



# Quantitative impacts of climate change and human activities on the watershed runoff variation of the Geum River basin

Oh, Mi Ju<sup>a</sup> · Kim, Dongwook<sup>b</sup> · Lee, Joo-Heon<sup>c</sup> · Kim, Tae-Woong<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Master Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Research Engineer, R&D Center, Burin Co., Ltd, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (ERICA), Ansan, Korea

Paper number: 23-017

Received: 5 March 2023; Revised: 5 May 2023; Accepted: 7 June 2023

## Abstract

Precipitation, runoff, and evapotranspiration are changing worldwide due to climate change and human activities. Because watershed runoff is an important component of the hydrological cycle, it is important to investigate the changes in watershed runoff for water resources management. This study collected observed data of runoff, precipitation, temperature, and evapotranspiration in the Geum River basin as well as their synthetic data according to Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios, investigated the trend of hydro-meteorological variables using the Mann-Kendall test, and quantitatively evaluated the effects of climate change and human activities on the watershed runoff using the climate elasticity approach and the Budyko framework. The results indicated that the relative contribution of climate change and human activity to changes in runoff varies from region to region. For example, the watershed with the greatest contribution from climate change and human activity were the Yongdam Dam (#3001) basin and the Daecheong Dam (#3008) basin, respectively. Future climate change showed an increase in precipitation and temperature in both RCP 4.5 and 8.5 scenarios, resulting in changes in runoff in the Geum River basin from 44.8% to 65.5%, respectively. We concluded that the effect on watershed runoff can be separated into climate change and human activities, which will be important information in establishing sustainable water resource management plans.

**Keywords:** Climate change, Human activities, Runoff, Budyko analysis

## 기후변화 및 인간 활동이 금강 유역의 중권역 유출량 변동에 미치는 영향의 정량적 평가

오미주<sup>a</sup> · 김동욱<sup>b</sup> · 이주헌<sup>c</sup> · 김태웅<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정, <sup>b</sup>(주)부린 부설연구소 연구원, <sup>c</sup>중부대학교 건축토목공학부 교수,

<sup>d</sup>한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

## 요 지

기후변화와 인간 활동으로 강수량, 유출량 및 증발산량 등이 변화되고 있다. 유역 유출량은 수문 순환의 매우 중요한 구성 요소이며, 기후변화와 인간 활동으로 변화되고 있는 유역 유출량에 대한 분석은 수자원 관리에 있어서 중요하다. 본 연구에서는 금강 유역 중권역의 과거 관측자료 및 미래 대표농도경로(RCP) 시나리오에 따른 유출량, 강수량, 기온 및 증발산량 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 이용하여 수문기상학적 변수의 추세를 분석하였고, 기후변화와 인간 활동이 금강 유역의 유출량에 미치는 영향을 기후 탄력성 접근법과 Budyko 프레임워크를 이용하여 정량적으로 평가하였다. 과거의 유출량과 미래 유출량을 분석한 결과, 중권역마다 유출량 변화에 기후변화와 인간 활동이 미치는 상대적인 기여도가 다양하게 나타났다. 예를 들어, 기후변화의 기여도가 가장 큰 중권역은 용담댐(#3001) 유역이었으며, 인간 활동의 기여도가 가장 큰 중권역은 대청댐(#3008) 유역이었다. 미래 기후변화는 RCP 4.5와 8.5 시나리오 모두에서 강수량과 온도의 증가가 나타났다. 이러한 기후 요인의 변화는 금강 유역의 유출량 변화에 44.8%에서 65.5%까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 유출량은 기후변화에 의한 영향뿐만 아니라 인간 활동에도 크게 영향을 받고 있으며, 이는 지속적인 수자원 관리 계획을 세우는데 중요한 정보가 될 것이다.

**핵심용어:** 기후변화, 인간 활동, 유출량, Budyko 분석

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184

E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (Kim, Tae-Woong)

## 1. 서론

물은 모든 생태계의 유지뿐만 아니라, 농업, 산업, 경제 발전 등에 필요한 자원이다(Shahid *et al.*, 2018). 기후변화와 인간 활동은 물의 흐름에 영향을 주는 주요한 요인이다. 온실가스 배출로 인한 기후변화는 강수량 및 증발산량의 변화를 일으키고, 이는 유출량의 변화로 이어진다. 인간 활동은 댐 및 제방 건설, 도시화, 경작법의 변화, 삼림 벌채 및 토지 이용 변화 등을 포함하며, 이는 유출량에 직·간접적으로 영향을 미친다. 기후변화와 인간 활동의 상호작용으로 인한 유역 유출량의 변화는 수자원 분야에서 중요한 문제가 되고 있다. 전 세계적으로 많은 하천에서 유량의 상당한 변화가 감지되고 있다(Jiang *et al.*, 2015). 유량의 변화는 수문학적 가뭄의 지속기간 및 심도 등에 영향을 미칠뿐만 아니라(Jehanzaib *et al.*, 2020a), 홍수의 위험성을 증가시킨다. 또한 농업, 가정, 산업 및 수력 발전 등에서 하천 유량은 중요한 역할을 하고 있다. 이에 따라 지난 수십 년 동안 하천 유량에 대한 기후변화 및 인간 활동의 기여도를 정량화하는 연구 사례가 증가하고 있다(Xin *et al.*, 2019). 우리나라에서도 유량이 인간 활동에 민감한 것으로 분석되고 있으며(Shah *et al.*, 2022), 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 우리나라는 관측 유량자료가 많지 않아서 장기 유출분석 자료가 다양하게 활용되고 있다(Kim *et al.*, 2020). Kim and Kim (2011)은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 분산형 강우-유출 모형(Precipitation Runoff Modeling System, PRMS)에 의한 모의 유출량의 변화를 분석하여 기후변화가 우리나라 수자원에 미치는 영향을 파악하였으며, 우리나라 연 강수량 및 유출량은 기후변화에 의해 증가할 것으로 예측하였다. 우리나라에서 PRMS는 유출특성을 평가하는 데 주로 사용되고 있으며, 전국유역조사사업의 장기 유출량 산정 모형으로 활용된 바 있다(Kim *et al.*, 2020). 따라서, PRMS 유출량 자료를 이용하여 수문 순환에 미치는 기후변화와 인간 활동의 영향을 예측할 수 있으며, 이는 미래의 효율적인 수자원 관리를 결정하는데 중요한 기반이 될 수 있을 것이다.

기후변화와 인간 활동으로 인한 유량 및 유출량의 변화에 대한 분석은 국내·외 연구에서 수행된 바 있다(Ye *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2015; Mwangi *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017; Jehanzaib *et al.*, 2020a, 2020b; Shah *et al.*, 2022). 국외 연구의 경우, Ye *et al.* (2013)는 1960~2007년까지 중국 Poyang강 유역의 유량을 Budyko-Zhang 방법을 사용하여 기후변화와 인간 활동에 대하여 상대적 영향을 구별하였다. 분석 결과에 의하면, 1960년대의 하천 유량 감소는 주로 기후변화의 영향이 컸지만 물 사용량이 증가

함에 따라 2000년대에는 인간 활동에 의한 영향이 더 컸다. Zeng *et al.* (2015)은 중국 Luan강 유역의 유출량을 평가하기 위해 Budyko 기반 공식을 이용하였으며, 기후변화가 유출량 변화에 미치는 영향은 28.3~46.8%, 인간 활동이 53.2~71.7%를 차지하였다. Mwangi *et al.* (2016)은 케냐 Mara강 상류 유역을 Budyko 프레임워크를 이용하여 1965~2007년까지의 유량 변화에 대하여 기후변화와 토지 이용 변화의 상대적 기여도를 평가하였다. 그 결과, 1977년 이후로 방류량이 크게 증가하는 추세가 보였으며, 유량 변화의 주요 요인으로 토지 이용 변화가 97.5%를 차지하였다. Zhang *et al.* (2016)은 중국 Poyang강 유역의 유량 변화를 분석하기 위하여 물 수지 모델과 다중회귀 모델을 이용하였다. 그 결과, 2~5월에는 인간 활동이 하천 유량을 감소시키는 요인이었으며, 5~6월에는 기후변화가 하천 유량을 감소시키는 요인이었다.

