

연구노트

실시간 수질관리도구로서의 3차원 수질모형의 최적 격자크기 산정

안 기 홍

낙동강유역환경청

(2011년 4월 8일 접수, 2011년 8월 11일 승인)

Plausible grid size for a real time decision making system based 3D water quality model

Ahn, Ki Hong

NAKDONG River Basin Environmental Office, Ministry of Environment

(Manuscript received 8 April 2011; accepted 11 August 2011)

Abstract

In this study, the plausible grid size was estimated to increase for efficiency of reservoir management using 3 dimensional water quality model. To validate utilization of a real time water quality management tool, ELCOM-CAEDYM model was applied to Soyang reservoir in Korea. 100m grid size can represent the real topography and take out exact analysis results. 400 × 400m grid can be easily used to analysis because of data capacity. Consequently, the grid size of 200m or 300m was recommended to establish 3D model considering the required simulation time and the irrelevance between horizontal grid size and vertical distribution for temperature and turbidity analysis.

Keywords : grid size, 3-dimensional model, ELCOM-CAEDYM, Soyang reservoir

1. 서론

현재 국내에서는 수자원의 지속적 확보와 안정적 공급을 위해서 댐과 저수지를 활용하고 있다. 이러한 댐 저수지 수질관리를 위해 그동안 수질조사 및 오염물 유입시 사후처리를 위한 환경기초시설 확충 등에 많은 관심을 기울여왔다. 그러나 실시간 댐 저수지 수질관리를 위해서는 관심 관리항목에 대한 거

동을 사전 예측하고 그 피해를 예방할 수 있는 tool 이 필요하다.

그 동안의 저수지에서의 수질모의는 1차원 혹은 2차원 모형을 통해 실시되어 왔다. 그러나 이러한 수질모의는 국내의 저수지의 형태가 일반적으로 매우 복잡하고 지류와의 합류부분이 넓어 종방향과 수직방향으로의 해석만으로는 호내의 유체거동을 충분히 해석하기 어렵다. 특히 본류의 흐름경로에서

벗어난 지역에서의 유체거동은 유기물의 체류시간에 많은 영향을 미치기 때문에 이에 대한 보다 정확한 해석이 필요하다. 결국 3차원 모형을 이용하여 정확한 수체거동을 분석함으로써 이를 활용한 수질 관리가 세계적인 흐름이라 할 수 있다.

Leon 등(2011)은 ELCOM-CAEDYM 모형을 이용하여 미국 Erie호에 적용하여 저수지의 수질과 플랑크톤의 영향을 분석한 바 있으며, Zou 등(2006)은 EFDC 모형을 이용하여 미국의 TMDL을 지원도구로서의 재현성을 검토한 바 있다. 국내에서는 정세웅 등(2008)이 3차원 수리·수질모형인 ELCOM-CAEDYM 모형을 이용하여 대청호의 유입탁수를 모델링한 바 있고, 박재충 등(2010)은 EFDC 모형을 이용하여 영주댐 저수지의 수질예측을 실시한 바 있으며, 이요상 등(2009)은 CFD 모형을 이용하여 용담댐의 대류식 순환장치의 수질영향을 검토한 바 있다.

그러나 이러한 3차원 수질분석 모형을 이용하여 수질관리를 실시하기 위해서는 계산시간과 분석모형의 정확성이 무엇보다도 중요하다. 계산시간은 3차원 모형의 실시간 적용에 대한 가장 큰 걸림돌 중

하나인데 계산 소요시간의 주요요인으로는 계산 격자망의 크기를 꼽을 수 있다. 결국 계산 격자망의 적절한 크기 산정을 통해 정확성과 신속성을 확보해야만 수질관리도구로서의 실효성을 거둘 수 있다. 현재까지 이루어진 기존 연구는 3차원 모형을 이용하여 수질관리 도구로서의 활용성을 검토하는데 그 목적이 있었다. 기타 격자크기에 관련된 연구는 문영일 등(2006)과 박상식 등(2008), 그리고 이준혁 등(2008)과 같이 수문모형에 주로 적용되었다. 본 연구에서는 실시간으로 활용가능한 수질관리 도구로서 3차원 수질분석모형의 적용성을 높이는 방안에 대해 강구해 보고자 한다. 특히 지형격자 구성에서부터 수온, 탁도에 이르는 분석과정별 비교검토를 통해 적정 격자크기를 산정하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 소양강유역의 소양강 다목적댐이다. 소양강댐유역을 포함하는 북한강유역은

