



## Identification of yearly variation in Hwacheon dam inflow using trend analysis and hydrological sensitivity method

Kim, Sang Ug<sup>a\*</sup> · Lee, Cheol-Eung<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Kangwon National University

Paper number: 18-008

Received: 26 January 2018; Revised: 13 February 2018; Accepted: 13 February 2018

### Abstract

Existing studies that analyze the causes and effects of water circulation use mostly rainfall - runoff models, which requires much effort in model development, calibration and verification. In this study, hydrological sensitivity analysis which can separate quantitatively the impacts by natural factors and anthropogenic factor was applied to the Hwacheon dam upper basin from 1967 to 2017. As a result of using various variable change point detection methods, 1999 was detected as a statistically significant change point. Especially, based on the hydrological sensitivity analysis using 5 Budyko based functions, it was estimated that the average inflow reduction amount by Imnam dam construction was 1.890 billion m<sup>3</sup>/year. This results in this study was slightly larger than the those by existing researchers due to increase of rainfall and decrease of Hwacheon dam inflow. In future, it was suggested that effective water management measures were needed to resolve these problems. Especially, it can be suggested that the monthly or seasonal analysis should be performed and also the prediction of discharge for future climate change should be considered to establish reasonable measures.

**Keywords:** Hydrological sensitivity analysis, Change point, Hwacheon dam inflow, Imnam dam

## 경향성 분석과 수문학적 민감도 기법을 이용한 화천댐 유입량의 연별 변동량 규명

김상욱<sup>a\*</sup> · 이철응<sup>a</sup>

<sup>a</sup>강원대학교 공과대학 토목공학과

### 요 지

물순환에 영향을 미치는 원인과 결과를 분석하는 기존의 연구들은 대부분 강우-유출모형을 사용하고 있어 모형의 구축 및 매개변수의 보정과 검증에 많은 노력이 필요하다. 본 연구에서는 수문기상자료만을 이용하여 유량의 변동성분을 정량화할 수 있는 수문학적 민감도 분석기법을 화천댐 상류유역에 적용하고 화천댐 유입량에 대한 1967~2017년 동안의 변동량을 자연적 요인과 인위적 요인으로 분리하여 제시하였다. 다양한 변동점 탐색기법을 사용한 결과 1999년이 통계적으로 유의한 변동점으로 탐색되었으며, 이를 활용하여 수문학적 민감도 분석을 5가지의 Budyko 함수들을 이용하여 산정한 결과 평균적으로 18.99억 m<sup>3</sup>/y의 유입량 감소가 임남댐 건설로 인하여 발생된 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 기존 연구자들의 화천댐 유입량 감소량에 비해 다소 크게 산정된 결과이며, 이는 2000년대 이후 증가된 강우량 및 화천댐 유입량의 감소가 주된 영향을 미친 결과로 추정된다. 향후 월별, 계절별 단위의 분석이 추가로 연구될 필요가 있으며, 미래의 기후변화 상황을 고려한 예측을 통한 실효성 있는 계획이 수립될 필요가 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 수문학적 민감도 분석, 변동점, 화천댐 유입량, 임남댐

\*Corresponding Author. Tel: +82-33-250-6233  
E-mail: sukim70@kangwon.ac.kr (S. U. Kim)

## 1. 서론

특정 지점에서 관측된 유량 또는 댐유입량 자료는 관측된 상류지점에서의 강수, 온도, 증발산 등의 자연적 요인(natural factor)과 토지이용도의 변화, 댐 건설, 취수 등의 인위적 요인(anthropogenic factor)이 총체적으로 반영된 자료로 시간에 따라 변동된다. 수문순환에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위한 기존 연구는 주로 수문학적 요인들과 자연적 요인 및 인위적 요인들 사이의 관계를 규명하는 데 초점을 두고 진행되었다(Pike 1964; Nash and Gleick 1991; Burn 1994). 자연적 요인의 변화에 따른 수문순환의 변화는 최근 주로 기후변화를 주제로 다루고 있는 연구들(Abdul Aziz and Burn, 2006; Li *et al.*, 2008; Shehadeh and Ananbeh, 2013; Akurut *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016)에서 찾아볼 수 있으며, 인위적 요인에 의한 수문순환의 변화는 주로 유량자료에서의 점진적 및 급진적 변동이 발생하는 원인을 분석하기 위한 연구들(Rouge *et al.*, 2013; Odongo *et al.*, 2015)에서 찾아볼 수 있다.

그러나 이러한 연구과정을 통해 얻어진 결과는 수문모형의 입력자료의 변화에 따른 모의유량의 변화만 분석될 뿐, 관측된 유량에 내포되어 있는 요인별 변화를 분석하기는 불가능하다. 따라서 본 연구는 관측유량에 내포되어 있는 자연적 및 인위적 요인으로 인한 유량의 변동량을 정량화하여 분리할 수 있는 수문학적 민감도 분석(hydrological sensitivity analysis) 기법의 국내 적용에 목적을 두고 진행되었다.

Zhang and Lu (2009)는 Xijiang유역에 대하여 강수 변화에 따른 유량 및 유사량의 변동량을 분리하는 연구를 진행하였다. Liu *et al.* (2010)은 Dongjiang 강 유역에 대하여 인공신경망(artificial neural network)을 활용하여 자연적 요인과 인위적 요인이 직접유출량에 미치는 영향을 분리한 바 있다. 특히 수문학적 민감도 분석 방법을 이용한 유량 변동량의 분리를 위해 Koster and Suarez (1999)는 토양수분의 흐름을 단순구조로 파악하는 기초적 연구를 수행하였으며, Zhang *et al.* (2001)은 유역 단위에서 식생의 변화에 따른 연평균 증발산의 반응에 연구한 바 있다. Arora (2002)는 수문학적 민감도 분석에 중요하게 활용되는 건조지수(aridity index)를 이용해 기후변화로 인해 영향을 받는 연유량을 평가한 바 있다. 국내에서도 Kim *et al.* (2017)은 SWAT모형을 이용한 방법과 수문학적 민감도 분석기법들을 이용하여 소양강 상류유역과 섬강유역에서 관측된 유량자료를 요인별로 구분하여 제시한 바 있다.

특히 본 연구에서는 유량자료의 변동을 요인별로 산정하기 위한 대상 유역을 화천댐 상류유역으로 설정하고 화천댐 유입량 자료에 대한 연구를 수행하였다. 화천댐 상류유역 북

한지역에는 1997년 공사가 시작되어 2000년부터 본격적인 담수가 시작된 임남댐이 위치하고 있으며, 임남댐의 담수 및 도수로 인해 발생하는 화천댐 유입량의 감소는 우리나라의 북한강 수계에 직접적으로 영향을 미쳐 갈수기 유량감소, 녹조발생, 수질악화, 발전량 감소 등 국가적 측면의 문제를 일으키고 있는 것으로 추정된다.

Sunwoo (1986)는 하루 남한 측 피해에 관한 대책 방안을 제시함에 있어 임남댐 건설로 인해 화천댐 유입량이 18.6억  $m^3/y$ 만큼 감소될 것을 분석한 바 있으며, Lim (2006)은 SSARR모형을 이용하여 화천댐 유입량을 산정한 결과 16.0억  $m^3/y$ 가 감소됨을 제시한 바 있다. 또한 Kim and Lee (2009)는 SWAT-K모형을 이용하여 화천댐 유입 감소량을 18.3억  $m^3/y$ 로 제시하였으며, Ahn *et al.* (2011a, 2011b)은 PRMS모형과 KModsim모형을 이용하여 12.20~16.20억  $m^3/y$ 의 유입량 감소가 발생할 수 있음을 제시한 바 있다. 이와 같은 기존 연구는 모두 화천댐 유입량을 산정하기 위하여 특정 강우-유출모형의 매개변수를 자연상태 유량에 보정하여 모의함으로써 자연유량을 산정하고 이로부터 댐 건설 전후의 유입량을 비교하여 감소량을 산정하는 연구방식을 사용하였다.

이와 같은 방법은 특정 강우-유출모형의 구축, 보정 및 검증 절차를 거쳐야 하므로 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점이 있으며, 보정된 매개변수의 적절성에 대한 문제가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강우-유출모형의 구축 대신 관측자료만으로도 비교적 정확한 유량의 변동량을 산정할 수 있는 수문학적 민감도 기법을 화천댐 상류유역에 적용하여 유량변동량을 분리함으로써 이 분석기법의 국내 적용성을 알아보았으며, 2017년까지의 자료를 추가하여 다양한 통계적 분석을 시행함으로써 최근 화천댐 유입량의 연별 변동성에 대한 통계적 특성을 함께 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 자료의 변동특성 탐색을 위한 기법

#### 2.1.1 평균의 차이에 대한 모수적 가설검정

관측된 시계열 자료에 있어서 특정 시점을 전후로 모집단의 평균 및 분산 특성이 동일한지의 여부를 규명하기 위해서는 통계학적 가설 검정(statistical hypothesis test)이 활용될 수 있으며, 통계학적 가설은 모수적 검정(parametric test)과 비모수적 검정(non-parametric test)으로 구분된다. 모수적 검정은 모집단의 통계적 특성이 정규분포 등의 특정 분포를 따른다는 가정이 활용됨에 따라 이 같은 가정이 만족되지 않

는 경우 검정력의 신뢰성이 감소될 수 있는 단점이 있으나 두 모집단의 평균 및 분산특성을 규명함에 있어 가장 기본적으로 사용될 수 있는 기법이다.

