J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 57, No. 4 (2024), pp. 237-248
doi: 10.3741/JKWRA.2024.57.4.237
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Assessment of the impact of climate variability on runoff change of middle-sized watersheds in Korea using Budyko hypothesis-based equation

Oh, Mi Ju[a] · Hong, Dahee[b] · Lim, Kyung Jin[c] · Kwon, Hyun-Han[d] · Kim, Tae-Woong[e]*

[a]Master Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea
[b]Master Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea
[b]Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea
[c]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea
[d]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Paper number: 23-101
Received: 22 December 2023; Revised: 21 March 2024; Accepted: 22 March 2024

Abstract

Watershed runoff that is an important component of the hydrological processes has been significantly altered by climate variability and human activities in many watersheds around the world. It is important to investigate the impacts of climate variability and human activities on watershed runoff change for water resource management. In this study, using watershed runoff data for 109 middle-sized watersheds in Korea, the impacts of climate variability and human activities on watershed runoff change were quantitatively evaluated. Using the Pittitt test, the analysis period was divided into two sub-periods, and the impacts of climate variability and human activities on the watershed runoff change were quantified using the Budyko hypothesis-based climate elasticity method. The overall results indicated that the relative contribution of climate variability and human activities to the watershed runoff change varied by middle-sized watersheds, and the dominant factors on the watershed runoff change were identified for each watershed among climate variability and human activities. The results of this study enable us to predict the watershed runoff change considering climate variability and watershed development plans, which provides useful information for establishing a water resource management plan to reduce the risk of hydrological disasters such as drought or flood.

Keywords: Climate variability, Human activities, Budyko hypothesis, Pettitt test

Budyko 가설 기반 기후 탄력성을 고려한 기후변동이 우리나라 중권역 유출량 변화에 미치는 영향 평가

오미주[a] · 홍다희[b] · 임경진[c] · 권현한[d] · 김태웅[e]*

[a]한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정, [b]한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정,
[c]한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정, [d]세종대학교 건설환경공학과 교수, [e]한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

요 지

수문 순환의 중요한 구성 요소인 유역 유출량은 기후변동과 인간 활동의 영향으로 전 세계 많은 유역에서 크게 변화되고 있다. 기후변동과 인간 활동으로 변화되고 있는 유역 유출량에 대한 분석은 수자원 관리에 있어서 중요하다. 본 연구에서는 우리나라 5개 권역의 109개 중권역의 유출량 자료를 대상으로 기후변동과 인간 활동이 유역 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 유역 유출량 자료에 대하여 Pettitt 검정을 수행하여 분석 기간을 나누었으며, Budyko 기반 기후 탄력성 방법을 이용하여 기후변동과 인간 활동이 유역 유출량의 변화에 미치는 영향을 구분하였다. 본 연구 결과, 중권역마다 유역 유출량 변화에 기후변동과 인간 활동이 미치는 상대적인 기여도가 다양하게 나타났으며, 중권역별로 유역 유출량의 변화에 지배적인 영향을 주는 요인이 무엇인지 파악하였다. 본 연구의 결과는 기후변동과 유역 개발 계획에 따른 유역 유출량 변화를 예측할 수 있도록 하며, 이는 가뭄이나 홍수 등 수문 재해의 위험을 줄이기 위한 수자원 관리 계획을 수립하는데 중요한 정보가 될 것이다.

핵심용어: 유출량, 기후변동, 인간 활동, Budyko 가설, Pettitt 검정

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-400-5184
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (Kim, Tae-Woong)

© 2024 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

유출량은 수문 순환의 중요한 구성 요소이며, 물을 이용하는 농업, 산업 및 일상생활에서 중요한 역할을 한다. 그러나 전 세계적으로 많은 유역에서 유출량의 상당한 변화가 감지되고 있으며, 이러한 변화는 기후변화와 인간 활동에 의해 영향을 받는 것으로 분석되고 있다(Jiang *et al*., 2015). Walling and Fang (2003)은 전 세계 145개 대하천 중 약 31%가 수십 년 동안 기후변화와 인간 활동으로 인해 연간 유출량이 통계적으로 유의하게 증가(9%) 또는 감소(22%)하는 경향을 발견하였다. 또한 중국 남부 동진강 유역의 경우, 기후변화로 인해 0.38℃의 온도 상승이 나타났으며, 이러한 온도 상승은 유역의 유출량에도 영향을 미칠 수 있다(Zhou *et al*., 2018). 우리나라도 지난 수 십 년 동안 기후변화 및 도시화 등으로 인한 변화가 급격하게 진행되었다(Kim *et al*., 2017). 기후변화는 기온과 강수량과 같은 기상 인자가 장기간 지속되는 변화이며, 유출량에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있다. 최근 수십 년 동안의 기후변화는 온실가스 배출 증가와 같은 인간이 유발한 기후변화와 자연적으로 유발된 기후변동이 결합된 형태이다(Wu *et al*., 2017). 또한, 유출량은 토지 피복의 변화, 댐 및 제방 건설, 도시화, 농업 패턴의 변화 및 삼림 벌채 등과 같은 인간 활동과도 밀접한 관련이 있다. 따라서 기후변화와 인간 활동으로 인한 유출량의 변화는 수자원 분야에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 유출량의 변화는 하천 관리를 어렵게 하여 홍수와 가뭄의 위험성을 증가시킨다. 이에 따라 지난 수십 년 동안 유량 및 유출량에 대한 기후변화 및 인간 활동의 기여도를 정량적으로 평가하는 연구가 증가하고 있다. 우리나라는 관측 유량 자료가 많지 않아서 장기 유출분석 자료가 활용되고 있다(Kim *et al*., 2020). 국가수자원관리종합정보시스템(Water Resources Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 분산형 강우-유출 모형(Precipitation Runoff Modeling System, PRMS)에 의한 모의 유출량은 우리나라의 유출특성을 평가하는 데 주로 사용되고 있다(Kim *et al*., 2020). 따라서 본 연구에서 유출량 변화에 미치는 기후변화와 인간 활동의 영향을 분석하는데 PRMS 유출량 자료를 이용하였다.

하천 유량 및 유역 유출량 변화에 대한 기후변화와 인간 활동을 정량적으로 평가하는 연구 사례들이 늘어가고 있다(Sun *et al*., 2013; Bai *et al*., 2014; Shahid *et al*., 2018; Liu *et al*., 2020). Sun *et al*. (2013)은 중국 Poyang 강의 유량 변화의 주요 원인을 파악하기 위해 기후 탄력성 방법을 이용하였으며, 1961~2000년까지의 유량 변화의 59% 이상이 강수량의 증가에 의한 것이라고 밝혔다. Bai *et al*. (2014)은 기후변화와 인간 활동이 중국 Qinhe 강의 유량 감소에 미치는 영향을 평가하기 위해 Budyko 가설 기반 기후탄력성 방법을 이용하였다. 그 결과 기후변화가 하천 유량 감소의 약 54%를 차지하는 것을 확인하였다. Shahid *et al*. (2018)은 파키스탄 Soan 강 유역의 유출량 변화에 대한 기후변화와 토지 이용 변화의 상대적 기여도를 평가하였으며, 1983~2012년까지의 유출량 자료를 분석한 결과, 연간 유출량의 감소에서 기후변화가 68%를 차지하는 것을 확인하였다. Liu *et al*. (2020)은 중국 Lancang 강 유역의 유출량은 심각한 감소 추세를 보였으며, 이러한 유출량 감소에 기후변화, 인간 활동, 그리고 잠재적 증발산량이 각각 46%, 40%, 14% 기여한 것으로 분석하였다.

