

유로 만곡부 특성과 단면형상

Characteristics of Channel Bend Reach and Shape of Cross-Section

송재우* · 박영진** · 이용환**

Song, Jai Woo · Park, Young Jin · Lee, Yong Hwan

Abstract

The purpose of this study is to examine morphometric characteristics in a channel bend reach. The new shape factor is suggested that channel deformation rate of cross section (ΔA_s) showed the variation of concentrated location of force due to the current and the variation of erosional section in alluvial channel. In the downstream direction the meaning of decreasing " ΔA_s " is the stability of channel bed. This study was analyzed morphological characteristics of cross section-width of channel (W_s), width to the thalweg (W_{th}), maximum depth (D_{th})-on the Guem River, and typical cross sections in channel bend were proposed. The channel migration rate (M) for the study river was represented that the zones of curvature ratio (R/W) with 2~4 were larger 12% than other zones.

요 지

본 연구에서는 제안된 유로단면변동율(ΔA_s)으로써 하천의 전형적인 특성인 유로사행으로 인한 유로 횡단면의 흐름방향 변화를 정량화하고 유로에서의 유수력 집중부분과 침식구간의 변동상황을 조사하여 유로사행을 수리학적 및 형태학적으로 구명해보았다. 측정된 유로단면변동율은 하류로 내려올수록 점차 감소함을 보이며 이는 하류로 갈수록 유로가 안정된다는 것을 나타낸다. 유로횡단면의 형태학적 인자들인 수면 폭(W_s), 최심선까지의 하폭(W_{th}), 그리고 최대수심(D_{th})의 분석을 통하여 D_{th}/W_s 분포에 따른 금강유역의 만곡점부 대표단면형상을 제시하였다. 대상하천의 유로이동율은 만곡부가 발달한 구간과 곡률비(R/W)가 2~4인 구간이 그외 구간보다 12% 높게 나타났으며 곡률비가 2~4에 집중되고 있음은 제방의 침식 가능성이 다른 구간에 비해 상대적으로 높음을 나타낸다.

1. 서 론

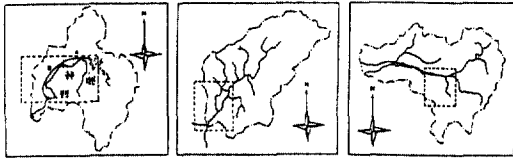
하천에서 홍수조절과 제방보호 및 안정하도 등의 문제를 해결하기 위해서는 유로의 사행과정 및 그

특성에 관한 충분한 지식이 필요하다. 유로만곡부를 포함한 하천형태에 관한 연구는 지형학자와 수공기술자들에 의하여 진행되고 있으며 유수거동과 통수능의 산정은 하천형태학적 특성을 고려해야만 한다는 많은 연구결과가 제안되고 있다.

유로의 형태학적 특성에 관한 연구로는 사행현상

* 정희원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 박사과정



유로연장 A구간 : 50 Km B구간 : 51 Km 유로연장 19 Km 유로연장 8.2 Km
 그림 1.1a 금강유역도 그림 1.1b 섬강유역도 그림 1.1c 전주천유역도

그림 1. 연구대상구간

에 따른 유로만곡부에서의 침식 및 이동에 관한 연구로 Ripley⁽¹²⁾가 유로의 곡률반경과 횡단면 특성 사이의 관계를 경험적으로 유도한바 있으며 1945년 미 육군 공병단에서 대규모 사행모형실험⁽⁵⁾을 통해 사행특성을 정량적으로 연구하였다. 유로이동 및 하상형을 포함한 유로단면에 관한 연구로는 Brice⁽⁴⁾의 연구, 유로이동을 지배하는 주요인자가 곡률비(곡률반경과 하폭의 비)라고 제안한 Hickin와 Nanson^(8,9)의 연구, 그리고 Bagnold,⁽¹⁾ Ikeda,⁽¹⁰⁾ Begin,^(2,3) Johannesson⁽¹¹⁾ 등의 연구가 이어지고 있으며 국내에서는 고,⁽¹³⁾ 송,^(14,15) 윤⁽¹⁶⁾ 등의 사행유로 만곡부에 관한 연구가 있다.

