

곡류부에서 국부세굴깊이 예측식 산정에 관한 연구

○김 두 래* · 이 용 환** · 송 재 우***

1. 서 론

교각주위의 국부적인 하상세굴에 관한 연구는 대체로 직유로부를 기초로 해서 수 많은 연구가 이루어졌으나, 만곡부에 설치되어 있는 교량의 국부 세굴깊이를 예측하기 위해서는 아직까지도 만곡부에서의 흐름특성을 완전히 규명하지 못한 관계로 직유로부의 국부 세굴깊이에 일정한 비율을 증가시킨 값으로 만곡부의 국부 세굴깊이를 추정하고 있는 실정이다.

교각세굴에 관한 기존의 연구로는 이(1985) 등이 국부 세굴깊이를 교각 Reynolds number와 난류강도로 나타낸 식으로 제안하였으며, Raudkivi(1986)는 원형 교각에서의 세굴의 함수적 경향을 연구하였으며, 최(1997)는 수리모형실험을 통하여 만곡부 국부세굴 예측식을 제안하였으나, 현재까지 만곡부에서의 국부세굴 예측식에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 수리모형실험을 실시하여 만곡부의 흐름특성과 교각 주위의 국부세굴현상 등을 분석한 후 실험에서 얻어진 자료를 기초로하여 유로 만곡부 국부 세굴깊이에 영향을 주는 수리학적·기하학적 인자들을 선별하고, 비선형 다중회귀분석을 통하여 최적의 인자들로 만곡부 국부 세굴깊이 예측식을 제안함으로써 원형교각에서 발생하는 국부 세굴깊이의 예측과 기존 교각의 유지관리 및 신설교량, 교대의 가설시 안정성 검토에 기여하고 만곡부 국부 세굴깊이를 예측하는데 기초 연구자료를 제공하는데 있다.

2. 기본이론

2.1 만곡부 국부세굴 예측식

만곡부에서 국부세굴깊이 예측시 주요한 수리학적 인자 및 기하학적 인자와 곡률비를 포함한 함수식으로 나타내면 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_s = f(b, H_a, V_a, t, g, d_{50}, a', \rho, \rho_s, \nu, K_s, \sigma_g, r) \quad (1)$$

여기서 D_s 는 세굴깊이, H_a 는 접근수심, t 는 흐름의 지속시간, a' 는 교각에 접근하는 흐름의 각도, K_s 는 교각형상계수이다. 또한 곡률비에 대한 영향을 무차원화 시키면 다음과 같다.

$$\frac{D_s}{b} = f\left(\frac{H_a}{b}, \frac{V_a}{\sqrt{g b}}, \frac{d_{50}}{b}, \sigma_g, a', K_s, \frac{V_a t}{b}, \frac{\rho V_a}{\rho_s d_{50}}, \frac{r}{r_c}, \frac{V_a}{U_c}\right) \quad (2)$$

여기서 r_c 는 중심선에서의 곡률반경이다. 유체의 밀도와 하상재료 입경의 기하학적 표준편차(또는 균등계수), 흐름에 지속시간 등에 의한 영향은 다른 인자들에 비하여 세굴에 대한 영향이 상당히 적으므로 인자를 제외하고 교각형상계수를 일정한 계수로 가정하고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{D_s}{b} = k K_s K_a \left(\frac{H_a}{b}\right)^{a'} (F r_b)^b \left(\frac{d_{50}}{b}\right)^c \left(\frac{r}{r_c}\right)^d \left(\frac{V_a}{U_c}\right)^e \quad (3)$$

식 (3)의 비선형 회귀모형을 일반선형 회귀모형으로 치환하기 위해 식을 변형하면 다음과 같이 된다.

* 홍익대학교 과학기술연구소 연구원

** 홍익대학교 토목공학과 박사과정

*** 홍익대학교 토목공학과 교수

$$\log\left(\frac{D_s}{b}\right) = \log k + \log K_s + \log K_a + a' \log\left(\frac{H_a}{b}\right) + b' \log(Fr_p) + c' \log\left(\frac{d_{50}}{b}\right) + d' \log\left(\frac{r}{r_c}\right) + e' \left(\frac{V_a}{U_c}\right) \quad (4)$$

이 식을 일반화된 선형 회귀모형으로 나타내기 위하여 각 항을 각각 치환하면 다음 식과 같이 간단한 일반선형 회귀모형이 된다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 X_1 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_4 + \beta_7 X_5 \quad (5)$$

