입자추적방법을 이용한 새만금 해역의 수리특성 변화 분석 Analysis of Hydrodynamic Change around the Saemangeum Area Using a Particle Tracking Method

서승원* · 이화영**
SeungWon Suh* and Hwa Young Lee**

요 지 : 장기간 시행된 새만금 건설단계별 환경변화 분석을 위해 3차원 무작위 행보에 의한 입자추적 기법을 이용한 해석이 시도되었다. 방조제 공사로 만경·동진강 및 금강 하구역의 운동 양상이 크게 변화되었다. 변산반도 외해 부근 운동 감소와 호 내 북측구간의 흐름 정체가 특이하다. 조류 이동거리를 건설단계별로 평가한 결과도 유사한 결과를 보인다. 연직혼합형태의 변화 분석을 위해 수온, 염분을 고려한 밀도성층을 재현한 결과 방조제 착공 전 잘 혼합된 연직구조 형태는 공사 중 개방구간 존재 시 부분적으로 혼합된 구조로 변화되고, 완공 후에는 만경·동진강 하구 입구부에 염분층이 구역과 호소 측에는 강한 밀도성층이 발생한다. 해석결과 수평방향의 확산과 연직 방향의 혼합능력 감소로 새만금 내외측 수질환경에 부정적 영향으로 작용할 수 있음이 추론된다.

핵심용어 : 새만금, 무작위 행보, 입자추적, 밀도성층, 환경변화

Abstract : A three dimensional random walk particle tracking method is applied to the Saemangeum area in order to find stepwise environmental changes according to long term construction. Flow regime around Mangyeong, Dongjin and Geum river estuary changed greatly due to dike construction. It is distinctive that reduction of Byeonsan area's flow field and stagnant change in the northern part of the inner reservoir. Similar characteristics are found through the tidal excursion analysis. By analysis of the vertical mixing structures according to density stratification based on temperature and salinity variation, a salt wedge and very strong stratification arises in the inner part of the reservoir after final closure, while it has been well mixed or partially mixed estuary during construction. Shrinking of horizontal dispersion and vertical mixing capability may cause adverse effect on water quality not only inner part but also outer region of the Saemangeum reservoir.

Keyword: Saemangeum, random walk, particle tracking, density stratification, environmental change

1. 서 론

2006년 4월 15여 년간 공사 끝에 방조제 끝물막이가 완료된 새만금 방조제 건설 사업은 1991년 기공식을 시작으로 진행되었지만 수질문제가 부각되어 1999년 5월과 2003년 7월 두 차례 공사가 중단된 후 재개된 바 있다. 그러나 내부 방수제 공사가 진행 중인 현재까지도 환경문제에 대한 많은 논란이 지속되고 있다. 끝물막이 이후 현재는 내부 수질저하 방지대책의 일환으로 신시·가력 배수갑문을 통해 해수소통을 실시해오고 있다. 배수갑문이 외해역과 소통되는 유일한 출입구 역할을 하게 되면서 호 내측의 수리 및 수질은 배수갑문 운영에 따라 지배적인 영향을 받게 되고 방조제 완공 전과는 다른 상태로 변화 되었다.

대규모 공사에 따른 영향을 사전에 예측하고 최소화하기 위한

많은 연구가 수행되었는데 한국해양연구원에서 새만금 방조제 건설에 따른 내외측의 수리, 수질, 생태 환경변화를 10여 년간 장기 모니터링하고 분석한 연구(국토해양부 한국해양과학기술진흥원, 2011)가 대표적이다. 이외에도 새만금 방조제 건설에 따른 조석체계 변화에 대한 예측을 김(2000)과 Kang et al.(2003) 그리고 서와 이(2007) 등 여러 연구자가 검토한 바 있으며 새만금 해역에서 밀도성층의 계절별 변동에 관한 김 등(2006)의 연구, 호 내측에서 인위적으로 발생된 평균수위 상승을 규명한 서와 조(2007)의 연구, 하구역의 수리특성 변화가 수질에 미치는 영향을 검토한 서와 이(2008)와 서 등(2010)의 연구 등 다양한 분야의 연구가 지금까지 수행되었다.

