유로 만곡부에서의 원환에 의한 교량세굴 감소효과에 관한 연구

A Study of the Effect of Pier Scour Decreasing by Collar in Channel Bends

○최인호*, 박영진**, 송재우***

1. 서 론

자연하천에서 세굴을 포함한 유로하상의 변동은 유속 및 수심의 변형을 동반하여 제방파괴 및 교각등의 국부세굴에 따른 하천재해를 유발하는등 하천공학상의 여러문제와 밀접한 관계가 있다.

교각 형상을 변화시켜 세굴심을 감소시키는 보호공에 관한 연구는 주로 교각 전면에서 하강류에 의한 마제형 와를 제어 시키는 방법으로 Shen 등이 교각 전면에 일정한 간격을 두고 작은 판을 부착한 방법이 있고 Laursen 등, Tanaka 등 ,Kikkawa 등 , Dargahi 등이 교각에 원형 원환(collar)을 부착하여 세굴심 감소 효과를 연구 하였으며, 특히 Kikkawa 등은 흐름을 포텐셜 흐름으로 가정하고 원주 교각 주위에 부착된 원환으로 인한 압력 변화량에 대한 이론식을 제시 하였다. 또한 Ettema 와 Chiew는 교각 보호공으로 원환이 매우 효과적이라고 발표하였다.

국내의 세굴 보호공에 관한 연구는 이 등이 3가지 교각 형상에 대하여 세굴을 방지하기 위한 장치로 부목과 원환을 교각의 전면에 부착하여 세굴 효과를 실험하였으며 윤 등은 기초의 상류 연장판이 국부 세굴감소에 미치는 영향을 실험을 통해 고찰하였다.

이와 같이 교각으로 인한 국부세굴 연구는 수 많은 학자들에 의해 수행되어져 왔으나, 교각으로 인한 국부세굴에 관한 연구는 대부분 직유로에서 이루어졌다. 그러나, 지형 및 지질 등 주위의 환경조건으로부터 만곡부에 구조물의 신설이 불가피한 경우나 기존의 교각이 설치되어 있는 경우에는 만곡부에서의 교각주위의 세굴형상 및 세굴심에 관한 연구가 필수적이다. 또한 유향을 변화시켜 교각에 접근하는 흐름의 각도를 조정한 연구가 일부 있었으나 흐름 및 횡방향하상형이 직유로와 다른 특성을 보이는 유로만곡부에서 교각 주위에 발생되는 연속적인 세굴형상, 세굴심의 변화 및 예측에 관한 연구는 국내외에서 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 원환을 이용한 세굴보호공을 통해 직유로부와 만곡부에서의 세굴감소 효과를 유량 변화 및 시간변화에 따라 분석하고 개도비등 교량 국부세굴에 영향을 미치는 매개변수를 산정하여 수공구조물 유지관리면의 기술적 검토와 설계에 기여하는데 그 목적이 있다.

2. 기본이론

2.1 만곡부의 흐름특성

유로만곡부에 대한 유속과 수심분포가 그림 2.1에 정의 되었다. s축은 유로중심을 따라서 흐름방향으로 +인 축이며, n축은 s축에 직각이고 외측제방쪽으로 +인 축이며 또한, z축은 흐름하상에서 수면방향으로 수직인 축이다. s, n, z방향의 유속 $u\frac{\partial u}{\partial s}+v\frac{\partial u}{\partial n}+w\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{uw}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s}+F_s$성분은 각각 u, v, w이다.

