

기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가

Impact Assessment of Climate Change on Extreme Rainfall and I-D-F Analysis

김 병 식* / 김 보 경** / 경 민 수*** / 김 형 수****

Kim, Byung Sik / Kim, Bo Kyung / Kyung, Min Soo / Kim, Hung Soo

Abstract

Recently, extreme precipitation events beyond design capacity of hydraulic system have been occurred and this is the causes of failure of hydraulic structure for flood prevention and of severe flood damage. Therefore it is very important to understand temporal and spatial characteristics of extreme precipitation events as well as expected changes in extreme precipitation events and distributional characteristics during design period under future climate change. In this paper, climate change scenarios were used to assess the impacts of future climate change on extreme precipitation. Furthermore, analysis of future extreme precipitation characteristics and I-D-F analysis were carried out. This study used SRES B2 greenhouse gas scenario and YONU CGCM to simulate climatic conditions from 2031 to 2050 and statistical downscaling method was applied to establish weather data from each of observation sites operated by the Korean Meteorological Administration. Then quantile mapping of bias correction methods was carried out by comparing the simulated data with observations for bias correction. In addition Modified Bartlett Lewis Rectangular Pulse(MBLRP) model (Onof and Wheater, 1993; Onof 2000) and adjust method were applied to transform daily precipitation time series data into hourly time series data. Finally, rainfall intensity, duration, and frequency were calculated to draw I-D-F curve. Although there are 66 observation sites in Korea, we consider here the results from only Seoul, Daegu, Jeonju, and Gwangju sites in this paper. From the results we found that the rainfall intensity will be increased and the bigger intensity will be occurred for longer rainfall duration when we compare the climate conditions of 2030s with present conditions.

keywords : Climate Change, YONU CGCM, Downscaling, Quantile Mapping, MBLRP, I-D-F curve

요 지

최근 수공시설물의 설계규모를 넘어서는 극한 강우사상이 발생하여 홍수방어를 위하여 구축된 수리구조물이 파괴되는 등 많은 홍수피해가 발생하고 있다. 따라서 극한 강우사상의 시공간적 발생 특성을 파악하고 미래의 기후변화

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Research Div, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-Do, Korea
(e-mail: hydrokbs@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-Do, Korea
(e-mail: winnerbk@kict.re.kr)

*** 인하대학교 토목공학과 박사과정

PhD Candidate, Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, Korea
(e-mail: gigatg@inha.ac.kr)

**** 인하대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, Korea
(e-mail: sookim@inha.ac.kr)

하에서 극한강우사상이 어떻게 변화하고 설계수명기간(Design period)동안 분포 특성이 어떻게 변화할지를 이해하는 것은 매우 중요하다. 이에 본 논문에서는 미래의 기후변화가 극한 강우에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위해 기후변화 시나리오를 이용하여 미래의 극한강우의 특성 분석과 I-D-F 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 SRES B2 온난화가스 시나리오와 YONU CGCM를 이용하여 2030s(2031-2050)를 모의하였으며 통계학적 축소기법을 적용하여 우리나라에 위치한 기상청 산하 관측소별로 일 기상자료를 구축하였다. 또한, 이를 과거 관측 자료와 비교하여 Quantile Mapping 방법으로 편이보정을 실시하였고, 구형펄스(Modified Bartlett Lewis Rectangular Pulse, MBLRP) 모형(Onof과 Wheater, 1993; Onof 2000)과 분해기법(adjust method)을 적용하여 일 강우 시계열자료를 일 강우 시계열 자료로 변환하였으며 지속기간별 빈도별 강우량을 산정하여 I-D-F 곡선을 작성하였다. 본 논문에서는 66개 관측소 중에서 서울, 대구, 전주, 광주 지점의 결과만을 수록하였으며 그 결과 거의 모든 지점에서 현재와 비교하였을 때 지속기간이 길어질수록 강우강도가 증가함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 기후변화, YONU CGCM, 축소기법, Quantile Mapping, MBLRP 모형, 강우강도-지속기간-빈도 곡선

1. 서 론

기후변화로 인해 수문학적 극한사상의 규모와 빈도가 변화한다는 사실은 이미 국제적으로 인정되고 있는 과학적 사실이다. 대기 중에 증가되는 온실가스의 농도는 기온을 꾸준히 상승시키고, 이는 수문순환 과정을 활성화하는 요인이 되어 결과적으로 과거 관측과는 다른 극한사상들이 발생하게 되는 것이다. 기후변화에 따른 이상기상으로 홍수나 가뭄과 같은 극한 수문학적 사상으로 인한 피해가 세계 곳곳에서 발생함에 따라 극한 기후가 중요한 환경 요소로 인식되고, 각종 언론 매체와 환경정책 토론의 주제가 되고 있다. 국내에서도 몇 년 동안의 극심한 홍수나 연이은 3월 달의 폭설과 같은 이상기후로 인해 기후변화에 대한 경각심이 고조되고 있으며 이에 대한 대응책 마련에 대한 목소리가 높아지고 있다.

IPCC(2001)는 대기 중의 CO₂ 농도는 1750년 280ppm에서 1999년에는 367ppm까지 증가하였으며, 2050년과 2100년쯤에는 각각 463-623ppm와 470-1099ppm까지 증가할 것으로 전망하였다. 또한, 전구의 평균기온이 20세기를 지나면 약 0.6±0.2℃ 상승할 것이며 이는 지난 1000년 동안 가장 큰 상승이라고 하였다. 이 현상을 Clausius-Clapeyron의 물리식 개념에서 설명하면, 온도가 높아질수록 증기압은 더 증가하게 되는데 이는 홍수를 유발할 수 있는 강우의 잠재력이 온도와 함께 증가하게 됨을 의미한다. 이러한 현상은 실제로, 이미 많은 지역에서 관측된 바 있다(IPCC, 2001). 기후변화가 수문순환 과정을 빠르게 진행시키고, 극한 사상의 빈도와 극치 상태를 증가시킨다는 가정이 실제 수문자료에서 그 변화가 관측됨에 따라 최근 주된 관심사가 되고 있다. 기상청 발표에 의하면 우리나라의 경우 기온은 20

세기 동안 1.5℃ 상승하였으며, 최근 20년간 강수량은 7% 증가한 반면 강수일수는 14% 감소하고 80mm 이상의 호우 발생빈도는 증가하는 추세를 보이고 있다고 하였다. 이러한 극한강우 특성의 변화는 인간 생활 및 생태계에 변화를 야기할 수 있으며 특히, 수자원 부족량의 변화와 홍수 및 가뭄의 빈도에 영향을 미치게 될 것이다. 기후변화가 수문학적 극한사상에 미치는 잠재적 영향은 지난 십년간 수문학 분야에 많은 관심을 이끌어 왔으며 많은 연구들이 전구적 온난화로 인해 극한 수문사상의 규모 및 빈도가 증가한다는 결과를 보여주었다(Kite, 1993; Boorman and Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Saethun *et al.*, 1998; Mirza *et al.*, 1998; Prudhomme *et al.*, 2003; Meehl and Tebaldi, 2004). 국외적으로 최근 기후변화 및 변동이 극한 강수량 및 하천유출량에 미치는 영향에 관한 연구 동향은 매우 다양하게 진행되어 왔다(McKerchar and Henderson, 2003; Paturel *et al.*, 2003; Pongracz *et al.*; 2003; Koutsoyiannis, 2003; Tate *et al.*, 2004., Kundzewicz, 2004; Lindstrom and Bergstrom, 2004). 기후변화가 하천유출량에 미치는 영향은 주로 기후변화를 반영하여 모의된 강수량을 이용하는 것으로 시작되어 왔으며, 모의된 강수량의 경향성은 지역에 따라 다르게 나타나는 것으로 분석되어 있었다. 주로 북반구 지역과 고위도 지역으로 갈수록 강수량이 증가하며 적도와 남반구 지역은 감소하는 경향성을 가지는 것으로 분석되었다. McGuffie *et al.*(1999)은 온난화가 진행되는 기후상황에서는 집중호우의 규모와 빈도가 증가한다고 하였으며 강수량의 변화는 유역의 유출량을 변화시킨다고 하였다. 최근 수공시설물의 설계규모를 넘어서는 극한 강우사상의 발생은 여러 수공구조물과 홍수방어시스템을 파괴하는 원인이 되고 있기 때문에 극

한 강우사상에 대한 현재의 시공간적 특성을 파악하는 것뿐만 아니라(Osborn *et al.*, 2000; Osborn and Hulme, 2002) 미래의 기후변화 하에서 극한강우사상이 어떻게 변화하고 수공구조물의 설계수명기간(Design period)동안 분포형이 어떻게 변화할지를 이해하는 것이 매우 중요하다(Fowler and Kilsby, 2003a,b).

한편, GCM 자료를 이용한 국내 연구는 기후변화에 대한 관심사와 함께 증가하고 있는 추세이다. 기상청(1993)은 지구온난화에 따른 GCM을 이용하여 한반도의 온도 및 강수량의 변화를 예측하였고, 한국건설기술연구원(2000)은 우리나라에 미치는 기상변화와 특성을 분석하기 위하여 METRI/YONU GCM을 이용하여 1987년 엘니뇨와 1988년 라니냐 기간의 아시아 여름 몬순기후가 단기적인 영향을 분석하였다. 오재호와 홍성길(1995)은 CO₂ 증가로 인한 한반도의 강수량 변화에 대하여 연구하였으며 윤용남 등(1999)은 지구 온난화로 인하여 연/월 강수량의 변화로 일강수량의 변화에 대하여 분석하고 이후 기후변화로 인한 설계강수량의 변화를 추정하는 연구를 진행하였다(윤용남 등, 2004). 안재현 등(2001)은 GCM 결과를 이용하여 대청댐 유역의 수문환경을 분석하였으며 김병식 등(2003)은 전이함수모형과 일기 발생모형을 이용하여 유역규모 기후변화시나리오를 작성하여 수문요소와 수자원 영향을 평가한 바 있다. 이들 기후변화 관련 연구에 따르면 대기 중 기온 상승이 강우량 증가를 유발하는 것으로 분석되고 있다. 이는 강우 발생 시기나 양적인 측면에서 그 특성이 변화하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 이에 본 논문에서는 SRES B2 온난화가스시나리오와 YONU CGCM을 이용하여 2030s(2031-2050)를 모의한 후 통계학적 축소기법을 이용하여 서울, 대구, 전주, 광주 지점의 일 강우량 시계열 자료를 구축하였다. 또한, Bartlett Lewis의 수정구형필스(MBLRP) 모형과 분해기법을 통해 시간단위의 강우 자료를 모의하여 미래의 기후변화가 극한강우에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하였다.

