

## 한국의 주요도시지점 기준강수량 초과 강수의 최근 증가경향 분석

윤선권\* · 문영일\*\*

Yoon, Sun-Kwon\*, Moon, Young-Il\*\*

### The Recent Increasing Trends of Exceedance Rainfall Thresholds over the Korean Major Cities

#### ABSTRACT

In this study, we analysed impacts of the recent increasing trend of exceedance rainfall thresholds for separation of data set and different research periods using Quantile Regression (QR) approach. And also we performed significant test for time series data using linear regression, Mann-Kendall test and Sen test over the Korean major 8-city. Spring and summer precipitation was tend to significant increase, fall and winter precipitation was tend to decrease, and heavy rainy days in last 30 years have increased from 3.1 to 15 percent average. In addition, according to the annual ranking of rainfall occurs Top 10<sup>th</sup> percentile of precipitation for 3IQR (inter quartile range) of the increasing trend, most of the precipitation at the point of increasing trend was confirmed. Quantile 90% percentile of the average rainfall 43.5mm, the increasing trend 0.1412mm/yr, Quantile 99% percentile of the average rainfall 68.0mm, the increasing trend in the 0.1314mm/yr were analyzed. The results can be used to analyze the recent increasing trend for the annual maximum value series information and the threshold extreme hydrologic information. And also can be used as a basis data for hydraulic structures design on reflect recent changes in climate characteristics.

**Key words** : Trend analysis, Mann-Kendall test, Sen test, Quantile regression, 3IQR

#### 초 록

본 연구에서는 전국의 8개 주요 도시지점 강우관측 자료를 대상으로 다양한 분류 기준을 적용하여 Quantile Regression (QR)에 의한 기준강수량 초과 강수의 선형추세분석과 Mann-Kendall, Sen 검정을 실시하였다. 분석결과 봄철과 여름철 강수의 뚜렷한 증가경향이 있으며, 가을철과 겨울철 강수는 감소하는 경향이 있음을 확인하였고, 폭우 사상은 최근 30년 평균 3.1~15% 증가 하였다. 또한, 연도별 발생강우의 Ranking에 따른 Top 10<sup>th</sup> 백분위 강수의 3IQR (inter quartile range)의 최근증가경향을 분석한 결과, 대부분 지점에서 강수의 증가경향을 확인하였으며, Quantile 90%의 평균 백분위 강수량은 43.5mm, 증가경향은 0.1412mm/yr, Quantile 99%의 평균 백분위 강수량은 68.0mm, 증가경향은 0.1314mm/yr로 분석되었다. 본 연구의 결과는 매년 발생한 연최대치계열에 대한 분석뿐만 아니라 기준값 이상의 수문 사상정보에 대한 반영과 최근 변화하는 기후의 증가경향을 반영한 수공구조물 설계의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

**검색어** : 경향성분석, Mann-Kendall 검정, Sen 검정, Quantile regression, 3IQR

\* 정회원 · APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (skyoon@apcc21.org)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수, 도시홍수연구소 소장  
(Corresponding Author · University of Seoul · ymoon@uos.ac.kr)

Received July 15, 2013/ revised August 27, 2013/ accepted December 2, 2013

## 1. 서론

수문시계열자료(hydrological time series data)의 변화를 추정하는데 있어서 경향성 분석(trend analysis)이 주로 이용이 되며, 시계열 경향성의 유의성을 판별하기 위한 많은 통계학적 방법들이 사용되고 있다(Adamowski and Bougadis, 2003; Gemmer et al., 2004; Modarres and Silva, 2007; Ryu et al., 2013). 또한 대상구역의 수문변량(hydrologic variables)이 어떤 해에 발생한 최대치뿐만 아니라 두 번째와 세 번째 등의 값도 그 구조물의 안정성에 중요한 영향을 미칠 수 있다(Yoon, 2012). 이러한 여러 차례에 걸쳐 내린 폭우사상(heavy rainfall)의 발생 빈도(frequency)와 강도(intensity) 최근의 증가경향(trend)을 분석하여 수공구조물 설계에 반영하는 일은 매우 중요하다(Webster et al., 2005; Elsner et al. 2008; Yoon, 2012).

최근 변화하는 기후와 지구온난화로 인한 강수량과 유출량 등 극대치 수문사상의 발생 확률이 점차 증가하고 있는 추세이며, 이러한 극대치 수문사상의 경향을 분석하는 연구들이 활발히 진행 되고 있다. 국외의 경우, Hamed and Rao (1998)는 수정 Mann-Kendall 검정법을 개발하여 이를 강수량 관측자료와 유출량 관측자료의 경향분석과 자기상관 분석에 적용한바 있으며, Adamowski and Bougadis (2003)는 캐나다 Ontario 지역의 44개 강우량관측자료를 바탕으로 지속시간 5, 10, 15, 30분 자료와 1, 2, 6, 12시간의 년최대치계열을 추출하여 강우관측 지역을 남쪽과 북쪽으로 구분하여 Mann-Kendall S trend 검정과 L-moment 방법에 의한 경향 분석을 실시한바 있다. 또한 Gemmer et al. (2004)은 1951-2002년 까지의 중국의 160개 강우관측소 월자료를 대상으로 Mann-Kendall 검정을 통한 지역별 강수경향의 증가와 감소 추세의 공간분포 특성을 분석하였으며, Webster et al. (2005)은 전 지구적으로 발생하는 태풍의 6개 지역을 대상으로 1975-1989년과 1990-2004년의 두 기간으로 구분하여 해수면온도 상승에 따른 태풍의 발생횟수와 기간, 강도의 변화 경향성을 분석한 바 있다. Partal and Kahya (2006)는 비모수적 경향 분석 방법인 Mann-Kendall 검정과 Sen 검정을 통하여 터키의 96개 강우관측소자료를 대상으로 연평균강수량과 월평균강수량의 장기간의 경향성을 분석하였다. 또한 Modarres and Silva (2007)는 이란의 Arid 지역과 Semi-arid 지역의 20개 강우관측소의 강수량 측정자료를 바탕으로 Mann-Kendall 검정을 통한 계절강수량과 평균 강우일수의 경향성분석을 실시하였으며, 겨울철과 봄철에 유의한 증가경향이 있음을 확인한바 있다. Elsner et al. (2008)은 전 지구적으로 발생하는 태풍 풍속의 최근 증가경향 분석을 위하여 Quantile Regression (QR) 방법을 사용하여 경향성 분석을 실시하고 p-value에 의한 유의성 검정을 실시한 바 있다. Krishnamurthy et al. (2009)은 1951년부터 2003년까지의 인도지

역의 격자 강수량 자료를 대상으로 극대치 강수량의 강도와 발생빈도의 경향성을 분석하여 90<sup>th</sup> 와 99<sup>th</sup> 백분위 일강수량의 변동성과 최근 유의한 증가경향이 있음을 분석하였으며, Sharif et al. (2013)은 인더스강 상류 지역의 유출량 자료를 대상으로 봄철 용설효과에 의한 유출량 변화의 시점(timing)과 크기(magnitude)의 Onset 경향을 분석하기 위하여 Mann-Kendall 검정을 통한 시계열분석을 실시한 바 있다.

국내의 경우, 수문 시계열자료 분석을 위하여 Moon (1997)은 Mutual information (MI) 기법을 적용하여 많은 수문자료에서 보여지는 비선형 관계를 추정하는 방법론을 제시하였으며, Oh et al. (2005)은 비단조적으로 변화하는 시계열을 단조적으로 변화하는 구간으로 구분하여 seasonal Kendall test를 통한 시계열자료의 변동경향 분석을 실시하였다. 또한 Oh et al. (2006)은 수문 및 기후 시계열 자료에 존재하는 경향성을 분석하기 위하여 MK 검정, Spearman's Rho 검정 등 총 8가지 기법을 사용하여 선형 경향성 및 평균이동 분석을 실시한 바 있으며, Kwon et al. (2007)의 분석에 의하면 1996년-2005년의 최근 10년 우리나라의 평균 기온은 0.6도 상승하였고 강수량은 11% 증가하였고, 이중 여름철은 18% 증가하였고 호우일수도 증가한 것으로 분석한바 있으며, Oh and Moon (2009)은 일강우자료를 이용한 강우사상의 변동 특성 분석을 통하여 우리나라의 최근 10년간 강우량의 증가추세와 강우일수의 감소 추세가 있음을 분석하였다. Lee et al. (2010)은 우리나라 기상관측소 중 30년 이상관측이 이루어진 63개 지점을 대상으로 9개 수문기상인자의 경년별 특성변화 분석을 Hostelling-Pabst 검정과 Mann-Kendall 검정을 통하여 실시하였으며, Lee et al. (2010)은 통계적으로 유의한 경향성을 갖는 관측지점을 선정하기 위하여 선형회귀 분석을 통한 비정상성 강우빈도해석을 실시하였다. Lee et al. (2010)은 Bayesian 모형구축을 통한 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 사후분포 매개변수를 추정하는 경향성 분석 개념을 소개하고 비정상성 강우빈도해석을 통한 극대치 수문자료의 경향성 존재 여부를 P-value에 의한 유의성 검증을 통하여 분석하였으며, Lee et al. (2012)은 Mann-Kendall 검정을 통하여 국내 기상청 산하 59개 관측소를 대상으로 가뭄지수의 경향성을 분석하였다. So et al. (2012)은 우리나라 47개 강우관측 지점 자료를 바탕으로 Quantile Regression을 이용한 극대 강수량 자료의 경향 분석을 실시하였으며, 기존의 OR (Ordinary Regression) 방법에 비하여 우수한 결과를 얻은 바 있고, Ryu et al. (2013)은 수문시계열 자료의 경향성 분석기법인 Mann-Kendall 검정, Hostelling-Pabst 검정, t 검정, Sen 검정을 적용하여 Monte Carlo 모의실험을 통한 비교분석을 통해 t 검정이 상대적으로 우수한 검정력을 보임을 확인하였다.

본 연구는 전국의 8개 주요 도시유역에 대하여 과거 관측자료로부터 연평균 강수량과 계절강수량, 여름강수에 해당하는 JJAS (June to September) 기간에 대한 전기간치 자료와 최근 30년까지의 자료 기간으로 구분하여, 총강우량과 강우발생일수 기준강우량을 초과하는 강우를 대상으로 Mann-Kendall 검정과 Sen 검정을 통한 강우의 증가경향을 분석하였다. 또한, 연도별 발생강우의 Ranking에 따른 Top 10<sup>th</sup> 강우의 Box Whisker plot을 수행하고 Quantile Regression (QR)을 통한 백분위 강수와 3IQR (inter quartile range)의 증가경향을 분석하여 우리나라 도시지점의 기준 강수량을 초과하는 강우의 최근 증가경향을 분석하였다.

