

〈ISE 수자원학회 특별호 논문〉

사석의 수리적 안정성 실험식 개발

Experimental Formulae Development of Hydraulic Stability for Riprap

최 흥 식* / 박 광 호**

Choi, Heung Sik / Park, Gwang Ho

Abstract

By examining the experimental results, the critical mean velocity which initiates the movement of riprap is increased with the riprap size in mean diameter, the mean diameter over water depth (d/h), Froude number (Fr), and turbulent shear velocity over critical mean velocity (u_*'/v) which have great correlations among them so these parameters are adopted governing hydraulic stability for riprap. The hydraulic stability equation for riprap is developed by regression analysis. The developed equation is expanded from $0.36\sim 0.73\text{ m/s}$ of experimental range to $0\sim 5.0\text{ m/s}$ for the application in engineering discipline. So many useful relations among those parameters including critical mean velocity are derived by expanding to high Reynolds regions. Mean diameter calculation results by expanding to high Reynolds regions coincide with the calculations of ASCE and USBR at the range of $0\sim 3.0\text{ m/s}$ and the calculation result of ASCE at the range of $3.0\sim 5.0\text{ m/s}$. The results by developed formulae coincide well with the formulae of ASCE in general and also the results by recently developed existing formulae of hydraulic stability for riprap. Thus, the developed equation has the high applicability in engineering discipline to evaluate the hydraulic stability for riprap.

Keywords : critical mean velocity, turbulent shear velocity, hydraulic stability, mean diameter, experimental formulae

요 지

사석 입자의 운동을 시작하는 한계평균유속은 사석의 평균입경, 수심에 대한 사석의 평균입경 비, Froude수 및 한계평균유속에 대한 난류전단속도 비에 따라 증가함을 실험을 통해 확인하였고, 이 값을 사석의 수리적 안정성을 지배하는 변수로 채택하여 회귀분석을 통한 사석의 안정성 실험식을 개발하였다. 개발된 사석 안정성 식은 기존 실험의 유속범위인 $0.36\sim 0.73\text{ m/s}$ 에서 $0\sim 5.0\text{ m/s}$ 까지 확장시켜 실제 하천에 적용 가능성을 검토하였다. 큰 값의 Reynolds수의 확장에 따른 한계평균유속을 포함한 매개변수간의 유용한 상관성을 제시하였다. 실험값으로부터 확장된 큰 값의 Reynolds의 범위에서의 사석 안정성에 대한 평균입경의 산정은 $0\sim 3.0\text{ m/s}$ 에서는 미국 토목학회 공식과 미개척국에서 제시한 안정성식과 적합함을 보였으며, $3.0\sim 5.0\text{ m/s}$ 에서는 미국 토목학회 공식과 잘 일치하였다. 개발된 사석평균입경 결정공식은 일반적으로 미국 토목학회 공식과 잘 일치하였고, 기존 안정성식과 비교한 결과 대부분 잘 일치하는 것으로 확인되었다. 따라서 개발된 사석평균입경 산정식은 높은 사용성을 가지고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 한계평균유속, 난류전단속도, 수리적 안정성, 평균입경, 실험식

* 교신저자, 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (e-mail: hsikchoi@sangji.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engineering, Sangji Univ, Wonju 220-702, Korea

** (주)경호엔지니어링 이사 (e-mail: 6002349@chol.com)

1. 서 론

최근 국내·외에서는 하천정비 및 관리에 중요한 변화들이 일어나고 있다. 특히 유럽지역에서 이러한 변화를 쉽게 확인할 수 있는데 그 중 하나가 하천을 생태적 서식처로서의 기능을 가질 수 있도록 정비하고 관리한다는 점이다. 지금까지 이수, 치수의 관점에서 경제성을 강조하던 기존의 정비방식에서 벗어나 하천의 자연적 특성을 살리고, 특히 생태계 서식처를 고려한 다양한 기법들이 도입된다는 것이다. 또한 하천정비에 있어서도 자연적 공법을 이용하고자 하는 움직임이 일고 있다. 국내에서도 초기의 하천 환경에 대한 심미적 관점에서 벗어나, 생태성이 강조된 하천으로의 복원에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 하천복원에 대한 관심이 하천의 기능 중 환경 기능만을 강조하는 방향으로 이루어져서는 안 되며, 전통적인 치수적 접근 방식에 대한 새로운 평가에서 출발해야 한다.

이러한 관점에서 생태성이 강조된 호안은 식생호안이 전형적인 예일 수 있다. 그러나 식생호안은 흐름에 대한 저항이 크지 않아 치수에 대한 안정성을 확보하기 어렵다. 따라서 흐름이 크게 발달하는 구간에는 사용이 어려워 안정성과 식생이 강조된 생태호안블록을 사용하나, 이는 경제성에 문제가 있다. 따라서 최근에는 하천주위에 산재해 있는 자연재료 사용의 일환으로 사석을 이용한 제방의 보강이 많이 사용되고 있다. 그러나 사석의 사용에 따른 사석호안의 안정성에 관한 식은 많이 제안되고 있으나, 식의 사용에 따른 각종 변수의 적절한 사용에 대한 지침은 없는 실정이다. 따라서 각종 사석의 안정식에 대한 사용 및 활용성을 연구한 결과(최홍식과 이민호, 2008)를 토대로 우리현실에 부합되는 새로운 식의 개발이 필요하다. 기존의 식은 각종 상수의 적절한 입력을 요구하고 있어, 사용에 따른 설계자의 주관이 반영되어 그 값을 달리 함이 지적된다. 따라서 개발되는 식은 각종 매개변수의 도입보다는 하천에서 얻을 수 있는 물리적인 양 만에 의해 결정되는 식의 개발을 통해서 설계실무에 적용가능하도록 함은 무엇보다 중요하다.

따라서 본 연구에서는 하천 제방의 안정성 평가를 위해 기존의 사석 안정성 식들과 실험을 통해 도출된 실험값을 비교하여 가장 사용성이 높은 사석 안정성 식을 제시하였다. 실험결과를 이용한 회귀분석을 실시하여 경험계수의 사용이 많은 기존 식들과는 다른 형태의 실험식을 개발하였으며, 개발된 식이 실무에 적용 가능하도록 Reynolds수가 큰 범위까지 확장시켜 기존식과의 비교를 통하여 사용성을 검토하였다. 아울러 큰 Reynolds수 범위에서의 확장을 위해서 사석의 수리적 안정성을 지배하는 각종 매개변수 간의 상관성을 제시하였다.

