

연구논문

Flushing 방류로 인한 섬진강 하구부 염수침입 영향분석

노준우 · 이진영 · 신재기

한국수자원공사 K-water 연구원

(2011년 1월 28일 접수, 2011년 5월 29일 승인)

Analysis of Saltwater Intrusion by Flushing Discharge in the Seomjin River Estuary

Joonwoo Noh · Jin-Young Lee · Jae-Ki Shin

K-water Research Institute

(Manuscript received 28 January 2011; accepted 29 May 2011)

Abstract

Estuary is a transitional zone between river and ocean environment that receives the maritime and riverine influence simultaneously. Estuaries are the most productive habitats because their incoming water provides large quantities of nutrients. The Seomjin River estuary, located in the middle south of Korea, has no barrage and shows natural characteristic of estuary. However, due to dredging and reclamation the environment of the estuary has been changed significantly in the river mouth. In addition, increased freshwater intake in midstream of the Seomjin River results in salinity intrusion. In this paper salinity variation in downstream estuary of the Seomjin River has been simulated and tested using EFDC model. The results of simulation were compared with measured data collected at three points, Culture & Art Center, Sumjin Iron Bridge, and Mokdori, located at 9Km, 14Km, and 15.5Km respectively from downstream estuary. Based on the simulated results, the contribution of the flushing discharge has been evaluated in preventing the salinity intrusion by increasing the discharge flowrates released from the Juam dam.

Keywords : Flushing discharge, Seomjin river estuary, Salinity intrusion, EFDC

1. 서론

하구는 담수와 해수가 서로 혼합되는 천이 수역으로 하천류, 해진류, 조석파, 지형, 그리고 담수와 염수간의 밀도차 등에 의한 요인들로 흐름이 지배된다. 강과 바다가 만나는 연안해역은 염수와 담수의 만남으로 다양한 동식물의 서식처가 될 뿐 아니라 자연적인 항구로서의 기능을 수행하여 공업발전의 기반과 각종 오염물 자연처리 기능까지 여러 역할을 담당하게 된다. 하천 하구에서는 밀도가 작은 담수가 상대적으로 밀도가 큰 염수를 만나면서 하나의 경계층을 형성하게 된다. 이는 하구흐름의 대표적 특성이라 할 수 있으며 최근 지구 온난화로 인한 해수면 상승으로 말미암아 연안수역에 대한 연구와 관리의 필요성은 날로 증대되고 있다.

하구흐름에 대한 특성을 규명하기 위하여 물리적 실험 및 수치해석을 통한 다양한 연구가 이루어져 왔다. 류시완 등(2009)은 실내실험을 통하여 연안해역에서 담수와 염수의 혼합으로 형성된 염수뺨기에 대하여 경계면의 형상을 예측하였다. Xu 등(2008)이 Pamlico River Estuary에 대해서, Jiang과 Shen(2009)이 Oujiang River Estuary에 대해 EFDC를 이용해 염분의 성층현상을 수치모의 하였다. 정성태 등(2009)은 2차원 수치모형인 SMS와 3차원 수치모형인 EFDC를 이용해 섬진강 하구부의 염수침입을 분석해 염수의 밀도차에 따른 하천단면에서의 성층화를 표현할 수 있는 3차원 모형인 EFDC에서 실제의 염수침입 현상을 더 잘 나타냈음을 확인했다. 김종규 등(2008)은 섬진강 하구역을 중심으로 광양만과 여수해만에서 염분을 현장관측하고 기상, 조석, 하천유출수 및 온배수를 고려해 3차원 수치모형 EFDC로 섬진강하구역의 3차원 혼합특성을 파악하였다. 손용구 등(2009)은 EFDC모형을 사용하여 낙동강 하구둑의 염수침입 및 염해피해 방지 효과에 대해 재평가 하였다. EFDC모형은 WASP나 HEM-3D와 연계한 수질해석이 가능하여 해외에서 많이 사용되고, 국내에서도 사용자가 증가하는 추세다. 서동일 등(2009)은 WASP와 EFDC를 연계해 용담호에 대해 수리-수

질 연계모델링을 실시한 바 있으며, Park 등(2005)은 광양만에 대해 HEM_3D 모의를 실시한 바 있다.

