

〈論 文〉

彎曲水路의 橫方向 河床傾斜와 흐름特性

(Flow Characteristics and Transverse Bed Slope in Curved Alluvial Channels)

車 英 基*, 李 大 澈**
 Cha, Young Kee Lee, Dae Cheol

Abstract

This study is for simulating to the model which analyzes flow characteristics and transverse bed slopes in a coarse-streambed of the meandering alluvial channels.

Using the equations for conservation of mass, momentum, and for lateral stability of the streambed, a linear differential equation of transverse bed slope is derived from the flow characteristics in curved channels. Its solutions are solved by the Sine-generated curve method (SCM) and compared with results of field measurements.

Lag distances by the maximum transverse bed slope and velocity profiles will predict risk sections of concave bank under floods.

要 旨

본 연구는 彎曲 冲積水路의 거친하상(재료의 입경이 2mm이상)에 있어 횡방향 하상경사와 흐름특성을 해석하기 위한 모형을 개발하는데 있다. 질량 보존법칙, 운동량 방정식 및 하상 안정식을 적용하여 彎曲 水路의 흐름특성을 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사에 관한 일반식으로 유도하고, 그 해를 Sine-generated curve method (SCM)에 의해 구하였으며, 실측치와 비교, 분석하였다.

최대 횡방향 하상경사와 유속분포에 의한 遲滯 距離(lag distances)는 홍수시 제방의 위험단면을 예측할 수 있을 것이다.

1. 序 論

하천제방의 붕괴와 하천의 蛇行化로 인한 인명과 재산의 피해가 크므로 충적 만곡수로의 흐름 및 하상특성을 예측할 수 있는 이론적인 모형의 개발이 필요하게 되었다. 실제적으로, 직선수로의 길이가

수로폭의 10-12배보다 긴 수로는 드물 정도로 자연 하천은 거의 蛇行川이고 이들의 흐름특성은 직선수로보다 복잡하다. 대부분의 자연하천은 다소는 규칙적인 모양의 만곡구간과 직선구간이 교대로 이루어지는 구불구불한 사행천이다^{1,2)}. 만곡수로의 가장 중요한 흐름특성은 만곡 정점부근의 deep pool과

* 檀國大學校 土木工學科 教授 / ** 大田工業大學 土木工學科 教授

point bar의 형성으로 인한 하상형상의 변화, 수로 곡률의 변화와 유속분포의 불균등으로 인한 흐름의 螺線化(spiraling)現象이다.⁽¹²⁾ 이러한 문제점 때문에 많은 수공 기술자들은 수공구조물의 취급시 많은 어려움에 접하게 되므로 각종 수리 구조물의 기획, 설계, 축조 및 유지관리를 합리적으로 하기 위해서는 이들 蛇行特性은 定量化되어야 할 것이다.

만곡수로 흐름의 이론과 실험에 관한 연구가 최근 수십년 동안에 활발히 수행되어 왔다. Langbein과 Leopold⁽⁶⁾는 만곡수로의 단면형상을 Sinegenerated curve로 연구하였고, Blondeaux와 Seminara, Falcon⁽⁴⁾, Hooke⁽⁷⁾, Leopold와 Wolman⁽⁹⁾, Yen, Zimmermann과 Kennedy⁽¹⁷⁾ 등은 만곡수로의 緩傾斜 하상을 따라 이동하는 입자에 작용하는 힘의 橫的平衡에 기초하여 평형 횡방향 하상경사에 관한 이론을 제안하였다. Odgaard⁽¹⁰⁾는 횡방향 하상경사를 하상표면의 특성과 연관지어 初期運動概念으로 해석하였으며, Griffiths⁽⁵⁾는 거친하상의 조도계수를 하상재료 표면의 粗度, 渦流, 副次流 및 흐름의 減加速 등에 의한 조합으로 보아, 하상 경계조건을 제안하였다. 그리고 Hey와 Thorne⁽⁶⁾은 2m 이상의 거친하상 재료에 의해 흐름이 지배 되는 62개 하천을 대상으로 복합 회귀분석을 통하여 수로폭, 수심, 수로경사 등의 관계식을 滿堤流量(bankfull discharge)⁽¹⁴⁾에 관한 함수식으로 나타냈으며, 高⁽¹⁸⁾, 尹⁽¹⁹⁾, 李⁽²⁰⁾ 등이 만곡수로에 관해 연구하였고, 거친하상에 관해서는 車⁽²¹⁾가 만곡 충적수로의 횡방향 하상경사에 관해 발표하였다.