두 모집단의 평균에 대한 통계학적 가설 검정은 주로 두 모집단의 평균의 차이가 통계적으로 유의한지의 여부를 검정하게 되며, 이를 위해서는 두 모집단의 분산인  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 에 대한 정보수집의 유무와 관측값 크기의 대·소여부에 따라 검정을 위한 분포 및 검정절차의 선택이 결정된다. 즉 대표본(일반적으로 자료개수가 30 이상)인 경우 two sample Z-test를, 소표본(일반적으로 자료개수가 30 미만)인 경우 two sample t-test를 사용하며, 모집단의 분산을 모르는 경우는 표본 표준편차를 이용한 검정절차를 진행하게 된다.

대개 우리나라의 수문기상자료는 중심극한정리(central limit theorem)을 적용하기에는 다소 어려운 소표본에 해당되는 경우가 많고, 수문기상자료의 특성상 모집단의 분산을 사전에 알 수 있는 경우가 없으므로 특정한 경우를 제외하면 분산을 모르는 경우의 two sample t-test가 사용되는 것이 일반적이다. 이와 같이 모집단의 분산을 모르고 소표본인 경우 두 모집단의 평균의 차이를 검정하기 위한 통계량으로는 Eq. (1)이 이용되며, Eq. (2)는 t분포의 자유도이다(Kottegoda and Rosso, 1997).

$$T = \frac{(X_1 - X_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)}} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)]^2}{[(S_1^2/n_1)/(n_1 - 1) + (S_2^2/n_2)/(n_2 - 1)]} \quad (2)$$

여기서,  $T$ 는 검정통계량,  $X_1 - X_2$ 는 두 집단 표본평균의 차이,  $\mu_1 - \mu_2$ 는 두 집단 모평균의 차이,  $S_1, S_2$ 는 두 집단 표본의 표준편차,  $n_1, n_2$ 는 두 집단의 자료개수이고  $\nu$ 는 t분포의 자유도를 나타낸다.

따라서 관측된 시계열자료의 변동점을 선택하여 두 개의 표본집단을 구성한 이후 표본평균과 표준편차, 자유도를 계산하고,  $T$ 통계량과 검정하고자 하는 유의수준(significance level)에 대한 t분포값을 산정함으로써 귀무가설( $H_0: \mu_1 = \mu_2$ )와 대립가설( $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ )에 대한 채택 및 기각여부를 결정하게 되며 귀무가설에 대한 검정이므로  $\mu_1 - \mu_2$ 의 값은 0으로 처리된다.

### 2.1.2 점진적 변동 탐색을 위한 비모수적 가설검정

비모수적 검정은 특별한 가정없이 주어진 자료를 순위로

대체하여 검정하는 방법으로 기본적인 절차는 자료를 대체하는 것을 제외하면 모수적 검정의 절차와 유사하다. 비모수적 검정의 장점은 수문시계열자료에서 종종 나타나는 자료의 비정규성(non-normality), 결측값(missing values) 및 계절성(seasonality) 등을 모수적 검정에 비해 보다 유동성 있게 고려할 수 있다는 점이다(Hirsch and Slack, 1984). 비모수적 검정은 주로 특정시계열의 점진적 증가 또는 감소의 경향성을 검정하기 위해 주로 사용되는데, 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 수문자료를 대상으로 경향성 분석의 응용적 연구사례가 다수 존재하며, 국내의 경우도 강우 및 유량자료에 대한 기후변화에 따른 경향성 분석과 관련된 연구사례(Lee *et al.*, 2012; Yang, J.-S. and Kim, I.-H., 2013; Kim *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2017)가 다수 존재한다.

점진적 경향성의 검정을 위한 비모수적 가설검정 기법 중 가장 흔히 활용되는 기법은 Mann-Kendall 검정기법(Mann, 1945; Kendall, 1975)이다. Mann-Kendall 검정기법은 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). 귀무가설  $H_0$ 은 시계열자료에 단조경향성이 없으며 통계적으로 독립임으로 가정되며, 대립가설  $H_1$ 은 시계열자료에 증가하거나 감소하는 단조경향성이 존재함으로 가정된다. 시계열자료  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 의  $x_j$ 와  $x_k$ 가 통계적으로 독립일 때, 통계량  $S$ 는 Eq. (3)과 같이 정의된다(Mann, 1945; Kendall, 1975).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

여기서,  $x_j$ 와  $x_k$ 는 시계열자료  $X$ 의 값으로 통계량  $S$ 는 시계열자료  $X$ 의 가능한 모든 두 값의 쌍에 대해 부호( $\text{sgn}$ )를 고려한 것과 같다.  $n$ 이 자료의 길이를 나타낸다고 하면 부호는 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Mann-Kedall검정은 양측검정에 기반을 두고 유의수준  $\alpha$  를 가정했을 때 유의확률  $p$ 가 유의수준,  $\alpha$ 보다 작은 경우 귀무 가설을 기각하게 되는데, 이 때 유의확률  $p$ 는 Eq. (5)와 같이 구할 수 있다.

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

2.1.3 급진적 변동 탐색을 위한 다양한 기법

시계열자료의 급진적 변동탐색이란, 특정한 시점을 중심으로 시계열자료의 이전과 이후가 급격히 변화되어 모집단의 특성이 변화되었음을 나타내는 변동점(change point)를 결정하는 일련의 작업이다. 이와 같은 변동점의 탐색은 크게 주관적(정성적) 기법과 객관적(정량적) 기법으로 구분될 수 있으며, 주관적 기법에는 자료의 도시(plotting)에 따른 이중누가곡선(double mass curve)과 이동평균(moving average)기법이 활용될 수 있으며, 객관적 기법에는 통계적 가설검정을 활용하는 Pettitt 검정기법과 Bayesian 사후평균(posterior probability)을 산정하는 베이지안 변동점 분석(Bayesian change point analysis)이 활용될 수 있다. 각각의 기법에 대해 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

먼저 주관적 기법은 특정 기법에 따라 자료를 도시하고 이로부터 특정 시기에 자료가 급변했음을 판단하는 기법이다. 기초적인 자료의 도시만으로는 특정 시점에서 자료의 통계적 특성이 급변되는 변동점을 찾아내기 매우 어려운 경우가 많은데, 이 경우 이중누가곡선을 활용하면 주관적이기는 하지만 자료의 통계적 특성이 급변된 시점을 개략적으로 알 수 있다는 장점이 있다. 이중누가곡선은 수자원 분야에서는 일반적으로 강우자료의 일관성을 분석하기 위해 사용되어지는 방법으로서 두 자료의 누가값을 산정하고 이를 하나의 그래프에 도시하여 특정 시점에서 선형그래프의 기울기가 변화되는지를 판단함으로써 개략적 변동시기를 결정하게 된다.

이동평균방법은 시계열의 각 자료에 대하여 특정 자료를 중심으로 전후 일정 자료의 평균값을 연결하여 경향을 나타내는 추세선을 작성하는 방법으로 개개의 자료가 가지고 있는 불규칙한 변동이 평활화(smoothing)되므로 특정 시점에서의 급변적 변화를 탐색할 수 있다. 이동평균방법에는 단순이동평균, 가중이동평균, 기하이동평균 등의 방법이 활용될 수 있으며, 자료의 평활화를 위한 자료의 이동길이(moving window)에 따라 다른 결과가 나타날 수 있어 사용자에게 따라 주관적 결정과정이 최종 결과에 반영될 수 있다는 특성이 있다.

