

상·하류의 기반암 차이에 따른 하천의 형태와 암석의 저항력 분석

이광률*

Analysis on Channel Morphology and Rock Resistance by Difference of Bedrock Types between Upper and Lower Reach

Gwang-Ryul Lee*

요약 : 하천은 암석의 저항력, 구조 운동, 퇴적물, 유량 등에 의해 다양한 형태로 발전한다. 본 연구는 이러한 요인 중에서도, 암석의 침식 저항력에 초점을 두었다. 상·하류간 기반암의 차이가 뚜렷한 어룡천, 흥정천, 두학천, 대화천, 남천천, 구룡천의 6개 하천을 대상으로, GIS를 이용하여, 유역분지 상·하류의 평면 및 종단면 특성을 분석하였다. 화강암 유역은 완만한 경사, 낮은 요형도, 넓은 하곡 면적을 이루며, 편마암 유역은 급한 경사, 높은 요형도, 좁은 하곡 면적을 나타내며, 퇴적암 유역은 본류 경사도와 기복량은 크지만, 나머지는 하천별로 차이가 있다. 여러 가지 형태적 특성 중 상·하류 암석간의 차이가 분명한 본류의 경사, 본류의 요형도, 하계밀도, 하곡의 면적비, 유역의 평균 경사, 유역의 평균 기복을 대상으로, 그 값을 지수화하여, 상·하류 암석의 침식 저항력을 판단하였다. 그 결과, 편마암으로 이루어진 하천의 상류는 침식에 대한 저항력이 높으며, 퇴적암은 상·하류에 관계없이 중간 정도의 저항력을 나타내고, 화강암은 퇴적암과 접한 상류의 경우를 제외하면, 대체로 침식 저항력이 낮다.

주요어 : 하천지형, 암석의 차이, 침식 저항력, 하천 종단면, 요형도, 하도 경사, 기복

Abstract : The streams evolve to diverse forms influenced by various factors such as rock resistance, tectonic process, sediments and discharge. This study focuses on erosion resistance of rocks among these factors. The morphology of plane and longitudinal profile has been analysed in upper and lower reach of 6 streams using GIS; Yeoryong-cheon, Heungeong-cheon, Duhak-cheon, Daehwa-cheon, Namcheon-cheon, Guryong-cheon, having distinct bedrock types between upper and lower reach. While the basins of granite have gentle slope, low concavity and wide valley area, those of gneiss form steep slope, high concavity and narrow valley area. However, the basins of sedimentary rock make steep slope and high relief in main channel, the other features show some differences in each stream. Among the various morphological features, the indices on slope and concavity of main channel, drainage density, ratio of valley area, average slope and average relief of the basin which have clear differences between rocks in upper and lower reach are calculated to interpret the erosion resistance of rocks in upper and lower reach. As a result, the upper reaches composed of gneiss have the highest erosion resistance, sedimentary rocks in upper and lower reaches show moderate resistance, and granite reaches generally have the lowest resistance except the upper reaches bordered by sedimentary rock.

Key Words : fluvial geomorphology, difference of lithology, erosion resistance, channel longitudinal profile, concavity, channel slope, relief

* 경북대학교 사범대학 지리교육과 전임강사(Full-time Lecturer, Department of Geography Education, Kyungpook National University), georiver@knu.ac.kr

1. 연구 배경 및 목적

지형은 암석 및 지구조적 특성과 같은 지표 구성물질의 저항력에 대한 기후, 중력 등의 외적 작용에 의해 형성된다(Ritter *et al.*, 1995). 특히, 암석은 종류에 따라 풍화와 침식에 대한 저항력이 다르기 때문에, 동일한 기후 조건에서 암석의 차이는 차별적인 풍화와 침식에 의해 다양한 지형을 발달시키며(Leopold *et al.*, 1992; 권혁재, 2006), 하천의 침식과 하천 종단면의 형태를 결정하는 중요한 요인이다(Gilbert, 1877; VanLaningham *et al.*, 2006에서 재인용; Stock and Montgomery, 1999). 암석을 통과하면서 유로를 형성하고 유지·변화시키는 하천은 암석의 종류와 특성에 의한 영향을 받아, 하계망 및 하도의 패턴, 하천 종단면의 형태와 경사, 하곡 및 하상의 형태와 유형 등에 변화와 차이를 가지게 된다(Miller and Gupta, 1999; VanLaningham *et al.*, 2006).

우리나라 한반도는 선캄브리아대부터 신생대에 이르기까지 다양한 시대에 형성된 다양한 종류의 암석들로 구성되어 있다. 선캄브리아대에 형성된 변성암은 전체의 약 50%를 차지하며, 화성암은 약 30%를 차지하는데, 그 가운데 중생대의 화강암은 전체의 약 20%를 차지하며, 고생대에서 신생대 제3기까지 형성된 퇴적암은 약 20%를 차지하고 있다(권혁재, 2005). 따라서 우리나라의 이러한 다양한 암석 구성은 서로 다른 지형적 특성을 나타내며, 예로, 화강암은 석산이나 침식분지를 이루며, 변성암은 대체로 토산을 이룬다(권혁재, 2005).

하천 지형과 지질 사이의 관계에 대한 선행 연구동향은 크게 두 가지 유형으로, GIS를 이용하여 유역분지의 지형과 암석의 저항력 사이의 관계를 분석한 연구와, 야외조사 및 지형도 분석을 통해 지질적 차이를 고려하여 하천의 형태와 종단면의 수리적·지형적 특성을 분석한 연구로 구분된다.

GIS를 이용한 지질별 지형 특성에 대한 연구로, 김우관·임용호(1997)는 GIS를 이용하여 거제도도를 대상으로 지질별 고도, 경사도, 하계밀도, 하계빈도를 분석하였다. 이금삼·조화룡(1998)은 GIS를 이용하여 경상

도의 지질별 면적, 고도, 기복량, 하천길이, 하천밀도 등을 분석하였는데, 변성암과 유천층군의 퇴적암이 침식에 가장 강하고, 대보화강암이 침식에 가장 약하다고 설명하였다. Clayton and Shamoan(1998)은 영국의 고도 Grid 자료를 토대로 지형 기복에 따른 지질의 상대적 저항력을 분석하였다. 그 결과, 대체로 오래된 암석일수록 저항력이 커서, 선캄브리아기와 고생대 초반의 암석은 평균 이상의 저항력을 가지며, 신생대보다는 중생대 암석이 가장 약한 것으로 나타났다. 또한 같은 시기라도 암석의 종류에 따라서도 저항력이 다른데, 화성암이 가장 강하고, 다음으로는 사암이며, 이암이 가장 약한 것으로 분석되었다. Mills(2003)는 미국 테네시 산지의 DEM 자료를 기초로, 광역적 기복, 국지적 기복, 경사 지수를 토대로 침식 저항 지수(ERI)를 계산하여, 대하천보다는 소하천이 암석에 의한 영향을 크게 받는다고 설명하였다.

