주운하천으로 유입하는 점착성 및 비점착성 유사의 3차원 이송·퇴적 해석

Analysis of the transport and sedimentation processes of cohesive and non-cohesive sediments induced into a navigational river

류재일*, 정세웅, 정진웅***, 김현철****

Jae Il Ryoo, Se Woong Chung, Jin Woong Chung, Hyun Cheol Kim

요 지

본 연구에서는 3차원 수리해석과 함께 유사의 이송, 침식, 퇴적 현상을 연동하여 모의할 수 있는 유한차분 수치모형인 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)를 이용하여 주운하천 구간으로 유입되는 다입경 혼합유사의 입경별 시·공간적 퇴적분포 특성을 고찰하고, 하상변동 예측에 있어서 유사의 밀도와 모델의 유한차분 격자구조에 의한 불확실성 해석을 수행하였다. 유입 유사의 입경별 공간적 퇴적특성은 하천 하류부와 단면 확대부에서 발생하는 3차원적 수리현상과 매우 밀접한 상관성을 보였으며, 굴포천과 합류하는 주운수로 유입부에서는 대부분 입경이 큰 비점착성 유사(63㎛ 이상)인 사질(sand)입자들이 주로 퇴적되는 것으로 나타났으며, 주운하천 합류부로부터 하류구간까지는 4~63㎛ 입자의 실트질(silt) 유사가 대부분 이송되어 퇴적되는 것으로 분석되었다. 점착성 유사인 4㎛ 이하의 점토(clay)는 단면이 확대되어 유속이 매우 느린 구간이나 사수역을 중심으로 퇴적되는 것으로 나타났다. 단면 횡방향 분포특성은 굴포천과 주운하천이 합류하는 합류부 구간의 주흐름 방향 남쪽에서 흐름의 정체구간이 발생되어 퇴적이 발생하고, 단면 급확대부 양안에서 사수역이 형성되므로 퇴적이 지배적으로 발생되었다. 하상변동 예측의 불확실성 해석을 위해 유사 밀도값에 대한 민감도 분석결과, 하상변동량은 유사밀도(1.3ton/㎥~2.65ton/㎥)가 감소됨에 따라 약 2배까지 증가하는 것으로 분석되어 민감도가 매우 크게 나타났다. 또한 수치격자 구조의 민감도 분석결과, 수층을 3개 층으로 분석한 결과가 단일층 분석결과보다 최대 6배의 하상변동량이 많게 산정되었다. 이는 수심방향의 유속과 부유사 농도의 불균등 분포특성이 실제 자연현상에 더 가깝게 모의되기 때문으로 판단되었다.

핵심용어 : 주운하천, EFDC, 유사량, 하상변동, 수치모형

1. 서론

수리시설물의 건설로 인해 하천의 하상은 지속적으로 변화되고 있어 하천 유지관리를 위해 하천의 수위, 유량, 유속 분포와 더불어 유사의 이송과 퇴적 및 침식에 따른 하상변동 현상에 대한 예측 또한 매우 중요하다.

수리시설물 건설 후 장기간 경과에 따라 유역 상류로부터 하천을 따라 이송된 유사가 하류에 근접하면서 유속이 감소되고 유사의 이송능력은 급격히 감소하게 된다. 따라서 유속저하로 접속부에서는 유사가 침강, 퇴적되면서 하상상승을 가져오게 되며, 상승된 하상은 결과적으로 저수지 및 수로의 유입부 통수단면을 축소시켜 상류하천의 홍수범람을 가져와, 퇴적된 만큼 수심 저하를 유발시킨다. 또한, 규칙적인 사주의 이동, 또는 기록적인 홍수로 인한 사주의 형성과 소멸 등은 특히 취수장의 취수 장애를 일으킬 수 있다. 문제는 이러

* 정회원·한국수자원공사 차장·E-mail : jiryoo@kwater.or.kr

** 정회원·충북대학교 공과대학 환경공학과 교수·E-mail : schung@chungbuk.ac.kr

*** 한국수자원공사 경인 아라뱃길건설단장·E-mail : jwchung@kwater.or.kr

**** 한국수자원공사 팀장·E-mail : khcheol@kwater.or.kr

한 하상의 침식과 세굴, 퇴적현상이 복합적으로 나타나는 경우가 많기 때문에 문제 접근과 해결이 더욱 어렵다는 것이다(우효섭, 2001).