객관적 기법은 특정한 통계적 방법을 통해 자료의 변동시

점을 정량적으로 분석하는 기법을 의미한다. Pettitt 검정기법은 Pettitt (1979)이 제안한 기법으로 통계적 가설검정을 활용한 전형적인 비모수 경향성 분석기법이다. 이 기법은 Pettitt (1979)이 제안한 비모수 검정통계량( $K_T$ )을 Eqs. (6) and (7)과 같이 산정하고 유의확률을 Eq. (8)에 따라 산정한 이후, 유의확률( $p$ )과 선정된 유의수준( $\alpha$ )을 비교하여  $p < \alpha$ 인 경우 귀무가설을 기각하게 되며, 이를 모든 자료에 대해 순차적으로 반복함으로써 특정시점에서의 급격한 변동점의 존재여부를 판정하게 된다. 이 기법은 자료에 포함된 변동점을 간단한 절차를 통해 탐색할 수 있다는 장점이 있으나, 대표적 변동점 1개만을 최종 결과로 도출한다는 단점이 있다.

$$K_T = \max |U_{i,T}| \tag{6}$$

$$U_{i,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \tag{7}$$

$$p \approx 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \tag{8}$$

베이지안 변동점 분석(Bayesian change point analysis)은 변동점의 위치(location)와 크기(magnitude)를 정량적으로 제시할 수 있는 변동점 분석 방법으로 여러 개의 변동점을 동시에 탐색할 수 있다는 장점을 가지고 있다.  $n$ 의 길이를 가지는 관측자료  $[x]_i=1^n$ 가 존재하고 자료 안에 여러 개의 변동점이 존재한다고 가정할 때, 각각의 변동점으로 구분된 구간의 자료들은 각 구간별 특정 확률밀도분포함수(probability density function),  $p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 변동점에 의해 구분된 구간은 확률변수  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 에 대해 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i \sim \begin{cases} p_1(x) = p(x_i | \theta_1), & 1 \leq i \leq \tau_1 \\ p_2(x) = p(x_i | \theta_2), & \tau_1 < i \leq \tau_2 \\ \vdots \\ p_n(x) = p(x_i | \theta_n), & \tau_{n-1} < i \leq n \end{cases} \tag{9}$$

여기서,  $\theta_1, \dots, \theta_n$ 은 확률밀도 함수에 포함된 모수(parameter)이며,  $\tau_1, \dots, \tau_{n-1}$ 는 변동점을 나타낸다.

베이지안 변동점 분석은 Barry and Hartigan (1992, 1993)이 제안한 분리구간모형(Product Partition Model, PPM)을 Carlin et al. (1992)이 일반화시켜 활용되고 있다. Carlin et al.

(1992)은 PPM모형의 개념을 이용해 변동점 탐색을 위한 사후평균산정식인 Eq. (10)을 제안하였다. 다만, Eq. (10)에 포함된 모수는 개수가 많거나 확률분포가 복잡한 경우 간단히 추정될 수 없으므로, 본 연구에서는 이와 같은 MCMC기법을 이용한 베이시안 기법을 적용하기 위해 Erdman and Emerson (2007)이 개발한 bcp package를 활용하였다. Eq. (10)의 좌변은 산정될 사후평균값이며, 우변의 분모는 주변분포값이고 분자는 각각 우도(likelihood)와 사전분포(prior distribution)을 나타낸다.

$$f_{ij}(\theta_j | X_{ij}) = \frac{f_{ij}(X_{ij} | \theta_j) f(\theta_j)}{\int f_{ij}(X_{ij} | \theta_j) f(\theta_j) d\theta} \quad (10)$$

## 2.2 유량 변동량 규명 개념과 수문학적 민감도 분석기법

### 2.2.1 유량 변동량의 요소별 정량적 분리이론

특정지점에서 관측된 유량자료 또는 특정 댐으로 유입된 유입량은 강수, 온도, 증발산 등의 수문기상학적 요인과 토지의 이용형태, 하천 내 댐과 같은 수공구조물에 의한 조절, 생·공·농업용수의 취수 등의 인위적 요인에 의해 시간에 따라 변동된다. Zhang *et al.* (2008)과 Zheng *et al.* (2009)은 이와 같이 유량에 영향을 미치는 다양한 요인을 자연적 요인(natural factor, *N*)과 인위적 요인(anthropogenic factor, *A*)의 두 그룹으로 분할하여 간략화 하였다. 여기서, 자연적 요인과 인위적 요인의 상호작용을 배제할 수 있다고 가정하면 두 요인은 서로 독립적인 변수로 가정될 수 있으므로 유량은 Eq. (11a)와 같이 두 변수만의 함수로 표시될 수 있다(Wang *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2011). 따라서 Eq. (11a)를 활용하여 유량의 변동량을 편미분형태로 나타내면 Eq. (11b)로 표시될 수 있다(Zhang *et al.*, 2008).

$$Q = f(N, A) \quad (11a)$$

$$\Delta Q = f'_N \Delta N + f'_A \Delta A = \Delta Q_N + \Delta Q_A \quad (11b)$$

여기서,  $\Delta Q$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta A$ 는 각각 유량의 총변동량, 자연적 요인의 변동량 및 인위적 요인의 변동량을 나타내며,  $\Delta Q_N$ 는 자연적 요인에 의한 유량변동량과  $\Delta Q_A$ 는 인위적 요인에 의한 유량변동량을 나타낸다.

Fig. 1에서 검은색 실선과 같이 특정댐의 유입량 변동점 이후 급격히 감소된 경우 이에 대한 부호를 고려하여 Eq. (11b)를 다시 쓰면 Eq. (12)와 같으며,  $\Delta Q_N$  또는  $\Delta Q_A$  중 한가지의 변수만 산정하면,  $\Delta Q$ 는 관측된 기지의 값이므로 다른 나머지 변수는 Eq. (12)에 의해 구해진다. 단, Fig. 1에서  $\bar{Q}_{obs}^1$ 는 변동점 이전에 관측된 유량의 평균값,  $\bar{Q}_{obs}^2$ 는 변동점 이후에 관측된 유량의 평균값이고  $\bar{Q}_{sim}^2$ 은 특정 기법을 이용해 추정된 변동점 이후 모의유량의 평균값이다(단, 본 연구에서 활용된 수문학적 민감도 기법은  $Q_{sim}^2$  전체를 모의하는 기법이 아니며, 오직  $\Delta Q_N$ 만을 산정하는 방법이다).

$$\Delta Q = \Delta Q_A - \Delta Q_N \quad (12)$$

따라서 Fig. 1에서 제안한 개념에 따라 유량 변동총량( $\Delta Q$ )을 자연적 유량변동량( $\Delta Q_N$ )과 인위적 유량변동량( $\Delta Q_A$ )로 분리하기 위해서는 다음과 같은 절차가 필요하다.

- [Step 1] 변동점 탐색기법을 이용하여 변동점을 결정하고 기간을 분리한다.
- [Step 2] 수문학적 민감도기법을 이용하여  $\Delta Q_N$ 을 산정한다.
- [Step 3] Eq. (12)로부터  $\Delta Q_A$ 를 산정한다.

### 2.2.2 수문학적 민감도 분석 이론

물 순환과정에서 질량보존법칙은 물수지방정식으로 나타낼 수 있으며, 물수지방정식에 대하여 수문학적 민감도분석

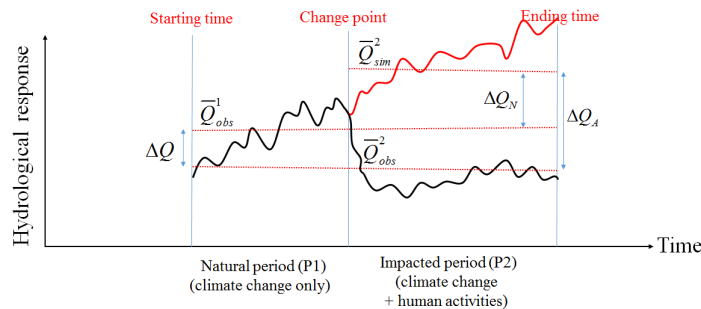


Fig. 1. Concept for separation of runoff variation

기법을 수행하면 자연적 요인으로 인한 유량변동량,  $\Delta Q_N$ 의 산정이 가능하다. 유역 내의 물수지방정식은 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = AET + Q + \Delta S \tag{13}$$

여기서,  $P$ 는 강수,  $AET$ 는 실제증발산량,  $Q$ 는 유량,  $\Delta S$ 는 토양수분의 변화량을 나타낸다. 이때 장기간의 수문분석에서는  $\Delta S$ 를 무시될 수 있다.

한편, 인위적 요인이 발생되지 않은 자연상태 유역에 대한 유출분석을 위해서는 Budyko 곡선이 활용될 수 있는데, 이 곡선은 Budyko 가설(Budyko, 1974)에 의해 물수지방정식과 에너지수지방정식을 연립하여 구성된다. 물수지방정식은 Eq. (13)이 사용되며, 에너지수지방정식은 Eq. (14)가 사용된다.

$$N = L \times AET + H + \Delta G \tag{14}$$

여기서,  $N$ 은 일정기간동안의 순복사에너지,  $L$ 은 일정기간동안의 증발에 대한 잠열,  $H$ 는 일정기간동안의 열 플럭스(sensible heat flux),  $\Delta G$ 는 지표의 열 플럭스 변화를 나타내는데, 물수지방정식에서  $\Delta S$ 가 무시할 수 있는 이유와 마찬가지로  $\Delta G$  또한 무시될 수 있다.

