

< 論文 >

河川 蛇行의 計量形態學的 特性

—Morphometrical characteristics of River Meandering—

宋	在	偶*
Song	Jai	Woo
李	元	煥**
Lee	Won	Hwan

—ABSTRACT—

The purpose of this study is to examine the meander characteristics for the rivers in Korea.

In this study, the new characteristics factors of meander are proposed, and the relationships among the factors proposed in this study and the existing factors are derived.

An attempt is made to find considerable relation among meander characteristics, but width and meander belt did not show any defined trend and considerable scatter of points was observed.

Relationships among the meander length, belt and flowrate, etc., which are factors of meander characteristics, are analyzed the 67 rivers above 30km in length.

Channel shape factor which is the ratio of the length from the starting point to the end to the channel length, tortuosity which is the ratio of the curved channel length against the channel length are suggested for a new characteristics factor of meander.

They are well correlated with channel length, Horton's shape factor and meander gradient, consequently have to be important measures of river meander.

The results of the detailed comparison and the analysis of degree of sinuosity, velocity and water surface slopes are brought light on the fact show that the curved reach is more stable than the straight one.

The ratio of the meander length to the meander belt and its accumulative frequency showed excellent correlation when plotted on the semi-log paper.

The results of regression analysis of meander belt and meander length show linear for the South Han river branches and power curve for the Geum river and the Nakdong river branches.

要 旨

하천 재해 방지 및 하천 유지의 관점에서 반드시 구명되어야 하는 하천 사행에 관한 연구는 자연 현상에 대한 관점에서 출발하여, 급세기 초부터 체계적이고 과학적인 연구가 진행되어 왔다. 그 발생 원인은 정설이 확립되지 않은 가운데 복합적인 여러 요인에 의하여 사행은 생성, 발달되며, mechanism의 고찰과 함께 계량형태학적 분석으로 사행 특성이 일부 밝혀지고 있다.

본 연구에서는 유로연장 30km 이상의 67개 대상하천에서 사행 특성인자인 사행파장( $M_l$ )과 사행대( $M_b$ ) 등의 관계를 구명하여 유량과의 상관성을 분석하였다.

\*京畿大學 土木工學科 助教授(工博)

\*\*延世大 工大 土木工學科 教授(工博)

또한 하천의 기점에서 종점까지의 직선 거리에 대한 유로 연장의 비인 유로형상계수( $L_f$ )를 처음으로 제안 했으며, 유로 연장에 대한 만곡부연장의 비인 Tortuosity( $T$ )와 더불어, 유로연장, 사행경사, Horton의 유역형상계수 등과 상관분석 및 복합회귀분석을 시행한 결과  $L_f$ 와  $T$ 가 하천사행의 한 척도가 됨을 밝혔다.

사행 유로부와 직유로부에서 유속과 수면경사, 하상굴곡도(degre of sinuosity)를 비교 검토한 결과, 사행 유로부가 직유로부 보다 하상의 안정성이 높음을 알았다.

하천 수계별 사행과장과 사행대의 상관식은 자기 선형관계와 역함수관계로 대별되었으며, 남한강 수계의 경우에는 선형관계, 낙동강, 금강 수계의 경우에는 역함수 관계식을 제시하였다.

## 1. 서 론

“meander”라는 말은 아시아에서의 꼬불꼬불한 하천(winding-river)을 가리키는 그리스의 “maianares”라는 단어에서 유래 되었다는 설과, 소아시아 서부에서 Aegen sea에 유입되는 Meander river가 사행성질을 잘 나타내고 있어 붙여진 이름 이라는 설 또는 터키의 Buyuk Menderes river를 어원으로 주장하기도 한다.

자연하천의 전형적인 특징의 하나가 사행성향이며, 이러한 사행현상은 유심의 변천을 동반하여 향로 수심의 유지곤란, 취수구의 기능 저하, 제방의 파괴, 국소세굴에 따른 하천 재해등 하천공학상의 제문제와 밀접한 관계가 있다.

우리나라에서도 최근 매년 되풀이되는 수해와 개수 하천의 제방 유실이 여러가지 원인이 있겠으나, 하도 설계시 사행법칙을 과소 평가하지 않았나 하는 관점에서, 우리나라 하천의 사행특성을 구명하여 하천 개수 계획, 또는 수로의 유지관리면에 있어서 기술적 검토에 도움을 주고자 본 연구를 착수하게 되었다.

또한 지금까지 연구된 사행특성구명에 필요한 인자들과 함께 고려되어야 할 새로운 인자들의 제안에 첫째 목표를 두었고, 둘째는 이미 사용중인 특성 인자들과 상관분석을 시도하므로써 제안된 인자들의 당위성을 증명하여 사행 특성을 보다 명확히 구명하는데 그 목표를 두었다.

## 2. 연구방법

본 논문에서는 regime theory에 입각하여 대상하천의 사행특성인자간의 상관관계를 구명하여 사행 특성을 분석하였다. 이미 잘 알려져 있는 사행과장의 개념을 사용하여 사행대 및 하곡과의 관계를 분석하였고 일반적으로 기존의 조사 연구가 규칙적인 사행유로의 관계식 구명에 국한되어 실제로는 불규칙 구간이 대부분인 하천 만곡부의 관계를 밝히므로써, 보다 실용성을 높이기 위하여 본 연구에서는 광의의 사행개념으로 모든 불규칙 만곡부를 포함 시켰다. 또한 기구와 형상면에서 복잡한 사행을 보다 세밀하게 분석하기 위하여

새로운 특성인자로서 Tortuosity와 더불어 유로형상계수를 제안하여 기존 특성인자들과 상관분석을 행하였다.

Nemec, J.는 수문 및 형태학적 상관분석에서 상관계수  $r=0.60$  이상이면 양호한 상관관계라고 밝히고 있으며 본 연구에서도 상관계수 0.60 이상인 상관식들을 제시하였다.

