

영서 및 영동 하천의 하상 퇴적물 입경과 하도 경사에 관한 연구*

김 중 옥**

A Study of Channel Slope and Grain Size of Coarse Bed Materials in Streams in the Youngseo and Youngdong Area, Korea*

Jong-Wook Kim**

요약 : 본 연구에서는 유역 분지의 지형 조건이 상이한 영서 및 영동 하천들을 대상으로 하상 퇴적물 입경과 하도 경사의 경향성, 그리고 이들 간의 상관관계를 중점적으로 조사하였다. 조사 결과, 유역 분지의 지형 조건이 다른 것과 마찬가지로, 영서 하천과 영동 하천은 퇴적물 입경 및 하도 경사의 경향성이 서로 달랐다. 영서 하천에서는 유역 면적의 증대에 따라 퇴적물 입경 및 하도 경사가 소폭으로 감소되는 경향으로 보이고 있으며, 그 경향성이 뚜렷하지 않았다. 이와는 달리, 영동 하천에서는 퇴적물 입경 및 하도 경사가 유역 면적의 증가에 따라 지속적으로 감소되었으며, 그 경향성 또한 매우 분명하였다. 한편, 영서 및 영동 하천을 모두 고려한다면, 퇴적물 입경과 하도 경사간에는 통계적으로 의미있는 상관관계가 성립되는 것으로 조사되었다. 즉, 입경 증대에 따라 하도 경사가 지속적으로 증가하는 것으로 밝혀졌다. 그러나 이들 간의 상관관계는 영서 하천보다는 영동 하천에서 높게 나타났다. 위와 같은 사실로 미루어 볼 때, 본 연구 지역에서는 유역 분지의 지형 조건이 퇴적물 입경 및 하도 경사에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요어 : 영서 하천, 영동 하천, 하상 퇴적물, 하도 경사, 유역 분지 지형

Abstract : This study surveyed the spatial distribution and downstream trend of grain size of coarse bed materials and channel slope and the relationship between these two factors, grain size and channel slope, in streams in the Youngseo and Youngdong area, Korea. The research result shows that the grain size and channel slope decrease exponentially with the increase in drainage basin area especially in the case of Youngdong streams, which originate from steep slope of the Taebak Mountains and flow into lower coastal plain in a short distance. In contrast, it can be hard to say that there are any statistically significant relationships between drainage basin area and the two factors, grain size and channel slope, in Youngseo streams flowing through incised valleys of the Taebak Mountains. In addition, there is a positive relationship between channel slope and grain size in study streams. The correlation coefficient in Youngdong stream is much higher than that in Youngseo streams. From this research result, it can be concluded that morphological conditions of drainage basins and river valleys influence strongly the characteristics of the grain size and channel slope in the study area.

key words : Youngseo streams, Youngdong streams, channel bed materials, channel slope, drainage basin morphology

1. 서론

1) 연구 목적

하천 지형은 유역 분지의 기후, 지형, 지질 등

여러 조건들에 의해 영향을 받는다. 그러나 이를 하도 중심의 지형 체계로 좁혀 생각한다면, 하천 지형은 결국 하천수와 그에 의해 실려 이동되는 퇴적 물질에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 한편, 이들 하천수와 퇴적 물질이 만들어내는 하도 지

* 본 연구는 서울대학교 발전기금의 지원을 받아 연구한 논문임.

** 서울대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Seoul National University)

형은 하폭, 수심, 하도 경사 등으로 파악되는 기하학적인 존재이므로, 하천수 및 퇴적 물질과 이들에 의해 종속적으로 결정되는 하도의 기하학적인 특성은 하나의 하도 체계 내에서 유기적으로 연계되어 있다. 과정 분석을 중시하는 하천 지형 연구에서는 이러한 체계 변수들간의 상관관계를 과학적이고 실증적인 방법으로 밝히려는 노력을 기울여 왔다(Leopold *et al.*, 1964, 151-332; Richards, 1982, 24-28).

특히 하도 체계 변수들 중에 하상 퇴적물과 하도 경사는 지형 연구자들의 더 많은 관심을 받아왔다(Hey *et al.*, 1982; Thorne *et al.*, 1987). 그것은 하상 퇴적물의 변동 그 자체가 역동적으로 변화하는 하도 지형의 한 단면이며, 이러한 변화의 결과가 궁극적으로 하도 경사로 표현된다고 보았기 때문이다. 이러한 사고는 하상 퇴적물과 하도 경사간에 어떤 유의미한 관계가 성립한다는 것을 전제로 한 것인데, 그간 적지 않은 수의 학자들이 하상 퇴적물의 특성, 특히 입경과 하도 경사간에 성립되는 상관관계를 구명하는 연구를 행하였다(Yatsu, 1955; Hack, 1957; Wilcock, 1967; Penning-Rowse and Townshend, 1978).

그러나 하도 경사에는 하상 퇴적물 입경 이외에도 유량, 하상 단면 형태 등이 영향을 미치고 있으므로 하상 퇴적물 입경과 하도 경사와의 관계는 그리 단순한 것은 아니다(Rubey, 1952). 또한 실제의 자연 하천, 특히 산지 하천에서는 하상 퇴적물이나 하도 경사가 하폭의 국지적인 지형 조건에 의해 매우 민감한 영향을 받고 있으므로, 그들 간의 관계가 복잡한 양상으로 나타날 수 있다. 그렇다 하더라도 그것 자체가 해당 하천의 지형 특성을 반영하는 것이므로 하상 퇴적물 입경과 하도 경사에 대한 조사는 하천 지형 연구에서 필수적이라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 영서 및 영동 지방의 하천들을 대상으로 이들 지형 이해에 기본이 되는 지형 변수들인 하상 퇴적물 입경과 하도 경사를 조사하였다. 연구에서는 퇴적물 입경 및 하도 경사의 공간적인 분포 특성과 이들간에 성립되는 상관관계를 밝히는데 중점을 두었다.

연구 하천으로는 영서 지방에서는 남한강의 주요 지류인 골지천, 동대천, 송천, 오대천, 임계천

등 5개의 하천, 그리고 영동 지방에서는 신리천, 사천내, 군선강 등 3개의 하천을 선정하였다. 영동 및 영서 지방의 하천들을 연구 대상으로 선정할 이유는 이들 하천의 지형 조건이 매우 대조적이어서, 하상 퇴적물과 하도 경사간의 관련성이 유역 분지의 지형 조건에 의해 어떻게 규제되는지 잘 살필 수 있기 때문이다.

2) 연구 방법

하상 퇴적물 입경 및 하도 경사의 경향성과 이들 간의 상관관계를 분석하기 위해서는 퇴적물 입경과 하도 경사에 관한 자료가 요구된다. 본 연구에서는 영동 하천 자료는 김종욱(1991)이 조사한 자료를 활용하였으며, 영서 하천 자료는 조사 지점을 새로 선정하여 1993년 5월부터 10월 사이에 야외에서 실측하여 구하였다. 야외 실측 조사에서는 조사의 일관성을 유지하기 위하여 조사 방법은 물론이고 조사 지점의 선정 또한 김종욱(1991)의 경우와 동일한 조건 하에서 행하였다.

조사 지점은 대상 하천의 본류를 따라 상류에서 하류로 가면서 일정 간격(대략 2~4km)으로 선정하였다. 그러나 하도에 댐,¹⁾ 보 등이 건설된 경우에는 이들의 영향을 배제할 수 있도록 조사 지점의 간격을 조정하였다. 또한 조사 지점은 인위적인 변화를 크게 받지 않은 여울(riffle)이면서, 하상과 하안에 암반이 노출되지 않은 구간으로 한정하였다. 조사 지점을 특별히 여울로 한정할 이유는 소(沼, pool)의 경우 수심이 깊어 퇴적물 조사가 현실적으로 불가능했기 때문이다. 조사 지점의 수는 영동 하천에서 23개(신리천 7개, 사천내 8개, 군선강 8개), 영서 하천에서 52개(골지천 14개, 동대천 11개, 송천 9개, 오대천 12개, 임계천 6개)로 총 75개이다(그림 1).

