

# 인천대교의 세굴심 산정을 위한 다학제적 연구

## An Interdisciplinary Study on the Scour Depth Estimation of Incheon Bridge

여운광\*, 이훈\*\*, 김정환\*\*\*, 곽문수\*\*\*\*

Woon Kwang Yeo, Hoon Lee, Jeong Hwan Kim, Moon Su Kwak

### 요 지

최근 들어 국내에서는 도서지방을 잇는 연육교와 해상구간을 통과하는 대형교량의 건설이 활발히 진행되면서 해상조건에서 발생하는 교량세굴에 대처하기 위한 연구의 중요성이 대두되고 있다. 그러나 아직까지 해상조건에서의 세굴현상을 파악하기 위한 적절한 세굴평가 기준이 제시되어 있지 않고 대부분 자연 하천교량 기준에 의해 해상교량의 세굴평가가 이루어지고 있는 실정이다. 교량에서 발생하는 세굴 현상은 교량 기초의 안정성에 치명적인 영향을 줄 수 있고 나아가서는 교량의 붕괴 원인이 될 수 있다. 또한 교량기초 지반의 지지력 부족이나 적정피복두께 결여 등의 원인으로 구조적인 문제점을 초래할 수 있다. 해상교량의 경우에는 조석에 의한 왕복류, 파·흐름의 상호작용, 점착성 지반 등 세굴에 영향을 미칠 수 있는 요인들이 복합적으로 작용하므로 교량 건설 전부터 해상조건을 반영한 다각적인 세굴검토가 요구된다.

본 연구는 강한 조석류가 작용하고 넓은 조간대를 형성하고 있는 인천대교의 세굴심을 합리적으로 산정하기 위하여 다학제적인 연구를 시도한 것이다. 본 연구에서는 해상조건에서의 침식유발특성을 파악하기 위한 연구로서 수치모형 및 수리모형 실험을 수행하고, 지반종류에 따른 침식저항능력을 파악하기 위한 세굴률 실험을 수행하였다. 더불어 인천대교 건설현장에 타설되어 있는 대구경 시험말뚝에 대한 실시간 세굴모니터링을 실시하여 얻은 현장관측 자료를 검증자료로 사용함으로써 종합적인 세굴검토를 통하여 다학제적이고 합리적인 해상교량의 세굴심을 평가하고자 한다.

**핵심용어 : 해상교량세굴, 인천대교, 세굴심 산정, 다학제적 연구**

### 1. 서론

인천항 전면에 위치한 인천대교 건설 지역은 조수간만의 차가 7.9(대조차)~3.3m(소조차)로 관측되는 대조차지역으로서 큰 조차로 인한 광범위한 조간대가 발달되어 있고 복잡한 유동형태를 띄고 있다. 더구나 인천대교의 교량건설과 더불어 항로확보 및 교량 안전을 위한 충돌방지시설이 추가적으로 시공될 예정이어서 국부세굴에 의한 세굴피해가 더욱 우려되는 실정이다. 또한 이러한 국부세굴에 영향을 미칠 수 있는 최강유속과 더불어 조석에 의한 왕복운동으로 하루 4회씩 연속적으로 발생하는 해상세굴에 대한 세밀한 주의 및 공학적인 판단이 요구된다. 인천항 전면에 위치한 인천대교 교각주위의 해저지형에 대한 지질을 조사한 결과 해성퇴적층, 잔류토, 풍화암, 연암 및 경암으로 구성되어 있다. 지질구성 중 상부에 위치한 해성퇴적층의 경우 대부분 세립토로 구성되어 있어 세굴 산정에 있어 일반 자연 하천과는 상이한 결과가 도출될 우려가 있다. 따라서 기존의 하천에서 실험 연구된 결과를 그대로 가져다 적용한다는 것은 매우 무리가 있다고 보이며 특히 조석영향과 파랑 그리고 흐름이 공존하는 해상교량에 대한 연구는 전 세계적으로도 미미한 실정에 있어

\* 정회원·명지대학교 토목환경공학과 교수·공학박사E-mail : yeo@mju.ac.kr

\*\* 정회원·명지대학교 토목환경공학과 석사과정E-mail : h1lee@mju.ac.kr

\*\*\* 정회원·삼성물산 건설부문 차장·공학박사E-mail : jnghwan@samsung.com

\*\*\*\* 정회원·명지전문대학 토목과 부교수·공학박사E-mail : moonsu@mjc.ac.kr

더욱 신중한 세굴산정 및 그 대책마련이 필요하다.

