

배수갑문을 통해 부분 개방된 하구호에서의 순환과 수질모의 Simulation of Circulation and Water Qualities on a Partly Opened Estuarine Lake Through Sluice Gate

서승원* · 김정훈* · 유시흥*

Seung Won Suh*, Jung-Hoon Kim* and Si-Heung Yoo*

요 旨 : 시화호의 수질을 개선할 목적으로 배수갑문을 통하여 외해수를 자유롭게 유통하는 방안이 고려되고 있다. 좁은 갑문을 통해 외해와 연결된 하구호는 갑문을 열고 닫는 것에 따라 희석 확산되고 상류 하천의 유입과 바람에 의해서 순환이 영향을 받는다. 이런 하구호의 수질예측목적으로 3차원 유한체적모형인 CE-QUAL-ICM을 3차원의 유한요소 동수역학모형인 TIDE3D와 연계 적용하였다. 서로 다른 두가지의 모형을 접합하여 이용할 때 발생할 수 있는 오차를 질량보존을 만족하면서 최소로 줄일 수 있는 방법을 제시하였다. 실제 관측치와의 비교 검증을 통한 후 일년간 모델을 시험한 결과, 미확정적인 초기조건에 영향을 받아 계산 초기의 60일간의 신뢰성은 의문시 되었다. 그러나 이후에는 부영양화 인자나 다른 수질 인자들이 준정상상태에 다다른 결과를 보여 초기의 영향을 원만히 다룰 수 있는 완화방안이 필요할 것으로 판단되었다. 수체와 저질사이의 반응도 모의하였지만 이 영향은 크지 않아 장기간의 모의에서는 저질의 영향을 고려하지 않아도 무난할 것으로 판단된다. 본 연구에서 새롭게 적용된 기법을 이용한 모의결과는 하구호의 수질개선을 위해 부영양화를 저감하는 것 뿐만 아니라 능동적인 순환을 고려하는데 만족스럽게 응용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

핵심용어 : 인공호, 순환, 부영양화, 수질예측모델, 장기간모의

Abstract □ To improve the water quality of the recently constructed Siwhaho, sluice gates were operated to allow free exchange of water with the sea. This estuarine lake connected to the outer sea through narrow gates is affected mainly by flushing by gate operation and river flows and wind forcing sometimes. As a predicting tool for the water qualities, a three-dimensional finite volume model CE-QUAL-ICM is incorporated into a finite element hydrodynamic model, TIDE3D. In coupling these two different modules, a new error minimization technique is applied by considering conservation of mass. Model tests for one year after calibration and validation using field observation show that eutrophication and other biological changes reach quasi-steady state after initial 60 days of simulation, thus it would be necessary to consider moderate ramp up option to remove initial uncertainties due to cold start option. Sediment-water interaction might not be a concern in the long-term simulation, since its effect is negligible. Simulated results show the newly applied scheme can be applied with satisfaction not only for lessening of eutrophic processes in an estuarine lake but also looking for some active circulation to improve water quality.

Keywords : artificial lake, circulation, eutrophication, water quality simulation, long-term changes

1. 서 론

담수 이용목적을 충족하기 위하여 건설된 인공적인 하구호의 일반적인 특성은 육상 오염원의 유입에 능동적으

로 대처할 동수역학적 반응이 자연 하구에 비하여 현저히 떨어진다. 인위적인 수문 조작 등의 제한적인 수동적 방법에 의해서는 폐쇄된 하구호 내의 수질 개선에 기여하지 못하기 때문이다. 육상으로부터 유입된 오

*군산대학교 해양시스템공학과(Corresponding author: Seung Won Suh, Dept. of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Chonbuk 573-701, Korea. suh@kunsan.ac.kr)

염수의 영향으로 부영양화와 같은 수질문제가 일어나며 이러한 현상의 주 원인으로는 인위적으로 축조된 방조제가 외해와의 해수유통을 근본적으로 차단하고 있기 때문이다. 특히 하구호에 육상에서 기원한 인산과 질산염 등의 영양염 물질이 풍부하여 이로 인한 부영양화가 가중되고 있다. 하구호의 수질악화는 우리나라에서 뿐만 아니라 국외에서도 그 발생 예가 많이 보고 되고 있다.

하구호의 수질관리를 위해서 다양한 접근방법이 시도 되고 있으며 그 중에서 수치모형을 수립하고 적용하면서 오염부하에 종합적으로 대처하는 방안이 현재로서는 타당한 수단으로 인식된다. 그러나 하구호의 수질모의의 중점 사항은 수리특성을 잘 묘사할 수 있는 도구를 선택하는 것이 선행되어야 하며, 수체와 저질과의 상호작용을 고려할 수 있고, 외부 오염부하에 따른 영향을 적절히 모의할 수 있어야 한다는 것이다. 미국 내 오염이 심한 몇몇 하구에서 적용되었던 수질모의 모델인 CE-QUAL-ICM은 유한체적방법을 이용하여 완벽한 질량보존을 만족하도록 개발되고 적용된 바 있고(Martin and McCutcheon, 1999), 이와 연계하여 구동 되는 동수역학 모형인 CH3D-WES (Curvilinear Hydrodynamics in 3-Dimensions - Waterways Experiment Station)는 non-orthogonal curvilinear 격자에 유한차분방법을 이용하여 여러 해안이나 만, 하구등에 이용되어져 왔으며(Johnson *et al.*, 1999) 이를 ICM에 결합된 형태로 하구 및 하구호의 수질예측에 이용된 바 있다 (Cerco and Cole, 1994). 그러나 수동현상을 구동하는 유한차분모델이 복잡한 하구의 지형적용에 불리한 점을 극복하고자 유한요소모형인 PADCIRC(Parallel Advanced Circulation Model)와 UTBEST(U Texas bay and estuary code)를 적용하는 연구가 수행되고 있고(Wheeler, M., and Saltz, J., 1999), 이와 아울러 계산효율을 증진시키기 위해 병렬처리 기법을 적용하고 있는 연구 결과가 보고 되고 있다(Chippada *et al.*, 1998). 그러나 이들이 지적한 바와 같이 기본 미분방정식의 수치 근사화 방법이 서로 다른 모형을 결합할 때의 질량보존이 완벽히 이루어지지 않는 등의 문제점들이 있었다. 또한 시간진행형의 3차원 유한요소모형인 ADCIRC는 정밀한 경계 처리를 하며 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있으므로(Luetlich *et al.*, 1992) 이를 적용하기 위해 막강한 컴퓨터의 계산 능력을 필요로 하게 되어 슈퍼컴퓨터의 병렬처리를 고려하기도 하였다.

본 연구에서는 우리나라 하구호 중에서 인공적으로 체결되어 외해와의 해수교환이 자연적으로 원활하게 이루어

지지 않고 인위적인 수문의 개폐에 따라 내외수가 교환되는 시화호를 선정하여 앞서 언급한 3차원 수질모형(CE-QUAL-ICM)을 적용하여 하구호의 장기적인 수질변동을 해석하고자 한다. 정확한 수질변동을 모의하기 위해서는 동수역학적 특성을 제대로 재현하는 모형의 선정이 중요한데, 특히 장기간의 수질을 모의하기 위한 기본 사항으로 동수역학모의에서 조화특성을 고려되어야 한다. 따라서 적절한 모형선정에 많은 노력이 기울여졌으며, 이용 가능한 모델들 중 TIDE3D 모형은 서(1999)에 의해 주기적인 운동에 효과적으로 적용할 수 있음이 제시된 바 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 3차원의 수질모형과 연계되도록 연직방향으로 4개의 층으로 구분된 모형인 동수역학모형을 적용하였다.

유한요소 근사화에 의해 수립된 동수역학모형과 유한체적이론에 근거한 수질모형은 특성이 상이하여 접합시에 질량보존이 원만히 되지 않을 수 있다. 이로 인하여 야기될 수치오차를 줄이기 위하여 본 연구에서는 두 모형의 원활한 접합을 시도하였으며 접합과정에서 발생하는 질량보존 오차로 인한 수질모의 전반에 미치는 영향을 최소화 하도록 노력하였다. 바람에 의한 단기간의 항류 효과도 고려하여 실질적으로 장기간의 수질모의에 적합한 조건을 만족하도록 하였다.

