

충적하천에 대한 수리학적 형상방정식 유도

Derivation of Downstream Hydraulic Geometry Equations for Alluvial Rivers

이종석* · Pierre Y. Julien**

Lee, Jong-Seok · Pierre Y. Julien

Abstract

This study analyzed downstream hydraulic geometry equations for alluvial channels using the flow rate, flow resistance, secondary motion, and particle mobility. The data set used to test these equations consists of 1,485 measurements: 1,125 field measurements for calibration and verification, 360 field and laboratory measurements for validation. The data set covers a wide range of rivers including meandering and braiding rivers with sand-bed, gravel-bed, and cobble-bed substrate. The regression equations define bankfull conditions for five dependent variables as a function of three independent variables. The calculated downstream hydraulic geometry from these equations is in excellent agreement with the field and laboratory measurements of channel width, average flow depth, mean flow velocity, channel slope, and Shields parameter. These equations can be used to predict the downstream hydraulic geometry of sand-bed to cobble-bed channels with a range of channel width $1.0 < B < 1,100$ m, flow depth $0.1 < y < 20$ m, flow velocity $0.1 < U < 8$ m/s, channel slope $0.00001 < S < 0.02$, and Shields parameter $0.001 < \tau_* < 20$, respectively.

Keywords : secondary flow, meandering rivers, stable channels, particle mobility, downstream hydraulic geometry, bankfull discharge

요지

본 연구는 유량, 흐름저항, 2차흐름 및 입자 이동성에 관한 기본식을 사용하여 충적하천에서의 수리학적 형상 방정식을 유도하였다. 이들 방정식의 유도에는 1,485개 자료가 사용되었는데, 그중 유도와 검정에 현장자료 1,125개, 검증에 현장자료와 실험자료 360개가 각각 사용되었다. 이들 자료는 모래, 자갈, 호박돌 하상재료의 사행하천과 망상하천을 포함하여 광범위한 흐름조건에 분포되어 있다. 5개 종속변수에 대한 방정식은 만체유량 조건하의 3개 독립변수를 함수로 하여 유도되었다. 이들 방정식으로부터 계산된 수로 폭, 수심, 유속, 수로경사 및 Shields 매개변수의 값은 실측치와 아주 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이들 방정식은 각각 수로 폭 $1.0 < B < 1,100$ m, 수심 $0.1 < y < 20$ m, 유속 $0.1 < U < 8$ m/s, 수로경사 $0.00001 < S < 0.02$ 및 Shields 매개변수 $0.001 < \tau_* < 20$ 범위에 속하는 실험실 및 실제 하천자료를 활용하여 유도되었다.

핵심용어 : 2차흐름, 사행하천, 안정수로, 입자 이동성, 수리학적 형상, 만체유량

1. 서론

침식성 충적하천은 주어진 수로 폭과 수심 및 유속, 수로 경사 등에서 유량과 유사량을 공급을 받으면서 안정상태를 유지하기 위해 계속적으로 변화하게 된다. 이러한 충적하천에서 수리학적 형상 방정식은 평균 1.5년 홍수량에 해당하는 만체유량 조건하의 수로 폭, 평균수심, 평균유속, 수

로경사, Shields 매개변수 및 하상재료 등을 변수로 하는 함수관계로부터 회귀식을 유도할 수 있으며, 이를 통해 수리학적 형상을 예측할 수 있다. 이들 충적수로의 수리학적 형상의 예측방법과 관련된 연구는 평형조건이나 안정론에 근거하여 수로형상의 연구가 진행된 지 100여년이 지난 오늘날은 주로 하천역학분야에서 이루어지고 있다.

충적하천에서의 유사이송과 흐름특성 연구에 관한 주요

*정회원 · 한밭대학교 토목·환경·도시공학부 부교수(E-mail: ljs96@hanbat.ac.kr)

**Professor, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University(E-mail: pierre@engr.colostate.edu)

공현자로는 1895년의 Kennedy 이후 1960년도까지 Keulegan(1938), Einstein과 Chien(1954), Chien(1957) 등이 있는데, 이들은 주로 평형 접근법에 의한 수리학적 형상 관계식 등을 연구하였다(Wargadalam 1993). 그 후 Dury(1961)는 만체유량의 해석에 통계적 방법을 적용하였고, Rozovskii(1961)는 많은 실측자료를 통해 사행수로의 흐름특성을 2차원적으로 해석하였으며, Leopold 등(1964), Langbein과 Leopold(1966), Woodyer(1968)는 최소변화 이론에 접근한 사행하천과 만체유량의 발생빈도 등에 관해 연구하였다. Chitale(1973), Hey(1978), Chang(1979), Ranga Raju와 Garde(1988)는 수로조도와 수리학적 형상 및 수로의 형상관계 등에 관해 연구하였고, Parker(1976), Callander(1978), Engelund와 Fredsoe(1982), Falcon과 Kennedy(1983)는 사행하천과 망상하천의 유사이송 및 하상특성 등에 관해 연구하였다. Anthony(1992), Karim(1995), Cheema 등(1997)은 충적수로의 안정 수로폭과 흐름분포 특성 및 하상형상에 관해 연구하였고, Cao와 Knight(1998)은 충적 사행하천에서의 수리학적 형상에 관해 연구하였으며, Julien과 Anthony(2001), Huang 등(2002), Kassem과 Chaudhry(2002)는 직선수로의 수리학적 형상과 사행하천의 유사이송 및 하상변형의 수치적 접근에 관해 연구하였다.

국내에서는 노섭 등(1993)과 유권규 등(1993) 및 이(1995, 1999)가 충적하천의 유료이동, 하상마찰 변화 및 하상변화 추정에 관해 연구하였고, 임명진과 조원철(2001)은 소규모 충적수로의 안정하폭 및 수심에 관해 연구하였으며, 이희철과 이은태(2002)는 충적하천의 안정도 계획을 위한 지배유량 산정에 관해 연구하였다.

