

冲積河川의 水路樣相에 따른 流砂 및 흐름特性

Characteristics of Sediment and Flow with Channel Patterns in Alluvial Rivers

이종석* · 이대철** · 배동만*** · 차영기****

Lee, Jong Seok · Lee, Dae Cheol · Pai, Dong Man · Cha, Young Kee

Abstract

This paper aims to develop the numerical model for prediction of the channel migration by analyzing of sediment and flow characteristics with patterns of channel in alluvial rivers. Flow in rivers constitutes to be the meandering or the braided form and rarely straight channel through morphologically stable patterns with mutual actions between the flowing water and bed materials. In order to develop the model for simulation of the channel migration, the channels are divided into two types with positive or negative sign by the direction of curvature radius of the centerline channel (r_c). That is, the single bend-channel consists of only one curvature of positive or negative sign and the multi-bend channel consists of two more curvatures of positive or negative sign, respectively. The model analyzes the sediment and flow characteristics under the influence of superelevation, spiral motion, irregularity in bed topography and depth-averaged velocity of channels. For reliability of this model, the single bend-channel and the multi bend channel are compared with experiment data in other models and the measured field data in the Keum-River, respectively. As a result, the both comparisons turn out to be excellent.

요 지

본 논문은 충적하천에서 수로의 양상조건에 따른 유사 및 흐름특성을 해석함으로써 수로의 변이를 예측할 수 있는 수치모형을 개발하기 위한 연구이다. 하천의 흐름은 하상 및 제방재료 특성과의 상호작용에 의해 복잡한 관계를 이루면서 수로변이를 통하여 형태학적으로 안정적인 형상을 유지하고 흐르기 때문에 대부분의 경우 직선형수로는 드물고 사행 또는 망류상을 이루고 있다. 본 연구에서는 수로변이를 모의할 수 있는 모형을 개발하기 위해 수로중심선 곡률반경 r_c 값의 양과 음의 부호수에 따라 수로를 구분 즉, r_c 의 양 또는 음의 값이 하나 만으로 이루어진 단만곡수로(single-bend channel)와 양과 음이 둘 이상의 값을 갖는 복만곡수로(multi-bend channel)로 구분하여 이들 수로에서의 편수 위상승, 나선운동, 하상 및 수심평균유속의 불규칙 현상의 영향에 의한 유사이동과 흐름특성을 해석한다. 단만곡수로는 타 모형의 실험자료와 복만곡수로는 금강의 매포수위관측소를 시점으로하는 연구구간에서

* 정회원 · 단국대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

** 정회원 · 대전산업대학 토목공학과, 교수

*** 정회원 · 명지실업전문대 토목과 교수

**** 정회원 · 단국대학교 토목공학과, 교수

실측치 현장자료와 비교분석함으로써 본 모형의 적용성을 검증하였으며, 그 결과는 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

1. 서 론

현대사회에서 하천과 수자원의 관리는 그 무엇보다도 우선되어야 할 중요한 과제로서 하천의 효율적인 관리와 운영은 국민경제의 직·간접적인 영향을 미친다. 이러한 하천에서의 수로는 흐름장내의 수리학적 특성과 제방구성재료 특성과의 상호작용에 의하여 복잡한 관계를 이루면서 흐름방향으로 확장되거나 횡방향이동을 통해 형상적으로 안정적인 형태를 유지하려하기 때문에 대부분의 경우 직선형보다는 망상(braided) 또는 사행(meandering)수로를 이루고 있다. 그러므로, 이들 하천에서의 흐름특성과 유사이동에 관한 해석적 모형의 필요성은 하천과 수자원의 중요성과 더불어 증대되고 있다.

하천의 형상적 조건을 고려한 흐름장내 유사이동과 흐름특성에 관한 연구가 수로폭의 변화, 하상형상 및 곡률변화의 영향에 의한 수로형상의 변화 등을 예측할 수 있다면 침식과 이송 및 퇴사작용의 반복에 의한 수로변이로 발생되는 홍수시 제방의 유실과 농경지 범람 등의 피해를 최소화시킬 수 있을 것이다.

하천의 흐름특성과 유사문제에 관한 연구는 흐름과 하상재료 사이의 복합작용에 의해 형성되는 사행수로의 연구로 직결되며 또한, 이 연구에는 유속의 방향성분, 편수위상승(superlevation) 및 만곡부를 통한 에너지 손실 등과 관련된 연구가 계속되고 있으나 아직까지 완전한 모형은 없다. Rozovskii⁽¹⁾는 이차원 모형의 만곡실험수로에서 여러 조건하에 유속분포 등을 포함하는 해석적 모형을 개발하였으며, Yen⁽²⁾은 유속과 전단응력분포, 편수위상승에 관한 실험연구를 하였다. Engelund⁽³⁾는 사행수로에서 수로의 측방침식을 연구하기 위해 Langbein 등(1966)⁽⁴⁾이 제안한 정형형사행형상을 도입하여 수심평균 지배방정식의 개략해를 섭동기법으로 구하였다. 같은 방법이 임의 형상을 갖는 하천에서의 일반해를 구하는데 Parker 등(1981)⁽⁵⁾에 의해 사용되었으나, 유속의 예측치와 실측치간의 비교는 없었다. 또한, Hi-

ckin은 현장측정에 기초하여 수로변이과정을 설명하였는데 빠른 유속이 만곡부 정점의 외측제방부근에서 생길때, 이곳의 전단응력은 한계전단응력을 초과하게 되므로 외측제방은 서서히 세굴되고 만곡부의 진폭은 점진적으로 확장된다고 하였다. 이 개념이 Parker 등(1981)⁽⁵⁾의 수로변이에 관한 이론모형의 개발에 사용되었는데, 여기서 제방의 측방침식은 제방부근의 유속과 평균유속간의 차이에 비례하여 발생되며 이때의 비례상수를 침식계수로 하였다. Hooke,⁽⁶⁾ Vanoni,⁽⁷⁾ Zimmermann 등,⁽⁸⁾ De Vriend 등,⁽⁹⁾ Falcon 등,⁽¹⁰⁾ Dietrich 등,⁽¹¹⁾ Blondeaux 등⁽¹²⁾이 만곡수로의 하상경사 등에 관해 연구하였는데, 이들의 연구에서 흐름장과 유사이송간의 연관성이 강조되었다. Chang,⁽¹³⁾ Odgaard 등⁽¹⁴⁾은 만곡수로의 정상류하에서 하상의 횡방향경사에 대한 예측을 위해 기존모형의 실험 및 현장자료를 이용, 유사유입에 따른 한계조건인 이론을 토대로해 하상의 횡방향경사 및 흐름특성에 관한 해석적 모형을 제안하였다. 국내에서는 윤용남,⁽¹⁵⁾ 고재웅,⁽¹⁶⁾ 이종태 등,⁽¹⁷⁾ 송재우 등⁽¹⁸⁾이 만곡수로의 형태학적 특성분석, 하상변동 및 흐름특성 등에 관하여 연구하였으며, 차영기 등⁽¹⁹⁻²¹⁾이 횡방향 하상경사 및 하상조건에 따른 이행특성을 연구하였다.

