

다중 기상모델 앙상블을 활용한 다지점 강우시나리오 상세화 기법 개발

김태정* · 김기영** · 권현한***

Kim, Tae-Jeong*, Kim, Ki-Young**, Kwon, Hyun-Han***

Development of Multisite Spatio-Temporal Downscaling Model for Rainfall Using GCM Multi Model Ensemble

ABSTRACT

General Circulation Models (GCMs) are the basic tool used for modelling climate. However, the spatio-temporal discrepancy between GCM and observed value, therefore, the models deliver output that are generally required calibration for applied studies. Which is generally done by Multi-Model Ensemble (MME) approach. Stochastic downscaling methods have been used extensively to generate long-term weather sequences from finite observed records. A primary objective of this study is to develop a forecasting scheme which is able to make use of a MME of different GCMs. This study employed a Nonstationary Hidden Markov Chain Model (NHMM) as a main tool for downscaling seasonal ensemble forecasts over 3 month period, providing daily forecasts. Our results showed that the proposed downscaling scheme can provide the skillful forecasts as inputs for hydrologic modeling, which in turn may improve water resources management. An application to the Nakdong watershed in South Korea illustrates how the proposed approach can lead to potentially reliable information for water resources management.

Key words : Climate model, Hidden markov chain model, Downscaling, Correlation matrix

초 록

기후모형으로 가장 널리 사용되는 GCM의 불확실성 및 시공간적 편의로 인하여 GCM으로부터 생산된 기상정보를 응용수문분야에서 직접적으로 이용하기 위해서는 상세화 과정이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 선행연구에서 개발된 비정상성 은닉 마코프 모형(Non-stationary Hidden Markov Chain Model, NHMM)을 기반으로 다지점 공간상관성을 고려할 수 있는 Chow-Liu Tree 알고리즘과 결합하여 유역단위 강우시나리오 상세화 기법(CLT-NHMM)으로 확장하였으며, 낙동강 유역에 적용하여 적용성을 평가하였다. 상관행렬(correlation matrix)을 통한 강우네트워크의 공간상관성 평가결과 유역상관성이 우수하게 모의하는 것을 확인하였으며, 강수의 빈도 및 양적 관점에서 효과적인 모의가 가능하였다. 본 연구에서 제시한 CLT-NHMM 모형은 수자원뿐만 아니라 수문자료를 입력 자료로 하는 농업, 보건, 환경 및 에너지 등 다양한 응용기상분야에 핵심 기술로 활용이 전망된다.

검색어 : 기후모형, 은닉 마코프 모형, 상세화 기법, 상관행렬

1. 서론

최근 도시화와 산업화로 인한 화석연료의 사용이 급증하면서 전 지구적으로 지구온난화의 징후가 점차 뚜렷해지고 있으며 엘니뇨(El Nino)와 라니냐(La Nina) 현상 등의 기후변동성도 크게 증가하는 경향이 있다. 이러한 기후변화와 기상변동성 증가는 전 지구적으로

* 정희원 · 전북대학교 토목공학과 박사과정, 방재연구센터 (Chonbuk National University · kim.t.j.@jbnu.ac.kr)

** 한국수자원공사 K-water 연구원 기반시설연구소 책임연구원 (Korea Water Resources Corporation · kky0606@kwater.or.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 교수, 방재연구센터 (Corresponding Author · Chonbuk National University · hkwon@jbnu.ac.kr)

Received December 19, 2014/ revised February 21, 2015/ accepted February 24, 2015

돌발홍수, 집중호우 및 장기간의 가뭄 등과 같은 많은 기상이변이 발생하는 원인으로 작용하고 있다. 특히, 강수의 경우 경년변동(interannual variability)의 증가로 인해 시공간적 강수특성이 급격한 변화를 나타내고 있다(Cox et al., 2000; Meehl, 2000; Grimm, 2011).

지구온난화로 기인하는 미래의 기상학적 변동성 및 기후변화의 영향은 대기순환모형(General Circulation Model, GCM)을 통하여 구체화되며 가장 일반적인 기후변화 전망자료로서 활용되고 있다. GCM은 전지구를 대상으로 기상학적 역학관계를 수치적으로 연산하게 되며 계절(seasonal) 및 1년(annual) 단위 이상의 대규모 기상장(large scale climate pattern)을 비교적 정확하게 묘사하는 것으로 알려지고 있다. 그러나 일반적으로 GCM을 통한 강수예측은 계절이하의 스케일(sub-seasonal scale)에서 모형의 제약조건으로 인해 지역적인 규모에서 월강수계열, 주강수계열, 일강수계열의 발생빈도 및 양적특성을 재현하는데 어려움이 존재한다. 이러한 문제점으로 인해 GCM으로부터 유도된 계절단위 이하의 상세화 자료는 시공간적 정확도가 요구되는 단기 수자원계획 수립 시 계획의 신뢰성 측면에서 문제점을 표출시킬 수 있다(Bate et al., 1998; Kwon et al., 2009). 즉, GCM은 전 세계적으로 나타나는 광역적이고 평균적인 기상학적 특성을 효과적으로 모의하는 반면, 시공간적 편향(spatio-temporal bias) 및 모형의 불확실성(uncertainty)으로 인해 GCM으로부터 생산된 기상정보를 응용수문분야에 직접적으로 이용하기에는 많은 문제점이 존재한다(Malcolm et al., 2006; Muhammad et al., 2011; Kim, 2014). 이러한 문제점을 해결하고자 GCM으로부터 예측된 대규모 기상장으로부터 지역 규모의 예측값을 산출 할 수 있는 상세화(downscaling)기법 개발 및 적용

사례가 국내외를 중심으로 진행되고 있다(Karl et al., 1990; Hewitson and Crane., 2006; Khalil et al., 2010; Kwon et al., 2011).

상세화 기법은 지상자료 및 기상모델자료와 같은 동화자료들의 융합을 통해 향상된 정보를 나타내는 방법으로(Cho et al., 2013), 상세화 기법의 적용시에는 반드시 지형학적 특성이 고려되어야 한다. 다시 말하면, 서로 다른 GCM 모의결과로부터 특정지역에 대한 일관성을 갖춘 의미 있는 정보들을 추출하기 위해서 지역화(regionalization)과정이 필요하다. 그러나 GCM을 통하여 지역규모의 상세화된 기상정보를 도출하는데 한계가 존재한다. 이는 GCM 모형의 불확실성이 내제된 초기조건(initial condition) 및 지역규모에서 나타나는 물리적 과정의 매개변수 산정시 불완전한 지식과 지배방정식 수치해석상의 부정확성 및 이산화된 계산스케일 등에 기인한다 하겠다.

최근 기상정보를 고려한 수문인자의 영향분석은 수문기상학분야에서 매우 중요한 연구 분야로 자리 잡고 있다. 특히, 여러 가지 수문모형의 기초적 입력자료로 사용되는 강수량의 정확한 추정이 수문기상학 연구에서 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. 선진국에서는 자국의 GCM 및 RCM을 입력자료로 사용한 통계학적 상세화 기법의 연구가 활발히 진행 중에 있으며 대표적으로 기후변화가 극한강우에 미치는 영향에 대한 연구가 Fowler et al. (2005), Ekstör m et al. (2005), Frei et al. (2006) 등에서 진행이 되었다. Grum et al. (2006)은 HIRHAM RCM을 이용하여 25km×25km 격자크기에 해당하는 일단위 이하의 강우량을 모의하였다. Mailhot et al. (2007)은 SRES-A2 scenario를 Canadian Coupled Global Climate Model (CGCM2)을 통하여 상세화 하였으며 남부

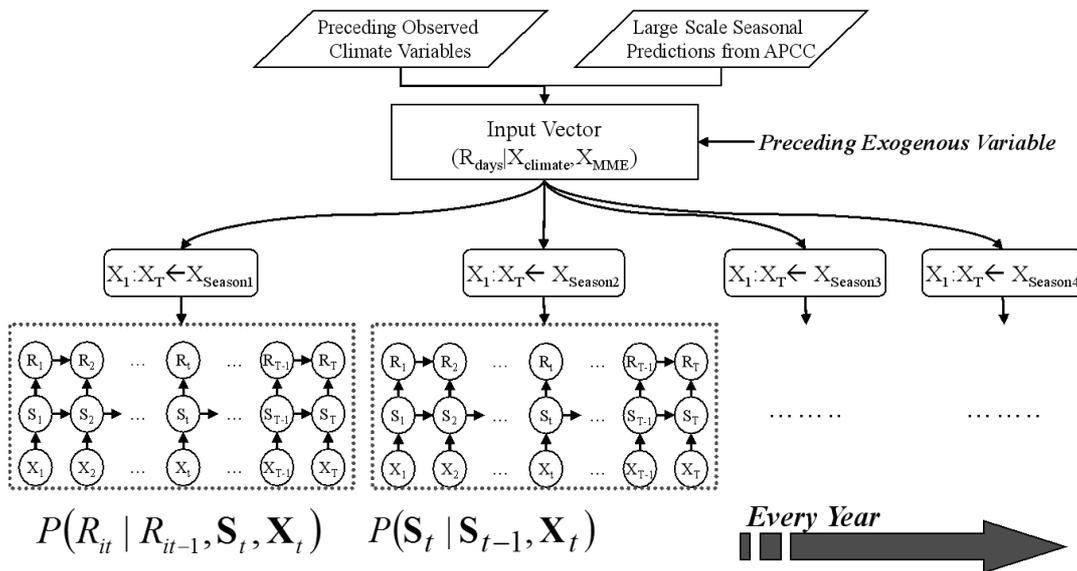


Fig. 1. Graphical Model Interpretation of a Non-Stationary Hidden Markov Chain Model

Quebec의 강우재현기간별 최대강우강도와 강우지속기간의 관계를 알아보기 위하여 IDF (Intensity-Duration-Frequency) 곡선의 변화를 모의하였다. Mailhot et al. (2010)은 SRES A2, A1B, B1 시나리오를 적용하여 1~5일의 연최대 강우량을 모의하였다. Willems and Vrac (2011)은 GCM의 강우량 자료를 직접 상세화에 이용하는 Quantile Perturbations 기법과 강우량을 모의하기 위한 2차 기상변수를 활용하는 Weather Typing 기법을 이용하여 일단 위 이하의 강수량을 모의하였다.