남해안 중부에 위치하고 있는 섬진강 하구역은 하구둑이 건조되어 있지 않은 자연하구로 섬진강 하류 일대와 광양만이 하나의 광활한 기수역을 형성하고 있다. 섬진강 하구역에서는 지하체의 대규모 모래채취, 댐건설과 하류단의 취수장으로 인한 유량 감소 등으로 인하여 하구의 기수역이 점차 상류로 확장되는 추세이다. 이에 본 연구에서는 섬진강 본류 및 하구역을 대상으로 3차원 수치모형인 EFDC를 구축하고 기수역의 염분침투 현상과 상류단 방류량 증가에 따른 하구 기수역에서의 염분 감소현상에 대한 모의를 실시하였다. 실측된 조위자료와 대상유역에서 측정된 염분자료를 바탕으로 모형의 검보정을 실시하였고 주암댐 flushing 방류유무에 따른 하류단 수심별 염분농도 저감효과에 대하여 비교 분석한 결과를 제시하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상유역

섬진강 유역은 한반도의 남해안 중서부의 동경 126° 51' 50" ~ 127° 53' 05", 북위 34° 40' 26" ~ 35° 50' 0" 사이에 위치하고 있다. 인접하는 유역은 동쪽으로 낙동강유역, 서쪽으로 영산강유역과 동진강유역, 북쪽으로 금강유역 및 만경강유역이다. 섬진강 하구지점의 유역면적은 4,911.89 km², 유로연장은 223.86 km, 유역평균폭은 21.94 km, 형상계수는 0.1이고, 유역형태는 수지상이며, 평균고도는 EL. 301.60 m이다. 행정구역상 전라북도의 정읍시, 남원시, 진안군, 장수군, 임실군, 순창군, 전라남도의 순천시, 광양시, 담양군, 곡성군, 구례군, 화순군, 보성군, 장흥군, 경상남도의 하동군을 포함 3도 4시 11군으로 이루어져 있다. 연구 대상지역은 섬진강 하구로부터 상류방향으로 약 30km지점을 포함한 범위로 연구대상지역 내 다압취수장이 존재한다.

하구는 담수와 해수가 서로 혼합하는 천이 수역

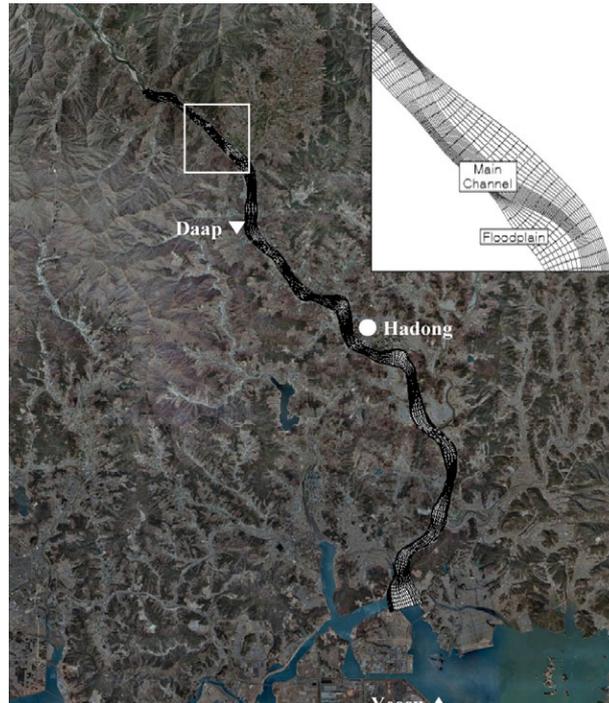


그림 1. 대상구역 및 계산격자

으로 하천류, 해빈류, 조석파, 지형, 담수와 염수간의 밀도차 등에 의한 요인들로 흐름이 지배된다. 염수에 비해 밀도가 작은 담수는 밀도가 큰 염수를 만나는 하천 하구에서 염수와 밀도차에 의해 염수 위로 흐르게 된다. 하천 하구에서의 염수의 침입길이와 혼합형태는 담수와 염수가 만나는 경계면에서의 전단력에 영향을 받고, 이러한 밀도차에 의해 생기는 하천 하구부근의 흐름을 하구 밀도류라고 하며 혼합의 강약에 따라 약혼합형하구, 완혼합형 하구, 강혼합형 하구의 3가지 형태로 구분된다. 섬진강 하구는 담수와 염수의 밀도차에 의한 염분경사가 존재하므로 완혼합형 하구라고 할 수 있다. 섬진강 하구 입구의 조석은 반일주조로 평균대조차가 260cm이며, 광양만 중앙부에서의 최강 조석류 유속은 50~80cm/s 이다.

EFDC 모형에서의 대상구역의 수평계산 격자는 종단방향으로 약 100m 간격의 280개, 횡단방향으로 약 20m 간격으로 25개로 총 7000개의 격자를 가지고 있으며, 연직방향으로 5개의 층으로 격자를

구성하였다. 계산격자는 그림 1과 같이 주수로와 홍수터를 구분하여 유량변동에 따른 wet/dry 현상을 반영한 모의가 가능하도록 구성하였다.

