

# 만곡부 교각세굴실 ]에 의한 흐름특성 연구

○김지호\*, 최인호\*\*, 송재우\*\*\*

## 1. 서론

일반적으로 사행하천의 만곡부 흐름은 곡률반경의 변화에 의해서 이차류가 발생함으로서 횡방향 하상경사나 횡방향 수면경사가 야기된다. 이러한 흐름의 변화는 양안에 침식과 퇴적을 발생시키므로 1879년에 사행이론에 관한 Thomson의 발표이후 많은 수공학자들에 의하여 지속적인 연구가 이루어졌으며, Englund<sup>2)</sup>, Ikeda<sup>3)</sup>, Kikkawa<sup>5)</sup>, Odgaard<sup>6),7)</sup>, Parker<sup>8)</sup>, Yen<sup>14)</sup>, Zimmermann과 Kennedy<sup>15)</sup>, Vadnal(1985), Johannesson(1988)등이 만곡유로의 하상변동에 관하여 연구를 계속해오고 있다.

또한 직류부에서의 교각세굴에 관한 연구들은 1873년에 Durand-Claye가 실험한 이후로 Baker<sup>8)</sup>, Shen<sup>13)</sup>, Breusers<sup>1)</sup>, Jain과 Fischer<sup>4)</sup>, Peggy<sup>9)</sup>, Raudkivi와 Ettema<sup>10),11),12)</sup> 등에 의해 지속적으로 연구되어 왔지만 유로만곡부에서 교각세굴에 관한 연구는 미흡한 실정이며 이는 복잡한 만곡부의 흐름특성이 정확히 구명되지 않았을 뿐 아니라 일반적으로 만곡부에 교각을 설치하지 않도록 규정해 놓았기 때문으로 사료된다. 그러나 실제하천의 경우 대부분이 사행하천이며, 지형특성상 유로 만곡부에 교각이 가설된 경우도 많이 있으므로 유로만곡부에서의 교각에 의한 하상변화나 세굴심등을 예측할 수 있는 방법을 개발하는 것이 시급하다 하겠다.

본 연구는 180도 만곡부 모형실험을 통하여 만곡부의 흐름특성을 구명하고 최대 횡방향 하상경사가 발생하는 단면에 교각을 설치하여 그에 따른 흐름특성의 변화와 세굴심을 제시함으로써 만곡부의 교각설치시에 기초자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 기본이론

### 2.1 횡방향 하상경사

만곡부내에서 하상형의 변화를 파악하기 위해서 횡방향하상경사를 실측한 후 예측식과 비교하기 위한 일반식을 나타내면 다음과 같으며  $h$  는 수심이고  $r$  은 중심선 곡률반경이다.

$$S_t = K \frac{h}{r} \quad (1)$$

표 1. 횡방향하상경사식의 비례계수 K

횡방향 하상경사에측식	비례계수	횡방향하상경사 인자		
		h/r	비례계수 K	
			$F_D$	n
Englund식 (이하 ENG식)	$K = 7\mu$	○	×	×
Van Bendegom식 (이하 VAN식)	$K = 0.0585 F_D^2$	○	○	×
Kikkawa와 Ikeda식 (이하 KIK식)	$K = (2.75 - 4.35 \frac{u_*}{u}) f_v^2 F_D$	○	○	○
Zimmermann과 Kennedy식 (이하 ZIM식)	$K = (\frac{\alpha}{2}) N F_D^2$ 여기서, $N = \frac{(n+1)}{n(n+2)}$	○	○	○

\* 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\* 서일전문대학 토목과 조교수

\*\*\* 홍익대학교 토목공학과 교수

식1에 제시된 바와 같이 횡방향 하상경사를 예측하는 식들은 수심 h와 곡률반경 r의 비에 비례한다는 점에서 유사점을 보이며 모형사이의 차는 비례계수 K로 나타나므로 표1에 각각의 예측식들에서 K값과 지배인자를 나타내었다.