실제 미국의 Tennessee-Tombigbee 운하는 준공후 운영기간동안 상류에서 이송되어온 유사가 항구에 퇴적되어 운항 선박의 항구 진입에 지장을 초래하여 매년 준설을 해야 하는 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 상기와 같은 문제점 예측 및 대책 마련을 위한 자료를 제공하기 위해 국내 최초로 건설중인 주운하천에 대한 3차원 수리해석과 함께 유사의 이송, 침식, 퇴적 현상을 연동하여 모의할 수 있는 유한차분 수치모형인 EFDC를 이용하여 주운수로에 유입되는 다입경 혼합유사의 입경별 시·공간적 퇴적분포 특성을 고찰한 후, 하상변동 예측에 있어서 입력자료와 모델의 유한차분 격자 구조에 의한 불확실성 해석을 수행하였다.

2. 유역현황 및 EFDC 모델의 구성

2.1 유역현황

연구대상 유역은 굴포천 유역으로 한강으로 유입되는 굴포천과 서해로 방류되는 시천천을 비롯하여 소규모 지류 하천의 일부를 포함, 총 유역면적 159.2㎢, 유로연장 34.6㎞이다. 표고별 면적분포는 EL. 0~50m 구간이 전체 면적의 83.4%에 달하는 저지대 유역 특성을 가지고 있으며, 유역 경사 또한 경사도 5° 이하가 주로 분포하는 매우 평탄한 지역으로 홍수시 도달시간이 길어 홍수의 지속시간이 매우 증가하는 것으로 분석되었다. 굴포천 하류구간의 하상경사는 1/2,700~1/4,500, 하폭은 90~100m 이며, 주운하천 구간의 하상고는 EL.(-)3.6m로 일정하며, 수로 저폭은 75~80m, 상시운영수위(EL.2.7m)에서 하폭은 105~115m 정도이다.

2.2 EFDC 모델의 구성

EFDC 모델의 버전은 Hydro 버전과 USEPA 1.01 Full Version이 있는데 Hydro 버전은 Box 형태의 수질모델인 WASP의 수리 모델로 많이 활용되고 Full version은 Hydrodynamics, Water quality, Sediment transport, Toxic 등의 모의가 가능하며, 이 중 Sediment 모의가 광범위하게 사용되어진다(Hamrick, 1992). Sediment transport 모의는 수체와 퇴적층으로 나누어 모의 되며 각각의 수체와 퇴적층에서는 점착성과 비점착성으로 나누어 계산되어 진다.

지형자료는 현재 진행중인 사업의 실시설계 지형도를 SMS 10.0 프로그램을 이용하여 구성하였으며, 종 방향 격자는 굴포천 유역으로부터 주운하천을 따라 분할하여 수평 방향의 이송 및 확산에 대해 모의가 가능하도록 구성하였다. 수평방향으로는 직교곡선 좌표계, 수직방향으로는 sigma 좌표계를 사용하였으며, 수직방향으로의 격자는 수층을 3개로 분할하였다. 유입경계 조건은 상류는 굴포천 하류의 귤현보로 지정하고 방류경계조건은 서해 배수갑문으로 지정하였다.

주운하천 현황은 다음 그림 1과 같으며, 굴포천(GP-R), 서해(IC-T), 한강(KP-T)지점으로 구분하였다.

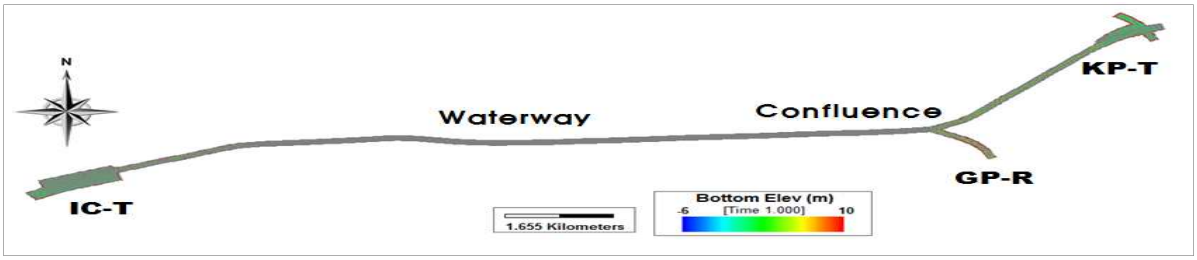


그림 1. 주운하천 현황

유입량은 “경인 아라뱃길사업 홍수처리 계획보고서(한국수자원공사, 2009. 9)”에서 검토된 100년빈도 홍수량을 적용하였으며, 방류조건은 서해 조위조건이 고려된 서해 배수문의 방류능력을 적용하였다. 유사량은

1991년과 2004년에 실측된 자료를 이용, 유량-유사량 관계식을 개발하여 100년빈도 홍수량까지 확장시켜 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델의 적용성평가

모델의 적용성을 검증하기 위해 그림 2 및 그림 3과 같이 굴포천 유역의 100년빈도 홍수 수문곡선을 이용한 3차원 모델결과와 HEC-RAS 모델 결과(수위, 유속)를 주운하천 지점에 대해 비교분석하여 연구대상 지역에 대한 적용성을 검증하였으며, 최고수위 기준 0.11m, 최대유속 기준 0.05m/sec 이하의 차이가 발생되는 것으로 분석되어 적용성을 검증하였다.

