

급격한 저니토 교란이 인공 하구호 수질에 미치는 영향 Impacts on Water Quality to an Artificial Lake Due to Sudden Disturbance of Sediments

서승원* · 김정훈*

SeungWon Suh* and Jung-Hoon Kim*

요 旨 : 시화호 복측확장단지 조성을 위하여 반월천과 동화천이 유입되는 상류에서 호안 축조 공사가 진행되는 경우 침적된 오염도가 심한 이 지역에서 저니토가 급격하게 교란될 때 시화호 수질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 3차원 수동역학 모델인 TIDE3D를 수질모델인 CE-QUAL-ICM과 결합하고 4개의 σ 층을 사용하여 수체와 저질사이의 상호작용과 층별 변화를 모의하였다. 1년 이상의 장기적인 수질모의결과, 교란된 지점 인근에서는 저층에만 수질의 악화현상이 나타나고 시화호의 형상 및 외부 하천 유입의 복합적인 특성 상 약 5 km를 지나면서 저질 교란의 영향이 표층에 나타난다. 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. 선행연구(서 등, 2002)에서 취하였던 격자망보다 배정밀도로 상세화 하여 150 m×150 m의 격자에서 수치실험 한 결과는 계산시간의 증대를 유발하지만, 격자의존도가 수치해에 미치는 영향이 있는 것으로 판단되며 특히 유동이 큰 배수갑문 인근의 영역에서 셀을 통과하는 유량의 차이를 줄여 만족스러운 결과를 제공한다.

핵심용어 : 저질교란, 저층수질, 3차원 모의, 공사의 영향

Abstract □ This study aims to figure out water quality impacts due to sudden disturbances of sediments during dike construction in land reclamation for the northern part of the Siwhaho Lake where heavily deteriorated settlements from upstream loadings are outstanding. We exploit a 3-D water quality model CE-QUAL-ICM combined with a hydrodynamic model TIDE3D. Simulations are done accounting water-sediment interaction in a 4- σ layers. Long-term simulation for 1-year shows that bottom layers around the disturbance location are only affected and marks very high concentration. Complete vertical mixing appears at least 5 km apart to downward due to complex effects of geometry, bathymetry and river inflows. It should be addressed that existing condition of the Siwhaho Lake stands for high concentration of COD and TP in winter and spring due to relatively high incoming loadings, however the effect of sediment disturbances yields reverse phenomena, i.e., impacts of dike construction arise greatly in summer and fall. Refined grid system consisting of 150 m×150 m rectangular grid, which is doubled system compared to previous study (Suh *et al.*, 2002), gives affordable results by reducing flux differences through a cell especially in front of gate.

Keywords : disturbance of sediments, bottom layer water quality, 3-d simulation, construction effect

1. 서 론

서해안에 건설된 인공 하구호인 시화호는 방조제가 외해와의 해수유통을 차단하여 육상 오염원의 유입에 능동

적으로 대처할 동수역학적 반응이 자연상태에 비하여 떨어진다. 부분적으로 폐쇄된 하구호에서는 유입된 오염물질이 침강하여 일단 축적되었다가 복잡한 작용에 의하여 수중으로 용출 되어 수질에 다시 악영향을 미칠 수 있게

*군산대학교 해양시스템공학과(Corresponding author: Seung Won Suh, Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University San 68, Miryong-dong, Kunsan, Chonbuk 573-702, Korea. suh@kunsan.ac.kr)

된다. 저층과 수체 사이의 물질교환은 부영양화의 한 중요한 작용이며 저질토층 산소 요구량은 총 산소 소비량에서 상당한 비율을 차지하고 있다. 수체와 저질의 상호작용은 수년에서 10년 이상의 오랜 기간 동안 오염물질의 침강을 이루며 짧게 몇 개월에서 몇 년 사이에는 수체에 오염물질을 내보내는 역할도 하고 있다. 그러므로 저질토에 대한 정량적인 조사와 객관적인 영향분석이 수질 관리에 중요한 인자로 작용한다. 오염도가 심한 국내의 하구역 중에서 마산만의 경우는 지속적으로 용출물의 조사와 수치 모형의 적용이 이루어져 수질모델링에 활용되고 있으며(조와 채, 1998, 1999), 시화호의 경우 해양연구소(한국해양연구소, 1999)와 수자원공사(한국수자원공사, 2001)에 의해 제한적으로 용출물이 조사되어 수질관리의 기초자료로 활용할 수 있게 되었다.

본 연구는 시화호의 순환에 영향을 미치는 인자로 수문의 개폐와 하천수의 유입 등을 고려한 상태에서 저질과 수체와의 상호작용을 모의한 선행의 연구(서 등, 2002)에 이어서 동일한 수질관리 모형을 확대 적용하여 시화호 내에 복측확장단지를 개발하면서 공사초기의 호안 축조로 인해 일대에 침적되었던 저니토가 급격하게 교란될 때 저질로부터 단기간에 용출된 영향에 의해 변화하는 장기적인 수질을 분석하고자 한다. 선행의 연구에서는 시화호 수질 분석을 통해 검증과 보정을 거쳤으나 저질에 대해서는 연구의 제한사항으로 충분한 관측자료가 구비되지 않아 심층적인 분석이 이루어지지 않았다. 본 논문은 전편에서 다루어지지 않은 공학적인 검토로 설계 및 시공 등 현실적으로 정보를 제공할 수 있다는 면에 중점을 두어 이미 수립된 모델의 정교화를 통해 오차를 최소화하면서 정제된 구역내의 특이 상황인 저니토가 외적인 충격에 의해 급격히 교란되는 즉, 공사시의 저니토 연직 및 평면적인 확산경향과 이에 대한 저감을 목적으로 실시한 것으로써, 수질관리모델의 구축과 활용에 중점을 두어 공사로 인한 부정적인 영향을 줄이도록 하였다. 수질관리 도구으로써 기 구축된 모델을 이용하여 공사시의 인위적 영향이 미치는 범위를 예측 평가하고자 하였으나 본 연구의 수행결과를 직접 검증하지 못한 제한사항이 있으며, 수치실험 결과의 신뢰성을 향상시키는 적절한 수질관리 도구로 진전시키기 위해서는 조 등(2002)이 마산만에 대해 수년간 연속적인 관측을 통해 수질관리 모형을 세련화 하는 것과 같은 지속적인 향후의 연구가 절실한 것으로 판단된다.

수치실험은 시화호내 특정 정점에서 표층과 저층에 대한 1년간의 농도변화 비교 분석으로 호안 공사로 저질토

가 급격하게 교란되는 인위적인 영향이 장기적으로 계절별로 시화호 내의 수질에 미칠 수 있는 영향을 파악한다. 아울러 선행 연구에서 다소 미흡하게 여겨졌던 배수갑문 인근의 유속경사가 큰 특정 셀에서 농도가 크게 발생하던 수치적 진동 문제점을 최소화하기 위하여 배정밀도로 상세히 해상된 격자체계인 150 m×150 m를 이용하여 셀을 통과하는 유량차를 줄임으로써 개선된 결과를 도출하고 이에 대한 영향을 평가한다.

