

# BCM2 모의 결과를 반영한 목표연도 확률강우량 산정

## Estimation of Design Rainfalls Considering BCM2 Simulation Results

이창환\* · 김태웅\*\* · 경민수\*\*\* · 김형수\*\*\*\*  
Lee, Chang Hwan · Kim, Tae-Woong · Kyoung, Minsoo · Kim, Hung Soo

### Abstract

Climatic disasters are globally soaring due to recent acceleration of global warming. Especially the occurrence frequency of heavy rainfalls is increasing since the rainfall intensity is increasing due to the change of rainfall pattern, This study proposed the non-stationary frequency analysis for estimating design rainfalls in a design target year, considering the change of rainfall pattern through the climatic change scenario. The annual rainfalls, which are regionally downscaled from the BCM2 (A2 scenario) and NCEP data using a K-NN method, were used to estimate the parameters of a probability distribution in a design target year, based on the relationship between annual mean rainfalls and distribution parameters. A Gumbel distribution with a probability weighted method was used in this study. Seoul rainfall data, which are the longest observations in Korea, were used to verified the proposed method. Then, rainfall data at 7 stations, which have statistical trends in observations in 2006, were used to estimate the design rainfalls in 2020. The results indicated that the regional annual rainfalls, which were estimated through the climate change scenario, significantly affect on the design rainfalls in future.

**Keywords :** *Climate change scenario, BCM2, design rainfall, non-stationary frequency analysis*

### 요 지

최근 지구온난화가 가속화되면서 전 세계적으로 기록적인 기상재해가 급증하고 있다. 특히 강우패턴의 변화로 인하여 강우 강도가 증가하여 집중호우의 발생빈도가 높아지고 있다. 본 연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 강우패턴의 변화를 반영하여 목표연도 확률강우량을 산정하는 비정상성 강우빈도해석법을 제안하였다. BCM2 모형(A2 시나리오)과 NCEP 자료를 K-NN 축소기법을 사용하여 축소시킨 연 총 강우량을 이용하여 연 최대 강우량 평균, 연 최대 강우량 평균과 매개변수 간 통계학적 관계를 분석하여 목표연도 확률강우량을 산정하였다. 분포형은 Gumbel 분포를 사용하였으며 매개변수 추정법은 확률기중모멘트법을 사용하였다. 국내에서 가장 긴 관측 강우자료를 가진 서울지점을 대상으로 모형의 적합성 검증을 실시하였으며, 2006년 현재 통계학적으로 증가경향성을 가진 7개의 강우관측지점에 적용한 결과를 분석하였다. 기후변화 시나리오에 따른 지역적 연 총 강우량의 변화는 미래 확률강우량의 증감에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 기후변화 시나리오, BCM2, 확률강우량, 비정상성 강우빈도해석법

### 1. 서 론

최근의 기후변화는 산업혁명 이후 인간의 산업 활동에 의한 온실가스 배출이 증가되어 지구의 온도를 상승시켜 지구의 기후 시스템에 영향을 미치게 되어 발생하는 것으로 알려져 있다(박재현, 2008). 이와 같은 기후변화의 영향으로 집중호우로 인한 피해가 증가하고 있다. 2006년 원인별 재산피해액을 살펴보면 호우에 의한 피해가 약 2조원으로 대부분을 차지하고 있다. 우리나라의 1979년부터 1997년까지 시간당 50 mm 이상 호우의 평균 발생 횟수는 10.95회인 반면에 1998년부터 2006년 8월까지의 평균 발생 횟수는

20.11회로서, 1998년 이후 시간당 50 mm 이상의 호우사상 발생 횟수가 약 1.8배 증가한 것으로 나타났다(소방방재청, 2007). 이와 같이 홍수피해를 유발할 수 있는 강우강도의 발생 횟수가 증가하지만, 일반적인 강우 및 홍수 빈도해석은 연 최대 강우량 또는 홍수량이 기후변화 등의 장기적 변동에 영향을 받지 않는 정상성(stationary)임을 가정하고 있어 (Stedinger *et al.*, 1993), 강우나 유출의 증가경향을 확률강우량이나 확률홍수량의 추정에 반영하지 못하는 실정이다.

최근에 이러한 수문량의 비정상성(non-stationarity)을 고려하여 확률수문량을 산정하는 것과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구경향은 강우나 홍수량 등 관측자료

\*정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : chang810906@hanmail.net)

\*\*정회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : twkim72@hanyang.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 삼성중재해상보험(주) 삼성방재연구소 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : minsoo.kyoung@samsung.com)

\*\*\*\*정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : sookim@inha.ac.kr)

를 이용하여 비정상성 빈도해석을 수행하는 방법과 기후의 변동성 및 기후변화를 고려하여 빈도해석을 수행하는 방법으로 나눌 수 있다.

관측자료를 이용하여 비정상성 빈도해석을 수행하는 경우, 관측자료에 내재된 경향성은 통계학적인 회귀모형을 이용하여 미래의 확률수문량에 반영된다. He *et al.*(2006)은 Gumbel 분포와 Log Pearson type-3 분포를 이용하여 각 분포의 매개변수 변화를 회귀분석하여 목표연도의 매개변수를 산정하고 이를 이용하여 홍수빈도해석을 수행하였으며, Leclerc and Ouarda(2007)은 홍수빈도해석을 위한 GEV 분포의 매개변수들을 시간의존 함수로 표현하여 적용한 비정상성 모형을 제안하였다. 권영문 등(2009)에서는 연 최대 강우량의 평균과 Gumbel 분포의 매개변수와의 관계를 선형 회귀식을 이용하여 추정함으로써 미래시점의 매개변수 추정을 통한 비정상성 강우빈도해석 방법을 제안하였다.

