

RCP 4.5와 8.5에 따른 기온 및 강수량변화를 반영한 서울 기후 건조/습윤특성

Climate Aridity/humidity Characteristics in Seoul According to Changes in Temperature and Precipitation Based on RCP 4.5 and 8.5

임 창 수* / 김 성 엽**

Rim, Chang-Soo / Kim, Seong-Yeop

Abstract

In this study, monthly and annual aridity indices which are the ratios of precipitation to potential evapotranspiration in Seoul climate measurement station were analyzed for past 50 years (1961~2010), and the ratio of aridity index simulated by climate change scenarios (RCP 4.5 and 8.5) for each future period (2011~2040, 2041~2070, 2071~2100) to aridity index for the past period (1971~2000) was analyzed. Furthermore, 5 different potential evapotranspiration equations (FAO P-M, Penman, Makkink, Priestley-Taylor, Hargreaves) were applied to analyze the effect of potential evapotranspiration equation on estimating aridity index and aridity index variation ratio (%). The study results indicate that the monthly precipitation, average temperature and potential evapotranspiration were increased in each future period as compared to past period for both RCP 4.5 and RCP 8.5. Furthermore, winter period showed more significant increase of potential evapotranspiration than summer period, but aridity index showed different patterns as compared with potential evapotranspiration reflecting the influence of precipitation. Therefore, it is necessary to make preparation for the increment of winter evapotranspiration in terms of water resources management. The monthly and annual aridity indices based on future climate change scenarios were greatly different according to potential evapotranspiration equations; however, monthly and annual patterns of aridity index variation ratio (%) in the future period as compared to past period were very similar regardless of applied potential evapotranspiration equation.

Keywords : aridity index, climate change scenarios, precipitation, evapotranspiration, temperature

요 지

본 연구에서는 과거 50년간(1961~2010)의 서울 기후관측지점의 월 및 연별 강수량대비 잠재증발산량의 비인 건조지수의 변화를 분석하고, 과거기간(1971~2000)의 건조지수 대비 기후변화시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 따른 미래기간별(2011~2040, 2041~2070, 2071~2100) 건조지수 변화율(%) 분석을 실시하였다. 또한 각기 다른 5개의 잠재증발산량 산정식(FAO P-M식, Penman식, Makkink식, Priestley-Taylor식, Hargreaves식)을 적용하여 잠재증발산량 산정식이 건조지수와 건조지수 변화율(%)에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과에 의하면 RCP 4.5와 8.5 모두에서 과거기간에 비해서

* 교신저자, 경기대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (e-mail: csrim@kgu.ac.kr, Tel: 82-31-249-9740)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, San 94-6 Iui-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-760, Korea

** 경기대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (e-mail: Jinkiss123@naver.com)

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, San 94-6 Iui-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-760, Korea

기후변화시나리오에 따른 미래기간에서 월별 강수량, 평균기온 그리고 잠재증발산량이 증가하였다. 또한 잠재증발산량은 겨울철이 여름철과 비교하여 과거기간 대비 미래기간에서 큰 증가를 보였으나, 건조지수는 강수량의 영향으로 잠재증발산량과 다른 양상을 보였다. 따라서 수자원관리 측면에서 미래기후변화에 따른 겨울철 증발산량의 증가에 따른 적절한 대응이 필요하다. 기후변화시나리오를 반영하여 산정된 미래기간의 월 및 연별 건조지수 값은 각기 다른 잠재증발산량 적용식에 따라서 큰 차이를 보였다. 하지만 과거기간대비 미래기간의 월 및 연별 건조지수 변화율(%) 양상은 적용된 잠재증발산량 산정식에 따라서 큰 차이가 없었다.

핵심용어 : 건조지수, 기후변화시나리오, 강수, 증발산, 기온

1. 서 론

최근 연구결과에 의하면 산업화와 도시화에 따른 이산화탄소의 증가는 지구온난화를 초래하는 것으로 나타났다(IPCC, 2007a, 2007b; Andrighetti et al., 2009; Tabari and Hosseinzadeh 2011). 지구온난화는 강수량과 증발산량에 직접적인 영향을 미치고, 지역의 강수량과 증발산량의 상대적인 비인 건조지수(AI)는 그 지역의 건조 및 습윤 정도를 나타내고, 수자원량을 파악하는 지표로 활용할 수 있다(UNESCO, 1979; UNEP, 1992). 과거에 일부 연구자들(Lang, 1920; Emberger, 1930; de Martonne, 1942; Erinc, 1965)은 건조지수 산정을 위해 증발산량대신에 기온을 적용한 바 있으며, Budyko (1958)는 순방사를 적용하였고, Sahin (2012)은 비습도를 적용한 바 있다. 하지만 Tsakiris and Vangelis (2004)는 건조지수 지표산정을 위해 강수량과 함께 증발산량을 사용하는 것이 기온 등을 사용하는 것보다 적절한 방법이라 하였으며, 강수량/증발산량의 비는 지역의 건조 및 습윤 정도를 나타낼 수 있는 적절한 방법이라 언급하였다(Khalili et al., 2011). 따라서 적절한 증발산량의 산정은 지구온난화에 따른 지역의 건조 및 습윤 정도와 가용 수자원량을 파악하는 데 매우 중요하다.

UNESCO (1979)는 잠재증발산량(RET)에 대한 강수량(P)의 비인 건조지수(P/RET) 산정을 위해 잠재증발산량 산정식으로서 Penman (1948)식을 제안한 바 있으나, Penman 식을 적용하기 위해서는 구체적인 기상자료가 필요하고 지역적 특성을 반영한 공기동력항의 상수를 보정하는 것이 필요하다. UNEP (1992)는 건조지수 산정을 위한 증발산량 산정식으로 Penman식 대신에 Thornthwaite (1948) 식을 제안한 바 있으나, 과거 잠재증발산량 산정에 관한 비교연구에 의하면 기상자료가 충분한 경우에 FAO Penman-Monteith식이 다른 잠재증발산 산정식에 비해 더 적절한 것으로 발표하였다(Vörösmarty et al., 1998; Lu et al., 2005). 많은 지역에서 기상자료가 충분하지 않는

경우 FAO Penman-Monteith식 대신에 기상자료가 덜 필요한 경험식이 사용된 바 있고, 경험식으로서 Hargreaves-Samani식(Salvati et al., 2011)이나 Jensen and Haise식(Munson et al., 2011)이 적용된 바 있다.

최근에는 전 세계적으로 여러 연구자들(Kafle and Bruins, 2009; Sulieman and Elagib, 2012; Liu et al., 2013)에 의해서 기후변화에 따른 건조지수의 지역적 변동을 파악하고자 하는 연구가 수행된 바 있다. 또한 미래 기후변화 시나리오를 반영하여 미래 증발산량변화(Chattoadhyay and Hulme, 1997; Li et al., 2012)와 미래 강수 및 기온 변화(Ahn et al., 2008; Schlünzen et al., 2010; Im et al., 2011; Lee et al., 2011; Park et al., 2013)가 분석된 바 있다. 특히 서울지점의 기후변화영향과 관련된 연구의 경우 Kyoung et al.(2009)이 AR4 SRES A2 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화가 기온 및 가뭄에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, Shin et al. (2011)은 A2 기후변화시나리오를 적용하여 기후변화 시나리오에 따른 서울지점의 강우-지속기간-빈도 관계를 평가한 바 있다.