국내 연구의 경우, Kim *et al.* (2017)은 소양강 상류 유역과 섬강 유역을 대상으로 월별, 계절별 및 연별 시간 단위로 분석 시기를 구분하여 유량의 변동에 미치는 영향을 정량화하였다. 그 결과, 강수와 온도와 같은 기상학적 자료는 두 유역에서 비슷한 양상을 보였으나 섬강 유역에서는 인구 및 불투수층 증대가 소양강 상류 유역에 비해 상당히 증가하였다. Jehanzaib *et al.* (2020b)은 우리나라의 한강 유역의 4개의 중권역을 대상으로 기후변화와 인간 활동이 수문학적 가뭄에 미치는 영향을 정량화하였다. 유출량 시계열에 대하여 heuristic 분할 방법을 이용하여 변화 시점을 감지하였으며, 수문학적 가뭄에 미치는 영향을 평가하기 위해 비정상성 프레임워크를 이용하였다. 그 결과, 모든 중권역에서 변화 시점이 1990년대 이후에 나타났으며, 변화 시점 이후에는 강수량과 유량은 감소, 잠재 증발산량은 증가 경향을 나타내었다. 또한 3개월 시간 척도에서는 기후변화의 영향이 봄과 겨울에 컸으며, 인간 활동의 영향은 6개월 및 12개월 시간 척도에서 여름과 가을에 크게 나타났다.

Shah *et al.* (2022)은 우리나라 한강 유역을 남한강, 북한강, 한강하류로 나누어 기후변화와 인간 활동이 관측 기간과 미래 기후변화시나리오에 따른 유량에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. Pettitt test를 이용하여 시계열을 두 기간으로 나누었으며, 기후 탄력성 접근법 및 분해 프레임워크를 이용하여 유량에 대한 정량적 기여도를 평가하였다. 그 결과, 남한강과 북한강에서 유량 변화의 주요 원인으로 기후변화가 크게 차지하였으며, 한강하류는 인간 활동에 더 민감한 것으로 나타났다. 또한 미래의 경우 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 모두 기후변화가 미래 유량 변화의 주요 요인이었으며, 이러한 기후변화는 유량에 22.14%에서 27.32%까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 금강 유역을 대상으로 과거 및 미래 기후변화 시나리오에 따른 유출량 모의 자료를 이용하여 기후변화와 인간 활동이 유역 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

## 2. 연구지역 및 자료

### 2.1 연구지역

본 연구는 과거와 미래 기간을 구분하고, 기후변화와 인간 활동이 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 금강 유역은 우리나라에서 3번째로 큰 유역이며(Fig. 1), 유역 면적은 9,914.02 km<sup>2</sup>으로 우리나라 면적의 약 10%를 차지한다. 모든 분석은 금강 유역의 14개 중권역별로 수행되었으며, 중권역의 번호와 유역명은 Fig. 1과 같다.

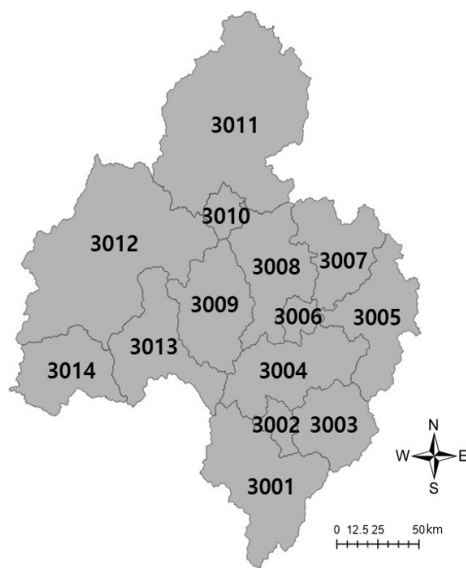
### 2.2 연구자료

본 연구에서는 과거 기간의 유출량에 대한 정량적 분석을 위해 1966년부터 2017년까지의 온도(일 평균, 최대, 최소), 강수량, 증발산량, 일 유출량의 자료를 수집하였다. 온도와 강수량 자료는 기상청에서 제공하는 중권역별 자료이고, 유출량 자료는 WAMIS에서 제공하는 중권역 장기 유출량(PRMS) 자료이다. PRMS는 확정론적 준분포형 모형으로 유역 특성인자에 대한 물리적 해석과 경험적 관계를 바탕으로 유출량을 산정한다(Kim *et al.*, 2020). 증발산량은 Hargreaves 공식을 이용하여 중권역별 잠재 증발산량을 산정한 것이다. 또한, 금강 유역의 특성을 파악하기 위해 WAMIS에서 제공하는 인구 자료

(1966~2017년)와 토지 이용 변화 자료(1975~2010년)를 이용하였다.

미래 기간의 유출량에 대한 정량적 평가를 위해서 기상청에서 제공하는 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에 대한 HadGEM2-AO 모델 및 HadGEM2-ES의 중권역별 일 온도(최소, 최대 및 평균), 증발산량, 유출량 및 강수량 자료(2024~2099년)를 사용하였다. 예를 들어, Fig. 2는 갑천(#3009)의 과거 및 미래 기간의 유출량 자료를 도시한 것이다.

기후변화에 관한 정부간 협의체는 2013년에 발간된 5차 평가보고서에 대표농도경로(RCP) 온실가스 배출 시나리오를 도입하였으며, 본 연구에서 RCP 시나리오 중 대표적으로 많이 사용되고 있는 RCP 4.5와 8.5를 사용하였다. RCP 4.5 시나리오는 2100년 후에 약 4.5W/m<sup>2</sup>에서 안정화되는 저농도 시나리오이며, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된다고 가정하는 배출 시나리오이다. RCP 8.5 시나리오는 2100년에 복사강제력이 8.5W/m<sup>2</sup>를 초과하는 고농도 시나리오이며, 온실가스 저감없이 현재 추세로 배출되는 경우이다(Park *et al.*, 2013). RCP 4.5 시나리오에 대한 HadGEM2-ES의 모델은 영국 기상청 해들리 센터의 지구 시스템 모델이며, 수평해상도는 1.875°×1.250°이다. 이는 식생, 해양 생물학적 과정, 해빙, 대류권의 화학적 과정 및 육지와 해양의 탄소 순환 요소를 통합한 것이다(Reboita *et al.*, 2018). RCP 8.5 시나리오에 대한 HadGEM2-AO 모델은 영국 기상청 해들리 센터에서 개발한 전 지구 대기-해양 결합모델이며, 수평해상도는 1.875° × 1.250°이다. 이는 대기, 해양, 해빙 모델로 구성되어 있어 기후계 구성요소 사이의 에너지, 운동량 등의 상호작용을 현실적



Code	Watershed Name
3001	Yongdam Dam
3002	Downstream of Yongdam Dam
3003	Namdaechon in Muju
3004	Yungdong Stream
3005	Cho River
3006	Upstream of Daecheong Dam
3007	Bocheong Stream
3008	Daecheong Dam
3009	Gap River
3010	Downstream of Daecheong Dam
3011	Miho Stream
3012	Gongju station in Geum River
3013	Nonsan Stream
3014	Geum River Weir

