

# 기후변화에 따른 미래 하천 수온 예측을 위한 비선형 기온-수온 상관관계 구축\*

이길하\*\*

Building a Nonlinear Relationship between Air and Water Temperature  
for Climate-Induced Future Water Temperature Prediction

Lee, Khil-Ha\*\*

대구대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Daegu University(DU))

제출: 2013년 12월 17일 수정: 2014년 4월 18일 승인: 2014년 6월 18일

## 국문 요약

지구의 온난화로 인하여 기온이 상승하고 이에 대응하여 수온 증가가 감지되고 있다. 하천의 수온 변화는 수질과 생태계, 특히 용존산소변화와 생물체의 이동으로 이어진다. 기온 변화가 하천의 수질과 생태 환경에 미치는 영향을 추정하기 위해서 수온 상승의 시기와 하천 어종에 대한 이해가 필요한데 이를 위하여 미래의 수온을 예측할 필요가 있다. 환경부 산하 국립환경과학원에서 설치한 국가수질관측망 자료와 기상청 기상관측소의 기온 자료를 활용하여 기온-수온 비선형 상관관계모형을 구축하였다. 기온-수온 대표 관계인 비선형 로지스틱(Logistic) 함수에 포함된 4개의 매개변수를 결정하기 위하여 SCE최적화 기법을 이용하였다. 기온-수온 상관관계는 시간규모에 따른 최대 온도와 최소 온도에 차이가 있으나 수질 또는 생태 반응의 적당한 시간규모에 해당하는 주 평균 온도를 이용하여 분석하였다. 전반적으로 우리나라 하천의 기온-수온 관계는 선형보다는 비선형 모형에서 NSC와 RMSE가 더 우수하여 비선형 모형이 적합한 것으로 나타났다. 연구 결과는 미래의 기온 상승 변화에 반응하는 수질, 수문 및 생태반응에 대비하여 공학기술자 또는 정책입안자에게 적절한 기후변화 대책 방향을 설정하는 데 지침을 제공할 것이다.

■ 주제어 ■ 기온, 수온, 이력현상, 지구온난화, 로지스틱(Logistic) 함수

## Abstract

In response to global warming, the effect of the air temperature on water temperature has been noticed. The change in water temperature in river environment results in the change in water quality and ecosystem, especially Dissolved Oxygen (DO) level, and shifts in aquatic biota. Efforts need to be made to predict future water temperature in order to understand the timing of the projected river temperature. To do this, the data collected by the Ministry of Environment and the Korea Meteorological Administration has been used to build a nonlinear relationship between air and water temperature. The logistic function that includes four different parameters was selected as a working model and the parameters were optimized using SCE algorithm. Weekly average values were used

\* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A4A01004846)

\*\* 교신저자: Khil\_ha@yahoo.com

to remove time scaling effect because the time scale affects maximum and minimum temperature and then river environment. Generally speaking nonlinear logistic model shows better performance in NSC and RMSE and nonlinear logistic function is recommendable to build a relationship between air and water temperature in Korea. The results will contribute to determine the future policy regarding water quality and ecosystem for the decision-driving organization.

■ **Keywords** ■ Air Temperature, Water Temperature, Hysteresis, Global Warming, Logistic function

---

## I. 서론

지구의 온난화로 인한 기온변화는 강우, 증발산 등 주요한 기후인자와 더불어 토지피복형태, 생태계, 물순환에 지속적인 영향을 미친다. 이는 결국 수문학적 인자의 변화로 연결되어 인간의 생활 특히 사회, 경제, 문화, 보건 등의 기본생활과 재해(disaster)에 영향으로 이어지므로 이에 대한 고찰을 거친 후 적절한 대비가 필요하다(Caissie et al., 2001; Asselman et al., 2003; IPCC, 2007; Pedersen and Sand-Jensen, 2007; Lyons et al., 2010; Rehana and Mujumdar, 2012). 기온의 증가는 곧바로 수온의 변화로 이어져 새로운 하천 환경에 적응하기 위한 생존 경쟁이 유발할 것이고 여기에서 살아남는 수생식물의 종류가 바뀔 수 있다. 식물의 경우에는 성장일수가 증가하고 성장시점을 앞당길 수 있다. CO<sub>2</sub>농도의 증가는 CO<sub>2</sub>거름효과(fertilization effects)를 통해 다양한 식물로부터 생산되는 생체량(biomass)에 직접적으로 영향을 미칠 것이다(Stockle et al., 1992; Stefan and Sinokrot, 1993). 동물의 경우에는 기온의 증가에 따른 환경변화로 인해서 개체수의 증감을 초래하고 서식지의 변화를 가져와 이동을 유발할 것이다. 또 하천의 수온 증가는 수중에서의 생화학적 반응을 지배하여 수질반응에 직간접적으로 영향을 미칠 것이다. 기온증가는 연안해역의 수온에도 영향을 미치기 때문에 수온의 영향을 직접적으로 받는 연안 수중생물의 환경조건에도 큰 영향을 미칠 것이다.

하천의 지속 가능하고 친환경적인 유지관리를 위해서 하천생태의 보전 및 복원은 중요한 요소이다. 우리나라는 인구밀도가 크고 도시화와 산업화가 대규모로 진행되어 하천 환경의 교란 및 훼손에 쉽게 노출되어 있다. 현대에 이르러서는 하천 정비보다는 환경적 기능을 중시하면서 물이용과 관련된 공간적 기능이 서로 조화할 수 있도록 관리할 필요가 있다. 따라서 미래의 기후변화에 따른 하천의 수온변화 예측에 대한 적절한 대비가 있어야 하천 환경의 유지 관리가 용이할뿐더러 수문학, 농업, 하천환경, 하

천 생태학, 기상학, 자연 재해 등의 다방면에 기초 자료를 제공하고 정부의 정책결정자에게 가이드라인을 제시할 수 있을 것이다(정세옹, 오정국, 2006).

하천의 수온을 예측하기 위하여 물리적인 이론에 바탕을 둔 이송방정식을 수치모형화하여 해를 찾으려는 시도가 있었다(Stefan and Sinokrot, 1993). 이는 기후인자를 입력 자료로 이용하여 수온을 예측해내는 일반적인 수치 기법이다. 그러나 복사열 또는 일조시간, 강수, 풍속, 풍향, 습도, 기압, 지형도, 위도, 경도, 기온 등 방대한 기상자료를 필요로 하는 단점이 있다. 설사 이러한 물리적 모형이 정확도에서는 통계적 또는 경험적 모형보다 미미하게 앞선다 하더라도 물리적 모형의 정확도는 입력 자료의 질과 조건이 절대적으로 지배하기 때문에 이러한 조건을 충족하기는 쉽지가 않다.