이에 본 연구에서는 강한 조석류가 작용하고 넓은 조간대를 형성하고 있는 인천대교의 세굴심을 합리적으로 산정하기 위하여 다학제적인 연구를 시도하였다. 해상조건의 침식유발특성을 파악하기 위한 연구로서 수치모형 및 수리모형 실험을 수행하고, 지반종류에 따른 침식저항능력을 파악하기 위한 세굴률 실험을 수행하였다. 더불어 인천대교 건설현장에 타설되어 있는 대구경 시험말뚝에 대한 실시간 세굴모니터링을 실시하여 얻은 현장관측 자료를 검증자료로 사용함으로써 종합적인 세굴검토를 통하여 다학제적이고 합리적인 해상교량의 세굴심을 평가하였다.

## 2. 수치모형실험

수치모형실험으로는 3가지 모형을 사용하여 모의 하였다. 파랑 모형으로 SWAN모형, 해수유동모형으로 EFDC모형을 사용하였고, 지형변동 모의로는 FLOW-3D를 사용하였다. 구조물 주변에서의 수위와 유속을 예측하기 위하여 SWAN 모형과 EFDC 모형을 사용하여 모의하였다. 또한 이 결과 자료는 지형변동 수치모형 실험에 필요할 뿐만 아니라 수리모형실험 및 세굴률 실험에서도 경계조건의 기초자료로도 사용된다. 지형변동 실험은 수심조건과 유속조건 뿐만 아니라 하상특성을 나타낼 수 있는 세굴률실험 결과를 사용함으로써 해상교량의 지형변동실험에 신뢰를 더해준다. 현재 지형변동 실험은 조사정점의 현장계측 자료와 세굴률실험 자료를 바탕으로 모형 검증단계에 있다.

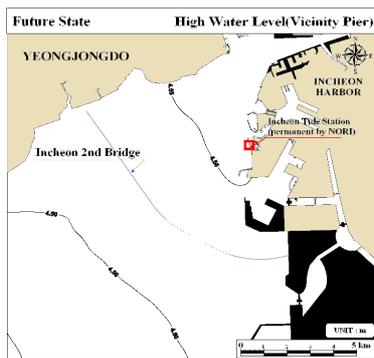


그림 1. 대조기 고조위 분포도

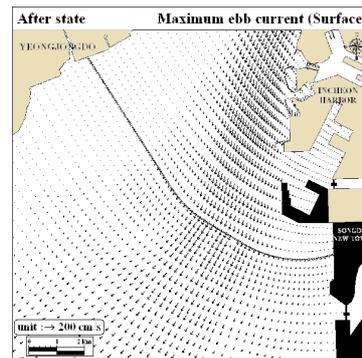


그림 2. 대조기 낙조류 분포도

## 3. 세굴률 실험

세굴률 실험의 목적은 대상지반 고유의 정량적인 침식특성을 결정하는 것이다. 이 침식특성은 한계전단응력과 그 이후의 물에 의해 야기되는 전단응력과 지반의 세굴물과의 관계로 구성된다. 한계전단응력(critical shear stress)  $\tau_c$ 는 세굴이 발생하기 시작할 때 지반에 가해지는 전단응력을 의미하며, 본 실험에서는 실험의 정도를 고려하여 세굴률이 1mm/hr가 되기 바로 직전에 흐르는 물에 의해 지반에 작용하는 전단응력을 한계전단응력으로 정의하였다. 실험결과는 전단응력  $\tau$ 에 대한 세굴률 변화곡선으로 구성되며, 관속을 흐르는 물로 인해 흙시료 상부에 야기되는 전단응력은 Moody 도표를 이용해서 구하며 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $f$ 는 Moody 도표로부터 얻어지는 마찰계수,  $\rho$ 는 물의 밀도 (1000 kg/m<sup>3</sup>),  $V$ 는 관수로내의 평균유속 (m/s)이다. 마찰계수  $f$ 는 관의 레이놀즈수  $Re(= VD/\nu)$ 와 관의 상대조도  $\epsilon/D$ 의 함수이며, 여기서  $D$ 는 관의 직경(m),  $\nu$ 는 물의 동점성계수(10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, 20°C),  $\epsilon$ 은 조도(粗度)이다. 일반적으로 구형단면인 경우 직경  $D$ 는 동수반경의 4배이다. 관수로의 단면은 구형이므로 구형에 대한 동수반경을 구한 후 4배를 하여 그 직경으로 한다.