본 연구는 충적하천에서 수리학적 형상 방정식을 2차원 정상류하의 유량, 흐름저항, 2차흐름 및 비접착성 토사이동의 기본식에 근거하여 유도하고자 한다. 식의 유도에는 국내외 총 1,485개 자료가 사용되었는데, 그 중 식의 유도와 검정에는 사행하천과 망상하천에서 측정된 만체유량 조건하의 모래, 자갈, 호박돌 하상수로 1,125개 현장자료가 사용되었다. 이를 자료를 사용하여 비선형 회귀분석을 실시함으로써 수로 폭, 수심, 유속, 수로경사, Shields 매개변수의 5개 수리학적 형상 방정식이 유도되었다. 또한 유도된 형상 방정식은 같은 자료를 이용하여 검정작업을 수행하였고, 360개 현장자료와 실험자료는 수공실무의 활용성 확보를 위한 검증작업에 사용되었다. 이를 과정을 통해 유도된 형상 방정식이 충적하천의 수리학적 형상을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 이론적 배경

침식성 충적하천에서 만체유량하의 안정수로 형상 방정식은 유량과 흐름저항 및 2차흐름, 토사입자의 이동성에

관한 기본식(Julien과 Wargadalam, 1995)을 적용함으로써 유도할 수 있는데, 이들중 유량과 흐름저항에 관한 기본식은 다음과 같다.

$$Q = ByU \quad (1)$$

$$U = k\sqrt{8g}(y/D_{50})^\beta y^{1/2} S^{1/2} \quad (2)$$

여기서 Q 는 유량(m^3/s)이고, B 는 수로 폭(m)이며, y 는 평균수심(m), U 는 평균유속(m/s)이다. 또 β 는 상대 점수비(y/D_{50})가 감소함에 따라 증가되는 지수이고, k 는 대수형 식을 멱함수 형태의 식으로 변환시킬 때 사용되는 계수이다. 식 (2)는 Darcy-Weisbach의 마찰손실계수로부터 유도할 수 있는데, 대수형 식은 하상에서의 유속관계를 명확하게 정의하기 어려우므로 멱함수 형의 식이 많이 사용된다.

정상등류조건하의 직선수로에 적용된 흐름방향 하상전단응력 τ_θ 는 단수반경 $R_h = Cy$ 와 물의 밀도 ρ 및 수로경사 S 의 함수이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_\theta = CpgyS \quad (3)$$

식 (3)에서 B/y 값이 큰 수로라면 매개변수 C 는 R_h 가 수심 y 와 같게될 것이므로 1에 가깝게 된다.

2차원 충적하천에서 2차흐름은 흐름방향의 형태학적 변화와 하상재료의 특성에 따라 발생된다. 수면부근의 유선은 수로 중심선을 기준으로 외측제방을 향해 편구배를 갖는 반면, 하상부근의 유선은 내측제방쪽으로 꺾이게 된다. 이러한 흐름특성 때문에 충적 사행하천의 흐름해석은 그림 1과 같이 곡선형 좌표계가 사용된다.

Rozovskii(1961)에 의하면 사행하천 흐름에서 원심 가속도향의 상대적인 크기는 구심가속도가 압력경사와 횡방향 전단응력에 의해 상대적인 평형을 이룸으로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{u^2}{r} = gS_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (4)$$

여기서 u 는 흐름방향 접유속이고, τ_r 은 흐름방향 전단응력이며, S_r 은 곡률반경 r 및 연직좌표 z 에 따라 변화하는 횡방향 수면경사이다.

식 (4)는 그림 1의 점 A에 무차원 매개변수를 도입하고, 밀도 ρ 와 유체의 미소크기 dx, dr, dz 가 갖는 체적의 곱을 구간의 무차원 체적 ∇_* 에 관해 적분함으로써 다음과 같은 횡방향의 무차원형 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho By \int_{\nabla_*} \frac{u_*^2}{r_*} d\nabla_* = \rho gy RBS_{rA} \int_{\nabla_*} S_{r*} d\nabla_* - RB \tau_{rR} \int_{\nabla_*} \frac{\partial \tau_{r*}}{\partial z_*} d\nabla_* \quad (5)$$

여기서 S_{rA} 는 곡률반경 R 인 임의 점 A에서의 횡방향 수면경사이고, τ_{rR} 는 R_A 점에서의 횡방향 경계전단응력이며, $u_*(= u/U)$ 는 무차원 유속, $z_*(= z/y)$ 는 무차원 수심, $r_*(= r/R)$ 는 무차원 곡률반경, $\tau_{r*}(= \tau_r/\tau_{rR})$ 는 무차원 횡방향 전단응

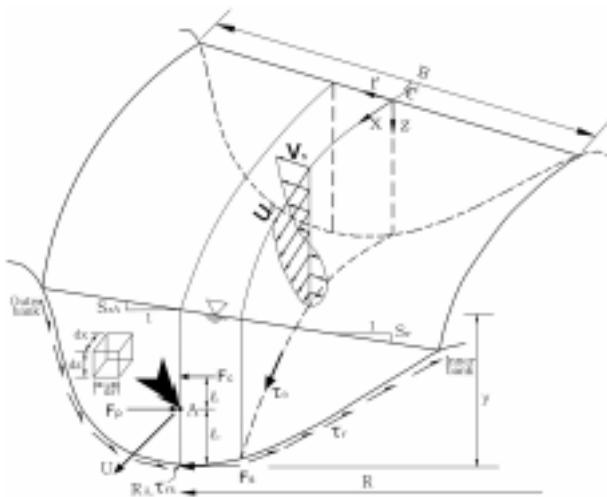


Fig. 1. Definition of Alluvial Meandering Channel

력, $S_r (= S_r / S_{rR})$ 는 무차원 수면경사이다. 또한 $dV_* (= dV / BR)$ 는 무차원 미소체적이다, $dV (= dx dr dz)$ 는 미소 단면적 $dA (= dr dz)$ 에 흐름방향의 미소구간길이 dx 를 곱한 유체의 미소체적이다.

식 (5)는 그림 1에서와 같이 좌변은 원심력이고, 우변의 첫째항은 압력 힘이며, 둘째항의 적분은 전단력이다. 압력 힘은 임의 점 A로부터 거리 l_1 에 작용되는 원심력의 합과 평형을 이루는 반면, 전단력은 점 A로부터 거리 l_2 에 작용하므로 점 A 주위의 모멘트 평형은 다음과 같다.

$$M_r = \frac{\rho y U^2}{\tau_{rR} R} = \frac{l_2 \int_{V_*} \frac{\partial \tau_{r*}}{\partial z_*} dV_*}{l_1 \int_{V_*} \frac{u_*^2}{r_*} dV_*} \quad (6)$$

여기서 M_r 는 무차원 매개변수로 2차흐름에 의해서 발생되는 원심력의 작용으로 인해 감소된 전단력과 손실된 에너지의 비이다.