2. 연구 방법 및 순서

본 논문에서는 먼저 SRES B2 온난화가스 시나리오를 기반으로 YONU CGCM 모형을 이용하여 기후변화 모의실험을 실시하였으며 이를 통해 한반도의 기후변화 시나리오를 작성한 후, 통계학적 축소기법을 적용하여 한반도 주변의 9개의 격자점으로부터 우리나라 기상청 산하의 각 관측소별 일(daily) 단위 기후변화 시나리오를 작성하였다(Kim *et al.*, 2007). 그리고 Quantile-Mapping 방법(Wood *et al.*, 2002; Hamlet *et al.*, 2003)

을 이용하여 관측기간(1980-2000)과 제한실험기간(1980-2000)자료에 대하여 편이 보정(bias correction)을 실시하였다. 또한, 기후변화가 고려된 단기(short term) 강우 사상을 모의하기 위해 Rodriguez-Iturbe *et al.* (1987)이 제시한 구형필스(MBLRP)모형과 분해기법(adjustment method)(Koutsoyannis, 1994)을 이용하여 일 강우자료를 시간(hourly) 단위의 강우로 분해하였다. 마지막으로 미래의 기후변화가 극한강우의 강우강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 빈도분석을 통해 강우강도-지속시간-빈도 곡선(I-D-F curve)을 작성하였다. 다음 Fig. 1은 분석과정을 나타낸 것이다.

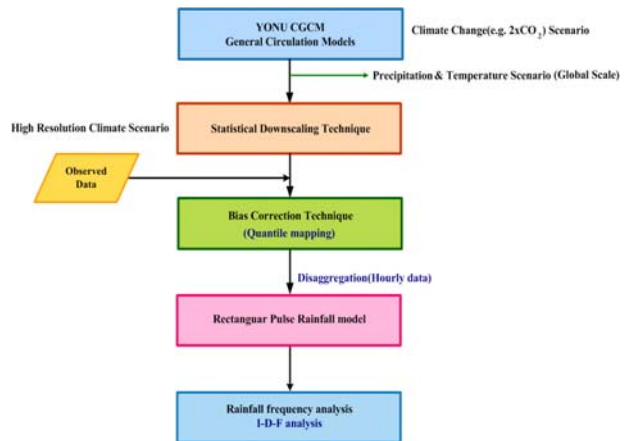


Fig. 1. Flowchart of This Study

3. 축소기법

기후변화에 대한 우리나라의 영향을 평가하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 300km × 300km의 해상도를 가진 YONU CGCM 모의 자료를 이용하였다. 격자 범위는 위도 0.0°N~50°N와 경도 70°E~150°E 내에서 한반도 주변에 위치한 9개의 격자로부터 YONU CGCM의 기상변수를 일 시계열자료의 형태로 추출하고 서울, 대구, 전주, 광주 강우관측소에 상세화하기 위하여 역거리법과 통계학적 축소기법(down-scaling technique)인 전이함수(Transfer function)기법을 적용하여 각 지점별 일 기상자료를 모의하였다. YONU CGCM 자료의 구성 및 축소기법에 대한 자세한 설명은 김병식(2005)과 Kim *et al.*(2007)을 참고할 수 있다.

Figs. 3과 4는 각각 서울과 광주 지점의 통계학적 축소기법의 적용 결과를 나타낸 것으로 각각 월 평균 강수량, 월 평균 습윤 및 건조 지속기간을 나타낸 것이다. Figs. 3과 4를 통해 알 수 있듯이 관측치(obs)와 통계학적 축소기법으로 동일 기간에 대하여 획득한 현재상

황의 $1CO_2$ 가 대체적으로 잘 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 특히 월 평균 강수량과 습윤 및 건조 지속기간에서 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 분석 결과는 서울과 광주 지점에서만 나타나는 것이 아니라 우리나라에 위치한 66개 관측소에서 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 여러 국외의 연구문헌을 통해 이러한 결과는 온도, 기압을 포함한 여러 기후 변량 등의 영향을 받는 강우의 특성인 것으로 알려져 있다(Wilby and Dawson, 2001).

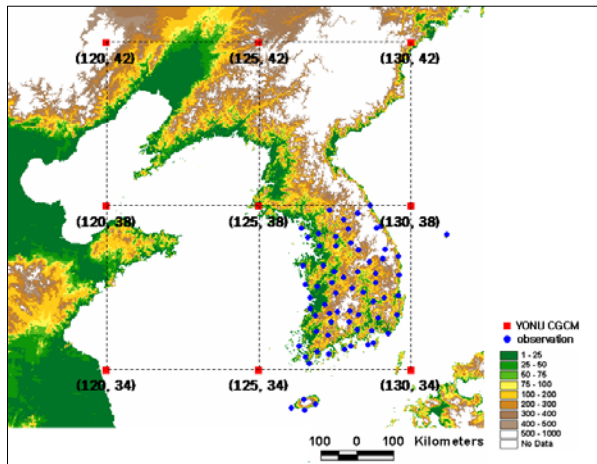


Fig. 2. Location of YONU CGCM

4. Quantile Mapping 방법을 이용한 편이보정

이미 많은 불확실성이 잠재하고 있는 현실을 모형으로 완벽하게 구현하기에는 상당한 무리가 따른다. 특히

근래와 같이 기후변화로 인한 징후들이 나타나고 있는 상태에서는 더욱 그렇다. 물론 모형의 단순화와 여러 입력 자료를 구축하는 과정에서 일정 정도의 편이(bias)가 내재되어 있으며, 이로 인해 계통오차(systematic discrepancy)가 포함된 결과를 얻게 된다는 사실도 부정할 수 없다. 이러한 계통오차를 제거하는 방법의 하나로 Panofsy and Brire(1963)는 Quantile Mapping 방법을 제안하였으며 Wood *et al.*(2002, 2004)과 Hamlet *et al.*(2003)은 유출량을 보정하기 위해 이 방법을 이용하였다. 한편 기후변화 분야의 경우 Palmer *et al.*(2004)이 GCM 자료 보정에 이 방법을 적용하였다. 최근 Hashino *et al.*(2007)은 유출량을 산정 및 보정하는 연구 과정 중에 Bias-Correction 방법론을 크게 비율(ratio) 보정 방법, 회귀방법, 그리고 Quantile Mapping 방법의 세 가지로 나누어 적용한 후 그 결과에 대하여 검토하였다. 한편, Fowler *et al.*(2007)은 모의된 기후 변량을 보정하기 위하여 적용되는 기본적인 방법으로 GCM과 관측치의 월별 비율을 산정하고 이를 모의치에 적용하는 과정을 설명하였으며 2001년 Durman 등이 이를 적용하여 GCM 시나리오의 강수량과 온도를 보정하였다. 기존 Bias-Correction 방법이 비율 보정에만 근거하였다면 Quantile Mapping 방법은 자료에 내포된 변동성도 고려할 수 있는 장점이 있다(Wood, 2006). 이러한 연구 내용에 근거하여 본 논문에서는 변동성과 통계적 특성을 고려할 수 있는 Quantile Mapping 방법을 이용하여 앞에서 축소화된 일 기상자료

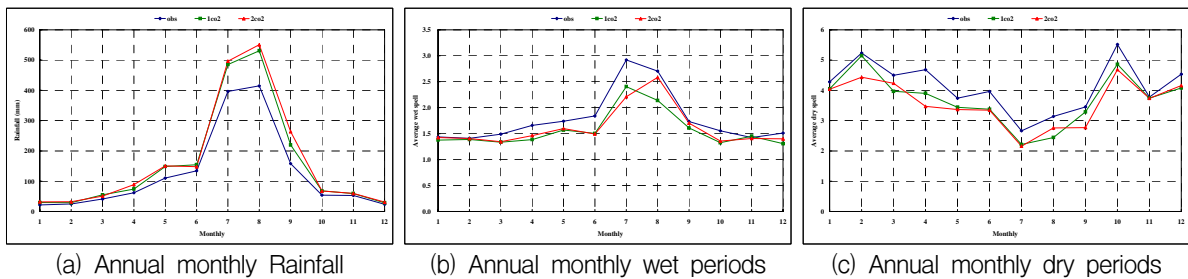


Fig. 3. Result of Statistical Downscaling(Seoul station)

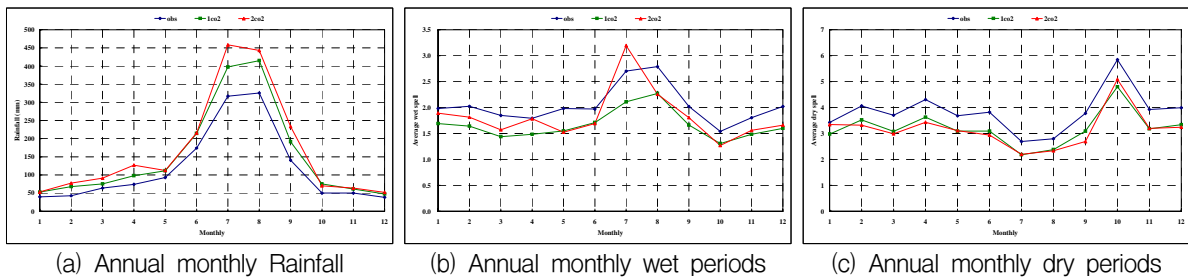


Fig. 4. Result of Statistical Downscaling(Gangju station)

