

유로 만곡부의 수리 및 계량형태학적 특성

Hydraulic and Morphometric Characteristics of the Channel Bends

송 재 우*

Song, Jai Woo

Abstract

A feature typical of natural rivers is the bend. The purpose of this study is to examine hydraulic and morphometric characteristics in channel bend reach by the deterministic approach.

Cross section shape factor, "As" is suggested for a new characteristic factor of channel bend reach analysis.

The variation of this new factor along the river reach showed the location of the concentration of the force due to the current all over the reach, that is curved or not.

Some general meander factors are used for correlation with new factor suggested, and the applicability of "As" is verified.

The range R/W values are concentrated 2~4, the meaning of this value can be regarded to the warning for bank erosion or breaking.

And this paper dealt with prediction of cross section bed shape variation.

요 지

자연 하천의 전형적인 특성인 하도사행으로 인한 만곡부의 수리 및 계량형태학적 특성을 확정론적 방법으로 구명하였다.

새로운 특성인자로 단면형상계수(A_s)을 제안했으며 하도구간에서의 A_s 의 변화는 모든 유로에서의 수류력의 집중위치를 확인시켜주고 만곡의 영향이 단면형상의 변화에 미치는 영향을 정량적으로 보여주었다.

또한 기존의 사행특성인자와의 상관분석을 통하여 적용성을 입증하였다.

곡률비 R/W이 2-4에 집중되어있고 이는 제방의 침식이나 파제의 가능성이 있음을 보여주는 수치임을 알수있고 횡단면 하상의 변화를 예측할수있는 Bendegom의 식이 본 연구대상 하천에도 적용될수 있음을 밝혔다

* 정희원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

유로만곡부를 포함한 하천 사행에 관한 연구는 지형학 분야와 하천공학 분야에서 동시에 다루어지고 있으며, 세계적으로는 최근에 더욱 활발해지고 있다. 이와 같은 이유는 유출의 문제가 유역의 지형학적 특성을 간과할 수 없는 것 처럼 하천유수와 그 소통능력은 유로의 형태학적 특성을 고려하지 않고는 해결될 수 없기 때문이다.

일반적으로 하천 유로의 변동에 대한 연구는 단기(1-10년), 중기(1-100년), 장기(1-1000년)로 구분하고 있다.

하천공학자의 관심은 단기와 중기에 집중되고 지형학자는 장기적인 유로의 변동성향에 대한 연구가 활발하며, 중기는 양분야가 공통으로 관심을 가지고 연구해야 할 분야로 사료된다.

하천 유로의 만곡 및 사행에 관한 연구는 극심한 사행현상으로 유로의 변화가 심한 인도에서 Inglis⁽¹⁾ 등에 의하여 사행특성인자간의 사행관계식이 발표된 이래, 1945년 미육군 공병단의 대규모 사행실험⁽²⁾과 인도의 UPIRI⁽³⁾ (Uttar Pradesh Irrigation Research Institute) 등에서 모형실험을 통하여 사행특성을 정량적으로 연구하였고 Leopold⁽⁴⁾, Wolman⁽⁴⁾, Langbein⁽⁵⁾, Ferguson⁽⁶⁾, Chang⁽⁷⁾, Schumm⁽⁸⁾, Brice^(9,10), Hickin^(11,12), Begin^(13,14) 등의 연구로 이어지고 있다. 국내에서는 1975년 이후 고재웅⁽¹⁷⁾, 송재우^(18,19), 윤세의⁽²⁰⁾ 등에 의하여 지금까지 10여편의 논문이 발표되고 있을 뿐 아직 미흡한 실정이다. 최근 매년 되풀이 되는 수해와 개수하천의 제방유실이 여러가지 원인이 있겠으나 하도설계시 유로만곡부의 수리학적 특성을 간과하거나 사행법칙을 과소평가하지 않았나 하는 관점에서 본 연구를 착수했으며, 대규모 댐의 축조로 인한 유로의 변화, 50%를 상회하는 하천개수로 인한 자연하천 고유의 유로특성에 관한 자료가 소멸되어가는 시점에서 이 분야의 연구는 시급한 실정이라 판단된다.

