

2차원 수리모형을 이용한 교량에서의 홍수로 인한 최대세굴심도 예측
 (Prediction of Maximum Scour Depth at Bridges due to Flood
 using 2-dimensional Hydrodynamic Model)

윤 용 남*, 윤 재 영**, 이 재 수***, 김 중 훈*

1. 서론

교량은 국가에 있어서 중요한 사회간접자본으로서 국민생활 뿐만 아니라 국가경제에 커다란 영향을 미치는 구조물이다. 이러한 교량의 중요성은 지난 94년 성수대교 붕괴사고로 초래되었던 엄청난 사회-경제적 피해를 경험하면서 크게 부각되었으며, 교량의 안정성에 대한 국민적 관심 또한 높아지고 있다. 본 연구에서는 많은 수의 교량이 위치하고 있고 해마다 큰 홍수가 발생하여 그 피해가 심각한 한강을 대상으로 2차원 수리모델과 지금까지 알려진 여러 세굴추정기법을 적용하여 건설부의 하천정비 기본계획의 한강 하류부 기준홍수량인 200년 빈도의 홍수량에 대해 최대세굴심도를 계산하고자 하며, 그 결과를 토대로 교량에서의 유지 및 보수에 필요한 자료로서 제공하고자 한다.

2. 수리특성치 계산

수리특성치 계산을 위해 2차원 수리모형인 TABS-MD가 이용되었으며 그 지배방정식은 식 (1)의 연속방정식과 (2)~(3)의 운동량방정식과 같다. 이 방정식들을 각각의 격점에 적용하여 얻어지는 일련의 연립방정식을 음해법으로 풀게 되면 그 결과로서 각 격점별 수위(h) 및 유속(u, v)을 구할 수 있게 된다.

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

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

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

* 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

** 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정

*** 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사후과정

여기서

- x = 흐름방향으로의 거리[L]
- u = x방향 수평유속성분[LT^{-1}]
- y = 흐름의 연직방향으로의 거리[L]
- v = y방향 수평유속성분[LT^{-1}]
- t = 시간[T]
- g = 중력가속도[LT^{-2}]
- h = 수심[L]
- a_0 = 하상표고[L]
- ρ = 유체의 밀도[ML^{-3}]
- ϵ_{xx} = x방향으로의 법선 난류교환계수[$MT^{-1}L^{-1}$]
- ϵ_{xy} = x방향으로의 접선 난류교환계수[$MT^{-1}L^{-1}$]
- ϵ_{yx} = y방향으로의 접선 난류교환계수[$MT^{-1}L^{-1}$]
- ϵ_{yy} = y방향으로의 법선 난류교환계수[$MT^{-1}L^{-1}$]
- C = Chezy의 조도계수(Manning의 n 으로 부터 변환된)[$L^{2/3}T^{-1}$]

대상구간으로는 94년 성수대교 붕괴사고 후 이루어진 한강 교량 안전성 검토로부터 교각본체 손상과 심각한 하상세출이 지적된 바 있는 영동대교 전후부(성수대교 ~ 잠실대교 구간)로 선정하였으며 이에 대한 유한요소망은 그림 1과 같다. 대상구간에 대한 정상류모의를 위해 부여된 경계 조건은 표 1과 같으며 계산결과를 이용하여 얻은 유속벡터도 및 유속등고선도는 그림 2, 3과 같다.

표 1. 경계조건파일 주요 입력자료

종 류	선정값	선정근거
난류교환계수	3,600 [$N \cdot sec/m^2$]	FastTABS Reference Mannual
Manning의 n 값	0.025(저수로) 0.030(고수부지)	Chow와 USGS 제안치
상류단 유량	37,000 m^3/sec	한강하류부 기준 홍수량
하류단 수위	17.01 m	「서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수종합대책수립 기본계획보고서」(1992. 12.)의 HEC-2 배수위 계산결과

