

연구논문

용담호 수온성층해석을 위한 유입수온 회귀분석 모형 개발

안기홍* · 김선주** · 서동일***

낙동강유역환경청*, 한국수자원공사 댐·유역관리처**, 충남대학교 환경공학과***
(2011년 3월 25일 접수, 2011년 8월 11일 승인)

Development of the Inflow Temperature Regression Model for the Thermal Stratification Analysis in Yongdam Reservoir

Ahn, Ki Hong · Kim, Seon Joo · Seo, Dong Il

NAKDONG River Basin Environmental Office Ministry of Environment*,
Dept. of Dam & Watershed Managemen, K-water**, Dept. of Environmental Eng. Chungnam National Univ.***
(Manuscript received 25 March 2011; accepted 11 August 2011)

Abstract

In this study, a regression model was developed for prediction of inflow temperature to support an effective thermal stratification simulation of Yongdam Reservoir, using the relationship between gaged inflow temperature and air temperature. The effect of reproductability for thermal stratification was evaluated using EFDC model by gaged vertical profile data of water temperature(from June to December in 2005) and ex-developed regression models. Therefore, in the development process, the coefficient of correlation and determination are 0.96 and 0.922, respectively. Moreover, the developed model showed good performance in reproducing the reservoir thermal stratification. Results of this research can be a role to provide a base for building of prediction model for water quality management in near future.

Keywords : regression model, inflow temperature, thermal stratification, EFDC, Reservoir

1. 서론

현재 산업발달과 수자원의 환경의 변화로 사전적 수질관리에 대한 중요성이 커지고 있다. 국내의 주요 수자원은 주로 댐과 저수지를 통해 확보되고 있고 더구나 4대강살리기 사업 등으로 하천의 성격이 변화되고 있어 저수지와 보 등에 대한 해석은 매우 중

요하다. 저수지 수질거동을 효과적으로 해석하기 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. 특히 저수지 수체의 수온 성층화는 저수지의 수직혼합과 수온, 체류 시간, 용존산소, 영양염류 농도 등 수질환경에 영향을 미치므로 이에 대한 정확한 분석은 수질관리에 있어 필수적이다. 또한 정확한 수체거동해석을 기반으로한 저수지 수질관리를 위해서는 3차원 모형 도입이 예측적, 예방적 수질관리를 위한 필수적인 사항이며, 저수지 수질관리 선진화를 위한 세계적인 흐름이라 할 수 있다(안기홍, 2009).

Elçi 등(2007) 등은 저수지 유사이송과 성층화의 관계에 대해 연구하였고, Zou 등(2006)은 EFDC 모델을 이용하여 TMDL 지원도구로서의 재현성 검토를 위해 수온 모델링을 실시하여 그 재현성을 확인한 바 있다. 그리고 Nazariha 등(2009)은 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 저수지 수온성층화를 예측하는 등 수온성층화에 대한 연구사례는 매우 많다.

국내에서도 정세웅 등(2009)은 3차원 모형인 ELCOM을 이용하여 대청호의 수온성층을 모의한 바 있고, 이상욱 등(2003)은 2차원 수리·수질해석 모형을 이용하여 수온성층현상에 대한 재현성을 검토한 바 있다. 또 이진우 등(2010)은 3차원 모형을 이용하여 저수지 수체의 수온성층흐름에서 바람에 의해 발생하는 순환흐름을 해석하고자 하였다. 그리고 미지의 값을 통계자료로부터 산정하고자 하는 회귀분석모형은 홍수예측(이범희, 2010), 저수량 지역빈도 분석(김상욱 등, 2008), 일별 암모니아성 질소 예측(정세웅, 2003) 등 다양한 분야에 적용된 바 있다.

본 연구대상유역인 용담댐 유역은 유역수자원 활용계획 및 과학적인 다목적댐 운영방안을 마련하기 위하여 2001년 수자원 시험유역으로 지정되어 수문 자료 생산, 물수지 운영, 수질관측 등 다양한 조사가 수행되었다. 이때 생성된 양질의 자료를 이용하여 이요상 등(2008)은 WASP를 이용하여 수질관리 시스템을 구축한 바 있으며, 노준우 등(2010)은 1차원 모형을 이용하여 수온변동을 모의한 바 있다. 본 연구도 이러한 연구의 연장에서 용담댐 유역에 적

합한 하천유입수온 회귀모형을 개발하고 개발된 모형을 이용한 수온성층화 재현성 여부를 파악하여 향후 수질관리 도구로서 활용성을 가늠해 보고자 한다. 특히, 기존에 구축되어 있는 하천유입수온 회귀분석모형과의 통계지표 비교를 통해 정량적인 재현성 검토를 파악하고자 하였다.

