

교량에서의 세굴깊이 산정 및 산정치와 실측치의 비교분석

Estimation of Scour Depth at Bridges and Comparative Analysis between Estimated and Measured Scour Depths

윤 용 남* / 이 재 수** / 호 정 석***

Yoon, Yong Nam / Lee, Jae Soo / Ho, Jung Seok

Abstract

Recent internal and external bridge failures due to pier and abutment scour have emphasized the need for better methods of scour depth estimation. This paper compares the hydraulic analysis of the Namhan River Bridge over the Namhan River using one-dimensional models, WSPRO & HEC-2, and the two-dimensional model, TABS-MD based on the procedures presented in HEC-18 published by the U.S. Federal Highway Administration. A comparison of estimated scour depth for this research based on the results from both one-dimensional and two-dimensional model is presented. At the same time, field measurement has been performed before and after flood using sounding instrument, Fathometer (DE-719C). A comparison between estimated and measured scour depth at bridge is also presented. Result shows that there is all the difference between estimated and measured scour depth due to dissimilarity between laboratory and field conditions. Also, it is difficult to measure the maximum scour depth accurately due to refilling. Therefore development of scour measuring equipment which can be used during peak flood, and derivation of empirical model appropriate for internal river system seems urgent.

요 지

최근에 국내외적으로 발생한 교각과 교대에서의 세굴로 인한 교량의 붕괴는 보다 나은 세굴깊이 산정방법에 대한 필요성을 강조하고 있다. 본 논문에서는 미국 연방고속도로국에서 발간한 HEC-18에서 제시하는 절차를 바탕으로 1차원 모형인 WSPRO 모형과 HEC-2 모형, 그리고 2차원 모형인 TABS-MD 모형을 사용하여 남한강에 위치하고 있는 남한강교에 대한 수리분석을 비교하였다. 본 연구에서는 또한 1차원 및 2차원 모형으로부터 구한 수리량을 사용하여 산정한 세굴깊이를 비교하였다. 이와 동시에 홍수를 전후하여 음향측심기인 Fathometer(DE-719C)를 사용하여 현장실측을 수행하였다. 교량에서의 예측한 세굴깊이와 측정된 세굴깊이를 또한 비교하였다. 본 연구의 결과 실험실과 현장조건사이의 차이 때문에 산정된 세굴깊이와 실측된 세굴깊이 간에는 많은 차이를 보이고 있다. 또한 퇴매움현상 때문에 최대세굴깊이를 정확히 측정하기가 어렵다. 따라서 침두 홍수시 사용할 수 있는 세굴측정장비의 개발과 국내 하천에 적합한 경험식을 개발하는 것이 시급하다고 본다.

Keywords: maximum scour depth, contraction scour, local scour, pier scour, abutment scour, Fathometer, refill

* 고려대학교 토목환경공학과 교수
** 전주대학교 토목환경공학과 전임강사
*** 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

1. 서 론

경제 발전과 인구의 증가로 인한 교통량을 소화해 내기 위해 많은 도로 및 고속도로가 건설되어져 왔다. 이와 같은 도로가 하천을 통과할 경우 교량의 설치가 불가피하며 이러한 경우 홍수에 의한 교량의 안정성에 세심한 주의를 기울여야 한다. 홍수 및 기타 여러 요인으로 인한 도로의 손실은 비교적 쉽게 보수되어 교통의 소통을 빠른 시간내에 정상화 할 수 있으나 교각 및 교대에서의 세굴에 의한 교량의 붕괴나 구조적인 피해는 시민의 안전뿐만 아니라 사회 경제에 막대한 손실을 끼치게 된다.

우리나라에서는 비록 홍수로 인한 세굴이 직접적인 원인은 아니지만 성수대교 붕괴 이후 교량에 대한 전반적인 안전점검을 실시하고 있는 가운데 95년 8월의 집중호우로 충북 괴산군의 화성철교에서 세굴로 인한 교각붕괴로 열차가 탈선하여 인명피해가 발생하였다. 이와 같이 대부분의 교량들이 건설된지 상당히 오래 되었지만 세굴에 대한 조사가 제대로 이루어 지지 않아 집중호우 발생시 잠재적인 위험이 있다고 볼 수가 있다. 미국의 경우 교량붕괴의 약 60%가 세굴로 인한 것으로 조사되었으며, 따라서 세굴로 인한 교량의 붕괴 및 피해에 관심을 가지고 실험에 의한 세굴깊이 산정공식들을 유도하여 실제교량에 적용하고, 또한 최대세굴깊이를 측정할 수 있는 실측장비를 개발하여 경험식을 보완하고 교량의 안전성을 점검할 수 있도록 노력하고 있다.

본 연구에서는 세굴이 많이 발생하고 있다고 판단되는 영동고속도로상의 남한강교(구교)를 선택하여 홍수로 인한 세굴깊이를 산정하고, 실측장비를 사용한 실측 세굴깊이와 비교분석하였다. 본 연구에서 사용된 수리모형은 1차원 모형으로는 WSPRO모형 (Shearman, 1990), HEC-2모형 (U.S. Army Corps of Engineers, 1990b), 그리고 2차원 모형으로는 TABS-MD모형 (U.S. Army Corps of Engineers, 1990a)이며, 이들 수리모형을 사용하여 남한강교 지점에서의 수리량을 구한 후, 실험으로 부터 제안된 경험식을 사용하여 세굴깊이를 구하였다. 경험식에 의한 세굴깊이 계산은 미국의 연방고속도로국(Federal Highway Administration)에서 발행한 HEC-18(Richardson 등, 1993)에 소개된 방법과 국내에 발표된 논문(윤용남 등, 1995; 이재수 등, 1996)을 참조하여 수행하였다.