본 연구에서는 유동의 결과인 만곡부 단면특성 및 새로운 특성인자의 제안과 함께 곡률반경 등 중횡단의 형태학적 인자를 상관분석하여 그 변화를 예측하고 수리량과의 상관성을 분석하여 하천재해의 원인이 되는 제방붕괴를 예방하거나 하천의 개수

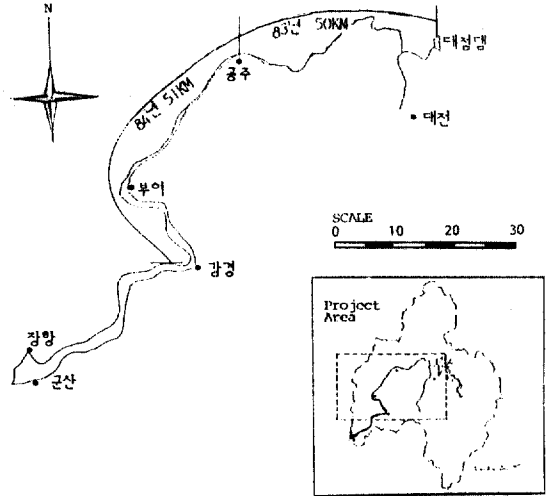


그림 1. 연구대상구간

계획 또는 수로의 유지관리면의 기술적 검토에 기여하는데 그 목적이 있다.

연구대상하천은 전형적으로 불규칙 사행이 잘 발달되어 있고 자료취득이 가능한 구간을 택했으며 1983년과 1984년에 실시된 금강 하류부 하상변동조사 구간⁽²¹⁾인 대청댐으로부터 하류쪽으로 101 km를 선정했다.

연구대상하천의 자료분석을 위하여 1/25000 지형도와 함께 금강하상변동조사보고서 등의 기존보고서의 자료를 주로 이용했다.

2. 유로만곡부의 수리 기하학적 거동

2.1 확정론적 기법

유로 만곡부의 수리학적 거동은 이방성 난류로부터 발생한 2차흐름으로 인하여 나선류가 형성되며, 3차원 동수역학적 해석으로만 해결이 가능한 난해한 과제이다.

만곡부해석 방법에는 유로만곡부의 유동의 결과인 횡단하상형상, 사행과장, 곡률하폭 등 하도의 사행 특성을 나타내는 기하학적 인자들간에, 또는 수리량과의 상관성을 전제로 하는 Regime concept에 의하여 유로만곡부 특성 구명에 접근하는 확정론적 방법과, 만곡부의 하상변동과정이 실제적으로 추계학적 성질을 나타내므로 Einstein 등에 의하여 제

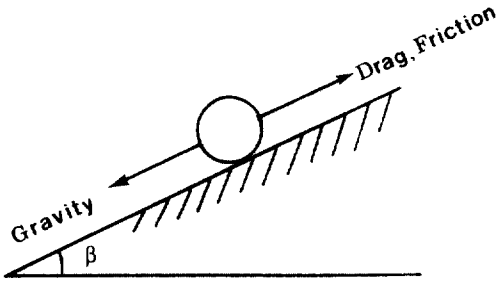


그림 2 하상입자에 작용하는 힘

안된 추계학적 접근방법이 있다.

본 논문에서는 확정론적 접근방법으로 새로운 특성인자의 제안과 함께 기존의 특성인자 및 수리량과의 관계를 분석하였다.

만곡부 하상변동의 과정을 수리학적으로 해석하기 위하여 Bendegom⁽¹⁵⁾과 NEDECO⁽¹⁶⁾의 연구를 이동 하상에 적용하면 다음과 같다.

하상입자에 작용하는 중력에 의한 성분 G_y 는 다음과 식과 같다.

$$G_y = (\rho_s - \rho)g \sin\beta \frac{1}{6} \pi D^3 \quad (1)$$

여기서 β : 하상의 횡방향경사

ρ_s : 입자의 밀도

ρ : 물의 밀도

D : 입자의 직경(D_{50})

수류력 F_y 는 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$F_y = -\rho \frac{h}{r} \left(\frac{n^2}{n+1} \frac{u_*^2}{\kappa} \right) \left[\frac{2(n+1)^2}{n^2(n+2)(n+3)} \right] \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2)$$

