

교각 국소 세굴 예측 공식들의 비교 평가

A Comparative Evaluation of Bridge Pier Scour Formulas

류권규*, 심봉주**, 윤병만***

Kwonkyu Yu, Bongjoo Shim, Byungman Yoon

요 지

본 연구는 교각의 국부 세굴심 추정 공식들의 정확성과 적용성을 분석하고, 현장 상황에 적합한 공식을 선정하기 위한 연구이다. 이를 위해 비교적 널리 알려진 26개의 세굴심 추정 공식들을 선정하였다. 이들 선정된 공식들을 미 지질조사국에서 작성한 교각 세굴 데이터베이스(BSDMS)에 수록된 493개 교각 세굴 측정값들 중에 246개의 측정값들에 적용하여 각 공식들의 우열을 검토하였다.

각 공식들을 이용하여 계산한 세굴심과 측정 세굴심을 비교하여 각 자료별 불일치율을 계산하였다. 계산된 불일치율을 통계 처리하여 불일치율의 기하 평균과 기하 표준편차를 구하여, 각 공식의 우수성과 적용성을 검토하였다. 또한, 각 공식들을 구성하는 주요 변수들을 분석하고, 각 변수의 변화에 따라 세굴심 추정치가 어떻게 변화하는가를 분석하였다. 분석 결과, 모든 공식들의 불일치율의 기하 평균이 1보다 상당히 큰 것을 보여주고 있다. 즉, 모든 공식들이 실측치보다 세굴심을 과대 추정한다는 의미이다.

정확성의 면에서 보면 불일치율의 기하 평균이 1에 가깝고 기하 표준편차가 작은 공식들이 우수한 공식들이다. 이런 점에서 CSU (HEC-18) 공식, Chitale 공식과 Larras 공식, Hancu 공식 등이 차례로 우수한 공식으로 들 수 있다. 연구 결과는 또한 기존의 여러 연구에서 좋은 결과를 보인 Froehlich 공식이 세굴심을 대체적으로 과소 추정하는 경향이 있음을 보여 주었다.

핵심용어: 교각 세굴 공식, 비교 평가, 세굴심, 불일치율

1. 서 론

하천에 설치된 교량은 하천의 흐름에 지장을 초래하며, 크고 작은 세굴 문제를 야기한다. 교각에 의한 국부 세굴은 교량의 안전에 매우 중대한 영향을 미치는 요소이며, 이를 정확히 예측하고 이에 대한 대비책을 세우는 것은 교량 설계에서 매우 중요한 부분을 차지한다. 그러나, 국소 세굴 문제는 흐름의 복잡성, 유사 이송에 대한 이해 부족 등으로 그 추정에 매우 많은 어려움을 겪어 왔다.

현재까지 학계에 보고된 국부 세굴 예측 공식은 수십 가지가 넘으며, 이 공식들의 정확성에 대해서도 많은 비교 연구가 있어 왔다. 대표적인 연구를 들자면 Johnson (1995), Mohamad et al. (2005), Mueller and Wagner (2005) 등을 들 수 있으며, 국내 연구도 다수 있다. Johnson (1995)의 연구에서는 515개의 실측 자료를 이용하여, CSU 공식, Melville-Sutherland, Hancu, Laursen-Toch, Shen et al., Jain-Fisher, Hopkins et al.의 7개의 공식을 비교하였다. 그 결과 Breuser (1977) 공식이 가장 우수한 것으로 결론을 내렸으며, 많은 공식들이 세굴심을 과대 추정한다고 하였다. Mohamad et al. (2005)의 연구에서는 CSU, Laursen-Toch, Melville-Sutherland, Jain-Fisher의 4개 공식에 Pakistan, Canada, India의 14개 자료를 적용하였다. 분석 방법으로는 Mean Absolute Error, Root Mean Square Error, Theil의 계수 등을 적용하였으며, 그 결과 Laursen-Toch과 CSU는 타당한 결과를, Melville-Sutherland, Jain-Fisher는 과대 추정한다고 결론 지었다.

* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 교수 · E-mail : pururumi@deu.ac.kr

** 정회원 · 한진개발공사 수자원부 · E-mail : bonjour0024@lycos.co.kr

*** 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : bmyoon@mju.ac.kr

국부 세굴 공식에 대한 광범위한 비교 분석은 Mueller and Wagner (2005)에 의해 수행되었다. 이들은 CSU 공식(이 보고서에서는 HEC-18 공식이라 함)을 포함한 26개의 주요 공식에 미국 17개 주의 79 지점에서 수집된 493 교량 세굴 자료중에서 266개 자료를 적용하였다. 각 공식의 검토 기준으로는 오차의 제곱합, 과소 추정치 수, SSE의 크기 등이었다. 주요 결과로는 Froehlich design, HEC-18-K4Mo, HEC-18-K4, HEC-18, Mississippi 공식이 비교적 다른 공식보다 나은 결과를 보였지만, 어느 공식도 뚜렷하게 다른 공식보다 우월한 결과를 보이지 못한다고 하였다. 또한, HEC-18의 방법은 보수적인 경향을 보여 대체적으로 세굴심을 과다 추정한다고 하였다. 또한, Choi and Cheong (2006)은 인공 신경망 기법을 이용하여 Laursen-Toch, Neil, Jain-Fischer, CSU, Melville의 5가지 공식을 비교하였다. 그 결과 CSU 공식과 Laursen-Toch 공식이 비교적 타당한 결과를 보인다고 하였다.

