

기후변화에 따른 소하천에서의 수온 모의연구

박정술·김삼은**·곽재원·김정욱*†·김형수*

국토교통부 낙동강홍수통제소
*인하대학교 사회인프라공학과
**유량조사사업단 품질정책실

Water temperature assessment on the small ecological stream under climate change

Jung Sool Park·Sam Eun Kim**·Jaewon Kwak·Jungwook Kim**†·Hung Soo Kim*

Nakdong Flood Control Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Busan, Korea

**Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea*

***Data Quality Management Department, Hydrological Survey Center, Goyang, Korea*

(Received : 8 August 2016, Revised: 29 August 2016, Accepted: 29 August 2016)

요약

수온은 하천의 물리적·생물학적 과정에 지대한 영향을 미치는 인자로서 어류를 비롯한 수생생태계에 대한 제약조건으로 작용한다. 기후변화로 인하여 실질적인 환경의 변화가 나타나고 있는 현실에서 수온 변화에 대한 예측은 필수적이라 하겠다. 본 연구의 목적은 자연 소하천을 대상으로 하천 수온을 모의 및 그 효율을 비교 분석하고, 향후 기후변화로 인한 하천 수온의 변동을 고찰하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 캐나다 동북부의 Fourchue 강을 대상으로 하여 2011년부터 2014년까지의 하천수온을 측정하고 결정론적, 확률론적, 비선형 수온모형을 적용하여 각각의 방법론에 따른 효율성을 비교 분석하여 미래 수온 모의를 위한 모형으로 결정론적 모형인 CEQUEAU 모형을 선정하였다. 또한, 선정된 모형을 기반으로 하여 CMIP5 기후모형과 RCP 2.6, 4.5, 8.5 기후변화 시나리오를 이용하여 해당 소하천 유역의 미래 수온 변동성을 예측하고 분석하였다. 연구결과, Fourchue 강의 수온은 6월 중 평균 수온은 0.2 ~ 0.7°C가 상승하고, 9월은 0.2 ~ 1.1°C가 감소하는 것으로 나타나 실질적인 수온환경의 변화가 발생하는 것으로 나타나서 이에 대한 주의가 요구된다. 또한, 해당 수역에 서식하고 있는 연어류의 치사상한수온을 넘는 경우도 발생하여 이에 대한 대책이 시급한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수온, 기후변화, 수온모의 모형, 치사상한수온

Abstract

Water temperature affects physical and biological processes in ecologies on river system and is important conditions for growth rate and spawning of fish species. The objective of this study is to compare models for water temperature during the summer season for the Fourchue River (St-Alexandre-de-Kamouraska, Quebec, Canada). For this, three different models, which are CEQUEAU, Auto-regressive Moving Average with eXogenous input and Nonlinear Autoregressive with eXogenous input, were applied and compared. Also, future water temperature in the Fourchue river were simulated and analyzed its result based on the CMIP5 climate models, RCP 2.6, 4.5, 8.5 climate change scenarios. As the result of the study, the water temperature in the Fourchue river are actually changed and median water temperature will increase 0.2 ~ 0.7 °C in June and could decrease by 0.2~1.1°C in September. Also, the UILT (24.9°C) for brook trout are also likely to occurred for several days.

Key words : Water Temperature, Climate change, Temperature Modeling, UILT

1. 서 론

수온은 하천의 물리적 생태적 과정을 결정짓는 가장 중요한

요소 중에 하나로서 (Nunn et al., 2003), 어류의 성장과 산란에 지배적인 요소로 작용한다 (Smith, 2014). 특히, 연어와 같은 냉수성 어종에서 이러한 경향성이 두드러지며 (Matthews, 2014), Bouck et al.(1975)은 하천수온이 24도 이상으로 유지될 경우 연어와 같은 냉수성 어종의 생존에 문제가 발생할 수 있음을 주장하기도 하였다. 기후변화로 인하여 잠재적인 수온

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea
E-mail: love10406@nate.com

증가가 예견되고 있는 시점에서 향후 수온으로 인한 수생태계의 문제점이 발생할 가능성이 크나 (Wenger et al., 2011), 미래 수온 관련 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

Caissie(2006)는 하천의 수온관련 연구를 크게 회귀론, 결정론, 확률론적의 3가지로 구분할 수 있음을 보였다. 이 중에서 회귀기법을 이용한 수온모의는 Johnson(1972)과 Kothandaraman(1972)의 초기 연구 이후로 적용성을 인정받아 널리 사용되고 있다. 단순 선형 회귀는 일반적으로 기온을 예측인자로서 사용하며 (Stefan and Preud'Homme, 1993), 다중회귀 (Jourdonnais et al., 1992), 로지스틱회귀 (Mohseni and Stefan, 1999), 리지회귀 (Ahmadi-Nedushan et al, 2007), 가우시안 프로세스 회귀 (Grbić et al, 2013) 등도 다양하게 적용되고 있다. 결정론적 기법은 열교환을 나타내는 지배방정식에 의거하여 수온을 모의하기 때문에, 다양하고 복잡한 에너지 흐름과 하천에서의 혼합을 고려할 수 있는 장점이 있다 (Caissie, 2006, 2007). 특히 복잡한 열교환이 일어나는 현상을 상대적으로 정확하게 모의할 수 있는 장점이 있지만(Danner et al., 2012), 일반적으로 더 많은 입력자료를 필요로 한다. 대조적으로, 확률론적 기법의 경우 하천 수온과 관계가 있는 소수의 예측인자를 필요로 하며 (Webb et al., 2008), 통계론적 기법은 주/월단위 수온 (Benyahya et al., 2008), 일단위 수온 (Larnier et al., 2010), 시간단위 수온 (Jeong et al., 2013) 등, 광범위하게 적용되었다. 이외에도, 비모수적 분류에 속하는 인공신경망 (Hadzima-Nyarko et al., 2014), 비선형 동적모델인 k-최근접 이웃 알고리즘 (Caldwell et al., 2013), 그리고 동적 카오스 모델 (Sahoo et al., 2009)들이 수온을 예측하는데 적용되었다. 다만, 대부분의 수온 모의 연구들은 각각의 기법을 이용하여 현재나 지난 시점에서의 수온을 주로 모의하고 있으며, 그에 따라서 기법 간의 비교분석이나 미래 수온 변화로 인한 변동은 상대적으로 부족한 실정이다. 특히, 대한민국의 경우에는 주로 연안 및 해양에서의 수온 연구 위주로 진행되는 경향을 보였으며 (안중배 등 1997; 정희동 등 2003; 윤동영 등, 2011; 성기탁 등, 2010; 김성중 등 2011 수온으로 인한 영향도 주로 자원의 생산량 (박영규 등, 2012; 주세등 등 2013; 김봉태 등 2015) 위주로 진행되는 경향이 있었다. 지표생태계에 큰 영향을 미치는 하천수 및 지표수 수온에 대한 연구 (안중호 등 2010; 윤성완 등 2014; 이길하 등 2014; 이혜숙 등, 2016)는 상대적으로 미흡한 실정으로, 특히 하천 수온과 그에 따른 생태환경을 다룬 연구는 제한적으로 이루어지고 있다 (김수전 등, 2013; 이길하 등, 2016).

따라서, 본 연구에서는 상류에 댐이 존재하는 소하천에서의 수문-기상 인자와 결정론적, 확률론적, 비모수적 모형을 적용하여 수온 모의 효율성을 분석하고, 해당 하천에서의 미래 수온 변동을 고찰하는 데 있다. 이를 위하여 해당 소하천 유역의 2011년부터 2014년까지의 하천수온 및 수문-기상 인자와 결정론적, 추계학적, 비선형 모형을 이용하여 수온을 모의하고 비교 분석하였으며, CMIP5 기후모델 및 RCP 2.6, 4.5, 8.5 시나리오를 이용하여 구축된 모형을 통하여 향후 수온 변동을 모의하였다.

