이며, K, Al, Mn은 하부에서 상부로 갈수록 감소하고, Ti, Mg, Fe는 상부로 갈수록 증가한다고 하였다.

최한성(2003)은 거창 분지의 화강암 풍화층에 대한 광물 분석을 통해, 풍화층의 광물은 석영, 장석, 운모와 illite가 주로 나타나며, 풍화층 절리면에서는 석영, 장석, 운모 및 풍화층에서 재이동된 halloysite가 나타난다고 하였다.

## 2. 연구 방법

먼저, 1:37,500 축척의 항공사진을 판독하여 하안단구를 중심으로 한 하천 지형면을 1차적으로 분류한 후, 1:5,000 지형도로 정밀하게 검토하고, 지형 기복 및 노두의 퇴적물 관찰 등 야외조사를 통해서 해당 지형면을 최종적으로 수정·분류하였다. 그리고 각 지형면들은 GIS를 이용하여 수치지형도상에 입력하여 하안단구 지형 분류도를 완성하고, 수치 지형 분류도와 1:5,000 지형도, 1:50,000 지질도를 참조하여 하안단구 지형면의 해발고도, 현 하상에서의 비고<sup>1)</sup>, 면적, 경사도, 평면적인 개석율, 지형면이 위치한 지점의 하곡 폭을 측정하여 지형면의 특성을 검토하였다.

다음으로, 하안단구 T1면 2개 지점(BH2, BH4)과 T2면 3개 지점(BH1, BH3, BH5)의 퇴적층 노두에서, 퇴적물의 물리·화학적 특성을 비교·분석하였다. 이를 위해, 하안단구 퇴적층의 노두 관찰을 통하여, 퇴적상, 역층의 두께, 역의 입경, 원마도, 풍화단계를 조사하고, 퇴적층의 주상도를 작성하였다. 그리고 자갈을 절개하여 바깥쪽에 나타나는 변색대인 역의 풍화각 두께를 vernier calipers를 이용하여 0.5mm 단위까지 측정하였고, 'Demetra soil tester DM-5'를 이용하여 퇴적층의 습도와 pH를 측정하였다. 또한 각 퇴적층에 따라 퇴적물 시료를 수집하여 입도의 통계적 분석, 적색화 및 흑색화 지수의 측정, X선 회절(XRD)분석을 통한 광물 조성의 변화, X선 형광(XRF)분석을 통한 광물 구성 원소의 함량비 변화를 확인하였다.

입도 분석은 Stokes법칙에 의한 침전법으로 4φ 이상의 mud를 구분하고, 채를 이용해 4φ이하의 sand 및 granule을 분류하였다. 입도의 통계 분석은 Fork and Ward(1957)와 Blott(2000)에 의한 방법을 이용해 평균, 중앙값, 분산 값을 계산하고 퇴적물의 유형을 분류했다.

토색은 시료를 건조기에서 완전히 건조시켜 Munsell 방식의 표준토색칩을 사용하여 측정된 dry 상태와 시료를 물에 포화시켜 측정된 wet 상태를 각각 측정하여, Taylor(1988)에 의해 수정된 아래와 같은 식의 적색화(rubification)와 흑색화(melanization) 지수를 측정하였다.

$$\text{Rubification} = 10[(\text{hue}\Delta X + \text{value}\Delta X + \text{chroma}\Delta X) \text{dry} + (\text{hue}\Delta X + \text{value}\Delta X + \text{chroma}\Delta X) \text{wet}]/190$$

$$\text{Melanization} = 10[(\text{hue}\Delta Y + \text{value}\Delta Y + \text{chroma}\Delta Y) \text{dry} + (\text{hue}\Delta Y + \text{value}\Delta Y + \text{chroma}\Delta Y) \text{wet}]/85$$

(여기서 X는 '표본-모재'의 값이 양수인 경우이고, Y는 '표본-모재'의 값이 음수인 경우임)

X선 회절분석은 경희대학교 중앙기기센터에서 Rigaku DMAX-IIIa를 이용하였고, 분석 조건은 Cu target, 40KV, 30mA, 2θ스캔속으로, 5°~80°까지의 범위 내에서 0.05°간격으로 실시하였다. 이를 통해 얻어진 값으로 회절 패턴을 작성하고, 회절선의 피크를 동정하여 광물의 종류를 판단하여, 하안단구의 형성시기 및 각 퇴적 층준의 특징에 따른 광물 조성의 변화를 검토하였다.

X선 형광분석은 서울대학교 기초과학교육연구공동기기원에서 Shimadzu XRF - 1700 Sequential을 이용 Rh target, 40KV, 30mA의 조건에서 분석을 실시하여, 원소의 무게비(weight percent)를 구하였다. 이 값을 분자량(molecular weight)으로 나누어서 각 원소의 분자량비(molecular percent)를 구하여, 암석 및 토양의 풍화작용을 화학적으로 분석하기 위해 가장 유용한 자료로써 취급되는(Birkeland, 1999) 아래와 같은 네 가지의(Colman, 1982; Nesbitt and Young, 1982) 몰비(molar ratio)의 변화를 분석하였다.

$$3,2\text{산화물: 규산}(\text{sesquioxides: silica}) = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 \times 100$$

$$\text{규반비}(\text{silica: alumina}) = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$$

규철반비(silica:  $R_2O_3$ ) =  $SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2)$   
 CIA(chemical index of alteration) =  $100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)]$

### 3. 연구지역의 개관

한반도의 중심부에 위치한 북한강 유역분지는 휴전선을 경계로 상류는 북한 지역이며, 중류와 하류는 남한 지역에 해당된다(그림 1). 이러한 이유로, 북한강 유역분지 일대의 많은 지형들이 군사적인 목적으로 이용되고 있어 접근이 곤란할 뿐 아니라 인위적인 훼손도 심각하다. 또한 북한강의 하도와 하천 양안은 대부분 제방과 댐에 의해 개조되어 있어 원지형을 추정하기가 매우 어렵다. 이러한 제약 때문에 북한강에 대한 지형학적 연구는 매우 빈약하다.

북한강은 남한강을 본류로 하는 한강의 지류하천으로, 경기도 양평군 양서면 양수리에서 남한강

에 유입되며, 본류 길이는 332.73km, 유역면적은 10,758.93km<sup>2</sup>이다. 북한강은 유역분지에서도 해발고도가 낮은 서쪽에 치우쳐서 대체로 남 또는 남서류하여 흐른다. 북한강의 지류하천 중에서는 소양강이 유역분지 면적 2,886.6km<sup>2</sup>로 가장 크며, 홍천강이 1,566.2km<sup>2</sup>로 그 다음을 차지한다.

북한강 수계에는 특히 댐이 많은데, 발전 또는 홍수 조절용 댐은 1944년에 건설된 화천댐부터 1989년에 준공된 평화의 댐까지 총 6개이며, 하천 유로에 대한 댐의 분포 밀도는 우리나라 하천 중 가장 높다. 따라서 현재 북한강은 이들 댐과 저수호로 인하여 인위적으로 지형이 개조되어 있어, 최근에 발간된 지형도와 야외조사를 통해 자연상태의 원 하천 유로와 하상을 확인하기 어렵기 때문에, 일제시대와 1970년 이전에 작성된 지형도를 참고하여 하상의 고도를 확인하였다.