2. 사석의 안정성 이론

일반적으로 수중에서의 비점착성 입자의 이동은 입자의 중량, 입경 및 흐름특성에 의한 마찰속도에 영향을 받게 된다. 하상의 입자가 받는 힘은 항력(drag force) 및 양력(lifting force)과 이러한 힘에 저항하는 입자의 수중 중량 등이다. 사석의 안정에 관한 식은 크게 하천에서 제방, 하상보호, 세굴방지 등의 목적과 바다에서 호안 또는 방조제의 축조에 따라 투하하는 사석의 안정성에 기초를 둔 연구가 대부분이다. 사석의 안정에 관한 이론은 중량의 산정 시 Brahm가 제시한 6승 법칙에서 출발한다. 사석의 규모결정에서 사석의 중량은 사석의 공칭직경의 3승에 비례하므로 유속의 2승으로 정의된다.

사석의 안정성에 관한 공식은 크게 하천에서의 안정성과 바다에서 매립지 조성을 위한 최종제철구간의 사석투하에 따른 안정성에 관한 식으로 대별할 수 있다. Table 1에서와 유속의 2승에 비례하는 범주 I의 식, 유속의 2.5승에 비례하는 범주 II의 식 그리고, 유속의 3승에 지배되는 범주 III의 식으로 대별된다. 식은 수심(y)에 따른 사석의 직경(d)로 정의되고 Froude수의 함수로 표시된다.

이중 Isbash(1935)는 구조물이 없는 흐름에 사석을 떨어뜨려 하류로 쓸려가지 않는 사석의 크기 및 중량을 결정하는 경험식을 평균유속 개념으로 제안하였다. 이 식은 완전한 흐름의 경우 sill 위에서의 유속변화에 따라 사석의 규모를 결정하는 식으로 수심과 사석직경의 관계(y/d)가 5~10의 범위 내에서 유용하게 사용되고 있다. 여기서 S_r 은 사석의 비중, α 는 사면의 경사각, y' 는 Isbash계수로 조밀하게 채워진 사석의 경우 1.4, 느슨하게 채워진 사석의 경우 0.7, 사석이 노출된 경우 0.86 또는 흙에 묻힌 경우 1.2를 사용한다. Isbash식의 계속적인 연구를 수행하여 미공병단 수로시험소(USACE, 1991)에서 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 제시하여 수심, 유속, 재료의 중량 등을 고려하였다. 미국 California 주정부 도로국(1970)은 모든 해안 및 하천에서 호안, 수제공 등 설계기준으로 해안 사석호안용 사석 크기의 결정과 하천사석호안용 돌의 크기에 대한 공식이 별도로 제시되어 있다. 이 식은 한계소류 해석상 Brahm가 제안한 6승 법칙을 이용하고 있다. 여기서, S_r 은 사석의 비중, u 는 유속(m/s), α' 는 사석 쌓기 각도(70°)를 나타낸다. 이 식에서 사석의 비중은 큰 사석일수록 모암의 광물 성분을 그대로 가지고 있지만, 작은 사석의 경우는 마모에 강한 석영의 구성비가 높다. 따라서 실

Table 1. Classification of Existing Formulae of Hydraulic Stability for Riprap

Type	Investigator	Equation	Remark
I ($Fr^{2.0}$)	Isbash (1935)	$\frac{d_r}{y} = \frac{1}{2y'(S_r - 1)(\cos\alpha - \sin\alpha)} Fr^2$	modified by USACE (1991)
	Isbash and Khaldre (1970)	$d_{s50} = C_r \frac{V_b^2}{g(S_s - 1)\Omega}$	d_{s50} ; diameter of equivalent sphere, $d_{s50} = \left(\frac{6M_{50}}{\phi\rho S_s}\right)^{1/3}$ $\Omega = \left(1 - \frac{\sin^2\alpha}{\sin^2\phi}\right)^{0.5}$; slope factor C_r ; 0.35 (low turbulence) or 0.68 (high turbulence)
	California Division of Highways (1970)	$\frac{d_{r33}}{y} = \frac{0.274}{\sin(70^\circ - \alpha)(S_s - 1)} Fr^2$ $\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0.24}{\sin(70^\circ - \phi)(S_s - 1)} Fr^2$ $\frac{d_{r50}}{y} = 0.29 \frac{Fr^2}{(S_s - 1)}$	α ; slope angle of levee revetment d_{r33} ; diameter of 33% sieve passing d_{r50} ; diameter of 50% sieve passing ϕ ; frictional angle of riprap
	ASCE (1975)	$\frac{d_{50}}{y} = \frac{0.174}{(S_r - 1) \cdot \cos\alpha} Fr^2$	S_r : specific gravity of riprap α : slope angle
	Jansen et al., (1979)	$\frac{d_s}{y} = \frac{A}{2(S_s - 1)\Omega^2} Fr^2$	A ; 0.2 (minor turbulence), 0.5~0.7 (normal turbulence), 1.4 (major turbulence)
	Pilarczyk (1990)	$\frac{D_n}{y} = (1/\Delta)\Phi K_r \frac{0.035}{\Psi_{cr}} K_h K_s^{-1} \frac{1}{2} Fr^2$	
	Japan river association (1997)	$\frac{d_m}{y} = \frac{1}{2E_1^2(S_s - 1)} Fr^2$	d_m ; averaged diameter E_1 ; 1.2 (low turbulence), 0.86 (high turbulence)
II ($Fr^{2.5}$)	Neill (1967)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0.32}{(S_s - 1)^{1.25}} Fr^{2.5}$	d_{r50} ; diameter of 50% sieve passing
	Bogardi (1968)	$\frac{d_r}{y} = \frac{0.26}{(S_s - 1)^{1.25}} Fr^{2.5}$	d_r ; diameter of equivalent sphere
	Maynord (1987)	$\frac{d_{r30}}{y} = \frac{C_s}{(S_s - 1)^{1.25}} Fr^{2.5}$	d_{r30} ; diameter of 30% sieve passing C_s ; stability coeff. for riprap (0.30)
	USACE (1991)	$\frac{d_{r30}}{y} = \frac{S_f C_s C_v C_t}{K_s^{1.25} (S_s - 1)^{1.25}} Fr^{2.5}$	$d_{n50} = 0.85d_{r50}$ (riprap), ϕ_c ; stability coeff. for riprap (0.75), K_i ; turbulence coeff. 1.0 (normal turbulence), 1.5 (increased turbulence), 2.0 (high turbulence), K_h ; velocity distribution coeff. $K_h = \frac{2}{\log^2\left(1 + 12\frac{y}{d_{n50}}\right)}$ (for fully developed profile) $K_h = \left(1 + \frac{y}{d_{n50}}\right)^{-0.2}$ (for not fully developed profile)
III ($Fr^{3.0}$)	Maynord (1978)	$\frac{d_{r20}}{y} = 0.22Fr^3$	d_{r20} ; diameter of 20% sieve passing