Julien과 Wargadalam(1995)에 따르면, 흐름방향 하상전단응력 τ_θ 에 대한 횡방향 전단응력 τ_{rR} 의 비는 하상부근 유선의 편각 λ 와 같으므로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tan \lambda = \frac{\tau_{rR}}{\tau_\theta} = \alpha \frac{y}{R} \quad (7)$$

여기서 $\alpha [= (8k^2/CM_r)(y/D_{50})^{2\beta}]$ 는 식 (2)와 (3) 및 (6)의 조합에 의한 매개변수로 Rozovskii (1961), Engelund(1974), Odgaard(1981), Dietrich와 Smith(1984), Hussein과 Smith (1986) 등에 의해 약간 다른 값이 제안되었으나, 이는 상대 잡수비(y/D_{50})에 따라 변화되며, 대략 11을 갖는다.

편각 λ 에 대한 Rozovskii(1961)의 다음 공식이 사행하천의 2차흐름을 해석하는데 사용된다.

$$\tan \lambda = k_r \left(\frac{y}{D_{50}} \right)^\delta \left(\frac{y}{R} \right) \quad (8)$$

여기서 k_r 과 δ 는 각각 저항식의 계수와 지수로서 $k_r = 11$,

$\delta = 0$ 일 때 $\alpha = 11$ 이 된다.

직선수로에서 비점착성 토사의 안정성은 흐름방향의 전단력과 입자무게의 상대적인 크기로 표시할 수 있는데, 이를 두 힘의 비를 입자의 흐름방향 이동계수 즉, Shields 매개변수로 부르며, 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_* = \frac{\tau_\theta}{(\rho_s - \rho) g D_{50}} \quad (9)$$

여기서 τ_* 는 Shields 매개변수이고, ρ 와 ρ_s 는 각각 물 및 토사입자의 밀도이다. Shields 매개변수의 한계값 τ_{*c} 는 대략 0.047이며, 이보다 큰 값을 가질 때 비점착성 토사는 운동을 시작한다.

3. 형상 방정식

수리학적으로 거친 난류조건하의 비점착성 충적수로에 대한 수리학적 형상 방정식은 식 (1)의 유량, 식 (2)의 흐름저항, 식 (3)과 (9)의 입자 이동성 및 식 (8)의 2차흐름에 관한 4개 기본식을 조합하여 풀므로써 유도할 수 있다. 이들 식으로부터 유량, 수로경사, 하상재료 또는 Shields 매개변수의 3개를 독립변수로 하는 멱함수 형인 수로 폭, 평균수심, 평균유속, 수로경사 및 Shields 매개변수의 5개 종속변수에 대한 형상 방정식을 도출하였다. 식 (2)에서 지수 $\beta = 1/\ln(12.2(y/D_{50}))$ 으로 Manning-Strickler 저항 방정식의 $\beta = 1/6$ 에 상응하는 값이다(Julien 2002). 즉, 저항 방정식으로 Manning 식을 적용 할 때 $\beta = 1/6$ 을 사용하여 유도된 식 (10a)~(14a)를 형상 방정식이라 한다.

본 연구에는 표 1에서와 같이 총 1,485개의 자료가 사용되었는데, 그중 식의 유도와 검정에는 모래, 자갈, 호박돌 하상재료의 사행하천과 망상하천 자료가 포함된 만제 유량 흐름조건의 현장자료 1,125개가 사용되었고, 유도된 식의 적용성 확보를 위한 검증에는 하천형상과 하상특성이 광범위하게 포함된 309개 현장자료와 51개 실험자료를 합한 360개 자료가 사용되었다.

3.1 방정식의 유도와 검정

수리학적 형상 관계식의 예는 문헌을 통해 활용할 수 있는데, 전형적인 예는 수로 폭과 수심 및 유속, 수로경사가 만체유량이나 평형유량 및 연평균유출량의 항으로 표시된다. 유량 또는 수로경사 만을 독립변수로 하는 1개 변수식과 이들 2개 변수를 독립변수로 하는 2개 변수식이 많이 제안되었다. 3개 변수식으로 하상재료를 추가한 최근 연구에는 기준 유사크기로 체적통과 중량백분율로 표시된 유사분석표의 50%, 65%, 84% 및 90%인 유사크기가 사용된다. 이 중에서 대부분의 경우 중앙입경인 D_{50} 이 많이 사용된다.

Julien과 Wargadalam(1995)은 표 2에서와 같이 3개의

Table 1. Verification and Validation Data Range

Notation	Verification data (1,125)	Validation data (360)	
		Field(309)	Laboratory(51)
B (m)	1.44~1,097	2.32~610	0.220~2.44
y (m)	0.04~16	0.10~13	0.005~0.244
U (m/s)	0.02~7.1	0.04~4.26	0.110~0.86
Q (m ³ /s)	0.0478~26,560	0.1370~11,546	0.0002~0.227
S (-)	0.00001~0.081	0.000044~0.0508	0.00023~0.0172
D ₅₀ (mm)	0.01~945	0.02~343	0.011~2.30
τ _* (-)	0.00092~35.5	0.00093~12.7	0.01337~5.89

Table 2. Downstream Hydraulic Geometry Equations for Stable Channel

Hydraulic geometry	Author	Derivation			Verification		
		Equation	Eq. No.	R ²	Equation	Eq. No.	R ²
Channel width (m)	LEE	$B = 3.0040Q^{0.4265}D_{50}^{-0.0029}S^{-0.1539}$	(10a)	0.8268	$B_p = 0.8701B_m$	(10b)	0.8707
	J-W	$W = 1.33Q^{0.44}d_s^{-0.11}S^{-0.22}$	(10a')		$W_p = 1.5223W_m$	(10b')	0.7719
Flow depth (m)	LEE	$y = 0.2013Q^{0.3364}D_{50}^{-0.0251}S^{-0.0605}$	(11a)	0.8574	$y_p = 0.9237y_m$	(11b)	0.9250
	J-W	$h = 0.2Q^{0.33}d_s^{0.17}S^{-0.17}$	(11a')		$h_p = 0.7742h_m$	(11b')	0.8050
Flow velocity (m/s)	LEE	$U = 2.9968Q^{0.1989}D_{50}^{0.0077}S^{0.2429}$	(12a)	0.5351	$U_p = 0.8943U_m$	(12b)	0.8941
	J-W	$V = 3.76Q^{0.22}d_s^{-0.05}S^{0.39}$	(12a')		$V_p = 0.6506V_m$	(12b')	0.8745
Channel slope	LEE	$S = 4.9819Q^{-0.3460}D_{50}^{0.9554}\tau_*^{0.9669}$	(13a)	0.9151	$S_p = 0.9023S_m$	(13b)	0.9263
	J-W	$S = 12.608Q^{0.87}d_s^{2.03}\tau_\theta^{*1.02}$	(13a')		$S_p = 1.3107S_m$	(13b')	0.8568
Shields parameter	LEE	$\tau_* = 0.0901Q^{0.4238}D_{50}^{-0.9656}S^{0.9127}$	(14a)	0.9588	$\tau_{*p} = 0.9589\tau_{*m}$	(14b)	0.9599
	J-W	$\tau_\theta^* = 0.121Q^{0.33}d_s^{-0.83}S^{0.83}$	(14a')		$\tau_{\theta p}^* = 0.3141\tau_{\theta m}^*$	(14b')	0.9340

