

## 3차원 수질관리 모형을 이용한 시화호 수질변화 해석

서승원\*

### 1. 서론

인공적으로 축조된 시화호의 당초 목적은 담수호를 조성하면서 내부개발을 통해 농업 및 공업단지를 확장하는 것이나, 방조제 완공이후 내부 수질 악화로 당초의 취지와는 달리 해수호로 전환하여 수문을 열고 담음으로써 목표 수질을 유지하고 있다. 그러나 현재의 수문개폐만으로는 만족스러운 수질을 확보하기가 곤란하므로 내부 단지개발을 시행하는 경우에 관리수위와 함께 적정수질의 확보가 관건이 되고 있다. 이러한 시점에서 수질개선의 대안 중의 하나로 인식되고 부차적으로 전력생산을 하는 방안으로 조력발전이 검토되고 있으며 기본설계 단계에 있다.

시화호는 평균수심 4.5m로 낮은 수심분포를 보이고 있으며, 하구호의 특성상 상류 유역으로부터 하수와 오염부하가 유입되어 호내의 오염이 심화되고 있다. 여기에 인위적으로 축조된 방조제는 외해와의 해수유통을 근원적으로 차단하고 있어 이로 인해 폐쇄된 시화호는 단지 수문 개폐를 통해서만 유출입 되는 형태로 수질개선이 제한적으로 이루어지는 실정이다. 하구호는 특성상 육상에서 기원한 인산과 질산염 등의 영양염 물질이 풍부하고 이로 인하여 부영양화가 가중되고 있다.

본 연구에서는 시화호로 유입된 오염부하에 따른 수질모의와 함께 정체된 저질-수체의 상호작용이 호내의 전체적인 수질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 특히 호내의 침적된 오니 중에서 그 오염도가 상대적으로 심한 북측확장단지 개발을 위하여 호안축조 공사가 진행되는 경우 오염도가 심한 이 지역에서 저니토가 급격하게 교란될 때 시화호 수질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 아울러 조력발전이 검토되는 경우 최적의 수질을 확보하기 위한 예비연구로써 본 연구를 수행하였다. 해석에는 3차원 수동역학모델 TIDE3D를 수질관리모델인 CE-QUAL-ICM과 결합하고 4개의  $\sigma$  층을 사용하여 수체와 저니토 사이의 상호작용과 층별 변화를 모의하였다. 모형 검증을 위해 특정 정점에서 수동역학 특성과 수질분석을 1년에 걸쳐 계절별로 실시하여 분석에 활용하였다.

### 2. 시화호의 특성 및 수동역학모델과 수질관리 모델적용

수질변화에 직접적으로 영향을 미치는 시화호의 유동은 크게 나누어 외해와 연결된 수문의 개폐에 따른 외해수와의 교환, 상류 하천으로부터의 유입, 그리고 기상조건에 따라 발생된 취송류의 영향으로 대별할 수 있다. 이 중에서 평상시의 유동에 영향을 미치는 것은 단지 수문의 조작이며, 여름철 홍수시 유입량의 증가에 따른 단기간의 유동을 제외하면 봄, 가을 및 겨울에는 하천유입량의 영향에 의한 유동이 미미하다. 그러나 바람에 의한 수표면의 응력으로 발생된 취송류는 시화호 인근의 인천기상대의 바람자료와 동기간에 관측된 유속자료의 분석결과 매우 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 시화호의 수질변화 해석을 위해 3차원 모델로 CE-QUAL-ICM(이하 ICM, Corps Engineering Quality Integrated Compartment Model)을 선정하였다. ICM은 외해와 하천을 연결하는 하구에 대해서 적용토록 설계되었지만, 모델 내부에서는 해수유동을 계산하지 않고 외부의 해수유동모델의 결과로부터 유량

\* 군산대학교 해양시스템공학전공 교수(suh@kunsan.ac.kr)

확산계수 및 계산되는 Cell 체적을 입력 받는다. ICM은 Chesapeake외에 초기에는 정규격자체계를 갖는 CH3D-WES 수동역학 모델과 연동되어 Lower New York Bay의 준설에 따른 수질변화 연구(Dorth et al., 1999)에 이용되었으며 근자에는 비정규격자를 갖는 수리모델인 RMA10모델과 연계되어 Florida Bay(Cerco et al., 2000)등 널리 이용되어지고 있다.

