

# 기후변화 및 단기에측을 시공간적 다지점 Downscaling 기법 개발

## Development of Multisite Spatio-Temporal Downscaling for Climate Change and Short-term Prediction

권 현 한\*·문 영 일\*\*·문 장 원\*\*\*·김 병 식\*\*\*\*

Hyun-Han Kwon-Young-Il Moon-Jang-Won Moon-Byung-Sik Kim

### 요 지

기후변화로 인한 사회, 경제, 자원, 환경, 수자원 등에 영향분석은 세계적인 연구 트렌드로 자리 잡고 있다. 다양한 모형들이 기후변화 영향을 효과적으로 평가하기 위해서 개발되고 있으나 주로 강우-유출 모형을 통한 유출의 변화 특성을 모의하는데 대부분의 연구가 초점을 맞추고 있다. 그러나 기본적으로 사용되는 강수량자료의 정확한 추정이 기후변화 연구에서 가장 중요하다고 해도 과언이 아니다. 이러한 관점에서 GCM 기후모형으로부터 유도된 기후변화 시나리오로부터 여러 단계로 가공하여 모형의 입력 자료로 사용하기 위한 강수량 자료를 생산하게 된다. 이러한 과정을 총칭해서 Downscaling이라고 한다. 본 연구에서는 기후모형으로 얻은 정보를 유역단위의 수문시나리오로 변환하기 위한 통계학적 Downscaling의 연구이론 변천 상황을 종합적으로 검토하고 각 모형이 갖는 장단점을 분석하고자 한다. 즉, Weather Generator, Single-site Nonstationary Markov Chain, Multi-site Nonstationary Markov Chain, Multi-site Weather State Based Markov Model 등 다양한 모형의 변화 및 진보 과정을 살펴보고 실제 국내 유역에 적용하여 모형의 타당성을 평가해보고자 한다. 이를 위해 IPCC 기후변화 시나리오를 활용하였으며 일강수량자료계열의 특성치, 극치수문량 변동특성 등 기후변화에 따른 영향분석을 일부 실시하여 분석하였다.

**핵심용어 : 통계학적 Downscaling, 비정상성, 다지점, 불확실성, Bayesian**

### 1. 서론

일강수 시계열의 확률, 강수일과 무강수일의 지속성 등과 같은 여러 일강수 특성은 시공간적으로 체계적인 변화를 나타낸다. 이러한 강수확률의 경년변동은 기상으로부터 기인하며, 기상이 시공간적 강수특성에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. GCMs은 Large 스케일 관점에서 계절(seasonal) 및 1년(annual) 단위이상의 기상상태에 비교적 합리적인 특성을 제공해주고 있다. 또한 미래의 기후를 전망하는데 주요한 수단으로 이용되고 있다. 이러한 관점에서 GCM으로부터 추정되는 결과물들은 기후변화 영향분석을 위한 가장 기초적인 자료로서 이용되고 있다. 그럼에도 불구하고 GCMs에 의해서 표현되는 지역규모의 기후자료들은 상당한 불확실성을 내포하고 있다고

\* 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원 · E-mail : hkwon@kict.re.kr

\*\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\*\* 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원

널리 알려지고 있다. 특히, GCMs으로부터 유도된 계절단위 이하의 상세규모 자료는 일반적으로 계획을 위한 자료로서 이용할 경우 자료의 신뢰성 측면에서 문제점을 표출시킬 수 있다. 게다가, GCM의 강수예측은 계절이하의 스케일(subseasonal scale)에서 제한된 기술력으로 인해 지역적인 규모에서 일강수통계치를 재현하는데 어려움이 존재한다(Bate et al., 1998. Kwon et al. 2009).

