

교각 주변에서의 국부적 세굴에 관한 실험적 연구

李正圭* 鄭棟元**

1. 서론

흐름으로 인해 이동이 가능한 유사물 지닌 일반 하천에 교각을 설치하게 되면 교각으로 인한 흐름체계의 변화에 의해 교각 주변에서 국부적인 세굴(local scour)이 발생하게 된다.

교각으로 인한 흐름체계의 변형은 교각 상류에서 3차원 경계층 분리현상 그리고 압력변화에 따른 하강류, 다양한 종류의 와류(vortex)등으로 나타나며 이런 여러가지 요소들이 교각주변에서 국부적인 세굴을 발생시킨다.

국부세굴의 형태는 세굴공(scour hole)으로 유입되는 유사량과 세굴공으로 부터 유출되는 유사량의 차이에 따라 3가지 형태로 나눌 수 있다.

1) 무세굴 (no-scour): 소류력이 너무 작아서 교각주위와 상류에서 유사 이동이 전혀 일어 나지않는 상태

2) 정지상 세굴 (clear-water scour): 교각상류에서 유사공급이 일어나지않고 교각 주변의 세굴공에서 유사의 방출만 일어나는 상태

3) 이동상 세굴 (live-bed scour): 하상 전구역이 움직이는 상태이기 때문에 세굴 공에서 유사의 방출 뿐 아니라 세굴공으로의 유사의 공급도 일어난다.

정지상 세굴이나, 이동상 세굴에서나 평형 상태는 발생하는데 정지상 세굴인 경우는 전단응력이 유사입자를 움직이는데 필요한 값 이하로 떨어질때 발생하며 이동상 세굴의 경우는 세굴공으로 유입되는 유사량과 유출되는 유사량이 같을때 평형상태를 이룬다 [6]. 이중에서 세굴이 가장크게 발생하는 것은 정지상 세굴인 것으로 알려져있고 유속이 증가하여 이동상 세굴로 접어 들면 교각상류에서 유사공급이 일어나기 때문에 세굴심은 오

* 한양대학교 토목공학과 교수 ** 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

히려 감소하는 경향이 있다. 일부 문헌([4],[7])에는 이동상 세굴에서 더 많은 세굴이 발생한다고 하지만 그 조건은 자연하천과는 어울리지 않는 면이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

한양대 수리실험실에 설치된 순환체계(circulation system)를 지닌 수로(폭 0.45m, 길이 10m)를 사용했다. 유량을 측정하기 위해 유량측정 수로를 설치했다.

실험에 사용한 교각의 종류는 <표 1>과 같이 원형, 직사각형, 및 반원사각형의 3종으로 구분되며 기하학적 길이의 비에 따라 모두 10개의 교각형상에 대하여 실험하였다. 교각의 설치방향은 흐름방향과 평행하게 하였다. 하상재료로 모래를 사용했으며, 모래는 4번체(눈금 4.75mm)를 통과한 모래와 12번체(눈금 1.41mm)를 통과한 모래 두가지를 사용했으며 개요는 <표 2>와 같다.

세굴에 대한 실험은 수로에 모래를 15 cm의 두께로 깔고 교각을 설치한 후 수심이 약 5 cm, 10 cm, 15 cm인 경우에 대하여 여러가지로 유속을 변화시키면서 실험을 실시하였다. 실험은 정지상 세굴의 평형상태에 도달할 때 까지를 대상으로 하였으며 약 4시간 동안 실험을 진행하면서 측정을 하였다. 실험유속은 shield도표를 이용하여 限界流速(threshold velocity) V_c 를 구했으며 대략 한계유속의 0.8 ~ 0.9배의 범위까지 실험하였다.

