

수치모형에 의한 만곡수로의 흐름 및 하상특성 분석 An Analysis of the Flow and Bed Topography Characteristics of Curved Channels with Numerical Model

정재욱* / 한정석** / 윤세의***

Jung, Jae Wook / Han, Jung Suk / Yoon, Sei Eui

Abstract

A numerical model which can analyze the flow and bed topography characteristics of a single bend and continuous one was suggested using the equations of mass, momentum, the vertical distribution of secondary flow, and the transverse bed slope. The calculated flow and bed topography characteristic values were compared with the experimental data in a single bend, and the predicted path of maximum streamwise velocity in continuous bends also compared with the Vadnal and Chang's data. The comparisons gave good results. A curved channel with 180 degrees was used. Sand and anthracite were selected as bed materials in the movable bed experiments. The model application of this model to the sand bed and the anthracite one accorded well with the observed values in the experiments. This model was proved to be useful for predicting the flow and bed topography with the change of bed materials. The results of this research could be used to construct and control curved channels as a fundamental information.

keywords: curved channel, bed material, maximum scour depth, numerical model, continuous bend

요 지

본 연구에서는 연속방정식, 운동량방정식, 2차흐름의 연직분포식, 횡방향 하상경사식 등을 이용하여 단일만곡수로 뿐만 아니라 연속만곡수로에서도 흐름특성과 하상변동을 분석할 수 있는 수치모형을 제시하였다. 단일만곡수로에서는 흐름특성치와 하상변동을 실험치와 비교하였으며, 연속만곡수로에서는 최대유속의 이동경로를 Vadnal 수치모형의 계산치, Chang의 실험치와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 중심각 180° 인 유로만곡부에서 고정상 및 이동상의 조건으로 실험을 실시하였으며, 하상재료로는 모래와 안트라사이트를 선택하였다.

모래와 안트라사이트의 경우에도 실험치와 계산치가 비교적 일치하고 있어서 하상재료가 변화되는 유로만곡부에서도 수치모형의 적용성을 확인하였다. 이 연구는 유로만곡부의 설계, 시공, 유지 및 관리 등에 필요한 흐름특성과 하상변동에 관한 기초자료를 제공할 것으로 생각된다.

핵심용어 : 유로만곡부, 하상재료, 최대세굴심, 수치모형, 연속만곡수로

- * 국립방재연구소 위촉연구원
Researcher, National Institute for Disaster Prevention, Seoul 121-719, Korea
- ** 경기대학교 대학원 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon 442-760, Korea
- *** 경기대학교 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon 442-760, Korea

1. 서론

만곡부에서는 원심력, 2차흐름 등에 의한 수위상승, 침식 등으로 제방이 월류되고 파괴되어 홍수피해가 빈번히 발생하고 있다. 만곡하천의 하상은 흐름특성, 만곡도, 단면의 형태, 하상재료 특성 등에 의하여 직선수로 구간보다 예민하게 변동되고 있다. 만곡부의 곡률형태가 매우 다양하고 하상조건에 따라 흐름의 특성이 변화되므로 실험 결과를 이용하여 일반화된 결과치를 도출하기에는 시간적, 경제적으로 어려움이 있다. 이러한 현실을 감안할 때 유로만곡부에서 흐름특성과 하상변동을 이론적으로 분석하여 수치모형화하고, 이의 적용성을 입증하기 위하여 실험을 실시하며 이 결과를 이용하여 만곡하천 구간에서 하상특성을 분석하여 홍수소통, 취수, 관개, 준설, 주운, 친수, 하천수질 등의 하천설계 및 시공에 필요한 기본자료를 제공해야 할 필요성은 크다.

본 연구에서는 만곡하천의 흐름 및 하상변동 특성을 표현하는 식들을 조사·분석하고 연속 및 운동량 방정식, 횡방향 하상경사식, 2차흐름의 연직분포식 등을 이용하여 수치모형을 구성하였다. 또한 수치모형의 검증뿐만 아니라 만곡부의 흐름 및 하상변동 특성을 분석하기 위하여 수리모형실험을 실시하였다. 고정상 만곡수로에서 예비실험을 실시한 후 하상재료를 포설하고 이동상 만곡수로에서 유량 및 하상재료를 변경시키며 실험을 실시하였다. 만곡하천을 설계, 시공 및 관리함에 있어서 필요한 흐름특성과 하상변동 자료를 제공하는 것이 본 연구의 목적이다.

만곡수로에 관한 대규모의 실험은 미육군 공병단의 Friedkin(1945)으로부터 시작되었으며 이 후 이론 및 실험적인 연구가 다양하게 전개되어 왔다. Francis와 Asfari(1971)는 Rozovskii(1961)가 사용한 유한차분식을 적용하여 만곡부의 영향으로 발생하는 흐름방향 접선유속의 재분포를 해석하였으며 이를 위해 중심각 180°에서 곡률반경을 변화시키며 실험을 실시하였다. Ashida와 Michiue(1972)는 충적하천에서 유사량과 수리학적인 저항변수에 관해 연구한 바 있으며 Ferguson(1973)은 규칙적인 만곡형상에 관한 다양한 모형들을 5개로 구분한 후 축적인자와 형상계수 등을 도입하여 상호관계를 비교, 분석하였다. Zimmermann과 Kennedy(1973, 1978)는 곡률이 서로 다른 3개의 만곡수로에서 실험을 실시하여 수로곡률이 유사량과 하상경사, 마찰계수 등에 미치는 영향을 Onishi 등