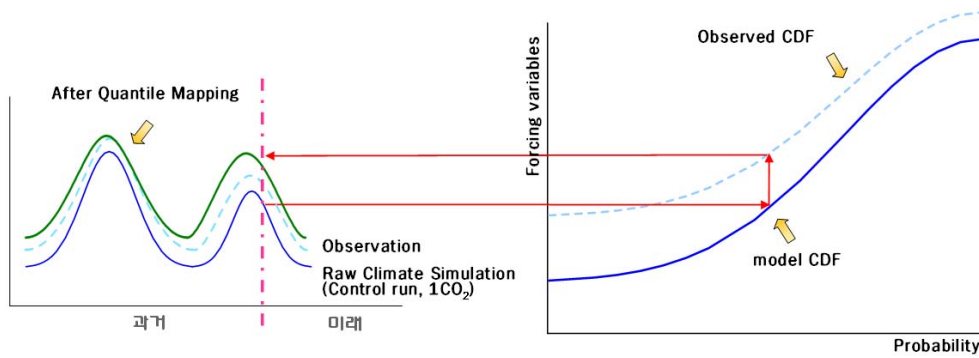


Fig. 5. Concept for Quantile Mapping Method

를 보정하였다. Quantile Mapping 방법은 관측치와 모의치에 대한 경험적 확률 분포를 사용하며 Eq. (1)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

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

여기서, F_{oj} 는 관측 자료 j 월에 대한 누가확률분포를, F_{sj} 는 과거 기간에 대한 모의자료로부터 작성된 누가확률분포를 나타내고 이들의 관계로부터 보정된 자료를 획득하게 된다. 이 방법은 GCM에 의한 모의 자료가 동일한 비초과확률을 갖는 관측 자료의 크기로 대체되어 단순히 형태를 맞추는 것이 아니라 과거 자료로부터 관측 자료와 모의 자료의 통계치를 일대일(one-to-one)로 대응하는 과정을 반복하는 것으로 이는 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 6은 통계학적 축소기법을 이용하여 모의한 서울과 광주 지점의 GCM자료와 관측 자료의 누가분포를 도시한 것이다. Figs. 3 and 4에서 나타내었던 것과 같

이 동일 기간의 과거 자료를 누가확률분포로 나타내었을 때 모의 결과와 관측 자료가 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 동일 과거 기간에 대한 모의치와 관측치의 누가확률이 일치하도록 이들 각각의 월별 비율을 산정하였다. 이후 모의치를 관측치와 일치하도록 보정하였으며 이 결과는 Fig. 7과 같다. Quantile Mapping 방법을 통한 자료 편이 보정 실시 이후 서울과 광주 지점의 7, 8월 모두 관측치를 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있었다.

Figs. 8 and 9는 각각 서울과 광주 지점의 Quantile Mapping 방법을 적용하여 현재를 모의한 1CO₂와 미래 기후변화를 고려한 2030년대(2031-2050)의 자료를 보정한 결과이다. 두 지점 모두 월평균 강수량의 경우 8월과 9월에 증가하는 것으로 나타났으며 서울 지점은 8월에서 9월로 강우가 더 증가하는 것으로 분석된 반면, 광주 지점의 경우에는 상대적으로 7월 강우가 더 많이 발생하는 것으로 추정되었다. 또한 두 지점 모두에서 미래에는 습윤 및 건조 지속기간이 대체적으로 감소하

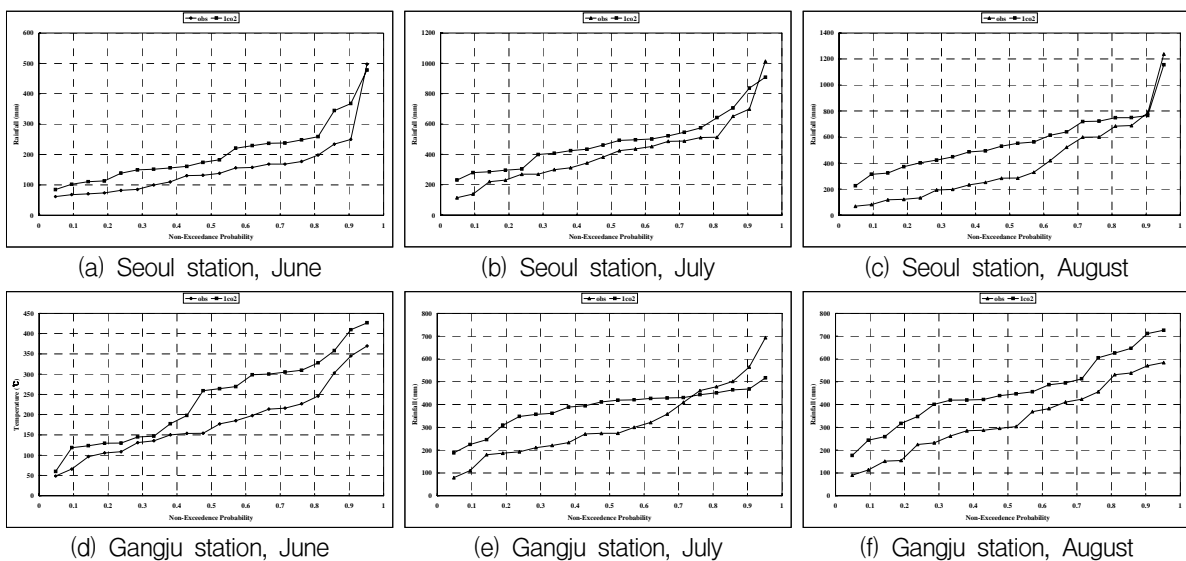


Fig. 6. Before Bias correction Using Quantile Mapping Method(Seoul, Gangju station)

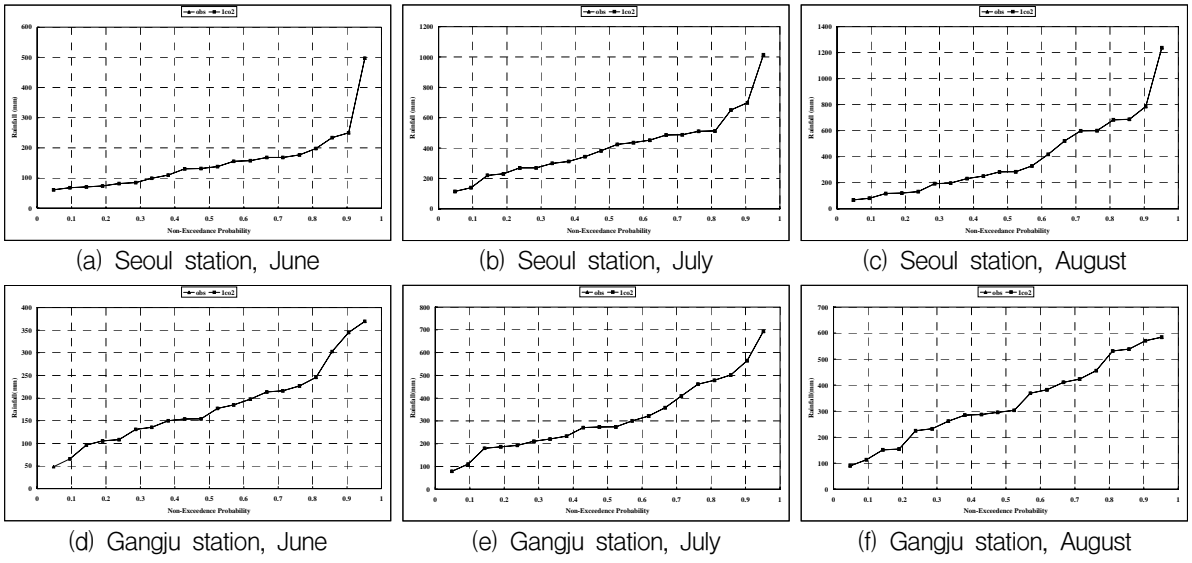


Fig. 7. After Bias Correction Using Quantile Mapping Method(Seoul, Gangju station)

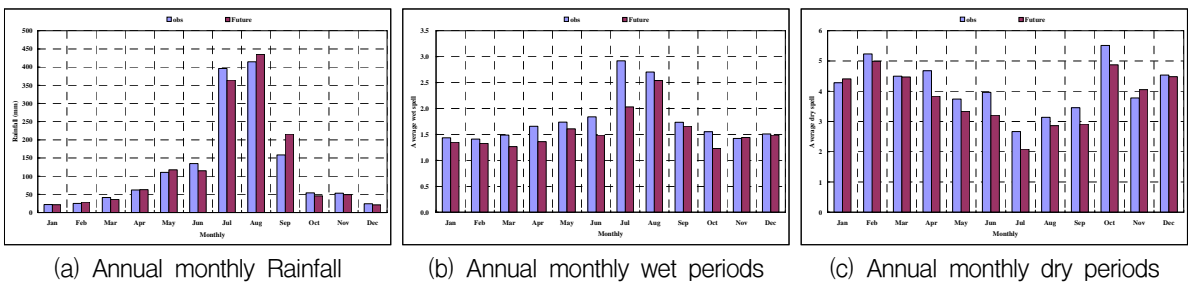


Fig. 8. Result of Quantile Mapping(Seoul station)

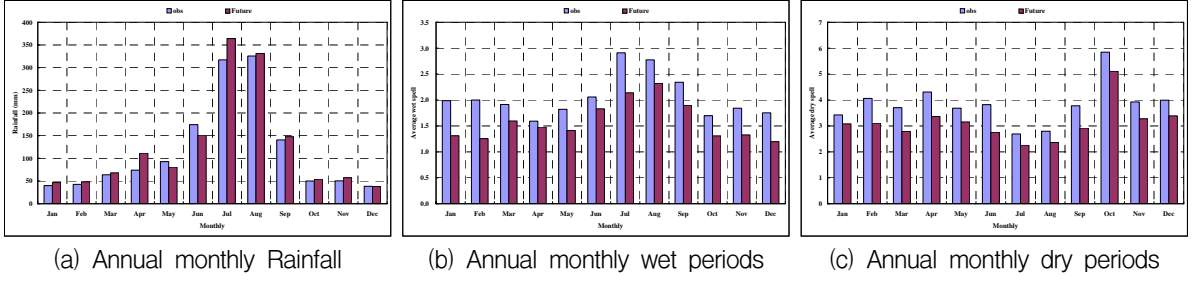


Fig. 9. Result of Quantile Mapping(Gangju station)

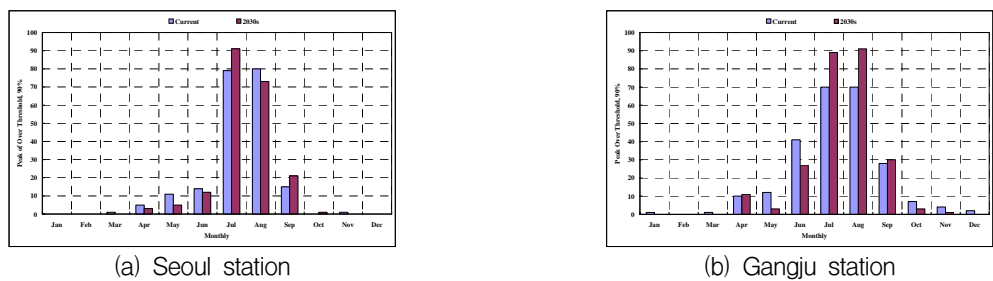


Fig. 10. Result for Monthly Rainfall POT(90%)

고 있는 것으로 나타났다. 강수량은 증가하는 반면 습윤 및 건조 지속기간이 감소한다는 것은 현재보다 강도가 큰 경우가 더 자주 빈번하게 발생할 수 있는 것으로

해석할 수 있다. 이러한 결과는 김병식(2005)과 Kim *et al.*(2007)의 연구 내용에서도 확인된 바 있다. 한편, Fig. 10은 서울과 광주 지점에서 90% 한계점

이상(Peak Over Threshold, POT)의 강우 발생에 대해 현재와 미래(2031-2050)를 비교하였을 때 어떠한 차이를 보이는지를 나타내었다. 서울과 광주 지점 각각을 분석한 결과 두 지점 모두에서 현재보다는 미래 극한 강우 사상으로 분류할 수 있는 90% 한계점 이상의 강우 발생이 더 증가할 가능성이 있음을 Fig. 10의 (a)와 (b)를 통해 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과와 해석은 본 연구에서 사용된 YONU CGCM의 기후변화 시나리오에 근거한 것이다.

5. 구형펄스 모형과 분해기법을 이용한 시강우 자료의 모의

기본적으로 분해기법(disaggregation)은 일(daily) 단위 자료에서 시(hourly) 단위 자료로 변환하는 것과 같이 더 작은 시간 단위 자료 확보에 사용된다. 이상적인 분해기법 모형은 시 자료를 모두 합하였을 때, 일자료와 정확하게 일치함은 물론이고 실제에 가까운 자료를 생성하는 것이다. 물론 분해기법을 적용하여 실제 발생하는 강우량 또는 발생일이 관측치를 정확하게 재현할 수는 없을 것이다(Koutsoyannis, 1994). 본 연구에서는 일 단위 이하(sub-daily) 시간 자료를 모의하기 위하여 Rodriguez-Iturbe *et al.*(1987, 1988)이 제안 및 수정한 구형펄스(Modified Bartlett Lewis Rectangular Pulse, MBLRP)모형을 적용하였다.

초기 BLRP 모형은 호우 특성 등을 고려하여 λ , β , μ , x , γ 와 η 로 총 5개의 매개변수로 구성되었다. 먼저, 매개변수 λ 와 β 는 Poisson process에 근거하여 각각 강우 발생률과 강우 집합에서 단위(cell) 강우 발생률이 결정된다. 이 단위(cell) 강우량(depth)을 나타내는 μx 를 포함하여 강우 기간을 나타내는 γ 와 각 단위(cell)강우 기간을 나타내는 η 역시 지수분포를 따른다. 그러나

초기 모형의 경우, 습윤 및 건조 기간이 과소 추정되는 것을 확인하였으며, 이후 매개변수 한 개를 추가하였다. 이 과정에서 지수분포에 따라 단위(cell) 강우의 기간을 나타내었던 η 를 감마분포의 모양 및 축적 매개변수 α 와 $1/v$ 로 변경하여 현재는 λ , μx , k , ϕ , α 와 v 의 총 6개로 구성하고 있으며 Fig. 11과 같은 일련의 과정을 거치게 된다. 매개변수 추정에 대한 자세한 설명은 Khaliq and Cunnane(1996)을 참고할 수 있다.

본 논문에서는 매개변수 최적화를 위해 Pattern search 방법을 적용하였으며 목적함수는 상대제곱근 오차(relative root mean square error)를 사용하였다. 그리고 추정된 매개변수를 Koutsoyannis(1994)가 제시한 Adjustment 기법을 이용하여 조정 한 후 시(hourly) 단위 자료를 모의 발생하였다. Adjustment 기법은 Proportional adjusting procedure, Linear adjusting procedure과 Power adjusting procedure과 같이 크게 세 방법으로 나눌 수 있다(Koutsoyannis, 1994; Koutsoyannis and Manetas, 1996). 각 방법의 특성을 간략히 설명하면 다음과 같다. Proportional adjusting procedure은 가장 단순한 방법으로 시(hourly)단위 자료 모의를 위하여 Gamma 분포가 적용되며 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$X_s = \tilde{X}_s \left(Z / \sum_{j=1}^K \tilde{X}_j \right) \quad (s = 1, \dots, k) \quad (1)$$

여기서 Z 는 일(daily)단위의 변량, K 는 일정기간의 일 단위 이하(sub-daily) 변량의 수를 의미한다.

Linear adjusting procedure은 Gaussian 분포가 적용되며 X_s 와 Z 의 공분산에 대한 단일 매개변수 λ_s 를 고려하여 Eq. (2)와 같이 나타낸다.

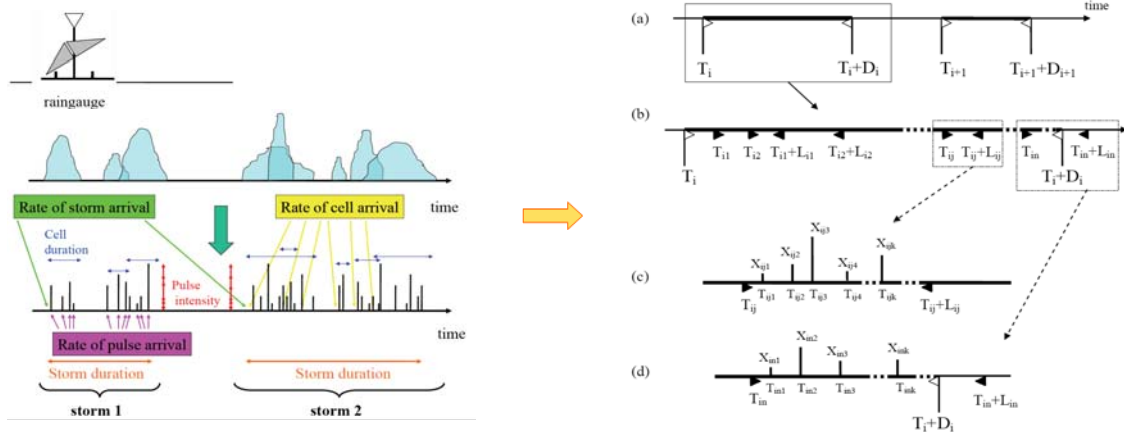


Fig. 11. Explanatory sketch for the Modified Bartlett-Lewis Rectangular Model(Onof, 2007)

$$X_s = \tilde{X}_s + \lambda_s \left(Z / \sum_{j=1}^K \tilde{X}_j \right) \quad (s = 1, \dots, k) \quad (2)$$

Power adjusting procedure 은 Eq. (1)에 나타난 Proportional adjusting procedure 에 X_s 와 Z 의 공분산을 나타내는 매개변수 λ_s 와 이들의 평균에 대한 매개변수 η_s 를 고려하는 방법으로 Eq. (3)과 같이 표현하고 있다.

$$X_s = \tilde{X}_s \left(Z / \sum_{j=1}^K \tilde{X}_j \right)^{\lambda_s / \eta_s} \quad (s = 1, \dots, k) \quad (3)$$

이들 세 가지 방법 중 본 논문에서는 가장 단순화한 Proportional adjusting procedure 를 적용하여 일 단위 이하(sub-daily) 자료를 모의하였다. 이들 각각에 대한 자세한 설명은 Koutsoyannis(1994)와 Koutsoyannis and Onof(2001)의 논문을 참고할 수 있다.

본 논문에서는 각 지점에 따라 1999년부터 2001년 자료를 매개변수 추정에 적용하였다. 이는 강우량과 출현 빈도 등이 과거와 구분되기 시작한 1990년대 후반부터 최근까지의 자료를 이용하는 것이 유용할 것으로 판단하였기 때문이다. 또한, 2002년과 2003년의 경우 태풍 루사와 매미로 인한 영향으로 인하여 특히, 낙동강 유역 일대의 강우자료가 다른 기간에 비하여 다소 비정상적인 현상이 잠재되어 있을 가능성을 고려하여 분석에 포함하지 않았다.

한편, 조하만 등(1997)은 우리나라 월별강수량이 평년값을 기준으로 하여 7월, 8월, 6월과 9월 순으로 많다고 하였으며 최근 몇 년 사이(1998년 ~ 2004년 단, 2001년 제외) 장마 종료 후 더 많은 양의 비가 내린 현상으로 미루어볼 때(차은정, 2006) 7월과 8월에 걸쳐 꾸준히 강우가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 본 논문에서는 강우 및 기후변화의 양상이 반영된 1999년에서 2001년까지 여름철 강우 중에서 장마철 전·후와 태풍의 발생시기를 대체적으로 잘 반영할 것으로 판단된 8월 강우 사상을 선정하였다. MBLRP 모형을 이용하여 서울, 대구, 전주와 광주까지 4개 지점의 매개변수 추정결과를 Table 1에 정리하였다. 이들 매개변수 값들을 이용하여 일 단위로 구성된 서울을 포함한 이들 4개 지점의 일(daily) 단위 강우 자료를 시(hourly) 단위로 분해(disaggregation)하였다. 매개변수를 적용하여 합성 시계열을 발생한 후에는 이 합성 시계열이 관측 시계열의 통계학적 특성을 잘 대표하고 있는지를 검토할 필요가 있다. 일반적으로 비교의 기준이 되는 통계 특성값은 평균값, 표준편차 및 왜곡도 계수이며, 이 때 관측과 합성 시계열의 상관도를 작성해 비교하여 두 계열의 특성을 비교·평가할 수 있다(윤용남, 2001). 이러한 내용에 의거하여 추정된 시간 단위 자료와 관측강우의 통계적 특성을 비교한 결과 Figs. 13 and 14와 같이 관측치에 크게 벗어나지 않는 것으로 분석되었으나 극치계열을 뚜렷하게 재현하지 못하여 다소 과소 추정되는 경향이 있는 것을 확인할 수 있었다.