야외 조사에서는 이상과 같이 선정된 각 조사 지점마다 하상 퇴적물을 채취하여 그것의 입경을 측정하고, 여울 구간의 하도 경사를 실측하였다. 입경 조사에서는 연구 하천의 퇴적물이 대부분 조립질이므로, Wolman(1954)의 방법을 원용하여 각 조사 지점에서 100개씩 퇴적물을 채취하였으며, 채취한 퇴적물의 중경(b 축)을 자로 재는 방법으로 입경 값을 구하였다.²⁾ 통계 처리 시에는

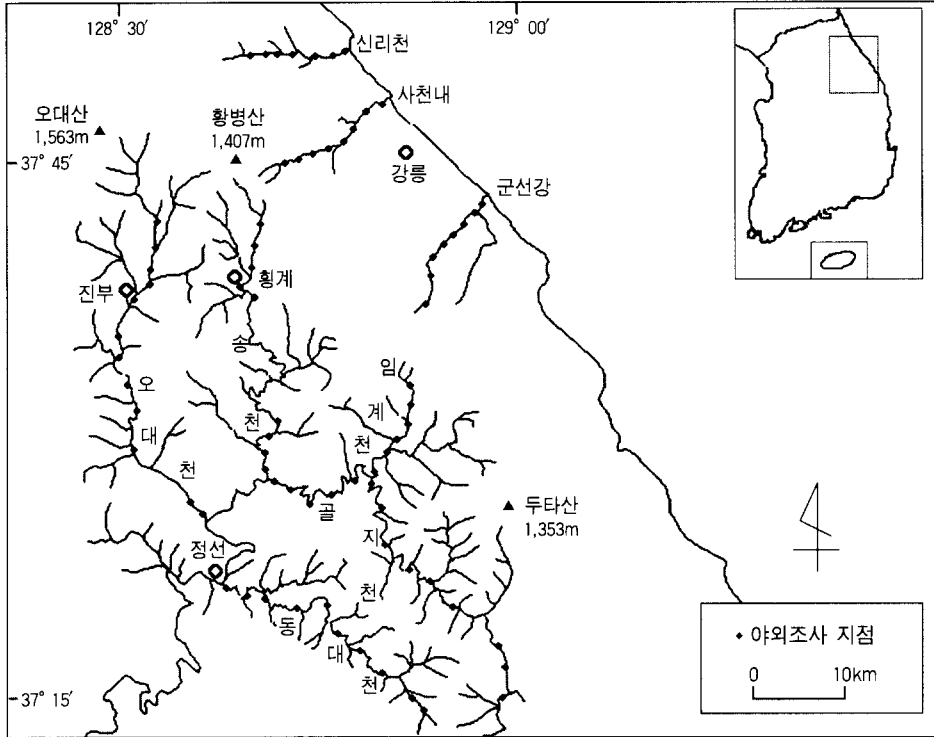


그림 1. 연구지역

측정한 중경 값들을 산술 평균하여 각 조사 지점의 입경 값으로 처리하였다. 한편, 하도 경사는 조사 지점의 수면 경사를 전경의와 표척을 이용하여 실측하였다.

2. 연구지역 개관

1) 지형 및 지질

연구 하천을 포함하는 영서 및 영동 지방은 태백산맥을 분수계로 서로 인접해 있지만, 여러 면에서 서로 대조적인 지형 경관을 이룬다. 영서 지방은 해발고도 1,000m가 넘는 고산지가 많다. 그러나 고산지의 산정부가 평탄한 곳이 많아 영동 지방에 비하여 사면 경사가 대체로 완만하다. 이에 비하여 영동 지방은 태백산맥의 정상부에 인접한 곳은 영서와 마찬가지로 고산지이지만, 산지로부터 매우 경사 급하게 해안의 평야 지대로 지

형이 달라진다.

이와 같이 영서 및 영동 지방 간에 대조적인 지형 특성이 나타나게 된 것은 제3기 마이오세(Miocene) 이래 지반 융기 운동이 태백산맥을 중심축으로 하여 동서간에 비대칭적으로 진행되어 온 것에 기인한다(김상호, 1973).³⁾ 지반 융기 운동의 유형이나 양상에 대하여는 지금까지 다소 논란이 있었으나,⁴⁾ 지반 융기가 있었고 또 그것이 이 지역 지형의 근간을 형성하였다는 점에 대해서는 대체로 학자간에 별 이견이 없는 듯하다. 융기를 시사하는 지형 증거들은 여러 가지이다. 영서 지방 고산지의 산정부를 따라 널리 분포하는 고위 침식면은 그 좋은 예이다. 고위 침식면은 파랑상의 소기복(小起伏) 평탄면으로 연구 지역에서는 현재 삼양목장이 입지한 황병산(해발 1,407m) 일대에 널리 분포한다.⁵⁾

연구 지역의 기반암은 북부에는 대체로 화강암 및 선캄브리아기 변성암(주로 화강편마암)이, 중·남부에는 중·고생대 퇴적암의 분포 면적이

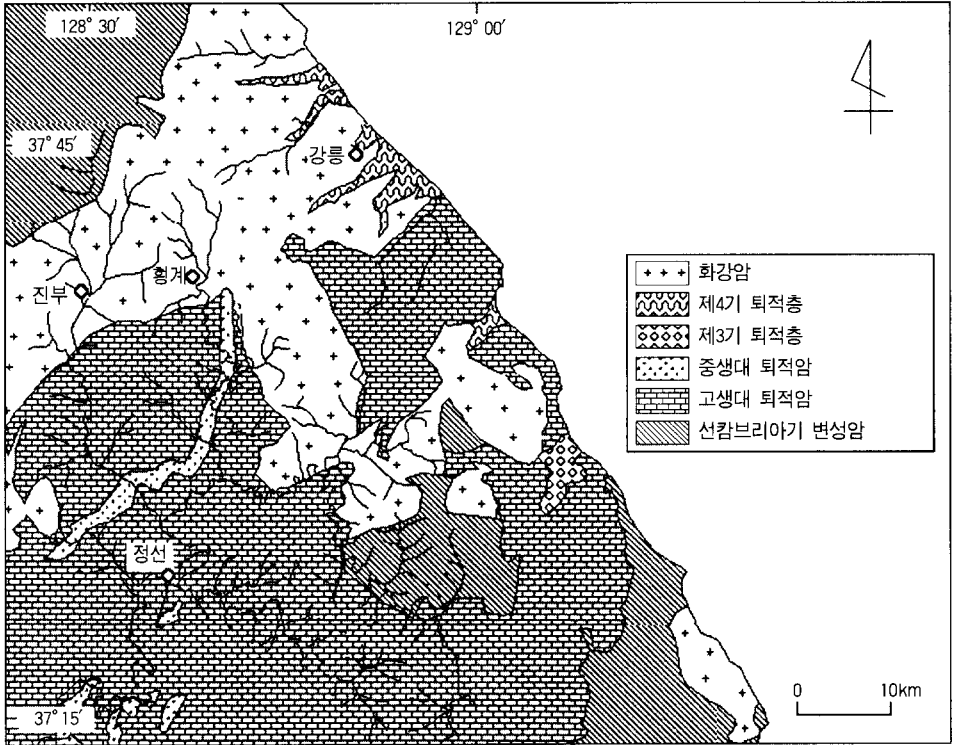


그림 2. 연구지역 지질도

넓다(그림 2). 지역별로 보면, 영서 지방에서는 진부, 형계 등 오대천과 송천의 상류 지역을 제외하고는 대체로 고생대 석회암과 사암이 기반을 이룬다. 이와 달리 영동 지방의 신리천과 사천내에서는 주로 화강암이, 군선강에서는 중·고생대의 퇴적암이 기반을 이루고 있다.

2) 연구 하천

영서 및 영동 지방이 대조적인 지형 특성을 지닌 것과 마찬가지로 연구 하천 역시 양쪽 지방에서 그 성격을 달리한다.

골지천, 동대천, 송천, 오대천, 임계천 등 영서 지방의 연구 하천들은 크게 볼 때 모두 남한강의 지류들인데, 영동 지방의 하천들에 비하여 유역 분지가 넓고 하도 길이가 길며 하천 경사가 완만하다(표 1). 이들 하천은 고위 침식면 또는 이들이 해체되면서 생겨난 고산지에서 발원하여 구조선을 따라 대체로 남류하거나 북류하여 남한강에

흘러든다. 이 하천들은 태백산맥의 용기와 더불어 보다 강화된 하강 작용에 의해 지반을 개석하여 곳곳에 골이 깊은 감입하곡(incised valley)을 만들어 놓았다. 이러한 하곡은 골지천, 송천, 동대천 등지에서 특히 잘 관찰되는데, 대부분의 경우 하곡이 좌우 비대칭을 이루는 생육사행하곡(ingrown meandering valley)이다.

영서 하천들은 감입하곡이 많으므로 하곡 사면의 경사가 가파른 곳이 많고, 하안과 하상에 암반이 드러나 있는 곳도 적지 않다. 따라서 하천의 하상에는 하천의 상류뿐만 아니라, 하상과 하안으로부터 공급된 중력(cobble) 이상의 조립질 퇴적물이 지배적이다. 한편, 영서 지방은 하천이 합류하는 일대를 제외하고는 곡저평야가 넓지 않아 취락은 주로 하곡의 활주사면 상에 발달된 단구면이나 그 하부의 범람원 상에 입지하는 경우가 일반적이다.

