

## 낙동강 유역의 과거 및 미래 강우자료에 대한 다양한 비모수적 경향성 검정 기법의 적용

### The Application of Various Non-parametric Trend Tests to Observed and Future Rainfall Data in the Nakdong River Basin

김 상 욱\* / 이 영 섭\*\* / 이 철 응\*\*\*

Kim, Sang Ug / Lee, Yeong Seob / Lee, Cheol-Eung

#### Abstract

In recent, the various methods to predict the hydrological impacts due to climate change have been developed and applied. Especially the trend analysis using observed and future hydrological data has been performed than ever. Parametric or non-parametric tests can be applied for a trend analysis. However, the non-parametric tests have been commonly used in the case of trend analysis using hydrological data. Therefore, the two types of non-parametric tests, Mann-Kendall (MK) test and Spearman Rho (SR) test, were used to detect the trend in the observed and future rainfall data that were collected from the Nakdong River basin. Also, the Pre-Whitening (PW) and the Trend Free Pre-Whitening (TFPW) as the pre-process of the trend analysis were performed. Also, the result of trend analysis suggest that those pre-processes have a statistically significant effect. Additionally, the Sequential Mann-Kendall (SMK) was used to reveal the beginning point of a trend in the observed and future rainfall data in the Nakdong River basin. The rainfall patterns in most rainfall gauges using the observed rainfall show the increasing trend and the abrupt changes in the specific months (from April to May and September to October). Also, the beginning point of the trend is brought forward by several months when climate change is accelerated. Finally, the results of this study can provide the useful background for the research related to climate change and water resources planning in the Nakdong River basin.

**Keywords** : trend analysis, TFPW, SMK test, climate change, non-parametric test, rainfall analysis

#### 요 지

최근 기후변화가 미래 수문자료에 미칠 수 있는 영향을 예측하기 위한 다양한 기법이 개발 및 적용되고 있으며, 과거 및 미래 수문자료의 경향성을 파악하고 비교하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 경향성 분석은 크게 모수적 검정과 비모수적 검정으로 구분될 수 있으나, 수문자료의 특성에 의해 비모수적 검정이 유리한 경우가 대부분이다. 본 연구에서도 낙동강 유역에서 수집된 과거 및 미래 강우량의 경향성 분석을 위해 비모수적 검정 중 MK 검정과 SR 검정을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 경향성 분석 절차의 사전절차로 PW 기법과 TFPW 기법을 적용하고 비교함으로써, 자료의 사전처리가 최종 결과에 통계적으로 유의한 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다. 특히 SMK 기법을 적용하여 낙동강 유역

\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: sukim70@kangwon.ac.kr)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

\*\* 교신저자, 강원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (e-mail: dldudtjq1216@naver.com)

Corresponding Author, Master Course, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

\*\*\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: celee@kangwon.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

의 강우자료의 경향성이 시작되는 시기를 추가로 분석하였다. 과거 강우자료의 분석결과 년총강우량은 대부분 증가하는 경향을 보였으며, 4월과 5월 그리고 9월과 10월 사이를 기점으로 강우패턴이 변화됨을 알 수 있었으며, 미래 강우자료의 분석결과 기후변화가 심해짐에 따라 경향성이 시작되는 시기가 수개월씩 빨라짐을 알 수 있었다. 이와 같은 연구결과는 향후 기후변화와 관련된 연구의 기초자료로 제공될 수 있으며, 낙동강 유역의 수자원 관리와 계획의 수립에 있어 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 경향성 분석, TFPW, SMK 검정, 기후변화, 비모수적 검정, 강우자료 분석

## 1. 서 론

최근 기후변화에 의해 발생될 수 있는 이상기후 현상에 대비하기 위한 수자원 관리 및 계획의 수립에 필요한 수문자료의 분석에 있어 경향성 분석을 활용하는 사례가 어느 때 보다 빈번하다. 경향성은 크게 시계열자료의 급격한 변화나 점진적인 변화로 구분할 수 있다(Hirsch et al., 1991).

일반적으로 단조경향성은 모수적 검정(Parametric test)과 비모수적 검정(Non-parametric test)으로 구분할 수 있다.  $t$ -검정 같은 모수적 검정은 모집단의 가정 등과 같은 특정한 조건에 기반을 두고 수행되는 경우가 많다. 그러나 수질자료나 수문자료의 경우 모집단이 정규분포를 따르지 않는 경우가 많으며, 자료의 특성과 측정 장비의 오류로 정확한 값을 알 수 없는 경우가 대부분인데, 이와 같이 해당 자료가 모수적 검정의 기본조건을 충족하지 않는 경우의 모수적 검정은 검정력의 신뢰성이 감소되는 것이 일반적이다. 이와 반대로 비모수적 검정은 수문시계열자료에서 종종 나타나는 자료의 비정규성(non-normality), 결측값(missing values) 및 계절성(seasonality) 등을 모수적 검정에 비해 보다 유동성 있게 고려할 수 있다는 장점이 있다(Hirsch and Slack, 1984).

해외의 경우 수질(Hirsch et al., 1982; Hirsch and Slack, 1984; van Belle and Hughes, 1984; Hirsch et al., 1991; Yu et al., 1993), 강우(Gerstengarbe and Werner, 1999; Xu et al., 2003; Partal and Kahya, 2006; Karpouzou et al., 2010), 유량(Douglas et al., 2000; Zhang et al., 2001; Kahya and Kalayci, 2004) 등 다양한 수문자료를 대상으로 경향성 분석의 응용적 연구사례가 다수 존재하며, 최근 기후변화를 주제로 하는 많은 경향성 분석 관련 연구가 제시되고 있다. Abdul Aziz and Burn (2006)은 기후변화를 고려한 경향성 분석 연구를 통해 증가하는 기온으로 인해 해빙시기가 빨라지고 있으며 봄철 용설로 인한 유량이 증가함을 확인한 바 있다. Novotny and Stefan (2007)도 겨울철 유량은 감소하고 봄과 이른 여름철의 유량이 증가함

을 확인하고 그 원인을 비슷한 거동을 보이는 강우와 비교분석한 바 있으며, Yang and Tian (2009)은 강우와 유량사이의 상관관계를 제시하기도 하였다.

특히 해외에서는 기존에 사용되는 경향성 분석기법의 응용뿐만 아니라 분석기법 자체의 개선에 관한 연구도 일부 수행되고 있다. Yue et al. (2002a)은 비모수검정법의 일종인 Mann-Kendall (MK)검정과 Spearman Rho (SR)검정의 검정력을 경향성의 크기와 자료의 길이, 유의수준, 변동계수 그리고 확률분포의 형태에 따라 비교한 결과, MK검정과 SR검정이 비슷한 수준의 검정력을 나타냄을 확인하였다. 또한 von Storch (1995)는 시계열자료의 상관관계가 큰 경우 상관관계의 영향 때문에 경향성 분석에서 잘못된 결과를 도출할 수 있음을 제시하면서, 시계열자료에서 자기상관관계가 제거된 시계열자료에 대해 경향성분석을 수행하는 PW(Pre-Whitening) 기법을 제안하였다. 이러한 분석 절차는 이후 Dougals et al. (2000), Zhang et al. (2001), Partal and Kahya (2006)의 연구에서도 적용된 바 있다. Yue et al. (2002b)은 선형경향성과 자기상관관계를 변수로 하는 몬테카를로 모의(Monte Carlo simulation)를 통해 von Storch (1995)가 제기한 문제점을 개선하였다. Yue et al. (2002b)이 수행한 모의실험에 의하면 시계열자료에 경향성이 없을 경우에는 PW 기법이 비교적 잘 적용됨을 확인하였으나 시계열자료에 선형경향성이 존재할 경우에는 자기상관관계를 제거할 때 선형경향성도 제거되어 오히려 경향성 검출확률이 감소됨이 확인되었다. 특히 Yue et al. (2002b)은 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 PW 기법을 변형한 TFPW(Trend Free Pre-Whitening) 기법을 제안하였으며, 이 기법은 Bayazit and Önoz (2007), Abdul Aziz and Burn (2006), Novotny and Stefan (2007)의 연구에서도 활용된 바 있다.

