



Estimation methods of maximum scour depth in steep gravel-bed bend channel

Cho, Jaewoong^{a, b} · Nam, A-Reum^c · Woo, Tae Young^d · Park, Sang Deog^{a*}

^aDept. of Civil Eng., Gangneung Wonju National University, Gangneung, Korea

^bDept. of Disaster Prevention, National Disaster Management Research Institute, 365, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44538, Korea

^cRiver&Tech Co., 1113-ho, Doosan Venture Digm, 415, Heungan-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, Korea

^dDept. of Institute of Technology, BAU Consultant Co., LTD. 10 Hakdongro24-gil, Gangnam, Seoul, Korea

Paper number: 15-101

Received: 6 December 2015; Revised: 12 January 2016 / 31 March 2016; Accepted: 31 March 2016

Abstract

The existing methods to estimate the maximum scour depth in the bend of steep gravel bed channel have been evaluated by the hydraulic movable-bed experiments. In the 90° bend steep-slope channel paved with the fluvial gravels which are uniform in size and have a mean diameter of 43mm, the maximum scour depths due to the flow discharge and the gradient of bed slope have been investigated and compared with the scour depth computed from the equations. The local scour has occurred in conditions that the bed slope is steeper than 0.02 and the F_r is greater than 0.95. Except Lacey's equation and Zeller's equation, the existing methods computing the maximum scour depth overestimate the maximum scour depth in the steep channel with the very coarse gravel bed. However, Lacey's equation with the bed material size and Zeller's equation considering the approach channel gradient and the bend angle may be relatively used to estimate the scour depth in bend of the steep gravel-bed river.

Keywords: Channel bend, Scour depth, Steep channel, Gravel riverbed, Hydraulic experiment

급경사 자갈하상 만곡수로의 최대세굴심 산정공식 평가

조재웅^{a, b} · 남아름^c · 우태영^d · 박상덕^{a*}

^a강릉원주대학교 토목공학과, ^b국립재난안전연구원 방재연구실, ^c(주)리버엔텍, ^d(주)바우컨설턴트 기술연구소

요 지

본 연구는 급경사 자갈하상 만곡수로의 이동상 수리실험을 이용하여 만곡부 최대세굴심 산정공식들의 적용성을 평가하였다. 평균입경 43mm의 하천자갈을 90° 만곡 급경사 개수로에 포설하고 유량과 하상경사에 따른 만곡부의 최대세굴심을 조사하고 세굴심 공식으로 산정한 최대세굴심과 비교하였다. 자갈하상 만곡부 국부세굴은 유입부의 하상경사 0.02이상 F_r 0.95이상에서 발생하였다. 이 수로에서 Lacey공식과 Zeller공식을 제외한 기존 세굴심 산정공식들은 최대세굴심을 과대 추정하는 것으로 나타났다. 하상재료를 고려한 Lacey공식과 접근경사와 만곡도를 반영한 Zeller공식은 급경사 자갈하상 만곡부의 최대세굴심 평가에 적용될 수 있는 것으로 판단된다.

핵심용어: 만곡부, 세굴심, 급경사 수로, 자갈하상, 수리실험

1. 서 론

하천은 유수에 의한 세굴, 침식, 퇴적 작용으로 다양한 형상을 이루며 끊임없이 변한다. 하천의 하상과 형태는 반복적으

로 변하는 특성이 있다. 하천의 평면 형태에 따라 직류하천, 다지하천, 곡류하천으로 하천을 구분한다. 곡류하천은 만곡 하천 또는 사행하천이라고도 하며 유로의 굴곡을 따라 소와 여울이 교대로 나타나기도 한다. 소와 여울은 하천유역의 지형 및 지질과 하천의 하상 및 유황을 반영하여 하천이 스스로 적응한 결과이다. 하천만곡은 홍수 시 외측에서 세굴과 내측에서 퇴적이 심화되기 때문에 만곡형상은 더 깊게 발달한다.

*Corresponding Author. Tel: +82-33-640-2417

E-mail: sdpark@gwnu.ac.kr (S. D. Park)

인간의 경제적 활동이 크게 증대되면서 늘어난 제방이나 보와 같은 기반시설의 설치는 하천의 자기조절 기능을 더욱 억제한다. 만곡부에 있는 제방이나 도로는 만곡 외측의 하상세굴에 의해 파괴될 수 있다. 따라서 하천 만곡부에서 하상의 세굴심을 파악하는 것은 기반시설의 안전설계에서 고려해야 할 중요한 요소의 하나이다.