미래의 하천 수온은 수중 생물의 환경조건을 파악하는 중요한 인자이나 미래의 수온을 관측한다는 것은 불가능하다. 따라서 기존의 관측 자료를 이용하여 기온-수온 관계를 미리 설정하여 놓고 수온을 예측하는 방법을 흔히 사용하며, 미국에서는 지역적 특성을 반영한 비선형 상관관계를 이용하여 분석하는 연구가 있었다(Mohseni et al., 1998; Mohseni, Stefan, 1999; Mohseni et al., 1999; Mohseni et al., 2002; Morril et al., 2005; Benyahya et al., 2007). 보다 정확하게 수온 자료를 추정하기 위해서는 보다 신뢰할 만한 수온-기온 관계를 도출하는 연구가 필요하다. 선행 연구(안지혁, 이길하, 2013)에서는 우리나라 4대강 유역 하천에서 기온변화에 상응하는 수온의 상승 여부를 파악하기 위하여 환경부에서 수집한 하천수온 자료와 이에 대응하여 지리적으로 가장 가까운 기상청의 기온 자료를 이용하여 기온과 수온의 통계적인 특성분석, 상관관계 분석을 수행한 바 있다. 특히 기온의 상승기(rising limb)와 하강기(falling limb)로 분리하여 계절적으로 수온의 증감 양상이 다르게 나타나는 이력현상을 보여 주었다. 선행연구의 연장선상에서 수행된 연구로서 기온변화에 상응하는 수온반응을 파악하기 위하여 기온과 수온자료의 비선형 상관관계 분석을 수행하였다. 기존의 연구에서 제시되는 선형 상관관계의 한계를 극복한 비선형 상관관계를 분석하는 것에 무게를 두어 보다 간단하고 실용적이면서도 상대적으로 향상된 수온 추정기법을 보여주고자 한다.

## II. 대상 지역 및 관측 자료

우리나라에서는 환경부 산하 국립환경과학원에서 주요 하천에 대하여 국가수질관측망을 설치하여 실시간으로 수온 및 오염물질의 농도를 관측하고 있다. 한 관측소에서 수집한 기온과 수온 자료를 일대일 매칭으로 놓고 기온과 수온 상관관계를 이끌어내는 게 이상적이다. 그러나 국가수질관측망에서는 기상관측을 수행하고 있지 않기 때문에 공간적으로 같은 지점에서의 기온과 수온 자료의 일대일 매치가 불가능하다. 대안으로 국가수질관측망 수온 관측소에서 지리적으로 가장 가까운 기상관측소를 선별한 후 기상관측소의 기온자료를 가져와 기온과 수온의 일대일 매칭으로 보고 분석을 수행하였다. 그림 1과 2는 각각 연구에 사용된 기온 관측소와 수온 관측소의 위치를 보여준다. 분석기간은 2009년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지의 3년간 자료이다.

물론 수온의 자료 기간이 충분히 길면 더 신뢰성 있는 결과를 도출하리라 예상된다. 그러나 3년의 연구 대상 기간 동안에 관측된 자료가 전형적인 값을 보였으며 특별히 이상한 관측현상이 발견되지 않았으므로 기존 관측 자료를 이용하여 기온-수온의 관계를 규명하는 이 연구에서는 큰 물리적인 손상이 없다고 사료된다.

수온은 미국 YSI사의 YSI600XL, 600EDS, 600XL BCR와 독일 SEBA사의 Qualilog-16 제품을 이용하여 관측하였으며, 오차 범위가  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 이다. 수온 관측은 수면으로부터 50cm가 기본이며 수위에 따라 변할 수 있으며 관측간격은 5분이며, 일 자료는 5분 간격으로 측정된 자료를 평균한 자료이다. 분석에 앞서 정확도를 보장하기 위해서는 자료의 품질 검증이 선행되어야 한다. 결측 자료는 선형 내삽법을 이용하여 보완(filling)하였으며, 장기간의 결측 구간은 자료 분석의 신뢰성을 확보하기 위하여 분석에서 제외시켰다. 정규분포를 가정하여 관측값이 95% 신뢰구간을 벗어나는 자료는 다른 자료 와는 확연히 다른 양상을 보이고 있는 이상자료(outlier)라고 간주하고 전체적인 분석에 미치는 영향이 클 것으로 판단하여 분석에서 제외하였다. 수온 자료에서는 이상자료로 판단되는 이상의 자료 분석결과 수온의 자료는 최소 873개(영산강 유역의 서창 관측소)에서 최대 1084개(금강 유역의 용담호 관측소)에 이르렀다.

4대강 유역 하천의 관측 지점에서 수온 및 기온자료의 기본적인 통계정보 및 분석은 선행 연구(안지혁, 이길하, 2013)를 참조하면 더 자세하게 알 수 있다.

