

CMIP5 GCMs과 추정 방법에 따른 우리나라 기준증발산량 평가

박지훈 • 조재필 • 이은정 • 정임국

APEC 기후센터 응용사업본부 응용사업팀

Evaluation of Reference Evapotranspiration in South Korea according to CMIP5 GCMs and Estimation Methods

Park, Jihoon • Cho, Jaepil • Lee, Eun-Jeong • Jung, Imgook

Climate Application Team, Climate Application Department, APEC Climate Center

ABSTRACT : The main objective of this study was to assess reference evapotranspiration based on multiple GCMs (General Circulation Models) and estimation methods. In this study, 10 GCMs based on the RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 scenario were used to estimate reference evapotranspiration. 54 ASOS (Automated Synoptic Observing System) data were constructed by statistical downscaling techniques. The meteorological variables of precipitation, maximum temperature and minimum temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation were produced using GCMs. For the past and future periods, we estimated reference evapotranspiration by GCMs and analyzed the statistical characteristics and analyzed its uncertainty. Five methods (BC: Blaney-Cridde, HS: Hargreaves-Samani, MK: Makkink, MS: Matt-Shuttleworth, and PM: Penman-Monteith) were selected to analyze the uncertainty by reference evapotranspiration estimation methods. We compared the uncertainty of reference evapotranspiration method by the variable expansion and analyzed which variables greatly influence reference evapotranspiration estimation. The posterior probabilities of five methods were estimated as BC: 0.1792, HS: 0.1775, MK: 0.2361, MS: 0.2054, and PM: 0.2018. The posterior probability indicated how well reference evapotranspiration estimated with 10 GCMs for five methods reflected the estimated reference evapotranspiration using the observed data. Through this study, we analyzed the overall characteristics of reference evapotranspiration according to GCMs and reference evapotranspiration estimation methods. The results of this study might be used as a basic data for preparing the standard method of reference evapotranspiration to derive the water management method under climate change.

Key words : Climate Change, GCMs, Reference Evapotranspiration, Uncertainty

I. 서 론

안정적인 수자원 관리를 위해서는 장기적으로 이용 가능한 하천유출량을 우선적으로 산정해야 한다. 특히 우리나라는 강수량의 계절적 편차와 하천유량의 변동이 큼에 따라 안정적인 수자원 관리를 하는 데 불리한 자연 조건을 가지고 있어 다양한 인자의 변동성을 고려한 하천유출량 산정이 필요하다 (MOLIT, 2016). 또한 기후변

화로 인해 강수량, 기온 등의 특성이 변하고 있어 전반적인 변동성을 고려하여 장기적인 하천유출량을 산정해야 하는 상황에 놓여있다 (IPCC, 2014).

하천유출량은 수자원 총량에서 손실량을 제외하여 산정하며, 손실량 중 증발산량은 하천유출량에 중요한 영향을 미치는 인자로 구분된다 (MOLIT, 2016). 또한 증발산량은 유역의 가뭄 전망에 직접적인 영향을 미치므로 기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 증발산량 추정이 필요하다 (Kim et al., 2013). 증발산량은 기상 인자로부터 상관관계를 통해 추정하는 방법, 기온을 기반으로 추정하는 방법, 기온과 일

Corresponding author : Cho, Jaepil
Tel. : 051-745-3994
E-mail : jpcho89@gmail.com

사량을 기반으로 추정하는 방법, 다양한 기상 인자를 조합하여 추정하는 방법 중 자료 구축 현황에 맞추어 적절한 방법으로 추정할 수 있다 (Oudin et al., 2005). 과거 기간의 증발산량은 다양한 기상 인자가 구축된 경우에는 일반적으로 FAO에서 표준으로 권장하는 Penman-Monteith 방법을 사용하여 추정한다 (FAO, 1998; Allen et al., 1998; Hur et al., 2006; Kim et al., 2017). 미래 기간의 증발산량은 기후변화 시나리오에서 제공하는 기상 인자에 종류에 따라 적합한 방법을 사용하여 추정한다 (Lee and Park, 2008; Oh and Lee, 2004). 미래 기후변화 시나리오에서 다양한 기상 인자를 모두 제공하지 못하는 경우 보통 기온에 초점을 맞추어 증발산량을 추정하고 추가적으로 일사량, 상대습도, 풍속 등의 제공여부에 따라 가능한 방법으로 추정한다 (Hargreaves and Samani, 1985; Allen et al., 1998; Allen et al., 2005; Shuttleworth and Wallace, 2009; Priestly and Taylor, 1972; De Bruin and Lablans, 2012; McMahon et al., 2012; Valiantzas, 2013).

기후변화에 따른 미래 증발산량의 추정에 관한 많은 연구가 수행된 바 있다. Bae et al. (2011)은 13개 GCM (General Circulation Model)과 3개 수문모형의 불확실성을 고려한 우리나라의 장기유출량을 모의하면서 수문모형에서 제공하는 증발산량 추정 방법을 모두 적용하여 증발산량이 장기유출량에 미치는 영향을 분석하였다. Choi et al. (2017)은 APEX-Paddy 모형을 이용하여 기후변화가 작물생산량에 미치는 영향을 분석하면서 증발산량의 변화 경향을 분석하였다. Yoo et al. (2015)은 합리적인 농업수자원 기후변화 영향 평가를 위해 제5차 결합기후모델비교사업 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)에서 제공하는 25개 GCM과 기상청에서 제공하는 지역기후모델인 HadGEM3-RA의 산출물에 대한 경향성을 분석하였다. 연강수량과 기준작물증발산량을 산정하여 GCM과 HadGEM3-RA의 차이를 비교하였다. Kim et al. (2016)은 기상청에서 제공하는 고해상도 국가표준 기후변화 시나리오를 사용하여 4개의 산정 방법에 따른 5,050개 읍면동 지역의 기준증발산량 (Reference evapotranspiration, ET₀)을 산정하였다. 산정결과를 데이터베이스로 구축하여 자료 활용성을 제고하였다. Hong et al. (2015)은 발작물의 미래 가뭄 전망을 위해 기상청에서 HadGEM3-RA를 이용하여 상세화한 남한상세 시나리오를 사용하여 기준작물증발산량을 산정하였다.

국외의 연구사례를 살펴보면 국가 단위를 기준으로 GCM과 추정 방법에 따른 증발산량의 불확실성을 정량화하여 수자원 관리에 적용하려는 연구가 수행되고 있으며, GCM에서 제공할 수 있는 기상 자료를 고려하여 적

절한 추정 방법을 제시하고 있다. Prudhomme and Williamson (2013)은 HadRM3-Q0 모형에서 제공하는 자료를 이용하여 12가지 방법으로 영국의 증발산량을 추정하여 비교하였다. Mishra et al. (2017)은 5개 GCM과 3개의 수문모형을 사용하여 증발산량의 불확실성을 평가하였고, Kingston et al. (2009)은 5개 GCM과 6개 증발산량 방법을 사용하여 증발산량의 불확실성을 평가하였다. 기존의 연구에서 GCM과 추정 방법에 따른 증발산량의 불확실성을 평가하면서 수자원 관리에 증발산량을 적용할 때 이러한 점을 고려해야 한다고 제안하였다.

현재 우리나라 기상청은 제어적분 200년을 수행한 HadGEM3-RA (12.5 km, 1 day)자료를 기반으로 Penman-Monteith 방법을 사용하여 우리나라 시군별 증발산량과 Hargreaves 공식을 사용하여 우리나라 중권역별 증발산량을 제공하고 있다 (Climate information portal, 2017). 기후변화로 인한 수자원 관리의 중요성과 선행연구를 통해 파악한 증발산량 추정 결과를 감안하면 기후모형에 내재한 불확실성과 추정 방법에 따른 불확실성을 추가적으로 고려하여 증발산량을 분석할 필요가 있다.

증발산량의 불확실성 평가는 전지구 순환모형 (General Circulation Model, GCM)과 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)종류에 따른 불확실성과 증발산량 추정 방법에 따른 불확실성으로 구분하여 수행할 수 있다. 국외 사례에 비해 현재 우리나라를 대상으로 CMIP5 GCMs 다중모델 앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME)을 이용한 증발산량 불확실성 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 국가 수자원 정책 수립을 위한 신뢰성 있는 미래 증발산량을 제공하기 위해서는 다중모델 결과를 이용하여 각 GCM이 가지고 있는 미래 전망의 불확실성과 GCM별로 생산할 수 있는 기상 인자를 고려하여 추정 방법에 따른 증발산량의 불확실성을 정량화하는 것이 중요하다.

본 연구의 목적은 기후변화 상세 시나리오 기반의 CMIP5 GCMs과 증발산량 추정 방법에 따른 기준증발산량을 평가하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 기준증발산량 추정을 위한 기상 자료 구축과 기준증발산량 추정으로 구분하여 수행하였다. 기상 자료 구축은 CMIP5 GCMs을 ASOS (Automated Synoptic Observing System)지점을 대상으로 상세화와 편의보정을 수행하여 일단위 기상 자료를 생성하였다. 기준증발산량 추정은 10개 GCMs과 5개의 방법에 대해 각각 기준증발

산량을 추정하고 분석하였다. 10개 GCMs에 대해 ASOS 별 기준증발산량을 추정한 뒤 전체 ASOS에 대한 평균 값을 산정하여 우리나라의 미래 기준증발산량을 분석하였다. 이후 10개 GCMs 평균값을 다중모델 앙상블로 사용하여 5개의 방법별로 분석하여 기상변수확장에 따른 기준증발산량의 특성을 분석하였다. Bayesian Model Averaging 기법을 이용하여 5개의 방법에 대한 사후 확률을 산정하여 기상변수 확장에 따른 기준증발산량의 불확실성을 분석하였다. 최종적으로 사후 확률을 각 방법별 가중치로 적용하여 10개 GCMs 평균값을 가중 평균한 값을 도출하였다. Figure 1은 기준증발산량 추정에 대한 전체적인 순서를 보여주고 있다.