표에서 인자들은  $\mu$  : Coulomb의 마찰계수,  $F_D = u/\sqrt{((\rho_s - \rho)/\rho)gD_{50}}$  : 입자 Froude수,  $u$  : 유속,  $\rho_s$  : 입자의 밀도,  $\rho$  : 물의 밀도,  $g$  : 중력가속도,  $D_{50}$  : 중앙입경,  $f$  : 마찰계수,  $\alpha$  : 입자투영비,  $n = x\sqrt{8/f}$  : 지수,  $\tau_*$  : shield소류력,  $P$  : 하상공극비,  $u_*$  : 마찰속도이다.

## 2.2 교각세굴공식

표2에는 본 만곡부 모형실험에서 얻어진 세굴심을 비교하기 위해서 세굴심 예측식들을 정리하여 나타내었다.

표2. 세굴심 예측식

제안자	공식	비고
CSU식 (이하 CSU식)	$d_s = 2.0 y K_1 K_2 K_3 (b/y)^{0.65} F^{0.43}$	
Breusers 등의 식 (이하 BRE식)	$d_s = bf K_1 K_2 [2 \tanh(y/b)]$	
Shen 등의 식 (이하 SHE식)	$d_s = 0.00022 Re^{0.619}$	
Laursen 과 Toch의 식 (이하 LAT식)	$d_s = 1.35 b^{0.7} y^{0.3}$	

위의 표에 제시된 예측식들에 들어가는 인자들에 대한 설명은 다음과 같다.

CSU식(이하 CSU식)에서  $d_s$  = 세굴심,  $y$  = 교각 상류 수심,  $K_1$  = 교각 형상 보정계수,  $K_2$  = 흐름 입사각 보정계수,  $K_3$  = 하상조건 보정계수,  $b$  = 교각폭,  $F$  = Froude 수이다.

Breusers의 식(이하 BRE식)에서  $V/V_c$ 의 관계에 의해  $f$ 값이 영향을 받으며  $K_1$ 과  $K_2$ 는 CSU식과 동일하다.

$$V/V_c \geq 0.5 \text{에 대해 } f = 0 \quad (2a)$$

$$0.5 < V/V_c \leq 1 \text{에 대해 } f = 2 V/V_c - 1 \quad (2b)$$

$$V/V_c \geq 1 \text{에 대해 } f = 1 \quad (2c)$$

Shen의 식(이하 SHE)에서  $Re = V(b/2)/\nu$  이고 동적세굴에 대해서는 사용할 때는 주의를 요한다고 하였으며 이 경우 Larras(1963)의 예측식 ( $d_s = 1.05 b^{0.75}$ )사용하도록 권고하였다.

## 3. 수리모형실험

본 연구에서 사용된 수리모형의 제원은 그림1에 나타내었으며 그림에서 보는 바와 같이 중심선 곡률반경이 2.5m인 180도 만곡부와 두 개의 유입, 유출직류부를 갖는다.

흐름특성 실험시 횡방향하상경사와 유속분포는 만곡부 0도지점에서 30도 간격으로 7개 단면에서 측정하였으며, 만곡부에서 최대 횡방향 하상경사가 발생하는 지점과 만곡부 진입하기 전의 직류부에 대해 원형교각을 세워 교각세굴실험을 수행하였다.

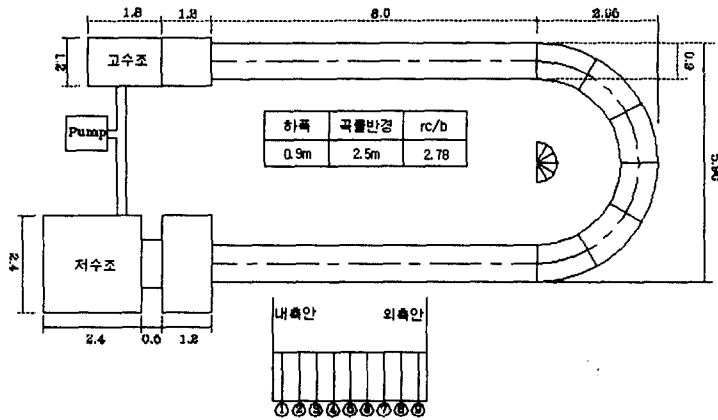


그림 1. 모형실험제원

### 3.1 유속분포

본 실험에서 나타난 흐름방향 유속분포도는 아래 그림2에 제시하였다.

