

〈論 文〉

水路의 形狀과 河床條件에 따른 移行特性
Migration Characteristics with Forms of Channels and Bed Conditions

차 영 기* 이 종 석**
CHA Young Kee LEE Jong Seok

Abstract □ Migration characteristics with forms of channels and bed conditions are studied by constant-radius curve (CRC), sine-generated curve (SGC) and small-wave theory (SWT) method. For channels which are meandering and of which bed conditions are of coarse materials, transverse bed slope, depth and velocity distributions are predicted by CRC and SGC method, and the results are compared with measured field data. And for fine bed-materials of the sinuous channels, lateral and downvalley migration rates are computed by SWT method. It is confirmed from this investigation that transverse mass-flux factor plays significant roles in determining of magnitude and direction of meander migration.

요 지 : 수로의 형상과 하상조건에 따른 이행특성을 一定半徑曲線(CRC), 正弦曲線(SGC) 및 微小振幅波 理論(SWT)의 方法에 의해 연구하였다. 수로의 형상이 사행이고, 하상조건이 거친 하상입자인 蛇行河川의 경우에는 CRC 및 SGC의 方法을 적용하여 횡방향 하상경사, 수심 및 유속분포의 예측치를 구하고, 이를 실측치와 비교 하였다. 또한 가는 입자의 準蛇行河川(sinuous channels)에 대해서는 SWT의 方法을 이용하여 횡방향과 흐름방향의 蛇行移行量을 각각 구하였다. 그 결과 횡방향 질량이송계수는 사행이행의 크기 및 방향을 결정하는데 중요한 계수임이 확인되었다.

1. 서 론

자연하천에서의 제방침식과 蛇行化에 대한 관심의 증가는 彎曲水路의 흐름과 이행특성을 예측할 수 있는 모형의 필요성을 증대시켜 왔다. 사행수로의 중요한 흐름 특성은 원심가속도로 인한 흐름의 螺旋化現象(spiraling)과 편수위 상승(superelevation)으로, 이는 하상의 형상, 수로곡률의 변화 및 하상재료에 따른 유속분포의 불균등 등이 원인이다. 만곡수로의 사행성은 舟運, 治水問題, 농경 및 하천유역의 인간활동에 장애를 주는 하천공학상의 문제를 야기시켜왔다. 이행특성에 관한 연구를 많은 학자들이 하여왔으며, 하천 유역의 계획, 수리 구조물의 축조 및 제방 보호물의 유지관리를 합리적으로 하기 위해서는 이행특성을 정량화 하는 것이 필요할 것이다.

Langbein & Leopold(1966)는 만곡수로의 형상을 수로의 방향각 변화를 이용하여 정현곡선으로 표현하였고, Yen(1965), Zimmermann & Kennedy(1978), Dietrich & Smith(1983), Falcon & Kennedy(1983) 등은 환경사하상을 따라 이동하는 유사 입자에 작용 하는 힘의 횡적 평형에 기초하여 하상 변동에 관해 연구하였다. Odgaard(1987)는 횡방향 하상경사를 하상면의 특성과 연관지어 초기 운동개념을 도입 하였고, Hey(1988)와 Griffiths(1989)는 거친 하상의 조도계수에 관해 연구하였으며, 彎曲比가 작은 수로에 대해서는 Ikeda et al.(1981), Blondeaux & Seminara(1985) 등이 제방침식과 이행관계를 연구하였다.

고(1975)는 만곡수로의 하상변동에 관해, 이 등(1987)은 개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름특성에 관해 연구하였고, 사행수로의 거친하상

* 정희원, 단국대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 단국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

에 대한 횡방향 하상경사와 흐름특성에 관해서는 차 등(1990, 1991a, 1992)이 연구한 바 있다. 수로의 형상과 하상조건에 따른 사행수로의 이행특성을 연구하기 위한 본 논문은 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사에 관한 선형식을 유도하고, 그 해를 일정 반경곡선 및 정현곡선의 방법(차 등 1991a)과 미소 진폭과 이론의 방법(차 등 1991b, 1992)에 의해 각각 구하고자 하며, 또한 이들 방법에 의한 결과치를 실측치 현장자료와 비교 하고자 한다.

2. 기본 방정식

본 연구는 층적하천 만곡부의 정류, 상류 및 난류에 대한 것으로, 흐름의 양상에 의한 제방의 영향이 적은 수로폭 B의 수로 중앙부분에 적용 하였으며, 수로폭은 일정한 것으로 가정하였다. 또한 砂丘와 砂漣(dunes and ripples)과 같은 하상의 형상에 의한 하상양상의 국부적인 변화는 고려하지 않았다.

기본 방정식과 이들 방정식에 포함된 각종 변수들은 그림 2.1과 같은 曲線 座標系를 사용하여 표시하였다. 흐름방향을 陽(+)으로하여 수로 중심선을 따르는 축을 X로하고, X축과 직교하는 축으로서 수로 중심선에서 외측제방쪽 을 陽(+)으로 하는 축을 Y로, 하상으로부터 수면에 연직인 방향을 Z축으로 하며, 이들 축에 대한 각각의 속도성분은 U, V, W 로 나타냈다.

2.1 지배 방정식

2.1.1 운동량 방정식(Rozovskii 1961, Chang 1988)

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{UV}{R} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_x}{\partial Z} - \frac{\partial Pr}{\partial X} \right) \quad (2.1)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} - \frac{U^2}{R} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_r}{\partial Z} - \frac{\partial Pr}{\partial Y} \right) \quad (2.2)$$