변수로된 형상 관계식을 현장자료 382개로부터 유량(Q), 하상재료(d_s), 수로경사(S)를 독립변수로 하여 수로 폭(W), 수심(h), 유속(V), 수로경사(S) 또는 Shields 매개변수(τ_θ^*)를 예측할 수 있는 식을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 표 2의 식 (10a')~(14a')를 기존 식이라 부르며, 이 식의 예측정도를 향상시킴으로써 수공실무에서 충적하천의 수리학적 형상을 예측하는데 활용할 수 있도록 하고자 표 1과 같은 자료를 사용하여 새로운 관계식을 제안하였다.

본 연구에 사용된 총 1,485개 자료중, 식의 유도와 검정에 사용된 1,125개의 자료에는 Griffiths(1981), Church와 Rood(1983), Hey와 Thorne(1986), Higginson과 Johnston(1988)의 자료 764개 외에 Emmett(1972), Williams(1978), 이(1999), Kodoatie(2000) 등의 자료 361개가 추가되었다.

또한, 충적수로의 형상 방정식 유도에는 하천에서 흐름 특성을 가장 잘 대변할 수 있는 주요 3개 독립변수로 유량, 수로경사 또는 무차원 Shields 매개변수, 하상재료를 택하였다. 그리고 이를 변수를 함수로 하여 유도된 5개의 식 (10a)~(14a)를 제안 식이라 부르며, 이는 표 2와 같이 수로 폭, 수심, 유속, 수로경사 또는 무차원 Shields 매개변수를 예측하는데 활용할 수 있다. 이를 제안 식의

유도에는 SAS 프로그램(Release 8.02)의 PROC NLIN을 사용하였고, 제안 식의 검정은 기존 식에 의한 예측값과 실측치를 정량적으로 비교함으로써 이루어졌는데, 그 결과는 표 2 및 그림 2~6과 같이 나타났다.

