

감조 하구의 흐름 해석을 위한 수치 실험

A Numerical Experiment for the Flow Analysis in the Tidal River Estuary

황승용¹, 이삼희², 최미경³

Seung-Yong Hwang¹, Sam Hee Lee², and MiKyoung Choi

1. 서 론

우리나라 대하천 중에서 황해로 유입되는 자연 하구를 한강에서 유일하게 찾을 수 있다. 하천의 담수와 바다의 염수가 자연스레 교차·혼합되는 기수역은 수생태계의 중요한 서식처가 될 뿐만 아니라 바다와 하천을 잇는 중요한 생태통로이기도 하다(우 등, 2003).

황해의 영향으로 조석의 범위가 과거에는 팔당호까지 달았으며, 현재에도 한강대교 관측소의 수위 기록에 영향을 미친다. 한강대교 자동유량 관측성과에 따르면, 역류되는 유량이 2,000 m³/s에서 4,500 m³/s에 달한다(이 등, 2009). 하구에서 최대 유속이 창조와 낙조 모두 대조 때는 2 m/s가 넘기도 하며, 소조 때도 1 m/s 이상의 유속이 기록된다(Hwang et al., 2005).

또한 하천 홍수의 규모도 매우 커서 최근 10년간 2005년을 제외하고 일유량 규모로 매년 6,500 m³/s 이상의 홍수가 발생되었다. 같은 기간 동안 큰 홍수는 2006년 7월에 발생되었으며, 한강대교 관측소에서 일유량 규모로 22,900 m³/s에 달하는 홍수로 기록된 바 있다(건교부, 2006). 조석과 홍수에 의해 발생하는 강한 유속에 의해 심각한 하상변동이 야기되는데, 주로 장주기 홍수에 의한 세굴과 단주기 조석에 의한 퇴적이 반복되는 양상으로 나타난다(황 등, 2007).

최근 한강 하구에서 인위적 또는 자연적 요인에 의한 지형의 변화가 관찰되고 있는데, 그 중 대표적인 것이 식생으로 덮인 우안 고정사주이다

(Fig. 1 참조). 과거 신곡수중보의 건설과 하중도의 준설 이후 출현한 우안의 사주 위에 홍수와 조석에 의한 퇴적과 식생의 번무로 고정되면서 그 규모가 확대되고 있다(이 등, 2005). 현재 습지보호지역(일명, 장항습지)으로 지정된 이 고정사주는 하천 내에 버드나무와 조류, 심지어 고라니, 삼과 같은 대형 포유류까지 서식하는 기이한 생태환경을 이루고 있다.

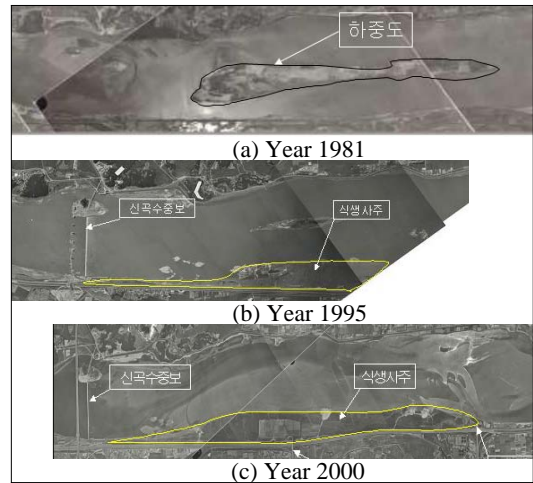


Fig. 1. Aerial photos of the Han River Estuary

정전협정 이후로 한강 하구에 대한 개발이나 보전 요구가 첨예하게 대립된 적은 많지 않았다. 개발이든 보전이든 어떤 방안을 평가하기 위해서는 관측 자료의 축적, 분석 방법의 수립, 종합적인 검토 등이 필요할 것이다. 그 중 분석 방법으로 물리 모형과 수치 모형을 통한 분석이 있겠으며, 하구의 복잡한 현상과 다양한 구성 재료를

1 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 하천·해안항만연구실 선임연구원

2 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 책임연구원

3 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 하천·해안항만연구실 연구원

생각하면 물리 모형보다는 수치 모형이 더 적절할 것이다(우 등, 2003).