2. EFDC (Environmental Fluid Dynamic Code) 모형

EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모형은 연안, 하구, 호소, 습지 및 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의하는 3차원 수치모델로서 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되었으며, 미국환경청(EPA: Environmental Protection Agency)의 공인모델로 지정되어 있고 HEM-3D(Three-Dimensional Hydrodynamic Eutrophication Model), WASP등의 수질모형과 연계도 가능하다. EFDC는 wet/dry기법으로 조석간만의 영향이 있는 곳이나 댐, 압거 등과 같은 인공구조물에 의한 영향도 모의가 가능하며 특히, mass-conserving scheme을 이용하여 천해역에서 3차원의 조간대 처리가 가능하도록 설계되어져

있어 조건대가 넓게 분포하는 우리나라 연안에 용이하게 적용할 수 있는 장점을 가진다. EFDC모형은 이론적인 면과 수치해석적인 면에서 Blumberg and Mellor(1987)의 모형과 많은 공통점을 가지며, 수평적으로 직교(Cartesian) 또는 곡면(Curvilinear)좌표계를 사용하며 수치적으로는 같은 수의 층을 가지는 σ -좌표계를 사용한다. EFDC의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \partial_t m_x m_y H u + \partial_x m_y H v u + \partial_y m_x m_y w u - f_e m_x m_y H v \\ & = -m_y H \partial_x p + p_{am} + \phi + m_y \partial_x z_b^* + z \partial_x H \partial_z p \\ & + \partial_z (m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z u) + \partial (\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_x u) \quad (\text{식 1}) \\ & - \partial (\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y u) - m_x m_y c_p D_p u^2 + v^{2/2} u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \partial_t m_x m_y H v + \partial_x m_y H u v + \partial_y m_x H v w + \partial_z m_x m_y w v \\ & + f_e m_x m_y H v = -m_x H \partial_y p + p_{am} + \phi + m_x \partial_y z_b^* \\ & + z \partial_x H \partial_z p + \partial_z (m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z v) + \partial_x (\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_x v) \quad (\text{식 2}) \\ & + \partial (\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y v) - m_x m_y c_p D_p v^2 + v^{2/2} v \end{aligned}$$

$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y \quad (\text{식 3})$$

$$\tau_{xz}, \tau_{yz} = A_v H^{-1} \partial_z u, v \quad (\text{식 4})$$

여기서, u 와 v , w 는 각각 x , y , z 축의 유속벡터이고, m_x 와 m_y 는 유속벡터의 크기를 나타낸다. z_b^* 는 자유수면의 수직좌표, z_b^* 는 하상의 수직좌표이다. H 는 전수두, ϕ 는 gz_b^* 와 같은 값을 가지는 위치수두이다. 코리올리효과를 고려하기 위해 식(3)의 매개변수 f 에 코리올리의 구심가속도 항 f_e 를 더한다. 식 (1)과 (2)의 Q 항은 추가적인 수평 운동량 확산항이다. 수직 난류 점성항 A_v 는 수평 속도의 수직 전단응력과 관련된다.

염분은 용존산소의 포화도(dissolved oxygen saturation concentration)와 해수와 담수와의 밀도차에 의한 동역학적 거동에 영향을 받는다. EFDC의 염분추적은 질량보존 방정식을 기본으로 사용한다(Hamrick(1992)). 다양한 수질변수에 대한 질량보존의 지배방정식은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} \quad (\text{식 5}) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S_e \end{aligned}$$

여기서, C 는 오염부하량, u , v , w 는 x , y , z 방향 유속벡터, K_x , K_y , K_z 는 x , y , z 방향 난류확산계수, S_e 는 단위부피당 오염물질 유출입에 대한 항이다. 식 (5)의 좌변 마지막 3개 항은 이송(advective)항이고, 등호 우측의 첫 3개 항은 확산(diffusive)항으로 물질수송에 대한 이 6개 항은 수리동역학 모델(Hamrick 1992)의 염분에 대한 질량보존방정식과 비슷하다. 식 (5)의 마지막 항은 동역학적 과정(kinetic process)과 외부 오염부하량(external loads)을 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 검증

상류부 경계자료로 송정지점의 유량자료를 사용하였고, 하류부 경계자료로 여수조위관측소의 조위자료를 사용했다. 염분도의 경우 여수지점 평균치인 32‰을 사용해 모의를 실시한 결과를 그림 2에 제시하였다.

먼저 구축된 EFDC 모형의 수리학적 재현성에 대해 검증하기 위하여 본 연구에서는 송정관측소의 유량과 여수관측소에서 측정된 조위자료를 경계조건으로 반영하였고 그림 3에 하동수위관측소에서 관측한 수위와 모델을 이용하여 계산한 결과값을 비교 제시하였다. 하동지점은 조위의 영향을 그대로 받는 지역으로서 입력자료로 사용된 조위의 형태를 그대로 재현하는 지점이다. 하동지점에서의 계산값은 관측값과 비교하여 고조시와 저조시에 관측값보다 다소 작게 나타나고 있으며, 고조 및 저조의 최고, 최저점의 발생시기도 비슷하거나 약간 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인으로는 하류단 경계조건으로 반영된 조위자료가 하구부와 거리상으로 약 20km 남쪽에 위치해 있는 여수지점의 조위를 사용하여 모의한 결과라

