

비정상성 분위사상법을 이용한 GCM 장기예측 편차보정 Bias Correction for GCM Long-term Prediction using Nonstationary Quantile Mapping

문수진* / 김정중** / 강부식***

Moon, Soojin / Kim, Jungjoong / Kang, Boosik

Abstract

The quantile mapping is utilized to reproduce reliable GCM (Global Climate Model) data by correct systematic biases included in the original data set. This scheme, in general, projects the Cumulative Distribution Function (CDF) of the underlying data set into the target CDF assuming that parameters of target distribution function is stationary. Therefore, the application of stationary quantile mapping for nonstationary long-term time series data of future precipitation scenario computed by GCM can show biased projection. In this research the Nonstationary Quantile Mapping (NSQM) scheme was suggested for bias correction of nonstationary long-term time series data. The proposed scheme uses the statistical parameters with nonstationary long-term trends. The Gamma distribution was assumed for the object and target probability distribution. As the climate change scenario, the 20C3M (baseline scenario) and SRES A2 scenario (projection scenario) of CGCM3.1/T63 model from CCCma (Canadian Centre for Climate modeling and analysis) were utilized. The precipitation data were collected from 10 rain gauge stations in the Han-river basin. In order to consider seasonal characteristics, the study was performed separately for the flood (June~October) and nonflood (November~May) seasons. The periods for baseline and projection scenario were set as 1973~2000 and 2011~2100, respectively. This study evaluated the performance of NSQM by experimenting various ways of setting parameters of target distribution. The projection scenarios were shown for 3 different periods of FF scenario (Foreseeable Future Scenario, 2011~2040 yr), MF scenario (Mid-term Future Scenario, 2041~2070 yr), LF scenario (Long-term Future Scenario, 2071~2100 yr). The trend test for the annual precipitation projection using NSQM shows 330.1 mm (25.2%), 564.5 mm (43.1%), and 634.3 mm (48.5%) increase for FF, MF, and LF scenarios, respectively. The application of stationary scheme shows overestimated projection for FF scenario and underestimated projection for LF scenario. This problem could be improved by applying nonstationary quantile mapping.

Keywords : climate change, GCM, nonstationary quantile mapping

요 지

분위사상법(QM, Quantile Mapping)은 GCM(Global Climate Model) 자료의 계통적 오차를 보정하여 보다 신뢰성 높은 자료로 재생성하기 위해 활용되고 있다. 이 기법은 사상(mapping)시키려는 대상(object) 자료의 통계분포모수가 정상적(stationarity)이라는 가정 하에 대상 자료의 누적확률분포(CDF, Cumulative Distribution Function)를 목표(target) CDF에

* 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사수료 (e-mail: moonsujin@dankook.ac.kr)

Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin 448-701, Korea

** (주) 이산 수공부 사원 (e-mail: 2587@isg.kr)

Engineer, Dept. of Hydro-power, Isan Corporation, 1608-4 Kwanyangdong, Dongaangu, Anyangsi, Gyeonggi-do 431-060, Korea

*** 교신저자, 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수 (e-mail: bskang@dankook.ac.kr, Tel: 82-31-8005-3471)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si 448-701, Korea

통계적으로 투영시키는 것이 일반적이다. 따라서 GCM에서 제공되는 미래 기후시나리오의 강우시계열과 같이 비정상성(non-stationarity)을 갖는 장기 시계열자료에 대한 적용에는 문제점을 보이고 있다. 본 연구에서는 비정상성을 갖는 장기시계열자료의 오차보정을 위해 통계분포모수에 경향성을 부여하는 비정상성 분위사상법(NSQM, Nonstationary Quantile Mapping)을 적용하였다. NSQM 적용을 위한 확률분포로 수문분야에서 광범위하게 쓰이고 있는 Gamma 분포를 선정하였으며, 대상 시나리오는 CCCma(Canadian Centre for Climate modeling and analysis)에서 제공하고 있는 CGCM3.1/T63모형의 20C3M(reference scenario)과 SRES A2 시나리오(projection scenario)를 활용하였다. 한강유역 내 관측기간이 충분한 10개의 지상관측소로부터 강우량을 수집하였다. 또한 6월과 10월 사이에 연강수량의 65% 이상이 집중되는 한반도의 계절성을 반영하기 위해 홍수기(6~10월)와 비홍수기(11~5월)를 구분하였고, 기준기간(Baseline)은 1973~2000년, 전망기간(Projection)은 2011~2100년으로 구분하였다. 다양한 목표분포의 설정을 통하여 NSQM의 적용성을 평가하고자 하였으며, 전망기간은 FF시나리오(Foreseeable Future Scenario, 2011~2040년), MF시나리오(Mid-term Future Scenario, 2041~2070년), LF시나리오(Long-term Future Scenario, 2071~2100년)의 3개의 구간으로 설정하여 기준기간과 전망기간의 연평균강우량에 대한 경향성분석을 실시하였다. 그 결과 NSQM이 FF시나리오에서 330.1 mm (25.2%), MF시나리오에서 564.5 mm (43.1%), LF시나리오에서 634.3 mm (48.5%)로 증가하는 전망결과를 나타내고 있었다. 정상성기법을 적용한 결과, 전망기간 중 전체적으로는 동일한 평균값을 갖는 목표통계모수를 사용한다고 하여도, 전망전반부에서 과다하고, 후반부에서 오히려 과소한 전망을 보여주고 있었다. 이러한 결과는 비정상성기법을 사용함으로써 상당부분 개선될 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 기후변화, GCM, 비정상성 분위사상법