여기서 r : 곡률반경

h : 수심

n : 유속분포지수

u_* : 마찰속도

κ : Karman 상수

$G_y + F_y = 0$ 이므로

$$\sin\beta = \frac{3 h u_*^2}{2 g r \Delta D} \alpha$$

$$\text{여기서 } \alpha = \frac{2n^2}{\kappa^2(n+2)(n+3)} \quad (4)$$

$$\Delta = (\rho_s/\rho - 1)$$

경사가 매우 작을 때는 $\sin\beta = \beta = \frac{dh}{dr}$ 이고

$$u_* = \sqrt{gh i_0} \text{ 이므로}$$

$$\frac{dh}{h^2} = \frac{3}{2} \alpha i_0 \frac{dr}{r \Delta D} \quad (5)$$

적분하여 다음식이 된다.

$$\left(\frac{1}{h} - \frac{1}{h_0} \right) = \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \frac{1.5 \alpha i_0 r_0}{\Delta D} \quad (6)$$

여기서 h_0 : 최대수심

r_0 : 최대수심까지의 곡률반경

i_0 : 에너지경사

2.2 한계사행대

이론적으로 가능한 한계 사행대 M_{blim} 는 그림에서 $P=0$ 일때 침수로(cut off)가 발생될 수 있으므로 다음식과 같이 유도할 수 있다.

$$\tan\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{M_b - W - 2R}{R + W/2} = 2 \times \frac{M_b - (2R + W)}{(2R + W)} \quad (7)$$

$$M_{blim} = \frac{2R + W}{2} [\tan\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{2}\right) + 2] \quad (8)$$

$$M_{blim} = (2R + W) + \frac{1}{2} \sqrt{12R^2 - 4RW - W^2} \quad (9)$$

2.3 만곡부의 기하학적 표현

사행유로의 특성을 분석하기 위하여 많은 연구가 거듭되어 오면서 지금까지 사용되어온 유로만곡부에

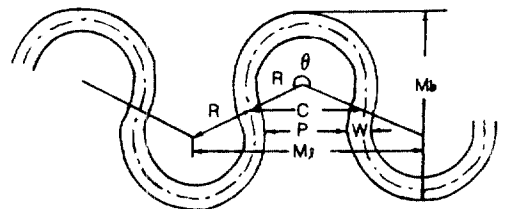


그림 3 이론적인 사행

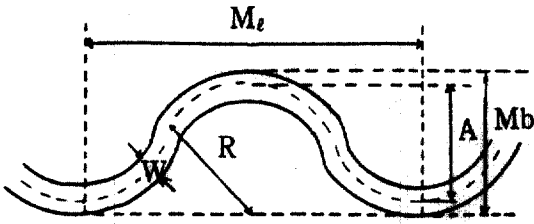


그림 4 만곡부의 기하학적 표현

대한 기하학적 표현방법중 본 연구에 사용된 것은 다음과 같다.

- 1) 사행파장 (meander wave length) M_e , 또는 λ
- 2) 사행대 (meander belt) M_b
- 3) 사행진폭 (meander amplitude) A
- 4) 곡률반경 (radius of curvature) R
- 5) 사행유로장 (meander arc length) $S_1=R\theta$
- 6) 굴곡도 (sinuosity) S

굴곡도는 유로의 축방향 길이 (axial length, or valley length)에 대한 최심선의 길이(length of thalweg)로 정의하는 것이 가장 일반적이다.

3. 만곡부 하도고찰

3.1 한계사행대

곡률반경과 하폭이 주어졌을 때 이론상의 한계사행대는 식(9)에서 계산할 수 있고, 연구대상 하천에서 계산된 결과는 그림 9의 B 구간 No.11~30, $R=3400m$, $W=950m$ 일때 한계사행대 $M_{lim}=13338m$ 로, 실제 최대사행대는 이에 훨씬 못 미치는 2900m 인바 이는 M_b/M_l 로 나타나는 사행경사가 금강 전 구간에서 0.42로 알려져 있으므로 우리나라 하천의 경우 중하류부에서도 자유사행에 제약울 가하는 지형적 조건에 기인될 것으로 사료된다. 그러나 자유사행이 가능한 지역에서는 사행대의 증가로 인한 유로의 이동이 예상된다.