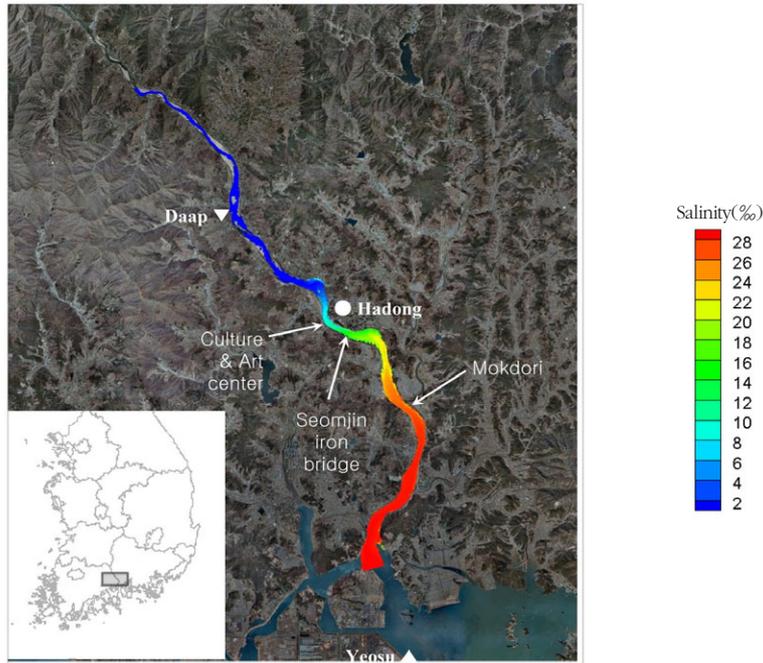


그림 2. EFDC 모의결과

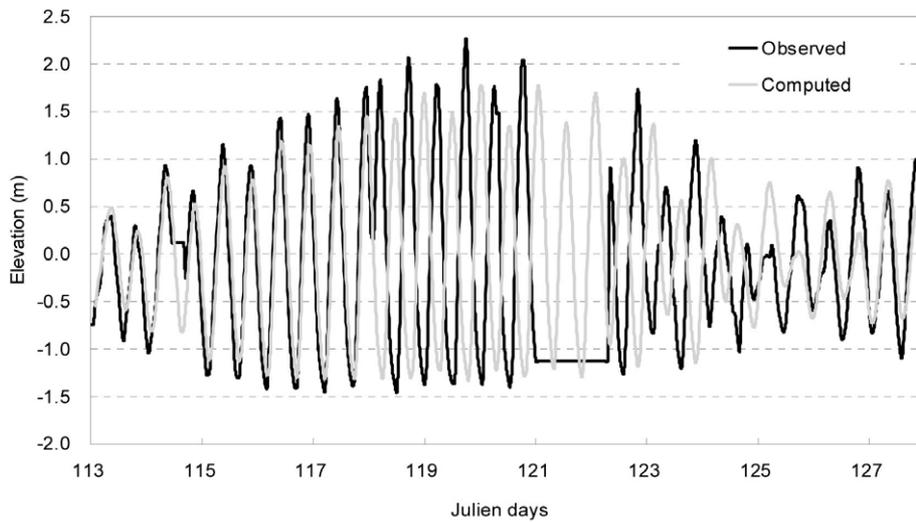


그림 3. 하동관측소수위비교결과

판단된다. 즉 실제의 조류는 여수지점을 통과하여 광양만을 지나 하구부까지 도달하는 과정에서 광양만 내부수역의 특성에 의해 변형되는 현상을 가지고 있지만, 하구부에서 여수지점의 조위값을 그대로

로 사용하여 이러한 감쇄특성을 고려하지 않은 상태에서 하류부 경계조건으로 입력되었다.

EFDC로부터 계산된 염분모의결과를 그림 4에 제시하였다. 하류에서부터 상류방향으로 9km 지점

의 목도리지점, 14km 지점의 섬진철교지점, 그리고 15.5km 지점의 문화회관의 3개 지점에서 실측 염분 자료와 EFDC 모형으로 계산된 염분자료를 비

교한 결과 EFDC 모형의 모의결과는 실측치와 비교적 잘 일치하였으며, 염분 성층화현상도 잘 모의되고 있음을 알 수 있었다. 목도리 지점의 경우 실측