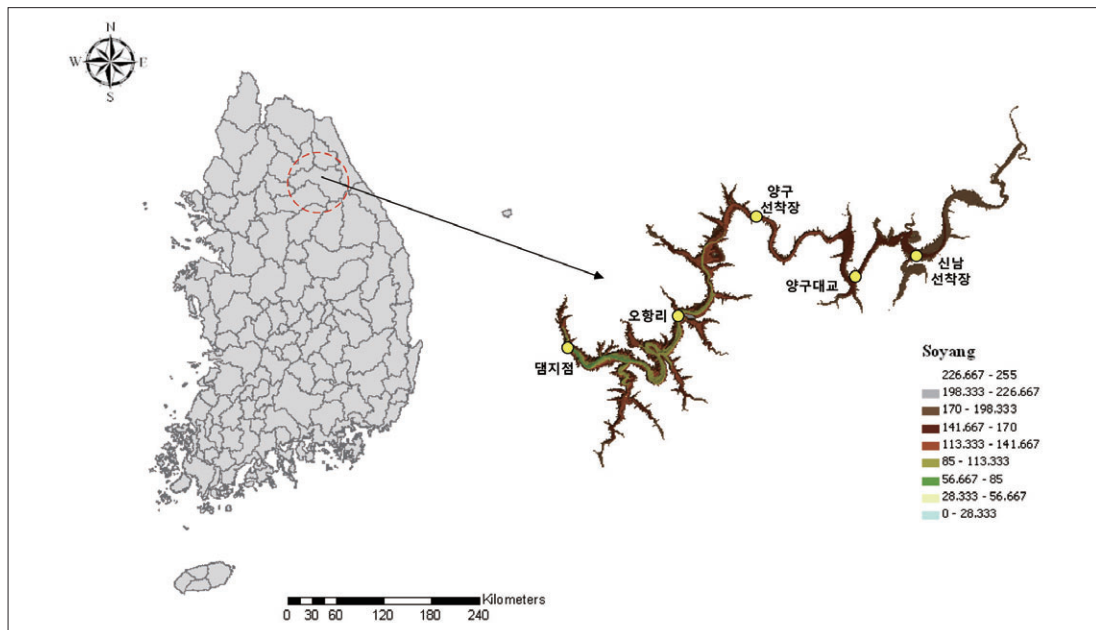


그림 1. 연구대상지역

한반도 중앙부에 위치하며, 화천호, 춘천호, 의암호, 청평호, 그리고 소양호 등의 5개의 인공호가 위치하고 있다. 소양강은 강원도 인제군 서화면 무산에서 발원하여 남류하다 다목적댐인 소양강 댐을 관류한 후 다시 서류하다 강원도 춘천시에 위치한 북한강 좌측으로 유입된다. 소양강은 국가하천 1개소, 지방1급 하천 1개소(소양강)와 내린천을 포함한 지방2급 하천이 24개소가 존재한다. 소양강댐 유역의 면적은 2,703km²이고 저수용량은 29억 톤/년, 만수면적은 약 70km²이다. 유역둘레는 약 383.6km이고 유역평균 폭은 약 16.5km이며, 유역평균 표고는 약 650.5m이다. 북한강 전체 유역면적의 26.01%를 차지하며, 유로연장은 158.6km인 대규모 하천이다.

2. 3차원 수질분석 모형

본 연구에서는 3차원 모형을 이용하여 실시간 수질관리 도구로서의 활용성 재고방안을 검토하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 3차원 저수지 수질분석 모형인 ELCOM-CAEDYM 모형을 이용하였다. ELCOM-CAEDYM 모형은 호주 CWR(Western Australia University)에서 개발된 모델로서 호수, 저수지, 하구, 해양 등에 적용가능한 3차원 수리수질모델이다. 이 모델은 수리동역학 모델인 ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) 모델과 수질 및 생태계의 동적 모델링을 위한 CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)이 연결된 형태를 가진다. 이러한 수리모델과의 연동해석은 특히 수체의 태양복사에너지 투과능이 물의 탁도와 수질농도(부유물질, 유기물, 식물성플랑크톤 등)에 의존하는 경우 수질-수리 상호작용을 반영할 수 있어 보다 정확한 해석을 할 수 있다는 장점을 가진다(한국수자원공사, 2009).

ELCOM-CAEDYM 모형은 호수와 저수지에 특화된 모델로서 미국 Erie호(Leon 등, 2011), 호주의 Burrageorang 호(Kristiana 등, 2011), 그리고 이탈리아의 como호(Morillo 등, 2009) 등 다양한 유역에 적용된 바 있다. 국내에서도 정세웅 등

(2009)은 대청호에 대해 수온성층, 유입탁수를 모델링한 바 있으며, 한국수자원공사(2010)은 용담댐에 대해 수리·수질예측 모델의 적용성을 평가한 바 있다.

