

사석의 수리적 안정성 분석식의 비교

Comparative Study of Hydraulic Stability Analyzes of Riprap

이민호*, 최흥식**
Min Ho Lee, Hung Sik Choi

요 지

본 연구는 호안보호공 중 하천 바닥 또는 제방의 유지시설로 많이 쓰이는 사석의 안정성 분석을 위하여 수리실험을 실시하였다. 안정성 분석을 위해 Isbash식, Netherlands 간이공식, ASCE식, Pilarczk식, Maynard식을 검토하였다. 실험결과 사석의 직경이 커짐에 따라 한계유속이 증가하였고, 형상계수가 커지면 한계유속이 증가하였다. 또한 랜덤배열일 때보다 규칙배열일 경우 한계유속이 크게 측정되었다. 이로서 형상계수와 인터로킹의 정도가 사석의 안정성에 중요한 함수라는 것을 나타낸다. 사석은 Maynard의 직경공식과 미 California주 정부 중량공식이 적합하게 나왔고, 모형사석의 규칙배열에서는 Pilarczk의 직경공식과 Netherlands 간이 무게공식이 적합하였다. 모형사석의 랜덤배열시에는 Isbash 공식이 적합하였다. Isbash 공식과 직경산정에 형상계수를 대입하여 새로운 식을 개발하였다. 이는 기존공식의 적용성을 더 개선할 수 있으리라고 기대된다.

핵심용어 : 사석, 수리적 안정성, 형상계수, 수리모형실험

1. 서 론

일반적으로 하천 바닥 또는 제방의 유지시설로는 사석, 돌망태, 콘크리트재료 등으로 시공하고 있으며, 사석의 안정성 중량이나 공칭직경에 대한 산정은 Isbash(1935)를 시작으로 하천의 수심이나 유속, 사석의 수중 비중을 이용하여 평가를 하였다. 미국 California 정부 도로국에서는 하천사석호안용 돌의 크기에 대한 공식을 한계소류력에 기초하여 Brahm의 제안한 유속의 6승법칙을 이용하여 나타냈고, Delft에서는 접근유속계수 α 를 이용하여 사석의 공칭직경 및 중량을 계산하였다(문수남, 1995). 또한 Pilarczk(1990)은 Shields 공식과 Isbash 공식을 혼용하여 공식을 산정하였으며 난류계수 및 안정계수를 사용하여 안정성을 평가하였다. 기존의 공식들이 일반적인 평탄한 하상보호공부터 구조물 하류의 바닥보호공까지 그 적용이 확장되었던 반면에, Maynard(1989)는 연구의 대상을 수리구조물 하류의 강한 난류 흐름이 발생하는 구간으로 범위를 한정하여 연구를 진행하였다. 나아가 Isbash 형태의 식을 기초로 하여, 난류 강도가 주요 변수가 되는 입경 결정 공식을 제안하였다. 이번 실험에서는 이러한 사석의 안정성 이론들이 얼마나 적용성이 있는지의 검토와 더불어 사석의 형상계수를 달리하여 실험하였으며, 사석의 이동이 시작되는 조건을 한계유속이라 설정하고 이때 각 지점에서의 유속분포 및 수위를 측정하여 마찰속도 및 마찰응력의 분석을 통하여 사석의 안정성 분석을 하였다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 이전식의 고찰

Isbash(1935)는 구조물이 없는 흐름에 사석을 떨어뜨려 하류로 끌려가지 않는 사석의 크기 및 중량을 결정하는 경험식을 평균유속 개념으로 제안하였다. 이 식은 수심과 사석직경의 관계(h/D)가 5~10의 범위 내

* 정회원. 상지대학교 토목공학과 석사과정. E-mail : alsgh81@sangji.ac.kr

** 정회원. 상지대학교 건설시스템공학과 교수. E-mail : hsikchoi@sangji.ac.kr

에서 유용하게 사용되고 있다.