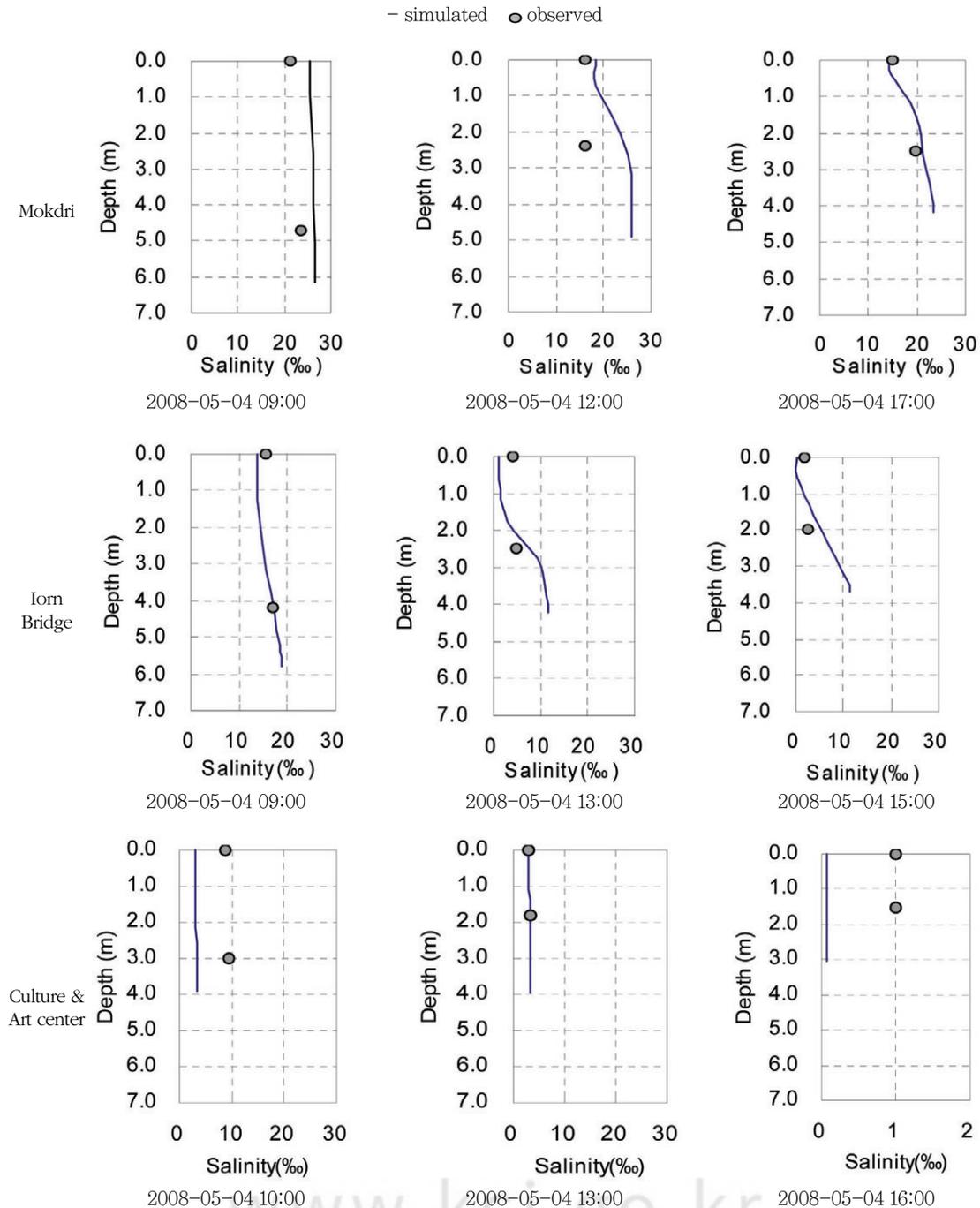


그림 4. 수심별 모의결과 비교

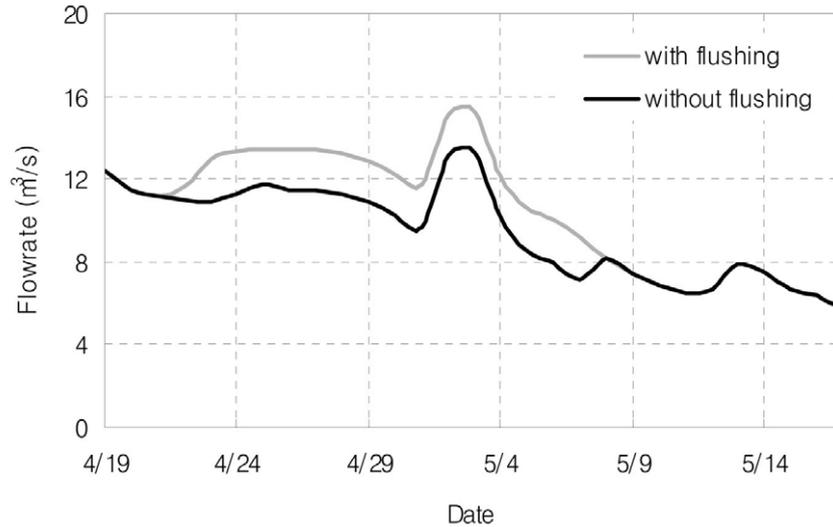


그림 5. Flushing 유무에 따른 송정지점의 유량비교

값과 모의치 사이의 오차평균은 3.13이고, 상관계수는 0.67로 모의되었다. 섬진철교의 경우 오차평균이 2.34, 상관계수는 0.90였고, 문화회관의 경우 각각 3.31, 0.97로 분석되었다. 따라서 구축된 EFDC 모형이 실제 유역의 특성을 제대로 반영한 것으로 판단된다.

