韓國水資源學會論文集
第35卷 第2號 · 2002年 4月
pp. 195~201

자연하천 만곡부의 횡방향 안정하상을 위한 한계속도

Limit Velocity for Lateral Stable Bed in Natural Curved Channels

최 종 인*
Choi, Jong In

Abstract

In this study, an equation is proposed to estimate the limit velocity for lateral stable bed in a curved channel stream. The stable bed on lateral direction is satisfied when there is no more deformation occurs on the transverse bed slope and non-scouring condition in a bend. A theoretical equation for limit velocity is derived using a transverse bed slope model. So, the limit velocity has its theoretical background in the equilibrium of two forces, lateral shear force at the bed due to longitudinal flow and the corresponding lateral bed shear force. To verify the equation, data from four natural river channels were used. There is good agreement between the calculated values using this equation and the measured values. The corrections in equation was found to be correlated with the averaged particle Froude number.
keywords :

요 지

본 연구에서는 자연하천의 만곡수로에서 종방향 유속으로 인해 현재보다 더 이상 횡 방향 경사의 변형이 일어나지 않아 세굴이 감소하고 하상이 횡방향으로 안정한 상태를 유지할 수 있는 적정 유속의 한계인 한계속도를 제시하였다. 한계속도의 이론 유도는 하상횡경사모형의 이론적 배경이 되는 운동량모멘트방정식으로부터 얻은 하상면 횡방향 전단력성분과 이에 대응하는 하상전단력과의 힘의 평형으로부터 유도되었다. 이론식의 검증을 위해 4개 자연하천수로의 실측자료를 적용하여 계산치와 실측치를 비교한 결과 잘 일치하였다. 적용결과에서 보정계수와 만곡수로의 평균입자 Froude수는 밀접한 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다.
핵심용어 : 만곡수로, 한계속도, 세굴, 안정하상, 하상횡경사, 자연하천

* 삼척대학교 제2공과대학 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engrg., Samchok National University, Kangwon 245 080, Korea
(E mail : jichoi@samchok.ac.kr)

1. 서 론

최근 산업화와 도시화로 훼손된 하천을 원래의 자연하천으로 되돌리거나 복원하려는 시도와 노력이 활발히 진행되고 있다. 자연재료를 이용하여 하천의 생태적 기능을 회복시키고 인공적인 구조물을 철거하거나 직강화된 하도를 원래의 모습대로 사행시킴으로서 하천의 종적 횡적 연속성을 재생시키려는 다양한 노력이 함께 진행되고 있다.

자연하천으로의 복원은 아직 국·내외적으로 학문적, 실용적으로 완전히 확립된 상태가 아닌 이제 막 시작하는 새로운 분야(우효섭과 박재로, 2000)로 인식되고 있다. 우리나라에서 이 분야의 관심은 1990년 들어 하천의 환경적 기능을 고려한 하천의 정비와 관리로부터 시작되었다. 따라서 초창기 방향과 목표는 자연히 수변공간의 조성과 같은 친수성이나 조경성 성격이 강했다.

자연형 하천공법의 연구와 개발은 1995년부터 현재까지 건설기술연구원을 중심으로 양재천에 시험구간을 설정하고 자연형 하천공법의 시험적용 후 모니터링 한 결과, 부적절한 하도 만곡으로 인해 만곡부 안쪽에 사주가 형성되고 저수로 호안이 토사로 매몰되어 하도의 기하 특성과 흐름특성을 고려해야 한다는 문제점이 지적되고 하천복원에 의한 식생의 흐름저항 증가나 세굴 취약성 등과 같은 공학적 기능에 대한 구체적인 검토가 필요하다는 모니터링 결과를 제시하였다(우효섭과 박재로, 2000).

