

## 만곡부에 위치한 교각주위의 국부세굴 보호공에 관한 실험적 연구

### Experimental Study for Protection of Local Scouring around Bridge Pier in a Curved Channel

최 인 호\* / 박 영 진\*\* / 송 재 우\*\*\*

Choi, In Ho / Park, Young Jin / Song, Jai Woo

---

#### Abstract

Laboratory flume experiments to investigate the characteristics of the flows and local scour around circular bridge pier in a curved channel are performed. In this study, the effect of a circular collar device for controlling the depth of scour is examined. The scour depth with a collar is about 40 % of the scour depth without collar in the straight course of the flume while it is about 44 % of the scour depth without collar at the location of 150° in the curved channel. As the results of experiments using the collar of which diameter is twice of pier, the reduction of scour depth is the most effective in a straight channel when the location of collar is 0.2h (h : depth) below the channel bottom. And, the reduction of scour depth is the most effective in a curved channel when the location of collar is 0.1h below the channel bottom

*keywords* : transverse bed slope, scour, protection of local scouring, collar, channel bend

---

#### 요 지

본 연구에서는 수리실험을 실시하여 만곡부의 흐름특성과 만곡부에서의 교각 주위 국부세굴형상, 최대 국부세굴 심 등을 분석하였다. 또한, 기존의 세굴보호공법 중 원환에 의한 보호공법을 만곡부에 적용하여 세굴감소효과를 분석하였다. 180° 만곡수로에 대해 이동상 실험결과 본 실험조건에서는 최대 횡방향 하상경사가 150° 단면에서 발생 하였으며, 원환에 의한 세굴감소효과는 유로 직선부에서 최대 40 %, 만곡부에서는 150° 단면 외측의 경우 최대 44 %의 감소효과를 보였다. 폭이 교각폭에 2배인 원환에 대하여 실험한 결과, 유로 직선부에서는 원환을 0.2h (여기서 h는 수심) 만큼 하상저면에 설치하였을 때 가장 효과적이었으며, 유로 만곡부에서는 0.1h 만큼 하상저면에 설치하였을 때 가장 효과적이었다.

**핵심용어** : 횡방향 하상경사, 세굴, 세굴보호공, 원환, 유로 만곡부

---

\* 서일전문대학 토목과 조교수

\*\* 서일전문대학 토목과 전임강사

\*\*\* 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서 론

교각주위의 국부세굴에 관한 기존 연구는 교량의 안정성문제와 관련하여 대부분 유로의 직선부에서 이루어졌으며 세굴 예측식 또한 대부분 직선부에 대하여 수리모형실험을 수행하여 제안되었다. 그러나 직선부의 국부세굴심 예측식을 만곡부에 적용할 경우 복잡한 이차류의 흐름특성을 나타내는 만곡부의 흐름특성을 고려하지 못하기 때문에 교각주위의 세굴형태와 세굴보호공에 대하여 만곡부의 흐름특성을 고려한 연구가 필요하며 유로 만곡부에 존재하는 기존의 교량이나 신설 교량 설계시 안정성 검토에 따른 관련 기준이 제시되어야 할 것이다.

1879년에 Thomson이 실험을 수행하여 만곡부 하상의 저항을 고려한 하상부근의 흐름과 자유수면 부근에서 빠르게 이동하는 흐름사이의 원심가속도차에 의해 생성되는 나선류를 최초로 연구한 이후로 Engelund(1974), Ikeda 등(1981), Kikkawa 등(1976), Odgaard(1984), Zimmermann과 Kennedy(1978), Yen (1967), Rozovskii(1961)에 의해 유속성분, 에너지 손실, 양안의 수면차, 수축세굴 등을 고려한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 국내연구로는 고재웅(1975), 송재우(1980), 안상진 등(1982), 윤세의(1986), 차영기와 이대철(1991) 등의 연구가 있다.

교각주변의 세굴에 관한 연구는 1873년 Durand-Claye가 처음으로 실험을 한 이후 많은 실험적 연구와 이론(Breuser 등, 1977; Jain, 1981; Raudkivi와 Ettema, 1983; Melville, 1984; Ettema와 Melville; 1989 등)이 발표되었다. 국내연구로는 이원환 등(1985), 안상진 등(1993), 이정규 등(1994), 김종섭(1994) 등의 연구가 있다. 한편 노섭과 송재우(1996)는 유로 만곡부에서 국부세굴에 관한 연구를 발표한다.