최근에 NIMR (National Institute of Meteorological Research) (2011)가 수행한 미래 한반도 기후변화 전망에 따르면 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우(RCP 8.5), 21세기 후반에 기온은 6.0℃까지 상승하고, 강수량은 20.4% 증가할 것으로 예측하였다. 반면에 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우(RCP 4.5), 21세기 후반에 약 3.4℃까지 상승하고, 강수량은 17.3% 증가할 것으로 전망하였다. 미래 기후변화는 수자원을 효율적으로 관리하는데 심각한 문제를 야기할 것으로 판단된다. 따라서 적절한 수자원관리를 위해서는 과거 기후변화 양상을 파악하고, 미래 기후변화시나리오를 반영함으로써 적절하게 기후변화에 대응하여 수자원관리를 수행하는 것이 필요하다. 수자원관리 측면에서 수자원에 가장 밀접한 영향을 미치는 기후변화 요소는 기온과 강수량으로서, 기온은 지구상의 수자원의 손실인 증발산량에 직접적인 영향

을 미친다. 따라서 본 연구에서는 미래 지구온난화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 따른 서울지점의 기온과 강수량 변화를 분석하였다. 또한 기온변화에 따른 잠재증발산량변화를 예측하고 미래 기온 및 강수량 변화에 따른 강수량 대비 잠재증발산량의 비를 산정하여 서울지점의 기후 건조/습윤 특성을 분석하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구자료

본 연구를 위해 1961년 1월부터 2010년 12월까지 과거 50년간의 서울 기후관측지점의 월별 강수, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 풍속, 상대습도, 일조시간 관측자료를 활용하였다. 또한 기후변화시나리오 자료는 기상청에서 제공하는 RCP 4.5와 8.5 기후변화시나리오를 통해 모의되어진 최고기온, 최저기온 그리고 강수량자료를 활용하였다. RCP 4.5와 8.5 기후변화시나리오는 영국 기상청 해들리센터 지역기후모델인 HedGEM3-RA가 사용되며, 한반도 영역에서는 12.5 km 해상도로 산출되었다. 지역기후변화 시나리오는 전 지구 기후모델에서 표현할 수 없는 복잡한 지형의 효과가 잘 반영되었다(NIMR, 2011). 과거 30년간(1971년 1월~2000년 12월)의 서울지점의 기후변화 시나리오 모의치 자료를 활용하여 각 월의 기후자료(강수량, 평균기온, 최고기온, 최저기온) 평년값을 산정하였으며, 미래 90년간(2011년 1월~2100년 12월)의 서울지점의 월별 강수, 평균기온, 최고기온, 최저기온 시나리오 모의 자료를 활용하여 미래 월 및 연별 건조지수 변화를 분석하였다.

2.2 연구방법

2.2.1 기후변화시나리오 검토

본 연구에서 적용한 기후변화시나리오는 RCP (Representative Concentration Pathways)이다. IPCC 4차보고서(2007a,b)에 포함된 SRES (Special Report on Emission Scenario) 온실가스 시나리오가 기후변화에 영향을 미치는 인위적인 요인 중 온실가스와 에어로졸의 영향에 의한 강제력만 포함한 시나리오라면, RCP는 토지이용변화에 따른 영향까지를 포함하고 있다. RCP는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 등 4가지의 시나리오를 가지고 있으며, 각 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m^2 이다. 본 연구에서 적용한 RCP 시나리오는 4.5와 8.5로서 RCP 4.5

는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우, RCP 8.5는 온실가스가 저감되지 않고 현재 추세대로 배출되는 경우를 나타낸다.

2.2.2 편이보정

본 연구에서는 과거 여러 연구자들(Alcamo et al., 2003; Droogers and Aerts, 2005; Park et al., 2010)에 의해서 적용된 바 있는 편이보정(bias correction) 방법을 적용하여 Eqs. (1) and (2)로부터 최고기온, 최저기온 그리고 강수량 시나리오자료의 편이보정을 수행하였다.

$$T'_{GCM,fut} = T_{his} + (\bar{T}_{GCM,fut} - \bar{T}_{GCM,his}) \quad (1)$$

여기서, $T'_{GCM,fut}$ =보정된 미래의 월별 최고 및 최저기온, $\bar{T}_{GCM,fut}$ =GCM에서 모의된 미래 30년 동안의 월별 평균 최고 및 최저기온, $\bar{T}_{GCM,his}$ =GCM에서 모의된 과거 30년 동안의 월별 평균 최고 및 최저기온, T_{his} =과거 30년 동안의 월별 최고 및 최저기온이다.

$$P'_{GCM,fut} = P_{his} \times (\bar{P}_{GCM,fut} / \bar{P}_{GCM,his}) \quad (2)$$

여기서, $P'_{GCM,fut}$ =보정된 미래의 월별 강수량, $\bar{P}_{GCM,fut}$ =GCM에서 모의된 미래 30년 동안의 월별 평균 강수량, $\bar{P}_{GCM,his}$ =GCM에서 모의된 과거 30년 동안의 월별 평균 강수량, P_{his} =과거 30년 동안의 월별 강수량이다.

미래 강수량과 최고 및 최저기온변화 시나리오 모의자료(2011~2100)의 편이보정을 위해 과거 관측자료(1971년 1월~2000년 12월)의 월별 평년값과 과거 기후변화 시나리오 모의 자료(1971년 1월~2000년 12월)의 월별 평년값 비교를 실시하였다. Fig. 1은 1971년부터 2000년까지 과거 30년간의 강수량, 최고기온, 최저기온의 기후변화 시나리오 모의치와 관측치를 비교한 결과를 보여주고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 최고기온이나 최저기온과는 달리 강수량의 경우 기후변화시나리오 모의치 자료와 관측치 자료사이에 편차가 크게 나타났다. 특히 8월과 9월의 경우 상대적으로 다른 월에 비해서 큰 차이를 보였다.

2.2.3 건조지수 변화분석

과거 50년간(1961~2010)의 서울지점의 월 및 연별 건조지수 변화를 분석하고, 과거 30년간(1971~2000)의 건조지수 대비 RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오에 따른 미래(2011~2100) 건조지수(P/RET) 변화율(%) 분석을 실시하였다. 월 및 연별 건조지수 변화를 분석하기 위해 미래 각 기간별(2011~2040, 2041~2070, 2071~2100)로 건조지수(강수량대비 잠재증발산량의 비)를 산정하여 비교

분석하였다. 미래 기후변화 시나리오에 따른 기온 및 강수량변화를 반영한 잠재증발산량 및 건조지수를 산정하기 위해 기후자료(상대습도, 풍속, 일조시간)는 과거 30년간(1971~2000)의 월별자료를 이용하고, 최고기온, 최저기온 그리고 강수량은 Eqs. (1) and (2)로부터 편이보정된 월별 미래 기후변화 시나리오자료를 이용하여 2011년부터 2100년까지의 건조지수를 산정하였다.

잠재증발산량산정을 위해 5가지의 잠재증발산량 산정식을 비교 분석하였다(Table 1). 적용된 5가지 증발산량 산정식은 Penman식(1948), Makkink식(1957), Priestley and Taylor식(1972), Hargreaves and Samani식(1985) 그

리고 Allen et al. (1998)에 의해서 제안된 FAO Penman-Monteith식 등이다. 이들 5가지 식들은 Rim (2008)의 논문에 적용된 바 있고 각 식들의 특징이 자세하게 기술되어 있다. 이들 잠재증발산량 산정식에서 Allen et al. (1998)에 의해서 제안된 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 증발산식은 전 세계적으로 다양한 기후조건에서 검증된 바 있고, 또한 다른 증발산량 산정식들을 평가하는 표준으로 사용하도록 국제식량농업기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)는 제시하고 있다(Walter et al., 2000; Lage et al., 2003; Trajkovic, 2005).

