HSPF 유역모델을 이용한 낙동강유역 실시간 수온 예측

신창민[†] · 나은혜 · 김덕길 · 김경현

국립환경과학원 물환경연구부 물환경평가연구과

Operational Water Temperature Forecast for the Nakdong River Basin Using HSPF Watershed Model

Chang Min Shin[†] · Eun Hye Na · Duck Gil Kim · Kyunghyun Kim

Water Environment Research Department, Water Quality Assessment Research Division, National Institute of Environment Research
(Received 21 November 2014, Revised 27 November 2014, Accepted 28 November 2014)

Abstract

A watershed model was constructed using Hydrological Simulation Program Fortran to predict the water temperature at major tributaries of Nakdong River basin, Korea. Water temperature is one of the most fundamental indices used to determine the nature of an aquatic environment. Most processes of an aquatic environment such as saturation level of dissolved oxygen, the decay rate of organic matter, the growth rate of phytoplankton and zooplankton are affected by temperature. The heat flux to major reservoirs and tributaries was analyzed to simulate water temperature accurately using HSPF model. The annual mean heat flux of solar radiation was estimated to 150 ~ 165 W/m², longwave radiation to -48 ~ -113 W/m², evaporative heat loss to -39 ~ -115 W/m², sensible heat flux to -13 ~ -22 W/m², precipitation heat flux to 2 ~ 4 W/m², bed heat flux to -24 ~ 22 W/m² respectively. The model was calibrated at major reservoir and tributaries for a three-year period (2008 to 2010). The deviation values (Dv) of water temperature ranged from -6.0 to 3.7%, Nash-Sutcliffe efficiency(NSE) of 0.88 to 0.95, root mean square error(RMSE) of 1.7 ~ 2.8°C. The operational water temperature forecasting results presented in this study were in good agreement with measured data and had a similar accuracy with model calibration results.

Key words : Forecast, Heat flux, HSPF, Nakdong River, Water temperature

1. Introduction

환경부에서는 2012년부터 한강, 낙동강, 금강, 영산강 등 4대강 주요 지점에 대해 향후 7일간의 수온과 클로로필-a 농도에 대해 수질예보를 시행하고 있다. 수질예측 정보는 수질예보홈페이지(<http://wqcast.nier.go.kr:8080>)를 통해 물관리 관계기관(환경부, 국토교통부, 산업통상자원부, 농림축산식품부와 그 소속기관, 지방자치단체, 한국환경공단, 한국수자원공사, 한국농어촌공사, 한국수력원자력(주), 수면관리자, 취수장·정수장)에 전파되어, 수질 악화를 미리 예측하고 대응하는 사전예방적 수질관리를 위한 기반자료로 이용되고 있다.

수질예보는 수치모델링을 이용하여 기상 및 오염원의 변화에 따른 장래의 수질변화를 예측하고 발표하는 것을 말하며(Environment instruction No. 1053, 2013), 환경부에서는 수질예보를 위한 수치모델로 유역에서의 유출량 및 오염부하를 모의하기 위한 HSPF(Hydrological Simulation Program Fortran) 유역모델과 수계 분류구간에서의 수질모의를 위한 EFDC(Environmental Fluid Dynamic Code) 3차원수질

모델을 결합하여 운용하고 있다.

선행연구에서 Shin et al.(2013)은 낙동강 주요 지류에서 실시간 수온 유출 예측을 위한 HSPF 유역모델의 재현성 및 예측결과를 평가하였으며, Na et al.(2014)은 유역 및 수체모델을 결합한 실시간 낙동강 본류 흐름에 대한 재현성 및 예측결과를 평가하였다.

수온은 수중생태계의 중요한 영향 인자일 뿐 아니라, 수체에서 일어나는 대부분의 물질반응 속도, 용존산소 농도, 그리고 식물성 플랑크톤 및 동물성 플랑크톤의 계절적 발생특성에 직·간접적으로 영향을 주므로, 수질예측을 위해서는 수온에 대한 정확한 모의가 선행되어야 한다.