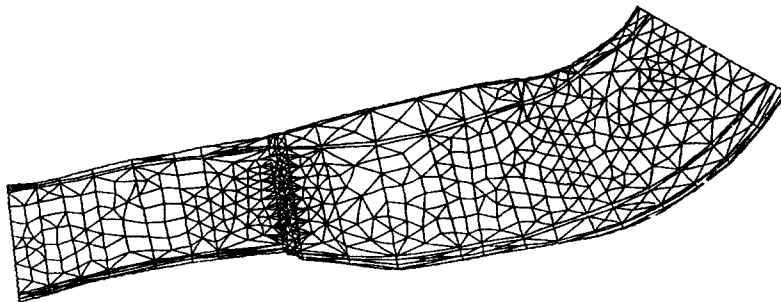


그림 1. 대상구간 유한요소망

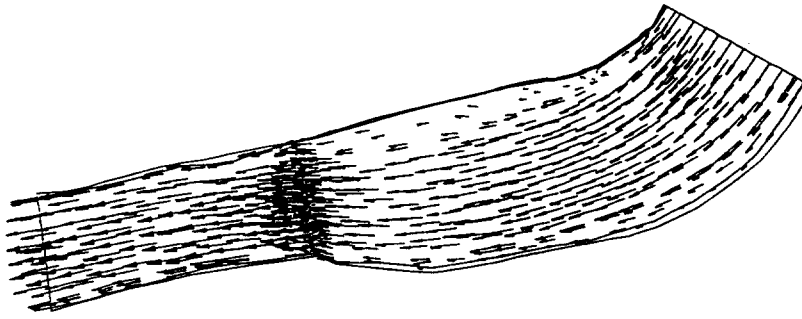


그림 2. 대상구간 유속벡터도

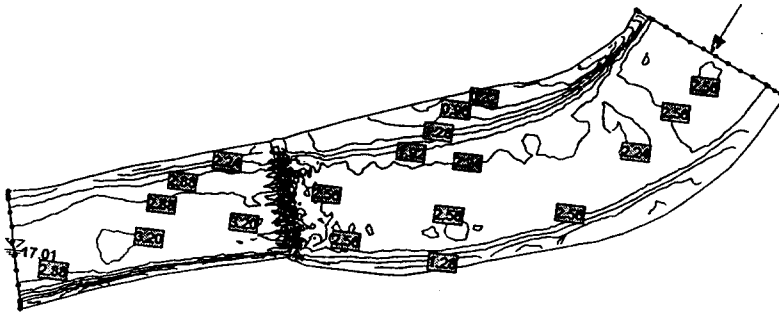


그림 3. 대상구간 유속등고선도

3. 세굴심도 계산

세굴에는 크게 장기하상변동, 단면축소세굴, 교각 및 교대에서의 국부세굴이 있으며 각각의 세굴심도의 총합이 바로 총세굴심도가 된다. 본 연구에서는 장기하상변동을 제외한 기타 세굴심도를 계산하였으며 교대국부세굴의 경우 영동대교에서 교대의 고수부지 근입길이가 매우 작기 때문에 교대로 인한 국부세굴의 영향은 거의 없다고 판단되어 세굴심계산에서 고려하지 않았다.

세굴심도 계산에 이용된 식으로는 단면축소세굴에 대해서 Laursen의 비유사(clear-water) 및 유사(live-bed)세굴공식이, 교각국부세굴에 대해서는 Colorado State University 공식이 이용되었으며 각각 식 (4), (5), (6)과 같다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left\{ \frac{Q_2}{Q_1} \right\}^{\frac{6}{7}} \left\{ \frac{W_1}{W_2} \right\}^{k_1} \left\{ \frac{n_2}{n_1} \right\}^{k_2} \quad (4)$$

$$y_s = y_2 - y_1 = (\text{평균세굴심, ft})$$

여기서

$$y_1 = \text{상류저수로에서의 평균수심, ft}$$

y_2 = 단면축소부에서의 평균수심, ft

W_1 = 상류 저수로에서의 바닥폭, ft

W_2 = 단면축소부 저수로에서의 바닥폭, ft

Q_1 = 상류에서 유사를 이송하는 유량, cfs

Q_2 = 단면축소부에서의 유량

n_2 = 단면축소부에서의 Manning의 n값

n_1 = 상류 저수로에서의 Manning의 n값

k_1 & k_2 = 하상재료의 이송 양상에 따라 결정되는 지수

$$\frac{y_s}{y_1} = 0.13 \left[\frac{Q}{D_m^{\frac{1}{3}} y_1^{\frac{7}{6}} W_2} \right]^{\frac{3}{7}} - 1 \quad (5)$$

여기서

y_s = 세굴심, ft

y_1 = 접근단면에서의 수심, ft

D_m = 평균입경, ft

W_2 = 단면축소부에서의 바닥폭, ft

Q = 단면축소부에서의 유량, cfs

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0K_1K_2K_3 \left\{ \frac{a}{y_1} \right\}^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (6)$$

여기서

y_s = 세굴심, ft

y_1 = 교각 직상류부에서의 수심, ft

K_1 = 교각전면부 형상에 대한 보정계수

K_2 = 흐름의 유입각에 대한 보정계수

K_3 = 하상조건에 대한 보정계수

a = 교각이 폭, ft

L = 교각의 길이, ft

Fr_1 = Froude 수 = $V_1/(gy_1)^{\frac{1}{2}}$

V_1 = 교각 직상류부에서의 평균유속, ft/s

수리특성치 계산 결과로 부터 위의 세굴공식들을 이용하여 얻은 각각의 세굴심도를 살펴보면

표 2, 3, 4와 같다.