III. 격자크기별 모형 적용성 검토

본 연구에서는 지형자료의 가용성, 생성된 계산 격자망, 수위-체적관계, 수위재현성, 계산시간, 수직 수온분포, 수직 탁수분포 등에 대해 격자크기별 모형결과를 비교하였다.

1. 생성격자망 비교

본 연구에서 사용한 ELCOM-CAEDYM 모형은 수치지도로부터 지형자료를 변환하여 격자를 구성하게 된다. 수치지도의 지형자료는 캐드파일과 같은 존재가 일반적이며 이러한 자료는 저수지내 구간에 대한 보간작업을 필요로 하게 된다. 이러한 보간작업을 통해 수치계산을 위한 격자망이 구성되며 이 격자망은 결국 실제 저수지지형을 반영하게 된다. 원 지형자료로부터 보간작업을 통해 세밀한 격자망을 구성할 경우 정확한 지형반영이 가능하며 이와 반대로 격자크기가 큰 격자망인 경우 세밀한 지형모사가 힘들어 정확한 수치해석이 어려울 수 있다. 본 연구에서는 가로 세로의 크기가 동일한 정방형의 격자를 생성하였고 layer간격은 1m로 통일하였다. 그리고 격자크기는 100m에서 400m까지 각각의 경우에 대해 격자망을 구성하였다. 그 결과 100×100m 격자망의 경우 저수지내 세부지형과 상류 및 지류하천에 대한 세밀한 묘사가 가능하였으나 격자수가 약 34만 여개로 격자수가 매우 많아 지형핸들링이 부자연스러웠다. 이와 반대로 400×400m 격자의 경우에는 용량의 감소로 인해 지형 처리가 자유로웠으나 상류하천 및 댐내 지형의 세부적 표현이 불가능하여 3차원 모형을 이용한 수질관리도구로서의 활용성이 저하되었다. 그림 2는 격자크기별 생성 격자망을 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 400×400m의 경우

격자수가 약 25,000여개로 적으나 실제 지형 반영 시 문제점이 발생되어 실시간 수질관리도구로서의

활용성이 떨어짐을 확인할 수 있었다.