ICM 모델은 Algae, 질소, 인, 탄소와 COD, DO등 총 22개의 수질 항목에 대하여 시뮬레이션 가능토록 설계되어 있으며, 서브 모델을 통하여 저질에 관하여 분석 및 예측할 수 있도록 되어있다. 각 수질항목에 대하여 다음의 질량보존방정식이 기본식으로 이용된다.

$$\frac{\delta V_j C_j}{\delta t} = \sum_{k=1}^n Q_k C_k + \sum_{k=1}^n A_k D_k \frac{\delta C}{\delta x_k} + \sum S_j$$

위의 식은 j번째 control volume에서의 질량보존을 나타내며 여기서 n은 control volume에 접하는 각각의 통수면의 수,  $Q_k$ ,  $C_k$ ,  $D_k$ ,  $A_k$ 는 각 통수면에서의 유량, 농도, 확산계수, 통수면적을 나타내며  $S_j$ 는 외부 오염 부하량 및 침전을 나타낸다. 수평방향으로는 확산보다 이송항이 더욱 지배적이므로 양해법으로 계산하는 것이 적합하나, 연직방향으로는 확산이 중요하고 지배적이며 오랜 계산시간이 필요하므로 음해법으로 구한다.

시화호의 유동은 외해의 조위와 연계하여 내부관리 수위인 EL(-)1m를 유지하도록 수문을 규칙적으로 운영하는데 따라 특이하게 발생된다. 이러한 유동의 특성을 장기간의 수질모의에 반영하기 위해 적절한 수동역학 모델의 적용이 필요하며, 규칙적인 특성을 고려한 조화유한요소모델로 3차원의 TIDE3D가 적합하다. 수질모델인 ICM은 유한체적방법에 의해 기본 물질보전식을 근사화하므로 상이한 두 모델을 접합하는데 있어 질량이 완벽하게 보존되지 못하는 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 오차를 최소화하기 위해 계산격자를 정규화한 영역에서 각 격자면을 통해 유출입되는 질량을 유한요소 근사화에 따라 보존되도록 하였다(서동, 2002).

시화호 모델링의 일차적인 단계로 내부영역을 이산화하는데, 초기 수행에서는 수평방향으로 300m x 300m의 일정한 형태로 총2739개로 구성하여 격자(Box)는 유한요소모형과 연계되도록 설계되도록 하였다. 연직방향으로는 4개층의  $\sigma$  좌표계로 구성하였다. 비정규격자를 이용하는 TIDE3D는 유연하게 격자망을 구성할 수 있으나, 본 연구에서는 유한체적법을 응용하는 수질관리모델과의 원활한 접합을 위해 정규격자체계를 적용하였다. 수동역학모델은 배수갑문 주위의 정점과 내부 정점에서 15일간 연속적으로 RMC-7, RMC-9을 계류하여 관측된 유동과의 비교를 통한 검증을 실시하고, 수질모델도 YSI6600 수질계측기를 통해 연속관측된 수온 및 DO를 대상으로 실시하여 만족스럽게 적용할 수 있는 것으로 판단되어 이후의 다양한 대안 검토에 본 모델을 성공적으로 활용할 수 있게 되었다. 이와 같은 일련의 과정을 거친 1년 이상의 모델링을 실시한 이후에는 오염도가 심한 시화호의 복측확장단지 4,5공구에서 호안 축조공사로 인하여 급격하게 저질이 교란되는 경우의 수질평가를 실시하면서 격자간격을 2배로 상세히 해상하여 모델의 정교화를 도모하였다(서와 김, 2003).

### 3. 계산결과 및 토의

수치모의 본단계 계산 초기에서는 시화호 영역 전체의 수질정보 획득이 불가능하므로 초기값을 0으로 시작하는 cold start 조건을 적용하였다. 이 영향으로 불안정한 계산결과가 50여일간 지속되므로 이러한 미확정적인 영향을 배제하기 위하여 ramp up 조건으로 단계적으로 외적조건에 따라 반응하도록 조정하거나 계산된 결과 중에서 계산초기의 60일간 정도를 제거하고 실제의 모델링 결과를 평가하는 것이 타당하다(서동 2002). DO, COD, Nitrate, Total Phosphate 등을 모의하였지만, COD의 계절적 변화를 표현하기 위해 도식화 하여 평가하였다. 수질모델링의 입력으로는 시화호에 대한 기존 분석자료를 이용한 일년간의 외부 오염부하를 월별로 분석한 자료를 분할하여 매 15일간 단위로 오염유입을 고려하였고, 하천유입량은 월별자료를 적용하였다. 이처럼 장기간의 수질모의에 있어서 시간적으로 변화되는 오염부하의 유입과 하천수의 유입 등 실시간으로 그 변화되는 조건이 모의에 반영되지 않아 다소 현실성이 떨어질 수는 있지만, 계절적으로 변화되는 장기적인 특성을 재현하는 데는 만족스럽게 이용될 수 있는 것으로 판단된다.