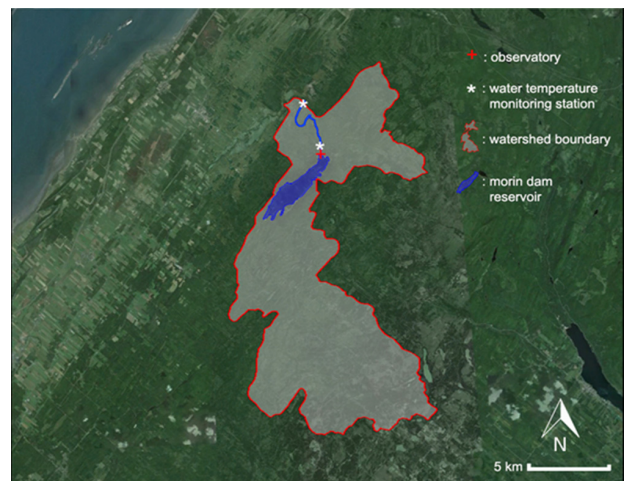
2. 이론적 배경

2.1 대상 유역 및 자료

본 연구의 대상 하천인 Fourchue 강은 캐나다 동부 퀘벡에 있는 Du-Loup 강의 지류로서 상류의 수리학적 구조물 (Morin Dam)에서 주요 하천유량을 공급받고 있는 소하천이다. 국내에도 국가수질측정망을 통하여 수온자료가 수집되고 있으나, 대부분 국가 및 주요 지방하천을 대상으로 하고 있으며, 생태소하천에 대한 자료가 부족한 실정이라 관련 자료가 풍부한 캐나다 동부 지역의 유역을 선정하였다. 해당 유역은 261 km²의 유역면적을 지니고 있으며, 대부분의 유역이 관목 및 숲으로 구성되어 있고 하천 유량은 0.06에서 8.0 m³/s 사이로 나타나고 있다 (Centre d'expertise hydrique Quebec; <http://www.cehq.gouv.qc.ca>). 특히, 해당 하천은 여름철에도 수온이 22°C를 넘지않는 지역으로서 냉수성 어종인 무지개송어 및 연어 등의 다양한 어종자원이 존재하여 관광 및 낚시 등의 활동이 친수활동이 활발하게 이루어지고 있으나, 기후변화로 인한 수온 상승으로 인하여 하천 유지에 많은 어려움을 겪고 있다 (Fig. 1).



(A)



(B)

Fig. 1. Study area and measuring station.

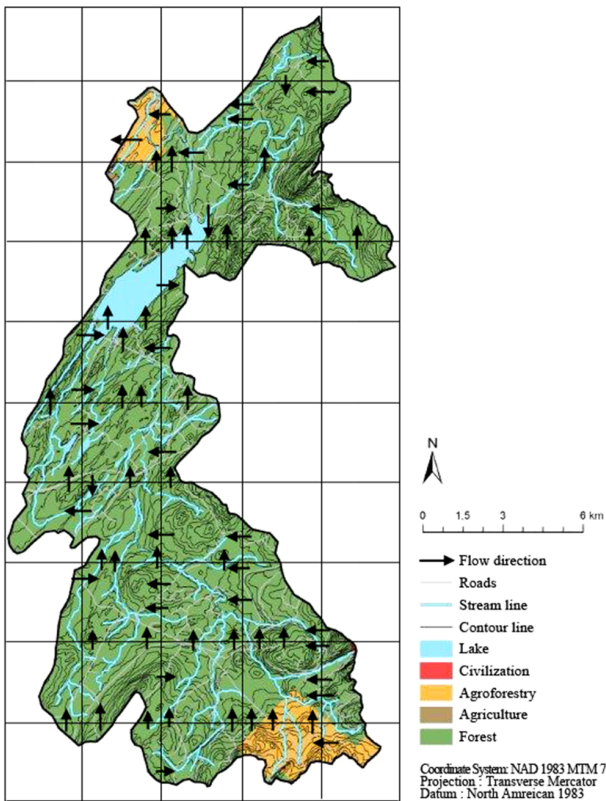


Fig. 2. Hydro-physiographical characteristics of study area. Map shows land use, whole squares (elementary hydrological units) and arrows indicate water routing used for the deterministic (CEQUEAU) model

많은 수문-기상 인자들이 하천수문 변화와 하천에서의 열 교환에 영향을 미치나 크게 대기, 지형, 수문, 하상조건 의 4가지로 구분할 수 있다. 이 중에서 소하천의 특성을 감안하여 대기조건을 가장 큰 열 교환 과정의 원인으로 가정하고 기온을 포함한 일사량, 상대습도 및 풍속을 조사하였다. Fourchue 강의 수온은 2011년부터 2014년까지 여름철 (6-9월) 동안에 Hobo Pro V2 자기수온계를 이용하여 15분 간격으로 측정되었으며, 시간당 일사량 데이터는 Kipp and Zonen pyranometer (SP-LITE, $\pm 10\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$)로 측정 하였다. 자기수온계는 Morin 댐의 하류에서 Du-Loup 강과의 합류점까지 8km 하도에 걸쳐 배치되었으며, 기온과 상대습도는 Fourchue 기상관측소 (Environment Canada; <http://climate.weather.gc.ca>)의 자료를 활용하였다. 또한, 결정론적 모델을 실행하는데 필요한 Fourchue 지역의 수문-지형학적 특성은 3X3km 격자의 DEM과 토지이용도를 이용하여 산정하였다 (Fig. 2).

2.2 모형 및 예측인자 선정

수문 및 입력자료의 특성에 적합한 모형을 선택하거나 적합한 예측인자를 선정하는 것은 유역과 하천 및 자료의 특성을 고려하여 선정하여야 한다. 이에 본 연구에서는 측정된 수문자료와 예측 인자로 사용되는 수문-기상 인자의 특

성을 파악하기 위하여 데이터 시계열의 임의성에 대한 스피만 순위 상관계수 (Myers and Well, 2003), 자기상관에 대한 Ljung-Box Q 검정 (Ljung, 1978), 이분산성에 대한 Levene's 검정 (Levene, 1960), Lyapunov exponent 검정 (Bask and Gençay, 1998), 카오스 특성에 대한 BDS 통계 (Brock et al. 1987)의 5가지 검정통계량을 적용하였다. 또한, 적절한 예측인자를 선정하기 위하여 상호정보량(Mutual Information) 통계를 적용하였다. 상호정보량 $I(X, Y)$ 는 하나의 연속 확률변수 X 에 다른 연속 확률변수 Y 가 포함되어 있는 정보의 양에 대한 척도이다.

$$I(X, Y) = \int_Y \int_X p(x, y) \log\left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)}\right) dx dy \quad (1)$$

$p(x)$ 와 $p(y)$ 는 각각 변수 X 와 Y 의 확률 밀도 함수이고, $p(x, y)$ 는 결합 확률 밀도 함수이다. 상호 정보량은 강한 상호관계 및 상관성을 가지는 변수에 대해 증가하므로, 출력변수와 각 입력변수의 상호정보량을 이용하여 중요한 예측인자를 선정하는데 사용할 수 있다 (Battiti, 1994).

2.3 수문모의모형

다양한 모의 기법 중에서 본 연구에서는 크게 결정론적 수문모의 모형인 CEQUEAU, 추계학적 모형인 ARMAX, 비선형적 방법인 NARX를 수문모의를 위한 모형으로 선정 하였다. CEQUEAU 모형의 경우 다양한 열교환을 고려할 수 있는 모형으로 북미지역에서 좋은 결과를 나타낸 바 있으며 (Seiller and Anctil, 2014), ARMAX 모형의 경우 자료에 각종 잡음과 교란요소가 있는 경우 효율적으로 모의 할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Breaker and Brewster, 2009). 마지막으로 NARX 모형의 경우에는 Chaos 시계열 특성을 보이는 자료에 대해서 좋은 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다 (Diaconescu, 2008).