그림 1 전국의 기온 관측소

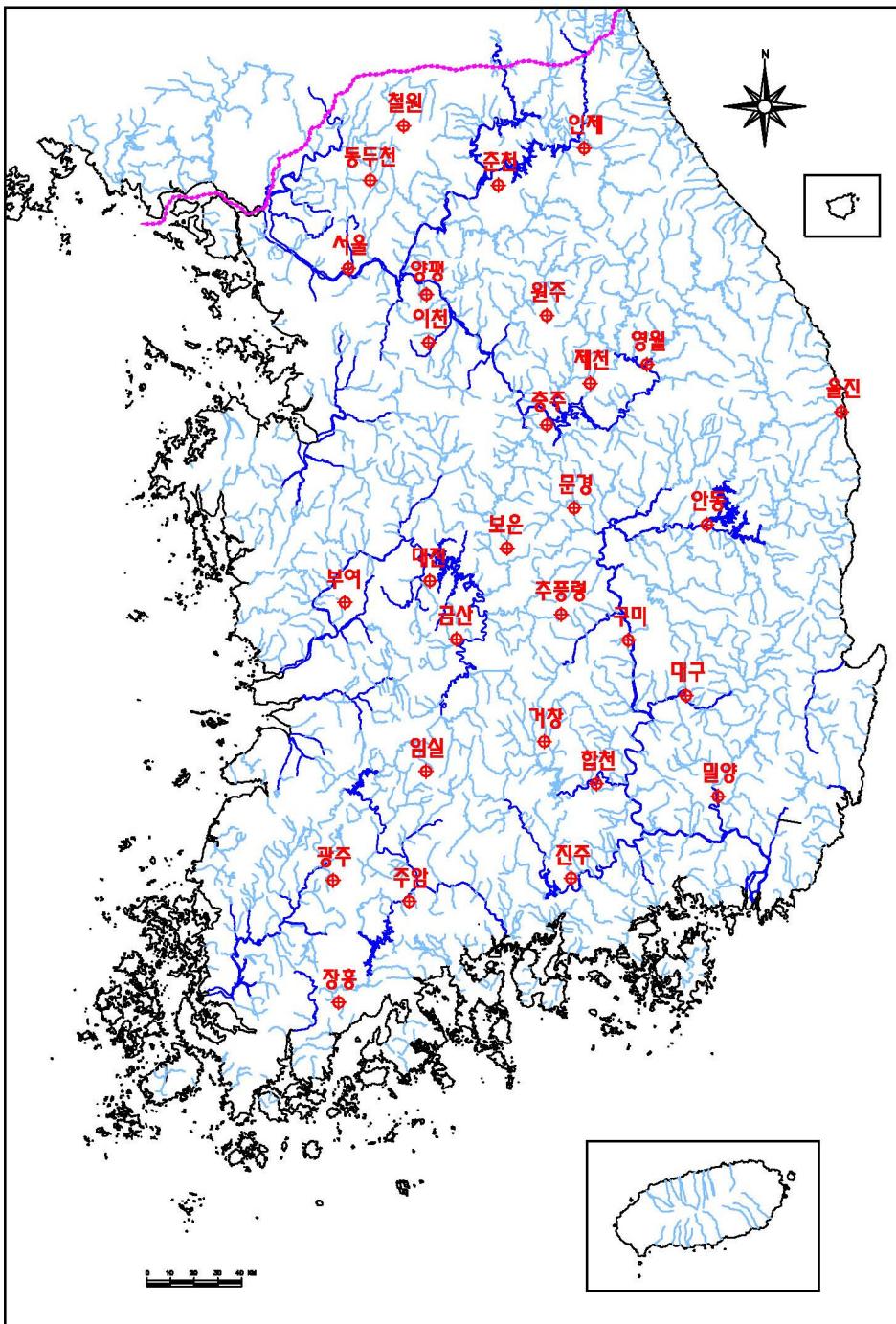
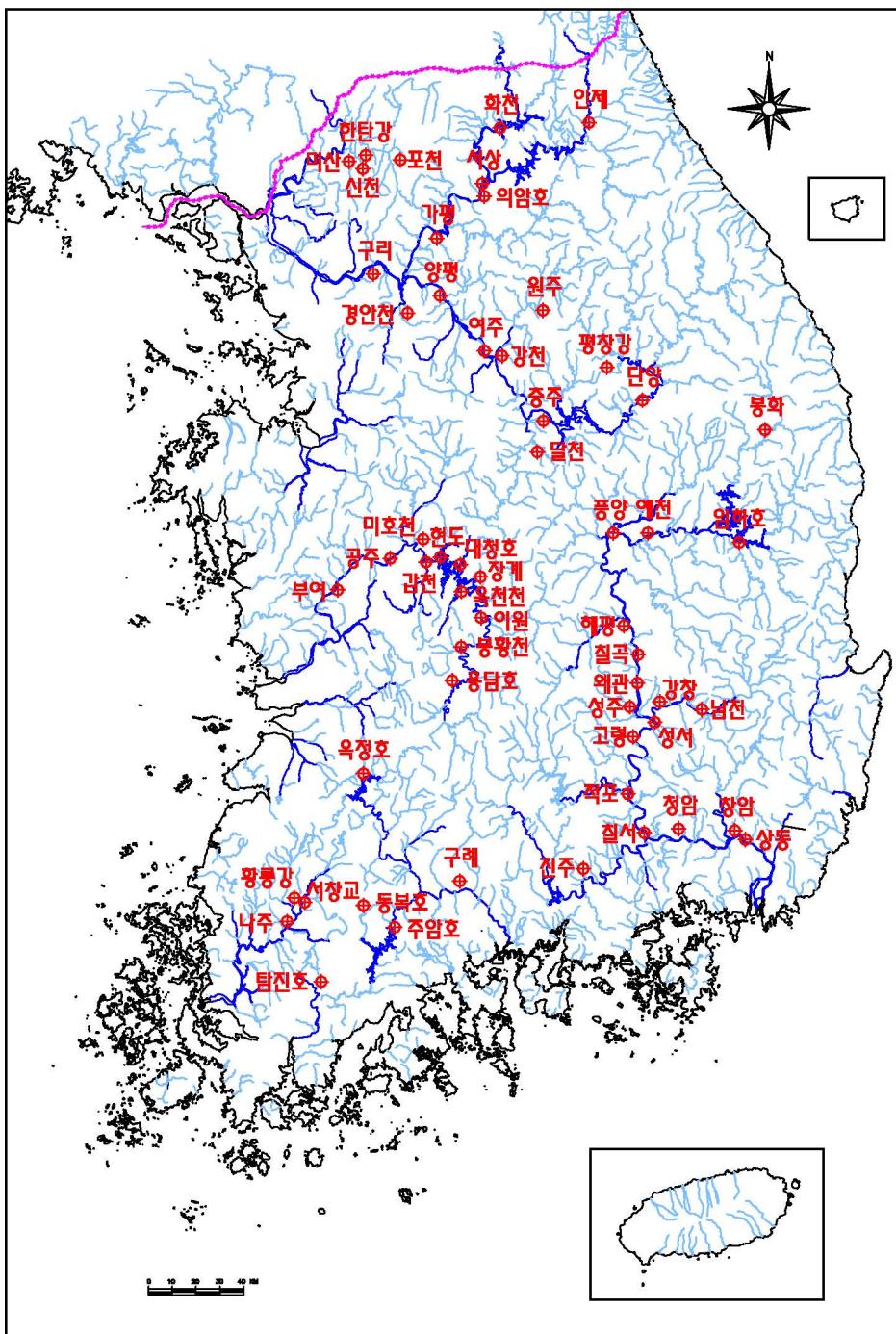


