기후변화에 따른 우리나라 기준증발산량 변화 분석

Analysis of Reference Evapotranspiration Change in Korea by Climate Change Impact

문장원*

Moon, Jang Won*

Abstract

In this study, the impact of climate change on the characteristics of evapotranspiration in Korea was assessed. The Regional Concentration Pathway (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios were used to calculate the reference evapotranspiration for 62 stations of the Korea Meteorological Administration (KMA) and compared with the calculation results from observation data. The results of the analysis showed that the average annual evapotranspiration increases by 5.4% in the RCP 4.5 scenario and 9.5% in the RCP 8.5 scenario compared with the current one. On a monthly scale, the reference evapotranspiration for January, February, November and December is expected to increase by more than 10% compared to the current period. The ratio of annual rainfall to yearly evapotranspiration was used to examine the possibility of droughts for future periods, and the results were found to be relatively high in the RCP 8.5 scenario when compared to the RCP 4.5 scenario. The increase in the reference evapotranspiration due to climate change may lead to a decrease in the available water resources, and therefore, continuous monitoring and appropriate adaptation measures are necessary.

Key words : Reference Evapotranspiration, Climate Change, RCP Scenario, Hargreaves Equation

요 지

본 연구에서는 기후변화가 우리나라의 증발산 특성에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 기상청 62개 지점에 대한 기준증발산량을 산정한 후 관측자료에 의한 산정 결과와 비교하였다. 분석 결과, 연평균 기준증발산량의 경우 RCP 4.5 시나리오에서는 현재 대비 5.4%, RCP 8.5 시나리오에서는 현재 대비 9.5% 증가할 것으로 나타났으며, 월별로는 1월, 2월, 11월, 12월에서 현재 대비 10% 이상 기준증발산량이 증가할 것으로 나타났다. 연 강수량과 연 기준증발산량의 비율을 이용하여 미래 기간에 대한 가뭄 발생 가능성을 검토하였으며, RCP 4.5 시나리오에 비해 RCP 8.5 시나리오의 가뭄 발생 가능성이 상대적으로 높게 나타나는 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 기후변화로 인한 기준증발산량의 증가는 이용 가능한 수자원량의 감소를 초래할 수 있으므로 지속적인 모니터링과 적절한 적응대책의 수립이 필요하다는 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 기준증발산, 기후변화, RCP 시나리오, Hargreaves 공식

1. 서 론

최근 들어 우리나라에서도 기후변화는 점차 현실화되어 나타나고 있는 현상으로 인식되고 있으며, 미래 수자원 관리 여건에 대한 불확실성을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다. 기후변화로 인해 강수량의 변동 폭이 증가하고 기온

또한 증가하게 될 것으로 전망되는 등 미래의 우리나라 수문기상학적 특성은 지금과 다르게 나타나게 될 것으로 예측되고 있다. 강수량의 변동 폭 증가로 홍수와 가뭄의 발생 가능성이 증가하게 되며, 기온의 증가는 증발산량의 증가를 초래하여 이용 가능한 수자원의 감소 원인으로 작용할 수 있다는 점은 관련 연구를 통해 확인할 수 있다. Palutikof

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원(Tel: +82-31-910-0591, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: jwmoon@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

et al. (1994)은 지중해지역에 대한 분석을 통해 기후변화가 미래 지중해지역 잠재증발산량 증가를 초래할 수 있다는 결과를 제시하였으며, Remrova and Cislrova (2010)는 체코의 Uhliriska 유역에 대해 기후변화가 증발산량의 변화에 미치는 영향을 분석한 후 기후변화로 인해 증발산량의 증가 경향이 뚜렷하게 나타난다는 연구결과를 제시하였다. Khalil (2013)은 이집트 증발산량 특성에 대한 기후변화 영향을 평가할 수 있는 시나리오에 따라 정도의 차이는 있으나 대부분 미래 증발산량이 증가하게 될 것이라는 결과를 확인하였다. Mundo-Molina (2015)는 멕시코 북부지역에 대해 기후변화가 증발산량의 변화에 미치는 영향을 평가하였으며, 기후변화로 2030년대에는 현재보다 약 7% 증가 가능성이 있다는 결과를 제시하였다. 우리나라의 경우 Ahn et al. (2013)은 SWAT 모형을 이용하여 설마천 유역에서 기후변화가 증발산 및 토양수분에 미치는 영향을 평가한 바 있으나 기후변화에 따른 미래 우리나라의 증발산 특성 변화를 정량적으로 제시한 연구는 상대적으로 미흡한 상황이다. 따라서 기후변화가 우리나라의 수문기상학적 특성 변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 제시함으로써 이에 효과적으로 대처할 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 기후변화에 대한 효과적인 대책 수립은 이로 인해 발생 가능한 피해 최소화 필수적이라 할 수 있다.

