

(뒷면)

(측면)

(앞면)

<p>보고서 발간 번호 예: PE 9 8 5 3 D</p> <p>H L D S 기 법 을 이 용 한 · · ·</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>주 의 (편집순서8)</p> </div> <p>(16 포인트 고딕체)</p> <p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p> <p style="text-align: center;">↑ 5cm ↓</p>	<p>보고서 발간 번호 예: PE 9 8 5 3 D</p> <p>H L D S 기 법 을 이 용 한 · · ·</p> <p>한 국 해 양 연 구 원</p> <p style="text-align: center;">↑ 5cm ↓</p>	<p style="text-align: right;">PE-985-3D보고서발간번호 (14포인트 중고딕체)</p> <p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p> <p style="text-align: center;">Hysteresis Loop Down-Scaling 기법을 이용한 연안 수온변화 예측기술 개발(총괄과제명) (20 포인트 중고딕체)</p> <p style="text-align: center;">Development of the Coastal Water Temperature Prediction Model using the Hysteresis Loop Down-Scaling Method (16 포인트 신명조체)</p> <p style="text-align: center;">↑ 5cm ↓</p> <p style="text-align: center;">2011.05.31 (16 포인트 신명조체)</p> <p style="text-align: center;">한 국 해 양 연 구 원 (20 포인트 중고딕체)</p> <p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p>
---	---	---

제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “Hysteresis Loop Down-Scaling 기법을 이용한 연안 수온변화 예측기술 개발에 관한 연구”과제의 (연차,최종)보고서로 제출합니다.

2011. 5. 31.

총괄연구책임자 : 조 홍 연

참 여 연 구 원 : 김 경 욱

“ : 조 범 준

보고서 초록

과제고유 번호	PE9853D	해당단계 연구기간		단계 구분	최종보고서
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	창의연구사업 (Lab. 창의과제)			
	세부과제명	Hysteresis Loop Down-Scaling 기법을 이용한 연안 수온변화 예측기술 개발			
연구책임자	조 홍 연	해당단계 참여연구원수	총 : 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 3 명 내부: 3 명 외부: 명	총 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계 : 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 해양환경보전연구부		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>GCM 모형 결과의 Down-Scaling 기법 적용을 통하여 우리나라 연안의 수온변화 양상을 예측하는 모형을 개발·적용하였다. 모형의 적용과 관련하여 기상자료의 검정에 관한 논문을 게재("환경영향평가, 2011.10. 학진등재")하였으며, 기상자료를 이용한 환경변수 추정에 관한 논문도 게재("환경영향평가, 2011.10. 학진등재")하였다. 또한, 기온변화와 수온변화의 변동성분을 각각 간단한 관계식(비율 또는 차이) 연결하는 방법도 SCI 논문에 게재(J. of Environmental Engineering; 현재 Online Version)하였다.</p> <p>Down-Scaling 기법은 다양한 기법을 적용하여 광역 기상자료 및 GCM 추정자료를 이용하여 국지적인 환경자료(수온자료 포함)를 추정하는 방법으로, 기법의 적용에 앞서 기법에 사용하는 자료의 품질검정이 매우 중요하며, 보다 구체적으로는 기온자료를 이용한 수온추정방법의 경우 기온과 수온 추정 관계의 기후변화에 따른 영향검토도 수행되어야 한다. 본 연구에서는 기온과 수온의 관계가 간단한 하나의 회귀곡선으로 표현하는 방식이 아니라 Hysteresis LOOP 형태를 고려하기 위하여 Parametric 함수형태를 도입하였으며, 본 연구에서 제안한 방식이 기존의 선형 회귀분석에 의한 추정방법보다 보다 우수한 추정결과를 보여주고 있음을 확인하였다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	이력고리모형, 기온, 연안 수온, GCM 자료, Down-Scaling 기법			
	영 어	Hysteresis Loop Model, Air Temperature, Coastal Water Temperature, GCM data, Down-scaling method			

요 약 문

I. 제 목

Hysteresis Loop Down-Scaling 기법을 이용한 연안 수온변화 예측기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

- 전구 기후변화 모형의 결과를 우리나라 연안의 수온예측에 적용할 수 있도록 하는 이력현상(hysteresis loop)을 고려한 Down-scaling 방법의 개발
- 개발된 방법의 정량적인 예측수준 및 적용(활용)방안 검토

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

- 광역격자(한반도가 2개 정도의 격자)로 예측되는 기후변화 모형의 한반도 주요 지역 적용을 위해서는 Down-Scaling 기법 적용이 필요
- 다양한 기상자료를 이용한 연안 수온 추정과정이 신뢰할만한 자료의 가용상황으로 제한되는 상황에서 수온 및 장기간 축적되어 활용 가능한 자료를 이용하여 연안 수온변화를 추정하는 신뢰할만한 수준높은(RMS 추정오차 1.℃ 수준) 기술개발이 필요

나. 경제, 산업적 측면

- 기후변화로 예상되는 장래 연안 및 내만의 수온변화는 수산자원 및 양식활동·어업활동의 생산성이 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단.
- 연안의 환경변화에 대응하여 수산업 분야의 생산성 향상을 위해서는 연안의 환경변화 예측이 매우 중요.

다. 사회, 문화적 측면

- 전지구적인 환경변화가 국지적으로 미치는 영향에 대한 분석으로 사회적인 지구온난화 문제 대처 노력에 대한 관심 증대.
- 수산분야의 식량자원 보호 및 확보를 위한 범국민적인 관심이 증가.

III. 연구개발의 내용 및 범위

○ 가용하고 신뢰할만한/ 장기간 축적된 기상자료(특히 기온)를 이용하여 연안의 수온(또는 환경변화 인자)을 신뢰할만한 수준(RMS 오차 1.0 °C 수준)으로 예측하는 모형 개발. (본 모형은 연구책임자가 일본 PARI 연구연가 과정에서 개발한 모형으로 일본 미카와만 부이자료를 이용하여 검증한 바 있으나, 우리나라 자료를 이용한 모델 예측 수준에 대한 검토는 미시행).

IV. 연구개발결과

GCM 모형 결과의 Down-Scaling 기법 적용을 통하여 우리나라 연안의 수온변화 양상을 예측하는 모형을 개발·적용하였다. 모형의 적용과 관련하여 기상자료의 검정에 관한 논문을 게재("환경영향평가, 2011.10. 학진등재")하였으며, 기상자료를 이용한 환경변수 추정에 관한 논문도 게재("환경영향평가, 2011.10. 학진등재")하였다. 또한, 기온변화와 수온변화의 변동성분을 각각 간단한 관계식(비율 또는 차이) 연결하는 방법도 SCI 논문에 게재(J. of Environmental Engineering; 현재 Online Version)하였다.

Down-Scaling 기법은 다양한 기법을 적용하여 광역 기상자료 및 GCM 추정자료를 이용하여 국지적인 환경자료(수온자료 포함)를 추정하는 방법으로, 기법의 적용에 앞서 기법에 사용하는 자료의 품질검정이 매우 중요하며, 보다 구체적으로는 기온자료를 이용한 수온추정방법의 경우 기온과 수온 추정 관계의 기후변화에 따른 영향검토도 수행되어야 한다. 본 연구에서는 기온과 수온의 관계가 간단한 하나의 회귀곡선으로 표현하는 방식이 아니라 Hysteresis LOOP 형태를 고려하기 위하여 Parametric 함수형태를 도입하였으며, 본 연구에서 제안한 방식이 기존의 선형 회귀분석에 의한 추정방법보다 보다 우수한 추정결과를 보여주고 있음을 확인하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

○ 본 연구는 전 지구적인 환경변화가 우리나라 연안에는 국지적으로 어떤 영향을 미칠 것인가에 대한 정량적인 분석에 활용하는 연구로, 전지구적인 광역모델(우리나라를 포함하는 격자가 2개 정도로 공간적인 해상도가 매우 낮은 수준)을 하는 연구팀과 국지적인 영향분석을 연구하는 팀 및 수산자원 분야의 연구팀과의 유기적인 협조관계가 필요한 과제로 발전시켜야 한다.

○ 본 연구에서 개발된 모형은 전지구적인 모형과 연계하여 우리나라 특정 연안에 대하여 모형을 적용하여 연안 환경변화 및 수산자원에 미치는 영향분석을 수행하는 기술이전이 가능하다. 또한 다양한 연안 환경 모니터링을 하는 해양관측기지를 구축하여 자료를 생성하는 연구팀과의 자료 활용연구도 중요하다.

S U M M A R Y

I. Title

Development of the Coastal Water Temperature Prediction Model using the Hysteresis Loop Down-Scaling Method

II. The goal and necessity of research

1. The goal of research

- Development of the down-scaling method considering the hysteresis loop-type relationship which can apply to the estimation of the water temperatures using the GCM model results in the coastal zone, Korea.
- Checking and test on the prediction level and application method of the suggested method.

2. The necessity of research

(1) Technical aspect

- Down-scaling method is needed for GCM data to apply the local areas because the grid size of the GCM is too coarse. Korean peninsula is covered only 1~2 grids of the GCM.
- Coastal water temperature estimation is highly limited due to weather data availability. The reliable technical method on the estimation of the coastal water temperatures is required only using the long-term available data set.

(2) Economic and industrial aspect

- The water temperature in the coastal bay will be changed by the climate change. It is expecting to directly affect the fishery resources and productivity of the aqua-culture and fishery activities.
- It is very important to estimate the environmental change for the fishery productivity improvement with respect to the climate change.

(3) Social and cultural aspect

- The concern and action-plan coping with the climate change become a hot issue. The local effect due to the global climate change impact should be analysed.
- Public concern on the food resources protection in the fishery market is increasing.

III. Contents and scopes of research

○ Development of the reliable estimation model on the coastal water temperature using the available and long-term weather data(especially air temperature)

IV. Research outcome

The model estimating the coastal water temperature is developed by applying the down-scaling method of the GCM data. In relation to this study, the article on the climate data qualification has been published on the EIA(Environmental Impact Assessment) journal. The article title is "Climate Data Qualification for Water Quality Impact Assessment".

Another article including the core down-scaling method also has been published as an online-version in the J. of Environmental Engineering, ASCE. This article is titled as "Development of an air-water temperature relationship model to predict climate-induced future water temperature in estuaries". Down-scaling method is the local parameter estimation method using the global model results. In this study, the method is focused on the local water temperature estimation only using the global and/or local air temperature data. The novel type method considering the hysteresis loop shape relationship between air and water temperatures are suggested and evaluated based on the RMS(root-mean squared) error comparison. The newly-suggested method shows more accurate estimation results than that using the existing regression method.

V. Plans of applying research outcome

○ This study is related to the local impact assessment by the global climate change. The joint-research between global climate model research team, fishery resources evaluation team, and local coastal impact analysis research team should be organized as the open and flexible inter-relationship network.

○ There are much data set provided by the various coastal monitoring projects. The data sharing and analysis in depth should be carried out in the perspective of the modeler and data providers doing the monitoring projects.

(KEYWORDS : 이력고리모형, 기온, 연안 수온, GCM 자료, Down-Scaling 기법, Hysteresis Loop Model, Air Temperature, Coastal Water Temperature, GCM data, Down-scaling method)

C O N T E N T S

Summary	iii
Contents	vi
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Review of research topic	3
Chapter 3. Research Outcome	4
Chapter 4. Contribution of research	7 2
Chapter 5. Plans of applying research outcome	8 2
Chapter 6. References	9
Appendix	30

목 차

요약문	i
목 차	vii
제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	4
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	27
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	28
제 6 장 참고문헌	29
부 록	30

제 1 장 서 론

1. 연구개발의 목적

- 지구 기후변화 모형의 결과를 우리나라 연안의 수온예측에 적용할 수 있도록 하는 이력현상(hysteresis loop)을 고려한 Down-scaling 방법의 개발
- 개발된 방법의 정량적인 예측수준 및 적용(활용)방안 검토

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

- 광역격자(한반도가 2개 정도의 격자)로 예측되는 기후변화 모형의 한반도 주요 지역 적용을 위해서는 Down-Scaling 기법 적용이 필요
- 다양한 기상자료를 이용한 연안 수온 추정과정이 신뢰할만한 자료의 가용상황으로 제한되는 상황에서 수온 및 장기간 축적되어 활용 가능한 자료를 이용하여 연안 수온 변화를 추정하는 신뢰할만한 수준높은(RMS 추정오차 1.℃ 수준) 기술개발이 필요

나. 경제, 산업적 측면

- 기후변화로 예상되는 장래 연안 및 내만의 수온변화는 수산자원 및 양식활동·어업활동의 생산성이 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단.
- 연안의 환경변화에 대응하여 수산업 분야의 생산성 향상을 위해서는 연안의 환경변화 예측이 매우 중요.

다. 사회, 문화적 측면

- 전지구적인 환경변화가 국지적으로 미치는 영향에 대한 분석으로 사회적인 지구온난화 문제 대처 노력에 대한 관심 증대.
- 수산분야의 식량자원 보호 및 확보를 위한 범국민적인 관심이 증가.

3. 연구개발의 내용 및 범위

- 가용하고 신뢰할만한/ 장기간 축적된 기상자료(특히 기온)를 이용하여 연안의 수온(또는 환경변화 인자)을 신뢰할만한 수준(RMS 오차 1.0 ℃ 수준)으로 예측하는 모형 개발. (본 모형은 연구책임자가 일본 PARI 연구연가 과정에서 개발한 모형으로 일본

미카와만 부이자료를 이용하여 검증한 바 있으나, 우리나라 자료를 이용한 모델 예측 수준에 대한 검토는 미시행).

- 동일한 시간간격, 시간대의 가용한 기온(또는 기상자료)-수온(환경인자) 자료 수집
- 기온변화에 따른 연안의 수온변동 특성 분석 및 Hysteresis Loop 모형의 예측수준 검토

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국외

- 하천에서 기온-수온 상관관계 분석을 통한 담수환경(내수면 어업)에서의 환경변화(수온 변화) 및 상업어류(연어 등)서식환경에 관한 연구가 활발.
- 연안에서의 기상변화 연구는 광역모형을 이용한 기상모형(OGCM+AGCM) 예측연구로 집중. 주로 모니터링에 집중. 자료는 축적되어 있으나 장래 국지적인 변화예측을 위한 연구는 미흡한 실정.

2. 국내

- 국내에서도 관측 및 수치모형을 이용한 연구에 집중. 연안 수온변화 예측은 회귀 분석을 이용한 선형-비선형 예측모형의 적용 수준.
- 기온변화에 따른 수온변화의 이력현상(또는 시차[Time-lag] 등)을 고려한 모델개발·적용은 미흡한 실정. 그러나 연안 수온 관측자료는 다소 산발적이나 장기간의 자료 또는 연속적인 측정자료가 축적되어 있는 실정. 기상자료와 연계하여 분석할 필요가 있으나 연구성과는 단기간의 자료 분석에 집중.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 연구수행 추진체계

- 제1단계: 동일한 시간간격, 시간대의 가용한 기온(또는 기상자료)-수온(환경인자) 자료 수집
- 제2단계: 기온변화에 따른 연안의 수온변동 특성 분석 및 Hysteresis Loop 모형의 예측수준 검토
- 제3단계: GCM 모형 결과의 Down-scaling 기법 적용에 의한 장래 우리나라 주요 연안의 수온변화(또는 가능한 경우의 주요 환경인자) 예측

2. 연구수행 결과

연구수행 결과는 우리나라 기상자료의 품질검정에 관한 연구와 본 연구의 중심이 되는 Hysteresis Loop 모형 개발·적용으로 분류할 수 있다. 기상자료의 품질검정에 관한 연구는 다양한 기상자료의 기본적인 품질검정에 관한 방법으로 연구 성과를 환경영향평가(학진등재논문) 논문에 게재하였으며, 그 주요 내용은 다음과 같다.

또한 Hysteresis Loop 모형 개발 및 적용에 관한 연구 성과는 Journal of Environmental Engineering(ASCE, American Society of Civil Engineers) 논문에 투고하여 심사를 완료하였으며, 현재 Online Version 논문이 가용하다. 주요 내용은 다음과 같다.

제 1 절 기상자료의 품질 검정

기상자료의 품질검정은 Down-scaling 과정 및 연안 환경인자가 기상인자와 밀접한 관련이 있기 때문에 기본적인면서도 매우 중요한 주제이다. 이와 관련된 연구 성과가 논문으로 출판되었으며, 그 전문을 다음에 제시한다. 또한, 기상자료를 이용한 환경인자 추정과정의 정확도 검정에 관한 논문은 부록에 제시하였다.

▣ 제 1 논문

수질영향평가의 신뢰수준 향상을 위한 기상자료의 검정

이길하¹⁾ · 조홍연²⁾

* 대구대학교 토목공학과

** 한국해양연구원 해양환경보전연구부

Climate Data Qualification for Water Quality Impact Assessment

Lee, Khil-Ha* · Hongyeon Cho**

* Department of Civil Engineering, Daegu University

** Marine Environment & Conservation Research Department,
Korea Ocean R&D Institute

Abstract

This study is focused on a climate data integrity to improve water quality assessment due to the social development projects. The study is in an attempt to calculate both extreme ranges of weather data measurements and partly provide means to assess qualification of data which fall within the extremes at the 23 meteorological weather stations. Generally speaking, maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, dew point temperature are in the range of reasonable accuracy. However, there found some outliers of the brightness sunshine hours in Cheonan station. Also some years in Gwangju, Seoul, Wonju, Busan, and Jeju never reach to their upper limit and perhaps the calibration of the equipment is doubtful. The users need to take cautions in using the brightness sunshine hour data in preparation of water resources planning and management by estimating evapotranspiration and river discharge, and/or growth rate of the algae (phytoplankton).

Keywords : climate data qualification, outlier, quality check, water quality assessment

2) Corresponding author : Hongyeon Cho, Marine Environment and Conservation Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Tel: +82-31-400-6318, Fax: +82-31-400-7868, E-mail : hycho@kordi.re.kr

I. 서론

1. 연구의 배경과 목적

다양한 개발사업에 대한 환경영향평가는 주로 대기, 수질, 생활(소음·진동) 환경에서의 예측모델링 기법 등을 이용하여 수행되고 있다. 우리나라는 계절 변동이 뚜렷하기 때문에 보다 정확하고 신뢰할만한 환경영향평가를 수행하기 위해서는 개발사업에 의한 환경부하의 영향과 더불어 계절 변화를 유발하는 기상인자의 변화도 고려하여야 한다. 계절변화를 고려한 환경영향평가는 수치모델링 기법으로 수행되고 있으며, 모형에서 요구하는 입력 자료로서 기상자료는 필수적이다. 신뢰할만한 모델링 예측결과를 도출하기 위해서는 관측 자료를 이용한 모형의 보정 및 검증 과정과 더불어 신뢰할만한 모형 입력자료 확보가 매우 중요하다(Martin and McCutcheon, 1999).

본 연구는 개발사업에 대한 수질환경영향평가를 보다 정확하게 수행하기 위한 기상 입력자료의 검정에 중점을 두고 수행되었다. 기상인자는 직접적·간접적으로 수질인자의 변동에 영향을 미치고 있다. 강수량과 더불어 기본적인 기상자료를 이용하여 추정되는 기준 증발산량 자료는 어떤 유역에서의 수량(유출량)에 영향을 미치고, 수량은 수질에 직접적으로 영향을 미친다. 기온은 수온에 영향을 미치고, 수온은 대부분의 수질항목의 반응계수에 영향을 미친다(Snoeyink and Jenkins, 1980). 또한 수온예측을 위한 열수지(heat budget) 분석과 부영영화, 적조 및 녹조와 관련되어 있는 식물플랑크톤 밀도 예측에 일사량 및 일조시간이 직접적으로 영향을 미친다(Taylor, 2005; Thomann and Mueller, 1987). 따라서 기상자료에 대한 적절한 검정없이 기상자료를 바로 수질예측모형의 입력자료로 사용하는 경우에는 자료의 품질이 의심되는 특정시기 및 특정지점에서는 예측결과에 큰 오차가 포함될 수 있다. 기상자료는 비교적 품질이 양호한 수준으로 인식되고 있으나, 개발사업에 대한 수질환경영향평가는 대부분 특정기간, 특정지점의 기상자료를 사용하기 때문에 기상자료의 품질 검정은 매우 중요하다. 또한 기상자료는 지역에 따라 매우 다른 특성(지역성)을 가지고 있기 때문에 시간적인 변화양상과 더불어 공간적인 변화양상이 적절하게 사업 지역의 특성을 반영하고 있는가를 검토하여야 한다. 본 연구에서는 대표적인 기상자료 검정 기법 등을 사용하여 우리나라의 기상자료 검정을 수행하였다. 검정 기법 자체는 본 논문에서 개발하거나 제안하는 방법은 아니지만 우리나라의 공간적인 특성이 반영된 자료에 대한 검정의 관점에서 의미가 있다고 할 수 있다.

어떤 유역에서의 하천 수량에 중요한 영향을 미치는 기준 증발산량은 기상자료의 품질에 좌우되기 때문에 기상자료의 품질 관리는 매우 중요하다(Lee, 2009). 그러나 우리나라의 경우 기상관측소 및 자동기상관측소(AWS) 등에서 수집한 기상 자료의 품질관리에 대한 노력은 상대적으로 부족하다. 기본적인 기상자료는 풍부한 반면 증발산량, 태양복사열 등은 관측이 곤란하고, 장기관측으로 인한 인력·비용 문제로 인하여 자료가 상대적으로 매우 부족한 실정이다. 따라서 자료부족의 한계를 극복하기 위하여 가용한 다른 기상요소를 이용하여 추정하는 방법이 제안되어 왔으며, 기준 증발산량의 경우 단지 하나의 기상자료(온도)만을 이용하여 추정함에도 불구하고 적정 수준의 정확도를 제공해 주는 Hargreaves 공식(Hargreaves and Samani, 1985)이 사용되고 있다(Hargreaves and Allen, 2003). 또한 증발산량추정기기를 이용한 관측 대신 물리이론에 바탕을 두고 기준 증발산량을 산정하는 Penman-Monteith (PM) 공식을 정해의 대안으로 추천하는 상황에서

태양복사열, 풍속, 온도, 습도와 같은 다양한 기상자료를 필요로 하는 PM 공식 등을 이용하기 위해서는 기상자료의 품질관리는 선행되어야 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

미국의 경우, 실시간 기상자료의 품질관리에 대한 기준(guideline)에는 한계범위를 벗어나는 이상자료(outliers)에 대한 적절한 처리 방법은 제시되어 있으나 한계 범위 내에 들어가는 자료에 대한 품질관리는 대안이 없는 실정이다(CIMIS, 1989).

따라서 본 연구는 이상자료에 대한 적절한 처리와 더불어 부분적으로 한계 범위 내에 들어가는 자료에 대한 품질관리를 이론적인 그리고 전반적인 변화양상을 반영하는 제약조건(constraints) 등을 이용하는 Allen(1996), Irmak et al.(2003) 방법에 기초하고 있다. 이 방법으로 우리나라 주요 기상관측 지점에 대한 전반적인 기상자료 품질 관리를 수행하였으며, 품질관리에서 문제가 되는 자료의 처리방법도 제안하였다. 최근에는 탐구적 자료분석(EDA, exploratory data analysis)의 관점에서 다양한 시각적인 자료 분석이 시도되고 있다(Martinez and Martinez, 2005). 따라서 다양한 형태의 시각정보를 제시하는 기법을 이용하여 기상 자료 등을 검증하는 방법도 유용할 것으로 판단하여, 기상인자의 간단한 치환 또는 환산과정을 산포도, 시계열도, 막대그래프 등을 이용하는 시각적인 검정 방법도 병행하였다.

II. 기상자료 검정에 관한 선행연구 고찰

기상자료를 이용한 연구는 기상자료가 다양한 분야에 영향을 미치기 때문에 매우 다양하다. 대표적인 기상자료 활용연구는 복사량 추정연구(이변우 등, 1991; 이관호·심광열, 2010; Lee, 2010), 결로 추정 연구(윤진일 등, 1998), 물수지 연구(양해근, 2007), 수량-수질변화 연구(박종윤 등, 2008; 김도희, 2007) 등으로 매우 다양하다. 그러나 기상자료 검정에 관한 내용은 미흡하며, 기상자료를 그대로 사용하는 경우가 대부분이다. 김도희(2007)의 논문에서는 건기와 우기의 수질변화에 관한 분석을 다루고 있으나, 강우자료에 대한 검정 내용은 생략되어 있다. 또한 박종윤 등(2008)의 논문에서도 미래의 토지이용(land use) 변화가 수량 및 수질에 미치는 영향을 분석하고 있으나 수량에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 강수량 및 증발량 자료의 검정에 관한 내용은 미흡한 실정이다.

기상자료 검정에 관한 연구는 Meek & Hatfield(1994), Allen(1996), Irmak et al.(2003) 등의 연구가 대표적이다 (Meek & Hatfield, 1994; Allen, 1997; Allen et al., 2006; Irmak et al., 2003; Lee, 2009; Lee, 2010). Meek & Hatfield(1994) 논문에서는 기본적인 기상인자(일사량, 기온, 지중온도, 바람 및 강수량, 습도, 대기압 등)에 대한 검정규칙을 제시하고 있다. 한편 Allen(1996)의 연구에서는 주로 일사량에 중점을 두어 수행되었다. 즉 구름이 없는 조건에서의 최대가능 일사량을 이론적으로 산정하여 관측일사량과 이론적으로 계산된 일사량의 포락곡선(envelope curve)을 비교하여 관측일사량의 검정 및 조정(adjustment) 방법을 제안하고 있다.

사용한 기상자료가 이상이 없는 경우에는 연구결과를 신뢰할 수 있다. 그러나 기상자료의 영향이 중요한 경우, 기상자료에서 오류가 발견되는 경우에는 그 연구결과도 오류가 될 가능성이 매우 크

기 때문에 기상자료를 활용하는 연구는 기상자료에 대한 품질 검정이 매우 중요한 부분을 차지한다고 할 수 있다.

이어지는 기상 자료 검정 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 기상자료는 전반적으로는 양호하지만 적지 않은 지역에서 의심이 가는 자료가 발견되고 있다. 따라서 본 논문은 새로운 기법을 제안하는 논문이라기보다는 우리나라의 기상자료에 대한 기본적인 검정방법과 그 검정결과를 제시하는 논문이다. 향후 기상자료를 활용하는 다양한 연구에서 기상자료가 가질 수 있는 오차를 미리 감지하고 처리하여 보다 향상된 연구 성과를 도출할 수 있는 기본적인 방법을 제안하는 연구이다. 특히 기상인자의 영향을 크게 받는 수질환경영향평가는 기상자료에 대한 검정이 매우 중요하므로 수치모델을 이용한 예측이전에 모형 입력 자료에 해당하는 기상자료의 신뢰수준 검정이 선행되어야 하며, 기본적이고 표준적인 검정방법이 제시되어야 한다. 국내 연구에서는 연구자가 자료에 대한 기본적인 검정은 수행하고 있을 것으로 판단되나, 논문에서 기상자료 검정에 관한 내용이 미흡하기 때문에 검정수준은 매우 큰 격차를 가지게 될 수 있다. 따라서 전반적인 기상자료 검정연구와 더불어 보다 다양한 환경영향평가 관련 자료에 대한 신뢰구간과 오차범위를 판단할 수 있는 자료검정 연구가 수행되어야 할 것으로 판단한다.

기상인자가 수질에 미치는 영향에 관한 민감도 분석연구는 오염물질이 하천이나 호소에서의 수질에 미치는 영향연구에 비하면 매우 미흡한 실정이다. 강우에 의한 수량변화가 수질에 미치는 영향분석 연구는 김도희(2007), 박종운 등(2008)에 의하여 수행된 바 있으나, 기상인자가 다양한 수체(water body)에서 다양한 수질항목에 미치는 민감도 분석사례는 매우 단편적으로 수행되고 있는 실정이다.

Ⅲ. 수질영향평가 항목에 영향을 미치는 기상인자

기상인자가 수질항목에 미치는 영향경로는 다양하고 매우 중요하다. 본 논문에서는 기본적인 기상자료로 제공되는 기상인자, 즉 기온, 습도, 일조시간, 일사량 등을 중심으로 자연적인 수질환경변화의 영향경로를 중심으로 특정 현상 등을 중심으로 분석을 수행·제시하였다.