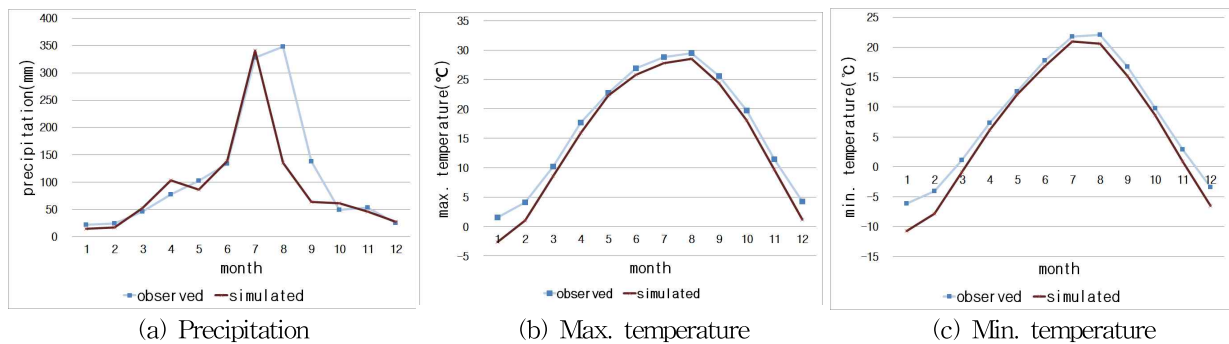


Fig. 1. Comparisons of Observed and Simulated Monthly Climatological Normal in Seoul (1971~2000)

Table 1. Comparisons of Potential Evapotranspiration Equations

Equations		Description of equations
1	$PET = \frac{0.408\Delta Q_n + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	<i>PET</i> =potential evapotranspiration (mm/day), <i>Q_n</i> =net radiation (W/m ²), <i>T_a</i> =avg. temperature at 2 m height (K), <i>u₂</i> =wind speed at 2 m height (m/sec), <i>e_s</i> =saturation vapor pressure (Pa), <i>e_a</i> =actual vapor pressure (Pa), (<i>e_s</i> - <i>e_a</i>)=vapor pressure deficit (Pa), Δ=slope of the saturation vapor versus temperature curve(Pa/K), γ=psychrometric constant(Pa/K)
2	$PET = \frac{\Delta Q_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$ $E_a = f(u)(e_s - e_a) = (0.263 + 0.141u_2)(e_s - e_a)$	<i>PET</i> =potential evapotranspiration (mm/day), <i>Q_n</i> =net radiation (W/m ²), <i>u₂</i> =wind speed at 2 m height(m/sec), <i>e_s</i> =saturation vapor pressure (Pa), <i>e_a</i> =actual vapor pressure (Pa), (<i>e_s</i> - <i>e_a</i>)=vapor pressure deficit (Pa), Δ=slope of the saturation vapor versus temperature curve (Pa/K), γ=psychrometric constant (Pa/K), <i>E_a</i> =drying power (mm/day)
3	$PET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Q_s}{H_v} - 0.12$	<i>PET</i> =potential evapotranspiration (mm/day), <i>Q_s</i> =solar radiation (W/m ²), Δ=slope of the saturation vapor versus temperature curve(Pa/K), γ=psychrometric constant (Pa/K), <i>H_v</i> =latent heat of vaporization(J/kg)
4	$PET = \alpha \frac{\Delta Q_n}{\Delta + \gamma}$	<i>PET</i> =potential evapotranspiration (mm/day), α=empirical coefficient (=1.26), <i>Q_n</i> =net radiation (W/m ²)
5	$PET = aR_a TD^{1/2}(T_a + 17.8)$	<i>PET</i> =potential evapotranspiration (mm/day), a=0.0023, <i>TD</i> =difference between daily maximum and minimum temperature (K), <i>R_a</i> =extra-terrestrial solar radiation (W/m ²), <i>T_a</i> =avg. temperature at 2 m height (K)

3. 연구결과 및 고찰

3.1 과거 기후 평년값 변동 비교분석

Fig. 2의 경우, 기간 I(1961~1990), 기간 II(1971~2000), 기간 III(1981~2010)으로 구분하여 과거 기후자료(강수량(P), 최고기온, 최저기온, 평균기온, 잠재증발산량(RET), P/RET)의 월 및 연별 평년값 변화를 알아보았다. 비교를 위해 기간 II(1971~2000)를 기준평년값으로 정하고, 기간 I과 III이 기간 II와 비교하여 어느 정도 변화를 보이는지를 알아보았다. 월별 강수량 평년값의 경우 1, 4, 11월에는 기간 I이 기간 II에 비해 큰 강수량 평년값을 보인 반면에 기간 III의 경우 기간 II에 비해 작은 강수량 평년값을 보였다. 반면에 5월과 8월의 경우 기간 I이 기간 II에 비해 작은 강수량 평년값을 보인 반면에 기간 III의 경우 기간 II에 비해 큰 강수량 평년값을 보였다. 다른 월(2, 3, 7, 9, 10월)의 경우 기간 I과 III 모두 기간 II보다 큰 강수량 평년값을 보인 동시에 기간 III이 기간 I보다 큰 강수량 평년값을 보였다. 각 기간별 월 강수량 평년값의 경우 기간별로 5월과 8월이 가장 큰 증가를 보인 반면에 4월이 가장 큰 감소를 보였다. 연별 강수량 평년값의 경우 기간 I과 III 모두에서 기간 II보다 큰 강수량 평년값을 보여서 기간에 따라서 일관성 있는 변화를 보여주지 않았다. 또한 기간 III이 기간 I보다 더 큰 강수량 평년값을 보였다. 기온의 경우 강수량과는 달리 대부분의 월 및 년 평년기온에서 기간이 지날수록 증가양상이 뚜렷하게 나타났다. 하지만 최저기온의 경우 8월에 기간 I이 기간 II보다 높은 평

년기온을 보이고, 다른 월이나 년에서 기간 III이 기간 II보다, 기간 II가 기간 I보다 높은 평년기온을 보였다. 반면에 최고기온의 경우 1월과 7월에 기간 III이 기간 II보다 낮은 평년기온을 보였다. 연평균기온 평년값의 경우 최고 및 최저기온 모두에서 증가하는 양상을 보였다. 평균기온 평년값의 경우 5월과 8월은 기간 I과 II의 변화가 없었으며, 7월은 기간 II와 III의 변화가 없었다. 그 이외의 다른 월과 연별 평균기온 평년값이 증가하는 것으로 나타났다.

잠재증발산량 평년값의 경우 기온과 유사한 양상을 보였다. 5월과 7월을 제외하고 기간이 지날수록 각 월의 잠재증발산량 평년값이 증가하였고 특히 겨울철(12, 1, 2월)에 큰 폭으로 증가한 것으로 나타났다. 잠재증발산량 연평균값의 경우 기간 I에서 기간 II로 가면서 2.16% 정도 증가하였고, 기간 II에서 기간 III으로 가면서 1.73% 정도 증가하였다. 건조지수(P/RET)의 경우 2월, 3월 그리고 12월을 제외하고 강수량 변화와 거의 유사한 양상을 보였다. 잠재증발산량이 겨울철에 크게 증가하였음에도 불구하고 건조지수는 강수량의 영향으로 잠재증발산량과 다른 양상을 보였다. 연별 건조지수의 경우 기간 I과 III 모두 기간 II보다 크게 나타나서 기간에 따라서 일관성 있는 건조지수의 변화를 보여주지 않았다.