1. 서 론

GCM(Global Climate Model; 전지구기후모형)은 자연 대기중의 온실가스를 이산화탄소에 대한 등가치로 환산하여 2001년부터 2100년까지 100년간 온실가스 증가추세와 환경정책의 추진에 따른 감축량을 고려하고 배출시나리오를 구분하여 기후변화를 전망하고 있다. 이는 기후변화의 영향에 대한 대응책을 마련할 수 있게 하는 기반자료로 활용되고 있다. 하지만 GCM은 최소 100 km 이상의 공간해상도를 갖고 있기 때문에 수자원분야에서 주로 사용되는 유역규모에서의 수문해석에 직접 적용하기는 어렵다. 따라서 GCM의 공간해상도를 높이기 위해 상세화(downscaling) 과정을 거쳐 이용되고 있지만, 상세화과정을 거치더라도 지역적 편차가 남아있는 경우가 많다(Kang et al., 2006). 이러한 지역 편차를 보정하기 위해 분위사상법(QM: Quantile Mapping)을 통하여 두 자료군사이의 통계적 투영을 수행한다. Kang et al. (2006)은 유출량 모의 이전에 GCM강수량 자료에 대한 QM 적용을 통해 신뢰성이 있는 입력 자료로 재구성하고 유출량을 계산하여 관측값과 비슷한 결과 값을 나타냄바 있으며, Kang and Moon (2011)은 MME(Multi-Model ensemble) 계절 모의자료에 대하여 가뭄관리 및 전망에 활용하고자 강우자료에 대해 QM을 적용하여 기상 변수의 오차를 보정하고자 하였다. 또한, Kim et al. (2011)

은 실측값보다 다소 과소 추정되어있는 GCM에 대하여 QM을 적용하여 약 2.3~3.0배의 상향 보정된 강우량을 제시한 바 있다. 국외의 경우 Boe et al. (2007)은 기후변화의 수문학적 영향 연구를 위한 QM 기반의 역학적상세화 기법을 제시하고 있으며, Haibin et al. (2010)은 AR4모델의 과거기간과 전망기간에 대한 QM 적용을 위해 과거기간의 관측값과 기후시나리오 모델의 오차를 전망기간에 적용하는 새로운 QM을 수행하고 있다.

일반적인 QM은 과거기간에 대한 관측값과 모의값의 CDF(Cumulative Distribution Function; 누적확률분포)를 이용하는 기법으로 자료의 정상성을 가정하여 적용한다. 하지만, 시계열 자료의 통계분포모수가 비정상성을 보일 경우 전망기간의 강우량이 다소 과소 추정되어 과거기간과의 연결성이 떨어지는 오류를 범하게 된다. 이러한 QM의 한계를 보완하기 위해 본 연구에서는 비정상성을 보이는 시계열 자료의 통계분포모수에 선형회귀식을 이용하여 원시GCM의 경향성을 부여하는 비정상성 QM을 제안하고자 한다.

2. 비정상성 분위사상법 (NSQM, Nonstationary Quantile Mapping)

GCM모델예측자료는 지역적 편차를 보이기 마련이므로 이를 보정하는 과정이 필요하다. 이에 대한 기법으로

는 인공신경망, 다중선형회귀분석, 마코프 상태변수모형 등 다양한 기법이 가능한데 특정한 한 가지 기법으로 보정 효과가 미흡할 경우 분위사상법과의 조합을 통하여 보정의 효과를 극대화 할 수 있다. 본 연구에서는 기후변화 시나리오에서 제공하는 강우시계열을 기준기간(1976~2000년)과 전망기간(2011~2100년)으로 구분하여 분위사상법에 의한 지역오차보정을 수행하였다. 동시에 우리나라 강우의 계절특성을 고려하기 위하여 홍수기와 비홍수기를 구분하여 연구를 수행하였다. 기준기간 동안은 실제 관측값을 사용하여 통계분포모수를 추정하였으며, 전망기간의 경우 Mann-Kendall Test를 통해 GCM 원시모의자료의 경향성을 검정한 후 비정상성기법의 적용여부를 판단하였다. 최종적으로 두 기간의 선형회귀식을 산정하여 장기예측 편차보정을 실시하고 원시 GCM이 가지는 경향성을 반영할 수 있는 비정상성 분위사상법(NSQM, Non-Stationary Quantile Mapping)을 제안하고자 한다. 다음은 본 연구의 흐름도이다(Fig. 1).

분위사상법은 모의자료군의 계통적 오차를 제거하기 위하여 경험적 확률분포 혹은 모수적 확률분포를 사용하여 모의자료군의 확률분포를 관측자료군의 확률분포에 사상(mapping)시키는 방법이다(Panofsky and Brier, 1968). 분위사상법을 통해 모의자료군의 특정값은, 그 자료의 누적확률값과 동일한 관측자료군의 누적확률값에 대응하는 자료값으로 변환되며, 결과적으로 변환된 자료군의 확률분포는 관측확률분포와 동일한 확률분포를 지니게 된다 (Eq. 1).

$$Z_j = F_{oj}^{-1}(F_{sj}(\hat{Y}_j)) \quad (1)$$

여기서, \hat{Y}_j 는 보정전의 모의값, Z_j 는 보정후의 모의값, F_{sj} 는 원 모의값의 누적확률분포(모의값 CDF), F_{oj} 는 사상의 목표가 되는 관측값의 누적확률분포(목표 CDF).

일반적인 분위사상법은 사상의 대상이 되는 모의자료군과 관측자료군의 통계분포모수가 정상성을 갖는다는 가정 하에 적용된다. 만일 정상성을 가정한 과거기간에 대하여 GCM 모의값의 계통오차를 보정하려는 것이 목적이라면 QM이 적절한 기법이 될 수 있지만, 모의자료군이 GCM의 미래 기후시나리오와 같이 일정한 추세를 갖는 장기 시계열자료에 정상성 분위사상법을 적용할 경우 사상된 자료의 확률분포가 왜곡되어 당초의 의도와 달리 구간에 따라 사상이 과소 혹은 과대 추정될 수 있다(Fig. 3).

이를 개선하기 위하여 비정상성 분위사상법(NSQM; Non-stationary Quantile Mapping)은 미래 기후변화 시나리오와 같은 장기사계열 자료의 연도별 통계분포모수에 추세를 반영하는 기법이다. 기준기간은 실제 관측자료, 전망기간은 원시 GCM자료로 하여 연도별 계절(홍수기, 비홍수기) 강우량을 계산하고 통계분포모수를 산정한다. 강우량의 통계분포모수는 다음과 같이 $\mu_{t,B}$, $\mu_{t,P}$ 와 $\sigma_{t,B}$, $\sigma_{t,P}$ 로 나타낸다. 여기서, t는 연도를 의미하고, 첨자 B와 P는 기준기간(Baseline)과 전망기간(Projection)을 나타낸다.