북한강 유역분지에 분포하는 기반암은 크게 두 가지 종류로, 선캄브리아대의 편마암과 중생대 쥐라기 대보화강암이 대부분이다. 이 두 지질은 북

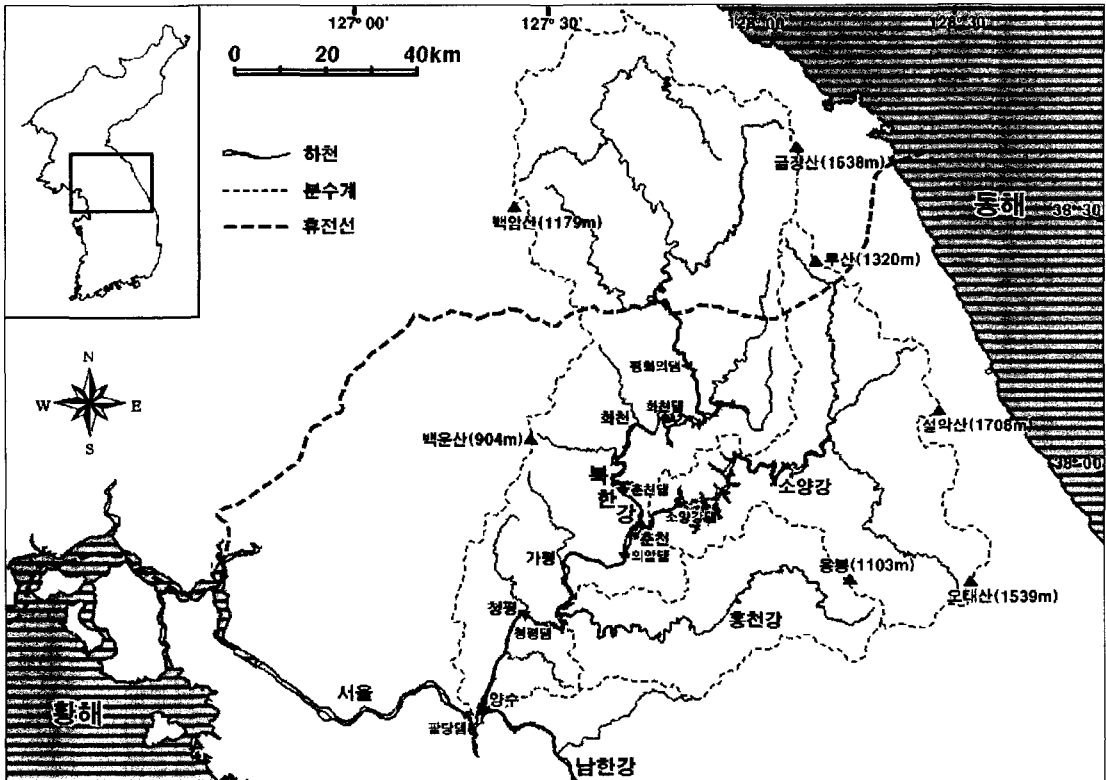


그림 1. 북한강 유역분지

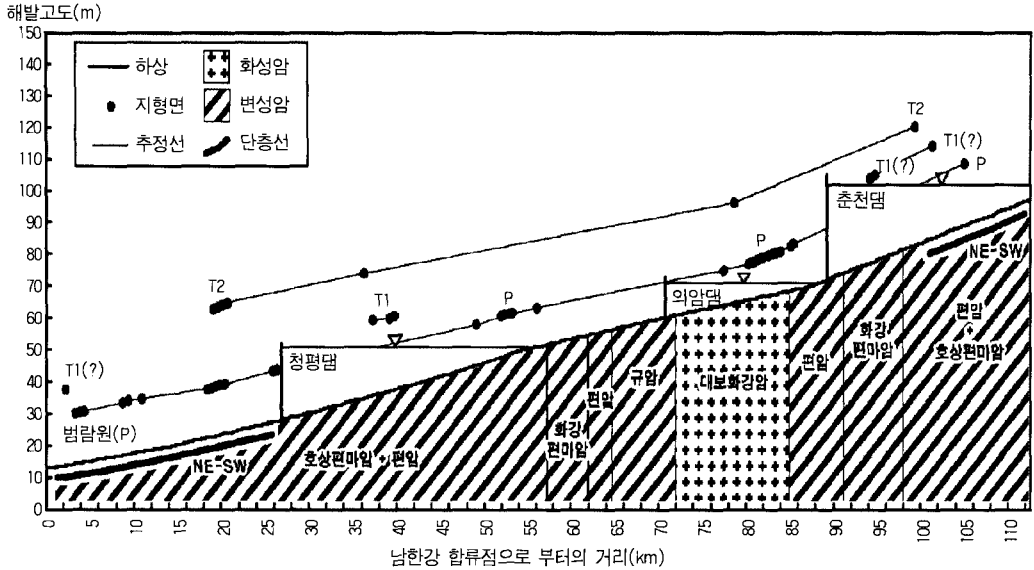


그림 2. 북한강의 하천 종단면도

동-남서 방향의 단층선을 경계로 하여 대상으로 반복되어 나타난다. 화강암 지역은 상대적으로 하곡이 넓고 평탄하며 완만한 구릉성 산지를 이루고, 편마암 지역은 상대적으로 하곡이 좁고 깊으며 경사가 급한 산지가 발달되어 있다.

북한강의 중류에 위치한 춘천은 연평균 강수량이 1,266.8mm로 내륙 평균값과 비슷하지만 여름철 강수량은 772.5mm로 다우지역에 속하고, 겨울철 강수량은 66.4mm이며, 연평균기온은 10.9°C, 1월 평균기온은 -4.5°C, 7월 평균기온은 24.5°C이다.

#### 4. 하안단구의 분포와 지형 특성

하천에서 양수리까지의 북한강에는 하천을 따라 하상비고가 낮고 보다 최근에 형성된 하안단구 T1면과 하상비고가 높고 보다 오래된 하안단구 T2면이 발달해 있지만(그림 2), 북한강의 지류인 홍천강(윤순옥·이광률, 2000), 사내천(이광률, 2003), 소양강(이광률, 2004) 등과 비교할 때, 하천의 규모에 비하여 하안단구의 발달이 매우 빈약하다. 또한 범람원도 대보화강암으로 이루어진 춘천 지역을 제외하면 지형면의 빈도와 규모가 매우 적은 편이다. 현 하천에 의해 형성되는 범람원의 발달이 불

량하고, 하안단구의 분포 밀도가 매우 낮다는 점은 북한강이 신생대 제4기 후반에 퇴적작용보다는 지속적인 하방침식을 통해 현재의 유로를 형성하였음을 의미한다.

북한강에서 하안단구가 분포하는 지역은 상류쪽에서 신포리와 인남리 일대, 춘천의 소양강 합류점 부근인 금산리 일대이고, 하류쪽에서는 홍천강과 합류하는 관천리 일대와 이후 예각으로 곡류하는 지점인 고성리 일대, 그리고 삼회리 일대에서 유로를 따라 길게 하안단구가 분포하고, 그 이후로는 양수리까지의 하도 우안에 소규모의 하안단구성 전상지들이 연속적으로 나타난다(그림 3).

북한강의 하천 종단면상에서 범람원 및 하안단구의 고도 분포는 화강암으로 이루어진 춘천 부근에서 하상비고가 가장 낮으며, 이보다 상류쪽과 하류쪽에서는 하상비고가 점차 높아진다. 이러한 특징은 기반암의 차이에 의한 하곡의 폭 때문이다. 춘천 일대의 화강암 지역에서 하곡의 평균 폭은 약 3,593m지만, 나머지 변성암 지역에서 하곡의 평균 폭은 1,080m로, 화강암 지질로 이루어진 곳이 상대적으로 침식에 약하여 하곡의 폭이 3배 이상 더 넓기 때문에, 동일한 유량일 때 하천의 홍수위는 더 낮으며, 따라서 하안단구의 고도가 상대적으로 더 낮을 수 있다.

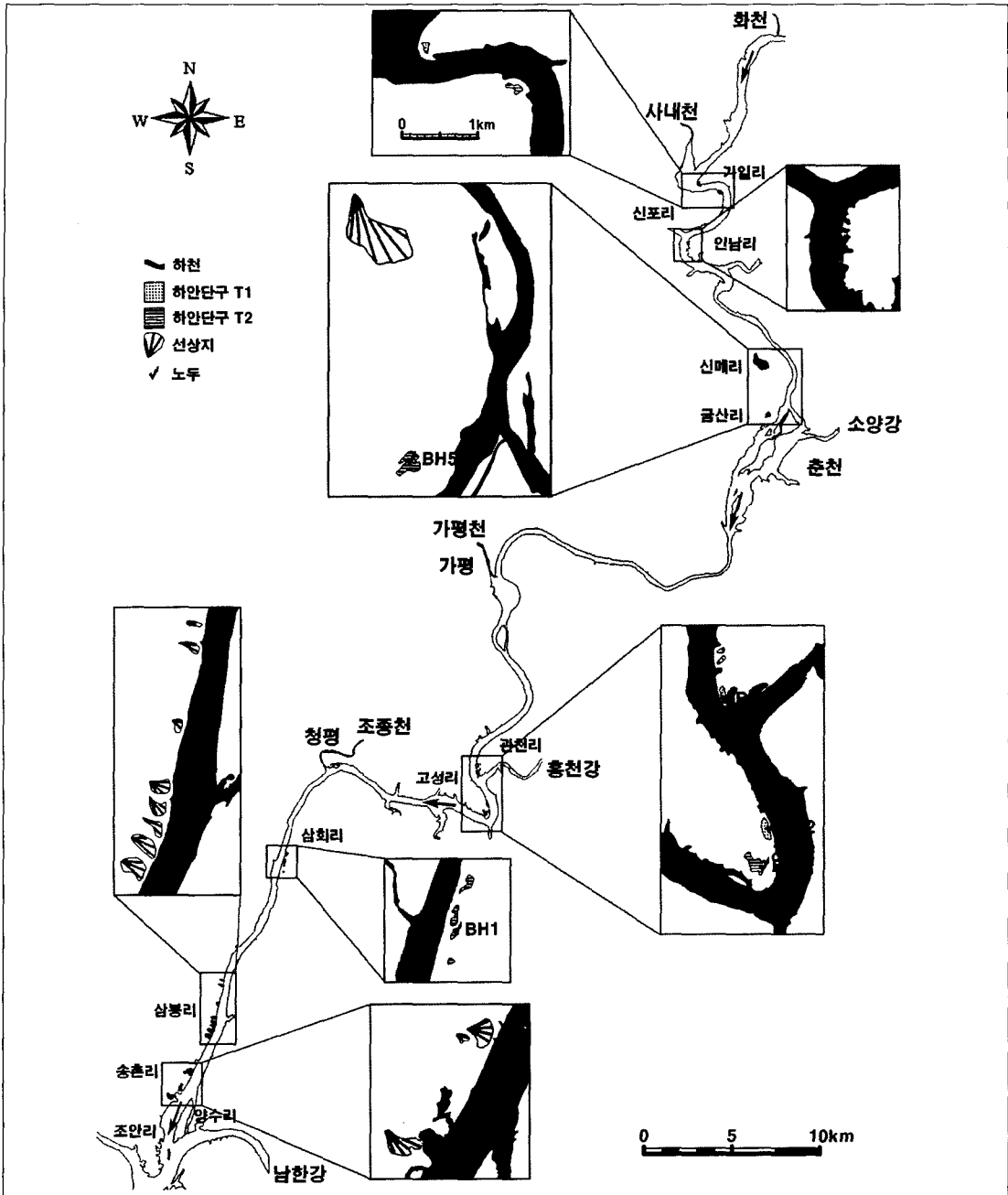


그림 3. 북한강의 하안단구 지형분류도

표 1. 북한강 하안단구의 지형면 특성

	하상비고(m)	단구면 개수	전체 면적(km <sup>2</sup> )	평균 면적(m <sup>2</sup> )	개석율(%)	경사도(°)	하곡 폭(m)
BH-T2	25~39	4	0.14	35,341	33.3	3.54	2,212
BH-T1	18~29	5	0.06	12,357	30.6	3.81	1,417
평균(계)		9	0.20	22,572	31.8	3.69	1,770

북한강의 지류하천인 소양강, 홍천강, 내린천, 사내천에 분포하는 하안단구 T1면의 최고 하상비고는 각각 21m, 21m, 19m, 20m로 대체로 20m 내외이지만, 북한강 본류에서 하안단구 T1면의 최고 하상비고는 29m로, 지류 하천에 비해 더 높다. 이는 북한강 본류가 지류와 비교할 때, 하곡의 폭은 그다지 크지 않지만 유역분지가 넓고 유량이 많아서 하천의 수위는 상대적으로 훨씬 더 높기 때문에 하안단구 T1면의 하상비고도 그에 따라 높은 것으로 생각된다.

화천에서 양수리까지의 북한강에는 총 9개 지점에서 하안단구면이 분포하며, T1면은 5곳, T2면은 4곳에서 발견된다. T1면의 하상비고는 18~29m, T2면은 25~39m이며, 전체 면적과 평균 면적은 최근에 형성된 T1면보다 오래된 T2면이 더 넓은 것으로 측정되었다. 하안단구면의 평면적인 개석율은 T1면이 30.6%, T2면이 33.3%이고, 단구면의 경사도는 T1면이 3.81°, T2면이 3.54°로 대체로 유사하다.

하안단구면이 위치한 지점의 하곡 폭은 T1면이 1,417m, T2면이 2,212m로, T2면이 발달한 지점이

T1면보다 하곡의 폭이 더 넓은 것으로 나타났다. 이러한 점에 비추어 볼 때, 하안단구 T2면 퇴적층은 하천의 측방이동과 같이 하곡을 확장하는 과정에서 형성되었을 가능성이 높으며, 따라서 T2면 퇴적층은 상대적으로 하천의 침식에 의해 제거될 가능성이 적기 때문에, T1면보다 단구면의 면적이 상대적으로 넓게 나타나는 것으로 판단된다.