수자원계획을 수립하거나 유역의 수문학적 특성을 분석하는 과정에서 중요한 인자 중 하나는 증발산량에 대한 정량적 평가라 할 수 있다. 증발산량은 지하수와 지표수에 대한 물수지 분석에 있어 매우 중요한 인자이며, 국지적 혹은 대륙적 규모의 기후변화나 환경변화를 예측하기 위해서도 정확한 측정과 정량적 분석이 필수적이다(Chae et al., 1999). 또한 증발산량의 정확한 예측은 수자원의 효과적이고 지속적인 관리에 반드시 필요한 요소로 침투, 유출 과정의 계산과 함께 수문학적 물 순환 과정에서 아주 중요한 역할을 한다(Oh et al., 2002). 그러나 다른 수문기상학적 인자들과 달리 실제 관측이 이루어지기 어려우며, 계기에 의해 현상에서 실측된 증발산량 자료는 매우 제한적으로 존재하기 때문에 일반적으로 증발산량에 대한 분석은 기상자료를 이용하여 이론적인 방법에 의해 산정되어 이용되고 있다(Grismer et al., 2002). 이론적인 방법에 의해 산정되는 증발산량은 잠재증발산량(potential evapotranspiration)과 기준증발산량(reference evapotranspiration)이 있으며, 이중 기준증발산량은 충분한 물의 공급이 있을 경우 기준작물(알파파나 잔디)에 의한 증발산량을 의미한다. 이와 같이 기준증발산은 대상 작물을 구체적으로 0.12m 높이의 잔디로 정의함으로써 증발 대상이 되는 식생조건을 보다 명확하게 명시하였다(Rim, 2008). 이에 따라 증발산 분석을 위한 표준 값으로 기준증발산량을 이용하는 것이 최근 연구자들의 추세라 할 수 있다. 기준증발산량을 산정할 수 있는 공식은 현재까지 약 50여 가지 이상의 방법이 제시되었으며(Grismer et al., 2002), Hargreaves and

Samani (1985)는 최고 및 최저기온과 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation) 자료만을 이용하여 기준증발산량을 산정할 수 있는 방법인 Hargreaves 공식을 제시하였다. Samani (2000)는 기준증발산량의 약 80%를 기온과 태양복사열로 설명할 수 있다는 연구결과를 제시한 바 있으며, 많은 국내외 연구자들에 의해 Hargreaves 공식의 적용성이 확인되었다(Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Temesgen et al., 1999; Oh et al., 2002; Hargreaves and Allen, 2003; Oh and Lee, 2004; Lee et al., 2008; Lee and Park, 2008; Rim, 2008; Moon et al., 2013). 이러한 연구 중 Moon et al. (2013)은 우리나라의 기후특성을 고려하여 Hargreaves 공식의 매개변수 지역화 연구를 수행하였으며, Penman-Monteith 방법에 의한 결과와 비교하여 기존 Hargreaves 공식에 비해 향상된 기준증발산량 산정 결과를 나타내고 있다는 연구결과를 제시하였다.

이에 본 연구에서는 기상청에서 제시된 기후변화 시나리오와 Hargreaves 공식을 이용하여 우리나라 주요 지점별로 기준증발산량을 산정하였으며, 그 결과와 관측자료에 의한 기준증발산량 산정 결과와의 비교를 통해 기후변화가 우리나라의 기준증발산량에 미치는 영향을 평가하였다. 기준증발산량은 실제 증발산량이 아닌 이론적인 값이라 할 수 있으나 현재 및 미래기간에 대한 기준증발산량을 비교함으로써 기후변화 영향에 대한 정량적 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단하였다. 이와 함께 기준증발산량과 강수량과의 비교를 수행한 후 미래 우리나라의 이용 가능한 수자원량에 대한 간접 평가 결과를 제시하였다.

2. 이용자료 및 분석방법

2.1 연구대상지점 및 이용자료

본 연구에서는 과거 30년 이상 관측자료 활용이 가능한 기상청 지점을 검토하여 연구대상지점으로 선정하였으며, 이를 통해 서울 등 62개 지점을 대상으로 선정하였다. 62개 지점에 대해 1988년부터 2017년까지의 기간에 대해 강수량, 최고 및 최저기온 자료를 수집하였으며, 이를 관측자료에 의한 기준증발산량 산정에 활용하였다. Table 1은 본 연구의 연구대상지점에 해당하는 62개 지점 현황을 정리하여 나타낸 것이다.