지질과 하천의 수리 및 지형적 특성과의 관계에 대한 연구로, Meybeck(1987)은 유역분지에서 침식에 대한 암석의 영향을 계량적으로 분석하였으며, 화강암을 기준으로 다른 암석의 상대적인 침식 비율을 계산하여, 화강암이 1이라면, 편마암과 편암 1, 사암 1.3, 화산암 1.5, 셰일 2.5, 대리석 5, 석회암 12 등으로 제시하였다. Kelson and Wells(1989)는 미국 뉴멕시코 북부의 6개 산지하천 유역분지를 대상으로 고도-면적 분포, 지질, 빙하 퇴적물이 하천 물수지에 미치는 영향을 분석하여, 퇴적암 지역보다 결정질암 지역에서 하상하중의 비율이 높고, 퇴적물 입자의 크기가 커진다고 제시했다. Ahmad *et al.*(1993)은 자메이카와 푸에르토리코의 산지 하천을 대상으로 형태와 퇴적물의 특성을 조사하여, 하도 형태의 차이는 암석, 구조운동, 유량의 계절적 차이 등에 의해 국지적으로 영향을 받는다고 하였다. 황상일(1996)은 하계망이 유역분지의 지질, 지형, 기후 등의 영향으로 발달한다고 전제하고, 하계망 특성을 통해 중국의 자연지역 구분을 시도하였다. 이광률·윤순옥(2003)은 북한강 유역의 8개 하천을 대상으로, 기반암과 단층선의 유형에 따른 하천의 평면적·종단면적 특성을 분석하였다. Snyder *et al.*(2003)은 미국 캘리포니아 북부에서 지역적 용기량의 차이가 유량, 하폭, 암석, 퇴적물 등에 의한 하각을

2. 연구 방법

에 미치는 영향에 대해 조사하였다. Hodgkinson *et al.*(2006)은 오스트레일리아 Queensland 남동부의 Lacey천에서 변성작용에 따른 암석의 구조와 유역분지의 패턴 사이의 관계를 분석하여, 중차수 하천의 방향은 암석의 구조에 지배적인 영향을 받고, 저차수 하천의 방향은 미세한 층리와 엽리의 방향과 밀접하다고 설명하였다. VanLaningham *et al.*(2006)은 미국 오래된 해안 산지의 하상의 형태, 요형도, 암석의 종류, 지반 용기 사이의 관계를 분석하였는데, 암석 하상보다는 층적 하상에서, 화산암보다는 퇴적암에서 요형도가 높다고 설명하였다.

하천은 유역분지를 이루는 암석의 저항력, 퇴적물 공급, 유량, 구조적 작용 등에 의해 다양한 형태의 하도를 갖게 된다(Wohl, 1999). 본 연구는 하천의 형태에 영향을 미치는 다양한 요인 중에서도, 암석의 종류에 따른 저항력의 차이에 초점을 두고 진행하였다. 암석의 종류에 따른 풍화·침식의 차이는 기존의 많은 선행 연구들에서 제시되었으나, 각각의 하천 유역분지에서 명확하게 구분되는 두 개의 암석이 분포할 경우에, 상·하류 암석간의 저항력을 대상으로 연구가 진행된 바는 많지 않다.

본 연구의 목적은 하천 및 유역분지의 지형도 및 GIS 프로그램을 이용하여, 우리나라에서 유역분지 상·하류간의 암석의 차이에 따른 하천의 평면 및 종단면 특성을 분석하여, 상·하류 암석의 종류 및 하천 형태 사이의 관계와 하천 침식에 대한 상·하류 각 암석의 저항력을 파악하고자 한다. 이를 위해, 우리나라를 구성하는 대표적인 암석인 편마암, 화강암, 퇴적암이 분포하는 하천 유역분지 중에서 상류와 하류가 각각 다른 암석으로 이루어진 6개 하천을 선정하여, 동일 암석이 분포하는 상·하류의 구간별로 길이, 면적, 밀도, 경사, 기복 등 하도와 유역 분지의 평면 및 종단면의 형태적 특성을 계측하고, 이를 지수화하여, 하천 침식에 대한 저항력을 계량적으로 분석하였다.

먼저, 유역분지의 상·하류 사이에 두 가지 유형의 기반암으로 뚜렷하게 구분되는 하천을 선정하기 위해, 1:250,000 지질도를 토대로, 우리나라 전 지역의 하천을 검토하여, 길이 10~30km의 중규모 하천 중 그 특징이 가장 뚜렷한 6개 하천을 선정하였다.

하천의 평면적 형태 분석을 위해, 1:25,000 수치 지형도를 토대로, ArcGis 프로그램을 이용하여, 분류 하도와 분수계를 추출하고, 지질도를 중첩시켜 기반암의 차이에 따른 상·하류 유역을 구분하였다. 그리고 본류 길이, 유역 면적, 하계 총 길이, 곡저의 면적 등을 계측하고, 등고선을 이용 TIN을 제작하여, 음영기복도를 작성한 후, 5m 격자의 GRID 파일로 전환하여, 유역의 평균 고도와 평균 경사도를 계산하였으며, 유역의 기복량은 여러 가지 계산 방법 중 유역을 이루는 각 격자의 전체 고도 값에 대한 표준편차로서 사용하였다.

하천의 종단면적 형태 분석을 위해, 각 하천 유역분지의 1:5,000 지형도를 이용하여, 발원지로부터의 거리별 하상의 고도를 읽어, 하천 종단면도를 작성하고, 그림 1과 같은 형태의 하천 종단면에 대한 분류 하도의 경사도(S)를 계산하였다. 그리고 요형도(Concavity, C)는 Leopold *et al.*(1992)에 의해 제시된 계산법보다, 종단면의 세부적인 형태를 보다 잘 반영하는 Goldrick and Bishop(2006)에 의한 방법으로 아래와 같이 계산하였다.

$$S_{AD} = \cot \frac{(Y_A - Y_D)}{(X_A - X_D)}$$

$$C_{AD} = \frac{[(X_B - X_A)(Y_B + Y_A) + (X_C - X_B)(Y_C + Y_B) + (X_D - X_C)(Y_D + Y_C) - (X_D - X_A)(Y_D + Y_A)]}{2(X_B - X_A)(Y_A - Y_D)}$$