Fig. 1. Study area and watershed code of the Geum River basin

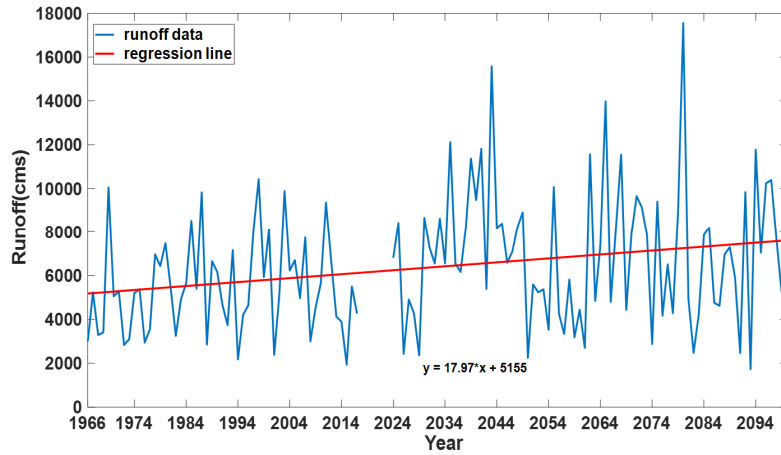


Fig. 2. Changes in the runoff of observational and future scenario data (#3009)

으로 모의할 수 있다(Hong *et al.*, 2013).

선행 연구를 참고하여, 14개의 중권역을 대상으로 Pettitt test를 수행한 결과, 수문시계열의 변동시점이 중권역에 따라 다르게 나타났다. 따라서 분석의 일관성을 위해서, 기준기간의 경우 B1(1966~1991) 및 B2(1992~2017), 전망기간의 경우 S1(2024~2061) 및 S2(2062~2099)로 나누었다.

### 3. 연구방법

#### 3.1 Mann-Kendall 검정과 Sen's slope 방법

모든 유역에서 현재 및 미래의 수자원 상황을 이해하기 위해 수문기상학적 변수의 경향을 파악하는 것이 중요하다(Shahid *et al.*, 2018). 일반적으로 자료의 경향을 파악하기 위해서는 모수적 또는 비모수적 통계방법이 사용되며, 자연에서 관측된 자료는 계절에 따른 변이가 심하고 정규성을 나타내지 않으며, 결측치가 많기 때문에 비모수적인 통계방법을 사용한다(Kim and Park, 2004). 이에 본 연구에서는 수문기상학적 변수의 추세를 감지하기 위해 비모수적 방법인 Mann-Kendall (M-K) 검정과 Sen's slope 방법을 수행하였다. M-K 검정은 세계기상기구가 기상자료의 경향성 분석을 수행할 때 권장하는 방법이며, 분석에 필요한 데이터의 정규성을 요구하지 않는 비모수적 방법이다(Jin *et al.*, 2021). 또한 M-K 검정은 강수량, 유출량, 및 증발산량 등의 시계열 자료 사이의 상관계수를 통해 유의성을 검증하며, 각 결과들의 가중합을 산정하여 시계열의 경향성을 분석하는데 널리 사용된다. M-K 검정은 Eq. (1)과 같이 표현된다. 유출량, 증발산량 및 강수량 등의 시계열 자료를 연도 순서대로 정리하여  $x_j(j=2, 3, \dots, n)$ 와

$x_k(k=1, 2, \dots, n-1)$ 의 차이를 계산하여 비교한다.

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

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

여기서,  $\text{sgn}(x_j - x_k)$ 는  $j$ 시점과  $k$ 시점에서의 자료들의 차이가 각각 양(positive), 영(zero), 음(negative)일 때 1, 0, -1로 표현되며, 이들의 합인  $S$ 는 Eqs. (3) and (4)와 같은 평균과 분산을 가지는 정규분포를 대략적으로 따른다.

$$E(S) = 0 \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 자료의 총 개수이며, Eq. (5)를 통하여 구해진 M-K 통계치  $Z$ 에 대한 p-값을 구하여 유의성을 검증함으로써 경향성을 판단할 수 있다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

M-K 검정은 검정에 대한 유의수준  $\alpha$ 에 대하여  $p$ -값  $\geq \alpha$ 이면 경향성이 없다는 귀무가설을 받아들이고,  $p$ -값  $< \alpha$ 이면 경향성이 있다는 대립가설을 받아들인다.

Sen's slope 방법은  $n$ 쌍의 자료에 대해 추세 기울기의 정도를 평가하는 비모수적 방법으로, 추세 기울기의 추정을 위해 선형 모델을 사용한다(Jin *et al.*, 2021). 또한 Sen's slope은 자료의 오류와 이상치에 크게 영향을 받지 않는다는 점에서 회귀 기울기에 비해 유리하다(Aswad *et al.*, 2020). 추세 기울기  $Q_i$ 는 Eq. (6)과 같이 표현된다.  $X_i$ 와  $X_j$ 는 각각  $i$ 와  $j$  시간에서의 자료 값( $j > i$ )이며,  $n$ 은 자료기간의 수이다.

$$Q_i = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

Sen's slope의 추정값은 기울기  $Q_i$ 에 대한 중앙값  $Q_{med}$ 으로 Eq. (7)과 같다.

$$Q_{med} = \begin{cases} \frac{Q_{n+1}}{2} & \text{if } n \text{ is odd} \\ \frac{Q_{n+2} + Q_{n+1}}{2} & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \quad (7)$$

$Q_{med}$  값이 양의 값이면 증가 경향을 나타내며, 음의 값이면 감소 경향을 나타낸다. Sen' slope는 Kendall Tau의 추정 방법으로 도출되었기 때문에,  $p$ -값이 Mann-Kendall 검정과 동일하게 나타난다(Agbo and Ekpo, 2021).

### 3.2 Budyko Analysis

기후 탄력성 분석은 강수량과 증발산량 등을 이용하여 유출량의 정량적 분석을 위해 사용되는 방법이다. 본 연구에서는 기후 탄력성 분석법 중 Budyko 기반 기후 탄력성 분석법을 사용하였다. Budyko 가설은 유역의 물과 에너지 균형 원리에 따른다. Budyko 프레임워크는 장기간의 증발산량이 주로 물 공급(강수량)과 증발 수요(잠재 증발산량) 사이의 균형에 의해 결정된다는 가정에 기반하여 유역의 장기간 증발산량과 유출량을 해석하는 모델이다(Kim *et al.*, 2022). 즉 유출량, 잠재적 증발산량 및 강수량의 관계인 Eq. (8)은 “강수량은 유출량과 증발산량의 합”을 설명한다. 이러한 관계를 고려하여 Budyko는 강수량에 대한 연간 증발산량인 증발지수가 강수량에 대한 연간 잠재적 증발산량인 건조지수 및 물리적 특성과 관련될 가능성이 있다고 예상하였다(Shah *et al.*, 2022). Budyko 프레임워크의 신뢰도는 1년 이상의 장기적 평균을

사용하고 10,000 km<sup>2</sup> 이상의 유역일 경우에는 최대가 된다(Donohue *et al.*, 2007).

$$P = ET + Q + \Delta S \quad (8)$$

여기서  $P$ 는 강수량,  $ET$ 는 증발산량,  $Q$ 는 유출량,  $\Delta S$ 는 저수량의 변화를 나타내며,  $\Delta S$ 는 시간 범위가 10년이 넘는다면 0으로 가정할 수 있다. 이러한 Budyko 프레임워크는 여러 연구에서 제안한 함수를 이용할 수 있으며(Liang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2001), 본 연구에서는 Zhang *et al.* (2001)이 제안한 Budyko 곡선 기반 함수를 사용하였다.

$$\frac{PET}{P} = \frac{1 + \omega(PET/P)}{1 + \omega(PET/P) + (PET/P)^{-1}} \quad (9)$$

여기서  $PET$ 는 잠재 증발산량,  $\omega$ 는 유역의 특성을 나타내며 식생 유형과 지형 특성을 나타내는 함수이다.

