

우리 나라 沖積河川 河床傾斜의 水理幾何 特性에 관한 연구

우효섭* · 유권규** · 박중관***

본 연구에서는 하상이 주로 모래로 이루어진 우리 나라 충적하천에서 중단 하상경사와 하천수리량과의 관계를 조사하였다. 조사대상 하천들은 주로 대하천의 1차 지류 중에서 평형상태에 있다고 보여지는 하천들이다. 평형상태를 검토하기 위해서 Richards의 평형하천의 조건을 참고하였다. 본 연구에서 채택된 방법은 Leopold와 Maddock식 형태와 Garde식 형태 두 가지이며, 이를 위하여 유역면적 100~2,000km²까지의 18개 하천에 대해 상류로부터 하천거리에 따른 하상경사, 유역면적, 하상재료 크기의 변화 등을 조사하였다. 조사대상 충적하천에서 하상경사와 유역면적 및 하상재료의 크기 변화를 7개 하천자료를 이용하여 Garde식 형태로 표시한 결과는 하상재료 크기의 변화에 대한 신뢰성 있는 자료의 부족으로 현단계로서는 객관성이 부족한 것으로 보여진다. 14개 하천자료를 이용하여 얻어진 Leopold와 Maddock식 형태로 표시한 하상경사 S 는 유역면적 A 와 유역면적의 변화계수 β 를 이용하면 $S=S_0A_0^{-\frac{0.0063}{\beta}+0.51}A^{-\frac{0.0063}{\beta}-0.51}$ 로 표시할 수 있다. 이 식에 의하면 조사대상 충적하천의 중단하상경사는 개략적으로 유역면적의 -0.6승 정도에 비례하는 것으로 나타났다.

主要語 : 沖積河川, 河床傾斜, 河川水理, 水理幾何

1. 서 론

하상재료가 모래 등으로 구성된 충적하천은 흐름에 의해 하상재료가 끊임없이 유송되며, 이에 따라 하폭, 수심, 하상재료, 하천단면형, 중단하천경사 등은 물론 하천의 평면형도 변한다. 이러한 변화는 단기간적으로 특히 대규모 홍수에 의해 잘 나타나며 홍수가 지난 후에도 일부 하천에서는 원상태로 다시 회복되지 않고 장기간 그 변화가 남아있게 된다. 그러나, 대부분의 충적하천에서는 이러한 단기간내에 일어난 변화는 서서히 흡수되어 원 상태로 복귀하게 되며, 장기간적으로 하천은 평형상태를 유지하게 된다.

본 연구는 우리 나라 충적하천의 하천수리기하에 관한 기초적 연구로서, 하상이 주로 모래

로 구성된 하천들을 대상으로 하천의 하상경사와 수리량과의 관계를 조사한 것이다. 이를 위하여 우리 나라 전역에 걸쳐 18개 충적하천을 대상으로 건설부 하천정비기본계획에 나와 있는 하천측량자료를 수집하여 하상경사와 그 하천의 유량과 하상재료의 크기 등 수리량과의 관계를 경험적으로 도출하였다. 이러한 관계는 하천공학측면에서 평형상태의 하도를 계획하는데 참고 자료로 이용될 수 있을 뿐더러 자연지리학 측면에서도 우리 나라 충적하천의 수리기하특성을 연구하는데 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 하천의 하상경사를 하천거리 20~100km 정도에 걸쳐 거시적인 측면에서 조사한 것으로 자갈이나 모래하천에서 흔히 보이는 pool-riffle 형태에 의한 미시적인 하상경사의 변화는 여기서는 구체적으로 나타나지 않는다. 또한 본 연구는 하천공학 측면에서 수리기하특성

* 한국건설기술연구원 수자원연구실장

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

*** 건국대 이과대학 지리학과 조교수

을 연구한 것으로, 각 하천에서 유역 및 하도의 지점별 자연적 특성 등에 관한 구체적인 조사는 수행하지 않았다.

2. 연구동향 및 연구방법

1) 연구동향

자연 상태의 총적하천의 평형은 노년기 하천의 특징으로 간주되며, 일찍이 Davis(1899)는 이를 'graded stream'이라 불렀다. 이러한 동적 평형 상태의 하천을 Macken(1948)은 '하천에서 공급되는 유사의 이송에 꼭 필요한 만큼의 유속이 생길 수 있도록 장기간에 걸쳐 하천경사가 자연적으로 정교하게 조정된 하천으로, 외부의 변화에 의해 그 하천의 평형상태를 어느 한 방향으로 깨뜨려도 곧 그 변화 효과를 흡수하려 한다'라고 구체적으로 정의하였다. 한편, 하천공학자들은 이러한 하천을 'adjusted stream', 'stream in regime' 등으로 부르고 있다.

평형하천의 특징을 구체적으로 Richards(1982 pp. 20-23)는 ① 장기간에 걸쳐 하천형태의 변화가 없고, ② 하천시스템에 유사의 유입과 유출이 균형을 맞으며, ③ 水理上 하천의 효율이 최대가 되고, ④ 하천 수리변수간의 높은 상관성을 꼽고 있다. 이러한 평형상태에서의 하천의 수리하 특성은 하천지형학자들의 오랜 관심사로 일찍이 1950년대에 미국의 Rubey(1952, p. 175)는 하천의 한 지점에서 유량과 유사량, 하상경사, 하상재료의 크기 등과의 관계를 경험식으로 표시한 바 있다. Lane(1957)은 이러한 관계를 다시 다음과 같은 단순한 경험관계로 표시하였으며, 이 관계는 지금도 외적 변화에 대한 하천의 대응을 정성적으로 예측하는데 자주 사용되고 있다.

$$Q_s D_{50} \propto Q S \quad (1)$$

여기서, Q 와 Q_s 는 각각 하천유량과 유사량이며, S 와 D_{50} 은 각각 하상경사와 하상재료의 중앙입경이다. 한편, Leopold와 Maddock(1953, p. 57)은 하곡, 수심, 종단하상경사, 평균유속 등 하천의 수리하변수들을 단순히 유량의 지수함수꼴로 표시하였으며, 이 때 유량은 그 지점의 연 평균유량을 사용하였다. 이 중 종단하

상경사와 유량과의 관계를 표시하면 다음과 같다.

$$S = C_s Q^z \quad (2)$$

여기서, C_s 는 상수이며, z 는 하천의 특성에 따라 변하는 지수이다.

Hack(1957, p. 97)은 상기 식에 하상재료의 중앙입경 D_{50} 을 추가한 경험식을 제안하였으며, 이 경우 지수 z 는 -0.6 정도로 나타났다. 다시 Hey(1982, p. 565)는 Hack의 경험식에 유사량 Q_s 를 추가하여 다음과 같은 새로운 경험식을 제안하였다.

$$S = C Q_s^{z_1} Q^{z_2} D_{50}^{z_3} \quad (3)$$

여기서, C 는 상수이며, z_1, z_2, z_3 등은 하천특성에 따라 변하는 지수들이다.