하천의 환경적, 생태적 복원에 앞서 현재 나타나고 있는 이러한 문제들을 보완하기 위해서는 자연하천 만곡부의 흐름특성과 하상면을 형성하고 있는 하상물질과의 상호관계를 파악하고 공학적으로 하도 만곡부에서 발생하는 하천 수리학적 문제들을 검토한 다음 자연형 하천공법에 적용할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다. 따라서 만곡부에서 세굴과 퇴적의 결과로 나타나는 하상의 횡방향 경사 모형을 자연형 하천공법 연구에 도입해 적절히 이용할 수 있는 방안을 고려 할 수 있다.

자연하천 만곡부의 흐름특성은 종방향 흐름에 의한 원심력의 작용으로 외측제방 근처에서 수면이 상승하고 수심방향의 깊이에 따라 서로 다른 유속이 발생한다. 수면 근처에서는 원심력에 의한 압력경사와 수심방향의 유속분포의 차이에 의해 외측제방에서 내측제방으로 이차흐름이 발생한다. 횡방향으로 이차흐름과 크고 작은 하상물질로 구성된 하상면과의 상호작용으로 외측제방 근처에서 세굴이 발생하고 이송된 하상물질에 의해 내측제방 부근에서는 퇴적된다. 이에 따라 사주가 발생하고 횡방향으로 일정한 하상경사를 유지하게 된다(Zimmer mann 과 Kennedy, 1978 ; Falcon과 Kennedy, 1983).

만곡수로에서 운동량 모멘트 방정식을 도입하여 하상면에 작용하는 흐름력과 하상면을 구성하는 하상물질과의 힘의 평형을 이용한 하상횡경사 모형연구는 Zimmermann과 Kennedy(1978), Falcon(1979), Falcon과 Kennedy(1983), Odggard(1981), Odggard와 Kennedy(1982)에 의해 이미 오래 전에 수행되었다. 이러한 연구들은 대개 만곡수로에서 하상의 횡방향 경사가 수로의 통상적인 수리적 요소들과 하상물질 그리고 수로의 만곡반경과 같은 지형적 요소와 어떤 상호관계가 있는지 잘 보여준다.

본 연구에서는 자연하천수로의 만곡부에서 상류의 흐름으로 인해 하상이 횡 방향으로 세굴과 퇴적이 감소하거나 적어도 이론적으로는 세굴과 퇴적이 발생하지 않아 현재의 횡 방향 하상경사의 변화가 거의 없어 횡방향으로 안정하상을 유지할 수 있는 흐름 유속의 이론적 한계를 산정 할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 한계속도 이론식 유도

그림 1은 하천의 만곡부 상류로부터 흐름이 진행되었을 때 만곡수로 한 지점의 일반적인 횡단면 형상을 간략하게 도시한 것이다. 수로의 횡단면에서는 종방향 흐름으로 기인되는 이차흐름에 의해 외측 제방근처에서 세굴이 발생하고 내측 제방부근에 퇴적현상이 발생한다. 이와 같은 현상은 대체로 종방향 흐름으로 인해 하상면에 작용하는 횡방향 힘의 성분과 하상면의 횡방향 전단력성분과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 왔다(Zimmerman과 Kennedy, 1978 ; Falcon, 1979 ; Falcon과 Kennedy, 1983 ; Odggard, 1981 ; Odggard와 Kennedy, 1982).

본 연구의 한계속도 이론식 유도는 이러한 하상횡경사모형들의 이론적 근거를 기초로 하였다. 먼저 자연하천 만곡부에서 횡 방향 안정하상이라 함은 수로 상류에서 만곡부로 유입되는 흐름으로 인해 적어도 이론적으로는 더 이상의 세굴과 퇴적이 발생하지 않거나 거의 없어 기존의 횡방향 하상경사($\sin\beta$)의 변화가 일어나지 않을 조건을 갖는 하상으로 정의하고 이때의 만곡수로 중심선(r_c)에서 종방향 흐름 유속의 한계를 한계속도($\overline{V_{cl}}$)로 규정하였다.

