

# RCM과 단계적 스케일링기법을 연계한 혼합 상세화기법의 적용성 평가

## Evaluation of Hybrid Downscaling Method Combined Regional Climate Model with Step-Wise Scaling Method

이 문 환\* / 배 덕 효\*\*

Lee, Moon Hwan / Bae, Deg Hyo

### Abstract

The objective of this study is to evaluate the hybrid downscaling method combined Step-Wise Scaling (SWS) method with Regional Climate Model (RCM) simulation data for climate change impact study on hydrology area. The SWS method is divided by 3 categories (extreme event, dry event and the others). The extreme events, wet-dry days and the others are corrected by using regression method, quantile mapping method, mean & variance scaling method. The application and evaluation of SWS method with 3 existing and popular statistical techniques (linear scaling method, quantile mapping method and weather generator method) were performed at the 61 weather stations. At the results, the accuracy of corrected simulation data by using SWS are higher than existing 3 statistical techniques. It is expected that the usability of SWS method will grow up on climate change study when the use of RCM simulation data are increasing.

**Keywords** : RCM, step-wise scaling method, climate change, hydrological application

### 요 지

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위한 지역기후모형과 단계적 스케일링기법을 연계한 혼합상세화기법을 개발하고 그에 따른 적용성을 평가하고자 하였다. 단계적 스케일링기법은 강수량 구간을 총 3구간(극치호우사상, 무강수일수, 기타)으로 나누어 각 구간에 따라 각기 다른 방법을 적용하여 보정하는 기법으로, 극치호우사상은 회귀식을 이용한 보정기법, 무강수일수는 분위사상법, 나머지 부분은 평균 및 분산보정 기법을 적용하였다. 이 기법의 비교·평가를 위해 최근 혼합 상세화기법으로 가장 많이 적용되고 있는 선형보정기법, 분위사상법, 일기상발생기법을 활용하여 기상청 관할 기상관측소 61개 지점을 대상으로 적용성 평가를 수행하였다. 평가 결과, RCM에서 생산된 원자료 및 3가지 기존 기법(선형보정기법, 분위사상법, 일기상발생기법)으로 보정된 기후시나리오에 비해 본 연구에서 제안한 단계적 스케일링기법이 실제 기후특성을 잘 모의하는 것으로 나타나 적용성이 우수한 것으로 판단된다. 이러한 연구결과를 통해 단계적 스케일링기법은 RCM 사용이 증대될 기후변화 연구에 있어 그 활용성이 높을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : RCM, 단계적 스케일링기법, 기후변화, 수문학적 활용

\* 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: ycleemh@daum.net)

Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\* 교신저자, 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 02-3408-3814)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

## 1. 서 론

기후변화로 인한 국내 수자원분야의 영향은 극치호우 사상의 증가로 홍수위험성이 증대되는 것과 더불어 가뭄의 심도 및 발생빈도가 증가하는 것이다. 실례로 Bae et al. (2008)은 국내 5대강 유역 수문자료의 경향성 평가를 수행한 결과 여름철 유출량 증가 및 봄철 유출량 감소경향이 나타난다고 제시하였다. Jung et al. (2013)은 MME 기후 및 수문시나리오를 이용하여 국내 전역에 자연유량의 변화를 평가하였으며, 그 결과에서도 여름철 유출량 증가 및 봄철 유출량 감소 결과를 제시하였다. 또한, Lee et al. (2011)은 국내 5대강 유역에 홍수 취약성을 평가한 결과 국내 전역에서 취약성이 증대된다고 제시하였으며, Son et al. (2010)은 남한강유역의 확률강우량, 확률홍수량, 확률홍수위의 변화를 평가하여 확률홍수위의 경우 약 13% 정도 증가할 것으로 전망하였다. Lee et al. (2012)은 SPI3과 SPI6의 경향성을 분석한 결과 봄과 겨울에는 국내 모든 지역에서 가뭄이 심화되는 경향이 나타난다고 제시하였다. 실제 사례에서도 2010년, 2011년 서울에 집중호우가 발생하였으며, 2010년 태백시 가뭄과 2012년 전국적인 가뭄으로 인해 많은 인명 및 재산피해가 발생하였다. 이러한 홍수 및 가뭄 피해를 줄이기 위해서는 기후변화로 인해 변화될 미래 수문환경을 정확히 평가하고, 그에 따른 적절한 대응책 마련이 필요하다.

기후변화에 따른 홍수 및 가뭄의 정확한 영향평가를 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 기후시나리오 생산이 요구되지만, 기후시나리오 생산과정에서 발생하는 많은 불확실성으로 영향평가 결과의 신뢰성에 의문을 갖게 한다 (Bae et al., 2011). 게다가, 우리나라와 같이 좁고 복잡한 지형을 갖는 지역의 경우 고해상도 기후시나리오가 필요하며, 특히 홍수는 수 시간 안에 발생하기 때문에 일단위 이하의 자료가 필요하다. 이러한 점을 고려하여 기후변화에 따른 수자원 영향을 평가할 수 있는 적절한 방법은 지역기후모델(Regional Climate Model, 이하 RCM)의 활용이다. RCM은 수~수십 km의 공간해상도로 일단위 이하의 기후시나리오를 생산할 수 있기 때문에, 국지성 호우를 평가하기에 적절하다고 할 수 있다. Lee and Bae (2012)은 RegCM3의 Sub-BATS 기법을 이용하여 국내 전역에 5 km 해상도의 기후시나리오를 생산하였으며, 평가 결과 기존 GCM (350×350 km) 및 RCM(60×60 km, 20×20 km) 결과에 비해 국내 기후 특성을 더 잘 반영한다고 제시하였다. 하지만, RCM의 구조 및 모수화 과정 등의 한계로 인하여 관측치와의 편차가 발생하며, 여러 연구결과에서

RCM으로 생산된 결과값을 그대로 영향평가에 사용하는 것보다 통계적인 보정기법이 필요하다고 제시하였다 (Kwon et al., 2008; Hanel and Buishand, 2011).

