

교각 사석보호공의 안정사석크기에 미치는 제반 수리변수의 영향

윤태훈*, 윤성범**, 오철승***, 제갈선동***

1. 서론

사석보호공은 교각주위에서 발생하는 세굴방지를 위하여 오랜동안 사용되어온 공법으로서 시공성과 경제성이 좋아 널리 사용되고 있다. 그러나, 그 사용 횟수에 비해서 정확한 설계식을 제안한 연구는 미흡한 실정이다. 사석보호공 설계시 가장 중요한 점은 교각 주위의 강한 유속으로 보호층이 유실되지 않도록 충분히 큰 사석을 사용하여야 한다. 그러나 현장 여건과 시공 가능성을 고려하면 무조건 큰 사석만을 사용할 수는 없으므로 수심, 교각 형상과 크기, 유속 등에 따라 사석의 최적 직경을 결정하여야 한다.

기존의 사석보호공에 대한 연구는 대부분이 Isbash(1935)의 연구에 기초하고 있다. Isbash는 구조물이 없는 하상에서의 사석크기를 결정하는 경험식을 실험을 통하여 제안한 바 있는데, Isbash의 연구를 기초로 하여 산정된 설계식은 Carstens(1966), Neill(1975), Breusers 등(1977), 및 Richardson 등(1993) 등이 제안한 식들이다. Parola(1993)는 사각형교각에 대하여 광범위한 실험을 수행하여 교각폭의 영향을 고려한 새로운 경험 공식을 제안하였으나 변수간에 정확한 관계를 규명하지는 못하고 대략적인 경험식을 제안하였다.

본 연구에서는 실험을 통하여 흐름 조건에 따라 사석이 교각 주위로부터 이탈하기 시작하는 한계흐름상태를 결정하고, 사석의 안정에 영향을 미치는 각 변수들의 관계를 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 기존의 사석보호공 결정식

기존의 사석보호공의 설계 방법은 Isbash(1935)의 연구에 기초를 두고 있다. Isbash(1935)는 구조물이 없는 하상에서 안정한 사석의 크기를 결정하는 연구를 수행했고, 실험에 의해서 다음과 같은 경험식을 도출해냈다.

$$u_s = C \sqrt{2gD_p \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma}} \sqrt{\cos \beta - \sin \beta} \quad (1)$$

여기서, u_s 는 구조물이 없는 상태에서의 한계유속, C 는 Isbash 계수(최대 0.86, 최소 1.20), g 는 중력 가속도, D_p 는 사석의 구체환산직경, γ_s 는 사석의 단위중량, γ 는 물의 단위중량, β 는 사석이 부설되는 하상의 경사이다.

주어진 흐름조건하에서 하상의 사석이 안정을 유지할 수 있는 조건은 Isbash(1935)의 연구에

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 토목환경공학과 조교수

*** 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

기초하여 다음의 입자안정수(stability number) N_c 의 함수로 주어진다.

$$N_c = \frac{u_0^2}{(S_s - 1)gD_p} \quad (2)$$

여기서, u_0 는 수심평균된 비교란유속(m/sec), S_s 는 사석의 비중이다.

Carstins(1966), Neill(1975), Breusers등(1977) 및 Richardson등(1993)은 입자안정수 N_c 가 일정하다고 보아, 안정사석크기를 결정하는 공식을 발표하였으며, 이 유형의 식들중 미국고속도로청(FHWA)에서 사용하고 있는 Richardson등의 공식은 원형교각에 대해 다음과 같다.

$$N_c = 1.285 \quad (3)$$

$$D_p = \frac{0.692(Ku_0)^2}{(S_s - 1)2g} = \frac{u_0^2}{(S_s - 1)gN_c} \quad (4)$$

여기서 K 는 형상계수로서 원형교각에 대해 1.5이다. 이 유형의 식들은 비교란 즉 접근수심 y_0 와 교각폭 b 의 영향이 고려되어 있지 않다.

