

유로만곡부의 횡방향 하상경사에 관한 연구

A Study on Transverse Bed Slope in Channel Bends

정용태* · 최인호** · 송재우***

Chung, Yong Tai · Choi, In Ho · Song, Jai Woo

Abstract

When the transverse bed slope (S_t) in channel bend is more than 0.1, it may produce undesirable results on the bed topography of the cross section. The linear relationship for S_t results in zero or negative flow depths at the shallow side of the cross section (i.e., inner bank). The exponential relationship for S_t results in excessive flow depths at the deep side of the cross section (i.e., outer bank). This problem can be solved by combining the best features of both relationships described above. From the study, the linear relationship can be applied for the deep side of the cross section. But the exponential relationship is suitable for the shallow side. Therefore, the new relationship of S_t is clarified mathematically. A new mathematical model for bed topography is developed herein which takes accounts of the phase lag and the influence of the width to depth ratio. This model is used to analyze two sets of data: one from laboratory channel and the other from natural channel. A good agreement is found between the observed and the calculated bed topography based on the analysis of two sets of data.

요 지

평균수심을 고려하여 유도된 만곡부의 횡단면형은 횡방향 하상경사가 0.1보다 클 때 선형관계식은 내측안에서 0 혹은 부(-)수심을 갖고, 지수관계식은 횡단면의 외측안에서 과도한 수심을 갖게 되어 비정상적인 하상형을 나타내므로, 두 관계식을 이용하여 실제하천에 적용할 수 있는 식을 제시하기 위하여 외측안은 선형관계식을 내측안은 지수관계식을 적용하여 횡방향 하상형에 관한 새로운 식을 제시하였다. 또한 위상지체 및 폭-수심비의 영향을 고려한 횡방향 하상경사를 구할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 본 모형을 사용하여 실험실수로 및 자연수로로부터 실측자료를 분석한 결과, 제시된 식에 의하여 계산된 값은 실측값과 비교적 잘 일치하였다.

1. 서 론

사행하천의 형성은 사행현상에 따른 유속과 에너

* 정회원 · 순천전문대학 환경관리과 전임강사

** 정회원 · 서일전문대학 토목과 조교수

*** 정회원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

지 분포의 변화 및 이차흐름의 생성 등 흐름성향의 변화로 인하여 집중된 수류력이 유로의 한쪽 재방을 침식하고, 다른쪽은 퇴적됨으로써 이루어진다. 일반적으로 직선유로는 불안정하기 때문에 자연하천에서 거의 찾아볼 수 없으며, 미소한 교란이 발생

하더라도 하류방향으로의 확폭과 유로이동 및 유로 변형을 일으키게 된다. 특히 흐름특성과 유로이동에 의한 횡방향 하상형은 원심력으로 인한 유로의 비선형유선, 편수위상승, 이차흐름, 하상이동 등의 복합적인 영향을 받게 되므로 흐름특성과 횡방향 하상형간에는 상호종속적인 관계를 갖게 된다.

유로의 횡방향 하상형에 관한 연구로는 만곡부를 따라 정상상태로 움직이는 유체체적에 미치는 힘의 균형에 의하여 횡방향 항력을 결정한 바 있는 van Bendegom⁽¹⁾이 수면의 흐름방향, 횡방향 경사에 기인한 힘과 원심력을 고려하여 횡방향 하상경사식을 제안한 이래 Rozovskii,⁽¹²⁾ Engelund,⁽²⁾ Kikkawa 등,⁽⁴⁾ Zimmermann 등,⁽¹⁴⁾ Odgaard⁽⁶⁻¹⁰⁾ 등의 연구로 이어지고 있다. 우리나라의 경우 고재웅,⁽¹⁸⁾ 송재우,⁽¹⁹⁾ 윤세의,⁽²⁰⁾ 차영기⁽²¹⁾ 등에 의하여 연구된 바 있다.

