

〈論 文〉

만곡수로에서의 곡률반경 변화에 따른 흐름특성

Flow Characteristics for the Variation of Radius of Curvature in Open Channel Bends

윤 세 의* 이 중 태**

Abstract

The flow characteristics varying with the rate of the radius of curvature to width (Rc/B) in open channel bends are investigated with a simplified numerical model, briefly. Secondary flow velocity and transverse bed slope are formulated from the equations of moment of momentum and force balance analysis, respectively.

The conservation equations of mass and streamwise momentum are simplified by depth integration and its solution could be obtained from explicit finite difference method. Three sets of computer simulation are executed. The rates of Rc/B adopted in simulations are 2.7, 5.4 and 8.1, respectively.

The terms analyzed in this paper are secondary flow velocity, streamwise velocity, the path of maximum streamwise velocity, deviation angle, and mass-shift velocity.

요 약

만곡수로에서의 곡률반경에 대한 하폭비 변화에 따른 흐름특성을 단순화된 수치모형을 이용하여 분석하였다. 각 운동량 방정식과 힘의 평형원리로부터 각각 2차 흐름속도와 횡방향하상 경사를 계산하였다. 깊이 방향으로 적분된 연속방정식과 흐름방향의 운동방정식을 양적 유한 차분법으로부터 그 해를 구하였다.

곡률반경에 대한 하폭의 비율(Rc/B) 2.7, 5.4 및 8.1로 변화시키면 수치실험을 실행하여, 그 결과로부터 2차 흐름속도, 흐름방향유속, 최대유속의 이동경로, 편외각 및 질량이동유속에 관한 특성을 분석하였다.

1. 서론

인간의 활동이 증가하면서 하천의 중요성은 날로 증대되어 왔으며, 대부분의 하천은 정도의 차이는 있지만 끊임없이 하도를 변화시켜서 만곡(meandering)과 분류로(braiding)의 형태를 나타낸다. 수공구조물을 건설할 때 하도를 안정 및 고정시키는 일이 필요하며, 이 때 만곡부의 흐름 및 하상변동에 관한 특성을 분석하는 것이 문제 해결의 근본이 된다.

물리학적 및 수학적 모형이 만곡부에서의 수리학적 특성을 구명하기 위하여 많이 개발되어 사용되고 있으며, 최근에는 수학적모형이 널리 사용되고 있는 실정이다. 이런 수학적 모형을 크게 분류하면 하상형태 변화모형, 만곡의 생성원인 모형, 흐름특성 모형 등이 있다.

하상형태를 예측하는 모형은 두 가지로 구분된다. 첫번째는 곡률반경이 크고 하폭이 넓은 만곡부에서의 횡방향 하상경사를 예측하는 모형이다. 이 경우에는 흐름방향속도의 변동량은 무시되고 깊이평균 흐름방향 유속의 방향과 토사의 이동방향은 하천축에 평행하다고 가정한다. 이러한 해석 모형에는 Kikkawa(1976), Odgaard(1981, 1988), Nakato(1983) 등에 의하여 개발된 모형이 있다. 두번째는 흐름방향속도의 전이(streamwise velocity transition)를 고려하여 흐름과 토사이동의 재분포를 고려하는 모형이다. 이 모형은 최초로 Rozovskii(1961)에 의하여 발표되었다. 이러한 모형에는 Engelund(1974), Struiksmas(1985) 등이 있다.

만곡부의 생성원인과 발달은 고전적인 학설을 제외하면 선형안정도분석(linear stability analysis)과 정상류상태분석(steady state analysis)을 사용한 모델로 구분된다. 이에 해당하는 모형에는 Parker(1985), Olesen(1988) 등이 포함된다.

흐름특성에 관한 연구는 Rozovskii(1961)에 의하여 그 기본이론이 확립되었으며, De

Vriend(1977), Ikeda(1975), Falcon(1979), Kalkwijk(1980), Rodi(1979) 등에 의하여 계속 연구되어 왔다.

위에서 언급한 각종 모형들은 상호보완되어 개수로 만곡부에서의 수리특성을 분석하는데 사용되고 있으나 현재까지 많은 제약조건을 가지고 있다.

국내에서는 고(1975), 송(1981), 윤(1986, 1988), 이(1987) 등이 만곡부에 관한 연구를 발표한 바 있으나 아직 미흡한 실정이다.

본 연구는 하상형태모형과 흐름특성모형을 조합한 형태로 각 운동량식과 힘의 평형원리를 이용하여 2차흐름(secondary flow)과 횡방향하상경사(transverse bed slope)를 각각 계산하였다. 수심은 하폭에 비해 작다고 가정하여 연속방정식과 운동방정식을 깊이 방향으로 적분하고, 횡방향하상 경사는 횡방향수면경사에 비하여 크다고 가정하여, 즉 횡방향 수면경사를 무시하면, 횡방향의 운동방정식을 고려할 필요가 없는 수학적모형을 이용하였다. 하폭을 고정시키고 곡률반경을 변화시킨 수치모형실험의 결과로부터 만곡수로에서의 흐름특성을 분석하였다.