측자료가 없는 경우에는 사석의 비중을 2.65를 사용한다. 미국토목학회 수리분과위원회 (ASCE, 1975)에서 유사량 매뉴얼을 만들기 위한 소위원회에서 추천, 권고한 식으로 통과입경을 50%로 한 d_{50} 으로 실험을 실시하였다. 여기서 유속은 제방에서 3.0 m 떨어진 거리에서의 평균유속을 적용하였다. Jensen 등 (1979)의 Netherlands 간이공식은

화란의 방조제 축조 시 끝막이 공사에서 모래 또는 흙주머니가 사용된 사례를 중심으로 유도되었다. 이 공식은 접근유속과 공사에 사용된 재료의 상대밀도의 함수로 구성되어 있으며, 수중에서 안착된 모래주머니의 중량이 흐름에 충분히 견딜 수 있도록 하기 위한 설계식이다. 이 공식은 접근유속계수 α 가 주된 변수이며, 사석의 공칭직경

및 중량을 계산할 때 이용되는 식이다. 여기서, α 는 접근 유속계수로서 일반적인 흐름일 경우 1.1, 난류현상이 심한 경우 1.4로 구별되어 사용된다. Pilarczyk (1990)은 조류 유속에 대응하기 위한 사석의 크기를 산정하기 위해 특별한 계수와 상수를 Shields식과 Isbash식을 혼용한 공식을 제안하였다. Pilarczyk식은 2002년 2월 화용 방조제 끝막이 보고서 바닥 보호공 안정성에 적용된 바 있으며, 최근에 많이 사용되고 있는 공식이기도 하다. 이때 각각의 변수는 다음과 같다.

K_h : 수심에 따른 유속분포계수로, $K_h = (h/D_n)^{-0.2}$, 대수형 유속분포일 경우는 $K_h = 2/(\log_{10}h/k_s)^2$

k_s : 바닥조도계수, $k_s = (2 \sim 5)D_n$,

K_T : 난류계수, 1.0~3.0 (1.0: normal turbulence or rivers, 1.5: very common case or non-uniform flow, 2.0: high turbulence as in a hydraulic jump, 3.0: jet impact)

K_s : 경사감소계수 (slope reduction factor), $K_s(\alpha, \beta) = k_d k_i$ (α 는 사면 경사 함수, β 는 하상경사함수),

$$k_d(\alpha) = \cos\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\tan\alpha}{\tan\phi}\right)^2}, \quad K_i(\beta) = \frac{(\sin\phi - \beta)}{\sin\phi}$$

k_d : 사면경사와 관련된 감소계수,

k_i : 흐름방향과 관련된 감소계수,

α : 흐름방향과 수평인 구조물의 사면각도,

β : 하상경사,

ϕ : 사석의 안식각,

Φ : 안정계수 (1.0~1.5 : exposed edge, 0.5~0.75 : 연속적인 보호공 (embedded rock)),

Ψ_{cr} : 한계전단력 계수 (0.035 : loose rock, 0.07 : gabions and stone mattresses, ≤ 0.1 : for the rockfill inside

gabions and stone mattresses)이다.

Maynord 등 (1989)의 식은 유속의 2.5승 및 3승에 비례하는 식을 통과입경을 d_{30} 에 대해서 제시하였으며, 이 식에서 C_s 는 사석에 관한 안정성 계수로 보통 0.3을 쓴다 (Stefano and Ferro, 1998).

3. 실험 방법 및 내용

3.1 실험장치 및 측정기기

경사 개수로 실험장치의 제원은 Table 2와 같으며, 유량의 정확한 값을 알기 위하여 경사 가변형 개수로 실험장치의 유량을 Francis 유속공식 (구형웨어) 및 평균유속공식으로 측정하고 비교하여 유량이 일치하는 $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 유량을 고정시켜 실험하였다.

수위는 개수로 레일위의 이동장치에 부착된 후크계이지를 이용하여 측정하였다. 유속의 측정은 마그네틱 유속계 (LP1100)로 흐름방향의 유속을 측정하였다. 유속계의 측정방향은 1축 1방향으로 유속 측정범위는 $0 \sim 2.0 \text{ m/s}$ (LPT-200-09PS), $0 \sim 5.0 \text{ m/s}$ (LPT-500-25F)이다. 정확도는 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 에서 $\pm 0.02 \text{ m/s}$, $1.0 \sim 2.0 \text{ m/s}$ 에서 $\pm 0.04 \text{ m/s}$ 이며 유속의 측정은 하류의 수위 조절밸브 조절을 통하여 사석이 움직이기 시작할 때 유속을 계속하였다.

