

원형교각에서의 세굴방지를 위한 사석보호공의 설계

윤태훈*, 윤성범**, 윤광석***

1. 서론

한강을 횡단하는 교량을 포함한 국내 하천교량의 안전관리를 위해 교량수증하부구조의 안전성이 검토되고 있으며, 그 결과에 따라 국부세굴이 심한 교량에 대한 세굴방지대책이 수립되고 있다. 기존 교량의 국부세굴방지공법으로는 세굴공에 사석, 돌망태, 콘크리트 블럭 등 굴요성이 좋은 재료를 채워 넣는 공법이 대체적으로 사용된다. 사석보호공 설계시 가장 중요한 점은 교각 주변의 강한 유속에 보호층이 유실되지 않도록, 충분히 큰 사석을 사용하여야 하나, 현장여건과 시공가능성을 고려하면 무조건 큰 사석만을 사용할 수는 없으므로 수심, 교각형상과 크기, 유속 등에 따라 사석의 최적 직경을 결정하여야 한다.

기존의 세굴방지 또는 감소 공법에 관한 연구를 살펴 보면 사석보호공의 포설면적이 세굴 심 감소에 미치는 영향을 검토한 Fotherby(1993) 및 Ruff & Nickelson(1993) 등의 연구가 있으며, 교각 하부의 하상 부근에 원환(collar)을 설치하거나, 교각에 동공을 설치하여 교각 전면의 하향류를 제어함으로써 세굴심을 감소시킬 수 있었다고 보고한 Chiew(1992)의 연구, 그리고 국내에서는 이와 유사한 종류의 실험 연구를 발표한 이정규(1994)의 논문이 있다.

한편, 세굴방지공 사석의 한계직경에 관한 연구로는 Breusers et al.(1977), Bonasoundas (1973), Quazi & Peterson(1973) 및 콜로라도 주립대 등에서 제안한 공식이 있으며, Bonasoundas 를 제외하면 모든 제안식이 Isbash(1935)의 경험식을 변형한 형태이다. 한편, Parola(1993)는 정사각형교각과 원형교각에 대해 광범위한 실험을 행하여 교각주위에 포설한 사석보호공의 한계직경이 교각의 크기, 수심, 포설면의 위치와 접근유속의 함수임을 보였다. Parola는 정사각형교각에 대해 사석보호공 표면이 하상보다 약간 낮게 포설되었을 때가 가장 불안정함을 밝히고 이 경우에 대한 새로운 경험공식을 제안하였으나, 제반 변수들간의 분명한 관계를 제시하지는 못했다.

본 연구에서는 원형교각에 대해 접근유속, 수심, 포설면 위치와 교각직경 사이의 명확한 관계를 나타내는 한계사석결정 공식을 Parola(1993)의 실험 결과를 이용하여 얻고, 이를 증명하기 위한 기초적인 실험 결과를 제시한다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 조교수
*** 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

2. 사석보호공 설계식 도출

주어진 흐름조건하에서 하상의 사석이 안정을 유지할 수 있는 조건은 Isbash(1935)의 연구에 기초하여 다음의 사석안정수(stability number) N_c 의 함수로 주어진다.

$$N_c = \frac{u_o^2}{(S_s - 1)gD_p} \quad (1)$$

여기서, u_o 는 수심평균된 접근유속, S_s 는 사석의 비중, g 는 중력가속도(9.81m/sec^2), D_p 는 사석의 평균직경(m)이다. 교각이 없을 때 하상의 사석안정조건에 대한 Neill(1967)의 경험식은 다음과 같다.

$$N_c = 2.5 \left(\frac{D_p}{y_o} \right)^{-0.20} \quad (2)$$

Breusers et al.(1977)은 교각의 세굴공에 설치한 표층사석에 대한 안정 조건으로 다음의 식을 제안하였다.

$$N_c = 0.3524 \quad (3)$$

Quazi & Peterson(1973)은 Neill(1967)의 경험식(2)에서 계수 조정을 통하여 교각세굴보호공 사석에 대해 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$N_c = 1.14 \left(\frac{D_p}{y_o} \right)^{-0.20} \quad (4)$$

또한 Bonasoundas(1973)는 접근유속만의 함수로 안정사석의 직경을 구하는 공식을 제안하였다.

$$D_p = 0.01(6 + 3.3u_o + 4u_o^2) \quad (5)$$

Parola(1993)는 기존 공식의 적용성을 확인하기 위한 광범위한 실험을 실시하고, 사석보호공 표층의 위치(d), 교각의 직경(b), 수심(y) 등이 안정사석크기(D_p) 결정에 상당한 영향을 미치므로(그림 1 참조), 이를 고려하지 않는 기존 공식이 개선되어야 한다고 보고하였다. 그러나 Parola는 여러가지 제반 변수사이의 관계를 명확히 밝히지 못하고, 정사각형교각에 대한 설계식을 제안하였으며, 원형교각에 대해서도 같은 식을 실무에 적용하였다.