1. 자료 구축

본 연구에서는 5개의 기준증발산량 추정 방법을 모두 고려하기 위해 6개의 기상 인자 (강수량, 최고기온, 최저

기온, 풍속, 상대습도, 일사량)를 모두 제공하는 총 10개의 GCMs를 선정하여 기상 자료를 구축하였다. 각 GCMs를 장기간의 신뢰성 있는 기상 자료가 구축되어있는 우리나라 54개 종관기상관측소 (ASOS)를 대상으로 상세화하고 편의보정을 수행하여 생성한 일단위 강수량 (PRCP), 최고기온 (TMAX), 최저기온 (TMIN), 풍속 (WSPD), 상대습도 (RHUM), 일사량 (RSDS)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 10개 CMIP5 GCMs은 1976년~2099년까지 상세화된 기상 자료를 제공한다. 통계적 상세화 방법은 BCSD (sbias-correction/spatial disaggregation) 방법과 기후시나리오 내 장기추세를 반영하기 위한 QDM (quantile delta mapping)방법을 결합한 SDQDM 방법과 기후변화 시나리오 자료를 경험적 분포를 이용하여 관측점 단위로 상세화하는 SQM (Simple Quantile Mapping)방법을 사용하였다 (Eum and Cannon, 2017; Cho et al., 2016). Table 1은 본 연구에서 사용한 GCMs에 대해 설명하고 있다.

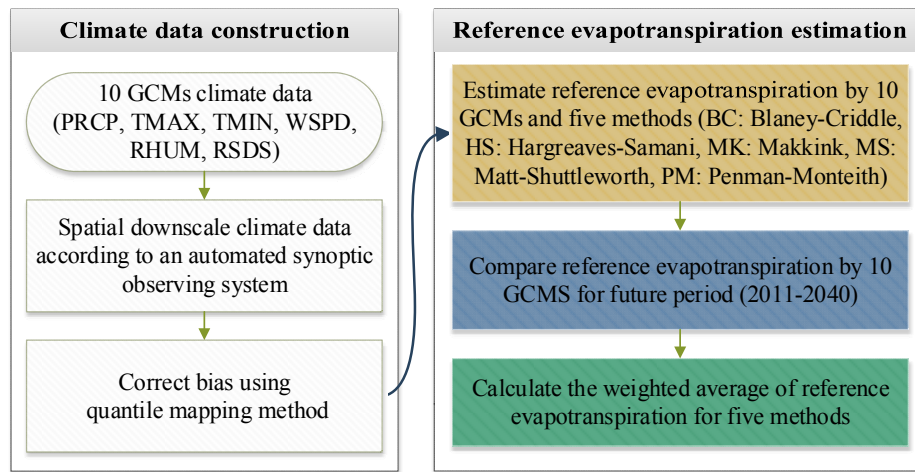


Figure 1. Procedure of estimation of reference evapotranspiration

Table 1. Description of CMIP5 GCMs selected in this study

No	GCMs	Resolution (degree)	Institution
1	BCC-CSM1-1	2.813 x 2.791	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
2	CanESM2	2.813 x 2.791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
3	GFDL-ESM2G	2.500 x 2.023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
4	GFDL-ESM2M	2.500 x 2.023	
5	HadGEM2-CC	1.875 x 1.250	Met Office Hadley Centre
6	HadGEM2-ES	1.875 x 1.250	
7	INM-CM4	2.000 x 1.500	Institute for Numerical Mathematics
8	IPSL-CM5A-LR	3.750 x 1.895	Institut Pierre-Simon Laplace
9	MIROC-ESM	2.813 x 2.791	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
10	MIROC-ESM-CHEM	2.813 x 2.791	

2. 기상변수 확장을 고려한 기준증발산량 추정 방법 선정

기준증발산량은 5개의 방법 (BC: Blaney-Criddle, HS: Hargreaves-Samani, MK: Makkink, MS: Matt-Shuttleworth, PM: Penman-Monteith)을 선정하여 추정하였다. 5개의 방법을 선정한 근거는 GCMs에 구축된 기상자료를 고려하여 변수를 확장함에 따라 기준증발산량이 어떻게 변하는지 분석할 수 있기 때문이다. 기온을 이용하여 기준증발산량을 추정하는 방법에서 시작하여 일사량을 이용하는 방법으로 확장하고 최종적으로 상대습도, 풍속을 모두 사용하는 방법으로 마무리하였다. Blaney-Criddle은 실무에서 기온을 사용하여 기준증발산량을 산정하는 데 널리 쓰이고 있어 선정하였다. Hargreaves-Samani는 최고, 최저기온만을 사용하여 기준증발산량을 추정하는 대표적인 방법으로 기상 자료가 부족한 경우를 고려하여 선정하였다. Makkink는 최고, 최저기온에 일사량을 추가적으로 고려할 수 있는 방법으로 기상 변수가 확장되었을 때 기준증발산량이 어떻게 변하는지 분석하기 위해 선정하였다. Matt-Shuttleworth와 Penman-Monteith는 최고, 최저기온, 상대습도, 일사량, 풍속을 모두 사용할 수 있는 경우를 고려하여 선정하였다. Penman-Monteith는 다른 추정 방법과 비교할 기준 값으로 선정하였다. 식 (1)-(4)는 본 연구에서 사용한 기준증발산량 추정 식을 나타내고 있다.

$$BC: ET_o = p(0.457 \times T_{mean} + 8.128) \quad (1)$$

식 (1)에서 p 는 연간 총 일조시간에 대한 해당 월의 일 평균 일조시간의 백분율(%), T_{mean} 은 일최고기온과 일최저기온을 평균한 기온(°C)을 의미한다.

$$HS: ET_o = 0.0023(T_{mean} + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} RA \quad (2)$$

식 (2)에서 T_{max} 는 일최고기온(°C), T_{min} 은 일최저기온(°C), T_{mean} 은 일최고기온과 일최저기온을 평균한 기온(°C), RA 는 대기권 밖에서의 복사에너지(extraterrestrial radiation)를 기준증발산량 단위(mm day⁻¹)로 변환한 값을 의미한다.

$$MK: ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (3)$$

식 (3)에서 R_s 는 태양복사량(solar radiation, MJ m⁻²

day⁻¹), γ 는 건습계상수(psychrometric coefficient, kPa °C⁻¹), Δ 는 증기압 곡선의 기울기(slope of the saturation vapor pressure-temperature curve, kPa °C⁻¹), λ 는 증발잠열(latent heat of vaporization, MJ kg⁻¹)을 의미한다.

$$PM: ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{mean} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

식 (4)에서 R_n 은 순복사량(net radiation, MJ m⁻² day⁻¹), G 는 토양 열 유속 밀도(soil heat flux density, MJ m⁻² day⁻¹), T_{mean} 은 2 m 높이의 일평균기온(°C), u_2 는 2 m 높이의 풍속(m s⁻¹), $(e_s - e_a)$ 는 포화증기압에서 실제 증기압(kPa)을 제한 포화 결손량, Δ 는 증기압 곡선의 기울기(kPa °C⁻¹), γ 는 건습계상수(psychrometric coefficient, kPa °C⁻¹)를 의미한다.

3. 기준증발산량 추정 방법에 따른 불확실성 분석 방법 선정

5개의 기준증발산량 추정 방법에 따른 불확실성은 BMA (Bayesian Model Averaging)기법을 사용하여 분석하였다 (Hoeting et al. 1999). BMA 기법은 모형의 베이즈 이론 (Bayes'theorem)을 이용하는 방법으로 사후 확률을 산정하여 모형의 불확실성을 분석하는 통계적인 방법이다. 관측값과 모의값의 차이가 클수록, 관측값의 변동성이 클수록 사후 확률이 작게 산정된다. 사후 확률이 작을수록 기준증발산량을 추정하는데 사용하는 변수의 불확실성이 크다는 것을 의미한다. 사후 확률을 활용하여 변수 확장을 통한 기준증발산량의 불확실성을 평가하고 이를 방법별 가중치로 적용하여 5개의 방법을 모두 고려하는 기준증발산량을 산정하였다. 식 (5)는 BMA 기법의 기본 식을 보여주고 있다 (Raftery et al., 2005).

$$p(y) = \sum_{k=1}^K p(y|M_k) p(M_k|y^T) \quad (5)$$

$p(y|M_k)$ 는 모형 M_k 이 주어졌을 때 예측 확률(predictive probability)을 의미하며, $p(M_k|y^T)$ 는 모형 M_k 의 사후 확률 (posterior probability)을 의미한다. y^T 는 학습 자료 (training data)를 의미한다 (Raftery et al., 2005). 본 연구에서는 5개의 기준증발산량 추정 방법을 M_k , 과거 기간 (1976-2005)의 관측 자료로 추정한 기준증발산량을 y^T 로 대입하여 각 방법에 대한 불확실성을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 10개 GCMs를 이용하여 추정한 기준증발산량 평가

Table 2는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040) 기준증발산량을 추정한 결과를 5개의 방법별로 나타내고 있다. 5개의 방법별로 살펴보면 전체적으로 Blaney-Criddle 방법을 이용한 기준증발산량