## 2. 대상자료 및 분석방법

### 2.1 대상 자료

본 연구에서는 한국의 주요도시지점의 기준강수량을 초과하는 강우의 최근 증가경향을 분석하기 위하여 우리나라의 대표적 도시 지점에 해당하는 서울(ID: 108), 인천(ID: 112), 대전(ID: 133), 대구(ID: 143), 울산(ID: 152), 광주(ID: 156), 부산(ID: 159) 및 춘천(ID: 101)의 8개 기상관측소를 선정하였다. 각 지점의 관측 자료는 기상청(Korea Meteorological Agency; www.kma.go.kr)에서 제공하는 종관기상관측장비 ASOS (Automated Surface Observing System)에 의해 관측된 강우자료를 사용하였으며, 관측 개시일로부터 2010년 12월 31일까지의 시 자료(hourly rainfall)와 일 자료(daily rainfall)로 부터 월(monthly), 계절(seasonal), JJAS (June to September) 그리고 년(annual) 강수자료를 추출하였다. 추출된 강수자료를 이용하여 평균강우(월, 계절 및 년), 연최대강우, JJAS 기간 강우, 습윤강우일수(wet days), 기준강우량(30mm/d, 50mm/d, 80mm/d, 100mm/d)을 초과하는 강우일수, 연간 상위 10번째 강우자료를 추출하여 관측시작부터 최근까지 그리고 최근

30년 자료로 구분하여 수문 시계열 자료의 경향성을 분석하였다. 다음 Fig. 1은 수문시계열 자료의 경향분석을 위하여 자료를 수집한 기상관측소 8개 지점의 위치도이며, Table 1은 8개 기상관측지점의 일표와 지점별 관측자료 보유기간을 나타내고 있다.

### 2.2 분석방법

수문시계열자료의 추세를 추정하는데 있어 경향성 분석이 주로 사용되며, 시계열 경향성의 유의성 판별을 위해서 많은 통계학적 방법들이 사용되고 있다. 그중에서도 비모수통계(non-parametric statistics)는 모수에 대한 가정을 전제로 하지 않고 모집단의 형태에 관계없이 주어진 데이터에서 직접 확률을 계산하여 통계학적 검정을

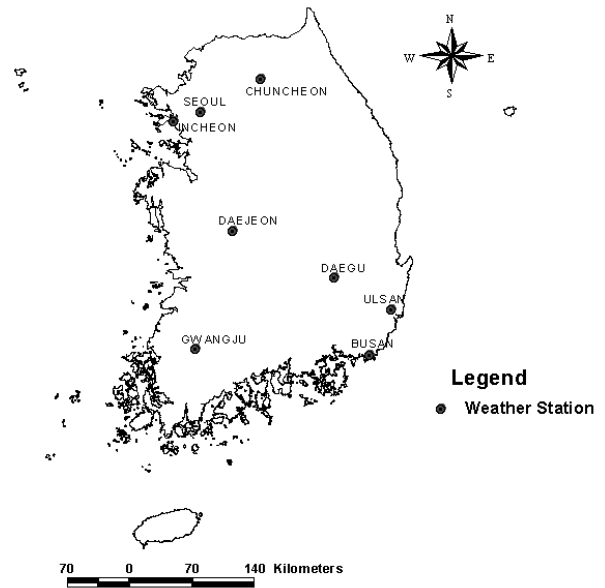


Fig. 1. The Study Area and the Location of Weather Stations in South Korea

Table 1. List of Weather Stations and Duration of Observed Data Hold in Each Weather Station

Station ID	Station Name	Latitude (North)	Longitude (East)	H (EL.m)	h <sub>r</sub> (m)	Data hold	
						Daily	Hourly
108	Seoul	37°34'	126°58'	86.0	0.5	1907-2010	1961-2010
112	Incheon	37°28'	126°38'	68.9	0.5	1904-2010	1961-2010
133	Daejeon	36°22'	127°22'	68.3	1.5	1969-2010	1969-2010
143	Daegu	35°53'	128°37'	57.6	0.6	1907-2010	1961-2010
152	Ulsan	35°33'	129°19'	34.7	0.6	1932-2010	1961-2010
156	Gwangju	35°10'	126°54'	70.5	0.6	1939-2010	1961-2010
159	Busan	35°06'	129°02'	69.2	0.6	1904-2010	1961-2010
101	Chuncheon	37°54'	127°44'	76.8	0.6	1966-2010	1966-2010

\* H means height of observation field above mean sea level, h<sub>r</sub> is height of rain gauge above the ground.

하는 분석법이며, 비모수검정법 혹은 분포무관(distribution-free) 검정법이라고도 한다. 본 연구에서는 시계열자료의 경향성 분석을 위하여 자료의 정규화 과정을 거친 후 각각의 검정통계량으로부터 가설검정을 실시하였으며, 대표적인 비모수적 통계방법으로 사용되고 있는 Mann-Kendall 검정과 Sen 검정을 사용하였다. 경향성이 존재하지 않는다는 귀무가설을 전제로 경향성이 존재하는 대립가설을 만족하는 경우를 유의수준  $\alpha$ 에 대하여 양측검정 ( $Z_{1-\alpha/2}$ )에 의한 시계열 관측자료의 추세를 평가함으로써 우리나라 주요 도시지점 강우자료의 최근 증가경향을 분석하였다. 다음은 Mann-Kendall 검정과 Sen 검정의 이론적 배경과 경향분석방법의 기본이론을 기술하였다.

### 2.2.1 Mann-Kendall 검정

Mann-Kendall 검정(Mann, 1945; Kendall, 1975)은 수문 기상 시계열자료의 비모수적 경향성분석을 위한 방법으로 가장 폭넓게 사용되고 있는 방법 중 하나이다. Mann-Kendall 검정 방법은 자료  $Y_t(t=1,2,\dots,N)$ 에 대하여  $Y_{t'}(t'=1,2,\dots,N-1)$ 과  $Y_t(t=t'+1,\dots,N)$ 의 크기를 비교하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_k &= 1 & \text{if } Y_t > Y_{t'} \\ Z_k &= 0 & \text{if } Y_t = Y_{t'} \\ Z_k &= -1 & \text{if } Y_t < Y_{t'} \end{aligned}$$

여기서,  $k=(t'-1)(2N-t')+(t-t')$ 라 하면 Mann-Kendall 검정의 검정통계량은 다음 Eqs. (1) ~ (3)과 같이 주어진다(Hirsch et al., 1982).

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^N Z_k \quad (1)$$

$$U_c = \frac{S+j}{[V(S)]^{1/2}} \quad (2)$$

여기서,

$$V(S) = \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(2E_i+5) \right] \quad (3)$$

$S < 1$ 이면  $j=1$ ,  $S > 1$ 이면  $j=-1$ ,  $S=0$ 이면  $j=0$ 의 값을 가지고,  $G$ 는 같은 값을 갖는 자료군의 총수이며,  $E_i$ 는  $i$  번째 자료군에 속하는 같은 값을 갖는 자료의 수이다. 다음의 Eq. (4)의

조건이 만족되면 유의수준  $\alpha$ 에서 주어진 자료가 상향경향(upward trend) 또는 하향경향(downward trend)을 갖는다고 할 수 있다.

$$|U_c| > u_{1-\alpha/2} \quad (4)$$

주어진 자료에 대하여  $S=0$ 이면  $U_c=0$ 으로 경향을 갖지 않으며,  $S$ 가 양수인 경우에는 상향경향을 가지며,  $S$ 가 음의 값을 갖는 경우에는 하향경향을 갖는다.

### 2.2.2 Sen 검정

Sen 검정은 Sen (1968)에 의해 제안된 비모수적 방법으로, 주어진 자료  $Y_t(t=1,2,\dots,N)$ 에 대하여 다음 Eq. (5)와 같이 새로운 변수  $Z_k$ 를 정의한다.

$$Z_k = \frac{Y_j - Y_i}{j - i} \quad (5)$$

여기서, 모든  $i$ 와  $j$ 에 대해  $j > i$ 이고,  $Z_k$ 를 다시 내림차순 방향으로 정렬한 값을  $X_k$ 로 정의하면 Sen의 경사(slope)에 대한 검정통계량은 다음 Eq. (6)과 같이 주어진다(Gilbert, 1987).

$$M \text{이 홀수일 때, } S = X_{(M+1)/2}$$

$$M \text{이 짝수일 때, } S = \frac{1}{2} [X_{M/2} + X_{(M+2)/2}]$$

여기서,  $M=N(N-1)/2$ 로 앞의 Eq. (5)에서 구한 검정통계량이 다음의 신뢰한계 안에 있게 되면 유의수준  $\alpha$ 에서 경향을 갖는다고 할 수 있다.

$$[X_{M_L}, X_{M_U}] \quad (6)$$

여기서,

$$M_L = \frac{M - u_{1-\alpha/2} [V(S)]^{1/2}}{2} \quad (7)$$

$$M_U = 1 + \frac{M + u_{1-\alpha/2} [V(S)]^{1/2}}{2} \quad (8)$$

이고,  $V(S)$ 는 Eq. (3)을 이용하여 구할 수 있으며, 하한계(lower limit:  $X_{M_L}$ )은  $X$ 값 중 가장 작은 값으로부터  $M_L$ 번째 값이고, 상한계(upper limit:  $X_{M_U}$ )는  $M_U$ 번째 값을 의미한다.

### 2.2.3 경향성 분석방법

본 연구에서는 수집된 강수량 자료를 바탕으로 건조일(dry day)

과 습윤일(wet day), 계절(seasonal)과 년(yearly)으로 구분하여 비모수검정법에 해당하는 Mann-Kendall 검정과 Sen 검정을 통한 경향성 분석을 실시하였으며, Z statistics와 p-value에 의한 유의성 검정을 실시하였다. 신뢰구간(confidence interval)은 0.99, 0.95, 0.90을 기준으로 4개 구간으로 구분하여 분석하였으며, 유의수준(level of significance)에 따라 분석된 결과는 1등급에서 4등급까지 등급화 하였다. 1등급은 99% 신뢰구간( $\alpha=0.01$ )을 채택(accept)하는 경우이며, 2등급은 99% 신뢰구간( $\alpha=0.01$ )을 기각(reject)하고 95% 신뢰구간( $\alpha=0.05$ )을 채택하는 경우이다. 또한, 3등급은 95% 신뢰구간( $\alpha=0.05$ )을 기각, 90% 신뢰구간( $\alpha=0.10$ ) 채택하는 경우이며, 4등급은 90% 신뢰구간( $\alpha=0.10$ )을 기각하는 경우이다. 다음 Fig. 2는 유의수준에 따른 등급구분의 모식도이며, Table 2는 각 등급별 유의수준에 따른 가설(hypothesis)의 채택역(acceptance region)과 기각역(rejection region), Sen 검정에 의한 구간별 등급화 기준을 나타내었다. 또한, Sen 검정의 경사(slope)는 표준화 과정을 통하여 1등급의 경우  $75\% \leq \text{slope} \leq 100\%$ , 2등급의 경우  $50\% \leq \text{slope} \leq 75\%$ , 3등급의 경우  $25\% \leq \text{slope} \leq 50\%$ , 4등급의 경우  $0\% \leq \text{slope} \leq 25\%$ 로 등급화 하였다. 따라서 대상자료의 경향 분석결과가 Class4에 가까워질수록 시계열자료의 경향성이 존재하

지 않는다는 기본가설의 채택역이 작아짐으로 이를 기각할 확률이 커진다는 것을 알 수 있다.

