

실시간 교량세굴 관측을 통한 세굴현상 분석 및 수치해석을 이용한 최대 세굴심 비교

○*강준구, **정재현, ***여운광

1. 서론

한강은 서해안에 인접하여 감조하천의 성격을 띄며 집중호우시 남한강과 북한강에서의 유량이 팔당댐을 통해 많은 양의 물을 흘려 보내게 되어 세굴의 영향에 노출된 곳이기도 하다. 특히, 교량안전에 결정적 영향을 미치게 되는 세굴의 영향을 고려할 때, 교량을 통한 교통량이 많은 한강의 경우 만조시 홍수위가 겹칠 때 교량 안전에 상당히 큰 문제를 야기시킬 수 있다. 하지만, 한강 내 교량에는 이에 대비하여 설계된 교량도 극히 소수에 불과하며 이를 위한 안전진단 및 대책도 대부분 수치모형과 수리모형에 의존할 뿐이었다. 하지만, 수치모형과 수리 모형의 겨우 시간적, 경제적, 공간적 제한으로 인해 실질적인 세굴현상을 제대로 규명할 수 없다는 단점을 안고 있다.

이에 본 연구에서는 한강상의 교량인 한남대교, 청담대교 부근을 중심으로 실시간 교량세굴 관측을 수행함으로써 한강내 세굴특성 파악을 위한 실제 세굴심자료를 획득하였고, 이들 자료를 각각 평수시, 홍수시, 계절별로 나눠 분석하였다. 그 결과 최대 세굴심과 최대 수위발생 시점간의 불일치성이 있는 것으로 확인되었으며 한강 내의 하상은 세굴에 대해 안정적인 것으로 판단되었다. 그리고, 수치모형 모의 자료를 통한 이론적 최대 세굴심을 산정함으로써 실제 실측된 세굴심 자료와 이론값을 비교·검토 하였다.

2. 실시간 교량세굴 계측

실시간 현장 세굴심 계측을 위해 서울 도심 내의 한강상에 위치한 한남대교와 청담대교 상에 자체 개발된 SM200 초음파 센서를 설치하여 98년 11월~99년 10월경까지 한남대교상의 교각 P10 과 99년 6월~99년 10월까지 청담대교상의 교각 P44, 45, 46에서 각각 계측작업을 수행하였다. 그림 1은 한남대교와 청담대교의 한강상 위치와 종단면도를 나타낸 것이다. 여기서, 한남대교의 경우 유심부의 경우 이미 하상에서의 암반이 드러난 것으로 확인되어 유심부 옆에 위치한 P10상에서 연구가 수행되었으며, 교각 P10은 우물통 기초로서 1.5×21.5^m의 장방형 형태이다. 그리고, 청담대교는 잠실대교 하류부에 위치한 탄천의 합류부로서 교각기초는 모두 우물통 기초를 취하고 있으며, 교각 P44는 12×18^m, P45, 46은 12×12^m이다.

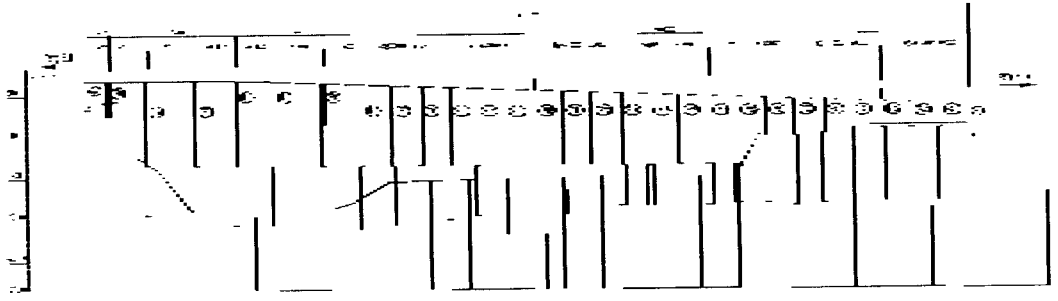
그림 2는 각각 한남대교와 청담대교 상에 설치된 센서를 나타낸 것이다. 한남대교의 경우 교각