Eqs. (13) and (14)에서  $\Delta S$ 와  $\Delta G$ 를 제거하고, Arora (2002)가 제안한  $PET = N/L$ ,  $\gamma = H/(L \times AET)$ 의 관계를 Eq. (14)에 대입한 뒤, Eq. (14)를 Eq. (13)으로 나누면 Eq. (15)가 유도된다.

$$\frac{PET}{P} = \frac{AET}{P} + \frac{AET \times \gamma}{P} = \frac{AET}{P}(1 + \gamma) = \phi \tag{15}$$

여기서,  $PET$ 는 잠재증발산량,  $\gamma$ 는 Bowen ratio,  $\phi$ 는 건조지수(aridity index)이다.

Bowen ratio,  $r = f(\phi)$ 로 나타낼 수 있으므로(Arora, 2002), Eq. (15)는 Eq. (16)으로 정리될 수 있다. Eq. (16)은 궁극적으로 실제증발산량과 강수량의 관계를 나타내는데, 관측자료로부터 이 관계를 추정된 함수식을 나타낸 곡선을 Budyko 곡선이라 하며,  $F(\phi)$ 를 Budyko 곡선식이라 명명하여 사용한다.

$$\frac{AET}{P} = \frac{\phi}{1 + f(\phi)} = F(\phi) \tag{16}$$

Budyko 곡선 함수는 기상자료(실제증발산 및 강수)를 실측함으로써 다양한 연구자들에 의해 사용가능한 함수가 제안된

Table 1. Type of Budyko curve functions

Name of function	$F(\phi)$
Schreiber (1904)	$1 - e^{-\phi}$
Ol'dekop (1911)	$\phi \tanh(1/\phi)$
Budyko (1948)	$[\phi \tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{0.5}$
Pike (1964)	$(1 + \phi^{-2})^{-0.5}$
Fu (1981)	$1 + \phi - (1 + \phi^{2.5})^{1/2.5}$

바 있다. 이 중 대표적인 Budyko 곡선함수는 Schreiber (1904), Ol'dekop (1911), Budyko (1948), Pike (1964), Fu (1981)에 의해 제안된 것으로 이들 함수의 형태는 Table 1과 같다.

Penman-Montheith 방법에 의해 산정된 잠재증발산량( $PET$ )과 측정된 강수량을 Eq. (15)에 대입하면 건조지수  $\phi$ 가 산정되는데, 이 값을 Table 1의 5개 Budyko 함수들에 대입하면  $F(\phi)$ 를 산정되므로 이를 이용하여 다음의 자연적 요인에 의한 유량변동량( $\Delta Q_N$ )을 산정한다.

$\Delta S$ 가 무시된 Eq. (13)의 양변에 변화량( $\Delta$ )을 취하면  $\Delta P = \Delta AET + \Delta Q$ 로 변환될 수 있으며, 수문학적 민감도 분석에 사용되는 변수는 모두 자연적 요인에 의해서만 변화되는 변수(강우 및 증발산)이므로, Eq. (13)의  $\Delta Q$ 는 기후변화에 의해서만 변동되는 유량인  $\Delta Q_N$ 으로 대체될 수 있다. 따라서 이를 고려하여 Eq. (13)에 대한 변화량을 다시 쓰면 Eq. (17)과 같다.

$$\Delta Q_N = \Delta P - \Delta AET \tag{17}$$

여기서,  $\Delta Q_N$ 는 자연적 요인에 의해서만 변화되는 유량을 의미하며,  $\Delta P$ 는 강수의 변화,  $\Delta AET$ 는 실제증발산량의 변화를 나타낸다.

Koster and Suarez (1999)는 Budyko 곡선 함수와 실제증발산 사이의 관계를 개발하였다. Eq. (16)의  $AET = P \times F(\phi)$ 를 변수  $P$ 와  $\phi$ 에 대해 전미분하고 미분기호를  $\Delta$ 로 바꿔 쓰면 Eq. (18)을 유도할 수 있다. 또한 Eq. (15)의  $\phi = PET/P$ 의 관계를  $P$ 와  $PET$ 에 대해 전미분하고 미분기호를  $\Delta$ 로 바꿔 쓰면 Eq. (19)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} d(AET) &= F(\phi)dP + PF'(\phi)d\phi \\ \Rightarrow \Delta AET &= F(\phi)\Delta P + PF'(\phi)\Delta\phi \end{aligned} \tag{18}$$

$$d\phi = \frac{1}{P}d(PET) - \frac{PET}{P^2}dP \tag{19}$$

$$\Rightarrow \Delta\phi = \frac{1}{P}\Delta(PET) - \frac{PET}{P^2}\Delta P$$

Eq. (18)에 Eq. (19)를 대입하면 Eq. (20)이 유도되며, Eq. (17)에 Eq. (20)을 대입하면 Eq. (21)이 유도된다.

$$\Delta AET = [F(\phi) - \phi F'(\phi)]\Delta P + F'(\phi)\Delta PET \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_N &= [1 - F(\phi) + \phi F'(\phi)]\Delta P - F'(\phi)\Delta PET \\ &= \alpha\Delta P + \beta\Delta PET \end{aligned} \quad (21)$$

또한 Eq. (13)에  $AET = P \times F(\phi)$ 을 대입해 정리하면 Eq. (22)가 얻어지며, Eq. (21)의 양변을 Eq. (22)로 나누고  $P = PET/\phi$ 의 관계를 대입하면 Eq. (23)을 얻을 수 있다.

$$Q = P(1 - F(\phi)) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_N &= \frac{\Delta P}{P} Q \left(1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}\right) + \frac{\Delta PET}{PET} Q \left(-\frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}\right) \\ &= \varepsilon_P \frac{\Delta P}{P} Q + \varepsilon_{PET} \frac{\Delta PET}{PET} Q \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,  $\varepsilon_P$ 와  $\varepsilon_{PET}$ 는 강우량과 잠재증발산의 탄성계수(elasticity coefficient)라고 불리며,  $\varepsilon_P + \varepsilon_{PET} = 1$ 의 관계를 가진다.

건조지수,  $\phi$ 만 산정되면 Eq. (23)으로부터 5개의 Budyko 함수에 따른  $\varepsilon_P$ 와  $\varepsilon_{PET}$ 를 산정할 수 있으며, 측정된 자료로부터  $P$ 와  $\Delta P$ 를 계산하고 Penman-Montheith 방법으로부터  $PET$ 와  $\Delta PET$ 를 계산하면 최종적으로 자연적 요인에 의해 변동된 유량( $\Delta Q_N$ )을 산정할 수 있다.

따라서 수문학적 민감도 분석 절차를 진행하면 5개 Budyko 함수들에 따른 자연적 요인에 의한 변동량( $\Delta Q_N$ )을 산정할 수 있으므로 2.2.1절에서 제시한 [Step 1]~[Step 3]에 따라 인위적 요인에 의한 변동량( $\Delta Q_A$ )의 계산이 가능해지고, 궁극적으로 유량의 총변동량( $\Delta Q$ )에 미친 두 가지 요인의 영향을 정량적으로 분석할 수 있게 된다.

앞서 언급한 수문학적 방법은 자연적 요인에 의한 변동량을 수학적 전개에 따라 논리적으로 산정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 수문분석에서 가장 어려움이 큰  $\Delta S$ 와  $\Delta G$ 를 0으로 처리하기 위해서는 일정정도 장기간의 연속적 자료에 대한 분석만 가능하다는 단점이 있어 년별 장기 분석에서만 적용이 가능하며 시간적 척도를 보다 세분화한 월별 분석 또는 시기별 분석에서는 사용될 수 없다는 단점이 있다는 점을 주의할 필요가 있다.

### 3. 연구의 적용 및 결과

#### 3.1 유역의 선정

본 연구에서 수문학적 민감도 분석기법을 활용하여 유량의 변동량을 요인별로 분리함으로써 자연적 요인과 인위적 요인에 따른 변동량을 정량적으로 분석하기 위한 대상유역은 화천댐 상류유역(Fig. 2)이다. 화천댐 상류유역은 3개의 중권역인 금강산댐 중권역(1008, 2384.68 km<sup>2</sup>), 평화의댐 중권역(1009, 940.45 km<sup>2</sup>) 및 춘천댐 일부 중권역(1010, 759.79 km<sup>2</sup>)으로 구성되며 전체 유역면적은 4084.92 km<sup>2</sup>이다.

화천댐 상류유역 북한지역에는 임남댐이 1997년 착공되어 2000년부터 본격적으로 담수를 시작하였으며, 임남댐 지하류에는 평화의 댐이 1987년 건설된 바 있다. 임남댐은 높이 121.5 m, 폭 710 m으로, 약 26억 m<sup>3</sup>의 저수용량을 가지고 있는 것으로 추정되고 있다. 북한은 임남댐을 건설하여 일정 수량을 동해안 안변천으로 도수함으로써 수력발전을 시행하고 있으나, 정확한 도수 수량을 통보하지 않고 있다.