비교적 최근에 하류로 감에 따른 종단하천경사의 감소에 관한 경험식이 Garde(1982)에 의해 제안되었다. 그의 식은 다음과 같은 형태로 되어 있다.

$$S = S_0 e^{(a\alpha + b\beta + c\gamma)x} \quad (4)$$

여기서,

$$D = D_0 e^{-\alpha x} \quad (5)$$

$$Q = Q_0 e^{\beta x} \quad (6)$$

$$Q_s = Q_{s0} e^{\gamma x} \quad (7)$$

여기서, 아래첨자 '0'는 상류 한 지점에서의 값을 나타내며, a, b, c 등은 계수들이다.

Garde는 인도의 총적하천자료를 이용하여 식 (4)의 계수 a, b, c 등을 결정하였다. 식 (5), (6), (7)에 의해 지수 α, β, γ 값들이 각각 결정되면 식 4에서 하천의 하상경사 S 가 결정될 수 있다.

종단하상경사의 변화를 위와 같은 경험적 방법이 아니라 추계학적인 방법으로 접근하여 해석하려는 시도가 Leopold와 Langbein(1962, p. 20)에 의해 수행되었다. 그들에 의하면 종단하상경사는 유역면적의 -0.55 승에 비례하는 것으로 나타났다.

우리 나라에서는 최근에 정장호(1974; 1978; 1979), 안상진 등(1982), 김중욱(1991) 등이 하계망, 하곡, 하도의 수리하 특성, 하상재료(물질)의 특성 등 하천수리하특성을 연구하였다.

2) 연구방법

본 연구에서는 충적하천에서 하상경사와 하천 수리량과의 관계를 조사하기 위하여 2가지 방법을 고려한다. 첫번째 방법은 전술한 Garde의 방법과 같이 하류로 갈에 따른 각 하천의 하상재료 크기, 유량, 유사량 등의 변화를 지수함수적으로 표시하고 여기서 얻어진 지수들을 이용하여 식 (4)에서 계수 a, b, c 값들을 추정하는 것이다. 두번째 방법은 Leopold와 Maddock이 제안한 방법과 같이 하천유량과 종단하상경사와의 관계를 경험식으로 간단히 표시하는 것이다. 이를 위하여 우선 우리 나라의 중규모 충적하천들 중에서 본 연구에 필요한 자료가 있는 하천 18개를 대상으로 각 하천별로 건설부 및 시·도·군 등 하천관리청이 작성한 하천정비기본계획을 통해 자료를 수집하였다.

3. 자료의 수집

1) 대상하천의 선정

본 연구에서는 종단하천경사를 추정하는 방법을 검토하기 위하여 우리 나라에서 충적하천자료를 수집하였다. 우리 나라의 경우 대하천의 본류는 대부분 댐이 축소되어 있어 자연적인 평

형상태를 벗어나 있기 때문에 주로 중·소하천 중에서 선정하였다. 또한, 하천상류의 호박돌(cobbles, boulders)이나 자갈하천보다는 주로 중·하류의 모래하천구간을 대상으로 선정하였다.

먼저 대상하천을 선정하기 위하여 전술한 Richards의 평형하천의 특성을 고려하여 다음 표 1과 같이 선정기준을 정하였다. 이 표의 기준에 따라 국내 하천을 살펴 보면, 주로 대하천인 직할하천 중에는 이 기준을 만족하는 하천은 거의 없는 것으로 사료된다. 이것은 우리나라의 직할하천 대부분에 댐이 건설되어 있고, 이런 하천에는 거의 예외없이 하천이 인위적으로 정비되어 이미 자연 상태에서 상당히 벗어나 있기 때문이다. 그런데 우리나라에서 정비되지 않은 하천은 하천 측량자료가 거의 없으므로 본 연구의 선정대상이 되지 못한다. 따라서 보다 완화된 조건으로 본 연구에 필요한 자료가 있고 대하천의 1차 또는 2차 지류로서 대규모 댐이나 하구둑이 없는 중규모 하천 18개를 선정하여 이들의 하상경사에 변화 특성을 분석하기로 하였다. 이렇게 하여 선정된 하천은 표 2와 같고, 그림 1은 이들 하천의 위치 및 유역을 표시한 것이다. 각 하천별 조사대상구간은 해당 유역의 본류 구간 20~100km 정도이며, 감천의 경우 그

표 1. 대상하천의 선정기준

구분	기 준	비 고
1	충적하천-모래하천(자갈하천 포함. 직경 64mm 이하)	급경사의 산지하천으로 하상이 자갈 이상으로 이루어진 하천이나, 이토/점토로 이루어진 하구부근 제외
2	하천구간내에 인공변화 요인 없을 것. (댐/대규모 도시화/식림/벌채/최근의 제방축조 등)	직할 하천이 아닌 경우 대규모 댐이 거의 없으며 대규모 개발지역 제외
3	가급적 지류가 많지 않은 하천구간 100km 이내	
4	지류의 하천 특성(하상재료 등)이 본류와 매우 다른 경우 제외	
5	대하천 하류와 소하천 제외	소하천이라 함은 비범정 하천을 의미.
6	하천변수간의 상관성이 특이하게 다른 경우 제외	
7	상당한 거리에 걸쳐 하상/하안에 암반이 노출된 하천 제외	실제 답사에 의해 암반 노출 상황을 검토