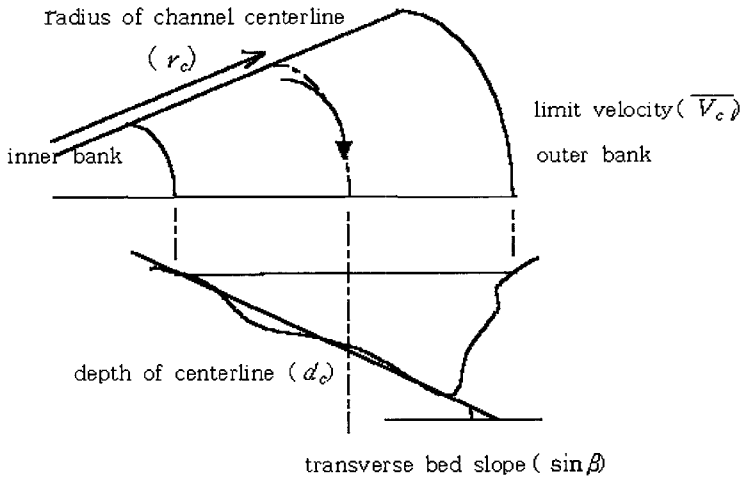

그림 1. 만곡수로의 횡단면 형상

Falcon과 Kennedy(1983)는 만곡수로에서 운동량 모멘트방정식으로부터 얻은 하상층에 작용하는 횡방향 전단력 성분과 하상물질의 수중중량에 의한 횡력과의 힘의 평형으로부터 횡방향 하상경사에 관한 식(1)를 완성하였다.

$$\sin\beta = \frac{\sqrt{8\theta}}{(1-p)} \frac{(1+f^{1/2})}{(1+2f^{1/2})} F_D \frac{d_c}{r_c} \tag{1}$$

여기서 $\sin\beta$: 횡방향하상경사(transverse bed slope), θ : Shields parameter, p : 하상층의 공극률(porosity of bed), f : Darcy-Weisbach 마찰계수, d_c : 만곡수로 중심선에서의 수심, r_c : 만곡수로 중심선에 대한 곡선반경, $F_D = \overline{V_c}/\sqrt{(\triangle\rho/\rho)gD_{50}}$: 입자 Froude수이다.

Darcy-Weisbach 의 마찰계수와 Chezy 계수는 식(2)와 같은 관계가 있다.

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}} \tag{2}$$

또 Manning 계수와 Chezy 계수의 관계는 다음 식(3)과 같다.

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \tag{3}$$

식(3)을 식(2)에 대입하고 마찰계수에 대해 정리하면 식(4)와 같다.

$$f^{1/2} = \sqrt{8g}\frac{n}{R^{1/6}} \tag{4}$$

여기서 g : 중력가속도, n : Manning 조도계수, R : 동수반경이다.

식(1)에 입자Froude수($F_D = \overline{V_c}/\sqrt{(\triangle\rho/\rho)gD_{50}}$)를 대입하고 식(4)에 포함되어 있는 만곡수로 중심선에서의 평균유속에 대해 정리하면 식(5)와 같다.

$$\overline{V_c} = \sin\beta\sqrt{(\triangle\rho/\rho)gD_{50}}\frac{(1-p)}{\sqrt{8\theta}}\frac{(1+2f^{1/2})}{(1+f^{1/2})}\frac{r_c}{d_c} \tag{5}$$

식(5)에서 공극률 p는 Falcon과 Kennedy(1983)에 의해 Shields parameter θ가 0.06으로 충분히 발달한 난류흐름 영역에서 0.47을 추천한 바 있어 이 값을 대입하면 $(1-p)/\sqrt{8\theta}$는 0.77이 된다. 또한 근사적으로 하상입자의 밀도와 물의 밀도 ρ_s, ρ를 각각 2.65, 1.00으로 가정하여 식(5)에 대입하면 식(5)는 식(6)과 같이 된다.

$$\overline{V_c} = \sin\beta\sqrt{gD_{50}}\frac{(1+2f^{1/2})}{(1+f^{1/2})}\frac{r_c}{d_c} \tag{6}$$