국내의 경우도 경향성분석에 관련하여 많은 연구(Oh et al., 2006; Seo et al., 2010; Shon and Shin, 2010; Lee et al., 2011; Lee et al., 2012)가 수행되어 왔으나, 기후변화로 인한 수문자료의 경향성 분석에 관한 연구 및 각종 기

후변화 시나리오에 따른 미래 수문자료의 경향성 분석 등을 다룬 연구는 상대적으로 적은 편이며, 특히 경향성 분석기법 자체의 개선을 위해 제안된 다양한 기법을 국내 수문자료를 대상으로 적용한 연구는 매우 미미한 형편이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 국내 특정유역(낙동강 대권역)에 존재하는 11개 강우관측소의 과거 강우자료와 기후변화 시나리오 중 RCP 4.5 및 8.5 기반으로 생성된 21개 강우관측소의 미래 강우자료에 대한 경향성 분석을 수행하여 낙동강 대권역의 과거 및 미래 강우의 변동패턴을 분석하였다. 또한 경향성 분석 절차의 신뢰도를 향상시키기 위하여 PW 기법 및 TFPW 기법을 적용한 후 그 결과를 비교 평가하였으며, 이와 함께 경향성 분석 시기를 추정할 수 있는 SMK (Sequential Mann-Kendall) 기법을 추가로 적용하여 과거 강우자료 및 미래 강우자료의 변동시기에 대한 패턴을 분석하고 그 결과를 제시하였다.

## 2. 비모수적 경향성 분석 기법

### 2.1 MK 검정 기법

MK검정 기법은 시계열 자료에서 나타나는 단조경향성이 통계적으로 유의한지를 확인할 수 있는 대표적인 기법으로 이미 많은 수문자료의 경향성 분석에서 널리 사용되어 왔다 (Abdul Aziz and Burn, 2006; Douglas et al., 2000; Novotny and Stefan, 2007; Xu et al., 2003; Zhang et al., 2001). 시계열자료  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의  $x_j$ 와  $x_k$ 가 통계적으로 독립일 때, 통계량  $S$ 는 다음과 같이 정의된다(Mann, 1945; Kendall, 1975).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

여기서  $x_j$ 와  $x_k$ 는 시계열자료  $X$ 의 값으로 통계량  $S$ 는 시계열자료  $X$ 의 가능한 모든 두 값의 쌍에 대해 부호(sgn)를 고려한 것과 같다.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Mann (1945)과 Kendall (1975)은  $n$ 이 10보다 클 경우 통계량  $S$ 의 분포는 평균  $E[S]=0$ 이고 다음과 같은 분산을 가지는 정규분포로 근사됨을 제안하였다.

$$\text{Var}[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

여기서,  $t_i$ 는  $i$ 번째 중복그룹 내 중복자료의 개수이고  $g$ 는 중복그룹의 개수이다. 통계량  $S$ 가 점근적으로 정규분포를 따르므로 가설검정을 위한 표준정규변량  $Z_{MK}$ 를 구하면 다음과 같다(Hirsch and Slack, 1984).

$$Z_{MK} = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}[S]} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}[S]} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

일반적으로 MK검정은 양측검정에 기반을 두고 가설검정을 하는데 유의수준  $\alpha$ 를 가정했을 때 Eq. (4)로부터 구한 표준정규변량  $Z_{MK}$ 의 절대값이  $Z_{1-\alpha/2}$ 보다 클 경우 귀무가설을 기각하여 시계열자료에 증가하거나 감소하는 단조경향성이 존재함을 나타내며, 유의확률  $p$ 가 유의수준  $\alpha$ 보다 작은 경우 귀무가설을 기각한다. 유의확률  $p$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{|Z_{MK}|}^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (5)$$

### 2.2 SR 검정기법

SR검정 기법은 모수적 검정의 일종인 PPMC (Pearson Product Moment Correlation)를 비모수 통계기법으로 나타낸 것이다. 다른 비모수적 검정과 마찬가지로 자료 값들을 오름차순이나 내림차순으로 순위를 부여하고 모수적 검정과 같은 절차로 검정을 수행한다. 자료의 개수를  $n$ 이라 하면 SR검정의 상관계수  $R_S$ 는 다음과 같이 정의된다(Spearman, 1906; Sneyers, 1990).

$$R_S = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (r_{x_i} - i)^2}{n^3 - n} \quad (6)$$

여기서  $r_{x_i}$ 는 시계열자료  $X$ 의 값들을 순위로 나타낸 것으로 Eq. (6)은 시계열자료  $X$ 와 시계열자료  $\{i | i = 1, 2, \dots, n\}$  간의 차이를 변수로 두 표본간의 상관관계를 구한다. 상관계수  $R_S$ 의 분포는 점근적으로 평균  $E[R_S]=0$ 과 분산  $\text{Var}[R_S]=1/(n-1)$ 을 가지는 정규분포로 근사되므로 검정 통계량  $Z_{SR}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다(Sneyers, 1990).

$$Z_{SR} = \frac{R_S}{\sqrt{\text{Var}[R_S]}} \quad (7)$$

따라서 검정통계량  $Z_{SR}$ 의 절대값이  $Z_{1-\alpha/2}$ 보다 크면 귀무가설을 기각하여 시계열자료에 증가하거나 감소하는 단조경향성이 존재함을 나타낸다.

### 2.3 Sen의 기울기 추정 기법

MK검정의 경우 단순히 시계열자료의 경향성 유무를 판단할 뿐 경향성의 변화율에 대해서는 정량적으로 알 수 없다. Sen (1968)은 시계열자료에 선형경향성이 존재한다고 가정했을 때 MK검정에서 착안한 시계열자료를 대표하는 기울기(시간당 변화율)를 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 자료의 결측이나 이상치에 영향을 크게 받지 않는 비모수적인 절차로 기울기는 다음과 같이 정의된다.

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

여기서,  $x_j$ 와  $x_k$ 는 각각 시간  $j$ 와  $k$ 에서의 자료 값으로  $j > k$ 인 경우의 기울기를 구한다( $j = k + 1, \dots, n, k = 1, \dots, n - 1$ ). MK검정과 마찬가지로 모든 두 개의 쌍에 대해서 검정이 이루어진다. 모든 기울기  $Q_i$  중에 중앙값(median)을 대표 기울기로 결정하며  $N$ 이 홀수인지 아니면 짝수인지에 따라 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]} & \text{if } N \text{ is odd} \\ [Q_{(N/2)} + Q_{[(N+2)/2]}] / 2 & \text{if } N \text{ is even} \end{cases} \quad (9)$$

계산된 기울기는 100(1- $\alpha$ )%의 양측 신뢰구간을 가지며 위에서 언급한 MK검정의 가설검정을 통해 통계적으로 유의한 기울기를 결정하게 된다.

### 2.4 Sequential Mann-Kendall test

Sequential Mann-Kendall (SMK)검정은 시계열자료에서 경향성이 시작되는 시기를 추정하기 위한 방법으로 Sneyers (1990)에 의해 제안된 이후 여러 연구에 적용되어 왔다(Partal and Kahya, 2006; Yang and Tian, 2009; Karpouzou et al., 2010). 시계열자료  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 를 순차적으로 MK검정을 수행할 때 검정통계량은 다음과 같은 절차로 구할 수 있다(Gerstengarbe and Werner, 1999).

$$t_j = \sum_{i=1}^j n_i \quad \text{for } j = 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

여기서  $n_i$ 는 각 성분  $x_j$  ( $j = 2, \dots, n$ )보다 앞의 성분  $x_k$  ( $k = 1, \dots, j - 1$ )에 대해서  $x_j > x_k$ 에 해당되는 값의 개수를 의미한다. 즉, 통계량  $t_j$ 는 1에서  $j$ 까지  $n_i$ 의 값을 누적해서 더한 것을 나타낸다. 통계량  $t_j$ 는 점근적으로 Eqs. (11) and (12)와 같은 평균과 분산을 가지는 정규분포로 근사되며, 표준정규화한 변수  $u(t)$ 는 Eq. (13)과 같이 구할 수 있다.

$$E[t_j] = \frac{j(j-1)}{4} \quad (11)$$

$$Var[t_j] = \frac{j(j-1)(2j+5)}{72} \quad (12)$$

$$u(t) = \frac{t_j - E[t_j]}{\sqrt{Var[t_j]}} \quad (13)$$

마찬가지로 시계열자료  $X' = \{x_n, x_{n-1}, \dots, x_1\}$ 에 대해서 위의 절차대로 수행하면 또 다른 변수  $u'(t)$ 를 구할 수 있다. SMK검정은  $u(t)$ 와  $u'(t)$ 를 도사하여 단조 경향성이 시작되는 시기와 시계열자료에 급격한 변화가 일어나는 시기를 파악할 수 있는 간편한 방법이다.

## 3. 상관관계의 영향을 제거하기 위한 기법

### 3.1 자기상관관계가 시계열자료에 미치는 영향

시계열자료에 존재하는 양의 상관관계는 검정통계량의 분산을 증가시켜 귀무가설이 사실임에도 불구하고 귀무가설을 기각할 확률을 증가시킨다 (Yue et al., 2002b). 즉, 양의 상관관계는 제1종 오류(Type-I error)를 범할 확률을 증가시키고 음의 상관관계는 제2종 오류(Type-II error)를 범할 확률을 증가시킨다.