2. 부분적으로 폐쇄된 하구호

2.1 하구호 개황

시화호는 동경 126°31'~127°00' 북위 37°11'~37°23' 사이에 위치하며 경기도 안산시, 시흥시, 화성군과 인접해 있다. 수심은 방조제 중앙에서 최대 17.9 m에 이르며 평균수심은 4.5 m로 대체로 낮은 수심분포를 보이고 있고, 표면적은 79.4 km²이다. 인접 도시를 포함한 유역면적은 약 476.5 km²이며 주요 하천들은 10 km 내외의 소규모 하천이다. 방조제를 축조하여 103 km²를 개발함으로써 수도권 인구의 분산 및 농업용지를 확보함과 동시에 농지를 조성하고 이중 61 km²의 담수호를 조성하여 이 지역에 공급하도록 계획되었다. 공사 후 시화호 유역의 도시의 성장, 인근 공단으로부터의 수질 오염원의 증가, 축산폐수, 하수처리장의 증설지연, 오수관과 우수관의 오점합 등으로 수질은 급격히 악화되었으며 결국 담수화를 포기하고 배수갑문 조작을 통해 해수를 유통시킴으로써 수질을 개선 시키기는 방안이 채택되었다. 갑문은 8련으로 각각 폭 12 m, 높이 6.5 m로 구성되어있다. 홍수의 범람에 대비해

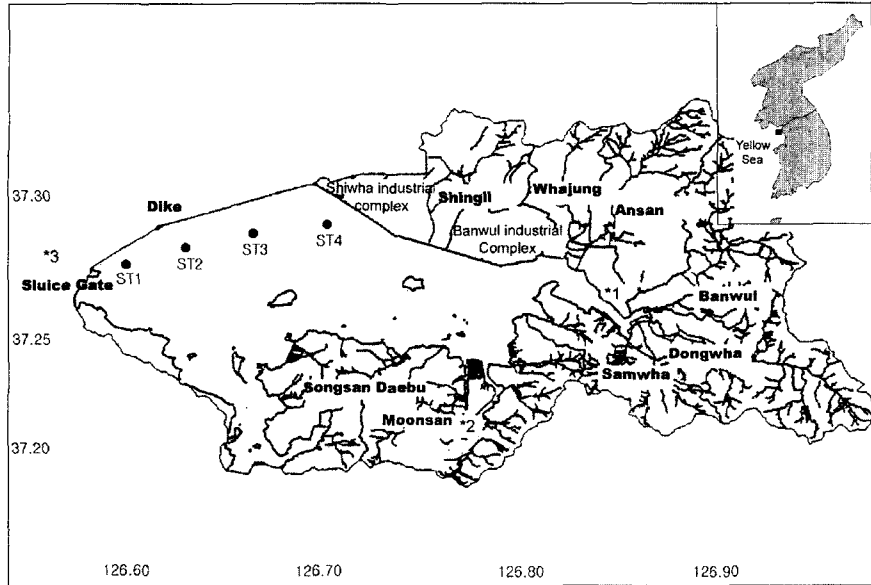


Fig. 1. Map showing study area of estuarine lake Siwhaho.

관리수위는 평균해수면으로부터 EL-1.0 m에 맞추고 있으며 이 때의 시화호의 체적은 $378 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다. 시화호의 형상, 주요하천 및 유역도와 본 연구기간 중 측정된 관측 지점 등이 Fig. 1에 제시되고 있다.

2.2 수질현황

시화호로 유입되는 주요 오염원은 안산 하수처리장과 시화 하수처리장의 건설이후 주로 하천이 차지하며 Table 1은 이중 안산천, 화정천, 동화천, 반월천에서의 오염 부하량 영향이 큰 것을 보여준다. 표층의 COD 및 영양염류는 다른 만이나 외해보다 높은 값을 나타내며 용존 중금

속은 방조제 건설전보다 1.5에서 최대 13배 높은 값을 나타내고 있다(한국해양연구소, 1997).

관측 값에 의하면 표층에서의 용존산소 포화도는 54.5~186%, 저층에서 36~116%의 범위를 나타낸다. 용존산소 농도는 봄의 경우 10.41~8.83 mg/l 범위로 Fig. 1에 묘사한 정점 1에서 정점4로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 표층의 COD는 0.54~3.56 mg/l 의 범위를 보이며 일반적으로 여름의 3,4 정점을 제외하고 2 mg/l이하의 값을 나타낸다. 총 질소(TN)의 경우 표층에서 0.139~0.545 mg/l, 저층에서 0.804~4.565 mg/l로 3, 4정점으로 갈수록 급속히 증가함을 나타내며 총인(TP)의 경우 0.077~0.1820 mg/l로 가장

Table 1. Annual waste loading input from tributaries (한국 수자원공사, 1998)

Analysis Year of 1997	Q (m ³ /day)	T-N (kg/day)	T-P (kg/day)	BOD (kg/day)
Donghwa	165,247	732	225	1,429
Samhwa	42,747	147	42	222
Banwol	132,778	1,089	210	1,707
Munsan	83,254	287	82	432
Songsan, Daeboo	71,256	246	70	369
Bon-o	29,767	617	62	1,288
Singil	31,455	246	21	516
Hwajung	86,320	1,664	176	3,663
Ansan	118,807	1,635	162	3,566
Guryong	15,629	239	24	581
Waterway	17,171	353	35	673
Industrial complex	20,335	181	16	420

높은 값을 나타내고 있다.

성층화는 여름에만 나타나며 염도는 갑문부근에서 표층의 29 ppt부터 저층의 30 ppt까지의 값을 보인다. COD 및 영양염류는 시화호 서측의 갑문부근 값이 동측의 값들 보다 상당히 작은 값을 나타내고 있다(과학 기술처, 한국해양연구소, 1997; 한국수자원공사, 2001).

2.3 시화호의 유동특성

시화호의 유동은 크게 나누어 외해와 연결된 수문의 개폐에 따른 외해수와의 교환과 상류 하천으로부터의 유입 그리고 기상조건에 따라 발생된 취송류의 영향으로 대별할 수 있다. 이 중에서 평상시의 유동에 영향을 미치는 것은 수문에 의한 외해수의 유입과 유출이며, 단지 여름철의 홍수시 유입량의 증가에 따른 단기간의 유입량을 제외하면 봄, 가을 및 겨울에는 하천유입량의 영향에 의한 유동이 미미하다. 또한 바람에 의한 수표면의 응력으로 발생된 취송류는 겨울철의 계절적인 영향을 받으므로 평상시의 동수역학 특성은 인위적인 수문의 개폐에 따라 좌우된다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 유동특성을 면밀히 파악하고, 적용하는 동수역학모형의 검증 및 이어지는 수질모형의 연계에 이용되도록 2000년 9월 이후 계절별로 4개의 정점에 대해 15일간의 연속적인 유향·유속을 측정하였다. 유동특성이 관측된 동일 기간에 시화호 인근의 인천과 수원기상관측소의 기상자료를 입수 분석하여 바람 응력에 기인된 취송류의 영향도 분석하였다.

유동특성을 조사하고 분석한 바에 따르면, 갑문의 개폐로 인한 외해수와의 규칙적인 유통과 상류하천의 유입 영향을 제외하고는 뚜렷한 인자가 없음에도 불구하고 배수갑문 인근의 정점을 제외하고 관념적인 판단으로 잘 이해되지 않는 유동장이 형성되고 있다. 이와 같은 분석은 수심이 낮은 시화호의 순환에 바람등의 기상인자가

로 작용할 수 있을 개연성이 있어, 이에 대한 규명을 하기 위하여 풍향·풍속등의 기상인자와 수리특성의 관계를 분석하였다. 대상지역과 멀지 않은 인천 기상관측소의 2000년의 기상자료를 분석하면 가을에는 동향(서풍)의 바람이 평균 4.5 m/s로 나타나고, 겨울에는 동남향(북서풍)의 바람이 평균 7.9 m/s로 불고 있다. 조사결과 수리특성은 풍향, 풍속등의 기상인자와 매우 밀접한 관련이 있음을 나타낼 수 있다. 대체적으로 최대 풍속이 발생한 2-6시간 이후에 호소내부의 수리특성도 유사한 구조를 보이고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 관측기간(2000년 9월 24일-10월 8일) 조사정점 4개 중 배수갑문으로부터 가장 멀고 상류부에 위치한 정점에서 -y축의 서향유속은 하구호의 형상에 의해 상류에서 유입하는 하천유입의 정상적인 결과로 판단되나 +y축의 동향유속은 관념적인 해석으로는 설명이 되지 않는 결과로 나타나며 유향·유속과 동시에 대비한 풍향(자료의 분석에서 풍향은 바람이 부는 쪽으로 바꾸어 도시하였음)·풍속과 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다. 경우에 따라서는 최대 10 cm/sec 정도의 역상하는 유속이 바람에 의해 나타난다. 이러한 결과는 시화호의 순환에 하천수의 유입, 외해수의 교환 뿐만 아니라 바람에 의한 취송류의 영향이 일정부분 정도로 기여하고 있는 것을 시사함을 알 수 있다(한국수자원공사, 2001).

3. 수질모델링

3.1 수질모델의 수립

수질모델은 수리모델과 연계하여 외적인 인자로 수문의 개폐와 하천수의 유입을 고려하며 저질과 수체와의 상호작용과 부영양화를 효과적으로 재현할 수 있어야 한다. 다양한 검토를 통하여 본연구의 적합한 모형으로 CE-QUAL-

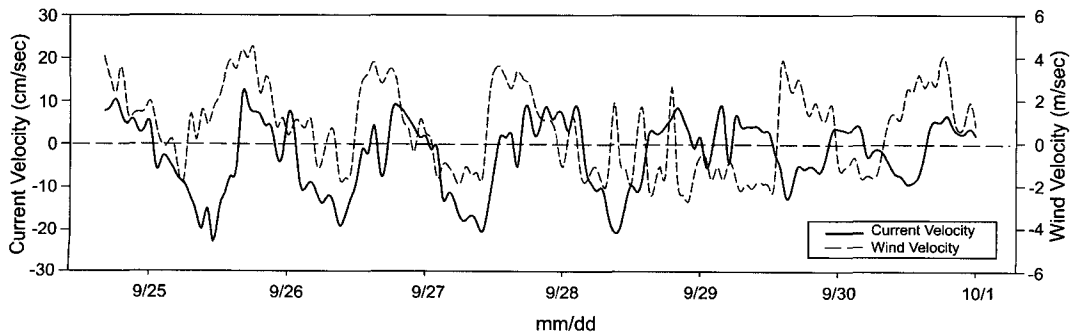


Fig. 2. Comparison of directional velocity of current and wind.

