

연구논문

댐 방류형태가 하류 하천 수온변화에 미치는 영향 예측

박재충* · 윤진혁** · 정용문*** · 손지연* · 송영일****

K-water 밀양권관리단*, (주)휴먼플래닛**, K-water 수자원사업처***, 한국환경정책·평가연구원****
(2012년 8월 2일 접수, 2012년 9월 24일 승인)

Simulation of Water Temperature in the Downstream According to Withdrawal Types of Dam using EFDC Model

Jae-Chung Park* · Jin-Hyuk Yoon** · Yong-Moon Jung*** · Ji-Yeon Son* · Young-Il Song****

Miryang Regional Office, K-water, Gyeongnam, Korea*, Human Planet Co., Daejeon, Korea**

Water Resources Business Dept., K-water, Daejeon, Korea***, Korea Environmental Institute(KEI), Seoul, Korea****

(Manuscript received 2 August 2012; accepted 24 September 2012)

Abstract

In this study, we simulated water temperature in the downstream according to withdrawal types of dam using EFDC model. Three scenarios were assumed as water was released from the surface layer, the middle layer, and the bottom layer at intervals of 10m depth. In case of the surface layer withdrawal, the water temperature rose from March and lowered gradually after it reached a peak in August. The middle and the bottom layers effluence temperatures were lower than the surface layer temperature by maximum 15.9°C (in July), but after September, temperature inversion appeared. It was advantageous for the surface layer withdrawal to decrease cold damage and fog in downstream area and was possible to the middle and the bottom layers withdrawal from August to September. However, the reliability of model should be improved by accumulating the real-time information of water temperature.

Keywords : Cold Damage, EFDC, Selective Withdrawal, Water Temperature

1. 서론

다목적댐은 홍수량을 조절하여 수해를 방지하고 갈수기에는 안정적인 용수공급을 위한 수리시설이다. 또한, 위락공간으로서 레크레이션 편익을 제공하기도 한다(권형준, 2008). 그러나, 댐 저수지 형

상에 따른 표면 거칠기 감소, 수면적 증가는 풍향, 풍속, 안개, 기온 등의 국지기상 변화를 야기하며(전병일 등, 2002), 댐 저온수는 냉해 발생과 어류 생태에 영향을 줄 수 있다(소상영 등, 2008). 운문댐, 보령댐 등 국내 일부 댐에서는 저온수 방류에 의한 비 수확량 감소사례가 발생하였으며, 냉해 방지를

위한 품종 개량, 온수로, 온수지 조성 등에 대한 연구가 이루어지고 있다(Raney *et al.*, 1957; 연구석과 최예환, 1977; 안중국, 1993; 정상욱과 오창준, 1999; K-water, 2003). 벼의 냉해는 낮은 기온 또는 수온의 결과로 수확량이 감소하는 경우이며(농촌진흥청, 2012), 벼의 생육기간 중 논 수온의 적온은 30~34°C이며 대략 20°C 이하의 관개용수가 공급되면 피해를 입을 수 있다(정상욱과 오창준, 1999). 또한, 수온과 기온 차이로 하류지역의 안개 발생을 증가시키며(이승호, 1998), 급격한 수온변화는 어류의 생리적 저항에 영향을 미치거나 스트레스를 줌으로써 성장 불량, 질병을 발생시킬 수 있다(김익수와 배경석, 1993; 소상영 등, 2008).

댐 저수지는 봄철 기온상승에 따라 수온성층이 형성되며, 수온약층(thermocline) 하부에는 자연 하천에 비해 저온수가 분포한다. 최근에 건설되는 댐은 하류지역의 생활·자연환경 영향을 줄이고자 선택취수탑을 설치하여 탁수(turbid water), 조류(phytoplankton) 등 호소 수질상태를 고려하여 방류수심을 결정하고 있다(K-water, 2009). 우리나라 주요 하천의 상류에는 소양강댐, 안동댐, 대청댐 등 대형 댐이 건설되어 있으므로 댐 방류량과 방류형태가 하류 하천의 수문, 수질, 생태계에 영향을 준다(한정호와 안광국, 2008). 댐과 하천의 수리·수질의 예측과 현상의 해석에는 다양한 예측모델이 이용되어 왔으며, 다수의 연구자들이 모델링을 통하여 댐 저수지 또는 댐과 연계된 하천 구간의 수리, 수질, 탁수 등을 연구하였다(서동일 등, 2008; 서동일 등, 2009; 김유경과 정세웅, 2011; 노준우 등, 2011; 박재충 등, 2011).

그러나, 기존의 연구는 댐, 하천의 개별 시스템에 관한 연구가 대부분이다. 일부 연구자의 댐-하천을 연계한 보고도 댐 저수지 내의 수심별 수질특성이 하천에서 변화되는 정도를 해석하기 보다는 댐 운영자가 방류량, 방류형태, 방류 수심 등을 결정하여 방류한 물의 유하거리별 수질변동을 보고하고 있다. 댐 저수지는 열용량, 증발량의 변화로 주변 국지기상에 대한 영향 뿐만 아니라, 저수온의 댐 방류