국내에서도 기후변화와 인간 활동을 평가한 여러 연구들이 있다(Kim *et al*., 2017; Shah *et al*., 2022; Oh *et al*., 2023). Kim *et al*. (2017)은 소양강 상류 및 섬강 유역을 대상으로 기후변화와 인간 활동으로 인한 유량 변화를 정량적으로 분석하였다. 유량 변화의 변동점을 감지하기 위해 Pettitt 검정을 사용하였으며, 탄력성 분석 방법인 Budyko 함수를 사용하였다. 그 결과, 섬강 유역에서는 인간 활동이 소양강 상류 유역보다 더 큰 영향을 보이는 것을 확인하였다. Shah *et al*. (2022)은 우리나라 한강 유역을 남한강, 북한강, 한강하류로 나누어 기후변화와 인간 활동이 유량에 미치는 영향을 평가하였으며, 기후 탄력성 접근법인 Budyko 프레임워크를 이용하여 유량에 대한 정량적 기여도를 평가하였다. 그 결과, 과거 기간(1973~2017) 동안 남한강과 북한강에서 유량 변화의 주요 원인으로 기후변화가 약 77~80%를 차지하였으며, 한강하류는 인간 활동이 약 56%를 차지하는 것으로 나타났다. Oh *et al*. (2023)은 우리나라 금강 유역 14개의 중권역을 대상으로 Budyko 곡선을 활용하여 기후변화와 인간 활동이 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Pettitt 검정에 의한 유출량의 변동점은 1991년이었으며, 유출량의 변화는 금강 유역의 중권역 14개 중 10개가 인간 활동보다는 기후변화로 인한 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 기후변화와 인간 활동의 상대적 기여도는 중권역 간에도 다양하게 나타났다.

이와 같이 우리나라에서는 유역 유량의 변화량을 특정 요인별로 구분하여 정량적으로 분석하는 연구 사례는 국외에 비해 매우 적다. 특히 대하천 유역에서 지역별로 분석한 연구는 국내·외 연구 모두에서 찾아보기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 대하천 유역의 유출량 변화에 영향을 주는 것은 기후변동과 인간활동으로 가정하고, 기후변동과 인간 활동이 유역 유출량에 미치는 상대적인 영향을 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 Oh *et al*. (2023)의 방법론을 우리나라 모든 대하천 유역에 적용하였으며, 기간을 구분하는 변동점 여부를 검정하는 Pettitt 검

정을 이용하였고, 유출량의 정량적 평가로 활용되는 Budyko 기반 기후 탄력성 접근법을 이용하였다.

2. 연구지역 및 자료

2.1 연구지역

본 연구의 대상지역은 우리나라의 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 등 5개 권역이다(Fig. 1). 한강권역은 4개의 대권역(한강, 안성천, 한강서해, 한강동해)과 26개의 중권역으로 구성되어 있으며, 면적은 약 25,953 km^{2}이다. 낙동강권역은 6개의 대권역(낙동강, 형산강, 태화강, 희야·수영, 낙동강동해, 낙동강남해)과 33개의 중권역으로 구성되어 있으며, 면적은 약 23,384 km^{2}이다. 금강권역은 4개의 대권역(금강, 삽교천, 금강서해, 만경·동진)과 21개의 중권역으로 구성되어 있으며, 면적은 약 9,912 km^{2}이다. 섬진강권역은 2개의 대권역(섬진강, 섬진강남해)과 15개의 중권역으로 구성되어 있으며, 면적은 4,911 km^{2}이다. 영산강권역은 4개의 대권역(영산강, 탐진강, 영산강남해, 영산강서해)과 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 면적은 3,467 km^{2}이다. 한강권역의 경우, 북한 지역이 포함되는 중권역인 고미탄천(#1020), 임진강 상류(#1021), 한탄강(#1022), 임진강 하류(#1023)은 연구에 필요한 자료가 존재하지 않아서 제외하였다.

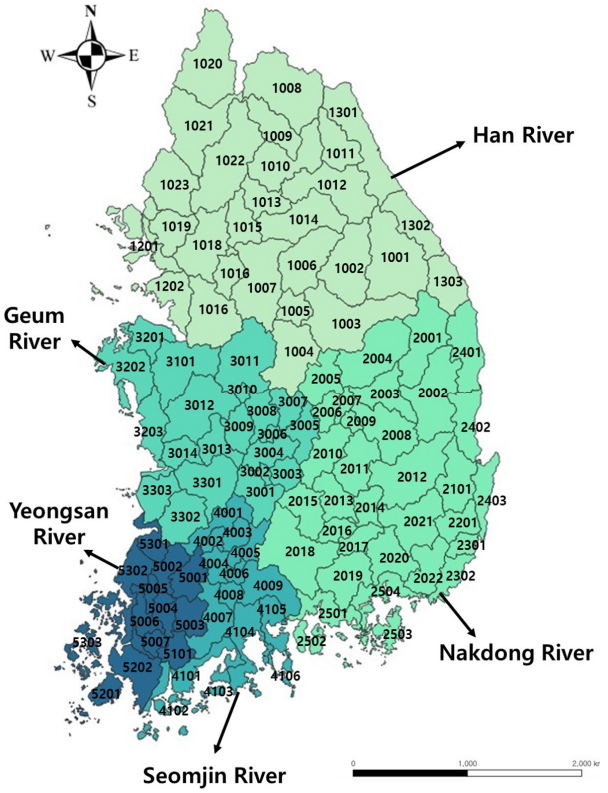


Fig. 1. Study area (five large river basins and middle-sized watersheds)

2.2 연구자료

본 연구에서는 유역 유출량에 대한 정량적 분석을 위해 1973년부터 2020년까지의 온도(일 단위 평균, 최대, 최소), 일 단위 강수량, 유출량의 자료를 수집하였다. 온도 자료는 기상청에서 제공하는 중권역별 자료이며, 면적 평균 강수량과 유출량 자료는 WAMIS에서 제공하는 권역 및 중권역별 자료이다. 유역 유출량 자료는 PRMS를 이용하여 산정한 값이며, 대권역 및 중권역 단위로 구분되어 있다. PRMS는 확정론적 준분포형 모형으로 강수량, 기온, 토양 조건, 토지피복 조건 등을 입력자료로 활용하여, 유역에서의 강우-유출 관계에 대한 물리적 해석과 경험적 관계를 바탕으로 유출량을 산정한다(Kim *et al*., 2020).

본 연구에서 Budyko 공식을 이용하기 위해서는 증발산량을 산정할 필요가 있으며, Hargreaves 공식을 이용하여 중권역별 잠재 증발산량을 산정하였다. 또한, 모든 권역의 인간 활동과 관련된 특성을 파악하기 위해 WAMIS에서 제공하는 토지 피복 자료(1975~2010년)를 이용하였으며, 이는 5년마다 구축된 자료이다.