최근에는 개별 GCM 및 RCM을 활용한 연구를 확장하여 모형의 불확실성과 모형간의 불확실성을 최소화하여 단일 모형의 모의결과에 비해 모의결과의 정확성 향상이 가능하다고 알려져 있는 (Krishnamurti et al., 1999; Shukla et al., 2000; Wang et al., 2004) 다중 모델 앙상블(Multi Model Ensemble, MME)을 활용하여 수문인자를 상세화하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Barnston et al., 2003; Palmer et al., 2004; Haugen and Iversen., 2008).

본 연구에서는 기존 비정상성 은닉 마코프 연쇄모형(Kim et al., 2014)을 유역단위 강우시나리오 모의가 가능한 다지점 상세화 기법으로 확장하였다. 본 연구에서 제안하는 다지점 상세화 기법은 관측지점간의 공간상관성을 정량적으로 고려하기 위해서 Chow-Liu Tree 알고리즘을 도입하였으며 외부인자와 모형 매개변수를 연계시키기 위해서 연결함수(link function)를 활용하였다. 본 연구에서는 상세화를 위한 기상정보로서 APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)에서 제공하는 총 10개의 GCM 모의결과 MME를 활용하였으며, 모형의 적합성은 낙동강유역을 대상으로 평가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 논문의 배경 및 목적에 대해서 언급하였으며, 2장에서는 본 연구의 핵심모형의 기초가 되는 정상성 은닉 마코프 모형 및 비정상성 은닉 마코프 모형과 사용된 자료에 대하여 기술하였다. 3장에서는 APCC의 MME를 예측인자로 활용한 유역단위 강우시나리오 상세화 기법의 결과를 요약하여 나타내었으며 마지막으로 결론 및 토의를 4장에 수록하였다.

2. 본론

2.1 분석방법

2.1.1 정상성 은닉 마코프 모형

발생시간을 고려하여 시변성이 있는 관측자료들이 순차적으로

나열되었을 때 이를 시계열(time series)이라 하며, 시계열 자료를 근거로 한 통계학적 특성을 이용하여 추계학적(stochastic) 모형을 구축하여 자료계열을 확장하거나 미래의 값을 예측하는 기법들을 통계학적 상세화(statistical downscaling)라 한다.

본 연구의 핵심 모형인 은닉 마코프 모형(Hidden Markov chain Model, HMM)은 통계학적 상세화를 진행함에 있어 강수 및 무강수 특성을 묘사하기 위해서 중관기후학적(synoptic climatological) 대기패턴을 간접적으로 고려할 수 있는 일기상태 모형으로서, 각 일기상태별로 혼합분포(mixture)의 확률분포를 적용할 수 있는 기법이다. 강우시나리오 상세화를 위하여 일기상태는 은닉상태(hidden state) 형태를 가지는 것으로 가정하며, 각각의 은닉상태마다 조건부 확률분포를 부여하여 이들 조건부 확률분포로부터 일강수량을 모의하는 방법이다. 이는 우리나라와 같이 계절에 따라 수분변량 특성이 복잡한 경우에 적용할 경우 우수한 모의결과를 도출한다.

HMM은 두 가지 조건부 독립 가정을 이용하여 강우벡터와 $R_{1:T}$ 와 은닉상태 벡터인 $S_{1:T}$ 의 결합 확률(joint probability) 분포로 정의되며, 두 가지 조건부 독립 가정은 다음과 같다.

첫째, 개별적인 관측강우벡터 R_t 는 주어진 은닉상태 S_t 에만 의존하며 모든 다른 변수들과 조건부적으로 독립이라고 가정한다. 즉, 관측강우벡터 R_t 는 R_{t-1} 와 관계가 없으며 은닉상태 S_t 에 의해서 조건부 분포를 갖는다. 즉, 다음의 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$P(\mathbf{r}_t | \mathbf{r}_{1:t-1}, s_{1:t}) = P(\mathbf{r}_t | s_t) \tag{1}$$

둘째, 시계열의 바로 이전의 은닉상태에만 상관성이 있다고 보는 경우를 1차 HMM 모형이라고 하며 일반적으로 HMM이라고 하면 1차 HMM을 말하는 것으로, 다시 정리하면 은닉상태의 확률 분포는 시간적으로 오직 이전의 은닉상태에 의존한다.

$$P(s_t | s_{1:t-1}) = \begin{cases} P(s_t | s_{t-k:t-1}) & t > k, \\ P(s_t | s_{1:t-1}) & t \leq k. \end{cases} \tag{2}$$

여기서, \mathbf{r}_t 는 현재시점의 강우량, s_t 는 현재시점의 은닉상태를 의미하며 k 는 은닉상태의 수를 나타낸다. 일반적으로 추가된 언급이 없으면 $k=1$ 으로 정의된다.

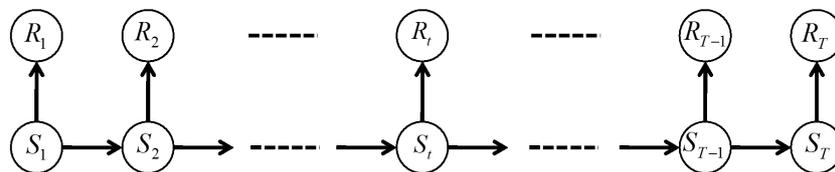


Fig. 2. Bayesian Network Representation of a Stationary HMM Satisfying Conditional Independence Assumptions (Kwon et al., 2013a)

2.1.2 비정상성 은닉 마코프 모형

기존의 정상성 HMM은 수문인자의 천이확률 및 확률밀도함수의 매개변수 등이 과거와 동일하다는 정상성(stationary) 가정을 기본으로 외부환경 변화에 따른 변동성을 고려 할 수 없는 문제점이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 외부인자가 사용되는데, 본 연구에서는 서로 다른 두 시간 스케일 사이를 연결시키는 연결고리로서 기상상태를 외부인자로 가정하였다. 강우의 빈도 및 양적변화를 모의하기 위해서 HMM의 매개변수인 천이확률과 확률분포형의 매개변수를 기상학적 예측정보(predictor)와 연계함으로써 기후변화 및 기후변동성과 같은 외부충격을 강수량 모의 시 직접적으로 고려할 수 있는 비정상성 은닉 마코프 모형 (Nonstationary Hidden Markov chain Model, NHMM)을 개발하여 활용하였다. 즉, HMM의 매개변수가 시간에 따라 예측인자의 영향을 반영하여 시간에 따라 변동될 수 있다고 가정하는 것이다.

일반적으로 관측된 강수량 자료를 이용하여 은닉상태의 확률밀도함수를 추정하는 것이 보편적인 방법이다. 지점 수준의 강수에 기상순환패턴의 영향을 고려하여 n 개의 강우지점을 갖는 유역에서 강수변량인 \mathbf{R} 과 시간 t 에서의 기상상태 S_t 를 정의하고 APCC의 MME 결과를 기상변량과 같은 외부인자로 \mathbf{X} 로 가정하였다.

$$P(s_{1:T} | \mathbf{r}_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}) = \frac{P(s_{1:T}, \mathbf{r}_{1:T} | \mathbf{x}_{1:T})}{P(\mathbf{r}_{1:T} | \mathbf{x}_{1:T})} = \sum_{S_{1:T}} P(s_{1:T}, \mathbf{r}_{1:T} | \mathbf{x}_{1:T}) \quad (3)$$