한강 하구에 대한 하상변화 평가모형의 개발을 위한 첫 단계로 감소하구 지형을 본뜬 실험 구간에서 홍수와 조석이 병합되는 흐름을 분석하기 위해 2차원 수치모형을 검토하고자 한다.

2. 모형의 이론

2.1 연구 동향

한강 하구에서 홍수와 조석이 두드러진 영역은 상류의 신곡수중보부터 하류의 전류관측소 구간 일 것이다. 변동하는 조위에 대한 해석을 위해서는 부정류 모의가 불가피하며, 홍수와 조석과의 전파를 재연하기 위해서는 상류와 사류에 대한 동시 해석이 요구된다.

1980년대 공기동역학 분야에서 시작된 충격포착(shock-capturing) 기법이 널리 소개되면서 쌍곡선형 지배방정식의 해법에 대한 괄목할 만한 진전이 있었다. 주로 특성치의 불연속과 그 전파에 대해 Riemann 문제로 접근한 것으로 1950년대 말 S.K. Godunov의 선구적인 시도에서 비롯된다. 이후 국외 연구 사례는 기술하기 어려울 정도로 무수히 많으며, Riemann 해법에 대한 종합적인 기술은 Toro(2009)의 저작에서 참조할 수 있다.

Riemann 해법을 적용한 국내 연구로는 오 등(1995)이 처음으로 Saint Venant 방정식에 적용하였다. 이(1998)는 처음으로 2차원 천수방정식에 적용하였으며, 같은 방정식에 대해 이 등(2001), 이 등(2001), 김 등(2004), 그리고 김 등(2009)의 연구가 뒤따른다. 특히, 김 등(2009)은 분할격자기법(cut-cell method)을 처음으로 적용하여 계산의 정확도를 높였다.

2.2 지배방정식과 해법

지배방정식은 다음과 같은 천수방정식이다.

$$\mathbf{U}_t + \mathbf{F}(\mathbf{U})_x + \mathbf{G}(\mathbf{U})_y = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (1)$$

여기에서, 아래 첨자 t , x , 그리고 y 는 각각 시간과 공간에 대한 편미분을 의미한다. 보존변수의 벡터, \mathbf{U} , x 와 y 방향의 플럭스 벡터, \mathbf{F} 와 \mathbf{G} , 그리고 원천항, \mathbf{S} 는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = [h, hu, hv]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = [0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy})]^T \quad (5)$$

여기에서, h 는 수심, u 는 x 방향 유속, v 는 y

방향 유속, g 는 중력가속도, S_0 는 바닥 경사, 그리고 S_f 는 마찰경사를 의미한다.

식(1)을 하나의 유한체적(m 개의 변으로 이루어진 i 번째 셀)에 대해 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{U}}_i = -(1/A_i) \sum_{j=1}^m \mathbf{T}(\theta_j)^{-1} \mathbf{F}(\bar{\mathbf{U}}_j) L_j + \mathbf{S}(\mathbf{U}_i) \quad (6)$$

여기에서 A 는 그 셀의 면적, L 는 그 셀에서 j 번째 변의 길이, θ 는 그 변이 (x, y) 좌표계에서 이루는 각도, $\dot{\mathbf{U}}$ 는 시간에 대한 \mathbf{U} 의 도함수, $\bar{\mathbf{U}}$ 는 그 변에서 외부로 법선 방향인 \mathbf{U} 의 성분, 그리고 변환행렬, $\mathbf{T}(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

셀의 한 변에 대한 새 좌표계에서 Riemann 문제는 다음과 같이 1차원 쌍곡선형 미분방정식의 초기치 문제이다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{U}}_t + [\mathbf{f}(\bar{\mathbf{U}})]_x &= 0 \\ \bar{\mathbf{U}} &= \begin{cases} \bar{\mathbf{U}}_L & \bar{x} < 0 \\ \bar{\mathbf{U}}_R & \bar{x} > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

한 셀의 각 변에서 식(8)에 대해 정확해를 구하면 정확 Riemann 해법이 되고, 준선형식으로 근사하여 푸는 방법을 근사 Riemann 해법으로 부른다. 이렇게 구한 값을 식(6)에 대입하여 시간에 대한 상미분 방정식을 풀면 하나의 셀에서 보존변수의 벡터 즉, 수심과 유속을 얻는다.