새만금 해역에 대해 기 수행된 많은 연구들은 Eulerian 개념에 의한 평가가 주를 이루고 있는데, 이와 달리 Lagrangian 입자추적에 의한 해석은 기존 연구에서 평가할 수 없었던 새

*군산대학교 해양건설공학과(Corresponding author : SeungWon Suh, Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Dahak-ro 1170, Gunsan, Jeonbuk 573-701, Korea, suh@kunsan.ac.kr)

**군산대학교 대학원 해양산업공학과(Department of Ocean Science & Engineering, Kunsan National University)

만금 방조제 공사 단계별 수리변화에 대한 심도 있는 분석이 가능하다. 일반적으로 Lagrangian 방법은 이송·확산을 모의하는데 우수한 장점을 가지나 해석하는 입자의 개수에 따라 계산시간이 증가하는 단점이 있다. 그러나 최근 컴퓨터의 연산능력 발달과 계산효율이 개선되어 큰 무리 없이 효율적인 해석을 할 수 있는 매력이 있다. 입자추적 기법을 적용한 국내 사례를 보면 류 등(1998)은 마산만의 해수교환율을 평가하였고 김 등(2000)은 동일해역에서 수중 확산관을 통해 방류되는 하수플룸의 거동 해석에 적용하였으며 정(2002)은 해양 방류구 해석에 농도개념에 의한 수치확산 오차를 줄이고자 입자추적 기법을 적용한 바 있다. 최 등(2010)은 선박의 침몰시 수색구난활동을 위해 입자추적모형을 이용하였고 조 등(2010)은 바다숲 조성을 위한 해조포자의 거동을 예측하는 등 주로 이송과 확산에 관한 연구에 무작위 행보에 의한 입자추적 방법이 적용되었다. 국외에서 입자추적 방법에 의한 해안공학분야의 연구 중 Dimou(1989)는 하구에서의 담수 확산에, Smith and Scott(1997)는 조석환경에서 담수 확산현상을 모의하는데 입자추적 기법을 사용하여 방류시기와 위치 그리고 방류속도의 적절한 선택이 환경영향을 저감하는데, Suh(2006)는 Lagrangian과 Eulerian 방법의 장점을 취한 결합 모형을 수립하여 실제해역에서 부유사 및 온배수의 이송·확산에 적용하여 모형의 효율성을 제시하여 이 방법의 중요함을 제시한 바 있다.

본 연구는 무작위 행보에 의한 입자추적 모형을 이용하여 새만금 방조제 건설에 따른 단계별 수리특성 변화를 제시하기 위하여 수행하였다. 장기간에 걸친 공사의 영향을 살펴보기 위하여 시간적인 범위를 새만금 방조제 공사 시작 단계에서부터 방조제 끝물막이 이후 시점까지 단계별로 구분하였고, 공간적 범위는 새만금호를 중심으로 방조제 건설로 인한 영향범위를 충분히 반영할 수 있는 영역으로 설정하였다. 본 논문에서는 새만금 해역과 같이 조류 속도가 큰 해역에서 이송과 확산의 동시 재현이 우수한 3차원 입자추적기법을 적용하여 새만금 방조제 공사 단계별로 달라진 유동특성과 이에 따른 내외해역의 환경변화를 종합적으로 파악하는데 중점을 둔다.

2. 모형수립

2.1 Random walk 입자추적 모형

입자추적 모형은 여러 연구진(Hunter, 1987; Dimou, 1989, 1992; Dimou and Adams, 1993; Dunsbergen and Stelling, 1993; Smith and Scott, 1997; 류 등, 1998; 정, 2002; Suh, 2006; 정·김, 2008; 최 등, 2010; 조 등, 2010)이 제시하여 해안공학 분야에 활발하게 적용되고 있는데, 입자는 기본적으로 확정론적 이송과정과 난수 발생에 의한 확률론적 확산 과정에 따라 모의되며 농도개념의 해석방법과 달리 이송행 처리시 수치적 확산에 따른 오차가 없으며, 개개의 입자별로 침강률 등의 입자특성 부여가 가능하므로 해역에서 다양한 이

송·확산과정을 모의하는데 편리한 장점이 있다. 그러나 확률론적 난수 발생에 의해 모의결과는 일회성에 제한되며 계산 수행시 유동모형과 시간간격 차이로 인한 불필요한 계산시간과 많은 저장 공간을 발생시키는 단점을 갖는다(Dimou, 1992). 이러한 비효율성을 개선하기 위한 방법으로 Eulerian-Lagrangian 혼합방법을 이용한 모형이 제안되기도 하였다(Baptista et al., 1984; Baptista, 1987; Suh, 2006).