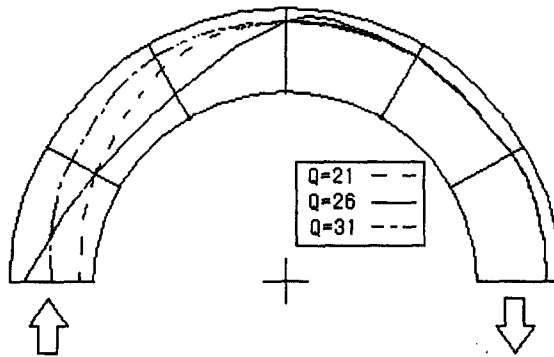


그림2. 유속분포도

그림2에서 보듯이 최대유속선은 만곡부로 진입하면서 내측으로 편기되다가 90도를 지나면서 외측으로 편기되어 만곡부 밖으로 유출되었다.

### 3.2 횡방향 하상경사

그림3에 종방향 및 횡방향하상경사의 변화를 도시하였으며 최대횡방향 하상경사는 만곡부의 정점을 지나서 150도 지점에서 발생하였다.

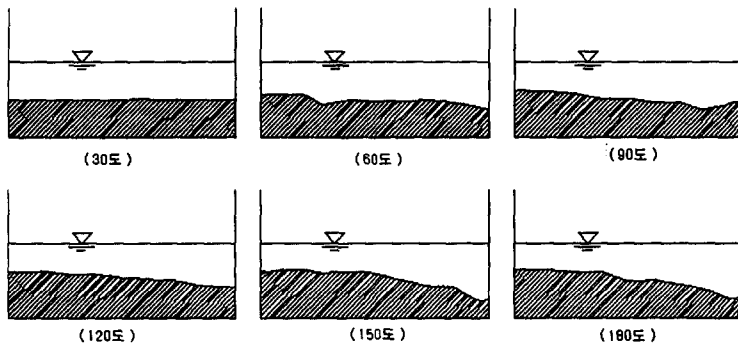
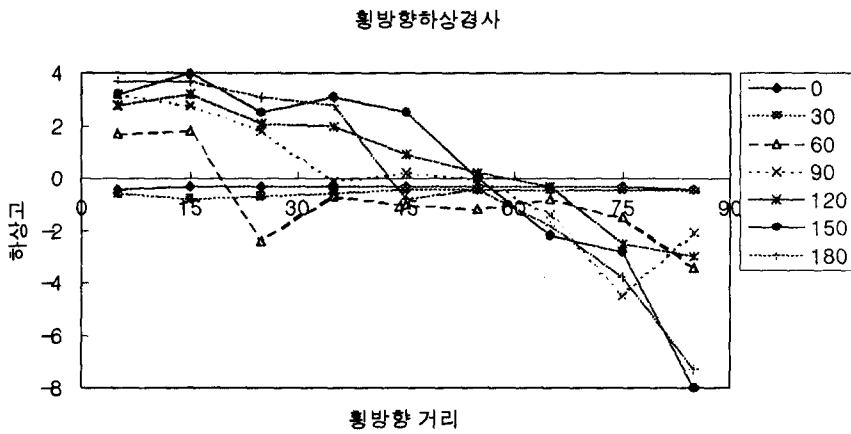
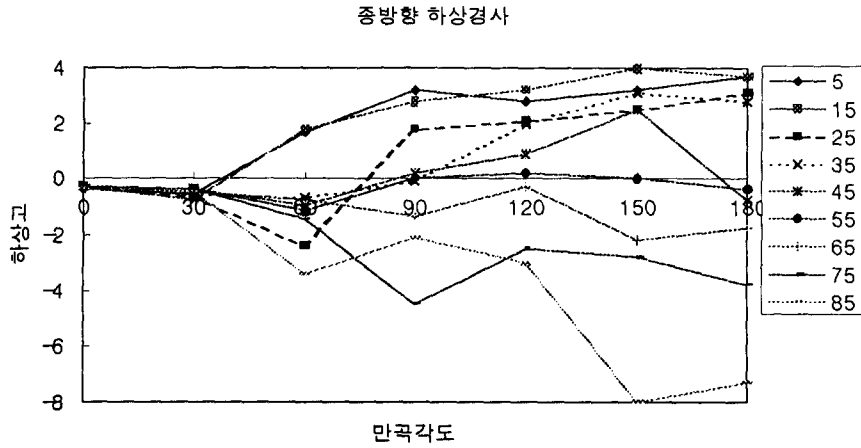