Ahn *et al.* (2011)은 화천댐 및 소양강댐 유입량을 이용하여 두 댐 간의 상관성 분석 및 유역전이법을 사용하여 도수량을 추정한 바 있으며, 이 연구에서 제시된 추정 도수량은 12.7~16.2억 m<sup>3</sup>/y으로 제시한 바 있다. 2002년 1월 북한은 사전 방류통보 없이 3억 5천만 m<sup>3</sup>를 방류한 바 있으며, 같은 해 6월에는 사전 방류통보를 남한에 공지하고 3억 3천만 m<sup>3</sup>를 방류한 바 있다. 이후 2004년과 2013년에도 적은 방류량이긴 하지만 간헐적인 방류가 시행되고 있는 상황이다. 한편, 임남댐의 하류에 위치하고 있는 평화의 댐은 2005년 완공된 2단계 증축공사를 통해 높이 125 m, 폭 601 m으로 26억 3천만 m<sup>3</sup>의 저수용

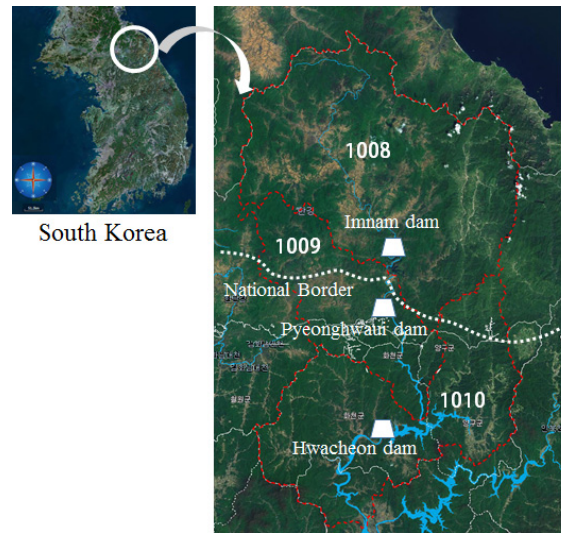


Fig. 2. Selected basin: Hwacheon dam upper basin



량을 가지고 있으나, 평상시에는 담수를 하지 않고 유입량 전체를 하류로 방류하고 있어 화천댐 유입량에 미치는 조절효과는 미미한 것으로 볼 수 있다.

대상 유역(춘천댐 중권역의 경우는 유역전체를 대상)에 대한 인구변화를 살펴보면 1985년 71,722명이었으나 2005년까지 45,855명으로 감소되었으며, 2014년을 기준으로 53,935명이 거주하고 있는 것으로 나타났다. 또한 화천군의 주거지역 변동은 1985년 10.89 km<sup>2</sup>였으며 2014년 기준으로 13.00 km<sup>2</sup>로 미미한 증가가 있었던 것으로 나타났다. 특히 이 지역은 군사분계선과 인접된 지역으로 특정 개발사업의 진행이 어려워 물순환에 영향을 미칠 수 있는 불투수지역의 증가는 무시될 수 있어 유량변동의 원인을 댐의 조절로 인한 인위적 요인과 자연적 요인으로 구분이 가능하다.

**3.2 자료의 선정 및 기술통계분석**

본 연구의 대상유역 내 북한측 강우자료는 수집이 불가능하므로 화천댐 인근에 위치한 화천군청(국토교통부)와 다목초교(국토교통부)에서 측정된 1967~2017년(51개년)동안의 연평균강우자료를 활용하였으며, 화천군청 강우관측소에서 결측된 강우자료는 다목초교 강우관측소 자료로 보완하였다. 또한 화천댐 연평균유입량은 강우자료와 동일한 기간에 대해 수집하고 강우자료와 일치된 단위를 사용하기 위하여 화천댐 상류유역 면적(4084.92 km<sup>2</sup>)으로 나누어 연평균유입고(annual average inflow depth, mm)로 환산하여 사용하였다(다만, 기존 연구와의 비교가 필요한 경우는 유입량(m<sup>3</sup>)을

사용하였음).

Fig. 3은 수집된 51개년에 대한 연평균강우량과 연평균유입고를 도시한 그래프이며, 두 자료에 대한 개략적인 자료의 변동을 알아보기 위하여 10년-이동평균을 산정하여 함께 도시하였다. 연평균강우자료의 경우 1997년까지는 점진적 감소가 진행되었으나, 가뭄이 극심했던 2014~2016년을 제외하면 1998년 이후 증가 추세가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 연평균유입고는 1998년 이후 강우의 증가에도 불구하고 지속적으로 감소되고 있는 것으로 판단되어 1997년부터 시작된 임남댐 건설에 의한 영향이 연평균유입고에 큰 영향을 준 것으로 추정할 수 있었다.

한편, 연평균강우량에 대한 10년-이동평균 결과는 1998년 정도에서 급진적 변동이 발생된 것으로 추정될 수 있으나, 연평균유입고의 10년-이동평균 결과만으로는 뚜렷한 급진적 변동의 여부를 알기 어려웠다. 다만, 연평균유입고에 대한 개개의 자료 변동을 정성적으로 살펴보면 2000년 정도를 중심으로 급격한 감소가 발생된 것을 알 수 있었다.

Table 2는 수집된 연평균강우량과 연평균유입고에 대한 기술통계량을 분석한 결과이다. 연평균강우량과 연평균유입고의 51개년 평균값은 각각 1266.8 mm와 592.7 mm로 개략적인 유출율은 46.8%로 비교적 낮은 수치를 보였다. 또한 표준편차는 연평균강우량이 79.8 mm가 크게 산정되었으며, 왜곡도와 첨예도는 거의 0에 가까워 대칭적이면서 정규분포와 유사한 첨예도를 가지는 것을 알 수 있었다.

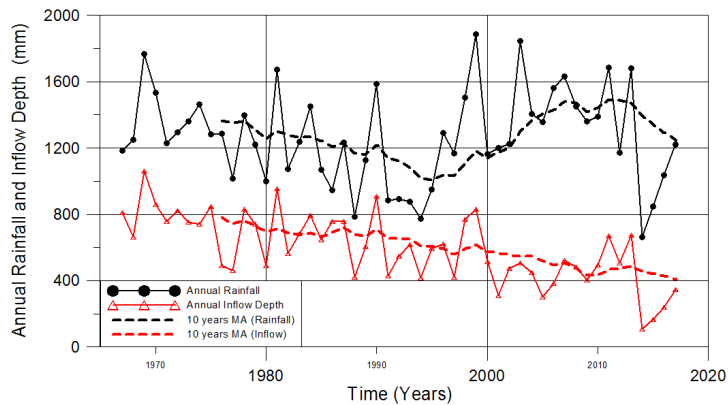


Fig. 3. Annual average rainfall and inflow depth and results of moving average

Table 2. Descriptive statistics of the two selected data

Data	Mean (mm)	Std. (mm)	Skewness	Kurtosis
Annual average rainfall	1266.8	286.6	0.099	-0.391
Annual average inflow depth	592.7	206.8	-0.092	-0.335



### 3.3 평균의 차이에 대한 가설검정 및 점진적 경향성 분석 결과

자료의 도시로부터 임남댐의 본격적인 담수가 시작된 2000년을 중심으로 건설 전후의 연평균강수량과 연평균유입고에 대한 모집단의 특성이 동일한지의 여부를 보다 객관적으로 분석하기 위하여 평균의 차이에 대한 모수적 가설검정 기법인 two sample *t*-test를 수행하였다. Table 3은 2000년을 전후로 분할된 두 표본집단의 평균의 차이에 대한 유의수준 5%에 대한 가설검정 결과이다. 연평균강수량은 가설이 채택되어 2000년 전후 표본집단의 평균에 차이가 없는 것으로 결정되었으나, 연평균유입고는 가설이 기각되어 2000년 전후 표본집단의 평균에 차이가 있어 두 모집단의 성질이 다른 것으로 결정되었다. 따라서 이와 같은 가설검정 기법을 이용하여 자료의 도시와 10년-이동평균 산정결과만으로는 판단이 어려웠던 연평균강수량과 연평균유입고의 모집단의 성질을 보다 객관적으로 파악할 수 있었다.

또한 자료의 점진적 경향성을 판단하기 위하여 대표적 비모수 점진적 경향성 기법인 Mann-Kendall 기법을 유의수준 5%에서 연평균강수량과 연평균유입고를 대상으로 시행하고 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 연평균강수량의 경우도 시적 기법과 10년-이동평균 결과를 통해 감소와 증가구간이 있었던 것으로 최초 판단하였으나 Mann-Kendall 경향성 기법에서는 경향성이 존재하지 않는다고 판단하는 것이 통계적으로 유의하였다. 그러나 연평균유입고에 대한 결과는 유의확률이 유의수준보다 매우 작아 가설이 기각되어 점진적 경향성이 존재하는 것으로 결정되었다.