이 가장 크게 추정되었고, Matt-Shuttleworth 방법이 가장 작게 추정되었다. Hargreaves-Samani 방법은 5월과 7월에 기준증발산량이 가장 크게 추정되었고, Makkink 방법도 IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM 등을 제외하면 5월에 기준증발산량이 가장 크게 추정되었다. Matt-Shuttleworth와 Penman-Monteith 방법은 전반적으로 7월과 8월에 기준증발산량이 가장 크게 추정되는 경향을 나타냈다. GCMs별로 살펴보면, HadGEM2-CC가 4월과 5월의 기준증발산량을 가장 크게 추정하고, IPSL-CM5A-LR가 7월의 기준증

Table 2. Future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

GCMs	(a) Blaney-Criddle												(b) Hargreaves-Samani											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BCC-CSM1-1	57.9	64.2	94.9	122.4	157.6	176.9	197.8	189.5	152.8	120.3	84.7	65.3	29.9	41.0	74.4	115.0	144.7	148.9	155.6	143.5	109.0	82.1	48.4	32.1
CanESM2	58.3	62.1	91.7	121.1	157.5	177.6	199.8	190.5	153.4	120.3	83.9	65.0	29.3	39.9	70.4	115.6	145.4	147.5	156.8	146.5	108.1	82.1	47.7	32.4
GFDL-ESM2G	57.5	63.1	94.8	121.7	157.1	175.9	198.0	187.8	152.9	117.7	83.0	63.3	27.8	37.9	70.4	107.9	145.7	146.5	156.6	141.4	106.9	77.9	45.5	30.7
GFDL-ESM2M	60.1	65.2	94.6	122.9	157.5	176.2	196.5	187.5	152.7	118.6	84.5	66.0	28.8	38.9	68.1	112.2	147.6	146.3	155.3	141.8	106.6	80.3	47.6	31.3
HadGEM2-CC	61.5	68.2	99.4	125.8	161.1	178.9	200.5	192.5	155.0	121.1	85.5	65.7	29.8	42.9	75.9	136.9	155.0	151.5	156.7	144.6	111.1	86.0	50.1	31.7
HadGEM2-ES	63.7	79.8	115.6	143.7	175.9	193.9	205.4	177.9	134.0	98.6	66.5	54.3	28.5	39.3	74.3	126.5	154.2	149.6	158.3	144.4	110.2	82.4	47.9	31.9
INM-CM4	58.1	63.5	91.2	118.8	153.4	173.4	195.1	185.5	148.9	115.7	81.3	61.3	28.7	37.9	69.2	114.6	142.0	149.5	155.8	141.5	105.7	81.9	46.8	29.8
IPSL-CM5A-LR	59.1	64.4	93.1	115.9	153.7	170.4	189.3	185.6	149.1	116.5	80.9	61.8	30.4	38.1	70.9	111.8	145.7	145.9	155.9	145.2	105.7	79.1	46.4	30.2
MIROC-ESM	58.9	67.1	96.0	123.8	160.3	178.7	200.2	190.0	152.5	120.3	85.9	66.5	29.5	40.9	71.9	113.2	147.2	145.1	156.8	144.5	105.4	79.7	48.5	32.7
MIROC-ESM-CHEM	60.8	66.3	98.3	122.0	159.4	177.1	198.8	188.0	153.5	120.9	85.6	67.5	30.3	41.2	77.4	112.1	143.7	142.4	155.0	141.2	106.8	78.9	47.8	33.2
Average	59.6	66.4	97.0	123.8	159.4	177.9	198.1	187.5	150.5	117.0	82.2	63.7	29.3	39.8	72.3	116.6	147.1	147.3	156.3	143.5	107.6	81.0	47.7	31.6
Standard deviation	1.9	5.1	7.0	7.5	6.3	6.2	4.2	4.0	6.1	6.7	5.8	3.9	0.8	1.7	3.0	8.6	4.2	2.6	1.0	1.9	2.0	2.4	1.2	1.1
GCMs	(c) Makkink												(d) Matt-Shuttleworth											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BCC-CSM1-1	31.6	42.1	71.0	91.7	128.1	120.8	115.6	115.0	103.5	82.3	45.1	31.7	14.4	25.5	51.7	76.1	113.5	118.3	120.8	118.7	93.3	59.5	25.0	13.2
CanESM2	30.6	38.4	66.7	92.8	132.3	122.1	122.9	124.8	97.0	84.8	46.4	32.2	13.8	23.2	47.5	75.9	116.6	119.2	127.3	129.0	89.8	61.2	24.3	12.6
GFDL-ESM2G	31.6	40.1	68.6	89.9	133.0	119.5	130.1	107.7	97.9	75.1	44.6	29.9	13.6	23.5	48.9	73.4	116.7	115.7	133.3	110.3	88.5	54.0	23.5	12.0
GFDL-ESM2M	31.3	41.6	67.3	94.5	129.1	119.5	123.7	126.0	95.1	79.5	43.4	30.6	13.8	23.8	48.1	76.9	114.2	116.6	127.4	125.6	85.8	56.3	23.6	12.6
HadGEM2-CC	30.5	42.3	67.1	110.3	135.2	131.5	127.2	129.4	103.4	80.9	45.0	31.4	14.6	25.6	49.3	87.6	119.7	126.4	131.6	131.2	93.3	57.6	23.8	12.5
HadGEM2-ES	30.7	40.6	66.6	102.9	131.6	128.1	131.7	126.5	104.3	75.6	43.7	30.6	14.1	23.8	49.0	82.0	117.2	122.5	135.2	128.0	94.6	55.7	23.4	12.5
INM-CM4	26.7	37.4	64.9	92.0	122.7	117.8	125.7	114.3	96.4	80.0	40.8	28.8	13.4	22.8	46.2	74.0	108.0	114.4	128.9	116.4	85.3	55.4	22.0	11.7
IPSL-CM5A-LR	31.6	41.8	69.7	87.5	129.6	130.4	139.6	132.2	102.0	82.9	44.8	32.3	14.2	23.7	49.4	72.4	116.6	126.2	142.1	135.5	93.7	58.6	23.3	12.0
MIROC-ESM	32.1	45.3	71.9	99.0	135.9	124.6	135.2	117.3	100.0	78.7	46.9	32.8	14.0	25.7	49.7	80.1	121.0	121.5	139.1	121.5	90.8	57.5	25.0	12.8
MIROC-ESM-CHEM	32.8	42.2	72.2	96.3	134.4	112.3	119.5	109.2	99.1	77.8	44.9	34.0	14.7	25.4	52.4	78.4	119.8	111.0	124.8	113.2	91.9	57.9	24.2	13.3
Average	31.0	41.2	68.6	95.7	131.2	122.7	127.1	120.2	99.9	79.7	44.5	31.4	14.1	24.3	49.2	77.7	116.3	119.2	131.1	122.9	90.7	57.4	23.8	12.5
Standard deviation	1.6	2.2	2.5	6.8	4.0	6.0	7.3	8.6	3.3	3.1	1.7	1.5	0.4	1.1	1.8	4.6	3.8	5.0	6.6	8.3	3.3	2.1	0.9	0.5
GCMs	(e) Penman-Monteith																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
BCC-CSM1-1	30.7	41.4	71.8	100.1	138.3	135.7	135.1	132.5	108.9	77.5	42.7	28.9												
CanESM2	28.9	37.9	66.9	101.6	142.9	138.8	144.0	144.4	104.8	78.5	40.8	28.5												
GFDL-ESM2G	28.3	38.1	68.7	96.2	141.7	133.7	148.3	123.8	102.5	70.4	39.6	26.8												
GFDL-ESM2M	29.2	40.2	67.3	101.7	137.8	132.7	140.9	141.1	100.5	74.1	38.0	26.8												
HadGEM2-CC	29.7	41.5	69.3	117.7	146.3	146.9	147.5	147.5	109.3	77.3	41.8	28.6												
HadGEM2-ES	29.2	40.1	68.4	111.8	142.7	144.2	152.4	145.8	109.9	73.7	40.7	28.1												
INM-CM4	28.1	37.1	66.4	99.4	130.7	130.0	142.5	129.6	100.8	73.5	38.3	27.0												
IPSL-CM5A-LR	31.9	41.3	70.4	97.1	139.5	144.9	158.8	150.9	107.4	75.6	40.4	27.7												
MIROC-ESM	31.2	44.0	74.6	106.7	144.7	139.6	155.3	137.2	106.0	74.5	41.4	28.9												
MIROC-ESM-CHEM	28.8	40.6	74.0	103.0	142.7	127.4	139.2	127.1	105.4	73.5	41.1	28.1												
Average	29.6	40.2	69.8	103.5	140.7	137.4	146.4	138.0	105.5	74.9	40.5	28.0												
Standard deviation	1.3	2.1	2.9	6.8	4.4	6.6	7.5	9.4	3.4	2.4	1.5	0.8												

발산량을 가장 크게 추정하는 경향을 나타냈다.

Figure 2는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040) 기준증발산량을 추정한 결과를 5개의 방법별 Box plot으로 나타내고 있다. 5개의 방법별로 살펴보면 겨울철의 기준증발산량 변동성은 비슷하게 산정되는 것으로 보이며, 전체적으로 4월의 기준증발산량 변동성이 크게 나타나는 경향을 나타냈다. Makkink, Matt-Shuttleworth, Penman-Monteith 방법은 7월과 8월의 기준증발산량 변동성이 크게 나타내는 경향을 나타냈다. 3개의 방법이 모두 일사량을 고려하므로 GCMs에 따라 월별 일사량의 특성이 다르게 나타남에 따라 기준증발산량 추정에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Figure 3은 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040)의 기준증발산량을 Blaney-Criddle 방법으로 산정한 결과를 4개의 대권역 (한강 유역, 금강 유역, 낙동강 유역, 영산강 유역)으로 구분하여 Box plot으로 보여주고 있다. Blaney-Criddle 방법으로 산정한 결과를 살펴보면 전체적으로 7월의 기준증발산량이 가장 크게 나타났다. 4개의 대권역별 기준증발산량의 경향성은 비슷한 것으로 분석되었다.