2. 기본이론

만곡부내의 흐름특성과 하상형태의 특성을 분석하기 위하여 흐름을 비압축성, 정류로 가정하고, 하폭에 대한 수심의 비(B/H)는 크다고 보았다. 단면의 중심선에서의 수면과 하상은 평행하고, 하상을 구성하고 있는 재료는 균질의 모래이며 벽면효과는 무시하였다.

2-1 2차흐름과 횡방향하상경사

2차흐름은 원심력분포와 횡방향 압력분포의 불균형으로 발생하는 성분과 흐름방향 유속의 불균형으로 횡방향쪽으로 발생하는 질량이동(mass-shift)에 의한 횡방향유속성분으로 구성된다.(Vadnal, 1984) 이 때 질량이동에 의한 횡

방향유속성분의 연직분포는 일정하다고 가정하고, 원심력에 의한 2차흐름의 연직분포는 식(1)과 같이 선형분포로 가정하였으며, 이 가정들은 실제하천에 적용함에 부리가 없는 것으로 알려져 있다. (Odgaard, 1981)

$$u = 2U \{ (Z - Z_b) / h - 1 / 2 \} \quad (1)$$

여기서, U : 표면에서의 2차흐름 성분

h : 수심

Z_b : 기준점의 위치

Z : 수위

일반적으로 표면에서의 2차흐름의 크기는 깊이 방향 평균유속의 10% 정도이다. 한편 질량이동에 의한 2차흐름은 만곡부의 입구부에서와 곡률반경이 급격히 변화되는 구간에서 존재하다가 흐름이 하류로 진행되면서 그 크기는 급격히 감소한다. 하상전단응력은 흐름방향성분 τ_o와 횡방향성분 τ_r로 구분되며, τ_r의 크기는 횡방향하상경사를 계산할 때 중요한 요소이다. 이 때 τ_r / τ_o는 하상에서의 2차흐름유속 U_b과 흐름방향유속 V_b의 비와 비례하며 식(2)와 같다. (Rozovskii, 1961)

$$\tau_r / \tau_o = U_b / V_b \quad (2)$$

Vadnal(1984)는 식(3)과 같이 V_b 대신 깊이 평균유속 V를 사용하였으며 비례상수 β를 도입하였다.

$$\tau_r / \tau_o = \beta (U_b / V) \quad (3)$$

그러나 실제로 V_b 값과 비례상수 β를 계산하기가 어려움이 있으므로, 본 연구에서는 V_b = kV로 가정하고 하상모래의 평균입경 D₅₀인 높이에서의 유속을 V_b로 가정하고 k의 값을 속도의 지수 분포식으로부터 식(4)와 같이 계산하였다.

$$k = (n + 1 / n)(D_{50} / H)^{1/n} \quad (4)$$

여기서 n : 지수분포식의 비례상수

H : 수심

D₅₀ : 하상구성 재료의 평균입경

식(2)와 (4)로부터 τ_r을 결정할 수 있으므로 횡방향 하상전단응력의 토오크(torque)를 구할 수 있다. 따라서 2차흐름의 종방향의 분포 U(s)는 식(5)와 같이 계산된다.

$$U(s) = U(s_o) e^{-g_1 |s - s_o|} + g_2 / g_1 (H\bar{V} / R_c) [1 - e^{-g_1 |s - s_o|}] \quad (5)$$

여기서 g₁ = f / 8k(3n + 1)(2n + 1) /

$$(2n^2 + n + 1)$$

$$g_2 = [(n + 1)(3n + 1)(2n + 1)] /$$

$$[n(n + 2)(2n^2 + n + 1)]$$

f : darcy-weisbach의 마찰손실계수

R_c : 곡률반경

s_o : 흐름방향좌표에서의 기준점

s : 흐름방향좌표

V : 단면평균유속

2차흐름의 횡방향분포는 Falcon(1983)에 의하여 n 값이 일정할 때 식(6)으로 표현된다.

$$U / U_c = (V / V_c)(h / H)(R_c / R_c + r) \quad (6)$$

여기서 U_c : 중심선에서의 2차흐름유속성분

V_c : 중심선에서의 흐름방향유속성분

h : 중심선에서의 수심

r : 횡방향좌표

횡방향하상경사는 2차흐름의 함수로 표시되며 횡방향 전단응력과 이동하상층의 무게성분의 평형을 고려하면 식(7)과 같다.

