



Quantitative separation of impacting factors to runoff variation using hydrological model and hydrological sensitivity analysis

Kim, Hyeong Bae^a · Kim, Sang Ug^{a*} · Lee, Cheol-Eung^a

^aDepartment of Civil Engineering, Kangwon National University

Paper number: 16-101

Received: 16 December 2016; Revised: 26 January 2017; Accepted: 26 January 2017

Abstract

The variation in runoff due to global climate change and urbanization should be identified quantitatively because these two factors have been significantly accelerated during the last three decades in South Korea. However, only a few research to analyze the impacts due to two factors over different time scales can be found. Therefore, in this study, the hydrological model based approach and the hydrological sensitivity approach were used to separate relative impacts by two factors on monthly, seasonal, and annual time scales at the Soyang River upper basin and the Seom River basin in South Korea. The 3 techniques such as the double mass curve method, the Pettitt's test, and the BCP analysis were performed to detect change point occurred by abrupt change in the collected observed runoff. After detection of change points, SWAT models calibrated on the natural periods were used to calculate the changes due to human activities. Also, 6 Budyko based methods were auxiliary to verify the results from hydrological based approach.

Keywords: Climate change, Human activities, Hydrological sensitivity analysis, Change point

수문모형과 수문학적 민감도분석을 이용한 유량변동 요인의 정량적 분리

김형배^a · 김상욱^{a*} · 이철응^a

^a강원대학교 공과대학 토목공학과

요 지

우리나라는 지난 30년 동안 기후변화 및 도시화 등으로 인한 변화가 급격하게 진행된 바 있으므로, 두 가지 요소들로 인한 유량의 변동량을 정량화하여 분석할 필요가 있다. 그러나 유량의 변동량을 특정 원인으로 구분하여 분석하고자 하는 국내 연구는 매우 미미한 형편이며, 다양한 시간단위를 이용한 원인별 유량 변동량의 산정에 관한 연구는 더욱 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 및 인간활동으로 인한 유량 변동량을 정량적으로 분리하기 위하여 수문모형을 이용한 방법과 수문학적 민감도(hydrological sensitivity) 분석 방법을 소양강 상류유역 및 섬강 유역에 대해 적용하고 유량 변동량의 결과를 월별, 분기별 및 연별로 구분하여 제시하였다. 인간활동으로 인해 발생하는 급진적인 변동점을 탐색하기 위해 이중누가곡선, Pettitt 검정 및 베이지안 변동점(Bayesian change point) 분석을 시행하였으며, 탐색된 변동점을 활용하여 변동점 이전 구간에 대해 보정 및 검증된 SWAT모형과 6가지의 Budyko 곡선 함수들로부터 각각 유량 변동량을 산정하여 수문모형에 의한 유량 변동량을 검증하였다.

핵심용어: 기후변화, 인간활동, 수문학적 민감도 분석, 변동점

1. 서 론

유량자료는 특정 유역 내에서 발생하는 하천정비사업, 보

의 설치, 준설, 도시개발사업 등과 같은 인간의 활동에 의한 변화 및 온도의 증가나 강수의 변화 등과 같은 자연적 요소에 의한 변화를 모두 포함한 결과로 볼 수 있으며, 시·공간적으로 변화된다. 물순환에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위한 기존 연구는 수문학적 요인들과 자연적 요인 및 인위적 요인들 사이의 관계를 규명하는 데 초점을 두고 진행되었다(Pike,

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

1964; Nash and Gleick, 1991; Burn, 1994). 몇몇의 연구에서는 지난 20년 동안의 지구온난화와 관련된 유량의 변동성을 분석하였는데 이러한 연구들은 강수, 기온, 유량의 급진적 혹은 점진적 변화를 규명하는데 있어 지구 온난화로 발생된 기후변화가 수문학적 극치값의 출현 빈도를 점진적으로 증가시키고 있음을 제시한 바 있다(Abdul Aziz and Burn, 2006; Li et al., 2008; Shehadeh and Ananbeh, 2013; Akurut et al., 2014; Li et al., 2016).

기후변화로 인한 변동이 점진적인 반면 인간활동으로 인한 변동은 유량과 같은 수문학적 자료에 급진적인 변동을 발생시킨다. 이와 같은 급진적 변동을 분석하기 위해서는 변동점 탐색이 시행된다. 변동점 탐색은 Pettitt (1979)이 개발한 비모수검정통계량을 이용하는 경우가 많다. Rouge et al. (2013)은 Mann-Kendall 검정과 Pettitt 검정을 이용해서 수문자료에 대하여 점진적 변화(gradual change)와 급진적 변화(abrupt change)를 분석하였다. Odongo et al. (2015)는 케냐의 Naivasha 유역에 대해 수문기상학적 자료에 대한 추세와 변동점을 탐색하는 연구를 진행하였는데, 변동을 탐색하는 방법으로 베이저안 변동점 분석(Bayesian change point), Mann-Kendall 검정, 이중누가곡선(double mass curve)을 이용하여 연평균·최대·최소·분기별 강수와 유량에 대한 연구를 진행한 바 있다.

한편, 본 연구의 주요 주제인 유량분리에 관한 연구는 변동의 원인별 분리를 위한 이론을 제공하는 연구들로 Zhang and Lu (2009)는 Xijiang 유역에 대하여 강수의 변화에 따른 유량 및 유사량의 변동량을 분리하는 연구를 진행하였다. Liu et al. (2010)은 Dongjiang 강 유역에 대하여 인공신경망분석(artificial neural network)을 통해 기후변화와 인간활동에 대한 직접유출량의 변화를 연구하였다. Dooge et al. (1999)은 식생의 변화가 없는 장기간 동안의 유역에서의 유량 변화를 강우-유출모형을 이용해 유량의 민감도를 추정하였다. Li et al. (2007)은 Wuding 강 유역에 대해 강수와 잠재증발산을 이용해 연유량의 민감도를 계산함으로써 유량과 강수사이의 관계를 분석한 바 있다. Seyoum et al. (2015)은 동아프리카 중앙 유역에 대해 통계적 분석 방법인 SPI (Standard Precipitation Index) 분석과 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)모형을 이용해 기후변화와 인간활동의 영향으로부터 발생하는 수문학적 반응을 연구하였다.

수문학적 민감도 분석 방법을 이용한 유량변동량의 산정 연구는 수문학적 민감도 분석의 시행을 위한 기초적인 이론을 제공하는 연구들이다. Koster and Suarez (1999)는 토양수분의 흐름을 단순구조로 파악하고 기초적인 변화를 탐색하는

연구를 수행하였다. Zhang et al. (2001)은 유역 단위에서 식생의 변화에 따른 연평균 증발산의 반응에 연구하였고, 연구결과를 바탕으로 식생계수를 제안하였다. Arora (2002)는 건조지수(aridity index)를 이용해 기후변화로 인해 영향을 받는 연유량을 평가한 바 있다.

그러나 위에서 진행된 바 있는 유량자료의 원인별 정량화와 관련된 연구는 국내 유역에 대해서는 아직 적용된 바가 없으며, 관측된 유량자료의 원인별 변동성분의 분리는 향후 수자원관련 계획의 수립에 주요한 기초적 자료를 제공할 수 있다는 측면에서 연구가 진행될 필요가 있다.

2. 이론적 배경

2.1 유량분리의 개념

특정지점에서의 유량이 기후변화에 대한 변수(C)와 인간활동에 대한 변수(H)에 의해서만 정의될 수 있다고 가정하면, 유량은 Eq. (1)과 같은 함수로 나타낼 수 있다(Zhang et al., 2008; Zheng et al., 2009).

$$Q = f(C, H) \quad (1)$$

여기서, Q 는 유량, C 는 기후변화 요인, H 는 인간활동 요인이다.

기후변화 요인과 인간활동 요인의 상호작용을 배제하면, 두 요인은 서로 독립적인 변수로 가정될 수 있으며(Wang et al., 2009; Jiang et al., 2011), 이러한 가정에 따라 식(1)의 양변을 전미분하면 Eq. (2)와 같이 유량의 변동량 및 변동성분을 정의할 수 있다.

$$\Delta Q = f'_C \Delta C + f'_H \Delta H \quad (2)$$

여기서, ΔQ , ΔC , ΔH 는 유량의 변동량과 기후변화 및 인간활동에 대한 변동량을 나타내며, Eq. (2)에서 $f'_C \Delta C$ 와 $f'_H \Delta H$ 를 ΔQ_C 및 ΔQ_H 로 간략히 표기하면 Eq. (3)과 같다(Zhang et al., 2008).

$$\Delta Q = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (3)$$

여기서, ΔQ_C 는 기후변화로 인한 유량변동량, ΔQ_H 는 인간활동으로 인한 유량변동량이다.