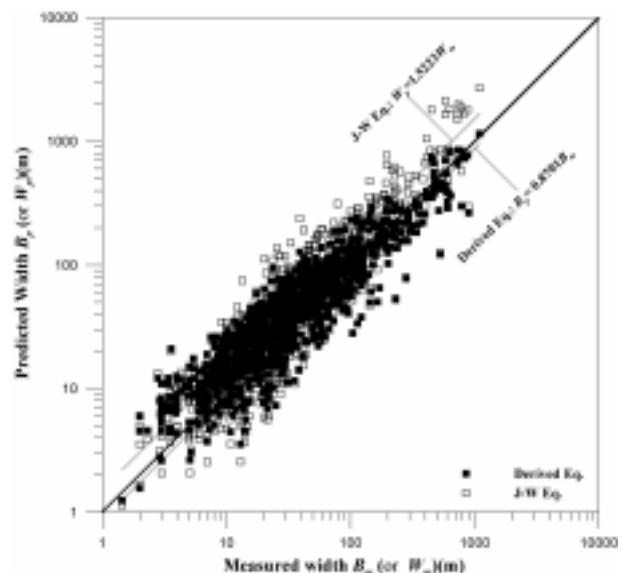


Fig. 2. Verification of Channel Width

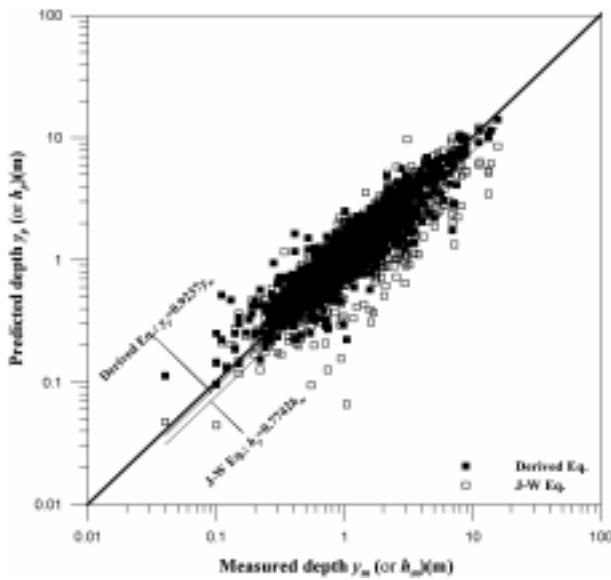


Fig. 3. Verification of Flow Depth

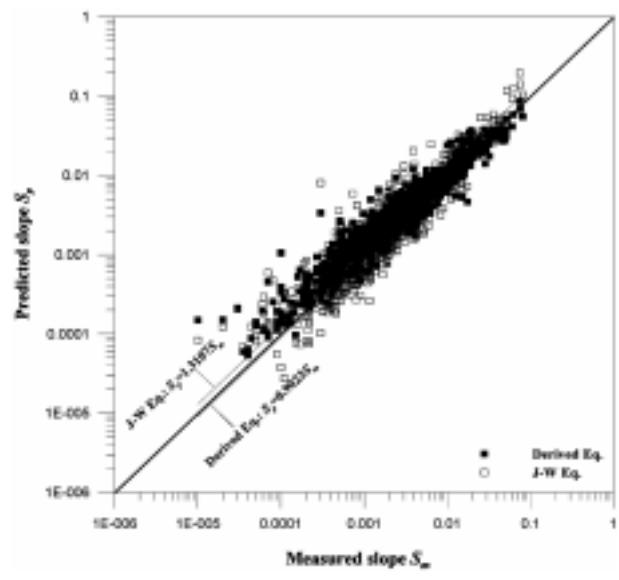


Fig. 5. Verification of Channel Slope

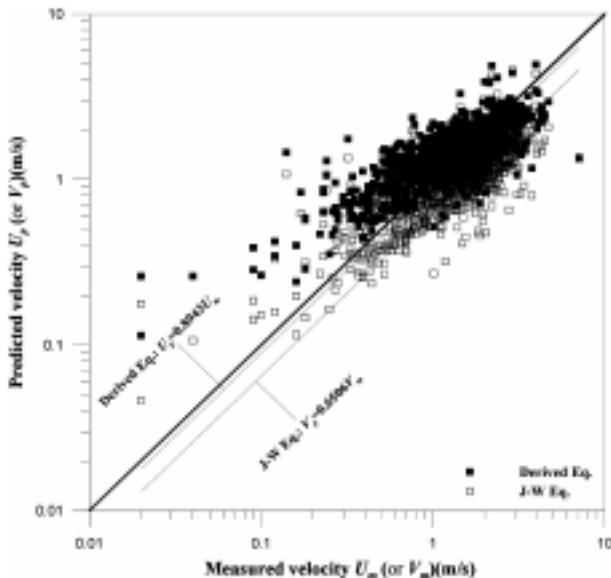


Fig. 4. Verification of Flow Velocity

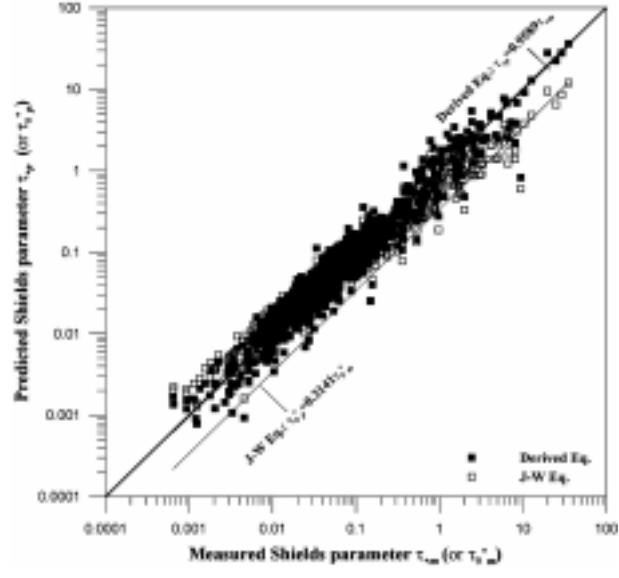


Fig. 6. Verification of Shields Parameter

3.2 방정식의 검증

제안 식 (10a)~(14a)의 검증자료로는 표 1에서와 같이 총 360개가 사용되었는데, 그중 현장자료에는 Brownlie (1981), Andrews(1984), Bathurst(1985), Collazzi(1985, 1989), Collazzi와 Ireland(1985), Colosimo 등(1988), 01(2001), Peter 등(1999), Castro와 Jackson(2001)의 309개가 포함되었으며, 실험자료에는 Kodoatie(2000), Julien(2002) 등의 51개가 사용되었다.

또한, 이들 제안 식의 검증에 사용된 자료중 현장자료는 표 3과 같이 하상재료의 크기에 따라 $D_{50} < 2$ mm인 경우는 모래하상, $2 \leq D_{50} < 64$ mm인 경우는 자갈하상, $64 \text{ mm} \leq D_{50}$ 인 경우에는 호박돌 하상으로 각각 구분하여 적용하였다. 이들 자료의 분포범위는 사행하천 및 망상하천

등 다양한 흐름조건이 광범위하게 포함되었다. 그리고 제안 식의 검증은 제안 식에 의해 계산된 수로 폭, 수심, 유속, 수로경사 또는 Shields 매개변수 값과 실측치를 정량적으로 비교함으로써 이루어졌는데, 그 결과는 그림 7~11과 같이 나타났다.

4. 결과 분석

충적하천의 흐름과 유사 이동성 등 4개 기본식에 근거하여 유도된 제안 식 (10a)~(14a)는 만계 흐름조건하의 유량, 하상재료, 수로경사 또는 Shields 매개변수 3개의 주요변수로 구성되었다. 이들 주요변수의 역할은 형으로 유도된 제안 식은 충적하천에서의 수리학적 형상을 예측

Table 3. Validation Range in Field Data (309 measurements)

Parameter	Sand ($D_{50} < 2$ mm; 45)	Gravel ($2 \leq D_{50} < 64$ mm; 138)	Cobble ($64 \text{ mm} \leq D_{50}$; 126)
B (m)	3.62~610	2.32~594	4~104
y (m)	0.15~13.28	0.11~8.84	0.10~3.13
U (m/s)	0.10~2.93	0.04~3.32	0.26~4.26
Q (m ³ /s)	0.5377~10,222	0.40~11,546	0.1370~650
S (-)	0.000044~0.00275	0.0001~0.026	0.0003~0.0508
D_{50} (mm)	0.02~1.44	2~63	64~343
τ_* (-)	0.04242~12.75	0.00093~2.08	0.00176~0.15