기후의 변동성 및 기후변화를 고려하여 빈도해석을 수행하는 경우, 원격상관분석 등을 이용하여 지역의 수문량 변동과 전지구적인 기후인자 변동간의 상관성을 반영하는 것이다. Wang and Yang(2005)는 북인도양 해수면 온도와 몽골지역의 평균 강우량을 활용하여 예측 모형을 구축하고 지역적 강우예측을 수행하였으며, Olsen *et al.*(1999)는 홍수의 변화를 초래하는 기후요인으로 PDO(Pacific Decadal Oscillation)와 NAO(Northern Atlantic Oscillation)를 지목하고 선형 회귀식을 이용하여 연 최대 홍수량이 두 기후요인들과 관계가 있는 시간의 변수임을 주장하였다. 오재호와 홍성길(1995)은 3개 GCM 모형의 광역적 강수변동 자료를 이용하여 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 배중에 따른 한반도 강수량 변화를 예측하였다. 윤용남 등(1999)은 지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄의 빈도 변화 분석을 실시하기 위하여 현 상태가 지구온난화 과정의 한 시점이라는 가정 아래 현재까지 관측된 일 강수량 자료를 분석하여 과거 연강수량의 증가가 일강수량의 분포에 어떻게 영향을 미치고 있는지 분석하였다. 김병식 등(2003)은 통계학적 축소기법을 이용하여 국지규모의 기후변화의 영향을 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 통계학적 회귀방법인 전이함수와 추계학적 일기발생 모형을 이용하여 전국규모의 기후변화 시나리오를 작성하였다.

본 연구에서는 관측자료에 내재된 강우량의 경향성과 기후변화 시나리오를 반영한 GCM 모형에서 추정된 미래 강우변화 패턴을 동시에 고려하기 위하여, GCM 모형을 통해 구축된 기후인자를 축소기법을 이용하여 지점 자료로 변환하여 관측 강우자료와의 통계적 분석을 실시한 후 목표연도 확률강우량을 산정하였다. 국내 강우자료 중 가장 긴 자료기간을 가진 서울 지점의 강우자료를 이용하여 본 연구에서 제안된 모형의 비교 검증을 실시하고, 국내 강우자료 중 경향성을 가지고 있는 7개 지점에 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 목표연도의 확률강우량을 산정하여 분석하였다.

## 2. 연구대상 지점 및 확률분포함수

기상청 시 강우자료(hourly rainfalls)를 30년 이상의 자료를 보유하고 있는 56개 지점(그림 1)에서 임의시간 24시간 연 최대 강우량 자료를 구축하여 경향성 분석(Kendall,

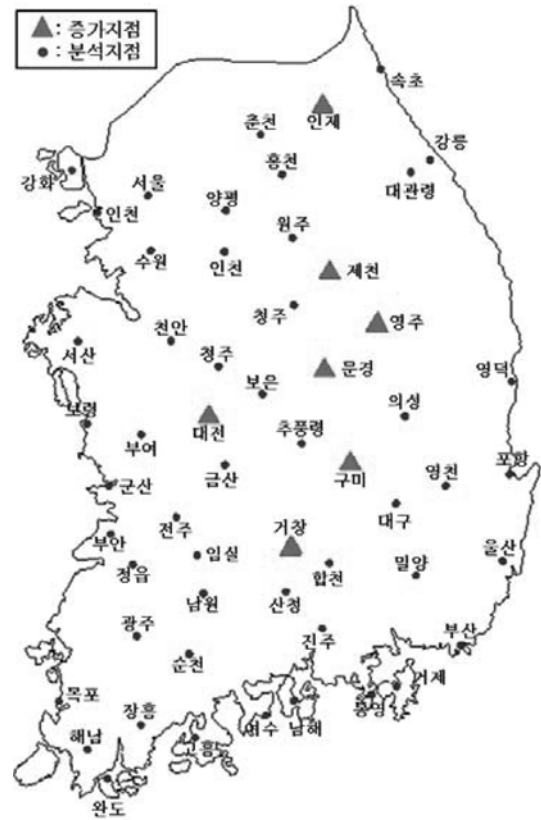


그림 1. 분석지점 및 강우량 증가 경향 지점

표 1. 경향성 검정 결과

지점	경향성 검정 방법					
	Kendall		Hotelling		Spearman's-rho	
거창	2.51	OK	-2.61	OK	2.88	OK
대전	2.02	OK	-2.26	OK	2.40	OK
문경	3.13	OK	-3.02	OK	3.49	OK
구미	3.35	OK	-3.23	OK	3.85	OK
영주	2.02	OK	-2.17	OK	2.30	OK
인제	2.11	OK	-2.21	OK	2.36	OK
제천	2.33	OK	-2.37	OK	2.57	OK

Hotelling-Pabst, Spearman's-rho 방법)을 실시한 결과, 거창, 대전, 문경, 구미, 영주, 인제, 제천 등 7개 지점에서 유의수준 5%에 대해 경향성이 유의한 것으로 나타났다(표 1).

건설교통부(2000)는 강우 양상을 일관되게 반영하기 위하여 Gumbel 분포를 채택하여 확률강우량도를 작성한 바 있다. 따라서 기존에 산정된 확률강우량과의 비교가 가능한 Gumbel 분포를 이용하여 본 연구를 수행하였다. Gumbel 분포는 연 최대치 계열을 이용하는 강우빈도해석 시 실무에서 가장 많이 사용하는 분포로써, 확률밀도함수와 누적분포함수는 식 (1)과 같다.

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

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right] \quad (2b)$$

여기서,  $\alpha$ 는 척척(scale) 매개변수이며,  $x_0$ 는 위치(location) 매개변수이다. 매개변수 추정법은 국내 강우자료의 보유연수가 충분하지 않다는 점을 고려하여 이상치가 있는 경우에도

왜곡특성을 크게 나타내지 않고, 자료수가 충분하지 못한 경우에도 영향을 덜 받으며, 상대적으로 안정적인 장점을 지니고 있는 확률가중모멘트법(Method of probability weighted moments, PWM)을 사용하였다.

우리나라는 유역의 효과적인 치수계획을 위해 10년 단위의 유역종합치수계획이 수립되고 있다. 따라서 10년 후의 목표연도 확률강우량을 산정하여 수공구조물 설계에 적용하므로(건설교통부, 2005; 김병식 등, 2008), 본 연구에서는 약 10년 후인 2020년을 목표연도로 설정하고 비정상성 강우빈도해석을 수행하였다.