3.2 과거 건조지수 변화비교

과거 50년간(1961~2010)의 월 및 연별 건조지수 통계 분석을 실시하였다(Fig. 3). 분석결과 과거 50년간의 연평균 건조지수는 1.58이었다(Fig. 3(m)). 월별 평균건조지수

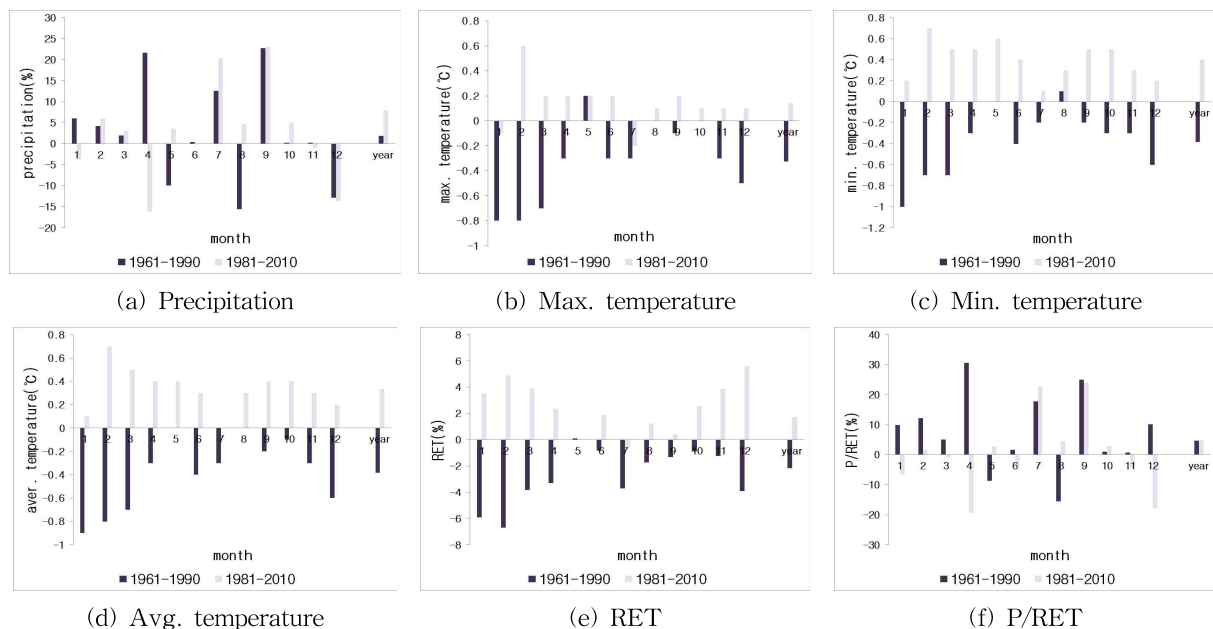


Fig. 2. Variations of Climatological Normal

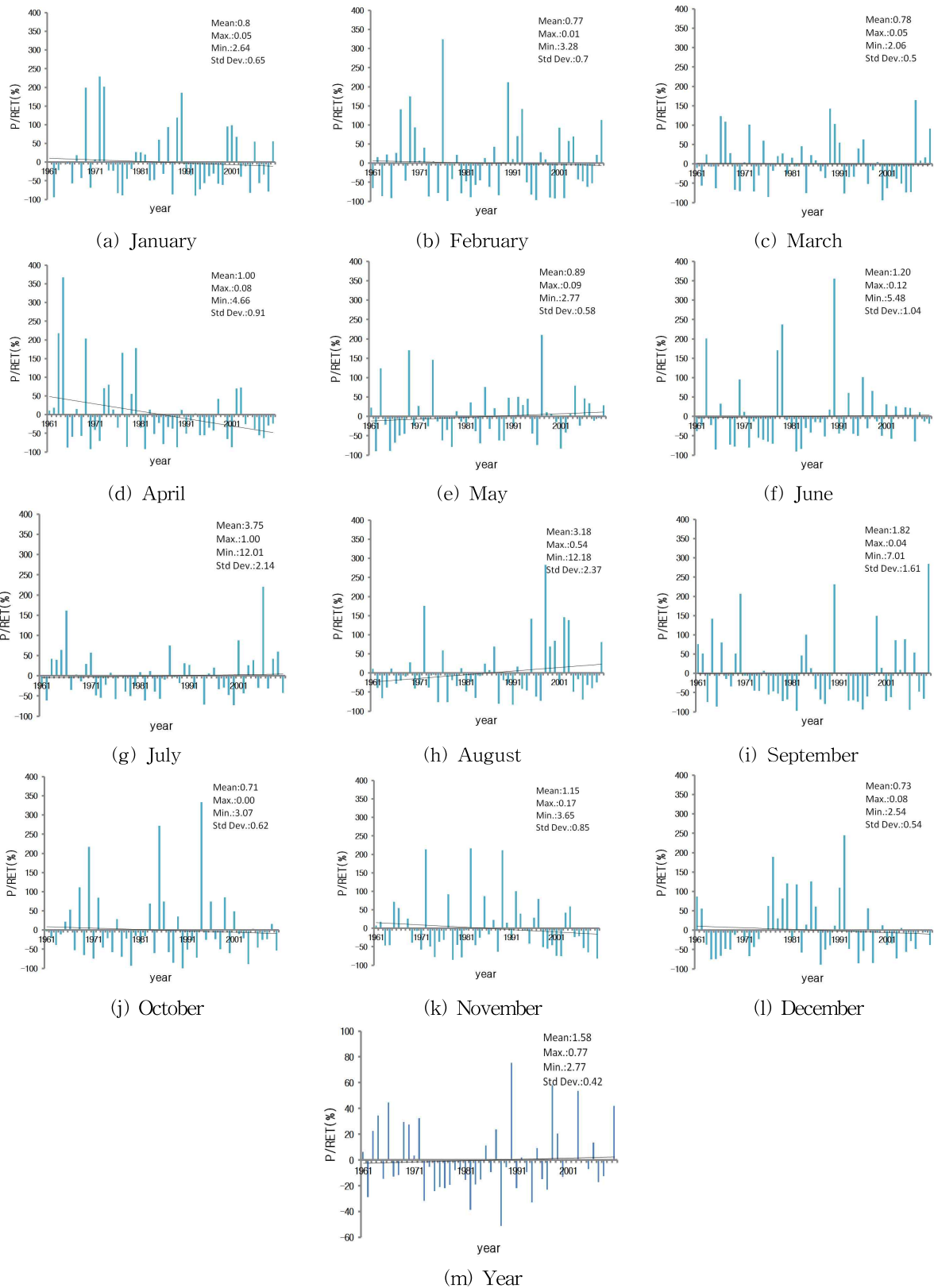


Fig. 3. Percent Variation of P/RET in each Month and Year as Compared to Past 50-year (1961~2010) Average P/RET (mean: average P/RET; max: maximum P/RET; min.: minimum P/RET; Std. Dev.: standard deviation of P/RET)

에 따르면 10월의 경우 평균건조지수가 0.71로서 가장 건조한 양상을 보였고(Fig. 3(l)), 반면에 7월의 경우 3.75로서 가장 습한 상태를 보였다(Fig. 3(g)). 7월, 8월 그리고 9월을 제외하고 다른 모든 월의 평균건조지수는 연평균 건조지수보다 작은 값을 보였다.

과거 50년간(1961~2010)의 건조지수 평균값 대비 각 월 및 연별 건조지수의 변화를 분석하였다(Fig. 3). 분석 결과에 의하면 서울지점의 경우 1, 2, 3, 4, 10, 11, 12월에 과거 50년(1961~2010) 평균 건조지수 대비 매년 건조지수가 감소하는 경향을 보였던 반면에 5, 6, 7, 8, 9월 그리고 연별 건조지수는 증가하는 경향을 보였다. 특히 4월의 경우 과거 50년 건조지수 평균값대비 가장 큰 건조지수의 감소추세를 보여서 서울지점의 경우 4월에 수자원 관리측면에서 기후변화 영향 검토가 필요하다. 반면에 9월은 가장 미미한 변동추세를 보였다. 또한 각 월별 건조지수 모두에서 50년 동안 심한 건조지수의 편차를 보이고 있다.