은닉상태의 우도 $P(\mathbf{r}_{1:T} | \mathbf{x}_{1:T})$ 를 산정하기 위해서 전향-후향 (Forward-Backward) 추론과정을 통한 반복법을 이용하였다. 각 은닉상태 S_t 에 대해서, 반복적으로 선행 은닉상태(α_t)와 이틀 상태를 뒤따르는 후행 은닉상태(β_t)를 산정하는 과정을 수행하였으며 다음과 같이 Eq. (4)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_t(i) = P(S_t = i, \mathbf{r}_{1:t} | \mathbf{x}_{1:t}) \quad (4a)$$

$$\beta_t(i) = p(\mathbf{r}_{t+1:T} | S_t = i, \mathbf{r}_t, \mathbf{x}_{t+1:T}) \quad (4b)$$

$$\alpha_1(i) = P(S_1 = i | \mathbf{x}_1) P(\mathbf{r}_1 | S_1 = i)$$

$$\alpha_{t+1}(i) = P(\mathbf{r}_{t+1} | S_{t+1} = j, \mathbf{r}_t) \sum_{i=1}^K P(S_{t+1} = j | S_t = i, \mathbf{x}_{t+1}) \alpha_t(i)$$

$$\beta_T(i) = 1 \quad (4c)$$

$$\beta_t(i) = \sum_{j=1}^K P(S_{t+1} = j | S_t = i, \mathbf{x}_{t+1}) P(\mathbf{r}_{t+1} | S_{t+1} = j, \mathbf{r}_t) \beta_{t+1}(j) \quad (4d)$$

최종적으로 강수량 자료에 대한 우도는 다음과 같이 Eq. (5)로 산정된다.

$$P(\mathbf{r}_{1:T} | \mathbf{x}_{1:T}) = \sum_{i=1}^K P(S_T = i, \mathbf{r}_{1:T} | \mathbf{x}_{1:T}) = \sum_{i=1}^K \alpha_T(i) \quad (5)$$

2.1.3 조건부 Chow-Liu Tree 알고리즘

유역단위에서 강우사상은 시공간적 변동성이 매우 크며 특히 산악지형과 해안가 등이 많은 우리나라에서는 지형적인 영향을 더 받는 것이 일반적이다. 이러한 시공간적 특성을 고려하는 가장 근본적인 이유는 강수모의 시 유역단위에서 면적강수량 재현과 더불어 현실성 있는 유출분석을 위함이다(Kwon et al, 2013b). 즉, 선행적으로 수행된 강수모의기법의 경우 지점별로 무작위로 강수모의가 이루어지기 때문에 유역단위에서 면적강수량을 효과적으로 복원하기 어려운 문제점이 있다. 기존의 NHMM은 단지점 강수모의에 적용되었으나 유역에 존재하는 강우네트워크의 공간상관성을 현실적으로 고려하지 못하는 문제점으로 인하여 매우 제한적인 형태로 수문모형에 적용되었다.

본 연구에서는 유역단위에서 나타나는 강수지점간의 공간적

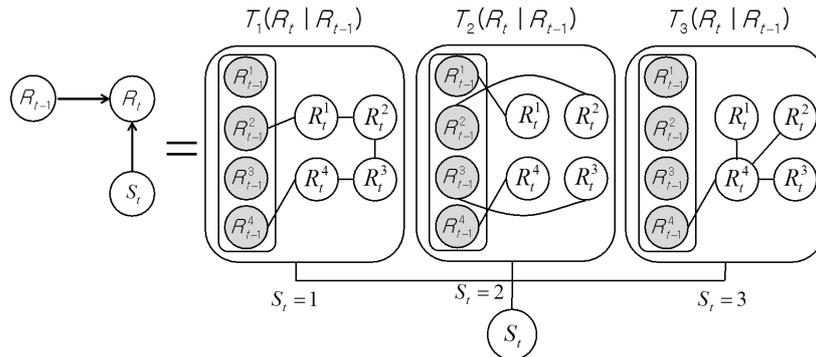


Fig. 3. Graphical Model Interpretation of a Hypothetical Chow-Liu Tree Algorithm with NHMM

상관특성을 보다 정량적으로 재현하기 위하여 조건부 확률분포에 근간을 둔 Chow-Liu Tree (CLT) 알고리즘을 도입하여 유역내에 위치한 강우네트워크의 공간상관성을 효과적으로 고려하는 모형으로 확장하였다. CLT는 다변량(multivariate) 형태의 다지점의 공간적 상호종속성을 고려하기 위해 개발되었으며, 앞서 언급한 목적에 맞추어 NHMM과 CLT를 결합하여 CLT-NHMM 강수시나리오 상세화 기법으로 확장하였다. CLT 알고리즘은 결합 확률밀도함수를 근사적으로 해석하는데 효율적인 방법으로서 Chow and Liu (1968)에 의해서 처음 제안되었다. 즉, CLT 방법은 결합 확률밀도함수를 추정하는데 있어서 2차(second order) 조건부확률분포와 주변 확률밀도함수의 곱(product)을 통하여 이루어진다.

CLT는 다변량 형태의 종속성을 모의할 수 있는 방법으로서 유역단위 다지점 형태의 강우네트워크에 모형을 적용할 수 있는 장점을 가지고 있으며(Kirshner et al., 2004), CLT-NHMM에서 M개의 강우지점과 시간 T의 강우벡터가 K개 은닉상태 수를 갖는다고 가정하면 매개변수 집합 θ 는 $K \times K$ 의 천이확률 행렬 Γ , $K \times 1$ 의 은닉상태의 초기확률 Π , 은닉상태 i 에 해당하는 매개변수 (ϕ_i, ν_i) 를 가지는 Tree 형태의 $T_i(\mathbf{r}_{nt}|\mathbf{r}_{nt-1})$ 로 구성된다. NHMM과 연계한 CLT의 매개변수 θ 에 대한 우도는 $P(\mathbf{r}_{nt}|s_{nt}, \mathbf{r}_{n,t-1}, \theta) = P(\mathbf{r}_{nt}|s_{nt}, \theta)$ 와 Chow-Liu Tree $T_i(\mathbf{r}_{nt}|\mathbf{r}_{n,t-1}) = T_i(\mathbf{r}_{nt})$ 를 이용하여 다음 Eq. (6)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 L(\theta) &= P(R|\theta) = \prod_{n=1}^N \sum_{s_{n,1}:T} P(s_{n,1}:T | \mathbf{r}_{n,1}:T | \theta) \\
 &= \prod_{n=1}^N \sum_{s_{n,1}:T} P(s_{n,1} | \theta) \prod_{t=2}^T P(s_{nt} | s_{n,t-1}, \theta) \prod_{t=1}^T P(\mathbf{r}_{nt} | s_{nt}, \mathbf{r}_{n,t-1}, \theta) \\
 &= \sum_{n=1}^N \sum_{i_{id}=1}^K \pi_{i_{id}} T_{i_{id}}(\mathbf{r}_{n1}) \sum_{t=2}^T \sum_{i_{it}=1}^K \gamma_{i_{nt}-i_{it}} T_{i_{it}}(\mathbf{r}_{nt} | \mathbf{r}_{n,t-1})
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

2.2 가용자료

2.2.1 낙동강유역 강우관측소

우리나라의 근대적 기상관측이 개시된 이래 강우관측은 크게 기상청과 국토교통부 및 한국수자원공사 관할 지점으로 구분되어 이루어져 왔다. 그중에 기상청은 서울 기상관측소를 비롯하여 전국 81개소의 중관기상관측장비(Automated Surface Observing System, ASOS)와 무인으로 운영되는 471개소의 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)를 이용하여 지상기상관측업무를 수행하고 있다. 본 연구에서는 다지점 강우시나리오 상세화 기법의 적합성을 평가하기 위하여 낙동강 유역의 기상청 산하 10개 관측소의 우리나라 대표적 우기기간인 6월부터 9월까지 일강우량을 대상으로 CLT-NHMM의 적용성을 평가하였다.

CLT-NHMM의 입력자료로 사용되는 일강수량 자료를 확보하기 위하여 1983년부터 2005년까지 APCC의 MME Hindcast



Fig. 4. Weather Station Locations of the Nakdong River Watershed

Table 1. Weather Station in Nakdong River Basin(1983 ~ 2005)

Station Name	Station Code	Latitude	Longitude	Elevation (m)
Daegu	143	35°53'	128°37'	64.1
Busan	159	35°06'	129°01'	69.6
Jinju	192	35°09'	128°02'	30.2
Yeongju	272	36°52'	128°31'	210.8
Mungyeong	273	36°37'	128°08'	170.6
Gumi	279	36°07'	128°19'	48.9
Yeoncheon	281	35°58'	128°57'	93.6
Geochang	284	35°40'	127°54'	226.0
Hapcheon	285	35°33'	128°10'	33.1
Sancheong	289	35°24'	127°52'	138.1

자료와 위 기간의 기상청 산하 관측소의 일강우자료를 입력자료로 사용하였으며 본 연구에 사용된 전체 관측소의 제원은 Table 1과 같으며 낙동강유역에 존재하는 10개 지점에 대한 기상관측소의 위치는 Fig. 4와 같다.

2.2.2 APEC Climate Center Multi Model Ensemble

지구온난화와 극한강우 및 기후변동성 증가로 기후변화에 따른 피해가 급증하면서 기후예측정보에 대한 수요는 연구자와 정부, 산업체뿐만 아니라 일반인에게 이르기까지 크게 늘어나고 있는 추세이며, 또한 관측장비 및 컴퓨터 연산능력의 발달과 함께 양적으로나

질적으로 예전보다 상당히 개선된 기후예측정보 생산이 가능하게 되었다. 이러한 기후예측자료 수요의 증가와 기후자료의 개선에도 불구하고 여전히 기후예측정보를 이용함에 여러 가지 제약이 있다. 예를 들면, 기후예측정보는 일반 컴퓨터 시스템에서 처리하기에는 그 양이 너무 방대하며, 응용분야에서 익숙하지 않은 파일구조로 구성되어 있어 이에 대한 사전지식이 필수적으로 요구된다. 따라서 보다 효과적으로 기후예측정보의 활용성을 높이기 위해서는 사용자의 편리성을 배려한 자료배포 서비스의 역할이 매우 중요하다.

