

만곡수로에 위치한 교각에서의 접근수위 변화를 고려한 세굴심 산정

○ 박영진* 최인호** 김윤태*** 송재우****

1. 서론

자연하천에서 하상의 변동은 수리학적 인자들의 변화를 수반하여 하천의 재해를 유발시킬 수 있다. 특히 교각 주위에서의 국부세굴은 교량의 안전성 문제와 관련되어 폭넓은 연구가 이루어져왔다.

교량이 만곡부에 위치하는 경우 수축세굴은 만곡부 외측에 집중되고 만곡부에서 유량이 증가함에 따라 최심선은 수로의 외측안을 향하며 이는 교량 통수부에서 세굴 및 세굴형태의 비균등 분포를 증가시키게 된다.

만곡부에 대한 해석적인 연구는 유속분포에 대한 수리적인 모형을 개발한 Rozovskii로부터 시작되었으며, Kikkawa 등은 이차흐름과 주흐름간의 비선형 상호작용을 이용하여 횡방향유속에 대한 해석모형을 제안하였다. 최근에 Tsai 등은 만곡부에서의 2차원 부정류를 유한요소법으로 해석한 후 횡방향 수면고와 종방향 유속을 예측한 바 있다.

교각주위의 국부세굴에 관한 연구로는 최근들어 Olsen, Ahmed 등, 그리고 Li 등이 원형 교각주위의 국부세굴 특성을 3차원으로 해석한 수치모형을 제시한바 있으며, 만곡부에서의 교각주위 국부세굴에 관한 연구는 최초로 Noh가 90° 만곡수로에서 교각형상에 따라 최대세굴심을 최대난류강도와 최대전단응력으로 분석한 후 시간에 따른 함수로 세굴심을 제시하였다. 최근에 Takaki는 실제 하천의 만곡부에 위치한 교각주위의 국부세굴심을 설계홍수량에 대한 유속분포와 수위분포의 분석과 함께 실측 세굴심으로써 분석한 바 있다.

국내의 관련연구로서 노 등이 모형실험을 수행하여 유로만곡부 교각주위의 하상세굴을 연구하였으며, 최 등은 직유로부와 만곡부에 위치한 교각 세굴보호공으로 원환을 적용한 바 있으나 국부세굴에 관한 연구는 대부분 직유로부에서 이루어졌으며, 기존의 세굴 예측식 또한 직유로부에 대하여 수리모형 실험을 수행하여 제안되었다. 또한 유향을 변화시켜 교각에 접근하는 흐름의 각도를 조정한 연구가 일부 있었으나, 흐름 및 횡방향 하상형이 직유로부와 다른 특성을 보이는 유로만곡부에 대하여 교각 주위에서 발생하는 연속적인 세굴형상과 국부세굴심의 변화 및 예측에 관한 연구는 국내외에서 매우 미흡한 실정이다.

본 연구는 만곡부에 위치한 원형교각 주위의 흐름특성과 국부세굴 특성을 분석하기 위하여 만곡각이 180° 인 실험수로에서 수리모형실험을 실시하였고, 만곡부에서의 흐름특성과 수축세굴을 고려한 하상변동을 분석하였다. 분석된 결과를 기초로 직유로부에서는 유로중심선, 만곡부에서는 최대 횡방향 하상경사가 측정된 150° 단면에서 원형교각 국부세굴 실험을 수행하여 최대세굴심을 분석하였다.

2. 만곡부의 흐름특성 변화와 교각 접근수위 변화

유로만곡부에 대한 유속과 수심분포가 그림 1에 정의 되었다. s 축은 유로중심을 따라서 흐름방향으로 +인 축이며, n 축은 s 축에 직각이고 외측제방쪽으로 +인 축이며 또한, z 축은 흐름하상에서 수면방향으로 수직인 축이다. s , n , z 방향의 유속성분은 각각 u , v , w 이다.