Figure 4는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040)의 기준증발산량을 Hargreaves-Samani 방법으로 산정한 결과를 4개의 대권역 (한강 유역, 금강 유역, 낙동강 유역, 영산강 유역)으로 구분하여

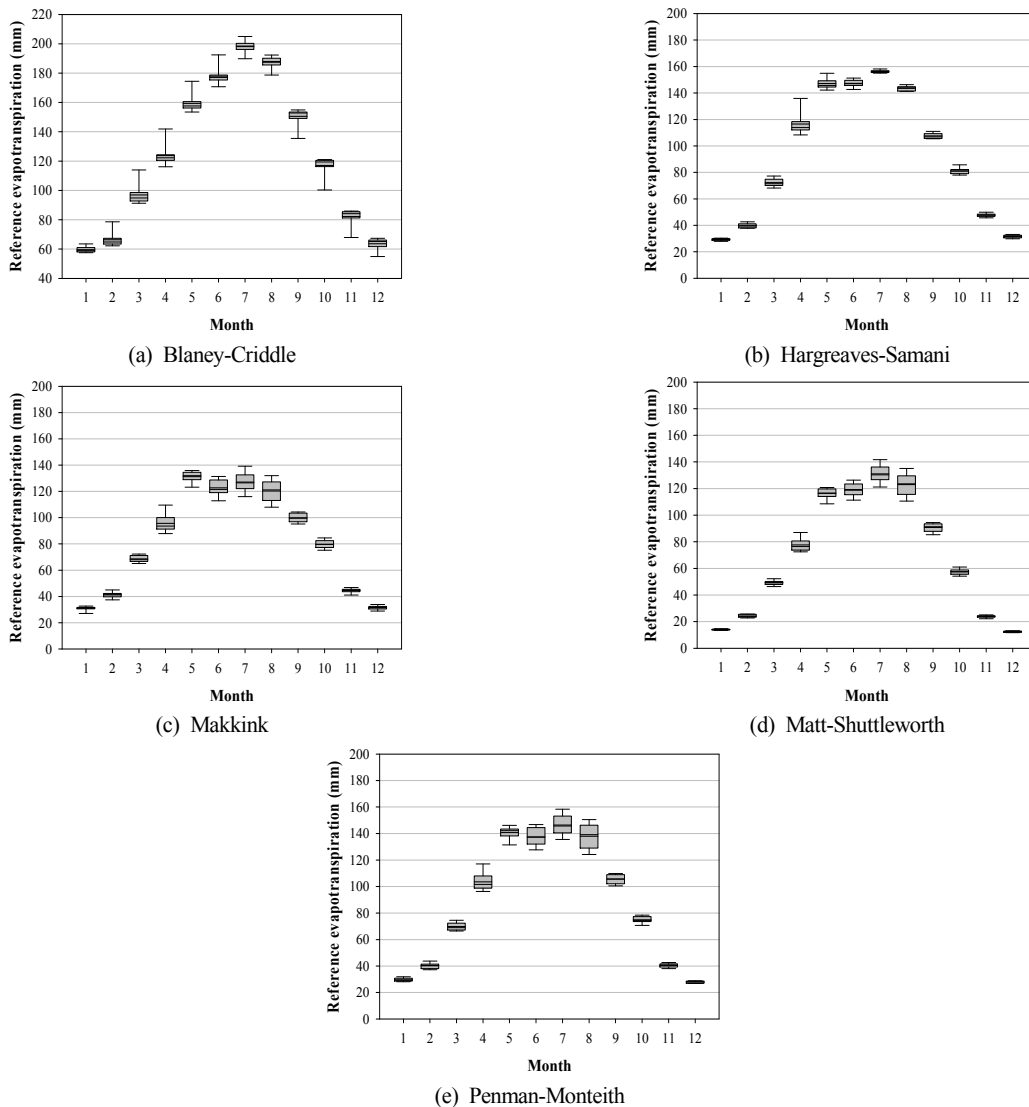


Figure 2. Box plot of future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

CMIP5 GCMs과 추정 방법에 따른 우리나라 기준증발산량 평가

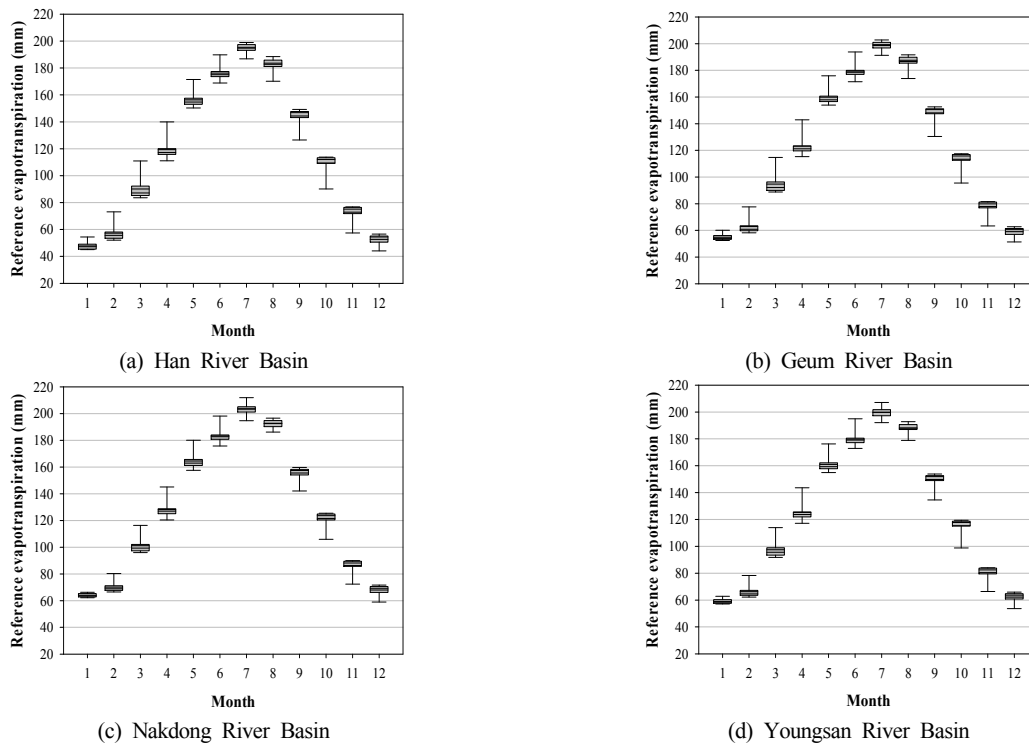


Figure 3. Box plot of future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs and Blaney-Criddle method from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

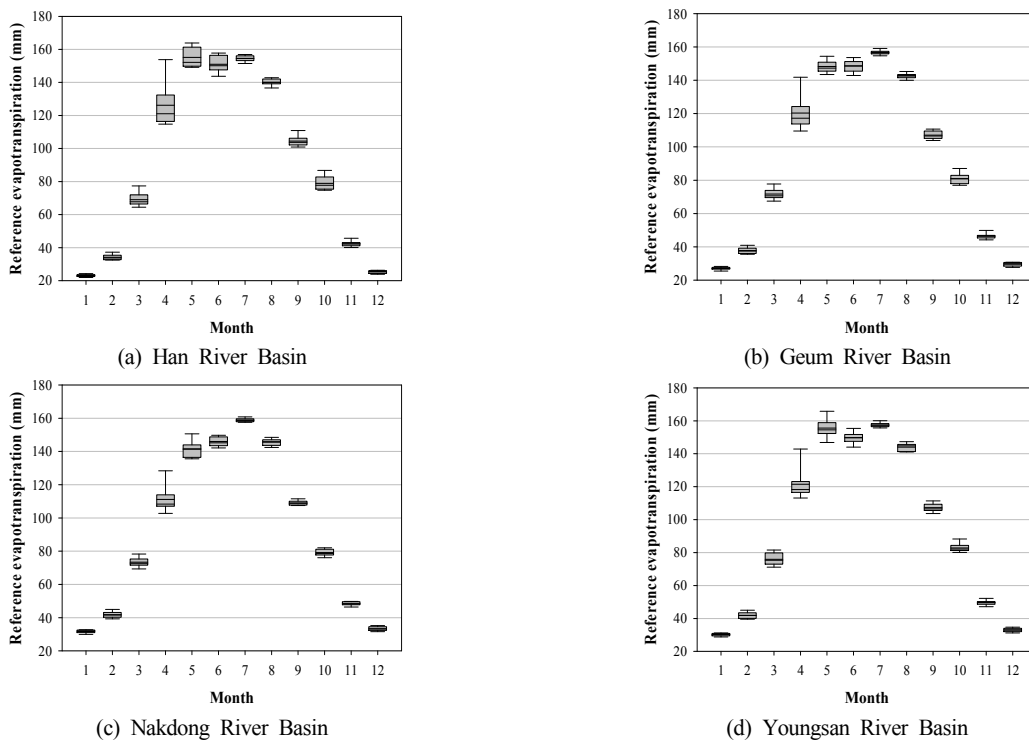


Figure 4. Box plot of future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs and Hargreaves-Samani method from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

Box plot으로 보여주고 있다. Hargreaves-Samani 방법으로 산정한 결과를 살펴보면, 한강 유역은 5, 6, 7월의 기준증발산량이 크게 나타나는 경향을 보였고, 4, 5, 6월의 변동성이 크게 나타났다. 금강 유역은 7월의 기준증발산량이 가장 크게 나타났고, 4월의 기준증발산량 변동성이 크게 나타났다. 낙동강 유역도 7월의 기준증발산량이 가장 크게 나타났고, 영산강 유역은 5, 6, 7월의 기준증발산량이 전체적으로 크게 나타났다. 다른 유역에 비해 한강 유역의 4, 5, 6월 기준증발산량의 변동성이 큰 것으로 분석되어 농업 분야의 관계계획을 수립 시에 이러한 점을 고려해야 할 것으로 사료된다.