62개 지점의 관측자료와 함께 기상청에서 제공하고 있는 기후변화 시나리오 자료를 수집하였다. 기상청에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정한 대표 농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 고려하여 미래 기후변화 시나리오를 생산하였으며, 이를 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)을 통해 제공하고 있다. 기상청에서는 4가지 대표 온실가스 농도(2.6, 4.5, 6.0, 8.5)를 이용하고 있으며, 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO를 도입하여 수평해상도 135 km의 RCP 시나리오를 산출하였

Table 1. Descriptions for Weather Stations Used in this Study

Code	Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Code	Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)
090	Sokcho	38° 15'	128° 33'	22.9	203	Icheon	37° 15'	127° 29'	90.0
095	Cheorwon	38° 08'	127° 18'	154.9	211	Inje	38° 03'	128° 10'	198.7
100	Daegwallyeong	37° 40'	128° 43'	772.4	212	Hongcheon	37° 41'	127° 52'	146.2
101	Chuncheon	37° 54'	127° 44'	76.8	216	Taeback	37° 10'	128° 59'	714.2
105	Gangneung	37° 45'	128° 53'	26.1	221	Jecheon	37° 09'	128° 11'	263.1
108	Seoul	37° 34'	126° 57'	85.5	226	Boeun	36° 29'	127° 44'	173.0
112	Incheon	37° 28'	126° 37'	69.0	232	Cheonan	36° 46'	127° 07'	21.3
114	Wonju	37° 20'	127° 56'	150.7	235	Boryeong	36° 19'	126° 33'	17.9
119	Suwon	37° 16'	126° 59'	34.5	236	Buyeo	36° 16'	126° 55'	11.0
127	Chungju	36° 58'	127° 57'	113.7	238	Geumsan	36° 06'	127° 28'	170.6
129	Seosan	36° 46'	126° 29'	25.2	243	Buan	35° 43'	126° 42'	3.6
130	Ulsan	36° 59'	129° 24'	47.0	244	Imsil	35° 36'	127° 17'	248.0
131	Cheongju	36° 38'	127° 26'	56.4	245	Jeongeup	35° 33'	126° 51'	39.5
133	Daejeon	36° 22'	127° 22'	62.6	247	Namwon	35° 24'	127° 19'	93.5
135	Chupungnyeong	36° 13'	127° 59'	240.9	248	Jangsu	35° 39'	127° 31'	407.0
136	Andong	36° 34'	128° 42'	140.7	260	Jangheung	34° 41'	126° 55'	44.5
138	Pohang	36° 01'	129° 22'	1.3	261	Haenam	34° 33'	126° 34'	4.6
140	Gunsan	36° 00'	126° 45'	26.9	262	Goheung	34° 37'	127° 16'	53.3
143	Daegu	35° 53'	128° 37'	57.3	271	Bongwhoa	36° 56'	128° 54'	320.9
146	Jeonju	35° 49'	127° 09'	61.0	272	Yeongju	36° 52'	128° 31'	210.5
152	Ulsan	35° 33'	129° 19'	34.6	273	Mungyeong	36° 37'	128° 08'	170.8
155	Changwon	35° 10'	128° 34'	36.8	277	Yeongdeok	36° 31'	129° 24'	41.2
156	Gwangju	35° 10'	126° 53'	74.5	278	Uiseong	36° 21'	128° 41'	82.6
159	Busan	35° 06'	129° 01'	69.2	279	Gumi	36° 07'	128° 19'	47.4
162	Tongyeong	34° 50'	128° 26'	30.8	281	Yeongcheon	35° 58'	128° 57'	93.3
165	Mokpo	34° 49'	126° 22'	37.4	284	Geochang	35° 40'	127° 54'	221.4
168	Yoesu	34° 44'	127° 44'	73.3	285	Hapcheon	35° 33'	128° 10'	33.0
170	Wando	34° 23'	126° 42'	27.7	288	Miryang	35° 29'	128° 44'	10.7
192	Jinju	35° 09'	128° 02'	27.1	289	Sancheong	35° 24'	127° 52'	138.7
201	Ganghwa	37° 42'	126° 26'	46.2	294	Geoje	34° 53'	128° 36'	44.5
202	Yangpyeong	37° 29'	127° 29'	47.4	295	Namhae	34° 48'	127° 55'	43.2

고 이를 기반으로 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 이용하여 한반도 영역에 대해 12.5 km 해상도를 갖는 상세화된 지역기후변화 시나리오를 산출하였다. 12.5 km 해상도의 시나리오를 기반으로 통계적 상세화 기법을 통해 1 km 해상도의 남한상세 시나리오를 생산하였으며, 이를 이용하여 기상청 지점별 기후변화 시나리오를 생산하여 제공하고 있다. 남한상세 시나리오는 관측자료(2000~2010년)를 PRISM based Downscaling Estimation (PRIDE) 모델에 적용하여 1 km

해상도의 관측격자 자료를 생산하여 기후 값으로 사용하고 12.5 km 한반도 시나리오 자료에서 각 격자점별로 계절 변동을 제거한 편차 자료를 추출한 후 관측에서 얻은 기후 값에 지역기후모델의 편차를 더하여 생산된 자료이다. 통계적 상세화 과정을 통해 기후모델의 계통오차가 제거된 자료가 생산되며, 1 km 격자로 생산된 자료로부터 기상청 주요 지점에 대한 강수량, 평균기온, 최고기온, 최저기온 자료를 생산하여 제공하고 있다. 본 연구에서는 지점별로 제공되고 있는

4가지 남한상세 시나리오 중 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 이용하였으며, 시나리오별 강수량, 최고기온 및 최저기온 자료를 이용하여 기준증발산량 관련 기후변화 영향을 평가하였다. 평가 과정에서 1988~2017년까지 30년 간의 관측자료를 이용하여 현재의 기준증발산량 특성을 판단하였으며, 2021~2100년의 기간을 미래기간으로 고려하여 미래에 대한 기준증발산량 특성을 판단하였다.

