

기후변화를 고려한 일강우량의 지역빈도해석

송창우 · 김연수 · 강나래 · 이동률* · 김형수+

인하대학교 토목공학과

* 한국건설기술연구원 수자원연구실

Regional Frequency Analysis for Rainfall Under Climate Change

Chang Woo Song · Yon Soo Kim · Na Rae Kang · Dong Ryul Lee* · Hung Soo Kim⁺

Department of Civil Engineering, Inha university

* Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

요 약

기후변화에 따른 기상변화로 인하여 집중호우 및 돌발홍수 등의 빈도가 증가하고 있다. IPCC 4차 보고서(2007)는 21세기 후반까지 온도상승으로 인한 폭우 및 태풍이 점차 강력해질 것이라는 예측을 하고 있다. 영국에서 발간한 Flood Estimation Handbook(Institute of Hydrology, 1999)에 의하면 대상자료의 기간이 구하려는 재현기간보다 작은 경우에는 지점 빈도해석은 적절하지 않으므로, 지역빈도해석을 추천하고 있다. 이에 본 논문은 기후변화를 고려한 빈도해석을 수행하였으며, 이에 앞서 세계기상기구에서 제시한 기후지수를 이용하여 기후변화를 평가하고, 기상청 지역기후모델(KMA-RegCM3)의 강우 자료를 이용하여 기상청 산하 58개 관측소에 대하여 지역빈도해석을 실시하였다. Hosking와 wallis(1993)이 제안한 L-moment 알고리즘을 이용하여 지역빈도해석을 수행하였으며, 그 결과 일부지역을 제외한 대부분의 지역에서 강수량이 증가하였으며, 현재 기간 대비 7~10%의 증가율을 나타내었다. 미래 기후변화의 영향으로 중·남부지방은 상대적으로 강우량이 증가할 것으로 보이며, 미래 강우량에 따른 설계빈도를 재설정 및 강수량이 증가하는 지역에 대한 확률수량량의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 기후지수, KMA-RegCM3, 지역빈도해석

Abstract

Global warming and climate change have influence on abnormal weather pattern and the rainstorm has a localized and intensive tendency in Korea. IPCC(2007) also reported the rainstorm and typhoon will be more and more stronger due to temperature increase during the 21st century. Flood Estimation Handbook(Institute of Hydrology, 1999) published in United Kingdom, in the case that the data period is shorter than return period, recommends the regional frequency analysis rather than point frequency analysis. This study uses Regional Climate Model(RCM) of Korea Meteorological Administration(KMA) for obtaining the rainfall and for performing the regional frequency analysis. We used the rainfall data from 58 stations managed by KMA and used L-moment algorithm suggested by Hosking and wallis(1993) for the regional frequency analysis considering the climate change. As the results, in most stations, the rainfall amounts in frequencies have an increasing tendency except for some stations. According to the A1B scenario, design rainfall is increased by 7~10% compared with the reference period(1970-2010).

Keywords : Climate Change, Climate Indices, KMA-RegCM3(Regional Climate Model), Regional Frequency Analysis

1. 서론

전 세계적으로 지구온난화에 따른 기후변화로 인하여 기상이변이 빈번히 발생하고 있으며, 이로 인한 피해가 확대되고 있다. 기후변화는 단순히 평균기온의 상승만을 의미하는 것이 아니라 극한 온도, 바람, 강설, 강우, 해수면 상승과 같이 인간생활에 직·간접적으로 영향을 미치는 자연현상의 변화를 초래하고 있다. 이러한 자연현상의 변화는 국가와 국민들에게 막대한 물적·정

신적 피해를 입히게 되어 국가적 차원에서 기후변화에 적응하기 위한 대안 마련이 시급하고, 기후변화의 영향은 앞으로도 지속될 것이라는 견해가 지배적이기 때문에 기상이변으로부터 국민을 보호하기 위한 방재기준 마련이 어느 때보다 중요한 시점이라 할 수 있다.

기후변화에 따른 미래 강우량의 증가와 설계기준의 재설정이 요구되는 시점에서 기존의 지점 빈도해석은 우리나라와 같이 강우 자료의 관측기간이 짧고 자료가 부족할 경우 정확도의 문제를 발생시킬 수 있으므로,

+ To whom correspondence should be addressed.
sookim@inha.ac.kr

지점빈도해석에는 충분한 자료확보가 이루어져야 한다. 그렇지 못할 경우에는 선정된 확률분포형에서 매개 변수의 편차가 발생할 수 있다(Oh et al., 2008). 지역 빈도해석은 지점자료가 부족한 경우 확률강우량을 산정하기 위하여 제안된 방법으로 관측된 강우자료의 부족에 따른 문제점을 해결하기 위한 대안으로 연구가 수행되었으며 안정적인 확률 강우량을 산정할 수 있는 방법으로 적용되고 있다(Stedinger and Lu 1995; Hosking and Wallis, 1997; Lee and Heo, 2001; Heo et al., 2007). Flood Estimation Handbook(Institute of Hydrology, 1999)에 의하면 대상자료의 기간이 구하려는 재현기간보다 작은 경우, 지점 빈도해석보다는 지역빈도해석을 추천하고 있다. 대상자료기간이 T 에서 $2T$ 일 때는 지점빈도해석과 지역빈도해석을 동시에 수행하는 것을 추천하고 있다. 대상자료의 기간이 $2T$ 이상이면 지점빈도해석을 사용하는 것으로 충분하며, 비교대상으로 지역빈도해석을 수행하는 것도 추천하고 있다(Heo et al., 2007). 이와 함께 기후변화에 따른 미래 강우 변화를 예측하기 위해서 각 국은 Global Climate Model(GCM) 및 GCM을 지역상세화한 Regional Climate Model(RCM)을 이용하고 있으며, 예측된 미래 강우를 통하여 빈도해석 및 유출량을 평가하고 있다.

Odena and Prudhomme(2002)는 미래의 강우-유출 모델에 적용하기 위한 자료를 구축하고, 홍수량 빈도해석을 실시하였으며, 2005년에 영국의 Hadley 센터에서 개발한 HadRM2, HadRM3H를 이용하여 Fowler et al.,(2005)은 지역빈도해석 및 Grid Box Analysis(GBA)를 이용하여 평가 및 확률강우량의 변화를 분석하였으며, HadRM3H 모형의 극한강우 재현에 대하여 적용성을 평가한 결과 영국내의 50년 이상의 극한 강우에 대하여 만족할만한 결과를 보여주었다. Kay et al.,(2006)는 미래 강우의 빈도해석시 GCM보다 RCM이 유리하다고 제안하였으며 RCM을 이용하여 기후변화가 영국의 침투 홍수량에 미치는 영향을 평가하였다. Mailhot et al.,(2007)은 Canadian Regional Climate Model (CRCM)을 이용하여 연 최대 2, 6, 12, 24 시간 강우를 추출하여 지역빈도해석을 적용하여 Intensity- Duration-Frequency(IDF)곡선을 작성하였다. Thodsen(2007)은 HIRHAM RCM 모형을 이용하여 기후변화가 강우의 극한값에 미치는 영향을 평가하였다. 국내에서는 Kwon et al.,(2008)은 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위하여 RCMs로부터 제시된 강수계열의 특성을 분석하였다. 즉, RCMs의 적용성을 평가하기 위하여 수문학적 통계 특성치분석, Wavelet Transform 분석, EOF분석 등을 실시하여 관측강우와 비교하였다. Kim et al.,(2008)은 YONU CGCM을 이용하여 2030s(2031~2050)를 모의하였으며, 통계학적 축소기법을 적용하여 Quantile- Mapping 방법으로 편이보정한 후, BLRPM을