이러한 수요자의 요구에 맞추어 APCC에서는 아태지역 9개국 17개 기관으로부터 수집한 기후예측 모델자료를 모델간 앙상블 기법을 적용하여 매월 3개월과 6개월의 기후예측 정보를 생산하고 있으며, 21개 APEC 회원국 및 다양한 기관(ECWWMF, IRI, NCEP 등)들에 실시간으로 정보를 제공하고 있다(Sohn et al., 2012). APCC의 기후예측 정보 생산은 우리나라만을 대상으로 하는 것이 아니라 전 지구를 대상으로 하고 있으며 APCC에서 생산되는 MME 자료는 강수량(Precipitation)과 온도(2m Temperature) 그리고 지위고도(Geopotential height) 등을 포함한 총 8개의 변수이며, 전 지구규모에 대하여 2.5°×2.5° 격자화된 정보를 제공한다. 이는 기후 및 기후응용 분야(수자원, 농업 등)에서 그 활용성이 증대되고 있는 추세로(Bundel et al., 2011; Min et al., 2011;

Sohn et al., 2013) APCC에서 생산하고 있는 MME 자료는 각 기관의 자료를 모두 취합하여 결정론적(deterministic) 예측과 확률적(probabilistic) 예측으로 구분된 분석기법을 통하여 예측자료를 생산하며 위 과정에서 각 기관의 모든 자료를 각 기법의 입력자료로 사용하여 MME 산출이 이루어지고 있다(Min et al., 2009). Fig. 5는 APCC에서 사용되고 있는 MME 생산기법을 정리한 모식도이다.

3. 적용

3.1 최적은닉상태 선정결과

분석모형을 사용함에 있어 모형의 매개변수를 최소화하고 우도 값을 최대화하므로 모형의 최적화를 이룰 수 있다. Matsuyama (2011)은 은닉상태의 수가 증가할 경우 모형이 과적합(overfitting) 되는 문제가 발생할 수 있으며, 이러한 문제는 대수우도함수(log-likelihood)가 수렴하는 부분에서 은닉상태의 수를 결정하는 것이 효율적이라고 주장한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 모형의 대수우도를 사용하여 CLT-NHMM의 최적 은닉상태의 개수를 결정하는 최적화 과정을 수행하였다.

본 연구에서는 은닉상태의 수 S 를 2~7까지 증가시키며 우도를 추출하고 그 과정에서 S 가 증가함에 따라 우도가 증가하면서 특정 은닉상태 수 이상에서 변화의 양상이 급변하였다. 본 연구에서는 낙동강유역의 경우 은닉상태의 수가 5개인 경우 최적우도를 가지는 것을 확인하여 은닉상태의 수 S 를 5로 결정하여 강우시나리오 상세화를 실시하였다.

3.2 낙동강유역 강우시나리오 상세화 결과

유역단위 강우시나리오 상세화 기법인 CLT-NHMM의 적합성 평가를 위하여 낙동강 유역에 존재하는 총 10개의 강우관측소를 대상으로 적합성을 평가하였다. CLT-NHMM은 유역에 존재하는

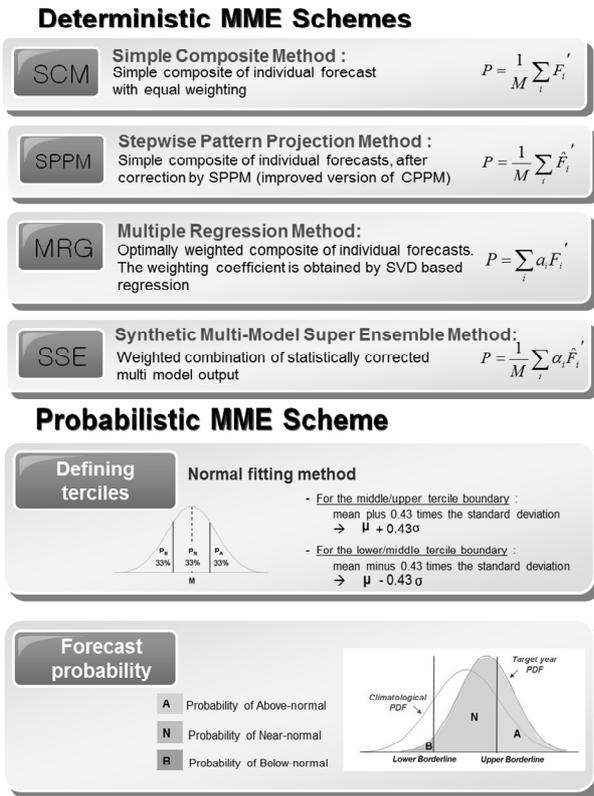


Fig. 5. Concept of Producing Multi Model Ensemble of APCC

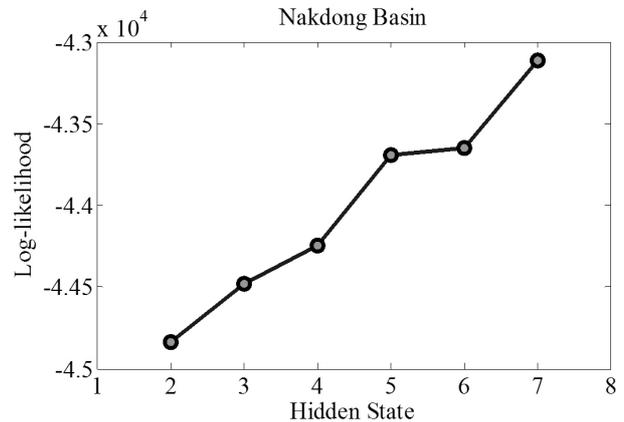


Fig. 6. Number of Parameter and Log-likelihood Given No. of Hidden State

강우네트워크의 강우패턴을 은닉상태로 간주하며 최적화 기법을 통하여 유사한 특성을 가지는 기상상태를 정량적으로 분류하는 것을 의미한다. 단일지점을 대상으로 하는 기존 NHMM과 가장 큰 차이점은 NHMM의 경우 1개 지점만을 대상으로 은닉상태를 분류하지만 CLT-NHMM은 유역의 모든 강우관측소에 대하여 은닉상태를 동시에 분류하는 장점이 있다.

Fig. 7은 총 10개의 관측지점 모두에 대하여 은닉상태를 동시에 분석하여 관측강수량의 강수특성을 분석한 결과이다. 매년 6월부터 9월까지 총 122일의 일강우량에 대하여 1번부터 5번까지 은닉상태를 부여하여 나타낸 결과로 State 5의 기상상태 발생빈도가 가장 빈번한 것을 확인 할 수 있으며 세부적으로 Figs. 8 and 9는 낙동강 유역에 존재하는 총 10개의 강우지점에 대한 각각의 은닉상태에 따른 강우총량과 강우빈도 결과를 나타낸다. 결과에서 확인할 수

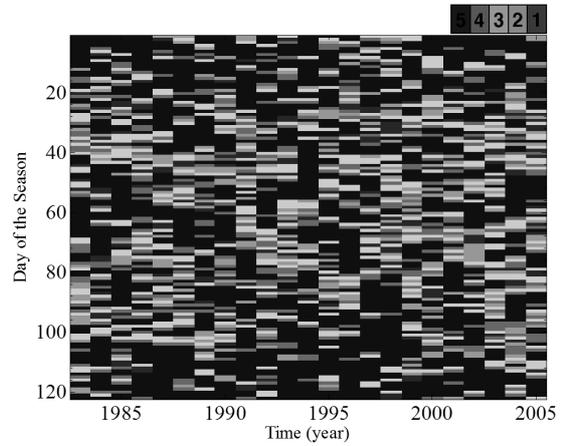


Fig. 7. Estimated Hidden State Sequence for Nakdong River Watershed for JJAS (June-September) Season

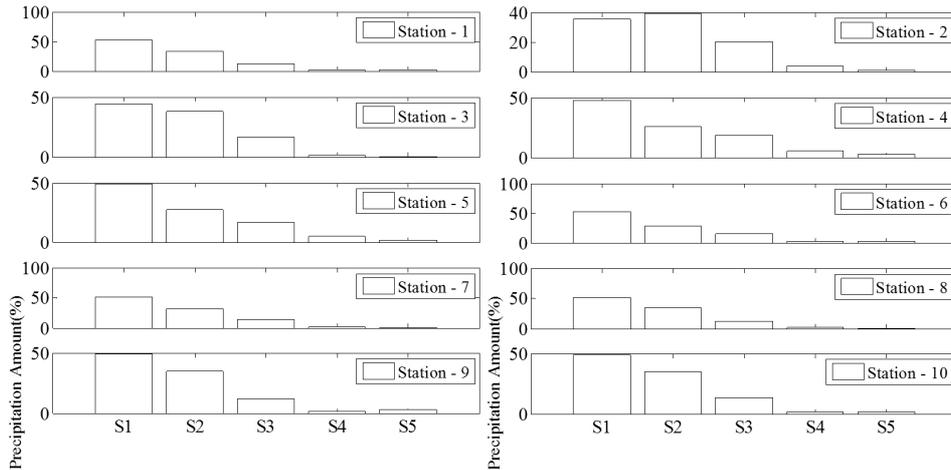


Fig. 8. Estimated Percentage of Seasonal Rainfall Amount according to Each Hidden State for Each Station in Nakdong River Watershed for JJAS Season