일반적으로 수체에서 수온이 물질반응에 미치는 영향은 Van't Hoff-Arrhenius 근사식(1)을 이용하여 모의되며, 식 (1)에서 보듯이 물질반응 속도는 수온의 함수로 표현된다.

$$K = K_0 \theta^{(T-T_0)} \quad (1)$$

여기서, K와 K₀는 온도 T와 T₀에서의 물질반응 속도이고, θ 는 온도보정계수이다.

수온 예측을 위한 다중회귀모델의 개발과 수질·수리모델의 적용 등 다양한 연구가 국·내외적으로 진행되고 있으며,

[†] To whom correspondence should be addressed.
cmshin77@korea.kr

최근에는 위성영상을 이용한 remote sensing에 의한 수온의 공간적 분포에 대한 모니터링 및 예측에 관한 연구(Alcantara et al., 2010)도 활발히 진행되고 있다. Chung et al.(2009)은 3차원 ELCOM모델을 이용하여 대청호에서의 열수지분석 및 수온성층모의를 평가하였으며, Yi et al. (2006)은 다중회귀분석을 이용한 임하호 유입하천의 수온예측에 대한 적용성을 평가하였다. Marce et al.(2008)은 HSPF 모델의 수체와 대기 및 지반과의 결정론적 열교환식을 수정하여, (1) 평형온도만을 고려한 경험적 열교환식 및 (2) HSPF 모델의 결정론적 열교환식에 경험적 열교환 경계조건을 추가하는 hybrid 방법을 고안하여, 각 방법의 수온 예측의 정확성을 비교·평가하였다.

본 연구에서는 선행연구(Na et al., 2014; Shin et al., 2013)를 바탕으로 낙동강 주요 지류의 실시간 수온예측을 위하여, HSPF 유역모델을 이용하여 낙동강 주요 지류에 대해 수온예측 모델을 구축하고 수체에서의 다양한 열수지 분석을 통해 모델 변수를 합리적으로 추정하였다. 실시간 수온 예측은 기상청에서 생산된 지역 및 전지구 기상예측모의 결과를 바

탕으로 향후 7일간의 수온 변화를 모의하였으며 예측결과와 정확성은 주요 하천의 관측 수온과 비교하여 평가하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 대상 지역

낙동강 유역은 한반도 남동부(동경 127° 29' ~ 129° 18', 북위 35° 03' ~ 37° 13')에 위치한다. 낙동강은 해발 1,549 m의 태백산에서 발원하여 남쪽으로 흐르다 안동호에 유입 후 서쪽으로 흐르면서 차례로 반변천, 미천, 내성천과 합류하고 다시 남쪽으로 유하하면서 영강, 병성천, 위천, 감천, 백천, 금호강, 회천, 황강, 남강과 차례로 합류한 후 남서쪽으로 유로를 변경하면서 밀양강 및 양산천과 합류 후 낙동강 하구둑을 통해 남해로 유출된다(Hwang, 2007). 연구 대상 지역의 유역면적은 약 23,500 km²이며, 낙동강 본류의 유로연장은 약 521.5 km로 전국토의 약 1/4를 차지한다. Fig. 1에 낙동강 유역의 지리적 위치와 주요 유입지천을 나타내었다(Shin et al., 2013).

Fig. 1. Site description of Nakdong River basin(Shin et al., 2013).

2.2. HSPF 모델의 수온 모의

HSPF 모델은 강우에 의한 유역유출 및 수체에서의 수리·수질모의를 위한 대표적인 유역모형으로 1960년대 초반 스탠포드 유역모형(Stanford Watershed Model)으로 처음 개발되었으며, 이후 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 및 U.S. Geological Survey에 의해 발전·보완되고 있다. HSPF 모델은 물리적 기반의 준분포모형으로 광범위한 수문·수질 모의가 가능하도록 일련의 구조화된 모듈로 구성되어 있으며, 각각의 소유역 및 하천에 공간적으로 다양한 유역특성 및 기상 입력자료를 지정할 수 있다(Bicknell et al., 2001; Shin et al., 2013).