Fig. 1은 Eq. (3)을 이용하여 유량변동량, ΔQ 를 산정하기 위한 개념도이다. Fig. 1에서 ΔQ 는 관측이 시작된 지점부터

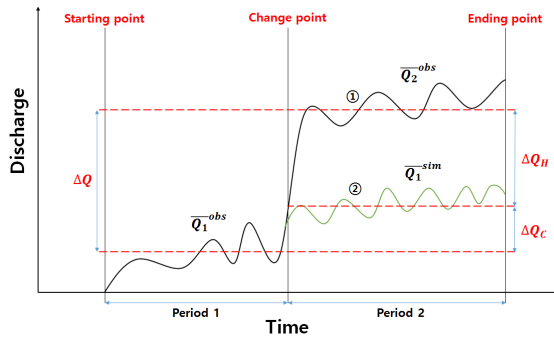


Fig. 1. Concept for runoff separation

특정한 변동이 일어난 변동점까지의 유량 평균값($\overline{Q_1^{obs}}$)과 변동점 이후부터 관측이 끝난 지점까지의 유량 평균값($\overline{Q_2^{obs}}$)의 차로 구할 수 있다. 수문모형을 이용하여 ΔQ_H 을 산정하는 방법은 단계별로 나타내면 다음과 같다.

- Step 1) 특정한 변동점 탐색기법을 이용하여 변동점을 결정하고 이를 기준으로 구간을 분리한다.
- Step 2) 강우-유출모형을 구축하고 Period 1에 대해 모형의 매개변수를 보정한다.
- Step 3) 보정된 매개변수를 이용하여 Period 2에서의 유량을 모의한다.
- Step 4) Period 2에서 관측된 유출시계열의 평균과 모의된 유출시계열의 평균값을 산정하고, 이들의 차이로부터 ΔQ_H 을 산정한다.
- Step 5) 산정된 ΔQ_H 과 ΔQ 로부터 Eq. (3)을 이용하여 ΔQ_C 를 산정한다.

유량을 요인별로 분리하기 위하여 추가적으로 이용될 수 있는 방법인 수문학적 민감도 분석은 물수지 방정식에 Budyko (1974)가 제안한 가정을 적용하여 강수량과 실제 증발산량의 관계를 규명하고, 이로부터 Period 2의 모의유출시계열 ②를 산정하는 방법이다. Budyko 함수로 명명된 특성 함수를 이용하여 Period 2의 모의유출시계열 ②를 구하면 이로부터 ΔQ_C 를 산정할 수 있다. 이 방법은 물수지 방정식을 사용한다는 측면에서 대상 지역의 수문학적 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있어 많은 연구에서 활용되고 있으나, 연 단위 이상의 분석만 가능하고 월 단위 또는 계절별 단위에 대한 분석이 불가능하다는 단점이 있다.

2.2 변동점 탐색 이론

요인별 변동원인의 분석은 유량분리의 기준을 제공한다는

측면에서 매우 중요하게 활용된다. 본 연구에서는 변동점 탐색방법으로 이중누가곡선, Pettitt 검정, 베이지안 변동점 분석방법이 사용되었다. 이중누가곡선은 강수량자료의 일관성을 분석하기 위해 흔히 사용되는 방법이나 분석자의 주관이 반영될 수 있어 본 연구에서는 통계적 방법인 Pettitt검정과 베이지안 변동점 분석을 추가로 활용하여 변동점 분석 결과의 신뢰성을 제고하였다.

Pettitt (1979)에 의해 제안된 Pettitt 검정은 통계적 가설검정을 활용한 비모수적 경향성 분석기법으로 수문학적 자료 또는 기상학적 자료의 변동점을 탐색하기 위하여 흔히 사용된다. Pettitt 검정에서 활용되는 비모수 검정통계량(K_T)은 Eq. (4)와 같으며 비모수 검정통계량 K_T 에 대한 유의확률은 Eq. (6)과 같다(Pettitt, 1979).

$$K_T = \max|U_{t,T}| \tag{4}$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \tag{5}$$

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

베이지안 변동점 분석(Bayesian change point analysis)은 변동점의 위치(location)와 크기(magnitude)를 정량적으로 제시할 수 있는 변동점 분석 방법이다. n 의 길이를 가지는 관측자료 $[x_i]_{i=1}^n$ 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. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i \sim \begin{cases} p_1(x) = p(x_i|\theta_1), & 1 \leq i \leq \tau_1 \\ p_2(x) = p(x_i|\theta_2), & \tau_1 < i \leq \tau_2 \\ \vdots \\ p_n(x) = p(x_i|\theta_n), & \tau_{n-1} < i \leq n \end{cases} \tag{7}$$

여기서, $\theta_1, \dots, \theta_n$ 은 확률밀도 함수에 포함된 모수(parameter)이며, $\tau_1, \dots, \tau_{n-1}$ 는 탐색되어야 하는 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 베이지안 통계기법을 사용하여 변동점 탐색을 위한 사후평균식을 제안하였다. PPM모형의 개념에 따라 b 개의 분리구간에서의 확률 ρ 가 주어진다. 이는 블록 사전밀도(block prior density)라 불리는 $f_{i_j-1, i_j}(\theta_{i_j})$ 형태의 확률밀도 함수를 가지는 $\theta_{i_j} (= \theta_{i_1}, \theta_{i_2}, \dots, \theta_{i_b})$ 가 독립적으로 존재한다는 것이다. Carlin et al. (1992)은 이를 활용해 Eq. (8)과 같은 베이지안 사후확률분포를 구성하였다.

$$f_{i_j}(\theta_j | X_{i_j}) = \frac{f_{i_j}(X_{i_j} | \theta_j) f(\theta_j)}{\int f_{i_j}(X_{i_j} | \theta_j) f(\theta_j) d\theta} \quad (8)$$

Eq. (8)에 포함된 모수는 모수의 개수가 많거나 확률분포가 복잡한 경우 간단히 추정될 수 없으므로, 본 연구에서는 이와 같은 MCMC기법을 이용한 베이지안 기법을 적용하기 위해 Erdman and Emerson (2007)이 개발한 bcp package를 활용하였다.

2.3 유량변동량을 산정하기 위한 SWAT모형의 구축 및 보정방법

본 연구에서는 수문모형을 이용한 유량변동량을 산정하기 위하여 SWAT모형(Soil and Water Assessment Tool)을 이용하였는데, SWAT모형은 Eq. (9)와 같은 물수지 방정식에 의해 유출의 산정이 수행되며, 유량을 정확하게 모의하기 위해서는 모형의 매개변수가 적절히 보정될 필요가 있다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (9)$$

여기서, SW_t 는 최종일의 토양수분양, SW_o 는 초기 토양수분양, R_{day} 는 강수량, Q_{surf} 는 지표유출량, E_a 는 증발산량, Q_{gw} 는 회귀수량, w_{seep} 는 토양면에서 투수층으로 투수되는 총량을 나타낸다.

SWAT모형을 이용하여 유량변동량을 산정하기 위해서는 탐색된 변동점을 기준으로 변동점 이전구간에 대하여 모형의 매개변수를 보정하고 검증한 뒤, 이 매개변수를 사용하여 변동점 이후구간에 대해 모의유량을 생성해야 한다. 본 연구에서는 매개변수의 최적값을 추정하기 위한 도구로 SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Programs)이 제공하는 5가지 알고리즘 중 선행 연구(Yang et al., 2008; Ryu et al., 2012)를 통해 SUFI-2 알고리즘을 사용하여 모형을 보정하였

으며, 보정 및 검증의 정확도를 최적화하기 위한 목적함수로는 NSE (Nash-Sutcliffe Coefficient)를 사용하였다.

2.4 수문학적 민감도 분석을 이용한 유량변동량 산정 방법

수문순환은 물수지방정식으로 나타낼 수 있으며, 물수지방정식을 통해 수문학적 민감도분석(hydrological sensitivity analysis)을 수행하면 기후변화로 인한 유량변동량 산정이 가능하다. 유역 내의 물수지방정식은 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = AET + Q + \Delta S \quad (10)$$

여기서, P 는 강수, AET 는 실제증발산량, Q 는 유량, ΔS 는 토양수분의 변화량을 나타낸다. 이때 장기간의 수문분석에서는 ΔS 를 무시할 수 있으므로 강수는 실제증발산과 유량만의 식으로 나타낼 수 있다.

자연상태 유역에 대한 유출분석을 위해서는 Budyko 곡선이 활용될 수 있는데, Budyko 곡선은 Budyko 가설(Budyko, 1974)에 근거하여 물수지 방정식과 에너지수지방정식에 의해 작성될 수 있다. 물수지방정식으로는 앞서 제시된 Eq. (10)이 사용되며, 에너지수지방정식은 Eq. (11)이 사용된다.

$$N = L \times AET + H + \Delta G \quad (11)$$

여기서, N 은 일정기간동안의 순복사에너지, L 은 일정기간동안의 증발에 대한 잠열, H 는 일정기간동안의 열 플럭스(sensible heat flux), ΔG 는 지표의 열 플럭스 변화를 나타낸다.