식(6)은 각각 다른 곡선반경과 수심을 갖는 수로 만곡부에서 횡방향 하상경사에 대응하는 종방향 흐름 평균유속의 한계를 나타낸 식이다. 이에 따라 평균유속 $\overline{V_c}$를 한계속도 $\overline{V_c}_l$로 규정하고 우변 항의 Darcy-Weisbach 마찰계수 f는 무차원 항이므로 이를 단순화

하고 그 차이 값을 보정하는 보정계수 C_l을 도입하면 식(7)과 같이 된다.

$$\overline{V_{c\,l}} = C_l \sin\beta \sqrt{gD_{50}}\; f^{1/2}\; \frac{r_c}{d_c} \tag{7}$$

자연하천에 적용을 보다 용이하게 하기 위해 Darcy-Weisbach 마찰계수 f와 Manning조도계수 n의 관계 식(4)를 식(7)에 대입하고 한계속도 $\overline{V_{c\,l}}$에 관하여 다시 정리하면 식(8)이 된다.

$$\overline{V_{c\,l}} = C_l \sin\beta\; n\sqrt{8D_{50}}\; \frac{g}{R^{1/6}}\; \frac{r_c}{d_c} \tag{8}$$

일반적으로 넓은 자연하천에 적용할 경우 동수반경 R은 수심 d로 대체 할 수 있어 식(8)은 식(9)와 같이 쓸 수 있다. 따라서 식(8), 식(9)는 자연하천수로의 만곡부에서 우변 항의 지형 및 수리적 조건을 갖는 종방향 유속의 한계속도가 된다.

$$\overline{V_{c\,l}} = C_l \sin\beta\; n\sqrt{8D_{50}}\; \frac{g}{d^{1/6}}\; \frac{r_c}{d_c} \tag{9}$$

여기서 $\overline{V_{c\,l}}$: 만곡수로 중심선에서의 한계속도, D_{50} : 하상물질의 중앙입경, n : Manning조도계수, R : 동수반경, d : 수심, d_c : 만곡수로 중심선에서의 수심 r_c : 만곡수로 중심선의 곡선반경

3. 하천 실측자료의 선정

이론식 검증을 위해 기존의 하천 실측자료로부터 본 연구에서 유도한 식(9)를 적용하기 위해 필요한 항목들을 표 1과 같이 정리하였다. 실측자료들은 Oddgaard (1981)에 의해 하상 횡경사모형의 검증에 이용되었던 Sacramento강의 측정자료와 Bhowmik(1979)이 실측

표 1. 하천실측자료

Section number (1)	Average velocity (m/sec) (2)	Flow depth (m) (3)	Mean Particle diameter (mm) (4)	Transverse bed slope (5)	Radius of Channel (m) (6)	Remarks
(1) Sacramento River						
2-L	0.793	1.708	4.9	0.010	1195.60	
2-H	1.165	3.385	10.8	0.018	1195.60	
3-L	0.695	2.470	6.3	0.020	805.20	
4-L	0.648	3.721	1.6	0.073	549.00	
4-H	1.192	7.045	6.1	0.135	549.00	
5-L	0.695	4.636	0.7	0.150	549.00	
6-H	1.220	2.623	6.1	0.041	610.00	
(2) Oship-chon River						
Sec.1	0.30	1.480	2.4	0.091	198.00	
Sec.2	0.34	1.330	4.4	0.055	198.00	
Sec.4	0.37	1.460	2.0	0.119	198.00	
Sec.6	0.40	1.750	8.0	0.072	198.00	
Sec.7	0.48	2.560	11.2	0.125	152.00	
Sec.8	0.52	2.850	12.8	0.171	152.00	
(3) Fall River						
1	0.523	0.280	0.37	0.103	11.00	
2	0.442	0.410	0.21	0.193	11.00	
3	0.432	0.310	0.21	0.180	11.00	
5	0.377	0.310	0.23	0.072	13.50	
6	0.346	0.440	0.21	0.170	13.50	
8	0.472	0.410	0.22	0.162	13.50	
(4) Kaskaskia River						
Sec.2	0.402	0.604	0.39	0.004	445.00	
Sec.3	0.350	0.874	0.75	0.005	380.40	
Sec.5	0.259	1.204	0.28	0.020	380.40	
Sec.6	0.210	1.597	0.25	0.079	91.44	
Sec.8	0.314	0.892	0.85	0.046	51.20	