본 연구의 목적은 기존의 연구에서 횡방향 하상형을 지수관계식이나 선형관계식으로 표현할 때 하안부근에서 수심의 과부족이 발생하는 모순을 해결하기 위하여 하상경사에 따른 새로운 횡방향 하상형을 제시하고, 또한 사행성향을 갖는 유로에 대하여 횡방향 하상경사를 구하는 새로운 방법을 제시함으로써 횡방향 하상형상을 명확히 구명하는데 있으며, 한편 평균수심을 고려하여 유도된 만곡부의 횡단면형은 횡방향 하상경사가 0.1보다 클 때 선형관계식은 내측안에서 0 혹은 부(-)수심을 갖고, 지수관계식은 횡단면의 외측안에서 과도한 수심을 갖게 되어 비정상적인 하상형을 나타내므로 본 연구에서는 두 관계식을 이용하여 실제하천에 적용할 수 있는 식을 제시하기 위하여 외측안은 선형관계식, 내측안은 지수관계식을 적용하여 횡방향 하상경사에 따른 횡방향 하상형에 대한 새로운 식을 얻었다.

또한 Odgaard^(9,10)가 제안한 흐름방향에 따른 횡방향 하상형의 변화에 관한 선형 2차 미분방정식에 Langbein 등⁽⁵⁾이 제안한 모의정현형을 도입함으로써 위상지체 및 폭-수심비의 영향을 고려한 횡방향 하상경사를 구할 수 있는 새로운 방법을 제시하고, Hooke⁽³⁾의 실험자료 및 남한강의 연구대상유로에 대한 자료를 이용하여 실측값과 비교검증하였다.

본 연구의 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 토립자는 정상운동을 한다.
- 2) 토립자의 형상은 구형으로서 회전에 의한 Ma-

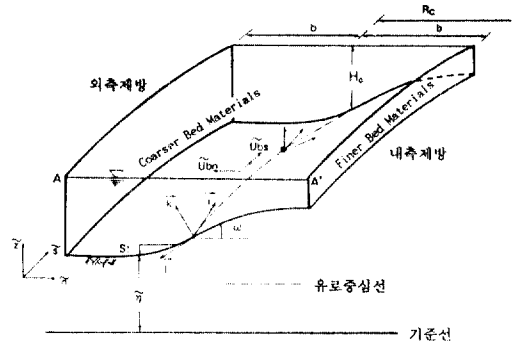


그림 1. 유로만곡부의 좌표계.

gnus효과 및 Coriolis의 힘을 무시한다.

2. 유로만곡부의 형상특성

유로횡방향 하상형에 대한 근사해는 수면의 횡방향 변화가 흐름조건이 상류(subcritical flow)일 때 하상의 횡방향 변화보다 적게 되어 양안의 수면차의 영향을 무시하면, 횡단면에 대한 수면고를 일정하다고 가정하므로써 얻을 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 만곡유로에서 횡방향 하상경사는 하상면을 가로질러 움직이는 토입자에 작용하는 이차흐름에 의한 항력, 중력에 의한 토립자의 이동, 양력 및 원심력에 의한 힘의 평형조건으로부터 토립자에 대한 평형방정식은 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$\vec{F}_D + W \tan \omega \vec{j} + \vec{F}_R = 0 \quad (1)$$

여기서,

- \vec{i}, \vec{j} : 각각 흐름방향과 횡방향의 단위벡터
- \vec{F}_D : 움직이는 토립자에 작용하는 항력벡터
- \vec{F}_R : Coulomb 저항력벡터
- W : 수중의 토립자 무게

하상부근의 전단응력과 유속벡터 및 유사량벡터를 고려한 횡방향 하상경사는 다음 식으로 표현된다.⁽¹⁶⁾

$$\tan \omega = \frac{\mu}{1 + \mu r} \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{q}_n}{\bar{q}_s} - \tan \delta \right) \quad (2)$$

여기서, μ 는 Coulomb의 동역학적 마찰계수, r 은 항력계수에 대한 양력계수의 비, τ^* 는 하상전단응력, τ_c^* 는 한계하상전단응력이고, \bar{q}_s, \bar{q}_n 은 각각 단위폭당 유사량의 흐름방향 및 횡방향 성분이다.