결정론적 모형인 CEQUEAU 모형은 유역의 수문지형학적 특성을 고려한 준분포형 모델로서 (Morin et al., 1981), 특정 크기의 격자(whole squares) 기반의 물수지 및 유출, 수문 등을 모의한다 (Morin et al., 1998). CEQUEAU 모형은 크게 (a) 물수지에 기반하는 유출발생을 모의하는 부분과 (b) 유출 및 홍수의 추적을 통한 유출 흐름을 모의하는 부분으로 구분 된다 (Fig. 3).

적정하게 수문을 모의하기 위하여 모형의 최적화 과정이 필요하며, 해당 매개변수는 2011년부터 2013년 사이의 Fourchue 강 수위 및 유출량, 수문 자료를 이용하여 보정되었다. CEQUEAU 모형은 수문학적인 물수지를 분석함과 동시에 각 수문 단위에서의 열수지를 계산하며, 열수지는 단파 태양복사, 순 장파 복사, 잠열, 현열, 상류에서 이루어지는 열, 하류 열손실, 그리고 지하수와 중간유출에서의 열교환이 포함된다 (Morin et al, 1998). 결정론적 모형인 CEQUEAU 모형을 이용하여 보정한 결과는 Fig. 4와 같다.

확률론적 모형인 ARMAX 모형의 경우에는 입력 자료에 많은 잡음이 포함되어 있을 경우에 유용하며, 특히 ARMA 또는 ARX와 같은 다른 확률론적 모델보다 많은 유연성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 댐 하류에 위치한 소하천의 특성상 수온에 많은 잡음이 발생할 수 있을 것으로 판단되므로 해당 모형을 적용 하였다. ARMAX 모형은 다음과 같이 규정된다.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t-k) + C(z)e(t) \quad (2)$$

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \quad (3)$$

$$B(z) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-(m-1)}$$

$$C(z) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_kz^{-k}$$

$y(t)$ 는 출력값이며 $u(t)$ 는 입력자료, $e(t)$ 는 오류값, k 는 열수지에서의 지연시간이며, $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$ 는 후방연산자 z^{-1} 에 대한 다항식으로 Eq. (2)와 같다. 본 연구에

서 ARMAX 모형은 시행착오법을 통하여 최적화 되었으며, 2차 AR, MA 및 1차 시간지연(k)이 선정되었다 (ARMAX(2,2,1)).

NARX 모형은 비선형 자기회귀모형으로서 지연시간을 가지는 피드백(feed-back)을 가지는 인공신경망의 특별한 형태로서, 비선형 모델링 및 카오스 시계열 특성을 모의하는데 적합하고, 또한 비선형 데이터의 손실 예측에서 발생하는 문제에 대해서 자유로운 것으로 알려져 있다 (Haykin, 1999). NARX 모형은 Eq. (4)와 Fig. 5를 통하여 설명할 수 있다.

$$y_i(t+1) = \begin{cases} \varnothing(u(t), y_i(t), & i = 1 \\ y_i(t), & i = 2, 3, \dots, k \end{cases} \quad (4)$$

출력 $y_i(t+1)$ 과 $y_i(t) (i=1,2,\dots,k)$ 는 지연시간을 포함하고 있는 피드백 연결을 포함한 회귀 신경망 상태 변수이다. t 는 시계열의 시간을 나타내며, \varnothing 는 신경망 시스템을 나타낸다. 신경망에서의 역전파 알고리즘은 기상 및 수문자료 등의 비선형 문제에 대해서 좋은 결과를 나타내는 것으로 알려진

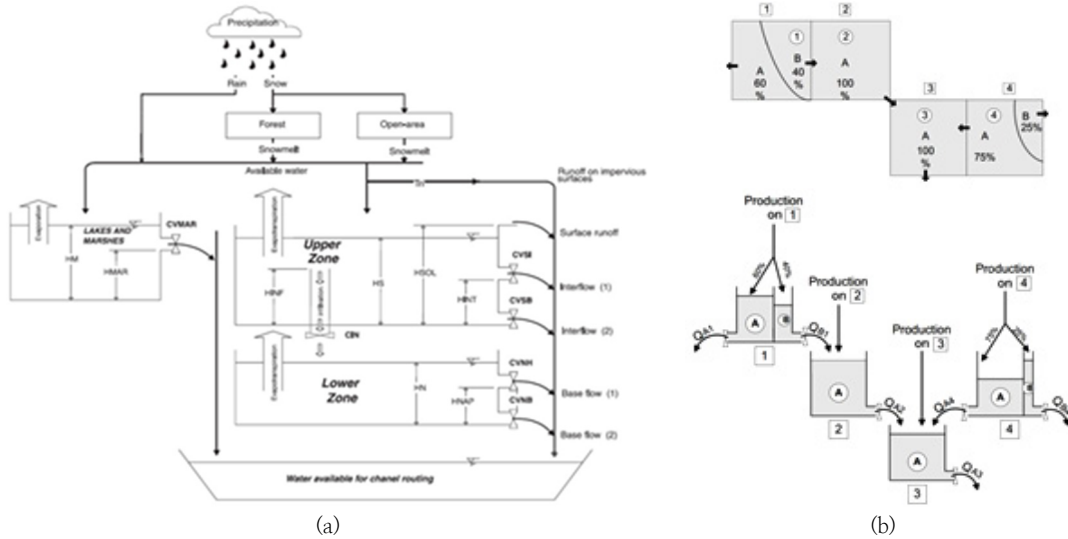


Fig. 3. Schematic description of CEQUEAU model; (a) production function (b) routing function (Morin, 2007)

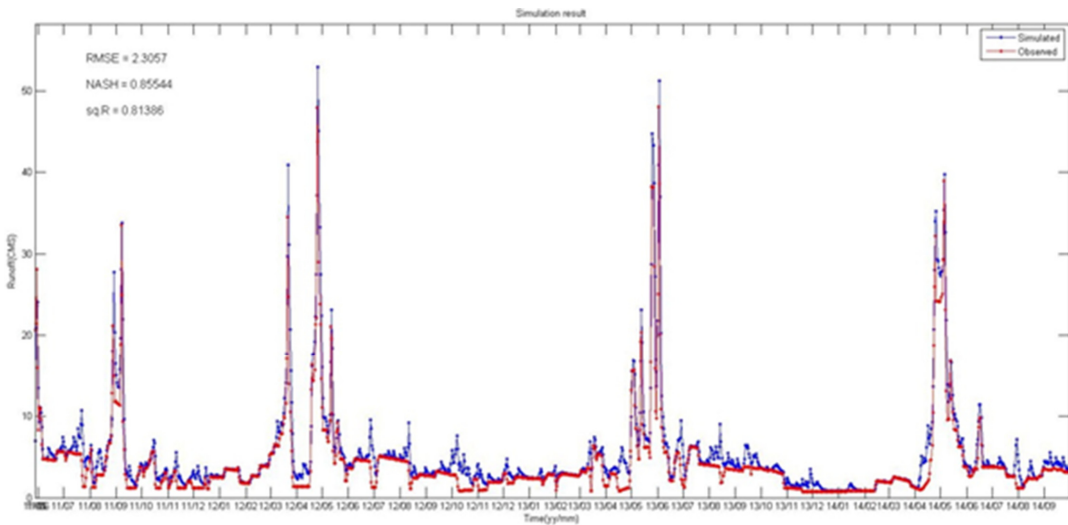


Fig. 4. Observed and simulated flows with CEQUEAU hydrological model for both calibration and validation periods (June, 2011 to September, 2014)