(1976)의 직선수로 실험결과치와 비교하였다. 또한 그들은 흐름방향으로 변하는 유체의 운동량 모멘트는 원심력과 전단력 때문에 발생하는 회전력과 같다고 가정하여 횡방향 하상경사식을 제시하였다. Englund(1974)는 하상경사를 예측하기 위하여 만곡수로에서 유사의 연속 및 이송관계식을 이용하여 유사의 움직임을 분석하였다. Kalkwijk과 De Vriend(1980)는 연속 및 운동량 방정식을 사용하여 수심을 변화시키며 주흐름, 2차흐름에 관한 수치모형을 분석하고 실험치와도 비교하였다. Odgaard(1986a, 1986b, 1989a, 1989b)는 연속 및 운동량방정식과 유사입자의 시동조건식을 이용하여 흐름과 하상경사를 계산하는 2차원 수치모형을 개발하였으며 여기에는 만곡수로의 유속과 수심, 유로형의 발달과정도 포함되었다. Hsu(1988)는 연속 및 운동량 방정식을 흐름에 적용하고 하상입자에 대해서는 횡방향 힘의 평형관계식을 도입하여 횡단면을 따라 불균일하게 분포하는 입자등급에 관한 연구를 수행하였고 모형검정을 위해 다양한 실험 및 현장자료를 사용하였다. Ervine 등(1993)은 만곡수로에서 통수능을 실제유량과 이론유량의 비율로 정의하고 하폭을 홍수터와 주수로로 구분한 후 이로부터 얻어진 변수들이 유량계수에 미치는 영향을 분석하였다. Whiting과 Dietrich(1993a, 1993b)는 경계전단응력과 흐름형태, 유사의 이송과정 등을 연구하기 위해 큰 진폭을 갖는 대칭성 만곡수로에서 실험을 실시하였는데 흐름과 하상의 횡방향 이동거리의 차이에서 나타나는 불안정성을 사주의 형성과정과 연계시켜 해석하였다. 최근에는 James(1994)가 여러 개의 만곡수로 실험자료를 가지고 만곡손실에 영향을 끼치는 변수들을 예측하였고 Talmon 등(1995)은 횡방향 하상경사를 갖는 수로상에서 유사의 이송방향을 실험적으로 연구하였다.

국내에서는 고재용(1975)이 만곡수로에서 하상변동에 관한 연구를 시작하였으며 송재우 등(1994)과 윤세익와 이종태(1990), 차영기와 이대철(1991) 등에 의해 만곡부의 흐름특성과 하상변동이 연구된 바 있다. 그러나 만곡수로에서 하상재료의 변화에 따른 흐름특성과 연속 만곡수로에 적용 가능한 수치모형에 관한 연구는 미흡한 것으로 조사되었다.

2. 기본이론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 연속방정식, 흐름방향 및 횡방향 운

동량방정식, 횡방향 하상경사식을 이용하여 다음과 같은 지배방정식을 구성하였다(Odgaard, 1986a; Hsu, 1988; Vadnal, 1984).

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{u_b h}{k} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial (v_s r h)}{\partial n} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{u_b}{k} \right)^2 + \frac{\kappa^2}{m^2 h} \left(\frac{u_b}{k} \right)^2 = g \frac{S_c r_c}{r} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_s'}{\partial s} + \frac{\partial v_s}{\partial s} + A v_s = F \quad (3)$$

$$S_t = \frac{\partial h}{\partial n} \quad (4)$$

여기서, u_b 는 하상에서의 흐름방향 유속, h 는 수심, k 는 흐름방향 유속계수, r 은 곡률반경, v_s 는 수면에서의 2차흐름 유속, κ 는 von Karman 상수, m 은 유속분포지수, S_c 는 수로중심부의 흐름방향 수면경사를 나타내며, v_s' 는 원심력으로 인한 수면의 2차흐름 유속, A 와 F 는 각각 유속분포지수 (m)를 포함한 치환변수로 표현된다.

식들을 단순화시키기 위하여 흐름은 비압축성, 정류이며, 횡방향 및 연직방향의 유속은 흐름방향 유속에 비해 작으며, 횡방향 유속의 연직분포는 선형으로 가정한다. 또한 만곡수로 중심부에서는 흐름의 특성치가 유

사하다고 가정한다.

2.2 수치모형

상류(常流)에서는 흐름이 하류단 경계조건에 의하여 지배되고 흐름계산도 하류에서 상류로 진행되지만 만곡수로에서는 2차회전류와 곡률변화 때문에 흐름이 하류방향으로 발달이 되고, 그 크기도 상류구간의 흐름특성에 의존하게 된다(Vadnal, 1984). 그러므로 수로상류단에서는 횡방향으로 경계조건이 필요하게 되고 계산은 하류로 진행이 된다.

Odgaard(1986a)와 Ikeda 등(1987)은 여러 실험결과와 현장실측치를 이용하여 대부분의 만곡수로에서는 수로중심부를 따라서 흐름특성치가 거의 일정하다고 발표하였다. 따라서 본 연구에서는 수로상류단과 중심부에 경계조건을 적용하고 계산은 상류에서 하류로 진행될 수 있도록 유한차분도를 구성하였다. 흐름방향으로 후방차분법을 횡방향으로는 수로중심선을 기준으로 내, 외측으로 각각 전방 및 후방차분법을 사용하였으며 이러한 격자망을 따라 지배방정식이 격점별로 적용되면서 계산이 진행된다. 곡률반경이 일정하고 흐름방향으로 완전 발달된 구간에서는 흐름방향(s 축) 변수들을 생략하면 독립적인 계산이 가능하도록 모형을 구성하였다.

상류구간에서 횡방향단면(n 축)의 초기치와 수로중심선에 경계조건을 적용하면 수심(h), 흐름방향 유속(U), 2차흐름 유속(V), 횡방향 하상경사를 차례로 구할 수 있다. 식 (1) ~ (4)를 차분화시키면 식 (5) ~ (8)과 같다.