* 명지대학교 토목·환경공학과 박사과정

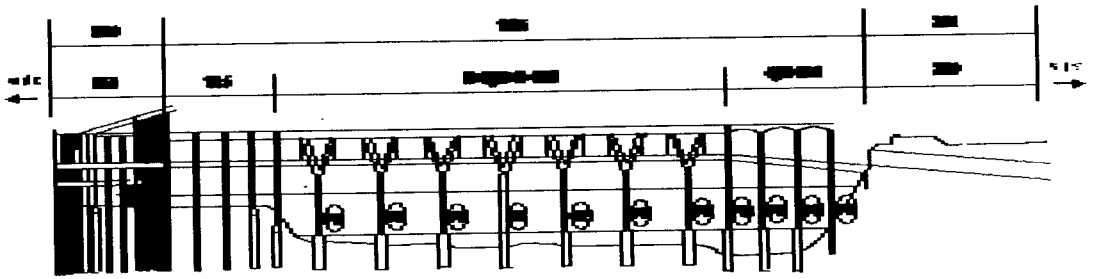
** 명지대학교 토목·환경공학과 석사졸업

***명지대학교 토목·환경공학과 교수

P10의 흐름방향 상류부와 좌측면, 후면부에 각각 1기씩 설치하였으며, 청담대교의 경우에는 각 교각의 흐름방향 및 측면부에 1기씩 총 6기를 설치하였다.

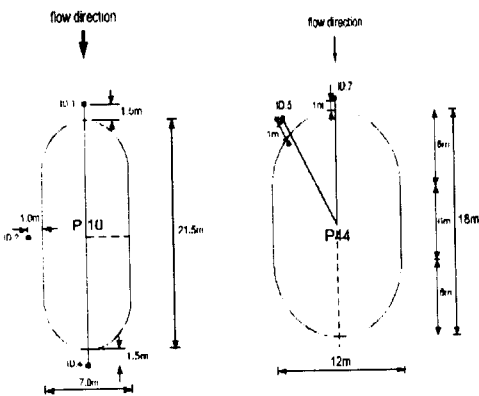


(a) 한남대교

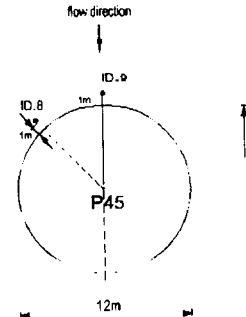


(b) 청담대교

그림 1 한남대교와 청담대교의 위치와 종단면도



(a) 한남대교



(b) 청담대교

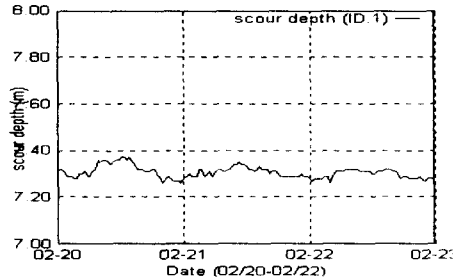
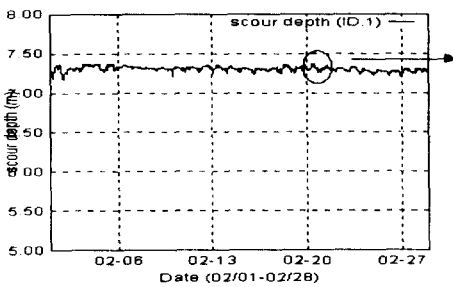
그림 2 센서의 설치위치