한편, 국내의 연구로는 안상진과 김용용 (1997)이 CSU 공식, Melville-Sutherland, Hancu, Neill, Breuser, Jain-Fischer, Laursen 공식의 6개 공식을 보충한 유역에서 측정된 8개 자료에 적용하여 그 결과를 비교하였다. 그 결과 대부분의 공식의 추정치가 실측치 보다 크게 나타났으며, CSU 공식과 Melville-Sutherland 공식이 비교적 실측치와 근사한 결과를 보였다고 하였다. 또한, 건설교통부(1997)에서는 외국의 272개 실측 자료를 Inglis-Poona 공식 등 26개 공식에 적용하여 공식을 평가한 바 있다.

이러한 연구 결과를 종합해 보면, 이들 연구들이 공식들의 정확성에 주안을 두고 검토하고 있으며, 대상 하천의 특성에 따른 공식의 적용 범위 등에 대해서는 주목하지 못한 면이 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 연구들에서 비교적 적용성이 높은 것으로 추천된 공식 10여 개를 선정하고, 이 공식들에 광범위한 자료를 적용하여 공식의 정확성, 적용 범위 등에 대한 분석을 통하여 우수한 공식을 선정하고자 한다.

2. 비교 공식과 자료의 선정

2.1 공식의 선정

위와 같은 기존 연구들(Johnson, 1995; 건설교통부, 1997; 안상진, 김용용, 1997; Mohamad et al., 2005; Mueller and Wagner, 2005)에서 적어도 2회 이상 언급된 공식들을 기준으로 하여 총 12개를 선정하였다. 표 1은 비교에 이용되는 공식들의 이름과 본 연구에서 사용되는 약어명을 보여 주고 있다.

2.2 자료의 선정

본 연구에서는 Bridge Scour Data Management System (BSDMS)은 미 지질 조사국(USGS)에서 교량의 세굴에 대한 분석을 위해 하천의 교량 세굴 자료를 집적해 놓은 데이터베이스이다. 2005년 현재, 여기에는 미국 17개 주의 79 지점에서 수집된 493개의 교량 세굴 실측 자료가 있다(Mueller and Wagner, 2005). 이 데이터베이스의 단일 교각에 대한 교각 세굴 실측 자료 중에서 (1) 교각의 배치 방향이 흐름과 평행하고, (2) 교각에서의 유속이 하상토의 중앙 입경을 움직일 정도이며, (3) 교각의 상하류 측정 자료가 있을 때 하나만 이용하는 등의 기준에 따라, 246개의 자료를 최종 선정하였다. 이들 자료의 범위는 표 2와 같다. 이 표에서 알 수 있듯이, 이용된 실측 자료는 매우 광범위하여, 실제 상황에서 접할 수 있는 거의 모든 상황을 망라하고 있는 것으로 보인다.

표 1. 비교될 공식들과 그 약어

번호	연구자	연도	약어	번호	연구자	연도	약어
1	Ahmad	1962	AMD	7	Hancu	1971	HNC
2	Breusers	1965	BRS	8	Inglis-Poona	1938	INP
3	Chitale	1944	CHT	9	Jain-Fischer	1979	JNF
4	Coleman	1971	COL	10	Larras	1963	LAR
5	CSU (HEC-18)	1995	CSU	11	Laursen	1956	LSN
6	Froehlich	1987	FRO	12	Neil	1973	NEL

표 2. 비교에 사용된 실측 자료의 범위

변수	최소값	최대값	변수	최소값	최대값
교각폭 (m)	0.6	5.5	Gradation	1.2	21.8
교각길이 (m)	2.4	25.3	세굴심 (m)	0.10	7.70
접근각 (deg)	0	0	수심/교각폭	0.20	9.67
접근유속 (m/s)	0.2	4.5	교각폭/ D_{50}	8.3	14333.3
수심 (m)	0.2	20	세굴심/교각폭	0.11	1.79
하상재료 (mm)	D_{16}	0.03	한계유속	0.421	3.854
	D_{50}	0.15	접근유속/한계유속	0.45	4.97
	D_{84}	0.26	Froude 수	0.040	0.816
	D_{90}	0.35			