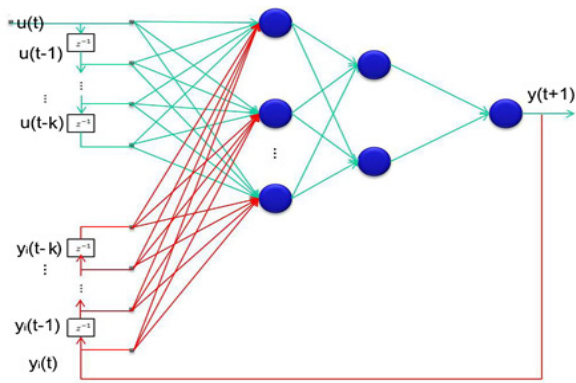


Fig. 5. NARX network schematization (Jose et al., 2008). is the input set, is the exogenous input, k is the input delay and each circle represents neural network

Levenberg–Marquardt–QNBP 알고리즘을 적용하였다. 또한 본 연구에서의 신경망은 시행착오법을 이용하여 하루의 지연시간(k)를 갖는 피드백 층을 포함하여 총 12개의 은닉 층을 가지는 것으로 설정 되었다.

마지막으로, 상기의 수온모형을 통하여 산정되는 결과를 정량적으로 비교하기 위하여, 평균 제곱근 오차(RMSE, Hyndman and Koehler, 2006; Eq. 5), Bias(Eq. 6), Nash–Sutcliffe 모델 효율계수(Nash and Sutcliffe, 1970; Eq. 7)의 평가함수를 적용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - O_{sim})^2}{n}} \quad (5)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - O_{sim})}{n} \quad (6)$$

$$Nash E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - O_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - \overline{O_{obs}})^2} \quad (7)$$

여기서 O_{obs} 와 O_{sim} 은 각각 동일 시간에 측정된 값과 모의된 값이며, $\overline{O_{obs}}$ 는 O_{obs} 의 평균을 나타내고, n은 측정수를 나타낸다. RMSE는 예측에 대한 평균오차값을 나타내며 직관적인 장점이 있으나, 평균오차값의 위상차에 대한 정보를 제공하지 않는 단점이 있다. Bias는 모든 개별 오차의 평균을 나타내며 RMSE가 가지는 평균오차값의 위상차를 나타낸다. Nash–Sutcliffe 모델 효율 계수의 경우에는 수문 모형의 예측 효율을 평가하는데 주로 사용되며, 예측 효율이 높을수록 1.0에 가까운 값을 나타낸다 (Moriasi et al., 2007).

4. 수온 모형기법 보정 및 검증

4.1 모형 및 예측인자 선정

수집된 데이터(수온 및 대기온도, 유출, 일사량, 상대습도, 풍속)의 특성을 결정하기 위해 5가지 검정통계량 (스피만 순위 상관계수, Ljung–Box Q 검정, Levene’s 검정, Lyapunov exponent 검정, BDS 통계 검정)을 적용하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Test statistics for each dependent and independent variables

Test Stat.	Value	Dependent and independent variable						
		Water Temp.of Upstream	Water Temp.of Downstream (Target)	Air Temp.	Runoff from Fourchue dam	Solar Radiation	Relative humidity	Average Wind Speed
Spearman Rank Corr. Coeff. test	p-value	5.411	5.291	2.026	5.641	0.154	2.494	1.629
	critical value	1.96						
Ljung–Box Q test	p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.997	0.000	0.020
	critical value	31.4104						
Levene’s test	p-value	0.448	0.877	0.548	0.000	0.239	0.992	0.657
	critical value	0.050						
Lyapunov exponent Lamda test	p-value	1.82 x 106	1.62 x 106	0.000	1.000	0.0003	0.084	0.000
	critical value	-0.0653						
BDS test	W(2)	79.02	62.15	20.96	16.49	2.82	19.58	2.53
	W(3)	85.80	67.11	20.30	15.17	0.81	18.29	2.42
	W(4)	94.52	73.32	19.81	13.79	0.46	17.12	2.05
	W(5)	106.87	82.27	19.86	12.74	0.54	16.62	1.74
	critical value	1.96						
Result		Nonlinear stochastic time series	Nonlinear stochastic time series	Nonlinear stochastic time series	Chaotic time series with hetero-sked asticity	Random series	Chaotic time series	Nonlinear stochastic time series

Table 1에서의 결과와 같이, 무작위 자료 및 시계열 특성을 검증하는 Spearman Rank Corr. 검정과 Ljung-Box Q 검정은 태양복사량을 제외하고는 모두 해당되는 것으로 나타났다. 따라서, 태양복사량의 경우 무작위 시계열로 분류되었다. 유출량의 경우 Levene's 검정 및 BDS 검정을 통하여 이분산성을 가지는 카오스 시계열로 분류되었으며, 수온을 포함하여 이외의 인자들은 카오스 또는 비선형 시계열인 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 수온 특성을 고려할 수 없는 다중회귀 또는 AR(1) 같은 모형들은 Fourchue 강의 수온을 모의하는데 적합하지 않다. 따라서, NARX와 ARMAX 모형 또는 열수지 방정식에 의거한 모형과 같이 시계열 모형의 특성을 고려할 수 있으며 좋은 결과를 나타낸 모형을 선정하는 것이 타당할 것으로 판단된다 (Diaconescu, 2008; Diversi et al., 2011).

또한 수온 모의에 있어서 적절한 예측 인자의 선택은 모형 선택과 버금가는 중요한 과제이다. 확률론적 모형의 경우에는 일반적으로 다수의 입력 변수를 대상으로 시행착오법을 수행하여 결정할 수 있다 (Grbić et al., 2013). 그러나, 인공신경망의 경우에는 시행착오 방법은 과대한 시간소요 및 전체적인 신경망의 효율 저하로서 나타날 수 있다 (Haykin, 1999; Maier and Dandy, 2000). 따라서, 본 연구에서는 대안으로서 상호정보량(MI) 검증을 통하여 모형의 입력 변수를 선정하였다. 상호정보량 산정결과, 대기온도(MI = 1.28), 유출(MI = 0.82) 그리고 상대습도(MI = 1.09)는 태양복사(MI = 0.30)와 풍속(MI = 0.09)보다 수온에 더 의미 있는 상호정보 값을 갖는 것으로 나타났다. 높은 양(+)의 상호정보량은 잠재적인 예측인자(수온 종속 변수)와 강력한 상관 관계를 가지고 있음을 보여주는 지표로 사용될 수 있으므로 (Sahoo et al., 2009), 기온, 유출량, 상대습도를 각 모형의 입력자료로 선정하였다. 특징적으로 기온과 상대습도가 높은 상호정보량을 나타내는 것은 하천에서의 열교환에서 일반적인 현상으로 판단되나, 유출량이 중요한 인자로서 선정된 것은 강의 상류에 Morin Dam이 위치하고 있는 지역적인 특성 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 댐에서 방류되는 방류수의 수온도 Fourchue 강의 수온에 상당한 영향을 미치는 것으로 추정된다.

2.3 수온모의결과

수온 모의는 2011년부터 2013년까지의 시 단위 수온 및 수문-기상 인자 (기온, 유출량 및 상대습도) 를 이용하여 보정되었으며, 2014년 자료를 이용하여 검증을 수행하였다.