Rozovskii에 의하면 흐름방향과 횡방향 유속성분의 운동방정식과 연속방정식은 다음과 같다.

$$u\frac{\partial v}{\partial s}+v\frac{\partial v}{\partial n}+w\frac{\partial v}{\partial z}-\frac{u^2}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}+F_n \tag{2.1}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial s}+v\frac{\partial w}{\partial n}+w\frac{\partial w}{\partial z}+g=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+F_z$$

$$\frac{\partial u}{\partial s}+\frac{1}{r}\frac{\partial (vr)}{\partial n}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

여기서 r : 국부곡률반경, p : 압력, ρ: 유체밀도, F_s, F_n, F_z : s, n, z 방향의 마찰항

* 서일전문대학 토목과 조교수
** 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*** 홍익대학교 토목공학과 교수

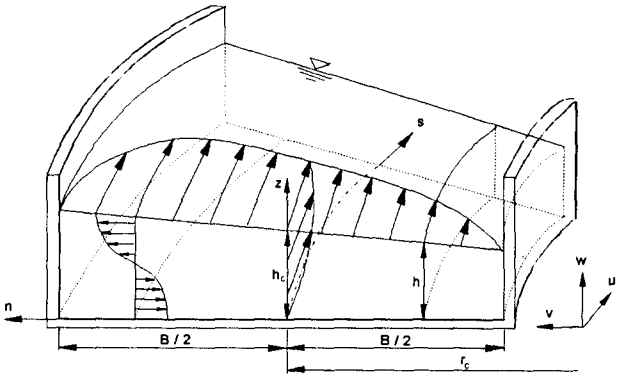

그림 2.1 유로만곡부의 횡단면 정의도

2.2 만곡부의 횡방향 하상형

만곡부 흐름특성의 결과로서 발생되는 유로 횡단면의 변화는 하상표면에 횡방향으로 움직이는 하상입자에 대한 힘의 평형조건을 적용함으로서 얻어질 수 있다. 평형조건으로부터 하상전단응력을 고려하여 횡방향 하상경사를 제안한 연구가 Rozovskii, Odgaard등에 의해 발표되었으며 특히, Odgaard는 만곡부에서의 수축세굴에 관하여 정리하였고, 횡방향 하상의 경사각도 β를 다음과 같이 표현하였다.

$$\sin\beta = k(F_r)^{\alpha}(H/r) \tag{2.2}$$

여기서 k는 상수, F_r은 $V/\sqrt{gH}$ 이며, H/r은 평균수심과 곡률반경의 비이다. 실험 및 실측연구로부터 α값은 1이 유효하다고 제안되었으므로 횡방향 경사는 유속, 상대수심 및 유사입경에 의해 영향 받는다고 할 수 있다.

2.3 교각주위의 국부세굴

개수로 흐름에서 교각을 지나는 흐름형은 매우 복잡하며, 이러한 복잡성은 세굴공의 발달과 함께 증가된다. 이러한 흐름형의 상세한 연구로는 세굴공을 형성시키는 흐름의 매체를 더욱 잘 이해하기 위해 Melville에 의해 연구되었으며, 원형 교각에서 흐름형의 성분을 다음과 같이 분리하였고, 이에 관한 개념도는 그림 2.2에 표현되어있다.

(1) 교각 전면의 하강류(downflow)
(2) 교각 전면의 수면에서 발생되는 파동(bow wave)
(3) 교각 하부의 마제형 와(horse-shoe vortices)
(4) 교각 후면의 후류(wake)

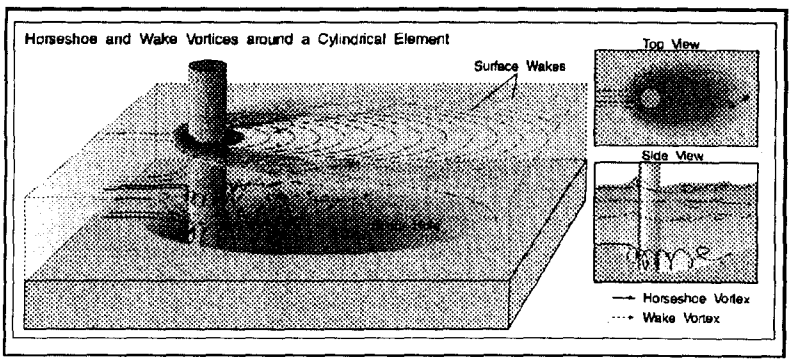

그림 2.2 원형교각 주위의 교각 국부세굴

마제형 와는 하강류에 의해 파여진 세굴공의 상류 가장자리에서 흐름의 박리로 인해 발달되고 하류로 확대되면서 교각의 측면을 지나 교각직경의 수배의 길이로 영향을 미치다가 일반적인 난류의 한 부분이 된다. 흐름은 교각의 측면에서 박리되며, 박리된 흐름에 의해 교각의 하류방향으로 후류가 발생되는데, 이러한 박리는 수면의 불연속을 발생시킨다.