연구 대상 하천은 우리나라의 유로연장이 30km 이상인 67개 하천을 택하여 도상 조사를 행하였으며, 도상 조사 및 실측시 개수부와 저수지 등으로 사행이 억제되거나 본래의 사행 특성인자 구성에 영향을 미치는 구간은 제외 하였다.

본 연구 대상에서 제외된 유로연장 30km 이하의 소하천에 대하여는 1 : 25,000 지형도상의 조사로는 자료가 불충분하며, 실측이나 대축척의 지형도에 의하여 조사 분석하므로써 그 정도를 높일 수 있다.

본 연구의 적용 범위는 유로연장 30km 이상의 하천에 한하며 연구 결과에서 얻어진 관계식은 하도 설계시 법선계획에 사용되고, 특히 Tortuosity 및 유로형상계수가 크거나 사행경사가 큰 대상 하천에 적용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

총자료 수는 4,580개에 달했고 자료의 분석을 위하여 S.S.P. (Scientific Subroutine Package)의 program을 사용하였다.

## 3. 사행 특성인자

### 가. 사행 형상의 기하학적 인자.

사행을 형상면에서 그 특성을 분석하기 위해서 사행과장( $M_l$ )이 가장 중요한 인자로서 포함되어야 함은 잘

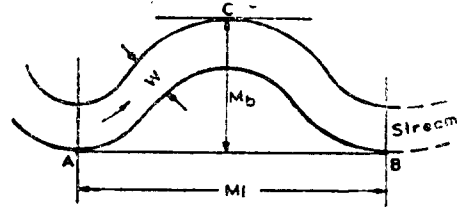


그림 3-1  $M_l$ 과  $M_b$ 의 정의

알려져 있는 바이며 사행대( $M_b$ ) 및 하쪽( $W$ )과 함께 많은 관계식들이 발표되어 왔다.

사행의 기하학적 인자로 곡률반경, 만곡중심각, 사행축의 직선거리 등이 사용되고 있으나, 가장 합리적으로 모든 불규칙 사행에 통용될 수 있는 인자는 사행파장과 사행대이며, 여러가지 특성인자들의 분석에 의하여 사행현상이 구명되고 있지만 사행파장과 사행대의 관계가 하천별로 밝혀지므로서 하도설계시 검토 자료로 사용될 수 있는 것이다.

나. 사행 계수와 하상 굴곡도

(1) 사행계수( $M_f$ )

규칙적 사행의 한 척도인 사행계수는 다음식에 의한 다.

$$M_i = M_f \sqrt{R \cdot W} \dots\dots\dots(3-1)$$

여기서  $M_i$ : 사행과장

$M_f$ : 사행계수

$R$ : 수리 평균심

$W$ : 하폭

$M_f$ 는 대하천의 경우 200~300 전후 소하천의 경우 100 전후로 알려져 있다.

(2) 하상 굴곡도(Degree of Sinuosity)

유로의 최심선의 연장에 대한 수면투영길이의 비로서 하상의 종단 굴곡의 정도를 표시하는 특성인자로서 하상굴곡도  $D.S$ 는 다음 식으로 표시 된다.

$$D.S = \frac{L_{sf}}{L_b} \dots\dots\dots(3-2)$$

여기에  $L_b$ =최심선의 연장

$L_{sf}$ =최심선에 대한 수면투영 길이

다. 새로운 사행 특성인자의 제안

본 논문에서는 규칙적인 만곡 뿐만이 아니라 직선 수로가 아닌 모든 만곡부를 연구대상으로 사행을 분석했으며, 사행특성을 보다 명확히 구명하기 위하여 한 하천이 기점에서 종점에 이르는 동안 어떤 경로로 대소규모의 만곡을 이루며 유하 하였는지가 정량적으로 먼저 구명되어야 할 것으로 판단되어 그 parameter로써 유로형상계수를 제안했으며, 한하천이 전 유로연장 중에서 얼마 만큼의 만곡부를 포함하고 있는지를 표시하는 Tortuosity를 제안하여 4장에서 형태학적 특성인자들과 상관 분석을 행하였다.

$$T = \frac{L_m}{L} \dots\dots\dots(3-3)$$

여기서  $L_m$ : 만곡부 연장

$L$ : 유로연장

하천이 종점에 이르는 경로는 하천의 유역형상에 따라 차이가 있다. 즉, 기점에서 종점까지를 직선으로

흐르지 않고 사행을 이루며 유하하는 각 하천들의 유로특성을 표시하는 무차원의 유로형상계수( $L_f$ )를 식 (3-4)로 제안하였다.

$$L_f = \frac{L}{L_s} \dots\dots\dots(3-4)$$

여기서  $L$ : 유로연장

$L_s$ : 기점에서 종점까지의 직선거리

또한 하천사행의 특성인자로 사행경사( $M_s$ )를 제안하여 식 (3-5)로 정의하였다.

$$M_s = \frac{M_b}{M_i} \dots\dots\dots(3-5)$$

4. 사행 특성의 통계적 분석

4.1 Tortuosity와 사행특성인자간의 상관성

유로연장에 대한 만곡부 연장의 비인 Tortuosity를 우리나라 하천에서 구하여 하천별 사행정도를 구명하여 본 바 5대 하천의 경우 낙동강 0.846, 남한강 0.845, 금강 0.827, 섬진강 0.704, 영산강 0.689의 순이었으며 나머지 대상 하천의 Tortuosity는 표 4-1에 수록하였다.

여기서 직선 유로의 구분은 자연하천에서 기하학적으로 완전한 직선수로만 존재하기 어렵기 때문에  $\frac{M_b}{M_i}$ 가 0.1 이하인 부분을 직선 유로로 간주하여 상대적인 비교치로서 Tortuosity를 구했음을 밝혀둔다.

4.1.1 Tortuosity와 유로연장

5대 하천의 유로연장과 Tortuosity는 높은 상관 관계가 있음을 그림 4-1에서 알 수 있고 Tortuosity는 유로연장에 비례하며 사행하천의 중요한 척도임이 분명하다.