$$\tau_r dr = (1 - \lambda)(\rho_s - \rho) g y_b dr \sin \theta \quad (7)$$

여기서 λ : 공극률

ρ_s : 모래의 밀도

ρ : 물의 밀도

y_b : 이동하상층의 두께

θ : 횡방향 하상 경사각

식(7)를 정리하고 θ가 작다고 가정하면 횡방향하상경사 S_r = sin θ이므로 식(8)은 횡방향

하상경사를 나타낸다.

$$S_1 = g_3 U / \bar{V} \quad (8)$$

$$g_3 = (1 / \alpha (1 - \lambda) k) \sqrt{(f \Psi_c / 8)} * (\bar{V} / \sqrt{(\rho_s / \rho - 1) g D_{50}})$$

여기서 Ψ_c : Shield parameter
 α : 비레상수

2.2 흐름의 기본방정식

그림 1에서와 같은 검사체적 요소에서의 깊이 방향으로 적분된 연속방정식과 흐름방향 운동방정식은 각각 식(9), (10) 및 (11)로 표시한다.

$$F_1 \bar{U} + F_2 V + HF_4 (\partial V / \partial S + \partial \bar{U} / \partial r) = 0 \quad (9)$$

$$HF_1 \partial (V \bar{U}) / \partial r + F_1 V \bar{U} + 1 / (2n + 1) [HF_4 (\partial V / \partial r) + F_1 V] + [n + 1]^2 / n(n + 2) HF_4 (\partial V^2 / \partial S) + \{[(n + 1)^2 / n(n + 2)] F_2 + f / 8\} V^2 = gHSF_1 \quad (10)$$

$$F_1 \bar{U}^2 + HF_4 \bar{U}^2 / \partial r - \{(n + 1) / n(n + 2)\} (HF_4 / R_c + r) V^2 + V \bar{U} (F_2 + f / 8k) + (1 / 2n + 1) HF_4 \partial (V \bar{U}) / \partial S + F_3 V \bar{V} + gHF_4 (\partial Z_s / \partial r) = - (1 / 3) F_1 U^2 \quad (11)$$

여기서 $F_1 = St + h / R_c + r$

$$F_2 = [g_2 g_3 (r / R_c) - g_1 St (r / H)] (R_c / R_c + r)$$

$$F_3 = (1 / 2n + 1) [g_2 (H / R_c + r) - g_1 / g_3 (R_c / R_c + r) St] * [h / H + g_3 (r / H) (U / \bar{V})] - (f / 8k) (U / \bar{V})$$

$$F_4 = h / H$$

식(9), (10) 및 (11)에서 2차흐름의 성분 중 원심력에 의하여 발생하는 성분 u 는 깊이방향으로 적분하면 0가 되므로 u 항은 없어지며, V, \bar{U}, Z_s 가 미지수로 남는다. 한편 u 는 식(5)로부터 구해지며 식(9), (10) 및 (11)과는 독립적이다.

3. 곡률반경의 변화에 따른 흐름특성분석

3.1 수치모형

자연하천에서 횡방향하상경사는 횡방향수면경사사보다 크기 때문에 횡방향 수면경사의 영향을 무시하면 횡방향 운동방정식은 풀 필요가 없게 되므로 미지수는 \bar{U} 와 V 만 남게되어 연속방정식과 흐름방향의 운동방정식으로부터 미지수들을 구할 수 있으므로 계산시간을 크게 단축시킬 수 있다.