Rozovski⁽¹²⁾에 따르면 $v\left(=\frac{b}{R_c}\right) \ll 1$ 인 만곡부 흐름이 발달된 경우에 대하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\tan\delta = -\varepsilon \frac{H_c}{R_c} \quad (3)$$

여기서, H_c 는 유로 중심선의 수심이고, ε 은 임의의 수심과 곡률에 따른 계수로서 Rozovski⁽¹²⁾와 Englund⁽²⁾의 연구결과에 따르면 각각 11과 7로 나타났으며, 그림 1로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\tan\omega = -\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{n}} \quad (4)$$

3. 횡방향 하상변동모형의 개발 및 적용

3.1 만곡부 횡단면의 새로운 모형

충분히 발달된 만곡부의 흐름일 때 \tilde{q}_n 를 무시하면 식 (2), 식 (3) 및 식 (4)로부터 다음 식이 된다.

$$\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{n}} = \frac{\varepsilon\mu}{1+\mu r} \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*}\right)^{1/2} \frac{H_c}{R_c} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{n}} = -A \frac{H_c}{R_c} \quad (6)$$

여기서, A 는 횡방향 하상경사인자(transverse bed slope parameter)이고, 만곡부에서 횡방향 하상경사의 특성을 나타내는 인자로서 다음 식과 같다.

$$A = \frac{\varepsilon\mu}{1+\mu r} \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*}\right)^{1/2} \quad (7)$$

Zimmermann 등⁽¹⁴⁾의 자료를 이용하여 식 (7)에 의한 분석결과를 그림 2에 도시하였다.

본 연구에서 횡방향 하상경사식은 식 (6)을 변형하여 다음 식을 얻었다.

$$\frac{d\tilde{h}}{d\tilde{n}} = -S_t \frac{\tilde{h}}{H} \quad (8)$$

$$S_t = -AH\tilde{C} \quad (9)$$

여기서, \tilde{h} 는 임의지점에서의 수심을, H 는 횡단면의 평균수심을, \tilde{C} 는 유로곡률을 각각 나타낸다.

식 (8)의 해를 구하면 다음과 같다.

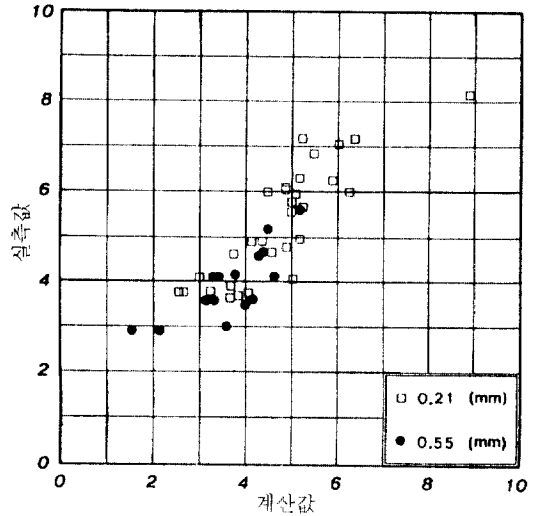


그림 2. 횡방향 하상 경사인자의 실측값과 계산값의 비교.

$$\tilde{h} = \frac{6H^3}{6H^2 + S_t^2 \tilde{b}^2} \exp\left(-S_t \frac{\tilde{n}}{H}\right) \quad (10)$$

또한 횡방향 하상경사가 작을 때, 식 (10)은 다음 식과 같이 된다.

$$\tilde{h} = H - S_t \tilde{n} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)로부터 횡방향 경사의 변화를 계산하여 도시한 결과 그림 3과 같이 평균수심을 고려하여 유도된 만곡부의 횡단면형은 횡방향 하상경사가 0.1보다 클 때 선형관계식은 내측안에서 0 혹은 부(-)수심을 갖고, 지수관계식은 횡단면의 외측안에서 과도한 수심을 갖게 되어 비정상적인 하상형으로 나타난다.

따라서 두 관계식을 이용하여 실제하천에 적용할 수 있는 식을 제시하기 위하여 외측안은 선형관계식, 내측안은 지수관계식을 적용하므로써 횡방향 하상경사에 따른 횡방향 하상형에 대한 새로운 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{h} = \left(1 - \frac{\tilde{h}_c}{S_t \tilde{n}}\right) \left[[-S_t \tilde{n}, 0]\right] + \frac{\tilde{h}_c}{S_t \tilde{n}} \exp\left(-S_t \frac{\tilde{n}}{H}\right) \left[[S_t \tilde{n}, 0]\right] \quad (12)$$

$$\tilde{h}_c = \frac{4bH |S_t| - S_t^2 b^2}{2b |S_t| + 2H - 2H \exp\left(-|S_t| \frac{b}{H}\right)} \quad (13)$$