### 3. 비정상성 강우빈도해석 절차 및 검증

#### 3.1 관측 강우자료의 경향성을 반영하는 비정상성 강우빈도해석법

관측 강우자료의 경향성을 반영하여 비정상성 확률강우량을 추정하는 방법의 전체적인 절차는 그림 2와 같다. 이러한 비정상성 확률강우량 추정법은 권영문 등(2009)에서 제안한 방법으로 관측 강우자료에 내재된 경향성을 직접적으로 반영하여 미래의 확률강우량을 산정하는 방법이다. 따라서 통계된 온실가스 감축 계획에 따른 기후변화 시나리오에 따른 강우패턴의 변화를 반영하기에는 한계가 있다.

3.2 기후변화 시나리오를 반영하는 비정상성 강우빈도해석법  
기후변화 시나리오를 반영하여 비정상성 확률강우량을 추정하기 위해서 본 연구에서는 현재까지 관측된 강우 경향성의 회귀식에 의존하여 목표연도 매개변수를 산정하는 그림 2와 같은 비정상성 강우빈도해석법의 한계를 극복하고 기후

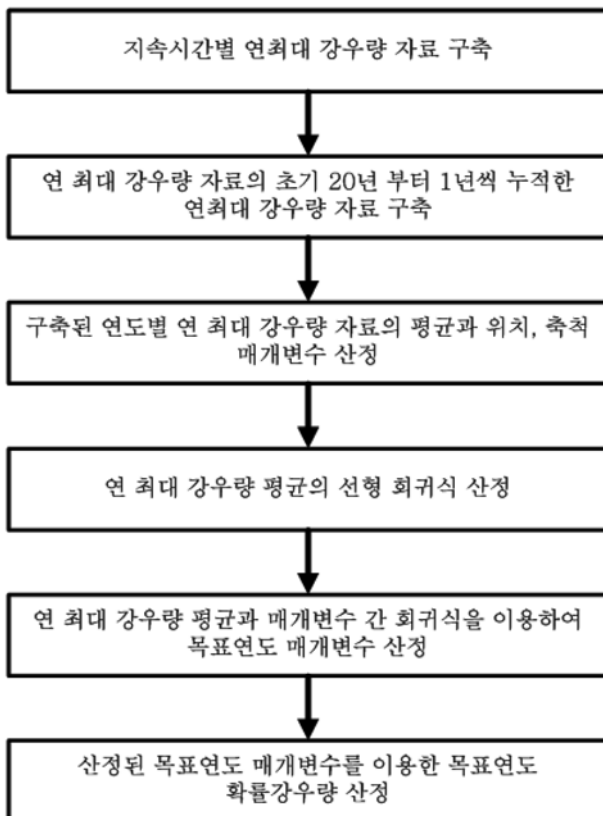


그림 2. 관측 강우자료의 경향성을 반영하는 비정상성 강우빈도해석법의 절차

변화로 인한 강우 경향성을 보다 적절한 반영하기 위하여 제안한 방법이다. 이 방법은 GCM 모형과 기후변화 시나리오를 이용하여 예측된 강우량 자료를 축소기법을 이용하여 지점 강우량 자료로 변환한 후 관측강우(연 최대치 계열)와의 관계를 통해 비정상성 강우빈도해석을 수행하는 방법이다(그림 3).

#### 3.2.1 기후변화 강우자료

본 연구는 최근린법(K-Nearest Neighbor, K-NN)을 적용하여 노르웨이 BCCR(Bjerknes Center for Climate Research)의 BCM2(Bergen Climate Version) 모형에 의한 월 강수량을 기상청 산하 관측지점(그림 1)으로 축소하였다. BCM2 모형은 2005년에 개발된 대기모형인 ARPEGE와 해양모형인 MICOM 모형을 접합하여 만들어졌으며, 위도 -90°~90°, 경도 0°~360°를 포함하는 전 지구모형으로 월단위로 제공된다. 본 연구에서는 사용된 BCM2은 IPCC의 기후변화 시나리오 중 A2 시나리오를 포함하고 있으며 모형의 공간적 해상도는 2.8° 이다(경민수 등, 2009).

