

# 하천양상에 따른 수로경사, 유량 및 상대전단응력과의 관계

## Relationship of Channel Slope, Discharge, and Relative Shear Stress with River Patterns

차영기\*, 김이현\*\*

### 1. 서론

충적하천에서 수로양상은 수로경사와 유량 및 상대전단응력에 따라 직선(straight)하천, 사행(meandering)하천, 그리고 망상(braided)하천으로 구분할 수 있다. 이 3가지 유형의 하천자료를 가지고 수로경사와 유량과의 관계를 각 하천별로 회귀분석하여 비교함으로써 수로양상이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 이들 하천의 수로경사와 유량과의 관계뿐만 아니라 상대전단응력과의 관계도 검토해 보고자 한다.

직선하천은 굴곡도가 1.5 이하인 하천을 말하고, 사행하천은 굴곡도가 1.5 이상인 하천을 말하는데, 일반적으로 충적하천의 대부분이 사행하천으로 이루어져 있다. 그리고 망상하천은 굴곡도가 1.5 이하이고, 충적선상지(alluvial fan), 평원 및 빙하계곡 등지에서 발달하는데, 특히 수로경사가 급변하는 충적선상지에서 가장 잘 발달하는 것으로 알려져 있다. 한편 국내의 망상하천은 하천을 횡단하여 축조된 보(weir)의 상·하류유역에서 발달하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 실험자료를 포함한 270개의 충적하천 실측자료를 대상으로 하여 직선하천, 사행하천, 그리고 망상하천으로 나누어서 수로경사와 유량 및 상대전단응력과의 관계에 따라 각각 비교·분석해 보고자 한다.

### 2. 이론적 배경

광폭수로에서 동수반경을 수심과 거의 동일하다고 보면 흐름에 의해 영향을 받는 전단응력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_o = \gamma h S \quad (1)$$

여기서  $\tau_o$ 는 전단응력이고,  $\gamma$ 는 물의 단위중량이다. 그리고  $h$ 는 평균수심이며,  $S$ 는 수로경사이다.

또한 Leopold와 Maddock(1953)은 수심과 연평균유량이 서로 상관관계가 있다는 것을 제안하였다. 즉 다음과 같은 관계식으로 나타내었다.

---

\* 단국대학교 토목공학과 교수

\*\* 단국대학교 토목공학과 박사과정, 대전산업대학교 강사

$$h = cQ^f \quad (2)$$

여기서  $c$ 와  $f$ 는 상수이고,  $Q$ 는 연평균유량이다. Graf(1971)에 의하면  $f$ 값은 0.22~0.45의 범위를 가지며, Leopold와 Wolman(1957)에 의하면  $c$ 값은 0.15~0.55의 범위를 가진다. 연평균유량은 홍수시나 갈수시보다도 유량의 변동폭이 적어서 일반적으로 수리학적 해석을 할 때 이 유량을 많이 사용하고 있다.

식 (2)를 식 (1)에 대입하면

$$\tau_o = \gamma c Q^f S \quad (3)$$

식 (3)을 수로경사에 대해 다시 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \left( \frac{\tau_o}{\gamma c} \right) Q^{-f} \quad (4)$$

본 연구에서 구하고자 하는 것 중 하나가 식 (4)의  $\frac{\tau_o}{\gamma c}$  와  $f$ 값이다. 이 상수값을 구해서 각 하천별로 비교·분석해 보고자 한다. 한편 Lane(1957)은 식 (4)와 유사한 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$S = kQ^f \quad (5)$$

Lane은 식 (5)의  $k$ 값을 가지고 사행하천과 망상하천을 판단하였다. 식 (4)의  $\frac{\tau_o}{\gamma c}$  값은 식 (5)의  $k$ 값과 유사하며, Lane은  $k$  값이 0.0007~0.0041의 범위를 가진다고 하였다.