국·내외에서 RCM과 통계적 상세화기법을 결합한 혼합 상세화기법(hybrid downscaling)을 이용하여 수자원의 영향을 평가하는 사례가 증대되고 있는 추세이다. Cameron (2006)은 HadRM3로 생산된 기후시나리오를 기반으로 추계학적 강우모형(stochastic rainfall model)을 통해 시단위 기후시나리오를 생산하였으며, TOPMODEL을 이용하여 홍수량의 변화를 평가하였다. Veijalainen et al. (2010)은 4개의 RCM 결과와 변화율(change factor, 이하 CF)기법을 이용하여 핀란드 지역의 100년 빈도의 홍수량을 평가하였으며, 2차원 수리모형을 통해 홍수범람의 영향을 평가하였다. Fowler and Kilsby (2007)은 HadRM3에서 생산된 기후시나리오에 분위사상법(Quantile mapping method)을 적용하여 편의보정을 수행하였으며, ADM 모형을 이용하여 계절 및 연 평균 강수량과 유출량을 평가하였다. Minville et al. (2008)은 CRCM(Canadian Regional Climate Model)과 CF기법을 이용하여 생산한 기후시나리오를 Hydrotel에 적용하여 용설 및 유출의 특성 변화를 평가하였으며, 이를 토대로 연평균수력발전량의 변화를 평가하였다. 국내에서도 Bae et al. (2007)은 MM5로 생산된 27 km 해상도 기후시나리오와 일기발생기를 이용하여 국내 전역의 기후 및 수문의 변화를 평가하였다. Kwon and Kim (2009)에서는 비정상성 마르코프 연쇄(non-stationary Markov chain)모형을 이용한 상세화기법을 개발하였으며, Kim et al. (2010)은 RegCM3로 생산된 27 km 해상도의 기후시나리오와 비정상성 마르코프 연쇄모형을 이용하여 일단위 기후시나리오를 재생산하였으며, SLURP와 K-WEAP을 이용하여 한강유역의 수자원 영향평가를 수행하였다. Kwon et al. (2011)에서는 다변량 상세화기법과 강우-유출모형을 이용하여 설계홍수빈도의 변화를 평가하였다. Park et al. (2011)은 MM5 (27×27 km)와 다지점 비정상성 상세화기법을 이용하여 생산된 기후시나리오 및 SWAT모형을 통해 용담댐 및 대청댐 지역의 미래 유출량의 변화를 분석하였다.

국내·외 사례에서와 같이 혼합 상세화기법의 경우 사용되고 있는 통계적 기법이 사례 별로 다르게 나타나고 있으며, 각 기법마다 장·단점이 존재한다. 혼합 상세화기법에서 사용할 통계적 기법의 결정은 영향평가의 목적 및 대상에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수자원 분야 특히 홍수 및 가뭄을 평가하는데 있어 가장 적절한 혼합 상세화기법을 제안하고자 한다. 이를 위해 RCM

과 단계적 스케일링기법을 연계한 혼합 상세화기법을 개발하였으며, 이 기법의 적용성을 평가하고자 한다.

## 2. 혼합 상세화기법

### 2.1 상세화기법의 개요

일반적으로 기후시나리오는 GCM을 이용하여 생산한다. GCM은 물리적 과정에 기초한 대기/해양/지면의 3차원 자료를 객관적으로 제공할 수 있어 인위적 요인에 의한 복사강제력의 변화에 따른 지구 기후시스템의 변화를 모의하거나 전망하는데 유용한 도구이다. GCM의 공간해상도는 보통 100~500 km 정도로 우리나라의 경우 한 개 혹은 두 점으로 표현되며, 이 경우 국내의 산악지형효과 등으로 인한 기후특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 이러한 GCM 정보를 국지 규모의 다양한 기후 특성이 나타나는 지역에 그대로 활용하기는 한계가 있다는 점에서 상세화기법 혹은 지역화기법이 요구된다(Bae et al., 2011).

상세화기법은 크게 역학적 상세화기법과 통계적 상세화기법으로 구분된다. 역학적 상세화기법은 GCM의 결과 경계조건으로 지역기후모델을 통해 상세화하는 방법으로 대상지역에 대해 공간적으로 자세한 정보를 얻을 수 있다. 또한 물리적으로 생산하기 때문에 비선형적 예측이 가능하며, 비정상성을 기초로 자료를 생산할 수 있어 급격히 변화될 기후변화를 모의할 수 있다. 하지만 자료를 생산하는데 시간 및 비용이 많이 발생하는 단점이 있어 앙상블 자료를 만들기 쉽지 않으며, RCM의 구조적, 모수화 과정 등의 한계로 인하여 편이가 발생하는 한계가 나타난다. 반면에 통계적 상세화기법은 역학적 상세화기법에 비해 많은 양의 컴퓨터 계산이 필요하지 않아 손쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 이 방법을 적용하기 위해서는 장기간의 신뢰성 있는 지상의 기후관측소 자료가 있어야 한다는 점과 복잡한 지형을 갖는 지역에서는 예측 변수 사이에 상관성을 찾기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 각 기법들의 장·단점을 보완하고 적절한 평가를 위해 지역기후모형과 함께 통계적 기법을 결합하여 기후시나리오를 시·공간적으로 상세화하는 혼합 상세화기법이 사용되고 있는 추세이다.

### 2.2 단계적 스케일링기법

수자원 분야의 영향평가를 위해, 기후시나리오는 관측 자료의 월 및 계절적 변동성뿐만 아니라 극한 사상(high, low)을 잘 반영해야 한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 방법은 RCM으로 모의된 강수량을 총 3구간(극치호우사

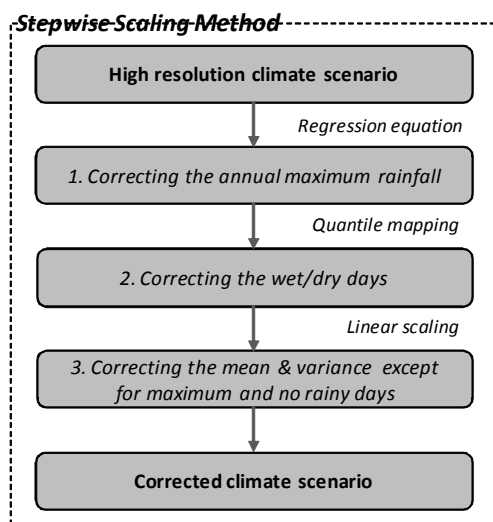


Fig. 1. Concept of Step-Wise Scaling Method

상, 무강수일수, 기타)으로 나누어 각 구간에 따라 각기 다른 방법을 적용하여 보정하는 것이다. 극치호우사상은 회귀식을 이용한 보정기법, 무강수일수는 분위사상법의 비초과확률을 이용한 보정기법, 나머지 부분에 대해서는 평균 및 분산보정 기법을 적용하는 방법이다(Fig. 1). 세 가지의 서로 다른 강수구간을 차례로 보정한다고 하여 본 기법의 명칭을 단계적 스케일링기법(Step-Wise Scaling Method, 이하 SWS기법)이라 명명하였다.

#### 2.2.1 극치호우사상 편의보정

일반적으로 기후모형에서 생산된 극치호우사상을 추출하여 관측치와 비교하면 Fig. 2a와 같이 과소 추정되는 경향이 있다. 이 기법은 모의치의 연최대치 일강수량과 잔차(관측치-모의치)의 함수를 회귀식으로 산정하여 모의치의 크기에 따른 잔차(residual)만큼을 보정하는 방법이다. 기후시나리오와 관측치를 최소값부터 최대값 순으로 나열한 뒤 해당되는 순위별로 관측치와 모의치의 잔차를 구하여, 2차 방정식 회귀식을 Eq. (1)과 같이 산정한다(Fig. 2b). 산정된 회귀식을 이용하여 Eq. (2)에 대입하여 보정된 기후시나리오를 생산한다(Fig. 2c). 여기서,  $y_i$ 는 보정된 연최대치 모의 자료,  $y_i$ 는 모의치,  $e_i$ 는 관측치와 모의치의 잔차.  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ 는 회귀식의 상수이다. 시계열의 일단위 기후시나리오를 보정할 경우, 전체기간의 강수량 중 연최대치계열의 최소값보다 큰 강수량에 대해서는 극치사상 편의보정을 적용시킨다.