2.2 분석방법

기상청 62개 지점에 대해 수집된 관측자료와 기후변화 시나리오를 이용하여 현재(1988~2017년) 및 미래(2021~2100년)에 대한 지점별 기준증발산량을 산정하였다. Hargreaves 공식과 Moon et al. (2013)에 의해 제시된 지점별 매개변수를 이용하여 일 단위 기준증발산량을 산정하였으며, 산정된 일 단위 기준증발산량을 월 단위 및 연 단위 자료로 환산하여 결과를 비교하였다. 결과의 비교는 먼저 지점별 관측자료에 의한 현재기간 기준증발산량과 기후변화 시나리오에 의한 미래기간 기준증발산량 연 평균 값을 비교하여 현재 대비 미래기간 기준증발산량의 증감 여부를 판단하였으며, 62개 지점의 평균을 통해 우리나라 기준증발산량에 대한 기후변화 영향을 검토하여 제시하였다. 또한 월별 평균 기준증발산량을 산정하여 비교하였으며, 이를 통해 기후변화로 인한 영향의 월별 범위를 파악하고자 하였다. 마지막으로 강수량과 기준증발산량을 비교하였으며, 이를 통해 가뭄의 발생 가능성을 간접적으로 파악하고자 하였다. 강수량과 기준증발산량의 비율이 가뭄을 표현할 수 있는가를 확인하기 위해 관측자료를 이용하여 사전 분석을 수행하였으며, Fig. 1은 62개 지점의 연강수량과 관측자료를 이용하여 산정된 연도별 기준증발산량의 비를 도시하여 나타낸 것이다. Fig. 1의 결과를 살펴보면, 과거 우리나라에서 가뭄이 발생했던 것으로 알려져 있는 1988년, 1994~1996년, 2001년, 2008년, 2015년, 2017년에서 산정된 비율 값이 1보다 작거나 1에 근접하는

결과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 그림에서 점선은 비율 값 1.2에 해당하는 것으로 이를 기준으로 할 경우 과거 가뭄년도를 잘 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 강수량과 기준증발산량의 비율을 산정하여 검토함으로써 가뭄의 발생 가능성을 확인해볼 수 있을 것으로 판단하였으며, 이를 기후변화 시나리오에 의한 미래기간 강수량 및 기준증발산량에 적용함으로써 미래기간에 대한 가뭄 발생 가능성을 검토하였다.

3. 기준증발산량 산정

본 연구에서는 기준증발산량 산정을 위한 방법으로 Hargreaves and Samani (1985)가 제안한 방법을 이용하였다. Hargreaves et al. (1985)에 의하면 Hargreaves 공식은 별도의 검정과정이 없이 전 세계적으로 이용될 수 있다고 하고 있으나 적용 대상 지역의 기후 조건을 고려하여 매개변수를 수정하여 적용할 경우 보다 정확한 기준증발산량 산정이 가능하다는 연구결과가 제시되었으며(Vanderlinden et al., 2004; Gavilan et al., 2006), 국내에서도 매개변수를 수정하여 적용하고자 하는 연구가 수행되었다(Lee et al., 2008; Lee and Park, 2008; Moon et al., 2013). 이러한 연구 중 Moon et al. (2013)은 우리나라의 자료를 이용하여 태양복사열과 기온과의 관계를 분석한 후 Hargreaves 수정 공식을 Eq. (1)과 같이 제안한 바 있다.

$$RET = K_{ET} \times RA \times (TC + 17.8) \times TD^{0.58} \quad (1)$$

여기서, K_{ET} 는 Hargreaves 공식의 매개변수로 알려져 있으며, RA 는 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation), TC 는 최고기온과 최저기온의 평균, TD 는 최고기온과 최저기온의 차이를 의미한다. Moon et al. (2013)은 기상청 71개 지점의 기상자료를 이용하여 지점별 K_{ET} 를

Fig. 1. The Ratio of Annual Rainfall and Reference Evapotranspiration by Observed Data

Fig. 2. Yearly RET of Seoul Station

제시하였으며, 본 연구에서는 현재(1988~2017년) 및 미래 기간(2021~2100년)에 대한 기준증발산량을 산정하기 위한 방법으로 Moon et al. (2013)의 수정 공식과 지점별 K_{ET} 산정 결과를 적용하였다. 이러한 과정을 통해 기상청 62개 지점에 대해 현재(1988~2017년) 및 미래기간(2021~2100년)에 대한 기준증발산량을 산정하였으며, Fig. 2는 서울 지점에 대해 산정된 연 기준증발산량을 도시하여 나타낸 것이다.

