

橋脚 局部洗掘의 時間的 變化에 관한 實驗研究

Experimental Study on Temporal Effects of Local Scour at Bridge Pier

한상연*, 김창성**, 강준구***, 여운광****

Sang Yeon Han*, Chang Sung Kim**, Joon Gu Kang***, Woon Kwang Yeo***

요 지

국부세굴은 수공구조물 주변에서의 국부적인 흐름변화가 그 원인이라 할 수 있으며 이러한 변화는 교각 또는 교대의 하상재료를 굴착하여 이동시키는 침식작용의 결과이다. 이러한 교량의 교각 또는 교대, 그리고 교각을 지지하는 구조물에서 발생하는 국부세굴은 교량의 수명과 안정성에 좋지 않은 영향을 미쳐 재산상의 피해를 줄뿐만 아니라 교량 붕괴 사태 등으로 인한 대형 인명사고를 초래하는 원인이 될 수도 있다. 따라서 국부세굴의 경향을 예측하고 분석하는 것은 교량 구조물이나 수중 구조물의 설계에 있어서 매우 중요한 과업이다. 이러한 국부세굴을 예측하고 분석하는데 있어서 국내에서는 일정한 흐름조건에 대한 최종세굴심을 예측하는데 초점이 맞추어져 있다. 하지만 국부세굴은 하상재료에 따라 세굴이 진행되는 속도가 다르며 세굴의 진행은 시간 의존적인데 반해 국내에서의 국부세굴의 예측과 분석은 최종세굴심 산정에 초점이 맞추어져 있다. 이에 본 연구에서는 보다 실질적이고 경제적인 국부세굴 경향을 예측할 수 있도록 다양한 하상재료에 대한 시간에 따른 세굴 변화의 특성을 파악하고 분석하였다. 이를 위해 하상재료에 따라 수리실험을 실시하였고, 이를 통해 하상재료에 따른 세굴심의 시간적 변화 곡선을 구하였다. 이렇게 구한 하상재료에 따른 세굴심의 시간적 변화 곡선을 통해 하상재료별 평형세굴심 산정하였고, 산정한 평형세굴심과 기존 세굴심 산정공식을 이용하여 입자별 세굴심을 산정하여 비교 분석하였다.

핵심용어: 국부세굴, 시간에 따른 세굴심 변화 곡선, 평형세굴심

1. 서 론

태풍이나 홍수 및 국지성 집중호우로 인해 발생할 우려가 큰 세굴에 대한 문제는 하천 내 구조물의 설계과정뿐만 아니라 구조물의 유지관리측면에서도 중요하게 인식되어야 할 사항이다. 이에 따라 국부세굴의 경향을 예측하고 분석하는 것은 교량 구조물이나 수중 구조물의 설계에 있어서 매우 중요한 과업이며, 교량의 안정성을 확보하기 위한 세굴방호대책을 수립하는데 있어서도 우선적으로 수행되어야 할 사안이라 하겠다. 이렇듯 교량 구조물이나 수중 구조물의 설계시 중요한 사안인 국부세굴에 대하여 국내에서는 수치모형, 수리모형실험, 그리고 CSU 공식과 같은 기존 연구에서 제안하는 세굴심 예측 공식을 통해 일정한 흐름사상에 대한 최종세굴심을 예측하는 방식으로 이루어져 왔다. 그러나 세굴은 하상재료에 따라 세굴이 진행되는 속도가 매우 다른데도 불구하고 기존 연구들이나 국내에서의 세굴 예측 방식은 시간에 따른 세굴심 변화를 고려하지 않고 주로 최대세굴심 산정에 초점을 맞춰서 진행되고 있다. 이로 인해 세굴심 예측 공식을 통해 예측되거나 모형실험을 통해 도출된 세굴심은 현장에서 발생할 수 있는 실제 세굴심과 다소 차이를 보

* 정회원 · 동일기술공사 수자원부 사원 · E-mail : korn1012@hanmail.net

** 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 · E-mail : csckim@mju.ac.kr

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

**** 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 정교수 · E-mail : yeo@mju.ac.kr

일 수 있으며, 그 차이가 심할 경우 과다 산정될 우려도 있다. 이에 보다 실질적이고 경제적인 세굴심 예측 및 국부세굴현상을 파악하기 위해, 본 연구에서는 모래뿐만 아니라 안트라사이트, 규조토 등의 하상재료에 대한 시간에 따른 세굴심 변화에 관찰 및 분석을 수행하였다.