$$\frac{1}{2\Delta s_j} [U_{l,j}^2 - U_{l-1,j}^2] + \frac{k^2}{m^2 h_{l,j}} U_{l,j}^2 = g \frac{S_c r_c}{r_j}$$

$$U_{l,j} = \left(\frac{2\Delta s_j g \frac{S_c r_c}{r_j} + U_{l-1,j}^2}{1 + 2\Delta s_j \frac{k^2}{h_{l,j} m^2}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\Delta s_j} \left[\left(\frac{S_t}{a} \right)_{l,j} - \left(\frac{S_t}{a} \right)_{l-1,j} \right] + \frac{1}{\Delta s_j} [V_{l,j} - V_{l-1,j}] + \left(\frac{A}{a} S_t \right)_{l,j} = F_{l,j}$$

$$S_{u,j} = (F_{l,j} \Delta s_j + \left(\frac{S_t}{a} \right)_{l-1,j} - V_{l,j} + V_{l-1,j}) \frac{a_{l,j}}{1 + A_{l,j} \Delta s_j} \quad (6)$$

$$j > 0$$

$$\frac{1}{\Delta S_j} [(Uh)_{i,j} - (Uh)_{i-1,j}] + \frac{1}{r_j \Delta n} (r_j (Vh)_{i,j} - r_{j-1} (Vh)_{i,j-1}) = 0$$

$$V_{i,j} = \frac{1}{h_{i,j}} [(hV)_{i,j-1} \frac{r_{j-1}}{r_j} - \frac{\Delta n}{\Delta S_j} [(Uh)_{i,j} - (Uh)_{i-1,j}]]$$

$$j < 0$$

$$\frac{1}{\Delta S_j} [(Uh)_{i,j} - (Uh)_{i-1,j}] + \frac{1}{r_j \Delta n} (r_{j+1} (Vh)_{i,j+1} - r_j (Vh)_{i,j}) = 0$$

$$V_{i,j} = \frac{1}{h_{i,j}} [(hV)_{i,j+1} \frac{r_{j+1}}{r_j} + \frac{\Delta n}{\Delta S_i} [(Uh)_{i,j} - (Uh)_{i-1,j}]] \quad (7)$$

$$j > 0 \quad h_{i,j} = h_{i,j-1} + \Delta n S_{u,j}, \quad j < 0 \quad h_{i,j} = h_{i,j+1} - \Delta n S_{u,j} \quad (8)$$

2.3 연속만곡수로의 적용

본 연구에서는 연속만곡수로에 사용가능한 Vadnal (1984)의 수치모형과 수로중심선에 경계조건을 도입한 Hsu(1988)의 수치모형을 결합하여 연속만곡수로에 사용할 수 있는 수치모형을 개발하였다. Vadnal(1984)은 흐름방향 하상유속을 연직평균유속으로 대체하고 이에 대한 오차를 보정하기 위하여 비례상수를 도입하였으며 힘의 평형관계식을 고려하여 하상층의 두께 및 전단유속간의 오차보정계수가 포함된 횡방향 하상경사식을 사용하였다. 또한 식의 단순화를 위하여 횡방향 수면경사는 횡방향 하상경사에 비해 작다고 가정하여 횡단면간 수심의 변화율이 포함된 횡방향 운동량 방정식을 무시하였다.

본 연구에서는 횡방향 운동량 방정식을 V 와 v_s' 의 함수로 표시한 후 v_s' 는 다시 Odgaard(1986)의 하상경사식으로 대체하여 횡방향 하상경사를 산정하는 방법을 사용하였으며 경계조건은 수로중심선을 선택하였다.

Vadnal은 상류단(U)과 수로내측부($U = \sqrt{8 g h S_s / f}$, $V=0$)에 경계조건을 취하고 계산은 상류에서 하류로, 각 단면에서는 수로내측에서 외측으로 진행되는 후방차분법을 선택하였다. 격점구성은 수로중심선의 곡률반경을 기준으로 내(-), 외측(+)으로 상반된 부호를 설정하여 임의의 격점간격으로 증가 또는 감소시켰으며 이 경우 곡률이 역전되는 만곡부에서는 곡률반경의 부호를 반대로 하여 횡단면간 격점좌표를 정하였다.

본 연구에서는 만곡유입부에서 상류부로 일정길이의 직선구간을 연장시켜 격자망을 구성하였으며 수로내측부에 경계조건을 적용하기보다는 수로중심선을 선택하였는데, 이는 여러 실험자료에서도 수로중심선에서 흐름특성치가 일정한 값으로 나타남을 보여 주고 있다 (Odgaard, 1986). 그러므로 수로중심선에서 먼저 외측방부로 격점을 따라 수리량이 계산되고 이후 내측방부의 순서로 진행된다. 곡률반경이 변화되거나 역전되는 연결구간에서는 각 격점의 배열을 조정하여 수리량을 계산하였다. 한편, 지베방정식에 사용된 곡률반경을 무한대로 가정함으로써 연속구간 사이에서 나타날 수 있는 직선수로에서도 흐름특성을 계산할 수 있다.

그림 1은 계산순서를 요약한 흐름도이다. 먼저 주어진 만곡부의 형상에 따라 Δn 과 ΔS 를 결정하고 구성된 경계조건에 초기조건이 입력된 후 경험계수를 선택한다. 이후 수로중심선에 경계조건을 도입하여 수심, 입경, 흐름 및 횡방향 유속, 하상경사순으로 계산이 진행되며 각각의 미지수들은 허용오차내로 수렴될 때까지 계산이 되풀이된다.

3. 수리실험

본 실험에서는 기초실험으로서 만곡부 고정상 실험을 먼저 실시하고 그 자료를 바탕으로 이동상 실험을 실시하였다. 이 실험은 국립건설시험소에 설치된 만곡수로를 이용하였으며, 실험수로의 제원과 실험재료의 특성은 표 1과 같다. 체분석 결과, 얻어진 모래의 평균 입경(D_{50})은 0.56mm, 안트라사이트는 0.26mm 정도이며, 모래와 안트라사이트의 기하표준편차(σ)는 각