Figure 5는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040)의 기준증발산량을 Makkink 방법으로 산정한 결과를 4개의 대권역 (한강 유역, 금강 유역, 낙동강 유역, 영산강 유역)으로 구분하여 Box plot으로 보여주고 있다. Makkink 방법으로 산정한 결과를 살펴보면, 전체적으로 5, 6, 7, 8월의 기준증발산량이 크게 산정된 결과를 나타내고 있다. 한강 유역은 6월, 금강, 낙동강, 영산강 유역은 5월의 기준증발산량이 가장 크게 산정되었다. 또한 한강, 금강 유역은 8월의 기준증발산량 변동성이 큰 것으로 분석되었다. 유역별로 비교

를 하면 영산강 유역의 기준증발산량이 가장 크게, 낙동강 유역의 기준증발산량이 가장 작게 산정되었다. Makkink방법은 전체적으로 봄철의 기준증발산량이 크고, 여름철의 기준증발산량 변동성이 큰 경향을 보이고 있다.

Figure 6은 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040)의 기준증발산량을 Matt-Shuttleworth 방법으로 산정한 결과를 4개의 대권역 (한강 유역, 금강 유역, 낙동강 유역, 영산강 유역)으로 구분하여 Box plot으로 보여주고 있다. Matt-Shuttleworth 방법으로 산정한 결과를 살펴보면, 전체적으로 5, 6, 7, 8월의 기준증발산량이 크게 산정된 결과를 내고 있으며 이 중 7월이 기준증발산량이 가장 크게 산정되었다. 또한 전체적으로 8월의 기준증발산량 변동성이 크게 나타났다. 유역별로 비교를 하면 영산강 유역의 기준증발산량이 가장 크게, 낙동강 유역의 기준증발산량이 가장 작게 산정되었다.

Figure 7은 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040)의 기준증발산량을 Penman-Monteith 방법으로 산정한 결과를 4개의 대권역 (한강 유역, 금강 유역, 낙동강 유역, 영산강 유역)으로 구분하

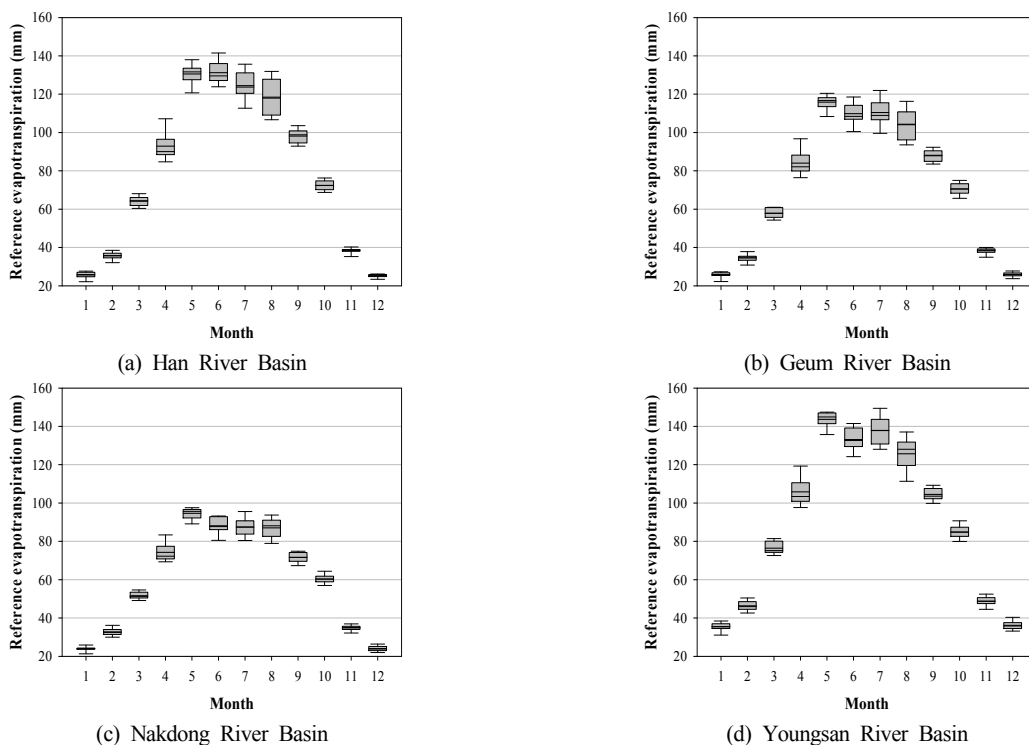


Figure 5. Box plot of future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs and Makkink method from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

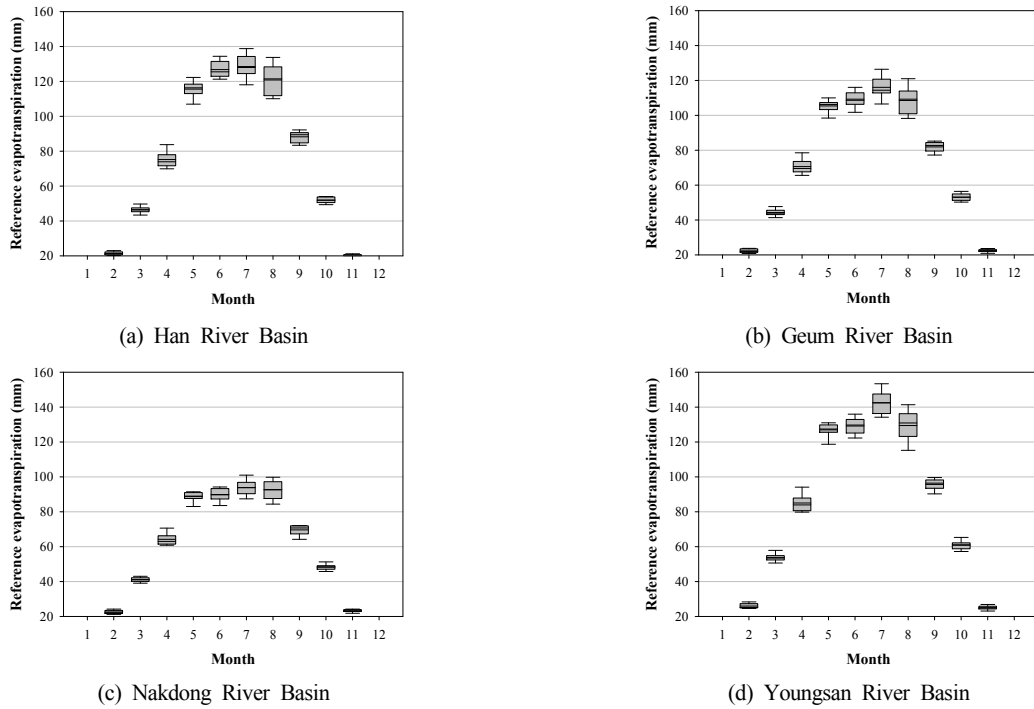


Figure 6. Box plot of future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs and Matt-Shuttleworth method from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

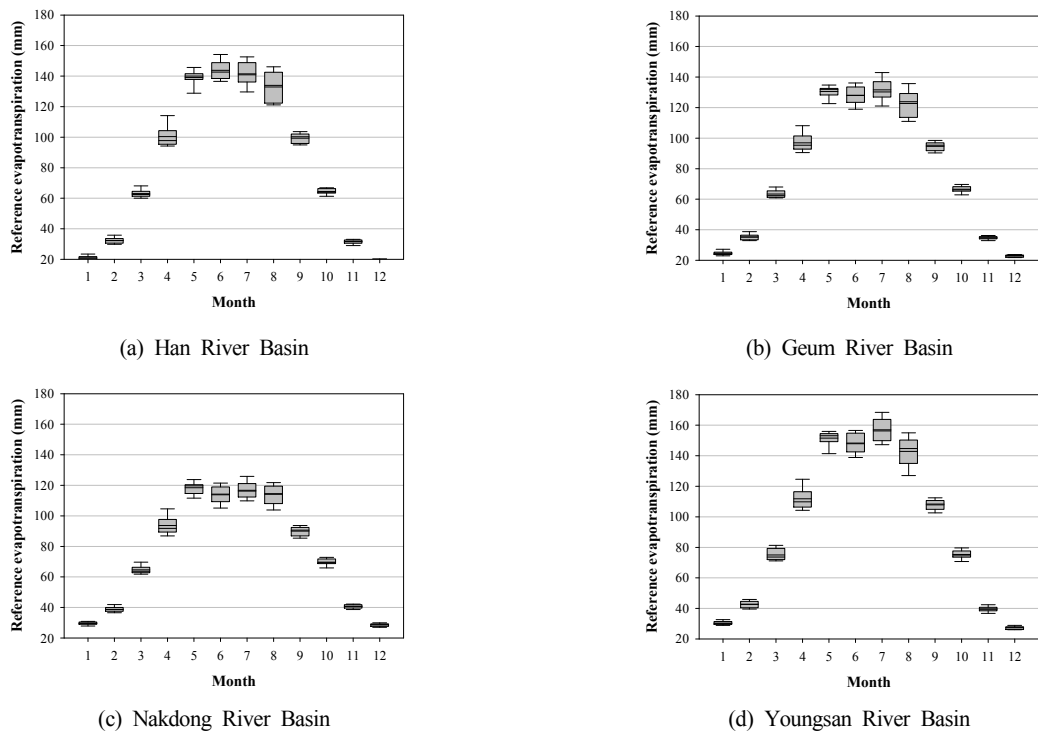


Figure 7. Box plot of future mean monthly reference evapotranspiration compared by 10 GCMs and Penman-Monteith method from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