그림 2 전국의 수온 관측소



### III. 이론적 배경

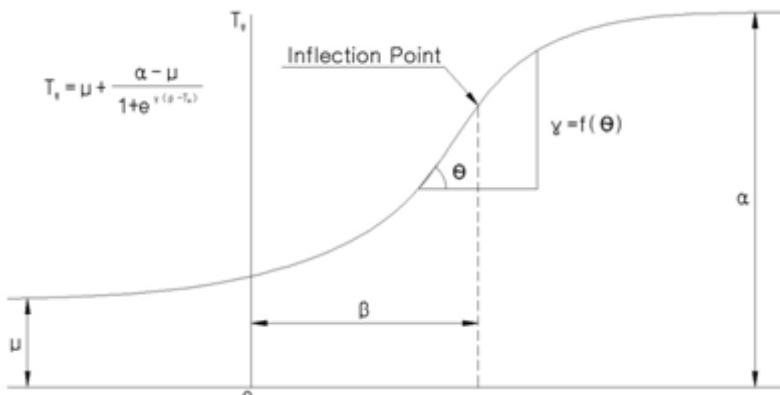
#### 1. 비선형 기온-수온 관계모형

대기에서 수면으로 열전도가 일어날 때 대기보다 밀도가 큰 물에 열이 저장되는 데 걸리는 시간이 대기보다 크기 때문에 최대 및 최소 수온에 도달하기까지는 시간지체 (delayed lag) 현상이 일어난다. 따라서 기온-수온 상관관계는 시간규모에 따른 최대 온도와 최소 온도에 차이가 있으므로 수온의 변화양상이나 수중의 생태반응을 고려할 때 일주일의 기간이 적합한 것으로 판단되어 주평균 자료를 이용하여 분석하였다 (Webb, 1987; Preud'Homme, Stefan, 1993). 일반적으로 기온-수온 관계에서 기온 증가에 비례하여 수온이 증가하는 경향을 보이다가 기온이 최고조에 이르는 여름철에는 수온의 증가 추세가 약해진다. 여름에서 가을로 접어들면서 기온이 하강에 비례해서 수온이 감소하는 경향을 보이다가 기온이 최하로 떨어지는 겨울철에는 수온의 감소 추세가 약해진다. 따라서 기온-수온 관계는 선형보다는 S-모형을 보이는 비선형 로지스틱(logistic) 함수 관계에 더 가깝다(Pilgrim, Stefan, 1995). 로지스틱 함수는 생태학에서 개체군 성장 또는 인구 성장 모형의 단순한 모델로 고안된 미분 방정식, 또는 차분 방정식을 말하며, 혼돈이론의 초기 연구 대상의 하나로 연구되어 현재는 생태학뿐 아니라 여러 분야에서 응용되어 쓰이고 있다(Gershensonfeld, 1999; Jannedy, Bod, Hay, 2003; Kingsland, 1995). 로지스틱 함수는 지수함수를 따라 성장하다가 어느 한계점에 도달하면 성장이 거의 평행선을 따라 이루어진다. 저점에서는 성장이 평행선을 따르다가 급격한 성장을 거치게 되며 변곡점에 다다르면 고점으로 변하게 되고 다시 평행선을 따르는 S자 모형의 곡선이다. 하천의 수온도 지하수의 영향을 받아 겨울철에는 상승(+) 효과를 가져오고 반대로 여름철에는 하강(-) 효과를 가져온다(Mohseni et al., 2002; Morril et al., 2005; Pilgrim, Stefan, 1995; Preud'Homme, Stefan, 1993; Webb, 1987). 따라서 식 (1)로 제시되는 로지스틱 함수 형태를 선정하여 기온-수온 비선형 관계분석을 수행하였다.

$$T_w = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{r(\beta - T_a)}} \quad (1)$$

여기서,  $T_w$ 는 모형에서 추정하는 수온(기온자료를 이용하여 추정되는 수온),  $T_a$ 는 관측된 기온을 나타낸다. 수식에 의하면  $\alpha$ 는 최대 수온,  $\beta$ 는 변곡점에서의 기온,  $\gamma$ 는 변곡점에서의 기울기,  $\mu$ 는 최소 수온으로 모형의 매개변수에 해당한다.

그림 3 로지스틱 함수 모형의 개요



식 (1)로 제시되는 곡선은 기울기, 변곡점까지의 거리, 최대 수온, 최소 수온에 해당하는 4개의 매개변수( $\alpha, \beta, \gamma, \mu$ )를 가진다. 4개의 매개변수는 지역의 특성을 반영하고 있기 때문에 지역과 관측 지점에 따라 매개변수를 결정해야 한다. 비선형 모형의 최적화된 매개변수 결정은 많은 시간이 필요하고 어려운 문제이나 모형의 정확도에 지배적이기 때문에 주의를 기울여 구할 필요가 있다.

## 2. 매개변수의 최적화

최대 온도, 최저 온도, 중간 값, 기울기 등 지역의 기온변화 특성을 고려한 비선형 기온-수온 관계에서 4개의 매개변수를 결정하여 관계식을 완성할 필요가 있다. 이때 4개의 매개변수를 결정하기 위하여 적어도 4개 이상의 관측값을 이용하는 것이 일반적이다. 각 하천의 관측 지점에서 관측값과 4개의 매개변수로 결정된 모형 추정치의 오차는 목적함수(objective function) O로 구성할 수 있으며, RMSE(Root Mean Square Error) 오차가 최소화되도록 하였다. 보정(calibration)과정은 n개의 매개변수를 일정

경계 범위 이내에서 반복적으로 시행착오를 거쳐 목적함수 O의 값을 최소화하면서 수렴할 때까지 찾아가는 것이다.