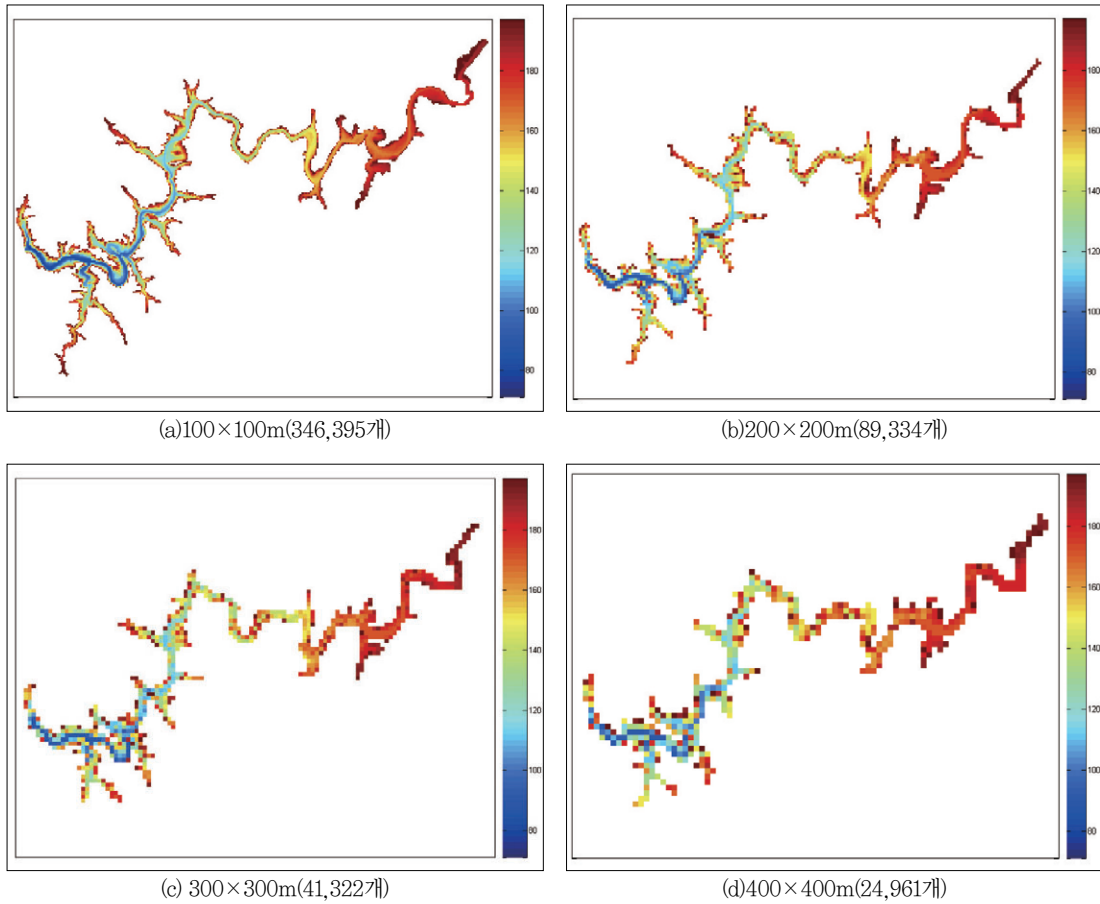


그림 2. 격자크기별 생성 계산격자망 비교

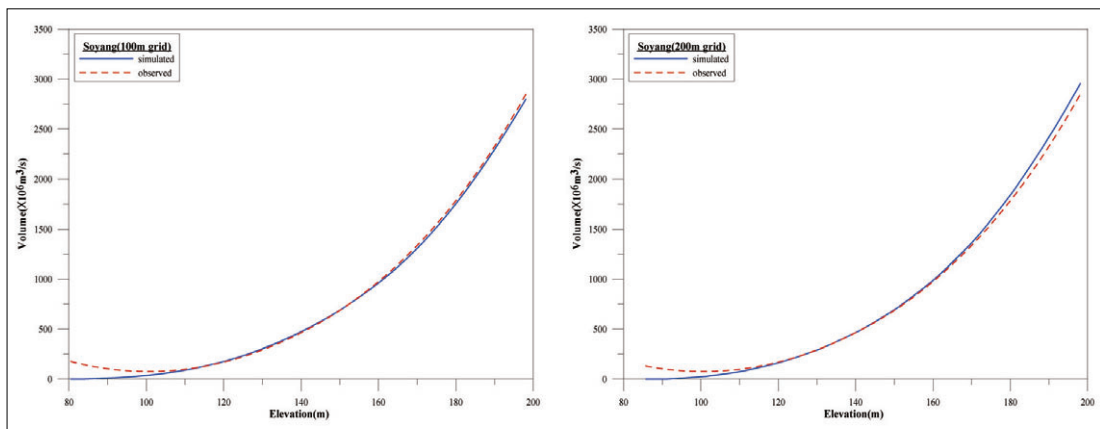


그림 3. 격자크기별 수위-체적관계 비교

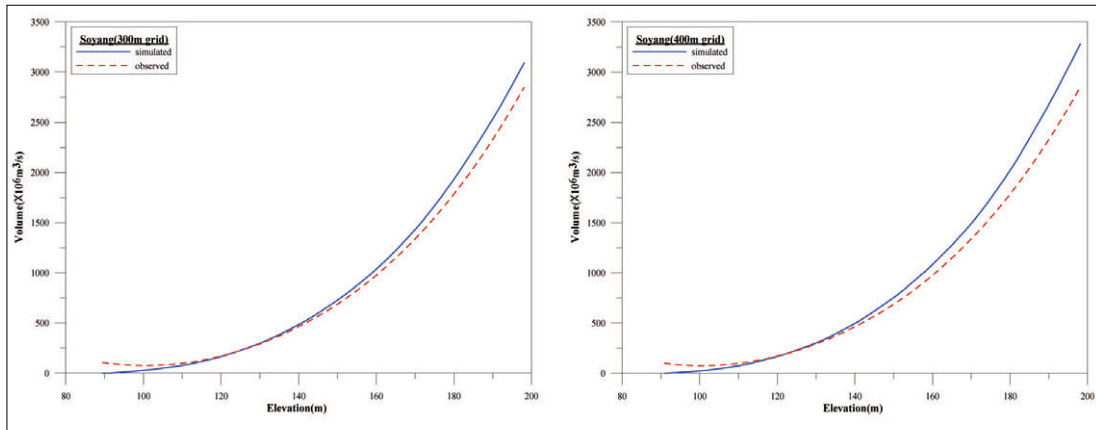


그림 3. 계속

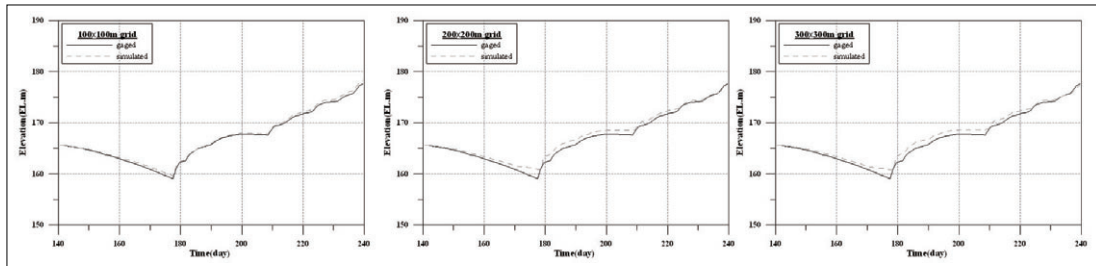


그림 4. 격자크기별 수위재현성 비교

2. 수위-체적관계 비교

지형 재현성을 보다 정량적으로 분석하기 위해 실제 수위-체적관계식과 본 연구에서 구성한 모형들의 수위-체적관계를 비교하였다. 비교는 통계지표인 상관계수(R^2), 절대평균오차(Absolute Mean Error, AME), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 등을 이용하여 그래프와 함께 비교하였다. 그 결과 그림 2에 나타나있는 계산격자망 형태와 마찬가지로 격자간격이 증가할수록 오차도 증가하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 100m부터 300m 간격의 격자망까지는 총저수용량대비 오차가 각각 AME의 경우 0.770, 1.168, 2.477, RMSE는 1.002, 1.637, 3.416%로 비교적 양호한 결과를 보였다. 특히 100m와 200m 격자크기의 수위-체적관계는 상관계수가 0.999를 보이고 절대평균오차와 평균제곱근오차가 작아 지형 재현성이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 그림 3은 이와 같은 격자크기별 수위-체적관계를 나타내고 있다.

3. 수위 재현성 비교

본 대상유역에 대한 3차원 수질관리모형의 모의 결과가 실제 물수지를 잘 재현하는 지를 확인하기 위해 그림 4와 같이 모의수위와 실측수위를 비교하였다. 모의기간은 2005년 5월 20일부터 8월 30까지 약 100일간 실시하였으며 모의치와 실측치에 대한 비교는 통계지표인 AME, RMSE, R^2 를 이용하였다. 모의 결과, AME의 경우, 0.279, 0.581, 0.620, RMSE는 0.329, 0.701, 0.741로, 100m, 200m, 300m 모두 양호한 결과를 보였다. 발생한 오차는 지형자료 처리시 발생한 오차와 경계조건 산정시 불확실성 요소, 그리고 미세측 유량 등으로 발생한 오차라고 판단된다.

