韓國水資源學會論文集
第48卷 第11號·2015年 11月
pp. 879~889

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 11:879-889, November 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.11.879
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

합류부 하상고 불일치에 의한 두부침식 및 분리구역 특성분석

An Analysis for the Characteristics of Headward Erosion and Separation Zone due to Bed Discordance at Confluence

최 흥 식* / 모 선 재** / 이 삼 희***

Choi, Heung Sik / Mo, Sun Jea / Lee, Sam Hee

Abstract

The pattern of headward erosion at tributary and the separation zone formation in a loosed bed at confluence according to the confluence angle, discharge ratio, and dredging depth ratio have been analyzed. The separation zone is defined the inside of zero velocity boundary at downstream of confluence. The limit of separation zone occurrence is presented with dredging depth ratio. The propagation length of knickpoint increases as the confluence angle, discharge ratio, and dredging depth ratio increase in general and its regression equation has been suggested. The length and width ratios of separation zone in a loosed bed increase as discharge ratio and confluence angle increase as well as in a fixed bed. The length ratio decreases and the width ratio increases as dredging depth ratio increases results in great increase of shape factor and backwater rise by the conveyance reduction at confluence. The regression equation of shape factor with confluence angle, discharge ratio, and dredging depth ratio has been suggested.

Keywords : separation zone, loosed bed, headward erosion, knickpoint migration, shape factor

요 지

본 연구는 지류의 합류각, 지류와 본류의 유량비, 준설 깊이비의 변화에 따른 지류에서의 두부침식 양상과 합류부 이동상 하도에서의 분리구역의 특성을 분석하였다. 분리구역은 지류가 합류되어진 직후 단면에서의 유속이 0(영)인 구간으로 정의하였다. 준설 깊이에 따른 두부침식이 발생치 않은 범위를 제시하였다. 합류각, 유량비, 준설 깊이비 증가에 따른 두부침식 깊이비 및 천급점의 이동거리비는 전반적으로 증가하였으며, 천급점의 이동거리비의 관계식을 제시하였다. 이동상 하도에서의 유량비와 합류각 증가에 따른 분리구역의 길이비 및 폭비는 고정상 하도에서와 같은 양상으로 증가하였다. 준설 깊이비 증가에 따른 분리구역의 길이비는 감소하고 폭비은 증가하여 형상지수는 크게 증가하여 통수단면의 감소로 배수위 현상이 기대된다. 고정상 하도와 이동상하도에서의 합류각, 유량비, 준설 깊이비에 따른 형상지수 관계식을 제안하였다.

핵심용어 : 분리구역, 이동상 하도, 두부침식, 천급점 이동, 형상지수

* 교신저자, 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (e-mail: hsikchoi@sangji.ac.kr, Tel: 82-33-730-0472)
Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 26339, Korea
** ㈜천마기술단 (e-mail: mjy0617@nate.com)
Engineer, Chunma Engineering Co. Ltd., Seongnam 13636, Korea
*** 한국건설기술연구원 선임연구위원 (e-mail: samhee.lee@kict.re.kr)
Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Koyang, 10223, Korea

1. 서 론

지류가 유입하는 합류부에서는 분리구역(separation zone)이 형성되며, 상류로부터 내려온 유사에 의한 하상변화로 다양한 수리특성을 나타낸다. 합류부에서 수리특성의 변화는 통수능력의 변화를 가져와 본류와 지류에 홍수범람의 피해를 가져올 수 있다.

최근 기후변화로 인한 가뭄과 집중호우에 따른 홍수피해를 방지하고자 준설에 의한 하천유지용수 확보와 홍수방어능력 증대를 제안하였다. 하지만 본류를 과도하게 준설하면, 본류와 지류 하상의 급격한 단차에 의한 현저한 하상고의 불일치가 발생하며, 급경사 구간에서 사류의 발생으로 수력도약 현상이 발생한다. 아울러 지류의 상류구간으로 하상이 침식되는 천급점(knickpoint)의 이동에 이한 두부침식(headward erosion)이 발생하고 이에 따른 본류에서의 유사 퇴적이 발생한다. 두부침식에 의한 퇴적은 합류부에서의 분리구역 형상의 변화를 포함한 수리 특성의 변화를 가져온다. 합류부의 복잡한 수리특성의 변화와 더불어 지류방향의 두부침식은 지류 상류에 위치하는 하상의 저하로 하천구조물의 안정성에 매우 중요한 영향을 주게 된다. 또한 두부침식에 의한 합류부에서의 하상의 변화를 예측하는 것은 하천의 계획과 관리에서 매우 중요하다.

Taylor (1944)는 합류각이 45°, 135°인 합류수로에 운동량 방정식을 사용하여 수심의 변화를 규명하여 실험결과와 유사함을 확인하였다. 아울러 합류각에 추가하여 지류와 본류의 유량비에 따른 합류부의 수리특성의 규명에 대한 많은 연구가 있었다(Modi et al., 1981; Best and Reid, 1984).

Brush and Wolman (1960)은 비점착성 하상토로 구성된 실험수로에서 두부침식에 의한 천급점의 거동특성을 분석하였다. 실험결과는 하상재료가 미세할수록 유사이동속도가 빠르고, 그에 상응하는 천급점의 이동속도가 빨라지는 것을 확인하였다. Vasquez et al. (2006)은 River2D 모형을 수정하여, 두부침식에 의한 천급점 이동특성을 모의하여 단차가 형성된 하류단에서 수력도약의 특성은 잘 맞았으나, 하상변동 결과는 잘 일치하지 않음을 확인하였다. Frankel et al. (2007)은 실험을 통해 하상 표고차가 발생에 따른 천급점의 이동 특성을 규명하였다. Ribeiro et al. (2012)은 수심의 급경사 지류가 수심이 깊은 본류로 합류에 따른 현저한 하상고의 차이가 발생되는 합류부에서의 2중 구조의 수리특성을 규명하였다. 아울러 유사의 이송에 따른 합류부에서의 퇴적은 통수능력의 저하와 난류운동에너지의 증가에 따른 전단경계의 발생으로 유사이동을 가속시키는 현상을 규명하였다. 이와 같이 지류와 본류와의 단차에 의한 합류부 하상고의 불일치는 합류부 수리특성에 큰 영향을 주게 된다. Liu et al. (2012)은 90도 각도로 합류하는 지류와 본류에서의 유량비에 따른 본류에서의 분리구역, 배수위 현상에 추가하여 유사의 이동에 의한 하상의 변화를 규명하였다. Zhang et al. (2015)은 중국의 황하에 지류로부터 고농도 유사(hyperconcentrated tributary flow)의 유입에 따른 유사의 이송과 하상의 변화를 실험적으로 해석하였다.