본 연구는 총적하천의 양상조건 즉, 하천에서 주로 접하는 사행수로에서 수로를 수로중심선 곡률반경 r_c 값의 양(+)과 음(-)의 부호수에 따라 단만곡수로와 복만곡수로로 구분한다. 다시말하면, r_c 값이 양 또는 음 하나 만을 갖고 수로가 변화하는 사행수로를 단만곡수로로, r_c 값이 양과 음 둘 이상으로된 수로를 복만곡수로로 구분하고, 이들 수로에서의 편수위상승, 이차류(secondary flow), 하상 및 수심평균유속의 불규칙 현상에 의한 유사와 흐름특성의 관계를 구명한다. 또한, 이차류에 대한 운동방정식을 Kikkawa 등(1976)⁽²²⁾의 실험식을 이용하여 수로중심선의 수면유속에 관한 1계상미분 방정식으로 유도하여 그 해를 구하였으며, 하상의 횡방향경사를 마찰응력에 대한 입자크기 비의 평형식으로부터 공극비를 고려

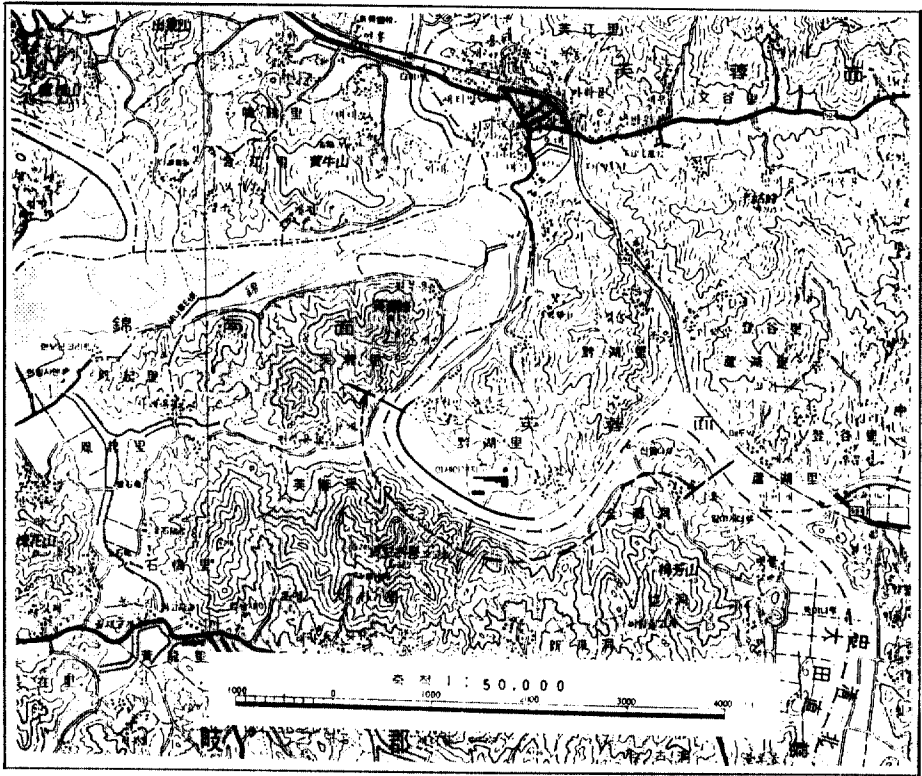


그림 1.1. 복만곡수로의 현장자료에 대한 연구구간 위치도

하여 구하였다. 그리고 이를 흐름방향의 운동량 방정식에 적용함으로써 흐름방향 운동량 방정식을 풀 수 있었다.

그리고, Odgaard 등⁽¹³⁾의 실험자료와 그림 1.1 금강의 매포수위관측소를 시점으로하는 6100미터의 연구구간을 설정하여 실측치 현장자료와 비교분석함으로써 본 모형을 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

하천에서 수로의 하상형상과 형태학적 특성은 일반적으로 수심, 유속 및 유량 등의 흐름특성과 유사이송량에 의해 지배를 받기 때문에 하상의 변형과 수로의 이동은 이들 특성의 변화속도에 비해 그 속도가 아주 느리다. 이들의 관계를 연구하기 위해 수로폭은 연구구간에서 동일하고, 수로중심선의 수심은 일정하며, 수심에 대한 수로폭의 비는 큰 것으로 가정한다. 또한, 폭이 큰 개수로의 경우 기준면으로부터 연직방향좌표 z 에서의 유속성분 w 는

수로중심선으로부터 외측을 양으로하는 횡방향좌표 r 에서의 유속성분 u 보다 작고, 흐름방향좌표 x 에서의 유속성분 v 보다는 더욱 작으므로 연직방향에 대한 운동방정식은 무시한다. 따라서, 정상류 이차원 흐름에 대한 일반모형의 기본방정식은 다음과 같다.

2.1 기본 방정식

정수압 조건하의 횡 및 흐름방향 운동방정식과 유체 및 유사의 연속방정식은 전수심에 관해 수직으로 적분한 Reynolds 방정식의 기본형을 Yen⁽²⁾의 연구에 기초하여 만곡수로의 흐름에 적용할 수 있는 원통좌표의 단순형으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

2.1.1 유체의 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial r}(r u_a d) + r_c \frac{\partial}{\partial x}(V d) = 0 \quad (2.1)$$

여기서 u_a 와 V 는 횡 및 흐름방향의 수심평균유속이고, d 는 수심이며, x_c 는 수로중심선의 흐름방향좌

표이다.

2.1.2 운동 방정식

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -g \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} = -g \frac{\partial Y}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial z} \quad (2.3)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도이고, g 는 중력가속도, Y 는 기준면으로부터 수면까지의 표고이며, τ_{rx} 와 τ_{zz} 는 z 에서의 횡 및 흐름방향의 전단응력이다.

2.1.3 유사의 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial r}(r q_r) + r_c \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

여기서 q_r 과 q_x 는 횡 및 흐름방향의 단위폭당 유사량이다.

2.2 유속분포 및 저항 방정식

$$\frac{v}{V} = \frac{\xi + 1}{\xi} \left(\frac{z-y}{d} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$u = 2U \left(\frac{z-y}{d} - 0.5 \right) \quad (2.6)$$

$$\tau_{bx} = \rho f V^2 / 8 \quad (2.7)$$

$$\tau_{br} = K_1 \tau_{bx} (U/V) \quad (2.8)$$

여기서 ξ 는 유속분포지수, y 는 하상고, U 는 수면의 횡방향유속이고 이차흐름은 직선분포로 가정하였으며, f 는 마찰계수, τ_{br} 과 τ_{bx} 는 횡 및 흐름방향의 하상전단응력이며, K_1 은 비례상수이다.

3. 방정식의 간략화

연속방정식과 흐름방향 운동량방정식을 풀기 위해서는 먼저 횡방향유속의 흐름방향변화를 구하고 그 값을 이들 방정식에 초기치와 함께 대입함으로써 미지수를 구할 수 있다.