이용하여 시자료로 분해하여 IDF 곡선을 제시하였다. Kyoung et al.,(2009)은 기후모형으로부터 축소된 월 총 강수량을 일 강수량으로 축소하기 위한 축소기법을 개발하여 기후변화가 확률강우량에 미치는 영향평가 기법을 제안하였다. 또한, 노르웨이 GCM인 BCM2 모형을 이용하여 기후변화가 서울지역에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법론을 제시하였다. Kim et al.,(2008)은 YONU GCM SRES B2 시나리오를 대상으로 STARDEX(2005)에서 제시한 방법을 이용하여 국내 기상청 지점을 대상으로 극한지수를 산정함으로써 기후변화가 극한 강우에 미치는 영향을 지수를 통해서 제시하였다. 또한, 기후변화가 극한강우에 미치는 영향을 기후변화에 대비한 물안보 확보방안(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009)에서 검토한 사례가 있으며, 기상청에서 제공하는 RCMs을 기반(A2 시나리오)으로 카오스적 분해기법을 적용하여 한강유역에 대한 지속시간에 따른 빈도별 확률강우량을 제시하였다. 지금까지의 확률강우량 산정과 관련된 기존 연구들은 지점 빈도해석과 더불어 지역빈도해석을 수행하고 있으나, 기후변화 시나리오를 이용한 연구에서는 미래 확률강우량 예측에 있어 아직까지 지점빈도해석이 대부분으로 지역 빈도해석을 적용은 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 세계기상기구에서 제시한 기후지수를 이용하여 기후변화를 평가하고, 기상청 지역기후모델(KMA-RegCM3)의 강우 자료를 이용하여 기상청 산하 58개 관측소에 대하여 지역빈도해석을 실시하고자 하였다.

2. 기후변화 시나리오와 기후모형

2.1 기후변화 시나리오

IPCC의 배출시나리오에 관한 특별보고서(Special Report on Emission Scenarios, SRES)에 따르면 배출 시나리오는 4개의 배출시나리오로 구성된다. 이 중 A1B(중배출), A2(고배출), B1(저배출) 시나리오는 IPCC AR4 작성을 위한 표준시나리오로 채택되었고, 우리나라 기상청에서는 미래 기후변화 시나리오 산출을 위해 IPCC SRES A1B, A2, B1 온실가스 증가 시나리오를 전 지구 기후변화예측모델에 적용하여 전지구 기후변화 자료를 산출하고 있다. 각각의 시나리오에 따라 모의한 결과를 보면, 2100년에 830ppm, 720ppm, 550ppm의 CO₂ 농도를 보이고 있다. 본 연구에서는 기후변화 시나리오는 현재 전세계가 온실가스 감축을 위해 노력하고 있고, 대체 에너지 개발을 지속적으로 하고 있는 것에 착안하여 A1B 시나리오를 선택하였으며, Table 1은 해당 시나리오에 대한 KAM-RegCM3에 대한 정보이다.

Table 1. The future climate data

Item	Future climate data(KMA-RegCM3)
Scenario	A1B
Climate model	MM5
Grid size	~27km (~0.2432°)
Meteorological Factor	Temperature(Maximum, Minimum, Average), Precipitation, Specific humidity
Observation period	daily, monthly

2.2 기후모형의 선정

기후변화에 의한 강수량 예측 기법으로는 크게 합성 시나리오 기법, 상사 시나리오기법, 대기 순환 시나리오 기법이 있는데 그 중 가장 대표적인 것은 대기순환모형인 General circulation Model(GCM) 모형을 이용하는 방법이다. 이는 기후 구성 요소간의 상호 작용 과정의 물리적, 화학적, 생물학적 특성에 근거하여 기후 시스템을 수치화한 것으로 다양한 시나리오로 표현한다.

Kyoung(2010)는 IPCC AR4에서 제시하고 있는 24개의 GCM 모형 중 한반도를 육지로 모의하고 있는 BCM2, CNCM3, FGOLS, MIHR 모형을 우선적으로 1차 선정하여 국내 적용성을 검토하였다. 최종적으로 국내에 가장 적합한 모형을 CNCM3 모형으로 제시하였는데, 특히, 겨울철 영하 온도를 가지는 우리나라 기상특성을 잘 모의하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 Kyoung(2010)의 연구결과를 참고하여 우리나라의 기후변화 모의를 위한 모형으로 CNCM3 모형을 선정하였다. 본 연구를 위하여 CNCM3 모형은 IPCC DDC를 통해 제공되는 강수, 온도, 습도, 바람 등 기후자료를 이용하였다.

3. ETCCDI 극한지수

3.1 극한지수의 개념 및 종류

IPCC 3차 보고서(Third Assessment Report, TAR)에서 극한 기상 사상이란, 특정기간을 벗어나 발생한 사상들의 평균이라 하였으며 이 평균 자체를 극한이라고 표현하였다. 예를 들면, 이전의 강우 발생 시기를 벗어나 출현한 강우 사상 자체를 극한으로 표현하는 것이다. 또한, 극한 기상 사상은 특정 장소의 통계적 특성 분포에서 거의 발생하지 않은(rare) 사상으로 보통 10th 또는 90th 퍼센타일(percentile) 또는 그보다 더 발생하지 않는 경우로도 정의하고 있다(IPCC, 2001; Ganguly). 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서는 극치사상에 대한 정량화의 중요성을 인식하고 최근 극치값의 분석과 관련한 가이드라인 “Guidelines on Analysis of

extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation(WMO, 2009)”을 제시하였다.

여기서는 관측된 자료의 극치 기상 및 기후의 변화를 파악 할 수 있도록 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices)는 극치지수를 정의하였고, 온도 및 기후에 관한 27개 지수들의 극치 특성을 설명하였다. 지수개념의 중요성 중 하나는 연중 특정 한계점 이상을 초과하는 일수를 계산하는 것이다. 극치사상을 평가하기 위하여 초과 일수를 계산하는 한계점 기준은 퍼센타일(percentile)을 기초로 한다. 고정된 한계점보다 퍼센타일 한계점을 선택하는 이유는 퍼센타일 한계점을 초과하는 일수가 공간적으로 균등하게 분포되어 있고, 지역을 분석할 경우 더 의미있는 결과를 주기 때문이다. 본 논문에서는 ETCCDI에서 정의한 27개의 온도 및 강우관련 지수 중 강우관련 6가지 지수를 선정하였다. 선정된 지수는 Table 2와 같다.

(1) 강우강도(SDII)

강우강도지수는 식(1)과 같이 계산되며, 여기서, RR_{wj} 는 j 기간 내에 습윤일 $w(RR \geq 1mm)$ 일 총 강우이며, W 는 j 기간 내에 습윤기간 일수이며 Eq. (1)이다

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \tag{1}$$

(2) 50 mm, 80 mm이상 강우관측 횟수

(R_{50mm}, R_{80mm})

강우량과 관련한 지수는 50mm, 80mm 이상인 날의 횟수로 정의된다(Eq. (2)). 여기서 RR_{ij} 은 j 기간 내에 i 번째 날의 일총강우량이며, RR_{ij} 가 50mm, 80mm이상 발생하는 일수이다.

$$RR_{ij} \geq 50\text{ mm}, 80\text{ mm} \tag{2}$$

(3) 건조 지속기간(CDD)

건조 지속기간은 1mm 이하인 날이 연속적으로 발생하는 날의 수로 정의된다(Eq. (3)). RR_{ij} 는 j 기간 내에 i 번째 날의 총강우량이며, RR_{ij} 가 1mm이하로 연속적으로 발생하는 날의 수이다.