표 4-1 사행특성인자 (67개 하천)

수 계	하 천 명	L(km)	F	T	$L_f$
한 강	본 류	488.2	0.106	0.843	1.63
	북 한 강	320.8	0.104	0.730	2.68
	남 한 강	369.4	0.090	0.803	3.10
북한강	홍 천 강	140.8	0.078	0.780	2.20
	가 평 천	56.7	0.094	0.875	1.89
	수 입 천	55.5	0.195	0.745	1.77
	조 종 천	39.1	0.171	0.848	1.69
남한강	평 창 강	145.5	0.083	0.845	2.60
	달 천	125.2	0.102	0.822	2.66
	섬 강	101.5	0.144	0.811	1.79
	제 천 천	69.3	0.112	0.757	1.91
	오 대 천	58.5	0.132	0.679	1.57
	송 천	56.4	0.110	0.707	1.91

	팔형천	56.2	0.092	0.919	2.02
	옥동천	50.7	0.196	0.769	1.76
	동대천	48.5	0.099	0.599	1.87
	동남천	48.1	0.097	0.615	1.56
	혹천	42.5	0.172	0.798	1.34
	북하천	37.3	0.218	0.630	1.44
	양화천	32.1	0.176	0.292	1.34
낙동강	본류	511.8	0.090	0.846	2.73
	남강	193.7	0.092	0.750	2.51
	금호강	118.4	0.149	0.707	2.14
	위천	117.5	0.102	0.684	2.34
	황강	116.9	0.097	0.780	2.91
	반변천	116.1	0.146	0.643	2.31
	내성천	107.1	0.158	0.576	1.70
	밀양강	101.0	0.142	0.902	2.40
	감천	76.6	0.174	0.770	1.42
	회천	73.2	0.146	0.585	1.74
	덕천강	53.0	0.148	0.792	1.66
	미천	147.2	0.174	0.529	1.35
	신반천	35.7	0.153	0.710	1.43
	백천	34.9	0.237	0.726	1.22
	광로천	32.4	0.147	0.328	1.36
양산천	31.7	0.245	0.641	1.44	
금강	본류	401.4	0.061	0.827	5.75
	미호천	89.2	0.234	0.538	1.29
	갑천	73.7	0.122	0.525	1.68
	보청천	65.5	0.116	0.648	2.55
	초강	64.25	0.165	0.778	2.37
	논산천	57.1	0.162	0.590	1.27
	병천	48.31	0.154	0.774	1.62
	유동천	44.35	0.106	0.789	1.53
	지천천	44.00	0.122	0.709	2.74
	남대천	43.00	0.247	0.834	1.79
	유구천	40.00	0.178	0.456	1.93
	무심천	34.18	0.113	0.757	2.04
초평천	34.56	0.149	0.728	1.80	
조천	32.99	0.130	0.855	3.07	
영산강	본류	124.4	0.181	0.689	1.71
	황룡강	59.2	0.163	0.508	2.31
	지석천	50.1	0.264	0.705	1.68
	고막원천	39.7	0.137	0.663	1.25
석진강	본류	225.3	0.096	0.704	1.76
	요천	60.4	0.130	0.510	1.20
보성강	본류	128.85	0.083	0.872	1.83
	동북천	53.55	0.133	0.761	2.42
삽교천	본류	61.0	0.434	0.591	1.57

	곡교천	51.3	0.199	0.471	1.33
	무한강	51.0	0.174	0.600	1.21
안성천	본류	58.1	0.494	0.620	1.68
	진위천	50.7	0.298	0.629	1.85
만경강	98.5	0.165	0.622	1.53	
영산강	62.2	0.302	0.558	1.42	
남대천(강릉)	51.25	0.101	0.618	1.41	
오십천(삼척)	52.0	0.138	0.720	1.86	

남한강과 낙동강 수계지류들의 유로연장과 Tortuosity도 상당한 상관 관계가 있으며 식(4-1), 식(4-2)과 같다.

$$T = 0.31L^{0.40} \quad (r = 0.65) \dots\dots\dots(4-1)$$

$$T = 0.06L^{0.51} \quad (r = 0.75) \dots\dots\dots(4-2)$$

금강의 경우  $r = 0.45$ 로 상관 관계가 높지 않았다.

#### 4.1.2. Tortuosity와 유역형상계수

유역형상계수는 평균년유출율과 상관관계가 높음은 이미 알려져 있으며 5대 하천의 자료에 의하면 Tortuosity와도 상당한 상관 관계가 있음을 그림(4-2)에서 볼 수 있다.

그림에서 유역형상계수가 "0"에 접근하면 즉 유역 면적에 비하여 유로연장이 매우 클때는 Tortuosity는 필연적으로 "1"에 접근함을 알 수 있다.

#### 4.1.3. 하천 연장비( $e^d$ ) 및 하천 함몰도( $e^f$ )와 Tortuosity

$e^d, e^f$ 의 값과 Tortuosity의 관계를 남한강 수계에서 분석한 결과는 식(4-3), 식(4-4)와 같으며 Tortuosity는 하천의 형태학적특성인자라도 상당한 상관관계가 있음을 의미 한다.

남한강 수계지류

$$e^F = 3.74^{1.44} \quad (r = 0.76) \dots\dots\dots(4-3)$$

$$e^D = 0.17 - 0.79L_n \quad T(r = 0.78) \dots\dots\dots(4-4)$$

#### 4.1.4. 복합 회귀 분석

다시 유로연장과 유역형상계수 및 Tortuosity를 복합회귀분석 해본 결과는 다음 식과 같다.