II. 자료의 구축

저수지내 유입되는 하천수의 수온은 저수지 수온 성층화에 매우 큰 역할을 담당한다. 저수지 수온(밀도) 성층화 정도, 강도 및 그 형성에 영향을 미치는 주요한 요인으로는 물의 밀도, 태양복사, 대기와 수체 사이의 에너지 전이, 호수형태 그리고 이류와 바람에 의해 유발되는 혼합현상 등을 들 수 있다. 이러한 요인들을 반영하여 수체에 대한 분석이 이루어지기 위해서는 분석모형에 대한 해당 요인의 반영뿐 만 아니라 유입수온의 반영이 매우 중요하다. 하지만 호소 내 수온측정이 이루어지는데 반해 하천에서 호소 내 유입되는 지점에서의 하천수 수온측정은 이루어지지 않고 있다. 이에 일반적으로 회귀분석모형을 통해 하천에서의 유입수온을 산정하게 된다.

회귀분석이란 객관적으로 나타난 자료를 바탕으로 독립변수와 종속변수간의 상호관계(선형 혹은 비선형관계 등)를 분석하는 기법이다. 이러한 회귀분석은 변수들간의 관계를 정형적으로 표현할 수 있으므로 독립변수와 종속변수간의 미래 추이를 예측하고자 할 경우 사용이 가능하다. 회귀분석에 사용되는 변수는 크게 예측에 이용되는 독립변수(independent variable)와 독립변수의 변화에 따라 영향을 변수로 예측되어지는 변수인 종속변수(dependent variable)로 구분된다.

본 연구의 대상지역인 용담호 유역의 경우 저수지내 유입되는 하천에서의 실시간 유입수온 측정이 이루어지지 않고 있다. 이에 국내 다목적댐 중 용담댐과 위·경도가 근접하고 연평균기온이 12.55℃로 유사하며, 실시간 하천 유입수온 측정이 이루어지

고 있는 임하댐 청송지점의 2005년 1월부터 2009년 12월까지 수온의 시자료와 안동기상대 기온의 시자료로부터 선형 관계의 유입수온 회귀분석모형을 개발하였다.

III. 저수지 수온성층해석

1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 금강유역에 있는 용담다목적댐이다. 용담다목적댐은 유역면적 930km²로서 금강유역 면적 9,886km²의 약 9.45%를 점유하고 있다. 동경 127° 31' 40", 북위 35° 56' 30"에 댐축이 위치하며 저수지 수변길이는 약 60km에 이른다. 용담댐 유역 동측은 국립공원 덕유산 향적봉(EL. 1,614m)을 중심으로 동남측은 낙동강의 지류인 황강 유역과 경계를 이루고 유역의 남측으로 장안산(EL. 1,236.9m), 신무산(EL. 896.8m), 팔공산(EL. 1,151m), 성수산(EL. 1,059.2m), 마이산(EL.

678m) 등을 경계로 하여 섬진강 유역과 접하며, 서측으로는 장수산(EL. 1,125.9m)을 경계로 만경강 유역과 접하고 있다. 행정상으로 전라북도 무주군, 진안군, 장수군에 포함된다. 그림 1은 본 연구대상 지역인 용담호 유역을 나타내고 있다.