3.2 곡률비, 굴곡도

하폭에 대한 곡률반경의 비율 곡률비 R/W 라 하며 Hickin⁽¹²⁾에 의하면 최빈 곡률비는 2 - 3이고 2.0~4.1 일때 수류력의 집중이 최대가 된다고 한다. 본

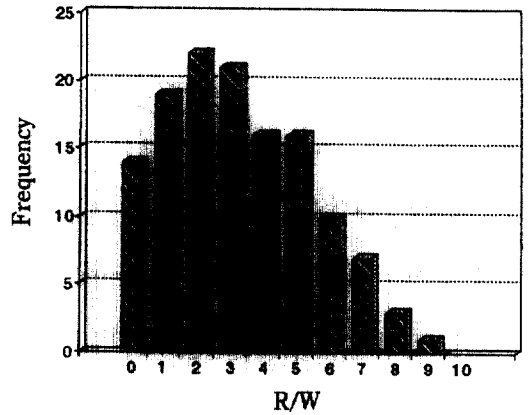


그림 5 곡률비의 빈도분포

연구대상구간의 곡률비의 빈도분포는 그림 5와 같으며 $R/W=2\sim3$ 에서 빈도가 가장 높고 2~4에 집중되어 있는 것을 볼때 수류력의 집중이 예상되어 제방파괴의 위험이 있는 구간이 33.3%에 달 함을 알 수 있다.

현지의 지형에 따라 다르나 자유사행의 우려가 있는 곳은 수류력의 집중에 대비해야 할 것으로 사료된다.

연구대상구간의 굴곡도 S 는 1.1755 이었다. 일반적으로 $S=1.3\sim4.0$ 의 값을 보인다는 연구결과가 있고, 금강 대청댐 하류부 전구간의 굴곡도는 1.1864로 연구대상구간보다는 큰 편임을 알 수 있다. 일반적인 외국의 하천에 대한 연구결과보다 S 가 작은 것은 금강하류부의 사행경사가 작기 때문이다.

3.3 수리학적 변수와 기하학적 인자와의 상관성

일반적으로 사행특성인자인 사행파장 M_l 과 사행대 M_b 는 유량의 평방근에 비례하는 것으로 알려져 있다. Claude Inglis가 인도하천에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.

$$M_l = C_L Q_{max}^{1/2} \quad (C_L: 18\sim42) \quad (10)$$

$$M_b = C_w Q_{max}^{1/2} \quad (C_w = 1/2C_L) \quad (11)$$

여기서 Q_{max} 는 재현기간 100년에 해당되는 홍수유량이다.

연구대상 하천의 경우 다음 관계식이 성립하였다.