무작위 행보(random walk)에 의한 입자추적 모형은 서해안과 같이 유속이 큰 연안해역에 적용할 경우 Eulerian 방법에 의해 이송행을 처리할 때 발생하는 수치적 확산이 나타나지 않기 때문에 이송·확산 과정을 정확하게 모의할 수 있다(Suh, 2006). 특히 방조제 내측에서 flushing 기능과 외해수와의 교환율 평가에 수월하며 임의의 해역에 육상기원 또는 해상기원의 오염부하 기여도를 방류 지점별로 용이하게 평가할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Dunsbergen and Stelling(1993)이 제안한 연직성분이 고려된 3차원 무작위 행보에 의한 입자추적 모형을 사용하는데 기존 입자추적 기법에 비해 시간적분 과정에서 발생하는 오차와 초기 입자 수에 대한 확률론적 오차 그리고 입자의 변위계산을 위한 격자 이산화시 발생하는 오차가 작은 장점을 가진다. 최근 Craig(2011)와 Dynamic Solutions(2009)에서는 해양환경모델인 EFDC(Hamrick, 1992)에 이들의 무작위행보 모듈을 추가하고 계산효율을 개선 시켰다.

3차원 이송·확산 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(\vec{V}c) = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_H \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_H \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_V \frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, x, y, z 는 입자의 Lagrangian 좌표, c 는 농도, $\vec{V} = (u, v, w)$ 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이며 D_H, D_V 는 각각 수평방향과 연직방향의 확산계수이다. 입자에 대한 Lagrangian 운동의 미분방정식은 식 (2)~(4)와 같이 표현되며 Fokker-Planck 방정식을 만족한다. 여기서 dt 는 계산 시간 간격이며, p 는 평균 0.5의 값을 가지고 난수 구성요소는 $2p-1$ 을 통해 변환될 때, -1부터 1까지 평균 0의 값을 가진다. 본 연구에서는 Lagrangian 운동에 관한 이들 상미분 방정식의 수치적 적분방법으로 계산의 정확성과 효율성을 장점으로 하는 Runge-Kutta 법을 사용하였다(Dynamic Solutions, 2009).

$$dx = dx_{drift} + dx_{ran} = \left(u + \frac{\partial D_H}{\partial x}\right)dt + \sqrt{2D_H dt}(2p-1) \quad (2)$$

$$dy = dy_{drift} + dy_{ran} = \left(v + \frac{\partial D_H}{\partial y}\right)dt + \sqrt{2D_H dt}(2p-1) \quad (3)$$

$$dz = dz_{drift} + dz_{ran} = \left(w + \frac{\partial D_V}{\partial z}\right)dt + \sqrt{2D_V dt}(2p-1) \quad (4)$$

2.2 실험안

앞서 기술한 바와 같이 새만금 방조제 공사로 인한 내·외측의 수리특성 변화를 분석하기 위해 Fig. 1에 도시된 최대 7,700여개의 셀을 갖는 직교곡면 선형좌표계로 광역의 격자

Fig. 1. Overall grid structure for the study area, Saemangeum and showing dike construction development with particle release points, from P1 to P5.

Table 1. Modeling conditions

Number of horizontal cell	7,700
Time interval(dt)	5 sec
Vertical layer	5 layer(sigma level)
Minimum mesh size	$\Delta x = 300$ m, $\Delta y = 200$ m
Number of drifters	1000
Case	a) 1990, b) 2004, c) 2006

망을 구축하였으며, 연직방향을 시그마 좌표계를 이용하여 5개 층으로 나누었다(Table 1). 수치실험에서는 새만금 방조제 건설에 따른 영향을 평가할 수 있도록 5개의 영역을 선택하였는데, 변산반도 부근을 P1, 동진·만경강 하구역을 P2, P3,

금강 하구역 부근을 P4 그리고 신시도 부근을 P5로 설정하였다. 방조제 공사 단계별 상황을 반영하도록 1) 새만금 방조제 건설 전 상황인 1990년 2) 개방구간 2.7 km 존치 상황인 2004년 그리고 3) 방조제 끝물막이 후 배수갑문을 통한 해수 소통 상황인 2006년 이후 3가지를 실험안으로 설정하였다. 수치모의는 초기조건을 cold start로 취하였으므로 초기조건의 불확실성을 제거하고자 1년을 사전 모의하고 수치적 안정화가 이루어진 후, 각 영역에 해당되는 쉘 별로 200여개의 중립입자를 수심별로 순간 부여되도록 설정하여(Fig. 1) 30일간 실험하였다. 방조제 완공 후 배수갑문의 운영조건은 당시 조건을 반영하여 상시 개방으로 설정하였다.