ICM을 선택하였다. CE-QUAL-ICM은(이하 ICM) 3차원 수질 모형으로서 Chesapeake에 적용(Cerco and Cole 1994, 1995)되었으며, Chesapeake 외에 초기에는 정규격자체계를 갖는 CH3D-WES 동수역학 모델과 연동되어 New York과 New Jersey의 항과 하구의 수질연구(Dortch et al., 1997)에 이용되었고 근년에는 비정규격자를 갖는 수리모델인 RMA10 모델과 연계되어 Florida Bay(Cerco et al., 2000) 등에 널리 이용되어지고 있다.

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

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

위의 식 (1)은 n 번째 control volume에서의 질량보존을 나타내며 여기서 n 은 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.

이 질량보존방정식을 계산하는데 있어 두 가지 단계를 거치는데, 먼저 체적의 변화, 외부 오염 부하량과 침전에 따른 수평방향의 이송과 확산을 포함하는 값을 다루며 이 과정은 양해법을 이용하여 다음의 질량보존방정식을 계산한다. 이 수평방향의 이송을 계산함에 있어서는 수치해석적으로 upwind 방법과 QUICKEST 방법을 선택할 수 있도록 되어있다.

$$C_j^* = \frac{V_j}{V_j^{t+\Delta t}} C_j + \frac{\Delta t}{V_j^{t+\Delta t}} \left[\sum_{k=1}^{nhf} Q_k C_k + \sum_{k=1}^{nhf} A_k D_k \frac{\delta C}{\delta x_k} + \sum S_j \right] \quad (2)$$

여기서, C_j^* =체적변화, 부하량, 수평방향의 이송과정 이후의 농도

nhf = 수평방향 통수면 수.

다음으로는 연직방향의 계산 단계를 거친다. 수평방향으로는 확산보다 이송항이 더욱 지배적이므로 계산함에 있어 양해법이 적합하나, 연직방향으로는 확산이 중요하고 지배적이며 이를 양해법으로 계산시 작은 시간단계와 오랜 계산시간이 필요하므로 음해법으로 구하며 그 질량보존방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{C_j^{t+\Delta t} - C_j^*}{\Delta t}$$

$$= (1-\theta) \sum_{k=1}^{mvf} \frac{Q_k C_k}{V_k} + \theta \sum_{k=1}^{mvf} \frac{Q_k^{t+\Delta t} C_k^{t+\Delta t}}{V_k^{t+\Delta t}} + \sum_{k=1}^{mvf} \frac{A_k D_k \delta C}{V_k^{t+\Delta t} \delta z} \quad (3)$$

여기서 θ =음해법을 표현하는 가중인자($0 \leq \theta \leq 1$)

mvf =연직방향 통수면 수

z =연직좌표축.

수질모델 내부의 여러 가지 반응들 중에서 대표적으로 COD(Chemical Oxygen Demand)보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\delta}{\delta t} COD = -\frac{DO}{KHocod + DO} Kcod COD \quad (4)$$

여기서 COD =화학적 산소요구량($gm O_2$ -equivalents m^{-3})

$KHocod$ =COD의 용존산소 전환에 필요한 반포

화농도($gm O_2 m^{-3}$)

$Kcod$ =화학적 산소요구량의 산화율 (day^{-1}).

한편 DO는 아래 식과 같이 표현되는데,

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} DO &= \sum_{x=c,d,g} \left[(1.3 - 0.3PNx)Px - \frac{DO}{KHrx + DO} BMx \right] AOCR Bx \\ &- AONT NT - \frac{DO}{KHodoc + DO} AOCR Kdoc DOC \\ &- \frac{DO}{KHocod + DO} Kcod COD + \frac{Kr}{\Delta z} (DOs - DO) \end{aligned} \quad (5)$$

위에서 조류의 대사작용(Px , BMx)과 용존유기탄소에 관한 항(DOC , $AOCR$)을 다루지 않으면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} DO &= \\ &- AONT NT - \frac{DO}{KHocod + DO} Kcod COD + \frac{Kr}{\Delta z} (DOs - DO) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, DO =용존산소($gm O_2 m^{-3}$)

$AONT$ =질산화과정에 소모된 용존산소($4.33 gm O_2 gm^{-1} N$)

$KHocod$ =호흡에 필요한 용존산소의 반포화농도 ($gm O_2 m^{-3}$)

Kr =재포기계수($m day^{-1}$).

그리고 질산화는 다음과 같이 정의 된다.

$$NT = \frac{DO}{KH_{ont} + DO} \frac{NH_4}{KH_{mnt} + NH_4} f(T) NTm \quad (7)$$

여기서, NT =질산화 비율($gm\ N\ m^{-3}\ day^{-1}$)
 KH_{ont} =질산화에 필요한 용존산소의 반포화농도
 ($gm\ O_2\ m^{-3}$)
 KH_{mnt} =질산화에 필요한 NH_4 의 반포화농도
 ($gm\ N\ m^{-3}$)
 NTm =최대 질산화율($gm\ N\ m^{-3}\ day^{-1}$).

3.2 동수역학과 수질모델의 접합

ICM은 유한체적방법을 이용하므로 완벽한 질량보존을 만족하도록 고안되었으나 자체 내에서 동수역학 계산을 하지 않고 외부의 모델로부터 유량, 확산계수 및 셀 체적 등의 값을 입력 받게 되어있다. 이러한 동수역학적 정보는 3차원 또는 2차원의 비정규격자(unstructured grid)의 각 Cell(또는 Box)과 서로 인접한 Cell사이의 통수면(flow face)에서 유출율과 반응으로 정의된다. 결국 Cell과 Cell사이의 상대적인 위치는 비교적 중요하지 않은 반면 통수면과 통수면에 인접한 Cell의 정보가 중요하게 인식된다.

ICM은 총 세 가지 형태의 해수유동 결과를 입력으로 받게 되어있는데, 하나는 간단한 BOX 모델 수준의 모의를 하기 위한 ASCII 형태의 입력파일과, 많은 격자 및 장기간 모의를 위한 Binary 형태의 입력파일이 있으며, Binary 형태의 입력은 또 다시 2차원 모의를 위한 수심 평균된 형태와 3차원 모의를 위한 형태로 나뉘어서 할 수 있도록 되어 있다. 수면변위에 대한 변화는 동수역학 입력 파일이 ASCII형태일 경우 전혀 반영되지 않으며, Binary일 경우는 한 셀에서의 들어오는 유량과 나가는 유량의 나머지 의해 변화되는 체적을 ICM내부에서 계산토록 되어 있고, 표층에서만 각 셀의 체적을 동수역학 파일을 통해 바꾸어주도록 되어 있다.

본 연구에서 시화호내 순환모의에 대한 모델로 3차원 유한요소 모형으로 TIDE3D 모형을 적용하였는데, 이 모형은 국외에서의 연구 적용 및 국내의 기존 연구(서, 1999)에서 황해 및 서해연안역에 적용되어져 3차원적인 동수역학 특성을 잘 재현한 바 있다. 그러나 적용된 모형이 유한요소 모형자체에서 질량보존을 평가(서, 2000)하는 것 이외에 해수유동모형으로부터 얻은 유속장 결과를 ICM의 비구조화 격자로 질량보존을 만족시키며 투영시키는 방법이 필요하게 되었으며, Chippada *et al.*(1997)은 이러한 질량보존을 충족하는 방법으로 유속투영방법(conservative

velocity projection method)을 제안한 바 있다.

유량의 계산은 수평방향과 수직방향의 계산이 서로 다른데, 본 연구에서는 수평방향의 유량을 다음 식 (8)과 같이 유한요소의 보간방법을 도입하여 통수면에서의 유출 유량의 기중치를 두어 계산하는 기법(서, 2000)을 사용하였다.

$$Q_f = \frac{l_e}{6} (2H_1 v_{n1} + H_1 v_{n2} + H_2 v_{n1} + 2H_2 v_{n2}) \quad (8)$$

여기서, Q_f : 통수면에서의 유량

l_e : 통수면의 평균 선분 길이

H : 마주한 두 노드 점 1,2에서의 수위

v_n : 마주한 두 노드 점 1,2에서 통수면에 연직된 유속성분.

연직방향 유속은 표면적이 수심에 비해 넓으므로 통수면의 4개 절점의 수심방향 유속성분 w 를 평균취한 값에 통수면적을 곱한 값을 사용하였다. 그 후 유량에서 발생하는 오차가 해수유동의 결과와 비교하여 그 수면변위의 값에서 일정범위를 넘어설 경우에 한하여, 한 셀이 가지는 여섯 면의 통수면 중에서 가장 큰 유량을 가지는 통수면의 값을 보정해주는 방법을 사용한다(Suh *et al.*, 2002).