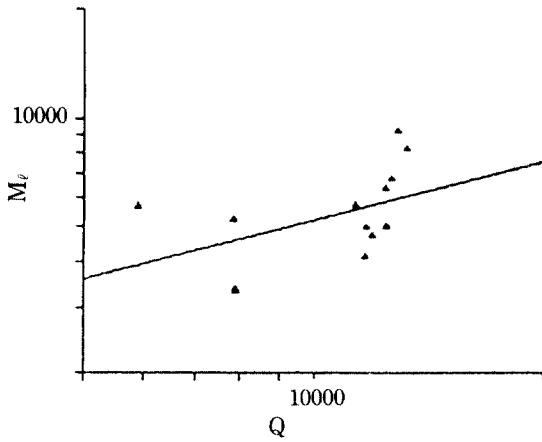


그림 6 사행파장과 유량의 상관도

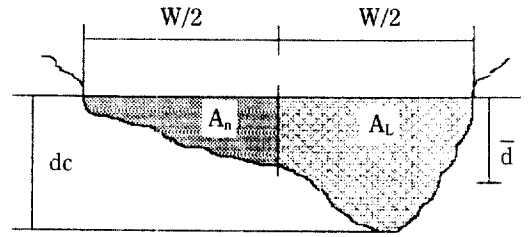


그림 8 단면형상계수 정의도

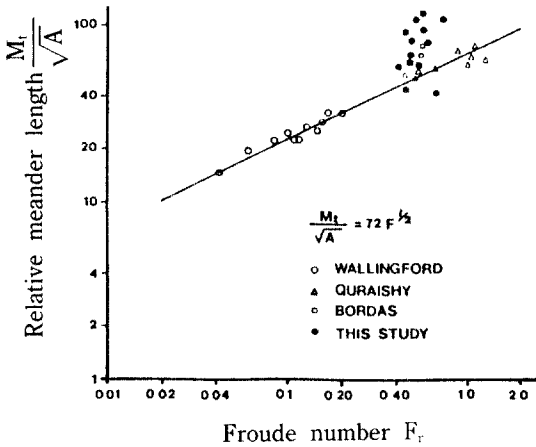


그림 7 사행파장, 유수단면적, Froude수의 관계

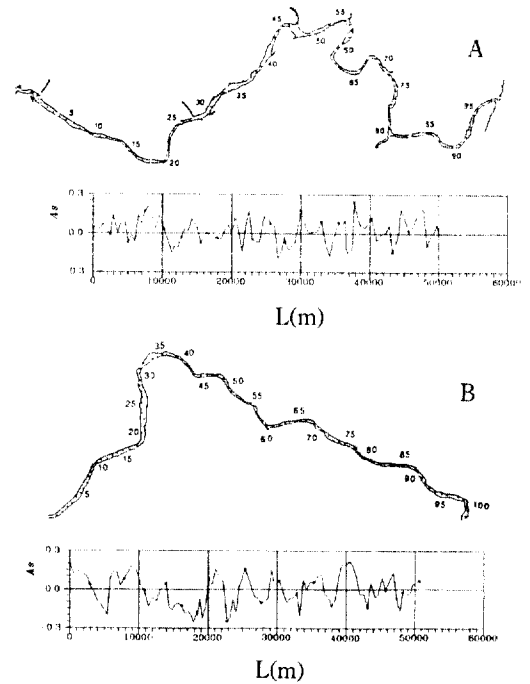


그림 9 연구대상구간 및 As변화

$$M_l = 37.18 Q_{max}^{0.536} \quad (12)$$

사행대와 유량의 관계는 상관성이 아주 낮았다.

사행과장과 유수단면적은 Froude 수와 관계가 있는 것으로 연구되었으며, 본 연구 대상하천에서 상관 분석한 결과를 외국의 관련연구 결과와 비교하여 함께 도시한 결과는 그림 7과 같다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{M_l}{\sqrt{A}} = 104.9 F_r^{0.5} \quad (13)$$

4. 단면 형상의 변화

4.1 새로운 특성인자의 제안

그림 8과 같이 좌우의 횡단면적의 차가 클수록 만곡의 영향이 클 것이며 이를 양적으로 표시하기 위하여 다음과 같은 식을 제안하고 단면형상계수 (A_s)라 정의하였다.

$$A_s = \frac{A_L}{A_L + A_R} - 0.5 \quad (14)$$

$A = A_L + A_R$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$A_s = \frac{2A_L - A}{2A} \quad (15)$$

단면적을 구하기 위한 기준수위는 지배유량이나 만계유량(Bankfull discharge)의 정의에 의한 수위 측정의 곤란으로 기존 하상변동조사보고서를 이용하기 위하여 재현기간 100년에 해당하는 계획홍수위를 기준으로 택하였다.

그림 9은 연구대상하천인 금강 하류부(대청댐 하류에서 101 km까지)의 유로연장에 따른 A_s 의 변화를 나타낸 것으로 $A_s=0$ 선과 만곡점들이 변곡점이 되며, 극대, 극소값부근에 만곡부정점이 존재함을 알 수 있다. 평면도에서는 알 수 없는 수로의 만곡성향도 하상단면의 변화를 나타내는 A_s 변화를 통하여 확인할 수 있다. 즉 평면도 상에서는 직류부으로 보이는 구간에서도 단면형상계수가 극대, 극소값이 발생됨을 알 수 있고 이것은 직류부에서도 수류가 교호로 양안에 집중되는 것을 보여주며, 또한 수로내 사행현상이 있음을 의미하는 것이다.

이것은 또한 평면도상의 정점의 위치와 A_s 의 극대값이 일치하지 않는다는 사실을 입증시켜주고 실제 수류력의 집중위치를 연속적으로 보여준다.

또한 연구대상 구간 중 A구간의 단면형상계수의 산술평균이 $A_s=0.0167$, B구간의 $A_s=-0.0127$ 로 나타나는 것은 A구간은 전체적으로 좌측으로 편기되고 B구간은 우측으로 편기됨을 확인시켜 준다. 즉, 어떤 구간에서

$\sum A_s > 0$ 이면 좌안쪽으로 편기된 하도구간이고,
 $\sum A_s < 0$ 이면 우안쪽으로 편기된 하도구간임을 알 수 있다.

4.2 단면형상계수와 곡률반경과의 상관성

단면형상계수 A_s 의 값이 "0"에서 멀어질 수록 즉 A_s 절대값이 클수록 만곡의 형상이 커지므로 곡률반경은 작아질 것이다. 그림 10은 대상하천의 A구간의 곡률반경과 단면형상 계수의 관계를 보여주며 상관성이 큼을 알 수 있다.

