

# 사석 바닥보호공 재료 입경 결정을 위한 실험 연구

## An Experimental Study for Determination of the Material Diameter of Riprap Bed Protection Structure

이동섭\*, 여흥구\*\*

Dong Sop Rhee, Hong Koo Yeo

### 요 지

하상유지시설의 하류에 설치되는 바닥보호공은 국내의 경우 일반적으로 사석(riprap)이나 돌망태(gabion mattress) 등을 이용하여 시공되고 있으며, 바닥보호공에 사용되는 재료는 유속에 따라 적절한 입경의 재료를 결정하여 사용하게 된다.

1970년대 중반부터 적절한 하상보호공 재료를 결정하기 위한 연구는 사석, 돌망태, 콘크리트 보호 블록 등에 대하여 순차적으로 이루어져 왔다. 초기 연구는 주로 사석에 대해서 이루어졌으며, 중량과 유속 관계를 이용하여 사석 입경 결정 공식을 제안하였으며, 점차 수심 및 하상 경사, 난류 강도 등을 고려하여 재료 입경 결정 공식을 정밀화시켜왔다. 공식에 난류 강도를 고려하기 시작하면서, 단순한 하상보호공 재료를 결정하기 위해서 제안되었던 공식들은 하천 구조물 하류에 설치되는 바닥보호공으로 관심의 대상이 옮겨가기 시작하였다. 기존의 공식들이 일반적인 평탄한 하상보호공으로부터 구조물 하류의 바닥보호공 까지 그 적용이 확장되었던 반면에, Escarameia와 May는 연구의 대상을 수리구조물 하류의 강한 난류 흐름이 발생하는 구간으로 범위를 한정하여 연구를 진행하였으며, Izbash 형태의 식을 기초로 하여, 난류 강도가 주요 변수가 되는 입경 결정 공식을 제안하였다.

본 연구에서는 Escarameia와 May의 연구 결과를 기초로 하여, 국내 하상유지시설 하류에 설치되는 사석 바닥보호공 재료의 입경을 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 하천설계기준을 만족하는 실험용 보를 설치한 후 유량 및 실험에 사용된 사석의 입경을 변화시키면서, 유속을 측정하여, 입경별 한계 유속(threshold velocity)의 상관관계를 분석하였다. 실험 결과, Escarameia와 May가 제안한 공식을 더 확장하여 적용할 수 있는 실험 공식으로 개선하였으며 다양한 조건에 대한 실험을 수행하여 보다 정밀한 공식으로 개선할 수 있었다.

**핵심용어 : 사석, 바닥보호공, 재료 입경**

### 1. 서론

하상유지시설의 하류에 설치되는 바닥보호공은 수공구조물의 하류에서 발생하는 세굴을 방지하고 하상유지시설의 본체와 물받이를 보호하기 위해서 설치하는 구조물이다. 국내의 경우에 일반적으로 하천에 시공되는 바닥보호공은 사석(riprap)이나 돌망태(gabion mattress) 등을 이용하여 시공된다. 바닥보호공에 사용되는 재료는 일반적으로 유속에 따라 재료의 입경이나 중량 등을 고려하여 사용하게 된다.

1970년대 중반부터 적절한 하상보호공 재료를 결정하기 위한 연구는 사석, 돌망태, 콘크리트 블록 보호공 등에 대하여 순차적으로 진행되어져 왔다. 초기 연구는 주로 사석에 대하여 이루어졌으며, 최근에는 사석에 대하여 개발된 공식이 돌망태, 콘크리트 블록 보호공 등에 대해서 실험 범위를 확대하여 연구하여 범용성 있는 관계식으로 개선되고 있다(Pilarczyk, 1990; Escarameia, 1995).

\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원·E-mail : dsrhee@kict.re.kr

\*\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원·E-mail : yeo917@kict.re.kr

하상보호공으로 사석을 이용할 경우 초기에는 평탄한 하상에 대해서 사석의 중량과 유속에 대한 간략한 관계식을 이용하여 입경을 결정하다가(Raudkivi, 1967; Blodgett와 McConaughy, 1986), 점차 수심(Raudkivi, 1998)과 사석의 안식각 등을 고려하기 시작했다(California Division of Highways, 1970). 미공병단 수로시험소(USACE WES)의 Maynard 등(1989)은 차원해석과 실험을 통하여 새로운 관계식을 제시하였는데, 수심 및 유속, 재료의 중량을 고려하였으나 기존 공식은 기준 입경을  $D_{50}$ 에 대하여 제시한 반면, Maynard 등의 식은 기준 입경을  $D_{30}$ 에 대해서 제시하였으며 다음과 같다.

$$\frac{D_{30}}{y} = 0.30 \left[ \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gV}} \right]^{2.5} \quad (1)$$

여기에서,  $D_{30}$ 은 30% 통과입경이며,  $y$ 는 수심,  $\gamma_w$ 와  $\gamma_s$ 는 각각 물과 사석의 비중을 의미하며,  $V$ 는 국부 평균 유속이다.