### 5. 하안단구 퇴적층의 이화학적 특성

연구지역에서는 BH1~BH5까지 총 5개의 하안단구 퇴적층 노두가 발견·조사되었다(그림 3). 이중 BH1, BH3, BH5는 하안단구 T2면이고, BH2와 BH4는 하안단구 T1면의 노두이다.

BH1은 하류의 가평군 삼회리에 위치한 T2면 노두로, 최상부의 해발고도는 약 61m이고 하상비고는 약 37m이다(그림 3, 4). 최하부에는 풍화 단계 2~3정도로 외관상 절반 이하의 풍화가 진행된 기반암이 분포하며, 그 위에 다양한 종류의 퇴적층이

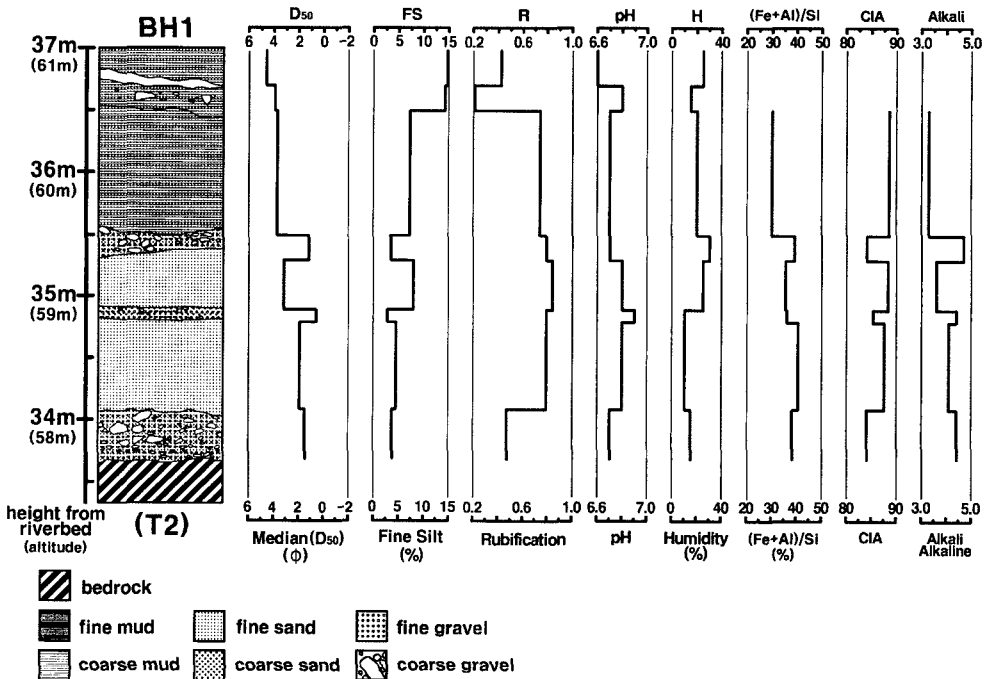


그림 4. 북한강 하안단구 T2면 노두 BH1 퇴적층의 특성

반복적으로 나타난다. 이중 하상비고 33.7m~36.5m 까지를 하천의 영향에 의한 충적층(alluvium)으로 해석할 수 있으며, 36.5m 이상의 최상부는 사면운 반작용에 의해 형성된 녹설층(colluvium)과 산불에 의해 타고남은 재가 쌓인 층, 인간의 토지이용에 의한 인위적인 층이 차례로 나타난다.

BH1 퇴적층에서 2mm 이내의 퇴적물의 입도 평균값은 모래와 mud의 비율이 72.6%와 27.4%이고, 입도의 평균은 2.89 $\phi$ , 중앙값은 2.48 $\phi$ 로 모두 fine sand의 범위이며, 분산은 1.92로 약간 불량(poorly sorted)하며, 7 $\phi$ 이하의 fine silt와 clay의 비율은 5.0%로 높지 않다(표 2). 적색화지수는 평균 0.74로 매우 높아 장기간 산화작용을 받았음을 의미하며,

흑색화지수는 0.26이다. pH는 6.8로 약산성이며, 습도는 18.3%이다.

BH1 퇴적층의 단면에서 입도, 적색화, pH, 습도의 변화를 살펴보면(그림 4), 모래층에 비해 자갈층에서 중경(D50)이 더 크고, fine silt의 비율이 낮다. 적색화지수는 하상비고 34.1~36.5m까지의 층에서 값이 높게 나오며, pH는 34.1~35.3m에서 높은 값을 보인다. 습도는 대체로 pH와 반대의 경향으로 나타나며, 하상비고 34.9~35.5m에서 값이 가장 높고, 퇴적층의 하부보다 상부에서 높게 나타난다.

BH3은 가평군 고성리에서 북한강의 유로가 급격하게 곡류하는 지점의 활주사면에 위치한 하안단구 T2면의 노두이며, 깊이 약 3.7m까지 모두 퇴적물로

표 2. 북한강 하안단구 T2면 노두(BH1, BH3, BH5)의 퇴적물 특성

노두	층준	유형 <sup>1</sup>	역		입도(2mm이하, $\phi$ )							토색		적색화 지수	흑색화 지수	pH	습도 (%)
			크기 <sup>2</sup>	원마도 <sup>3</sup>	sand (%)	mud (%)	평균	분산	중앙 값	7 $\phi$ 이하 (%)	최빈 값	빈도	건				
BH1	-0.1	gM	-	-	39.4	60.6	4.67	2.32	4.96	14.8	bi	7.5yr6/6	7.5yr4/4	0.42	0.24	6.6	25
	-0.4	gM	∞	a~sa	44.3	55.7	4.51	2.25	4.56	14.3	bi	10yr6/4	7.5yr2/2	0.21	0.59	6.8	15
	-1.0	gmS	-	-	55.7	44.3	3.94	1.76	3.68	7.3	bi	5yr4/6	5yr4/6	0.74	0.35	6.7	20
	-1.6	msG	pe~co	sr	74.1	25.9	2.63	2.16	2.35	3.4	bi	5yr5/8	2.5yr4/6	0.79	0.35	6.7	30
	-1.9	gmS	-	-	62.9	37.1	3.64	1.79	3.16	8.0	bi	5yr7/8	5yr4/8	0.84	0.12	6.8	25
	-2.2	msG	pe	sr	82.4	17.6	2.12	2.12	1.80	2.7	bi	7.5yr5/8	5yr4/8	0.79	0.35	6.9	10
	-2.6	mS	-	-	79.8	20.2	2.56	1.75	1.95	4.5	bi	5yr6/8	2.5yr4/6	0.79	0.24	6.8	10
	-3.1	msG	pe~co	sr~r	80.9	19.1	2.43	1.91	1.92	3.8	bi	10yr6/6	7.5yr5/6	0.47	0.12	6.7	15
	평균	-	-	-	72.6	27.4	2.89	1.92	2.48	5.0	-	-	-	0.74	0.26	6.8	18.3
BH3	-1.0	mS	-	-	75.4	24.6	2.99	1.73	2.48	4.4	bi	7.5yr6/8	5yr4/6	0.68	0.24	6.9	15
	-1.7	mS	-	-	79.0	21.0	2.87	1.73	2.45	5.5	uni	7.5yr6/8	5yr5/8	0.79	0.12	6.9	10
	-2.5	sM	-	-	49.8	50.2	4.25	1.61	4.01	4.0	bi	5yr6/8	2.5yr5/8	0.89	0.12	6.9	20
	-3.5	msG	co	r~wr	68.5	31.5	2.42	2.32	2.06	1.9	bi	5yr6/6	5yr4/8	0.74	0.24	6.8	25
평균	-	-	-	68.2	31.8	3.13	1.85	2.75	4.0	-	-	-	0.78	0.18	6.9	17.5	
BH5	-0.3	gmS	-	-	67.7	32.3	3.36	1.45	2.96	2.4	bi	7.5yr6/6	5yr5/6	0.58	0.12	6.9	20
	-0.8	gmS	-	-	81.6	18.4	2.66	1.57	2.33	4.4	uni	7.5yr6/6	5yr4/4	0.47	0.24	6.7	20
	-1.3	mS	-	-	80.8	19.2	2.92	1.37	2.70	0.6	uni	7.5yr6/8	5yr4/6	0.68	0.24	6.6	30
	-2.0	msG	pe~co	sr~wr	87.1	12.9	1.66	1.77	1.37	1.7	uni	10yr6/4	7.5yr4/4	0.26	0.24	6.9	10
	-3.0	gmS	-	-	88.5	11.5	1.91	1.31	1.70	1.5	uni	10yr6/6	7.5yr5/6	0.47	0.12	6.9	5
	-3.7	msG	pe~co	sr~wr	80.4	19.5	2.19	2.19	1.67	3.4	bi	10yr7/4	10yr5/6	0.32	0.00	6.9	10
평균	-	-	-	81.0	19.0	2.45	1.61	2.12	2.3	-	-	*	0.46	0.16	6.8	15.8	
평균	-	-	-	73.9	26.1	2.82	1.79	2.45	3.8	-	-	-	0.66	0.20	6.8	17.2	

주: 1. gM: gravely mud, gmS: gravely muddy sand, mS: muddy sand, msG: muddy sandy gravel, sM: sandy mud  
 2. co: cobble, pe: pebble  
 3. a: angular, sa: subangular, sr: subrounded, r: rounded, wr: wellrounded



구성되어 있고 기반암의 깊이를 확인할 수 없다. 하상비고 34.8m를 경계로 하부는 coarse sand와 coarse mud가 많이 포함된 matrix에 풍화단계 3~5의 cobble급 원~완원력들이, 상부는 fine sand와

coarse mud로 이루어진 층이 분포한다(그림 3, 5).

BH3에서 모래와 mud의 평균 비율은 68.2%, 31.8%이고, 입도 평균은 3.13φ로 very fine sand이며, 중앙값은 2.75φ로 fine sand의 범위이다(표 2).

