

산지하천 만곡부의 편수위 산정

Estimation of Superelevation in Mountainous River Bends

박 상 덕* / 이 승 규** / 신 승 숙*** / 조 재 웅****

Park, Sang Doeg / Lee, Seung Kyu / Shin, Seung Sook / Cho, Jaewoong

Abstract

In a river bend the water surface is inclined by the centrifugal force toward the transverse section. If channel slope and flow rate increase, the gradient is rising generally. There are lots of the flood damage at the bends of mountain river because the flood water levels have exceeded frequently the levee levels which are added a free board to the design flood water level. Therefore the superelevation should be considered in designing the mountainous river bend. In present study it was proposed to estimate the superelevation at the bend of mountain river and the superelevation coefficient defined from multiplying the sub-factors. The values of the influence factors for the superelevation coefficient were suggested from analyzing the superelevation measured at the bends in Yangyangnamdae river and the hydraulic experiments in gravel-bed channel with a 90° bend. The applicability of these methods to estimate the superelevation at the bends in mountain river was verified by the superelevation measured at the bend in Naerin river.

keywords : mountain river, superelevation, river bend, superelevation coefficient, influence factor

요 지

홍수 시 하천 만곡부에서 유수의 원심력에 의한 횡단 수면경사가 발생한다. 하천 경사와 유량이 증가하면 그 수면경사는 더욱 커진다. 경사가 급한 산지하천 만곡부는 제방의 여유고보다 수면상승이 큰 경우가 빈번하게 발생하기 때문에 홍수피해가 크다. 따라서 편수위에 따른 수면 상승효과는 산지하천 만곡부의 설계를 위해 고려되어야 한다. 본 연구에서는 산지하천 만곡부의 편수위를 산정할 수 있는 기법을 제안하고, 편수위자들의 곱으로 편수위계수를 정의하였다. 양양남대천 만곡부에서 측정한 편수위와 90° 만곡 자갈하상에 대한 수리실험에서 측정한 편수위 자료를 이용하여 편수위자별 영향인자 값을 제시하였다. 내린천 만곡부에서 측정한 편수위를 이용하여 편수위 산정기법의 적용성을 검증하였다.

핵심용어 : 산지하천, 편수위, 하천만곡부, 편수위계수, 영향인자

* 교신저자, 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (e-mail: sdpark@gwnu.ac.kr, Tel: 82-33-640-2417)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ., Gangwon 210-702, Korea

** 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (e-mail: ef2377@nate.com)

Doctoral Student, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ., Gangwon 210-702, Korea

*** 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원 (e-mail: cewsook@hanmail.net)

Senior Researcher, Institute of Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National Univ., Gangwon 210-702, Korea

**** 국립재난안전연구원 방재연구실 책임연구원 (e-mail: jwcho80@korea.kr)

Senior Researcher, National Disaster management Institute., Seoul 121-719, Korea

1. 서 론

경사가 급한 산지하천 하상은 주로 자갈이나 호박돌과 같이 큰 재료로 되어 있다. 산지하천은 평지하천에 비해 하상조도, 유수저항, 난류정도, 계절적인 유량변화가 크며 압초와 같은 하도 장애물 때문에 지형이 복잡하다(Park and Shin, 2011; Shin et al., 2012). 일반적으로 하천은 유역의 지형 및 지질에 구속된다. 산지하천은 하만이 좁기 때문에 홍수 시 평면적 변화속도가 매우 느리며 만곡수충부가 많다.

하천 만곡부에서는 유수의 원심력이 작용하므로 횡단방향 수면경사가 발생한다. 이 수면경사에 의한 만곡부 내측과 외측의 수위차가 편수위이다. 하도경사와 유량이 증가하면 만곡부의 횡단면 수면경사는 더욱 커진다. 산지하천에서는 도로가 하천을 따라 발달된 경우가 많기 때문에 홍수 시 하천의 만곡부에 접한 도로의 피해가 많다. 따라서 만곡부에서 수위상승이 우려되는 경우에는 편수위를 감안하여 계획홍수위를 설정해야 한다(KWRA, 2009).

하천 만곡부의 편수위 산정공식들은 Euler 운동방정식에 근거해 단면평균유속과 수로중심부의 곡률반경을 사용한다(Shukry, 1950, Ippen and Drinker, 1962). 만곡부 횡단면 수면경사는 비선형으로서 만곡부 내측이 외측보다 더 크다(Leschziner and Rode, 1979). 만곡부에서 이차류는 저층에서는 만곡내측으로 흐르고 상층에서는 만곡외측을 향하며 그 발생위치는 편수위에 영향을 받는다. 또한 만곡입구에서 최대유속은 수로 중심선의 약간 내측부근에서 발생하나 만곡부에서는 그 위치가 만곡외측으로 이동한다. 최대유속의 크기는 만곡입구부터 증가해 만곡출구에 이르러 가장 크게 된다(Hicks et al., 1990; Ye and McCorquodale, 1998; Kim et al., 1997; Kim et al., 2010). 기존 편수위 식들은 하도조건이 단순한 수로에서는 적용성이 있으나 단면변화가 큰 하천에서는 편수위를 과소평가한다(Kim et al., 1997; Lee et al., 2009). 따라서 불규칙한 하도, 복잡한 평면기하, 넓은 범위의 하상재료 크기, 거친 조도 등을 가진 하천에 적합한 편수위 식이 필요하다. 특히 산지하천 만곡부의 편수위에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 산지하천 만곡부의 편수위를 측정하고 실용성을 고려한 편수위식과 산지하천 만곡부의 특성을 반영한 편수위계수를 산정하는 기법을 개발하였다.

2. 만곡부의 흐름과 편수위식

만곡부에서 흐름은 횡방향의 가속도를 받는 부등류이

다. 만곡부에서는 원심력에 의한 수면상승과 나선-이차류가 발생하고 Fig. 1과 같이 내측 또는 외측으로 흐름이 편중된다. 만곡부의 외측 수위는 상승하고 내측 수위는 하강해 횡단방향 수면경사가 발생한다. 만곡수로에서 중심원을 갖는 유선과 정수압 분포를 가정하고 횡단방향으로 Euler 방정식을 적용하면 수면경사는 유속과 곡률반경의 함수이다.

$$\frac{dh}{dr} = \frac{V^2}{gr} \quad (1)$$

여기서, h 는 수위, r 은 곡률반경, V 는 수심평균 유속, g 는 중력가속도이다. Fig. 2와 같이 직사각형 만곡수로에서 유속과 수면경사가 일정하면 편수위는 속도수두와 하폭-곡률반경 비($= B/r_c$)에 좌우된다.