SCE(Shuffled Complex Evolution) 기법은 Downhill Simplex Algorithm(Nelder and Mead, 1965) 방법에 기초하여 단일 목적함수를 사용한 다변수 최적화 기법으로 개발되었다. SCE 기법은 가능한 매개변수 공간에서 여러 변수를 선택하여 시도하기 위하여 임의로 표본 선정을 반복한다. SCE최적화 기법은 일반적인 최적화 기법의 취약점중의 하나인 국지적 최적화 지점(local minima 또는 secondary minima)에 도달하는 문제를 극복하고 다경로(complex)를 통해 반복 수행함으로써 광역 최적화 지점(global minima)에 도달하도록 개발되었다. SCE 기법은 가능한 매개변수 경계 범위를 미리 선정하여 놓은 후 그 범위 내에서 오차 목적함수 O가 최소가 되도록 최적화된 매개변수를 결정한다. 그래서 SCE 기법은 수문모형 또는 기상 모형과 같은 비선형 수치 모형의 광역(global) 최적화된 매개변수를 추정하는 데 많이 이용되었다.

#### IV. 분석 결과

기온-수온 모형의 최적화 과정에서 추정의 정확도를 정량화하기 위하여 Nash-Sutcliffe coefficient of Efficiency(NSC)(Nash and Sutcliffe, 1970)값과 RMSE 오차를 다음과 같이 이용하여 계산하였다.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (K_{simi} - K_{obsi})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{K}_{obsi} - K_{obsi})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{simi} - T_{obsi})^2}{n-4}} \quad (3)$$

여기서, T는 수온, 첨자로 사용한  $obs_i$ ,  $sim_i$ 는 각각 관측치, 계산치를 의미하며, n은 사용한 자료의 개수, 변수 상단의 bar(-) 표시는 평균값을 의미한다. NSC값의 최대값은 1로, 1에 접근할 수록 추정 정확도가 높음을 의미하며, RMSE오차는 오차의 크기를 나

타내므로 작을 수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미한다.

기온-수온 관계는 지역에 따라 다양한 영향인자 특성을 보이는데 특히 물이 공기에 비하여 비열이 크다는 물리적 특성 때문에 일반적으로 나타나는 이력현상을 고려하여 관계를 도출할 수도 있다(Crisp, Howson, 1982; Webb, 1987; Webb, Nobilis, 1997). 그래서 우선 기온과 수온 관계를 찾아내기 위해서 온도 상승기(rising limb: 이른 봄에서 여름철로 이동하는 온도 증가시기)와 온도 하강기(falling limb: 늦여름에서 겨울철로 이동하는 온도감소시기)에 따른 계절적 이력현상을 고려하여 수온상승시기와 수온하강시기에 대하여 서로 다른 상관관계곡선을 구축해 보았다. 식(1)에서 제시한 비선형 상관관계의 우수함을 보여주기 위하여 선형 상관관계를 앞서 분석한 후 서로 비교하였다.

우선 <표 1>에서 선형과 비선형 모형 분석의 기본적인 통계분석과 상관관계를 보여 주고 있다. <그림 4>와 <그림 5>는 4대강에서 각 1개 관측소를 대표관측지점으로 선정하여 상승기와 하강기에 대하여 분석한 관측값과 예측값의 산포도를 보여준다. 대표관측관측 지점은 임의로 선정되었으며 한강 유역은 서상관측소, 낙동강 유역은 칠곡관측소, 영산강 유역은 탐진호관측소, 금강 유역은 갑천관측소로 선정하였다. 전반적으로 전 지점에 대하여 분석결과의 경향이 비슷하기 때문에 임의로 선정된 대표관측지점에서 분석 결과의 대표성을 전혀 손상하지는 않는다고 판단하였다.

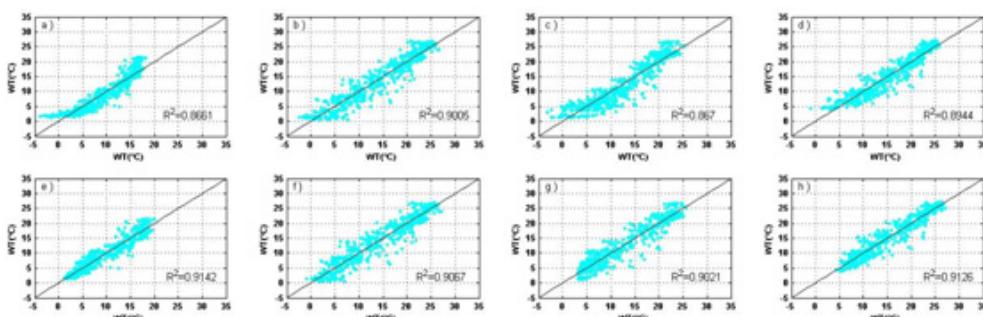
선형 모형의 결과를 분석하면 전반적으로 비선형에 비하여 오차가 큰 편이다. 한강 유역의 평창강 지점을 보면 상승기에서는 RMSE가 2.889, NSC가 0.872이며, 하강에서는 RMSE가 2.670, NSC가 0.902이다. 일반적으로 여름철이 겨울철보다 증발로 인해 잠열(latent heat flux) 손실이 크다. 우기 이후의 지하수 유입이나 봄철의 융설 유입은 최대 온도나 최소 온도의 값을 상쇄시키는 효과를 가져오므로 선형보다는 비선형 형태의 기온-수온 관계를 형성할 수도 있다(Stefan, Preud'home, 1993; Stefan, sinokrot, 1993). 또 하천 수온에는 복사열, 복사열의 장애물에 의한 차단 정도, 유역에서 유출되는 하천수 및 지하수의 온도, 수면에서의 열 교환 등을 포함한 복합적인 요소가 영향을 미치므로 선형 모형의 대안으로서 식 (1)의 비선형 관계식을 이용하여 기온-수온 관계를 분석해 시도해 보았다(Pilgrim, Stefan, 1995). 선형 모형의 분석결과와 같이 <표 1>에서 비선형 모형 분석 결과에 대한 기본 통계치를 비교하여 볼 수 있다.