이와는 달리 신리천, 사천내, 군선강 등 영동 지방의 하천들은 태백산맥의 동쪽에 면한 급경사

표 1. 연구 하천의 길이, 유역면적, 경사 및 퇴적물 입경

하천	하도길이 (km)	유역면적 (km ²)	하천평균경사 (100*tanθ)	하도경사 (100*tanθ)	퇴적물입경 (mm)	
영동 하천	신리천	15.8	42.3	6.15	0.15~9.19	31~724
	사천내	18.6	55.6	5.63	0.04~14.6	7~482
	군선강	18.5	68.9	4.89	0.25~6.54	88~223
영서 하천	골지천	80.4	370	1.17	0.35~3.16	83~187
	동대천	47.4	220	2.19	0.46~3.32	65~174
	송천	66.2	340	1.45	0.56~2.84	81~253
	오대천	60	440	1.63	0.29~2.29	72~172
	임계천	20.4	130	2.23	0.49~2.88	57~162

*하천 평균경사 = (하천의 최고점 고도 - 최저점 고도) / 하도 길이
 하도 경사 = 조사지점에서 실측한 하도 경사

산록에서 발원하여 저위 침식면과 해안 평야를 동서 방향으로 가로질러 동해로 유입한다. 이 지역에서는 해발 고도가 높은 태백산맥이 해안 가까이에서 대략 남북 방향으로 뻗어 있는 관계로 고산지로부터 낮은 평야 지대로 매우 급격하게 지형이 달라진다. 그러므로 영서 지방의 하천에 비하여 경사가 급하고, 길이가 짧으며, 유역 분지가 좁다(표 1).

3. 하상 퇴적물 입경 및 하도 경사 분포

1) 하상 퇴적물 입경

연구 하천의 하상 퇴적물은 영동 하천의 하류 일부 구간을 제외하고는 대부분 자갈 중심의 조립질이다. 각 조사 지점에서 측정한 퇴적물의 중경 값을 산술 평균하여 구한 입경 값의 분포를 보면 영서 하천이 57~253mm, 영동 하천이 7~724mm였다(표 1). 따라서 영서 하천보다 영동 하천의 퇴적물 입경 폭이 더 크다. 영동 하천의 경우 하도 길이가 15.8~18.6km 정도로 20.4~80.4km에 이르는 영서 하천에 비하여 훨씬 짧다. 이것을 감안한다면 퇴적물 입경 변화를 역시 영동 하천에서 더 크게 나타날 것이 예측된다.

그러나 퇴적물 입경 분포의 경향성을 보다 확실하게 파악하기 위해서는 퇴적물 입경과 유역면적 또는 하도 길이와의 상관관계를 살피는 것이 필요하다. 하상 퇴적물의 이동이 일어나는 것

은 유량과 관련이 있고, 유량은 다시금 유역 면적과 밀접한 상관관계가 있으므로, 여기서는 유역면적과 관련지어 퇴적물 입경 분포의 경향성을 조사하였다.

입경 분포의 경향성은 유역 면적(A, km²) 및 퇴적물 입경(G, mm) 자료를 회귀분석하여 조사하였는데, 분석 결과 아래와 같은 회귀식과 상관계수를 얻었다.

$$\text{영서 하천 } G = 10^{0.15} \cdot A^{-0.05} \quad r = -0.20 \quad (1)$$

$$\text{영동 하천 } G = 10^{0.66} \cdot A^{-1.80} \quad r = -0.80 \quad (2)$$

위의 식 (1)과 (2)에서 지수 값은 퇴적물의 입경 변화율로 그림 3에 표시한 회귀선의 기울기를 뜻한다. 이 수식들과 그림 3에서 알 수 있듯이, 연구 하천에서는 유역 면적과 퇴적물 입경이 대체로 반비례한다. 유역 면적은 하천의 하류 방향으로 가면서 증가되는데,⁶⁾ 이는 퇴적물 입경이 하천의 하류 방향으로 가면서 감소된다는 것을 의미한다.

그러나 하천에서 퇴적물 입경이 하류 방향으로 가면서 감소된다는 것은 이미 잘 알려진 것이며, 새로운 사실은 아니다. 다만 여기서 영서 하천과 영동 하천이 확연히 서로 다른 경향성을 보인다는 점은 주목할만한 것이라 생각한다. 영서 하천과 영동 하천이 이와 같이 서로 다른 경향성을 보이는 것은 이들 하천의 지형적인 특성과 관련된 현상일 수 있으므로 이에 관해서는 좀 더 자세히 살펴볼 필요가 있다.

그림 3, 그리고 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 영서 하천은 유역 면적의 증가에 따른 퇴적물 입경 감소율이 매우 작을 뿐만 아니라, 상관계수 값이 또한 -0.20에 불과하다. 영서 하천의 조사 지점수가 52개 지점인 점을 감안한다 하더라도 이 값은 신뢰수준 90% 이하로 통계적으로 그리 의미있는 것이 아니다. 따라서 영서 하천에서는 하천의 하류 방향으로 가면서 퇴적물 입경이 감소된다고 분명하게 말하기는 어렵다.

영서 하천의 이러한 경향은 영서의 개별 하천들을 살펴보아도 마찬가지이다(그림 4). 영서 하천들 중에는, 단지 오대천(r = -0.65)과 동대천(r = -0.65)의 경우만이 통계적으로 의미있는 수준(신

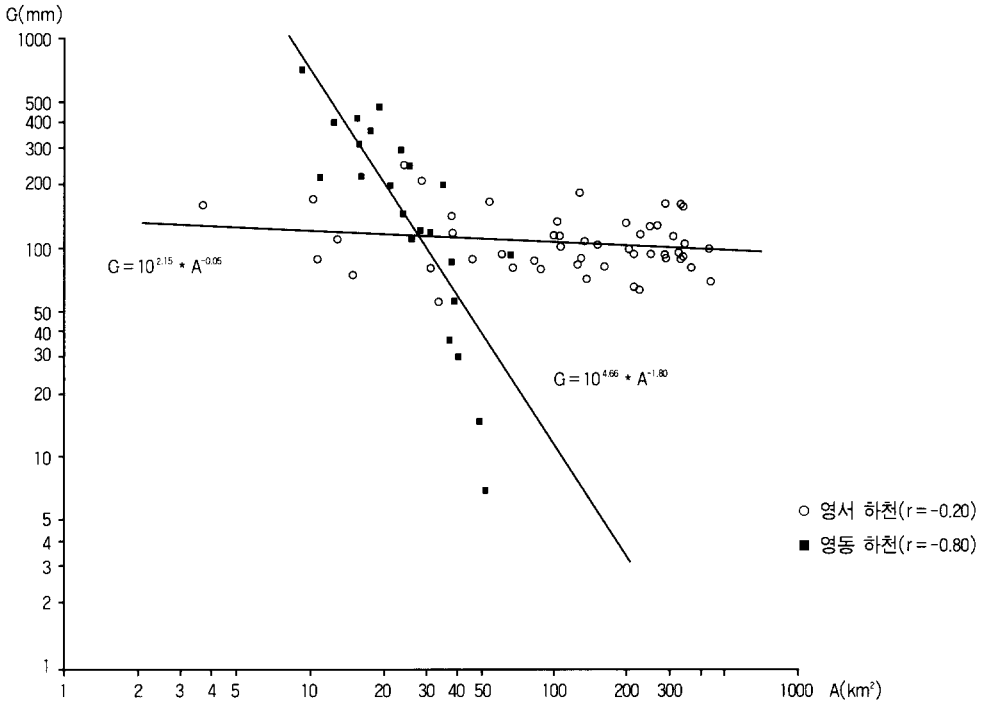


그림 3. 유역 면적(A, Km²)과 하상 퇴적물 입경(G, mm)과의 상관관계(영서 및 영동 하천)

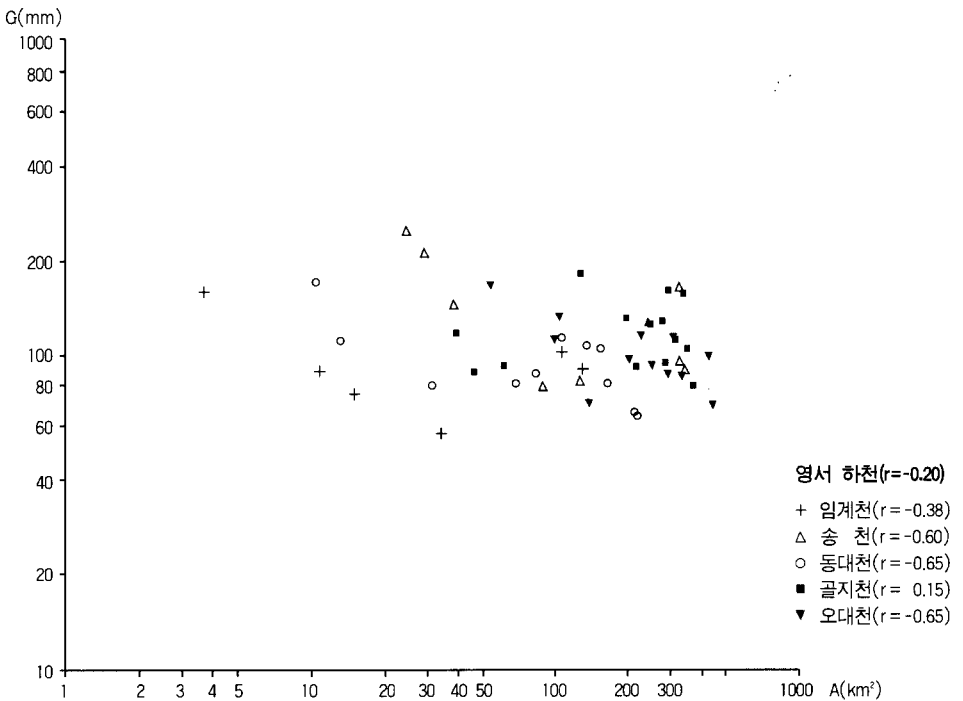


그림 4. 유역 면적(A, Km²)과 하상 퇴적물 입경(G, mm)과의 상관관계(영서 하천)