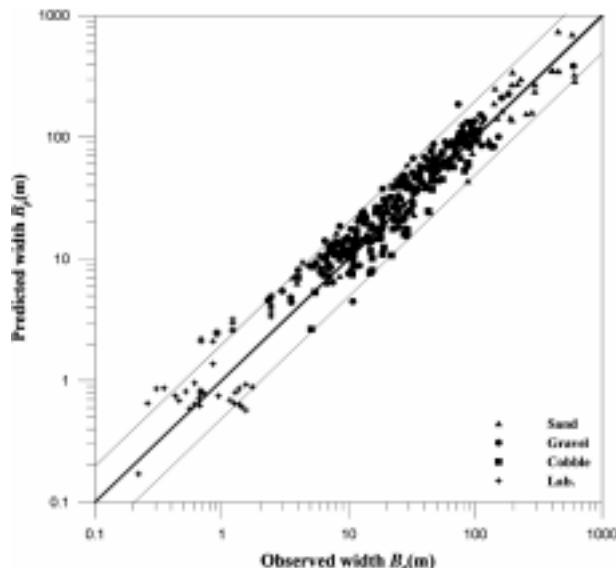


Fig. 7. Validation of Channel Width

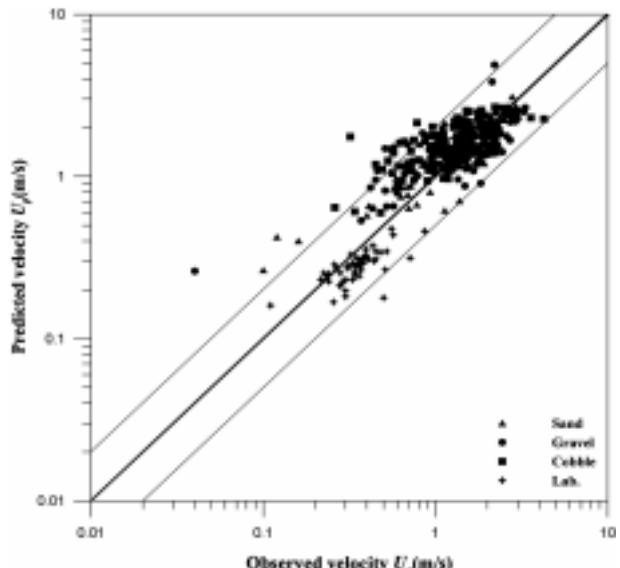


Fig. 9 Validation of Flow Velocity

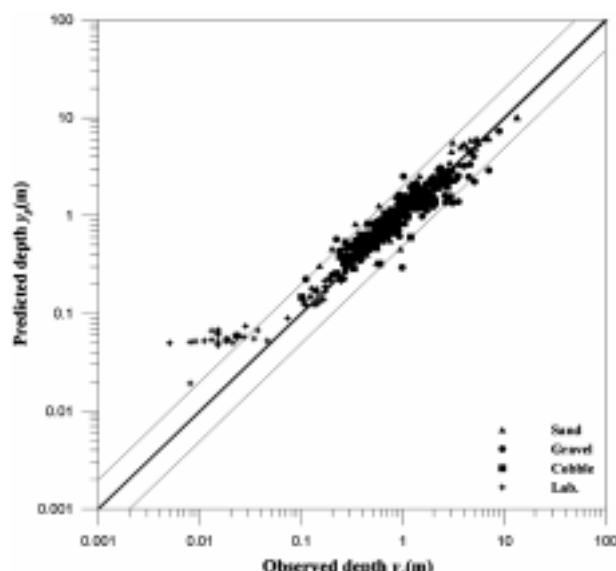


Fig. 8 Validation of Flow Depth

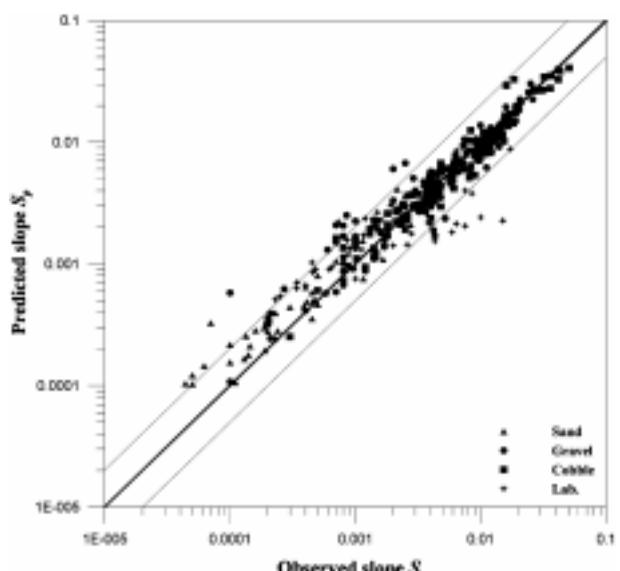


Fig. 10. Validation of Channel Slope

하는데 활용할 수 있도록 검정과 검증작업이 수행되었다. 검정과 검증은 기준 식과 제안 식에 의한 예측치와 실측치를 정량적으로 비교함으로써 이루어졌으며, 이들 과정에

는 1,485개 모래, 자갈, 호박돌 하상재료의 사행하천과 망상하천 자료가 포함된 현장자료와 실험자료가 사용되었다.

표 2에서와 같이 본 연구에서 유도된 제안 식은 평균

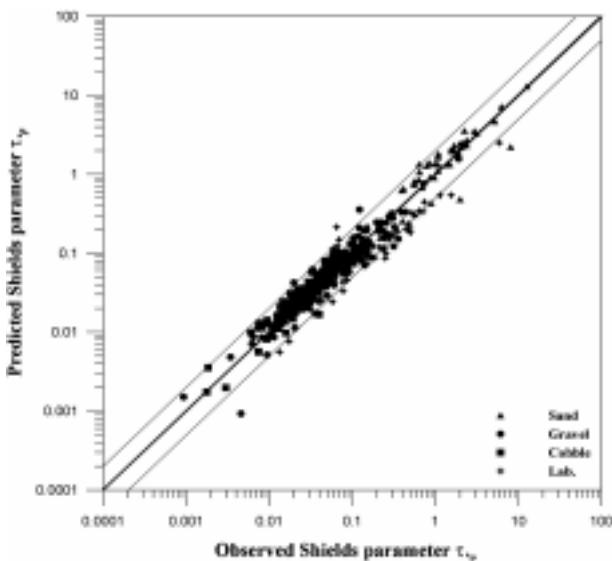


Fig. 11. Validation of Shields Parameter

유속에서는 최소 결정계수 $R_{\min}^2 = 0.54$ 로 다소 낮게 나타났으나, 수심과 수로경사 및 Shields 매개변수 3개 식에서는 평균 결정계수 $R_{\text{ave}}^2 = 0.91$, 5개 변수 식에서는 $R_{\text{ave}}^2 = 0.82$ 로 좋은 결과를 보였다.