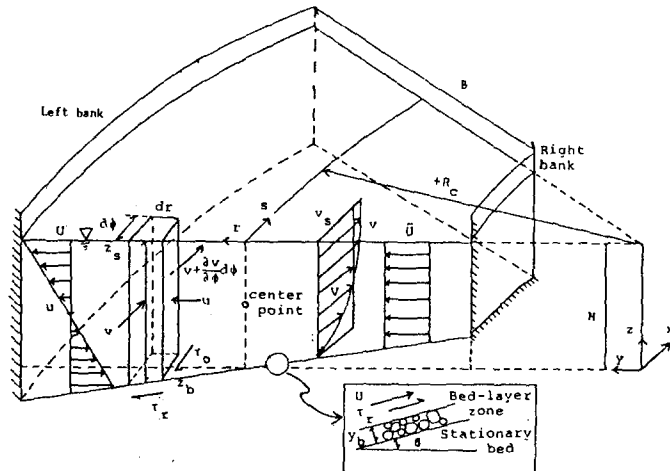


그림 1 검사체적 및 좌표계

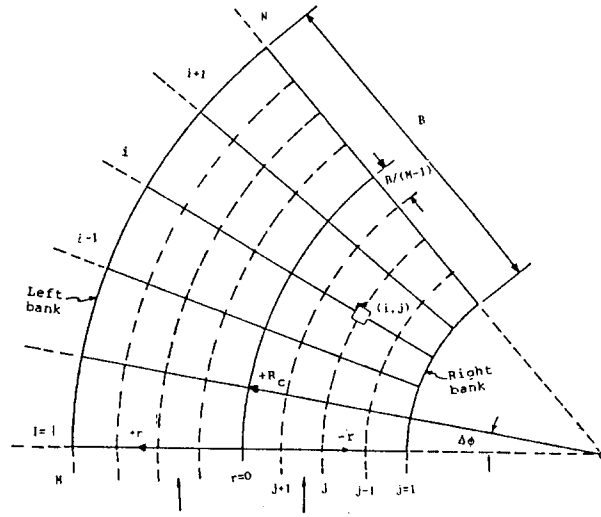


그림 2 격자망의 구조

본 연구에서 사용한 격자망은 그림 2와 같으며, \bar{U} 와 V 를 구하기 위하여 Nakato(1983), Vadnal(1984)의 수치모형을 이용하였다. 그들은 식(3)에서의 β 값은 U/\bar{V} 가 약 0.1이 된다고 가정하여 2-4 정도라고 발표하였으나, 본 연구에서는 식(4)의 k 값으로부터 τ_r 을 직접 계산하였다.

Darcy-Weisbach 의 식($V = \sqrt{8gHS/f}$)으로부터 구한 V 와 $h = H + S_r r$ 로 구한 h 를 가지고 연속방정식으로부터 \bar{U} 를 식(12)로부터 구할 수 있다.

$$\bar{U}(r_j) = \bar{U}(r_{j-1}) * h(Rc+r) |_{j-1} / (h(Rc+r) |_{j-3} [\sqrt{(2gS_r/f)}]^{-\mu(H+S_r) / (H+S_r)}) * g_2 g_3 e^{-\mu(H+S_r) / (H+S_r)} [Y/h(Rc+r)]_j \quad (12)$$

여기서 $Y = 2(S_r R_c - H)R_c^2(Y_1 + Y_2 + Y_3)$
 $Y_1 = 1/4(S_r R_c - H) * t / (t^2 - S_r R_c^2) |_{j-1}$
 $Y_2 = [(5S_r R_c - H) / (8S_r R_c)] * t \sqrt{(t^2 - S_r R_c^2)} |_{j-1}$
 $Y_3 = (H + 3S_r R_c / 8S_r R_c) \{1 / (\sqrt{-S_r R_c}) \tan^{-1}(1/\sqrt{-S_r R_c})$

$$\begin{aligned} &|_{j-1} \} : S_r R_c < 0 \\ &(H + 3S_r R_c / 8) \{1 / \sqrt{2(S_r R_c)} \} \ln \\ &|_{j-1} \{ t - \sqrt{(S_r R_c)} / t + \sqrt{(S_r R_c)} \} |_{j-1} \\ &: S_r R_c > 0 \\ &t = \sqrt{R_c(H + S_r r) / (R_c + r)} \end{aligned}$$

식(12)로부터 $\bar{U}(r_{j-1})$ 관한 경제조건을 알고 있으면 횡방향으로 $\bar{U}(r_j)$ 를 계산할 수 있다. V 는 흐름방향 운동방정식인 식(10)을 이용하여 풀 수 있는데, 이 때 $\partial V / \partial r$ 에 비해 그 크기가 매우 작기 때문에 무시하면 식(10)은 식(13)과 같이 변형되어 $V_{i,j}$ 가 계산된다.

$$AV_{i,j} + BV_{i,j} + C = 0 \quad (13)$$

여기서 $A = HF_4/S_{i,j} - S_{i-1,j} [1/n(n+2) + 1/2] + 1/8k + F_2/n(n+2)$
 $B = (HF_4/r_{j-r_j-1}) * \bar{U}_{i,j} + U_{i,j}/2n + 1 (HF_4/r_{j-r_j-1} - 1 + F_1)$
 $C = HF_4 \{ U_{i,j} + \bar{U}_{i,j}/2n + 1 \} * V_{i,j} - 1/r_{j-r_j-1} [1/n(2n+1) + 1/2] V^2_{i-1,j} / [S_{i-1,j} - S_{i-1,j} + g_s]$

식(12)와 식(13)으로 구한 \bar{U} 와 V 는 다시 연속 방정식을 이용하여 \bar{U} 의 반복계 산해를 식(14)로 구한다.

$$\bar{U}(r_j) = \bar{U}(r_{j-1}) * h(Rc + r)_{j-1} / (h(Rc + r)_j - [(vh)_{ij} - (vh)_{i-1}] / 2(S_{ij} - S_{i-1})) * (Rc + r)_{j-1} / h(Rc + r)_j \quad (14)$$

식(14)로 구한 $\bar{U}(r_j)$ 을 이용하여 새로운 V 값을 식(13)에서 계산하여 \bar{U} 와 V 가 허용오차를 만족할 때까지 반복 계산한다. \bar{U} 의 경계조건은 내측제방에서의 \bar{U} 는 0으로 가정하고 입구단면에서의 횡방향이상경사는 0로 가정하였다.