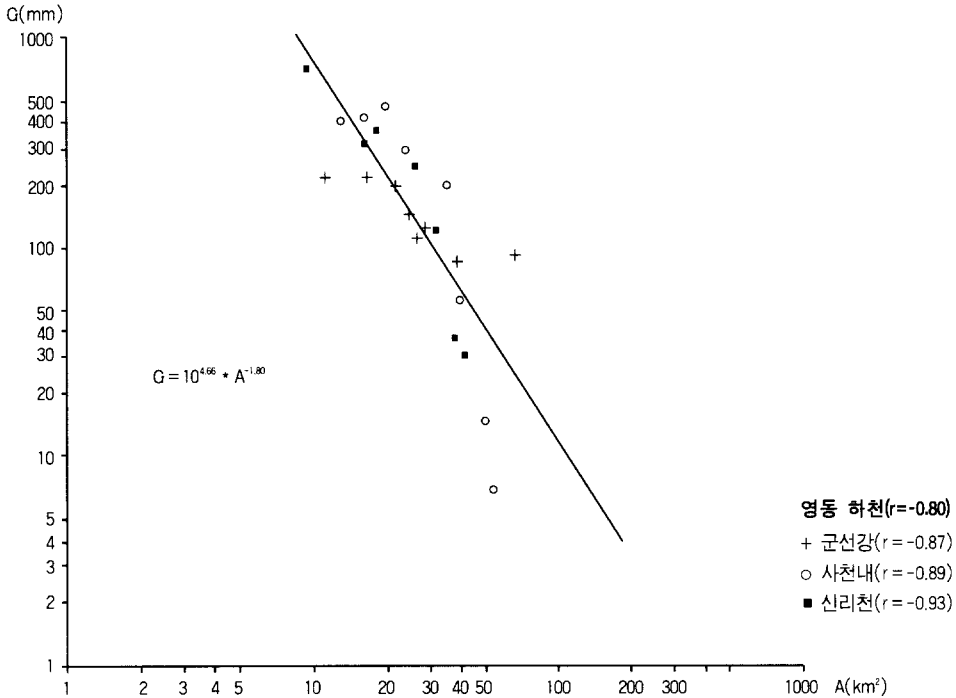


그림 5. 유역 면적(A, Km²)과 하상 퇴적물 입경(G, mm)과의 상관관계(영동 하천)

퇴수준 95% 이상)에서 입경 변화의 경향성을 인식할 수 있다. 반면, 골지천(r=0.15), 임계천(r=-0.38) 등의 경우는 입경 변화의 경향성을 거의 인식할 수 없다. 특히 골지천의 경우, 다른 하천들과 달리 상관계수의 값이 양의 값을 보이고 있는 것을 볼 때, 통계적으로 의미있는 수준은 아니지만, 유역 면적이 증대됨에 따라 퇴적물 입경이 감소되는 것이 아니라 오히려 증대되는 경향마저 보인다 하겠다. 실제로 그림 4를 보면, 하천의 하류 방향으로 가면서 퇴적물 입경이 커지는 하도 구간도 적지 않음을 알 수 있다.

골지천에서 이와 같은 경향이 두드러지게 나타나는 것은 무엇보다도 하곡의 지형 조건과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단한다. 골지천은 태백시 상수원인 광동댐(삼척군 하장면 광동리)을 벗어난 하류(대략, 하도 길이 > 28.2km) 부터는 거의 대부분의 하도 구간에서 감입사행하면서 하곡을 깊게 개석하고 있어 하도 지형이 국지적인 지형 조건에 의해 큰 영향을 받고 있다. 즉, 가파른 하곡 사면과 암반이 노출된 하상으로부터 운반

물질들이 곳곳에서 공급되고 있어 퇴적물의 입경 변화가 일정한 경향성을 띄지 않는 것으로 보인다. 그밖에도 퇴적물 입경 변화에는 지류에 의한 영향도 무시할 수는 없는데, 골지천에서는 지류와 합류하는 지점들을 전후하여 입경 값을 조사 비교한 결과, 지류의 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단되었다.

그러나 이와 같이 퇴적물의 입경 변화가 일정한 경향성을 띄지 않는 것은 산지 하천에서 흔한 것으로 예외적인 것은 아니다(Miller, 1958). 그림 4를 보면, 입경 변화의 경향을 미약하게나마 인식할 수 있는 동대천, 송천 등지에서도 일부 구간에 걸쳐 퇴적물의 입경이 하류 방향으로 가면서 오히려 커지고 있음을 알 수 있다.

한편, 영동 하천에서는 이상과 같은 영서 하천과는 달리 입경 변화의 경향성이 뚜렷하다. 즉, 영동 하천은 유역 면적이 증대됨에 따라 퇴적물의 입경이 현저하게 그리고 분명하게 감소되는 경향을 보인다(그림 5). 즉, 영서 하천에 비하여 입경 감소율이 크고, 상관계수의 값도 높다(그림 3). 영

동 지방이 영서에 비하여 유역 분지 경사가 대체로 급하다는 점을 고려할 때, 이러한 사실은 하상 퇴적물의 입경 변화와 유역 분지의 지형 조건 사이에 밀접한 상관관계가 있음을 시사한다.

실제로 기반암이 화강암으로 비교적 동질적이며, 유역 분지 지형 역시 유사한 특징을 보이는 신리천과 사천내를 예로 들어 살펴보면(김종욱, 1991: 그림 6), 높은 산지에서 낮은 평야 지대로 지형이 비교적 급하게 전환되는 일대를 중심으로 퇴적물 입경 변화율이 현저하게 달리 나타난다. 즉, 산지의 상류 구간에서는 퇴적물 입경이 크지만 그 감소율은 작은 반면, 평야 지대의 하류 구간에서는 입경이 작지만 그 감소율은 크다(그림 5).

영동 하천의 이러한 특성은 김종욱(1991)이 이미 언급한 바 있는데, 영동 하천의 경우와 마찬가지로 산지로부터 평야로의 지형 전환이 매우 급격한 록키산맥의 소하천들에서도 입경 변화의 동일한 경향성이 보고되었다(김종욱, 1998).

이와 같이 산지로부터 평야로 지형 조건이 급격히 전환되는 일대를 중심으로 퇴적물의 입경이

큰 폭으로 감소되는 것은 여러 가지 원인에서 비롯된다. 그러나 그 주된 원인의 하나는 하천이 산지에서 평야로 접어들면서 하곡과 하도의 폭이 급격히 넓어지는 것에서 찾을 수 있다. 즉, 하천이 평지로 흘러 들면서 하곡과 하도의 폭이 넓어지면 퇴적물의 운반력 역시 급격하게 감소되므로 그런 전환점을 중심으로 조대(粗大)한 퇴적물이 하상과 하안에 퇴적된다. 따라서 이를 기점으로 그 하류로는 퇴적물 입경이 크게 줄어들 수밖에 없는데 영동 하천의 경우도 위에 언급한 로키의 하천만큼 전형적인 것은 아니지만 그러한 지형 조건에 영향을 받고 있는 것으로 생각된다.

이 밖에도 하천이 산지를 흐를 때에는 하곡 사면이나 하상 암반으로부터 새로운 퇴적물이 끊임 없이 공급되어 대체로 퇴적물의 입경이 크고 그 경향성이 불분명하지만, 하천이 산지를 지나 평야 지대에 접어들면 이미 쌓아 놓은 층적층 위를 흐르게 되므로 하천수에 의한 퇴적물의 분급 작용이 보다 탁월하여 퇴적물 입경 변화의 경향성이 보다 분명해지게 된다.