### 3. 분석결과

#### 3.1 연 평균 및 계절 강수 경향분석

한국의 주요 도시지점 연평균 강수량자료와 계절 강수량 자료를 대상으로 선형추세(linear trend)분석과 이동평균과정(moving average process)에 의한 경향성 분석을 실시하였다. 시계열 자료의 추세를 이용한 회귀분석은 다음의 Eq. (9)에 의하여 구할 수 있다(Park and kim, 2005).

$$z_t = TR_t + \epsilon_t \tag{9}$$

여기서,  $z_t$ 는 시점  $t$ 에서의 관측값을 의미하며,  $TR_t$ 는 시점  $t$ 에서의 추세,  $\epsilon_t$ 는 시점  $t$ 에서의 오차항을 의미한다.

다음으로 어떤 시계열  $z_t$ 를 설명하는데  $z_{t-1}$ 도 정보를 가지고 있는 경우 시계열자료의 이동평균과정을 통하여 표현할 수 있다. 시계열의 각 항에 대하여 그것을 중심으로 하는 전후 일정 항

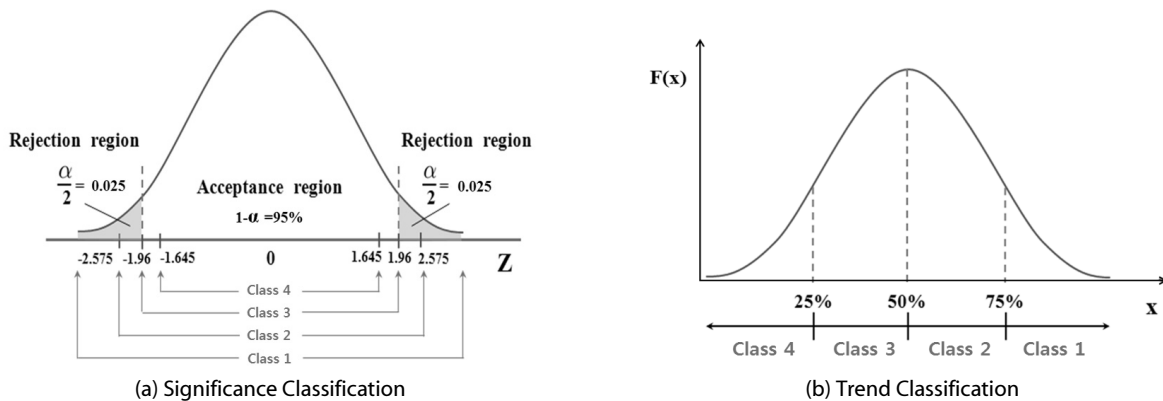


Fig. 2. Schematic View of Classification for Trend Analysis Using Time Series Data

Table 2. Classification of Significant Level for Trend Analysis

Test	Confidence limit ( $\alpha$ ; Significant level)	Hypothesis test results	Sen test for trend analysis (Slope)
Class 1	Upper 99% ( $\alpha=0.01$ )	0.99 accepted	$75\% \leq \text{slope} \leq 100\%$
Class 2	99% ~ 95% ( $\alpha=0.01 \sim 0.05$ )	0.99 rejected, 0.95 accepted	$50\% \leq \text{slope} \leq 75\%$
Class 3	95% ~ 90% ( $\alpha=0.05 \sim 0.10$ )	0.95 rejected, 0.90 accepted	$25\% \leq \text{slope} \leq 50\%$
Class 4	Lower 90% ( $\alpha=0.10$ )	0.90 rejected	$0\% \leq \text{slope} \leq 25\%$

수의 평균값을 연결하여 경향선을 구하는 방법으로 다음 Eq. (10)에 의하여 구할 수 있다.

$$z_t = \mu + a_t + \theta a_{t-1} \quad (10)$$

여기서,  $\mu$ 는 평균수준을 나타내는 모수이며,  $a_t$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 백색잡음과정(white noise process)을 의미하고,  $a_{t-1}$ 는 과거 한 시점 전까지의 백색잡음과정이다.

분석결과, 연평균 강수량은 모든 지점에서 증가경향을 보이고 있음을 확인하였으며, 특히 여름철 강수의 증가 추세가 뚜렷하고

가을, 겨울은 약한 강수 감소 추세를 보임을 확인하였다. 연평균 강수량의 선형추세의 증가경향이 가장 크게 나타난 지점은 광주(156) 지점으로 기울기가 +3.8475로 분석되었으며, 가장 작은 지점은 울산(152) 지점으로 기울기가 +0.8161로 분석되었다. 또한 계절강수량의 선형추세는 봄철의 경우 평균 -0.037로 여름철은 평균 +2.785, 가을철은 평균 -0.338, 겨울철은 평균 -0.168로 분석되었다(Fig. 3). 여기서, 서울(108) 지점과 인천(112) 지점의 경우 1951-1952년 한국전쟁 동안 미계측 자료구간이 존재함으로 이 기간은 제외하고 분석을 실시하였다.

또한, Sen 검정에 의한 slope 분석 결과 8개 지점의 평균은

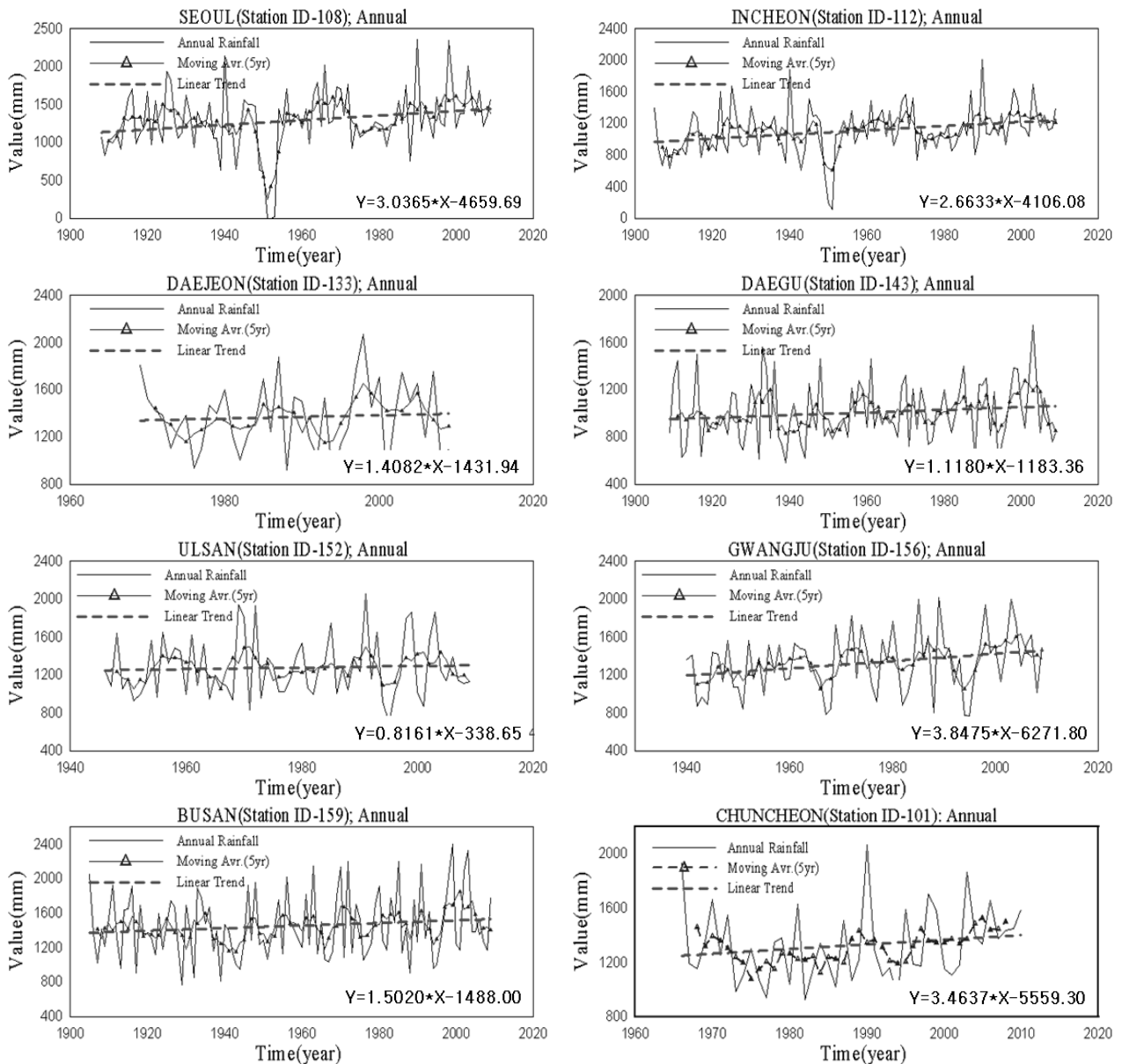


Fig. 3. Results on Trend Analysis for Annual Mean Precipitation in Each Station

Table 3. Statistical Results From Sen Test Slope Analysis for Annual and Seasonal Mean Precipitation

Station (ID)	Annual		Seasonal								
	Slope	Class	Spring		Summer		Fall		Winter		
			Slope	Class	Slope	Class	Slope	Class	Slope	Class	
Seoul (108)	2.595	3	0.343	1	1.682	3	0.467	1	-0.086	1	
Incheon (112)	2.536	3	0.363	1	1.674	2	0.515	1	-0.016	1	
Daejeon (133)	2.801	3	-1.391	4	5.380	1	-1.020	4	-0.637	4	
Daegu (143)	1.598	3	0.200	2	1.599	4	-0.239	2	-0.074	1	
Ulsan (152)	0.872	4	-0.283	3	2.528	3	-0.960	4	-0.511	3	
Gwangju (156)	4.111	1	0.086	3	4.126	1	-0.797	3	0.439	1	
Busan (159)	1.366	4	0.666	1	1.113	4	-0.318	2	-0.095	2	
Chuncheon (101)	3.174	2	0.621	1	4.097	1	-0.792	3	-0.214	2	
Total	Mean	2.3816	△ (+)	0.076	△ (+)	2.775	△ (+)	-0.39	▽ (-)	-0.149	▽ (-)
	S.D.	1.05481		0.665		1.557		0.61		0.327	
	SK.	0.127821		-1.806		0.686		0.69		0.234	

\* S.D. means standard deviation and S.K. means skewness.

