

교각의 형상에 따른 하부구조물에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Substructures through the Shapes of Piers

이 영 재* 이 윤 영**
Lee Young-Jae Lee Yoon-Young

Abstract

This study is a simulative paper on scour around piers. As materials on the river bed have been changing through erosion, transportation and accumulation, so does the waterway's section. Analyzing them through the BOSS SMS, this study deals with the local-scour characters with the change of shapes in row piers which have been built in the identical direction of water flow.

요 지

본 연구는 교각의 형상에 따라 교각하부구조물에 미치는 영향에 관한 연구이다. 유수의 흐름에 의해 교각 주위에서의 하상재료가 침식, 운반, 퇴적작용을 하여 이에 따라 수로의 하상단면은 변화를 하게 된다. 본 연구에서는 흐름과 동일한 방향으로 설치된 일련연속교각에서 교각의 형상변화에 따른 국부세굴 특성을 BOSS SMS로 통하여 분석하였다.

Keywords : Local-Scour Character, Shapes of Piers

핵심 용어 : 국부세굴 특성, 교각의 형상

* 정회원, 국립 상주대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 정회원, 국립 상주대학교 토목공학과 겸임교수, 공학박사

E-mail: yjlee@sangju.ac.kr 011-535-3161

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량은 중요한 사회 기반시설로 교량의 붕괴는 인명과 재산피해, 교통난과 더불어 사회·경제적인 측면에 많은 영향을 미친다. 국·내외 여러 연구 결과 하천에 설치되어지는 교각의 안전에 큰 영향을 미치는 세굴의 유형은 크게 둘로 구분된다.⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 첫째는 하천내의 유속과 유량 변화에 기인하여 하상재료가 이동 하게되는 자연발생적 하상의 상승이나 하상의 하강작용이 있으며, 둘째는 수중에 축조된 수중구조물이나 축조된 제방 등에 의하여 생기는 수축세굴과 국부세굴이 있다. 또한, 안정된 하천이나 해상에서 교량의 안전에 크게 영향을 미치는 것은 수축세굴과 국부세굴이다. 국부세굴은 교각이 설치됨에 따라 수류 흐름에 영향을 미치고 이로 인하여 교각 주위에 발생하는 와류(Vortex)가 발생하고 하상재료의 이동에 따른 단면 변화를 가져오는 현상을 말한다.

현재까지는 유수의 흐름방향에 직각으로 설치되어 있는 교량의 교각을 대상으로 국부세굴에 대한 많은 연구가 수행 되어 왔으나, 최근 흐름방향과 동일한 방향의 종방향 교량이 많이 건설되고 있으나 교각의 형상에 따른 세굴의 연구는 미비한 실정이다.

자연하천에서 국부세굴은 교각 주위의 국부세굴의 크기는 교각의 형상, 접근유속, 접근수심, 하상재료 등에 영향을 받으며, 이러한 교각주위의 국부세굴은 교량의 안전을 위협하며 현재 건설되어 있는 모든 교량에 대해 예상할 수 있는 홍수량에 견딜 수 있는 조치를 취하는 것은 많은 어려움이 따르고, 세굴에 대한 완벽한 대응책을 마련하여 교량을 건설하는 것 또한 현실적으로 불가능한 일이어서 일부 파괴에 대한 위험을 감수하고 있다.⁽¹⁾⁽⁶⁾

이와 같이 교량에 대한 세굴현상의 문제점을 계산하기 위하여 본 연구의 목적은 교각의 형상에 따른 하상세굴의 특성인 교각 주위의 유속과 수위상승의 요인들을 유한요소법으로 적용하여 분석함으로써 교각 기초설계나 세굴보호공 설계의 기초자료로 활용토록 하고자 한다.