본 연구는 수심이 수로폭에 비해 작고, 수로의 곡률반경은 수로폭에 비해 큰 만곡수로의 거친하상을 대상으로하여 수로 중심선에서의 흐름특성을 횡방향 하상경사에 관하여 일반식으로 유도하고, 이 해를 S CM에 의해 구하여, 그 실측치를 결과치 및 타모형에 의한 것과 비교, 검토하였다.

2. 理論的 背景

만곡수로의 거친하상에서 흐름특성을 수로 중심선의 횡방향 하상경사에 관한 일반식으로 유도하기 위

해서 일정한 유사량을 가진 만곡 충적수로의 (1) 수로폭은 수로 전구간을 통해 일정하고, (2) 수로 중심선의 곡률반경은 수로폭에 비해 크며, (3) 수심은 수로폭과 비교하여 작고, (4) 유속의 횡방향 성분은 종방향 성분에 비해 작으며, (5) 흐름의 난류성은 등방성으로 가정하였다. 그리고 적용한 기본 방정식과 이들 방정식에 포함된 각종 변수들은 직교성곡선 좌표계를 사용하여 그림1과 같이 표시하였다.

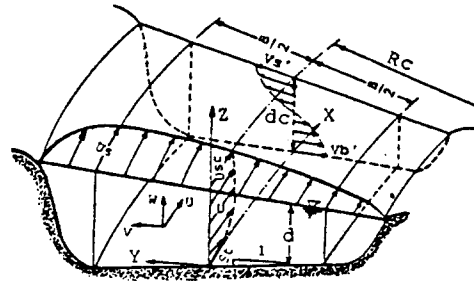


Fig. 1 Definition Sketch of Idealized Channel Cross Section.

2.1 基本 方程式

그림1에서 X축은 흐름방향을 양(+)으로하여 수로 중심선을 따르는 축이며, Y축은 X축과 직교 하는 축으로서, 수로 중심선에서 외측제방(concave bank)쪽을 양(+)으로 하며, 하상으로부터 수면에 연직인 방향을 Z축으로 한다. 또한, 이들 축에서의 각각의 속도성분은 U, V, W로 나타냈다.

運動 方程式^{(2), (11)}

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{UV}{R} = gS_L + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial Z} \right) \quad (1)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} - \frac{U^2}{R} = -gS_R + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial Z} \right) \quad (2)$$

여기서 S_L과 S_R은 종 및 횡방향의 수면경사이고, ε = κ U_{*} Z/d(d-Z)로 와점성 계수(eddy viscosity)이

고 R은 곡률반경, g는 중력가속도이다.

連續 方程式

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{R} \frac{\partial(VR)}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (3)$$

縱 및 橫方向 流速 分布式

$$\frac{U}{\bar{U}} = \left(\frac{P+1}{P} \right) \left(\frac{Z}{d} \right)^{1/P} \quad (4)$$

$$V = \bar{V} + 2V_s' \left(\frac{Z}{d} - \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

여기서 p는 유속 분포지수로서 $p = \kappa \bar{U} / U_* = \kappa \sqrt{8/f}$ 인 관계를 가지며, U_* 는 마찰속도 $\sqrt{\tau_0/\rho}$ 이고, ρ 는 유체의 밀도, τ_0 는 하상의 전단응력, κ 는 von Karman의 상수 (= 0.4)이며, f는 Darcy-Weisbach의 마찰계수, \bar{U} 는 흐름방향의 유속U의 평균유속이고, \bar{V} 는 V의 외측방향 평균유속, V_s' 는 수면에서의 원심력에 의한 횡방향 유속이다.

2.2 抵抗 方程式

거친하상 재료에 있어 조도계수는 하상면의 조도와 관계되는 周面摩擦 (skin friction), 渦流 및 螺線流에 의한 하상의 屈曲, 轉石 (boulders), 砂洲 (point bar) 등의 특수 경계특성으로 인한 内部歪曲抵抗 (internal distortion resistance)과 흐름의 감가속에 의한 偏抵抗 (spill resistance)의 조합으로 제안한 Griffiths's의 이론을 적용하였다.

固定 및 移動境界 水路의 抵抗係數

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.76 + 1.98 \log_{10} \left(\frac{R_b}{D_{s_0}} \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.21 \left(\frac{\bar{U}}{\sqrt{g D_{s_0}}} \right)^{0.34} \quad (7)$$

여기서 R_b 는 동수반경이고 D_{s_0} 은 하상재료의 평균 입경이다.