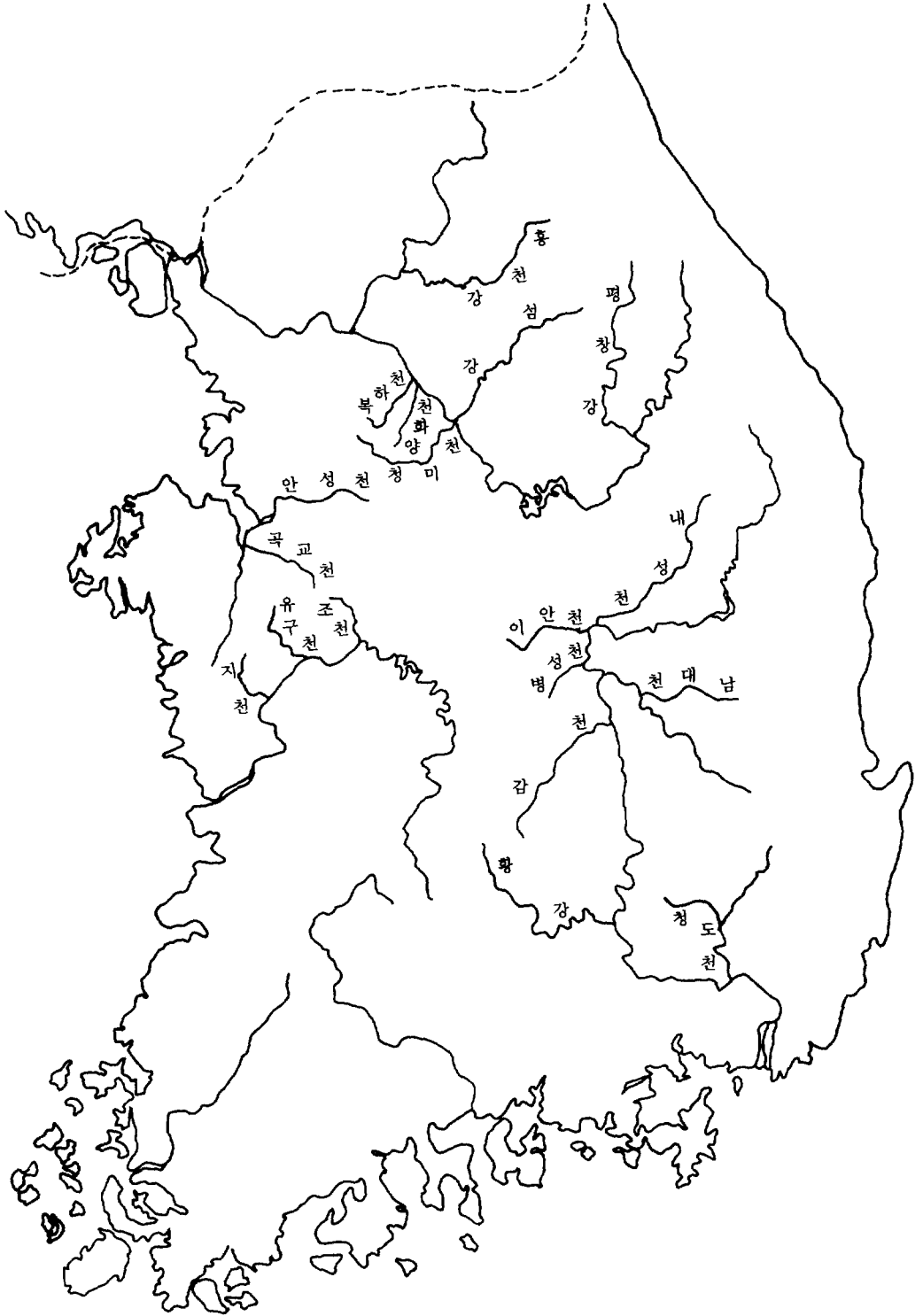


그림 1. 조사대상하천(18개 하천)

표 2. 본 연구에서 선정된 대상하천과 조사구간

번호	하천명	수계명	등급	대상 길이 (km)	'하정' 수립	하상 재료
1	감천	낙동강	직할	29.8 13.0	건설부(1984) 건설부(1985)	모래
2	목교천	삼교천	준용	20.2	충청남도(1986)	자갈/ 모래
3	남대천	낙동강	준용	20.4	경상북도(1987)	자갈
4	내성천	낙동강	직할	27.0	경상북도(1985)	모래
			지방	23.4		
			준용	36.6		
5	병성천	낙동강	지방	15.0	경상북도(1990)	모래
			준용	8.0		
6	북하천	한강	직할	19.8	건설부(1983c)	모래
			준용	16.2	경기도(1984a)	
7	섬강	한강	직할	19.5	건설부(1990)	자갈/ 모래
			지방	39.3	강원도(1988)	
8	안성천	안성천	준용	21.1	경기도(1986a)	자갈/ 모래
9	양화천	한강	준용	27.9	경기도(1986b)	모래
10	유구천	금강	지방	15.7	충청남도(1988a)	자갈/ 모래
			준용	19.8		
11	이안천	낙동강	준용	39.4	경상북도(1991)	모래
12	조천	금강	지방	22.4	충청남도(1988b)	모래
13	지천	금강	지방	24.6	충청남도(1987)	모래
14	청도천	낙동강	준용	38.2	경상남도(1986)	자갈
15	청미천	한강	직할	25.2	건설부(1983c)	모래
			준용	34.2	경기도(1984b)	
16	평창강	한강	지방	96.4	강원도(1987)	자갈/ 모래
17	홍천강	한강	지방	89.7	강원도(1991)	모래
18	황강	낙동강	직할	45.0	건설부(1983b)	모래

주) '하정'은 하천정비기본계획을 의미하며, ()안은 수립연도임

립 2와 같다. 참고로 우리 나라는 하천관리상 중요한 하천구간은 직할하천이라 하여 건설부장관이 직접 관리하고, 다음으로 중요한 하천구간은 지방하천이라 하여 시도지사가 관리하며, 그

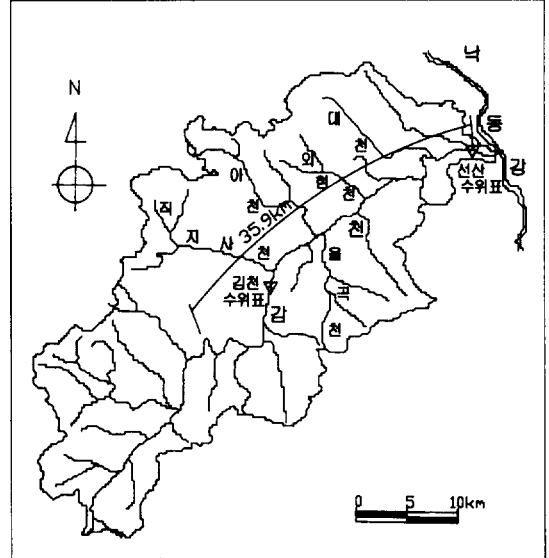


그림 2. 감천 연구 대상 유역

다음 하천구간은 준용하천이라 하여 시장/군수가 관리한다. 이 세 하천구분을 법정하천이라 하며 그 밖의 소하천은 비법정하천이라 한다.

2) 자료의 정리

본 연구에서는 각 하천에서 종단하상경사와 하상재료의 크기, 기타 수리량 자료는 건설부의 하천정비기본계획에 있는 자료를 토대로 보완하여 이용하였으며, 각 하천의 지점별 유역면적은 구적기를 이용하여 도상에서 구하였다. 한편, 조사구간에 주요지류가 유입하는 경우 지류유입직전과 직후로 나누어 유역면적을 계산하였다. 본 연구의 대상하천들의 유역면적은 100~2,000km²까지 다양하게 분포하고 있으며, 하상경사는 주로 0.001~0.01에 분포하고 있다. 참고로 하천정비기본계획이란 하천의 보전과 이용에 관련된 기본적인 사항을 정하는 계획으로 우리나라 대부분의 주요하천에 수립되어 있다. 하천정비기본계획에는 하천거리 500m마다 횡단 측량자료가 실려 있으며, 본 연구에서는 이들 횡단면에서 하상고가 가장 낮은 최심 하상고를 2.5km마다 평균하여 그 구간의 대표 하상경사를 구하였다.

일반적으로, 하천정비기본계획상에 나타난 하

상재료 자료는 현지에서 시료를 채취하여 실험실에서 체분석을 하여 얻어진 것으로, 시료 채취지점의 선정 및 시료 분석방법면에서 어느 정도 불확실성이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서도 하천정비기본계획상의 하상재료를 이용한 검토 결과는 어느 정도의 불확실성이 있음을 부인할 수 없다. 본 연구 대상하천의 하상재료 크기(중앙입경)는 주로 1mm 내외의 모래이나 일부 10mm 정도까지의 자갈로 구성되어 있다.