3.2 수치모형 실험

앞에서 설명한 수치모형을 이용하여 중심각 $\theta = 180^\circ$ 인 반곡수로에서 하폭 B 를 고정시키고 곡률반경 Rc 를 변화시키므로서 Rc/B 의 변화에 따른 흐름방향유속의 횡방향분포, 최대유속선의 이동경로, 2차흐름의 연직분포, 편의각 및 질량이동유속 등의 특성을 분석할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 자료는 표 1과 같다.

〈표 1〉 수치실험에 사용한 기본자료(Oakdale flume)

V(ft/sec)	1.56
H(ft)	0.505
B(ft)	8.0
Q(cfs)	6.30
Rc	43
D_{50} (mm)	0.30
α	1.0
k	0.2836
ϕ	0.032
n	4.24

표 1로부터 Rc/B 는 약 5.4이다. 본 연구에서는 Rc 를 21.5 ft와 64.5 ft로 변화시키면 Rc

$/B$ 의 값은 각각 2.7과 8.1이 되어 표 1에서의 Rc/B 값의 0.5배 및 1.5배가 된다. Rc/B 값이 2.7 일때는 반곡부의 곡률은 비교적 급한 경우이며, 8.1인 경우에는 비교적 완만한 곡률의 수로이다. 실제하천에서 Rc/B 값이 2-4의 범위일 때 하천제방의 횡방향 이동성향이 큰 것으로 알려져있다. (Begin,1981)

그림 3, 4, 5는 중심각이 각각 $\theta = 20^\circ, 100^\circ, 140^\circ$ 단면에서 단면평균 유속 V 로 무차원화한 종방향 유속의 분포를 나타낸다. 반곡부 입구에서는 θ 는 0이며 하류로 갈수록 θ 는 증가된다.

그림 3에서 Rc/B 가 2.7과 5.7인 경우에는 흐름방향 최대유속이 내측제방 부근에서 발생되며 외측으로 접근하면서 속도경사 (V/\bar{V} 의 기울기)는 점차 감소하나, Rc/B 가 8.1인 경우에는 최대유속이 외측제방 부근에서 발생되며 속도경사도 앞의 경우와 반대 방향으로 나타낸다. 속도