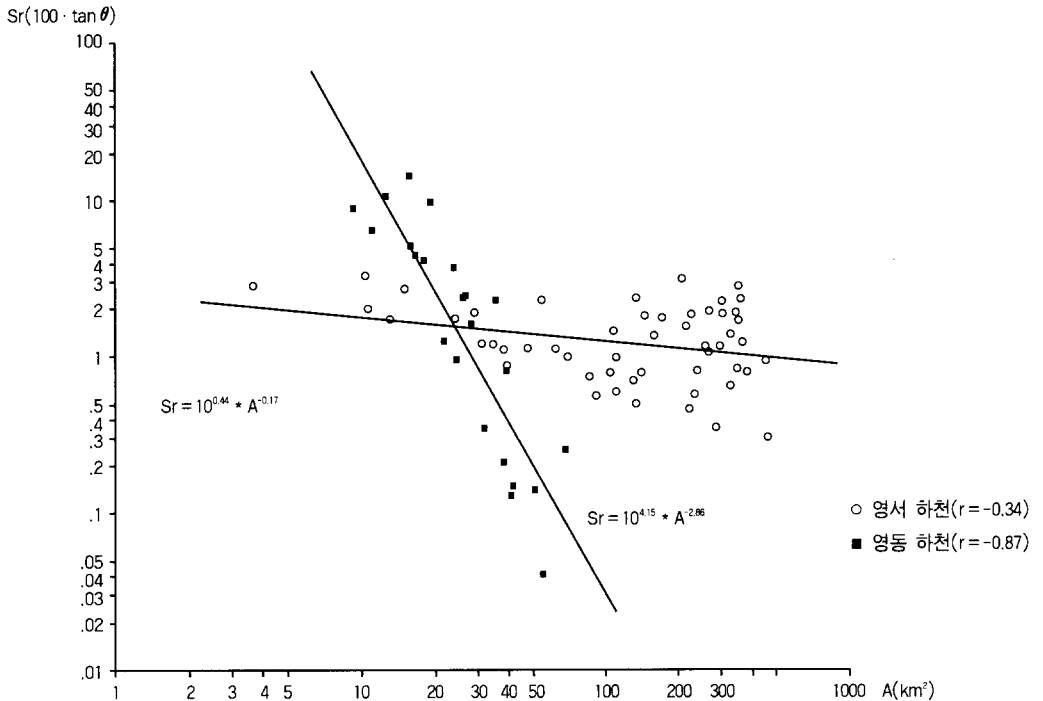


그림 6. 유역 면적(A, Km²)과 하도 경사(Sr, 100 · tanθ)와의 상관관계(영서 및 영동 하천)

2) 하도 경사

하도 경사는 조사 지점의 하도 구간 즉, 여울 구간의 경사를 야외에서 실측하여 구하였다. 이와 같이 구한 하도 경사($100 \cdot \tan \theta$) 값은 영서 하천에서 0.29~3.32, 영동 하천에서 0.04~14.6의 값을 보인다(표 1). 이에 의하면 영서 하천보다 영동 하천에서 하도 경사 값의 폭이 훨씬 더 크다. 이러한 결과는 퇴적물 입경 분포에서와 크게 다르지 않다(그림 3, 6).

하도 경사의 경향성은 유역 면적(A, km^2)과 하도 경사($Sr, 100 \cdot \tan \theta$)와의 관련성을 조사하면 잘 알 수 있다. 아래의 회귀식과 상관계수는 이들 간의 관계를 보다 분명하게 보여 준다.

$$\text{영서 하천 } Sr = 10^{0.44} \cdot A^{-0.17} \quad r = -0.34 \quad (3)$$

$$\text{영동 하천 } Sr = 10^{4.15} \cdot A^{-2.86} \quad r = -0.87 \quad (4)$$

위의 식 (3)과 (4)에 의하면 연구 하천에서는 유역 면적과 하도 경사가 반비례하는 관계이다.

다시 말하여, 유역 면적이 증대될수록 하도 경사가 감소되는 경향을 보인다. 그러나 감소율은 식 (3)과 (4)의 지수 값에서 보이듯이, 영서 하천이 -0.17, 그리고 영동 하천이 -2.86으로 영동 하천에서 훨씬 더 크다. 영동 하천의 유역 분지 경사가 더 가파르므로, 이러한 조사 결과는 세밀한 조사가 뒷받침이 되지 않더라도 예측 가능하다. 다만, 하도 경사의 변화율 뿐만 아니라, 경사 값의 분포 양상마저도 퇴적물의 경우와 유사한 패턴을 보인다는 점이 관심을 끈다.

영서 하천에서는 임계천($r = -0.91$), 동대천($r = -0.73$) 등지에서 하도 경사의 경향성이 보다 분명하다. 반면에 골지천($r = 0.08$)과 송천($r = 0.23$)에서는 통계적으로 의미있는 경향성을 보이지 않는다(그림 7). 특히, 송천과 골지천은 다른 하천들과는 달리 상관계수가 양의 값을 보인다. 상관계수의 값이 낮아 통계적으로 의미가 있는 것은 아니지만, 상관계수가 양의 값을 보인다는 것은 유역 면적이 증대됨에 따라, 즉 하천의 하류 방향으로 가면서, 하도 경사가 더불어 증대된다는 것을 의미

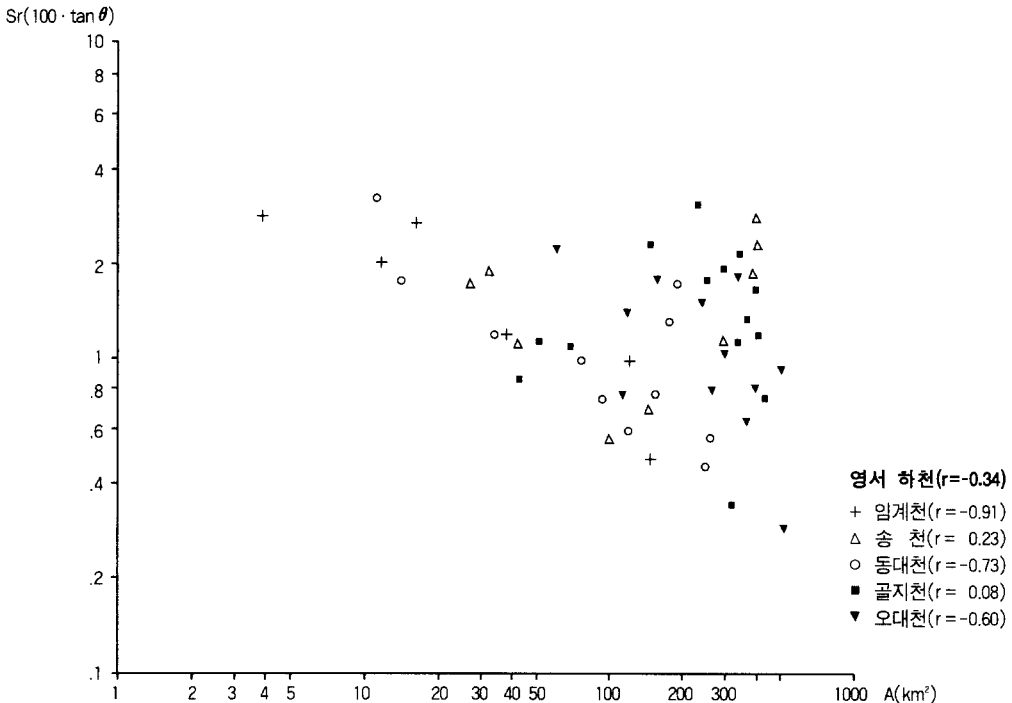


그림 7. 유역 면적(A, km^2)과 하도 경사($Sr, 100 \cdot \tan \theta$)와의 상관관계(영서 하천)

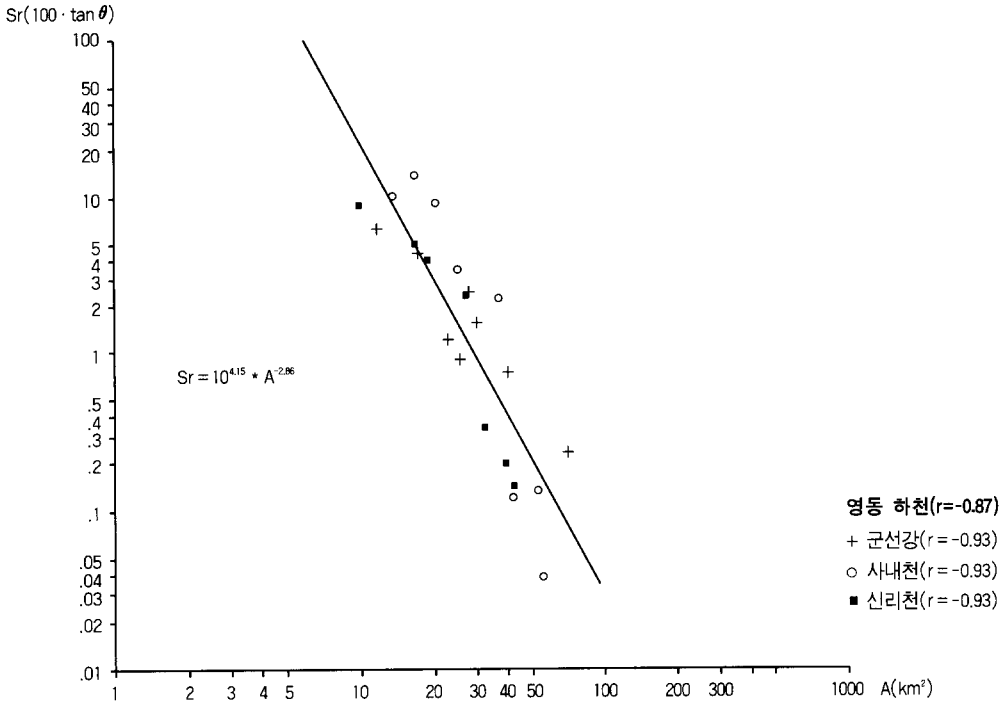


그림 8. 유역 면적(A, Km²)과 하도 경사(Sr, 100 · tanθ)와의 상관관계(영서 및 영동 하천)

한다. 이것은 하류일수록 하도 경사가 완만해진다 는 일반의 상식과는 배치되는 결과이다. 그러나 이러한 현상은 국지적인 지형 조건의 영향을 강하게 받고 있는 산지 하천에서는 드물지 않은 현상이다.