섬진강 하구유역과 같은 완혼합형 하구의 염분분포는 조류와 바람에 의한 영향을 많이 받게 된다. 특히 섬진강 하구의 경우에는 하류부 광양제철소의 매립으로 인한 지형의 영향도 고려되어야 할 것이다. 아래의 그림 4로부터 목도리 지점의 경우 모의값은 염분의 성층화 현상을 잘 나타내지만 실측치에는 이러한 성층화 현상이 뚜렷하지 않음을 알 수 있는데 이는 하류의 염분농도가 입력되는 단면 전체 5개 수층에 대하여 동일한 값인 32%이 입력되었고, 그 외에도 성층화 현상에 영향을 끼치는 다양한 인자들, 즉 바람이나 파도, 지형 등에 대한 영향을 고려되지 않고 외해 조류만을 고려하여 모의한 것이 주원인이라 판단된다.

2. 모형의 적용

1) Flushing 방류

Flushing 방류는 댐 조절하천에서 하류하천의 수질환경과 생태계 서식환경(Tanaka, 2004)을 개선하기위해 일시에 많은 양의 물을 방류하는 저수지 운영방법이다. 금강의 경우 대청댐 하류 상수원의 NH₃-N 농도의 일시적인 저감을 위해 플러싱 방류가 실시된 적이 있으며, 정세웅(2004)은 비정상상태 하천수질모형인 KORIV1-WIN을 이용해 대청댐의 flushing방류가 하류 하천에서의 수질사고와 갈수기 수질악화에 미치는 영향을 평가했다. Cho(2001)는 QUAL2E와 WASP5 모형을 이용해 수력발전소의 침투방류가 남대천의 수질에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 또한 Hartnett 등(2003), Choi 와 Lee(2004) 등에 의해 현재까지 이루어진 하천하구에서의 flushing에 대한 연구는 조석이나 계절적 해수의 순환 등으로 인한 flushing의 수질개선 효과에 그 초점이 맞춰져 있다. 일반적으로 flushing 방류는 저수지 하류에서의 수질개선을 목적으로 하나 본 연구에서는 flushing 방류로 인한 하구에서의 염분도 변화에 대해 알아봄으로써 섬진강하구에서의 기수역 확장의 대안으로 flushing 방