1,125개의 현장자료를 이용한 검정결과는 그림 2~6과 같이 나타났는데, 그림 2의 수로 폭 비교는 약 1.0~1,100 m 범위에서 제안 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.87$, 기존 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.77$ 로 본 연구결과가 좋은 것으로 나타났다. 그림 3의 수심 비교는 약 0.01~20 m 범위에서 제안 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.93$, 기존 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.81$ 로 제안 식이 우수한 것으로 나타났으며, 그림 4의 유속 비교는 0.01~0.30 m/s 범위에서 분산된 결과를 보였으나, 0.3~8 m/s 범위에서는 양호한 결과를 보여 전체적으로는 제안 식이 $R_{\text{ave}}^2 = 0.89$, 기존 식이 $R_{\text{ave}}^2 = 0.87$ 로 비슷한 결과를 보였다. 그림 5의 수로경사 비교는 0.00001~0.0001 범위에서 분산된 경향을 보였으나, 0.001~0.1 범위에서는 거의 회귀직선 부근에 수렴하여 제안 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.93$, 기존 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.86$ 로 제안 식이 양호한 것으로 나타났으며, 그림 6의 Shields 매개변수 비교는 0.001~40의 범위에서 제안 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.96$, 기존 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.93$ 으로 나타나 비슷한 결과를 보였다. 이상과 같이 검정과정에서 5개 식을 비교한 결과는 제안 식에서 $R_{\min}^2 = 0.87$, $R_{\text{ave}}^2 = 0.93$ 을 보인 반면, 기존 식에서 $R_{\min}^2 = 0.77$, $R_{\text{ave}}^2 = 0.85$ 를 보여 제안 식이 기존 식보다 훨씬 우수한 것으로 나타났다. 특히 제안 식은 평균수심과 수로경사 및 Shields 매개변수에서 $R_{\text{ave}}^2 = 0.94$ 의 좋은 결과를 보였다.

360개의 현장자료와 실험자료를 이용한 검증결과는 그림 7~11과 같이 나타났는데, 그림 7의 수면 폭 비교에서 현장자료는 예측치와 실측치가 아주 잘 일치하였으나, 실험자료는 수로 폭 1 m 미만에서 오차를 보였다. 그림 8의

평균수심 비교는 0.1 m 미만 실험자료에서 오차가 발생되었고, 현장자료는 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 그림 9의 평균유속 비교는 1 m/s 미만 실험자료만이 오차를 보인 외에 아주 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림 10의 수로경사 비교는 0.0001 부근의 현장자료와 0.01 부근 실험자료에서 다소의 오차를 보인 외에 아주 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 그림 11의 Shields 매개변수 비교는 0.001~10 범위에서 아주 잘 일치하는 것으로 나타났다.

이들 결과를 종합할 때 제안 식은 수공실무에 활용할 수 있는 적용성이 검정과 검증과정을 통해 확인되었는데, 검정결과는 수로 폭, 수심, 유속, 수로경사 및 Shields 매개변수의 예측치와 실측치 비교에서 제안 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.92$, 기존 식은 $R_{\text{ave}}^2 = 0.85$ 를 보여 제안 식이 우수한 것으로 나타났다. 또한 검증결과는 수로 폭 1.0~1,100 m, 수심 0.1~20 m, 유속 0.1~8 m/s, 수로경사 0.00001~0.02, Shields 매개변수 0.001~20 범위에서 제안 식에 의한 예측치가 관측치와 아주 잘 일치하는 것으로 나타났다.

제안 식은 수공실무에서 수로 폭 1.0~1,100 m, 수심 0.1~20 m, 유속 0.1~8 m/s, 수로경사 0.00001~0.02, Shields 매개변수 0.001~20 범위를 갖는 충적하천의 수리학적 형상을 예측하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

충적하천에서의 수리학적 형상 방정식이 유량, 흐름저항, 2차흐름 및 입자 이동성에 관한 기본식을 적용하여 유도되었다. 유도된 제안 식 (10a)~(14a)는 유량, 하상재료, 수로경사 또는 Shields 매개변수의 3개 독립변수를 함수로 한다. 이들 식의 유도에는 모래, 자갈, 호박돌 하상재료의 사행하천과 망상하천 및 광범위한 흐름조건의 현장자료와 실험자료가 포함된 1,485개가 사용되었다.

제안 식은 1,125개 만재 흐름조건의 현장자료를 이용한 검정 및 360개의 현장자료와 실험자료를 이용한 검증작업을 수행함으로써 수공실무에 적용할 수 있는 활용성이 확보되었다. 이들 과정에서 제안식에 의해 계산된 수로 폭, 수심, 유속, 수로경사 및 Shields 매개변수의 예측값은 실측치와 아주 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 유도된 제안 식은 수로 폭 1.0~1,100 m, 수심 0.1~20 m, 유속 0.1~8 m/s, 수로경사 0.00001~0.02 및 Shields 매개변수 0.001~20 범위에 속하는 실험실 및 실제 하천자료를 활용하여 유도되었다.

감사의 글

본 연구는 제1저자가 소속된 한밭대학교(HNU)와 콜로라도 대학교(CSU) 및 (주)다우컨설팅(DWC)간의 국제 공동연구 프로그램에 의해 수행되었다. 이에 저자는 본