위에 기술한 골지천과 마찬가지로, 송천 역시 대체로 산지 하천의 성격을 강하게 지니고 있다. 특히 감입하곡이 완전한 도암댐(평창군 도암면 수하리) 하류의 하도가 그러하다. 이 하도 구간은 접근조차도 쉽지 않을 정도로 하곡 사면의 경사가 급하고, 하안과 하상에 암반이 노출된 곳이 많다. 따라서 야외의 실측 조사에서도 접근이 비교적 용이한 구절리⁷⁾ 이하의 하류(하도길이 > 57.7km)만을 조사하였다.

이러한 영서 하천과는 달리, 영동 하천에서는 유역 면적과 하도 경사와의 상관관계가 보다 더 긴밀하다(그림 8). 즉, 하류 방향으로 가면서 하도 경사가 더 급격하게 감소되는 경향을 보인다. 하도 경사의 감소율은 비교적 높은 산지가 해안 가까운 하류에까지 분포하는 군선강보다는 높은 산

지로부터 낮은 평지로의 지형 전환이 보다 분명한 신리천과 사천내에서 더 높다. 유역 면적(A, km²)과 하도 경사(Sr, 100*tanθ) 간의 관계를 회귀분석하여 얻은 아래의 수식들이 이를 잘 시사한다.

$$\text{신리천 } Sr = 10^{4.20} \cdot A^{-2.99} \quad r = -0.93 \quad (5)$$

$$\text{사천내 } Sr = 10^{5.91} \cdot A^{-4.03} \quad r = -0.93 \quad (6)$$

$$\text{군선강 } Sr = 10^{2.70} \cdot A^{-1.79} \quad r = -0.93 \quad (7)$$

식 (5)~(7)의 지수 값을 보면 신리천은 -2.99, 사천내는 -4.03, 그리고 군선강은 -1.79로 신리천과 사천내가 군선강에 비하여 높은 값을 보이고 있다. 신리천과 사천내에서 한 가지 더 주목할 것은 퇴적물 입경과 마찬가지로 상·하류의 하도 간에 하도 경사의 경향성이 크게 다르다는 점이다. 즉, 상류의 하도들은 경사가 전체적으로 급한 편이지만 하류 방향으로 가면서 감소되는 비율이 작고, 하류의 하도들은 경사가 전체적으로 완만하지만, 감소되는 비율은 크다. 또한 이들 상·하류의 구분 경계선은 대략 높은 산지가 평야 지대로 전환

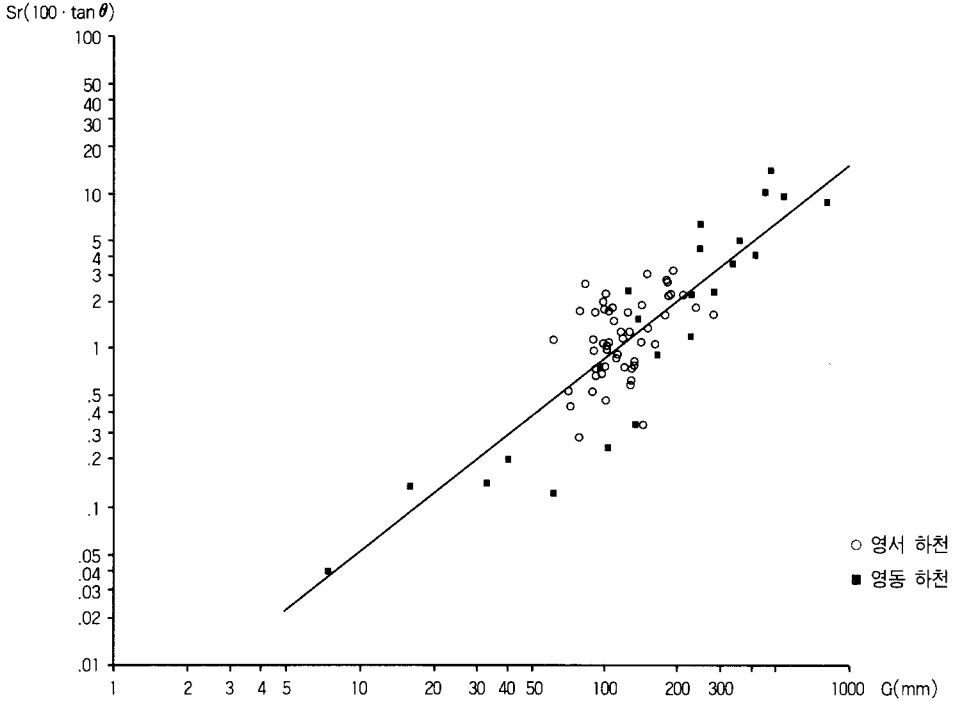


그림 9. 하상 퇴적물 입경(G, mm)과 하도 경사(Sr, 100 · tanθ)와의 상관관계(영서 및 영동 하천)

되는 일대에 놓여 있다(김종욱, 1991). 이와 같이 높은 산지에서 낮은 평지로 지형 변화가 급격하게 일어나는 곳에서 하도 경사의 변화율 역시 높은 값을 지닌다는 것은 위에 소개한 록키산맥의 소하천들에서도 마찬가지로 확인된다(김종욱 1998).⁸⁾

위와 같은 조사 결과는 하도 경사가 퇴적물의 입경과 마찬가지로 하곡 및 유역 분지의 지형 조건과 밀접한 관련을 맺고 있다는 것을 시사한다. 또한 이러한 지형 조건과의 관련성은 영동 하천들이나 록키산맥의 소하천처럼 비교적 짧은 거리에 걸쳐 고산지로부터 낮은 평지로 흘러내리는 하천들에서 전형적으로 나타난다.

수밖에 없다. 여기서는 이들 퇴적물 입경과 하도 경사와의 상관관계를 통계적인 방법으로 분석하여 고찰하였다.

위에서 고찰한 바와 같이 본 연구 지역에서는 퇴적물 입경 및 하도 경사의 분포 양상은 물론이고, 변화율까지도 유사한 특징을 보이고 있다. 따라서 퇴적물 입경과 하도 경사 사이에는 보다 긴밀한 관계가 성립될 것으로 예측된다(그림 3, 6). 그림 9와 아래의 회귀식 (8)은 영서 및 영동 하천을 포함한 전체의 연구 하천에서 퇴적물 입경(G, mm)과 하도 경사(Sr, 100*tanθ)간의 관계가 어떻게 나타나는지를 단적으로 보여준다.

$$Sr = 10^{-251} \cdot G^{1.26} \quad r = 0.84 \quad (8)$$

4. 퇴적물 입경과 하도 경사와의 상관관계

하도 경사는 퇴적물이 쌓여 이루는 하도 지형의 기하학적인 특성의 하나이다. 따라서 하도 경사와 퇴적물 입경은 어떤 형태로든 관련이 있을

위 식에서 상관계수가 양의 값을 가지므로, 연구 하천에서는 퇴적물 입경과 하도 경사가 정비례하다고 말할 수 있다. 즉, 퇴적물 입경의 증대에 따라 하도 경사가 지수적으로 증가되는 경향을 보인다. 영서 및 영동 하천을 포함하여 조사 지점

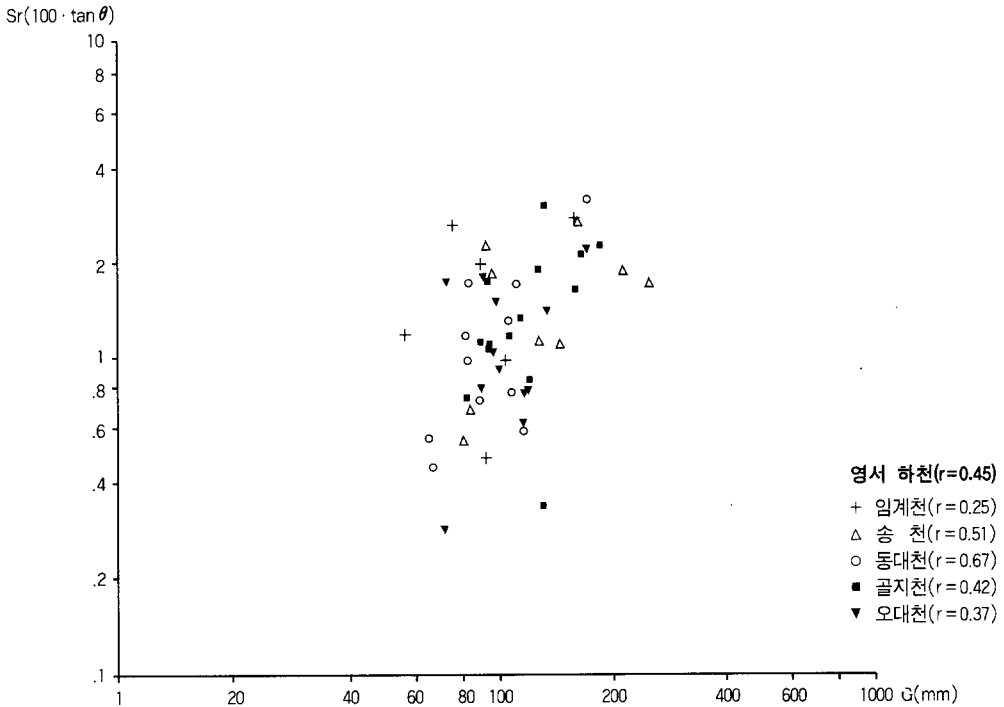


그림 10. 하상 퇴적물 입경(G, mm)과 하도 경사(Sr, 100 · tanθ)와의 상관관계(영서 하천)

이 75개에 이르므로, 위의 상관계수 값 0.84는 매우 높은 수준의 신뢰도를 보인다고 하겠다.