일강수량을 추계학적으로 모의하는데 있어서 유역단위의 강수지점들에 대해서 공간상관성을 고려하는 것은 잠재적인 기후변화 영향분석, 홍수위험도 관리, 강우유출과정 등을 검토하는데 매우 중요한 요소이다. 즉, 기존 강수지점간의 공간상관성을 고려하지 않고 일강수량을 모의 발생시킨 후 이를 입력자료로 강우-유출 모형에 사용한다면 유역전체의 내리는 강수의 특성을 반영하지 못하게 되므로 과소 추정되게 된다.

이러한 점에서 본 연구에서는 유역에 존재하는 실제 강우패턴을 모의할 수 있는 다지점 강우발생 모의기법을 개발을 개발함과 동시에 기후변화와 같은 외부인자를 고려할 수 있는 비정상성 Downscaling 기법을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서 제시하는 방법론은 서로 다른 두 시간스케일 사이를 연결시키는 연결고리로서 기상상태를 가정함으로써 지점수준의 강수에 기상순화패턴의 영향을 고려할 수 있다. 즉,  $R = \{R_t^1, \dots, R_t^n\}$ 를  $n$ 개의 강수지점을 갖는 유역에서 강수변량이라고 하고  $S_t$ 를 시간  $t$ 에서의 기상상태라고 정의하자. 또한  $X = (X_1, \dots, X_T)$ 를 GCMs 또는 기상변량과 같은 외부인자로 가정하자. 최적의 기상상태의 개수는 미리 정해지는 것이 아니라, 자료자체에서 BIC(Bayes Information Criteria)를 이용해 결정되며 일반적으로 4~5의 값을 갖는다. 강수량과 기상상태, 외부인자의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다. 식에서처럼 강수량은 기상상태와, 외부인자에 조건부로 변화하게 된다.

$$P(R_t | S_1^T, R_1^{t-1}, X_1^t) = P(R_t, S_t) \quad (1)$$

또한 기상상태  $S_t$ 는 이전 기상상태  $S_{t-1}$ 과 외부인자  $X_t$ 에 조건부로 변하게 된다. 즉 1차 Markov Chain에서 현재의 강수량과 전날의 강수량과의 상관관계 대신에 기상상태를 통한 천이확률을 추정하여 강수모의발생에 이용하는 것이다. 이러한 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P(S_t | S_1^{t-1}, X_1^t) = P(S_t | S_{t-1}, X_t) \quad (2)$$

시간에 따라 변화하는 Dynamic Markov 과정이 가능한 것은 외부인자  $X_t$ 가 모형에 도입되면서 가능하다. 본 모형은 조건부 독립을 가정하고 있으며 이러한 관계는 다음 그림으로부터 쉽게 이해할 수 있다.

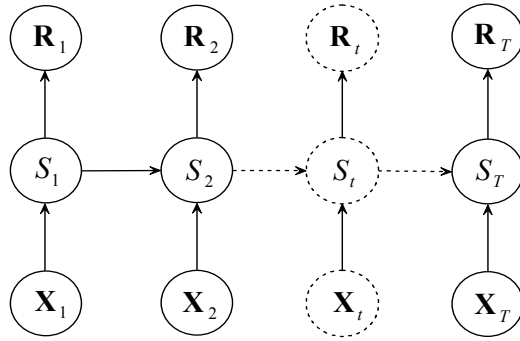


그림 1. 조건부 독립을 가정하는 Markov Chain 모형 개념

기상상태간의 천이는 다음과 같은 외부인자  $X$ 에 조건부로 변동하는 Multinomial Logistic 회귀 방정식에 의해서 수행된다. 여기서  $\sigma$ 와  $\rho$ 는 매개변수가 된다.

$$P(S_t = i \mid S_{t-1} = j, X_t = x) = \frac{\exp(\sigma_{ji} + \rho_i^t x)}{\sum_{m=1}^M \exp(\sigma_{jm} + \rho_m^t x)} \quad (3)$$

최종적으로 자료의 log-likelihood는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$L(\theta) = \log(p(R_1^T \mid X_1^T, \theta)) = \log \sum_s \left[ p(S_1 \mid X_1) \prod_{t=2}^T p(S_t \mid S_{t-1}, X_t) \right] \prod_{t=1}^T P(R_t \mid S_t) \quad (4)$$