$$\Delta h = \frac{BV^2}{gr_c} \quad (2)$$

여기서, Δh 는 편수위로서 만곡 내측과 외측 수위의 차이, B 는 수로 폭, V 는 평균유속, r_c 는 수로중심 곡률반경으로 평균곡률반경과 같다. 내측곡률반경 r_i 부터 외측곡률반경 r_o 까지 Eq. (1)을 적분하면 편수위는 내측과 외측 곡률반경의 비에 관계있다(Chow, 1959; Lee, 1997).

$$\Delta h = \frac{V^2}{g} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (3)$$

내외측 곡률반경은 수로중심 곡률반경과 $r_c \pm B/2$ 의 관계에 있으므로 Eq. (3)은 Eq. (4)가 된다. 여기서 대수항을 무한급수로 나타내면(Gradshteyn and Ryzhik, 1980) 편수위는 Eq. (5)와 같다.

$$\Delta h = \frac{V^2}{g} \ln \frac{1+B/2r_c}{1-B/2r_c} \quad (4)$$

$$\Delta h = \frac{2V^2}{g} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} (B/2r_c)^{2k-1} \quad (5)$$

일반적으로 하천만곡부의 곡률반경이 하폭보다 크기 때문에 B/r_c 는 1보다 작다. Eq. (5)에서 B/r_c 가 0.33보다 작으면 무한급수의 두 번째 항부터 무시될 수 있으므로 편수위는 Eq. (2)와 같고 그 최대오차는 약 0.91%이다. 그러나 B/r_c 가 1이면 오차가 8.98%로 증가하기 때문에 k 를 2까지 고려해야 하므로 편수위는 Eq. (6)과 같이 되며, 그 최대오차는 약 1.39%이다.

$$\Delta h = \frac{BV^2}{gr_c} \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{B}{r_c} \right)^2 \right] \quad (6)$$

편수위 산정공식은 대부분 Eqs. (2)~(6)에 바탕을 두며 국내외의 주요 공식들을 정리하면 Table 1과 같다. Woodward (1920), Grashof (1937), Shukry (1950), Ippen-Drinker (1962)

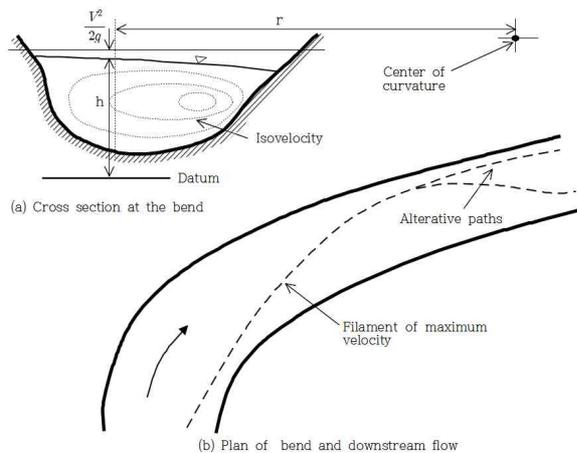


Fig. 1. Flow Behavior at a Channel Bend (Henderson, 1966)

의 식에 의한 편수위는 서로 큰 차이가 없으나, 이들 중에서 Ippen-Drinker식의 적용범위가 가장 큰 것으로 알려져 있다. ADWR (Arizona Depart of Water Resources, 1985) 식에서 C 는 편수위계수로서 흐름과 단면형상에 따라 Table 2와 같다. 여기서 Δy 는 평균수면에서 상승한 수위이며 편수위 Δh 의 1/2이다. 이 식은 곡률반경에 대한 하폭의 비 B/r_c 가 0.33보다 큰 자연하천, 포장 및 비포장 수로에서 편수위를 산정할 수 있다. $B/r_c < 0.33$ 이고 유속이 빨라 만곡부에서 흐름분리가 발생하는 사류인 경우 편수위는 속도수두의 25%를 더하여야 한다. KWRA (2009)의 하천설계기준·해설에서 편수위식은 ADWR식의 C 를 0.75로 한 것과 같다. 하천 만곡부 설계에서는 이 식으로 산정한 수면상승($\Delta h/2$)이 여유고의 절반 이하인 경우에는 제방고 결정에 편수위를 반영하지 않으나, 편수위가 1m 이상이면 참조하게 되어 있다. 산지하천 만곡부의 홍수 시 편수위는 KWRA의 식으로 산정한 값보다 큰 경우가 많다 (Park et al., 2013). Table 1의 편수위 식들은 자연하천 만

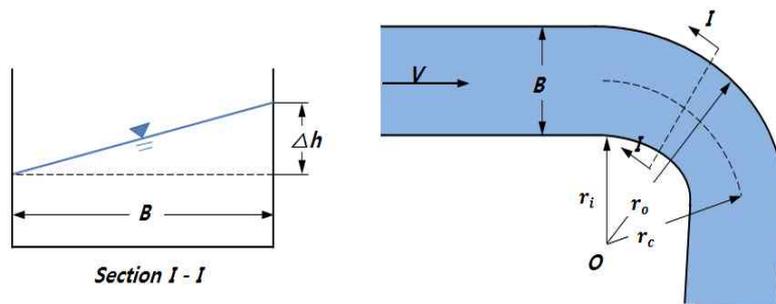


Fig. 2. Basic Concept of Superelevation in the Bend (Lee, 1997)

Table 1. Superelevation Formulas

	Formulas	Remarks
Woodward (1920)	$\Delta y = \frac{V^2}{gr_c}(r_o - r_i)$	Woo(2001)
Grashof (1937)	$\Delta h = 2.3 \frac{V^2}{g} \log \frac{r_o}{r_i}$	Chow(1959)
Shukry (1950)	$\Delta h = \frac{(rV)^2}{2g} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right)$	
Ippen-Drinker (1962)	$\Delta h = \frac{BV^2}{gr_c} \left(\frac{1}{1 - B^2/4r_c^2} \right)$	free vortex
	$\Delta h = \frac{BV^2}{gr_c} \left(\frac{1}{1 + B^2/12r_c^2} \right)$	forced vortex
ADWR (1985)	$\Delta y = C \frac{BV^2}{gr_c}; (B/r_c \geq 0.33)$	
	$\Delta y = C \frac{BV^2}{gr_c} + 0.25 \frac{V^2}{2g}; (B/r_c < 0.33)$	
KWRA (2009)	$\Delta h = 1.5 \frac{BV^2}{gr_c}$	

곡부의 곡률반경과 하폭 이외에 하폭변화, 하상재료, 접근 유속, 하도장애물 등과 같은 다양한 특성을 반영하지 못하고 있다.