5대 하천

$$L = -1083.53 + 1871.79 T - 370.67F \quad (r = 0.97) \dots\dots\dots(4-5)$$

남한강 수계지류

$$L = 39.20 + 93.14 T - 288.19F \quad (r = 0.64) \dots\dots\dots(4-6)$$

낙동강 수계지류

$$L = 133.81 + 90.30 T - 721.77F \quad (r = 0.75) \dots\dots\dots(4-7)$$

상기식들에서 알 수 있는 바와 같이 유로연장에 비

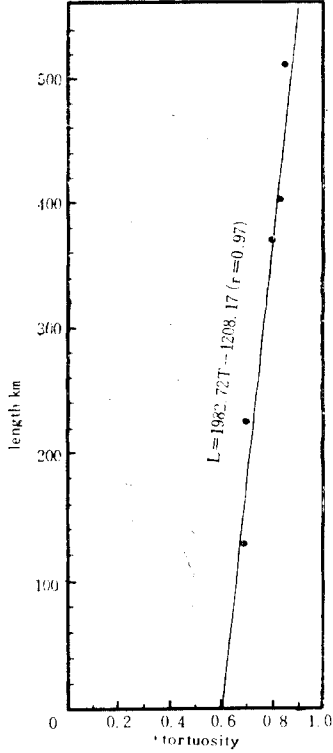


그림 4-1 유로연장과 Tortuosity간의 상관도

배하여 상관계수가 높았으며 참고적으로 금강의 경우는  $r=0.57$ 이었다.

4.2. 유로형상계수와 사행특성인자의 상관성

4.2.1. 유로연장과 유로형상계수

유로연장(L)과 유로형상계수( $L_f$ )의 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

5대하천의 경우 :  $L=110.124L_f^{0.98}(r=0.86) \dots (4-8)$

남한강 수계지류 :  $L=21,234L_f^{1.80}(r=0.87) \dots (4-9)$

낙동강 수계지류 :  $L=24.664L_f^{1.83}(r=0.86) \dots (4-10)$

금강 수계의 경우는  $r=0.39$ 로 상관성이 높지 않았다.

4.2.2. 유로형상계수와 유역형상계수

유로연장의 함수들인 유역형상계수(F)와 유로연장계수( $L_f$ )의 상관관계를 분석해본 결과 식(4-11), (4-12), (4-13)을 얻었다.

5대하천의 경우 :  $F=0.19L_f^{-0.65}(r=0.82) \dots (4-11)$

남한강 수계지류 :  $F=0.23L_f^{-1.03}(r=0.71) \dots (4-12)$

낙동강 수계지류 :  $F=0.24L_f^{-0.80}(s=0.80) \dots (4-13)$

금강 수계의 경우는  $r=0.40$ 으로 상관계수가 높지 않았다.

4.2.3. 유로형상계수와 Tortuosity

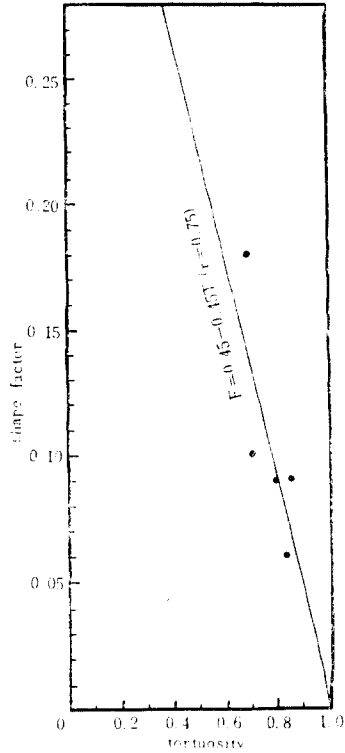


그림 4-2 유역형상계수와 Tortuosity간의 상관도

5대 하천의 경우 유로형상계수( $L_f$ )와 Tortuosity(T)를 상관분석한 결과 식(4-14)로 표시 되었다.

$T=0.66L_f^{0.15}(r=0.79) \dots (4-14)$

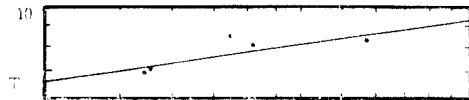


그림 4-3 5대하천의 T와  $L_f$  상관도

4.2.4. 복합회귀 분석

유역형상계수(F)와 Tortuosity(T) 유로형상계수( $L_f$ )의 복합회귀분석 결과 표(4-2)와 같은 상관식을 얻었다.

표 4-2  $L_f$ , T 및 F간의 상관식

하 천	상 관 식	상관 계수
5 대 하 천	$L_f = -2.29 + 8.81T - 14.58F$	0.73
남한강지류	$L_f = 1.76 + 1.03T - 4.96F$	0.75
낙동강지류	$L_f = 22.23 + 1.41T - 8.59F$	0.84

금강수계의 경우  $r=0.52$ 로 상관계수가 높지 않았다. 유로연장( $L$ ) 유로형상계수( $L_f$ ) Tor-uosity간의 복합 회귀분석 결과는 표(4-3)와 같다.

표 4-3  $L, L_f$  및  $T$ 간의 상관식

하 천	상 관 식	상관 계수
5 대 하천	$L = -1439.6 - 20.55L_f + 2362.25T$	0.98
남한강지류	$L = -70.96 + 98.77L_f + 17.27T$	0.87
낙동강지류	$L = -192.47125.5L_f + 90.99T$	0.66
금강지류	$L = 13.65 + 77.64L_f - 158.58T$	0.86

유로연장( $L$ ) 유로형상계수( $L_f$ ), 유역형상계수( $F$ )와의 사이에 복합회귀분석 결과는 표(4-4)와 같다.

표 4-4  $L, L_f$  및  $F$ 간의 상관식

하 천	상 관 식	상관 계수
5 대 하천	$L = 574.56 + 3.27L_f - 2489.61F$	0.77
남한강지류	$L = -87.24 + 78.26L_f + 84.04F$	0.87
낙동강지류	$L = -13.81 + 104.85L_f - 510.46F$	0.66
금강지류	$L = -109.75 + 73.63L_f + 143.1F$	0.84

4.2.5. 유로형상 계수와 사행경사

표(4-5)는 5대 하천의 유로형상계수와 함께 사행의 평균 경사를 보여 준다.