이와 동시에 음향측심기인 Fathometer를 사용하여 홍수 전후에 교량에서의 하상고 실측을 하여 홍수

로 인한 세굴깊이를 구하고 경험식으로 부터 구해진 세굴깊이와 비교하였다.

본 연구에서 수행한 방법을 바탕으로 이론적인 세굴깊이 산정 및 실측을 하여 세굴깊이를 비교분석할 수 있으며, 따라서 세굴에 의한 교량의 안전성을 예측할 수 있는 절차를 마련할 수가 있다고 본다. 또한 세굴로 인해 교량이 불안정하다고 판단되면 적절한 보강조치를 하여 교량붕괴로 인한 인명 피해 및 경제적 손실을 미연에 방지할 수가 있게 될 것이다.

2. 적용 수리모형 및 실측장비

2.1 적용 수리모형

하천교량에 있어서의 세굴깊이에 대한 분석을 하기 위해서는 교량지점에서의 유량, 유속 및 수심을 먼저 구한 뒤 이 값들을 사용하여 세굴깊이를 산정하게 된다. 따라서 이러한 수리량을 결정하기 위해 여러 수리모형들이 사용되어지는데, 본 연구에서는 1차원 모형으로 WSPRO 모형과 HEC-2 모형을, 2차원 모형으로는 TABS-MD 모형을 사용하여 수리량을 구하였다.

WSPRO 모형은 하천교량의 통수단면과 교각의 설계를 주목적으로 하여 개발되어진 모형으로 개수로상의 1차원 정상점변류(steady gradually varied flow)흐름을 분석할 수 있다. 설계목적에 따라 다양한 형태의 통수단면과 교대부 제방 제원을 고려할 수 있다. 또한 세굴심 예측을 위한 수리특성분석의 적용시 총유량의 5%씩 유량통과 구간을 설정하여 단면을 통수능이 같은 20개의 구간으로 나누어 각 구간별 수리특성을 분석할 수가 있다. WSPRO 모형에서 배수위 계산은 표준축차법(standard step method)을 사용하는데 교량에 의한 흐름의 영향이 없는 구간에 적용할 때는 다른 1차원 수리모형과 거의 같은 결과를 얻으나 교량통과 흐름분석에서는 다른 모형에 비해 실제수면곡선과 비슷한 결과를 주고 있다.

HEC-2 모형은 자연하천이나 인공하천에서의 흐름이 1차원 정상류 상태의 점변류인 흐름에 대해 적용할 수 있는 모형으로 기본방정식은 WSPRO 모형과 같은 표준 축차법을 사용하고 있다. HEC-2 모형에서는 교량을 통한 에너지 손실을 두가지 경우에 대하여 계산할 수가 있는데, 첫째는 흐름단면의 축소나 확대가 발생하는 교량의 상류와 하류에서 발생하는 에너지 손실부분이고, 두번째는 구조물 즉, 교량에 의해 생기는 손실이다. 구조물에 의해 발생하는 손실은 일반교량방법(normal bridge method)과 특별교량방법(special bridge method)을 사용하여 결정하게 된다.

TABS 모형은 전후처리기(Pre & post processor)인 FastTABS(Engineering Computer Graphics Laboratory, 1994)와 수리모형인 TABS-MD로 구성되며 TABS-MD내의 RMA-2를 사용하여 수리계산을 하게 된다. RMA-2는 2차원, 수심평균, 자유표면 유한 요소 프로그램으로 하천, 항구 또는 하구와 같은 수역을 대표하는 유한요소망의 각 격점에서의 수위 및 유속을 계산할 수 있으며 정상류 뿐만 아니라, 부정류 상태까지 모의할 수 있고 지배방정식으로는 식 (1)의 연속 방정식과 식 (2)~(3)의 x, y 방향에 대한 운동량 방정식이 이용된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) - \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (3)$$

여기서 x, y 는 흐름방향 및 흐름의 연직방향으로의 거리 [L], u, v 는 x 방향 및 y 방향 수평유속성분 [LT^{-1}], t 는 시간 [T], g 는 중력가속도 [LT^{-2}], h 는 수심 [L], a_0 는 하상표고 [L], ρ 는 유체의 밀도 [ML^{-3}], $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 는 x 방향으로의 법선 및 접선 난류교환계수 [$MT^{-1}L^{-1}$], $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}$ 는 y 방향으로의 법선 및 접선 난류교환계수 [$MT^{-1}L^{-1}$]이며 C 는 Chezy의 조도 계수(Manning의 n 으로부터 변환된) [$L^{2/3}T^{-1}$]이다.

2.2 실측장비

현장에서의 세굴 깊이의 실측은 교량의 지속적인 유지 및 관리와 세굴깊이 산정 경험공식들을 비교 검토하는데 필요할 뿐만 아니라 실측자료와 경험공식으로 부터 구한 결과의 차이에 영향을 주는 인자를 규명하고 이를 보완하는데 도움을 준다.