### 3.3 유출량 변화에 대한 기후변화와 인간 활동의 상대적 기여도

유역 유출량의 변화는 기후변화와 인간 활동의 상호작용에 영향을 받는다. 유역에서 기후변화는 주로 외적인 힘에 의해 유출량에 영향을 주므로 이러한 힘을 독립적인 변수로 생각한다(Zuo *et al.*, 2014).

유출량의 변화를 기후변화와 인간 활동으로 정량화하기 위하여 Fig. 3과 같이 Budyko 곡선을 활용하였다. Budyko 곡선의 궤적은 고려된 기간 동안 변화의 이동 방향과 크기로 특징 지을 수 있다(Van der Velde *et al.*, 2014). 이동 방향은 강수량( $P$ ), 실제 증발산량( $E$ ) 및 잠재 증발산량( $PET$ )의 상대적인 변화 정도를 나타내며, 변화 크기는 기후변화와 인간 활동에 대한 변화에 대한 민감도를 나타내는 지표이다. 기준점 이전의 기간에 대한 유량의 변화는 주로 기후변화에 의한 것이며, 인간 활동은 무시할 수 있는 것으로 간주한다. 기준점 이후의 기간은 기후변화와 인간 활동 모두 영향을 미친다고 가정한다(Wang *et al.*, 2012; Dey and Mishra, 2017). Budyko 곡선에서는 시간에 따라 A점에서 B점으로 수평방향과 수직 방향으로 이동한다. C점은 B점과 동일한 기후 조건을 가진 가상의 점이다. 이는 수직 방향을 따라 이동한다. 여기서 기후변화는 수평적 및 수직적 변화를 나타내며, 직접적인 인간 활동에 대한 영향은 수직 방향을 따라 이동한다.

Eqs. (10)~(13)은 유출량 변화에 대한 기후변화( $RC_C$ )와 인간 활동( $RC_A$ )의 상대적 기여도를 나타낸다.

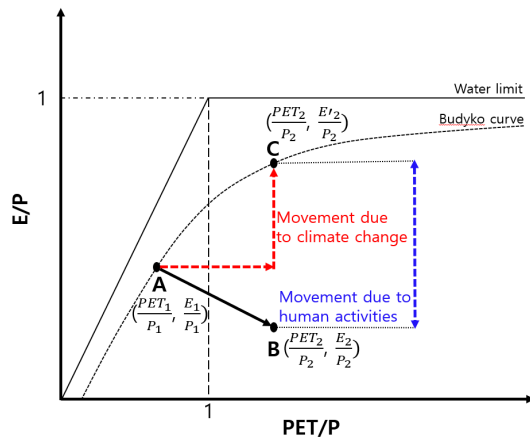


Fig. 3. Variation on Budyko curve according to climate change and human activities

$$\Delta Q_{Total} = \overline{Q_{B2}} - \overline{Q_{B1}} \quad (10)$$

$$|\Delta Q_{Total}| = |\Delta Q_C| + |\Delta Q_A| \quad (11)$$

$$RC_A(\%) = \frac{\Delta Q_A}{|\Delta Q|} \times 100(\%) \quad (12)$$

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

여기서  $\Delta Q_{Total}$ 는 연평균 유출량의 총 변화량,  $\overline{Q_{B1}}$ 은 B1기간 동안의 연평균 유출량,  $\overline{Q_{B2}}$ 은 B2기간 동안의 연평균 유출량을 나타낸다. 유역 유출량의 총 변화는 기후변화와 인간 활동의 두 가지 요인에 의해 변한다고 가정하면, Eq. (11)와 같이 나타낼 수 있다.  $\Delta Q_C$ 는 기후변화로 인한 연평균 유출량의 변화를 나타내고,  $\Delta Q_A$ 는 인간 활동에 의해 유발된 연평균 유출량의 변화를 나타낸다. Eq. (14)에서 유출량 탄력성( $\varepsilon_X$ )은 기후인자( $X$ )의 변동률에 대한 유출량( $Q$ )의 변동량의 비율로 정의된다. 기후인자에 대한 유출량의 반응은 기후인자 중 강수량과 잠재 증발산량에 의해 발생한다는 가정하에 Eq. (15)과 같이 나타낼 수 있다(Zeng *et al.*, 2015).

$$\varepsilon_X = \frac{\partial Q}{\partial X} \cdot \frac{Q}{X}, \quad \frac{\partial Q}{\partial X} = \varepsilon_X \frac{Q}{X} \quad (14)$$

$$\Delta Q_C = \left( \varepsilon_P \frac{\Delta P}{P} - \varepsilon_{PET} \frac{\Delta PET}{P} \right) \times Q \quad (15)$$

여기서  $\Delta P$ 와  $\Delta PET$ 는 각각 강수량과 잠재 증발산량의 변화를 나타내며,  $\varepsilon_P$ 와  $\varepsilon_{PET}$ 는 각각 강수량과 잠재 증발산량에 대한 유출량 탄력성을 의미한다.

$$\varepsilon_P + \varepsilon_{PET} = 1 \quad (16)$$

$$\varepsilon_P = 1 + \frac{\varphi \times f'(\varphi)}{1 - f(\varphi)} \quad (17)$$

$$f(\varphi) = \frac{1 + \omega(PET/P)}{1 + \omega(PET/P) + (PET/P)^{-1}} \quad (18)$$

$$f'(\varphi) = \frac{2\omega(PET/P) + 1}{(\omega(PET/P)^2 + (PET/P) + 1)^2} \quad (19)$$

여기서  $\varphi$ 는 강수량( $P$ )에 대한 연간 잠재적 증발산량( $PET$ )인 건조지수이다.  $\varepsilon_P$ 가 Eq. (17)에 의해 산정되면, Eq. (15)와 Eq. (11)을 이용하여  $\Delta Q_C$ 와  $\Delta Q_A$ 를 각각 산정할 수 있다.

## 4. 연구결과

### 4.1 Mann-Kendall 및 Sen's slope을 이용한 검증

본 연구에서 사용하는 수문기상학적 변수에 대한 유의성과 경향성을 검증하기 위해 M-K 검증과 Sen's slope 분석을 수행하였다. M-K 검증에서는 검정통계량  $Z$ 를 이용하여 자료에 경향성이 존재하는지를 검정할 수 있으며, 검정통계량 값의 부호에 따라 경향의 방향성 표현이 가능하다(Jin *et al.*, 2021). M-K 검증에서는 p-값을 이용하여 자료의 유의성을 판단할 수 있으며, 본 연구에서의 유의수준은 0.05로 설정하였다. Sen's slope 분석에서는  $Q_{med}$ 를 이용하여 자료의 경향성을 보여줄 수 있으며, 그 값들은 경향의 기울기를 나타낸다(Yun *et al.*, 2015). Sen's slope는 p-값 < 0.05이면 통계적으로 유의하며, p-값  $\geq 0.05$ 이면 통계적으로 유의한 경향성은 없다고 판단한다. 중권역별 1966~2017년 간 중권역별 일 유출량의 시계열 자료에 대한 경향성 검증 결과는 Table 1과 같다.