2. 세굴량 추정

2.1 추정 세굴심의 정확도

선정된 공식들에 246개의 자료를 적용한 결과 각 공식에 의해 추정된 세굴심과 현장에서 관측된 세굴심간의 불일치율 (discrepancy ratio, $r = \text{실측치} / \text{추정치}$)의 기하 평균, 기하 표준 편차는 표 3과 같다. 이 때, 불일치율의 기하평균과 기하 표준 편차는 다음과 같이 계산한다.

$$m_r = \left(\prod_{i=1}^n r_i \right)^{1/n} \quad (1)$$

$$\log s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log r_i - \log m_r)^2} \quad (2)$$

표 3은 이와 같이 하여 구해진 각 공식별 세굴심 산정 자료수 (계산된 세굴심이 0보다 작지 않은 자료의 수), 불일치율의 기하 평균과 기하 표준 편차, 과소 추정의 자료수를 보여주고 있다.

표 3. 각 공식별 계산 결과

공식	계산 자료수	기하 평균	기하 표준 편차	불일치율의 범위					
				< 0.0	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0	> 5.0
AMD	193	1.977	3.472	21.5	8.1	10.2	18.3	22.8	19.1
BRS	246	2.540	1.819	0.0	0.0	4.1	30.9	49.2	15.9
CHT	240	1.659	2.347	2.4	6.9	17.1	27.2	41.1	5.3
COL	246	2.039	1.807	0.0	0.0	12.6	39.0	41.1	7.3
CSU	246	1.077	2.637	0.0	21.1	24.8	26.4	20.7	6.9
FRO	246	0.762	1.825	0.0	24.0	45.1	23.6	6.9	0.4
HNC	246	1.709	2.204	0.0	8.9	15.0	29.7	39.0	7.3
INP	149	1.386	2.666	39.4	6.9	11.4	19.1	20.3	2.8
JNF	246	4.003	1.787	0.0	0.0	0.4	10.2	54.1	35.4
LRS	246	1.676	1.884	0.0	2.4	18.3	41.1	32.9	5.3
LSN	246	3.270	1.805	0.0	0.0	2.0	18.7	54.1	25.2
NEL	246	3.640	1.761	0.0	0.0	0.0	16.3	56.5	27.2

우수한 공식의 조건 (1) 산정된 세굴심의 불일치율의 기하 평균이 1.0에 가까워야 하며, 기하 표준 편차가 작아야 하며, (2) 세굴심이 음수가 되는 경우가 가급적 없어야 하고, (3) 세굴심을 과소 추정(불일치율이 1.0 보다 작은 경우)가 가급적 적어야 한다.

위의 표 3의 결과에 따르면, 널리 알려진 CSU 공식은 기하 평균이 1.077이며 기하 표준 편차가 2.637이다. 이것은 세굴심을 과다 추정한다는 기존의 연구 결과와 달리 이 공식이 세굴심을 대체적으로 적절히 추정한다는 것을 의미한다. 다만, 기하 표준 편차가 다른 공식에 비해 상당히 크다는 점에서는 약간의 문제가 있다는 것을 의미한다. 즉, 과소 추정하는 비율(즉, 불일치율이 1.0 보다 작은 확률)이 46%로 약 절반에 가깝다는 것은 보수적인 추정을 해야하는 세굴 추정 공식의 입장에서 보면 단점이 될 수도 있을 것이다.

기하 평균의 관점에서 보면, 다른 11개 공식 중에서 Froelich 공식이 기하 평균이 1에 가장 가까우나, 둘 다 세굴심을 과소 추정하는 문제를 지니고 있다. 세굴심 산정 공식은 보수적인 추정을 하는 것이 안전하므로 가급적 기하 평균이 1.0보다 큰 것이 바람직하다. 반면, Inglis-Poona 공식의 기하 평균이 1.386으로 약 1.4배 정도 과대 추정하여 비교적 우수한 것처럼 보이나, 이 공식은 세굴심을 음수로 산정하는 경우가 많은 문제를 안고 있다. 이런 점에서 Chitale 공식과 Larras 공식, Hancu 공식이 1.6~1.7 배 정도의 추정을 하므로, 보다 우수한 공식이라 볼 수 있다. 이들 세 공식이 세굴심을 과소 추정하는 비율은 약 25% 내외로 거의 비슷하다. 위의 각 공식의 결과를 그래프로 보이면, 그림 1~그림 13과 같다.