2.3 기본자료 및 제한사항

새만금 방조제 공사에 따른 해양환경의 변화로 방조제 공사 진척 상황에 따라 연직방향의 혼합형태의 변화가 유발되기 때문에 본 연구에서는 공사 진행에 따른 염분변화에 의한 밀도 성층을 반영하였다. 만경·동진강의 하천유량은 한국농어촌공사에서 2002년부터 2008년까지 관측한 유량을 연평균하여 사용하고, 수온 및 염분 관측자료는 한국농어촌공사에서 제공하는 수질 측정망 중 만경·동진 상류부에 해당하는 정점 ME1, DE1의 8월 평균(2002~2008년) 수온과 염분을 적용하였다(Fig. 2). 수심 및 초기조건은 선행된 서와 이(2008), 서 등(2010)의 연구를 참조하였으며, 외해 개방경계 조건은 서와 이(2008)의 연구와 한반도 조석조하상수집(한국해양연구원, 1996)의 간월도에서 임자도에 이르는 7개 조석관측 자료를 참고하여 주요 4대 분조를 입력하였다. 외해 개방경계에 대한 수온 및 염분은 국립수산물자원 한국해양자료센터의 국가해양환경측정망(<http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>) 중 근해 조사 정점인 서해남부 정점 9와 고창연안의 정점 4, 태안연안 정점 5

Fig. 2. Map showing water temperature and salinity measuring stations around Saemangeum area.

에서 2002년부터 2008년까지 관측된 값을 평균하여 입력하였으며 Fig. 2에 정점의 위치와 값이 제시된다.

본 연구는 관측된 자료들을 이용하여 현재의 시점에서 과거 상황을 재현하는 후측(hindcast)을 실시하는데 장래 상황을 모의하는 예측(forecast)과 달리 과거시점을 재현하기 위한 충분한 자료가 존재하지만 실제 자연현상 재현에는 항상 어려움이 따른다. 일대 해역에 다수의 공사가 진행되었지만, 본 연구에서는 새만금 방조제 건설로 인한 영향만을 평가하는 제한사항이 있다.

수치실험에서 수많은 입자에 대해 시간경과별 이동경로를 장기간에 걸쳐 파악한다면 실제 해수 움직임을 파악할 수 있겠지만, 현실적으로 평가 하는데 어려움이 따르므로 새만금 방조제 공사 단계별 변화양상을 파악할 수 있도록 제한적인 평가가 이루어 졌다. 그러나 이러한 제한사항을 극복하기 위해 수시간-수일정도에 그치는 단기 모의와 달리 초기 입자의 투여 시 발생 가능한 조시의 영향을 극소화 하도록 1개월간 장기 모의 하였다. 이렇게 함으로써 단기간 모의에서 입자방류 시점이 조석 조건에 따라 달라지면서 수치결과에 영향을 미칠 수 있는 개연성을 배제하도록 하였다.

2.4 모형 검증

본 연구결과의 신뢰성을 부여하기 위한 검증은 2004년 상황에 대하여 실시하였다. 기 수행된 서와 이(2008)와 서 등(2010)의 연구에서 검증된 바 있는 경계조건 및 초기 값을 준용하고 수온 및 염분을 고려하기 위해 한국농어촌공사 자료와 국립수산물품질관리원 한국해양자료센터 국가해양환경측정망의 2004년 관측 값을 사용하였다. 한국농어촌공사 수질측정망 정점 중 Fig. 2에 제시된 방조제 외측에 위치한 SO6 정점과 내측에 위치한 DL2 정점에 대하여 관측치와 비교하였으며 그

결과는 Fig. 3에 제시된다.

결과를 분석해 보면 수온과 염분 모두 비교적 관측치와 잘 일치됨을 확인할 수 있는데, 본 검증에 사용한 한국농어촌공사의 수온, 염분은 수질 관측시 유량이 배제된 자료이므로 만경·동진강 하천 유량의 영향을 비교적 크게 받는 새만금 내측의 정점 DL2에서는 방조제 외측의 정점보다 관측 값과의 차이가 큰 것으로 분석된다.

3. 입자추적 실험

3.1 방조제 건설로 인한 수리특성 변화

방조제 축조 단계별 해양환경 변화를 이해하고자 입자추적 모형을 30일간 모의하여 그 결과를 분석한다. 새만금호 내·외측에서의 입자 분포가 Fig. 4에 도시된다. 입자의 궤적은 12시간 단위로 갱신되도록 하여 새만금 해역의 조석특성인 반일주조 우세가 반영되도록 하였으며 연직방향의 흐름변화를 검토하기 위해 층별로 색을 달리하였다.