3.2 실험방법 및 내용

길이 12.0 m, 폭 0.4 m의 가변 경사형 직선수로에 수로에 Fig. 1에서와 같이 상류에서부터 7.0 m 지점에 길이 1.0 m 구간에 사석을 설치하였다. 아울러 사석거치대를 제작하여 수로바닥을 사석의 높이와 일치시켰으며, 거치대를 사석설치 구간 하류부까지 충분히 연장하여 실험

Table 2. Description of Experimental Tilting Flume

Channel	Dimension	Max. slope	Water supply	Lower tank	Higher tank
Tilting flume	Length: 12.0 m Width: 0.4 m Height: 0.4 m	1/30	Centrifugal pump: 11.0 kw max. discharge: 280 l/min	Length: 4.5 m Width: 2.0 m Height: 0.75 m	Length: 2.44 m Width: 1.22 m Height: 0.7 m

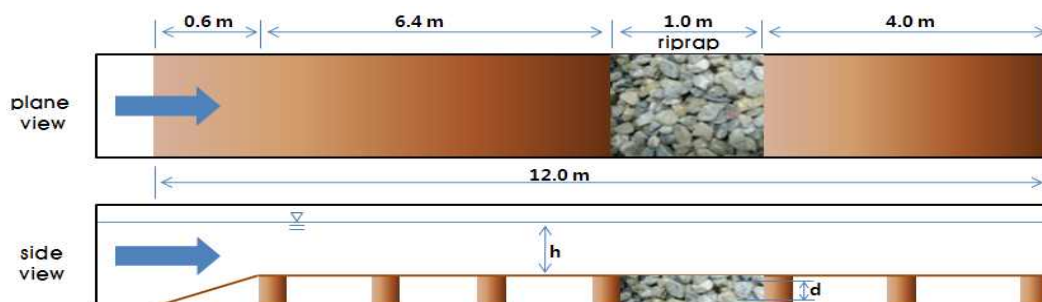


Fig. 1. Experimental Set-up of Hydraulic Stability for Riprap at Tilting Flume

구간내 안정적 흐름을 유도하였다. 수로 상류에는 여과막 (screen)을 설치하여 상류 웨어탱크 내에서 생긴 와류가 하류로 전파되지 않도록 하였다. 실험에 사용된 사석은 체분석 실험을 통하여 통과입경 (d_{50})이 5, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 27, 32 mm인 사석 (Fig. 2)을 사용하였으며, 수로경사를 0.020으로 고정시키고 하류 수위조절 웨어를 조절하여 사석입자가 움직일 때를 한계유속으로 결정하고 그에 상응하는 제반 수리특성을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 사석 실험 결과 분석

실험을 통하여 통과입경이 5.0~32.0 mm인 사석에 대응하는 한계유속은 0.37~0.75 m/s로 나타났다. 사석의 통과입경과 중량이 커질수록 한계유속이 크게 나타났다. 아울러 Reynolds수는 사석의 크기가 커짐에 따라 증가하는 경향으로 나타났으나, 큰 상관성을 찾기는 어렵다. 사석의



Fig. 2. Experimental Situation and Riprap Used for Experiment

Table 3. Critical Condition for Riprap Movement with Sizes in Mean Diameter

Mean diameter (mm)	Frictional slope (S_f)	Critical mean velocity v (m/s)	Depth (m)	d/h	Reynolds number (Re)	Shear velocity (u_*)	Shear stress (N/m^2)	Froude number (Fr)	u^*/v	Shields parameter (θ)
5	1.43E-02	0.37	0.11	0.04	32,599	0.101	10.13	0.35	0.27	0.125
7	1.45E-02	0.41	0.11	0.06	34,761	0.100	10.03	0.39	0.25	0.088
10	1.46E-02	0.43	0.11	0.09	36,509	0.100	9.98	0.42	0.23	0.061
13	1.48E-02	0.44	0.10	0.13	35,657	0.099	9.87	0.44	0.23	0.046
16	1.52E-02	0.47	0.10	0.17	35,349	0.098	9.67	0.48	0.21	0.037
19	1.58E-02	0.56	0.09	0.21	39,512	0.098	9.62	0.59	0.18	0.031
22	1.62E-02	0.62	0.08	0.26	41,042	0.097	9.40	0.68	0.16	0.026
25	1.66E-02	0.66	0.08	0.31	42,231	0.097	9.38	0.74	0.15	0.023
27	1.70E-02	0.71	0.08	0.35	42,771	0.096	9.27	0.81	0.14	0.021
32	1.73E-02	0.75	0.07	0.46	40,625	0.093	8.70	0.91	0.12	0.016