2. 수리모형실험

본 연구의 수행 방법은 그림 2.1과 같은 개수로 실험 장치를 이용한 수리실험을 실시하였다. 또한 본 연구의 목적인 정적세굴 조건하에서 다양한 하상재료에 대해 각 하상재료의 입도분포와 비중을 고려한 단일 원형 교각 주위의 시간에 따른 세굴심 변화를 파악하기 위해 시간에 따른 세굴심을 실시간으로 관찰, 측정할 수 있도록 본 연구에서는 우선 개수로 실험 장치에 그림 2.1과 같이 하상재료를 포설하였다. 수심은 0.15m로 일정하게 유지하고 모형교각은 그림 2.2와 같이 직경 0.1m인 투명 아크릴 원형 교각을 사용하여 CCD를 이용한 실시간 세굴 촬영이 가능하도록 하였다.

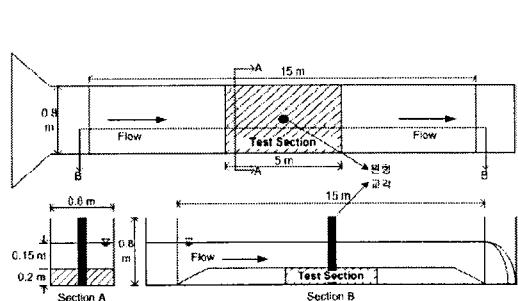


그림 2.1 실험수로의 개략도

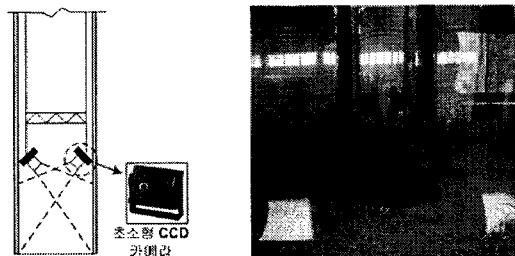


그림 2.2 교각 내부 초소형 CCD 카메라

설치 전경

표 2.1 실험조건

	모 래		안트라사이트	규 조 토
입 경(d_{50} , mm)	1.5	0.425	1.36	0.36
비 중(S)		2.65	1.60	1.87
한계유속(V_c , m/s)	0.53	0.27	0.292	0.173
유 속(m/s)	0.425(0.8) 0.383(0.7) 0.340(0.6) -	0.270(1.0) 0.230(0.85) 0.190(0.7) -	0.292(1.0) 0.263(0.9) 0.234(0.8) 0.204(0.7)	0.173(1.0) 0.156(0.9) 0.138(0.8) 0.121(0.7)
			0.175(0.6)	-

() : 각 유속별 흐름강도를 나타낸 수치이다.

- : 5 mm이하로 세굴이 발생하여 카메라를 통한 측정이 불가능한 것이다.

3. 실험결과 및 분석

많은 연구자들은 경험식을 통해 국부세굴심의 시간적 변화를 설명하기 위해 많은 노력을 기울였다. 일반적으로 이러한 식들은 단일 시간 상수(Single time constant)에 대해 지수 또는 거듭제곱 곡선 형태로 나타내었다. 그러나 단일 시간 상수로 써는 Melville (1975), Nakagawa와 Suzuki (1975) 및 Ettema (1980)가 제기하고 Gosselin (1997)이 밝힌 세굴 진행의 다중 위상에 대해서 설명할 수가 없다. 이에 Bertoldi와 Jones (1998)는 식 3-1과 식 3-2로 표현되는 평형조건 회귀식을 통해 단시계열 자료를 외삽하였다.

$$y_s(t) = a \left[1 - \frac{1}{1 + abt} \right] + c \left[1 - \frac{1}{1 + cdt} \right] \quad (3-1)$$

$$y_s(t) = a [1 - \exp(-bt)] + c [1 - \exp(-dt)] \quad (3-2)$$

그림 3.1과 그림 3.2는 모래 중앙입경 1.5 mm, 흐름강도 0.8과 안트라사이트의 시간에 따른 세굴심 변화와 평형세굴심, 그리고 회귀곡선의 계수를 나타낸 것이다. 초반 100분 동안의 세굴심 변화 그래프의 한 예이다. 그리고 전 입자와 흐름조건에 대한 회귀곡선을 통해 산정한 평형세굴심 결과와 계수 값, 그리고 R^2 값을 정리하여 표 3.1에 수록하였다.