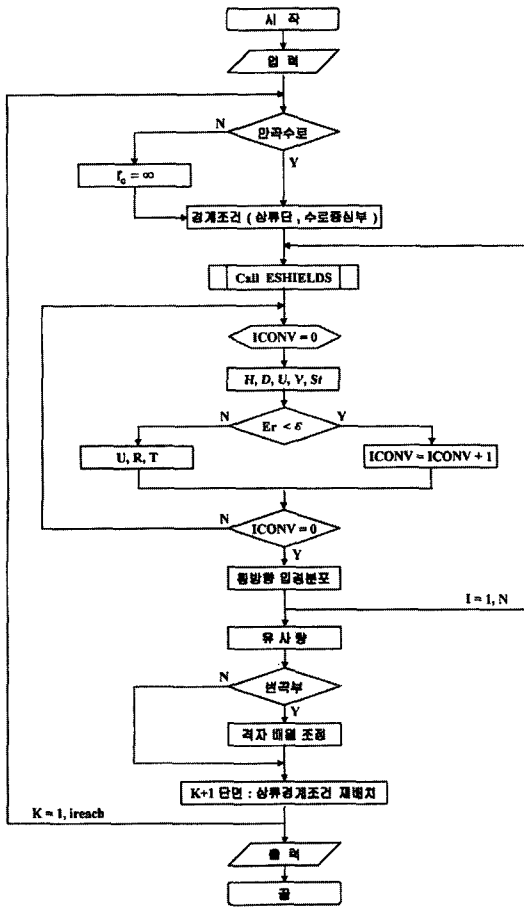


그림 1. 수치모형의 흐름도

1.65와 2.73이다. 실험에서 측정된 수리량은 수위, 유속, 유향 등이며, 분류 만곡부를 만곡각 15° 씩 13개 단면으로 구분하고, 만곡부 입구로부터 상류로, 출구로부터 하류로 하폭의 4배 정도까지 측정선을 분할하였다.

유사량은 실험수로 하류단 밑에 유사량 채집기를 2개 제작하여 등류수심과 사선이 충분히 발생하였을 때 일정시간 간격으로 측정하였다. 실험에 관한 상세한

표 1. 실험수로 제원 및 실험재료 특성

하상재료 \ 제원	길이 (m)	수로폭 (m)	유량 (l/s)	중심각 (°)	곡률반경 (m)	경사	하상 재료		
							D ₅₀ (mm)	비중	σ
모래	34	1.5	80, 110	180°	5.5	1/750	0.56	2.65	1.65
안트라사이트	모래하상과 동일						0.26	1.54	2.73

내용은 정재욱과 윤세의(1998)에 수록되어 있다.

4. 비교 및 고찰

4.1 수위

그림 2~3은 종방향 상대수심을 하상재료별로 실측치와 계산치를 비교한 것이다. 만곡부 입구에서 점진적으로 증가하던 횡방향 상대수심의 계산치는 중심각 30° ~60° 구간에서 가장 크게 계산되었으며 중심각 90° 구간에서 약간 감소하다가 만곡부 하류로 흐름이 진행되면서 다시 증가하였다. 하상재료별로는 안트라사이트인 경우 상대수심의 최대치가 모래보다 약간 빠르

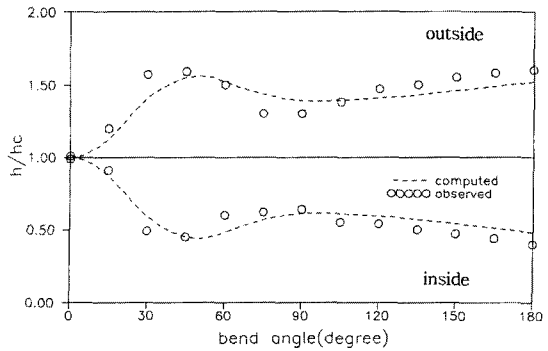


그림 2. 종방향 상대수심(모래)

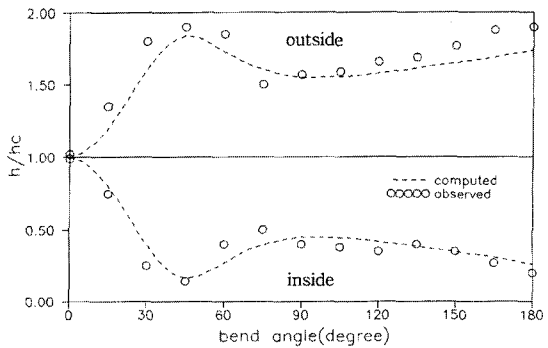


그림 3. 종방향 상대수심(안트라사이트)

게 나타나고 있으며 그 크기도 증가하였다. 이는 계산식에서 횡방향 하상경사율이 입자의 비중 등에 반비례하여 적용되기 때문에 비중이 작은 안트라사이트에서 수심이 증가하고 하상입자의 저항력이 작아 상대수심비의 최대치도 모래보다 약간 빠르게 나타났다.

실측치는 만곡유입부에서 2차 회전류에 의한 횡방향 유속이 하상부근에서 수로내측으로 작용하면서 내, 외측구간의 유사입자를 퇴적 및 세굴시키고, 이후 흐름방향 유속의 최대치가 외측으로 편이되면서 상대수심을 증가시키고 있는 것을 볼 수 있다. 중심각 $60^\circ \sim 135^\circ$ 구간에서 상대수심의 변화가 감소되고 있는 것은 종방향 유속의 최대치가 내측에서 중심부를 통과하면서 수로 내, 외측에 영향을 작게 미치기 때문이다. 전반적으로 만곡수로에서는 횡방향 유속과 종방향 최대유속선의 분포에 따라 상대수심은 크게 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 실측치와 계산치의 비교결과는 비교적 잘 일치하고 있으며, 중심각 $30^\circ \sim 60^\circ$ 구간 외측부에서 약간의 오차가 발생하였는데 하상재료가 안트라사이트인 경우에 크게 나타났다. 이는 외측벽면의 영향을 하상전단응력이 작은 안트라사이트에서 더 크게 받고 있는 것으로 생각된다.

그림 4는 중심각 180° 인 만곡수로에서 하상재료의 입경을 $0.5\text{mm} \sim 2.0\text{mm}$ 까지 변화시키며 흐름방향으로 수심의 계산결과를 나타낸 것이다.