물수지방정식에서 ΔS 가 무시할 수 있는 이유와 마찬가지로 ΔG 또한 0의 값을 가진다고 가정될 수 있다. 따라서 Eq. (10)과 Eq. (11)에서 ΔS 와 ΔG 를 제거하고, Arora (2002)가 제안한 $PET = N/L$, $\gamma = H/(L \times AET)$ 의 관계를 Eq. (11)에 대입한 뒤, Eq. (11)을 Eq. (10)으로 나누면 Eq. (12)이 유도된다.

$$\frac{PET}{P} = \frac{AET}{P} + \frac{AET \times \gamma}{P} = \frac{AET}{P} (1 + \gamma) = \phi \quad (12)$$

여기서, PET 는 잠재증발산량, γ 는 Bowen ratio, ϕ 는 건조지수(aridity index)이다.

또한 Bowen ratio는 $r = f(\phi)$ 로 나타낼 수 있으므로(Arora, 2002), Eq. (12)는 식(13)으로 정리될 수 있다. Eq. (13)은 궁극적으로 실제증발산량과 강수량의 관계를 나타내는데, 관측

자료로부터 이 관계를 추정된 함수식을 나타낸 곡선을 Budyko 곡선이라 한다.

$$\frac{AET}{P} = \frac{\phi}{1+f(\phi)} = F(\phi) \tag{13}$$

여기서, $F(\phi)$ 가 Budyko 곡선의 함수식이다. 다만 Budyko 곡선의 함수식은 각각의 함수식에 따라 높은 불확실성이 내포되어 있으므로 본 연구에서는 6가지의 곡선식을 활용하여 연구를 진행하였다. Budyko 곡선 함수는 기상자료(실제증발산 및 강수)를 실측함으로써 다양한 연구자들에 의해 사용 가능한 함수가 제안된 바 있다. 이 중 대표적인 Budyko 곡선 함수는 Schreiber (1904), Ol'dekop (1911), Budyko (1948), Pike (1964), Fu (1981)에 의해 제안된 것으로 이들 함수의 형태는 Table 1과 같다.

Eq. (12)에서 강수량(P)와 잠재증발산량(PET)를 산정할 수 있다면, 건조지수 ϕ 를 산정할 수 있고, 산정된 ϕ 를 Table 1의 5개 Budyko 함수들에 대입하면 Eq. (13)로부터 실제증발산량을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 소양강 상류유역과 섬강 유역에서의 PET 는 Penman-Montheith 방법을 이용하여 추정되었으며, 이를 통해 건조지수 ϕ 를 계산한 이후 Eq. (13)과 5개의 Budyko 곡선 함수로부터 장기간의 실제증발산(AET)량을 계산하였다.

유량의 변화량(ΔQ)은 앞서 제시한 Eq. (10)의 변동을 나타내는 ($\Delta P = \Delta AET + \Delta Q$)로부터 산정될 수 있다. 그러나 수문학적 민감도 분석에 사용되는 변수는 모두 기후변화에 의해서만 변화되는 변수(강수 및 증발산)이므로, 이 식에 포함된 ΔQ 는 기후변화에 의해서만 변동되는 유량인 ΔQ_C 로 가정될 수 있다. 따라서 Eq. (10)로부터 기후변화로 인한 유량의 변동량은 Eq. (14)와 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta Q_C = \Delta P - \Delta AET \tag{14}$$

여기서, ΔQ_C 는 기후변화에 의해서만 변화되는 유량을 의미

하며, ΔP 는 강수의 변화, ΔAET 는 실제증발산량의 변화를 나타낸다.

Koster and Suarez (1999)는 Budyko 곡선 함수와 실제증발산 사이의 관계를 개발하였다. Eq. (13)의 $AET = P \times F(\phi)$ 를 변수 P 와 ϕ 에 대해 전미분하고 미분기호를 Δ 로 바꿔 쓰면 Eq. (15)을 유도할 수 있다. 또한 Eq. (12)의 $\phi = PET/P$ 의 관계를 P 와 PET 에 대해 전미분하고 미분기호를 Δ 로 바꿔 쓰면 Eq. (16)을 유도할 수 있다.

$$d(AET) = F(\phi)dP + PF'(\phi)d\phi \Rightarrow \Delta AET = F(\phi)\Delta P + F'(\phi)\Delta\phi \tag{15}$$

$$d\phi = \frac{1}{P}d(PET) - \frac{PET}{P^2}dP \Rightarrow \Delta\phi = \frac{1}{P}\Delta(PET) - \frac{PET}{P^2}\Delta P \tag{16}$$

Eq. (15)에 Eq. (16)을 대입하면 Eq. (17)이 유도되며, Eq. (14)에 Eq. (17)을 대입하면 Eq. (18)이 유도된다.

$$\Delta AET = [F(\phi) - \phi F'(\phi)]\Delta P + F'(\phi)\Delta PET \tag{17}$$

$$\Delta Q_C = [1 - F(\phi) + \phi F'(\phi)]\Delta P - F'(\phi)\Delta PET = \alpha\Delta P + \beta\Delta PET \tag{18}$$

또한 Eq. (10)에 $AET = P \times F(\phi)$ 을 대입해 정리하면 Eq. (19)로 정리할 수 있으며, Eq. (18)의 양변을 Eq. (19)로 나누고 $P = PET/\phi$ 의 관계를 대입하면 Eq. (20)을 얻을 수 있다.

$$Q = P(1 - F(\phi)) \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_C &= \frac{\Delta P}{P}Q \left(1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}\right) + \frac{\Delta PET}{PET}Q \left(-\frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}\right) \\ &= \varepsilon_P \frac{\Delta P}{P}Q + \varepsilon_{PET} \frac{\Delta PET}{PET}Q \end{aligned} \tag{20}$$

여기서, ε_P 와 ε_{PET} 는 강수와 잠재증발산의 탄성계수(elasticity coefficient)라고 불리며, $\varepsilon_P + \varepsilon_{PET} = 1$ 의 관계를 가진다. 따라서 건조지수가 산정되면 Eq. (20)으로부터 5개의 Budyko 함수에 따른 ε_P 와 ε_{PET} 를 산정할 수 있으며, 측정된 자료로부터 P 와 ΔP 를 계산하고 Penman-Montheith 방법으로부터 PET 와 ΔPET 를 계산하면 기후변화에 의해 변동된 유량(ΔQ_C)을 산정할 수 있다.

한편, Zhang et al. (2001)은 앞에서 제시한 5개의 Budyko

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)	$1 + \phi - (1 + \phi^{2.5})^{1/2.5}$

함수와는 달리 유역 내 식물의 성장조건을 고려한 실제증발산량 산정방법을 개발하였으며, 최근 이 방법을 이용한 다수의 연구가 진행된 바 있다(Zhang et al., 2001, 2004; Li et al., 2007; Liu et al., 2009; Shao et al., 2012). Zhang et al. (2001)이 개발한 관계식은 Eq. (21)과 같다.

$$\frac{AET}{P} = \frac{1 + w(PET/P)}{1 + w(PET/P) + (PET/P)^{-1}} \quad (21)$$

여기서, AET 는 실제증발산량, P 는 강수, PET 는 잠재증발산량, w 는 식물타입에 따른 식생의 이용률 물계수를 의미한다. Li et al. (2007)은 Budyko 곡선 함수와 실제증발산과의 관계식인 Eq. (18)에서 α 와 β 를 추정하기 위하여 Eq. (22)과 Eq. (23)를 제안하였으며, 본 연구에서도 이 식을 이용하여 연구를 수행하였다.

$$\alpha = \frac{1 + 2x + 3wx}{(1 + x + wx^2)^2} \quad (22)$$

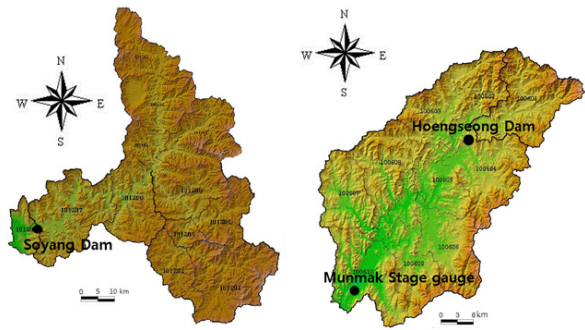
$$\beta = -\frac{1 + 2wx}{(1 + x + wx^2)^2} \quad (23)$$

여기서, w 는 Eq. (21)에서 추정된 식생계수를 의미하며, x 는 연평균건조지수로 PET/P 이다.