국내의 경우 Choi et al. (2010)은 지류와 본류의 합류부 유로폭 변화 및 제방 설치, 본류와 지류의 유량비 변화에 따른 수리모형실험을 실시하여 수리학적 특성과 그에 따른 하상변화 양상을 분석하였다. 합류부의 퇴적은 합류부 하류의 좌안, 우안 그리고 합류점 정체구간에 나타나는 것을 확인하였다. Jang (2012)은 2차원 하상변동 수치모형을 적용하여, 단차가 형성된 급경사 구간에서 흐름 특성, 두부침식에 의한 천급점의 거동과 하도의 변화과정을 분석하였다. 단차가 발생한 구간의 상류에서는 지속적으로 하상이 저하되고 천급점은 상류로 이동하였다. 또한 유량이 증가함에 따라 하상변동 구간이 증가하고, 두부침식 속도가 증가함을 확인하였다. Kim (2014)은 2차원 하상변동 모형인 CCHE2D 모형을 사용하여 낙동강과 병성천 합류부를 대상유역으로 선정하여 본류의 준설로 높은 단차가 형성되어있는 구간에 하상유지공 설치 전과 후의 흐름 및 지형특성을 분석하였다. 하상유지공 설치 전의 경우 준설부에서 퇴적이 발생하였으며, 지류 상류방향으로 두부침식 현상이 발생하였다. 아울러, 하상유지공 설치 후의 경우 준설부의 퇴적은 설치 전보다 퇴적양상이 저하되는 것을 확인하였다.

이와 같이 기존의 연구는 합류각과 유량비에 추가하여 합류부 하상고 불일치에 의한 천급점의 이동과 합류부에서 분리구역을 포함한 각종 수리특성을 분석하였다. 그러나 지류에서의 침식에 의한 합류부에서 퇴적 양상을 고려한 수리특성을 분석한 사례는 없다. 따라서 본 연구는 합류각과 유량비에 추가하여 합류부 하상고 불일치에 의한 지류에서 두부침식과 합류부에서의 수리 및 지형변화 특성을 규명하였다. 아울러 침식과 퇴적에 의한 합류구간의 이동상 하도에서의 합류부 분리구역 형성 변화를 분석하였다.

2. 수치모형의 선정과 검증

2.1 모형실험의 조건

Brush and Wolman (1960)은 두부침식에 의한 천급점

의 거동특성을 파악하기 위하여 길이가 15.9 m이고, 폭이 1.22 m인 가변형 경사수로에서 실험을 실시하였다. 하상토는 평균 입경이 0.67 mm인 모래를 사용하였다. 초기하도는 폭이 0.21 m이고, 깊이가 0.03 m인 사다리꼴 단면이며, 하도 저면에서 둥글게 처리되었다(Fig. 1).

길이 0.3 m, 높이 0.03 m, 경사가 10.0%의 하상고 불일치에 따른 급경사 구간은 수로의 상류에서 10.8 m지점에서 11.1 m에 위치하고 있다. 하상고 불일치에 의한 급경사 구간을 전과 후의 하도경사는 0.125%로서 완만하게 형성되었다. 수치모의 입력 조건은 Table 1과 같이 유량은 0.00059 m^3/s로 일정하게 공급하였다고, 초기 수심은 0.0137 m이다.

2.2 수치모형의 선정과 모의결과 검증

합류부에서의 복잡한 수리특성과 그에 따른 하상의 변화를 규명에는 연직 전단 난류 구조의 해석을 포함하는 3차원모형의 적용이 원칙일 수 있다. 그러나 본 연구는 유량비, 합류각에 추가하여 준설 깊이비에 따른 지류방향의 천급점의 이동과 침식 깊이비의 양상과 지류의 침식에 의한 합류부에서의 퇴적에 의한 분리구역의 특성에 대한 규명으로 2차원적 해석이 실용적이다. 2차원 흐름 및 하상변동을 위한 수치해석모형은 River2D, RMA2의 SED2D, CCHE2D (Center for Computational Hydroscience and Engineering 2 Dimensional)모형 등이 있다.

합류부에서 하상고 불일치에 의한 지류의 두부침식과 분리구역 형성의 분석을 위하여 사류와 상류영역의 흐름과 수력도약의 해석, 이차류(secondary flow)의 흐름과 이에 상응하는 하상변화가 모의 가능하고, 하상토 입도분포의 입력이 가능하고, 소류사와 부유사의 총유사의 이송형태에 대해 각각 모의 가능하고, 다양한 형태의 유사량 공식의 적용이 가능하여 자주 사용(Ji and Jang, 2014; Kim, 2014)하는 CCHE2D모형을 사용하였다. CCHE2D는 미국 Mississippi 대학의 NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering)에서 개발한 2차원 수치모형이다(Jia and Wang, 2001; Wu, 2001). CCHE2D 모형은 수심적분 2차원 난류흐름에 대한 천수방정식과 수심적분 2차원 이송-확산방정식과 유사이송공식을 해석한다.

수치모의는 Fig. 1의 모형수로에 Table 1에서의 실험조건에 대해 흐름의 종방향으로 636개, 횡방향으로 13개의 격자를 설정하였다. 수치격자의 구성에 따른 계산 간격은 수치해석의 안정성과 정확성을 감안하고 분석하고자 하는 목적에 부합을 목표로 예비 수치실험결과 0.05초로 설정하였다.