2. 수치해석모형

수온성층해석의 재현성 평가를 위해 본 연구에서는 대표적인 3차원 모델인 EFDC 모형을 이용하였다. EFDC 모형은 유동 및 물질수송을 모의하는 다변수 유한차분 수치모형으로서 초기에 Virginia Institute of Marine Science(Hamrick, 1992)에서 개발되었으며, 현재는 미국 환경청(EPA)과 Tetra Tech, Inc.에서 개발·관리되고 있는 3차원 수리동역학 모델이다. 하천, 하구, 호소, 해역 등 다양한 하천환경에 적용가능하고, 유체의 이동, 염분과 수온의 모의 외에도 부유물질을 cohesive-noncohesive로 나누어 거동을 해석할 수 있는 기



그림 1. 용담호 유역

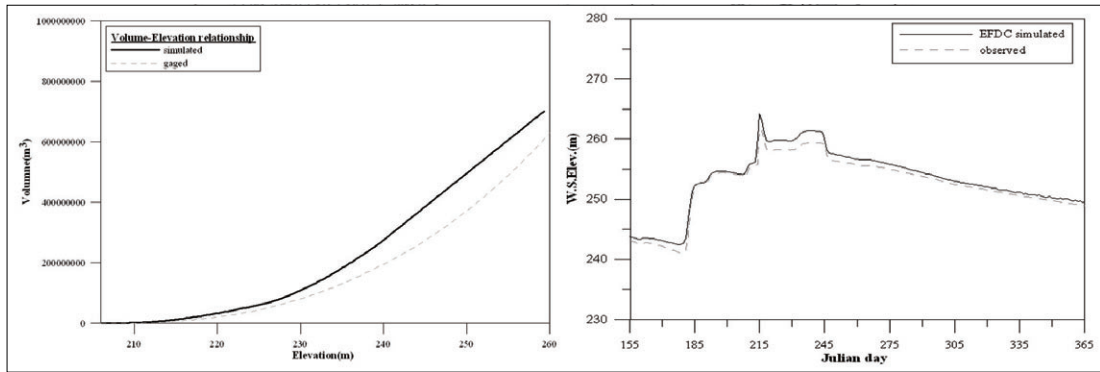


그림 2. 수위체적관계 및 수위 재현성 검토

능이 포함되어 있다. 뿐만 아니라 수심이 얇은 수체에 대한 wet/dry 현상을 모의할 수 있어 인공습지 등에서의 유동을 모의할 수 있는 장점이 있다. EFDC 모형은 국내외적으로 많은 분야에 적용된 연구사례가 있다. 대표적으로 미국의 버지니아주 James 강(Hamrick, 1995)과 플로리다주 Okeechobee 호 (Jin and Ji, 2001) 등 다양한 수역에 대한 연구가 있고, 국내에는 평택호(이정우, 2005), 한강(유하

나, 2007) 등의 예를 찾아 볼 수 있다.

본 연구를 위한 EFDC 모형의 격자구성은 수평방향 372개, 수직층 10개인 총 3,720개로 구성하였다. 그림 2는 지형격자 구성의 적정성과 수위계산에 대한 검토를 위해 수위-체적관계곡선식과 실제 관측수위를 비교한 결과이다. 모의치와 실측치의 비교는 통계지표인 AME, RMSE, R^2 를 적용하였다. 수위-체적관계의 경우 RMSE가 1.931×10^7 , AME