수심의 경우 입경이 작아질수록 상대수심의 변화폭이 커지고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 유한차분식에서 수심계산을 위해서 사용한 횡방향 하상경사식에 입경이 반비례하여 작용하기 때문에 나타난 결과이다. 즉 입경이 감소할수록 횡방향 하상경사가 증가하게 되고 횡방향 하상경사가 증가하면 수치계산을 위해 구성한 격자망에서 수로중심선을 기준으로 내, 외측으로 수심

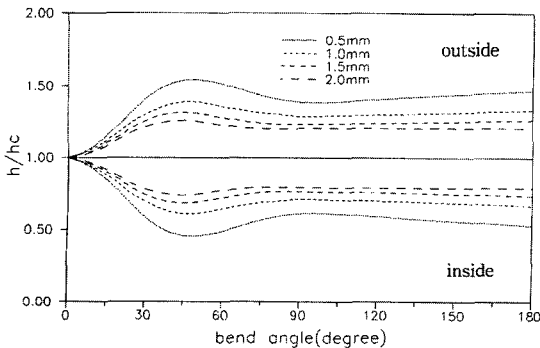


그림 4. 입경변화에 따른 종방향 수심분포

에 영향을 미치기 때문이다.

4.2 유 속

그림 5~6은 종방향으로 하상자료별, 유속분포도를 실측치와 비교한 것이다. 만곡부입구에서는 흐름방향의 압력경사가 내측에서 크기 때문에 안쪽으로 편이되며 그 이후에 2차 흐름의 영향으로 $30^\circ \sim 40^\circ$ 구간에서는 유속의 감속구간이 내측에서 발달되기 시작한다. 이후 외측부근의 속도가 증가하면서 유속의 외측편의 현상은 만곡부 출구까지 계속되었다. 이는 만곡유입부에서 2차회전류가 발달하는 과정에서 하상부근의 횡방향 유속이 내측으로 편이되면서 운동량의 손실이 발생하고 손실된 운동량이 회복되기 위해서 수면 부근에서의 횡방향 유속은 외측으로 편이되는데 이러한 과정이 이웃하는 유체에 영향을 미치면서 하류로 전달되기 때문이다. 즉 횡단면으로 교차하는 유속의 재분포가 흐름방향으로 전이되기 때문에 나타난 결과이다.

유속이 내측에서 외측으로 편이되는 구간은 하상재료가 모래인 경우에 하류로 약간 지체되었고 비중이

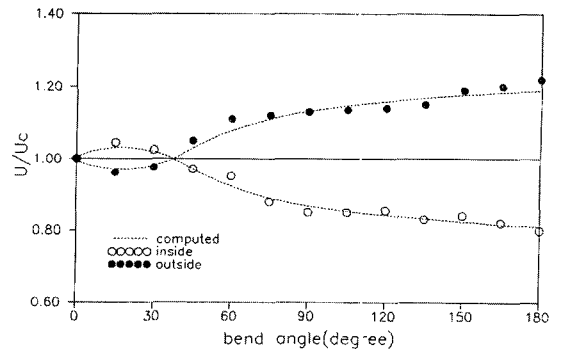


그림 5. 종방향 유속분포도(모래)

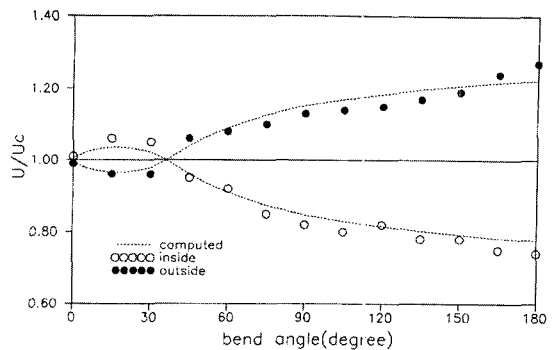


그림 6. 종방향 유속분포도(안트라사이트)

작은 안트라사이트에서는 흐름이 하류로 진행되면서 유속비는 증가하였다. 흐름방향의 유속에 상대수심이 비례함수로 작용하기 때문에 안트라사이트의 유속분포는 크게 계산되었다. 만곡부 입구에서는 계산치가 약간 작게 나타났으며 중심각 60° ~ 120° 구간에서는 외측 부근에서 계산치가 크게 산정되었다. 이는 실험과정에서 측정된 외측벽 부근에서의 역 2차 회전류와 측벽마찰로 인한 흐름방향의 관성력 및 측방구속력이 결합하여 흐름방향의 유속진달을 방해했기 때문으로 생각된다. 직선수로에서 만곡부로 흐름이 진행되면 만곡부 상류부에서 발생한 외측부 감속작용이 하류부로 진행되면서 외측으로 향한 변화속도 성분이 발생되어 외측 유속이 커지고 외측 하안이 받는 에너지도 증가하며 이 구간에서 외측제방에 가해지는 힘이 크기 때문에 제방붕괴가 빈번히 발생하는 구간이다.

그림 7은 만곡수로에서 하상재료의 입경을 변화시키며 흐름방향 유속의 계산결과를 나타낸 것이다. 만곡부 입부에서는 최대유속이 내측부에서 나타나다가 하류로 흐름이 진행되면서 외측 편의현상을 비교적 잘 표현해 주고 있으며 입경이 증가할수록 유속계산치의 변화폭이 감소하고 있다.

유속의 계산식에는 입경이 직접적으로 작용하지는 않지만 수심에 비례하여 표현되며 입경이 감소할수록 수심의 변동폭이 커지게 되고 이 결과가 유속에 영향을 주기 때문에 입경이 증가할수록 유속의 계산치는 감소하였다. 또한 입경은 일정한 간격으로 감소할지라

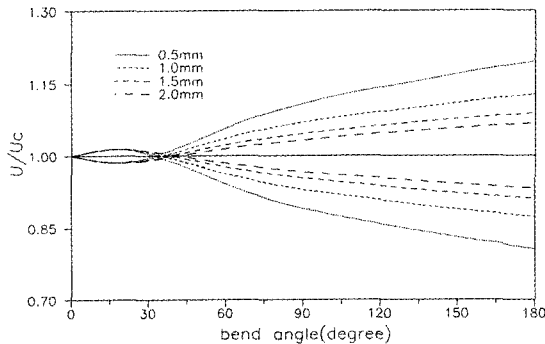


그림 7. 입경변화에 따른 종방향 유속분포

도 수심 및 유속의 계산치는 거의 2배씩 커지고 있는 것을 볼 수 있으며 결국 하상재료가 변함에 따라서 수치모형의 계산결과는 크게 달라지고 있는 것을 확인할 수 있다.

