

SED-2D를 이용한 한강 하구부의 하상변동 해석

Analysis of Bed Elevation Change in the Han River Estuary using SED-2D

서일원*, 전인옥**, 김성은***

Il Won Seo, In Ok Jun, Sung Eun Kim

요 지

하구는 담수와 해수가 만나 넓은 갯벌과 기수역을 형성하여 각종 생물의 서식지이자 어류의 산란지로 이용되는 생태학적으로 중요한 지역이다. 특히 한강 하구는 국내 4 대강 가운데 유일하게 하구둑이 설치되어 있지 않아 조수의 출입이 자유롭고 민간인 접근이 통제되어 있어 자연적인 하천지형과 기수역 생태계가 비교적 잘 보전된 구역이다. 본 연구의 모의영역은 한강 하류부로 상류 경계단은 행주대교, 하류 경계단은 전류단 수위표가 위치한 경기도 연천군 전곡읍 전곡 사랑교 부근으로 설정하였다. 지형자료는 한국건설기술연구원에서 2009년 8월 홍수사상 전·후에 대해 측량한 자료를 사용하였다. 한강 하구역에 대한 지형 격자를 구성하기 위하여 RAMS 전후 처리기인 RAMS-GUI를 사용하였으며, 구성된 지형 격자의 질점 수는 2,354개, 요소 수는 2,145개로 삼각요소와 사각요소가 혼용되어 있다. 구성된 격자망을 이용하여 2차원 하상변동 해석 모형인 SED-2D 모형을 통해 홍수사상에 의한 한강 하구부의 하상변동을 살펴보았다. SED-2D 모형은 미국 육군 공병단의 WES와 미 연방 도로국이 연계하여 개발되어 현재 국내외 2차원 하천해석에서 가장 널리 사용되고 있는 모형 중 하나이다. 하상변동 해석모형인 SED-2D를 통해 모의된 하상 변동량을 실제 측량된 홍수 전·후의 지형자료와 비교함으로써 모형의 성능을 분석하였다. 분석결과 SED-2D 모형의 경우 침식에 의한 하상변동이 모의되지 않았지만, 전반적인 하상변동 경향을 살펴볼 수 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 하상변동 모의, 한강 하구부, SED-2D, 홍수사상

1. 서 론

하천의 하상변동은 단기적으로는 하천에서의 취수, 배수, 주운 등 하천관리에 직접적인 영향을 주며, 장기적으로는 하천 시설물의 안정, 홍수위 및 지하수위의 변화, 홍수터와 같은 하천부지의 변화 등 하천 및 유역관리에 광범위한 영향을 준다. 특히 하천정비사업 등에 의한 영향을 제대로 평가하기 위해서는 단기간의 홍수 또는 호우 사상에 대한 하상변동을 예측하는 것이 필수적이다. 외국에서는 하상변동 예측의 필요성을 일찍이 인식하여 다수의 하상변동 예측 모형이 개발되어 하천실무에 사용되어 왔다. 반면 국내의 경우 하상변동에 관련된 연구가 외국에 비해 절대적으로 빈약하였으나, 최근 들어 4대강 사업, 하천정비사업 등으로 인해 그 중요성이 점차 부각되고 있는 실정이다. 또한 기존에 국내에서 수행된 하상변동 예측에 관한 연구는 1차원 모형을 이용한 해석이 대부분이며, 이 경우 하천의 사행이나 유사의 횡방향 분포 등을 고려할 수 없고 하상변동 계산 시 이동상 부분의 전체가 균일하게 변화하는 것으로 가정하기 때문에 흐름이 급변하는 하천 하구역, 지류 유입부, 취수구 주위 등의 모의에 적합하지 않다.