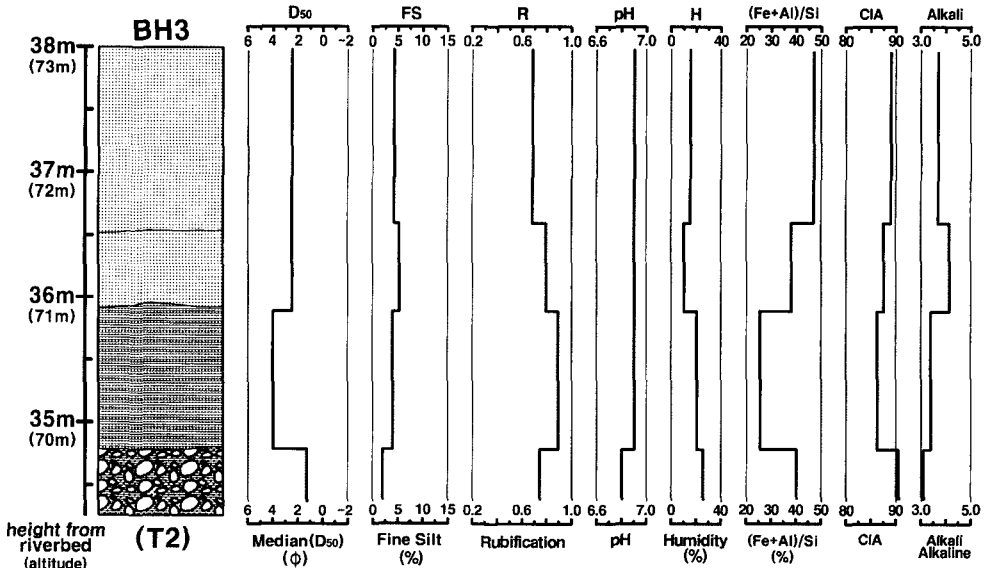


그림 5. 북한강 하안단구 T2면 노두 BH3 퇴적층의 특성

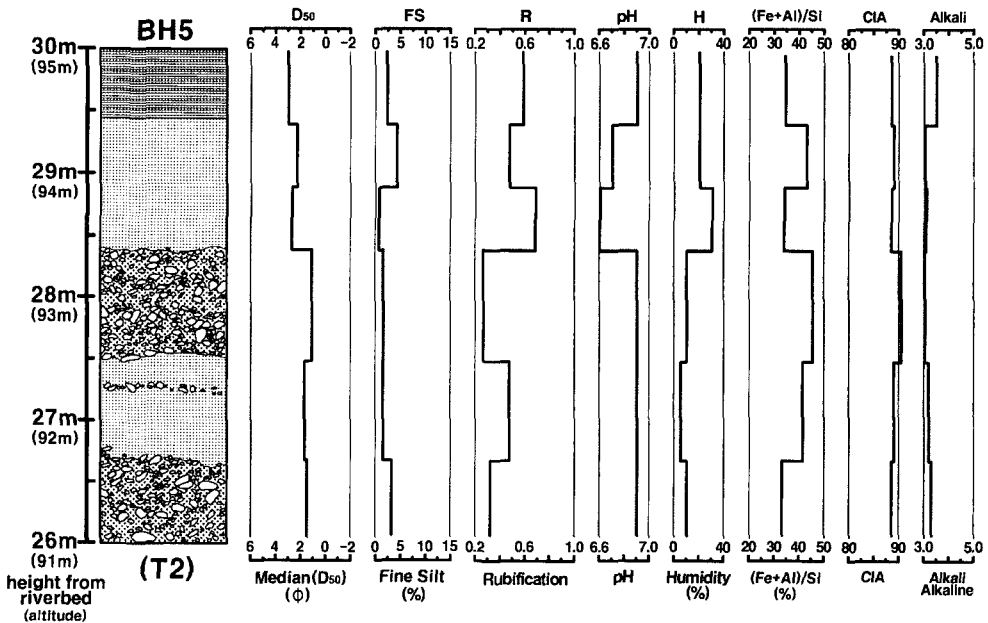


그림 6. 북한강 하안단구 T2면 노두 BH5 퇴적층의 특성

분산은 1.85로 약간 불량하며, 7 $\phi$ 이하의 fine silt와 clay의 비율은 4.0%이다. 적색화지수는 평균 0.78로 5개 노두 중 가장 높은 값을 나타내며, 흑색화지수는 0.18이다. pH는 6.9이며, 습도는 17.5%로 측정되었다.

BH3 퇴적층 단면에서 입도, 산도는 역층의 경계인 하상비고 34.8m에서 값이 변화가 뚜렷하게 나타난다(그림 5). 적색화지수는 중경이 가장 작은 하상비고 34.8~35.9m의 sandy mud층에서 가장 높다. 습도는 퇴적층의 중앙부에서 하부의 역층으로 가면서 점차 높아진다.

BH5는 춘천시 금산리에 위치한 하안단구 T2면의 노두로, BH1과 유사한 형태의 퇴적층이 분포한다. 퇴적층의 두께는 4m이상으로, 기반암은 확인하지 못하였다. 가장 아래에는 모래로 구성된 matrix에 풍화단계 3~6의 pebble~cobble급의 아원~완원력으로 이루어진 자갈층과 주로 medium 및 fine sand로 이루어진 모래층이 교대로 나타난다.

퇴적물의 평균 입도 통계값은 모래와 mud의 비율이 81.0%, 19.0%로 모래의 비율이 매우 높으며, 입도 평균은 2.45 $\phi$ , 중앙값은 2.12 $\phi$ 로 fine sand의 범

위이다(표 2). 분산은 1.61로 약간 불량하며, 7 $\phi$ 이하의 fine silt와 clay의 비율은 2.3%로 매우 낮다. 적색화지수는 평균 0.46이며, 흑색화지수는 0.16이고, pH는 6.8, 습도는 15.8%이다.

BH5 퇴적층 단면에서 입도의 변화는 BH1과 BH3 퇴적층에 비해 미약한 편이다. 적색화지수는 자갈층에서 상대적으로 낮게 측정되었으며, 하상비고 28.4~28.9m의 모래층은 적색화지수와 습도는 가장 높고, pH는 가장 낮다.

북한강 하안단구 T1면인 BH2는 가평군 고성리에서 BH3의 북쪽에 위치한 노두로, 기반암은 나타나지 않으며 4m이상의 두께를 가진 모래층으로만 이루어져 있다(그림 3, 7). 그러나 BH2 노두를 포함하는 하안단구 T1면의 지표에는 아원~원력의 pebble급 역들이 산재해 있다.

BH2 퇴적층에서 모래와 mud의 비율은 53.3%와 46.7%이고, 입도 평균은 4.07 $\phi$ 로 very coarse silt이며, 중앙값은 3.84 $\phi$ 로 very fine sand로, 다른 노두에 비해 상대적으로 세립질이다(표 3). 분산은 1.79로 약간 불량(poorly sorted)하며, 7 $\phi$ 이하의 fine silt와 clay의 비율은 6.2%이다. 적색화지수는 평균 0.45로

표 3. 북한강 하안단구 T1면 노두(BH2, BH4)의 퇴적물 특성

노두	층준	유형 <sup>1</sup>	역		입도(2mm이하, $\phi$ )						토색		적색화지수	흑색화지수	pH	습도(%)	
			크기 <sup>2</sup>	원마도 <sup>3</sup>	sand(%)	mud(%)	평균	분산	중앙값	7 $\phi$ 이하	최빈값	건					습
BH2	-0.2	gmS	-	-	52.9	47.1	3.91	1.63	3.84	4.3	bi	10yr7/4	5yr4/4	0.32	0.12	6.5	40
	-1.0	gmS	-	-	42.8	57.2	4.27	1.66	4.35	5.7	bi	10yr7/6	5yr4/6	0.53	0.12	6.5	30
	-2.0	mS	-	-	63.3	36.7	3.92	1.94	3.33	7.1	bi	2.5yr8/4	7.5yr5/6	0.37	0.00	6.9	10
	-3.0	sM	-	-	46.1	53.9	4.39	1.83	4.32	7.6	bi	10yr8/6	7.5yr5/8	0.63	0.00	6.8	30
	-4.0	mS	-	-	61.5	38.5	3.85	1.89	3.34	6.2	bi	10yr7/6	10yr5/6	0.42	0.00	6.8	25
	평균	-	-	-	53.3	46.7	4.07	1.79	3.84	6.2	-	-	-	0.45	0.05	6.7	27.0
BH4	-0.2	gsM	-	-	49.4	50.6	4.17	1.74	4.04	5.8	bi	5yr6/8	5yr4/6	0.74	0.24	6.6	70
	-1.0	gsM	-	-	47.8	52.2	4.21	1.59	4.12	4.5	uni	10yr7/8	5yr4/6	0.74	0.12	6.8	40
	-3.5	gmS	co	sr~wr	58.1	41.9	3.50	2.40	3.24	7.7	bi	7.5yr6/6	5yr4/8	0.68	0.24	6.7	35
	-4.0	gmS	co	sr~wr	51.6	48.4	3.83	2.31	3.89	8.2	bi	10yr7/6	7.5yr6/8	0.58	0.00	6.8	25
	-4.5	gmS	co	sr~wr	63.9	36.1	3.06	2.64	2.50	7.8	bi	10yr7/6	7.5yr5/8	0.58	0.00	6.7	35
	-5.0	gmS	co	sr~wr	68.8	31.2	2.87	2.65	2.15	9.1	tri	2.5yr8/4	2.5yr7/6	0.37	0.00	6.8	30
평균	-	-	-	56.6	43.4	3.60	2.22	3.16	7.2	-	-	-	0.62	0.10	6.7	39.2	
평균	-	-	-	55.0	45.0	3.84	2.01	3.50	6.7	-	-	-	0.54	0.08	6.7	33.6	

주: 1. gmS: gravely muddy sand, mS: muddy sand, sM: sandy mud, gsM: gravely sandy mud