4. 수온 및 탁수 재현성 비교

저수지내로 유입되는 하천수의 수온은 저수지의 수온성층화에 큰 영향을 미친다. 또한 수온성층화는 탁수의 밀도류 진행경로나 두께 등에 영향을 미

치므로 정확한 유입하천 수온의 산정은 중요하다. 그러나 일반적으로 호소내 유입되는 지점에서의 하천수 수온은 측정되고 있지 않고 회귀분석모형을 통해 유입수온을 산정하고 있다. 본 연구에서는 '다목적댐 탁수저감방안 수립 보고서(한국수자원공사, 2009)'에서 사용한 유량대비 수온 추정식을 사용하였다.

$$WT_{IB} = 0.32T_{air} + 0.34T_{Dew} + 7.59 \quad (1)$$

(사구미교 지점 유량 $\leq 300 \text{ m}^3/\text{s}$)

$$WT_{IB} = -0.02T_{air} + 0.24T_{Dew} + 11.04 \quad (2)$$

(사구미교 지점 유량 $> 300 \text{ m}^3/\text{s}$)

그리고 유입수 SS농도는 유량크기별로 구분하여

회귀식을 적용하였다. 먼저, 유입량이 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 작은 경우에는 '다목적댐 탁수저감방안 수립 보고서(한국수자원공사, 2009)'에서 사용한 식 (3)을 이용하였고, 유량이 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 초과하는 경우에는 '다목적댐(소양강댐 등) 탁수저감방안 수립 보고서(한국수자원공사, 2009)'에서 개발한 비선형 회귀식 식 (4)를 적용하였다.

$$SS = 0.06 \times Q \quad (\text{유량} \leq 2,000 \text{ m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

$$SS = 17.939e^{0.0006Q}, R^2: 0.6898 \quad (\text{유량} > 2,000 \text{ m}^3/\text{s}) \quad (4)$$

그림 5와 그림 6은 각각 댐체 앞에서의 수심별 수온분포와 수심별 탁도분포 양상을 나타내고 있다.