표 4-5. 5대 하천의  $L_f$ 와  $M_s$

하 천 명	$L_f$	$M_s$
남한강	2.60	0.31
낙동강	2.73	0.31
금강	5.75	0.42
영산강	1.71	0.28
섬진강	1.76	0.30

금강의 경우 유로형상 계수가 다른 하천들의 2배 이상의 값을 나타내고 있는 바, 이와 같은 사실은 표(4-5)에서 볼 수 있는 바와 같이 필연적으로 사행의 평균경사가 큼을 알 수 있고 이들의 관계를 상관 분석한 결과 선형관계가 성립하여 높은 상관계수를 보여줌을 식(4-15)와 그림(4-4)에게 알 수 있다.

즉 유로형상계수는 사행경사에 비례하며, 역으로 유로형상계수가 크다는 것은 사행경사가 증대되어야 함을 의미한다.

$$L_f = -6.71 + 29.69M_s (r=0.98) \dots\dots\dots (4-15)$$

4.3. 사행과장, 사행대, 하폭관계

사행의 계량형태학적 연구에서 사행과장이 가장 중요한 인자로서 포함되어야 함은 잘 알려져 있는 바이다.

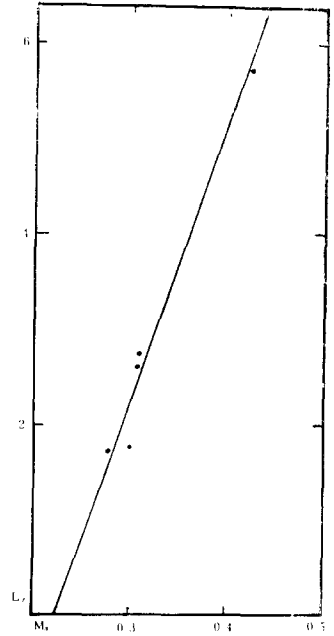


그림 4-4 5대하천의  $L_f$ 와  $M_s$  상관도

며 본 연구에서도 사행과장( $M_l$ )과 사행대( $M_b$ )등의 관계에 중점을 두어 분석했다.

일반적으로 이들의 관계는 멱 함수 및 선형관계로 성립되며 우리나라 5대하천의  $M_l$ 과  $M_b$ 의 관계를 상관분석한 결과는 다음표(4-6)와 같다.

표 4-6 5대하천의  $M_l$ 과  $M_b$ 의 상관식

하 천 명	상 상 식	상관 계수
남한강	$M_l = 1102.54 + 1.81M_b$	0.77
낙동강	$M_l = 19.80M_b^{0.72}$	0.72
금강	$M_l = 20.47M_b^{0.68}$	0.75
영산강	$M_l = 51.07M_b^{0.56}$	0.81
섬진강	$M_l = 72.35M_b^{0.53}$	0.80

사행과장( $M_l$ )과 하폭( $W$ )의 상관관계는 남한강, 낙동강, 금강에서 비교적 양호한 관계를 보여 주며 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \text{남한강 } M_l &= 1104.90 + 20.82W (r=0.87) \\ \text{낙동강 } M_l &= 251.08W^{0.51} (r=0.87) \\ \text{금강 } M_l &= 437.24W^{0.40} (r=0.66) \end{aligned} \right\} \dots\dots (4-16)$$

사행대( $M_b$ )의 하폭( $W$ )의 상관분석 결과는 남한강, 낙동강, 영산강에서 비교적 양호한 관계를 보여 주며 남한강, 영산강의 경우 선형관계가 성립함을 볼 수 있다.

표 4-7. 사행특성인자( $M_i, M_b, W$ )간의 회귀 계수

수 계	하 천 명	a	b	c	d	e	f
북 한 강	홍 천 강	*124.57	*0.42				
	가 평 천	391.67	15.3	453.59	36.08	210.72	15.97
	수 입 권	*38.76	*0.55				
	조 증 천	846.62	0.94	120.34	16.94	761.89	22.07
남 한 강	본 류	1102.54	1.81	1104.90	20.82	554.46	6.35
	평 창 강	655.64	1.19				
	달 천	642.41	1.47	*234.64	*0.50		
	섬 강	1344.64	1.24				
	제 천 천	728.22	0.94				
	오 대 천	813.97	0.96				
	송 천	396.39	1.21				
	골 형 천	*115.06	*0.38			*63.94	*0.67
	옥 동 천			*11.25	*1.31		
	동 대 천	538.35	0.91				
혹 천	842.74	1.83	809.98	57.51	47.89	28.79	
북 하 천	153.00	3.37					
양 화 천	-196.64	4.39					
낙 동 강	본 류	*19.80	*0.72	*251.08	*0.54	*170.54	*0.39
	남 강	*200.71	*0.41				
	금 호 강	*87.30	*0.50	*139.88	*0.69		
	위 천	*125.99	*0.42				
	황 강	255.55	0.30	*600.50	*0.30		
	내 성 천	420.41	2.18	554.84	18.01		
	밀 양 강	809.44	1.67	*128.64	*0.68		
	감 천	*348.56	*0.30				
	회 천	*25.55	*0.64	*46.54	*0.91		
	덕 천 강	*63.90	*0.54				
	미 천	812.65	0.87				
	신 반 천	*17.01	*0.65				
	백 천	*55.51	*0.57				
	광 로 천	381.63	1.60				
양 산 천	*5.38	*1.00	*19.44	*1.15	66.04	5.31	
금 강	본 류	*20.47	*0.68	*437.24	*0.40		
	미 호 천	*37.85	*0.66	305.52	21.40		
	갑 천	*85.79	*0.47	844.22	23.16		
	보 칭 천	*59.16	*0.51				
	초 강	536.44	1.67	*176.14	*0.56		
	논 산 천	*25.62	*0.71	*8.86	*1.21		
	병 천	*81.46	*0.45				
	남 대 천	*71.61	*0.47				
	초 명 천	635.40	0.99	*96.21	*0.80	*19.57	*1.09
무 심 천	*59.99	*0.54					
영 산 강	본 류	*51.07	*0.56			315.93	2.94
	황 룡 강	1005.59	1.44				