3. 연구방법

3.1 Pettitt 검정

기후변동과 인간 활동이 유출량에 미치는 영향은 서로 다른 두 기간에 대한 자료 분석을 기반으로 상대적인 측면에서 정량화할 수 있다(Ahn and Merwade, 2014). 변동점(change point)을 감지하는 것은 유출량의 변화 분석의 가장 중요한 부분이다(Zuo *et al*., 2014). 본 연구에서는 시계열의 변동점을 확인하기 위해 Pettitt 검정을 사용하였다. Pettitt 검정은 순위 기반 비모수 통계 검정법으로 수문 및 기후 변수의 급격한 변화를 감지하는 가장 편리한 통계적 방법이다. Pettitt 검정의 과정에서는 주어진 시계열 $X(x_1, x_2,...,x_N)$을 두 개의 시계열 $x_1, x_2,..., x_t$와 $x_{t+1}, x_{t+2},..., x_N$으로 나누며, Mann-Whitney 통계 $U_{t,N}$은 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$U_{t,N} = \sum_{j=1}^{t}\sum_{i=1}^{N} sgn(x_j - x_k) \; (t = 1,..., N) \tag{1}$$

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

$U_{t,N}$은 1에서 N까지의 모든 확률 변수에 대해 평가하며, 가장 가능성이 높은 변화점 τ은 Eq. (3)을 통해 계산되며, τ은 K_τ에 위치한다(Conte *et al.*, 2019; Das and Banerjee, 2021).

$$K_\tau = U_{t,N} = \max \left| U_{t,N} \right|, 1 \le t \le N \quad (3)$$

본 연구에서는 Pettitt 검정을 통해 감지된 변동점을 기준으로 연구 기간을 변동점 이전 기간과 변동점 이후 기간으로 나누었다. 여러 선행 연구에서는 Budyko 가설에 기반하여 변동점 이전 기간에 대한 유출량의 변화는 주로 기후변화에 의한 것이며, 변동점 이후 기간은 기후변화와 인간 활동 모두 영향을 미친다고 가정하였다(Shahid *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2022).

최근 수십 년 동안의 기후변화에는 자연적으로 유발되는 기후변동과 인간 활동에 의한 간접적인 영향이 포함된다. 그러나 본 논문에서 사용한 자료 기간이 짧으므로 기후변화에서 인간 활동으로 인한 영향은 포함하지 않는 것으로 가정하였다. 그러므로 본 논문에서는 변동점 이전 기간에 대한 유출량 변화는 자연적으로 유발된 기후변동에 의한 것이며, 변동점 이후 기간에 대한 유출량 변화는 기후변동과 인간 활동 모두 영향을 미친다고 가정하였다. 또한 본 연구에서의 인간 활동은 수문과정을 변화시킬 수 있는 토지피복의 변화, 댐 건설, 도시화 등을 포함한다.

3.2 Budyko 가설

기후 탄력성 분석은 강수량과 증발산량 등을 이용하여 유출량에 대한 기후변화와 인간 활동의 영향을 정량화하기 위해 사용되는 방법이다(Oh *et al.*, 2023). 본 연구에서는 기후 탄력성 분석법 중 Budyko 기반 기후 탄력성 분석법을 사용하였다. Budyko 가설에 의하면 장기간의 증발산량(ET)은 주로 물 공급(강수량(P))과 증발수요(잠재증발산량(PET)) 사이의 균형에 의해 결정되며, 이들의 관계는 Fig. 2와 같은 Budyko 곡선으로 표현될 수 있다. Wang and Hejazi (2011)에 의하면, 인간의 영향 없이 기후변화로 인해 건조지수(PET/P)가 더 건조하거나 습하게 되면 증발지수(ET/P)도 이동한다. 또한, 유역에서 건조지수와 증발지수의 관계는 기후변화 때문에 Budyko 곡선을 따라 이동할 수 있으며, 인간의 간섭으로 인해 수직 방향으로 이동할 수 있다(Li *et al.*, 2020).

PET/P가 1보다 작은 경우는 증발산의 제한 인자는 에너지 공급이며, PET/P가 1보다 큰 경우는 증발산의 제한 인자는 물 공급이다(Wang and Hejazi, 2011). Budyko 곡선의 이동 방향은 강수량(P), 실제 증발산량(ET) 및 잠재 증발산량(PET)의 상대적인 변화 정도를 나타내며, 변화 크기는 기후변화와 인간 활동에 대한 민감도를 나타낸다(Oh *et al.*, 2023). Budyko 곡선에서 수직 및 수평 방향의 이동은 기후변화의 영향이며, 수직 방향의 이동은 기후변화와 인간 활동 모두의 영향이다(Li *et al.*, 2020). Fig. 2에서 A점은 변동점 이전 기간 동안의 기후 조건을 나타내며, B점은 변동점 이후 기간 동안의 기후 조건을 나타낸다. C점은 가상의 점으로 A점과 같이 Budyko 곡선에 위치하지만, B점과는 동일한 기후 조건인 PET/P를 가지고 있다. 이를 통해 여러 연구에서는 A점에서 C점으로의 유출량의 변화는 기후변화가 유일한 영향 요인으로 가정하며, C점에서 B점으로의 유출량의 변화는 기후변화와 인간 활동의 영향으로 가정하였다(Jiang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020).

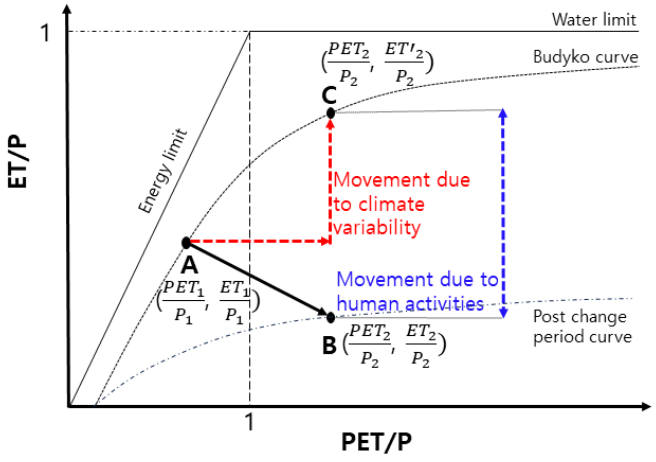


Fig. 2. Variation on Budyko curve according to climate variability and human activities (Oh *et al.*, 2023)

여러 연구에서 제안한 Budyko 곡선 중 본 연구에서는 Zhang *et al*. (2001)이 제안한 Budyko 함수(Eq. (4))를 사용하였다. 최근 인간 활동이 활발해지면서 증발산량을 추정하기 위해 Eq. (4)를 사용하는 연구가 늘어나고 있다(Wang *et al*., 2013; Shah *et al*., 2022).

$$\frac{ET}{P}=\frac{1+\omega(PET/P)}{1+\omega(PET/P)+(PET/P)^{-1}}=f(\varphi) \tag{4}$$

여기서 ω는 유역의 식생 유형과 지형 특성을 나타내는 매개변수이며, 일반적으로 범위가 0.5~2이다(Wang *et al*., 2013). ω의 값이 높을수록 유역의 특성이 증발산량을 선호한다는 것을 나타내며, ω의 값이 낮을수록 증발산량을 선호하지 않는 특성을 나타낸다(Zhang *et al*., 2001).