3.1 횡방향유속의 흐름방향변화

식 (2.3)에서 $u(\partial u/\partial r)$ 와 $w(\partial u/\partial z)$ 는 v 에 비해 u 와

w 가 작기 때문에 무시할 수 있으며, Rozovskii⁽¹⁾에 의하면 횡방향 난류전단항은 수면에서 수로조도의 함수로서 다음식으로 바꿔 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \tau_{rx}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\kappa (0.5f)^{1/2} (Uv/d)_c \quad (3.1)$$

여기서 첨자 c 는 수로중심선의 값을 나타낸다.

식 (3.1)을 식 (2.3)에 대입하고 정리하면 다음을 얻는다.

$$\frac{dU}{dx} = \frac{v_s}{r_c} - \frac{g S_r}{v_s} - \kappa (0.5f)^{1/2} \frac{U}{d_c} \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 흐름방향 수면유속 v_s 를 흐름방향 단면평균유속 V_m 과 마찰계수 f 의 함수관계인 $v_s/V_m = \phi$ (f)로 놓고, 횡방향 수면경사를 $S_r = V_m^2/gr_c$ 로 계산하면 다음식이 된다.

$$\frac{dU}{dx} + \frac{\kappa}{d_c} (0.5f)^{1/2} U = \frac{V_m}{r_c} \left(\phi - \frac{1}{\phi} \right) \quad (3.3)$$

Kikkawa 등⁽²²⁾의 실험결과에 의한 횡방향 수면유속과 흐름방향 단면평균유속의 관계식인 $(U/V_m) = (1/\kappa)(d_c/r_c)[3.333 - (0.555/\kappa)(0.5f)^{1/2}]$ 과 식 (3.3)의 충분히 발달된 흐름조건에서의 매개변수 $[\phi - (1/\phi)]$ 을 계산한 후 이를 다시 식 (3.3)에 대입하면 다음과 같이 x 에 관한 선형미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dU}{dx} + A_1 U = A_2 \frac{V_m}{r_c} \quad (3.4)$$

여기서 $A_1 = (\kappa/d_c)(0.5f)^{1/2}$ 이고, $A_2 = (0.5f)^{1/2}[3.333 - (0.555/\kappa)(0.5f)^{1/2}]$ 이다.

그러므로, 식 (3.4)의 일반해는 다음과 같이 구할 수 있다.⁽²³⁾

$$U = [C + \int A_2 (V_m/r_c) \exp(\int A_1 dx) dx] \exp(-\int A_1 dx) \quad (3.5)$$

여기서 C 는 상수로 수로상단부 시점에서의 경계조건으로부터 구할 수 있는 초기횡방향유속이다.

3.2 하상의 횡방향경사

그림 3.1과 같이 하상의 횡방향경사는 하상표층 (bed layer)에 있어 힘의 평형식으로부터 유도할 수 있다. 하상표층의 두께 y_b 는 하상재료의 중앙입경 (median diameter) D_{50} 과 마찰속도 u_* 간의 관계식

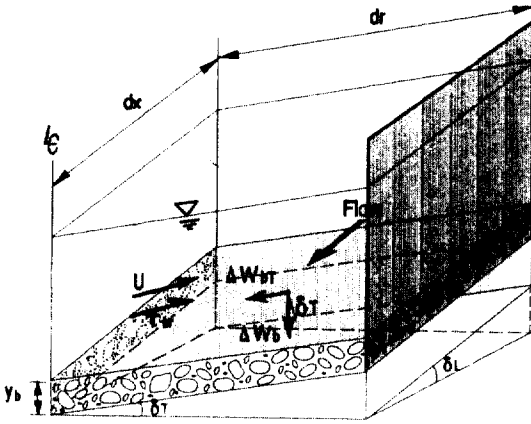


그림 3.1. 하상표층의 횡방향경사

으로 쓸 수 있다.

$$\frac{y_b}{D_{50}} = K_2 \frac{u_*}{u_{*c}} \quad (3.6)$$

여기서 u_{*c} 는 한계마찰속도이고, K_2 는 비례상수이다.

하상의 횡방향경사는 하상전단응력의 횡방향성분 τ_{br} 과 하상표층무게의 횡방향성분 ΔW_{br} 간의 평형식에 의해 유도되며 이 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_{br} dr = (1 - p_o)(\rho_s - \rho) g y_b dr \sin \delta_r \quad (3.7)$$

여기서 p_o 는 공극비이고, ρ_s 는 하상재료의 밀도이다.

식 (2.7)을 식 (2.8)에 대입하고 τ_{br} 에 관해 정리한후 식 (3.7)에 대입하면 $\sin \delta_r \approx S_T$ 인 횡방향 하상경사는 다음과 같다.

$$S_T = K_3 (U/V_m) \quad (3.8)$$

여기서 $K_3 = (K_1 V_m) / K_2 (1 - p_o) [(\rho_s - \rho) / \rho g D_{50} (8/f T_h)]^{1/2}$ 이고, T_h 는 Shields의 무차원 마찰응력이다.

3.3 흐름방향 운동량방정식

검사체적에서의 연속방정식에 흐름방향 유속성분을 곱하여 식 (2.2)의 좌변에 더하고, 식 (2.5)와 (2.6)을 대입하여 수직으로 적분한후 식 (2.7)을 이용해 정리하면 다음식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (a_1 v^2 d) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U a_2^{-1} v d) = g S d - 0.125 f V^2 \quad (3.9)$$

여기서 $a_1 = (\xi + 1)^2 / \xi(\xi + 2)$, $a_2 = (2\xi + 1)$ 이다.

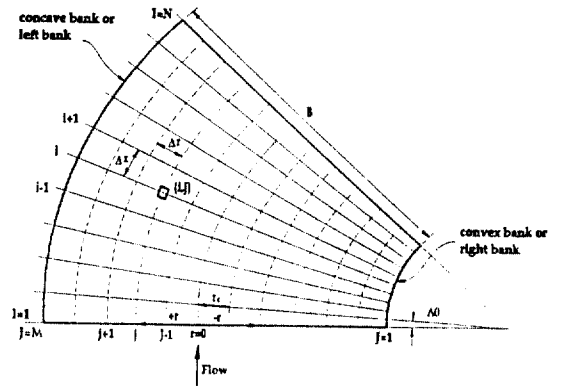


그림 4.1. 격자망의 구성

식 (3.9)를 수로중심선의 수심과 유속에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$G_1 UV + \frac{U}{a_2} (d_c G_3 \frac{\partial V}{\partial r} + G_1 V) + d_c G_3 \frac{\partial (UV)}{\partial r} + a_1 d_c G_3 \frac{\partial V^2}{\partial x} + (a_1 G_2 + 0.125 f) V^2 = g d_c S_c G^3 \quad (3.10)$$

여기서 $G_1 = S_T + (d/r)$ 이고, $G_2 = \partial d / \partial x$, $G_3 = d/d_c$ 이다.