사행현상에 기인한 유로만곡부의 특성은 편수위 상승현상, 세굴과 퇴적의 교호발생 등으로 수공구조물에 크게 영향을 줌으로, 이에 따른 정량적인 해석이 반드시 필요하며 하천개수로 인한 자연하천 고유의 유로특성에 관한 자료가 소멸되어가고 있는 시점에서 이 분야의 연구는 시급하다고 사료된다.

연구대상구간은 사행이 잘 발달되어있는 1983년과 1984년에 실시된 금강 하상변동조사 구간⁽¹⁷⁾인 대청댐 하류방향 101 km와 섬강 하류부 하상변동조사구간⁽¹⁸⁾ 19.4 km 그리고 전주천 하상변동조사구간⁽¹⁹⁾ 8.2 km를 선정했다. 연구대상구간의 자료분석을 위하여 1/25000지형도와 함께 하상변동조사보고서의 자료를 주로 이용하였으며 유로 횡단면 번호는 보고서의 측정번호를 사용했다.

본 연구의 목적은 새로운 특성인자의 제안을 통해 유수력 집중위치의 경년적 이동을 분석하고 유동의 결과인 만곡부 단면특성과 곡률등 종횡단 형태학적 인자들의 상관분석을 통해 만곡부 대표단면을 구하여 하천의 개수계획 또는 유로의 유지관리면에 있어 기술적 검토에 기여하는데 있다.

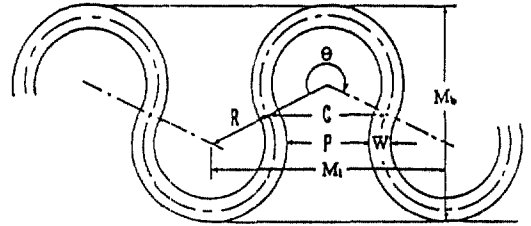


그림 2. 이론적인 사행

2. 유로만곡부의 수리 기하학적 특성인자

2.1 일반적인 유로만곡부의 형태학적 인자

유로만곡부의 연구에서 형태학적 인자의 산정에는 연구목적에 따라 다소 차이는 있으나 일반적으로 다음과 같은 인자들이 사용된다.

여기서, W : 하폭

R : 유로 중심선 곡률반경

P : 경심부 폭

C : 현

θ : 중심각

M₁ : 사행과장

M₂ : 사행대

또한, 사행유로의 특성을 분석하기 위한 유로만곡부에 대한 기하학적 표현방법은 상기 인자들이외에 사행진폭(meander amplitude, M₂), 사행유로장(meander arc length, S₁=Rθ), 굴곡도(sinuosity, S) 등이 있으며 여기서, 굴곡도는 여러가지 정의가 사용되고 있으나 일반적으로 유로의 축방향 길이(axial length, or valley length)에 대한 최심선의 길이(length of thalweg)로 정의한다.

2.2 유로이동을 산정

침식과 퇴적 과정을 거쳐 발생하는 유로이동율은 유로의 횡방향 이동을 나타내는 계수이며 본 연구에서는 유로이동율을 구하기 위해 Hasegawa⁽⁶⁾에 의해 제안된 다음 식을 사용하였다.

$$M = \frac{(B_1 + B_2)}{2\Delta t} \quad (1)$$

여기서, M : 유로의 이동율(m/yr)

B₁ : 측정년에서의 거리(m)

B₂ : 기준년에서의 거리(m)

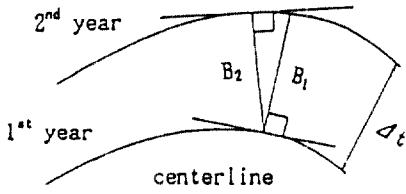


그림 3. 유로이동물의 측정

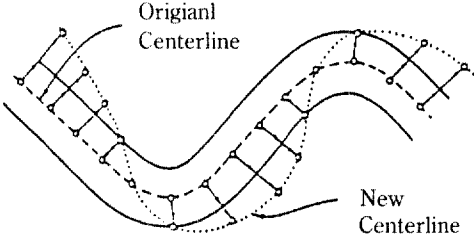


그림 4. Hickin mapping에 의한 유로이동 묘사

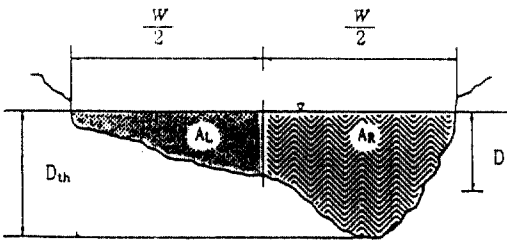


그림 5. 단면형상계수 정의도

Δt : 관측년 차(years)