Neill(1967)은 교각이 없을 때 하상에서의 사석안정조건에 대한 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$N_c = 2.5 \left(\frac{D_p}{y_0} \right)^{-0.20} \quad (5)$$

Quazi와 Peterson(1973)은 Neill(1967)의 경험식 식(5)에서 계수 조정을 통하여 반원사각형교각에 대해 실험을 수행한 후 입자안정수 N_c 를 수심 y_0 의 함수로 표현한 경험식을 제안하였는데 다음과 같다.

$$N_c = 1.14 \left(\frac{D_p}{y_0} \right)^{-0.20} \quad (6)$$

Parola(1993)는 기존 공식의 적용성을 확인하기 위한 광범위한 실험을 실시하고, 사석보호공 표층의 위치(d), 교각의 직경(b), 수심(y_0) 등이 안정사석크기(D_p) 결정에 상당한 영향을 미치므로, 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. d 가 0에 가까운 경우 사각형교각에 대해 다음과 같은 설계 기준을 제시하였다.

$$\begin{aligned} N_c &= 0.8, & 20 < \frac{b}{D_p} < 33 \\ N_c &= 1.0, & 7 < \frac{b}{D_p} < 14 \\ N_c &= 1.2, & 4 < \frac{b}{D_p} < 7 \end{aligned} \quad (7)$$

Parola공식에서는 교각폭 b 의 영향이 고려되어 있으며, 교각폭 b 가 증가할 수록 N_c 는 감소하므로, 사석직경 D_p 는 증가하는 경향을 보인다.

Ruff & Fotherby(1995)는 그림1에 보인 바와 같은 토스케인(toskane)이라는 이형블럭 보호공에 대한 실험을 실시하고 다음과 같은 경험식을 제안하였다(그림2).

$$(S_s - 1)D_u = 0.003 + 0.255 \frac{u_0}{\sqrt{gb}} \quad (8)$$

여기서 D_u 는 Toskane의 부피를 구체의 부피로 환산했을 때 구의 직경을 나타낸다. 설변 0.003이 매우 작으므로 이를 무시하고 N_c 의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$N_c = \frac{(S_s - 1)D_u}{0.255^2 b} = 25.4 \frac{D_u}{b} \quad (9)$$

여기서 N_c 값은 상대 Toskane 직경(D_u/b)의 함수로 주어지며, b 가 증가할수록 N_c 값이 감소하여, Parola(1995)의 실험결과와 같은 경향을 보인다.

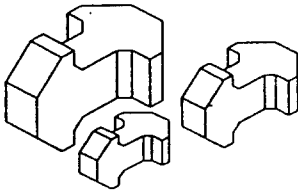


그림 1. Toskane 형상

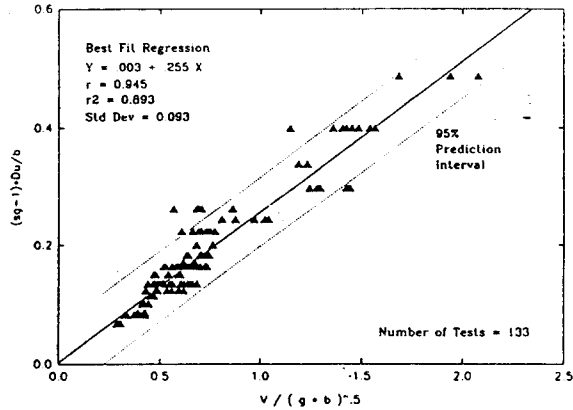


그림 2. 무차원 Toskane 직경과 교각 Froude수와의 관계

3. 수리실험

수로는 폭 45 cm, 길이 12 m, 깊이 60 cm의 가변 경사 개수로에 두께 15 cm로 평균입경 0.4 mm의 하천모래를 부설하고, 수로의 중앙에 직경 2, 3, 4, 5cm의 원형 아크릴 교각을 설치하였다(그림 3 참조). 정확한 한계상태의 조건을 제공하기 위하여 교각 주위를 제외한 나머지 부분에 모르타르를 발라 고정상 상태를 유지하도록 하였다. 유량은 수로하류단의 위어를 율류한 물이 보조수조에 모이도록 하고 보조수조에 부착한 사각형 위어를 이용하여 측정하였으며, 전자기 유속계를 이용하여 수로 내의 각 단면에서 측정된 유속을 이용하여 검증하였다. 보호공에 사용된 사석은 작은 모래를 체분석하여 표 1에 보인 바와 같이 크기별로 분류하여 사용하였다.

