한국방재학회논문집
제8권 3호 2008년 6월
pp. 149 ~ 155

사석의 수리적 안정식의 비교분석

Comparative Analyses on Hydraulic Stability Formulae of Riprap

최흥식* · 이민호**
Choi, Hungsik · Lee, Minho

Abstract

To evaluate the formulae for the stability of riprap, the formulae of Isbash, California division of highway, Netherlands, ASCE, Pilarczk, and Maynord are comparatively analysed with the experimental results. The critical velocity which initiates the motion of riprap is increased with the weight and the size in diameter and the riprap size with water depth, Froude number, shear velocity with mean velocity, Shields parameter have great correlation with them. The results by 6 formulae are overestimated in riprap size in diameter and the result by Maynord formula proposed by U.S. Army Corps of Engineers estimates rather correct. The results by Isbash, Netherlands, and Pilarczk are overestimated in riprap weight but the result by California division of highway formula coincides with experimental result. In the experimental results of model riprap artificially made by gypsum with light weight density, the critical velocity is increased with shape factors. The critical velocity appears greater in regular arrangement of model riprap than in random arrangement of it. Therefore the shape factor and the degree of interlocking are an important parameters in riprap stability.

***Key words* :** riprap, hydraulic stability, shape factor, critical velocity

요 지

사석의 안정성 분석을 위해 Isbash식, California 도로국식, Netherlands간이식, ASCE식, Pilarczk식, Maynord식의 검토를 수리모형실험을 통해서 수행하였다. 사석의 경우는 직경과 중량이 커질수록 한계유속이 크게 나왔으며, 그에 따른 수심에 대한 사석의 직경비, Froude수, 평균유속에 따른 전단유속비, Shields수는 상관성이 크게 나왔다. 공칭직경에 대한 안정식은 6가지 식이 모두 크게 산정하고 있고, 그중 미 공병단에서 제시한 Maynord식이 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 중량산정식의 경우 Isbash식, Netherlands식, Pilarczk식은 중량이 유속에 대하여 과대추정 되었고, 켈리포니아주 정부 도로국 식이 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다. 단위중량이 작은 석고재료에 의한 모형사석 실험에서는 형상계수가 클수록 한계유속이 크게 나타났고, 또한 임의배열일 때보다 규칙배열일 경우 한계유속이 크게 측정 되었다. 이로서 형상계수와 결속의 정도가 사석의 안정성에 중요한 함수라는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 사석, 수리적 안정성, 형상계수, 한계유속

1. 서 론

하천에서 사석의 안정중량이나 공칭직경에 대한 산정은 평균유속개념을 사용한 Isbash(1935)를 시작으로 수심, 유속, 사석의 수중비중 등을 이용하여 평가를 하였다. 미국 California 정부 도로국(California Division of Highways, 1970)에서는 하천사석호안용 돌의 크기에 대한 공식을 한계소류력에 기초하여 Brahms가 제안한 유속의 6승법칙을 이용하여 나타냈고, Delft에서는 접근유속계수 α를 이용하여 사석의 공칭직경 및 중량을 계산하였다(서영제, 1995).

1970년대부터는 점차 수심 및 하상경사, 난류강도 등의 난류전단경계층 이론을 고려하여 재료의 입경결정 공식을 정밀화 시켜왔다. Pilarczk(1990)은 난류전단경계층 이론에 기초한 Shields식과 Isbash식을 혼용한 공식을 산정하였으며, 난류계수 및 안정계수를 사용하여 안정성을 평가하였다. 기존의 공식들이 일반적인 평탄한 하상보호공부터 구조물 하류의 바닥보호공까지 그 적용이 확장되었던 반면에, Maynord 등(1989)은 연구대상을 수리구조물 하류의 강한 난류흐름이 발생하는 구간에 까지 연구를 진행하였고(한국건설기술연구원, 2006), 나아가 Isbash 형태의 식을 기초로 하여, 난류강도가 주요 변수가 되는 입경결정 공식을 제안하였다. 또한 사석크기 산정식에 안전계수를 추가한 Brown 등(1989)의 식과 Froude

*정회원 · 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (E-mail: hsikchoi@sangji.ac.kr)
**상지대학교 대학원 토목공학과 석사과정

수를 도입한 Lagasse 등(2001)의 기존식과 비교를 통하여 사석층의 전단파괴에 대한 안정성평가를 실시하였다(Melville 등, 2007).

사석의 안정식은 중량과 크기의 산정으로 구분된다. 국내에서 최근 수행된 사석에 대한 안정성의 연구로는 사석의 사용목적에 따라 교각 주위 또는 낙차시설의 세굴 방지 목적의 바닥 보호공(이동섭 등, 2005), 저수 및 고수호안의 안정을 위한 호안공(문수남, 1995), 방조제 끝막이의 최종체절공(Dellft, 2002) 등으로 그 형태는 다양하다. 따라서 본 연구는 평균유속개념을 이용한 Isbash(1935)식을 기초로 하여 사용되는 California도로국(1970)식, Netherlands간이식, ASCE(1975)식과 평균유속공식과 난류전단 경계층을 이론을 혼용한 Pilarczk(1990)식, Maynord(1989)식의 적용성을 수리모형실험을 통해서 수행하였다.