표 1 선형과 비선형 모형 분석 결과에 대한 기본 통계치

유역	관측소	상승기				하강기			
		RMSE		NSC		RMSE		NSE	
		선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형
한강	평창강	2.889	2.612	0.872	0.896	2.670	2.399	0.902	0.921
	원주	2.688	2.504	0.884	0.899	2.433	2.248	0.921	0.933
	강천	2.773	2.599	0.893	0.906	2.661	2.486	0.913	0.924
	여주	2.313	2.075	0.876	0.900	2.102	2.009	0.923	0.930
	양평	2.784	2.592	0.866	0.884	2.549	2.416	0.907	0.917
	서상	2.138	1.711	0.866	0.914	2.088	1.794	0.901	0.927
	의암호	2.469	2.066	0.862	0.903	2.254	2.087	0.884	0.900
	가평	2.387	2.093	0.867	0.898	2.470	2.305	0.880	0.896
	경안천	2.572	2.403	0.902	0.914	2.540	2.348	0.918	0.930
	구리	2.715	2.514	0.864	0.883	2.532	2.419	0.900	0.909
	포천	2.485	2.304	0.895	0.910	2.767	2.616	0.877	0.890
	신천	2.402	2.273	0.897	0.908	2.383	2.210	0.922	0.933
낙동강	임하	3.588	3.013	0.793	0.854	2.361	2.119	0.904	0.922
	예천	2.471	2.369	0.887	0.896	2.324	2.218	0.922	0.929
	풍양	3.005	2.907	0.843	0.853	3.071	2.893	0.873	0.887
	해평	2.803	2.737	0.894	0.899	2.332	2.193	0.945	0.951
	칠곡	2.544	2.463	0.901	0.907	2.392	2.248	0.930	0.939
	왜관	2.885	2.780	0.866	0.876	2.439	2.291	0.923	0.932
	성주	2.986	2.872	0.863	0.873	2.493	2.336	0.922	0.932
	남천	1.822	1.703	0.877	0.892	1.653	1.484	0.916	0.932
	강창	2.596	2.521	0.867	0.875	2.455	2.344	0.899	0.908
	성서	1.929	1.794	0.860	0.879	1.649	1.476	0.910	0.928
	진주	2.280	2.230	0.904	0.908	2.357	2.110	0.920	0.936
	상동	2.747	2.625	0.887	0.897	2.679	2.429	0.906	0.923
영산강	서창교	2.304	2.146	0.879	0.895	1.939	1.802	0.934	0.943
	황룡	2.709	2.583	0.884	0.895	2.503	2.383	0.923	0.930
	옥정호	3.070	2.493	0.840	0.895	2.391	2.275	0.893	0.903
	주암호	2.863	2.335	0.863	0.909	2.510	2.218	0.871	0.899
	탐진호	2.762	2.370	0.867	0.902	2.358	2.220	0.894	0.906
금강	용담호	3.201	2.386	0.836	0.909	2.083	2.022	0.911	0.916
	봉황	2.273	2.108	0.901	0.915	2.320	2.161	0.908	0.920
	이원	3.037	2.885	0.878	0.890	2.834	2.604	0.909	0.923
	장계	3.042	2.706	0.884	0.908	2.850	2.586	0.881	0.902
	옥천천	2.699	2.532	0.883	0.897	2.482	2.343	0.915	0.925
	대청호	3.098	2.269	0.850	0.920	2.117	2.017	0.911	0.919
	갑천	2.221	2.020	0.894	0.913	1.944	1.865	0.929	0.935
	미호천	2.710	2.543	0.884	0.898	2.368	2.237	0.924	0.932

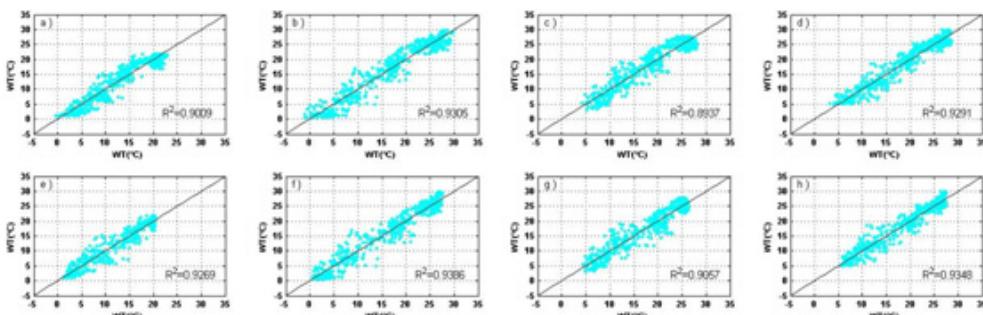
우선, 대표관측지점인 서상관측소에서는 이력현상을 고려하여 기온상승기와 기온하강기를 분리하여 관계식을 구한 결과 비선형모형을 이용한 경우에는 NSC가 0.914(온도 증가 시), 0.927(온도 감소 시)로 선형모형을 이용한 경우의 0.866(온도 증가 시), 0.901(온도 증가 시)보다 약 0.03 증가하였다. 한편, RMSE 오차는 1.711(온도 증가 시), 1.794(온도 감소 시)로 선형관계식을 이용한 경우에서의 2.138(온도 증가 시), 2.088(온도 감소 시)보다 약 0.4°C 감소하였다. 나머지 관측소에서도 정도의 차이는 있으나 일반적으로 기온수온 관계의 비선형 추정결과와 단순 선형 관계식을 이용한 추정결과를 비교하였을 때, 계산된 NSC와 RMSE 오차 모두 감소하는 경향을 보인다.

그림 4 대표관측지점의 상승기에서 수온의 추정치와 관측치의 상관관계



주: a) 서상관측소(한강)-선형, b) 칠곡관측소(낙동강)-선형, c) 탐진호관측소(영산강)-선형, d) 갑천관측소(금강)-선형, e) 서상관측소(한강)-비선형, f) 칠곡관측소(낙동강)-비선형, g) 탐진호관측소(영산강)-비선형, h) 갑천관측소(금강)-비선형

그림 5 대표관측지점의 하강기에서 수온의 추정치와 관측치의 상관관계



주: a) 서상관측소(한강)-선형, b) 칠곡관측소(낙동강)-선형, c) 탐진호관측소(영산강)-선형, d) 갑천관측소(금강)-선형, e) 서상관측소(한강)-비선형, f) 칠곡관측소(낙동강)-비선형, g) 탐진호관측소(영산강)-비선형, h) 갑천관측소(금강)-비선형

이상의 결과에서 제시된 바와 같이, 관측 지점 모두 식 (1)로 제시되는 비선형 기온-수온 관계를 표현하는 곡선이 보다 우수한 추정결과를 보이고 있으며 향후 하천 환경에서 수리, 수문, 수질 및 생태 분야의 전반적 기후변화 반응을 검토할 때에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 판단한다.