하천 만곡부의 세굴심 평가에 대한 연구로는 Lacey (1930)와 Neill (1973)가 현장조사를 바탕으로 유량을 매개변수한 세굴심 공식을 제시하였으며, Blench (1969)는 하상의 유상이송을 세굴심에 관련시켰다. Zeller(1981)은 만곡부 외측에서 발생하는 세굴은 나선류 (spiral), 횡방향 흐름에 의해 발생한다고 보고 접근유속과 접근 경사, 만곡정도에 따른 만곡부에서의 세굴심 평가방법을 제시하였다. Mussetter는 (1994) 제방과 흐름이 평행할 때 제방을 따라 발생하는 세굴은 제방의 조도감소로 인해 국부적으로 증가된 유속에 의한 경계의 전단응력에 의해 증가하고, 국부세굴은 흐름의 방해로 발생하며, 와류와 흐름 가속에 의해 발생한다고 보고, 수심과 F_r , 그리고 충격각을 고려한 세굴심 산정 공식을 제시하였다.

국내에서는 Ko (1975)는 만곡유로에서 하상변동에 관한 연구를 하였으며, Song et al. (1994)은 유로만곡부의 횡방향 하상경사산정 모형에 관한 연구를 수행하였다. Yoon and Lee (1990)는 만곡수로에서 곡률반경 변화에 따른 흐름특성에 관

하여 연구한 바 있다. 하천의 교각과 같은 구조물 주변의 세굴심 평가에 대한 연구는 활발히 진행되었으나, 하천 만곡부의 세굴심 평가에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 급경사 자갈하상 만곡부의 이동상 수리실험을 통해 측정된 세굴심과 기존의 만곡부 국부세굴 공식에 의한 세굴심을 비교함으로써, 산지하천 만곡부에 적용 가능한 세굴심 산정 공식을 제시하고자 한다.

2. 세굴심 평가 방법

하천에서 총 세굴은 하상저하, 하상파에 의한 세굴, 국부세굴, 만곡세굴, 충격세굴 등 다양한 세굴요소들이 결합된 경우가 많으며 장기적인 하상변동과 단기적인 하상변동을 반영한다. 본 연구에서는 세굴에 대한 장기하상변동의 영향은 제외하며, 수심, 유속, 하상재료 등과 같은 특성변수로 이루어져 있는 세굴심 산정공식들 중에서 하천 만곡부의 세굴심 평가에 사용 가능성이 있는 8개의 방법을 선정하였다. 이 세굴심 산정 공식들은 지배적으로 사용된 독립변수에 따라 Table 2와 같이 유량, 유속 또는 Froude수, 수심, 하상재료의 직경으로 분류할 수 있다. 세굴심 산정공식은 대부분 경험식으로 하천경사, 하상재료, 유로형태 등의 조건별로 제시되고 있다.

Table 1. Equations for Scour Depths

Types	Equations	Feature and Application	Source
Discharge	$d_m = 0.47 \left(\frac{Q}{f} \right)^{0.33} \quad (6)$ <p> d_m : Mean depth at design discharge (ft) Q : Discharge (ft^3/s) $f = 1.76(D_{50})^{0.5}$ (Lacey's silt factor) D_{50} : Median diameter of bed materials (ft) </p>	Consideration of the empirical regime equation, Bureau	Lacey (1930)
	$\delta = K(q)^{0.24} \quad (2)$ <p> δ : Scour depth (ft) K : 2.45 q : Discharge per unit width ($ft^3/s/ft$) </p>	Should only used for wide sand-bed (Bureau)	Abbott (1963)
	$d_{f0} = \frac{q_f^{0.667}}{F_{b0}^{0.333}} \quad (3)$ <p> d_{f0} : Depth for zero-bed sediment transport(ft) q_f : Discharge per unit width ($ft^3/s/ft$) F_{b0} : Blench's zero-bed factor </p>	Consideration of the zero-bed sediment transport (Bureau)	Blench (1969)
	$d_f = d_m \left(\frac{q_f}{q_m} \right)^m \quad (4)$ <p> d_f : Scour depth below design floodwater level d_m : Mean flow depth q_f : Bankfull discharge per unit width q_m : Mean discharge per unit width m : Exponent varying from 0.67 for sand to 0.85 for coarse gravel </p>	Field measurement (Bureau)	Neill (1973)