4.3 단일파장 내에서의 상대거리별 단면형상 계수의 변화

파장과 진폭이 상이한 여러개의 만곡구간을 변곡

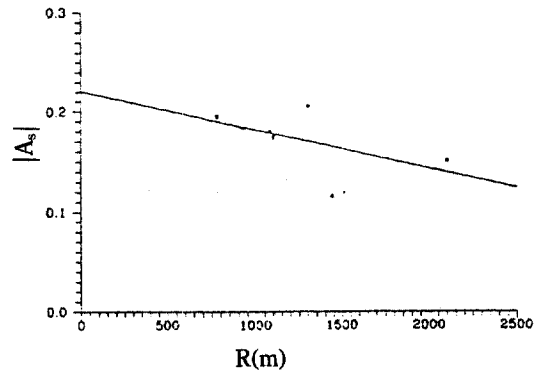


그림 10 단면형상계수(A_s)와 곡률반경(R)의 관계

표 1. α 의 변화와 수심관계 (A-구간 No.19 측정)

1.5 α	C	r	h
3	1490	1546.8	10.98
		1517.1	9.10
		1457.7	6.67
		1398.3	5.17
		1338.9	4.16
		1279.5	3.42
6	2980	1546.8	9.15
		1517.1	6.80
		1457.7	4.40
		1398.3	3.19
		1338.9	2.45
		1279.5	1.95

$$*C = \frac{1.5\alpha \cdot i_0 \cdot r_0}{r \Delta D}$$

점에서 정점을 거쳐 변곡점까지의 상대거리 즉 l/L 에 따른 단면형상계수 A_s 의 변화를 추적해 보았다.

즉 단일구간에 대하여 plotting하거나 모든 A_s 치를 동시에 plotting한 결과가 만곡부에서의 변화폭과 집중도를 동시에 보여주며 최대단면형상계수는 -0.205~0.244의 변화폭을 가지고 있음을 알 수 있다.

4.4 횡단하상 단면의 예측

식(6)은 유량이 일정하고 균일한 하상입도, 고정된 제방을 가정조건으로 유도된 식이며, 식(6)에 의하여

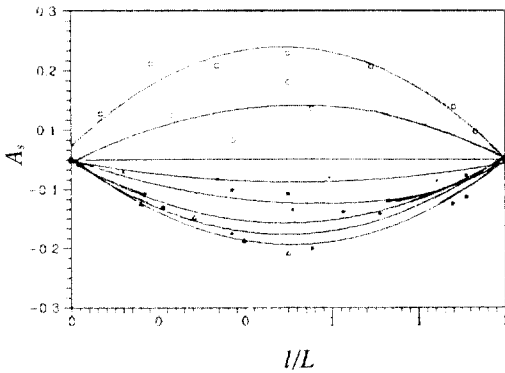


그림 11 A_s 와 상대거리의 관계

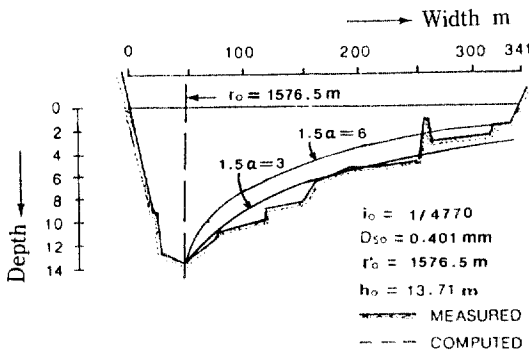


그림 12 실제하상과 예측하상의 비교

대상하천의 만곡부 횡단면의 곡률반경에 따른 하상 변화를 구해 본 결과 $1.5\alpha=3$ 일때가 실측된 하상의 횡단형상에 근접함을 알 수 있다.

여기서 i_0 , D_{50} , r_0 , h_0 등은 금강하상변동 조사보고서의 자료를 이용했으며 A구간 No.19번 이외의 단면에서는 $2 < 1.5\alpha < 6$ 의 범위를 보였다.

5. 결 론

하도재해의 주요인으로 작용하는 유로의 사행성향과 만곡부의 수리 및 기학적 특성을 연구대상 하천에 대하여 정량적으로 분석 및 고찰해본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 이론적으로 계산된 금강하류부, 연구대상구간의 한계사행대는 13338m이었으며 실제 최대 사행

대는 2900m이므로 지형에 따라서는 더 큰 진폭으로 발달도 가능하며, 곡률비가 2.0~4.0에서 빈도가 높은 것은 수류력의 집중으로 파제의 위험이 있는 구간이 33.3%에 달함을 알 수 있다.