2. 저질의 영향을 고려하는 수질모형

본 연구에서는 선행 연구와 동일하게 관리수위유지 및 호내의 적정수질을 유지하기 위한 목적으로 조작되는 시화호의 수문의 개폐라는 특수한 유동을 고려하고, 저질과 수체와의 상호작용과 부영양화를 효과적으로 재현하기 위하여 CE-QUAL-ICM(이하 ICM)모형을 수질 모형으로 사용하였으며 이와 연계되어 사용하는 동수역학모형으로는 TIDE3D모형을 이용하였다.

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

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

위의 식 (1)은 j 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.

ICM에서 수체와 저질과의 관계는 Fig. 1에서와 같이 표현하는데 저질의 영향을 예측하기 위한 서브 모델과 동적반응을 다루는 서브 모델을 통하여 계산한다. 각 인자의 동적반응을 계산하는 동안 사용자 정의의 용출률을 반영하는데 그 중 저질토에서의 산소 소비량은 다음 식과 같이 온도와 층에 따른 용존산소량에 의해 영향을 받으며 계산한다.

$$BENDO = \frac{DO}{KH_{So} + DO} BENDO_b \cdot e^{K_{So}(T - TR_{So})} \quad (2)$$

$BENDO$ =저질토층 산소소비량(gm m⁻² day⁻¹)

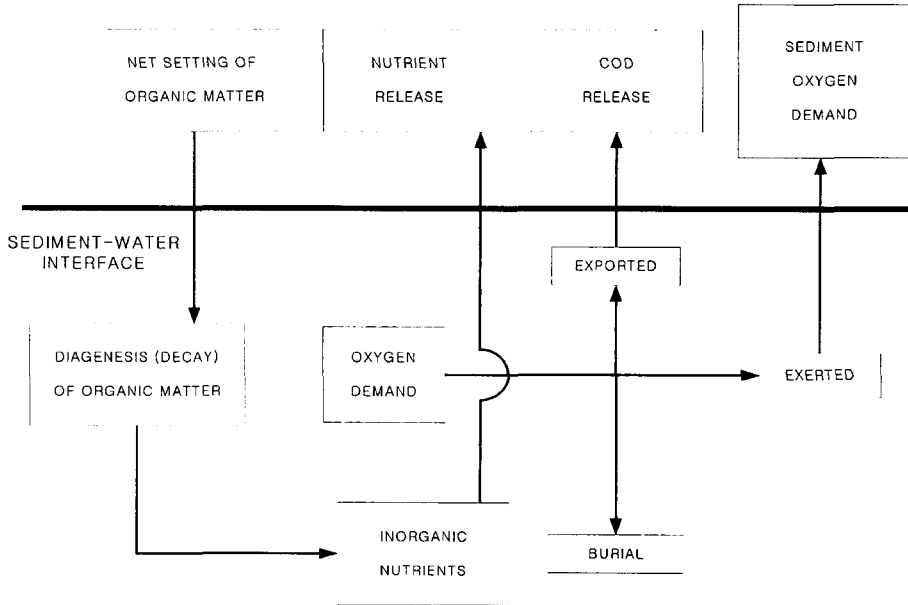


Fig. 1. Sediment model schematic (Cercio and Cole, 1995).

KH_{so} =저질토층 산소 소비량이 절반인 곳에서 용존산소 농도($gm\ m^{-3}$)

$BENDOb$ =온도 $TRSo$ 에서 저질토 산소 소비량($gm\ m^{-2}\ day^{-1}$)

KS_o =저질토층 산소 소비량에 있어서 온도효과($^{\circ}C^{-1}$)

$TRSo$ =지정된 저질토층 산소 소비량의 참고 온도($^{\circ}C$)

또한 이와 연동하는 용출에 의한 COD는 다음과 같이 계산한다.

$$BENCOD = BENCODb \frac{KH_{so}}{KH_{so} + DO} BENDOb \cdot e^{KS_o(T-TRSo)} \quad (3)$$

$BENCOD$ =COD 용출률($gm\ m^{-2}\ day^{-1}$)

$BENCODb$ =사용자 정의된 COD 용출률($gm\ m^{-2}\ day^{-1}$)

수질 모형에서 수체로부터 저질토로의 이동은 침전 속도에 의하여 처리되어지며, 저질토층 산소 소비량과 저질토층의 오염물질 용출에 대해서는 두 가지 과정에 따라 처리된다. 첫번째 방법은 위의 식 (2), 식 (3)과 같이 지정된 수체의 용출률에 관측 값 등 사용자 정의의 값을 이용하여 관계식을 통해 처리하며, 두번째 방법은 유기물질과 다른 인자들의 반응을 근간으로 서브모형을 통해 침전과 용출관계를 계산한다. 후자는 환경의 변화에 상응하여 합리적인 예측을 가능하게 하지만 많은 정보를 요구하고 전자는 오염 부하량과 다른 인자들의 변동에 대하

여 대처하는 것에 한계가 있지만 적용이 쉽다.

3. 급격한 저질토 교란으로 인한 수질의 변화

3.1 공사시의 저질 교란

여기서는 수질관리 모델이 설계 및 시공 등 현실적으로 공학적인 정보를 제공할 수 있다는 면에 중점을 두어 이미 전회의 연구에서 시화호에 대해 수립된 수질관리모델의 정교화를 통해 오차를 최소화하면서 정체된 수역내의 특이 상황인 저니토가 외적인 충격에 의해 급격히 교란되는 즉, 공사시의 저니토 연직 및 평면적인 확산경향과 이에 대한 저감을 목적으로 실시한다.

자연상태 하에서 인위적인 교란이 없이 침적된 저니토를 대상으로 선행연구에서 저질이 수체에 미치는 영향에 대하여 모의 하였으며 매개변수와 용출률은 Table 1과 같이 Chesapeake(Cercio and Cole, 1995)와 Florida bay(Cercio et al., 2000)에서 참조하였다. 여기에 수록된 Florida 만에 적용된 용출율은 물론 시화호의 저니토 특성과는 거리가 있지만, 본 연구에서 적용한 수질관리 모델인 CEQUAL-ICM이 자연상태 하에 침적된 저니토와 수체사이의 반응을 고려하는 용출율과 반응상수의 범위를 제시하고 있으며, 이러한 수체와 저니토와의 반응상수를 결정지을 만한 충분한 현장관측 자료가 결여된 현재의 상태에

Table 1. Benthic flux values in water-sediment interaction (units: $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$)