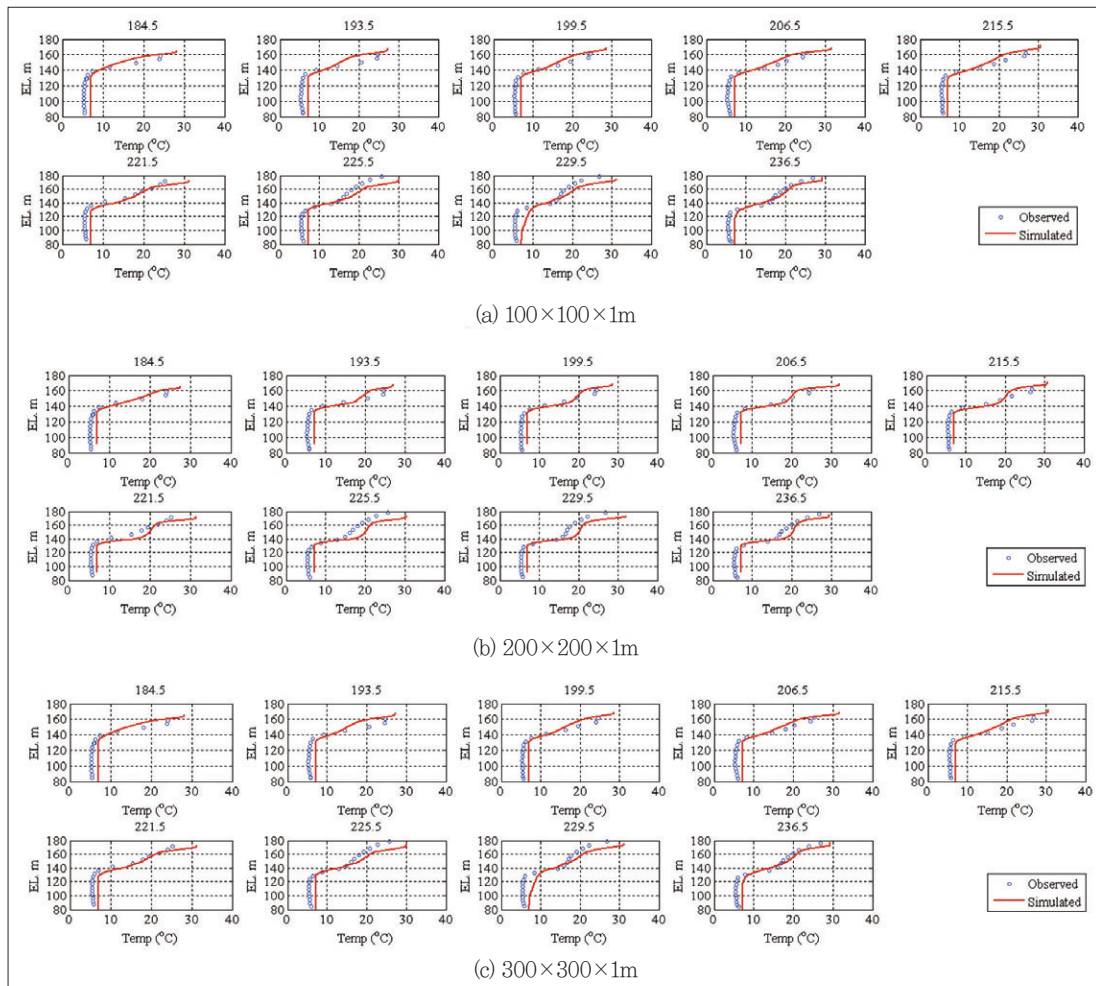


그림 5. 수심별 수온분포 양상

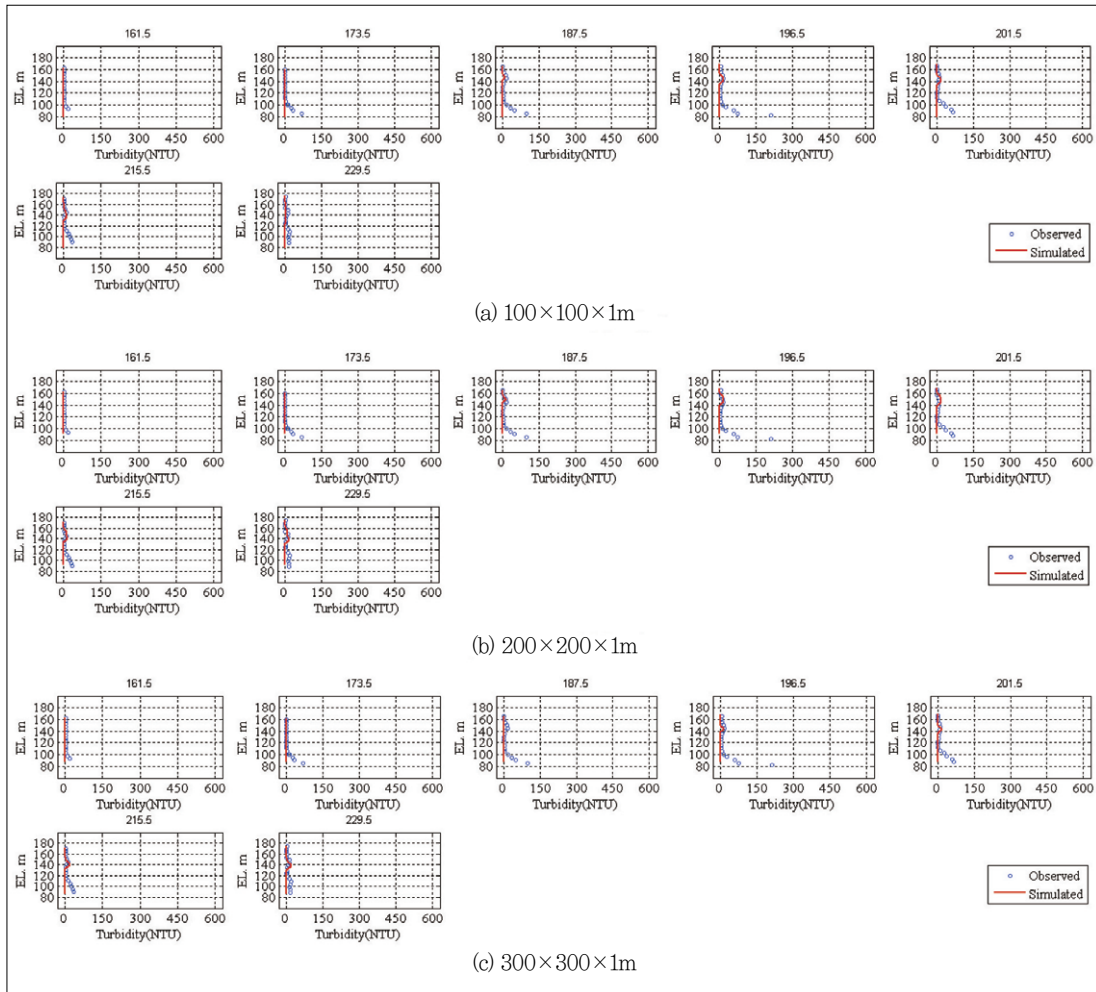


그림 6. 수심별 탁도분포 양상

그림에서 알 수 있듯이 수직격자망의 간격은 모두 1m 간격으로서 물수지재현성이 양호할 경우 수심별 수온 및 탁도분포의 재현성은 모두 양호한 결과가 나타나 수평격자의 해상도는 수심별 수온 및 탁도분포에 영향을 미치지 못하였다.

표 1. 격자크기별 계산 소요시간

격자간격	100m	200m	300m	400m
격자 수	346,395개	89,334개	41,322개	24,961개
모의기간	100일	100일	100일	100일
소요시간	328.64hr (약 14일)	63.92hr (약 2.6일)	20hr (약 0.8일)	

※ Personal Computer Specification: Intel Core(TM)2 Quad CPU Q8300 @ 2.50GHz 2.49GHz, 3.00GB RAM

5. 계산시간 비교

실시간 저수지 수질관리 및 대책수립을 위해서는 신속하고 정확한 모델링 결과도출이 필수적이다. 신속한 모델링 결과도출을 파악하고자 소요되는 계산시간을 각 격자크기별로 비교하였다. 표 1은 각 격자크기별 계산시간을 비교한 결과를 나타내고 있

다. 소양강댐의 경우 하천유입부에서 댐체까지 도달시간을 고려했을 때 200m 혹은 300m 크기의 격자사용이 실효성을 가진다고 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 3차원 수질분석모형인 ELCOM-CAEDYM 모형을 이용하여 실시간 저수지 수질관리를 하기 위한 최적 격자크기를 산정하기 위해 격자망 구성에서부터 물수지 재현성, 수온 및 탁도분석 등 일련의 과정별 비교분석을 실시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 격자크기별 계산 격자망을 구성하여 지형형태 반영성 및 수위-체적관계를 검토하여 실제 지형의 재현성을 분석하였다. 약 2,700km²의 유역면적을 갖는 소양강댐의 경우 400m이상의 격자망 생성시 상류하천 및 댐 내 지형의 세부적 묘사가 힘들었으며, 100×100m 격자망의 경우 저수지내 세부지형과 상류 및 지류하천에 대한 세밀한 묘사가 가능하였으나 격자수가 약 34만 여개로 격자수가 매우 많아 지형핸들링시 어려움이 발생하였다.