수는 하류지역의 기상, 농작물, 하천 생태계에 영향이 예상되지만 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 댐 저수지의 선택취수 설비를 통하여 방류된 물이 하류로 유하하면서 지천 유입, 기온 영향으로 수온이 변화되는 정도를 모델로 예측·제시하고자 수행되었다. 운영 중인 댐 방류수의 유하거리별 수온을 실측하여 모델의 적용인자를 추출하고 건설 예정인 댐의 다양한 수심대에서 방류된 물의 유하거리별 수온변화를 고찰함으로써 우리나라의 신규 댐에 보편적으로 도입하고 있는 선택취수탑의 효과를 검증하고, 댐 운영자가 수온을 고려하여 탁수 배제 등의 방류 수심을 결정하는 데 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

낙동강의 지류인 내성천에 건설되고 있는 영주다목적댐과 하류 하천을 연구대상지로 하였다(그림 1). 댐 방류수온에 따른 하류 하천의 수온변화를 예측하기 위해서는 대상지의 일별, 거리별 수온자료가 필요하나 내성천은 환경부 수질측정망의 월별 수온자료만 존재한다. 따라서, 장흥댐 하류 하천(탐진강)을 연구대상지로 추가하여(그림 2) 댐 방류수온에 따른 하류 하천의 수온변화를 모델로 재현하여 산정된 매개변수를 연구대상지(내성천)에 적용하였다. 장흥댐 하류 하천은 실시간 수온 실측자료가



그림 1. 영주댐-내성천 Active cell 구성도



그림 2. 장흥댐-탐진강 Active cell 구성도

존재한다.

영주댐은 2009년부터 낙동강의 지류인 내성천에 건설되고 있는 다목적댐이며, 장흥댐은 탐진강 수계에 건설된 다목적댐으로 2007년에 준공되었다. 장흥댐과 영주댐의 저수용량은 각각 191.0백만 m^3 , 181.1백만 m^3 이다. 영주댐에서 방류된 물은 내성천을 통하여 낙동강에 합류되며, 장흥댐에서 방류된 물은 탐진강을 유하하여 남해(강진만)로 유입된다.

2. EFDC 모델

수온변화 모의에 3차원 유동모델인 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)를 사용하였다. 수질 모델, 부유사 이동 및 독성물질 모델과 연결된 통합 버전의 모델로도 사용되고 있는 EFDC는 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유사의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동·반응 등의 모의가 가능하다. EFDC 모델은 모의 수체의 연속 시간에 대해 수평 및 수직변화를 확인할 수 있으며, 본류, 지류, 점·비점오염원 등의 유입·유출과 취수 및 댐 여수로 방류 등의 시간 변화를 고려할 수 있다. 모델의 입력자료는 지형자료, 수리·수질 매개변수, 초기·경계조건(유량, 기상자료, 수질자료), 검·보정자료 등이 있다.

3. 모의격자 및 입력자료

내성천의 모의격자는 하천정비 기본계획(국토해

양부, 2012)의 지형자료를 이용하여 영주댐 예정지로부터 하류 14km까지를 모의구간으로 설정하였다. 모의구간에는 지천인 서천이 유입되며, 수평격자 2,225개와 수직격자 2개 층으로 구성하여 댐 방류형태별로 수온모의를 실시하였다(그림 1). 셀 크기는 평균 25m×25m이며, 계산시간은 1초 간격으로 모의하였다. 내성천의 유출입량자료는 한국수문조사연보(국토해양부, 2008)에 제시된 조계수위관측소(그림 1)의 일 유량자료를 이용하여 내성천 본류와 서천의 유입량을 비유량법으로 산정하였다. 내성천과 서천의 유입 수온은 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)의 내성천4 및 영주서천2 지점의 2008년 월별 수온자료를 이용하였다. 기상자료는 영주기상관측소의 시간별 기압, 기온, 습도, 강수량, 풍향, 풍속과 안동기상대의 일사량, 전운량 및 증발량 자료를 이용하였다. 영주댐의 유출량 자료는 영주다목적댐 건설사업 환경영향평가서(K-water, 2009)의 계획 방류량을 이용하였다.

장흥댐 하류 하천(탐진강)은 댐 방류지점에서 7km 구간을 수평격자 1,075개, 수직격자 2개로 모의격자를 구성하고, 모의구간에 지천인 부산천이 유입되는 것으로 구성하였다. 초기 수온은 장흥댐 방류구로부터 유하거리별(0.1km-St. 1, 1.0km-St. 2, 6.7km-St. 3)로 2008년 3월 24일부터 5월 15일까지 30분 간격으로 측정된 값을 이용하였으며(그림 2), 수온 측정에는 onset[®]-HOBO Data Loggers를 사용하였다. 탐진강의 유출입량 자료는 국가수자원정보관리시스템(WAMIS)의 시간별 댐 운영자료를 사용하였으며, 부산천은 장흥댐 유입량을 기준으로 비유량법으로 산정하였다. 부산천의 유입 수온은 단계별 회귀분석모델인 DLINE3를 사용하였다. 용담댐 유입 하천에서 개발한 유입 수온(T_w) = $5.118 + 0.6868T_a - 0.0122Q$ 이다. DLINE3는 통계적 모델로서 지점에 따라 결과가 달라지지만, 비유량법으로 산정한 부산천 유량은 본류인 탐진강의 9% 미만이므로 수온영향은 미미할 것으로 가정하고 유환과 정세웅(2008)이 보고한 결과를 사용하였다.