2. 교량의 세굴현상

2.1 교량세굴현황

우리나라는 산악지역이 국토의 대부분을 차지하고 있어 전체유역을 놓고 볼 때 대하천이 차지하는 부분보다는 중·소하천이 차지하는 부분이 상대적으로 크고, 교량의 길이가 짧은 소교량이 수적으로 많은 부분을 차지하고 있다. 또한, 소교량을 가지고 있는 중·소하천은 대부분 산악지대에 위치하여 하상경사가 크기 때문에 유속이 대체적으로 빠르고 평상시 흐름방향과 홍수 시 흐름방향이 현격히 차이나는 경우가 많다.

이러한 지형적 특성과 더불어 우리나라 연강우량의 2/3 이상이 여름철에 집중되고 있을 뿐 아니라, 태풍 또는 국지적 호우도 짧은 기간에 강우가 집중적으로 내려 피해를 가중시키고 있다. 그 중에서도 특히 중·소 하천의 유량은 시간적으로 매우 빠르게 변화하며 유속 또한 급속히 빨라져 하상의 변형이 순식간에 일어나고 있다. 이와 같은 시간적, 공간적인 호우특성과 지형특성으로 인하여 중·소 하천에 위치한 교량은 특히 세굴에 매우 취약함을 보여주고 있다. 1995년의 충남서해안 지역, 1996년에 연천지역에서 발생한 집중호우 및 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미 등 전국을 강타한 1000년 빈도의 기상이변 현상은 산사태나 세굴로 인한 위험성을 증대시키고 있으며 이에 대한 대책수립의 시급함을 보이고 있다.

2.2 교량세굴 형태의 분류

경제적이고 안전하게 교량의 교각을 설계하기 위하여 최대세굴심도를 예측하는 것이 필요하다. 교량의 교각과 흐름, 퇴적층의 상호관계는 매우 복잡하기에 현재까지는 해석이나 수치해를 구할 수 없고 모형실험 또는 실험식을 이용하여 예측하고 있다.

일반적으로 세굴현상은 하상의 변화, 통수단면의 확대 또는 축소, 하천에서의 구조물의 설치 그리고 상류로부터의 유사유입의 정도에 따라 하상 상승 및 하강, 수축세굴, 국부세굴 세 가지로 구분할 수 있다.

상류부분에 있는 하상재료가 운반되어 퇴적된 경우에는 하상상승이 발생하고 반대로 하상재료의 침식으로 인하여 하상이 낮아지는 현상이 하상하강이다. 일반적으로 댐의 상류에서는 하상상승이 발생하고 하류에서는 하상하강이 일어난다. 자연하천 및 인공호수에서 통수

단면적이 감소하게 되면 유속이 증가하게 되고 이로 인한 하상의 세굴이 발생하는데, 이것을 수축세굴이라고 한다. 국부세굴은 하천에 교량과 같은 구조물 등을 설치함으로써 물의 흐름을 방해하게 되고 이들 구조물 주위에서의 유속의 증가로 인한 부분적인 세굴현상이다. 대부분 국부세굴의 세굴심도가 하상상승 및 하강 또는 수축세굴의 세굴심도에 비하여 크다.

2.3 교각 주위의 세굴에 미치는 인자

하천의 흐름이 등류인 경우 여러 개의 변수가 교각의 세굴심도에 영향을 주며, 세굴심도 d_s 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$d_s = f(\rho, v, g, d, \rho_s, y_0, U, b)$$

여기서,

ρ : 물의 밀도, v : 물의 동점성 계수

g : 중력가속도, d : 하상재료의 크기

ρ_s : 유사의 수중밀도, y_0 : 교각전면수심

U : 평균유속, b : 교각의 폭

3. 수치해석 및 결과분석

본 연구에서는 다양한 기하형상의 교량교각 주위에서, 교각주위에 발생하는 국부세굴의 주요 원인인 유속의 변화를 수치적으로 모의하기 위하여 격자 생성이 쉬우며, 경계처리가 용이한 유한요소법을 사용하는 수심 평균된 2차원 모형인 BOSS SMS(Surfacewater Modeling System)가 사용되었다. 이를 위하여 상류 경계와 하류 경계에서 정상상태의 경계조건을 사용하였고, 계산 영역에서 각 변수의 정의를 Fig. 1과 Table

1에 나타내었다.