식(8)의 Riemann 해법은 공간에 대해 1차의 정도이나, 셀 내부에서 보존변수를 선형으로 외삽하는 van Leer(1973; 1974; 1977a; 1977b; 1979)의 경사 제한 기법을 적용하면 2차의 정도를 얻을 수 있으며, 이를 MUSCL(Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws)이라 부른다. 그런데 이 기법은 2차원 공간에서 셀의 형상이 직사각형이어야 하는 단점이 있다. 즉, 격자체계가 구조적 격자로 한정되는 것이다.

MUSCL을 비구조적 격자체계에 적용하기 위해 제안된 기법이 수정 MUSCL이며(이, 1998), 이 연구에서는 이 기법을 적용한다.

3. 모형의 적용

수치모형을 적용하기 위해 현재의 한강 하구 신곡수중보 직하류 구간을 개략적으로 본떠 실험 구간으로 설정하였다(Fig. 2 참조).

세 가지 종류의 경계조건에 대해 검토하였다.

첫 번째 경우(C1)로써, 상류 경계 전체에 500 m^3/s 의 고정 유량이 유입되고 하류 경계 전체에 3 m의 고정 수위 위에 파고 4 m의 사인파를 계산 시간, 3,000 s 동안 1주기가 되도록 발생시켜 조위 변동에 대한 영향을 고려하였다. 두 번째 경우(C2)에는 하류 경계를 그대로 두고 상류의 고정 유량에 더해 1/2주기 사인 파형의 유량수문곡선을 발생시켰으며, 이때 첨두유량은 1,000 m^3/s 가 된다. 마지막 경우(C3)는 하류 경계를 그대로 두고 상류 경계에 하류 수위와 크기는 같으나 1/8주기 선행하는 사인파를 발생시킨 것이다.

실험구간을 40 m × 40 m의 사각형 셀, 7,500개로 구분하였으며, 총 절점의 수는 7,781개이다. 초기조건은 하류 고정 수위와 같은 값으로 전 구간에 부여하였다.

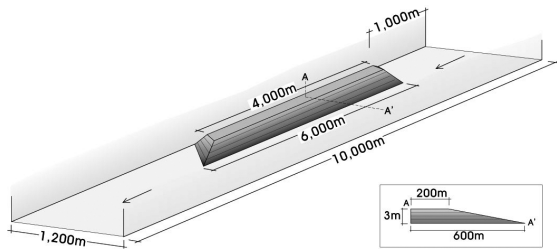


Fig. 2. Experimental reach

4. 결 과

실험 경우 C1과 C2에 대한 계산 결과 중 수위를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 (a) ~ (c)는 C1에 대한 결과로서, 상류와 하류에서 각각 홍수파와 조석파가 발생(a)되어 병합(b)되었다가 서로 다른 방향으로 분리(c)되는 과정이 잘 보인다. (d)는 실험 경우 C2에 대한 것으로 C1과 비슷하나, 더 큰 유입 유량 때문에 유속이 증가되어 홍수파의 전파 속도가 C1에 비해 더 빠르다.

Fig. 4는 상·하류 경계조건이 모두 수위인 C3에 대한 수위를 보인 것으로 C1과 C2와 마찬가지로 경계에서 발생(a)된 파가 진행(b)하여 병합(c)되고 분리(d)되는 과정이 잘 나타난다.

실험 경우 C3에서 홍수터 부분이 드러나는 모습을 Fig. 5에 보였다. (a)는 물이 빠지기 시작할 때의 수위이며, 이때의 유속 벡터를 나타낸 것이 (c)이다. (b)와 (d)는 홍수터 마루가 거의 드러난 상태의 수위와 유속 벡터를 각각 나타낸 것이다. (d)의 경우 상류에서 다시 수위가 증가하는 시각으로 홍수터의 상류 끝에서 매우 복잡

한 흐름을 보인다. 표고가 상대적으로 높은 홍수터에서 물이 빠져나가는 과정이 성공적으로 재연됨을 알 수 있다.