실험결과를 자세히 보면 공사 이전 상황에서 입자운동은 조류 영향으로 인해 만경·동진강 하구역까지 강한 왕복성 운동을 하는 것으로 나타난 반면, 새만금 방조제 물막이를 2.7 km 남긴 시점인 2004년 상황에서는 4호 방조제 완공 및 1, 2호 방조제 공사에 따른 흐름 단절의 영향으로 만경·동진강 하구역의 왕복성 운동은 감소된다. 4호 방조제 외측의 흐름은 동서방향의 왕복성 운동이 남북방향으로 변화되고 방조제 내측으로 유입되던 해수가 금강 하구역 입구부로 유입되면서 유속이 증가하는데 이는 김 등(2006)이 HF 레이더를 이용하여 표층 분조의 조류 변화를 관측한 결과와 일치한다. 방조제 완공 후인 2006년 상황에서는 배수갑문이 개방구간(0.54 km) 역할을 하게 되면서 이러한 현상은 더욱 심화되지만, 해수소통량 감소로

Fig. 3. Validation of water temperature and salinity in 2004.

Fig. 4. Particle tracks during one month in different years for construction development. Color tracks through (a) to (c) mean depthwise particles starting at each layers divided as 5. Also (d) shows particle hitting percentages on the boxed area in front of the Saemangeum area from releasing points, P1 to P5 at each distinguishable years as shown in (a) to (c).

인해 새만금 방조제 내측의 입자들은 정체되며 방조제 외측에서도 흐름 단절의 영향으로 동서방향의 왕복성 운동이 크게 감소됨이 입자의 운동과 궤적을 통해 확인된다. 연직방향으로는 방조제 공사 이전 상황과 2.7 km 개방구간만 남아있는 경우에 표-저층간 입자의 연직운동이 활발히 나타나지만 방조제 완공 후 배수갑문을 통한 입자의 연직방향 운동은 둔화되어 나타난다.

새만금 방조제 공사 단계별 흐름체계 변화 분석을 위해 Fig.4(d)와 같이 신시도 전면해역에 10 km × 20 km 크기의 해역을 설정한 후 변산반도 인근(P1), 만경·동진강 하구(P2, P3), 금강 하구(P4) 그리고 고군산군도(P5)의 해수 움직임을 관찰하였는데, 설정된 해역에 5개 방류지점으로부터 이동된 입자들이 통과되는 경우를 방조제 공사 진척 상황별로 평가하였다. 즉, 설정된 해역에 포함되는 5개 방류 지점별 전체 입자 수 대비 새만금 방조제 공사 이전 상황(1990년), 방조제 개방구간 2.7 km 상황(2004년), 방조제 완공 이후 상황(2006년)별로 통과하는 입자수를 백분율로 표현하여 평가를 하였으며 이들 결과가

Fig. 4(d)에 제시된다. 결과를 분석하면 새만금 방조제 공사가 진행됨에 따라 변산반도 부근(P1)의 입자들이 설정해역에 포함되는 경우는 방조제 공사 이전에는 17%, 2.7 km 개방상황에서 39%, 방조제 완공 후 상황에서는 44%로 증가되어 나타난다. 이는 변산반도 부근의 해수가 해안을 따라 동북-남서향하는 창낙조 흐름에서 1, 2호 방조제 전면에 체류하다 신시도 서측의 외해역으로 빠져나가는 상태로 변화됨을 통해 확인 할 수 있다. 동진강에 위치한 P2의 입자들은 공사 단계별로 19%, 25%, 56%로 증가되는데 공사가 진행되면서 방조제 개방구간인 가력갑문을 통해 외해측으로 빠져나가는 경향이 반영되어 나타난 결과로 분석된다. 만경강에 위치한 P3의 입자는 방조제 공사 이전 24%에서 37%로 증가되고 방조제 완공 후 38%로 미미하게 증가된다. 4호 방조제 공사 단계별로 2.7 km 개방구간과 신시 배수갑문 구간으로 유출되면서 증가하는 것으로 분석된다. 금강 하구역의 P4에서 방류된 입자는 공사 단계별로 25%에서 34% 그리고 41%로 증가되는데, 이는 방조제 착공 전

만경강의 주수로를 통해 해수가 동남-북서향 하던 영향은 4호 방조제 체절로 완전히 차단되면서 군산외항 주수로 구간을 통한 흐름이 신시도 전면인 서남측으로 전향됨을 의미한다. 이러한 수치모의 결과는 금강 하구의 담수 거동이 도류제를 거쳐 신시도 전면방향으로 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 신시도 인근 P5의 입자들은 방조제 착공 이전 32%에서 2.7 km 개방구간 상황과 방조제 완공 후 모두 34%로 미미하게 증가하는데, 신시도 인근 P5에서는 개방구간 차이에 의한 영향이 크게 작용하지 않음을 의미한다.