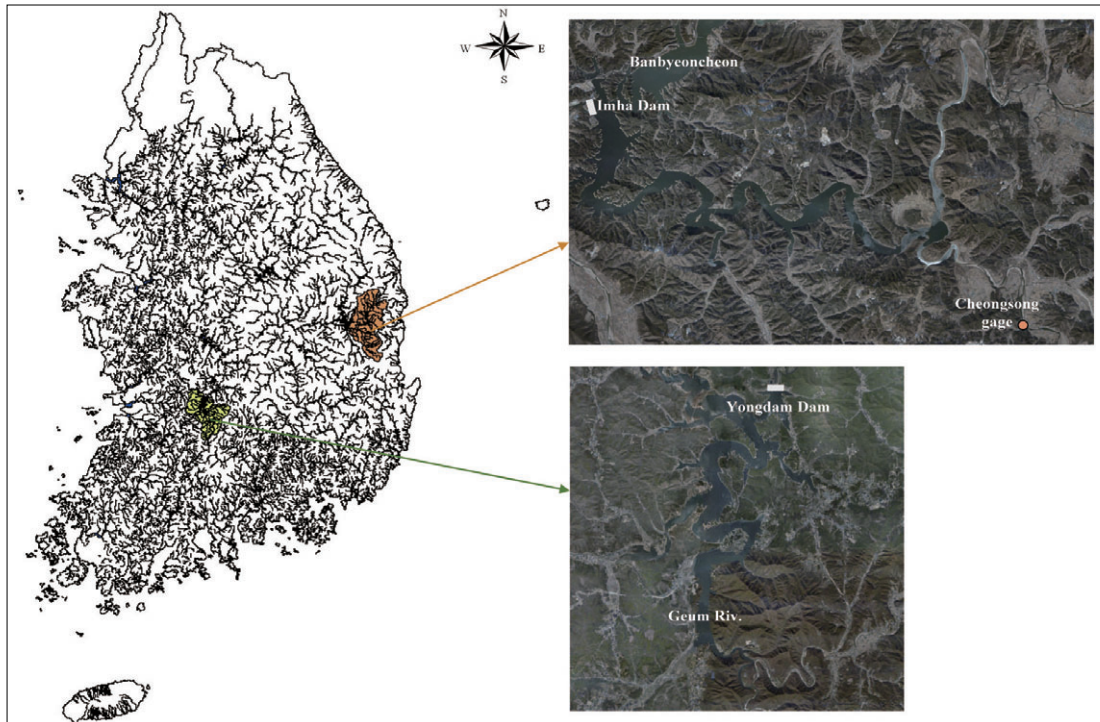


그림 3. 유입수 수온 측정지점 위치

는 1.894×10^7 , 실제 관측수위의 경우 RMSE는 0.793, AME는 0.603로 전반적으로 실제 양상을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

3. 유입수온 회귀분석 모형

본 연구에서는 ‘저수지 3차원 유체거동 및 수질모의 모형 적용성 평가(K-water, 2009)’ 결과를 이용하여 기존 연구에 사용된 몇 가지 통계형 모형과 물리적 모형을 사용하여 유입수 수온을 예측한 방법 가운데, 기온과 수온의 선형관계를 가정한 DLine 모형, 단계적 회귀분석 기법(Stepwise Linear Regression Method)를 적용한 DLine 3 모형을 본 연구에서 도출한 회귀분석모형과 수온성층 재현성 검토에 활용하였다. 본 연구에서 수행한 회귀분석모형은 용담댐과 지리적 특성이 유사하고 실시간 하천 유입수온 측정이 이루어지고 있는 임하댐과 안동기상대의 자료를 활용하였다. 2005년부터 2009년까지 측정한 유입수온과 기온자료를 활용하여 기온과 수온의 선형관계를 이용한 Imha 모형을 개발하였다. 회귀분석 모형의 상관계수는 0.96, 결정계수는 0.92, 그리고 P값은 0.000으로 유의한 값을 보여주었다. 그림 3은 유입수 수온 측정지점 위치를 나타내고 있고, 그림 4는 유입수 수온(임하댐)과 기온(안동 기상대)자료의 상관관계를 나타내고 있다. 표 1은 수온성층 재현성 비교를 위해 본 연구에서 사용한 유입수 수온 모의 관계식을 나타내고 있다. 개발된 모형을 적용하여 실측자료

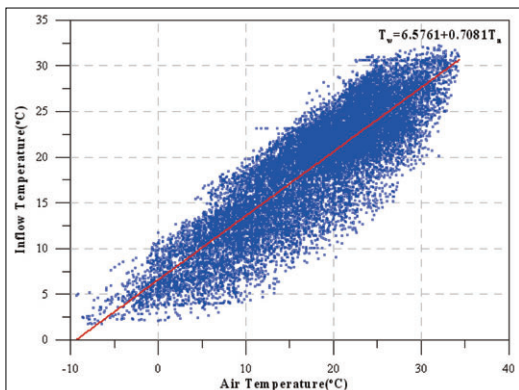


그림 4. 유입수 수온과 기온과의 상관관계

표 1. 유입수 수온 예측모델

구분	Model Equation	AME	RMSE	R ²
DLINE 1	$T_w = 6.445 + 0.709T_a$	1.486	1.842	0.844
DLINE 3	$T_w = 5.118 + 0.6868T_a - 0.0122Q$	1.380	1.672	0.919
Imha	$T_w = 6.5761 + 0.7018T_a$	1.684	1.982	0.922

와 비교 검증한 결과, 본 연구에서 개발한 Imha 모형이 가장 오차가 작았으며, 결정계수가 높게 나타났다. 그러나 모든 모형이 강우시 급격히 떨어지는 하천수온 변화를 모의하는 데는 한계를 보였다. 강우시 하천수온 변동은 탁수의 밀도류 해석 등과 같은 저수지 수질관리를 위해서는 매우 중요한 요소이므로 이를 뒷받침해 줄 수 있는 실시간 수온 측식이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4. 하천 유입수온 산정방식에 따른 수온성층 재현성 비교