그러나 하천이 아니라 하더라도 물질 입자가 큰 것들이 쌓여 이루는 지형은 그렇지 않은 경우보다 경사가 더 급한 것이므로 이러한 결과는 그리 새로울 바가 없다. 하지만 하천에서는 퇴적물 입경 이외에도 유역 분지, 하곡, 하도의 지형 및 지질 조건이 복합적으로 하도 경사에 영향을 미친다. 따라서 퇴적물 입경과 하도 경사와의 상관관계가 항상 높게 나타나는 것만은 아니다. 즉, 하천의 지형 및 지질 조건에 따라 퇴적물 입경과 하도 경사와의 상관관계가 달라질 수 있다. 영서 및 영동 하천에서도 이와 같은 경향성을 확인할 수 있다.

위에 기술한 바와 같이 영서 및 영동 하천을 다 함께 고려한다면, 퇴적물 입경과 하도 경사는 높은 상관관계를 보인다. 그러나 영서 하천만을 두고 본다면 퇴적물 입경과 하도 경사간의 관계가 그리 높지 않다(그림 10). 상관계수만으로 본다면 0.45로 결코 아주 낮은 수준이라고 보기는 어렵다.

그러나 양자간의 관계를 뜻하는 값들이 그림 10에서 보듯이 하나의 군집을 이루고 있어, 그것의 상관관계가 정말로 의미있는 수준에서 성립되는지 의문시된다. 이러한 사정은 영서의 개별 하천들을 살펴보아도 마찬가지이다. 영서 하천들 중에 상관계수의 값이 가장 높은 동대천을 사례로 보더라도 그 값이 0.67에 불과하다.

영서 하천들에서 이와 같은 특성이 나타나는 것은 위에 언급한 바와 같이 이들 하천이 국지적인 지형 조건에 크게 지배를 받는 산지 하천이기 때문이라 생각된다. 산지 하천에서 퇴적물 입경과 하도 경사간의 관계가 영서 하천에서처럼 매우 불규칙하게 나타난다는 것은 일찍이 Hack(1957), Miller(1958) 등이 지적한 바 있다.

그러하기에 Hack은 퇴적물 입경 이외에 제3의 변수로 유역 면적을 고려해야 퇴적물 입경과 하도 경사간에 보다 더 의미있는 상관관계가 성립된다고 주장하였다. 즉 Hack에 의하면, 퇴적물 입경과 하도 경사간의 관계보다 퇴적물 입경을 유역 면적으로 나누어 얻은 값과 하도 경사간의 상관관계가

더 높다고 한다. Hack이 미국 버지니아(Virginia)와 메릴랜드(Maryland) 일대의 하천들을 대상으로 조사하여 밝힌 아래의 식은 아직도 유용한 것으로 학계에 널리 인식되어 인용되고 있다.

$$S = 18 \cdot (M/A)^{0.6} \quad (9)$$

위의 식에서 S는 지도 위에서 측정한 하도 경사(feet per mile), M은 입경의 중앙값(mm), 그리고 A는 유역 면적(square miles)을 뜻한다. 이와 같은 Hack의 주장은 유역면적이 유량과는 정비례 관계에 있는 변수이고, 또 유량 증가에 따라 하도 경사가 감소되는 관계에 있는 것이므로, 단순히 퇴적물 입경과 하도 경사만을 고려한 경우보다는 더 합당한 측면이 있는 것도 사실이다. 그러나 Hack의 방법을 인용하여 영서 하천을 조사한 결과, 아래의 식 (10)에서 보듯이 유역 면적을 제3의 변수로 고려한다 하더라도 더 높은 상관계수의 값을 얻을 수는 없었다.

$$Sr = 10^{0.99} \cdot (G/A)^{-0.26} \quad r = 0.42 \quad (10)$$

위에서 Sr는 하도 경사($100 \cdot \tan \theta$), 그리고 G/A는 퇴적물의 입경(G, mm)을 유역 면적(A, km^2)으로 나눈 값이다. 식 (10)의 상관계수($r = 0.42$)에서 보듯이 유역 면적을 제3의 변수로 고려한 경우가 퇴적물 입경과 하도 경사만을 조사한 경우($r = 0.45$)보다 소폭이기는 하지만 그 값이 오히려 더 작은 것을 알 수 있다. 그뿐 아니라 전체 연구 하천을 대상으로 조사한 결과도 유역 면적을 제3의 변수로 고려한 경우($r = 0.63$)가 그렇지 않은 경우($r = 0.84$)보다 오히려 더 작은 것으로 조사되었다. 이러한 조사 결과는 Hack의 주장대로 유역 면적을 고려한 경우가 항상 높은 수준의 상관관계를 보이지 않은 것은 시사한다. 물론 이러한 주장은 Hack의 자료와 본 연구의 자료가 완전히 동일한 방법으로 획득된 것은 아니므로 한계는 지니고 있다.

한편, 이상과 같은 특징을 보이는 영서 하천과는 달리, 영동 하천에서는 퇴적물 입경과 하도 경사간의 상관관계가 보다 더 긴밀한 것으로 조사

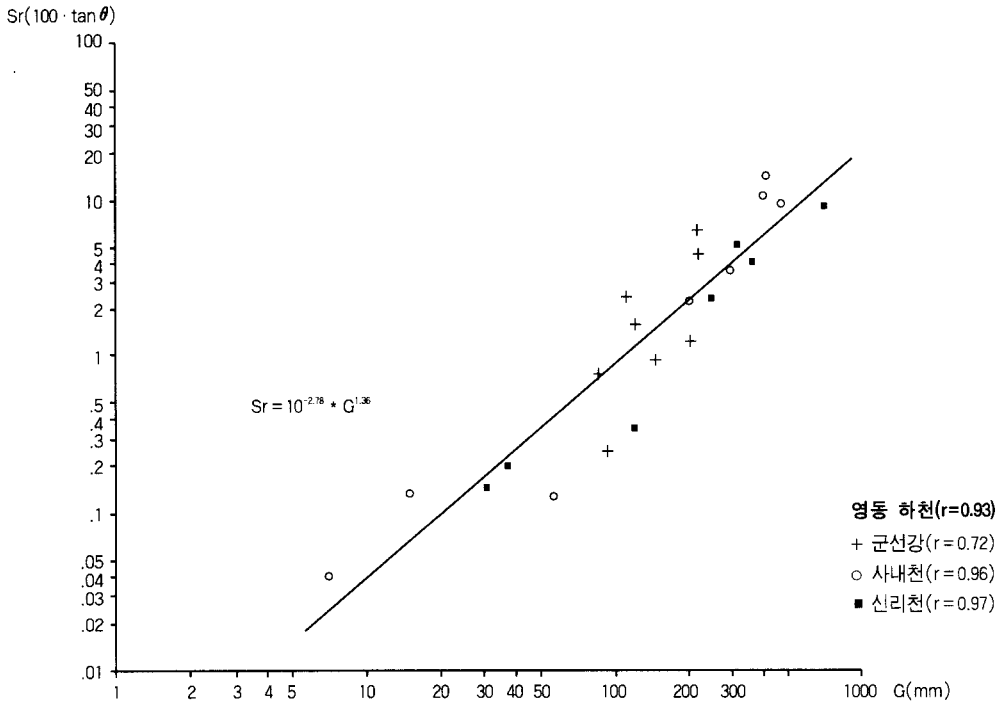


그림 11. 하상 퇴적물 입경(G, mm)과 하도 경사($Sr, 100 \cdot \tan \theta$)와의 상관관계(영동 하천)

되었다(그림 11). 아래의 회귀식 (11)과 상관계수는 이를 잘 말해 준다.

$$Sr = 10^{-2.78} \cdot G^{1.36} \quad r = 0.93 \quad (11)$$

영동 하천의 이러한 경향성은 개별 하천들을 살펴보아도 마찬가지이다. 아래의 식 (12)~(14)가 이를 잘 시사한다. 이들에 의하면 군선강보다는 신리천과 사천내에서 퇴적물 입경과 하도 경사간의 상관관계가 더 높다.