이와 함께 반일조주성분이 우세한 새만금 해역에서 M_2 분조 주기(12.42 시간) 동안 입자가 이동할 수 있는 최대 거리인 tidal excursion을 평가하기 위해 변산반도 부근의 P1과 만경강 하구역 부근의 P3 그리고 금강 하구역 부근의 P4에서 입자의 입자 하나를 선택하여 30일간 입자의 이동경로를 추적하고 평가한 후 그 결과를 Fig. 5(d)에 제시하였다. 방조제 공사 진행에 따라 입자가 M_2 분조 주기 동안 평균 이동한 거리를 분석해보면 변산반도 인근 P1의 입자의 경우, 방조제 공사 전 입자의 이동거리는 12.6 km로 나타나며 2.7 km 개방구간 존치 시

개방구간에서의 강한 흐름으로 인해 25.2 km로 증가 되었다가 방조제 완공 후 개방구간 축소와 흐름 감소에 따른 영향으로 8.5 km로 급격하게 감소된다. 만경강 하구부 P3의 입자의 이동거리는 14.3 km에서 16.9 km로 증가되었다가 끝물막이 이후 7.8 km로 감소된다. 이는 방조제 공사 진행에 따른 개방구간의 축소와 새만금호 내 북측 정체구간 발생에 따른 영향으로 분석된다. 방조제가 완공된 후 호 내 북측 정체구간 발생과 체류시간 증가에 기인하는 조석 영향력의 감소는 장기적으로 수질 및 생태계에 부정적인 영향으로 작용할 가능성이 높은 것으로 분석된다. 금강 하구역 P4의 입자의 이동거리는 방조제 공사 전 15.3 km로 4호 방조제가 완공된 2.7 km 개방구간 상황에서 12.1 km로 감소된다. 이는 4호 방조제 구간을 통해 외해로 이동하던 흐름이 4호 방조제 완공의 영향으로 흐름이 감소한데 기인한다. 새만금 방조제 완공 후에는 입자의 이동거리가 14.6 km로 증가하는데 방조제 완공 후 방조제 인근 조석 영향력이 더욱 감소된 결과로 분석된다.

3.2 밀도성층 변화

Fig. 5. Paths continuously tracked during 30 days for a particle released at P1, P3 and P4 at different year owing to construction development are shown in (a) to (c). (d) shows M_2 tidal excursion changes due to construction procedure.

새만금 방조제 완공 후 조석 영향 감소에 따른 연직 혼합 능력 감소로 밀도성층이 발달하게 된다. 새만금 일대에서 하구 밀도성층을 연구한 김 등(2006)은 새만금 방조제 끝물막이 전후 수온 및 염분 관측을 통하여 하구역 밀도성층의 계절적 변화를 다루었다. 서와 이(2008)와 서 등(2010)은 새만금 방조제 끝물막이 후 조석 영향력이 감소된 만경·동진강 하구역에서 수질저하 문제를 언급하였다. 평균수심이 얕은 미국 Alabama Mobile Bay 연구(Schroeder et al., 1990)에서 조석의 영향이 작은 해역에서 성층 형성 과정은 하천유량과 풍속의 영향을 크게 받으며 수일에서 수개월 주기의 변동성이 나타날 수 있음이 제시되었다.

본 연구에서는 염분 밀도의 연직방향 변화를 통해 새만금 방조제 공사에 따른 하구 밀도성층의 변화를 분석하는데, Fig. 6(a)에 보이는 기존 만경강 하구의 주 흐름선을 따라 연직성층 변

화선을 설정하고 대조의 낙조시 상황에서 새만금 공사 단계별 염도 성층변화를 Fig. 6(b)~(e)에 제시하였다. 모의된 결과를 종합하면 새만금 방조제 착공 전에는 조석 영향력이 크게 작용하기 때문에 입자의 수평 및 연직운동이 활발하게 나타나는 잘 혼합된 형태의 구조를 보이는 반면 개방구간 2.7 km 상황에서는 입자의 운동이 감소된 부분적으로 혼합된 형태를 나타낸다. 새만금 방조제 완공 후에는 연직 혼합능력 감소로 하천 유량의 영향을 상대적으로 크게 받게 되면서 Fig. 6(d)와 같이 해수와 담수의 염분 차이에 의한 염분층기 구역이 만경·동진강 하구역 입구부에 나타난다. Fig. 6(e)에서는 배수갑문을 중심으로 호 내외측에 밀도성층이 발달하는데, 염분농도는 내측에서 표-저층간 8 ppt 내외, 외측은 내측유량 방류시에 2 ppt 내외의 차이를 보인다. 방조제 완공 후 표-저층간의 성층은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 입자의 연직운동이 새만금호 내 표층에 국한

Fig. 6. Vertical salinity profile variations along the reference line shown in (a).

Fig. 7. Particle tracks released at P3 in different years showing (a) horizontal distribution (b) vertical fluctuations.