2.3 단면형상계수와 단면변동율

횡단면의 형태학적 인자로서 그림 5와 같이 좌우의 횡단면적의 차가 클수록 만곡의 영향이 클 것이므로 이를 정량적으로 연구한 송⁽¹⁵⁾에 의해 제안된 단면형상계수(A_s)를 사용하였다.

$$A_s = \frac{A_L}{A_L + A_R} - 0.5 \quad (2)$$

식 (2)에서, $A = A_L + A_R$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$A_s = \frac{2A_L - A}{2A} \quad (3)$$

또한, 침식과 퇴적에 의한 토사이동성향에 따른

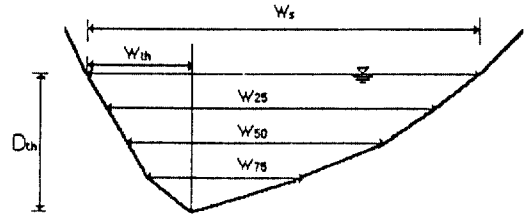


그림 6. 만곡정점 대표횡단면의 형태학적 인자

유로변화와 유수력 집중부분의 이동으로 인한 최대 침식위치의 변화등 유로 횡단면의 종방향 변화를 알아보기 위해 유로 단면변동율을 $\Delta A_s = |A_s - \text{기준년 } A_s|$ 로 제안하였다.

$$\Delta A_s = \left| \left[\frac{A_L}{A_L + A_R} - 0.5 \right]_{ob} - \left[\frac{A_L}{A_L + A_R} - 0.5 \right]_{st} \right|$$

또는

$$\Delta A_s = \left| \left[\frac{A_L}{A_L + A_R} \right]_{ob} - \left[\frac{A_L}{A_L + A_R} \right]_{st} \right| \quad (4)$$

여기서, ob: 관측년(observation year)

st: 기준년(standard year)

2.4 만곡정점부 횡단면의 형태학적 인자

만곡 정점부에서의 대표단면형상을 예측하기 위하여 다음과 같은 횡단면의 형태학적 인자들을 분석하였다.

- 1) 수면 폭 : W_s
- 2) 최심선까지의 하폭 : W_{th}
- 3) 최대수심 : D_{th}
- 4) 최대수심의 25%인 지점의 하폭 : W_{25}
- 5) 최대수심의 50%인 지점의 하폭 : W_{50}
- 6) 최대수심의 75%인 지점의 하폭 : W_{75}

위의 인자들중 W_s, W_{th}, D_{th} 를 W_{th}/W_s 와 D_{th}/W_s 로 무차원화시켜 일정하게 나타낸 계수를 산출하여 몇 가지 유형으로 분류하였으며, 분류된 단면들은 유형별로 W_s, W_{th}, D_{th} 의 평균치를 산정하여 대표단면을 제시하였다.

3. 유로만곡부의 횡방향 이동특성

3.1 연구대상구간의 곡률비 분포

곡률비(R/W)는 하폭에 대한 곡률반경의 비로 나

타내며 Hickin⁽⁷⁾은 최빈곡률비가 2~3 고 2.0~4.1일 때 유수력 집중이 최대라고 제안하였다.

연구대상구간의 곡률비 분포는 2~3구간에서 가장 높은 빈도를 보였으며 곡률비가 2~4구간에 집중되어 있으므로 이 구간은 유수력 집중이 예상되어

제방관리에 주의를 기울여야 할 구간으로 사료된다.

곡률비의 빈도분포를 10년 주기로 나누어 검토한 결과 섬강의 경우 거의 변화가 없었으나 금강의 경우 연구대상구간중 B구간에서 靑南堤, 玉城堤등 하천 개보수공사로 인해 하폭의 변화가 여러 차례 있었으므로 곡률비 분포에 영향을 주었다. 금강의 경우 인위적인 개보수공사 구간만을 검토해보면 개수후 곡률비가 2~4인 범위의 빈도에서 2개 구간이 추가되었다.