4. 매개변수 산정

탐진강의 수온 실측자료가 존재하는 기간 (2008.3.24~5.15)을 대상으로 유하거리별 수온모의의를 하고 EFDC 모델의 재현성을 검토하였다. 실측치와 모의치의 오차가 최소화되도록 시행착오법으로 매개변수를 산정한 후 영주댐 하류 하천(내성천)의 수온변화를 예측하는데 이용하였다. 수온 예측의 정확도 평가는 Root Mean Square Error (RMSE; 평균제곱근오차), Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency(NSC; 모형효율성계수), coefficient of determination(R²; 결정계수) 등의 통계적 방법을 이용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}{N}}$$

$$NSC = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_M)^2}$$

$$R^2 = \left[\frac{(1/N) \sum_{i=1}^N [(O_i - O_M) \times (X_i - X_m)]}{\sigma_0 \times \sigma_X} \right]^2$$

O_i는 I일에 실측한 수온값, O_M은 실측 수온의 평균값, X_i는 I일에 예측된 모의 수온값, X_m은 모의수온의 평균값, σ₀와 σ_X는 실측 수온의 표준편차와 모의 수온의 표준편차이며 N은 모의된 기간을 의미한다. RMSE는 모델 수행의 결과가 실측치와 어느 정도의 오차를 보이는지 측정할 때 사용되는 지표로

표 1. 탐진강 지점별 수온모의 성능 평가

지 점	실측 평균(°C)	모의 평균(°C)	RMSE	NSC	R ²
St. 2	11.76	11.57	1.121	0.855	0.8618
St. 3	13.85	13.88	1.277	0.829	0.8615
평균	12.81	12.73	1.199	0.842	0.8617

표 2. 탐진강 수온보정에 적용한 매개변수

항 목	범 위	적용값
DABEDT(바닥층 두께)	1 ~ 10 meters	1
TBEDIT(바닥층 온도)	10 ~ 20 °C	10
HTBED1(열대류계수)	0.001 ~ 0.005	0.005
HTBED2(열교환계수)	1×10 ⁻⁷ ~ 15×10 ⁻⁷ m ² /s	1×10 ⁻⁷

서 일종의 평균치라 할 수 있다. NSC는 모의치가 실측치와 일치할수록 1에 근접하며, 이 값이 음수이면 실측치를 사용하는 것이 모의치를 이용하는 것보다 낫다는 것을 의미한다.

탐진강 St.2, St.3의 실측치와 모의치 수온값에 따른 보정결과, RMSE는 1.121, 1.277, NSC는 0.855, 0.829, R²는 0.8618, 0.8615로 각각 나타나 수온 예측의 재현성이 높은 것으로 평가되었다(표 1, 그림 3). 매개변수는 Hamrick(2007)이 제안한 범위에서 DABEDT(바닥층 두께), TBEDIT(바닥층 온도) 및 HTBED2(열교환계수)는 최소값을, HTBED1(열대류계수)는 최대값을 적용할 때 재현성이 높았다(표 2).

5. 경계조건 및 시나리오 구성

내성천과 서천의 유입량은 조제수위관측소(그림

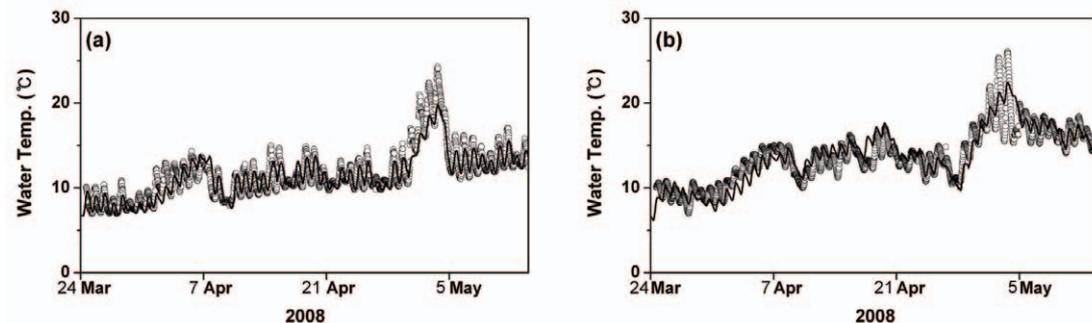


그림 3. 탐진강 지점별 수온모의 결과 (• Observed, — Simulated); (a)St. 2, (b)St. 3

표 3. 내성천과 서천의 유입 유량 및 수온 (2008년)

구 분		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
유입 유량 (m ³ /sec)	내성천	5.06	2.48	2.93	2.35	2.21	4.04	39.36	32.08	8.10	2.85	1.50	1.10
	서천	3.70	1.81	2.14	1.71	1.61	2.94	28.71	23.40	5.90	2.08	1.09	0.80
유입 수온 (°C)	내성천	5.0	6.0	12.0	15.0	20.0	20.0	30.0	25.0	25.0	22.0	14.0	8.0
	서천	7.0	9.0	13.0	16.0	23.0	21.0	31.0	24.0	25.0	23.0	17.0	11.0

표 4. 모의기간의 월별 기상변화 (2008년)