표 1. 사석의 제원

사석번호	입경 D_p (mm)			비고
	최소	최대	평균	
1	2.00	2.25	2.13	비중 2.65 모난입자
2	2.25	2.38	2.32	
3	2.38	2.95	2.67	
4	2.95	3.35	3.15	
5	3.35	3.70	3.53	
6	3.70	4.40	4.05	
7	4.40	4.75	4.58	
8	4.75	6.40	5.58	
9	6.40	7.40	6.90	
10	7.40	9.52	8.46	

교각 보호용 사석은 각 크기별로 주위 하상고와 부설면이 일치하도록, 원형교각의 주위에 원형으로 부설하였다. 여기서 사석의 부설 범위 B 는 교각폭의 1.5배($=1.5b$), 부설 두께 T 는 사석직경의 3배($=3D_p$)로 하였으며, 각각의 사석직경과 교각직경에 대해 교각주위의 사석이 최초로 움직이는 상태에서 수심을 기록하였다.

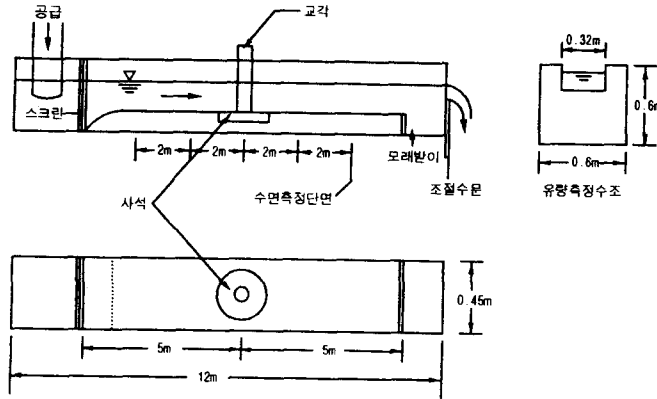


그림 3. 모형수로의 개략도

4. 실험결과의 분석

주어진 사석직경 D_p 에 대해 교각주위 사석이 움직이기 시작하는 유속을 한계유속이라 하며, 반대로 주어진 유속에 대해 그 유속이 한계유속이 되는 사석크기를 한계사석직경이라 한다.

주어진 사석크기에 대한 수심 y_0 와 교각폭 b 의 변화가 한계유속 u_c 에 미치는 영향을 보이기 위해 사석직경 2.13mm와 4.05mm에 대한 실험결과를 그림4에 도시하였다.

그림4로부터 사석직경이 커질수록 한계유속 u_c 가 증가하는 경향을 알 수 있으며, 일정한 사석직경에 대해서는, 수심 y_0 가 증가할수록, 또한 교각폭 b 가 증가할수록, 한계유속 u_c 는 감소하여 작은 유속에서도 사석이 이동하므로 사석은 불안정해짐을 알 수 있다. 이는 실험에 사용된 10종류의 모든 사석크기에 대해 같은 경향을 보인다.