만곡수로에서 나타나는 2차흐름과 최대유속선의 외측편의 현상은 하상세굴심에도 중요하게 작용한다. 흐름이 만곡부로 유입되어 2차흐름이 발생하는 과정에서 하상부근의 유속이 내측으로 편이되어 수로내측부에 퇴적을 발생시킨다. 이후 하류로 흐름이 진행되면서 하상세굴심은 최대유속선의 외측편의 현상으로 외측에서의 세굴심이 크게 나타남을 비교적 잘 표현해 주고 있다.

4.3 연속만곡수로

연속만곡수로에 본 연구에서 제시된 수치모형의 적용성을 확인하기 위하여 Vadnal(1984)의 모의 수치자료와 Chang(1971)의 실측치를 사용하였다.

4.3.1 Vadnal의 수치실험

만곡수로의 출구부분에서 횡방향 하상경사를 측정하고 횡방향유속의 최대치는 흐름방향 유속의 10% 이내 임을 감안하여 검정계수 α 와 β 를 산정하였다. 연속된 만곡수로를 모의하기 위해 적용된 수치실험 자료는 표 2와 같다.

연속만곡수로는 두 개 만곡부(I, II)의 곡률이 서로 역전되며 곡률반경(r_c)은 그림 8에 나타낸 바와 같이 그 크기가 각각 10% 씩 감소되는 4개의 영역으로 구

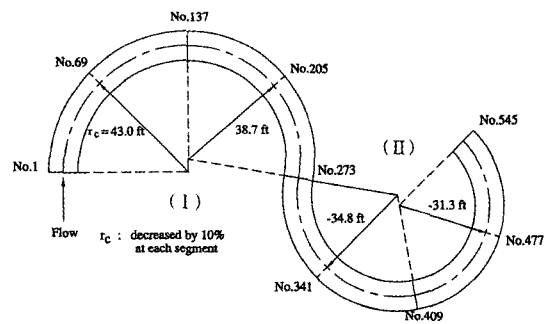


그림 8. 연속만곡수로(Vadnal, 1984)

표 2. 수치실험자료(Oakdale flume)

$Q(m^3/s)$	$h(m)$	$b(m)$	$U(m/s)$	$D_{50}(mm)$	α	β	n
0.179	0.15	2.44	0.48	0.3	1.42	3.27	4.24

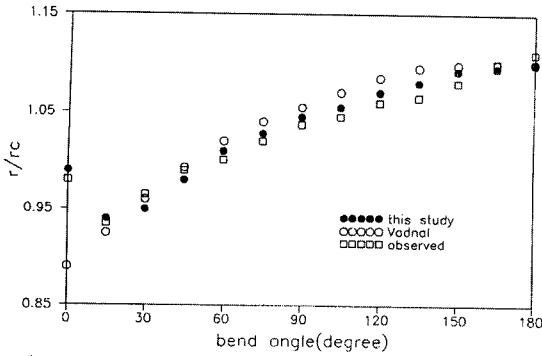


그림 9. 최대유속 발생위치
(본 연구- Vadnal-실측치)

분된다. 편의상 Vadnal의 경우에 한하여 곡률이 역전되는 만곡부와 무관하게 흐름방향으로 우측제방을 내측, 좌측제방은 외측으로 표시하였다.

그림 9는 흐름방향 최대유속이 발생하는 구간을 횡단면별로 나타낸 것이며 Vadnal 및 본 연구에서 계산된 결과치와 실측치를 함께 비교하였다. 만곡유입부로 흐름이 유입되면서 내측에서 크게 나타나던 중방향 유속이 중심각 45°를 지나면서 외측으로 편이되어 만곡부 하류에서는 외측 편이현상이 가장 크게 나타났다. 실측치는 중심각 60°~120° 구간에서 계산치보다 약간 작게 나타났으며 Vadnal의 경우에 비해, 본 연구의 계산치가 비교적 실측치에 접근하였지만 전반적인 경향은 비교적 일치하였다. 특히 상류구간에서 Vadnal의 계산치가 상대적으로 작게 나타났는데 이는 수로상류단에 적용된 경계조건에 흐름방향의 에너지 경사가 포함되고 이 값은 다시 횡단면 임의점의 곡률반경이 반비례하여 적용되기 때문에 발생한 결과이다. 따라서 자연하천에서 제방세굴을 방지하기 위해서는 최대유속선의 이동경로를 파악하는 것이 중요하며 이를 위해서 수치모형의 경계조건은 수로내측보다 중심부에 적용하는 것이 방재공학 측면에서 안전할 것으로 판단된다.

그림 10은 본 연구에서 수행된 계산결과를 단면별로 나타낸 것이다. 전반적으로 첫 번째 만곡부(I)에서는 만곡유입부를 지나 내측으로 편이되던 흐름방향 최대유속이 단면 69를 지나면서 흐름 및 횡방향 유속의 재분포가 진행되어 최대유속은 서서히 외측으로 이동되고 있다.