3.3 유출량 변화에 대한 기후변동과 인간 활동의 기여도 평가

본 연구에서 기후변동과 인간 활동은 유출량의 변화에 영향을 주는 두 가지 주요 요인이다. 기후변동에 따른 유출량의 변화는 강수량 및 잠재 증발산량의 변화로 나타낼 수 있다(Eq. (5)).

$$\triangle Q_C=\frac{\partial Q}{\partial P}\triangle P+\frac{\partial Q}{\partial PET}\triangle PET \tag{5}$$

여기서 $\triangle Q_C$는 기후변동으로 인한 연평균 유출량의 변화량을 나타내며, $\triangle P$와 $\triangle PET$는 각각 강수량과 잠재 증발산량의 변화를 나타낸다. 기후인자에 대한 유출량의 민감도를 평가하기 위해 Schaake (1990)는 기후인자에 대한 유출량의 탄력성(ε_X)을 제안하였으며, 이는 Eq. (6)과 같이 특정 기후인자(X)의 변동률에 대한 유출량의 변동률의 비율이다.

$$\varepsilon_X=\frac{\frac{\partial Q}{Q}}{\frac{\partial X}{X}} \tag{6}$$

Eq. (6)은 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 Eq. (5)는 Eq. (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial X}=\varepsilon_X\frac{Q}{X} \tag{7}$$

$$\triangle Q_C=(\varepsilon_P\frac{\triangle P}{P}+\varepsilon_{PET}\frac{\triangle PET}{PET})\times Q \tag{8}$$

여기서 ε_P와 ε_{PET}는 각각 강수량과 잠재적인 증발산량에 대한 유출량의 탄성 계수를 나타내며, $\varepsilon_P+\varepsilon_{PET}=1$이다. ε_P와 ε_{PET}의 절대값이 상대적으로 높으면 유출량이 기후변동에 더 민감하다는 것을 의미한다(Xing *et al*., 2018). ε_P는 Budyko 가설에 기반한 공식을 이용하여 Eq. (9)와 같이 나타낸다(Zhou *et al*., 2018).

$$\varepsilon_P=1+\frac{\varphi\times f'(\varphi)}{1-f(\varphi)} \tag{9}$$

여기서, $f'(\varphi)$은 Budyko 함수(Eq. (5))를 미분한 것이며, Eq. (10)과 같다.

$$f'(\varphi)=\frac{2\omega(PET/P)+1}{(\omega(PET/P)^2+(PET/P)+1)^2} \tag{10}$$

인간 활동의 영향으로 인한 유출량($\triangle Q_H$)은 연평균 유출량의 변화량($\triangle Q_{total}$)으로부터 계산할 수 있으며, Eq. (11)과 같다.

$$\triangle Q_{total}=\triangle Q_{obs2}-\triangle Q_{obs1}=\triangle Q_C+\triangle Q_H \tag{11}$$

여기서 $\triangle Q_{obs1}$은 변동점 이전 기간 동안의 연평균 유출량, $\triangle Q_{obs2}$는 변동점 이후 기간 동안의 연평균 유출량을 나타낸다. Eqs. (12)~(14)는 유출량 변화에 대한 기후변화(RC_C)와 인간 활동(RC_H)의 상대적 기여도를 나타낸다.

$$\triangle Q=|\triangle Q_C|+|\triangle Q_H| \tag{12}$$

$$RC_C(\%)=\frac{\triangle Q_C}{|\triangle Q|}\times 100(\%) \tag{13}$$

$$RC_H(\%)=\frac{\triangle Q_H}{|\triangle Q|}\times 100(\%) \tag{14}$$

4. 연구결과

4.1 Pettitt 검정 결과

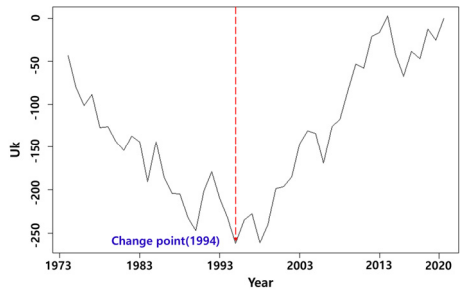
본 연구에서는 각 권역의 중권역별 유출량에 대한 기후변동과 인간 활동에 대한 정량적 기여도를 평가하고, 권역별로 각 중권역 유출량 변화에 대한 영향을 비교 및 분석하였다. 따

라서 권역 단위의 연평균 유출량 자료를 이용하여 Pettitt 검정을 수행하였다. 또한 각 권역의 중권역을 대상으로 Pettitt 검정을 수행했을 경우에는 변동점이 중권역마다 다르게 나타났기 때문에 권역 평균 유출량으로 변동점을 산정하였다. 자료 기간 동안 5개의 권역에 대한 Pettitt 검정 결과는 Fig. 3과 같다.

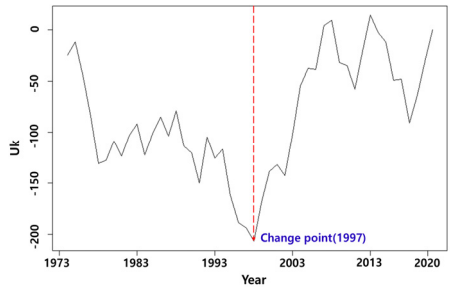
한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 권역에 대한 유출량의 변동점은 각각 1994년, 1997년, 1994년, 1996년, 1997년으로, 모든 권역의 변동점은 1990년대 중반 이후에 발생한 것을 확인하였다. 우리나라는 1960년대부터 경제개발5개년계획, 유역종합계발계획 등으로 여러 개의 댐을 건설하였으며, 1990년대에도 다목적댐, 발전전용 및 용수전용댐 등을 지속적으로 건설하였다. 자연 상태의 유역을 개발하는 것은 유역 특성 인자의 변화로 인해 불투수 면적이 증대되고 우수의 지하 침투량은 감소하며, 보유력의 약화로 토양침식, 첨두유량, 유출량이 증가한다(Lee *et al.*, 2019). 도시화로 인한 불투수 면적, 댐 건설 등으로 인하여 유출량의 변화가 일어났으며, 이로 인한 유출량의 변동점은 1990년대로 감지되었다. Jehanzaib *et al.* (2020)는 우리나라 권역별 유량 자료를 sequential Mann-Kendall을 이용하여 분석한 결과, 한강은 1997년, 낙동강은 1995년, 금강은 1992년, 섬진강은 1993년, 영산강은 1993년이 유출량의 변동점인 것으로 나타났다. Shah *et al.* (2022)은 우리나라 한강권역을 북한강, 남한강, 한강하류로 나누어 각각의 유출량 자료에 대해 Pettitt 검정을 수행한 결과, 북한강과 남한강은 1997년, 한강하류는 1995년이 변동점이었다. 따라서 본 연구에서는 각 권역의 중권역별 1973~2020년의 강수량, 유출량, 증발산량, 토지 피복 자료를 변동점을 기준으로 두 기간으로 나누었다. Budyko 가설에 기반하여 변동점 이전 기간에 대한 유출량 변화는 자연적으로 유발된 기후변동에 의한 것이며, 변동점 이후 기간에 대한 유출량 변화는 기후변동과 인간 활동 모두 영향을 미친다고 가정하였다.

4.2 기후변동과 인간 활동의 기여도 평가

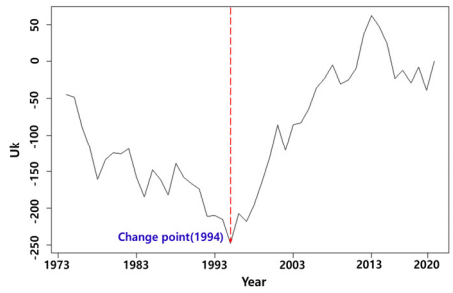
먼저 각 권역의 중권역별 유역의 특성을 파악하기 위해 토지의 피복 변화를 파악하였다. Kim *et al.* (2017)은 토지 피복 자료를 인간 활동으로 인한 영향을 받았다고 판단할 수 있는 기준으로 사용하였다. 본 연구에서는 변동점 이전 기간과 변동점 이후 기간에 대한 토지 피복의 변화를 확인하기 위해서 1995년 자료와 2020년 자료를 비교하였다. 중권역별 토지 피복의 특징은 주로 도시화 및 건조지역, 산림, 경작지의 세 가지 유형에 의해 구성되어 있으며, 토지 피복 비율에서 현저한 차이를 확인할 수 있다. Fig. 4는 각 중권역의 전체 면적 대비 도시화 및 건조지역, 산림, 경작지의 면적 변화를 보여준다.