3. 산지하천 편수위 자료

3.1 현장조사

유속이 빠른 산지하천 만곡부에서 홍수 시 수위상승에 대한 편수위 산정공식을 개발하기 위하여 양양남대천 지남교와 범수치의 만곡부와 인제 내린천 미산의 만곡부에서 편수위를 측정하였다. 편수위를 조사하기 위해 만곡부 횡단면 내측과 외측에 설치한 자기수위계를 이용해 2분 간격으로 수위를 측정하였다. 자기수위계는 Schlumberger Water Services사의 압력식 수위계인 Mini-Diver이다.

만곡부의 각 조사지점은 Fig. 3과 같고 주요특성은 Table 3과 같다. 편수위는 동일 시간에 관측된 만곡부 양안의 수위 차로 결정하였다. 미산과 지남교의 편수위는 2011년에 조사하였고, 2012년에는 범수치에서 관측하였으며 측정 자료의 특성은 Table 4와 같다. 최대 편수위는 미산에서 1.63 m, 지남교와 범수치에서 각각 1.32 m, 0.56 m로 나타났다. 유량은 30.0~853.3 m³/s였다. 지남교의 경우 상대적으로 적은 유량에서 큰 편수위가 발생하였다. 범수치에서는 상대적으로 큰 유량에서 작은 편수위가 측정되었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 다른 두 지점에 비해 범수치는 만곡도가 상대적으로 작다.

3.2 수리실험 조사

산지하천 편수위 산정기법 개발을 위해 본 연구에서는

Table 2. Values of C (ADWR, 1985)

Flow type	Channel cross section	Type of curve	C	Remarks
Tranquil	Rectangular	Simple circular	0.5	
	Trapezoidal	Simple circular	0.5	×1.15
Rapid	Rectangular	Simple circular	1.0	
		Spiral transitions, Spiral banked	0.5	
	Trapezoidal	Simple circular, Spiral transitions	1.0	×1.3

Table 3. Characteristics of River Bend in the Study Sites

Rivers	Sites	Width (m)	Bend degree (°)	Radius of central curvature (m)
Naerincheon	Misan (MS)	50.8	180	134.1
Yangyang	Jinam (JN)	78.7	110	81.0
Namdeacheon	Beopsuchi (BSC)	38.4	80	162.3

Table 4. Measured Results of the Superelevation

Sites	Measured date	Superelevation (m)	Discharge (m ³ /s)	Velocity (m/s)	Design flood discharge (m ³ /s)
Misan (MS)	2011.7.27 ~ 2011.7.28	0.95 ~ 1.63	389.0 ~ 835.3	2.98 ~ 4.55	2,010
Jinam (JN)	2011.7.27 ~ 2012.9.17	0.18 ~ 1.32	30.0 ~ 310.3	1.30 ~ 3.13	1,130
Beopsuchi (BSC)	2012.7.15 ~ 2012.9.17	0.09 ~ 0.56	49.4 ~ 357.0	0.65 ~ 3.72	905



Fig. 3. Sites to Investigate the Superelevation (Misan, Jinam, Beopsuchi from Left)

Fig. 4와 같은 만곡개수로 이동상 수리실험으로 부족한 편수위 자료를 확충하였다. 편수위에 관한 실험에서 하상 조건을 이동상으로 한 것은 만곡부의 단면형상을 임의로 주기보다는 유수의 세굴과 퇴적 작용을 이용해 가능한 자연수로의 단면형상을 조성하기 위한 것이다. 이 실험에서 하상경사, 하상재료, 유량의 변화에 따른 만곡부 최대편수위를 측정하였다. 실험수로의 폭은 1.5m, 만곡도는 90°, 길이는 유입부 8.6m, 만곡부의 외측과 내측에서 각각 5.1m와 2.9m, 유출부 6.1m이다. 실험수로는 내측과 외측의 벽면이 매끄러운 철판으로 이뤄진 사각형 단면이다. 저수조에는 유사채집기와 스크린을 설치하여 실험 중에 저수조에 유입하는 하상재료를 포착하고 유사의 펌프흡입을 방지하였다. 개수로의 하류단에 있는 수문으로 수위를 조절하여 만곡 하류부의 흐름이 등류가 되게 하였다. 실험용수는 두 대의 펌프로 최대 240 l/s까지 공급할 수 있다. 하상에는 평균입경이 24mm와 50mm인 굵은 자갈을 약 40cm의 두께로 깔고 실험경사 조건에 일치하도록 하상을 평탄하게 정리한 후 실험유량을 공급하였다. 실험유

량을 공급하는 과정에서 하상재료의 이동을 방지하기 위해 초기에는 작은 유량을 공급하여 하상의 공극에 물을 채운 다음 실험유량에 도달할 때까지 공급유량을 서서히 증가시켰다. 하상재료별 최대 실험유량은 만곡부의 세굴 깊이가 최대 허용깊이보다 작은 유량으로 하였다. 실험유량이 공급된 이후 만곡부를 포함하여 실험수로 전 구간에서 유사이동이 없을 때까지 충분히 기다렸다가 유사이동 유무를 확인한 후에 만곡부의 편수위를 측정하였다. 만곡부의 최대편수위는 만곡부에서 매 5°마다 총 20개 단면에서 수로 양안의 수위를 측정하여 결정하였다. 실험유량 측정을 위해 Zhuhai Able Autocontrol Equipment CO. LTD사의 초음파 유량계 TDS-100F1모델이 사용되었다. 실험의 주요 조건과 결과는 Table 5와 같다. 실험으로 측정된 만곡부의 최대편수위 자료는 총 45개였으며 그 발생위치는 실험조건에 따라 달랐다. 유입부에서 이송된 유사는 미미하지만 일부가 만곡부 내측에 퇴적되었고, 만곡부의 외측에서 국부세굴로 발생한 유사들은 유출부 하류 구간에서 퇴적되거나 저수조로 유출되었다. 퇴적형태는