수온 보정시 ARMAX 모형은 RMSE 0.56 °C, Bias 0.03°C, 0.96의 Nash 효율계수로서 가장 좋은 결과를 나타내었으며, NARX 및 CEQUEAU 모형도 모두 0.90 이상의 효율계수로서 적합한 모의를 하는 것으로 나타났다. 다만, ARMAX 모형 및 NARX 모형의 경우 일부 구간에서 시간 지연으로 의심되는 거동이 나타났다 (Fig. 6(b) 및 Fig. 7(c) 참조). 이는 Fourchue 강 자체가 댐 방류수의 영향을 강하게 받는 것이 원인으로 판단되며, 댐 방류의 유무에 따라서 시간지연 효과가 발생 및 소멸하는 것으로 보인다. CEQUEAU

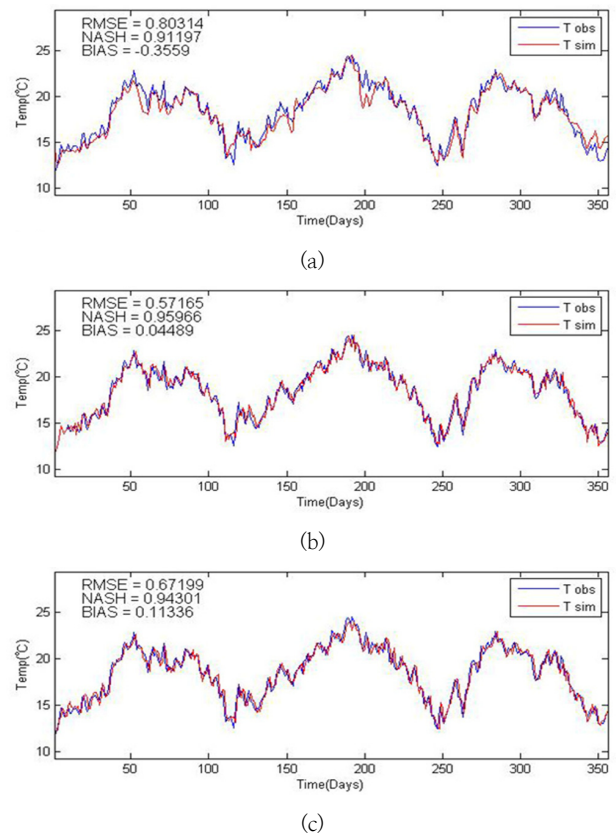


Fig. 6. Calibration results for Case 1; (a) CEQUEAU model, (b) ARMAX, (c) NARX

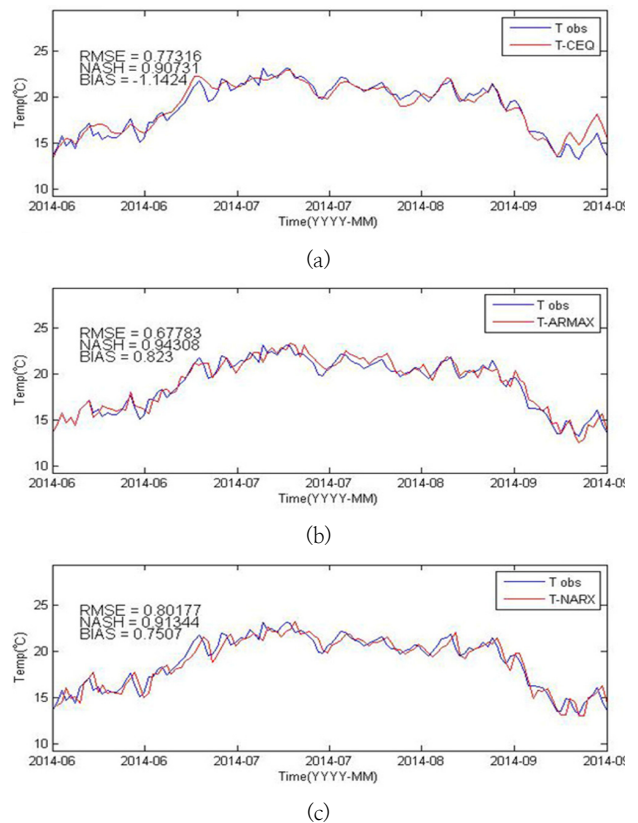


Fig. 7. Validation results for Case 1; (a) CEQUEAU model, (b) ARMAX, (c) NARX

모형의 경우 수온을 다소 하향 모의하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 댐 방류수의 도달시간이 0.5일 이내로 매우 짧기 때문에, 댐 저수지의 수온이 하류에 영향을 미치는 것이 주요한 영향으로 판단된다. 전체적으로는 ARMAX 모형과 CEQUEAU 모형이 가장 적합하게 모의하는 것으로 나타났지만, 댐 방류수에 의한 영향을 고려하였을 때 CEQUEAU 모형이 향후 수온 모의를 수행하는데 시간지연 효과가 없이 가장 안정적인 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

4. 기후변화에 따른 수온변화

4.1 기후변화 모의

기후변화에 따른 수온의 변화를 모의하기 위하여 본 연구에서는 기후변화 모형 및 기후변화 시나리오를 통하여 미래의 수문-기상 인자를 구축하였다. 최근의 기후변화 연구를 반영하여 다양한 수문-기상관련 인자를 다루고 (Sillmann et al., 2014) 높은 공간해상도 (Lynch, 2006) 를 제공하는 CMIP5 모형을 선정하였다. 미래 기후 투영자료는 캐나다의 Pacific Climate Impacts Consortium에서 제공하는 자료를 사용하였으며 (PCIC; <http://www.pacificclimate.org/data/statistically-downscaled-climate-scenarios>, 2014), 북미 대륙의 일 단위의 편의보정 구축 아날로그 기법 (BCCA; Maurer et al., 2010)을 통하여 최적화된 모형 및 자료를 사용하였다.

기후 변화에 관한 정기간 패널(IPCC; <http://www.ipcc.ch/>)은 IPCC 5th 보고서에서 대기에 대한 인간 활동의 영향을 기반으로 이산화탄소 저감 수치에 따라 얼마나 많이 온실가스를 배출하는지를 고려하여 4가지 가능한 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오 (RCP 2.6, 4.5, 6.0 그리고 8.5)를 제시하였다 (Meinshausen, 2011) (Table 2).

Fourchue 강 유역에 가장 적합한 시나리오나 기후모델에 대한 연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 현재와 유사한 온실가스 저감 노력이 이루어지는 것으로 가정하는 RCP 4.5 기후변화 시나리오를 기준으로 하여 최선의 노력과 최악의 경우를 고려하여 각각 RCP 2.6 및 RCP 8.5 시나리오를 이용하여 모의를 수행하였다. 또한, 다양한 기후모형 결과를 고려하기 위하여 총 33개의 CMIP5 기후모형을 이용하였으며, 각각 9개의 모형이 RCP 2.6에 12개의 모형이 RCP 4.5 및 8.5에 적용되었다.

4.2 기후변화에 따른 수온 모의

본 연구에서는 선정된 RCP 2.6, 4.5 및 8.5 기후변화 시나리오와 CMIP5 모형을 이용한 강수량, 최대 및 최소 기온 등의 수문-기상 입력자료와 기보정된 CEQUEAU 모델을 이용하여 미래의 Fourchue 강의 하천수온을 모의하였으며, 모의 시에 상대습도 및 이슬점 온도는 자료동화 (Assimilation) 하여 사용하였다. 모의결과에 따른 2015년부터 2100년까지의 여름철 하천수온에 대한 Boxplot 은 Fig. 8과 같다.