Fig. 2는 수치모형에 의하여 계산된 각 시간별 하상고와 수위이다. 수치모의 2분 이후부터 급경사 구간의 상류에서 하상이 저하되기 시작하였고, 하류는 상류의 침식에 의한 퇴적의 영향으로 하상고가 상승하였다. 수면에서는

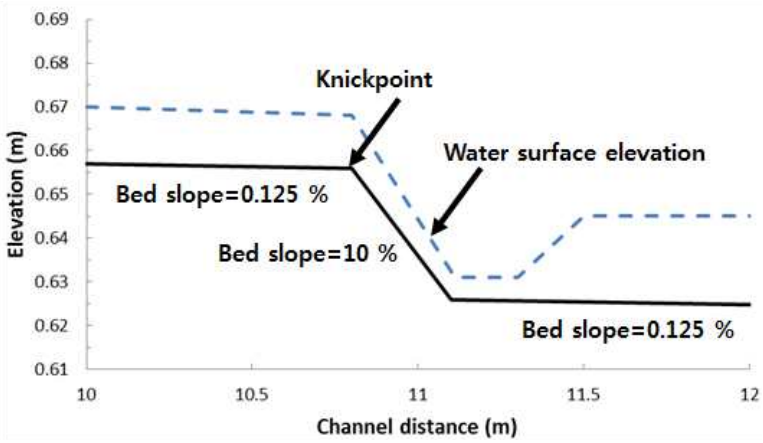


Fig. 1. Experimental Configuration of Water Surface and Bed Profile (Jang, 2012)

Table 1. Experimental condition(Brush and Wolman, 1960)

Case	Discharge (m^3/s)	Initial depth (m)	Channel slope (%)	Slope at steep reach (%)	Dia. of bed material (mm)
Run-1	0.00059	0.0137	0.125	10.0	0.67

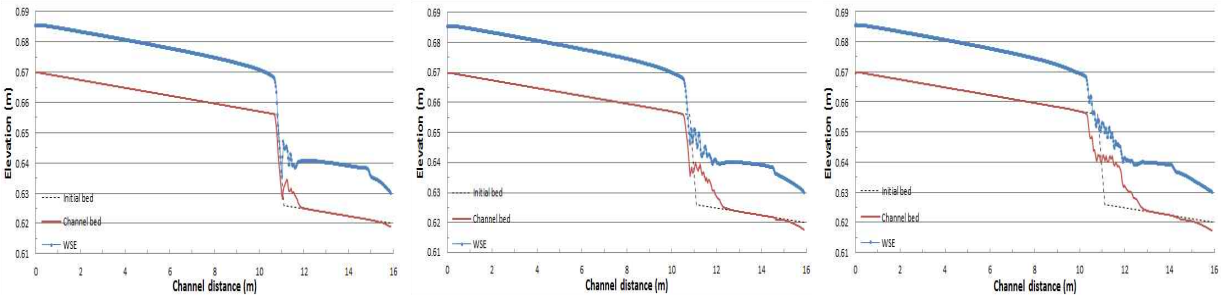
경사가 급경사에서 완경사로 변하는 지점에서 수력도약이 발생하였다. 수치모의 10분 후, 두부침식의 영향이 상류로 전파되어 단차가 형성된 상류에서 침식이 발생하였으며, 시간이 증가하면서 급경사 구간은 완만한 경사를 형성하였다. 아울러, 급경사의 상류에 형성된 천급점은 상류로 이동하면서, 두부침식에 의한 하상고 저하가 상류로 전파되며, 단차 구간의 경사는 완만하게 형성되었다.

Fig. 3은 Zang (2012), Schippa and Pavan (2009)의 검증 결과와 본 연구에서의 160분 동안의 하상변화에 대한 검증결과이다. 시간이 증가함에 따라 단차가 형성된 구간에서 하상경사는 감소하며 천급점은 상류로 이동하였다. 천급점의 이동에 따른 수리모형 실험결과와 수치모의 결과가 잘 일치하여 CCHE2D 모형의 적용성을 확인하였다.

3. 수치모형의 적용과 결과분석

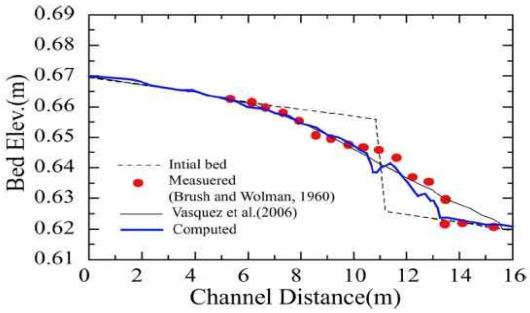
3.1 무차원 매개변수의 정의와 수치모의 조건

수치모의를 위한 수로는 길이 1.80 m, 폭 0.40 m, 지류의 폭 0.32 m로 Park (2003)의 실내실험에서 사용된 수로제원을 사용하였다(Fig. 4). 분리구역의 정의는 유속이 0(영)인 구역을 분리구역으로 정의하였다. 이때 B는 본류의 폭, L_s는 분리구역의 거리, B_s는 분리구역의 폭을 나타낸다. 분리구역의 특성은 길이와 폭을 본류 하천폭으로 나눈 길이비(L_s/B)와 폭비(B_s/B)로 분석하였다. 분리구역

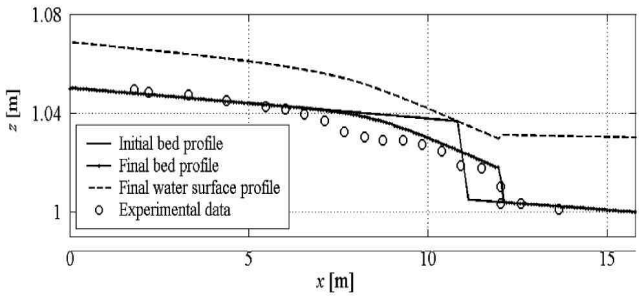


(a) T = 2 Min. (b) T = 10 Min. (c) T = 20 Min.