만곡부에서의 교각주의 국부세굴에 관한 연구는 최초로 Noh(1984)가 90° 만곡수로에서 교각형상에 따라 최대세굴심을 최대단류강도와 최대단응력으로 분석한 후 시간에 따른 함수로 세굴심을 제시한 바 있다. 그의 국외 및 국내의 연구는 매우 비흡한 실정이다.

교각 주위의 세굴보호공으로 교각형상을 변화시켜 국부세굴심을 감소시키는 보호공에 관한 연구로는 Laursen과 Toch(1956), Tanaka와 Yano(1967), Kikkawa 등(1971), Ettema(1980), Dargahi(1990), Chiew(1992) 등이 교각에 원환(collar)을 부착하여 국

부세굴심 감소효과를 연구 하였으며, 특히 Kikkawa 등(1971)은 흐름을 포텐셜 흐름으로 가정하고 원형교각 주위에 부착된 원환때문에 변화하는 압력변화량의 이론식을 제시하였다.

국내의 세굴 보호공에 관한 연구는 이정규 등(1995)이 3가지 교각 형상에 대하여 세굴을 방지하기 위한 장치로 부목과 원환을 교각의 전면에 부착하여 세굴 감소효과를 연구하였으며, 윤태훈 등(1996)은 기초의 상류 연장관이 국부세굴감소에 미치는 영향을 실험을 실시하여 고찰하였다. 또한 최인호 등(1997)은 원환에 의한 세굴감소효과를 만곡부에 적용하여 연구한바 있다.

본 연구의 목적은 수리모형 실험을 실시하여 만곡부의 흐름특성과 횡방향 하상형을 분석한후 교각 주위의 국부세굴형상과 최대 국부세굴심 등을 분석하였으며 기존의 세굴보호공법 중 원환에 의한 보호공법을 만곡부에 적용하여 적절한 만곡부의 교각 세굴보호공을 제시하는데 기여하고자 하는 것이다.

## 2. 기본이론

### 2.1 지배 방정식

유로의 흐름은 연속방정식과 운동방정식에 의해 표현되며 본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 곡선을 이루는 직교좌표가 사용되었다.

여기서, s축은 유로중심을 따라서 수평흐름방향으로 +인 축이고, n축은 수평면상에서 s축에 직각이고 외측 제방쪽으로 +인 축이며, 또한 z축은 연직상향인 축이다. 또한 s, n, z축 방향으로의 속도성분은 각각 u, v, w이다.

지배방정식은 비압축성 정상류에 대하여 정리할 수 있으며 기본적인 가정조건은 다음과 같다.

- (1) 유로폭은 일정하다.
- (2) 유로중심선의 곡률반경은 유로폭에 비해 크다. ( $0 \gg B$ )
- (3) 수심은 유로폭에 비해서 매우 작다. ( $h \ll B$ )
- (4) 횡방향 유속성분은 흐름방향 유속성분에 비해 매우 작다. ( $v \ll u$ )

Rozovskii(1961)에 의하면 유로만곡부의 흐름방향, 횡방향, 연직방향의 운동방정식과 연속방정식은 식(1)~(4)와 같다.

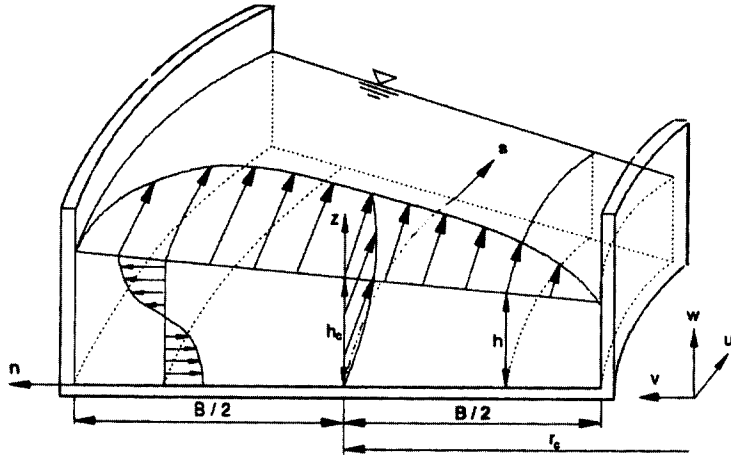


그림 1. 유로 만곡부의 횡단면 정의도

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + F_s \quad (1)$$

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

$$u \frac{\partial w}{\partial s} + v \frac{\partial w}{\partial n} + w \frac{\partial w}{\partial z} + g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(vr)}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $r$ 은 곡부곡률반경,  $p$ 는 유체압력,  $\rho$ 는 유체밀도,  $F_s$ ,  $F_n$ ,  $F_z$ 는  $s$ ,  $n$ ,  $z$  방향의 마찰력, 그리고  $g$ 는 중력가속도이다.

