〈論 文〉

교각의 세굴에 미치는 Armouring효과
Armouring Effect on Local Scour around Bridge Piers

李 正 圭*
LEE Jong-Kyu

Abstract The results of laboratory experiments on the clear-water local scour of cohesionless bed sediment at three types of the pier shape are presented. Based on the experimental data, the relative equilibrium depth of local scour is related to the pier shape, the geometric standard deviation of the bed material, the velocity ratio and the pier Froude number. The relative local scour depths were smallest at the round-nosed pier and remarkably reduced at the non-uniform bed sediment, comparing with those at the uniform bed material. The effect of sediment grading on the local scour reduction was discussed and compared with Raudkivi and Ettema's experiments.

요 지 : 본 연구는 3가지 교각형상에 대하여 국부적 정지상세굴에 대한 수리실험결과를 분석한 것이다. 실험결과에 의하면 국부적 상대세굴심은 교각형상, 하상입경의 기하표준편차, 유속비, 교각 푸르드수와 관계가 있는 것으로 나타났다. 교각의 상대세굴심은 반원사각형교각에서 가장 작고 하상재료가 균일할 때 보다 불균일할 때 현저하게 작게 나타났다. 입도의 불균일성으로 인한 세굴감소효과는 Raudkivi와 Ettema의 연구결과와 비교 검토하였다.

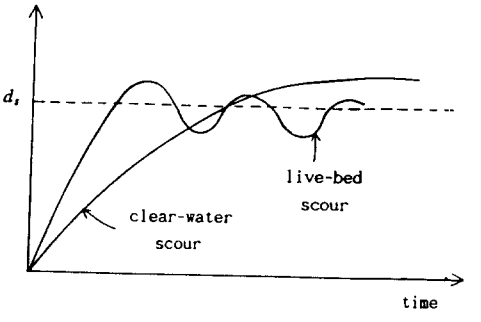
1. 서 론

교각주변에서 일어나는 국부적세굴(local scour)은 하상재료가 균일한 경우(uniform sediment)와 불균일한 경우(non-uniform sediment)와는 세굴특성이 상당히 다르다. 세굴심은 하상재료가 균일할 때 가장 크게 나타나며 하상재료가 불균일한 경우에는 상대적으로 굵은 입자로 인하여 보호층(armouring layer)이 형성되며 이로 인한 armouring효과가 나타나므로 세굴심이 작게 된다고 알려져 있다[1,2,4,5,8].

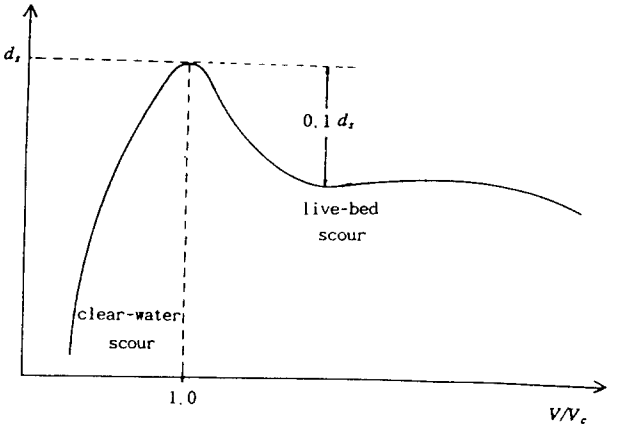
교각에 발생하는 국부세굴은 정지상세굴(clear-water scour)과 이동상세굴(live-bed scour)로 나눌 수 있다. 정지상세굴은 교각보다 상류에 있는 하상재료들이 정지해 있을 때 발생한다. 이 때는 세굴지역에서 멀리 떨어진 곳의 소류력이 하상입자의 이동이 일어나는 한계이동소류력 이하이다. 이동상세굴은 하천의 유사이송과 더불어 발생되며 이 때는 교각의 세굴공(scour hole)에 상류로 부터 유사가 유입된다[6]. 일반적으로 최대세굴심은 정지상세굴일 때 나타난다. 그림 1은 세굴현상을 도식적으로 설명한 것이다.