$$D \geq \frac{\overline{u}^2}{y^2 \cdot 2g \cdot (S_r - 1)(\cos \alpha - \sin \alpha)}, \quad W = \frac{\pi \cdot \gamma_r \cdot u^6}{48g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \alpha - \sin \alpha)^3} \quad 2.1$$

California주 정부에서 실험하는 모든 해안 및 하천에서 호안, 수제공 등 설계기준으로 해안사석호안용 사석의 크기 결정과 하천사석호안용 돌의 크기에 대한 공식이 별도로 제시되어 있다. 이 식은 한계소류 해석상 Brahm가 제안한 유속의 6승법칙을 이용하고 있다.

$$W = \frac{0.0115 \cdot u^6 \cdot S_r \cdot \operatorname{cosec}^3(\theta - \alpha)}{(S_r - 1)^3} \quad 2.2$$

Delft에서 고안된 Netherlands식은 접근유속계수 α 를 약간 변형하여 사석의 공칭직경 및 중량을 계산하는 식이다. 이 공식은 정근유속과 공사에 사용된 재료의 상대밀도의 함수로 구성되어 있다. 여러 가지 크기의 규모별 사석을 이용할 경우 전체사석의 약 50%가 계산중량을 초과 하여야 한다.

$$D_n = \alpha \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{1}{(S_r - 1)}, \quad W = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_s \cdot D_n^3 \quad 2.3$$

ASCE공식은 미토목학회 수리분과위원회에서 유사량 매뉴얼(sedimentation manual)을 만들기 위한 소위원회에서 추천 권고한 식이다. 여기서 유속은 제방에서 3m 떨어진 거리에서의 평균유속을 적용하였다.

$$d_{50} = \frac{0.347 V^2}{(S_r - 1) \cdot g \cdot \cos \alpha} \quad 2.4$$

Pilarczk(1990)은 조류속에 대응하기 위한 사석의 크기를 산정하기 위해 특별한 계수와 상수를 Shields 공식과 Isbash 공식을 혼용하여 공식을 제안하였다. 사석직경을 구할 때 바로 공칭직경으로 나타내는 식이며, 산출된 공칭직경을 사석중량으로 산출할 수 있다.

$$D_n = (1/\Delta) \cdot \Phi \cdot K_T \cdot \frac{0.035}{\Psi_{cr}} \cdot K_h \cdot K_s^{-1} \frac{V^2}{2g}, \quad W = \rho_s \cdot D_n^3 \quad 2.5$$

미공병단에서 개발된 이 식은 하상보호공으로 사석을 이용할 경우 초기에는 평탄한 하상에 대해서 사석의 중량과 유속에 대한 간략한 관계식을 이용하여 입경을 결정하는 식이다(Maynard, 1989).

$$\frac{D_{30}}{y} = C_s \left(\left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{g y}} \right)^{2.5} \quad 2.6$$

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 수로는 가변 경사식으로 저수용량 $2m^3$ 이고, 저수조는 저수용량 $6.75m^3$ 이다. 수로의 길이는 $12m$ 폭 및 높이는 $0.4m$ 의 직사각형 수로로 $10mm$ 의 투명유리로 되어 실험양상을 관찰할 수 있다. 유량의 정확한 값을 알기 위하여 경사 가변형 개수로 실험장치의 유량을 Francis 유속공식(구형웨어) 및 평균유속공식으로 측정하고 비교하였다. 그 결과 유량이 일치하는 $0.018 m/s^3$ 에 유량을 고정시켜 실험을 실시하였다. 유속의 측정은 마그네틱 유속계(LP1100)로 흐름방향의 유속을 측정할 수 있다. 유속측정범위는 $0 \sim 200cm/s$ (LPT-200-09PS)로 정확도는 $0.5m/s \sim 1m/s (\pm 0.02m/s)$ $1 \sim 2m/s (\pm 0.04m/s)$ 이다.