### 3.4 변동점 탐색에 의한 급진적 경향성 분석 결과

본 논문의 3.3절에서 다룬 가설검정 및 점진적 경향성 분석 결과는 51개년 간 연평균강수량과 연평균유입고 자료가 가

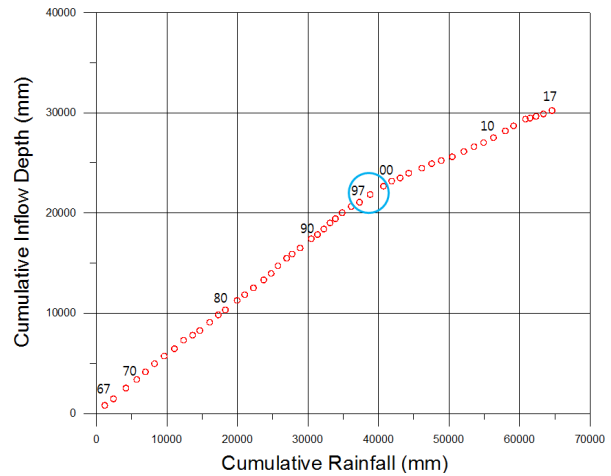


Fig. 4. Double mass curve between rainfall and inflow depth

지고 있는 통계적 특성을 보여주고 있지만, 수문학적 민감도 분석에 있어 중요하게 다루어져야 하는 변동점을 결정하기에는 정확성 측면에서 부족한 면이 있다. 따라서 본 연구에서는 이중누가곡선, Pettitt test 및 베이지안 변동점 분석을 활용하여 자료의 급진적 경향성을 파악함으로써 보다 신뢰성 높은 변동점을 탐색하였다.

Fig. 4는 1967~2017년까지 51개년에 대한 누적연평균강수량과 누적연평균유입고를 이용한 누가우량곡선으로서 1997~2000년 사이를 변동구간으로 하여 이전과 이후의 기울기가 다소 차이가 있다. 따라서 이를 이용하여 변동점이 1997년과 2000년 사이에 존재하고 있음을 정성적으로 판단할 수 있었다.

이중누가곡선을 이용하여 개략적인 변동점 존재 가능성의 구간을 확인한 이후 Pettitt test와 베이지안 변동점 분석을 활용하여 통계적으로 유의한 변동점을 결정하였다. Table 4는 Pettitt test의 결과로 연평균강수량은 유의확률이 유의수준보다 큰 값으로 산정되어 변동점이 존재하지 않는 것으로 판단

Table 3. Results of two sample *t*-test and Mann-Kendall test (significance level,  $\alpha = 0.05$ )

Test name	Data	<i>p</i> -value	Decision
Two sample <i>t</i> -test	Annual average rainfall	0.2681	Accept
	Annual average inflow depth	$1 \times 10^{-6}$	Reject
Mann-Kendall test	Annual average rainfall	0.8718	Accept
	Annual average inflow depth	$1.65 \times 10^{-6}$	Reject

Table 4. Results of Pettitt test (significance level,  $\alpha = 0.05$ )

Data	<i>p</i> -value	Change point	Year
Annual average rainfall	0.403	No	No
Annual average inflow depth	$1.12 \times 10^{-8}$	Yes	1999

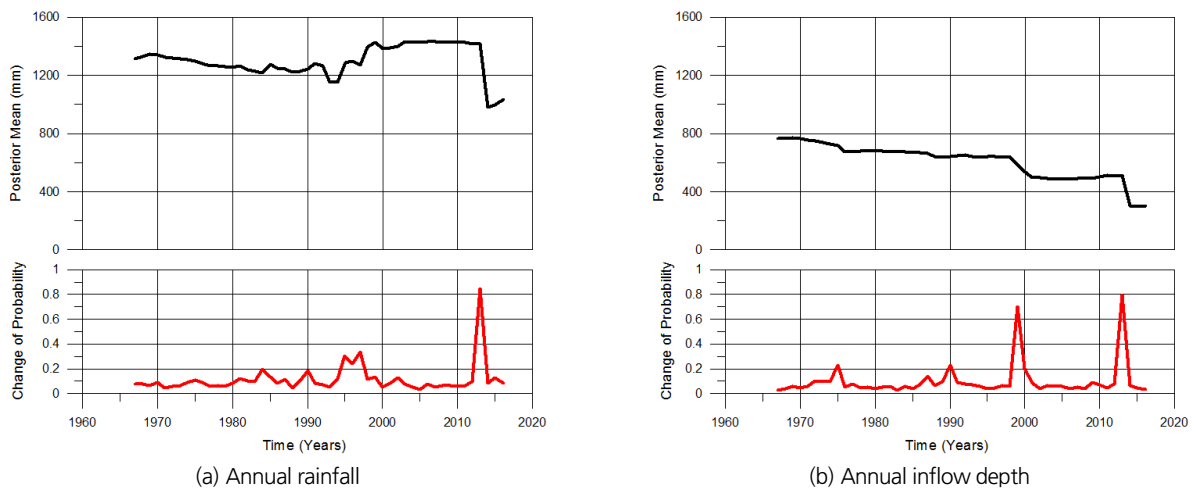


Fig. 5. Results of Bayesian change point analysis

되었으나, 연평균유입고는 33번째 자료인 1999년을 변동점으로 1967~1999년과 2000~2017년의 자료가 급진적으로 변동되었음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 베이지안 변동점 분석결과로 상단 그림은 베이지안 사후평균값이고, 하단 그림은 변동확률을 나타낸다. 연평균강우량의 경우 1994년 사후평균값이 감소하였으나 변동확률이 0.334로 낮아 변동점으로 취급되기 어려웠으며, 2014년은 극심한 가뭄으로 인한 강우감소로 변동확률이 0.85로 선정되어 변동점으로 판단되었다. 이와 달리 연평균유입고의 경우는 1999년과 2014년 모두 각각 변동확률이 0.705와 0.794로 선정되어 변동점으로 판단되었다. 따라서 2014년은 강우감소라는 자연적 요인에 의한 변동점이므로 수문학적 민감도 분석을 위한 인위적 요인의 변동점으로는 1999년만이 선정되었다.

### 3.5 수문학적 민감도 분석결과

3.2절부터 3.4절의 분석결과는 연평균강우량은 점진적 경향성과 급진적 경향성(2014년 제외)이 모두 탐색되지 않았으며, 연평균유입고는 점진적 감소와 1999년을 변동점으로 하는 급진적 감소가 탐색되었다. 따라서 본 연구에서는 수문학적 민감도 분석에 의한 유량변동량의 요인별 정량적 구분을 위한 변동점을 금강산댐의 본격적 담수가 이루어지기 직전인 1999년으로 결정하고 해당 자료를 1967~1998년과 1999~2017년으로 구분하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서 수문학적 민감도 분석기법을 이용하여 자연적 요인에 의한 유량변동량( $\Delta Q_N$ ), 인위적 요인에 의한 유량변동량( $\Delta Q_A$ ) 및 총유량변동량( $\Delta Q$ )을 산정하기 위한 절차를 간단히 요약하여 제시하면 다음과 같다.

- [Step 1] Penman-Montheith 방법으로 대상유역의 잠재증발산량( $PET$ )을 산정하고, 강우량 자료를 이용하여 Eq. (15)의 건조지수,  $\phi$ 를 산정한다.
- [Step 2] Table 1에 제시된 5개의 Budyko 함수식을 이용하여 5개의  $F(\phi)$  값을 산정한다.
- [Step 3] 산정된  $\phi$ 값과  $F(\phi)$  값을 이용하여 Eq. (23)의 강우량과 잠재증발산량에 대한 탄성계수  $\varepsilon_P$ 와  $\varepsilon_{PET}$ 를 산정한다.
- [Step 4] 탐색된 변동점을 전후로 강우량과 잠재증발산량을 분리하고 기간별 평균값을 산정하여 강우 변동량( $\Delta P$ )과 잠재증발산 변동량( $\Delta PET$ )을 산정한다.
- [Step 5] Step 3과 Step 4에서 산정된 값들을 Eq. (23)에 대입하여 자연적 요인에 의한 유량변동량( $\Delta Q_N$ )을 산정한다.
- [Step 6] 변동점을 중심으로 총유량변동량( $\Delta Q$ )을 산정하고 Step 5에서 산정된  $\Delta Q_N$ 을 Eq. (12)에 대입함으로써 인위적 요인으로 인한 유량변동량( $\Delta Q_A$ )를 산정한다.

먼저 대상유역 내 측후소가 존재하지 않아 인근의 춘천 측후소로부터 51개년에 해당되는 상대습도, 일사량, 풍속, 온도(최저, 최대)를 일자료로 취득한 이후 Penman-Montheith 방법에 의한 일별 잠재증발산량을 산정하고 이를 연별로 합산하여 연별 잠재증발산량을 산정하고 산정된 잠재증발산량을 이용하여 건조지수,  $\phi$ 를 산정하였다. 51개년 간 연평균강우량의 평균값은 1,357.1 mm, 연별 잠재증발산량의 평균값은 802.5 mm로 건조지수,  $\phi$ 는 0.591342로 산정되었으며, 이 값을 이용하여 [Step 2]~[Step 6]의 산정결과는 Table 5와 같다.