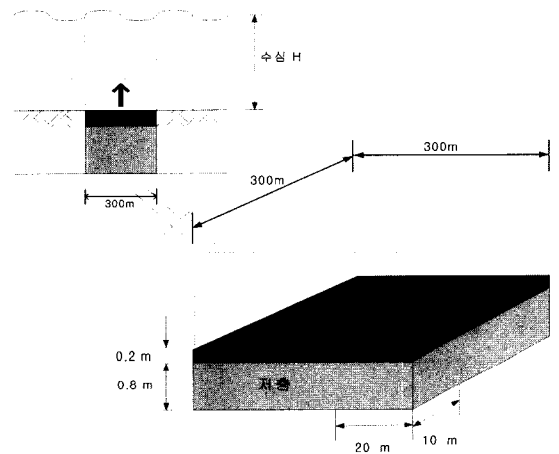
| Constituents | Applied in Sihwaho w/q management project(2002) | | Suggested values by ICM | Ranges for Florida bay modeling (2000) |
|-----------------|---|----------|-------------------------|--|
| NH ₄ | | | 10 | 1-19.7 |
| NO ₃ | TKN | 30-173 | 10 | (-4.6)-0 |
| DON | | | 100 | 1.1-6.9 |
| PO ₄ | TP | 6-46 | 10 | 0.3-1.9 |
| DOP | | | 100 | 0.1-0.9 |
| COD | COD | 382-1949 | 1500 | - |
| SOD | - | - | -1500 | (-964)-(-164) |

서 준거하여 적용할 수 있는 대안으로 평가되어 이들의 자료를 활용하였다. 그러나 이러한 변수 범위내의 값들을 변화시키며 수치계산한 결과 자연상태의 용출률에 의하여 호내 전반에 미치는 수질이 영향은 크지 않은 것으로 보고되었다(서 등, 2002).

시화호의 저니토의 오염은 지역에 따라 다른데 동북측의 동화, 반월, 안산천 유입구 부근에서 타 지역에 비해 오염도가 심하며 저층의 심도별로 오염도가 크게 달라진다. 저질의 표층부(0.2 m)까지의 COD의 분포는 21700 mg/Kg, 저층(0.8 m)에서는 8658 mg/Kg이며 TP의 경우는 표층에서 1293 mg/Kg, 저층에서 941 mg/Kg로 층별로 다른 분포를 보이는 것으로 나타났다(시화호 최적관리 방안 수립연구, 2001).

자연상태에서 호내 저질과 수체와의 상호작용에 의하여 수질이 변하는 것과는 달리 호안 공사시에는 일시적으로 침적되어 있던 저질에서 교란되어 급부상한 저니토가 보다 높은 농도로 수체내에 혼합되어 호내 수질에 부정적 영향을 미친다. 이와는 달리 강우시 하천을 통해 유입되는 강우유출이 저니토의 교란을 유발하여 시화호와 같은 정체된 수역에 부정적인 영향을 미치기도 하지만 본 연구에서는 이러한 자연상태의 강우사상을 고려하지 않았으며, 일반적인 하천유입이 없는 안정된 호내의 순환체계에서 저니토가 급격히 교란된 경우의 영향을 평가하도록 하였다.

수치실험안 설정은 시화호의 북측확장단지 개발을 위한 호안 공사가 Fig. 2와 같이 선행연구(서 등, 2002)와 동일한 격자체계에서 하나의 셀에 폭이 10 m인 호안이 공사가 진행되는 방향으로 20 m가 동시에 교란된다고 가정하였다. 저질의 오염도가 심한 동화천과 반월천 유입구 인근지점(Fig. 3의 정점(1) 옆의 화살표 표시부분)에서 교란되는 저니토는 오염도가 심한 표층부의 20 m가 일시적

**Fig. 2.** Conceptual diagram of sedimentary disturbance during dike construction.

으로 분출되어 저층의 셀에 완전히 혼합되는 것으로 가정하였다. 따라서 실제 저니토로부터 자연적으로 용출되어 수체에 미치는 영향보다도 매우 크게 작용한다. 이러한 가정에 의해 공사가 진행된다고 고려하고 계절적인 수질변화를 분석하기 위하여 저질의 교란이 매 계절적으로 15일간 한시적으로 발생된다고 가정하여 수질항목 중 대표적으로 COD와 TP에 대하여 공사가 없는 경우와 비교하였다. 해당 지역에서 저층의 상태는 Table 2에 보이는 바와 같다.

3.2 저질교란 모의 및 분석

앞서 설정한 상태에 대한 수치실험의 변화를 살펴보기 위하여 시화호 내에 비교 정점으로 6지점을 Fig. 3과 같이 선정하여 각각의 정점에 대한 평면 및 연직방향의 수질변화를 분석하여 그 결과를 Fig. 4~Fig. 7에 도시하였으며 COD의 경우는 정량적인 비교가 용이하도록 Table

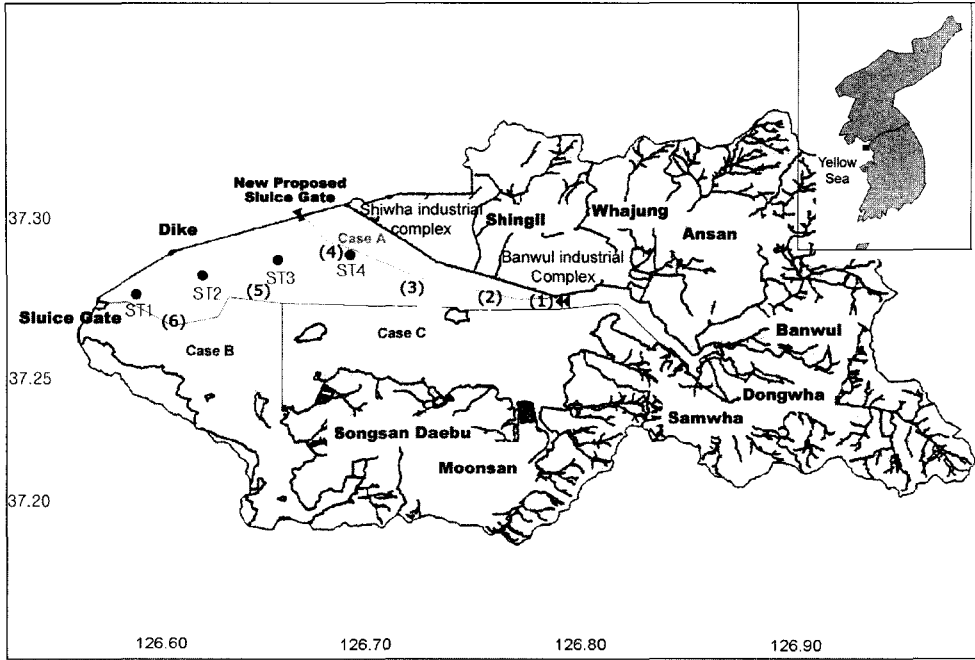


Fig. 3. Comparison stations of disturbances simulation in the modeling of land reclamation (northern part-Case dA).