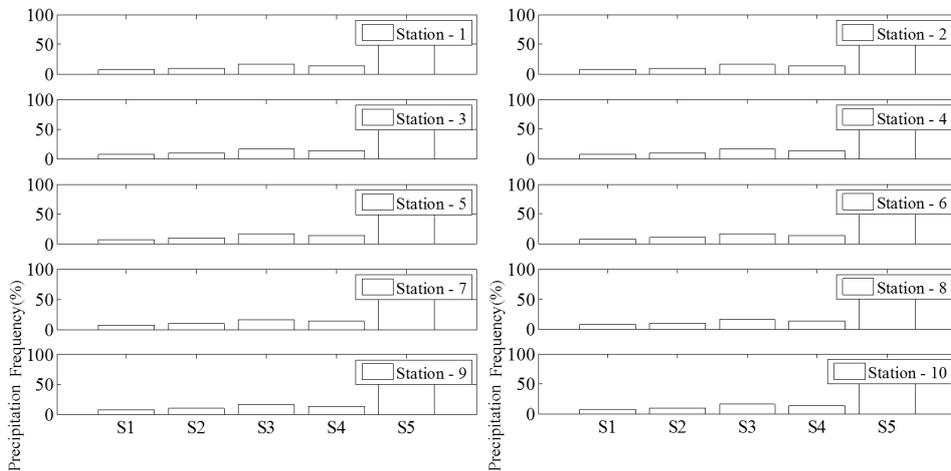


Fig. 9. Estimated Percentage of Seasonal Rainfall Frequency according to Each Hidden State for Each Station in Nakdong River Watershed for JJAS Season

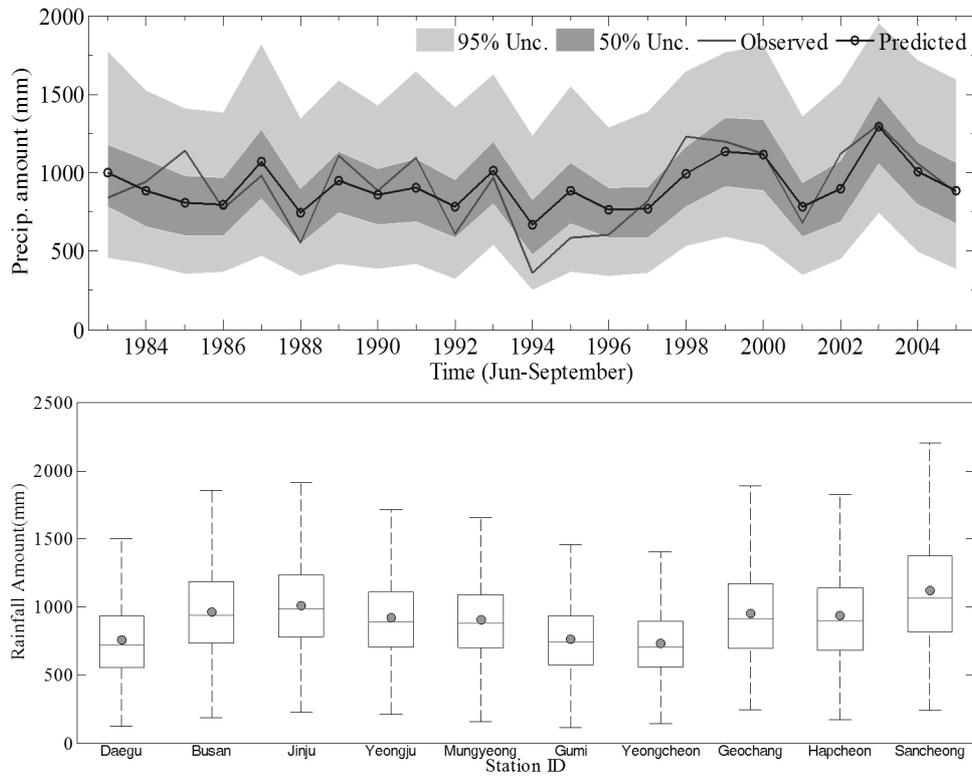


Fig. 10. Seasonal Rainfall Amounts and Uncertainty according to Each Season. Red Solid Line Indicates Observation and Blue Dotted Line Show APCC MME Predicted. The Uncertainty Bounds are Derived by Hundred Ensemble Series for Nakdong River Watershed

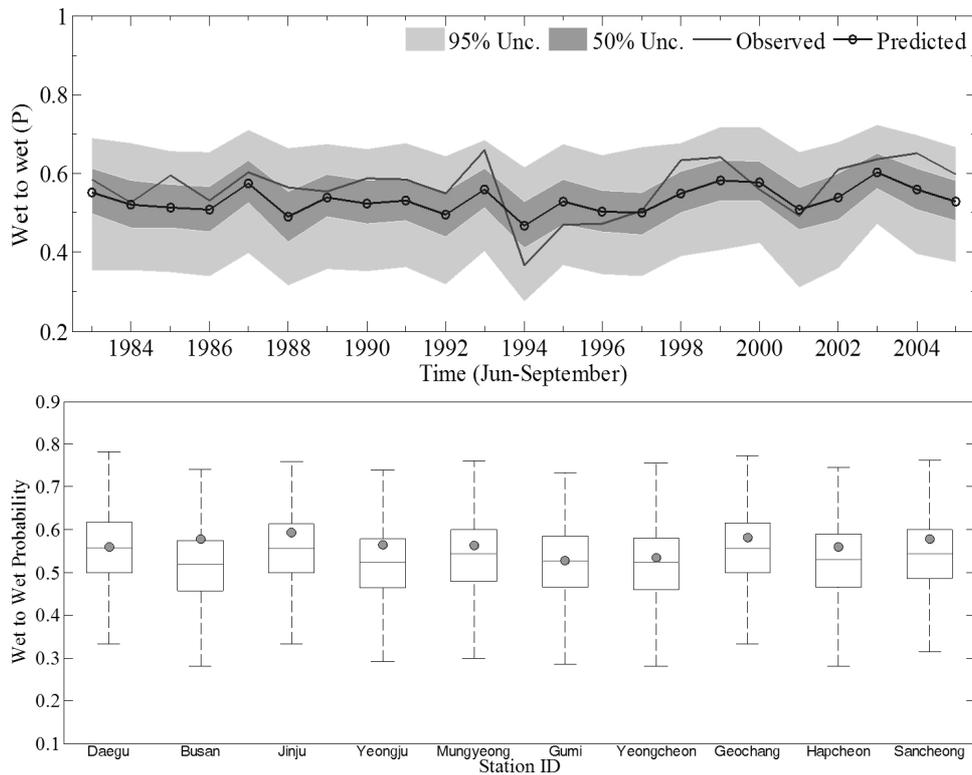


Fig. 11. Wet to Wet Probability and Uncertainty according to Each Season for Nakdong River Watershed

있듯 각각의 관측소별 강우총량과 강우빈도의 경우 대체로 관측소 끼리 유사한 결과를 보이며 이는 CLT-NHMM이 각 관측소의 기상상태를 매우 유사한 은닉상태로 분류한 것을 의미한다.

Fig. 11은 낙동강유역에 전날에 강우가 발생하였을 경우 다음날 강우가 연속적으로 발생할 확률인 습윤일 천이확률에 대한 결과를 나타낸 것으로서 모의결과는 신뢰구간에 효과적으로 포함되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 각 지점에 대한 습윤일 천이확률의 결과는 모든 지점에서 관측값과의 상관계수가 0.74로 관측값과 유사하게 모의된 결과를 확인하였다.

Fig. 12는 낙동강유역에 대하여 강우사상의 발생한 일을 모의한 결과로 1994년을 제외하고 모든 기간에서는 모의결과가 관측값을 우수하게 재현하고 있다. 또한 각 지점별 강수일을 도출한 결과 총 10개의 지점에서 관측값과 상관계수는 0.79의 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 본 연구를 통하여 개발된 CLT-NHMM은 여름철 강우발생을 효과적으로 인지할 수 있는 모형으로 판단된다.

Table 2는 CLT-NHMM을 통하여 상세화된 강우시나리오를 대상으로 평균 강우량과 강수 천이확률 및 강수일을 각 관측소별로 도출하여 관측강우량과 정량적으로 비교하였다. 모든 통계적 특성치는 관측값과 거의 유사한 통계적 특성을 가지고 재현되고 있음을 확인할 수 있다.