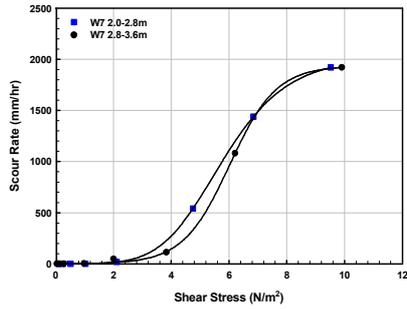


그림 3. W7 교각의 실험결과

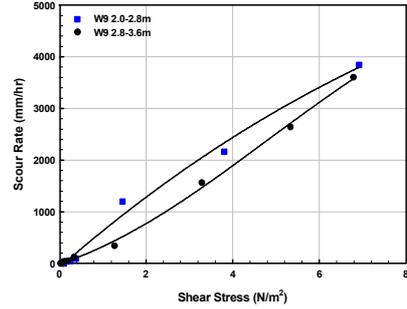


그림 4. W9 교각의 실험결과

## 2. 수리모형실험

### 2.1 경계조건

경계조건은 현장관측 자료를 바탕으로 수치모의를 수행하여 인천대교 건설구간에서의 수심 및 유속을 산정하는 절차를 수행 하였다. 이러한 결과를 현장의 원형경계조건으로 하였고 이를 Froude 상사법칙을 적용하여 수리모형 실험에 적용할 수심 및 유속 조건을 낙조와 창조로 구분하여 산정 하였다. 대상교각들이 유속에 비하여 수심의 변화가 큰 이유로 축척을 달리 적용하여 수리모형실험 수행시 최소한의 수심을 확보할 수 있도록 하였다. 아래 표는 수리모형실험의 모형 경계조건을 나타낸 것이다.

표 1. 실험별 경계조건

실험 케이스	원형(수심 평균)		축척	모형		접근각(°)
	수심(m)	유속(m/s)		수심(m)	유속(m/s)	
W1 낙조	17.7	1.488	1:80	0.221	0.166	-4.448°
W1 창조	22.3	1.197		0.279	0.134	-5.048°
W2 낙조	19.3	1.428	1:60	0.322	0.184	-4.248°
W2 창조	22.8	1.150		0.380	0.148	+ 5.652°
W3 낙조	19.3	1.364	1:60	0.322	0.176	-1.547°
W3 창조	22.8	1.114		0.380	0.144	+ 4.252°
W4 낙조	17.4	1.288	1:60	0.290	0.166	-0.248°
W4 창조	20.5	1.044		0.342	0.135	+ 1.452°
W11 낙조	5.7	0.904	1:36	0.158	0.151	+ 13.819°
W11 창조	6.0	0.904		0.167	0.151	+ 7.519°
W20 낙조	6.4	0.866	1:40	0.160	0.137	+ 20.752°
W20 창조	5.6	0.818		0.140	0.129	+ 21.152°

### 2.2 고정상 실험

고정상실험의 목적은 유속을 측정하여 교각 주변의 유속변화를 측정하고 와류역의 범위를 파악하며 이 동상실험 수행시 교각 주변에서 발생할 수 있는 세굴범위를 예측하는데 있다. 고정상 실험은 표 1에 제시되어 있는 경계조건에 따라 수행하였고 측정된 유속자료를 무차원화 하였다. 전체적으로 와류의 폭은 교각의 전체폭을 D라고 하면 약 1.5D~2.0D의 범위를 형성하여 나타나고 있다.