수문 개폐시 변동되는 내부수위가 일정한 시간적분간격 내에서는 크게 변화되지 않으며 수 cm에 불과한 본 영역에서는 질량보존을 만족하기 위해서는 그 합이 0에 가까워야 한다고 설정하고, 체적의 변화량이 유동의 결과를 통해 이미 산정된 수면변위를 넘는 해당 셀에 대해서만 적용토록 하였다. 그 이유는 체적의 변화가 심한 셀이 갑문 부근의 일부로 한정되어 있기 때문이며, 이러한 체적산정을 모든 셀을 통해 해결 경우 비정규격자의 특성상 오차가 순차적으로 누적되어 전혀 예상치 않은 결과를 도출하는 우려가 있기 때문이다.

4. 수질모의 및 분석

4.1 동수역학적 특성

본 연구의 대상인 시화호를 수치적으로 이산화하기 위해 격자(Box)는 동수역학모델과 수질모델의 원활한 접합을 위해 수평방향으로는 300mx300m의 일정한 형태로 총2739개로 구성하였으며, 수직적으로 4개층의 σ 좌표계로 구성하였다.

배수갑문의 운영은 외해수위와 직접적으로 관련시켜 조작을 하고 있으나 내측의 수위를 조절하므로 일정한 규

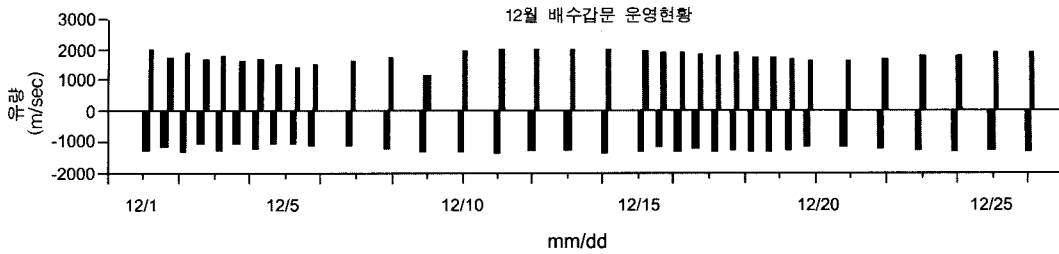


Fig. 3. Flux changes due to gate operation.

칙에 따라 움직이는 것이 아니고 대부분 인위적인 거동을 보인다. 한 예로 겨울철에 개폐되는 수문과 이를 통하여 외해수와 호소수의 취배수량이 Fig. 3에 보이는 바와 같이 유출입 된다. 그림에서 보는 바와 같이 겨울철에는 호소 상류의 담수 유입량이 상대적으로 작아 주로 배수갑문의 조작에 의해서만 내측의 호소수위가 유지되므로 다른 계절에 비해 규칙적으로 갑문을 열고 닫는다. 이러한 규칙성은 일종의 주기를 가지는 것으로 간주되어 모델링에 반영할 수 있다. 시간에 따라 변하는 유동장을 모의하기 위해서 유동특성을 효과적으로 적용할 수 있는 적합한 모델이 절실히 필요하게 되었다. 1년간 계절별로 관측한 결과 시화호에서 배수갑문을 통한 해수 유통이 비교적 주기적으로 실시되고 있으며, 1년 이상의 장기적인 수질모의에서 하천의 유입을 고려할 때 이러한 주기성을 효율적으로 고려하는 수리모델이 적절하므로 3차원의 비정규 격자체계에서 운용되는 TIDE3D 모델을 선정하였다. 이 모델은 Walters(1992)에 의하여 제시된 것으로 조화함수기법을 이용하여 해안과 만에서의 유동을 재현한다. 실제 적용은 Foreman과 Thomson(1997), 서(1999)에 의하여 비선형 조석에 대하여 만족스럽게 분석된 바 있다.

계산결과 Fig. 4와 Fig. 5에서 보듯이 호내 순환이 주로 갑문 근처에만 있음을 보여주며 내외수의 혼합영역이 갑문으로부터 4-5 km까지 미치고 있음을 보여준다. 이렇게 제한된 순환은 오랜 동수역학적 체류기간으로 호내 수질개선에 미치는 효과가 작음을 의미한다. 살펴본 바와 같이 내외수의 혼합영역은 지천의 유입 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 얇은 호 내에서 바람의 응력은 내부 순환에 바로 영향을 끼치고 있다. 이런 동수역학적 특성에 의해 이송과 확산 역시 제한된 영역에서만 일어남을 보여준다. 대체적인 유동의 특성은 폐쇄된 하구호의 실상을 그대로 재현하고 있으며, 능동적인 순환기작이 없는 현실에서 갑문의 개폐에 의존하는 결과를 보이고 있다. 즉, 시화호의 순환에 영향을 미치는 것은 일차적으로 갑문의 조

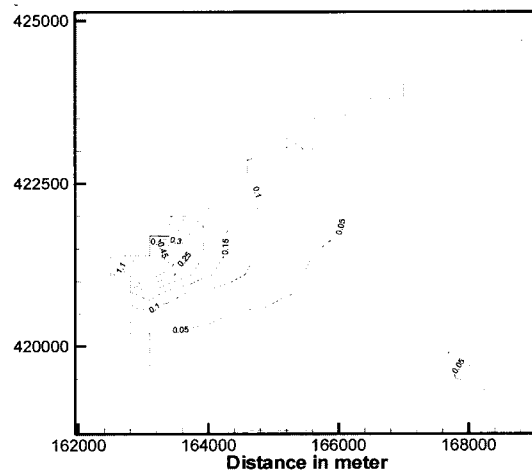


Fig. 4. Simulated velocity contour in front of sluice gate.

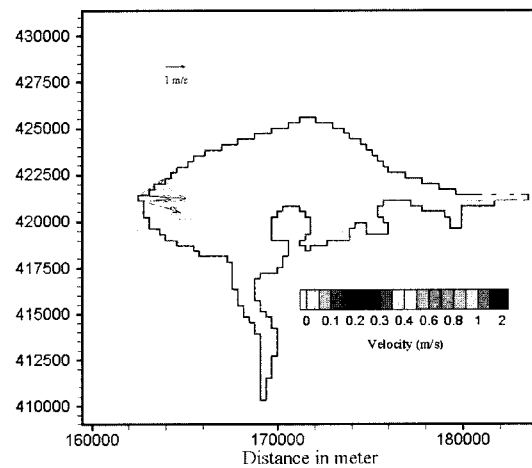


Fig. 5. Simulated circulations due to sluice operation and river inflow.

에 의한 국지적인 영역에서 내외수의 혼합순환과 계절적인 바람에 의한 순환이 주를 이룬다. 결과적으로 동수역학적 특성은 이어지는 수질모의에도 직접적으로 영향을

미치게 되는 것으로 판단된다.

4.2 수질모의의 보정 및 검증

실제적인 수질모의 전에 관측값을 이용하여 모델내의 변수에 대한 보정과 검증을 할 필요가 있으며, 이와 같은 목적을 수행하기 위해 본 연구에서는 이미 Fig. 1에 묘사한 4개의 정점에서 계절적으로 연속 관측된 자료를 이용하였다. 안정된 모델은 개발 이후에 다양한 지역에 적용된 경험 및 특정 대표적인 지역에서 수년에 걸쳐 관측한 수질 값들과의 상호 비교를 통해 보정된 매개변수들의 적정 값의 범위를 제시하고 있으며, ICM의 보정과 검증을 잘 수행된 자료로 Cerco *et al.*(2000)이 제시한 것을 참조할 수 있다. 본 연구와 유사하게 폐쇄된 만인 진해(마산만에서 월별 및 계절별 관측자료를 이용하여 수질모

의 보정과 검증을 실시한 조와 채(1999)의 연구 성과를 제외하고는 국내에서 수질관리 연구로는 주로 단기간에 걸쳐 새로운 모델의 적용에 급급하여 현장관측을 토대로 축적된 자료에 근거한 모델 매개변수의 튜닝이 이루어지지 않은 제한 사항이 있다. 본 연구에서도 이러한 제한 사항이 포함되어 있으며, 제한된 여건 하에서 관측된 값들과의 비교 검토가 충분하지 못한 점이 있었다.