	지 석 천	552.96	2.99				
	교 막 원 천	*9.76	*0.80				
섬진강	본 류	*72.35	*0.53	*473.77	*0.40		
	요 천	372.14	3.82	*43.55	*1.03	*5.32	*0.19
보성강	본 류	*64.36	*0.50				
삼교천	본 류	108.18	3.73				
	목 교 천	*62.71	*0.54				
	무 한 강	*55.44	*0.55				
안성천	본 류	841.46	1.43	765.29	10.71	-102.11	8.02
	진 위 천	*90.55	*0.45				
만경강		*37.48	*0.62	*280.62	*0.44	232.15	4.58
형산강		*57.77	*0.56	*22.77	*1.11		
남대천(강릉)		160.12	3.60	407.08	42.22	100.72	10.41

\*regression coefficient of powercurve

남한강  $M_b = 554.46 + 6.35W (r=0.62)$  —  
 낙동강  $M_b = 170.54 - W^{0.39} (r=0.63)$  — ..... (4-17)  
 영산강  $M_b = 315.93 + 2.94W (r=0.77)$  —  
 연구대상하천 즉 유로연장 30km 이상의 하천에서 분석한 결과는  $r=0.60$  이상의 다음 식으로 표시된 회귀계수를 표(4-7)에 수록하였다.

$$\left. \begin{aligned} M_i &= *aM_b^{*b} \\ M_i &= a + bM_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-18)$$

$$\left. \begin{aligned} M_i &= *cW^{*d} \\ M_i &= c + dW \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-19)$$

$$\left. \begin{aligned} M_b &= *eW^{*f} \\ M_b &= e + fW \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-20)$$

67개 대상하천의 모든  $M_i$ 와  $M_b$ 의 자료를 상관 분석한 결과 식(4-21)를 얻었으며 수계 별자료분석결과 다음 식과 같다.

67개 하천 (30km 이상)

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 750.19 + 1.57M_b (r=0.72) \\ M_i &= 1068.28 + 13.18W (r=0.67) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-21)$$

남한강(본류 및 지류)

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 455.21 + 1.82M_b (r=0.79) \\ M_i &= 704.47 + 22.25W (r=0.76) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-22)$$

북한강(지류)

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 743.45 + 1.19M_b (r=0.73) \\ M_i &= 288.32W^{1.19} (r=0.67) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-23)$$

금강(본류 및 지류)

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 737.94 + 1.38M_b (r=0.63) \\ M_i &= 1013.75 + 13.51W (r=0.73) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-24)$$

낙동강 본류 및 지류

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 41.07M_b^{0.59} (r=0.71) \\ M_i &= 1200.07 + 13.97W (r=0.72) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-25)$$

영산강(본류 및 지류)

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 20.15M_b^{0.70} (r=0.80) \\ M_i &= 268.31 + 3.11W (r=0.62) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-26)$$

기타

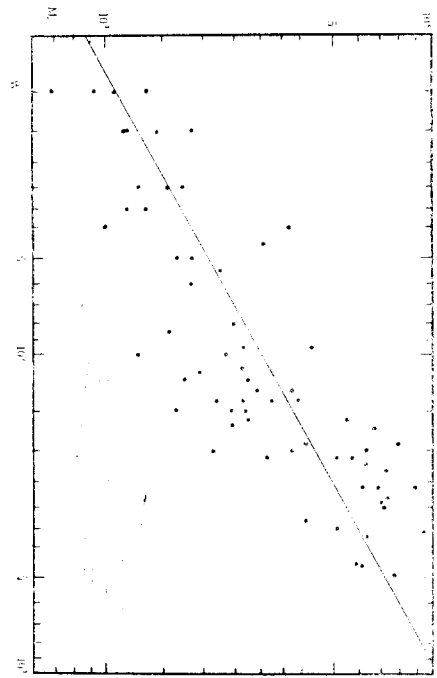
$$M_i = 832.81 + 1.73M_b (r=0.76) \dots\dots\dots (4-27)$$


그림 4-5  $M_i$ 와  $W$ 의 상관도(낙동강)

4.4. 사행특성치와 수리량과의 상관성

일반적으로 사행과정, 사행대 및 하류는 유량 Q의 평방근에 비례하는 것으로 알려져 있으며 사행하천의 유



량측정자료는 기록이 없어 직접 실측을 행하였다. 대상하천은 남한강 지류인 곤지암천을 택했으며 이들인자와 유량의 상관분석 결과는 다음과 같다.

$$M_I = 271.25Q^{0.49} \quad r = 0.68 \dots\dots\dots(4-28)$$

$$M_b = 86.42Q^{0.47} \quad r = 0.56 \dots\dots\dots(4-29)$$

$$W = 3.08Q^{0.70} \quad r = 0.92 \dots\dots\dots(4-30)$$

이들의 상관분석결과, 상관계수가 그리 높지 않은 것은 자료수가 적은 것과 하천 자체의 불규칙성에 기인하는 것으로 사료된다. Dury는 유로형성유량을 재현기간 1.58년의 홍수유량으로 보고 있으며 Blench는 지배유량을 재현빈도 2년에 해당하는 홍수유량으로 보고 있으나, 본 대상하천의 홍수 유량에 대한 기록치가 없어 현지주민의 경험적 홍수위를 택하여 실측을 행하였으므로 개략적인 관계식밖에 얻을 수가 없었다.

또한, 곤지암천에서 실측한 자료에 의하면 만곡부와 직류부의 유속과 수면경사의 상관 관계를 plotting한 결과는 그림 4-6과 같으며 만곡부에서 높은 상관성을 보이고 있음은 사행하천은 직류부보다 수리학적 변수가 조정되고 안정성이 높음을 보여 준다.