연구가 원활히 수행될 수 있도록 해외파견 및 연구시설 등을 지원해준 HNU, CSU, DWC에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 노섭, 정용태, 송재우(1993) 충적하천의 유로이동에 관한 연구. *대한토목학회 논문집*, 제13 제5호, pp. 173-181.
- 엄명진, 조원철(2001) 소규모 충적수로의 안정 허폭 및 수심. *대한토목학회 2001 학술발표회 논문집*, pp. 1-4.
- 유권규, 김형섭, 김활곤, 우효섭(1993) 충적하천의 하상마찰 변화에 대한 조사 분석. *대한토목학회 논문집*, 제13권 제4호, pp. 111-121.
- 이종석(2001) *하천공학*. 도서출판 새론.
- 이종석(1999) 충적하천에서 하상변동의 예측을 위한 관계식의 유도 및 적용. *대전산업대학교 논문집*, 제16권, pp. 41-58.
- 이종석(1995) 만곡수로에서의 하상변화 추정을 위한 변수값 결정. 박사학위논문, 단국대학교.
- 이희철, 이은태(2002) 충적하천의 안정하도 계획을 위한 지배 유량 산정에 관한 연구. *대한토목학회 2002년 학술발표회*, pp. 514-517.
- Andrews, E.D. (1984) Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado. *Bull. Geological Soc., Am.*, Vol. 95, pp. 371-378.
- Anthony, D.J. (1992) *Bedload transport and sorting meandering bends*. PhD dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
- Bathurst, J.C. (1985) Flow resistance estimation in mountain rivers. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 11, No. 4, pp. 625-643.
- Brownlie, W.R. (1981) *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels*. PhD dissertation, California Inst. of Technology, Pasadena California.
- Callander, R.A. (1978) River meandering. *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 129-158.
- Cao, S. and Knight, D.W. (1998) Design for hydraulic geometry of alluvial channels. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 124, No. 5, pp. 484-492.
- Castro, J.M. and Jackson, P.L. (2001) Bankfull discharge recurrence intervals and regional hydraulic geometry relationships patterns in the Northwest. *J. Water Res. Bull., AWRA*, Vol. 37, No. 5, pp. 1249-1262.
- Chang, H.H. (1979) Geometry of rivers in regime. *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 105, No. 6, pp. 691-706.
- Cheema, M.N., Marino, M.A. and DeVries, J.J. (1997) Stable width of an alluvial Channel. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, Vol. 123, No. 1, pp. 55-61.
- Chien, N. (1957) A concept of the regime theory. *Trans., ASCE*, Vol. 122, pp. 785-793.
- Chitale, S.V. (1973) Theory and relationship of river channel patterns. *J. Hydrology*, Vol. 19, pp. 285-308.
- Church, M. and Rood, R. (1983) *Catalogue of alluvial river channel regime data*. Rep., Dept. of Geography, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Collazzi, E.J. (1989) *Results of a summer reconnaissance of the Holitna River basin*. Alaska, 1985, Univ. Avenue, Alaska.
- Collazzi, E.J. (1985) *Hydrologic reconnaissance of the Stony River basin*. Alaska, 1983-1984, Univ. Avenue, Alaska.
- Collazzi, E.J. and Ireland, R.R.W. (1985) *Hydrologic reconnaissance of the North Fork Kuskokwin River basin*. Alaska, 1983-1984, Univ. Avenue, Alaska.
- Colosimo, C., Coppertino, V.A. and Veltri, M. (1988) Friction factor evaluation in gravel-bed rivers. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 861-876.
- Dietrich, W.E. and Smith, J.D. (1984) Bed load transport in a river meander. *W. R. R.*, Vol. 20, No. 10, pp. 1355-1380.
- Dury, G.H. (1961) Bankfull discharge : An example of its statistical relationships. *Int. Assn. Sci. Hydrology Bull.*, Vol. 6. No. 3, pp. 48-55.
- Einstein, H.A., and Chien, N. (1954) Similarity of distorted river models with movable bed. *Proc., ASCE*, Vol. 80, pp. 1-21.
- Emmett, W.W. (1972) *The hydraulic geometry of some Alaska streams south the Yukon River*. USGS.
- Engelund, F. (1974) Flow and bed topography in channel bends. *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.
- Engelund, F. and Fredsoe, F. (1982) Hydraulic theory of alluvial rivers. *Advances in Hydroscience*, Vol. 13, pp. 187-215.
- Falcon, A.M. and Kennedy, J.F. (1983) Flow in alluvial-river curves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 133, pp. 1-16.
- Griffiths, G.A. (1981) Stable channel design in gravel-bed rivers. *J. Hydrology*, Vol. 52, pp. 291-305.
- Hey, R.D. (1978) Determinate hydraulic geometry of river channels. *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 104, No. 6, pp. 869-885.
- Hey, R.D. and Thorne, C.R. (1986) Stable channels with mobile gravel beds. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 112, No. 6, pp. 671-689.
- Higginson, N.N.J. and Johnston, H.T. (1988) Estimation of friction factors in natural streams. *River regime*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 251-266.
- Huang, H.Q., Nanson, G.C. and Fagan, S.D. (2002). Hydraulic geometry of straight alluvial channels and the principle of least action. *J. Hydraul. Res., IAHR*, Vol. 40, No. 2, pp. 153-160.
- Hussein, A.S.A. and Smith, K.V.H. (1986) Flow and bed deviation angle in curved open channels. *J. Hydraul. Res., IAHR*, Vol. 24, No. 2, pp. 93-108.
- Julien, P.Y. (2002) *River Mechanics*. Cambridge Univ. Press.
- Julien, P.Y. and Anthony, D.J. (2001) Bed load motion and grain sorting in a meandering stream. *J. Hydraul. Res., IAHR*, Vol. 40, No. 2, pp. 125-133.
- Julien, P.Y. and Wargadalam J. (1995) Alluvial channel geometry : Theory and applications. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 121, No. 4, pp. 312-325.
- Karim, F. (1995) Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 121, No. 1, pp. 15-25.
- Kassem, A.A. and Chaudhry, M.H. (2002) Numerical modeling of bed evolution in channel bends. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 128, No. 5, pp. 507-514.
- Keulegan, G.H. (1938) Laws of turbulent flows in open channels. *J. Res. Nat. Bureau Standards*, Vol. 21, pp. 707-741.
- Kodoatie, J.K. (2000) *Sediment transport relations in alluvial channels*. PhD dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
- Langbein, W.B. and Lepold, L.B. (1966) River meanders-theory of minimum variance. *Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers*.

- Leopold, L.B., Wolman, M.G. and Miller, J.P. (1964) *Fluvial processes in geomorphology*. W. H. Freeman and Co., San Francisco.
- Odgaard, A.J. (1981) Transverse bed slope in alluvial channel bends. *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 107, No. 12, pp. 1677-1694.
- Parker, G. (1976) On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. *J. Fluid Mech.*, Vol. 76, pp. 457-480.
- Peter, J.W., John, F.S., Douglas, B.M. and Richard, L.O. (1999) Sediment-transporting flows in headwater streams. *GSA Bull.*, Vol. 111, No. 3, pp. 450-466.
- Ranga Raju, K.G. and Garde, R.J. (1988) Design of stable canals in alluvial material. *Int. J. Sediment Res.*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-37.
- Rozovskii, I.L. (1961) *Flow of water in bends of open channels*. Translated by Y. Prushanyk, Israel Program Sci. Translation, Jerusalem, Israel.
- Wargadalam, J. (1993) *Hydraulic geometry equations of alluvial channels*. PhD dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
- Williams, G.P. (1978) Bank-full discharge of river. *W. R. R.*, Vol. 14, No. 6, pp. 1141-1154.
- Woodyer, K.D. (1968) Bankfull frequency in rivers. *J. Hydrology*, Vol. 6, pp. 114-142.

(접수일:2003.7.22/심사일:2003.9.30/심사완료일:2003.10.20)