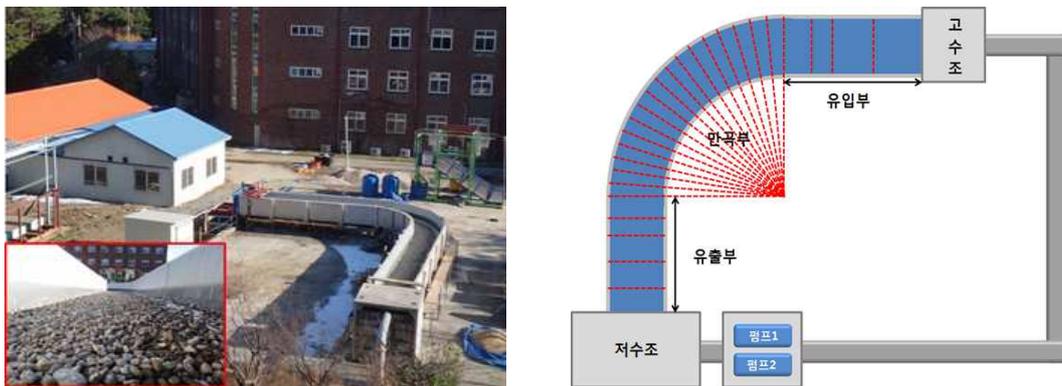


Fig. 4. Experimental Facilities to Investigate the Superelevation

Table 5. Experiment Conditions & Results

Experiments	Channel slope			Mean diameter of bed material (mm)	Discharge (m ³ /s)	Average velocity (m/s)	Maximum superelevation (m)	Number of data	
	Inlet	Bend	Outlet						
BV	222	0.02	0.02	0.02	50	0.076 ~ 0.198	0.770 ~ 1.189	0.045 ~ 0.089	7
	221	0.02	0.02	0.01	50	0.096 ~ 0.231	0.800 ~ 1.296	0.071 ~ 0.084	6
	211	0.02	0.01	0.01	50	0.092 ~ 0.237	0.876 ~ 1.247	0.060 ~ 0.099	8
	111	0.01	0.01	0.01	50	0.103 ~ 0.232	0.805 ~ 1.073	0.066 ~ 0.100	8
BC	222	0.02	0.02	0.02	24	0.105 ~ 0.142	0.622 ~ 0.849	0.051 ~ 0.053	2
	221	0.02	0.02	0.01	24	0.108 ~ 0.186	0.657 ~ 0.843	0.054 ~ 0.066	3
	211	0.02	0.01	0.01	24	0.106 ~ 0.186	0.606 ~ 0.954	0.058 ~ 0.061	3
	111	0.01	0.01	0.01	24	0.108 ~ 0.187	0.584 ~ 0.802	0.056 ~ 0.066	3

뚜렷하지는 않았지만, 유출부 구간에서 작은 규모의 반사 퇴를 나타내기도 하였다. 이는 하상재료의 입경이 크고 유속이 빠르기 때문이다. 최대편수위의 발생 위치는 유입부에서 유출부까지 전체 경사가 1/50인 경우에는 50~90°, 유입부와 만곡부의 경사가 1/50이고 유출부의 경사가 1/100인 경우에는 60~90°, 유입부에서 유출부까지 전체 경사가 1/100일 때는 80~85°에서 발생하였다. 하상경사가 급하면 완만한 경우보다 발생위치의 변화가 큰 것으로 조사되었다. 최대편수위는 0.045~0.1 m의 범위로서 하상재료가 작은 실험군(BC)보다 큰 실험군(BV)에서 더 컸다. 이는 하상재료 별 최대실험유량의 차이 때문으로 생각된다. 편수위는 유속의 제곱에 비례하지만 BV 실험군의 실험결과는 유속이 큰 경우에 오히려 작아지는 현상을 보였다. 이는 만곡부의 세굴에 의한 하상형상의 차이에 따라 편수위가 영향을 받기 때문인 것으로 보인다.

4. 산지하천 만곡부 편수위 산정식

4.1 편수위 산정공식

산지하천 만곡부에서 홍수 시 편수위에 따른 수위상승은 제방의 여유고를 초과하는 경우가 많으므로 만곡부의 하천설계에 편수위를 반영하기 위해서는 산지하천에 적합한 편수위 산정기법이 필요하다. 균일단면 만곡수로에 대해서는 기존 공식들을 적용해 적절한 편수위를 추정할 수 있다(Kim et al., 1997). 그러나 산지하천 만곡부는 단면 변화가 심하고 암초와 같은 장애물이 있어 매우 복잡하다. Fig. 5는 강원도 산지하천과 한강, 금강, 낙동강 본류의 주요 만곡부에서 접근부와 중심부 하폭의 관계를 나타낸다. 산지하천 만곡부는 평지하천에 비하여 하폭변화가 큰 것

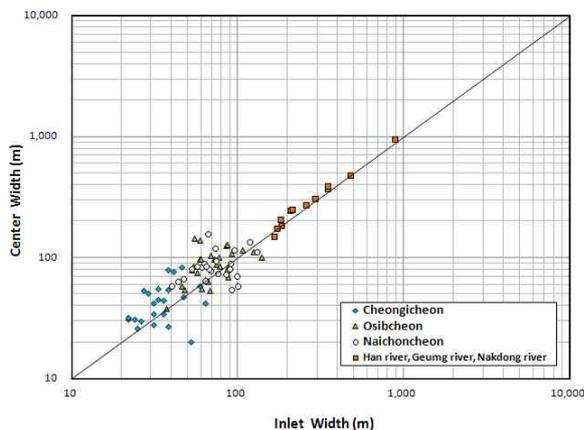


Fig. 5. Relations between Inlet Width and Center Width of Curved Bend in Rivers

을 알 수 있다. 이는 만곡부의 단면변화를 고려하지 않은 기존 편수위 산정공식이 산지하천의 적용에 한계가 있다는 것을 의미한다.

자연하천의 만곡부에서 홍수위에 영향을 미치는 하천 특성은 하폭, 하상경사, 하상재료, 단면형상, 곡률반경, 만곡도, 하도 장애물 등이 있다. 기존 편수위 산정공식이 만곡부 중심단면에 대한 평균유속, 하폭, 곡률반경을 사용하는 것은 이들이 만곡부를 대표하는 인자라고 판단했기 때문이다. 만곡부의 단면변화가 큰 산지하천에서는 이를 인정하기 어려우므로 대표성을 가진 새로운 매개변수가 필요하다. 편수위 산정공식의 매개변수는 사용자의 영향을 적게 받고 구하기도 쉬워야 한다. 따라서 본 연구에서는 만곡부에 접근하는 구간의 평균유속, 만곡부 출구와 입구의 평균하폭, 만곡부 내측과 외측의 평균곡률반경을 사용한 편수위 공식을 제시한다.

$$\Delta h = CWF_{im}^2 \quad (7)$$

여기서, W 는 만곡부 입구와 출구의 평균하폭, F_{im} 은 곡률반경 Froude수, C 는 편수위계수이다. 만곡부의 평균수위를 기준으로 한 수위상승은 $\Delta h/2$ 가 된다. 곡률반경 Froude수는 만곡부 접근수로의 평균유속과 곡률반경으로부터 구한다.

$$F_{im} = \frac{V_{im}}{\sqrt{gr_m}} \quad (8)$$

여기서, V_{im} 은 만곡부의 입구에 연결된 접근구간의 평균유속이고, r_m 은 만곡부 내측과 외측의 곡률반경의 평균($= (r_i + r_o)/2$)이다(Fig. 6). 따라서 Eq. (7)을 사용한 홍수 시 만곡부의 수위상승은 만곡부와 접근구간의 하천특성과 홍수량을 고려한 것이다. 편수위계수 C 는 하천특성과 유동특성에 포함된 다양한 인자들을 반영한다. 따라서 본 연구에서는 편수위계수가 만곡부에 대한 횡단인자, 평면인자, 하상인자, 유동인자에 좌우된다고 가정하고 이들의 곱으로 나타내었다.