일반적으로 교각주위 흐름의 접근각은 국부 세굴심에 바로 영향을 준다. 흐름방향으로 놓여진 경우가 흐름에 거슬러 놓여진 경우와 비교해서 세굴심이 적고, 교각 투영면의 폭이 커지면 세굴심은 증가될 것이다. 교각의 형상에 따른 유속의 변화를 비교 분석하기 위하여 모든 경우의 교각이 흐름방향으로 설치되고 각각의 폭은 같게 가정하였으며, 교각 형상에 따라 교각 전면부 및 후면부의 수위변화를 비교 분석하였다.

Table 1에서 수로 및 흐름의 재료특성으로 n 과 E 가 사용되었다. SMS 모형은 개개 요소마다 4개의 E (turbulence exchange coefficient)와 1개의 Manning 조도계수 n 을 사용하는데 여기서 E 는 와점성계수 (eddy viscosity coefficient)로 수치해석상 안정성 문제를 야기하지 않는 범위에서 가능한 한 작게 유지되어야 하며 큰 E 값은 안정된 해를 얻을 수 있으나 흐름분포, 흐름의 이탈, 그리고 와류 등의 현상을 적절히 모의할 수 없다. 반대로 너무 작은 E 값은 해를 불안정하게 하여 연속성에 문제를 일으키게 된다. 와점성은 단지 물리현상에만 근거하는 것이 아니며, 수치해의 안정성을 위해 필수적으로 필요한 수치점성을 포함하기 때문에 요소의 간격, 예상 유속 등이 모두 초기 E 값 선정에 반영되어야 한다.

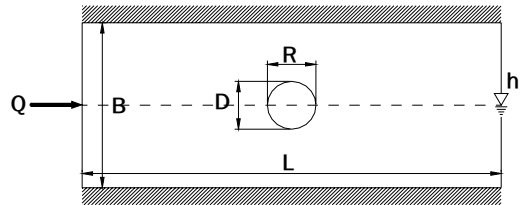


Fig. 1 수치 모의를 위한 계산영역

Table 1 부등류 흐름 변수와 하도 및 교각의 제원

교각의 형상	D	R	Q	B	L	S0	n	E	h
원형	1m	1m	15m ³ /sec	5m	10m	0.000	0.025	200	1.6m
사각형	1m	1m	15m ³ /sec	5m	10m	0.000	0.025	200	1.6m
마름모형	1m	1m	15m ³ /sec	5m	10m	0.000	0.025	200	1.6m
타원형	1m	2m	15m ³ /sec	5m	10m	0.000	0.025	200	1.6m

와점성계수의 결정방법에는 Peclet수를 정해 줌으로써 유속과 격점의 간격에 따라 E값을 결정해주는 방법과 사용자가 직접 입력하는 방법이 있으나, 본 모형에서는 계산영역에서 요소의 크기 및 유속의 변화가 심하므로 Peclet수를 이용할 경우 수치점성이 커지게 되고 교각주위에서의 흐름변화에 대해 정확하게 표현할 수 없을 것으로 판단되어 직접 입력하는 방법을 사용하였으며, USACE-WES에서 제공된 Table 2의 값 중 구조물 주위의 경우를 참고하였다.