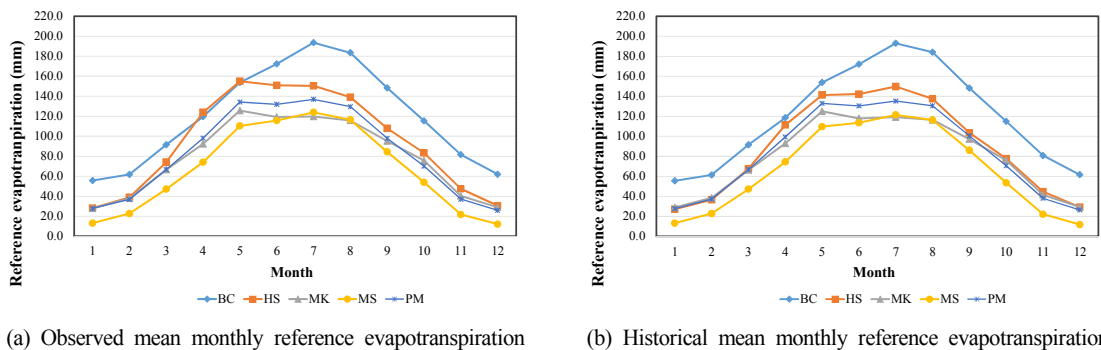
여 Box plot으로 보여주고 있다. Penman-Monteith 방법으로 산정한 결과를 살펴보면, 전체적으로 5, 6, 7, 8월의 기준증발산량이 크게 산정된 결과를 나타내고 있다. 한강, 금강 유역은 8월의 기준증발산량 변동성이 가장 크게 나타났고, 영산강 유역은 6, 7, 8월의 기준증발산량 변동성이 전체적으로 크게 나타났다. 유역별로 비교를 하면 영산강 유역의 기준증발산량이 가장 크게, 낙동강 유역의 기준증발산량이 가장 작게 산정되었다.

2. 기준증발산량 추정 방법에 따른 불확실성 분석

Figure 8은 과거 기간 (1976-2005)의 관측 자료와 10개 GCMs의 기준증발산량을 추정한 결과를 5개의 방법별로 나타내고 있다. 10개 GCMs의 기준증발산량을 각각 추정 한 뒤 평균값을 산정하여 분석하였다. 5개의 방법 (Blaney-Cridle, Hargreaves-Samani, Makkink, Matt-Shuttleworth, Penman-Monteith 순서)별로 과거 기간의 관

측 자료와 10개 GCMs 결과로 추정한 연평균 기준증발산량은 관측 자료로 추정한 값이 BC: 1438.1 mm, HS: 1128.6 mm, MK: 944.1 mm, MS: 795.0 mm, PM: 992.3 mm, 10개 GCMs 결과로 추정한 값이 BC: 1435.0 mm, HS: 1068.1 mm, MK: 948.3 mm, MS: 791.6 mm, PM: 995.0 mm로 나타났다. Hargreaves-Samani 방법만 관측 자료로 추정한 기준증발산량이 10개 GCMs 결과로 추정한 기준증발산량 보다 조금 크게 나타났고, 나머지 4개의 방법은 유사하게 나타났다. 이는 Hargreaves-Samani 방법으로 관측 자료를 사용한 기준증발산량이 5월에 크게 추정되었기 때문이라 사료된다. 관측 자료의 5월 기온값이 10개 GCMs 값보다 커서 이러한 결과를 나타낸 것으로 보인다.

Figure 9는 5개의 방법에 따른 불확실성을 분석하기 위해 과거 기간 (1976-2005)의 관측 자료와 10개 GCMs 결과로 추정한 기준증발산량에 BMA 기법을 적용하여 5개의 방법의 사후 확률을 산정한 결과를 보여주고 있다.



(a) Observed mean monthly reference evapotranspiration

(b) Historical mean monthly reference evapotranspiration

Figure 8. Observed and Historical mean monthly reference evapotranspiration compared by five estimation methods from 1976-2005

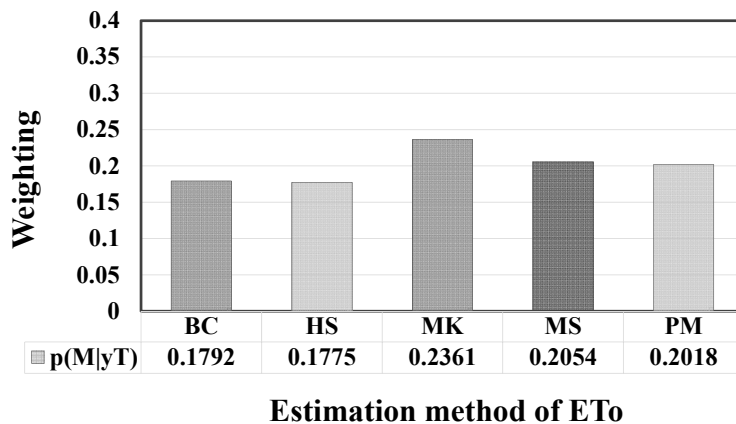


Figure 9. Weightings of five estimation methods of reference evapotranspiration. Weightings were calculated by comparing the observed and historical mean monthly reference evapotranspiration using BMA approach

5개의 방법의 사전 확률은 모두 0.20으로 동등하게 설정하였고 우도함수를 이용하여 관측 자료와 10개 GCMs 결과로 추정된 기준증발산량을 비교하여 사후 확률을 산정하였고 이를 각 방법의 가중치로 적용하였다. 사후 확률은 5개의 방법에 대해 10개 GCMs 결과로 추정된 기준증발산량이 관측 자료를 이용하여 추정된 기준증발산량을 얼마나 잘 반영하는지를 나타낸다. 사후 확률이 클수록 기준증발산량을 추정하는데 사용하는 변수의 불확실성이 작다는 것을 의미한다. 5개의 방법을 선정한 이유는 변수를 확장함에 따라 기준증발산량의 불확실성이 어떻게 변하는지 분석할 수 있기 때문이었다. 사후 확률을 이용하여 이러한 변수 확장을 통한 기준증발산량의 불확실성을 평가하고 5개의 방법을 모두 고려하는 데 가중치로 적용하였다.

5개의 방법의 사후 확률은 BC: 0.1792, HS: 0.1775,

MK: 0.2361, MS: 0.2054, PM: 0.2018로 산정되었다. Hargreaves-Samani 방법의 사후 확률이 가장 작게 산정되었는데 이는 기온에 따른 불확실성이 커서 우도함수의 값이 작게 산정되어 결과적으로 사후 확률이 작게 산정된 것으로 사료된다. Makkink 방법의 사후 확률이 제일 크게 산정되었는데 기상 변수로 일사량이 추가됨에 따라 전체적인 불확실성이 감소하여 사후 확률이 크게 산정된 것으로 사료된다. Matt-Shuttleworth와 Penman-Monteith 방법의 경우 기상 변수로 상대습도, 풍속이 추가됨에 따라 전체적인 불확실성이 증가하여 사후 확률이 작게 산정된 것으로 보인다.

Table 3과 Figure 10은 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간 (2011-2040) 기준증발산량을 5개의 방법으로 추정된 결과와 BMA 기법을 이용하여 가중 평균한 값으로 보여주고 있다. BMA 기법을 사용하

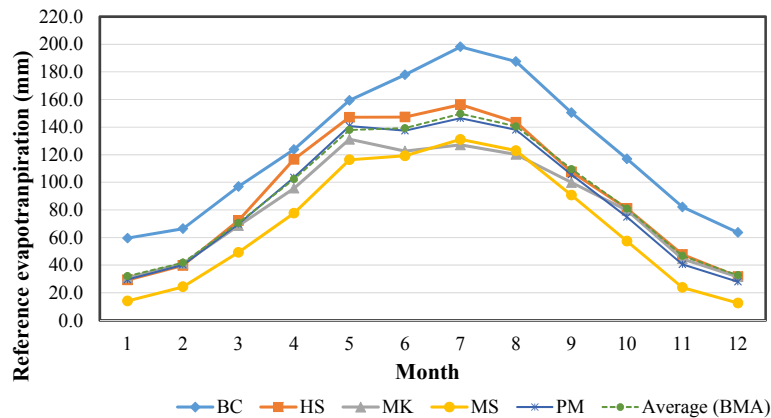


Figure 10. Future mean monthly reference evapotranspiration compared by five estimation methods and BMA approach from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

Table 3. Future mean monthly reference evapotranspiration compared by five estimation methods and BMA approach from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

Month	Blaney-Cridde	Hargreaves-Samani	Makkink	Matt-Shuttleworth	Penman-Monteith	Average (BMA)
1	59.6	29.3	31.0	14.1	29.6	32.0
2	66.4	39.8	41.2	24.3	40.2	41.8
3	97.0	72.3	68.6	49.2	69.8	70.6
4	123.8	116.6	95.7	77.7	103.5	102.3
5	159.4	147.1	131.2	116.3	140.7	137.9
6	177.9	147.3	122.7	119.2	137.4	139.2
7	198.1	156.3	127.1	131.1	146.4	149.7
8	187.5	143.5	120.2	122.9	138.0	140.5
9	150.5	107.6	99.9	90.7	105.5	109.6
10	117.0	81.0	79.7	57.4	74.9	81.1
11	82.2	47.7	44.5	23.8	40.5	46.8
12	63.7	31.6	31.4	12.5	28.0	32.6
Sum	1483.0	1120.0	993.2	839.2	1054.5	1084.2

여 산정한 사후 확률을 가중치로 적용하여 5개의 방법으로 추정한 기준증발산량의 가중평균값을 산정하였다. 가중평균값은 전체적으로 Penman-Monteith 방법으로 추정된 기준증발산량과 비슷한 경향을 나타내며, 9월 이후에는 Hargreaves-Samani 방법, 10월 이후에는 Makkink 방법과 비슷한 경향을 나타냈다.