4. 분석 및 결과 검토

4.1 연평균 기준증발산량

62개 지점에 대해 산정된 현재 및 미래기간 기준증발산량을 비교하여 지점별 기후변화 영향을 검토하였다. Table 2는 62개 지점에 대한 관측자료 기반 기준증발산량과 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 기반 기준증발산량의 연평균 값을 비교한 것이며, 지점별 연평균 기준증발산량과 증감율(%)을 정리한 것이다. Table 2의 결과를 살펴보면, 두 가지 기후변화

시나리오 모두 관측자료를 이용하여 산정한 현재기간 기준증발산량에 비해 증가하는 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 대관령 지점의 경우에는 RCP 8.5 시나리오의 결과에서 현재에 비해 약 20%까지 기준증발산량이 증가하는 것으로 나타나고 있으며, RCP 4.5 시나리오에서도 현재에 비해 약 14% 증가하는 것으로 나타났다. 62개 지점의 변동률을 살펴보면, 먼저 RCP 4.5 시나리오의 경우 1.5~13.8%의 범위로 기준증발산량이 증가할 것으로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오에서는 6.2~20.4%의 범위로 기준증발산량이 증가할 것으로 전망되었다.

62개 지점을 평균한 결과에서도 현재(1988~2017년 평균)에 비해 기준증발산량이 증가할 것으로 나타나고 있으며, 증감율은 RCP 4.5 시나리오에서 현재 대비 5.4%, RCP 8.5 시나리오에서 현재 대비 9.5%로 나타났다. 따라서 우리나라에서는 기후변화로 인한 기온 증가로 기준증발산량이 증가할 것으로 전망되었으며, 이는 수자원의 손실량 증가를 초래하여 이용 가능한 수자원량의 감소를 초래할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Comparison of the Yearly Reference Evapotranspiration at 62 Stations

Code	Name	Yearly reference ET (mm)			Rate of change (%)	
		Observed data (1988~2017)	RCP 4.5 (2021~2100)	RCP 8.5 (2021~2100)	RCP 4.5 (2021~2100)	RCP 8.5 (2021~2100)
090	Sokcho	953.7	1,005.4	1,061.3	5.4	11.3
095	Cheorwon	833.6	891.1	923.6	6.9	10.8
100	Daegwallyeong	807.8	919.2	972.7	13.8	20.4
101	Chuncheon	840.8	892.1	927.2	6.1	10.3
105	Gangneung	989.7	1,012.6	1,066.9	2.3	7.8
108	Seoul	935.3	988.0	1,024.8	5.6	9.6
112	Incheon	950.6	1,058.8	1,089.7	11.4	14.6
114	Wonju	846.6	900.6	931.1	6.4	10.0
119	Suwon	860.7	901.3	936.5	4.7	8.8
127	Chungju	877.1	918.6	951.1	4.7	8.4
129	Seosan	883.3	940.5	969.1	6.5	9.7
130	Ulsin	1,014.6	1,039.0	1,098.6	2.4	8.3
131	Cheongju	910.3	939.6	975.6	3.2	7.2
133	Daejeon	902.3	945.4	983.8	4.8	9.0
135	Chupungnyeong	951.6	1,023.7	1,066.2	7.6	12.0
136	Andong	902.6	954.8	989.9	5.8	9.7
138	Pohang	1,012.8	1,028.3	1,089.9	1.5	7.6
140	Gunsan	966.8	1,065.2	1,108.1	10.2	14.6
143	Daegu	1,073.3	1,110.4	1,161.9	3.4	8.2
146	Jeonju	900.3	955.6	993.8	6.1	10.4
152	Ulsan	966.2	989.7	1,040.2	2.4	7.7
155	Changwon	1,008.7	1,050.0	1,084.6	4.1	7.5
156	Gwangju	960.6	1,008.4	1,049.5	5.0	9.3
159	Busan	1,097.6	1,132.5	1,170.9	3.2	6.7
162	Tongyeong	980.6	1,039.0	1,065.8	6.0	8.7
165	Mokpo	1,022.4	1,064.2	1,088.9	4.1	6.5
168	Yoesu	1,061.1	1,131.3	1,165.0	6.6	9.8
170	Wando	998.9	1,124.8	1,160.9	12.6	16.2
192	Jinju	934.1	978.2	1,015.7	4.7	8.7
201	Ganghwa	859.1	912.8	941.8	6.3	9.6
202	Yangpyeong	851.0	892.6	923.6	4.9	8.5
203	Icheon	878.3	925.4	959.5	5.4	9.3
211	Inje	876.5	920.5	961.6	5.0	9.7
212	Hongcheon	817.9	858.9	889.9	5.0	8.8
216	Taebaek	802.3	836.7	877.7	4.3	9.4
221	Jecheon	850.8	883.6	915.9	3.8	7.6
226	Boeun	876.4	916.3	949.6	4.6	8.4
232	Cheonan	902.8	948.8	985.4	5.1	9.1
235	Boryeong	884.5	927.2	957.2	4.8	8.2