$$C = C_s C_p C_b C_t \quad (9)$$

여기서 C_s 는 횡단인자, C_p 는 평면인자, C_b 는 하상인자, C_t 는 유동인자이며 이들을 편수위인자(superlevation factor)라고 한다. 또한 각 편수위인자에 영향을 미치는 요인은 편수위 영향인자(influence factor)이다. 횡단인자는 편수위에 대한 만곡부 횡단면 형상의 영향을 반영하기 위한 것으로 단면형태와 유심부의 위치 등을 영향인자로 한다. 평면인자는 편수위를 좌우하는 하천의 평면적 특성을 대

표하며 만곡부의 만곡정도, 곡률반경, 하폭변화 등에 따라 달라진다. 하상인자는 만곡부 하상조건의 영향을 나타내는 것으로 하천경사, 하상재료, 호안, 압초 등을 영향인자로 한다. 유동인자는 흐름의 특성을 반영하기 위한 것으로 유속과 수심 등에 좌우된다.

4.2 편수위계수

본 연구에서는 편수위 영향인자를 조사하기 위하여 양양남대천 지남교와 범수치의 하천 편수위와 만곡수로 이동상 수리실험의 편수위를 분석하였다. 만곡부의 편수위는 유속이 증가하면 커진다. 이는 만곡부의 접근유속에 대해서도 같다. 만곡부의 접근유속과 내외측 평균곡률반경을 사용한 Fr_{im}^2 와 만곡부 입구부와 출구부의 평균으로 편수위를 나눈 $\Delta h/W$ 의 관계는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 선형적이다. 따라서 만곡부의 접근유속, 만곡부 입구와 출구의 평균하폭, 만곡부 내측과 외측의 평균곡률반경을 사용하더라도 선형적인 관계는 변하지는 않는다. 이 선형관계에서 기울기가 편수위계수이며 Table 6에 제시한 것과

같다. 편수위계수는 0.9985~1.5251의 범위로서 1보다 크다. Fig. 8에서 보면 편수위계수는 만곡부에 접근하는 구간의 하상경사가 증가함에 따라 감소한다. 일반적으로 개수로에서 수로경사에 따라 유속이 증가하므로 Fr_{im}^2 와 무차원 편수위가 증가하는 것에 반해 편수위계수 C가 감소하는 것은 하상경사에 대한 Fr_{im}^2 의 증가율이 무차원 편수위 증가율보다 크다는 것을 의미한다.

4.3 편수인자

4.3.1 횡단인자

곡률이 정해진 만곡부의 편수위는 유속과 하폭에 따라 달라진다. 유속과 하폭은 유수단면과 밀접히 관련되어 있으므로 만곡부의 유수단면 특성이 편수위에 영향을 미치게 된다. 이는 ADWR 식의 편수위계수에 Table 2와 같이 단면형상을 반영하는 것에서도 알 수 있다. 본 연구에서는 만곡부 횡단면의 형태와 유심의 위치를 횡단인자의 대표적인 편수위 영향인자로 선정하였다. Fig. 6에 나타낸

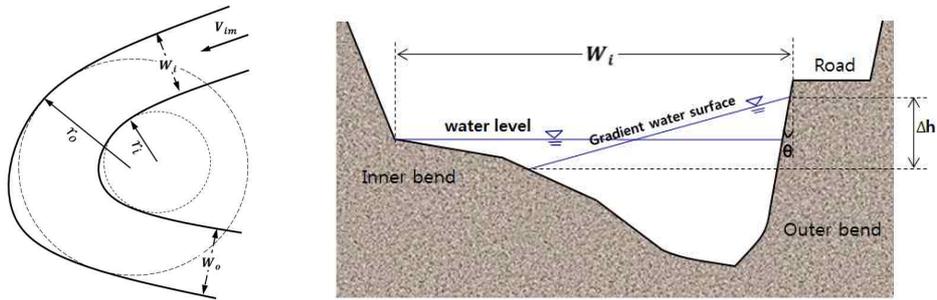


Fig. 6. Schematic Diagram in Mountainous Bend Channel

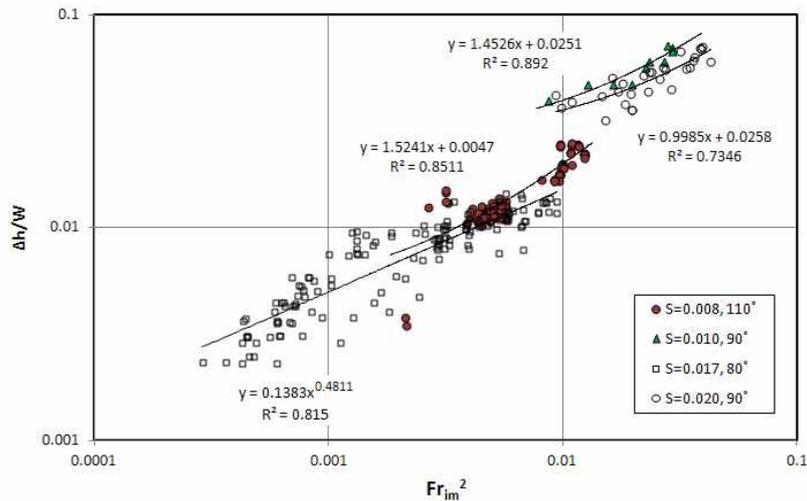


Fig. 7. Dimensionless Superelevation $\Delta h/W$ with Fr_{im}^2

만곡외측 제방의 경사를 고려하여 횡단인자를 구할 수 있는 Eq. (10)을 제시하였다.

$$C_s = 1 + \frac{\tan\theta}{(W_a + W_o)/2 - \tan\theta} \quad (10)$$

여기서, θ 는 만곡외측제방의 제외지 측 사면경사이고, W_a 와 W_o 는 각각 만곡부의 접근부와 출구부의 폭이다. θ 가 작을수록 외측제방은 직각에 가까워 횡단인자(C_s) 값은 1에 가까워지며, 횡단인자 값은 1보다 크다.