### 3. 연구결과 및 결론

모형의 적합성을 평가하기 위해서 소양강댐 유역에 7개 일강우관측소를 대상으로 하였다. 각각의 관측소는 1987년부터 2008년까지 22년 자료를 대상으로 검토하였다. 1월부터 12월까지 12개 모형을 구성해서 결과를 도출하였으며 본 논문에서는 5월의 결과를 중심으로 평가하였다. 5월의 22년 일강수량(31×22=682) 자료를 5개의 기상상태로 구분하였으며 이를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 5개의 기상상태의 분류에 따른 강수사상의 빈도와 강수량을 동시에 평가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 상태 1은 전체 강우 빈도수의 50%를 차지하고 있으며 이에 따른 강우량도 5월 전체 강수량의 40%를 가리키고 있다. 이를 강우형태와 연관 지어 평가하면 강우강도가 그리 크지 않은 5월의 일반적인 강우형태라 할 수 있다. 반면 상태 2는 전체 강우일수의 28%를 차지하며 강수량은 상태 1과 비슷한 형태로서 상태 1보다는 강우빈도는 적지만 강우강도는 큰 강수의 형태라고 볼 수 있다. 상태 5의 경우 10%이하의 강수분포와 강수량을 나타내는 등 간헐적으로 내리는 강수 현상으로 평가할 수 있다. 이렇게 강우의 빈도와 강수량을 패턴별로 분류하고 상태간의 천이확률을 강수자료로부터 직접 추정하며 이를 이용하여 강수를 모의하게 된다.

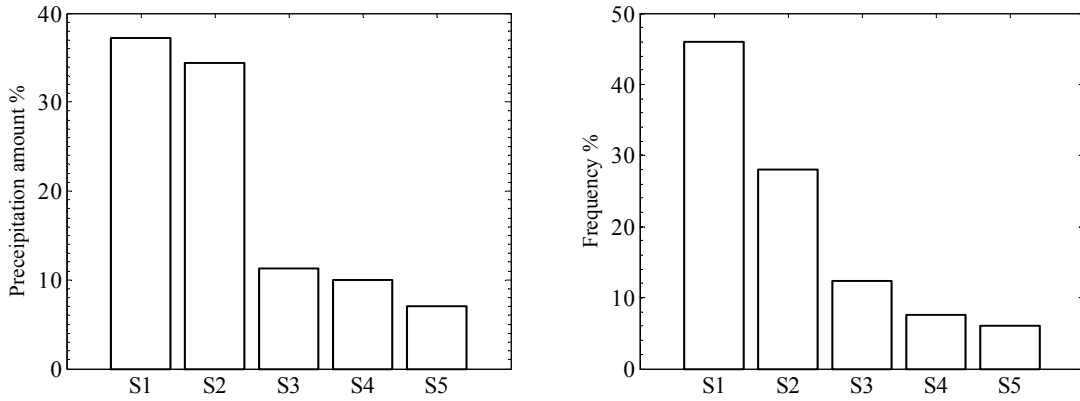


그림 2. 5월 강수량에 대한 기상상태 분류와 강우빈도와 강우량 분포

그림 3은 모형으로부터 추정된 5월 강수량과 실측 강수량을 비교하여 나타낸 결과로서 실측 강수량의 거동을 매우 잘 묘사하고 있다. 모형으로부터 추정된 불확실성 구간도 적절하게 추정되었으며 실측 강수량이 50% 불확실성 구간에 대부분 위치한다.