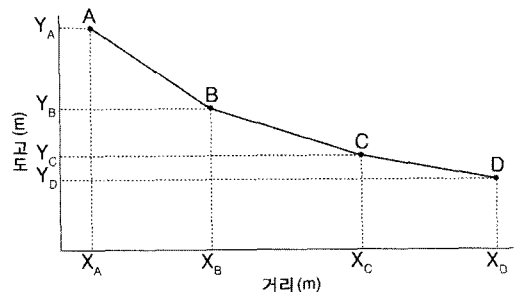


그림 1. 경사도와 요형도 계산 예시 하천 종단면

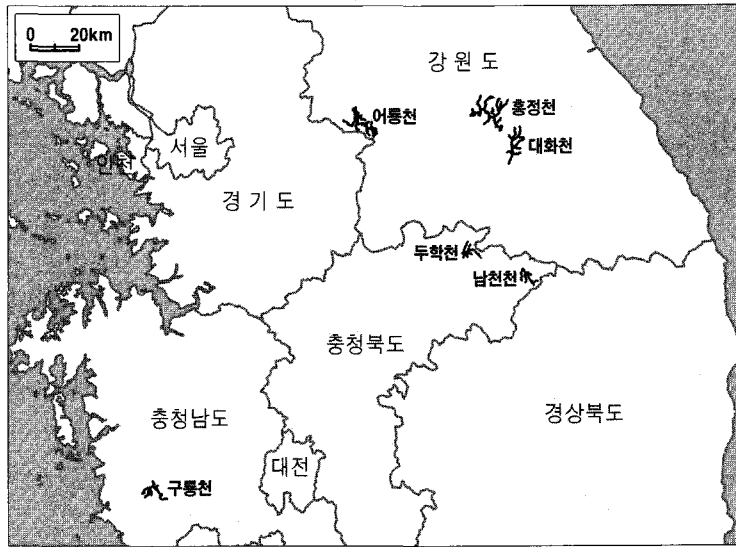


그림 2. 연구 대상 하천의 위치

하천과 유역분지의 여러 가지 형태적 특징 중에서, 상·하류 및 암석별로 그 특징이 뚜렷이 나타나는 분류 하도의 경사, 요형도, 유역분지의 하계밀도, 유역 면적에 대한 하곡의 면적 비, 유역분지의 평균 경사, 유역분지의 평균 기복을 대상으로, 서로간의 상관계수를 계산하고, 이 6가지 요소의 값을 아래와 같이 최대 및 최소값을 기준으로 지수(I)화 한 다음, 그 결과를 종합적으로 검토하여 하천의 침식에 대한 상·하류 간 암석의 저항력에 대해 설명하였다.

$$I_A = \frac{(A - A_{min})}{(A_{max} - A_{min})}$$

3. 연구 대상 하천의 지형 및 지질 개관

연구 대상은 10~30km의 중규모 하천 중에서, 유역 분지의 상류와 하류를 이루는 기반암의 종류가 우리나라에서 분포 비율이 가장 높은 암석인 편마암, 화강암, 퇴적암으로 크게 구별되어 나타나는 하천으로 선정하기 위해, 1:250,000 지질도 및 지형도를 토대로 연구 목적에 적합한 하천을 선별하였다. 그 결과, 연구 대상 하천은 상류와 하류의 암석 구성이 화강암과 편마암인 어룡천, 편마암과 화강암인 홍정천, 퇴적암과 화강암인 두화천, 화강암과 퇴적암인 대화천, 편마암과 퇴적암인 남천천, 퇴적암과 편마암인 구룡천이다(그림 2, 표 1). 우리나라 중부지방은 편마암과 화강암이 대상으

표 1. 연구 대상 하천의 상·하류간 기반암 구성

암석 구성	대상 하천	위치	상·하류의 기반암	
			상류	하류
화강암	어룡천	강원 홍천군 남면	화강암	편마암
편마암	홍정천	강원 평창군 봉평면	편마암	화강암
퇴적암	두화천	충북 제천시 자작동, 두화동	퇴적암	화강암
화강암	대화천	강원 평창군 대화면	화강암	퇴적암
편마암	남천천	충북 단양군 영춘면	편마암	퇴적암
퇴적암	구룡천	충남 부여군 내산면, 구룡면	퇴적암	편마암

로 분포하고 있어, 상·하류가 편마암과 화강암으로 구분되는 하천은 쉽게 발견할 수 있다. 그러나 퇴적암의 경우, 경상남·북도에서는 광역적으로 분포하고, 강원 남부 및 충북 북부, 충남 중서부 등에는 단일 지층의 분포가 좁은 띠 모양을 이루고 있어, 퇴적암과 다른 1개 암석을 가로지르는 하천이 그리 많지 않다. 특히, 상류가 퇴적암이고 하류가 편마암으로 이루어진 하천은 매우 드물다.

어룡천은 본류 길이 25.6km, 유역 면적 110.4km²로, 강원도 홍천군 남면의 대부분을 유역분지로 하고 있으며, 남면 시동리의 삼마치 고개 부근에서 발원하여, 서류 및 북류하여 용수리에서 홍천강에 유입된다(그림 3). 어룡천은 발원지로부터 14.1km 지점을 경계로 하여 상류의 대부분은 중생대 쥐라기 대보화강암으로 이루어져 있으며, 하류는 선캄브리아대 호상편마암으로 이루어져 있다. 상류인 시동리 일대에는 넓은 화강암 침식분지(시동 분지)가 나타나며, 시동 분지를 지난 이후 하천은 대체로 좁고 깊은 하곡을 이루며 감입곡류하여 흘러 홍천강에 유입된다.

홍정천은 본류 길이 24.1km, 유역 면적 147.2km²로, 강원도 평창군 봉평면 홍정리의 홍정산(1,279m) 북사면에서 발원하여, 남동류하며 봉평면을 지나 용평면 백옥포리에서 속사천과 합류하여 평창강을 이룬다(그림 4). 홍정천은 발원지로부터 11.4km 지점을 경계로 하여, 상류는 선캄브리아대 호상편마암으로, 좁고 깊은 하곡을 이루며, 하류는 중생대 쥐라기 대보화강암으로 상대적으로 넓고 평탄한 하곡을 이루고 있다.

두학천은 본류 길이 10.1km, 유역 면적 29.6km²로, 충북 제천시 자작동 갑산(777m)의 북사면에서 발원하여, 북서류, 서류하며 두학동을 지나, 강제동에서 고암천, 용두천 등과 합류하여 제천천을 이룬다(그림 5). 두학천은 발원지부터 5.5km 지점을 경계로, 상류는 석회암, 사암, 세일 등으로 구성된 고생대 전기 영월형 조선누층군과 사암 및 세일로 이루어진 고생대 후기 하부평안층군이 분포하며, 하류는 중생대 쥐라기 대보화강암으로 이루어져 넓은 침식분지와 하곡이 발달해 있다.

대화천은 본류 길이 18.3km, 유역 면적 85.9km²로, 강원도 평창군 대화면 신리 백적산(1,141m)에서 발원

하여 남쪽으로 흘러 대화리를 거쳐 하안미리에서 평창강에 유입된다(그림 6). 대화천은 발원지로부터 9.6km 지점을 경계로, 상류는 중생대 쥐라기 섬강암을 협제한 대보화강암이 대부분이며, 하류는 석회암, 퇴적암, 편암, 규암 등이 혼재된 고생대 전기 평창형 조선누층군과 사암 및 세일로 이루어진 고생대 후기 하부 및 중부 평안층군으로 구성되어 있다. 대화천은 최상류를 제외한 전 구간에서 하곡이 상대적으로 넓고 평탄하다.

남천천은 본류 길이 13.6km, 유역 면적 49.5km²로, 충북 단양군 영춘면 남천리의 신선봉(1,379m)에서 발원하여, 북쪽으로 흘러 하리에서 남한강에 유입된다(그림 7). 남천천은 발원지에서 9.7km 지점을 경계로 상류는 선캄브리아대 미그마타이트질편마암, 반상변정질편마암, 화강암편마암 등의 편마암류가 분포하며, 하류는 세일 및 규암으로 이루어진 고생대 캄브리아기 양덕층군과 석회암 및 사암으로 이루어진 고생대 오르도비스기의 상부대석회암층군으로 구성되어 있다. 남천천의 상류는 하곡이 매우 좁고 깊지만, 하류에서는 상대적으로 넓은 하곡이 나타난다.