교각세굴에 관한 연구를 살펴보면 Shen 등(1969)은 교각세굴의 기본적 機構와 세굴심을 추정하는 설계기준을 제안하였으며 Breusers 등(1977)은 교각세굴에 대한 연구결과를 종합적으로 분석하였다. Raudkivi와 Ettema(1983)는 정지상세굴실험(clear-water scour)을 통하여 국부적 평형세굴심은 하상재료의 입도분포, 교각직경과 하상재료의 중앙입경의 비, D/d_{50}, 수심과 교각직경의 비, y_o/D,와 관계가 있음을 밝혔으며, Melville(1984)은 이동상세굴실험(live-bed scour)을 통하여 최대세굴심이 하상에서 사련(ripple)의 발생여부에 관계가 있다고 하였다. Raudkivi(1986)는 하상재료가 균일할 때 상대세굴심, $y_o/D<2.3$이라

* 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수



(a)



(b)

Fig.1 Scour Depth Development for Pier : (a) Function of Time, (b) Function of Velocity Ratio

하였으며, Melville과 Sutherland(1988)와 Yanmaz와 Altinbilek(1991)는 교각의 세굴에 대한 설계도표를 제시하였다.

한편 하상재료가 불균일한 경우에는 세굴심은 수로의 소류력의 크기에 따라 균일한 경우와 다르게 나타난다. Breusers(1977)에 의하면 3종류의 균일한 모래를 혼합한 모래를 대상으로 한 실험에서 세굴심은 균일한 경우보다 약 25%가 작게 나타났으며, 세굴심의 감소는 세굴공내의 보호층효과(armouring effect)때문이라고 하였다. Raudkivi와 Ettema(1977)는 세굴심은 하상입도분포의 표준편차의 함수라고 하였으며, Raudkivi와 Ettema (1983)와 Raudkivi(1986)는 하상재료가 균일한 경우와 불균일한 경우에 발생하는 평형세굴심의 관계를 입도분포의 기하표준편차, $\sigma_g=(d_{84.1}/d_{15.9})^{1/2}$, 의 함수라고 보고하였다. $d_{84.1}$과 $d_{15.9}$는 각각 하상재료의 84.1%와 15.9%가 이보다 작은 입자의 크기를 말한다. Shen과 Lu(1983)는 하상보호층의 발달과정과 입도구성에 대하여 연구하였고 Raudkivi와 Ettema (1985)는 하상에 보호층이 이미 형성되어 있는 경우의 세굴에 관한 연구를 수행하였으며 Borah(1989)는 보호층이 형성되는 조건하에서 세굴심을 계산하는 간단한 방법을 제안하였다.

세굴현상은 물의 흐름조건과 하상재료의 성질이 관련된 대단히 복잡한 현상이기 때문에 아직은 이에 관한 이론적인 연구나 해석적인 해를 구하는 연구는 찾아보기 어렵다. 현재까지의 연구는 대부분

이 차원해석을 통하여 관련 변수(parameter)를 찾아내고 실험결과를 가지고 이들의 관계를 구하는 것이다. 세굴에 관한 발생기구와 세굴의 진행과정이나 실험결과를 정리하기 위한 차원해석이론에 대해서는 문헌[2,5,8]에 상세히 기술되어 있으며, armouring현상에 대해서도 문헌[1,7,9,11]을 참조하고 여기서는 상세한 기술은 생략한다.

본 연구의 목적은 정지상세굴일 때 중앙입경이 거의 같은 동일한 자연상태의 모래를 체가름에 의하여 기하표준편차가 다른 두 종류의 실험모래로 나누어 세 종류의 교각에 대한 세굴실험을 실시하고 교각의 형상별로 세굴심에 영향을 주는 하상재료의 armouring효과를 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

세굴실험은 한양대 수리실험실에서 수행하였다(문헌 [13]참조). 수로의 폭은 0.55m, 전체길이는 11.46m, 실험용 모래를 깔아 놓은 수로의 길이는 9.85m이고 교각모형은 수로의 중앙에 설치하였다. 유량은 수로의 하류단에 연결된 유량측정 수조에 矩形웨어를 설치하여 측정하였다.

수로의 하류 끝 부분에는 모래받이(sand trap)를 설치하였고 수문을 두어 수위를 조절할 수 있게 하였다.

수로바닥은 수평이고 수위, 하상고 및 세굴심은 수면측정기(point gauge)로 측정하였다.