2. co: cobble, pe: pebble

3. a: angular, sa: subangular, sr: subrounded, r: rounded, wr: wellrounded

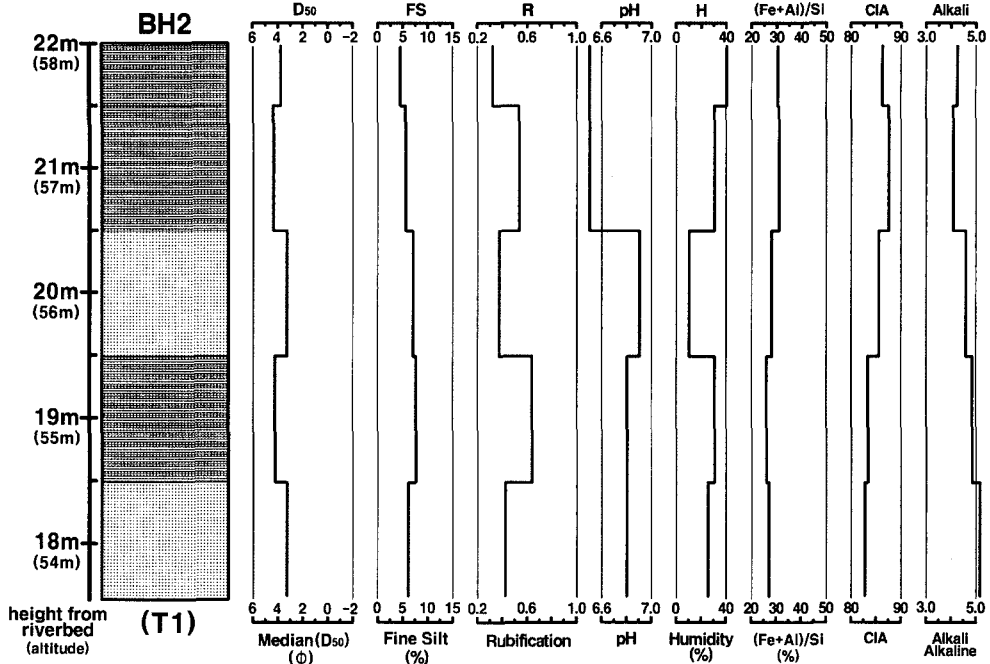


그림 7. 북한강 하안단구 T1면 노두 BH2 퇴적층의 특성

5개 노두 중 가장 낮으며, 흑색화지수는 0.05이다. pH는 6.7로 약산성이며, 습도는 27.0%이다.

BH2 퇴적층의 단면에는 역층을 포함하지 않기 때문에, 퇴적물 입도의 변화가 크게 두드러지지 않지만, 입도의 중앙값과 적색화 지수는 층준에 따라 수치의 변화가 반복적으로 나타난다. 퇴적층의 중앙부인 하상비고 19.5~20.5m 층에서는 pH가 가장 높으며 습도는 가장 낮다(그림 7).

BH4는 흥천강이 북한강에 합류되는 지점인 가평군 관천리에 위치한 하안단구 T1면의 노두이다(그림 3). 지형면은 2개의 단으로 구분되는데, 아랫단은 약 3m이상의 역층으로 기반암은 발견되지 않으며, 윗단은 약 2m의 sand층으로 구성되어 있다(그림 8, 9).

BH4에서 모래와 mud의 비율은 56.6%, 43.4%이며, 입도 평균은 3.60φ, 중앙값은 3.16φ로 very fine sand의 범위이다(표 3). 분산은 2.22로 매우 불량(very poorly sorted)하며, 7φ이하의 fine silt와 clay의 비율은 7.2%로 5개 노두 중 가장 높다. 적색화지수는 평균 0.62이며, 흑색화지수는 0.10이다. pH는 6.7이고, 습도는 39.2%로 5개 노두 중 가장 높다.

BH4 퇴적층의 단면에서도 상부의 모래층은 물리적 특성에 큰 변화가 없으며, 하부의 자갈층에서는 아래로 갈수록 matrix의 입도가 커지고 적색화 지수는 낮아지며, pH와 습도는 반복적으로 변화한다.

하안단구 T2면과 T1면의 퇴적층을 비교해보면, mud의 비율은 T2면이 평균 16.1%, T1면이 평균 45.0%로 T1면에서 3배정도 더 높게 나타난다(표 2) T1면 퇴적층은 모래층과 자갈층 모두 30% 이상의 mud를 포함하고 있다. 또한 fine silt 및 clay의 비율도 T1면이 평균 6.7%로 3.8%인 T2면에 비해 더 높다. 일반적으로 형성시기가 오래된 퇴적층일수록 풍화작용에 의해 상대적으로 mud의 비율이 증가한다(Birkeland, 1999). 그러나 북한강의 하안단구에서는 T2면보다 최근에 형성된 T1면에서 mud의 비율이 높게 나타나는데, 이는 결국 풍화에 의한 것이라기보다는 T1면 형성 시의 퇴적환경이 상대적으로 세립질의 부유성 범람 퇴적물이 활발하게 퇴적되었던 것으로 판단된다. 하안단구 T1면은 세립물질의 비율이 상대적으로 높지만, 분산값은 T1면이 평균 2.01로 T2면보다 분급이 좀 더 불량하고, 입도 분포에서 최빈값이 두 곳에서

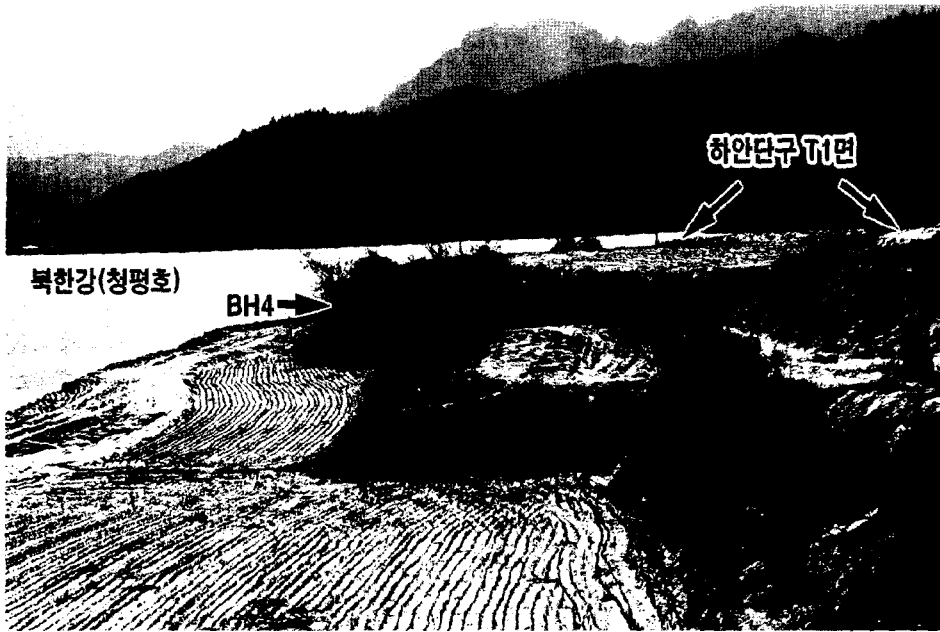


그림 8. 노두 BH4 하안단구면의 지형 경관

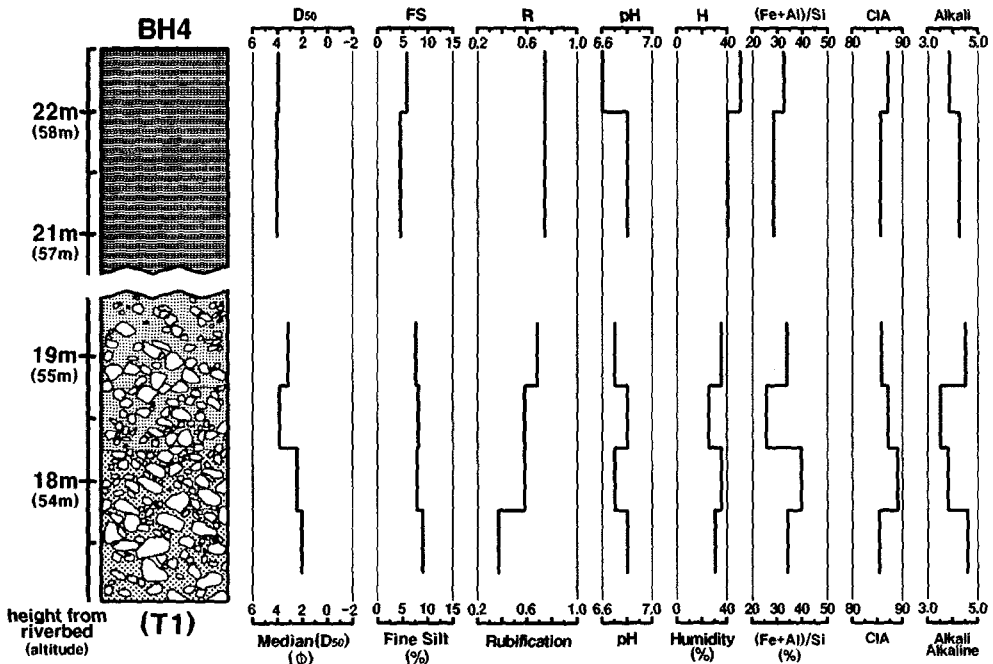


그림 9. 북한강 하안단구 T1면 노두 BH4 퇴적층의 특성

나타나는 bimodal type으로 대부분 이루어져 있는 점에서, 수 차례의 부유성 퇴적 event를 통해 형성된 것으로 추정된다.

적색화 지수는 T2면이 평균 0.66으로 T1면의 0.54보다 더 높게 나타난다(표 2). 이는 형성시기가 더 오래된 T2면이 T1면에 비해 상대적으로 오랜

기간 대기에 노출되어 산화작용을 받았기 때문이다. 흑색화지수는 T2면이 0.20, T1면이 0.08로, 역시 T2면이 더 높게 나타난다(표 2). 이는 상대적으로 T2면 퇴적층이 오랜 기간 높은 수분 함량을 유지하였을 가능성이 있음을 지시한다고 볼 수 있다. 특히, 흑색화 지수의 값은 T2면의 각 퇴적층에서도 BH1의 -0.4m와 -1.6m, BH3의 -3.5m, BH5의 -2.0m 층준에서 높게 나타나는데, 이 층들은 모두 최상부에 위치한 자갈층이라는 점에서, 지표에서 지하로 침투하는 수분이 자갈층에서 상당 기간 체류되어 퇴적물의 환원작용을 일으켰을 가능성이 있으며, 이러한 가정은 BH1과 BH3 노두에서 해당 층준의 높은 습도 값으로 잘 증명되고 있다(표 2).

북한강 분류는 지류인 소양강, 홍천강, 사내천에 비해 유량이 많고 하폭이 크며 하도의 경사가 완만하기 때문에(이광률·윤순옥, 2003a), 상대적으로 퇴적물의 운반 및 퇴적 능력이 높아서, 하안단구 퇴적층의 두께가 훨씬 더 크게 나타난다. 또한 북한강에서 발견된 5개의 퇴적층 노두는 모래층과 자갈층이 다양하게 나타나며, 퇴적층 상부에 두꺼운 모래층이 나타나는데, 이는 상류로부터 공급된 퇴적물이 풍부한 유수의 작용에 의해 형성된 층리 및 분급 현상으로 볼 수 있다. 따라서 퇴적층의 두께, 층리 및 분급의 정도로 볼 때, 북한강에서 하안단구 퇴적층이 형성되었던 시기에는 유량이 매우 많았고, 상류로부터 다량 공급된 퇴적물이 넓고 완만한 하곡을 지나면서 퇴적작용이 일어났던 것으로 추정된다.