구룡천은 본류 길이 18.4km, 유역 면적 46.3km²로, 충남 부여군 내산면 금지리의 월명산(544m)에서 발원하여, 시계방향으로 돌면서 남류 및 동류하여 구룡면 주정리에서 넓은 충적지를 이루며 금천에 유입된다. 구룡천은 발원지로부터 10.9km 지점을 경계로, 상류는 사암, 세일, 역암으로 구성된 중생대 쥐라기 남포층군으로 이루어져 있으며, 하류는 선캄브리아대 호상편마암으로 이루어져 있다. 구룡천은 6개 하천 중 해발고도가 가장 낮으며, 상대적으로 넓은 하곡이 발달되어 있다.

4. 상·하류 암석별 하천의 형태 분석

암석이 다른 6개 하천 상·하류에 대한 하도, 유역 분지, 하계, 하곡에 대한 길이, 면적, 밀도, 경사 등의 형태를 분석한 결과(표 2)를 토대로, 암석의 차이에 따른 하천의 형태적 특성을 종합적으로 검토하였다.

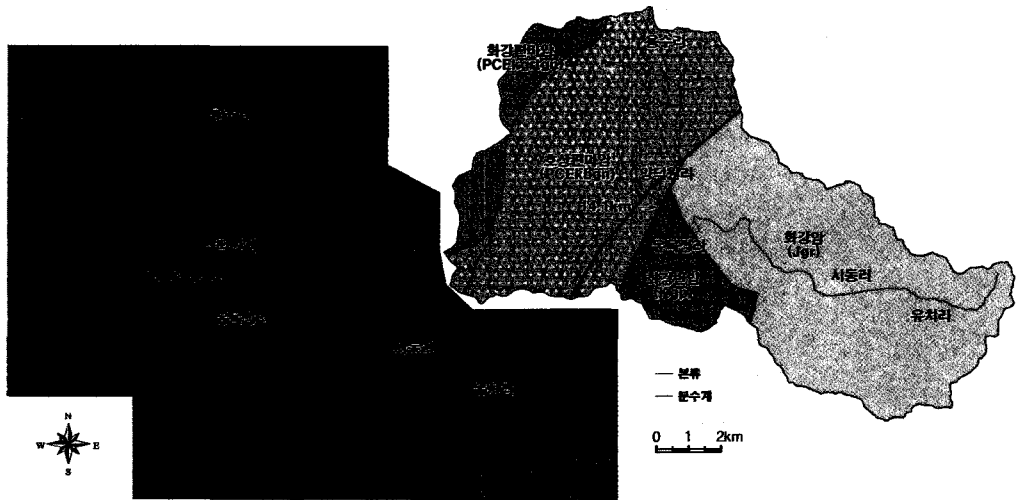


그림 3. 어룡천 유역분지의 지형과 지질

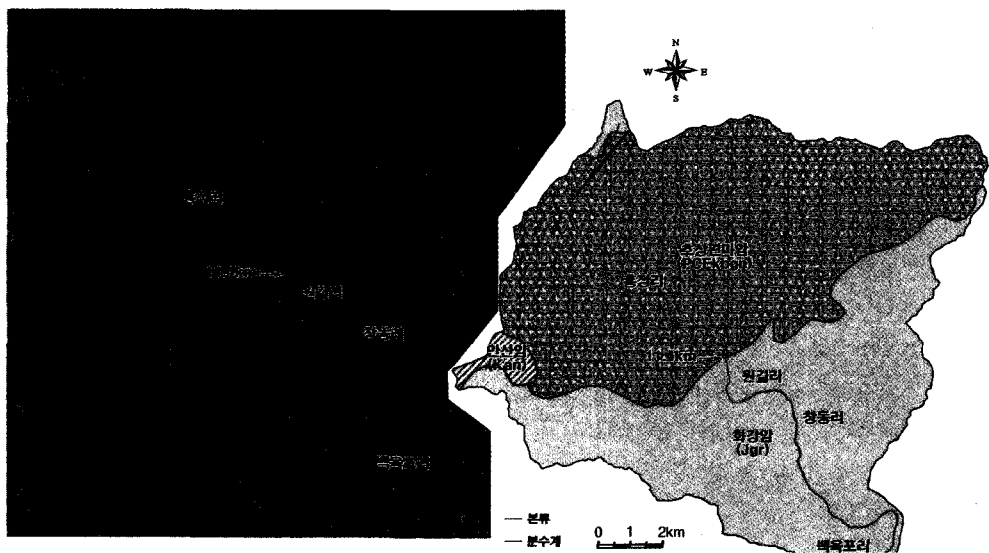


그림 4. 홍정천 유역분지의 지형과 지질

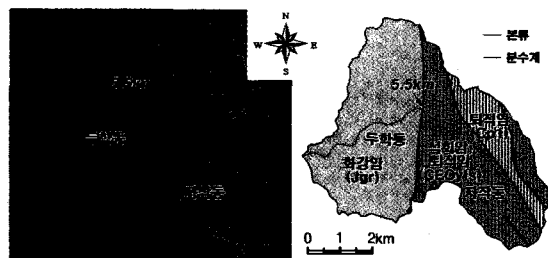


그림 5. 두학천 유역분지의 지형과 지질

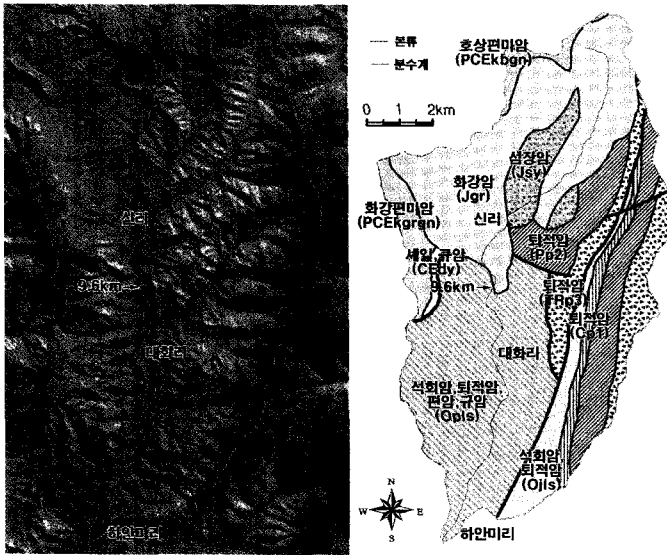


그림 6. 대화천 유역분지의 지형과 지질

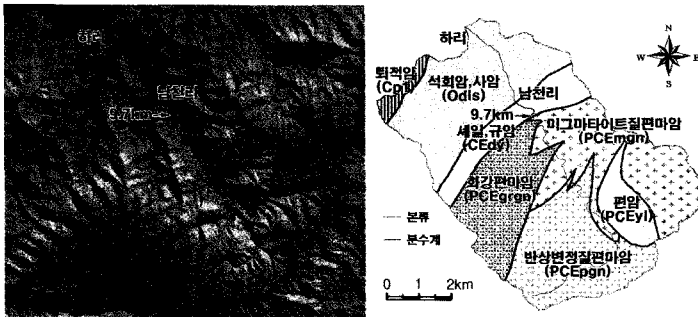


그림 7. 남천천 유역분지의 지형과 지질

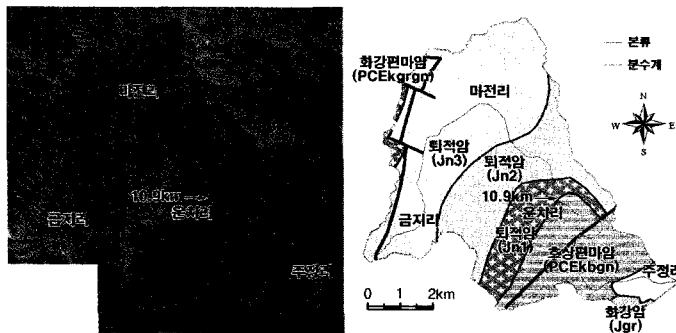


그림 8. 구룡천 유역분지의 지형과 지질

표 2. 6개 하천 상·하류의 하도 및 유역분지의 형태적 특징

하천	암석 종류	최 하류 고도 (m)	본류 길이 (km)	유역 면적 (km ²)	본류 길이/유역 면적	유역 평균 고도 (m)	유역 평균 경사 (°)	유역 평균 기복 (m)	본류 하도 경사 (°)	요형도	하계 총 길이 (km)	하계 밀도	본류 곡저 면적 (km ²)	곡저 면적 비율 (%)	평균 곡저 폭 (m)
어룡천			25.6	110.4	0.23	291	19.9	99	0.45	-0.16	175.0	1.59	6.017	5.5	427
상류	화강암	155	14.1	58.1	0.24	317	18.7	101	0.55	-0.15	105.3	1.81	3.178	52.8	226
하류	편마암	91	11.5	52.3	0.22	264	21.1	89	0.32	-0.21	69.6	1.33	2.839	47.2	246
홍정천			24.1	147.2	0.16	812	22.4	172	0.71	-0.34	139.5	0.95	4.838	3.3	201
상류	편마암	584	11.4	84.0	0.14	902	26.2	146	1.06	-0.64	67.9	0.81	0.795	16.4	070
하류	화강암	495	12.7	63.3	0.20	693	17.0	126	0.40	-0.04	71.7	1.13	4.043	83.6	319
두학천			10.1	29.6	0.34	349	17.2	106	1.10	-0.27	40.8	1.38	2.440	8.2	241
상류	퇴적암	264	5.5	14.3	0.38	427	24.2	101	1.73	-0.23	15.5	1.08	0.472	19.3	86
하류	화강암	236	4.6	15.3	0.30	278	9.7	39	0.35	-0.12	25.3	1.66	1.968	80.7	426
대화천			18.3	85.9	0.21	697	24.6	190	0.83	-0.18	100.3	1.17	4.567	5.3	249
상류	화강암	448	9.6	28.3	0.34	690	21.7	141	1.15	-0.10	37.9	1.34	1.537	33.7	160
하류	퇴적암	375	8.8	57.6	0.15	702	25.4	209	0.48	-0.06	62.4	1.08	3.030	66.3	346