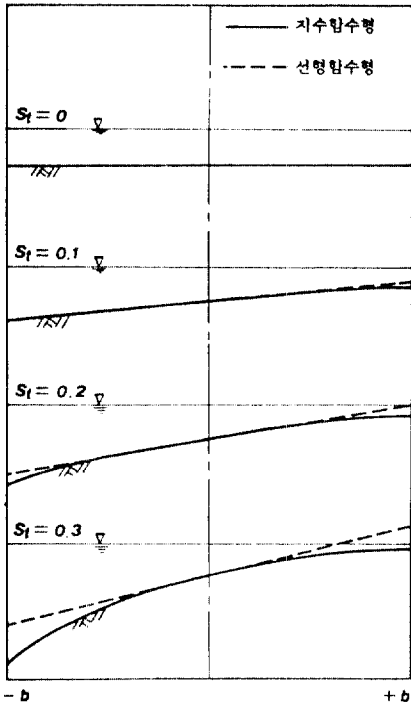


그림 3. 횡방향 하상경사에 따른 단면변화.

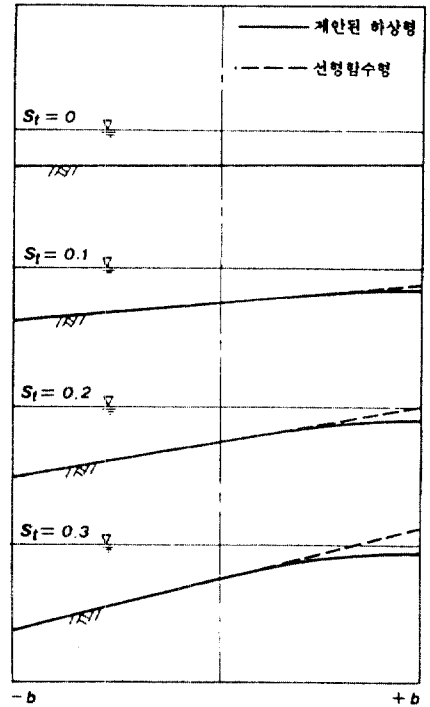


그림 4. 새로운 모형에 의한 단면변화.

여기서, \bar{h}_c 는 횡단면 중심에서의 수심이고, 기호 $[[A, B]]$ 는 Patankar⁽¹¹⁾에 의하여 정의된 것으로 A나 B중에서 큰 값을 의미한다. 한편 선형관계와 새로운 모형에 의한 비교는 그림 4에 나타내었다.

3.2 횡방향 하상경사의 새로운 산정방법 제안

Langbein & Leopold⁽⁶⁾은 수많은 사행유로를 분석한 결과 그림 5에서와 같이 사행이 완전한 정현곡선은 아니지만 다음과 같은 모의정현곡선으로 간주할 수 있는 식을 제시하였다.

$$\theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi \bar{s}}{M}\right) \quad (14)$$

여기서, θ 는 \bar{x} 축과 흐름방향이 이루는 방향각을, θ_0 는 유로하류측 방향과 모의정현곡선이 이루는 최대 사행각을, M 은 유로중심선에 따라 측정된 총사행장을 각각 나타낸다.

한편 유로 중심선길이에 대한 하류측 방향에 따른 길이(down valley length)의 비인 굴곡도(sinuosity, S)와 파수(wave number, k)는 각각 다음 식 (15)와 (16)에 의하여 정의된다.

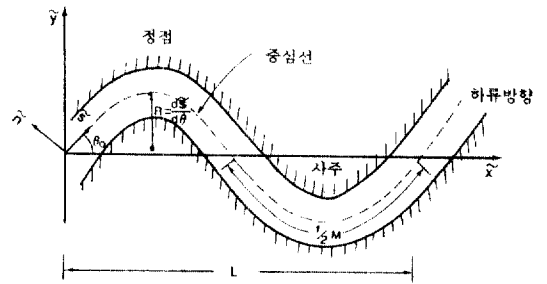


그림 5. 모의정현곡선에 의한 사행형.

$$S = \frac{M}{L} = \frac{I_0}{I} \quad (15)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (16)$$

여기서, L 은 유로하류방향에 따라 측정된 총사행과장, I_0 는 유로하류방향경사(down valley slope)이며 I 는 유로경사(channel slope)이다.