**Table 5.** Results of hydrological sensitivity analysis

Methods	$F(\phi)$	$\varepsilon_P$	$\varepsilon_{PET}$	$\Delta P$ (mm)	$\Delta PET$ (mm)	$\Delta Q_N$ (mm)	$\Delta Q$ (mm)	$\Delta Q_A$ (mm)
Schreiber (1904)	0.4464	1.5913	-0.5913	406.30	49.55	194.22	241.09	435.31
Ol'dekop (1911)	0.5525	1.9505	-0.9505	406.30	49.55	231.90	241.09	472.99
Budyko (1948)	0.4966	2.3532	-1.3532	406.30	49.55	274.15	241.09	515.24
Pike (1964)	0.5090	1.7681	-0.7681	406.30	49.55	212.76	241.09	453.85
Fu (1981)	0.4914	1.7044	-0.7044	406.30	49.55	206.08	241.09	447.17

Mean of  $\Delta Q_A$ : 464.91 mm/y (=  $18.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ )

#### 4. 분석결과에 대한 고찰

본 연구의 3절에서는 수문학적 민감도 분석을 활용하여 1967년부터 2017년까지 51개년 간 화천댐의 연평균유입고의 총변동량을 강우의 변동에 따른 자연적 요인의 변동량과 임남댐 건설에 따른 인위적 요인의 변동량으로 구분하여 정량적으로 분리하였다. 적용된 수문학적 민감도 기법은 본 연구의 2.2.1 절의 Fig. 1에서 제시한 기간 2에서의 모의곡선(모든 값)을 산정한 것이 아니라 변동시점과 끝점 사이의 변동량만을 산정함으로써 간단한 계산이 가능하다는 것이 이 기법의 특징이다. 5개의 Budyko 곡선 함수들에 따른 인위적 요인에 따른 유량변동량( $\Delta Q_A$ )는 435.31~515.24 mm/y사이의 값을 가질 것으로 추정되고 화천댐 상류유역에서의 특정한 개발 등으로 인한 불투수 면적의 증가가 미미하였으므로, 이 값은 거의 대부분이 북한이 건설한 임남댐 건설로 인해 감소된 유량변동량으로 취급될 수 있다.

즉, 변동점인 1999년을 시점으로 강우량으로 인한 유량증대가 194.22~274.15 mm/y의 범위에서 증대되었음에도 불구하고 화천댐의 평균유입고의 변동량은 241.09 mm/y만 발생되어 궁극적으로 임남댐으로 인한 인위적 영향이 화천댐의 평균유입고의 감소에 미친 영향은 435.31~515.24 mm/y의 범위에서 산정됨을 알 수 있었다.

Table 6은 본 연구의 산정결과인 유입고(mm)를  $10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ 의 단위로 환산하고 임남댐으로 인한 화천댐 유입량의 감소를

연구하였던 기존 연구와의 결과를 비교한 것이다. 단 Table 6에서는 최소값을 산정한 Schreiber 함수식과 최대값을 산정한 Budyko 함수식에 대한 비교만 나타내었다. Schreiber 함수에 의한 임남댐으로 인한 감소량은 17.78억  $\text{m}^3/\text{y}$ 로 가장 오래된 연구인 Sunwoo (1986)의 산정값에 비해 0.82억  $\text{m}^3/\text{y}$  적게 산정되었으며, 가장 최근 연구인 Ahn *et al.* (2010)의 산정 결과보다는 1.58~5.08억  $\text{m}^3/\text{y}$  크게 산정되었다. 또한 Budyko 함수에 의한 임남댐 감소량은 21.05억  $\text{m}^3/\text{y}$ 로 Sunwoo (1986)의 산정값에 비해 2.45억  $\text{m}^3/\text{y}$  큰 값으로 산정되었고, Ahn *et al.* (2010)의 산정 결과보다는 4.85~8.35억  $\text{m}^3/\text{y}$  크게 산정된 것을 알 수 있다. 특히 5종류의 Budyko 함수들의 산정 결과의 평균 감소량은 18.99억  $\text{m}^3/\text{y}$ 로서 작게는 0.39억  $\text{m}^3/\text{y}$ 이 증가되었고, 크게는 6.29억  $\text{m}^3/\text{y}$ 만큼 증가되었음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 산정된 결과는 기존 연구자들의 임남댐 건설로 인한 화천댐 감소 유입량보다 다소 크게 산정되었는데, 이러한 결과는 2000년 이후 증대된 강우량의 반영과 더불어 화천댐 유입량의 감소가 주된 영향을 미친 것을 판단된다.

#### 5. 결론

수자원공학과 관련된 많은 연구 중에서 관측된 유량에 영향을 미치는 요인을 자연적 요인과 인위적 요인으로 정량화한 결과를 제시하는 연구는 홍수나 가뭄 연구에 비해 많지 않

**Table 6.** Comparison of results between this study and conventional studies

Authors	Reduction amount ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ )	Reduction amount ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ )		Reduction amount ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ )		Reduction amount ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ )	
		Mean of 5 functions	Diff.	Schreiber function	Diff.	Budyko function	Diff.
Sunwoo (1986)	18.60	18.99	0.39	17.78	-0.82	21.05	2.45
Lim. (2006)	16.00		2.99		1.78		5.05
Kim <i>et al.</i> (2009)	18.30		0.69		-0.52		2.75
Ahn <i>et al.</i> (2011)	12.20~16.20		2.79~6.29		1.58~5.08		4.85~8.35

며, 대부분 연구는 강우-유출모형의 입력자료 변화에 따른 출력자료의 변화를 모색함에 집중되어 있어 모형의 구축, 매개변수의 보정 및 검증에 많은 노력이 필요하다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 강우-유출모형을 사용하지 않고 취득된 강수량 자료 등의 기상수문자료만을 이용하여도 비교적 정확하게 연유출량의 변동량을 산정할 수 있는 수문학적 민감도 분석기법을 활용하여 관측된 유량자료에 내포되어 있는 총변동량을 자연적 요인과 인위적 요인으로 구분할 수 있는 기법을 국내 유역에 적용하였다.

특히 수문학적 민감도 분석기법을 이용한 요인별 정량화의 대상유역을 화천댐 상류유역으로 선정하여 임남댐 건설 전후 1967~2017년 동안 화천댐으로 유입된 유입량의 감소에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 먼저 해당 기간의 연평균강수량자료와 화천댐의 연평균유입고에 대한 자료도시와 10년-이동평균기법을 이용하여 기술통계분석을 시행하였으며, two sample *t*-test와 Mann-Kendall 비모수 경향성 검정기법을 이용하여 임남댐 건설 전후로 구분된 자료에 대한 평균의 차이 유무와 점진적 경향성 유무를 판정하였다. 이와 같은 분석 결과, 연평균강수량의 경우 점진적 경향성이 탐색되지 않았으나 연평균유입고는 점진적 경향성이 탐색되었고, two sample *t*-test결과 연평균강수량은 임남댐 건설을 전후로 평균의 차이가 없었으나, 연평균유입고는 두 모집단의 특성이 다르게 나타난다는 점을 알 수 있었다.

화천댐의 연평균유입고에 대한 수문학적 민감도 분석기법을 적용하기 위하여 이중누가곡선, Pettitt test, 베이지안 변동점 분석기법을 적용하여 변동점을 정확하게 탐색하였다. 연평균강수량의 경우는 급진적 변동을 나타내는 변동점이 존재하지 않거나 최근의 가뭄으로 인한 2014년만이 변동점으로 탐색되었으나, 연평균유입고는 1999년이 가장 통계적으로 유의한 변동점으로 탐색되었다. 탐색된 변동점인 1999년을 중심으로 51개년의 자료를 1967~1998년과 1999~2017년으로 구분하고 수문학적 민감도 분석기법을 적용하기 위해 잠재증발산량을 Penman-Montheith 방법으로 산정한 뒤 자연적 요인에 의한 변동량( $\Delta Q_N$ )을 산정하기 위한 절차를 진행하였으며, 최종적으로 인위적 요인에 의한 변동량( $\Delta Q_A$ )을 산정하였다. 화천댐 상류유역은 특정한 개발이 진행된 바 없으며, 인구도 지속적으로 감소되고 있어 인위적 변동량( $\Delta Q_A$ )을 대부분 북한에 위치한 임남댐의 담수 및 도수에 의한 영향으로 판단하였다.