$$e_i = m_0 + m_1 \times y_i + m_2 \times y_i^2 \quad (1)$$

$$y_i = \underline{y}_i + e_i \quad (2)$$

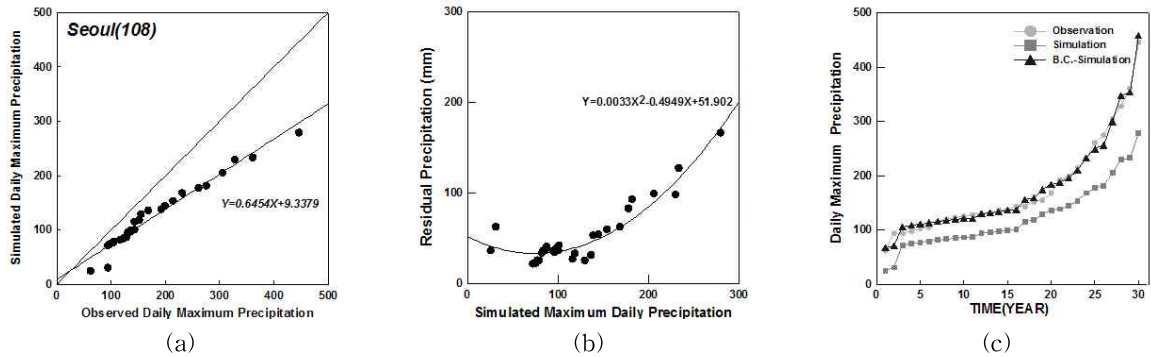


Fig. 2. Concept of 1-day Maximum Rainfall Correction Method (Lee et al., 2012)

### 2.2.2 무강수일수 편의보정

무강수일수 보정방법은 분위사상법을 이용하였으며, 이는 관측된 강수량과 모의된 강수량이 발생하는 비초과 확률을 동일하게 적용시키는 방법이다. GCM 일단위 강수량과 관측자료의 일단위 강수량을 이용하여 확률분포의 누가밀도함수(CDF)를 추정하면 Fig. 3과 같이 GCM 모의 강수량은 관측강수량에 비해 작은 강수량이 과다하게 발생하는 것이 일반적이다. 이는 일반적으로 GCM 및 RCM과 같은 기후모형은 육지에 떨어지는 강수량을 모의하는 모형이 아니라 대기에서의 발생량을 추정하기 때문이다. 여기서, 관측자료의 CDF에서 강수가 발생하기 시작하는 비초과확률 지점을 교정 임계치(calibrated threshold)라고 하여 그 교정임계치 아래의 비초과확률을 갖는 모의 강수에 대해서는 무강수로 가정한다. 일반적으로 확률분포형은 Gumbel, Gamma, GEV 등 주로 극치분포가 이용된다.

본 연구에서는 확률분포형을 Gumbel 분포를 사용하였으며, 매개변수 추정방법은 모멘트법을 이용하였다. Eq. (3)은 Gumbel 분포의 확률밀도함수(PDF)이며, Eq. (4)는 CDF이다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right], \quad (3)$$

$$-\infty < x < \infty$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right] = e^{-e^{-y}} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha > 0$ 는 척척매개변수이고,  $x_0$ 는 최대확률(mode)이 발생하는 위치이다. 모멘트법을 이용하면 아래 Eqs. (5)~(6)과 같이 매개변수 산정이 가능하다.

$$\hat{x}_0 = \bar{x} - 0.5772158\hat{\alpha} = \bar{x} - 0.45s \quad (5)$$

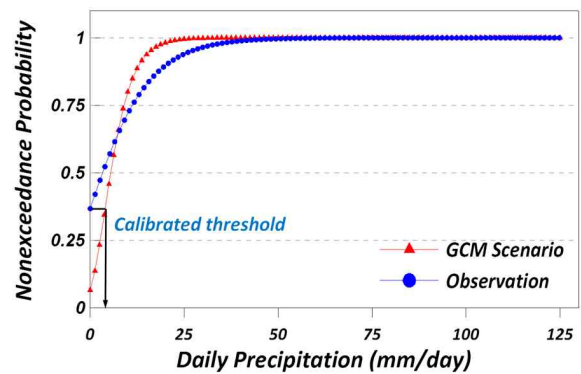


Fig. 3. Concept of Wet-Dry Day Correction Method

$$\alpha = 0.7797s \quad (6)$$

여기서,  $\bar{x}$ 와  $s$ 는 각각 표본자료  $x$ 의 평균값 및 표준편차이다.

### 2.2.3 평균 및 표준편차 편의보정

평균 및 표준편차 편의보정은 관측자료와 기후 모의자료의 월별 평균 및 표준편차를 이용하여 보정하는 방법을 사용하였다. 이 기법은 Eq. (7)과 같이 두 가지 변수( $\alpha_k$ ,  $b_k$ )로 구성된다.  $a_k$ 는 평균을 보정하는 계수이며,  $b_k$ 는 표준편차를 보정하는 계수이다. 여기서  $b_k$ 는 시행착오법(trial and error)을 이용하여 두 변동계수의 차이가 특정 임계치보다 작아질 때의 값으로 결정한다. 결정된  $b_k$ 를 적용하여 산정된 월별 평균강수량의 차이를 보정하기 위해  $\alpha_k$ 를 이용하여 월별 평균강수량의 차이를 보정한다(Eq. 9).

$$PF'_{i,k} = \alpha_k \times (PF_{i,k})^{b_k} \quad (7)$$

$$CV(PO_{i,k}) = CV((PR_{i,k})^{b_k}) \quad (8)$$

$$mean(PO_{i,k}) = mean((\alpha_k \times PR_{i,k})^{b_k}) \quad (9)$$

여기서,  $k$ 는 각 월을,  $i$ 는 강우의 시계열,  $PF'_{i,k}$ 는 보정된 미래 기후시나리오,  $PF_{i,k}$ 는 미래 기후시나리오 원자료,  $PO_{i,k}$ 는 관측 강수량,  $PR_{i,k}$  기준기간의 기후시나리오를 의미한다.

### 2.3 기존 혼합 상세화기법

혼합 상세화기법은 지역기후모형과 함께 통계적 기법을 결합하여 기후시나리오를 시·공간적으로 상세화하는 것으로 일반적으로 사용되고 있는 통계적 기법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째가 역학적 상세화기법과 일기상발생기를 결합하는 방법, 두 번째는 역학적 상세화된 결과를 편의보정하는 방법, 세 번째는 역학적 상세화된 결과의 CF를 과거기간의 관측자료에 적용하는 방법이다. 본 연구에서 개발한 단계적 스케일링기법과의 비교·평가를 위해 기존 연구에서 많이 사용되고 있는 일기상발생기를 이용한 기법, 선형보정기법, 분위사상법을 선택하였으며, 이에 대한 간단한 이론은 아래와 같다.