Table 2. (Continued)

Code	Name	Yearly reference ET (mm)			Rate of change (%)	
		Observed data (1988 ~ 2017)	RCP 4.5 (2021 ~ 2100)	RCP 8.5 (2021 ~ 2100)	RCP 4.5 (2021 ~ 2100)	RCP 8.5 (2021 ~ 2100)
236	Buyeo	915.5	977.0	1,012.6	6.7	10.6
238	Geumsan	889.9	940.0	977.5	5.6	9.8
243	Buan	911.3	969.3	1,012.5	6.4	11.1
244	Imsil	877.6	939.9	975.5	7.1	11.1
245	Jeongeup	877.0	917.4	956.3	4.6	9.0
247	Namwon	879.7	931.4	969.0	5.9	10.1
248	Jangsu	854.0	900.0	932.9	5.4	9.2
260	Jangheung	896.8	936.0	972.6	4.4	8.5
261	Haenam	966.5	1,021.8	1,066.2	5.7	10.3
262	Goheung	928.3	966.9	997.6	4.2	7.5
271	Bongwhoa	819.0	848.4	878.3	3.6	7.2
272	Yeongju	958.5	1,008.3	1,041.4	5.2	8.7
273	Mungyeong	928.2	967.5	1,000.4	4.2	7.8
277	Yeongdeok	1,009.9	1,026.0	1,072.7	1.6	6.2
278	Uiseong	880.5	918.9	955.3	4.4	8.5
279	Gumi	946.5	990.8	1,033.0	4.7	9.1
281	Yeongcheon	949.3	995.6	1,041.7	4.9	9.7
284	Geochang	911.3	976.5	1,016.7	7.1	11.6
285	Hapcheon	951.2	998.5	1,039.8	5.0	9.3
288	Miryang	955.5	1,005.9	1,043.6	5.3	9.2
289	Sancheong	911.6	963.1	1,003.1	5.6	10.0
294	Geoje	975.3	1,034.4	1,058.9	6.1	8.6
295	Namhae	986.0	1,030.0	1,064.9	4.5	8.0
Average		923.0	972.5	1,010.5	5.4	9.5
Max		1,097.6	1,132.5	1,170.9	-	-
Min		802.3	836.7	877.7	-	-

4.2 월별 평균 기준증발산량

월별 평균 기준증발산량을 산정한 후 기후변화의 영향을 평가하였다. 62개 지점에 대한 산정결과를 이용하여 월별로 평균값을 산정하였으며, 월별로 관측자료에 의해 산정된 기준증발산량과 기후변화 시나리오에 따른 산정 결과를 비교하였다. Table 3은 월별로 산정 결과를 정리하고 월별 변동율을 정리하여 나타낸 것이며, Fig 3은 월별 산정 결과를 도시하여 나타낸 것이다.

세 가지 기준증발산량(관측자료, RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오)의 월별 분포를 살펴보면, 5월과 6월의 기준증발산량이 가장 많은 것으로 나타나고 있으며, 이러한 월별 분포 특성은 미래에도 유사하게 나타나게 될 것임을 알 수 있다. 모든 월에서 기후변화에 따라 기준증발산량이 증가할 것으로 나타났으며, 증가량은 기준증발산량이 많은 월이 크게

나타나고 있으나 증가율의 경우에는 1월, 2월, 11월, 12월과 같이 상대적으로 기준증발산량이 적은 월이 10% 이상으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 월별 증가율을 보면 1월의 기준증발산량 증가율이 가장 높게 나타나고 있으며, 7월의 증가율이 가장 낮게 나타나고 있다. 따라서 상대적으로 강수량이 적은 시기에 해당하는 동절기 기준증발산량의 증가로 인해 해당 시기 가뭄 발생 가능성이 증가할 것으로 예상할 수 있으며, 이에 효과적으로 대응할 수 있는 기후변화 적응 대책의 마련이 필요할 것으로 판단된다.