기준기간과 전망기간에 대하여 통계분포모수 중 홍수기의 평균에 대한 단순회귀식은 Eq. 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{t,B} &= a_B \cdot t + b_B \\ \mu_{t,P} &= a_P \cdot t + b_P \end{aligned} \quad (2)$$

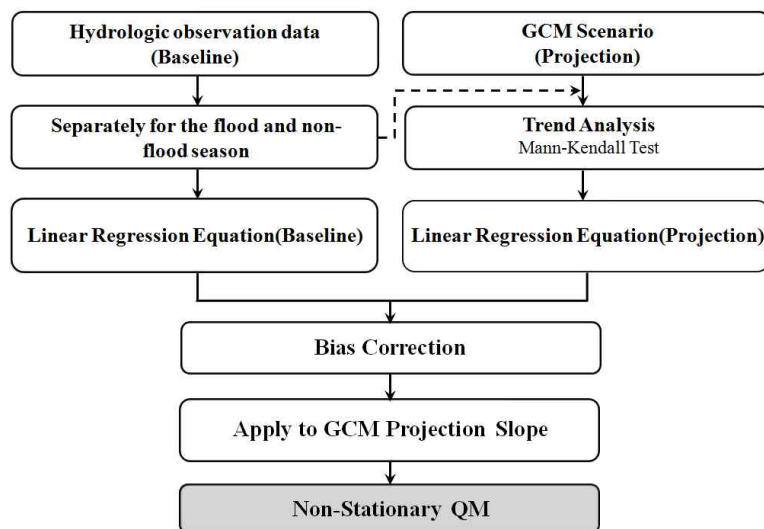


Fig. 1. Process for implementing Nonstationary Quantile Mapping

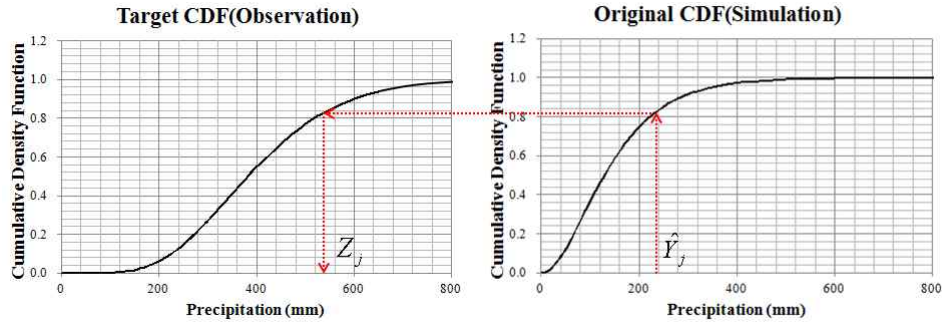


Fig. 2. Schematic diagram for Quantile Mapping

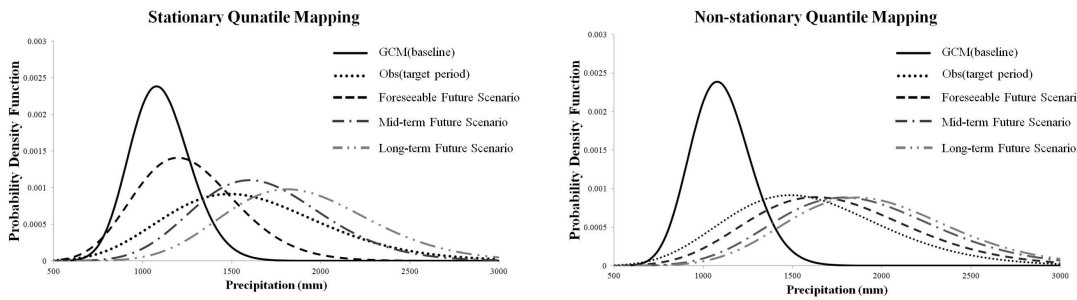


Fig. 3. Statistical Distribution Obtained from Stationary and Nonstationary Quantile Mapping

전망시작년도 t_0 에서는 $\mu_{t_0,B} = \mu_{t_0,P}$ 이므로,

$$b_P = (a_B - a_P)t_0 + b_B$$

$$\text{즉, } \mu_{t,P} = a_P \cdot t + (a_B - a_P)t_0 + b_B, \quad t > t_0 \quad (3)$$

마찬가지 요령으로 홍수기의 표준편차에 대해서도 다음과 같이 선형회귀식을 산정할 수 있다.

$$\sigma_{t,P} = c_P \cdot t + (c_B - c_P)t_0 + c_B, \quad t > t_0 \quad (4)$$

이렇게 산정된 통계분포모수의 선형회귀식은 비홍수기에도 마찬가지로 동일한 방식으로 산정한다.

강우량에 대한 적정 확률 분포형을 선정하기 위한 많은 연구들이 수행되었으며, 특히, Kwon and Kang (2008)은 강수량자료에 대하여 Gamma 분포와 혼합분포를 통한 분위 사상법 적용 결과 Gamma 분포가 오차보정효과가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인한 바 있고, Lee and Kang (2008)도 Gamma 분포를 이용한 분위사상법을 적용하여 오차보정을 실시한 바 있다. 또한, Gamma 분포 특성상 변수 x_t 가 양의 값을 갖기 때문에 mapping시 음의 값을 갖지 않는다는 장점을 가지고 있으며 축척변수 β_t 가 정수인 경우 완전 Gamma 함수가 된다. 본 연구에서는 NSQM 적용을 위한 확률 분포형으로 Gamma분포를 선정하였다.