2.2 실험방법

세굴실험은 수로바닥에 약 15cm 두께로 모래를 깔았으며, 실험용 교각은 등류상태에 가까운 지점이라고 생각되는 수로의 중앙부근에 교체가 용이하도록 설치하였다. 하나의 교각에 대한 실험은 수심을 약 5cm, 10cm, 15cm의 3가지 경우로 나누어 각각의 수심에 대하여 느린 유속에서 부터 한계입자유속 근방까지 유량을 변화시켜 실험을 수행하였다. 수위와 유량조절은 하류단에 장치된 수문과 유량조절밸브를 이용하였다. 실험은 입자의 이동이 생기지 않도록 서서히 수로에 물을 채운후 실험을 수행하였다[실험에 대한 자세한 사항은 문헌 [13] 참조]. 평형세굴심은 세굴실험에서 세굴이 더 이상 진행되지 않는 상태로서 본 실험에서는 실험시작 후 4시간 정도 경과한 후에 세굴심을 측정하였다.

모래는 자연하천의 모래를 사용하였으며 armouring 효과를 알아 보기 위하여 체를 이용하여 모래를 중앙입경이 거의 같은 두 종류로 나누어 실험하였다. 즉 4번체를 통과한 모래 Ⅰ (d_{max}=2.0 mm; d_{50}=0.4mm; σ_g=2.01)과 12번체를 통과한 모래 Ⅱ (d_{max}=0.85mm; d_{50}=0.35mm; σ_g=1.51)의 두 종류이다. d_{max}는 최대모래입경, d_{50}은 중앙입경, σ_g는 모래입경의 기하표준편차이다.

교각모형은 표 1과 같이 원형, 반원사각형, 사각형의 3가지이며 교각의 설치방향은 물의 흐름방향과 일치시켰다.

유속은 한계이동유속(threshold velocity)의 0.4~1.1배의 범위에서 실험하였다.

3. 실험결과의 고찰

일반적으로 하상의 세굴은 河床粒度가 均一할 때보다 不均一할 때 적게 일어나며 그 이유는 입도가 불균일할 때는 입자들이 보호층(armouring layer)을 형성하여, 가는 입자의 세굴을 억제해 주는 armouring효과 때문이다[10]. 세굴에 대한 armouring효과는 河床材料의 기하표준편차의 영향이 크다고 알려져 있다[8].

Raudkivi와 Ettema(1983)는 混合砂일 때의 세굴심을 구하기 위하여 均一砂일 때의 세굴심에 계수를 곱하는 식으로 표시하였다.

즉,

$$d_s = K_\sigma d_{se} \tag{1}$$

여기서, d_s는 혼합사일 때 평형세굴심, d_{se}는 균일사일 때 평형세굴심이고 K_σ와 σ_g의 관계는 그림 2와 같다.

Raudkivi와 Ettema(1982) 와 Melville과 Sutherland(1988)에 의하면 σ_g<1.3~1.5이면 하상의 armouring작용이 일어나지 않으므로 均一砂

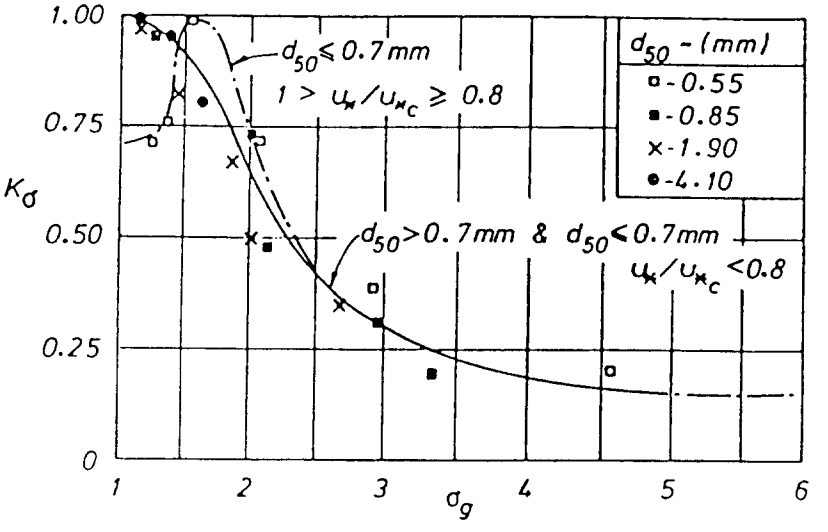


Fig. 2 Coefficient K_σ as a Function of the Geometric Standard Deviation of the Particle Size Distribution[8]

교 각 모 형		교 각 폭	L/D
원 형	D	D=2cm	
		4cm	
사각형	D, L	2cm	2
			3
		4cm	2
			3
반 원 사각형	D, L	2cm	3
			4
		4cm	3
			4

Table 1 Types of Pier for Experiments

로 보아도 좋을 것이다.