대부분의 수문시계열자료의 경향성분석 연구에서 나타나는 오류는 제1종 오류로 이 경우에는 시계열자료에 MK검정이나 SR검정같은 경향성분석기법을 적용하기 전에 적절한 방법으로 시계열자료의 자기상관성을 처리할 필요가 있다. Hamed and Rao (1998)는 상관관계로 인해 변형되는 검정통계량의 분산을 조정하기 위해 분산수정법(Variance Correction Approach)이라는 경험적인 수식을 제안하였다. 또 다른 방법으로 von Storch (1995)는 상관관계를 제거한 후 경향성분석을 수행하는 PW 기법을 제안하였으며 다음과 같은 절차로 시계열자료의 자기상관성을 제거할 수 있다.

- 1) 시계열자료의 자기상관계수  $r_1$ 을 계산한다(McCuen, 2003).

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} X_t X_{t+1} - \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} X_t \sum_{t=2}^n X_t}{\sqrt{\left[ \sum_{t=1}^{n-1} X_t^2 - \frac{1}{n-1} \left( \sum_{t=1}^{n-1} X_t \right)^2 \right] \left[ \sum_{t=2}^n X_t^2 - \frac{1}{n-1} \left( \sum_{t=2}^n X_t \right)^2 \right]}} \quad (14)$$

- 2) 자기상관계수  $r_1$ 이 다음과 같이 유의수준 10%를 벗어나면 시계열자료에 유의한 자기상관성이 존재하는 것으로 판단한다 (Salas et al., 1980).

$$\frac{-1 - 1.645\sqrt{n-2}}{n-1} \leq r_1 \leq \frac{-1 + 1.645\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (15)$$

3) 시계열자료의 자기상관성을 제거한 후 경향성 분석을 수행한다.

$$Y'_t = X_t - r_1 X_{t-1} \quad (16)$$

### 3.2 TFPW 기법

Yue et al. (2002b)은 통계적 모의실험을 통해 PW 기법과 분산수정법이 시계열자료에 선형경향성이 없을 경우에는 잘 적용되나 선형경향성이 있는 경우에는 적절하지 못함을 제시하였으며, 이와 같은 문제점을 해석하기 위하여 PW 기법을 변형한 TFPW 기법을 제안하였다. TFPW 기법의 절차는 앞에서 기술한 PW 기법과 유사하나 Sen의 기울기  $\beta$ 를 고려했다는 점에서 더 신뢰도 있는 경향성 분석의 수행이 가능하다. TFPW 기법의 적용절차를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 선형경향성을 가정한 Sen의 기울기  $\beta$ 가 유의하다면 다음과 같이 시계열자료에서 선형경향성을 제거한다.

$$X'_t = X_t - \beta t \quad (17)$$

- 2) Eq. (14)에 의해 계산된  $X'_t$ 의 자기상관계수  $r_1$ 을 제거한다. 시계열자료  $Y'_t$ 은 선형경향성이 제거된 시계열자료  $X'_t$ 에 PW 기법을 적용한 것과 같다.

$$Y'_t = X'_t - r_1 X'_{t-1} \quad (18)$$

- 3) 마지막으로 제거했던 선형경향성을 다시 추가한다.

$$Y_t = Y'_t + \beta t \quad (19)$$

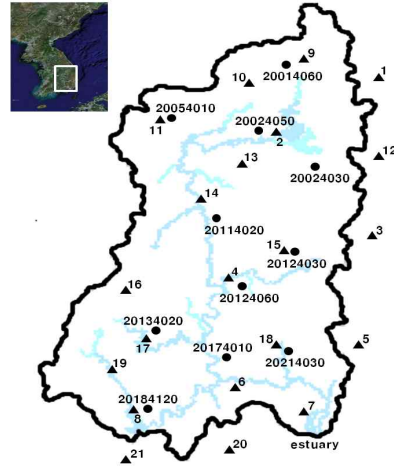


Fig. 1. Rainfall Gauges in the Nakdong River Basin (●: Observed, ▲: Future)

### 4. 자료의 선정 및 특성

본 연구에서 선정된 유역은 수자원단위지도 상의 낙동강 대권역(6개는 유역 외)이며, 유역면적은 23,384.21 km<sup>2</sup>이다. 먼저 낙동강 대권역에 존재하는 강우관측소 중 과거 일강우자료는 낙동강 상류, 중류, 하류를 정성적으로 구분하여 Fig. 1에 표시한 11개 강우관측소를 대상으로 수집되었으며, 11개 관측소별 자료의 길이는 Table 1에 나타내었다. 미래 일강우자료는 Fig. 1에 표시한 21개 강우관측소를 대상으로 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 사용하여 생성된 2006년부터 2099년까지 94년의 길이를 가지는 자료이다.

우리나라 기상청은 이와 같은 RCP 시나리오를 기반으로 하여 GCM (General Circulation Model) 모형 중 하나

Table 1. Summary of Rainfall Gauges (Observed rainfall)

Code	Gauge name	Location	Years	Length of record (Year)
20014060	Docheon	Bongwhoa	1968~2012	45
20054010	Nongam1	Mungyeong	1966~2005	40
20024050	Gilan	Andong	1966~2012	47
20024030	Hyeonseo	Cheongsong	1965~2012	48
20114020	Jangcheon	Gumi	1975~2012	38
20124030	Sinryeong	Yeongcheon	1966~2012	47
20124060	Sincheon	Daegu	1977~2005	29
20134020	Yaro	Hapcheon	1966~2012	47
20214030	Sannae	Milyang	1967~2012	46
20174010	Changnyeong	Changnyeong	1966~2012	47
20184120	Sugok2	Jinju	1966~2005	40

인 HadGEM2-AO를 수행하고, 그 결과를 다시 RCM (Regional Circulation Model) 중 하나인 HadGEM3-RA 모형에 입력함으로써, 2006년부터 2099년까지의 각종 온도 및 강수량 자료를 모의하여 낙동강유역 21개 관측소에 대해 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서도 현재 기상청이 제공하고 있는 모의결과에 따른 21개 강우관측소에 대한 일강우자료를 취득하여 사용하였다. 본 연구의 진행을 위해 데이터베이스화된 자료의 구성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) SET1-OM(Observed Month): 11개 관측소별 월총량 과거 강우(11개소 × 12개월별 × 자료보유기간)
- 2) SET2-OY(Observed Year): 11개 관측소별 년총량 과거 강우(11개소 × 자료보유기간)
- 3) SET3-FM(Future Month): 21개 관측소별 월총량 미래 강우(21개소 × 12개월별 × 94년 × 2개 시나리오)
- 4) SET4-FY(Future Year): 21개 관측소별 년총량 미래 강우(21개소 × 94년 × 2개 시나리오)

Tables 2 and 3에는 본 연구에서 사용된 관측소별 년총강우량에 대한 기술통계량 자료를 나타내었으며, 일부 관측소를 제외한 대부분의 지점에서 RCP 농도가 증가할수록 강우의 평균 및 분산이 증가함을 알 수 있다.

## 5. 경향성 분석의 주요 절차 및 결과

### 5.1 경향성 분석의 주요 절차

본 연구에서는 구성된 데이터베이스 SET1-OM, SET2-OY, SET3-FM, SET4-FY를 이용하여 경향성 분석을 수행함에 있어 수문자료에 많이 사용하는 MK검정과 SR검정을 적용하였다. 특히 본 연구에서는 MK 검정과 SR검정과 같은 경향성 분석을 수행함에 있어 분석절차의 상관관계에 따른 신뢰성을 고려하기 위한 절차를 추가하였다.

먼저 시계열자료의 상관성 유무를 파악하기 위해 lag-1 자기상관 계수를 계산하였다. 계산된 자기상관계수가 Eq. (15)의 범위를 벗어나면 시계열자료에 상관성이 있는 경우이므로 TFPW 기법을 추가로 적용하여 상관성을 제거하였다. 그러나 TFPW 기법의 적용에 앞서 Sen의 기울기  $\beta$ 를 구하게 되는데 기울기  $\beta$ 가 0에 가까운 경우는 시계열자료에 단조경향성이 없는 경우이므로 이 경우에는 자기상관관계가 존재하더라도 TFPW 기법을 적용하지 않았다. 또한 경향성 분석 이후에는 단조경향성이 있는 자료에 대하여 경향성이 시작하는 시기와 급격한 변화가 발생하는 시기를 추가로 분석하기 위해 Sequential MK검정을 적용하였다. 본 연구에서 경향성 분석을 위한 적용절차를 플로우 차트로 요약하면 Fig. 2와 같다.