일기발생기를 이용한 기법은 관측자료의 통계적 특성을 이용하여 기후를 무작위로 발생시키는 모형이다. 미래의 경우 과거에 대한 변화율을 일기상발생기의 입력자료에 적용함으로써 강우, 기온 등의 자료를 생산할 수 있다. 일기상발생기의 기후변화 활용에 대한 적용방법은 우선, 관측자료를 이용하여 일기상발생기(WG)의 입력자료를 구축하고, 기후시나리오를 이용하여 일기상발생기의 입력변수들의 과거기간 대비 미래기간의 변화를 산정한다. 산정된 미래기간의 입력변수를 기반으로 일기상발생기를 구동하여 미래 기간의 기상자료를 생산하게 된다. 본 연구에서는 일기발생기 중 WXGEN을 이용하여 평가에 활용하였다. 자세한 적용 방법은 Sunyer et al. (2012)을 참조하길 바란다.

편의보정기법은 모의된 기후시나리오와 관측치에서 발생하는 편의를 보정시키는 기법이며, 대표적인 편의보정 기법으로는 선형보정방법(Linear scaling method), 분위사상법(Quantile mapping method) 등이 있다. 편의보정 기법은 GCM이나 RCM에서 모의된 시나리오를 기반으로 관측자료와의 편이만큼을 모의된 시나리오에 적용하는 방법으로 강수의 발생패턴 변화 등을 반영할 수 있는 장점이 있다. 가장 일반적으로 사용되고 있는 선형보정방법은 기준기간에 관측치와 모의치의 월별 편차를 계산하여 미래기간에도 같은 편차가 발생한다고 가정하고 미래기간의 모의치에 적용하는 방법이다. 모의된 기후시나리오와 관측치의 차이를 월별로 산정하여 모의된 미래 기간의 자료에 적용하는데 강수량은 Eq. (10)과 같이 관측치와 모

의치의 비를 적용한다. 자세한 적용방법은 Lenderink et al. (2007)을 참조하길 바란다. 분위사상법은 앞서 제시한 무강수일수 편의보정 방법에서 설명과 같으며, 무강수일수 보정 후 Eq. (11)을 통해 GCM의 임의 강수량( $x_i$ )을 보정 기후시나리오( $x'_i$ )로 보정시킨다. 자세한 적용방법은 Boe et al. (2007)을 참조하길 바란다.

$$P_{fut} = P_{fut.s} \times \frac{\sum_{i=1}^{ref} P_{obs}}{\sum_{i=1}^{ref} P_{ref.s}} \quad (10)$$

여기서,  $P_{fut}$ 는 보정된 미래 기후시나리오,  $P_{obs}$ 는 관측 강수량,  $P_{ref.s}$ 과  $P_{fut.s}$ 는 RCM을 통해 모의된 과거기간과 미래기간의 강수량이다.

$$x'_i = F_{obs}^{-1}(F_{GCM}(x_i)) \quad (11)$$

여기서,  $x_i$ 는 기후시나리오 원자료이며,  $x'_i$ 는 보정된 기후시나리오이다.

## 3. 대상지점 및 자료수집

### 3.1 대상지점

본 연구의 대상지점은 기상청 관할 기상관측소 중 1976년부터 2005년(총 30년)까지 강수량 자료가 가용한 총 61개 지점(서울, 부산, 목포, 울릉도, 제주관측소 등)을 선정하였다(Fig. 4). 선정된 지점들은 남한 전역에 일정하게

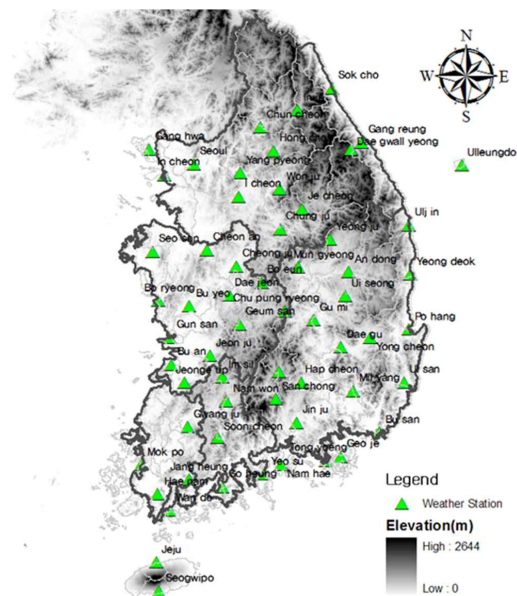


Fig. 4. Study Area

분포되어있으며, 관측소의 고도 역시 0~883 m로 다양하기 때문에 국내 지역의 국지성 기후 특성을 반영하는지 평가하기에 적절한 것으로 판단된다.

### 3.2 자료 수집 및 분석

본 연구를 위해 61개 지점을 대상으로 관측 일강수량 자료를 1976~2005년 동안 구축하였다. 기후시나리오의 경우 NIMR (2011)에서 생산한 자료를 이용하였으며, 기후시나리오 생산 방법은 Fig. 5와 같다. 새로운 RCP 시나리오 (RCP8.5와 RCP4.5)에 기초해 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO로 약 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오를 산출하였으며, 지역기후모델 HadGEM3-RA로 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역 기후변화 시나리오를 산출하였다(NIMR, 2011). 본 연구를 위해 일단위 강수량 자료를 수집하였으며, 관측소와 가장 가까운 격자지점을 선정하여 연구에 사용하였다.

RCM의 모의능력을 평가하기 위해, 수집한 관측자료 및 기후모의자료를 이용하여 비교·분석하였다. Fig. 5는 서울 관측소와 목포 관측소를 대상으로 1976~2005년 동

안의 월평균강수량, 월별 일강수량의 표준편차 및 왜곡도, 월별 총 강수일수, 월별 천이확률을 비교 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 나타나는 것과 같이 월 평균 강수량의 경우 대체적으로 잘 모의하지만, 여름철(8~9월)의 강수량이 관측자료에 비해 적게 모의되는 경향이 발생하였다. 월평균 강수일수는 겨울철을 제외한 모든 월에서 강수일수를 2배 이상 모의하는 것으로 나타났다. Table 1은 61개 관측소의 월별 강수량의 평균 편차를 나타낸 것으로 3~6월까지의 과대모의, 7~9월까지의 과소모의되는 것을 알 수 있으며, 특히 4월에는 +43.7 mm, 8월에는 -163.8 mm 편차가 발생한다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 극치호우사상 평가

연최대치 강수량계열은 수공구조물 설계에 가장 많이 활용되는 인자이며, 일강수량의 경우 하천제방 및 댐 설계 등에 활용된다. 비교·평가를 위해 관측 강수량, RCM 원자료와 기존 통계기법(선형보정, 일기상발생기, 분위사