사각형 교각이 설치되었을 때의 계산 격자망과 수로에서 흐름 변화를 Fig. 2~3에 나타내었다. Fig. 3에서 나타나듯이, 수로내의 유속은 교각전면부와 후면부에서 정지된 상태로 계산되었으며, 최대 유속은 교각의

Table 2 흐름 조건에 따른 와점성계수

문제 유형	Pa · sec
섬 주변에서의 균일한 수평흐름	500-5000
합류부에서의 균일한 수평흐름	1100-5000
저유속 하천에서 열교환에 대한 정상상태 흐름	1000-50000
하구언에서의 조석 흐름	2500-10000
얕은 웅덩이를 지나는 저속 흐름	10-50
구조물 주위의 흐름이탈	50-240

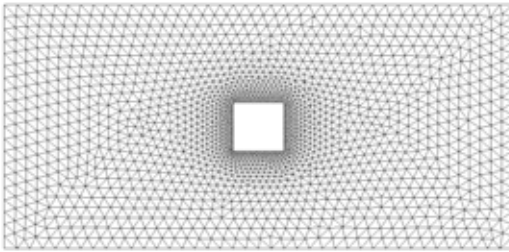


Fig. 2 사각 형태의 교각의 격자망

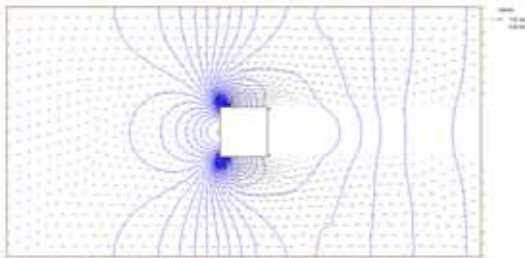


Fig. 3 사각형태의 유속분포와 등수위선

상류측 모서리에서 7.97m/s로 계산되었다. 교각의 설치로 인해 교각 전면부의 수위가 1.84m까지 상승하여 교각설치 전에 비하여 약 20cm정도 상승하며, 측면부와 후면부에서는 수위가 하강한다.

마름모 교각이 설치되었을 때의 계산 격자망과 수로에서 흐름 변화를 Fig. 4~5에 나타내었다. Fig. 5에서 나타나듯이, 수로내의 유속은 교각 후면부에서 정지된 상태로 계산되었으며, 최대 유속은 교각의 상류측 모서리에서 3.02m/s로 계산되었다. 교각의 설치로 인해 교각 전면부의 수위가 1.91m까지 상승하여 교각설치 전에 비하여 약 30cm정도 상승하며, 후면부의 수위 하강 영향이 계산영역의 하류단 경계까지 미치게 됨을 알 수 있다. 원형 교각이 설치되었을 때의 계산 격자망과 수로에서 흐름 변화를 Fig. 6~7에 나타내었다. Fig. 7에서 나타나듯이, 수로내의 유속은 교각 전면부와 후면부에서 정지된 상태로 계산되었으며, 최대 유속은 교각의 좌우측면에서 10.75m/s로 계산되었다. 교각의 설치로 인해 교각 전면부의 수위가 1.80m까지 상승하여 교각설치 전에 비하여 약 20cm정도 상승하며, 후면부의 수위하강 영향이 다른 형상의 교각에 비해 가장 적음을 알 수 있다.