IPCC에서 동부 캐나다 지역은 RCP 8.5 시나리오에서 대기온도가 중기(2046-2065)적으로 2-3°C, 장기(2046-2065)적으로 4-5°C 상승하며, 북부지방에서 최대로 더워지고 (IPCC, 2013), 대서양 연안의 남부지방에서 최소로 더워진다고 전망했다 (Barrow et al., 2004). 이는 Fourchue 강이 캐나다의 동남부 지역에 위치하고 있기 때문에 캐나다의 다른 지역보다 지구온난화의 영향이 덜 하다는 것을 의미한다. 하지만, 6월과 9월에 일관된 변화 추세를 보이는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 수온에서 무시할 수 없는 변화가 발생하는 것으로 판단된다. 7월과 8월에 현재보다 비슷하거나 약간 높은 중앙값을 나타내지만 상대적으로 중요한 변화는 6월과 9월에 있다. 6월 미래 시나리오에 대한 수온 중앙값은 RCP 2.6에서 16.04(+0.2)°C, RCP 4.5에서 16.03(+0.2)°C, 그리고 RCP 8.5에서 16.50(+0.7)°C 가 될 것으로 예상된다. 9월 미래 월간 중앙값은 RCP 2.6에서 15.96(-0.2)°C, RCP 4.5에서 15.45(-0.7)°C, 그리고 RCP 8.5에서 14.97(-1.1)°C로 최근 과거에 비해 낮게 전망되고 있다. 다음 10년 동안의(2016-2025) 6월에 예상되는 시나리오에 의하면, 최근 과거와 비교해서 RCP 2.6에서 수온의 중앙값이 0.2°C 상승하고 RCP 4.5에서 0.4°C, RCP 8.5에서 1.2°C 상승하였다(Fig. 8). 물론 이러한 변화는 대기 온도의 변화보다 상대적으로 작지만(Table 1 and IPCC, 2014), 이런 변화는 수온에 크게 의지하는 연어류 서식지에 영향을 미칠 수 있다.

예를 들어 Fourchue 강에서 보고된 민물 송어의 성장을 위한 최적 온도는 14.4-16.0°C이다(Dwyer et al., 1983). 따라서, 향후에 6월의 수온이 민물 송어 성장속도에 영향을 미치는 온도를 초과할 것으로 예상된다. 또한, 민물 송어의 치사상한수온은 약 24.9°C이다 (Wisner and Christie, 1987; Hasnain et al., 2010). 관측기간인 2011년부터

Table 2. RCP (Representative Concentration Pathways) scenario description (IPCC, 2014)

Scenarios	Description	CO ₂ density(ppm)	Global warming until 2100 (Mean and likely range)
RCP 2.6	Peak in radiative forcing at ~3 W/m before 2100 year and then decline	490	1.0(0.3~1.7)°C
RCP 4.5	Stabilization without overshoot pathway to ~4.5 W/m at stabilization after 2100 year	650	1.8(1.1~2.6)°C
RCP 6.0	Stabilization without overshoot pathway to ~6 W/m at stabilization after 2100 year	850	2.2(1.4~3.1)°C
RCP 8.5	Rising radiative forcing pathway leading to 8.5 W/m by 2100 year	1370	3.7(2.6~4.8)°C

2014년동안 최대 일 수온은 2012년 8월 5일에 관찰된 24.44°C로서 임계값을 초과되지 않았으나, 각 RCP 시나리오에 대한 모의 결과 초기 치사 온도 상한값을 넘는 수온이 발생하는 것으로 판단되며 (Fig. 9), 이 경우 연어와 같은 냉수성 어종의 생존에도 영향을 미칠 것으로 판단된다 (Fry et al., 1947).

하천 수온과는 대조적으로 치사상한수온을 상회하는 날짜에서는 RCP 2.6에서 17일로 최대를 나타냈었고, RCP 8.5에서는 오직 3일 뿐이었다 (Fig. 9). 가장 낙관적인 미래 시나리오인 RCP 2.6은 RCP 8.5보다 평균 수온의 변화가

낮다는 사실에도 불구하고 상대적으로 민물 송어에 대한 초기 치사 온도 상한 값을 넘는 날이 더 많이 나타났다. 따라서, 전체적으로 모든 기후변화 시나리오가 수온의 증가를 나타내고 있으며, 치사상한수온을 초과하는 수온도 나타나고 있으므로 미래 Fourchue 강의 생태계 및 냉수성 어종에 대하여 큰 위협으로 다가올 수 있을 것으로 보이며, 직접적인 대책 및 노력이 필요하다고 하겠다. 마지막으로 본 연구에서 제시된 방법론을 통하여 향후 미래 수온에 대한 예측을 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 우리나라의 생태 환경 연구에서 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

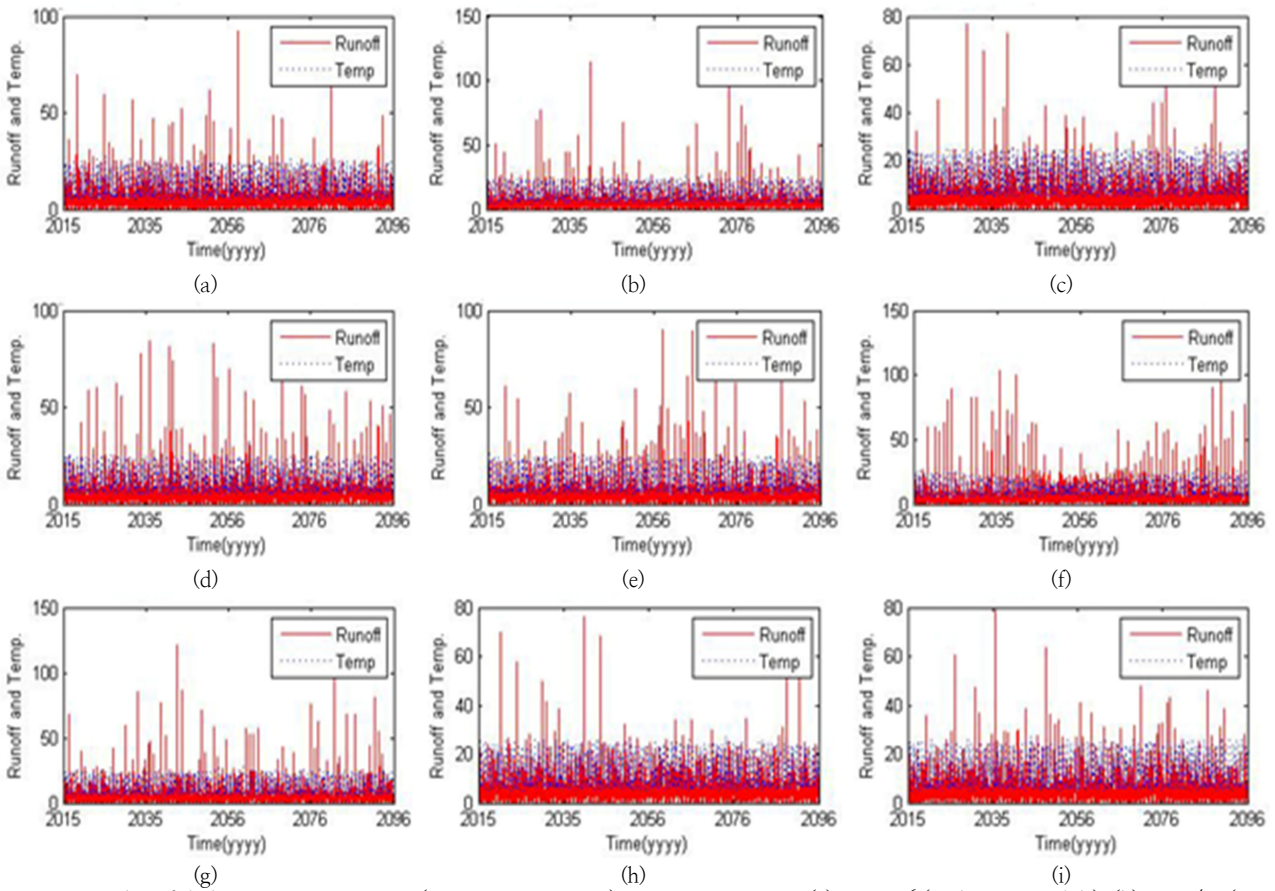


Fig. 8. Boxplot of daily water temperature (2015 to 2100 years) in summer season; (a) RCP 2.6 (9 climate models); (b) RCP 4.5 (12 climate models); (c) RCP 8.5 (12 climate models) climate scenario and bold red line indicated monthly median temperature for observed period (2011 to 2014)