교각의 세굴이 일어나는 주요한 원인은 교각의 저면부근에 형성되는 말굽형와류(horse-show vortex)이며 세굴심은 수로의 접근유속과 교각의 폭과 밀접한 관계를 나타냈다[10]. 이러한 관계로부터 교각의 평형세굴심을 무차원화한 상대세굴심, d_s/D, 는 유속비, V/V_c, 와 교각 푸르드수, Frp, 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$d_s/D = f(V/V_c, Frp) \quad (2)$$

여기서, d_s = 교각의 평형세굴심
D = 교각의 직경 또는 폭
V = 수로의 평균유속
V_c = 한계이동유속
Frp = 교각 푸르드수($=V/\sqrt{gD}$)
g = 중력가속도

상대세굴심이 σ_g의 함수라는 것이 알려져 있으므

로 본 연구에서 행한 세굴실험결과를 기초로 세굴심이 σ_g와 교각형상에 따라 armouring효과가 어떻게 나타나는지 검토해 보았다.

실험결과 상대적인 교각폭(=L/D)의 영향은 거의 없었으므로 이에 대한 분석은 하지 않았다.

3.1 유속비의 영향

일반적으로 교각의 세굴은 유속비, $V/V_c>0.5$이면 시작된다고 본다[10].

본 연구의 실험결과를 상대세굴심과 유속비의 관계로 그린 그림 3과 4를 살펴보면 교각의 형상에 따라 세굴발생 시점의 차이를 보여준다.

세굴이 시작되는 시기는 대체로 원형일 때는 $V/V_c>0.4\sim0.45$이고 반원사각형일 때는 $V/V_c>0.5$, 사각형일 때는 $V/V_c>0.45\sim0.55$로 나타났으며 이것은 다른 연구결과[10]와 대체로 일치하였다. 하상입자가 불균일한 경우에 한계이동유속을 정확하게 정의하기는 어렵다. 작은 입자들은 d_{50}에 대한 한계이동유속, V_c, 이하에서도 이동을 시작하기 때문이다. Shields도표로 부터 구한 한계이동유속은 균일입자에 대한 것이지만 한계이동유속에 대한 지표로서 d_{50}에 대한 한계이동유속을 사용하였다[5]. 한계이동유속은 Shields도표에서 마찰속도 u_*를 구하고 식 $V_c/u_*=5.75\log(5.53\ y/d_{50})$으로부터 V_c를 구하였다[4]. y는 수심이다.

세굴이 시작되면 상대세굴심은 유속비의 증가에 따라 실험범위내에서 선형적으로 증가 하였다. 그림 3과 4에서 세굴심의 증가현상을 살펴보면 전반적으로 반원사각형교각의 세굴심이 가장 작게 나타났다. 이것은 다른 교각에 비하여 반원사각형교각의 중간 사각형 부분에서 세굴발생의 주원인인 말굽형와의 발달을 억제해 주기 때문이라고 생각된다. 원형교각의 세굴심은 반원사각형의 세굴심보다 크게 나타났다. 이것은 원형일 때는 후류와(wake vortex)에 의하여 교각후면의 세굴이 크게 일어나면서 교각전면의 세굴도 영향을 받기 때문으로 생각된다. 사각형교각의 세굴심은 그림 3과 4에서 알 수 있는 바와 같이 유속비가 커짐에 따라 다른 교각보다 세굴심의 증가율이 더 커서 유속이 한계이동유속에 가까워 지면 세굴심이 제일 크게 나타났다. 이것은 유속비가 느릴때는 사각형교각의 모서리 부근에서 발생하는 박리현상의 영향이 별로 크지 않지만 유속이 클 때는 박리현상의 영향이 다른 형태의 교각에 비하여 더 크게 나타나기 때문으로 생각된다.