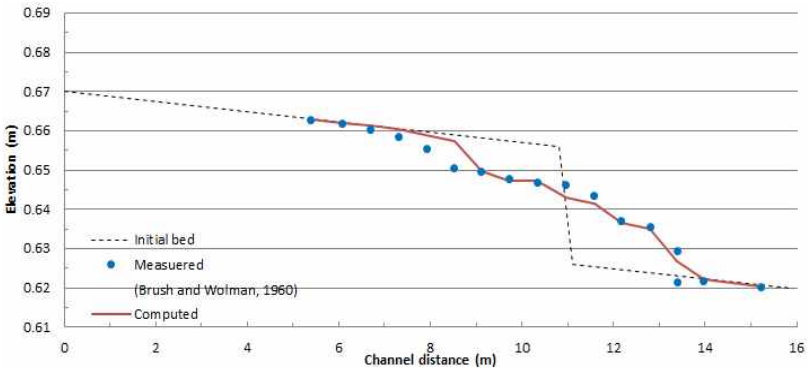
Fig. 2. Simulation Results for Each Time Step



(a) Zang (2012)



(b) Schippa and Pavan (2009)



(c) Computed

Fig. 3. Numerical Result after 160 Minutes

의 형상지수(shape factor)는 B_s/L_s이고, 분리구역을 제외한 흐름단면 폭의 수축지수(contraction factor)는 $C_c=(B-B_s)/B$이다. 유량비는 본류의 유량(Q_1), 지류 유량(Q_2), 지류 합류후 유량($Q_3=Q_1+Q_2$)의 유량비($Q_r=Q_2/Q_3$)로 정의하였다.

본류와 지류의 하상고 불일치를 재현하기 위한 단차를 위해 수로바닥의 높이는 0.40 m로 설정하였다. 합류각은 본류에 지류가 유입하는 우측의 각으로 정의하여 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°로 7가지 경우, 유량비는 0.15, 0.35, 0.45로 3가지 경우, 준설에 의한 깊이(z_d)는 0.02 m, 0.04 m, 0.06 m로 3가지 경우이다(Table 2). 본류수심(y)에 따른 준설 깊이비 $z_{dr}(=z_d/y)$는 유량비 0.15의 경우 0.22, 0.44, 0.66이며, 유량비 0.35와 0.45의 경우 0.19, 0.37, 0.56이다.

본류에서의 수치격자는 종방향으로 180개와 횡방향으로 40개로 구성하였고, 지류에서는 종방향으로 100개와 횡방향으로 32개로 수성하였다. 격자수는 본류에서는 동일하나 지류에서는 합류각에 따라 각기 다른 격자수로 구성된다.

수심적분한 운동량과 유사 이송방정식에서의 난류점성계수는 포물선 와점성 모형(parabolic eddy viscosity model)을 사용하였고, Wall slipness 계수는 0.5를, Prandtl-Schmidt 수는 0.5를 적용하였다. 유사이송 공식은 남한강과 금당천 합류부에 적용(Ji and Jang, 2014)하고 하상재료 입경 0.67 mm에 적합한 Wu et al. (2000)공식을 사용하였다. 하상의 조도계수는 0.025를 사용하였고 하상변동 방정식을 포함한 각종 매개변수는CCHE2D 모형의 기본값을 사용하였다.

3.2 수치모의 결과 분석

유량비, 합류각, 준설 깊이비 변화에 따른 지류부 상류로의 두부침식과 천급점 이동변화와 더불어 합류부에서의 하상변화에 기인한 분리구역 변화를 분석하였다. 두부침식과 천급점의 이동특성은 두부침식의 무차원 깊이비($e_r=e/z_d$, e는 침식깊이)와 천급점의 무차원 이동거리비($x_r=x/z_d$, x는 천급점 이동거리)로 나타내었다. 천급점 직상류의 침식 깊이가 0.005 m 이하일 경우, 천급점의 발생 직상류와 직하류에서의 소류력의 차이가 미미하여 두

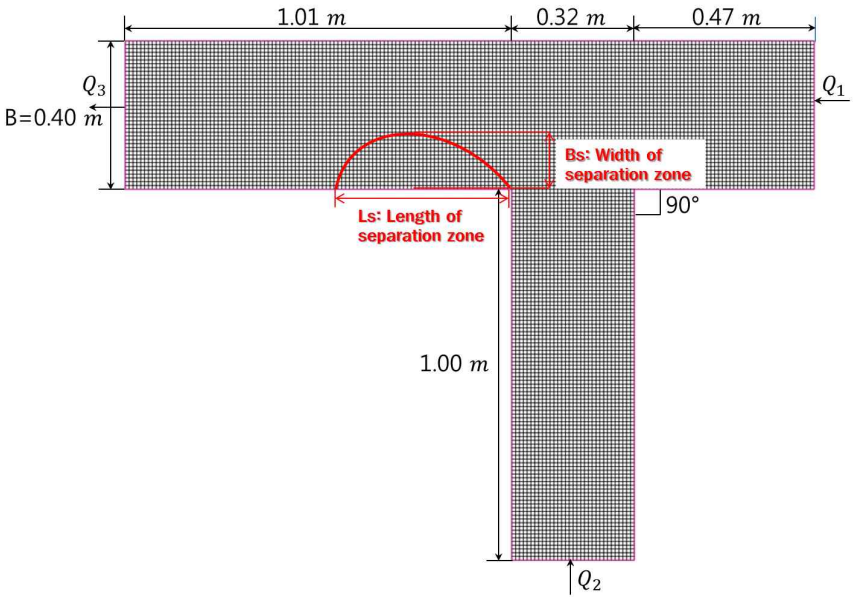


Fig. 4. Definition of Separation Zone and the Experimental and Numerical Schematization

Table 2. Numerical Simulation Conditions

Confluence angle (°)	Dredging depth (m)	Dia. of sediment size (mm)	Main channel discharge (m^3/s)	Tributary discharge (m^3/s)	Discharge ratio	Water depth at main channel (m), y
30, 45, 60, 75, 90, 105, 120	0.02	0.67	0.011	0.002	0.15	0.091
	0.04			0.006	0.35	0.107
	0.06			0.009	0.45	0.107

부침식이 발생되지 않는 것으로 정의하였다.