HSPF 유역모델에서의 수온 모의는 (1) 유역에서 수체로 유출되는 지면유출수, 중간유출수, 기저유출수에 대한 수온 모의와 (2) 대기-수체 및 수체-지반과의 열교환 반응에 의한 수온 모의로 크게 구분될 수 있다. 일반적으로 하천 및 호소에서의 수온은 유역으로부터 유출되는 유출수의 수온보다는 수체 내에서의 열교환 반응에 의해 주로 영향을 받는다. 이는 유역으로부터의 유출수량은 일부 홍수기를 제외하면 수체 용량에 비해 훨씬 적어 유출수의 수온은 수체에 유입되면서 수체의 수온과 짧은 시간안에 평형을 이루게 된다.

유역에서 수체로 유출되는 지면유출수, 중간유출수, 기저유출수의 수온은 각 토양층의 온도와 동일하다고 가정된다. 즉, 지면유출수의 수온은 지표면 토양온도와, 중간유출수의 수온은 토양상층부의 토양온도와, 기저유출수의 수온은 토양하층 및 지하수층의 토양온도와 동일하다고 가정된다.

지표면의 토양온도는 기온에 따른 선형 회귀식에 의해 계산된다.

$$T_{SL} = ASLT + BSLT \times T_{AIR} \quad (1)$$

여기서, T_{SL} 은 지표면 온도(°C), ASLT는 지표면온도 절편(°C), BSLT는 지표면온도 경사, T_{AIR} 는 기온(°C)이다.

토양상층부의 토양온도는 두 가지 방법에 의해 모의될 수 있다. 첫 번째 방법은 식 (1)의 지표면 토양온도 산정 선형회귀식과 동일한 방법이며, 두 번째 방법은 smoothing factor와 기온과의 평균 편차를 이용하는 식 (2)를 이용하여 모의된다. 본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하여 토양상층부 온도를 모의하였다.

$$T_{IF} = T_{IF.S} + SMO \times (T_{AIR} + T_{DIF} - T_{IF.S}) \quad (2)$$

여기서, T_{IF} 는 모의 종점의 토양상층부 온도(°C), $T_{IF.S}$ 는 모의 시점의 토양상층부 온도(°C), SMO는 smoothing factor, T_{DIF} 는 기온과 토양상층부 온도의 평균 편차(°C)이다.

지하수층의 토양온도 모의는 두 가지 방법을 사용할 수 있다. 첫 번째 방법은 월별 첫째 날의 토양온도를 입력해 주고 나머지 날짜의 토양온도는 내삽에 의해 산정하는 방법이다. 두 번째 방법은 토양상층부 토양온도를 산정하는 식 (2)과 동일한 방법으로 smoothing factor와 기온과의 평

균 편차를 이용하는 방법이다. 본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하여 지하수층 토양온도를 모의하였다.

$$T_{GW} = T_{GW.S} + SMO \times (T_{AIR} + T_{DIF} - T_{GW.S}) \quad (3)$$

여기서, T_{GW} 는 모의 종점의 지하수층 온도(°C), $T_{GW.S}$ 는 모의 시점의 지하수층 온도(°C), SMO는 smoothing factor, T_{DIF} 는 기온과 지하수층 온도의 평균 편차(°C)이다.

HSPF 모델에서 수체의 수온을 모의하기 위해서는 일사량, 운량, 기온, 이슬점온도, 풍속의 다섯 가지 기상 속성이 필요하다.

Fig. 2는 HSPF 모델의 수체에서의 주요 열 교환 반응을 나타내고 있다. HSPF 모델의 수온 모의는 (1) 이류(advection)에 의한 열전달, (2) 대기-수체-지반간의 열교환으로 구분될 수 있다. 이류에 의한 열전달은 상류 하천 및 유역의 유출수로부터의 열전달로 구성되며, 대기-수체-지반간의 순 열전달(net heat exchange)은 단파복사량(+), 장파복사량(±), 전도-대류 열량(±), 증발열손실량(-), 강우에 의한 유입열량(+), 지반 전도열량(±)의 합과 같다.