BMA 기법을 이용하여 5개의 방법별 불확실성을 평가

하고 5개의 방법을 모두 고려하는 기준증발산량을 산정하였다. Table 4는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs과 BMA 기법을 이용하여 5개의 방법을 모두 고려한 54개 ASOS의 미래 기간 (2011-2040) 기준증발산량을 정리하여 보여주고 있다. 또한 농업 등의 분야에서 활용성을 높이기 위해 작물 계수가 구축되어 있고 (Yoo et al., 2006), FAO에서 표준으로 권장하는 Penman-Monteith

Table 4. Future mean monthly reference evapotranspiration for 54 ASOS using 10 GCMs and BMA approach from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

Month	ASOS (Automated Synoptic Observing System) ID																	
	100	101	105	108	112	114	119	127	129	130	131	133	135	138	143	146	156	159
1	21.1	22.0	33.2	25.7	26.5	24.4	24.7	28.5	26.8	35.5	25.6	27.2	29.4	36.5	33.4	28.6	31.8	40.7
2	27.5	31.4	38.9	34.2	34.0	34.6	32.8	37.9	34.6	37.5	34.1	36.6	37.5	43.5	42.0	36.7	40.2	47.4
3	47.2	57.6	60.1	58.8	56.5	63.7	56.5	70.7	58.3	54.4	58.9	62.3	62.1	66.0	67.5	61.1	64.8	68.9
4	77.0	89.5	87.6	85.9	80.6	98.1	83.4	111.9	85.4	75.3	88.7	92.8	90.8	92.1	96.7	90.0	92.3	89.6
5	101.6	116.1	113.2	112.6	106.0	129.4	109.9	152.0	113.9	96.1	116.6	117.7	113.3	117.1	123.6	115.2	119.1	112.6
6	102.8	122.2	113.0	117.6	114.2	136.4	115.3	161.1	120.3	94.7	119.4	120.5	115.6	119.2	125.2	119.4	121.0	113.6
7	107.0	122.7	120.6	115.6	117.3	141.5	117.9	174.2	122.4	107.7	122.9	126.3	118.0	128.5	131.1	125.9	128.1	125.2
8	96.3	115.9	110.3	111.8	115.0	130.7	113.6	158.1	120.4	99.4	115.6	119.7	111.1	119.3	122.0	119.0	122.9	123.6
9	72.5	88.9	85.4	89.3	91.2	101.7	89.9	117.2	94.1	78.0	89.6	92.3	87.0	91.1	94.1	93.2	96.6	96.3
10	55.9	62.4	67.4	66.1	67.2	71.3	66.0	80.1	69.3	62.8	66.9	69.1	68.4	72.7	72.6	70.1	74.0	78.4
11	34.1	34.6	44.8	38.5	40.1	38.2	37.9	44.2	39.6	42.2	38.6	40.3	41.9	48.4	45.8	41.7	45.3	53.3
12	23.1	22.7	34.7	26.4	27.9	24.9	25.7	28.0	27.5	34.3	26.3	28.0	30.2	37.1	33.8	29.5	32.5	41.7
Month	ASOS (Automated Synoptic Observing System) ID																	
	165	170	184	188	192	201	202	203	211	212	221	226	232	235	236	238	243	244
1	35.3	39.6	38.0	44.5	33.2	27.9	26.4	28.6	22.9	27.7	25.7	27.8	29.8	30.1	31.2	29.3	31.0	30.4
2	42.0	47.3	43.9	56.7	42.2	40.5	38.3	43.5	32.2	41.0	35.6	38.2	41.9	38.6	42.1	38.8	41.1	41.6
3	65.2	74.0	65.4	88.0	67.2	75.4	69.9	83.0	58.7	78.6	69.2	69.4	76.9	66.0	74.5	66.8	70.0	73.0
4	89.3	94.8	88.3	115.3	92.8	112.2	108.7	129.2	92.6	116.9	104.2	106.0	117.4	96.0	111.5	100.2	100.5	109.2
5	115.4	130.4	112.7	150.0	118.8	161.5	150.8	185.0	123.2	169.5	142.3	149.3	168.6	137.0	154.2	136.1	138.6	149.4
6	119.0	122.9	118.8	145.4	118.2	177.7	162.5	178.5	131.6	180.6	152.2	148.3	172.4	141.5	159.3	135.5	140.6	139.4
7	129.1	148.0	137.3	189.2	127.9	180.0	169.2	180.6	132.6	172.2	151.9	153.4	182.5	154.0	173.1	145.5	159.7	149.4
8	129.1	142.9	128.1	177.0	121.4	168.4	156.9	170.8	121.6	170.1	140.8	139.0	169.2	150.5	165.1	131.6	157.3	148.6
9	101.6	111.5	98.9	138.5	94.7	132.8	117.3	132.5	94.6	133.9	110.1	115.7	132.2	117.2	125.4	104.3	116.8	117.6
10	79.8	86.4	78.1	106.7	74.1	90.5	80.4	89.2	64.9	92.7	79.8	84.3	90.7	81.9	89.6	78.5	85.4	88.6
11	50.1	51.7	51.7	63.5	46.1	44.8	42.3	46.4	36.3	45.7	40.0	44.1	46.4	45.8	47.0	46.3	47.2	46.6
12	36.4	38.8	39.7	47.1	33.7	27.3	26.5	28.7	24.3	27.4	25.8	28.2	30.1	30.8	31.3	30.7	31.7	30.9
Month	ASOS (Automated Synoptic Observing System) ID																	
	245	247	256	260	261	262	272	273	277	278	279	281	284	285	288	289	294	295
1	32.2	33.6	35.4	37.6	39.2	41.7	30.8	32.2	37.9	30.7	35.2	33.9	32.3	34.4	35.1	36.5	35.8	41.8
2	42.6	46.0	50.0	49.3	50.0	54.5	42.3	42.6	48.5	43.2	48.7	44.4	43.6	46.8	46.7	46.1	45.2	49.7
3	71.1	80.8	84.7	84.2	78.4	86.2	74.7	74.9	75.3	76.7	86.5	73.3	75.7	78.9	76.5	82.6	71.9	89.8
4	103.0	119.3	130.4	119.3	111.6	119.2	112.5	109.8	106.8	120.0	128.5	107.8	113.8	113.0	106.7	115.2	95.5	109.5
5	135.4	155.6	187.0	166.2	155.8	164.9	153.0	151.2	145.6	161.1	176.0	149.3	151.9	148.2	147.0	156.6	128.9	148.2
6	139.7	151.8	168.6	158.4	147.4	156.4	155.7	152.6	147.9	159.5	174.7	143.6	145.9	148.5	147.4	149.7	128.6	151.2
7	152.6	170.0	190.4	184.5	174.0	181.5	159.9	155.1	165.5	168.5	182.2	158.3	154.9	156.7	167.2	169.6	141.6	164.8
8	141.8	156.3	175.9	175.3	164.9	170.1	141.6	138.5	146.2	148.7	164.9	147.5	143.5	142.6	154.5	163.4	137.2	160.1
9	116.7	125.0	127.1	136.2	127.9	133.7	111.3	107.1	115.9	113.5	129.2	114.0	112.9	114.8	121.7	120.4	106.8	132.7
10	86.8	91.3	93.3	101.7	96.9	104.0	81.9	79.3	87.0	86.7	93.1	83.7	82.6	87.3	90.1	90.1	78.1	95.9
11	48.8	49.8	52.9	57.1	56.5	60.2	45.1	46.3	54.2	46.6	50.4	48.9	47.1	49.8	52.4	51.9	48.3	57.5
12	32.7	33.9	37.1	40.0	39.8	41.9	30.2	32.2	39.9	30.7	34.6	35.0	33.0	35.0	36.9	36.8	36.0	41.3

방법으로 기준증발산량을 추정한 결과를 따로 구분하여 제시하였다. Table 5는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs과 Penman-Monteith 방법을 이용하여 추정한 54개 ASOS의 미래 기간 (2011-2040) 기준증발산량을 정리하여 보여주고 있다. 54개 ASOS의 기준증발산량은 기후 변화에 따른 우리나라의 기준증발산량을 추정하는 데 참고자료로 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 다중모델 앙상블 GCMs의 결과를 이용하여 GCMs별 기준증발산량의 특성을 분석하고, 기준증발산량 추정 방법에 따른 특성을 분석하여 기준증발산량을 평가하였다. 다중모델 앙상블 GCMs은 강수량, 최고

Table 5. Future mean monthly reference evapotranspiration for 54 ASOS using 10 GCMs and Penman-Monteith method from 2011-2040 based on the RCP4.5 scenario