3. 실시간 세굴심 계측 자료 분석

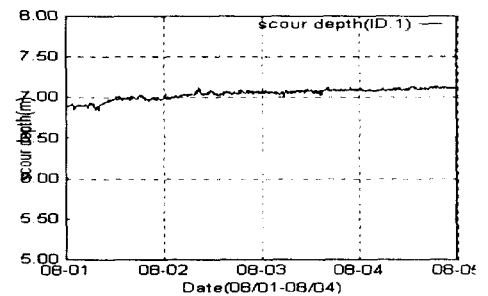
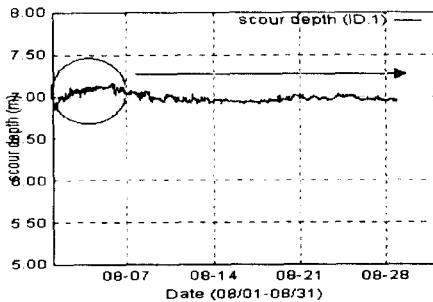
(1) 한남대교 구간

한남대교 구간에서 1년여간 측정된 세굴심 자료를 각각 평수시와 홍수시별로 자료를 분석함으로써 조석의 영향이 세굴심에 미치는 영향의 유무와 급격한 유량공급에 따른 세굴심 급변의 위험이 있는 홍수시의 세굴심 변동량을 확인하였다. 그림 3은 한남대교 구간 내의 세굴량 자료중 교각 전면부의 자료를 나타낸 것이다. 그림 3.(a)에서 보는 것과 같이 조석의 영향에 따른 교각 전면부의 유사량 이동이 나타나고 있음을 뚜렷이 확인함으로써 인천만의 조석영향에 따른 세굴심의 영향이 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 이러한 조석 영향이 얼마나 한강 내 교량의 세굴심에 기여하는지에 대해선 장기적인 관측이 필요할 것으로 판단된다.

한편 그림 3.(b)는 8월 홍수시 발생한 세굴심의 변동량을 나타낸 것이다. 이 때, 한강 상류부인 팔당댐에서의 최대 방류량이 18,000CMS까지 이르렀으며, 자료를 통해 세굴심의 변동량이 약 40cm 내외로 나타남을 확인할 수 있다. 하지만, 이는 곧 얼마 지나지 않아 되메움이 일어남을 확인할 수 있다. 이를 기초해 볼 때, 한남대교 구간내 하상은 장갑화와 암반층에 이미 노출되어 하상변화가 크지 않은 평형세굴에 도달한 것으로 판단된다.



(a) 평수시



(b) 8월 홍수시

그림 3 한남대교 구간의 세굴량 자료

그림 4는 99년 발생한 8월과 9월의 홍수기간중 한남대교 하상에서 발생한 세굴심변동량을 수위자료와 함께 나타낸 것이다. 여기서, 세굴심 변동량 자료와 수위자료간의 상호검토를 통해 최대 세굴심의 발생시점이 침두수위의 발생시점이 일치하지 않음을 발견할 수 있다. 곧, 최대세굴심은

침두수위 발생시점 이후 약간의 기간이 지난 후 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 9월 홍수사상에 비해 상대적으로 큰 홍수인 8월 홍수사상시의 최대세굴심 발생시점이 상대적으로 더 긴 공백기간을 띄고 있음을 통해 확인할 수 있다. 이러한 이유는 바닥에서의 한계 소류력과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

그림 5는 연간세굴량자료와 수온자료를 함께 나타낸 것으로서 연간세굴량자료만을 볼 때, 마치 동절기에 세굴의 진전이 이뤄진 것으로 판단할 수 있다. 하지만, 홍수시의 미미한 세굴변동량과 수온 자료와의 대칭적 형태를 고려할 때, 이는 동절기시 수온변화에 따른 센서의 온도보정 착오로 인한 것이라고 판단된다.