Table 2. Polluted sediment Dike concentrations and assumed benthic flux(시화호 최적관리방안 수립연구, 2001)

| Constituents | | COD | TKN | T-P | Cd | Cu | Mn | Pb | Zn |
|--|---------------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Average concentration (mg/l) | Surface layer | 21700 | 1422 | 1293 | 1.1 | 129 | 189 | 27 | 148 |
| | Bottom layer | 8658 | 900 | 941 | 1.0 | 88 | 168 | 11 | 96 |
| Benthic flux (mg/m ² · day) | | 1729 | 173 | 27 | 0.5 | 1.3 | 9.4 | 0.3 | 1.9 |

3에 그 값을 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5의 수직 분포도를 보면 저층에서 교란으로 발생하는 시화호의 오염은 동화천, 반월천 및 안산천의 유입이 직접적인 원인으로 판단되며 연직방향의 확산보다 하천의 흐름방향인 횡방향으로의 이송에 더욱 지배 받고 있음을 알 수 있다. 확산은 인접한 셀로 영향을 미치므로 하천유입에 의한 흐름방향에 따라 수평방향인 서측으로 먼저 이동하며 이후에 연직방향인 표층으로 확산되어 저질이 교란된 해당 격자의 셀 인근은 주로 저층에서만 영향을 받는 것으로 분석되었다. 호소의 수심 전층에 걸쳐 균등한 분포가 되는 것은 비로소 5 km를 지나면서 연직방향으로의 환전혼합이 일어난 이후로 파악된다. 이러한 결과는 수질모델에 직접적 영향을 미치는 수동역학적 수치모델의 결과에서 연직방향으로의 유동의 크기가 수평방향에 비하여 매우 작게 나타나는 것을 통해서도 이해할 수 있다. 이와 같은 현상을 유발하는 여러 가지 인

자 중 호의 형상(Fig. 8참조)이 저층 중앙부분에서 움푹 들어가있으며 시화호 체질 전의 기존 수로의 형태로 남아있어 횡방향 이송을 촉진하는 것이 주된 이유라고 판단된다. 또한 저니토가 교란된 지점부터 5 km서측에서 지형적으로 수심이 급격이 얕아지고 이후 다시 수심과 폭이 넓어지므로 저질 교란지점으로부터 5 km 떨어져서 수직적인 혼합이 더욱 가속되는 것으로 분석된다. 수치모델 결과 호안 축조 공사 인근에서는 저질의 교란된 영향이 곧바로 표층으로 부상하여 나타나지 않고 일정 거리를 수중에서 횡방향으로 이송되면서 점차 연직상향으로 부유 확산되는 자연적인 현상을 매우 잘 보여주고 있는 결과로 인식된다.

1년 이상 장기간의 시화호의 수질을 모의하면서 외부 오염원의 변동이나 하천 유입수량의 변화 등의 영향에 따라 계절적인 변동을 해석할 필요가 있으며, 앞서의 가정 사항에 입각하여 저질 교란이 매 계절마다 15일간 연속

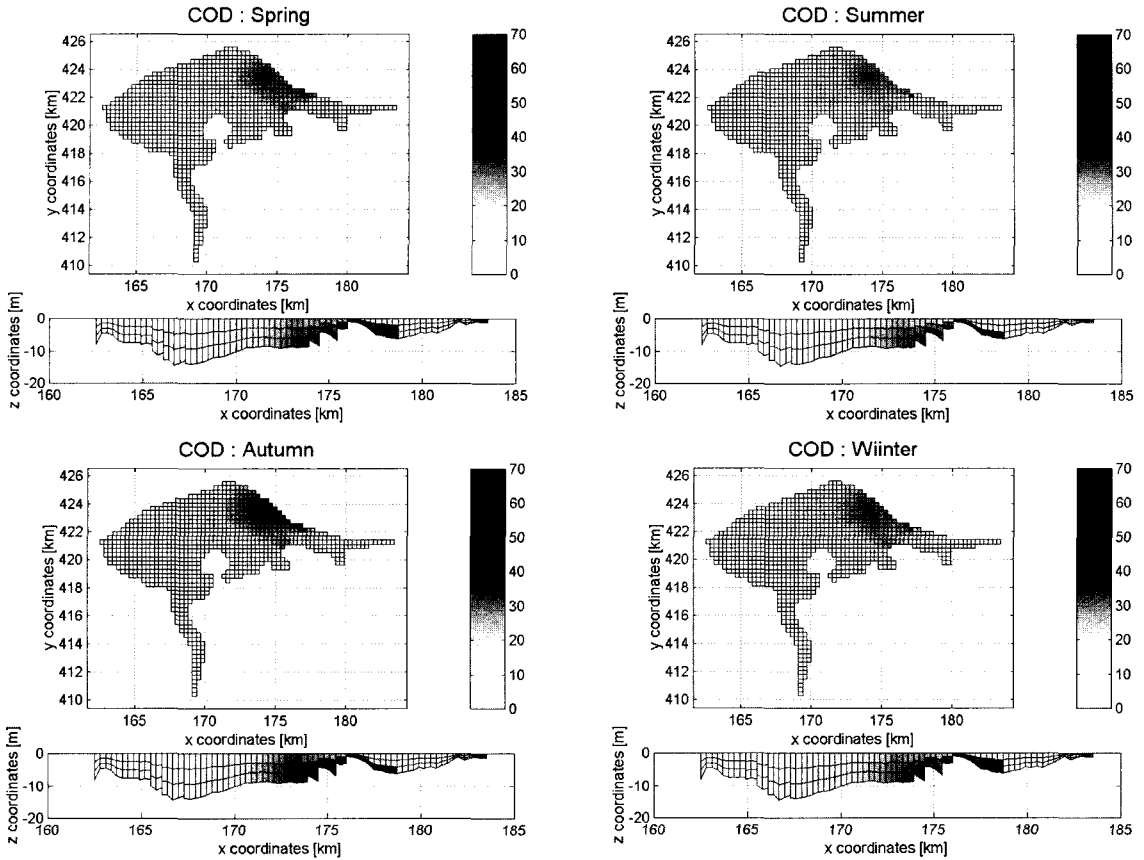


Fig. 4. Spatial and seasonal distribution of COD(mg/l) due to sudden disturbances of sediment.

된다는 조건에서 계산된 결과를 해석하면 COD의 농도는 겨울과 봄에 저층에서 평균 25 mg/l 정도로 나타나고, 여름과 가을에는 29 mg/l, 32 mg/l의 큰 값이 발생되는 것으로 해석되고 있다. 이러한 결과는 앞서 검토한 보고서(수자원공사, 2001)의 결과인 외부 상류의 오염부하에 따라 지천에서의 유입이 크게 나타났던 겨울과 봄에 비해 저질의 교란으로 야기되는 COD 수질저하가 여름과 가을에 나타나는 것과 반전된 결과이다. 급격한 저질 교란의 영향에 기인된 TP 반응 역시 온도가 높은 여름과 오염 부하량이 큰 가을에 높은 값을 나타내고 있어 상류의 오염 부하 감소로 TP 수질이 양호하였던 여름과 가을에 저층의 교란 영향이 오히려 크게 작용될 수 있음을 시사한다. 즉, 이로부터 유추할 수 있는 사항은 외적인 특이 인자가 없어 저질이 교란되지 않은 평상시의 수질이 타 계절에 비해 양호하였던 여름과 가을에 호안 공사가 진행되었다면 이로 인해 발생하는 수질저하는 외부 오염부하 증가에 따

른 수질 악화보다도 심하게 시화호 수질에 부정적으로 영향을 끼칠 수 있음을 시사한다.