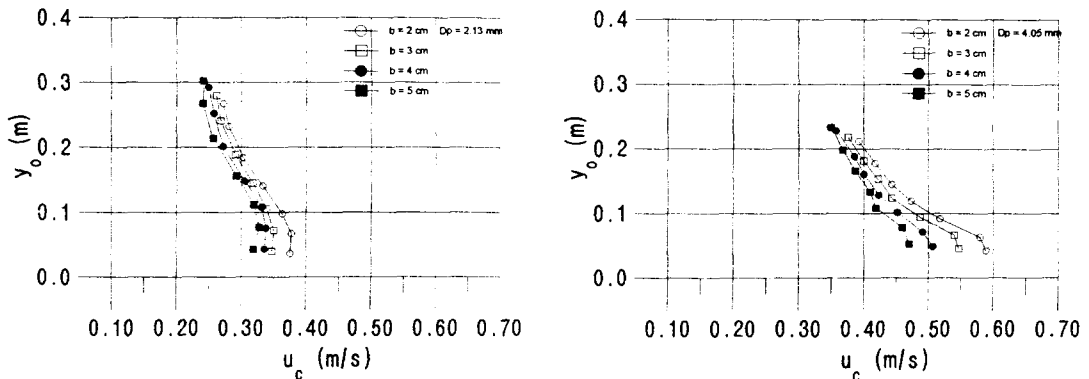


그림 4. 수심 y_0 와 교각폭 b 의 변화가 한계유속 u_c 에 미치는 영향

이번 실험결과에 의하면, 수심 y_0 의 영향을 고려한 Quazi & Peterson의 공식과는 반대의 경향을 보이므로, Quazi & Peterson의 공식은 수심의 영향이 잘못 고려되어 있음을 알 수 있다. 이는 Quazi & Peterson의 공식이 교각이 없는 수평상에서의 안정사석크기 결정식인 Neill공식의 수심 함수를 교각주위의 사석에 대해서도 그대로 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 흐름이 교각을 만나면 교각전면부에서 하향류가 발생하고 이 하향류가 수로바닥의 교각주위 사석에 직접 작용하므로 교각이 없는 경우와는 이동양상이 다르며, 이 하향류는 수심이 깊을수록 증가하므로 본 실험의 결과는 합당하다고 판단된다.

한편 교각폭 b 의 영향을 고려한 Parola와 Ruff등의 공식과 본 실험 결과를 비교하면 그림5와 같다. 이로부터 Ruff의 실험치는 실험에 이용된 유량 조건이 한정되어 넓은 범위의 수심과 유속에 대해 검토되지 못했음을 알 수 있으며, Parola의 공식은 깊은 수심에 대해 교각폭의 영향이 2배 정도의 안전율을 가지고 적절히 고려되었음을 알 수 있다.

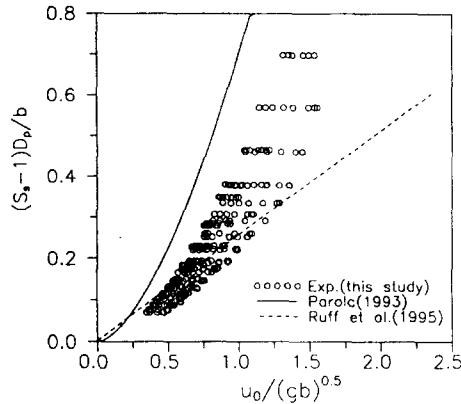


그림 5. Parola(1993) 및 Ruff(1995)의 공식과 실험치의 비교

이상의 실험결과로부터 수심과 교각폭의 영향을 동시에 고려한 개선된 식을 도출하기 위해 입자안정수 N_c 와 수심 Reynolds수($u_0 y_0 / \nu$) 및 상대사석크기(D_p/b)관계를 도시하면 각각 그림6 및 7과 같다.

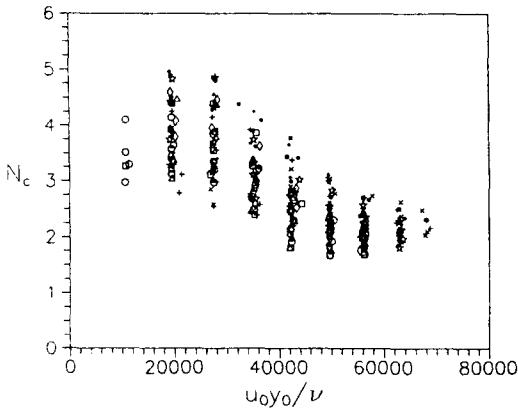


그림 6. N_c 와 수심 Reynolds수($u_0 y_0 / \nu$)