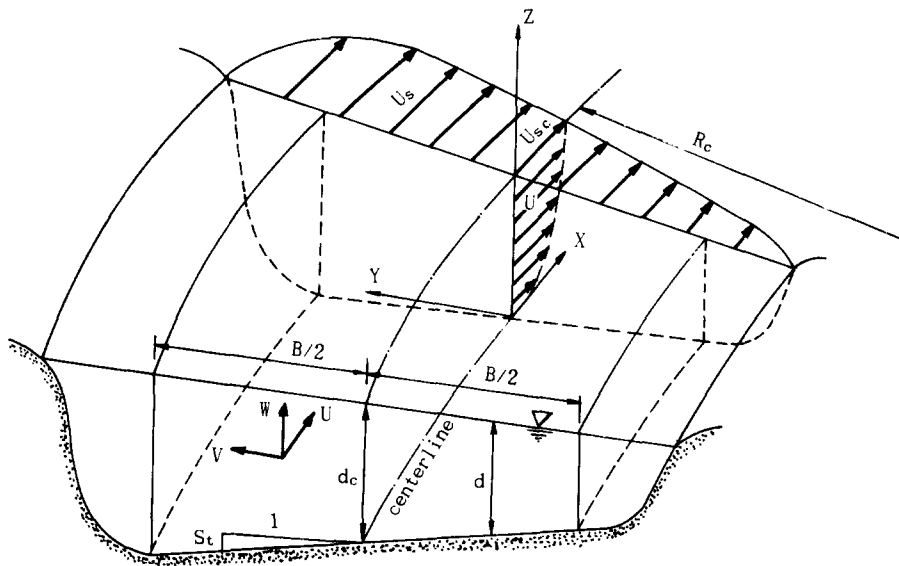


Fig.2.1 Definition Sketch of Channel Cross Section

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} + g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial Pr}{\partial Z} \quad (2.3)$$

여기서 R은 곡률반경, Pr는 압력, τ_x 와 τ_y 는 각각 X, Y방향의 전단응력이며, g는 중력 가속도, ρ 는 유체의 밀도이다.

2.1.2 연속 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{R} \frac{\partial(VR)}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial X} + \frac{1}{R} \frac{\partial(Q_y R)}{\partial Y} = 0 \quad (2.5)$$

여기서 Q_x , Q_y 는 각각 X, Y방향의 단위폭당 유사량이다.

2.1.3 유속의 연직 및 횡방향 분포식

$$U/U_* = (P+1/P)(Z/d)^{1/P} \quad (2.6)$$

$$V = V_m + 2Vs(Z/d - 1/2) \quad (2.7)$$

여기서 P는 유속 분포지수로 $P = \kappa U_m/U_* = \kappa(8/f)^{1/2} = \kappa C(g)^{-1/2}$ 인 관계를 가지며, U_* 는 마찰속도(τ_0/ρ)^{1/2}이고, τ_0 는 하상의 전단응력, κ 는 von Karman의 상수이며, f는 Darcy-Weisbach의 마찰계수, C는 Chezy의 계수이며, V_m 은 V의 평균유속, V_s 는 수면에서의 원심력에 의한 횡방향 유속이다.

2.2 마찰계수

하상재료의 마찰계수는 하상면의 조도에 대한 저면마찰, 와류 및 회전류로 인한 특수경계특성의 내부왜곡저항, 흐름의 감가속에 의한 편저항을 고려해 다음과 같이 구분하였다.

2.2.1 정지상경계수로의 마찰계수

流砂 이송량이 무시할 정도로 작은 $D_{50} \geq R_h S_L$ 인 경우의 고정수로는 상대조도 R_h/D_{50} (Griffiths, 1981)를 매개변수로한 다음식을 마찰계수로 사용하였다.

$$1/(f)^{1/2} = 0.76 + 1.98 \log_{10}(R_h/D_{50}) \quad (2.8)$$

2.2.2 이동경계수로의 마찰계수

유사 이송량을 갖는 $D_{50} < R_h S_L$ 인 경우의 이동수로는 移動性 數(mobility number) $U_m/(gD_{50})^{1/2}$ 을 매개변수로한 다음식을 적용하였다.

$$1/(f)^{1/2} = 2.21 [U_m/(gD_{50})^{1/2}]^{0.34} \quad (2.9)$$

여기서 $1 \leq R_h/D_{50} \leq 200$ 이고, S_L 은 종방향 수면경사, R_h 는 동수반경이며, D_{50} 은 하상재료의 중앙입경이다.

2.3 횡방향 하상경사

하상에서 유사입자는 충돌에 의한 운동량의 손실과 관련된 마찰력 F_a 와 입자의 수중무게 W_s , 유체의 항력 F_b , 揚力 F_l 의 작용하에 총적수로를 이동한다.

그림 2.2와 같은 만곡구간의 유사입자에서 입자의 운동에 관한 한계조건을 도입함으로써 입경별 이송의 국부방향을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(\tan \phi)_i = \tan \alpha + b(\theta_{icr}/\theta_i)^{1/2} S_t \quad (2.10)$$

여기서 S_t 는 $\partial(d)/\partial Y$ 로 국부횡방향 하상경사이고, α 는 하상에서 유체 전단응력의 방향과 흐름방향이 이루는 角, ϕ 는 하상입자의 이동방향과 흐름방향이 이루는 角, θ_i 는 無次元 하상 전단응력인 Shields의 응력, θ_{icr} 은 Shields의 한계전단응력이며, b는 Coulomb의 마찰함수이다. 국부횡방향 하상경사는 D_{50} 을 갖는 입자에 대해 힘의 평형조건을 적용해 결정하면 다음과 같다.

$$St = 1/b(\theta/\theta_{icr})^{1/2}(\tan \phi - \tan \alpha) \quad (2.11)$$

식(2.11)에서 D_{50} 을 사용하였으므로, 하상입자의 불균등에 상관없이 횡방향 하상경사는 Shields의 응력 $\theta = \tau_{bx}/\rho \Delta g D_{50}$ 과 $\tau_{bx} = \rho U_*^2$, $\tan \alpha = \tau_{by}/\tau_{bx}$ 를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_t = [\kappa/bP(\theta_{icr})^{1/2}] [U_m/(\Delta g D_{50})^{1/2}] (\tan \phi - \tau_{by}/\tau_{bx}) \quad (2.12)$$

여기서 $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$, ρ_s 는 유사입자의 밀도이다.