Table 1. Equations for Scour Depths continued

Types	Equations	Feature and Application	Source
	$\frac{\delta}{Y_1} = 1.1 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.4} F_r^{0.33} \quad (5)$ <p> δ : Scour depth Y_1 : Depth of upstream a : Length of embankment </p>	Consideration of impinging from Equ. for bridge embankment (Clark County & Denver)	Liu et. al (1961)
Froude number	$\delta_{bs} = \frac{0.0685 Y_{max} V_m^{0.8}}{Y_h^{0.4} S_e^{0.3}} \times \left[2.1 \left(\frac{\sin^2(\alpha/2)}{\cos\alpha} \right)^{0.2} - 1 \right] \quad (6)$ <p> δ_{bs} : Bend-scour component of total scour depth (ft) = 0 when $r_c/T \geq 10.0$, or $\alpha \leq 17.8^\circ$ = computed value when $0.5 < r_c/T < 10.0$ or $17.8^\circ < \alpha < 60^\circ$ = computed value at $\alpha = 60^\circ$ when $r_c/T \leq 0.5$, or $\alpha \geq 60^\circ$ V_m : Mean velocity of flow upstream of bend (ft/s) Y_{max} : Maximum water depth of flow upstream of bend(ft) Y_h : Hydraulic depth flow upstream of bend (ft) S_e : Energy slope upstream of bend or bed slope for uniform flow condition(ft/ft), α : Angle formed by the projection of the channel centerline from the point of curvature to a point which meets a line tangent to the outer bank of the channel($^\circ$) </p>	Consideration of bend angle and bed slope (MCFCD)	Zeller (1981)
	$\frac{\delta}{Y} = (0.73 + 0.14\pi Y F_r^2) \cos\theta + F_r^{0.33} \sin\theta \quad (7)$ <p> δ : Scour depth (ft) Y : Hydraulic depth (ft) θ : Impingement angle </p>	Consideration of impinging angle (AMAFCA)	Mussetter (1994)
Water depth	$\delta = d_m \left(\frac{V_m}{V_c} - 1 \right) \quad (8)$ <p> δ : Scour depth d_m : Mean flow depth V_m : Mean velocity V_c : Velocity for incipient motion of bed materials </p>	Similar to the Blench equation for “zero-bed factor”, (Bureau)	
	$d_{max}/Y_{mean} = -4.2146(W/R_c) + 5.06 W/R_c + 1.1571 \quad (9)$ <p> d_{max} : Maximum depth in bend Y_{mean} : Mean depth in upstream W : Water-surface width R_c : Center-line radius of bend </p>	for sand bed (USACE)	
Bed material	$\delta = 6.5 D_{50}^{-0.11} \text{ (if } D_{50} > 0.005ft \text{)} \quad (10)$ $\delta = 12ft \text{ (if } D_{50} < 0.005ft \text{)}$ <p> δ : Probable maximum scour depth (ft) D_{50} : Median diameter of bed materials </p>	Determined by bed material diameter, (FHA)	

2.1 유량-세굴심

세굴심의 추정에 단위폭당 유량이 사용된 것은 유량이 세굴하상까지의 수심과 특정 관계(regime)를 가진다는 사실에 주목하면서 시작되었다. Lacey (1930)는 실험으로 하상입경 D_{50} 에 따른 실효계수 f 를 고려한 세굴이 발생한 안정하상까지의 수심과 유량의 관계식 Eq. (1)을 제시하였다. 이 수심에서 평균수심을 빼면 세굴의 깊이이다. Abbott (1963)는 모래 하천의 세굴심 자료를 기반으로 Eq. (2)를 제안하였다. 하상의 유사이송을 고려한 Blench(1969)는 유사이송에 의해 발생한 원하상(zero-bed)의 수심을 구할 수 있는 Eq. (3)을 제시하였다.

여기서 원하상계수(zero-bed factor) F_{b0} 는 하상재료의

평균입경에 따라 증가한다(Pemberton and Lara, 1984). Neill(1973)은 현장 측정 자료를 이용하여 무차원 만제유량과 수심을 이용하여 설계수면으로부터 세굴된 하상까지의 깊이를 추정할 수 있는 Eq. (4)를 제시하였다. m 은 모래하상보다 자갈하상에서 더 크다. Perberon and Lara(1984)는 Eqs. (1), (3), (4)에서 구한 수심을 이용하여 세굴심을 산정할 수 있도록 통합한 수심과 세굴심의 안정관계를 제시하였으며 Eq. (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$d_s = Z d_{rg} \quad (11)$$

여기서 d_{rg} 은 안정한 세굴하상의 수심으로 Eqs. (1),

(3), (4)에서 구하며 Z 는 안정하상의 계수(zero-bed regime factor)로서 만곡의 정도에 따라 다르며 Table 1과 같다.

Table 2. Z Factors for Regime Equation (Pemberton and Lara, 1984)

Condition	Value of Z		
	Neill	Lacey	Blench
Straight Reach	0.5	0.25	0.6
Moderate Bend	0.6	0.5	0.6
Severe Bend	0.7	0.75	0.6
Right Angle Bend		1.0	1.25
Vertical Rock Bank or Wall		1.25	

2.2 F_r -세굴심

Liu et al.(1961)는 교량-제방 세굴에 대한 식으로부터 제방에 유수력으로 인해 발생하는 식을 유도하여 세굴심과 F_r 의 관계를 Eq. (5)와 같이 제시하였다. Zeller (1981)는 만곡부 외측에서 발생하는 세굴은 나선류(spiral)와 횡방향 흐름에 의해 발생한다고 보고 Eq. (6)을 제안하였으며, MCFCD (Maricopa County Flood Control District)에서 채택하였다. 이는 Eq. (12)와 같이 만곡부의 접근수로에서 F_r 의 관계로 나타낼 수 있기 때문에 이 식은 만곡부의 수층각도 α 와 하상경사 S_c 를 고려하고 있다.

$$\frac{\delta_{bs}}{Y_{max}} = 0.5768S_c^{0.3} \left[\left(\frac{\sin^2(\alpha/2)}{\cos\alpha} \right)^{0.2} - 0.476 \right] F_r^{0.8} \quad (12)$$

여기서, δ_{bs} 는 만곡세굴심이고 Y_{max} 와 S_c 는 만곡 접근수로의 최대수심과 하상경사이다. 만곡 수층각도 α 는 만곡 접근수로의 중앙선과 만곡부 외측곡선이 만나는 지점의 접선과 이루는 각도($^\circ$)이다.