이러한 지배방정식중에서  $z$ 방향의 유속성분인  $w$ 항은 다른 항들에 비해 미소하기 때문에 일반적으로 소거되며, 지배방정식에 포함된 마찰항들은 마찰응력 이외의 마찰항은 고려하지 않으므로  $F_s = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_s}{\partial z}$ ,

$F_n = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_n}{\partial z}$ 로 나타낼 수 있으며 여기서,  $\tau_s$ 와  $\tau_n$ 은  $s$ 와  $n$ 방향의 마찰응력이다.

## 2.2 곡부세굴의 특성

교각주위의 곡부세굴은 흐름장과 유사입자간의 간섭의 결과이며 흐름이 교각에 접근할 때 정체면이 형성되기 때문에 연직압력경사는 정체면을 따라 형성된다.

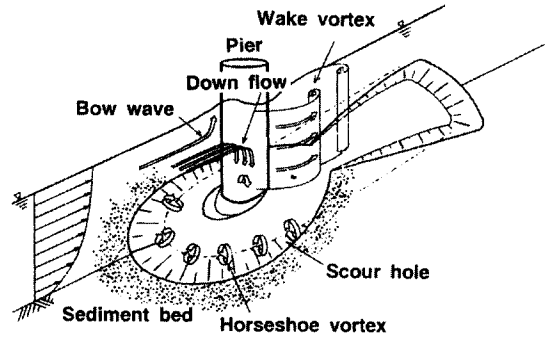


그림 2. 원형 교각 주위의 곡부 세굴 개념도

이 연직압력경사는 교각의 전면에서 하강류를 생성하며 교각주위에서 침식의 중요한 원인이 된다. 이러한 흐름형의 상세한 연구는 Dargahi(1990), Melville(1984) 등에 의해 연구되었으며 원형교각 주위의 흐름 성분은 다음과 같고 이에 관한 개념도는 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

- (1) 교각 전면의 하강류(downflow)
- (2) 교각 하부의 마제형와(horse-shoe vortices)
- (3) 교각 후면의 후류와(wake vortices)
- (4) 교각 전면의 수면에서 발생하는 파동(bow wave)

## 2.3 원환을 이용한 교각 세굴 보호공

Kikkawa 등(1971)은 흐름을 포텐셜흐름으로 가정하고 원형교각 둘레에 부착된 평판으로 인한 압력변화량을 계산하는 식을 유도하였다. 그림 3과 4에는 원환

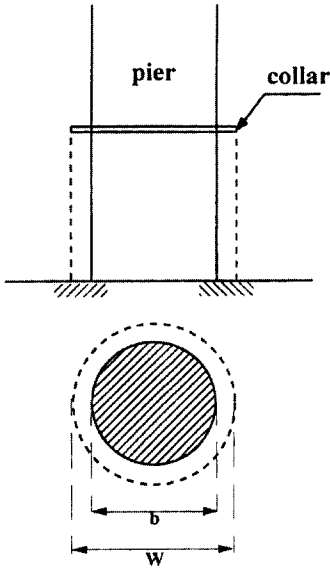


그림 3. 원환설치 교각 정의도

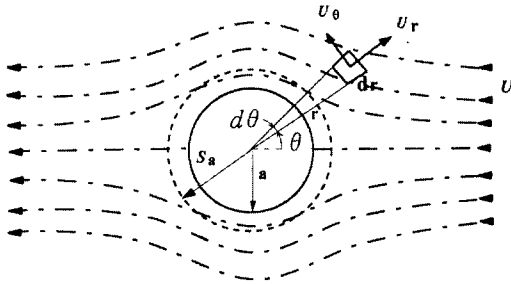


그림 4. 원형 교각주위의 흐름 정의도

을 설치한 교각의 정의도와 원형교각 주위의 흐름 정의도를 나타내었다.