이해를 돕기 위해 평면적인 오염도의 분포와 별도로 저니트의 교란에 의한 영향을 실선으로 표현하고 교란이 있지 않은 현재상황을 점선으로 표시하여 정점별 저층과 표층에서의 COD와 TP의 연간변화를 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 이들의 그림을 분석하면 공사가 이루어지는 인근에서는 COD의 경우 저질의 교란으로 저층에서는 봄과 겨울에는 최고 42 mg/l 정도를, 오염이 심한 여름과 가을에는 73 mg/l의 매우 높은 농도를 나타내 교란이 없을 때의 1.5 mg/l-7 mg/l에 비해 농도가 급격하게 높아지는 것이 뚜렷하게 보인다. 그러나 표층에서는 교란이 없을 때 거의 같은 농도를 보이며 저질이 교란되었을 때 영향을 크게 받지 않아 대체적으로 3 mg/l-25 mg/l 정도로 나타난다. 이는 공사시에 발생된 교란된 저층의 침전물이 성층화된 시화호의 특성상 일정한 영역 내에서는 바닥부분

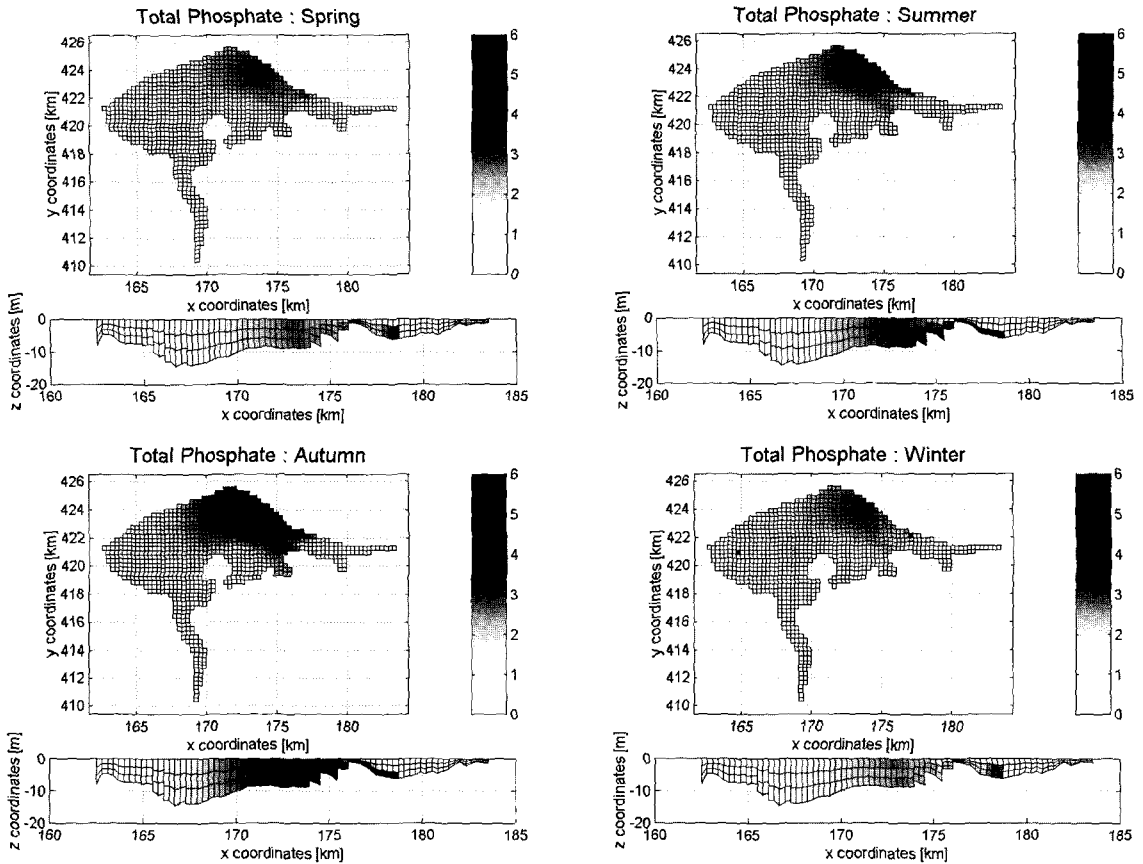


Fig. 5. Spatial and seasonal distribution of TP(mg/l) due to sudden disturbances of sediment.

에서만 영향이 크게 나타나고 있으며, 표층에서는 상대적으로 영향이 작게 나타나고 저층과 달리 각 오염인자의 농도가 공사시점과 가까운 비교정점(1)에서 가장 크고 점차 연직방향으로의 확산이 하류쪽으로 진행되어 비교정점(3)에서 가장 크게 나타난다. 그 이후로는 오염원과 점차 멀어지고 갑문의 영향을 받는 시화호의 특성상 농도가 전체적으로 줄어들어 배수갑문 인근영역에서는 표층 저층 모두 2 mg/l~3 mg/l로 공사전의 1 mg/l~2 mg/l와 비교했을 때 거의 영향이 나타나지 않는 결과를 보인다.

4. 격자의 상세화를 통한 개선된 결과 도출

ICM은 유한체적방법을 이용하므로 완벽한 질량보존을 만족하도록 개발되었다. 그러나 모델 자체 내에서 동수역학 계산을 하지 않고 외부의 동수역학 모델로부터 유량, 확산계수 및 셀 체적 등의 값을 입력 받게 되어있다. ICM과 결합되어 연구에 응용된 발표사례로는 비정규 격자체

계에서는 RMA2(Cerco *et al.*, 2000)등의 결과가 있는데, 본 연구에서는 동수역학 모델로 3차원 유한요소 모형인 TIDE3D 모형을 이용하였다. 이처럼 상이한 두 모형을 결합하면서 발생할 수 있는 질량보존 오차를 줄이기 위하여 TIDE3D 모형으로부터 계산된 유속장 결과를 ICM의 비구조화 격자로 질량보존을 만족시키며 투영시키는 것이 필요하다. 선행연구(서 등, 2002)에서는 유한요소의 보간방법을 도입하여 통수면에서의 유출량에 가중치를 두어 계산하는 기법을 사용하였다(서, 2000). 그러나 인공 하구호인 시화호는 자연상태의 흐름이 아닌 갑문의 조작에 의하여 인근에 강한 유속변화가 생기며 이를 적용한 300 m×300 m의 격자의 결과에서는 유속의 차가 심한 갑문 근처의 특정 한 셀에서 관측치와 상당히 차이가 나는 점이 지적되었다. 전희의 연구에서는 여러 가지 수치실험을 실시하며 질량보존을 만족하면서 두 모델의 접합을 시도하였지만, 불가피하게 나타나는 질량 비보존을 제거할 수는 없었다. 이와 같은 질량 비보존이 전체영역에 대한 수