유수력이 만곡제방에 가하는 수층각도를 고려한 Zeller와 같이 Mussetter (1994)는 유수가 직선제방에 어떤 각도로 수층을 가하는 경우의 세굴을 고려하여 Eq. (7)을 제시하였다. 이 식은 AMAFCA (Albuquerque Metropolitan Arroyo Flood Control Authority)의 만곡부 세굴심 평가방법으로 채택되었다.

2.3 수심-세굴심

USBR (United States Bureau of Reclamation)에서는 사용하는 세굴심 산정공식은 유사의 초기운동을 위한 한계유속 V_c 와 유수의 평균유속의 차이를 평균유속으로 나눈 값을 가중계수로 하는 수심과 세굴심의 관계를 나타내며 Eq. (8)과 같다. 이는 무차원 세굴심과 무차원 유효유

속 V_e 의 관계, 즉 $\delta/d_m = (V_m - V_c)/V_c = V_e/V_c$ 로 나타낼 수 있으므로 평균수심에 대한 세굴심의 비가 평균유속에 대한 유효유속의 비와 같다는 것을 의미한다. 유사이동의 한계유속을 고려한 식은 원하상계수를 사용한 Blench 공식과 유사하며, 한계유속은 유사의 크기와 수심에 따라 다르다(Pemberton and Lara, 1984). USACE (U.S. Army of Corps of Engineers)는 사석제방 모래하천의 만곡부에서 수면폭과 중앙곡률반경의 비인 무차원 수심에 따라 최대세굴수심과 접근수로 평균수심의 비인 무차원 세굴심이 비선형적으로 증가하는 것을 제시한 바 있다.

2.4 하상재료-세굴심

하천 만곡부에서 세굴심은 하상재료에 따라 발생할 수 있는 최대 크기가 정해져 있다고 보는 것으로서 FHA(Federal Highway Administration)에서는 하상재료의 평균입경을 사용한 세굴심 산정식 Eq. (10)을 사용하였다. 하상재료는 하천의 유사이송능력과 유역이 하천에 공급하게 되는 유사공급능력을 반영하기 때문에 하천의 수리특성을 나타낼 수 있는 변수이다. 그러나 하상재료의 평균입경에 영향을 미치는 수리요인이 너무 많고 간접적이라는 한계가 있기 때문에 하천의 특정 만곡부에서 장기간 조사된 결과로 구해진 현장 최적화된 식이 되어야 한다.

3. 수리실험

3.1 수리실험 시설

만곡부에서 세굴심을 측정하기 위한 이동상 개수로 실험 장치는 물 순환식 개수로이며 고수조, 개수로, 하류부 수위조 절장치, 유사포집장치, 저수조, 펌프로 구성되어있으며, Fig. 1과 같다. 고수조에는 흐름 안정을 위한 다공판을 설치하였으며, 저수조에는 수로에서 이송된 유사를 채집할 수 있는 유사 포집장치와 유사가 펌프에 유입되지 않도록 흡입관 전면에 스크린을 설치하였다. 개수로의 만곡부는 90° 에 평균곡률반경 2.05m로 굽이지게 하였다. 만곡부 상류에 8.6m의 유입부, 외측 5.1m와 내측 2.9m 길이의 만곡부, 만곡부 하류에 6.1m의 유출부로 수로를 구성하였다. 펌프는 최대 $0.25m^3/s$ 까지 실험용수의 공급이 가능하다.



Fig. 1. Experiment Equipment

3.2 실험 조건 및 방법

실험에 사용된 하상재료는 평균입경 43mm인 강자갈을 이용하였으며, 수로에 30cm의 두께로 깔았고 하상경사 조건을 만족하도록 표면을 정리하였다. 실험재료의 입경분포는 Fig. 2와 같다. 실험유량의 초기 공급에 의해 발생할 수 있는 실험하상의 세굴방지하기 위하여 하류단 수위조절장치를 올려놓은 상태에서 소량의 실험유량을 공급해 실험수로 하류단부터 물을 채우기 시작하였다. 실험하상이 물에 충분히 잠긴 이후 하류단 수위조절 장치를 이용하여 등류상태로 유지한 후 실험을 시작하였다. 실험시간은 흐름이 시작되는 시간부터 2시간동안 수로 전 구간에서 유사이동이 없는 시간까지로 하였으며, 실험조건은 Table 3과 같다. 각 실험조건별 하상고를 실험 시작 전과 종료 후에 조사하여 최대세굴심을 측정하였다. 실험유량은 최종단계에 이르기까지 단계적으로 증가시키고 각 단계별 수심을 조사하였다.