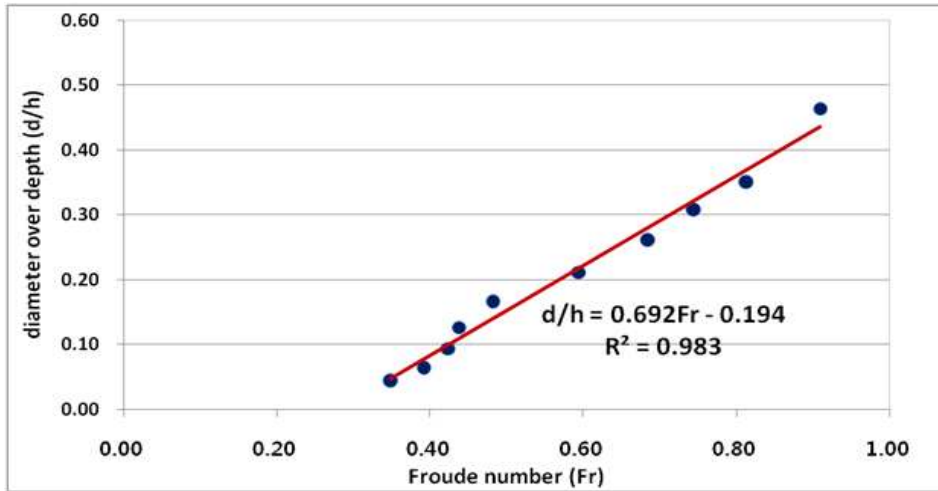


Fig. 3. Relationship between Diameter over Water Depth and Froude Number

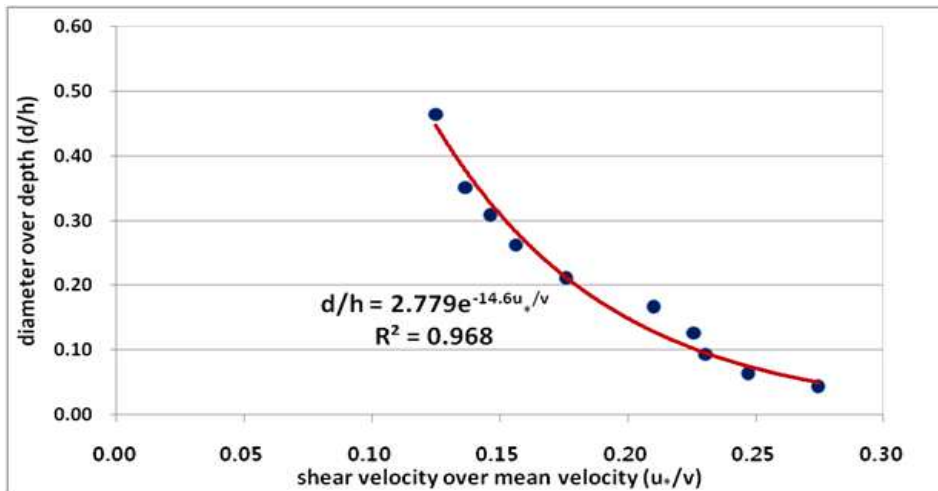


Fig. 4. Relationship between Diameter over Water Depth and u^*/v

안정에 대한 수심의 영향을 반영하기 위한 수심에 대한 사석 평균입경 비 (d/h), Froude 수는 한계유속과 마찬가지로 증가하는 경향을 보였으며, 난류 전단속도, 전단응력, Shields계수는 감소하는 경향을 보였다 (Table 3).

실험결과는 실내실험에서의 제한된 유속범위에 대해 수행한 결과로 유속이 크게 발달되는 실무에서의 적용성에 대해서는 한계가 있음이 지적된다. 따라서 실험을 통하여 개발된 식은 유속이 큰 범주로 확장시켜 기존 식에 의한 결과와 비교하여 실무에 사용성을 검토하였다.

Fig. 3은 Froude수가 증가함에 따라 수심에 대한 사석 평균입경의 관계로 비례적으로 증가하였으며, Fig. 4는 난류전단 흐름특성의 반응을 위한 한계 평균유속에 대한 난류 전단속도 비 (u^*/v)의 증가에 따라 수심에 대한 사석 평균입경 비로 감소함을 보여준다. Fig. 5는 한계평균유속의 증가에 따른 수심에 대한 사석 평균입경의 비로 서로 비례함을 보여준다. Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 제시한 그래프와

식을 토대로 Froude수, u^*/v , 한계평균유속의 값으로 부터 수심에 대한 사석평균입경 비를 결정하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 아울러 이러한 결과는 Reynolds 수가 큰 실무 영역까지 실험결과를 이용하여 실험식을 확장하는데 사용하였다.

4.2 사석 안정성식 개발 및 적용성 검토

4.2.1 실험결과의 적용성 검토

개발한 식은 유속범위가 0.75 m/s 이하인 실험결과로부터 도출한 식으로 Reynolds수가 크게 발생하는 실무에 적용에 한계가 있다. 따라서 실무에서 발생할 수 있는 유속범위인 5.0 m/s 까지 확장한 그래프는 Fig. 6과 같다. 이는 Table 3에서 얻은 한계평균유속과 사석의 평균입경의 관계를 Reynolds수가 큰 범위까지 회귀분석을 통하여 확장한 결과이다.

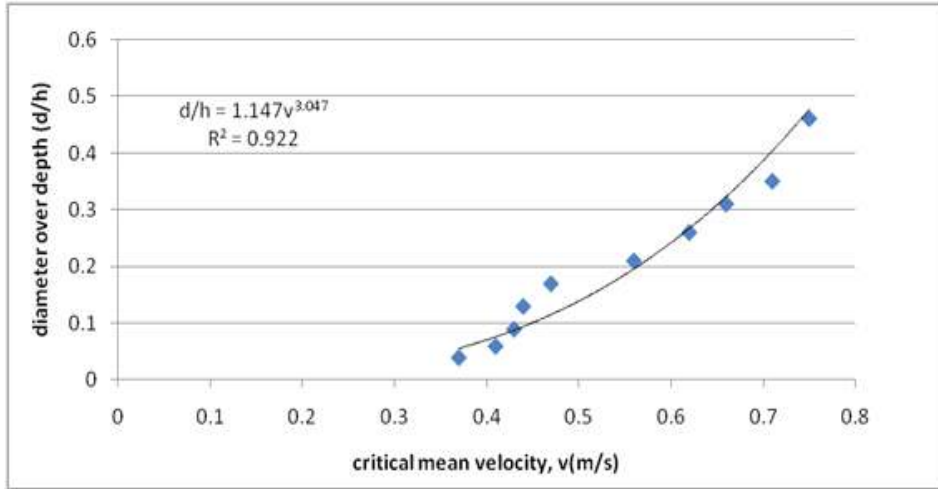


Fig. 5. Relationship between Diameter over Water Depth and Critical Mean Velocity