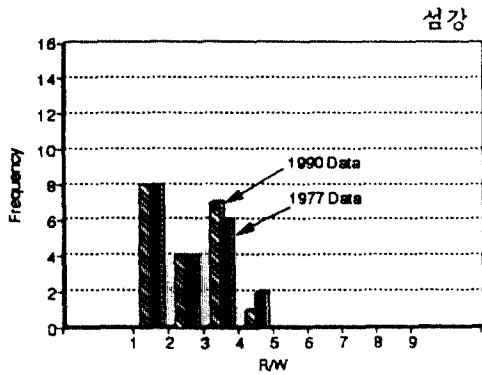
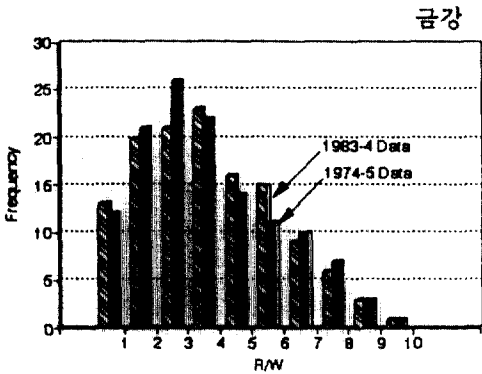


그림 7. 곡률비와 빈도분포도

3.2 곡률비와 유로이동율

연구대상구간에 대한 유로이동율을 산정한 결과 금강의 경우 A구간 $\bar{M}=5.283$, B구간 $\bar{M}=4.953$, 섬강의 경우 $\bar{M}=2.281$ 으로 나타났으며, 여기서, bar는 구간 평균값을 의미한다.

섬강에 대한 구간별 유로이동율과 곡률비는 표 1과 같다.

섬강의 만곡부와 곡률비를 고려한 유로이동율은 아래와 같다.

- 섬강 전체 유로이동율 $\bar{M}=2.2281(\text{m/yr})$
- 섬강 만곡부 유로이동율 $\bar{M}=2.5650(\text{m/yr})$
- R/W=2~4일 때 $\bar{M}=2.6970(\text{m/yr})$
- R/W<2, R/W>4일 때 $\bar{M}=2.4000(\text{m/yr})$

여기서, 만곡부의 유로이동율은 섬강 전체 측정 구간중 곡률반경이 측정된 구간만을 대상으로 유로이동율이 측정되었다.

직류부를 포함한 섬강전체 유로이동율과 만곡부만의 유로이동율을 비교한 결과 만곡부에서 유로이

표 1. 섬강 만곡부의 유로이동율과 곡률비

구 분	구 간									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M(m/yr)	1.78	1.13	1.63	4.49	2.29	3.59	2.57	4.68	6.77	2.23
R/W	4.25	3.98	3.81	1.71	3.57	3.91	3.53	2.81	3.12	2.81

구 분	구 간								전 체	
	11	12	13	14	15	16	17	18	합	평균
M(m/yr)	5.05	1.01	0.71	0.99	1.03	1.35	1.78	1.13	46.17	2.565
R/W	1.24	1.39	1.29	2.09	2.25	1.87	1.70	1.70	47.03	2.613

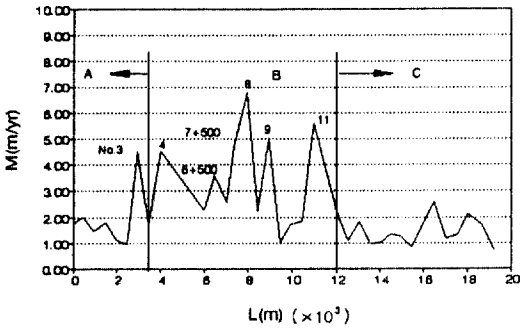


그림 8. 누가거리에 따른 유로이동율 변화도(섬강)

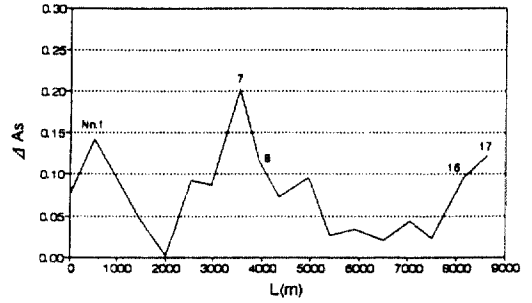


그림 10. 누가거리에 따른 단면변동율 변화도(전주천)