본 연구에서는 음향측심기인 Fathometer(DE-719C)를 사용하여 남한강교 직상류부를 횡단 실측하였으며 세굴이 많이 발생하는 몇개의 교각을 택하여 교각주위를 실측하였다. Fathometer는 다음과 같은 원리로 수심을 측정하게 된다. 즉, 수면에 가까운 음원으로부터

매우 짧은 시간동안 지속하는 음파를 수중에 발사하면 그 음파는 사방에 확산전파되며, 그 중 수직방향으로 전파된 음파가 수중바닥면에서 반사되어 수면부근에 도달하여 측심봉에 전달된다. 이러한 송신음파가 수중바닥에 반사되어 도달하는 시간을 거리로 환산하여 수심을 측정한다.

3. 교량에서의 최대세굴깊이 계산

하천에서의 세굴은 시간에 따라 장기적인 변화와 단기적인 변화로 구분 할 수가 있으며, 장기적인 변화는 하상의 상승(aggradation)이나 저하(degradation)로 하천과 유역에 있어서의 수리특성과 하천 단면변화와 관련이 있고, HEC-6 모형(U.S. Army Corps of Engineers, 1991), BRI-STARS 모형(Molinas, 1990) 등을 사용하여 구하게 된다. 단기적인 변화로는 단면축소로 인한 세굴 및 국부세굴로 나눌 수가 있다. 따라서 최대세굴깊이는 장기간에 걸친 하상의 상승 및 저하, 통수 단면 축소에 의한 세굴 그리고 국부 세굴의 세가지 요소의 합으로 구하게 된다.

3.1 통수단면 축소세굴

통수단면 축소에 의한 세굴은 교량 등 인공구조물 및 자연적 원인으로 하천내의 홍수 단면적이 축소되어 발생하는 세굴이다. 통수 단면 축소에 의한 세굴은 다음과 같은 두가지 상태에 대하여 고려를 하는데, 첫째는 혼탁수세굴(live-bed scour)로 교량 상류부로부터 토사의 이송이 있는 경우이며, 두번째는 청정수세굴(clear-water scour)로 상류부로부터 토사의 이송이 없는 경우이다.

혼탁수세굴인 경우 축소세굴깊이 y_s 는 다음과 같은 Laursen의 경험식(Laursen, 1960, 1963)이 주로 추천되어 사용된다(Richardson 등, 1990).

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_{mc2}}{Q_{mc1}} \right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{W_{c1}}{W_{c2}} \right)^{K_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{K_2} \quad (4)$$

여기서 y_s 는 평균 세굴 깊이(ft)로 $y_2 - y_1$ 이 주어지며, y_1, y_2 는 주 하도 및 축소단면에서의 평균 수심(ft), W_{c1}, W_{c2} 는 주 하도 및 교량단면에서의 하상 폭(ft), Q_{mc1}, Q_{mc2} 는 퇴사를 포함하는 주하도의 접근 유량 및 축소단면에서의 유량(cfs), n_1, n_2 는 주하도 및 축소단면에서의 Manning의 조도계수이며, K_1, K_2 는 하상재료의 전단속도와 침강속도에 따른 계수이다.

3.2 교각에서의 국부세굴

국부세굴은 교대와 교각에서의 세굴로 나눌 수가 있는데, 흐름속에 설치된 구조물에 의한 간섭때문에 발생한다. 교각에서의 국부세굴은 Colorado State University 공식이 주로 추천되고 있는데 다음과 같다(Richardson 등, 1993).

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad (5)$$

여기서 y_s 는 세굴 깊이(ft) y_1 는 교각 직상류의 수심(ft), K_1, K_2, K_3 는 각각 교각 형상, 흐름의 접근각, 하상조건에 대한 보정계수, a 는 교각의 폭(ft), Fr_1 은 접근수로부 흐름의 Froude 수이다.

교각에서의 국부세굴 계산시 기초가 흐름에 노출되어 있는 경우는 다음 식과 같이 V_f, y_f 를 구하고 교각폭을 기초의 폭으로 사용하여 식 (5)를 적용한다. 이와 같이 구한 세굴깊이와 기초의 노출을 고려하지 않은 경우의 세굴깊이와 비교하여 큰 값을 채택한다.

$$\frac{V_f}{V_1} = \frac{\ln\left(10.93 \frac{y_f}{k_s} + 1\right)}{\ln\left(10.93 \frac{y_1}{k_s} + 1\right)} \quad (6)$$

여기서 V_f 는 기초상단부 아래 영역에서의 평균유속(ft/s), V_1 은 교각 직상류부에서의 평균유속(ft/s), y_f 는 하상부터 기초상단부까지의 길이(ft), k_s 는 하상입경 D_{84} (ft), y_1 은 교각상류부 수심(ft)이다.