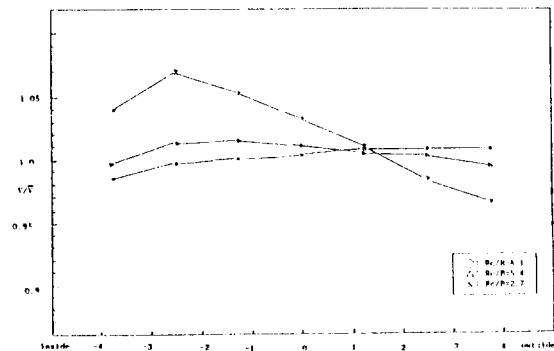


그림 3 $\theta = 20^\circ$ 단면에서의 V 의 횡방향 분포

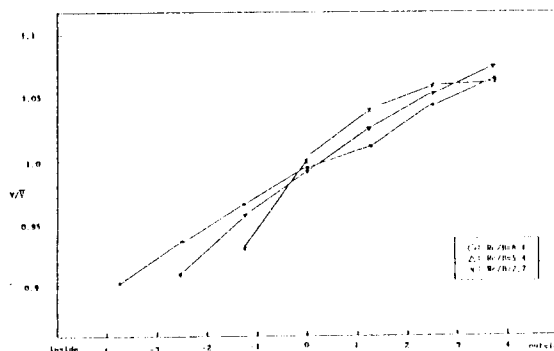


그림 4 $\theta = 100^\circ$ 단면에서의 V 의 횡방향 분포

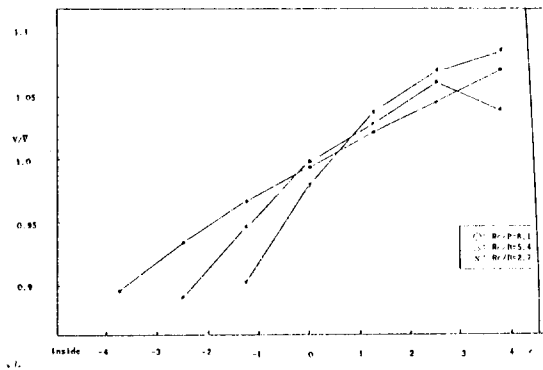


그림 5 $\theta = 100^\circ$ 단면에서의 V의 횡방향

경사는 $Rc/B = 2.7$ 일때가 가장 급하다. 흐름이 하류로 진행되면 흐름은 서서히 발달하여 세가지의 경우 모두 흐름방향 최대유속은 외측 제방부근에서 발생하며, 속도경사도 모두 비슷하며 방향도 같다. (그림 4) 하류부의 그림 5에서는 외측제방부근에서 흐름방향 최대유속이 발생하는 현상은 모두 동일하나 속도 경사는 Rc/B 값이 클수록 적다. 즉 Rc/B 값과 속도경사는 반비례한다.

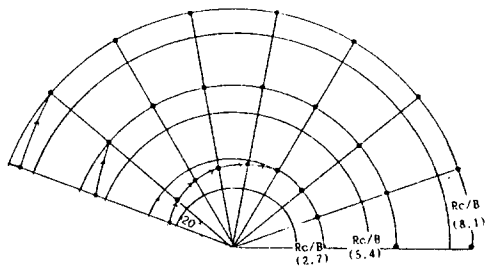


그림 6 흐름방향 최대유속선의 이동경로

흐름방향 최대유속의 이동경로는 Rc/B 가 8.1과 5.4인 경우에는 $\theta = 40^\circ$ 에서 흐름방향 최대유속이 외측제방 부근에서 발생하지만 Rc/B 가 2.7인 경우에는 더욱 하류부인 $\theta = 120^\circ$ 에서 최대유속이 외측제방에서 발생되어(그림 6), Rc/B 값이 큰 흐름 일수록 상류부에서 흐름이 발달되며, 반대로 Rc/B 값이 작은 경우에는 흐름의 발달은 보다 하류에서 이루어 진다.

그림 7은 2차흐름유속의 연직분포를 직선으로

가정하여 Rc/B 의 변화에 따른 2차흐름유속성분의 강도를 비교한 결과이다. 그 크기는 Rc/B 가 2.7일 때 가장 크게 계산되었으며 Rc/B 가 8.1 일때 가장 작게 계산되었다. 실제하천에서는 U/\bar{V} 값이 0.1이라고 발표되었으나, 곡률이 크면 그 값이 급격히 증가하는 현상을 잘 나타내고 있다. 즉 Rc/B 값과 2차흐름의 강도는 반비례한다.

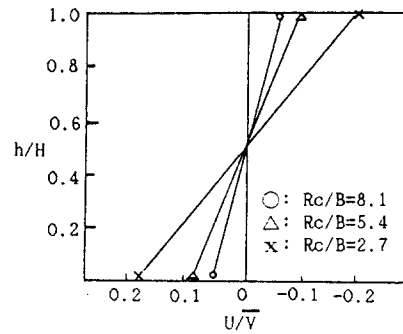


그림 7 $\theta = 100^\circ$ 단면에서의 2차흐름

그림 8은 \bar{U}/\bar{V} 값의 흐름방향의 변화를 나타낸 것으로서 Rc/B 가 2.7일 때는 그 값이 20도에서는 0.1이 되며, Rc/B 값이 8.1인 경우에는 0.05 정도이고, 하류부에서는 10° 정도로 그 값은 극히 적다. 일반적으로 질량 이동속도는 크기가 매우 작으며 만곡부 입구부분과 곡률반경이 변화되는 구간에서 존재하다가 하류로 내려 갈수록 급격히 감소하는 현상을 그림 8에서도 확인할 수 있었다. Rc/B 값이 증가 할수록 \bar{U}/\bar{V} 값은 대체로 감소하는 경향을 보여준다.

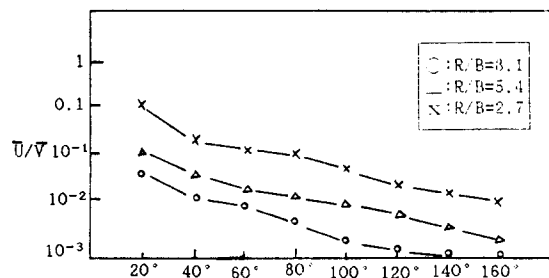


그림 8 \bar{U}/\bar{V} 의 흐름방향변화

그림 9는 $\tan \phi = (U + \bar{U}) / V$ 로 계산된 편각의 변화를 만곡부 중심선을 따라 나타내었다. Rc / B 가 작을수록 ϕ 는 증가하며, 일정한 Rc / B 값에서는 흐름방향에 따라 감소하나 그 크기는 크게 변화하지 않는 현상을 발견할 수 있었다.