본 연구에서는 여러 지역에서 증가 및 감소하는 경향성이 나타났다. Table 1에 제시한 유출량의 M-K 검증 결과, 중권역 중 보청천(#3007)과 대청댐 하류(#3010)는 양의  $Z$ 값을 가지며 p-값은 0.05(신뢰도 95%) 이하로 귀무가설을 기각시켜 유의미한 증가(+) 경향을 나타내었다. 용담댐하류(#3002), 무주남대천(#3003), 영동천(#3004), 대청댐 상류(#3006), 대청댐(#3008), 갑천(#3009) 및 미호천(#3011)은 음의  $Z$ 값을 가

**Table 1.** Results of Z-value (Mann-Kendall test) and Sen's slope for runoff

Code	Z-value	Sen's slope	p-value	Trend
3001	0.73387	-7.93E-05	0.4630	no trend
3002	-8.6039	-8.05E-06	0.0001	downward
3003	-7.0373	-2.27E-05	0.0001	downward
3004	-9.6183	-4.14E-05	0.0001	downward
3005	1.0673	4.81E-06	0.2859	no trend
3006	-13.546	-5.59E-06	0.0001	downward
3007	5.0241	1.70E-05	0.0001	upward
3008	-8.033	-2.85E-05	0.0001	downward
3009	-6.8533	-2.65E-05	0.0001	downward
3010	2.0883	0.0000	0.0368	upward
3011	-4.7387	-6.78E-05	0.0001	downward
3012	0.4027	3.94E-06	0.6872	no trend
3013	-1.4638	-8.75E-06	0.1433	no trend
3014	-1.1602	-5.22E-06	0.2460	no trend

지며 p-값은 0.05(신뢰도 95%) 이하로 귀무가설을 기각시켜 유의한 감소(-) 경향을 나타내었다. 나머지 유역의 경우, p-값은 0.05(신뢰도 95%) 이상으로 유의한 경향성이 나타나지 않았다. 또한 Sen's slope를 수행한 결과는 M-K test 검증과 같은 경향이 나타났다.

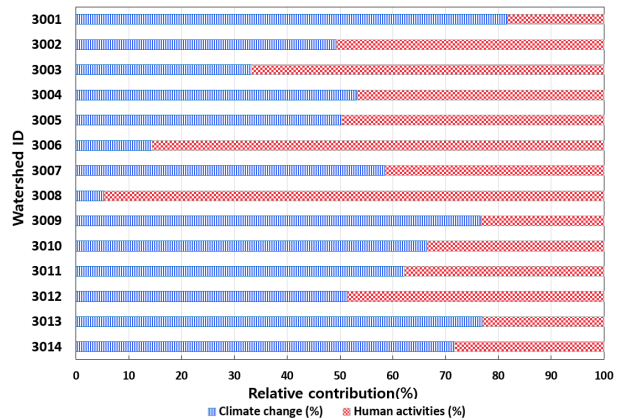
**4.2 과거 기간 유출량 정량적 평가**

과거 기간 유출량의 정량적 평가 및 분석을 위해서 1966~2017년의 유출량, 강수량 및 증발산량 자료를 Budyko 기반 기후 탄력성 기법을 이용하였다. 본 연구에서는 1991년을 기준으로 과거 기간을 B1(1966~1991)과 B2(1992~2017)로 나누었다. Ye *et al.* (2013)은 중국 Poyang강 유역의 과거 기간을 1990년으로 나누었으며, Shah *et al.* (2022)은 Pettitt test를 이용하여 우리나라 한강 유역의 변화 지점을 1990년대로 판단하였다. 이전 연구와 비교하면 본 연구의 기준점은 1990년대로 비슷한 것을 확인할 수 있다. 금강 유역의 모든 중권역에서 B1 기간에 대한 B2 기간에 유출량이 모두 증가하였다. 이를 바탕으로 유출량의 변화량에 대하여 기후변화와 인간 활동의 기여도를 정량적으로 분리하였다. Table 2는 금강 유역의 중권역별 B1과 B2 기간 동안의 연평균 강수량과 잠재 증발산량을 보여준다.

Table 2에서는 강수량은 대청댐 상류(#3006)을 제외한 중권역에서 B1 기간보다 B2 기간에 0.9~6.8% 증가하였다. 잠재 증발산량은 모든 중권역에서 B1 기간보다 B2 기간에 0.6~5.1% 증가하였다.

**Table 2.** Changes of precipitation and potential evapotranspiration

Code	P (mm)			PET (mm)		
	B1	B2	ΔP	B1	B2	ΔPET
3001	1270.0	1338.1	68.1	891.8	908.2	16.3
3002	1131.5	1173.0	41.5	895.6	929.8	34.3
3003	1124.8	1169.3	44.5	904.2	949.9	45.8
3004	1149.8	1194.3	44.6	911.1	946.0	34.9
3005	1099.9	1156.6	56.7	967.2	1001.8	34.6
3006	1219.8	1190.2	-29.6	900.1	930.7	30.6
3007	1148.1	1203.4	55.3	906.4	919.0	12.5
3008	1214.3	1224.7	10.4	923.9	938.9	14.9
3009	1271.8	1312.4	40.5	933.4	952.4	19.0
3010	1126.8	1200.6	73.8	955.0	960.3	5.3
3011	1165.8	1229.4	63.5	941.5	953.6	12.0
3012	1237.4	1301.1	63.7	938.0	960.2	22.2
3013	1197.4	1278.4	81.0	926.3	952.3	26.0
3014	1168.2	1232.5	64.3	935.8	961.7	25.9



**Fig. 4.** Relative contributions of climate change and human activities to runoff

Fig. 4은 과거 유출량을 기후변화와 인간 활동을 정량적으로 분리하여 상대적 기여도를 나타낸 것이며, B1 기간에 대한 B2 기간의 유출량 변화의 상대적인 영향을 비교하였다.

유출량에 대한 기후변화의 영향은 용담댐(#3001), 영동천(#3004), 초강(#3005), 보청천(#3007), 갑천(#3009), 대청댐 하류(#3010), 미호천(#3011), 금강공주(#3012), 논산천(#3013) 과 금강하구연(#3014)에서 각각 81.7%, 53.1%, 50.4%, 58.5%, 76.7%, 66.5%, 51.4%, 62.2%, 76.9%, 71.7%의 기여도를 차지하였다. 이는 기초자료에서 강수량의 변화량이 크거나 잠재 증발산량의 변화량이 작으면 기후변화에 대한 기여도가 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 유출량에 대한 인간 활동의 영향은 용담댐 하류(#3002), 무주남대천(#3003), 대청댐 하류(#3006)