3. 세굴의 발생체계

초기세굴을 일으키는 것은 vortex system이 아니지만 지속적인 세굴을 일으키는 것은 vortex system이다. 이런 vortex를 야기시키는 mechanism은 압력변화이다. 압력변화가 크게되면 3차원 경계충분리 현상이 일어나며, 이 분리된 전단층은 교각상류에서 vortex system으로 발전하여 흐름에 의해 하류로 이동하게 된다. 이때의 vortex system은 말굽형 와류(horseshoe-vortex)이다. 초기 세굴의 원인은 압력변화에 의해 발생하는 하강류이며, 이 하강류는 어떤 고도에서도 속도 분포를 가지게된다. 말굽형 와류는 초기 세굴의 결과로 발생하며 지속적인 세굴을 일으킨다. 일단

세굴이 발생하면 초기에 급격히 이루어 지며 평형상태에 도달하기 까지는 상당한 시간이 걸린다. 평형상태는 교각의 특성, 흐름특성, 하상재료의 특성에 따라 다르게 나타난다.

4. 연구 및 분석

차원해석을 통해서 세굴에 영●을 미치는 인자를 무차원 변수로 정리하게 되면 다음과 같이된다.

$$\frac{Z_e}{D} = f \left\{ \phi, \alpha, \sigma_s, \frac{V}{V_c}, \frac{DV}{\nu}, \frac{V}{gD}, \frac{\tau_o}{\rho gh}, \frac{L}{D} \right\} \quad (1)$$

- 여기서 Z_e : 평형세굴심
 D : 교각의 폭
 ϕ : 교각형상의 함수
 α : 하상 모래의 기하학적 표준편차
 V : 접근유속
 V_c : 하상모래의 한계유속
 g : 중력가속도
 ρ : 물의 밀도
 h : 접근수로의 수심
 ν : 물의 동점성 계수
 τ_o : 수로바닥의 전단응력
 α : 교각설치 방향
 L : 교각의 길이

실험할때 흐름방향과 평행하게 교각을 설치했기 때문에 α 는 일정하며, α 의 영향을 무시할 수 있다. L/D 는 실험결과 세굴심에 별로 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. ϕ 는 교각형상에 관련된 변수로 형상에 따라 다른 값을 가진다. 식(1)의 내용을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{Z_e}{D} = f \left\{ \frac{V}{V_c}, \frac{DV}{\nu}, \frac{V}{gD}, \frac{\tau_o}{\rho gh}, \sigma_s, \phi \right\} \quad (2)$$

식(2)에서

- ① 항은 평형세굴심을 교각의 폭에 대한 상대세굴심을 나타낸다.
- ② 항은 접근유속의 한계유속에 대한 비를 나타낸다.

- ③ 항은 교각 Reynolds수 이다.
- ④ 항은 교각 Froude수 이다.
- ⑤ 항은 바닥의 전단력의 정수압에 대한 비를 나타내며 “掃流力比”라고 부르고자 한다.
- ⑥ 항은 하상모래의 입도분포의 균일성을 나타낸다.

a) 접근유속의 영향

일반적으로 V/V_c 가 0.5이상이면 국부세굴이 일어난다고 한다 [1]. 그러나 0.3이상이라는 보고도 있다 [10]. 본 실험의 경우에서도 V/V_c 가 0.4정도 이상이 되면 일어나는 것으로 확인되었으며 $Z_s/D \sim V/V_c$ 의 관계는 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 상관성이 매우높다. 본 연구의 실험 범위는 V/V_c 가 약 0.8~0.9에 이르기까지 실행했으며, 몇몇의 경우에 대해서만 약 1까지 실행했다. 이는 정지상 세굴까지로 실험 범위를 제한했기 때문이다. 그림에서 보면 σ_s 가 큰 모래에서 armoring(보호작용) 효과를 볼 수 있다. 교각형상을 나타내는 ϕ 와의 관계를 보면 사각형 단면의 교각이 앞모양이 원형인 교각보다 세굴이 많이 일어났음을 알 수 있다.