-
- * 서일전문대학 토목과 전임강사
 - ** 서일전문대학 토목과 조교수
 - *** 홍익대학교 토목공학과 박사과정
 - **** 홍익대학교 토목공학과 교수

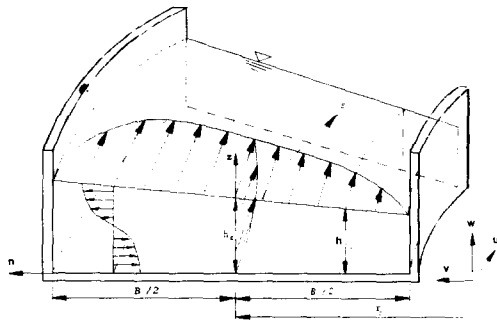


그림 1. 유로만곡부의 횡단면 정의도

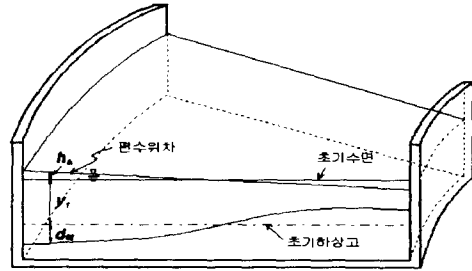


그림 2. 만곡부에 위치한 교각에서의 접근수심 변화도

유로만곡부에 위치한 교각의 세굴심 예측시 교각 접근수심은 직유로부와는 다르게 산정되어야 할 것이다. 만곡부 흐름특성을 고려하면 그림 2에서와 같이 만곡부 외측에서는 하상에서 횡방향 하상경사로 인해 접근 수심이 증가하며, 수면에서 편수위차에 의해 수위의 증가로 접근수심이 더욱 증가하게 된다. 따라서, 만곡부 흐름특성을 고려하면 만곡부 외측에서는 직유로부에 적용되는 CSU식에서 접근수심을 의미하는 y_1 이 만곡부에서의 흐름특성 변화에 따라 다음과 같이 산정되어야 한다.

$$y'_1 = y_1 + d_{st} + h_s \quad (1)$$

여기서, y'_1 : 만곡부에 위치한 교각접근수심, y_1 : 직유로부 교각접근수심

d_{st} : 만곡부 흐름특성에 기인한 하상변동량, h_s : 편수위차에 의한 수위 변동량

편수위차에 의한 수위 변동량은 만곡부에서의 유체요소에 대한 힘의 평형조건으로부터 횡방향 수면경사 dh/dr 로부터 산정된다.

$$\frac{dh}{dr} = I_r = a \frac{U^2}{gr} \quad (2)$$

만곡부 흐름특성에 기인한 하상변동량은 횡방향 하상경사를 예측하는 기존의 식들로부터 산정될수 있는데 일반적으로 수심 h 와 곡률반경 r 의 비에 비례하며 그외 인자들을 비례계수 K 로 나타낼 경우 다음과 같은 일반식으로 표현할 수 있다.

$$S_i = K \frac{h}{r} \quad (3)$$

여기서, S_i : 횡방향 하상경사, K : 비례계수, h : 수심, r : 곡률반경

표 1에 각각의 예측식들에서 K 값과 지배인자를 나타내었다.

횡방향 수면경사 산정모형은 비례계수 K 를 사용하여 다음과 같은 일반식으로 표현할 수 있으며, 각 모형의 비례계수 K 는 표 2에 제시하였다.

$$I_r = K \frac{U^2}{g} \quad (4)$$

만곡부에 위치한 교각에서의 세굴심을 산정하고자 할 때는 기존의 CSU식을 만곡부 흐름특성에 의한 접근유속 변화와 접근수심 변화를 고려한 후 이용하는 것이 적절하다고 판단된다.

$$\text{CSU식} : \frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.35} \left(\frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \right)^{0.43} \quad (5)$$

만곡부에 위치한 교각세굴심 산정을 위한 제안된 CSU 수정식 :

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{y_1'}{a} \right)^{0.35} \left(\frac{V_1'}{\sqrt{g y_1'}} \right)^{0.43} \quad (6)$$

여기서, y_1' : 만곡부에 위치한 교각접근수심 (= $y_1 + d_{st} + h_s$)