또한 본 실험의 경우 원형교각에 대한 만곡부의 교각주위 국부 세굴깊이를 예측하므로 교각형상계수 K_s 과 교각에 접근하는 흐름의 각도에 따른 계수 K_a 모두 1 이 된다. 따라서 위 식은 아래와 같이 간략화 될 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \beta_3 X_1 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_4 + \beta_7 X_5 \quad (6)$$

3. 수리모형실험

3.1 흐름특성실험

수리모형실험은 3 가지 유량조건($Q = 20, 25, 30$ l/sec) 하에서 이루어 졌으며, 실험수로의 제원은 만곡각 ($\theta = 180^\circ$), 하폭(B)은 0.90 m, 수로중심선을 따른 곡률반경(r_c)은 2.5 m, 유입·유출부의 직유로부의 길이는 8.0 m이고, 조도계수는 0.012이다. 또한 실험에 사용된 하상재료의 중앙입경 d_{50} 은 0.53mm, 기하학적 표준편차 $\sigma_g(d_{84.1}/d_{15.9})$ 는 1.82 였고, 곡률반경-하폭 비(r_c/B)는 2.78이었다.

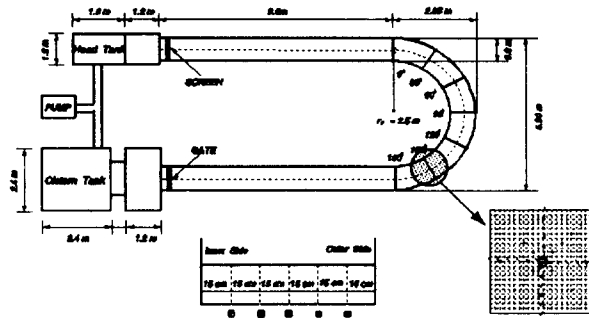


그림 1 수리모형 실험장치

3.2 교각 국부세굴 실험

교각주위의 국부세굴을 연구하기 위하여 만곡부의 흐름특성을 실측한 결과 최대 횡방향 하상경사는 15 0° 단면에서 발생되었으므로, 국부 세굴실험은 직유로부에서는 유로중심선, 만곡부에 대해서는 150° 단면에 내측을 기준으로 15 cm 간격으로 5 등분하여 각각 국부세굴실험이 실시되었다. 이 때 만곡부의 교각 설치 위치는 기초 자료 실험을 통하여 얻어진 결과로부터 벽면 효과를 고려하여 벽면으로부터 15 cm의 거리를 두었다.

4. 분석 및 고찰

4.1 흐름특성실험

1) 유속분포

본 실험수로에서 이동상 수리모형 실험을 통하여 나타난 각 단면별 만곡부 흐름방향 유속분포는 모든 유량조건에서 만곡부로 진입하면서 내측으로 편기되다가 90° 를 지나면서 외측으로 최대 유속선이 편기되는

경향을 보였고, 최대유속은 150° 단면에서 발생하였다.

2) 하상변화

만곡부 내에서 하상형의 변화를 파악하기 위해서 횡방향 하상경사를 각 단면별로 실측하였으며, 최대 횡방향 하상경사는 150° 지점에서 발생하였으며, 유량이 증가함에 따라 내측은 퇴적되고 외측은 침식하는 경향이 만곡부를 지나면서 나타났으며, 유량이 증가할수록 내측은 퇴적되고 외측은 침식하는 경향이 더욱 심하게 나타났다.

4.2 교각 국부세굴 실험

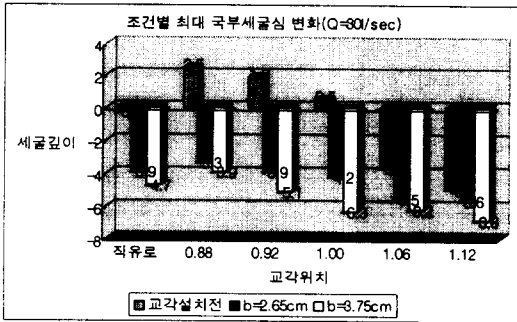


그림 2 교각 직경에 따른 국부 세굴 깊이 변화

직유로부와 만곡부에 설치된 교각의 국부 세굴깊이를 비교하여 보면, 만곡부 내측에서는 만곡부 흐름특성에 의한 수축세굴 때문에 직유로부에 비해 국부 세굴깊이가 작게 나타났으며, 외측에서는 침식으로 인해 국부 세굴깊이가 더욱 증가한 것을 알 수 있다.