다른 월과는 달리 4월의 경우 과거 50년 동안 매우 급

격한 건조지수의 감소추세를 보여서 이 기간에 서울지점이 매우 건조해지고 있음을 알 수 있다. 특히 1970년 4월에는 과거 50년간의 건조지수 평균값보다 92% 정도 작은 건조지수를 보여서, 이 시기에 서울지점은 다른 해에 비해서 건조한 상태를 보였다. 반면에 1964년 4월의 경우 과거 50년간의 건조지수 평균값보다 367% 정도 큰 건조지수를 보여서, 이 시기에 서울지점은 다른 해에 비해서 매우 습한 상태를 보였다. 1981년 이후에는 일부 기간을 제외하고 대부분 해에 50년 평균값보다 작은 건조지수를 보였다.

3.3 미래 기후요소 및 건조지수 변화

3.3.1 기후요소 변화

Fig. 4는 Eq. (3)을 이용하여 산정하였으며, 과거기간 (1971~2000) 대비 기후변화시나리오에 따른 미래기간 I (2011~2040), 미래기간 II (2041~2070), 미래기간 III (2071~2100)

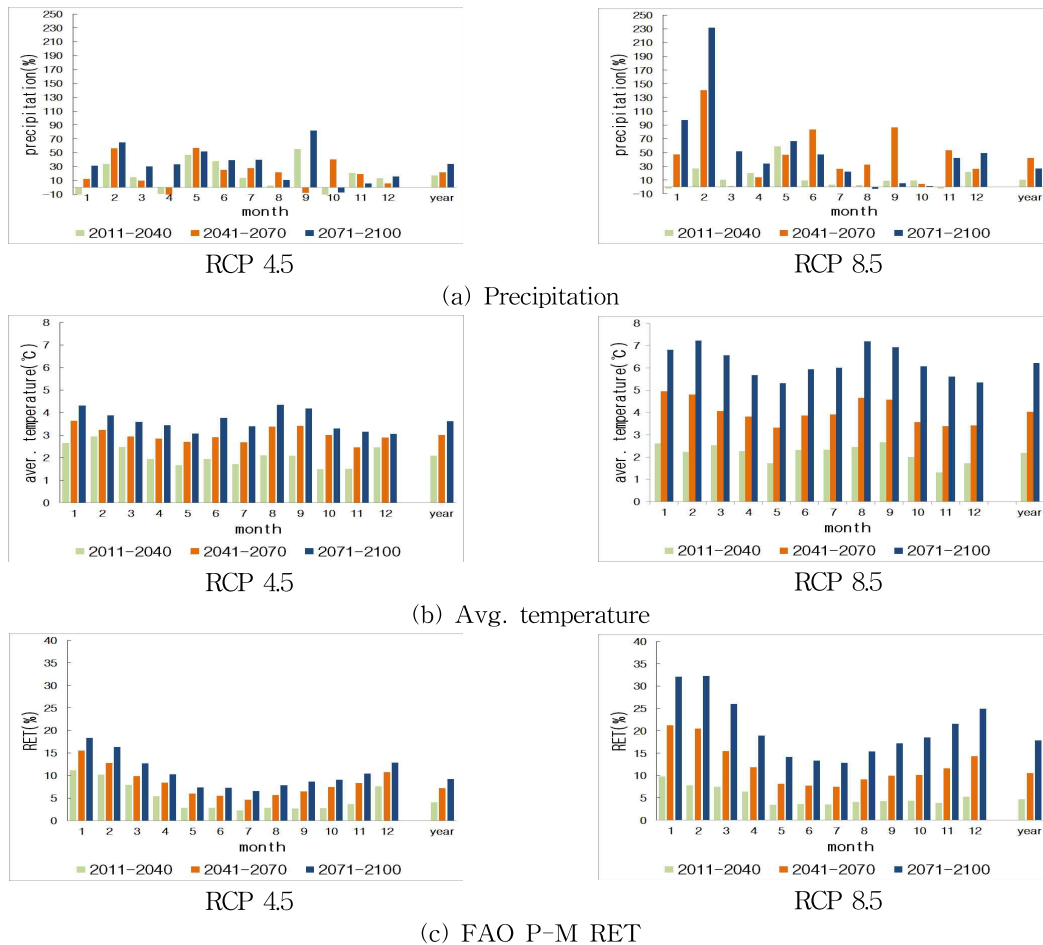


Fig. 4. Variations of Future Climatological Normal Compared with Past Climatological Normal (1971~2000)

(2071~2100)의 강수량, 잠재증발산량, 평균기온 평년값 변화를 보여준다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 RCP 4.5와 8.5 모두에서 과거기간(1971~2000)에 비해서 월별 평균 기온과 잠재증발산량의 평년값이 증가하였고, RCP 4.5 (온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우)보다 RCP 8.5(온실가스가 저감되지 않고 현재 추세대로 배출되는 경우)에서 보다 큰 증가를 보였다. 특히 2월 강수량 평년값의 경우 다른 월에 비해서 RCP 4.5보다 RCP 8.5에서 매우 큰 증가를 보였다.

$$\% \text{ Change} = \frac{\text{미래기간}(I, II, III) - \text{과거기간}(1971-2000)}{\text{과거기간}(1971-2000)} \times 100 \quad (3)$$

각 월별 강수량 평년값의 경우 RCP 4.5 시나리오에서는 1, 2, 7월에서, RCP 8.5의 경우 1, 2, 12월에서 기간에 따라 일관성 있게 증가하는 경향을 보여서, RCP 4.5, 8.5 모두에서 겨울철에 증가현상을 보였다. 그 이외 다른 월에서는 일관성 있는 증가 혹은 감소추세는 보이지 않았다. 연별 강수량 평년값의 경우 RCP 4.5에서 각 기간별로 일관성 있는 증가경향을 보인 반면에 RCP 8.5에서는 미래기간 III이 미래기간 II보다 커서 일관성 있는 변화를 보이지 않았다.

평균기온 평년값의 경우 모든 월에서 과거기간(1971~2000) 대비 미래기간에서 일관성 있게 증가하는 경향을 보였고, RCP 4.5와 비교하여 RCP 8.5에서 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 미래 기온변화를 반영한 미래 월 및 연별 잠재증발산량 평년값의 경우, 강수량과는 다르게 과거기간(1971~2000)과 비교하여 RCP 4.5와 8.5 모두에서 기간에 따라서 일관성 있게 증가하는 경향을 보였다. 또한 겨울철에 해당하는 12, 1, 2월이 여름철에 해당하는 6, 7, 8월과 비교하여 과거기간 잠재증발산량 대비 미래기간 잠재증발산량이 크게 증가하였다. 따라서 수자원관리 측면에서 미래기후변화에 따른 겨울철 증발산량의 증가에 따른 적절한 대응이 필요하다.

3.3.2 잠재증발산 산정식 비교

각기 다른 잠재증발산량 산정식(FAO P-M식, Penman식, Makkink식, Priestley-Taylor식, Hargreaves식) 적용에 따른 건조지수 차이를 분석하기 위해서 FAO P-M식을 적용하여 산정한 건조지수 평년값과 다른 증발산식을 적용하여 산정한 건조지수 평년값을 비교하였다. 분석 결과에 의하면 Penman식을 이용하여 건조지수를 산정하는 경우는 FAO P-M식을 이용하는 경우보다 모든 월 및 연에서 건조지수가 작게(Table 2의 -값) 나타났다. 특히 3월의 경우 RCP 4.5와 8.5 모두에서 21%보다 작은 건조지수

를 보였다. 반면에 Makkink식을 이용하여 건조지수를 산정하는 경우는 모든 월 및 연에서 FAO P-M식을 이용하는 경우보다 큰 건조지수를 보였다. 특히 12월의 경우 RCP 4.5와 8.5 모두에서 48%보다 큰 건조지수를 보였다. Priestley-Taylor (P-T)식을 이용하는 경우는 5, 6, 7, 8월의 경우 FAO P-M식을 적용하는 경우보다 작은 건조지수를 보인 반면에 다른 월과 연에서 큰 건조지수를 산정하였다. 특히 12월의 경우 RCP 4.5와 8.5 모두에서 128%보다 큰 건조지수를 보였다. Hargreaves식을 이용하는 경우 주로 가을과 겨울철 그리고 연 건조지수에서 FAO P-M식을 적용하는 경우보다 큰 건조지수를 보였고 나머지 월에서는 작은 건조지수를 보여서 각각의 월 및 연에 따라서 다른 건조지수를 보였다(Table 2). 따라서 강수량과 잠재증발산량을 이용하여 서울지점의 건조지수를 산정하는 경우 잠재증발산량 적용식에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