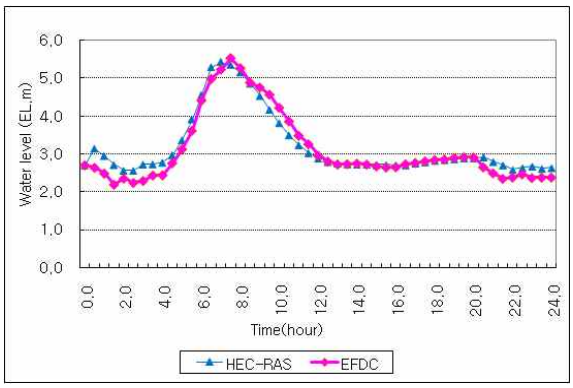


그림 2. 수위분포 비교

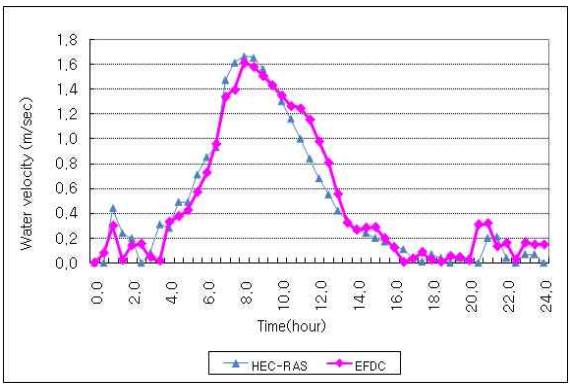
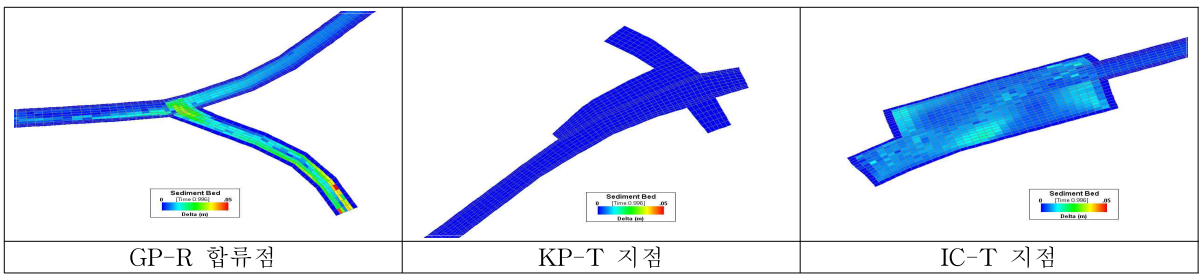


그림 3. 유속분포 비교

3.2 혼합유사의 공간적 퇴적 특성 분석

3.2.1 하상변동 해석

하상변동 해석을 위해 100년빈도 홍수량(지속시간 24시간)에 대한 유사량 자료를 적용하였다. 입경분포는 3구간(4㎛ 이하, 4㎛~63㎛, 63㎛ 이상)으로 구분하여 주운하천, IC-T 및 KP-T 구간에 대한 유사의 시간적, 공간적 분포 특성을 모의하였다. 그림 4에서 보는바와 같이 GP-R 합류지점은 유속감소 및 와류 발생으로 인해 3~4㎝의 하상변동이 발생되며, 홍수량의 주흐름 방향이 IC-T 지점으로 형성되어 KP-T지점에는 퇴적현상이 거의 발생되지 않고 IC-T 구간에 약 1.4㎝ 정도의 하상 상승이 예측되었다.