표 2. 단면축소세굴심 추정

변 수	저수로부	고수부지
접근단면 수심, m	17.54	4.84
접근단면 유량, m ³ /sec	35127.06	-
교량단면 유량, m ³ /sec	36263.93	737.71
접근단면 폭, m	886.25	-
교량단면 폭, m	710	77.5
평균입경, mm	-	9.03
세굴심, m	3.23	0.95

표 3. 교각국부세굴 추정(교각 #1 ~ 교각#7)

변 수	교각 #1	교각 #2	교각 #3	교각 #4	교각 #5	교각 #6	교각 #7
흐름의 유입각, °	18	16	16	14.5	15.5	10	16
교각폭, m	5	5	5	5	5	5	5
교각길이, m	25	25	25	25	25	25	25
유 속, m/s	0.54	0.48	1.38	0.54	0.46	1.23	1.07
수 심, m	11.02	16.81	17.16	17.98	20.04	20.33	20.1
Foude 수	0.05	0.04	0.11	0.04	0.03	0.09	0.08
세굴심, m	5.06	4.87	7.71	5.01	4.85	6.41	7.06

표 4. 교각국부세굴 추정(교각 #8 ~ 교각 #14)

변 수	교각 #8	교각 #9	교각 #10	교각 #11	교각 #12	교각 #13	교각 #14
흐름의 유입각, °	12	13.5	16	20	26	24	37
교각폭, m	5	5	5	5	5	5	5
교각길이, m	25	25	25	25	25	25	25
유 속, m/s	1.49	0.93	1.46	1.56	0.97	1.53	0.9
수 심, m	19.74	19.13	19.87	21.07	20.78	19.54	18.67
Foude 수	0.11	0.07	0.1	0.11	0.07	0.11	0.07
세굴심, m	7.33	6.20	8.05	9.09	8.34	9.68	9.17

4. 결론

지금까지 살펴본 2차원 모델을 이용한 수리특성치 계산 및 세굴심도 계산을 정리해보면 다음과 같다.

- 1) 2차원 수리모델은 만곡부, 단면축소부, 교량단면부 등 현저한 지형변화가 발생하는 곳에서의 유속 및 수위분포를 잘 모의할 수 있음이 나타났고 그 결과는 실제 자연현상과도 잘 일치함을 파악할 수 있었다.
- 2) 2차원 모델을 이용한 수리특성치 계산 결과 유속 및 수위의 2차원적인 분포를 파악할 수 있어 세굴계산시 입력자료가 되는 단면내 구간별 유량 산정에 보다 정확도를 기할 수 있었으며 이

부분에서 1차원 모형과 상당한 차이를 나타낼 것으로 보이며 그로 인한 세굴심도 예측치에도 영향을 미칠것으로 보인다.

- 3) 2차원 수리학적 모의 결과 각 교각에서의 흐름유입각을 알 수 있어 보다 정확한 세굴심 예측이 되리라고 본다. 교각국부세굴의 경우 세굴심은 교각 직상류부의 수심과 유속의 함수로 나타나는데 이러한 두가지 요소의 영향은 표 4에서 잘 관찰될 수 있다. 즉 한 교각에서의 수심이 다른 교각에서의 수심보다 크더라도 흐름의 유입각이 작을 경우에는 발생하는 세굴심이 작을 수 있다는 것이다.
- 4) 본 연구에서 세굴심도 예측을 위해 사용된 공식들은 대부분 실험실에서의 모형실험을 통해 얻어진 실험식들이다. 또한 세굴심도 예측을 위한 공식 개발에 관심을 가지게 된 것도 얼마되지 않았기 때문에 현장실측자료와의 겹정도 상당히 미비된 상태이다. 따라서 지금까지 개발된 세굴식들에 대한 신뢰도는 상당 부분 의문을 제기하지 않을 수 없으나 계산된 값들을 개략치로 삼아 정성적인 판단을 내릴 때에 참고자료로 이용할 수 있으리라고 본다.
- 5) 앞서 언급한 바와 같이 세굴심도 예측 관련기술들은 아직까지는 초보적인 상태라고 볼 수 있다. 하지만 지속적인 세굴심도 계산식의 개발과 이를 현장실측치와 비교하고 그 결과를 보완해 나간다면 앞으로 좀더 정확한 세굴심도 예측이 가능하리라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. 윤흥남, 수리학, 청문각, 1994
2. Hydraulics Laboratory, 1990. Generalized Computer Program System For Open-Channel Flow and Sedimentation, "TABS System, Volumes 1-2", Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi
3. Richardson, E.V., 1991. Evaluating Scour at Bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18, Office of Research and Development, Federal Highway Administration, McLean, Virginia
4. Ven Te Chow, 1959. Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York, NY
5. M. Hanif Chaudhry, 1993. Open-Channel Flow, Prentice-Hall, New Jersey, NJ
6. D. B. Sinons, 1992. Sediment Transport Technology, Water Resources Publications, Littleton, Colorado
7. Engineering Computer Graphics Laboratory, 1994. FASTTABS, Hydrodynamic Modeling, Reference Mannual, Brigham Young University, Provo, Utah
8. Proceedings of the 1993 Conference, 1993. Hydraulic Engineering '93, Vol. 2, ASCE, New York, NY