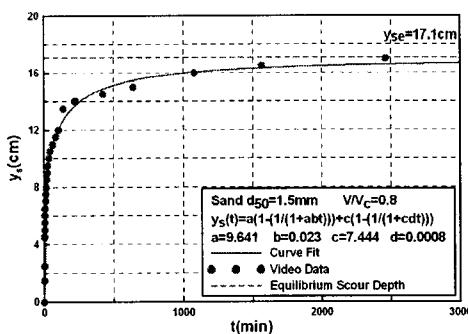


그림 3.1 모래 $d_{50} = 1.5\text{mm}$,
 $V/V_c = 0.8$ 시간에 따른 세굴심 변화

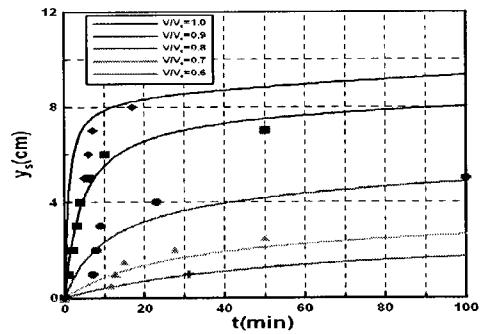


그림 3.2 안트라사이트 초반 세굴심
변화 그래프

입자와 입경, 흐름조건이 시간에 따른 세굴심 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Melville과 Chiew (1999)이 제안한 시간축척을 도입하였다. Melville과 Chiew (1999)는 시간축척으로써 평형세굴심 도달시간 (t_e)을 제안하였으며, 이 평형세굴심 도달시간을 24 시간동안 세굴 변화율이 교각 직경의 5 %를 초과하지 않을 때(즉, $\frac{d(y_{se})}{dt} \leq \frac{0.05}{24}$)로 정의하였고, 산정 결과를 표 3.1에 기입하였다.

표 3.1 입자별 회귀곡선의 계수 및 평형세굴심

입자	d_{50} (mm)	흐름 강도	a	b	c	d	R^2	평형세굴심 (cm)	t_e (hrs)
모래	1.5	0.8	9.641	0.0230	7.444	0.0008	0.995	17.1	89.8
		0.7	7.855	0.0014	7.841	0.0415	0.994	15.7	83.4
		0.6	7.266	0.2670	4.799	0.0005	0.996	12.1	63.2
	0.425	1.0	8.461	0.0106	7.491	0.0003	0.996	16.0	107.4
		0.85	7.762	0.0002	7.379	0.0163	0.999	15.1	103.5
		0.7	2.765	0.1333	6.257	0.0001	0.997	9.0	53.8
안트라사이트	1.36	1.0	8.468	0.1265	6.077	0.0003	0.993	14.5	96.5
		0.9	7.821	0.0295	3.019	0.0007	0.988	10.8	74.3
		0.8	4.529	0.0219	4.693	0.0004	0.970	9.2	55.8
		0.7	2.938	0.0135	2.885	0.0004	0.981	5.8	54.1
		0.6	2.380	0.0003	2.347	0.0086	0.985	4.7	41.9
규조토	0.36	1.0	12.99	0.0002	9.522	0.0034	0.976	22.5	164.3
		0.9	8.186	0.0014	8.314	0.0002	0.992	16.5	157.8
		0.8	6.564	0.0003	2.317	0.0225	0.992	8.88	152.3
		0.7	3.098	0.0017	1.968	0.0002	0.985	5.1	61.4

앞에서 살펴보았듯이 평형세굴심 또한 흐름강도가 증가할수록 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 흐름강도가 증가할수록 평형상태에 도달하는 시간이 증가함에 따라 평형세굴심이 증가하기 때문이라 보여진다.

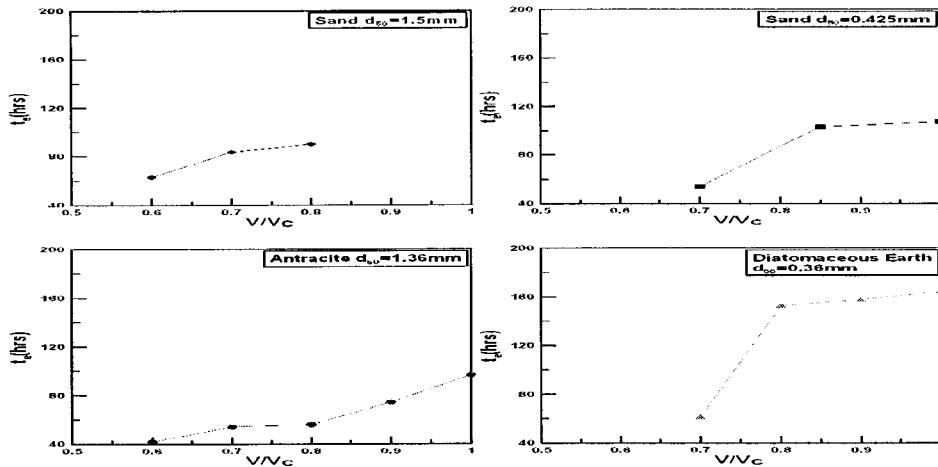


그림 3.3 입자별 흐름강도 대 평형세굴심 도달시간(t_e)