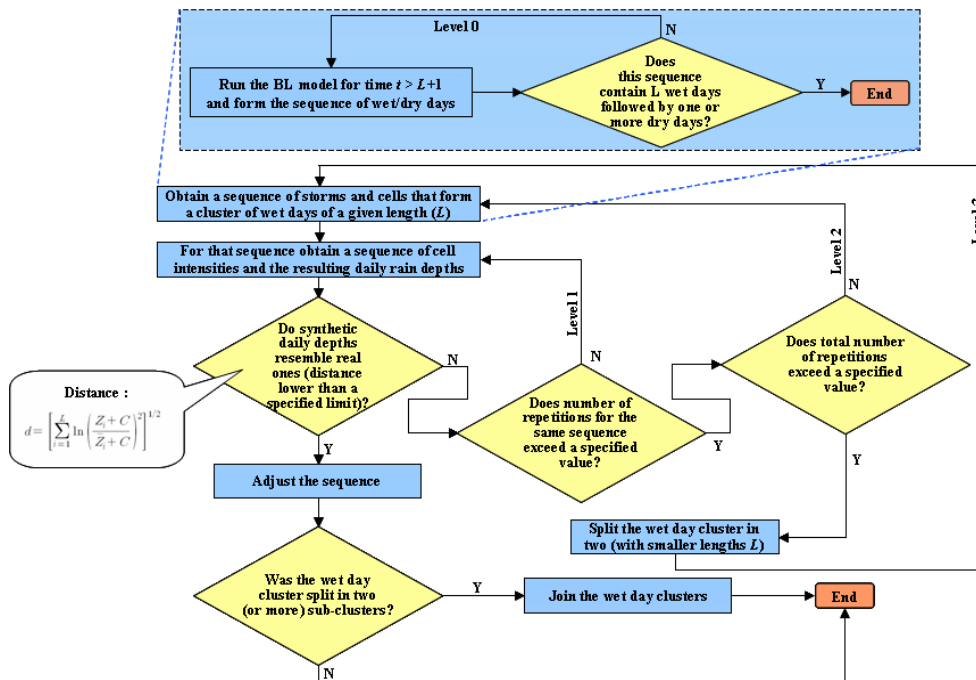


Fig. 12. Flow Diagram of the Repetition Scheme Using Adjustment Method(Koutsoyannis,1994)

Table. 1 Parameter Estimation Using MBRP Model(1999~2001 August)

Station	λ	$1/\mu x$	κ	ϕ	α	ν
Seoul	0.3267	0.0126	2.6937	0.0995	3.6953	0.0592
Daegu	2.9556	0.0187	0.0835	0.0193	7.7571	0.7606
Jeonju	0.3308	0.0136	0.0124	0.0160	3.1597	0.3898
Gangju	0.5376	0.0261	3.9085	0.0995	5.9297	0.0592

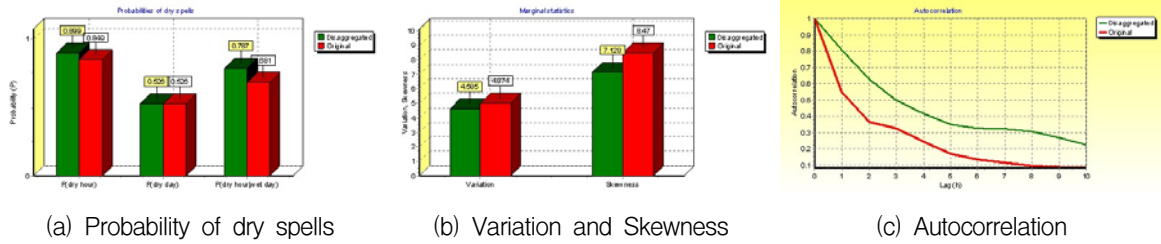


Fig. 13. Comparison with Statistical Characteristic between Sim. and Obs, Seoul Station

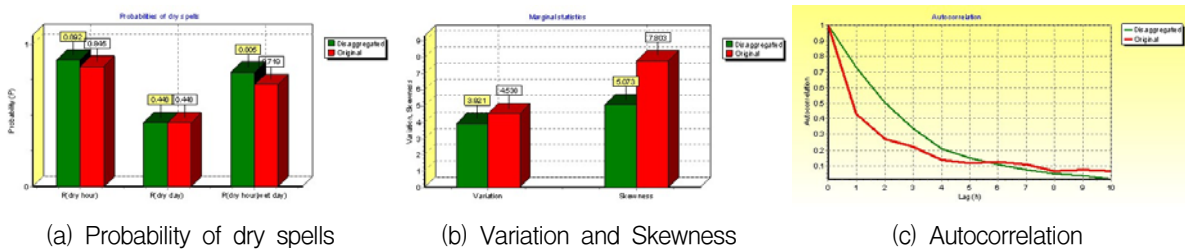


Fig. 14. Comparison with Statistical Characteristic between Sim. and Obs, Gangju Station

Fig. 13은 서울 지점의 매개변수를 이용하여 과거 일 정기간 시(hourly) 단위 자료를 모의한 후 관측 자료와 비교한 결과이다. 건조기간 발생확률을 포함하여 변동계수, 왜곡도와 같은 통계적 특성이 대체적으로 관측 자료에서 크게 벗어나지 않는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 13의 (c)를 통해서 각 강우들의 지속성을 평가할 수 있다. 실제와 비교하였을 때 0.2정도의 차이를 보이며 관측자료 보다는 각 강우 발생에 있어 더 큰 연관성을 갖는 것으로 나타났으나 전반적으로는 크게 벗어나지 않는 범위 내에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 광주 지점의 시(hourly) 단위 모의 결과와 관측 자료를 비교한 것으로 서울 지점의 경우와 마찬가지로 건조기간 발생 확률과 각 통계적 특성이 대체적으로 관측치와 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 광주 지점의 자기상관계수는 지속성이 커짐에 따라 관측치를 따라 위치하고 있으며 전체적인 형상 또한 서울 지점보다 더 고르게 관측치를 재현하는 것으로 나타났다. 각 지점별 모의치의 건조기간 발생 확률, 변동계수와 왜곡도, 자기상관계수를 관측 자료와 비교하였을

때 본 논문에서 제시한 서울 및 광주 지점과 마찬가지로 각 강우의 특성을 대체적으로 잘 반영하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 불확실성분석을 추가로 실시하지 않았으며 이에 대하여 추후 매개변수 추정을 통한 분해기법(Disgregation) 적용 후 결과의 적정성 검토 등이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

6. 지점별 I-D-F 곡선 작성

본 절에서는 YONU CGCM으로부터 축소기법을 통해 얻은 2CO2(2031년-2050년)상황에서의 일(daily) 단위 강우를 시(hourly)단위 강우로 분해하였다. 그리고 이들 결과를 이용하여 기후변화로 인한 미래 강우강도-지속기간-빈도 곡선(rainfall Intensity-Duration-Frequency curve, I-D-F 곡선)을 작성하였다. 강우지속 시간은 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간, 48시간(60분, 120분, 180분, 360분, 720분, 1440분, 2280분)으로 선정하고, 재현기간은 5년, 10년, 20년, 50년, 100년, 200년으로 하였다. 확률가중모멘트법(method of

probability weighted moments)에 따른 Gumbel 분포형을 채택하여 미래의 I-D-F 곡선을 분석하였다.

여러 가지 기후 변수들로 인하여 현재와 미래의 기상현상은 변화하게 되고 이는 곧 현재와는 대별되는 극한 사상의 크기와 발생이 두드러지는 것으로 설명할 수 있다. 또한 이를 가시화하기 위하여 Fig. 15와 같이 현재와 미래의 확률분포형으로 도시하였을 때 현재와는 일치하지 않고 과거 극한 강우와 같은 특정 사상의 크기와 위치는 변화하게 된다(Klein Tank, A.M.G. and Konneb, G. P., 2003; Griffith, G.M. *et al.*, 2005). 예를 들어 1990대에 10이라는 크기를 갖는 극한강우가 5회만 큼 발생하였다면 미래에는 10이라는 크기의 강우는 20회 이상으로 빈번하게 발생하여 극한강우로 표현하기 어렵게 된다. 이는 곧 미래 극한강우는 1990년대 정의 하였던 10이라는 크기를 넘는 20이상의 크기가 될 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 서울, 대구, 전주와 광주 지역의 각 관측소별 현재와 미래(2030s)의 확률분포형을 도시하여 Fig. 16에 나타내었다. 각 관측소에 따라 차이는 있으나 현재와 미래를 비교하였을 때 확률분포형이 오른쪽으로

이동하고 있는 것으로 나타났다. 이는 곧 미래의 강우는 현재 느끼는 강도보다 더 크게 발생하고 그 빈도 또한 증가할 가능성이 있음을 시사한다.

Figs. 17 and 18은 서울과 광주 지점에서 지속시간별 (1, 3, 6, 12, 24, 48시간) 현재와 기후변화 시(2030s)의 빈도분석 결과를 비교한 것으로 지속시간이 길어질수록 현재와 비교하였을 때 강우강도가 점차 크게 증가하고 있는 것으로 분석되었다. Fig. 17에 나타낸 서울 지점의 지속시간별 빈도별 확률강우량 비교는 지속시간 1시간, 3시간과는 달리 특히, 6시간의 지속시간을 기점으로 하여 현재와 2CO2(2031-2050) 상황의 강우가 현저한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 18의 광주 지점의 경우 지속시간 12시간에서 이러한 차이를 보였다.