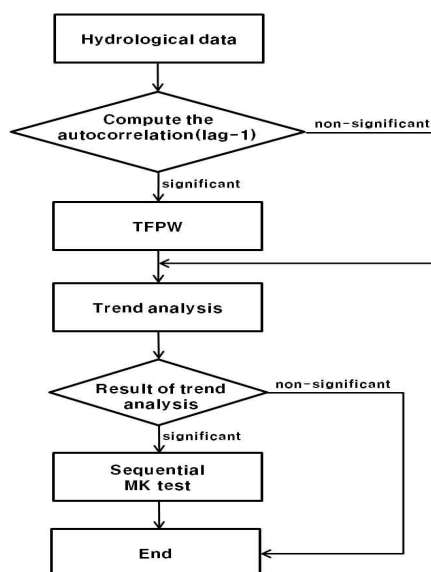


Fig. 2. Procedure for Trend Analysis

Table 2. Descriptive Statistics of Annual Total Observed Rainfall (SET2-OY)

Rainfall gauges	Mean (mm)	Variance	Skewness	Kurtosis
Docheon	1,071.0	58,368	-0.1627	2.2748
Nongam1	1,341.3	92,450	0.2467	2.3948
Gilan	989.9	58,019	0.3472	2.7206
Hyeonseo	992.5	52,010	0.1264	2.5620
Jangcheon	1,013.6	82,144	0.3108	2.3989
Sinryeong	1,096.9	62,116	0.4665	2.9095
Sincheon	1,198.5	123,410	0.4832	3.0275
Yaro	1,213.3	1,16,740	0.0212	2.2226
Sannae	1,230.5	1,03,860	0.1867	2.3700
Changnyeong	1,152.6	870,27	0.1803	2.7930
Sugok2	1,596.3	2,067,50	-0.0110	2.0296

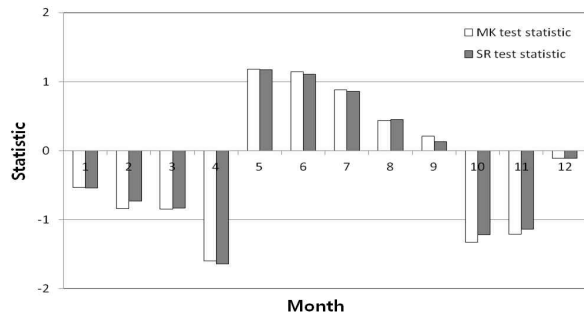
**Table 3. Descriptive Statistics of Annual Total Future Rainfall (SET4-FY)**

No.	Gauges	Mean (mm)		Variance		Skewness		Kurtosis	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
1	Ulsjin	1,272.4	1,285.3	68,829	90,791	1.3922	1.0726	7.2433	5.1603
2	Andong	1,066.5	1,068.2	70,831	80,956	1.3815	1.1805	6.8702	4.7291
3	Pohang	1,225.6	1,254.1	64,699	69,680	0.9391	0.4247	4.0128	3.7411
4	Daegu	1,049.7	1,016.1	49,388	43,670	1.6905	0.7926	9.5783	5.6548
5	Ulsan	1,401.9	1,435.7	86,157	99,742	1.1963	0.5572	5.4949	4.0729
6	Changwon	1,348.5	1,442.4	76,058	133,990	1.2737	0.8977	8.1597	4.3905
7	Busan	1,542.4	1,648.3	134,550	241,750	1.2884	0.9236	7.0597	3.8621
8	Jinju	1,529.9	1,642.0	78,929	144,560	0.5524	0.5166	4.2684	3.2942
9	Bonghwa	1,248.9	1,242.4	81,977	90,131	1.0673	0.7775	5.5425	4.0707
10	Yeongju	1,358.6	1,376.6	159,070	166,730	1.8048	1.0742	8.8515	4.2176
11	Moongyeong	1,312.0	1,294.7	111,790	111,630	0.9694	0.8694	4.2362	3.7881
12	Yeongdeok	1,223.7	1,266.5	79,854	73,176	2.0458	0.4383	11.0844	3.3780
13	Uiseong	1,022.3	992.5	66,393	52,968	1.7428	1.2865	8.6447	7.0556
14	Gumi	1,058.1	1,044.1	48,065	51,594	1.0213	1.0895	4.5035	5.2361
15	Yeongcheon	1,045.6	1,044.5	51,735	50,357	1.2793	0.9581	5.8953	6.2195
16	Geochang	1,213.9	1,235.4	60,428	59,550	0.9319	0.5488	4.2726	3.5737
17	Hapcheon	1,225.2	1,272.1	53,248	66,461	0.8190	0.5519	4.3506	3.8656
18	Milyang	1,314.4	1,359.7	75,254	96,361	1.1768	0.5132	7.2171	4.2245
19	Sancheong	1,457.7	1,532.5	99,486	125,220	1.0677	0.4296	4.8947	2.8658
20	Geoje	1,300.9	1,377.4	71,586	96,492	0.3924	0.4093	3.2733	3.9322
21	Namhae	1,628.5	1,790.5	148,290	292,890	0.9357	1.2104	4.0473	5.3753

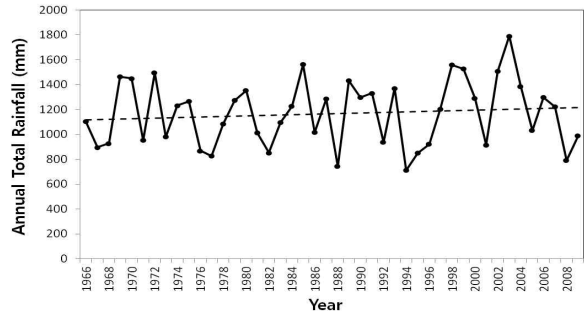
**5.2 과거 및 미래 강우자료에 대한 경향성 분석 결과**

Table 4에는 SET1-OM 및 SET2-OY에 대한 사전절차를 거친 경향성 분석결과를 수록하였다. 유의수준 5%에서 SET1-OM의 4개 요소(현서 3월 및 11월, 장천 5월, 신천 5월)와 SET2-OY의 1개 요소(장천)가 기각되어 경향성이 있음을 알 수 있었으며, 유의수준 10%에서는 이외에 SET1-OM의 6개 요소가 추가로 기각되었음을 알 수 있다. 특히 SET2-OY는 현서지점을 제외하고는 약간 증가하는 경향을 나타냈으나 통계적으로 유의하지는 않았으며, 장천 지점은 유의수준 5%에서도 증가하는 경향을 보였다.

낙동강 대권역에 대한 전체적인 경향성 분석결과를 알아보기 위하여 티센방법(Thiessen method)을 이용하여 SET1-OM과 SET2-OY의 자료를 면적평균강우량으로 다시 환산한 후 같은 경향성 분석 기법을 적용하고 그 결과를 각각 Figs. 3 and 4에 나타내었다. Figs. 3 and 4를 보면 낙동강 대권역에 대한 면적평균강우량의 월별 분석 결과는 MK검정 및 SR검정 모두 단조경향성의 존재에 대한 통계적으로 유의한 결과를 보여주지 않고 있어, 특징적인 경향성이 존재하지 않는다는 결과를 알 수 있었다.



**Fig. 3. Monthly Pattern of Nakdong River Basin**



**Fig. 4. Annual Time Series of Nakdong River Basin**

Tables 5 and 6에는 SET3-FM 및 SET4-FY를 대상으로 하는 낙동강 대권역의 미래 강우량을 대상으로 하는 경향성 분석결과를 수록하였다. Table 5를 보면, 유의수준 5%에서는 SET3-FM의 10개 요소가 기각되었고, SET4-FY의 7개 요소가 기각되었음을 알 수 있었다. 또한 유의수준 10%에서는 SET3-FM의 8개 요소 및 SET4-FY의 6개 요소가 추가로 기각되었음을 알 수 있었다. 따

라서 RCP 4.5 시나리오에 의한 미래강우는 과거 강우에 비해 경향성을 나타내는 요소가 상당히 증가되었음을 알 수 있었으며, 통계적으로 의미있는 범주 내에서 강우의 증가 추세가 과거 강우자료에 비해 확연히 나타남을 알 수 있었다. 특히 월별로 보면 7월의 경우 21개 관측소 중 14개 관측소가 유의수준 10%에서 증가되는 추세를 나타내어 7월의 강우증가추세가 뚜렷해짐을 파악할 수 있었다.