또한, 식 (3.10)을 수로중심선의 흐름방향 수심평균 유속에 관한 이차식으로 유도하면 다음과 같다.

$$[(a_3 G_2 + 0.125 f) + \frac{\partial}{\partial x} \{d_c G_3 (0.5 + a_3)\}] V^2 + [U a_2^{-1} \{ \frac{\partial}{\partial r} (d_c G_3) + G_1 \} + \frac{\partial}{\partial r} (d_c G_3 U)] V + [- \{g S_c + (0.5 + a_2^{-1}) \frac{\partial V^2}{\partial x} + (U a_2^{-1}) \frac{\partial V}{\partial r}\} d_c G_3 = 0 \quad (3.11)$$

여기서 $a_3 = 1/\xi(\xi + 2)$ 이다.

4. 수치계산

하천구간은 그림 4.1의 좌표격자계와 같은 방법으로 차분하였고, 각 격자점은 흐름방향과 횡방향의 격자망을 나타내는 첨자(i, j)로 표시하였으며, 운동량 방정식의 편도함수는 다음과 같이 후진유한차분법에 의해 개략해를 구하였다.

표 5.1. 단만곡수로의 수리학적 특성자료

수리학적 인자	특성값	수리학적 인자	특성값
평균유속 $V_m(m/s)$	0.45	만곡 중심각 $\theta(^{\circ})$	180
수로중심선 수심 $d_c(m)$	0.15	수로중심선 곡률반경 $r_c(m)$	13.11
평균수로폭 $B(m)$	2.44	수로중심선 구간길이 $x(m)$	41.18
평균수로경사 $S_c(\%)$	1.16	격자크기 $x(cm)$	6.60
중앙입경 $D_{50}(mm)$	0.30	횡방향 절점수 M	37
무차원 마찰용력 T_h	0.033	흐름방향 절점수 N	626

$$\frac{\partial \Omega}{\partial x} \approx \frac{\Omega_{ij} - \Omega_{i-1,j}}{x_{ij} - x_{i-1,j}} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial r} \approx \frac{\Omega_{ij} - \Omega_{ij-1}}{r_{ij} - r_{ij-1}} \quad (4.2)$$

입의 절점에서의 횡 및 흐름방향의 간략화한 운동방정식 (3.5)와 식 (3.11)을 유한차분법에 의한 차분식으로 쓰면 다음과 같다.

$$U_i = [U_{i-1} + A_{2m} \frac{V_m}{r_c} \exp[A_1 \Delta x] \Delta x] \exp(-A_{1m} \Delta x) \quad (4.3)$$

$$A_3^2 V_{ij} + A_4 V_{ij} + A_5 = 0 \quad (4.4)$$

여기서 A_{1m} , A_{2m} 은 흐름방향의 절점좌표 (i, j)와 (i-1, j)에서의 평균치이고, $A_3 = (a_3 G_2 + 0.125f) + [d_c G_3 (0.5 + a_3)/(x_{ij} - x_{i-1,j})]$, $A_4 = a_2^{-1} U_{ij} [(d_c G_3 / r_j - r_{j-1}) + G_1] + (d_c G_3 / r_j - r_{j-1}) U_{ij}$ 이며, $A_5 = -[g S_c + (0.5 + a_2^{-1}) \{ (V_{i-1,j}^2)/(x_{ij} - x_{i-1,j}) \} + (a_2^{-1} U_{ij}) \{ (V_{ij-1}) / (r_j - r_{j-1}) \}] d_c G_3$ 이다.

따라서, 식 (4.2)의 해는 이차식의 양의 근을 취해 다음과 같이 계산한다.

$$V_{ij} = [-A_4 + (A_4^2 - 4A_3 A_5)^{1/2}] / 2A_3 \quad (4.5)$$

유사량은 식 (2.4)의 유사량 연속방정식에 의함으로 횡 및 흐름방향에 대해 소류사량과 부유유사량을 구분하여 계산하고 이를 합계하는 것이 타당하겠으나 본 연구에서는 차원해석에 기초한 경험적인 방법에 의해 경험적 계수 α 와 e 의 값을 구해서 총유사량을 산정하였다.

흐름방향 단위폭당의 총유사량을 $q_x = \alpha V^e$ 로 계산하여 이를 합계함으로써 i번째 단면에서의 총유사량을 얻는다.

$$Q_{xi} = \frac{\alpha}{M-1} \sum_{j=1}^M \frac{a_{ij}}{a_{i,c}} V_{ij}^e \quad (4.6)$$

여기서 α , e 는 경험적 매개변수이고, $a_{ij}/a_{i,c}$ 는 수로 중심선의 소단면적에 대한 j번째의 소단면적비이다. 입구부에서의 초기조건은 수심 d_c 와 흐름방향유속인 Darcy-Weisbach의 유속 관계식 $V = (8gd_c S_c)^{1/2}$ 및 이차류 유속 u_a 이 사용되며, 경계조건으로는 내측제방에서 $V = (8gd_c S_c)^{1/2}$ 과 u_a 는 u_a 는 u_a 가 사용된다. 각 절점에서는 위의 식들에 의해 수심, 횡 및 흐름방향의 유속, 유사량이 계산된다.

5. 실측자료의 적용 및 비교분석

본 모형에 대한 연구결과를 검증하기 위해 단만곡수로는 타 모형 실험자료와 복만곡수로는 실측치 현장자료를 이용하여 다음과 같이 비교분석였다.

5.1 실측자료의 적용

5.1.1 단만곡수로의 실험자료

단만곡수로에서 흐름특성을 검증하기 위해 실험자료로 Odgaard 등⁽¹⁴⁾의 모형을 이용하였다. 이 실험은 미국의 Iowa 주립대학교 수리실험실에서 연구된 것으로 본 연구결과와 비교하기 위한 수리학적 특성치들은 표 5.1과 같다.

5.1.2 복만곡수로의 현장자료

복만곡수로에서의 유사 및 흐름특성에 대한 해석 결과는 그림 5.1과 같이 6100미터를 연구구간으로 선정하고, 이를 1985개의 절점으로 측정단면을 구분하여 비교하였다.

연구구간의 시점은 수원으로부터 268.10 km에 위치한 매포수위관측소로서 유역면적 4834.05 km²인 금강의 상류부이다.⁽²⁴⁾ 만제유량(bankfull discharge)

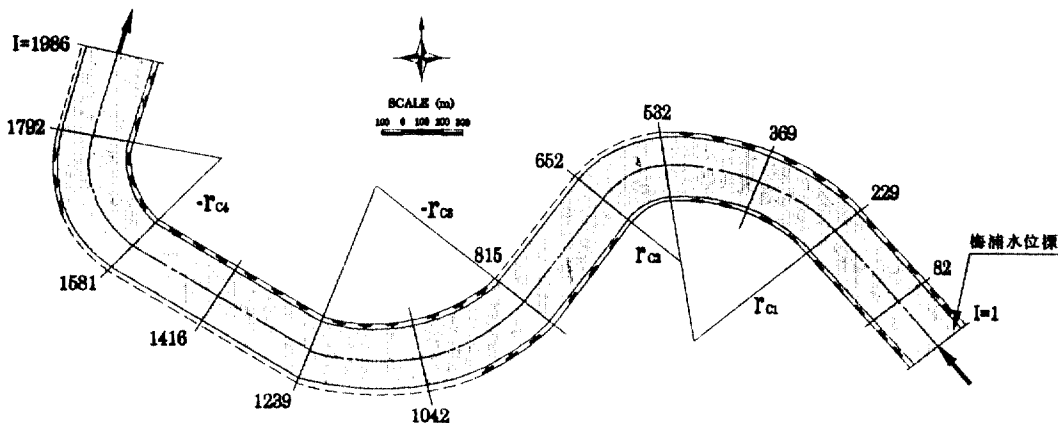


그림 5.1. 복만곡수로 연구구간의 측정단면

은 수위유량곡선(rating curve), 흐름발생빈도해석 및 Gauckler-Manning 방정식형 등에 의한 방법으로 산정할 수 있다.⁽²⁵⁾ 본 연구에서는 자기수위계가 설치된 관측소에서 측정된 시수위자료를 이용한 수위유량관계와 금강단위도 및 Muskingum방법에 의한 수문학적 하도추적에 의해 산정한 건설부 자료와 비교하여 만제유량을 결정하였다. 그 외의 연구구간내 각 측정간 거리와 수로폭 등의 측량결과 및 수리학적 특성자료는 표 5.2와 같다.