Gamma 분포의 매개변수는 매개변수의 추정이 간편하

고 실무에서 많이 쓰이는 모멘트법을 선정하였으며 모멘트법은 관측자료의 모멘트와 모집단의 모멘트가 같다고 가정하여 모집단의 모멘트로부터 과거자료의 매개변수를 추정하는 방법이다. 다음은 Gamma 분포의 확률밀도함수와 매개변수에 대한 식을 나타낸다(Eqs. 5~7).

$$f(x_t; \alpha_t, \beta_t) = \frac{x_t^{\alpha_t - 1} e^{-x_t/\beta_t}}{\beta_t^{\alpha_t} \Gamma(\alpha_t)}, \quad x_t \geq 0, \alpha_t > 0, \beta_t > 0 \quad (5)$$

$$\alpha_t = \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)^2 \quad (6)$$

$$\beta_t = \frac{\mu_t}{\alpha_t} = \frac{\sigma_t^2}{\mu_t} \quad (7)$$

여기서, 매개변수 α_t 는 모양변수(Shape parameter), β_t 는 축척변수(scale parameter)이다.

3. 대상구역 및 기후변화시나리오

3.1 대상구역

본 연구의 대상구역인 한강유역은 한반도 중부지역에 위치해 있으며, 한강유역의 총 유역면적이 3,292 km², 주하천길이가 471.2km, 연평균 유출량은 1.8 × 10⁹ m³인 국내 최대규모 유역이다. 연평균강우량은 1,390 mm로 6월

과 10월 사이에 총 강우의 65%가 발생하는 특징을 가지고 있다. 유역내의 기상청 강우관측소는 총 14개소가 있으며, 이중 관측기간이 충분한 10개소를 대상으로 1976년부터 2000년까지의 일단위의 강우 자료를 수집하였다 (Table 1). 면적 평균강우량은 티센법을 사용하여 산정하였으며 이를 기준기간(1976~2000년)의 QM 적용을 위한 자료로 활용하였다. 선정된 지상관측소의 평면도상 위치와 면적강우산정을 위한 관측소별 티센계수는 Fig. 4와 Table 2에 제시되어 있다.

3.2 기후변화시나리오

본 연구에서 선정한 대상 기후변화 시나리오는 CCCma (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis)에서 제공되는 CGCM3.1모형의 결과값으로서, 이 모형은 현재 연직해상도에 따라 CGCM3.1/T47모형과 CGCM3.1/T63의 결과값이 제공되고 있다. CGCM3.1/T47 모형은 96

× 48 가우시안 그리드(경도 3.75° × 위도 3.75°)에 대한 47개의 연직층으로 구성되어 있으며, CGCM3.1/T63 모형은 128 × 64 가우시안 그리드(경도 2.81° × 위도 2.81°)에 대한 63개 연직층으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 수평 해상도에서 유리한 CGCM3.1/T63모형의 결과값을 사용하였다.

기후변화시나리오는 과거시나리오인 CGCM3.1/T63 20C3M시나리오와 이를 토대로 미래의 경제구조, 경제성장, 에너지원, 인구변화, 환경보전 등의 요인을 고려하여 대기 중 이산화탄소 배출농도를 가정하여 다양한 온실가스 배출시나리오에 의해 기후변화시나리오가 생성된다. 이 중 A2 시나리오는 CO₂농도가 2100년경 820 ppm까지 증가할 것으로 전망하고 있으며 인구 및 오염물질 배출량이 지속적으로 증가하는 시나리오이다. 본 연구에서는 고배출시나리오인 A2 시나리오의 전망기간(2011~2100년)에 대하여 NSQM기법을 수행하였다.

Table 1. Specifications of Rain Gauge Stations

Code	Rain gauge	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Observation Start date
100	Daegwanryeong	37°41′	128°43′	772.4	1971.08.01
101	Chuncheon	37°54′	127°44′	76.8	1966.01.01
108	Seoul	37°34′	126°57′	85.5	1907.10.01
114	Wanju	37°20′	127°57′	150.7	1973.01.01
127	Chungju	36°58′	127°57′	113.7	1973.01.01
202	Yangpyeong	37°29′	127°30′	47.4	1973.01.01
203	Icheon	37°16′	127°29′	90.0	1973.01.01
211	Inje	38°04′	128°10′	198.7	1973.01.01
212	Hongcheon	37°41′	127°53′	146.2	1973.01.01
221	Jecheon	37°09′	128°11′	263.1	1973.01.01

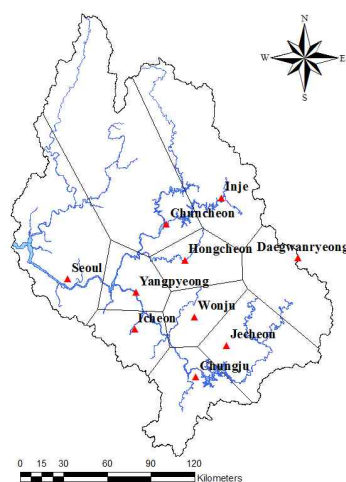


Fig. 4. Rain Gauge Distribution in the Han-river Basin

Table 2. Thiessen Coefficient for the Rain Gauge Stations

Rain gauge	Thiessen Coefficient
Daegwanryeong	0.080
Chuncheon	0.157
Seoul	0.048
Wonju	0.047
Chungju	0.047
Yangpyeong	0.153
Icheon	0.090
Inje	0.248
Hongcheon	0.078
Jecheon	0.052

4. 적용 및 고찰

4.1 경향성 검정 결과

경향성을 확인하기 위해 기준기간 및 전망기간에 대하여 홍수기와 비홍수기로 분리한 후 연 강우량에 대한 선형회귀식을 산정하여 단순회귀분석을 실시하였다. Figs. 5 and 6에서 나타난 바와 같이 기준기간에 해당하는 실제 관측자료와 GCM 시나리오에 대한 선형회귀식으로 홍수기를 살펴보면 실제 관측자료에서는 경향성을 나타내는 반면, GCM의 기준(baseline) 시나리오에서는 경향성이 거의 보이지 않고 있다. 이는 GCM자료가 태풍이나 국지성 강우 등 여름철 강우의 지역적 특성을 적절히 반영하지 못하고 있는 점과 기준기간동안의 강제력 시나리오가 전망기간과는 달리 배출시나리오를 적용하지 않는 기간이

라는 점 등이 주요 이유인 것으로 사료된다.