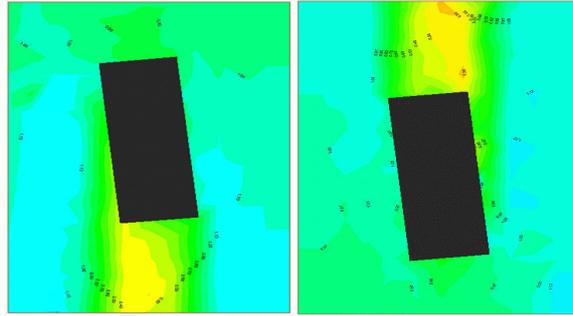


그림 5. W1 낙조(좌)와 W1 창조(우)의 실험결과

### 2.3 이동상 실험

이동상 실험의 목적은 교각이 설치되었을 경우 발생할 수 있는 세굴심을 예측하는데 있다. 실험에 사용된 모형사는 규사이고 모의시간은 교각 주변에서 더 이상의 세굴이 발생하지 않을 때까지 수행하였다. W1 교각에 대해 살펴보면 계측결과 W1 창조(우)의 경우보다 W1 낙조(좌)의 경우에서 더 큰 세굴심이 발생하였다. 최대세굴심은 구조물의 첫 번째 교각열에서 발생하였고 값은 5.1cm(원형 약 4m)이고 세굴폭은 교각지름 37.5mm의 약 3배 정도인 100mm 였고 W1 창조(우)의 경우 세굴심은 교각영역 전반에 걸쳐 1.5cm(원형 약 1.2m)의 값으로 골고루 발생 하였고 세굴폭은 약 2배 정도인 80mm로 발생 하였다.

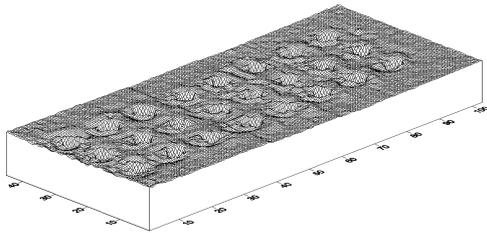


그림 6. W1낙조 실험결과(흐름방향↑)

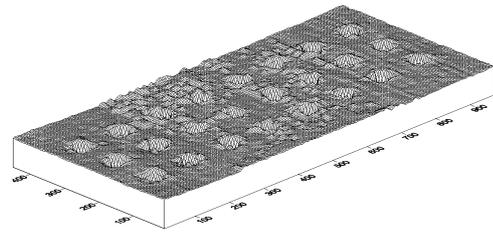


그림 7. W1창조 실험결과(흐름방향↑)

### 2.4 충돌방지공 실험

인천대교 건설구간중 사장교 부근에는 선박운행으로부터 피해를 방지하고자 충돌방지공이 건설된다. 이러한 교각주변의 구조물은 흐름의 특성을 변화시키고 바닥에서 발생하는 세굴양상에도 영향을 미친다. 따라서 충돌방지공을 고려한 세굴심 변화도 실험을 통하여 조사하였다. 실험결과 충돌방지공이 없는 경우에 비하여 최대세굴심이 발생하는 위치가 바뀌었고 최대세굴심 또한 더 크게 발생 하였다. W1 낙조의 경우 최대세굴심은 첫 번째 충돌방지공 주변에서 4.9cm(원형 약 4m)의 값으로 발생하였고 첫 번째 교각열에서 발생하는 세굴심은 충돌방지공이 없는 경우에 비하여 감소하였지만 전체적으로 충돌방지공으로 인하여 더욱 복잡해진 흐름으로 인하여 세굴발달 형상은 매우 복잡하게 나타났다.