일강수량에서 중요한 특성 중 하나는 모형을 통해서 일강수계열의 확률적 특성이 얼마나 현실성 있게 재현될 수 있는가이다. 이러한 관점에서 CLT-NHMM을 통하여 모의된 결과를 관측값과 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 일강수량 모의 결과의 무강우 기준

Table 2. Each Station Statistics Value for Nakdong River Basin

Station	Precipitation Amount(mm)		Wet to Wet Probability		Wet Days	
	Observation	CLT-NHMM	Observation	CLT-NHMM	Observation	CLT-NHMM
Daegu	760.40	768.60	0.55	0.56	46.44	46.35
Busan	965.70	969.00	0.51	0.58	44.71	44.61
Jinju	1011.20	1019.60	0.55	0.59	47.08	47.09
Yeongju	920.50	927.70	0.52	0.57	46.32	46.30
Mungyeong	904.60	911.80	0.54	0.56	45.77	45.87
Gumi	765.10	774.20	0.52	0.53	42.44	42.30
Yeoncheon	733.70	739.20	0.51	0.53	41.89	41.78
Geochang	951.00	957.30	0.55	0.58	45.53	45.39
Hapcheon	935.90	936.00	0.52	0.56	42.92	42.96
Sancheong	1118.80	1126.80	0.54	0.58	45.14	45.13
Mean	906.69	913.02	0.53	0.56	44.82	44.78

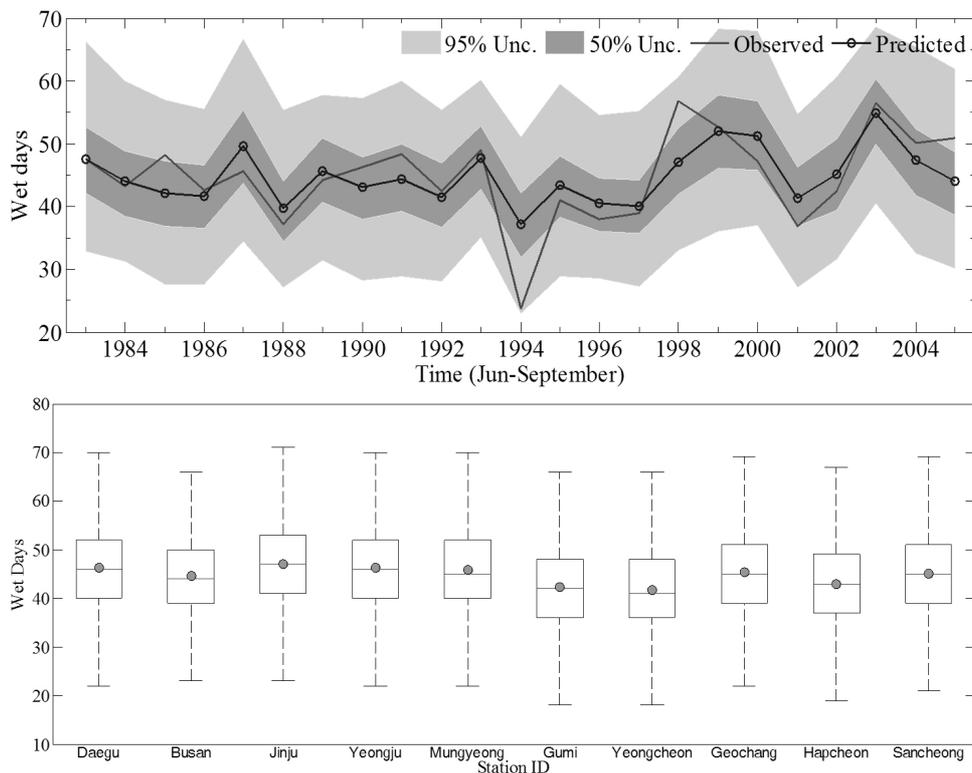


Fig. 12. WetDays and Uncertainty according to Each Season or River Nakdong Basin

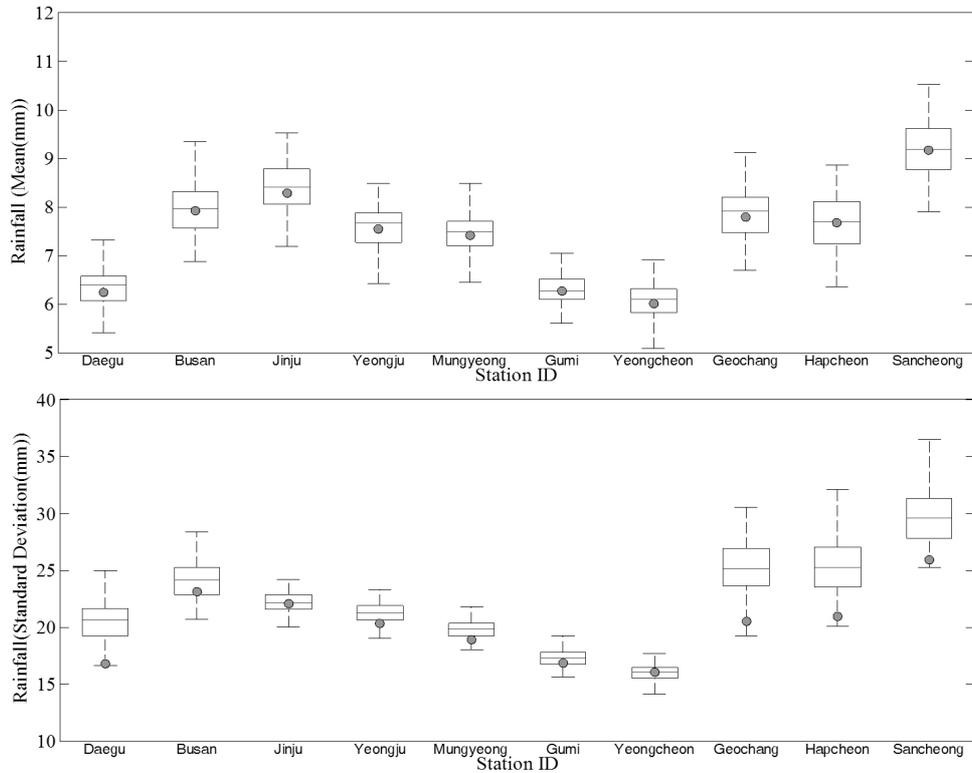


Fig. 13. Daily Rainfall Statistics (Mean and Standard Deviation) between Observation and Simulation

(threshold)을 0.1mm로 설정하여 모든 관측지점에 대하여 관측강우량 평균과 표준편차를 비교하였다. Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 CLT-NHMM을 통하여 얻은 결과 값은 평균의 경우 모든 지점에서 관측강우량의 평균과 일치하는 것을 확인하였다. 표준편차의 경우는 대부분의 지점의 결과가 신뢰구간에 포함되는 것을 확인하였으며 거창, 합천 및 산청지점을 제외하고는 대체로 관측강우량의 표준편차의 경우에도 유사하게 모의되는 결과를 얻었다. 위 결과들을 종합적으로 살펴보면 지점별로 약간의 차이는 있지만 관측된 일강수량과 CMT-NHMM을 통하여 모의된 일강수량이 인접하거나, 불확실성 범위 내로 우수한 모의 결과를 보여주고 있다. 그러나 거창, 합천 및 산청지점의 경우 타 지점들과 통계적인 특성이 일부 상이한 점으로 인해 표준편차의 재현 시 왜곡되는 문제점을 확인할 수 있었다. 즉, 다지점 모형 적용시 강수 지점간의 통계적 유사성을 우선적으로 고려하여 모형을 적용하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

유역단위 강우모의기법의 유역상관성 복원여부의 적합성을 평가하기 위해서 총 10개의 관측지점간의 상관행렬(correlation matrix)을 계산하여 Figs. 14 and 15에 나타내었다. 선형회귀식의 적합도(goodness of fit)를 측정하는데 사용되는 상관행렬인 Figs. 14 and 15는 총 10개의 관측지점에서 추정된 강수량에 대하여

각각 강우발생(occurrence)시계열과 강우량(amounts) 계열로 구분하여 지점간의 상관계수를 비교·분석한 결과를 나타내며 평균오차는 강우발생의 경우 0.02, 평균오차가 강우량의 경우 0.19로 강우관측소간의 상호종속성을 효과적으로 고려한 것으로 판단된다. 최대오차가 강우발생의 경우 0.04 진주관측소와 산청관측소가 해당하며, 강우량의 경우 최대오차가 0.3으로 합천관측소와 산청관측소가 이에 해당하여 강우발생과 강우량의 산청관측소가 최대치를 포함하는 것으로 확인되어, 낙동강 유역의 분석에 사용된 10개 관측소 중 기타 9개 관측소와 이질성이 가장 크게 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 총 10개의 관측소를 대상으로 하여 CLT-NHMM의 적용결과 전반적으로 낙동강 유역의 강우네트워크의 유역상관성 또한 효과적으로 복원하는 것을 확인할 수 있었다.