Fig. 7은 A2 배출시나리오에 대한 홍수기와 비홍수기의 강우전망시계열을 보여주고 있다. 회귀식은 홍수기와 비홍수기 모두 증가하는 경향을 나타내고 있으나 홍수기의 경우 기준기간에서의와 마찬가지로 강우량을 과소추정하고 있음을 알 수 있다. Mann-Kendall 검정을 통해 홍수기와 비홍수기 강우량의 경향성 분석을 실시하였다. Mann-Kendall 검정기법은 비모수적 경향성검정기법으로서 시계열자료에서 이웃한 관측자료간의 차분값을 이용한 쌍대비교를 통하여 산정된 부호값을 검정통계량으로 사용하는 기법이다(Mann, 1945; Kendall, 1975). Fig. 7의 A2 시나리오에 대한 경향성 검정을 실시한 결과, 모두 90% (유의수준 0.1) 및 95% 신뢰구간(유의수준 0.05)에 대하여 증가추세가 나타남을 확인할 수 있었다(Table 3). 이 때

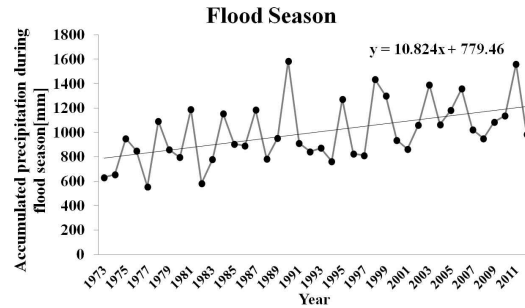
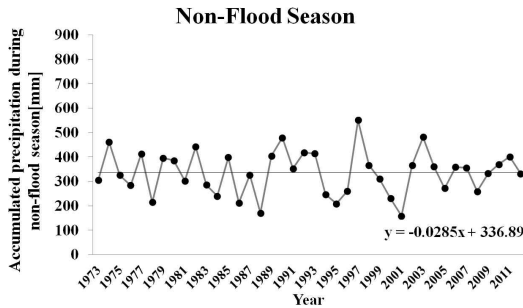


Fig. 5. Time Series of Accumulated Precipitation for Observation (1973~2010)

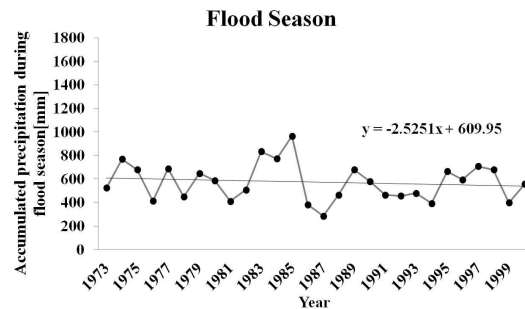
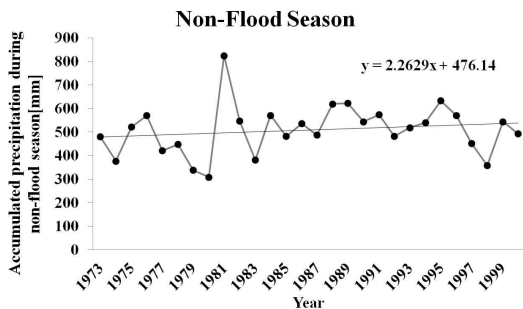


Fig. 6. Time Series of Accumulated Precipitation for GCM Baseline Scenario (1973~2000)

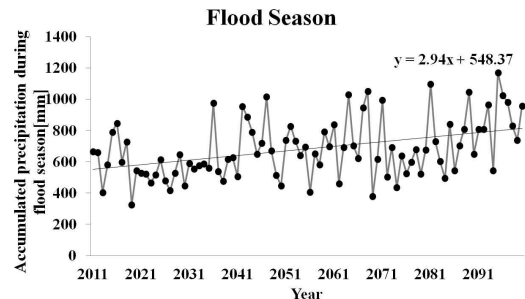
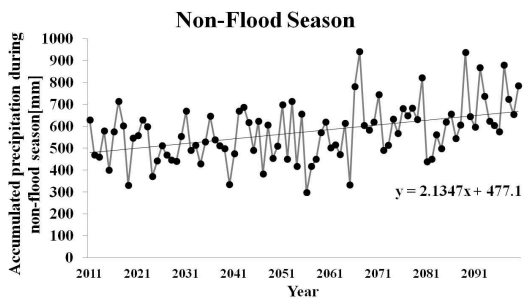


Fig. 7. Time Series of Accumulated Precipitation for Original A2 Scenario

p -value는 이들 경향성의 유의성을 판단하는 기준으로 유의수준이 10%일 경우 $p \leq 0.1$, 유의수준이 5%일 경우 $p \leq 0.05$ 이면 경향성의 존재는 통계적으로 의미있는 값으로 고려될 수 있다(Gilbert, 1987).

4.2 비정상성 분위사상법의 적용성 평가 결과

본 연구에서는 위에서 제시한 NSQM기법을 적용하기 위해 목표 누적확률분포(Target CDF)의 연도별 모수(평균, 표준편차)를 산정하였다. 산정된 통계분포모수에 대한 NSQM의 적용성을 평가하기 위하여 전망기간의 목표자료군인 통계분포모수를 다양한 Case별로 나누어 분위사상법을 수행하여 전망기간의 강수량 결과를 비교 분석하였다. 전망기간은 FF시나리오(Foreseeable Future Scenario, 2011~2040년), MF시나리오(Mid-term Future Scenario, 2041~2070년), LF시나리오(Long-term Future Scenario, 2071~2100년)의 3개의 구간으로 설정하였다. Fig. 8은 전망기간 중 Case별로 사용된 통계분포모수를 나타내고 있다.