3. 연구의 적용

3.1 유역의 선정 및 기초자료 분석

본 연구에서는 인간활동으로 인한 영향을 받았다고 판단

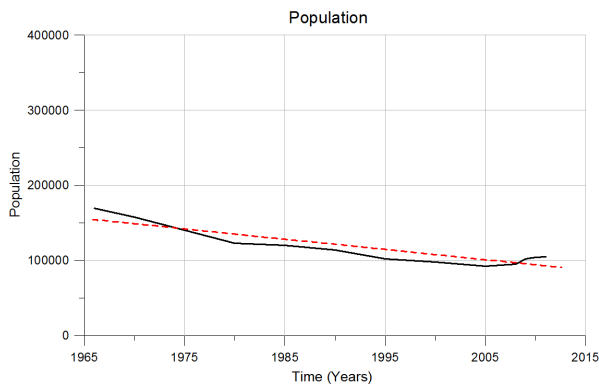


(a) Soyang River upper basin (b) Seom River basin

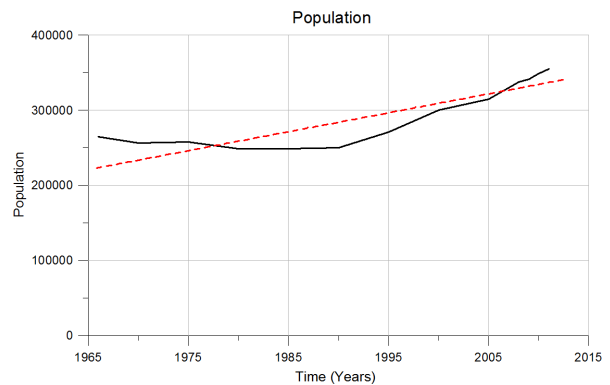
Fig. 2. Selected two basins

할 수 있는 기준으로는 인구의 변화와 불투수층의 변화가 사용되었고, 기후변화의 영향을 받았다고 판단할 수 있는 기준으로는 기온의 변화, 강수량의 변화, 유역 내 유출고의 변화가 이용되었다. 이와 같은 기준들을 사용하여 본 연구에서는 인간활동의 영향을 많이 받았을 것으로 추정되는 유역으로 섬강 유역(유역면적: 1,491.01 km²)을 선정하였고, 기후변화의 영향을 많이 받았을 것으로 추정되는 유역으로는 소양강 상류유역(유역면적: 2783.26 km²)을 선택하였다(Fig. 2).

소양강 상류유역과 섬강 유역의 인구 및 불투수층의 연도별 특성은 Figs. 3 and 4에 나타내었다. 소양강 상류유역의 인구는 38.32%의 감소 추세를 보였고, 불투수층 면적은 98.124%의 증가 추세를 보였다. 한편, 섬강 유역의 경우 인구는 34.11%의 증가 추세를 보였고, 불투수층 면적은 700.45%의 증가 추세를 보였다. 또한 유출고(runoff depth)의 경우 소양강 상류유역은 유출고의 변화가 강수량의 변화와 거의 유사하지만, 섬강 유역은 강수량의 변화에 비해 유출고의 변화가 매우 심하게 발생되었음을 알 수 있었다(Fig. 5). 이와 같은 현상은 2000년 11월에 완공된 황성댐의 유역 출구점에 대한 유량



(a) Soyang River upper basin



(b) Seom River basin

Fig. 3. Population growth

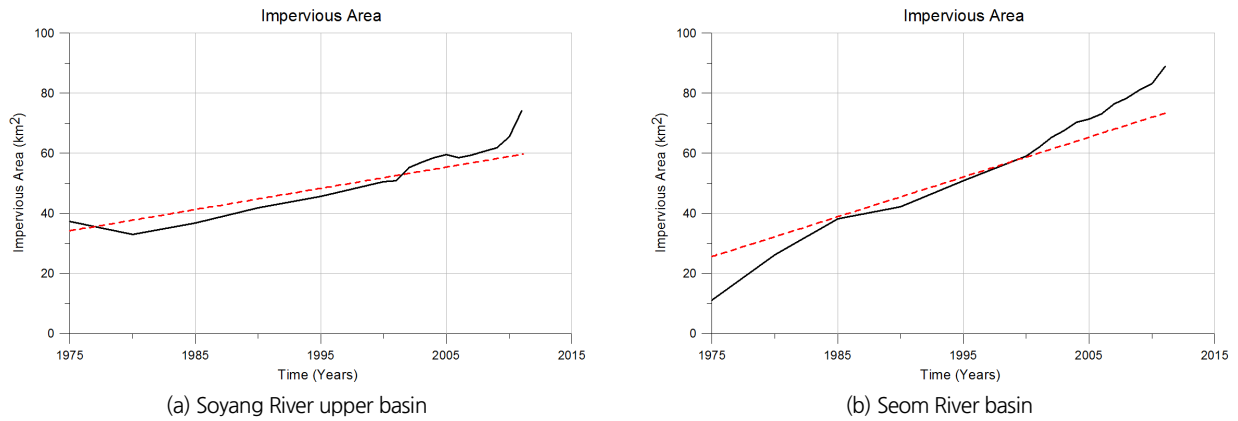


Fig. 4. Change of impervious area

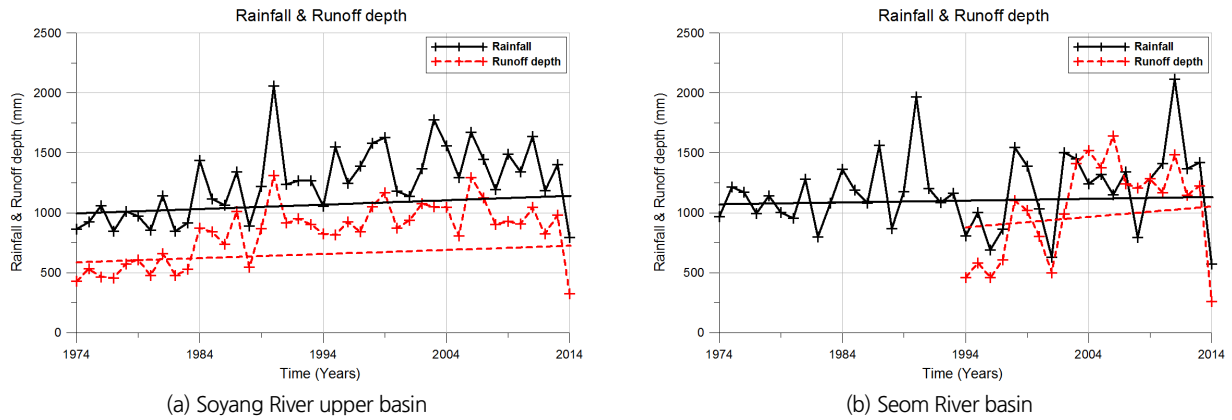


Fig. 5. Rainfall & Runoff depth

의 조절 및 불투수층의 증대로 인해 발생된 것으로 추정된다.

3.2 변동점 탐색 결과

본 연구에서는 변동점 탐색방법을 위하여 이중누가곡선, Pettitt 검정, 베이지안 변동점 분석을 사용하였다. 본 연구에서는 우리나라의 계절적 특성을 이용하여 시기를 1-3월, 4-6월, 7-9월, 10-12월로 구분하였다. 이중누가곡선을 이용하여 변동점을 탐색한 결과, 소양강 상류유역에서는 1~3월의 시기적 구분에서는 1987~1988년 사이에 변동점이 존재할 것으로 추정되며, 4~6월 시기적 구분에서는 1988~1989년 사이에, 7~9월 시기적 구분에서는 1982~1983년 사이에, 마지막 10~12월 시기적 구분에서는 1983~1984년 사이에 변동점이 존재할 것이라고 추정되었다(Fig. 6). 또한 섬강 유역의 이중누가곡선의 결과는 1~3월 시기적 구분에서 2000~2001년 사이에 변동점이 존재할 것으로 추정되며, 4~6월 시기적 구분에서는 2002~2003년 사이에, 7~9월 시기적 구분에서는 2002~2003년 사이에, 10~12월 시기적 구분에서는 2000~2001년

사이에 변동점이 존재할 것이라고 추정되었다(Fig. 7).

두 번째로 Pettitt 검정 결과, 소양강 상류유역의 경우 1~3월 시기적 구분에서는 1988년에서 변동점이 발생하였고, 4~6월 시기적 구분에서는 1989년, 7~9월 시기적 구분에서는 1983년, 10~12월 시기적 구분에서는 1984년에서 유의수준보다 작은 유의확률이 발생되었다. 섬강 유역의 경우 1~3월 시기적 구분에서는 2003년에서 변동점이 발생하였고, 4~6월 시기적 구분에서는 2002년, 7~9월 시기적 구분에서는 2002년, 10~12월 시기적 구분에서는 2001년에서 유의수준보다 작은 유의확률이 발생되었다(Tables 2 and 3).