2) 사행과장과 유량의 상관식은 $M_1 = 37.18 Q_{max}^{0.536}$ 으로 Inglis의 연구결과에 상응하고, 사행과장, 횡단면적, Froude수와의 관계도 상관성이 높았으며 $M_1 / \sqrt{A} = 104.9 Fr^{0.5}$ 의 관계를 보였다.

3) 새로운 특성인자로 단면형상계수 A_s 를 제안했으며 A_s 의 변화를 통하여 모든 유로에서 하상 단면변화에 미치는 수류력의 집중위치를 밝혔으며 곡률반경등 기존 사행특성인자와의 상관분석을 통하여 그 적용성을 입증했다.

4) Bendegom의 식을 이용하여 만곡부 단면형상을 재현할 수 있었으며 본 연구대상하천의 경우, 1.5α 가 2~6의 값을 보였다.

감사의 글

이 논문은 1991년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공도과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Inglis, C.C., "Meanders and Their Bearing on River Training," *Maritime Waterway pap.7*, The institution of Civil Engineerings, 1947, pp.1~23.
- Friedkin, J.F., *A laboratory study of the Meandering of Alluvial Rivers*, U.S. Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss, 1945.
- U. P. I. R. I., "Annual reviews of research scheme applied to river valley project", Rookkee, 1963~1970," U. P. I. R. I. 1972.
- Leopold, L.B., and Wolman, M. G., "River meanders," *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71, 1960, pp. 769~794.
- Leopold, L.B., and Langbein. W. B., "The Concept of Entropy in Landscape Evolution," *U. S. Geol. Surv. Prof. paper* 500-A. 1962.
- Ferguson, R.L., "Meander Irregularity and Wavelength Estimation," *J. Hydrol.*, 226, 1975, pp.315~333.
- Chang, H.H., "Plan Geometry of River Mean-

- ders,” *Frontiers in Hydraulic Engineering, Hydraulics Div. of ASCE*, 1983, pp.133~140.
8. Schumm, “River Morphology and Behavior,” *Proc. of the Conf. of Rivers '83*, ASCE, 1983, pp. 16~29.
 9. Brice, J.C., “Evolution of Meander Loops,” *Geological Society of America Bulletin*, Vol.85, 1974, pp. 581~586.
 10. Brice, J.C., “Stream Channel Stability Assessment,” Report No. FHWA/Rd-82/021, Federal Highway Administration, Washington, D. C., 1982.
 11. Hickin, E.J., “The Development of Meanders in Natural Channels,” *American Journal of Science*, Vol.274, 1974, pp.414~442.
 12. Hickin, E.J., and G. L. Nanson, “The Character of Channel Migration on the Beatton River, Northwest British Columbia,” *Geological Society of America Bulletin*, Vol.86, No.4, 1975, pp.487~494.
 13. Begin, Z.B., “Stream Curvature and Bank Erosion : A Model Based on the Momentum Equation,” *Journal of Geology*, Vol.89, No.4, 1981, pp.497~504.
 14. Begin, Z.B., “Curvature Ratio and Rate of River Bend Migration Update,” *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vlo.112, No.10, 1986, pp. 904~908.
 15. Bendegom, L.Van., “*Einige Beschouwingen over Rivier Morfologie en Rivier Verbetering*” De Ingenieur, 59, 4, B&W, 1947. pp.B1~B12.
 16. NEDECO, “*River Studie Recommendations on Improvement of Niger and Benue.*” North-Holland Publ, Amsterdam, 1959.
 17. 고재웅, “만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구”, *한국수문학회지*, 제8권 제2호, 1975, pp.75~80.
 18. 송재우, “하천수계의 수리기하학적 특성에 관한 연구”, *한국수문학회지*, 제13권 2호, 1980, pp.49~55.
 19. 송재우외 1인, “Spectral해석에 의한 한강수계 사행분석”, *대한토목학회논문집* 제 8 권 1호, 1988, pp.187~194.
 20. 윤세의, “수심이 얇은 고정상 만곡수로에서의 흐름 특성 해석”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
 21. 건설부, “금강하상변동조사보고서” 1973~75, 1983~85.

(接受 : 1992. 7. 30)