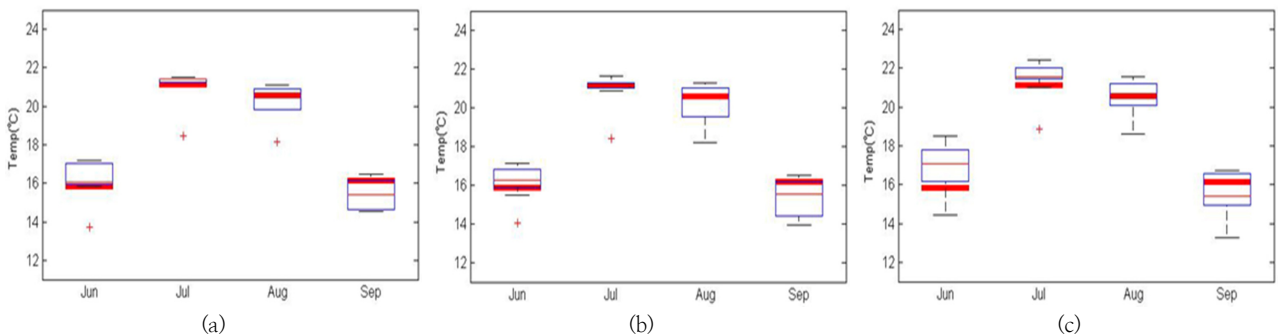


Fig. 9. Boxplot of number of the day over UILT of the brook trout for each RCP climate scenarios; RCP 2.6 (9 climate models), RCP 4.5 and 8.5 (12 climate models)

5. 결 론

본 연구에서는 3가지의 수온모의 모형을 이용하여 소하천의 수온을 모의하고 그 효율을 비교하였으며, CMIP5 및 기후변화 시나리오를 통하여 미래의 하천수온 변동을 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요 결론을 간략히 요약하자면 다음과 같다.

1) Fourchue 강의 수온과 수문-기상 인자들은 추계학적 특성을 지니고 있으며, 이를 반영하기 위한 모형 및 모의기법이 필요할 것으로 판단된다.

2) ARMAX 모형이 수온을 가장 적합하게 모의하는 것으로 나타났으며, CEQUEAU 모형은 모의효율 측면에서 ARMAX 모형보다 낮게 나타났으나 지역적인 시간지연 문제가 발생하지 않으므로 미래 수온 모의에 적합할 것으로 판단된다.

3) 2,100년 까지의 하천 수온을 CEQUAEAU 모형으로 모의한 결과, 본 연구에서 사용된 기후모형 및 기후변화 시나리오에 따라 6월 중 평균 수온은 0.2 ~ 0.7 ° C가 상승하고, 9월은 0.2 ~ 1.1 ° C가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 향후 기후변화로 인한 하천수온의 실질적인 변화가 발생할 것으로 판단된다.

4) 6월의 수온 상승은 온도가 최적의 성장 범위(16.0°C)를 초과하거나 근접하기 때문에, 민물 송어 성장에 유리할 수 있다. 그러나 민물 송어의 치사상한수온 (24.9°C)을 넘는 경우가 발생할 수 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다.

References

- Ahmadi-Nedushan, B, St-Hilaire, A, Ouarda, TB, Bilodeau, L, Robichaud, E, Thiemonge, N, and Bobee, B(2007). Predicting river water temperatures using stochastic models: case study of the Moisie River (Québec, Canada). *Hydrological Processes*, 21(1), pp. 21-34.
- Ahn, JB, Ryu, JH, Cho, EH, Park, JY, and Ryoo, SB(1997). A Study on Correlations between Air-Temperature and Precipitation in Korea and SST over the Tropical Pacific. *Asia-Pacific J. of Atmospheric Sciences*, 33(3), 487-495.
- Ahn, JH and Han, DH(2010). Projected Climate Change Impact on Surface Water Temperature in Korea. *J. of Korean Society on Water Quality*, 26(1), pp. 133-139.
- Bask, M and Gençay, R(1998). Testing chaotic dynamics via Lyapunov exponents. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 114(1), pp. 1-2.
- Battiti, R(1994). Using mutual information for selecting features in supervised neural net learning. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(4), pp. 537-550.
- Barrow, E, Maxwell, B, and Gachon, P(2004). *Climate Variability and Change in Canada, Past, Present and Future. Meteorological Service of Canada*, Environment Canada: Toronto.
- Benyahya, L, St-Hilaire, A, Ouarda, TB, Bobee, B, and Dumas, J(2008). Comparison of non-parametric and parametric water temperature models on the Nivelles River, France. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), pp. 640-655.
- Bouck, GR, Chapman, GA, Schneider, PW, and Stevens, DG(1975). *Effects of Holding Temperatures on Reproductive Development in Adult Sockeye Salmon (Oncorhynchus Nerka)*. In 26th Annual Northwest Fish Culture Conference.
- Breaker, LC and Brewster, JK(2009). Predicting offshore temperatures in Monterey Bay based on coastal observations using linear forecast models. *Ocean Modelling*, 27(1), pp. 82-97.
- Brock, WA, Dechert, WD, and Scheinkman, JA(1987). *A Test for Independence Based on the Correlation Dimension*. Department of Economics, University of Wisconsin at Madison, University of Houston, and University of Chicago. Social Science Research Working Paper, 8762.
- Caissie, D(2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51(8), pp. 1389-1406.
- Caissie, D, Satish, MG, and El-Jabi, N(2007). Predicting water temperatures using a deterministic model: application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *J. of Hydrology*, 336(3), pp. 303-315.
- Caldwell, RJ, Gangopadhyay, S, Bountry, J, Lai, Y, and Elsner, MM(2013). Statistical modeling of daily and subdaily stream temperatures: Application to the Methow River Basin, Washington. *Water Resources Research*, 49(7), pp. 4346-4361.
- Danner, EM, Melton, FS, Pike, A, Hashimoto, H, Michaelis, A, Rajagopalan, B, and Nemani, RR(2012). River temperature forecasting: A coupled-modeling framework for management of river habitat. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal*, 5(6), pp. 1752-1760.
- Diaconescu, E(2008). The use of NARX neural networks to predict chaotic time series. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 3(3), pp. 182-191.
- Diversi, R, Guidorzi, R, and Soverini, U(2011). Identification of ARMAX models with noisy input and output. In *World Congress*, 18(1), pp. 13121-13126.
- Fry, FEJ(1947). Effects of the environment on animal activity. *Univ. Toronto Studies, Biol. Ser.* 55, Ontario Fish. Res. Lab. Publ. 68, pp. 1-62.
- Grbić, R, Kurtagić, D, and Slišković, D(2013). Stream water temperature prediction based on Gaussian process regression. *Expert Systems with Applications*, 40(18), pp. 7407-7414.
- Hadzima-Nyarko, M, Rabi, A, and Šperac, M(2014). Implementation of Artificial Neural Networks in Modeling the Water-Air Temperature Relationship of the River Drava. *Water Resources Management*, 28(5), pp. 1379-1394.