3.2.1 두부침식 깊이비

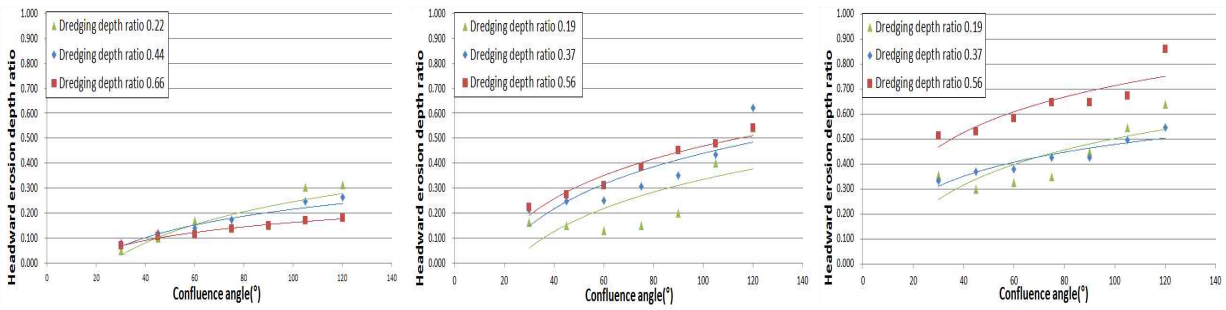
Table 3은 합류각, 유량비, 준설깊이비에 따른 지류에서의 두부침식 깊이비이다. 유량비 0.15에서의 준설 깊이비 0.22와 유량비 0.35에서의 준설 깊이비 0.19에서 합류각 30°~90° 경우는 두부침식 깊이가 0.005 m 이하로 나타나 두부침식이 발생되지 않은 것으로 판단하였다.

유량비 0.15의 경우 준설 깊이비가 커질수록 일반적으로 두부침식 깊이비가 증가 후 감소 또는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 준설 깊이비가 커질수록 두부침식 깊이는 증가하나, 그 차이가 미미하여 합류부 수심의 변화에 따른 두부침식 깊이비가 전반적으로 감소되는 것으로 판단된다. 유량비 0.35와 0.45에서 준설 깊이비가 커질수록 두부침식 깊이비가 증가하였다. 이는 급경사 지점에서부터 유속과 소류력 증가에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 0.45의 유량비에서 90°~120° 합류각의 경우, 준설 깊이비 0.37에서 준설 깊이비가 커질수록 두부침식 깊이는 증가하나, 그 차이가 미미하여 합류부 수심의 변화에 따른 무차원 두부침식 깊이비는 가장 작게 나타났다.

동일 준설 깊이비에서는 유량비와 합류각이 커질수록 두부침식 깊이비가 증가하였다(Fig. 5). 이는 지류의 유입유량이 증가함에 따라 유속과 소류력 증가에 기인한 것으로 판단된다. 아울러 준설깊이비가 작고 유량비가 커질수록 두부침식 깊이비와의 상관성이 작게 나타남은 상대적으로 작은 준설깊이에 따른 무차원 침식 깊이비에 기인한

Table 3. Headward Erosion Depth Ratios to Confluence Characteristic Changes of the Confluence Angle, Discharge Ratio, and Dredging Depth Ratio

Discharge ratio	Dredging depth ratio	Headward erosion depth ratio						
		Confluence angle						
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
0.15	0.22	0.050	0.100	0.170	0.150	0.150	0.305	0.315
	0.44	0.080	0.120	0.140	0.175	0.150	0.248	0.265
	0.66	0.068	0.107	0.115	0.138	0.150	0.170	0.180
Discharge ratio	Dredging depth ratio	Confluence angle						
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
0.35	0.19	0.165	0.150	0.130	0.150	0.200	0.400	0.540
	0.37	0.215	0.248	0.250	0.308	0.350	0.435	0.623
	0.56	0.223	0.273	0.310	0.385	0.450	0.478	0.542
Discharge ratio	Dredging depth ratio	Confluence angle						
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
0.45	0.19	0.355	0.300	0.325	0.350	0.450	0.545	0.640
	0.37	0.333	0.370	0.380	0.425	0.425	0.495	0.545
	0.56	0.512	0.530	0.582	0.645	0.645	0.673	0.858



(a) Discharge ratio 0.15 (b) Discharge ratio 0.35 (c) Discharge ratio 0.45

Fig. 5. Headward Erosion Depth Ratios to the Confluence Angle

것으로 판단된다.

Fig. 6은 30° 합류각일 때 유량비 별 준설 깊이비에 따른 두부침식 깊이비이다. 준설 깊이비가 커질수록 급경사 지점에서부터 유속과 소류력 증가에 기인하여 두부침식 깊이비가 증가하였다. 동일 준설 깊이비에서는 유량비가 커질수록 지류의 유입유량이 증가함에 따라 유속과 소류력 증가로 두부침식 깊이비가 증가하였다. 유량비 0.15의 경우, 준설 깊이비가 커질수록 두부침식 깊이비가 감소하는 것으로 나타났으나, 두부침식 깊이가 0.003~0.004 m로 두부침식이 발생하지 않아 상관성이 없는 것으로 판단된다.

3.2.2 천급점의 이동 거리비

Table 4는 합류각, 유량비, 준설깊이비의 변화에 따른 천급점의 이동거리비이다. 유량비 0.15에서의 준설 깊이비 0.22와 유량비 0.35에서의 준설 깊이비 0.19에서 합류각 30°~90° 경우는 두부침식이 발생되지 않았다. 동일 유량비에서 준설 깊이비가 커질수록 급경사 지점에서부터 유속과 소류력의 증가로 천급점의 이동거리비는 증가하였다. 유량비 0.45에서의 60°, 90°~105° 합류각에서는 준설 깊이비가 0.37일 때 가장 크게 나타났다. 이는 준설 깊이비 0.56에서의 천급점의 이동거리의 증가 차이가 미미하여 준설 깊이비 0.37일 때 무차원 이동거리비가 가장 크게 나타난 것으로 판단된다.