b) 교각 Reynolds數의 영향

교각 Reynolds數의 영향은 본 실험의 경우에는 그 영향이 뚜렷하게 나타나지 않는 것 같다. 일부 문헌([3],[4],[5],[7],[8],[9])에서는 하천흐름이 Reynolds수가 매우 큰 난류이기 때문에 점성의 영향을 무시해서 이 인자 자체를 고려하지 않고 있다. 그러나 교각 Re 가 $d_{50} > 0.5\text{mm}$ 일 때에 국부세굴에 영향을 준다는 실험보고가 있다 [2]. 그림 2참조

c) 교각 Froude數의 영향

세굴심은 일반적으로 교각 Froude數에 비례해서 선형적인 경향을 나타내는 것으로 알려져 있으며 ([3],[5]), 그림 3과 같이 본 실험에서도 그와 비슷한 분포를 보여준다. 이는 유속성분의 영향이 매우 큰 것으로 보여진다. 또한 a)와같이 σ_s 가 큰 모래에서 세굴이 적게 일어남을 알 수 있다.

d) 掃流力 비의 영향

차원해석 결과 얻어진 인자로 소류력에 대한 정수압의 비를 나타낸다. 이 인자는 energy line의 경사 I 와 같은 의미를 가진다. 이 인자에 대해

기술한 문헌을 구하지 못해 임의로 소류력 비라는 이름을 지었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 소류력비 ($\tau_r = \tau_o / \rho gh$)가 0.0001보다 작은 경우에 대해서는 매우 선형성이 큼을 알 수 있다. $\tau_r > 0.0001$ 일때 기울기가 많이 둔화 되거나 X축에 평행한 경향을 나타낸다. 그림에서 교각이 원형인 경우 $d_{50} = 0.4\text{mm}$ 일때 위 설명과 같은 경향이 나타나지 않는데, 이는 아마도 실험치가 부족하기 때문인 것 같다. 이 인자에 대한 세굴심과의 관계는 계속 연구할 계획이다. 그리고 궁극적으로 세굴에 관한 회귀공식을 만들때도 이 인자를 주목할 예정이다. 그림 4참조

e) σ_g 의 영향

σ_g 는 입도분포의 특성을 나타내고 있다. σ_g 가 1에 가까울수록 균등분포를 나타낸다. 일반적으로 σ_g 가 큰 경우는 폭넓게 입도가 분포하기 때문에 armoring(보호작용) 효과를 두드러지게 볼 수 있다. 그림 1~4에서 알 수 있는 바와 같이 σ_g 가 큰 $d_{50} = 0.4\text{mm}$ 의 모래가 σ_g 가 작은 $d_{50} = 0.35\text{mm}$ 의 모래보다 평형세굴심이 작게 나타났다. 우리의 궁극적인 목표가 세굴심을 최소화 하는 것 이므로 이 인자의 영향을 집중적으로 연구해야 할 것 같다.

f) ϕ 의 영향

그림 1~4에서 알 수 있는 바와 같이, 사각형 단면을 지닌 교각(rectangular pier)이 앞모양이 원형인 교각(round-nosed pier)보다 많은 세굴을 발생시킨다. 이는 3차원 흐름분리를 전자가 후자보다 크게 일으키기 때문에 말굽형와류(horseshoe vortex)의 영향을 크게 받기 때문일 것이다. 그러나 ϕ 를 정량적으로 표현함에 어려움이 있다.