2.3816으로 모든 지점에서 연평균강수는 증가추세를 보이고 있음을 확인하였으며, 특히 광주(156)지점에서 slope이 4.111로 Class 1으로 구분되어 유의한 증가경향이 있는 것으로 분석되었다. 또한 계절강수량의 증가경향 분석결과 대부분의 지점에서 봄철(평균 slope: +0.076)과 여름철(평균 slope: +2.775)에 평균강수가 증가 추세를 나타내고 있는 반면에 가을철(평균 slope: -0.390)과 겨울철(평균 slope: -0.149)의 경우 많은 지점들이 감소추세를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 봄철은 대전(133)과 울산(152)지점을 제외한 모든 지점에서 증가하는 경향이 있었으며, 여름철은 모든 지점에서 증가경향이 있었고 특히 대전(133)과 광주(156), 춘천(101) 지점에서 class 1으로 구분되어 유의한 증가경향을 보이는 것으로 분석되었다(Table 3).

### 3.2 JJAS 기간 강수의 경향 분석

우리나라는 여름철 동아시아 몬순(monsoon)의 영향으로 인하여 여름철에 강우가 집중하여 발생하며, JJAS (June to September) 기간의 강수량은 연평균 강수량의 약 71.0 %를 차지한다(Yoon et al., 2013). 특히 도시구역의 경우 여름철 강수에 의한 유출량은 수공구조물 계획을 세우는데 있어 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 일강수량 자료를 바탕으로 관측시작년도부터 2010년까지 여름철(JJAS) 강수를 추출하여 전 기간치 시계열자료(Series 1,  $S_1$ )와 최근 30년 시계열자료(Series 2,  $S_2$ )로 구분하여 JJAS 기간 동안에 내린 강수의 증가경향을 분석하였다.

경향분석의 유의성검정을 위한 고전적 가설검정 방법은 모집단으로부터 추출한 표본을 이용하여 계산된 검정 통계량  $\bar{X}$  또는

Z)과 사전에 임의로 결정하는 유의수준  $\alpha$ 에 해당하는 임계치를 비교하여 검정통계량이 채택영역에 들어가면 귀무가설을 채택하고 기각영역에 들어가면 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택하는 방법을 의미한다. 이러한 고전적 가설검정에서는 유의수준을 의사 결정자가 자의로 결정하기 때문에 동일한 자료에 대해서도 서로 다른 결론을 내릴 수 있는 위험이 따른다(Kang and park, 2007). 따라서, 본 연구에서는 경향성 분석을 위하여 p값(p-value)에 의한 유의성 검정을 실시하였으며, Mann-Kendall 검정과 Sen 검정에 의한 경향성 분석을 실시하였다. p값이란 제 I 종 오류를 범할 실제로 정확한 확률, 즉 사실인 귀무가설을 거부하게 하는 유의수준 (observed significance level)  $\alpha$ 의 최소치를 말하며, 고전적인 가설검정에서 나타나는 위험은 귀무가설에 대한 p값을 제시함으로써 미연에 방지할 수 있다. 유의성검정을 위한 통계분석 시 p값을 계산해 줌으로써 이를 유의수준  $\alpha$ 와 비교하여 귀무가설의 채택여부를 결정할 수 있다.

JJAS 기간동안의 강수량을 전기간자료와 최근 30년 자료로 구분하여 선형추세분석과 경향분석을 실시한 결과, 모든 지점에서 강우의 증가 경향이 있음을 확인하였다(Fig. 4). 그러나 신뢰구간 95% ( $\alpha=0.05$ )에 대하여 전기간 시계열 자료의 경우 모든 지점에서 유의한 증가경향이 나타나지 않았으며, 최근 30년 시계열자료의 경우 서울(108)지점과 인천(112)지점에서 Mann-Kendall 검정과 Sen 검정 모두 유의한 증가경향을 보임을 확인하였다(Table 4).

또한 습윤 강수일수(wet days)에 대하여 전기간자료의 선형추세 분석과 경향분석을 실시한 결과, 서울(108), 부산(159), 춘천(101) 지점의 경우 강우일 수가 감소하는 경향이 있으며, 나머지 인천

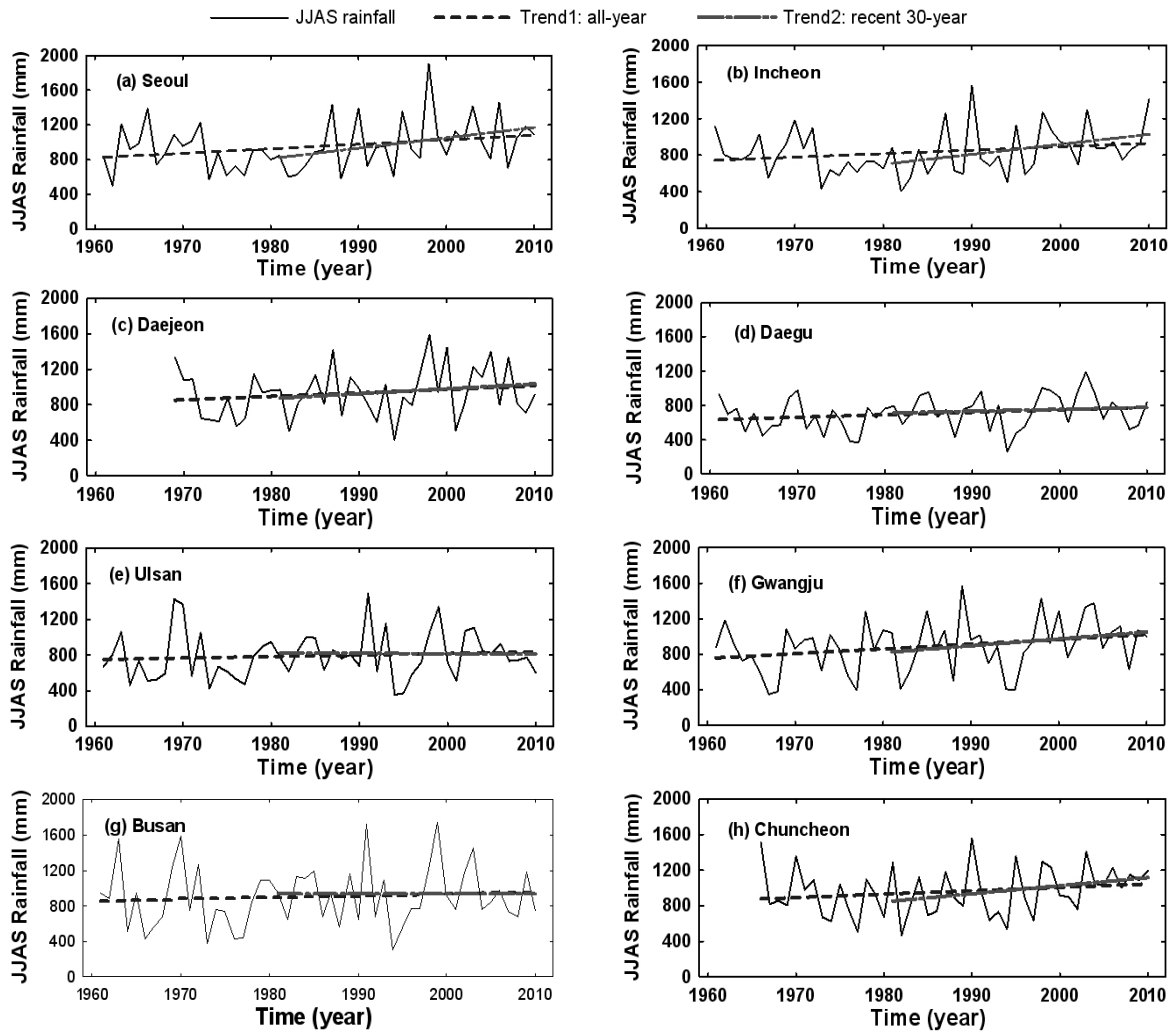


Fig. 4. Linear Trends in Whole Periods and Recent 30-Year During JJAS Season for the 8-Major Cities. The Solid Line is the JJAS Rainfall Series. The Dotted Blue Line is the Linear Regression Trends in Whole Period and the Dashed Red Lines Delineate the Linear Regression Trends During Recent 30-Year

Table 4. Results on Significant Test for JJAS Precipitation in Each Station

ID	Station Name	Z statistics		P-value		Significant level ( $\alpha=0.05$ )			
		$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$	M.K		Sen	
						$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$
108	Seoul	1.9597	0.8556	0.0250	0.1961	0	1	0	1
112	Incheon	1.6099	0.7011	0.0537	0.2416	0	1	0	1
133	Daejeon	1.4567	0.4380	0.0726	0.3307	0	0	0	0
143	Daegu	1.8337	1.0722	0.0334	0.1418	0	0	0	0
152	Ulsan	0.6422	0.4988	0.2604	0.3090	0	0	0	0
156	Gwangju	1.9543	0.8942	0.0253	0.1856	0	0	0	0
159	Busan	0.8693	0.5186	0.1923	0.3020	0	0	0	0
101	Chuncheon	1.2861	0.4738	0.0992	0.3178	0	0	0	0

\*  $S_1$  means time series in whole period during June to September. And  $S_2$  is time series of recent 30-year during June to September. Significant test has performed Mann-Kendall test and Sen test slope. Significant: '1' has trend, '0' has no trend.