원형교각의 상류측 반원부에서 발생하는 총 압력변화량  $\Delta p$ 는 식 (5)와 같이 된다.(Kikkawa 등, 1971)

$$\begin{aligned} \Delta p &= \int_a^{R_1} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} (p - p_0) r \, dr \, d\theta \\ &= \frac{\rho U^2}{2} \left( \frac{\pi a^4}{2R_1^2} - \frac{\pi a^4}{2a^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 교각의 반경,  $R_1$ 은 교각의 중심으로부터 원형교각의 영향을 받지 않는다고 생각되는 지점까지의 거리이다.

$R_1$ 이  $a$ 에 비하여 아주 큰 값일때는 식 (5)의 우

변의 제1항은 무시될 수 있으므로 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta p = - \frac{\pi \rho U^2 a^2}{4} \quad (6)$$

원형교각의 중심으로부터 원환의 끝단까지 거리를  $S_a$ 라고 하면 총압력 변화량은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta p &= \int_{S_a}^{R_1} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} (p - p_0) r \, dr \, d\theta \\ &= \frac{\rho U^2}{2} \left( \frac{\pi a^4}{2R_1^2} - \frac{\pi a^4}{S_a^2 2a^2} \right) \\ &= - \frac{\pi \rho U^2 a^2}{4S_a^2} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)로부터 원환을 부착했을 때 압력변화량은  $S_a^2$ 에 반비례하므로 세굴심도 같은 경향으로 감소될 것이 예상된다.

### 3. 수리모형실험

#### 3.1 흐름특성실험

본 연구에서 수행된 수리모형실험은 3가지 유량조건 하( $Q=20, 25, 30 \text{ l/sec}$ )에서 이루어졌으며, 실험수로의 만곡각( $\theta$ )은  $180^\circ$ , 수로폭( $B$ )은  $0.90 \text{ m}$ , 수로 중심선을 따른 곡률반경 ( $r_c$ )은  $2.5 \text{ m}$ , 유입, 유출부의 직유로부 길이는  $8.0 \text{ m}$ , 곡률반경-하폭 비 ( $r_c/b$ )는  $2.78$ 이다. 그림 5에는 모형실험 장치와 관측지점을 나타내었다.

유량은 유량공급 수조에 월류관을 설치하여 조절하였으며 평형세굴심에 도달하는 4시간을 유하시켰다. 실험에 사용된 하상재료의 중앙입경  $d_{50}$ 은  $0.53 \text{ mm}$ , 기하학적 표준편차  $\sigma_g(d_{84.1}/d_{15.9})$ 는  $1.82$ 인 비균등 유사틀 사용하였으며, 최대세굴심은  $1 \text{ mm}$  측정용 봉을 제작하여 측정하였고 유속측정은 만곡부에서 이차류를 포함한 흐름특성을 분석하기위해 3차원 유속계 (ADV-F)를 이용하여 만곡이 시작되는 유입부에서 유출부까지  $30^\circ$  간격으로 단면을 설정하고 각 단면에서 횡방향으로  $15 \text{ cm}$ 씩 분할하여 각각 5지점, 총 35개 측정에서 측정하였다. 또한 횡방향 하상경사는 양안에서  $5 \text{ cm}$ 씩을 뿔 후  $10 \text{ cm}$ 간격으로 측정하였다.