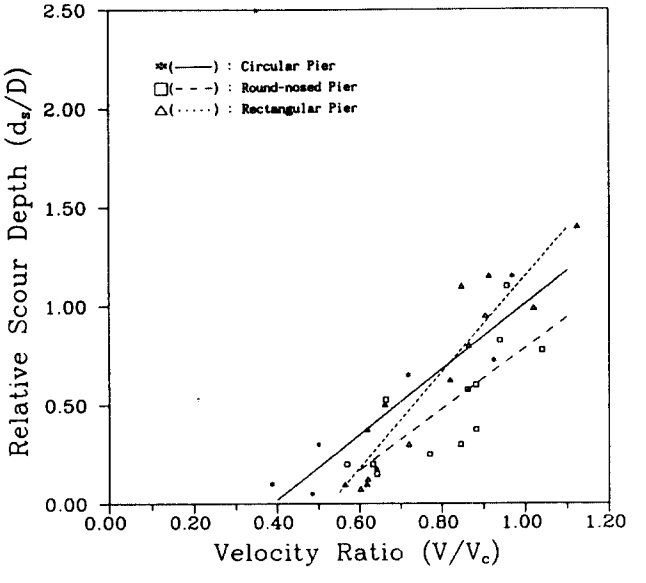


Fig. 3 Relation between Relative Scour Depth and Velocity Ratio ; Sand I

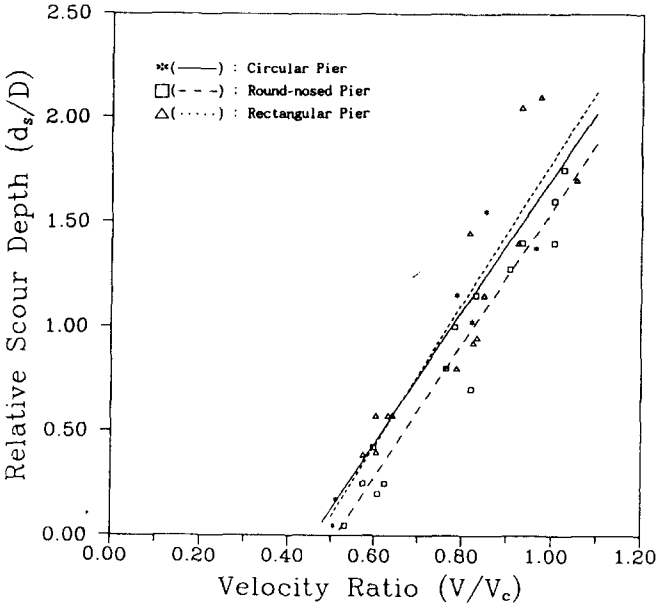


Fig. 4 Relation between Relative Scour Depth and Velocity Ratio ; Sand Ⅱ

그림 3과 4를 전체적으로 비교해 보면 모래 Ⅰ이 모래 Ⅱ보다 세굴심이 아주 작고 $d_s/D \sim V/V_c$의 관계에서 세굴심의 증가율이 모래 Ⅰ보다 모래 Ⅱ에서 큰 것을 알 수 있다. 이것은 0.05㎜에 불과한 중앙입경, d_{50}, 의 차이 때문이 아니라 기하표준편차인 σ_g가 모래 Ⅰ(σ_g=2.01)이 모래 Ⅱ(σ_g=1.51)보다 훨씬 크기 때문에 일어나는 armouring효과의 영향이라고 생각된다.

교각의 세굴심이 최대로 나타날 때는 유속이 한계이동유속에 가까워 질 때 이므로 $V/V_c \fallingdotseq 1.0$일 때의 세굴심을 비교하여 armouring효과를 검토하여 보았다.

표 2는 $V/V_c \fallingdotseq 1.0$일 때의 세굴감소비를 나타내는 K_σ를 비교한 표이다.

Table 2 K_σ Values for Pier Shapes

교각형상	K_σ
원 형	0.59
반원사각형	0.51
사 각 형	0.64
Raudkivi & Ettema[5] (원 형)	0.75

표 2에서 알 수 있는 바와 같이 교각세굴은 하상재료가 균일할 때 보다 불균일할 때 교각세굴이 적게 일어난다는 것을 알 수 있으며 실험결과로 미루어 볼 때 재료의 불균일에 의한 세굴감소효과는 반원사각형의 경우가 제일 크고 원형, 사각형 순으로 작게 나타났으며 평균적으로 약 40%의 감소효과가 있었다. 반면 원형교각의 경우를 Raudkivi & Ettema[5]의 25% 감소와 비교해 보면 본 연구에서 σ_g의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 σ_g의 영향이 더 크게 나타났으나 이것은 실험조건이 다르기도하고 아직은 K_σ와 σ_g의 관계가 완전히 정립된 단계가 아니므로 차후 계속적인 연구가 필요하다.