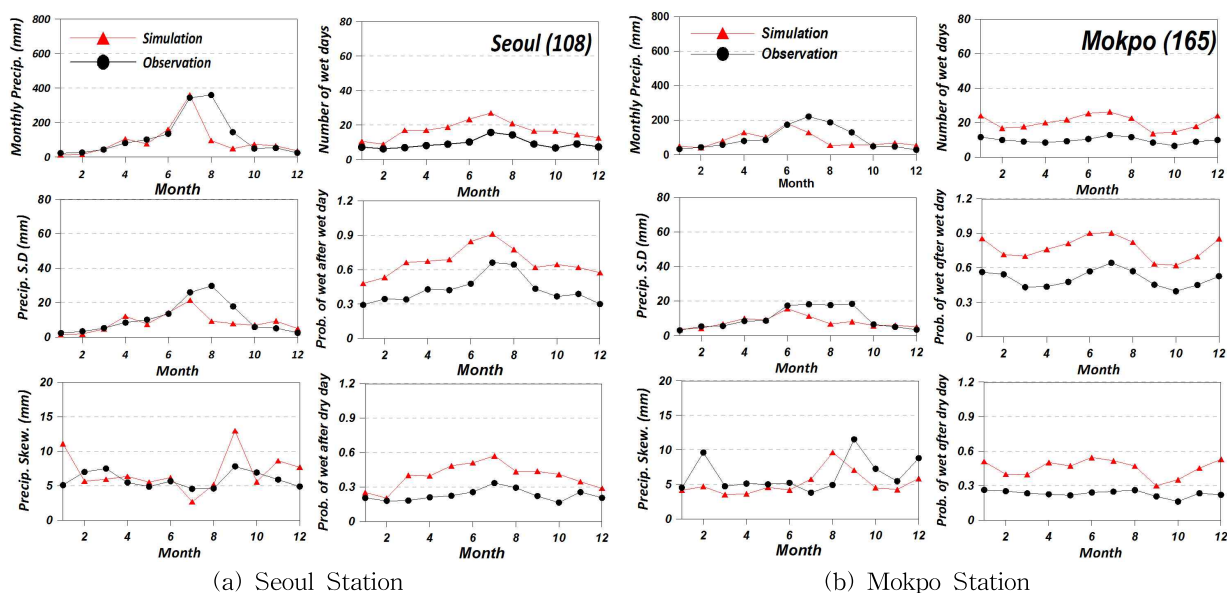


Fig. 5. Comparison Between Observation and Simulation Precipitation Statistics

Table 1. Comparison of the Observed and Simulated Monthly Average Precipitation on 61 Weather Stations (1976~2005)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Obs.	31.8	40.1	59.7	94.7	101.5	183.0	274.2	292.8	158.3	56.1	52.4	29.0
Sim.	33.3	37.1	88.0	138.5	108.5	194.1	216.8	129.1	79.1	62.7	63.7	42.1
Bias	1.5	-3.0	28.4	43.7	7.0	11.1	-57.4	-163.8	-79.2	6.7	11.3	13.1



상법) 및 단계적 스케일링기법으로 보정된 기후시나리오에 대해 연최대치 일강수량을 추출하였다. Fig. 6은 추출된 일강수량을 이용하여 서울, 인천, 대구, 목포관측소의 보정 결과를 비교한 것으로 본 논문에서 제시한 단계적 스케일링기법의 경우가 가장 관측자료와 유사한 것으로 나타났다. 또한, 대구관측소와 같이 RCM 원자료의 모의 결과가 좋은 지점의 경우 선형보정기법과 분위사상기법의 경우 관측자료 보다 크게 모의하는 경우가 발생하는 것을 보

였다. 이는 선형보정기법의 경우 월단위의 보정계수를 이용하기 때문에 각 월별로 발생하는 강우 크기에 따른 보정은 고려가 안 되며, 이는 RCM에서 발생하는 이상치 보정에 한계가 있을 수 있다. 또한 분위사상법의 경우는 관측자료와 모의결과의 PDF 추정하는 과정에서 간혹 발생하는 이상치를 고려하지 못하는 것으로 분석되었다.

Table 2는 61개 관측소를 대상으로 연최대치계열 강수량의 평균, 최대, 최소값을 나타내었으며, 또한 각 관측소

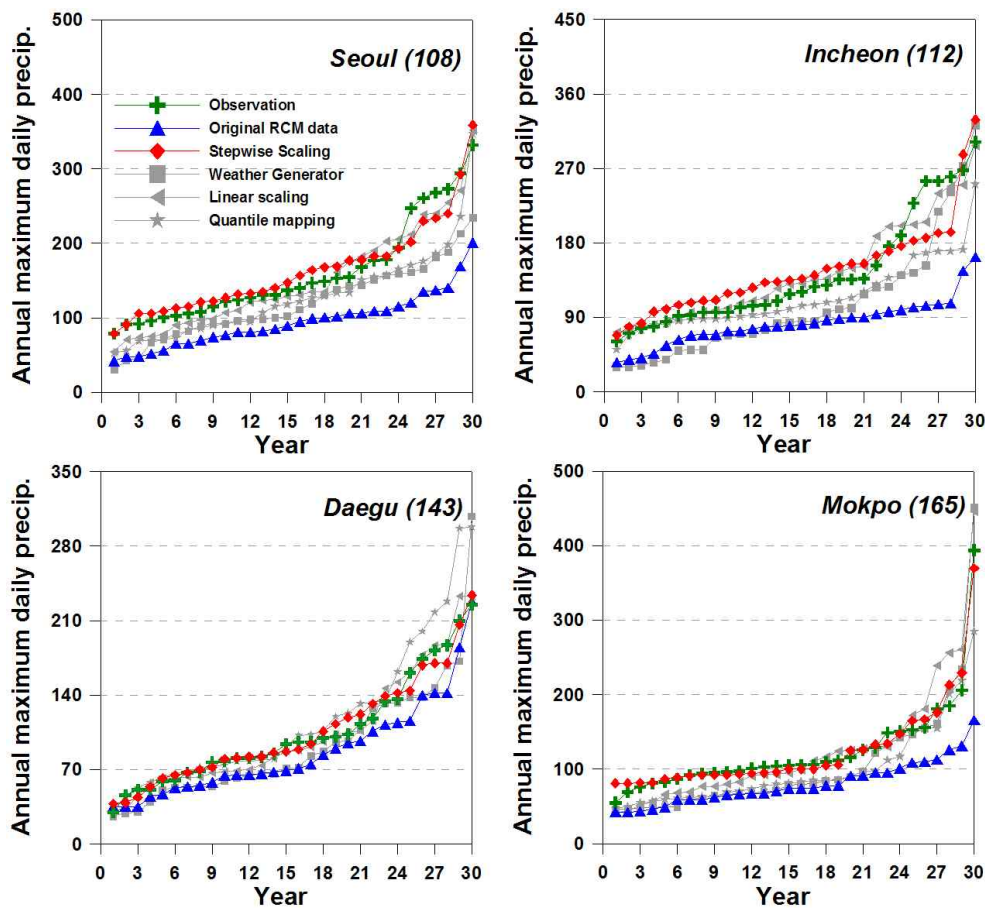


Fig. 6. Comparison of 1-Day Maximum Precipitation each Method (4 stations)

Table 2. Comparison of the 1-Day Maximum Rainfall Between Observation and Simulation (61 stations)

	Obs.	RCM	LS	WG	QM	SWS
Average Value	140.8	95.2	129.9	121.3	127.1	143.3
Maximum Value	195.4	115.9	182.8	256.1	165.7	195.3
Minimum Value	99.1	76.1	96.4	80.6	102.4	100.9
Average of Bias	-	45.6	10.8	19.4	13.7	-2.5
Maximum of Bias	-	102.6	40.7	42.3	73.2	1.4
Minimum of Bias	-	2.7	-30.8	-80.0	-38.0	-13.4

Obs.: Observation, RCM: Original RCM Simulation Data, LS: Linear Scaling Method, WG: Weather Generator Method, QM: Quantile Mapping Method, SWS: Step-Wise Scaling Method.