수치모형의 보정 목적으로 YSI6600 관측기를 이용하여 pH, DO, 수온 등 제한된 수질항목에 대한 10분 간격의 연속관측을 2개 정점에서 계절별로 20분 간격으로 연속적으로 15일간 실시하였으나, 관측항목의 제한과 센서의 한계로 2001년 6월 30일부터 7월 14일기간 동안 취득한 자료 중 온도와 DO에 대하여 보정을 하였다. 계산된 값과 관측 값의 일치된 경향을 나타내는 것을 확인 후

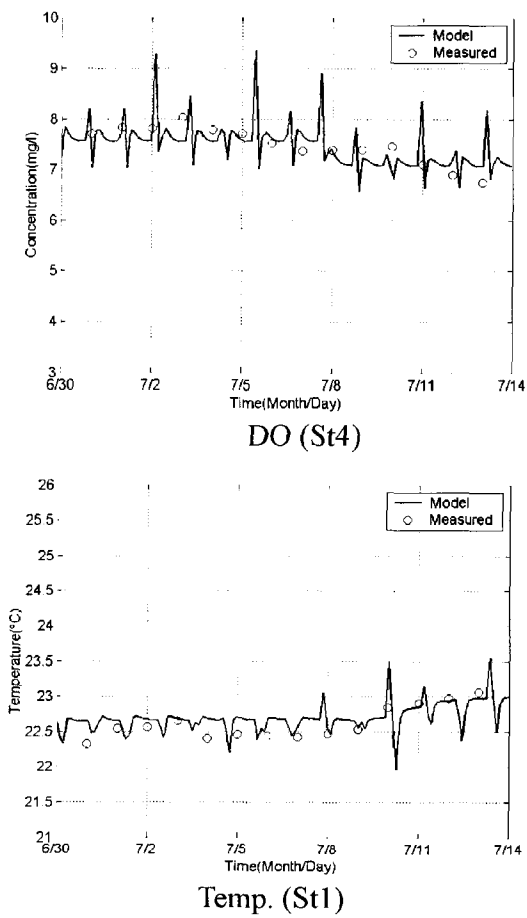


Fig. 6. Calibration of CE-QUAL-ICM using observed data of July, 2001.

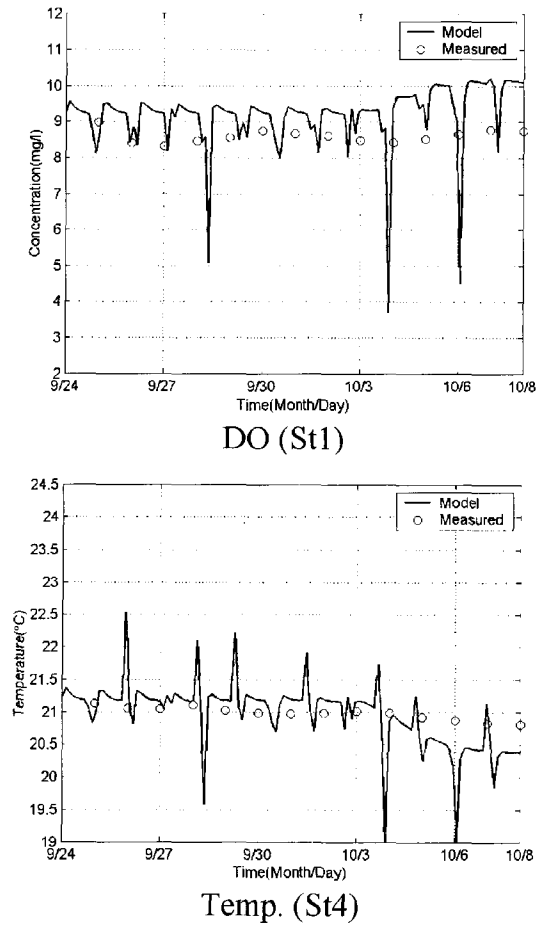


Fig. 7. Validation of CE-QUAL-ICM using observed data of September, 2000.

보정에 이용된 범위의 계수들을 다른 시기의 관측 값에 적용하여 객관성 검증을 수행하고자 2000년 9월 24일부터 10월 8일까지 자료와 비교하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 검증결과 만족스럽게 신뢰할 수 있는 정도 내에서 일치함을 보이고 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 보정과 검증 결과를 나타내며 여기서 관측 값은 1일 평균값이다. 평균을 취한 이유는 관측된 수온과 용존산소 모두 하루 중 주야간의 변화 폭이 커서 실제로 모델 내에서 이러한 단기적인 변동을 표현하는 것이 무리이고, 또한 본 연구의 목적이 1년 이상의 장기적인 수질변동을 해석하는 것이므로 단기간의 모델링에 반영 가능한 인자보다는 장기적인 변동에 영향을 미칠 수 있는 인자를 우선적으로 고려하였기 때문에 일간의 변동을 무시하였다. 이렇게 타당성이 객관화된 수질 모델의 매개변수들은 시화호의 국지적

인 변화를 포함하여 장래예측에 이용할 수 있음을 보여 준다.

4.3 장기간의 수질모의

수치모의 초기단계에서 시화호 영역 전체의 수질정보의 획득이 불가능하므로 초기값을 0으로 시작하는 cold start 조건을 적용하였다. 이의 영향으로 불안정한 계산결과가 50여일간 지속되므로 이러한 미확정적인 영향을 배제하기 위하여 ramp up 조건으로 단계적으로 외적조건에 따라 반응하도록 조정하거나 계산된 결과 중에서 계산초기의 60일간 정도를 제거할 필요가 있다. 모의된 결과중 DO, COD, Nitrate, Total Phosphate 는 다음 Fig. 8~11에서 계절적 변화를 나타내고 있다. 본 연구에서는 시화호에 대한 기존 분석자료를 이용하여 일년간의 외부 오염부하를

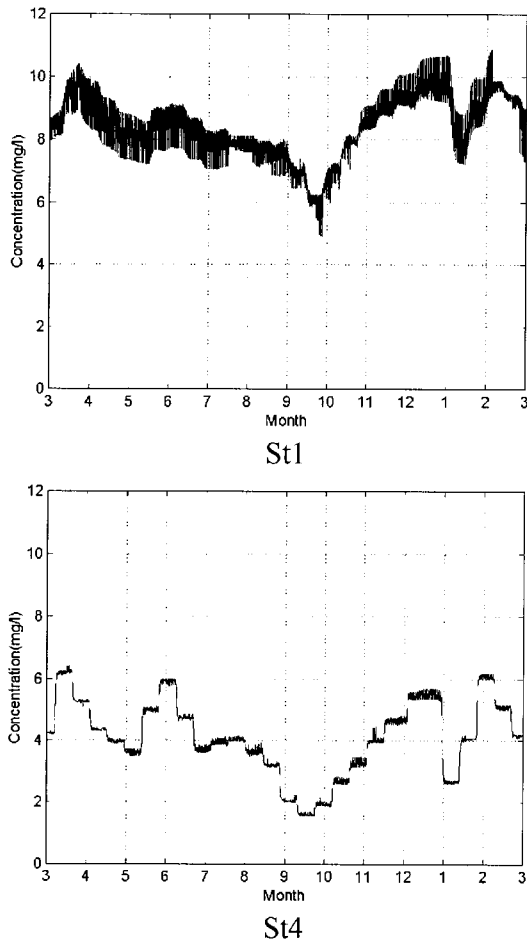


Fig. 8. One-year long simulation of DO at stations 1 and 4 for the target control water levels, i.e., EL-1.0 m.

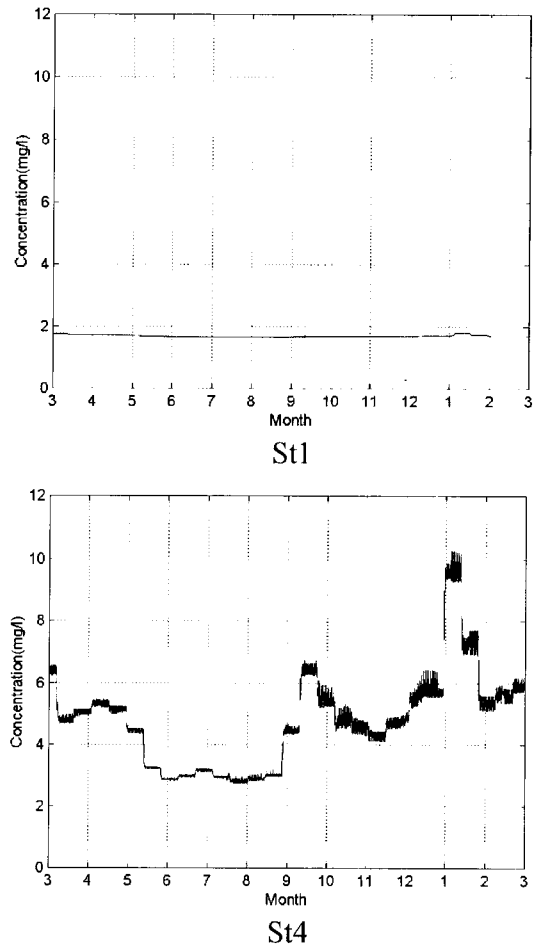


Fig. 9. One-year long simulation of COD at stations 1 and 4 for the target control water levels, i.e., EL-1.0 m.