3.3.3 미래 건조지수 변화

각기 다른 잠재증발산량 산정식(FAO P-M식, Penman식, Makkink식, Priestley-Taylor식, Hargreaves식)을 적용하여 미래기간 I (2011~2040), 미래기간 II (2041~2070), 미래기간 III (2071~2100)의 건조지수(P/RET) 평년값을 분석하였다(Figs. 5 and 6). 월별 분석결과 미래기간 I, II, III 모두에서 특히 여름철에 해당하는 7월과 8월에 증발산량 산정식 사이에 건조지수의 차이가 크게 나는 것으로 나타났다. 연별 분석결과 RCP 4.5와 8.5 사이에 서로 다른 건조지수 양상을 보였다. RCP 4.5의 경우 미래기간 III에서 가장 큰 건조지수를 보인 반면에 RCP 8.5의 경우 미래기간 II에서 가장 큰 건조지수를 보였다. 5가지 잠재증발산식 중에서 Makkink식이 대부분의 월에서 가장 큰 건조지수를 보였고, 겨울철의 경우 P-T식이 가장 큰 건조지수를 보였다. 따라서 각 계절별로 적정한 건조지수 산정을 위해서는 적정한 잠재증발산량 산정식을 선정하는 것이 필요하다.

또한 Eq. (3)으로부터 과거 30년간(1971~2000)의 건조지수 평년값 대비 RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오에 따른 미래기간 I (2011~2040), 미래기간 II (2041~2070), 미래기간 III (2071~2100)의 건조지수(P/RET) 평년값 변화율(%) 분석을 실시하였다(Fig. 7). 각 월별 건조지수 변화율분석에 의하면 1, 2월만이 RCP 4.5와 8.5 모두에서 과거기간에 비해 미래기간에서 일관성 있게 건조지수 변화율이 증가하는 것으로 나타났으며 7월은 RCP 4.5에서만 건조지수 변화율 증가를 보였다. 반면에 11월의 경우 RCP

Table 2. Comparisons of 30-year Average Aridity Index Depending on a Formula for Estimating the Potential Evapotranspiration

			Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
Penman	4.5	I	-16.14	-23.06	-23.22	-21.01	-18.32	-16.64	-14.77	-12.81	-9.75	-8.47	-7.47	-9.95	-14.29
		II	-16.31	-22.18	-23.16	-20.81	-17.93	-16.23	-14.45	-12.70	-9.40	-8.21	-6.23	-9.08	-14.08
		III	-16.77	-21.81	-22.78	-20.50	-17.64	-16.27	-14.07	-12.62	-8.99	-7.56	-6.62	-8.13	-13.95
	8.5	I	-17.09	-22.66	-23.85	-20.99	-18.12	-16.71	-14.79	-12.50	-9.76	-8.21	-6.52	-9.48	-14.43
		II	-17.00	-21.68	-22.19	-20.24	-17.43	-16.13	-14.27	-12.37	-8.91	-7.31	-6.49	-8.21	-13.65
		III	-16.32	-20.96	-21.12	-18.92	-16.71	-15.47	-13.54	-12.09	-8.12	-6.72	-5.33	-6.90	-13.67
Makkink	4.5	I	39.74	22.86	19.21	22.44	20.83	22.26	26.30	28.33	29.02	29.28	46.30	48.32	28.84
		II	39.12	24.33	19.46	23.25	22.16	23.62	27.56	29.82	31.00	30.87	48.68	49.80	30.16
		III	38.08	24.87	20.21	23.80	22.85	24.17	28.78	31.02	32.30	32.08	48.40	51.46	30.76
	8.5	I	38.17	23.61	18.26	22.58	21.29	22.49	26.79	29.23	29.78	29.89	47.69	49.36	29.36
		II	37.67	25.03	21.38	24.44	23.19	24.44	29.00	31.86	32.96	32.61	48.84	51.32	31.71
		III	39.03	26.87	23.72	27.38	25.75	27.31	32.23	35.66	37.27	36.08	52.43	54.15	34.41
Priestley-Taylor	4.5	I	88.41	29.67	8.17	1.76	-6.12	-10.81	-13.39	-9.41	2.94	26.60	81.85	128.99	13.32
		II	89.33	31.29	8.42	2.21	-5.54	-10.33	-13.09	-9.36	3.27	26.71	84.34	131.87	14.25
		III	89.11	32.35	9.11	2.56	-5.17	-10.40	-12.71	-9.33	3.60	27.62	83.68	134.63	13.67
	8.5	I	86.27	29.99	7.31	1.82	-5.83	-10.84	-13.42	-9.09	2.98	26.84	83.64	129.31	15.15
		II	89.45	32.88	10.15	2.96	-4.98	-10.26	-12.91	-9.09	3.67	27.84	83.93	134.84	16.25
		III	93.16	35.50	12.03	4.79	-4.04	-9.55	-12.19	-8.96	4.30	28.13	86.23	140.54	21.88
Hargreaves	4.5	I	30.99	12.60	0.89	-6.15	-9.04	-16.12	-19.39	-12.02	-0.55	2.63	18.66	32.21	-3.58
		II	29.43	12.80	0.35	-6.83	-10.38	-16.49	-17.70	-10.92	-1.44	4.02	20.28	32.10	-3.22
		III	28.38	13.16	0.71	-4.98	-10.35	-15.63	-17.58	-10.58	1.79	4.52	20.42	32.36	-2.59
	8.5	I	29.55	13.20	-0.06	-5.92	-10.05	-17.36	-19.87	-12.47	-3.30	4.07	20.05	32.60	-3.40
		II	26.38	13.50	0.17	-5.05	-8.76	-15.26	-18.66	-11.24	0.53	5.50	19.86	32.11	-2.09
		III	23.07	10.05	2.91	-2.94	-9.42	-15.52	-19.31	-12.97	0.44	7.43	20.90	28.97	-1.38

4.5에서 건조지수 변화율이 오히려 과거기간에 비해 감소하였다. 이러한 경향은 모든 잠재증발산량 산정식에서 동일하게 나타났다. Fig. 3에서 과거 50년 건조지수 평균값 대비 가장 큰 연평균 월 건조지수의 감소추세를 보였던 4월의 경우 미래 기후변화를 고려한 건조지수변화에서는 기간 I(2011~2040)과 기간 II(2041~2070)가 과거기간(1970~2000)에 비해 더 작은 건조지수 변화율을 보인 반면에 기간 III(2071~2100)의 경우 더 큰 건조지수 변화율을 보였다. 따라서 과거 기간(1971~2000)과는 달리 미래 기간(2011~2100)에서는 4월에 급격한 건조지수의 감소는 나타나지 않는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig.

4(a)에서 보는 바와 같이 4월 강수량 변화율과 유사한 양상을 보였다.