4.3.2 하상인자

편수위를 좌우하는 유속은 유수저항과 에너지경사에 따라 달라진다. 하천에서 유수저항은 조도계수나 마찰계수로 나타낼 수 있고 이들은 하상재료 크기의 함수가 된다. 산지하천의 하상재료는 자갈과 호박돌이 대부분이고 전석과 같이 큰 하상재료가 있는 경우도 많다. 유수의 속도수두는 에너지경사에 비례하므로 등류흐름을 가정하면 유속은 하상경사에 따라 증가한다. 특히 산지하천에서는 하상경사가 급하기 때문에 홍수 시 유속이 크다. 따라서 본 연구에서는 하상인자에 대한 만곡부의 접근수로 경사와 하상재료 크기를 편수위 영향인자로 선정해 이들의 평균을 사용한다.

$$C_b = (C_{bsa} + C_{bmn})/2 \quad (11)$$

여기서, C_{bsa} 는 만곡부 접근수로의 하상경사에 대한 편수위 영향인자이며, C_{bmn} 은 하상재료에 대한 편수위 영향인자이다. 하상재료는 굵은 자갈, 매우 굵은 자갈, 호박돌, 작은 전석으로 구분하였다(Yang 1996). 만곡부에 대한 하상인자와 편수위계수가 어떤 관계를 가지는지를 파악하는 것이 필요하다. 편수위계수는 Eq. (7)에서 접근유속 대신에 편수위가 측정된 단면의 평균유속에 대한 것을 C^* 로 표시한다. 만곡부의 접근수로 하상경사는 Fig. 8에서 보듯이 편수위계수 C 와 반비례의 관계를 갖는다. Fig. 9는 하상재료 입경분포곡선에서 d_{84} 와 편수위계수 C^* 의

관계를 보여주는 것으로 C^* 는 d_{84} 가 클수록 증가한다.

4.3.3 평면인자

하천에서 하폭의 변화는 유속과 수심에 영향을 미친다. 만곡부의 출구부 폭이 좁아지면 그 지점의 유속은 빨라지는 반면에 그 상류는 유속이 느려지고 수위는 상승하여 만곡부의 수면경사가 감소한다. 만곡부의 수면경사는 편수위에 큰 영향을 미친다. 이처럼 만곡부의 하폭변화나 만곡각도는 편수위에 영향을 미치는 평면적인 조건들이다. Fig. 10에서 (a)는 C 와 만곡각도의 관계를 나타내고, (b)는 C^* 와 하폭비의 관계를 나타낸다. 편수위계수는 만

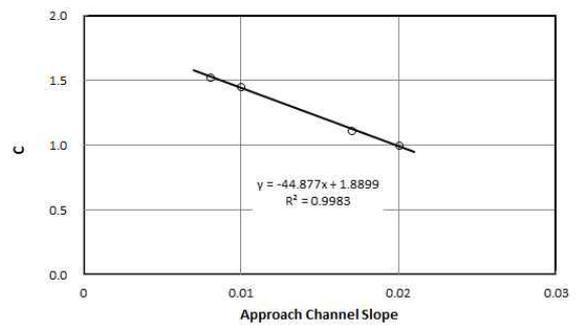


Fig. 8 Relation between C and Approach Channel Slope

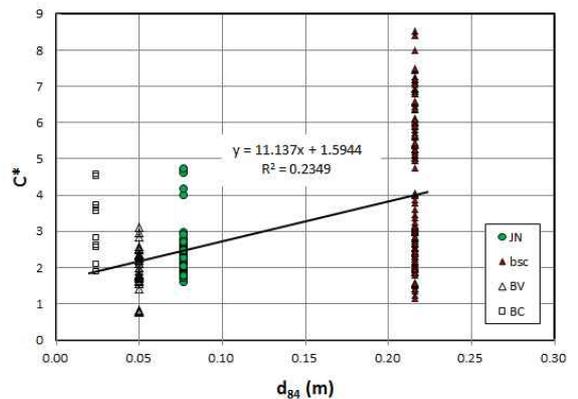


Fig. 9 Relation between d_{84} and C^*

Table 6. Superelevation Coefficients

Data	Channel width (m)	Bend curvature (°)	Radius of curvature (m)	Dimensionless radius of curvature	Slope of approach channel	Superelevation coefficient	Number of data
JN	78.7	110	81.0	1.03	0.008	1.525	93
BSC	38.4	80	149.7	3.90	0.017	1.162	135
BC	1.43	90	4.7	3.29	0.01	1.453	29
BV	1.43	90	4.7	3.29	0.02	0.999	11

곡각도에 따라 증가하고 하폭비에 따라 감소하는 경향이 있다. 본 연구에서는 만곡부의 만곡각도와 하폭비를 평면 인자의 대표적인 편수위 영향인자로 하였다.

$$C_p = (C_{pc} + C_{pw})/2 \quad (12)$$

여기서, C_{pc} 는 만곡각에 대한 편수위 영향인자이고 C_{pw} 는 하폭비에 관한 편수위 영향인자로서 만곡부의 입구 하폭과 출구 하폭의 비(= W_o/W_i)이다. 만곡부에서 하천방향으로 하폭의 변화가 없는 $C_{pw} = 1$ 을 기준으로 할 때 하폭이 감소하면 $C_{pw} < 1$ 이 되고 만곡부의 수심이 더 크게 되며, 하폭이 증가하면 $C_{pw} > 1$ 이 되어 만곡부의 수심은 상대적으로 작아진다.

4.3.4 유동인자

유속이나 유량은 편수위에 영향을 미치는 대표적인 유동특성이다. 본 연구에서는 편수위 영향인자의 유동인자로 접근수로의 Froude 수 F_r 을 채택하였다. F_r 은 유속과 수심을 변수로 하고 있고 Table 2에서 알 수 있듯이 ADWR 식의 편수위계수도 이를 고려하고 있다. 따라서 유속이 빠른 산지하천에서 F_r 를 편수위의 영향인자로 사용하는 것은 의미가 있다. 기존 편수위 산정공식들의 대부분은 만곡부의 평균유속을 사용하고 있기 때문에 만곡부 중횡 단면의 변화가 적은 경우에 적합하다. Fig. 5에서 보듯이 산지하천의 만곡부는 평지하천에 비하여 단면 변화가 매우 심하므로, 평균유속이 단면의 위치에 따라 크게 다르고 산정된 편수위는 비선형적으로 큰 영향을 받는다. 이런 점 때문에 단면변화가 큰 만곡구간에 대한 평균유속보다는 단면변화가 작은 만곡부 접근구간의 평균유속을 사용하는 것이 실용적인 장점이 있다. Fig. 11은 유동인자인 만곡부 접근구간 유속을 사용한 F_r 와 C^* 의 관계를 나타낸 것으로 멱함수의 반비례 관계를 갖는다. 접근수로에서

F_r 가 0.7보다 작은 상류 흐름인 경우 C^* 는 2보다 크지만 F_r 가 1.4인 사류 흐름에서는 약 1이 된다.

4.4 편수위계수 영향인자의 값

편수위에 대한 영향인자의 범위를 고려하여 편수위 영향인자들의 값을 Table 7에 제시하였다. 편수위계수는 Eq. (9)에 편수위 영향인자를 적용하여 구한다.