1년이상의 장기적인 모델링을 실시한 이후에 계절적으로 변화되는 시공간적 3차원적인 수질평가를 분석하

면 다음과 같다. COD 농도는 DO처럼 시화호의 대부분의 영역에서는 크게 변함이 없고, 대체적으로 2-4mg/l로써 연간 계절적인 변화가 크게 나타나지는 않지만, 하천의 상류 유입부에서만 계절적인 변동을 나타내고 있다. 이러한 결과는 상류 오염부하량에 직접적인 영향을 받는 곳에서 2-12mg/l로 변화폭이 크게 나타나고 있으며, 다른 정점들 특히 배수갑문이 위치한 곳에서는 시화호 내부의 확산된 오염부하량에 근거한 농도 변화가 아니라 외해로부터 유입되는 외해수의 경계 값에 따라 크게 영향을 받아 연중 유사한 값을 보여주고 있다고 판단된다. 즉, 현재상태 시화호의 수질은 갑문 유통으로 호내 동측의 부영양화는 개선시키기 어려움을 나타내고있다. 여러 실험을 통해 검토한 바 이러한 경향은 여름철에 하천 유출량이 증대하거나 혹은 상류의 N,P 부하량을 저감하여도 크게 개선되지 않는 것으로 분석되어 부분적으로 폐쇄된 구조적인 문제점을 드러내는 것으로 판단된다.

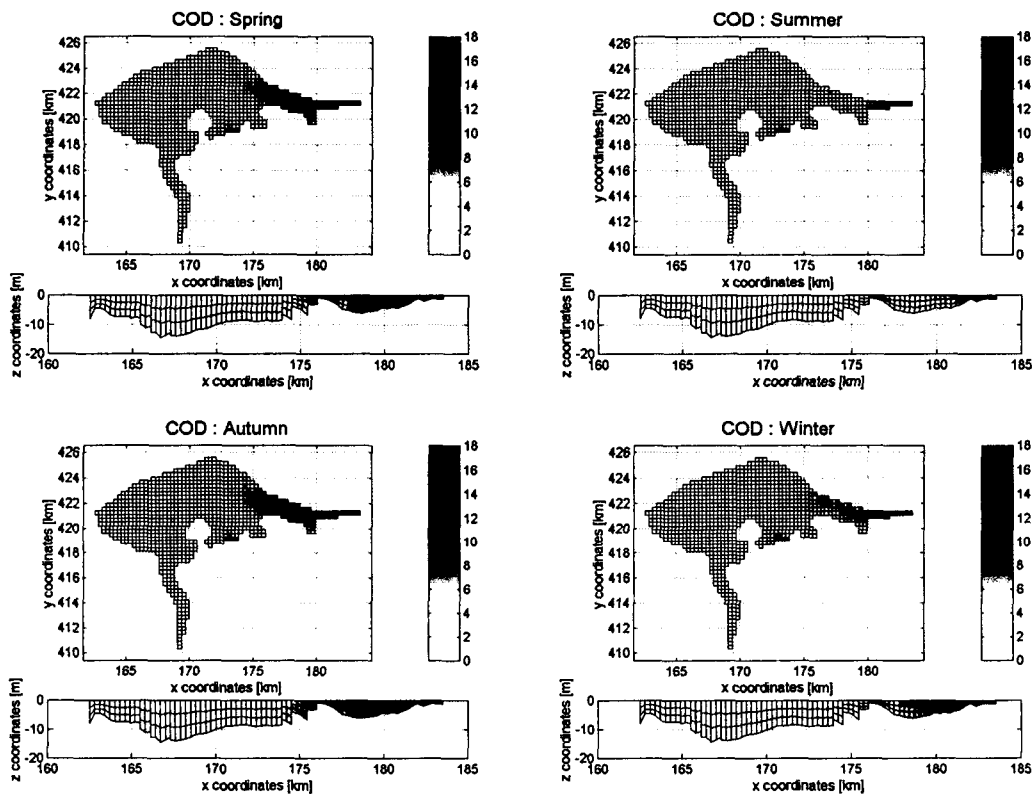


그림1. 시화호 유입 오염부하가 공간적 및 계절적 수질(COD)에 미치는 영향

수질관리모델을 적용하는 주 목적 중의 하나는 시화호의 다양한 개발사업(북측 테크노 콤플렉스의 확장단지 포함 조력발전등)에 대비하여 일련의 사업이 시화호 내외의 수질에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 이와 같은 목적에 부합하기 위해, 일차적으로 검토되는 대안은 북측 확장단지를 개발하면서 동측의 하천유입구인 4,5공구에서 호안공사가 진행되는 경우에 이 일대에 광범위하게 침적되어 있는 높은 오염도의 저니토가 급격하게 부상하게될 때 이에 대한 영향을 평가하고자 한다. 앞서 적용한 상태에서 동일한 조건 하에서 ICM을 이용한 1년 이상의 장기적인 수질모의 결과, 교란된 지점 인근에서는 저층에만 수질의 악화현상이 나타나고 시화호의 형상 및 외부 하천 유입의 복합적인 특성상 약 5km를 지나면서 저질 교란의 영향이 표층에 나타난다. 이 결과는 저니토가 교란된 지점부터 5km서측에서 지형적으로 수심이 급격이 얕아지고 이후 다시 수심과 폭이 넓어지므로 저질 교란지점으로부터 5km 떨어져서 수직적인 혼합이 더욱 가속되는 것으로 분석된다. 수치모형 결과 호안축조 공사 인근에서는 저질의 교란된 영향이 곧바로 표층으로 부상하여 나