2.3 橫方向 河床傾斜

횡방향 하상경사 S_t 는 $d = d(X, Y)$ 의 분포를 나타내 주며 하상 안정 방정식과 초기 운동개념으로부터 구할 수 있다.

그림 2 (a)에서 하상 안정 방정식은 하상에 평행한 유체항력의 횡방향 성분 F_t 과 수중입자의 무게 W_s 가 같다는 것으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

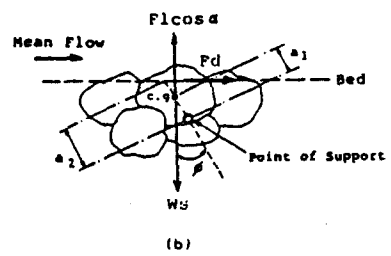
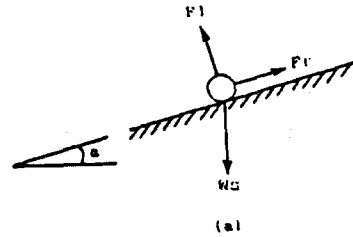


Fig. 2 Radial(a) and Vertical Longitudinal(b) - Plane Componests of Forces on Sediment Particle.

$$F_t = W_s \sin \alpha \quad (8)$$

여기서 $\sin \alpha$ 를 평형 횡방향 하상경사라 하며, 이때에 하상을 형성하는 입자는 각각의 구성입자들이 그들의 지지점 주위를 Rolling함으로써 종방향으로 곧바로 운동하게 된다는 것이 Odgaard의 초기 운동개념이다. 임의 X점의 입자에 대해 하상이 종방향으로 수평이라고 가정하면, 그림 2의 (b)에서 종방향의 입자 지지점에 대한 항력 F_d , 중력 W_s 및 양력 F_l 의 모멘트 관계에서

$$F_s = \frac{a_2}{a_1} (W_s - F_s \cos\alpha) \tan\phi \quad (9)$$

여기서 ϕ 는 수중 입자의 안식각 이고, $F_s \cos\alpha$ 는 양력의 종방향 성분이므로, 식(9)를 한계 전단응력 τ_c 에 대한 Shields의 식으로 바꾸면

$$\tau_c = \frac{\kappa^2}{P^2} \rho \bar{U}_c'^2 \quad (10)$$

여기서 \bar{U}_c' 는 한계 평균유속이며, 이때 입자는 τ_c 보다 클때 이동하게 되므로 식(8)의 F_s 은 입자의 투영표면적 A_p 에 τ_c 를 곱하고, $\sin\alpha$ 는 S_s 로 변형시킨후 Rozovskii⁽¹¹⁾의 개념 및 Shields의 이론을 적용 하면 다음 식으로 표현할 수 있다.⁽¹²⁾

$$S_s = H V_s' \quad (11)$$

여기서 $H = -1.9 \frac{\theta^{1/2}}{k} V_b' \frac{1}{[(\rho_s - \rho)/\rho Dg]^{1/2}}$ 이고, k 는 비례상수이며, V_b' 는 하상 인근의 횡방향 속도이다.

2.4 方程式의 簡略化

기본 방정식에서 네개의 미지수인 \bar{U} , \bar{V} , V_s' , d 를 결정하여 횡방향 하상경사에 관한 일반식을 유도하기 위해 운동량 방정식, 질량 보존법칙 및 하상 안정식을 적용함으로써 편미분 형태인 식(1)과 식(2)의 지배 방정식을 상미분식으로 변형시키고, S_s 에 대한 하상 안정식을 만들어 V_s' 와 연결시키고 이들의 식을 정리하면 간략화시킬 수 있다.

2.4.1 橫方向 流速成分

식(2)는 흐름방향에 대한 횡방 속도성분의 변화율 $(\partial V_s'/\partial X)$ 이 횡방향 전단력, 수면경사 및 원심가속도와 관련되므로 포물선형 ϵ 분포를 써서변형시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial V_s'}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial X} + A \bar{V}_s' = F \quad (12)$$

여기서 $A = \frac{2\kappa^2}{(P+1)d}$ 이고,

$$F = \frac{P+1}{P} \frac{\bar{U}}{R} \left[1 - \frac{P^2}{(P+1)^2} \frac{gRS_R}{U^2} \right] \text{이다.}$$

식(12)에서 $\partial/\partial X$ 항은 곡률반경이 길면서 일정한 구간의 충분히 발달된 만곡흐름에서 작으므로

$$V_s' = N \frac{d}{R} \bar{U} \quad (13)$$

여기서 $\frac{\bar{U}^2}{gR} = S_R$ 로 놓으면, $N = \frac{2P+1}{2\kappa^2 P}$ 이 된다.