남천천			13.6	49.5	0.27	645	30.3	265	1.58	-0.16	71.6	1.45	1.116	2.3	82
상류	편마암	232	9.7	32.1	0.30	773	31.0	224	1.76	-0.22	43.8	1.36	0.292	26.2	30
하류	퇴적암	156	3.9	17.4	0.22	410	28.9	146	1.13	-0.15	27.9	1.60	0.824	73.8	213
구룡천			18.4	46.3	0.40	122	13.3	88	0.54	-0.27	68.6	1.48	5.020	10.8	273
상류	퇴적암	27	10.9	35.3	0.31	150	17.8	81	0.80	-0.21	50.7	1.43	1.840	36.7	168
하류	편마암	6	7.5	11.0	0.68	33	8.1	25	0.17	-0.13	17.9	1.64	3.180	63.3	425

1) 하도와 유역분지의 형태적 특징

유역분지의 형상이 정방형에 가까운 홍정천은 유역 면적에 대한 본류 하도의 길이 비가 0.16으로 가장 작고, 유역분지 내에서 본류 하도가 크게 곡류하며 흐르는 구룡천은 면적에 비해 길이가 매우 큰 것으로 나타난다. 따라서 유역면적에 대한 본류 길이의 비는 암석의 특성보다는 유역과 하도의 형상에 의해 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

암석별로, 화강암은 상류에서 0.24, 0.34, 하류에서 0.20, 0.30으로 대체로 일정한 범위의 값을 유지하는 것으로 나타나며, 편마암은 상류에서 0.14, 0.30, 하류에서 0.22, 0.68로 그 편차가 매우 심해서 경향을 설명하기 어렵지만, 퇴적암은 상류에서 0.38, 0.31, 하류에서 0.15, 0.22로서, 상류에서는 유역면적에 비해 하도의 길이가 길지만, 하류에서는 반대로 나타난다.

유역분지의 평균 고도는 홍정천이 812m로 가장 높

고, 대화천 697m, 남천천 645m, 두학천 349m, 어룡천 291m 순이며, 구룡천이 122m로 가장 낮다. 홍정천 유역분지의 상류는 평균 고도가 902m, 하류는 693m로 상·하류 지역 모두 다른 하천에 비해 해발고도가 가장 높은 곳이다. 반면, 구룡천은 상류 유역의 평균 고도가 150m, 하류가 33m로, 다른 하천에 비해 해발고도가 매우 낮은 편이다. 상·하류 유역간의 평균 고도의 차는 남천천이 363m로서 가장 크고, 어룡천이 54m로서 가장 작다.

유역분지의 평균 경사도는 상·하류간의 고도차가 가장 큰 남천천이 30.3°로 가장 급하며, 해발고도가 가장 낮은 구룡천이 13.3°로서 가장 완만하다. 암석별로 보면, 화강암은 상류에서 18.7°, 21.7°, 하류에서 17.0°, 9.7°로서, 상·하류 모두 대체로 완만한 경사의 유역분지를 이루고 있다. 편마암은 상류에서 26.2°, 31.0°, 하류에서 21.1°, 8.1°로서, 구룡천의 하류를 제외하면, 대부분 유역분지의 경사가 급하다. 퇴적암은

상류에서 24.2°, 17.8°, 하류에서 25.4°, 28.9°로서, 상류보다 하류 유역분지의 경사가 더 급한 것으로 나타나는데, 이는 고도의 차이에 기인한 것으로 보인다. 즉, 상류가 퇴적암인 연구 대상 하천은 해발고도가 낮고, 하류가 퇴적암인 연구 대상 하천은 해발고도가 높기 때문에, 오히려 해발고도가 높은 하류의 퇴적암 지역에서 큰 경사를 갖는 것으로 판단된다.

해발고도의 표준편차로 계산된 유역분지의 평균 기복량은 평균 경사도와 마찬가지로, 남천천이 265m로 가장 높고, 구룡천이 88m로 가장 낮다. 화강암은 상류에서 101m, 141m, 하류에서 126m, 39m로, 하천별로 차이가 심하다. 편마암은 상류에서 146m, 224m, 하류에서 89m, 25m로, 상류는 기복이 매우 크며, 하류는 기복이 매우 작다. 퇴적암은 상류에서 101m, 81m, 하류에서 209m, 146m로, 평균 경사도와 마찬가지로, 대상 하천의 해발고도차에 의해 상류보다 하류에서 기복이 더 큰 것으로 나타났다.