$0.4m \times 0.4m \times 12m$ 의 가변 경사형 직선수로에 수로 7~8m지점에 길이 1m구간의 사석을 설치하였다. 정상류 상태를 유지하기 위하여 수로바닥을 사석의 높이와 일치 시켰다. 모형사석과 일반사석의 상관관계를 알아볼 수 있도록 2가지 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험으로 일반사석은 체분석 실험을 통하여 평균입경이 9mm, 13mm, 15mm인 사석으로 실험하였다. 두 번째 실험은 모형사석으로 실제 하천주변에서 사용되는 재료를 이용시 모형에서 가지는 상사성의 만족이 다소 어렵다고 판단하여 실제 사용재료보다 가벼운 석고를

사용하였다. 그림 2.1에서 보듯이 모형사석의 중량을 일치시키고 형상의 변화를 주어 형상계수를 달리 하였다.

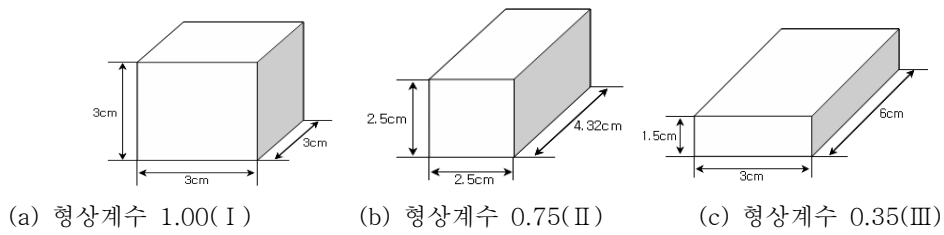


그림 2.1 모형사석 치수

표 2.1 모형사석의 제원

형상	a	b	c	부피 (cm^3)	무게 (g)	비중량 (g/m^3)	형상계수	구로환산 직경 D (cm)
I	3.12	3.01	2.88	27.09	40.1	1.48	0.94	3.72
II	4.29	2.55	2.47	26.97	39.92	1.48	0.75	3.72
III	5.97	3.04	1.49	27.11	40.27	1.49	0.35	3.73

3. 실험결과

3.1 바닥 사석공

본 실험에서는 유량을 $0.018 m^3/s$ 로 고정시켜 놓고 통과직경이 9, 13, 15mm인 사석과 모형사석의 규칙 배열, 랜덤배열 한경우의 실험을 통하여 수심에 따른 유속분포를 측정하였다. 또한 경사개수로 실험장치의 7~8m 구간에 한계유속을 측정하여 각 실험에 관한 프루드수 및 전단속도, 바닥 전단응력을 구했다.

표 3.1은 실험을 통하여 얻은 유속분포에 따른 수리적 안정성 실험 결과이다. 사석의 직경이 커짐에 따라 한계유속이 증가하였고, 형상계수가 커지면 한계유속이 증가하였다. 또한 랜덤배열일 때보다 규칙배열일 경우 한계유속이 크게 측정 되었다. 이로써 형상계수와 인터로킹의 정도가 사석의 안정성에 중요한 함수라는 것을 알 수 있다.

표 3.1 사석의 이동 한계조건

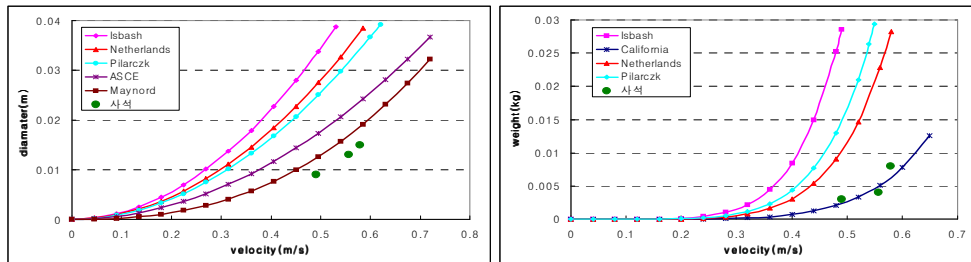
구분	경사 (I_s)	한계유속 (V)	수심 (h)	$\frac{d}{h}$	프루드 수 (F)	레이놀즈 수 (R_s)	마찰속도 (U_*)	마찰응력 (N/m^2)	s.f	$\frac{u_*}{V}$	
사석	0.0068	9mm	0.490	0.102	0.009	0.490	39307	0.067	4.476	0.78	0.137
		13mm	0.579	0.092	0.014	0.609	41896	0.065	4.175	0.69	0.112
		15mm	0.583	0.087	0.017	0.631	39906	0.063	4.017	0.74	0.108
모형사석 규칙배열	0.0095	I	0.666	0.078	0.477	0.762	40896	0.072	5.205	0.94	0.108
		II	0.648	0.087	0.428	0.702	44369	0.075	5.624	0.75	0.116
		III	0.637	0.08	0.465	0.719	40069	0.073	5.301	0.35	0.115
모형사석 랜덤배열	0.0095	I	0.550	0.125	0.298	0.497	54091	0.084	7.136	0.94	0.153
		II	0.490	0.115	0.323	0.462	44371	0.082	6.773	0.75	0.167
		III	0.376	0.138	0.27	0.324	40868	0.087	7.575	0.35	0.231