별로 모의치와 관측치의 편의(관측치-모의치)를 산정하여 편이의 평균, 최대, 최소값을 나타내었다. 편이를 산정한 결과, 기존 RCM은 평균적으로 +45mm/day 정도가 나타났다. 그 중 최대 차이가 발생한 지점은 남해관측소로 +102.6 mm의 편이가 나타나며, 그 외에도 거제, 완도, 고흥, 강화 등이 90mm 이상의 편이가 발생한 것으로 나타났다. 이처럼 남해안 근처의 지점들에서 큰 편이가 발생하는 이유로는 태풍 모의 한계에서 오는 것으로 판단된다. 기존 3가지 통계적 기법을 이용하여 시나리오의 경우 +10~20mm의 편이가 발생하였으며, 단계적 스케일링 기법의 경우 -2.5 mm 정도의 편이가 발생하여 적용성이 우수한 것으로 판단된다.

#### 4.2 일단위 강수발생 패턴분석

강수량의 천이확률은 강수 발생 패턴을 알아볼 수 있는 중요한 지표이다. Fig. 7의 x축은 무강수일 후 강수일이 발생할 확률(wet/dry)을, y축은 강수일 후 강수일이 발생할 확률(wet/wet)을 나타낸 것으로, 계절별로 나누어 평가하였다. RCM 원자료는 삼각형(▲)으로, 관측자료는 더하기(+), 단계적 스케일링기법으로 보정된 자료는 마름모(◆)로 표현하였다. 우선 국내 기상관측소의 천이확률을 산정해 본 결과, 여름철의 경우 관측소에 따라 큰 차이가 나지 않는 반면(평균 wet/wet 60%, 평균 wet/dry 30%)

겨울철의 경우 wet/wet이 관측소에 따라 작게는 23%에서 크게는 58%까지 차이가 나타났다. 하지만 RCM 모의 결과의 경우 여름철 wet/wet이 87%, wet/dry의 경우 53%로 과다 산정되는 것을 볼 수 있으며, 관측소간의 차이도 많이 나타난다. 반면, 단계적 스케일링기법의 경우 관측소와 비교했을 때 봄철과 여름철에 wet/wet이 약 6% 정도 높게 산정되고, wet/dry 약 4% 정도 작게 산정되는 결과가 나타났으며, 가을철과 겨울철은 1% 이내의 차이를 보였다. 또한 앞서 설명한 관측자료의 계절별 특성을 잘 반영하고 있어, 타 기법들에 비해 높은 모의능력을 보였다.

Table 3은 강수량 크기에 따른 연평균 발생일수를 평가한 것으로 PNI50은 1일 강수량이 150mm 이상이 되는 연평균 날의 수를 의미한다. 관측자료의 61개 지점 평균 150mm 이상은 약 0.3회, 80mm 이상은 약 1.8회, 50mm 이상은 약 4회, 10mm 이상은 약 18회 정도 나타난다. RCM 원자료의 경우 80mm 이상의 극치 호우는 거의 모의하지 못하고 있으며, 0.1mm 이상의 호우의 경우 2배 이상 모의하고 있는 것으로 나타났다. 기존 기법들에서도 선형보정 기법의 경우는 극치호우사상의 평가에는 적절히 모의하나 강수일수를 보정해주지 못하는 한계가 있다. 분위사상법의 경우 작은 강우에 대한 모의 결과가 단계적 스케일링 기법과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있으나, 50mm 이상의 호우일수 모의에는 다소 적게 모의되는 경향이 나

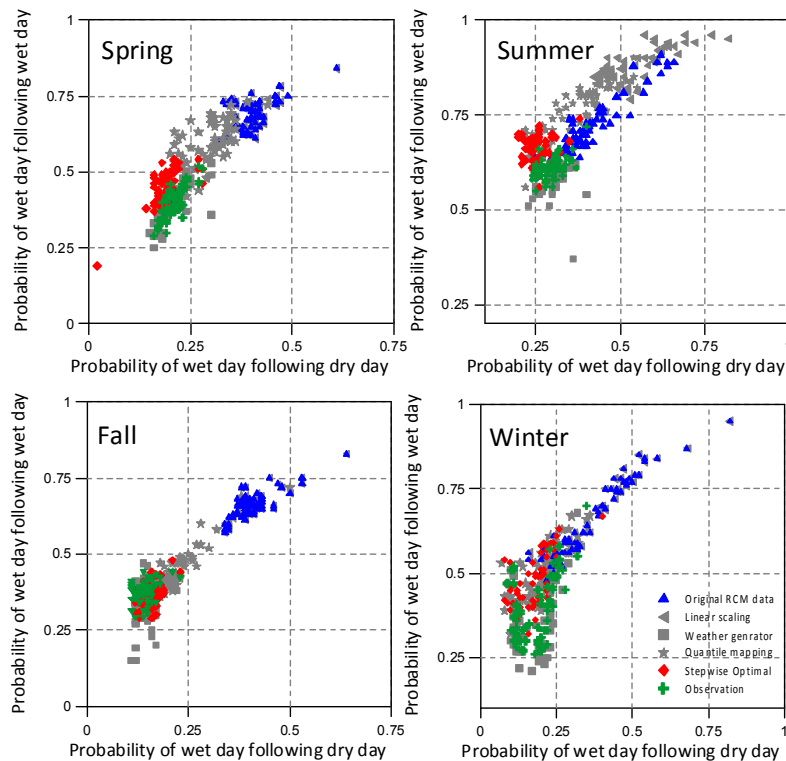


Fig. 7. Comparison of Probability of Wet-Dry Day on Each Method (61 Stations)



타났다. 일기상발생기의 경우도 분위사상법과 같이 강수량이 적은 경우에 정확성이 높았으나, 큰 호우의 경우 과소추정되는 경향이 나타났다.

### 4.3 연 및 월평균 강수량 평가

수자원의 관리 및 댐 운영을 위해서는 월, 계절 및 연평균 유출량을 정확히 모의해야 한다. 특히 우리나라와 같이 월별 유출량 패턴이 뚜렷한 지역은 수자원 관리 및 계획에 있어 월별 유출량 패턴의 변화를 정확히 평가해야 할 필요가 있다. Fig. 8은 61개 지점(x축)의 연평균 강수량의 편의(관측치-모의치)를 산정하여 나타낸 것으로 y축이 0에 가까울수록 정확히 모의하는 것을 의미한다. RCM 원자료의 편의를 산정해 본 결과 평균적으로 +180mm 정도로 나타났으며, 편의가 가장 큰 관측소는 대관령, 거제, 남해, 강화 기상관측소로 나타났다. 특히 대관령의 경우 편의가 760mm 정도로 나타났는데, 대관령은 타 관측소에 비해 고도(해발고도 883m)가 높고 지형이 복잡하기 때문

에 이러한 지형적 특성이 RCM에서 반영이 안되는 것으로 판단된다. 각 통계적 기법을 이용하여 재생산된 모의시나리오를 이용하여 분석한 결과 모든 기법들이 RCM 원자료에 비해 편의가 많이 줄어드는 것으로 나타나지만, 단계적 스케일링기법의 경우 -18mm 정도로 나타나 그 적용성이 우수하다고 할 수 있다.