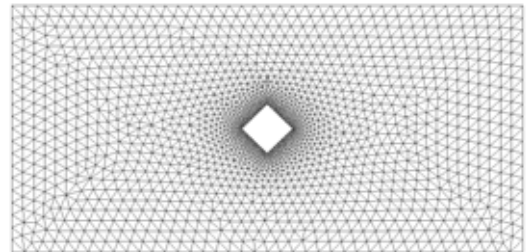


Fig. 4 마름모 형태의 교각의 격자망

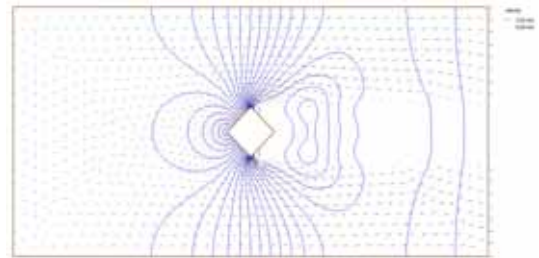


Fig. 5 마름모 형태의 유속분포와 등수위선

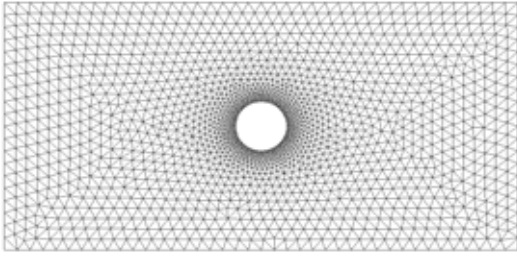


Fig. 6 원형 형태의 격자망

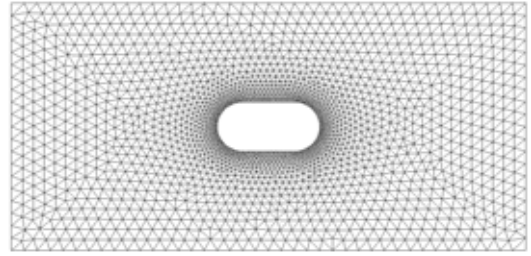


Fig. 8 타원 형태의 격자망

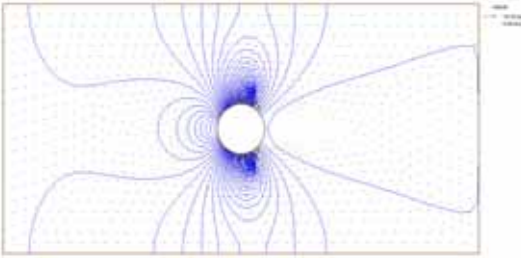


Fig. 7 원형 형태의 유속분포와 등수위선

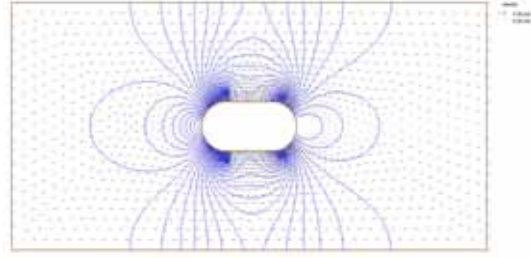
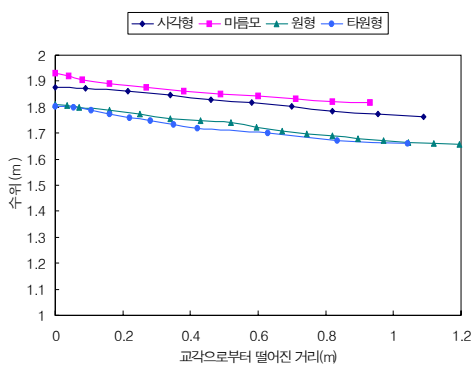


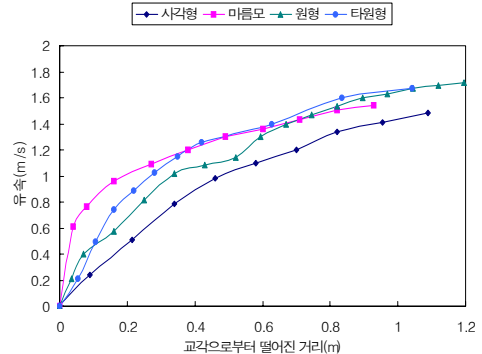
Fig. 9 타원 형태의 유속분포와 등수위선

타원형 교각이 설치되었을 때의 계산 격자망과 수로에서 흐름 변화를 Fig. 9~10에 나타내었다. Fig. 10에서 나타나듯이, 수로내의 유속은 교각 전면부와 후면부에서 정지된 상태로 계산되었으며, 최대 유속은 교각의 좌우 상류측 측면에서 5.08m/s로 계산되었다. 교각의 설치로 인해 교각 전면부의 수위가 1.70m까지 상승하여 교각설치 전에 비하여 약 20cm정도 상승한다. 본