단파복사량(shortwave solar radiation)은 식 (4)에 의해 모의된다.

$$Q_{SR} = 0.97 \times CFSAEX \times SOLRAD \times 10 \quad (4)$$

여기서, Q_{SR} 는 단파복사량(Kcal/m²/time), 0.97은 단파복사 흡수량, CFSAEX는 일사에 노출되는 수면의 비율, SOLRAD는 일사량(langleys/time), 10.0은 단위변환계수(Langleys = 10Kcal/m²)이다.

대기뿐만 아니라 모든 지구표면은 자체 온도에 따라 장파복사에너지(longwave radiation)를 방출하며 대기과 수체간의 장파복사량은 식 (5)로 표현된다.

$$Q_B = \sigma \times (T_{W.K}^4 - KATRAD \times 10^{-6} (1 + 0.0017C^2) T_{AIR.K}^6) \quad (5)$$

Fig. 2. Flow diagram for heat exchange process of RCHRES (U.S. EPA., 2010; Bicknell et al., 2001).

여기서, Q_B 는 장파복사량(Kcal/m²/time), σ 는 수면복사율 0.97을 곱한 Stephan-Boltzman constant, $T_{W,K}$ 는 수온(K), KATRAD는 대기 장파복사 계수, C는 운량(0~10), $T_{AIR,K}$ 은 기온(K)이다.

전도-대류에 의한 열전달은 대기와 수체간의 온도차에 의해 발생하며, 식 (6)으로 표현된다.

$$Q_H = CFPRES \times (KCOND \times 10^{-4}) \times WIND \times (T_W - T_{AIR}) \quad (6)$$

여기서, Q_H 는 전도-대류 열전달량(Kcal/m²/time), CFPRES는 수위에 따른 압력보정계수, WIND는 풍속(m/time), T_W 는 수온(°C), T_{AIR} 은 기온(°C), KCOND는 전도-대류 열전달계수이다.

증발열손실량은 수면으로부터 물이 증발할 때 발생하며 물의 증발잠열과 증발량에 비례한다. 증발량은 아래 식 (7)에 의해 계산되며 증발열손실량은 식 (8)에 의해 계산된다.

$$EVAP = KEVAP \times 10^{-9} \times WIND \times (e_{SW} - e_{SA}) \quad (7)$$

여기서, EVAP는 증발량(m/time), KEVAP는 증발계수, e_{SW} 는 수면에서의 포화증기압(mbar), e_{SA} 는 수면으로부터 2m 높이의 실제증기압(mbar)이다.

$$Q_E = HFACT \times EVAP \quad (8)$$

여기서, Q_E 는 증발열손실량(Kcal/m²/time), HFACT는 열손실전환계수(증발잠열×물의 밀도)이다.

수체로 직접 떨어지는 강우에 의한 열손실은 강우의 온도를 수면 온도와 같다고 가정하여 계산한다.

HSPF 모델에서 수체와 지반과의 전도열량은 세 가지 방법에 의해 계산된다. 첫 번째 방법은 수온과 평형지반온도의 차의 함수로써 식 (9)에 의해 계산된다.

$$Q_{BED} = KMUD \times (T_{GRND} - T_W) \quad (9)$$

여기서, Q_{BED} 는 수체와 지반과의 열전달량(Kcal/m²/time), KMUD는 수체-지반 열전도계수(Kcal/m²/°C/time), T_{GRND} 는 평형 지반온도(°C)이다.

두 번째 방법은 Caupp et al. (1994)에 의해 제안된 방법으로 지반층 위에 침전층(sediment or mud layer)이 있다고 가정하여, 지반층-침전층의 열교환과 침전층-수체와의 열교환을 각각 모의한다.

세 번째 방법은 Jobson (1977)와 Jobson and Keefer (1979)에 의해 제안된 방법으로 열교환에 관한 이류-확산식을 계산한다. 본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하여 수체-지반과의 열전달량을 모의하였다.

이상에서 모의한 각각의 열전달량으로부터 수체에서의 순 열전달량은 식 (10)으로 표현된다.

$$Q_T = Q_{SR} - Q_B - Q_H - Q_E + Q_P + Q_{BED} \quad (10)$$

여기서, Q_T 는 순 열전달량(Kcal/m²/time)이다.