4. 실측 및 산정된 세굴깊이

본 연구의 대상 교량은 한국도로공사에서 1994. 10. 28 ~ 11. 20에 실시한 '중점점검교량(하천) 수중정밀 조사시행'의 결과로 부터 각 고속도로 노선별로 위치한 37개의 교량중 가장 문제가 되는 영동고속도로상의 남한강에 위치한 남한강교를 선정하였다. 따라서 본 연구에서는 남한강교를 대상으로 경험식에 의한 세굴깊이와 실측에 의한 세굴깊이를 비교분석하였다. 경기도 여주군 여주읍 우만리에 위치한 남한강교는 길이가 540m인데 30m 간격으로 17개의 교각이 설치되어져 있다(그림 1). 각

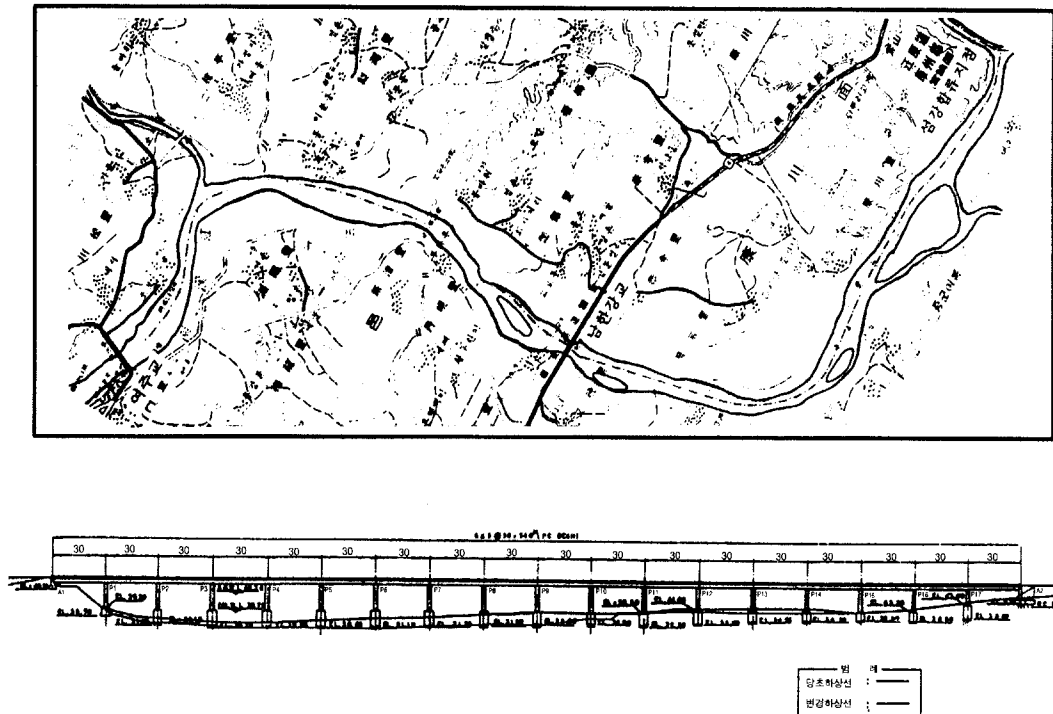


그림 1. 남한강교(구교)의 형상

교각의 우물통 기초는 폭 5.6m, 길이 8.9m로 선단 및 끝단이 둥글고 중간 직선부분이 1.9m인 기초이며, 이 기초 위에 폭 2m, 길이 3m인 직사각형 교각이 설치되어져 있다. '영동선 남한강교 교각기초 세굴조사보고서'(한국도로공사 영동지사, 1994)에 의하면 남한강교 지점에서의 평상시 유속은 1.2m/s로 나타나 있고, 4번째와 6번째 교각의 전면부에서 우물통기초의 하단과 지지암반이 분리되어 있어 94년 말에 우물통기초 전단면에 강제거푸집을 교각전방 약 0.6m지점 암반에서 1.6m높이로 설치하여 수중콘크리트를 타설하여 집합을 한 상태이다.

4.1 1차세굴깊이 실측

남한강교에 대해 95. 6. 17 - 18 양일간 횡단 및 교각 주위를 실측하였다. 실측당시 남한강교에서의 수위는 36.91(EL.m)이며 유출량은 같은 기간의 여주수위표에서 측정된 수위를 유량으로 환산한 결과 약 120m³/sec였다. 그림 2는 교각전면부로부터 1m상류지점에 대한 횡단 하상고 실측결과를 보여주고 있다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 교각이 위치한 부분이 교각사이 부분보다 상당히 세굴되었으며, 1m전방에서 실측한 것을 고려하면 교각전면부에서의 세굴은 그림보다는 더 심하다고 판단할 수가 있다. 교량건설(1971년) 당시의 교각에서의 하상고와 비교해 볼때 주하도에 있는 교각부분이 약 3-4m 정도 낮아진 것으로 나타나 있다. 표 1은 유심부에 위치한 2번교각부터 9번교각까지의 1차 실측하상고와 각 교각 우물통기초의 상단부 및 하단부의 위치를 비교하여 하상고의 상대적인 높이를 보여주고 있다. 표 1에서 보면 4, 5, 6번 교각이 위치한 지점에서 세굴이 상당히 진행되고 있음을 알 수가 있다.