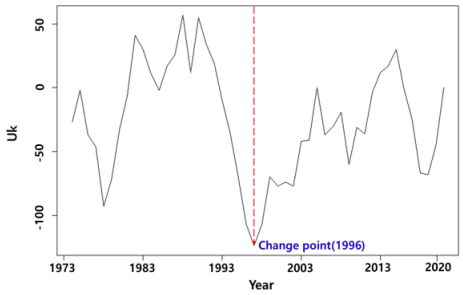
(a) Han River



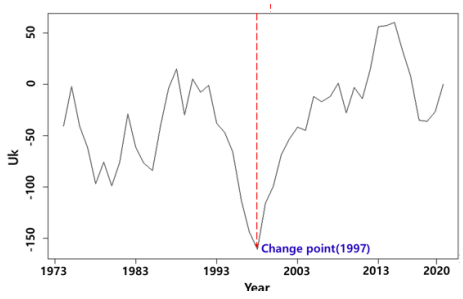
(b) Nakdong River



(c) Geum River

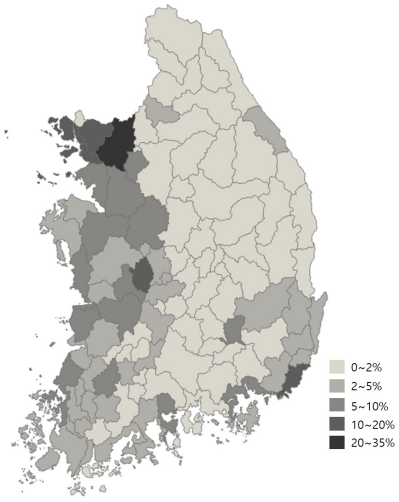


(d) Seomjin River

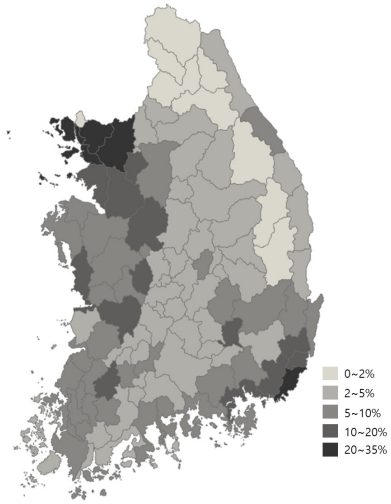


(e) Yeongsan River

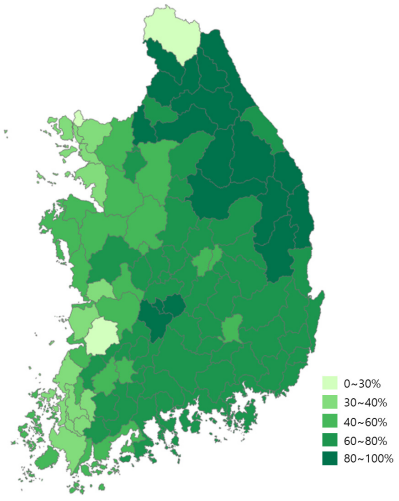
Fig. 3. Results of the Pettitt test for annual runoff



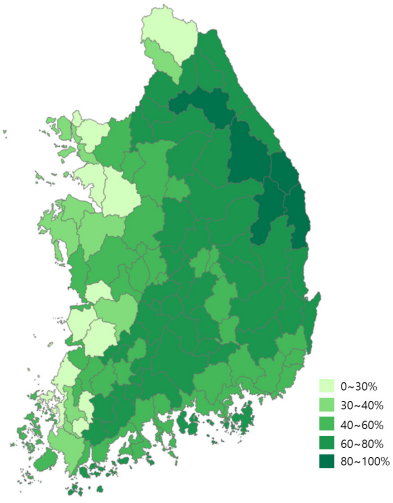
(a) Urbanized/Dry land (1995)



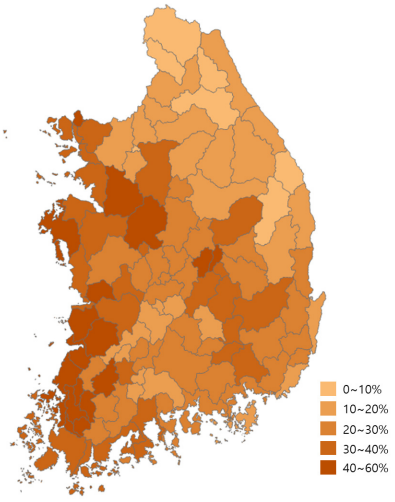
(b) Urbanized/Dry land (2020)



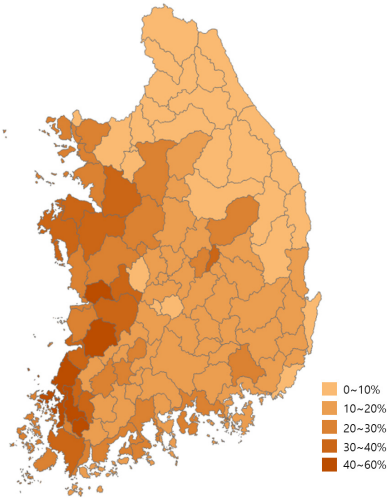
(c) Forest (1995)



(d) Forest (2020)



(e) Cultivable land (1995)



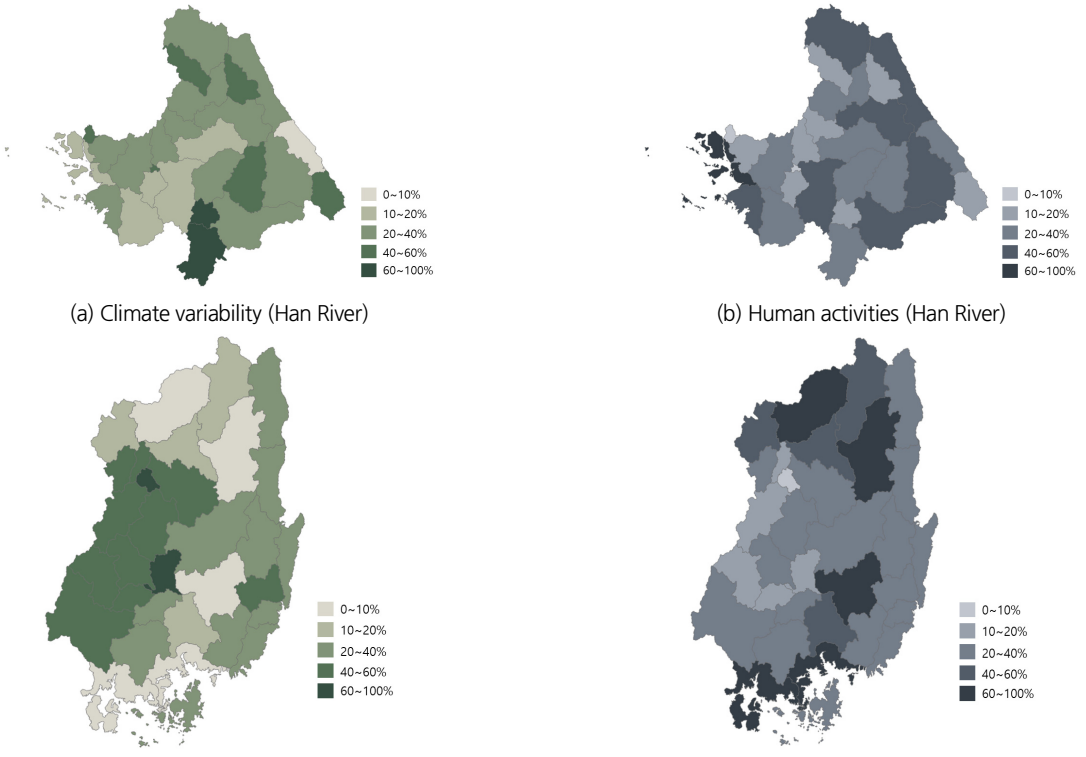
(f) Cultivable land (2020)