Izbash와 Khaldre(1970)는 사석의 입경을 결정하기 위해서 난류의 영향을 계수의 형태로 고려하기 시작했으며, 일반적인 난류 흐름뿐만 아니라 암거(culvert)와 같은 수공구조물 하류에서도 쓸 수 있는 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$D_{s50} = C_1 \frac{V_b^2}{g(s-1)\Omega} \quad (2)$$

여기에서,  $s$ 는 비중이며,  $\Omega = \left( 1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \phi} \right)^{1/2}$ 로 정의된다.  $\alpha$ 와  $\phi$ 는 각각 제방비탈면이 수평면과 이루는 각, 사석의 안식각이며,  $C_1$ 은 난류 계수로 약한 난류 흐름에 대해서는 0.35, 강한 난류 흐름에 대해서는 0.68을 제시하였다. Escarameia와 May(1992)는 Izbash와 Khaldre가 제시한 식을 기초로 하여 수공구조물 하류를 대상으로 사석에 대한 실험을 수행한 후 다음과 같은 공식을 제시하였다.

$$D_{m50} = C \frac{U_b^2}{2g(s-1)} \quad (3)$$

여기에서,  $D_{m50}$ 은 상당입경(equivalent cube)으로  $D_{m50} = 0.909D_{50}$ 으로 알려져 있으며,  $U_b$ 는  $0.1d$ 에서 측정된 평균 유속이며,  $s$ 는 비중을 의미한다. 계수  $C$ 는  $0.1d$ 에서의 난류강도(turbulence intensity, TI;  $u_{rms}/U_b$ )에 의해서 결정되는데, 다음과 같은 관계식을 이용하여 계산하도록 되어있다.

$$C = 12.3TI - 0.87 \text{ for } 0.1 < TI \leq 0.3 \quad (4)$$

## 2. 실험 시설 및 실험 조건

본 실험은 길이 14 m, 높이 1.2 m, 폭 1.5 m의 수로에서 수행하였다. 수로의 바닥은 철제이며 좌우 측벽은 강화 유리로 구성되어, 실험 중 재료의 움직임을 육안으로 관찰하는 것이 가능하였다. 이 수로에 하천설계기준에 제시된 고정보 설계 기준을 적용하여 그림 1.과 같이 실험용 보를 설치하였고, 실험에 사용된 바닥보호공의 길이는 3.0 m로 설정하였으며, 물받이 중 2.0 m의 구간에서 5 mm 입경의 사석을 붙여 도수의 발생을 촉진하도록 하였다. 실험 방법은 유량을 고정 시킨 후 하류 수위조절 게이트를 이용하여 실험 구간(바닥보호공)의 상류에서 도수가 발생하도록 하였다.

사석이 움직이기 시작하는 한계점(threshold)은 정량적으로 계산하여 결정하기가 힘들기 때문에 정성적으로 결정하였다. 도수가 물받이 부분에서 일단 발생하면, 하류 수위조절게이트를 이용하여 점차 실험 구간의 수심을 조절하여 실험 재료가 움직이는 시점에서 측정을 시작하였다. 한계점의 판단은 육안 관찰에 의하였으며, 유속 측정 지점 부근에서 이동을 시작하는 개별 사석의 숫자가 10개 이상 확인되는 경우 한계점으로 판단하였다.



그림 1. 실험 수로

유속 측정은 Sontek의 3차원 Micro ADV를 이용하여 측정하였으며, 초당 50개의 자료를 측정하여 각 측정별로 100초 이상씩 측정하여 총 5,000개 이상의 자료를 이용하여 분석을 시행하였다. 실험 구간 상단으로부터 1.5 m 떨어진 지점에 측선을 설정하여 횡방향으로 3개 지점에 대하여 측정(45 cm 간격)하여 횡적으로 공간 평균하였다. 수직 방향 유속 측정은 실험 조건별로 7~8개 지점에 대하여 수행하였다.