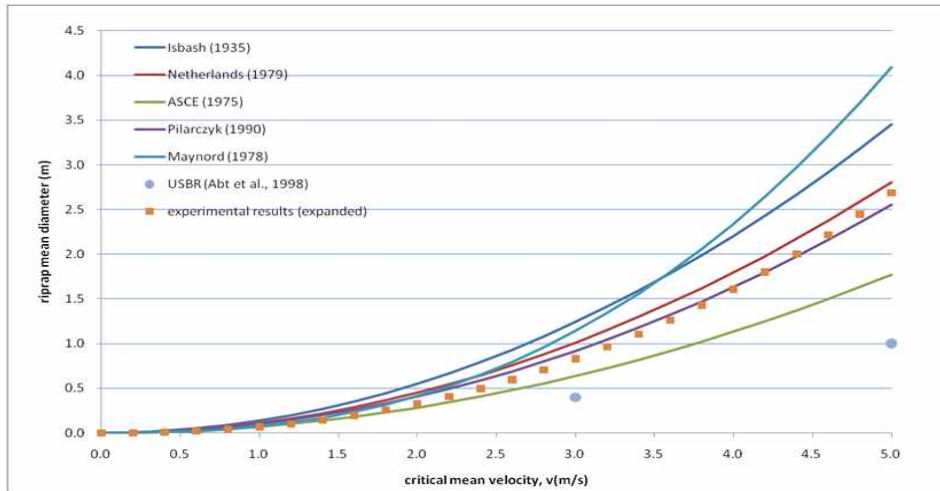


Fig. 6. Expansion of Experimental Results to High Reynolds Region

실험값과의 비교검토를 위해서 Isbash (1935)식, Jensen 등 (1979)의 Netherlands 간이공식, Pilarczyk (1990)식, Maynard (1987)식, ASCE (1975)식과의 비교를 통하여 확장된 식의 사용성을 확인하였다. 한계평균유속에 따른 사석 평균입경식의 경우 Isbash식, Netherlands 간이공식, Pilarczyk식은 과도하게 산정되었고, ASCE식과 Maynard 식은 다소 크게 산정하나 사용성이 있음을 보였다. 기존 실험 (최홍식과 이민호, 2008)에서 개발한 식은 Maynard식과 잘 맞는 것으로 확인되었으나, Fig. 6과 같이 Maynard식의 경우 유속 2.5 m/s 이후로 급격한 변화를 보이며 평균 입경비를 과대하게 산정하였다. 따라서 확장된 유속범위에서의 실험값에 의한 개발한 식은 유속 3.0 m/s 이하에서는 ASCE식과 잘 부합되고, 그 이상의 유속범위에서는 Pilarczyk식과 잘 부합하였다. 아울러 확장된 식의 결과는 USBR의 원형 실험결과 (Abt et al., 1998)인 유속 3.0 m/s 에서의 안정적 사석의 평균입경은 약 0.5 m , 5.0 m/s 에서

의 약 1.0 m 로 실험결과가 다소 작게 산정함을 보였다.

4.2.2 사석 안정성식의 개발

사석의 안정성 식의 개발을 위해 실험결과를 토대로 한 변수를 무차원화하여 회귀분석을 실시하였다. 사석의 안정성에 일관성 있는 영향을 주는 변수는 한계평균유속, 수심에 대한 사석 평균입경 비, Froude수 및 평균한계유속에 따른 난류전단유속 비로 나타났다. 기존의 식들은 사석의 안정을 크게 지배하는 난류전단유속에 대한 값을 고려하기 위하여 많은 경험계수를 가지고 있음이 지적된다. 따라서 경험계수의 도입보다는 관측이 가능한 값들만을 가진 무차원 매개변수에 의한 사석의 안정성 식의 개발이 필요할 것으로 판단하였다. Table 4는 회귀분석을 위한 무차원 매개변수의 실험결과를 정리한 것이다. 개발한 회귀식은 아래와 같고, 결정계수 (R^2)는 0.997로 매우 적합함을 알 수 있었다. 이때 d 는 사석의 평균입경, h 는

Table 4. Data Used to Regression Analysis

Riprap mean diameter, d (mm)	Critical mean velocity, v (m/s)	d/h	Reynolds number (Re)	Froude number (Fr)	u_*/v
5	0.37	0.04	32,599	0.35	0.27
7	0.41	0.06	34,761	0.39	0.25
10	0.43	0.09	36,509	0.42	0.23
13	0.44	0.13	35,657	0.44	0.23
16	0.47	0.17	35,349	0.48	0.21
19	0.56	0.21	39,512	0.59	0.18
22	0.62	0.26	41,042	0.68	0.16
25	0.66	0.31	42,231	0.74	0.15
27	0.71	0.35	42,771	0.81	0.14
32	0.75	0.46	40,625	0.97	0.12

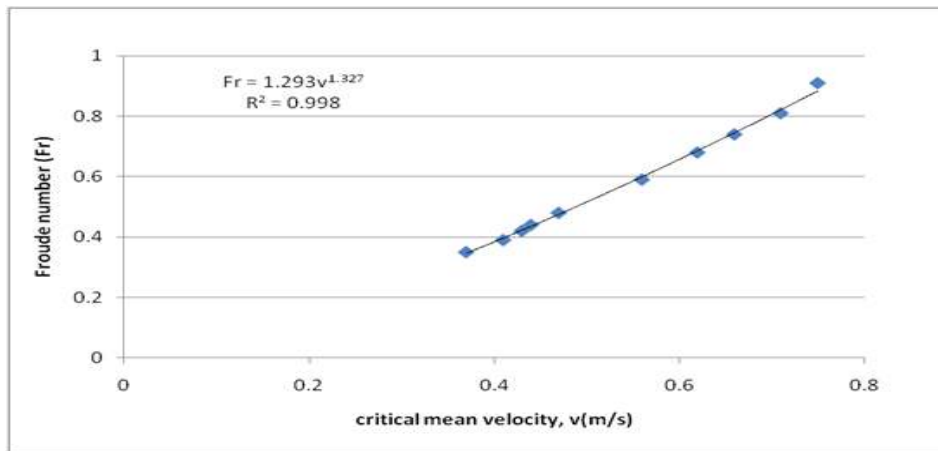


Fig. 7. Relationship between Froude Number and Critical Mean Velocity

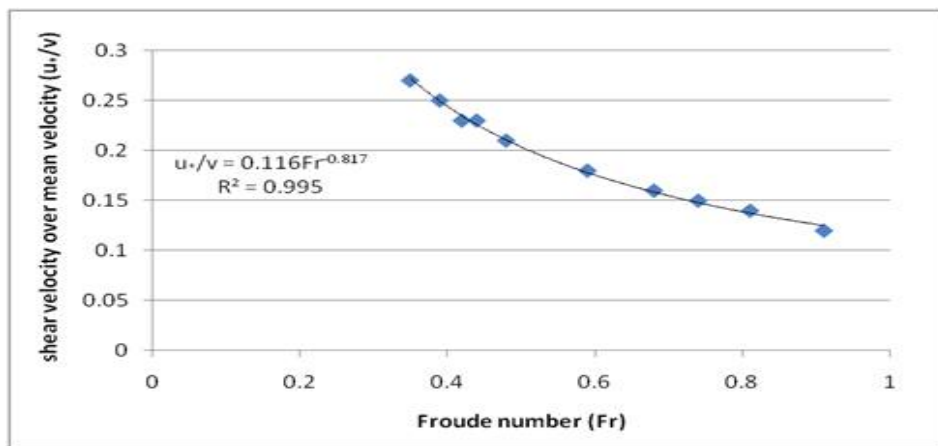


Fig. 8. Relationship between u_*/v and Froude Number

수심, v 는 한계유속, u_* 는 난류 전단속도이다.