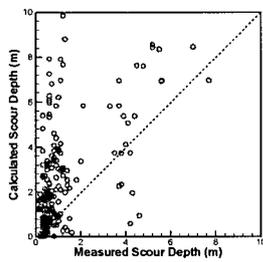


그림 1. Ahmad 공식

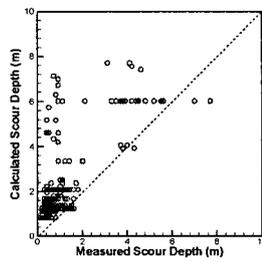


그림 2. Breusers 공식

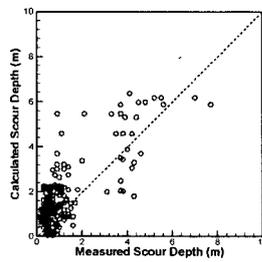


그림 3. Chitale 공식

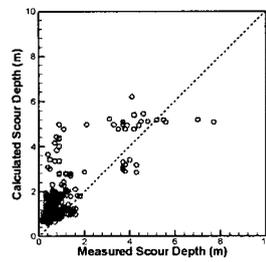


그림 4. Colman 공식

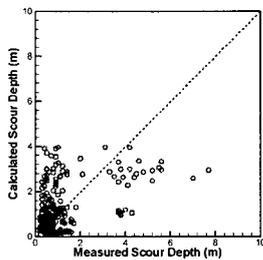


그림 5. CSU 공식

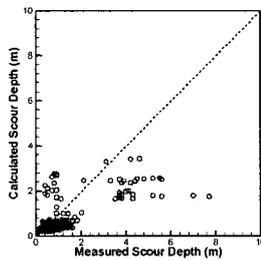


그림 6. Froelich 공식

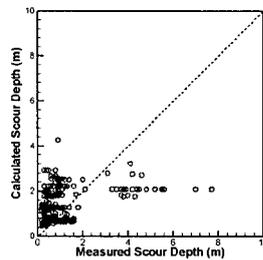


그림 7. Hancu 공식

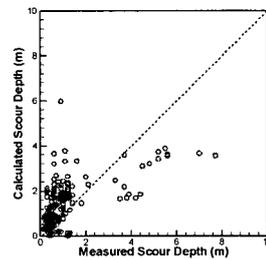


그림 8. Inglis-Poona 공식

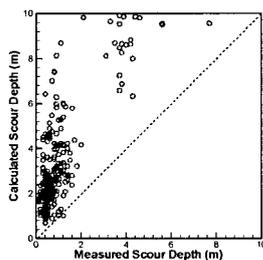


그림 9. Jain-Fischer 공식

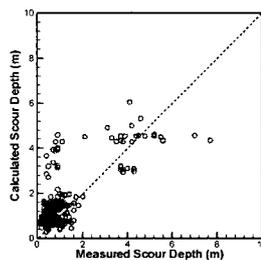


그림 10. Larras 공식

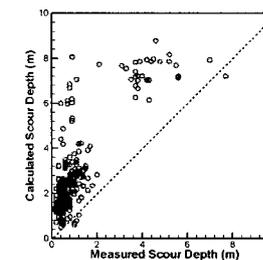


그림 11. Laursen 공식

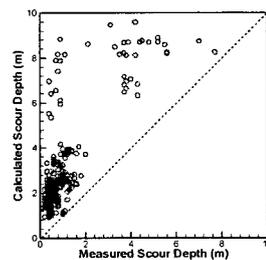


그림 12. Neil 공식

3. 요약 및 결론

비교적 널리 알려진 12 개의 교각 세굴심 추정 공식에 246개의 하천 실측 자료를 적용하여 각 공식의 산정 결과를 비교하였다. 그 결과 CSU 공식은 불일치율의 기하 평균이 1.0에 가까우나, 과소 추정의 비율이 상대적으로 높으며, Chitale 공식과 Larras 공식, Hancu 공식이 불일치율의 기하 평균이 1.0에 가깝고, 기하 표준 편차가 작은 우수한 공식으로 밝혀졌다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행 한 2003년도 건설핵심기술연구 개발사업 (03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술 연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1997) “하천 횡단 구조물의 세굴 안전진단 시스템의 개발(최종)”.
- 안상진, 김용용 (1997) “실측 자료와 교각 세굴 방정식의 비교,” 충북대학교 건설기술연구소 논문집, 제16권 제1호, pp.177-183.
- Johnson, P. A. (1995). "Comparison of pier-scour equations using field data." *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8), 626-629.
- Mohamed, T. A., Noor, M. J. M. M., Ghazali, A. H., and Huat, B. B. K. (2005). "Validation of some bridge pier scour formulae using field and laboratory data." *American Journal of Environmental Sciences*, 1(2), 119-125.
- Mueller, D. S., and Wagner, C. R. (2005). "Field observations and evaluations of streambed scour at bridges." *FHWA-RD-03-052*, Federal Highway Administration.
- Choi, S. and Cheong, S. (2006) "Prediction of local scour around bridge piers using artificial neural networks," *Journal of the AWRA*, Vol. 42, No. 2, pp. 487-494.