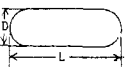
5. 결론

이번 실험을 통해서 소류력비라는 인자를 찾아냈으며 이 인자가 세굴심과 상당한 관계가 있음을 알 수 있었다. 앞에서도 언급했지만 이 관계에 좀더 깊은 연구를 할 계획이다. 그리고 세굴이 적게 발생하도록 하는 것이 중요하며 이를 위한 연구가 많이 진행되어야 할 것이다. 이번 실험을 통해서 armoring효과를 볼 수 있었다. 많은 문헌이 이의 영향을 언급하고 있다. 그리고 교각의 형상도 상당히 세굴에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

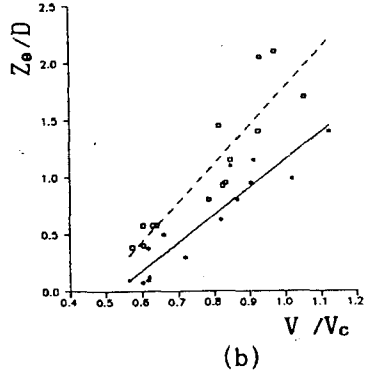
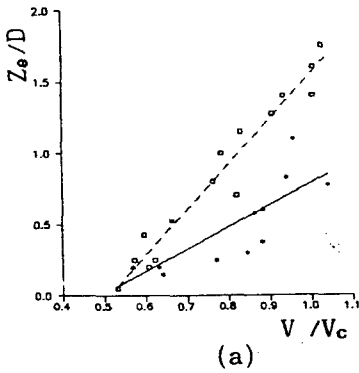
- (1) Breusers, H.N.C., et.al., Local Scour Around Cylindrical Piers, J. of Hydraulics Research, 15 No.3, 1977, pp211-252
- (2) Shen, H.W., et.al., Local Scour Around Bridge Piers, J. of Hydraulics Division, Vol. 95, No. HY6, Nov., 1969, pp1919-1940.
- (3) Jain, S.C., Maximum Clear-water Scour Around Circular Piers, J. of Hydraulics Division, Vol. 107, No. HY5, May, 1981, pp611-626
- (4) Melville, B.W., & Sutherland, A.J., Design Method for Local Scour at Bridge Piers, J. of Hydraulics Engineering, Vol. 114, No. 10, Oct., 1988, pp1210-1226
- (5) Jain, S.C., & Fischer, E.E., Scour Around Bridge Piers at High Flow Velocities, J. of Hydraulics Division, Vol. 106, No. HY11, Nov., 1981, pp1837-1841
- (6) Baker, C.J., Theoretical Approach to Prediction of Local Scour Around Bridge Piers, J. of Hydraulic Research, Vol. 18, No.1, 1980, pp1-12
- (7) Chiew, Y.M., & Melville, B.W., Local Scour Around Bridge Piers, J. of Hydraulic Research, Vol. 25, No.1, 1987, pp15-26
- (8) Raudkivi, A.J., & Ettema, R., Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour, J. of Hydraulics Division, Vol. 103, No HY10, Oct., 1977, pp1209-1213
- (9) Raudkivi, A.J., & Ettema, R., Clear-water Scour at Cylindrical Piers, J. of Hydraulics Engineering, Vol. 109, No. 3, March, 1983, pp338-350
- (10) 金孝燮., 橋脚周圍에서의 洗掘현상에 관한 研究, 서울대 공학석사 학위 논문, 1985
- (11) 金鎮洪., 원형교각 주위에서의 최대세굴심도에 관한 연구, 서울대 공학석사 학위 논문, 1985
- (12) 鄭信澤., 圓形橋脚에서의 국소洗掘에 관한 實驗的 研究, 서울대 공학석사 학위 논문, 1986

<표 1> 실험교각의 종류

교각 모형		교각 폭	L / D
원형		D = 2 cm	
		4 cm	
직사각형		2 cm	2
			3
		4 cm	2
			3
반원 사각형		2 cm	3
			4
		4 cm	3
			4

<표 2> 실험에 사용한 모래

	$d_{50}(\text{mm})$	σ_w	비중
4번 계층 통과한 모래	0.4	2.01	2.64
12번 계층 통과한 모래	0.35	1.51	2.64