최근린법은 단일변수의 시계열 자료를 지체시간과 위상공간차원을 고려하여 벡터화하여 과거에 발생한 시계열 패턴

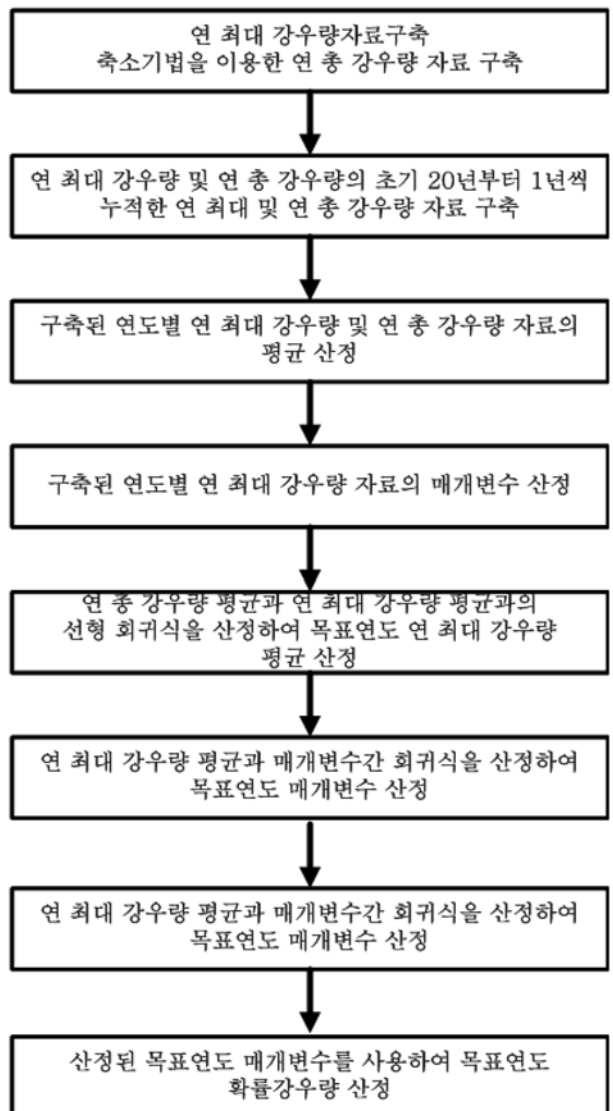


그림 3. 기후변화 시나리오를 반영하는 비정상성 강우빈도해석법의 절차

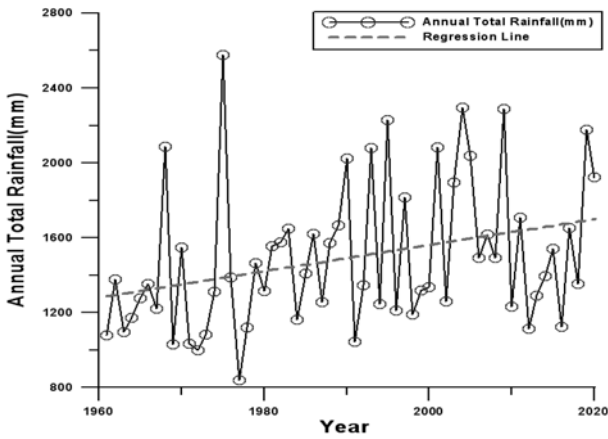


그림 4. 서울지점의 기후변화 시나리오에 따른 연 총 강우량 (1961-2020)

이 미래에도 발생한다고 가정한다. 따라서, 본 연구에서는 NCEP/NCAR Reanalysis 자료 중 강수에 영향을 주는 기상 변수인 지표면 월평균 최대온도(surface monthly average), 지표면 월평균 최소온도(surface monthly average), 지표면 풍속(zonal surface wind speed), 자오선 풍속(meridional surface wind speed) 등을 대상으로 벡터자료를 구성하였다. 최적의 최근린 계수(K)를 계산하기 위하여 NCEP/NCAR Reanalysis 자료로부터 구성된 벡터( $X_i$ )를 Training set인  $X_{iset}$ 과 Prediction set인  $X_{pset}$ 로 구분하였다.  $X_{pset}$ 과  $X_{iset}$ 의 유사성을 알아보기 위하여 두 벡터 사이의 거리  $\|X_{pset} - X_{iset}\|$ 을 모두 계산하여 이를 통해  $X_{pset}$ 과 가장 유사한  $X_{iset}$ 이 결정되면  $X_{iset}$ 인 상황에서 발생한 강우가  $X_{pset}$ 에서도 발생한다고 가정하였다. 이때  $X_{pset}$ 과 유사한  $X_{iset}$ 의 개수를 가장 유사한 순서에 따라서 변화시키면서 최적의 결과를 주는  $X_{iset}$ 의 개수가 최근린 개수가 된다.

본 연구에서 산정된 최적의 최근린 개수는 9개이며 이를 이용하여 기후모형 결과로부터 제시된 기상변수와 가장 유사한 값을 가지는  $X_i$ 를 최근린 수 만큼 찾아서 각각의  $X_i$ 에서의 유사한을 산술평균하였다. K-NNNNN의 잭사 최근린 개수를 고려해 평균하여 사용하기 때문에 일반적으로 극값이 과소 추정되게 된다. 이에 본 연구에서는 발생한 편의를 보정하기 위하여 Quantile mapping 기법(김병식 등, 2008)을 활용하였다. 그림 4는 K-NN방법을 이용하여 축소시킨 서울지점 연 총 강우량 자료의 시계열(1961-2020)을 나타낸다.

### 3.2.2 자료구축

본 연구에서는 기상청 시 강우자료를 이용하여 지속기간 24시간 연 최대 강우자료(관측 강우자료)를 추출하였으며, BCM2 모형, NCEP 자료, K-NN 방법을 사용하여 추정된 월 총 강우량 자료를 합하여 연 총 강우량 자료(기후변화 강우자료)를 구축하였다. 연 최대 강우량 및 연 총 강우량을 초기 20년을 기준으로 1년씩 누적하여 누적 연 최대 강우량 및 연 총 강우량을 산정하였다. 초기 20년을 기준으로 1년씩 강우자료를 추가하여 나타난 변화는 최근 변화 양상을 가장 잘 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다(안재현 등, 2000). 각 자료기간에 해당하는 연 최대 강우시계열을 이용하여 각 자료기간의 확률분포 매개변수를 산정하였다. 표 2는 대상지점 중 거창지점의 평균 연 최대 강우량 및 평균

표 2. 연 최대 강우량 평균, 연 총 강우량 평균 및 확률분포함수의 매개변수 (거창지점)

순번	자료기간	연 최대 강우량 평균 (mm)	연 총 강우량 평균 (mm)	Gumbel 분포	
				위치 매개변수	축척 매개변수
1	1973~1992	127.34	1448.96	109.44	31.01
2	1973~1993	127.42	1479.00	110.01	30.17
3	1973~1994	127.11	1468.35	110.17	29.34
4	1973~1995	125.49	1501.41	108.57	29.31
5	1973~1996	126.20	1489.35	109.55	28.85
6	1973~1997	126.48	1502.44	110.19	28.22
7	1973~1998	130.50	1490.37	112.12	31.85
8	1973~1999	128.92	1483.99	110.52	31.88
9	1973~2000	129.90	1478.72	111.60	31.70
10	1973~2001	130.68	1499.58	112.58	31.36
11	1973~2002	132.49	1491.59	113.96	32.09
12	1973~2003	133.36	1504.66	114.96	31.88
13	1973~2004	137.50	1529.36	116.80	35.85
14	1973~2005	139.66	1544.77	118.29	37.02
15	1973~2006	140.50	1543.29	119.26	36.79

연 총강우량 자료와 연도별 연 최대 강우시계열의 매개변수를 나타낸다.

### 3.2.3 목표연도 확률강우량 산정

특정재현기간에 해당하는 확률강우량은 비초과확률함수의 역변환을 실시하여 추정할 수 있다. 비초과확률함수는 확률 분포함수로부터 추정할 수 있으며, 확률분포함수의 매개변수는 연 최대 강우량의 평균과 매우 밀접한 회귀함수관계를 가지고 있다(권영문 등, 2009). 따라서, 본 연구에서는 목표연도 확률분포함수의 매개변수와 밀접한 함수관계를 가지고 있는 목표연도의 평균강우량을 기후변화 강우량 자료를 이용하여 추정하였다. 그림 3과 같이 목표연도 총 강우량, 목표연도 평균 강우량, 목표연도 매개변수 등을 순차적으로 추정하여 목표연도 확률강우량을 산정하였다.