- Hasnain SS, Mins CK, Shuter BJ(2010). *Key Ecological Temperature Metrics for Canadian Freshwater Fishes*, Applied Research and Development Branch, Ontario Ministry of Natural Resources.
- Haykin, S(1999). *Neural networks: a comprehensive foundation (second ed.)*. Prentice hall.
- Hyndman, RJ and Khandakar, Y(2007). *Automatic time series for forecasting: the forecast package for R (No. 6/07)*. Monash University, Department of Econometrics and Business Statistics.
- IPCC(2013). *Region by Region: The Science of AR5 WG1 and the Consequences*, IPCC.
- Jeong, DI, Daigle, A, and St-Hilaire, A(2013). Development of a stochastic water temperature model and projection of future water temperature and extreme events in the Ouelle River basin in Québec. Canada. *River Research and Applications*, 29(7), pp. 805–821.
- Johnson FA(1971). Stream temperatures in an alpine area. *J. of Hydrology*, 14(3), pp. 322–336.
- Jourdonnais JH, Walsh RP, Pickett F, and Goodman D(1992). Structure and calibration strategy for a water temperature model of the lower Madison River, Montana. *Rivers*, 3(3), pp. 153–169.
- Ju, SJ and Kim, SJ(2013). Assessment of the Impact of Climate Change on Marine Ecosystem in the South Sea of Korea II. *Ocean and Polar Research*, 35(2), pp. 123–125.
- Jung, HD, Hwang, JD, Jung, KG, Heo, S, Sung, KT, Ko, WJ, Yang, JY, and Kim, SW(2003). Long Term Trend of Change In Water Temperature and Salinity in Coastal Waters around Korean Peninsula. *J. of the Korean society of marine environment & safety*, 9(2), pp. 59–64.
- Kothandaraman, V(1972). Air–water temperature relationship in illinois. *J. of the American Water Resources Association*, 8(1), pp. 38–45.
- Kim, BT, Eom, KH, Lee, JS, Park, HJ, and Yook, KH(2015). A Study on the Relationship Between the Catch of Coastal Fisheries and Climate Change Elements using Spatial Panel Model. *J. Fish. Bus. Adm.*, 46(3), pp. 63–72.
- Kim, SJ, Noh, HS, Hong, SJ, Kwak, JW, and Kim, HS(2013). Impact of Climate Change on Habitat of the *Rhynchocypris Kumgangensis* in Pyungchang River. *J. of Wetlands Research*, 15(2), pp. 271–280.
- Larnier, K, Roux, H, Dartus, D, and Croze, O(2010). Water temperature modeling in the Garonne River (France). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 398(1), pp. 4.
- Lee, KH(2016). Prediction of Climate–induced Water Temperature using Nonlinear Air–water Temperature Relationship for Aquatic Environments. *J. of Environmental Science International*, 25(6), pp. 877–888.
- Levene, H(1960). *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press. pp. 278–292.
- Ljung GM and Box GE(1978). *On a Measure of a Lack of Fit in Time Series Models*. *Biometrika*, 65(2), pp. 297–303.
- Lynch, P(2006). "The ENIAC Integrations". *The Emergence of Numerical Weather Prediction*. Cambridge University Press. pp. 206–208.
- Matthews, K(2014). *California Golden Trout: Can Their Warming Streams Handle Other Stressors?*. In 144th Annual Meeting of the American Fisheries Society. Afs.
- Maier, HR and Dandy, GC(2000). Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling & Software*, 15(1), pp. 101–124.
- Maurer, EP, Hidalgo, HG, Das, T, Dettinger, MD, and Cayan, DR(2010). The utility of daily large–scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), pp. 1125–1138.
- Meinshausen, M, Smith, SJ, Calvin, K, Daniel, JS, Kainuma, ML, Lamarque, JF, Matsumoto, K, Montzka, SM, Raper, SC, Riahi, K, Thomson, A, Velders, GJ, and Van vuuren, DP(2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change*, 109(1–2), pp. 213–241.
- Mohseni, O and Stefan, HG(1999). Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *J. of Hydrology*, 218(3), pp. 128–141.
- Morin G, Fortin JP, Lardeau JP, Sochanska W, and Paquette S(1981). *Mode'le CEQUEAU: manuel d'utilisation*. INRS–Eau, Ste–Foy, Que ´ bec, Canada.
- Morin G, Sochanski W, Paquet P(1998). *Le mode'le de simulation de quantite ´ CEQUEAU–ONU*, Manuel de re ´ fe ´ rences. Organisation des Nations–Unies et INRS–Eau. Rapport de recherche no. 519, 252.
- Moriasi, DN, Arnold, JG, Van Liew, MW, Bingner, RL, Harmel, RD, Veith, TL(2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3), pp. 885–900.
- Myers, JL and Well, AD(2003). *Research Design and Statistical Analysis (2nd ed.)*. Lawrence Erlbaum. 508. ISBN 0–8058–4037–0.
- Nash, JE and Sutcliffe, JV(1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. of Hydrology*, 10 (3), pp. 282–290.
- Nunn, AD, Cowx, IG, Frear, PA, and Harvey, JP(2003). Is water temperature an adequate predictor of recruitment success in cyprinid fish populations in lowland rivers?. *Freshwater Biology*, 48(4), pp. 579–588.
- Park, YG, Choi, SH, Kim, SD, and Kim, CH(2012). Assessment

- of Changes in Temperature and Primary Production over the East China Sea and South Sea during the 21st Century using an Earth System Model. *Ocean and Polar Research*, 34(2), pp. 229–237.
- Parra, I, Almodóvar, A, Ayllón, D, Nicola, GG, and Elvira, B(2012). Unravelling the effects of water temperature and density dependence on the spatial variation of brown trout (*Salmo trutta*) body size. *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(5), pp. 821–832.
- Seiller, G and Ancil, F(2014). Climate change impacts on the hydrologic regime of a Canadian river: comparing uncertainties arising from climate natural variability and lumped hydrological model structures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), pp. 2033–2047.
- Seong, KT, Hwang, JD, Han, IS, Go, WJ, Suh, YS, and Lee, JY(2010). Characteristic for Long-term Trends of Temperature in the Korean Waters. 16(4), pp. 353–360.
- Sillmann, J, Kharin, VV, Zhang, X, Zwiers, FW, and Bronaugh, D(2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), pp. 1716–1733.
- Smith, N(2014). *Evaluation of Growth, Survival, and Recruitment of Chinook Salmon in Southeast Alaska Rivers*. In 144th Annual Meeting of the American Fisheries Society. Afs.
- Stefan, HG and Preud'Homme, EB(1993). Stream temperature estimation from air temperature. *J. of the American Water Resources Association*, 29(1), pp. 27–45.
- Webb, BW, Hannah, DM, Moore, RD, Brown, LE, and Nobilis, F(2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes*, 22(7), pp. 902–918.
- Wenger, SJ, Isaak, DJ, Luce, CH, Neville, HM, Fausch, KD, Dunham, JB, and Williams, JE(2011). Flow regime, temperature, and biotic interactions drive differential declines of trout species under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(34), pp. 14175–14180.
- Wismer, DA and Christie, AE(1987). *Temperature relationships of Great Lakes fishes*. Great Lakes Fishery Commission Special Publication, Great Lakes Fishery Commission, MI, USA.
- Yi, HS, Kim, DS, Hwang, MH, and An, KG(2016). Assessment of Runoff and Water temperature variations under RCP Climate Change Scenario in Yongdam dam watershed, South Korea. *J. of Korean Society on Water Environment*, 32(2), pp. 173–182.
- Yoon, DY and Choi, HW(2011). A Comparison of Spatio-Temporal Variation Pattern of Sea Surface Temperature According to the Regional Scale in the South Sea of Korea. *J. of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 14(4), pp. 182–193.
- Yoon, SW, Park, GY, Chung, SW, and Kang, BS(2014). Projection of the Climate Change Effects on the Vertical Thermal Structure of Juam Reservoir. *J. of Korean Society on Water Environment*, 30(5), pp. 491–502.