그림 3과 4는 세굴이 가장 심하다고 판단되는 5번 및 6번교각에 대해 교각 주위를 각각 1m, 2m, 4m 떨어

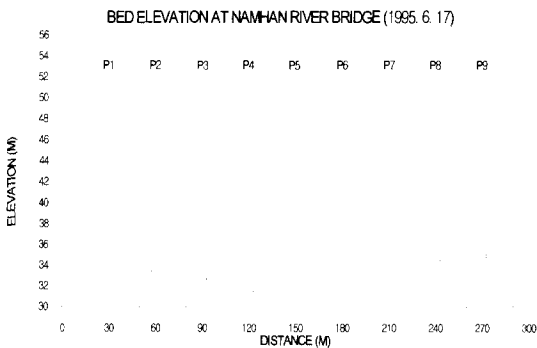


그림 2. 남한강교 1차횡단실측 하상고

표 1. 1차실측하상고와 우물통 기초높이의 비교

교각	실측하상고 (EL.m)	기초하단부 높이(EL.m)	상단부높이 (EL.m)	실측하상고와 하단부높이차(m)
2	33.07	30.40	39.40	2.67
3	32.54	30.70	39.40	1.84
4	31.38	30.90	39.20	0.48
5	31.77	30.60	39.20	1.17
6	32.39	31.10	39.20	1.29
7	33.67	31.70	39.20	1.97
8	34.38	31.90	39.20	2.48
9	34.27	32.60	39.20	1.67

져서 실측한 결과를 보간하여 등고선 형태로 나타낸 실측 하상고 평면을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 교각 상류측에서 유수에 의해 세굴이 상당히 심함을 알 수가 있고, 교각하류부에서는 상류측에서 세굴된 유사들이 퇴적되어 상류부 보다는 세굴이 비교적 덜 심함을 알 수가 있다. 또한 교각에서의 국부세굴이 교각과 접촉된 부분에서 심하게 발생함을 감안하면 그림에서 교각과 접촉하고 있는 부분은 하상고가 더 낮다고 보아야 한다. 그림에서 타원형으로 표시된 점들은 각 교각주위 1m, 2m, 4m의 거리를 두고 실측한 지점

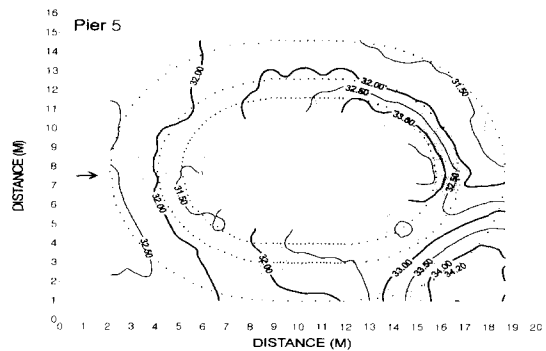


그림 3. 5번교각 주위 1차실측하상고

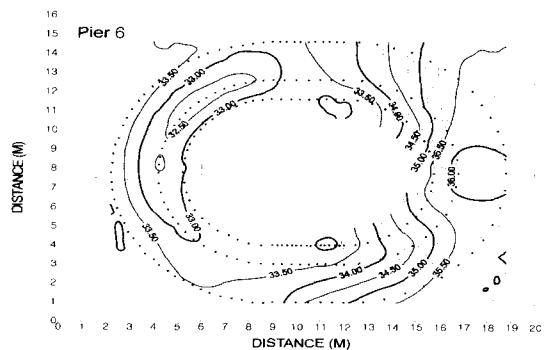


그림 4. 6번교각 주위 1차실측하상고

을 나타내고 있다. 실제적으로는 물의 흐름과 배의 조작, 위치표시 등에 어려움이 있으므로 그림처럼 정확하게 일정한 거리로 실측은 할 수 없었지만 가급적 그림에 표시된 것처럼 실측하려고 노력하였으며, 이와 같은 이유로 약간의 오차발생은 감수할 수 밖에 없다고 본다.

4.2 2차세굴깊이 실측

홍수로 인한 세굴깊이를 계산하기 위해 95년 9월 18일에 2차 실측을 실시하였다. 그림 5는 1차와 2차실측 사이에 발생한 여주수위표 지점에서의 수심(영점표고: EL.33.013m)을 보여주고 있다. 1차와 2차실측기간 사이에 큰호우가 발생하였는데 8월 25일경 수위가 43.6(EL.m)로 가장 높게 나왔으며 이에 해당하는 유출량은 여주수위표 지점의 수위-유량관계곡선으로 부터 약 17145 m³/sec로 계산되었으며, 이는 여주수위표 지점에서의 100년 빈도의 계획홍수량 15600 m³/sec보다 상당히 큰 값이다. 2차 세굴실측도 1차와 동일한 방법으로 수행하였으며, 그림 6은 2차 횡단실측 하상고를 보여주고 있다. 전반적으로 교각이 하단부까지 거의 노출되어 있는 것을 볼 수 있으며, 1차 실측결과와 비교해 볼때 홍수로

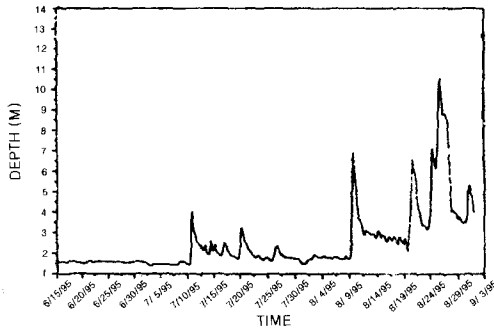


그림 5. 여주수위표 지점의 수심
(영점표고 : EL. 33.013mm)