그림 3에서 보는 바와 같이 동일한 유량조건하에서 교각의 직경이 증가할 수록 국부 세굴깊이도 증가하는 경향을 보였으며, 특히 만곡부 외측에 세워진 교각은 만곡부의 흐름특성으로 인한 수축세굴의 영향 때문에 직유로부에 비하여 세굴깊이가 1.5~2.0 배까지 증가하는 경향을 보였다.

4.3 다중회귀분석

만곡부에서 국부 세굴깊이를 예측하기 위해서 세굴깊이를 교각폭으로 나누어 무차원화시킨 값을 종속변수로 하고, 다음 식 (6)에서와 같이 5 가지 독립변수를 사용하여 다중회귀분석을 실시하였으며, 그림 5는 다중회귀분석의 흐름도를 나타내고 있다. 또한 여러 변수들간의 선형관계의 정도를 알아보기 위하여 Pearson 상관계수를 구하여 보았다. 표 1에서 보는 바와같이 세굴깊이(Ds)는 $\log(d50/b)$ 의 변수를 제외한 나머지 다른 4 가지의 독립변수들과 비교적 높은 상관관계를 나타내었다.

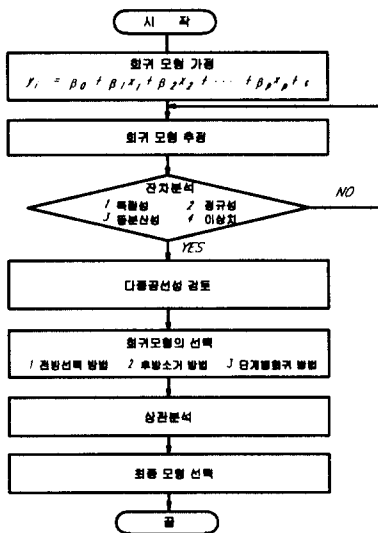


그림 3 최적모형을 선택하기 위한 흐름도

	$\log(Ha/b)$	$\log(Fr_a)$	$\log(r/r_c)$	$\log(d50/b)$	$\log(Va/Uc)$	$\log(Ds/b)$
$\log(Ha/b)$	1	0.6426	0.7134	0.5687	0.4107	0.7067
$\log(Fr_a)$	-	1	0.5830	0.3617	0.9422	0.8042
$\log(r/r_c)$	-	-	1	0.0002	0.5444	0.7259
$\log(d50/b)$	-	-	-	1	0.0499	0.3198
$\log(Va/Uc)$	-	-	-	-	1	0.7163
$\log(Ds/b)$	-	-	-	-	-	1

표 1 자료들의 Pearson상관계수

1) 잔차분석

모형의 적합성을 보다 정확하게 판단하기 위해서 잔차분석을 실시하였다.

① 독립성검토

오차들이 시계열상으로 서로 독립관계인지를 검증하기 위해서는 DW(Durbin-Watson) 통계량을 사용하는데 DW의 값은 다음 표 2와 같다.

② 등분산성 검토

오차들의 등분산성 여부를 알아보기 위하여 잔차와 예측값들을 도표로 그려보면 아래의 그림 4와 같고, 자료들이 0을 중심으로 어떤 특별한 형태를 갖고 있지 않으므로, 오차항들이 등분산성을 보임을 알 수 있다.

③ 정규성 검토

그림 5은 오차항의 정규성을 검토하기 위한 정규확률지의 모습을 개략적으로 나타낸 그림이며, 기준선과 (+)와 관측치(*)들이 많이 일치하고, 관측치들이 직선형태를 나타내고 있으므로 정규성이 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 2 Durbin-Watson의 통계량