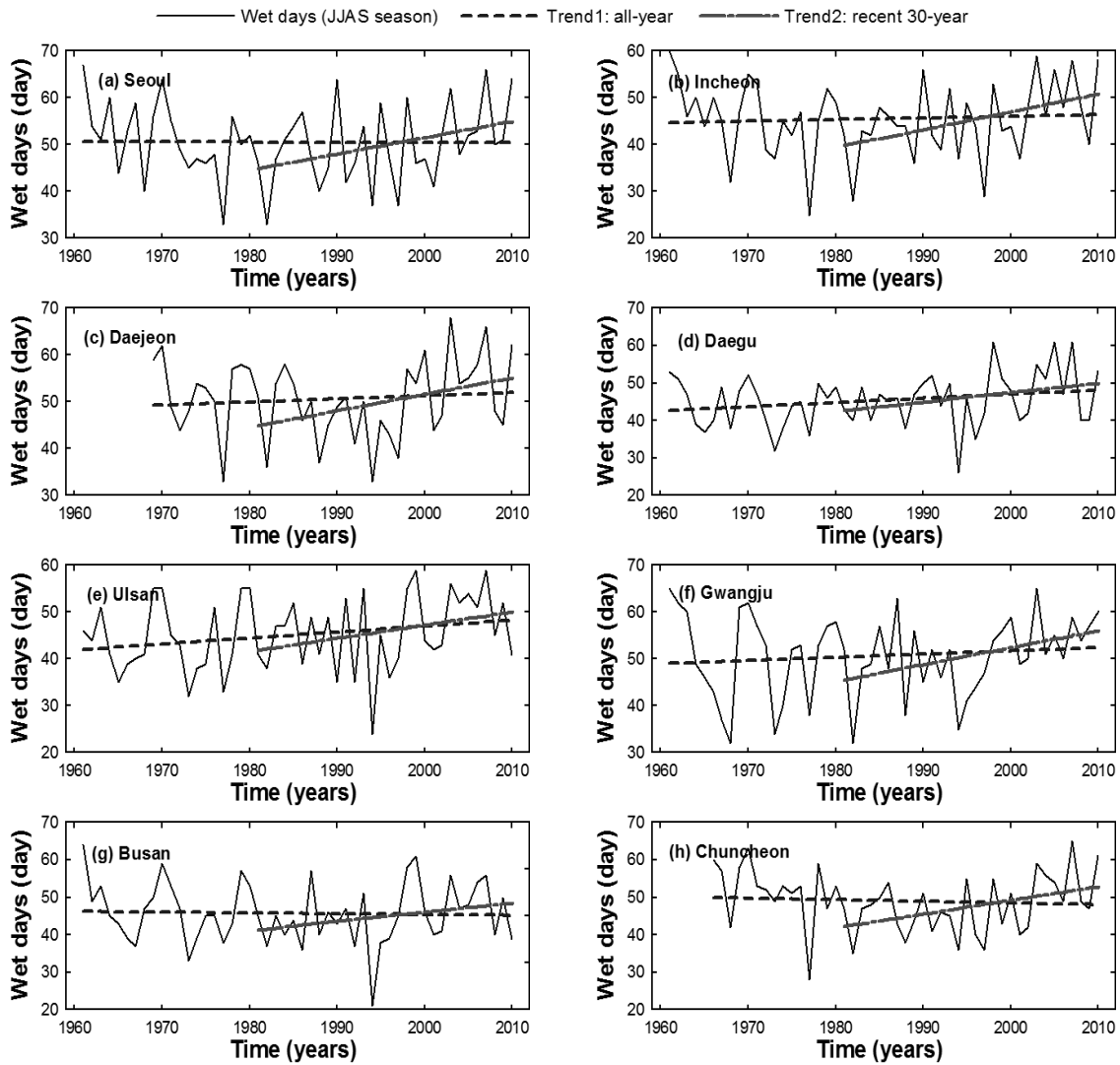


Fig. 5. Wet Days Linear Trends in Whole Periods and Recent 30-Year During JJAS Season for the 8-Major Cities

Table 5. Result on Significant Test for Wet Days in Each Station

ID	Station Name	Z statistics		P-value		Significant level ( $\alpha=0.05$ )			
		$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$	M.K		Sen	
						$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$
108	Seoul	0.5618	-0.4039	0.2871	0.3431	0	1	0	1
112	Incheon	0.9094	-0.1660	0.1816	0.4341	0	1	0	1
133	Daejeon	1.2609	-0.3659	0.1037	0.3572	0	0	0	0
143	Daegu	1.6473	0.6984	0.2425	0.0497	0	0	0	0
152	Ulsan	1.6863	0.5592	0.2880	0.0459	0	1	0	0
156	Gwangju	1.4568	0.0502	0.0726	0.4800	0	1	1	1
159	Busan	1.0839	-0.5513	0.1392	0.2907	0	1	0	1
101	Chuncheon	0.3831	-0.9707	0.3508	0.1658	0	1	0	1

\* Same as in Table 4.

(112), 대전(133), 대구(143), 울산(152), 광주(156) 지점에서는 증가하는 경향이 있음을 확인하였다(Fig. 5). 그러나 Mann-Kendall 검정에 의한 결과 전기간 시계열자료의 경우 신뢰구간 95% ( $\alpha = 0.05$ )에 대하여 강우일수의 증가경향이 나타나지 않았으나, Sen 검정에 의한 결과 광주(156) 지점에서 유의한 증가경향이 있는 것으로 분석되었으며, 최근 30년 시계열자료의 경우 Mann-Kendall 검정에 의한 결과 서울(108), 인천(112), 울산(152), 광주(156), 부산(159), 춘천(101) 6개 지점에서 유의한 증가경향을 보였으며, Sen 검정에 의한 결과는 서울(108), 인천(112), 광주(156), 부산

(159), 춘천(101) 5개 지점에서 유의한 증가경향을 보임을 확인하였다(Table 5).

### 3.3 폭우 사상의 경향 분석

폭우사상(30mm/d, 50mm/d, 80mm/d, 100mm/d)을 초과하는 강수량의 전기간과 최근 30년 동안의 발생 횟수에 대한 시계열자료를 구축한 후 경향분석을 실시하였다. 기준 강수량을 초과하는 지속기간별 호우사상의 발생 횟수를 지점별로 살펴본 결과 각 지점마다 다른 강우형태, 입지 등으로 인하여 서로 다른 결과를

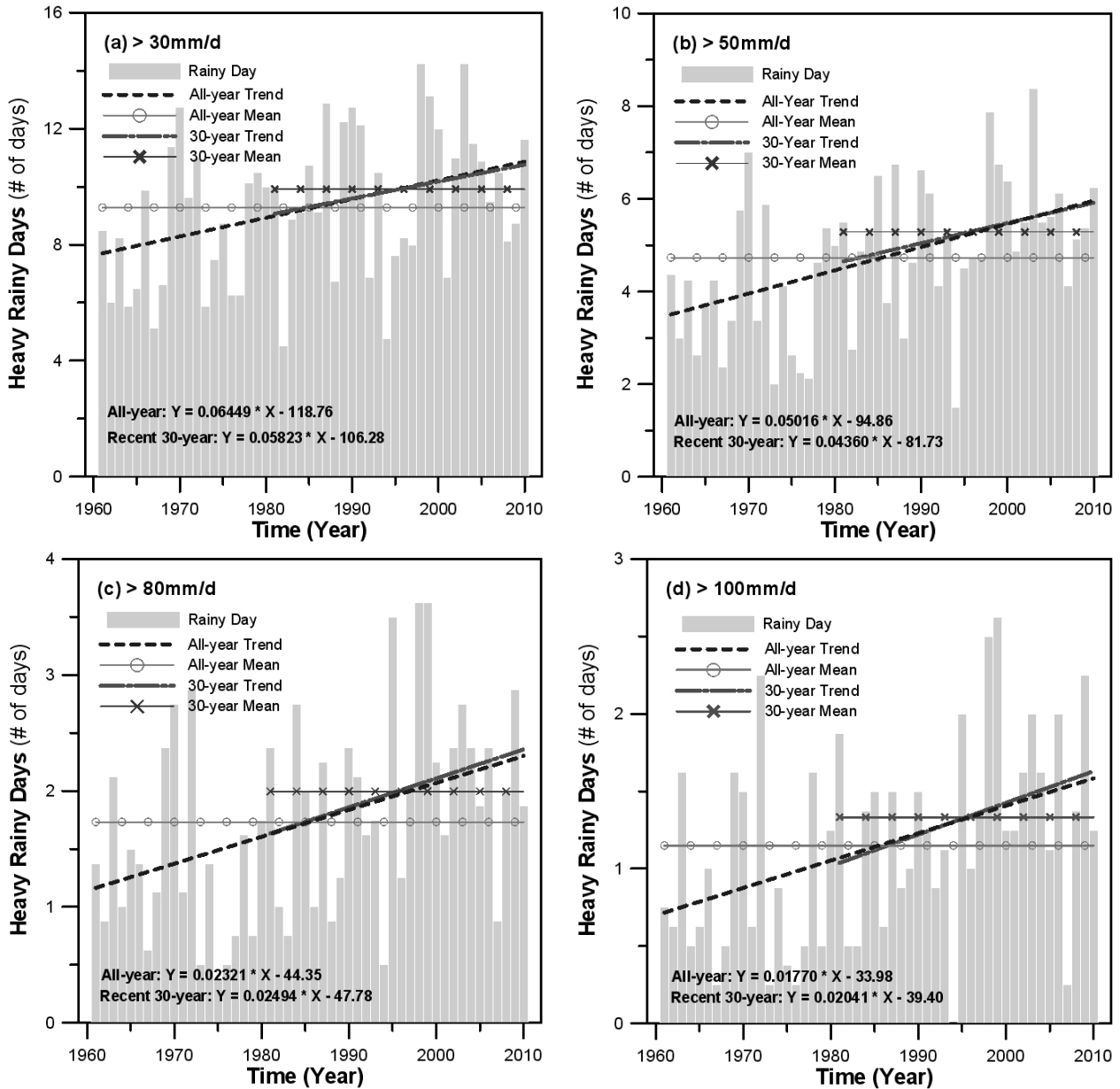


Fig. 6. Increasing Trends of Heavy Rainy Day Average in Each Rainfall Intensity

Table 6. Number of Occurrences in Exceeds of Threshold Rainfall

ID	Periods	Heavy rainy days (JJAS)							
		Occurrence				Trend			
		> 30mm	> 50mm	> 80mm	> 100mm	> 30mm	> 50mm	> 80mm	> 100mm
108	$S_1$	11.0	5.9	2.7	1.6	0.0326	0.0527	0.0332	0.0301
	$S_2$	11.3	6.4	3.1	1.9	0.1231	0.0860	0.0658	0.0516
112	$S_1$	9.3	4.4	2.1	1.2	0.0107	0.0358	0.0331	0.0288
	$S_2$	9.3	4.8	2.4	1.4	0.0813	0.0836	0.0566	0.0648
133	$S_1$	10.2	5.2	2.1	1.2	0.0707	0.0286	0.0193	0.0119
	$S_2$	10.6	5.4	2.2	1.3	0.0938	0.0312	0.0288	0.0013
143	$S_1$	7.8	3.3	1.2	0.5	0.0384	0.0342	0.0081	0.0057
	$S_2$	8.3	3.8	1.3	0.6	0.0344	0.0484	0.0226	0.0002
152	$S_1$	8.7	4.4	1.7	1.1	0.0190	0.0096	0.0047	0.0006
	$S_2$	8.8	4.6	1.8	1.1	-0.0102	-0.0146	0.0109	0.0043
156	$S_1$	9.7	5.2	1.9	1.1	0.0571	0.0489	0.0319	0.0119
	$S_2$	10.1	5.8	2.2	1.2	0.1088	0.0548	0.0473	0.0172
159	$S_1$	9.8	5.4	2.2	1.5	0.0164	0.0211	0.0197	0.0072
	$S_2$	10.1	5.8	2.6	1.6	-0.0309	-0.0123	0.0049	-0.0088
101	$S_1$	10.5	5.4	2.3	1.5	0.0235	0.0475	0.0194	0.0182
	$S_2$	10.7	5.8	2.6	1.6	0.0501	0.0600	0.0032	0.0274

\* Significant test has performed Mann-Kendall test and Sen test slope.