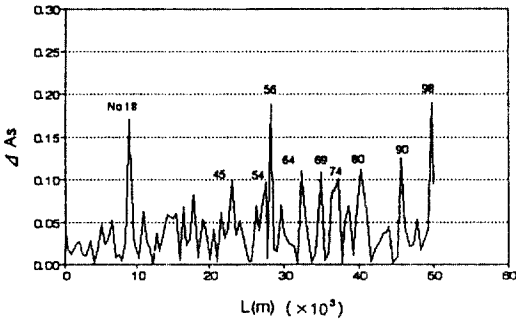


그림 9. 누가거리에 따른 단면변동율 변화도(금강)

동율이 섬강전체 유로이동율보다 15.12% 높으며 곡률비가 2~4인 구간의 유로이동율이 곡률비가 2보다 작거나 4보다 큰 구간의 유로이동율보다 12.37% 높게 나타났다.

그림 8의 섬강 유로이동량에 있어서 A, C구간은 유로이동량이 비교적 낮은 값을 보였으나 만곡구간이 발달된 B구간은 유로이동량이 상당히 큰 값을 보였으며 이는 C구간의 직류부나 A구간의 하류부에서보다 상대적으로 만곡부가 발달된 B구간에서 유로이동이 활발하다는 것을 보여준다.

그림에서 No. 6+500, 7+500, 8지점은 곡률비가 2~4인 지점으로 곡률비가 2~4인 범위에서 유로이동율이 최대가 된다는 Bagnold와 Leopold & Wolman 그리고 Hickin의 연구결과와 일치한다.

4. 단면형상에 따른 유로변동

4.1 유로 횡단면의 경년적 변동

유로에서 일정구간에 대해 ΔA_S 가 큰 경우는 그

구간의 유로 단면변동율이 높다는 의미이며 ΔA_S 가 작은 값을 가질수록 구간의 유로 단면변동율은 낮아진다.

ΔA_S 값을 연구대상하천의 경우 상류, 중류, 하류로 구분해서 검토해보면

금강 A구간

상류(No. 56-99) : $\Sigma \Delta A_S = 2.1785$, $\overline{\Delta A_S} = 0.0495$

중류(No. 21-55) : $\Sigma \Delta A_S = 1.3730$, $\overline{\Delta A_S} = 0.0392$

하류(No. 0-20) : $\Sigma \Delta A_S = 0.6082$, $\overline{\Delta A_S} = 0.0289$

구간별 $\overline{\Delta A_S}$ 값으로 유로의 단면변동율이 높은 구간을 알아볼 수 있으며 연구대상구간의 경우 $\overline{\Delta A_S}$ 는 상류구간에서 높게 나타났고 하류로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보였다.

ΔA_S 가 큰 구간($\Delta A_S > 0.1$)을 살펴보면 No. 0~20 구간에서 No. 18지점, No. 21~55구간에서 No. 45, 54지점, 그리고 No. 56~99구간에서 No. 56, 64, 69, 74, 80, 90, 98지점 등이 과거 10년간 단면변동율이 높은 지점들이고 사행구간의 완만한 하류구간보다 주로 상류구간에서 단면변동량이 크게 나타났다.

4.2 제방의 영향에 의한 단면변동율

하천의 하안침식에 대비한 제방축조에 있어서 제방 축조 후 사행성향의 유로를 인위적으로 억제함으로써 발생하는 잉여유수력은 결국 종방향으로 작용하여 하상형의 변화를 가속시키게되어 제방이 축조된 사행하천의 ΔA_S 는 축조되기 전보다 더욱 큰 값을 갖게 될 것으로 사료된다. 본 연구에서는 제방이 축조된 대상하천으로 전주천을 택하였으며 전주천의 경우 농경지 보호를 위해 거의 모든 구간이 제방에 의해서 횡방향 흐름을 구속받고 있다.