$$d = 55.10 \frac{d}{h} - 22.12 Fr - 113.11 \frac{u_*}{v} + 40.94$$

개발식의 경우 기존 실험에서 유속이 큰 범위까지 확장

함에 있어, 사석의 안정에 대한 한계평균유속에 따른 수심이 너무 작아지므로 Froude수의 정확한 산정이 어렵다. 따라서 유속과 Froude수의 관계곡선을 도출하여 실험식을 Reynolds수가 큰 범위까지 확장하였다. 이때 유속에

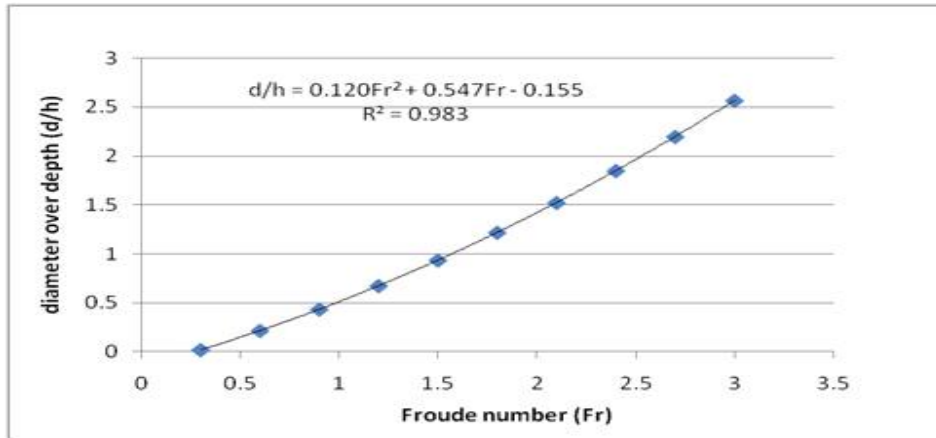


Fig. 9. Relationship between Diameter over Water Depth and Froude Number

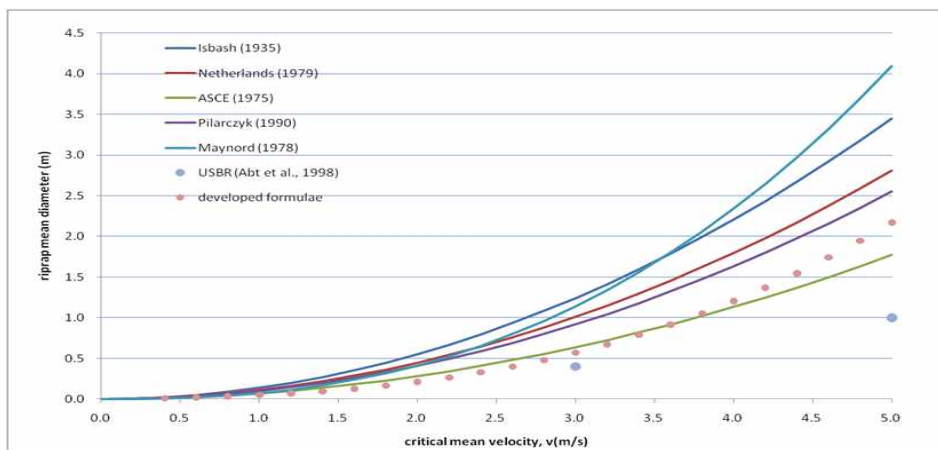


Fig. 10. Applicability of Developed Equation of Hydraulic Stability for Riprap

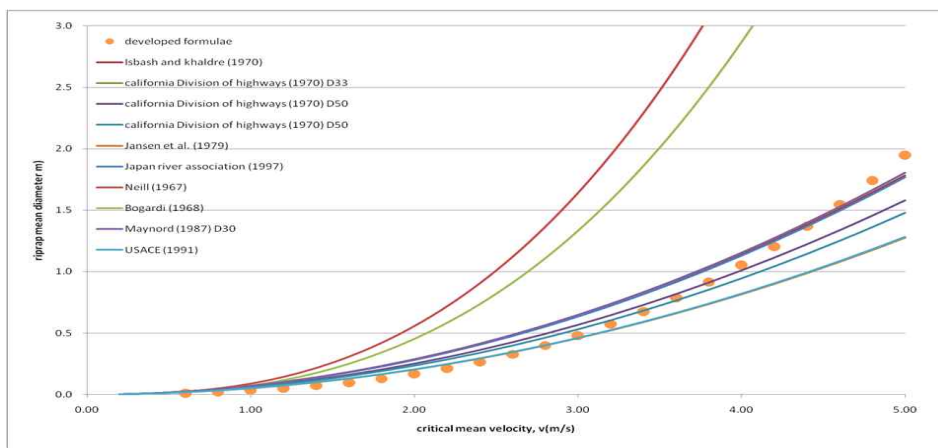


Fig. 11. Comparing with other Hydraulic Stability Equations for Riprap

따른 Froude수 관계식의 결정계수는 0.998로 매우 적합함을 보였다(Fig. 7). 아울러 Froude 수에 따른 u_* / v 의 관계는 Fig. 8과 같고, 결정계수는 0.995로 매우 적합함을 보였다. 개발된 식의 변수 중 수심에 대한 사석의 평균입경 (d/h)의 값을 알 수 없기 때문에 Fig. 9와 같이 Froude 수

에 따른 수심에 대한 사석 평균입경 관계곡선식을 도출하여 수리적으로 안정한 수심에 대한 사석의 평균입경을 결정하였다. 여기서 Froude수에 따른 수심에 대한 사석 평균입경 관계곡선식의 결정계수는 0.983으로 나타났다.

Fig. 10은 개발한 식에 의한 사석안정성의 결과로 유속

범위 3 m/s 까지는 미국 토목학회 수리분과위원회에서 권고한 식(ASCE, 1975)과 미개척국에서 제시하고 있는 사석의 안정성에 따른 평균입경 값(Abt et al., 1998)과 적합함을 보였으나, 유속 범위 3.8 m/s 지점부터는 개발식의 직경비가 미국 토목학회 공식에 의한 산정결과보다 높게 산정되는 것을 볼 수 있었으나, 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 확장된 다른 안정성식의 경우 실험값과 개발식의 확장에 따른 비교결과 직경비가 다소 크게 산정됨을 알 수 있었다.