언을 수 있었지만, 한국의 주요 도시지점에서 기준 강우강도를 초과하는 평균강수가 증가하고 있음을 확인할 수 있으나 최근 30년 평균 증가경향이 뚜렷하게 나타나지는 않은 것으로 확인되었다 (Fig. 6). 이는 Table 6의 전기간에 해당하는 시계열자료( $S_1$ )와 최근 30년에 해당하는 시계열자료( $S_2$ )의 경향성 분석결과에서 확인할 수 있다. 일강수량이 30mm/d를 초과하는 강수발생 횟수의 경우 전기간 자료는 8개 도시지점 평균 9.6회로 나타났으며 최근 30년까지 자료의 평균은 9.9회로 증가하였고 시계열자료의 선형 추세분석결과 전기간자료는 0.0336, 최근 30년까지 자료는 0.0563으로 증가하였다. 또한 일강수량이 50mm/d를 초과하는 강수발생 횟수의 경우 평균 4.9회로 나타났으며 최근 30년까지 자료의 평균은 5.3회로 증가하였고 시계열자료의 선형 추세분석결과 전기간자료는 0.0348, 최근 30년까지 자료는 0.0421로 증가하였다. 그리고 일강수량이 80mm/day를 초과하는 강수발생 횟수의 경우 전기간 자료의 평균은 2.0회로 나타났으며 최근 30년까지 자료의 평균은 2.3회로 다소 증가하였고 시계열자료의 선형 추세분석결과 전기간 자료는 0.0212, 최근 30년까지 자료는 0.0300로 증가하였다. 마지막으로 일강수량이 100mm/day를 초과하는 강수발생 횟수의 경우 평균은 1.2회로 나타났으며 최근 30년까지 자료의 평균은 1.3회로

다소 증가하였고 시계열자료의 선형 추세분석결과 전기간자료는 0.0143, 최근 30년까지 자료는 0.0198로 증가하였다. 따라서 중호 수사상의 기준강수량을 초과하는 강수의 증가경향은 최근 30년 동안 평균적으로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있었으며, 그 증가경향은 낮은 강우강도에서 보다 100mm/d이상의 극대치 강우에 해당하는 강우에서 보다 현저히 나타남을 확인하였다.

### 3.4 TOP 10 백분위 강수의 경향 분석

수문시계열자료를 통한 극대치 수문량 해석의 방법론으로 현재까지는 연최대치계열(annual maxima series)과 연초과치계열(annual exceedence series)의 사용이 대부분이었으나 수문자료가 갖는 고유의 계절변동성(seasonal variability)과 경향성(trend) 분석을 위해서는 부분기간치계열(partial duration series)에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 매년 발생한 강수의 상위 10번째까지의 백분위 강수사상을 추출하였으며, Quantile Regression (Buchinsky, 1994; McGuinness and Bennett, 2007)에 의한 각 백분위 계열에 대한 경향성을 분석하였다. 이는 연최대치 자료와 연초과치를 포함한 수문자료의 극대치계열에 해당하는 시계열자료로 폭우사상의 연차별 경향을 판단할 수 있는 지표로 활용될 수 있다. 연간 상위 10번째

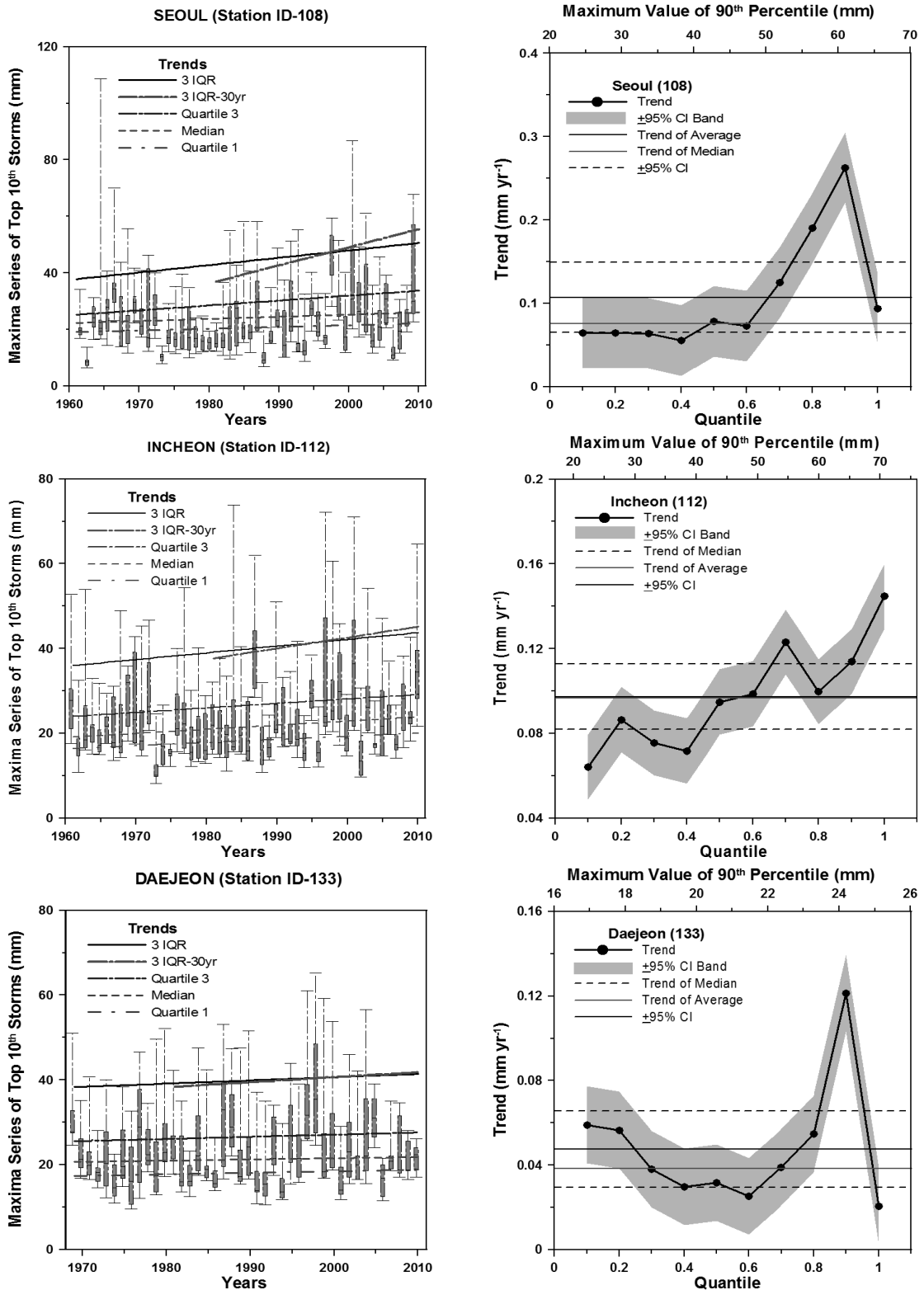


Fig. 7. Box Whisker Plot of Time Series in Hourly Maximum Precipitation of the Annual TOP 10<sup>th</sup> Series for the Periods of Observed Data Hold and Recent 30-Year in Each 8-Major City Observatories. The Conditional Quartiles (From Bottom to Top: 0.25, 0.50, 0.75, 3IQR) are Shown as Left Figures and the Trends of Percentile Precipitation are Shown as Right Figures. Trends are Estimated Coefficients from Quartile Regression. The Point Wise 95% Confidence Band in Shown in Gray (continue)

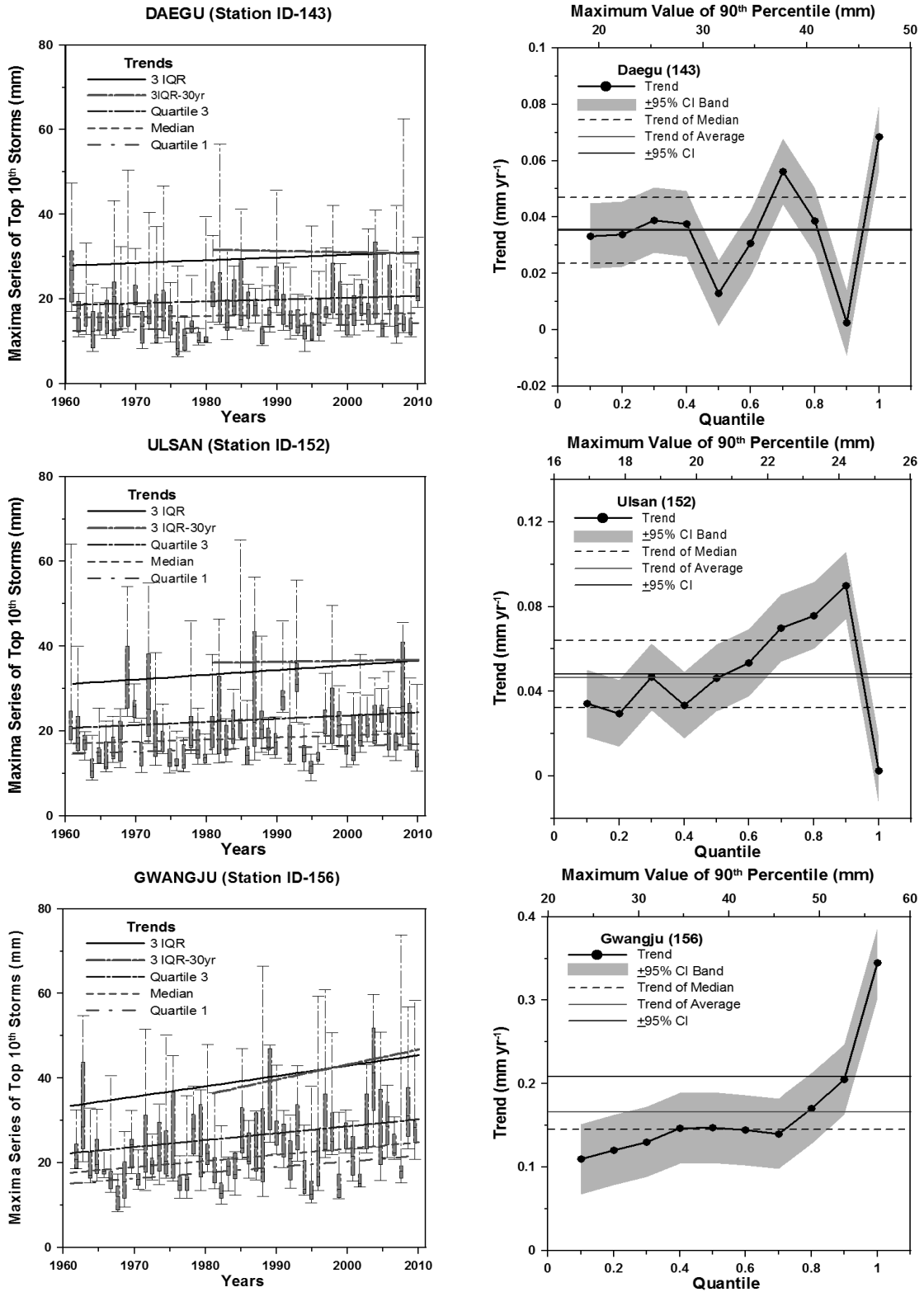


Fig. 7. Box Whisker Plot of Time Series in Hourly Maximum Precipitation of the Annual TOP 10<sup>th</sup> Series for the Periods of Observed Data Hold and Recent 30-Year in Each 8-Major City Observatories. The Conditional Quartiles (From Bottom to Top: 0.25, 0.50, 0.75, 3IQR) are Shown as Left Figures and the Trends of Percentile Precipitation are Shown as Right Figures. Trends are Estimated Coefficients from Quartile Regression. The Point Wise 95% Confidence Band in Shown in Gray (continue)