* 중신회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수, E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

** 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, E-mail : jioda85@snu.ac.kr

*** 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, E-mail : eric1004@snu.ac.kr

해수와 담수가 만나 넓은 갯벌과 기수역(brackish water zone)을 형성하는 강의 하구는 각종 생물의 서식지이자 어류의 산란지로 이용되는 생태학적으로 매우 중요한 지역이다. 특히 한강 하구는 국내 4대강 가운데 유일하게 하구둑이 설치되어 있지 않아 조수의 출입이 자유로우며 민간인 접근이 통제되어 있어 자연적인 하천지형과 기수역 생태계가 비교적 잘 보존된 구역이다(서일원 외, 2008). 2005년 국립환경연구원의 하구역 생태계 정밀조사 보고서에 따르면 한강 하구부에는 세계적 희귀종이자 각종 멸종 위기 동물들이 서식하고 있으며, 버드나무, 갈대, 갯잔디 등 다양한 하구 식생이 보존되어 있는 것으로 보고되었다. 한강 하구부에 대한 수리학적 해석은 주로 동수역학적 흐름에 대한 연구가 지배적이며, 오염물 부하에 따른 수질 및 하상변동에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 한강의 하상 실태조사는 1953년도에 실시된 바 있으며, 1963년에 본격적으로 하상변동에 대한 조사가 현류 수위표부터 고안 수위표까지 약 100 km 구간에 걸쳐 진행되었다(건설부, 1981). 이후 1980년도에 한강유역종합개발계획이 실시되면서 1987년 이후 매년 횡단면 측량이 이루어지고 있다. 박정웅과 정대석(1991)은 점변부정류 개념을 적용하여 홍수 발생시 한강 하류부의 유량 변화 및 하상고 변동을 모의하였으며, 이재수와 윤용남(1995)은 CHARIMA 모형을 한강 인도교부터 광장교까지 구간에 적용하여 하상 저하가 발생하는 구간을 예측한 바 있다. 본 연구에서는 국·내외에서 대표적으로 사용되는 2차원 하상변동 모형인 SED-2D를 이용하여 홍수 사상에 의한 한강 하구역의 하상변동을 모의하고 이를 실제 측량된 지형자료를 바탕으로 모의결과를 분석하였다.

2. 수치모형

2.1 수치모형 개요

미국 육군공병단의 WES(Waterways Experiment Station)와 미 연방도로국이 연계하여 Brigham Young University의 EMRL(Environmental Modeling Research Laboratory)에서 개발된 SMS(Surfacewater Modeling System) 내에 GFGEN 모형, RMA-2 모형, RMA-4 모형과 함께 SED-2D 모형이 구성되어 있다. SMS 내 2차원 하상변동 모형에 속하는 SED-2D는 모래하상과 점토질 하상에 대한 모의가 가능하지만, 유효입경을 고려함에 있어 단 하나의 대표 유효입경만을 선택할 수 있으며, 자체 내에서 수위와 유속을 계산하지 못하기 때문에 RMA-2에서 수위와 유속을 계산하여 그 결과를 이용하게 된다. SED-2D의 기본공식은 Ariathurai(1974)와 Krone 등(1977)에 의해 제안되었으며, 이송-확산 방정식을 이용하여 부유사 농도, 하상 전단응력, 하상 제원, 하상 변동량을 계산하게 된다. SED-2D 모형의 지배방정식인 2차원 이송-확산 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2 \quad (1)$$

여기서, C 는 부유사의 수심평균 농도, t 는 시간, u , v 는 각각 x , y 방향의 수심평균 유속, h 는 수심, D_x , D_y 는 분산계수, α_1 하상제원에 대한 계수, α_2 하상제원의 평균농도를 의미하며 이는 유사의 형태나 침식 혹은 퇴적 발생 여부에 따라 결정된다. 모래 이송의 경우 하상으로부터 유사의 공급은 흐름의 잠재 이송능력과 물질의 활용도에 의해 제어되며, 점토 이송의 경우 점토하상의 퇴적물은 Krone(1962) 방정식으로 계산한다.

2.2 수치모의 영역

본 연구의 모의 대상영역은 한강 하구역으로 상류 경계단은 행주대교, 하류 경계단은 전류단 수위표가 위치한 경기도 연천군 전곡읍 전곡 사랑교 부근으로 설정하였다(그림 1). 하상 지형자료는 한국건설기술연구원에서 2009년 8월 홍수사상 전·후로 측량한 한강 하구역 지형자료를 사용하였다. 한강 하구역에 대한 지형 격자를 구성하기 위하여 RAMS 프로그램의 전후 처리기인 RAMS-GUI를 사용하였다. RAMS는 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 순수 국내기술로 개발된 수평 2차원 하천해석 모형이다. 현재 RAMS 베타버전 2.0이 출시되었으며, 추후 국내 상용버전이 출시될 예정이다(서일원, 2010). 구성된 지형 격자의 절점 수는 2,354개, 요소 수는 2,145개로 삼각요소와 사각요소가 혼용되어 있다. 구성된 지형격자의 최저 하상고는 -7.636 m이며, 최고 하상고는 2.45 m이다.