2.4 원환을 이용한 교각 국부세굴 보호공

Kikkawa 등은 흐름을 포텐셜흐름으로 가정하고 원주교각 둘레에 부착된 평판으로 인한 압력변화량을 계산하는 식을 유도하였다.

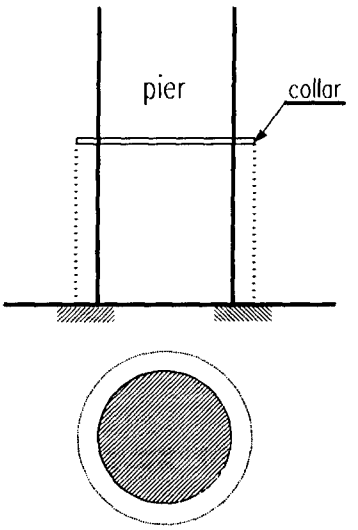

그림 2.3 원환설치 교량 평면도 및 단면도

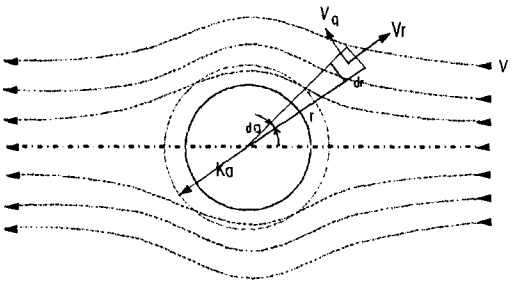

그림 2.4 원형 교각주위 흐름 정의도

그림 2.4에서 점(r,θ)의 압력을 p라고 하면 베르누이 정리로부터 원주의 상류측 반원부에서 발생하는 총 압력변화량 Δp는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \int_a^{R_1}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} (p-p_0)\, r dr d\theta \\ &= \frac{\rho V^2}{2}\left(\frac{\pi a^4}{2R_1^2} - \frac{\pi a^4}{2a^2}\right) \end{aligned} \tag{2.3}$$

여기서, p_o와 V는 교각의 영향이 없는 지점의 압력과 유속, V_r 과 V_θ는 점(r,θ)에서 반경방향과 반경에 직각방향의 유속성분, ρ는 물의 밀도이고 R_1은 원주중심으로부터 원주의 영향을 받지 않는다고 생각되는 지점까지의 거리이다.

원형교각에 원환을 부착하면 원환 안쪽의 압력변화량은 원환에 의하여 억제되므로 원환의 바깥쪽 부분에서 압력변화량을 계산한다. 교각의 중심으로부터 원환 끝단까지 거리를 ka라고 하면, 총압력 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \int_{ka}^{R_1}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} (p-p_0)\, r dr d\theta \\ &= \frac{\rho V^2}{2}\left(\frac{\pi a^4}{2R_1^2} - \frac{\pi a^4}{2k^2a^2}\right) \\ &\fallingdotseq -\frac{\pi\rho V^2 a^2}{4k^2} \end{aligned} \tag{2.4}$$

3. 비교 및 검토

3.1 수리모형 제원 및 실험방법

수리모형실험의 제원으로 만곡각은 180° , 하폭은 .0m, 수로중심선을 따른 곡률반경은 2.5m, 유입, 유출부의 직유로부의 길이는 8.0m, 그리고 조도계수는 0 .2이며 곡률반경-하폭 비는 2.78이다. 또한, 유속은 3차원 유속계인 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 만곡각 30° 단면별로 내측안에서 외측안으로 5개 지점의 자료를 분석하였다. 사용된 모래의 평균입경(D_{50})은 0.52이고 기하표준편차(σ_g)는 1.63인 불균등 모래를 사용하였고 이때 모래의 비중은 2.58이었다. 그림 3.1은 수리모형실험장치와 관측지점을 나타내고 그림 3.2는 만곡각도에 따른 최대 유속분포도를 나타낸다.