2.4.2 縱方向 流速成分

ϵ 의 분포가 $\kappa U_z/d$ ($d-Z$)이고, $\partial U/\partial Z$ 가 $U_s/(\kappa Z)$ 이면 식(1)은 수면에서

$$U_s \frac{\partial U_s}{\partial X} + V_s \frac{\partial U_s}{\partial Y} + W_s \frac{\partial U_s}{\partial Z} = -\frac{U_s V_s}{R} + gS - \frac{U_s^2}{d} \quad (14)$$

또한, U_s 는 $\kappa \bar{U}/P$ 이고, $W_s = 0$ 으로 볼때 U_s 는 $\bar{U}(P+1)/P$ 이므로 이를 수로중심선에 적용하면 \bar{U} 와 d 는 상수로 취급되어

$$\frac{\kappa^2 \bar{U}_c'^2}{P_c^2 d_c} = g(S_c - S_c') \quad (15)$$

식(15)의 우항은 좌항이 X 에 무관할 경우 수로 중심선의 임의 점에서 계산할 수 있으며, $\partial \bar{U}/\partial X$ 에 대한 수위차 (superelevation)의 영향을 무시하고, 무차원량 $\Psi (= X/B)$ 를 도입하여 $\bar{U}_c'^2$ 으로 나누면 수로 중심선으로부터 일정한 거리에서의 흐름방향 유속의 변화를 구할 수 있다.

$$\frac{d}{d\Psi} \mu + G \frac{d_c}{d} \mu = G \frac{R_c}{R} \left\{ \frac{P}{P_c} \right\}^2 \quad (16)$$

여기서 $G = \frac{2\kappa^2}{(P+1)^2} \frac{B}{d_c}$ 이고, $\mu = (\bar{U}/\bar{U}_c)^2$ 이다.

2. 4. 3 橫方向 河床傾斜

식(11)의 흐름방향의 변화는 식(12)의 편미분식을 수로 중심선에서의 상미분식으로 변형시켜 얻을 수 있다.

$$\frac{dV_{s,c}'}{dX} + \frac{d\bar{V}_c}{dX} + A_c V_{s,c}' = F_c \quad (17)$$

여기서 $V_{s,c}' = S_{t,c}/H$ 이며, \bar{V}_c 는 질량 보존법칙에 의거 수로 중심선에서 외측제방 쪽으로 이동되는 유체의 양과 수로 중심선 외측단면의 흐름방향으로 이동하는 유체의 증가량을 같게 놓으므로써 계산할 수 있으며, $V_{s,c}' = S_{t,c}/H$ 를 식(12)에 대입하고 Ψ 를 도입하면, 다음식과 같이 계수 A' , B' , C' 를 갖는 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사 $S_{t,c}$ 에 관한 선형 2차 미분방정식으로 유도할 수 있다.

$$\frac{d^2 S_{t,c}}{d\Psi^2} + A' \frac{dS_{t,c}}{d\Psi} + B' S_{t,c} = C' \quad (18)$$

여기서 $A' = 4.2 \frac{\kappa N'}{\sqrt{\theta}} \frac{P+2}{P+1} \frac{1}{F_{D,c}} \frac{d_c}{B}$ (19)

$$B' = 8.4 \frac{\kappa^3 N'}{\sqrt{\theta}} \frac{P+2}{(P+1)^2} \frac{1}{F_{D,c}} \quad (20)$$

$$C' = 16 \frac{\kappa^2 N'}{P+1} \frac{d_c}{R_c} \quad (21)$$

3. 橫方向 河床傾斜 및 흐름特性 解析

3. 1 檢證資料

횡방향 하상경사와 흐름특성에 관한 본 모형을 검증하기 위해 실측치 자료로 대전직할시를 관통하는 만곡이 비교적 잘 발달된 금강수계의 그림 3 (a)의

甲川을 대상으로, 사행성이 현저한 제1상소교 10m 하류지점을 시점으로 1000m 구간을 검증구간으로 택하였다.

검증구간을 20m 간격으로 나누어 종방향 수로경사와 수면경사를 측정 하였으며, 검증구간은 23개를 두었으나 편의상 10개 지점만을 선정하여 그림 3의 (b)와 같이 표시하였다.