5. 편수위 식의 적용성

편수위 산정식 Eq. (7)과 Table 7의 편수위 영향인자 값을 양양남대천 및 내린천에 적용해 편수위를 계산하고 실측편수위와 비교하여 Fig. 12에 나타냈다. 양양남대천의 편수위 자료는 수리실험 편수위 자료와 함께 편수위 영향인자 값의 개발을 위해 사용하였다. 편수위 영향인자 값의 개발에 사용되지 않은 내린천 미산지점의 편수위 자료는 편수위 산정기법의 적용성을 판단하기 위하여 사용하였다. 미산 지점의 편수위 측정 자료는 총 174개이다.

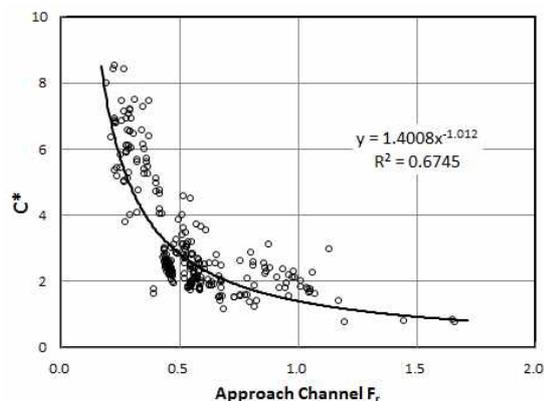
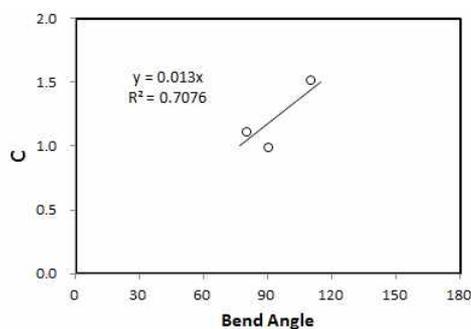
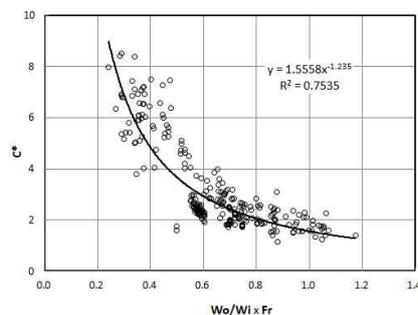


Fig. 11. Relation between Approach Channel F_r and C^*



(a)



(b)

Fig. 10. Changes of C according to the Bend Angle (a) and the Rate of River Width (b)

Table 8은 미산 지점의 편수위 영향인자의 산정에 사용된 접근수로 경사, 하상재료 입경(d_{s4}), 만곡각, 만곡 입출구 하폭비 자료들이다. 편수위 산정기법의 정확도는 최소제곱오차 (RMS)를 이용하여 판단하였다.

$$RMS = \frac{\sqrt{(\Delta h_m - \Delta h_c)^2}}{\Delta h_m} \quad (13)$$

여기서, Δh 는 편수위이고 첨자 m 과 c 는 실측과 계산을

Table 7. Influence Factors of Superelevation Coefficient

Factors	Influence factor	Range	Value
Trans-factor (Cs)	Cross Section (Csc)	$C_s = 1 + \frac{\tan\theta}{(W'_a + W'_o)/2 - \tan\theta}$	-
Bed factor (Cb)	Approach Channel Slope (Cbsa)	< 0.002	2.10
		0.002 ~ 0.005	2.00
		0.005 ~ 0.01	1.50
		0.01 ~ 0.02	1.00
		> 0.02	0.60
	Bed Material Size (Cbm; d_{s4} (m))	< 0.032	0.85
		0.032 ~ 0.064	1.00
		0.064 ~ 0.128	1.25
0.128 ~ 0.256		1.75	
> 0.256	-		
Plane factor (Cp)	Bend Angle (Cpc; °)	< 30	0.30
		30 ~ 70	0.60
		70 ~ 110	1.00
		110 ~ 150	1.10
		> 150	1.20
	Width Ratio (Cpw; W_o/W_i)	< 0.8	3
		> 0.8	2
Flow factor (Ct)	Approach Channel Froude Number (Ctf; Fr No.)	< 0.2	5.00
		0.2 ~ 0.4	3.00
		0.4 ~ 0.6	1.50
		0.6 ~ 0.8	1.20
		0.8 ~ 1.0	1.00
		1.0 ~ 1.1	0.90
		1.1 ~ 1.2	0.8
		> 1.2	0.5

Table 8. Influence Factors of Superelevation Coefficient for Applied Eqn.(7) to Misan

Factor Place (Symbol)	Trans-factor (Cs)	Bed factor (Cb)		Plane factor (Cp)	
	Cross Section (Csc)	Approach Channel Slope (Cbsa)	Bed Material (Cbm; d_{s4} ,mm)	Bend Angle (Cpc; °)	Width Ratio (Cpw; W_o/W_a)
MiSan (MS)	65°	0.0092	0.12	180	1.285

나타낸다. Fig. 12에서 보면 알 수 있듯이 계산편수위는 실측편수위와 대체로 잘 일치하는 경향을 보였다. 편수위가 0.5m 이하로 작은 경우에는 계산편수위가 실측편수위보다 작은 경향이 있으나 편수위가 이보다 큰 경우에 이런 경향은 나타나지 않았다. 미산 지점에 대한 계산편수위와 실측편수위의 RMS는 0.0048~0.299로서 평균 8%의 편차를 보여주고 있어서 편수위 영향인자 값의 개발에 사용한 자료에 대한 것보다 더 작았다(Table 9). 편수위 영향인자 값의 개발에 사용된 자료의 최대편수위가 1.5m 이하이므로 편수위 실측자료를 더 확보하고 편수위 영향인자의 적용성을 더 높여야 할 것이다.

