韓國水資源學會論文集
第44卷 第9號 2011年 9月
pp. 741~751

http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2011.44.9.741

저수지 수온성층 해석능력 제고를 위한 적정 EFDC 매개변수 선정

Estimation of Proper EFDC Parameters to Improve the Reproductability of Thermal Stratification in Korea Reservoir

김 선 주* / 서 동 일** / 안 기 홍***
Kim, Seon Joo / Seo, Dong Il / Ahn, Ki Hong

Abstract

In this study, a methodology was devised to overcome that difficulty for thermal stratification modeling using EFDC. For the increase of reproductability for thermal stratification analysis, the effect of parameter such as distribution of solar radiation, depth of active bed temperature layer, heat transfer coefficients were analyzed. The simulation period was from June to December in 2005 and statistical index is used to analyze the model results. The results showed that distribution of solar radiation is zero and depth of active bed temperature layer is 10 m are suitable for simulation of thermal stratification in Yongdam Dam reservoir. This study results can be used for guideline to analyze the thermal stratification of large dam reservoir in Korea.

Keywords : EFDC, parameter, thermal stratification, reservoir

요 지

본 연구에서는 대표적 3차원 수리 수질해석모형인 EFDC의 수온성층해석 능력 제고를 위해 적정 매개변수를 도출하고자 하였다. 이를 위해 태양복사 분포, 하상 초기온도, 활성 하상 수온층 깊이, 열전달계수 등 태양에너지와 관련된 5가지 매개변수에 대하여 용담호 수온성층해석 결과를 비교 분석하였다. 모의기간은 2005년 6월부터 12월까지였으며 수온 성층 재현성 수행 결과는 통계 지표인 AME, RMSE, R^2을 적용하여 비교하였다. 그 결과 IASWRAD는 하상으로 분포하는 경우, 활성 하상 수온층 깊이는 10 m를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 도출된 결과는 EFDC 모형의 수온성층모의시 적용 가이드라인으로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : EFDC, 매개변수, 수온성층, 저수지

1. 서 론

다양한 저수지의 수질거동을 효과적으로 설명하기 위해서는 저수지 수체에 유출 · 입하는 물의 수리학적 순환관계와 오염물질의 이송, 확산, 반응과정에 대한 과학적인 인과관계 분석이 선행되어야 한다. 예를 들어, 저수지 내로 유입한 탁수의 밀도류 진행경로, 두께, 이동속도 등 수리학적 거동 특성은 유입량의 규모, 저수지 지형, 취수위치와 취수량, 그리고 수온 성층구조에 영향을 받는다. 따라서 성층화된 저수지로 유입된 부유사의 이송, 확산, 침강

* 한국수자원공사, 댐 유역관리처 차장 (e-mail: seonjoo@kwater.or.kr)
Assist-manager, Dam & Watershed Dept., K-Water, Daejeon 306-711, Korea
** 충남대학교 환경공학과 교수 (e-mail: seodi@cnu.ac.kr)
Professor, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
*** 교신저자, 낙동강유역환경청 연구사 (e-mail: khahn77@korea.kr)
Corresponding Author, Department of monitoring & analysis, Nakdong River Basin Environmental Office, Ministry of Environment, Changwon 641-722, Korea (Tel: 82-55-211-1699, Fax: 82-55-211-1709)

현상을 정확히 예측하고 효율적인 관리대책을 수립하기 위해서는 이러한 영향요소들을 모두 고려할 수 있는 수치모델링 기술이 필요하다.

지금까지 국내 저수지에서의 수질모의는 거시적인 관점 또는 정상상태를 대상으로 실시되었으며, 적정한 수준의 수리거동 분석이 미흡한 경향이 있었다. 그러나 국내 저수지의 형태가 일반적으로 매우 복잡하고 지류와의 합류부분이 넓어 종방향과 수직방향으로의 해석만으로 실시되는 기존의 모의기법으로는 호내의 유체거동을 충분하게 해석하기 어렵다. 특히 본류의 흐름경로에서 벗어난 지역에서의 유체거동은 영양염류의 체류시간에 많은 영향을 미치기 때문에 이에 대한 보다 정확한 해석이 필요하다. 이에 최근 들어 보다 정확하고 과학적인 수리해석 능력을 도모하고자 3차원 수리 수질모형에 대한 관심이 증대되고 있다. 현재 지금까지 3차원 모델링의 걸림돌이 되어온 계산시간의 제약은 컴퓨터 관련기술의 발달로 인해 실제 적용이 가능해 졌고, 이를 수질예측에 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

대표적 3차원 수리 수질모델로는 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)모델이 있다. 해양모델로부터 발달해 온 대표적 3차원 모델인 EFDC는 개발 당시부터 소스코드와 사용설명서를 모든 연구자들에게 공개해 왔으며, 미국 환경부는 모델의 발전을 위하여 격자구성, 실행 그리고 결과의 표현 등을 위한 GUI (Graphic User Interface)를 개발하고 있어, 지속적인 발전이 예상된다.