마지막으로, 수온의 변화는 식 (11)에 의해 모의된다.

$$\Delta T_W = CVQT \times Q_T / (1.0 + SPD \times CVQT) \quad (11)$$

여기서, ΔT_W 는 수온의 변화(°C), CVQT는 변환계수(열전달량을 온도로 변환), SPD는 열전달을 잔차의 합이다.

2.3. HSPF 모델 구축

낙동강수계의 소유역분할은 유역경계도, 하천도 및 DEM (30×30m)을 이용하여 232개의 소유역으로 구분하였으며, 이를 다시 동일한 기상 및 유출특성을 갖는 32개의 segment로 그룹화 하였다. 토지이용분류는 환경부 중분류토지피복지도(EGIS, 2008)를 기준으로 도시, 논 및 습지, 농업, 산림, 수체로 구분하였다(Fig. 3) (Shin et al., 2013).

기상자료는 대구기상관측소 등 19개의 기상관측소에서 관측한 기온, 강수량, 이슬점온도, 일사량, 운량, 증발량자료를 이용하였으며, 잠재증발산은 Jensen-Haise formula (Dockter, 1994; Hummel et al., 2001)을 이용하여 산정하였다. 그 외 HSPF 모델 구축을 위한 기상, 오염원, 댐방류 및 취수에 대한 입력자료의 구축, 저수지 모의 방법 등은 선행연구(Shin et al., 2013)에 상술하였다.

2.4. HSPF 모델의 수온 재현성 검토

낙동강 유역의 주요 댐 및 하천에서 HSPF 모델의 수온 재현성을 검토하기 위해 열수지 분석을 실시하고 환경부 수질측정망의 수온자료를 이용하여 2008년부터 2010년에 걸쳐 수온 보정을 실시하였다.

모델 보정을 위한 통계지표로 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), deviation (Dv), root mean square error (RMSE)를 사용하였다. NSE는 관측값의 변동폭 대비 모델 예측값의 평균오차로 계산되며 모델의 적합도를 평가하는 지표이고, Dv는 관측값과 모델 예측값의 상대적인 편차를 나타내는 지표이며, RMSE는 관측값과 모의값의 평균오차로써 모델의 정밀도를 나타내는 지표이다(Table 1).

Table 1. Statistical indices used to evaluate the model accuracy

Statistical index	Equation	Desired value
NSE	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2}$	1
Dv(%)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100$	0
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}$	0

Where, P_i is simulated temp. at time i , O_i is observed temp. at time i , and $\bar{O}_i$ is the mean of observed temp for the whole period

Fig. 3. DEM (unit : m), subwatershed, and segmentaion of Nakdong River basin (Shin et al., 2013).

2.5. 실시간 수온 예측

보정된 HSPF 유역모델을 이용하여 낙동강수계 각 지류에서의 향후 7일간의 수온을 예측하였다. 수온 예측을 위한 장래의 기상자료는 기상청의 주요 수치모델인 전지구예보모델(global data assimilation and prediction system, GDAPS) 및 지역예보모델(regional data assimilation and prediction system, RDAPS)의 결과자료인 GRIB(grided binary)형식의 자료를 이용하였다. 기상예측모델의 공간적 해상도, 예측기

간, HSPF 모델 적용방법 등은 선행연구(Shin et al., 2013)에 상술하였다.

3. Results and Discussion

3.1. 모델 보정

Table 2에 HSPF 모델의 수온 모의에 사용된 주요 매개변수의 범위를 나타내었으며, 각 매개변수의 보정 범위는 각

Table 2. Principal hydrologic calibration parameters and calibrated values in this study