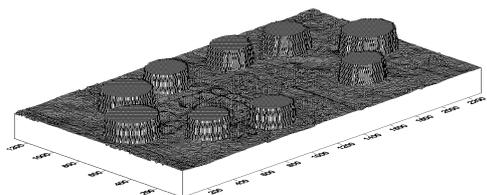


그림 8. W1낙조(충돌방지공) 실험결과(흐름방향↑)

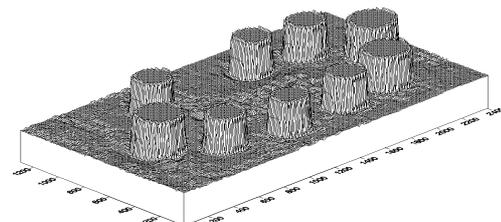


그림 9. W1창조(충돌방지공) 실험결과(흐름방향↑)

## 5. 현장측정

실제 인천대교 건설현장에서 발생하는 지형변동특성 및 흐름특성을 관측하고자 현장측정을 실시하고 있다. 현장관측 시스템의 설치위치는 사장교 교각(E1)이며 센서부는 구조물의 영향으로 인한 세굴현상을 살펴 보기 위하여 Steel Casing 으로부터 0.9 m 이격된 거리에 수중용접하여 고정하였다. 따라서 교량세굴센서 (UDM200)는 Casing로부터 0.9 m 떨어진 곳의 지반고를 측정하고 유속계는 센서설치지점으로부터 1~2 m 떨어진 구간의 교란되지 않은 조류속을 측정한다. 센서의 설치높이는 -18.5 m(E.L.) 이며 센서설치시 최초측정 된 지반의 하상고는 -20.6 m (E.L.)로 측정되었다.

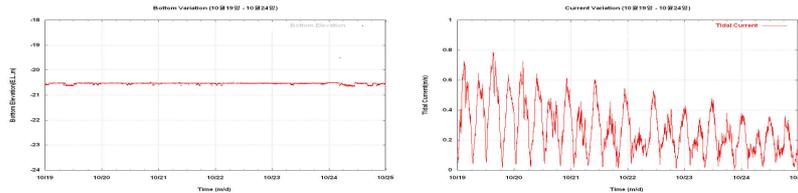


그림 10. E1 교각의 지반고(좌) 및 조류속(우) 측정 결과

## 6. 결론

인천대교 교량의 신뢰성 있는 세굴심을 산정하기 위하여 다학제적인 연구를 하였다. W1 교각의 수리모형 실험 결과 최대 세굴심은 약 4m 발생하는 것으로 나타났고 최대세굴심 발생 위치는 충돌방지공이 없는 경우 첫 번째 교각열에서 발생하였고 충돌방지공이 있는 경우에는 첫 번째 충돌방지공 주변에서 발생 하였다. 지반의 침식저항특성 연구인 세굴물실험 결과 자료는 수치모형실험의 기초자료로 사용되었고 현재 수치모의 실험 중 지형변동 실험이 모의중에 있다. 현장측정의 경우 특징적인 흐름특성이나 지형변동 특성이 나타나지는 않았다. 현재 모의중인 지형변동 실험이 완료되면 학제간의 결과자료들을 바탕으로 종합적인 비료·분석을 통하여 해상교량에서 발생하는 세굴심을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감 사 의 글

본 연구를 위하여 지원해주신 (주)삼성물산 건설부문에 깊은 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 여운광, 편종근, 윤병만 (1998) 서해대교 교각주변의 세굴예측 및 방호대책, 한국도로공사
2. Terry Sturm, Fotis Sotiropoulos, Mark Landers, Tony Gotvald, SeoungOh Lee, Liang Ge, Ricardo Navarro, and Cristian Escarriaza (2004) Laboratory and 3D Numerical Modeling with Field Monitoring of Regional Bridge Scour in Georgia, GDOT Research Project No.2002 Final Report
3. T. Paul Teng, P.E. (2003) Bridge Scour in Nonuniform Sediment Mixtures and in Cohesive Materials : Synthesis Report, FHWA-RD-03-083
4. 明石海峡大橋主塔基礎 洗掘防止工に關する水理模型實驗(その2) (1985), 本州四國連絡橋公団 鹿島建設株式會社