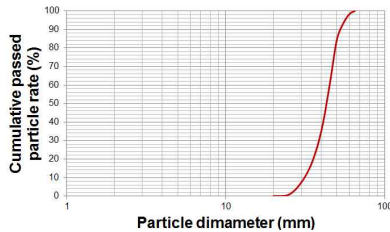


Fig. 2. Grain Size Distribution

Table 3. Experimental Conditions

Classify	Condition		
Bend (°)	90		
Slope (°)	1/50 or 1/100 (Upstream, Bend, Downstream)		
Channel width (m)	1.40		
Channel length (m)	Upstream	8.6	
	Bend	Outer	Inner
		5.1	2.9
Downstream	6.1		
Outer curvature (m)	3.25		
Inner curvature (m)	1.85		
Discharge (l/s)	77 ~ 235		
Observation Point	Upstream	3 point (20m, 18m, 17m)	
	Bend	19 point (No.0~No.18 - interval 5°)	
	Downstream	4 point (8m, 7m, 5m, 3m)	

Table 4. Experimental Results

No.	Bed Slope	Q(ℓ/s)	V _m (m/s)	F _r	δ _{max} (cm)
Case 1	Up stream : 1/50 Bend : 1/50 Down stream : 1/50	76	0.90	1.17	N
Case 2		77	0.77	0.92	N
Case 3		108.5	0.88	0.95	N
Case 4		112.6	0.88	0.93	N
Case 5		124.5	0.97	1.02	N
Case 6		164.0	1.01	0.95	4.0
Case 7		190.0	1.19	1.12	16.4
Case 8		190.7	1.14	1.01	S
Case 9		197.5	1.66	1.85	9.4
Case 10		210.0	1.74	1.74	S
Case 11		211.4	1.74	1.74	S
Case 12		211.8	1.74	1.89	17.8
Case 13	Up stream : 1/50 Bend : 1/50 Down stream : 1/100	96.3	0.80	0.87	N
Case 14		120.9	0.96	1.02	N
Case 15		148.8	1.04	1.04	N
Case 16		187.8	1.17	1.11	1.5
Case 17		210.3	1.15	1.01	4.6
Case 18		230.5	1.30	1.16	13.5
Case 19	Up stream : 1/50 Bend : 1/100 Down stream : 1/100	92.3	0.88	1.02	N
Case 20		117.5	0.93	0.99	N
Case 21		146.0	1.03	1.03	N
Case 22		183.0	1.12	1.04	N
Case 23		203.6	1.19	1.09	N
Case 24		223.0	1.24	1.10	N
Case 25		233.0	1.23	1.07	N
Case 26		237.2	1.25	1.08	1.2
Case 27		102.5	0.78	0.81	N
Case 28		113.7	0.81	0.81	N
Case 29	Up stream : 1/100 Bend : 1/100 Down stream : 1/100	139.4	0.88	0.83	N
Case 30		175.0	0.94	0.83	N
Case 31		183.4	0.96	0.83	N
Case 32		202.5	1.03	0.88	N
Case 33		218.0	1.05	0.87	N
Case 34		229.6	1.07	0.88	N
Case 35	231.9	1.07	0.87	N	

※ N : non-scoured, S : scoured

4. 결과 및 분석

4.1 실험결과

실험결과는 Table 4와 같다. 여기서 Q는 실험유량이고 V_m과 F_r은 만곡부의 직상류 유입부에서 평균유속과 Froude수이다. δ_{max}는 만곡부의 최대세굴심이다. 세굴이 발생하는 기본 조건은 만곡부에 접근하는 유입부의 경사가 0.02이고 유속이 1m/s이상인 경우로서 F_r 수가 0.95이상에서 발생하였다 (Fig. 3). 경사조건에 따른 만곡부의 접근유속과 접근수심의 관계는 Fig. 4와 같다. 경사에 따른 최대 세굴심과 접근유속, 접근 유속과 접근수심의 관계에서 세굴 발생의 주요 인자인 접근경사는 접근유속과 접근수심으로 표현할 수 있으며 것으로 판단되며, 기존에 제안된 공식들에서 주요 인자로 채택한 접근수심, F_r 수 등은 이러한 영향을 고려한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 최대 세굴심을 접근수심으로 나눈 무차원 세굴심 (δ_{max}/Y_m)와 Re 수의 관계를 나타낸 것이다. Re 수가 약 400,000 이상일 때 세굴이 발생하여 증가하는 경향이 있으나 Re 수가 그 이상으로 크다고 하더라도 유입부의 하상경사가 0.02보다 작거나 F_r 수가 0.95 미만인 경우에는 세굴이 발생하지 않았다. 유입부, 만곡부, 유출부의 하상경사 조합에 따라 세굴심이 증가하는 경향이 다르게 나타나고 세굴이 발생하는 최저 F_r 수가 존재하는 것으로 볼 때 자갈하상 만곡부의 세굴은 Re 수보다 하상경사나 F_r 수가 더 지배적인 변수라고 생각된다.