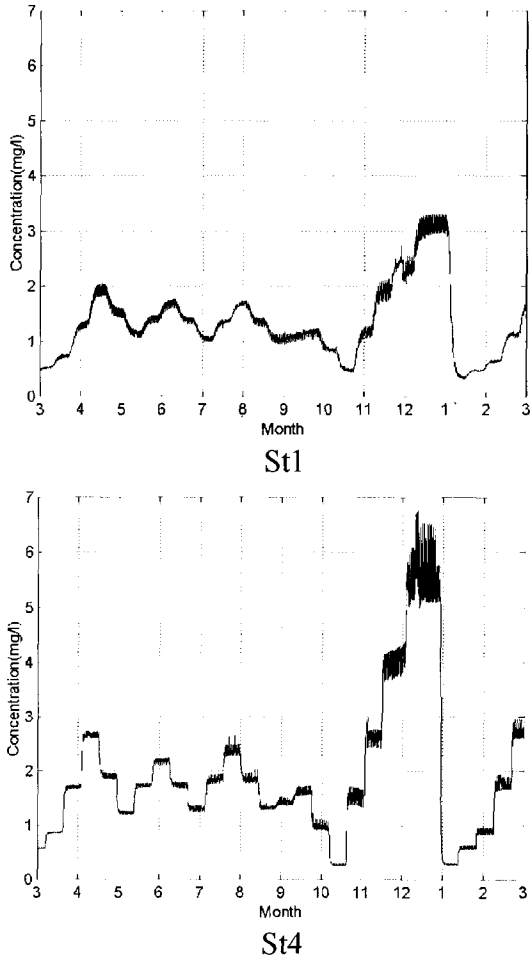


Fig. 10. One-year long simulation of Nitrate at stations 1 and 4 for the target control water levels, i.e., EL-1.0 m.

월별로 분석하여 Table 2에 나타내었으며 이를 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 특성을 재현하는 데는 만족스럽게 이용될 수 있는 것으로 판단된다. 평면적인 분포를 보이는 Fig. 12~13에서 하단부의 연직방향의 농도분포는 시화호의 상류부인 우측단으로부터 수문까지를 일직선으로 연결하는 가상적인 단면으로서 평면도의 y축의 중거 421을 따라서 취한 단면으로, 표층과 저층의 용존산소의 농도차이를 보여주고 있다. 용존산소의 시간적 변화 측면에서는 특히 가을

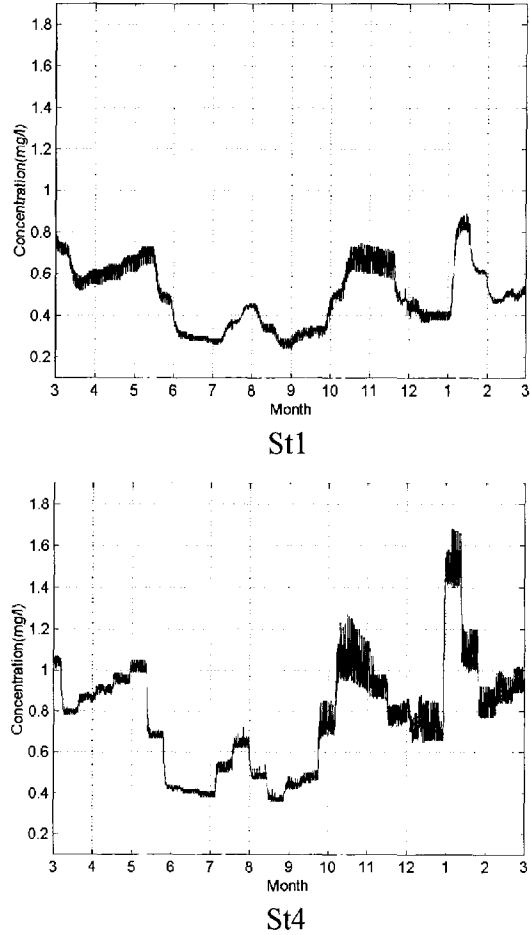


Fig. 11. One-year long simulation of Total Phosphate 1 and 4 for the target control water levels, i.e., EL-1.0 m.

에 좋지 않은 분포를 보이고 있으며, 공간적으로는 하천 유입구에서 대부분 전층에서 농도가 낮게 재현되고 있는 반면 수문이 위치한 부분에서는 외해수의 영향으로 전층에 걸쳐 양호한 농도분포가 있음을 용이하게 알 수 있다. COD를 포함한 다른 항목에서도 공간적으로는 수문의 영향을 받아 호내 서측에서 수질이 개선되며 계절적으로도 그 변화가 적으나 호내 동측은 상당히 오염이 가중되며 계절적으로는 봄과 가을 그리고 모의당시 경계농도가 가장 큰 1월 동안 오염이 심화되는 것을 보여준다.

4.4 저질이 수질에 미치는 영향

일반적인 하구호는 상류에서의 오염 유입뿐만 아니라 저질에서의 용출 영향으로도 수질이 악화되고 있는 것으로 알려져있다. 인위적으로 체절되어 호내가 정채되어 저

Table 2. (a) Boundary concentration at boundary face No.1 shown at Fig. 1 (한국 수자원공사, 1998)

Month	Temp.	Salt.	NH ₃	NO ₃	DON	PO ₄	DOP	COD	DO
1	2.34	2.36	15.52	0.40	3.59	1.71	0.29	19.36	3.2
2	3.34	2.36	8.26	0.98	2.01	0.94	0.60	13.43	6.7
3	6.15	2.36	10.53	3.08	0.00	1.06	0.56	14.35	5.2
4	14.90	2.36	7.52	1.40	1.66	1.20	0.30	13.15	4.0
5	20.26	2.36	5.94	2.51	0.00	0.50	0.77	11.12	8.0
6	22.80	2.36	5.32	1.49	0.51	0.46	0.87	14.23	4.0
7	24.62	2.36	5.48	2.70	0.00	0.74	0.50	9.71	4.2
8	25.73	2.36	6.88	1.52	0.00	0.44	0.81	11.03	2.4
9	28.70	2.36	9.64	1.82	0.59	0.54	1.22	15.77	2.0
10	17.71	2.36	8.41	1.08	1.54	1.12	0.41	12.23	2.3
11	12.16	2.36	7.14	2.99	0.00	1.07	0.37	12.47	3.7
12	4.36	2.36	9.53	6.17	0.00	0.80	0.77	13.84	6.5

(b) Boundary concentration at boundary face No.2 shown at Fig.1 (한국 수자원공사, 1998)

Month	Temp.	Salt.	NH ₃	NO ₃	DON	PO ₄	DOP	COD	DO
1	2.34	2.36	6.79	1.35	0.58	0.11	0.69	4.70	5.52
2	3.34	2.36	6.79	1.35	0.58	0.11	0.69	4.70	5.17
3	6.15	2.36	7.59	2.34	0.00	0.21	0.60	4.77	5.93
4	14.90	2.36	7.70	3.61	0.00	0.34	0.46	4.74	4.49
5	20.26	2.36	7.08	2.69	0.00	0.14	0.67	4.73	4.52
6	22.80	2.36	7.30	1.43	0.61	0.13	0.67	4.69	4.07
7	24.62	2.36	8.63	1.13	0.00	0.36	0.44	4.72	2.84
8	25.73	2.36	7.72	1.09	0.00	0.07	0.73	4.71	2.01
9	28.70	2.36	7.53	0.27	1.00	0.11	0.69	4.64	1.66
10	17.71	2.36	6.78	2.91	0.00	0.18	0.63	4.77	2.01
11	12.16	2.36	7.26	1.39	0.07	0.13	0.67	4.70	4.11
12	4.36	2.36	7.60	1.10	0.13	0.09	0.71	4.68	5.48

(c) Boundary concentration at boundary face No. 3 shown at Fig. 1 (한국 수자원공사, 1998)

	Temp.	Salt.	NH ₃	NO ₃	DON	PO ₄	DOP	COD	DO
1-12	var	21.2	0.138	0.207	0.075	0.023	0.037	1.50	7.64

질의 용출영향을 살펴보기 위해 본 연구에서도 저질-수질의 상호작용을 모의했으며 수직적으로 층별 영향을 파악하기 위해 저질 영향에 대한 특성을 검토하였다. 그러나 본 연구와 동기간에 수행한 현장조사 결과에서는 모델에 적용할 수 있는 용출율이 COD와 TP에 국한되어 있어 매개변수가 불확실한 상태에서 수행하여 실제의 반응을 파악하기는 곤란하였다. 이외의 매개변수는 Chesapeake (Cero and Cole, 1995)와 Florida bay(Cero *et al.*, 2000)에서 참조하였다. 즉 저질토가 수질에 미치는 영향분석에서 엄밀한 의미에서 저질의 기여를 평가하기보다는 선정한 모델인 ICM이 여하히 사회호의 저질과 수체와의 관련을 규정하는 것이냐에 대해 분석하였으므로 경우에 따라서는 다

소 과장된 큰값이 입력되어 모의되었다. 모의 결과, 상류 하천의 유입구와 저층에서는 저질에 의한 영향을 직접적으로 받을 수 있는 것으로 분석되었다. 저질에 의한 수체의 층별 변화를 보기위해 정점1에서의 DO의 결과를 비교하여 Fig. 14에 14일 동안 DO의 층별 변화를 나타내었다. 저질의 영향을 고려시 저층에서 영향이 더욱 크게 나타나 하루동안의 일간 DO의 변화는 저질의 반응을 고려하는 것과 무관하게 실제 관측치처럼 크게 나타나지는 않는 것으로 분석되었다. 평면적으로는 관측된 용출률 성과와 국외의 적용사례를 견주어 유사한 값을 적용하였으나 공간적인 분간이 되지않는 구조를 갖는 것으로 모의결과 나타났다. 결국 현조건에서 저질에 의한 반응이 연직적으로 감지되지만