HSPF parameter	Unit	Definition	Typical value range	This study
ASLT	°C	Intercept of the surface layer temp. regression equation (1)	0 ~ 45	7 ~ 13 (month values)
BSLT	none	Slope of the surface layer temperature regression equation (1)	0 ~ 1	0.3 ~ 0.5 (month values)
ULTP1	°C	Intercept in the upper layer soil temperature regression equation (1)	0 ~ 45	7 ~ 13 (month values)
ULTP2	none	Slope in the upper layer soil temperature regression equation (1)	0 ~ 1	0.3 (month values)
LGTP1	°C	Lower layer/groundwater layer soil temperature	0 ~ 45	13 ~ 17 (month values)
CFSAEX	none	fraction of water surface exposed to solar radiation	0.001 ~ 1.0	1.0
KATRAD	none	atmospheric long-wave radiation coefficient	1 ~ 20	8 ~ 10
KCOND	none	conduction coefficient	1 ~ 20	6 ~ 9
KEVAP	none	evaporation coefficient	1 ~ 5	2.24 ~ 3.0
KMUD	Kcal/m ² /°C/hr	water-bed sediment heat conduction coefficient	3 ~ 100	10
TGRND	°C	ground temperature	0 ~ 45	11 ~ 19 (month values)

segment 및 RCHRES에서 토지이용 및 계절적 변동에 따라 달라진다. 수온 모의를 위한 대부분의 매개변수는 적절한 허용범위 내에서 매개변수를 변화시키면서 관측값과 모의값이 가장 잘 일치할 때의 값으로 추정하였으며, 지하수층의 월별 온도를 나타내는 LGTP1은 지하수관측연보(MOLIT, 2009, 2010, 2011)의 낙동강권역 지하수 관측 수온을 기반으로 입력하였다.

수체에서의 수온은 유역에서 유출되는 유출수 열량과 대기-수체-지반간의 열전달에 의해 결정된다. 수면과 대기간의 순열전달량은 단파복사, 장파복사, 증발에 의한 열손실, 대기와 수면과의 온도차에 의한 전도-대류 열교환, 강우에 의한 유입열량으로 구성되며, 수체와 지반과의 열교환은 수온과 지반온도차에 의한 열전도에 의해 이루어진다.

Fig. 4에 유역에서 수체로 유출되는 지면유출수, 중간유출수, 기저유출수의 수온에 대한 모의 결과를 나타내었다. 지면유출수와 중간유출수의 수온은 식 (1)에서 보듯이 기온의 영향을 직접적으로 받기 때문에 각 segments에 적용된 기상관측소의 기온 변화와 유사한 경향을 보이고 있으며, 기저유출수의 수온은 지하수층의 월별 온도를 모든 segments에 동일하게 입력하였으므로 모든 segments에서 동일한 수온변화를 보이고 있다. 각 segment별 지면유출수의 연간 온도 변동 범위는 약 5~28°C, 중간유출수는 약 7~22°C, 기저유출수는 약 13~17°C로 모의되었다.

Fig. 5에 낙동강 주요 댐 및 지류에서 2008년부터 2010년까지의 연평균 열수지 분석결과를 박스플롯으로 나타내었다. 수면으로 흡수되는 태양복사에너지는 150~165 W/m², 장파복사에너지는 -48~-113 W/m², 증발에 의한 열손실은 -39~-115 W/m², 전도-대류에 의한 열교환은 -13~-22 W/m², 강우에 의한 열전달은 2~4 W/m², 지반과의 열교환은 -24~22 W/m² 범위를 각각 나타내었다.

Trenberth et al. (2009)는 2000년 3월부터 2004년 5월까지 지구의 연 평균 에너지수지 분석을 통해, 지면에 흡수되는 태양복사에너지는 161.2 W/m², 지면에서 방출되는 장파복사에너지는 -63 W/m², 증발산에 의한 열손실은 -80 W/m², 대기와 지면의 온도차에 의한 열손실인 현열은 -17 W/m²로 추정하였으며, 이러한 지구 전체의 에너지수지 추정 값은 낙동강 수계에서의 열수지 모의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 4. The simulated temperature of surface outflow, interflow, and groundwater outflow at each segments.

Fig. 5. Box plot of annually mean heat flux to major dam and tributaries of Nakdong river using HSPF model (2008~2010).