$$RR_{ij} < 1mm \tag{3}$$

(4) 지속기간 1, 5일 최대 강우량($RX1day, RX5day$)

최대 강우량 지수는 Eq. (4)와 같이 계산되며, 여기서, RR_{kj} 는 j 기간 내에 k 간격으로 연속 1일 또는 5일 동안의 총 강우량이며, j 기간 내에 1일 또는 5일 총 강우량의 최대값을 산정함으로서 1일 또는 5일 최대 강우량을 산정한다.

$$RX1day_j \text{ or } RX5day_j = \max(RR_{kj}) \tag{4}$$

Table 2. The ETCCDI rainfall related indices of extremes

ID	Description	Unit
<i>SDII</i>	Simple daily intensity index	mm/day
<i>I50</i>	Number of heavy precipitation days	Days
<i>I80</i>	Number of very heavy precipitation days	Days
<i>CDD</i>	Consecutive dry days	Days
<i>RX1day</i>	Max 1-day precipitation amount	mm
<i>RX5day</i>	Max 5-day precipitation amount	mm

4. 지역빈도해석

지역빈도해석은 지점 자료가 부족한 경우 또는 미계측 지점에서 확률강우량을 결정하기 위해 제안된 방법으로 지역빈도해석시 포함되는 지점의 자료들은 서로 독립적이고, 동일한 분포형을 모집단으로 갖는다는 가정에서 시작한다(Hosking and Wallis, 1997). 지역빈도해석 기법에는 Hosking와 Wallis이 제안한 L-모멘트기법과 지수홍수법(index flood method) 등이 있으며, 본 연구에서는 L-모멘트기법을 이용하여 빈도해석을 실시하였다.

4.1 L-모멘트 기법

L-모멘트법은 지역빈도해석 방법으로 대표적인 방법으로 최근에 Hosking and Wallis(1997)에 의해서 제안되었다. L-모멘트법은 근래에 많이 사용되고 있는 매개변수 추정방법(Hosking and Wallis, 1997)으로 추정량은 아래 Eqs. (5)~(8)와 같이 나타낼 수 있고, 확률가중모멘트법의 선형조합으로 표시되며, 전통적인 방법인 모멘트법이나 최우도법과는 달리 매개변수의 추정에서 거의 편이 되지 않는 것으로 알려지고 있다.

$$l_1 = E(X) \tag{5}$$

$$l_2 = 1/2E(X_{(2,2)} - X_{(1,2)}) \tag{6}$$

$$l_3 = 1/3E(X_{(3,3)} - 2X_{(2,3)} + X_{(1,3)}) \tag{7}$$

$$l_4 = 1/4E(X_{(4,4)} - 3X_{(3,4)} + 3X_{(2,3)} - X_{(1,4)}) \tag{8}$$

여기서, $E(\cdot)$ 는 기댓값이고, $X(i,n)$ 는 크기가 n 인 표본 중에서 i 번째로 작은 통계량이다. L-모멘트 비는 다음 식과 같다.

$$t_2 = l_2/l_1 \Rightarrow L-CV(L-coefficient\ of\ variation) \tag{9}$$

$$t_3 = l_3/l_2 \Rightarrow L-skewness \tag{10}$$

$$t_4 = l_4/l_2 \Rightarrow L-kurtosis \tag{11}$$

동질성을 갖는 한 지역 내에 있는 여러 지점들에 가장 적합한 확률분포형을 선정하기 위한 적합성 척도 Z 는 다음 Eq. (12)와 같다.

$$Z^{DIST} = \frac{\tau_4^{DIST} - \bar{t}_4 + \beta_4}{\sigma_4} \tag{12}$$

여기서 β_4 는 L-kurtosis의 편이, σ_4 는 \bar{t}_4 의 표준편차이고 다음 Eqs. (13)~(14)과 같다.

$$\beta_4 = \frac{1}{N_{sim}} \sum_{m=1}^{N_{sim}} (\bar{t}_4^{[m]} - \bar{t}_4) \quad (13)$$

$$\sigma_4 = \left[\frac{1}{N_{sim}} \left\{ \sum_{m=1}^{N_{sim}} (\bar{t}_4^{[m]} - \bar{t}_4)^2 - N_{sim} \beta_4^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (14)$$

여기서, N_{sim} 은 모의 발생수이며, 적합성 척도의 임계값은 1.64로 $|Z_{DIST}| \leq 1.64$ 와 같다(Hosking and Wallis, 1997).

4.2 강우의 동질성 검증

지역빈도해석의 적용에 대한 기본가정은 대상구역의 자료별 확률분포함수가 동일하다는 것이므로 지역구분의 실시 여부에 관계없이 지역의 동질성 검토를 실시할 필요가 있다. 불일치척도(Discordancy measure) 및 이질성 척도(Heterogeneity measure)를 이용한다.

불일치 척도란 여러 지점들이 하나의 지역으로 구성 되었을 때, 지점들이 지역과 전체적으로 불일치하는 지를 확인할 수 있는 일종의 기준으로 Eq. (15)를 이용하여 산정한다.

$$D_i = \frac{1}{3} N(u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (15)$$

여기서, $u_i = [t^{(i)} t_3^{(i)} t_4^{(i)}]^T$ 는 지점 i 의 L-CV, L-skewness, L-kurtosis인 t, t_3, t_4 를 포함하는 벡터이며, \bar{u} 는 소유역내 지점들의 산술평균 벡터이다. 만약 D_i 가 한계값을 초과하게 되면 지점 i 는 불일치하다고 한다. 불일치 척도를 결정하는 D_i 를 결정하는 것은 매우 어려운 문제로 Hosking과 Wallis(1993)는 $D_i \geq 3$ 을 제시하였다. 불일치척도에 의해 이상 자료를 제거한 후, 이질성 척도를 이용하여 자료의 동질성을 파악한다. 이질성 척도는 다음과 Eq. (16)과같이 자료의 이산도(dispersion)를 모의 발생시킨 평균과 이산도의 차, 모의 발생시킨 표준편차의 비로 정의된다(Hosking, 1990).

$$H = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} \quad (16)$$

여기서, V 는 지점 L-CV들의 가중표준편차, μ_V 와 σ_V 는 각각 V 의 평균과 표준편차를 의미한다. Hosking and Wallis(1997)는 이용된 L-모멘트비에 따라 이질성 척도를 (L-CV; L-변동계수), (L-skewness; L-왜곡도계수), (L-kurtosis; L-첨예도계수)로 구분하였고, $H < 1$ 이면 동질성 지역, $1 \leq H < 2$ 이면 이질성의 가능성이 있는 지역, $H > 2$ 이면 이질성 지역으로 분류하였다.

5. 기후변화를 고려한 지역빈도해석

5.1 대상구역 및 목표기간

본 논문에서는 한반도의 기상청 산하 강우관측소 중 관측 자료년수가 30년 이상이 되는 58개 관측소 선정하였다. 총 58개의 관측소 중 주요도시 6개 지점(서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산)을 대표지점으로 하여 경향성 분석 결과를 제시 하였다. 또한, 지역기후모델을 통하여 산정된 58개 지점의 미래 강우를 통하여 지역빈도해석을 실시하였다. Fig. 1는 전국 58개 대상 관측소 지점 및 위치를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 기후변화 관측기간으로 향후 90년간 (2011~2100)을 설정하였으며, 미래 확률강우량 산정을 위해 목표기간을 Table 3와 같이 2011~2040년(목표기간Ⅱ)까지를 단기, 2041~2070년(목표기간Ⅲ)까지를 중기, 2071~2100년(목표기간Ⅳ)까지를 장기로 구분하였으며, 이전 기간을 포함하지 않고 독립적으로 적용하려고 하였다.