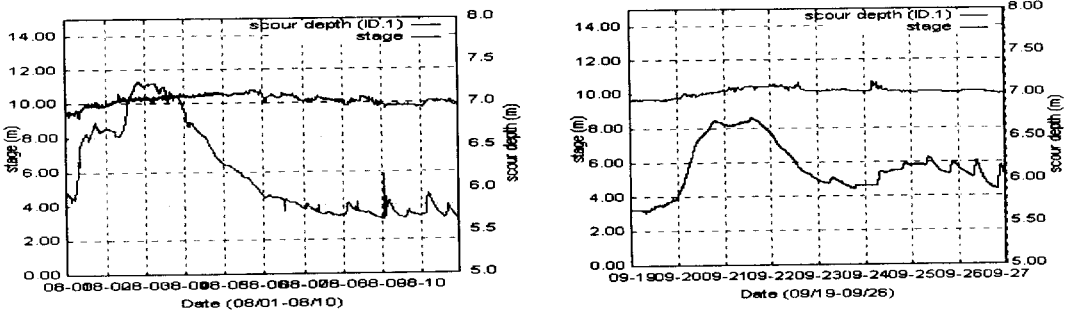


그림 4 침두수위와 최대 세굴심의 관계(한남대교 구간)

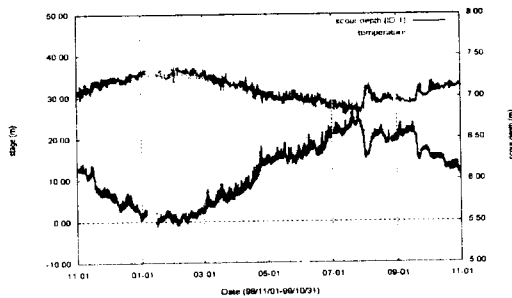
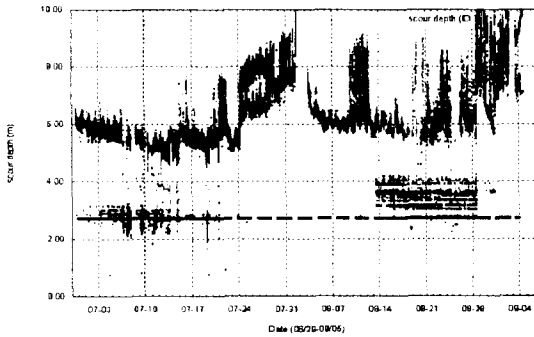


그림 5 연간세굴량 자료와 수온자료간의 관계(한남대교 구간)

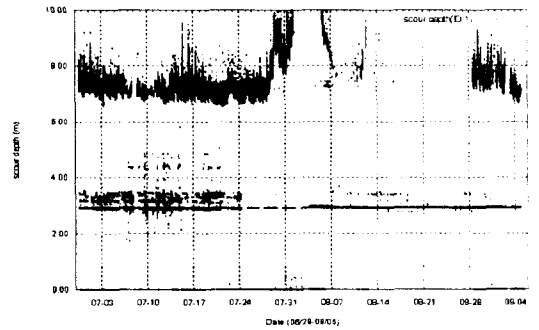
(2) 청담대교 구간

그림 6은 청담대교 구간의 교각주변에 포설된 사석보호공 주변에서의 세굴심 자료를 계측한 자료로서, 측정상의 double echo(이중 반사)현상으로 인해 확연한 자료의 구별이 난해하게 나타났으나, 전체자료를 함께 도시하여 예상세굴심의 위치를 굵은 실선으로 표시하였다.

3교각의 전면, 측면에서 총 6종류의 세굴심 자료가 획득되었으나 본 논문에선 각 교각 전면부에서의 세굴심 자료를 나타내었다. 세 교각면에서의 세굴심은 모두 3m대에서 형성되고 있는 것으로 확인되었으며 이는 사석투입공 직후 측정된 세굴심측정자료와의 비교시 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 하지만, 단기간의 측정이 수행된 점과 세굴보호공의 설치기간이 1년인 점을 고려할 때, 흐름에 따른 사석 보호공의 결속력 약화와 세굴보호공으로서의 역할 검토를 위한 장기적인 관측이 필요할 것으로 판단된다.