1. 기온

가장 풍부하고 품질관리 상태가 좋은 기상자료이다. 기온과 수온은 매우 높은 상관관계를 가지고 있으나, 보통 수질환경영향평가를 위하여 사용되는 수온자료는 일사량 자료 등을 에너지 보존방정식을 이용하여 추정하는 방법이 바람직하고 널리 이용되고 있으나, 에너지 보존방정식을 이용하여 수온을 예측하기 위해서는 바람, 일사량, 증발량, 수증기압, 습도 등 추가적인 기상정보를 필요로 하기 때문에 기상정보가 부족한 지역(대부분의 경우 기온정보에 비하여 추가 기상정보는 부족한 상황)에서는 기온정보를 이용하여 추정하는 경우도 빈번하다. 따라서 기온이 수온에 영향을 미친다는 간단한 영향경로 개념을 근거로 보면 수온이 영향을 미치는 모든 반응요소 및 생물의 성장 및 호흡활동에 기온이 영향을 미친다고 할 수 있다. 기온 정보의 품질 검증은 최고기온, 최저기온 자료와 같이 연 변화를 도시하면 그림으로도 자료의 품질 수준을 쉽게 파악할 수 있다. 가장 당연하고 기본적인 기준은 [최저기온 ≤ 평균기온 ≤ 최고기온] 조건으로 표현할 수 있다.

2. 상대습도 및 이슬점 온도

습도 정보를 직접적으로 수질모델링에서 사용하는 경우는 거의 없으나, 습도는 열에너지 수지분석, 증발량 추정 과정에서 기본적으로 사용되는 정보이다. 상대습도이기 때문에 최대는 100%, 최소는 0% 한계(경계)를 가지게 되고, 우리나라는 여름의 습한 기후와 겨울의 건조한 기후조건 양상을 반영하여 전체적인 연간 변화 양상이 적절한 수준인가를 판단하는 방법이 가능하다.

3. 일사량(태양복사량) 및 일조시간

본 연구에서 가장 중심을 두고 취급한 항목이며, 기온, 강수량 등의 정보에 비하여 상대적으로 미흡한 기상인자이지만 수질환경영향평가에서는 매우 중요하고 민감한 영향인자이다. 일사량은 에너지원으로서 기온과 수온변화를 주도하기도 하지만, 광합성을 하는 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 기상인자이다. 특히 식물플랑크톤의 성장은 최근 중요한 문제로 부각되는 적조, 녹조 등의 환경문제와 직결되어 있기 때문에 적절한 수질환경영향평가를 수행하기 위해서는 일사량 및 일조시간 자료의 검정은 필수적이다. 수질모델 입력자료로서 일사량 자료는 매우 중요하지만 일사량 자료가 미흡한 지역에서는 일조시간 자료를 이용하여 일사량을 추정하는 방법을 이용한다. 또한 일사량은 증발량에도 직접적인 영향을 미치기 때문에, 강수량과 더불어 수질환경영향평가의 주요 대상이 되는 하천 수량에 영향을 미치게 되고, 하천 수량은 오염물질의 반응 및 희석 등의 관점에서 수질에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 일조시간을 중심으로 자료의 검정을 수행하였으나 그 기본과정 및 개념은 일사량에도 적용가능하다. 일조시간 자료 검증을 위한 기본개념은 청정한 하늘(clear sky)에서 가능한 최대일조시간 개념으로, 태양의 고도(위도의 함수) 및 연중 시기 정보를 이용하여 계산할 수 있다. 실질적으로는 구름 등의 영향으로 일조시간이 계산된 시간보다는 항상 적게 나타나고 있으나 구름이 없는 맑은 날도 발생하는 경우가 있기 때문에 연간 일조시간 변화 양상에서 보이는 포락선(envelope)은 최대 일조시간에 도달하여야 한다. 전체적인 포락선 변화양상이 이론적인 가능 최대 일조시간과 차이를 보이는 경우에는 관측기기의 검정문제라고 판단하는 것이 합리적이다.

4. 바람, 강수량, 대기압 등

바람 정보는 호소에서의 수질모델링과정에서 공기전달(air transfer aeration)에 영향을 미치는 중요한 인자이며, 강수량은 수량, 대기압은 습도 등과 기본적인 기상정보이기도 하지만 수질모델을 이용한 환경영향평가에서 직접적인 입력 자료로는 사용되지 않고 있기 때문에 본 연구에서는 제외하였다. 그러나 최근 풍력발전에 대한 수요가 증가하면서 바람자료에 대한 검정이 중요한 항목으로 부각되고 있다. 또한 대기압은 해수면 상승을 분석하는 과정에서 조석에 의한 영향과 기상영향을 분석하는 중요한 자료로서의 역할이 있다. 강수량은 기온과 더불어 매우 관리가 잘 되는 그리고 수문분야의 유역유출(rainfall-runoff) 해석에서 매우 중요한 자료이기 때문에 자료 검정이 상대적으로 우수한 기상인자에 해당한다. 본 연구에서는 제외하였으나 기상자료는 용도에 따라 하나 하나 모두 중요한 자료이다.

IV. 기상자료의 검정

1. 기상자료의 기본정보

본 연구에서는 기상청의 23개 기상대에서 관측한 1997년부터 2006년까지 10년 동안의 일평균 기상 자료이다. 관측 자료의 개수(n)는 10년 동안의 일 자료이기 때문에 총 3,652개로 구성되어 있으며, 천안 기상대 결측자료(missing data) 때문에 총 3,617개이다. 본 연구는 기상자료의 장기 변동 분석이 아니라 자료의 검정에 있기 때문에 분석 자료의 기간은 중요하지 않지만 최소한 1년 이상의 자료를 이용하여야 이상자료와 더불어 전체적인 변화양상의 이상유무로 자료 품질을 검정하는 것이 가능하다.

기상 자료는 바다와의 인접거리를 고려하여 내륙 14개 지점과 해안(도서 포함) 9개 지점으로 구분하였으며, 관측위치 및 관측기기의 기본 고도 정보, 분석기간 동안의 기상인자 평균자료를 표 1에 정리·제시하였다. 우리나라는 동계 건조시기와 하계 습윤 시기가 뚜렷하게 구분되는 온대기후이며, 강우의 70% 정도가 여름에 발생한다. 습도와 풍속은 해안 지역이 다소 높으나, 일교차(DTR, Diurnal Temperature Range)는 해안 지역이 약 7 °C로 내륙지역보다 약 3 °C 정도 낮다.

표 1. 기상관측소의 기본 정보.

순번	지점	위도(°)	경도(°)	온도계 지상고도 (m)	풍속계 지상고도 (m)	일조시간 (hour)	풍속 (m/s)	상대습도 (%)	최저기온 (°C)	최고기온 (°C)
1	안동	36.57	128.70	1.5	15.5	5.90	1.57	65.44	6.68	18.15
2	천안	36.77	127.12	1.5	22.0	6.33	1.69	68.46	6.36	17.80
3	청주	36.63	127.43	1.5	10.0	5.86	1.81	64.71	8.18	18.31
4	춘천	37.90	127.73	1.6	9.8	5.68	1.28	70.03	6.21	17.71
5	추풍령	36.22	127.98	1.5	20.7	5.85	2.53	66.06	6.73	17.80
6	대구	35.88	128.62	1.5	18.2	6.10	2.37	59.14	10.05	19.60
7	대전	36.37	127.37	1.6	22.8	5.86	1.92	67.22	8.41	18.52
8	대관령	37.67	128.72	1.8	10.0	5.79	4.29	74.22	2.62	12.16
9	광주	35.17	126.88	1.5	17.5	5.56	2.09	67.15	9.72	19.33
10	전주	35.82	127.15	1.5	18.4	5.50	1.79	68.04	9.17	19.31
11	진주	35.15	128.03	1.5	10.0	6.09	1.61	67.67	7.93	20.05
12	서울	37.57	126.95	1.5	10.0	5.10	2.17	62.64	9.11	17.43
13	수원	37.27	126.98	1.5	20.0	5.80	1.89	65.33	8.09	17.57
14	원주	37.33	127.93	1.6	10.0	5.32	1.08	67.94	6.62	17.89
15	부산	35.10	129.02	1.7	17.8	6.08	3.47	63.73	11.62	19.20
16	강릉	37.75	128.88	1.7	13.8	5.82	2.81	59.11	9.58	17.84
17	흑산도	34.68	125.45	1.5	25.0	5.33	5.70	77.82	11.22	16.18
18	인천	37.47	126.62	1.4	11.0	6.15	2.47	67.65	9.11	17.38
19	제주	33.50	126.52	1.8	12.3	5.06	3.23	68.16	13.37	19.36
20	제주고산	33.28	126.15	1.8	10.0	5.40	7.42	74.39	13.07	18.67
21	목포	34.82	122.37	1.5	15.5	5.92	3.82	71.20	10.55	18.35
22	포항	36.02	129.37	1.6	13.2	6.12	2.72	61.85	10.88	19.02
23	서산	36.77	126.48	1.4	20.2	5.81	2.60	72.71	7.23	17.55

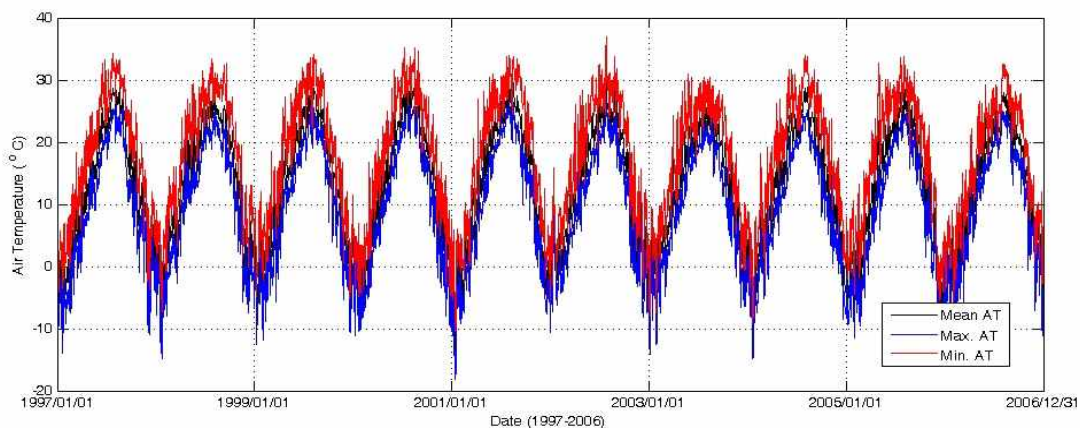
(주) 위치구분 : 내륙관측소(순번 1-14), 해안 관측소(순번 15-23)

2. 기상자료의 검정

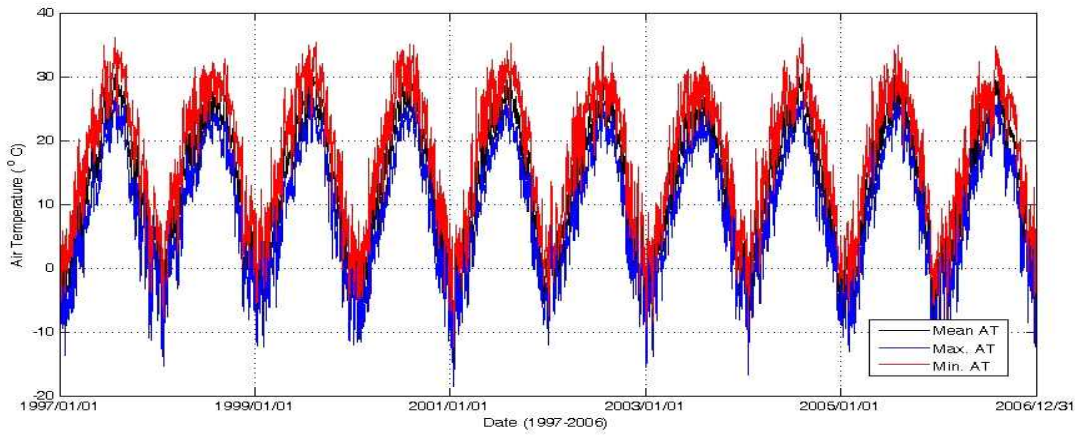
기상자료의 검정은 우리나라 모든 기상대의 자료를 이용하여 수행하였으며 각각의 기상인자에 대한 검정결과는 지점별로 차이를 보이고 있다. 본 논문에서 제시하는 결과는 검정결과가 다소 불량한 지점 및 우수한 다수의 지점을 대표할 수 있는 지점을 선택하여 제시하였다. 따라서 기상인자별로 제시하는 지점이 차이를 보이고 있으나, 본 논문에서 제시되지 않은 지점은 기본적인 기법을 이용한 자료검정 결과가 우수한 자료로 간주할 수 있다.

1) 기온

기온 자료의 검정 과정은 다음과 같다. 일반적으로 기온측정은 상당한 정확도와 신뢰도를 가지고 있기 때문에 간단한 도시(plot)만으로도 이상자료를 판단할 수 있다. 그러나 기온은 변동성분(fluctuation)이 크기 때문에 간단한 시계열도(time-series plot)를 이용한 자료검정은 전반적인 변화양상을 파악에는 적절하지만, 부분적인 이상자료 판단에는 그림 1에서 보이는 바와 같이 매우 곤란하다. 따라서 분석자료의 적절한 처리 또는 변환을 이용한 분석이 유용할 수 있다(Atkinson, 1985). 본 연구에서는 우선 1997년부터 2006년까지의 10년 동안의 자료를 동일 일자에 대하여 평균한 일최고기온(T_{max})과 일최저기온(T_{min}), 일평균기온(\bar{T})을 산정하고, 산정된 일최고기온과 일최저기온을 비교하여 이상자료(outlier)를 도식적으로 선별하며, 동시에 일평균기온이 한계 범위(최고기온과 최저기온의 사이)에 드는지를 판단하였다(그림 2 참조). 그림에서는 각각 해안과 내륙의 대표 지점인 인천, 서울의 장기 최고기온, 최저기온, 평균기온의 연변화 양상 및 최고기온-평균기온, 최저기온-평균기온, 일교차(Diurnal Temperature Range, DTR) 정보를 볼 수 있다. 봄과 가을에 해당하는 시기에 일교차가 약 10°C 정도로 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 매년 다른 지점의 기온도 비교한 결과, 기온자료는 아주 양호한 것으로 파악되었다. 한편 기온자료의 기본적인 특성 분석을 위하여 최고기온과 최저기온을 평균한 기온과 평균기온의 상관관계를 분석하였다. 높은 상관관계가 예상되며, 실제로 분석한 결과 그림 3에서 보이는 바와 같이 상관관계수가 0.99 이상으로 매우 높은 것으로 나타났다. 이러한 특성은 이상 자료를 판단하는 간단한 기법의 하나로 활용 가능할 것으로 판단된다.

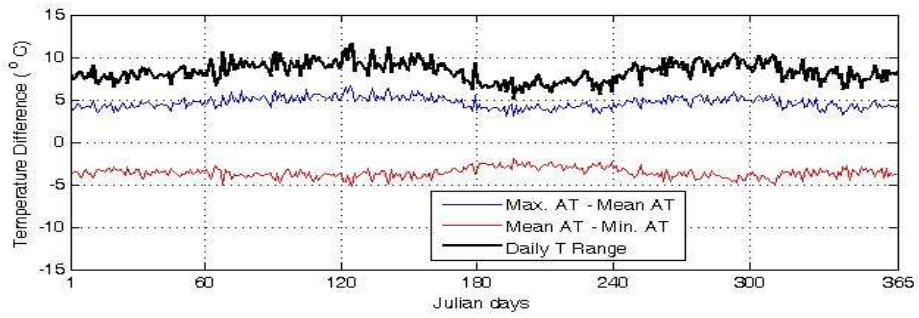
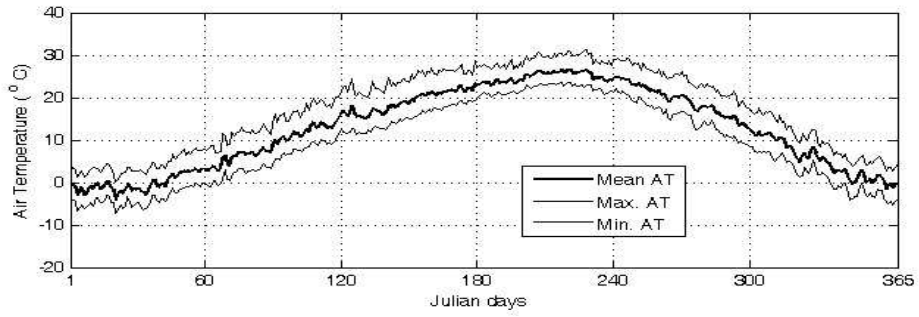


(a) 인천

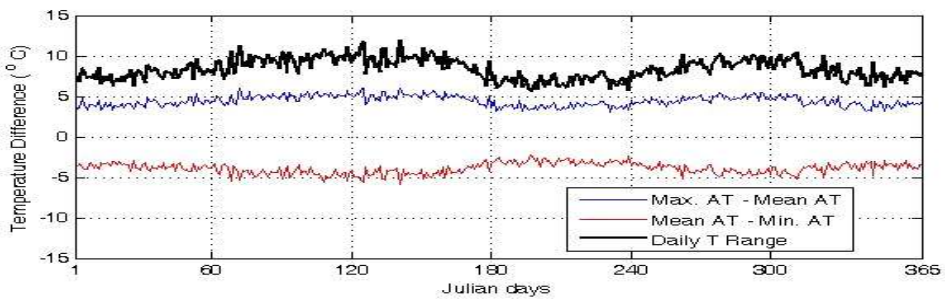
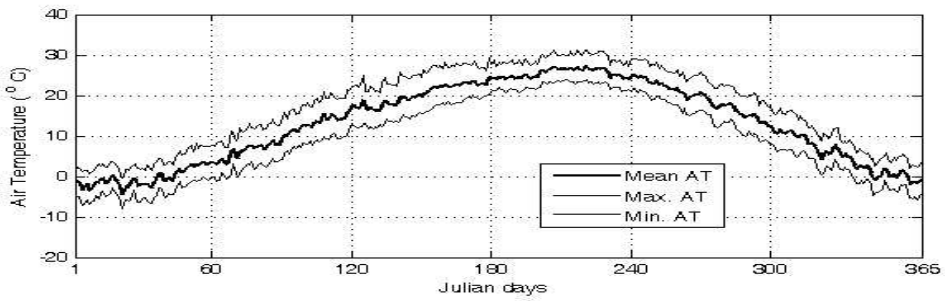


(b) 서울

그림 1. 평균기온 및 최대·최저기온의 변화양상 (1997~2006)

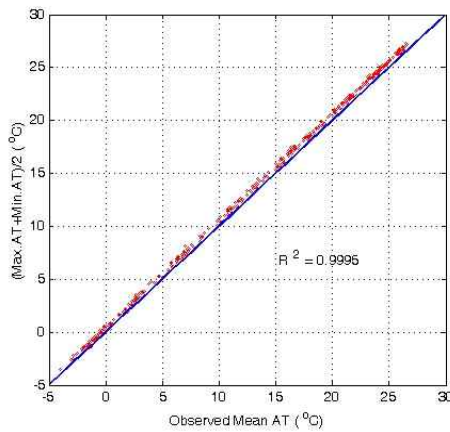


(a) 인천

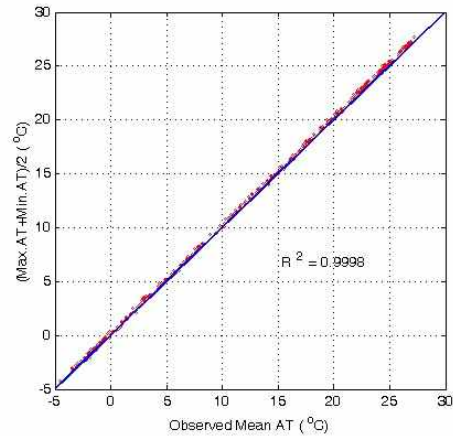


(b) 서울

그림 2. 인천과 서울지점의 10년 평균 연간 기온 및 기온차이



(a) 인천



(b) 서울

그림 3. 관측평균기온과 계산평균기온의 상관관계

2) 상대습도

온대 습윤 기후에서 상대습도의 최대치는 90%를 상회하는 게 일반적이다. 우리나라의 경우 여름은 습윤기후이며, 겨울은 건조기후로 간주할 수 있다. 건조기후인 경우 상대습도의 최소치는 25~30%를 넘어선다. 따라서 습윤 기후에서는 상대 습도의 최소치는 25~30% 범위를 상회하게 될 것이다. 그림 4는 내륙 지점과 해안 지점을 대표하는 안동과 포항의 일평균 상대 습도를 보여준다. 습도자료도 기온과 같이 매우 변동성이 크기 때문에 전반적인 변화양상을 제외하고는 이상자료 등을 감지하기 위해서는 자료의 적절한 변환이 필요하다. 이러한 분석은 최근 탐구적 자료분석(Exploratory Data Analysis)에서 활용되는 방법으로 새로운 분석방법이나 이상자료 추출방법으로 활용이 가능하다(Martinez and Martinez, 2005). 본 논문에서는 습도의 일간 변화 및 습도와 일조시간, 강수량 등과의 상관관계 분석을 수행하였으나 이상자료 추출에는 적절하지 못한 것으로 판단되었다. 그러나 습도분포는 어떤 지역의 기후 특성을 판단하는 인자이기 때문에 장기간의 습도자료의 분포 특성을 이용하여 특정기간의 분포특성을 비교·분석하는 방법이 적절할 것으로 파악되어, 안동과 포항의 습도 빈도분포를 분석하였다(그림 5 참조). 지역에 따라 분포형태가 뚜렷하게 차이가 나고 있는 것으로 파악되기 때문에, 분포형태가 변형·왜곡되는 것을 이상자료를 감지하는 방법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 전반적으로 해안 지역의 상대습도가 약간 높게 나타나는데 이는 해양으로부터의 수분 공급이 원활하기 때문이다. 평균 상대습도는 내륙과 해안이 약 40~90%의 범위로 양호한 것으로 판단할 수 있으며, 계절적인 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 이러한 경향은 전체적인 자료변화 양상을 이용한 자료 품질 검정에서 매우 중요한 기준으로도 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

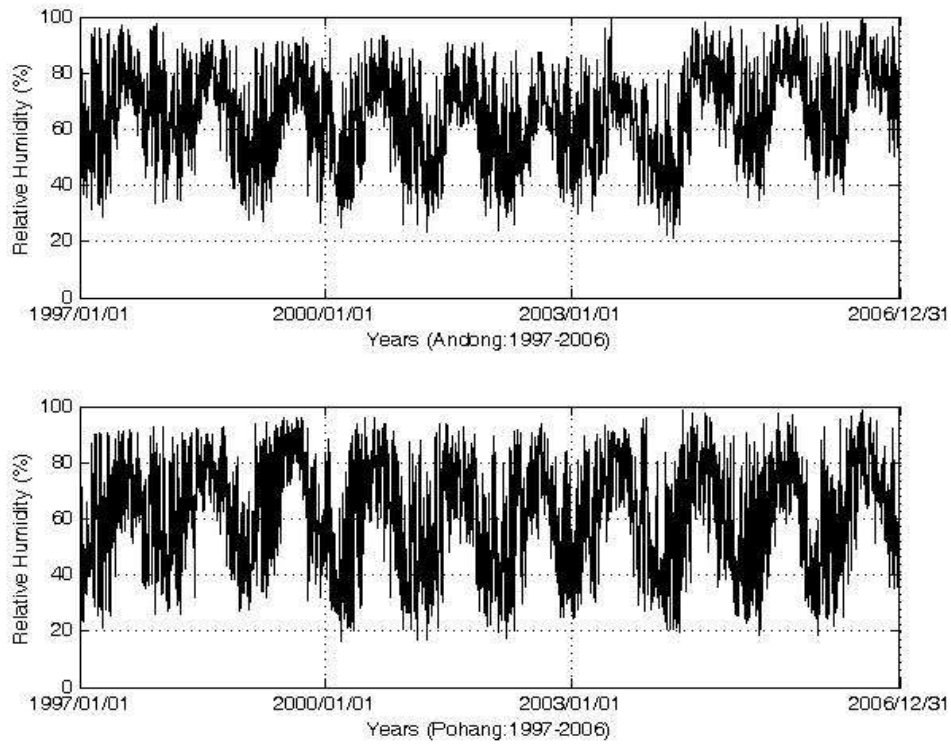


그림 4. 상대습도의 연간 변화 양상 (위 : 안동, 아래 : 포항)

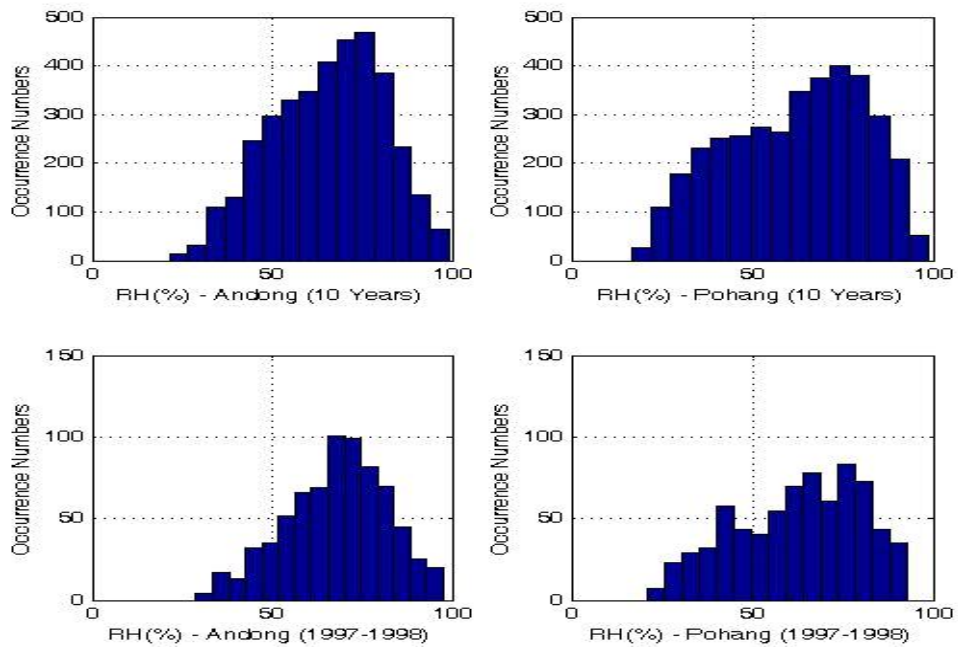


그림 5. 상대습도의 빈도분포

3) 일조시간 및 태양복사량(일사량)

태양에너지와 관련된 기상자료는 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 하나는 태양복사량(일사량, 복사열에너지, MJ/m²-day)이고 다른 하나는 일조시간(hours)이다. 일사량 자료가 없는 지점에서는 일조시간을 이용하여 일사량을 추정하는 경우가 많고, 다양한 경험공식이 제안되고 있기 때문에 일사량과 더불어 일조시간 자료의 검정은 수질모델링, 수온모델링, 증발산량 산정 등 다양한 영역에서 매우 중요한 위치에 있다(Lee, 2010). 일사량과 일조시간 모두 구름이 없는 맑은 날씨를 가정하여 가능한 최대값을 계산하여 품질관리에 이용하는데 본 연구에서는 일조시간을 점검하였다. 일 최대 가능 일조시간(N)은 다음과 같이 계산된다.

$$N = 24\omega/\pi \quad (1)$$

여기서, ω 는 시간각도(radian 단위)로 태양기울기(δ , radian 단위)와 위도(ϕ)의 함수로서 표현되며, 태양기울기는 Julian Day(J)의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\omega = \cos^{-1}[-\tan(\phi) \cdot \sin(\delta)] \quad (2)$$

$$\delta = 0.4093 \cdot \sin\left(\frac{365}{2\pi J} - 1.405\right) \quad (3)$$

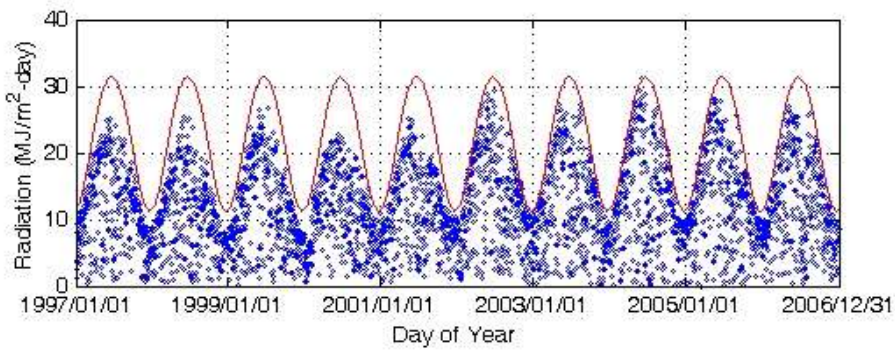
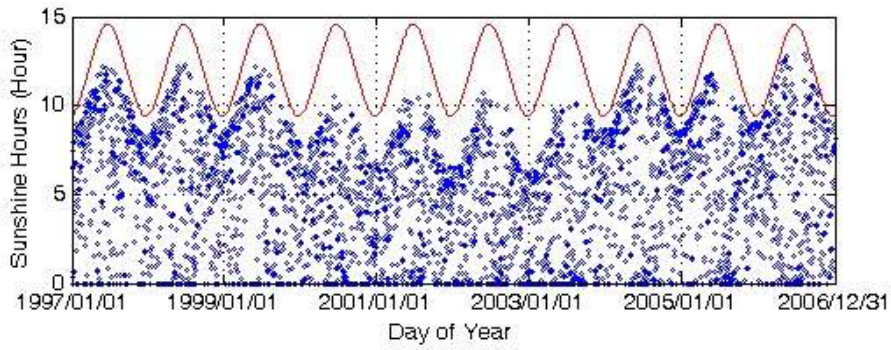
한편 일조시간과 마찬가지로 일사량도 맑은 하늘 조건에서의 최대가능 일사량을 이론적으로 유도하는 식이 제안되어 있기 때문에 일사량의 검정도 가능하다. 지구 대기 상부에서의 이론적인 일사량(Extra-terrestrial solar radiation, R_a [MJ/m²-day])은 다음과 같다(Allen, 1996; <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e07.htm>).

$$R_a = 0.0864K \frac{G_{SC}}{\pi} d [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (4)$$

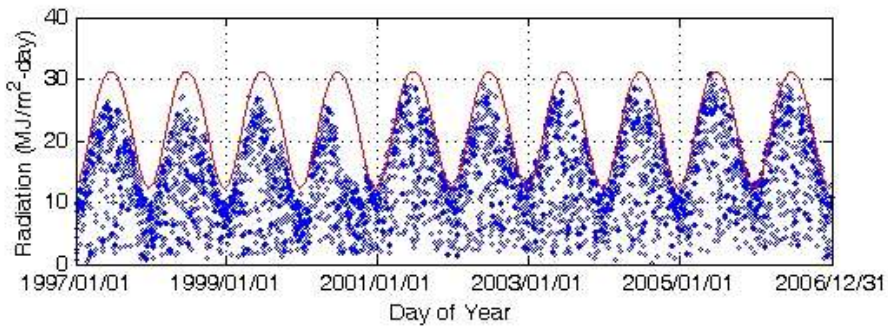
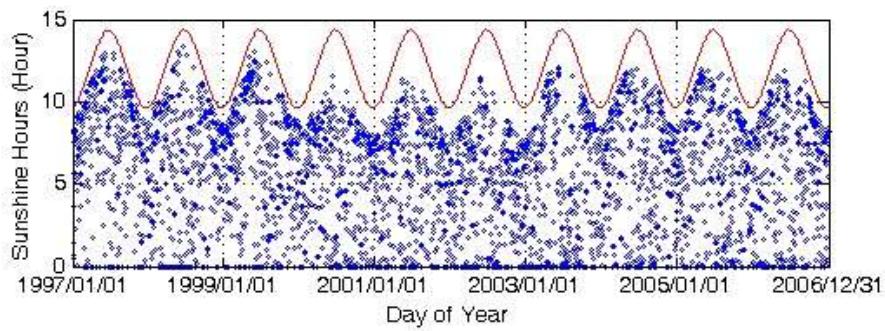
$$d = 1 + 0.033 \cos(2\pi J/365) \quad (5)$$

여기서, G_{SC} 는 태양상수(1,367W/m²), d 는 지구와 태양의 상대거리(astronomical units, 식 (5) 참조, 식 (3)과 유사), K 는 대기상층에서 지표면으로의 맑은 하늘 조건에서의 전달계수로 0.7~0.8 정도의 범위(Allen, 1996; 본 연구에서는 0.75 적용)이다.