되는 것으로 확인된다. 이와 같이 새만금 방조제 완공 후 조석 영향이 크게 감소된 상황에서 염분 및 수온 등에 의한 밀도 성층이 나타나며 호 내로 유입된 오염물질이 성층화된 호소부 저층에 유입되어 장기간 축적될 경우, 표-저층간의 연직혼합이 감소되면서 저층에서 빈산소 또는 무산소 현상을 발생시키게 되고(Kim et al., 2009) 새만금호 내측 수질환경에 부정적인 영향으로 작용할 가능성이 높은 것으로 예견된다.

4. 결 론

무작위 행보에 의한 3차원 입자추적 기법으로 새만금 방조제 공사로 인한 내외측의 수리특성 변화를 분석한 결과, 이 해석방법이 단계별 공사 진척에 따른 수평 및 연직방향의 물리적 변화와 이송·확산 해석에 매우 유용한 수단임이 확인되었다. 외해역과 만경·동진강 하구역간 동서방향의 왕복 흐름은 4호 방조제가 축조되면서 동북·남서 방향으로 변화된다. 방조제 완공 후 변산반도 인근과 동진강 하구역의 해수는 배수갑문을 통해 유출된 해수의 영향으로 외해역으로 이동되는 경향이 우세하게 나타나며, 새만금 방조제 완공 후 내측 북측구역은 조석의 영향력이 미치지 못하여 내부 순환이 원활하지 못하고 정체되는 것으로 분석된다.

무작위 입자 움직임을 M_2 분조 조석기간 동안 누산하여 산정한 조류 이동거리 평가에 따르면, 새만금 방조제 축조의 영향으로 변산반도 부근 입자의 이동거리는 방조제 공사 전

12.6 km에서 개방구간 2.7 km 존치 시 25.2 km, 방조제 완공 후에는 8.5 km로 크게 감소된다. 만경강 하구역 부근의 입자는 2004년 2.7 km 개방구간 존치 시 강한 유속의 영향으로 이동거리가 14.3 km에서 2.6 km 정도 증가되지만 방조제 완공 후 9.1 km 감소된 7.8 km로 축소되며, 금강 하구역 부근 입자의 이동거리는 3 km 내외로 변화되는데 방조제 공사 단계별로 15.3 km에서 12.1 km 그리고 14.6 km로 변화된다. 배수갑문을 중심으로 조석 영향력 감소에 기인한 연직 혼합능력 둔화는 새만금호 내측에 표-저층간 8 ppt 내외의 차이를 보이는 강한 밀도성층의 발달을 초래한다. 새만금 외측에서도 2 ppt 내외의 차이를 보이는 약한 성층이 나타나지만 담수 방류시에 국한된다.

새만금 방조제 완공 후의 갑문운행을 상시 개방조건으로 설정하고, 만경·동진강 유량을 연평균 유량으로 취하여 수치 실험한 제한사항이 존재하나, 조석 영향력 감소에 기인한 새만금 내측 북측구역에서의 흐름정체 현상과 밀도성층이 새만금호 내측 수질환경에 부정적으로 작용할 가능성을 배제할 수 없다. 향후 새만금호 내부개발에 따른 관리수위가 적용될 경우 이러한 현상은 더욱 심화되어 호 내측뿐만 아니라 외측 수질 환경에도 영향을 줄 가능성이 높을 것으로 예견되는 바 새만금호 내부 개발안에 따른 수리 및 수질환경 평가와 함께 내측 담수 방류시 나타나는 영향에 대한 평가가 심도 있게 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 2011년도 호남지역 Sea Grant 시범대학사업단 연구개발사업(과제번호 : 기획-5)의 연구비지원에 의해 수행되었으며, EFDC Explorer를 지원해주신 Dynamic Solutions-International사의 Craig께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

- 국립수산과학원 한국해양자료센터 국가해양환경측정망. <http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>.
- 국토해양부 한국해양과학기술진흥원 (2011). 새만금 해양환경보전 대책을 위한 조사연구.
- 김경옥 (2000). 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 김영도, 강시환, 서일원, 오병철 (2000). 3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수의 이송확산 예측. 대한토목학회논문집, 20(6-B), 843-852.
- 김창수, 이상호, 손영태, 권효근, 이광희, 김영배, 정우진 (2006). 새만금 4호 방조제 완성 전후의 HF 레이더로 관측된 표층 조류의 변화. 한국해양학회지(바다), 11(2), 37-48.
- 김태인, 이형래, 장경일 (2006). 새만금해역에서 밀도성층의 계절변동. Ocean and Polar Research, 28(3), 339-352.