4. 하천경사와 하천수리특성

1) Sternberg 식 형태

앞에서 선정된 18개 하천에 대해 종단하상경사와 유량 및 하천재료의 변화를 분석하였다. 먼저, 하천의 종단하상경사는 Shulits(1941)에 따르면 다음과 같은 Sternberg식 형태를 갖는다고 알려져 있다.

$$S = S_0 e^{-\phi x} \quad (8)$$

여기서, S_0 는 상류 임의 지점의 하상경사, x 는 상류 지점에서 하류방향으로의 거리, ϕ 는 계수

표 3. 하상경사와 하천거리와의 회귀분석 결과

하천명	S_0	$\phi(km^{-1})$	R^2	비고
감천	0.00245	0.0261	0.8607	
곡교천	0.00469	0.1005	0.9491	
남대천	0.00278	0.0362	0.9379	
내성천	0.00242	0.0120	0.8136	
병성천	0.00227	0.0351	0.9256	
북하천	0.00451	0.0552	0.8149	
섬강	0.00211	0.0169	0.7416	
안성천	0.00798	0.0934	0.9867	
양화천	0.00328	0.0523	0.7955	
유구천	0.00810	0.0712	0.9350	
이안천	0.00546	0.0335	0.8982	
조천	0.00255	0.0302	0.6180	$R < 0.8$
지천	0.00422	0.0899	0.7275	
청도천	0.00803	0.0470	0.5248	$R < 0.8$
청미천	0.00192	0.0191	0.6168	$R < 0.8$
평창강	0.00336	0.0131	0.6685	
홍천강	0.00258	0.0118	0.6734	
황강	0.00184	0.0370	0.9395	

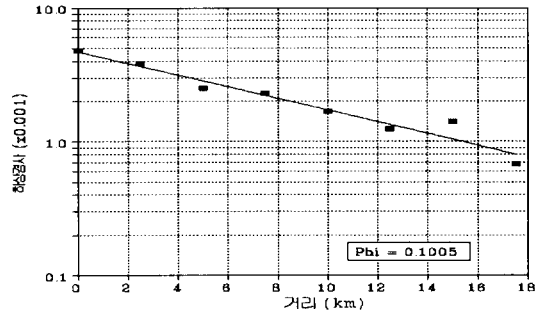


그림 3. 거리에 따른 곡교천 하상경사의 변화

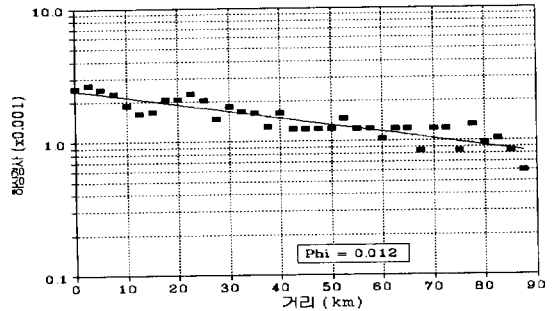


그림 4. 거리에 따른 내성천 하상경사의 변화

이다. 계수 ϕ 는 하천의 하상재료 특성이나 유량 등에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 앞서 선정된 18개 하천에 대해 회귀분석으로 ϕ 값을 계산한 결과는 표 3과 같다. 이러한 관계를 그림으로 표시하면 하상경사의 변화는 반대수지상에 직선으로 표시되며, 그림 3과 4는 각각 곡교천과 내성천에 대한 관계를 보여준다.

이 표와 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 채택된 18개 하천들은 식 (8)의 관계가 대부분이 상관계수 0.8 이상으로 비교적 명확하게 나타나며, 이러한 결과는 이 식의 유용성을 시사한다. 조사된 18개 하천에 대한 ϕ 값은 작게는 0.01(km⁻¹)에서 크게는 0.1(km⁻¹)까지 다양하게 나타났다. 상기 식 8의 형태로 볼 때 일반적으로 ϕ 값이 크다는 것은 거리에 따른 하상경사의 변화가 크고 하상고 변화가 크다는 것을 나타내며, 반대로 ϕ 값이 작다는 것은 하상경사의 변화가 작고 하상고 변화 역시 작다는 것을 의미한다. 참고로 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 등 우리 나라 5대하천 분류의 ϕ 값 들은 0.01~0.03(km⁻¹) 정도이나, 미국의 미시시피강

이나 오하이오강 등 대하천의 경우 ϕ 값은 이보다 차수가 하나 낮은 $0.001(\text{km}^{-1})$ 정도인 것으로 알려져 있다(한국건설기술연구원, 1993).

Schkolitsch(1933)에 의하면 식(8)의 ϕ 값은 하상재료의 광물특성과도 관련이 있는 것으로 알려져 있으나, 그 경우 하상재료는 자갈 이상의 크기로서 모암의 광물특성을 그대로 유지하고 있다. 그러나 본 연구의 경우 유역의 하상재료가 충분히 마모되어 모래 정도의 크기를 나타내고 있으므로 상류 유역의 지질특성과는 상관없이 하상재료는 석영이 주종을 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 ϕ 값과 하천유역의 지질특성과의 관련성은 조사하지 않았다.

다음, Sternberg식 형태인 식(8)과 Garde의 식(4)를 비교하면 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\phi = -\alpha\alpha - \beta\beta - \gamma\gamma \quad (9)$$

본 연구에서는 먼저 Garde의 방법과 유사하게 18개 대상하천에 대한 각 지수 α, β, γ 를 구한다. 다만, 국내 하천 유사량자료의 부족 때문에 Garde의 방법을 그대로 이용할 수 없으므로, 식(4)와 (9)에서 유사량 항을 제외하고 다음과 같이 축소시켜 이용하였다.

표 4. 하상재료의 크기와 하천거리와의 회귀분석 결과

하천명	상수항	α	R^2	비고
감천	1.04	0.0568	0.4921	채택
곡교천	9.90	0.1470	0.7561	채택
남대천	16.93	0.0720	0.4001	채택
내성천	1.43	0.0069	0.1680	
병성천	1.42	0.0349	0.3307	
북하천	1.69	0.0124	0.1121	
섬강	6.32	0.0491	0.5387	채택
안성천	8.90	0.1164	0.8216	채택
양화천	1.07	0.0243	0.2649	
유구천	1.64	0.0101	0.0106	
이안천	1.06	0.0101	0.0785	
조천	0.48	-0.0209	0.0665	
지천	1.40	0.0398	0.3933	
청도천	8.99	0.0108	0.0973	
청미천	1.53	0.0038	0.0049	
평창강	1.63	-0.0086	0.0799	
홍청강	3.05	0.0401	0.9528	채택
황강	1.94	0.0439	0.7672	채택

$$S = S_0 e^{(\alpha\alpha + \beta\beta)x} \quad (10)$$

$$\phi = -\alpha\alpha - \beta\beta \quad (11)$$

단, β 는 다음과 같이 유역면적 A 에 대한 경험식의 계수이다.

$$A = A_0 e^{\beta x} \quad (12)$$

본 연구에서 유량 대신 유역면적을 채택한 것은 각 하천 지점별 유량을 선정하는 것은 몇 가지 어려움이 있기 때문이다. 첫째, 하천의 평형상태와 관련이 깊은 것은 지배유량이나 지배유량의 개념 자체가 우리 나라 하천에 적용하는데는 많은 문제를 내포하고 있기 때문이며(우효섭·유권규, 1993), 둘째는 유량 실측자료의 부족으로 각 지점별 유량 산정이 매우 어렵기 때문이다. 반면, 유역면적은 유량과 밀접한 관계를 가지고 있으면서도 $1:1$ 지형도에서 비교적 손쉽게 자료를 구할 수 있는 장점이 있다.