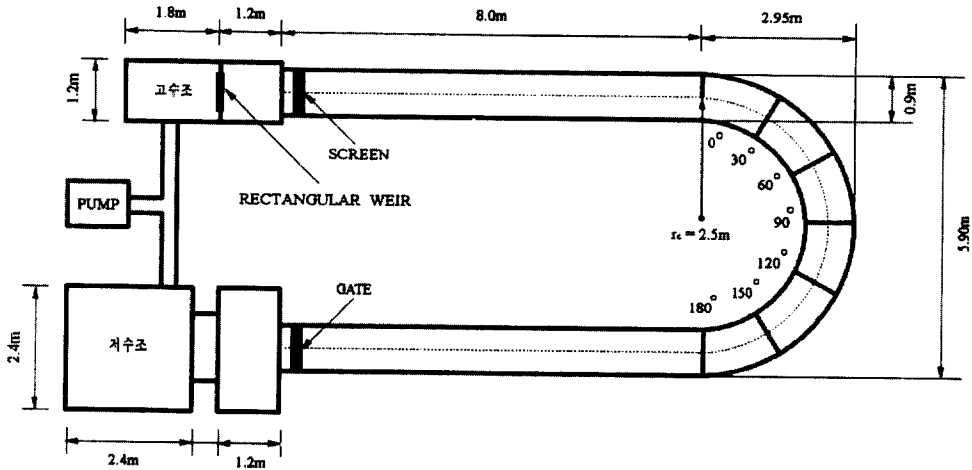


그림 5. 수리모형 실험장치

### 3.2 교각세굴실험

만곡부의 흐름특성 실험을 수행한 결과 최대 횡방향 하상경사는 150° 단면에서 발생하였다. 따라서 국부세굴실험은 직류로부에서는 유로중심선, 만곡부의 경우는 150° 단면의 내측, 외측, 중심선에서 수행되었다. 이때 만곡부의 교각 설치 위치는 벽면으로부터 15 cm를 띄웠으며 교각과 교각 사이의 거리는 30 cm간격으로 설치되었다. 또한 교각주위의 세굴심, 세굴폭, 세굴형상 등을 측정하기 위해 교각을 중심으로 상,하,좌,우 대각선방향과 직각방향으로 격자망을 설치하여 절점에서 국부 세굴심을 측정하였으며, 사용된 원형교각의 직경은 각각 2.65, 3.75 cm이다.

### 3.3 교각세굴 보호공실험

국부세굴심 감소효과를 분석하기 위하여 기존의 세굴 보호공법중 원환을 이용한 보호공법을 교각세굴 실험과 동일한 위치에 설치하여 실험하였다. 이때 교각 폭과 원환폭 비(W/b)는 2이며, 원환의 위치는 하상으로부터 평균수심의 +0.2h, +0.1h, 0.0h, -0.1h, -0.2h인 지점에 설치하여 실험을 수행하였다.

## 4. 비교 및 고찰

### 4.1 흐름특성실험

그림 6에는 그림 5에서 도시된 만곡각도에 대한 하상고 변화가 곡물비에 대해 제시되었다. 그림 6에서

보는바와 같이 180° 만곡수로에서 최대 횡방향 하상경사는 모의된 모든 실험유량 조건에 대하여 만곡부 150° 단면에서 발생하였으며, 유량이 증가함에 따라 내측은 퇴적되고 외측은 침식되는 경향이 정점부를 지나면서 점차적으로 증가하였다.

### 4.2 교각 국부세굴 실험

그림 7에는 실험에서 측정된 최대 국부세굴심에 대하여 직류부와 만곡부의 분석결과를 도시하였다.

그림 7에 제시된 것과 같이 동일한 유량조건에서 교각의 직경이 증가할수록 국부세굴심도 증가하는 경향을 보였다. 특히, 유량 증가에따른 횡방향 하상변동이 고려된 교각주위 국부세굴심을 분석한 결과 만곡부 외측에 세워진 교각은 만곡부의 흐름특성으로 인한 수축세굴의 영향때문에 직류부에 비하여 세굴심이 1.5배에서 2배까지 증가하는 경향을 보였다.

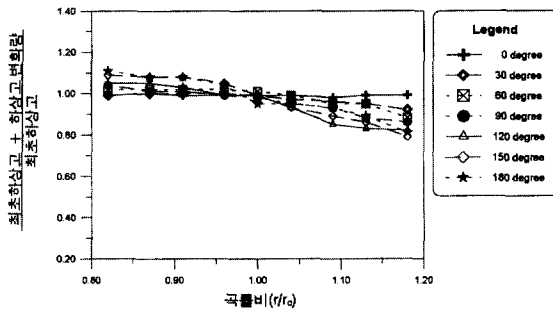
### 4.3 세굴보호공실험

#### 4.3.1 직류로부의 세굴감소효과

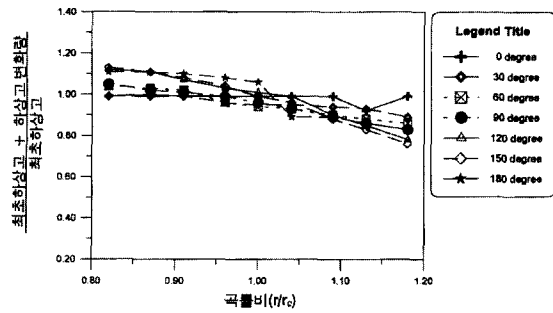
교각주위의 국부세굴심을 감소시키기 위한 세굴보호공으로 원환을 이용한 세굴 감소효과를 직류로부에서 대하여 분석하였으며 기존의 연구와 비교한 결과는 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서  $D_c$ 는 원환을 설치한 경우 세굴심,  $D_s$ 는 원환을 설치하지 않은 경우 세굴심이다.