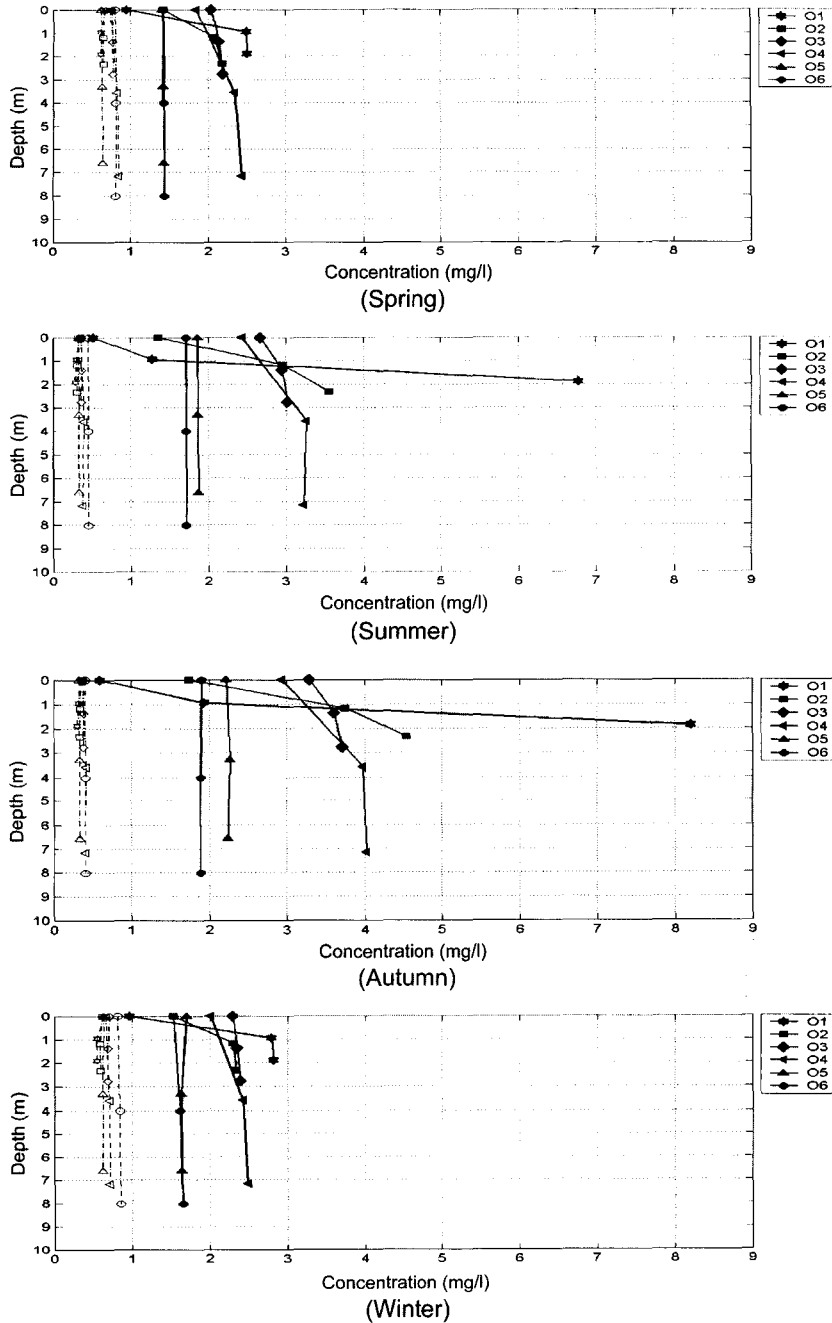


Fig. 6. Seasonal vertical profile of TP concentration with (solid lines)/without (dotted lines) disturbances of sediment.

치해석 결과에 심대한 영향을 끼치는 것은 아니지만 국부적으로는 영향을 미치기도 하며, 이러한 문제점을 해결하기 위해 급회의 연구에서는 격자를 4배정밀도로 상세화 하여 150 m×150 m의 격자체계에서 셀을 통과하는

유량차를 줄이는 실험을 하였다. 수직적으로는 동일하게 4개의 좌표계를 유지하였다.