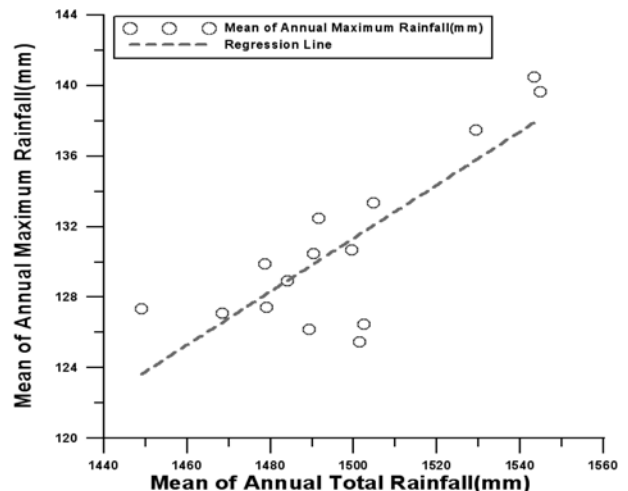


그림 5. 연 총 강우량 평균과 연 최대 강우량 평균의 관계(거창지점)

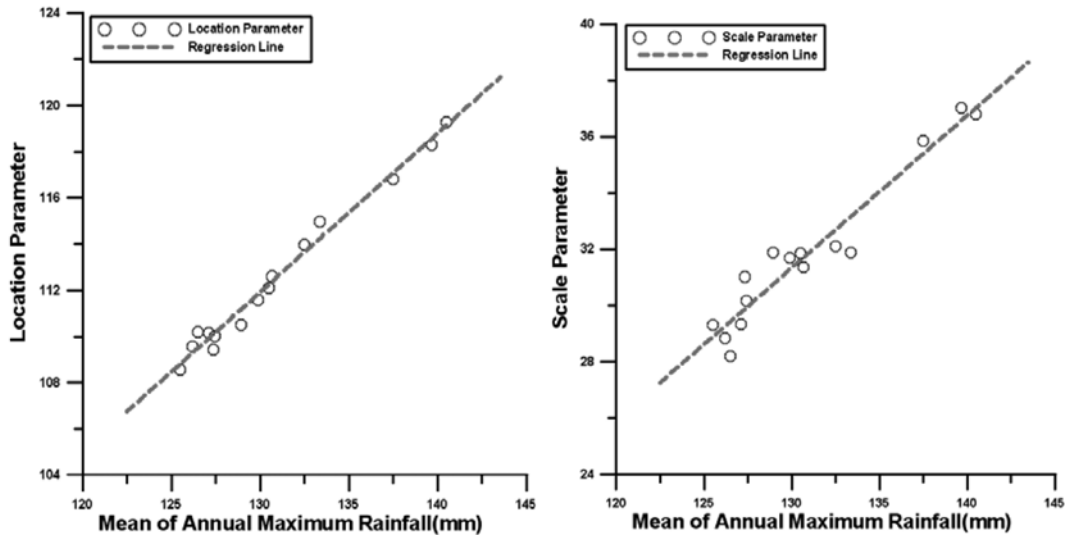


그림 6. 연 최대 강우량 평균과 Gumbel 분포의 매개변수의 관계 (거창지점)

연 총 강우량의 평균과 연 최대 강우량 평균 간의 관계는 그림 5와 같으며, 목표연도 연 최대 강우량 평균은 식 (2)와 추정할 수 있다.

$$MMR_t = \alpha_1 MTR(a, b, c, d) + \alpha_0 \quad (2)$$

여기서,  $MMR_t$ (Mean of Maximum Rainfall)는 목표연도 연 최대 강우량의 평균이며,  $\alpha_1, \alpha_0$ 는 회귀직선의 매개변수,  $MTR$ (Mean of Total Rainfall)은 목표연도 연 총 강우량 평균으로 BCM2 모의 강우량을 기후인자( $a, b, c, d$ )를 이용하여 지점으로 축소한 값이다. 기후인자  $a, b, c, d$ 는 각각 지표면 월평균 최대온도, 지표면 월평균 최소온도, 지표면 풍속, 자오선 풍속이다.

연 최대 강우량 평균과 Gumbel 분포의 매개변수 간의 관계는 그림 6과 같으며, 목표연도 매개변수는 식 (3)을 이용하여 추정할 수 있다.

$$L_t = \beta_1 MMR_t + \beta_0 \quad (3a)$$

$$S_t = \gamma_1 MMR_t + \gamma_0 \quad (3b)$$

여기서,  $L_t, S_t$ 는 각각 목표연도 위치매개변수와 축척매개변수를 나타내며,  $\beta_1, \beta_0$ 는 연 최대 강우량 평균과 위치매개변수 간 회귀직선의 매개변수,  $\gamma_1, \gamma_0$ 는 연 최대 강우량 평균과 축척매개변수 간 회귀직선의 매개변수를 나타낸다. 목표연도 확률강우량은 목표연도의 비초과확률함수(식 1(b))의 역함수를 이용하여 추정하였다.

### 3.3 비정상성 강우빈도해석의 검증

본 연구에서 제시된 기후변화 시나리오를 반영한 비정상성 강우빈도해석법의 검증은 국내자료 중 자료 보유기간(1961~2006, 46년)이 가장 긴 서울지점의 자료를 이용하여 수행되었다. 또한 확률분포함수와 매개변수 추정법은 동일하게 Gumbel 분포, 확률기중모멘트법을 사용하였으며 검증은 모형 적합성 검증과 확률강우량 검증 두가지 단계로 진행하였다.

#### 3.3.1 모형 적합성 검증

그림 2와 그림 3의 비정상성 강우빈도해석법은 목표연도

의 연 최대 강우량의 평균을 추정하는 방법에서 뚜렷한 차이를 가진다. 따라서 본 연구에서는 목표연도의 연 최대 강우량의 평균을 산정하는 모형의 적합성을 판단하기 위하여 3가지 기준( $R^2, C_p, PRESS_p$ )을 이용하였다.