5.2 비교분석

5.2.1 실험자료와의 비교분석

단만곡수로인 Odgaard 등⁽¹³⁾의 실험자료와 수심의 흐름방향변화를 비교한 결과는 이들의 실험자료에서 수심과 유속에 대한 자료를 이용하여 무차원폭(r/B) $J = \pm(0.125, 0.375)$ 에서 그림 5.2와 같이 나타났다.

그림 5.2(a)의 $J = \pm 0.375$ 에서 수심의 흐름방향변화는 내측수로벽부근($J = -0.375$)의 수로중심선 거리 90° 지점에서 오차가 나타났고, 그 외의 경우에는 외측수로벽부근($J = +0.375$)이 내측수로벽부근보다 대체로 잘 맞는 것으로 나타났다. 그림 5.2(b)의 $J = \pm 0.125$ 에서는 외측수로벽부근의 78° 지점과 내측수로벽부근의 $24^\circ, 78^\circ, 138^\circ, 170^\circ$ 지점에서 오차가 나타났는데 이것은 곡률반경에 따른 부차류의 발생으로 내측수로벽부근에서는 퇴사작용에 의해 사구(dune)가 형성되기 때문인 것으로 사료되며, 외측수로벽부근은 대체로 잘 맞았다.

5.2.2 현장자료와의 비교분석

복만곡수로의 현장자료에서는 수심의 횡 및 흐름방향변화, 무차원 흐름특성과 유사특성의 횡 및 흐름방향변화를 각각 비교하였다.

그림 5.3(1)의 (a)~(d)와 5.3(2)의 (e)~(h)는 양과 음의 직선구간, 그림 5.3(3)의 (a₁)~(d₄)와 5.3(4)의 (e₅)~(h₈)은 양과 음의 만곡구간에서 수심의 횡방향변화를 비교한 것이다.

무차원폭에 대한 직선 및 만곡구간에서 수심의 횡방향변화 비교결과는 양과 음의 직선구간에서는 그림 5.3(1)의 (c) 및 5.3(2)의 (h)단면에서, 만곡구간의 양과 음의 경우에는 그림 5.3(3)의 (c₃)와 (d₄) 및 5.3(4)의 (e₅)단면에서 다소의 오차가 발생되었으나 그외의 단면에서는 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 오차를 보인 단면은 직선구간의 출구단면과 만곡구간의 입구단면으로서 흐름의 상태가 불안정한 발달과정영역(developing region)이기 때문에 생기는 것으로 사료된다.

또한, 수로중심선의 거리에 대한 무차원폭(r/B) $J = \pm(0.111, 0.278, 0.444)$ 에서 수심의 흐름방향변화 비교는 그림 5.4와 같다.

그림 5.4는 수로중심선으로부터 내외측 횡방향의 무차원폭(r/B) $J = \pm 0.111(\pm 37.185 \text{ m}), \pm 0.278(93.13 \text{ m}), \pm 0.444(148.74 \text{ m})$ 에서 수심의 흐름방향변화를 비교한 것이다. 그 결과 $J = \pm 0.444$ 에서는 직선구간인 $I = 653$ 과 1416, 만곡구간인 $I = 532$ 와 1042 단면에서 오차가 발생되었으나, 다른 단면에서는 대체로 양호한 결과를 보였다.

복만곡수로의 직선 및 만곡구간에서 무차원 수심

표 5.2. 복만곡수로의 측량결과 및 수리학적 특성자료

측량결과	단면번호	거리 x(m)		수로폭 Bo(m)	단면번호	거리 x(m)		수로폭 Bo(m)
		구간	추가			구간	추가	
	1	0	0	410	1042	700	3200	340
	82	250	250	410	1239	600	3800	310
	229	450	700	320	1416	550	4350	280
	369	430	1130	370	1581	500	4850	435
	532	500	1630	285	1792	650	5500	315
	652	370	2000	260	1986	600	6100	315
	815	500	2500	300				
수리학적 특성자료	수리학적 인자			특성값	수리학적 인자			특성값
	평균유속 V_m (m/s)			2.90	평균 수로경사 S_c (%)			0.402
	수로중심선 수심 d_c (m)			8.14	격자의 크기 Δx (m)			3.07
	평균수로폭 B(m)			335.0	횡방향 절점수 M			109
특성자료	분할구간	곡률반경 r.(m)		중앙입경 D_{50} (mm)	무차원 마찰응력 T_b		흐름방향 절점수 N	
	1~ 229	+∞		0.35	0.040		228	
	229~ 532	+864		0.56	0.042		303	
	532~ 652	+631		0.56	0.042		121	
	652~ 815	+∞		0.56	0.042		162	
	815~ 1239	-876		0.56	0.042		424	
	1239~ 1581	-∞		0.56	0.042		342	
	1581~ 1792	-613		0.22	0.034		211	
1792~ 1986	-∞		0.22	0.034		194		

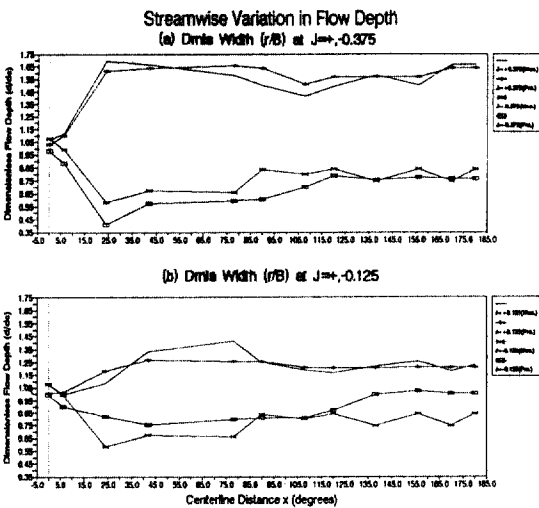


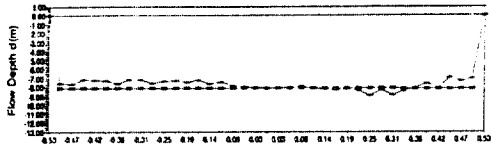
그림 5.2. 단만곡수로에서 수심의 흐름방향변화비교

폭에 대한 흐름방향유속, 부차류 유속 및 유사량의 무차원값에 대한 비교는 그림 5.5와 같다.