RCP 4.5에서는 모든 잠재증발산량 산정식에서 각 기간 별로 과거기간에 비해 미래 기간에서 연별 건조지수 평년값 변화율이 점차 증가하는 것으로 나타났으나, RCP 8.5의 경우 미래기간 III이 미래기간 II보다 오히려 작은 연별 건조지수 평년값 변화율을 보였다. RCP 4.5의 경우 FAO P-M식이 가장 큰 연별 증발산량 증가율을 보인 반면에 연별 건조지수 증가율은 Makkink식이 가장 크게 나타났다. 반면에 RCP 8.5의 경우 FAO P-M식이 가장 큰 연별 증발산량 증가율을 보인 반면에 연별 건조지수 증가율은

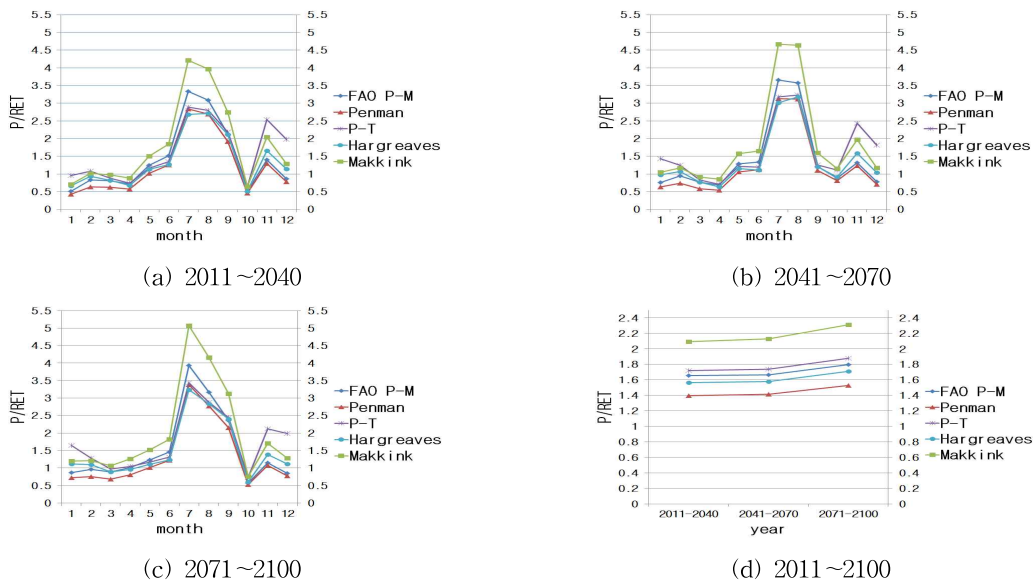


Fig. 5. 30-year Average Aridity Index Considering Future Climate Change Scenario (RCP 4.5)

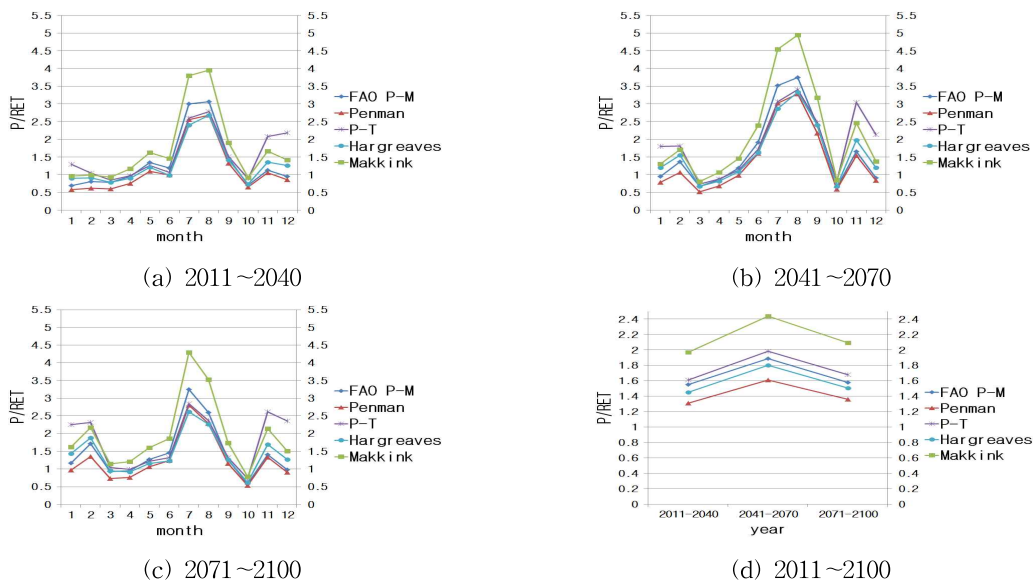


Fig. 6. 30-year Average Aridity Index Considering Future Climate Change Scenario (RCP 8.5)

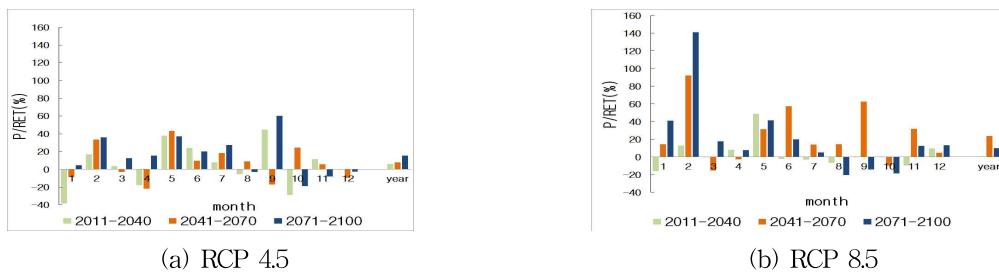


Fig. 7. Percent Variation of 30-year Average Aridity Index Based on FAO P-M Considering Future Climate Change Scenarios

P-T식이 가장 크게 나타났다. 하지만 분석결과 각기 다른 증발산량 산정식을 적용하였음에도 불구하고 잠재증발산량 산정식에 따른 월 및 연별 건조지수 변화율(%) 양상에는 큰 차이가 없었다. 이는 증발산량이 건조지수에 미치는 영향보다도 강수량이 건조지수에 미치는 영향이 상대적으로 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 미래 지구온난화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)를 적용하여 기온 및 강수량변화에 따른 서울지점의 미래 건조/습윤 정도를 분석하였고, 잠재증발산량 산정을 위해 5가지 서로 다른 잠재증발산량 산정식을 적용하여 비교분석하였다. 분석결과에 의하면 적용 시나리오에 따라서 월 및 연별 건조/습윤 분석결과가 서로 다르게 나타났으며, 잠재증발산량 산정식에 따라 건조지수에 큰 차이를 보였으나, 월 및 연별 건조지수 변화율(%) 양상에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 주요 연구결과 및 요약 및 결론은 다음과 같다.

- 1) 4월의 경우 다른 월과는 달리 과거 50년(1961~2010) 동안 매우 급격한 건조지수의 감소추세를 보여서 이 기간에 서울지점이 매우 건조해지고 있음을 알 수 있다. 반면에 과거 기간(1971~2000)과는 달리 미래기간(2011~2100)에서는 4월에 급격한 건조지수의 감소는 나타나지 않았다.
- 2) 과거기간(1971~2000) 대비 기후변화시나리오(RCP 4.5와 8.5)에 따른 미래기간 I(2011~2040), 미래기간 II(2041~2070) 그리고 미래기간 III(2071~2100)의 강수량, 잠재증발산량, 평균기온의 평년값변화를 분석한 결과에 의하면 과거기간에 비해서 기후변화 시나리오에 따른 미래기간에서 월별 평균기온 그리고 잠재증발산량이 증가하였다. 연별 강수량의 경우 RCP 4.5에서 각 기간별로 일관성 있는 강수량 증가 경향을 보인 반면에 RCP 8.5에서는 미래기간 III이 미래기간 II보다 커서 일관성 있는 변화를 보이지 않았다.
- 3) 겨울철에 해당하는 12, 1, 2월이 여름철에 해당하는 6, 7, 8월과 비교하여 과거기간 잠재증발산량 대비 미래기간의 잠재증발산량이 크게 증가해서 계절적으로 다른 양상을 보였다. 따라서 수자원관리 측면에서 미래기후변화에 따른 겨울철 증발산량의 증가에 따른 적절한 대응이 필요하다. 하지만 건조지수는 강수량의 영향으로 잠재증발산량과 다른 양상을

보였다.