Case 1에서는 기준기간의 통계분포모수를 그대로 전망기간에 적용하였고, Case 2에서는 기준기간에서의 회귀식으로부터 계산된 2011년의 통계분포모수를 전망기간 동안에 적용하였으며, Case 3은 본 연구에서 제시하고 있는 기법으로, GCM 원시전망으로부터 강우의 증가추세를 산정하고 이를 전망기간에 대하여 적용함으로써 비정상

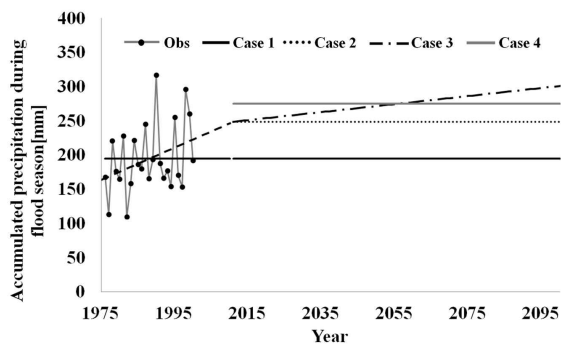


Fig. 8. Schematic Diagram for Statistical Parameters Used for Case Studies

성 통계분포모수를 사용하였고, Case 4에서는 Case 3의 통계분포모수를 평균하여 전망기간에 적용하였다.

Case 1부터 Case 4까지의 매 30년 기간별 전망결과는 Table 4에 정리되어 있고, Figs. 9 and 10에 도시되어 있다. 기준기간의 GCM 연평균 강우량은 1,077.9 mm로 실제 관측된 연평균 강우량인 1309.1 mm 보다 -17.7% 과소추정하고 있으며, 이는 GCM이 우리나라의 여름철 국지성강우와 태풍 등을 고려하지 못하여 나타난 결과로 사료된다. Case 1의 경우 연평균 강우량이 기준기간보다 FF시나리오에서 -15.7% 감소 후 MF시나리오와 LF시나리오에서 각각 3.2%, 13.7%가 증가하는 경향을 나타내고 있기 때문에 기준기간의 관측값과 전망시나리오간의 일관성이 상실된 결과를 보이고 있으며, 이는 기준기간의 통계분포모수를 정상성을 가정하여 전망기간에 그대로 적용함으로써 전망기간의 분포속성이 왜곡되었기 때문으로 판단된다. 전반적으로 통계모수 자체가 과소한 값이 사용됨으로써 전망도 과소하게 이루어진 것으로 보인다.

Case 2와 Case 3의 경우 전망기간동안 단조증가 경향을 나타내고 있으며, 기준기간의 관측값과 전망시나리오와의 일관성도 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. Case 2의 경우에는 기준기간 대비 FF시나리오에서 33.1 mm (2.5%), MF시나리오에서 331.8 mm (25.3%), LF시나리오에서 485.7 mm (37.1%)의 증가율을 보이고 있다. GCM값이 Case 1에 비하여 FF시나리오에서 과소 모의된 결과는 크게 개선된 것을 확인할 수 있으나 여전히 부족해 보인다. 이는 목표자료군의 통계분포모수에 GCM의 추세가 반영되지 않았기 때문에 전체적으로 증가율이 완만하게 산정된 것으로 판단된다. Case 3에서는 목표 통계분포모수에 GCM의 경향이 반영된 결과 FF시나리오에서 330.1 mm (25.2%), MF시나리오에서 564.5 mm (43.1%), LF시나리오에서 634.3 mm (48.5%)가 증가하는 경향으로 나타나고 있다. 증가율이 다소 크게 예측되고 있는데, 실제 관측자료를 분석한 결과, 홍수기 강수량 기준으로 한강유역에서 1973~2002년까지 30년 평균 943.7 mm의 강우량이 내렸고, 2003~2012년까지 모두 과거 30년 평균 대비 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 서울관측소의 경우 30년

Table 3. Trend Analysis Result from Mann-Kendall Test (Original A2 Scenario)

Original A2 Scenario (2011~2100)			
Season	Trend with 90% confidence interval	Trend with 95% confidence interval	p -value
Flood season	Increasing	Increasing	0.0001
Nonflood season	Increasing	Increasing	0.0001

Table 4. Precipitation Projection by Periods and Cases

Case	Baseline (Obs) [mm]	FF Scenario [mm]	MF Scenario [mm]	LF Scenario [mm]
Original GCM	1077.9	1097.5 (1.8%)*	1269.1 (17.7%)*	1402.4 (30.1%)*
Case 1	1309.1	1103.7 (-15.7%)*	1350.7 (3.2%)*	1487.9 (13.7%)*
Case 2	1309.1	1342.2 (2.5%)*	1640.9 (25.3%)*	1794.8 (37.1%)*
Case 3 (NSQM)	1309.1	1639.2 (25.2%)*	1873.6 (43.1%)*	1943.4 (48.5%)*
Case 4	1309.1	1794.7 (37.1%)*	1875.1 (43.2%)*	1788.5 (36.6%)*