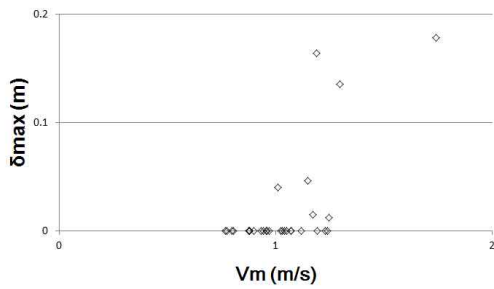


Fig. 3. Maximum Scour Depth δ_{max} Versus Mean Flow Velocity V_m

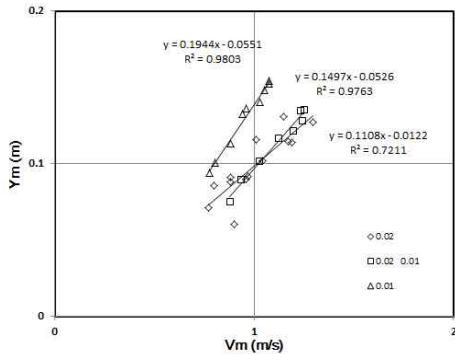


Fig. 4. Approaching Flow Depth Y_m Versus Mean Flow Velocity V_m

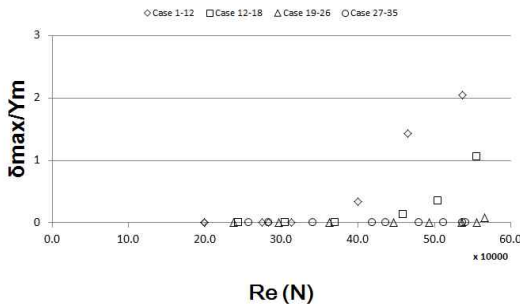


Fig. 5. Dimensionless Maximum Scour Depth δ_{max}/Y_m Versus Reynolds Number $Re(N)$

4.2 기존 공식의 적용성

기존 공식과의 비교 분석은 각 기관에서 채택하고 있는 공식 중 AMAFCA에서 제시하는 Mussetter(1994), MCFCD의 Zeller(1981), Clark and Denver의 Liu(1961), USBR의 Lacey(1930)과 Abbott(1963), USACE에서 제시하는 방법을 이용하여 비교하였다. Fig. 6은 접근유속 V_m 와 최대세굴심 δ_{max} 의 관계를 나타내고, Fig. 7은 단위폭당 유량 Q/W 과 최대세굴심 δ_{max} 의 관계를 나타낸다. 여기서 기존의 공식들은 세굴심을 매우 크게 산정하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 관측된 세굴심은 접근 경사 0.02 이상, 접근유속 1m/s 이상인 경우에만 발생하는 것으로 나타났다. Mussetter 공식은 접근수심과 F_r 수, 흐름이 제방에 부딪히는 충격각을 고려한 것으로 만곡부에서의 흐름 충격과는 다르며, 이로 인하여 실제로 매우 큰 세굴심을 산정한다.

Zeller공식은 접근수심, 만곡에 의한 접근각, 접근유속 등을 고려함으로써, 실험과 가장 유사하게 세굴심을 산정하였다. Lacey(1930)공식을 사용한 경우 단위폭당 유량, 즉 하천 폭과 수심, 유속을 고려하고 계수를 뒀으므로 실험에서 관측한 값과 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, Abbott 공식은 자갈하상이 아닌 모래 하상에 대한 것으로 실험에서 관측한 세굴심보다 매우 큰 값을 산정한다. Liu 방법은 접근수심과 F_r 수를 고려하나 만곡각 또는 충격각 등을 고려하지 않으며, 일반적인 제방 또는 만곡부의 세굴심보다는 교각 주위의 세굴심을 평가하기 위한 것으로 측정값보다 매우 큰 세굴심을 산정한다. USACE 방법은 사석 제방의 모래하상에 대한 세굴심을 평가하기 위한 것으로 자갈하상인 실험에서 관측된 세굴심보다 큰 값을 산정한다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 최대세굴심은 만곡부의 접근유속 V_m 과 단위폭당 유량 Q/W 에 따라 증가하는데 Abbott공식이 이들 변수에 의한 세굴심 민감도가 가장 크며 대부분의 세굴심 산정공식이 실험보다 세굴심 민감도보다도 더 큰 것으로 나타났다. 이는 자갈하상 만곡부의 세굴심에 대한 수리학적 민감도가 낮다는 것을 의미한다.