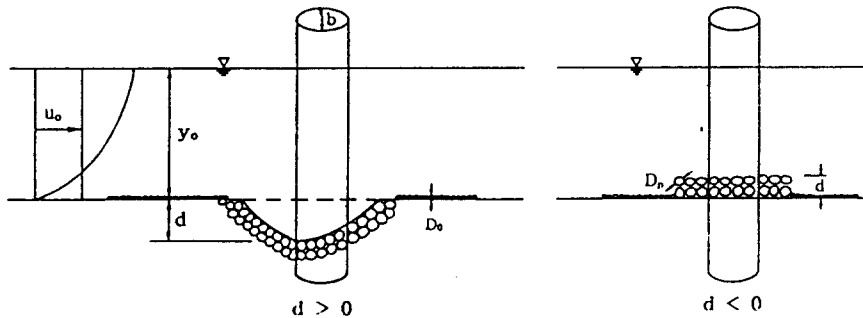


그림 1. Parola 실험의 포설위치 개념도

본 연구에서는 Parola의 실험결과를 이용하여 보다 포괄적이고 정확한 경험식을 도출하기 위해 교각 주변의 3차원 흐름에 대한 역학을 고려하여 다음과 같이 수정입자안정수 N_c^* 를 정의하였다.

$$N_c^* = N_c K_y^2 K_D^2 K_d^{-2} \quad (6)$$

여기서, K_y , K_D , K_d 는 무차원 변수로서 각각 수심보정계수, 입자크기 보정계수, 그리고 포설면 위치에 따른 보정계수를 나타낸다. K_y 는 기본적으로 Mellville & Sutherland(1988) 등에 의해 제안된 것을 약간 변형한 것으로, 수심이 작을 경우 교각 전면부의 수표면 와류가 세굴을 발생시키는 말굽형 와류를 방해하므로 세굴발생이 저감되는 효과를 고려하기 위한 것으로 다음과 같이 정의하였다.

포설면 위치가 하상보다 낮은 경우, 즉 $d \geq 0$ 에 대해

$$K_y = \begin{cases} 0.2 \left(\frac{y_o}{b} \right), & \frac{y_o}{b} \leq 5.0 \\ 1, & \frac{y_o}{b} > 5.0 \end{cases} \quad (7-1)$$

반대로 포설면이 하상보다 높은 경우, 즉 $d < 0$ 인 경우

$$K_y = \begin{cases} 0.2 \left(\frac{y_o + d}{b} \right), & \frac{y_o + d}{b} \leq 5.0 \\ 1, & \frac{y_o + d}{b} > 5.0 \end{cases} \quad (7-2)$$

K_D 는 교각에 의한 유량의 배제량과 공극을 가진 사석층에 의한 하강류의 흡수효과를 나타내는 보정계수로서 다음과 같다.

$$K_D = \left(\frac{b}{25D_p} \right)^{1.065} \quad (7-3)$$

K_d 는 세굴공과 말굽형 와에 의해 접근흐름이 하상으로부터 분리되는 현상을 고려하는 보정계수로서, 함수형태는 Melville(1975)에 의해 측정된 하강류의 강도로부터 유도되었다. 사석의 표층이 하상면과 같거나 높을 때에는 분리되지 않는다.

$$K_d = \begin{cases} 1 + \frac{d}{2.5b}, & d > 0 \\ 1, & d \leq 0 \end{cases} \quad (7-4)$$

Parola(1993)의 실험결과를 이용하여 N_c 와 D_p/y_o 의 관계를 전대수지상에 표시하면 그림 2와 같이 상관성이 매우 약한 반면, 본 연구에서 제안한 N_c^* 와 D_p/y_o 와의 관계는 그림 3에 보인 바와 같이 강한 상관성을 보인다. 그림 3으로부터 회귀식을 구하여 다음과 같은 새로운 사석설계식을 제안한다.