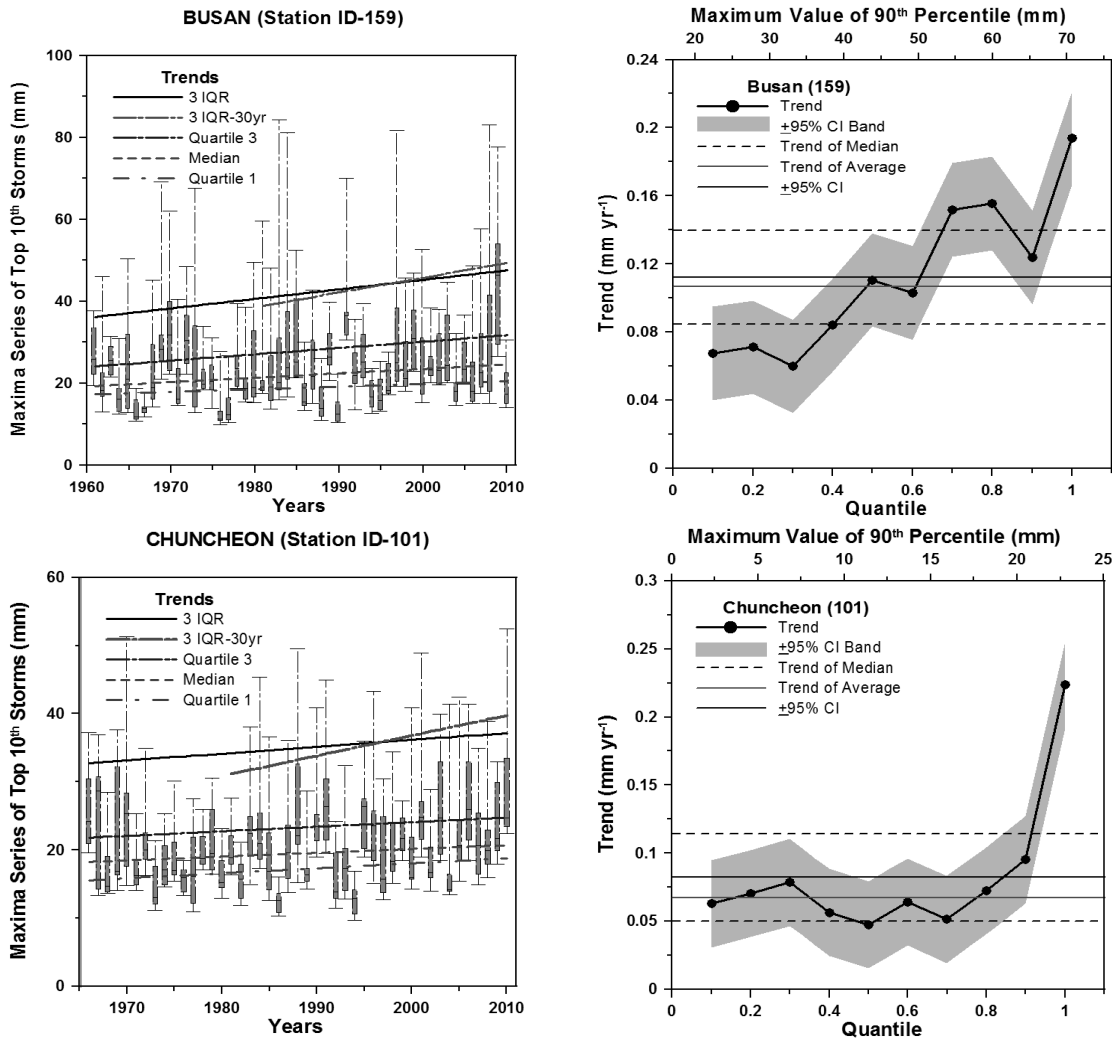


Fig. 7. Box Whisker Plot of Time Series in Hourly Maximum Precipitation of the Annual TOP 10<sup>th</sup> Series for the Periods of Observed Data Hold and Recent 30-Year in Each 8-Major City Observatories. The Conditional Quartiles (From Bottom to Top: 0.25, 0.50, 0.75, 3IQR) are Shown as Left Figures and the Trends of Percentile Precipitation are Shown as Right Figures. Trends are Estimated Coefficients from Quartile Regression. The Point Wise 95% Confidence Band in Shown in Gray

백분위 강수의 증가경향 분석은 기존의 기준강수량(threshold) 이상의 호우사상을 추출하는 POT (peak over threshold) 방법과는 다소 상이한 개념의 수문시계열해석 방법이다.

주요 도시지점 각 관측소의 강우지속 1시간 강수량자료를 추출하여 강우를 크기순으로 분류한 후 각 관측소별 연간 상위 10번째 백분위 강수의 상자수염(box and whisker plot) 분석을 통한 최솟치(minimum), 1사분위수(1st quartile), 2사분위수(median), 3사분위수(3rd quartile), 최대치(maximum)의 값을 구한 후 Quartile 1과 Median, Quartile 3 그리고 3 IQR (inter-quartile range)의 최근 경향성을 분석하였으며, 각 Quartile별 백분위강수의 증가경향에 대한 신뢰성 분석은 강수량자료의 표준오차 분석을 통하여 실시하였다. 본 연구에서는 표본회귀선을 이용하여 독립변수( $X_i$ )

가 종속변수( $Y_i$ )의 값을 예측하는데 어느 정도의 신뢰성을 갖느냐를 평가하기 위해서 추정의 표준오차(standard error:  $S_e$ )를 산정하여 평가하였으며, 표준오차는 다음 Eq. (11)에 의하여 산정할 수 있다.

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{SSE}{n-2}} = \sqrt{\frac{\sum Y_i^2 - a \sum Y_i - b \sum X_i Y_i}{n-2}} \quad (11)$$

여기서,  $SSE$ 는 오차제곱합이며, 분모의  $n-2$ 는 회귀분석과정에서 사용된 추정량  $a$ 와  $b$ 의 2개만큼 자유도가 줄어야 표본의 표준오차가 모집단의 불편추정량이 됨을 의미한다. 추정 회귀선을 중심으로 한  $\pm 1S_e$ 는 68%,  $\pm 1.5S_e$ 는 95.5%,  $\pm 2S_e$ 는 99.7%구간

을 설명하게 된다. 추정의 표준오차가 클수록 회귀선 주위로 관측치들은 널리 흩어져 분포하게 되며, 만약 모든 관측치들이 회귀선상에 놓이게 되면 표준오차는 0이 된다. 따라서 추정의 표준오차가 작을수록 관측치들은 표본회귀선 주위로 밀집하게 되어 표본회귀선이 독립변수와 종속변수의 통계적 관계를 적절히 설명할 수 있다.

다음 Fig. 7에서 보는바와 같이 대부분 지점의 상위 10번째

백분위 강수계열의 증가경향을 확인할 수 있으며, 최근 30년에 해당하는 각각의 강수계열의 순위백분율(percentile of rank) 값의 증가경향도 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 서울지점(108)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.2606, 최근 30년 +0.6397로 나타나 최근에 올수록 폭우사상의 증가경향이 있는 것으로 분석되었으며, Quantile 0.99에 해당하는 강수량의 경우 96.2mm, 경향성

Table 7. Statistics of Trend Analysis for the Annual Top 10<sup>th</sup> Precipitation Over the 8-Major Cities

Stations	Statistics	Quantile			
		0.85	0.90	0.95	0.99
SEOUL (Station ID: 108)	Precipitation (mm)	42.7	48.2	65.9	96.2
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.194	0.189	0.16	0.137
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.402	0.406	0.359	0.405
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.002	0.003	-0.064	-0.12
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	1.5411	1.6326	1.9011	2.3332
INCHEON (Station ID: 112)	Precipitation (mm)	40.1	48.9	62.5	71.2
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.093	0.100	0.104	0.071
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.235	0.267	0.287	0.310
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	-0.053	-0.060	-0.094	-0.119
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	1.3388	1.5039	1.6724	1.9117
DAEJEON (Station ID: 133)	Precipitation (mm)	38.9	46.7	54.3	62.0
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.087	0.092	0.027	-0.004
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.278	0.32	0.273	0.257
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	-0.105	-0.129	-0.154	-0.255
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	1.24539	1.41861	1.5088	1.64832
DAEGU (Station ID: 143)	Precipitation (mm)	27.6	33.1	41.9	56.2
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.03	0.02	0.059	0.075
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.097	0.123	0.183	0.219
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	-0.075	-0.091	-0.068	-0.111
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	0.7892	0.9098	1.1012	1.3979
ULSAN (Station ID: 152)	Precipitation (mm)	32.5	39.8	49.6	61.4
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.104	0.119	0.094	0.094
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.23	0.241	0.244	0.233
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	-0.032	-0.038	-0.097	-0.109
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	1.1733	1.2927	1.4874	1.732
GWANGJU (Station ID: 156)	Precipitation (mm)	37.4	45.0	52.3	66.5
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.193	0.217	0.279	0.311
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.331	0.346	0.448	0.524
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.059	0.079	0.097	0.112
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	1.2015	1.2541	1.4637	1.7626
BUSAN (Station ID: 159)	Precipitation (mm)	39.6	45.2	66.9	80.6
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.096	0.1	0.146	0.146
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.243	0.281	0.347	0.389
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	-0.054	-0.096	-0.11	-0.122
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	1.3271	1.5249	1.95	2.3733
CHUNCHEON (Station ID: 101)	Precipitation (mm)	33.2	36.1	42.9	50.3
	Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.124	0.13	0.199	0.221
	LCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	0.216	0.25	0.35	0.388
	UCL Trend (mm yr <sup>-1</sup> )	-0.008	-0.003	0.039	0.06
	S <sub>e</sub> (mm yr <sup>-1</sup> )	0.9261	1.0565	1.1604	1.3206

\* LCL means Lower Confidence Level and UCL means Upper Confidence Level.