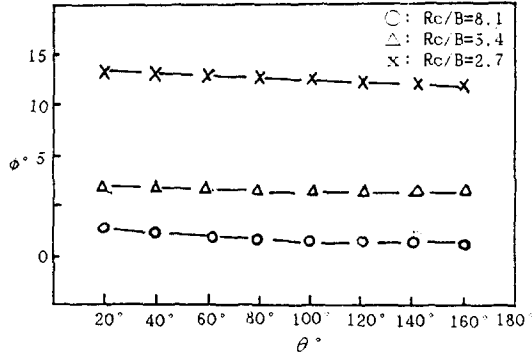


그림 9 흐름방향의 편각

4. 비교 및 고찰

2차흐름의 연직분포를 직선으로 가정하면 식(2)의 U_0 와 식(3)의 U 는 같기 때문에 식(4)의 k 값과 식(3)의 β 는 역수관계가 된다. 표 1에서의 $n.H.Rc$ 값과 U / \bar{V} 값을 0.1이라고 가정하여 식(15)와 식(16)으로부터 k 를 구하면 0.2988가 된다. (Vadnal, 1984)

$$U = [8k(n + 1) / (fn(n + 1))] (H\bar{V} / Rc) \tag{15}$$

$$n = 1 / \sqrt{(f)} \tag{16}$$

표 1에서의 $H.n.D_{50}$ 값을 사용하여 식(4)로 계산한 k 값은 0.2826이다. 따라서 표 1의 자료를 가지고 식(15)와 식(4)로 계산된 k 값은 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 Rc / B 가 감소하면 그림 7에서와 같이 U / \bar{V} 값이 증가하기 때문에 k 값도 증가한다. 식(15)로부터 k 값을 계산하려면 U / \bar{V} 값을 미리 예측해야 되는 단점이 있으나, 식(4)는 그 값을 미지수로 하고도

k 값을 구할 수 있다. k 값은 2차흐름의 강도 및 횡방향하상경사의 결정에 중요한 인자로 더욱 연구가 필요하다고 판단된다.

만곡부에서의 흐름방향 최대유속은 입구단면에서는 내측제방부근에서 발생되어 하류로 흐름이 진행되면 서서히 외측제방부근으로 편이된다. (이, 1987) 본 연구에서도 그와 비슷한 경향은 그림 3, 4, 5 및 6을 통하여 확인할 수 있었다. $Rc / B = 8.1$ 인 만곡수로에서는 20도 단면 하류부에서부터 최대유속이 외측제방에서 발생된다. 그러나 $Rc / B = 2.7$ 경우에는 강한 2차류의 발달과 횡방향 하상경사 때문에 $\theta = 120$ 도 단면부근에서부터 최대유속이 외측제방에서 발생된다. 즉 Rc / B 값이 큰 만곡수로에서는 최대유속이 외측제방으로 편이되는 구역이 Rc / B 가 작은 만곡수로에서보다 상류에 위치한다.

2차흐름의 크기는 단면평균유속에 대하여 약 10% 정도라고 발표되었다. (Odgaard, 1988). 그러나 Rc / B 가 감소하면 U / \bar{V} 값은 증가한다. 그림 7에서는 Rc / B 값은 2.7 일때는 U / \bar{V} 값은 20%까지 계산되었다. Shukry(1950)는 Rc / B 값이 3.0 이상이면 2차류의 강도를 무시할 수 있다고 발표하였다. 이는 U / \bar{V} 값이 10% 미만이면 실용적인 계산에서는 2차흐름의 강도를 무시할 수 있다고 판단되며, 본 연구결과에서 Rc / B 가 5.0 이상이면 U / \bar{V} 값은 10% 미만이 됨을 알 수 있다. (그림 7)

질량이동유속은 곡률이 급격히 변화하는 부분에서 발생되며 그 크기는 매우 적어서 일반적으로 무시되고 있는 실정이다 (Vadnal, 1984) 그러나 \bar{U} 는 Rc / B 에 크게 영향을 받는 것을 그림 8을 통하여 확인할 수 있었다. Rc / B 값이 2.7 일때는 \bar{U} / \bar{V} 의 값은 $\theta = 20$ 도 단면에서는 약 0.1이 된다. 이 값은 Rc / B 가 5.4 일때의 U / \bar{V} 값과 동일하다. 따라서 Rc / B 값이 작은 경우의 만곡수로에서는 \bar{U} 값을 무시할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} k(h/r) \tag{17}$$