먼저, 식(5)를 이용한 하상재료의 크기와 상류로부터의 하천거리에 대한 18개 하천의 회귀분석결과는 표 4와 같다. 이 표에서 보는 바와 같이 의외로 하상재료는 거리와의 상관성이 높

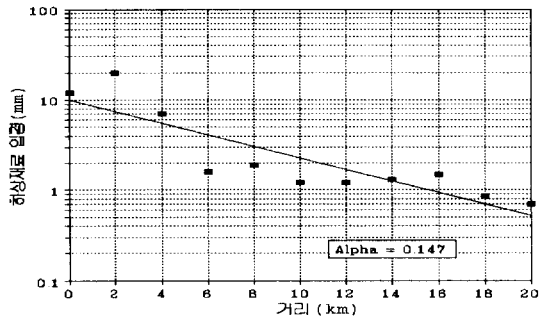


그림 5. 거리에 따른 곡교천 하상재료의 변화

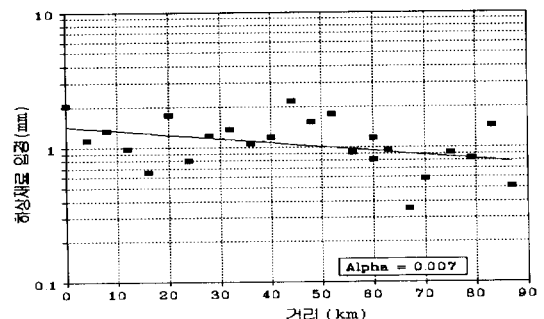


그림 6. 거리에 따른 내성천 하상재료의 변화

우리 나라 沖積河川 河床傾斜의 水理幾何 特性에 관 지 않으며, 조천과 평창강의 경우 회귀분석한 결과 오히려 하류로 내려갈수록 하상재료가 커지는 것처럼 계수 α 가 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 전술한 바와 같이 무엇보다도 하상 토 시료 채취와 분석상의 문제라 볼 수 있으며, 다음으로 대상하천의 지천에서의 조립질 재료의 유입으로 하류로 갈에 따른 하상재료 크기의 감소가 일관성이 부족하기 때문인 것으로 여겨지며, 이들 자료는 본 분석에서는 제외하였다.

표 4의 결과를 그림으로 표시하면 곡교천과 내성천의 경우 각각 그림 5와 6과 같다.

다음으로, 식 (12)를 이용하여 18개 하천에 대해 유역면적과의 회귀분석을 한 결과는 표 5와 같다. 한편, 이 결과를 그림으로 표시하면 곡교천과 내성천의 경우 각각 그림 7과 8과 같다. 이 표와 그림에서 보는 바와 같이, 모든 하천에 있어 유역면적과 하천거리는 상관계수 $R > 0.8$ 으로 비교적 상관이 높음을 알 수 있다.

본 연구에서는 식 (10)과 (11)의 적용성을 검토하기 위하여 표 3, 4, 5에서 나타난 결과를 이용한다. 다만, 표 4중에서 하상재료와 하천거리와의 상관성이 낮은 것, 즉 결정계수 R^2 이 0.4

표 5. 유역면적과 하천거리와의 회귀분석 결과

하천명	상수항	β	R^2	ϕ/β	
감천	4.845	0.0309	0.929	0.85	이상치
곡교천	2.005	0.1345	0.933	0.75	
남대천	3.126	0.0728	0.871	0.50	
내성천	4.732	0.0266	0.958	0.45	
병성천	3.112	0.0938	0.934	0.37	
북하천	2.652	0.0903	0.901	0.59	
섬강	5.476	0.0191	0.762	0.88	
안성천	1.622	0.1856	0.888	0.50	
양화천	2.127	0.1217	0.912	0.43	
유구천	3.234	0.0777	0.912	0.92	
이안천	3.267	0.0451	0.935	0.74	
조천	3.107	0.0572	0.910	0.53	
지천	5.033	0.0230	0.939	3.91	
청도천	3.084	0.0820	0.795	0.57	
청미천	3.248	0.0611	0.884	0.31	
평창강	5.477	0.0139	0.901	0.94	
홍천강	6.246	0.0132	0.680	0.89	
황강	6.411	0.0067	0.930	5.52	

이상치

이상치

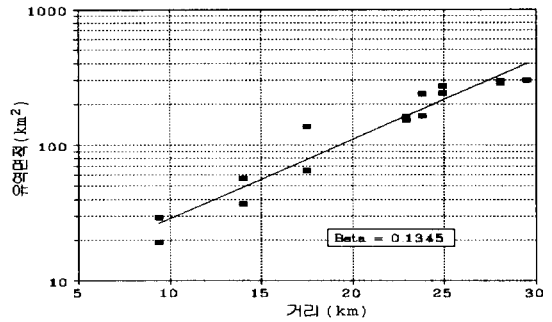


그림 7. 거리에 따른 곡교천 유역면적의 변화

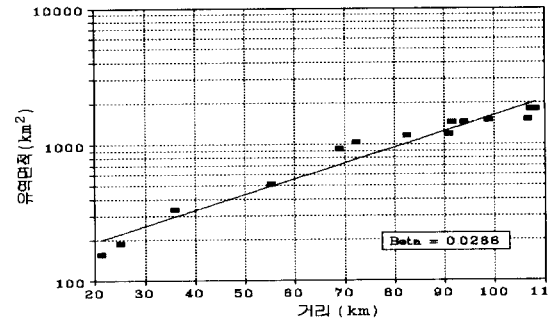


그림 8. 거리에 따른 내성천 유역면적의 변화

미만인 것들은 제외한다. 따라서 하상재료면에서 가용한 자료는 감천, 곡교천, 남대천, 섬강, 안성천, 홍천강, 황강 등 7개 하천자료에 불과하다.

이와 같은 7개 하천자료를 이용하여 식 (11)을 행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\phi = Ax \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -0.0261 \\ 0.1005 \\ 0.0362 \\ 0.0169 \\ 0.0934 \\ 0.0118 \\ -0.0370 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0568 & 0.0309 \\ 0.1470 & 0.1345 \\ 0.0720 & 0.0728 \\ 0.0491 & 0.0191 \\ 0.1164 & 0.1856 \\ 0.0401 & 0.0132 \\ -0.0439 & 0.0067 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

위 식에서, ϕ 와 x 는 벡터이며 A 는 α, β 로 구성된 행렬이다. 이 식에서 벡터 x 는 다음과 같이 구해진다.

$$x = (A^T A)^{-1} A^T \phi \quad (14)$$

이와 같은 방법으로 구한 결과는 결정계수 $R^2=0.93$, 표준오차 S.E.=0.012 수준에서 다음과 같다.