*increasing/decreasing ratio between projection and baseline periods

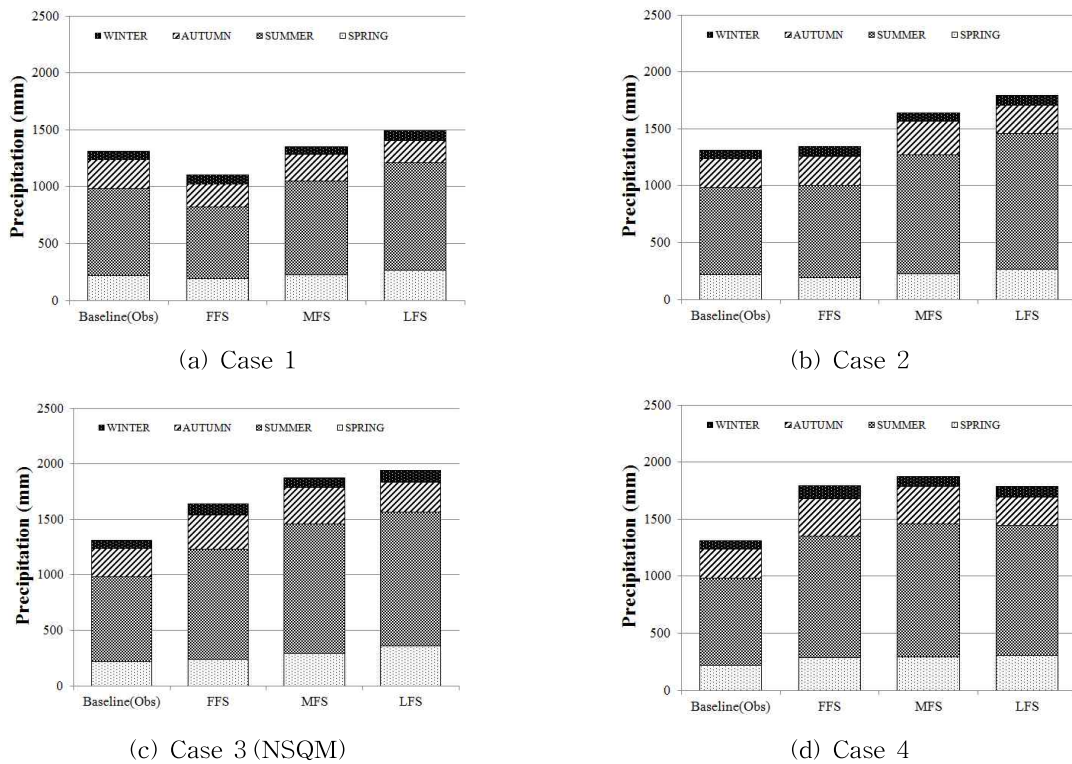


Fig. 9. Precipitation Projection by Seasons and Periods

평균 992.2 mm의 강우량이 내렸으나, 2010년에 1,663 mm, 2011년에는 1,760 mm의 연강우량을 보인바 있으며, 양평 관측소의 경우에도 30년 평균 971.9 mm의 강우량이 내렸으나, 2010년에 1,531 mm, 2011년에는 1,852 mm의 연강우량을 보인바 있어 최근 들어 과거에 비해 특이하게 증가하는 연강우량치가 빈번하게 나타나고 있다. 기후변화의 영향으로 인해 국지성 강우가 집중되는 현상이 빈발하고 있다는 점을 감안한다면 지나치게 무리한 예측이라 볼 수는 없다고 판단된다.

마지막으로 Case 4의 경우에는 FF시나리오에서 485.6 mm (37.1%), MF시나리오에서 566.0 mm (43.2%)가 증가하

다 LF시나리오에서는 479.4 mm (36.6%)로 FF시나리오보다 오히려 적은 증가율을 보인다. 전망기간 중 전체적으로는 동일한 평균값을 갖는 목표통계모수를 사용한다고 하여도, 정상성 기법으로는 전망전반부에서 과다하고, 후반부에서 오히려 과소한 전망을 보여줄 수 있다. 이러한 문제점은 비정상성기법을 적용함으로써 상당부분 개선될 수 있음을 보여주고 있다. 4가지 Case에 대한 결과를 비교·분석해 본 결과, 장기시계열의 예측편차를 보정하고 원시 GCM의 기울기를 반영한 Case 3 즉, NSQM을 통해 미래기후변화시나리오를 전망함으로써 정상성 기법에 비하여 합리적인 결과를 얻을 수 있었다.

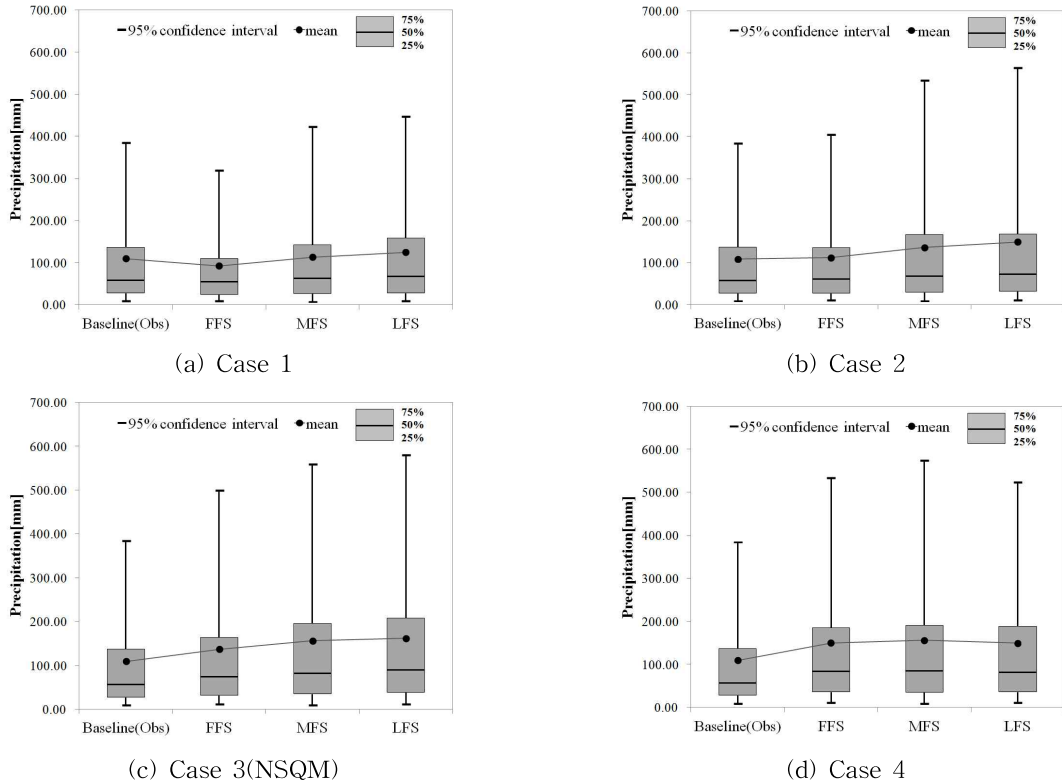


Fig. 10. Box Plots for the Precipitation Projections with 95% Confidence Level

5. 결론

자료의 계통적 오차를 보정하기 위하여 정상성을 가정하는 분위사상법이 많이 활용되고 있다. 하지만 미래 기후변화시나리오의 강우시계열과 같이 비정상성을 갖는 장기시계열에 일반적인 분위사상법을 적용할 경우 사상된 GCM자료의 분포속성이 왜곡되어 구간에 따라 추세를 과소 혹은 과대추정하게 된다. 이러한 한계점을 보완하기 위하여 전망기간의 장기시계열 자료와 실제 관측자료와의 예측편차를 보정하고 GCM이 가지는 경향성을 반영하기 위한 비정상성 분위사상법(Nonstationary Quantile Mapping, NSQM)을 적용하고자 한다.