(a) P44의 흐름방향 전면부



(b) P46의 흐름방향 전면부

그림 6 청담대교 구간의 세굴량 자료

4. 수치모형을 통한 세굴심 산정

수치모형을 이용한 최대 세굴심 산정을 위해 대상 구간으로는 청담대교 상류부 1.5km에 위치한 잠실 수중보를 상류부경계지역으로 선택하고, 하류부경계조건으로 한남대교 하류부 10.96km상에 위치한 한강대교를 선택하였다. 그리고, 모의를 위해 1차원 모형으로는 HEC-2, WSPRO, DWOPER을, 2차원 모형으로는 SMS모형 내의 RMA-2 모듈을 사용하였으며, 이 중 DWOPER과 RMA-2는 홍수와 해석을 위한 부정류 모형들이다. 적용대상시기는 세굴에 가장 큰 영향을 미치는 유속인자가 극대로 나타나는 홍수시기를 선택하여 최대 방류량 18,213CMS를 기록한 99년 8월 1일~8월 3일간의 3일간을 모의기간으로 설정하였다. 단면자료로는 93년 측량된 한강내의 단면자료를 활용하였으며, 조도계수는 전경수 등(1997)에 의해 부정류 모형을 통해 산정된 자료를 활용하였다.

정류 모형을 통한 모의를 통해 두 모형간에 모의가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며, 정류모형의 특성상 대상기간 내의 부정류흐름상의 수위자료와는 비교검토를 이루지 않았다. 그리고, 부정류 모형인 DWOPER과 RMA-2모듈을 통한 모의결과 본 연구대상기간 내의 수위자료의 변동량과 거의 일치하는 수위 변동량을 모의 확인할 수 있었다. 그림 8은 부정류 모형을 통한 모의 결과 중 한남대교상에서의 수위 자료를 실측 자료와 함께 나타낸 것이다.

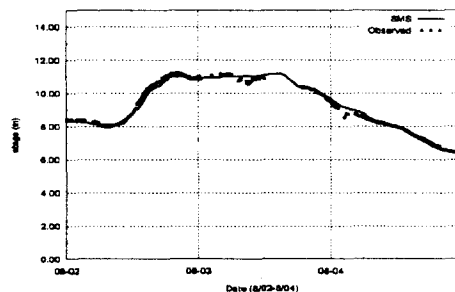
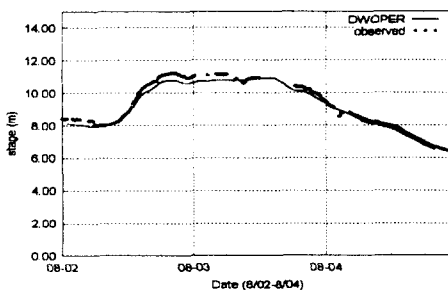


그림 7 부정류 모형을 통한 모의 결과 (DWOPER, RMA-2, 한남대교 구간)

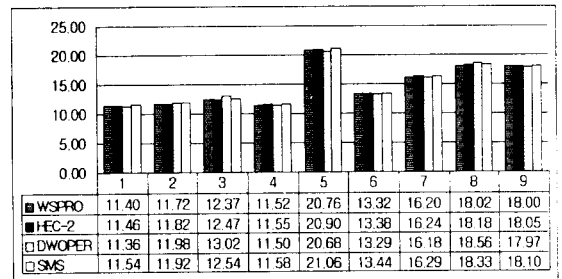
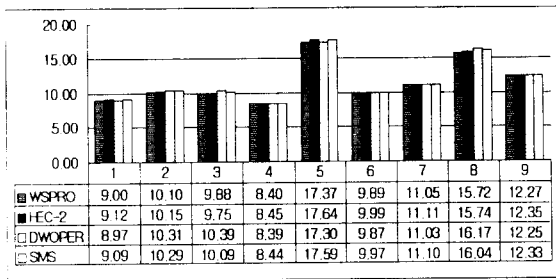
각 모형에서의 수위, 유속 자료를 기초로 하여 국내적으로 사용되는 세굴산정식 중 신뢰성을 인정받는 CSU공식을 비롯한 9개의 세굴심 산정식을 이용하여 세굴량 자료를 산정하였다. 표 1은 각각 한남대교 구간과 청담대교 구간에서의 수위, 유속 자료를 나타낸 것이며, 표 2는 이에 근거한 세굴심산정자료를 나타낸 것이다.