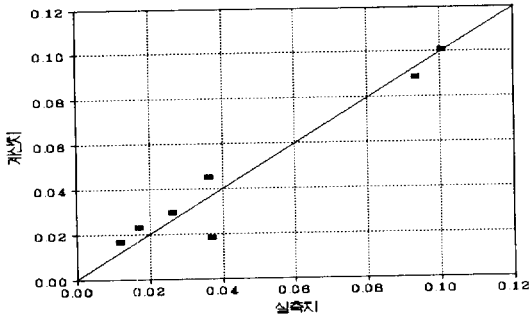


그림 9. 실측 ϕ 값과 계산 ϕ 값의 비교

$$\phi = 0.623\alpha + 0.144\beta - 0.01 \quad (15)$$

7개 하천자료에 대해 식(15)를 이용하여 계산된 ϕ 값과 표 3의 ϕ 값을 비교하면 그림 9와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 중단하상경사의 변화를 나타내는 계수 ϕ 는 하상재료 크기의 변화를 나타내는 계수 α 와 유역면적의 변화(유량의 변화)를 나타내는 계수 β 에 의해 식(15)의 형태로 표시될 수 있다. 다만, 전술한 바와 같이 우리나라의 경우 현재 하천조사에서 제시되는 하상재료 크기에 대한 자료의 신뢰도가 낮은 관계로 식(15)는 충분한 하천자료를 이용하여 얻어진 것이 아니기 때문에, 현단계에서는 객관성이 약하다. 이 식은 추후 보다 많은 하천자료를 이용하여 검증되고 보완될 필요가 있다.

2) Leopold와 Maddock식 형태

다음으로, Leopold와 Maddock이 제안한 바와 같이 하천의 유량과 중단하상경사와의 관계를 검토하기 위하여 식(8)과 (6)을 이용한다. 전술한 바와 같이 우리나라 하천유량 자료의 가용성 문제로 유량에 관한 식(6) 대신에 유역면적에 관한 식(12)를 고려한다.

식(8)과 (12)에서 하천거리 x 를 소거하면 다음과 같이 표시된다.

$$S = S_0 A_0^{\phi/\beta} A^{-\phi/\beta} \quad (16)$$

$$= CA^{-\phi/\beta}$$

여기서 C 는 상수이다.

본 연구에서는 ϕ 와 β 와의 관계를 검토하기 위하여 식(16)에 나타난 ϕ/β 값을 표 5에 수록하였다. 이 결과에 의하면 대부분의 하천에 대해

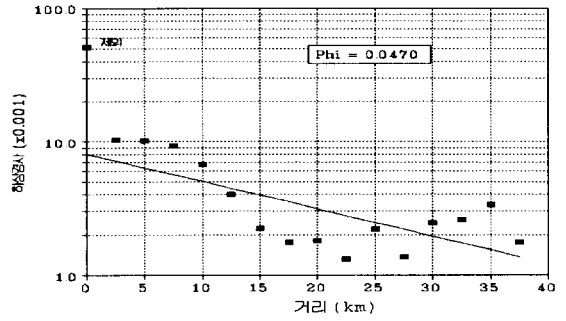


그림 10. 거리에 따른 청도천 하상경사의 변화

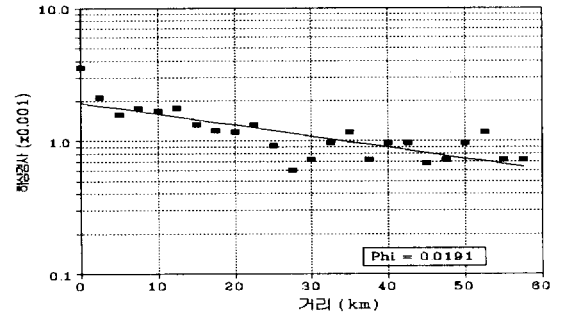


그림 11. 거리에 따른 청미천 하상경사의 변화

ϕ/β 값은 1.0 이하의 값을 가지나 지천과 황강의 경우 4에서 5정도의 예외적인 큰 값을 나타낸다. 이러한 결과는 유역형상계수가 낮은 기다란 모양의 유역에서와 같이 하상경사의 변화에 비해 유역면적의 변화가 지나치게 작은 경우이며, 따라서 이 두 자료는 검토대상에서 제외하였다. 한편, 청도천과 청미천의 하상경사 변화와 같이 (그림 10과 11 참조) 상관계수만 고려하면 상관상이 어느 정도 있어 보이나 실제의 경우 S 자 형태로 변화하는 하천의 경우 기본적으로 식(8)이 적용될 수 없다. 마찬가지로 이 하천들의 하

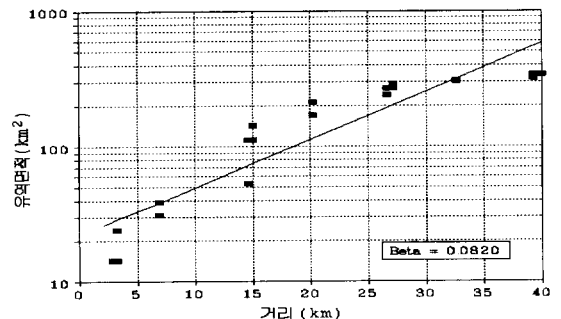


그림 12. 거리에 따른 청도천 유역면적의 변화

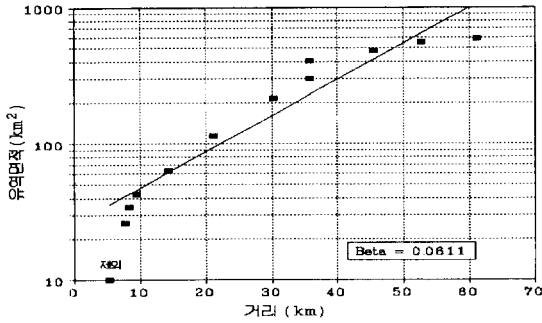


그림 13. 거리에 따른 청미천 유역면적의 변화

천거리에 따른 유역면적은 S자 모양으로 변화하므로(그림 12와 13 참조) 기본적으로 식 (12)를 적용할 수 없다.

따라서, 상기 네 하천자료를 제외한 14개 하천에 대해 ϕ 와 β 와의 관계를 회귀분석을 하여 선형함수 관계와 지수함수 관계로 나타내면 각각 다음과 같다.

$$\phi = 0.51\beta + 0.0063 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.80, \text{ S.E.} = 0.072$$

$$\phi = 0.342\beta^{0.79} \quad (18)$$

$$R^2 = 0.87, \text{ S.E.} = 0.09$$

상기 두 식들의 상관정도는 비슷하게 나타나므로 본 연구에서는 보다 간단한 형태의 선형식 (17)을 채택한다. 이 식을 그림으로 표시하면 그림 14와 같다. 이 식을 이용하면 식(16)에 있는 ϕ/β 는 다음과 같이 표시된다.

$$\phi/\beta = \frac{0.0063}{\beta} + 0.51 \quad (19)$$

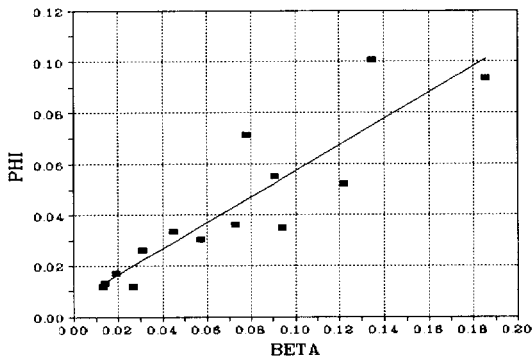


그림 14. ϕ 와 β 의 관계

따라서, 식(16)과 식(19)를 이용하면 총적하천에서 종단 하상경사 S 와 유역면적 A (유량 Q 의 대표값으로 간주)와의 관계가 다음과 같이 구해진다.