Fig. 9와 Table 4는 월별 강수량 보정결과를 나타낸 것으로, 기존 RCM 원자료에서는 3, 4월 강수량이 과대 모의되고, 7월, 8월, 9월 과소모의 되는 결과가 도출되었다. 이러한 기후시나리오가 보정없이 수문모형의 입력자료로 활용되게 되면, 생산되는 수문자료의 경우 관측자료를 통해 추정된 매개변수의 영향으로 국내 유역특성이 전혀 반영되지 못하는 한계점이 나타날 수 있다. 따라서 통계적 기법을 이용하여 월별 강수량의 패턴 보정이 필요하다. Fig. 9와 같이 통계적 기법으로 보정된 기후시나리오의 경우 관측자료의 월별 패턴을 적절하게 모의하는 것으로 나타났다. 하지만, 여기서 중요한 점은 앞서 평가한 극치

Table 3. Comparison of the Number of Days according to Rainfall Amount (61 Stations)

	OBS	RCM	LS	WG	QM	SWS
PN150	0.30	0.08	0.27	0.19	0.21	0.33
PN80	1.75	0.68	1.45	0.85	1.33	2.14
PN50	4.32	2.18	3.66	2.02	3.45	4.11
PN30	8.28	4.79	7.23	4.64	7.05	6.99
PN10	17.17	14.21	17.86	26.13	17.85	17.20
PN01	31.95	39.15	42.92	35.89	36.42	36.57
PN00	38.62	63.21	65.86	37.9	38.13	38.15

PN150: The number of days that 1-day precipitation is larger than 150 mm, PN80: The number of days that 1-day precipitation is larger than 80 mm, PN50: The number of days that 1-day precipitation is larger than 50 mm, PN50: The number of days that 1-day precipitation is larger than 30 mm, PN10: The number of days that 1-day precipitation is larger than 10 mm, PN01: The number of days that 1-day precipitation is larger than 1 mm, PN00: The number of days that 1-day precipitation is larger than 0.1 mm.

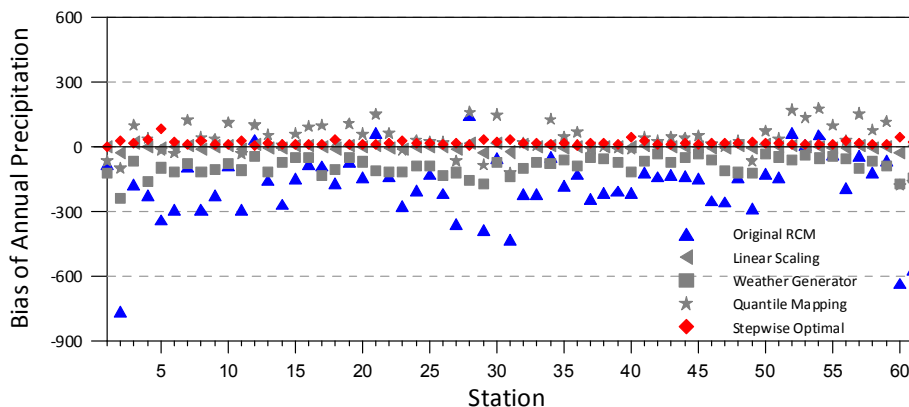


Fig. 8. Bias of Annual Precipitation on 61 Stations

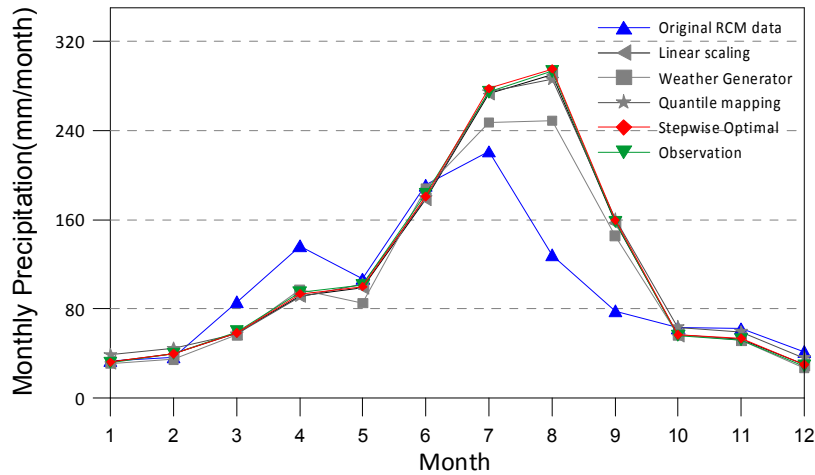


Fig. 9. Comparison of Averaged Monthly Precipitation on Each Method (61 Stations)

Table 4. Averaged Monthly and Annual Precipitation on Each Method (61 Stations)

	OBS	RCM	LS	WG	QM	SWS
Jan.	31.8	33.7	32.2	31.1	39.0	32.3
Feb.	40.1	36.5	39.7	34.7	44.7	39.9
Mar.	59.7	86.3	58.2	56.4	57.8	58.6
Apr.	94.7	136.6	92.0	97.6	91.2	93.6
May	101.5	106.9	99.0	85.2	102.4	100.1
Jun.	183.0	191.0	178.2	187.7	179.5	180.9
Jul.	274.2	221.2	272.8	246.9	274.4	277.6
Aug.	292.8	128.5	289.8	248.6	286.0	295.1
Sep.	158.3	78.2	156.9	145.3	160.1	159.3
Oct.	56.1	63.0	56.6	56.7	63.8	57.0
Nov.	52.4	62.8	53.1	51.8	59.6	53.6
Dec.	29.0	42.0	30.0	26.9	36.3	30.2
Ann.	1,373.6	1,186.5	1,358.7	1,268.8	1,394.7	1,378.0

강우량과 강수발생패턴에 비해 월 이상의 기간평가에 있어서는 통계적 기법간의 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타나 월 이상의 기간평가에서는 어떤 통계적 기법을 이용하는 지에 따른 영향은 적다고 할 수 있다. 하지만, 일단위 이하로 모의하는 수문모형의 경우 강수량과는 달리 강수량의 패턴에 따른 수문학적 응답이 다르기 때문에, 월별 수문량에 있어서 차이가 적게 나타나지 않을 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원 분야의 영향평

가를 위한 RCM과 단계적 스케일링기법을 연계한 혼합상세화기법을 제안하고, 그 적용성을 평가하고자 하였다. 이 기법과 함께 최근에 가장 많이 적용되고 있는 선형보정기법, 분위사상법, 일기상발생기 방법에 대한 적용성 평가를 기상관측소 61개 지점을 대상으로 수행하였다. 평가는 극치강우량, 강수발생패턴, 월·연평균 강수량 평가를 수행하였으며, 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 극치강우량을 평가한 결과, RCM은 평균적으로 +45 mm/day 정도가 나타났으며, 최대 차이가 발생한 지역은 남해관측소로 +102.6 mm의 편이가 나타났다. 기존 3가지 통계적 기법을 이용한 시나리오의 경우 +10~20 mm의 편이가 발생하였으며, 단계적

스케일링 기법의 경우 -2.5 mm 정도의 편이가 발생하여 적용성이 우수한 것으로 나타났다.