아울러 최근의 바닥보호공과 호안은 일반적인 사석의 사용보다는 일정한 형태를 가진 블록으로 규칙 배열에 따른 결속(interlocking)과 형상의 정도가 안정성에 큰 영향을 줄 것으로 판단하여 이에 대한 추가 실험을 수행하였다. 일반적으로 비중이 큰 콘크리트 블록을 사용할 경우 움직임의 정도가 둔감할 것으로 판단되어 비중이 작은 석고를 사용한 모형블록을 통해 형상과 결속에 따른 안정성을 분석하였다. 실험의 수행은 사석이동이 시작되는 조건을 한계유속이라 설정하고 이때 각 지점에서의 유속분포 및 수위를 측정하여 Froude수, Reynolds수, Shields계수, 전단속도 및 전단응력의 분석을 통하여 사석의 안정성 분석을 하였다.

2. 사석의 안정성

2.1 사석재 이동

유수 중 사석이 움직이기 시작할 때를 한계조건(threshold/critical condition)이라 하고, 이는 입자가 받는 항력(drag force) 및 양력(lifting force)과 이러한 힘에 저항하는 입자의 수중중량 등이다. 따라서 입자가 움직이기 시작하는 한계조건은 그림 2.1에서와 같이 하상을 형성하는 한 개의 입자가 유수중에서 받는 힘을 표시하고 있으며 하상경사를 α, 석재입자의 수중안식각을 ϕ로 표시하여 비점착성의 입자들이 움직이기 시작하는 한계조건은 식 1에서와 같이 입자에 작용하는 연직 및 접선 방향의 힘의 항으로 나타낼 수 있다.

$$\tan\phi = \frac{F_t}{F_n} \tag{1}$$

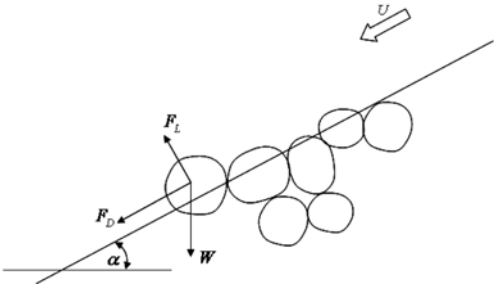


그림 2.1 사석이 유수중에 받는 힘

여기서, F_t는 석재의 안식각 ϕ에 대한 수평력, F_n는 석재의 안식각 ϕ에 대한 연직력이다.

F_t와 F_n는 항력 F_D와 양력 F_L, 그리고 수중중량 W에 대한 합력이다. 이들 세 힘이 작용할 때 입자가 이동되기 위한 한계조건은 식 2와 같다.

$$\tan\phi = \frac{W\sin\alpha - F_D}{W\cos\alpha - F_L} \tag{2}$$

일반적으로 항력과 양력은 식 3으로 표시된다.

$$F_D = C_D k_1 d^2 \frac{\rho_w u^2}{2}, \qquad F_L = C_L k_1 d^2 \frac{\rho_w u^2}{2} \tag{3}$$

여기서, u는 하상에서의 유속(m/s), C_D는 항력계수, C_L는 양력계수이고, d는 입자의 평균입경(m), k_1,k_2는 입자의 형상계수, ρ_w는 물의 밀도(kg/m^3)이다.

또한, 석재의 수중무게 W는 식 4와 같다.

$$W = k_3(\rho_r - \rho_w)gd^3 \tag{4}$$

여기서, k_3는 형상계수, ρ_r는 사석의 밀도(kg/m^3), g는 중력가속도(m/s^2)이다.

사석이 이동되기 위한 한계조건식에 항력, 양력, 입자의 수중무게공식을 대입하여 정리하면 식 5와 같다. 여기서 우측항을 유사계수(Sediment Coefficient) A라고 정의하면 A는 입자의 크기, 균등성, 형상, 입자분포 특성 및 항력계수와 양력계수를 결정하는 흐름의 특성, 석재의 안식각 등에 의하여 결정된다(박영욱 등, 2005).

$$\frac{(u_b^2)_{cr}}{\left(\frac{\rho_r}{\rho_w}-1\right)gd} = \frac{2k_3(\tan\alpha\cos\alpha - \sin\alpha)}{C_L k_2 \tan\phi - C_D k_1} \tag{5}$$

여기서, $(u_b)_{cr}$는 석재가 움직이기 시작하는 곳의 전단속도이다.

또한 식 6의 값은 항력과 이에 저항하는 중력의 비율을 나타내는 Shields계수 θ이며, 이의 무차원 값은 입경과 전단속도와 관계되는 Froude수와 같은 형식을 보여주고 있다. 그러나 Shields계수, θ는 흐름의 일반적인 특성인 난류에서의 양력의 영향이 고려되지 않았다.

$$\frac{(u_b^2)_{cr}}{\left(\frac{\rho_r}{\rho_w}-1\right)} = \frac{\tau_{cr}}{(\gamma_r - \gamma_w)d} = \frac{\rho_w u_*^2}{(\rho_r - \rho_w)gd} = \theta \tag{6}$$

여기서, τ_{cr}는 입자의 한계전단응력이고, γ_r는 사석의 비중량, γ_w는 물의 비중량이다.