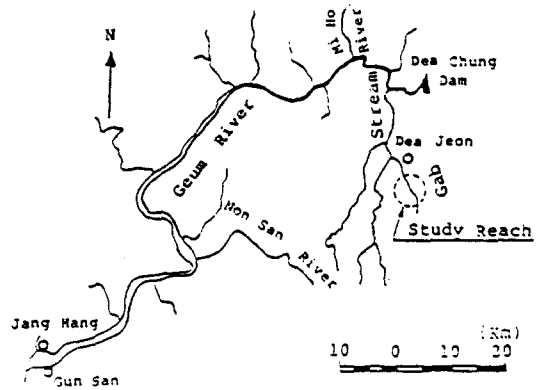


Fig. 3 Location Map of Gab Stream for TSis Study.

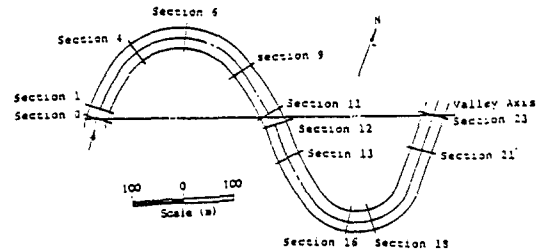


Fig. 4 Sine - Ceneccated Curve.

또한, 각 단면은 수로 중심선으로부터 내외측으로 2m씩 나누어 수심측량을 하였으며, 그 결과로 얻은 기본자료는 表1과 같다.

表 1에서 流量 $Q = 144\text{CMS}$ 는 1989년 7월 16일 大田 測候所의 自記雨量計에 기록된 日最大 降雨量 145.6mm에 대한 호우를 擇하여 실측 Rating curve로부터 求한 流量 값이며, 유효수로폭 $B=35.86\text{m}$ 은 23개 지점의 평균수로폭인 $B = 39.96\text{m}$ 에서 평균수심의 2배를 뺀 ($B = B - 2d_c$) 값이다. 또한, 평균입경 $D_{s,0} = 0.028\text{m}$ 은 수로 중심선에서의 값을 평균한 값이다.

Table 1. Primary Flow Data

River	Discharge Q (CMS)	Effective Width B (m)	Centerline Values			
			Flow Depth d _c (m)	Depth-averaged Velocity U _c (m/sec)	Median Grain Size D ₅₀ (m)	Longitudinal Slope of Water Surface S _c
Gab Stream	144	35.86	2.05	1.76	0.028	0.00994

3.2 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사 대한 解析

$$\frac{1}{R_m} \cos[f_m(\Psi - \frac{M}{4B})] \quad (23)$$

식(18)의 해를 구하기 위해 表 1의 자료를 사용하여, 그림 3의(b)에 대한 Sine-generated curve를 작성함으로써 식(21)의 R_c를 얻을 수 있다. Sine-generated curve는 Lanbein 과 Leopold⁸⁾에 의하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega = \omega' \sin\left(\frac{2\pi x}{M}\right) \quad (22)$$

여기서 ω는 임의의 X점에서 meander path가 down path와 만드는 사잇각이고, ω'는 그림4와 같이 수로 중심선과 crossover를 통하는 축의 사잇각이며, M은 수로 중심선 길이(meander arc length)이다.

식(22)의 곡률은 ω의 변화율으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

여기서 R_c는 수로 중심선에서의 곡률반경이고, R_m은 최소치 곡률반경이며, f_m·(B/R_m)(1/ω')로 사행 주기(meander frequency)이다.

그런데, 1/R_m은 2πω'/M이고, R_m은 정점(apex)에서 최소치가 되며 ω'는 굴곡도와 관계되므로, Leopold 와 Langbein⁹⁾에 의하면 ω' = 2.20(√(L/M))이다. 또한, dω/dX가 0인 crossover에서 X = 0이고, dω/dX가 1/R_m인 apex에서 X=M/4이다. 그림 3(b)를 Sine-generated curve에 의한 결과, 그림 4와 같이 ω = 71.5°sin(2πX/1000)로 나타났다. 따라서 식(23)을 식(21)에 대입하면 S_c에 대한 일반식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2 S_{c,c}}{d\Psi^2} + A' \frac{dS_{c,c}}{d\Psi} + B' S_{c,c} = \frac{16\kappa^2 N'}{P+1} \frac{d_c}{R_m} \cos[f_m(\Psi - \frac{M}{4B})] \quad (24)$$

이상에서 유도된 식(24)의 특수해는

$$S_{tc} = S_{tcm} \cos\left[f_m\left(\Psi - \frac{M}{4B}\right) - \phi'\right] \quad (25)$$

여기서

$$S_{tcm} = \frac{16\kappa^2 N'}{(P+1) \sqrt{(B'-f_m^2)^2 + (A'f_m)^2}} \frac{d_c}{R_m} \text{ 이고,}$$

φ' = tan⁻¹ $\frac{f_m A'}{B' - f_m^2}$ 로 位相角(phase angle)이다.