은닉상태에 따른 중관기후학적 패턴을 알아보기 위하여 미국 대기해양청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 재해석(reanalysis) 자료를 기본적으로 활용하였다. 은닉상태에 해당하는 강우일의 기상장을 추출하여 각 격자별로 평균하여 기상합성결과를 Fig. 16에 나타내었다. 총 5개로 분류된 은닉상태 중 강우 발생빈도가 높지만 강우 발생량이 가장 적은 State 5와 강우 발생빈도가 가장 낮지만 강우 발생량이 가장 많은 State 1에 대하여 각 은닉상태에 해당되는 강우일의 상태를

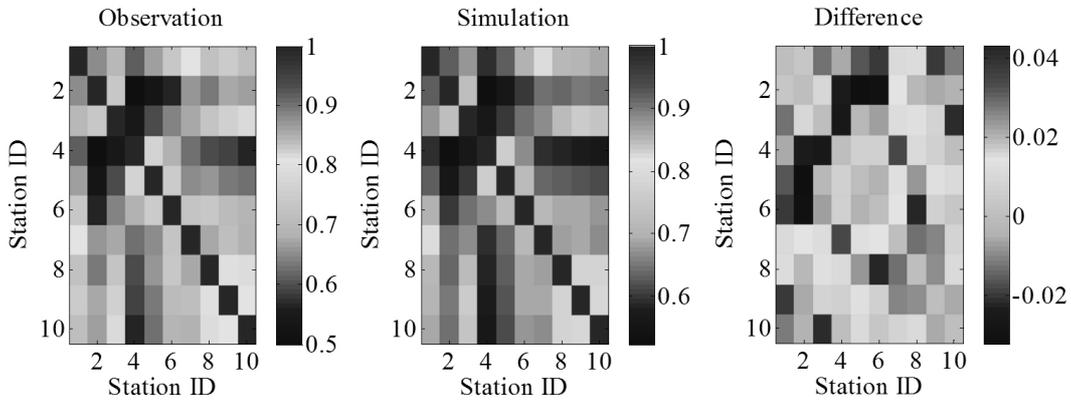


Fig. 14. Correlation Matrix Rainfall Occurrences between Observation and CLT-NHMM Simulation

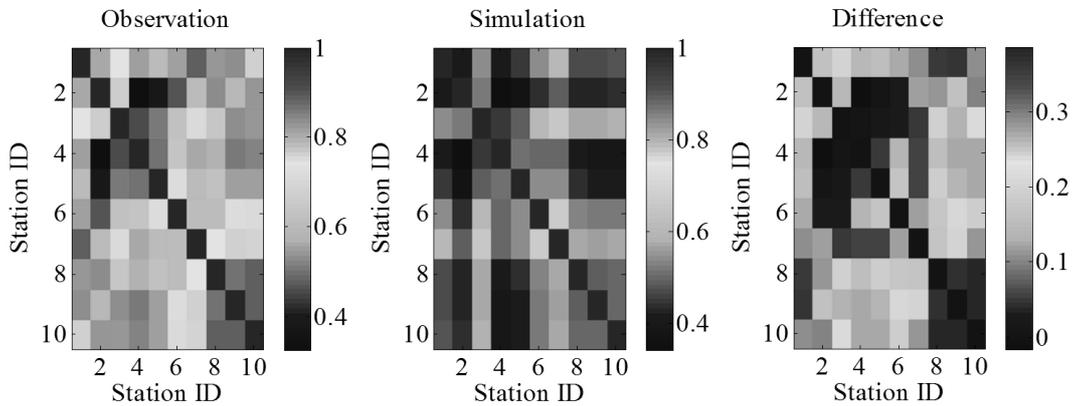


Fig. 15. Correlation Matrix Rainfall Amounts between Observation and CLT-NHMM Simulation

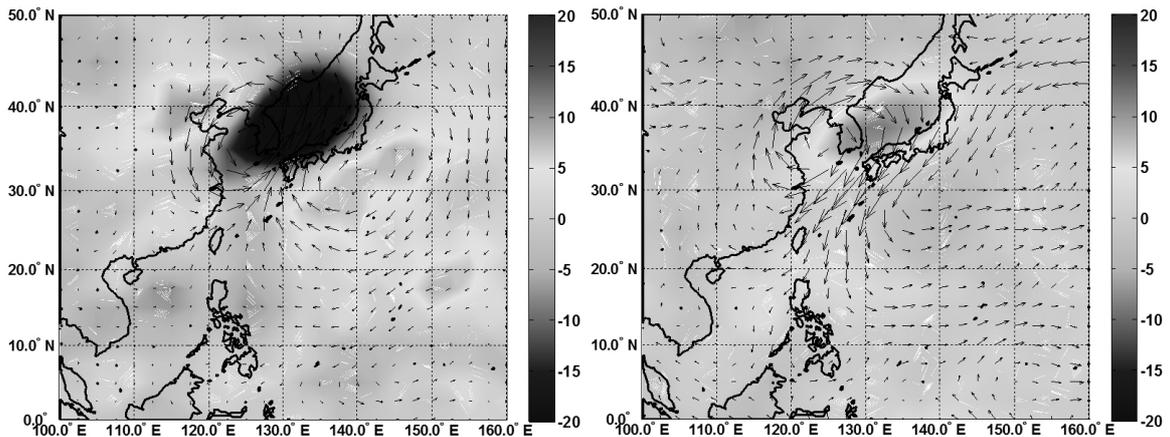


Fig. 16. Composite Plots of OLR and Wind Vectors at 850h Pa for Nakdong Basin (left: wettest states - State 1; right: driest state - State 4)

되어지는 850h Pa 압력면의 풍속과 외향장파복사(Outing Longwave Radiation, OLR)자료를 사용하여 나타냈으며, Fig. 16의 화살표의 크기는 풍속을 나타내며 화살표의 방향은 풍향을 의미한다.

State 1에 해당되는 Fig. 16의 좌측은 한반도 주변 전체에 걸쳐서 큰 음의 OLR 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. OLR이 음의

값을 가진다는 것은 구름이 많고 강우가 발생하고 있다는 것을 의미하며 음의 값이 클수록 강한 저기압대가 위치하고 있다는 것을 의미한다. 또한 바람장에서 확인할 수 있듯이 한반도 주변의 반시계 방향의 강한 바람장이 위치하는 등 대표적인 저기압의 특성을 나타내고 있다. 이러한 기상상태는 강한 집중호우의 형태를

가지는 기상패턴과 연계되어 있음을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 16의 우측은 State 4의 경우 State 1과는 다르게 한반도 주변에 고기압이 배치되어 있고 OLR의 값도 양의 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

최근 우리나라는 게릴라성 집중호우가 빈번한 산악형강수와 산지유역의 급한 경사와 맞물려 인명 및 재산피해가 매년 발생하고 있으며, 과거 돌발홍수(flash flood)가 발생한 사례가 있어 기후변화로 인한 기상재해 위험도 및 수자원 관리에서 불확실성을 저감하기 위한 노력으로 국내외를 중심으로 기상예측정보를 활용한 연구는 점차 증가하고 있다. 전 지구모형인 GCM 모의결과를 활용한 상세화 기법으로는 아주 단순한 모형에서부터 매우 정교한 모형까지 다양하게 개발되어 왔지만 여전히 실제 적용하고자하는 유역규모의 상세화 기법에는 정확도가 현저하게 부족하다.

본 연구에서는 선행연구를 통하여 개발된 NHMM을 강우네트워크의 공간상관성을 고려한 강수자료를 모의하기 위하여 다변량 형태의 CLT 알고리즘을 도입하여 유역단위 수문예측모형의 입력 자료 생산을 위한 체계적 강우시나리오 상세화 기법을 개발하였다. 이를 위하여 GCM 모의결과와 정확성을 개선시킨 APCC의 MME를 예측인자로 활용하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 수문분석의 기본적 입력자료인 강우자료를 대상으로 하는 체계적 다지점 강우자료 상세화 기법 NHMM을 조건부 확률분포에 기반을 둔 CLT 알고리즘과 연계 확장하여 CLT-NHMM을 개발하였다. 이어서 개발된 CLT-NHMM은 기상상태(hidden state)를 이용하는 유역상관성 및 경년변화(interannual variability)를 효과적으로 모의할 수 있는 시공간적 상세화 기법으로 확장하였다.

둘째, 강수량의 총량을 변화시키는 기상인자 및 Large-scale의 기상패턴인 GCM 모의결과를 가공한 APCC의 MME 자료를 외부인자로 사용하여 상세화된 강수계열에 대하여 관측값과 비교한 결과 관측치의 통계적 특성 및 천이확률, 습윤일 및 건조일 등이 경년변동성을 우수하게 재현하는 것을 확인하였다. 또한 불확실성의 범위를 정량적으로 제시하여 다양한 수문모형의 입력자료로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

셋째, 관측강수량과 CLT-NHMM의 상세화 결과를 사용하여 강우지점간의 상관성을 추정한 결과 낙동강 유역에 존재하는 강우네트워크의 강우발생패턴을 효과적으로 복원하면서, 관측지점간의 계절강수량 및 일강수량 통계적 특성도 현실성 있게 재현 하였다. 이는 유역단위 면적강수량을 추정하여 강우-유출 모형과 같은 기타 수문모형의 입력자료로 활용하고, 이를 통해 댐 및 저수지의 유입량

산정이 가능할 것으로 판단된다.

넷째, 수문시스템을 평가는 동질성을 갖는 유역을 대상으로 하며 이는 유역단위로 이루어지는 수문학적 거동을 평가하기 위한 이다. CLT-NHMM은 미래 기후변화에서 나타날 수 있는 다양한 변동성을 유역단위에서 관측소들 간에 물리적 특성을 유지하면서 모의가 가능하게 해주는 유역단위 상세화 기법으로 기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 위한 중요 기술로 판단된다.