한 Illinois주의 Kaskaskia강의 Reach2 , Thorne et al (1983)에 의해 측정된 Fall 강의 실측자료, 국내자료로 최종인(1997)의 연구에 적용되었던 삼척시 오십천의 하천실측자료를 이용하였다.

표 1에서 (1)란은 각 하천의 횡단면 번호를 표시하며, (2)란은 만곡수로 중심선에서의 수심평균유속, (3)란은 만곡수로 중심의 수심, (4)란은 만곡수로 중심선에서 채취한 하상물질의 평균입경 , (5)란은 각 횡단면에서 직선으로 그은 하상의 횡방향 경사이며 (6)란은 하천수로의 곡선반경이다.

4. 자료적용 및 결과

자료적용을 위해 선정된 Sacramento, 오십천, Fall 및 Kaskaskis 강, 4개 하천의 실측자료들을 보정계수을 고려하지 않고 식(9)에 적용한 결과를 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 횡축은 실측값을 표시한 것이고 종축은 계산치를 표시하였다.

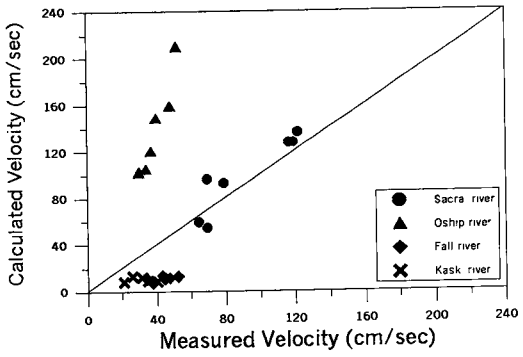

그림 2. 4개 하천의 실측자료 적용결과

그림 2에 나타난 결과를 보면 Scaramento강의 경우만 결과치들이 중앙에 분포하고 있고 계산치가 실측치에 근접하였고 나머지 3개 하천은 모두 계산치와 실측치의 오차가 크게 나타났다. 오십천은 계산치가 실측치보다 과대하게 산정 된 반면 Fall강과 Kaskaskia강에서는 오히려 계산치가 실측치보다 적게 산정 된 결과를 보였다.

5. 적용결과의 분석

5.1 자연하천에서의 적용성 검토

본 연구는 만곡수로에서 적절하게 설정된 하상의 횡방향 경사에 대응하는 흐름유속의 적정 한계를 추정하려는 것이다. 만약 자연하천의 상류로부터 일정한 유속을 갖는 흐름이 유입될 때 만곡수로에서 이 흐름력에 의한 횡력성분과 하상의 횡방향 전단력 성분에 의한 힘의 평형이 깨진다면 하상면에서는 횡방향으로 세굴과 퇴적이 발생하고 이로 인해 하상의 횡방향 경사가 변화한다.

따라서 흐름력과 하상면의 힘의 평형이 유지될 수 있는 적정한 유속의 한계를 식(9)로 미리 산정하여 상류로부터 유입유속을 적절한 유속으로 조절할 수 있다면 하상의 세굴과 퇴적을 감소시킬 수 있고 횡방향으로 안정하상을 유지 할 수 있다.

식(9)를 자연하천에 적용하려면 각 하천별로 적절한 보정계수를 산정해 계산치에 보정해 주어야 한다. 각 하천의 보정계수 C_f은 실측치와 계산치의 차이를 보정해 주는 방법으로 산정하였다. 산정된 하천별 보정계수 C_f은 각각 Sacramento강 0.925, 오십천 0.285, Fall 강 3.882, Kaskaskia강 2.982 였다.