구 분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
강수량(mm)	25.6	3.4	63.9	20.2	50.5	131.2	371.1	243.3	66.8	34.3	6.6	11.0
기 온(°C)	-3.0	-3.6	4.0	10.5	15.7	18.6	24.5	21.8	18.3	11.8	3.6	-1.9
일사량(MJ/m ²)	0.36	0.46	0.56	0.67	0.62	0.65	0.54	0.52	0.44	0.44	0.32	0.29
전운량(1/10)	3.6	4.6	5.6	6.7	6.2	6.5	5.4	5.2	4.4	4.4	3.2	2.9
습 도(%)	67.6	53.9	68.3	61.8	62.4	74.2	80.1	80.1	79.3	77.0	71.9	67.7
풍 속(m/sec)	1.5	1.7	1.5	1.8	1.7	1.7	1.2	1.3	1.2	1.2	1.4	1.4

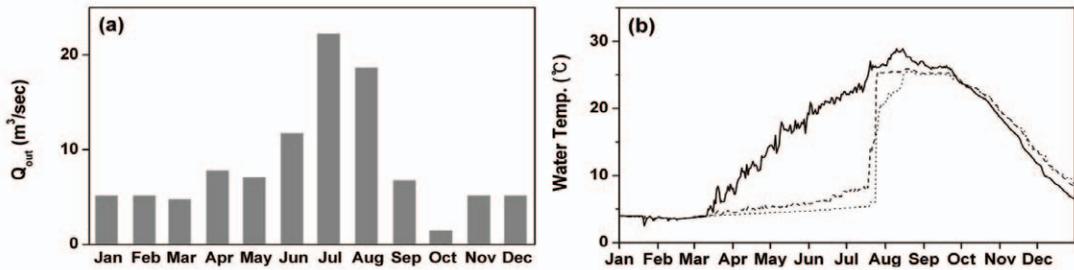


그림 4. 영주댐 방류량 및 방류 수온 (— 표층방류, --- 중층방류, 저층방류); (a)방류량, (b)방류수온

1)의 일 유량자료를 이용하여 비유량법으로 산정하였고, 유입 수온은 환경부 물환경정보시스템의 월 측정자료를 매월 15일 12시의 입력자료로 사용하였다. 내성천의 유입 유량은 최소 1.10m³/sec(12월)에서 최대 39.36m³/sec(7월)였으며, 서천은 0.80m³/sec(12월), 28.71m³/sec(7월)였다. 내성천과 서천의 유입 수온은 1월에 5.0°C, 7.0°C로 각각 최저를 보인 후 점차 상승하여 7월에 30.0°C, 31.0°C로 최고 분포를 보였다(표 3). 시간별 기상자료의 월 누계 강수량은 7월에 371.1mm로 최대였으며, 기온은 2월에 -3.6°C로 최저, 7월에 24.5°C로 최고를 보였다. 일사량, 운량 및 풍속은 4~6월이 높았으며, 습도는 7~9월에 높았다(표 4).

영주댐은 5개의 취수구를 통해 선택적으로 방류할 계획이므로(K-water, 2009), 방류수는 수심 10m 간격으로 표층부(EL.155m), 중층부(EL.145m),

저층부(EL.135m)에서 각각 방류되는 것으로 가정하여 3개의 시나리오로 구성하였다. 방류수 수온의 경계조건은 박재충 등(2010)이 CE-QUAL-W2 (Cole and Buchak, 2003)로 예측한 수온자료를 사용하였다. 방류형태별로 1~2월에는 수온차이가 없었으나 3월부터 표층방류 수온은 점차 상승하여 8월에 27.6°C로 최고를 보인 후 낮아지는 경향을 보였다. 중층과 저층방류는 유사한 경향으로 6월까지의 표층방류보다 최대 15.9°C가 낮았으나 7~8월에는 3.7°C의 차이로 감소하였다. 9월 이후에는 중·저층의 방류 수온이 표층보다 상대적으로 높아지는 역전현상을 보였다(그림 4b). 유량은 영주댐의 계획 방류량 자료이다(K-water, 2009).

III. 결과 및 고찰

1. 모델보정 및 성능평가

내성천에는 실시간 수온 측정자료가 존재하지 않으므로 환경부에서 운영하는 내성천4, 내성천5 지점의 수질측정망 자료를 이용하였다(그림 2). 월 1회 측정된 자료는 실시간 수온이 아니므로 탐진강의 실시간 수온자료로 산정한 매개변수(표 2)를 사용하여 내성천의 수온을 재현하였다. 내성천4 지점의 평균 수온은 16.83°C였으나 탐진강에서 산정한 매개변수로 모의한 평균치는 15.95°C이며, 보정한 통계치는 RMSE가 1.168, NSC가 0.977, R²가 0.9853으로 각각 나타났다. 내성천5 지점은 평균 수온 16.92°C, 모의 수온 14.64°C, RMSE 3.623, NSC 0.808, R² 0.8766으로 각각 나타났다(표 5, 그림 5). 탐진강의 평균 RMSE는 1.199로서 내성천의 2.396에 비해 모델의 신뢰도가 상대적으로 높았으나 NSC는 유사하였다. 탐진강의 R²는 평균 0.8617로서 내성천4의 0.9853보다는 낮았으나 내성천5의 0.8766과 유사한 결과를 보였다(표 1, 표 5). 내성천5는 수온이 증가하는 시기인 2~7월에 실측치보다 낮게 모의되었고 수온이 하강하는 시기에는 실측치와 유사하였다(그림 5b).