$$N_c^* = 5.3 \times 10^{-5} \left(\frac{D_p}{y_o} \right)^{-2.24} \quad (8)$$

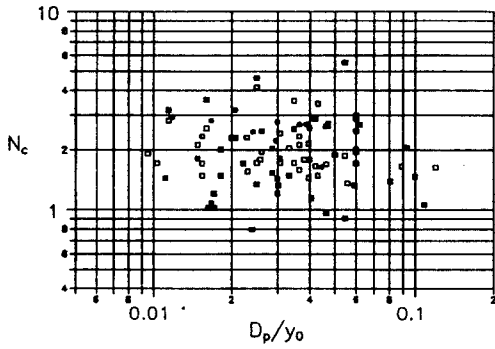


그림 2. 입자안정수 N_c 와 D_p/y_o 관계도

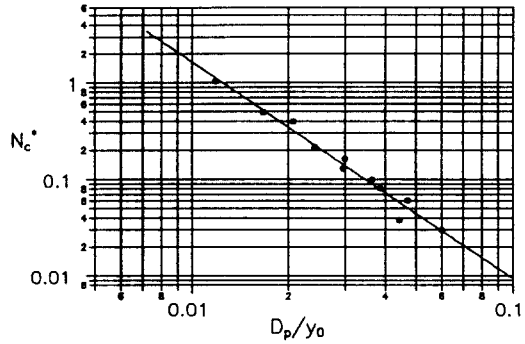


그림 3. 수정입자안정수 N_c^* 와 D_p/y_o 관계도

식(8)을 이용하여 입자안정수 N_c 를 $y_o/b < 5$ 인 경우에 대해서 다시 쓰면 다음과 같다.

$$N_c = 1.26\alpha\beta\left(\frac{D_p}{y_o}\right)^{-0.24} \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \left(1 + \frac{d}{25b}\right)^2, \quad \beta = \left(\frac{b}{D_p}\right)^{-0.13} \quad (10)$$

α 는 포설면 위치(d)가, β 는 교각직경(b)이 사석의 안정에 미치는 영향을 각각 나타낸다.

3. 검증 실험

본 연구에서 제안된 설계공식의 검증을 위하여 원형교각에 대한 사석안정실험을 수행하였으며, 실험 조건은 다음과 같다.

$$u_o = 0.29 \text{m/s}, \quad y_o = 0.166 \text{m}, \quad b = 0.05 \text{m}, \quad D_o = 0.4 \text{mm}, \quad S_s = 2.65 \quad (11)$$

사석은 교각주위에 원형으로 포설했고, 포설면의 위치는 하상과 동일하게 하였다($d=0$). 실험에 사용된 사석의 제원은 표1에 주어져 있다. 각각의 사석 입자에 대해서 포설 면적과 포설 두께를 변화시키면서 실험을 실시하였는 바, 사석범위나 사석층 두께에 관계없이, 1~4번 사석(0.84mm~2.38mm)은 불안정하고, 하류쪽으로 이탈되어 사석포설범위를 벗어났다. 5번 사석은 불안정하나, 사석포설범위 밖으로 이탈되지는 않았으므로, Parola가 정의한 한계상태로 보인다. 그리고 6번과 7번 사석은 어떤 경우에도 안정했다. 따라서, 주어진 흐름조건에서의 한계사석직경은 2.38mm~3.36mm의 범위에 있다.

원형교각에 대해서 $d=0$, $y_o/b=3.32$ 인 경우, 식(7-4)에 의하여 $K_d=1$ 이므로, 식(8)을 이용하여 다음과 같이 한계사석직경 D_p 를 구할 수 있다.

$$D_p = \frac{0.795u_o^{2.25}b^{0.15}}{(S_s-1)^{1.12}g^{1.12}y_o^{0.27}} \quad (12)$$

표 1. 실험에 사용한 사석의 제원

사석번호	체번호		입경 D_p (mm)			비고
	통과	잔류	최소	최대	평균	
1	16	20	0.84	1.19	1.02	비중 2.65 모난 입자
2	12	16	1.19	1.68	1.44	
3	10	12	1.68	2.00	1.84	
4	8	10	2.00	2.38	2.19	
5	6	8	2.38	3.36	2.87	
6	4	6	3.36	4.76	4.06	
7	-	4	4.76	9.52	7.14	

식(11)의 실험조건들을 식(12)에 대입하여 계산하면 $D_p=2.3\text{mm}$ 가 된다. 이는 사석직경이 $2.00\text{mm} \sim 2.38\text{mm}$ 인 4번 사석에 해당하므로 실험 결과, 즉 $2.38\text{mm} < D_p < 3.36\text{mm}$ 인 5번 사석보다 약간 작은 값을 준다. 이는 식(12) 또는 식(8)을 유도할 때 그림 3에 보인 바와 같이 실험자료의 오차를 최소화 하는 회귀직선을 이용하였으므로, 이 회귀직선식(8)의 하부에 존재하는 자료에 대해서는 다소 작은 사석직경을 주는데 기인한다. 회귀직선에서 가장 아래로 쳐진 한점을 제외한 모든 자료에 대해 하단 포락선을 취하면 식(8)은 다음과 같이 수정된다.