타나지 않고 일정 거리를 수중에서 횡방향으로 이송되면서 점차 연직상향으로 부유 확산되는 자연적인 현상을 매우 잘 보여주고 있는 결과로 인식된다. 현재의 상황에서는 겨울과 봄에 상류 오염유입이 많아서 COD와 TP 수질이 좋지 않으나 이에 비해 저질의 교란으로 야기되는 수질 변화는 여름과 가을에 크게 저하되는 것으로 나타나 현존 상태와 반전된 결과를 제시한다.

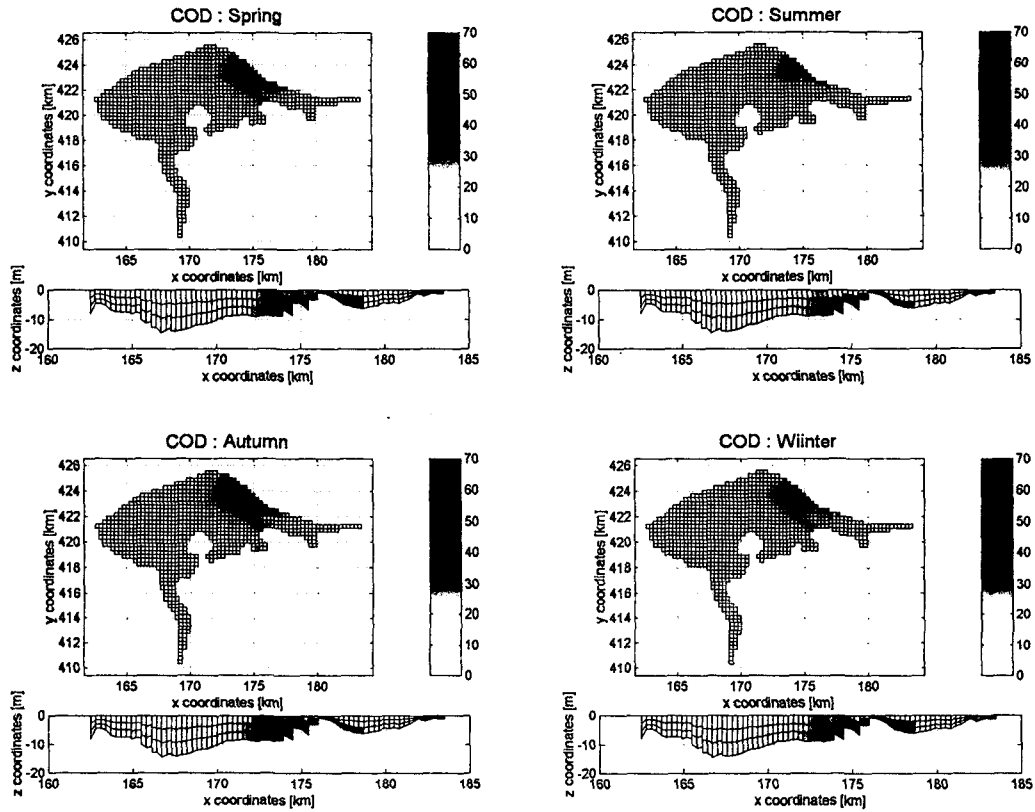


그림2. 시화호 저니토 교란이 공간적 및 계절적 수질(COD)에 미치는 영향

#### 참고문헌

- 서승원, 김정훈, 유시홍, 2002. 배수갑문을 통해 부분개방된 하구호에서의 순환과 수질모의, 한국해양·해양공학회지, Vol. 14(2), pp. 136-150.
- 서승원, 김정훈, 2003. 급격한 저니토 교란이 시화호 수질에 미치는 영향, 한국해양·해양공학회지, Vol. 15(1), in press.
- Cerco, C.F., Bunch, B.W., Teeter, A.M. and Dortch, M.S., 2000. Water quality model of Florida Bay. *Technical Report ERDC/EL TR-00-10*, Us Army Corps of Engineers Water Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Dortch, M., Fleming, B. and Bunch, B., 1999. Three-dimensional contaminant transport/fate model, *Estuarine and Coastal Modeling. 75-89, 5th Proc. Int. Conf. ASCE, Alexandria, Virginia.*