

하상재료에 따른 교각국부 세굴심의 시간적 변화에 관한 실험연구

Temporal Effect of Pier Local Scour on Bed Material

강준구*, 여홍구**, 노영신***, 최종석****

Kang, Joon Gu / Yeo, Hong Koo / Roh, Young Sln / Choi, Jong Suk

Abstract

국부세굴의 발생은 일반적으로 흐름조건, 구조물 조건과 하상재료 세 가지의 주 원인으로 구분할 수 있다. 흐름조건인 경우 구조물 영향으로 발생하는 3차원적인 와류가 주요원인이며 하상재료의 경우 여러 요인이 있겠지만 비중이 같은 입자라 가정할 경우 입자의 크기를 주요 변수로 정할 수 있다. 교각 국부세굴에 관한 연구는 1960년대 이후 연구자들에 의해 매우 다양하게 수행되어 왔으며 많은 산정공식도 제시되었다. 하지만 기존 연구는 최대세굴심 조건으로 다양한 하상재료와 시간에 대한 세굴변동(홍수사상 등)에 대한 영향을 고려하는데 어려움이 있다. 특히 국내의 경우 다양한 하상재료와 홍수빈도를 고려할 때 이에 대한 세굴적용은 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 따라서 교각세굴에 대한 궁극적인 목적은 다양한 하상재료와 홍수빈도를 고려할 수 있는 세굴평가를 제안하는데 있다.

이를 위해 본 연구에서는 우선적인 연구로 입자의 다양성과 이미지 기법을 이용한 실시간 측정을 통해 보완하여 입자에 따른 시간적 변화를 분석하였다. 현재 4가지의 하상재료의 입경차이에 따른 국부세굴의 시간적 변화와 초기세굴 발생의 수리적 조건을 파악하고 기존연구와 비교분석하였으며, 이를 기초자료로 세굴심(S , S_{max}), 교량주변 전단력(τ_p, τ_{pc}), 접근수로부 전단력(τ_a)와 입자한계전단력(τ_c)에 대한 시간분석(time effect)을 통해 다양한 하상재료와 홍수빈도를 해석을 위한 초기분석을 수행하는데 목적이 있다. 수리모형실험에 사용된 가변경사수로의 제원은 0.6m(W) × 20m(L) × 2m(H)이며 모형구조물은 투명한 아크릴로 제작하였다. 실험방법은 교각 내부에 CC카메라를 전·후면 및 상측면에 설치하여 세굴 발생을 실시간으로 촬영한 후 이미지 분석을 통해 분석하였다.

핵심용어 : 국부세굴, 하상재료, 유속비, 전단응력비, time effect

1. 서론

세굴 구분[정적 세굴(Clear Water Scour) 또는 동적 세굴(Live bed Scour)]을 결정하기 위해 사용되는 변수는 상류 유속과 하상에서 유사 이동을 원인인 유사 한계 유속과의 비이다. 흐름강도라고 불리는 이 비율은 유속에 대한 영향에 대해 고려된 것으로 두 가지 형태로 제시될 수 있다. 첫째 전단 또는 하상 마찰속도(u_*)를 사용하여 u_*/u_{*c} 로 나타낼 수 있으며 전단속도(u_*)는 $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ 로 정의되고 여기서 τ 는 하상 전단응력이다. 초기 또는 한계전단속도인 u_{*c} 는 한계전단응력 (τ_c)로 표현할 수 있는데 이 식에서 흐름강도는 $\tau/\tau_c = (u_*/u_{*c})^2$ 의 전단응력으로 나타낼 수

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원부 선임연구원 · E-mail : jgkang02@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원부 선임연구원 · E-mail : yeo917@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원부 박사후과정 · E-mail : rohys@kict.re.kr

**** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원부 · E-mail : choijs8411@hanmail.net

있다. 이 식은 대부분 이송식이 하상 전단응력 항이기 때문에 유사 이송과 직접적인 상관성을 가지고 있다. 한계전단속도는 주어진 유사에 대해 결정할 수 있지만 u_* 의 값은 원형 흐름 상황에서 쉽게 유도할 수 없고 유속 장의 가정을 이용해서 유도되어야만 한다. 두 번째로 흐름강도는 수심 평균한 접근 유속(V)과 한계수심 평균한 접근 유속(V_c)를 사용한다. 한계수심 평균한 접근 유속은 유사 이동이 발생할(주어진 유사에 대한) 접근 흐름의 최소 수심 평균한 유속이다. 이 흐름강도식(V/V_c)은 주어진 유사에 대한 그림 1로부터 한계수심 평균한 유속(V_c)을 계산한다고 알려지고 가정된 연직 유속 장을 필요로 한다. 일반적으로 정의에 의해 정적 세굴은 $0.5 \leq V/V_c < 1$ 에서 발생하고, 동적 세굴은 $V/V_c \geq 1$ 에서 발생한다. 대부분의 연구자들은 $V/V_c = 0.4$ 와 0.5 사이에서 정적 세굴에 대한 최소 한계가 위치한다고 한다. Sheppard(2002)의 경우는 0.47 을 사용하였다. Laursen(1963)은 지형, 흐름, 유사의 함수로서 긴 수축에서의 정적 세굴의 관계를 조사하였다. 그는 그의 모형에서 시간의 함수가 한계소류력(τ_c)과 같다고 함으로서 정적 세굴이 경계 전단응력(소류력)을 발생했을 때 제한한다는 가정을 기초로 하였다. 그는 과일 또는 교대에 대한 평형 세굴심(d_{se})에 대해 식을 개발하였다.

$$\frac{d_{se}}{y_0} = 0.8 \frac{D/2}{y_0} \left(\frac{\tau_0}{\tau_c} \right)^{2/3}$$

여기서 y_0 는 접근 흐름의 수심이고 D 는 과일의 직경(또는 교대의 길이)이며, τ_0 는 과일로부터 경계 전단응력이다. 여기에서 그는 시간의 함수로서 소류력항에서 시간의 함수(d_s)에 따른 세굴심에 대한 식을 유도하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \left(\frac{d_{se}}{d_s} \right)^{3/2}$$

세굴공을 원뿔의 밑면 반경은 $2.75d_s$, 높이는 d_s 이라고 가정하면 세굴공의 부피(\bar{V})는 약 $\bar{V} = 8d_s^3$ 이며 세굴공 밖의 재료의 이송률은 다음과 같다.

$$q_s = \frac{d\bar{V}}{dt} = 24d_s^2 \frac{dd_s}{dt}$$

여기에서 q_s 는 유사 이송의 부피비이다. 그는 소류사 이송관계를 간단히 나타내었다.

$$c = 8 \left(\frac{d_m}{y_0} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)$$

여기서 무게와 d_m 에 의한 백분율에서의 유사량에서 c 는 평균 유사 직경이다. 그는 q_s 를 얻기 위해 단위 폭당 유량을 $q = V_0 y_0$ 로 가정하였다. 여기에서 V_0 는 수심 평균한 접근 흐름 유속이다. 결국 그는 시간을 가지는 세굴 진행에 대한 다른 식을 유도하였다. 원형 과일에 대해 식을 변형하면,

$$\frac{y^{3.5}}{1-y^{1.5}} dy = 1.92 \sqrt{\frac{g}{D}} \left(\frac{d_m}{D} \right)^2 \left(\frac{\tau_0}{\tau_c} \right)^{-1.5} dt$$

여기서 $y = d_s/d_{se}$ 이다.

2. 모형실험

유속장의 측정을 위한 계측기로는 2차원 전자기 유속계를 사용하였으며 하상측정은 이동상 표고 측정기인 사면측정기(WH-501; WHT-40, Kenek Co.)를 사용하였다. 실험시설은 그림 11과 같이 폭 0.6 m, 길이 16.0 m, 그리고 높이 0.7 m 를 가지는 가변경사수로에서 실험을 수행하였다. 모형교각은 그림 12와 같이 직경이 0.1 m인 투명 아크릴 봉을 사용하여 CCD를 이용한 실시간 세굴 촬영이 가능하도록 하였다.