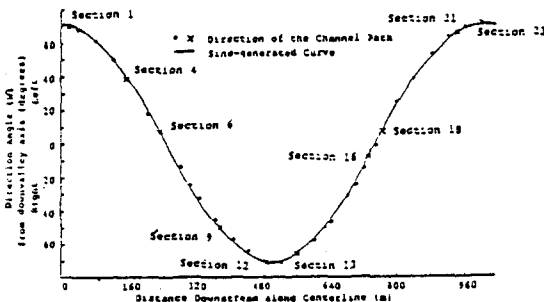


Fig. 4 Sine - Canecaded Curve.

$$\frac{1}{R_c} = \frac{d\omega}{dx} = \frac{i1}{R_m} \cos\left(\frac{2\pi x}{M}\right) =$$

따라서, 임의 수심에 있어 횡방향 하상경사는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$St = Stc \left(\frac{d}{d_c} \right) \left(\frac{R_c}{R} \right) = S_{i,c} \left(\frac{R_c}{R} \right)^{1-\beta} \quad (26)$$

여기서 $\beta = Stc \frac{R_c}{d_c}$ 이다.

3.3 \bar{U}/\bar{U}_c 에 대한 解析

식(16)은 수로 중심선으로부터 일정한 거리에서 흐름 방향을 따라 逐次 積分法 (stepwise integration)에 의해 미분형태로 표시하면

$$\Delta\mu = G \left| \frac{R_c}{R} - \mu \frac{d_c}{d} \right| \Delta\psi \quad (27)$$

Sine-generated curve에서 \bar{U} 의 주기는 $1/R_c$ 과 $S_{i,c}$ 의 주기와 같아야 한다. 이 조건이 적분상수로서 적분의 시점을 결정하게 된다. 따라서 식(27)은 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\Delta\mu = \frac{2\pi G}{\omega'} \left[\left(1 + \frac{\Delta R}{R_c} \right)^{-1} - \mu \left(1 + S_{i,c} \frac{\Delta R}{d_c} \right)^{-1} \right] \Delta \left(\frac{X}{M} \right) \quad (28)$$

여기서 $\Delta R = R - R_c$ 이다.

4. 結果 및 分析

본 연구는 만곡수로의 거친하상에 있어 횡방향 하상경사와 흐름특성을 알기 위한 검증자료로 表 1을 사용하여 마찰계수는 0.0898, $\nu = 3.775$, $G = 0.246$, $N' = 7.078$, $U_* = 0.186\text{m/sec}$, $R_{*c} = 5185$, $A' = 1.286$, $B' = 1.507$ 를 각각 얻었다. 식(18)을 구하기 위해 그림 4의 Sine-generated curve를 작성하여 $\omega' = 1.356$, $M/L = 1.61$, $f_* = 0.224$ 를 얻었으며, R_{*c} 은 수로 중심선을 따라 이어지는 곡률반경중 최소치에 해당하는 값으로 118m를 얻었

다.

이상에서 구한 값들을 식(23)와 식(26)에 대입하면 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{1}{R_c} = 0.0085 \cos \left[2\pi \left(\frac{X}{M} - 0.25 \right) \right] \quad (29)$$

$$S_{i,c} = 0.0445 \cos \left[2\pi \left(\frac{X}{M} - 0.2812 \right) \right] \quad (30)$$

그리고, crossover는 section 0과 section 1사이, section 11과 section 12사이 및 section 23에서 생겼다. 또한 수로 중심선으로부터 외측제방으로 10m 거리의 흐름방향 경로를 따르는 수심과 유속의 변화를 식(25)와 식(28)을 이용하여 구한 결과를 plot한 바, 그림 5와 같이 나타났다. 그림 5에서 수심의 변화는 본 모형에 의한 값과 실측자료와 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

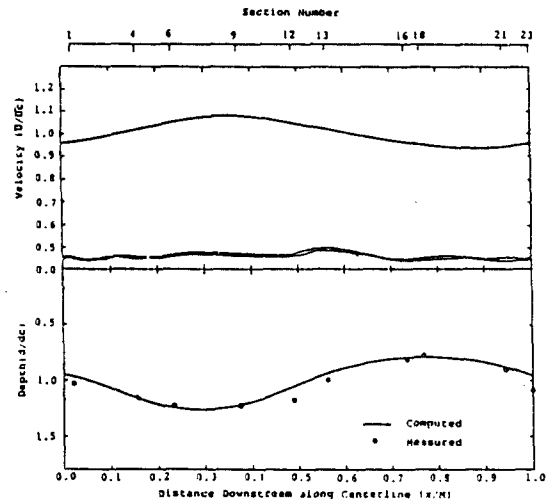


Fig. 5 Streamwise Variation of Depth (a) and Velocity (b) along Left (10m) in Gab Stream.