- 류청로, 김종규, 설동관 (1998). 조류에 의한 내만의 해수교환율 산정 모델 -입자추적모델의 응용-. 한국해양공학회지, 12(4), 76-82.
- 서승원, 이화영 (2007). 병렬클러스터 시스템 구축 및 유한요소 모형을 이용한 황해 조석재현. 한국해양·해양공학회지, 19(1), 1-15.
- 서승원, 조완희 (2007). 새만금호 완공 전후의 수동역학 변화 해석. 대한토목학회논문집, 27(3B), 361-369.
- 서승원, 이화영 (2008). 새만금호 완공에 따른 수질변화 모의. 대한토목학회 논문집, 28(1B), 79-93.
- 서승원, 이화영, 유상철 (2010). 방조제 완공에 따른 호내부 수질변화 모의. 한국해양·해양공학회 논문집, 22(8), 258-271.
- 정연철 (2002). 입자추적법을 이용한 해양방류구 모델링. 한국항해항만학회지, 26(5), 563-569.
- 정태성, 김태식 (2008). 목포해역의 해수유동 및 담수확산 예측 시스템. 한국해양환경공학회지, 11(1), 13-23.
- 조재권, 김대권, 이문옥, 오탈권 (2010). 입자추적기법을 이용한 바다숲 조성지의 확장에 관한 수치예측. 한국마린엔지니어링학회지, 34(6), 922-934.
- 최병호, 민병일, 김경옥, 육진희 (2010). 유한요소 황동중국모형과 입자추적모형에 의한 2010년 3월 26일 해난사고의 실시간적 추적. 2010년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 14-17.
- 한국농어촌공사. www.seamangeum.or.kr.
- 한국해양연구원 (1996). 한반도 조석조화상수집.
- Baptista, A.M., Adams, E. and Stolzenbach, K. (1984). Eulerian-Lagrangian analysis of pollutant transport in shallow water. Technical Report 296, R.M. Parsons Lab., MIT, Cambridge, USA.
- Baptista, A.M. (1987). Solution of advection-dominated transport by Eulerian-Lagrangian methods using the backward methods of characteristics. Ph.D. dissertation, MIT, Cambridge, USA.
- Craig, P. M. (2011). User's Manual for EFDC_Explorer: A Pre/Post Processor for the Environmental Fluid Dynamics Code. Dynamic Solutions-International, LLC, Knoxville, TN, USA.
- Dimou, K.N. (1989). Simulation of estuary mixing using a 2-dimensional random walk model. MS thesis, MIT, Cambridge, USA.
- Dimou, K.N. (1992). 3-D hybrid Eulerian-Lagrangian/particle tracking model for simulating mass transport in coastal water bodies. Ph.D. dissertation, MIT, USA.
- Dimou K.N. and Adams E.E. (1993). A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 37, 99-110.
- Dunsbergen, D.W. and Stelling G.S. (1993). The combination of a random walk method and a hydrodynamic model for the simulation of dispersion of dissolved matter in water. Transactions on Ecology and the Environment, 2, 235-242.
- Dynamic Solutions (2009). Implementation of a Lagrangian particle tracking sub-model for the environmental fluid dynamics Code. Knoxville, TN and Hanoi, Vietnam.
- Hamrick, J.M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code : theoretical and computational aspects. Special Report 317. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science.
- Hunter, J.R. (1987). The application of Lagrangian particle-tracking technique to modeling of dispersion in the sea. Numerical Modelling: Application to Marine Systems, North-Holland.
- Kang, S.K., Lee, S.R., Jung, K.T., Chang, C.J. and Kang, H.W. (2003). Tidal regime change of the Yellow and East China Seas due to the construction of Saemankeum tidal barrier. International Symposium for PEACE, 121-141.
- Kim, K.J., Lee, M.H., Jeong, H.J., Kim, W.J., Park, J.G. and Yang, J.S. (2009). Enhanced benthic nutrient flux during monsoon periods in a coastal lake formed by tideland reclamation. Estuaries and Coasts, 32, 1165-1175.
- Schroeder, W.W., Dinnel, S.P. and Wiseman W.J. Jr. (1990). Salinity stratification in a river-dominated estuary. Estuaries, 13, 145-154.
- Smith, R. and Scott, C.F. (1997). Mixing in the tidal environment. Journal of Hydraulic Engineering 123(4), 332-340.
- Suh, S.W. (2006). A hybrid approach to particle tracking and Eulerian-Lagrangian models in the simulation of coastal dispersion. Environmental Modelling & Software, 21, 234-242.

원고접수일: 2011년 9월 27일

수정본채택: 2011년 10월 25일

게재확정일: 2011년 10월 26일