내성천의 모델보정에 사용한 수온자료는 월 1회 측정된 자료로서 측정날짜와 시간이 불분명하고 자료의 양도 부족하다. 따라서, 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 해당 하천의 유하거리별 실시간 측정 자료를 기반으로 매개변수를 산정하고 모델을 보정

표 5. 내성천 지점별 수온모의 성능 평가

구 분	실측 평균(°C)	모의 평균(°C)	RMSE	NSC	R ²
내성천4	16.83	15.95	1.168	0.977	0.9853
내성천5	16.92	14.64	3.623	0.808	0.8766
평균	16.88	15.30	2.396	0.892	0.9310

하는 추가 연구가 필요하다.

2. 댐 방류형태별 하류 하천 수온변화

심층의 고정 취수구(EL.121m)로 방류하는 안동호(상시만수위 EL.160m)의 방류수 수온이 10°C를 초과하는 시기는 6~8월로서(박재충 등, 2005), 영주댐의 중층방류일 경우 7월(12.8°C), 저층방류일 경우 8월(23.9°C)과 유사한 결과를 보인다. 영주댐 내 상·하층의 수온차이는 3월부터 증가하여 7~8월에는 20°C 이상까지 증가한다(박재충 등, 2010). 영주댐 표층에서 방류되는 수온은 3월부터 증가하여 8월에 27.6°C로서 최고를 보인 후 감소하여 2월에 3.6°C로 최저를 보였다. 중층방류는 6월까지 3.6~6.6°C의 분포를 보이다가 7월(12.8°C)부터 증가하여 8월에 25.5°C로 가장 높았다. 저층방류는 7월까지 8.4°C 이하이지만 8월에 23.9°C로 증가하고 9월에는 24.9°C로 최고였다. 방류되는 최저 수온은 방류형태별로 2월에 3.6°C로 동일하였다(표 6).

방류형태별 수온은 3월까지의 모의중점(14km)까지 2°C 미만의 차이를 보이다가 4월부터 증가하여 7월에 표층방류 24.3°C, 저층방류 8.4°C로서 최대 15.9°C까지 차이가 증가한 후 8월부터 감소하였

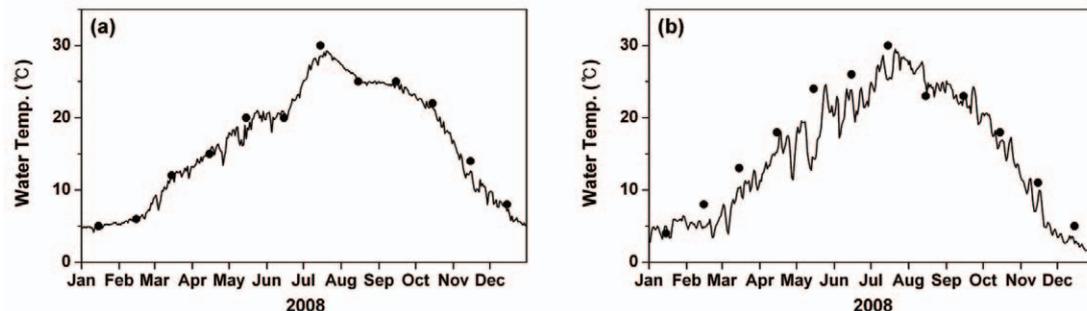


그림 5. 내성천 지점별 수온모의 성능 평가 (• Observed, — Simulated); (a)내성천4, (b)내성천5

표 6. 유하거리별 내성천 수온변화 (단위:°C)

구 분		0km	3km	6km	9km	12km	14km
1월	댐건설전	5.1	4.6	5.6	5.0	4.4	4.4
	표층방류	3.8	3.5	5.1	4.5	4.1	4.1
	중층방류	3.8	3.6	5.1	4.5	4.1	4.1
	저층방류	3.9	3.6	5.2	4.6	4.1	4.1
2월	댐건설전	6.6	5.1	6.3	5.3	4.5	4.5
	표층방류	3.6	3.5	5.7	4.9	4.3	4.2
	중층방류	3.6	3.5	5.7	4.9	4.3	4.2
3월	댐건설전	11.6	9.8	10.5	9.5	8.8	8.7
	표층방류	5.6	6.3	9.0	8.5	8.2	8.1
	중층방류	4.2	5.4	8.6	8.3	8.0	8.0
	저층방류	4.0	5.3	8.6	8.2	8.0	8.0
4월	댐건설전	15.3	13.9	15.1	14.5	14.1	14.2
	표층방류	10.9	11.8	14.2	14.0	13.7	13.9
	중층방류	5.1	9.2	13.1	13.3	13.3	13.6
5월	저층방류	4.4	8.9	13.0	13.2	13.3	13.6
	댐건설전	19.4	17.5	19.3	18.4	18.0	18.1
	표층방류	16.5	16.6	18.9	18.2	17.9	18.0
6월	중층방류	5.7	12.7	17.2	17.4	17.4	17.7
	저층방류	4.7	12.3	17.1	17.3	17.4	17.6
	댐건설전	21.3	21.2	21.7	21.7	21.5	21.5
7월	표층방류	20.8	20.9	21.6	21.6	21.4	21.5
	중층방류	6.6	12.5	18.0	19.0	19.8	20.0
	저층방류	5.1	11.5	17.6	18.7	19.6	19.8
8월	댐건설전	28.1	27.1	27.6	27.0	26.7	26.7
	표층방류	24.3	24.9	26.8	26.1	26.0	26.1
	중층방류	12.8	17.6	24.0	23.1	23.7	24.1
9월	저층방류	8.4	14.1	22.9	21.0	21.8	22.5
	댐건설전	25.6	25.5	25.2	25.4	25.3	25.3
	표층방류	27.6	27.1	25.7	26.4	26.1	26.0
10월	중층방류	25.5	25.5	25.2	25.4	25.4	25.3
	저층방류	23.9	24.1	24.6	24.7	24.7	24.8
	댐건설전	24.6	23.3	23.4	22.7	22.1	22.0
11월	표층방류	25.8	24.2	23.8	23.1	22.5	22.4
	중층방류	25.2	23.6	23.6	22.9	22.2	22.2
	저층방류	24.9	23.4	23.5	22.8	22.2	22.1
12월	댐건설전	21.2	18.2	18.8	17.2	16.0	15.8
	표층방류	21.7	18.5	19.0	17.2	16.1	15.9
	중층방류	22.4	18.9	19.1	17.3	16.1	15.9
12월	저층방류	22.3	18.7	19.0	17.3	16.1	15.9
	댐건설전	14.2	7.6	10.1	8.0	6.7	7.0
	표층방류	15.5	8.0	10.2	8.1	6.7	7.0
12월	중층방류	16.9	8.1	10.2	8.2	6.7	7.0
	저층방류	16.9	8.3	10.3	8.2	6.7	7.0
	댐건설전	7.9	3.4	4.4	3.1	2.4	2.4
12월	표층방류	8.8	3.6	4.4	3.1	2.4	2.4
	중층방류	10.8	4.0	4.4	3.2	2.4	2.3
	저층방류	11.0	4.0	4.4	3.1	2.4	2.3