**Table 3.** Proportion of land use land cover for Geum River basin

Characteristics of Watershed	Yongdam Dam		Downstream of Yongdam Dam		Namdaecheon in Muju	
	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)
Urbanized/Dry land	1.23	2.63	0.44	1.53	0.35	1.65
Cultivable land	13.15	17.16	9.41	11.90	5.87	11.82
Forest	82.74	75.25	86.84	82.87	92.01	84.30
Grass land	2.05	2.81	0.85	0.86	1.10	0.90
Marsh	0.06	0.13	0.08	0.42	0.05	0.15
Impervious	0.57	0.63	0.54	0.45	0.17	0.39
Water bodies	0.20	1.40	1.85	1.97	0.45	0.79
Characteristics of Watershed	Yungdong Stream		Cho River		Upstream of Daecheong Dam	
	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)
Urbanized/Dry land	1.33	3.24	0.53	1.46	1.18	4.16
Cultivable land	18.96	21.54	15.77	21.69	24.47	16.63
Forest	74.06	70.88	81.80	74.43	67.96	60.96
Grass land	3.20	1.60	1.07	0.94	1.95	1.62
Marsh	0.11	0.32	0.09	0.16	0.30	0.43
Impervious	1.03	0.86	0.21	0.43	1.53	1.12
Water bodies	1.31	1.56	0.54	0.89	2.61	3.58
Characteristics of Watershed	Bocheong Stream		Daecheong Dam		Gap River	
	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)
Urbanized/Dry land	0.85	2.25	0.98	3.16	6.37	13.27
Cultivable land	22.57	26.17	16.34	18.48	19.81	18.36
Forest	73.76	68.01	74.50	66.89	70.30	60.29
Grass land	1.47	1.19	1.65	1.37	3.05	3.90
Marsh	0.08	0.26	0.12	0.37	0.18	0.41
Impervious	0.52	0.79	0.93	0.61	2.72	2.57
Water bodies	0.75	1.32	5.48	9.12	0.62	1.20
Characteristics of Watershed	Downstream of Daecheong Dam		Miho Stream		Gonju station in Geum River	
	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)
Urbanized/Dry land	2.84	7.22	2.24	7.44	1.29	3.84
Cultivable land	36.76	34.37	41.38	38.84	32.26	28.54
Forest	53.45	50.45	51.22	47.23	61.27	59.88
Grass land	3.54	2.87	2.91	2.78	2.76	3.76
Marsh	0.47	0.75	0.13	0.43	0.17	0.26
Impervious	1.02	1.36	1.04	1.67	0.85	1.47
Water bodies	1.92	2.98	1.08	1.62	1.41	2.25
Characteristics of Watershed	Nonsan Stream		Geum River Weir			
	B1(%)	B2(%)	B1(%)	B2(%)		
Urbanized/Dry land	1.78	6.60	2.27	5.63		
Cultivable land	43.02	39.49	51.08	47.09		
Forest	48.45	46.21	36.51	35.71		
Grass land	3.77	3.64	2.17	2.47		
Marsh	0.10	0.26	0.80	0.38		
Impervious	1.42	1.65	0.65	1.45		
Water bodies	1.46	2.16	6.50	7.28		



와 대청댐(#3008)에서 각각 50.7%, 66.7%, 85.6%, 94.7%의 기여도를 차지하였다. 인간 활동이 유출량에 미치는 영향은 유출량 변화의 50% 이상을 차지하는 것을 확인할 수 있으며, 저수지 운영, 수질 및 토양 보전, 식생 복원 등은 유출량 변화에 영향을 미치는 인간 활동의 주요 요인이다. 이와 같은 결과를 통해 유출량의 변화는 금강 유역의 중권역 14개 중 10개가 인간 활동보다는 기후변화로 인한 영향을 크게 받는다는 것을 파악할 수 있다. Zhang *et al.* (2016)에서 중국 Poyang강 유역의 강수량 및 유량은 전반적으로 증가하였고 기후변화와 인간 활동의 기여도는 각각 73.2%, 26.8%로 인간 활동의 영향이 큰 것을 확인하였다. 또한, Wu *et al.* (2017)에서 중국 Yanhe 강 유역은 전반적으로 유출량이 감소하였고 기후변화는 46.1~60.8%, 인간 활동은 39.1~53.9를 차지하였다. 이는 기후변화가 유출량 감소에 지배적인 역할을 한 것이라고 할 수 있다. 본 연구와 이전 연구를 통해 기후변화와 인간 활동의 상대적 기여도는 중권역 간에도 다양하다는 것을 확인할 수 있었다.

금강 유역의 도시화를 파악하기 위해 토지이용 변화를 분석하였다. 금강 유역은 세종시 개발 등 하천 환경 변화와 도시화에 따른 불투수면 증가 등으로 물순환 구조가 약화된 지역이다(Lee *et al.*, 2019). Table 3은 B1과 B2 기간 동안의 금강 유역의 중권역 전체 면적 대비 각각의 토지 이용 변화 자료를 정리한 것이다. 이 자료는 WAMIS에서 제공하고 있으며, 1975~2015년까지 5년마다 구축되어 있다.

금강 유역에서 토지 이용의 특성은 주로 도시화 및 건조지역, 경작지, 산림이 대부분의 면적을 차지하였으며, 토지 이용

비율에서 현저한 차이를 볼 수 있었다. 예를 들어, B2 기간 동안 대청댐 하류(#3010)에서 도시화 및 건조지역, 경작지, 산림의 비율은 각각 7.22%, 34.37%, 50.45%이다. B1과 B2 기간의 토지 이용 비율을 비교하였을 때 도시화 비율은 4.38%로 증가하였으며, 경작지의 비율 2.39%, 산림의 비율은 3.0%로 감소하였다. 대부분의 중권역에서 도시화 지역의 비율은 증가하고, 산림의 비율은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 자료를 통해 금강 유역의 과거의 토지 이용 비율 대비 인간 활동에 의한 유역의 환경 변화를 감지할 수 있다.

### 4.3 RCP 시나리오에 따른 미래 유출량의 변화에 대한 평가

본 연구에서는 미래 기간 동안의 유출량의 변화를 평가하기 위해 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 이용하였으며, 미래 유출량 변화에 대하여 기후변화의 영향을 평가하기 위해 기후 자료의 기간을 세 기간으로 나누었다. 과거 기간이 기준기간인 S0(1966~2017)이며, 미래 기간인 전망기간은 S1(2024~2061) 및 S2(2062~2099)로 구분하였다. 이는 전망기간인 2024~2099년을 2061년을 기준으로 하여 37년씩 각각 두 기간 S1과 S2로 나눈 것이다. 또한 RCP 4.5 시나리오의 경우 HadGEM2-ES 모델을 사용하였으며, RCP 8.5 시나리오의 경우 HadGEM2-AO를 사용하였다.

Table 4에 나타난 바와 같이, RCP 4.5 시나리오와 RCP 8.5 시나리오의 연평균 강수량은 각각 기준기간보다 S2 기간에 358.94 mm, 472.54 mm가 증가하였으며, 연평균 증발산량은 각각 S2 기간에 169.73 mm, 87.80 mm가 감소하였다. Table 5에 나타난 바와 같이, 기준기간부터 전망기간까지 점점 기온이 증가하였다. RCP 4.5 시나리오의 경우 평균 기온이 기준기간보다 S2 기간에 3.18°C 증가하였으며, RCP 8.5 시나리오에서는 4.91°C 증가하였다. Budyko 프레임워크를 기반으로 한 대부분의 연구에서 유출량에 영향을 끼치는 기후변화의 요인을 확인할 수 있다(Gardner, 2009; Wang *et al.*, 2012; Shahid *et al.*, 2018). Gardner (2009)은 온도가 유출수에 미치는 영향은 거의 고려되지 않지만, 온도가 잠재 증발을 변경하여 간접적으로

Table 4. Variation in the annual precipitation and evapotranspiration

Scenario	Period	P (mm)		PET (mm)	
		Average	ΔP	Average	ΔPET
Baseline	1973~2017	1207.25	-	898.60	-
RCP 4.5	2024~2061	1472.88	256.63	688.95	-209.65
	2062~2100	1566.19	358.94	728.87	-169.73
RCP 8.5	2024~2061	1461.80	254.55	688.89	-209.71
	2062~2099	1679.79	472.54	810.80	-87.80

Table 5. Variation in the annual temperatures (mean, minimum, maximum)

Scenario	Period	Mean Temp.(°C)		Min. Temp.(°C)		Max. Temp.(°C)	
		Average	ΔT	Average	ΔT	Average	ΔT
Baseline	1973~2017	11.84	-	6.54	-	17.97	-
RCP 4.5	2024~2061	14.01	2.17	8.3	1.76	19.72	1.75
	2062~2100	15.02	3.18	9.27	2.73	20.76	2.79
RCP 8.5	2024~2061	13.97	2.13	8.18	1.64	19.75	1.78
	2062~2099	16.75	4.91	10.88	4.34	22.61	4.64

유출수를 변경하는 역할을 한다고 가정했다. Wang *et al.* (2012)은 중국 Yellow 강에 대한 유출량의 변화를 강수량은 11.76%, 잠재 증발산량은 -3.83%로 분석하였다. Shahid *et al.* (2018)은 중국 Soan 강 유역의 강수량의 감소와 잠재 증발산량의 증가는 유출량 변화의 68%를 차지하였다.