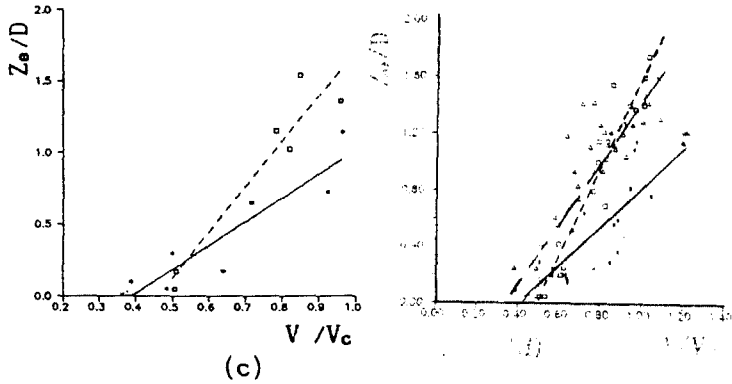


그림 1. V/V_c 의 영향: (a) 반원사각형 교각, (b) 직사각형 교각, (c) 원형 교각, (d) 서울대 자료와의 비교

*** $d_{50} = 0.4mm$, □□□ $d_{50} = 0.35mm$, △△△ 서울대 자료

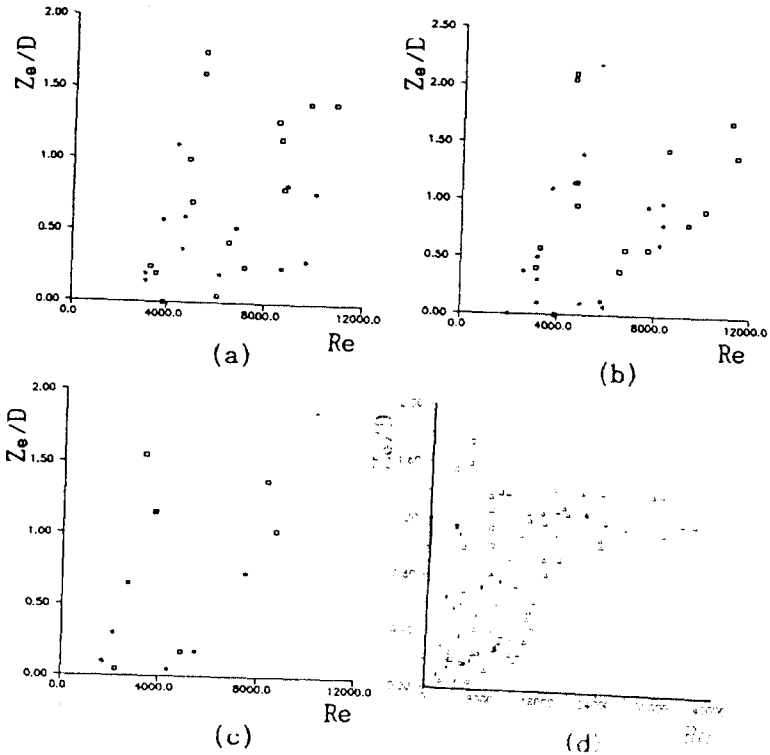


그림 2. 교각 Re 의 영향: (a) 반원사각형 교각, (b) 직사각형 교각, (c) 원형 교각, (d) 서울대 자료와의 비교

*** $d_{50} = 0.4mm$, □□□ $d_{50} = 0.35mm$, △△△ 서울대 자료

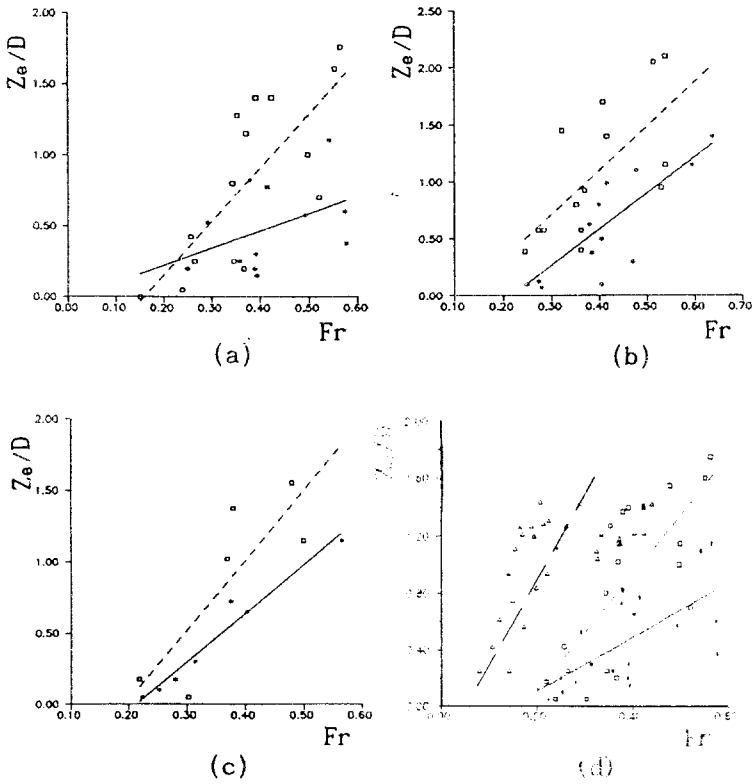