3. 수치모의 결과

3.1 유속장 모의

하상변동 모의에 앞서 RMA-2를 이용한 2차원 흐름모의를 진행하였다. 유량에 대한 모의조건으로 2009년 7월 중순에 발생한 홍수사상을 선택하였는데, 이는 급격한 유량변화로 인한 하상의 변화를 살펴보기 위함이다. RMA-2의 입력 자료인 상·하류 경계단의 수위 및 유량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 일자료를 이용하였다. 상류단은 2009년 7월 12일부터 21일까지 2주 동안의 행주대교 일 유량자료를 입력하였으며, 하류단은 동일기간 전류 수위표 지점의 수위자료를 사용하였다. 이상의 흐름모의를 위한 경계조건을 그림 2에 도시하였다.



그림 1. 모의영역 위성사진

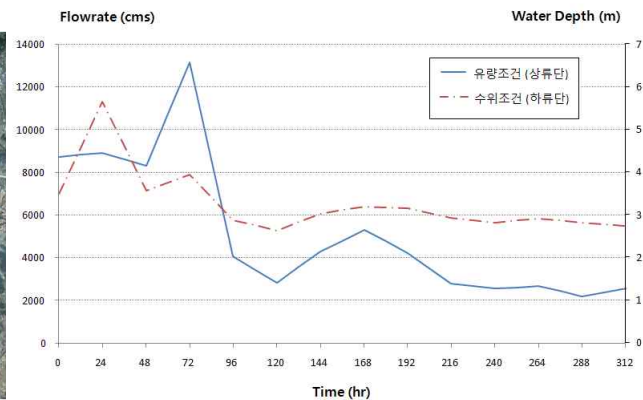


그림 2. 모의 경계조건

RMA-2 모형의 매개변수 중 Manning의 조도계수는 해양수산부(2001)가 제시한 0.025를 적용하였으며, 와점성 계수 값으로 1000을 사용하였다. 계산시간은 12 시간간격으로 총 312 시간까지 모의를 수행하였으며, 유량이 가장 큰 72 시간일 때의 흐름모의 결과를 그림 3에 도시하였다. 그림 4는 흐름모의 결과를 유속분포는 벡터형태로, 수심분포는 컨투어로 나타낸 것이다.



그림 3. 유속장 모의결과 (좌: 유속장, 우: 수심분포)

3.2 하상변동 모의

하상변동 모의를 위한 중분산계수 및 횡분산계수는 모의구간이 습지보호구역 및 군사제한구역인 특성상 현장실측이 제한적이기 때문에 널리 사용되는 Elder와 Fisher의 경험식(Fisher 등, 1979)을 이용하여 각각 $7.5 \text{ m}^2/\text{sec}$, $0.75 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 산정하였다. 2002년 한강하천정비기본계획 보고서에 따르면 한강 하구부의 부유사 구성성분 분석 결과 홍수시 유사는 하천유출에 의해 상류로부터 이송된 것이기 때문에 실트와 점토의 비중이 줄어들고, 모래의 양이 많게 나타났다. 또한 홍수류의 유속이 비교적 약해지는 창조시에 모래의 비중이 줄어들고 낙조시에는 커지는 경향이 나타나는데 이는 홍수류의 유속이 저하되면서 이송력이 약해져 입경이 비교적 큰 모래가 침강하기 때문으로 추정된다. 한강 하류부의 하상변동 산정시 유사자료는 한강하천정비기본계획 보고서에서 한강수계치수기본계획 자료를 이용하여 산정한 유량-유사량 관계곡선을 사용하였으며, 대표입경 값 또한 한강하천정비기본계획 보고서에서 측정한 한강 하류부의 하상재료 대표입경 종단분포 자료를 이용하여 단일 대표입경 값 0.065 mm 로 정하였다.