대부분의 하천은 요형(concave) 종단면을 이루고 (Knighton, 1998), 하류로 갈수록 유량이 증가하고, 퇴적물 입자의 크기가 작아져, 하도 경사도와 요형도가 감소한다(Leopold *et al.*, 1992). 본 연구 결과에서도, 본류 하도의 경사도는 6개 하천 모두 상류가 하류에 비해 크다(그림 9). 화강암은 상류에서 0.55°, 1.15°, 하류에서 0.40°, 0.35°로, 상·하류 모두 전체적으로 완만한 경사를 유지하고 있다. 편마암은 상류에서 1.06°,

1.76°, 하류에서 0.31°, 0.17°로, 상류에서는 경사도가 매우 급하지만, 하류에서는 상대적으로 완만한 경향으로 띈다. 퇴적암은 상류에서 1.73°, 0.80°, 하류에서 0.48°, 1.13°으로, 상·하류 모두 대체로 경사가 심한 것으로 나타난다.

하천 종단면의 형태를 보면, 대부분 평형하천의 형태인 요형의 종단면을 이루고 있으나, 어룡천은 종단면의 기복이 심한편이다. 어룡천에서 철형(convex) 단면이 뚜렷한 지점은 두 곳인데, 11.5km 지점은 화강암과 화강반암 사이의 경계로, 두 암석간의 침식 저항력 차이에 의한 것으로 판단되며, 24km 지점은 하단단구 최저위면의 곡류절단에 의해 형성된 경사급변점이다.

요형도는 값이 음수이면 요형을 의미하며, 값이 작을수록 요형도가 더욱 커지는 것이다. 분석 결과, 모든 하천에서 음의 값을 가져, 요형을 이루는 것으로 나타나지만, 하천과 암석마다 차이가 있다(그림 9). 요형도가 가장 높은 하천은 해발고도가 가장 높은 흥정천으로 -0.34이며, 가장 낮은 하천은 부분적으로 철형의 단면이 나타나는 어룡천과 경사도가 가장 급한 남천천으로 -0.16이다. 그리고 단면의 기복이 심한 어룡천을 제외한 모든 하천은 하류보다 상류에서 요형도가 높은 것으로 나타난다.

화강암의 요형도는 상류에서 -0.15, -0.10, 하류에서 -0.04, -0.12로, 상·하류에 관계없이 작은 요형도를 가진다. 편마암은 상류에서 -0.64, -0.22, 하류에

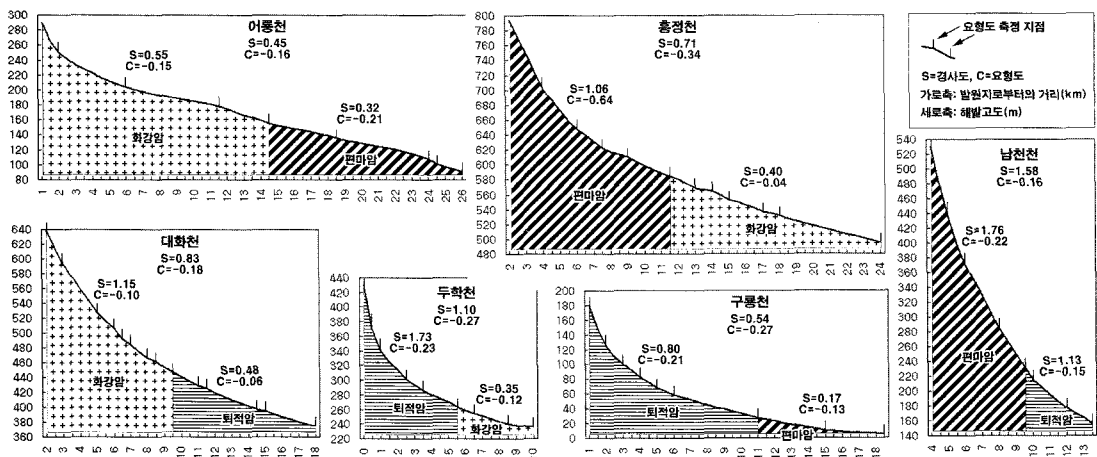


그림 9. 6개 하천의 종단면과 경사도 및 요형도

서 -0.21, -0.13으로 상·하류 모두 큰 요형도를 가진다. 퇴적암은 상류에서 -0.23, -0.21, 하류에서 -0.06, -0.15로, 상류에서는 상대적으로 요형도가 크지만, 하류에서는 작은 것으로 나타난다.

2) 하계와 하곡의 형태적 특성

유역분지의 면적에 대한 본류 및 지류 하천의 전체 길이의 비인 하계 밀도는 어룡천이 1.59로 가장 높으며, 홍정천이 0.95로 가장 낮다(표 2). 화강암은 상류에서 1.81, 1.34, 하류에서 1.13, 1.66으로, 상류에서는 하계밀도가 매우 높고, 하류에서는 평균 정도의 값을 가진다. 편마암은 상류에서 0.81, 1.36, 하류에서 1.33, 1.64로서, 상류에서는 하계밀도가 낮고, 하류에서는 하계 밀도가 높은 것으로 나타난다. 퇴적암은 상류에서 1.08, 1.43, 하류에서 1.08, 1.60으로, 상류에서는 중간 정도의 값을, 하류에서는 다소 작은 값으로 하계밀도가 나타난다.

유역 면적에 대한 본류 곡저의 면적 비율은 해발고도가 가장 낮은 구룡천이 10.8%로 가장 높으며, 경사가 가장 급하고 해발고도가 높은 남천천이 2.3%로 가장 낮다(표 2). 6개 하천에서 곡저 비율은 상류에서 평균 30.9%, 하류에서 69.1%로, 상류보다 하류에서 곡저의 면적비가 2배 이상 넓은 것으로 나타난다. 그러나 어룡천은 상류 화강암 지역이 하류의 편마암 지역보다 곡저 면적비가 더 넓게 나타난다.

하천 전체에 대한 상·하류의 암석별 곡저의 면적 비율을 보면, 화강암은 상류에서 52.8%, 33.7%, 하류에서 83.6%, 80.7%로서, 상·하류 모두 평균보다 매우 높은 값을 가진다. 즉, 화강암 지역을 흐르는 하천은 상대적으로 넓은 하곡이 발달되어 있음을 의미한다. 편마암은 상류에서 16.4%, 26.2%, 하류에서 47.2%, 63.3%로, 상·하류 모두 평균 이하의 낮은 값을 나타내고 있다. 퇴적암은 상류에서 19.3%, 36.7%, 하류에서 66.3%, 73.8%로, 상·하류에 화강암이 접하면 상대적으로 곡저 면적비가 낮고, 편마암이 접하면 곡저 면적비가 높다.

5. 상·하류 암석의 침식 저항력

6개 하천의 상·하류 및 암석의 종류에 따라 뚜렷한 값의 차이를 갖는 형태적 특성으로, 본류 하도의 경사, 본류 하도의 요형도, 유역분지의 하계밀도, 유역분지에 대한 하곡의 면적비율, 유역분지의 평균 경사, 유역분지의 평균 기복을 들 수 있다. 이러한 6가지 특성 사이의 상관계수를 계산한 결과(표 3), 본류 하도의 경사도와 유역분지의 경사도 사이에 상관성이 72%로 가장 높게 나타났으며, 본류 하도의 요형도와 유역분지의 기복 사이에는 상관성이 5%로 매우 낮은 것으로 나타났다. 한편, 본류 경사, 유역 경사, 유역 기복과 요형도, 하계밀도, 하곡 면적 사이에는 역상관을 의미하는 음의 값으로 상관계수가 나타난다. 즉, 하천의 본류 경사, 유역 경사, 유역 기복이 클수록, 요형도, 하계밀도, 하곡 면적은 작음을 의미한다.