$R^2$ (coefficient of determination, 결정계수)는 추정된 회귀직선이 표본들을 얼마나 잘 적합시키고 있는가를 나타낼 수 있는 척도로 식 (4)와 같이 정의된다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum (Y_j - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

여기서,  $Y_j$ 는 표본의 값,  $\hat{Y}_j$  회귀직선에 의한 추정값, 그리고,  $\bar{Y}$  표본의 평균이다. 결정계수는 0에서 1사이의 값을 갖게 되고 만약 모든  $j$ 에 대하여  $Y_j = \hat{Y}_j$ 가 성립되면  $R^2=1$ 이 된다.

$C_p$ 는 총 평균제곱오차(total mean squared error)와 연관된 통계량으로 식 (5)와 같이 산정된다.

$$C_p = \frac{SSR_p}{\hat{\sigma}^2 - n + 2(P+1)} \quad (5)$$

여기서,  $SSR_p$ 는  $P$ 개의 독립변수를 포함하는 모형에서의 잔차제곱합,  $n$ 은 관측 값의 수,  $\hat{\sigma}^2$ 는 회귀직선으로 추정된 값의 표준편차를 나타낸다.  $C_p$  값이 작은 것은 총 평균제곱오차가 작다는 것을 의미하므로, 추정된 모형들 중에서  $C_p$ 의 값이 작은 모형을 선택하는 것이 바람직하다(이우리와 오광우, 2003).

$PRESS_p$ (prediction sum of squares, 예측제곱합)는 식 (6)과 같은 제외잔차(deleted residuals: DR)에 기초한다.

$$d_j = Y_j - \hat{Y}_{j(j)} \quad (6)$$

여기서,  $\hat{Y}_{j(j)}$ 는  $j$ 번째 관측값을 제외시키고 회귀함수를 추정했을 때의  $j$ 번째 관측값에 대한 예측값을 나타낸다. 이때 예측제곱합기준( $PRESS_p$ )은 제외잔차들의 제곱합으로 식 (7)과 같이 정의된다(이우리와 오광우, 2003).

$$PRESS_p = \sum_{j=1}^n d_j^2 = \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_{j(j)})^2 \quad (7)$$

표 3. 모형의 적합성 검증결과 (서울지점)

지점	강우빈도해석법	R <sup>2</sup>	C <sub>p</sub>	PRESS <sub>p</sub>
서울	그림 2	0.61	92.24	52.46
	그림 3	0.44	66.73	6.04

PRESS<sub>p</sub>의 값이 작은 모형은 작은 예측오차를 가지므로 추정된 모형들 중에서 PRESS<sub>p</sub>의 값이 작은 모형을 적합한 모형으로 판정할 수 있다(이우리와 오광우, 2003).

표 3은 서울지점의 지속기간 24시간 연 최대치 강우자료를 이용하여 목표연도 연 최대 강우량 평균을 산정하는 모형의 적합성을 판별한 결과이다. 모형의 적합성을 판별하기 위하여 3가지 기준으로 검증을 실시해 본 결과 본 연구에서 제안한 그림 3의 방법이 C<sub>p</sub>와 PRESS<sub>p</sub>의 기준으로 적합한 모형임을 확인할 수 있다.

3.4.2 확률강우량 검증

비정상성 강우빈도해석법에 의한 목표연도 확률강우량 산정법을 검증하기 위하여 현재 시점을 1992년으로 가정하고, 표 4와 같은 분석 대상 확률강우량을 산정하여 기준 확률강우량과의 편차를 식 (8)과 같이 산정하여 비교 분석하였다.

$$\text{편차}(\%) = \frac{|X - Y|}{X} \times 100 \quad (8)$$

여기서, X는 기준 확률강우량이며, Y는 분석 대상 확률강우량을 나타낸다.

그림 7은 표 4의 여러 가지 확률강우량 산정법에 의한 빈도곡선을 도시한 것이다. '○'를 지닌 선은 표 4의 정상성 2002년 확률강우량이며, '△'를 지닌 선은 표 4의 비정상성 2006년 확률강우량(그림 2)이며, '◇'를 지닌 선은 표 4의 비정상성 2006년 확률강우량(그림 3)이며, '⊕'를 지닌 선은 표 4의 정상성 2006년 확률강우량이다. 표 5는 여러 가지

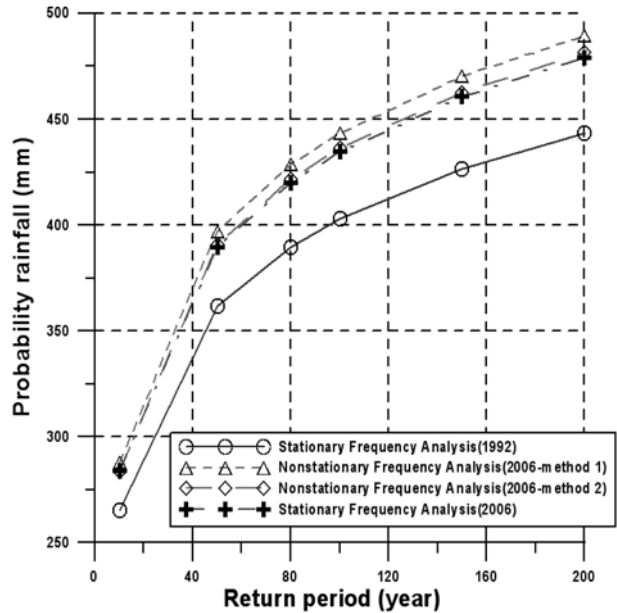


그림 7. 여러 가지 확률강우량 산정법에 의한 빈도곡선 (서울지점)

방법에 의해 산정된 확률강우량을 검증한 결과를 정리한 것이다. 편차 1은 정상성 방법으로 산정한 2006년 확률강우량과 정상성 방법으로 산정한 1992년 확률강우량의 편차(%), 편차 2는 정상성 방법으로 산정한 2006년 확률강우량과 그림 2의 방법으로 산정한 2006년 확률강우량의 편차(%), 편차 3은 정상성 방법으로 산정한 2006년 확률강우량과 그림 3의 방법으로 산정한 2006년 확률강우량의 편차(%)를 나타낸다. 그림 3에 제시된 방법을 이용하여 산정한 2006년의 확률강우량이 기타 방법에 의해 산정된 2006년 확률강우량에 비해 작은 편차를 보이고 있어, 설정된 목표연도(2006년)의 확률강우량으로 적절한 값을 산정해 주고 있음을 확인할 수 있다.