다섯 째, CLT-NHMM 모형은 수자원뿐만 아니라 수문자료를 입력 자료로 하는 농업 보전, 환경 및 에너지 등 다양한 응용기상분야에 핵심 기술로 활용이 전망된다.

후속 연구로는 상세화기법의 신뢰성을 확보하기 위해서 외부인자로 사용된 예측인자의 예측성을 개선하여 상세화기법의 고도화 작업을 계획하고 있으며, 본 연구에서 사용한 APCC의 MME 강수량 이외의 기타 수문인자(풍속, 온도 등)의 적용성을 검토하여 통합 수문모형으로의 확장을 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B065985-02)에 의해 수행되었습니다. 저자들은 전북대학교 방재연구센터에 소속되어 연구를 진행하였습니다.

References

Barnston, A. G., Mason, S. J., Goddard, L., Dewitt, D. G. and Zebiak, S. E. (2003). "Multimodel ensembling in seasonal climate forecasting at IRI." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 84, No. 12, pp. 1783-1796.

Bates, B. C., Charles, S. P. and Hughes, J. P. (1998). "Stochastic downscaling of numerical climate model simulations." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 13, No. 3, pp. 325-331.

Bundel, A. Y., Kryzhov, V. N., Min, Y. M., Khan, V. M., Vilfand, R. M. and Tishchenko, V. A. (2011). "Assessment of probability multimodel seasonal forecast based on the APCC model data." *Russian Meteorology and Hydrology*, Vol. 36, No. 3, pp. 145-154.

Cho, H. R., Hwang, S. H., Cho, Y. S. and Choi, M. H. (2013). "Analysis of spatial precipitation field using downscaling on the korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 11, pp. 1129-1140 (in Korean).

Chow, C. K. and Liu, C. N. (1968). "Approximating discrete probability distributions with dependence trees." *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 14, pp. 462-467.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. and Totterdell, I. J. (2000). "Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model." *Nature*, Vol. 408, No.

- 6809, pp.184-187.
- Ekstör, M. Fowler, H. J., Kilsby, C. G. and Jones, P. D. (2005). "New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies." *Journal of Hydrology*, Vol. 300, No. 1, pp. 234-251.
- Fowler, H. J., Ekstrom, M., Kilsby, C. G. and Jones, P. D. (2005). "New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model intergrations. 1. Assessment of control climate." *Journal of Hydrology*, Vol. 300, No. 1, pp. 212-233.
- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J. and Vidale, P. L. (2006). "Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of Scenarios from Regional Climate Models." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, Vol. 111, No. D6, DOI: 10.1029/2005JD005965.
- Grimm, A. M. (2011). "Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 25, No. 4, pp. 537-554.
- Grum, M., Jorgensen, A. T., Johansen, R. M. and Linde, J. J. (2006). "The effect of climate change on urban drainage: An Evaluation Based on Regional Climate Model Simulations." *Water Science & Technology*, Vol. 54, No. 6-7, pp. 9-15.
- Haugen, J. E. and Iversen, T. (2008). "Response in extremes of daily precipitation and wind from a downscaled multi-model ensemble of anthropogenic global climate change scenarios." *Tellus A*, Vol. 60, No. 3, pp. 411-426.
- Hewitson, B. C. and Crane, R. G. (2006). "Consensus between GCM climate change projection with empirical downscaling : Precipitation Downscaling over South Africa." *International Journal of Climatology*, Vol. 26, No. 10, pp. 1315-1337.
- Karl, T. R., Wang, W. C., Schlesinger, M. E., Knight, R. W. and Portman, D. (1990). "A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. Part 1 : Seasonal Statistics." *Journal of Climate*, Vol. 3, No. 10, pp. 1053-1079.
- Khalil, A. F., Kwon, H. H., Lall, U. and Kaheil, Y. H. (2010). "Predictive downscaling based on non-homogeneous hidden markov models." *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 55, No. 3, pp. 333-350.
- Kim, T. J. (2014). *Development of nonstationary spatio-temporal downscaling technique using general circulation model multi-model ensemble*, Master's Thesis, Chonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk, Republic of Korea.
- Kim, T. J., Kwon, H. H., Lee, D. R. and Yoon, S. K. (2014). "Development of stochastic downscaling method for rainfall data using GCM." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 825-838 (in Korean).
- Kirshner, S., Smyth, P. and Robertson, A. W. (2004). "Conditional chow-liu tree structures for modeling discrete-valued vector time series." *Appears in Proceedings of the Twentieth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI2004)*, pp. 317-324.
- Krishnamurti, T. N., Kishtawal, C. M., LaRow, T. E., Bachiochi, D. R., Zhang, Z., Williford, C. E., Gadgil, S. and Surendran, S. (1999). "Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble." *Science*, Vol. 285, No. 5433, pp. 1548-1550.
- Kwon, H. H., Kim, T. J., Hwang, S. H. and Kim, T. W. (2013a). "Development of daily rainfall simulation model based on homogeneous hidden markov chain." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1861-1870 (in Korean).
- Kwon, H. H., Kim, T. J., Kim, O. K. and Lee, D. R. (2013b). "Development of multi-site daily rainfall simulation based on homogeneous hidden markov chain model coupled with chow-liu tree structure." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 1029-1040 (in Korean).
- Kwon, H. H., Lall, U. and Obeysekera, J. (2009). "Simulation of daily rainfall scenarios with interannual and multidecadal climate cycles for south Florida." *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, Vol. 23, No. 7, pp. 879-896.
- Kwon, H. H., Sivakumar, B., Moon, Y. I. and Kim, B. S. (2011). "Assessment of change in design flood frequency under climate change using a multivariate downscaling model and a precipitation-runoff model." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 25, No. 4, pp. 567-581.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D. and Talbot, G. (2007). "Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for southern quebec using the canadian regional climate model (CRCM)." *Journal of Hydrology*, Vol. 347, No. 1, pp. 197-210.
- Mailhot, A., Kingumbi, A., Talbot, G. and Poulin, A. (2010). "Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada." *Journal of Hydrology*, Vol. 388, No. 3, pp. 173-185.
- Malcolm, M. R., Cawley, G. C., Harpham, C., Wilby, R. L. and Clare, M. G. (2006). "Downscaling heavy precipitation over the united kingdom: A Comparison of Dynamical and Statistical Methods and their Future Scenarios." *International Journal of Climatology*, Vol. 26, No. 10, pp. 1397-1415.
- Matsuyama, Y. (2011). "Hidden markov model based on alpha-EM algorithm : Discrete and Continuous Alpha-HMMs." *International Joint Conference*, Vol. 7, No. 5, pp. 808-816.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L. and Whetton, P. (2000). "Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, No. 3, pp. 427-436.
- Min, Y. M., Kryjov, V. N. and Oh, J. H. (2011). "Probabilistic interpretation of regression-based downscaled seasonal ensemble predictions with the estimation of uncertainty." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, Vol. 116, No. D8. DOI : 10.1029/2010JD015284.
- Min, Y. M., Kryjov, V. N. and Park, C. K. (2009). "A probabilistic multimodel ensemble approach to seasonal prediction." *Weather and Forecasting*, Vol. 24, No. 3, pp. 812-828.
- Muhammad, Z. H., Asaad, Y. S. and Bruce, W. M. (2011).

- “Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 25, No. 4, pp. 475-484.
- Palmer, T., Andersen, U., Cantelaube, P., Davey, M., Deque, M., Doblas-Reyes, F. J., Feddersen, H., Graham, R., Gualdi, S., Gueremy, J. F., Hagedorn, R., Hoshen, M., Keenlyside, Noel, Latif, Mojib, Lazar, A., Maisonnave, E., Marletto, V., Morse, A. P., Orfila, B., Rogel, P., Terres, J. M. and Thomsen, M. C. (2004). “Development of a european multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER).” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 85 No. 6. pp. 853-872. DOI : 10.1175/BAMS-85-6-853.
- Shukla, J., Marx, L., Paolino, D., Straus, D., Anderson, J., Ploshay, J., Brankovic, C., Palmer, T., Chang, Y., Schubert, S., Suarez, M. and Kalnay, E. (2000). “Dynamical seasonal prediction.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, No. 11, pp. 2593-2606.
- Sohn, S. J., Tam, C. Y. and Ahn, J. B. (2013). “Development of a multimodel based seasonal prediction system for extreme droughts and floods: A Case Study for South Korea.” *International Journal of Climatology*, Vol. 33, No. 4, pp. 793-805.
- Sohn, S. J., Tam, C. Y., Ashok, K. and Ahn, J. B. (2012). “Quantifying the reliability of precipitation datasets for monitoring large-scale East Asian precipitation variations.” *International Journal of Climatology*, Vol. 32, No. 10, pp. 1520-1526.
- Wang, B., Kang, I. S. and Lee, J. Y. (2004). “Ensemble simulations of asian-australian monsoon variability by 11 AGCMs.” *Journal of Climate*, Vol. 17, No. 4, pp. 803-818.
- Willems, P. and Vrac, M. (2011). “Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change.” *Journal of Hydrology*, Vol. 402, No. 3, pp. 193-205.