북한강 하안단구 5개 노두의 역층에서 선캄브리

야대 편마암과 중생대 화강암 역을 대상으로 단면을 절개하여 바깥쪽의 변색된 부분인 풍화각의 두께를 측정하였다(표 4). 하안단구 T2면은 총 40개의 편마암 역에서 풍화각 두께의 중앙값이 14.0mm이었고, 총 6개의 화강암 역은 모두 내부까지 완전히 변색되었다. 하안단구 T1면에서는 총 26개의 편마암 역에서 풍화각 두께의 중앙값은 5.0mm, 총 17개의 화강암 역의 풍화각 두께의 중앙값은 8.0mm로 측정되었다.

북한강의 지류 하천인 홍천강(윤순옥·이광률, 2000; 이광률·윤순옥, 2003b), 사내천(이광률, 2003), 소양강(이광률, 2004)에 대한 연구에서 하안단구의 형성시기는 모두 빙기로 추정되었으며, 북한강은 한강의 중상류에 위치하여 해수면과 거리가 멀고, 대체로 하곡이 좁고 깊은 산지 하천의 특성을 띠고 있으므로, 식생이 빈약한 빙기에 활발한 퇴적물 공급에 의해 하안단구면이 형성될 것으로 판단된다.

북한강의 지류인 홍천강(이광률·윤순옥, 2003b)의 하안단구 역 풍화도와 비교할 때, 북한강의 하안단구 T1면과 T2면 퇴적층의 역은 풍화각이 매우 두꺼운 편으로, 북한강의 T2면은 홍천강의 T3 또는 T4면과 유사한 값을 가지며, 북한강의 T1면은 홍천강의 T2면과 풍화각의 두께가 유사하다. 1회 이상의 간빙기 또는 아간빙기를 거친 퇴적층의 역에서 풍화각이 수 mm 이상 나타난다(이광률·윤순옥, 2003b)는 점을 고려하면, 북한강의 하안단구 T1면은 MIS(Marine Oxygen Isotope Stage) 4 또는 6시기에 형성되었을 가능성이 높다.

표 4. 북한강 하안단구 퇴적물의 역 풍화각 두께

class	site	편마암			화강암		
		풍화각 두께(mm)		개수	풍화각 두께(mm)		개수
		평균값	중앙값		평균값	중앙값	
T2	BH1	19.4	∞	14	-	-	-
	BH3	10.3	6.0	14	∞	∞	3
	BH5	9.0	8.8	12	∞	∞	3
	평균	15.1	14.0	40	∞	∞	6
T1	BH2	6.2	4.5	13	8.1	∞	10
	BH4	5.8	5.0	13	14.0	8.0	7
	평균	6.0	5.0	26	10.5	8.0	17

## 6. 하안단구 퇴적층의 풍화 특성과 형성 시기

북한강의 5개 하안단구 노두의 퇴적층 단면에 대한 원소 및 광물 자료에 기초한 풍화 특성을 살펴보기 위해, 각 층준에서 silt 입자를 대상으로 X선 회절분석을 통한 광물 조성의 변화, X선 형광분석을 통한 원소 함량비의 변화, 그리고 풍화 정도를 정량적으로 확인할 수 있는 분자의 몰비를 계산하였다.

32산화물인  $Fe^{3+}$  과  $Al^{3+}$  은 보통의 토양 pH에서 용해성이 매우 낮기 때문에(Birkeland, 1999; Bohn et al., 2001), 풍화가 진행될수록 (Fe+Al)/Si의 값은 커지게 되며, Markewich and Pavich(1991)는 (Fe+Al)/Si와 시간 사이에 대수적인 상관성이 있음을 증명하였다. 그리고 Na, K 및 Mg, Ca와 같은 알칼리 및 알칼리 토류 원소는 용해도와 이동성이 높기 때문에(Ritter et al., 1995; Birkeland, 1999; Bohn et al., 2001), 퇴적층 속에서 용탈 작용에 의해 쉽게 제거될 수 있어, 풍화가 진전됨에 따라 그 양은 감소된다. 규반비( $SiO_2/Al_2O_3$ )와 규철반비( $SiO_2/R_2O_3$ )에서,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ 는 일반적인 풍화 조건에서 가장 안정한 원소들이므로(Birkeland, 1999), 시간에 따라 풍화가 진행될수록 그 값은 작아진다. 반면, CIA(Chemical Index of Alteration)는 알칼리 및 알칼리 토류 원소에 대한 용출성이 낮은  $Al_2O_3$ 의 비율로 계산되므로, 풍화가 진전될수록 값은 커지게 된다.

하안단구 T2면인 BH1 노두의 단면에서 (Fe+Al)/Si의 백분율은 퇴적층의 하부에서 대체로 값이 크게 나타나며, CIA와 알칼리의 함량비 변화는 그 특성상 면상대칭 관계로 나타나고 있다. 특히, 알칼리의 함량비는 중경(D50)의 변화와 유사하며, 반대로 CIA는 fine silt의 변화와 유사하게 나타난다(그림 4). 이는 BH1 퇴적층이 모래층에 비해 자갈층을 구성하고 있는 silt 입자에서 알칼리 및 알칼리 토류 원소들의 함량이 더 높다는 것을 의미하며, 모래층에서 상대적으로 용탈이 활발하게 일어나는 것으로 해석된다.

BH1 퇴적층에서 (Fe+Al)/Si의 평균값은 36.58%이며, 규반비는 3.34, 규철반비는 2.68이다(표 5). CIA는 86.34%로 계산되었으며, 알칼리 및 알칼리 토류의 평균 함량은 4.06%이다.

BH3의 퇴적층 단면에서는 자갈층의 바로 상부에 위치한 coarse mud층에서 (Fe+Al)/Si의 값이 가장 낮으며, BH1과는 달리 자갈층에서 알칼리 및 알칼리 토류의 함량이 가장 낮고, 규반비의 평균값은 3.37, 규철반비는 2.69이다(그림 5, 표 5).

BH5의 퇴적층 단면에서 (Fe+Al)/Si의 값은 상부 자갈층에서 가장 높고, 하부 자갈층에서 가장 낮게 나타났다(그림 6). 다른 노두에 비해 BH5는 CIA의 평균값이 89.04로 가장 높고, 규반비의 평균값은 3.26, 규철반비는 2.56, 알칼리 및 알칼리 토류의 함량은 평균 3.33%로 가장 낮아서, 하안단구 T2면 중 가장 풍화가 진전된 퇴적층이라고 할 수 있다(표 5).

BH5는 다른 노두와는 달리 풍화가 매우 진전되어 손으로도 쉽게 부수어지는 새프플라이트화된 화강암으로 이루어진 기반암의 상부에 위치하고, 다른 노두에 비해 퇴적층 내부에 fine silt의 비율이 전체적으로 낮기 때문에, 퇴적층을 거쳐 기반암 내부로 수분의 침투가 용이하여 용탈이 활발히 발생한 결과, 규산과 이동성이 높은 알칼리 원소들이 상대적으로 쉽게 제거된 것으로 판단된다.

하안단구 T1면인 BH2 노두에서 (Fe+Al)/Si는 하부로 갈수록 대체로 감소하나 그 변화가 두드러지지 않으며, CIA는 -1.0m 층준에서 가장 높고 하부로 갈수록 꾸준히 감소하고, 알칼리 및 알칼리 토류는 다른 퇴적층에서처럼 CIA와 대칭을 이루어 하부로 갈수록 값이 커진다(그림 7). 이러한 경향은 퇴적층의 상부에서 지표로부터 수분의 침투에 의해 Na, K, Mg, Ca와 같은 용해성이 높은 양이온들은 용탈 작용에 의해 하부층으로 이동되고, 이후 지하수에 의해 유출되거나 점토광물에 다시 흡착되기 때문에(이석훈·김수진, 2001), 하부에서 상부로 갈수록 알칼리 및 알칼리 토류의 함량은 감소한다. 이는 또한 퇴적층의 상부에서 토양생성 작용이 보다 활발하다는 것을 의미한다.

BH4 노두의 상부 모래층에서 (Fe+Al)/Si와 CIA는 표층에서 더 높고, 알칼리 및 알칼리 토류는 표층에서 더 낮아, 표층에서 풍화 및 토양생성 작용이 더 활발하게 나타난다(그림 8). 하부 자갈층은 하상비고 18.3m를 경계로 값의 변화가 달라지는데, 이러한 양상은 다른 이화학적 특성에서도 동일하기 때문에, 퇴적물의 입도, 습도, pH 등에 의