그림 6은 10년 동안의 주요 지점의 일조시간 변화양상과 일사량 변화양상을 최대 가능 일조시간과 일사량을 중첩하여 도시하고 있다. 기온과 상대 습도같이 상대적으로 정확도가 높은 기상인자에 비해 일조시간은 흔히 오차나 오류를 쉽게 발견할 수 있다. 일조시간은 근처에 큰 나무가 있는 경우 센서에 그늘이 쳐서 장기적인 오차가 발생하거나 센서에 새가 앉는다거나 이물질이 센서를 가려서 일시적으로도 쉽게 오차를 발생시키기 때문에 꾸준하면서도 지속적인 관리가 필요한 인자이다. 또한 이러한 오류 발생 가능성이 크기 때문에 자료의 검정도 필수적이며 매우 중요하다.

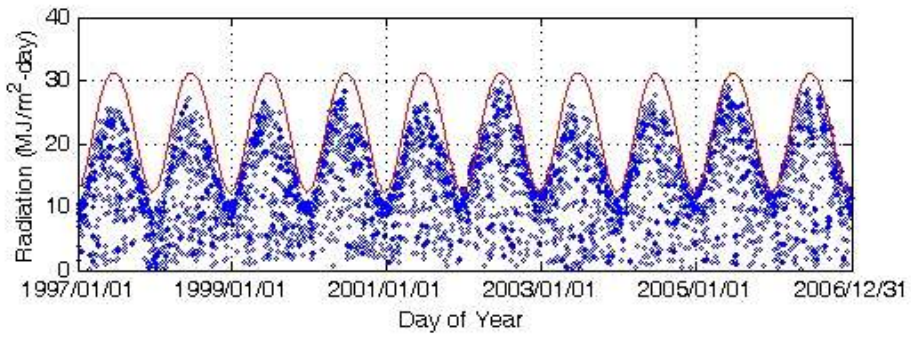
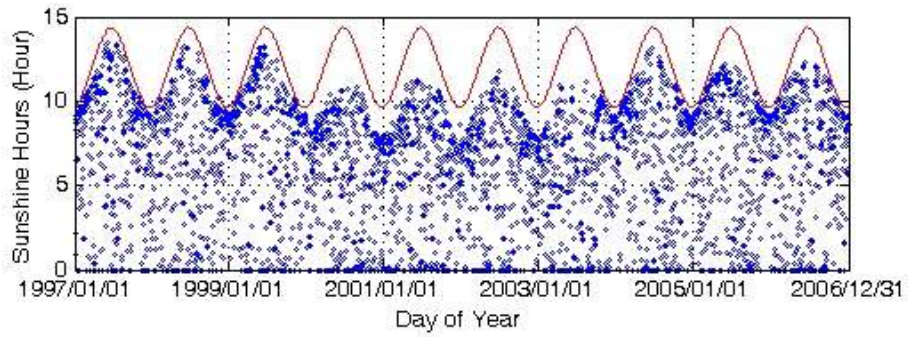


(a) 서울

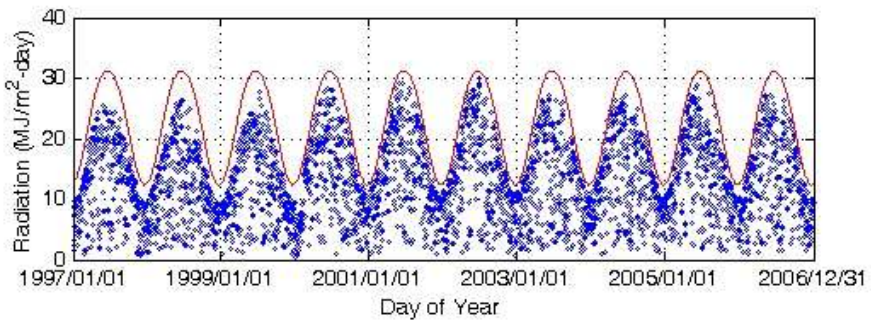
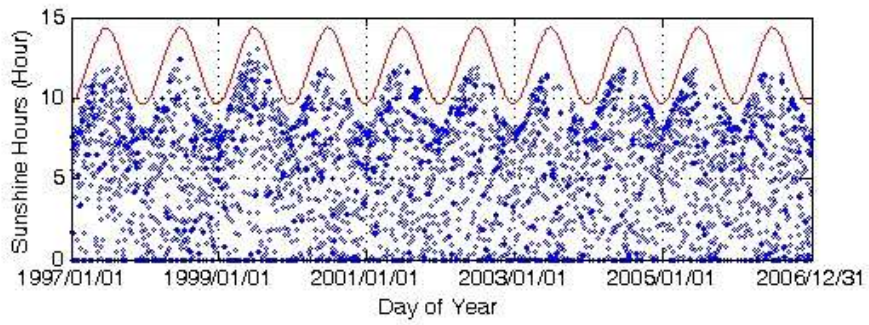


(b) 광주

그림 6. 관측 및 최대가능 일조시간과 일조량의 변화

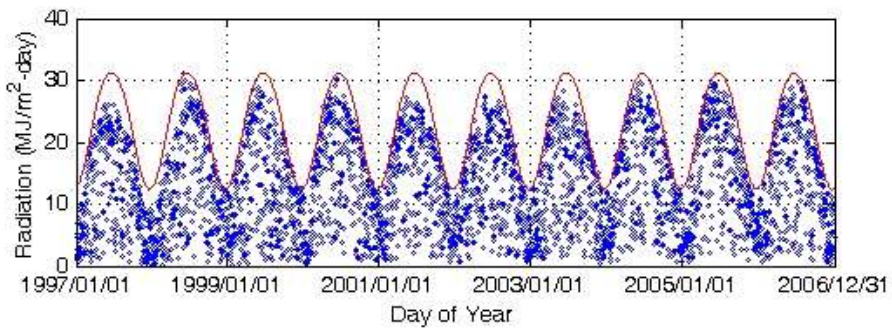
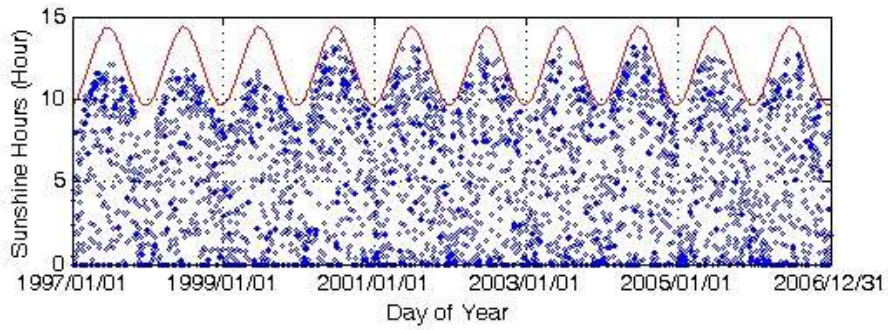


(c) 부산

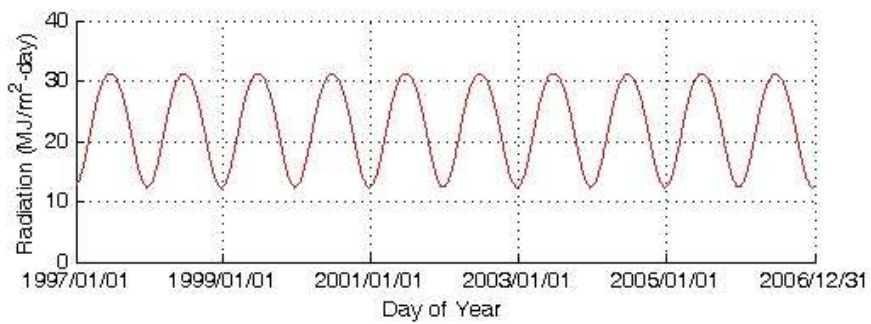
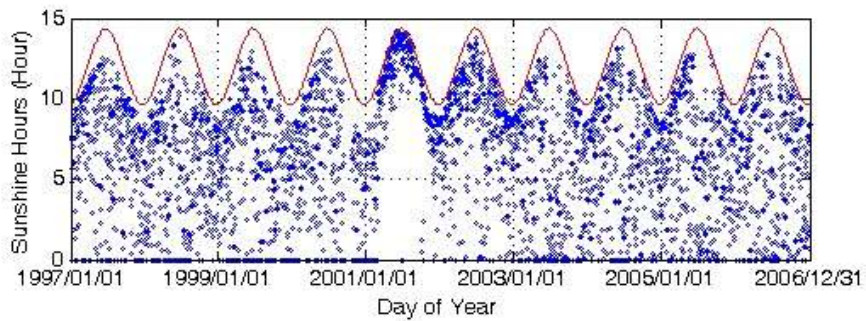


(d) 원주

그림 6. 관측 및 최대가능 일조시간과 일조량의 변화(계속)



(e) 제주



(f) 천안 (일사량 자료 없음)

그림 6. 관측 및 최대가능 일조시간과 일조량의 변화(계속)

그림에서 보면 봄과 가을에는 관측된 일조시간이 가능 최대 일조시간에 도달하는 경우가 빈번하지만 여름철에는 최대값에 미치지 못한다. 이는 우리나라의 기후 특성상 여름철에 강우가 잦고 구름이 많이 발생하므로 설득력이 있어 보인다. 그러나 간헐적으로 이상영역이 발견되는데 천안 2001년 자료는 최대일조시간에 도달하고 있으나 자료 기간과는 매우 다른 양상을 보이고 있으며, 광주 2000-2003, 서울 1997-2002, 원주 1997-2006, 부산 2000-2004, 제주 1997-2000 기간에서는 일년 내내 꾸준히 최대값에 미치지 못하는데 이런 지점은 장비의 보정(calibration)이 의심된다. 또한 일조시간이 최대 일조시간에 도달하는 기간과는 일사량이 최대 일사량이 도달하지 못하는 기간은 서로 다르게 나타나고 있는 것으로 파악되었다. 이는 일조시간 관측 장비의 이상 및 일사량 관측 장비의 이상이 서로 독립적으로 발생하고 있기 때문으로 판단된다.

따라서 일조 시간 및 일사량 자료를 이용하는 연구자는 일조시간 자료의 품질문제를 인식하여야 하며, 적절한 기법을 이용하여 일조시간 자료를 보정(adjustment)하여 사용하여야 한다(Allen, 1997). 본 연구에서는 간단하게 일정한 환산계수를 곱하여 일사량 자료를 보정하는 방법을 제안하며, 천안 지점에 대하여 보정 전과 보정 후의 결과를 그림 7에 제시하였다. 일조시간과 일사량은 상관관계가 매우 높은 것으로 보고되고 있으며, 각각 독립적으로 관측되기 때문에 상관관계 분석은 또 하나의 검정 방법으로 판단된다. 그러나 일조시간에 비하여 일사량 자료가 상대적으로 미흡하기 때문에 일조시간을 이용하여 필요한 지점의 일사량을 추정하는 경우가 빈번하다. 따라서 일조시간의 검정은 일사량을 입력자료로 이용하는 수질모델링, 수온모델링, 증발산량 산정 등에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.

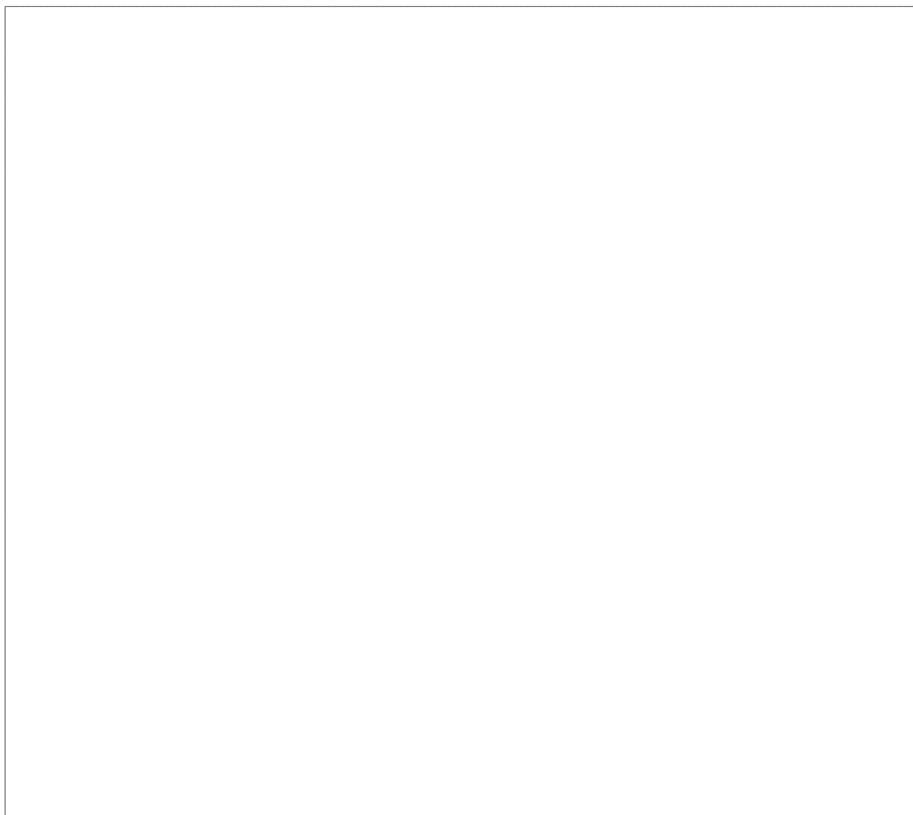


그림 7.

보정계수를

이용한 전주(1999) 일조시간 자료의 보정(환산계수=1.1)

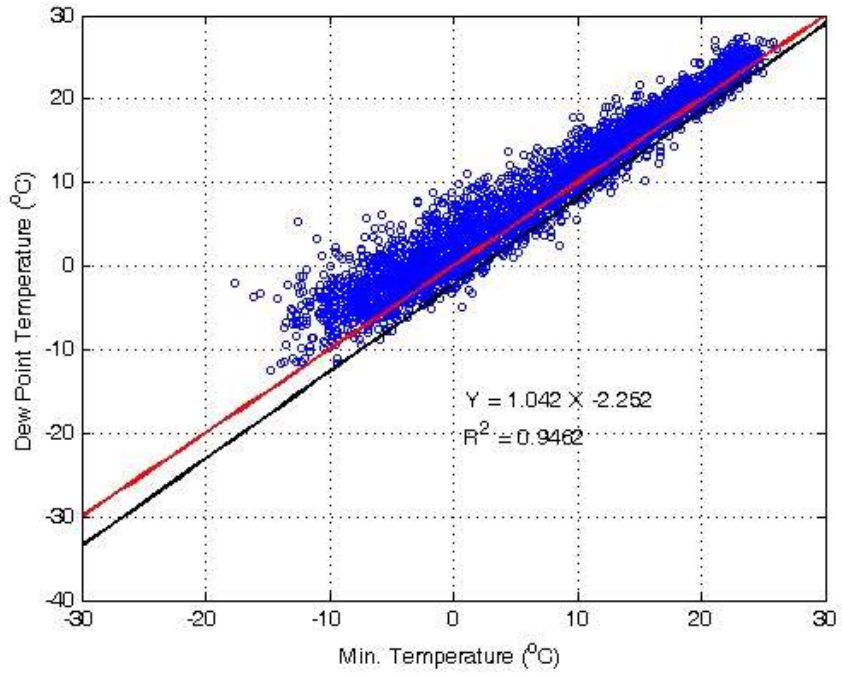
4) 이슬점온도와 최저기온

일반적으로 최저기온(T_{\min})와 이슬점온도(T_{dew})는 상관관계가 상당히 높은 것으로 알려져 있어 습윤 지역에서는 이슬점온도의 관측값 대신에 최저기온을 사용하기도 한다. 최저기온 과 이슬점온도의 차이는 대부분에서 3~4 °C를 벗어나지 않는데 그림 8은 광주와 목포 지점의 최저기온과 이슬점온도의 상관관계를 보여준다. 이슬점 온도는 평균기온과 상대습도의 함수로 표현되며, 다음과 같은 관계식을 이용하여 계산한 이슬점 온도를 계산하여 상관관계 분석에 이용하였다(<http://www.srh.noaa.gov>).

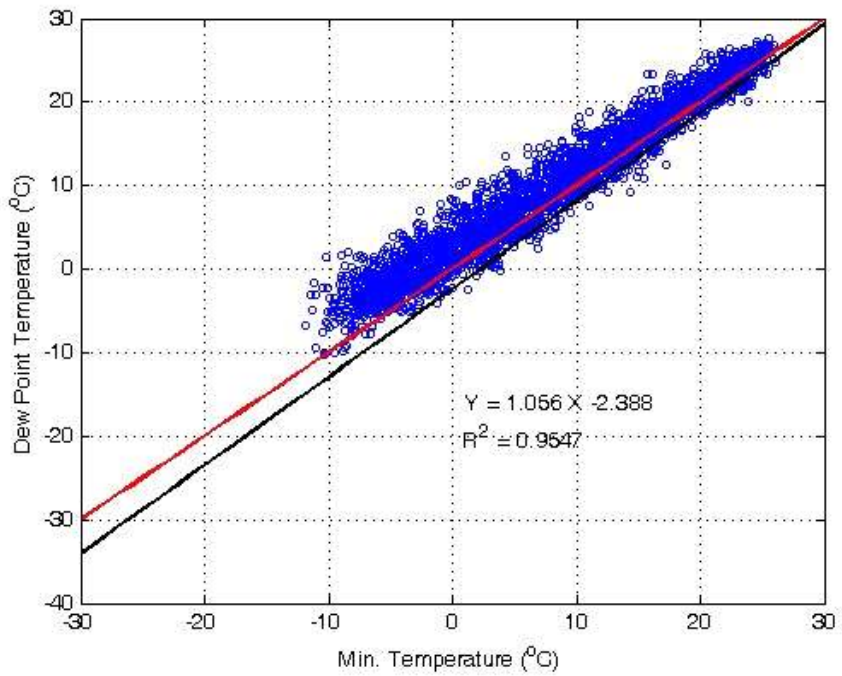
$$e = \frac{e_s \cdot RH}{100} = 6.112 \cdot e^{\left(\frac{17.67 \cdot T}{T + 243.5}\right)} \cdot \frac{RH}{100} \quad (4)$$

$$T_{dew} = \frac{243.5 \cdot \ln\left(\frac{e}{6.112}\right)}{17.67 - \ln\left(\frac{e}{6.112}\right)} \quad (5)$$

여기서 e , e_s 는 각각 실제 수증기압, 포화수증기압이며, RH(%)는 상대습도, T는 평균기온이다. 최저기온과 이슬점온도의 상관관계는 작게는 0.87에서 크게는 0.95로 나타났으며, 본 논문의 그림으로 제시한 광주와 목포지점에서는 0.95 정도로 추정되었다(그림 8. 참조). 또 최저기온과 이슬점온도는 부분적으로 3~4°C를 벗어나나 중요부분(여름철)에서는 범위내에 들어 전반적으로 양호한 것으로 파악되었다.



(a) 광주



(b) 목포

그림 8. 최소기온과 이슬점은도의 상관관계 산포도

V. 결론 및 제언

개발사업에 대한 수질환경영향평가를 하기 위해서는 자연적인 변동성분과 인위적인 변동성분을 구별하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 수질의 자연적인 변동성분과 인위적인 변동성분에 직접적·간접적인 영향을 미치는 기상인자의 검정을 수행하였다. 수질모델링의 결과에 영향을 미치는 주요한 인자, 기준증발산량을 이용한 하천 수량 산정, 일사량 자료 등을 이용한 식물플랑크톤의 성장률 산정 등은 기상자료의 품질 그 자체에 따라 좌우되기 때문에 기상자료의 관리는 수질변화 예측 모델링에서 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 이상자료에 대한 적절한 처리와 더불어 부분적으로 한계 범위 내에 들어가는 자료에 대한 품질관리를 기상인자의 변화 특성을 고려한 제약조건을 이용하여 우리나라 23개(내륙 14개, 해안 9개 지점) 기상관측 지점의 기상자료를 이용하여 수행하였다. 전반적으로 최고기온, 최저기온, 상대습도, 이슬점온도 등은 양호한 것으로 나타났으나, 일조 시간에서는 천안을 포함한 여러 지점에서 이상자료가 발견되었다. 서울, 광주, 원주, 부산, 제주 지역에서는 일년 내내 꾸준히 최대값에 미치지 못하는 부분이 발견되는데 이런 지점은 장비의 보정(calibration)이 의심된다. 이 자료를 이용하여 기준 증발산량을 계산하여 하천수량을 추정하거나 식물플랑크톤의 성장률을 계산하는 경우 오차가 수반될 수 있기 때문에 자료의 적절한 보정 과정을 통하여 사용할 필요가 있다.

한편 본 연구에서 수행한 자료관리가 신뢰할 만한 관측장비의 정확도, 정기 점검, 적절한 장비 보정, 불량 장비 대체 등과 같은 기본적인 하드웨어적인 문제는 해결할 수 없으나 관측자료의 환경적인 문제와 관측결함에 대한 사후 관리 정도의 문제는 처리할 정도로 판단된다. 본 연구에서 제시한 기상자료 검정기법은 매우 기본적인 방법으로 기상자료를 활용한 다양한 연구(복사량 추정 연구, 증발산량 추정연구, 식물플랑크톤의 성장률 추정연구, 유역의 유출 추정연구 등)에서 기본적으로 수행하여야 하는 과정으로서 활용되어야 한다. 일반적으로 기상자료를 활용하는 연구는 기상자료에 대한 완전한 신뢰를 기반으로 하고 있다. 그러나 모든 자료는 관측장비의 오작동, 인위적인 실수, 일시적인 충격 등 다양한 원인에 의하여 오차가 포함될 수 있기 때문에 기상자료를 포함한 모든 자료는 가능한 방법으로 신뢰수준을 검정하는 과정이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 창의과제 연구사업(PE-9853D)의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 논문에서 사용한 기상 자료를 제공해 주신 기상청에 감사드립니다.

참고문헌

김도희, 2007. 건기와 우기시 화원면 주변 해역의 수질비교, 한국해양환경공학회지, 10(4), 193-200.

박종윤, 이미선, 이용준, 김성준, 2008. SWAT 모델을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향분석, 대한토목학회논문집, 28(2B), 187-197.

양해근, 2007. 기후변화에 따른 유역의 물수지 변화, 대한지리학회지, 42(3), 405-420.

윤진일, 조경숙, 황헌, 박은우, 조성인, 1998. 표준 기상자료에 의한 벼 군락내 기온, 습도 및 결로 추정, 한국기상학회지, 34(2), 216-221.

이관호, 심광열, 2010. 국내 주요도시의 일조시간데이터를 이용한 시간당 전일사량 산출 및 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 30(2), 16-21.

이변우, 김병찬, 명을재, 1991. 종관(綜觀)기상자료에 의한 순복사량 추정, 한국작물학회지, 36(3), 204-208.

Allen, R. G., 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation, J. of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 122(2), 97-106.

Allen, R. G., 1997. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature, J. of Hydrologic Engineering, ASCE, 2(2), 56-67.

Allen, R. G., Trezza, R. and Tasumi, M., 2006. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes, Agricultural and Forest Meteorology, 139, 55-73.

Atkinson, A. C., 1985. Plots, Transformations, and Regression, An introduction to graphical methods of diagnostic regression analysis, Clarendon Press.