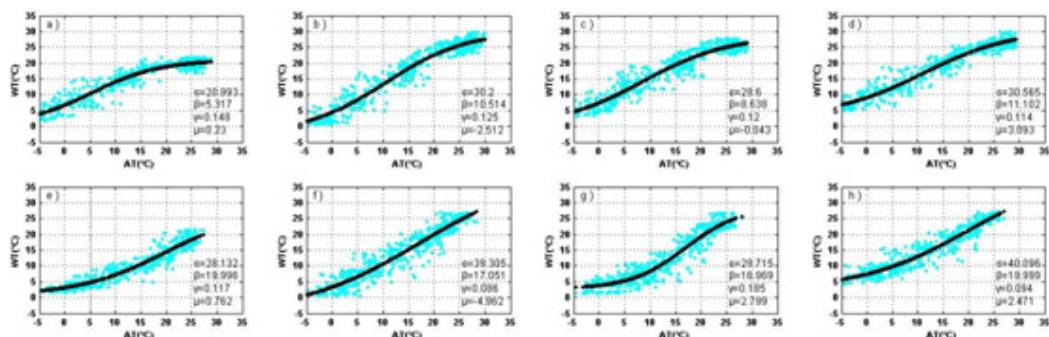
수온 예측에서 모형을 적용할 때에도 지역적 지형과 기후 특성을 반영하여 지점별로 구한 매개변수를 이용하여야 할 것이며, 관측 지점별로 상이한 매개변수를 보여줄 것이다. <표 2>에서는 전 관측 지점에 대하여 앞서 설명한 최적화 기법을 이용하여 구한 비선형 모형의 매개변수를 보여준다. <표 2>에서 구한 매개변수를 이용하여 대표 관측지점에서 완성한 비선형 추세선을 <그림 6>에서 보여준다. 시각적으로 보더라도 상승기와 하강기 모두 비선형 관계식이 더 적합한 것으로 보인다.

표 2 각 지점에서 최적화한 비선형 모형의 매개변수

유역	관측소	상승기				하강기			
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\mu$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\mu$
한강	평창강	31.124	14.965	0.123	-1.232	25.044	10.017	0.167	0.413
	원주	37.062	17.523	0.091	-3.081	27.223	10.04	0.135	-0.656
	강천	34.079	14.22	0.103	-3.149	28.515	9.376	0.131	-1.196
	여주	35.548	19.994	0.092	-0.272	27.892	8.471	0.111	0.226
	양평	39.214	19.584	0.084	-3.077	27.563	8.106	0.12	-1.262
	서상	28.132	19.996	0.117	0.762	20.993	5.317	0.148	0.23
	의암호	32.723	19.994	0.111	0.864	23.346	5.372	0.127	1.042
	가평	23.593	15.144	0.147	0.84	23.618	7.241	0.134	0.376
	경안천	32.793	13.724	0.106	-2.474	27.915	9.364	0.136	-0.506
	구리	28.508	15.131	0.122	-0.509	27.179	9.628	0.123	-0.004
낙동 강	포천	27.684	10.081	0.130	-1.253	26.174	8.089	0.134	-0.273
	신천	31.084	12.228	0.112	-0.004	27.547	8.8	0.135	0.87
	임하	28.942	17.206	0.191	3.996	31.831	0.004	0.081	-11.3
	예천	27.869	13.909	0.121	-0.999	29.695	8.519	0.105	-3.978
	풍양	28.335	13.388	0.123	-1.579	27.447	8.391	0.149	-0.469
	해평	39.75	17.063	0.09	-4.944	31.481	10.931	0.123	-3.403
	칠곡	39.305	17.051	0.086	-4.962	30.2	10.514	0.125	-2.512
	왜관	29.971	15.276	0.132	-0.055	30.073	12.073	0.131	-0.702
	성주	32.86	16.521	0.118	-1.217	30.121	11.839	0.131	-1.297
	남천	27.371	17.308	0.134	7.278	26.031	10.406	0.144	6.852

유역	관측소	상승기				하강기			
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\mu$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\mu$
영산 강	강창	30.089	15.025	0.128	2.61	29.49	12.986	0.135	2.747
	성서	28.347	16.938	0.149	9.91	27.794	10.809	0.152	9.919
	진주	34.141	14.091	0.104	-1.845	28.302	8.65	0.139	-1.149
	상동	31.092	14.492	0.133	-0.696	29.563	8.628	0.13	-1.885
금강	서창교	33.729	17.772	0.117	4.286	29.517	12.413	0.142	4.602
	황룡	37.322	17.456	0.106	-0.639	31.231	13.256	0.136	0.138
	옥정호	30.882	16.301	0.16	2.659	30.522	4.144	0.094	-1.622
	주암호	28.238	16.323	0.211	4.479	27.975	6.096	0.145	3.847
	탐진호	28.715	16.969	0.185	2.799	28.6	8.638	0.12	-0.043
하강기	용담호	29.603	16.707	0.194	4.038	32.95	4.577	0.077	-2.605
	봉황	32.86	15.823	0.106	0.761	26.968	8.113	0.132	1.386
	이원	33.867	13.971	0.121	-1.764	28.859	10.128	0.161	-0.083
	장계	31.383	13.256	0.145	-0.067	29.582	2.881	0.112	-3.135
	옥천천	33.75	15.611	0.113	-0.412	28.758	10.918	0.135	0.206
	대청호	30.403	16.327	0.185	3.764	32.187	3.982	0.088	-0.162
	갑천	35.096	19.999	0.094	2.471	30.565	11.102	0.114	3.093
	미호천	36.878	16.599	0.105	-0.279	30.697	12.008	0.129	1.089

그림 6 대표관측지점의 비선형 기온-수온) 추세선



주: a) 서상관측소(한강)-상승기, b) 칠곡관측소(낙동강)-상승기, c) 탐진호관측소(영산강)-상승기, d) 갑천 관측소(금강)-상승기, e) 서상관측소(한강)- 하강기, f) 칠곡관측소(낙동강)- 하강기, g) 탐진호관측소(영산강)- 하강기, h) 갑천관측소(금강)- 하강기