버지니아주의 James and York강 하구 (Hamrick, 1992a, 1995a)와 Chesapeake Bay 등에 적용 (Hamrick, 1994)되었고 Indian River Lagoon의 북쪽 부분에 대한 담수 유입 (Moustafa and Hamrick, 1994)과 플로리다 주의 Everglades에서의 높은 식생 밀도에 의해 제한되는 흐름에 대한 연구 (Moustafa and Hamrick, 1995)에도 적용되었다. 현재는 Chesapeake Bay 시스템 (Johnson et al., 1993)에 대한 점원과 비점원으로부터의 오염물질과 병원성 유기물의 이동이나 굴과 게의 유충의 이동 등의 연구 (Hamrick, 1992b, 1994, 1995b)에 이용되고 있다. 우리나라에서는 경기만의 수리 및 수질 통합평가를 하기 위해 사용하였고 (한국해양연구소, 2001), 남해안에 조위 및 조류거동 수치모의 연구에도 사용되었다 (권석재와 강태순, 2007). 또한 수질평가를 위해 평택호에 적용 (서동일과 이정우, 2005)되었고, 한강유역 (서동일과 유하나, 2007)에 적용된 바 있다.

그러나 국내의 저수지는 수심이 깊고 지형이 복잡하며 이로 인한 성층현상 발생의 중요도가 높아 EFDC 모델은 주로 하천 및 해안에서 주로 적용되어 왔다. 이에 국내의 댐 저수지에는 CE-QUAL-W2와 같은 2차원 모델에 의존하고 있는 실정이다. 해양 모델의 경우 염분에 따른 성층해석능력이 필수적임을 감안할 때 EFDC 모델의 성층해석능력은 충분할 것으로 예상되나 저수지 성층현상에 대한 EFDC 모델의 적용 예는 아직 미진한 상황이다. 서동일 등 (2009)은 EFDC 모형을 이용하여 용담호에 대한 3차원 수리 및 수온 모델링을 실시하여 격자크기별 수위 재현성과 수심별 수온분포 재현성을 검토하였고, 서승원과 이화영 (2008)은 새만금호 완공에 따른 수질모의를 실시하여 수온 및 염분 성층화 현상의 재현성을 검토하였으나 기존의 연구들은 수심이 깊은 저수지에 대해 성층화 현상의 재현성이 떨어졌으며, 실제 관측치와의 비교가 아닌 단순 예측에 그치는 경우가 많았다. 또한 계산시간의 증대와 수위 및 온도변화의 보정에 따른 다수의 시행착오의 요구로 인해 적정 매개변수 산정에 대한 노력은 아직 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 EFDC를 이용한 수온성층 해석시 필요한 적정 매개변수를 산정하고 이를 통해 수온성층해석에 대한 적정성을 제고하고자 하였다.

2. 수온성층해석 모형

2.1 수온성층

수심이 낮은 호수와는 달리 수심이 깊은 호수에서는 계절에 따라 수심별로 수온이 다르게 나타나게 되며 이러한 수직적인 수온의 차이는 수직적인 밀도 차이를 유발하게 된다. 겨울에는 표층부의 물이 빙점인 0℃에 가깝게 되며 깊은 수심의 수온은 4℃의 비교적 안정된 상태에 놓이게 되고 물의 수직적인 혼합은 없게 된다. 봄이 되면 기온 상승에 따라 상층에서 하층으로, 하층에서 상층으로 물의 이동이 있게 된다. 여름에는 저수지의 표층부가 태양복사열에 의하여 가온되어 수온이 높고 밀도가 낮은 물이 상층부에, 수온이 낮고 밀도가 높은 물이 하층부에 위치하게 되어 안정된 상태에 놓이게 되고, 바람에 의한 저수지 물의 순환은 상층부에 국한된다. 이 층을 표수층 (Epilimnion)이라 하고, 이 층 아래의 수심에 따라 온도가 변화되는 층을 수온약층 (Thermocline)이라 하며, 수온약층 하부의 수온이 일정한 수층을 심수층 (Hypolimnion)이라 한다. 이와 같이 저수지의 물이 수심에 따라 여러 개의 층으로 분리되는 현상을 성층현상 (stratification)이라고 한다.

또한, 저수지는 에너지 교환 또는 물질 순환 과정을 통하여 외부로부터 영향을 받는다. 여기에는 대기와 수면 접촉부를 통한 에너지 전달작용, 유입수 흐름을 통한 운동에너지와 위치에너지의 전달, 유출수 흐름을 통한 저수지 내부로의 전달작용 등이 포함된다. 이러한 전달 과정에 의해 저수지 내부 성층화현상과 부영양화현상을 일으키는 반응메카니즘이 생겨난다. 또한 이들의 교환 및 순환과정은 위도, 고도, 저수지 형태 등의 특징에 의해서도

제한을 받는다.

수체내 성층현상이 심하면 유체는 연직방향운동이 제한되고 상대적으로 수평방향운동이 활발하게 된다. 이렇게 성층화된 댐이나 저수지에서의 수체의 거동은 유입수온으로부터 직접적인 영향을 받는다. 유입지천의 수온이 저수지 표층의 수온보다 높거나 비슷하면 표층으로 유입되며 표층의 수온보다 낮으면 표층 아래로 유입된다. 결국 이러한 수온성층은 밀도류를 형성하게 되어 강우시 댐 저수지내 유입되는 탁수의 거동에 매우 중요한 인자로 작용하게 되므로 이에 대한 분석은 저수지 수질관리를 위해 매우 중요하다.

2.2 EFDC 모형

EFDC모형은 초기에 Virginia Institute of Marine Science에서 개발되었으며, 현재는 USEPA와 Tetra Tech, Inc.에 의해 개발 관리되고 있는 3차원 수리동역학모형이다. EFDC 모형의 물리학과 수치계산적 측면은 Blumberg-Mellor 모형과 미공병단의 Chesapeake Bay 모형과 유사하다. EFDC 모형은 가변 밀도 흐름에 대해 수직적으로 정수압 가정을 하며, 자유표면, 그리고 난류 평균의 3차원 운동 방정식의 해를 구한다. 운동방정식에 동력학적으로 연결된 난류운동에너지, 난류길이 스케일, 염도, 그리고 온도 이송 방정식 또한 함께 풀어진다. 또한 부유물질 또는 용존물질에 대한 Eulerian 이송 전환방정식도 동시에 해를 구한다. 이송 방정식의 이송항에 대해서는 중앙차분법을 사용하거나 positive definite upwind difference 방법을 사용한다. EFDC 모형은 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비 흡착성 부유물질의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동/반응 등에 대한 모의가 가능하다. 특히 EFDC 유동해석은 댐 또는 암거 등의 치수 구조물 해석뿐만 아니라 수심이 얕은 수체에 대한 젖음/마름현상을 모의할 수 있어 인공습지 등에서의 수체거동을 가능케 한다. 또한 유동 및 확산 등의 물리적인 이동 기작에 대한 정보는 비반응성 또는 반응성 수질변수들의 모의를 위해 사용될 수 있다.

EFDC 모형의 3차원 연속방정식과 운동방정식, 정역학 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\partial_t(m_x m_y \zeta)+\partial_x(m_y Hu)+ \\ &\partial_y(m_x Hv)+\partial_z(m_x m_y w)=0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\partial_t(m_x m_y Hu)+\partial_x(m_y Huu)+\partial_y(m_x Hvu)+ \\ &\partial_z(m_x m_y wu)-m_x m_y f_c Hv=-m_y H\partial_x(p+g\zeta) \\ &-m_y(\partial_x h-z\partial_x H)\partial_z p+\partial_z(m_x m_y H^{-1}A_v\partial_z u)+Q_u \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} &\partial_t(m_x m_y Hv)+\partial_x(m_y Huv)+\partial_y(m_x Hvv)+ \\ &\partial_z(m_x m_y wv)+m_x m_y f_c Hu=-m_x H\partial_y(p+g\zeta) \\ &-m_x(\partial_y h-z\partial_y H)\partial_z p+\partial_z(m_x m_y H^{-1}A_v\partial_z u)+Q_v \end{aligned} \tag{3}$$

$$\sigma_z p=-gH\rho=-gH(p-p_o)p_o^{-1} \tag{4}$$

여기서, u, v는 x, y방향에서 수평속도성분 (m/sec)이고, w 변환된 무차원 연직좌표계 z에서의 연직유속성분 (m/sec), H는 전체 수심, m_x, m_y는 곡선좌표계 임의거리 $ds^2=m_x^2 dx^2+m_y^2 dy^2$을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근, Q_u, Q_v는 Momentum source-sink 항 (kg m/sec), ρ는 밀도 (kg/m^3), 그리고 b는 부력 (m/sec^2), A_v는 수직난류점성계수, f, z 는 Coriolis parameter, p는 수심에서 기준수압과의 차를 p_o로 나눈 값, z는 수직좌표, g는 중력가속도 (9.81 m/sec^2)이다.

3. 실제유역에 대한 적용

3.1 대상유역

본 연구의 적용성을 검토하고자 금강유역에 있는 용담다목적댐에 대해 모의를 실시하였다. 용담다목적댐은 유역면적 930 km^{2}로서 금강유역 면적 9,886 km^{2}의 약 9.45%를 점유하고 있고 동경 127°31′40″, 북위 35°56′30″에 댐 축이 위치하며 저수지 수면길이는 약 60 km에 이른다. 용담댐 유역 동측은 국립공원 덕유산 향적봉 (EL. 1,614 m)을 중심으로 동남측은 낙동강의 지류인 황강 유역과 경계를 이루고 유역의 남측으로 장안산 (EL. 1,236.9 m), 신무산 (EL. 896.8 m), 팔공산 (EL. 1,151 m), 성수산 (EL. 1,059.2 m), 마이산 (EL. 678 m) 등을 경계로 하여 섬진강 유역과 접하며, 서측으로는 장수산 (EL. 1,125.9 m)을 경계로 만경강 유역과 접하고 있다. 행정상으로 전라북도 무주군, 진안군, 장수군에 포함된다.

용담댐 지점의 하상표고는 EL. 205.0 m, 하폭은 140 m로 하상구배는 약 0.2% 정도이고 유로는 댐 지점을 지나 급격한 동북 방향의 사행성 구조를 형성하고 있다. Fig. 1은 본 연구가 적용된 용담댐 유역을 나타내고 있다.

3.2 모형의 구성

EFDC에 적용되는 좌표계는 데카르트 좌표와 직교곡선좌표 등이 있다. 본 연구에서는 실제 형상의 재현성 증대를 위하여 직교곡선좌표를 이용하였다. 그리고 모의수행의 시간적 제약성 극복과 재현성 확보를 위해 기존연구 (서동일 등, 2009; 안기홍, 2011; 한국수자원공사, 2009)의 연구결과를 활용하여 수평격자는 372개를 사용하였고, 수

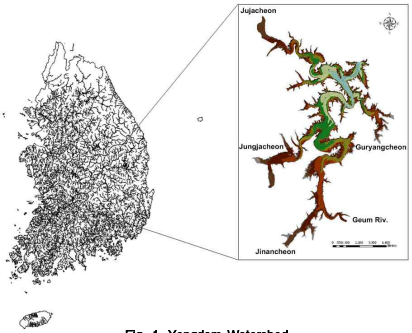

Fig. 1. Yongdam Watershed

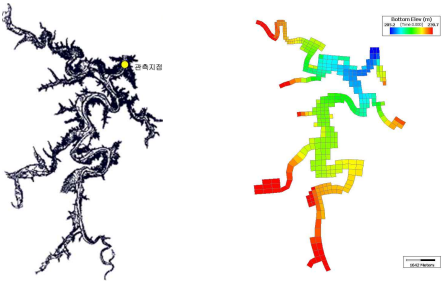

Fig. 2. Topographical Map & Grid of Yongdam Reservoir

온 성층에 재현성 증대를 위하여 40개로 구성하여 총 14,880개의 격자로 모의를 실시하였다. Fig. 2는 용담호 유역에 사용된 지형자료와 이를 이용하여 구성한 격자모양을 보여주고 있다.

입력조건으로는 유입 수온은 기온자료로부터 산정한 회귀식을 사용하였고, 수온계산 방법은 Full-Heat Balance 방식을 이용하였다. 모의기간은 2005년 6월부터 12월까지이다. Fig. 3은 지형격자 구성의 적정성과 수위계산에 대한 검토를 위해 수위-체적관계곡선식과 실제 관측수위를 비교한 결과이다. 모의치와 실측치의 비교는 통계지표인 AME, RMSE, R^2를 적용하였다. 그 결과 RMSE는 1.931 $\times 10^7$, 0.793, AME는 1.894 $\times 10^7$, 0.603로 전반적으로 실제 양상을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

3.3 적정 매개변수의 선정

저수지내 수온성층 현상에 영향을 미치는 주요한 원인으로는 물의 밀도, 태양복사, 대기와 수체사이의 에너지 전이, 바람에 의한 혼합현상 등이 있다. 그 중 가장 밀접한 관계를 갖는 에너지원은 태양에너지일 것이다. 본 연구에서는 EFDC 모형에서 태양에너지와 관련된 수온 관련 매개변수

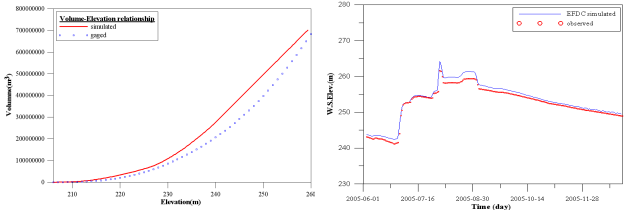

Fig. 3. Reproducibility of Water Balance

인 IASWRAD, DABEDT, TBEDIT, HTBED1, HTBED2 등 총 5개의 매개변수에 대하여 비교 분석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 매개변수는 Table 1과 같이 구분될 수 있으며 이들 매개변수들을 중심으로 해석 결과 값에 미치는 영향을 분석하였다. 각 매개변수들은 Table 1에 제시된 기준값을 기본적으로 사용하였으며 다른 매개변수의 기준값에 대해 해당 매개변수를 적용범위(Hamrick, 2007) 내에서 변화시키면서 Fig. 2에 표시된 댐 축지점에서의 관측값과 모의값의 변화양상을 도시하였다. 또한 수온 성층 재현성 수행 결과는 통계 지표인 AME, RMSE, R^2를 적용하여 정량적으로 제시하고자 하였다.

3.3.1 태양복사

일반적으로 호수가 흙탕물이거나 부영양화 단계이면 투명도가 0~2 m 정도이지만 빈영양호이거나 깊은 바다에서는 40 m 이상까지도 가능하다. Table 2는 용담호 댐 축 지점의 투명도를 나타낸 것으로 모의기간인 2005년 6월부터 2005년 12월까지 투명도는 약 2 m 정도이며, 이것은 표층의 태양복사열이 하층부까지 전달되지 않는 것을 알 수 있다.

Table 1. Parameters for Temperature Prediction

Parameter	Mean	Range	Default
IASWRAD	태양복사열 분포 - 0 : 수층에서 하상으로의 태양복사열 분포 - 1 : 표층과 동일	0 또는 1	0
TBEDIT	하상 초기 온도(℃)	10~20	10
DABEDT	활성 하상 수온층의 깊이(m)	1~10	10
HTBED1	하상과 바닥층사이의 대류열전달계수(no dim)	0.001~0.005	0.001
HTBED2	하상과 바닥층사이의 열전달계수(m/s)	1.0E-07~15E-07	1.0E-07

Table 2. Monthly Transparency

Time	Transparency (m)	Time	Transparency (m)
2005/1	5.0	2005/7	2.0
2005/2	5.0	2005/8	3.0
2005/3	3.2	2005/9	2.0
2005/4	3.2	2005/10	2.0
2005/5	4.5	2005/11	0.5
2005/6	4.2	2005/12	1.5

본 연구에서는 동일한 입력 조건에서 수온 모의를 수행하여 실측 수온과 비교 검토를 실시하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같으며, Table 3은 태양복사열 분포 매개변수에 따른 수온 성층 재현성 수행 결과를 통계 지표인 AME, RMSE, R^2을 적용하여 비교한 결과이다. 그 결과 평균적으로 R^2은 IASWRAD 값이 0인 경우 0.947이었으며, 1인

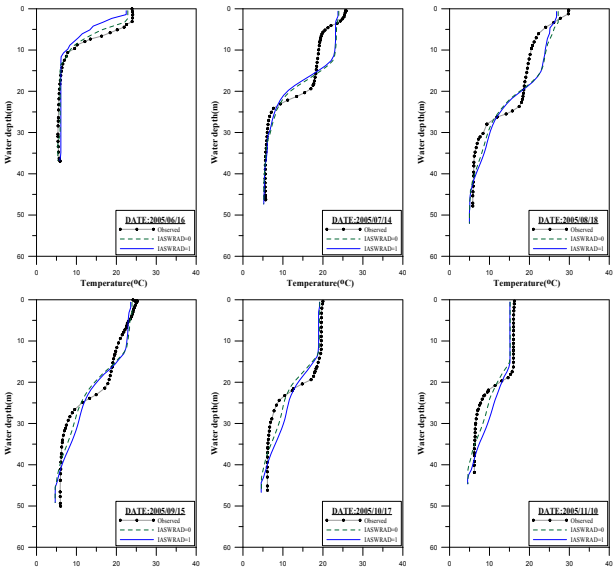

Fig. 4. Comparison with Model Results (Solar Radiation)

Table 3. Comparison with Model Results (Solar Radiation)

Time	AME(℃)		RMSE(℃)		R^2	
	0	1	0	1	0	1
2005/6/16	0.651	1.530	0.884	2.507	0.992	0.935
2005/7/14	1.571	1.558	2.122	2.113	0.941	0.933
2005/8/18	2.075	2.078	2.463	2.396	0.923	0.924
2005/9/15	1.312	1.480	1.548	1.747	0.959	0.949
2005/10/17	1.175	1.387	1.419	1.714	0.952	0.935
2005/11/10	1.251	1.722	1.393	2.066	0.915	0.854

경우 0.922로 매개변수 중 태양복사열 분포를 나타내는 IASWRAD의 경우, 용담호에서는 월별 투명도를 고려해 볼 때 표층의 태양복사열이 하층부까지 전달되지 않으므로 0을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.3.2 하상 초기 온도

물의 밀도는 수온이 4℃일 때 가장 커서 계절이 변할 때마다 호소의 상하층간의 수온은 독특한 변화를 한다. 이중 호소의 상층부인 표수층 온도와 바닥층인 심수층의 온도가 성층현상의 중요한 인자이다. 따라서 EFDC 모형에서 하상의 초기온도인 TBEDIT의 적정 값 산정이 수온 모의에 필수적이다. 하상의 초기 온도인 TBEDIT 값은 Table 1에서 적정 적용범위를 10~20℃로 제시하고 있어, 본 연구에서는 용담호의 심수층 온도를 고려하여 최소값인 10℃로 적용하였다.

3.3.3 활성 하상 수온층 깊이

본 연구에서는 활성 하상 수온층의 깊이인 DABEDT 값을 변화시켜 수온 모의를 수행하여 실측 수온과 비교 검토하였다. 이때 적용값은 제시된 적용범위인 1~10 m에서 최대값인 10 m, 최소값인 1 m, 중간값인 5 m를 비교하였다. 그 결과는 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다. 그 결과 평균적으로 R^2은 DABEDT 값 1 m인 경우 0.928이었으며, 5 m인 경우 0.941이었으며, 10 m인 경우 0.947로 나타났다. 특히 6~8월의 경우 큰 영향은 없지만 기온이 낮아지는 9월부터는 DABEDT 값이 적을수록 많은 오차가 나타났다. 따라서 용담호의 활성 하상 수온층의 깊이는 10 m를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

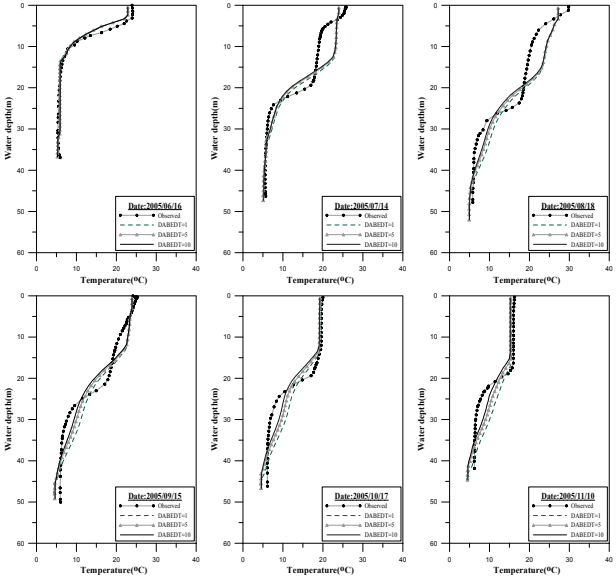

Fig. 5. Comparison with Model Results (Active Bed Layer)

Table 4. Comparison with Model Results (Active Bed Layer)

Time	AME(℃)			RMSE(℃)			R^2		
	1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m
2005/6/16	0.646	0.653	0.651	0.855	0.911	0.884	0.992	0.992	0.992
2005/7/14	1.660	1.577	1.571	2.194	2.123	2.122	0.947	0.943	0.941
2005/8/18	2.373	2.153	2.075	2.755	2.512	2.463	0.929	0.928	0.923
2005/9/15	1.666	1.422	1.312	2.041	1.669	1.548	0.944	0.956	0.959
2005/10/17	1.397	1.200	1.175	1.897	1.500	1.419	0.927	0.944	0.952
2005/11/10	1.819	1.443	1.251	2.371	1.731	1.393	0.830	0.882	0.915

3.3.4 열전달계수(HTBED1)

하상과 바닥층사이의 대류열전달계수인 HTBED1값을 변화시켜 수온 모의를 수행하여 실측 수온과 비교 검토하였으며, 이때 적용값은 Table 1에서 제시하고 있는 적용범위인 0.001~0.005에서 최대값인 0.005, 최소값인 0.001, 중 간값인 0.0025를 비교하였다. 모의 결과는 Fig. 6과 Table 5와 같다. 평균적으로 R^2은 HTBED1값 0.001인 경

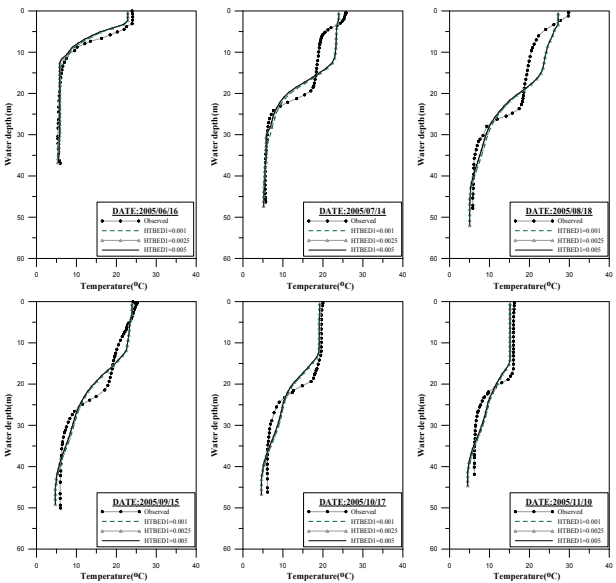

Fig. 6. Comparison with Model Results (HTBED1)