Fig. 4. Proportion of land use land cover

한강권역 중 금강산댐(#1008)의 경우 1975~2000년까지 토지 피복 자료가 없어 토지 피복 변화를 파악할 수 없었다. 한강권역의 평화의댐(#1009), 금강권역의 새만금(#3303)과 영산강권역의 신안군(#5303)을 제외하고는 도시화 및 건조지역이 1995년에 비해 2020년에 모든 중권역이 0.23~12.86%의 범위로 증가하였다. 산림의 면적은 섬진강권역의 완도(#4102) 및 금산면(#4103)과 영산강권역의 영산강하구언(#5008)을 제외하고 1975년에 비해 2020년에 모든 중권역이 0.50~41.64%의 범위로 감소하였다. 경작지의 면적은 금강권역의 대호방조제(#3201)을 제외하고 1975년에 비해 2020년에 모든 중권역이 0.60~56.94%의 범위로 감소하였다. 이를 통해 대부분의 중권역에서 1975년에 비해 2020년에 도시화 지역의 면적은 증가하였으며, 산림과 경작지의 면적은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 산림은 일반적으로 농업 작물보다 더 많은 물을 증발시키며(Calder *et al*., 1995; Brown *et al*., 2005), 농경지와 농업 활동의 증가는 농업용수를 증가시켜 유출량의 변화를 가져온다(Yang and Tian, 2009). 도시화 면적 증가와 산림과 경작지의 면적 감소는 모든 중권역에서 인간 활동의 영향이 있다는 것을 확인할 수 있다.

유출량의 정량적 평가를 위해서 Pettitt 검정으로 얻은 변동점을 바탕으로 모든 권역의 변동점 이전 유출량과 변동점 이후 유출량을 비교하였다. 한강권역의 남한강상류(#1001), 충주댐하류(#1005), 한강하류(#1024), 삼척오십천(#1303), 낙동강권역의 낙동강하구언(#2022), 섬진강권역의 완도(#4102), 영산강권역의 지석천(#5003), 죽산보(#5004), 고막원천(#5005), 영산강하류(#5006), 영암천(#5007), 영산강하구언(#5008), 탐진강(#5101), 진도(#5201), 영암방조제(#5202), 신안군(#5303)을 제외하고 모든 중권역에서 유출량이 증가하였다. 이러한 유출량의 변화량에 대하여 기후변동과 인간 활동의 기여도를 정량적으로 분리하였다. Fig. 5와 6은 권역별 기후변동과 인간 활동의 상대적 기여도를 지도와 Boxplot을 이용하여 보여준다.

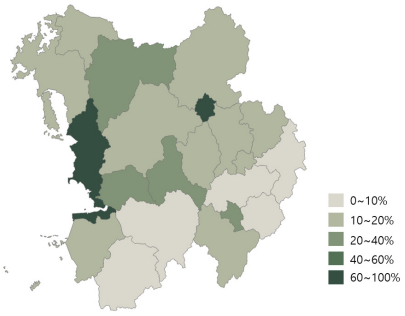
한강권역의 경우 매개변수인 ω는 모든 중권역에서 약 0.95로 산정되었으며, 강수량에 대한 유출량의 탄력성(ε_P)은 1.35~1.50, 잠재 증발산량에 대한 유출량의 탄력성(ε_{PET})은 -0.50~-0.35의 범위로 산정되었다. 중권역 중 13개는 기후변동보다는 인간 활동으로 인한 영향이 크게 받는 것을 확인하였다. 예를 들어, 한강권역 중 도시화 및 건조 지역에서 높은 증가 비율을 보여준 남한강 하류(#1007), 경안천(#1016), 한강고양(#1019), 안성천(#1101)은 인간 활동의 영향이 50%



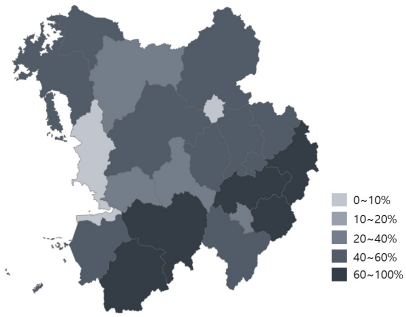
(a) Climate variability (Han River) (b) Human activities (Han River)

(c) Climate variability (Nakdong River) (d) Human activities (Nakdong River)

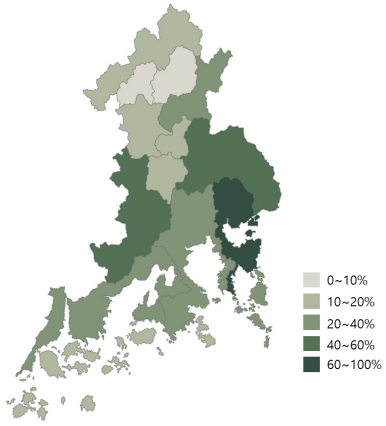
Fig. 5. Relative contributions of climate change and human activities to runoff (map)



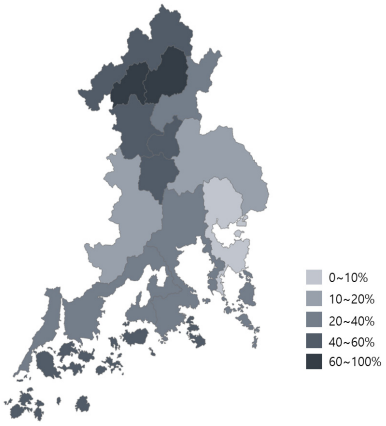
(e) Climate variability (Geum River)



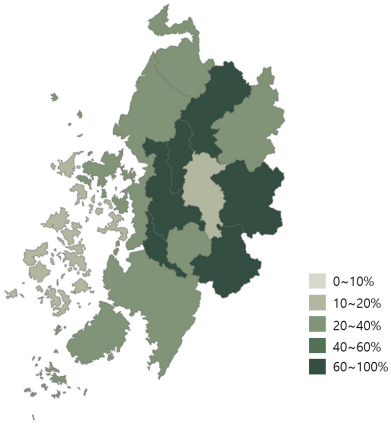
(f) Human activities (Geum River)



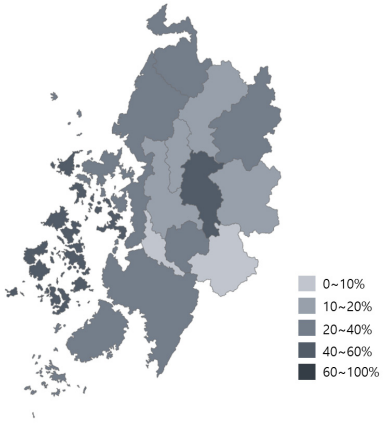
(g) Climate variability (Seomjin River)



(h) Human activities (Seomjin River)



(i) Climate variability (Yeongsan River)

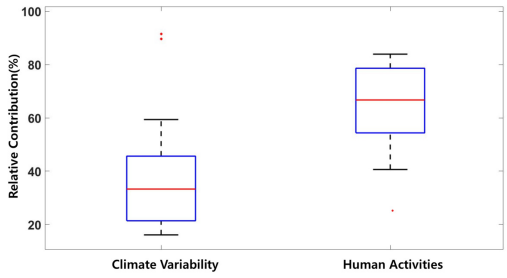


(j) Human activities (Yeongsan River)