3.2 사석 안정성식의 적용성 검토

3.2.1 공칭직경 산정

실험결과를 토대로 통과직경 9, 13, 15mm의 사석의 한계유속을 측정하고 그에 관한 직경환산식과 중량에

관하여 알아보았다. 그림 3.1에서 종축은 공칭직경을, 횡축은 유속을 나타내고, 실험이 이전 경험식의 계산결과이고, ●값이 실험결과를 도시한 것이다. 실험결과를 살펴보면 공칭직경 산정에 Maynord 공식이 가장 잘 맞는 것으로 나타난다. 그 외 모든 실험식들은 유속에 대해 직경이 과대추정된 것으로 판단된다. 횡축을 중량으로 하였을 때, 캘리포니아주 정부 도로국의 중량산정공식이 실험결과와 일치하는 것으로 나타난다. Isbash 식을 비롯한 모든 중량 산정식들의 중량이 유속에 대하여 과대추정 되어있다. 표 3.2는 통과입경이 13mm인 사석과 이전 경험식간의 관계를 비교분석한 것으로 캘리포니아 식을 제외한 모든 식들이 과대추정 되었음을 확인하였다.



(a) 공칭직경 산정

(b) 중량 산정

그림 3.1 사석의 유속별 공칭직경 및 중량산정

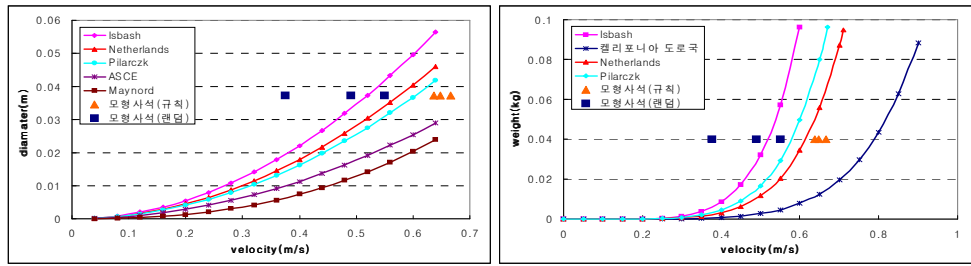
표 3.2 공식별 직경 및 중량의 비교(통과입경이 13mm인 경우)

사용식	직 경		중 량		비 고
	산정비	적격판정	산정비	적격판정	
Isbash	3.29	과대추정	15.4	과대추정	
캘리포니아 도로국	-	-	1.24	적합	
Netherlands	2.68	과대추정	5.53	과대추정	
Pilarczk	2.44	과대추정	7.93	과대추정	
ASCE	1.69	적합	-	-	
Maynord	1.3	적합	-	-	