마지막으로 베이지안 분석 방법결과, 소양강 상류유역의 경우 1~3월 시기적 구분에서는 1988년에 변동점이 발생하였고, 4~6월 시기적 구분에서는 1989년, 7~9월 시기적 구분에서는 1983년, 10~12월 시기적 구분에서는 1984년에 변동점이 발생하였다. 또한 섬강유역의 경우 1~3월 시기적 구분에서는 2001년에 변동점이 발생하였고, 4~6월 시기적 구분에서는 2003년, 7~9월 시기적 구분에서는 2002년, 10~12월 시기적

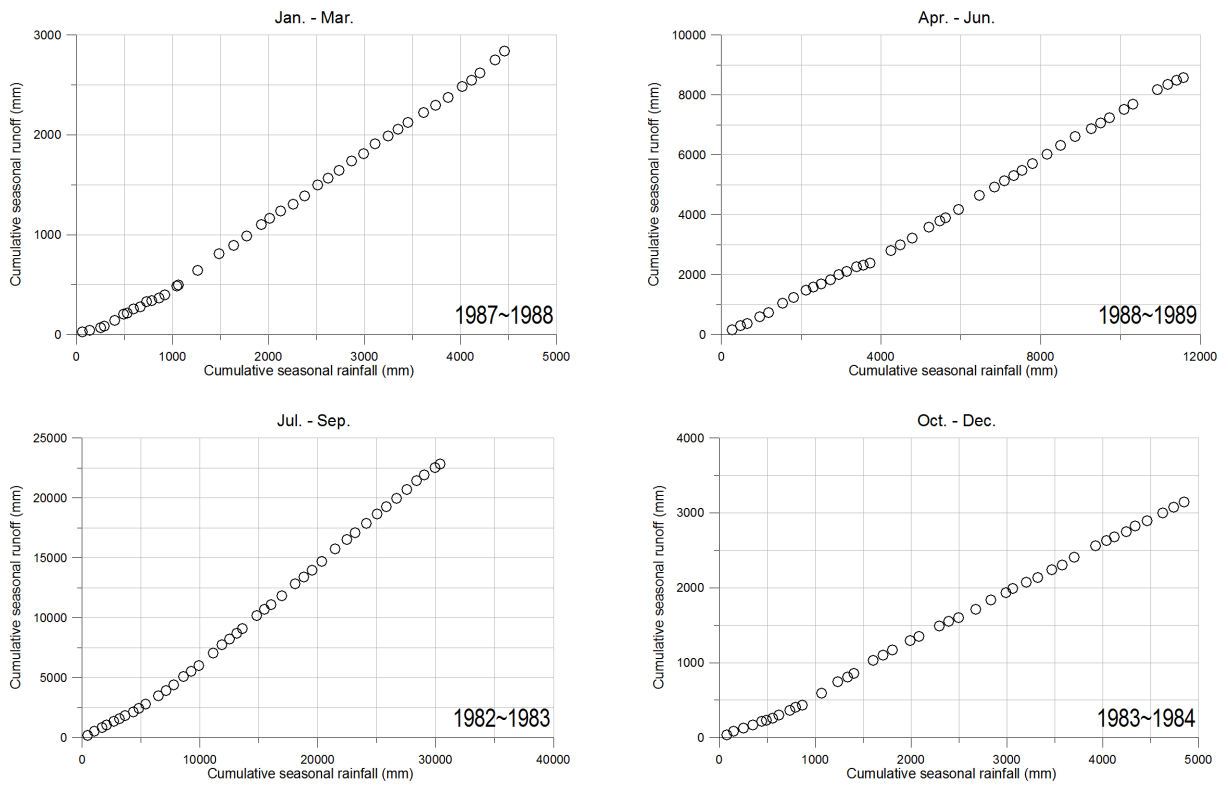


Fig. 6. Results of double mass curve: Soyang River upper basin

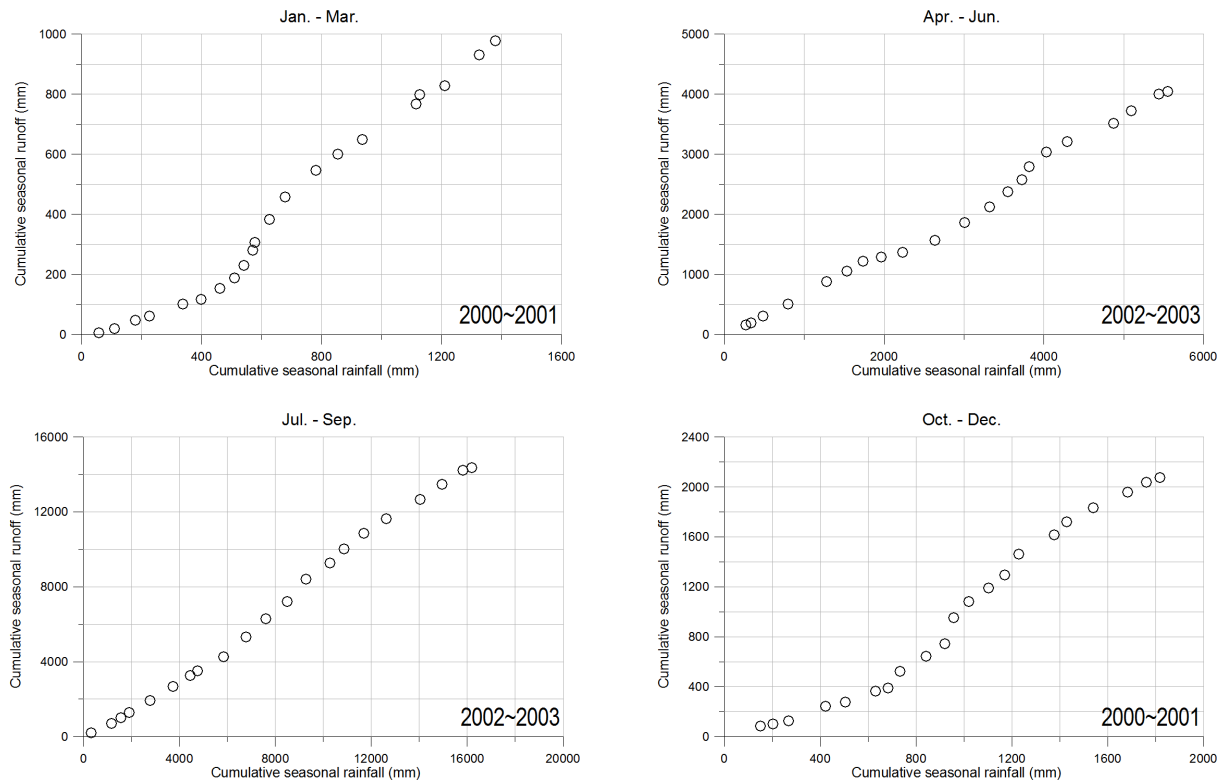


Fig. 7. Results of double mass curve: Seom River basin

구분에서는 2001년에 변동점이 발생하였다(Figs. 8 and 9). 세 가지의 변동점 탐색방법을 수행한 후, 각각의 분석방법

을 종합적으로 판단하여 최종적으로 선정된 변동점 결과는 Table 4와 같다. 소양강 상류유역은 1~3월 시기적 구분에서는

Table 2. Results of pettitt test: Soyang River upper basin

Season	Soyang River upper basin		
	<i>p</i> -value	Significance level	Change point
Jan. ~ Mar.	0.0000400	0.050	1988년
Apr. ~ Jun.	0.0149700	0.050	1989년
Jul. ~ Sep.	0.0007765	0.050	1983년
Oct. ~ Dec.	0.0005108	0.050	1984년

Table 3. Results of pettitt test: Seom River basin

Season	Seom River basin		
	<i>p</i> -value	Significance level	Change point
Jan. ~ Mar.	0.0206400	0.050	2003년
Apr. ~ Jun.	0.0218560	0.050	2002년
Jul. ~ Sep.	0.0133500	0.050	2002년
Oct. ~ Dec.	0.0362000	0.050	2001년