4.3 강수량과 기준증발산량 비율 분석

앞서 연 강수량과 연 기준증발산량의 비율을 통해 가뭄의 발생 가능성을 간접적으로 파악할 수 있음을 확인한 바 있다. 관측자료에 대한 검토를 통해 1988년 이후 우리나라에

Table 3. Comparison of the Monthly Reference Evapotranspiration in Korea

Code	Monthly reference ET (mm)			Rate of change (%)	
	Observed data (1988~2017)	RCP 4.5 (2021~2100)	RCP 8.5 (2021~2100)	RCP 4.5 (2021~2100)	RCP 8.5 (2021~2100)
Jan	24.1	27.2	28.7	13.2	19.2
Feb	33.3	38.0	38.9	14.4	17.0
Mar	60.7	64.5	66.7	6.2	9.9
Apr	93.6	98.1	101.1	4.8	8.0
May	123.2	129.0	133.9	4.7	8.6
Jun	124.0	128.7	135.3	3.8	9.1
Jul	118.3	124.3	126.7	5.1	7.1
Aug	115.5	118.3	123.8	2.4	7.2
Sep	92.7	95.2	101.6	2.8	9.7
Oct	72.1	76.0	78.9	5.4	9.4
Nov	40.4	44.6	46.0	10.4	14.0
Dec	25.2	28.5	28.7	13.3	14.2
Sum	923.0	972.5	1,010.5	5.4	9.5

Fig. 3. Results of Monthly Reference Evapotranspiration

서 발생했던 가뭄년도를 기준으로 연 기준증발산량 대비 연 강수량 비율을 검토하였으며, 비율 값 1.2를 기준으로 할 경우 과거 가뭄년도를 표현할 수 있음을 확인한 바 있다. 이에 본 연구에서는 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오의 연 강수량 및 연 기준증발산량을 비교하여 비율 값을 산정하였으며, 그 결과를 검토함으로써 미래 기간에 대한 가뭄 발생 가능성을 검토하였다. Figs. 4와 5는 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에 대한 연도별 비율 산정 결과를 도시하여 나타낸 것이며, 적색으로 표시된 점은 비율 값 1.2보다 작은 값을 나타낸 연도를 나타낸 것이다. 먼저 RCP 4.5 시나리오에 의한 결과를 살펴보면, 2021~2100년의 기간 동안 14개년에서 비율 값 기준 1.2보다 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 해당 연도의 경우 가뭄 발생 가능성이 상대적으로

높다고 판단할 수 있다. 두 번째로 RCP 8.5 시나리오에 의한 결과를 살펴보면, 21개년에서 비율 값 기준 1.2보다 작은 값을 나타내고 있으며, RCP 4.5 시나리오보다 많은 결과를 보이고 있다. 따라서 RCP 4.5 시나리오에 비해 RCP 8.5 시나리오에서 가뭄 발생 가능성이 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 기준증발산량이 상대적으로 많이 증가함에 따라 이용 가능한 수자원이 부족한 상황이 나타날 가능성이 높음을 의미하는 결과라 하겠다.

5. 결 론

본 연구에서는 기후변화가 우리나라의 증발산 발생 특성에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 증발산

Fig. 4. The Ratio of Annual Rainfall and Reference Evapotranspiration by RCP 4.5 Scenario

Fig. 5. The Ratio of Annual Rainfall and Reference Evapotranspiration by RCP 8.5 Scenario

발생 특성을 평가하기 위해 기상자료를 이용하여 기준증발산량을 산정하는 방법을 이용하였으며, Hargreaves 공식을 적용하였다. Hargreaves 공식과 Moon et al. (2013)에 의해 제시된 우리나라 주요 지점별 매개변수를 이용하여 기상 관측자료 및 기후변화 시나리오에 의한 기준증발산량을 지점별로 산정하였으며, 그 결과를 이용하여 기후변화 영향을 평가하였다. 기상 관측자료는 1988~2017년의 30년 자료 활용이 가능한 기상청 62개 지점을 대상으로 하였으며, 해당 지점에 대해 기상청에서 제공하고 있는 남한상세 기후변화 시나리오 2종(RCP 4.5, RCP 8.5)을 이용하였다. 지점별로 산정된 연 기준증발산량과 월별 평균 기준증발산량을 이용하여 연평균에 대한 변동과 월별 변동 영향을 평가하였다. 마지막으로 연 강수량과 연 기준증발산량의 비율을 산정하여 검토함으로써 미래 기간에 대한 가뭄 발생 가능성을 평가하여 제시하였다.

먼저 연평균 기준증발산량에 대해 검토한 결과, 62개 지점 모두 기후변화로 인해 현재(1988~2017년)에 비해 미래기간(2021~2100년) 기준증발산량이 증가하게 될 것으로 나타났다. 증가율을 평가한 결과, RCP 4.5 시나리오의 경우

현재 대비 1.5~13.8%의 범위로 기준증발산량이 증가할 것으로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오에서는 6.2~20.4%의 범위로 증가하게 될 것으로 분석되었다. 62개 지점을 평균하여 우리나라의 기준증발산량 변동을 검토한 결과, RCP 4.5 시나리오에서는 현재 대비 5.4%, RCP 8.5 시나리오에서는 현재 대비 9.5% 증가하게 될 것으로 나타났다.