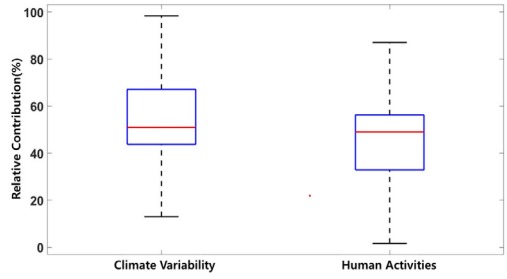
Fig. 5. Relative contributions of climate change and human activities to runoff (map) (Continued)

이상을 차지하는 것으로 나타났다. 금강산댐(#1008), 평화의댐(#1009), 춘천댐(#1010), 인북천(#1011) 등 북한강 내 중권역에 대한 기여도 결과는 기후변동(52.2%)이 인간 활동(48.8%)의 영향보다 크게 나타났으며, Shah *et al*. (2022)의 북한강 유역의 결과와 같이 기후변동이 지배적인 요인인 것으로 확인되었다. 또한, 평창강(#1002), 충주댐(#1003), 달천(#1004), 충주댐 하류(#1005) 등 남한강 내 중권역은 기후변동(62.1%)이 인간 활동(38.9%)의 영향보다 크게 나타났으며, 한강서울(#1018), 한강고양(#1019) 등 한강하류 내 중권역은 인간 활동(55.6%)이 기후변동(44.4%)의 영향보다 크게 나타났다.

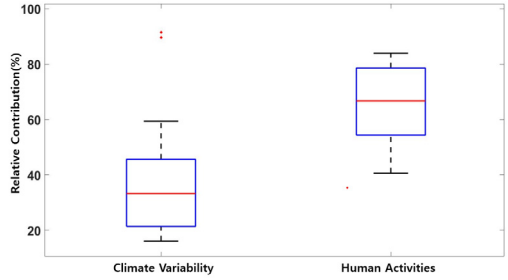
낙동강권역의 경우 매개변수인 ω는 모든 중권역에서 약 0.97로 산정되었으며, 강수량에 대한 유출량의 탄력성(ε_P)은 1.36~1.66, 잠재 증발산량에 대한 유출량의 탄력성(ε_{PET})은 -0.66~-0.36의 범위로 산정되었다. 중권역 중 19개는 인간 활동



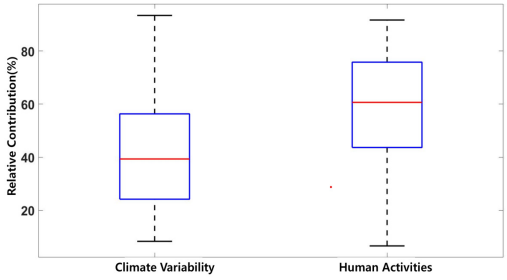
(a) Han River



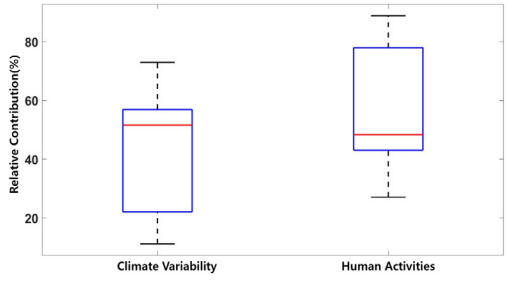
(b) Nakdong River



(c) Geum River



(d) Seomjin River



(e) Yeongsan River

Fig. 6. Relative contributions of climate change and human activities to runoff (Boxplot)

보다는 기후변동으로 인한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

금강권역의 경우 매개변수인 ω는 모든 중권역에서 약 0.96으로 산정되었으며, 강수량에 대한 유출량의 탄력성(ε_P)은 1.40~1.49, 잠재 증발산량에 대한 유출량의 탄력성(ε_{PET})은 -0.49~-0.40의 범위로 산정되었다. 중권역 중 17개는 기후변동보다는 인간 활동으로 인한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 특히, 금강권역 중 새만금(#3303)은 인간 활동의 영향이 주된 요인이었다. 새만금(#3303)은 도시화 및 건조지역의 면적이 감소하였지만, 산림과 경작지의 면적이 증가했으며, 이러한 토지 피복 변화는 인간 활동의 큰 요인으로 작용한 것으로 추정된다. He *et al.* (2008)은 토지 이용 자료가 중국 Hei 강 유역의 증발산, 하천유량, 유출 생성 과정에 상당한 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주었다.

섬진강권역의 경우 매개변수인 ω는 모든 중권역에서 약 0.95로 산정되었으며, 강수량에 대한 유출량의 탄력성(ε_P)은 1.37~1.50, 잠재 증발산량에 대한 유출량의 탄력성(ε_{PET})은 -0.50~-0.37의 범위로 산정되었다. 중권역 중 10개는 기후변동보다는 인간 활동으로 인한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

영산강권역의 경우 매개변수인 ω는 모든 중권역에서 약 0.95로 산정되었으며, 강수량에 대한 유출량의 탄력성(ε_P)은 1.40~1.60, 잠재 증발산량에 대한 유출량의 탄력성(ε_{PET})은 -0.60~-0.40의 범위로 산정되었다. 중권역 중 8개는 인간 활동보다는 기후변동으로 인한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 영산강권역의 경우 14개 중 10개의 중권역이 유출량이 감소되었다. 유출량의 감소도 유출량의 증가와 마찬가지로 기후변동과 인간 활동의 영향을 받는다. Wu *et al.* (2017)의 결과에서는 기후변화는 유출량 감소의 46.1~60.8%를 차지했으며, 인간 활동은 39.2~53.9%를 차지한 것으로 나타났다. 또한 Kazemi *et al.* (2019)의 결과에서는 유출량이 38~58%가 감소하였으며, 기후변화가 하천 흐름 감소에 55%를 차지하였다.

본 연구와 이전 연구를 통해 기후변화와 인간 활동의 상대적 기여도는 중권역 간에도 다양하다는 것을 확인하였으며, 중권역별로 기후변동과 인간 활동의 영향 중에 유출량 변화에 지배적인 요인이 무엇인지 파악할 수 있었다. 또한, 기후변동의 영향이 큰 중권역들은 기초자료에서 강수량의 변화량이 크거나 잠재 증발산량의 변화량이 작으면 기후변동에 대한 기여도가 커진다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

유출량은 수문 순환의 매우 중요한 구성 요소이며, 유출량

의 변화는 수문학적 재해의 징후가 될 수 있다. 대부분의 연구에서 기후변동과 인간 활동은 유출량 변화의 두 가지 주요 요인으로 간주되고 있다. 따라서 더 나은 수자원 계획 및 관리를 위해서는 유출량 변화에 대하여 기후변동과 인간 활동의 영향을 정량적으로 분리하는 것이 중요하다. 그러나 우리나라 전체 중권역을 대상으로 유출량 변화에 대해 정량적으로 분석한 연구 거의 없다. 그러므로 본 연구에서는 선행 연구와 달리 국내 대하천 유역을 중권역 단위로 나누었으며, 선행 연구들의 방법론을 이용하여 하천 유출량의 변화량을 특정 요소별로 구분하여 정량적으로 분석하였다.