계산된 여러 가지 결과 중에서 해석 편의상 DO의 변화를 Fig. 9와 Fig. 10에 기존 선행연구에서 취하였던

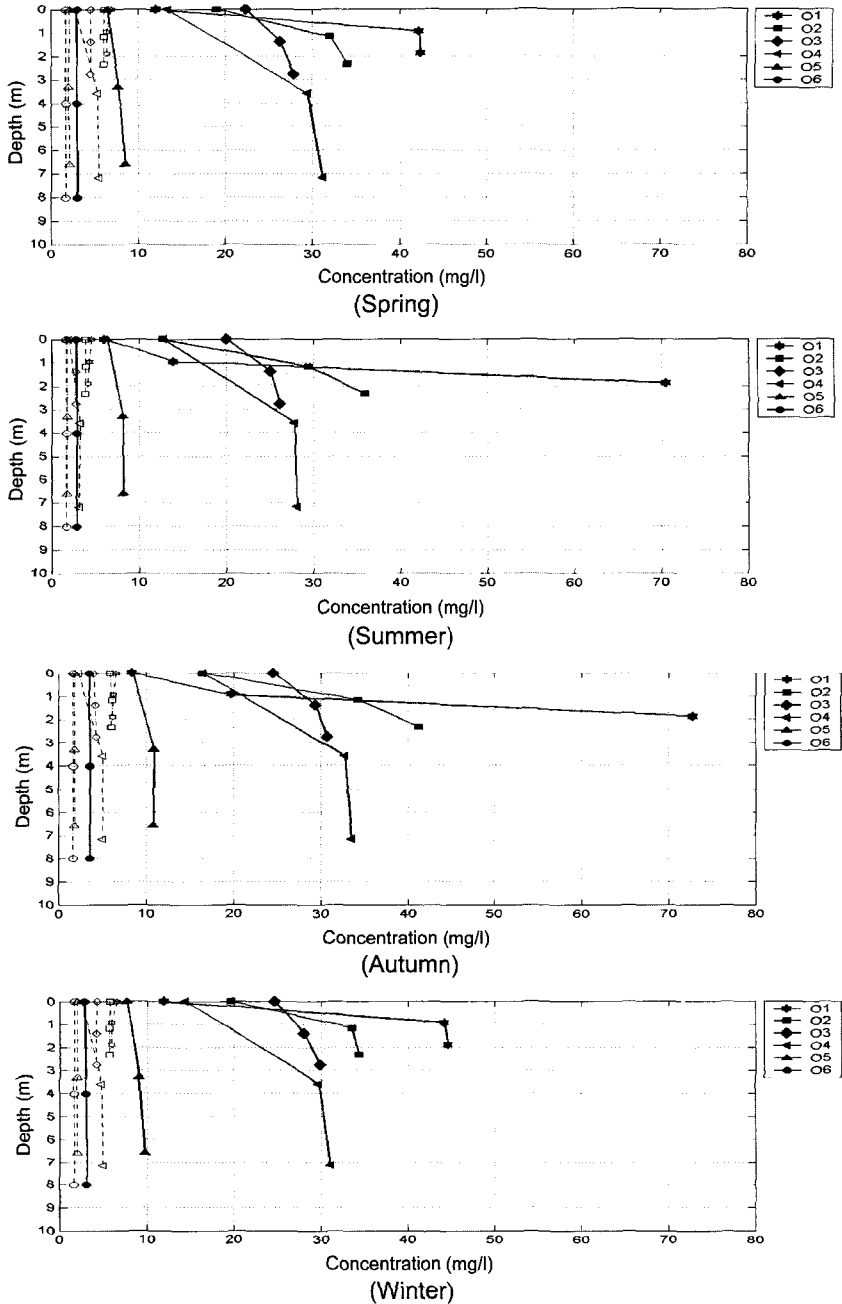


Fig. 7. Seasonal vertical profile of COD concentration with (solid lines)/without (dotted lines) disturbances of sediment.

300 m×300 m와 함께 비교하였다. Fig. 9의 DO 관측 값은 선행연구에서 모형의 검증용 위해 2000년 7월중 14일간 조사된 값으로 관측 값에 해당되는 수치모형의 결과는 300 m×300 m, 150 m×150 m 격자체제 모두 만족스럽게 일치하고있다. 그러나 Fig. 10에서 보이는 바와 같

이 기존 격자체제는 배수갑문에서 약 2.5 km정도 위치한 곳에서 질량 비보존의 문제로 모의 결과가 만족스럽지 못하였던 문제가 있었다. 금번 상세화된 격자의 결과는 이러한 특정 지역에서도 충분히 만족시켜주고 있는 것으로 나타났다. Fig. 9에서와 같이 기존 격자에서는 인근 셀과

Table 3. The change of COD concentration after disturbance of sediments (mg/l) (A: with disturbance, B: without disturbance)

| Stations | | (1) | | (2) | | (3) | | (4) | | (5) | | (6) | |
|---------------|--------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|
| | | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| Surface layer | Spring | 12.0 | 6.9 | 19.0 | 6.1 | 22.4 | 4.6 | 13.3 | 2.7 | 6.5 | 2.1 | 2.9 | 1.7 |
| | Summer | 6.1 | 4.5 | 12.8 | 3.9 | 20.0 | 2.8 | 12.8 | 2.0 | 6.4 | 1.8 | 2.8 | 1.6 |
| | Autumn | 8.3 | 6.6 | 16.4 | 5.9 | 27.6 | 4.0 | 16.4 | 2.3 | 8.5 | 1.8 | 3.5 | 1.6 |
| | Winter | 12.0 | 6.6 | 19.7 | 5.7 | 24.7 | 4.2 | 14.4 | 2.5 | 7.7 | 2.0 | 2.8 | 1.7 |
| Bottom layer | Spring | 42.4 | 6.4 | 34.0 | 6.1 | 27.9 | 4.6 | 31.1 | 5.5 | 8.5 | 2.1 | 3.0 | 1.7 |
| | Summer | 70.5 | 4.2 | 35.9 | 3.8 | 26.1 | 2.7 | 28.1 | 3.1 | 8.2 | 1.8 | 2.8 | 1.6 |
| | Autumn | 72.8 | 6.2 | 41.2 | 6.1 | 30.8 | 4.3 | 33.6 | 5.0 | 10.8 | 1.8 | 3.6 | 1.6 |
| | Winter | 44.6 | 6.0 | 34.3 | 5.7 | 29.9 | 4.2 | 31.0 | 4.9 | 9.8 | 2.0 | 3.1 | 1.7 |

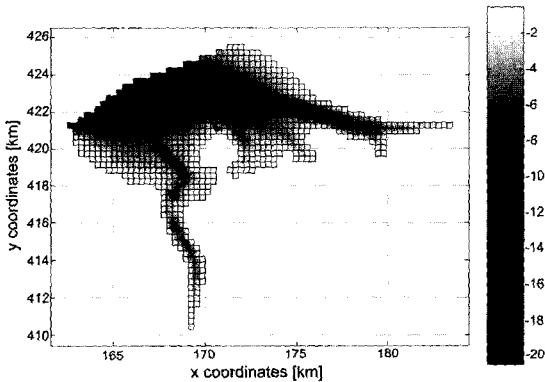


Fig. 8. Bathymetry of Siwhaho Lake (depth: m).

달리 평균 15.5 mg/l의 높은 값을 나타내던 갑문근처의 셀의 DO 농도가 상세화된 격자에서는 인접 셀의 실측치의 일 평균 7 mg/l~9 mg/l에 준하는 평균 9.1 mg/l의 만족스러운 값이 나타났다. 배경밀도로 상세화 함으로써 총 수평방향의 격자 수가 2,739개에서 10,980개로 늘어

나 동일조건에서 수치모의를 하는데 Pentium 4 1.5 GHz 프로세서에서 기존의 2.8시간 보다 3배정도 증가된 7.2시간이 걸렸다. 그러나 비록 계산시간이 늘었지만 일반 PC에서 사용하는 데도 큰 무리가 없을 정도이며, 모의결과를 분석하였을 때 상세한 격자가 특정한 셀에서 발생한 큰 농도차를 줄여 상세화가 충분히 고려될 만한 가치가 있다고 판단된다. 그러나 선행연구나 금회의 연구 모두 비정규격자를 취하는 유동모형인 TIDE3D를 이용하면서도 해석 편의상 일률적인 정규격자를 취하여 경계 표현이 매끄럽지 못한 문제가 대두되므로 앞으로는 수행시간의 효율적인 단축과 질량보존의 두 가지 조건을 충족시키기 위하여 유속차가 큰 곳의 격자만을 상세화 시키는 비정규격자의 생성이 필요한 것으로 판단된다. 향후의 연구에서는 비정규격자와 접합하는 유한체적 모형인 ICM의 오차를 최소화하기 위해 전처리 과정에서부터 두 모형의 특성을 고려한 결합방식에 대한 심도 있는 연구가 필요한 것으로 사료된다.

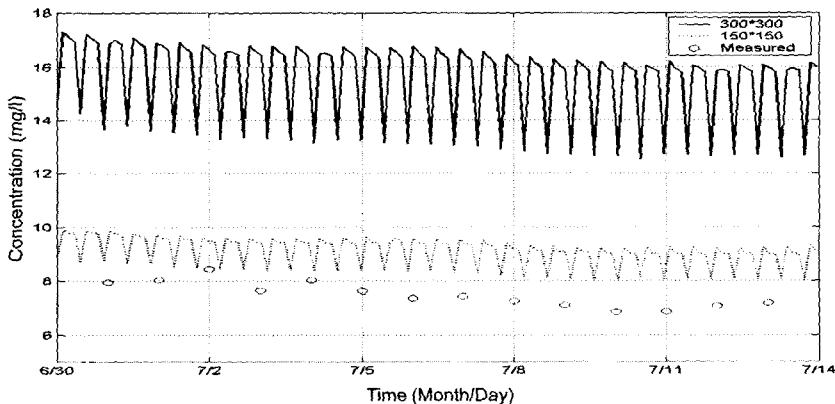


Fig. 9. Comparison between the observed and model results due to different grid resolution system.