2.2 형상계수

사석입자의 모양(shape)은 유수에 의한 입자의 유송에 막대한 영향을 미치며 구상도(sphericity)와 원상도(roundness)로서 구형에 가까운 정도와 둥근 정도를 표시한다. 입자의 구상도나 원상도를 실질적으로 결정한다는 것은 쉽지 않다. 따라서 실무에서는 무차원의 형상계수(shape factor, s.f.)를 다음과 같이 정의하여 사용한다.

$$sf = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{7}$$

여기서 a, b, c는 세 수직축의 길이로 a가 장축, b가 중간축, c가 단축의 길이이다. 구형과 정육면체는 1이고, 자연하천에서 유사의 형상계수는 0.5~0.9 정도이며 평균 0.7정도로 알려졌다(우효섭, 2001).

2.3 사석 안정성이론

2.3.1 Isbash식

Isbash(1935)는 구조물이 없는 흐름에 사석을 떨어뜨려 하류로 쓸려가지 않는 사석의 크기 및 중량을 결정하는 경험식을 평균유속 개념으로 제안하였다. 이 식은 수심과 사석직경의 관계(h/d)가 5~10의 범위 내에서 유용하게 사용되고 있다.

$$V_{min} = y\sqrt{2g(S_r - 1)d(\cos\alpha - \sin\alpha)} \tag{8}$$

여기서 V_{min}는 바닥에 놓여 있는 입경 d인 사석을 움직일 수 있도록 하는 최소유속(m/s)이고, S_r은 사석의 비중, α는 사면의 경사각이다.

이 식에서 사용한 Isbash계수 y는 사석의 조밀함과 느슨함에 따라 0.7에서 1.4까지 변화하는 값으로(박영욱 등, 2005) 사석의 노출상태에 따른 계수로 노출된 경우에는 0.86 또는 흙에 묻힌 경우는 1.2의 형태를 나타내는 값이다. 이후 미공병단에서 계속 연구 개발 시켰으며 그 식은 아래와 같다(USACE, 1991).

$$d \geq \frac{u^2}{y^2 \cdot 2g \cdot (S_r - 1)(\cos\alpha - \sin\alpha)} \tag{9}$$

$$W = \frac{\pi \cdot \gamma_r \cdot u^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos\alpha - \sin\alpha)} \tag{10}$$

여기서 W는 사석의 안정중량(t)이고, γ_r는 사석의 단위중량(t/m^3), 는 사석에 직접 작용하는 유속(m/s)이다.

2.3.2 미 California주 도로국식

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 Brahms가 제안한 유속의 6승법칙을 이용하고 있다(California Division of Highways, 1970).

$$W = \frac{0.0115 \cdot u^6 \cdot S_r \cdot \mathrm{cosec}^3(\alpha' - \alpha)}{(S_r - 1)^3} \tag{11}$$

여기서, W은 사석의 무게(kg), u는 유속(m/s), α는 사석쌓기 각도(70°)이다.

2.3.3 Netherlands 간이공식

Delft에서 고안된 식으로 접근유속계수 α를 약간 변형하여 사석의 공칭직경 및 중량을 계산하는 식이다. 이 공식은 접근유속, V와 공사에 사용된 재료의 상대밀도의 함수로 구성되어 있다. 접근유속계수는 일반적으로 1.1을 적용하고 난류현상이 심할 경우 1.4까지 적용한다(서영제, 1995). 여러 가지 크기의 규모별 사석을 이용할 경우 전체사석의 약 50%가 계산중량을 초과 하여야 한다.

$$d_n = \alpha \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{1}{(S_r - 1)} \tag{12}$$

$$W = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_s \cdot d_n^3 \tag{13}$$

2.3.4 ASCE 공식

이 방법은 미국토목학회 수리분과위원회에서 유사량 매뉴얼(sedimentation manual)을 만들기 위한 소위원회에서 추천 권고한 식으로 50% 통과입경 d_{50}은 다음과 같다. 여기서 유속은 제방에서 3 m 떨어진 거리에서의 평균유속을 적용하였다(ASCE, 1975).

$$d_{50} = \frac{0.347 V^2}{(S_r - 1) \cdot g \cdot \cos\alpha} \tag{14}$$

여기서, S_r은 사석의 비중, α는 경사면의 기울기이다.

2.3.5 Pilarczk 공식

Pilarczk(1990)은 조류속에 대응하기 위한 사석의 크기를 산정하기 위해 특별한 계수와 상수를 Shields식과 Isbash식을 혼용하여 공식을 제안하였다. 이 식은 화옹방조제 체절 시 Delft 수리연구소 보고서(Delft, 2002)에서 바닥보호공 안정성에 적용된 바 있으며, 최근에 많이 사용되고 있는 공식이기도 하다. 또한 사석직경을 구할 때 바로 공칭직경, d_n으로 나타내는 식이며, 산출된 공칭직경을 사석중량으로 산출할 수 있다.

$$d_n = \left(\frac{1}{S_r - 1}\right) \cdot \Phi \cdot K_T \cdot \frac{0.035}{\Psi_{cr}} \cdot K_h \cdot K_s^{-1} \cdot \frac{u^2}{2g} \tag{15}$$

$$W = \rho_r \cdot d_n^3 \tag{16}$$

여기서, Φ는 안정계수, K_h은 유속분포계수($K_h = (h/d_n)^{-0.2}$)이고, K_T는 난류계수(1.0~3.0), Ψ_{cr}는 한계전단력 계수이다. K_s는 경사감소계수($K_s(\alpha,\beta) = k_d k_l$로 α는 사면경사, β는 하상경사), k_d은 사면경사와 관련된 감소계수로 $k_d(\alpha) = \cos\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\tan\alpha}{\tan\phi}\right)^2}$, kl 은 흐름방향과 관련된 감소계수 $k_l(\beta) = \frac{\sin(\phi - \beta)}{\sin\phi}$ 이다.