Escarameia와 May가 제안한 공식은 바닥보호공 재료를 사석(angled stone) 및 둥근 자갈(rounded stone)을 이용한 실험으로부터 얻어졌다. 하지만 국내의 경우 바닥보호공 재료는 주로 사석을 이용하기 때문에 둥근 자갈은 실험 대상으로 고려하지 않았다. 더불어 사석에 대한 실험 조건을 늘려 실험을 수행할 경우 국내 시설물 조건에 보다 적합한 공식으로 개선하는 것이 가능하리라 기대되었다. 실험에는 파쇄석을 표준체를 이용하여 입경별로 분류하여 총 3가지 사석으로 구분하여 이용하였으며, 실험 조건은 표 1.과 같다.

표 1. 실험 조건

실험 번호	평균입경 $D_{50}$ (mm)	평균수심 $h$ (cm)	평균유속 $U_0$ (m/s)	단위폭당 유량 $q$ ( $m^3/s/m$ )	$F_r$
1	5.95	21.0	0.44	0.094	0.307
2	5.95	19.0	0.53	0.099	0.388
3	7.10	22.0	0.48	0.106	0.327
4	7.10	23.0	0.49	0.113	0.326
5	7.10	24.5	0.52	0.124	0.335
6	7.10	27.0	0.49	0.135	0.301
7	7.10	28.0	0.52	0.148	0.314
8	8.73	25.0	0.48	0.122	0.307
9	8.73	25.0	0.53	0.134	0.338
10	8.73	27	0.54	0.147	0.332
11	8.73	29	0.55	0.160	0.326

### 3. 실험 결과

표 1.에 나타낸 것처럼 총 11가지 실험 조건에 대하여 실험을 수행하여 얻어진 실험 결과를 분석하였다. Escarameia 등의 실험 결과와 비교하기 위하여 기준 유속은  $0.1d$ 유속인  $U_b$ 를 이용하여 난류계수  $C$ 와 TI의 관계를 분석하였다. 분석에 이용된 난류 계수  $C$ 와 TI의 값은 다음의 식을 이용하여 구하였다.

$$C = \frac{D_{160}(s-1)2g}{U_b^2} \quad (5)$$

$$TI = u_{rms}/U_b \quad (6)$$

그림 2.에 Escarameia와 May의 실험 결과를 나타내었다. 대체로 TI의 값이 0.10~0.20 사이에 집중되어 있

다는 사실을 확인할 수 있으며, 0.20보다 큰 경우는 3가지 실험 조건에 대해서만 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 산정식의 신뢰성을 높이기 위해서는 TI가 0.20보다 큰 구간에 대해서 보완을 하여야 할 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

그림 3은 Escarameia와 May의 실험 결과 중 사석에 대한 경우만 따로 도시한 것이다. 그림에 표현된 회귀식이 전체 결과에 비교했을 때 매우 상이한 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다.