Table 3. Target periods

Division	Period
Target I(1990s)	- 1971~2010 yrs (Reference period)
Target II(2020s)	- 2011~2040 yrs (Projection period)
Target III(2050s)	- 2041~2070 yrs (Projection period)
Target IV(2080s)	- 2071~2100 yrs (Projection period)



Fig. 1. Weather stations

5.2 극한지수 산정

기후변화를 고려한 강우관련 극한지수 6가지 지수를 산정한 결과, 건조지속기간을 제외한 5가지 지수에 대해서 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 2~Fig. 7). 또한, 건조지속기간은 현재 상태와 비슷하거나 증가 또는 감소를 반복하며 지역별로 차이를 보였다. 건조지속기간이 증가경향을 나타내는 곳은 강우일 수는 줄어들면서 집중호우가 크게 나타남을 알 수 있고, 감소경향을 나타내는 곳은 강우일수가 늘어남에도 불구하고 집중호우가

크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 과거관측자료(약 40년)에서 확인 할 수 있듯이 집중호우 현상이 현재까지 증가하고, 미래에도 이 경향을 유지할 것이라는 판단을 할 수 있다. Fig. 2~Fig. 7은 한반도 지역 58개 지점중 주요 도시지역 6개에 대하여 연도별 극한지수를 산정하여 그래프로 도시한 것이며, Table 4는 한반도 지역 58개 지점중 주요 도시지역 6개에 대한 유의성 검토결과이다. 유의수준 검토는 6가지 지수에 대하여 신뢰구간 95%에 대하여 이루어졌으며, 전반적으로 유의한 결과를 얻은 것을 확인할 수 있다.

Table 4. The significance test (P-value)

Station	<i>SDII</i>	<i>R50</i>	<i>R80</i>	<i>CDD</i>	<i>RX1day</i>	<i>RX5day</i>
Seoul	0.162	0.341	0.227	0.628	0.205	0.024
Incheon	0.042	0.144	0.032	0.715	0.223	0.052
Daejeon	0.123	0.271	0.282	0.842	0.196	0.136
Daegu	0.810	0.400	0.504	0.889	0.340	0.508
Gwangju	0.144	0.070	0.064	0.886	0.203	0.319
Busan	0.304	0.238	0.113	0.399	0.937	0.535

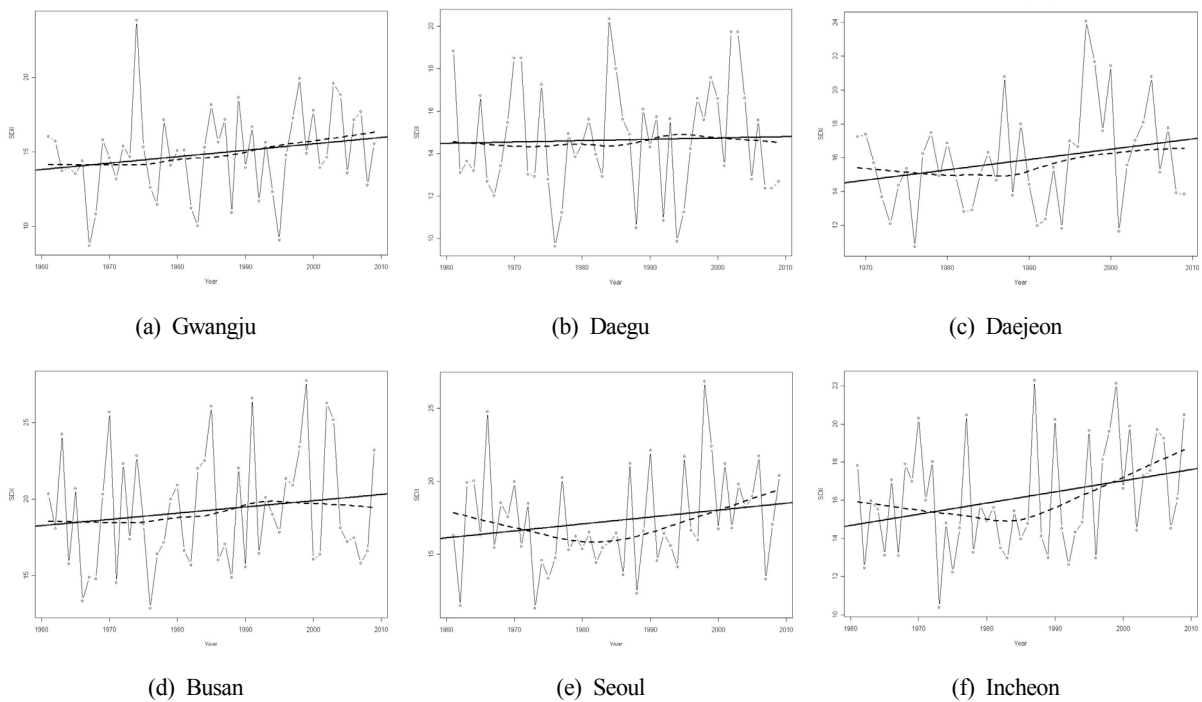


Fig. 2. Rainfall intensity(Simple daily intensity index, *SDII*)

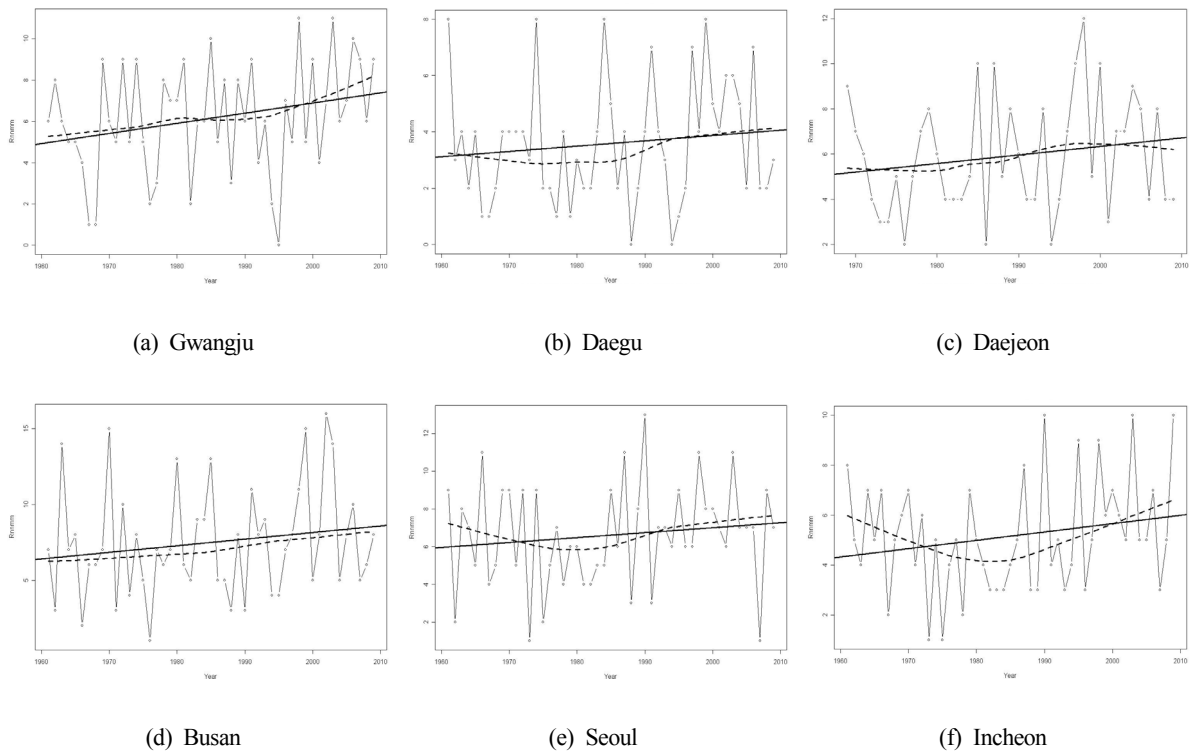


Fig. 3. The number of heavy precipitation days($R50$)