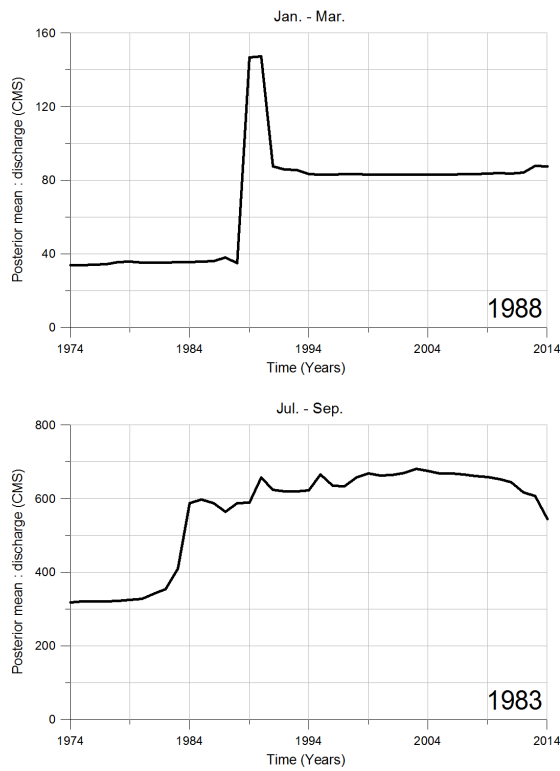


Fig. 8. Results of BCP: Soyang River upper basin

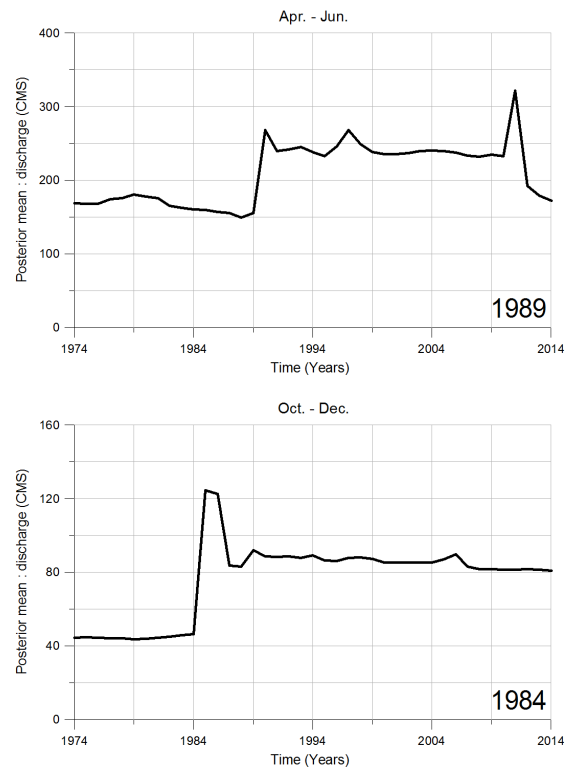
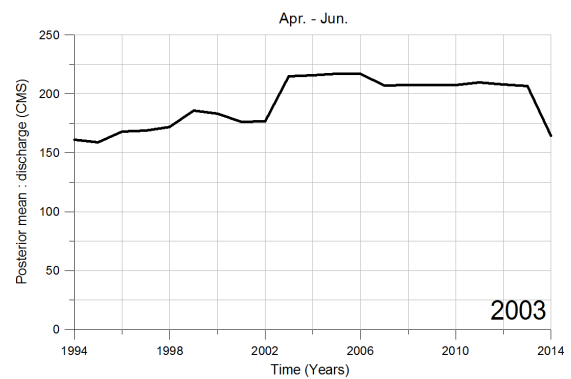
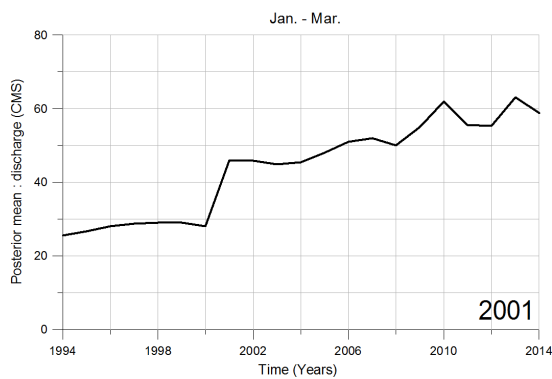


Fig. 9. Results of BCP: Seom River basin



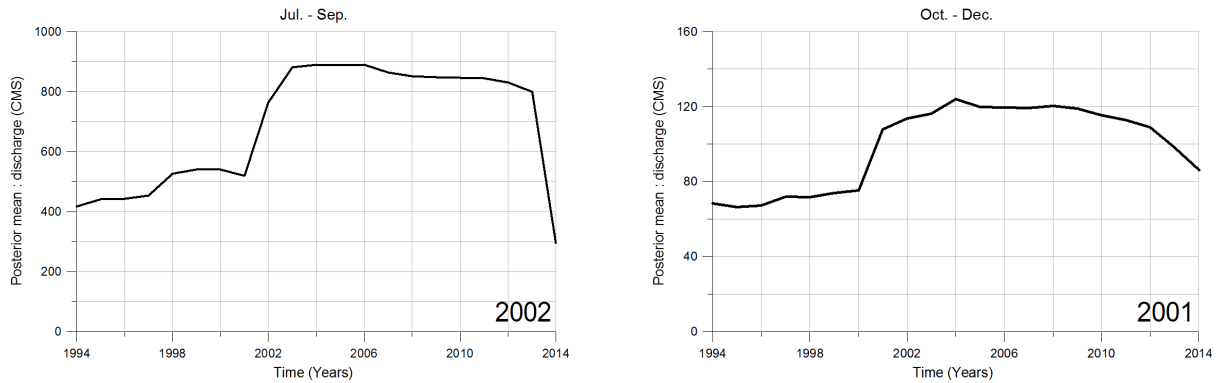


Fig. 9. Results of BCP: Seom River basin (Continue)

Table 4. Determination of final change points in two selected basins

Season	Final change point	
	Soyang River upper basin	Seom River basin
Jan. ~ Mar.	1988	2001
Apr. ~ Jun.	1989	2003
Jul. ~ Sep.	1983	2002
Oct. ~ Dec.	1984	2001

1988년, 4~6월 시기적 구분에서는 1989년, 7~9월 시기적 구분에서는 1983년, 10~12월 시기적 구분에서는 1984년으로 결정되었다. 또한 섬강 유역의 경우는 1~3월 시기적 구분에서 2001년, 4~6월 시기적 구분에서는 2003년, 7~9월 시기적 구분에서는 2002년, 10~12월 시기적 구분에서는 2001년으로 결정되었다. 특히 본 연구에서는 두 개 이상의 변동점이 발생하는 경우에도 가장 큰 변동점 1개만을 활용하여 연구를 수행하였다.

3.3 수문모형을 이용한 유량변동량 산정 결과

본 연구에서는 SWAT 모형을 활용해 모의유량을 생성하였으며, SWAT-CUP과 NSE를 이용하여 모의에 필요한 매개변수를 보정하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각 소양강 상류유역과 섬강 유역에 대한 보정 및 검증 결과를 나타낸 것이다. 해당 기간에 대한 NSE 값은 1~6월의 시기적 구분에서 보정은 0.71, 검증은 0.62로 계산되었고 7~12월 시기적 구분에서 보정은 0.67, 검증은 0.64로 계산되었다. 섬강 유역의 경우는 시기적 구분 없이 보정연도를 1997~1999년으로 선택하였고, 검증연도는 1994~1995년으로 선택하였다. NSE 값은 보정은 0.68, 검증은 0.71로 계산되었다.

본 연구에서 분석된 변동점, 모의유량 및 해당 자료에 대한 보정과 검증 결과를 활용해 인간활동에 의해 변화되어진 유량의 변동량을 월별, 분기별, 연총량으로 산정하면 Tables 5 and

6과 같이 나타낼 수 있다. 소양강 상류유역은 1월, 4월, 12월, 4분기를 제외한 모든 구간에서 기후변화로 인한 유량변동량이 인간활동에 대한 유량변동량보다 큰 것으로 측정되었다. 섬강 유역은 3월, 5월, 6월, 9월, 2분기를 제외한 모든 구간에서 인간활동에 대한 유량변동량이 기후변화에 대한 유량변동량보다 큰 값으로 산정되었다. 유역 출구점에 소양강 댐이 있는 소양강 상류유역과는 달리 섬강 유역은 유역 내에 유량을 조절하는 횡성댐이 존재하기 때문에 유역 출구점에서 관측된 유입량은 댐 방류량에 큰 영향을 받는다. 따라서 섬강 유역은 기후변화에 대한 유량변동량 보다 인간활동에 대한 유량변동량이 크게 산정되는 구간이 발생되었다.

3.4 수문학적 민감도 기법을 이용한 유량변동량 산정 결과

본 연구에서는 앞에서 제시된 5가지의 Budyko 곡선 함수 및 Zhang의 방법으로 기후변화로 인한 연단위의 유량변동량을 산정하였다(Tables 7 and 8). 6가지 방법 중 Budyko (1948)가 제안한 Method 3이 가장 큰 값을 산정하였고, Zhang (2001)이 제안한 Method 6이 가장 작은 값을 산정하였으나, 두 방법의 차이는 약 55 mm로 큰 차이를 보이지는 않았다.