Fig. 19는 서울, 대구, 전주와 광주 지점의 지속시간별 I-D-F 곡선을 비교한 것으로, 5년, 10년, 20년, 50년, 100년과 200년의 재현기간에 따라 도시한 I-D-F 곡선은 현재의 각 재현기간과 비교하였을 때 지속시간이 길어지면서 강우강도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Figs. 19 (a) and 19(d)의 서울과 광주 지점은 지속시간이 길어질수록 강우강도가 고르게 증가하는 형

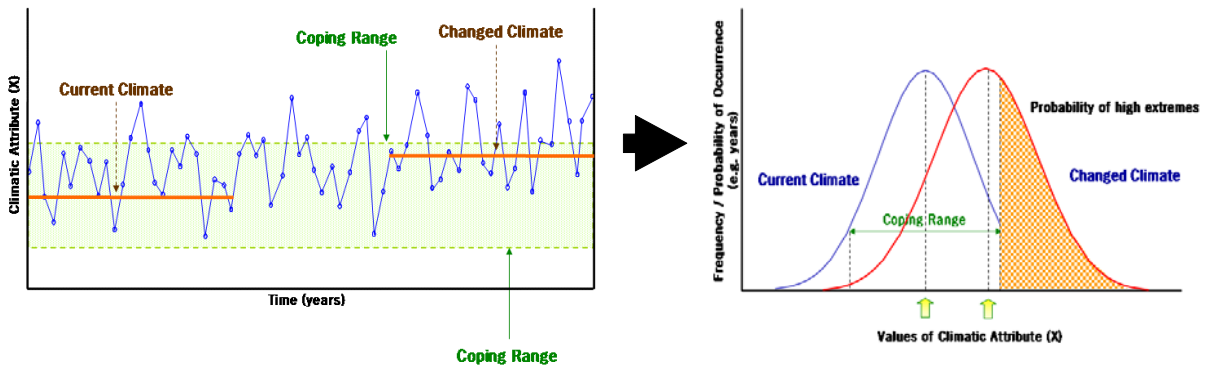


Fig. 15. Concept for Climate Change and Extreme Climate Events

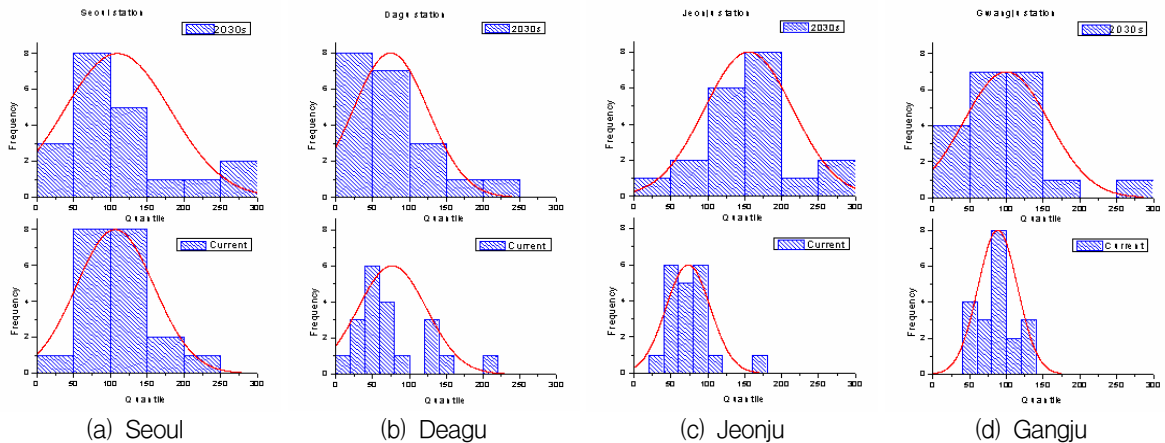
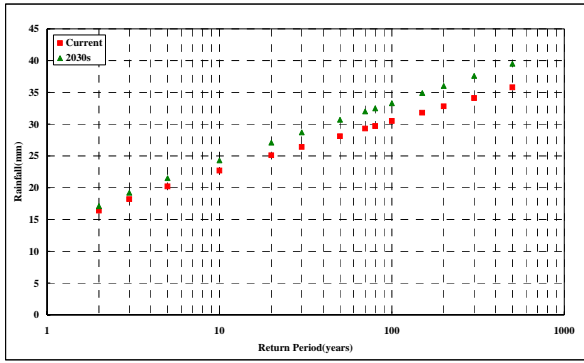
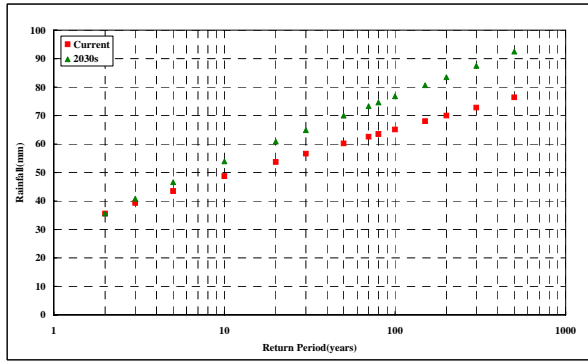


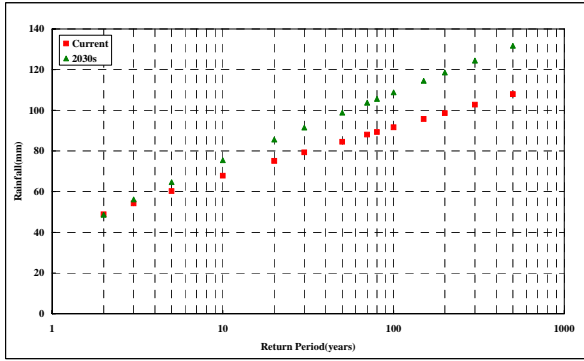
Fig. 16. Comparison for Probability Distribution Current and Future(2030s)



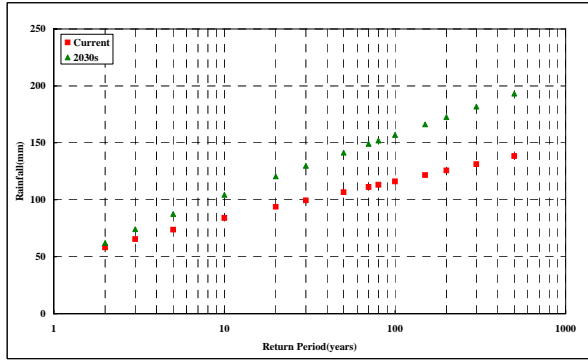
(a) Duration 1hr



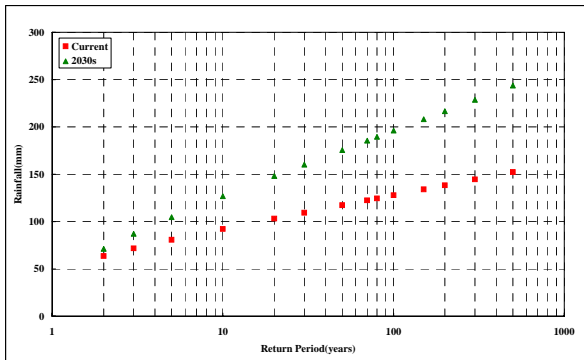
(b) Duration 3hr



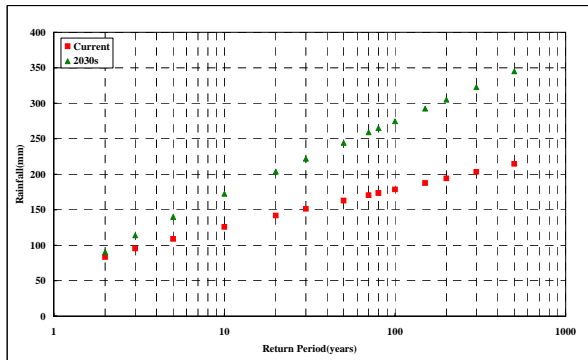
(c) Duration 6hr



(d) Duration 12hr

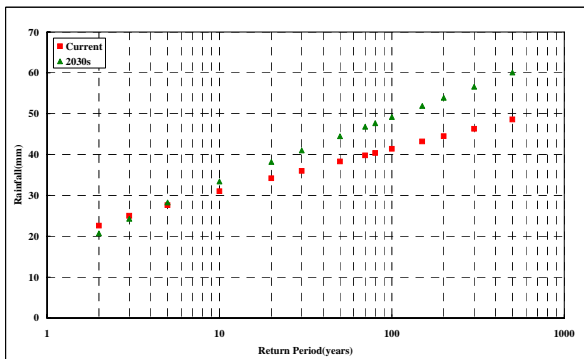


(e) Duration 24hr

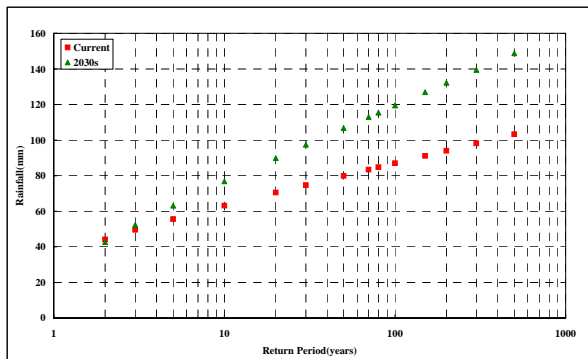


(f) Duration 48hr

Fig. 17. Duration-Frequency-Probability Distribution(Seoul Station)