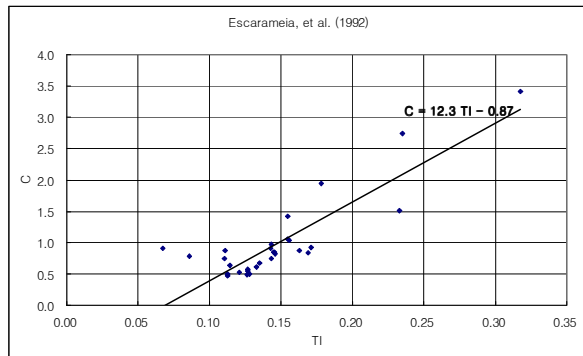


그림 2. Escarameia와 May(1992)의 실험 결과

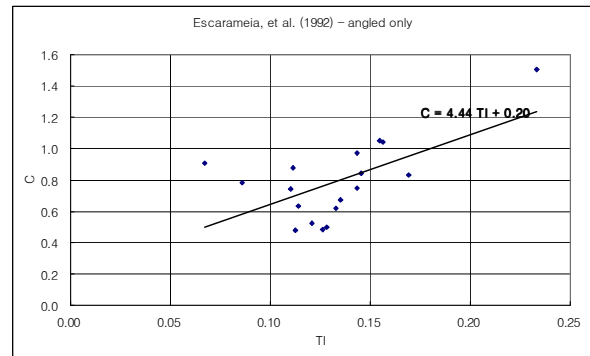


그림 3. Escarameia와 May(1992)의 실험 결과 중 사석에 대한 실험 결과

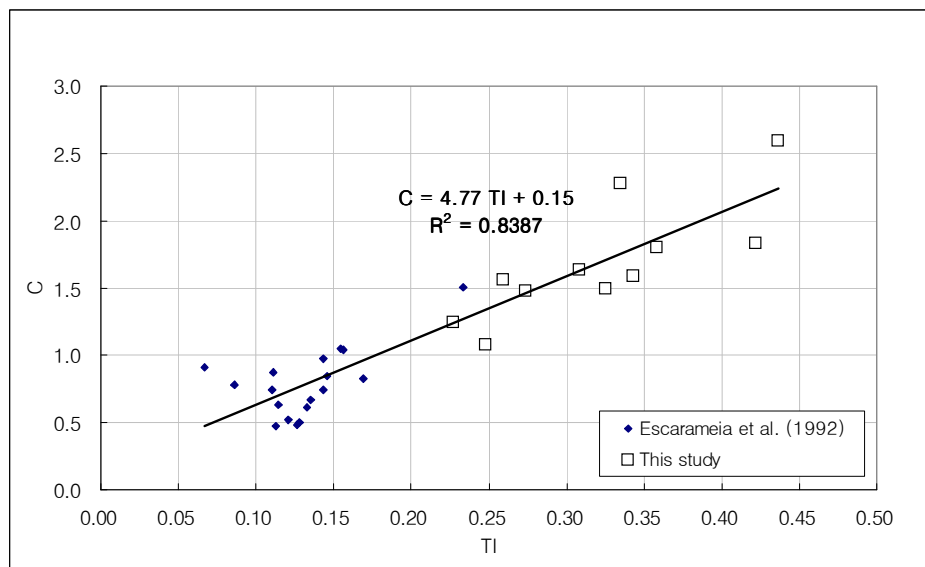


그림 4. 전체 실험 결과

그림 4는 Escarameia와 May의 실험 결과 중 사석에 대한 실험 결과에 본 연구의 실험 결과를 같이 나타낸 것이다. 본 실험의 실험 결과에서 TI의 범위는 대체로 0.25 ~ 0.45 사이에 속하므로 기존 Escarameia와 May의 실험 결과를 크게 보완할 수 있었으며, 이를 바탕으로 난류 계수  $C$ 와 난류강도 TI의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C=4.77TI+0.15 \quad \text{for } 0.1 < TI \leq 0.4 \quad (7)$$

결과적으로, 바닥보호공 사석 입경 산정식은 다음과 같이 변형된다.

$$D_{\text{r50}} = (4.77 \text{ TI} + 0.15) \frac{U_b^2}{2g(s-1)} \quad (8)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 Escarameia와 May의 실험 결과를 기초로 하여 실험 조건을 보완하여 바닥보호공 사석 재료 입경 결정을 위한 실험을 수행하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Escarameia와 May가 제안한 공식은 사석과 둥근 자갈에 대한 실험 결과를 대상으로 하였기 때문에 본 실험의 결과와 다소 차이가 있지만, 사석에 대한 실험 결과를 비교하였을 때는 비교적 경향이 유사한 것을 확인할 수 있었다.

2) Escarameia와 May의 실험 결과를 보완하여 보다 적용 범위가 넓은 공식으로 개선하는 것이 가능하였다.

3) 3가지 다른 입경을 가지는 사석에 대한 실험 결과를 추가하는 것만으로도 기존 공식의 적용성을 개선할 수 있었다. 따라서 보다 넓은 범위(보다 입경이 큰)의 재료를 대상으로 실험을 수행할 경우, 기존 공식의 적용성을 더 개선할 수 있으리라고 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. Blodgett, J.C. and McConaughy, C.E. (1986). *Rock Riprap Design for Protection of Stream Channels Near Highway Structures*. Vol. 2., Evaluation of Riprap Design Procedures, Water Resources Investigations Report, U.S. Geological Survey, Sacramento, California, USA.
2. California Division of Highways (1970). *Bank and Shore Protection in California Highway Practice*.
3. Escarameia, M., May, R.W.P. (1992). *Channel Protection; Turbulence Downstream of Structures*. HR Report SR 313.
4. Escarameia, M. (1995). *Channel Protection; Gabion Mattresses and Concrete Blocks*. HR Report SR 427.
5. Izbash, S.V. and Khaldre, Kh.Yu. (1970). *Hydraulics of River Channel Closure*. Butterworths, London, UK.
6. Maynard, S.T., Ruff, J.F., Abt, S.R. (1989). "Riprap Design." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115
7. Pilarczyk, K.W. (1990). "Stability Criteria for Revetments." *Proc. of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, San Diego, USA.
8. Raudkivi, A.J. (1967). *Loose Boundary Hydraulics*. 1st edition, Pergamon Press.
9. Raudkivi, A.J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. 4th edition, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands.