

합천댐 저수지에서의 시공간적 수온모의를 위한 매개변수 민감도 분석

Parameter Sensitivity Analysis for Spatial and Temporal Temperature Simulation in the Hapcheon Dam Reservoir

김 보 람* / 강 부 식**
Kim, Boram / Kang, Boosik

Abstract

This study have implemented finding the optimal water temperature parameter set for Hapcheon dam reservoir using CE-QUAL-W2 model. In particular the sensitivity analysis was carried out for four water temperature parameters of wind sheltering coefficient (WSC), radiation heat coefficient (BETA), light extinction coefficient (EXH2O), heat exchange coefficient at the channel bed (CBHE). Firstly, WSC, BETA, EXH2O shows relatively high sensitivity in common during April to September, and CBHE does during August to November. Secondly, as a result of identifying depth range of parameter influence, BETA and EXH2O show 0~9 m and 8~14 m which is thermocline layer close to water surface, CBHE is deep layer 12 m away from bottom. Finally, applying annual or monthly optimal parameter sets indicates that the bias between two sets does not show much differences for WSC and CBHE parameters, but BETA and EXH2O parameters show 0.20°C and 0.51°C of monthly average biases for two parameter sets. In particular the bias reveals to be 0.4°C and 1.09°C during May and August that confirms the necessity of use of monthly parameters during that season. It is claimed that the current operational custom use of annual parameters in calibration of reservoir water quality model requires the improvement of using monthly parameters.

Keywords : Water temperature parameters, Sensitivity analysis, CE-QUAL-W2, Multipurpose reservoirs

요 지

다목적댐 저수지는 여름철에 발생하는 성층현상이 발생하고 가을철에는 성층화된 저수지의 밀도 차로 인한 전도현상이 일어나게 된다. 이러한 현상은 저수지의 시공간적 수온분포의 변화에 의하여 발생하며, 이를 정확히 모의하고 예측하기 위해서는 수온에 작용하는 관련 매개변수의 작용특성을 명확히 파악할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 합천댐 저수지를 대상으로 횡방향 평균 2차원 저수지 수리 수질 해석모형인 CE-QUAL-W2를 적용하여 저수지내 발생하는 수온성층, 탁수의 거동 및 수질을 예측하기 위해 선행되어야 할 수온모의를 통해 합천댐 저수지에 적합한 수온 매개변수 산정에 대한 연구를 진행하였다. 특히 모델에서 합천댐 수온모의와 관련된 매개변수 중 바람차폐계수(WSC), 복사열계수(BETA), 빛소멸계수(EXH2O), 바닥 열교환계수(CBHE)의 민감도 분석을 수행하였다. 첫 번째로, 민감도가 높은 기간을 확인한 결과 WSC, BETA, EXH2O는 공통적으로 4~9월, CBHE는 8~11월로 나타났다. 두 번째로, 매개변수가 영향을 미치는 수심대를 확인한 결과 BETA는 0~9m, EXH2O는 8~14m 구간으로, 수표면과 가까운 표층과 수온약층, CBHE는 바닥에서부터 12m 구간으로 심층구간에서 영향이 나타났다. 마지막으로 연단위

*단국대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 (e-mail: boramkim87@dankook.ac.kr)

Master Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

**교신저자, 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수 (e-mail: bskang@dankook.ac.kr, Tel: 031-8005-3471)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

혹은 각월에서의 최적매개변수를 적용한 결과 WSC와 CBHE 매개변수는 모의온도의 편차가 그다지 크지 않았으나, BETA와 EXH2O의 경우 연단위와 월단위 최적매개변수 적용 시 모의수온편차가 각각 월평균 0.20℃와 0.51℃로 다소 큰 값을 보이고 있으며, 특히 수온이 최대로 상승하는 5~8월 중에는 0.4℃와 1.09℃의 편차를 보여 월단위 매개변수사용의 필요성이 뚜렷이 확인되었다. 이는 현재 저수지수질모형의 검토정에서 입력요구조건에 따라 혹은 관행적으로 사용되고 있는 연단위 매개변수의 사용에 있어서 월단위로의 개선이 필요한 부분으로 사료된다.

핵심용어 : 수온 매개변수, 민감도 분석, CE-QUAL-W2, 다목적댐 저수지

1. 서 론

국내 저수지에서는 여름에 강한 일사량으로 인해 표층의 온도가 크게 상승하여 심층과의 온도차가 커짐으로써 수직적으로 층을 이루게 되는 성층현상(Stratification)과 성층화된 저수지에서 밀도가 큰 표층수는 심층에, 밀도가 작은 심층수는 표층으로 이동하면서 수체의 수직적인 혼합이 일어나는 전도현상(Turnover)이 발생한다. 이러한 현상들은 심층의 풍부한 영양염류가 표층으로 이동됨에 따라 녹조현상을 야기하며, 수중으로의 햇빛 차단과 용존 산소의 추가 유입 감소로 인해 하부오염물질이 증가하여 호소수질이 나빠져 상수취수에 악영향을 미친다. 이러한 현상을 대비하고 수자원을 안정적이고 효과적으로 관리 및 활용하기 위해서는 댐 저수지의 수환경 변화의 정확한 분석과 예측이 필요하다.

저수지의 수환경 변화예측은 수자원관리에 대한 관심이 높아짐에 따라 국내에서는 대청호, 소양호, 팔당호, 용담호 등 댐 저수지 관련 연구가 진행된 바 있으며, 국내·외에서 연구가 꾸준히 이뤄지고 있다. Kim et al. (2001)은 소양호를 대상으로 CE-QUAL-W2를 이용하여 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상을 모델링한 바 있다. Na et al. (2002)은 팔당호를 대상으로 호수 내 연직 수온 분포와 수체 이동의 계절적 변화를 분석한 바 있으며, Chung et al. (2005)은 실시간 탁수감시와 예측시스템(RTMMMS) 구축을 위하여 CE-QUAL-W2를 저수지 수온과 탁도 예측 모형으로 선정하고 2004년 홍수기 동안 대청댐 저수지를 대상으로 모형의 적용가능성을 평가하였다. Lee et al. (2008)은 유역모델인 HSPF와 저수지모델 CE-QUAL-W2를 연계 적용하여 집중강우 시 용담댐 저수지의 탁수 현상을 연구하여 탁수관리 방안으로 활용될 수 있음을 검증하였다. 국외의 경우 Yang et al. (2002)도 미국 오리건 주의 Deschutes River을 대상으로 수온성층현상과 수질 모의를 수행한 바 있으며, 1995년과 1996년의 관측데이터로 검·보정하여 CE-QUAL-W2가 수직분포 및 수질 모

에 적합하다고 제시하였다. 최근 Chang and Lawler (2011)은 1991~2009년의 기후변화에 따른 저수지 수온 변화에 미치는 영향을 CE-QUAL-W2를 이용하여 모의한 결과가 물 관리 전략을 수립하는데 유용할 것이라 제시하였다.

다목적댐 저수지에서의 수온성층화 및 전도현상은 저수지의 시공간적 수온분포의 변화에 의하여 발생하며, 이를 정확히 모의하고 예측하기 위해서는 수온에 작용하는 관련 매개변수의 작용특성을 명확히 파악할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 횡방향 평균 2차원 저수지 수리 수질 해석모형인 CE-QUAL-W2를 적용하여 저수지내 발생하는 수온성층, 탁수의 거동 및 수질을 예측하기 위해 선행되어야 할 수온모의를 통해 합천댐 저수지에 적합한 수온 매개변수를 산정하고자 한다.

2. 연구개요

2.1 모델의 선정 및 개요

본 연구에서는 저수지의 성층현상과 탁도 밀도류 유동해석이 용이하며 우리나라 다목적댐 저수지(대청호, 소양호, 팔당호, 용담호 등)를 대상으로 연구에 적용되어 다양하게 진행된 바 있는 CE-QUAL-W2모형을 선정하였다. CE-QUAL-W2는 미 육군공병단(US Army Corps of Engineers)에 의해 개발된 2차원 횡방향 평균(Laterally-averaged) 수리 및 수질 모형으로 수체를 흐름 방향과 수심 방향으로 각각 일정한 간격으로 나누어 시간에 따른 수위, 수온, 유속 등을 모의하는 모델이다. 이 모델은 폭 방향의 수질이 균일하다고 가정하므로 상대적으로 폭이 좁고 수심이 깊은 저수지에 가장 적합하다. CE-QUAL-W2 모델에서 수체의 수리학적 거동을 결정하는 방정식은 크게 6개의 기본식(운동량 방정식, 정수압방정식, 연속방정식, 수표면 고도 방정식, 상태방정식, 이류확산방정식)으로 구성되어 있으며, 6개의 미지수(자유수표고(η), 압력(P), 흐름방향 유속(U), 연직방향 유속(W), 구성성분농도(ϕ), 밀도(ρ))에 대한 6개 방정식의 해는 기본모델구조를 형성한다(Table 1).

Table 1. Hydrodynamics and Transport Equation

	Equation
x-Momentum Equation	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}$
z-Momentum Equation	$0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$
Continuity Equation	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$
Free-Water Surface Equation	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$
State Equation	$\rho = f(T_w, \Phi, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$
Advection-Diffusion Equation	$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial \left(BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)}{\partial z} = q_{\Phi} B + S_{\Phi} B$

U =흐름(x)방향 유속(m/sec), W =연직(z)방향 유속(m/sec), B =수체의 폭(m), t =시간(sec), ρ =밀도(kg/m³), g =중력가속도(g/sec²), η =자유수표면 위치(m), P = 압력(N/m²), τ_{xx} =흐름(x)방향 전단력(g/m²sec²), τ_{xz} =연직(z)방향 전단력(g/m²sec²), q =유입 또는 유출유량(m³/sec), B_{η} =시·공간에 따라 변하는 수표면 폭(m), h =총 수심(m), $f(T_w, \Phi, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$ =수온, 총 용존성 고형물질 또는 염분도, 부유물질에 의존하는 밀도 함수, Φ =물질농도(g/m³), D_x =흐름(x)방향 확산계수(m²/sec), D_z =연직(z)방향 확산계수(m²/sec), q_{Φ} =유입 또는 유출량(g/m³/sec), S_{Φ} =반응에 의한 유입 또는 유출량(g/m³/sec)

2.2 대상지역 및 자료구축

연구 대상유역인 합천호는 경상남도 합천군 대병면에 위치하고 있으며, 낙동강 하류지역의 생활 및 농업용수, 농업용수를 공급하고 산업 시설과 농경지의 홍수피해를 조절하기 위하여 낙동강 지류인 황강에 건설된 다목적댐 저수지이다. 합천댐 유역은 청정지역으로 알려져 있지만 매년 여름철 태풍의 영향과 주변 농경지의 토사유출로 인해 장기간 이어지는 탁수현상이 보고되고 있다. 이러한 피해를 최소화하여 청정지역을 유지하기 위해서는 지속적인 관리가 필요하다. 합천댐 유역의 면적은 929km², 총 저수용량이 7억 9000만 m³, 저수면적은 25km², 저수지 길이는 30km, 최대 수심은 약 80m이다. 합천댐은 유역 내 기상관측소 및 하천 수질측정망, 저수지 수질측정망이 위치하고 있다. 본 연구에서는 2010년을 대상으로 매개변수 보정을 실시하였으며, 검증은 다음 해인 2011년을 대상으로 실시하였다.

CE-QUAL-W2의 지형자료로 구성되는 합천댐 저수지의 격자는 한국수자원공사(K-water) 연구원에서 제공받아 활용하였다. 국가하천인 황강분류와 유입부는 4개의 Branch로 구성되었고, 황강으로 유입하는 지방하천 중 유입량이 가장 크며, 유량 및 하천 수질측정망이 위치하는 가천천은 Tributary로 구분되었다. Tributary는 모델의 격자로 표현되지 않으며 모의 시 유량, 수온, 수질 등의 경

계조건을 입력한다. 모델 격자는 댐 축으로부터 약 29km 상류지점까지 91개의 구획(Segment), 수심방향으로 1m 간격으로 84개의 수층(Layer)로 구성되었다(Fig. 1).

모델 수행 시 요구되는 기상 입력 자료는 기온(°C), 이슬점 온도(°C), 풍속(m/s), 풍향(Radian), 운도(1-10)가 포함되며 기온, 이슬점온도, 운량은 합천댐 유역에서 가장 가까운 기상대인 거창기상대의 일자료를 이용하였으며, 풍향과 풍속은 거창AWS의 일자료를 이용하여 구성하였다.

합천댐 유역의 유량관측지점은 총 2개소로 Branch 1의 유입지점인 황강1 관측소와 Tributary로 구분된 가천천 유입지점인 가천 관측소가 위치하고 있지만 모델 지형 격자에서 황강 유입부로 구분된 나머지 3개의 Branch 유입량은 관측소가 없어 관측값이 존재하지 않고, 관측소가 있는 지점 또한 자료수가 부족하여 이를 모델에 적용하기에는 불확실성이 크다. 이를 보완하기 위해 한국수자원공사에서 제공하는 댐 수문자료를 바탕으로 합천댐의 일별 총 유입량을 합천댐 전체 유역면적에 대한 유입지류의 유역면적 비율을 고려하여 각 Branch의 일별 유입량을 산정하였다(Table 2). 또한 발전방류량과 여수로 방류량을 고려하여 입력 자료를 구성하였다.

강우 시 하천수온변동은 탁수의 밀도류 해석에 매우 중요한 요소이므로 하천수온변동을 정확히 반영하기 위해서는 실시간 수온계측이 반드시 필요하다. 하지만 저수지 유입부에서 장기 수온 계측 데이터가 부족하므로 회귀분

석을 통하여 통계적 수온회귀식을 입력자료로 이용하면 비교적 정확한 수온예측이 가능하여 하천수온 평가에 자주 활용이 되고 있다. 본 연구에서는 기온, 이슬점 온도, 유량을 변수로 하여 수온 회귀식을 산정하였으며, 세 가지 변수를 모두 이용한 모의(Sim 1), 이슬점 온도를 제외하고 기온과 유량 변수를 이용한 모의(Sim 2), 유량을 제외하고 기온과 이슬점 온도를 변수로 이용한 모의(Sim 3)를 비교하였다(Table 3). 황강유역에서는 기온과 유량만을 변수로 하는 수온 회귀식(Sim 2)의 결과가 실측 수온과의 차이가 가장 적게 나타났으며, 다른 지류 유입수에서도 수온 측정 자료가 없으므로 기온과 유량만을 변수로 하는 수온 회귀식(Sim 2)을 전체유입수의 수온을 대표하는 것으로 간주하여 적용하였다.

3. 모델의 수온예측 모의

3.1 모델의 지형격자 검증

CE-QUAL-W2 모형의 수치지격자가 유역의 지형을 잘 재현하는지 확인하기 위해 모형에서 모의된 저수용량과 수위-저수용량관계곡선식(Korea Water Resources Corporation, 2007)을 이용해 산정된 값을 비교한 결과 R^2 가 0.999, 모형의 적합도를 나타내는 신뢰도 지수(RI)가 1.182로 높게 나타났다. 저수용량의 상대오차는 저수위에서 계획홍수위사

이에 수위가 관측되기 때문에 이에 해당하는 140~179m 구간의 저수용량을 비교해본 결과 상대오차는 2.00%로 나타나는 것을 확인하였다. 물의 유입과 유출을 나타내는 물수지 모의는 모의된 저수위와 관측 저수위를 비교하여 나타내는데 2010~2011년의 결정계수 R^2 가 0.999, 신뢰도 지수 RI가 1.001, 상대오차가 약 0.17%로 합천댐의 지형격자는 재현성이 높은 것으로 판단된다(Fig. 2, Table 4).

3.2 관측지점의 유속분포

합천댐의 수온 관측지점은 합천댐 상류 6.5km지점(Fig. 1, 48번째 Segment)에 위치한 취수구지점이다. 취수구지점에서 깊이에 따른 유속은 최대 0.05m/s 차이를 보였으며, 대부분의 위치에서 흐름의 변화가 거의 없는 상

Table 2. Percentage of Sub-Watershed Area

	Area (km ²)	Percentage (%)
Branch 1	636.76	68.5
Branch 2	9.16	1.0
Branch 3	77.77	8.4
Branch 4	25.34	2.7
Tributary	179.91	19.4
Sum	928.94	100

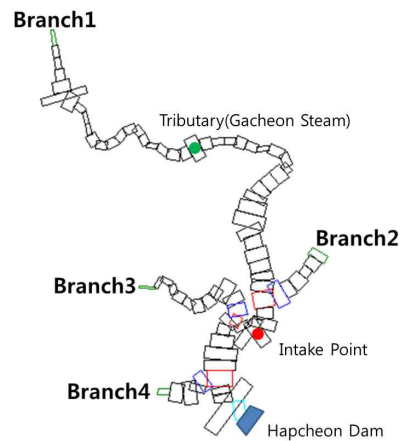
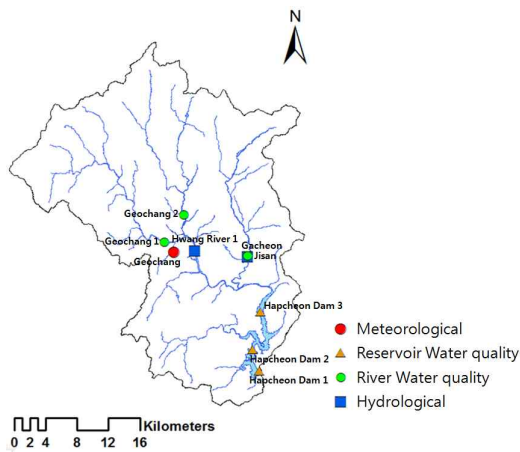


Fig. 1. Hapcheon Dam Basin Map and Computational Segments

Table 3. Comparison of Water Temperature Prediction Model

Site	Model	Regression Equation	R^2	Parameter
Hwang River	Sim 1	$T_w = 4.825 + 1.099T_a - 0.38T_d - 0.0115Q$	0.802	T_a, T_d, Q
	Sim 2	$T_w = 5.516 + 0.744T_a - 0.01057Q$	0.875	T_a, Q
	Sim 3	$T_w = 6.794 + 0.851T_a - 0.28T_d$	0.693	T_a, T_d

T_w : Water temperature, T_a : Temperature, T_d : Dew point temperature, Q : Flow

태라는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 따라서 합천댐 취수구 지점의 관측값은 유속의 흐름이 거의 없는 저수지 모의를 비교하는데 적합하다고 판단된다.

3.3 수온성층구조 모의

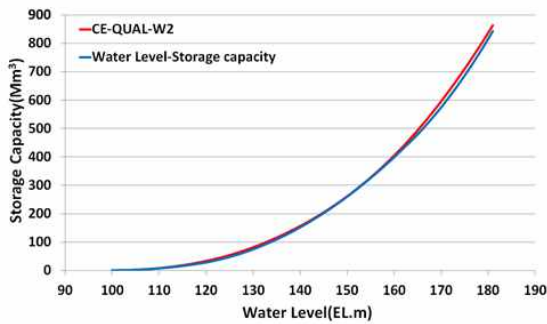
CE-QUAL-W2의 수온 예측 정확도를 향상시키기 위해 사용자 지침서를 참고하여 수온 매개변수 보정 시 모의값과 실측값의 편차를 나타내는 통계값이 최소가 되도록 시행착오법으로 수행하여 보정하였다. 본 연구는 보정년도인 2010년 모의값과 관측값 비교를 통해 연단위 수온 매개변수를 산정하였으며, 보정된 매개변수를 검증년도인 2011년에도 동일하게 적용하여 합천댐 저수지의 수온

예측의 적합한 매개변수인지 확인해 보았다. 합천댐측으로부터 상류 6.5km지점인 합천댐 취수구지점의 관측값을 비교한 결과, 2010~2011년 수온보정결과 관측수온과의 오차가 2℃ 안의 범위로 대체로 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다(Fig. 4).

4. 수온의 민감도 분석

4.1 저수지 온도변화

저수지 온도변화는 난류확산, 바람의 전단력, 열 교환, 증발, 밀도함수 등에 영향을 받게 되는데 수표면에서의 수온변화는 열수지식(Heat Balance Equation)을 이용하



(a) Water Level-Storage Capacity



(b) Water Balance Simulation

Fig. 2. Reproducibility of the Geomorphological Model Grid

Table 4. Error Evaluation of Geomorphological Model Grid

		R ²	Relative Error (%)	RI
Water Level-Storage Capacity		0.999	2.00*	1.182
Water Balance Simulation	2010 yr	0.999	0.165	1.001
	2011 yr	0.999	0.167	1.001

*140~179 m

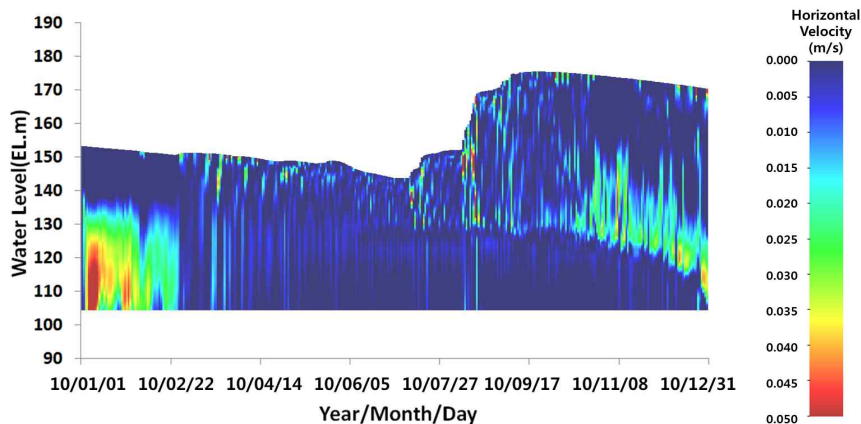


Fig. 3. Velocity Distribution at Hapcheon Dam Intake Point

Table 5. Hydrodynamic and Water Temperature Parameters for CE-QAUL-W2 Model

Parameters	Variable	Unit	Default	Calibrated	Application
Longitudinal eddy viscosity	AX	m^2s^{-1}	1.0	1.0	-
Longitudinal eddy diffusivity	DX	m^2s^{-1}	1.0	1.0	-
Chezy bottom friction factor	CHEZY	$m^{1/2}s^{-1}$	70	70	Segment
Wind sheltering coefficient	WSC	-	0.85	0.85	Segment daily
Solar radiation absorbed in the surface layer	BETA	-	0.45	0.75	-
Extinction coefficient for pure water	EXH2O	m^{-1}	0.45	0.90	Daily
Coefficient of bottom heat exchange	CBHE	$Wm^{-2}s^{-1}$	0.3	0.45	-

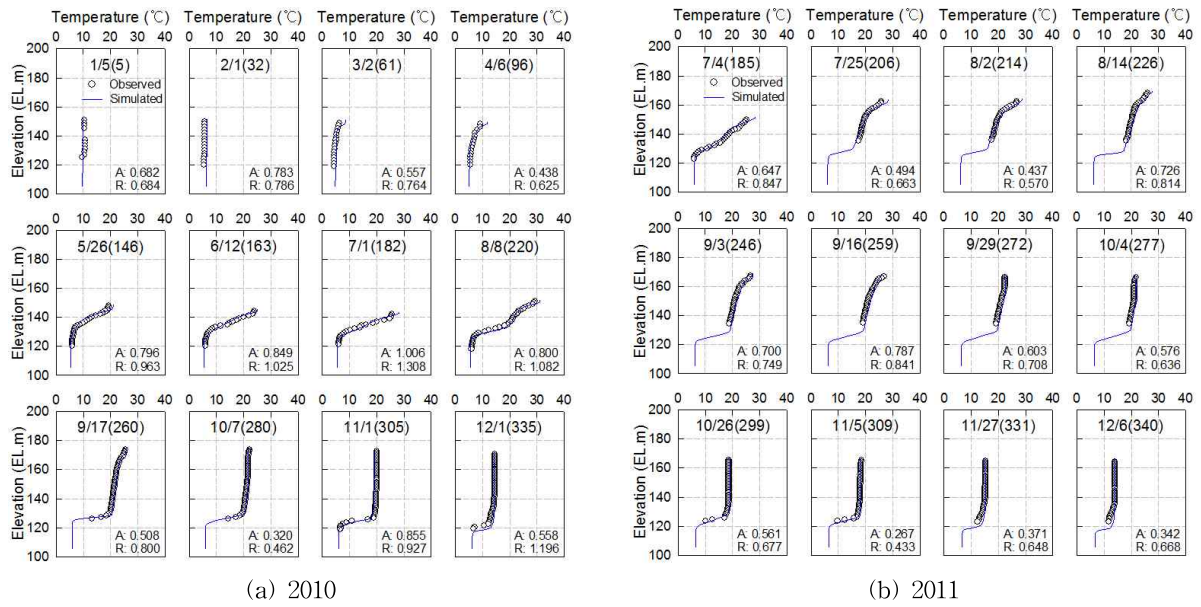


Fig. 4. Water Temperature Simulation Results at Hapchoen Dam intake Point

며 그 식은 다음과 같다.

$$H_n = H_s + H_u + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ur} + H_{br}) \quad (1)$$

$$H_s = \frac{H_s(z)}{(1-\beta)e^{-\eta z}} \quad (2)$$

$$H_u = \sigma T_a^4 (\epsilon_a - 1) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

$$H_e = (9.2 + 0.46 W^2) (e_s - e_a) \quad (4)$$

$$H_c = 0.47 (9.2 + 0.46 W^2) (T_w - T_a) \quad (5)$$

$$H_{sr} = AH_s \quad (6)$$

$$H_{ur} = AH_u \quad (7)$$

$$H_{br} = c\sigma^* (T_w + 273.15)^4 \quad (8)$$

여기서, H_n 은 수표면을 통한 순수 열교환율(W/m^2), H_s 는 수표면에 입사된 단파장 복사에너지(W/m^2), H_u 는 수표면에 입사된 장파장 복사에너지(W/m^2), H_e 는 증발에 의한 열손실(W/m^2), H_c 는 수표면에서의 열전도율(W/m^2), H_{sr} 은 반사되는 단파장 복사에너지(W/m^2), H_{ur} 은 반사되는 장파장 복사에너지(W/m^2), H_{br} 은 수표면으로부터 반사되는 복사에너지(W/m^2)이다.

4.2 수온 매개변수

CE-QAUL-W2의 수온 매개변수 중 AX (Longitudinal eddy viscosity)는 횡방향 점성을 나타내고, DX (Longitudinal eddy diffusivity)는 횡방향 확산도를 나타낸다. Eq. 10에서, Δx 는 횡방향 격자 크기이다(Okudo, 1971). 저수지 바닥 마찰계수인 CHEZY계수는 유속이 큰 경우 민감도가 큰 것으로 알려져 있으며 구간별로 달라질 수 있다.

또한 CBHE (Coefficient of bottom heat exchange)는 바닥과 수체간의 열 교환계수를 나타낸다. 위에 매개변수는 유체의 흐름과 바닥 경계면에서의 에너지 교환에 영향을 미치게 된다.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \frac{\tau}{\rho} = \nu \frac{\partial u}{\partial x} = AX \frac{\partial u}{\partial x} \quad (9)$$

$$DX = 5.84 \times 10^{-4} \Delta x^{1.1} \quad (10)$$

$$CHEZY = \frac{V}{\sqrt{R_h S_0}} = (1/n) R^{1/6} \quad (11)$$

저수지 수표면 경계에서 열 교환 및 증발은 바람 차단효과를 반영하는 매개변수인 WSC (Wind sheltering coefficient ; 바람에 의한 차폐계수)에 의해 결정되며, WSC는 일별, 저수지 구간별로 달라질 수 있다. 수온 상층에 가장 많이 영향을 미치므로 선행 보정해야 하며, 대체로 지형적인 영향(산악지형 등)으로 바람에 의한 차폐가 생길 경우 0.5~0.9 값을 가지며, 매우 큰 호수의 경우 1.0을 사용한다(Cole et al., 2004). 바람차폐계수의 추정은 저수지의 면적과 저수지에 바람이 작용한 면적의 비로 나타내는데, 호수가 D 라는 지름을 가진 원형으로 가정하였을 때 다음과 같은 관계를 정의할 수 있다. 여기서, WSC는 바람차폐계수, $A_{wind\ access}$ 는 바람이 작용한 면적, A_{lake} 는 저수지 전체 면적, x_r 는 바람이 작용하지 않는 면적의 중심거리를 의미한다(Fig. 5).

$$WSC = \frac{A_{wind\ access}}{A_{lake}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x_r}{D} \right) - \left(\frac{2x_r}{\pi D^2} \right) \sqrt{D^2 - x_r^2} \quad (12)$$

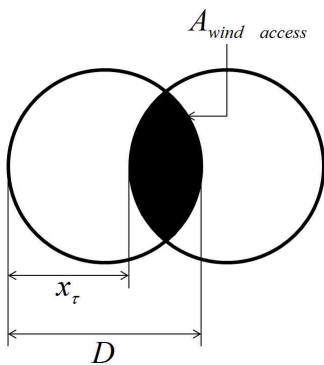


Fig. 5. Estimate of the Wind Sheltering Factor

Table 6. Parameter Quantiles for Sensitivity Analysis

	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Sim 5
Parameter Quantiles	0	0.25	0.50	0.75	1.00

순수한 물에 의해 수면 아래 도달하는 태양복사에너지의 빛이 단위 미터당 소멸하는 감쇠계수를 나타내는 EXH2O (Extinction coefficient for pure water)는 일별로 적용이 가능하며, 관측된 투명도로부터 빛 소멸 계수를 구하는 식은 다음과 같다(Caffrey et al., 2007). 여기서, EXH2O는 빛 소멸 계수이며, Z_s 는 Secchi disk (Secchi 투명도 판)의 깊이(m)이다. 태양방사선이 물 표면에서 0.6 m 깊이에서 흡수되는 비율을 나타내는 BETA (Solar radiation absorbed in the surface layer)는 빛 소멸 계수의 함수로도 표현되는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Williams et al., 1980).

$$\log(EXH2O) = -0.96 \log(Z_s) + 0.30 \quad (13a)$$

$$EXH2O = 10^{0.3 Z_s^{-0.96}} \quad (13b)$$

$$BETA = 0.265 \ln(EXH2O) + 0.614 \quad (14)$$

4.3 민감도 분석

수온에 관련되어 있는 매개변수 중 바람차폐 및 복사열에 관련되어 있는 WSC, BETA, EXH2O와 합천댐 저수지 온도변화에 영향이 있는 바닥 열 교환 매개변수인 CBHE를 선정하여 각각에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 민감도가 높은 기간과 수심대, 연단위와 월단위의 적정 매개변수 값을 독립적으로 수행하였으며, 수심에 따른 수온 실측값이 부족하여 실측값이 존재하는 날이 해당 월을 대표한다고 가정한 후 연구를 진행하였다. 민감도가 높은 기간과 수심대는 모의수온들과의 비교를 통해 확인하였으며, 적정 매개변수 값은 모의수온과 관측수온의 차이가 가장 적게 나는 값으로 선정하였다. 다음 표는 조정된 매개변수의 값의 분위값들을 나타낸다(Table 6).

4.3.1 민감도가 높은 기간

매개변수의 값을 0~1 사이로 변화시켜 연직 평균 월 모의수온변화를 산정하였다. 저수지의 수심은 기상조건의 따라 매번 달라지기 때문에 정량적인 비교를 위해 연직 평균 월 모의수온 변화량 결과로 분석하였다. 민감도 분석결과 WSC는 4~12월, BETA는 4~11월, EXH2O는 4~9월에서 매개변수값의 변화에 따른 수온변화가 크게 나타났으며, CBHE는 8~11월에 수온변화의 영향이 큰

것으로 확인되었다. 매개변수 중 태양방사선이 흡수되는 비율을 나타내는 BETA의 경우 변화된 값에 따른 모의수온간의 차이가 7월 최고 6.66°C로 가장 큰 변동 폭을 나타냈으며, 이는 합천댐 저수지에서 가장 민감한 매개변수임을 알 수 있었다. 다음 표와 그림은 매개변수에 따른 월 평균 모의 수온 변화량을 나타낸 것이다(Table 7).

4.3.2 민감도가 높은 수심대

매개변수의 값을 0~1 사이로 변화시켜 연 평균 모의수온 변화가 크게 나타나는 수심대를 산정하였다. 저수지의 수심은 기상조건의 따라 매번 달라지기 때문에 해당 수심대에 수온값이 존재하는 날들을 분석하여 수표면으로부터 최대 70m 수심까지 나타내었다. 하지만 CBHE는 바

닥에서의 영향을 나타내므로 바닥면을 기준으로 수심대를 정렬하여 바닥면으로부터 최대 70m까지 나타내었다. 민감도 분석결과 WSC는 모든 수심대에서 연 평균 모의수온 변화가 0.5°C로 민감도 높은 수심대가 뚜렷하게 나타나지 않았다. BETA는 수심 1~9m 구간에서 최대 1.89°C, EXH2O는 수심 8~14m에서 최대 1.12°C의 연 평균 모의수온변화를 나타냈으며, 이들은 수표면과 가까운 표층과 수온약층에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 마지막으로 CBHE는 바닥에서부터 12m구간으로 연평균 모의수온 변화는 최대 1.2°C로 심층의 수온변화에 관련이 있음을 알 수 있었다. Fig. 6은 수심에 따른 연 평균 모의수온변화를 그림으로 나타낸 것이다.

Table 7. Monthly Variation of Average Water Temperature Simulation Values

Month	Monthly Average Simulated Water Temperature variation (°C)			
	WSC	BETA	EXH2O	CBHE
Jan	0.08	0.01	0.04	0.00
Feb	0.32	0.04	0.02	0.04
Mar	0.46	0.37	0.64	0.20
Apr	1.12	1.36	2.17	0.38
May	1.33	4.80	3.13	0.73
Jun	1.01	3.56	2.40	0.78
Jul	1.40	6.66	2.93	0.97
Aug	1.30	4.54	2.35	1.31
Sep	1.46	2.54	1.35	1.24
Oct	2.63	1.42	0.12	1.33
Nov	2.48	2.38	0.48	1.55
Dec	2.01	0.96	0.76	0.93

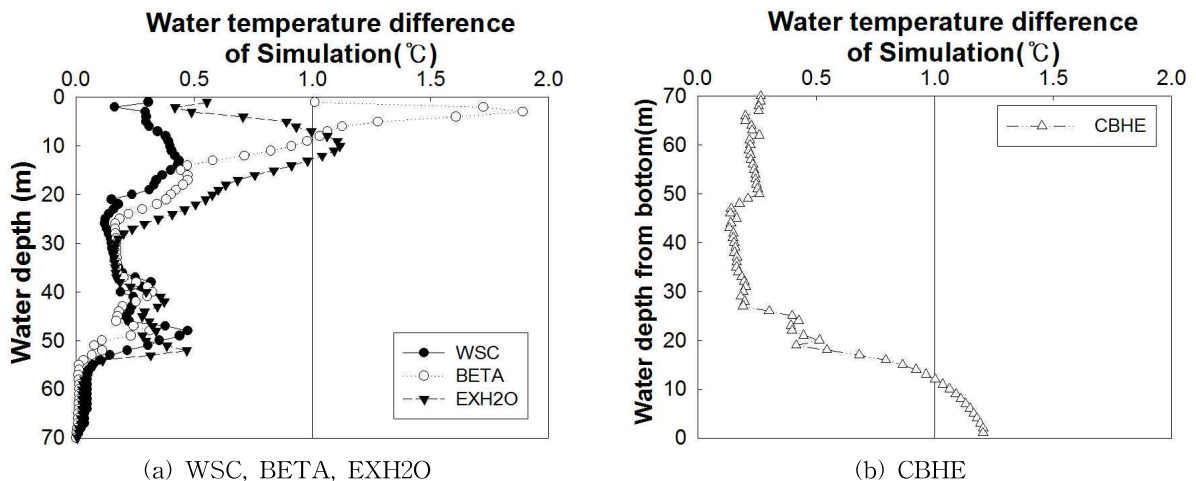


Fig. 6. Simulated Water Temperature Variation Over Depth

4.3.3 매개변수 특성에 따른 적정 매개변수

매개변수의 값을 0~1 사이로 변화시켜 모의수온과 관측수온의 차이가 최소로 되는 적정 매개변수를 선정하였다. 월 단위로 매개변수 모의가 가능한 WSC와 EXH2O는 각 월에 적정 매개변수 값을 산정하였고, 연 단위로만 모의 가능한 BETA와 CBHE는 각 월에 산정한 매개변수의 값을 평균하여 하나의 값으로 나타내었다(Table 8). 월 단위 매개변수가 연 단위 매개변수보다 수온모의능력이 얼마나 개선되었는지 확인하기 위해 월별 연직 평균수온 절

대오차를 살펴보았다. 모든 월에서 감소하는 형태는 아니지만 전체적으로는 감소 경향을 나타냈으며, WSC와 CBHE는 각각 연 평균 0.11℃, 0.03℃ 감소하여 연단위 매개변수와 월단위 매개변수를 사용한 경우 간에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 또한 BETA는 전체적으로 0.2℃ 편차가 발생하지만 수온이 가장 높은 5~8월에는 0.24~0.61℃, 평균 0.4℃차를 보이며, EXH2O도 연 평균 0.51℃ 감소된 경향을 나타냈지만 5~8월에는 0.71~1.64℃, 평균 1.09℃차를 보여 표층수온에 크게 관여된 BETA와 EXH2O의 수온오차 개선도가 큰 것을 확인하였다(Table 9).

Table 8. Optimal Annual and Monthly Parameters

Month	WSC		BETA		EXH2O		CBHE	
	Annual	Monthly	Annual	Monthly	Annual	Monthly	Annual	Monthly
Jan	0.85	0.14	0.75	0.61	0.90	0.12	0.45	0.75
Feb		1.00		1.00		1.00		
Mar		0.87		0.75		0.38		0.18
Apr		0.75		0.30		0.32		0.05
May		0.77		0.17		0.27		0.07
Jun		0.85		0.23		0.46		0.06
Jul		0.71		0.62		0.65		1.00
Aug		0.46		0.56		0.75		1.00
Sep		0.42		0.75		0.26		0.85
Oct		0.51		0.93		0.28		0.94
Nov		0.15		0.15		0.53		0.96
Dec		0.86		0.55		0.24		0.93
Average	0.85	0.62	0.75	0.55	0.90	0.43	0.45	0.58
Application	Monthly		Annual		Monthly		Annual	

Table 9. Temperature Differences between Annual and Monthly Parameters (△: increase, ▼: decrease)

Month	Temperature Differences (°C)							
	WSC		BETA		EXH2O		CBHE	
Jan	0.01	▼	0.01	△	-	-	-	-
Feb	0.25	▼	0.01	△	-	-	0.01	△
Mar	-	-	0.05	△	0.12	△	0.04	△
Apr	-	-	0.10	▼	0.32	▼	0.05	▼
May	-	-	0.36	▼	1.03	▼	0.06	▼
Jun	-	-	0.40	▼	0.98	▼	0.05	▼
Jul	-	-	0.61	▼	1.64	▼	0.04	▼
Aug	0.16	▼	0.24	△	0.71	▼	0.05	▼
Sep	0.08	▼	0.20	△	0.25	△	0.03	▼
Oct	-	-	0.15	△	0.44	△	0.07	▼
Nov	0.48	▼	0.11	▼	0.26	▼	0.02	△
Dec	-	-	0.06	△	0.22	△	0.06	▼
Average	0.11	▼	0.20	▼	0.51	▼	0.03	▼

4.4 민감도 분석 결과

본 연구에서 제시한 월 단위 매개변수의 적용성을 확인하기 위해 이전에 진행된 연 단위 매개변수로 모의한 수온과 비교하였다. 각각 진행된 수온모의의 오차평가는 절대평균오차(Absolute Mean Error; AME)와 평균제곱오차의 평방근(Root Mean Square Error; RMSE)로 나타내었다(Table 10). 보정년도인 2010년과 검증년도인 2011년의 수온모의를 진행한 결과 2010년의 경우 월 단위 매개변수로 진행된 수온모의는 연 단위 매개변수로 진행된 수온모의보다 오차의 평균, 표준편차, 최대값이 줄어든 결과를 나타냈다. 2011년의 경우에는 오차의 평균, 표준편차, 최대값이 증가하였지만 증가폭이 크지 않고 수온보정 시 기준이 되는 수온오차의 최대값이 1°C를 넘지 않기 때문에 이러한 민감도 분석을 통해 선정된 월 단위 매개변수로 진행된 수온모의결과는 연 단위 매개변수로 임의의 값을 사용하여 모의한 수온결과보다 합리적이라고 판단된다.

CE-QUAL-W2모형의 경우 저수지수질모형의 수온모의에 있어서 수온 매개변수 중 WSC와 EXH2O의 경우에는 월단위 매개변수 적용이 가능하며 BETA와 CBHE의 경우에는 연단위 매개변수의 적용만이 가능하도록 되어 있다. 그러나 한편 월단위 매개변수의 적용이 가능한 모형에서도 편의상 연단위 매개변수를 사용하는 것이 수온검보정에 있어서 일반적 관행이다. 하지만 상기 결과에서 보듯 특히 BETA와 EXH2O의 경우 연단위 매개변수는 월단위 매개변수에 비하여 상당한 모의편차를 보일 수 있다는 점도 간과해서는 안 될 것으로 사료된다.

5. 결 론

다목적댐인 합천댐유역을 대상으로 CE-QUAL-W2의 수온 매개변수를 보정하기 위하여 수온 성층화 모의를 위한 바람차폐 및 복사열 매개변수의 민감도 분석을 실시하였다. 합천댐의 2010년과 2011년의 유량 및 수온자료를 이용하여 각각 보정년도와 검증년도로 선정하였다. 민감

도 분석을 실시한 WSC, BETA, EXH2O, CBHE에 대한 민감도 분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 바람차폐 매개변수인 WSC와 복사열 매개변수인 BETA, EXH2O가 공통적으로 수온성층화 현상이 시작되는 봄에서 저수지 물의 밀도가 안정화에 접어드는 가을(4~9월)의 수온 차이가 크게 나타났다. 또한 바닥 열 교환계수인 CBHE는 8~11월에 민감도가 높은 기간임을 알 수 있었다.
- 2) 월 모의 수온의 차이가 1°C 이상 나타나는 수심대를 선정한 결과 WSC는 모든 수심대에서 연 평균 모의 수온변화가 0.5°C로 큰 변화를 보이지 않아 민감도 높은 수심대가 뚜렷하게 나타나지 않았다. BETA는 수심 1~9m 구간, EXH2O는 수심 8~14m 구간으로 복사열 관련 매개변수는 수표면과 가까운 표층과 수온약층에 영향을 미치는 것을 확인하였다. CBHE는 바닥에서부터 12m구간으로 심층의 수온 변화에 관련이 있음을 알 수 있었다.
- 3) 월 단위로 매개변수 모의가 가능한 WSC와 EXH2O는 각 월에 적정 매개변수 값을 산정하였고, 연단위로만 모의 가능한 BETA와 CBHE는 각 월에 산정한 매개변수의 값을 평균하여 하나의 값으로 나타내었다. 월단위 매개변수가 연단위 매개변수보다 실측 수온과의 차이가 얼마나 개선되었는지 확인하기 위해 연직 평균수온 절대오차를 확인 한 결과 WSC와 CBHE는 각각 연 평균 0.11°C, 0.03°C 소폭 감소하였고, BETA와 EXH2O는 각각 연 평균 0.20°C, 0.51°C 감소를 보였다. 월단위 매개변수는 연단위 매개변수에 비하여 수온오차 개선도가 큰 것을 확인하였고, 수온이 최고로 상승하는 5월에서 8월까지의 기간에 더욱 뚜렷하였다.

수온 성층화 모의를 위한 바람차폐 및 복사열 매개변수의 민감도 분석을 진행함으로써 각 매개변수가 영향을 미치는 기간 및 수심대를 파악하고, 모의수온과 관측수온의 비교를 통해 적정매개변수를 선정하였다. 민감도 분석을 통해 선정된 월단위 매개변수로 진행된 수온모의결과는

Table 10. Evaluation of Water Temperature Simulated using Annual and Monthly Parameters

Year	Application	AME	RMSE
2010	Annual Parameters	0.683*±0.246** (1.178***/0.298****)	0.882*±0.307** (1.508***/0.415****)
	Monthly Parameters	0.659*±0.219** (1.015***/0.344****)	0.835*±0.288** (1.015***/0.398****)
2011	Annual Parameters	0.547*±0.156** (0.787***/0.267****)	0.679*±0.119** (0.847***/0.433****)
	Monthly Parameters	0.661*±0.156** (0.845***/0.273****)	0.747*±0.147** (0.975***/0.291****)

*: Average, **: Standard Deviation, ***: Max, ****: Min

연단위 매개변수로 임의의 값을 사용하여 모의한 수온결과보다 정확도 개선이 이루어짐을 확인할 수 있었으며, 특히 조류 및 탁수발생이 빈번한 5~8월의 경우에는 더욱 그러하였다. 비록 월단위 매개변수 산정 시 월 1회 측정자료를 해당월의 대푯값으로 가정하여 수온분석이 실시되었지만, 수온회귀식과 같은 방법을 추가적으로 수행하여 실측자료의 한계를 보완하려고 하였으며, 추후 모형 검정 결과의 신뢰성을 높이기 위해서 수온성층이 일어나는 월의 측정자료 확보가 절대적으로 필요하다고 사료된다. 본 연구의 결과는 추후 수온변화에 큰 영향을 받는 조류 모의와 수상태양광 발전시설에서 솔라패널의 태양복사에너지의 차단으로 인한 조류억제효과 등을 추정하는 등 수온의 경우 작은 온도차이로 인해서 식생의 변화가 확연히 다르게 나타나므로 실측자료가 절대적으로 부족한 수온을 입력값으로 진행되는 저수지환경변화를 분석하는 연구에 기초가 될 것으로 기대한다.

References

Caffrey, A., Hoyer, M., and Canfield, D. (2007). "Factors Affecting the Maximum Depth of Colonization by Submersed Macrophytes in Florida Lakes." *Lake and Reservoir Management*, Vol. 23, Issue. 3, pp. 287-297.

Chang, H., and Lawler, K. (2011). "Impacts of climate variability and change on water temperature in an urbanizing Oregon basin, USA." *IAHS-AISH Publication*, Vol. 348, pp. 123-128.

Chung, S.W., Oh, J.K., and Ko, I.H. (2005). "Simulations of Temporal and Spatial Distributions of Rainfall-Induced Turbidity Flow in a Reservoir Using CE-QUAL-W2." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 38, No. 8, pp. 655-664.

Cole, T.M., and Well, S.A. (2004). "CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2 User Manual." *U.S. Army Corps of Engineers*

Kim, Y.H., Kim, B.C., Choi, K.S., and Seo, D.I. (2001). "Modelling of Thermal Stratification and Transport of Density Flow in Soyang Reservoir Using the 2-D Hydrodynamic Water Quality Model, CE-QUAL-W2." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 15, No. 1, pp. 40-49.

Korea Water Resources Corporation (2007). "Dam Operation Practices Handbook."

Na, E.H., Ahn, K.H., and Park, S.S. (2002). "A Modeling Study of Seasonal Overturn and Vertical Thermal Profiles in the Paldang Lake." *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 24, No. 5, pp. 901-910.

Okudo, A. (1971). "Oceanic Diffusion Diagrams." *Deep Sea Research*, Vol. 18, Issue. 8, pp. 789-802.

Williams, D.T., Drummond, G.R., Ford, D.E., and Robey, D.L. (1980). *Determination of Light Extinction Coefficients in Lakes and Reservoirs*. Surface Water Impoundments, Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments, American Society of Civil Engineers, pp. 1329-1335.

Yang, Z., Khangaonkar, T., DeGasperi, C., Breithaupt, S., and Marshall, K. (2002). *Temperature stratification and water quality modeling for Lake Simtustus, Oregon*. Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the Seventh International Conference, pp. 765-782.

Yi, H.S., Jeong, S.A., Park, S.Y., and Lee, Y.S. (2008). "Modeling Study of Turbid Water in the Stratified Reservoir using linkage of HSPF and CE-QUAL-W2." *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 30, No. 1, pp. 69-78.

논문번호: 13-079	접수: 2013.10.03
수정일자: 2013.11.01	심사완료: 2013.11.01