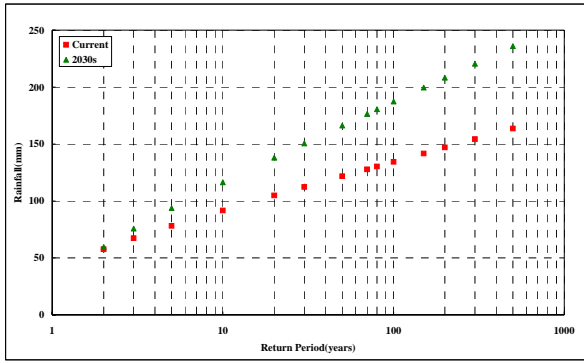


(a) Duration 1hr

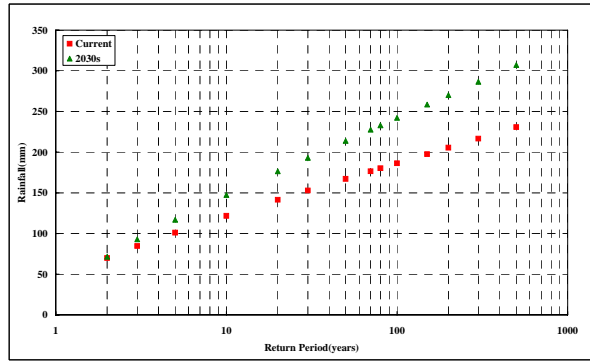


(b) Duration 3hr

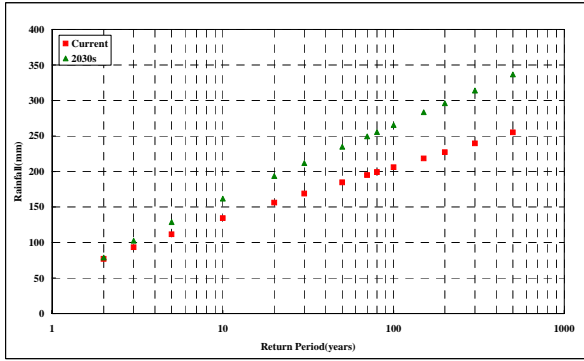
Fig. 18. Duration-Frequency-Probability Distribution(Gangju Station)



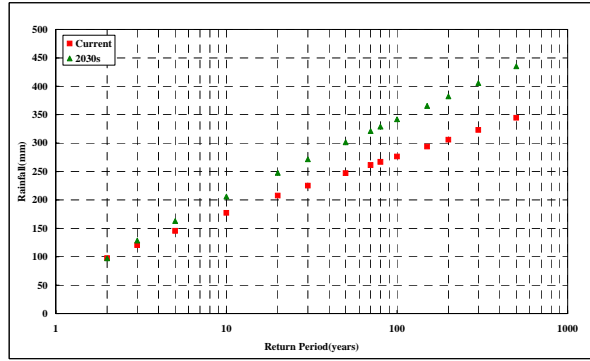
(c) Duration 6hr



(d) Duration 12hr

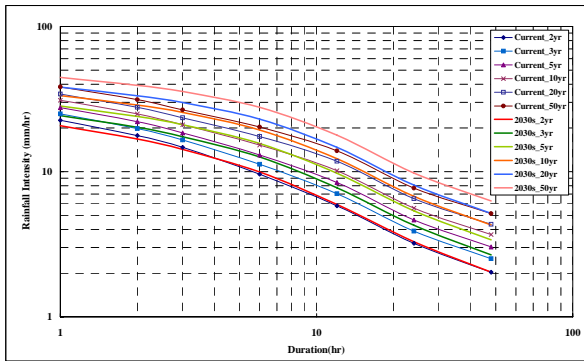


(e) Duration 24hr

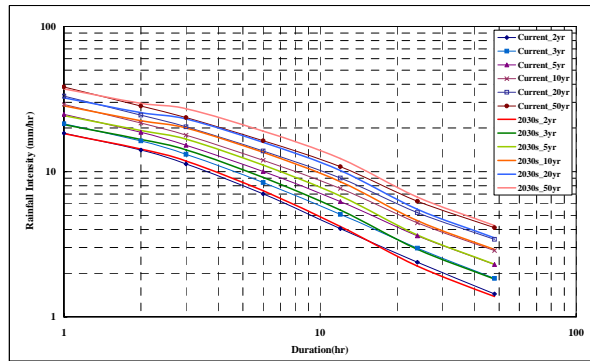


(f) Duration 48hr

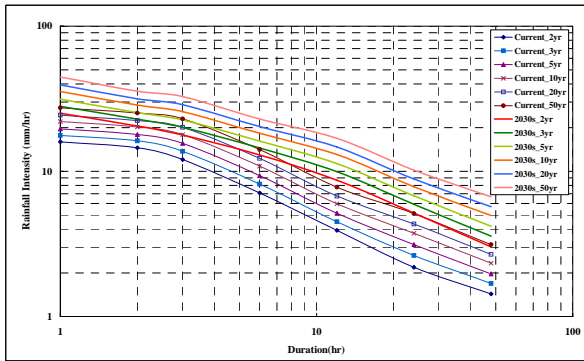
Fig. 18. Duration-Frequency-Probability Distribution(Gangju Station) (Continued)



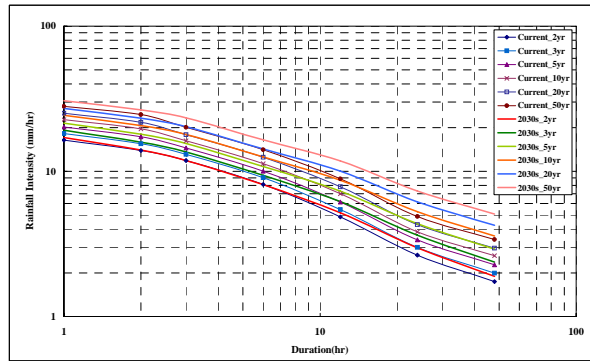
(a) Seoul station



(b) Daegu station



(c) Jeonju station



(d) Gangju station

Fig. 19. Intensity-Duration-Frequency Curve

태를 보여 Fig. 19 (b)에 나타난 대구 지점과 차이를 보였다. 한편, Fig. 19 (c)에 나타난 전주 지점의 경우, 가장 두드러지는 I-D-F 곡선을 얻을 수 있었다. 재현기간 5년부터 200년까지 지속시간이 길어질수록 강우강도가 크게 증가하였으며 서울, 광주 지점과는 다르게 짧은 지속시간에서도 현재 상태를 능가하는 결과를 보였다.

5. 결과 및 고찰

본 논문에서는 전 세계적으로 경험하고 있는 기후변화를 인정하고 미래의 기후변화가 극한 강우에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위해 SRES B2 기후변화 시나리오와 YONU CGCM을 이용하여 미래의 극한강우의 특성 분석과 I-D-F 분석을 실시하였다. 이 과정에서 MBLRP 모형을 이용하여 분해기법(Disaggregation)을 적용하여 매개변수를 추정하여 일(daily)단위의 모의 자료를 시(hourly)단위 자료로 모의하였다. 추정된 매개변수로부터 모의된 시(hourly)자료와 시(hourly)단위의 관측 자료를 비교한 결과 극치계열 사상을 적절히 재현하지 못하여 과소 추정되는 경향이 있는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Bias-Correction 방법 중 하나인 Quantile Mapping 방법으로 보정된 각 관측소별 일(daily) 단위 자료를 시(hourly) 단위 자료로 변환하기 위하여 수정구형필스(MBLRP) 모형을 적용하고 과거 일정 기간의 자료로부터 특성치를 추출하여 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수로 과거 일정 기간의 시(hourly) 단위 자료를 모의하여 실제 관측 자료와 비교한 결과 건조기간 발생 확률, 변동계수와 왜곡도 등 통계적 특성치를 포함하여 자기상관계수가 관측치와 비교해서 크게 벗어나지는 않았으나 극치계열을 적절히 재현하지 못하여 과소추정되는 경향이 있는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 기후변화는 이미 미래의 기상상태가 현재와는 다른 현상이 발생할 가능성을 대변하는 요소가 될 수 있으며 이는 현재와 미래의 기후사상들의 확률분포를 통해 확인할 수 있다. 이에 본 논문에서는 현재와 기후변화를 고려해 작성한 미래(2030s)의 시나리오를 이용하여 서울, 대구, 전주와 광주 관측소의 확률분포형을 비교하였다. 그 결과 관측소에 따른 차이를 보였으나 전반적으로 미래 시나리오에 의하여 작성된 확률분포형이 오른쪽으로 이동하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 곧 현재와 비교하였을 때 미래에는 극한강우 발생 가능

성이 높고 그 크기(강도)가 커질 가능성이 있는 것으로 해석할 수 있다.

- 3) 추정된 매개변수의 적용 가능성과 타당성을 검토한 후 모의한 미래 2030년대의 2CO₂ 상황에서의 시(hourly) 단위 자료로부터 I-D-F 곡선을 작성하였다. 강우 지속시간은 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간, 48시간으로 하였으며, 재현기간은 2년, 3년, 5년, 10년과 20년으로 설정하였다. 강우강도, 지속시간과 빈도별 곡선을 작성한 결과, 현재와 비교하였을 때 지속시간이 길어질수록 강우강도가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 전주 지점의 경우 강우강도 증가가 가장 큰 것으로 추정되었다.
- 4) 현재 분해기법(Disaggregation)으로부터 추정된 시(hourly) 단위의 모의자료가 과소추정되는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 본 논문에서는 이 결과에 대한 불확실성 분석을 추가로 실시하지 않았으며 추후 과소추정되는 부분과 불확실성 분석을 통해 모의자료의 적정성 여부를 객관화할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 정량적인 부분보다는 GCM 자료를 이용하여 모의된 1CO₂(현재)와 2CO₂(2030s)의 확률분포를 도시하여 기후변화로 인하여 현재보다 강우량의 증가가 발생할 수 있다는 가능성을 제시하는데 의미를 두고자 한다.