저수지 3차원 유체거동 및 수질모의 모형 적용성 평가(K-water, 2009)의 자료를 이용하여 몇 가지 통계형 모형과 물리적 모형을 수온성층 재현성 비교에 활용하였다. 기온과 수온의 선형관계를 가정하여 하천 유입수온을 예측한 DLine 1 모형, 단계적 회귀분석 기법(Stepwise Linear Regression Method)를 적용한 DLine 3 및 본 연구에서 개발된 Imha 모형을 비교·검토하였다. 모의기간은 2005년 6월부터 12월까지 약 7개월간이고, 입력조건으로는 수온계산 방식은 CE-QUAL-W2에서 계산하는 Equilibrium Temperature 식을 사용하였다. 그리고 수직격자수는 40개, 취수탑에서의 취수 방법은 해당기간의 취수위치인 15m 중층취수를 사용하였다. 각 월별 수심별 수온성층 재현성 결과는 그림 5와 같으며, 표 2는 유입수온 산정방식에 따른 수온 성층 재현성 수행 결과를 통계 지표인 AME, RMSE, R²을 적용하여 비교한 결과이다. 그 결과 평균적으로 R²은 DLine 1의 경우 0.925, DLine 3의 경우 0.915, Imha 모형의 경우 0.933으로 기존 연구에서 수행한 DLine 1과 DLine 3의 경우보다 새로 적용한 Imha 모형이 보다 나은 수온 성층 재현성 수행 결과를 보였다. 또한 수심별 수온 성층화