**Table 4. MK Test Statistics of Individual Precipitation Gauges in Nakdong River Basin**

Station	Monthly total												Annual total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Docheon	0.8608	-0.7435	<b>1.6826</b>	-0.7435	0.9	-0.5380	0.9195	-0.3326	0.2837	-0.6652	<b>-1.8195</b>	-0.4989	0.5380
Nongam1	-0.3379	-1.2583	-0.7573	-0.0699	0.7573	<b>1.7011</b>	0.6641	0.9321	0.8039	-1.0486	-1.5379	1.3282	1.4447
Gilan	-0.3485	-0.3576	0.3124	0.5502	1.5498	0.0642	1.1830	1.2380	0.4402	-0.9537	-0.6328	1.1463	1.0638
Hyeonseo	-1.2105	-1.2564	<b>-2.4760</b>	<b>-1.9166</b>	1.0821	-0.2017	-0.5777	0.5044	-0.3760	-1.2839	<b>-2.0725</b>	-0.2293	-1.2930
Jangcheon	1.056	-0.2514	0.3772	0.1634	<b>2.3132</b>	-0.088	1.0686	1.5041*	1.1189	0.1509	-0.2137	0.7292	<b>2.3384</b>
Sinryeong	-1.238	-0.4952	-0.3760	-0.7153	1.5498	0.4127	0.7245	0.9170	0.7978	-0.9996	-1.3114	1.4764	0.8162
Sincheon	0.7878	0.9379	0	-0.0938	<b>2.2322</b>	0.6565	0.7878	1.4444	0.5627	-0.5065	-0.4877	-0.1876	0.9681*
Yaro	-0.7887	-0.8712	-0.8895	1.4306	0.2935	0.9996	0.5319	0.7795	0.2659	<b>-1.6599</b>	-1.4856	-0.5044	0.5961
Sannae	-1.4392	0	0.5681	-1.6191	1.0036	0	1.5717	0.6154	-0.3124	-0.6249	-1.0131	-0.3787	0.7953
Changnyeong	-0.5686	-0.2384	-0.5869	-1.1371	1.2013	-0.3668	1.4122	0.2293	0.11	-0.8437	-0.9354	-0.4769	0.8804
Sugok2	0.0699	-0.5942	0.0233	-1.1535	1.5726*	0.5476	<b>1.7011</b>	1.5263	0.9670	-1.1884	-0.6059	-0.5476	1.4797

\*Applied to TFPW method, **Bold**: Rejected ( $\alpha=0.05$ ), **Bold + Bold**: Rejected ( $\alpha=0.10$ )

**Table 5. MK Test Statistics of Nakdong River Basin by RCP4.5 Scenario**

Gauge	Monthly total												Annual total	Starting trend
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Uljin	-0.65	-1.4992	-0.0849	0.0425	-0.2515	<b>2.4128*</b>	<b>2.1361</b>	1.0713	<b>1.7148</b>	-0.7937	1.1595	-0.1894	1.1040	-
Andong	-0.3724	-0.3985	0.6957	1.5449	0.1339	0.4148	<b>1.9892</b>	-0.1829	0.6729	-0.2842	1.1236	0.8721	<b>2.1949</b>	2057
Pohang	-0.4475	-1.4568	0.0686	0.3364	-0.5095	1.2216	<b>1.7213</b>	0.5814	1.5482	0.1111	1.3686	-0.0163	1.5809	-
Daegu	-0.0588	-1.2640	0.7403	0.9080	-0.6990	0.3593	<b>2.1459</b>	0.3756	1.1432	0.0915	1.3784	0.5161	<b>2.0278*</b>	2058
Ulsan	-0.7218	-1.8160	0.1045	0.3593	-0.8198	0.1960	<b>1.9238</b>	0.7512	0.9799	-0.2482	0.5814	0.1143	1.0583	-
Changwon	-0.1209	-1.1661	0.8264	0.6239	-0.2156	-0.1274	<b>2.6881</b>	0.2809	0.4834	-0.4638	1.0550	0.1404	<b>2.2145</b>	2056
Busan	-0.0882	-1.4666	0.4246	1.3098	0.0457	-0.1078	<b>2.8123</b>	0.2319	0.1796	-0.0686	1.1334	0.1731	<b>1.9349*</b>	2057
Jinju	-0.1796	-1.0844	0.8558	0.9113	-0.0261	0.1176	<b>2.2178</b>	0.2874	0.6794	-0.5487	0.7578	0.1274	<b>1.8944</b>	2048
Bonghwa	0	-0.3985	0.3822	1.4633	0.5749	0.4344	1.2608	-0.0915	0.5063	-0.5193	1.0387	1.2183	<b>2.2015</b>	2048
Yeongju	-0.5520	-0.4279	0.7578	1.6299	0.9048	1.0583	<b>1.9924</b>	0.2515	0.8590	-0.6337	1.1301	0.8525	<b>3.0699*</b>	2045
Moongyeong	-0.6631	-0.5324	0.7284	1.6331	0.2711	0.7349	0.8329	0.1731	0.6663	-0.2025	1.0093	0.9668	<b>1.9467</b>	2046
Yeongdeok	-0.5128	-1.5351	0.0294	0.1927	-0.4867	1.3490	1.1203	1.1889	<b>1.7964</b>	-0.2711	1.2216	-0.1013	1.1432	-
Uiseong	-0.0294	-0.1209	0.6337	1.0779	-0.2809	0.3332	1.4372	0.1078	0.8460	0.0196	1.1399	0.3887	1.4238*	-
Gumi	-0.3691	-0.7022	0.7545	1.0713	-0.9505	0.9407	1.3294	0.1209	1.0387	-0.0261	1.3032	0.2548	1.4110	-
Yeongcheon	-0.0915	-1.4372	0.2646	0.9440	-0.5683	0.5520	<b>1.7377</b>	0.5749	1.1203	0.1502	1.4241	0.3136	<b>1.6789</b>	2055
Geochang	-0.4279	-0.9603	1.3784	1.1922	-0.9864	0.2482	1.2183	-0.2417	0.8394	-0.1078	0.8558	0.3266	1.3784	-
Hapcheon	-0.1894	-1.3555	1.2216	0.7708	-0.1404	0.4116	<b>1.8389</b>	0.2940	0.9472	-0.3854	0.7349	0.3756	<b>1.9402</b>	2058
Milyang	-0.1470	-1.1628	0.6565	1.1889	-0.5193	-0.3103	<b>1.6952</b>	0.1404	0.3136	0.0817	1.5515	0.3430	<b>1.6593</b>	2055
Sancheong	-0.4703	-1.2902	1.0942	1.1367	0.0229	0.4181	<b>2.0515</b>	0.4409	1.1759	-0.6402	0.8656	0.1600	<b>2.2799</b>	2048
Geoje	0.0751	-0.8852	0.7153	0.9440	-0.7970	-0.7937	1.3751	-0.2156	0.2613	-0.1731	0.7512	0.1764	1.1040	-
Namhae	0.0653	-0.8100	0.8133	1.1726	-0.4703	-0.5455	<b>2.7927</b>	0.6141	0.4050	0.3724	1.0779	0.1535	<b>2.1949</b>	2046

\*Applied to TFPW method, **Bold**: Rejected ( $\alpha=0.05$ ), **Bold + Bold**: Rejected ( $\alpha=0.10$ )