3.2 교각 푸르드수의 영향

실험결과를 상대세굴심과 교각 푸르드수의 관계가 그림 5와 6에 표시되어 있다.

세굴심은 교각 푸르드수가 증가할 수록 크게 나타났으며 교각형상에 관계없이 그 증가경향은 같게 나타났다. 세굴이 시작되는 시기는 $Frp \fallingdotseq 0.2$일 때 이며 Frp가 증가하면 세굴심도 증가하는 것으로

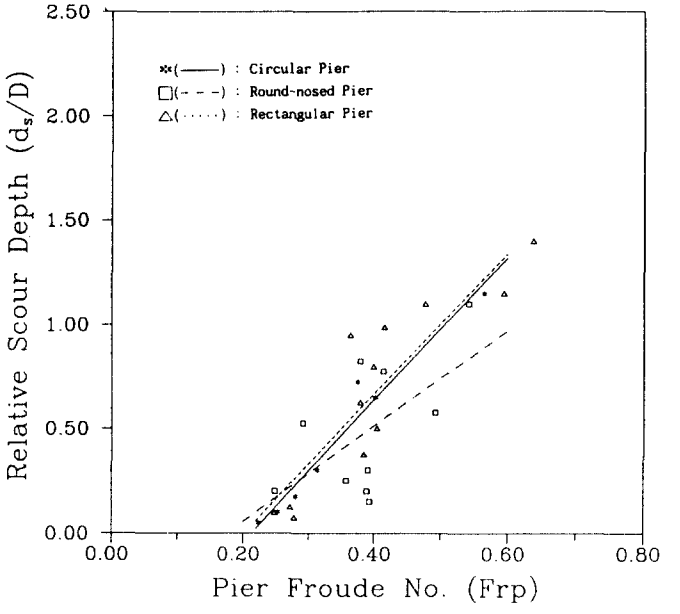


Fig. 5 Relation between Relative Scour Depth and Pier Froude Number ; Sand Ⅰ

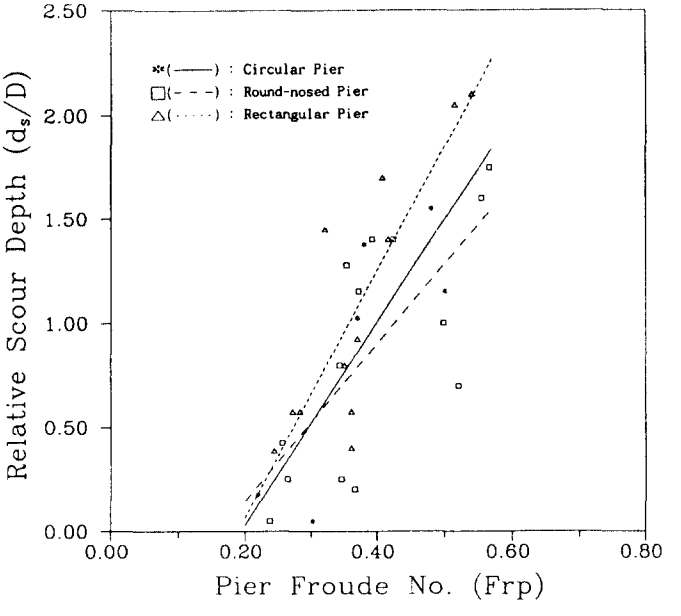


Fig. 6 Relation between Relative Scour Depth and Pier Froude Number ; Sand Ⅱ

나타났다. 세굴심은 사각형일 때 모래 Ⅰ과 Ⅱ에서 가장 크게 나타났으며 다음으로 원형과 반원사각형 순으로 작게 나타났다.

한편, 재료의 입도분포가 세굴심에 미치는 armouring효과를 알아 보기 위하여 세굴현상이 상당히 활발하다고 판단되는 Frp=0.4와 0.5일 때를 택하여 세굴심의 크기를 비교하여 보았다. 그림에서 실험치는 분산이 큰 경우도 있으나 대체로 Frp의 증가에 따라 상대세굴심이 커지는 경향을 알 수 있으므로 상대세굴심은 회귀직선식에서 구하였다.

표 3은 각 경우에 대한 세굴심을 정리한 것이다.