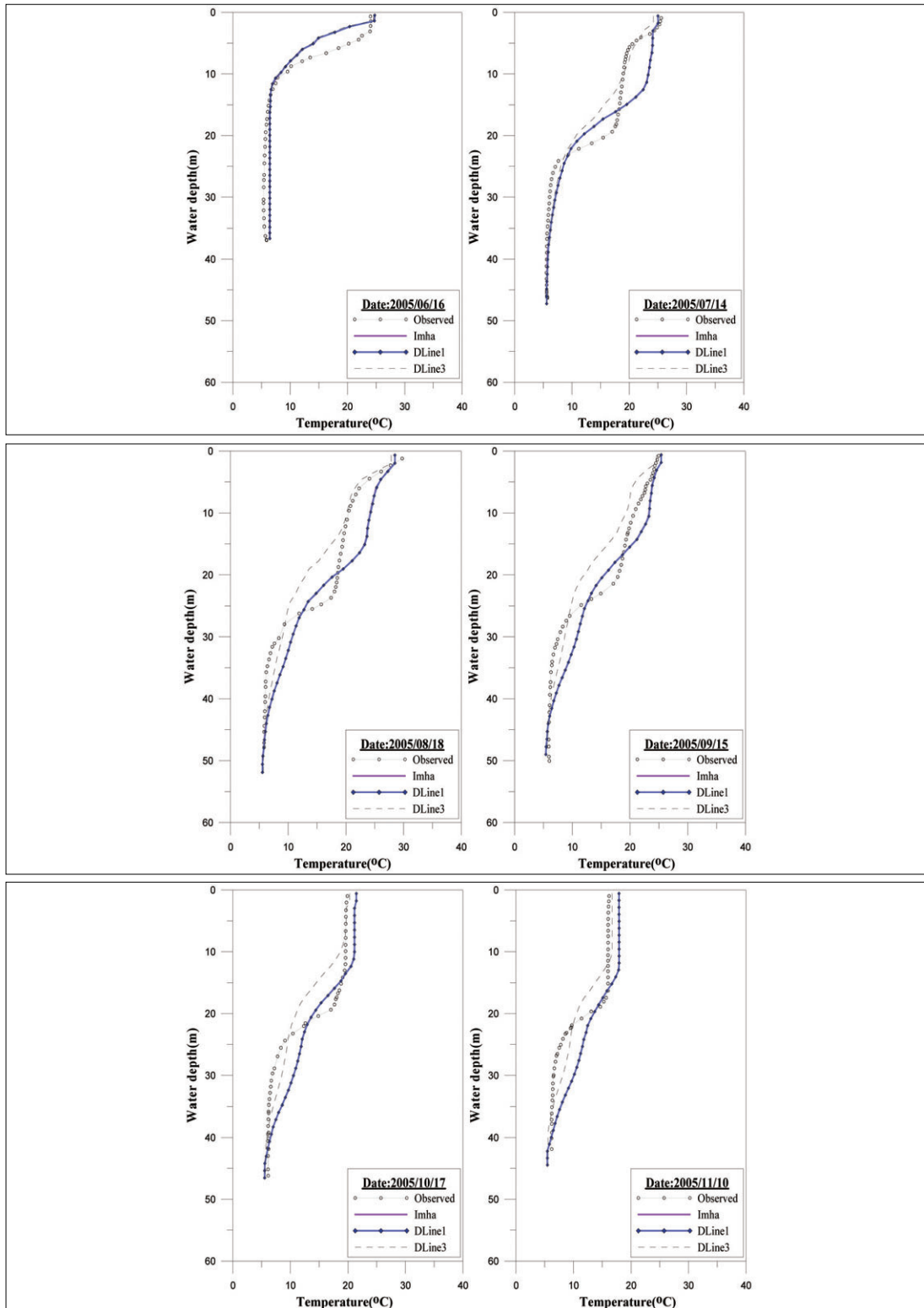


그림 5. 월별 수온성층화 재현성 검토

표 2. 유입수온 산정방식에 따른 수온 성층 재현성 검토

구 분	AME(℃)			RMSE(℃)			R ²		
	DLine 1	DLine 3	Imha	DLine 1	DLine 3	Imha	DLine 1	DLine 3	Imha
2005/6/16	1.396	1.396	1.383	2.141	2.141	2.134	0.922	0.922	0.923
2005/7/14	1.690	1.108	1.676	2.310	1.639	2.294	0.938	0.952	0.939
2005/8/18	1.719	1.719	2.251	2.560	2.560	2.590	0.891	0.891	0.933
2005/9/15	1.648	1.584	1.632	1.951	2.140	1.937	0.959	0.939	0.959
2005/10/17	1.637	1.534	1.633	1.973	2.267	1.967	0.933	0.882	0.933
2005/11/10	2.165	1.118	2.157	2.480	1.381	2.471	0.909	0.903	0.909

현상의 재현성 측면에서도 기온과 유량과의 관계로 하천 유입수온을 예측하는 DLine 3 모형 보다 나은 결과를 보였다. 이는 여름철 강수로 인해 유입유량 변동이 심한 2005년 상황을 미루어볼 때 독립변수로서의 유량이 정확한 수온을 반영하기에는 어려웠던 것으로 판단된다. 매년 하천유입 수온과 기온의 상관관계는 강수의 상황에 따라 변화되므로 이에 대한 현장조사가 보다 많이 시행되어야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 용담호 수온성층화에 영향을 미치는 유입하천 수온을 산정하기 위해 저수지 수온과 기온과의 관계를 고려한 회귀분석모형을 개발하였다. 또한, 개발된 회귀분석모형의 수온성층화 현상 재현성 검토를 위해 3차원 수리·수질해석모형인 EFDC모형을 이용하여 수온성층화 모의를 수행하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 저수지내 유입되는 하천수의 수온을 기온과의 선형적 상관관계를 고려하여 회귀분석을 실시하였다. 용담댐과 지리적 특성이 유사하고 실시간 하천 유입수온 측정이 이루어지고 있는 임하댐과 안동기상대의 자료를 활용하여 실시한 결과 상관계수는 0.96, 결정계수는 0.92, 그리고 P값은 0.000으로 유의한 값을 보여주었다.

2. 3차원 모형인 EFDC를 이용하여 기존에 구축된 유입수온모형인 DLine 1 모형과 DLine 3 모형을 본 연구에서 개발된 Imha 모형과 비교·검토하

였다. 용담호의 수심별 수온측정이 이루어졌던 2005년 6월부터 약 7개월간 수온 성층화현상의 재현성 여부를 검토한 결과 R²의 경우 DLine 1 모형은 0.925, DLine 3 모형은 0.915, 본 연구에서는 0.933으로 기존 연구에서 수행한 연구결과에 비해 보다 나은 수온성층 재현성 수행 결과를 보였다. 또한 수심별 수온 성층화 현상의 재현성 측면에서도 기온과 유량과의 관계로 하천 유입수온을 예측하는 DLine 3 모형 보다 나은 결과를 보였다.