$$N_c^* = 4.60 \times 10^{-5} \left(\frac{D_p}{y_0} \right)^{-2.24} \quad (13)$$

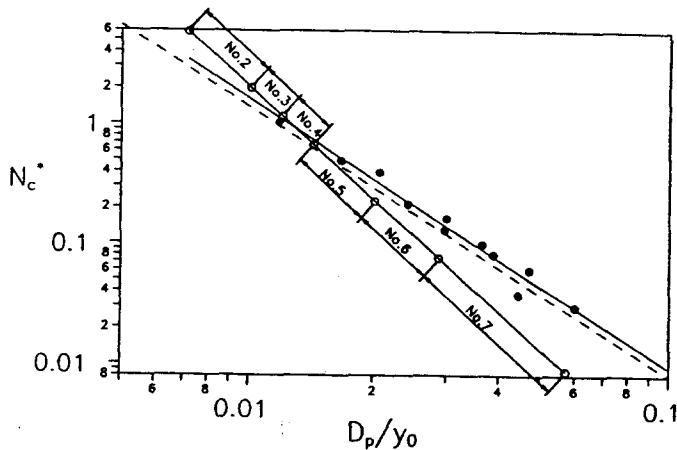


그림 4. 사석크기를 결정하는 설계곡선

그리고, 식(13)에 의해서 결정된 한계사석직경 D_p 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 D_p &= \frac{0.906 u_b^{2.25} b^{0.15}}{(S_s - 1)^{1.12} g^{1.12} y_0^{0.27}} \\
 &= 2.6 \text{ (mm)} \quad (14)
 \end{aligned}$$

이는 본 연구에서 얻어진 실험 결과, 즉 5번 사석($2.38\text{mm} < D_p < 3.36 \text{mm}$)에 해당한다. 이와 같이 실

험 결과가 회귀직선식에 의한 결과에 대해 다소 차이를 보이는 것은 다음의 두 가지 이유에 근거한다고 볼 수 있는데, 첫째로 육안에 의해서 결정되는 실험에서 사석의 안정·불안정 조건을 구별하는 확실한 기준이 없고, 둘째로, 본 연구에 사용한 사석은 모난 형태이나, Parola의 실험에서는 둥근 사석을 사용했기 때문이다.

4. 결론

교각주변하상세굴방지를 위한 최소사석크기를 결정하는 새로운 공식을 본 연구에서 제안하였다. 이 설계공식은 Quazi & Peterson(1973)의 식을 수정하고, Parola(1993)의 실험결과를 이용하였으며, 교각직경에 대한 수심, 입자의 직경, 그리고 포설면 위치의 영향을 종합적으로 고려하였다. 유도된 설계공식을 검증하기 위하여 실험을 수행하였으며, 그 결과 제안된 식의 타당성이 입증되었다. 또한, 접근수로의 하상조도와 사석의 포설면적의 영향을 고려하여 설계공식을 개선하기 위한 연구가 계속 진행 중이다.

5. 참고 문헌

- (1) 이정규 (1992) 하천교각의 세굴방지대책에 대한 실험적 연구, 한국과학재단 KOSEF 901-1302-005-2.
- (2) Bonasoundas, M. (1973) Flow structure and problems at circular bridge piers. Report No.28, Oskar V. Miller Inst., Munich Tech. Univ., Munich, West Germany.
- (3) Breusers, H.N.C., Nicollet, G. & Shen, H.W. (1977) Local scour around cylindrical piers. J. Hydr. Res., Vol.15, No.3, pp.211-252.
- (4) Chiew, Y.-M. (1992) Scour protection at bridge piers. J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.118, No.9, pp.1260-1269.
- (5) Fotherby, L.M. (1993) The influence of protective material on local scour dimensions. Proc. Hydraulic Engineering '93, ASCE, pp.1379-1384.
- (6) Isbash, S.V., 1935, Construction of dams by dumping stones in flowing water, W.S. Army Engrg. District, Eastport, Maine.
- (7) Melville, B.W. & Sutherland, A.J. (1988) Design method for local scour at bridge piers. J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1210-1226.
- (8) Mellville, B.W. (1975) Local scour at bridge sites, Report No.117, Univ. of Auckland, School of Engineering, Auckland, New Zealand.
- (9) Neill, C.R. (1967) Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material. Proc. 12th IAHR Congress, Fort Collins, Colo., C6.1-C6.9.
- (10) Parola, A.C. (1993) Stability of riprap at bridge piers. J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119, No.10, pp.1080-1093.
- (11) Quazi, M.E. & Peterson, A.W. (1973) A method for bridge pier riprap design. Proc. First Canadian Hydraulics Conf., Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, pp.96-106.
- (12) Ruff, J.F. & Nickelson, J.R. (1993) Riprap coverage around bridge piers. Proc. Hydraulic Engineering '93, ASCE, pp.1540-1545.