전주천의 경우 ΔA_S 를 살펴본 결과는 그림 10과

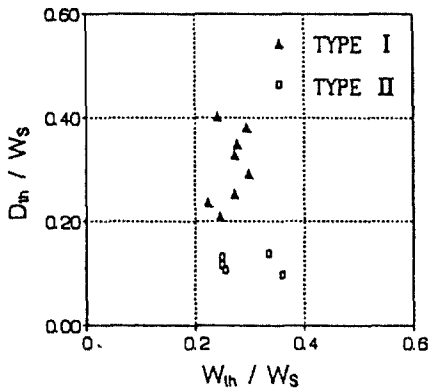


그림 11. W_{th}/W_s 와 D_{th}/W_s 의 분포도-금강

같다.

전주천의 $\overline{\Delta A_s}$ 는 0.077로 금강('83~'74년 $\overline{\Delta A_s}$ = 0.0516, '84~'75년 $\overline{\Delta A_s}$ = 0.042) 경우와 섬강의 경우 ($\overline{\Delta A_s}$ = 0.0745)에 비해서 상대적으로 크게 나타나고 있다. 그러나, 전주천이 횡방향 유수력을 억제하기 위한 제방 뿐만 아니라 농업용 관개배수와 하상보호를 위해 많은 weir를 설치하여(8.64 km 구간에 6개의 weir) 종방향으로도 흐름을 구속하고 있으므로 하상보호 구조물이 설치되지 않은 하천의 경우 더 큰 단면변동량이 예측된다.

4.3 만곡부 대표단면형상의 정량화

만곡유로의 정점에서 횡단면의 형태학적 인자들을 분석하여 무차원계수로 표현되는 만곡부 정점의 대표단면형상을 제시하였다.

즉, 하천의 만곡부로부터 얻어진 수면 폭(W_s), 외측안으로부터 최심선까지의 하폭(W_{th}), 그리고 최대수심(D_{th})을 사용하여 무차원비율인 W_{th}/W_s 와 D_{th}/W_s 를 산정한 후 그림 11에서와 같이 분석해 본 결과 금강의 W_{th}/W_s 는 0.2~0.4의 분포를 나타냈고 D_{th}/W_s 는 0.1~0.4의 분포를 보였다. 금강의 경우 D_{th}/W_s 가 0.2 이상인 구간을 Type I(83년 보고서 No. 20, 61, 64, 81, 87측점, 84년 보고서 No. 9, 61, 87), 0.2 이하인 구간을 Type II(83년 보고서 No. 48, 57측점, 84년 보고서 20, 43, 55)로 분류하고 상대수심(D/D_{th})과 하폭비(W/W_s)에 의해 결정되는 대표단면을 Type별로 그림 12, 13에 제시하였다.

여기서, W/W_s 와 D/D_{th} 를 산정할때 우 편의 만곡단면을 좌편의 단면기준으로 즉, 횡단면도의 우측

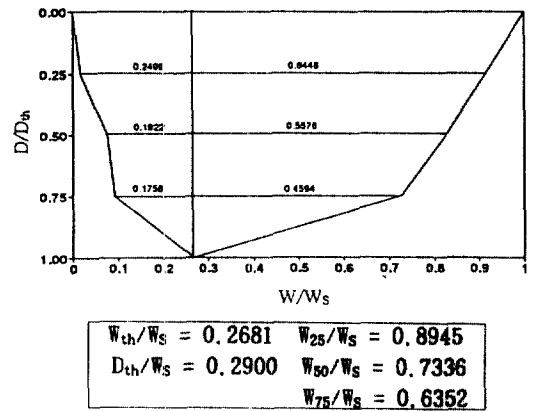


그림 12. 제안된 만곡정점부 대표단면형상-금강 Type I

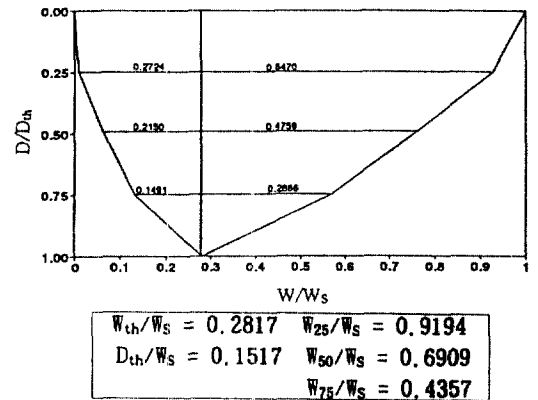


그림 13. 제안된 만곡정점부 대표단면형상-금강 Type II

안을 좌측안으로 가정한 후 상대수심과 하폭비를 산정하였으므로 제안된 대표단면은 Type I과 Type II 모두 좌편기 만곡정점부로 표현되었다.