은 +0.137mm/yr, 표준오차는 2.3332로 분석되었다. 인천지점(112)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.1584, 최근 30년은 +0.2562로 나타나 최근에 올수록 폭우사상의 증가경향이 있는 것으로 분석되었으며, Quantile 0.99에 해당하는 강수량의 경우 71.2mm, 경향성은 +0.071mm/yr, 표준오차는 1.9117로 분석되었다. 대전지점(133)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.0763, 최근 30년은 +0.1185로 나타나 뚜렷한 증가경향은 나타나지 않으나 최근에 올수록 폭우사상이 다소 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 Quantile 0.99에 해당하는 강수량의 경우 62.0mm, 경향성은 -0.004mm/yr, 표준오차는 1.6483으로 분석되었다. 대구지점(143)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.0644, 최근 30년은 +0.0325로 다소 증가하는 경향이 있으나, 최근강우의 증가경향이 전기간에 비하여 작게 분석되었다. 또한 Quantile 0.99에 해당하는 강수량은 56.2mm, 경향성은 0.075mm/yr, 표준오차는 1.3979로 분석되었다.

울산지점(152)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.1115, 최근 30년은 +0.0241로 증가하는 경향이 있으나, 최근강우의 증가경향이 전기간에 비하여 작게 분석되었다. 또한 Quantile 0.99에 해당하는 강수량은 61.4mm, 경향성은 0.094mm/yr, 표준오차는 1.732로 분석되었다. 광주지점(156)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.2441, 최근 30년은 +0.3555로 나타나 최근에 올수록 폭우사상이 증가하는 경향이 있음을 확인하였으며, Quantile 0.99에 해당하는 강수량은 66.5mm, 경향성은 0.311mm/yr, 표준오차는 1.7626으로 분석되었다. 부산지점(159)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.2318, 최근 30년은 +0.3603으로 나타나 최근에 올수록 폭우사상이 증가하는 경향이 있음을 확인하였으며, Quantile 0.99에 해당하는 강수량은 80.6mm, 경향성은 0.146mm/yr, 표준오차는 2.3733으로 분석되었다. 마지막으로, 춘천지점(101)의 경우 3IQR의 기울기는 전기간 +0.1007, 최근 30년은 +0.2963으로 나타나 최근에 올수록 폭우사상이 증가하는 경향이 뚜렷함을 확인하였으며, Quantile 0.99에 해당하는 강수량은 50.3mm, 경향성은 0.221mm/yr, 표준오차는 1.3206으로 분석되었다. 다음 Table 7은 지점별 Quantile 0.85, 0.90, 0.95 및 0.99에 해당하는 강수량 값과 경향성 분석결과 그리고 표준오차( $S_e$ )의 산정결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구는 전국 8개 주요 도시지점을 대상으로 전 기간 자료와 최근 30년 자료로 구분하여 경향 분석을 통한 기준강수량 초과 강수의 최근 증가경향을 분석하였다. 본 연구의 결론 및 향후 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선형 추세 분석결과 연평균 강수량은 모든 지점에서 증가경향을 보였고 여름철 강수의 증가 추세가 뚜렷하게 나타났으나 가을철과 겨울철은 약한 감소 추세를 보임을 확인하였다. 또한 Sen 검정에 의한 slope 분석 결과 8개 지점 평균 2.3816으로 분석되었으며, 계절평균 강수의 경우 봄철(slope: +0.076)과 여름철(slope: +2.775)은 증가추세를 가을철(slope: -0.390)과 겨울철(slope: -0.149)은 감소추세를 보임을 확인하였다.
- (2) Mann-Kendall 검정과 Sen 검정에 의한 JJAS기간 강수의 경향 분석 결과 신뢰구간 95% ( $\alpha=0.05$ )에서 서울(108)지점과 인천(112)지점의 최근 30년 시계열자료가 유의한 증가경향을 나타내었으며, 습윤 강수일수는 대전(133)과 대구(143)지점을 제외한 대부분 지점에서 최근 증가경향이 유의하게 나타났다.
- (3) 기준강수량을 초과하는 중호수사상의 증가경향을 분석한 결과 최근 30년 평균 3.1%~15% 증가하는 경향이 있음을 확인하였으며, 높은 강우강도에서 증가경향이 현저히 나타남을 확인하였다.
- (4) TOP 10<sup>th</sup> 백분위 강수사상의 Quartile 계열과 3IQR에 대한 Quartile Regression (QR)에 의한 경향분석을 실시한 결과 백분위 강수계열의 증가경향을 확인할 수 있었으며, 최근 30년 강수계열 순위백분위의 증가경향이 있음을 확인하였다. Quantile 90%의 평균백분위 강수량 43.5mm, 증가 경향은 0.1412mm/yr로 분석되었으며, Quantile 99%의 평균백분위 강수량은 68.0mm, 증가경향은 0.1314mm/yr로 분석되었다.

본 연구의 결과는 매년 발생한 연최대치계열에 대한 분석뿐만 아니라 기준값 이상의 수문 사상에 대한 최근 증가경향 분석을 통한 수공구조물설계 반영에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 최근 변화하는 기후의 과거 관측자료를 통한 경향성 분석 및 기후변화에 따른 폭우사상의 증가경향분석 등을 판단할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

Adamowski, K. and Bougadis, J. (2003). "Detection of trends in annual extreme rainfall." *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 18 pp. 3547-3560.  
 Buchinsky, M. (1994). "Changes in the U.S. wage structure



- 1963-1987: Application of quantile regression.” *Econometrica*, Vol. 62, pp. 405-458.
- Elsner, J. B., Kossin, J. P. and Jagger, T. H. (2008). “The increasing intensity of the strongest tropical cyclones.” *Nature*, Vol. 455, No. 7209, pp. 92-95.
- Gemmer, M., Becker, S. and Jiang, T. (2004). “Observed monthly precipitation trends in China 1951-2002.” *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 77, No. 39-45.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*, John Willy & Sons. Inc.
- Hamed, K. H. and Ramachandra, R. A. (1998). “A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 204, No. 1, pp. 182-196.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R. and Smith, R. A. (1982). “Techniques of trend analysis for monthly water quality data.” *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 107-121.
- Kang, K. S. and Park, J. M. (2007). *Excel statistics; 2<sup>nd</sup> edition*, Park Young Sa. pp. 366-367 (in Korean).
- Kendall, M. G. (1975). “Rank correlation measures” Charles Griffin, London, UK.
- Krishnamurthy, C. K. B., Lall, U. and Kwon, H. H. (2009) “Changing frequency and intensity of rainfall extremes over india from 1951 to 2003.” *Journal of Climate*, Vol. 22, No. 18, pp. 4737-4746.
- Kwon, W. T., Boo, K. O. and Heo, I. H. (2007). “Climate change during the recent 10 years in Korea.” *Conference proceedings of Korean Water Resources Association*, pp. 278-280 (in Korean).
- Lee, C. H., Ahn, J. H. and Kim, T. W. (2010). “Evaluation of probability rainfalls estimated from Non-stationary rainfall frequency analysis.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 187-199 (in Korean)
- Lee, J. J., Jang, J. Y. and Kwak, C. J. (2010). “An analysis of temporal characteristic change for various hydrologic weather parameters (I); On the basic statistic, Trend.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 43, No. 4, pp. 409-419 (in Korean).
- Lee, J. J., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2010). “Concept of trend analysis of hydrologic extreme variables and nonstationary frequency analysis.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 4B, pp. 389-397 (in Korean).
- Lee, J. J., Seo, J. W. and Kim, C. J. (2010). “Analysis on trends, periodicities and frequencies of korean drought using drought indices.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 75-89 (in Korean).
- Mann, H. B. (1945). “Non-parametric tests against trend.” *Econometrica*, Vol. 13, pp. 245-259.
- McGuinness, S. and Bennett, J. (2007). “Overeducation in the graduate labour market: A quantile regression approach.” *Econ. Educ. Rev.*, Vol. 26, pp. 521-531.
- Modarres, R. and V. de Paulo Rodrigues da Silva. (2007). “Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran.” *Journal of Arid Environments*, Vol. 70, pp. 344-355.
- Moon. (1997). “How to measure nonlinear dependence in hydrologic time series.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 30, No. 6, pp. 641-648.
- Oh, J. S., Kim, H. S. and Seo, B. H. (2006). “Trend and shift analysis for hydrologic and climate series.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4B, pp. 355-362 (in Korean).
- Oh, K. D., Park, S. Y., Lee, S. C., Jun, B. H. and Ahn, W. S. (2005). “Improved trend estimation of non-monotonic time series through increases homogeneity in direction of time-variation.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 38, No. 8, pp. 617-629 (in Korean).
- Oh, T. S. and Moon, Y. I. (2009). “Characteristic change analysis of rainfall events using daily rainfall data.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 933-951 (in Korean).
- Park, Y. S. and Kim, K. H. (2005). “Time series data analysis (I) using SAS/ETS.” *Freedomacademy*, pp. 12-13 (in Korean).
- Partal, T. and Kahya, E. (2006). “Trend analysis in turkish precipitation data.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2011-2026.
- Ryu, Y. J., Shin, H. J., Kim, S. Y. and Heo, J. H. (2013). “Power test f trend analysis using simulation experiment.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 219-227 (in Korean).
- Sen, P. K. (1968). “Estimates of the regression coefficient based in Kendall’s tau.” *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, No. 324, pp. 1379-1389.
- Sharif, M., Archer, D. R., Fowler, H. J. and Forsythe, N. (2013). “Trends in timing and magnitude of flow in the upper indus basin.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 4, pp. 1503-1516.
- So, B. J., Kwon, H. H. and Ahn, J. H. (2012). “Trend analysis of extreme precipitation using quantile regression.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 45, No. 8, pp. 815-826 (in Korean).
- Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A. and Chang. H. R. (2005). “Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment.” *Science*, Vol. 309, pp. 1844-1846.
- Yoon, S. K. (2012). *Flood risk and vulnerability analysis in an urban stream by climate change*, Ph.D. Dissertation, University of Seoul (in Korean).
- Yoon, S. K., Kim, J. S., Lee, J. H. and Moon, Y. I. (2013). “Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Nino phases.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 6, pp. 1465-1477.