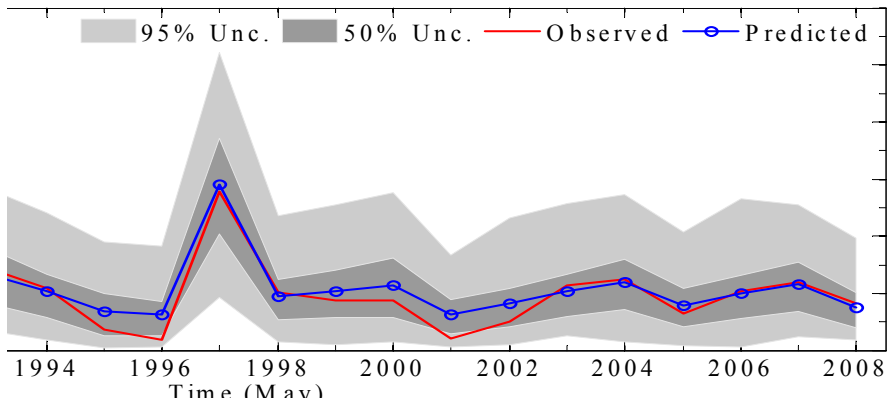


그림 3. 모형으로 추정된 5월강수량과 불확실성 구간

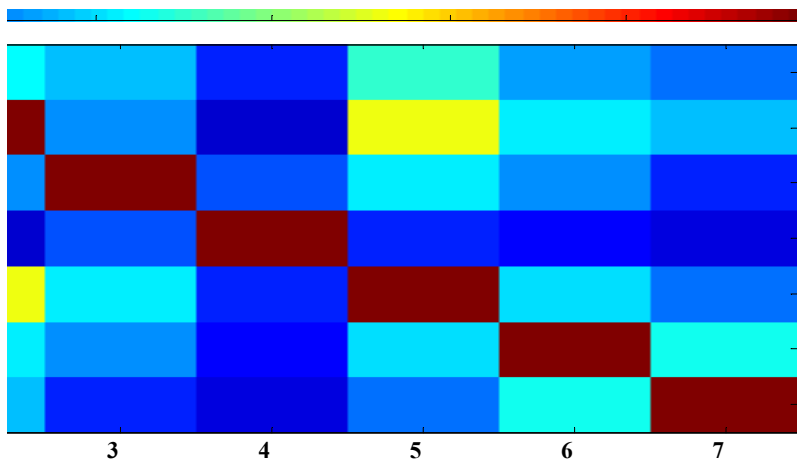


그림 4. 7개지점간의 Cross Correlation Matrix (좌:실측자료, 우:모의자료)

유역의 공간상관성을 고려한 모의가 가능한지를 검토하기 위하여 실측자료로부터 추정된 강수 발생계열의 교차상관행렬을 모의된 자료계열의 교차상관행렬과 비교하여 그림 4에 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 실측자료의 공간상관관계를 효과적으로 재현하고 있으며 오차범위는 0.1이하로서 매우 정확한 값을 나타내고 있다.

본 연구에서는 다지점 비정상성 Weather State 모형을 개발하였으며 이를 소양강댐 7개 일강수 지점에 적용하여 모형의 적합성을 평가하였다. 적용결과 유역에서 지점간의 공간상관성을 재현할 수 있을 뿐만 아니라 외부인자를 이용하여 동적거동을 동시에 모의할 수 있는 비정상성모형으로서 우수한 능력을 보여주었다. 따라서 기후변화시나리오를 입력자료로 활용한다면 수자원뿐만 아니라 농업, 환경 등 다양한 분야에 상세기후변화 시나리오를 제공할 수 있는 방법론으로서 적용이 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 수탁과제 『기후변화 대비 국가물안보 확보방안 연구』에 의해 지원되었습니다.

### 참고문헌

1. Bates, B. C., Charles, S. P. & Hughes, J. P. (1998) Stochastic downscaling of numerical climate model simulations. *Environmental Modeling & Software* 13, 325–331.
2. Kwon, H-H, U. Lall and J. Obeysekera (2009), Simulation of Daily Rainfall Scenarios with Interannual and Multidecadal Climate Cycles for South Florida, *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, DOI 10.1007/s00477-008-0270-2.