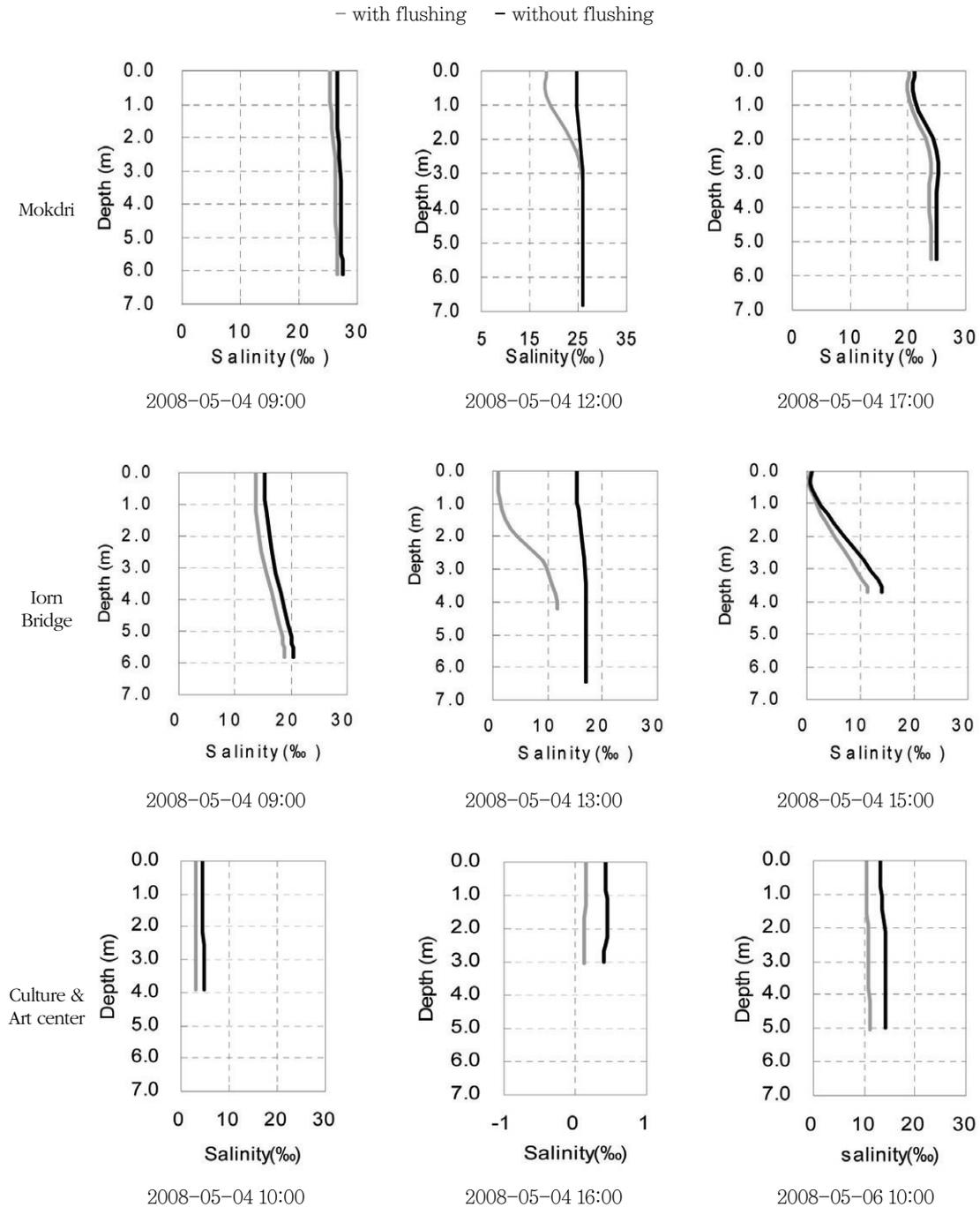


그림 6. Flushing 방류량 유무에 따른 염분비교

류의 효과에 대하여 검토하였다.

섬진강의 주요 지류인 보성강의 주암댐에서는 갈수기 수질악화를 개선하기 위하여 2008년 3월~5

월에 두 차례에 걸쳐 flushing 방류를 실시했다. 본 연구에서는 4/24~5/7에 걸쳐서 시행된 두 번째 flushing 방류를 기준으로 수행하였다. 주암댐에서

는 기존 방류량 대비 $0.7\text{m}^3/\text{s}$ 에서 $2.1\text{m}^3/\text{s}$ 범위내 증가방류를 실시하였고 송정수위표에서 측정한 유량변동을 그림 5에 제시하였다.

2) Flushing 모의 결과

기존 EFDC를 이용한 기수역에서의 염분 침입 분석 연구결과를 살펴보면 약 4m의 조차를 가진 하구인 Oujiang강 하구에서의 염분의 성층화 현상은 하천유량에 가장 민감하게 반응하고, 염분의 침투거리는 추가로 하구에서의 수위조건이나 하구에서의 바람 및 그 방향에 민감하게 반응했다(Jiang과 Shen(2009)). 하천의 담수유량이 많아지면 염분을 하구로 밀어내며, 하천유량이 적은 경우 염분이 보다 상류쪽으로 유입되는 것으로 나타났고, 염분의 성층화 현상 역시 담수유량이 적은 경우가 보다 뚜렷하게 나타났다(Xu *et al* (2008)). 모의 결과 flushing 방류가 없었을 경우, 하류로부터 약 300m 정도 더 상류까지 염분이 도달하는 것으로 나타났다. 모의기간 내의 주암댐에서의 증가방류량은 $2\text{m}^3/\text{s}$ 정도이나 Oujiang 강 의 경우와 마찬가지로 담수가 고유량일 경우 침투거리가 더 짧은 동일한 경향을 나타내고 있다. 또한 상류로의 염분침입한계의 위치는 조위와 그 양상이 잘 일치하는 것으로 나타났음을 알 수 있는데 이는 하천의 유량은 일정한데 반해 밀물 때는 조석류의 영향이 크기 때문에 염분이 썰물 때보다 상류로 더 올라가는 것이 주원인으로 판단된다.

그림 6에 flushing 방류유무에 따른 지점별 염분도를 제시하였다. 5월 4일 09시를 기준으로 목도리 지점에서 flushing 유무에 따른 염분농도의 차이는 평균 0.827, 섬진철교 지점에서 평균이 1.567, 문화회관 지점에서의 평균 1.499로 염분감소가 발생하는 것으로 모의되었다. 5/6일 10시의 경우 목도리 지점에서의 두 경우의 차이는 평균이 0.904, 섬진철교 지점에서의 차이의 평균은 1.677, 문화회관 지점에서의 차이의 평균은 3.051이다. flushing 방류량이 있는 경우의 단면에서의 염분도를 기준으로 했을 때 목도리지점에서는 약 3~5%, 섬진철교 지점에서는 약 8~20%, 문화회관 지점에서는 약

20~40%까지 차이가 발생한 것이다.