Figs. 5 and 6는 Budyko 기반 기후 탄력성 기법을 이용한 기후변화 시나리오에 따른 미래 유출량 변화에 대한 기후변화의 기여도이다. Fig. 5는 RCP 4.5 시나리오에 따른 기준기간에 대하여 S1과 S2 기간을 비교하였으며, Fig. 6는 RCP 8.5 시나리오에 따른 기준기간에 대하여 S1과 S2 기간을 비교하였다.

RCP 8.5 시나리오에 대해 기준기간과 비교하였을 때 용담댐(#3001), 대청댐(#3008), 대청댐 하류(#3010)를 제외하고는 S2 기간이 S1 기간보다 유출량 변화에 대한 기후변화의 기여도가 컸다. 대부분의 유역에서 유출량 변화에 대한 기후변화의 기여도는 RCP 4.5일 때에 비해 RCP 8.5에서 더 크게 상승한 것으로 나타났다. 기준기간에 대하여 S2 기간에 대한 분

석의 경우, RCP 8.5에서는 갑천(#3009)에서 기후변화에 대한 기여도가 65.5%로 가장 컸으며, RCP 4.5에서는 초강(#3005)에서 기후변화에 대한 기여도가 67.1%로 가장 컸다.

Figs. 7 and 8은 기후변화 시나리오에 따른 미래 유출량 변화에 대한 인간 활동의 기여도이다. Fig. 7은 RCP 4.5 시나리오에 따른 S1과 S2 기간을 각각 기준기간과 비교하였으며, Fig. 8은 RCP 8.5 시나리오에 따른 S1과 S2 기간을 각각 기준기간을 비교하였다.

RCP 8.5 시나리오에 대해 기준기간과 비교하였을 때 용담댐(#3001), 대청댐(#3008), 대청댐 하류(#3010)에서는 S2 기간이 S1 기간보다 유출량 변화에 대한 인간 활동의 기여도가 컸다. 또한 기준기간에 대하여 S2 기간에 대한 분석의 경우, RCP 8.5에서는 보청천(#3007)에서 인간 활동에 대한 기여도가 55.2%로 가장 컸으며, RCP 4.5에서는 무주남대천(#3003)에서 인간 활동에 대한 기여도가 73.2%로 가장 컸다.

Figs. 5-8을 보면 기준기간에 대하여 미래를 비교하였을 때

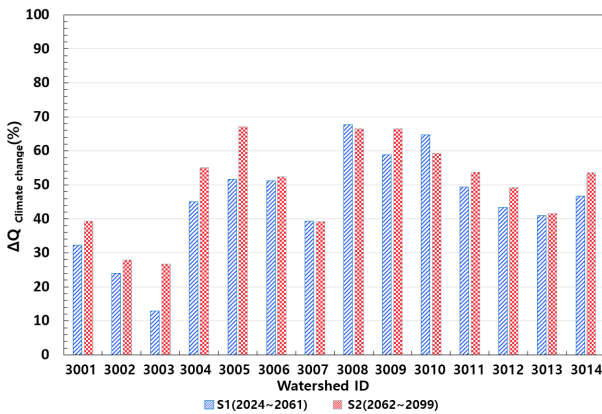


Fig. 5. Relative contributions of climate change to runoff for RCP 4.5 scenario

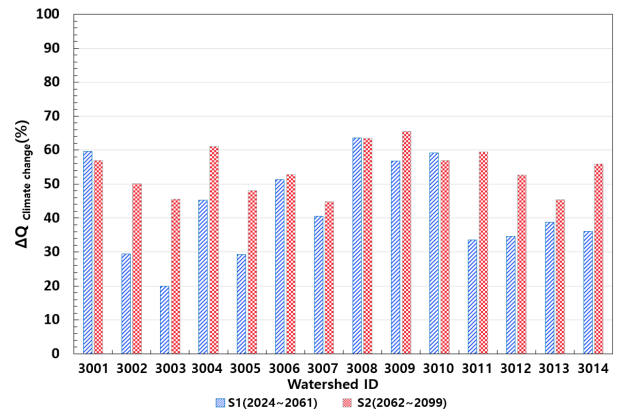


Fig. 6. Relative contributions of climate change to runoff for RCP 8.5 scenario

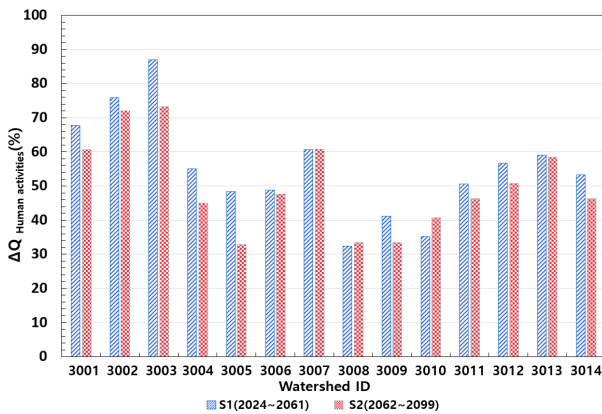


Fig. 7. Relative contributions of human activities to runoff for RCP 4.5 scenario

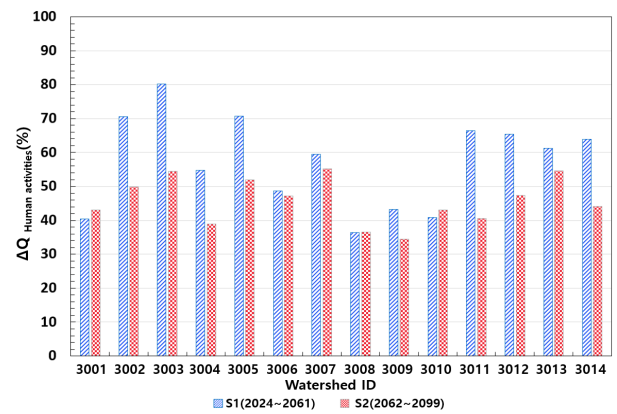


Fig. 8. Relative contributions of human activities to runoff for RCP 8.5 scenario

유출량 변화에 대한 주요 요인은 기후변화라는 것을 확인할 수 있다. Shah *et al.* (2022)은 우리나라 한강 유역에 대해 RCP 시나리오에 따른 미래 유출량을 분석하였다. 시나리오에 따라 2071~2100년 동안의 연간 강수량 증가는 RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 각각 11.1%, 13%로 2031~2060년 동안 보다 상대적으로 컸다. 이러한 기후변화 조건 하에서 기후 탄력성 접근법을 이용하여 유출량의 변화를 분석한 결과, 미래에 22.14%에서 27.32% 범위로 유출량의 변화가 나타났다. 이러한 결과들을 통해 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 모두에서 강수량과 기온이 증가하였으며, 이러한 기후 요소가 미래 유출량 변화의 핵심 요소가 될 것이라 예상된다.