Table 3 Relative Local Scour Depths

Frp	교각형상	D_s/D		A/B
		모래 Ⅰ (A)	모래 Ⅱ (B)	
0.4	원 형	0.64	1.01	0.63
	반원사각형	0.51	0.91	0.56
	사 각 형	0.67	1.26	0.53
0.5	원 형	0.98	1.50	0.65
	반원사각형	0.74	1.29	0.57
	사 각 형	1.01	1.86	0.54

표 2에서 모래 Ⅰ과 모래 Ⅱ의 상대세굴심을 비교해 볼 때 모래 Ⅰ과 모래 Ⅱ의 세굴심의 비, (A/B),는 교각형상에 따라 차이가 있으나 교각 푸르드수에는 거의 관계가 없는 것으로 나타났다. 세굴심의 비는 원형교각이 제일 크고 사각형교각이 제일 작았다. 하상재료의 입도분포가 상대세굴심에 크게 영향을 미치는 것은 입도가 불균일 할 때 굵은 입자들의 sheltering현상 때문에 가는 입자들의 세굴이 억제되는 armouring효과가 나타나기 때문이라고 생각된다.

실험결과로는 모래 Ⅰ의 세굴심이 모래 Ⅱ보다 평균 약 40%의 감소효과가 있었다.

4. 결 론

본 연구는 하상입자의 불균일이 교각세굴심에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 중앙입경은 거의 같고 σ_g가 다른 두 종류의 모래를 대상으로 실험을 수행하였다.

실험결과 상대세굴심은 교각형상이 사각형일 때 제일 크고 원형, 반원사각형 순으로 작게 나타났으며 입도분포가 불균일 하기 때문에 발생하는 armouring효과로 인한 세굴감소는 입도분포가 균일한 경우보다 불균일한 경우에 뚜렷하게 나타났으며 사각형교각일 때 그 효과가 제일 크게 나타났다.

세굴이 시작되는 시기는 유속비, $V/V_c=0.4\sim0.5$이고, 교각 푸르드수, Frp≒0.2이다.

앞으로의 교각세굴심에 대한 설계에는 하상재료의 불균일성의 영향이 반영되어야 하며 추후 더 많은 실험적인 연구를 통하여 이에 대한 설계방법이 제시되어야 할 것이다.

감사의 말

본 연구는 1991년도 산업과학연구소의 연구비 지원을 받았으며, 1990년도 한국과학재단에서 지원한 일반기초 연구비로 이루어진 연구결과의 일부를 정리한 것이다. 연구지원 기관에 감사드린다.

과제번호 KOSEF901-1302-005-2

참 고 문 헌

[1] Borah, D. K., "Scour-Depth Prediction under Armoring Conditions", J. of Hydraulic Eng., Vol.115, No.10, Oct., 1989

[2] Breusers, H. N. C., et. al., "Local Scour around Cylindrical Piers", J. of Hydraulic Research, Vol.15, No.3, 1977

[3] Melville, B. W., "Live-Bed Scour at Bridge Piers", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.110, No.9, Sep., 1984

[4] Melville, B. W. and Sutherland, A. J., "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.114, No.10, Oct., 1988

[5] Raudkivi, A. J., "Functional Trends of Scour at Bridge Piers", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.112, No.1, Jan., 1986

[6] Raudkivi, A. J. and Ettema, R., "Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour", J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol.103, No.HY10,

Oct., 1977

[7] Raudkivi, A. J. and Ettema, R., "Stability of Armour Layers in Rivers", J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol.108, No.HY9, Sep., 1982

[8] Raudkivi, A. J. and Ettema, R., "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", J. of Hydraulics Eng., ASCE, Vol.109, No.3, Mar., 1983

[9] Raudkivi, A. J. and Ettema, R., "Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.111, No.4, Apr., 1985

[10] Shen, H. W., Schneider, V.R. and Karaki, S., "Local Scour around Bridge Piers", J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol.95,No.HY6, Nov., 1969

[11] Shen, H. W. and Lu, J. Y., "Development and Prediction of Bed Armoring", J. of Hydraulic Eng., Vol.109, No.4, Apr., 1983

[12] Yanmaz, A. M. and Altinbilek, H. D., "Study of Time-Dependent Local Scour around Bridge Piers", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.117, No.10, Oct., 1991

[13] 이정규, "하천교각의 세굴방지대책에 대한 실험적 연구", 한국과학재단 보고서, 1992

(접수 : 8월 20일)