2.3.6 Maynord 공식

미공병단 수로시험소(USACE, 1991)에서 개발된 이 식은 하상보호공으로 사석을 이용할 경우 초기에는 평탄한 하상에 대해서 사석의 중량과 유속에 대한 간략한 관계식을 이용하여 입경을 결정하다가 점차 수심과 사석의 안식각 등을 고려하기 시작했다. 나아가 차원해석과 실험을 통하여 새로운 관계식을 제시하였는데, 수심 및 유속, 재료의 중량을 고려하였으나 기존 공식은 기준 입경을 d_{50}에 대하여 제시한 반면, Maynord 등(1989)의 식은 기준 입경을 d_{30}에 대해서 제시하였으며 식 17과 같다. 여기서 C_s는 사석에 관한 안정성 계

수로 보통 0.3을 쓴다(Stefano 등, 1998).

$$\frac{d_{30}}{y} = C_s\left(\left(\frac{1}{S_r - 1}\right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gy}}\right)^{2.5} \tag{17}$$

여기서, d_{30}은 30% 통과입경이고, y은 수심, V는 국부 평균 유속이다.

3. 실험내용 및 방법

3.1 실험장치 및 계측기기

경사 개수로 실험장치는 가변 경사식으로 유량을 공급하는 고수조는 수로상부에 위치하고 있으며 저수용량 2 m^3이고, 저수조는 저수용량 6.75 m^3이다. 수로의 길이는 12 m, 폭 및 높이는 0.4 m의 직사각형 수로로 10 mm의 투명유리로 되어 실험 양상을 관찰할 수 있다. 유량의 정확한 값을 알기 위하여 경사 가변형 개수로 실험장치의 유량을 Francis 유속공식(구형웨어) 및 평균유속공식으로 측정하고 비교하여 유량이 일치하는 0.018 m^3/s에 유량을 고정시켜 실험을 실시하였다(그림 3.1).

수위는 개수로 레일위의 이동장치에 부착된 후크게이지를 이용하여 측정하였다. 유속의 측정은 마그네틱 유속계(LP1100)로 흐름방향의 유속을 측정할 수 있다. 유속측정범위는 0~200 cm/s(LPT-200-09PS)로 정확도는 0.5 m/s~1 m/s(±0.02 m/s) 1~2 m/s(±0.04 m/s)이다. 유속의 측정은 사석이 움직이기 시작할 때 수로 종단을 따라 5지점에서 유속분포를 계측하였다. 그림 3.2는 유량측정 위치로 각 지점별 횡 방향으로 5지점을 수심방향으로 0.2d, 0.4d, 0.6d, 0.8d(d는 수심)지점의 4곳에서 유속을 측정하여 수로 종 방향 1지점에 대해 20지점에 대한 유속을 측정했다.

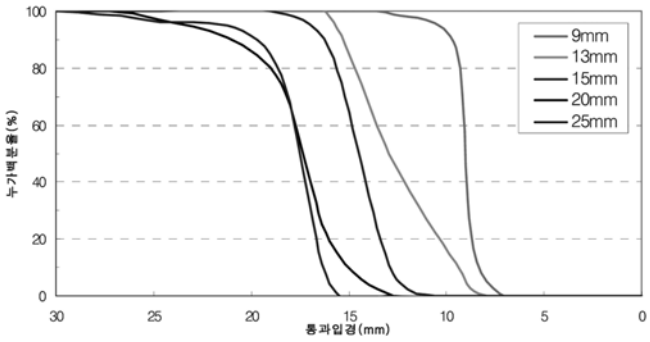


그림 3.2 사석의 통과입경

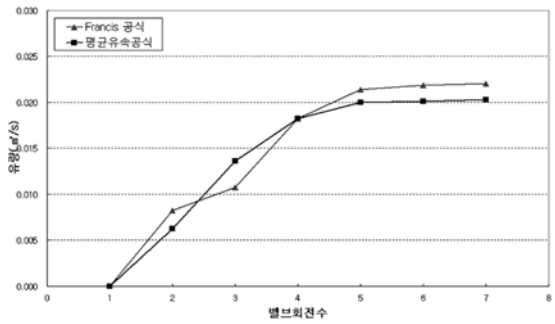
3.2 실험 방법 및 내용

가변 경사형 직선수로에 수로 7~8 m지점에 길이 1 m구간의 사석을 설치하였다. 정상류 상태를 유지하기 위하여 수로 바닥을 사석의 높이와 일치시켰다. 수로 상류에는 여과막(screen)을 설치하여 웨어탱크내에서 생긴 와류가 하류로 전파되지 않도록 하였다.