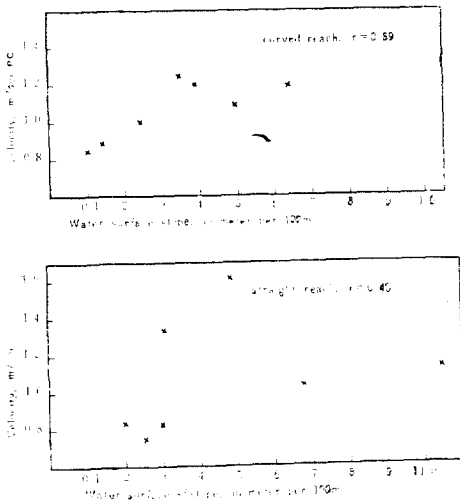


그림 4-6 곤지암천의 만곡부와 직류부에서의 유속과 수면경사의 상관도

4.5. 사행계수와 하상 굴곡도

4.5.1. 사행계수( $M_f$ )

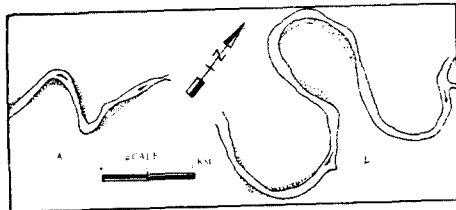


그림 4-7 사행형상(남한강, 제원군)

남한강 상류부(그림 4-7) 제원군과 단양군 지역에서 발견된 규칙적 사행유로에서 구한 사행계수  $M_f$ 는 표 4-8과 같다.

표 4-8. 남한강의 사행계수(제원군, 단양군)

A	$M_I = 2121$ $R = 1.67$ $W = 47.3$	$M_f = 238.9$	제원군 사거리
B	$M_I = 3234$ $R = 2.57$ $W = 52.0$	$M_f = 280.0$	단양군 노동리

4.5.2. 하상 굴곡도

하상의 종단굴곡의 정도를 표시하는 하상 굴곡도(D. S)를 곡류로부와 직류로부에서 각각 구해본 결과 표 4-9와 같다. 그림 4-8의 대상 하천은 남한강 상류부 제원군 지역이었으며 자료는 한강 하상변동조사 보고서에서 획득하였다. 표 4-9에서 알 수 있듯이 곡선부가 직선부보다 하상 굴곡도가 1936년이나 1966년을 막론하고 작은 값을 갖는 것은 사행하천이 보다 하상의 굴곡이 심하지 않은 안정하상을 유지하고 있음을 보여 준다.

또한, 그림에서 1936년 1966년 30년 사이의 하상변동 결과에서는 곡류부에서는 일률적인 침식이 있었음을 보여 주나, 직류부에서는 침식과 퇴적이 동시에 일어나는 변동하상임을 알 수 있다.

표 4-9. 하상굴곡도(남한강, 제원군)

하천형상 연도	직 유 로 부	곡 유 로 부
1936	$l = 4,066$ $D.S = 1.235$ $l_b = 5,020$	$l = 3,361$ $D.S = 1.10$ $l_b = 3,700$
1966	$l = 4,066$ $D.S = 1.102$ $l_b = 4,480$	$l = 3,361$ $D.S = 1.04$ $l_b = 3,510$

사행특성인자들의 상관분석결과 직류부 보다 사행유로부가 하상의 세굴이나 침식면에서 안정성이 높으며 자연하천 자체의 유로형상계수, Tortuosity, 사행경사가 클수록 사행과장과 사행대의 관계 즉 사행성향이 하천공학적인 면에서 하도설계시, 필수적으로 고려되어야 할 것으로 사료 된다.

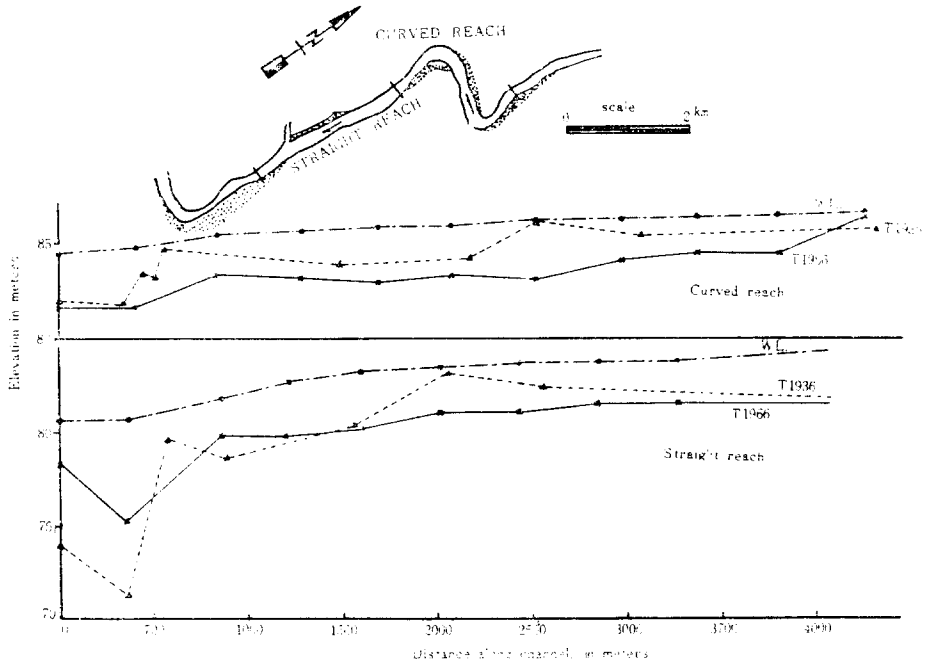


그림 4-8 사행유로부와 직유로부의 종단도(남한강, 제원군)

### 5. 결 론

자연 하천의 한 특성인 사행현상은 하도유지 및 재래 방지의 관점에서 필히 구명되어야 하며 우리나라 하천의 개수율이 30%를 상회하는 현시점에서, 자료의 확보와 그 연구, 조사의 시급성이 요망된다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 사행특정 분석에서 필수적인자인 사행과장( $M_l$ )과 사행대( $M_b$ )의 관계가 사행과장( $M_l$ )과 하폭( $W$ ), 사행대( $M_b$ )와 하폭( $W$ )의 상관관계보다 상관성이 높았다. 즉 대상하천의 86%가  $M_l$ 과  $M_b$ 의 상관계수가 0.60 이상이며  $M_l$ 과  $W$ 는 38%,  $M_b$ 와  $W$ 는 20%만이 양호한 상관관계가 성립했다.