Rozovskii(1961)는 편의각 ϕ 을 식(17)로 표현하였으며, 또한 k 는 Rozovskii(1961)는 11로 Engelund(1974)는 7로 발표한 바 있다. Bridge(1982)는 실측치를 통하여 k 값이 10정도 된다고 발표하였다. 본 연구에서도 k 를 10으로 채택하여 식(17)로부터 k 를 계산해보면, R_c/B 가 2.7 일때는 ϕ 는 13도, R_c/B 가 5.4 일때는 $\phi=7$ 도, R_c/B 가 8.1 일때는 ϕ 는 5도 정도로 계산되어 식(17)로부터 계산한 값과 그림 9와 비교하면 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편 R_c/B 가 감소할수록 편의각은 증가하고 있음을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 곡률반경에 대한 하폭의 비(R_c/B)의 변화에 따른 만곡수로에서의 흐름특성을 분석하기 위하여 각 운동량식과 힘의 평형원리를 이용하여 2차 흐름강도와 횡방향하상경사를 구하였다.

횡방향수면경사는 횡방향하상경사에 비하여 적다고 가정하여 연속방정식과 흐름방향 운동방정식으로 구성된 수치해석 모형을 사용하였다. R_c/B 값을 2.7, 5.4 및 8.1로 변화시키면서 수치실험을 실시하였다.

R_c/B 값이 감소할 수록 2차흐름의 강도, 횡방향하상경사, 편의각 및 질량이동속도는 증가하는 현상을 알 수 있었으며, 최대유속이 외측제방으로 편이되는 구역이 R_c/B 가 증가할 수록 만곡부 상류에 위치하는 현상을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Begin, Z.B., (1981) "Stream Curvature and Bank Erosion: A Model Based on the Momentum Equation", Geological Note, the University of Chicago, pp. 497-503
2. Bridge, J.S. and Jarvis, I., (1982) "The Dynamics of a River", Sedimentology, vol.29, pp 499-541
3. DE Vriend, (1977) "A Mathematical Model of Steady Flow in Curved Open Channels", J Hydr. Res., vol.15, No.1, pp.37-52
4. Engelund, F., (1974) "Flow and Bed Topography in Channel Bends", J. Hydr. Div., ASCE, vol.100, No.11, pp.1631-1648
5. Falcon, M.S. and Kennedy, J.F., (1983) "Flow in Alluvial-River Curves", J. of Fluid Mech., vol.133, pp.1-16
6. Kalkwijk, J.P. and DE Vriend, (1980) "Computation of the Flow in Shallow River Bends", J. Hydr. Res., vol.18, No.4, pp.327-343
7. Kikkwa, H., Ikeda, S. and Kitagawa, A., (1976) "Flow and Bed Topography in Curved Open Channels", J. Hydr. Div., ASCE, vol.102, No.9, pp.1327-1342
8. Nakato, T., Kennedy, J.F., and Vadnal, J.L., (1983) "A Numerical Model for Flow and Sediment Transport in Alluvial-River Bends", IIHR Report No.271, The University of Iowa
9. Odgaard, A.J., (1981) "Transverse Bed Slope in Alluvial Channel Bends", J Hydr. Div., ASCE, vol.107, No.12, pp.1677-1693
10. Odgaard, A.J. and Bergs, M.A., (1988) "Flow Processes in a Curved Alluvial Channel", WRR., vol.24, No.1, pp.45-56
11. Olesen, K.W., (1987) "Bed Topography in Shallow River Bends", PH.D. Thesis, Delft University of Technology
12. Parker, G., (1985) "Computer Simulated Migration of Meandering River in Minnesota", Project Report No. 232, University of Minnesota.
13. Rodi, W., (1979) "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow", J. Hydr. Div., ASCE, vol.105, No.10, pp.1297-1314
14. Rozovskii, I.L., "Flow of Water in Bend of Open Channels", IPST, 1961
15. Shukry, A., (1950) "Flow around Bends in an Open Flumes", Trans., ASCE, Paper No 2411, pp.751-788
16. Vadnal, J.L., (1984) "A Numerical Model for Steady Flow in Meandering Alluvial Channels", PH.D. Thesis,

The University of Iowa

17. 고재웅, (1975) “만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구”, 한국수문학회지, 제8권 제2호 pp.75-80
18. 송재우, (1980) “우리나라 하천의 사행특성에 관한 연구”, 연세대 대학원, 박사학위논문
19. 윤세의, 이종태, 이원환, (1986), “만곡수로에서의 2차원 흐름해석”, 대한토목학회 논문집, 제6권 제1호, pp. 87-94
20. 이종태, 윤세의, 이원환, (1987) “개수로 곡류부에서의 중심각 변화에 따른 흐름특성”, 대한토목학회 논문집, 제7권 제3호 pp.195-202
21. 윤세의, (1988) “만곡수로에서의 Ice Jam 과 흐름 특성”, 한국수문학회지, 제21권 제4호 pp.399-406