원심력에 의해 생기는 하상부근의 횡방향 유속 성분 V_b 와 V 간에는 다음의 하상 전단응력비와 대략 같게 볼 수 있다.

$$\tau_{by}/\tau_{bx} \cong (V_m + V_b')/U_b \quad (2.13)$$

여기서 U_b 는 흐름방향의 하상부근 유속으로 Rozovskii(1961)의 가정을 이용하고, 식(2.6)을

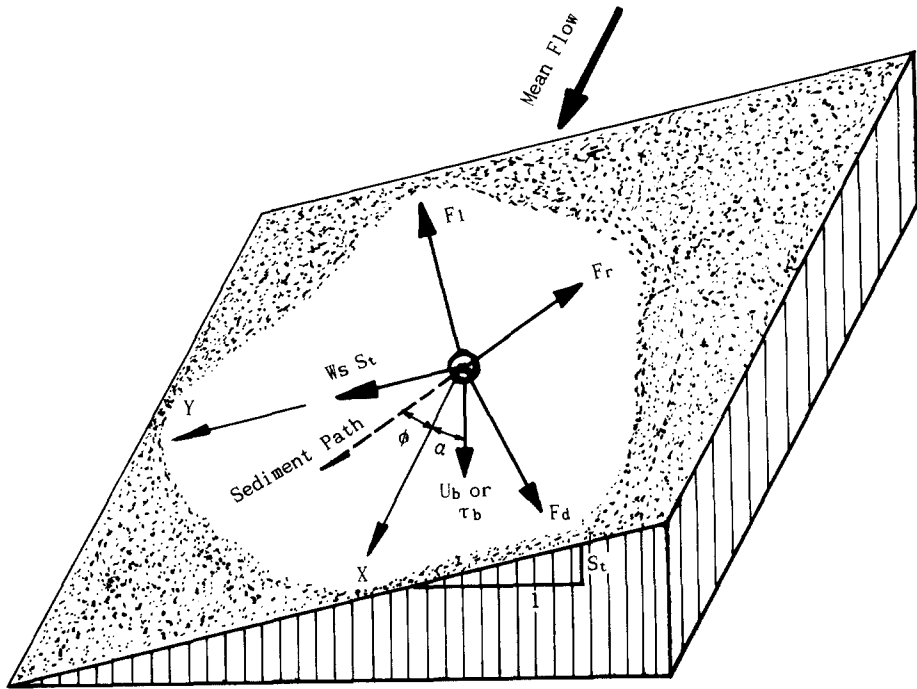


Fig. 2.2 Schematic Diagram of Forces on a Bed Particle in a Channel Bend

적용하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$U_b \cong (P+1/P)(Z/d)^{1/P} U_m \quad (2.14)$$

식(2.14)에서 U_b 는 P 와 Z/d 의 함수인 k_1 으로 대체하면 다음과 같다.

$$U_b = k_1 U_m \quad (2.15)$$

충분히 발달된 만곡부 흐름에서 D_{50} 인 입자의 이동방향과 흐름방향이 같은 경우 즉, 입자가 하상 전단응력을 가지고 α 의 각에서 같은 방향으로 이동할 때의 각인 $\tan \alpha = V_b'/U_b$ 로 주어진다. 그러나 흐름이 발달하는 만곡부의 흐름에서는 ϕ 에 의한 유체의 純橫方向 移送는 零이 아니므로 V_m 과 관련된 그 차이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tan \phi = V_m/U_b = V_m/k_1 U_m \quad (2.16)$$

따라서 $\tan \phi - \tan \alpha = -V_b'/k_1 U_m$ 이다. 식(2.7)에서 $V_b' = V_s'$ 로 개략화 하고, 식(2.13), (2.14) 및 (2.16)을 식(2.12)에 대입하면 다음과 같이 줄일 수 있다.

$$S_t = a V_s' \quad (2.17)$$

여기서 $a = 1.91(\theta_{cr})^{1/2}/k_1(\Delta \rho D_{50})^{1/2}$ 이다.

3. 기본 방정식의 선형화

주요 미지수는 유속 및 수심의 분포와 중앙입경의 분포이다. 이들 미지수는 상호관련되어 있으며, 만곡부에서 이들의 거동을 결정하기 위해서는 기본 방정식을 간략화 하는 것이 필요하다.

Rozovskii(1961), Odgaard & Bergs(1988)의 실험결과를 사용함으로써 흐름특성을 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사에 관한 선형식으로 유도, 편미분 형태의 지배 방정식을 상미분식으로 간략화 할 수 있다.

3.1 흐름방향 유속 성분

기본 방정식(2.1)은 운동학적 경계조건 즉 와점성 계수 ϵ 은 포물선 분포로서 $\epsilon = \kappa U_* Z(1-Z/d)$ 를 수면

과 하상에 적용함으로써 $\partial U/\partial Z = U_w/\kappa Z$ 이므로 다음과 같이 변형 시킬 수 있다.

$$U_s \frac{\partial U_s}{\partial X} + V_s \frac{\partial U_s}{\partial Y} + W_s \frac{\partial U_s}{\partial Z} = -\frac{U_s V_s}{R} + gS - \frac{U_s^2}{d} \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{P+1}{P} \right)^2 \frac{\partial U_m^2}{\partial X} + \frac{\kappa^2}{P^2 d} U_m^2 = gS - \left(\frac{P+1}{P} \right) V_s \left(\frac{U_m}{R} + \frac{\partial U_m}{\partial Y} \right) \quad (3.2)$$

식(3.2)를 수로 중심선에 적용하면 U_m 와 d 는 상수로 취급되므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\kappa^2 (U_c)_m^2 / P_c^2 d_c = g(S_c - S'_c) \quad (3.3)$$

여기서 S_c 는 $R=R_c$ 인 수로 중심선에서의 흐름방향 수면경사이고, S'_c 은 식(3.2) 우변 끝항의 값이다. 식(3.3)의 우변은 좌변이 X 에 무관할 경우 수로 중심선의 임의 점에서 계산할 수 있다. $\partial U_m/\partial X$ 에 대한 수위차의 영향을 무시하고, 무차원량 $\Psi (=X/B)$ 를 도입하여 $(U_c)_m^2$ 으로 나누면 다음식과 같은 수로 중심선으로부터 일정한 거리에서의 횡방향 유속의 변화를 구할 수 있다.

$$\frac{d}{d\Psi} \left[\frac{U_m}{(U_c)_m} \right]^2 + G \frac{d_c}{d} \left[\frac{U_m}{(U_c)_m} \right]^2 = G \frac{R_c}{R} \left(\frac{P}{P_c} \right)^2 \quad (3.4)$$

여기서 $G = 2\kappa^2/(P+1)^2(B/d_c)$ 이다.