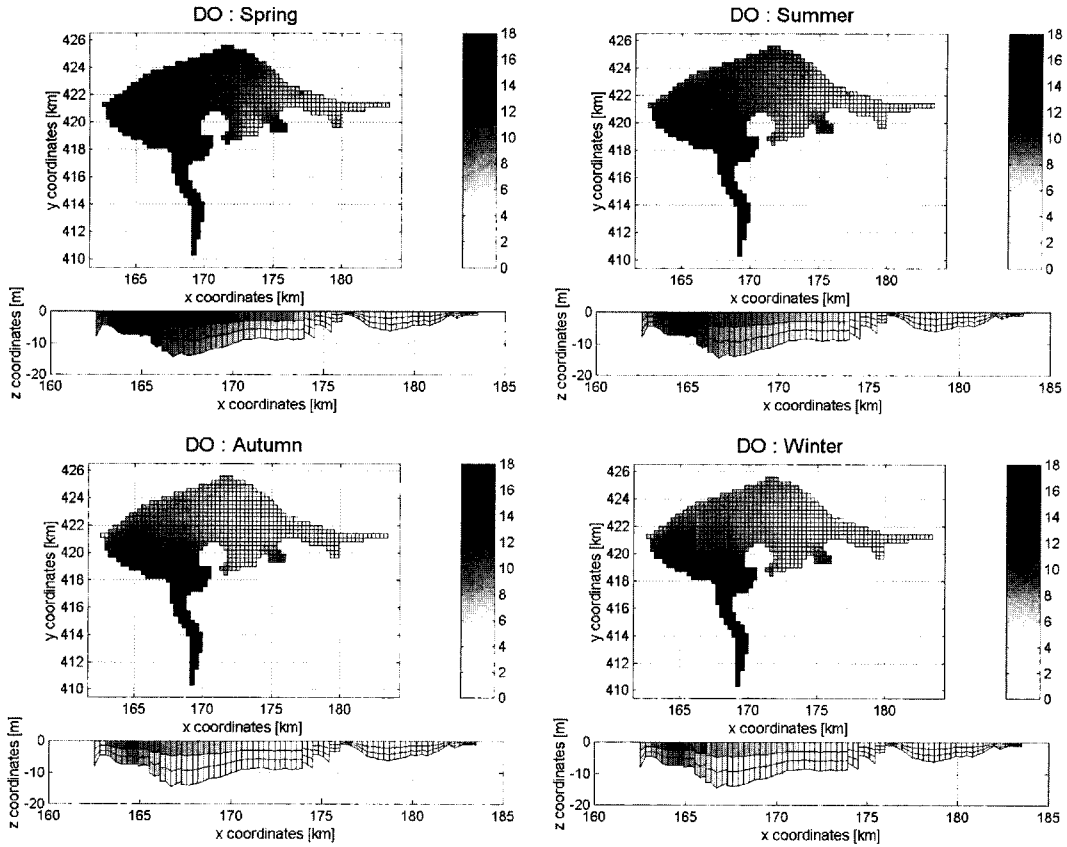


Fig. 12. Spatial and seasonal DO concentration distribution for one year.

평면적인 농도의 분포차이는 확연하게 나타나지 않아 장기적으로 수질을 모의할 때는 저질의 용출에 의한 영향을 고려하지 않아도 충분할 것으로 판단된다.

4.5 토의

질량보존 오차를 최소화하도록 동수역학 모델 TIDE3D 결과와의 집합기술이 적용된 수질예측모델인 CE-QUAL-ICM을 부분적으로 폐쇄된 하구호에 적용하여 관측자료와의 비교를 통해 보정, 검증 마쳤으며 이를 토대로 1년간의 모델실험을 수행하였다. 본 연구에서 몇몇 매개변수들의 범위는 추정하기 곤란하였으나 장기 모델에서 경향을 파악하는데 무시할 만한 것으로 판단되어 보정과 검증을 거친 계수 값들을 모델에 반영하였다. 자료부족으로 더 세밀한 검증을 수행하지는 못하였지만 유동이 크지않은 하구호 내에서 저질의 영향이 크게 작용할 수 있음에도 불구하고 해석결과 저질에 의한 수질의 반응과 이로 인한 영향은 1년 이상의 장기간의 수질변동 해석에 무시할 수

있을 것으로 판단되었다.

1년간의 장기적인 모델 적용결과, 계산 초기에는 하천 유입부근에서 상류의 오염원에 기인되어 제한적으로 확산되지 못하는 현상을 보이고 있으며 갑문외해 경계를 고정하고 모의를 계속하면 동수역학적 특성에 반응하여 갑문주위에서만 동적인 결과를 나타낼 뿐 이외의 영역에 걸쳐 준정상상태의 계산결과를 얻게 된다.

본 연구에서 선정된 모델인 ICM은 모두 22개의 수질 인자에 대해 모의 가능하지만 본 모델링에서 모의하여 출력하는 수질항목은, 수온, 염분도, 및 부영양화 평가에 반영하는 영양염류를 포함한 9가지에 대해 국한하였다. DO, COD, NO₃-N, PO₄-P에 대하여 1년간의 모의 결과를 살펴봄으로써 장기간의 수질변동을 이해하고자 하였다. 실제적인 수질모델의 적용 목적은 시화호의 장래 개발방안에 따른 이용목적에 충족하는 수질저하 혹은 개선을 평가하는 것이므로 오염원 변동 등의 외적인 조건의 변화를 부여하지 않고 고정하면서 살펴보았다. 계산결과를 도

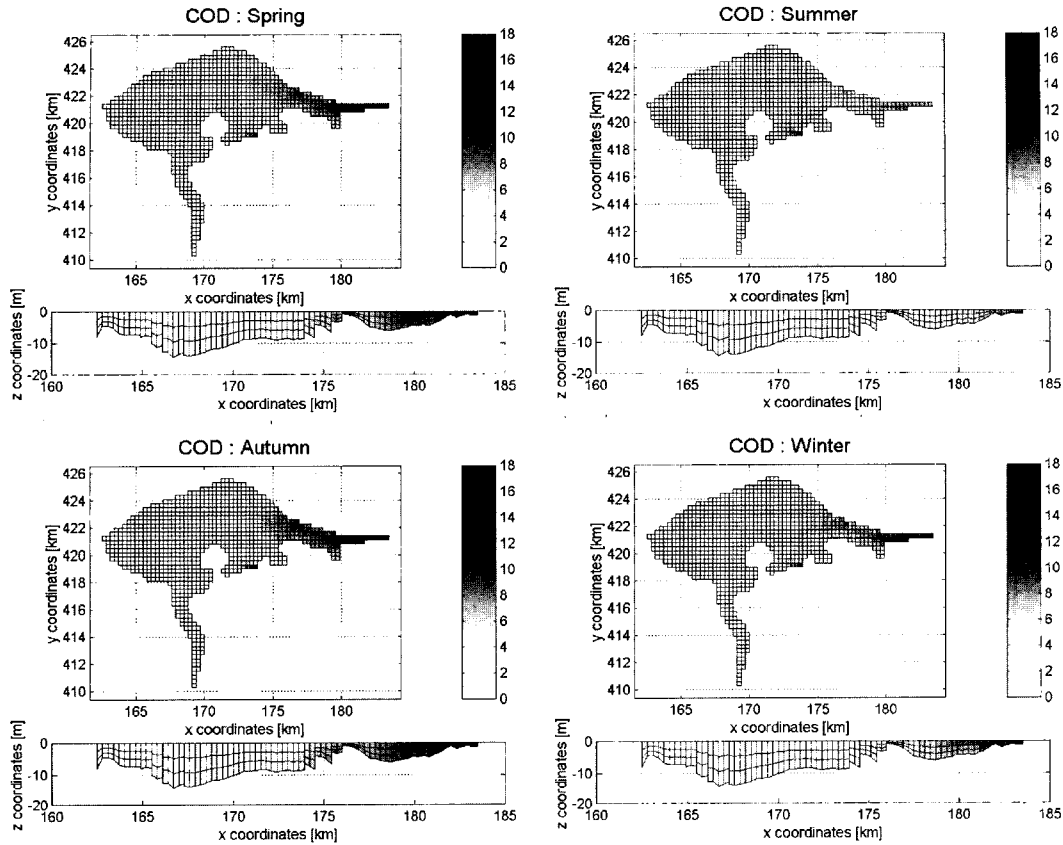


Fig. 13. Spatial and seasonal COD concentration distribution for one year.