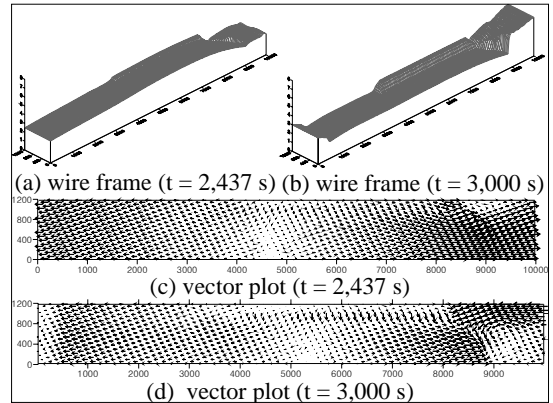


Fig. 5. Wetting and drying processes in flood plain (C3)

Fig. 6은 실험 구간의 세 정점에서 실험 경우 C3에 대한 수위의 변화를 시간대 별로 나타낸 것이다. 우안으로부터 200 m 위치에 대해 하류 끝으로부터 각각 2,500 m, 5,000 m, 그리고 7,500 m 떨어진 정점들이다.

5. 결론 및 향후 연구

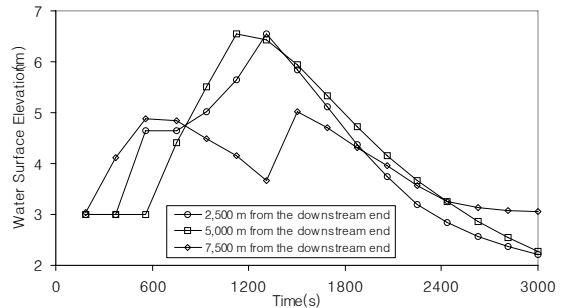


Fig. 6. Hydrographs at the cells, 200 m from the left side

하천의 홍수와 바다의 조석이 병합되는 하구의 개략 지형에 대해 Riemann 해법이 이용되는 수정 MUSCL을 적용하였다. 다양한 경계에 의해 발생된 불연속면의 전파가 잘 재연되었으며, 특히 홍수터에 물이 차고 빠지는 과정이 별도의 처리 없이 자연스럽게 재연되었다.

Riemann 해법은 계산 시간의 소모가 다른 기법에 비해 큰 것으로 알려져 있다. 게다가 어떤 단계에서 시간 간격은 가장 복잡한 흐름에 있는 셀에 대해 설정된 값에 지배된다. 이에 대한 대책으로 국부적으로 불연속인 영역에서는 정교한 Riemann 해법을 이용하고 부드러운 영역에서는

보다 단순한 해법을 적용하는 것이다. 이 기법은 적응 Riemann 해법(Toro, 2009) 또는 혼성 플럭스 계산(hybrid flux computation)으로 불린다(Müller, 2003). 이를 위해서는 연속인 영역에 대한 판별 기준과 적응 격자 분할(AMR: adaptive mesh refinement) 기법이 포함되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 이(1998)에 기초하여 수행되었으며, 이를 위해 Source Code의 사용을 허락해준 현대엔지니어링(주) 이성태 과장에게 감사한다.

이 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”으로 지원받은 과제이다.

참고문헌

건설교통부(건교부) (2006). 한국수문조사연보(유량편).
 김 원, 김창완, 윤광석, 윤태훈 (2001). 신곡수중보와 조석운동을 고려한 한강 본류의 흐름특성. 대한토목학회 논문집, 21(3B), 305-314.
 김대홍, 조용식 (2004). HLLC Approximate Riemann Solver를 이용한 천수방정식 해석. 한국수자원학회논문집, 37(10), 845-855.
 김정준, 김정민, 조용식 (2009). 분할격자기법을 이용한 실험수조 댐붕괴파의 수치모의. 대한토목학회논문집, 29(2B), 121-129.
 오성택, 황승용, 이길성 (1998). 흐름률 분리방법에 의한 도수의 수치해석. 대한토목학회 논문집, 11(II-3), 215-221.
 우효섭, 윤광석, 황승용 (2003). 지속가능한 하구부 이용·보전 방안의 분석 및 평가 모형 개발. 한국건설기술연구원.
 이민호, 김창완, 유동훈 (2009). 자동유량측정에 의한 한강대교 조석영향 분석. 한국수자원학회논문집, 42(7), 513-523.