그림 6은 Odgaard (1981)가 1986년에 미국의 Western Wyoming 소재 Muddy Creek을 대상으로 입경이 작은 하상재료의 만곡수로에 대한 모형을 검증한 결과이다.

그림 5의 (b)와 그림 6을 비교 분석한 결과, 유속 (\bar{U}/\bar{U}_c)의 흐름방향으로의 변화는 SCM에 의한 해

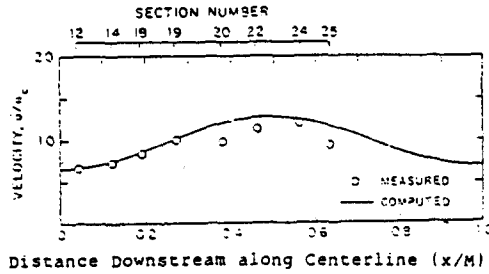


Fig. 6 Simulation of Near Bank Velocity in Bend of Muddy Creek, Wyoming.

석의 경우, 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사와 $1/R_c$ 의 주기가 같다는 것을 알 수 있었으며, 수심에 의한 遲滯 apex를 距離 (depth lag distance)는 지나 S_{c1} 가 최대인 점의 외측제방쪽으로 apex와 crossover간 거리의 약 20%되는 점에서 발생되었고, 유속에 의한 遲滯 (velocity lag)는 crossover를 약간 지나 $1/R_c$ 가 ∞ 에 가까운 단면 즉, 수로 중심선의 횡방향 하상경사가 최소인 단면에서 생기는 것으로 나타났다.

그림 7은 하천 단면별 입의 수심의 횡방향 하상경사를 추정 하고자 앞에서 유도한 식 (26)을 사용하여 얻었으며, 실측치와 비교한 결과 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 section 16과 section 18에서는 상당한 오차가 발생하였는데, 이것은 수로의 곡률반경이 최소치에 가까운 apex부근으로써 수심에 의한 遲滯가 屈曲度의 증가에 따라 감소함으로써 하상이 불규칙한 砂丘 (dunes)를 형성하였기 때문인 것으로 분석된다.

5. 結論

본 연구는 거친 하상재료의 만곡수로에 있어 횡방향 하상경사와 흐름특성에 관한 모형으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 1) 하상재료의 주변마찰, 내부왜곡저항 및 편저항으로 구성되는 조도계수를 사용하여 SCM에 의해 개발 되었으며, 입경이 작은 하상재료에 대한 Odgaard의 모형과 비교한 결과 SCM에 의한 흐름특성의 모형은 흐름방향 무차원 유속 (\bar{U}/\bar{U}_c)의 변화와 수로 중심선에서의 횡

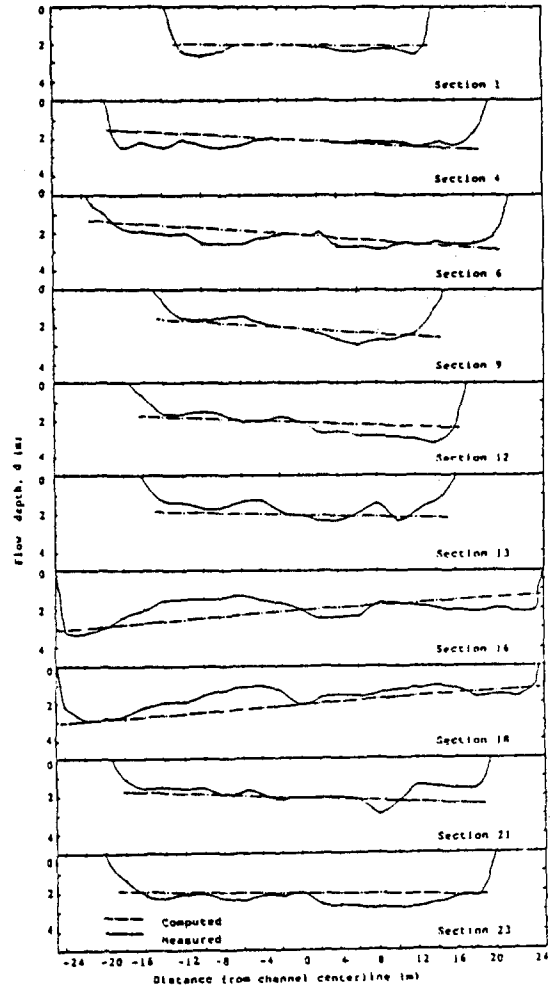


Fig. 7 Transverse Distributions of Depth.