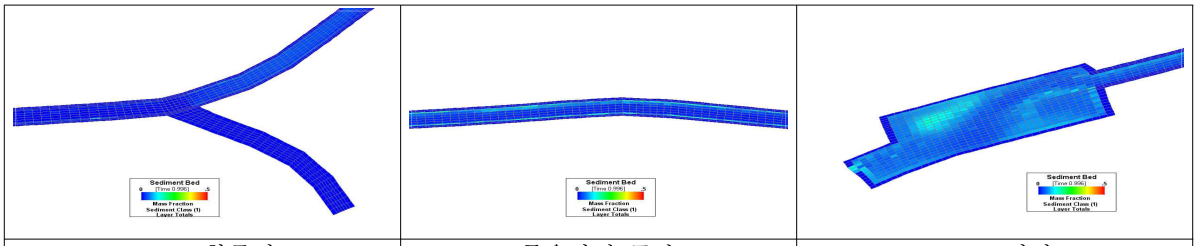
GP-R 합류점	KP-T 지점	IC-T 지점

그림 4. 지점별 하상변동 해석결과

3.2.2 입경별 공간적 퇴적분포 특성

입경분포는 4㎛ 이하(점토), 4㎛~63㎛(실트), 63㎛ 이상(모래) 등 3가지 유형으로 구분하여 분석하였다.

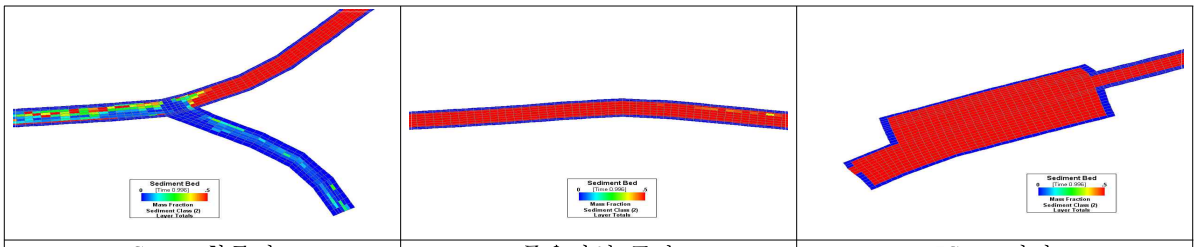
입경분포 4㎛ 이하의 경우 그림 5에서 보는바와 같이 GP-R 합류점, 주운수로 구간은 거의 퇴적되지 않는 것으로 예측되었으며, IC-T 구간에서만 10~15% 정도 퇴적되는 것으로 예측되었다.



GP-R 합류점	주운하천 구간	IC-T 지점

그림 5. 입경분포 4㎛ 이하 유사의 공간분포 특성

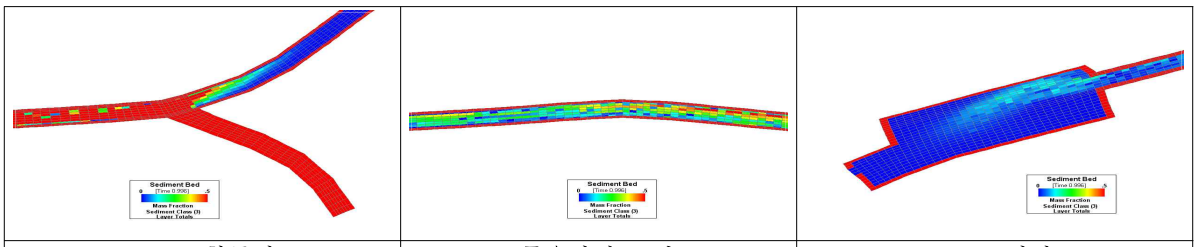
입경분포 4㎛~63㎛의 경우 그림 6에서 보는바와 같이 GP-R 합류점에서 KP-T 구간, 주운하천 및 IC-T 구간에서는 70~90% 정도로 대부분 동 구간에서 퇴적이 되는 것으로 예측되었다.



GP-R 합류점	주운하천 구간	IC-T 지점

그림 6. 입경분포 4~63㎛ 범위 유사의 공간분포 특성

입경분포 63㎛ 이상의 경우 그림 7에서 보는바와 같이 GP-R 합류점 인근에 80% 이상, 주운하천 구간에서는 10~20% 정도로 대부분 퇴적되고, IC-T 구간에서는 거의 퇴적되지 않는 것으로 예측되었다.