- 4) FAO P-M식과 각기 다른 잠재증발산량 산정식(Penman식, Makkink식, Priestley-Taylor식, Hargreaves식) 적용에 따른 건조지수 차이를 분석한 결과에 의하면 특히 여름철에 해당하는 7월과 8월에 잠재증발산량 적용식에 따라 건조지수에 큰 차이를 보여서 각 계절별로 적정한 건조지수 산정을 위해서는 적절한 잠재증발산량 산정식을 선정하는 것이 필요하다.
- 5) 각기 다른 잠재증발산량 산정식을 적용하여 과거 30년간(1971~2000)의 건조지수 대비 미래기후변화 시나리오(RCP 4.5와 8.5)에 따른 미래기간 I(2011~2040), 미래기간 II(2041~2070, 미래기간 III(2071~2100)의 건조지수(P/RET) 변화율(%) 분석을 실시한 결과에 의하면 강수량의 영향으로 인해 잠재증발산량 산정식에 따른 월 및 연별 건조지수 변화율(%) 양상에는 큰 차이가 없었다.

감사의 글

본 연구는 2013학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

References

- Ahn, S.-R., Park, M.-J., Park, G.-A., and Kim S.-J. (2008). "Assessment of streamflow and evapotranspiration influence on the climate change under SRES A1B scenario." *Korea Water Resources Association Conference, KWRA*, pp. 1097-1101.
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., and Siebert, S. (2003). "Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 3, pp. 339-348.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO.
- Andrighetti, M., Zardi, D., and Franceschi, M. (2009). "History and analysis of the temperature series of Verona (1769-2006)." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 103, pp. 267-277.

- Budyko, M.I. (1958). *The heat balance of the earth's surface. trs Nina A. Stepanova*, US Department of Commerce, Washington, D.D., 259 p.
- Chattopadhyay, N., and Hulme, M. (1997). "Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 87, pp. 55-73.
- de Martonne, E. (1942). "Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité." *Annales de Géographie*, Vol. 51, pp. 242-250.
- Droogers, P., and Aerts, J. (2005). "Adaptation strategies to climate change and climate variability: A comparative study between seven contrasting river basins." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 30, pp. 339-346.
- Emberger, L. (1930). "La végétation de la région méditerranéenne: essai d'une classification des groupements végétaux." *Revue Générale de Botanique*, Vol. 42(641-662), pp. 705-721.
- Erinc, S. (1965). *An attempt on precipitation efficiency and a new index* Istanbul University Institute Release. Baha Press, Istanbul (in Turkish).
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Appl. Engr. Agric.*, Vol. 1, No. 1, pp. 96-99.
- Im, E.S., Jung, I.W., and Bae, D.H. (2011). "The temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indices over Korea from a regional climate projection." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 72-86.
- IPCC. (2007a). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press: Cambridge.
- IPCC. (2007b). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Kafle, H., and Bruins, H. (2009). "Climatic trends in Israel 1970-2002: warmer and increasing aridity inland." *Climatic Change*, Vol. 96, pp. 63-77.
- Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A.A., Zand-Parsa, sh. (2011). "Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones." *Water Resources Management*, Vol. 25, pp. 1737-1757.
- Kyoung, M.S., Lee, Y.W., Kim, H.S., and Kim, B.S. (2009). "Assessment of climate change effect on temperature and drought in Seoul : Based on AR4 SRES A2 senario." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 29, No. 2, pp. 181-191.
- Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M., and Mourid, M.EI. (2003). "Estimating of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and pan evaporation methods under Moroccan conditions." *Agronomie*, Vol. 23, pp. 625-631.
- Lang, R. (1920). *Verwitterung und bodenbildung als einführung in die bodenkunde*. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart.
- Lee, W.H., Hong, S.H., Kim, Y.G., and Chung, E-S. (2011). "Temporal and spatial variability of precipitation and daily average temperature in the South Korea." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, pp. 73-86.
- Li, Z., Zheng F.-L., and Liu, W.-Z. (2012). "Spatio-temporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961-2009 and its projected changes during 2011-2099 on the loess Plateau of China." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 154-155, pp. 147-155.
- Liu, X., Zhang, D., Luo, Y., and Liu, C. (2013). "Spatial and temporal changes in aridity in northwest China: 1960 to 2010." *Theor. Appl. Climatol.*, Vol. 112, pp. 307-316.
- Lu, J.B., Sun, G., McNulty, S.G., and Amataya, D.M. (2005). "A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States." *J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 41, pp. 621-633.
- Makkink, G.F. (1957). "Testing the Penman formula by means of lysimeters." *J. Instit. Water Engineers*, Vol. 11, pp. 277-288.
- Munson, S.M., Belnap, J., Schelz, C.D., Moran, M., and Carolin, T.W. (2011). "On the brink of change: plant response to climate on the Colorado Plateau." *Ecosphere*,

- Vol. 2, No. 6, pp. 1-15.
- NIMR. (2011). Report on Climate Change Scenario Corresponding to IPCC 5th Assessment Report
- Park, J.H., Kang, M.S., Song, I.H., Hwang, S.H., and Song, J.-H. (2013). "Development of IDF curves based on RCP 4.5 scenario for 30-reservoirs in South Korea." *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 6, pp. 145-159.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-146.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.
- Rim, C.-S. (2008). "Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 213-229.
- Sahin, S. (2012). "An aridity index defined by precipitation and specific humidity." *Journal of Hydrology*, Vol. 444-445, pp. 199-208.
- Salvati, L., Perini, L., Sabbi, A., and Bajocco, S. (2011). "Climate aridity and land use changes: A regional-scale analysis." *Geographical Research*, doi:10.1111/j.1745-5871.2011.00723.x.
- Schlünzen, K.H., Hoffmann, P., Rosenhagen, G., and Riecke, W. (2010). "Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg." *International Journal of Climatology*, Vol. 30, pp. 1121-1136.
- Shin, J.-Y., Joo, K.-W., Kim, S.Y., and Heo, J.-H. (2011). "Assessment of depth-duration-frequency relationship considering climate change in Seoul." *Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 370-374.
- Sulieman, H.M., and Elagib, N.A. (2012). "Implications of climate, land-use and land-cover changes for pastoralism in eastern Sudan." *Journal of Arid Environments*, Vol. 85, pp. 132-141.
- Tabari, H., and Hosseinzadeh Talaei, P. (2011). "Recent trends of mean maximum and minimum air temperatures in the western half of Iran." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 111, pp. 121-131.
- Thornthwaite, C. (1948). "An approach towards a rational classification of climate." *Geogr. Rev.* Vol. 38, pp. 55-94.
- Trajkovic, S. (2005). "Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 316-323.
- Tsakiris, G., and Vangelis, H. (2004). "Towards a drought watch system based on spatial SPL." *Water Resources Management*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-12.
- UNEP. (1992). *World atlas of desertification*. Edward Arnold, London.
- UNESCO. (1979). *Map of the world distribution of arid regions: explanatory note*. MAP Technical Notes 7, UNESCO: Paris, 54.
- Vörösmarty, C.J., Federer, C.A., and Schloss, A.L. (1998). "Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modelling." *J. Hydrol.*, Vol. 207, pp. 147-169.
- Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Mecham, B., Jensen, M.E., Itenfisu, D., Howell, T.A., Snyder, R., Brown, P., Echings, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R.H., Wright, J.L., and Martin, D. (2000). ASCE standardized reference evapotranspiration equation, p. 209-215. In: Evans RG, Benham BL, Troien TP (eds.) Proc. National Irrigation Symposium, ASAE, Nov. 14-16, 2000, Phoenix, AZ.

논문번호: 14-019	접수: 2014.02.13
수정일자: 2014.03.17/03.31	심사완료: 2014.03.31