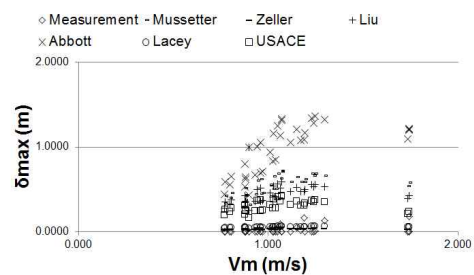


Fig. 6. Comparison of Maximum Scour Depth δ_{max} with V_m by 6 Methods and Measurement

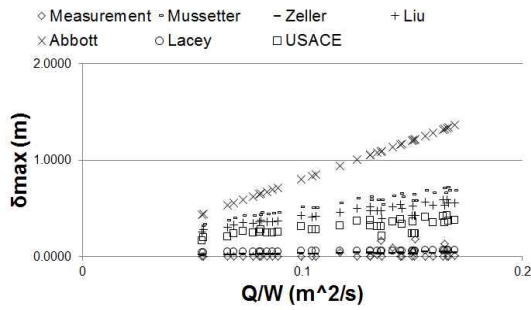


Fig. 7. Comparison of Maximum Scour Depth δ_{max} with Q/W by 6 Methods with Measurement

Fig. 8은 측정결과와 각 공식으로부터 산정한 최대세굴심을 비교한 것이다. Mussetter, Liu, Abbott 공식은 대부분 측정값에 비해 5배 이상 크게 세굴심을 추정하는 것으로 나타났다. 특히, 이 공식들은 실험 시 세굴이 발생하지 않는 조건에 대해서도 세굴을 예측하였다. 이 같은 결과는 세굴심 산정공식들에 세굴발생한계조건을 반영하지 않기 때문이다. USACE 방법은 모래하상에서 수면폭과 중앙곡률반경의 비인 무차원 수심과 세굴심과 접근수로 평균수심의 비인 무차원 세굴심의 관계를 나타낸 Eq. (9)를 이용한다. 따라서 이 방법에 의한 세굴심이 측정 세굴심과 크게 다른 경향을 나타내는 것은 본 연구의 수리실험 조건인 자갈하상과 달리 모래하상에 대해 개발된 것이기 때문으로 판단된다. F_r 수가 1.12이상으로 큰 경우를 제외하면 Zeller 공식과 Lacey 공식이 다른 공식보다 세굴심 산정에 더 적용성이 우수한 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 검토한 모든 공식들은 자갈하상 급경사수로에서 F_r 수가 0.8이상으로 큰 흐름의 경우 세굴심 변화의 폭이 실제와는 달리 매우 작기 때문에 이를 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

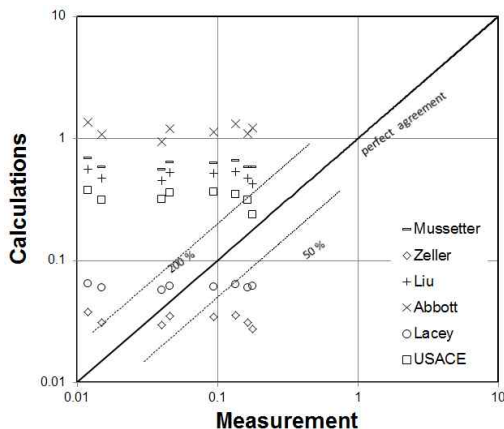


Fig. 8. Conformity of δ_{max} by Calculation and Measurement

Table 5. Computed Scour Depths under Experimental Conditions Which Local Scour Have Not Occurred

Condition		Method	Range of δ_{max} (m)
Slope (from upstream)	Range of Q/W		
1/50, 1/50, 1/50	0.054~0.088	Mussetter	0.317~0.455
		Zeller	0.014~0.023
		Liu	0.254~0.369
		Abbott	0.436~0.714
		Lacey	0.044~0.052
1/50, 1/50, 1/100	0.068~0.106	Mussetter	0.400~0.510
		Zeller	0.020~0.026
		Liu	0.328~0.413
		Abbott	0.552~0.854
		Lacey	0.047~0.055
1/50, 1/100, 1/100	0.065~0.166	Mussetter	0.373~0.683
		Zeller	0.018~0.037
		Liu	0.302~0.553
		Abbott	0.529~1.337
		Lacey	0.047~0.064
1/100, 1/100, 1/100	0.073~0.165	USACE	0.206~0.372
		Mussetter	0.427~0.719
		Zeller	0.026~0.049
		Liu	0.351~0.590
		Abbott	0.588~1.331
		Lacey	0.048~0.063
		USACE	0.259~0.424

Table 5는 세굴이 발생하지 않은 조건에서 각 공식으로 산정한 세굴심의 범위를 나타낸 것이다. Mussetter, Liu, Abbott, USACE 공식으로 산정한 세굴심은 0.165m ~ 1.337m로서 세굴이 매우 크다. 특히 이 중에서도 모래하상에서 개발된 Abbott 공식에 의한 세굴심이 가장 큰 것으로 산정되었다. 이는 자갈과 모래의 한계이동속도의 차이 때문인 것으로 생각된다. Zeller와 Lacey 공식에 의한 세굴심은 0.014m ~ 0.064m의 범위를 나타내고 있어서 비교적 작게 산정되었다. 이상과 같이 실험 시 세굴심이 발생하지 않더라도 각 공식을 적용하면 세굴이 발생하는 것으로 계산된다. 이것은 각 공식들이 자갈에 대한 세굴의 한계조건을 포함하지 못하기 때문으로 판단된다.