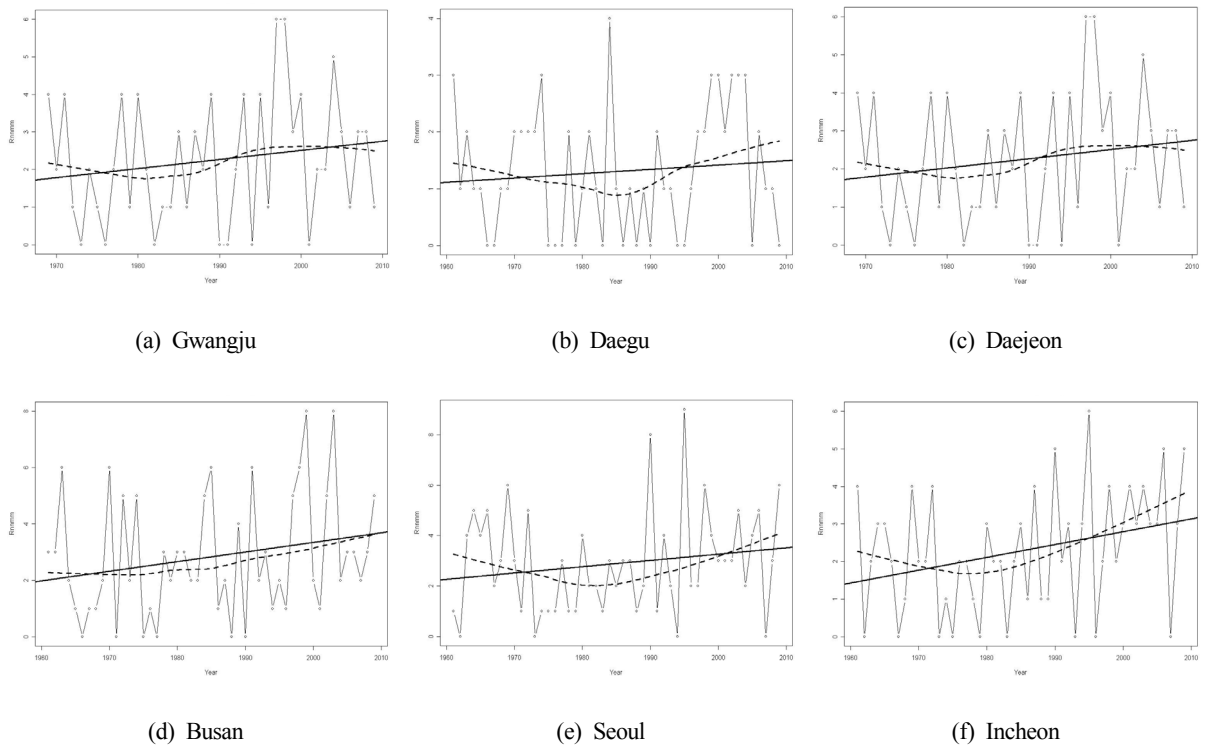


Fig. 4. The number of very heavy precipitation days($R80$)

Regional Frequency Analysis for Rainfall Under Climate Change

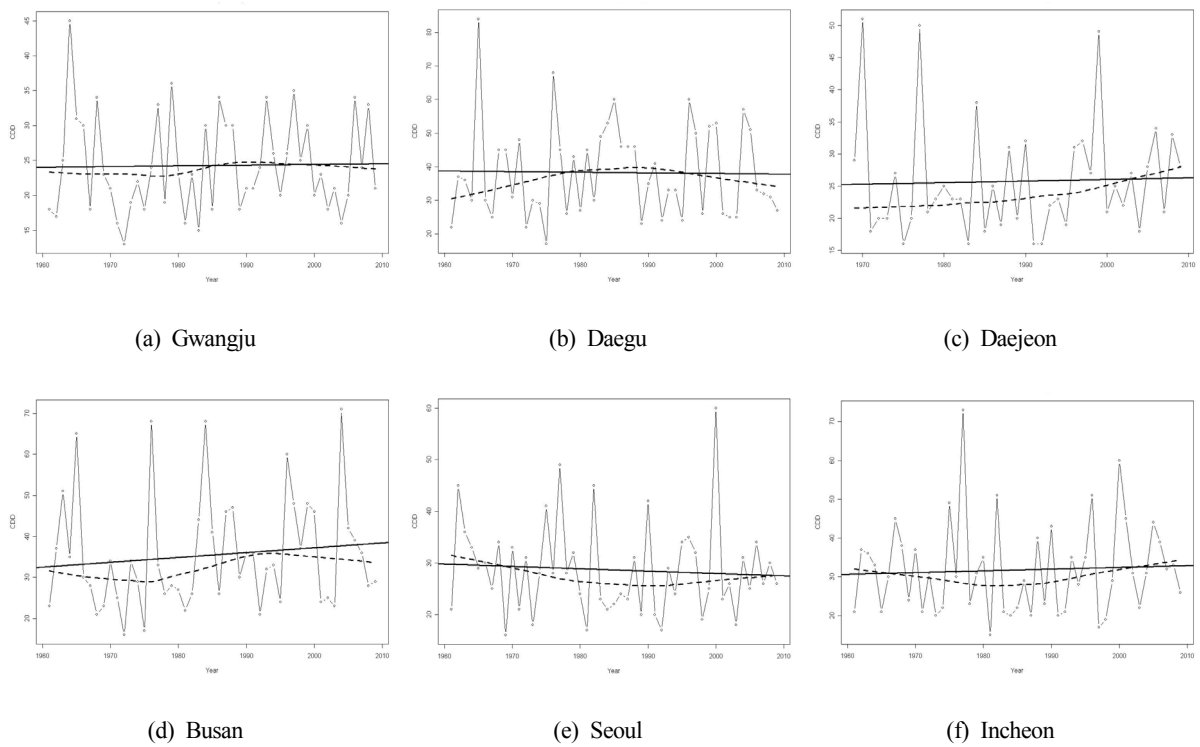


Fig. 5. Consecutive dry days(*CDD*)