2. 물수지 재현성 비교결과 약 100일간 모의시 100m, 200m, 300m 모두 양호한 결과를 보였다. 그리고 수온 및 탁도모의시 수직격자망의 간격은 모두 1m 간격으로서 물수지재현성이 양호할 경우 수심별 수온 및 탁도분포의 재현성은 모두 양호한 결과가 나타났다.

3. 수위-체적관계와 물수지 재현성 등에 나타난 오차는 수치지도의 오차, 지형자료 처리시 발생된 오차, 유입유량 및 수온, 탁도유입자료 산정시 불확실성 요소, 그리고 미세측 유량 등으로 발생한 오차로 판단되며, 수평 격자망의 크기에 따른 수심별 분포양상은 차이가 없어 실시간 수질관리시 격자크기는 계산시간을 고려하여 200m 혹은 300m가 적당할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구에 귀중한 자료를 제공해 주신 한국수자원공사 댐·유역관리처 관계자분들께 감사드립니다. 또한 연구의 완성에 큰 도움을 주신 충북대학교 정세웅 교수님께도 특별히 감사를 드립니다.

참고문헌

- 문영일, 최병화, 안재현, 오테석, 2006, 격자 크기에 따른 분포형 유출 모형의 강우-유출해석에 관한 연구, 한국수자원학회 학술대회논문집, 1787-1791.
- 박상식, 박완희, 이종태, 2008, 토지이용특성을 고려한 분포형 모형의 적정 매개변수 및 격자 크기의 결정, 한국수자원학회 학술대회논문집, 249-253.
- 박재충, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일, 2010, HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측, 한국환경영향평가학회, 19(5), 465-473.
- 안기홍, 이규탁, 반양진, 손병용, 2010, 국내 댐 저수지에 대한 3차원 수리·수질예측 모델의 적용성 평가, 한국수자원학회지, 43(2), 35-40.
- 이요상, 이광만, 고덕구, 염경택, 2009, 대류식 순환장치의 저수지수체 유동특성 및 수질영향, 한국하천호수학회, 한국육수학회지, 42(1), 85-94.
- 이준혁, 오경두, 허준행, 2008, GIS를 이용한 토양유실 모델링에서의 격자크기 효과, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2889-2892.
- 정세웅, 이홍수, 류재일, 류인구, 오동근, 2008, ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청댐 유입탁수의 3차원 모델링, 한국수자원학회 논문집, 41(12), 1187-1198.
- 정세웅, 이홍수, 최정규, 류인구, 2009, 3차원 ELCOM 모형을 이용한 대청호 수온성층모의, 한국물환경학회지, 25(6), 1229-1244.
- 한국수자원공사, 2008, 소양강댐 선택취수설비 개선평가 기본 및 실시설계-탁수거동해석 보고서.
- 한국수자원공사, 2009, 다목적댐(소양강댐 등) 탁수저감방안 수립 보고서.
- 한국수자원공사, 2009, 저수지 3차원 유체거동 및 수질모의 모형 적용성 평가.

- Hodges, B. and Dallimore, C., 2007, Estuary, Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM, v2.2 User Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Kristiana, R., Vilhena, L. C., Begg, G., Antenucci, J. and Imberger, J., 2011, The management of Lake Burragorang in changing climate: the application of the index of sustainable functionality, Lake and Reservoir Management, 27(1), 70-86.
- Leon, L. F., Smith, R. E. H., Hipsey, M. R., Bocaniov, S. A., Higgins, S. N., Hecky, R. E., Antenucci, J., Guildford, S. J., and Imberger, J., 2011, Application of a 3D hydrodynamic-biological model for seasonal and spatial dynamics of water quality and phytoplankton in Lake Erie, Journal of Great Lakes Research, 37(1), 41-53.
- Morillo, S., Imberger, J. Antenucci, J. P., and Copetti, D., 2009, Using impellers to distribute local nutrient loadings in a stratified lake: Lake como, italy, ASCE Journal of Hydraulic Engineering.
- Zou R., Carter S., Shoemaker L., Parker A., Henry T., 2006, Integrated Hydrodynamic and Water Quality Modeling System to Support Nutrient Total Maximum Daily Load Development for Wissahickon Creek, Pennsylvania, J. Envir. Engrg., 132(4).