식 (15)와 식 (16)을 식 (14)에 대입하여 유로 중심선에 따른 곡률($\bar{C} = d\theta/d\bar{s}$)을 구하면 다음과 같다.

$$\tilde{C} = \frac{k\theta_0}{S} \cos\left(\frac{k\tilde{s}}{S}\right) \quad (17)$$

식 (17)을 식 (9)에 대입하여 위상지체(位相遲滯, phase lag, λ)를 고려한 횡방향 하상경사를 구하기 위하여 삼각함수의 가법정리를 이용하면 다음 식이 된다.

$$S_1 = \frac{-k\theta_0 AH}{S} \left[\sin\lambda \sin\left(\frac{k\tilde{s}}{S}\right) + \cos\lambda \cos\left(\frac{k\tilde{s}}{S}\right) \right] \quad (18)$$

여기서, λ 는 최대 횡방향 하상경사지점과 최대 유로곡률지점간의 위상지체이다.

Struiksma 등⁽¹³⁾은 실험수로부터 사행하천의 하상형을 감쇠진폭계의 거동으로 나타낸 바 있으며, 본 거동에 대하여 Odgaard^(9,10)는 다음과 같은 선형 2차 미분방정식으로 표현하였다.

$$\frac{d^2 S_1}{d\tilde{s}^2} + C_1 \frac{dS_1}{d\tilde{s}} + C_2 S_1 = C_3 \tilde{C} \quad (19)$$

여기서 3개의 계수는 각각 다음 식과 같다.

$$C_1 = \left(\frac{1 + \cos\lambda}{\sin\lambda} \right) \frac{k}{S} \quad (20)$$

$$C_2 = \left(\frac{1}{1 - \cos\lambda} \right) \left(\frac{k}{S} \right)^2 \quad (21)$$

$$C_3 = \left(\frac{-AH}{1 - \cos\lambda} \right) \left(\frac{k}{S} \right)^2 \quad (22)$$

식 (19)는 선형 2계 비제차 상미분방정식이므로 매개변수변환법을 이용하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$S_1 = \exp(C_6 \tilde{s}) \left[C_4 \sin(C_7 \tilde{s}) + C_5 \cos(C_7 \tilde{s}) + \frac{C_3 \sin(C_7 \tilde{s})}{C_7} \int_{-\infty}^{\tilde{s}} \frac{\cos(C_7 \tilde{s}') \tilde{C}}{\exp(C_6 \tilde{s}')} d\tilde{s}' - \frac{C_3 \cos(C_7 \tilde{s})}{C_7} \int_{-\infty}^{\tilde{s}} \frac{\sin(C_7 \tilde{s}') \tilde{C}}{\exp(C_6 \tilde{s}')} d\tilde{s}' \right] \quad (23)$$

여기서, 계수 C_4 , C_5 는 경계조건에 종속하고, 계수 C_6 , C_7 은 다음과 같이 정의된다.

$$C_6 = -\frac{C_1}{2} \quad (24)$$

$$C_7 = \frac{\sqrt{4C_2 - C_1^2}}{2} \quad (25)$$

적분상수 C_4 , C_5 를 결정하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$S_1(0) = -AH\tilde{C}(0) \quad (26)$$

$$\left. \frac{dS_1}{d\tilde{s}} \right|_0 = 0 \quad (27)$$

따라서, 식 (23)은 식 (28)로 변환될 수 있다.

$$S_1 = \exp(C_6 \tilde{s}) \left[\frac{\sin(C_7 \tilde{s})}{C_7} \frac{dS_1}{d\tilde{s}} \Big|_0 + \left(\cos(C_7 \tilde{s}) - \frac{C_6 \sin(C_7 \tilde{s})}{C_7} \right) S_1(0) + \frac{C_3 \sin(C_7 \tilde{s})}{C_7} \int_0^{\tilde{s}} \frac{\cos(C_7 \tilde{s}') \tilde{C}}{\exp(C_6 \tilde{s}')} d\tilde{s}' - \frac{C_3 \cos(C_7 \tilde{s})}{C_7} \int_0^{\tilde{s}} \frac{\sin(C_7 \tilde{s}') \tilde{C}}{\exp(C_6 \tilde{s}')} d\tilde{s}' \right] \quad (28)$$

횡방향 하상경사의 예측에 대한 기존모형은 구하고자 하는 단면에 대한 기하학적인 인자를 필요로 하지만, 본 연구에서 제시한 식 (28)은 유로가 모의정현사행형을 나타내고, 유로상류단에서의 초기조건(표 1)만 알면 횡방향 하상경사를 예측할 수 있다는 특징을 갖고 있다.