식 (4)에서  $\frac{\tau_o}{\gamma c}$  의 값을 얻기 위해 표 1의 자료를 회귀분석에 사용하였다. 본 연구에서는 굴곡도가 1.5 이하인 것을 직선하천, 1.5 이상인 것을 사행하천, 그리고 망상하천은 굴곡도에 관계 없이 수로내 사주나 섬들이 발달한 하천으로 나누었다. 직선하천, 사행하천, 그리고 망상하천의 자료수는 각각 54개, 130개, 그리고 86개로써 총 270개의 자료를 가지고 분석하였다. 이 자료에서 굴곡도는 1.04~3.1의 범위로 이루어져 있고, 연평균유량은 0.001416~25485.12 CMS로 상당히 광범위한 유량자료를 사용하였다.

표 1. 회귀분석에 적용한 각 하천 및 실험수로의 자료

하 천	자 료 수	굴 곡 도	연평균유량(CMS)	비 고
직 선	54	1.04 ~ 1.4	0.1133 ~ 9911	
사 행	130	1.5 ~ 3.1	0.0014 ~ 16707	
망 상	86	-	0.0024 ~ 25485	
계	270			

식 (4)로부터 54개의 직선하천 자료를 사용하여 회귀분석한 결과 수로경사와 유량과의 관계가 다음과 같은 식으로 나타났다.

$$S = 0.00149Q^{-0.23} \quad (6)$$

여기서 상관계수는 0.802로 나타났고, 직선하천에서  $\frac{\tau_o}{\gamma c}$  값은 Lane이 제안한 값의 하한계 값에 가까우며,  $f$  값은 Graf가 제안한 완전 하한계 값과 거의 유사하게 나타났다.

식 (4)와 (6)으로부터  $\frac{\tau_o}{\gamma c}$  의 평균값이 0.00149이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\tau_o}{\gamma c}\right)_{avg} = 0.00149 \quad (7)$$

식 (7)에서  $\gamma$ 와  $c$ 의 값이 일정하다고 가정하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\tau_{avg}}{\gamma c} = 0.00149 \quad (8)$$

따라서

$$\tau_{avg} = 0.00149\gamma c \quad (9)$$

여기서  $\tau_{avg}$ 는 54개 직선하천에서의 평균전단응력이다.

식 (3), (6), 그리고 (9)를 묶으면 다음과 같은 상대전단응력식이 주어진다.

$$\frac{\tau_o}{\tau_{avg}} = \frac{\gamma c Q^{0.23} S}{0.00149\gamma c} = \frac{Q^{0.23} S}{0.00149} \quad (10)$$

여기서 미지수인  $c$ 가 소거된다.

직선하천과 동일한 방법으로 사행하천, 망상하천, 그리고 전체 하천에 대해서 회귀분석을 한 결과 표 2와 같이 나타났다. 연구에 이용된 전체 하천에 대한 상관관계를 나타내면 그림 1과 같다. 가운데 실선은  $S = 0.001422Q^{-0.32}$ 를 가리킨다.

표 2. 각 하천에서 분석한 결과치

하천양상	자료수	$\tau_o/\gamma c$	$f$	$\tau_o/\tau_{avg}$	상관계수
직선하천	54	0.001490	0.23	0.500 ~ 2	0.802
사행하천	130	0.000867	0.28	0.250 ~ 8	0.796
망상하천	86	0.003296	0.44	0.125 ~ 4	0.885
전체하천	270	0.001422	0.32	0.125 ~ 8	0.763