그림 3. 중방향 및 횡방향 하상경사 변화

표3에는 실험에 의해 얻어진 수리량을 이용하여 실측 횡방향하상경사치와 예측치를 비교하여 나타내었다.

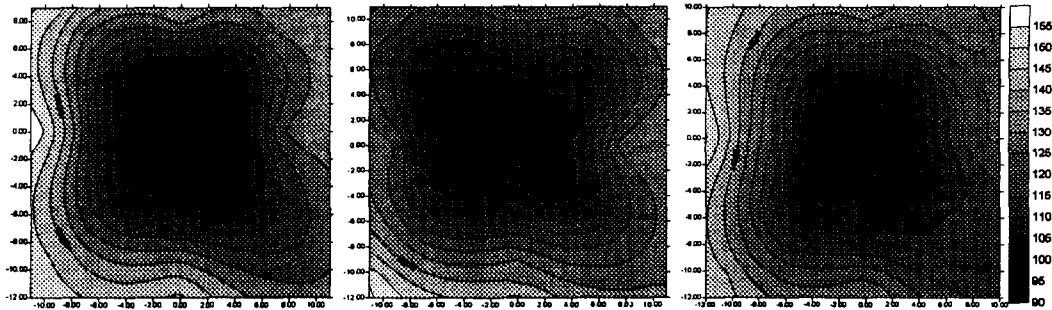
표3. 횡방향 하상경사(Q=41 l/sec)

측점	ZIM	ENG	WAN	KIK	VAD	실측치
0	0.54744	0.17217	0.47520	0.00994	0.04958	0
30	0.53137	0.17338	0.45601	0.00528	0.04874	-0.00125
60	0.61538	0.17338	0.54932	0.02254	0.05349	0.06375
90	0.57086	0.17217	0.5010	0.01466	0.05091	0.06625
120	0.56057	0.17699	0.49433	0.01671	0.05127	0.0725
150	0.63786	0.17217	0.59192	0.03966	0.05533	0.14
180	0.54921	0.17338	0.47852	0.01151	0.04992	0.1375

표3에 나타난 바와 같이 횡방향 산정식에 의한 횡방향하상경사값과 실측값이 비교되어 있으며 비교결과 KIK식이 실측치와 비교적 상관성이 좋은 것으로 나타났다.

### 3.3 교각세굴실험

최대횡방향 하상경사가 발생된 150도 지점에 대해서 원형교각을 설치한 후 교각세굴실험을 하였으며 그림4에 교각설치후의 하상형 변화를 surfer프로그램을 이용하여 세굴심도를 나타내었다.



(a) 만곡부 내측 (b) 만곡부 중심 (c) 만곡부 외측  
그림 4. 세굴심도 (단위 : X,Y축(cm), Z축(mm))

그림4에서 보는 바와 같이 만곡부 외측부에 교각을 세운 경우 직류부에 비해 세굴공이 외측 하류부로 편기되는 현상이 나타났으며 이는 흐름방향과도 유사한 현상을 보였다.

기존 연구에서 만곡부에 대한 세굴심 예측공식이 발표된 바가 없으므로 세굴심을 단순비교를 하기위해서 직류부에서 국부세굴심을 예측하는 식들을 이용하여 만곡부의 국부세굴심과 비교하였다. 모형 실험 결과는 표4에 수록하였다.