3.2 횡방향 유속성분

식(2.2)는 횡방향 유속성분의 수로방향 변화율 $\partial V/\partial X$ 와 횡방향 전단력, 수면경사 및 원심가속도와 관련되므로 식(2.6)을 사용하여 수면에서의 식으로 계산함으로써 다음식으로 줄일 수 있다(Odgaard 1986).

$$\frac{\partial V'_s}{\partial X} + \frac{\partial V'_m}{\partial X} + A_0' V'_s = F \quad (3.5)$$

여기서 $A_0' = 2\kappa^2/(P+1)d$ 이고, $F = (P+1)/P(U_m/R)[1 - P^2/(P+1)^2(gRS_R/U_m^2)]$ 이다.

식(3.5)에서 $\partial/\partial X$ 항은 곡률반경이 일정하고, 층

분히 발달된 만곡구간의 흐름에서 영이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V'_s = N(d/R)U_m \quad (3.6)$$

여기서 $U_m^2/gR = S_R$ 로 놓으면, $N = (2P+1)/(2\kappa^2 P)$ 가 된다.

3.3 수로 중심선에 관한 횡방향 하상경사

Zimmermann & Kennedy(1978), Thorne et al. (1989)의 실험 및 현장자료에 의하면 $(U_c)_m$ 과 d_c 는 수로 중심선을 따라 일정하며, 이들 값의 횡방향 변화는 수로중앙에서 거의 선형적인 변화를 나타내는 것으로 보고 되어 있으므로 다음식과 같이 간략화시킬 수 있다.

$$U_m/(U_c)_m = 1 + (Y/d_c)V_{ic} \quad (3.7)$$

$$d/d_c = 1 + (Y/d_c)S_{ic} \quad (3.8)$$

여기서 S_{ic} 는 $(\partial d/\partial Y)_c$ 인 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사이고, V_{ic} 는 $d_c[\partial/\partial Y\{U_m/(U_c)_m\}]_c$ 인 수로 중심선에서의 표준화한 횡방향 유속분포이며, 첨자 c 는 수로 중심선의 값이다.

그러므로 식(3.5)의 편미분식은 U_m 과 d 가 $R=R_c$ 인 수로 중심선에서의 상미분식으로 변형시킬 수 있다.

$$\frac{dV'_{sc}}{dX} + \frac{d(V_c)_m}{dX} + A_0' V'_{sc} = F_c \quad (3.9)$$

여기서 $V'_{sc} = S_{ic}/a$ 이며, $(V_c)_m$ 은 질량 이송속도(mass-shift velocity)로 질량보존법칙에 의하여 수로의 중앙 연직에 대해 Y 방향 이동 유체질량과 수로 중앙 외측단면의 X 방향 질량이동의 증가량을 같게 놓음으로써 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(V_c)_m = \frac{1}{d_c R_c} \frac{d}{dX} \int_0^{B/2} (R U_m d) dY \quad (3.10)$$

식(3.7)과 (3.8) 및 $R=R_c+Y$ 를 사용함으로써 다음과 같은 식(3.10)의 적분치를 얻을 수 있다.

$$(V_c)_m \cong \frac{\alpha'}{8} (U_c)_m \frac{B^2}{d_c} \frac{d}{dX} (S_{ic} + V_{ic}) \quad (3.11)$$

여기서 α' 는 식(3.10)의 적분으로 얻어진 식(3.11)이 개략치이므로 이를 모형화에 사용할때 생기는 오

차의 누적을 보정 해주기 위한 횡방향 질량이동 보정계수(transverse-mass flow correction factor)이다. α' 는 실측치 $(U_c)_m$ 및 d_c 분포와 이를 선형분포로 가정하고 계산한 식(3.11)의 적분치를 비교함으로써 구해지며, 현장자료의 경우 보통 α' 는 0.2~0.8의 값을 갖는다(Odgaard 1989). 이 값을 얼마로 결정하느냐에 따라 사행이행의 방향과 크기를 결정함에 큰 영향을 받는 바 본 논문에서는 0.4가 사용되었다.

식(3.7), (3.8) 및 (3.11)을 식(3.2), (3.9)에 대입하고 고차항을 무시 함으로써 다음의 선형식을 얻을 수 있다.

$$(dV_{tc}/d\psi) + (A_1 V_{tc}) = 1/2(A_1 S_{tc}) \quad (3.12)$$

$$\frac{d^2 S_{tc}}{d\psi^2} + A_2 \frac{dV_{tc}}{d\psi^2} + A_3 \frac{dS_{tc}}{d\psi} + A_4 \frac{dV_{tc}}{d\psi} + A_5 S_{tc} = A_6 \quad (3.13)$$

여기서 $\psi = X/B$ 이고, $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ 은 선형식의 계수이다. 식 (3.12)를 사용하여 S_{tc} 를 소거 함으로써 식(3.13)의 V_{tc} 와 S_{tc} 系는 減衰振動系(damped oscillation system)로 유도되며, Odgaard & Bergs(1988)에 의하면, $d^2 V_{tc}/d\psi^2$ 은 무시할 수 있을 만큼 작으므로 식(3.13)은 다음과 같은 계수 A_0, B_0, C_0 를 갖는 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사에 관한 선형 2계 미분방정식으로 유도할 수 있다.

$$\frac{d^2 S_{tc}}{d\psi^2} + A_0 \frac{dS_{tc}}{d\psi} + B_0 S_{tc} = C_0 \quad (3.14)$$

4. 선형식의 해

식(3.14)는 감쇠 진동계이므로 제어함수(forcing function)인 C_0 를 수로의 彎曲比(sinuosity)(M/L) [사행수로에서 한 점의 crossover에서부터 연속 하는 두 점의 crossover사이의 흐름방향 축의 직선길이인 蛇行帶(wavelength) L 에 대한 같은 세점에서의 수로 중심선의 길이인 蛇行長(meander wavelength) M 의 比]에 의해 구하였다. C_0 는 p, α', d_c 및 R_c 와 관련 되므로 p, α' 의 관계를 δ 라 하면 $C_0 = \delta(d_c/R_c)$ 이다. 여기서 d_c 는 수로 중심선을 따라

일정하므로 결국 $1/R_c$ 이 제어함수가 된다. 따라서 $1/R_c$ 을 구함에 있어 수로 형상을 만곡비의 크기에 따라 그 값이 1.5 보다 큰 수로의 거친 하상입자를 가진 蛇行河川(meandering channel)의 경우에는 CRC 및 SGC의 방법을, 1.5 미만인 準蛇行水路(sinuous channel)의 가는 입자로 된 수로의 경우에는 SWT의 방법을 각각 적용하여 선형식의 해를 구하였다.