표 5. 북한강 하안단구 T2면 노두(BH1, 3, 5) 퇴적층의 주 원소 함량비와 몰비

노두	층준	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	(Fe+Al)/Si(%)	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CIA (%)	알칼리 및 알칼리토류 함량
BH1	-1.0	53.25	22.58	0.89	7.61	0.59	0.07	0.00	2.59	0.07	0.09	11.43	30.30	4.01	3.17	88.50	3.25
	-1.6	48.57	25.96	0.91	10.02	0.65	0.75	0.00	3.30	0.07	0.15	10.56	39.18	3.18	2.46	84.01	4.70
	-1.9	50.88	26.03	0.84	7.44	0.45	0.06	0.00	3.07	0.08	0.11	11.35	35.58	3.32	2.72	88.31	3.58
	-2.2	50.46	25.42	0.74	8.41	0.49	0.07	0.00	3.79	0.15	0.16	10.27	35.88	3.38	2.70	85.71	4.35
	-2.6	47.90	27.73	0.67	8.33	0.51	0.10	0.00	3.49	0.08	0.13	11.76	40.58	2.94	2.40	87.47	4.11
	-3.1	49.19	26.09	0.07	8.90	0.33	0.73	0.00	3.34	0.22	0.23	11.17	37.99	3.20	2.62	84.06	4.40
	평균	50.04	25.64	0.69	8.45	0.50	0.30	0.00	3.26	0.11	0.15	11.09	36.58	3.34	2.68	86.34	4.06
BH3	-1.0	43.62	28.71	0.77	9.65	0.62	0.16	0.01	2.94	0.14	0.15	14.16	47.01	2.58	2.07	89.14	3.73
	-1.7	49.12	27.00	0.84	7.58	0.65	0.12	0.00	3.38	0.10	0.15	11.04	38.12	3.09	2.54	87.42	4.15
	-2.5	58.55	20.45	0.99	7.60	0.51	0.11	0.01	2.79	0.08	0.12	8.15	25.41	4.87	3.75	86.31	3.43
	-3.5	47.56	27.58	0.75	7.65	0.46	0.09	0.00	2.53	0.08	0.16	13.20	40.14	2.93	2.42	90.48	3.08
	평균	49.71	25.94	0.84	8.12	0.56	0.12	0.01	2.91	0.10	0.15	11.64	37.67	3.37	2.69	88.34	3.60
BH5	-0.3	51.21	24.22	0.93	9.18	0.75	0.10	0.01	2.66	0.12	0.14	11.05	34.55	3.59	2.78	88.69	3.53
	-0.8	41.91	23.07	0.65	12.11	0.55	0.11	0.01	2.46	0.28	0.33	19.13	43.22	3.09	2.25	88.92	3.12
	-1.3	49.91	22.38	0.95	10.02	0.58	0.09	0.00	2.50	0.15	0.22	13.91	33.90	3.79	2.83	88.61	3.17
	-2.0	44.60	28.44	0.42	9.56	0.45	0.15	0.04	2.44	0.13	0.27	14.24	45.54	2.67	2.16	90.48	3.08
	-3.0	46.98	26.84	0.59	9.94	0.47	0.14	0.03	2.77	0.18	0.28	12.26	41.53	2.98	2.35	89.00	3.42
	-3.7	52.96	26.14	0.50	5.34	0.60	0.12	0.00	2.92	0.97	0.13	11.30	32.82	3.44	2.98	88.53	3.64
	평균	47.93	25.18	0.67	9.36	0.57	0.12	0.02	2.63	0.30	0.23	13.65	38.59	3.26	2.56	89.04	3.33
T2면	평균	49.17	25.54	0.72	8.71	0.54	0.19	0.01	2.94	0.18	0.18	12.19	37.61	3.32	2.64	87.85	3.67

표 6. 북한강 하안단구 T1면 노두(BH2, 4) 퇴적층의 주 원소 함량비와 몰비

노두	층준	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	(Fe+Al)/Si(%)	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CIA (%)	알칼리 및 알칼리토류 함량
BH2	-0.2	53.07	22.20	0.91	8.32	1.29	0.33	0.10	2.52	0.01	0.13	10.68	30.48	4.06	3.15	86.37	4.24
	-1.0	52.79	22.15	0.95	8.84	1.37	0.18	0.13	2.43	0.08	0.13	10.65	30.97	4.05	3.09	87.45	4.11
	-2.0	55.75	21.54	0.96	7.92	1.43	0.20	0.18	2.79	0.12	0.15	8.04	28.05	4.40	3.41	85.41	4.60
	-3.0	56.31	19.89	0.98	8.25	1.52	0.22	0.32	2.81	0.14	0.15	8.81	26.27	4.81	3.63	83.31	4.87
	-4.0	56.13	20.67	0.98	8.31	1.55	0.30	0.43	2.87	0.11	0.16	7.93	27.21	4.62	3.51	82.60	5.14
	평균	54.81	21.29	0.96	8.33	1.43	0.25	0.23	2.68	0.09	0.14	9.22	28.60	4.39	3.36	85.03	4.59
BH4	-0.2	51.66	22.80	0.94	9.01	0.95	0.33	0.03	2.56	0.11	0.19	10.87	32.51	3.85	2.95	86.93	3.87
	-1.0	55.68	21.31	0.96	8.45	1.00	0.11	0.07	3.06	0.09	0.13	8.25	28.20	4.44	3.39	85.47	4.24
	-3.5	51.38	24.46	0.73	7.81	0.95	0.23	0.07	3.24	0.11	0.15	10.60	33.71	3.57	2.88	85.78	4.49
	-4.0	58.76	22.17	0.53	5.30	0.57	0.10	0.00	2.85	0.03	0.10	8.68	25.57	4.51	3.81	87.11	3.52
	-4.5	48.14	27.12	0.80	8.36	0.94	0.28	0.09	2.51	0.07	0.19	11.34	39.66	3.02	2.44	88.91	3.82
	-5.0	51.97	26.57	0.59	5.48	0.81	0.31	0.33	3.18	0.05	0.14	9.92	34.03	3.33	2.87	85.35	4.64
T1	평균	52.93	24.07	0.76	7.40	0.87	0.23	0.10	2.90	0.08	0.15	9.94	32.28	3.79	3.06	86.59	4.10
T1 평균		53.78	22.81	0.85	7.82	1.13	0.24	0.16	2.80	0.08	0.15	9.62	30.60	4.06	3.19	85.88	4.32

한 차이에 기인한 것으로 해석된다.

하안단구 T2면과 T1면에서 주 원소 함량과 몰비의 특성을 살펴보면, (Fe+Al)/Si은 T2면이 평균

37.61%, T1면이 30.60%로, 미국 남동부에 Markewich and Pavich(1991)의 연구로 판단할 때, 모두 100,000년 이상의 시간이 경과한 것으로 추정

된다.

규반비와 규철반비는 T2면이 평균 3.32, 2.64이고, T1면이 평균 4.06, 3.19로서, T1면보다 오래된 T2면에서 값이 더 작아, T2면 퇴적층이 풍화를 더 많이 받았음을 증명한다. 최후 간빙기에 형성된 것으로 추정된 안성천의 층적단구(이의환, 1999)에서 규반비는 5.60~7.02, 규철반비는 4.34~5.65이며, 민넬-리스 간빙기 이전으로 추정된 쌍천(강영복·박종원, 2000)의 단구에서는 규반비가 4.17~9.86, 규철반비가 3.52~8.06이다. 따라서 안성천 및 쌍천의 하안단구에 비해 북한강의 하안단구는 시기가 더 오래되었거나 풍화를 매우 강하게 받은 것으로 추정된다.

CIA는 T2면이 평균 87.85%, T1면이 평균 85.88%이고, 알칼리 및 알칼리 토류의 함량은 T2면이 3.67, T1면이 4.32로, 더 오래된 T2면에서 용탈 작용에 의해 알칼리 원소들의 함량이 감소하여, CIA의 값은 더 크게 나타난다. 풍화층의 단면에서는 일반적으로 기반암에서 지표면으로 갈수록 CIA를 비롯한 풍화지수가 지속적으로 증가하는 경향을 가지지만, 다양한 퇴적 층준이 발달한 하안단구 퇴적층의 단면에서는 CIA의 변화가 매우 복잡하게 나타나고 있다.

주 원소 함량비에서 LOI(Loss Of Ignition)는 T2면이 평균 12.19%, T1면이 평균 9.62%로, 오래된 T2면에서 값이 더 큰데, 이는 풍화에 의해 광물 내부 또는 광물간의 공극 확대로 수분 유입에 의한 토양 흡착수와 점토광물의 층간수 증가와 지표로부터의 유기물 공급의 증가에 기인한 것(이석훈·김수진, 2001)으로 추정된다.

퇴적층 단면에서 광물 조성의 변화를 살펴보면, 하안단구 T2면인 BH1 노두에서는 조암광물로 quartz(석영, Q), K-feldspar(K장석, Kf), mica(운모, mi)가, 점토광물로 halloysite(ha), illite(il), kaolinite(ka), chlorite(ch)가 모든 층에서 확인되었다(그림 10). -2.6m 층준에서는 illite-smectite 혼합층 광물(il/sm)과 gibbsite(gb)가 나타나는데, 특히 gibbsite는 Al을 주로 함유한 규산염 광물의 마지막 풍화 단계에서 생성되는 광물로(Taylor and Eggleton, 2001), 이 층의 풍화 정도가 매우 높음을 지시하는 광물이다.

BH3 퇴적층에서는 모든 층에서 석영, K장석,

mica를 포함하여, halloysite, illite, kaolinite, chlorite가 나타나며, gibbsite는 -2.5m 제외된 나머지 세 층에서 모두 확인되어(그림 11), (Fe+Al)/Si 및 CIA의 변화 양상과 일치된 결과를 보인다.

BH5 퇴적층에서는 상부의 두 층에서 석영, K장석, mica, halloysite, illite만 발견되며, -1.3m 층준부터 kaolinite가 나타나며, -2.0m 층준에서는 gibbsite가 확인된다(그림 12).

하안단구 T2면 노두에서는 층준에 따라 약간의 차이는 있지만, 대부분의 층에서 높은 풍화 정도를

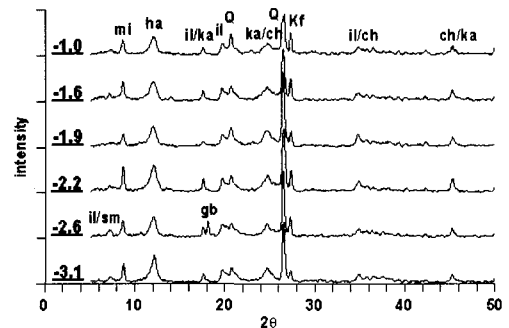


그림 10. BH1의 X선 회절 패턴

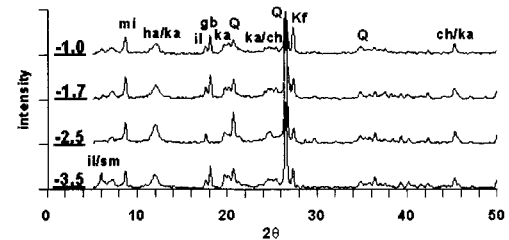


그림 11. BH3의 X선 회절 패턴

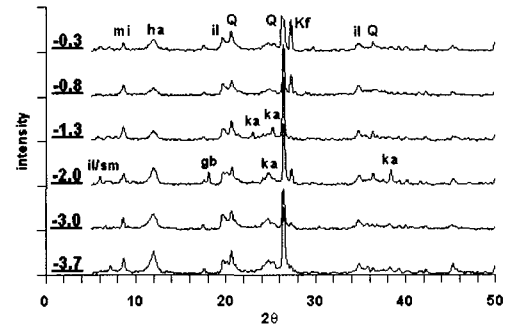


그림 12. BH5의 X선 회절 패턴



의미하는 kaolinite와 halloysite(Taylor and Eggleton, 2001)가 발견되고, kaolinite의 용탈에 의해 형성되는 gibbsite(Taylor and Eggleton, 2001)도 모든 노두에서 확인되고 있다. 따라서 점토광물의 유무에 따른 풍화 정도로 판단할 때 하안단구 T2면의 형성 시기가 매우 오래되었음을 짐작할 수 있다. 또한 T2면의 대부분 층에서는 K장석은 발견되지만 사장석은 발견되지 않는다. Lasaga(1984)<sup>21)</sup>의 실험에 따르면 25°C, pH5의 조건에서 1mm의 정장석 결정이 완전히 용해되는 데에는 520,000년이 걸리며, 사장석은 80,000년이 소요된다고 하였다. 온도와 pH의 조건이 우리나라의 일반적인 토양보다 더 강한 화학적 반응을 이끌 수 있지만, 모래와 silt 퇴적물은 이미 기원지로부터 기반암의 풍화작용을 거쳐 공급된 것이므로, 이러한 점을 감안하면, 하안단구 T2면의 형성시기는 100,000년에서 500,000년 사이의 범위일 것으로 추정된다.