CIMIS, 1988. California irrigation management and information system quality control criteria, Department of Water Resources, Water Conservation Office, Sacramento, California, USA

Hargreaves, G. H. and Allen, R. G., 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE, 129(1), 53-63

Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature, Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96-99

- Irmak, S., Allen, R. G., and Whitty, E. B., 2003. Daily grass and alfalfa-reference-Evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE*, 129(5), 360-370
- Lee, K., 2010, Constructing a non-linear relationship between the incoming solar radiation and bright sunshine duration, *International Journal of Climatology*, 30, 1884-1892.
- Lee, K., 2009. Predicting Incoming Solar Radiation and Its Application to Radiation-based Equation for Estimating Reference Evapotranspiration, *J. Irrigation and Drainage Engineering - ASCE*, 135(5), 609-619.
- Martin, J.L. and McCutcheon, S.C., 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, Lewis Publishers.
- Martinez, W.L. and Martinez, A.R., 2005. *Exploratory Data Analysis with MATLAB®*, Computer Science and Data Analysis Series, Chapman & Hall/CRC
- Meek, D.W. and Hatfield, J.L., 1994. Data quality checking for single station meteorological databases, *Agricultural and Forest Meteorology*, 69, 85-109.
- Morid, S., Gosain, A.K. and Keshari, A.K., 2002. Solar Radiation Estimation using Tempered-based, Stochastic and Artificial Neural Networks Approaches, *Nordic Hydrology*, 33(4), 291-304.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D., 1980. *Water Chemistry*, John-Wiley & Sons.
- Taylor, F.W., 2005. *Elementary Climate Physics*, Oxford Univ. Press.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper Collins Publishers.
- <http://www.srh.noaa.gov/images/epz/wxcalc/rhTdFromWetBulb.pdf>
- <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e07.htm>
- http://clearskycalculator.com/ASCE_memo.pdf

제 2 절 이력고리모형

이력고리모형은 본 연구의 핵심이 되는 모형이며, 연구성과이다. 이 모형은 기본적으로 기온자료만을 이용하여 연안의 수온자료를 추정하는 모형이다. 따라서 풍부한 장기간의 기온자료를 이용할 수 있기 때문에 기온과 수온의 관계추정이 정확하게 수행된다면 매우 높은 정도로 연안 수온을 추정할 수 있다. 또한 GCM 결과로 제시되는 장래 기후변화 모형의 결과중의 하나인 기온변화 자료를 이용하여 장래 연안 수온변화 예측도 가능하다.

본 모형은 기온과 수온의 관계에 중점을 두어 추진하였다. 기온과 수온은 연변화 양상이 뚜렷하기 때문에 다른 연안 환경자료에 비하여 상관관계가 매우 높게 나타나고 있다. 이러한 높은 상관성으로 인하여 연안의 기온추정은 선형 회귀분석 기법을 통하여 추정하는 연구가 많이 추진되어왔다. 그러나 이어지는 연구에서 선형 회귀분석에 의한 추정방법의 한계가 제기되고, 기온과 수온의 변화 양상이 하나의 직선/곡선 형태가 아니라 고리(loop) 형태를 보이고 있음이 많은 자료에서 제시되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 고리형태의 기온과 수온 관계를 표현하기 위하여 기온과 수온을 각각 독립적으로 근사화하는 과정과 기온과 수온의 변화성분을 연결하는 과정으로 구분된다.

기온과 수온을 근사화하는 과정은 기온과 수온을 연화 주기, 반년(1/2) 변화주기, 1/3년 변화 주기 등으로 세분화하여 근사화하는 과정이다. 이 과정은 간단한 최소자승법으로 가능하다. 이어지는 다음과정은 기온과 수온의 주기성분을 같은 주기성분에 대하여 연결하는 과정으로 비율에 의한 연결방법과 차이에 의한 연결방법을 본 연구에서는 검토하였다. 그 결과 차이에 의한 연결방법이 보다 안정적인 결과를 보여주는 것으로 파악되었다. 이상의 세세한 내용은 이어지는 On-line version 논문 원고로 부록에 제시하였다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 정량적 연구성과 목표 달성: SCI 1편

1. 대외기여도

가. 기술적 측면

- 연안 수온변화 예측 수준(RMS 오차 1.0℃ 정도 수준 또는 그 이하)의 향상
- 광역 격자를 이용한 GCM 모형의 Down-scaling 기법 적용을 통한 모형과 모니터링 자료의 연계 활용기술 향상.

나. 경제·산업적 측면

- 예상되는 환경변화에 따른 적절한 대책으로 수산자원 손실 저감 및 대체 수산자원 개발 가능
- 연안의 환경변화로 유발되는 예상되는 시설피해에 대한 사전 대책 수립으로 비용 절감

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

○ 본 연구는 전 지구적인 환경변화가 우리나라 연안에는 국지적으로 어떤 영향을 미칠 것인가에 대한 정량적인 분석에 활용하는 연구로, 전지구적인 광역모델(우리나라를 포함하는 격자가 2개 정도로 공간적인 해상도가 매우 낮은 수준)을 하는 연구팀과 국지적인 영향분석을 연구하는 팀 및 수산자원 분야의 연구팀과의 유기적인 협조관계가 필요한 과제로 발전시켜야 함.

○ 본 연구에서 개발된 모형은 전지구적인 모형과 연계하여 우리나라 특정 연안에 대하여 모형을 적용하여 연안 환경변화 및 수산자원에 미치는 영향분석을 수행하는 기술이전이 가능. 또한 다양한 연안 환경 모니터링을 하는 해양관측기지를 구축하여 자료를 생성하는 연구팀과의 자료 활용연구도 중요.

제 6 장 참고문헌

- Lee, K.H. and Cho, H.Y., 2011. 10. Estimation of the Reference Evapotranspiration using Daily Sunshine Hour, *환경영향평가*, 제20권, 제5호, pp.627-640.
- 이길하, 조홍연, 2011. 10. 수질영향평가의 신뢰수준 향상을 위한 기상자료의 검정, *환경영향평가*, 제20권, 제5호, pp.601-613.
- Hongyeon, Cho and Khil-ha, Lee. Development of an air-water temperature relationship model to predict climate-induced future water temperature in estuaries, *J. of Environmental Engineering -ASCE* (Accepted). (DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499).

부 록

- 부록 1. 기상자료를 이용한 환경인자 추정 성능 비교 논문 전문
- 부록 2. Hysteresis Loop Model On-line Version 원고전문
- 부록 3. 광역 기온 자료를 이용한 국지 수온 추정 오차 비교분석 원고전문

Development of an Air-water Temperature Relationship Model to Predict Climate-induced Future

Water Temperature in Estuaries

Hong-Yeon Cho

KORDI

1270 Sa2-dong, Sangrok-gu

Ansan-si, Kyunggi-do, 426-744

S. Korea

Tel: +82 31 400 6318

Fax: +82 31 408 5827

Email: hycho@kordi.re.kr

Khil-Ha Lee: The corresponding author

Civil Engineering, Daegu University(DU)

Jillyang, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-714

S. Korea

Tel: +82 53 850 6522

Fax: +82 53 850 6520

Email: klee@daegu.ac.kr

Abstract

To predict climate-induced change in aquatic environments, it is necessary to understand the thermal constraints of various fish species and to understand the timing of current and projected coastal temperatures. This paper presents a newly developed model of the relationship between air and water temperature that was constructed on the basis of harmonic analysis. The model is novel because it requires only a single variable (air temperature) to predict water temperature, and captures the hysteresis patterns of the rising and falling limbs and their historic memories. The model was calibrated and validated with data collected from monitoring buoys in Mikawa Bay, Japan between 2005 and 2009. The model validation showed a good performance with a Root Mean Squared Error (RMSE) in the range of 0.8-1.0 °C. It is especially encouraging that the suggested model can predict water temperature with a reasonable level of accuracy once an acceptable relationship between air temperature and water temperature has been constructed from previously measured data.

CE Database subject headings: Air temperature, water temperature, climate change, harmonic analysis, hysteresis

Introduction

Coastal bays and estuaries act as transition zones between upland streams and coastal oceans, are important nurseries and feeding grounds for a large number of marine species (Struyf et al., 2004; Bilgili et al., 2005). It is important to understand how water temperature affects the dissolved oxygen (DO) level in estuarine habitats. Saturated DO levels are lowest at higher water temperatures, which usually occur during the summer (Lee & Lwiza, 2007). Critically low DO levels have recently been observed in some estuaries and bays and place certain species at risk. Water temperature varies with air temperature, and both have seasonal and diurnal patterns.

Temperature also controls the rates at which chemical reactions and biological processes (such as metabolism and growth) take place. Temperature and salinity variations combine to determine the density of sea water, and this density greatly influences vertical water movement with consequent changes in chemical and biological processes within the water column and the surface sediment layer (Lalli & Parsons, 1997). Water temperature partly determines the concentration of dissolved gases in sea water; these gases include oxygen and carbon dioxide, which are profoundly linked with biological processes. Temperature is also one of the most important a-biotic factors influencing the distribution of marine species (Lalli & Parsons, 1997). Temperature controls the rate of metabolic and reproductive activities, and determines whether fish species can survive (Murphy, 2009). It is an essential factor that must be considered in any study involving heat budget computation in semi-enclosed bays, shallow

estuarine zones, and marginal seas (Hsu, 1988).

Anthropogenic global warming will influence the thermal dynamics of aquatic environments, and climate changes may impact the organisms living in those aquatic environments (Schirmer & Schuchardt, 2001; Struyf et al., 2004; IPCC, 2007; Tibby & Tiller, 2007). To project aquatic habitat changes under future climate change conditions, it is necessary to understand the thermal constraints of various aquatic species, and to predict the timing of changes in current and projected inland stream and estuarine temperatures. However, a lack of available data often limits our ability to estimate long-term water temperature variation.

In response to a build-up of greenhouse gases, the effect of air temperature on water temperature has been observed. Some efforts have already been made to build a model of air-water temperature relationship in an inland stream (Mohseni et al., 1998; Mohseni & Stefan, 1999; Mohseni et al., 1999; Mohseni et al., 2002; Morrill et al., 2005; Cho et al., 2007; Lee, 2007). In fact, a complete heat transfer equation and numerical models for the air-water interface have been developed to estimate water temperature as a function of climate variables (Stefan & Sinokrot, 1993). However, these equations and models require large data sets, including information about solar radiation or sunlight time, rainfall and snowfall, wind velocity and direction, humidity, air pressure, topography, altitude and longitude, and the air and water temperatures of the simulation area. Although these mechanism-based models may be more accurate than statistical models, the accuracy of the simulation results depends highly on input data

conditions and the condition of the complete input dataset for the model run, both of which are rarely satisfactory. Due to the complexity of the complete heat transfer equation, simple regression methods [e.g. a simple linear regression model or the non-linear S-shape curve (logistic) model] have been the dominant method of relating-air temperature to water temperature in stream/inland stream water sources (Mohseni et al., 1998; Mohseni & Stefan, 1999; Morrill et al., 2005, Benyahya et al., 2007).

However, most studies seeking to estimate water temperatures in bay and coastal areas are limited because of insufficient continuous monitoring data. The variations between air and surface water temperatures in inland stream and coastal areas, however, do have very similar patterns on the whole (Knauss, 1978; Berner & Berner, 1987). This study draws on previous research on inland streams to present a newly developed model of the air-water temperature relationship for coastal and estuarine environments. The model uses a simple regression approach and is based on the traditional method of harmonic analysis. Data collected from monitoring buoys in the Mikawa Bay in Japan between 2005 and 2009 were used to calibrate and validate the new model. The results were then compared to the error bounds for a simple linear regression model.

Materials

Data Used for the Study

The temperature data used for this study were recorded between July, 2005 and June, 2009. (48 months) and consists of 1,461 carefully screened daily values. The air and water temperature data

were provided by the Fishery Experiment Station, Aichi Prefecture, Japan (<http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken>). Secondary air temperature data (included to ensure an accurate analysis) was provided by the Japan Meteorological Agency (JMA, <http://www.jma.go.jp>). A summary of the site information, including the mean, maximum, and minimum temperature at each station used in this investigation, is presented in Table 1. The measured stations are shown in Figure 1. (Figure 1 here) (Table 1 here)

The study sites were selected on the basis of data completeness and reliability. If no daily observations were available, values were estimated using the stochastic linear regression and Bayesian methods (Akaike, 1980; Suzuki et al., 2005). The measured data was then checked for integrity, quality, and reasonableness. The data quality and integrity check were completed for all locations and were then followed by information from precedent studies (Little & Rubin, 2002; Barnett & Lewis, 1994) .

Preliminary Study

A preliminary study was undertaken to observe the general characteristics and/or seasonal pattern of the air and water temperature. In particular, a relative comparison of the air temperature recorded by the three buoys and the JMA station was performed to ensure data reliability. Figure 2 presents a scatter plot of the air temperature measurements recorded by buoy 1 and the JMA station and shows that the coefficient of determination was ~ 0.99 . This finding implies that the air temperature measurements from both reliable and interchangeable to some extent. As Figure 2 shows, there were no

noticeable outliers. A temperature data was frequently missing for various reasons and had to be estimated by neighborhood or extrapolation. (Figure 2 here)

Figure 3 shows the time course of the temperature data for buoy1 station. The temperature data show an annual pattern of variation, and thermal stratification between the surface and bottom temperatures is evident. The data also suggest that there is a time lag between changes in the air and water temperatures, but this time lag is not clearly shown in Figure 3. The time lag is the delayed response of water temperature to air temperature changes due to the thermal inertia of water and it is a function of the average water depth. Hence time lag may need to be incorporated into the regression analysis for a certain time scale (e.g. daily) (Stefan and Preud's home, 1993; Mohseni and Stefan, 1999). (Figure 3 here)

To identify the time-memory (or history) of the relationship between air temperature and water temperature, an auto-correlation analysis was performed, and the corresponding results are shown in Figure 4. However, the auto-correlation coefficient shows a slowly decreasing trend as the time lag increases, which implies that the memory effect is not negligible. Accordingly the memory effects should be included in the model structure in a suitable manner. (Figure 4 here)

In a bay and estuary, several factors may influence the relationship between air and water temperature: these factor include human use, current temperature, air-water interface, and heat exchange.

The air-water temperature relationship may have a seasonal hysteresis with a rising and a falling limb.

Figure 5 shows a scatter plot of water temperature against air temperature at Buoy 1 station. There is a noticeable hysteresis pattern in the air-water temperature data. The starting point of the annual cycle is on the bottom-left, and the cycle moves counterclockwise. (Figure 5 here)

Theoretical Background

Harmonic Analysis

First, a regression curve was independently constructed to have the best fit for both the air and water temperature data and to meet the following condition.

$$O = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^N (T_E(t_i) - T_O(t_i))^2 \right) \quad (1)$$

where T_E denotes estimated temperature, and T_O denotes observed temperature. The regression curve consists of a summation of the harmonic functions that have different frequency terms;

$$T_O(t_i) = T_E(t_i) + \varepsilon_i(t_i)$$

$$T_E(t_i) = A_o + \sum_{m=1}^M \{A_m \cos(\omega_m t_i) + B_m \sin(\omega_m t_i)\} \quad (2)$$

where A_o is the mean values of the time-series data (μ_T); A_m and B_m are the harmonic coefficients of the order m ; M is the maximum order of the frequency function in the harmonic analysis; ε_i is the residual term (error terms); and Y is the number of days per year (365 in a common year and 366 in a leap year; 365.25 days were used for more than 1 year); and $T(t_i)$ are the temperature data of the i^{th} day, which

are composed of T_1, T_2, \dots, T_N data in which N is the total number of measurements for N days.

The frequency function can then be expressed as follows:

$$\omega_m = 2\pi m / Y. \quad (3)$$

where m denotes the order of the harmonic analysis, and the optimal order (model selection) can be determined from Akaike's Information Criterion (AIC) values (Kitagawa, 2005). The multi-year (n-year) periodic function (e.g., $2\pi m / (nY)$) could be included with ease in the harmonic analysis to incorporate long-term frequencies over 1-year.

The harmonic coefficients with order M are estimated in such a way that the difference between the time series for measured and modeled temperature is minimized. In general the optimal order of air temperature was higher than that of water temperature for the study site. Table 2 shows the analyses of amplitude and the phase of the harmonic components as a function of order. It was found that the amplitude rapidly decreased until the order of 3-5 and slowly decreased after that point as harmonic order increased. The optimal order for the regression curve was determined on the basis of the lowest AIC values that are widely used as model selection criteria (Kitagawa, 2005). (Table 2 here)

In fact, raw data with no harmonic analysis has a higher fluctuation, and the data may make it difficult to analyze overall variation, including peak time, gradient, and time lag. Harmonic analysis is a data smoothing process and therefore makes an analysis of the overall variation easier.

Air-water Temperature Relationship

The independent regression curves for air and water temperature data do not provide any relationship between the two variables. Hence, it is desirable to establish a function-type relationship between the air and water temperature data.

As mentioned earlier, an air-water relationship can show hysteresis in the rising and falling limbs. Figure 5 presents scatter plots that shows a hysteresis loop between air and water temperature data for each buoy. Hence, a single valued relationship could not be realistic and sufficient, regardless of its nonlinearity (Lapshin, 1995; Cruz-Hernandez & Hayward, 2001).

To reflect the hysteresis effect in the model, the following parametric form was introduced as part of this study.

$$[T_w(t), T_A(t)] = [f_A(t), f_w(t)] = [HA(t), HW(t)] \quad (4)$$

where $f_A(t)$ and $f_w(t)$ are the best-fitting functions (harmonic function of order M in this study) of the air and water temperature data, respectively. The harmonic functions $HA(t)$ and $HW(t)$ can be expressed as follows:

$$HA(t) - \mu_A^C = \sum_{m=1}^M \{CA_m^C \cos(\omega_m t) + SA_m^C \sin(\omega_m t)\} \quad (5)$$

$$HW(t) - \mu_W^C = \sum_{m=1}^M \{CW_m^C \cos(\omega_m t) + SW_m^C \sin(\omega_m t)\} \quad (6)$$

where μ_A and μ_W denote the mean air and water temperatures, respectively; CA_m and SA_m denote the amplitude of the harmonic function of order m on air temperature; and CW_m and SW_m denote the amplitude of the harmonic function of order m on water temperature. The superscript C denotes the

calibration stage.

The parametric form in equations (5) and (6) is advantageous in constructing a variety of different shapes, as the order of the harmonic function controls the loop shape. The simplest shape is the ellipse-type loop with Order 1 (see Figure 6) and the loop shape is usually more complex as the order increases. Order 0 denotes the center point of the loop that corresponds to the location of the mean values.

(Figure 6 here)

The main goal of this study was to estimate water temperature (unknown) using air temperature (known). But future water temperature is estimated from future air temperature derived from the scenario based climate model, and no field record of water temperature for the future was available. It was therefore impossible to derive any harmonic coefficients of water temperature for the equation (6) in reality. Therefore, the suggested approach is based on the assumption that the ratio and/or difference of the harmonic coefficients between the air and water temperatures remain constant in the future. Eventually equations (5) and (6) were combined to offer the following relationship between the two temperatures:

$$\begin{aligned}
 HA(t) - \mu_A^V &= \sum_{m=1}^M \{CA_m^V \cos(\omega_m t) + SA_m^V \sin(\omega_m t)\} \\
 HW(t) - r_o \mu_A^V &= \sum_{m=1}^M \{cr_m CA_m^V \cos(\omega_m t) + sr_m SA_m^V \sin(\omega_m t)\} \text{ or} \\
 HW(t) - d_o \mu_A^V &= \sum_{m=1}^M \{cd_m CA_m^V \cos(\omega_m t) + sd_m SA_m^V \sin(\omega_m t)\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

where, $r_o = \mu_W^C / \mu_A^C$, $cr_m = CW_m^C / CA_m^C$, $sr_m = SW_m^C / SA_m^C$ (hereinafter called r_m (ratio)-type) and

$$d_0 = \mu_W^C - \mu_A^C \quad cd_m = CW_m^C - CA_m^C, \quad sd_m = SW_m^C - SA_m^C \quad (\text{hereinafter called } d_m \text{ (difference)-}$$

type) and subscript m denotes the order of the harmonic functions. The superscript V denotes the validation stage. The parameters CA_m and SA_m are separately determined from the observed data set in the validation and calibration stages, and there are different values for the validation and calibration stages unless otherwise stated.

Results

The data were divided into two groups: Data from July 2005 to June 2007 (24 months) were used for calibration, data from July 2007 to June 2009 (24 months) were used for validation. In particular, the time lag was investigated. Time lags between air and surface water temperatures changes are much larger in the falling limb, whereas time lags between surface and bottom water temperatures changes are much larger in the rising limb. It was observed that the time lags between surface and bottom water temperatures changes were more than 30 days. Results also indicated that most of the heat transferred from the surface was used to build thermal stratification during the warm season.

Calibration of the Suggested Model

To quantify the efficiency of fit, Root Mean Squared Error (RMSE) was applied as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_E(t_i) - T_o(t_i))^2}{N-1}} \quad (8)$$

where N is the number of total data points. Figure 7 presents a scatter plot of water temperature as

estimated by the suggested approach in comparison to field observation. A relative comparison of the suggested approach was made against a simple linear regression. Table 3 shows the basic statistics for the two methods. The RMSE for the suggested method was in the range of 0.79-0.97, while that for the linear regression method was in the range of 1.42-2.06. It was found that the suggested approach showed better performance and the RMSE for the new method was about 5% less at 30 degrees. (Figure 7 here) (Table 3 here)

Validation of the Suggested Model

The harmonic coefficients derived from the calibration process were used to validate the suggested model. These results are shown in Table 3 and Figure 8 (a: air temperature vs. surface water temperature; and b: air temperature vs. bottom water temperature). The RMSE of the d_m -type (r_m -type) was in the range of 0.788-0.937 (0.762-1.418), while that of the linear model was in the range of 1.360-1.838. Both r_m -type and d_m -type model showed better performance than did the linear regression model. However, between the two suggested models, the d_m -type model showed better accuracy. (Figure 8a and 8b here)

Summary and Conclusions

This study presents a newly developed model of the relationship between air and water temperature. The suggested model, built on the basis of harmonic analysis, is novel because it requires only a single variable (air temperature) as an input to project water temperature. The model captures the

hysteresis pattern of the rising and falling limbs as well as their historic memories. As a result of model validation, RMSE was in the range of 0.8-1.0 °C. Therefore, the new model can reproduce water temperature estimations with a reasonable accuracy.

The above results suggest that the ability to accurately estimate water temperature partly depends on the use of existing data to build an acceptable relationship between air and water temperatures. To some extent, the error may be different for every location of interest, but the method used in this study should work universally. This more realistic description of the air-water temperature relationship is highly desirable and the method suggested in this study could be used to describe the air-water temperature relationship in inland stream.

Acknowledgements

Hong-Yeon Cho was partly supported by KORDI PE985-01 and KORD PE9853D. We would like to thank all our colleagues at KORDI for their useful and cooperative comments. Also we would like to thank JMA and the Fishery Experiment Station at AICHI Prefecture in Japan for providing the supporting data.

References

Akaike, H. (1980). *Likelihood and Bayes procedur, Bayesian statistics*, ,Ed. J.M. Bernardo et al., University Press.

Barnett, V. and Lewis T. (1994). *Outliers in Statistical Data. Third Edition*, John Wiley & Sons.

Berner, E.K. and Berner, R.A. (1987). *The Global Water Cycle, Geochemistry and Environment.*,
Prentice-Hall, Inc.

Benyahya, L., Caissie, D., St-Hilaire, A., Ouarda, T.B.M.J., and Bobee, B. (2007). "A Review of
Statistical Water Temperature Models" *Canadian Water Resources Journal*, 32(3), 179-192.

Bilgili, A., Proehl, J.A., Lynch, D.R., Smith, K.W., and Swift, M.R. (2005) "Estuary/ocean exchange and
tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: A Lagrangian modeling study" *Estuarine Coastal and Shelf
Science*, 65, 607-624.

Cho, H.Y., Lee, K., Cho, K.J., and Kim., J.S. (2007). "Correlation and Hysteresis Analysis between Air
and Water temperatures in the Coastal Zone - Masan Bay" *J. of Korean Coastal and Ocean Engineering-
KSCOE*, 19(3), 213-221 (in Korean).

Cruz-Hernandez, J.M. and Hayward, V. (2001). "Phase control approach to hysteresis reduction" *IEEE*

Transactions on Control Systems Technology, 9(1), 17-26.

Hsu, S.A. (1988). *Coastal Meteorology*, Academic Press. WA. USA

IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*, Cambridge University Press. Cambridge.

UK

Kitagawa, G. (2005). *A Premier of the Time-series Analysis, Sec. 5.3*, Iwanami Press. Tyoko, Japan (in

Japanese).

Knauss, J.A. (1978). *Introduction to Physical Oceanography. Chapter 3*, Prentice-Hall Inc. NJ. USA

Lalli, C.M. and Parsons, T.M. (1997). *Biological Oceanography: An Introduction, Chapter 2. 2nd Edition*,

Butterworth-Heinemann. Oxford. UK.

Lapshin, R.V. (1995). "Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope" *The Review of Scientific Instruments. American Institute of Physics*, 66(9), 4718-4730.

Lee, K.H. (2007). "Nonlinear correlation analysis between air and water temperatures in the coastal zone" *J. of Korean Coastal and Ocean Engineering-KSCOE*, 19(2), 128-135 (in Korean).

Lee, Y.J. and Lwiza, K.M.M. (2007). "Characteristics of bottom dissolved oxygen in Long Island Sound" *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 7, 187-200.

Little, R.J.A. and Rubin, D.B. (2002). *Statistical Analysis with Missing Data, Part I, 2nd Edition*, John-Wiley & Sons, Inc. NJ. USA

Mohseni, O., Ericson, T.R. and 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.

Mohseni, O., Ericson, T.R., and Stefan, H. (2002). "Upper bounds for stream temperature in the

contiguous United States.” *Journal of Environmental Engineering*, 128(1), 4-11.

Mohseni, O., and Stefan, H. (1999). “Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation” *Journal of Hydrology*, 218, 128-141.

Mohseni, O., Stefan, H., and Ericson, T.R. (1998). “A nonlinear regression model for weekly stream temperature” *Water Resources Research*, 34(10), 2685-269.

Morril, J.C., Bales, R.C., and Conklin, M.H. (2005). “Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality” *Journal of Environmental Engineering*, 131(1), 139-146.

Murphy, S. (2009). *General Information on Temperature*. <http://bcn.boulder.co.us/basin/data/COBWQ/info/Temp.html>

Schirmer, M. and Schuchardt, B. (2001). “Assessing the impact of climate change on the Weser estuary region: an interdisciplinary approach” *Journal of Climate Research*, 18(1-2), 133-140.

Stefan, H.G. and Preud' home, E.B. (1993). "Stream temperature estimation from air temperature" *Water Resources Bullitin*, 29(1), 27-45.

Stefan, H.G. and Sinokrot, B.A. (1993). "Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams" *Climate change*, 24, 353-381.

Struyf, E., Damme, S.V., and Meire, P. (2004). "Possible effects of climate change on estuarine nutrient fluxes: a case study in the highly nutrified Schelde estuary (Belgium, The Netherland)" *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 60, 649-661.

Suzuki, K., Takeda, A., and Hashimoto, N. (2005). "Separation of tidal and sub-tidal currents from intermittent currents data measured at non-fixed routes" *Report of Port and Airport Research Institute*, 44(2), 39-56. (in Japanese)

Tibby, J. and Tiller, D. (2007). "Climate-water quality relationship in three Western Victoria (Australia) lakes 1984-2000" *Hydrobiologia*, 591, 219-234.

Illustrations Captions

Figure 1: Location of the Coastal Monitoring Buoy and Irigo Weather Monitoring Station (JMA) in Mikawa Bay (Ise Bay). (Buoy 1: N 34° 44' 36", E 137° 13' 13", Depth: 10.1 m; Buoy 2: N 34° 44' 42", E 137° 4' 19", Depth: 10.0 m; Buoy 3: N 34° 40' 30", E 137° 5' 49", Depth: 13.7 m; Irigo JMA Station: N 34° 37' 42", E 137° 5' 36", Elevation: +6.2 m)

Figure 2: A scatter plot of the air temperature data recorded by buoys and the JMA stations.

Figure 3: A time course of the temperature data for buoy1 station.

Figure 4: Auto-correlation coefficients to identify the time-memory (or history)

Figure 5: A scatter plot of weekly mean water temperature against weekly mean air temperature, showing the hysteresis pattern between air-water temperature data.

Figure 6: The simplest shape of the ellipse-type loop with the order 1.

Figure 7: A scatter plot of water temperature estimated by the suggested approach against field

observation: calibration process

Figure 8a: A scatter plot of surface water temperature estimated by the suggested approach against field

observation: validation process

Figure 8b: A scatter plot of bottom water temperature estimated by the suggested approach against field

observation: validation process

Accepted Manuscript
Not Copyedited

Tables

Table 1. Basic statistical information about the JMA and buoy monitoring data. These values were calibrated from data collected between July 2005 and June 2009 (total data numbers = 1,461); relatively little data was missing (less than 5%). AT denotes air temperature (°C) and WT denotes water temperature (°C).

ITEMS		Mean	Standard Deviation.	Maximum temperature	Minimum Temperature	No. of the missing data
AT (JMA Irago)		16.34	7.68	30.6	0.5	3
	AT	16.69	7.71	30.3	1.6	13
Buoy 1	Surface WT	16.94	7.37	29.9	4.2	26
	Bottom WT	15.93	6.09	26.9	4.3	45
	AT	16.34	7.67	29.9	1.4	13
Buoy 2	Surface WT	17.30	6.93	29.8	5.1	13
	Bottom WT	16.39	5.79	26.7	5.4	13
	AT	16.45	7.54	29.7	1.4	41
Buoy 3	Surface WT	16.85	6.77	29.3	5.3	66
	Bottom WT	16.24	5.71	25.6	5.5	47

Accepted Manuscript
 Not Copyedited

Table 2: Amplitude and phase of the harmonic components as a function of order. Order 0 indicates the mean value.