6. 결 론

산지하천은 유역의 지형적인 특성을 반영하기 때문에 경사가 급하고 유속이 빠르며 하상에는 자갈과 호박돌과 같이 큰 재료가 많다. 평지하천에 비하면 산지하천은 중 횡단면 형상이 복잡하고 하상재료의 변동 폭이 매우 크다. 산지하천 만곡부는 홍수 시 큰 편수위 때문에 하천피해가 집중되는 곳이다. 편수위가 큰 경우 만곡부의 하천 설계에 수위상승을 고려하여야 한다. 기존 편수위 산정식들은 산지하천의 복잡한 특성을 충분히 반영하지 못하기

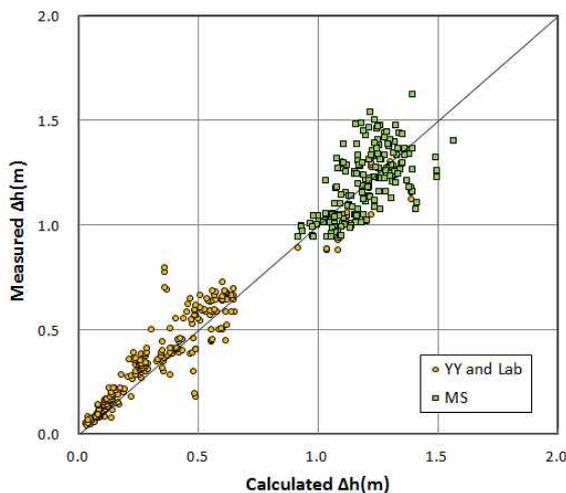


Fig. 12. Comparison between Measured and Calculated Δh

Table 9. Statistical Results for RMS

	Number of data	RMS		
		Maximum	Minimum	Average
YY and Lab	273	1.623	0.59	0.205
MiSan (MS)	174	0.299	0.0048	0.081

때문에 만곡부의 수위상승 예측에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 산지하천 특성을 반영한 편수위 산정기법을 제안하였다. 산지하천에서 정량화가 용이한 만곡부의 접근유속, 내측과 외측에 대한 평균곡률반경, 입구와 출구에 대한 평균하폭을 변수로 하는 편수위 산정식을 제시하였다. 만곡부에 대한 횡단인자, 평면인자, 하상인자, 유동인자를 편수인자로 정의하고 이들의 곱으로 편수위계수를 나타냈다. 편수인자들의 값을 도출하기 위해 산지하천인 양양남대천 만곡부에서 홍수 시 측정된 편수위와 만곡수로 이동상 수리실험의 최대편수위를 분석하고 편수위 영향인자 값들을 제시하였다.

편수위계수는 만곡 접근부의 경사와 유속, 만곡부의 하폭, 횡단면 형상, 유심부의 위치, 만곡도에 영향을 받는다. 만곡접근부의 하상경사가 증가함에 따라 무차원 편수위와 F_{im}^2 가 증가하는데 반해서 편수위계수는 감소하였다. 이는 하상경사에 따른 무차원 편수위 증가율이 F_{im}^2 보다 더 작다는 것을 의미한다. 횡단인자는 만곡 외측제방과 유심부가 이루는 각도가 증가하면 커지고 만곡부 입구와 출구의 평균하폭이 증가하면 감소한다. 하상인자는 만곡부의 접근수로 하상경사와 하상재료를 이용하여 구하며, 접근 하상경사가 증가할수록 감소하고 하상재료 입경 d_{84} 가 클수록 크다. 평면인자는 만곡도가 증가하면 커지고 만곡부의 입구에 대한 출구의 하폭비가 클수록 횡단인자는 작다. 유동인자는 접근유속 Froude수가 증가하면 감소한다.

내린천의 미산 지점에서 실측한 편수위를 이용하여 편수위 산정기법의 적용성을 확인하였다. 분석을 위해 사용한 자료들은 산지하천 만곡부의 제한된 지점에서 측정되었기 때문에 향후 연구에서는 만곡구간의 다양한 단면에서 편수위를 측정하고 편수위 영향인자들을 분석할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 지역기술혁신사업의 연구비 지원('08 지역기술 B-01)으로 이루어졌으며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Arizona Department of Water Resource (ADWR) (1985). "Design manual for engineering analysis of fluvial systems." Simon, Li & Associate, Inc., pp. 4.23-4.28.
- Chow, V.T. (1959). "Open channel hydraulics." McGraw-Hill, pp. 439-448.
- Gradshteyn, I.S., and Ryzhik, I.M. (1980). "Table of integrals, series, and products." Corrected and Enlarged Edition Prepared by Alan Jeffrey, Academic Press, Inc.
- Henderson, F.M., (1966). "Open channels flow." Prentice-Hall, New Jersey, Section 7.3, pp. 239-248.
- Hicks, F.E., Jin, Y.C., Steffler, P.M. (1990). "Flow near sloped bank in curved channel." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 55-70.
- Ippen, A.T., and Drinker, P.A. (1962). "Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels." *J. Hydro. Div.*, ASCE, Vol. 88, No. HY5, pp. 143-179.
- Kim, Y.S., Jang, C.L., Lee, G.H., and Jung, K. (2010). "Investigation of flow characteristics of sharply curved channels by using CCHE2D model." *J. Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 125-133. (in Korean)
- Kim, Y.T., Kim, J.H., Park, Y.J., and Song, J.W. (1997). "A comparative study of selected transverse water surface slope models in curved channels." *J. Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 17, No. II-2, pp. 129-135. (in Korean)
- Korea Water Resource Association (KWRA) (2009). "River design standards-explanations approved by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs." Geonseolgyotong-journal Inc., pp. 246-247. (in Korean)
- Lee, J.K., Kim, J.Y., Park, H.J., and Kang, J.Y. (2009). "Study of superelevation of Ichon-Banpo bend flow in the Han River." 2009 Conference of Korea Water Resources Association, pp. 810-814. (in Korean)
- Lee, W.H. (1997). "Hydraulics." Moonoondang, pp. 170-171. (in Korean)
- Leschziner, M.A., and Rode, W. (1979). "Calculation of strongly curved open channel flow." *J. Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 105, pp. 1297-1314.
- Park, S.D., Lee, S.K., Woo, T.Y., Dang, T., and Shin, S.S. (2013). "Applicability of superelevation formulas in mountainous rivers." 2013 Conference of Korean Society of Civil Engineers, pp. 500-503. (in Korean)
- Park, S.D. and Shin, S.S. (2011). "Scheme to reduce the superelevation and characteristic of mountainous river bends." Magazine of Korea Water Resources Association, Vol. 44, No. 11, pp. 24-30.
- Shin, S.S., Park, S.D., Lee, S.K., and Ji, M.G. (2012). "Estimating critical stream power by the distribution of gravel-bed materials in the meandering river." *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 151-163.
- Shukry, A. (1950). "Flow around bends in an open flume." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 115, No. 1, pp. 751-779.
- Woo, H. (2001). "River hydraulics." Cheongmoongak, pp. 217-222. (in Korean)
- Woodward, R.C. (1920). "Hydraulics of the Miami flood control project." Technical Report, Miami Conservancy District, Dayton, Ohio, part VII.
- Yang, C.T. (1996). "Sediment transport-theory and practice." the McGraw-Hill Companies, Inc., pp. 4-5.
- Ye, J., and McCorquadale, J.A. (1998). "Simulation of curved open channel flow by 3D hydrodynamic model." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 7, pp. 687-698.

paper number : 14-097

Received : 30 September 2014

Revised : 26 October 2014 / 5 November 2014

Accepted : 5 November 2014