하천 및 호소에서의 수온 및 열수지 특성을 비교하기 위해 안동댐 및 금호강에서의 열수지 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 저수지는 하천에 비해 수심이 깊고 수체용적이 커서 일별 수온의 변화가 크지 않고 비교적 안정적인 수온 변화 경향을 보인다. Fig. 5에서 보듯이 안동댐은 일반적으로 2월 중순부터 9월 초순까지는 순복사량이 0 이상으로 수온이 증가하고 그 이후 기간에는 수온이 감소하는 경향을 보이거나, 금호강은 순복사량의 일별 변동이 심하여 수온 또한 큰 변동 경향을 가지는 것으로 모의되었다. Chung et al. (2009)은 대청호 수온성층 모의 연구에서 순열복사량은 ± 200 W/m² 범위를 보이며 2월 중순부터 8월말까지 수열기로 수온의 증가 경향을 보인다고 분석하였다.

Fig. 7은 2008년에서 2010년까지의 낙동강수계 주요 댐 및 지류에서의 수온 관측값을 이용한 모델 보정결과를 나타낸다. Dv 값은 -6.0~3.7%, NSE 값은 0.88~0.95, RMSE 값은 1.7~2.8°C의 범위를 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 모든 지점에서 수온 모의 결과가 관측값을 잘 재현하고 있으며 모델의 재현성을 나타내는 통계지표도 양호한 값을 보이고 있다.

3.2. 실시간 수온 예측의 평가

Fig. 8에 보정된 모델을 이용하여 낙동강 주요지천에서 7일간의 수온 예측값을 환경부 수질측정망 수온 관측값과 비교하여 나타내었으며, 그래프에서 Ave. predicted는 해당 일자의 예측결과를 산술평균한 값이다. 수온예측은 2012년 1월부터 12월까지 1년 동안 총 236회 수행하였다. 낙동강 수계 주요 지천에서 수온 예측결과 Dv 값은 -1.5~12.1%,

Fig. 6. Heat flux to Andong dam and Geumho River using HSPF model (2008~2010).

Fig. 7. Comparison of simulated and observed water temperature at major dam and tributaries for model calibration (2008-2010).

(e) Wicheon

(f) Gamcheon

(g) Geumho River

(h) Hoicheon

(i) Hwang River

(j) Nam River

Fig. 7. Comparison of simulated and observed water temperature at major dam and tributaries for model calibration (2008-2010). (continued)

NSE 값은 0.85 ~ 0.93, RMSE 값은 2.4 ~ 2.9°C의 범위로 수온 보정결과와 유사한 예측 정확도를 보이고 있다. 이는 수온 모의에 직접적인 영향을 미치는 기온과 일사량의 연간 변동 경향이 매년 일정하게 반복되고 기온과 일사량에 대한 기상예측자료(GDAPS, RDAPS)의 불확실성도 강수 등 다른 기상요소에 비해 크지 않기 때문으로 판단된다.

4. Conclusion

낙동강수계 주요 지천에서의 실시간 수질 예측을 위해 HSPF 모델을 이용하여 수문유출 및 수질모형을 구축하였으며, 본 연구에서는 유역 및 수체에서의 열수지 분석 및 모델의 보정과정을 통해 신뢰성 있는 수온 예측 모델을 구축하고자 하였다.

하천 및 호소 등 다양한 수체에서 신뢰성 있는 수온 모의를 위해, 수온 관련 각 모델 변수의 일반적인 적용 범위

내에서 다양한 열수지 반응에 대한 개별적인 평가를 통해 최적의 모델 변수 값을 추정하였다.

낙동강수계 주요 댐 및 지천에 대한 열수지 분석 및 수온 보정결과 대부분 양호한 결과를 나타내었으며, 2012년 1년간 수행한 236회의 실시간 수온 예측에 대한 관측값과의 비교·평가도 양호한 결과를 나타내었다.

향후 보다 정확한 수온 예측 모델 구축을 위해서는 단순히 수체에서 관측 수온과의 비교를 통한 수온 보정뿐만 아니라, 하상 및 토양의 연중 온도 변화에 대한 모니터링과 수체에서의 열수지 분석을 통해 보다 현실적이고 실측 기반의 모델 변수를 산정하고자 하는 노력이 필요할 것이다.