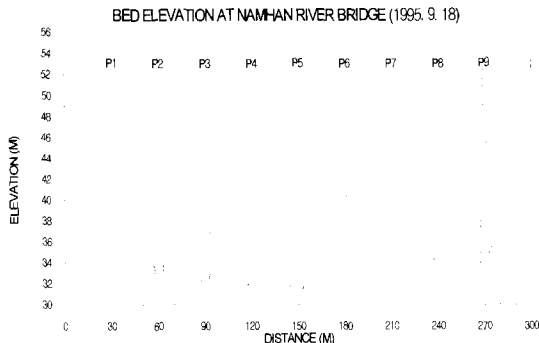


그림 6. 남한강교 2차횡단실측 하상고

표 2. 2차실측하상고와 우물통 기초높이의 비교

교각	실측하상고 (EL.m)	기초하단부 높이(EL.m)	상단부높이 (EL.m)	실측하상고와 하단부높이차(m)
2	32.03	30.40	39.40	1.63
3	32.17	30.70	39.40	1.47
4	31.45	30.90	39.20	0.55
5	30.80	30.60	39.20	0.20
6	32.42	31.10	39.20	1.32
7	33.71	31.70	39.20	2.01
8	34.07	31.90	39.20	2.17
9	33.64	32.60	39.20	1.04

인해 부분적으로 세굴이 발생하였음을 관찰할 수가 있다. 표 2는 이와같은 결과를 요약하고 있으며, 1차 실측하상고와 비교하면 간접적으로 1, 2차 실측사이의 홍수로 인한 세굴깊이를 알 수가 있다. 홍수발생전 1차 실측시에 4, 5, 6번 교각지점에서 세굴이 상당히 진행되고 있는데 홍수후 2차 실측에 의하면 4, 6번 교각보다는 5번 교각에서 거의 1m정도 세굴이 더욱 진전되고 있음을 알 수가 있다. 이는 4번과 6번 교각에 대해 94년도에 보수당시 채석 및 굵은 자갈을 교각전면부에 설치하였지만 5번 교각에 대해서는 보수를 실시하지 않아 4, 6번 교각에 비해 더욱 많이 세굴된 것으로 보인다. 그림 7과 8은 1차와 같은 방법으로 5번 및 6번 교각주위로 실측한 결과를 보여주고 있다. 5번교각을 1차 실측결과와 비교해 보면 교각전면부가 전반적으로 낮아졌다. 하지만 6번교각은 4번교각과 같이 전면부의 교각과 접촉되고 있는 부분은 거의 변화가 없음을 알 수가 있다.

4.3 경험식으로 부터 계산된 세굴깊이

하상고의 변동에 대한 모의를 하기전에 고정하상에 대한 수리량을 계산하기 위해 95년 8월 25일에 발생한 홍수량 17145 m³/sec을 HEC-2 모형과 WSPRO 모형에적용하였다. 모의 결과 남한강교가 위치한 지점에서의 수위는 HEC-2 모형은 47.37m, WSPRO 모형은 47.40m로 계산되었다. 이 홍수가 발생하였을 당시의 교랑지점에서의 관측된 수위는 47.30m 였으므로 두 모형의 검정결과는 양호하다고 할 수가 있다.

남한강에 대한 입도분석결과를 보면 전반적으로 자갈이 29.9%이고 모래가 70%이며 실트와 점토는 0.1%로 나와 있다. 그러나 본 연구의 대상구간인 여주교로부터 삼강합류지점까지는 자갈이 20.3% 모래가 79.7%로 실트 및 점토는 거의 없는 것으로 나타나 있다. 남한강교지점에서의 하상재료의 D₅₀은 1.2mm, D₈₄는 17mm 이며, 표 3은 각 주요지점에서의 하상재

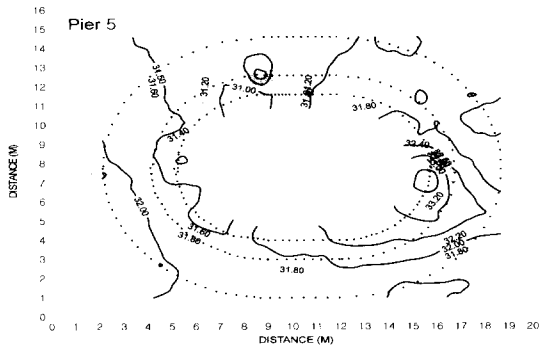


그림 7. 5번교각 주위 2차실측하상고

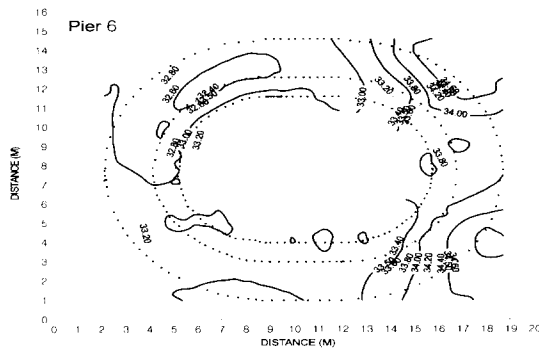


그림 8. 6번교각 주위 2차실측하상고

료의 입도분포를 보여주고 있다(건설부, 1992).