이삼희, 김원, 황승용, 김중우, 백경오, 김치영 (2005). 한강 하류부 하상변동조사 연구보고서. 건교부 서울지방국토관리청.
 이성태 (1998). 이차원 수리 충격파 모의를 위한 유한체적 비정상 흐름 모형. 공학석사 학위논문, 서울대학교.
 이종욱, 조용식 (2001). TVD 수치모형의 개발:II. 천수방정식. 한국수자원학회논문집, 34(2), 187-195.
 이종욱, 조용식, 윤광석, 윤태훈 (2001). TVD 수치모형의 개발: I. 선형 이송방정식. 한국수자원학회논문집, 34(2), 177-186.
 한국건설기술연구원(건기연) (2002). 한강수계하천정비기본계획(보완)용역 중 한강하류부 하상변동분석 연구.
 황승용, 이삼희, 박재민 (2007). 한강 하구 하상변동에 대한 홍수와 조석의 영향. 대한토목학회 2007년도 정기 학술대회 논문집, 4149-4152.
 Hwang, S.-Y., Oh, Y.M., and Woo, H. (2005). A field observation on the suspended sediment concentration in the Han river estuary affected by tide and river runoff. KSCE Journal of Civil Engineering, KSCE, 9(1), 13-18.
 Müller, S. (2003). Adaptive multiscale schemes for conservation laws. LNCSE 27, Springer-Verlag.
 Toro, E.F. (2009). Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics - A Practical Introduction (3rd ed.). Springer-Verlag.
 van Leer, B. (1973). Towards the ultimate conservative difference scheme I. The quest of monotonicity. Springer Lecture Notes in Physics, 18, 163-168.
 van Leer, B. (1974). Towards the ultimate conservative difference scheme II. monotonicity and conservation combined in a second order scheme. Journal of Computational Physics, 14, 361-370.
 van Leer, B. (1977). Towards the ultimate conservative difference scheme III. Upstream-centered finite-difference scheme for ideal compressible flow. Journal of Computational Physics, 23, 263-275.
 van Leer, B. (1977). Towards the ultimate conservative difference scheme IV. A new approach to numerical convection. Journal of Computational Physics, 23, 276-299.
 van Leer, B. (1979). Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to Godunov's method. Journal of Computational Physics, 32, 101-136.

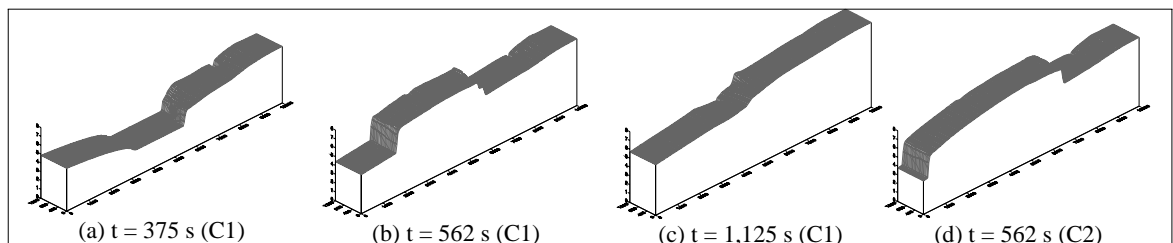


Fig. 3. Wire frames for water surface elevation (C1 and C2)

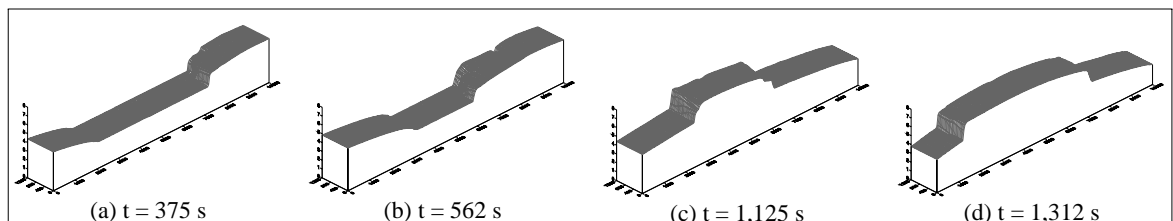


Fig. 4. Wire frames for water surface elevation (C3)