수치모형을 이용한 최대 세굴심산정의 경우 이론적 세굴심이 실제 세굴심에 비해 훨씬 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나, 한남대교의 경우 초기 세굴심 발생의 기준이 불명확한 관계로 정확한 비교·검토가 곤란한 것으로 나타났으며 단지 92년 당시의 표고 -3.00m와 99년 현재 표고 -4.5m을 통해 7년간 진행된 1.5m의 자료와 비교가 가능할 뿐이었다. 그리고, 청담대교의 경우 단기간의 측정자료와 현재까지 표고 -1.10m 내외에서 변하고 있는 세굴심 자료와의 비교·검토는 이른 것으로 판단되며, 사석보호공의 효과여부검토를 위한 지속적 계측작업이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

표 1 각 구간내에서의 모형별 수위, 유속 자료

	WSPRO		HEC-2		DWOPER		SMS	
	한남	청담	한남	청담	한남	청담	한남	청담
최고 수위	11.03	12.00	11.25	12.10	10.97	11.94	11.21	12.22
최고 유속	2.45	1.86	2.36	1.89	2.76	2.10	2.56	1.91

표 2 세굴심 산정 비교 표



4. 결론

한강 내의 한남대교와 청담대교 구간에서의 실시간 교량 세굴관측 자료의 분석내용과 수치모형에 의한 최대세굴심 비교사항은 다음과 같다. 첫째, 한강 내에서의 최대세굴심은 침투수위 발생 이후 약간의 지연기간을 두고 발생하는 것으로 확인되었으며 이는 하상저면의 소류력과 관계있는 것으로 판단된다. 둘째, 한남대교구간의 경우 최대 18,000CMS의 방류량하에서 40cm정도의 세굴심이 진행되었으나 곧 되메우겨진 것으로 확인되었으며, 이는 곧, 한남대교 구간내의 하상이 장갑화와 암반층에 노출되어 순수하게 세굴되는 속도는 매우 느림을 알 수 있다. 셋째, 청담대교 교각부근에 설치된 세굴량 자료 분석결과 홍수시 세굴심의 큰 변동이 확인되지 않았으나, 장기적인 관측을 통한 사석 보호공의 결속력 약화와 세굴보호공으로서의 역할 검토가 필요할 것으로 판단된다. 그리고, 수치모형을 이용한 최대 세굴심산정의 경우 이론적 세굴심 실제 세굴심에 비해 훨씬 크게 나타났으나, 한남대교의 경우 초기 세굴심 발생의 기준이 불명확한 관계로 정확한 비교·검토가 곤란하였으며 단기간의 측정이 수행된 청담대교의 경우에는 비교·검토의 단계로서는 아

직 이른 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 김원 등, 1995, 부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정, 한국 수자원 학회지 제 28권 6호, pp. 133~146
- 데이터피씨에스, 1999, 지하철 7-17공구 현장 교각 기초에 대한 세굴측정 및 세굴 방지공의 연구 검토 보고서
- 명지대학교, 1999, 한남대교 교각 기초 주변의 세굴깊이 측정 및 현장 모니터링에 관한 연구보고서
- 서울특별시, 1992, 서울시 관내 하천 제방 안전도 검토 및 치수 종합 대책 수립 보고서
- 서울특별시, 1992, 한남대교 확장 기본 및 실시 설계 종합 보고서
- 이종태 등, 1993, 한강의 홍수 규모에 따른 인도교 수위의 조성 영향 분석, 한국 수자원 학회지 제 6권 2호, pp. 67~77
- BOSS International, Inc & Brigham Young University, 1997, SMS(Surface Water Modeling System)5.0 User's manual,
- 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, 1999b, Waterway surface profile. User's manual : HEC-2, Hydraulic Engineering Center.