장기간의 하천 침식에 의해, 하도의 경사가 완만해지고 하곡이 넓어질수록, 하천은 보다 안정한 상태가 되며(Knighton, 1998), 저항력이 강한 암석 하천의 유역분지는 지형 기복량이 크고, 그로인해 하천 경사가 급하다(Wohl, 1999). 그리고 하도의 폭은 하도 구성물질의 침식 저항력에 영향을 받는데(Knighton, 1998), 저항력이 큰 암석을 흐르는 하천은 침식률이 낮기 때문에, 하도의 폭이 좁다. 또한 하계의 밀도도 기후 뿐 아니라 지질적 특성이 반영되는데(Ritter, 1995), 경암의 지역이 상대적으로 하계밀도가 낮다(권혁재, 2006). 따라서 하도와 유역의 경사가 급할수록, 유역의 기복이 클수록, 하곡의 면적과 하계밀도가 작을수록 유역분지를 이루는 암석의 저항력이 상대적으로 크다고 볼 수 있다.

표 3. 하천 및 하곡의 6가지 형태적 특성간의 상관계수

	요형도	하계밀도	하곡 면적	유역 경사	유역 기복
본류 경사	-0.25	-0.25	-0.69	0.72	0.58
요형도	-	0.51	0.67	-0.20	-0.05
하계밀도	-	-	0.44	-0.41	-0.41
하곡 면적	-	-	-	-0.48	-0.26
유역 경사	-	-	-	-	0.86

표 4. 상·하류 암석별 하천의 형태 특성에 의한 침식 저항력 지수

암석 구성	본류 경사	요형도	하계 밀도	하곡 면적비	유역 경사	유역 기복	평균	저항력 순위
화강-상류(편)	0.24	0.18	0.00	0.46	0.46	0.38	0.29	6
편마-하류(화)	0.09	0.28	0.48	0.54	0.57	0.32	0.38	5
편마-상류(화)	0.56	1.00	1.00	1.00	0.79	0.61	0.83	1
화강-하류(편)	0.14	0.00	0.68	0.00	0.39	0.51	0.29	6
퇴적-상류(화)	0.98	0.32	0.73	0.96	0.70	0.38	0.68	2
화강-하류(퇴)	0.11	0.13	0.15	0.04	0.07	0.07	0.10	7
화강-상류(퇴)	0.62	0.10	0.47	0.74	0.59	0.58	0.52	3
퇴적-하류(화)	0.19	0.03	0.73	0.26	0.75	0.92	0.48	4
편마-상류(퇴)	1.00	0.30	0.45	0.86	1.00	1.00	0.77	1
퇴적-하류(편)	0.60	0.18	0.21	0.14	0.91	0.61	0.44	4
퇴적-상류(편)	0.40	0.28	0.38	0.70	0.42	0.28	0.41	5
편마-하류(퇴)	0.00	0.15	0.18	0.30	0.00	0.00	0.10	7

평형하천의 종단면은 대부분 요형으로 나타나며, 암석의 종류에 따라 요형도는 다양해진다(Knighton, 1998). 그리고 특정 구간에서 하천의 길이가 길어지면 요형도는 증가한다(Leopold, *et al.*, 1992; Knighton, 1998). 즉, 하천이 충분한 시간동안 활발한 측·하방 침식작용을 통해 하상을 낮추고 곡류를 발달시켰다면 하천의 요형도는 높아지며, 상대적으로 안정한 평형하천에 가까운 상태가 된다. 반대로, 요형도가 낮거나 지점별로 차이가 크면 지역적인 용기 및 암석의 차이에 의해 하천이 불안정한 상태에 있음을 의미한다(VanLaningham, *et al.*, 2006). 따라서 요형도는 하천의 안정 상태를 반영한다고 볼 수 있는데, 본 연구 결과에서 요형도는 경사 및 기복과 음의 상관을 가지는 것으로 나타나고 있으므로, 상관 분석 결과를 그대로 반영하여, 요형도가 클수록, 유역분지 암석의 저항력이 상대적으로 큰 것으로 해석하여, 침식 저항력을 판단하였다.

상·하류 암석별로 침식에 대한 저항력의 정도를 비교·검토하기 위해, 6가지 형태적 특성간의 상관관계와 각 특성에 대한 최대값과 최소값을 기준으로, 각각의 값들을 1에서 0 사이의 지수(index) 형태의 값으로 환산하여, 침식 저항력 지수를 계산하였다(표 4, 그림 10).

침식 저항력 계산 결과, 하류의 화강암과 접한 상류의 편마암(편마-상류(화))이 평균 0.83, 하류의 퇴적암과 접한 상류의 편마암(편마-상류(퇴))이 평균 0.77로 침식 저항력이 가장 높은 것으로 측정되었다. 즉, 하천 유역분지의 상류가 편마암으로 이루어졌을 경우, 하류의 암석 종류와 관계없이 침식에 대한 저항력이 가장 강한 것으로 나타났다. 반면, 상류의 퇴적암에 접한 하류의 화강암(화강-하류(퇴))과 상류의 퇴적암에 접한 하류의 편마암(편마-하류(퇴))은 평균 0.10으로 침식 저항력이 가장 낮은 것으로 계산되어, 상류가 퇴적암인 유역분지의 하류 구간이 퇴적암 이외의 암석일 경우, 침식에 대한 저항력이 가장 약한 것으로 나타났다.

6가지 형태 지수의 평균값을 토대로 판단한, 상·하류 암석의 침식 저항력 순위는 다음과 같이 정리된다. 저항력이 가장 강한 1위는 화강암 및 퇴적암과 접한 상류의 편마암이며, 2위는 화강암과 접한 상류의 퇴적암, 3위는 퇴적암과 접한 상류의 화강암, 4위는 화강암이나 편마암과 접한 하류의 퇴적암, 5위는 화강암과 접한 하류의 편마암 및 편마암과 접한 상류의 퇴적암, 6위는 편마암과 접한 상류와 하류의 화강암, 저항력이 가장 약한 7위는 퇴적암과 접한 하류의 화강암과 편마암이다.

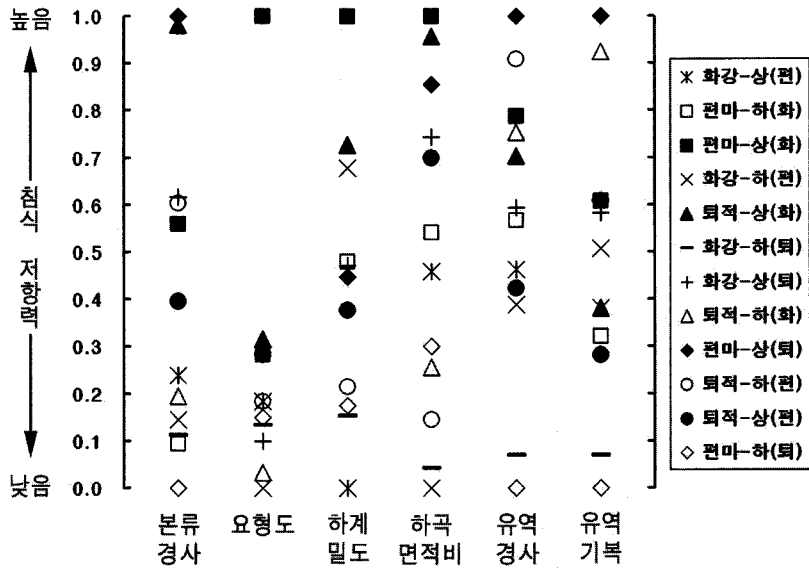


그림 10. 상·하류 암석별 침식 저항력 지수

6. 결론

본 연구는 상·하류간 암석 차이가 뚜렷한 우리나라 6개 하천을 대상으로, 하도 및 유역분지의 평면 및 종단면 형태를 계측하였다. 그중에서, 상·하류 및 암석의 종류에 따라 뚜렷한 값의 차이를 갖는 형태적 특성인 본류의 경사, 본류의 요형도, 하계밀도, 하곡의 면적비, 유역의 평균 경사, 유역의 평균 기복을 대상으로, 상·하류 암석의 침식 저항력을 분석하였다.