하안단구 T1면인 BH2 노두에서는 모든 층에서 석영, K장석을 포함하여, illite-smectite 혼합층 광물(il/sm), halloysite, illite, chlorite가 나타나며, -2.0m 층준부터는 muscovite(백운모, mu)가 나타난다.

BH4 퇴적층에서는 석영, K장석, mica, halloysite, chlorite가 대부분의 층에서 확인되며, -4.0m 층준부터는 풍화에 약한 광물인 plagioclase(사장석, pl)가 발견되어 원소와 광물 분석의 결과가 서로 잘 부합되고 있다(그림 13).

하안단구 T1면 노두에서는 우리나라 풍화토에서 장석과 운모류의 최종 풍화 산물인 kaolinite(황진연 외, 2000)가 발견되지 않으며, 풍화에 약한 사장석이 확인되는 층도 존재하므로, T2면의 형성시기는 100,000년 이내일 가능성이 높다.

결국, 역의 풍화각 두께와 퇴적층의 광물 조성으로 판단할 때, 북한강 하안단구 T1면의 형성시기는 MIS 4시기(59~74ka)일 가능성이 높다. 그리고 하안단구 T2면은 광물 조성으로 보아 100,000년에서 500,000년 사이의 범위로 추정되었지만, 지반 용기와 하천의 하각작용이 완만하게 변화하거나 일정하게 유지되었다면, 하상비고가 최고 29m에 분포하는 T1면보다 10m 더 높은 고도까지 분포한다는 점을 고려할 때, T2면의 형성시기는 200,000년 이내일 것으로 판단된다. 따라서 북한강 하안단구 T2면의 형성시기는 MIS 6시기(130~190ka)일 가

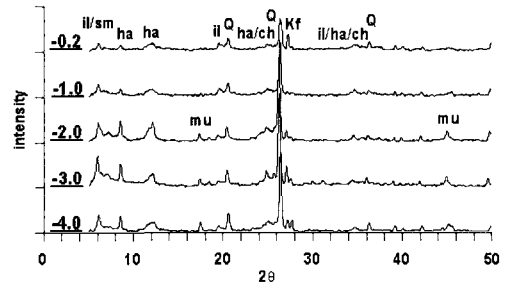


그림 13. BH2의 X선 회절 패턴

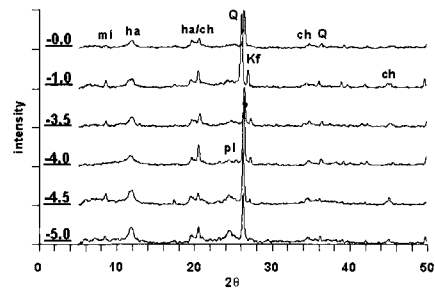


그림 14. BH4의 X선 회절 패턴

능성이 높다.

## 7. 결론

본 연구는 북한강에 분포하는 하안단구 T2면과 T1면을 대상으로, 하안단구면의 분포 및 지형 특성과 퇴적층 단면의 이화학적 특성, 원소 및 광물의 풍화 특성을 분석하고, 하안단구의 형성시기에 대해 논의 하였다.

화천에서 양수리까지의 북한강에는 하상비고가 낮고 보다 최근에 형성된 하안단구 T1면과 하상비고가 높고 보다 오래된 하안단구 T2면이 발달해 있지만, 북한강의 지류 하천들에 비해 하안단구의 발달은 매우 빈약한 편이다. 하안단구 T1면의 하상비고는 18~29m, T2면은 25~39m이며, 전체 면적과 평균 면적은 최근에 형성된 T1면이 T2면에 비해 더 작게 나타났다.

형성시기가 더 오래된 T2면이 T1면에 비해 상대적으로 오랜 기간 대기에 노출되어 산화작용을 받았기 때문에, 적색화 지수는 T2면이 평균 0.66으

로 T1면의 0.54보다 더 높게 측정되었다. 퇴적층 역에서 풍화각 두께의 중앙값은 T2면의 편마암이 14.0mm, 화강암은 모두 내부까지 완전한 변색이 이루어졌으며, T1면에서는 편마암이 5.0mm, 화강암은 8.0mm로 측정되었다.

하안단구 퇴적층의 두께, 층리 및 분급의 정도로 볼 때, 북한강에서 하안단구 퇴적층이 형성되었던 시기에는 유량이 매우 많고 상류로부터 다량 공급된 퇴적물이 넓고 완만한 하곡을 지나면서 퇴적작용이 일어났던 것으로 추정된다.

(Fe+Al)/Si는 T2면이 37.61%, T1면이 30.60%이고, 규반비와 규철반비는 T2면이 각각 3.32, 2.64, T1면이 각각 4.06, 3.19로서, 오래된 T2면에서 값이 더 작으며, 안성천 및 쌍천의 하안단구와 비교할 때, 북한강의 하안단구 T2, T1면은 시기가 더 오래되었거나 풍화를 매우 강하게 받은 것으로 추정된다.

CIA는 T2면이 평균 87.85%, T1면이 평균 85.88%이며, 풍화층의 단면에서는 기반암에서 지표면으로 갈수록 CIA를 비롯한 풍화지수가 지속적으로 증가하는 경향을 가지지만, 다양한 퇴적 층준이 발달한 북한강의 하안단구 퇴적층 단면에서는 CIA의 변화가 매우 복잡하게 나타나고 있다.

LOI(Loss Of Ignition)는 T2면이 평균 12.19%, T1면이 평균 9.62%로, 오래된 T2면에서 풍화에 의해 광물 내부 또는 광물간의 공극 확대에 의한 수분 유입으로 값이 더 크게 나타났다.

하안단구 T2면 퇴적층에서는 높은 풍화 정도를 의미하는 kaolinite와 halloysite가 발견되고, kaolinite의 용탈에 의해 형성되는 gibbsite도 확인되었다. T1면의 노두에서는 kaolinite가 발견되지 않으며, 풍화에 약한 사장석이 발견되기도 하였다.

하안단구의 하상비고 및 분포 특성, 퇴적층의 적색화, 역의 풍화각 두께, 원소 및 광물 분석 결과를 토대로 할 때, 북한강 하안단구 T2면의 형성시기는 MIS 6시기(130~190ka)일 가능성이 높으며, T1면의 형성시기는 MIS 4시기(59~74ka)일 가능성이 높다.

註

1) 지형면의 해발고도와 하상비고는 1:5,000 지형도를 이용

하여 정치한 결과로서 2m 이내의 오차는 인정된다.  
 2) Lasaga, 1984, "Chemical kinetics of rock interactions", Journal of Geophysical Research, 89-B6, 1009-1025으로 Goudie, A., 1995, The changing Earth: Rates of Geomorphological processes, Blackwell에서 인용하였다.

文 獻

강영복·박종원, 2000, "쌍천 하성단구의 토양 특성," 대한지리학회지, 35(2), 159-176.  
 김의선·황진연·김진섭·함세영·김재곤, 2001, "부산 북부지역의 모암 유형에 따른 토양의 구성광물 및 화학성분," 한국광물학회지, 14(1), 58-72.  
 윤순옥·이광률, 2000, "홍천강 중·하류의 하안단구 지형발달," 대한지리학회지, 35(2), 189-206.  
 이광률, 2003, "사내천의 하안단구 지형 분석," 한국지형학회지, 10(3), 359-372.  
 \_\_\_\_\_, 2004, "소양강 상류 하안단구의 지형면 특성과 퇴적물 분석," 대한지리학회지, 39(1), 27-44.  
 \_\_\_\_\_·윤순옥, 2003a, "북한강 유역분지 하천의 평면 및 종단면 특성," 한국지형학회지, 10(2), 207-219.  
 \_\_\_\_\_, 2003b, "홍천강 하안단구의 형성시기별 역 풍화 특성," 지질학회지, 39(4), 431-444.  
 이석훈·김수진, 2001, "유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 따른 원소의 거동," 한국광물학회지, 14(1), 39-51.  
 이의한, 1998, "미호천 유역의 충적단구," 지리학연구, 32(1), 35-56.  
 \_\_\_\_\_, 1999, "안성천 중류의 충적단구," 대한지리학회지, 34(1), 17-26.  
 전서령·이정후, 2002, "화강암의 풍화에 의해 생성된 토양단면에서 주원소 및 미량원소의 지화학적 특성: 전북 진안군 백운면에 분포하는 two-mica granite을 대상으로," 지질학회지, 38(3), 293-307.  
 최한성, 2003, "거창분지 화강암 풍화층 분석," 한국지형학회지, 10(3), 401-412.  
 황진연·장명익·김준식, 조원모, 안병석, 강수원,

- 2000, “우리나라 황토(풍화토)의 구성광물 및 화학성분.” 한국광물학회지, 13(3), 147-163.
- Birkeland, P. W., 1999, *Soil and Geomorphology*, Oxford University Press.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L. and O'Connor, G. A., 2001, *Soil Chemistry*, John Wiley & Sons.
- Colman, S. M., 1982, “Chemical weathering of basalts and andesites: Evidence from weathering rind,” *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1246.
- Markewich, H. W. and Pavich, M. J., 1991, “Soil chronosequence studies in temperate to subtropical, low-latitude, low-relief terrain with data from the eastern United States,” *Geoderma*, 51, 213-239.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1982, “Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites,” *Nature*, 299, 715-717.
- Ritter, D. F., Kochel, R. C. and Miller, J. R., 1995, *Process Geomorphology*, Wm. C. Brown Publishers.
- Taylor, G. and Eggleton, R. A., 2001, *Regolith Geology and Geomorphology*, John Wiley & Sons.

최초투고일 04. 02. 26

최종접수일 04. 06. 17