그림 3은 하천별로 각각 얻은 보정계수 C_f을 적용하여 다시 식(9)에 적용한 결과를 도시한 것이다. 그림 2의 보정계수 적용이전의 결과보다 보정계수를 적용한 그림 3에서는 계산치와 실측치가 잘 접근하고 있어 하천 고유의 보정계수를 적용할 경우 자연하천에서의 실제 적용 가능성을 보여주고 있다.

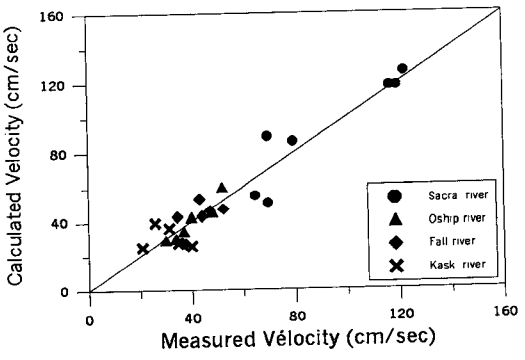

그림 3. 보정계수 적용결과

식(9)를 이용하여 자연하천 만곡수로에서 세굴과 퇴적이 거의 발생하지 않을 조건을 갖는 횡 방향으로 안정된 하도를 설계하려면 가장 간단한 방법으로 흐름이 만곡수로로 진입할 때 수로 상류의 적절한 지점에서 한계속도 이내로 흐름을 조절하는 방법과 필요에 따라 식을 구성하고 있는 각 변수들을 현장에 맞게 가변적으로 조정하여 사용할 수 있다.

5.2 보정계수

적용결과에서 하천 별 보정계수 C_l은 각각 Sacramento강 0.925, 오십천 0.285, Fall강 3.882, Kaskaskia강 2.986이었다. 보정계수는 평균유속 $\overline{V_c}$를 한계속도 $\overline{V_{c\,l}}$로 규정하고 식(6)의 Darcy-Weisbach 마찰계수 f가 무차원 항으로 이를 단순화하는 과정에서 그 차이 값을 보정하기 위해 식(7)에서 도입된 계수이다.

보정계수의 명확한 특성을 파악하려면 보다 더 많은 실측자료와 각 변수들과의 상호관계들이 실험결과들을 통해 규명되져야 한다. 그러므로 본 연구에서 적용한 몇 개의 하천실측자료를 이용하여 그 특성을 규명하기가 쉽지 않다.

다만 적용결과에서 보정계수는 계산치와 실측치의 차이를 반영하는 것으로 주로 각 하천 만곡수로의 지형적, 수리적 특성으로 발생할 것이라는 기본가정을 바탕으로 보정계수와 하천수로의 모든 지형적, 수리적 변수들과의 상관성 분석을 통해 계수의 특성을 파악하기로 하였다.

적용된 자료를 중심으로 여러 변수들과의 상관관계를 분석한 결과 그림 4와 같이 보정계수 C_l은 각 하천수로를 대표하는 평균 입자 Froude수(F_{DA})와 상관계수 0.87로 다른 변수들에 비해 상관성이 있는 것으로 나타났다. 이를 상관식으로 표시하면 식(10)과 같다.

$$C_l = -0.95\ F_{DA} + 4.74 \qquad (10)$$

이러한 결과로 볼 때 보정계수 C_l은 관성력으로 대표되는 Froude수와 깊은 연관성을 갖고 있어 유속과 하상물질을 구성하는 유사입자의 크기에 직접적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이외에도 식(5)에서 일정한 값으로 대체된 하상공극률, 유사입자와 물의 밀도, 입자의 이동한계 조건을 나타내는 Shield parameter θ의 차이 등에 의한 영향도 결코 무시될 수 없어 차후 보정계수에 관한 깊이 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