첫 번째 실험으로 일반사석을 체분석 실험을 통하여 평균입경(d_{50})이 9, 13, 15, 20, 25 mm인 사석으로 실험하였다(그림 3.3). 이 실험을 통해서 앞서 언급한 6가지 식의 사용성은 물론 각 식의 특성을 비교하였다.

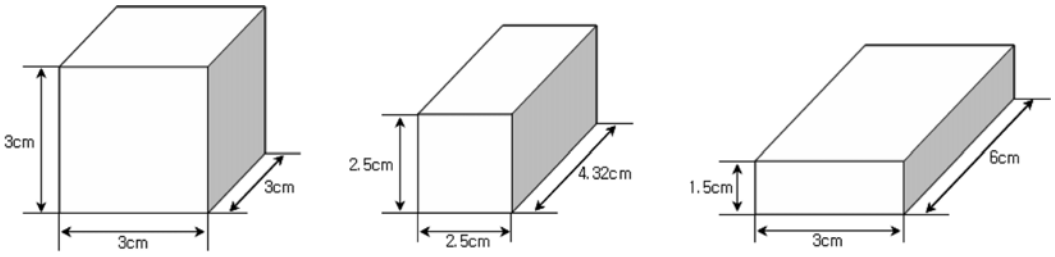
두 번째 실험은 모형사석으로 실제 하천주변에서 사용되는 재료를 이용시 모형에서 가지는 상사성의 만족이 다소 어렵다고 판단하여 실제 사용재료보다 가벼운 석고를 사용하였다. 그림 3.3에서 보듯이 모형사석의 중량을 일치시키고, 형상의 변화를 주어 형상계수를 달리 하였다. 모형사석의 비중을 측정하기 위해서 실험재료 중 무작위로 10개를 측정하여 평균

(a)구형웨어(trapezoidal weir)



(b)유량조절밸브 회전수에 따른 유량

그림 3.1 유량조절밸브 회전수에 따른 유량



(a) 형상계수 1.00(Ⅰ) (b) 형상계수 0.75(Ⅱ) (c) 형상계수 0.35(Ⅲ)

그림 3.3 모형사석 치수

표 3.1 모형사석의 제원

형상	각 축의 길이(cm)			부피 (cm^3)	무게 (g)	비중량 (g/cm^3)	형상계수	구로환산 직경 d (cm)
	a(장축)	b(중간축)	c(단축)					
I	3.12	3.01	2.88	27.05	40.1	1.48	0.94	3.72
II	4.29	2.55	2.47	27.02	39.92	1.48	0.75	3.72
III	5.97	3.04	1.49	27.04	40.27	1.49	0.35	3.73

값 1.48을 얻었다(표 3.1).

사석의 안정성 규명을 하기 위해서 일정유량에 대해 하부의 수위조절밸브를 조절하여 사석이 놓인 지점의 유속을 서서히 증가시켜 사석이 움직이기 시작할 때를 한계유속이라 설정하여 이때 각 지점에서의 유속분포 및 수위를 측정하였다. 이런 수리특성의 자료는 상대수심(d/h), Froude수, Reynolds수, Shields계수, 전단속도와 응력, 상대전단속도 등의 변수를 이용해서 분석하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 사석 및 모형사석의 한계유속

본 실험에서는 통과직경이 9, 13, 15, 20, 25 mm인 사석과 중량은 같고 형상을 달리한 석고블록에 대한 규칙배열, 임의배열한 경우의 실험을 통하여 수심에 따른 유속분포를 측정하였다.

사석의 실험결과는 수로경사를 0.0095로 고정시키고 하류수위조절 웨어를 조절하여 사석입자가 움직일 때를 한계유속이라 설정하였다. 실험을 통하여 d_{50}이 9 mm, 13 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm인 사석은 0.50 m/s, 0.56 m/s, 0.62 m/s, 0.65 m/s, 0.69 m/s로 각각 나타나, 사석의 통과입경이 커질수록 한계유속이 크게 나타났다. 아울러 Reynolds수, 전단속도와 응력과는 큰 상관성을 찾기는 어려우나, 수심에 대한 입자직경, Froude수, 평균유속에 대한 전단속도의 비, Shields계수와는 큰 상관이 있었다.

모형사석 실험에서도 경사를 0.0095로 고정하고 한계유속을 측정하였다. 규칙배열인 경우 실험을 통하여 형상계수가 0.94인 경우(I)는 0.68 m/s, 형상계수가 0.75인 경우(II) 경우는 0.65 m/s, 형상계수가 0.35인 경우(III) 경우는 0.62 m/s으로 나타났다. 또한 형상계수가 작아질수록 Froude수도 0.809, 0.725, 0.656로 각각 작아졌다.

모형사석을 임의배열 한 경우 규칙배열 보다 한계유속이 작게 측정되었다. 이는 규칙배열인 경우 각 사석간의 결속이 작용하여 한계유속이 크게 측정됨을 알 수 있다. 임의배열시 한계유속은 형상계수가 0.94인 경우(I)는 0.58 m/s, 형상계수가 0.75인 경우(II) 경우는 0.51 m/s, 형상계수가 0.35인 경우(III) 경우는 0.38 m/s으로 나타났다. 또한 형상계수가 클수록 Froude수, Reynolds수가 커짐을 알 수 있다. 이는 형상계수가 클수록 모형사석에 작용하는 힘이 항력보다는 양력이 크게 지배함을 의미한다.