5. 결 론

하도재해의 주요인으로 작용하는 유로의 사행성향과 그에 따른 단면형상의 변화를 정량적으로 분석 및 검토해 본 결과는 다음과 같다.

1. 유로 단면변동을 정량적으로 분석하였으며 ΔA_s 의 변화를 통해 모든 유로에서의 하상단면변화에 영향을 미치는 유수력 집중위치의 경년적 변동을 나타낼 수 있었다.

2. 만곡정점부 대표단면을 수면 폭(W_s), 최심선까지의 하폭(W_{th}) 그리고 최대수심(D_{th})으로 분석한 결과 금강에서 W_{th}/W_s 는 0.2~0.4의 분포를 보였으

며 D_{cb}/W_s 분포에 따라 두가지 유형의 만곡정점부 대표단면을 제시하였다.

3. 연구대상구간에서 추정된 횡방향 유로이동율 (M)을 직유로부와 만곡부, 곡률비(R/W)가 2~4인 구간과 $R/W < 2$ 이고 $R/W > 4$ 인 구간으로 나누어 분석한 결과, 섬강의 경우 직유로부에 비해 만곡부에서 횡방향 유로이동율이 15.12% 높게 나타났으며, 곡률비가 2~4인 구간이 $R/W < 2$ 이거나 $R/W > 4$ 인 구간보다 12.37% 더 높게 나타났다.

4. 연구대상구간의 곡률비가 2.0~4.0인 구간의 빈도가 높은 것은 유수력의 집중으로 인한 하안침식 위험구간이 존재함을 나타내며 유로개수공사에 있어 유로 횡방향 이동을 억제시키기 위해서는 $R/W = 2 \sim 4$ 인 구간을 축소시키는 것이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 1992년도 홍익대학교 교내 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Bagnold, R.A., "Some Aspects of the Shape of River Meanders", *U.S. Survey*, Prof. Paper, 282-E, 1960, pp. 135-144.
2. 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.
3. Begin, Z.B., "Curvature Ratio and Rate of River Bend Migration Update", *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 10, 1986, pp. 904-908.
4. Brice, J.C., "Stream Channel Stability Assessment", Report No. FHWA/Rd-82/021, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1982.
5. Friedkin, J.F., *A laboratory study of the Meandering of Alluvial Rivers*, U.S. Waterway Experiment Sta-

- tion, Vicksburg, Miss., 1945.
6. Hasegawa, K., "Universal Bank Erosion Coefficient for Meandering", *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 6, 1989, pp. 744-765.
7. Hickin, E.J., "The Development of Meanders in Natural Channels", *American Journal of Science*, Vol. 274, 1974, pp. 414-442.
8. Hickin, E.J., and Nanson, G.C., "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.
9. Hickin, E.J., and Nanson, G. C., "Lateral Migration Rates of River Bends", *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, 1984, pp. 1557-1567.
10. Ikeda, S., G. Parker, and K. Sawai., "Bend Theory of River Meanders, 1, Linear Development", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 112, 1981, pp. 363-377.
11. Johannesson, H., "Theory of River Meander", thesis presented to the Univ. of Minnesota, at Minneapolis, Minnesota, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, 1988.
12. Ripley, H.C., "Relation of depth to curvature of a channel", *Trans. ASCE*, Vol. 90, 1927.
13. 고재웅, "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구", **한국수문학회지**, 제 8권 제 2호, 1975, pp. 75-80.
14. 송재우, "우리나라 하천의 사행특성에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1980.
15. 송재우, "유로만곡부의 수리 및 계량형태학적 특성", **대한토목학회 논문집** 제 12권 3호, 1992, pp. 173-180.
16. 윤세의, "수심이 얇은 고정상 만곡수로에서의 흐름 특성 해석", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
17. 건설부, "금강 하상변동조사보고서", 1983-85.
18. 건설부, "섬강 하상변동 조사보고서", 1990.
19. 건설부, "만경강 하상변동 조사보고서", 1987.

(接受: 1994. 7. 25)