References

- Alcantara, E. H., Stech, J. L., Lorenzzetti, J. A., Bonnet, M. P., Casamitjana, X., Assireu, A. T., and de Moraes Novo, E. M. L. (2010). Remote Sensing of Water Surface Temperature

Fig. 8. Comparison of predicted and observed water temperature at major tributaries of Nakdong River for a year of 2012.

and Heat Flux over a Tropical Hydroelectric Reservoir, *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 2651-2665.

Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, Jr., J. L., Jobes, T. H., and Donigan, Jr., A. S. (2001). *HSPF Version 12 User's manual*, AQUA TERRA Consultants Mountain View, California, USA, pp. 49-69, 95-99, 176-183.

Caupp, C. L., Brock, J. T., and Runke, H. M. (1994). *Model formulation and program description of the Dynamic Stream Simulation and Assessment Model (DSSAM): Application to the Truckee River, Nevada for Truckee River Operating Agreement (TROA) DEIS/DEIR*, Technical Report No. RCR94-1.

Submitted to the U.S. Bureau of Reclamation, Carson City, NV, Rapid Creek Research, Inc., Boise, Idaho.

Chung, S. W., Lee, H. S., Choi, J. K., and Ryu, I. G. (2009). Simulation of Thermal Stratification of Daecheong Reservoir using Three-dimensional ELCOM Model, *Journal of Korea Society on Water Environment*, 25(6), pp. 922-934. [Korean Literature]

Dockter, D. (1994). *Computation of the 1982 imberly-Penman and the Jensen-Haise Evapotranspiration Equation as Applied in the U.S. Bureau of Reclamation's Pacific Northwest Agri-mant Program*, U.S. Bureau of Reclamation, Pacific Northwest

- Region, Water Conservation Center, pp. 1-26.
- Environmental Geographic Information System (EGIS). (2008). <http://egis.go.kr/egis>.
- Environmental Instruction No. 1053. (2013). *The rule of water quality forecasting and contingency plans*.
- Hummel, P., Kittle Jr., J., and Gray, M. (2001). *WDMUtil (Version 2.0)-A Tool for Managing Watershed Modeling Time-Series Data*, U.S. EPA, Washington, DC, USA, pp. 104-110.
- Hwang, H. S. (2007). *Applicability Study of BASIN/WinHSPF on TMDL in Korea -Nakdong River Basin Case Study-*, Ph. D. Dissertation, Konkuk University, Seoul, Korea, pp. 91-92. [Korean Literature]
- Jobson, H. E. (1977). *Bed Conduction Computation for Thermal Models*, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 103(HY10), pp. 1213-1217.
- Jobson, H. E. and Keefer, T. N. (1979). *Modeling Highly Transient Flow, Mass, and Heat Transport in the Chattahoochee River near Atlanta*, Georgia. U.S. Geological Survey Professional Paper No. 1136.
- Marce, R and Armengol, J. (2008). Modelling river water temperature using deterministic, empirical, and hybrid formations in a Mediterranean stream, *Hydrological Processes*, 22, pp. 3418-3430.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2009). *National Groundwater Monitoring Network in Korea Annual Report*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2010). *National Groundwater Monitoring Network in Korea Annual Report*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2011). *National Groundwater Monitoring Network in Korea Annual Report*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Na, E. H., Shin, C. M., Park, L. J., Kim, D. G., and Kim, K. H. (2014). A study on the Operational Forecasting of the Nakdong River Flow with a Combined Watershed and Waterbody Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(1), pp. 16-24. [Korean Literature]
- Shin, C. M., Na, E. H., Lee, E. J., Kim, D. G., and Min, J. H. (2013). Operational Hydrological Forecast for the Nakdong River Basin Using HSPF watershed Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(2), pp. 212-222. [Korean Literature]
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., and Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget, *American Meteorological Society*, 90, pp. 311-323.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2010). HSPF Lecture #12 : Instream Water Quality-Temperature, Sediment, & General Constituent, United States Environmental Protection Agency, pp. 3-7.
- Yi, Y. K., Lee, S. U., and Koh, D. K. (2006). Water-Temperature Prediction of Stream Entering into Imha Reservoir using Multi-Regression Method, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(5), pp. 919-925. [Korean Literature]