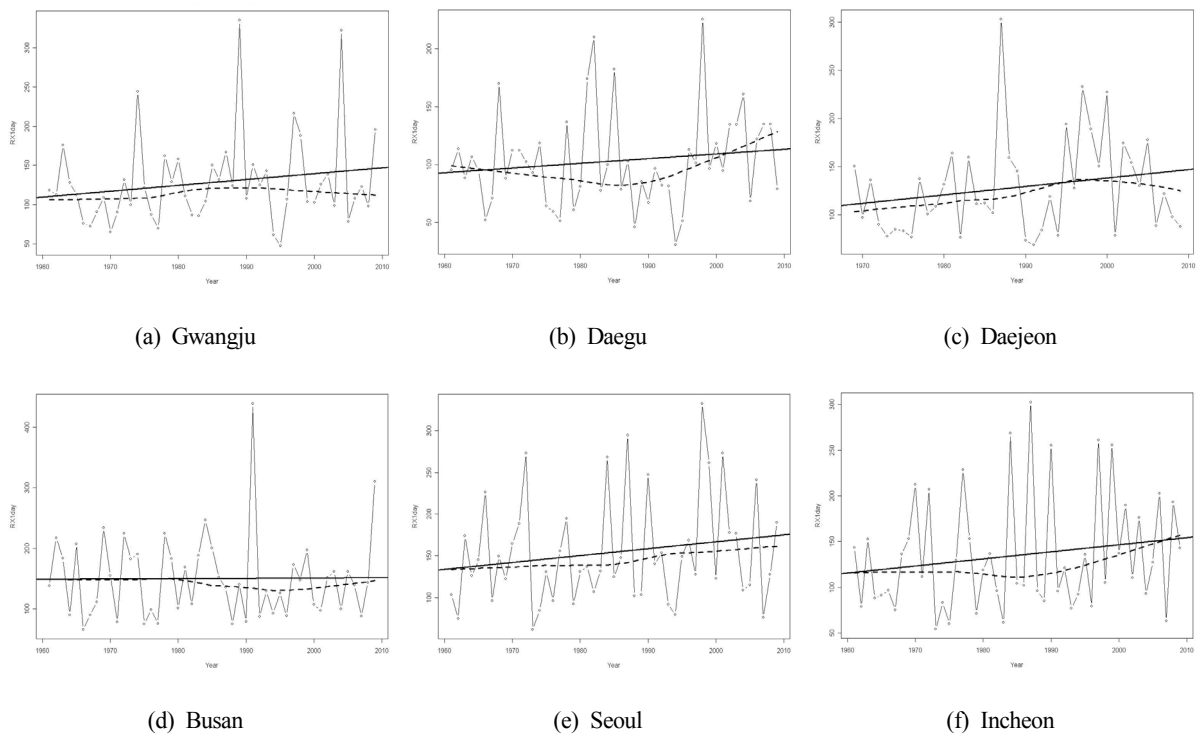


Fig. 6. Max 1-day precipitation amount(*RX1day*)

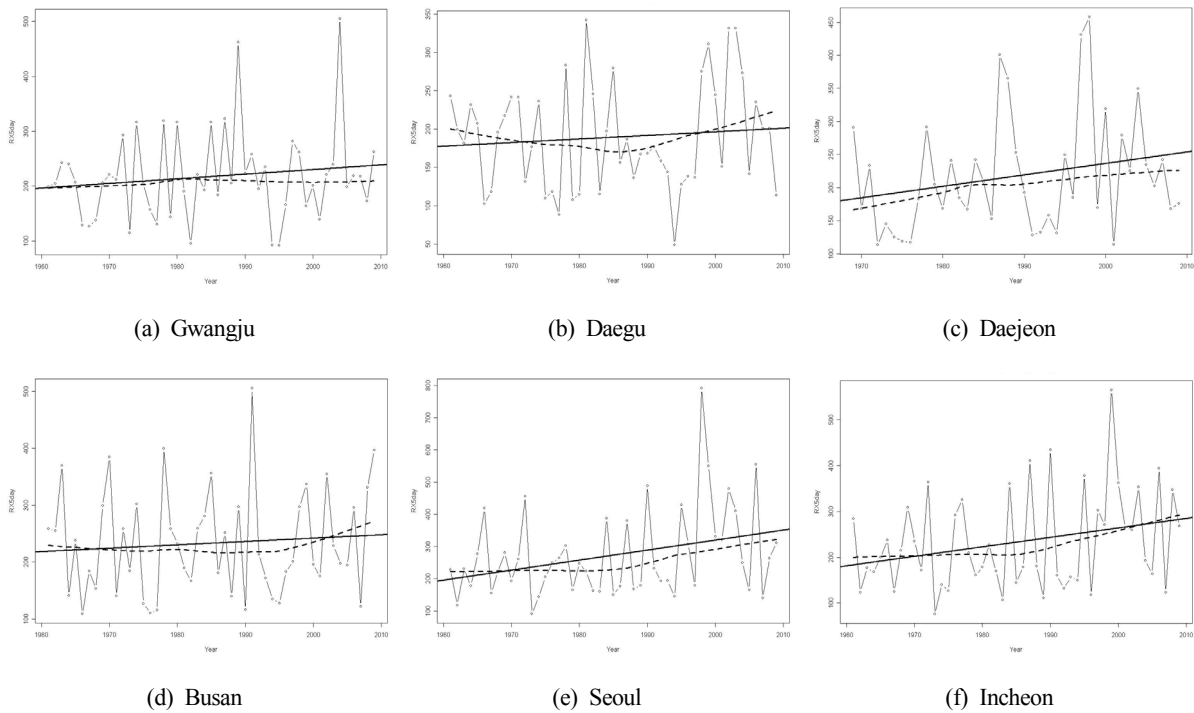


Fig. 7. Max 5-day precipitation amount($RX5day$)

5.3 강우자료의 군집분석

강우자료의 지점별 특성은 평균과 L-변동계수 및 L-모멘트비로서 나타낼 수 있다. l_1 는 분포의 평균을 의미

하며, l_2 는 L-scale, t_2 는 L-변동계수, t_3 는 왜곡도계수, t_4 는 첨예도계수이다. 이와 같이 L-모멘트 비를 통하여 분포의 Scale 및 Shape를 측정할 수 있다. Table 5은 각 지점별 통계적 특성을 나타낸 것이다.

Table 5. The statistical characteristics for each station

Station No.	Station	l_1	l_2	t_2	t_3	t_4
90	Sokcho	135.26	37.5462	0.2802	0.1017	0.0321
100	Daekwanryung	192.27	66.4603	0.4821	0.3812	0.2148
101	Chuncheon	130.73	33.5964	0.2302	0.1816	0.096
105	Gangneung	178.89	63.4255	0.4997	0.361	0.2438
...
295	Namhae	187.12	51.4462	0.2906	0.1434	0.0694

지역빈도해석의 동질지역 형성은 지형학적 의미가 아닌 통계적 특성이 동일한 집단을 의미하기 때문에 분석 결과 서울 및 제주도가 같은 군집으로 분석될 수 있다. 이러한 이유로 인하여 본 연구에서는 알고리즘을 통한 객관적 분할을 통해서 군집화된 지역 중 서울, 대전, 대구, 광주, 부산 등 대도시를 중심으로 한반도를 13개 지역으로 통계적 특성이 동일한 집단을 형성하였다(Table.

6). 동질성 검정 결과 기상청 관측 지점 58개 지역 모두 D_i 는 모두 3이하로 동질성 검정에서 모두 통과하였다 (Table 7). 또한 지역의 동질성을 검정하기 위하여 통계량 H 를 이용하여 지역의 동질성을 검토하였다. 동질성 통계량 H 에서 모두 1보다 작은 값을 가지므로 이 지역은 동질한 지역으로서의 의미를 갖는다고 할 수 있다 (Table 8).