$$S = S_0 A_0^{-\frac{0.0063}{\beta} + 0.51} A^{-\frac{0.0063}{\beta} - 0.51} \quad (20)$$

혹은,

$$S/S_0 = (A/A_0)^{-\left(\frac{0.0063}{\beta} + 0.51\right)} \quad (21)$$

5. 결과의 검토

식(20)을 검토하기 위해 이 식의 개발에 사용된 자료를 이용하여 우선 각 하천별 종단 하상경사와 유역면적의 관계를 검토하였다. 그림 15는 식(20)의 꼴과 같이 유역면적의 증가에 따른 하상경사의 감소를 보여주고 있다. 이 그림에서 알파벳은 14개 하천별 자료를 구분하기 위한 부호이다.

표 5에서 지천과 황강을 제외하고 β 값은 0.02에서 0.2까지 분포하고 있으며 이를 산술평균하면 0.07이 된다. 이 값을 식(20)에 대입하면 하상경사 S 는 유역면적 A 의 -0.6 승에 비례하는 것으로 나타난다. 이 값은 Hack의 연구 결과인 -0.6 , 혹은 Leopold와 Langbein의 이론치인 -0.55 와 비슷하다.

다음, 각 하천별로 유역면적을 산정한 지점 모두에 대해 실측하상경사와 식(20)에 의해 계산된 하상경사를 비교하였다. 여기서 하상경사는 하류에서 상류방향으로 계산하였다. 그 이유는 계산시점의 하상경사와 유역면적을 하류에서

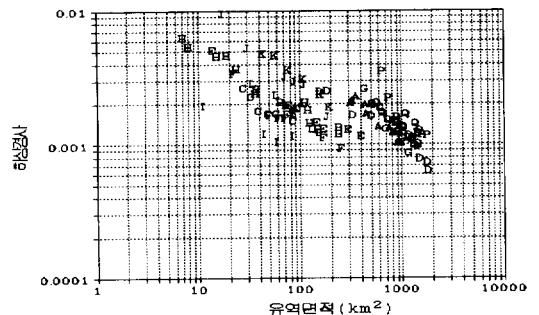


그림 15. 유역면적과 하상경사의 관계

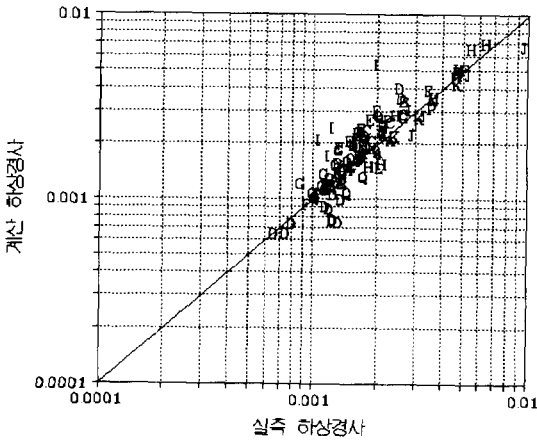


그림 16. 실측 하상경사와 계산 하상경사의 비교

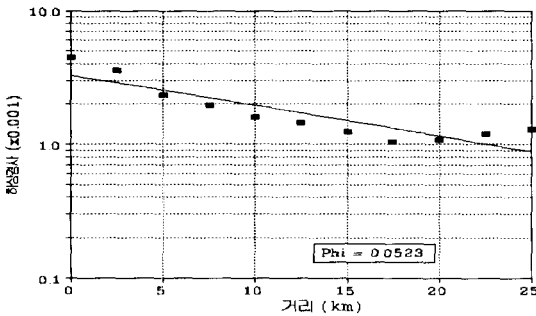


그림 17. 거리에 따른 양화천 하상경사의 변화

결정하는 것보다 비교적 오차를 덜 유발되기 때문이다.

그림 16은 이러한 방법으로 비교된 것으로, 이 그림에서 보는 바와 같이 양화천(I)을 제외하고 대체적으로 계산된 하상경사는 실측치와 근사하다. 참고로 양화천은 그림 17에서 보는 바와 같이 하상경사의 변화가 활자 모양을 띠고 있어 전술한 정도천이나 청미천의 경우와 마찬가지로 기본적으로 식(8)로 표시하기 어렵다.

그림 16은 공식의 개발에 이용된 자료를 이용하여 비교된 것으로 현 단계로서는 객관성이 미흡하다. 따라서, 추후 보다 광범위한 하상경사 자료를 수집하여 본 연구의 방법론과 결과를 검증하고 보완할 필요가 있다.

사실상, 식(17)과 (20)의 실질적인 의미는 우리 나라 하천에서 하천수리기술 측면에서 하천경사와 유량(유역면적) 등과의 관계를 분석하였

다는데 있을 것이다. 식(20)에 의한 하상경사의 변화가 대체적으로 유량(유역면적)의 -0.6 승에 비례한다는 결과도 이런 면에서 의의를 찾을 수 있을 것이다.

식(20)을 이용하여 하상이 주로 모래인 자연 하천의 중단하상경사의 변화를 추정하기 위해서는 다음과 같은 단계를 거친다.

(1) 반대수지상에 대상하천의 하상경사와 유역면적을 각각 하천길이에 대해 도시하여 각 회귀식의 상관계수가 0.8 이상이며 대체적으로 선형관계가 얻어지는가를 확인한다. 선형관계가 얻어지는 경우에 한하여,

(2) 식(8)의 ϕ 값과 식(12)의 β 값의 비율(ϕ/β)이 1을 크게 초과하는 경우 식(20)의 적용 한계를 넘으므로, $\phi/\beta < 1$ 인 경우에 한하여,

(3) 인위적인 변화가 작은 하류의 한 기준점에 대해 하상경사 S_0 와 유역면적 A_0 를 산정한다.

(4) 식(20)을 이용하여 상류 각 지점에 대해 하상경사를 산정한다.

(5) 이 결과를 이용하여 상류 각 지점에 대해 하상고를 산정한다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 하상이 주로 모래로 이루어진 자연/반자연 상태의 우리 나라 총적하천에서 중단하상경사와 하천수리량과의 관계를 조사하였다. 조사대상 하천들은 주로 대하천의 1차 지류 중에서 평형상태에 있다고 보여지는 하천들이다. 평형상태를 검토하기 위해서 Richards의 평형하천의 조건을 참고하였다. 본 연구에서 채택된 방법은 Leopold와 Maddock식 형태와 Garde식 형태 두가지이며, 이를 위하여 유역면적 100~2,000km²까지의 18개 하천에 대해 상류로부터 하천거리에 따른 하상경사, 유역면적, 하상재료의 크기의 변화 등을 조사하였다. 조사대상 총적하천에서 하상경사와 유역면적 및 하상재료의 크기 변화를 7개 하천자료를 이용하여 Garde식 형태로 표시한 결과는 하상재료 크기의 변화에 대한 신뢰성 있는 자료의 부족으로 현단계로서는 객관성이 부족한 것으로 보여진다. 14개 하

천자료를 이용하여 얻어진 Leopold와 Maddock 식 형태로 표시한 하상경사 S 는 유역면적 A 와 유역면적의 변화계수 β 를 이용하면 다음과 같다.

$$S = S_0 A_0^{\frac{0.0063}{\beta} + 0.51} A^{-\frac{0.0063}{\beta} - 0.51}$$

이 식에 의하면 조사대상 총적하천의 종단하상경사는 개략적으로 유역면적의 -0.6 승 정도에 비례하는 것으로 나타난다.