본 연구를 통해 산정된 화천댐 유입량의 감소량은 평균적으로 18.99억  $m^3/y$ 로 산정되었으며, 5개의 Budyko 함수들에 따라 17.78~21.05억  $m^3/y$ 사이에 존재하고 있음을 알 수 있

었다. 이와 같은 산정결과를 기존 연구자들의 결과와 비교한 결과 평균값에 대해서 작게는 0.39억  $m^3/y$ 이 증가되었고, 크게는 6.29억  $m^3/y$ 만큼 증가되었음을 알 수 있었는데, 이는 2017년까지의 추가된 연평균강수량과 연평균유입량 자료가 산정절차에 반영됨으로써 발생된 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 사용된 5 가지의 Budyko 함수들은 1개의 매개변수만을 사용하여 유역 전체의 증발산량을 산정하는 방법으로 산정된 결과에는 불확실성이 내포되어 있을 수 있어, 이를 개선하기 위해서는 국내 여건을 반영한 Budyko 함수의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

또한 본 연구를 포함한 대부분의 기존 연구자들은 연자료를 대상으로 화천댐 유입량의 감소분을 산정하였으나, 남측 북한강 유역에서의 실효성 있는 수자원 및 수질관리계획 수립을 위해서는 분석시간 단위를 월별 또는 계절별로 설정할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 수문학적 민감도 분석기법은 연속적인 장기 자료에 대해서만 적용이 가능하다는 단점이 있어, 자료가 짧거나 자료가 월별 또는 시기별로 구분된 분할자료에는 적용이 불가능할 것으로 판단된다. 따라서 향후에는 이를 극복할 수 있는 방법을 모색할 필요가 있으며, 이와 함께 기후변화와 같은 미래 상황을 고려한 유량, 수질, 수력발전 등과 관련된 장기적 관점에서의 대처 계획을 수립하기 위한 연구가 수행될 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(D1001197-01-01, 관리번호: 520170165) 및 2014년 교육부 재원을 한국연구재단을 통한 기초연구사업(NRF-2014R1A1A2053328)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사를 표합니다.

## References

- Abdul Aziz, O. I., and Burn, D. H. T. (2006). "Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie river basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 319, pp. 282-294.
- Ahn, J., Jung, K., and Lee, G. (2011a). "Problems of water use and estimation of water right in North Han river shared by North and South Korea (I) - Analysis of diversion impacts on downstream area by Imnam dam." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 4, pp. 305-314. (In Korean).
- Ahn, J., Jung, K., and Lee, G. (2011b). "Problems of water use and

- estimation of water right in North Han river shared by North and South Korea (II) - Estimation of water right in downstream area." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 4, pp. 315-325. (In Korean).
- Akurut, M., Willems, P., and Niwagaba, C. B. (2014). "Potential impacts of climate change on precipitation over Lake Victoria, East Africa, in the 21st Century." *Water*, Vol. 6, pp. 2634-2659.
- Arora, V. K. (2002). "The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff." *Journal of Hydrology*, Vol. 265, No. 1-4, pp. 164-177.
- Barry, D., and Hartigan J. A. (1992). "Product partition models for change point problems." *The Annals of Statistics*, Vol. 20, No. 1, pp. 260-279.
- Barry, D., and Hartigan J. A. (1993). "A Bayesian analysis for change point problems." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 88, No. 421, pp. 309-319.
- Budyko, M. L. (1948). *Evaporation under natural conditions*. Gidrometeorizdat, Leningrad.
- Budyko, M. L. (1974). *Climate and life*. Academic, San Diego, CA.
- Burn, D. H. (1994). "Hydrologic effects of climatic change in West Central Canada." *Journal of Hydrology*, Vol. 160, pp. 53-70.
- Carlin, B. P., Gelfand, A. E., and Smith, A. F. M. (1992). "Hierarchical Bayesian analysis of changepoint problems." *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 41, No. 2, pp. 389-405.
- 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.
- Erdman, C., and Emerson, J. W. (1993). "bcp: An R package for performing a Bayesian analysis of change point problems." *Journal of Statistical Software*, Vol. 23, No. 3, pp. 1-13.
- Fu, B. P. (1981). "On the calculation of the evaporation from land surface." *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 5, pp. 23-31.
- 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.
- 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.
- 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., 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.
- Jiang, S., Ren, L., Yong, B., Singh, V. P., Yang, X., and Yuan, F. (2011). "Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods." *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 16, pp. 2492-2505.
- Kahya, E., and Kalayci, S. (2004). "Trend analysis of streamflow in Turkey." *Journal of Hydrology*, Vol. 289, No. 1-4, pp. 128-144.
- Kang, H.-Y., Choi, J.-H., Kim, J.-S., and Moon, Y.-I. (2017). "Hydrologic variability in the Sumjin river dam basin according to typhoon genesis pattern." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 4, pp. 233-239. (In Korean).
- 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.
- Kim, H. B., Kim, S. U., and Lee, C.-E. (2017). "Quantitative separation of impacting factors to runoff variation using hydrological model and hydrological sensitivity analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 139-153. (In Korean).
- Kim, N. W., and Lee, J. E. (2009). "The characteristics of runoff for Hwacheon dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 12, pp. 1069-1077. (In Korean).
- Kim, S. U., Lee, Y. S., and Lee, C.-E. (2014). "The application of various non-parametric trend tests to observed and future rainfall data in the Nakdong river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 3, pp. 223-235. (In Korean).
- Koster, R. D., and Suarez, M. J. (1999). "A simple framework for examining the interannual variability of land surface moisture fluxes." *Journal of Climate*, Vol. 29, No. 24, pp. 1911-1917.
- Kottegoda, N. T., and Rosso, R. (1997). *Statistics, probability, and reliability for civil and environmental engineers*. McGraw-Hill, N.Y.
- Lee, C.-E., Kim, S. U., and Lee, Y. S. (2014). "Estimation of the regional future sea level rise using long-term tidal data in the Korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 753-766. (In Korean).
- 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).
- Li, F., Zhang, G., and Xu, Y. J. (2016). "Assessing climate change impacts on water resources in the Songhua river basin." *Water*, Vol. 8, W8100420.
- Li, Z. L., Xu, Z. X., Li, J. Y., and Li, Z. J. (2008). "Shift trend and step changes for runoff time series in the Shiyang river basin, northwest China." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 23, pp. 4639-4646.
- Lim, Y. K. (2006). *An analysis of inflow in Hwacheon dam using SSARR model*. Master thesis, Kongju National University (In Korean).
- Liu, D., Chen, X., Lian, Y., and Lou, Z. (2010). "Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang river basin of China." *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 11, pp. 1487-1495.
- Nash, L. L., and Gleick, P. H. (1991). "Sensitivity of streamflow in the Colorado basin to climatic changes." *Journal of Hydrology*, Vol. 125, No. 3-4, pp. 221-241.
- 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.
- Odongo, V. O., Van der Tol, C., Van Oel, P. R., Meins, F. M., Becht, R., Onyando, J., and Su, Z. (2015). "Characterisation of hydro-

- climatological trends and variability in the Lake Naivasha basin, Kenya." *Hydrological Processes*, Vol. 29, No. 15, pp. 3276-3293.
- Ol'dekop, E. M. (1911). *On evaporation from the surface of river basins*. Transmission of Meteorological Observatory University of Tartu 4.
- Partal, T., and Kahya, E. (2006). "Trend analysis in Turkish precipitation data." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 2011-2026.
- Pettitt, A. N. (1979). "A non-parametric approach to the change-point problem." *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 126-135.
- Pike, J. G. (1964). "The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate." *Journal of Hydrology*, Vol. 2, No. 2, pp. 116-123.
- Rouge, C., Ge, Y., and Cai, X. (2013). "Detecting gradual and abrupt changes in hydrological records." *Advances in Water Resources*, Vol. 53, pp. 33-44.
- Schreiber, P. (1904). "Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa." *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 10, pp. 441-452.
- Shehadeh, N., and Ananbeh, S. (2013). "The impact of climate change upon winter rainfall." *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 9, pp. 73-81.
- Sunwoo, J. H. (1986). The technical consideration by the Imnam dam construction, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 19, No. 4, pp. 294-302. (In Korean).
- 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.
- Wang, G., Xia, J., and Chen, J. (2009). "Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai river basin in northern China." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 7, WR006768.
- 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, J.-S., and Kim, I.-H. (2013). "Development of drought vulnerability index using delphi method considering climate change and trend analysis in Nakdong river basin." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2245-2254. (In Korean).
- 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.
- Zhang, L., Dawes, W. R., and Walker, G. R. (2001). "Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 701-708.
- Zhang, S., and Lu, X. X. (2009). "Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower Xijiang, China." *Catena*, Vol. 77, No. 2, pp. 130-142.
- 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.
- Zhang, X., Zhang, L., Zhao, J., Rustomji, P., and Hairsine, P. (2008). "Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 8, WR006711.
- Zheng, H., Zhang, L., Zhu, R., Liu, C., Sato, Y., and Fukushima, Y. (2009). "Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of Yellow river basin." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 7, WR006665.