2) 강수발생패턴은 강수발생의 천이확률(무강수일 후 강수일이 발생할 확률, 강수일수 후 강수일이 발생할 확률)을 평가하였다. 평가 결과 봄철과 여름철에 wet/wet이 관측자료에 약 6%정도 높게 산정되고, wet/dry 약 4% 정도 작게 산정되는 결과가 나타났으며, 가을철과 겨울철은 1% 이내의 차이를 보였다. 또한 관측치의 계절별 특성을 잘 모의하는 것으로 나타나 적용성이 우수하였다.

3) 연·월 평균강수량을 평가한 결과, RCM 원자료에서 발생했던 연평균 +180 mm 정도의 편이가 단계적 스케일링기법의 경우 -18 mm 정도로 나타나 편이가 90% 정도 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 월별 패턴의 경우도 과대추정된 봄철 강수량과 과소추정된 여름철 강수량 보정에 있어 보정결과가 우수한 것으로 나타났다.

4) 극치강우량과 강수발생패턴의 경우 통계적 기법에 따라 결과에 많은 차이가 나타났으나, 월 이상의 기간 평가에 있어서는 타 통계적 기법과의 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타나 월 이상의 기간평가에서는 어떤 통계적 기법을 이용하는 지에 따른 큰 영향은 없다고 할 수 있다. 하지만, 일단위 이하로 모의하는 수문모형의 경우 강수량과는 달리 강수량의 패턴에 따른 수문학적 응답이 다르게 나타날 수 있기 때문에, 월별 수문량에 있어서 차이가 발생할 수 있어 이에 대한 평가가 필요할 것으로 판단된다.

기후변화에 따른 다양한 수자원 분야의 영향평가를 위해서는 이를 평가할 수 있는 합당한 시나리오 생산이 필요하다. 기존 AR4 기반의 기후시나리오의 경우 IPCC DDC에서 200~400 km 격자의 월단위 자료만을 제공한 반면, 최근에는 기후모형과 컴퓨터 하드웨어의 발전으로 인하여 많은 고해상도 기후시나리오가 생산되고 있다. 즉, 이는 기존에는 물리적으로 평가하지 못했던 일단위 강수량 및 강수발생패턴 변화 등에 대해 평가가 가능해지고 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서 제안한 단계적 스케일링기법의 경우, 기존에는 평가하지 않았거나 혹은 못했던 부분들을 평가할 수 있는 기법으로 수자원(홍수, 가뭄 등) 영향평가 시 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 또한 RCM 자료 생산이 증대될 기후변화 연구에 있어 본 논문에서 개발한 혼합상세화기법의 활용성이 증대될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원으로 수행한 ‘국가 가뭄재해 상황관리 정보시스템 구축’ [NEMA-자연-2011-40]과 2011년도 교육과학기술부의 지원으로 한국연구재단(NO. 2011-0030839)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lee, B.J. (2007). "Outlook on Variation of Water Resources in Korea under SRES A2 Scenario." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 12, pp. 921-930.
- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). "Future Korean Water Resources Projection Considering Uncertainty of GCMs and Hydrological Models." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). "Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2644-2656.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lettenmaier, D.P. (2011). "Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju basin, Korea." *Journal of Hydrology*, Vol. 401, pp. 90-105.
- Boe, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E. (2007). "Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies." *International Journal of Climatology*, Vol. 27, No. 12, pp. 1643-1655.
- Cameron, D. (2006). "An application of the UKCIP02 climate change scenarios to flood estimation by continuous simulation for a gauged catchment in the northeast of Scotland, UK." *Journal of Hydrology*, Vol. 328, pp. 212-226.
- Fowler, H.J., and Kilsby, C.G. (2007). "Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England" *Climatic Change*, Vol. 80, pp. 337-367.
- Hanel, M., and Buishand, T.A. (2011). "Analysis of precipitation extremes in an ensemble of transient

- regional climate model simulations for the Rhine basin.” *Climate Dynamics*, Vol. 36, pp. 1135–1153.
- Jung, I.W., Bae, D.H., and Lee, B.J. (2013). “Possible change in Korean streamflow seasonality multi-model climate projections.” *Hydrological Processes*, Vol. 27, No. 7, pp. 1033–1045.
- Kim, S.J., Kim, B.S., Jun, H.D., and Kim, H.S. (2010). “The Evaluation of Climate Change Impacts on the Water Scarcity of the Han River Basin in South Korea Using High Resolution RCM Data.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 3, pp. 295–308.
- Kwon, H.H., Sivakumar, B., and Moon, Y.I. (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.
- Kwon, H.H., Kim, B.S., and Kim, B.K. (2008). “Analysis of Precipitation Characteristics of Regional Climate Model for Climate Change Impacts on Water Resources.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 5B, pp. 525–533.
- Kwon, H.H., and Kim, B.S. (2009). “Development of statistical downscaling model using nonstationary Markov Chain.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 3, pp. 213–225.
- Lee, M.H., Jung, I.W., and Bae, D.H. (2011). “Korean Flood Vulnerability Assessment on Climate Change.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 8, pp. 653–666.
- Lee, J.H., Seo, J.W., and Kim, C.J. (2012). “Analysis on Trends, Periodicities and Frequencies of Korean Drought Using Drought Indices.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 1, pp. 75–89.
- Lee, M.H., Shin, S.H., and Bae, D.H. (2012). “The Application Assessment of Future Design Rainfall Estimation Method Using Scale Properties.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 3, pp. 253–262.
- Lee, S., and Bae, D.H. (2012). “Local effects of climate change over South Korea with a high-resolution climate scenario.” *Climate Research*, Vol. 54, pp. 85–93.
- Lenderink, G., Buishand, A., and Van Deursen, W. (2007). “Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 1145–1159.
- Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. (2008). “Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed.” *Journal of Hydrology*, Vol. 368, pp. 70–83.
- NIMR (2011). Reports of climate change scenario in order to respond to the IPCC AR5, National Institute of Meteorological Research.
- Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.H. (2011). “Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 12, pp. 929–940.
- Son, K.H., Lee, B.J., and Bae, D.H. (2010). “Assessment on Flood Characteristics Changes Using Multi-GCMs Climate Scenario.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 9, pp. 789–799.
- Sunyer, M.A., Madsen, H., and Ang, P.H. (2012). “A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change.” *Atmospheric Research*, Vol. 103, pp. 119–128.
- Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehvilainen, B., and Kayhko, J. (2010). “National scale assessment of climate change impacts on flooding in finland.” *Journal of Hydrology*, Vol. 391, pp. 333–350.

논문번호: 12-124	접수: 2012.12.07
수정일자: 2013.03.07/03.15	심사완료: 2013.03.15