Durbin-Watson D	2.164
관측치의 개수	36
$D_u < D < 5-D_u$	$1.80 < 2.164 < 3.20$

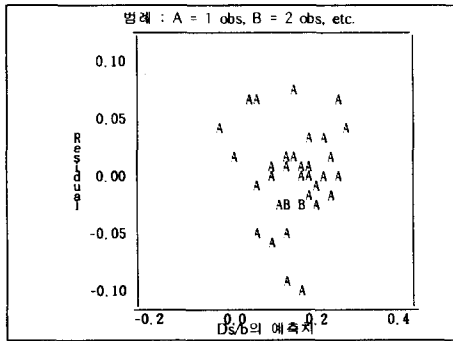


그림 4 등분산성 검토

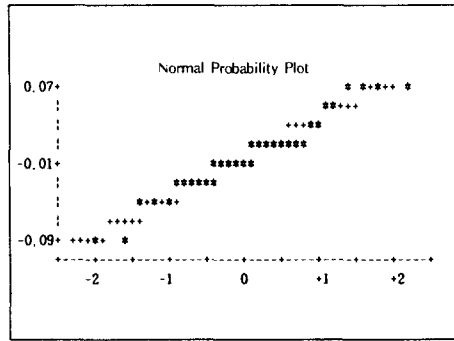


그림 5 정규확률지

2) 다중공선성 분석

다중공선성의 유무를 검토하는 여러 가지 방법 중에서 상대지수를 이용하여 다중공선성을 검토해 보았으며, 결과는 다음 표 3와 같다.

다중공선성 분석						
	y 절편	Ha/b	Fr _D	r/r _c	d ₅₀ /b	Va/Uc
고유치	3.9877	1.5283	0.4290	0.0538	0.0009	0.0000
상대지수	1.0000	1.6153	3.0486	8.60345	63.5404	1191

표 3 다중공선성 분석을 위한 상대지수

표 3에서 보는 바와 같이 독립변수들에 대한 고유치가 모두 양수이지만 d₅₀/b와 Va/Uc의 변수가 0에 매우 가까운 값을 나타내고 있으며, 또한 이 변수와 관련된 상대지수 역시 기준치인 30을 초과하고 있다. 따라서 본 연구에서 d₅₀/b와 Va/Uc의 변수에 다중공선성의 문제가 있다.

3) 최적 모형의 선정

최적모형을 선정하기 위한 방법으로는 전방선택, 후방소거, 단계별 회귀, 최대 R² 향상법 등이 있다. 본

연구에서는 전방선택법, 후방소거법, 단계별 회귀방법을 사용하여 최적모형을 선정해 보았고, 그 결과를 표 4에 제시하였다.

	만곡부 국부세굴깊이 예측식	결정계수
전방선택법	$\left(\frac{D_s}{b}\right) = 2.1828 \left(Fr_p\right)^{0.3599} \left(\frac{r}{r_c}\right)^{1.0570} \left(\frac{d_{50}}{b}\right)^{0.1513}$	0.761308
후방소거법	$\left(\frac{D_s}{b}\right) = 2.3814 \left(\frac{r}{r_c}\right)^{1.1918} \left(\frac{d_{50}}{b}\right)^{0.3257} \left(\frac{V_a}{U_c}\right)^{0.3606}$	0.762101
단계별회귀방법	$\left(\frac{D_s}{b}\right) = 1.7096 \left(\frac{r}{r_c}\right)^{0.9491} \left(Fr_p\right)^{0.4144}$	0.746920

표 4 만곡부 국부세굴깊이 예측식

4.4 기존 국부세굴 예측식들과의 비교

만곡부의 국부 세굴깊이 실측치와 예측치를 비교하기 위해서 기존의 직류부에 대한 국부 세굴깊이 예측식들인 CSU 식(이하 CSU), Melville와 Sutherland 식(이하 MAS), Shen 1 식(이하 SHE 1), Shen 2 식(이하 SHE 2), Laursen과 Toch 식(이하 LAT), Jain과 Fisher 식(이하 JAF)을 이용하여 실측치와 상관분석을 하였고, 기존의 만곡부 국부세굴 예측식인 최 식과도 상관분석을 하여 보았다.