3.3 모형사석의 안정식의 적용성 검토

3.3.1 공칭직경 산정

모형사석 실험에서는 사석의 거치상태를 랜덤배열과 규칙배열의 2가지로 분류하였으며, 형상계수의 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그림 3.2을 보면규칙배열시 형상계수에 관한 영향을 덜 받고, 랜덤배열일 경우에는 형상계수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이는 규칙배열시 모형사석간의 인터록킹의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 형상계수가 클수록 사석의 안정성이 커짐을 알 수 있다. 표 3.3은 형상계수가 일반 사석과 비슷한 0.75인 모형사석의 규칙배열, 랜덤배열시 직경 및 중량을 비교한 것이다. 여기서 규칙배열일때는 Pilarzk 공식이, 랜덤배열시에는 Isbash 식이 적합하게 산정되었다. 모형사석의 중량산정에서는 랜덤배열시는 모든 식이 과소추정 되었지만, Isbash 공식이 가장 적합하였고, 규칙배열일 경우는 Netherlands 간이공식이 가장 적합하게 나타났다.



(a) 공칭직경 산정 (b) 중량 산정
그림 3.2 모형사석의 유속별 공칭직경 및 중량산정

표 3.3 공식별 직경 및 중량의 비교

사용식	직 경		중 량		비 고
	산정비	적격판정	산정비	적격판정	
Isbash	1.56	과대추정	3.82	과대추정	규칙배열의 형상계수가 II인 경우
캘리포니아 도로국	-	-	0.31	과소추정	
Netherlands	1.27	과대추정	1.37	적합	
Pilarczk	1.15	적합	1.97	과대추정	
ASCE	0.8	과소추정	-	-	
Maynard	0.66	과소추정	-	-	
사용식	직 경		중 량		비 고
	산정비	적격판정	산정비	적격판정	
Isbash	0.89	적합	0.71	적합	랜덤배열의 형상계수가 II인 경우
캘리포니아 도로국	-	-	0.06	과소추정	
Netherlands	0.72	과소추정	0.26	과소추정	
Pilarczk	0.66	과소추정	0.37	과대추정	
ASCE	0.46	과소추정	-	-	
Maynard	0.33	과소추정	-	-	

4. 결론

바닥사석공은 일반적으로 유속에 따라 재료의 입경이나 중량 등을 고려하였다. 본 실험에서는 사석과 형상계수가 다른 모형사석을 경사개수로 실험장치에 0.018 m^3/s 의 유량으로 고정을 시키고 하류 수위게이트를 조절하여 점차 실험구간의 수심을 조절하여 유속의 변화를 주어 한계유속을 측정하였다. 그 실험결과를 토대로 프루드수, 레이놀즈수를 계산하였으며, 마찰속도 및 마찰응력을 산출하여, 기존 사석의 공칭직경산정공식과 중량산정식에 적용하였다. 그 결과 사석은 Maynard의 직경공식과 미 California주 정부 중량공식이 적합하게 나왔고, 모형사석의 규칙배열에서는 Pilarczk의 직경공식과 Netherlands 간이 무게공식이 적합하였다. 모형사석의 랜덤배열시에는 Isbash 공식이 적합하였다. Isbash 공식과 직경산정에 형상계수를 대입하여 새로운 식을 개발 하였다. 이는 기존공식의 적용성을 더 개선할 수 있으리라고 기대된다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 문수남(1995). “수리모형 실험에 의한 사행하도의 사석크기에 관한 연구”, 한국수자원학회 논문집, 제28

- 권, 제4호, pp.205-213.
2. 박영욱, 황보연, 구분충, 박상현 (2005). “방조제 끝막이 구간에서 유속에 대한 사석 및 돌망태의 안정성 분석”, 한국관개배수, 제12권, 제2호, pp. 26-36.
 3. 서영제 (1995), “조류속에 따른 사석규격 결정공식에 관한 연구”, 한국관개배수, 제2권, 제2호, pp.167-175.
 4. Isbash, S.(1935). Construction of Dams by Dumping Stones into Flowing Water, Rep., U.S. Army Engineering District, U.S. Army Corps of Engineers, Eastport, Maine.
 5. Maynard, S.T., Ruff, J.F., Abt, S.R. (1989). "Riprap Design." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 115
 6. Pilarczyk, K. W. (1990). "Stability Criteria for Revetments." Proc. of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, San Diego, USA.