V_1' : 흐름방향 유속의 임의 횡단면 유속

표 1 횡방향 하상경사 예측식의 비례계수 K

모형	비례계수 K
Engelund식 (ENG식)	7μ
Van Bendegom식 (VAN식)	$0.0585 F_D^2$
Kikkawa와 Ikeda식 (KIK식)	$(2.75 - 4.35 \frac{u_*}{U})^2 F_D$
Zimmermann과 Kennedy식 (ZIM식)	$(\frac{\alpha}{2}) N F_D^2$ 여기서, $N = \frac{(n+1)}{n(n+2)}$
Odgaard81식 (ODG81식)	$\frac{3\alpha}{2} N_f F_D^2$, $N_f = \frac{(n_f+1)}{n_f(n_f+2)}$
Yen식 (YEN식)	$-m \left[\frac{4}{3} \frac{\mu C_D}{(1 + \mu \lambda_*)} \right]^{1/2} F_D$

표 2 횡방향 수면경사 예측식의 비례계수 K

모형	비례계수 K
Rozovskii (ROZ식)	$\alpha \frac{1}{r}$
Shukry (SHU식)	$\frac{r_c^2}{2B r_o^2 r_i^2} (r_o^2 - r_i^2) = \frac{r_c^3}{r_o^2 r_i^2}$ (하폭이 일정한 경우)
Grashof (GRA식)	$\frac{2.30}{B} \log \frac{r_o}{r_i}$
Woodward (WOO식)	$\frac{1}{B} \left[\frac{20}{3} \frac{r_c}{B} - 16 \frac{r_c^3}{B^3} + \left(\frac{4r_c^2}{B^2} - 1 \right)^2 \ln \frac{2r_c + B}{2r_c - B} \right]$
Ippen1 (IPP1식)	$\frac{B}{r_c} \left(\frac{1}{1 - B^2/(4r_c^2)} \right)$
Ippen2 (IPP2식)	$\frac{B}{r_c} \left(\frac{1}{1 - B^2/(12r_c^2)} \right)$

3. 비교 및 검토

3.1 수리모형 제원 및 실험방법

수리모형 실험장치는 유로의 폭(B)이 0.5m이고 만곡부 유입 직유로부와 180° 만곡부 그리고 만곡부 유출 직유로부로 이루어져 있고, 만곡부의 유로중심선을 따른 곡률반경 r_c 는 2.25m이다.

본 연구에서 수행된 수리모형 실험수로의 제원으로 실험수로의 만곡각(θ)은 180°, 수로폭(B)은 0.90m, 수로중심선을 따른 곡률반경(r_c)은 2.5m, 유입, 유출부의 직유로부 길이는 8.0m, 곡률반경-하폭 비(r_c/b)는 2.78이다.

실험은 비균등유사를 18cm로 평형하게 포설한 후 유출부에 설치된 수문을 조절하여 하류로부터 물을 서서히 유입시킴으로서 급격한 유량변화에 따른 하상형의 변화를 감소시켰다. 또한 실험이 종료된 후 하상이 퇴채움되는 현상을 줄이기 위해서 유출부의 수문을 조절하여 급격한 유량의 유출과 유사손실을 방지하였다. 실험유량은 40 l/sec로 모의되었으며, 사용된 하상재료의 중앙입경 D_{50} 은 0.53mm, 기학적표준편차 $\sigma_g(D_{84.1}/D_{15.9})$ 는 1.82였다. 유속은 3차원 유속계인 ADV를 이용하여 직유로부에서 한 단면과 만곡이 시작되는 유입부에서 유출부까지 15° 간격으로 단면을 설정하고 각 단면에서 횡방향으로 7.5cm씩 분할하여 횡단면으로 각각 11개 측정, 총 154개 측정에서 측정하였다.

3.2 수리모형실험 결과분석

일반적인 수리모형실험에서 횡방향의 유속분포는 곡률반경 및 하폭과 같은 실험제원과 중심각의 변화 및 저면 마찰조건에 따라 많은 영향을 받게된다. 또한, 만곡유입부에서 흐름은 내측안 부근에서 가속작용이 발생하고 외측안 부근에서는 감속작용이 발생하여, 내측안으로부터 외측안으로 이동되는 운동량 이송현상이

발생되므로 나선운동이 발달되면서 횡방향 수면경사는 다시 감소되는 현상을 나타낸다.

최대유속선은 만곡유입부인 0° 에서는 최대유속이 내측안으로 편기되어 있으나 회전류가 발달하는 60° 이후 점차 최대유속선이 외측안으로 편기됨을 볼 수 있었으며 만곡 정점부를 지나 충분히 발달된 흐름특성을 보이는 180° 지점에서 최대유속이 외측안($r/r_c = 1.09$)에 발생되었다.

또한, 만곡부의 하상형 변화를 파악하기 위하여 횡방향 하상경사를 측정하여 분석하였다. 그림 3과 4에는 종방향과 횡방향 하상경사의 변화를 도시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 최대 횡방향 하상경사는 150° 단면에서 발생하였고, 만곡각이 증가함에 따라 내측은 퇴적되고 외측은 침식되는 경향이 정점부를 지나면서 점차적으로 증가하였다.

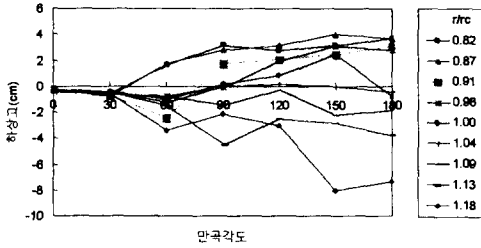


그림 3 종방향 하상경사 변화도

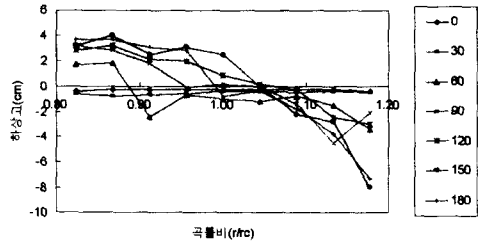


그림 4 횡방향 하상경사 변화도

만곡부의 수면형 변화를 파악하기 위하여 횡방향 수면경사를 측정하여 분석하였다. 그림 5에는 흐름방향 편수위차를 보여주고 있다.

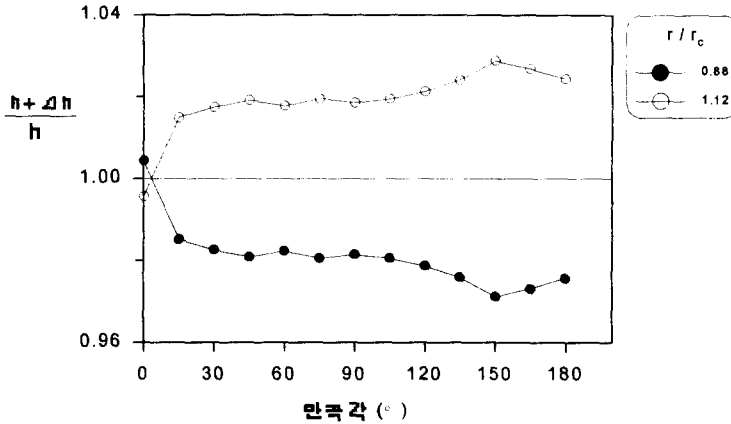


그림 5 흐름방향 편수위차

만곡부에 위치한 원형교각의 국부세굴심을 분석하기 위해 본 연구에 적용된 교각 모형은 7개(8.9cm, 7.6cm, 6.0cm, 4.8cm, 3.8cm, 3.2cm, 1.6cm)의 원형교각으로 직유로부와 만곡부 내측, 그리고 외측에 설치한 후 관측된 국부세굴심을 해석하였다. HEC-18에서 권장하는 균등교각 세굴예측식인 CSU 공식과 기존 국부세굴예측식을 측정된 균등교각 국부세굴심 자료들과 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다.

실험으로부터 관측된 실측치를 각 예측식들과 비교 분석한 결과 SHE 2식은 세굴심을 과소추정하고 있으며, 그 외에 적용된 세굴심 예측식 중 CSU식이 직유로부에 위치한 균등교각의 국부세굴심을 가장 잘 예측함을 볼 수 있다. 그러나, 직유로부가 아닌 유로 만곡부의 외측과 내측에서 얻어진 실측치를 CSU식으로 예측하게 되면 그림 7에서처럼 만곡부 외측에 위치한 균등교각의 경우 과소추정하게 되고 만곡부 내측의 경우 상당히 큰 과대 추정이 발생한다.

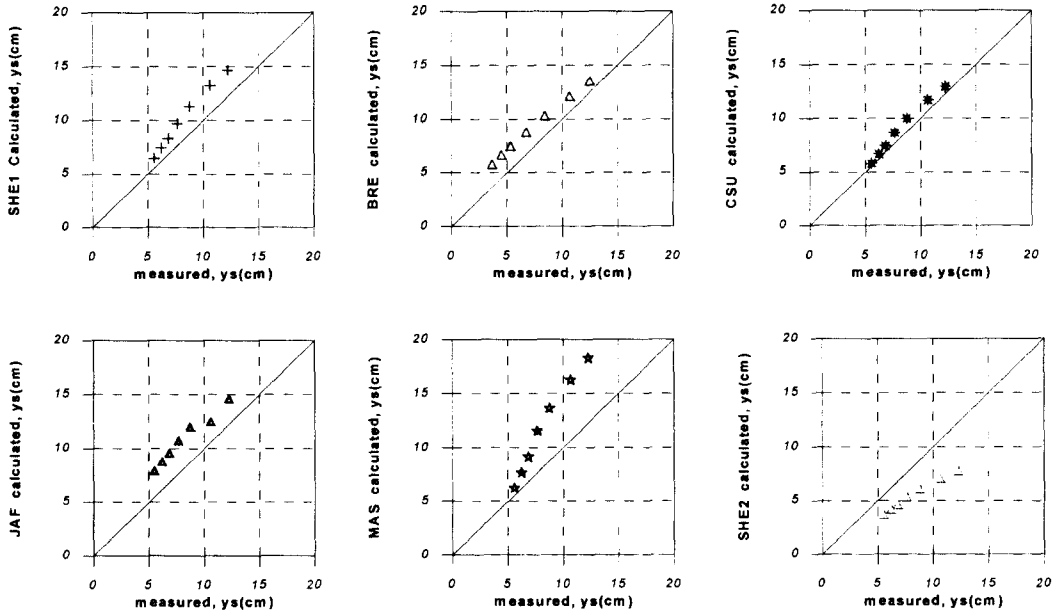
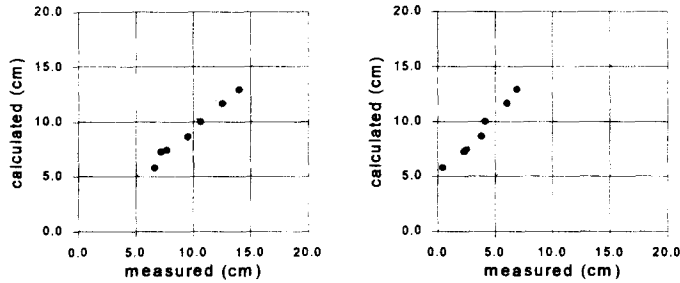


그림 6 직유로부에 위치한 균등교각에 대한 예측치와 관측치

따라서, 본 논문에서 제시된 수정 CSU식을 만곡부에 위치한 균등교각에 대해 적용한 결과가 그림 8에 제시되었으며 각각의 예측방법에 따른 상관계수가 표3에 제시되었다.



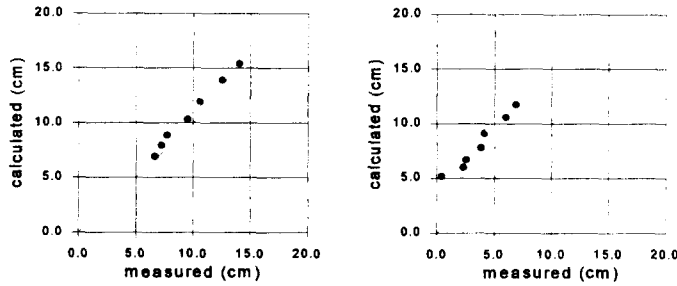
(a) 외측안

(b) 내측안

그림 7 만곡부에 위치한 균등교각에 대한 CSU식의 적용

표 3 세굴심 산정방법의 상관계수

교각 설치위치	적용공식	실측치 평균	예측치 평균	실측치 표준편차	예측치 표준편차	공분산	상관계수
직유로부	CSU식	8.2286	9.0371	2.4363	2.6437	5.4815	0.9929
만곡부 외측	CSU식	9.7286	9.1272	2.7998	2.5607	6.1038	0.9933
	CSU 수정식	9.7286	10.7643	2.7998	3.1523	7.5434	0.9971
만곡부 내측	CSU식	3.7143	9.1272	2.2356	2.5607	4.8496	0.9814
	CSU 수정식	3.7143	8.1657	2.2356	2.4319	4.5736	0.9883



(a) 외측안 (b) 내측안
그림 8 만곡부에 위치한 균등교각에 대한 수정 CSU식의 적용

4. 결 론

원형교각 주위의 흐름특성과 국부세굴 특성을 분석하기 위하여 만곡각이 180° 인 실험수로에서 수리모형실험을 실시하였고, 만곡부에서의 흐름특성과 수축세굴을 고려한 하상변동을 분석하였다. 분석된 결과를 기초로 직유로부에서는 유로중심선, 만곡부에서는 최대 횡방향 하상경사가 측정된 150° 단면에서 원형교각 국부세굴 실험을 수행하여 최대세굴심을 분석한 본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 180° 만곡부에서 흐름특성을 분석한 결과 최대 유속이 발생하는 150° 단면에서 최대 횡방향 하상경사와 편수위차가 발생하였으며, 교각의 최대 접근수심과 최대 접근유속 역시 150° 단면에서 발생하였다.
2. 수리모형실험에서 하상변동에 따른 수위증가량의 산정은 ZIM 모형이 관측값을 가장 잘 예측하였으며, 편수위차에 의한 수위상승량을 예측하는 모형은 ROZ 모형이 실측치를 가장 잘 예측하였다.
3. 직유로부에 위치한 균등교각 국부세굴심을 예측하는 CSU식에 만곡부 흐름변화에 따른 교각 접근수심의 변화와 교각 접근유속의 변화를 고려하여 직유로부 뿐만아니라 만곡부에 위치한 원형교각 주위의 국부세굴심을 예측하는 CSU식을 수정한 식을 제안하였다.

5. 참고문헌

- 1) 김윤태, 박영진, 김지호, 송재우(1997). "만곡수로에서 횡방향 수면경사 산정모형의 비교 연구." 대한토목학회 논문집 II, 제17권, 제 II-2호, pp.
- 2) 박영진(1997). "만곡수로에서의 비균등 원형교각 주위 국부세굴심과 하상변동에 관한 연구." 박사학위논문, 홍익대학교 대학원.
- 3) 송재우(1980). "우리나라 하천의 사행특성에 관한 연구." 박사학위논문, 연세대학교 대학원.
- 4) 이종태, 윤세의(1987). "개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름특성", 대한토목학회논문집, 제7권, 제3호, 1987, pp.195~202.
- 4) Ahmed, F. and Rajaratnm, N.(1997). "The Three-dimensional Turbulent Boundary Layer Flow Around Bridge Piers." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 209~224.
- 5) Li, Y. and Wang, S.S.Y.(1996). "3D Numerical Modeling of Local Scour by Stochastic Approach." *Stochastic Hydraulics '96*, Bouchart et al.(eds), pp.213~220.
- 6) Nouh, M.(1984). "Scour at Bridge Piers in Meandering Channels-I." *Channels and Channel Control Structures*, Smith. (eds), Computational Mechanics Centre, pp. 75~83.
- 7) Olsen, N.R.B. and Melaaen, M.C.(1993). "Three-Dimensional Calculation of Scour Around Cylinders." *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 119, No. 9, September, pp. 1048~1054.
- 8) Takaki, S. and Ichiyama, M.(1996). "3-D Simulations of Flow Around Bridge Piers at a River Bend." *Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Chen (eds), Balkema, pp. 565~572.
- 9) Rozovskii, I.L.(1957). *Flow of Water in Bends of Open Channels*. Academy of the Ukrainian SSR Institute of Hydrology and Hydraulic Eng.