시한 Fig. 8~11에서 보는 바와 같이 현재 갑문의 유통으로 호내 동측의 부영양화는 개선시키기 어려움을 나타내고 있다. 여러 실험을 통해 검토한 바 이러한 경향은 여름철에 하천의 유출량이 증대하거나 혹은 상류의 N, P의 부하량을 저감하여도 크게 개선되지 않는 것으로 분석되어 부분적으로 폐쇄된 하구호의 구조적인 문제점을 드러내는 것으로 판단된다. 상황별 장기간의 수질변화 결과로부터 본 연구에 적용한 수리 및 수질모델이 자연적인 현상을 잘 재현하고 있다고 판단되고, 향후 유사한 하구호의 부영양화를 포함한 수질예측과 관리에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 3차원의 동수역학과 수질모델을 이용하여 1년간의 장기간에 걸친 하구호의 수질을 예측하고 평가하였지만 PC에서 매우 효율적으로 작업할 수 있었던 것은 조합수 기법을 적용한 동수역학 모델을 수질모델과 연계하여 운영하였기 때문으로 판단된다. 따라서 주기적으로 반복되는 외해 조석의 움직임과 계절적으로 변동이 있는 하천의 유입수량 또는 수표

면에서의 바람에 의한 응력 등을 개별적으로 처리할 수 있는 장점이 내재된 동수역학모델의 결과와 함께 월별 평균된 오염부하량을 적용한 수질모델의 접합이 이상적인 것으로 사료된다.

5. 결 론

인공적으로 체결된 방조제의 일부 구간인 갑문을 통해서만 외해수와 유통되는 부분적으로 폐쇄된 하구호의 수질모의를 하기 위하여 3차원의 동수역학 및 수질모델을 적용하였다. 최소한 1년 이상의 장기간 수질변동을 모의하기 위하여 적절한 모형의 선정이 중요하였으며, 수문의 개폐가 규칙적으로 이루어지는 점을 감안하여 주기성을 고려한 동수역학 모형인 TIDE3D 모형을 적용하여 장기적인 동수역학적 정보를 효율적으로 취급할 수 있었다. 계산결과 수문의 개폐로 인한 거동은 제한적으로 수문의 인근 4-5 Km에서만 나타나고, 따라서 혼합효과는 미미한 정

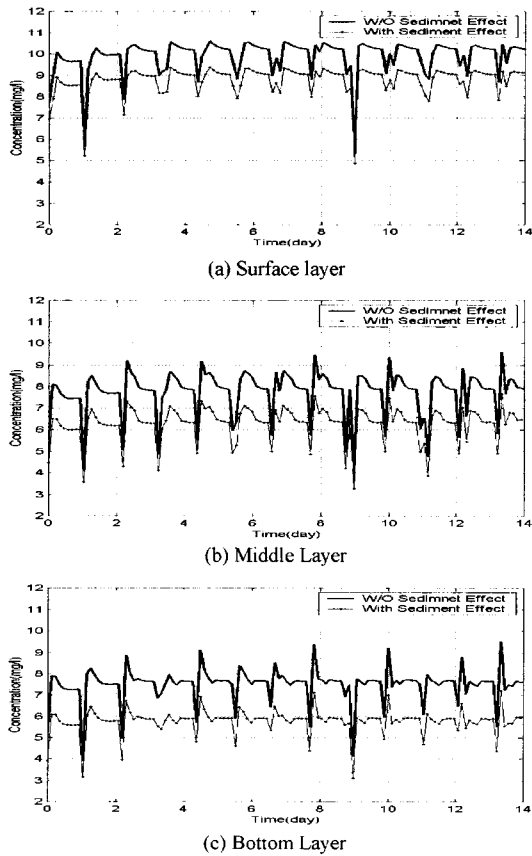


Fig. 14. Sediment-water interaction at station 1 for DO concentration.

도임을 알 수 있다. 계절적인 바람이 호소내 순환의 중요한 요인으로 작용하고 있는 것을 관측자료로부터 확인할 수 있었지만 현실적인 여건의 제약으로 장기간의 모델링에서는 고려하지 못하였다. 그러나 본 연구를 통해 유한요소 근사화를 이용하는 수치모형과 유한체적방법을 이용하는 수질모형의 접합에서 수치적 오차를 최소화하기 위한 질량보존을 만족하는 방법이 제시되었으며, 매우 만족스럽게 활용될 수 있음이 입증되었다.

하구호의 수질현황 파악과 수질모형의 보정 및 검증 목적으로 1년간 계절별로 15일간의 동수역학과 수질을 모니터링 하였으며 이들 자료를 이용하여 상당히 만족스러운 범위 내에서 모델변수를 선정함으로써 수질모형의 객관적인 타당성을 입증할 수 있었다. 장기간의 모델링에서는 외적인 인자에 의하여 반응하는 수치모형의 특성을 살펴볼 수 있었으나 초기조건의 불확실성에 기인되어 계산 결과가 준정상 상태에 다다르지는 않음을 확인할 수 있

었다. 따라서 장기적인 모의에서는 계산초기의 불확실한 부분에 대한 검토가 필요하였고, 최소한 초기의 60일간의 신뢰성은 결여되어 있어 이를 최소화하기 위한 적절한 완화방법이 강구되어야 함을 알 수 있었다. 저질과 수체와의 반응을 측정할 용출율자료 및 기타 국내외의 타 지역에서 제시된 자료를 입력으로 계산하여 표층과 저층 수질의 차이를 확인할 수 있었지만, 그 차이가 미미하고 대부분의 호내에서는 저질의 영향을 무시할 수 있을 것으로 판단되었으며 특히 장기간의 평면적 수질분포특성의 이해에서는 저질의 영향을 무시하여도 수질의 평가 및 관리에서는 문제가 되지 않는 것으로 분석되었다. 이런 여러가지 상황별 장기간의 수질변화 결과로부터 본 연구에 적용한 수치 및 수질모형이 자연적인 현상을 잘 재현하고 있다고 판단되고, 향후 유사한 하구호의 부영양화를 포함한 수질예측과 관리에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 있을 것으로 기대된다. 모의된 수질결과는 현재상태의 수동적인 여건에서는 수질개선의 효과가 기대하기 어려우므로 새로운 수문의 추가건설 및 효율적이고 능동적인 갑문유통 체계의 구성이 필요할 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 해양한국발전프로그램(KSGP), 새만금환경연구센터(SERC), 및 한국수자원공사의 지원에 의해 수행되었기에 심심한 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

서승원, 1999. 비선형 3차원 조화유한요소 모형을 이용한 황해의 천해조석 발생, 대한토목학회, **19**(II-3): 389-399.
 서승원, 2000. 유한요소 동수역학 모형에서의 질량보존 평가. 대한토목학회, **20**: 305-315.
 한국수자원공사, 1998. 시화호 수질관리대책수립 연구(최종 보고서).
 조흥연, 채장원, 1999. 진해(마산만의 환경관리를 위한 수질 모델링, 한국해양·해양공학회지, **11**(1): 41-49.
 한국수자원공사, 2001. 시화호 최적관리방안 수립연구.
 한국해양연구소, 1997. 시화호의 환경 변화 조사 및 보전대책 수립에 관한 연구 (1차 연도), 과학기술처.
 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.
 Cerco, C.F. and Cole, T., 1994. *Three-dimensional eutrophica-*

- tion model of Chesapeake Bay. Technical Report EL-94-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Cerco, C.F., 1995. Simulation of long-term trends in Chesapeake Bay eutrophication, *Journal of Eutrophication*, *Journal of Environmental Engineering*, **121**(4), 298-310.
- Cerco, C.F. and Cole, T., 1995. *User's Guide to the CE-QUAL-ICM Three-dimensional eutrophication model*, Release Version 1.0, Technical Report EL-95-15, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Chippada, S., Dawson, C.N., Martinez, M.L. and Heeler, M.F., 1997. *A projection method for constructing a mass conservative velocity field*. TICAM Report 97-09, University of Texas at Austin.
- Chippada, S.C., Dawson, C.N., Parr, V.J., Wheeler, M.F., Cerco, C., Bunch, B., and Noel, M., 1998. *A Parallel water quality model based on CE-QUAL-ICM*, CEWES MSRC PET Technical Report 98-10, Vicksburg, MS, March.
- Dortch, M., Fleming, B., and Bunch, B., 1997. Three-dimensional contaminant transport/fate model, *Estuarine and Coastal Modeling*, 5th Proc. Int. Conf. ASCE, Alexandria, Virginia pp. 75-89.
- Foreman, M.G.G. and Thomson, R.E., 1997. Three-dimensional model simulation of tides and buoyancy currents along the west coast of Vancouver Island, *J. of Physical Oceanography*, **27**, pp. 1300-1325.
- Johnson, B.H., Kim, K.W., Heath, R.E., Hsieh, and Butler, H.L., 1993. Validation of Three-Dimensional Hydrodynamic Model of Chesapeake Bay, *J. of Hydraulic Engineering*, **119**(1), pp. 2-20.
- Luetich, R.A., Jr., J.J. Westerink., and N.W. Scheffner., 1992, *ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL*, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137p.
- Martin, J.L. and McCutcheon, S.C., 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality modeling*, Lewis Publishers.
- Suh, S.W., Kim, J.H., Hwang, I.T. and Lee, H.K., 2002. Water Quality Simulation on Artificial Estuarine Lake Siwhaho, Korea. *J. of Marine Systems*. (in press).
- Walters, R. A., 1992. A three-dimensional finite element model for coastal and estuarine circulation, *Continental Shelf Research*, **12**(1), pp. 83-102.
- Wheeler, M. and Saltz, J., 1999. Multi-component models for energy and the environment, *NPACI enVision*, **15**(4).

Received April 19, 2002

Accepted May 21, 2002