IV. 결 론

최근 지구 온난화로 인한 해수면의 상승으로 인하여 연안수역에 대한 연구와 관리의 필요성은 날로 증대되고 있다. 본 연구에서는 갈수기 수질을 개선하기 위하여 실시한 flushing 방류의 효과를 염수침입방지 측면에서 EFDC 모의를 통하여 분석하였다. 섬진강 하구를 대상으로 분석한 결과 flushing 방류는 수질개선과 염분침입방지에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 주암댐에서 실시한 flushing 방류는 기존 저수지방류량 대비 $2\text{m}^3/\text{s}$ 내외의 증가하였을 때 염분침투거리의 약 300m의 차이를 보이는 것으로 모의되었다. EFDC 모의 결과는 하천 유량이 많은 경우 고유량이 염분을 하천 하구로 밀어내고 하천유량이 적은 경우, 염분이 좀 더 상류로 침입하는 이전의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 바탕으로 flushing 방류는 수질개선 및 염수침입 방지에 효과적인 것으로 판단되며 저수지 운영시 이를 반영하여 보다 최적화된 저수지 운영이 가능할 것으로 예상된다.

Jiang 등(2009)은 염분의 성층화 경향은 하천의 담수유량에 민감하고, 염분의 침입거리는 바람 등의 추가적인 요소에 민감하다고 했으며, 섬진강 하구와 같은 완혼합형 하구의 염분 침투정도와 양상은 조석류와 바람, 파도, 담수유량, 하구바닥 지형 등의 영향을 받는다. 하지만 본 연구에서는 조석류에 대해서만 고려하였고, 모의 결과 염분의 성층화 현상을 보였지만 실측치는 뚜렷한 성층화 현상을 보이지 않았다. 따라서 염분의 실제 침투양상을 재현하기 위해서는 하구에서의 바람과 파도에 대한 영향도 고려되어야 할 것이며, 또한 염분의 침투양상 및 성층화 현상에 대한 연구를 위해서는 보다 정확히 측정된 염분자료를 바탕으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

V. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심B01-자연과 함께 하는 하천복원기술개발, ECORIVER21)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 권기영, 문창호, 이재성, 양성렬, 박미옥, 이필용, 2004, 섬진강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스, 한국해양학회 논문집, 9(4), 153-163.
- 김종규, 광경일, 정정호, 섬진강 하구역의 3차원 혼합특성 연구 한국해양환경공학회지, 11(3), 164-174
- 류시완, 김영도, 최재훈, 서일원, 권재현, 2009, 정상염수쇄기 경계층 거동에 대한 실험적 연구, 한국상하수도학회지, 23(6), 833-842.
- 서동일, 권기환, 박병준, 2009, EFDC를 이용한 3차원 수리-수온 모델링, 한국수자원학회 학술대회 논문집, 2220-2224.
- 손용구, 정상만, 차기욱, 허영택, 2009, EFDC를 이용한 낙동강 하구둑 염수침입방지 기능 평가, 한국수자원학회 학술대회논문집, 2018-2022.
- 정성태, 노준우, 허영택, 2009, 2차원 및 3차원 수치모형을 이용한 섬진강 하구부 염수침입 분석, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 785-790.
- 정세웅, 2004, 저수지 플러싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모형의 적용, 한국수자원학회 논문집, 37(10), 857-868.
- 정세웅, 김유경, 2005, 상류 댐 플러싱 방류가 금강의 겨울철 암모니아성 질소 농도 저감에 미치는 효과분석, 한국물환경학회, 21(6), 609-616.
- Ali Abdollahi-Nasab, Micheal E. Boufadel, Hailong Li and James W. Weaver, 2010, Saltwater flushing by freshing by freshwater in a laboratory beach, Journal of Hydrology.
- Blumberg, A.F., and G.L. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In: Three-dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Science, Vol.4. (Heaps, N.S., ed.) American Geophysical Union, 1-19.
- EFDC Technical memorandum; Theoretical and computational aspects of sediment and contaminant transport in the EFDC model. Tetra Tech. Inc.
- Henrieta Dulaiova and William C. Burnet, 2008, Evaluation of the flushing rates of Apalachicola Bay, Florida via natural geochemical tracers, Marine Chemistry 109, 395-408.
- H.Jiang and Y.Shen, 2009, Numerical study on salinity stratification in the Oujiang River Estuary, Journal of Hydrodynamics, 21(6), 835-842.
- H.Xu, J.Lin. and D.Wang, 2008, Numerical study on salinity stratification in the Pamlico River Estuary'. Estuarine, Coastal and Shelf Science 80, 74-84.
- K.Park, H.Jung, H.Kim and S.Ahn, 2005, Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea, Marine Environmental Research 60, 171-193.
- K.Park, A.Y.Kuo, J.Shen and J.M.Hamrick, A three-dimensional hydrodynamic eutrophication model(HEM-3D): Description of water quality and sediment process submodells (EFDC water quality model)

K.W. Choi and J.H.W. Lee, 2004, Numerical determination of flushing time for stratified water bodies, *Journal of Marine Systems* 50, 263-281.

Michael Hartnett, Fiachra Gleeson, Roger Falconer and Mark Finegan, 2003, Flushing study assessment of a tidally active coastal embayment'. *Advances in Environmental Research* 7, 847-857.

최종원고채택 11. 06. 01