비정상성 분위사상법의 적용기간은 기준기간(1976~2000년)과 전망기간(2011~2100년)으로 구분하였으며, 우리나라의 여름철 강우의 특성을 분석하기 위하여 가장먼저, 홍수기와 비홍수기를 분리하여 연구를 수행하였다. 기준기간의 자료는 실제 관측값을 사용하였으며, 전망기간의 자료는 CGCM3.1 SRES A2 시나리오를 선정하였다. 이 때, A2 시나리오의 경향성 여부는 Mann-Kendall Test를 통해 검정하였다.

비정상성 분위사상법의 적용성을 평가하기 위하여 통

계분포모수를 다양한 Case별로 설정하여 기준기간 대비 증감률을 산정하고 이를 비교·분석하였다. 기준기간의 연평균 강우량을 확인한 결과 관측자료가 1309.1 mm, GCM(Reference scenario)자료가 1077.9 mm로 GCM(Reference scenario)자료가 -17.7% 과소 추정됨을 확인하였으며, Case 1의 경우 기준기간과 전망기간의 일관성이 떨어지는 결과를 보이고 있었다. 이는 기준기간의 정상성을 유지하여 계산된 통계분포모수를 전망기간에 그대로 적용함으로써 전망기간의 분포속성이 왜곡된 것으로 판단된다.

목표자료군의 통계분포모수에 GCM의 경향성이 반영되지 않은 Case 2와 경향성이 반영된 Case 3의 경우 연평균 강우량의 추세가 모두 증가하는 경향을 나타냈다. 실제 관측자료를 분석한 결과, 홍수기 강수량 기준으로 한 강우역에서 1973~2002년까지 30년 평균 943.7 mm의 강우량이 내렸고, 2003~2012년까지 모두 과거 30년 평균 대비 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 서울관측소의 경우 30년 평균 992.2 mm의 강우량이 내렸으나, 2010년에 1,663 mm, 2011년에는 1,760 mm의 연강우량을 보인바 있으며, 양평관측소의 경우에도 30년 평균 971.9 mm의 강우량이 내렸으나, 2010년에 1,531 mm, 2011년에는 1,852 mm의 연강우량을 보인바 있어 최근 들어 과거에 비해 특이하게

증가하는 연강우량치가 빈번하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 비정상성 분위사상법을 적용한 Case 3가 최근 기후변화로 인한 태풍 및 국지성 호우의 영향을 가장 적절하게 반영하고 있다고 판단된다. 반면 Case 2는 목표자료군의 통계분포모수에 GCM의 추세가 반영되지 않았기 때문에 전체적으로 증가율이 완만하게 산정된 것으로 판단된다. 마지막으로 Case 4의 경우, FF시나리오에서는 강우량이 과다 추정되고 LF시나리오에서는 과소 추정되는 결과를 보이며 이는 Case 3의 통계분포 모수를 기간 평균하여 적용함으로써 나타나는 결과로 판단된다.

본 연구에서 적용된 비정상성 분위사상법을 통해 경향성을 갖는 장기시계열에 대한 예측편차를 보정하여 미래 기후변화시나리오를 전망하는 것이 GCM의 지역편차를 보정하는데 적절할 것으로 판단되며, 향후 우리나라 여름철 강우를 재현하기 위한 태풍 모의 및 원시 GCM이 가지는 거친 해상도를 높일 수 있는 상세화기법과 함께 복합적으로 적용된다면 보다 합리적인 강수전망을 제시할 수 있고, 이를 활용한 다양한 기후변화영향평가의 신뢰도를 제고할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업에 의한 [기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망(09-기술혁신C01)]과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

Boe, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E. (2007). "Statistical and dynamic downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies." *International Journal of Climatology: Atmosphere*, Vol. 27, Issue D10, pp. 1643-1655.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Rienhold Company, Inc., NewYork, p. 127.

Haibin, Li., Sheffield, J., and Wood, E.F. (2010). "Bias

correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, Issue D10

Kang, B.S., and Moon, S.J. (2011). "Application of APCC seasonal projection information for drought outlook and real-time water management." *Korean Society of Hazard Mitigation, Kosham*, Vol. 11, No. 1, pp. 31-36. (in Korean)

Kang, D.H., and Kang, B.S. (2006). "Post-processing of GCM information using quantile mapping." *KSCE Conference & Civil Expo 2006*, KSCE, Gwangju, Vol. 10, pp. 1048-1051. (in Korean)

Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. Charles Griffin, London, pp. 202.

Kim, Y.H., Yeo, C.G., Seo, G.S., and Song, J.W. (2011). "Estimation of Regional Probable Rainfall based on Climate Change Scenarios." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Kosham*, Vol. 11, No. 3, pp. 29-35. (in Korean)

Kwon, J.W., and Kang, B.S. (2008). "Downscaling climate simulation using spatio-temporal random cascade model in Korea region." *2008 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, Gyeongju, Vol. 2, pp. 120-124. (in Korean)

Lee, B.K., and Kang, B.S. (2008). "Downscaling GCM Climate Change Output using Quantile Mapping and Artificial Neural Network." *KSCE Conference & Civil Expo 2008*, KSCE, Daejeon, Vol. 10, pp. 1603-1606. (in Korean)

Mann, H.B. (1945). "Nonparametric tests against trend." *Econometrica*, Vol. 13, No. 3, pp. 247-259.

Panofsky, H.A., and Brier, G.W. (1968). *Some Application of Statistics to Meteorology*, 224 pp., Penn. State Univ., University Park, Pa.

논문번호: 13-034	접수: 2013.03.08
수정일자: 2013.04.20/05.14	심사완료: 2013.05.14