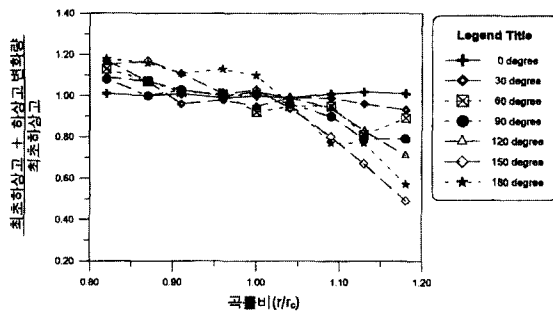
직류로부에서 세굴보호공으로 원환을 적용한 경우



(a)  $Q = 20$  (l/sec)일 때



(b)  $Q = 25$  (l/sec)일 때



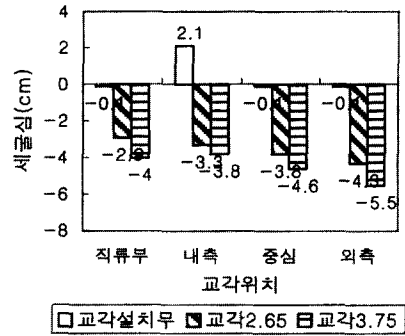
(c)  $Q = 30$  (l/sec)일 때

그림 6. 유량에 따른 단면별 횡방향 하상경사 변화도

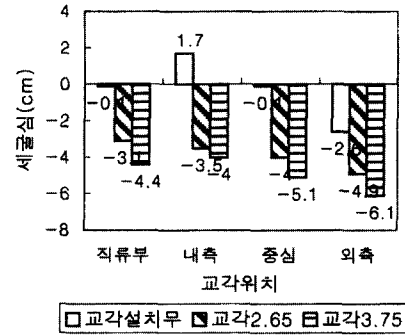
국부 세굴심 감소효과가 기존의 연구와 동일하게 하상으로부터 수심의 0.2h 만큼 저면에 설치하였을 때 ( $y_d/h = -0.2$  지점) 약 40%의 최대 감소효과를 보였다. 또한 Ettema(1980)와 Chiew(1992)의 실험 결과보다는 국부세굴심 감소효과가 작았으나 개도비에 따라 일정하게 증가함을 알 수 있었다.

#### 4.3.2 만곡부의 세굴감소효과

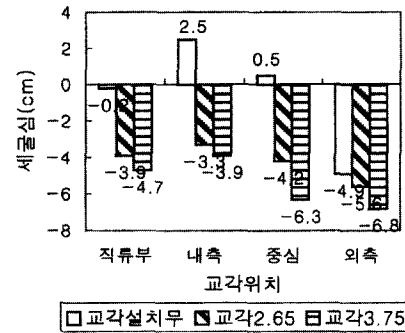
그림 9에 나타낸 바와 같이 유로 만곡부의 외측에



(a)  $Q = 20$  (l/sec)일 때



(b)  $Q = 25$  (l/sec)일 때



(c)  $Q = 30$  (l/sec)일 때

그림 7. 조건별 최대 국부세굴심 변화

원환을 설치하였을 때 원환에 의한 최대 국부세굴심 감소효과를 보인 설치지점은 하상으로부터 0.1h 만큼 하상저면에 설치하였을 때 ( $y_d/h = -0.1$  지점) 나타났으며 최대 국부세굴심은 44%까지 감소되었고, 하상위에 원환을 설치할 때는 원환설치 효과가 미소함을 볼 수 있었다. 만곡부 외측에서는 교각 폭보다 1.5배