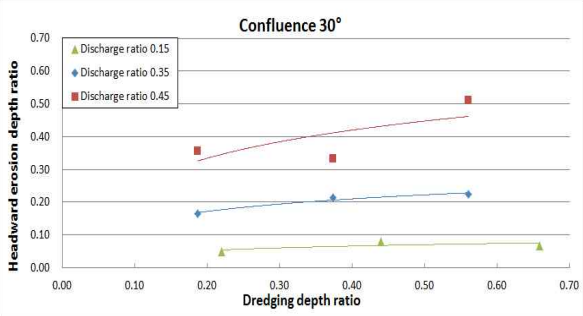


Fig. 6. Headward Erosion Depth Ratios to Dredging Depth Ratio in Confluence Angle of 30°

동일 준설 깊이비에서는 유량비와 합류각이 커질수록 천급점의 이동거리비는 증가하였다(Fig. 7). 이는 지류의 유입유량이 증가함에 따라 급경사 하단부에서 큰 단차에 의한 유속과 소류력 증가에 기인한 것으로 판단된다. 아울러, 약간의 차이는 있지만 전반적으로 합류각이 증가함에 따라 유속이 증가하여 천급점의 이동거리비가 증가하였다. 아울러 준설깊이비가 작고 유량비가 커질수록 두부침식 거리비와의 상관성이 작게 나타남은 상대적으로 작은 준설깊이에 따른 무차원 천급점 이동 거리비에 기인한 것으로 판단된다.

합류각, 유량비, 준설 깊이비에 따른 천급점 이동거리비(x_r)의 관계식은 Table 5와 같고, 결정계수는 0.734로 높은 상관성을 보여주었다.

3.3 이동상 하도 고려에 의한 분리구역의 특성

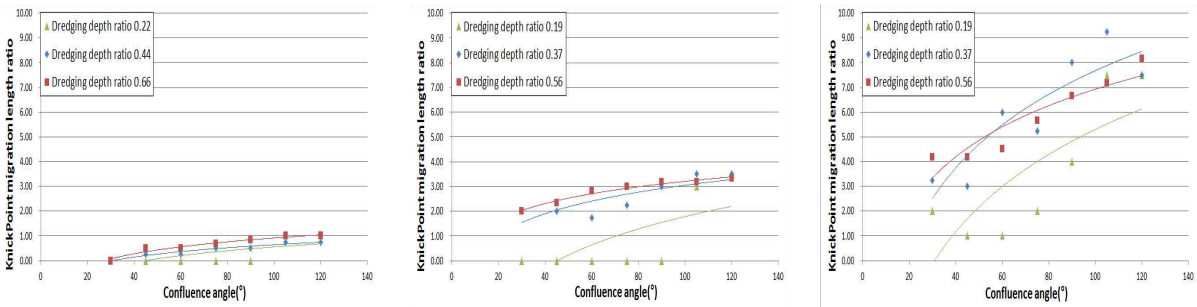
본류 준설에 의한 하상고 불일치의 현상으로 지류 상방

Table 4. Knickpoint Migration Length Ratios to the Confluence Angle, Discharge Ratios, and Dredging Depth Ratio

Discharge ratio	Dredging depth ratio	Knickpoint migration length ratio						
		Confluence angle						
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
0.15	0.22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
	0.44	0.000	0.250	0.250	0.500	0.500	0.750	0.750
	0.66	0.000	0.500	0.500	0.667	0.833	1.000	1.000
Discharge ratio	Dredging depth ratio	Confluence angle						
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
0.35	0.19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.000	3.500
	0.37	2.000	2.000	1.750	2.250	3.000	3.500	3.500
	0.56	2.000	2.333	2.833	3.000	3.167	3.167	3.333
Discharge ratio	Dredging depth ratio	Confluence angle						
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
0.45	0.19	2.000	1.000	1.000	2.000	4.000	7.500	7.500
	0.37	3.250	3.000	6.000	5.250	8.000	9.250	7.500
	0.56	4.167	4.167	4.500	5.667	6.667	7.167	8.167

향으로의 두부침식에 의한 합류부에서의 퇴적에 의한 하상의 변화에 따른 분리구역의 변화특성을 분석하였다. 일반적으로 합류각 30°의 경우 유량비 0.45에서의 준설 깊이비 0.37, 0.56을 제외한 모든 경우에서 분리구역이 형성되지 않았으며, 합류각 45°의 경우 유량비 0.15에서의 모든 준설 깊이비에서 분리구역은 형성되지 않았다.

합류부에서 하상변화를 고려한 이동상 하도에서의 유량비와 합류각에 따른 분리구역의 길이비와 폭비는 각각 Figs. 8 and 9이다. 유량비와 합류각이 커질수록 분리구역의 크기가 증가하는 것은 고정상 하도에서와 같은 양상으