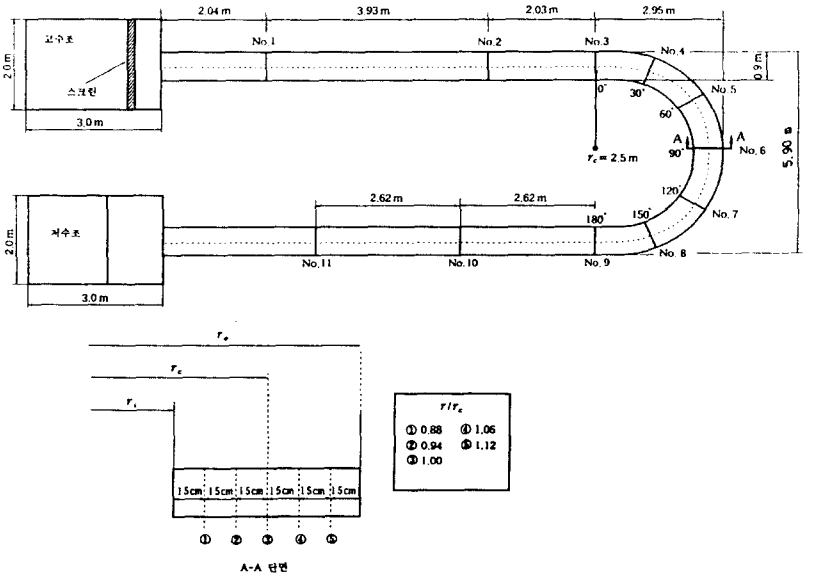

그림 3.1 수리모형 실험장치

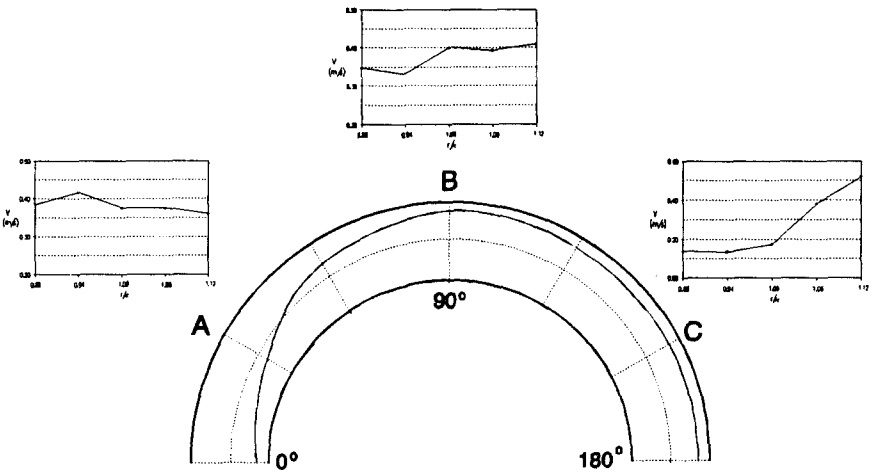

그림 3.2. 만곡각도에 따른 최대유속 분포도

3.2 원환 설치후 교각 국부세굴심

본 실험에서는 이동상 수리모형 실험결과 만곡부 150° 단면에서 최대 하상경사가 측정되었으므로 150° 단면에 대해 교각에의한 국부세굴심 실험과 원환을 설치한 세굴 보호공실험을 실시하였다. 만곡부 횡단면에서의 교각에 의한 세굴심은 국부세굴심이외에 만곡부 흐름특성에 의한 수축세굴의 영향이 매우 크고 또한, 만곡부에서의 편수위차에의한 접근수심이 증가하여 국부세굴심도 직유로부에 비해 매우 크게 측정되었다.