우리나라 5개 권역의 109개 중권역을 대상으로 1973~2020년의 자료를 이용하였으며, 기후변동과 인간 활동이 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 분리하였다. 이를 위해 Pettitt 검정을 이용하여 기간을 나누었으며, Budyko 가설 기반 공식을 이용하여 유출량의 변화에 미치는 영향을 정량화하였다.

유출량 자료에 대한 Pettitt 검정 결과, 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강권역에서 1990년대에 변동점이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이러한 변동점을 기반으로 변동점 이전 기간에 대한 유출량 변화는 자연적으로 유발된 기후변동에 의한 것이며, 변동점 이후 기간에 대한 유출량 변화는 기후변동과 인간 활동 모두 영향을 미친다고 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 유출량 변화를 기후변동과 인간 활동으로 분리하였으며, 중권역마다 유출량 변화에 미치는 요인의 상대적인 기여도를 산정하였다. 한강권역은 기후변동이 10.8~98.7%, 인간 활동은 1.3~89.2%를 차지하였으며, 낙동강권역은 기후변동이 13.0~92.7%, 인간 활동은 7.3~87.0%를 차지하였다. 금강권역은 기후변동이 16.1~91.5%, 인간 활동은 8.6~83.9%를 차지하였으며, 섬진강 및 영산강권역은 각각 기후변동이 8.3~93.4%, 11.2~72.9%, 인간 활동은 6.6~91.7%, 27.1~88.8%를 차지하였다. 중권역 간에 기후변동과 인간 활동의 영향이 다양한 범위로 작용하고 있는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 관측소의 공간적 분포가 고려되지 않았으며, 잠재증발산량을 추정하였다. 또한 기후변동이 유출량 변화에 미치는 영향을 계산할 때 얼마나 많은 기후 요인을 고려해야 하는지에 대해서는 논쟁이 있다(Yang and Yang, 2011). 이러한 요인들은 분석 결과의 불확실성에 영향을 주기 때문에 추후 연구에서는 고려되어야 할 것이다.

본 연구의 결과를 통해 과거 자료의 유출량 변화에 대하여 기후변동과 인간 활동으로 정량적으로 분리하여 유출량에 미치는 영향을 예측가능하게 하며, 이는 미래의 효율적인 수자원 관리를 결정하는데 중요한 기반이 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS63-001(RS-2022-ND641011))

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Ahn, K.H., and Merwade, V. (2014). “Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow.” *Journal of Hydrology*, Vol. 515, pp. 257-266.

Bai, P., Liu, W., and Guo, M. (2014). “Impacts of climate variability and human activities on decrease in streamflow in the Qinhe River, China.” *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 117, pp. 293-301.

Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., and Vertessy, R.A. (2005). “A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation.” *Journal of Hydrology*, Vol. 310, No. 1-4, pp. 28-61.

Calder, I.R., Hall, R.L., Bastable, H.G., Gunston, H.M., Shela, O., Chirwa, A., and Kafundu, R. (1995). “The impact of land use change on water resources in sub-Saharan Africa: A modelling study of Lake Malawi.” *Journal of Hydrology*, Vol. 170, No. 1-4, pp. 123-135.

Conte, L.C., Bayer, D.M., and Bayer, F.M. (2019). “Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data: Case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 64, No. 11, pp. 1312-1326.

Das, S., and Banerjee, S. (2021). “Investigation of changes in seasonal streamflow and sediment load in the Subarnarekha-Burhabalang basins using Mann-Kendall and Pettitt tests.” *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 14, No. 11, pp. 1-14.

He, H., Zhou, J., and Zhang, W. (2008). “Modelling the impacts of environmental changes on hydrological regimes in the Hei River Watershed, China.” *Global and Planetary Change*, Vol. 61, No. 3-4, pp. 175-193.

Jehanzaib, M., Shah, S.A., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2020). “Investigating the influence of natural events and anthropogenic activities on hydrological drought in South Korea.” *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, Vol. 31, No. 1, pp. 85-96.

Jiang, C., Xiong, L., Wang, D., Liu, P., Guo, S., and Xu, C.Y. (2015). “Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying

parameters." *Journal of Hydrology*, Vol. 522, pp. 326-338.

Kazemi, H., Sarukkalige, R., and Badrzadeh, H. (2019). "Evaluation of streamflow changes due to climate variation and human activities using the Budyko approach." *Environmental Earth Sciences*, Vol. 78, pp. 1-17.

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, T.J., Kim, S.H., Lee, S.H., Kim, C.S., and Kwon, H.H. (2020). "Runoff assessment using radar rainfall and precipitation runoff modeling system model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 7, pp. 493-505. (in Korean)

Lee, B.R., Jung, D.Y., and Choi, S.Y. (2019). "Analysis of urban runoff discharge characteristics affected by climate change and urbanization: case on Bokdae-dong Basin." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 3, pp. 41-46. (in Korean)

Li, Z., Huang, S., Liu, D., Leng, G., Zhou, S., and Huang, Q. (2020). "Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 34, pp. 575-592.

Liu, H., Wang, Z., Ji, G., and Yue, Y. (2020). "Quantifying the impacts of climate change and human activities on runoff in the Lancang river basin based on the Budyko hypothesis." *Water*, Vol. 12, No. 12, 3501.

Oh, M.J., Lee, J.H., Kim, D.W., and Kim, T.W. (2023). "Quantitative impacts of climate change and human activities on the watershed runoff variation of the Geum River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol, 56, No. 6, pp. 381-392. (in Korean)

Schaake, J.C. (1990). "From climate to flow." *Climate Change and U.S. Water Resources*, Vol. 5, No. 9, pp. 177-206.

Shah, S.A., Jehanzaib, M., Yoo, J., Hong, S., and Kim, T.W. (2022). "Investigation of the effects of climate variability, anthropogenic activities, and climate change on streamflow using multimodel ensembles." *Water*, Vol. 14, No. 4, 512.

Shahid, M., Cong, Z., and Zhang, D. (2018). "Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: A case study of the Soan River basin, Pakistan." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 134, No. 1, pp. 205-219.

Sun, S., Chen, H., Ju, W., Song, J., Zhang, H., Sun, J., and Fang, Y. (2013). "Effects of climate change on annual streamflow using climate elasticity in Poyang Lake Basin, China." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 112, pp. 169-183.

Walling, D.E., and Fang, D. (2003). "Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers." *Global and Planetary Change*, Vo. 39, No. 1-2, pp. 111-126.

Wang, D., and Hejazi, M. (2011). "Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 10, 411.

Wang, S., Zhang, Z., McVicar, T.R., Guo, J., Tang, Y., and Yao, A. (2013). "Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: Assessing three complementary approaches." *Journal of Hydrology*, Vol. 507, pp. 63-74.

Wu, J., Miao, C., Zhang, X., Yang, T., and Duan, Q. (2017). "Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities." *Science of the Total Environment*, Vol. 586, pp. 328-337.

Xing, W., Wang, W., Zou, S., and Deng, C. (2018). "Projection of future runoff change using climate elasticity method derived from Budyko framework in major basins across China." *Global and Planetary Change*, Vol. 162, pp. 120-135.

Yang, H., and Yang, D. (2011). "Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 7, W07526.

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.

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.

Zhou, Y., Lai, C., Wang, Z., Chen, X., Zeng, Z., Chen, J., and Bai, X. (2018). "Quantitative evaluation of the impact of climate change and human activity on runoff change in the Dongjiang River Basin, China." *Water*, Vol. 10, No. 5, 571.

Zuo, D., Xu, Z., Wu, W., Zhao, J., and Zhao, F. (2014). "Identification of streamflow response to climate change and human activities in the Wei River Basin, China." *Water Resources Management*, Vol. 28, pp. 833-851.