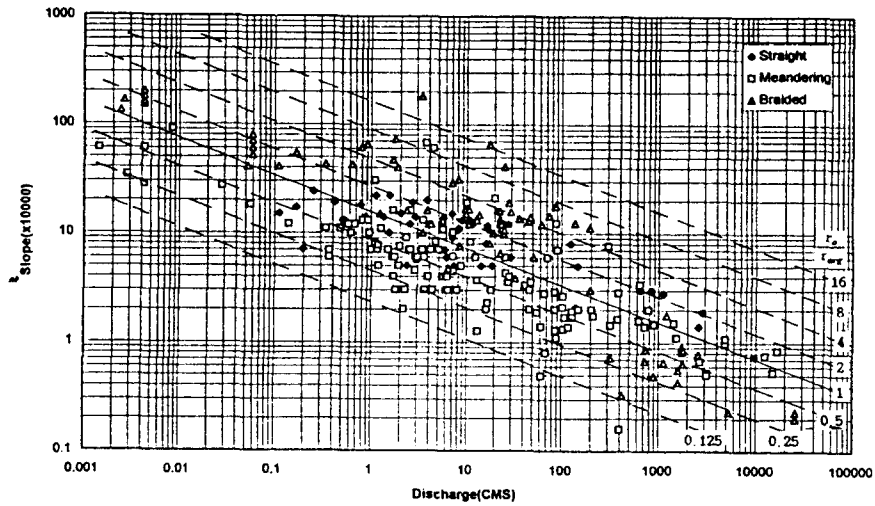


그림 1. 전체 하천에서 수로경사와 유량 및 상대전단응력과의 관계

### 3. 각 하천에 대한 비교 · 분석

이상과 같이 충적하천을 3가지 유형별로 회귀분석한 결과 각 하천마다 차이가 있는데, 이들을 비교 · 분석해 보기 위해 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2에서 보면 전체 하천 자료로 회귀분석한 것을 중심으로 이 보다 수로경사가 급하면 망상하천이 발달하고, 반대로 완만하면 사행하천이 발달한다는 것을 보여준다. 그러나 유량이 약 7,000 CMS 이상인 대하천에서는 망상하천보다 사행하천에서 수로경사가 다소 급경사로 나타났다. 일반적인 충적하천에서는 동일한 유량일 때 급경사에서 사행하천보다 망상하천이 잘 발달한다는 것을 알 수 있다.

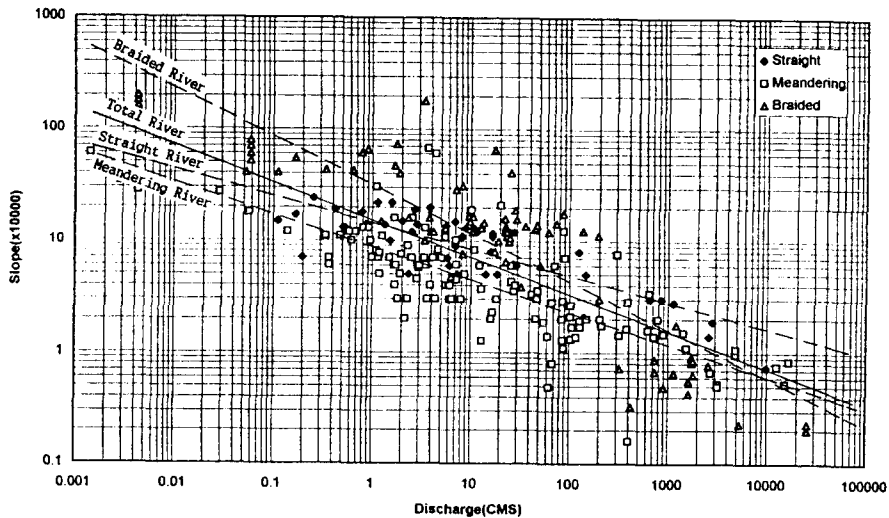


그림 2. 각 하천에서 수로경사와 유량과의 관계

대부분의 충적하천에서 상대전단응력( $\tau_o/\tau_{aug}$ )의 범위는 대략 0.125~8 정도로 나타났고,  $\frac{\tau_o}{\gamma C}$  값의 크기는 망상하천, 직선하천, 그리고 사행하천 순으로 작아졌고,  $f$ 값의 크기는 망상하천, 사행하천, 그리고 직선하천 순으로 작아졌다. 상대전단응력의 범위는 직선하천에서 가장 작게 나타났으며, 상관계수는 망상하천이 가장 양호한 모델로 나타났다.

그림 1의 자료를 가지고 각 하천별로 상대전단응력의 범위에 따른 하천자료의 수 및 상대빈도를 나타내면 그림 3과 같다.