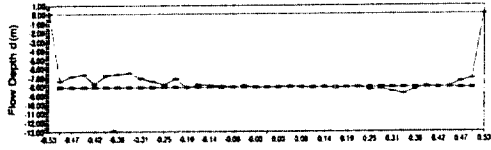
그림 5.5(1)에서 무차원 흐름방향유속의 횡방향변화는 양의 직선구간의 경우 내측제방 $J=-0.325 \sim -0.500$ 에서, 음의 직선구간에서는 $J=0.375 \sim 0.500$ 에서 불안정한 변화를 보였고, 양의 만곡구간에서는 $J=-0.400 \sim -0.500$, 음의 만곡구간은 $J=0.425 \sim 0.500$ 에서 각각 불안정한 변화를 보였다.

그림 5.5(2)에서 무차원 부차류 유속의 횡방향변화는 양의 직선구간에서 아주 적은 양을 보였고, 무차원폭에 대해서는 거의 일정한 값을 갖는 반면, 음의 구간에서는 $I=1794$ 단면을 제외하고 각 단면에서 작은 변화폭의 거의 일정한 값을 나타냈다. 만곡구간에서는 양의 경우 $I=231$ 과 380 단면에서

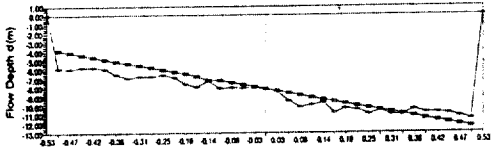
(1) Transverse Variation in Flow Depth (Straight Reach)



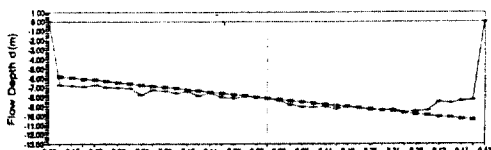
(b) Section I=229



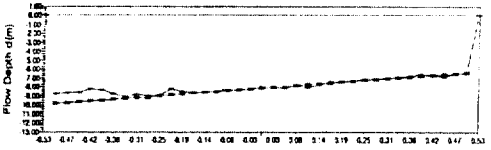
(c) Section I=652



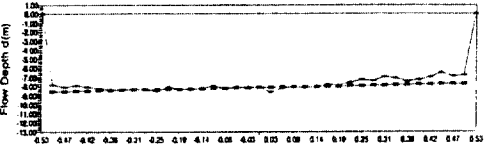
(d) Section I=814



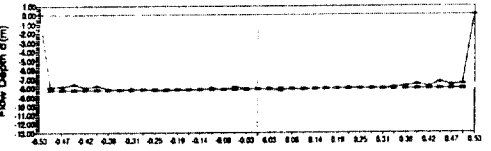
(e) Section I=1239



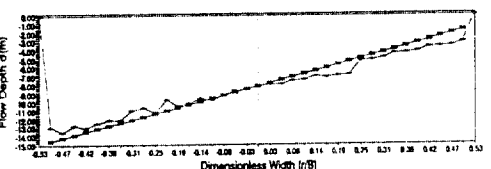
(f) Section I=1416



(g) Section I=1579

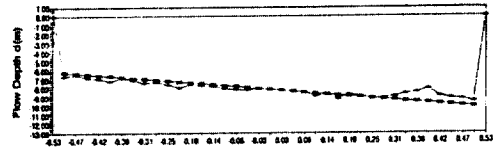


(h) Section I=1966

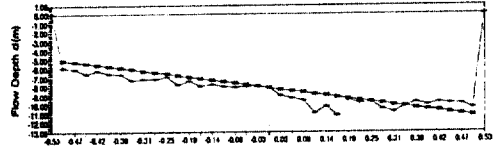


— Predicted — Measured

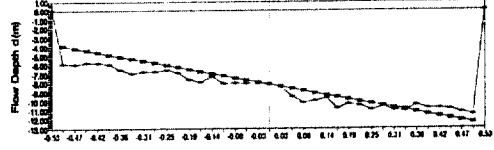
(2) Transverse Variation in Flow Depth (Curved Reach)