4. 비교검토 및 고찰

앞장에서 설명한 바와 같이 횡방향 하상경사에 대한 관계식은 위상지체와 수심에 대한 유로폭의 1/2비의 영향을 고려한 것이다. 횡방향 하상경사를 나타내는 식 (28)에 대한 검증을 위하여 Hooke⁽³⁾의 실험수리와 본 연구대상 하천유로에 대한 자료⁽¹⁷⁾는 표 1과 같다.

Hooke⁽³⁾의 실험수리의 총사행장은 1320 cm, 사행과장은 1033 cm, 유로폭은 1 m로서 유출량은 초당 10, 20, 35 및 50 l로 재순환시켰으며, 실험수리의 초기 최대사행각은 55°이고, 모의정현곡선을 나타

표 1. 실험수로 및 유역의 조건

인자	Hooke (1974)				남한강
	RUN 10	RUN 20	RUN 35	RUN 50	
총사행장 M (cm)	1,320	1,320	1,320	1,320	325,100
사행파장 L (cm)	1,033	1,033	1,033	1,033	240,000
반유로폭 b (cm)	50	50	50	50	38850
중앙입경 D_{50} (mm)	0.30	0.30	0.30	0.30	1.71
유량 Q (l/sec)	10	20	35	50.5	6,000 CMS
평균유속 U (cm/sec)	19.2	27.5	36.8	39.4	114
평균수심 H (cm)	5.2	7.3	9.5	12.8	676
사행각 θ (°)	55	55	55	55	60
Froude No. Fr	0.27	0.33	0.38	0.35	0.14
하상마찰인자, f_b	0.23	0.15	0.12	0.14	0.12

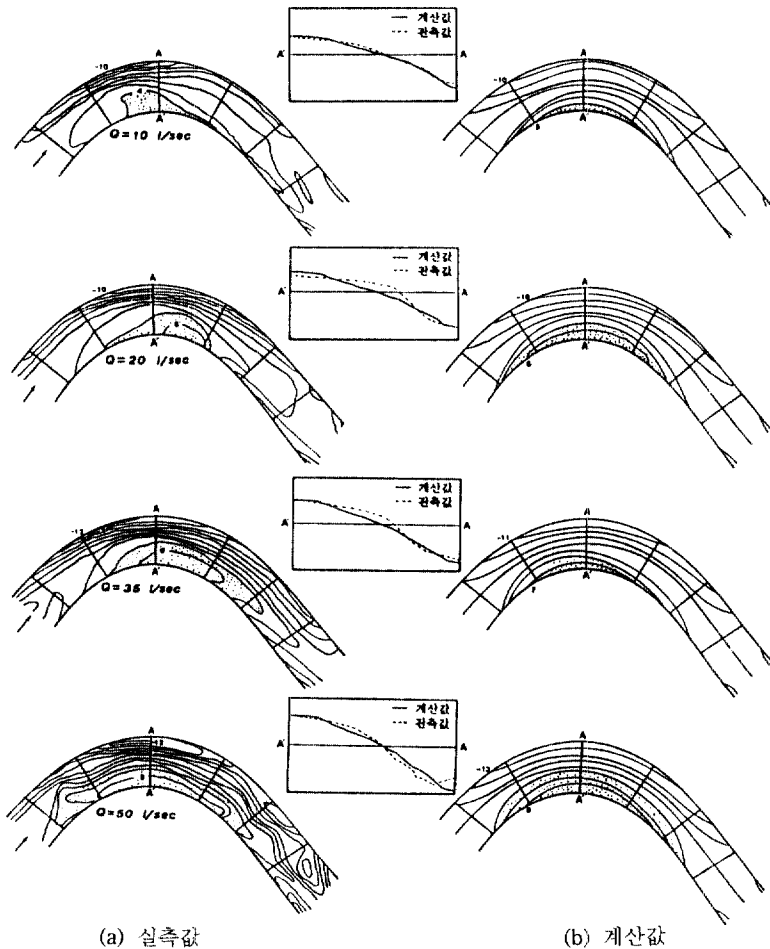


그림 6. 모의정현곡선에 의한 실측값과 계산값의 비교(Hooke).