연구에서 수행된 다양한 기하형상의 교각 주위 흐름의 수치모의 결과를 비교 분석하기 위하여 교각의 전면부와 측면부, 그리고 후면부에서의 수위 및 유속의 변화를 Fig. 10~12에 나타내었다. 전면부는 교각의 중심에서 교각으로부터 상류 방향으로 떨어진 거리로 도시하였으며, 측면부는 최대유속이 발생한 지점에서 측면 거리로 나타내었고, 후면부는 교각의 중심에서 하류 방향

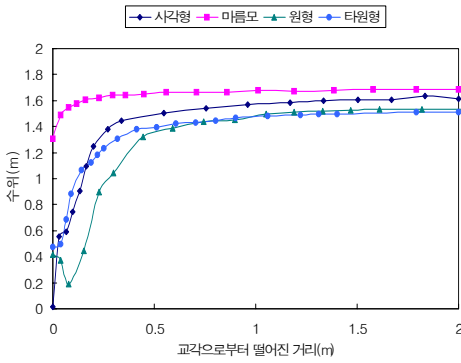


(a) 수위 변화

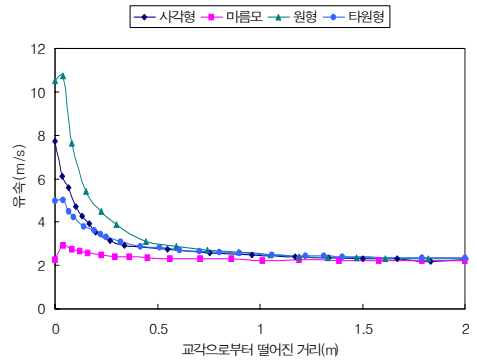


(b) 유속 변화

Fig. 10 교각형상에 따른 전면부 수위 변화 및 유속 변화

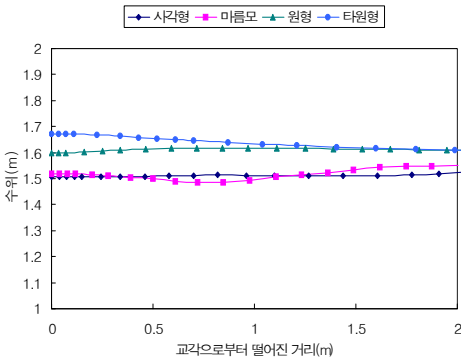


(a) 수위 변화

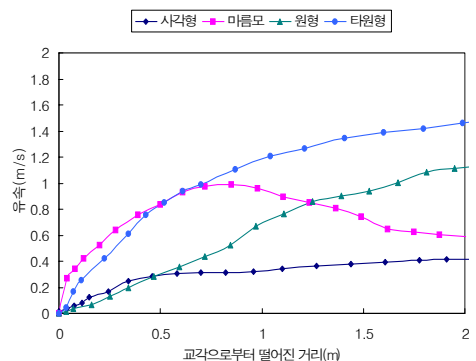


(b) 유속 변화

Fig. 11 교각형상에 따른 측면부 수위 변화 및 유속 변화



(a) 수위 변화



(b) 유속 변화

Fig. 12 교각형상에 따른 후면부 수위 변화 및 유속 변화

으로 떨어진 거리로 나타내었다.

모의 결과, 전면부 수위는 모든 경우에서 교각이 없을 때의 수위 1.6m보다 상승되었으며, 특히 마름모 교각일 경우가 가장 높게 상승되었다. 또한 사각형과 마름모 형상의 교각에서는 수위 상승이 시작되는 지점이 원형 또는 타원형 교각의 경우와 비교하여 일찍 나타났으며, 수위 상승률은 교각의 형상과 무관하게 거의 일정한 것으로 분석되었다.