## V. 결론

환경부 산하 국립환경과학원에서 주요 하천에 대하여 국가수질관측망을 설치하여 측정된 우리나라 주요 하천의 수온자료와 수온 관측소의 지리적 위치에서 가장 가까운 기상청 기상관측소의 기온 자료를 활용하여 기온-수온 비선형 상관관계모형을 구축하였다. 비선형 모형으로는 로지스틱 함수를 이용하였으며 4개의 매개변수는 SCE 최적화 기법을 이용하여 추정하고, 기온-수온의 비선형 상관관계식을 지점별로 제시하였다. 기온-수온의 비선형 모형이 선형 모형을 이용한 경우와 비교하였을 때, 계산된 NSC와 RMSE 오차 모두 전지역에서 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 전반적으로, 지역적 환경과 기후를 반영하여 개별 관측소에서 복잡한 매개변수 추정과정이 불가피하지만 로지스틱 모형을 이용한 비선형 관계식이 보다 적합한 것으로 파악되었다. 향후, 기후변화에 따라 하천 환경이 변할 것이고 미래 수온 자료의 예측은 필수적일 것이다. 우리나라 지역에서 기온-수온 상관관계 도출연구를 광범위하게 수행함으로써 기후변화 가설(scenario)에 따른 수생환경에서 장래 예상되는 미래의 수온변화 예측 및 이에 상응하는 수리, 수문, 수질 및 생태반응을 모의하여 공학기술자, 환경전문가 또는 정책입안자에게 적절한 대책을 수립할 수 있도록 기본 지침을 제공할 것이다. 수온이 변화하면 물속의 DO농도와 같은 수질 상태가 변하고, 이에 따른 수생태 환경이 달라지게 된다. 따라서 수리, 수문학적 설계와 운영에서 하천의 수질과 생태환경의 반영이 필수적이므로 수공구조물의 규모나 위치선정이 달라지고 하천 운영과 관리 전략이 달라지게 된다. 이에 수반한 하천의 흐름 양상과 패턴이 달라지게 되므로 환경적 분석이 뒤따라야 하며, 이를 새롭게 정비하여 관리 기준과 정책 현안 등에 반영하여야 할 것이다.

## 참고문헌

- 안지혁, 이길하. 2013. “우리나라 하천의 기온-수온의 상관관계 및 이력현상 분석: 미래 하천수온 변화 예측을 위한 사전검토”. 「환경정책연구」 12(2): 17–32.
- 정세웅, 오정국. 2006. “대청호 상류 하천에서 강우 시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발” 「수자원학회논문집」 39(1): 79–88.
- Asselman, N. E. M., H. Middelkoop, and P. M. Dijk. 2003. “The impact of change in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine” *Hydrological Processes*, 17: 3225–3244.
- Benyahya, L, Saint-Hilaire, A, Quarda, T.B.M.J., Bobee, B, and Nedushan, B. 2007. “Modeling of water temperature based on stochastic approaches: case study of Deschutes river”. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(4): 437–448.
- Caissie, D., El-Jabi, N., and Satish, M. G. 2001. “Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperature”. *Journal of Hydrology*, 251: 14–28.
- Crisp, D. T., and G. Howson. 1982. “Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennines and English Lake District”. *FishwaterBiol*, 12: 359–367.
- Gershenfeld, Neil A. 1999. *The Nature of Mathematical Modeling*. Cambridge, UK:Cambridge University Press.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: *Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press.
- Jannedy, S., Bod, R., Hay, J. 2003. *ProbabilisticLinguistics*. Cambridge, Massachusetts: MITPress.
- Kingsland, Sharon E. 1995. *Modeling nature:episodes in the history of populationecology*. Chicago:University of Chicago Press.
- Lyons, J., Stewart, J. S., and Mitro, M. 2010. “Predicted effects of climate warming on the distribution of 50 stream fishes in Wisconsin, U.S.A.”. *Journal of Fish Biologoy*, 77:1867–1898.

- Mohseni, O., and Stefan, H. 1999. "Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation." *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 218(3–4): 128 – 141.
- Mohseni, O., Ericson, T. R., Stefan, H. 1999. "Sensitivity of stream temperature in the United States to air temperature projected under a global warming scenario." *Water Resources Research*, 35(12): 3723–3733.
- \_\_\_\_\_ 2002. "Upper bounds for stream temperature in the contiguous United States." *Journal of Environmental Engineering*, 128(1):4–11.
- Mohseni, O., Stefan, H., and Ericson, T. R. 1998. "A nonlinear regressionmodel for weekly stream temperature." *WaterResour. Res.*, 34(10):2685 – 2692.
- Morril, J. C., Bales, R. C., Conklin, M. H. 2005. "Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality". *Journal of Environmental Engineering*, 131(1): 139–146.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. "River flow forecasting through conceptual models, I–A Discussion of principles". *Journal of Hydrology*, 10:282–290.
- Pedersen, N. L. and Sand-Jensen, K. 2007. "Temperature in lowland Danish streams: contemporary patterns, empirical models and future scenarios". *Hydrological Processes*, 21:348–358.
- Pilgrim, J. M. and H.G. Stefan. 1995. *Correlation of Minnesota stream water temperatures with air temperatures, Project. Rep. 382. St Anthony Falls Lab., U of Minn.* Minneapolis.
- Preud' home, E.B., Stefan, H.G. 1993. "Stream temperature estimation from air temperature". *Water Resources Research*, 29(1): 27–45.
- Rehana, S. and Mujumdar, P. P. 2012. "Climate change induced risk in water quality control problems". *Journal of Hydrology*, 444–445:63–77.
- Stefan, H. G. and B.A. Sinokrot. 1993. "Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams". *Climate change*, 24:353–381.
- Stefan, H. G. and E. B. Preud'home. 1993. "Stream temperature estimation from air temperature". *Water Resources Research*, 29(1):27–45.
- Stockle, C. O., P.T. Dyke, J. R. Williams, C.A. Jones, and N.J. Rosenberg. 1992. "A method for estimating the direct and climate effects of rising atmospheric carbon dioxide

- on growth and yield of crops: Part II. Sensitivity analysis at three sites in the Midwestern USA". *Agricultural Systems*, 38:239–256.
- Webb, B. W. 1987. "The relationship between air and water temperatures for a Devon river". *Rep. Trans. Devonshire Assoc. Adv. Sci*, 119:197–222.
- Webb, B. W., and F. Nobilis. 1997. "Long term perspective on the nature of the air–water temperature relationship: A case study". *Hydrological Processes*, 11:137–147.