3. 이는 DLine 1 모형의 경우 하천유입 수온과 기온과의 모표본자료의 수가 상대적으로 적어 상관관계를 반영하는데 어려움이 있었던 것으로 생각되고, DLine 3 모형의 경우 독립변수로서의 유량이 포함되어 여름철 급변하는 유입유량으로 인해 정확한 수온을 반영하기 어려웠던 것으로 판단된다.

결론적으로, 하천유입 수온의 직접적인 현장 모니터링을 통한 수질모델링 실사가 중요하며, 매년 하천유입 수온과 기온의 상관관계는 강수의 상황에 따라 변화되므로 이에 대한 현장조사가 보다 많이 시행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

김영성, 양재린, 이현석, 고덕구, 2007, 용담댐 수자원 시험유역, 한국수자원학회지, 물과미래, 40(6), 48-53.
 김상욱, 이길성, 성진영, 2008, Bayesian 다중회귀분석을 이용한 저수량(Low flow) 지역빈도 분석, 한국수자원학회 학술대회논문집, 169-173.

- 노준우, 김상호, 신재기, 2010, 1차원 동적수질모형을 활용한 용담댐 하류하천의 수온변동 모의, 수질보전, 26(2), 356-364.
- 안기홍, 염경택, 반양진, 손병용, 변창영, 2009, 국내·외 저수지 수리·수질 모델의 활용방안 및 발전방향 - 3차원 수리·수질 모델링을 중심으로, 한국수자원학회지, 42(8), 83-92.
- 유하나, 서동일, 2007, 한강 하류에 대한 정상상태 모델 QUAL2E와 비정상상태 모델 WASP7.2 동시 적용에 관한 연구, 대한상하수도학회 춘계학술대회.
- 이범희, 2010, 회귀분석에 의한 도시홍수 예보시스템의 개발, 대한토목학회지 논문집, 30(4B), 347-359.
- 이상욱, 서동일, 정세웅, 2003, 2차원 수리, 수질모델(CE-QUAL-W2)를 이용한 대청호 수온성층현상의 모델링, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 및 정기총회, 676-678.
- 이요상, 고덕구, 이해숙, 정선아, 2008, 용담댐 저수지 수질관리시스템 적용성 평가, 환경영향평가, 17(4), 235-242.
- 이정우, 2004, 3차원 수리수질모형(EFDC)을 이용한 저수지의 수질모의에 관한 연구, 석사학위논문, 충남대학교.
- 이진우, 김형준, 조용식, 2010, 수온성층흐름에서 바람에 의해 발생하는 순환흐름을 해석하기 위한 수치모형개발, 한국수자원학회논문집, 43(10), 911-920.
- 정세웅, 2003, 일별 암모니아성 질소(NH₃-N)농도 예측을 위한 다중회귀모형 개발, 한국수자원학회논문집, 36(6).
- 정세웅, 이홍수, 최정규, 류인구, 2009, 3차원 ELCOM 모형을 이용한 대청호 수온성층 모의, 한국물환경학회, 수질보전, 25(6), 922-934.
- 한국수자원공사, 2009, 저수지 3차원 유체거동 및 수질모의 모형 적용성 평가.
- Elçi S., Work P. A., Hayter E. J., 2007, Influence of Stratification and Shoreline Erosion on Reservoir Sedimentation Patterns, J. Hydra. Engrg., 133(3), TECHNICAL PAPERS.
- Hamrick, J. M., 1995, 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.
- Jin, K. R. and Ji, Z.-G., 2001, Calibration and verification of a spectral wind-wave model for Lake Okeechobee, Ocean Engineering, 29, 571-584.
- Nazariha M., Danaei E., Hashemi S. H., Doustdar A. H. I., 2009, Prediction of Thermal Stratification in Proposed Bakhtyari Reservoir with CEQUALW2, World Environmental and Water Resources Congress 2009.
- Tetra Tech., Inc., 2007, The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation.
- 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).
- www.kncold.or.kr
- www.wamis.go.kr