측면부의 경우, 교각이 없을 때의 수로 평균 유속 1.87m/s와 비교하여 모든 경우에 유속이 증가하는 것으로 모의되었으며, 이는 교각으로 인한 흐름 단면적의 축소에 기인하는 것으로 판단된다. 마름모 교각일 경우,

교각 주위의 수위 하강이 가장 적었으며 유속의 증가 또한 다른 형상의 교각에 비하여 가장 작은 것으로 모의되었고, 뿐만 아니라 원형의 교각이 사용될 경우, 측면부 유속의 증가가 현저하게 나타남을 볼 수 있다.

후면부의 경우, 타원형 교각이 사용된 경우에 교각을 설치하지 않은 경우보다 수위가 다소 상승되었다가 교각과 멀어지면서 1.6m의 수위로 차츰 하강하였고, 유속의 경우 마름모 교각에서는 잠시 유속이 상승되었다가 다시 감소하고 있는 것으로 모의되었으며, 원형이나 타원형의 경우 교각 후면의 정체수 영향거리가 매우 짧은 것에 비하여 사각형과 마름모 교각의 경우, 후면에서 정체되는 구간이 길어짐을 알 수 있다.

3. 결 론

교각의 형상에 따른 하상세굴의 특성인 교각 주위의 유속과 수심상승을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전면부 경우는 수위가 마름모 교각일 경우가 가장 높게 상승되었고, 사각형과 마름모 형상의 교각에서는 수위 상승이 시작되는 지점이 원형 또는 타원형 교각의 경우와 비교하여 일찍 나타났으며, 수위 상승률은 교각의 형상과 무관하게 거의 일정한 것으로 분석되었다.
- 2) 측면부의 경우는 마름모 교각일 경우에 교각 주위의 수위 하강이 가장 적었고, 유속의 증가 및 다른 형상의 교각에 비하여 가장 작은 것으로 모의되었다. 뿐만 아니라 원형의 교각이 사용될 경우, 측면부 유속의 증가가 현저하게 나타남을 볼 수 있다.
- 3) 후면부의 경우는 마름모 교각에서는 잠시 유속이 상승되었다가 다시 감소하고 있는 것으로 모의되었고, 원형이나 타원형의 경우 교각 후면의 정체수 영향거리가 매우 짧은 것에 비하여 사각형과 마름모 교각은 후면에서 정체되는 구간이 길어짐을 알 수 있다.
- 4) 교량의 하부구조를 설계 시 반드시 이러한 모의 결과 분석 또는 수리 모형실험을 통한 교각의 형상에 따른 하부구조물에 미치는 영향을 분석해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 심우배, 최인호, 강예석, 송재우(1999) “원환을 이용한 원형교각 주위의 국부세굴 방지 효과”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 121~124.
2. 서울특별시, “한강교량기초 수리모형실험 보고서”, 1998.
3. 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, “보청천내 교각설치에 따른 국부세굴심도의 산정”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제3호, pp.81~88, 1993.524.
4. 한국도로공사, “교량세굴 방지대책 연구(II)”, 도로연구소 연구보고서, 1996.
5. 김진홍, “원형교각 주위에서의 최대 국부세굴심도에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울대학교, 1985.
6. 노섭, 송재우, “유로만곡부에서 교각에 의한 국부적인 하상세굴”, 대한토목학회 논문집, 제 16권, 제 II-2호, pp 149~157, 1996.
7. Ettema, R. and Melville B. W. “Design for Local Scour at Bridge Piers : A Commentary”, Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, 1989, pp. 1~12
8. Ettema, R. “Scour at bridge sites”, Rep., NO. 117, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand, 1980.
9. Jain, S. C. and Fischer, E. E. “Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities”, Journal of Hydraulics Divisions, ASCE, Vol. 106, No. HY 11, November, 1980, pp. 1927~1842.

(접수일자 : 2005년 11월 22일)