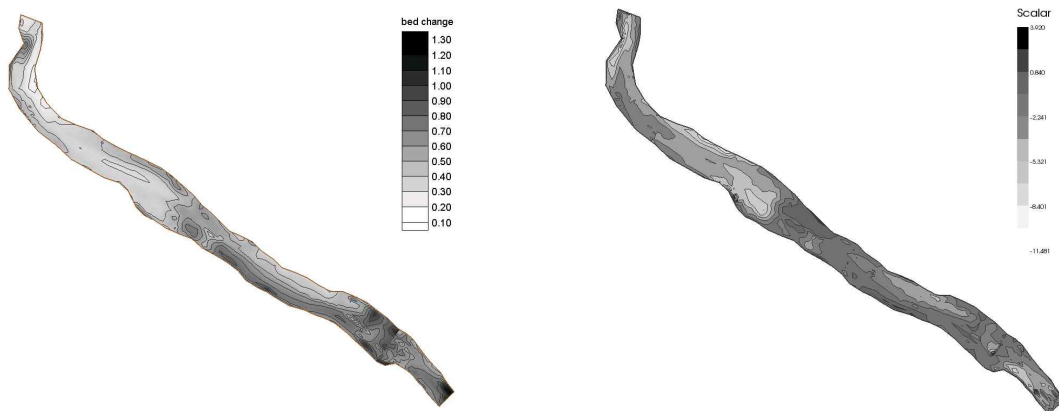


그림 4. 하상 변동량 (좌: SED-2D 모의결과, 우: 실제 측량결과)

RMA-2 흐름모의 결과를 바탕으로 홍수사상에 의한 한강 하류부의 하상변동을 살펴보았으며, 하상변동 모의결과와 실제 측량된 하상 변동량을 그림 4에 비교하였다. 2차원 하상변동 모형으로 모의된 하상 변동량과 실제 측정결과가 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 두 결과의 가장 큰 차이는 SED-2D를 이용한 하상 변동량 모의에서는 침식에 의한 하상변동이 나타나지 않은 반면, 실제 측량결과 홍수로 인한 하상의 큰 침식이 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 최저 하상고가 나타난 하

류 지점의 경우 실제 측량결과에서는 침식이 진행된 반면 SED-2D 모의결과에서는 퇴적이 일어나 모의결과에 큰 차이를 보였다. 이렇듯 두 결과에 큰 차이가 나타난 것이 사실이기는 하나, 전반적인 퇴적 형상을 살펴보았을 때 하상이 낮은 구간에서 많은 퇴적이 일어나고, 하상이 상대적으로 높은 구간에는 퇴적이 적게 발생하는 경향은 SED-2D 모의결과에서도 동일하게 재현되는 것을 알 수 있었다. 이렇듯 수치해석을 통한 하상변동에 대한 해석은 실제 하상 변동량과 비교해보면 다소 차이를 보이긴 하나, 전체적인 하상변동 경향을 살펴볼 수 있다는 점에서 효과적이다.

5. 결론

본 연구에서는 SED-2D 모형을 이용하여 홍수 발생시 한강 하류부의 하상변동을 모의하였으며, 모의결과를 실제 측량자료와 비교해봄으로써 결과를 분석하였다. 분석결과 SED-2D 모형의 경우 침식에 의한 하상변동이 모의되지 않았지만, 전반적인 하상변동 경향을 살펴볼 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단과 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-3-3; 과제명: RAMS 적용) 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소에서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1981) 한강하상변동조사보고서.
- 건설교통부 (2002) 한강하천정비기본계획.
- 박정웅, 정대석 (1991) “홍수시 한강 하류부의 하상변동에 관한 연구.” 수자원학회지, 24(2), pp. 109-119.
- 서일원 (2010) RAMS 적용 3단계 요약보고서, 수자원의 지속적 확보기술개발사업.
- 서일원, 송창근, 이명은 (2008) “한강 감조구간에서의 흐름 및 혼합거동.” 대한토목학회논문집, 28 (6B), pp. 731-741.
- 이재수, 윤용남 (1995) “한강분류의 하상변동에 관한연구.” 대한토목학회논문집, 15(4), pp. 875-884.
- 해양수산부 (2001) 한강·임진강 유역에 대한 조위 영향연구.
- 환경부, 국립환경연구원 (2005) 하구역 생태계 정밀조사: 한강·삼산천·탐진강.
- Ariathurai, R. (1974) *A Finite Element Model for Sediment Transport in Estuaries*, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, UC Davis.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979) *Mixing in inland and coastal waters*. ACADEMIC PRESS.
- Krone, R. B. (1962) Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes, Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, UC Berkeley.
- 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS): <http://wamis.go.kr>