만곡부에서 세굴 보호공에 의한 세굴심 감소 효과를 알아보기 위해 기존의 세굴 보호공법 중 원환을 이용한 보호공법을 수로의 내측안, 중심부, 외측안에 대해서 적용해 보았고 이때 교각 폭과 원환폭 비가 2인 경우에 대해 하상고와 수면사이 원환고의 위치를 변화시켜 가면서 관측된 실험 결과치가 표 3.1에 제시되었다.

표 3.1 (h : 수심)

	접근 수심(cm)	교각폭(cm)	최대세굴심(cm)	원환설치	교각설치 지점
RUN 1-1	12.8	3.75	6.8	무	만곡부 150° 외측
RUN 1-2	12.8	3.75	6.5	하상고 동일	
RUN 1-3	12.8	3.75	6.3	+ 0.1h	
RUN 1-4	12.8	3.75	6.0	+ 0.2h	
RUN 1-5	12.8	3.75	3.8	- 0.1h	
RUN 1-6	12.8	3.75	3.9	- 0.2h	
RUN 2-1	9.4	3.75	6.3	무	만곡부 150° 중앙
RUN 2-2	9.4	3.75	2.5	하상고 동일	
RUN 2-3	9.4	3.75	3.3	+ 0.1h	
RUN 2-4	9.4	3.75	5.5	+ 0.2h	
RUN 2-5	9.4	3.75	2.3	- 0.1h	
RUN 2-6	9.4	3.75	5.3	- 0.2h	
RUN 3-1	4.9	3.75	3.9	무	만곡부 150° 내측
RUN 3-2	4.9	3.75	1.7	하상고 동일	
RUN 3-3	4.9	3.75	3.9	+ 0.1h	
RUN 3-4	4.9	3.75	3.4	+ 0.2h	
RUN 3-5	4.9	3.75	3.8	- 0.1h	
RUN 3-6	4.9	3.75	1.7	- 0.2h	

표에서 나타난 것 처럼 개도가 동일한 경우의 국부세굴심 및 세굴보호공 실험의 결과로는 동일 유량 조건에서 만곡부 흐름특성에 따라 내측안의 하상은 퇴적되고 외측안의 하상은 세굴되며 동시에 편수위차로 인해 수심의 변화가 동일 횡단면 경우데도 크게 차이가 남을 알 수 있다. 실험결과 직유로부에 비해 만곡부에서의 교각에 의한 최대세굴심은 국부세굴심에 수축세굴심이 더해져 약 1.5배 세굴심이 증가함을 보였다.

최대 세굴심의 경우 만곡부 외측안에서 원환 설치후 세굴심이 최대 55%까지 감소됨을 볼 수 있으며 이때 원환 설치 위치는 수심의 0.1h만큼 하상고 저면에 원환을 설치할 때가 가장 효과적으로 나타났고 하상고 위에 원환을 설치하는 경우는 만곡부 외측안의 경우 원환설치 효과가 미미함을 볼 수 있다.

만곡부 횡단면 중앙에 설치되어 있는 교각의 경우도 가장 큰 효과는 외측안과 마찬가지로 -0.1h만큼 하상고 저면에 설치하였을 때 이며 만곡부 내측안의 경우는 교각에 의한 국부세굴과 흐름특성에 의한 만곡부 내측안 퇴적이 상쇄되면서 원환을 이용한 보호공의 효과가 불규칙함을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

원환을 이용한 유로 만곡부에서의 교각 세굴보호공에 관한 수리모형실험 결과는 다음과 같다.