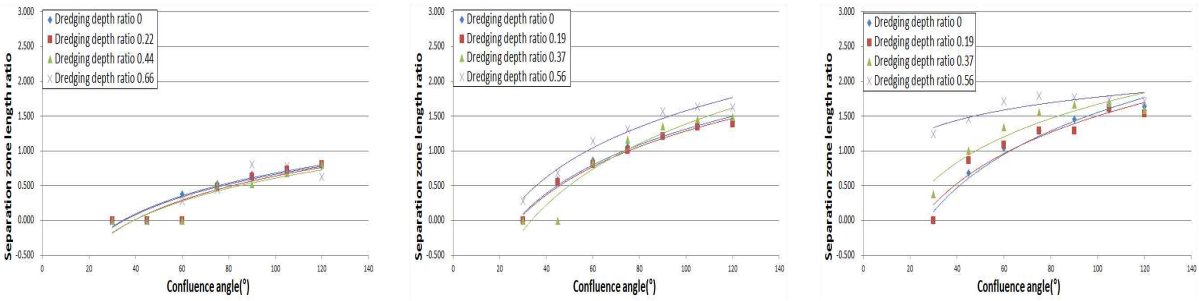


(a) Discharge ratio 0.15 (b) Discharge ratio 0.35 (c) Discharge ratio 0.45

Fig. 7. Knickpoint Migration Length Ratios to the Confluence Angle

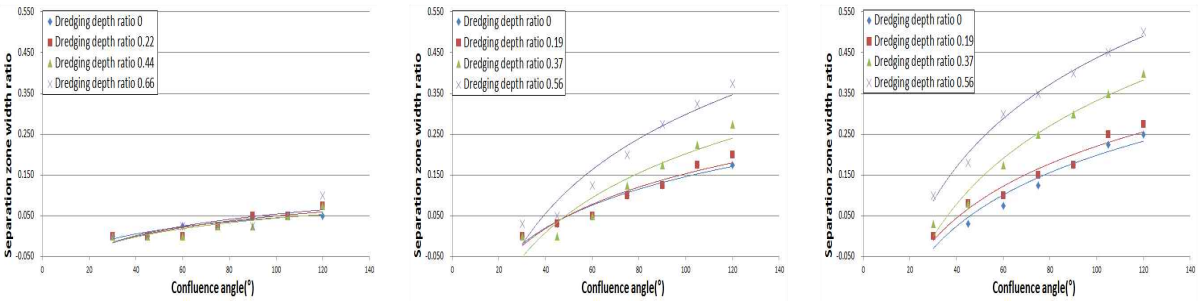
Table 5. Regression Equation of Knickpoint Migration Length Ratio for Loosed Bed as a Function of the Confluence Angle, Discharge Ratio, and Dredging Depth Ratio

Regression equation	Determination coefficient
$x_r = 0.033\text{dig} + 3.820 z_{dr} + 15.462 Q_r - 6.303$	$R^2 = 0.734$
dig: Confluence angle(°), z_{dr}: Dredging depth ratio, Q_r: Discharge ratio	



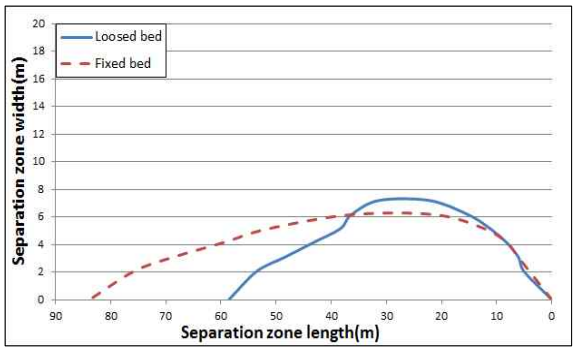
(a) Discharge ratio 0.15 (b) Discharge ratio 0.35 (c) Discharge ratio 0.45

Fig. 8. Separation Zone Length Ratios to the Confluence Angle for Loosed Bed at Confluence

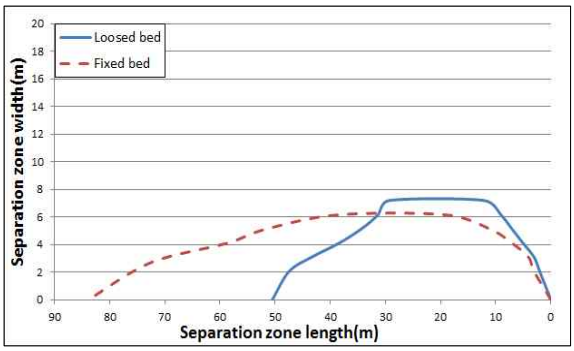


(a) Discharge ratio 0.15 (b) Discharge ratio 0.35 (c) Discharge ratio 0.45

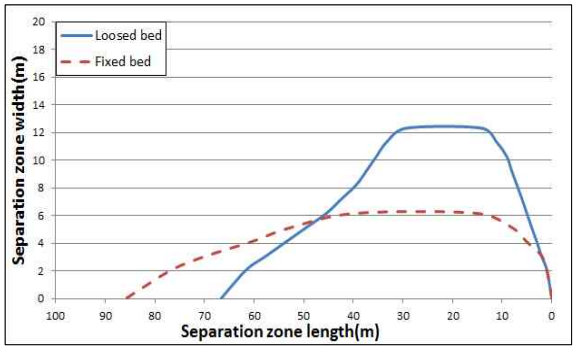
Fig. 9. Separation Zone Width Ratios to the Confluence Angle for Loosed Bed at Confluence



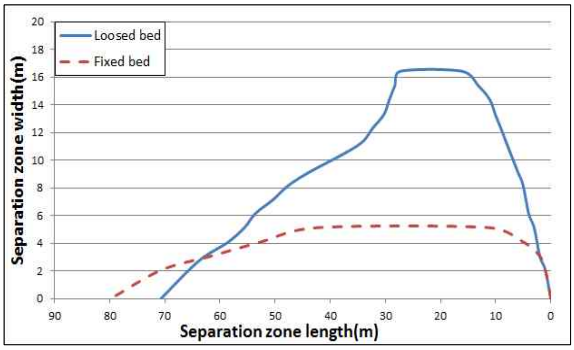
(a) Dredging depth ratio 0



(b) Dredging depth ratio 0.19



(c) Dredging depth ratio 0.37



(d) Dredging depth ratio 0.56

Fig. 10. Separation Zone Patterns of the Fixed Bed and Loosed Bed for Confluence Angle of 90°

Table 6. Regression Equation of Shape Factor for Loosed Bed as a Function of the Confluence Angle, Discharge Ratio, and Dredging Depth Ratio

Regression equation	Determination coefficient
$B_s/L_s = 0.002\mathrm{dig} + 0.096 z_{dr} + 0.314 Q_r - 0.152$	$R^2 = 0.833$

로 나타났다. 하지만 합류부의 하상변화를 감안한 이동상 하도에서는 준설 깊이비가 커질수록 분리구역의 길이비는 전반적으로 증가하나 그 차이가 미미하게 나타났다. 아울러, 분리구역의 폭비는 준설 깊이비가 커질수록 전반적으로 증가하는 양상으로 나타났으며 그 차이가 크게 나타났다.

Fig. 10은 고정상 하도와 이동상 하도에서의 분리구역의 형상을 나타낸 것으로 이동상 하도에서는 고정상 하도에서와는 달리 길이비가 증가하나 그 차이가 미미하고 폭비는 크게 증가하여 형상지수가 크게 나타났다. 이는 본류와 지류가 합류되는 지점에서 형성되는 분리구역에 따른 퇴적이 점차 진행되어 통수능력의 저감이 발생되어 분리구역의 길이비보다 폭비가 대폭 증가하여 형상지수가 증대된 것으로 판단된다. 이러한 현상은 합류부의 통수능력의 저하로 인한 배수위의 현상이 야기된다.