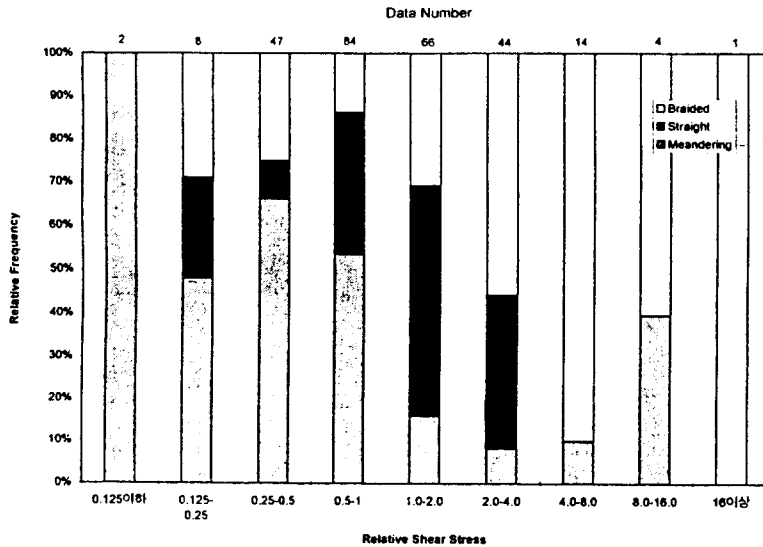


그림 3. 전체 하천에서 상대전단응력의 범위에 따른 하천자료의 수 및 상대빈도

그림 3에서 보면 망상하천에서는 상대전단응력이 다른 하천에 비해 크게 나타났고, 반대로 사행하천에서는 작게 나타났다. 그리고 두 하천 사이에 직선하천이 존재하며, 이 하천을 중심으로 하여 상대전단응력이 크면 망상하천이 잘 발달되는 경향이 있고, 반대로 작으면 사행하천이 잘 발달되는 경향이 있다.

이상에서 보는 바와 같이 수로경사, 유량 및 상대전단응력으로 각 하천유형을 명확히 구별할 수 있다.

#### 4. 결론

충적하천에서 수로경사와 유량 및 상대전단응력의 상관관계를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 각 하천에 따라  $\frac{\tau_o}{\gamma C}$  값은 0.000867~0.003296의 범위를 가지고,  $f$ 값은 0.23~0.44의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

(2) 연구대상으로 한 전체 하천에 대해서  $\frac{\tau_o}{\gamma C}$  값은 0.001422로 나타났으며,  $f$ 값은 0.32로 나타났다.

(3)  $\frac{\tau_0}{\gamma C}$  값이 크면 망상하천이 잘 발달하고, 반대로 작으면 사행하천이 잘 발달한다는 것을 알 수 있다.

(4) 수로경사와 유량과의 관계를 보면 직선하천의 수로경사를 기준으로 하여 동일한 유량에서 수로경사가 급하면 망상하천이 되고, 반대로 완만하면 사행하천이 발달하는 것으로 나타났다.

(5) 또한 직선하천을 중심으로 상대전단응력이 크면 망상하천이 잘 발달하고, 작으면 사행하천이 일반적으로 잘 발달한다는 결론을 얻을 수 있었다.

## 5. 참고문헌

- 금강수계 종합정비계획. (1988). 건설부.  
섬진강 수계종합정비계획. (1989). 건설부.  
이안천 하천정비기본계획. (1991). 경상북도.  
지석천 하천정비기본계획. (1988). 건설부.  
형산강 치수대책조사 보고서. (1992). 건설부.  
차영기, 김이현, 이종석 (1995). "망상하천에서의 수로경사와 유량에 따른 하상변화". 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp. 95-98.  
Begin, Z.B. (1981). "The relationship between flow-shear stress and stream pattern." *J. Hydrol.*, 52, pp. 307-319.  
Chitale, S.V. (1973). "Theories and relationships of river channel patterns." *J. Hydrol.*, 19, pp. 285-308.  
Graf, W.H. (1971). *Hydraulics of sediment transport*. McGraw-Hill, New York, N.Y.  
Lane, E.W. (1957). "A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material." *U.S. Army Corps Eng. Div., Missouri R., M.R.D. Sedimentol. Ser. No. 9*, pp. 1-106.  
Leopold, L.B., and Wolman, M.G. (1957). "River channel patterns: braided, meandering and straight." *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 282E, pp. 39-85.  
Osterkamp, W.R. (1978). "Gradient, discharge and particle-size relations of alluvial channels in Kansas, with observations on braiding." *Am. J. Sci.*, 278, pp. 1253-1268.  
Schumm, S.A., and Khan, H.R. (1972). "Experimental study of channel patterns." *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, pp. 1755-1770.