4.1 일정반경곡선(CRC)의 방법에 의한 해

본 방법은 식(3.14)의 C_0 가 일정한 곡률반경일때 다음의 제차 선형 2계 미분방정식의 해를 갖는다.

$$S_{tc} = S_{tco} - (S_{tco} - S_{tci})T_1 \quad (4.1)$$

여기서 S_{tci} 는 구간시점에서의 S_{tc} 값이고, S_{tco} 는 구간내 충분히 발달된 흐름에서의 S_{tc} 값이며, T_1 는 계의 감쇠특성에 좌우되는 ψ 의 함수로 $A_0^2 > 4B_0$ 인 경우는 臨界減衰(critical damping), $A_0^2 > 4B_0$ 인 경우는 過減衰(overdamping), $A_0^2 < 4B_0$ 인 경우는 不足減衰(underdamped system)가 발생되고, 부족감쇠의 경우 $T_1 (= T_{12})$ 는 다음과 같다.

$$T_{1,2} = [1 + (\frac{\psi}{\omega_0} - \frac{A_0}{2\omega_0})^2]^{1/2} \cos[\omega_0(\psi - \psi_1) - \phi_1] \exp[-\frac{1}{2} A_0(\psi - \psi_1)] \quad (4.2)$$

여기서 $\omega_0 = 1/2(4B_0 - A_0^2)^{1/2}$ 이고, $\tan\phi_1 = A_0/(2\omega_0) - \psi/\omega_0$ 이다.

4.2 정현곡선(SGC)의 방법에 의한 해

식(3.14)의 해를 구하기 위해 SGC를 작성함으로써 C_0 를 구할 수 있다. SGC는 Langbein & Leopold(1966)에 의하면 $\omega = \omega' \sin(2\pi X/M)$ 로 표현할 수 있는데, 여기서 ω 는 임의 X점에서 사행대축과 流深線(thalweg)이 이루는 방향각이고, ω' 는 수로 중심선과 사행대축이 이루는 角이며, M 은 수로 중심선의 길이인 사행장이다.

또한, 곡률은 ω 의 변화율으로써 다음과 같이 구할

수 있다.

$$\frac{1}{R_c} = \frac{d\omega}{dX} = \frac{1}{R_m} \cos\left(\frac{2\pi X}{M}\right) = \frac{1}{R_m} \cos\left[f_m\left(\Psi - \frac{M}{4B}\right)\right] \quad (4.3)$$

여기서 R_m 은 최소 곡률반경이며, f_m 는 $(B/R_m)(1/\omega)$ 로 사행빈도(meander frequency)이며, $\omega' = 2.20 [1 - (L/M)]^{1/2}$ 이다(Langbein & Leopold 1966). $d\omega/dX$ 가 영인 전향부에서 $X=0$ 이고, $d\omega/dX$ 가 $1/R_m$ 인 정점부에서 $X=M/4$ 이므로 식(4.3)을 식(3.14)에 대입하면 S_c 에 대한 C_0 를 얻을 수 있다.

하상형상이 SGC와 같은 수로곡률을 갖는다면, 식(3.14)에 대한 특수해로 다음과 같이 결정 되어진다.

$$S_c = S_{icm} \cos\left[f_m\left(\Psi - M/4B\right) - \phi_2\right] \quad (4.4)$$

여기서 $S_{icm} = 16\kappa^2 N / (P+1) [(B_0 - f_m^2)^2 + (A_0 f_m)^2]^{1/2}$ (d_c/R_m)이고, $\phi_2 = \tan^{-1}(f_m A_0 / B_0 - f_m^2)$ 로 위상각(phase angle)이다.

4.3 미소진폭파 이론(SWT)의 방법에 의한 해

감쇠진동계 선형식(3.14)의 해를 구하기 위해 이 계에 미소진폭 진행파 이론을 결합시키면 $\eta(X, t) = A(t)\sin[k(X-Ct)]$ 로 표현할 수 있으며, 여기서 X 는 수로 중심선을 따르는 거리이고, k 는 $2\pi/L$ 인 파수, A 는 진폭, t 는 시간, C 는 정현파의 파속이다. 수로 중심선에서의 변위 $\eta(t)$ 가 사행장보다 훨씬 작은 값이라고 하면, 수로 중심선의 곡률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$1/R_c = -(d^2\eta/dX^2) = k^2 A(t) \sin[k(X-Ct)] \quad (4.5)$$

V_{ic} 에 대한 미분 방정식은 식(3.14)에 식(4.5)을 대입 함으로써 구할 수 있으며, 주기 및 초기조건에 무관한 다음식의 해를 얻을 수 있다.

$$V_{ic} = \frac{NB\kappa^2 A}{(E_1^2 + E_2^2)^{1/2}} \sin[k(X-Ct) - \gamma] \quad (4.6)$$

여기서 $N = 8\kappa^2(2P+1)/[\alpha^3 P^3(P+2)]$ 이고, $E_1 = H_3 - 2H_2 k^2 B^2$ 이며, $E_2 = H_2 k B - k^3 B^3$ 이다. V_{ic} 와 수로축 변위간의 位相移動은 $\gamma = \tan^{-1}(E_2/E_1)$ 이며, 등치횡

방향 하상경사는 식(3.12)에 식(4.5)를 대입 함으로써 구할 수 있다.

$$S_c = \frac{2NB\kappa^2 A}{(E_1^2 + E_2^2)^{1/2}} \left[1 + \left(\frac{B\kappa}{A_1}\right)^2\right]^{1/2} \sin[k(X-Ct) - \phi_3] \quad (4.7)$$

여기서 $\phi_3 = \gamma - \tan^{-1}(B\kappa/A_1)$ 이다.