## 5. 결론

최근 수십 년 동안 전 세계적으로 거의 모든 하천 유역에서 하천 흐름 변동은 기후변화와 인간 활동에 의해 직간접적으로 영향을 받았다. 대부분의 연구에서는 과거 유량 자료를 이용하여 기후변화와 인간 활동으로 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 분리하였다. 하지만 국외 및 국내에서는 미래 기후변화 시나리오를 고려하여 유역 유출량의 변화에 미치는 기후변화와 인간 활동의 영향을 정량적으로 분석한 연구는 충분하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 금강 유역의 14개 중권역을 대상으로 과거 관측자료와 기후변화 시나리오를 이용하였으며, 기후변화와 인간 활동이 유출량에 미치는 영향을 기후 탄력성 접근법과 Budyko 프레임워크를 이용하여 정량적으로 분리하였다.

금강 유역의 유출량에 대한 기후변화와 인간 활동의 기여도를 전망한 결과, 과거의 경우, 중권역마다 유출량 변화에 미치는 요인의 상대적인 기여도가 기후변화와 인간 활동 모두에 의해 영향을 받았다. 중권역 중 무주남대천(#3003)은 66.7%, 대청댐 하류(#3006)는 85.6%, 대청댐(#3008)은 94.7%로 인간 활동이 유출량 변화에 주는 기여도가 컸으며, 금강 유역의 나머지 중권역은 기후변화가 유출량 변화에 주는 기여도가 컸다. 미래의 경우 대부분의 유역에서 기후변화의 기여도는 RCP 4.5일 때에 비해 RCP 8.5에서 더 크게 상승한 것으로 나타났다. 예를 들어, 기준기간에 대하여 S2 기간에 대한 분석에서 용담댐(#3001)은 RCP 4.5에서는 39.3%, RCP 8.5에서는 56.9%로 RCP 8.5가 큰 것을 확인할 수 있다 이를 통해 유출량 변화에 대한 기후변화와 인간 활동의 상대적인 영향은 수십 년 동안의 각 중권역의 유출량의 특성을 보여주었다.

본 연구의 결과를 통해 과거의 유출량 변화에 대하여 기후변화와 인간 활동으로 정량적으로 분리하여 유출량의 특성을

파악할 수 있었으며, 미래 기후변화 시나리오를 이용하여 기후변화가 미래의 유출량 변화의 주요 요인인 것을 확인할 수 있었다. 기후변화로 인한 강수량의 증가와 기온의 상승은 홍수나 가뭄 등과 같은 물 관련 재해를 크게 증가시킬 것이다. 따라서 본 연구 결과는 수문 순환에 있어서 유출량에 미치는 영향을 예측가능하게 하며, 이는 미래의 효율적인 수자원 관리를 결정하는데 중요한 기반이 될 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전 공동연구 기술개발사업(2022-MOIS63-001)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Agbo, E.P., and Ekpo, C.M. (2021). "Trend analysis of the variations of ambient temperature using Mann-Kendall test and Sen's estimate in Calabar, southern Nigeria." *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1734, No. 1, pp. 1-8.
- Aswad, F.K., Yousif, A.A., and Ibrahim, S.A. (2020). "Trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test for annual and monthly rainfall for Sinjar district, Iraq." *The Journal of Duhok University*, Vol. 23, No. 2, pp. 501-508.
- Dey, P., and Mishra, A. (2017). "Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions." *Journal of Hydrology*, Vol. 548, pp. 278-290.
- Donohue, R.J., Roderick, M.L., and McVicar, T.R. (2007). "On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 2, pp. 983-995.
- Gardner, L.R. (2009). "Assessing the effect of climate change on mean annual runoff." *Journal of Hydrology*, Vol. 379, No. 3-4, pp. 351-359.
- Hong, S.Y., Oh, S.G., Suh, M.S., Lee, D.G., Ahn, J.B., and Kang, H.S. (2013). "Future climate changes over north-east Asian region simulated by RegCM4 based on the RCP scenarios." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 27-44.
- Jehanzaib, M., Shah, S.A., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2020a). "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.
- Jehanzaib, M., Shah, S.A., Yoo, J., and Kim, T.W. (2020b). "Investigating the impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches." *Journal of Hydrology*, Vol. 588, 125052.
- 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.
- Jin, D.H., Jang, S.H., Kim, H.K., and Lee, Y.S. (2021). "A trend analysis of seasonal average temperatures over 40 years in South Korea using Mann-Kendall test and sen's slope." *The Korean Journal of Applied Statistics*, Vol. 34, No. 3, pp. 425-433. (in Korean)
- 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, J.H., and Park, S.S. (2004). "Long-term trend analyses of water qualities in Nakdong River based on non-parametric statistical methods." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 20, No. 1, pp. 63-71. (in Korean)
- Kim, J.P., and Kim, G.S. (2011). "The impact of climate change on the trends of precipitation effectiveness ratio and runoff data in South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 683-694.
- Kim, K., Hwang, S., Jun, S.M., Lee, H., Kim, S., and Kang, M.S. (2022). "Development of monthly hydrological cycle assessment system using dynamic water balance model based on Budyko framework." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 64, No. 2, pp. 71-83. (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, J.W., Park, J.Y., Jung, C.G., and Kim, S.J. (2019). "Evaluation of land use change impact on hydrology and water quality health in Geum River Basin." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 22, No. 2, pp. 82-96. (in Korean)
- Liang, W., Bai, D., Wang, F., Fu, B., Yan, J., Wang, S., and Feng, M. (2015). "Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau." *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 8, pp. 6500-6519.
- Mwangi, H.M., Julich, S., Patil, S.D., McDonald, M.A., and Feger, K.H. (2016). "Relative contribution of land use change and climate variability on discharge of upper Mara River, Kenya." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 5, pp. 244-260.
- Park, C.Y., Choi, Y.E., Kwon, Y.A., Kwon, J.I., and Lee, H.S. (2013). "Studies on changes and future projections of subtropical climate zones and extreme temperature events over South Korea using high resolution climate change scenario based on PRIDE model." *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 19, No. 4, pp. 600-614. (in Korean)
- Reboita, M.S., da Rocha, R.P., de Souza, M.R., and Llopart, M. (2018). "Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections." *International Journal of Climatology*, Vol. 38, No. 6, pp. 2866-2879.
- 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 multi-model ensembles. *Water*, Vol. 14, No. 4, p. 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.
- Van der Velde, Y., Vercauteren, N., Jaramillo, F., Dekker, S.C., Destouni, G., and Lyon, S.W. (2014). "Exploring hydroclimatic change disparity via the Budyko framework." *Hydrological Processes*, Vol. 28, No. 13, pp. 4110-4118.
- Wang, S., Yan, M., Yan, Y., Shi, C., and He, L. (2012). "Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River." *Quaternary International*, Vol. 282, pp. 66-77.
- 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.
- Xin, Z., Li, Y., Zhang, L., Ding, W., Ye, L., Wu, J., and Zhang, C. (2019). "Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal streamflow." *Journal of Hydrology*, Vol. 574, pp. 936-945.
- Ye, X., Zhang, Q., Liu, J., Li, X., and Xu, C.Y. (2013). "Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China." *Journal of Hydrology*, Vol. 494, pp. 83-95.
- Yun, J.H., Hwang, S.Y., Kim, D.H., and Kim, S.M. (2015). "Trend analysis of monthly water quality data in Nakdong River based on seasonal Mann-Kendall test." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 6, pp. 153-162. (in Korean)
- Zeng, S., Zhan, C., Sun, F., Du, H., and Wang, F. (2015). "Effects of climate change and human activities on surface runoff in the Luan River basin." *Advances in Meteorology*, Vol. 2015, pp. 1-12.
- 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, Q., Liu, J., Singh, V.P., Gu, X., and Chen, X. (2016). "Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China." *Hydrological Processes*, Vol. 30, No. 14, pp. 2562-2576.
- 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, No. 3, pp. 833-851.