표 4. 여러 가지 확률강우량에 대한 설명

확률강우량 산정법	설명	비고
정상성 2006년 확률강우량	1961-2006년 관측 강우자료를 이용하여 추정한 확률강우량	기준 확률강우량
정상성 1992년 확률강우량	1961-1992년 관측 강우자료를 이용하여 추정한 확률강우량. 정상성 가정을 바탕으로 목표연도(2006년) 확률강우량 산정에 적용.	현재 대부분의 확률강우량 산정에 적용되는 방법
비정상성 2006년 확률강우량 (그림 2)	1961-1996년 관측 강우자료를 이용하여 목표연도(2006년) 확률강우량	관측 강우자료의 경향성을 반영
비정상성 2006년 확률강우량 (그림 3)	1961-1996년 관측 강우자료와 기후변화 시나리오에 의한 연 강우량 자료를 이용하여 목표연도(2006년) 확률강우량	관측 강우자료와 기후변화에 의한 강우패턴을 반영

표 5. 확률강우량 검증 결과 (서울지점)

구분	재현기간					
	10년	50년	80년	100년	150년	200년
정상성 2006년 확률강우량 (mm)	283.81	389.78	420.18	434.58	460.71	479.22
정상성 1992년 확률강우량 (mm)	265.27	361.99	389.74	402.88	426.73	443.63
편차 1 (%)	6.53	7.13	7.24	7.29	7.38	7.43
비정상성 2006년 확률강우량 (그림 2)(mm)	287.7	397.14	428.54	443.41	470.39	489.51
편차 2 (%)	1.37	1.89	1.99	2.03	2.1	2.15
비정상성 2006년 확률강우량 (그림 3)(mm)	283.71	390.99	421.77	436.35	462.8	481.54
편차 3 (%)	0.03	0.31	0.38	0.41	0.45	0.48

#### 4. 비정상성 강우빈도해석법의 적용

본 연구에서 제시한 기후변화 시나리오를 반영한 비정상성 강우빈도해석법(그림 3)을 관측 강우의 증가경향을 가지고 있는 7개 지점(그림 1)에 대하여 적용하여 목표연도(2020년)의 확률강우량을 산정하였다. 표 6는 지속기간 24시간 연 최대 강우량의 평균과 Gumbel 분포의 매개변수와의 상관관계이다. 7개 지점 모두에서 높은 상관관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 표 7은 연 최대 강우량 평균(식 (2))과 Gumbel 분포의 매개변수(식 (3))의 추정을 위한 회귀직선의 매개변수의 산정결과를 정리한 것이다.

표 6. 연 최대 강우량 평균과 Gumbel 분포의 매개변수와의 상관관계 (7개 지점)

구분	거창	대전	문경	구미	영주	인제	제천
위치매개변수	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97
축척매개변수	0.96	0.92	0.90	0.98	0.97	0.72	0.75

표 8은 7개 지점의 정상성 방법으로 산정한 2006년 확률강우량과 본 연구에서 제안한 방법(그림 3)에 의해 산정된 2020년 확률강우량 및 증가량을 정리한 것이다. 정상성 방법으로 산정한 2006년 확률강우량과 비교해 볼 때, 본 연구에서 제안한에 의해 산정된 2020년 확률강우량 값이 증가한 지점은 4개 지점(대전, 문경, 구미, 영주), 감소한 지점은 3개 지점(거창, 인제, 제천)이다. 2020년의 확률강우량 값이 증가한 4개 지점은 2020년의 목표연도 연 최대 강우량 평균값이 2006년의 연 최대 강우량 평균값 보다 크게 산정되어 위치, 축척 매개변수가 증가한 결과이며, 감소한 지점은 2020년의 목표연도 연 최대 강우량 평균값이 2006년의 연 최대 강우량 평균값 보다 작게 산정되어 매개변수가 작게 추정된 결과이다.

#### 5. 결 론

본 연구는 강우자료의 경향성과 기후변화로 인한 강우량

표 7. 비정상성 강우빈도해석을 위한 회귀직선의 매개변수 (7개 지점)

구분		거창	대전	문경	구미	영주	인제	제천
연최대강우량평균 (식(2))	$\alpha_1$	0.15	0.12	0.14	0.17	0.18	0.13	0.12
	$\alpha_0$	-95.49	-18.49	-94.98	-147.16	-138.23	-53.18	-27.23
위치매개변수 (식(3a))	$\beta_1$	0.69	0.66	0.76	0.65	0.64	0.92	0.88
	$\beta_0$	22.55	22.19	13.33	24.16	24	-17.13	-12.17
축척매개변수 (식(3b))	$\gamma_1$	0.54	0.59	0.41	0.60	0.63	0.14	0.21
	$\gamma_0$	-39.06	-38.44	-23.10	-41.86	-41.59	29.67	21.09

표 8. 비정상성 강우빈도해석법의 적용결과

지점	구분	재현기간					
		10년	50년	80년	100년	150년	200년
거창	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	202.05	262.82	280.25	288.5	303.48	314.1
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	199.34	259.02	276.14	284.25	298.97	309.39
	증가량(mm)	-2.71	-3.8	-4.11	-4.25	-4.51	-4.71
대전	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	238.56	321.13	344.81	356.03	376.39	390.81
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	247.92	336.91	362.44	374.53	396.46	412.01
	증가량(mm)	9.36	15.78	17.63	18.5	20.07	21.2
문경	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	174.24	221.46	235.01	241.43	253.07	261.32
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	174.91	222.43	236.06	242.51	254.23	262.53
	증가량(mm)	0.67	0.97	1.05	1.08	1.16	1.21
구미	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	168.7	217.19	231.1	237.69	249.64	258.11
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	170.73	220.63	234.94	241.72	254.02	262.73
	증가량(mm)	2.03	3.44	3.84	4.03	4.38	4.62
영주	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	221.86	299.62	321.92	332.49	351.66	365.24
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	232.04	316.31	340.49	351.94	372.71	387.43
	증가량(mm)	10.18	16.69	18.57	19.45	21.05	22.19
인제	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	237.9	323.84	348.49	360.17	381.36	396.37
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	234.41	318.55	342.68	354.12	374.86	389.55
	증가량(mm)	-3.49	-5.29	-5.81	-6.05	-6.5	-6.82
제천	2006년 (정상성) 확률강우량(mm)	241.32	328.37	353.34	365.17	386.63	401.83
	2020년 (비정상성) 확률강우량(mm)	239.89	326.35	351.15	362.9	384.21	399.31
	증가량(mm)	-1.43	-2.02	-2.19	-2.27	-2.42	-2.52