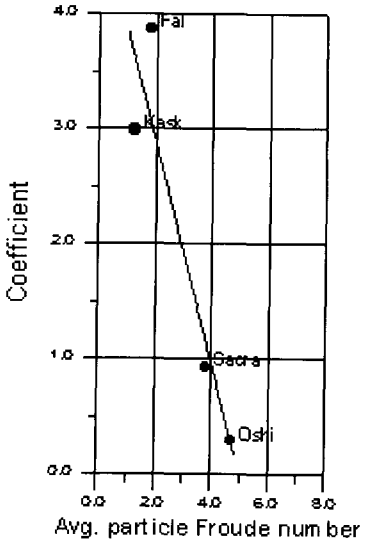

그림 4. 상관분석 결과

5. 결 론

본 연구에서는 하천 만곡수로에서 세굴과 퇴적이 감소하고 하상이 횡방향으로 안정을 유지할 수 있도록 적정유속의 한계를 추정할 수 있는 이론식을 제시하였다. 이론식의 검증과 현장 적용성 검토를 위해 4개 자연하천의 하천별 보정계수와 실측자료를 적용한 결과 계산치와 실측치가 잘 일치하였다.

이론식은 현장측정이 용이하고 Manning조도계수와 같이 기존의 하천조사에서 기본적으로 수행되는 변수들로 구성되어 자연하천 또는 자연형 하천공법 설계시 만곡수로에서 횡방향으로 안정하상을 유지하여 제방의 침식 및 사주의 발생과 같이 세굴과 퇴적으로 인해 발생하는 제반 문제들을 해결하기 위한 방안으로 실질적 적용이 고려될 수 있다.

적용된 4개 하천의 하천별 보정계수는 Sacramento강 0.925, 오십천 0.285, Fall강 3.882, Kaskaskia강 2.986으로 각각 나타나 모든 자연하천에 일률적 적용이 가능하려면 차후 보정계수에 관한 좀 더 체계적이고 깊이 있는 연구가 필요하다. 다만 상관분석에서 보정계수는 하천수로의 평균입자Froude수와 상관성을 갖고 있어 유속과 하상물질을 구성하는 입자의 크기에 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

우효섭, 박재로 (2000). "하천복원의 이해와 국내외 사례." 한국수자원학회지, **한국수자원학회**, 33권, 제6호, pp. 15-28.

최종인 (1997). 하천만곡부 혼합입경 모래하상의 횡방향경사. 박사학위논문, 건국대학교, pp. 40-42

Bhowmik, N. G. (1979). *Hydraulics of flow in the Kaskaskia river Illinois.* Report of Investigation 91, Board of Natural Resources and Conservation, State Water Survey Div., Illinois.

Falcon, M. A. (1979). *Analysis of flow in alluvial channel bend.* Ph. D. dissertation, University of Iowa, Iowa.

Falcon, M. A., and Kennedy, J. F. (1983). "Flow in alluvial-river curves." *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 133, pp. 1-16.

Odgaard, A. J. (1981). "Transverse bed slope in alluvial channel bends." *Journal of Hydraulics Div.*, Vol. 107, No. HY12, pp. 1677-1694.

Odgaard, A. J., and Kennedy, J. F., (1982). *Analysis of Sacramento river bend flows and development of a new method for bank protection.* IIHR report No. 241, Iowa Institute of Research, University of Iowa, Iowa city.

Thorne, C. R., Zevenbergen, L. W., Bradeley, J. B., and Julien, P. Y. (1983). *Measurements of bend flow hydraulics on the Fall river at low stage.* WRFSL Report No. 83-9P, National Park Service, 107C Natural Resources, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Zimmermann, C., and Kennedy, J. F. (1978) "Transverse bed slope in curved alluvial streams." *Journal of Hydraulics Div.*, Vol. 104, No. HY1, pp. 33-48.

(논문번호:01-083:접수:2001.12.17/심사완료:2002.03.18)