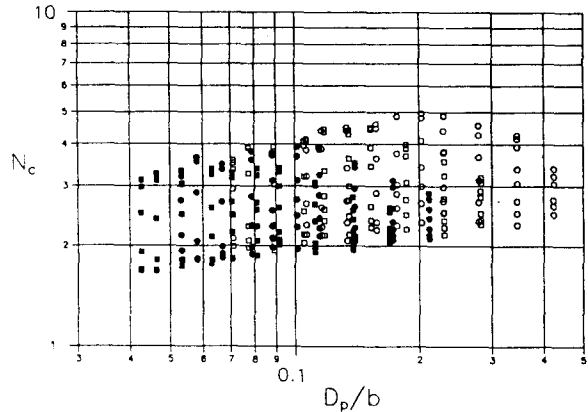


그림 7. N_c 와 상대사석크기(D_p/b)

그림6과 7로 부터 입자안정수 N_c 는 수심Reynolds수가 증가할수록 감소하며, 상대사석크기

(D_p/b)가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 이로 부터 수심과 교각폭의 영향이 고려된 개선된 설계공식을 유도할 수 있으며, 이에 대한 연구가 진행중이다.

5. 결론

본 연구에서는 사석보호공에 있어서 적절한 설계식을 제안하기 위하여 다양한 수심과 유속 및 사석크기로 실험을 수행하였고, 그 실험결과를 여러가지 방법으로 무차원변수들의 관계를 도출해서 그 상관성을 알아보았다. 입자안정수 N_c 는 수심 y_0 , 교각폭 b , 사석직경 D_p 의 함수로서, 수심 y_0 가 증가할수록, 교각폭 b 가 증가할수록, 사석직경 D_p 가 감소할수록, 입자안정수 N_c 는 감소하여 보호공 사석이 불안정해지는 것으로 나타났다. 입자안정수 N_c 가 수심 및 교각폭에 무관하게 일정한 값으로 결정되는 Isbash공식에 기초한 설계공식이 과대 또는 과소설계의 위험이 있음을 알 수 있었으며, 수심이 증가할수록 N_c 가 증가하는 Quazi등의 공식과는 정반대의 경향이 있으며, 교각폭이 증가할수록, 사석직경 D_p 가 감소할수록 N_c 가 감소하는 Parola 및 Ruff등의 공식과는 같은 경향을 보임을 알 수 있었다. 결론적으로 이 실험으로 부터 교각폭, 수심, 사석직경의 영향이 모두 고려된 개선된 식의 필요성이 제시되었다.

6. 참고 문헌

- (1) Bonasoundas, M., 1973, Flow structure and problems at circular bridge piers, Report No.28, Oskar V. Miller Inst., Munich Tech. Univ., Munich, West Germany.
- (2) 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.
- (3) Fotherby, L.M., Ruff, J.F., 1993, Review of concrete armor units, Report for Pennsylvania Dept. of Transportation, Colorado State University, February, 136p.
- (4) Isbash, S.V., 1935, Construction of dams by dumping stones in flowing water, W.S. Army Engrg. District, Eastport, Maine.
- (5) 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.
- (6) Neill, C.R. (ed), 1975, Guide to bridge hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, Univ. of Toronto Press, 2nd ed., 191p.
- (7) Parola, A.C., 1993, Stability of riprap at bridge piers, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119, No.10, pp.1080-1093.
- (8) 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.
- (9) Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R., and Davis, S.R., 1993, Evaluating scour at bridges, Hydraulic Engineering Circular No.18, FHWA-IP-90-017, FHWA, February, 105p.
- (10) Ruff, J. M., Fotherby, L. M., 1995, Bridge scour protection systems using Toskanes - Phase I, Report for Pennsylvania Dept of Transportation, Colorado State University, June, 57p.