Table 6. MK Test Statistics of Nakdong River Basin by RCP8.5 Scenario

Gauge	Monthly total												Annual total	Starting trend
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Uijin	-0.6271	<b>2.9305*</b>	0.1404	-0.1078	-0.1013	1.4110	1.2608	0.5585	0.2613	-0.8884	0.1502	-0.1048	1.2869	-
Andong	1.0909	<b>4.9353</b>	0.9668	-0.6239	-1.4045	1.5384	-0.5422	-0.9897	-0.2842	-0.3299	0.0653	1.4960	<b>1.6462</b>	2030
Pohang	0.5912	<b>3.6673*</b>	0.9440	-0.5683	0.0849	0.2711	0.9015	<b>1.8128</b>	0.8296	0.5161	-0.2744	0.7186	<b>2.3191</b>	2038
Daegu	1.5090	<b>4.1917*</b>	1.4992	-0.4965	0.1502	0.6239	-0.4638	-0.4889	0.7088	0.4050	-0.0653	1.5417	1.3588	-
Ulsan	0.9897	<b>4.0012</b>	1.0648	-0.8296	0.9113	0.3920	1.3359	<b>1.6893</b>	0.3201	0.1045	-0.2417	0.9178	<b>2.7437</b>	2041
Changwon	<b>1.8585</b>	<b>4.6120</b>	1.6070	-0.0751	-0.0196	0.8002	<b>1.8585</b>	0.8982	0.3952	-0.1633	0.3234	1.4698	<b>2.7248*</b>	2040
Busan	<b>1.7377</b>	<b>4.5532</b>	1.4568	-0.3266	0.0229	0.7447	1.4176	0.8917	0.5455	-0.0882	-0.1437	1.3196	<b>2.5854*</b>	2050
Jinju	<b>1.6919</b>	<b>4.3703</b>	1.4535	-0.1470	-0.2352	0.9342	0.8231	0.6304	0.0523	-0.1698	-0.0621	1.4241	<b>1.9990</b>	2041
Bonghwa	0.7218	<b>4.9027</b>	1.2053	-0.3626	-1.4110	1.2510	0.1633	-1.2706	-0.5226	-0.9635	0.0523	0.8264	1.5678	-
Yeongju	0.4769	<b>4.5369</b>	0.8656	-0.6337	-1.6233	1.2444	1.3196	-0.5749	-0.3593	-0.3789	0.1568	1.1399	<b>2.0578</b>	2032
Moongyeong	0.5455	<b>4.4421</b>	0.8982	-0.5487	<b>-1.6593</b>	1.2020	0.5487	-0.9635	-0.2613	-0.2515	0.0784	1.3261	1.4110	-
Yeongdeok	0.0229	<b>3.5146*</b>	0.5030	-0.1045	-0.1633	1.6070	0.7088	1.4304	0.9342	-0.1764	0.0229	0.5618	<b>2.4301</b>	2040
Uiseong	1.4274	<b>4.3974*</b>	1.1040	-0.5651	-1.2804	0.6533	-1.0452	-1.0223	0.0817	0.0784	-0.1470	<b>1.7050</b>	1.0713	-
Gumi	1.3457	<b>3.9394*</b>	1.2836	-0.8656	-0.1013	0.4181	-0.5063	-0.9146	0.2646	0.3430	-0.4638	<b>1.7279</b>	1.0648	-
Yeongcheon	1.2053	<b>4.1784*</b>	1.1759	-0.4997	-0.2123	0.1078	-0.0065	-0.1502	0.0490	0.1502	-0.2254	1.2967	1.0670	-
Geochang	<b>1.7377</b>	<b>3.9063*</b>	1.4372	-0.2776	0.0098	0.5291	0.4736	-0.2874	-0.1568	0.1339	-0.6794	1.5058	<b>1.7115</b>	2036
Hapcheon	<b>1.7050</b>	<b>3.8797*</b>	1.3424	-0.4050	0.0457	0.7153	0.7937	0.1535	0.1731	0.1927	-0.4605	1.5058	1.6331	-
Milyang	<b>2.0480</b>	<b>4.9451</b>	<b>1.7050</b>	-0.2058	-0.4116	0.8133	1.2640	0.1176	0.2352	0	0.4801	1.5743	<b>2.1427</b>	2034
Sancheong	<b>1.6723</b>	<b>4.1678</b>	1.3098	-0.2319	0.3103	1.0615	<b>2.3191</b>	0.7545	0.0490	-0.0751	-0.5749	1.3457	<b>3.2271</b>	2040
Geoje	<b>1.8095</b>	<b>4.2690</b>	<b>1.8552</b>	-0.0490	0.1470	0.2254	0.6892	1.0289	1.0550	0.4116	-0.3201	<b>1.7083</b>	<b>2.7845*</b>	2039
Namhae	<b>1.7213</b>	<b>4.4977</b>	<b>2.1231</b>	-0.2450	0.3201	0.8852	<b>3.3885</b>	1.5123	0.8656	-0.0784	-0.0327	<b>1.8160</b>	<b>3.5014*</b>	2033

\*Applied to TFPW method, Bold: Rejected ( $\alpha = 0.05$ ), Bold + Bold: Rejected ( $\alpha = 0.10$ )

Table 6을 보면, 유의수준 5%에서는 SET3-FM의 22개 요소가 기각되었고, SET4-의수준FY의 11개 요소가 기각되었으며, 유의수준 10%에서는 SET3-FM의 18개 요소 및 SET4-FY의 2개 요소가 추가로 기각되어 RCP 4.5보다도 뚜렷한 강우의 증가 추세를 확인할 수 있었다. 특히 RCP 8.5에서는 7월 강우의 증가추세는 뚜렷하게 나타나지 않은 반면 오히려 겨울철인 1월과 2월의 증가추세가 뚜렷하였다.

Figs. 5 and 6은 RCP 4.5와 8.5에 대한 SET3-FM자료의 분석결과를 보다 파악하기 쉽게 나타낸 것이다. Fig. 5에서 강우가 1월과 2월은 감소 경향을 보였으나 3월과 4

월은 증가하는 경향을 보였으며 5월에는 다시 감소하는 경향을 보였다. 여름철인 7월의 경우 강우 증가의 추세가 매우 두드러지게 나타났으며, 이후 9월과 10월을 기점으로 감소하는 추세를 보였다. Fig. 6에서 3월에서 12월의 강수 증가 패턴은 RCP 4.5와 상당히 비슷하였으나 관측 소별로 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있었고, RCP 4.5에 비해 1월과 2월의 강우 증가 추세가 매우 뚜렷하였다.

### 5.3 TFPW 기법의 비교 평가

본 절에서는 TFPW 기법이 유의한 자기상관성과 선형

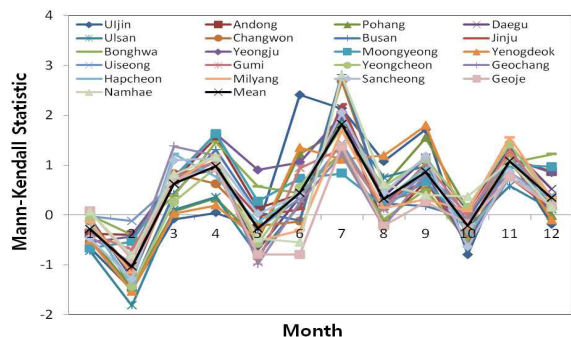


Fig. 5. Monthly Pattern by RCP 4.5 Scenario

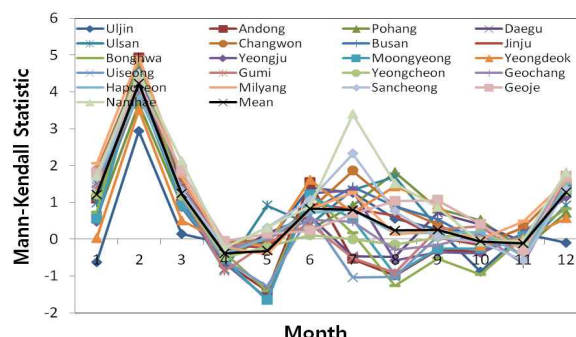


Fig. 6. Monthly Pattern by RCP 8.5 Scenario

**Table 7. Comparison between Original Series, Series with PW and Series with TFPW**

Gauge	$r_1$	Confidence limit ( $\alpha=0.10$ )		Original time series			PW time series			TFPW time series		
		Lower	Upper	$Z_{MK}$	$p$	$\beta$	$Z_{MK}$	$p$	$\beta$	$Z_{MK}$	$p$	$\beta$
<i>Observed precipitation data</i>												
Sincheon (annual)	0.303	-0.341	0.270	1.613	0.107	13.571	0.336	0.737	3.904	0.968	0.333	8.010
Jangcheon (AUG)	-0.336	-0.294	0.240	1.656	0.097	3.167	2.053	0.040	4.130	1.504	0.133	3.066
Sugok2 (MAY)	0.292	-0.286	0.234	1.678	0.093	1.906	1.186	0.236	1.239	1.573	0.116	1.796
<i>RCP4.5 scenario (annual total precipitation)</i>												
Daegu	0.162	-0.180	0.159	2.326	0.020	1.747	1.630	0.103	1.177	2.028	0.043	1.459
Busan	0.161	-0.180	0.159	2.130	0.033	2.719	1.596	0.110	2.129	1.935	0.053	2.566
Yeongju	0.251	-0.180	0.159	3.338	0.001	4.006	2.320	0.020	2.889	3.070	0.002	3.892
Uiseong	0.187	-0.180	0.159	1.777	0.076	1.422	1.072	0.284	1.001	1.424	0.155	1.267
<i>RCP8.5 scenario (annual total precipitation)</i>												
Changwon	0.265	-0.180	0.159	2.933	0.003	3.614	1.902	0.057	2.368	2.725	0.006	3.324
Busan	0.237	-0.180	0.159	2.803	0.005	4.671	1.942	0.052	3.286	2.585	0.010	4.394
Geoje	0.234	-0.180	0.159	2.985	0.003	3.389	2.174	0.030	2.384	2.785	0.005	3.176
Namhae	0.301	-0.180	0.159	3.769	0.000	6.609	2.413	0.016	4.003	3.501	0.001	5.994

$Z_{MK}$ : Test statistic of Mann-Kendall test,  $p$ : Significance probability,  $\beta$ : Sen's slope

경향성의 확인을 위하여 Table 7과 같이 검정통계량과 선형경향성을 비교분석하였다. SET1-OM과 SET2-OY 자료의 경우 7개의 시계열자료에서 유의한 자기상관성이 나타났다. 그러나 유의한 선형경향성이 있는 시계열자료는 총 3개로 이 경우에만 TFPW방법을 적용하였으며(Table 4의 \*표시 요소), TFPW 기법의 적용절차에 대한 필요성을 알아보기 위하여 사전처리를 하지 않은 경우, 사전처리 기법으로 PW 기법을 적용한 경우 및 TFPW 기법을 적용한 경우를 구분하여 Table 7에 제시하였다.