Table 5. Comparison with Model Results (HTBED1)

Time	AME(℃)			RMSE(℃)			R^2		
	0.001	0.0025	0.005	0.001	0.0025	0.005	0.001	0.0025	0.005
2005/6/16	0.651	0.699	0.724	0.884	0.999	1.051	0.992	0.991	0.990
2005/7/14	1.571	1.543	1.530	2.122	2.144	2.154	0.941	0.937	0.935
2005/8/18	2.075	2.024	2.011	2.463	2.437	2.431	0.923	0.923	0.923
2005/9/15	1.312	1.273	1.261	1.548	1.506	1.497	0.959	0.961	0.961
2005/10/17	1.175	1.190	1.193	1.419	1.433	1.440	0.952	0.953	0.953
2005/11/10	1.251	1.204	1.199	1.393	1.320	1.312	0.915	0.921	0.922

우 0.947이었으며, 0.0025인 경우 0.948이었으며, 0.005인 경우 0.948로 나타났으나, 시나리오별 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

3.3.5 열전달계수 (HTBED2)

하상과 바닥층사이의 열전달계수(m/s)인 HTBED2값

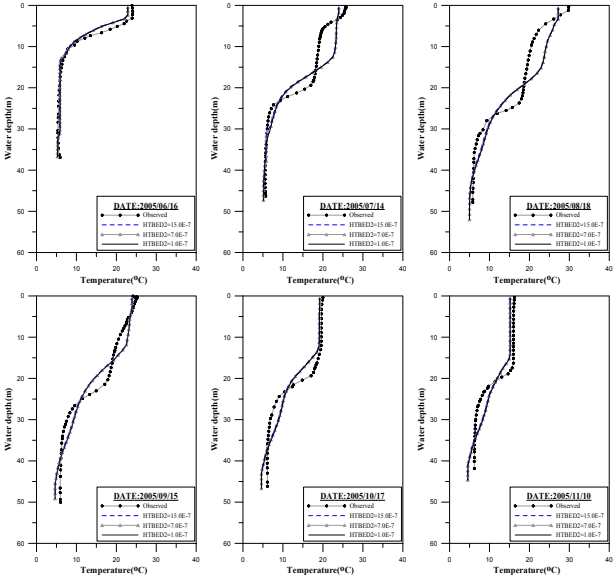

Fig. 7. Comparison with Model Results (HTBED2)

Table 6. Comparison with Model Results (HTBED2)

Time	AME(℃)			RMSE(℃)			R^2		
	1.0E-7	7.0E-7	15E-7	1.0E-7	7.0E-7	15E-7	1.0E-7	7.0E-7	15E-7
2005/6/16	0.651	0.652	0.673	0.884	0.908	0.942	0.992	0.992	0.991
2005/7/14	1.571	1.569	1.561	2.122	2.126	2.130	0.941	0.940	0.939
2005/8/18	2.075	2.060	2.048	2.463	2.453	2.447	0.923	0.923	0.923
2005/9/15	1.312	1.298	1.289	1.548	1.530	1.520	0.959	0.960	0.960
2005/10/17	1.175	1.183	1.184	1.419	1.424	1.426	0.952	0.952	0.952
2005/11/10	1.251	1.237	1.217	1.393	1.367	1.338	0.915	0.917	0.920