또한 기존 안정성식 외의 Isbash와 Khaldre (1970)식, California Division of Highways (1970)식, Jansen 등 (1979)식, 일본하천협회 (1997)식, Neill (1967)식, Bogardi (1968)식, Maynord (1987) d_{30} 식, USACE (1991)식의 8개 사석 입경 결정공식에 실측된 실험 데이터를 대입·확장하여 개발된 사석 직경식과의 비교를 통해 사용성을 확인하였다 (Fig. 11). 개발된 사석 직경식과 사석 입경 결정공식의 유속에 따른 직경의 관계가 Neill (1967)식과 Bogardi (1968) 식과는 차이를 보이고 있으나, 대부분 식과는 비슷한 양상으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 개발된 식은 실제 설계실무에 사용 가능함을 확인하였다.

5. 결론

사석의 수리적 안정성 실험에 의한 사석 평균입경에 따른 한계평균유속, Froude수, Reynolds수, Shields수, 난류전단유속, 전단응력, 수심에 대한 사석평균입경 비, 한계평균유속에 대한 난류전단유속 비에 따른 수리특성을 분석하였다. 또한 새로이 개발한 사석의 수리적 안정성의 사용성을 검토하기 위해 기존의 식을 3가지 범주로 구분하여 정리하고, 이들 식과의 비교와 검토를 실시하였다. 실험결과를 토대로 개발한 사석의 수리적 안정성식은 기존 식에서 많이 사용되는 경험계수를 없애고, 실제 하천에서 얻을 수 있는 실측자료를 토대로 사석의 직경을 산정할 수 있는 식의 형태로 개발하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 기존 실험결과의 최대 유속범위인 0.75 m/s 이하에서의 실험결과를 유속범위가 $0\sim 5.0\text{ m/s}$ 의 구간으로 확장한 실험식을 개발하였고, 그 적용성을 분석하였다. 실험결과에 의한 사석의 수리적 안정성에 대한 한계 평균유속에 따른 사석 평균입경 산정식의 경우 Isbash식, Netherlands 간이공식의 결과는 다소 크게 산정하였고, ASCE식과 Maynord식은 다소 크게 산정하나 사용성이 있음을 보였다. 그러나 실험값의 확장분석결과 Maynord식의 경우 유속이 2.5 m/s 이상이 되는 지점부터 급격한 변화를 보이며

입경을 크게 산정하여 실험값과 일치하지 않는 것을 볼 수 있었다. 따라서 확장된 유속범위에서의 실험값에 의한 개발한 식의 결과는 유속 3.0 m/s 이하에서는 ASCE식과 잘 부합되고, 그 이상의 유속범위에서는 Pilarczyk식과 잘 부합하였다.

- 2) 기존 실험결과를 회귀분석을 실시하여 개발한 사석의 평균입경 산정식은 유속범위 $0\sim 3.0\text{ m/s}$ 까지는 미국 토목학회 수리분과위원회에서 권고한 식인 ASCE식과 USBR에서 제시하고 있는 사석의 안정성에 따른 평균입경 값(Abt et al., 1998)과 적합함을 보였으나, 유속 범위 3.8 m/s 지점부터는 개발식의 직경비가 ASCE식보다 높게 산정되는 것을 볼 수 있었으나, 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 3) 개발된 사석의 입경 산정공식은 기존 안정성식 외의 Isbash와 Khaldre식, California Division of Highways식, Jansen 등 식, 일본하천협회공식, Neill 식, Bogardi식, Maynord d_{30} 식, USACE의 Maynord 식의 사석 입경 결정공식과 비교한 결과 Neill식과 Bogardi식과는 차이를 보이고 있으나, 대부분의 식과는 잘 일치하는 것으로 개발된 사석의 안정성을 위한 평균입경 산정식은 사용성이 높음을 확인할 수 있었다.
- 4) 개발된 사석의 수리적 안정성 식은 실험결과를 회귀 분석하여 개발된 실험식으로써 실험에서 적용된 유속범위에서의 적용성이 있다. 하지만 확장된 유속범위에서의 사용성을 확인할 수 있었으나, 그 적용 가능성에 대한 추가적인 원형실험을 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원 (자연과 함께하는 하천복원기술개발 ECORIVER21; 과제번호06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 일본하천협회 (1997). 建設省 河川砂防技術基準(案) 同解説(設計編 I).
- 최홍식, 이민호 (2008). 사석의 수리적 안정성 분석식의 비교, 한국방재학회논문집, 제8권, 제3호, pp. 149-155.
- Abt, S.R., Johnson, T.L., Thornton, C.I., and Trabant, S.C. (1998). Riprap Sizing at Toe of Embankment Slope, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE,

- Vol. 124, No. 7, pp. 672-697.
- ASCE (1975). *Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54*, Sediment Engineering, pp. 531-534.
- Bogardi, I. (1968). *Einige Anwendungen der Bodenverfestigung im Wasserbau*, Donau Europäische Konferenz, Wien.
- California Division of Highways (1970). *Bank and Shore Protection in California Highway Practice*.
- 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.
- Isbash, S.V., and Khaldre, K.Y. (1970). *Hydraulics of River Channel Closure*, Butterworths, London.
- Jansen, P.P., Bendegom, L.V., Berg, J.V.D., Vries, M.D., and Zanen, A. (1979). *Principles of River Engineering: The Non-tidal Alluvial River*. Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft, The Netherlands.
- Maynard, S.T. (1978). *Practical Riprap Design. Miscellaneous paper H-78-7*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Maynard, S.T. (1987). *Stable Riprap Size for Open Channel Flows*, Ph.D. Dissertation. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Maynard, S.T., Ruff, J.F., and Abt, S.R. (1989). Riprap Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7, pp. 937-949.
- Neill, C.R. (1967). *Mean Velocity Criterion for Scour of Coarse Uniform Bed Material 12th IAHR Congress*, pp. C6.1-C6.9.
- 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.

논문번호: 특별호	접수: 2011.03.07
수정일자: 2011.04.27	심사완료: 2011.04.27