본 연구에서 개발된 식을 이용하여 조사대상 하천과 특성이 비슷하고 하상이 주로 모래인 자연하천의 종단하상경사의 변화를 추정하기 위해서는 다음과 같은 단계를 거친다.

(1) 반대수지상에 대상하천의 하상경사와 유역면적을 각각 하천길이에 대해 도시하여 각 회귀식의 상관계수가 0.8이상이며 대체적으로 선형관계가 얻어지는가를 확인한다. 선형관계가 얻어지는 경우에 한하여,

(2) $S = S_0 e^{-\beta x}$ 에서 ϕ 값과 $A = A_0 e^{\beta x}$ 의 β 값의 비율(ϕ/β)이 1을 크게 초과하는 경우 본 연구에서 개발된 식의 적용한계를 넘으므로, $\phi/\beta < 1$ 인 경우에 한하여,

(3) 인위적인 변화가 작은 하류 한 기준점에 대해 하상경사 S_0 와 유역면적 A_0 를 산정한다.

(4) 본 연구에서 개발된 식을 이용하여 상류 각 지점에 대해 하상경사를 산정한다.

(5) 이 결과를 이용하여 상류 각 지점에 대해 하상고를 산정한다.

마지막으로, 본 연구에서 제안된 종단하상경사 관련식은 제한된 범위의 자료를 이용하여 도출된 것으로, 현 단계에서는 보편성이 충분하지 못하다. 따라서 추후 광범위한 자료를 수집하여 본 연구결과를 보완할 필요가 있다.

(投稿 1994년 7월 25일)

註

- 1) 유량은 유역면적에 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있으며, 우리나라 하천자료를 이용한 유량-유역면적 분석 결과는 '장기수자원계획을 위한 유역 물수지 추정방법의 개발(건기연, 1989)'에 구체적으로 수록되어 있다.

文 獻

- 김종욱, 1991, "하천지형 발달에 관여하는 주요 변수들간의 기능적인 관계에 관한 연구: 신리천, 사천내, 군선강을 사례지역으로 하여," *地理學*, 26(1), 1-29.
- 안상진, 윤용남, 강관원, 1982, "유역의 하천형태학적 특성과 수리기하학적 특성과의 상관성," *대한토목학회논문집*, 2(1), 1-7.
- 우효섭·유권규, 1993, "지배유량의 개념 및 하천실무에의 적용성의 재고찰," *대한토목학회 학술발표회*, 원광대학교, 185-188.
- 정장호, 1974, "북한강 유역의 하계망 발달의 정량적 분석," *수도여사대 논문집*, 6, 241-266.
- 정장호, 1978, "금강 유역의 하계망 발달의 정량적 분석," *수도여사대 논문집*, 7, 151-164.
- 정장호, 1979, "형산강 유역의 하계망 발달의 정량적 분석," *청파 노도향박사 고회 기념문집*, 175-192.
- 한국건설기술연구원, 1993, 평형하상경사의 추정방법 개발, 건기연 93-WR-112, 14-70.
- Davis, W.M., 1899, *The Geological Cycle*, *Geographical Journal*, 14, 481-504.
- Garde, R.L., 1982, Longitudinal Profile of an Alluvial Stream, in *Engineering Geoscience*, Singhal, B.B.S., Prakashan S.(eds.), New Delhi.
- Hack, J.T., 1957, *Studies of Longitudinal Stream Profiles in Virginia and Maryland*, United States Geological Survey Professional Paper, 294B.
- Hey, R.D., 1982, Design Equations for Mobile Gravel-Bed Rivers, *Gravel-Bed Rivers*, Hey, R.D. et al. (eds.), John Wiley & Sons, New York.
- Lane, E.W., 1957, *A Study of the Shape of Channels Formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material*, MRD Sedimentation Series, 9, U.S. Army Engineer Division, Missouri River, Corps of Engineers, Omaha,

- Neb.
- Leopold, L.R. and Maddock, T., 1953, *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*, United States Geological Survey Professional Paper, 252.
- Leopold, L.B. and Langbein, W.B., 1962, *The Concept of Entropy in Landscape Evolution*, United States Geological Survey Professional Paper, 500A.
- Mackin, J.H., 1948, *Concept of the Graded River*, Geological Survey of America Bulletin, 59, 561-588.
- Richards, K., 1982, *Rivers-Forms and Processes in Alluvial Channels*, Methuen, London.
- Rubey, W.W., 1952, *Geology and Mineral Resources of the Hardin and Brussels Quadrangles (in Illinois)*, United States Geological Survey Professional Paper, 218.
- Schoklitsch, A., 1933, About the Decrease of the Size of Bed Material in River Beds, translated by B.B. Eissler from *Akad. Wiss., Wien*, 142, 343-366.
- Shulits, S., 1941, Rational Equation for River Bed Profile, *Trans.*, American Geophysical Union, 22, 622-630.

A Preliminary Study of the Hydraulic-Geometrical Relations of Bed Slope in Some Selected Alluvial Rivers

Hyoseop Woo*, Kwonkyu Yu** and Jongkwan Park***

Summary

The hydraulic-geometrical relations between the riverbed slope and water discharge and other hydraulic variables in some selected alluvial rivers in Korea have been investigated. The rivers from which the data relevant to this study were collected are mainly the first tributaries, considered to be mostly in the equilibrium state, of the 10 major rivers in Korea. The investigating methods adopted in this study are similar to the one suggested by Leopold and Maddock and the one suggested by Garde. All of 18 rivers their drainage areas of which range between 100~2,000km² were

considered and the changes in riverbed slope, drainage area, bed material size along the downstream river distance were measured. It is found in this study that the change in the riverbed slope, S , along the downstream can be expressed in terms of the coefficient, β , expressing the change in the drainage area along the downstream and the drainage area, A , by an empirical relation as $S=S_0A_0^{\frac{0.0063}{\beta}+0.51}A^{-\frac{0.0063}{\beta}-0.51}$. According to this relation, the riverbed slope of the river reaches investigated in this study appear to be proportional to the -0.6 th power of the drainage area. This result is consistent with the previous ones obtained by Hack.

Key Words: alluvial rivers, riverbed slope, river hydraulics, hydraulic-geometry.

* Director, Water Resources Engrg. Div., Korea Institute of Construction Technology

** Researcher, Water Resources Engrg. Div., Korea Institute of Construction Technology

*** Assistant Professor, Department of Geography, College of Science, Konkuk University