Table 6은 이동상 하도에서의 합류각, 유량비, 준설 깊이비에 따른 형상지수의 관계식으로 결정계수는 0.833으로 높은 상관성을 보여주었다.

4. 결 론

본 연구는 지류가 유입하는 합류부에서 다양한 합류각과 유량비에 추가하여 본류의 준설로 인한 하상불일치에 의한 준설깊이비에 따른 두부침식의 양상과 합류부의 하상변화를 고려한 이동상 하도에서의 분리구역의 특성을 규명하였다. 수치모형은 CCHE2D를 사용하였고, 기존 실험결과와의 비교를 수행하여 모형의 적용성을 분석하였다. 분리구역은 지류가 합류되어진 직후 단면에서의 유속이 0(영)인 경계로 설정하였다. 분석결과는 다음과 같다.

1) 준설 깊이비가 작은 경우, 급경사 지점에서의 작은 유속과 이에 따른 작은 소류력으로 두부침식이 발생되지 않거나 그 크기가 미미하게 나타났다. 합류각, 유량

비, 준설 깊이비가 커질수록 지류와 본류와의 준설에 의한 하상의 불일치에 의한 급경사 구간에서의 유속과 소류력 증가로 두부침식 깊이비가 증가하였다.

2) 지류 상방향의 하상변동 분석을 통해 합류부 특성 변화에 따른 두부침식 최대깊이를 확인하였으며, 합류각, 유량비, 준설 깊이비 증가에 따라 천급점의 이동거리비는 전반적으로 증가하였다. 합류각, 준설 깊이비, 유량비에 따른 천급점 이동거리비의 관계식은 $x_r = 0.033\mathrm{dig} + 3.820 z_{dr} + 15.462 Q_r - 6.303$이며, 결정계수는 0.734이다.

3) 이동상 하도에서의 유량비와 합류각 증가에 따른 분리구역의 크기는 고정상 하도에서와 같은 양상으로 나타났다. 하지만 이동상 하도에서 준설 깊이비가 커질수록 분리구역의 길이비는 증가하나 그 차이가 미미하고, 폭비는 대폭 증가하여 형상지수는 크게 증가하였다. 이는 합류 지점에서 분리구역 형상지수의 증가에 따른 퇴적이 점차 진행되어 통수능력의 저감으로 본류에서의 배수위 현상이 예견된다.

4) 이동상 하도에서의 합류각, 유량비, 준설 깊이비에 따른 형상지수의 관계식은 $B_s/L_s = 0.002\mathrm{dig} + 0.096 z_{dr} + 0.314 Q_r - 0.152$이며, 결정계수는 0.833이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 지류하천 합류부 안정화 방안을 위한 연구 중 지류하천 대표구간 하상변동 모니터링 및 분석에 의해 수행되었습니다.

References

Best, J.L., and Reid, I. (1984). "Separation zone at open-channel junction." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1588-1594.

Brush, L.M., and Wolman, M.G. (1960). "Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study." *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 71, No. 1, pp. 59-74.

Choi, G.W., Ahn, K.H., and Jung, J.K. (2010). "Analysis of the characteristics of the river bed variation by flow direction changes at a channel junction." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 10, No. 5, pp. 117-124 (in Korean).

Frankel, K.L., Pazzaglia, F.J., and Vayghn, J.D.(2007). "Knickpoint evolution in a vertically bedded substrate, upstream-dipping terraces, and Atlantic slope bedrock channels." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 119, No.3/4, pp. 476-486.

Jang, C.L. (2012). "2-Dimensional numerical simulation of the behaviors of knickpoint in the channel with noncohesive materials." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 12, No. 6, pp. 259-265 (in Korean).

Ji, U., and Jang, E.K. (2014). "Numerical analysis of flow and bed changes due to tributary inflow variation at the confluence of the Namhan river and the Geumdang stream." *J. of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No.11, pp. 1027-1037 (in Korean).

Jia, Y., and Wang, S.S.Y. (2001). CCHE2D: Two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loosed bed. NCCHE-TR-2001-1, School of Engineering, The University of Mississippi, USA.

Kim, K.M. (2014). Numerical analysis of alluvial channel characteristics at confluent channel. M. Sc. thesis of Yeungnam University (in Korean).

Liu, T., Chen, L., and Fan, B. (2012). "Experimental study on flow pattern and sediment transportation at a 90° open-channel confluence." *International Journal of Sediment Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 178-187.

Modi, P.N., Ariel, P.D., and Dandekar, M.M. (1981). "Conformal mapping for channel junction flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 12, pp. 1713-1733.

Park, Y.S. (2003). The analysis of hydraulic characteristics depending upon the variation of discharge and approaching angle at channel junctions. Ph. D. dissertation of Incheon University (in Korean).

Ribeiro, M.L., Blanckaert, K., Roy, A.G., and Schleiss, A.J. (2012). "Flow and sediment dynamics in channel confluences." *Journal of the Geophysical Research*, Vol. 117, FO1035.

Schippa, L., and Pavan S. (2009). "Bed evolution numerical model for rapidly varying flow in natural streams." *Computers & Geosciences*, Vol. 35, pp. 390-402.

Taylor, E.H. (1944). "Flow characteristics at rectangular open-channel junction." *Journal of Hydraulic Engi-*

neering, ASCE, Vol. 10, No. 6, pp. 893-902.

Vasquez, J.A., Miller, R.G., and Steffler, P.M. (2006). Two-dimensional morphological simulation in transcritical flow. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005-Parker and Garcia(eds), pp. 253-258.

Wu, W. (2001). CCHE2D sediment transport model (version 2.1), NCHHE-TR-2001-3, School of Engineering, The University of Mississippi, USA.

Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000). "Nonuniform sediment transport in alluvial rivers." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434.

Zhang, Y., Wang, P., Wu, B., and Hou, S. (2015). "An experimental study of fluvial processes at asymmetrical river confluences with hyperconcentrated tributary flows." *Geomorphology*, Vol. 230, pp. 26-36.

paper number : 15-044
Received : 25 May 2015
Revised : 12 August 2015 / 9 September 2015
Accepted : 9 September 2015