그림 1 실험수로전경



그림 2 모형교각내부 CC카메라

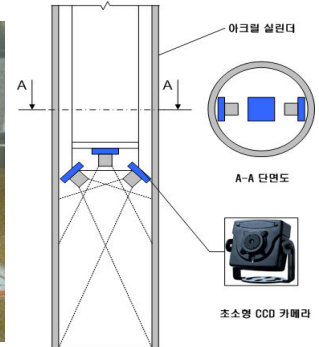


그림 3 카메라 설치

Table 1. Experimental conditions

교각형태	모형사 직경	유속	수위	Case
원통형	d = 0.060 mm	U = 0.126 m/s	H = 0.15 m	ps060-126
		U = 0.146 m/s	H = 0.15 m	ps060-146
		U = 0.170 m/s	H = 0.15 m	ps060-170
		U = 0.192 m/s	H = 0.15 m	ps060-192
		U = 0.210 m/s	H = 0.15 m	ps060-210
		U = 0.300 m/s	H = 0.15 m	ps060-300
	d = 0.427 mm	U = 0.190 m/s	H = 0.15 m	ps427-190
		U = 0.228 m/s	H = 0.15 m	ps427-228
		U = 0.283 m/s	H = 0.15 m	ps427-283
		U = 0.300 m/s	H = 0.15 m	ps427-300

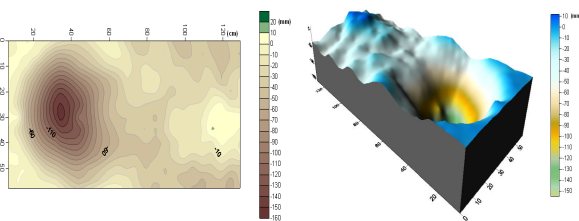


그림 4 하상변동(최대세굴심 발생시)



그림 5 국부세굴 실험

3. 결과분석

세굴의 진행에 있어 세굴공에서의 하상과 흐름의 경계에 작용하는 전단응력에 의해 영향을 받는 것으로 가정되어진다. 세굴공(교가주변 하상)에서의 전단응력은 세굴발생초기에 최대값을 기록

하며 평형세굴심 또는 최대세굴심인 Z_{max} 에 도달할 때까지 세굴심의 증가에 따라 점차적으로 감소한다. 세굴이 진행 중인 시점 t 에서 세굴심이 z 일 때, 전단응력은 교각주변을 따라 분포되며 세굴심이 z 로 가정된 지점에서의 전단응력의 최대값은 순간 최대전단응력 $\tau(z)$ 로 정의되어진다. 세굴이 발생하기전에 $\tau_p(z)$ 의 값이 가장크기 때문에 초기최대전단응력($t=0$)을 τ_{pmax} 라고 한다. 하상 침식에 있어 한계값(입자거동 시작할 때)을 한계전단응력 τ_c 라하고 세굴은 전단응력이 한계전단응력보다 클 때 발생한다. 같은 하상재료에 있어 세굴공의 τ_{pc} 는 최대세굴심이 발생되었을 때로 수리특성에 따른 최대세굴심의 차이에는 변화하지 않을 것이다. 하상재료에 따른 교각주변의 한계 전단력의 값은 Johnson(1992)와 강준구 등(2002)의 실험치를 이용하여 산정하였다. 원형교각의 경우 교각주변의 한계전단력의 값은 접근전단력과 하상한계전단력의 비를 $\tau_c/\tau_a = 6.7 - 6.75$ 로 나타내었다. 이와 같은 분석을 기초로 세굴의 진행과정의 초기조건과 경계조건은 세굴발생시점에서 ($t=0, s=0, \tau=\tau_{pmax}$), 세굴종료시점($t=t_{final}, z=S_{max}, \tau=\tau_{pc}$)로 정할 수 있다. 본 연구에서는 시간에 따른 세굴변화와 최대세굴심의 관계를 세굴공 전단응력 $\tau_{pmax}(\tau_{pmax} = K_i \tau_a)$, $\tau_{pc} (\tau_{pc} = 1/6.7\tau_a)$ 를 τ_a 와의 관계로 표현하여 분석하였다. 그림 6과 7은 시간에 따른 세굴심의 변화를 무차원화하여 나타낸 것이다.