방향 하상경사 및 곡률의 주기가 같다는 것이 확인 되었다.

2) 횡방향 하상경사의 예측치와 실측치를 비교한 결과 비교적 잘 일치하였으나, 외측제방의 apex부근에서 굴곡도의 증가에 따라 수심에 의한 지체가 생기는 것으로 나타났다. 이로 인한 지체거리는 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사가 최대인 apex와 crossover간 거리의 약 1/5지점에서 발생되었다. 이로써 홍수시 제방의 위험지점을 예측할 수 있을 것이다.

參考文獻

1. Blondeaux, P. and Seminara, G. (1985). *A Unified Bar-Bend Theory of River Meanders*, J. Fluid Mech., 157, pp. 449 - 470.
2. Chang, H. H. (1988). *Fluvial Process in River Engineering*. Wiley Interscience.
3. Dietrich, W. E., and Smith, J. D. (1983). *Influence of the Point Bar on Flow Through Curved Channel*, Water Resources Research, 19(5), pp. 1173 - 1192.
4. Falcon, M. A., and Kennedy, J. F. (1983). *Flow in Alluvial-River Curves*, J. Fluid Mech., 133, pp. 1-16.
5. Griffiths, G. A. (1989). *Form Resistance in Gravel Channels with Mobile Beds*, J. Hydr. Engrg., ASCE, 115(3), pp. 340-355.
6. Hey, R. D., and Thorne, C. R. (1986). *Stable Channels with Mobile Gravel Beds*, J. Hydr. Engrg., ASCE, 112(8), pp. 671-689.
7. Hooke, R. LeB. (1975). *Distribution of Sediment Transport and Shear Stress in a Meander Bend*, J. Geology, 83, pp. 543-565.
8. Langbein, W. B., and Leopold, L. B. (1966). *River Meanders- Theory of Minimum Variance*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422-H.
9. Leopold, L. B., and Wolman, M. G. (1960). *River Meanders*, Bull. Geolog. Soc. Am., 71, pp. 769-794.
10. Odgaard, A. J. (1986). *Meander Flow Model. I : Development, II : Applications*, J. Hydr. Engrg., ASCE, 112(12), pp. 1117-1150.
11. Rozovskii, L. L. (1961). *Flow of Water in Bends of Open Channels*. Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, Israel.
12. Syunsuke Ikeda, Parker G., and Kenji Sawai (1981). *Bed Theory of River Meanders, Part I : Linear Development*, J. Fluid Mech., 112, pp. 362-377.
13. Vanoni, V. A. (1976). *Sedimentation Engineering. Manual and Report on Engineering Practice, No. 54*, ASCE.
14. Williams, G. P. (1978). *Bank - Full Discharge of Rivers*, Water Resources Research, 14(6), pp. 1141-1154.
15. Wylie, C. R. (1979). *Differential Equations, International Student Edition*.
16. Yen, B. C. (1965). *Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel*, Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City.
17. Zimmermann, C., and Kennedy, J. F. (1978). *Transverse Bed Slope in Curved Alluvial Streams*, J. Hydr. Div., ASCE, 104(1), pp. 33-48.
18. 高在雄 (1975). "彎曲水路에서의 河床變動에 관한 研究". 韓國水文學會誌, 第 8卷 2號, pp. 75-80.
19. 尹龍男 (1973). "位置에너지 概念에 의한 河川形態學的 特性分析". 大韓土木學會誌, 第 21卷 2號, pp. 95-105.
20. 泰, 尹世儀 (1987). "開水路 彎曲部에서의 中心角 變化에 따른 흐름 特性." 大韓土木學會 論文集, 7(3), pp. 195-202.
21. 車英基, 李大澈, 李宗姬 (1990). "彎曲 沖積 水路의 橫方向 河床傾斜". 韓國水文學會, 水工學 論叢, 第 32卷, pp. 213-220.