표 4.1은 실험을 통하여 얻은 유속분포에 따른 수리적 안정성 실험 결과이다. 사석의 직경이 커짐에 따라 한계유속이 증가하였고, 형상계수가 커지면 한계유속이 증가하였다. 또한 임의배열일 때보다 규칙배열일 경우 한계유속이 크게 측정되었다. 이로서 형상계수와 결속의 정도가 사석의 안정성에 중요한 함수라는 것을 알 수 있다.

4.2 사석 안정식의 적용성 검토

실험결과를 토대로 통과직경 9, 13 ,15, 20, 25 mm의 사석의 한계유속을 측정하고 그에 관한 직경환산식과 중량에 관하여 알아보았다. 각 실험공식별 매개변수를 살펴보면 Isbash계수는 사석의 엉김이 적은 경우로 0.86를 사용하였고,

표 4.1 사석의 이동 한계조건

구 분		수면 경사 (I_e)	한계 유속 (m/s)	수심 (m)	$\frac{d}{h}$	Reynolds수 (R_e)	전단 속도 (U_*)	전단 응력 (N/m^2)	Froude수 (F_r)	$\frac{u_*}{V}$	Shields 계수	형상 계수	비고
사석	9 mm	0.0070	0.50	0.120	0.008	47207	0.072	5.143	0.461	0.143	0.0354	0.78	
	13 mm	0.0073	0.56	0.100	0.013	44060	0.069	4.768	0.565	0.123	0.0227	0.69	
	15 mm	0.0076	0.62	0.091	0.016	44390	0.068	4.656	0.656	0.110	0.0192	0.74	
	20 mm	0.0081	0.65	0.085	0.024	43470	0.069	4.733	0.712	0.106	0.0146	0.69	
	25 mm	0.0101	0.69	0.067	0.037	36373	0.070	4.966	0.851	0.102	0.0123	0.72	
모형 사석 규칙 배열	I	0.0093	0.68	0.072	0.051	38521	0.069	4.761	0.809	0.101	0.0274	0.94	
	II	0.0080	0.65	0.082	0.045	41935	0.068	4.624	0.725	0.105	0.0266	0.75	
	III	0.0078	0.62	0.091	0.041	44390	0.069	4.761	0.656	0.111	0.0274	0.35	
모형 사석 임의 배열	I	0.0073	0.58	0.115	0.032	52478	0.072	5.184	0.546	0.124	0.0298	0.94	
	II	0.0070	0.51	0.124	0.030	49756	0.072	5.184	0.462	0.141	0.0298	0.75	
	III	0.0066	0.38	0.144	0.026	42600	0.074	5.476	0.316	0.197	0.0315	0.35	

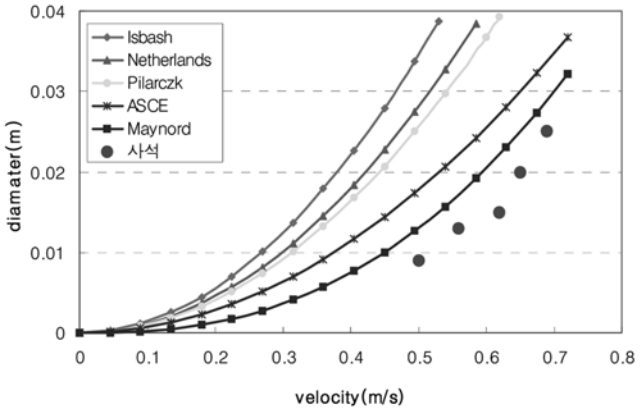


그림 4.1 사석의 유속별 공칭직경 산정

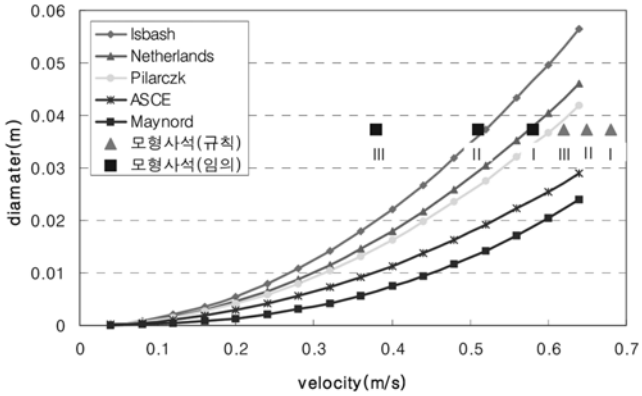


그림 4.3 모형사석의 유속별 공칭직경 산정

Netherlands 간이식에서는 접근유속계수(α)를 난류강도가 일반적인 경우인 1.1을 사용하였다. 또한 Pilarczk식에서 유속분포계수, 바닥조도계수, 난류계수, 한계전단력계수는 최근 설계에 적용된 사례를 바탕으로 0.5, 1.5, 2.0, 0.035를 사용하였다. 그림 4.1에서 한계유속별 안정성을 얻을 수 있는 공칭직경을 나타낸 것이다.