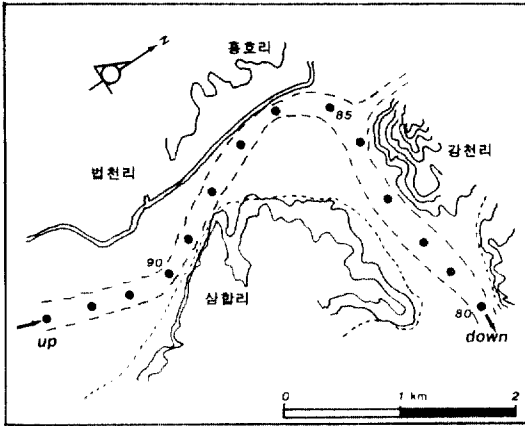


그림 7. 연구대상유로의 평면도(남한강의 여주 수위표 부근).

낸다. 또한 실험수로의 수심에 대한 유로폭의 1/2 비는 3.9~9.6의 범위로써 실험에 사용된 각 인자들은 표 1과 같다.

그림 6에서 보는 바와 같이 계산된 하상형은 실측된 하상형보다 다소 큰 값이 나타남으로써 외측에 대해서는 0~8.33%의 오차가 발생되고, 내측의 경우는 0~20%의 범위를 나타냈다. 특히 유량이 증가하므로써 본 연구에서 개발된 횡방향 하상모형이 더욱 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6에서와 같이 계산된 하상형보다 실측된 하상형이 복잡하게 나타난 것은 실험수로의 토립자가 불균등하기 때문인 것으로 사료되며, 계산된 하상형은 모의정현곡선에 의한 것이므로 주기성을 갖는다.

남한강 연구구역에 대한 유로의 평면도는 그림 7과 같으며, 그림에서 볼 수 있듯이 총사행장은 3251 m, 사행파장은 2400 m, 유로폭은 777 m이고, 유로 하류측 방향과 흐름방향이 이루는 최대사행각은 60° 이고, 모의정현사행형을 나타냈다.

한편 하상전단력과 흐름방향유속의 연직분포 및 원심력에 의하여 발생하는 비틀림을 고려하여 토립자에 작용하는 항력을 구한 후 침식성 만곡유로에 대한 횡방향 하상경사를 예측한 바 있는 Zimmermann 등⁽¹⁴⁾의 모형과 만곡부를 따라 정상상태로 움직이는 유체체적에 미치는 힘의 균형으로부터 횡방향 항력을 결정한 바 있는 van Bendegom⁽¹⁾의 모형에 대하여 도시해 본 결과 그림 8에서 보는 바와

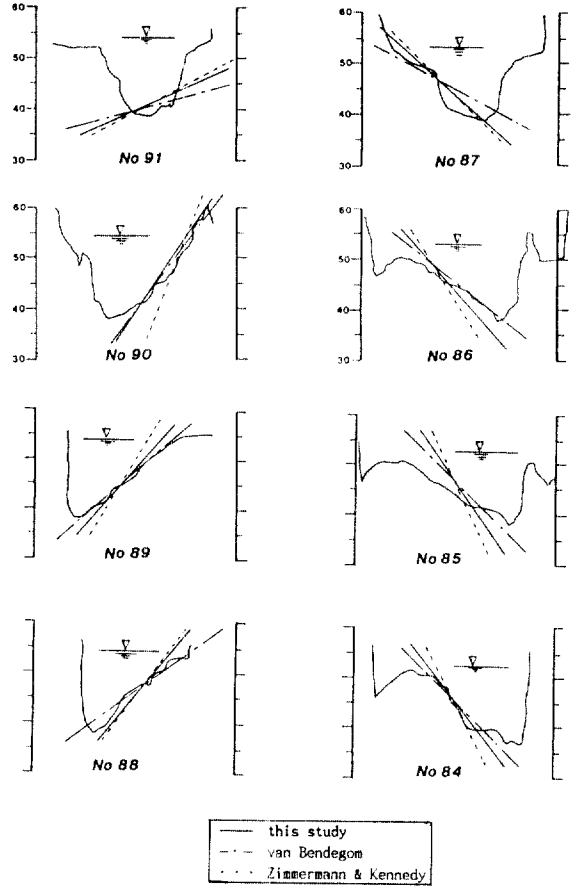


그림 8. 실측단면과 계산된 단면의 비교(No. 91~No. 84).