1. 흐름 특성을 직유로부와 유로 만곡부에서의 이동상 실험을 통해 비교분석한 결과 최대 유속 및 최대 수축세굴 지점은 만곡부의 150° 지점이였으며 특히, 최대 수축세굴심 발생지점은 편수위상승이 최대로 발생하여 만곡부에 위치한 교각의 경우 세굴심 산정시 교각 접근수심에 이를 고려해야 할 것으로 사료된다.

2. 원환을 이용한 세굴 보호공에 대해 직유로부와 만곡부를 비교한 결과 직유로부의 경우 최대 48%의 세굴심 감소 효과가 나타났으며, 만곡부의 경우는 외측안의 경우 최대 55%의 세굴심 감소 효과를 보였고 교각 세굴에 의한 세굴폭의 경우 직유로부에 비해 만곡부 외측안의 경우 교각 폭에 비해 1.5배에서 3.5배에 달하였으며 원환설치시 이는 현저히 감소하였다.

3. 유로 만곡부에서의 교각 세굴 보호공으로 원환을 적용할 경우 원환이 교각 폭의 2배 일 때 가장 큰 세굴심 감소효과를 보인 원환의 위치는 하상에서 수심(h)의 0.1h만큼 하상저면에 설치하였을 경우 가장 효과적이었다.

만곡부에 존재하는 교량의 경우 위에서 언급한 만곡부 흐름특성에 의한 수축세굴심과 편수위차 이외에 유입각 변화와 실제 하천의 경우 외측안 침식과 내측안 퇴적에 따른 횡방향 유로이동 문제도 고려해야 할것이다.

5. 참고문헌

1) 고재웅(1975). "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구." 한국수문학회지, 제8권 제2호, pp.75~80.

2) 송재우(1980). "우리나라 하천의 사행특성에 관한 연구." 박사학위논문, 연세대학교 대학원.

3) 이정규, 육운수, "하천교각의 세굴방지 대책에 대한 실험적 연구", 한국과학재단 보고서, 1992.

4) 이정규, 정동원 ,이창해 ,육운수. "교각에 의한 하상세굴에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집. 제 14권 제 6호. 1994, pp. 1349~1356.

5) 윤태훈, 남궁돈, 김경희, "푸팅의 상류 바닥판에 의한 교각주위 국부세굴 감소", 대한토목학회 학술발표회 논문집(Ⅱ), 1996, pp. 91~94.

6) Breusers, H.N.C. et al., "Local Scour around Cylindrical Piers", *J, of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 3, 1977, pp. 211~252.

7) Dargahi, B., "Controlling Mechanism of Local Scouring", *J. of hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 116, No. 10, Oct., 1990, pp. 1197~1214.

8) Ettema, R. and Melville, B.W., "Design for Local Scour at Bridge Piers : A Commentary", *J. of Hydr. Eng.*, ASCE, 1989, pp.1~12.

9) Jain, S.C., "Maximum Clear-water Scour Around Circular Piers", *J. of Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY5, May, 1981, pp. 611~626.

10) Kikkawa, H., Fukuoka, S., Iwasa, H. and Soogawa, H., "Study on Scouring around a Bridge Pier and Its Prevention", *Proc. of JSCE.* Vol. 194, Oct., 1971, pp. 83~90.

11) Melville, B.W, and Sutherland, A.J., "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", *J. of Hydraulics Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 10, Oct., 1988, pp. 1234~1247.

12) Odgaard, A.J.(1981). "Transverse Bed Slope in Alluvial Channel Bends." *J. of Hydraulics Div.* ASCE. vol.107, No.12, pp.1677~1693.

13) 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.

14) Richardson, E.V., Harrison, L.J., and Davis, S.R., "Evaluating Scour at Bridges (2nd Edition)." Hydraulic Engineering Circular No. 18, Federal Highway Administration, 1993.

15) Shen, H.W., Schneider, V.R and Karaki, S., "Local Scour around Bridge Piers" , *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 95, No. HY6, Nov.,1969, pp.1919~1940.

16) Shukry, A.(1950). "Flow Around Bends in an Open Flume." *Trans.*, ASCE, Vol.115, 1950, pp.751~779.