일반적으로 공칭직경에 대해서는 Isbash식, Netherlands식, Pilarczk식은 과도하게 산정하고 ASCE식과 Maynord식 역시 크게 산정하나, 실험값과 비교하여 적용성이 있음을 볼 수 있어 추가적 실험을 통한 식의 보완이 기대된다. 공칭직경에 대해서는 6가지 식이 모두 크게 산정하고 있고, 그중 미 공병단에서 제시한 Maynord식이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

중량산정식의 경우는 California 도로국의 중량산정공식이 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다. Isbash식, Netherlands식, Pilarczk식은 중량이 유속에 대하여 과대추정 되었다.

일반적으로 기존의 6가지 식은 사석의 크기가 일정 규모이상인 실무에 자주 사용하는 식이나, 실험에서 수행한 사석은 공칭직경 25 mm이하에 대한 실험결과로부터 도출된 결과이다. 따라서 실험의 범위에 따른 식의 적용성에 대한 분석은 추가적인 실험을 통해서 분석 및 보완되어야 할 것으로 판단된다.

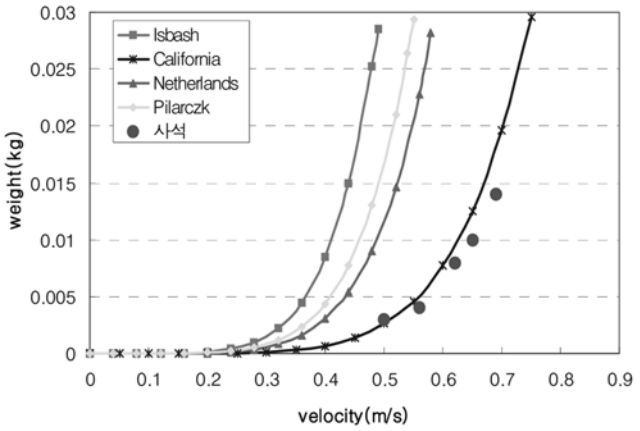


그림 4.2 사석의 유속별 중량 산정

4.3 모형블록의 안정식 적용성 검토

석고재료에 의한 모형블록 실험에서는 임의배열과 규칙배열의 2가지로 분류하였으며, 형상계수의 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그림 4.3을 보면 규칙배열시 형상계수에 관한 영향을 덜 받고, 임의배열일 경우에는 형상계수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이는 규칙배열시 모형사석간의 결속의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 형상계수가 클수록 사석의 안정성이 커짐을 알 수 있어, 형상계수가 커짐은 항력보다는 양력이 지배적임을 보여준다. 일반적으로 재료의 단위중량이 작아짐에 따라 단위중량이 큰 사석의 직경보다 크게 나타났고, 실험의 결과는 임의배열에서는 Isbash식이, 규칙배열에서는 Pilarczk식이 잘 일치함을 보여주나, 다양한 직경의 재료를 사용하여 실험의 결과분석이 요구된다.

모형사석의 중량산정에서는 임의배열시는 모든 식이 과소추정 되었지만, Isbash식이 가장 접합하였고, 규칙배열일 경우는 Netherlands간이식이 가장 접합하게 나타났다. 모형블록에 대한 실험은 비중이 작은 석고의 사용이므로 이는 단위중량의 영향이 기존의 식에 적절하게 반영이 안 되고, 단위중량의 증가 및 감소는 사석 또는 블록의 투영단면적을 증감에 따른 항력과 양력의 감소와 증가로 안정성의 해석식에 이의 영향이 고려되지 못함으로 판단된다. 따라서 단위중량과 투영면적의 감소에 따른 항력과 양력의 양상을 고려할 수 있는 식의 개발이 요구되어, 이의 규명을 위한 지속적인 실험의 수행이 필요하다.