을 변화시켜 수온 모의를 수행하여 실측 수온과 비교 검토하였으며, 이때 적용값은 Table 1에서 제시된 적용범위인 1.0E-7~15E-에서 최대값인 15E-7, 최소값인 1.0E-7, 중간값인 7.0E-7을 비교하였다. 비교 결과 평균적으로 R^2은 HTBED2 값 1.0E-7인 경우 0.947이었으며, 7.0E-7인 경우 0.947이었으며, 15E-7인 경우 0.948로 나타났다. 시나리오별 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 7과 Table 6은 비교결과를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대표적 3차원 수리 수질해석모형인 EFDC의 수온성층해석 시 필요한 적정 매개변수를 산정하고자 하였다. 이를 위해 금강유역의 대표적 다목적댐인 용담댐유역에 연구모형을 적용하여 수온성층해석에 대한 적정성을 제고하고자 하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용담댐 유역에 Orthogonal-Curvilinear 좌표계를 이용하여 수평격자는 372개, 수직격자는 40개, 총 14,880개의 격자를 구성하였다. 구축된 모형의 지형 및 물수지 재현성을 검토해 본 결과 RMSE는 1.931 × 107 m^3/s, 0.793 m, AME는 1.894 × 107 m^3/s, 0.603 m로 전반적으로 실제 양상을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.
2) 본 연구에서는 수온 관련 매개변수인 IASWRAD, DABEDT, TBEDIT, HTBED1, HTBED2 등 총 5개의 매개변수에 대하여 수온성층해석 결과를 비교 분석하였다. 모의기간은 2005년 6월부터 12월까지였으며 수온 성층 재현성 수행 결과는 통계 지표인 AME, RMSE, R^2을 적용하여 실측치와 모의치를 비교하였다. 적용범위는 EFDC Technical Memorandum (Hamrick, 2007)에서 제시된 적용범위를 활용하였다.
3) 태양열복사 수심별 분포를 나타내는 IASWRAD의 경우 수층에서 하상으로 분포하는 경우를 적용하였을 때 R^2가 0.947로 수온성층현상을 좀더 정확히 묘사하였다. 그리고 활성 하상 수온층 깊이의 경우는 여름철에는 큰 영향이 없었지만 수온이 낮아지는 9월부터는 값이 적을수록 많은 오차가 나타남으로서 용담호의 경우 10 m를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그리고 하상과 바닥층 사이의 대류열 및 열전달계수인 HTBED1과 HTBED2의 경우 매개변수 값의 변화에 따른 재현성 수행결과는 시나리오별로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.
4) 본 연구에서는 용담호에 대한 적정 매개변수를 도출하였고 이는 국내 깊은 저수지에서 나타나는 수온성층해석 능력을 제고시키는데 활용될 수 있을 것이다. 그러나 각 매개변수에 대한 보다 추가적인 민감도 분석과 계절적인 특성을 고려하여 다르게 적용하는 등의 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

권석재, 강태순 (2007). "남해안 조위 및 조류거동 수치모의." **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, 제19권, 제3호, pp. 253-265.

서동일, 권기환, 박병준 (2009). "EFDC를 이용한 3차원 수리-수온 모델링." **한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집**, 한국수자원학회, pp. 2220-2224.

서동일, 이정우 (2005). "3차원 수리 모델 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)를 이용한 준설에 의한 부유사 확산영향에 관한 연구." **한국물환경학회 대한상하수도학회 2005년도 공동춘계학술발표회 논문집**, 한국물환경학회 대한상하수도학회, pp. 360-363.

서동일, 유하나 (2007). "EFDC-Hydro와 WASP7.2를 이용한 QUAL2E 모델의 오차 원인 분석-한강하류부의 적용 사례를 중심으로." **대한상하수도학회 물환경학회 2007년도 공동학술대회 논문집**, 대한상하수도학

회 물환경학회
서승원, 이화영 (2008). "새만금호 완공에 따른 수질변화 모의." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제1B호, pp. 79-93.
안기홍 (2011). "실시간 수질관리도구로서의 3차원 수질모형의 최적 격자크기 산정." **한국환경영향평가학회지** 심사중.
한국수자원공사 (2009). 저수지 3차원 유체거동 및 수질모의 모형 적용성 평가.
한국해양연구소 (2001). 경기만 연안 개발에 따른 수리 및 수질 통합평가 모델 개발.
Hamrick, J.M. (1992a). *A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects*. The college of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report.
Hamrick, J.M. (1992b). *Estuarine environmental impact assessment using a three-dimensional circulation and transport model. Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 2nd International Conference*, M.L. Spaulding et al., Eds., American Society of Civil Engineers, pp. 292-303.
Hamrick, J.M. (1994). *Evaluation of island creation alternatives in the Hampton Flats of the James River*. A report to the U. S. Army Corps of Engineers, Norfolk District, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
Hamrick, J.M. (1995a). *Calibration and verification of the VIMS EFDC model of the James River, Virginia*. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report, in preparation.
Hamrick, J.M. (1995b). *Transport and fate of water surface deposited radionuclides in the James and York Rivers*. Unpublished memo to Los Alamos National Laboratory HAZMAT Team, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
Hamrick, J.M. (2007). *EFDC Technical Memorandum*.
Johnson, B.H., Kim, K.W., Heath, R.E., Hsieh, B.B., and Butler, H.L. (1993). "Validation of threedimensional hydrodynamic model of Chesapeake Bay." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, pp. 2-20.
Moustafa, M.Z., and Hamrick, J.M. (1994). *Modeling circulation and salinity transport in the Indian River Lagoon. Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 3rd International Conference*, M.L. Spaulding et al, Eds., American Society of Civil Engineers, New York, pp. 381-395.
Moustafa, M.Z., and Hamrick, J.M. (1995). *Development of the Everglades wetlands hydrodynamic model: 3.* Model application to South Florida water conservation area 2a. submitted to Water Resources Research.

논문번호: 11-031	접수: 2011.03.17
수정일자: 2011.06.22/08.08	심사완료: 2011.08.08