변화를 반영하여 목표연도 확률강우량을 산정하는 비정상성 강우빈도해석법을 국내에서 가장 긴 관측 강우자료를 가지고 있는 서울지점에 적용하여 검증한 후, 관측 강우자료가 경향성을 가지고 있는 전국 7개 지점에 대하여 적용하였다. 본 연구에서 제안한 비정상성 강우빈도해석법의 검증과 적용을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 초기 20년에 1년씩 관측자료를 추가하여 구축된 강우자료는 연 최대 강우량의 증가 경향성과 연 강우량의 상관성을 분석하는 데 기초자료를 제공한다. 또한 연 최대 강우량 평균과 확률분포함수의 매개변수와의 상관관계는 약 0.72~0.99로 높은 상관관계를 보이고 있어, 이러한 상관관계를 고려하여 기후변화 시나리오에 의한 미래 강우량의 변화를 강우빈도해석법에 반영할 수 있다.
2. 강우자료의 경향성을 반영하는 비정상성 강우빈도해석법과 기후변화로 인한 강우량 변화를 같이 반영하는 기후변화 강우빈도해석법에 대한 검증에서 목표연도 연 최대 강우량을 산정하는 모형의 적절성 분석결과( $R^2$ , CP, PRESSP 기준)와 산정된 확률강우량에 대한 분석 결과는 기후변화로 인한 강우량 변화를 같이 반영하는 강우빈도해석법이 더 질적인 확률강우량을 산정하였다. 이는 확률강우량의 변동성이 강우자료의 변동성과 기후변화에 의한 변동성으로 구분하여 모형에 반영된 결과인 것으로 판단된다.
3. 기후변화 강우빈도해석법을 국내의 경향성을 가지고 있는 7개 지점에 적용해 본 결과 정상성 방법으로 산정한 2006년 확률강우량 값보다 목표연도(2020년)의 확률강우량 값이 증가한 지점은 4개, 감소한 지점은 3개 지점으로 나타났다. 이러한 확률강우량의 변화는 기후변화 시나리오를 반영한 GCM 모형의 결과가 빈도해석과정에 반영된 결과이다. 본 연구는 기후변화 시나리오에 의한 강우량의 증감 경향을 확률강우량의 산정에 반영하는 방법론을 개발하였다. 본 연구에는 연구자료의 한계로 인하여 BCM2 모형으로 모의된 결과만을 이용하여 결론을 도출한 것으로, 여러 가지 GCM 모형과 기후변화 시나리오에 대한 미래 강우량의 모의 결과가 축적되고, 이에 대한 타당성이 인정된다면 여러 가지 시나리오에 대한 비교 분석이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안한 기후변화를 고려한 비정상성 강우빈도해석법을 이용하여 산정된 목표연도 확률강우량은 경향성을 지닌 수문자료를 바탕으로 수공구조물 계획 및 설계 시 참고자료로 활용함으로써 기후변화로 인한 피해를 예방할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한

국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2009-0069460)입니다.

### 참고문헌

건설교통부(2000) 1999년도 수자원관리기법개발 연구조사 보고서, 제 1권 한국 확률강우량도 작성, 건설교통부.

건설교통부(2005) 삼교천수계 유역종합치수계획, 건설교통부.

경민수, 이용원, 김형수, 김병식(2009) 기후변화가 서울지역의 기온 및 가뭄에 미치는 영향 평가, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제29권 제2B호, pp. 181-191.

권영문, 박진원, 김태웅(2009) 강우의 증가 경향성을 고려한 목표연도 확률강우량 산정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권 제2B호, pp. 131-139.

김병식, 서병하, 감남원(2003) 전이함수모형과 일기발생모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제36권 제3호, pp. 345-363.

김병식, 김보경, 경민수, 김형수(2008) 기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권 제4호, pp. 379-394.

박재현(2008) 이상 기후에 대비한 치수정책 방향, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제41권 제12호, pp. 33-37.

소방방재청(2007) 재해연보 2006, 소방방재청.

안재현, 김태웅, 유철상, 윤용남(2000) 자료기간 증가에 따른 확률강우량의 거동 특성 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권 제5호, pp. 569-580.

오재호, 홍성길(1995) 대기중 CO2 증가에 따른 한반도 강수량 변화, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권 제3호, pp. 143-157.

윤용남, 유철상, 이재수, 안재현(1999) 지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여 : 1. 연/월 강수량의 변화에 따른 일강수량 분포의 변화분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권 제6호, pp. 617-625.

이우리, 오광우(2003) 회귀분석 입문 및 응용, 탐진

He, Y., Brdossy, A., and Brommundt, J. (2006) Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany, *The 7th International Conference on HydroScience and Engineering*, Philadelphia.

Leclerc, M. and Ouarda, T.B.M.J. (2007) Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged site, *Journal of Hydrology*, Vol. 343, Issues 3-4, pp. 254-265.

Olsen, J.R., Stedinger, J.R., Matalas, N.C., and Stakhiv, E.Z. (1999) Climate variability and flood frequency estimation for the upper Mississippi and lower Missouri Rivers, *Journal of the American Water Resource Association*, Vol. 35, pp. 1509-1524.

Stedinger, J.R., Vogel, R.M., and Foufoula-Georgiou, E. (1993) frequency analysis of extreme events, *Handbook of Hydrology*, D. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York, pp. 18.1-18.66

Wang, J. and Yang, P. (2005) A compound reconstructed prediction model for nonstationary climate processes, *Journal of Climatology*, Vol. 25, pp. 1265-1277.

(접수일: 2009.12.8/심사일: 2010.1.11/심사완료일: 2010.3.17)