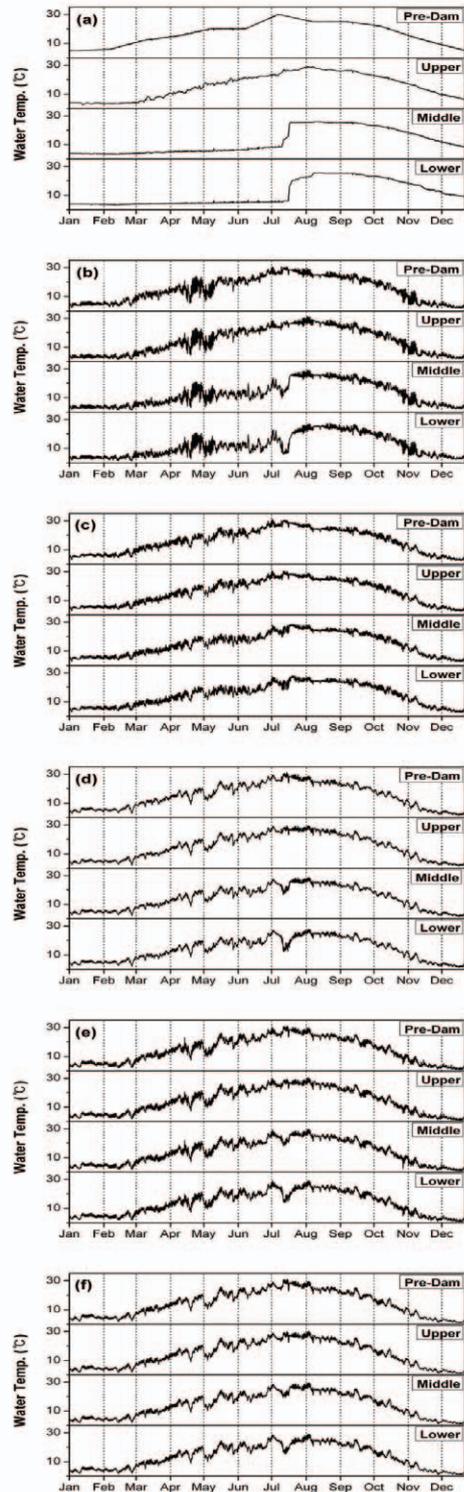


그림 6. 유하거리별 내성천 수온변화; (a) 0km, (b) 3km, (c) 6km, (d) 9km, (e) 12km, (f) 모의중점

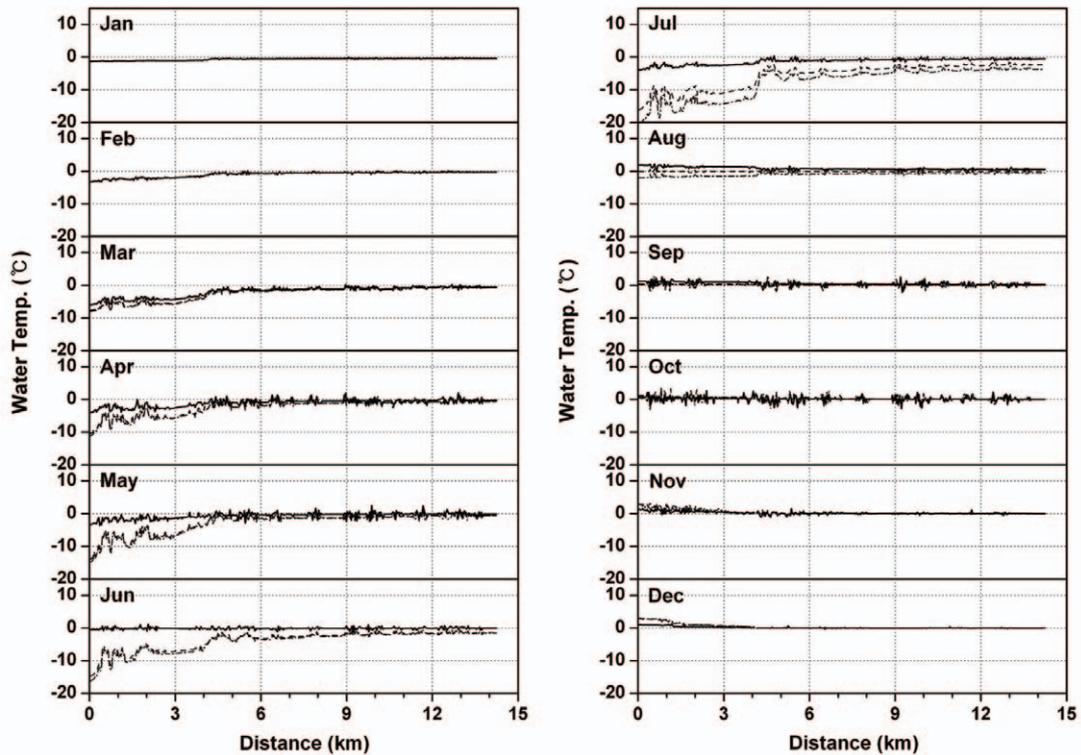


그림 7. 영주댐 건설 전 대비 방류형태별 수온 차이 (— 표층방류, ---- 중층방류, 저층방류)

다(표 6, 그림 6). 중층방류는 6월에 6.6°C로서 표층방류 20.8°C 보다 최고 14.2°C가 낮았다. 비의 관개기는 4~9월이며 수온이 20°C 이하일 때에는 냉해발생이 우려된다(정상옥과 오창준, 1999). 따라서, 댐 저온수 방류에 의한 하류지역의 냉해방지를 위해 7월까지의 표층방류를 하여야 하며 8~9월에는 저수지 수질상황 등을 고려하여 중·저층방류를 탄력적으로 결정할 수 있을 것이다.

댐 저수지에 의한 안개발생은 수면에서 수증기 공급량 증가에 의한 증발무, 방류수의 수온과 기온 차이에 의한 이류무로 대별할 수 있다(이승호, 1998). 댐에서 방류된 저온수는 상대적으로 높은 온도의 대기 중에 포함된 수증기를 냉각시켜 안개를 발생시키고, 고온수는 증발된 수증기가 찬 대기와 접촉하면서 응결되어 안개를 생성한다. 댐 건설 전(자연하천 상태)에 대한 댐 방류형태별 수온차이를 비교할 때, 8월에는 중층방류에서 수온차이가 0~0.1°C로 최소였으나 8~9월을 제외한 기간은 표