그림 3.3를 보면 전 입자에 걸쳐 정적세굴 조건하에서 동일 입자, 동일 입경일 경우 흐름강도가 증가할수록 평형세굴심 도달시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 흐름강도가 증가할수록 세굴공으로부터 이송되는 하상재료의 비율이 증가하게 되어 평형세굴심 도달시간을 증가시키는 경향이 있기 때문이라 보여진다. 결국 정적세굴 조건하에서 동일 입자, 동일 입경일 경우 흐름강도는 평형세굴심 도달시간과 평형세굴심에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉 흐름강도가 증가할수록 평형세굴심 도달시간과 평형세굴심은 증가하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

표 3.2 평형세굴심 비교

입자	d_{50} (mm)	흐름 강도	CSU	Shen	Chitale	Froehlich	Sheppard	Ex.
모래	1.5	0.8	0.16	0.16	0.2	0.14	0.19	0.17
		0.7	0.15	0.15	0.18	0.14	0.16	0.16
		0.6	0.14	0.14	0.16	0.14	0.11	0.12
	0.425	1.0	0.13	0.12	0.13	0.15	0.17	0.16
		0.85	0.12	0.11	0.11	0.14	0.16	0.14
		0.7	0.11	0.10	0.08	0.14	0.13	0.07
안트	1.36	1.0	0.14	0.13	0.11	0.18	0.20	0.15
라사		0.9	0.13	0.12	0.09	0.15	0.20	0.11
		0.8	0.12	0.11	0.06	0.11	0.18	0.09
		0.7	0.11	0.10	0.04	0.07	0.16	0.05
이트	0.36	1.0	0.11	0.09	0.08	0.18	0.16	0.20
		0.9	0.10	0.09	0.06	0.15	0.16	0.15
		0.8	0.10	0.08	0.05	0.11	0.14	0.09

표 3.2는 공식간의 평형세굴심의 비교를 나타낸 것으로써 Sheppard의 정적세굴 조건하에서의 평형세굴심

예측 공식 결과와 비교해보면 모래 $d_{50} = 0.425\text{ mm}$ 에서의 흐름강도 0.7에서 50 % 정도의 차이를 보이지만 그 외의 경우에는 8 % 이내의 차이만을 보인다. 또한 CSU, Shen, Chiltale 및 Froehlich 예측 공식에 의해 산정된 세굴심과 수리실험을 통해 구해진 정적세굴 조건하에서의 평형세굴심과의 차이는 5 ~ 20 % 가량의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 예측 공식, 특히 CSU 공식의 경우 교각에 대한 정적세굴과 동적세굴 조건 모두에 대해 사용되도록 제안된 식이다. 하지만 일반적으로 정적세굴의 평형세굴심은 동적세굴의 평형세굴심에 비해 약 10 % 정도 크게 산정되어짐에 따라 정적세굴 조건하에서 수행한 본 실험을 통해 구해진 평형세굴심이 기존 예측 공식에 의해 구해진 세굴심에 비해 크게 산정된 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 하상재료(모래, 안트라사이트, 규조토)에 따른 세굴심의 시간적 변화를 정적세굴 조건하에서의 수리실험을 통해 관찰하였다. 그 결과로 얻어진 시간에 따른 세굴심 변화 곡선을 통해 평형세굴심 도달시간과 평형세굴심을 산정을 하여 입자별, 흐름강도별 그 특성을 파악하였다.

각 입자별, 흐름강도별 평형세굴심 도달시간을 산출하여, 각 조건이 시간축척에 미치는 영향을 살펴본 결과 정적세굴 조건하에서 동일 입자, 동일 입경일 경우 흐름강도가 증가할수록 세굴공으로부터 이송되는 하상재료의 비율이 증가하여 평형세굴심 도달시간이 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 또한 정적세굴 조건하에서 동일 입자, 동일 입경일 경우 흐름강도가 증가할수록 평형세굴심 도달시간이 증가하여 평형세굴심이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 수리실험을 통해 구한 각 입자별, 흐름강도별 평형세굴심과 기존 세굴심 예측 공식을 통해 산정한 세굴심과 비교한 결과 모래의 경우 기존 예측 공식을 통해 산정한 세굴심에 비해 5 ~ 20 % 크게 나타났다. 하지만 모래와의 비중차와 점착성의 차이에 의해 안트라사이트와 규조토의 경우 예측 공식에서 산정한 세굴심과 비교하였을 때 최대 2배가량 차이를 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. Bertoldi, D.A. and Jones, J.S., 1998, "Time to Scour Experiments as an Indirect Measure of Stream Power Around Bridge Piers." Proceedings of the International Water Resource Engineering Conference, Memphis, Tennessee, August 1998, pp. 264-269.
2. Melville, B.W. and Chiew, Y.M, 1999, "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 1, pp.59-65.
3. Sheppard, D.M., 2002b, "Large Scale and Live Bed Local Pier Scour Experiments." Report to the Federal Highway Administration, University of Florida, Gainesville, Florida.