같이 Zimmermann 등의 모형의 경우 급한 하상형을 나타낸 반면 van Bendegom의 모형과 본 연구에서 제시한 횡방향 하상형을 나타내는 식 (28)에 의한 계산값과 실측값간의 비교결과는 지류가 합류하기 직전인 No. 85의 지점을 제외하고 계산된 하상형과 측정된 하상형 사이에 잘 일치됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 평균수심을 고려하여 유도된 만곡부의 횡단면형은 횡방향 하상경사가 0.1보다 클 때 선형관계식은 내측안에서 0 혹은 부(-)수심을 갖고, 지수관계식은 횡단면의 외측안에서 과도한 수심을 갖게 되어 비정상적인 하상형을 나타내므로 두 관계식을 이용하

여 실제하천에 적용할 수 있는 식을 제시하기 위하여 외측안은 선형관계식, 내측안은 지수관계식을 적용하므로써 횡단면의 새로운 모형을 얻었다.

2) 위상지체 및 폭-수심비의 영향을 고려한 횡방향 하상경사를 구할 수 있는 새로운 방법을 제시하였으며, 제시된 식에 의한 계산값은 실측값과 비교적 잘 일치하였다.

참고문헌

1. Bendegom, L.V., "Enige beschouwingen over riviermorfologie en riviervverbetering", *De Ingenieur*, 59, 4, B & W, 1947, pp. B1-B12 (In Dutch).
2. Engelund, F., "Flow and Bed Topography in Channel Bends", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 100, No. 11, Nov., 1974, pp. 1631-1648.
3. Hooke, R.L.B., "Shear-Stress and Sediment Distribution in a Meander Bend", *Report No. 30*, Naturgeo. Instit. University of Uppsala, Sweden, 1974.
4. Kikkawa, H., Ikeda S. and Kitagawa, A., "Flow and Bed Topography in Curved Open Channels", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. 9, Sept. 1976, pp. 1327-1342.
5. Langbein, W.B. and Leopold, L.B., "River Meanders-Theory of Minimum Variance". USGS Professional Paper 422-H, 1966, pp. H1-H15.
6. Odgaard, A.J., "Transverse Bed Slopes in Alluvial Channel Bends", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. 12, Dec., 1981, pp. 1677-1694.
7. Odgaard, A.J., "Bed Characteristics in Alluvial Channel Bends", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 108, No. 11, Nov., 1982, pp. 1268-1281.
8. Odgaard, A.J., "Flow and Bed Topography in Alluvial Channel Bend", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 110, No. 4, Apr., 1984, pp. 521-536.

9. Odgaard, A.J., "Meander Flow Model. I: Development", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 112, No. 12, December, 1986a, pp. 1117-1136.
10. Odgaard, A.J., "Meander Flow Model. II: Applications", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 112, No. 12, December, 1986b, pp. 1137-1150.
11. Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
12. Rozovskii, I.L., "Flow of Water in Bends of Open Channels", translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1961.
13. Struiksma, N., Olesen, K.W., Flokstra, C. and de Vriend, H.J., "Bed Deformation in Alluvial River Bends", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 23, No. 1, 1985, pp. 57-79.
14. Zimmermann, C. and Kennedy, J.F., "Transverse Bed Slopes in Curved Alluvial Streams", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 104, No. 1, Jan., 1978, pp. 33-48.
15. 吉川秀夫, 池田駿介, 北川明, "彎曲水路の河床變化について", *日本土木學會論文報告集*, 第251號, 1976. 7, pp. 65-75.
16. 池田駿介, "移動床河川彎曲部における二次流 動的橫斷平衡河床について", *日本土木學會論文報告集*, 第229號, 1974. 9, pp. 55-65.
17. 건설부, "남한강하상변동조사보고서", 1982. 12.
18. 고재웅, "만곡유로에서의 하상변동에 관한 연구", *한국수문학회지*, 제 8권 제 2호, 1975. 12, pp. 75-80.
19. 송재우, "우리나라 하천의 사형특성에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1980.
20. 윤세의, 이종태, "만곡수로에서의 곡률반경 변화에 따른 흐름특성", *한국수문학회지*, 제 23권 제 3호, 1990. 12, pp. 435-444.
21. 차영기, 이대철, "만곡수로의 횡방향 하상경사와 흐름특성", *한국수문학회지*, 제 24권 제 1호, 1991. 3, pp. 99-107.

(接受: 1993. 9. 7)