Table 6. The result of cluster analysis

Group No.	Station	Group No.	Station
1	Sokcho, Chuncheon, Inje	8	Mokpo, Wando, Haenam, Goheung
2	Seoul, Suwon, Yangpyeong, Icheon, Jecheon, Hongcheon	9	Gwangju, Imsil, Namwon, Suncheon, Jangheung
3	Incheon, Seosan, Ganghwa, Cheonan, Boryeong, Buyeo	10	Tongyeong, Jinju, Geochang, Hapcheon, Miryang, Sancheong, Geoje, Namhae, Yeosu
4	Chupungryeong, Daegu, Boeun, Gumi, Uiseong		
5	Daegwanryeong, Gangneung	11	Jejudo, Seogwipo, Sungsanpo
6	Uljin, Yeongdeok, Ulleungdo	12	Jeonju, Jeongeup, Gunsan, Buan
7	Pohang, Yeongcheon, Ulsan, Busan	13	Cheongju, Daejeon, Yeongju, Mungyeong

Table 7. The result of discordancy measure

SITE	N	NAME	L-CV	L-SKEW	L-KURT	D(I)
1	30	0112	0.3043	0.1291	-0.0127	1.61
2	30	0129	0.2506	0.2484	0.1575	0.81
3	30	0201	0.3090	0.2124	0.1351	1.19
4	30	0232	0.2606	0.3148	0.1502	0.10
5	30	0235	0.2837	0.3878	0.1899	1.29
6	30	0236	0.2154	0.371	0.1958	1.00
WEIGHTED MEANS			0.2706	0.2772	0.1360	
PARAMETERS OF REGIONAL KAPPA DISTRIBUTION			0.4884	0.5831	0.0820	0.8667

Table 8. The result of heterogeneity measure

**** HETEROGENEITY MEASURES *** (No. OF SIM. = 500)	
OBSERVED S.D. OF GROUP L-CV	0.0442
SIM. MEAN OF S.D. OF GROUP L-CV	0.0329
SIM. S.D. OF S.D. OF GROUP L-CV	0.0137
STANDARDIZED TEST VALUE H(1)	0.82
OBSERVED AVE. OF L-CV / L-SKEW DISTANCE	0.0695
SIM. MEAN OF AVE. OF L-CV / L-SKEW DISTANCE	0.0711
SIM. S.D. OF AVE. OF L-CV / L-SKEW DISTANCE	0.0248
STANDARDIZED TEST VALUE H(2)	-0.06
OBSERVED AVE. OF L-SKEW / L-KURT DISTANCE	0.0801
SIM. MEAN OF AVE. OF L-SKEW / L-KURT DISTANCE	0.0873
SIM. S.D. OF AVE. OF L-SKEW / L-KURT DISTANCE	0.0295
STANDARDIZED TEST VALUE H(3)	-0.25

5.4 지역빈도해석 결과

적정분포형을 선정하기 위해서는 다양한 분포형들로부터 선정된 L-skewness와 L-kurtosis가 허용 범위 내에 표본 자료로부터 구한 L-skewness와 L-kurtosis가 수렴하는지를 적합성척도 Z를 이용하여 산정하고, $|Z| \leq 1.64$ 를 만족시키는 분포형을 적정분포형으로 선정하였다. 또한, 적정분포형 선정 후 적합도 검정을 통과한 분포형을 선택해야 한다. 본 논문에서 선택된 분포형으로는 13개 지역 모두 공통적으로 GEV와 PARETO 분포형을 만족하였으나 극치자료계열의 빈도를 분석하는 데 자주 이용되며, 수문자료 중 홍수량의 분석에 널리 이용되고 있

는 GEV 분포형을 선택하였다.

시나리오의 목표기간별 지역빈도해석 결과는 다음 Table 9과 같다. 분석된 결과에서 알 수 있듯이 목표기간이 2100년으로 갈수록 증가함을 알 수 있으며, 현재 기간 대비 7~10%의 증가율을 확인 할 수 있었다. 예측된 확률수문량을 바탕으로 Fig. 8과 같이 빈도별, 목표기간별로 도식화 하였다. 빈도 및 목표기간이 II~IV로 갈수록 광주, 대구 등 상대적으로 적은 강우량을 보이던 중·남부지방의 강우량이 늘어나고 있음을 알 수 있다. 이것은 한 지역의 국한적인 문제가 아니라 한반도 전 지역에 대한 문제로 나타날 수 있다. 따라서 미래 강우량에 따른 설계빈도를 재설정 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

Table 9. The result of regional frequency analysis for each target period(unit : mm)

Freq. No.	Target period II			Freq. No.	Target period III			Freq. No.	Target period IV		
	80yr	100yr	200yr		80yr	100yr	200yr		80yr	100yr	200yr
1	414.9	429.4	474.1	1	442.7	459.5	511.1	1	428.4	444.5	494.1
2	435.8	450.0	492.3	2	477.9	494.6	545.0	2	475.6	492.2	541.8
3	384.4	396.1	431.9	3	415.2	429.1	471.4	3	398.6	411.8	452.0
4	333.9	344.2	375.0	4	310.5	321.1	352.8	4	355.3	367.2	403.2
5	515.8	527.7	562.6	5	560.3	574.5	616.1	5	569.4	583.6	625.4
6	362.3	373.2	406.2	6	327.5	338.3	371.2	6	393.8	406.7	445.9
7	421.1	433.0	468.2	7	433.0	446.4	486.1	7	484.0	498.8	542.7
8	483.9	498.8	543.4	8	503.9	520.6	570.8	8	518.9	535.9	587.1
9	378.8	390.3	425.3	9	420.2	434.2	476.8	9	378.3	390.8	428.8
10	449.9	466.2	516.2	10	442.1	459.4	512.2	10	508.3	528.0	588.1
11	540.2	559.2	616.8	11	594.9	617.2	685.0	11	526.5	546.0	605.5
12	338.4	349.5	382.8	12	346.4	359.0	396.6	12	323.3	334.9	369.7
13	345.9	358.2	395.2	13	412.9	429.0	477.5	13	369.6	383.9	426.8