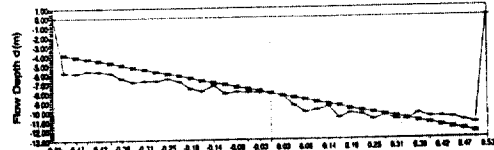
(b2) Section I=531



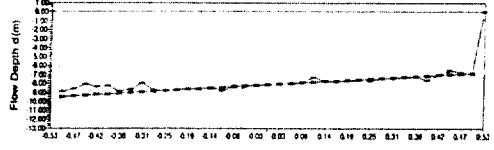
(c3) Section I=651



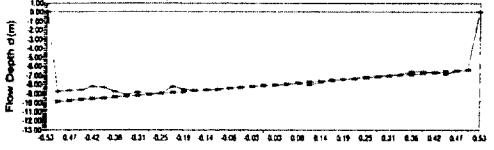
(d4) Section I=815



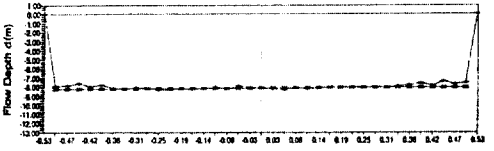
(e5) Section I=1042



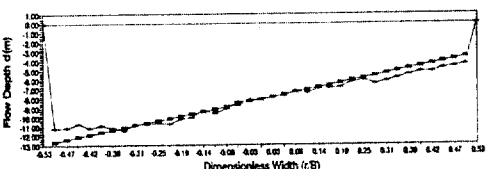
(f6) Section I=1238



(g7) Section I=1580



(h8) Section I=1791



— Predicted — Measured

그림 5.3. 복만곡수로에서 수심의 횡방향변화비교

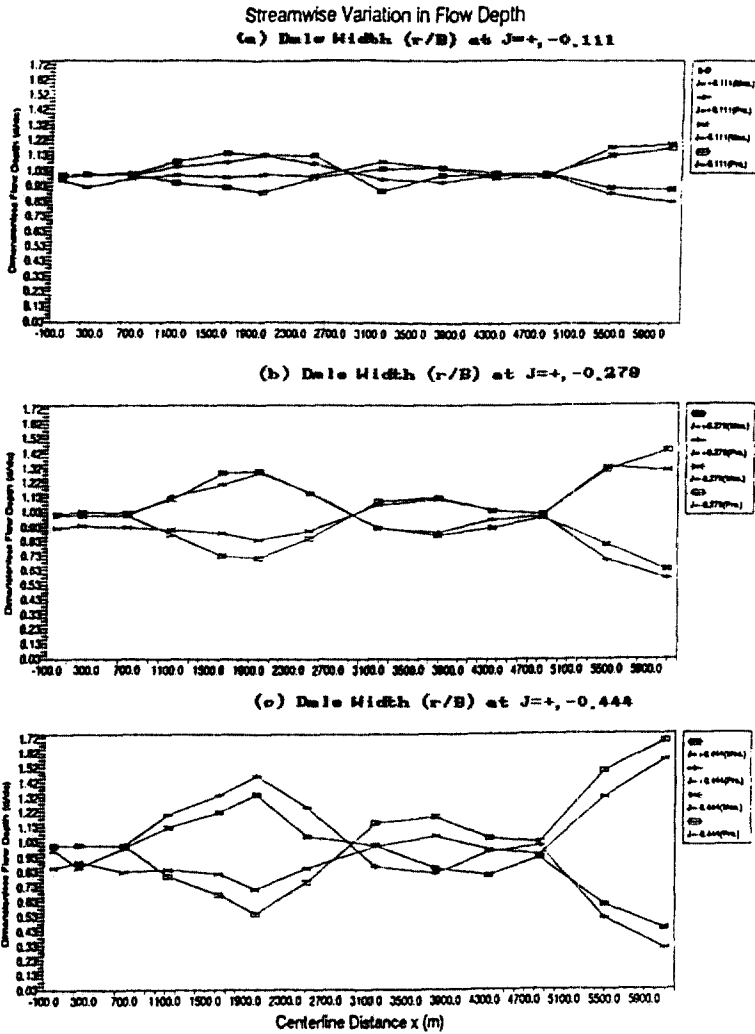


그림 5.4. 복만곡수로에서 무차원수심의 흐름방향변화비교

거의 같은 값을 나타냈고, 무차원폭에 관해서는 선형적인 변화를 보였으며, 음의 경우에는 $I=817$ 과 1791 단면에서 선형적인 변화를 보인 반면, 나머지 단면에서는 거의 일정한 값을 나타냈다. 만곡구간의 경우 곡률반경의 크기에 따라 부차류 유속의 크기가 변화하는 것으로 나타났다.

그림 5.5(3)의 무차원 유사량의 횡방향변화는 양의 직선구간 $I=2, 114, 228$ 단면과 음의 경우 $I=1241, 1409, 1580$ 단면에서 거의 일정하고, 음의 직선구간중 $I=1794, 1889, 1985$ 단면에서는 내측제방부근보다 외측제방부근이 두배 이상의 큰 값을 보였다. 이것은 외측제방부근은 세굴로 인해 유사이송량이 많은 반

면, 내측제방부근은 퇴사작용으로 인한 유사의 이송이 적기 때문인 것으로 생각된다. 만곡구간은 음의 경우 $I=1238, 1583$ 단면에서 거의 일정한 값을 나타냈고, 그 외의 단면에서는 큰 변화폭을 보였는데 이것은 만곡구간의 경우에는 부차류 및 편수위상승 영향 등으로 인해 유사이동량의 변화가 크기 때문인 것으로 사료된다.

수로중심선의 거리에 대한 무차원폭 $J=\pm(0.111, 0.278, 0.444)$ 인 점에서 무차원 수심, 부차류 유속 및 유사량의 흐름방향변화는 그림 5.6과 같다.

그림 5.6에서 무차원 흐름특성과 유사이송량의 흐름방향변화는 각 경우의 만곡구간에서 큰 변화폭

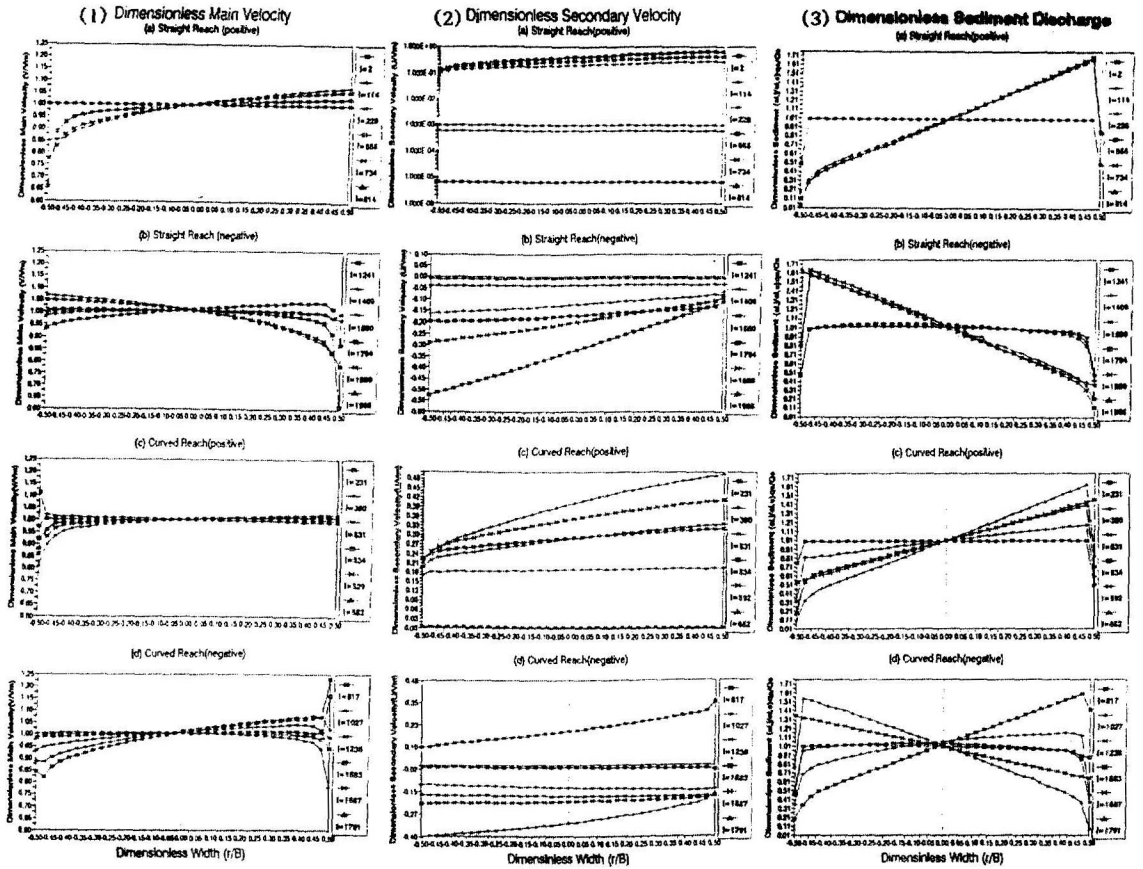


그림 5.5. 복만곡수로에서 무차원 유수량 및 흐름특성의 횡방향변화

을 보였는데 그 원인은 곡률반경의 변화에 따라 특성치가 변화되기 때문인 것으로 생각되며, 곡률 반경 값이 작은 경우가 큰 경우 보다 더 변화량의 폭이 큰 것으로 분석되었다.

6. 결 론

본 연구는 총적하천에서 수로를 수로중심선 곡률 반경의 부호수에 따라 단만곡수로와 복만곡수로로 구분하여 이들 수로에서의 유사 및 흐름특성을 모 의할 수 있도록 개발한 모형으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 단만곡수로에서 수심의 흐름방향변화비교는 그림 5.2와 같이 대체로 양호한 결과를 보였으나, 수로벽부근보다는 수로중심선부근에서 외측벽부근 보다는 내측벽부근에서 오차가 발생되었다.