단면 205에서의 외측 편이현상은 더욱 크게 나타났으며, 이러한 경향은 첫번째 만곡수로(I)의 마지막 구간까지 계속되었다. 만곡부가 역전되기 시작하는 두 번

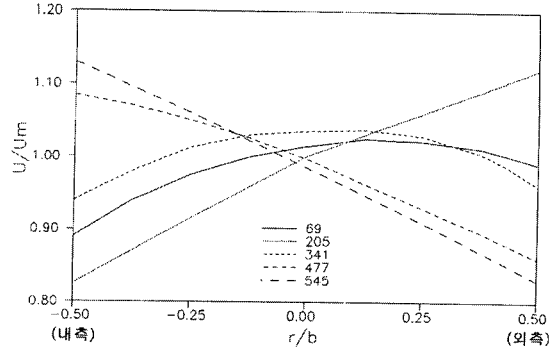


그림 10. 횡단면별 유속분포 비교(본 연구)

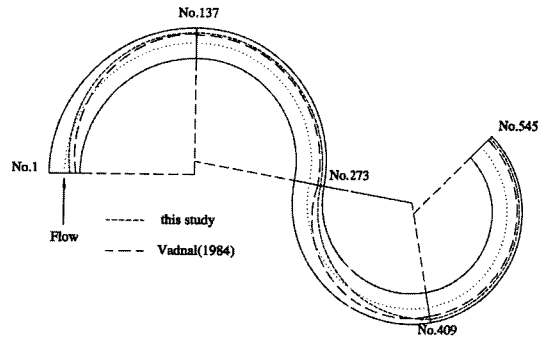


그림 11. 흐름방향 최대유속 분포비교
(본 연구- Vadnal)

째 만곡부(II)에서 흐름방향 최대유속은 단면 341, 외측에서 내측까지 지속적으로 유지되고 있다. 이후 운동량 이송이 수로 중심부를 거치면서 만곡수로의 끝부분인 단면 545에서는 내측부에서 크게 나타났는데 수로 중심선을 횡단하여 발생하는 운동량 이송의 변화과정을 비교적 잘 표현해 주고 있다.

그림 11은 흐름방향 최대유속선의 발생위치를 Vadnal의 결과와 비교한 것이다. 만곡유입부에서는 Vadnal결과치의 내측편의 현상이 크게 나타났으며 단면 137을 거치면서 발생한 최대유속의 외측편의가 단면 273까지 지속되는 현상은 유사하게 나타났다. 단면 409구간내에서는 본 연구의 계산치가 Vadnal의 경우에 비해서 흐름방향 최대유속의 점진적인 내측편의 현상을 보였으며 만곡유출부로 흐름이 진행되면서 내측편의 현상은 비교적 유사하게 나타났다.

4.3.2 Chang의 실험

Chang(1971)에 의한 연속만곡수로는 수로상류부에 중심각 90° 만곡수로를 통하여 흐름이 유입된 후

표 3. Chang(1971)의 실험자료

$h(m)$	$b(m)$	$U(m/s)$	$r_c(m)$	중심각(°)	b/h	r_c/b
0.115	2.34	0.366	8.53	90	20.3	3.66

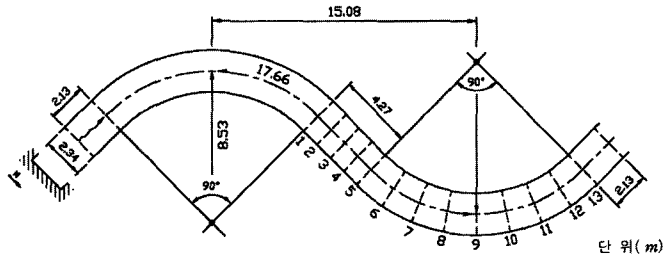


그림 12. 연속만곡수로(Chang, 1971)

4.27m의 직선구간을 거쳐 다시 만곡부가 역전되어 중심각 90°인 만곡수로로 흐름이 이어진다. 관측점 위치도는 그림 12와 같고 수리특성치는 표 3에 나타내었다.

흐름방향 유속측정은 첫 번째 만곡부를 제외한 직선부(1~5)와 두 번째 만곡부(6~13)에서 수행되었으며 계산결과는 그림 13에 나타내었다. 일반적으로 만곡수로 유입부에서는 내측으로 유속이 편이되며 흐름이 하류로 진행되면서 유속의 재분포가 발생하고 만곡수로의 출구부분에서는 외측편의 현상이 실험적으로 증명되었다.

수치모형으로 계산된 결과치는 첫 번째 만곡수로의 마지막 구간에서 유속의 최대치가 외측으로 편이되었다. 이후 그림 13에 나타낸 바와 같이 직선구간으로 흐름이 진행되면서 유속은 거의 변화하지 않았다. 이는 곡률반경을 무한대로 증가시킴에 따라 만곡부를 지배하는 운동량방정식에서 만곡부 특성치를 표현하는 원

심력의 항이 '0'으로 근사되어 나타난 결과이며 이러한 특성은 두 번째 만곡수로에 들어서면서 유속의 최대치가 점차적으로 외측으로 이동되었다. 본 모형은 연속만곡수로 뿐만 아니라 직선부가 만곡부 사이에 존재시에도 계산 가능하다.

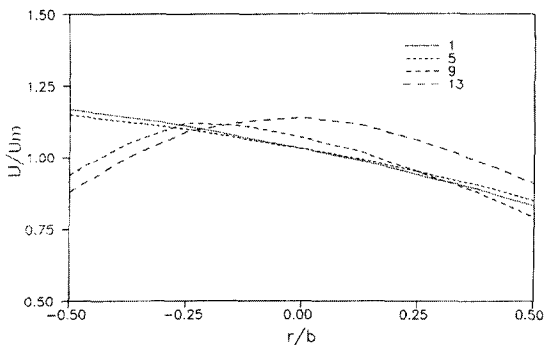


그림 13. 횡단면 유속분포(본 연구)

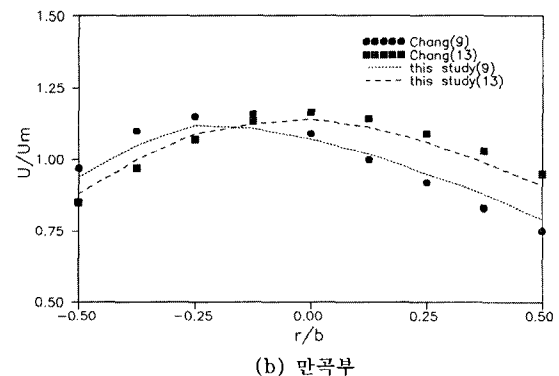
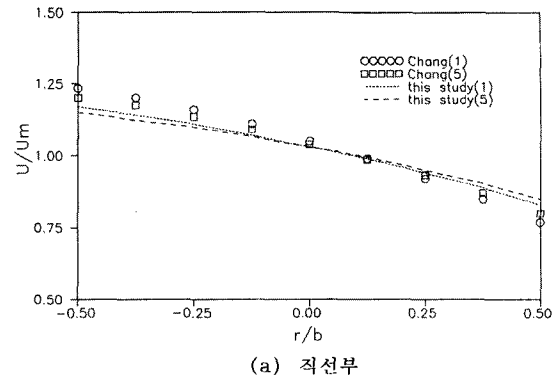