Table 7에서  $r_1$ 을 보면 대부분의 시계열자료는 양의 자기상관성을 나타내는 경우가 많아 제1종 오류를 범할 확률이 높았으며, 자기상관성을 제거하는 PW 기법과 TFPW 기법의 적용을 통해 검정통계량의 값이 상당히 낮아짐을 확인할 수 있었다. PW 기법과 TFPW 기법의 비교에 있어서 PW 기법의 경우 자기상관성을 제거할 때 선형경향성( $\beta$ )도 함께 제거하게 되어 단조경향성이 있음에도 이를 검출하지 못할 수 있는 오류를 범하게 되므로 매우 낮은 검정통계량이 산정됨을 볼 수 있다. 그러나 TFPW 기법을 적용하면 자기상관 관계를 제거하면서도 선형경향성은 보존하게 되므로 선형경향성을 유지시킬 수 있기 때문에 PW 기법보다 합리적인 검정통계량을 산정하게 됨을 알 수 있었다.

또한 장천지점 8월에 있어 PW 기법의 경우 양의 상관성과는 반대로 경향성을 과도하게 추정하였으며 TFPW 기법은 양의 상관성과 마찬가지로 기존 시계열자료의 선형 경향성을 비슷하게 유지하며 시계열자료의 자기상관성을

잘 제거하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7에 신천, 장천, 수곡2 지점 강우량의 자기상관도(autocorrelogram)를 TFPW 기법을 적용하기 전과후로 각각 나타내었다. TFPW 기법을 적용하기 전에도 유의한 자기상관성은 주로 lag-1에서 나타났으며, TFPW 기법을 적용한 결과 다른 지체시간에는 큰 영향을 주지 않고 lag-1 자기상관성이 비교적 잘 제거됨을 확인하였다.

### 5.4 경향성 시작 시기 분석

MK검정이나 SR검정과 같은 비모수적 경향성 검정방법은 경향성의 발생시점 등은 알 수 없으므로 유의한 단조경향성이 언제쯤 시작되는지를 분석하기 위해 SMK 검정방법을 추가로 적용하였다. SMK 검정방법은 유의수준 10%에서 통계적으로 유의한 SET2-OY 및 SET4-FY에 대해 수행되었으며, SET2-OY의 예로써 장천지점의 경우를 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8에서  $u(t)$ 는 앞에서부터 순차적으로 MK검정을 수행한 경우이고  $u'(t)$ 는 뒤에서부터 순차적으로 MK검정을 수행한 경우이다.  $u(t)$ 와  $u'(t)$ 가 분기되는 점이 시계열자료에서 경향성이 시작되는 시기를 나타낸다. Fig. 8의 경우 1988년이 경향성 시작시기가 되며 1990년이 유의한 경향성이 나타나는 시기가 됨을 알 수 있다. 증가하는 경향은 1990년부터 계속 임계값을 넘어서고 감소하는 경향은 전 기간에 걸쳐 임계 값내에서 변동하고 있으므로 이 지점이 증가하는 경향성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

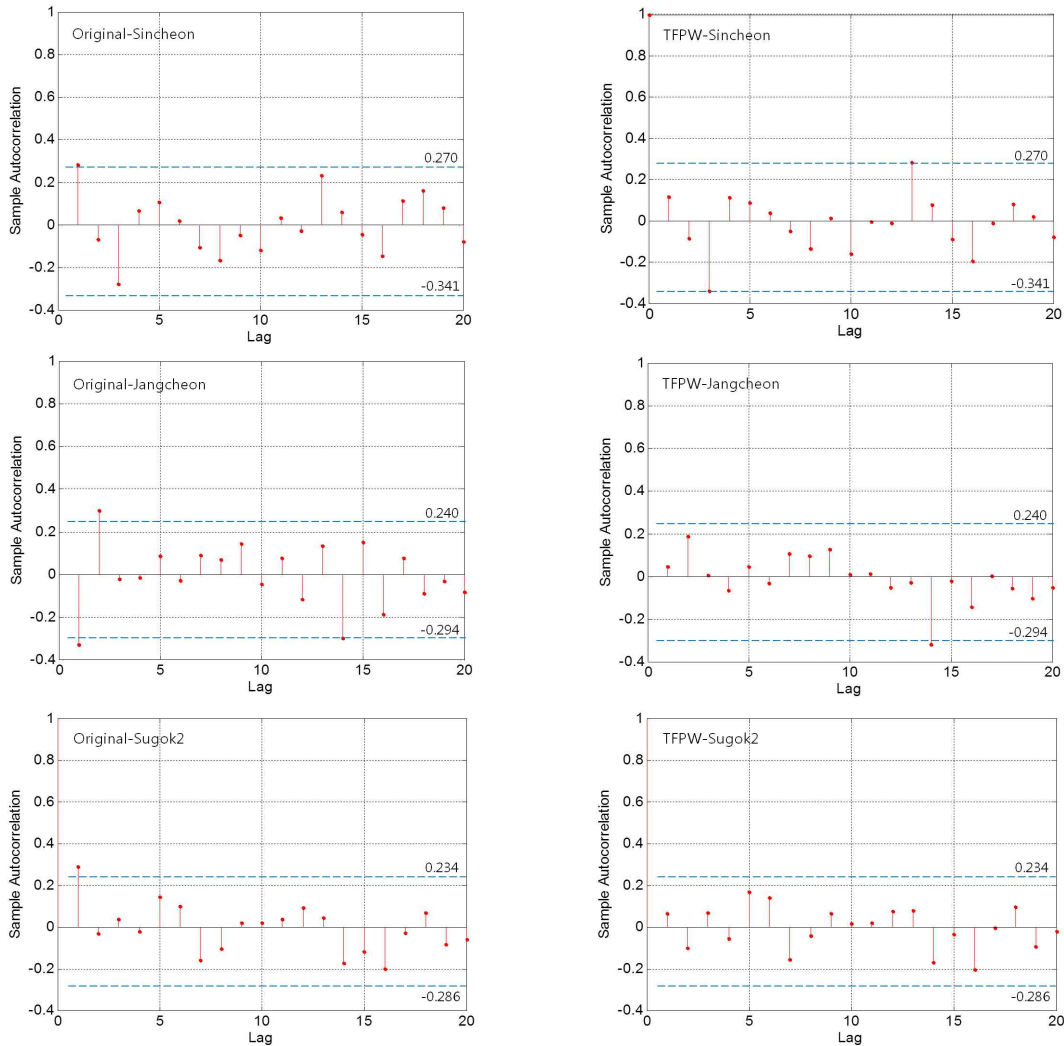


Fig. 7. Autocorrelogram of with TFPW (right) and without TFPW (left)

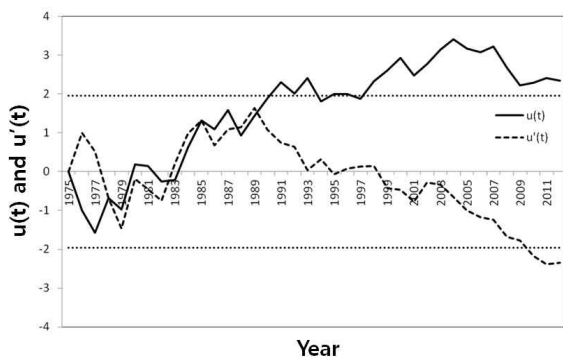


Fig. 8. Result of SMK Test with Annual Total Precipitation (Jangcheon)

또한 SET4-FY에 해당되는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 대해 유의수준 10%에서 경향성이 유의한 것으로 나타난 관측소에 대한 경향성 시작 시점은 앞의 Tables 5 and

6의 마지막 열(starting trend)에 나타내었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 경향성분석을 통해 과거 강수량의 변화 패턴을 분석하고 기후변화 시나리오에 기반하여 기상청에서 산출한 미래 강수자료를 분석함으로써 강수량의 거동특성을 파악하고자 하였으며, 이 과정에서 비모수적 검정방법의 수행에 필요한 사전절차 및 경향성의 변동시점을 파악할 수 있는 사후절차를 함께 고려하였다.