(2) 복만곡수로에서 수심의 횡방향변화는 그림 5.3 과 같이 양과 음의 직선구간 출구단면 및 만곡구간의 입구단면을 제외하고는 대체로 잘 맞는 것으로 나타났다. 또한, 수심의 흐름방향변화는 무차원폭 $J = \pm 0.444$ 지점의 내외측제방부근에서 다소의 오차를 보였으나 다른 지점에서는 대체로 양호한 결과를 보였다.

(3) 흐름방향 무차원유속의 횡방향변화는 그림 5.5 (1)과 같이 각 단면의 내외측제방부근에서 큰 값을 보였고, 흐름방향변화는 직선구간에서 일정한 값을 보였으나, 양의 만곡구간에서는 내측제방부근에서 음의 경우는 출구단면 내외측제방부근에서 큰 변화 폭을 보였다. 그리고, 무차원 부차류 유속의 횡방향 변화는 그림 5.5(2)와 같이 양의 직선구간에서는 적은 양의 거의 일정한 값을 나타냈으나, 최하류구간인 음의 직선구간 입구단면에서는 만곡구간과 비슷한

Streamwise Variation in Flow & Sediment
(a) Dimensionless Flow Depth

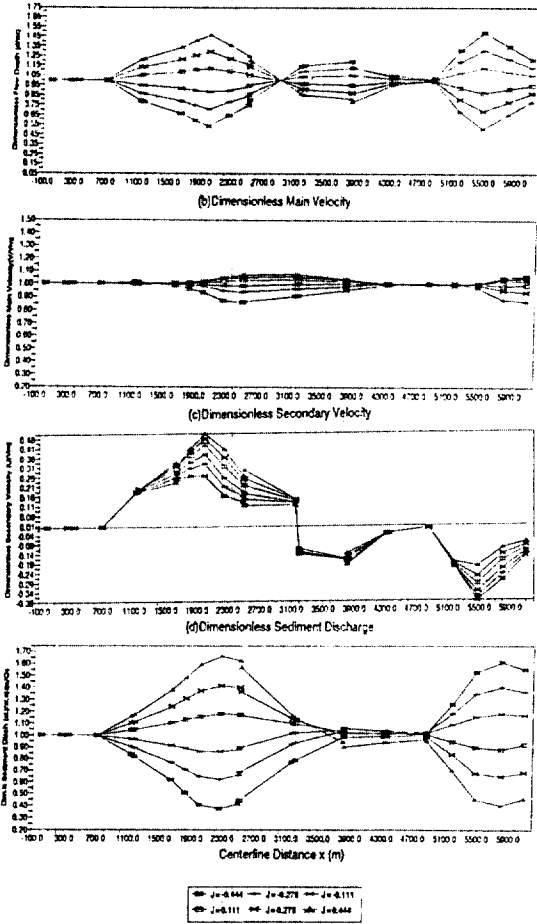


그림 5.6. 복만곡수로에서 무차원 흐름특성 및 유사량의 흐름방향변화

정도의 크기를 갖는 것으로 나타났다.

(4) 무차원 유사량의 횡방향변화는 그림 5.5(3)과 같이 양과 음의 직선구간 출구단면에서 내외측제방간의 평균차이는 외측제방부근이 내측제방부근의 두배 이상의 값을 보였고, 만곡구간에서는 양의 구간보다 음의 구간에서 변화폭이 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Rozovskii, L.L., Flow of Water in Bends of Open Channels, Israel Program for Scientific Translation, 1961, 1-233.
2. Yen, B.C., Characteristics of Subcritical Flow in

a Meandering Channel, I.H.R., the Univ. of Iowa, 1965, 1-155.

3. Engelund, F., "Flow and bed topography in channel bends", *J. of Hydr. Div., ASCE*, 100(11), 1974, 1631-1648.
4. Langbein, W.B. and L.B., "River meanders-Theory of minimum variation", USGS prof. paper, 1966, 422-H.
5. Parker, G., Ikeda, S. and Sawai, K., "Bend theory of river meanders, Part I: Linear development", *J.F.M.*, 112, 1981, 363-377.
6. Hooke, R.L., "Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend", *J. of Geology*, 83(5), 1975, 543-565.
7. Vanoni, V.A., Sedimentation Engineering, Manual and Report on Engineering Practice No. 54, ASCE, 1977, 1-745.
8. Zimmermann, C. and Kennedy, J.F., "Transverse bed slope in curved alluvial streams", *J. of Hydr. Div., ASCE*, 104(1), 1978, 33-48.
9. De Vriend, H.J. and Struiksma, N., "Flow and bed deformation in river bends", *Pro. of Conf. Rivers '83*, ASCE, 1983, 810-828.
10. Falcon, M.A. and Kennedy, J.F., "Flow in alluvial-river curves", *J.F.M.*, 133, 1983, 1-16.
11. Dietrich, W.E. and Smith, J.D., "Bed load transport in a river meander", *W.R.R.*, 20(6), 1984, 1355-1380.
12. Blondeaux, P. and Semimar, G., "A unified bar-bend theory of river meanders", *J.F.M.*, 157, 1985, 449-470.
13. Chang, H.H., *Fluvial Process in River Engineering*, Wiley Interscience, 1988, 1-432.
14. Odgaard, A.J. and Bergs, M.A., "Flow processes in a curved alluvial channel", *W.R.R.*, 24(6), 1988, 768-781.
15. 윤용남, "위치에너지 개념에 의한 하천형태학적 특성분석", *대한토목학회지*, 제 21권 제 2호, 1973, 95-105.
16. 고재용, "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구", *한국수문학회지*, 제 8권 제 2호, 1975, 75-80.
17. 이종태, 윤세희, "개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름특성", *대한토목학회 논문집*, 제 7권 제 3호, 1987, 195-202.
18. 정용태, 최인호, 송재우, "유로만곡부의 횡방향 하상경사에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*, 제 14권 제 1호, 1994, 143-150.
19. 차영기, 이대철, "만곡수로의 횡방향 하상경사와 흐름특성", *한국수문학회지*, 제 24권 제 1호, 1991,

- 99-107.
20. 차영기, 배동만, “정현파형 하천의 이행특성”, **한국수문학회지**, 제 25권 제 2호, 1992, 79-87.
 21. 차영기, 이종석, “수로의 형상과 하상조건에 따른 이행특성”, **한국수문학회지**, 제 26권 제 1호, 1993, 103-114.
 22. Kikkawa, H., Ikede, S. and Kitagawa, A., “Flow and bed topography in curved open channel”, *J. of Hydr. Div., ASCE*, 102(9), 1976, 143-179.
 23. Wylie, C.R., *Differential Equation*, Int. Student Edi., 1979, 1-593.
 24. 건설부, 금강수계 종합정비계획(I), (II) 및 부록, 1988.
 25. Williams, G.P., “Bank-full discharge”, *W.R.R.*, 14 (6), 1978, 1141-1154.

(接受 : 1994. 5. 7)