(a) Amplitude (°C)

Order	JMA		Buoy 1		Buoy 2			Buoy 3		
	AT	AT	SWT	BWT	AT	SWT	BWT	AT	SWT	BWT
0	16.45	16.46	16.88	15.77	16.31	17.30	16.47	16.53	17.01	16.38
1	10.48	10.45	10.20	8.32	10.39	9.52	7.83	10.18	9.25	7.73
2	0.78	0.85	0.85	1.76	0.85	0.59	1.52	0.77	0.77	1.71
3	0.35	0.25	0.11	0.47	0.31	0.17	0.50	0.29	0.11	0.41
4	0.26	0.23	0.22	0.10	0.27	0.25	0.17	0.24	0.22	0.14
5	0.23	0.16	0.14	0.18	0.23	0.10	0.16	0.23	0.11	0.17
6	0.17	0.20	0.12	0.09	0.19	0.16	0.12	0.21	0.11	0.11
7	0.12	0.12	0.16	0.06	0.11	0.19	0.11	0.08	0.14	0.13
8	0.12	0.15	0.11	0.06	0.19	0.20	0.08	0.16	0.12	0.04
9	0.13	0.18	0.15	0.18	0.18	0.14	0.12	0.15	0.14	0.09
10	0.18	0.17	0.08	0.05	0.16	0.08	0.02	0.16	0.06	0.05

(b) Phase(days)

Order	JMA		Buoy 1		Buoy 2			Buoy 3		
	AT	AT	SWT	BWT	AT	SWT	BWT	AT	SWT	BWT
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	33.30	34.84	42.75	50.08	35.31	44.66	51.04	36.48	47.10	52.40
2	-10.92	-6.36	10.27	20.32	-7.07	10.73	21.65	-3.12	18.73	23.46
3	-13.89	-13.47	1.11	-28.35	-8.20	-4.84	30.18	-13.13	-0.77	-28.80
4	-3.31	0.42	11.12	-13.25	1.12	6.59	-21.76	-0.88	7.54	20.85
5	1.08	-6.39	-4.92	7.22	-3.21	-7.89	3.20	-0.76	1.70	2.02
6	-1.75	-0.74	-1.92	-14.55	-3.92	-5.31	3.32	-1.95	0.36	9.52
7	-0.36	4.19	10.11	3.62	6.36	11.62	5.23	5.50	12.57	10.47
8	-10.93	-9.75	-8.26	-2.23	-9.53	-7.12	-8.74	-9.41	-3.67	-6.43
9	-2.43	-3.47	2.53	5.41	-2.58	2.04	4.82	-2.48	3.76	0.60
10	4.89	3.44	8.36	8.93	3.34	4.95	-5.17	3.31	7.65	-0.73

Accepted Manuscript
Not Copyedited

Table 3: Comparison of RMSE ($^{\circ}\text{C}$) for the linear regression model and the suggested model. AT, SWT, and BWT indicate the air, surface, and bottom water temperatures, respectively. LRM and HLM indicate the linear regression method and the hysteresis loop model, respectively. D and R refer to the difference- and ratio- type methods, respectively.

Buoy no.	Items	Calibration stage		Validation stage		
		LRM	HLM	LRM	HLM-D	HLM-R
<u>Buoy 1</u>	AT – SWT	1.500	0.972	1.415	0.937	0.864
	AT – BWT	2.062	0.972	1.838	0.856	1.418
<u>Buoy 2</u>	AT – SWT	1.482	0.820	1.360	0.852	0.921
	AT – BWT	1.946	0.874	1.765	0.835	1.240
<u>Buoy 3</u>	AT – SWT	1.532	0.847	1.557	0.860	0.762
	AT - BWT	1.903	0.872	1.794	0.788	1.102

Accepted Manuscript
 Not Copyedited

Figure01:Location of the Coastal Monitoring Buoy and Irago Weath

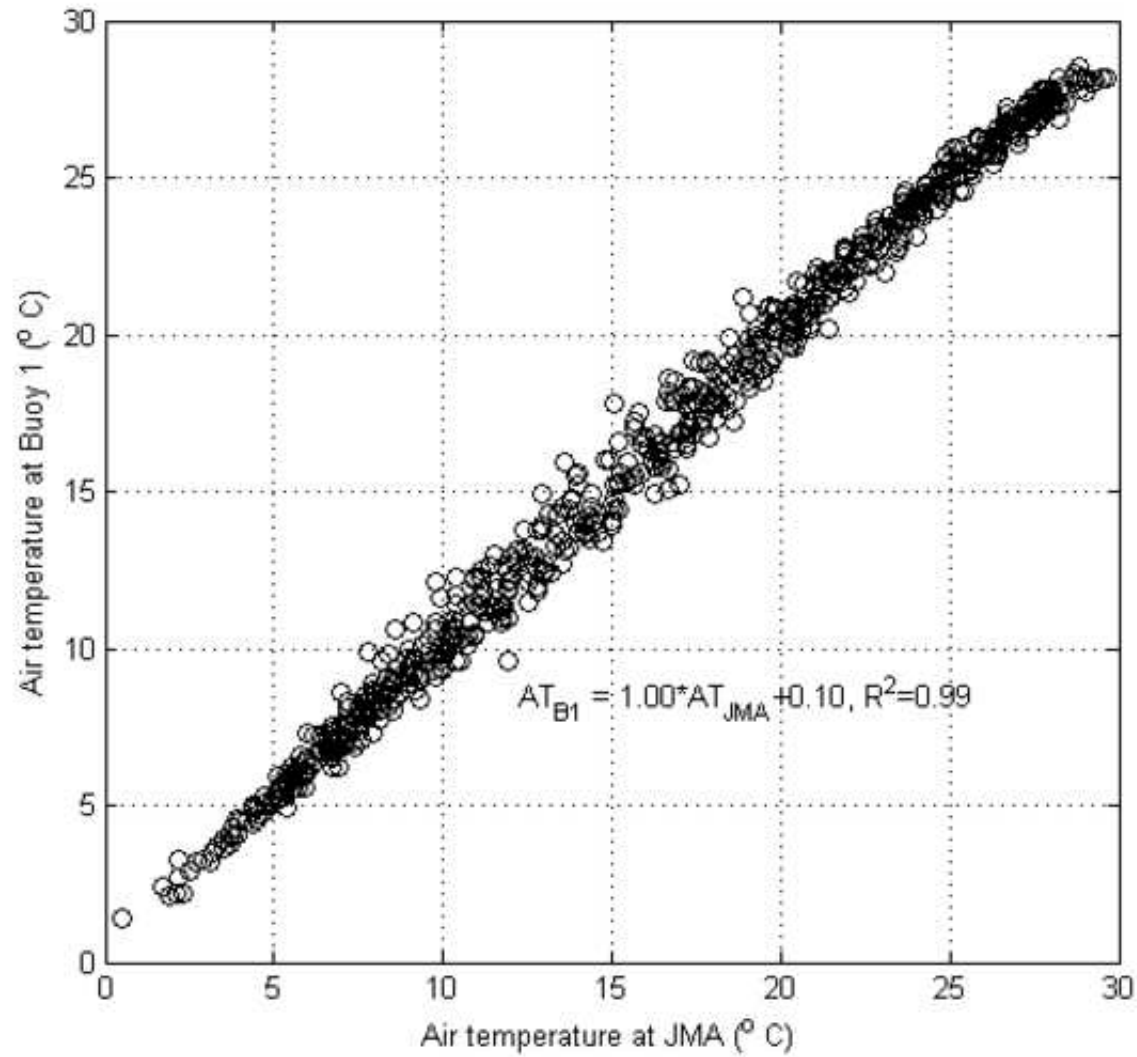
Journal of Environmental Engineering. Submitted February 15, 2011; accepted September 22, 2011;
posted ahead of print September 26, 2011. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499



Accepted Manuscript
Not Copyedited

Figure02:A scatter plot of the air temperature data recorded by

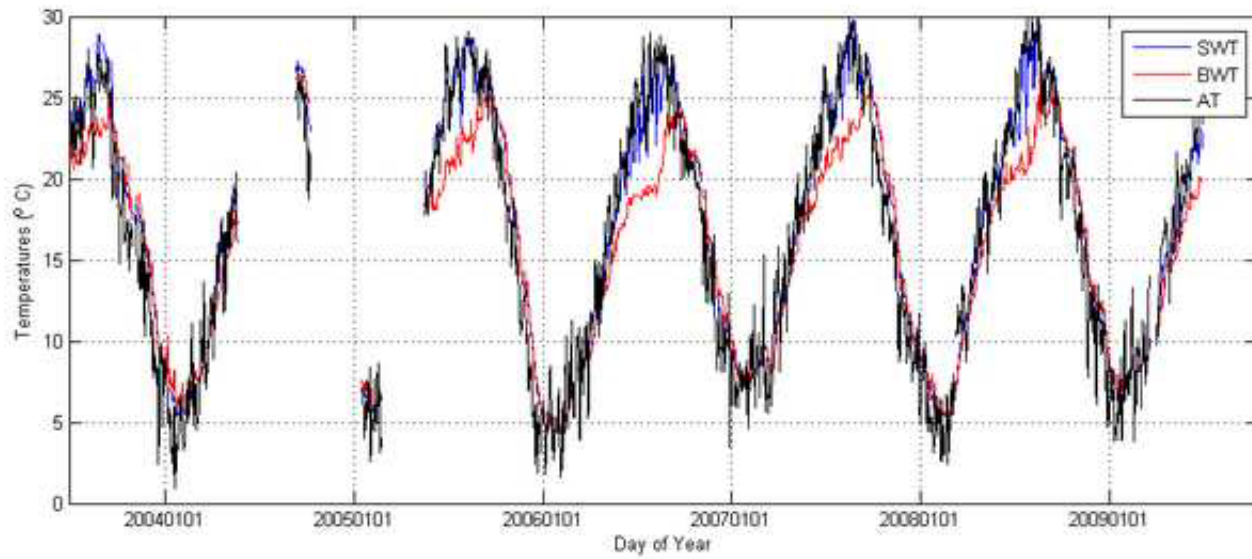
Journal of Environmental Engineering. Submitted February 15, 2011; accepted September 22, 2011;
posted ahead of print September 26, 2011. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499



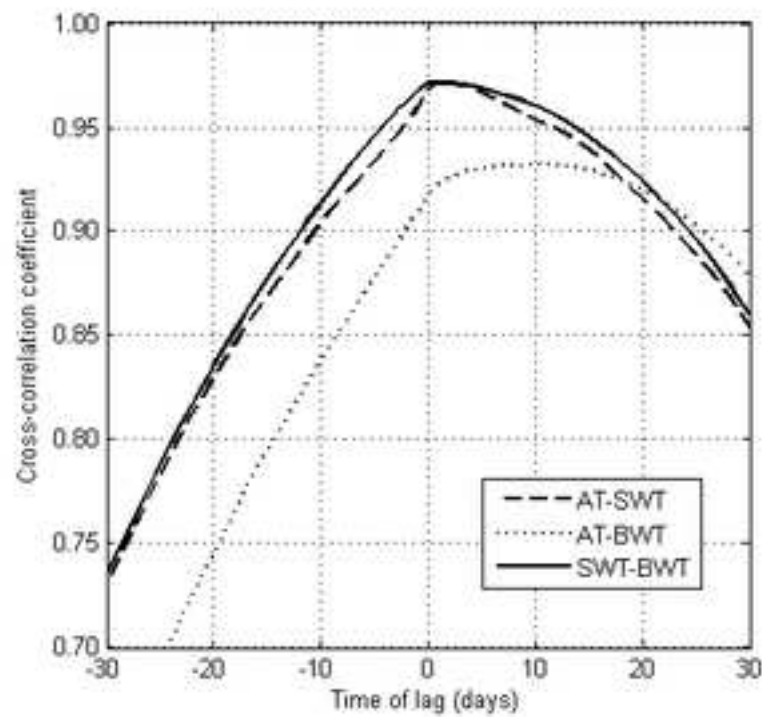
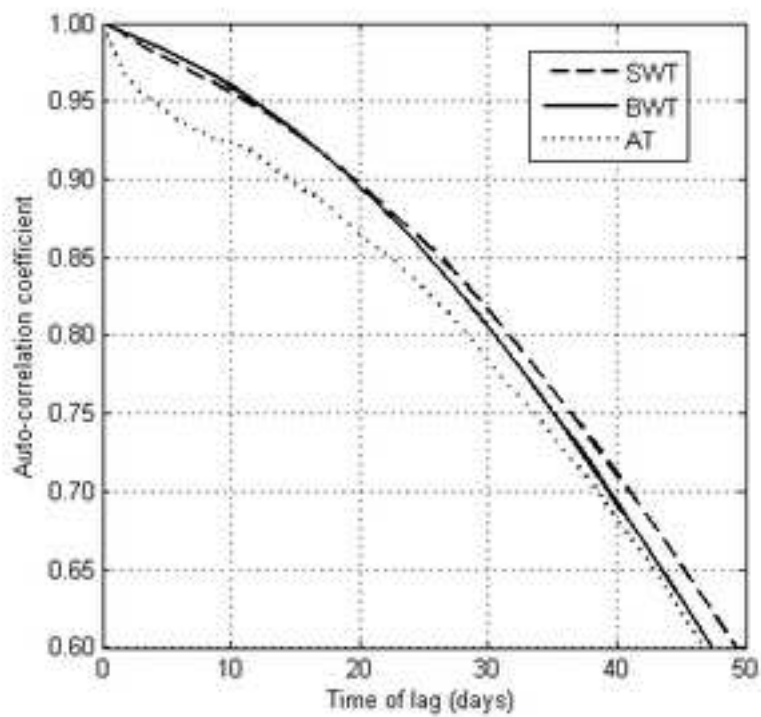
Accepted Manuscript
Not Copyedited

Figure03:A time course of the temperature data for buoy 1 sta

Journal of Environmental Engineering. Submitted February 15, 2011; accepted September 22, 2011;
posted ahead of print September 26, 2011. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499



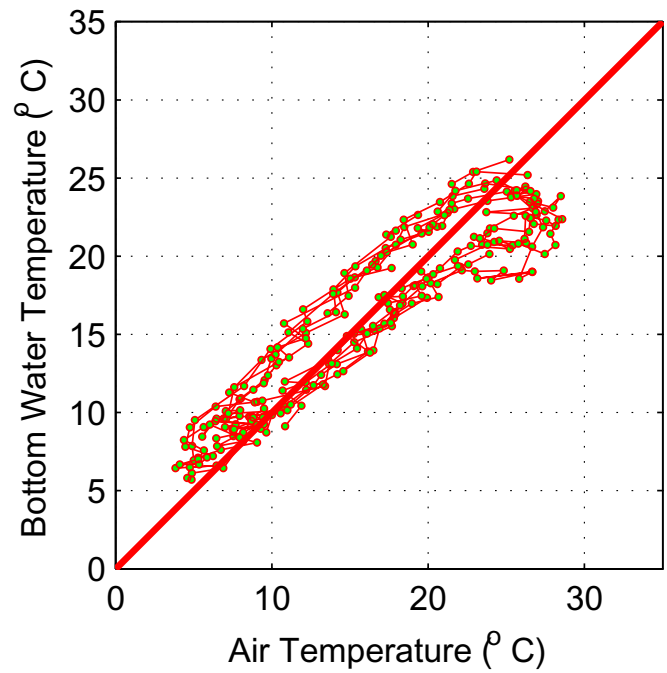
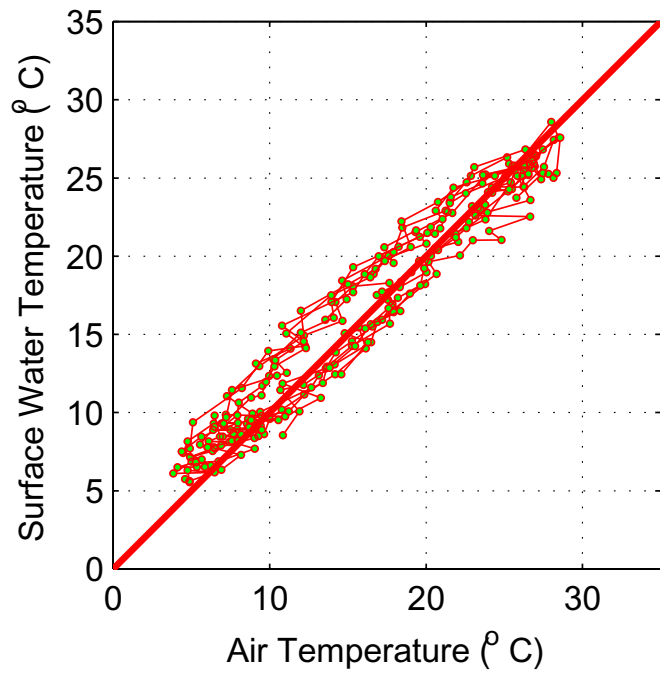
Accepted Manuscript
Not Copyedited



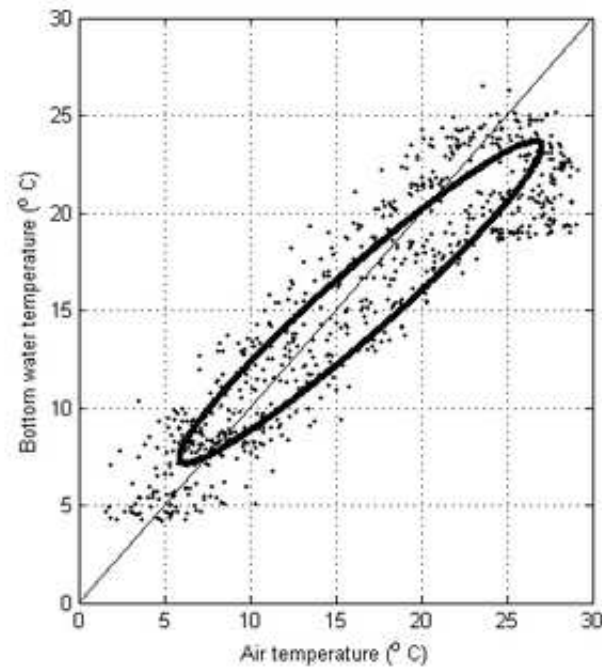
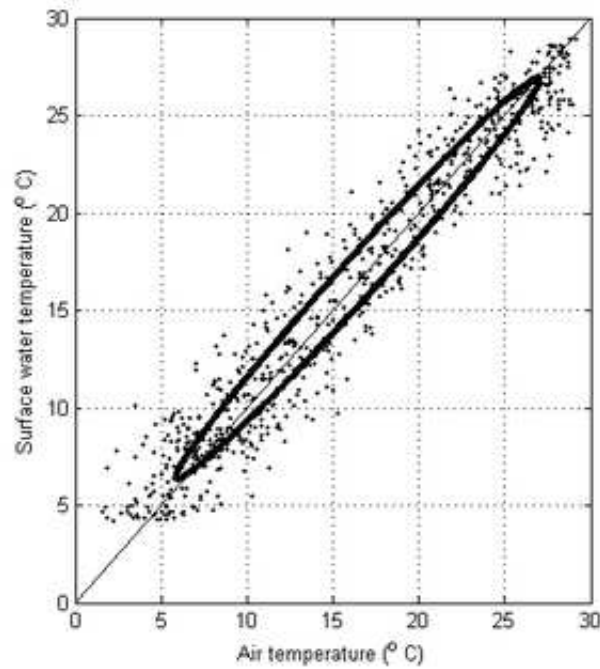
Accepted Manuscript
Not Copyedited

Figure5: A scatter plot of weekly mean water temperature against

Journal of Environmental Engineering. Submitted February 15, 2011; accepted September 22, 2011;
posted ahead of print September 26, 2011. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499



Accepted Manuscript
Not Copyedited



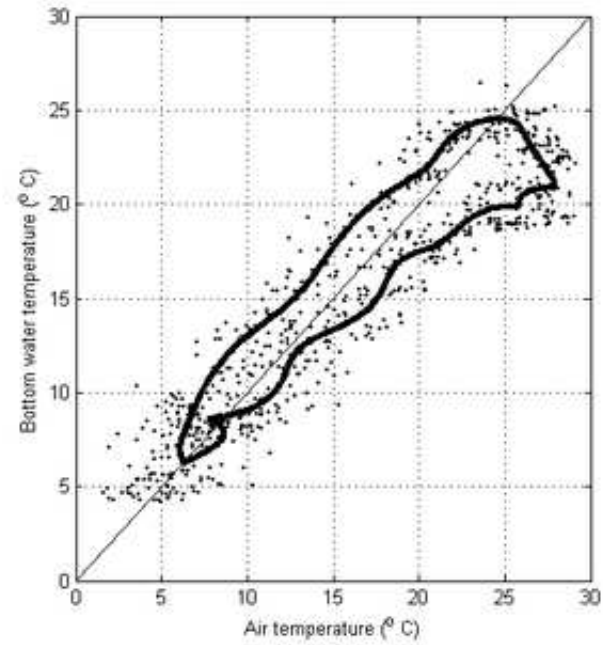
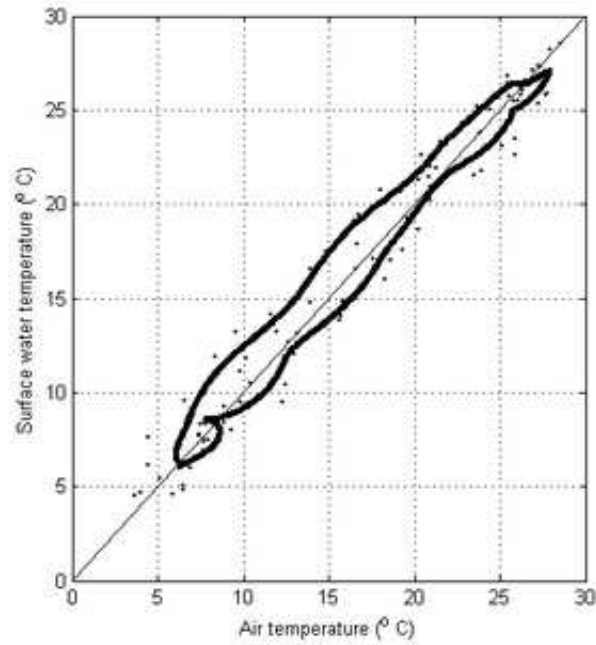
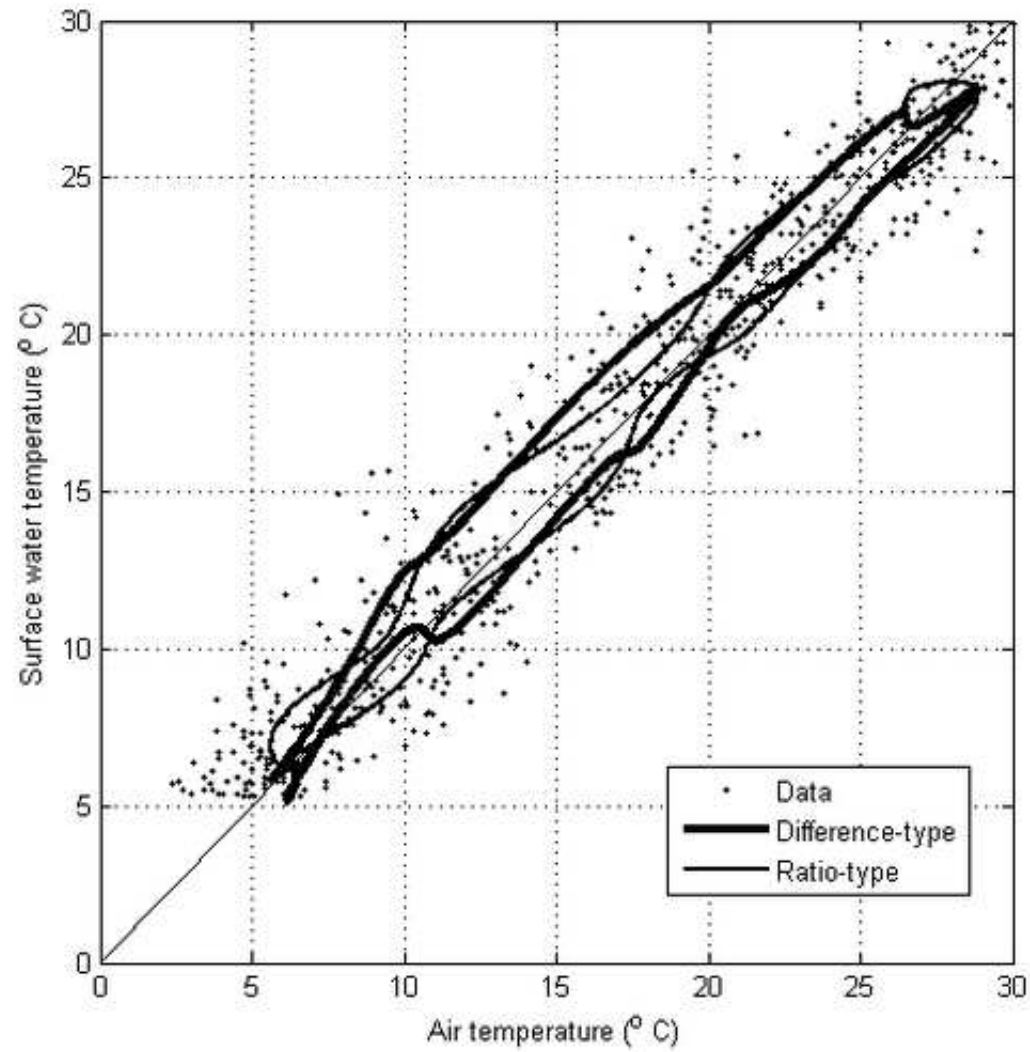


Figure08a:A scatter plot of surface water temperature estimated

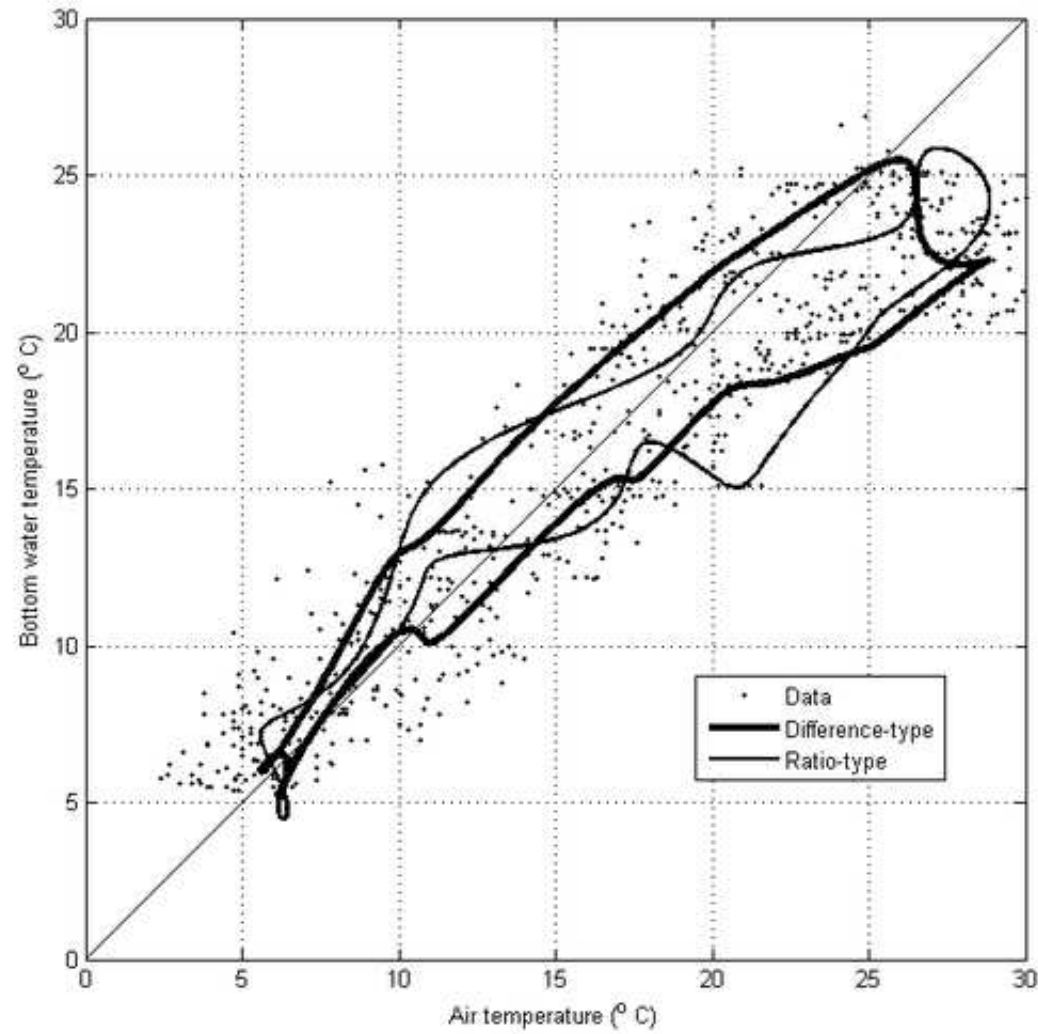
Journal of Environmental Engineering. Submitted February 15, 2011; accepted September 22, 2011;
posted ahead of print September 26, 2011. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499



Accepted Manuscript
Not Copyedited

Figure08b:A scatter plot of bottom water temperature estimated b

Journal of Environmental Engineering. Submitted February 15, 2011; accepted September 22, 2011;
posted ahead of print September 26, 2011. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000499



Accepted Manuscript
Not Copyedited

연구논문

Estimation of the Reference Evapotranspiration using Daily Sunshine Hour

Khil-Ha Lee* · Hongyeon Cho**

Civil Engineering, Daegu University*

Marine Environment and Conservation Research Department, Korea Ocean R&D Institute**

(Manuscript received 17 February 2011; accepted 24 August 2011)

일조시간을 이용한 기준 증발산량 추정

이길하* · 조홍연**

대구대학교 토목공학과*, 한국해양연구원 해양환경보전연구부**

(2011년 2월 17일 접수, 2011년 8월 24일 승인)

Abstract

이 논문에서는 일사량과 일조시간에 관한 통상적인 선형관계식보다 정확한 비선형 관계식에 대한 적용검토를 수행한다. 일조시간을 이용한 일사량 추정에 이어서 Penman-Monteith 방정식을 이용하여 기준 증발산량을 추정하였다. 우리나라 20개 지점의 1997년부터 2006년까지의 일사량 및 일조시간 자료를 포함한 기상자료를 이용하여 선형 그리고 수정 비선형 Angstrom 방정식을 보정하고 기준 증발산량을 추정하였다. 일조시간과 일사량 사이의 선형과 비선형 관계식을 이용한 기준 증발산량의 상대비교를 수행하였다. 선형 및 비선형 관계식을 이용한 방법 모두 RMS 오차는 5.96, NSC(Nash-Sutcliffe Coefficient)는 0.95로 추정되었고, 그 차이는 매우 미미하였다. 그러나 상대적으로 일사량이 기준 증발산량에 크게 기여하는 하계에는 그 차이가 증가하기 때문에 보다 개선된 비선형 관계식을 이용하는 방법에 대한 엄밀한 검토가 필요하다.