5. 적용 및 비교분석

5.1 CRC 및 SGC의 방법에 의한 분석

횡방향 하상경사와 유속의 횡방향 분포를 비교 분석하기 위해 실측치 자료로 그림 5.1과 같이 금강수계의 甲川을 대상으로, 사행성이 현저한 제1상소교 10m 하류지점을 시점으로 1000m 구간을 검증구간으로 택하였다. 검증구간을 20m 간격으로 나누어 종방향 수로경사와 수면경사를 측정하였으며, 검증구간은 23개를 두었으나 편의상 10개 지점만을 선정하여 그림 5.2와 같이 표시하였다. 또한, 각 단면은 수로 중심선으로부터 내외측으로 2m씩 나누어 수심측량을 하여 얻었으며, 그 외의 본 연구에서 사용된 기본자료는 1989. 7. 16일 대전축후소의 자기우량계에 기록된 일최대강우량 145.6mm에 대한 호우를 택하여 실측 rating curve로부터 구한 값들로 표 5.1과 같다(건설부 1988).

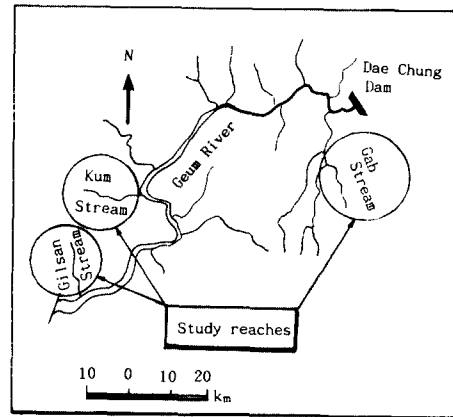


Fig. 5.1 Plan View of Study Reaches

Table 5.1 Primary Flow Data

Stream	Discharge Q(cms)	Effective Width B(M)	Centerline Values			
			Flow Depth d_c (m)	Depth-Avera ged Velocity $(U_c)_m$ (m/s)	Median Grain Size D_{50} (m)	Longitudinal Slope of Water Surface S_c
Gab	144	35.86	2.05	1.76	0.028	0.00994

Table 5.2 Computations of Transverse Bed Slopes along Centerline in Gab Stream

Rea. No.	Centerline radius of curvature(m)	Transverse-bed slope		Sec. No.	Distance of section from beginning of reach(m)	Value of Ti_2	Transverse bed slope at section, S_c
		S_{to}	S_{tb}				
1	343	0.00000	0.01475	1	20	0.81528	0.00269
		0.01659	0.03621	End	105	-0.13856	0.01659
2	138	0.03611	0.00050	4	50	0.28661	0.03059
				6	127	-0.11239	0.03841
				9	265	0.00500	0.03611
3	∞	0.00411	0.00889	11	100	-0.13477	0.00430
				12	118	-0.12946	0.00411
4	562	0.00942	0.04759	13	72	0.00345	0.00885
				End	157	-0.03900	0.00940
5	105	0.00942	0.04759	16	85	-0.08894	0.05098
				18	120	-0.12623	0.05241
				End	195	0.01448	0.04704
6	∞	0.04704	0.00000	21	75	-0.02274	0.00056
				23	135	-0.09337	0.00385

Table 5.3 Computation of Lateral and Down-Valley Migration Rates for Gilsan Stream

Parameter	Migration Rates	Parameter	Migration Rates
A_1	0.583	kB	0.2490
A_2	-1.482	E_1	0.0061
A_3	1.348	E_2	0.0550
A_4	-2.861	N	0.0870
A_5	0.329	K	5.1230
H_1	1.499	ϕ_3	1.0560
H_2	0.281	$(1/A)\partial A/\partial t$	$3.960 \times 10^{-8} \text{sec}^{-1}$
H_3	0.192	C	$2.287 \times 10^{-7} \text{m/s}$

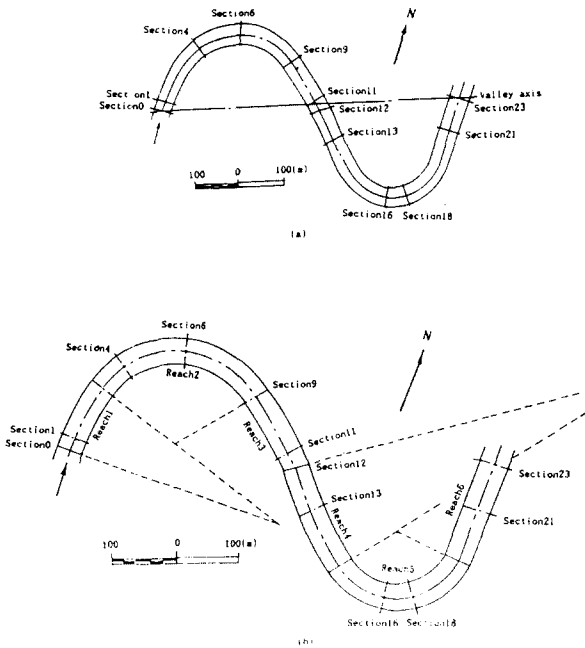


Fig. 5.2 Discretization of Reach Sections

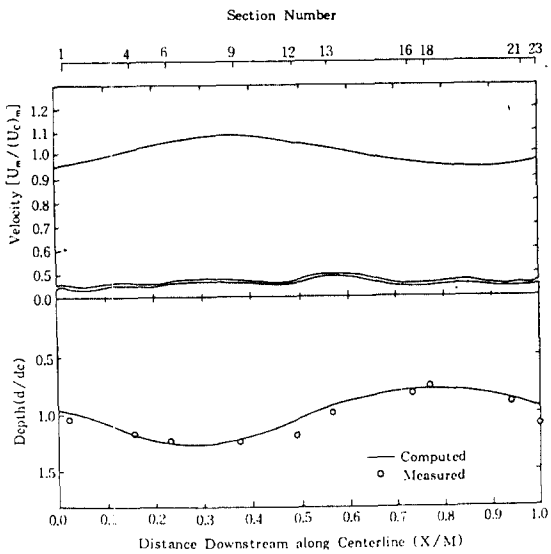


Fig. 5.3 Streamwise Variation of Depth and Velocity along Left(10m) in Gab Stream