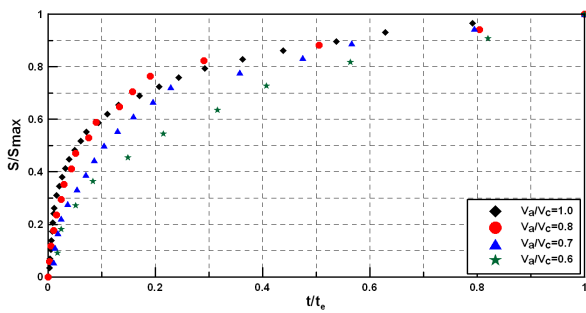


그림 6 S/Smax 와 t/te 관계비교_입경0.06)

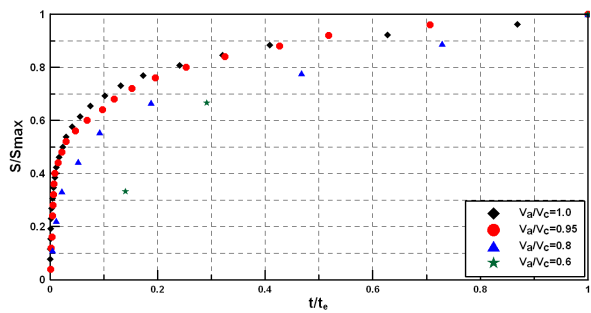


그림 7 S/Smax 와 t/te 관계비교_입경(0.425)

그림 8과 9는 세굴심비와 전단응력비를 비교한 것으로 전단응력의 감소모델과 세굴심의 시간 영향을 통한 각 입자와 수리특성에 대한 경향을 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 세굴감소와 전단응력 감소비의 차이는 여러 홍수사상에 대한 해석의 기초자료로 적용될 수 있을 것으로

판단된다. 본 연구에서는 입자의 고려가 충분하지 않아 전단응력비는 $\frac{\tau_p - \tau_{pc}}{\tau_{pmax} - \tau_{pc}} = e^{-4\left[\frac{s}{s_{max}}\right]^2}$

(Briaud, 2002)을 이용하여 산정하였다.

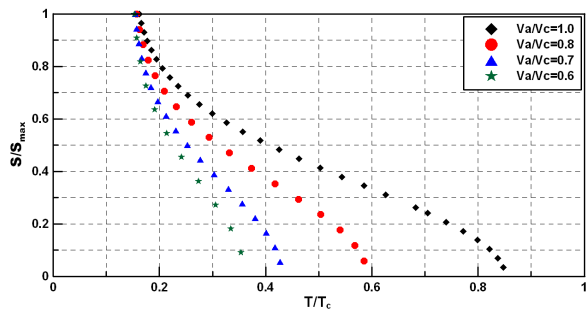


그림 8 S/Smax 와 τ_p/τ_c 관계비교_입경(0.06)

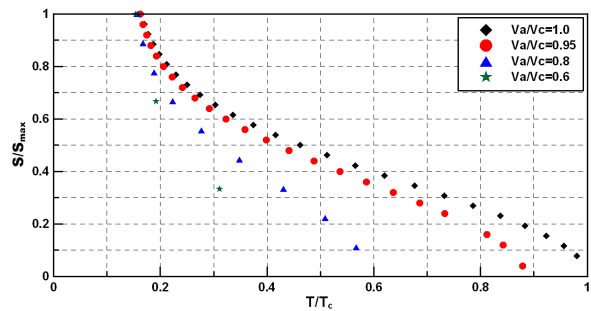


그림 9 S/Smax 와 τ_p/τ_c 관계비교_입경(0.425)

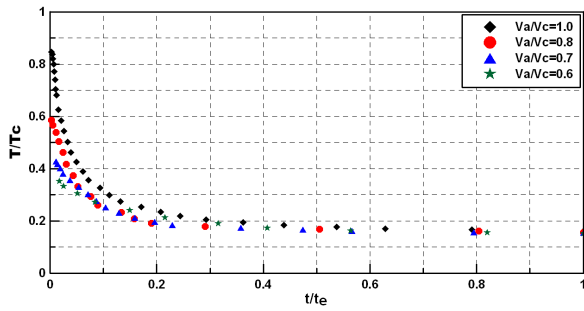


그림 10 τ_p/τ_c 와 t/te 관계비교_입경(0.06)