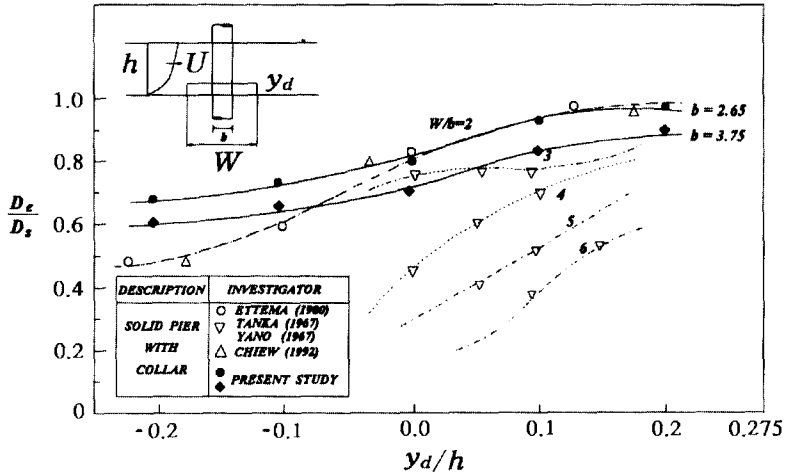


그림 8. 유로 직선부에서의 원환 설치에 따른 국부세굴심 변화도

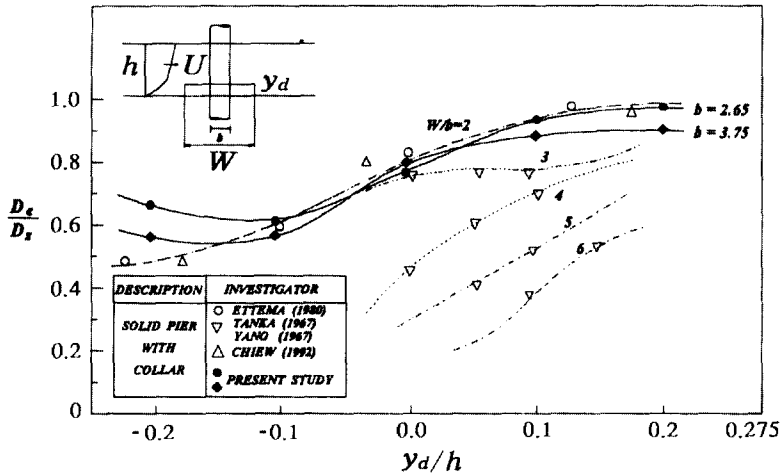


그림 9. 유로 만곡부에서의 원환 설치에 따른 국부세굴심 변화도

에서 3.5배로 나타났던 세굴폭이 원환을 설치한 후에는 현저히 감소하였다.

만곡부 횡단면 중앙에 설치한 경우도 외측과 마찬가지로  $-0.1h$ 만큼 하상 저면에 원환을 설치하였을 때 나타났으며, 만곡부 내측의 경우는 교각에 의한 국부 세굴과 흐름특성에 의한 영향때문에 내측이 퇴적되어 원환을 이용한 보호공의 효과가 불규칙함을 관찰할 수 있었다.

## 5. 결 론

만곡부에 위치한 교각주위의 국부세굴형상을 연구하

기 위하여  $180^\circ$  만곡부가 설치된 수로에서 수리실험을 수행하여 만곡부의 흐름특성과 이동상 하상의 변동을 분석하였으며, 직유로부에서는 유로중심선, 만곡부에서는 최대 횡방향 하상경사가 측정된  $150^\circ$  단면에서 교각국부 세굴실험과 원환에 의한 세굴보호공 실험을 수행한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 유로 직선부와 만곡부의 이동상 실험을 실시하여 흐름특성을 분석한 결과 만곡부 흐름특성에 의한 최대 횡방향경사는 최대유속이 발생하는 단면인  $150^\circ$  단면에서 발생하였다.

(2) 원환을 이용한 세굴보호공에 대하여 유로 직선

부와 만곡부를 비교한 결과 직선부의 경우 최대 40%의 국부 세굴심 감소효과가 나타났고 만곡부의 경우 외측에서 44%의 국부 세굴심 감소효과를 보였으며, 교각 국부세굴에 의한 세굴폭은 직유로부에 비하여 만곡부 외측에서는 교각 폭의 1.5배에서 3.5배에 달하였으며 원환설치시 약 50%의 감소효과를 보였다.

(3) 원환을 이용한 국부세굴 보호공을 유로 직선부와 만곡부에 설치하여 실험한 결과 본 연구 조건에서 직유로부의 최대 감소효과는 원환의 위치가 평균수심(h)의 0.2h만큼 하상저면에 설치하였을 때 가장 효과적이었으나, 만곡부에서는 평균수심(h)의 0.1h만큼 하상저면에 설치하였을 경우 가장 효과적이었다.