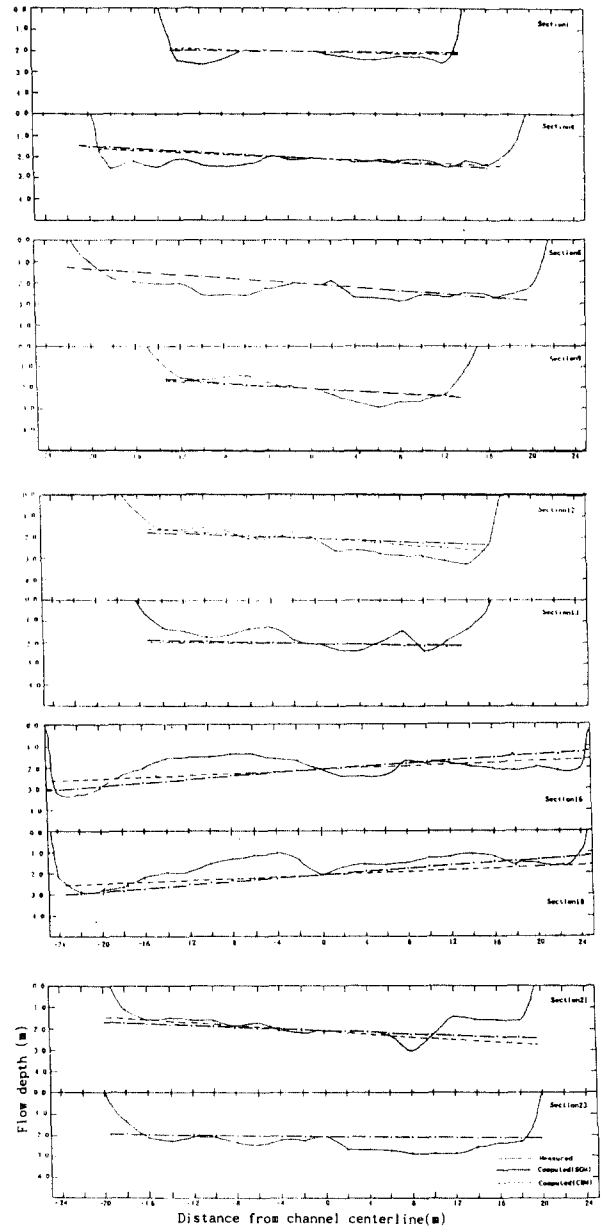


Fig. 5.4 Transverse Distribution of Depth in Gab Stream

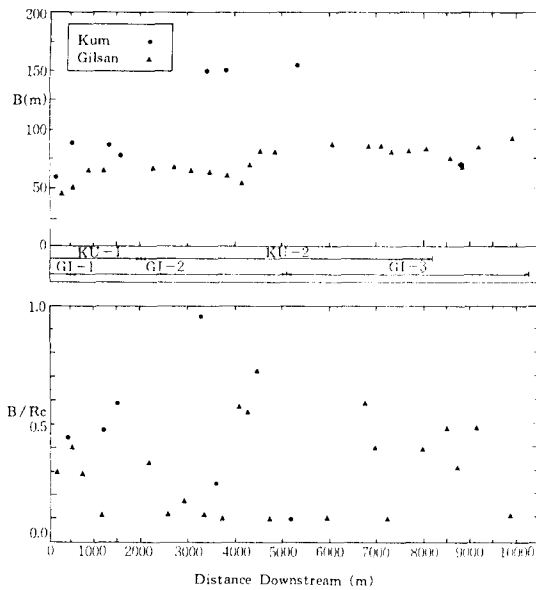


Fig. 5.5 Summary of Data on Bends of Study Reaches(in Kum and Gilsan Stream)

CRC의 방법에 의한 해를 구하기 위해 그림 5.2 (b)와 같이 4개의 일정한 곡률반경을 가진 곡선구간과 2개의 직선구간으로 구분하여 이행특성을 구하였다. 곡률반경이 일정하면서 충분히 발달된 곡선구간 흐름의 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사 S_{co} 와 식(4.2)의 값은 각각 다음과 같이 나타났으며, 각 단면에서의 횡방향 하상경사는 표 5.2와 같다.

$$S_{\text{co}} = 2.4374(d_c/R_c) \quad (5.1)$$

$$T_{12} = 1.1812 \cos(1.0563\psi - 0.5612) \exp(-0.6640\psi) \quad (5.2)$$

SGC의 방법에 의한 경우 식(3.14)의 C_0 를 구하기 위해 그림 5.2 (a)에 대한 SGC를 작성하여, $\omega' = 1.356$, $M/L = 1.61$, $f_m = 0.224$, 최소 곡률반경 118m를 각각 얻었다. 전향부는 Section 0과 1사이, Section 11과 12사이 및 Section 23에서 나타났다. 또한 수로 중심선으로 부터 외측제방쪽으로 10m 거리에서 흐름방향으로의 경로를 따르는 수심과 유속의 변화를 구해 도시한 결과 그림 5.3과 같이 나타났으며, 수심의 변화는 본 방법에 의한 값과 실측자료와 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타

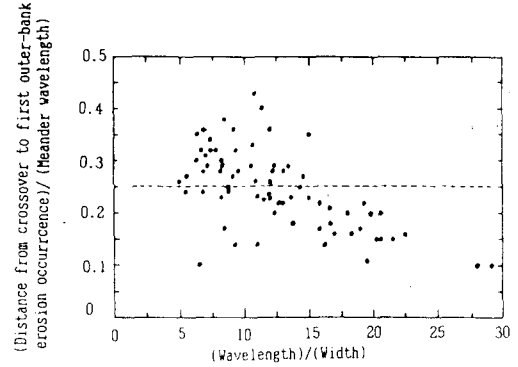


Fig. 5.6 Measured Distance from Crossover to First-Bank Erosion Occurrence in 72 Bends of East Nishabontna River, Iowa(By Odgaard 1989)

났다.

SGC 및 CRC의 방법에 의한 수심의 횡방향 변화는 그림 5.4와 같이 나타났다. 일점쇄선은 SGM에 의한 결과이고, 점선은 CRC의 방법에 의한 결과이며, 실선은 실측치를 각각 나타낸 것이다. 이들 두 방법에 의한 결과와 실측치를 비교한 결과 대체로 잘 맞았으나, Section 6, 12, 16, 18, 23에서는 다소의 오차가 발생되었는데 이는 만곡부 정점과 crossover부분으로 만곡비의 증가에 따라 수심의 위상지체(phase lag)가 발생되었기 때문인 것으로 나타났다.

5.2 SWT의 방법에 의한 분석

본 방법은 준사행수로의 사행이행량을 구하기 위해 그림 5.1에 나타난 바와 같이 금강의 지류인 연장 14.7km의 金川과 11.4km인 吉山川의 두 지방하천을 대상으로 하였다.