$$\text{신리천} \quad Sr = 10^{-2.68} \cdot G^{1.36} \quad r = 0.96 \quad (12)$$

$$\text{사천내} \quad Sr = 10^{-2.92} \cdot G^{1.37} \quad r = 0.97 \quad (13)$$

$$\text{군선강} \quad Sr = 10^{-4.08} \cdot G^{1.38} \quad r = 0.72 \quad (14)$$

위의 식 (12)과 (13)를 보면 신리천과 사천내는 상관계수가 각각 0.96, 0.97로 높을 뿐만 아니라, 그 값도 또한 크게 다르지 않다. 이에 더하여, 회귀식의 지수 값도 각각 1.36, 1.37로 거의 비슷하다. 이와 같이 신리천과 사천내에서 퇴적물 입경과 하도 경사간의 상관관계가 높은 것은 두 하천의 지형 및 지질 조건이 역시 유사한 특성을 보이기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 유역 분지의 지형도 급경사의 산지로부터 낮은 평야 지대로 전환되고 있는 양상이 유사하고, 기반암의 지질 조건도 화강암으로 동질적이다. 유역 분지의 지형 및 지질 조건이 유사한 곳에서 이와 같은 동일한 경향성이 나타난다는 것은 록지산맥의 소하천에 관한 연구에서도 마찬가지로 확인된다(김종욱, 1998; 그림 4).

유역 분지의 지형 조건과 지질 조건은 서로 상관관계가 있는 것이므로 이 두 조건들을 구분하여 고찰하기는 어렵다. 그러나 많은 경우, 기반암의 특성을 포함한 지질 조건보다는 유역 분지와 하곡의 지형 조건에 따라 유량, 유속 등이 달라지는 것이므로 지형 조건이 하상 퇴적물이나 하도 경사 등에 보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

이상과 같은 연구 결과로 살펴볼 때, 본 연구 지역에서는 유역 분지 및 하곡의 지형 조건이 퇴적물 입경과 하도 경사에 보다 강하게 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 영서 및 영동 하천들을 대상으로 하상 퇴적물의 입경과 하도 경사를 실측 조사하여 이들의 변화 경향성을 유역 면적과 관련지어 고찰하였으며, 이들 토대로 하상 퇴적물의 입경과 하도 경사간의 상관관계를 통계적인 방법으로 분석하였다. 이의 연구 결과는 아래와 같이 요약된다.

첫째, 유역 분지의 지형 조건이 다른 것과 마찬가지로 영서 하천과 영동 하천은 퇴적물 입경 및 하도 경사의 변화 경향성이 서로 다르다. 영서 하천에서는 유역 면적의 증대에 따라 퇴적물 입경 및 하도 경사가 소폭으로 감소되는 경향으로 보이며, 그 경향성이 뚜렷하지 않다. 이와는 달리, 영동 하천에서는 퇴적물 입경 및 하도 경사가 유역 면적의 증대에 따라 지수적으로 감소되며 그 경향성 또한 매우 분명하다.

둘째, 영서 및 영동 하천을 모두 고려한다면, 퇴적물 입경과 하도 경사간에 통계적으로 의미있는 상관관계가 성립된다. 즉, 입경 증대에 따라 하도 경사가 지수적으로 증가한다. 그러나 이들 간의 상관관계는 영서 하천보다는 영동 하천에서 보다 높게 나타난다.

이상과 같은 조사 결과를 토대로 고찰할 때, 본 연구 지역에서는 유역 분지 및 하곡의 지형 조건이 하상 퇴적물 입경과 하도 경사에 큰 영향을 미치고 있으며, 퇴적물 입경과 하도 경사와의 상관관계는 영동 하천과 같이 고산지로부터 낮은 평야 지대로 급격하게 흘러내리는 하천에서 높은 것으로 판단된다.

註

- 1) 본 연구 지역에는 광동댐(골지천)과 도암댐(송천)이 있다. 광동댐은 태백시의 상수원 공급을 위한 댐으로 삼척군 하장면 광동리 일대에 건설되었으며, 도암댐은 강릉 유역변경식 발전소에 물을 공급하기 위한 댐으로 평창군 도암면 수하리 일대에 건설되었다.
- 2) 김종욱(1991)이 영동 하천을 조사할 때에는 1

개 지점에서 50개의 하상 퇴적물을 채취하여 측정하였다. 이와는 달리 영서 하천에서는 100개의 퇴적물을 측정하였는데, 그 이유는 사전 조사 결과, 이곳에서는 적어도 100개 이상을 측정해야 보다 의미있는 입경 값을 얻을 수 있다고 판단하였기 때문이다.

- 3) 김상호(1973)는 태백산맥을 중심으로 동서(東西) 사면을 따라 계단상으로 나타나는 침식면들을 지형 증거로 들어 태백산맥 일대의 지반 운동을 요곡 운동(upwarping)이라 기술하고 있다.
- 4) 태백산맥 중심의 지반운동을 집중적으로 연구한 논문은 거의 없지만, 학계에서는 한 때 이곳의 지반운동을 미국의 시에라네바다 산맥에서처럼 단층 활동에 의한 것으로 해석하였다. 그러나 근래에는 김상호의 연구(1973)에 토대를 두어 요곡 운동에 의한 것으로 해석하는 경향이 있다.
- 5) 이 밖에도 본 연구 지역에 발달된 고위 침식면들 중에 학계에 알려진 것으로는 골지천의 분수계 산지인 매봉산(해발 1,303m, 태백시) 일대의 침식면을 들 수 있다.
- 6) 유역 면적(A, km²)와 하도 길이(L, km)와의 관계는 아래와 같다.
 영서 지방 $L = 0.93 \cdot A^{0.69}$
 영동 지방 $L = 0.56 \cdot A^{0.88}$
- 7) 정선군 북면 구절리로 현재는 폐광이 되었지만, 한 때는 제법 큰 규모의 탄광이 있었으며, 이 때문에 정선으로부터 연결되는 철도가 놓여 있다.
- 8) 김종욱의 록키 하천 연구(1998)에서는 하도 경사를 지도 위에서 계측하였으므로 직접 비교하는 것은 한계를 지닌다. 그러나 실측한 하도 경사와 지도를 이용하여 계측한 하도 경사는 밀접한 관련이 있으므로 그 경향성 역시 크게 다르지 않을 것으로 생각한다.

文 獻

김상호, 1973, "중부지방의 침식면 지형연구," 서울대 논문집, 이공계, 21, 85-114.

영서 및 영동 하천의 하상 퇴적물 입경과 하도 경사에 관한 연구

- 김종욱, 1991, "하천지형 발달에 관여하는 주요 변수들의 기능적인 관계에 관한 연구 : 신리천, 사천내, 군선강을 사례지역으로 하여," *地理學*, 26(1), 1-29.
- 김종욱, 1998, "로키 산맥 소하천의 조립질 하상 퇴적물에 관한 연구," *대한지리학회지*, 33(1), 1-16.
- Brush, L. M., 1961, Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in Central Pennsylvania, *United States Geological Survey Professional Paper*, 282F, 145-181.
- Gintz, D., Hassan, M.A. and Schmidt, K. H., 1996, Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 433-445.
- Hack, J. T., 1957, Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, *United States Geological Survey Professional Paper*, 294B, 1-53
- Hey, R. D., Bathurst, J. C. and Thorne, C. R., 1982, *Gravel-Bed Rivers : Fluvial Processes, Engineering and Management*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Kim, J.-W., 1989, Funktionale fluvialmorphologie der Kall, *Aachener Geographische Arbeiten*, 21, RWTH Aachen.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. and Miller, J. P., 1964, *Fluvial Processes in Geomorphology*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Leopold, L. B., 1994, *A View of the River*, Harvard University Press, London.
- Miller, J. P., 1958, High mountain streams : effects of geology on channel characteristics and bed material, *New Mexico State Bureau of Mines and Mineral Resources, Memoir*, 4, 1-53.
- Penning-Rowsell, E. and Townshend, J. R. G., 1978, The influence of scale on the factors affecting stream channel slope, *Transactions of the Institute of British Geographers*, New

- Series 3, 395-415
- Richards, K., 1982, *Rivers : Form and Process in Alluvial Channels*, Methuen, London and New York.
- Rubey, W. W., 1952, Geology and mineral resources of the Hardin and Brussels quadrangles, Illinois, *United States Geological Survey Professional Paper*, 218, 1-179.
- Schick, A. P., 1991, Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams, *Water Resources Research*, 27(4), 503-511.
- Thorne, C. R., Bathurst, J. C. and Hey, R. D., 1987, *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Wilcock, D. N., 1969, Coarse bedload as a factor determining bed slope, *Publication, International Association of Scientific Hydrology*, 75, 143-150.
- Wolman, M. G., 1954, A method of sampling coarse bed material, *Transactions of the American Geophysical Union*, 35, 951-956.
- Yatsu, E., 1955, On the longitudinal profile of the graded river, *Transactions of the American Geophysical Union*, 36, 655-663.