본 연구에서 제시된 결과는 180° 만곡수로에 대해 원형교각을 대상으로 세굴보호공으로 원환을 적용한 결과이므로 상이한 형태의 교각형상을 갖는 경우 등의 해석에 적용시에는 신중함이 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 서일전문대학 학술 연구 조성비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

고재웅 (1975). "만곡유로에서의 하상변동에 관한 연구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제8권, 제2호, pp. 75-80.

김종섭 (1994). 교각 주위의 국부세굴에 관한 실험적 연구. 박사학위논문, 충북대학교.

노섭, 송재우 (1996). "유로만곡부에서 교각에 의한 국부적인 하상세굴." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제16권, 제II-2호, pp. 149-158.

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

안상진, 이재형, 김경호, 김양수 (1982). "금강수계의 사행에 관한 연구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제15권, 제1호, 3, pp. 33-42.

안상진, 최계운, 김종섭, 안창진 (1993). "보청천내 교각설치에 따른 세굴심도의 산정." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제13권, 제3호, pp. 93-105.

윤세의 (1986). 수심이 얇은 고정상 만곡수로에서의 흐름특성 해석. 박사학위논문, 연세대학교.

윤태훈, 남궁돈, 김경희 (1996). "푸팅의 상류 바닥에 의한 교각주위 국부세굴 감소." 1996년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회,

pp. 91-94.

이원환, 이정식, 이홍래 (1985). "교각주변 하상의 국부세굴에 관한 실험적 연구." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제5권, 제1호, pp. 65-74.

이정규, 정동원, 이창해, 윤운수 (1994). "교각에 의한 하상세굴에 관한 실험적 연구." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제14권, 제6호, pp. 1349-1356.

이정규, 정동원, 이창해, 윤운수 (1995). "하천 교각의 세굴방지 대책에 대한 실험적 연구." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제15권, 제1호, pp. 165-172.

차영기, 이대철 (1991). "만곡수로의 횡방향 하상경사와 흐름특성." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제24권, 제1호, pp. 99-107.

최인호, 박영진, 송재우 (1997). "유로만곡부에서의 원환에 의한 교각세굴 감소효과에 관한 연구." '97년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 148-153.

Breusers, H.N.C., Nicollet, G., and Shen, H.W. (1977). "Local scour around cylindrical piers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, pp. 211-252.

Chiew, Y.M. (1992). "Scour protection at bridge piers." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 9, pp. 1260-1269.

Dargahi, B. (1990). "Controlling mechanism of local scouring." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 10, pp. 1197-1214.

Engelund, F. (1974). "Flow and bed topography in channel bends." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.

Ettema, R. (1980). *Scour at bridge sites*. Rep. No. 117, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.

Ettema, R., and Melville B. W. (1989). "Design for local scour at bridge piers: A commentary." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. 1-12.

FHWA, (1993). *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18.

Ikeda, S., Parker, G., and Sawai, K. (1981).



- "Bend theory of river meander. Part 1. Linear development." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 112, pp. 363-378.
- Jain, S.C. (1981). "Maximum clear-water scour around circular piers." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. HY5, pp. 611-626.
- Kikkawa, H., Fukuoka, S., and Soogawa, H. (1971). "Study on scouring around a bridge pier and its prevention." *Proc. of JSCE*, Vol. 194, pp. 83-90.
- Laursen, E.M., and Toch, A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments*. Iowa Highway Res. Board, Bulletin No. 4.
- Melville, B.W. (1984). "Live-bed scour at bridge piers." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 9, 1984, pp. 1234-1247.
- Nouh, M. (1984). "Scour at bridge piers in meandering channels- I." *Channels and Channel Control Structures*, Edited by Smith, Computational Mechanics Centre, pp. 75-83.
- Odgaard, A.J. (1984). "Flow and bed topography in alluvial channel bend." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 521-536.
- Raudkivi, A.J., and Ettema, R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical pier." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 338-350.
- Rozovskii, I.L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. The Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel.
- Tanaka, S., and Yano, M. (1967). "Local scour around a circular cylinder." *Proc. 12th Congress of IAHR*, Vol. 3, Fort Collins, Colorado, USA, pp. 193-201.
- Yen, B.C. (1967). *Bed configuration and characteristics of subcritical flow in a meandering river*. Ph. D. Thesis, University of Iowa.
- Zimmermann, C., and Kennedy, J.F. (1978). "Transverse bed slopes in curved alluvial stream." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 104, No. 1, 1978, pp. 38-48.

<최종본 접수일 : 1998년 4월 9일>