그림 5.5에서와 같이 금천의 경우 두개의 副區間(subreach; KU₁, KU₂)으로, 길산천의 경우는 세개의 부구간(GI₁, GI₂, GI₃)으로 구분하여 각 구간간의 시점으로부터의 B/R_c분포를 나타냈으며, 길산천을 대상으로한 횡방향 및 흐름방향의 사행이행량 $\partial A/\partial t$ 및 C의 계산을 위해 $E = 4.8 \times 10^{-7}$, $\alpha' = 0.4$ 를 사용 하였으며, P는 3.79, B/d_c는 26.17로 사행수로의 일반적인 경우에 잘 맞았으나, F_{DC}는 25.22

로 5~15인 평균치보다 큰 값을 나타냈다(차 등 1992). 또한 이들 변수에 대한 계산값은 표 5.3에 나타난 바와 같다.

또한, Odgaard(1989)에 의하면 그림 5.6과 같이 (L/B)비가 큰 단일만곡부에서는 0.25M 보다 작은 거리의 외측제방에서 침식이 시작되어 횡방향으로의 확장과 흐름방향으로의 이행이 동시적으로 일어나며, (L/B)비가 작은 단일만곡부에서는 0.25M 보다 큰 거리의 외측제방에서 침식이 시작되어 흐름방향으로만의 이행이 생기는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구는 수로의 형상과 하상조건에 따른 사행수로의 이행특성에 관한 모형으로 수로 중심선에서의 횡방향 하상경사에 관한 선형식을 유도하고, 그 해를 CRC, SGC 및 SWT에 의한 방법을 각각 적용하여 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 하상조건이 거친 하상입자이고, 사행수로인 경우에 CRC 및 SGC에 의한 방법을 적용하여, 구한 각 측정에서의 횡방향 하상경사와 수심의 분포는 예측치와 실측치가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

2) 가는 입자로된 준사행수로에 SWT의 방법을 적용하여 이행특성을 구한 결과, 횡방향 질량이송계수는 사행이행의 방향과 크기의 결정에 중요한 역할을 하는 계수임이 확인되었다.

3) 횡방향 하상경사의 예측치와 현장의 실측자료를 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 외측제방의 최대 만곡점부근에서는 다소의 오차가 발생 되었는데 이는 만곡비의 증가에 따라 수심의 위상지체가 발생되기 때문인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 대학교수 국비해외과제 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 교육부 당국에 심심한 사의를 표합니다.

參 考 文 獻

1. 건설부 (1988), 금강수계 종합정비계획 I, II 및 부록.
2. 고재용(1975), "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구", 한국수문학회지, 제 8 권 제 2 호, pp.75-80.
3. 이종태, 윤세의(1987), "개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름 특성", 대한토목학회 논문집, 제 7 권 제 3 호, pp.195-202.
4. 차영기, 배동만(1992), "정현과형 하천의 이행특성", 한국수문학회지, 제 25 권 제 2 호, pp.79-87.
5. 차영기, 이대철(1991), "만곡수로의 횡방향 하상경사와 흐름특성", 한국수문학회지, 제 24 권 제 1 호, pp.99-107.
6. 차영기, 이종석(1991), "Sinuosity가 작은 수로에서의 흐름모형", 단국대학교 논문집, 제 25 집, pp.281-296.
7. 차영기, 이대철, 이종석(1990), "만곡 총적수로의 횡방향 하상경사", 한국수문학회, 수공학 논총, 제 32 권, pp.213-220.
8. Blondeaux, P. and Seminara, G. (1985), "A Unified Bar-Bend Theory of River Meanders", J. Fluid Mech., 157, pp.449-470.
9. Chang, H. H. (1988), Fluvial Process in River Engineering, Wiley Interscience.
10. Dietrich, W. E., and Smith, J. D. (1983), "Influence of the Point Bar on Flow Through Curved Channel", W.R.R.,19(5), pp. 1173-1192.
11. Falcon, M. A., and Kennedy, J. F. (1983), "Flow in Alluvial-River Curves", J. Fluid Mech., 133, pp.1-16.
12. Griffiths, G. A.(1989), "Form Resistance in Gravel Channels with Mobile Beds", J. Hydr. Engrg., ASCE, 115(3), pp.340-355.
13. Griffiths, G. A.(1981), "Flow Resistance in Gravel Bed Rivers", J. Hydr. Engrg., ASCE, 107(7), pp.899-918.
14. Hey, R. D. (1988), "Bar Form Resistance in Gravel-Bed Rivers", J. Hydr. Engrg., ASCE, 114(12), pp. 1498-1508.
15. Ikeda, S., Parker, G., and Sawai, K.(1981), "Bed Theory of River Meanders, Part : Linear Development", J. Fluid Mech., 112, pp.363-377.
16. Langbein, W. B., and Leopold, L. B.(1966), "River

- Meanders—Theory of Minimum Variance”. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422-H.
17. Odgaard, A. J.(1989), “River-Meander Model : Applications”, J. Hydra. Engrg., ASCE, 115(11), pp.1451-1464.
 18. Odgaard, A. J., and Bergs, M. A. (1988), “Flow Processes in a Curved Alluvial Channel”, W.R.R., 24(1), pp.45-56.
 19. Odgaard, A. J.(1987), “Streambank Erosion Two Rivars in Iowa”, W.R.R., 23(7), pp.1225-1236.
 20. Parker, G. and Andrews, E.D.(1985), “Sorting of Bed Load Sediment by Flow in Meander Bends”, W.R.R., 21(9), pp.1361-1373.
 21. Rozovskii, L. L.(1961), Flow of Water in Bends of Open Channels, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, Israel.
 22. Thorne, C. R., Markhan, A. J., and Joyce Oldfield (1989), “Secondary Current Measurements in a Meandering Gravel-Bed River”, Proc. TIWARP-89. Conf., India Roorkee, pp.219-230.
 23. Yen, B. C. (1965), Characteristics of Subcritical Flow in a Menadering Channel, Institute of Hydraulic Reasearch, The University of Iowa, Iowa City.
 24. Zimmermann, C., and Kennedy, J. F. (1978), “Transverse Bed Slope in Curved Alluvial Streams”, J. Hydra. Div., ASCE, 104 (1), pp.33-48.

〈접수 : 10월 10일〉