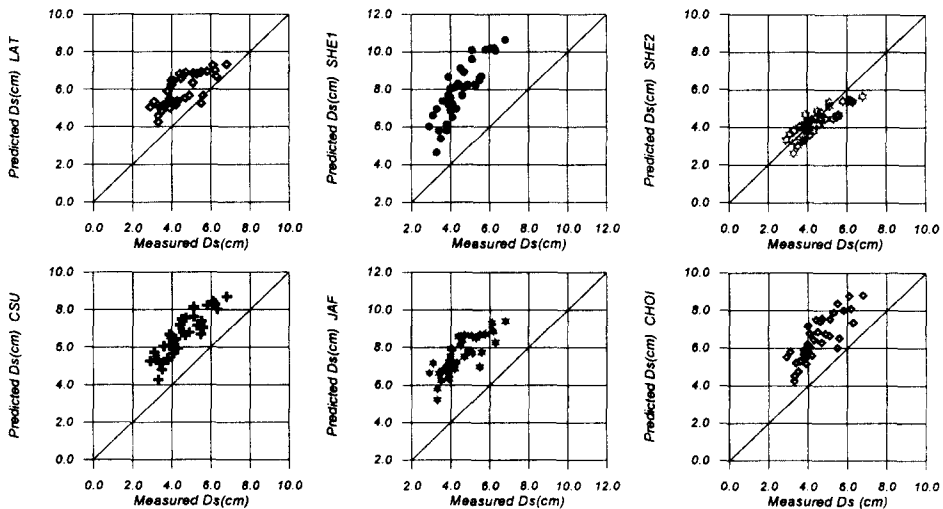


그림 6 국부 세굴깊이 실측치와 예측치의 상관도

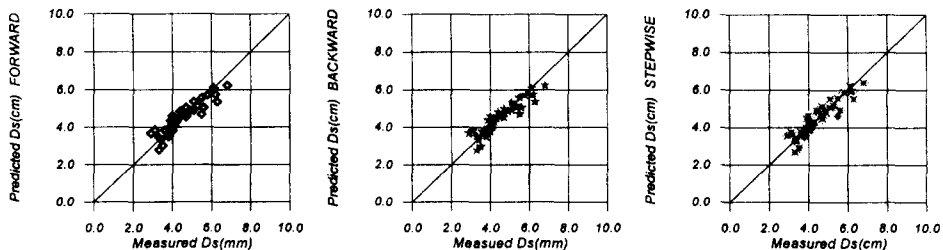


그림 7 본 연구에서 얻어진 예측식의 실측치와 예측치의 상관도

각 예측식의 상관계수									
	LAT	SHE1	SHE2	CSU	JAF	CHOI	전방선택	후방소거	단·회귀
상관계수	0.554021	0.744451	0.742472	0.782291	0.633956	0.683847	0.843978	0.845034	0.836238

표 5 각 예측식의 상관계수

5. 결 론

180° 만곡수로에서 수리모형실험을 실시한 결과와 비선형 다중회귀분석을 통한 국부 세굴깊이 산정에 관한 연구의 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 직유로부와 유로만곡부의 이동상 실험을 실시하여 흐름특성을 분석한 결과 최대 유속과 최대 횡방향 하상경사는 150° 단면에서 발생하였고, 교각 국부세굴 실험을 통하여 만곡부에서 수축세굴로 인하여 1.5~2 배 가량 증가됨을 알 수 있었다.

(2) 수리모형실험을 통해서 얻어진 36 개의 실측자료를 토대로 다변량 해석 방법에 의해 만곡부 국부 세굴깊이 예측식을 제안하였고, 기존의 교각주위의 국부 세굴깊이 예측식과 본 연구에서 측정된 실측치를 비교·검토해 본 결과 대부분의 예측치가 실측치보다 과대하게 나타났다.

(3) 상관분석을 실시한 결과 CSU 식이 가장 높은 상관성을 보였고, 다음으로 SHE 1, SHE 2 式의 상관성이 높게 나타났으나, 본 연구에서 제안한 예측식은 더 높은 상관성을 나타내었다. 기존의 만곡부 국부 세굴깊이 예측식인 최 식과 비교하여 본 결과 본 연구에서 제안한 예측식이 실측치를 더 근사하게 예측하였고, 상관성도 더 높았다.

참 고 문 헌

- 이원환 외 2인, “교각주변 하상의 국부세굴에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 5 권, 제 1 호, 1985., pp. 65~74.
- 이정규 외 3인, “교각에 의한 하상세굴에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 14 권, 제 6 호, 1994. 11., pp. 1349~1356.
- 이종태, 윤세의, “개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름 특성”, 대한토목학회논문집, 제 7 권 제 3 호, 1987. 9, pp. 195~202.
- 최인호, “유로만곡부의 원형교각 주위 국부세굴보호공에 관한 연구”, 박사학위논문, 홍익대학교 대학원, 1997.
- Breusers, H.N.C., G. Nicollet, and H.W.Shen, “Local Scour around Cylindrical Piers”, J.Hydr. Res. 15; 211-252, 1977.
- Melville, B.W., “Live-bed Scour at Bridge Piers”, *Journal of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 110, No. 9, Sep., 1984, pp. 1234 ~ 1247.
- Raudkivi, A.J., “Functional Trends of Scour at Bridge Piers”, *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 1, Jan., 1986, pp. 1~13.
- Shen, H.W., et al., “Local Scour around Bridge Piers”, *Journal of Hydraulics Division.*, ASCE, Vol. 95, No. HY6, Nov., 1969, pp. 1919~ 1940.