표4. 국부세굴심

실험조건	교각위치	예측 국부 세굴심				실측최대 세굴심 (cm)
		CSU	BRE	SHE	LAT	
Q=36l/sec b=3.75cm	직류부	7.11	7.49	4.17	7.35	3.47
	만곡(내)	4.38	7.47	2.13	7.07	3.6
	만곡(중)	8.05	7.49	4.97	7.39	3.9
	만곡(외)	7.00	7.49	4.00	7.52	4.3

표4에서 보는 바와 같이 만곡부에 세워진 교각의 경우 직류부에 비해 세굴심이 증가하는 경향을 보였으며 일반적으로 만곡부 외측부에 세워진 교각에서 최대세굴심이 발생하였다.

#### 4. 결론

1. 유로만곡부 흐름특성실험을 통하여 횡방향 하상경사 실측치와 예측식을 비교한 바 KIK식이 실측치와 비교적 좋은 상관을 나타내었다.
2. 최대 횡방향 하상경사가 발생한 150도 지점에 원형교각( $b=3.75\text{cm}$ )을 설치한 후 교각세굴 실험을 하여 세굴심 예측식과 측정치를 비교하였으며 직류로부터 만곡부외측부에서 더 큰 최대 세굴심이 발생하였다.
3. 교각세굴실험을 한 결과 만곡부에 세워진 교각의 세굴심은 직류부와는 전혀 다른 양상을 보이므로 만곡부에서의 적합한 세굴심 예측식이 제안되어야 한다고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Breusers, H.N.C. et al., "Local Scour around Cylindrical Piers", J. of Hydraulic Research, Vol. 15, No.3, 1977, pp.211~252.
- 2) Engelund, F., "Flow and Bed Topography in Channel Bends," Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.100, No. HY11, Proc.Paper 10963, Nov., 1974, pp.1631-1648
- 3) Ikeda, S., "Flow and Bed Profile in Meandering Sand-Silt Rivers" Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.112, No.7, July, 1986, pp.562-578.
- 4) Jain, S.C., and Fischer, E.E., "Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities", J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 106, No. HY11, Nov., 1980, pp. 1827~1842.
- 5) Kikkawa, H., and Ikeda, S., and Kitagawa, A., "Flow and Bed Topography in Curved Open Channels." Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.102, No.HY9, Sept., 1976, pp.1327-1342.
- 6) Odgaard, A.J., "Transverse Bed Slope in Alluvial Channel Bends." Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.107, No.HY12, Dec., 1981, pp.1677-94.
- 7) Odgaard, A.J., "River-Meander Model 1 : Development." Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.115, No.11, Nov, 1989.
- 8) Parker, G., Sawai, K., and Ikeda, S., "Bend Theory of River Meanders. Part 2. Nonlinear Deformation of Finite-Amplitude Bends." Journal of Fluid Mechanics, Vol.115, 1981, pp.303-314.
- 9) Peggy A. Johnson, "Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data". J. of Hydraulic Engineering, ASCE Vol. 121, No. 8, August, 1995, pp.626~629.
- 10) Raudkivi, A.J., and Ettema, R., "Clear-water Scour at Cylindrical Piers" , J. of Hydraulic Engineering, ASCE Vol. 109, No. 3, March, 1983, pp.338~350.
- 11) Raudkivi, A.J., and Ettema, R., "Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds" , J. of Hydraulic Engineering, ASCE Vol. 111, No. 4, April, 1985, pp.713~731.
- 12) Raudkivi, A.J., "Functional Trends of Scour at Bridge Piers , J. of Hydraulic Engineering, ASCE Vol. 112, No. 1, Jan., 1986, pp.1~13.
- 13) Shen, H.W, Schneider, V.R and Karaki, S., "Local scour around Bridge Piers", J. of Hydraulic Div., ASCE, Vol.95, No.HY6, Nov., '969, pp.1919~1940.
- 14) Yen, C.L., "Bed Configuration and Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel," thesis Presented to the University of Iowa, at Iowa city, Iowa, in 1972, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- 15) Zimmermann, C., and Kennedy, J.F., "Transverse Bed Slopes in Curved Alluvial Streams." Journal of Hydraulics Division, ASCE, vol.104, No.HY1, Proc.Paper 13482, Jan., 1978, pp.33-48.
- 16) 윤세의, "수심이 얇은 고정상 만곡수로에서의 흐름특성 해석.", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.