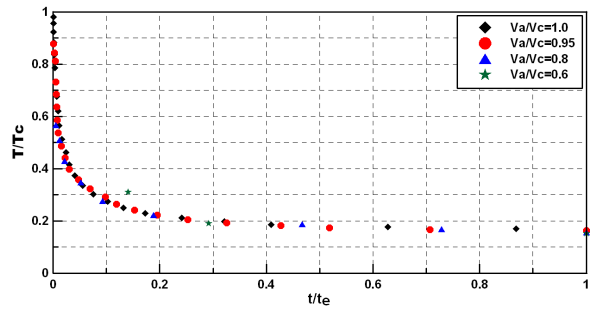


그림 11 τ_p/τ_c 와 t/te 관계비교_입경(0.425)

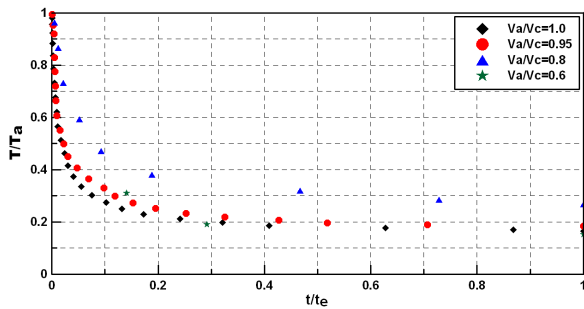


그림 12 τ_p/τ_a 와 t/te 관계비교_입경(0.425)

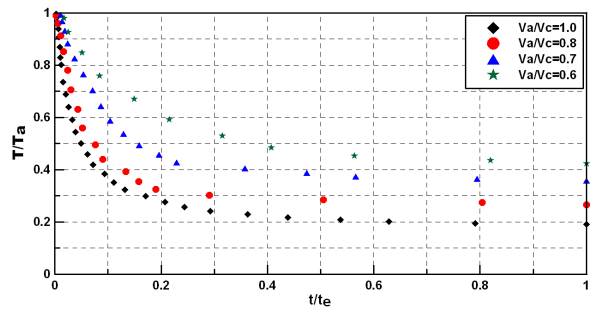


그림 13 τ_p/τ_a 와 t/te 관계비교_입경(0.06)

4. 결론

본 연구에서는 우선적인 연구로 입자의 다양성과 이미지 기법을 이용한 실시간 측정을 통해 보완하여 입자에 따른 시간적 변화를 분석하였다. 현재 4가지의 하상재료의 입경차이에 따른 국부세굴의 시간적 변화와 초기세굴 발생의 수리적 조건을 파악하고 기존연구와 비교분석하였으며, 이를 기초자료로 세굴심(S , S_{max}), 교량주변 전단력(τ_p, τ_{pc}), 접근수로부 전단력(τ_a)와 입자한계전단력(τ_c)에 대한 시간분석(time effect)을 통해 다양한 하상재료와 홍수빈도를 해석을 위한 초기분석을 수행하였다. 실험분석은 각 입자에 따른 전단응력의 감소모델과 세굴심의 시간영향에 대해 수행하였으며 현재 연구가 진행 중으로 뚜렷한 결론을 도출할 수는 없으나 가 조건에 대한 일정한 경향을 나타낼 수 있었다. 현재 진행 중인 실험연구가 보완된다면 세굴감소와 전단응력 감소비해석을 통한 입자와 홍수사상에 대한 해석을 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Sheppard, D.M., (2002), "Large Scale and Live bed Local Pier Scour Experiments." Report to the Federal Highway Administration, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Lausen, E.m., (1963). "An Analysis of Relief Bridge Scour." Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 84, No. HY3, pp. 93-118.
- Johnson, Peggy A. and J. Sterling Jones, (1992) "Shear Stress at Base of Bridge Pier," Transportation Research Record No. 1350, Transportation Research Board, pp 14-18,
- Ya Li, Jean-Louis Briaud, Hamn-Ching Chen, Prahoro Nurtjahyo, and Jun Wang(2002). "Shear stress approach to pier scour predictions", 1st International Conference on Scour of Foundation, ICSF-1, Texas A&M Univ. College Station, Texas, USA Nov. 17-20.