그림 14. 횡단면별 유속분포 비교(본 연구-Chang)

그림 14(a)와 14(b)는 Chang의 실험수로에서 직선부와 만곡부의 실측치를 계산치와 비교한 결과이다. 직선부인 단면 1, 5의 유속분포와 곡선부인 단면 9, 13에서 계산치와의 비교결과는 비교적 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 연속방정식, 운동량방정식, 2차흐름의 연직분포식, 횡방향 하상경사식 등을 이용하여 임의의 중심각을 가진 단순만곡수로에서 뿐만 아니라 연속만곡수로에서도 흐름 및 하상변동특성을 분석할 수 있는 단순화된 수치모형을 제시하였다. 모래와 안트라사이트를 하상재료로 선택하여 실험을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 단일만곡수로의 유속, 수심, 횡방향하상경사 등의 실측치와 계산치가 비교적 잘 일치하고 있어서 모형의 적용성을 확인하였다.

(2) 본 연구에서 제시한 수치모형은 연속만곡수로에서 최대유속선의 이동경로와 수로중심선을 횡단하여 발생하는 운동량 이송의 변화과정을 비교적 잘 표현하였다.

(3) 하상재료가 모래 및 안트라사이트의 경우에도 실험치와 계산치가 비교적 일치하고 있어서 이 수치모형은 하상재료의 변화에도 사용 가능하다고 판단된다.

(4) 종단면 최대유속선은 하상재료에 관계없이 수로 입구 내측으로부터 서서히 외측으로 이동되며 하상재료의 조도가 작을수록 외측 편의현상도 증가하였다.

참 고 문 헌

고재웅 (1975). "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제8권, 제2호, pp. 75-80.

송재우, 최인호, 김지호 (1994). "유로만곡부의 횡방향 하상경사 산정모형에 관한 연구." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제14권, 제6호, pp. 1395-1404.

윤세의, 이종태 (1990). "만곡수로에서의 곡률반경 변화에 따른 흐름특성." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제23권, 제3호, pp. 435-444.

정재욱, 윤세의 (1998). "만곡수로에서의 하상재료 변화에 따른 흐름 및 하상변동에 관한 실험적 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 291-301

차영기, 이대철 (1991). "만곡수로의 횡방향 하상경

사와 흐름특성." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제24권, 제1호, pp. 99-107.

Ashida, K., and Michiue, M. (1972). "Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams." *Trans. of JSCE*, No. 206 Oct. pp. 59-69.

Chang, Y. C. (1971). *Lateral Mixing in Meandering Channels*. Ph.D. dissertation, The University of Iowa, USA.

Engelund, F. (1974). "Flow and bed topography in channel bends." *J. of the Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 100, No. HY11, pp. 1631-1648.

Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.H.J., and Lorena, M. (1993). "Factors affecting conveyance in meandering compound flows." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 1383-1399.

Ferguson, R.I. (1973). "Regular meander path model." *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 1079-1085.

Friedkin, J.F. (1972). "A laboratory study of the meandering of alluvial rivers." *River morphology*, Edited by Schumm, S. A., John-Wiley & Sons, Inc.

Francis, J.R.D., and Asfari, A.F. (1971). "Velocity distribution in wide, curved open channel flows." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 73-89.

Hsu, S.H. (1988). *Mathematical modelling of flow and bed characteristics in curved channels with nonuniform bed material*. Ph.D. dissertation, The University of Iowa.

Ikeda, S., Yamasaka, M., and Chiyoda, M. (1987). "Bed topography and sorting in bends." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 113, No. 2, pp. 190-206.

James, C.S. (1994). "Evaluation of methods for predicting bend Loss in meandering channels." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 120, No. 2, pp. 245-253.

Kalkwijk, J.P.T., and De Vriend, H.J. (1980). "Computation of the flow in shallow river bends." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 18,

- No. 4, pp. 327-342.
- Odgaard, A.J. (1986a). "Meander flow model. I: development." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1136.
- Odgaard, A.J. (1986b). "Meander flow model. II: applications." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1137-1150.
- Odgaard, A.J. (1989a). "River-meander model. I: development." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 11, pp. 1433-1450.
- Odgaard, A.J. (1989b). "River-meander model. II: applications." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 11, pp. 1451-1464.
- Onishi, Y., Jain, S.C., and Kennedy, J.F. (1976). "Effects of meandering in alluvial streams." *J. of the Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 102, No. HY7, pp. 899-917.
- Rozovskii, I.L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel.
- Talmon, A.M., Van Mierlo, M.C.L.M., and Struiksma, N. (1995). "Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 495-517.
- Vadnal, J.L. (1984). *A numerical model for steady flow in meandering alluvial channels*. Ph.D. dissertation, The University of Iowa.
- Whiting, P.J., and Dietrich, W.E. (1993a). "Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders 1. observations." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 11, pp. 3605-3614.
- Whiting, P.J., and Dietrich, W.E. (1993b). "Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders 2. mechanisms." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 11, pp. 3615-3622.
- Zimmermann, C., and Kennedy, J.F. (1973). "Sediment transport and bed forms in laboratory streams of circular plan-form." *Proc. 15th Congr. IAHR*, Paper A-1, Istanbul, Turkey.
- Zimmermann, C., and Kennedy, J.F. (1978). "Transverse bed slopes in curved alluvial streams." *J. of the Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. HY1, pp. 33-48.

(논문번호:99-063/접수:1999.08.20/심사완료:1999.12.02)