주요어 : Modified Angstrom equation, Reference evapotranspiration, Solar radiation, Bright sunshine duration, Penman-Monteith equation

I. INTRODUCTION

In places where solar radiation (R_S) is not measured directly, it can be estimated by interpolation from nearby localities where radiation data are available, by using models and empirical correlations, starting with the more diffusely known meteorological data or by using a combination of methods (Allen, 1995; Allen, 1997; Lee, 2009a). A typical example of the second method is the correlation found by Angstrom (1924) and others between global solar radiation (R_S) and bright sunshine duration (hours, n) and measured at many meteorological stations. This relationship to draw solar radiation estimates is used more often than those estimates determined by using only direct measured radiation data.

The Angstrom equation (Angstrom, 1924; Prescott, 1940) has long been a dominant tool to use as a basis approach to estimate the R_S . The Angstrom equation is a very convenient tool for a large number of locations (Annear and Wells, 2007; Gopinathan, 1988); however, many scientists have presented slightly different model parameters for different locations (Doorenbos and Pruitt, 1977). Atmospheric constituents, such as molecules, aerosols, and clouds, can affect solar radiation, and these atmospheric constituents should be included in building the relationship between R_S and bright sunshine hours (n). Consequently other attempts have been made to modify the Angstrom equation, including the use of more meteorological parameters, such as surface albedo, latitude, ambient temperature, total precipitation, humidity, elevation, amount of cloud cover, etc. (Dorvlo and Ampratwum, 2000; Hargreaves *et al.*, 1985; Hay, 1979; Supit and van Kappel, 1988). However, the additional meteorological parameters needed to improve the origi-

nal Angstrom equation could present a bottleneck for these previous approaches. Hence, Lee (2009b) recently suggested a simple nonlinear form of the modified Angstrom equation to improve both its accuracy and fitness. It showed successful performance. This study focused on the simple modified Angstrom equation.

Evapotranspiration (ET) as a major component of the hydrologic cycle will affect crop water requirement and future planning and management of water resources. Estimates of reference evapotranspiration (hereafter ET_0) are an important input to hydrologic models and the present models generally do not provide direct estimates of ET_0 from the land surface. Management of regional and local water resources and irrigation has required the use of an empirical equation to estimate ET_0 . Either a relatively accurate equation or a simple equation usually requires solar radiation data as an essential input variable; yet in most cases the available network of meteorological stations does not allow direct measurement or even an estimation of incoming solar radiation.

In this study, the modified Angstrom equation was facilitated at 20 meteorological stations on the Korean Peninsula. Then ET_0 was calculated and tested against reference values to see how the modified Angstrom equation affects ET_0 . This study is meaningful in the sense that temperature and solar radiation can explain at least 80% of ET_0 (Vanderlinden *et al.*, 2004; Samani, 2000; Priestly and Taylor, 1972). The results show that both the original and the modified equation present a similar level of performance once they are locally calibrated, and the modified Angstrom equation is not able to provide superiority in terms of accuracy.

II. METEOROLOGICAL DATA

The meteorological data used for the study were provided by the Korea Meteorological Administration (KMA), corresponding to the period of 1997-2006 (total 120 months) and consisting of 3,652 carefully screened daily values. All the stations were close to the reference condition (Allen, 1996). A summary of site information, including daily manual observations, such as mean temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation (R_s) at the 20 stations (12 inland and 8 coastal, including island: Stations 16 and 17) appear in Table 1 (see Fig. 1).

Study sites were selected on the basis of data completeness and reliability. Those days when

observations were not available were averaged and filled with neighboring values. The measured weather data was checked for integrity, quality, and reasonableness. Data quality and integrity checks were made and followed up on, using precedent-setting studies (Irmak *et al.*, 2003a; Temegsen *et al.*, 1999; Allen, 1996) for all locations. In the temperature data quality check, the measured maximum and minimum air temperature (T_{\max} and T_{\min} , respectively) data for each individual year were compared against the long-term temperature extremes. The deviation of dew point temperature (T_{dew}) from T_{\min} was within 3-4 °C for the substantial portion of the records for all locations. To check the integrity of R_s , clear sky envelopes (Allen, 1995; Allen, 1997)

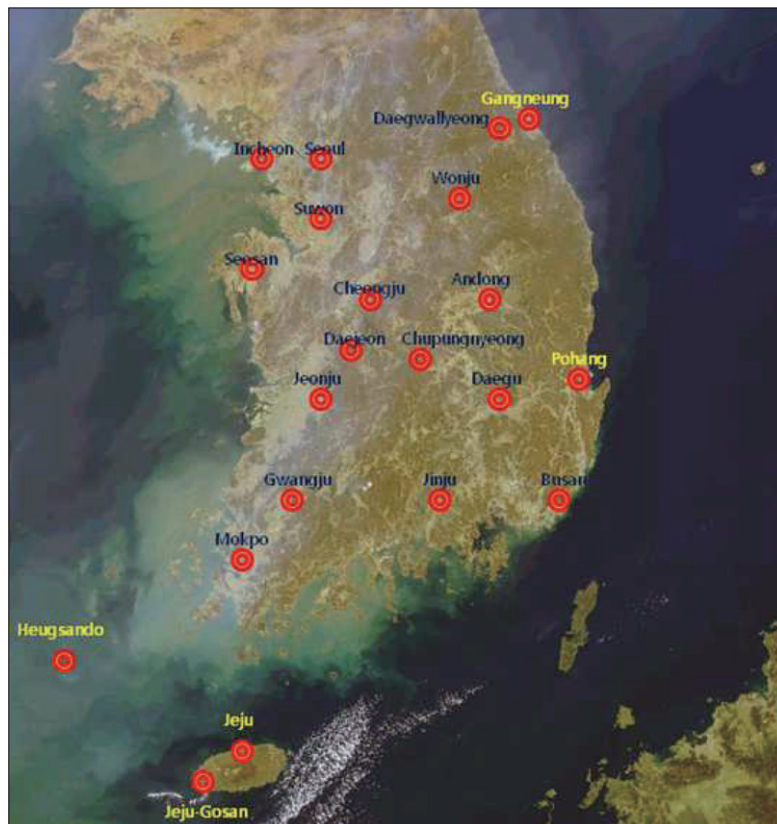


Figure 1. Study region and meteorological stations(The base map is the GOCI image provided by the Korea Ocean Satellite Center, KORDI)

Table 1. Summary of weather stations used for the study. Ele. = elevation (m), Lat. = latitude (degree), Lon. = longitude (degree), H_t = height of thermometer above the ground (m), H_w = height of anemometer above the ground (m), R_s = Incoming Solar Radiation ($MJm^{-2}d^{-1}$), Sunhr = bright sunshine duration (hours), WS = wind speed (m/sec), RH = relative humidity (%), Tmean = daily mean temperature ($^{\circ}C$). The mean and standard deviation values for all variables are for the period of the study (1997-2006).

	Station index.	Station name	Ele.	Lat.	Lon.	H_t	H_w	Mean					Std				
								Rs	Sunhr	WS	RH	T	Rs	Sunhr	WS	RH	T
Inland	1	Andong	140.7	36.57	128.70	1.5	15.5	13.65	5.90	1.57	65.44	12.42	6.12	3.69	0.82	15.48	9.74
	2	Cheongju	56.4	36.63	127.43	1.5	10.0	13.10	5.86	1.81	64.71	13.25	8.53	3.78	0.90	13.26	10.02
	3	Chupungnyeong	242.2	36.22	127.98	1.5	20.7	12.67	5.85	2.53	66.06	12.27	6.58	3.89	1.60	15.06	9.56
	4	Deagu	57.4	35.88	128.62	1.5	18.2	13.08	6.10	2.37	59.14	14.83	6.31	3.82	1.00	16.04	9.26
	5	Daejeon	62.6	36.37	127.37	1.6	22.8	13.48	5.86	1.92	67.22	13.47	6.71	3.73	1.03	14.02	9.78
	6	Daegwallyeong	790.0	37.67	128.72	1.8	10.0	12.73	5.79	4.29	74.22	7.39	7.10	4.05	2.53	17.33	9.84
	7	Gwangju	74.5	35.17	126.88	1.5	17.5	13.65	5.56	2.09	67.15	14.53	6.69	3.65	0.95	13.00	9.23
	8	Jeonju	61.1	35.82	127.15	1.5	18.4	12.82	5.50	1.79	68.04	14.24	6.34	3.71	0.76	12.55	9.67
	9	Jinju	27.1	35.15	128.03	1.5	10.0	13.65	6.09	1.61	67.67	13.99	6.52	3.76	0.88	14.59	9.34
	10	Seoul	85.5	37.57	126.95	1.5	10.0	11.68	5.10	2.17	62.64	13.27	6.37	3.59	0.88	14.24	10.18
	11	Suwon	34.5	37.27	126.98	1.5	20.0	13.31	5.80	1.89	65.33	12.83	6.55	3.79	0.86	13.81	10.23
	12	Wonju	150.7	37.33	127.93	1.6	10.0	12.88	5.32	1.08	67.94	12.26	6.57	3.59	0.64	13.28	10.48
Coast	13	Busan	69.2	35.10	129.02	1.7	17.8	13.27	6.08	3.47	63.73	15.41	6.70	3.84	1.36	18.84	7.97
	14	Gangneung	26.1	37.75	128.88	1.7	13.8	12.81	5.82	2.81	59.11	13.71	6.61	3.94	1.26	20.51	8.98
	15	Incheon	54.6	37.47	126.62	1.4	11.0	13.30	6.15	2.47	67.65	13.24	7.36	3.83	1.26	14.11	9.75
	16	Jeju	19.9	33.50	126.52	1.8	12.3	12.81	5.06	3.23	68.16	16.37	7.70	4.11	1.48	12.42	7.59
	17	Jejugosan	70.9	33.28	126.15	1.8	10.0	13.14	5.40	7.42	74.39	15.87	7.81	4.12	4.13	12.85	7.27
	18	Mokpo	37.4	34.82	122.37	1.5	15.5	14.08	5.92	3.82	71.20	14.45	7.08	3.91	1.98	12.09	8.85
	19	Pohang	1.3	36.02	129.37	1.6	13.2	13.27	6.12	2.72	61.85	14.95	6.64	3.97	0.92	18.95	8.69
	20	Seosan	25.2	36.77	126.48	1.4	20.2	13.40	5.81	2.60	72.71	12.39	6.67	3.84	1.35	10.48	9.87

were calculated. There was some mismatch between the measured and the clear sky radiation envelope because some points never reached a clear sky. These points needed further scrutiny; adjustment multipliers were applied to force the upper surface of measured R_s to reach computed clear-sky radiation envelopes. This adjustment was based on the assumption that there are commonly some clear-sky days at each location and that a single factor could produce suitable calibration correction for the measurement (Allen, 1996).

Solar radiation is measured using pyranometers of the CMP21 and sunshine duration with the MS-093. Expected daily accuracy of the pyra-

nometers is 2%, and the integration error of the sunshine duration meters is less than 10min/day. The data used for the study were daily averages on a horizontal surface. Table 1 also presents a summary of weather stations, including geographical coordinates, elevation, and measurement height. Stations 6 and 12 were located in a mountainous area and influenced by the orographic effect. The logarithm wind profile equation (Brustart, 1991) was used to adjust the measured wind speed at each height to a reference height of 2m. The Korean Peninsula has a moderate climate that is characterized by distinct wet and dry seasons. The dry season coincides with the Northwest wind, which is predominant from

November to March. The wet season results from the Southeast wind, which brings moisture-laden air from the Pacific Ocean. That season lasts from May to October and accounts for 70 % of the annual precipitation. July-August is usually the wettest season. All sites exhibit typical daily and seasonal variations in moderate temperature trends, ranging between a seasonal maximum from April to October to a minimum from November to March. Coastal sites show less variability in temperature, with a diurnal temperature range (DTR) of approximately 7 °C.

The net radiation was computed using the measured shortwave R_s and the outgoing longwave radiation equation (Irmak *et al.*, 2003c) as follows;

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (1)$$

in which, R_n =net radiation (MJ/m²/day); R_{ns} =the rate of incoming net shortwave radiation (MJ/m²/day); R_{nl} = the rate of outgoing net longwave radiation (MJ/m²/day).

The incoming net shortwave radiation was calculated as follows;

$$R_{ns} = R_s(\text{measured}) (1-\alpha) \quad (2)$$

in which, α = surface albedo and 0.23 was used for grass reference crop surface; $R_s(\text{measure})$ =total incoming (measured) solar radiation (MJ/m²/day).

The rate of outgoing net longwave radiation was expressed quantitatively as

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 e_a) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (3)$$

where σ is the Stefan-Boltzmann constant (4.903 · 10⁻⁹ MJ/K⁴/m²/day); e_a is actual vapor pressure (kPa), and R_{so} is the clear-sky solar radiation (MJ/m²/day).

III. THEORETICAL BACKGROUND

1. The Angstrom Equation

Angstrom (1924) and Prescott (1940) suggested a correlation in linear form as follows;

$$\frac{R_s}{R_a} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) = 0.177 + 0.552 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

where R_s is the total incoming shortwave solar radiation (MJ/m²/day); R_a is the extraterrestrial radiation (MJ/m²/day); a and b are the model parameters; n is the bright sunshine duration (hour); and N is the total day length (hour). To compute the extraterrestrial radiation R_a and total day length N , the following equations are used.

$$R_a = 15.392 d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (5)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(2\pi J/365) \quad (7)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (8)$$

$$\delta = 0.4093 \sin(2\pi J/365 - 1.405) \quad (9)$$

where R_a = extraterrestrial radiation (equivalent evaporation [mm/day] = 0.408 Radiation [MJ/m²/day]); d_r = relative earth-sun distance (-); ω_s = sunset hour angle (radians); ϕ = latitude of site (+ for northern hemisphere, - for southern hemisphere) (radians); δ = solar declination (radians), and J = Julian days.

In equation (4), n/N denotes the cloudiness fraction, while R_s/R_a is affected by various atmospheric conditions, as stated earlier.

The input of extraterrestrial shortwave radiation R_a is absorbed by atmospheric gases, particularly water vapor and ozone, and is scattered by air molecules and aerosol particles in clear sky conditions and additionally by clouds when these clouds are present (Maidment, 1993). Equation (4) is generalized in an attempt to improve accuracy and performance as follows and so called the

“modified Angstrom equation” (Lee, 2009b);

$$\frac{R_s}{R_a} = a + b \left(\frac{n}{N}\right)^c = 0.128 + 0.556 \left(\frac{n}{N}\right)^{0.649} \quad (10)$$

An additional parameter c , which describes the influence of the impeding factor and nonlinearity between R_s/R_a and n/N , is introduced in the equation (10). The original Angstrom equation (4) is a special form of the modified angstrom equation (10), giving $c=1.0$ (Lee, 2009b).

2. The FAO-56 Penman-Monteith Equation (FAO PM)

The limitation in availability of lysimeter measured ET_0 data in many locations required the scientists to use a standard method to develop a simplified equation with fewer input variables. Use of such a standard method has been, in practice, very beneficial; however, there can be certain/varied pros and cons as described in Irmak *et al.* (2003b). The concept of using one equation to calibrate or validate another equation is not new. Many studies have used the Penman-Monteith (PM) equation to calibrate and modify the coefficient for various empirical equations for different climate conditions (Trajkovic, 2007; Gavilan *et al.*, 2006; Vanderlinden *et al.*, 2004; Irmak *et al.*, 2003a; Allen, 1998; Allen and Brockway, 1983; Gunston and Batchelor, 1983). The FAO PM has been used as a substitute for the measured ET_0 data, the standard procedure when there is no lysimeter data (Irmak *et al.*, 2003b; Gavilan *et al.*, 2006; Trajkovic, 2007). For the same reason, the FAO PM was selected here as a reference for the comparison with other methods as follows:

$$ET_{0PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (11)$$

where ET_{0PM} = reference evapotranspiration estimated by the FAO PM equation (mm/day);

Δ = slope of the saturated vapor pressure function (kPa/°C), which can be calculated using mean air temperature; R_n = net radiation (MJ/m²/day); G = soil heat flux density (MJ/m²/day), which can be calculated using the air temperature difference for a specified time interval; γ = psychrometric constant (kPa/°C), which can be computed using atmospheric pressure; T = mean daily air temperature (°C); U_2 =average 24-h wind speed at 2-m height (m/s); and $(e_s - e_a)$ = vapor pressure deficit (kPa).

3. Evaluating the Efficiency of Fit for ET_0

To quantify the efficiency of fit for ET_0 , the Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSC) (Nash and Sutcliffe, 1970) and Root Mean Squared Error (RMSE) were used as follows:

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m ([R_{s,est}]_i - [R_{s,obs}]_i)^2}{\sum_{i=1}^m ([R_{s,obs}]_i - \bar{[R_{s,obs}]})^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m ([R_{s,est}]_i - [R_{s,obs}]_i)^2}{m - 1}} \quad (13)$$

where $R_{s,est}$ and $R_{s,obs}$ are the simulated and observed values of incoming shortwave solar radiation, respectively, and $\bar{[R_{s,obs}]}$ is the mean observed, incoming shortwave solar radiation, m is the number of total data points. NSC has a maximum perfect score of 1.0 and no minimum with values greater than 0, indicating satisfactory results. Physically, NSC is 1 minus the ratio of the mean-squared error to the variance of the observed data (Nash & Sutcliff, 1970). The normal distribution of error structure is assumed to determine the confidence intervals (CI) of the model output.

IV. OUTCOMES

Both the original and modified Angstrom equation were locally calibrated to fit the meteorological data, using the Shuffled Complex Evolution algorithm (SCE; Duan *et al.*, 1993, 1994), a general-purpose global optimization method designed to handle many of the response problems encountered in the calibration of non-linear simulation models. The corresponding results are as follows;

$$\frac{R_s}{R_a} = 0.177 + 0.552 \left(\frac{n}{N} \right)^{1.0} \quad (14)$$

for the original Angstrom equation

$$\frac{R_s}{R_a} = 0.128 + 0.556 \left(\frac{n}{N} \right)^{0.649} \quad (15)$$

for the modified Angstrom equation

The readers are referred to Lee (2009b) for more details.

For the original equation, the corresponding absolute error (AE) of the RMSE is in the range

of -0.126~0.158(3.40~8.45) (MJ/m²/day) and the correlation coefficient (r) is in the range of 0.85~0.94. For the modified Angstrom equation, the corresponding AE(RMSE) is in the range of -0.089~0.154(2.52~7.54) (MJ/m²/day) and the correlation coefficient is in the range of 0.86~0.95. Figure 2 presents a relative comparison of the basic statistics for both methods (RMSE in Figure 2a and absolute error (AE) in Figure 2b).

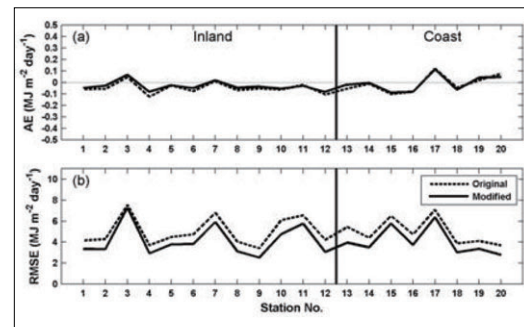


Figure 2. Relative comparison of basic statistics for two radiation methods: original and modified Angstrom equation

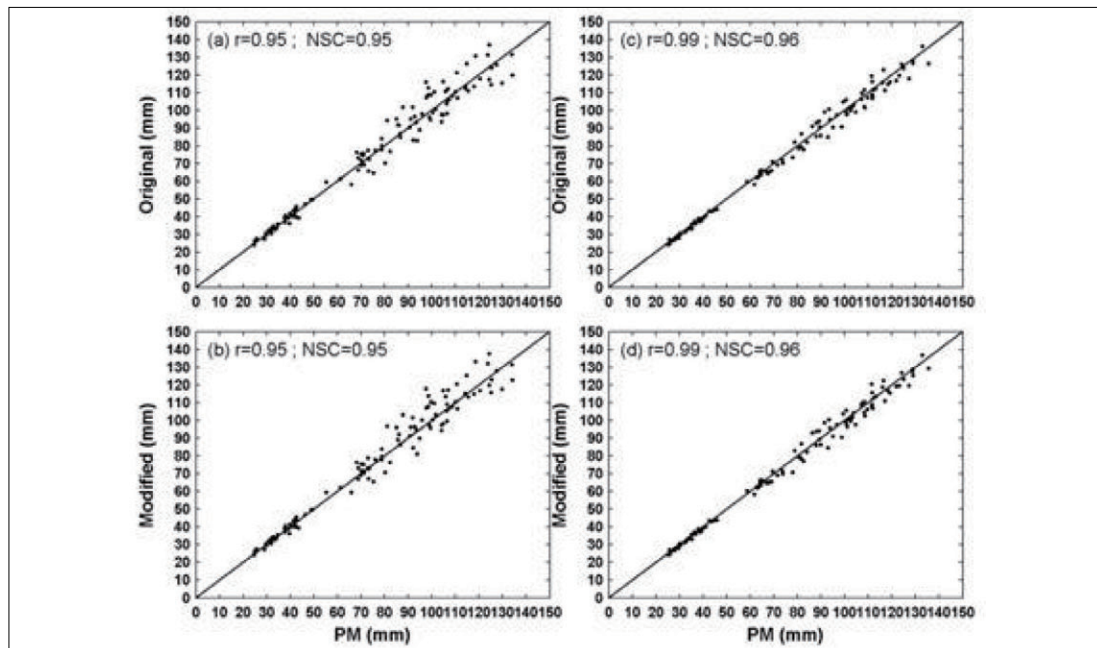


Figure 3. A scatter plot for the estimated vs. the reference values of monthly ET_0 at the representative stations: (a-b) for Seoul and (c-d) for Seosan station during the study period

Next, the solar radiations derived from both the original and the modified Angstrom equations were applied to compute ET_0 to see how significantly the modified Angstrom equation affects the irrigation schedule or water resources area. Other meteorological forcing parameters, such as air temperature, wind speed, and relative humidity, were set to be identical in computing ET_0 ; the only source that would differentiate the estimated ET_0 among the alternatives was the different solar radiation input derived from each method.

The PM equation has been selected for a reference here since the PM equation showed excellent performance under a variety of climatic conditions, and the FAO-56 PM (hereinafter called FAO PM) described the control condition against which the calibration methods were assessed as

in many other studies (Trajkovic, 2007; Gavilan *et al.*, 2006; Vanderlinden *et al.*, 2004; Irmak *et al.*, 2003a, b; Allen *et al.*, 1998; Allen and Brockway, 1983; Gunston and Batchelor, 1983).

Figure 3 presents the scatter plots for the estimated versus the reference values of monthly ET_0 at the representative stations. It was found that there is no noticeable difference between two methods. Table 2-3 presents the monthly estimates for the ET_0 and its basic statistics. There is some suggestion that the difference is larger in some inland areas because it appears that inland areas are less windy as shown in table 1 and larger portion of ET_0 stems from solar radiation in inland areas. The RMSE (AE) is 5.96 (1.75) for the original equation, while it was 5.96 (2.02) for the modified equation. The NSC (r) is 0.95 (0.93) for the original equation, while it was 0.95 (0.93)

Table 2. The monthly estimates of the ET_0 and the corresponding basic statistics for the original Angstrom equation (in mm)

	Station index.	Station name	ET_{PM}	ET_0	RMSE	NSC	r	AE
Inland	1	Andong	76.03	75.49	6	0.97	0.94	-0.54
	2	Cheongju	77.34	79.91	5.19	0.98	0.95	2.57
	3	Chupungnyeong	75.17	78.06	7.29	0.95	0.92	2.88
	4	Deagu	85.45	87.02	3.19	0.99	0.96	1.57
	5	Daejeon	78.22	78.42	4.51	0.99	0.95	0.2
	6	Daegwallyeong	64.81	67.36	4.94	0.97	0.95	2.55
	7	Gwangju	79.39	82.16	8.81	0.93	0.91	2.78
	8	Jeonju	72.85	76.53	6.89	0.96	0.94	3.68
	9	Jinju	78.49	78.86	2.78	0.99	0.96	0.37
	10	Seoul	72.87	77.05	6.64	0.95	0.95	4.18
	11	Suwon	70.59	76.25	12.19	0.87	0.88	5.67
Coast	12	Wonju	69.98	68.9	5.29	0.98	0.95	-1.08
	13	Busan	87.28	90.55	5.96	0.94	0.93	3.28
	14	Gangneung	84.66	87.66	4.12	0.98	0.96	3.01
	15	Incheon	81.64	79.51	5.02	0.98	0.95	-2.13
	16	Jeju	86.53	87.55	4.17	0.98	0.95	1.02
	17	Jejugosan	86.57	90.06	16.66	0.62	0.63	3.5
	18	Mokpo	89.07	88.37	3.61	0.99	0.96	-0.71
	19	Pohang	86.92	87.99	2.92	0.99	0.96	1.07
avg	20	Seosan	74.06	75.12	2.99	0.99	0.96	1.05
			78.90	80.64	5.96	0.95	0.93	1.75

Table3. The monthly estimates of the ET_0 and the corresponding basic statistics for the modified Angstrom equation (in mm)

	Station index.	Station name	ET_{PM}	ET_0	RMSE	NSC	r	AE
Inland	1	Andong	76.03	76.05	6.04	0.97	0.94	0.02
	2	Cheongju	77.34	80.37	5.4	0.98	0.95	3.02
	3	Chupungnyeong	75.17	78.23	7.16	0.95	0.93	3.05
	4	Deagu	85.45	87.31	3.34	0.99	0.96	1.86
	5	Daejeon	78.22	78.84	4.3	0.99	0.95	0.62
	6	Daegwallyeong	64.81	67.17	4.43	0.98	0.95	2.36
	7	Gwangju	79.39	82.75	9.05	0.93	0.91	3.36
	8	Jeonju	72.85	77.04	7.02	0.96	0.94	4.19
	9	Jinju	78.49	79.22	3.03	0.99	0.96	0.73
	10	Seoul	72.87	77.81	7.24	0.95	0.95	4.94
	11	Suwon	70.59	76.74	12.54	0.86	0.88	6.16
	12	Wonju	69.98	69.67	4.75	0.98	0.95	-0.31
Coast	13	Busan	87.28	90.63	5.68	0.94	0.94	3.36
	14	Gangneung	84.66	87.53	4	0.98	0.96	2.88
	15	Incheon	81.64	79.83	4.84	0.98	0.95	-1.81
	16	Jeju	86.53	87.55	4.09	0.98	0.95	1.02
	17	Jejugosan	86.57	89.87	16.7	0.62	0.62	3.3
	18	Mokpo	89.07	88.35	3.7	0.99	0.96	-0.72
	19	Pohang	86.92	87.98	2.81	0.99	0.96	1.06
20	Seosan	74.06	75.46	3.09	0.99	0.96	1.4	
avg			78.90	80.92	5.96	0.95	0.93	2.02

for the modified equation. The corresponding results are shown in Table 2-3 and Figure 3. It was generally found that both methods show a similar level of performance and that agreement varied with different stations.