또한 섬강 유역에서 Budyko 방법을 적용한 결과 Method 1의 기후변화로 인한 유량변동량은 55.6 mm, Method 2에서는 59.7 mm, Method 3에서는 63.7 mm, Method 4에서는 57.7 mm, Method 5에서는 56.8 mm, Zhang (2001)의 방법을 이용한 기후변화에 대한 유량변동량은 53.1 mm로 산정되었다. Zhang (2001)이 제안한 방법이 가장 작은 값을 나타냄을 확인할 수 있었으며, 두 방법의 차이는 약 11 mm로 역시 큰 차이를 보이지는 않았다. 따라서 수문학적 민감도 기법을 이용하여 산정된 기후변화로 인한 유량변동량은 적절히 산정되었다고 판단될 수 있으나, 연구의 정확도를 향상시키기 위해서는 항

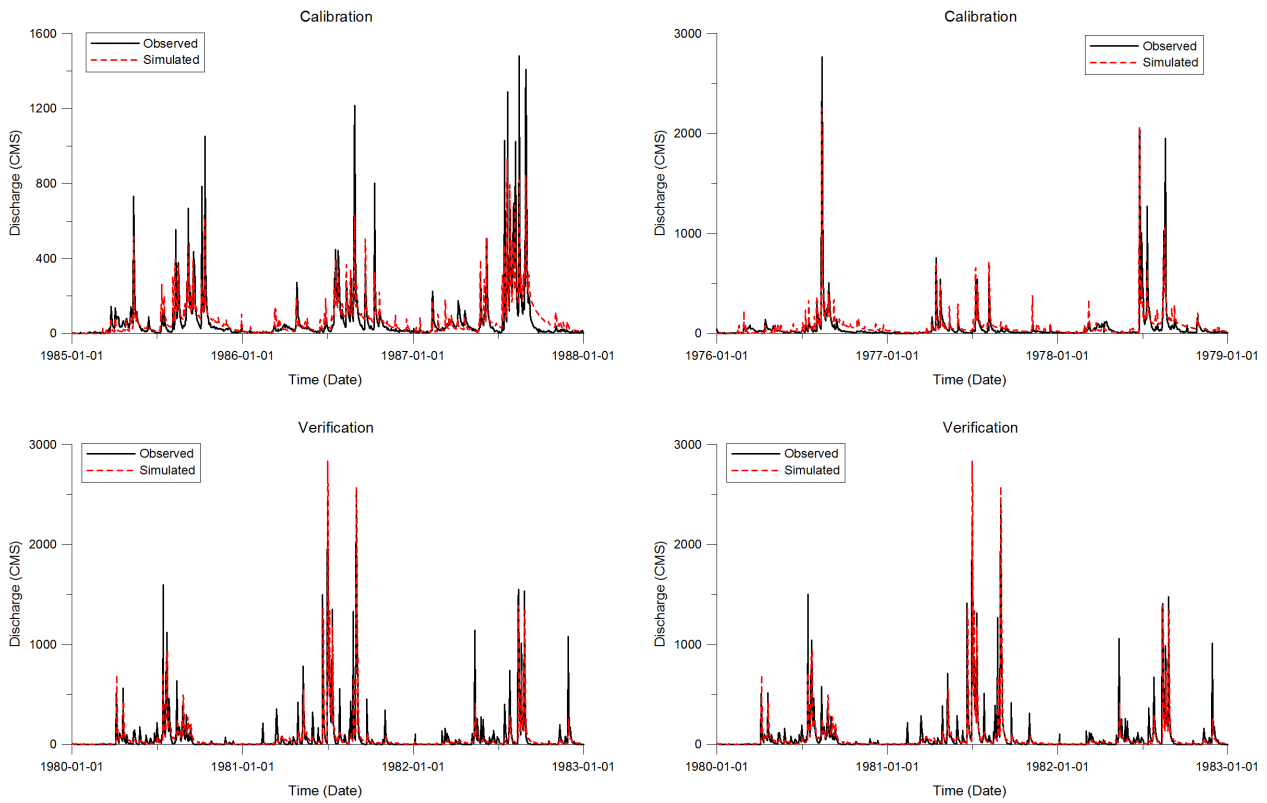


Fig. 10. Calibration and verification: Soyang River upper basin

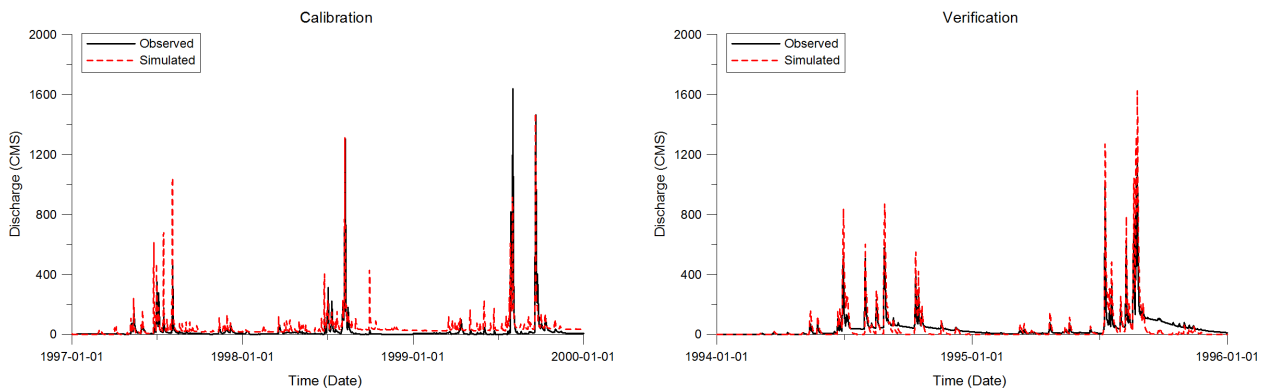


Fig. 11. Calibration and verification: Seom River basin

Table 5. Results of runoff variation by SWAT model: Soyang River upper basin

Time	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	P1	P2	P3	P4	Year
ΔQ (mm)	17.0	17.2	22.1	2.6	30.5	66.1	164.8	103.3	87.3	25.8	15.2	9.4	56.4	99.1	355.4	50.4	526.0
ΔQ_H (mm)	9.6	8.0	5.6	7.3	-2.1	24.1	55.7	47.3	27.7	11.1	7.0	7.7	23.2	29.3	130.7	25.8	201.3
ΔQ_C (mm)	7.4	9.3	16.5	-4.7	32.6	42.0	109.1	56.0	59.7	14.7	8.1	1.8	33.1	69.9	224.7	24.6	324.7
Factor	H	C	C	H	C	C	C	C	C	C	C	H	C	C	C	H	C

Table 6. Result of runoff variation by SWAT model: Seom River basin

Time	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	P1	P2	P3	P4	Year
ΔQ (mm)	2.8	6.2	5.1	8.3	17.4	6.7	111.8	4.4	51.0	8.4	5.1	7.0	14.1	32.3	167.2	20.5	214.0
ΔQ_H (mm)	8.5	13.5	-2.2	5.0	4.2	-0.9	74.3	6.9	12.4	17.9	8.2	13.5	19.8	8.3	93.6	39.6	150.6
ΔQ_C (mm)	-5.7	-7.3	7.3	3.2	13.2	7.6	37.5	-2.5	38.6	-9.5	-3.1	-6.6	-5.6	24.0	73.5	-19.1	63.4
Factor	H	H	C	H	C	C	H	H	C	H	H	H	H	C	H	H	H

Table 7. Results of runoff variation by hydrological sensitivity method: Soyang River upper basin

Methods	$F(\phi)$	$F'(\phi)$	ϵ_P	ϵ_{PET}	ΔQ_C (mm)
Method 1: Schreiber (1904)	0.4876	0.5123	1.2482	-0.7479	347.6453
Method 2: Ol'dekop (1911)	0.6047	0.6317	1.5475	-1.1956	373.8198
Method 3: Budyko (1948)	0.5430	0.9955	1.8378	-1.6296	399.1956
Method 4: Pike (1964)	0.5558	0.5743	1.3949	-0.9674	360.4750
Method 5: Fu (1981)	0.5359	0.5463	1.3370	-0.8807	355.4085
Method 6: Zhang (2001) ($w=0.7$)	α		β		343.2433
	1.1307		-0.6523		

Table 8. Result of runoff variation by hydrological sensitivity method: Seom River basin

Methods	$F(\phi)$	$F'(\phi)$	ϵ_P	ϵ_{PET}	ΔQ_C (mm)
Method 1: Schreiber (1904)	0.5001	0.4998	1.5909	-0.9394	55.6150
Method 2: Ol'dekop (1911)	0.6200	0.6049	1.9765	-1.4955	59.7848
Method 3: Budyko (1948)	0.5568	0.9512	2.3378	-2.0166	63.6921
Method 4: Pike (1964)	0.5698	0.5549	1.7798	-1.2119	57.6582
Method 5: Fu (1981)	0.5492	0.5282	1.7028	-1.1008	56.8252
Method 6: Zhang (2001) ($w=0.7$)	α		β		53.1332
	1.2096		-0.8329		

후 국내에 적절한 Budyko 곡선 함수식을 새로 개발할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

4. 유역별 비교 및 수문모형을 이용한 기법의 타당성 검증

소양강 상류유역에서 SWAT모형을 이용하여 산정된 인간활동으로 인한 유량변동량 비율은 38.3%로 분석되었으며, 수문학적 민감도 분석(Method 1~6)을 이용하여 산정된 인간활동으로 인한 유량변동량의 비율은 평균적으로 보았을 때, 소양강댐 상류유역은 인간활동으로 인한 영향이 32.0%로 분석되었으며, 기후변화로 인한 영향은 68.0%로 분석되었다(Table 9). 또한 섬강유역에서 SWAT모형을 이용하여

산정된 인간활동으로 인한 유량변동량 비율은 70.4%로 분석되었으며, 수문학적 민감도 분석(Method 1~6)을 이용하여 산정된 인간활동으로 인한 유량변동량의 비율은 평균적으로 보았을 때, 섬강유역은 인간활동으로 인한 영향이 72.6%로 분석되었으며, 기후변화로 인한 영향은 24.8%로 분석되었다(Table 10). 특히 소양강 상류유역과 섬강유역 모두에서 수문모형을 이용한 기법과 수문학적 민감도 분석을 이용한 기법의 연단위 분석 결과의 차이가 크지 않음을 알 수 있었으며, 이로부터 3.3절에서 분석된 수문모형을 이용한 월별 및 계절별 분석결과가 타당성이 있다고 판단할 수 있었다.