2) 사행과장과 사행대의 수계별 상관분석결과 남한강 수계의 경우 선형관계( $M_l = a + bM_b$ ), 금강과 낙동강은 역함수 관계( $M_l = aM_b^b$ )가 성립했다.

3) 유로연장에 대한 만족부 연장의 비인 Tortuosity( $T$ )를 대상하천에서 구하여 하천별 사행 성향을 구명하였으며, 대상하천의 79%가  $T=0.60$  이상이었으며 유역형상계수( $F$ )와는 역상반의 관계가 있었다.

4) 하도 사행의 한 척도로서 유로형상계수( $L_f$ )를 제안했으며, 5대하천의 다른 사행특성인자들과의 상관관계를 분석한 결과, 유로연장( $L$ )과는 상관계수  $r=0.86$ 이었고, 유역형상계수( $F$ )와는  $r=0.82$ , Tortuo-

sity( $T$ )와는  $r=0.79$ , 사행경사( $M_s$ )와는  $r=0.98$ 의 높은 상관관계를 보였다.

5) 유량과 사행 특성인자  $M_l$ 과  $M_b$ 의 관계를 분석한 결과 유량의 평방근에 비례하였다.

6) 사행유로부와 직유로부에서 유속과 수면경사, 하상굴곡도(Degree of sinuosity)를 비교 검토한 결과, 사행유로부가 직유로부보다 수리학적 변수가 조정되어 있고 하상의 안정성이 높았다.

또한 대상하천의 유로형상계수, Tortuosity 사행경사가 클수록 하천재해 방지의 관점에서 사행과장과 사행대의 관계가 하도설계시 필수적으로 고려되어야 할 것으로 판단 된다.

### 참 고 문 헌

1. Ackers, P., and Charlton, E.G., "Meandering of Small Streams in Alluvium," Hydraulics Research Station. Report No. INT 77, Wallingford, Berkshire, England, Jan. (1970).
2. Bagnold, R.A., Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Brush, L.M. "Flow Resistance in Sinuous or Irregular Channels," U.S. Geol. Survey, Prof. Paper, 282-D, pp.111~34 (1960).
3. Blench. T., Regime problems of rivers formed in sediment, Edited 2nd published by Haieh

- Wen Shen, Fort Collins, U.S.A. 1973. pp. 5~1  
~13
4. Carlstorn C.W., "The relation of free geometry to stream discharge and its geomorphic implications," Am. J. Sci., 263, pp. 864~885, (1965).
  5. Chang, H.H., "Geometry of rivers in regime.," J. Hydraul. Div., A.S.C.E., 105 (HY6), (1979).
  - 6) Ferguson, R.I., "Meander irregularity and wavelength estimation," JHydrol., 2 26. pp. 315~333, (1975).
  7. Friedkin, J.R., "A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers," U.S. Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss., (1945).
  8. Horton, R.E., "Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins-Hydrological Approach to Quantive Morphology," Geol. Soc. of Amer" Vol. 56, pp. 275~370, (1945).
  9. I.C.O.R.D., "Water Resources Research in India," C.B.I.P., New Delhi, p. 38, (1979).
  10. Inglis, C.C., "Meanders and Their Bearing on River Training," The Institution of Civil Engineers, pp. 1~23, (1947).
  11. Langbein, W.B., "Closure on Geometry of River Channels by W. B. Langbein," J. Hydraul. Div., Proceeding. A.S.C.E., (May. 1965).
  12. Leopold, L.B., and Wolman, M.G., "River Channel Patterns: Braided, Meandering, and Straight." U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 282-B, pp. 39~84, (1957).
  13. Leopold, L.B., and Wolman, M.G., "River meanders," Geol. Soc. Am. Bull., 71, pp. 769~794, (1960).
  14. Nemec. J., *Hydrology Engineering*. Mc Graw-Hill., 1973, p. 140.
  15. Paker, G., "On the cause and, characterstic scales of meandering and braiding in rivers," J. Fluid Mech., Part 3, 76, pp. 457~480, (1976).
  16. Quick, M.C., "Efficiency of Air-Entraining Vortex Formation at Water Intake," Journal of Hydraulics Div. A.S.C.E. Vol. 96, No. HY7., Proc Paper 7399, pp. 1403~1416, July. (1970).
  17. Speight, J. G., "Spectral Analysis of meanders of some Australasian rivers," In: J. N. Jennings and J.A. Mabbutt (Ebiters), Landform Studies from Australia and New Guinea, University Press, Cambridge, 1967. pp. 48~63.
  18. Strahler, A. N., "Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis," Amer. J. Sci., 248, pp. 973~696, pp. 800~814, 814, (1950).
  19. 건설부, 하천조사서. 1974. pp. 139~162.
  20. 고재웅, "만곡수로에서의 하상 변동에 관한 연구" 한국수문학회지. 제 8 권 2호. 1975. 12. pp. 75~80.
  21. 대한기술공단, "한강 하상변동 조사 보고서" I - IV 1965.
  22. 윤용남. "위치에너지 개념에 의한 수계의 하천 형태학적 특성분석", 대한토목학회지 제21권, 1973. 6. pp. 95~105.
  23. 윤용남. "한강수계의 하천형태학적 특성과 빈도유량과의 상관성", 대한토목학회지 제21권 1호 1973. pp. 46~59.