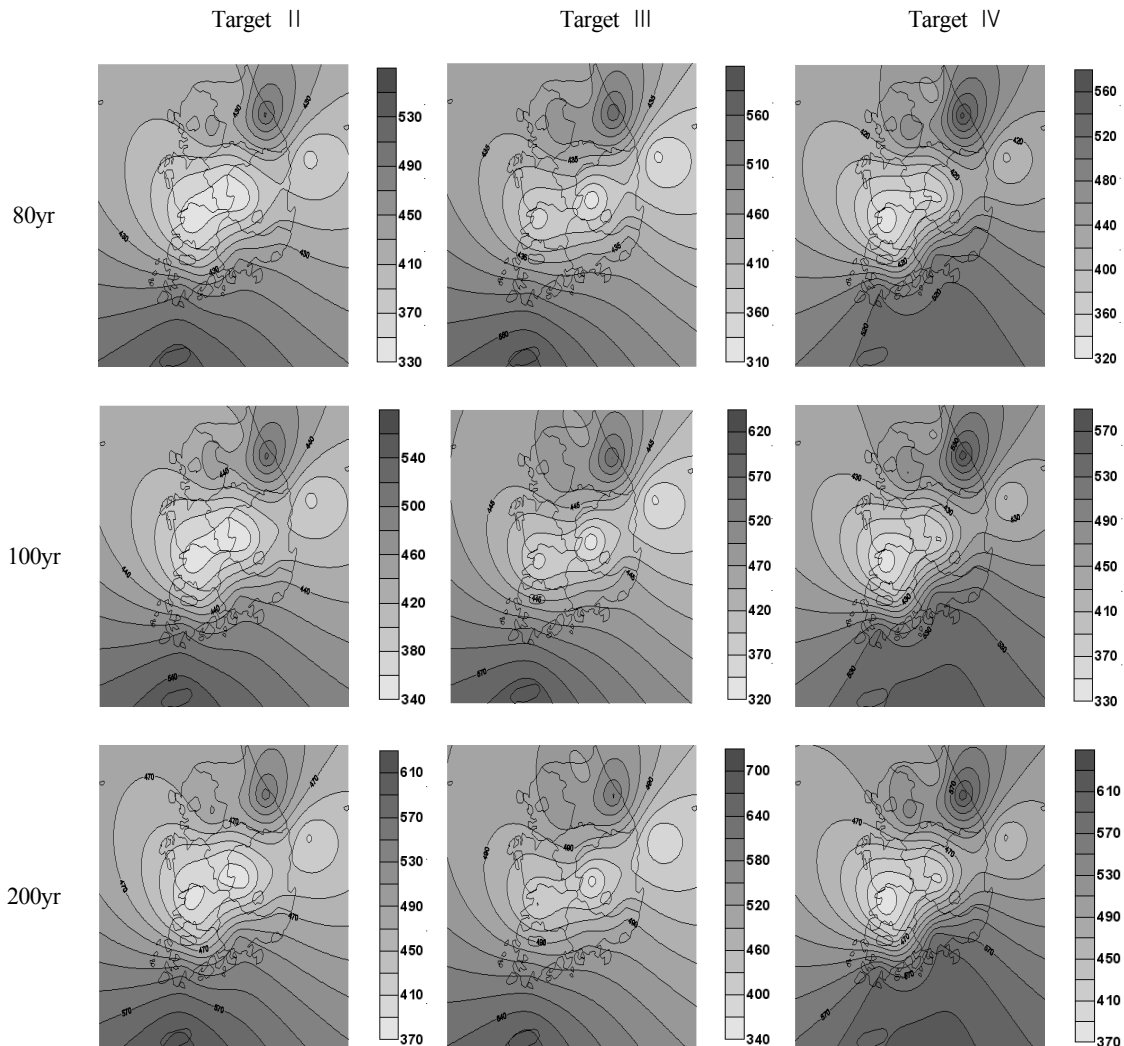


Fig. 8. Probability rainfall each target period Mapping

5. 결론

본 연구에서는 세계기상기구에서 제시한 기후지수를 이용하여 기후변화를 평가하고, 기상청 지역기후모델(KMA-RegCM3)의 강우 자료를 이용하여 기상청 산하 58개 관측소에 대해 L-moment 알고리즘을 이용하여 지역빈도해석을 수행하였으며, 목표기간별-빈도별 확률수문량을 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

관측자료(1971년~2010년)를 이용하여 ETCCDI에서 제시한 27개의 지수 중 강우관련 지수 6개를 선정하여 분석하였으며, 건조지속기간을 제외한 다른 강우지수 5가지는 증가하는 경향을 보였다. 특히 집중호우에 대한 지수가 크게 증가하는 경향을 보이고 있었다. 건조지속기간이 증가경향을 나타내는 곳은 강우일 수는 줄어들면서 집중호우가 크게 나타남을 알 수 있었고, 감소경향을 나타내는 곳은 강우일 수가 늘어남에도 불구하고 집중호우가 크게 나타남을 알 수 있었다. 집중호우 현상은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 미래에도 이러한 경향을 유지할 것이라는 판단을 할 수 있었다.

지역빈도 해석을 위한 강우자료의 군집분석에서 서울, 대전, 대구, 광주, 부산 등 대도시를 중심으로 한반도를 13개 지역으로 통계적 특성이 동일한 집단을 형성하였으며, 동질성 검정 결과 D_i 는 모두 3이하를 만족하였으며, 동질성 통계량 H 에서 모두 1보다 작은 값으로 13개 군집화된 지역은 동질한 지역으로서의 의미를 갖는 것으로 나타났다.

지역빈도해석을 적용하여 기후변화 시나리오에 따른 미래 목표기간별 확률수문량을 산정한 결과 목표기간이 증가함에 따라 확률수문량도 증가하는 것으로 나타났다. 지역빈도해석결과 확률수문량은 현재 대비 7~10% 증가할 것으로 예상되었으며, 빈도 및 목표기간이 II~IV로 갈수록 광주, 대구 등 상대적으로 적은 강우량을 보이던 중-남부지방 쪽으로 강우량이 늘어나고 있음을 알 수 있었다. 이것은 특정 지역의 국한적인 문제가 아니라 한반도 전 지역에 대한 문제로 나타날 수 있기에 미래 강우량에 따른 설계빈도를 재설정 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원으로 수행한 ‘복합위험요소에 대한 수방시설물의 재해위험 진단기술개발’ [NEMA-자연-2010-33]과제의 성과입니다.

References

- Fowler, HJ, Ekström, M, Kilsby, CG and Jones, PD (2005). New estimates of future change in extreme rainfall across the UK using regional climate model integration: 1. Assessment of control climate, *J. of Hydrology*, 300 (1-4), pp. 212-233.
- Ganguly, AR (2007). Climate extremes hydro-meteorological extremes and impacts, *Fall creek falls 2007 workshop* (www.ccs.ornl.gov).
- Heo, JH, Lee, YS, Shin HJ and Kim, KD (2007). Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea(I) : Rainfall quantile estimation, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 27(2B), pp. 101-111.
- Hosking, JRM (1990). L-moments : Analysis and estimation of distribution using linear combinations of order statistics, *J. R. Statist. Soc. B*, 52(2), pp. 105- 124.
- Hosking, JRM and Wallis, JR (1993). Some Statistics Useful in a Regional Frequency Analysis, *Water Resources Research*, 29,(2), pp. 271-281.
- Hosking, JRM and Wallis, JR (1997). *Regional frequency analysis*, Cambridge University Press.
- Institute of Hydrology (1999). *Flood estimation handbook*.
- Kay, AL, Reynard, NS and Jones, RG (2006). RCM rainfall for UK flood frequency estimation: I. Method and validation, *J. of Hydrology*, 318(1-4), pp. 151-162.
- Kim, BK, Kim, BS and Kim, HS (2008). On the change of extreme weather event using extreme indices, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 28(1B), pp. 41-53.
- Kim, BS, Kim, BK, Kyoung, MS and Kim, HS (2008). Impact assessment of climate change on extreme rainfall and I-D-F analysis, *J. of Korea Water Resources Association*, 41(5), pp. 129-141.
- Kwon, HH, Kim, BS and Kim, BG (2008). Analysis of precipitation characteristics of regional climate model for climate change impacts on water resources, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 28(5B), pp. 525-533.
- Kyoung, MS, Lee, JK and Kim, HS (2009). Downscaling technique of monthly GCM using daily precipitation generator, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 29(5), pp. 441-452.
- Kyoung, MS (2010). *Assesment of Climate Change Effect on Standardized Precipitation Index and Frequency based Precipitation*, Doctor's Thesis, Inha University.
- Lee, DJ and Heo, JH (2001). Frequency analysis of daily rainfall in Han river basin based on regional L-moments algorithm, *J. of Korea Water Resources Association*,

- 34(2), pp. 119-130.
- 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), *J. of Hydrology*, 347(1-2), pp. 197-210.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009). *Researches on National Water Security in Preparation for Climate Change (2nd)*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011). *Improvement and Supplement of Probability Rainfall in South Korea*.
- Oh, TS, Moon, YI and Oh, KT (2008). Estimation of probability precipitation by regional frequency analysis using cluster analysis and variable kernel density function, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 28(2B), pp. 225-236.
- STARDEX (STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions) (2005). <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>
- Stedinger, JR and Lu, LH (1995). Appraisal of regional and index flood quantile estimators, *Stochastic hydrology and hydraulics*, 9, pp. 45-75.
- Thodsen, H (2007). The influence of climate change on stream flow in danish rivers, *J. of Hydrology*, 333 (2-4), pp. 226-238.
- Tinsley Odena, J and Prudhommeb, S (2002). Estimation of modeling error in computational mechanics, *J. of Computational Physics*, 182(2), pp. 496- 515.
- World Meteorological Organization (WMO) (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, Climate data and monitoring*, WCDMP- No. 72.

- 논문접수일 : 2012년 11월 23일
- 심사의뢰일 : 2012년 11월 25일
- 심사완료일 : 2013년 02월 21일