본 연구에서 수행된 수문모형을 이용한 연단위 분석결과를 총괄적으로 나타내기 위하여 강우량의 평균적 변화와 유출고의 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 소양강 유역은 변동점인 1983년을 중심으로 32년 동안 347.0 mm의 강우량이 증가되

Table 9. Comparative results between two approaches: Soyang river upper basin

Soyang river upper basin (mm)					
Items	ΔQ	ΔQ_H	ΔQ_C	ΔQ_H (%)	ΔQ_C (%)
Hydrological modeling	526.0	201.3	324.7	38.3	61.7
Method 1: (Schreiber 1904)	526.0	178.3	347.6	33.9	66.1
Method 2: (Ol'dekop 1911)	526.0	152.1	373.8	28.9	71.1
Method 3: (Budyko 1948)	526.0	126.8	399.2	24.1	75.9
Method 4: (Pike 1964)	526.0	165.5	360.5	31.5	68.5
Method 5: (Fu 1981)	526.0	170.6	355.4	32.4	67.6
Method 6: (Zhang 2001)	526.0	182.8	343.2	34.7	65.3

Table 10. Comparative results between two approaches: Seom river basin

Seom river basin (mm)					
	ΔQ	ΔQ_H	ΔQ_C	ΔQ_H (%)	ΔQ_C (%)
Hydrological modeling	214.0	150.6	63.4	70.4	29.6
Method 1: (Schreiber 1904)	214.0	158.4	55.6	74.0	26.0
Method 2: (Ol'dekop 1911)	214.0	154.3	59.8	72.1	27.9
Method 3: (Budyko 1948)	214.0	150.4	63.7	70.2	29.8
Method 4: (Pike 1964)	214.0	156.4	57.7	73.1	26.9
Method 5: (Fu 1981)	214.0	157.2	56.8	73.5	26.5
Method 6: (Zhang 2001)	214.0	160.9	53.1	75.2	24.8

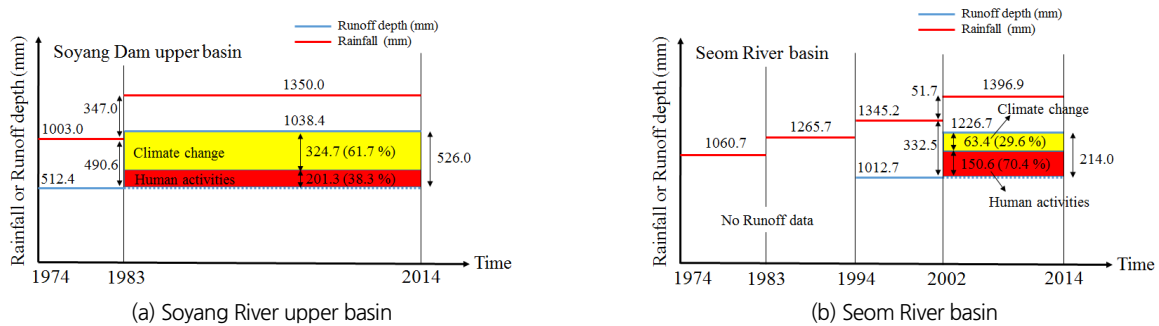


Fig. 12. Runoff variation of human activities and climate change

었으며, 유출고는 490.6 mm가 증가되었다. 또한 변동점 이후 기간에 대한 요인별 정량적 분리결과로부터 강우 증가분의 대부분이 유출고의 증가(61.7%)에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 한편, 섬강유역은 분석기간 시점인 1994년부터 변동점인 2002년을 기준으로 13년 동안 51.7 mm의 강우량이 증가되었으며, 유출고는 332.5 mm가 증가되었다. 이와 같이 유출고의 증가가 강우량의 증가보다 크게 나타난 이유는 강우량의 증가분에 따른 유출고의 증가와 함께 황성댐의 유량 조절 및 섬강유역의 불투수층 증대로 인해 추가적인 유출이 발생되었기 때문으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 관측된 유량의 변동량에 영향을 미치는 요인을 기후변화 및 인간활동 요인으로 구분하고, 각각의 영향 인자가 유량의 변동에 미치는 영향을 정량화하여 분리하기 위한 연구를 수행하였으며, 특히 월별, 계절별 및 연별 시간단위로 분석 시기를 구분함으로써 효과적인 수자원 계획 수립을 위한 기초자료를 제공하도록 하였다. 분석을 위한 대상 유역으로 소양강 상류유역과 섬강 유역을 대상유역으로 선정하였다. 강수 및 온도와 같은 기상학적 자료는 두 유역에서 매우 비슷한 양상을 보였으나 섬강 유역에서는 분석기간 동안 인구

및 불투수층 증대가 소양강 상류유역에 비해 심하게 증가됨을 파악할 수 있었다. 본 연구에서는 수문모형을 이용한 유량 변동량의 요인별 정량화 결과에 대한 타당성을 증명하기 위하여 수문학적 민감도 분석 방법의 결과를 별도로 사용하였다. 수문학적 민감도 분석은 Budyko 곡선을 나타내는 다양한 함수에 의해 시행될 수 있는데, 본 연구에서는 6가지의 Budyko 곡선 함수들을 이용한 결과를 각각 도출하였으며, 이를 통해 최종적으로 인간활동으로 인한 유량변동량과 기후변화로 인한 유량변동량을 정량적으로 구분하였다. 두 가지 기법의 최종적인 비교 결과, 두 유역에 대한 분석결과 수문모형을 이용한 방법의 결과와 6개의 수문학적 민감도 분석 방법의 결과들이 유사하게 나타나 수문모형을 이용한 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

이와 같은 연구 결과는 객관성 있는 유역별 자연유량의 산정을 통해 수자원 장기계획 및 하천기본계획의 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시된 연구 방법은 최근 시행되고 있는 저영향개발기법의 적용에 있어서도 도시화나 댐 개발 등이 유역의 유량변동에 미친 영향을 정량적으로 파악할 수 있다는 점에서 저영향개발기법의 우선순위 결정에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2014년 교육부 재원을 한국연구재단을 통한 기초 연구사업(NRF-2014R1A1A2053328) 및 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(D1000962-01-01, 520160450)에 의해 수행되었습니다.

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.
- 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.
- Dooge, J. C. I., Bruen, M., and Parmentier, B. (1999). "A simple model for estimating the sensitivity of runoff to long-term changes in precipitation without a change in vegetation." *Advances in Water Resources*, Vol. 23, No. 2, pp.153-163.
- 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. (In Chinese with abstract in English).
- 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.
- 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.
- 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, L. J., Zhang, L., Wang, H., Wang, J., Yang, J. W., Jiang, D. J., Li, J. Y., and Qin, D. Y. (2007). "Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China." *Hydrological Processes*, Vol. 21, No. 25, pp. 3485-3491.
- 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.
- 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.
- Liu, Q., Yang, Z., Cui, B., and Sun, T. (2009). "Temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climatic variability and vegetation changes in the Yiluo River basin, China." *Hydrological Processes*, Vol. 23, No. 21, pp. 3030-3039.
- 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.
- 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. *Trans. Meteorol, Obs. Univ. Tartu* 4.
- 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
- Ryu, J. C., Kang, H. W., Choi, J. H., Gong, D. S., Gum, D. H., Jang, C. H., and Lim, G. J. (2012). "Application of SWAT-CUP for streamflow auto-calibration at Soyang-gang Dam watershed." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 28, No. 3, pp. 347-358.
- 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.
- Seyoum, W. M., Milewski, A. M., and Durham, M. C. (2015). "Understanding the relative impacts of natural processes and human activities on the hydrology of the Central Rift Valley lakes, East Africa." *Hydrological processes*, Vol. 29, No. 19, pp. 4312-4324.
- Shao, Q., Traylen, A., and Zhang, L. (2012). "Nonparametric method for estimating the effects of climatic and catchment characteristics on mean annual evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 3, WR009610.
- Shehadeh, N., and Ananbeh, S. (2013). "The impact of climate change upon winter rainfall." *American Journal of Environmental Sciences*. Vol. 9, pp. 73-81.
- 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.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., Xia, J., and Yang, H. (2008). "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China." *Journal of Hydrology*, Vol. 358, No. 1-2, pp. 1-23.
- 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, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W., and Briggs, P. R. (2004). "A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 2, WR002710.
- 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., 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.