GP-R 합류점	주운하천 구간	IC-T 지점

그림 7. 입경분포 63㎛ 이상 유사의 공간분포 특성

3.3 하상변동 예측의 불확실성 해석

3.3.1 유사의 밀도값에 대한 민감도 분석

입력자료의 불확실성을 고려하기 위해 유입유사의 밀도값이 퇴적두께 변화에 미치는 민감도 분석을 실시하였다. 유사밀도를 1.3~2.65 tons/㎥까지 4개로 구분하여 모의한 결과 주운하천 등 퇴적 두께는 유사밀도가 작아질수록 더 커지는 것을 확인 할 수 있다. 비교적 퇴적이 많이 발생되는 GP-R 구간은 밀도가 2.65 tons/

㎥ 일 때 보다 1.3 tons/㎥ 일 때 약 1 cm정도 상승했지만 IC-T 구간에서는 유사밀도의 감소에 따라서 퇴적두께가 약 2배 가까이 증가되는 것을 알 수 있다.

3.3.2 수치 격자구조의 민감도 분석

수심방향의 3차원 수리-유사해석의 장점을 확인하기 위하여 수층을 단일층과 3개층으로 격자 분할하여 민감도를 분석하였으며 그 결과를 이론식과 비교하였다. 수층을 단일층으로 가정할 경우, GP-R 구간과 IC-T 구간에서 각각 8.6cm, 0.4cm의 하상변동이 예측되었으나, 수층을 3개로 분할할 경우 GP-R 구간에서 5.6cm, IC-T 구간에서 2.2cm의 하상변동이 예측되어, 수층을 3개층으로 분할할 경우에 하류 구간에서 최대 6배의 하상변동량이 많게 산정되었다. 이는 수층을 3개층으로 분할하여 모의할 경우, 수심방향의 유속과 부유사 농도의 불균등 분포 특성이 실제 자연현상에 더 가깝게 모의되기 때문으로 판단된다. 특히, 수류에 더 민감하게 반응하는 작은 입자들의 공간별 퇴적 특성이 많은 영향을 받는 것으로 해석된다.

수치모의 결과를 Toffaleti의 이론식(1969)에 근거한 수심방향의 유속분포 및 농도분포를 본 연구결과와 비교 분석한 결과, 수심방향을 3개 층으로 나눈 3차원해석이 더 재현성이 큰 것을 확인할 수 있었다.

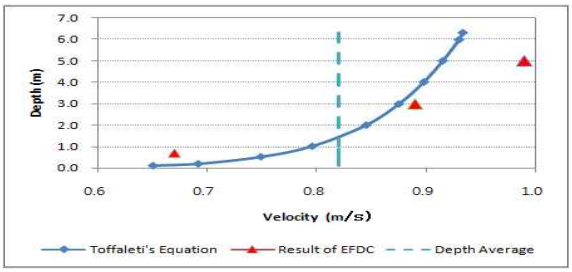


그림 8. 유속분포 비교

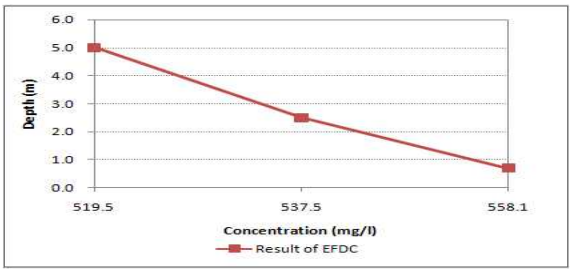


그림 9. 농도분포

4. 결론

국내 최초로 건설중인 주운하천을 대상으로 3차원 수리해석과 함께 유사의 이송, 침식, 퇴적 현상을 연동하여 모의할 수 있는 유한차분 수치모형인 EFDC를 이용하여 주운하천에 유입되는 다입경 혼합유사의 입경별 시·공간적 퇴적분포 특성을 고찰한 후 하상변동 예측에 있어서 입력자료와 모델의 유한차분 격자 구조에 의한 불확실성 해석을 수행하였다. 그 결과, 하천의 하상변동 예측의 신뢰도 향상을 위해서는 유사의 밀도값 등 퇴적물의 물리적 물성치에 대한 장기적인 모니터링이 필수적이라 판단되며, 연구 결과는 향후 주운하천, 자연하천과 연계된 인공하천의 계획 및 개발시 확대 적용되어질 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 한국수자원공사 (2004). 굴포천 방수로Ⅱ단계 건설사업 제1공구 시설공사, 기본설계보고서(보완).
2. 우효섭 (2001). 하천수리학, 청문각.
3. 한국수자원공사 (2009). 경인 아라뱃길사업 제5공구시설공사 홍수처리계획 보고서.
4. Hamrick, J. M. (1992). A three dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects, Special Report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Glouceslter Point, VA.
5. Toffaleti, F. B. (1969). Definitive computations of sand discharge in rivers, J. of Hyd. Div., ASCE, Vol. 95, No. HY1, pp. 225-248.