층방류가 중·저층방류에 비해 상대적으로 작았다(그림 7). 영주댐 주변의 안개는 평균 기온이 낮아지기 시작하는 8월부터 발생일수와 지속시간이 증가하는 경향을 보인다(K-water, 2009). 영주댐 방류수로 인한 하류지역의 안개발생 증가를 줄이기 위해서는 표층방류가 유리하며 8~9월에는 중·저층방류도 가능할 것으로 사료된다.

안개, 냉해 및 대부분의 물리·화학·생물학적 수질항목들은 온도 의존적이기 때문에 댐 사업자는 호소 수질관리와 하류지역의 수온 영향을 줄이기 위해 선택취수탑을 설치하고 있다. 본 연구는 댐 저수지에서 선택적으로 배제한 각기 다른 수온의 방류수가 하류로 유하하면서 지천 유입, 기상환경에 의해 변화되는 정도를 모델로 예측·비교한 데 의의가 있다. 그러나 모의대상 하천의 실시간 수온자료가 없는 상태에서 타 하천의 실측자료로 매개변수를 산정하고 월 1회 측정된 수온을 모델보정에 적용한 한계를 내포하고 있다. 따라서, 시기별, 유하

거리별 장기간의 실측자료를 축적하여 모델 보정, 매개변수 산정, 경제자료로 활용함으로써 모델의 정확도를 높임은 물론 저온수 방류 피해를 줄이고자 도입하는 선택취수탑의 효과를 검증하고, 댐 운영자가 하류지역의 수질 뿐만 아니라 안개, 냉해, 수생태계, 위락활동 등의 영향을 종합적으로 고려하여 방류수심을 결정하는 연구가 지속되어야 할 것이다.

IV. 결론

영주댐에서 선택적으로 방류된 방류수의 수온이 유하거리, 유입 지천, 기상조건 등으로 변화되는 정도를 EFDC 모델로 예측하였다. 시나리오는 수심 10m 간격으로 표층, 중층, 저층에서 각각 방류되는 것으로 구성하였다.