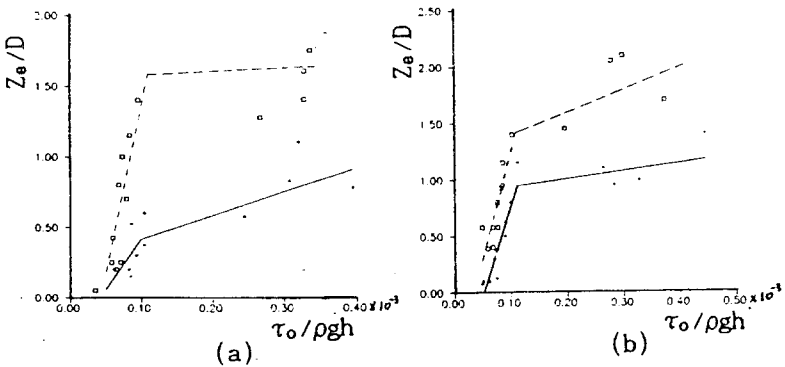


그림 3. 교각 Fr의 영향: (a) 반원사각형 교각, (b) 직사각형 교각, (c) 원형 교각, (d) 서울대 자료와의 비교
 *** $d_{50} = 0.4mm$, □□□ $d_{50} = 0.35mm$, △△△ 서울대 자료



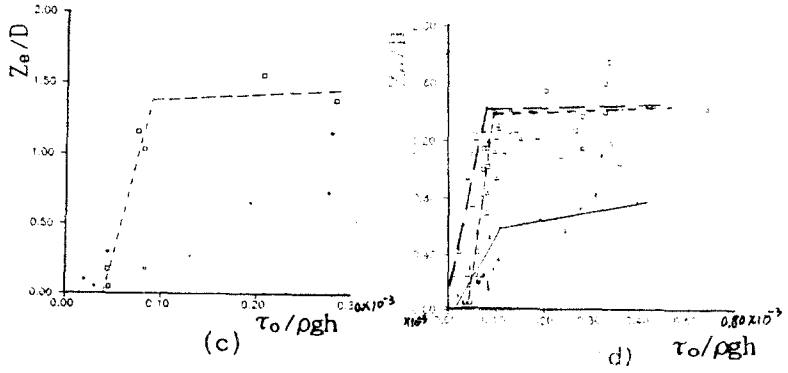


그림 4. 소류력 비의 영향: (a) 반원사각형 교각, (b) 직사각형 교각, (c) 원형 교각, (d) 서울대 자료와의 비교
 *** $d_{50} = 0.4\text{mm}$, □□ $d_{50} = 0.35\text{mm}$, ΔΔ 서울대 자료