두 번째로 월별 평균 기준증발산량을 산정한 후 기후변화의 영향을 평가하였다. 1월부터 12월까지 월별 분포를 살펴보면, 현재와 미래 시나리오에 의한 결과가 유사한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 5월과 6월의 기준증발산량이 가장 많음을 확인할 수 있었다. 월별 변동의 경우에는 모든 월에서 기후변화로 인해 기준증발산량이 증가할 것으로 나타났으며, 현재 대비 증가율의 경우에는 1월, 2월, 11월, 12월이 10% 이상으로 상대적으로 크게 나타나고 있었다.

마지막으로 연 강수량과 연 기준증발산량의 비율을 산정하여 기후변화로 인한 가뭄 발생 가능성을 검토하였다. 과거 관측자료에 의한 결과 검토를 통해 가뭄 발생 가능성이 높은 비율 값 기준을 선정하였으며, 이를 바탕으로 미래 기후변화

시나리오에 의한 결과를 검토하였다. 검토 결과, RCP 4.5 시나리오의 경우에는 전체 기간(2021~2100년) 중 총 14개년에서 기준 값보다 작은 값을 나타내고 있었으며, RCP 8.5 시나리오에서는 총 21개년에서 기준 값보다 작은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. RCP 4.5 시나리오에 비해 RCP 8.5 시나리오에서 기준 값 이하 연도의 발생 빈도가 높게 나타나고 있으며, 이는 RCP 8.5 시나리오가 실제로 나타날 경우 증발산의 증가에 따라 이용 가능한 수자원 부족 상황 발생 가능성이 높음을 의미하는 결과라 하겠다.

기후변화 시나리오를 이용하여 미래 우리나라의 증발산 발생 특성에 대한 기후변화 영향을 평가한 결과, 기후변화로 인해 우리나라의 증발산량이 증가할 것으로 예상되며, 강수량이 상대적으로 적은 비홍수기의 기준증발산량 증가율이 높을 것으로 나타나 해당 시기 가뭄 발생 가능성 및 이용 가능한 수자원량의 감소 가능성이 높다고 판단할 수 있다. 이러한 결과로부터 미래 기후변화 상황에 효과적으로 대응하기 위해서는 증발산 발생 특성 변동 등 수문기상학적 상황 변화를 지속적으로 모니터링하고 적절한 기후변화 적응 대책의 마련 및 시행이 필요할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 2종의 기후변화 시나리오만을 이용하여 분석을 수행하였으나 향후 검토 대상 시나리오를 확대하여 검토하고 그 결과를 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “가뭄대응 중소 하천 물 부족 위험도 평가 및 물 확보 기술 개발” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, S.R., Park, G.A., Jang, C.H., and Kim, S.J. (2013). Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 569-583.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome.
- Chae, H.S., Kim, S.J., and Jung, K.S. (1999). GRID-based daily evapotranspiration prediction model (GRIDET). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 32, No. 6, pp. 721-730.
- Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., and Berengena, J. (2006). Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, Vol. 81, pp. 257-281.
- Grismer, M.E., Orang, M., Snyder, R., and Matyac, R. (2002). Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 180-184.
- Hargreaves, G.H., and Allen, R.G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 1, pp. 53-63.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., and Riley, J.P. (1985). Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 265-275.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapo-transpiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, ASAE/ASABE, Vol. 1, No. 2, pp. 96-99.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70.
- Khalil, A.A. (2013). Effect of climate change on evapotranspiration in Egypt. *Researcher*, Vol. 5, No. 1, pp. 7-12.
- Lee, K.H., Cho, H.Y., and Oh, N.S. (2008). Calibration and validation of the Hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation in Gyeonggi bay watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 413-422.
- Lee, K.H., and Park, J.H. (2008). Calibration of the Hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 6B, pp. 675-681.
- Moon, J.W., Jung, C.G., and Lee, D.R. (2013). Parameter regionalization of Hargreaves equation based on climatological characteristics in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 9, pp. 933-946.
- Mundo-Molina, M. (2015). Climate change effects on evapotranspiration in Mexico. *American Journal of Climate Change*, Vol. 4, pp. 163-172.
- Oh, N.S., and Lee, K.H. (2004). Calculation of evapotranspiration based on daily temperature.

- Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 6, pp. 479-485.
- Oh, N.S., Lee, K.H., and Ko, Y.C. (2002). Capability of evapotranspiration estimation with short field data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 6B, pp. 795-801.
- Palutikof, J.P., Goodess, C.M., and Guo, X. (1994). Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the mediterranean basin. *International Journal of Climatology*, Vol. 14, pp. 853-869.
- Remrová, M., and Císlarová, M. (2010). Analysis of climate change effects on evapotranspiration in the watershed Uhlířská in the Jizera Mountains. *Soil and Water Research*, Vol. 5, pp. 28-38.
- Rim, C.S. (2008). Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 212-228.
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267.
- Temesgen, B., Allen, R.G., and Jensen, D.T. (1999). Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 125, No. 1, pp. 26-33.
- Vanderlinden, K., Giráldez, J.V., and Van Meirvenne, M. (2004). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 184-191.

Received	September 12, 2018
Revised	September 13, 2018
Accepted	October 1, 2018