그 결과, 편마암으로 이루어진 상류 구간에서 침식 저항력이 가장 높은 것으로 계산되었으며, 상류의 퇴적암에 접한 하류의 화강암과 상류의 퇴적암에 접한 하류의 편마암이 가장 낮은 침식 저항력을 갖는 것으로 계산되었다. 우리나라에서 편마암은 침식에 대한 저항력이 크다고(권혁재, 2005) 알려져 있으며, 이는 상류의 편마암에서 침식 저항력이 가장 높은 것으로 분석된 본 연구 결과와 부합된다. 그러나 편마암으로 이루어진 구룡천의 하류에서 저항력이 낮은 것으로 분석된 점은 일반적인 예상과는 다른 결과인데, 그 이유는 하천의 위치적 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다. 구룡천을 제외한 5개 하천은 한강 수계의 상류부로 해

발고도가 대부분 높지만, 구룡천은 금강 수계의 하류부에 위치하여 해발고도가 가장 낮다. 또한 구룡천의 하류는 다른 하천과는 달리 금강 하류의 넓은 충적평야와 연결되어 하곡과 범람원이 매우 넓다. 따라서 상대적으로 침식의 저항력이 낮게 측정되었다. 그리고 앞서 밝혔듯이, 상류가 퇴적암이고 하류가 편마암으로 이루어진 중규모 하천은 우리나라에서 매우 드물기 때문에, 연구 대상 하천 선정에 있어 현실적인 한계가 존재함을 인정해야 한다.

상·하류 하천의 형태 특성에 따른 암석의 침식 저항력을 종합적으로 판단하면, 편마암으로 이루어진 하천의 상류는 침식에 대한 저항력이 높으며, 퇴적암은 상·하류에 관계없이 중간 정도의 저항력을 나타내고, 화강암은 퇴적암과 접한 상류의 경우를 제외하면, 대체로 침식 저항력이 낮은 것으로 제시된다.

본 연구 결과에서 요형도가 경사 및 기복과 음의 상관성을 가지는 것으로 나타나고 있는데, 이러한 결과가 연구 대상 지역 선정의 문제인지, 우리나라의 암석과 하천의 특성을 제대로 반영한 결과인지에 대해서는 향후 연구를 통해 별도의 논의를 진행할 필요가 있다. 또한 본 연구는 유역의 지질 및 지형적 특성에 중점을 두

어, 하천과 유역의 형태에 영향을 미치는 유량이나 하상 구성물질 등과 같은 다양한 요인에 대해서 언급하지 않은 한계가 존재한다. 따라서 추후에는 하천 유역분지의 지질, 지형, 기후, 수리, 식생에 대한 특성과 종합적인 상관성을 밝히는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

文獻

- 권혁재, 2006, 지형학, 법문사, 서울.
- 권혁재, 2005, 한국지리, 법문사, 서울.
- 김우관·임용호, 1997, "GIS를 이용한 거제도 지형 및 하계 분석," 한국지역지리학회지, 3(2), 19-35.
- 이광률·윤순옥, 2003, "북한강 유역분지 하천의 평면 및 종단면 특성," 한국지형학회지, 10(2), 207-219.
- 이금삼·조화룡, 1998, "경상도 지역에 있어서 지질별 지형 특성 분석," 한국지형학회지, 5(1), 1-19.
- 황상일, 1996, "하계망패턴의 특색으로 구분한 중국의 자연지역," 한국지역지리학회지, 2, 151-164.
- Ahmad, R., Scatene, F. N., and Gupta, A., 1993, Morphology and sedimentation in Caribbean montane streams: examples from Jamaica and Puerto Rico, *Sedimentary Geology*, 85, 157-169.
- Clayton, K. and Shammon, N., 1998, A new approach to the relief of Great Britain II. A classification of rocks based on relative resistance to denudation, *Geomorphology*, 25, 155-171.
- Gilbert, G.K., 1877, *Report on the Geology of the Henry Mountains: U.S. Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region*, Government Printing Office, Washington, D.C.
- Goldrick, G. and Bishop, P., 2006, Regional analysis of bedrock stream long profiles: evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form), *Earth Surface Processes and Landforms*, published on line(in press), DOI: 10.1002/esp.1413.
- Goudie, A., 1995, *The Changing Earth*, Blackwel, New York.
- Hodgkinson, J. H., McLoughlin, S., and Cox, M., 2006, The influence of geological fabric and scale on drainage pattern analysis in catchment of metamorphic terrain: Lacey's Creek, southeast Queensland, Australia, *Geomorphology*, 81, 394-407.
- Kelson, K. I. and Wells, S. G., 1989, Geologic influences on fluvial hydrology and bedload transport in small mountainous watersheds, Northern New Mexico, U.S.A., *Earth Surface Processes and Landforms*, 14(8), 671-690.
- Knighton, D., 1998, *Fluvial Forms and Processes*, Oxford University Press, New York.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., and Miller, J. P., 1992, *Fluvial Processes in Geomorphology*, Dover Publication, New York.
- Meybeck, M., 1987, Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads, *American Journal of Science*, 287, 401-428.
- Miller, A. J. and Gupta, A., 1999, *Varieties of Fluvial Form*, John Wiley & Sons.
- Mills, H. H., 2003, Inferring erosional resistance of bedrock units in the east Tennessee mountains from digital elevation data, *Geomorphology*, 55, 263-281.
- Ritter, D. F., Kochel, R. C., and Miller, J. R., 1995, *Process Geomorphology*, Wm. C. Brown Publishers, Dubuque.
- Snyder, N. P., Whipple, K. X., Tucker, G. E., and Merritts, D. J., 2003, Channel response to tectonic forcing: field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California, *Geomorphology*, 53, 97-127.
- Stock, J. D. and Montgomery, D. R., 1999, Geologic constraints on bedrock river incision using the stream power law, *Journal of Geophysical Research*, 104, 4983-4993.
- VanLaningham, S., Meigs, A., and Goldfinger, C., 2006, The effect of rock uplift and rock resistance on river morphology in a subduction zone forearc, Oregon, USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1257-1279.

이광률

Wohl, E. E., 1999, Incised bedrock channels, in Darby, S. E. and Simon, A.(eds.), *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*, John Wiley & Sons, Chichester, 187-218.

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

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

최초투고일 07. 3. 4.

최종접수일 07. 3. 14.