1차실측과 2차실측사이에 발생한 홍수로 인한 세굴깊이를 경험식으로 부터 계산하기 위해 8월 25일 발생한 홍수에 상당하는 수위(여주수위표, 43.6EL.m)와 유량(17145 m³/sec)을 사용하여 TABS-MD, WSPRO, HEC-2 모형에 의한 수리량을 계산하였다. 먼저 통수 단면축소에 의한 세굴깊이를 계산할때, 혼탁수세굴과 청정수세굴의 구분은 유사이송에 대한 Neill의 한계유속식(Neill, 1968)을 이용하여 구한 한계유속과 접근

단면 평균유속을 비교하여 한계유속보다 접근단면의 평균유속이 크면 혼탁수세굴이 발생하는 것으로 본다. 세가지 모형으로 부터 계산된 수리량을 사용하여 한계유속을 구한결과 세가지 모두 혼탁수세굴이 발생하는 것으로 나타났다.

표 4는 세가지 모형에 의해 계산된 수리량 및 단면 축소 세굴깊이를 보여주고 있다. 우물통기초가 노출되어 있으므로 단면 축소 세굴깊이 계산시 교각폭은 다음과 같이 두가지를 사용하여 보았다. 교각폭을 2m로 적용했을 경우 2~2.5m, 그리고 교각폭을 우물통 기초의 폭인 5.6m로 했을 경우 3~4m의 단면 축소 세굴이 발생함을 알 수가 있다.

교각에서의 국부세굴깊이 계산은 세굴이 비교적 심하게 일어나고 있다고 판단되는 4, 5, 6 그리고 7번교각에 대해 수행하였다. 교각에서의 국부세굴깊이를 산정할 때 기초가 하상위로 노출되어 있는 경우 이를 고려하기 위해 먼저 교각이 노출되지 않은 상태 즉, CSU공식에서 교각폭을 2m로 하여 세굴깊이를 구하고, 식 (6)과 같이 기초의노출을 고려하여 V_f, y_f 를 구하여 교각폭을 5.6m로 하여 CSU공식을 적용하여 앞의 경우와 비교하여 큰 값을 채택한다.

표 5에 두가지 방법에 의한 교각에서의 국부세굴깊이가 나타나 있는데 두 방법중 기초의 노출을 고려한 경우가 모두 크게 나왔으므로 이 값을채택한다. 그림 9에 세가지 모형에 의한 통수단면 축소세굴과 국부세굴깊이 (a. 기초노출 고려하지 않은 경우, b. 기초노출 고려한

표 4. 세가지 모형에 의한 통수단면 축소세굴깊이

모 형	Q (cms)	W ₁ (m)	W ₂ (m)		y ₁ (m)	K ₁	y _s (m)	
			폭 2m	폭 5.6m			폭 2m	폭 5.6m
WSPRO	17145	620.7	457.7	403.7	10.17	0.64	2.24	3.26
HEC-2	17145	620.3	420.3	366.3	10.09	0.64	2.53	4.04
TABS	17145	570.0	420.0	366.0	9.33	0.64	2.05	3.08

표 3. 주요지점에서의 입도분포표

지 점	입도크기(mm) 및 누가백분율 (%)								
	32-16	16-8	8-4	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	0.125-0.0625
여주 수위표	32-16	16-8	8-4	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	0.125-0.0625
	100	100	100	98	97	96	80	65	30
남 한강교	32-16	16-8	8-4	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	0.125-0.0625
	100	85	73	68	60	47	28	12	3
섬강 합류점	32-16	16-8	8-4	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	0.125-0.0625
	100	98	97	95	88	60	26	7	1

5. 결 론

본 연구에서는 남한강교에서의 홍수로 인한 세굴깊이를 산정하기 위하여 2차원 수리모형인 TABS-MD와 1차원 모형인 WSPRO, HEC-2 모형을 사용하여 수리량을 구한 후 경험식으로 부터 세굴 깊이를 계산하였다. 또한 음향측심기인 Fathometer를 사용하여 교량에서의 횡단 하상고 및 교각주위의 하상고를 실측하여 계산치와 비교하여 보았다.

연구 결과 홍수로 인하여 5번 교각에서 세굴이 가장 심하게 나타나고 있으며 교각에서의 국부세굴깊이 계산시 기초가 하상에 노출되어 있어 이를 고려하면 노출이 되어있지 않은 경우보다 거의 두배 정도로 세굴깊이가 증가하고 있다. 세가지 모형에 대한 세굴깊이 계산은 큰 차이를 보이고 있지 않으나 실측치와 비교해 볼때 상당히 크게 나타나고 있는데, 이는 세굴깊이 계산공식에 사용하는 입력치인 수리특성치들이 정상류 상태하의 모의결과이고, 또한 홍수가 지나가고 난 후의 교각주위 퇴매움 효과를 고려하지 못하고 있으며 실제교량지점의 하상에 대한 구조를 적절히 고려하지 못하고 있는데 그 원인이 있다고 하겠다. 실측에 있어서도 최대세굴이 발생하는 위치에서 실측이 이루어져야 하는데 그렇지 못한 것도 실측치가 작게 나온 원인이 되고 있다.