연구대상지의 실시간 수온자료가 없어 장흥댐 하류 하천에서 측정된 자료를 이용하여 수온변화를 재현하고, 선정된 매개변수를 영주댐 하류 하천의 수온변화 예측에 적용하였다. 매개변수는 Hamrick (2007)이 제안한 범위에서 DABEDT(바닥층 두께), TBEDIT(바닥층 온도) 및 HTBED2(열교환계수)는 최소값을, HTBED1(열대류계수)는 최대값을 적용할 때 재현성이 높았다. 표층방류의 방류수 수온은 3월부터 증가하여 8월에 27.6℃로 최고를 보인 후 점차 낮아졌으나, 중층·저층방류는 7월까지 12.8℃ 이하로 표층방류보다 최대 15.9℃가 낮았다. 댐 하류지역의 냉해 및 안개발생을 줄이기 위해서는 표층방류가 상대적으로 유리하며 8~9월에는 중층·저층방류도 가능할 것으로 판단된다. 향후 시기별, 유하거리별 실시간 수온자료를 축적하여 예측의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

사 사

장흥댐 하류 하천(탐진강)의 수온 실측자료를 제공하여 주신 서진원 박사님과 논문의 내용과 체계를 검토하여 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

- 국토해양부, 2008, 한국수문조사연보.
 국토해양부, 2012, 내성천 하천정비 기본계획.
 권형준, 2008, 소양강댐의 레크레이션 편익, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 575-582.
 김유경, 정세웅, 2011, 용담댐 하류하천의 횡방향 평균 2차원 수리·탁수모델링, 수질보전 한국물환경학회지, 27(5), 710-718.
 김익수, 배경석, 1993, 수온변화 스트레스가 붕어의 무기수온 급성독성에 미치는 영향, 환경생물학회지, 11(2), 169-176.
 노준우, 김상호, 신재기, 2010, 1차원 동적수질모델을 활용한 용담댐 하류 하천의 수온변동 모의, 수질보전 한국물환경학회지, 26(2), 356-364.
 농촌진흥청, 2012, 농업기술종합정보(www.rda.go.kr).
 박재충, 박정원, 신재기, 2006, 안동호의 중층 저산소층 형성의 요인 분석, 한국육수학회지, 39(1), 1-12.
 박재충, 박정원, 신재기, 이희무, 2005, 인공호에서 문순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성, 한국육수학회지, 38(1), 105-117.
 박재충, 최재훈, 송영일, 유경미, 강보승, 송상진, 2010, 건설 예정인 댐에서 유역유출과 취수 형태에 따른 탁수의 거동 예측, 환경영향평가, 19(3), 247-257.
 서동일, 서미진, 구명서, 우재균, 2009, EFDC-Hydro와 WASP7.2를 이용한 금강 하류의 수리-수질 연계 모델링, 상하수도학회지, 23(1), 15-22.
 서동일, 윤종욱, 이재운, 2008, QUAL2E, QUAL2K 및 CAP 모델을 이용한 금강 하류 하천구간 정상상태 수질모델링 결과 비교 분석, 상하수도학회지, 22(1), 121-129.
 소상영, 허준욱, 이정열, 2008, 수온변화에 따른 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)의 산소 소비, 아가미 호흡수 및 헤모글로빈 변화,

- 한국어류학회지, 20(4), 239-247.
- 안종국, 1993, 냉수관개가 벼 생육, 수량 및 미질에 미치는 영향, 한작지, 38(6), 554-559.
- 안중호, 한대호, 2010, 기후변화에 따른 지표수의 수온 영향평가, 수질보전 한국물환경학회지, 26(1), 133-139.
- 연구석, 최예환, 1977, 온수지에 의한 관개용수의 수온상승 효과에 관한 연구, 한국농공학회지, 19(1), 4323-4337.
- 유환, 정세웅, 2008, 용담호 유입 하천수온 예측을 위한 단계별 회귀분석모델 개발, 대한상하수도학회·한국물환경학회 2008년 공동 추계학술발표회 논문요약집, 520-521.
- 이승호, 1998, 충주호가 주변지역의 안개 특성에 미친 영향 -충주와 제천을 중심으로-, 대한지리학회지, 33(2), 165-177.
- 전병일, 김일곤, 이영미, 2002, 낙동강 수계 중의 댐 건설에 의한 주변의 국지기상환경 변화; I. 댐 건설 전·후의 기상변화 분석, 한국환경과학회지, 11(3), 161-168.
- 정상옥, 오창준, 1999, 벼의 냉수피해 감소를 위한 관개수온 조사와 대책수립, 한국농공학회지, 41(1), 52-59.
- 한정호, 안광국, 2008, 인공댐과 그 영향을 받는 하류하천의 수질변동 역동성: 사례 연구, 한국육수학회지, 41(3), 382-394.
- Cole, T. and Buchak, E. M., 2003, CE-QUAL-W2: A two dimensional, Laterally averaged, Hydrodynamic and Water quality Model, Version 3.2 user's manual, Instruction report EL-95-1, U.S Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Hamrick, J., 2007, EFDC technical memorandum - Bed Thermal Model
- K-water(한국수자원공사), 2003, 보령댐 사후 환경영향조사-농작물 냉해조사, pp.44.
- K-water(한국수자원공사), 2009, 영주다목적댐 환경영향평가서, pp.1435.
- Morrill, J. C., Bales, R. C., Conklin, M. H., 2005, Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality, Journal of Environmental Engineering, January, 139-146.
- Raney, F. C., Hagan, R. M., Finrock, D. C., 1957, Water temperature in irrigation, California Agriculture, April, 19-37.