본 연구에 적용된 비모수적 검정인 MK검정과 SR검정은 모수적 검정에 비해 특별한 가정이 없이도 적용할 수 있다는 점과 수문시계열자료에서 종종 접하게 되는 정규성 등의 문제점을 유용성 있게 고려할 수 있다는 장점이 있어 경향성 분석기법으로 선정되었다. 경향성 분석 기법의 적

용을 위해 낙동강 대권역을 대상으로 과거 강우자료 2개 (SET1-OM과 SET2-OY)와 미래 강우자료 2개(SET3-FM과 SET4-FY)를 수집하고 데이터베이스화하였으며, 수집된 강우자료를 월별로 분석하여 낙동강 대권역에 대한 과거 및 미래 강우량의 경향에 대한 결과를 제시하였다.

특히 본 연구에서는 기존 연구와의 차별화를 위해 경향성 분석의 사전절차로서 PW 기법과 TFPW 기법을 적용하여 상호 비교 평가하였고, 이로부터 TFPW 기법이 보다 합리적인 결과를 나타낼 수 있다는 점을 제시하였다. 또한 경향성 분석 결과의 사후절차의 하나로 경향성이 나타나는 시점을 분석할 수 있는 SMK 기법을 추가로 적용함으로써 낙동강 대권역 내 강우관측소별 과거 및 미래의 경향성 발생 시점을 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통해 분석된 주요 결과를 요약하여 제시하면 다음과 같다.

- 1) 낙동강 대권역의 과거 강우자료에 대한 경향성 분석 결과 대부분의 경우 유의하지 않은 경향성을 나타내었다. 월별로 분석한 결과 4월과 5월 사이 및 9월과 10월 사이를 중심으로 강수패턴이 변화하는 것을 알 수 있었다. 또한 연총강우량의 경우 대부분이 약간 증가하는 경향을 나타내어 통계적으로 유의하지는 않았으나, 장천지점의 경우는 유의수준 5%에서 통계적으로 유의한 경향성을 나타냈다.
- 2) RCP 4.5 시나리오의 경우 과거 강우자료에 비해 강우량의 변동시기가 빨라졌고 특히 7월의 강우 증가 추세가 뚜렷함을 파악할 수 있었으며, 특히 RCP 8.5 시나리오의 경우에는 겨울철에 해당되는 2월의 강우 증가추세가 뚜렷해지는 현상을 파악할 수 있었다. 또한 연총강우량은 두 시나리오 모두 증가하는 경향을 보였으며 RCP 8.5 시나리오의 경우 유의수준 0.05에서 RCP 4.5 시나리오에 비해 심한 증가추세를 나타냄을 알 수 있었다.
- 3) 시계열자료의 자기상관관계는 경향성분석의 수행에 있어 오류를 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 TFPW 기법과 PW 기법을 비교분석함으로써 TFPW 기법이 PW 기법에 비해 선형경향성을 비교적 잘 유지하며 자기상관관계에 의한 영향을 제거할 수 있음을 확인하였다. 따라서 향후 경향성 분석의 연구에 있어서도 본 연구에서 제시한 TFPW 기법을 활용하면 보다 합리적인 연구를 진행할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 마지막으로 본 연구에서는 SMK 기법을 통해 경향성 시작시기를 파악하였으며 RCP 4.5 시나리오에 비해 RCP 8.5 시나리오의 경우가 강우 증가의 경향성 시작시기가 빠르게 나타나는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(13RDRP B066780)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Abdul Aziz, O., and Burn, D.H. (2006). "Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie river basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 319, No. 1-4, pp. 282-294.
- Bayazit, M., and Önoç, B. (2007). "To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis?" *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52, No. 4, pp. 611-624.
- Douglas, E.B., Vogel, R.M., and Knoll, C.N. (2000). "Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation." *Journal of Hydrology*, Vol. 240, No. 1-2, pp. 90-105.
- Gerstengarbe, F.W., and Werner, P.C. (1999). "Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime." *Climate Research*, Vol. 11, pp. 97-107.
- Hamed, K.H., and Rao, A.R. (1998). "A modified Mann Kendall trend test for autocorrelated data." *Journal of Hydrology*, Vol. 204, No. 1-4, 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, No. 1, pp. 107-121.
- Hirsch, R.M., and Slack, J.R. (1984). "A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 727-732.
- Hirsch, R.M., Alexander, R.B., and Smith, R.A. (1991). "Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 803-813.
- Kahya, E., and Kalayci, S. (2004). "Trend analysis of streamflow in Turkey." *Journal of Hydrology*, Vol. 289, No. 1-4, pp. 128-144.
- Karpouzou, D.K., Kavalieratou, S., and Babajimopoulos, C. (2010). "Trend analysis of precipitation data in Pieria region (Greece)." *European Water*, Vol. 30, pp. 31-40.

- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. Charles Griffin, London.
- Lee, J.H., Seo, J.W., and Kim, C.J. (2012). "Analysis on trends, periodicities and frequencies of Korean drought using drought indices." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 75-89. (In Korean)
- Lee, W.H., Hong, S.H., Kim, Y.G., and Chung, E.S. (2011). "Temporal and spatial variability of precipitation and daily average temperature in the south Korea." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 4, pp. 73-86. (In Korean)
- Mann, H.B. (1945). "Nonparametric tests against trend." *Econometrica*, Vol. 33, pp. 245-259.
- McCuen, R.H. (2003). *Modeling hydrologic change: statistical methods*. CRC press company.
- Novotny, E.V., and Stefan, H.G. (2007). "Streamflow in Minnesota: indicator of climatic change." *Journal of Hydrology*, Vol. 334, No. 3-4, pp. 319-333.
- Oh, J.S., Kim, H.S., and Seo, B.H. (2006). "Trend and shift analysis for hydrologic and climate series." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4B, pp. 355-362. (In Korean)
- Partal, T., and Kahya, E. (2006). "Trend analysis in Turkish precipitation data." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 2011-2026.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., and Lane, W.L. (1980). *Applied modelling of hydrologic time series*. Water Resources Publications: Littleton, USA.
- Seo, L., Choi, M.H., and Kim, T.W. (2010). "Outlook for temporal variation of trend embedded in extreme rainfall time series." *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 13-23. (In Korean)
- Sen, P.K. (1968). "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, pp. 1379-1389.
- Shon, T.S., and Shin, H.S. (2010). "Analysis for precipitation trend and elasticity of precipitation streamflow according to climate changes." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 5B, pp. 497-507. (In Korean)
- Sneyers, R. (1990). *On the statistical analysis of series of observations*. World Meteorological Organization, Technical Note 143, Geneva, Switzerland.
- Spearman, C. (1906). "The proof and measurement of association between two things." *American Journal of Psychology*, Vol. 15, No. 1, pp. 72-101.
- van Belle, G., and Hughes, J.P. (1984). "Nonparametric tests for trend in water quality." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 127-136.
- von Storch, H. (1995). *Misuses of statistical analysis in climate research*. In Analysis of climate variability: applications of statistical techniques, von Storch, H., Navarra, A. (Ed), Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 11-26.
- Xu, Z.X., Takeuchi, K., and Ishidaira, H. (2003). "Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation." *Journal of Hydrology*, Vol. 279, No. 1-4, pp. 144-150.
- Yang, Y., and Tian, F. (2009). "Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe river catchment, China." *Journal of Hydrology*, Vol. 374, No. 3-4, pp. 373-383.
- Yu, Y.-S., Zou, S., and Whittmore, D. (1993). "Nonparametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas." *Journal of Hydrology*, Vol. 150, No. 1, pp. 61-80.
- Yue, S., Pilon, P., and Cavadias, G. (2002a). "Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series." *Journal of Hydrology*, Vol. 259, No. 1-4, pp. 254-271.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., and Cavadias, G. (2002b). "The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 9, pp. 1807-1829.
- Zhang, X., Harvey, K.D., Hogg, W.D., and Yuzyk, T.R. (2001). "Trends in Canadian streamflow." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 4, pp. 987-998.

논문번호: 13-074	접수: 2013.09.13
수정일자: 2013.10.14/10.23	심사완료: 2013.10.23