Figure 4 shows the monthly performance for both the reference and the estimated ET_0 at the

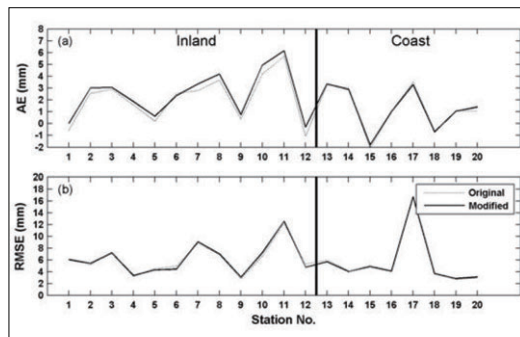


Figure 4. Relative comparison of basic statistics for the ET_0 derived from two radiation methods: original and modified Angstrom equation

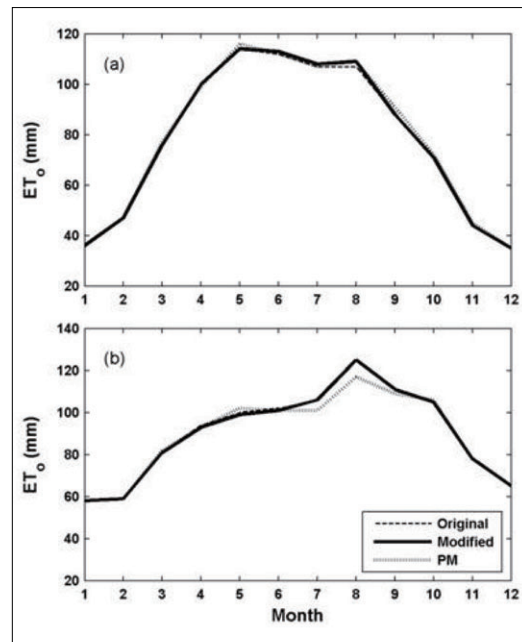


Figure 5. Monthly performance for the estimated ET_0 at the representative stations; (a) for Seoul and (b) for Seosan station during the study period.

representative station. The estimates from both alternatives were similar in their seasonal patterns. It appeared that the largest difference occurred during summer months for both alternatives. Previous research (Bois *et al.*, 2008;

McVicar *et al.*, 2007; Gong *et al.*, 2006) has shown that the sensitivity of the climatic variables to ET_0 varies with season and region, and ET_0 is mainly governed by solar radiation during summer and by wind speed during winter. In accordance with

Table 4. The monthly average values of heat each station (in)

		Station index																				
		Mon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PM	1	31	29	35	41	29	26	33	29	36	30	28	24	53	47	31	45	58	39	48	28	
	2	40	40	44	52	41	35	45	39	47	40	37	34	61	55	42	51	59	47	56	37	
	3	71	73	78	86	73	64	76	69	77	71	66	65	87	86	74	78	82	75	86	66	
	4	96	104	101	113	105	94	103	99	99	99	93	96	103	113	101	100	93	100	111	93	
	5	112	124	114	131	123	108	121	115	116	117	114	114	116	123	115	115	102	116	124	113	
	6	114	121	109	128	121	102	119	114	112	115	114	116	112	120	116	117	101	120	121	112	
	7	101	112	97	117	112	87	111	106	107	96	106	106	103	109	106	132	101	119	114	106	
	8	96	110	94	111	110	79	111	107	109	102	111	105	116	105	111	128	117	127	110	111	
	9	78	92	80	92	92	62	96	90	91	89	91	84	99	85	93	100	109	103	88	93	
	10	60	68	69	77	69	60	76	70	72	71	68	61	90	83	74	89	106	90	81	68	
	11	38	41	45	50	41	41	47	43	45	43	40	34	64	61	47	61	78	58	59	40	
	12	30	28	36	41	29	30	34	30	35	31	28	23	55	53	34	49	65	42	50	29	
Original	1	32	29	35	42	29	27	33	30	36	30	28	24	53	47	32	46	58	39	48	28	
	2	41	40	45	53	40	35	43	40	47	40	38	33	61	55	42	52	59	46	56	37	
	3	72	73	79	87	72	64	73	70	76	70	67	64	87	87	72	78	81	73	85	64	
	4	102	106	109	116	105	96	103	102	100	101	97	95	105	116	101	102	94	100	113	94	
	5	115	123	120	131	120	107	117	116	114	116	116	109	115	123	116	112	100	113	124	112	
	6	116	120	113	128	119	102	115	114	112	115	115	110	113	119	116	114	102	115	124	111	
	7	104	111	101	117	109	88	110	106	107	99	106	100	106	111	107	129	106	113	116	104	
	8	101	110	97	113	106	81	110	107	107	104	111	99	118	105	111	126	125	122	114	109	
	9	79	91	83	92	90	64	94	90	88	90	93	80	101	86	93	100	111	100	90	91	
	10	63	69	69	78	68	60	76	71	71	72	69	59	91	83	74	88	105	88	82	68	
	11	39	41	46	52	41	42	46	44	44	44	40	34	65	61	47	61	78	58	59	40	
	12	30	29	36	42	29	30	34	30	35	32	29	23	56	53	34	49	65	42	50	29	
Modified	1	32	29	35	42	29	26	33	30	36	30	28	24	53	47	32	46	58	39	48	28	
	2	41	40	45	53	40	34	44	40	47	40	37	33	61	55	41	52	59	46	56	37	
	3	72	73	79	86	72	63	73	70	76	71	67	64	87	87	72	78	81	73	85	64	
	4	102	106	108	116	106	96	103	102	100	101	97	96	105	116	101	102	93	100	113	94	
	5	115	123	119	131	120	107	117	116	114	117	115	110	115	124	116	112	99	112	124	112	
	6	118	121	114	129	120	102	116	116	113	116	116	112	113	120	117	114	101	116	124	112	
	7	105	113	102	118	110	87	111	108	108	100	107	101	106	110	108	129	106	114	116	104	
	8	102	112	98	114	108	80	112	109	109	106	113	101	119	105	112	127	125	123	114	110	
	9	80	91	83	92	90	63	95	91	88	91	94	81	101	86	93	99	111	100	89	92	
	10	63	69	69	78	68	60	76	71	71	72	69	59	91	83	74	88	105	88	81	68	
	11	39	41	46	52	41	41	47	44	44	44	40	34	65	61	47	61	78	58	59	40	
	12	30	29	36	42	29	30	34	31	35	32	29	23	56	53	34	49	65	42	50	29	

that work, Figure 5 presents the seasonal variation in ET_0 estimates with the largest difference occurs during summer season. Table 4 presents the monthly average of ET_0 estimated from two alternatives. It was shown that the difference for the two methods was up to ~2% during the summer season.

Figure 6 shows a relative comparison of the

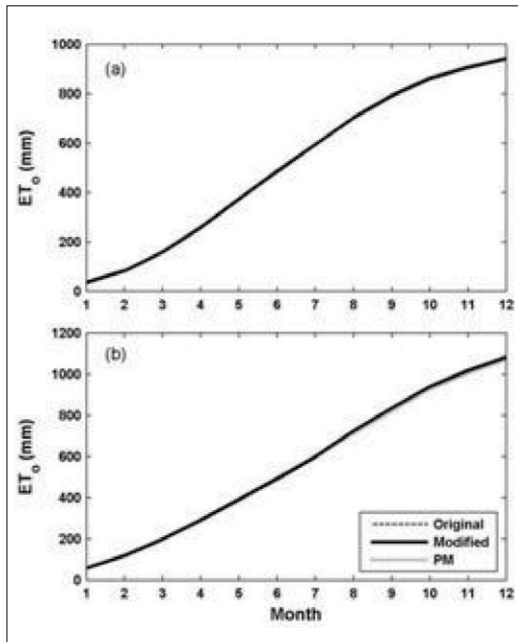


Figure 6. Relative comparison of the annual evolution of cumulative ET_0 according to both alternatives at the representative stations: (a) for Seoul and (b) for Seosan station during the study period

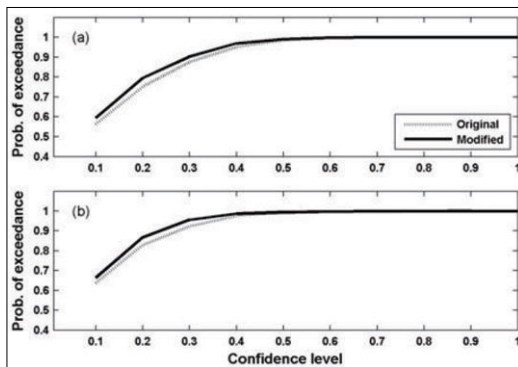


Figure 7. A statistical evaluation of the estimated ET_0 against the reference ET_0 .

annual evolution of the cumulative ET_0 according to both alternatives at the representative stations. There was no prominent difference between the alternatives. The difference for the cumulative ET_0 was not remarkable for either the inland areas or the coastal areas.

The figure shows the exceedance probability (EP) of upper/lower quantiles of the estimated ET_0 for a range of confidence level probability.

A statistical evaluation of the estimated ET_0 against the reference values is presented in Figure 7. Figure 7 shows the exceedance probability (EP) of upper/lower quantiles for the estimated ET_0 for a range of confidence level probability. Both stations showed a similar level of statistical accuracies for the suggested method, modified Angstrom equation. Both sites were associated with high EP values that ranged from near 100% at a high value of CI (0.5) to 60% at 0.1 of CI. It is obvious based on these findings that the modified Angstrom equation provided better performance than the original Angstrom equation at each station.

On the basis of the results above, it appears that the two alternatives present a similar level of performance and the modified Angstrom equation is not able to provide any superiority to the original equation in computing ET_0 . The modified equation shows better accuracy at some stations, while the original equation shows better accuracy at other stations. These findings may imply that performance varies with region.

V. SUMMARY AND CONCLUSIONS

This paper is based on the previously accepted fact that the nonlinear relationship is more accurate than the conventional linear relationship

between solar radiation and bright sunshine duration. The estimation method of solar radiation applies to the ET_0 . The probable impact of the nonlinear relationships between the solar radiation and bright sunshine duration on the ET_0 in irrigation and water resources was thus examined for relative comparison using the conventional linear method. The relative accuracies of the different methods are assessed by a comparison to the reference values. It appears that the two alternatives discussed here present a similar level of performance, and the difference between the original Angstrom equation and the modified Angstrom equation does not provide the benchmark control that would be desirable to demonstrate a significant difference for the methods. This study suggests that the selection of method used for estimating solar radiation from bright sunshine duration may have a minor influence on estimating ET_0 regardless of linearity once the method is locally calibrated, but much attention does need to be paid during summer season because solar radiation dominates ET_0 during the summer season in relative terms.

Acknowledgements

The study is supported by the KORDI project (PE-9853D). The author would like to thank Korea Meteorological Administration (KMA) for their kind cooperation and data provision.

References

- Allen, R.G., 1995. Evaluation of procedure for estimating mean monthly solar radiation from air temperature, Report of the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations.
- Allen, R.G., 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 122(2), 97-106.
- Allen, R.G., 1997. Self-Calibrating Method for Estimating Solar Radiation from Air Temperature, *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(2), 56-67.
- Allen, R.G. and Brockway, C.E., 1983. Estimating consumptive use on a statewide basis, *Proceedings of 1983 Irrigation and Drainage Specialty conference*, ASCE, New York
- Angstrom, A., 1924. Solar and Terrestrial radiation, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 50, 121-125.
- Annear, R.L., Wells, S.A., 2007. A comparison of five models for estimating clear-sky solar radiation, *Water Resources Research* 43, W10415, doi:10.1029/2006WR005055.
- Bois, B., Pieri, P., Leeuwen, C.V., Wald, L., Huard, F., Gaudillere, J.P., and Saur, E., 2008. Using remotely sensed solar radiation data for reference evapotranspiration estimation at a daily time step, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 619-630.
- Brustaert, W. 1991. *Evaporation into the atmosphere, theory, history and application*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherland.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. *Guideline for predicting crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- Dorvlo, A.S.S. and Ampratwum, D.B., 2000. Harmonic analysis of global irradiation,
- Allen, R.G., 1995. Evaluation of procedure for estimating mean monthly solar radiation from air temperature, Report of the Food and Agriculture Organization

- Renewable Energy, 20, 435-443.
- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., and Sorooshian, S., 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization", *J. of Optimization Theory and Applications*, 76, 501-521.
- Duan, Q.Y., Sorooshian, S., and Gupta, V.K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, 158, 265-284.
- Gavilan, P., Lorite, I. J., Tornero, L. S., and Berengena, J., 2006. Regional calibration of HE for estimating reference ET in a semiarid environment, *Agricultural Water Management*, 81, 257-281.
- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S., and Chen, Y.D., 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin, *Journal of Hydrology*, 329, 620-629.
- Gopinathan, K.K., 1988. A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration, *Solar energy*, 41(6), 499-502.
- Gunston, H. and Batchelor, C. H., 1983. A comparison of the Priestly-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries, *Agricultural Water Management*, 6, 65-77.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., and Riley, P., 1985. Irrigation water requirement for Senegal River Basin, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 111, 265-275.
- Hay, J.E., 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces, *Solar Energy*, 23(4), 435-443.
- Irmak, S., Allen, R.G., and Whitty, E.B., 2003(a). Daily grass and alfalfa-reference-Evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 129(5), 360-370.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., and Jones, J.W., 2003(b). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 129(5), 336-347.
- Irmak, S., Irmak, A., Jones, J. W., Howell, T. A., Jacobs, J. M., Allen, R. G., and Hoogenboom, G., 2003(c). Predicting daily net radiation using minimum climatological data", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 129(4), 256-269.
- Lee, K., 2009(a). Predicting incoming solar radiation and its application to radiation-based equation for estimating reference evapotranspiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 135(5), 609-619.
- Lee, K., 2009(b). Constructing a nonlinear relationship between incoming solar radiation and bright sunshine duration, *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.2032
- Maidment, D.R., 1993. *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, INC., NY, USA
- McVicar, T.R., Niel, T.G.V., Li, L., Hutchinson, M.F., Mu, X., and Liu, Z., 2007.

- Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences, *Journal of Hydrology*, 338, 196-220.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I-A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Prescott J., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation, *Trans R. Sec. South Australia*, 64: 114-118.
- Priestly, C.H.B. and Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92.
- Samani, Z.A. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data, *Journal of Irrigation and Drainage engineering-ASCE*, 126(4), 265-267.
- Supit, I., and van Kappel, R.R., 1988. A simple method to estimate global radiation, *Solar Energy*, 63, 147-159.
- Temegsen, B., Allen, R.G., and Jensen, D.T., 1999. Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 125(1), 26-33.
- Trajkovic, S. 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions, *Journal of Irrigation and Drainage engineering-ASCE*, 133(1), 38-42.
- Vanderlinden, K., Giraldez, J.V., and Meirvenne, M.V. 2004. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves Methods in Southern Spain", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 130(3), 184-191.

광역 기온자료를 이용한 국지 수온 추정오차 비교 분석

Error Analysis of the Local Water Temperature Estimated by the Global Air Temperature Data

이 길 하* / 조 홍 연**

Lee, Khil-Ha / Cho, Hong Yeon

Abstract

A local or site-specific water temperature is downscaled from the nation-wide air temperature that represents simulation by General Circulation Model (GCM). Both two-step and one-step method are tested and compared in three sites: Masan Bay, Lake Sihwa, and Nakdong River Estuary. Two-step method uses a linear regression model as the first step that converts nation-wide air temperature into local air temperature, and the corresponding coefficient of determination is in the range of 0.98~0.99. The second step that converts air temperature into water temperature uses a nonlinear curve, so called S-curve, and the corresponding root mean squared error (RMSE) is 2.07 for rising limb in Masan Bay, 1.93 for falling limb in Masan Bay, 2.59 for Lake Sihwa, and 1.58 for Nakdong River Estuary. In a similar way, one-step method is performed to directly convert nation-wide air temperature into local water temperature, and the corresponding RMSE is 2.28 for rising limb in Masan Bay, 1.89 for falling limb in Masan Bay, 2.55 for Lake Sihwa, and 1.52 for Nakdong River Estuary. Consequently both methods show a similar level of performance, and one-step method is recommendable in that it is simple and practical in relative terms.

Keywords : GCM data, global air temperature, local air temperature, local water temperature, regression analysis, S-shape function

요 지

미래 기온변화 정보를 제공하는 General Circulation Model (GCM) 자료, 즉 광역 기온자료를 이용하여 우리나라의 국지 수온변화를 추정하는 연구를 수행하였다. 국지수온 추정은 마산만, 시화호, 낙동강 하구를 대상으로 Two-step 접근방법과 One-step 접근방법을 적용하여 각각의 추정오차를 비교·분석하였다. Two-step 추정방법은 광역기온으로 국지기온을 추정하는 제1단계에서는 선형회귀분석 기법을 적용하였으며, 모든 지점에서 결정계수가 0.98~0.99 정도로 매우 높게 나타났다. 그리고 국지기온으로 국지수온을 추정하는 제2단계에서는 S-형태함수의 비선형 회귀분석기법을 적용하였으며 이 경우 RMS (Root-mean squared) 오차는 마산만에서 2.07(온도 증가시기), 1.93(온도 감소시기), 시화호에서는 2.59, 낙동강 하구에서는 1.58로 파악되었다. 반면 동일한 S-형태함수를 이용한 비선형 회귀분석기법으로 광역기온자료로부터 바로 국지 수온을 추정하는 One-step 접근방법을 적용한 경우, RMS 오차는 마산만이 2.28(온도 증가시기), 1.89(온도 감소시기), 시화호에서는 2.55, 낙동강 하구는 1.52로 Two-step 접근방법과 비슷한 수준의 오차를 보이는 것으로 파악되었다. 따라서 광역 기온자료를 이용하여 국지 수온을 추정하는 경우에는 One-step 접근방법도 유용하고 실용적인 것으로 판단된다.

핵심용어 : GCM 자료, 광역기온, 국지기온, 국지수온, 회귀분석, S-형태함수

* 웹솔루스 수자원부 (e-mail: khil-ha@yahoo.com)
Web-solus, Water Resources Department

** 교신저자, 한국해양연구원 해양환경방제연구부 책임연구원 (e-mail: hycho@kordi.re.kr)

Corresponding Author, Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, KORDI, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea

1. 서론

지구 온난화에 따른 미래의 장기 기후변화가 해양환경 및 생태계에 미치는 영향 분석 연구는 해양 환경·생태계와 관련한 모든 인자를 고려하여 연구하는 것이 바람직하다. 그러나 가용한 자료의 부족과 신뢰도 문제로 중요한 환경 인자에 중점을 두는 연구가 우선한다. 연안 생태계 및 해양환경에서 수온은 용존 산소 (Dissolved Oxygen, DO)의 양을 조절하는 역할을 하는 가장 중요한 환경인자 중의 하나로서, 21세기 연안 생태환경변화를 예측하기 위해서는 미래 기후변화에 따른 수온변화를 예측하는 연구가 수행 (선행)되어야 한다.

일반적으로 지구의 미래 기상자료 (예: 기온, 강우, 증발산, 습도, 복사열 등)는 GCM 자료를 활용할 수 있다 (IPCC, 1999; IPCC-TGCI, 2001; Wilby et al., 2004; Meehl et al., 2007; Asselman et al., 2003). 그러나 GCM 모형은 연안의 세부 지역이나 육지의 국지적인 수온 자료는 제공하지 않으므로 국지적인 수온을 추정하기 위해서는 기본적으로 두 단계를 필요로 한다. 즉 GCM 광역 기온자료로부터 국지적인 기온자료를 적절한 (기 구축된) 관계식을 이용하여 도출하는 단계와 국지 기온자료와 미리 구축한 국지 기온-수온 관계식을 이용하여 국지 수온을 추정하는 단계로 구분된다. 그러나 번거롭게 두 단계를 거치지 않고 오차전파를 줄이는 관점에서 바로 광역 기온자료를 이용하여 국지 수온자료를 추정하는 One-step 접근방법도 가능하다.

수온변화는 인근 지역의 기온변화와 밀접한 관계가 있으며, 국내외의 연구에서 간단하면서도 신뢰할만한 수준을 유지하는 관계식 도출이 가능하다는 것을 보여 주었다 (이길하, 2007; 조흥연 등, 2007; Webb, 1987; Preud'Homme and Stefan, 1993; Pilgrim and Stefan, 1995). 이러한 연구

에서 초기에는 선형의 기온-수온관계에 의지하였으나, 선형관계식이 고온과 저온에서 큰 오차를 발생시키는 문제점을 해결하기 위하여 S-형태함수 (logistic curve)를 이용하는 비선형관계식이 주류를 이루어 좋은 성과를 거두고 있다. 따라서 관심 대상해역 인근의 미래 기온자료가 가용하고 적절한 기온-수온 관계식을 미리 구축할 수 있다면 미래 수온변화를 적정 수준으로 추정할 수 있다.

GCM 자료는 낮은 공간 해상도 (약 1~5°)로 인하여 우리나라 전체 영역이 격자 1~2개 정도의 대표기온 (광역 기온)으로 표현되기 때문에 지역적인 기온차이 (위도, 고도 등)가 반영되지 못하는 단점이 있다. 그래서 우리나라 전체 대표기온 (평균기온, Nationally-averaged; 광역 기온으로 간주)과 주요 관심지점 (local or site-specific)의 기온과의 신뢰할 만한 관계를 파악하는 연구 즉 GCM 기온자료의 Down-scaling 방법과 국지 수온추정에 대한 정량적인 오차분석 연구가 필요하다 (이길하 등, 2008).

본 논문에서는 GCM 자료를 적용하여 장래 수온변화를 예측하기 위한 선행연구로서, 광역기온자료를 국지 수온자료로 추정하는 경우, Two-step 방법과 One-step 방법의 추정오차를 분석하였다. Two-step 방법에서는 우리나라 모든 기상대의 기온자료를 이용하여 우리나라 평균 기온 (GCM 자료에 상응한다고 가정; 광역 기온자료)을 산정하고, 시화호, 마산만, 낙동강 하구의 지역 기온 (국지 기온)과 광역기온자료와의 관계를 선형회귀분석을 이용하여 도출하였다. 도출된 관계식을 이용하여 추정한 시화호, 마산만, 낙동강 하구의 국지 기온자료 (추정치)와 국지 관측 수온자료의 비선형 관계식을 유도하여 국지 수온추정 오차를 산정하였으며, One-step 방법은 한 단계 단축되어 우리나라 평균기온자료와 시화호, 마산만, 낙동강 하구의 국지 관측 수온자료의 비선형 관계식을 바로 유도하여 국지 수온추정 오차를 산정하여 비교·분석하였다.

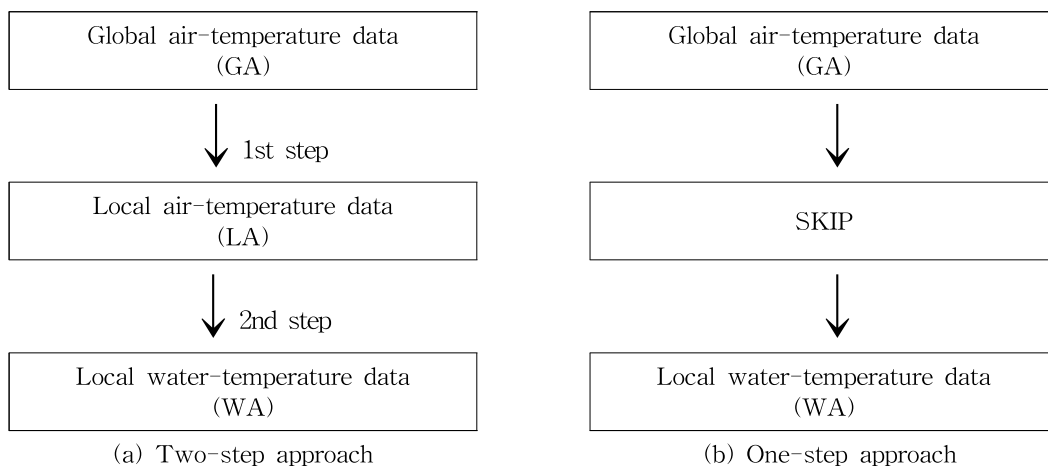


Fig. 1. Flow Chart for Predicting Future Change on Aquatic Environment

GCM 자료를 이용한 광역 기온자료를 이용한 국지 수온 추정을 위한 Two-step, One-step 추정과정은 Fig. 1과 같다.

2. 평균 기온자료의 지역화 (Down-scaling)

2.1 Down-scaling 대상 기온자료

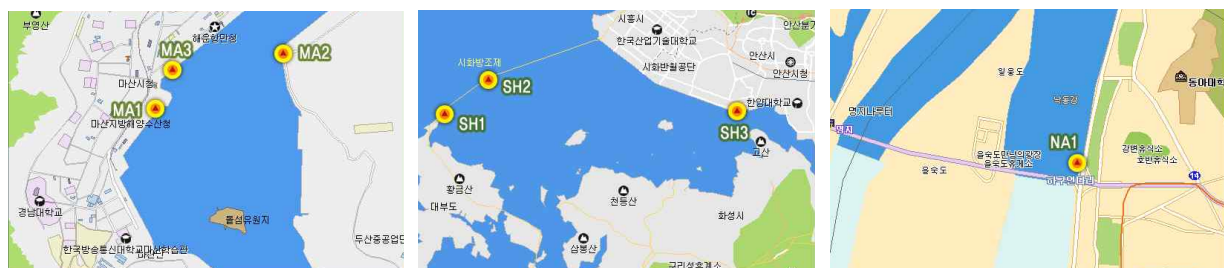
GCM 자료의 Downscaling 기법 적용을 위한 대상 자료는 우리나라 전국에 걸쳐 분포한 기상청 기상대 자료 19개 지점의 일평균 기온자료로부터 일주일 시간간격으로 평균하여 분석하였다. 총 19개 지점의 기온을 공간 평균한 자료 (평균 기온, 주 평균)를 GCM 자료로 간주하였으며, 이 평균기온과 각 세 지점 (시화, 마산, 낙동강 하구)의 평균기온과의 관계를 분석하는 방법은 선형회귀분석 방법을 이용하였다. 일반적으로 기상대의 일일 평균기온 자료는 양호한 상태이므로 아무런 수정이 없이 사용하였다.