본 연구에서 세굴깊이 산정을 위해 사용된 공식들은 대부분 실험실에서의 정상류 모형실험을 통해 얻어진 실험식들이다. 따라서 현장에서 홍수시 세굴깊이를 실측하여 경험식으로부터 계산된 세굴 깊이를 비교분석하여 해당 하도 또는 해당교량에 대해 적용할 수 있는 경험공식을 구하는 것이 중요하다고 볼 수 있으며 또한 최대세굴깊이가 발생할 때에 실측할 수 있는 장비의 개발이 시급하다고 본다.

감사의 글

본 연구는 도로공사의 연구비지원에 의해 수행되었음을 밝히며 이에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1992). **한강수계처수기본계획**.
 윤용남, 윤재영, 이재수 (1995). "2차원 수리모형을 이용한 홍수시 교량에서의 최대세굴심도 예측." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제6호, pp. 1689-1696.
 이재수, 윤용남, 호정식 (1996). "교량에서의 세굴깊이

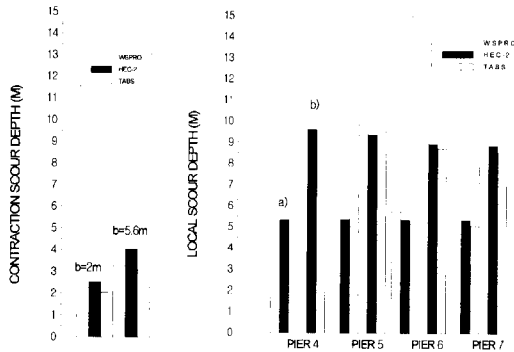


그림 9. 세가지 모형에 의한 세굴깊이의 비교

표 5. 세가지 모형에 의한 국부세굴깊이

교각 모형	4번 (m)		5번 (m)		6번 (m)		7번 (m)	
	a*	b	a	b	a	b	a	b
WSPRO	5.51	10.14	5.71	10.13	5.75	9.72	5.66	9.47
HEC-2	5.34	9.62	5.34	9.37	5.34	8.95	5.34	8.87
TABS	5.32	9.52	5.41	9.54	5.16	8.74	5.06	8.53

표 6. 실측치와 계산치의 비교

모형	교각	4번교각	5번교각	6번교각	7번교각
	실측치	+0.07	-0.97	+0.03	+0.04
WSPRO		-12.38	-12.37	-11.96	-11.71
HEC-2		-12.15	-11.90	-11.48	-11.40
TABS		-11.57	-11.59	-10.79	-10.58

* 기초노출 : a-고려하지않음, b-고려함

* 단위 : m, + : 증가, - : 감소

경우)가 그래프로 나타나 있다. 표 6은 홍수로 인한 세굴깊이의 실측치와 단면축소세굴 및 국부세굴깊이를 비교하고 있다. 5번 교각에 대해 실측한 세굴깊이를 보면 홍수로 인해 약 1m가량 세굴이 발생한 반면 계산치는 약 12m정도 세굴되고 있는 것으로 나타나 차이가 심함을 알 수가 있다. 이러한 주된 원인은 실측면에 있어 홍수시 최대세굴깊이가 발생하는 시점이 아닌 퇴매움이 발생한 후에 실측을 하였고, 또한 교량에의 접근이 어려워 교각 전면부에서 약 1m가량 거리를 두고 실측을 하였으므로 세굴깊이가 적게 측정될 수 밖에 없었으며, 경험식은 실험실에서 균등한 하상재료를 사용하여 평형하상이 발생할 때까지 계속 물을 흘려보냈을 경우에 대해 도출된 식이므로 실제 교량지점에서의 상황을 적절히 고려하지 못하고 있기 때문이라고 볼 수가 있다.

- 의 예측 및 실측치와의 비교분석.” 1996년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 167-172.
- 한국도로공사 영동지사 (1994). 영동선 남한강교 교각 기초 세굴조사보고서.
- Engineering Computer Graphics Laboratory (1994). *FastTABS, hydrodynamic modeling reference manual.* Brigham Young University, Provo, Utah.
- Laursen, E.M. (1960). “Scour at bridges crossing.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 89, No. HY2, pp. 39-54.
- Laursen, E.M. (1963). “An analysis of relief bridge scour.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 92, No. HY3, pp. 93-118.
- Molinas, A. (1990). “Bridges stream tube model for alluvial river simulation (BRISTARS), User’s manual.” *National Cooperative Highway Research Program, Project No. HR15-11*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Neill, C.R. (1968). “Note on initial movement of coarse uniform bed material.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 247-249.
- Richardson, E.V., Harrison, L.J., and Davis, S.R. (1993). Evaluating scour at bridges.” 2nd Edition, *Hydraulic Engineering Circular No. 18*, Federal Highway Administration.
- Shearman, J.O. (1990). *User’s manual for WSPRO-A computer model for water surface profile computation. FHWA-IP-89-027*, Federal Highway Administration.
- U.S. Army Corps of Engineers (1990a). *Generalized computer program system for open-channel flow and sedimentation, TABS System*. Volumes 1-2, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Corps of Engineers (1990b). *Waterway surface profile, User’s manual: HEC-2.* Hydraulic Engineering Center.
- U.S. Army Corps of Engineers (1991). *Scour and deposition in rivers and reservoirs, User’s manual: HEC-6.* Hydraulic Engineering Center.

〈최종본 접수일 : 1997년 8월 25일〉