과거에는 관측된 적이 없고, 따라서 예측할 수 없는 기후변화라는 현상이 전 세계적으로 이슈화되는 것은 근래에 들어 원인을 알 수 없는 폭우, 폭염과 이상 고온 현상 등을 경험하기 때문이다. 날씨, 기상과 기후는 고정된 형태나 일관성이 없는 것으로 그 안에 이미 많은 불확실성을 내포하고 있다. 그리고 이와 같은 사실은 비단 수문 관련 연구자만이 아니라 여러 분야 연구자들도 인정하고 있다. 어떤 모형을 통한 모의 결과가 현실을 똑같이 재현할 수도, 예측할 수 없음에도 불구하고 기후변화와 관련된 연구가 활발하게 진행되는 것은, 과거의 자료나 발생하였던 현상을 정확하게 맞추고 이에 근거하여 미래를 예측하는 것이 아니라 미래에 발생할 수 있는 가능성과 잠재성을 인지하도록 하는데 있다. 분명한 것은 이미 인정하고 부정할 수 없듯이, 모형은 현실에 나타난 현상을 똑같이 재현할 수도, 앞으로 일어난 일을 정확하게 예측할 수도 없으며 지금 이 순간도 시간이 지남에 따라 가까운 과거와는 다른 변화가 진행되고 있다. 다만, 모형을 이용한 모의 결과를 통해 잠재성을 인식함으로써 이에 대비하는 데 기반이 되어

줄 수 있을 것이다.

본 논문의 결과 또한 특정 기간, 특정 지역에 반드시 이러한 현상이 발생한다는 것을 의미하는 것이 아니라 기후변화를 고려한 여러 시나리오 중 하나에 근거하여 분석된 결과이며 그 잠재성을 평가하였다는 점에 의미를 부여하고 싶다. 모형의 목적은 각 자료나 현상을 정확하게 맞추는 것이 아니라 사람들이 가지고 있는 의문점을 가시화할 수 있다는 데 있다(Karlin, 1983).

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참고 문헌

- 김병식 (2005). 기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가, 박사학위 논문, 인하대학교.
- 김병식, 서병하, 김남원 (2003). “전이함수모형과 일기 발생모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 345-363.
- 안재현, 유출성, 윤용남 (2001). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.
- 오재호, 홍성길 (1995). “대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 143-157.
- 윤용남 (2001). 공업수문학, 13장 추계학적 모의발생기법, 청문각, p. 545.
- 윤용남, 유철상, 이재수, 안재현 (1999). “지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여: 1. 연/월강수량의 변화에 따른 일강수량 분포의 변화분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 617-625.
- 윤용남, 유철상, 오세정, 장수형 (2004). “기후변화에 따른 설계강수량의 변화추정에 관한 연구.” 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 849-853.
- 한국건설기술연구원(2000). 수자원계획의 최적화연구 IV: 기후변화에 따른 수자원계GhI의 영향평가, 건설교통부, 한국수자원공사
- Boorman, D.B. and Sefton, C.E.M. (1997).

“Recognizing the uncertainty in the quantification of the effect of climate change on hydrological response.” *Climate change*, Vol. 35, pp. 415-434.

Durman, C.F., Gregory, J.M., Hassell, D.C., Jones, R.G. and Murphy, J.M. (2001). “A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 127, No. 573, pp. 1005-1015.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G. and Stunell, J. (2007). “Modeling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England.” *Hydrologic & Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 1115-1126.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G., (2003a). “A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000.” *International Journal of Climatology*, Vol. 23, pp. 1313-1334.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G., (2003b). “Implications of changes in seasonal and annual extreme rainfall.” *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 13, p. 1720 doi:10.1029/2003GL017327.

Gellens, D. and Roulin, E. (1998). “Streamflow response of Belgian catchment to IPCC climate change scenarios.” *Journal of hydrology*, Vol. 210, pp. 242-258.

Griffith, G.M., Chambers, L.E., Haylock, M.R., Mamtom, M.J., Nicholls, N., Baek, H.J., Choi, Y., Della-Marta, P.M., Gosal, A., Iga, N., Lata, R., Laurent, V., Maitrepierre, L., Nakamigawa, H., Ouprasitwong, N., Solofa, D., Tahani, L., Thuy, T., Tibig, L., Trewin, B., VEDIAPAN, K., and Zhai, P. (2005). “Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific Region.” *International Journal of Climatology*, Vol. 25, pp. 1301-1330.

Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P. and Snover, A. (2003). “Climate change streamflow scenarios for critical period water planning studies: A technical methodology.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, in review

Hashino, T., Bradley, A.A., and Schwartz, S.S. (2007). “Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts.” *Hydrology*

- and *Earth System Science*, Vol. 11, pp. 939–950.
- Karlin, S. (1983). 11th R. A. Fisher Memorial Lecture. Lecture presented to the Royal Society, London.
- Khalik, M.N. and Cunnane, C. (1996). "Modeling point rainfall occurrences with the Modified Bartlett–Lewis Rectangular Pulse Model." *Journal of Hydrology*, Vol. 180, pp. 109–138.
- Kim, Byung Sik, Kim, Hung Soo, Seoh, Byung Ha, Kim, Na Won. (2007). "Impact of Climate Change on Water Resources in Yongdam Dam Basin, Korea." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment (SERRA)*, Vol. 21, No. 4, pp. 355–357.
- Kite, G.W. (1993). "Application of a land class hydrological model to climate change." *Water Resour. Res.* Vol. 29, pp. 2377–2384.
- Klein Tank, A.M.G. and Konneb, G. P. (2003). "Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–1999." *Journal of Climate*, Vol. 16, pp. 3665–3680.
- Koutsoyannis, D. (1994). "A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis." *Journal of Hydrology*, Vol. 156, pp. 193–225
- Koutsoyannis, D. and Onof, C. (2001). "Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model." *Journal of Hydrology*, Vol. 246, pp. 109–122
- Koutsoyiannis, D. (2003). "Climate change, the Hurst Phenomenon and hydrological statistics." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 1, pp. 3–24
- Kundzewicz, Z. W. (2004). Searching for change in hydrological data—Editorial *Hydrol. Sci. J. Special Section: Detecting Change in Hydrological Data* Vol. 49, No. 1, pp. 3–6.
- Lindström, G. & Bergström, S. (2004). Runoff trends in Sweden: 1807–2002. *Hydrol. Sci. J. Special Section: Detecting Change in Hydrological Data* Vol. 49, No. 1, pp. 69–83.
- McGuffie, K., Henderson–Sellers, A., Holbrook, N., Kothavala, Z., Balachova, O. & Hoekstra, J. (1999). "Assessing simulations of daily temperature and precipitation variability with global climate models for present and enhanced greenhouse climates." *Int. J. Climatol.* Vol. 19, pp. 1–26.
- Mckerchar, A. I. and Henderson, R. D. (2003). "Shifts in flood and low-flow regimes in New Zealand due to interdecadal climate variations." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 4, pp. 637–654.
- Meehl, G. A. and Tebaldi, C. (2004). "More intense, more frequent and longer lasting heat waves in the 21st century." *Science*, Vol. 305, pp. 994–997.
- Mirza, M.Q., Warrick, R.A., Ericksen, N.J. and Kenny, K.J. (1998). "Trend and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna basins in the south Asia." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 43, No. 6, pp. 845–858.
- Onof, C and Wheater, H.S. (1993). "Modeling of British rainfall using a random parameter Bartlett–Lewis rectangular pulses model." *Journal of Hydrology*, Vol. 149, pp. 67–95.
- Onof, C. (2001). "Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model." *Journal of Hydrology*, Vol. 246, pp. 109–122.
- Onof, C. (2007). "Bartlett–Lewis (not Rectangular) Pulse Model." RAINMAP workshop, Sep. 13th–14th http://www.rainmap.rl.ac.uk/pdfs/sep2007_workshop/Onof.pdf.
- Osborn, T.J., Hulme, M., (2002). "Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK." *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A*, Vol. 360, pp. 1313–1325.
- Osborn, T.J., Hulme, M., Jones, P.D., Basnett, T.A., (2000). "Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation." *International Journal of Climatology*, Vol. 20, pp. 347–364.
- Palmer, R., Wiley, M and Kameenui, A. (2004). Will Climate Change Impact Water Supply and Demand In the Puget Sound?, Department of Civil and Environmental Engineering University of Washington, Seattle WA.
- Panagoulia, D. and Dimou, G (1997). "Sensitivity of flood events to global climate change." *Journal of hydrology*, Vol. 191, pp. 208–222.
- Panofsky, H.A., and Briere, G.W. (1963). Some application of Statistics to Meteorology, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, p. 224.
- Paturol, J. E., Ouedraogo, M., Servant, E., Mahe, G., Dezetter, A. and Boyer, J.F. (2003). "The concept

- of rainfall and streamflow nomals in West and Central Africa in a context of climate variability." *Hydrol.Sci. J.*, Vol. 48, No. 1, pp. 125-137.
- Pongracz, R. Bogardi, I. and Duckstein, L. (2003). "Climate forcing of drought: a Central European example." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 1, pp. 39-50.
- Prudhomme, C., Jakob, D and Svensson, C. (2003). "Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchment." *Journal of hydrology*, Vol. 277, pp. 1-23.
- Rodriquez-Iturbe, I., Cox, D.R, and Isham, V. (1987). "Some models for rainfall based on stochastic point processes." *Proceeding Royal Society London A*, Vol. 410, pp. 269-288.
- Rodriquez-Iturbe, I., Cox, D.R, and Isham, V. (1988). "A Point Process Models for Rainfall: Further developments." *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 417, pp. 283-298.
- Saelthun, N.R., Aittoniemi, P., Bergstrom, S., Einarsson, K., Johannesson, T., Lindstom, G., Ohlsson, P. O., Thomsen, T. Vehrilainen B.and Aamodt, K. O (1998). "Climate change impacts on runoff and hydropower in the Nordic coundries." *TemaNord*, Vol. 552, p. 170.
- Tate, E. Sutcliffe, J., Conway, D. and Farquharson, F. (2004). "Water balance of lake victoria; update to 2000 and climate change modelling to 2100." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 49, No. 4, pp. 563-574.
- Wilby, R.L. and Dawson, C.W. (2001). "Using SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts." National Centre for Risk Analysis and Options Appraisal, UK Environment Agency.
- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P. (2004). "Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs." *Climatic Change*, Vol. 62, Issue 1-3, pp. 189-216.

(논문번호:07-157/접수:2007.12.29/심사완료:2008.02.14)