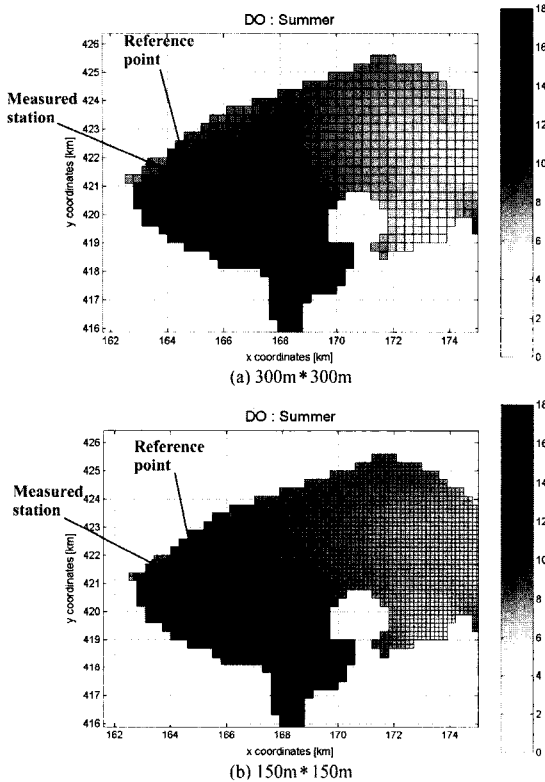


Fig. 10. Comparison of two different resolution grid systems.

5. 결 론

호안 축조공사가 있을 경우 자연상태와 달리 침적되어 있던 많은 양의 오염원들이 일시적으로 교란되어 수질에 심각한 영향을 끼치므로 이러한 상태에서 용출된 침전물이 시화호내 전반에 부정적으로 영향을 미칠 수 있으므로 적정 수질관리 측면에서 장기간의 수질 변화와 영향 역 범위를 모의하는 것이 필요하며 이에 따라 본 연구를 수행하였다.

모의결과 저층에서 급격하게 교란되어져 용출된 오염원은 해당 지점에서 바로 부상하지 않고 호내의 흐름과 시화호의 형상 특성 및 수동역학적 특성에 따라 상류 하천의 유입영향으로 서측으로 5 km이송된 이후에 수직적인 혼합이 이루어지며 오염된 저질토의 확산이 되는 것을 알 수 있다. 저질 교란이 시화호 내의 공간적인 수질 변화에 미치는 영향을 파악하고자 6개 정점을 선정하여 표층과 저층에서의 연간 수질의 변화를 비교하였다. 분석 결과 저질이 교란되는 지점에서는 저층의 높은 오염에 비해 표층의 영향은 미미하며, 교란지점으로부터 5 km떨

어진 정점3부터는 수직적 혼합으로 고르게 오염원이 확산되었으며 이후 배수갑문에 가까워 질수록 이러한 교란으로 거의 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 3차원 ICM 수질모델의 적용으로 표층과 저층의 층별 수질변화를 파악할 수 있기에 가능하며, 저질로부터 급격하게 용출된 침적된 오염물의 거동을 밝힐 수 있는 결과이다. 모의결과는 시화호의 물리적인 특성이 침전물의 교란으로 인한 부상의 영향이 수체에 영향을 미치지만 상당기간 그리고 상당거리를 저층에만 영향을 미치는 것으로 나타나 수심이 깊지 않은 시화호의 수질해석과 관리에 중요한 정보를 제공한다. 즉, 적정 모형을 적용함으로써 부분적으로 정제된 하구호의 특성 및 수질과 저질사이의 상호작용을 명확히 하는 것이 하구호의 수질 예측 및 관리에 매우 중요함을 알 수 있다. 교란이 계절별로 15일간 연속적으로 일어난다고 가정하여 수치실험을 수행하였을 때, 온도가 높은 여름과 외부 오염 부하량이 많아 부영양화의 우려가 있는 가을에 저질 교란으로 인해 수질의 악화가 특히 심함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 저질 교란이 없는 기존상태의 수질변화와 상이한 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구의 결과는 시화호의 수질관리 측면에서 호안 공사의 적정 시기의 선정과 방법에 대한 귀중한 정보를 제공하고 있는 것으로 판단된다. 모형의 수행시 배수갑문 유동의 영향으로 근처의 특정 셀에서 인접 영역에 비해 관측치와 다른 큰 농도가 나타나는 경우가 있어 이를 해결하기 위해 기존의 유한요소의 수동역학 정보를 수질모형의 비구조화 격자로 질량보존을 만족시키며 투영시키는 방법과 아울러 격자의 상세화를 통하여 해결하도록 모색하였다. 그 결과 질량보존이 만족하게 개선되어졌고 문제 셀에서 인근지역처럼 관측치와 가까운 모의결과를 제공하지만 격자 크기를 기존의 반으로 상세화 했을 경우 계산시간의 증가를 초래한다. 따라서 이어지는 연구에서는 합리적인 해석결과와 유도에 필요한 적정 격자의 크기의 산정과 함께 유속 변동이 질량보존에 부정적으로 영향을 미치는 유동영역을 판별하여 이 인근의 해당 격자만 상세화 시키는 비정규격자의 전처리 과정의 도입이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 수산과학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 서승원, 2000. 유한요소 동수역학 모형에서의 질량보존 평가. **대한토목학회**, 20(2-B): 305-315.
- 서승원, 김정훈, 유시홍, 2002. 배수갑문을 통해 부분 개방된 하구 호에서의 순환과 수질모의, **한국해양·해양공학회지**, 14(2): 136-150.
- 조홍연, 채장원, 1998. 진해·마산만의 오염부하량의 특성 분석, **한국해양·해양공학회지**, 10(3): 132-140.
- 조홍연, 채장원, 1999. 진해·마산만의 환경관리를 위한 수질모델링, **한국해양·해양공학회지**, 11(1): 41-49.
- 조홍연, 채장원, 전시영, 2002. 진해·마산만의 성층화 및 DO 농도변화, **한국해양·해양공학회지**, 14(4): 295-307.
- 한국해양연구소, 1999. 시화호의 환경 변화 조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(3차 연도).
- 한국 수자원공사, 2001. 시화호 최적관리방안 수립연구(최종 보고서).
- Cercio, 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.
- Cercio, 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 Water Experiment Station, Vicksburg, MS.

Received December 4, 2002

Accepted February 7, 2003