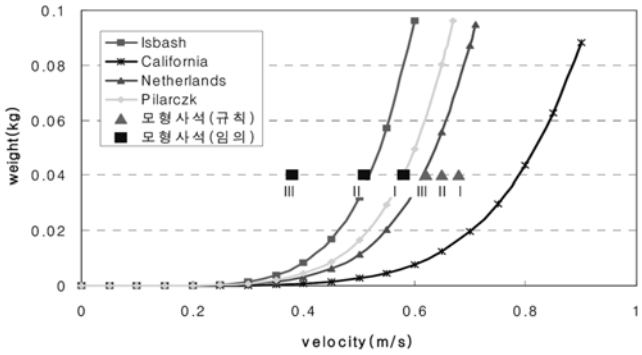


그림 4.4 모형사석의 유속별 중량 산정

5. 결　　론

본 연구는 평균유속개념을 이용한 Isbash식을 기초로 하여 사용되는 California 도로국식, Netherlands간이식, ASCE식과 평균유속공식과 난류전단 경계층을 이론을 혼용한 Pilarczk식, Maynord식의 적용성을 수리모형실험을 통해서 수행하였다. 아울러 최근의 바닥보호공과 호안은 일반적인 사석의 사용보다는 일정한 형태를 가진 블록으로 규칙 배열에 따른 결속(interlocking)과 형상의 정도가 안정성에 큰 영향을 줄 것으로 판단하여 이에 대한 추가 실험을 수행하였다. 그 실험결과를 토대로 수심에 대한 사석의 직경, Froude수, Reynolds수, 전단속도 및 응력, Shields계수를 계산하여 직경과 중량의 관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 사석의 경우는 크기과 중량이 커질수록 한계유속이 크게 나왔으며, 그에 따른 수심에 대한 사석의 직경비, Froude수, 평균유속에 따른 전단유속비, Shields계수는 상관성이 크게 나왔다. 사석의 공칭직경식에 대한 적용성은 Isbash식, Netherlands식, Pilarczk식은 과도하게 산정하고 ASCE식과 Maynord식은 다소 크게 산정하나 사용성이 있음을 볼 수 있다. 중량산정식의 경우는 California 도로국의 중량산정식이 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다. Isbash식, Netherlands식, Pilarczk식은 중량이 유속에 대하여 과대추정 되었다.

2) 단위중량이 작은 석고재료에 의한 모형블록 실험에서는 형상계수가 클수록 한계유속이 크게 나타났고, 또한 임의배열일 때보다 규칙배열일 경우 한계유속이 크게 측정 되었다. 이로서 형상계수와 결속의 정도가 사석의 안정성에 중요한 함수라는 것을 알 수 있다. 일반적으로 재료의 단위중량이 작아짐에 따라 단위중량이 큰 사석의 직경보다 크게 나타났고, 실험의 결과는 임의배열에서는 Isbash식이, 규칙배열에서는 Pilarczk식이 잘 일치함을 보여주나, 다양한 직경의 재료를 사용하여 실험의 결과분석이 요구된다. 모형사석의 중량산정에서는 임의배열시는 모든 식이 과소추정 되었지만, Isbash식이 가장 접합하였고, 규칙배열일 경우는 Netherlands간이식이 가장 접합하게 나타났다. 이는 단위중량의 영향이 기존의 식에 적절하게 반영이 안 되고, 단위중량의 증가 및 감소는 사석 또는 블록의 투영단면적을 증감에 따른 항력과 양력의 감소와 증가로 안정성의 해석식에 이의 영향이 고려되지 못함으로 판단된다.

3) 기존의 식은 사석의 크기가 일정 규모이상인 실무에 자주 사용하는 식으로 실험에서 수행한 사석은 공칭직경 25 mm이하와 비중이 작은 석고를 사용한 모형블록에 대한 실험결과로부터 도출된 결과이다. 따라서 제한된 실험의 범위에 따른 식의 적용성에 대한 분석으로 추가적인 실험을 통해서 분석 및 보완이 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

문수남 (1995) 수리모형 실험에 의한 사행하도의 사석크기에 관한 연구. 한국수자원학회논문집, **한국수자원학회**, 제28권, 제4호, pp. 205-213.

박영욱, 황보연, 구본충, 박상현 (2005) 방조제 끝막이 구간에서 유속에 대한 사석 및 돌망태의 안정성분석. **한국관개배수**, 제12권, 제2호, pp. 26-36.

서영제 (1995) 조류속에 따른 사석규격 결정공식에 관한 연구. **한국관개배수**, 제2권, 제2호, pp. 167-175.

우효섭 (2001) **하천수리학**. 청문각.

이동섭, 여홍구 (2005) 사석 바닥보호공 재료입경 결정을 위한 실험적 연구. 한국수자원학회 05학술발표회 논문집, **한국수자원학회**, pp. 1036-1039.

한국건설기술연구원 (2006) **다기능하천 설계기준 실험검증사업**.

ASCE (1975) *Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54*, Sediment Engineering. pp. 531-534.

Brown, S.A. and Clyde, E.S. (1989) *Design of Riprap Revetment. Hydraulic Engineering Circular No. 11(HEC-11)*. FHWA-lp-89-016, Washington, D.C.

California Division of Highways (1970) *Bank and Shore Protection in California Highway Practice.*

Delft Hydraulics (2002) *Hwaong Dike Closure.*

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.

Lagasse, P.F., Zevenbergen, L/W., Schall, J.D., and Clopper, P.E. (2001) *Bridge Scour and Stream Instability Countmeasures.* Rep. No. FWHA-NH1-01-003, Hydraulic Engineering Circular No. 23(HEC-23), 2nd Ed. Office of Bridge Technology, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Maynord, S.T., Ruff, J.F., Abt, S.R. (1989) Riprap Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115. No. 7, pp. 937-949.

Melville, B. W., Ballegooy, S., Coleman, S. E., and Barkdoll, B. (2007) Riprap Size Selection at Will-Wall Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 11, pp. 1265-1269.

Pilarczyk, K. W. (1990) Stability Criteria for Revetments. *Proc. of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, San Diego, USA.

Stefano, C. D. and Ferro, V. (1998) Calculating Average Filling Rock Diameter for gabion-Mattress Channel Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 9. pp. 975-978.

USACE (1991) *Hydraulic Design of Flood Control Channels.* EM1110-2-1601, Dept. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

◎ 논문접수일 : 2008년 05월 02일
◎ 심사의뢰일 : 2008년 05월 07일
◎ 심사완료일 : 2008년 06월 03일