2.2 연안의 수온자료

시화호, 마산만 및 낙동강 하구 지점에서는 해양수산부 (해양환경과)에서 수행하는 ‘해양수질자동측정망’ 운영사업을 통하여 연속적으로 기온을 포함한 기상인자, 수온 및 염도, DO, 오염물질의 농도가 관측되고 있으며, 관측 자료를 해양환경관리공단 해양수질자동측정망에서 실시간으로 제공하고 있다 (<http://tmsinfo.meis.go.kr>). 시화호에서는 3개 지점, 마산만 해역에서도 3개 지점, 낙동강 하구에서는 1개 지점에서 관측을 수행하고 있으나, 마산만-3 (MA3) 지점에서는 기상관측을 수행하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 마산만-1 (MA1) 지점, 마산만-2 (MA2) 지점의 기온 및 수온자료만을 이용하여 분석을 수행하였으며, 시화호 및 낙동강 하구에서는 모든 지점의 자료가 이용되었다 (Fig. 2. 관측지점 위치 참조). 분석대상 기온 및 수온자료는 시화호는 2003년 1월 1일부터 2006년 12월 31일 (총 4년 동안의 자료), 마산만은 2004년 1월 1일부터

Table 1. Comparison of the Researches on the Relationship Between Air and Water Temperatures

Researcher	Description of the research (methods and processes)
Lee et al. (2008)	One-Step, Linear-regression method using KMA data. Comparison (estimation error analysis) between observed and estimated air temperatures at each weather station. The local air temperatures are estimated by the relationship between nationally-averaged and local temperatures data.
Lee (2007)	One-step, Non-linear regression (logistic-curve) method using the MEIS data. Comparison (estimation error analysis) between observed and estimated water temperatures in Lake Shihwa, Masan Bay and Nakdong river estuary. The local water temperatures are estimated by the relationship between local air and water temperatures data.
Cho et al. (2007)	One-step, Linear-regression (hysteresis analysis) method using the MEIS data in Masan Bay.
This study (2010)	Suggestion of the one-step and two-step method in order to estimate the local water temperatures using GCM data. Non-linear regression method is used to estimate the local water temperatures from nationally-averaged air temperature data (considered as the GCM air temperature data). In the two-step method, the linear-regression method is used in the first step (local air temperature estimation using the GCM data) and the non-linear regression method is used in the second step (local water temperature estimation using the results of the first step).



(a) Masan Bay (b) Lake Shihwa (c) Nakdong River Estuary

Fig. 2. Air and Water Temperature Monitoring Stations (<http://tmsinfo.meis.go.kr>)

2006년 12월 31일 (총 3년 동안의 자료), 그리고 낙동강 하구는 2005년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지의 자료 (총 2년 동안의 자료)이며, 기온은 일반적으로 이용되는 온도센서를 이용하여 관측하였으며, 수온은 PT-1000 제품을 이용하여 관측하였다. 관측간격은 5분이며, 일 자료는 5분 간격으로 측정된 자료를 평균한 자료이다.

2.3. 광역 기온자료를 이용한 국지 기온 추정 : Two-step 방법에서의 제1단계 추정

앞서 설명하였듯이 지구온난화와 동반한 기후변화에 따른 연안 생태환경 변화 예측을 위한 입력 자료로 필수적인 수온자료를 구하기 위해서는 연안 지역의 기온자료가 필요하다. 연안지역의 기온자료는 GCM 자료로부터 일차적으로 필요한 지역적인 규모의 기온자료를 얻는 과정, 즉 GCM 자료의 Down-scaling (이하 DS) 과정이 필요하다. DS 방법은 선형관계식을 이용한 통계적인 방법이 널리 사용되고 있는데, 이길하 등 (2008)은 우리나라 전체 대표기온 (평균기온, Nationally-averaged)과 주요 관심지점 (local or site-specific) 사이에 다음과 같이 선형관계 (linear regression function)가 성립한다는 것을 보여주었다.

이 연구에서도 다음과 같이 선형관계식 (linear regression function)을 사용하였다.

$$T_L = aT_G + b \quad (1)$$

여기서, T_L =국지 기온 (지역인자), T_G =광역기온 (평균인자), a, b =각각 지역 보정 계수이다.

세 지역에서 Eq. (1)에 의한 관계식의 결정 계수는 0.98~0.99로 좋은 결과를 보여주고 있다. Fig. 3은 세 지역에서의 선형 관계를 산포도로 보여준다 (마산 지역은 이력 현상이 뚜렷하게 보이므로 온도 상승 시기와 하강 시기를 따로 분리하여 다른 관계식을 적용, 조흥연 등, 2007).

GCM 자료 적용을 위한 대상 자료로 우리나라 전국에 걸쳐 분포한 기상청 기상대 자료 23개 지점의 2000~2005년 기온자료를 이용하였으며, 모든 지점의 기온을 평균한 자료 (평균 기온)를 GCM 자료 (광역 기온)로 간주하여 이 평균기온과 각 기상대의 평균기온과의 관계를 선형회귀 분석방법을 이용하여 유도하였다. 결정 계수는 0.939~0.993이며, 평균은 0.977로 강한 선형성을 보여주어 전체 대표기온 (평균기온, Nationally-averaged)에서 선형 이동을 통하여 주요 관심지점 (local or site-specific)의 기온을 유도해 낼 수 있으며, 이는 곧 앞서 제시된 2 단계 접근법 대신 S-곡선의 계수 보정을 통하여 GCM 기온과 지역 수온의 관계를 직접 유도해 낼 수 있는 "1 단계 접근법"에 대한 근거를 제시해 준다.

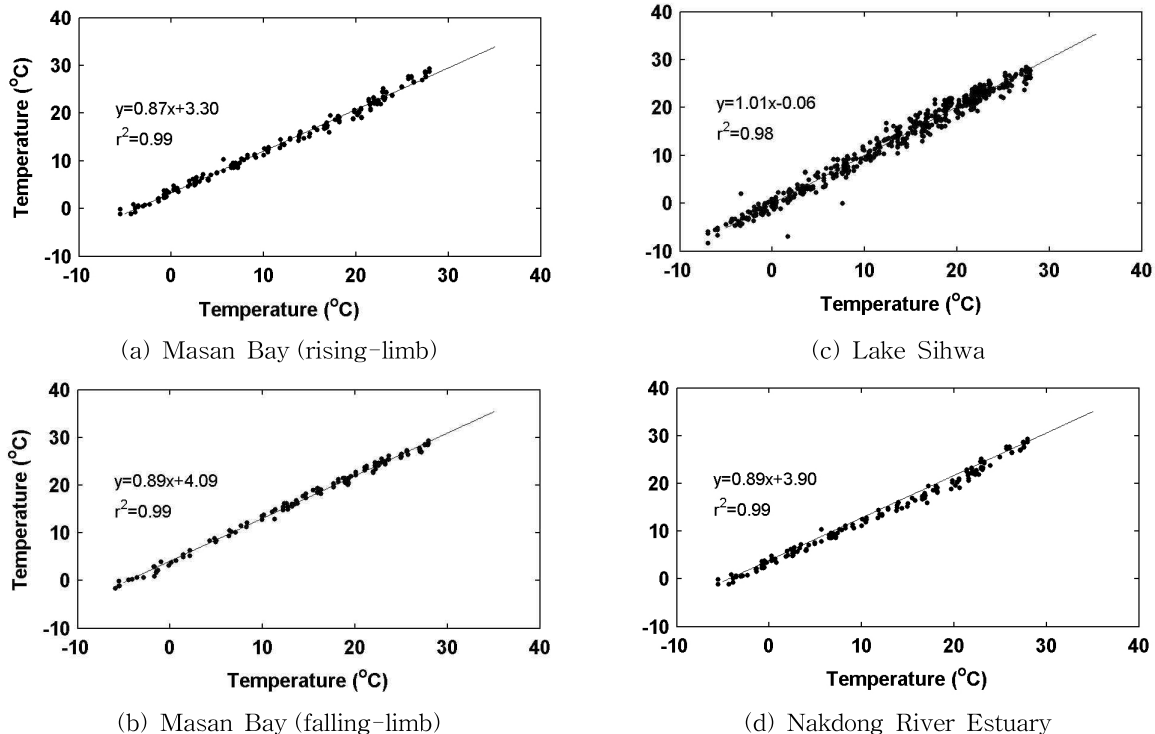


Fig. 3. Scatter Plot Showing a Linear Relationship between Nationally-averaged and Each Station (Masan Bay, Lake Sihwa, and Nakdong River Estuary)

3. 기온자료를 이용한 국지 수온 추정

이 단계는 국지 수온 추정에 이용하는 자료가 Two-step 방법의 제1단계에서 추정된 국지 기온자료인 경우에는 Two-step 추정방법의 제2단계 추정에 해당하며, 광역 수온자료인 경우에는 One-step 추정방법에 해당한다. 그러나 기본적으로 기온자료를 이용하여 수온을 추정하는 기온과 수온의 관계 도출이라는 측면에서 매우 유사하기 때문에 상호비교가 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 기온-수온 관계는 시간간격이 증가함에 따라 높은 온도는 낮아지고 낮은 온도는 높아지는 경향을 보이므로 선형 관계보다는 S-모형으로 제안된 비선형 관계를 가지고 있는 것으로 파악되고 있다 (Pilgrim and Stefan, 1995). 따라서 본 연구에서도 Eq. (2)로 제시되는 Logistic 함수형태를 선정한 S-모형을 이용하여 기온-수온 비선형 관계 분석을 수행하였다. S-모형은 곡선의 기울기, 변곡점까지의 거리, 최대 수온, 최소 수온에 해당하는 4개의 매개변수 ($\alpha, \beta, \gamma, \mu$)를 가지며, 분석기간 동안의 시간규모에 따라 평균한 관측자료를 활용하게 된다.

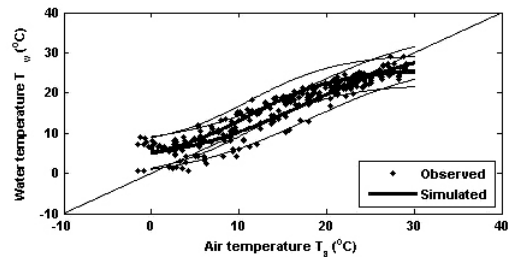
$$T_w = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}} \quad (2)$$

여기서, T_w 는 모형에서 추정하는 수온(기온자료를 이용하여 추정되는 수온), T_a 는 관측된 기온을 나타낸다. 수식에 제시된 α 는 최대 수온, β 는 변곡점에서의 기온, γ 는 변곡점에서의 기울기, μ 는 최소 수온에 해당하는 모형의 매개변수에 해당한다.

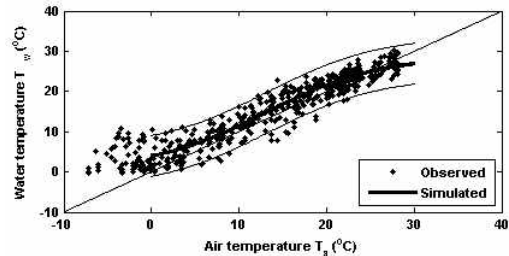
Eq. (2)로 제시되는 S-모형은 곡선의 기울기, 변곡점까지의 거리, 최대 수온, 최소 수온에 해당하는 4개의 매개변수 ($\alpha, \beta, \gamma, \mu$)를 가지며, 분석기간 동안의 시간규모에 따라 평균한 관측자료를 활용하게 된다. 기온-수온 비선형 관계모형의 매개변수에 해당하는 $\alpha, \beta, \gamma, \mu$ 값은 지역의 특성을 반영하고 있기 때문에, 지역에 따라 매개변수를 결정해야해야 하는데 이 연구에서는 Shuffled Complex Evolution (SCE) 최적화 기법 (Duan et al., 1993; Nelder, 1965)이 사용되었다.

마산만, 시화호, 낙동강 하구의 관측 지점에 대하여 SCE 최적화 기법으로 구한 매개변수는 Table 2에 제시하였으며, 구축한 S-모형을 이용하여 추정된 국지 수온자료(모형)와 관측자료를 도시하여 Fig. 4에 제시하였다.

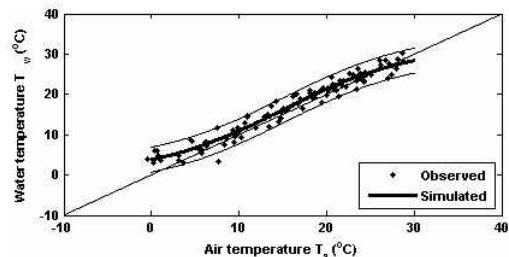
산정된 기온을 이용한 세 연안 지역의 기온-수온 관계식의 정확도를 파악하기 위하여 Eqs. (3) and (4)에서 제시된 NSC (Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMS 오차 (Root-mean squared error)를 이용하여 계산하였다.



(a) Masan Bay



(b) Lake Sihwa



(c) Nakdong Estuary (Two-step approach)

Fig. 4. The Fitted S-curve Using the Preferred Parameters Driven by SCE Scheme for Three Stations

Table 2. Preferred Parameter Set for S-curve Driven by SCE Optimization Scheme

	Two-step method (The second step)				One-step method			
	α	β	γ	μ	α	β	γ	μ
Masan bay(rising limb)	32.31	17.98	0.135	2.68	29.87	16.19	0.138	3.92
Masan bay(falling limb)	25.91	11.25	0.195	2.78	26.62	6.34	0.142	0.00
Lake Shihwa	28.80	13.31	0.156	0.84	29.80	13.27	0.144	0.00
Nakdong river estuary	32.30	15.15	0.133	0.00	32.30	12.48	0.118	0.00

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_{iO} - T_{iC})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{T_{iO}} - T_{iO})^2} \quad (3)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{iO} - T_{iC})^2} \quad (4)$$

여기서, T_{iO} =수온 관측자료, T_{iC} =추정식을 이용한 기온 계산자료, N =자료의 개수, $\overline{T_{iO}}$ =추정 기온자료의 평균 (평균기온)이다.

NSC 값의 최대값은 1로, 1에 접근할수록 추정 정확도가 높음을 의미하며, RMS 오차는 오차의 크기를 나타내므로 작을수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미한다.

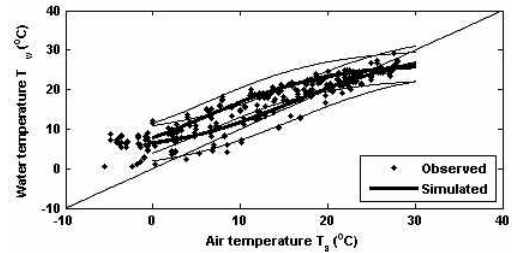
한편 One-step 추정방법을 적용한 경우도 동일한 과정으로 매개변수를 추정하고, 결과 비교를 위하여 Table 2, 3에 제시하였다. One-step 방법으로 마산만, 시화호, 낙동강 하구의 관측 지점에 대하여 SCE 최적화 기법으로 구한 매개변수는 Table 2에 제시하였으며, 구축한 S-모형을 이용하여 추정한 국지 수온자료 (모형)와 관측자료를 도시하여 Fig. 5에 제시하였다.

Two-step 추정방법의 제2단계에서는 마산지역의 경우 앞서 언급하였듯이 이력현상을 고려하여 기온상승기와 기온하강기를 분리하여 관계식을 구하였다. S-모형을 이용한 경우 마산 지역에서는 NSC 값이 0.91 (온도 증가 시), 0.98 (온도 감소 시)이며, RMS 오차는 2.07 (온도 증가 시), 1.93 (온도 감소 시)으로 양호한 결과를 보여주었다. 시화호 지역에서는 NSC 값이 0.90, RMS 오차는 2.59로 나타났으며, 낙동강 하구에서도 비슷한 양상이 나타나는데 NSC 값이 0.95, RMS 오차가 1.58로 나타났다 (Table 3).

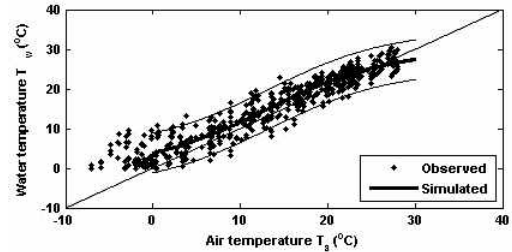
마찬가지로 One-step 추정방법에서도 마산지역의 경우는 이력현상 (조홍연 등, 2007)을 고려하여 기온상승기와 기온하강기를 분리하여 관계식을 구하였다. 연구 결과 기온-수온 비선형 관계에서 마산 지역에서는 NSC 값이 0.89 (온도 증가시기), 0.93 (온도 감소 시기)이며, 시화호 지역에서는 0.90 이며 낙동강 하구에서는 0.96으로 나타났다. RMS 오차는 마산이 2.28 (온도 증가 시기), 1.89 (온도

감소 시기)로 나타났으며, 시화호 지역에서는 2.55, 낙동강 하구에서도 1.52로 비슷한 양상을 보여주었다 (Table 3).

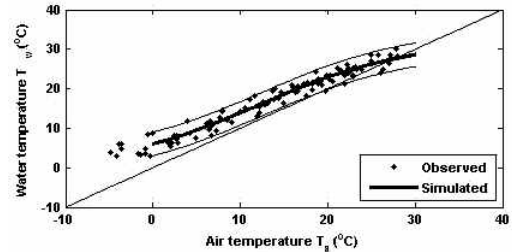
본 연구에서 제안한 방법의 RMS 오차는 2.0°C 수준에 해당하지만, 보다 낮은 수준의 오차범위에서 추정하기 위해서는 본 모형은 한계가 있으며, RMS 오차를 개선하는 새로운 모형의 개발 또는 새로운 접근방법의 제안 등이 필요할 것으로 판단된다. 기본적으로 기온과 수온은 뚜렷한 계절변동 성분을 가지기 때문에 계절 변동 성분



(a) Masan Bay



(b) Lake Sihwa

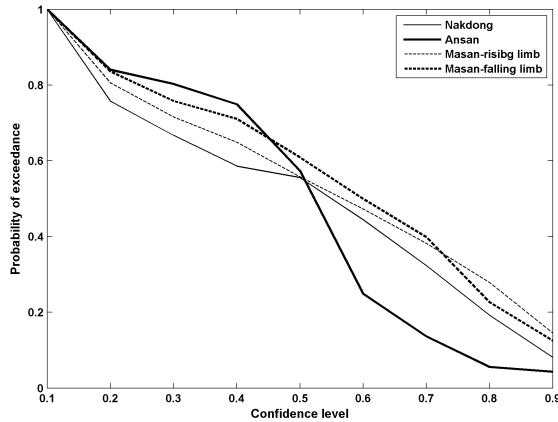


(c) Nakdong Estuary (One-step approach)

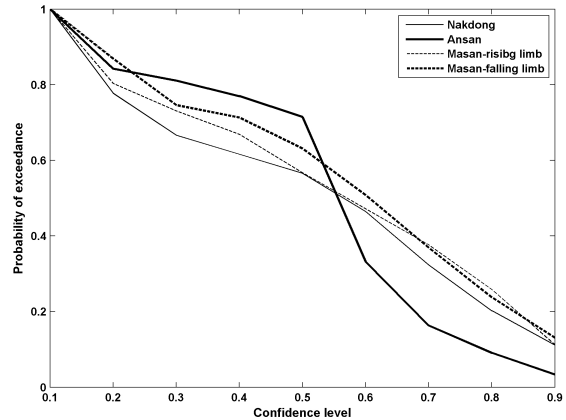
Fig. 5. The Fitted S-curve Using the Preferred Parameters Driven by SCE Scheme for Three Stations

Table 3. Basic Statistics (RMSE and NSC) for the Fitted S-curve

	Two-step method (The second step)		One-step method	
	RMS Error	NSC	RMS Error	NSC
Masan bay (rising limb)	2.07	0.91	2.28	0.89
Masan bay (falling limb)	1.93	0.98	1.89	0.93
Lake Shihwa	2.59	0.90	2.55	0.90
Nakdong river estuary	1.58	0.95	1.52	0.96



(a) Two-step approach



(b) One-step approach

Fig 6. Probability of Exceedance for the Fitted S-curve vs Observed Water Temperature for Three Stations

등을 제거한 전차성분만을 이용하여 추정하는 방법을 개발하는 것도 가능할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 GCM 자료를 이용한 국지 수온 추정기법을 제시하는 방법과 그 방법의 한계를 제시하는 것으로 그 범위를 한정하고 있다.

신뢰수준 (confidence level, significance level; 유의수준)이 높을수록, 신뢰구간 (오차범위/구간)이 증가하고, 신뢰구간이 증가하면 추정치를 기준으로 하는 추정범위 (추정치±신뢰구간)에서 벗어나는 자료가 감소하게 된다. 그 감소 정도는 추정범위를 벗어나는 자료의 개수를 전체 자료의 개수로 나눈 비율 (percentage), 즉 초과확률로 표현이 가능하다. 그 초과확률은 추정범위를 벗어나는 자료의 개수에 비례하기 때문에 신뢰구간이 증가할수록 초과확률이 감소하는 양상을 보이게 된다. 따라서 추정치와 관측치가 높은 수준의 일치성을 보일 경우에는 초과확률 감소양상이 매우 급격하게 발생하여야 하며, 낮은 수준의 경우에는 매우 완만한 감소양상을 보이게 된다.

본 연구에서의 일치수준은 보통 수준의 경우로 판단된다. 그러나 Two-step 추정방법과 One-step 추정방법에 따른 차이는 지역적인 차이는 있으나 방법에 따른 차이는 매우 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 6에서는 추정치와 관측치의 일치성을 나타내는 통계량으로 상한치와 하한치의 초과치를 그림으로 나타내었는데, 약 90-95%의 자료가 신뢰도 90% 수준의 범위에 있다. 이는 이 등 (2008)이 제시한 Two-step 방법의 제1단계와 비슷한 정도의 정확도를 보여준다.

이 연구의 결과는 연안 지역의 수온을 추정 시 GCM 격자의 수치 평균 기온이 관측 평균 기온과 일치한다는 가정이 성립한다면 S-곡선식을 이용하여 GCM 기온 자료로부터 지역의 수온 자료를 적절한 신뢰도와 정확도를 가지고 추정할 수 있다는 것을 보여준다.

실질적으로 GCM 자료는 다양한 조건에 대하여 미래의 기후변화, 즉 기온 변화예측자료를 제시하고 있기 때문에 GCM 자료를 이용하여 우리나라 연안의 미래의 수온자료를 예측하기 위해서는 본 연구에서 제안한 모형과 더불어 추가적인 연구·분석이 필요하다. 본 연구에서는 우리나라 모든 기상대의 기온관측 자료를 평균하여 GCM 자료로 가정하였으나, GCM 결과로 제시되는 자료와는 일정한 또는 예상할 수 없는 어떤 차이가 발생할 수 있기 때문에 GCM 과거자료와 우리나라의 전국 평균 기온자료를 비교하여 그 차이를 비교·분석하여야 한다. 이 경우, 적절한 GCM 모형으로부터 제시되는 미래 예측자료를 이용하여 우리나라 전국 평균 기온자료를 추정하고, 이러한 방법으로 추정된 전국 평균 기온자료는 본 연구에서 제안한 One-step 또는 Two-step 방법을 이용하면 국지적인 미래의 연안 수온 추정에 바로 활용할 수 있다. 현재 단계에서는 본 연구에서 제안한 모형의 매개변수가 제시되어 있는 시화호, 마산만, 낙동강 하구 영역으로 적용 영역이 제한되어 있으나, 향후 적용 범위를 확대하기 위해서는 연안 주요 지점에 대한 최소 3년 이상의 연속적인 수온 관측자료의 축적이 필요하다.

5. 결론 및 제언

지구 온난화와 관련된 장기 기후변화로 인한 연안 생태 환경 변화를 예측의 일환으로 연안 수온 변화를 예측할 필요가 있으며, 연안 수온변화 예측은 연안의 미래 기온 변화예측을 필요로 한다. 본 연구에서는 미래 기온변화 정보를 제공하는 GCM 자료를 우리나라 연안의 국지적인 수온변화 예측에 이용하기 위하여 우리나라 전국 기온평균 자료와 국지적인 기온자료의 선형회귀관계식을 도출하였다. 도출된 관계식을 이용하여 산정된 지역 기온 추

정치로부터 S-곡선을 바탕으로 연안 수온자료를 추정하여 관측 자료와 비교하였다.

선형회귀분석 기법을 이용한 우리나라 연안의 국지적인 기온은 결정계수가 0.98~0.99로, 이 방법으로 21세기 기후변화 모의조건 (scenario)에 대한 GCM 자료의 우리나라 격자정보 (전국 평균기온)를 이용하여 우리나라 연안의 국지적인 기온변화를 추정하는데 활용할 수 있었다. 이어진 기온-수온 비선형 관계에서 마산 지역에서는 NSC 값이 0.91 (온도 증가시기), 0.98 (온도 감소시기)이며, RMS 오차는 2.07 (온도 증가시기), 1.93 (온도 감소시기)으로 양호한 결과를 보여주었다. 시화호 지역에서는 NSC 값이 0.90, RMS 오차는 2.59로 나타났으며, 낙동강 하구에서도 비슷한 양상이 나타나는데 NSC 값은 0.95, RMS 오차는 1.58로 나타났다

한편, One-step 접근방법을 이용하여, 미래 기온변화 정보를 제공하는 GCM 기온 자료를 우리나라 하천 또는 연안의 국지적인 수온변화 예측에 이용하기 위한 사전 관계식 도출을 위하여 우리나라 전국 기온평균 자료를 바탕으로 S-곡선에 의한 관심지역의 수온관계식을 도출하였다. 연구 결과 기온-수온 비선형 관계에서 마산 지역에서는 NSC 값이 0.89 (온도 증가시기), 0.93 (온도 감소시기)이며, 시화호 지역에서는 0.90이며 낙동강 하구에서는 0.96으로 나타났다. RMS 오차는 마산이 2.28 (온도 증가시기), 1.89 (온도 감소시기)로 나타났으며, 시화호 지역에서는 2.55, 낙동강 하구에서도 1.52로 비슷한 양상을 보여주었다. 이 연구의 결과는 앞서 발표된 2단계 접근법보다 간단하면서도 비슷한 정도의 정확도를 보여주어 실용적인 면에서 우수한 것으로 판단된다.

본 연구는 연안 생태환경변화를 예측하기 위한 초기단계의 연구로서 GCM 자료형태의 광역정보를 국지적인 공간정보로 연결하는 연구, 연안의 수온을 인근 지역의 기온 및 기상정보로 정확하게 추정하는 연구가 수행되었거나 진행 중이며, 나아가 기상-환경변화 정보를 이용하여 연안 생태계 변화를 예측하는 연구가 추가로 이루어져야한다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 창의 연구과제 사업 (PE-9853D)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 본 논문을 심사해 주신 익명의 심사위원에게도 감사드립니다.

참고문헌

조홍연, 이길하, 조경준, 김준성 (2007). “연안 해역 기온

과 수온의 상관관계 및 이력현상 분석.” **한국해양·해양공학회지**, 한국해양해양공학회, 제19권, 제3호, pp. 213-221.

이길하 (2007). “우리나라 연안 기온과 수온의 비선형 상관관계 분석.” **한국해양·해양공학회지**, 한국해양해양공학회, 제19권, 제2호, pp. 128-135.

이길하, 조홍연, 조범준 (2008). “연안 해역의 미래 기온변화 예측을 위한 GCM 자료 Downscaling 기법의 신뢰수준 분석.” **한국해양·해양공학회논문집**, 한국해양해양공학회, 제20권, 제1호, pp. 34~41.

Asselman, N.E.M., Middelkoop, H., and Dijk, P.M. (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*, Vol. 17, pp. 3225-3244.

Duan, Q.Y., Gupta, V.K., and Sorooshian, S. (1993). “Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization.” *Journal of Optimization Theory and Application*, Vol. 76, pp. 501-521.

IPCC (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press.

IPCC-TGCLIA (1999). “Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, Version 1.” *Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment*. (Edited by Carter, T.R., Hulme, M., and Lal, M.).

Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R., and Taylor, K. (2007). “Multi-model dataset: A new era in climate change research.” *American Meteorological Society*, pp 1383-1394.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, I-A Discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.

Nelder, J.A., and Mead, R.A. (1965). “A simplex method for function minimization.” *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313.

Pilgrim, J.M., and Stefan, H.G. (1995). *Correlation of Minnesota stream water temperatures with air temperatures*. Project. Rep. 382. St Anthony Falls Lab., U of Minnesota, Minneapolis.

Preud’Homme, E.B., and Stefan, H.G. (1993). “Stream

temperature estimation from air temperature.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 29, No. 1, pp. 27-45.

Webb, B.W. (1987). *The relationship between air and water temperatures for a Devon River*. Rep. Trans., Devon Association for the Advancement of Science, Exeter, U.K., pp. 197-222.

Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., and Mearns, L.O. (2004). *Guidelines for*

Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. Task Group on Data and Scenario Support for Impacts and Climate Analysis (TGICA), IPCC.

논문번호: 10-078	접수: 2010.08.29
수정일자: 2011.01.06/03.17	심사완료: 2011.03.17

주 의

1. 이 보고서는 한국해양연구원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양연구원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.