5. 결론

급경사 자갈하상 만곡부에 대한 이동상 수리실험에서 만곡부의 세굴은 접근경사가 0.02 이상이고, 접근유속이 1m/s 이상일 때 발생하였다. 그 세굴심은 유입부의 하상경사와 F_r 수에 따라 달라졌다. 기존의 세굴심 평가 공식들은 하상재료, 만곡정도, 하상경사 등 다양한 조건에 따라 큰 편차를 나타낸다. Abbott 공식과 Mussetter 공식은 자갈하상 급경사 수로의 만곡부 세굴심에 적용성이 없다. 그러나 Mussetter 공식은 만

곡에 접근하는 흐름의 충격각을 도입하면 그 적용성이 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 급경사 자갈하상 만곡부 세굴심 평가에 적용성이 있는 방법은 유량과 하상재료를 고려한 Lacey 공식과, 접근경사와 만곡각도를 반영한 Zeller 공식인 것으로 나타났다. 기존 공식들은 자갈에 대한 세굴한계조건을 고려하지 못하기 때문에 유속이나 단위폭당 유량이 작더라도 국부 세굴이 발생하는 비현실적인 면이 있다. 기존 공식은 만곡도를 고정하고 단일 하상재료를 가진 만곡수로 세굴심에 대한 적용성을 평가한 것이지만 자갈하상에 대한 적용성의 한계를 드러낸다. 그러나 수로의 경사가 0.02 이상인 자갈하상의 90° 만곡부에서 세굴심을 평가하고자 한다면 Lacey 공식과 Zeller 공식을 적용하는 것이 보다 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Blench, T. (1969), *Mobile-Bed Fluviology*, University of Alberta Press, Edmonton.
- Brown, S.A., and E.S. Clyde (1989), *Design of Riprap Revetment*, Hydraulic Engineering Circular No. 11, FHWA-IP-89-016, Prepared for the Federal Highway Administration, Washington, D.C..
- Ko, J.U. (1975), "A Study on fluvial phenomena in the Bended Alluvial Rivers", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 8, No. 2, pp.75-80.
- Lacey, G., *Stable Channels in Alluvium, Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, v. 229., 1930.
- Lane, E. W. (1957), *A Study of the Shape of Channels Formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material*, Missouri River Division Sediments Series No. 9, U.S. Army Engineer Division, Missouri River, Corps of Engineers, Omaha, Nebraska.
- Langbein, W.B. and L.B. Leopold (1996), *River Meanders - Theory of Minimum Variance*, USGS Professional Paper 422-H.
- Laursen, E.M. (1960), Scour at Bridge Crossings, May, *Journal Hydraulic Division*, ASCE, v. 92, No. HY3.
- Leopold, L.B., and M.G. Wolman (1960), River Meanders, *Geologic Society of America Bulletin*, v. 32, pp. 769-794.
- Liu, H.K., F.M. Chang, and M.M. Skinner (1961), *Effect of Bridge Construction on Scour and Backwater*, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Report Number CER60HKL22.
- Mussetter, R. A., Lagasse, P.F., Harvey, M.D., and Anderson, C.E. (1994), *Sediment and Erosion Design Guide*, November, prepared for the Albuquerque Metropolitan Arroyo Flood Control Authority, RCE Reference Number 90-560.
- Pemberton, E.L. and Lara, J.M. (1984). *Computing Degradation and Local Scour*, Technical Guideline for Bureau of Reclamation, Engineering and Research Centre, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA.
- Richardson, E.V., L.J. Harrison, and S.R. Davis (1991), *Evaluating Scour at Bridges*, FHWA-IP-90-0 17, Hydraulic Engineering Circular No. 18, U. S. Department of Transportation, FHWA, Turner Fairbanks Highway Research Center, McLean, Virginia.
- Simons, Li & Associates, Inc. (1989a), *Design Guidelines & Criteria, Channels & Hydraulic Structures on Sandy Soil*, June, prepared for Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado and The City of Aurora, Colorado.
- Simons, Li & Associates, Inc. (1989b), *Standards Manual for Drainage Design and Floodplain Management in Tucson, Arizona*, December, prepared for the City of Tucson Department of Transportation, Engineering Division.
- Song, J.W. Choi, I.H., and Kim, J.H (1994)., "A Study on Selected Transverse Bed Slope Models in Channel Bend", *Journal of The Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp.1395-1404.
- U.S. Army Corps of Engineers (1993), *Velocity and Scour Prediction in River Bends*, Waterways Experiment Station.
- Yoon, S.E., Lee, J.T. (1990), "Flow Characteristics for the Variation of Radius of Curvature in Open Channel Bends", *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 23, No. 3, pp.435-444.
- Zeller, M.E. (1981), *Scour Depth Formula for Estimation of Toe Protection Against General Scour*, Pima County Department of Transportation and Flood Control District, Tucson, Arizona.