Month	ASOS (Automated Synoptic Observing System) ID																	
	100	101	105	108	112	114	119	127	129	130	131	133	135	138	143	146	156	159
1	26.2	17.8	45.9	27.3	30.8	18.9	21.6	20.3	23.3	52.8	22.3	23.1	35.9	47.4	40.0	23.0	29.6	57.3
2	31.2	27.5	47.3	36.2	37.4	29.8	29.7	32.2	31.6	49.9	31.7	33.7	43.8	52.6	49.1	31.8	38.8	62.4
3	49.4	52.7	66.0	62.3	60.1	59.2	53.1	65.6	55.5	62.4	56.8	60.6	68.6	73.8	76.2	56.1	64.7	82.5
4	85.1	83.1	96.8	92.9	85.3	93.6	80.0	109.1	84.3	83.5	87.7	93.3	97.8	101.1	108.5	86.2	93.7	100.4
5	106.1	106.6	117.4	116.2	106.7	124.3	104.0	154.5	111.9	98.1	114.8	115.8	113.6	123.0	133.3	108.7	118.4	117.7
6	94.3	110.1	103.0	112.8	107.0	129.7	104.4	166.0	113.0	80.8	111.8	112.3	106.4	114.4	128.9	108.3	113.8	106.2
7	91.9	104.3	106.5	100.2	103.2	130.9	100.0	179.8	107.6	91.8	109.2	113.1	100.6	121.5	128.3	110.5	116.7	113.6
8	79.4	100.2	95.1	100.8	105.4	120.5	99.1	161.3	109.2	83.5	103.6	108.3	95.7	112.7	120.3	105.6	114.1	119.8
9	60.4	75.5	77.0	84.0	86.2	91.4	79.2	112.8	85.2	70.7	79.5	82.1	76.8	87.2	91.9	82.2	90.0	98.1
10	53.6	49.5	71.9	64.5	67.0	58.6	56.3	68.4	61.1	69.1	57.7	59.6	64.3	76.7	73.6	60.2	69.7	88.7
11	37.7	25.8	55.8	38.4	43.8	27.7	30.7	31.8	33.4	57.3	31.7	32.1	42.9	55.4	48.2	33.4	40.6	66.1
12	28.9	16.7	49.8	27.3	32.3	17.0	20.7	17.5	22.6	55.0	21.0	21.5	34.9	46.9	37.9	22.7	28.6	57.8
Month	ASOS (Automated Synoptic Observing System) ID																	
	165	170	184	188	192	201	202	203	211	212	221	226	232	235	236	238	243	244
1	40.6	41.2	47.0	45.2	30.9	21.1	19.4	20.1	21.0	18.0	20.5	22.3	21.6	24.6	21.9	22.2	23.6	22.6
2	46.3	49.7	49.8	58.3	40.8	36.3	32.8	37.2	30.7	33.7	31.9	33.7	36.2	34.0	35.4	33.3	35.1	35.5
3	70.8	76.9	69.1	91.8	65.4	74.5	65.3	79.9	58.1	72.4	65.7	64.8	73.5	62.4	68.7	60.5	65.2	67.2
4	95.5	97.1	90.7	120.3	89.6	117.3	104.6	131.2	93.2	109.5	101.5	101.6	118.5	95.4	108.2	93.1	98.0	104.1
5	119.2	133.2	112.0	157.9	112.2	173.6	149.9	199.3	120.2	171.0	142.8	150.1	179.5	140.4	157.6	131.8	139.9	149.9
6	114.2	114.5	112.1	143.4	106.6	191.8	165.2	189.7	126.6	189.0	154.3	147.5	182.5	140.9	162.3	128.4	137.7	134.9
7	120.2	142.4	131.9	200.9	113.4	189.7	171.6	189.0	123.1	175.4	148.8	150.1	192.9	152.6	177.9	138.4	159.4	144.6
8	126.8	141.5	124.8	189.8	108.9	178.1	158.7	179.7	111.9	177.7	138.2	134.1	178.5	152.5	171.4	122.9	161.0	148.1
9	103.7	111.4	97.6	147.0	83.7	136.7	111.4	133.2	86.1	133.6	105.2	110.5	133.9	116.0	123.8	95.3	113.6	113.8
10	88.8	89.7	83.4	111.4	63.9	83.4	67.7	78.2	55.3	80.2	68.9	72.6	82.0	75.3	78.7	66.2	77.3	78.0
11	58.1	52.2	58.9	61.8	37.3	34.2	30.1	32.3	30.7	30.6	30.5	33.1	34.6	38.3	34.2	34.3	37.4	34.6
12	41.6	39.4	48.4	44.3	27.5	18.6	16.9	16.4	20.2	14.5	18.1	20.1	19.3	24.0	19.3	20.4	22.4	20.5
Month	ASOS (Automated Synoptic Observing System) ID																	
	245	247	256	260	261	262	272	273	277	278	279	281	284	285	288	289	294	295
1	23.0	24.7	28.0	32.6	33.5	33.5	31.5	30.3	40.4	23.3	31.7	33.1	25.9	26.2	28.9	32.8	35.1	37.1
2	35.5	39.7	44.6	46.1	46.5	49.5	44.3	42.3	50.5	37.3	47.1	43.9	38.6	40.8	42.7	43.3	44.2	48.3
3	64.5	75.1	81.6	83.3	77.3	84.6	77.2	76.3	77.5	70.4	87.2	72.6	71.1	74.8	73.2	80.7	71.3	91.5
4	98.1	115.1	132.0	122.3	114.5	121.6	118.6	113.7	112.5	114.1	134.6	108.0	110.9	111.8	104.7	115.7	97.0	113.3
5	131.7	156.3	200.6	176.8	165.2	174.7	160.6	155.6	154.6	158.1	188.9	150.7	150.7	148.1	148.1	159.8	131.4	155.8
6	134.4	150.9	175.6	163.4	149.3	160.0	159.6	154.1	151.3	159.5	186.3	143.3	143.1	148.2	148.2	149.0	123.9	154.6
7	147.8	173.4	204.0	196.1	181.6	191.6	160.0	151.4	171.0	170.6	192.3	159.1	151.6	155.2	171.5	173.3	134.9	167.6
8	136.8	158.1	187.2	187.6	173.3	180.3	138.4	132.6	147.3	146.5	171.7	148.0	140.0	138.6	157.5	168.9	133.1	166.4
9	112.3	123.3	125.7	139.8	129.7	136.8	107.2	100.5	115.7	106.9	130.3	111.0	106.9	110.0	120.7	116.9	100.8	137.6
10	77.4	80.2	84.0	96.1	93.5	98.9	75.4	71.5	85.2	73.2	86.1	75.7	70.5	76.9	81.1	80.5	71.0	94.1
11	36.6	36.7	40.6	47.1	48.5	48.3	40.1	39.0	51.4	33.2	41.4	41.2	35.6	37.3	40.4	41.5	41.9	49.8
12	21.2	21.7	25.6	30.4	31.1	29.9	28.5	27.3	38.4	20.1	27.5	29.4	23.4	23.6	25.8	29.1	32.1	33.5

기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량을 모두 생산하는 10개 GCMs를 선정하였다. 통계적 기법을 사용하여 54개의 종관기상관측소(ASOS)에 대해 상세화와 편의보정을 수행하여 과거 및 미래 기간에 대해 기준증발산량을 추정하였다. 기준증발산량 추정 방법은 총 5개의 방법(Blaney-Criddle: 최고, 최저기온 사용 / Hargreaves-Samani: 최고, 최저기온 사용 / Makkink: 최고, 최저기온, 일사량 사용 / Matt-Shuttleworth: 최고, 최저기온, 상대습도, 일사량, 풍속 사용 / Penman-Monteith: 최고, 최저기온, 상대습도, 일사량, 풍속 사용)을 선정하였다. 변수 확장을 통해 기준증발산량 추정 방법에 따른 불확실성을 비교하여 어느 변수가 기준증발산량 추정에 큰 영향을 미치는지 분석하였다.

RCP4.5 시나리오를 사용하여 10개 GCMs의 미래 기간(2011-2040) 기준증발산량을 추정한 결과를 5개의 방법별로 살펴보면 전체적으로 Blaney-Criddle 방법이 기준증발산량이 가장 크게, Matt-Shuttleworth 방법이 가장 작게 추정되었다. 월별로 살펴보면 Hargreaves-Samani 방법은 기준증발산량이 5월과 7월에 가장 크게 추정되었고, Makkink 방법도 IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM 등을 제외하면 기준증발산량이 5월에 가장 크게 추정되었다. Matt-Shuttleworth와 Penman-Monteith 방법은 기준증발산량이 전반적으로 7월과 8월에 가장 크게 추정되었다. 이는 추정 방법에 따라 계절별 기준증발산량의 차이가 나타남을 의미한다. Hargreaves-Samani, Makkink 방법은 봄철 기준증발산량을 크게 추정하고, Matt-Shuttleworth와 Penman-Monteith 방법은 여름철 기준증발산량을 크게 추정한다. 이러한 점을 고려해서 계절별 물관리의 중요도가 다를 경우 적절한 기준증발산량 추정 방법을 선택할 수 있는 근거로 사용할 수 있다. 또한 5개의 방법 모두 전반적으로 4월의 기준증발산량 변동성이 크게 나타나는 경향을 나타내는 경향을 보였고, 겨울철의 기준증발산량 변동성은 비슷하게 추정되는 것으로 사료된다. Makkink, Matt-Shuttleworth, Penman-Monteith 방법으로 추정한 기준증발산량은 7월과 8월에 크게 나타났으며, 이는 월별 일사량의 특성이 다르게 나타남에 따라 기준증발산량 추정에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

GCMs별로 살펴보면 HadGEM2-CC 결과를 이용하여 추정한 기준증발산량은 4월과 5월에 가장 크게, IPSL-CM5A-LR 결과를 이용하여 추정한 기준증발산량은 7월에 가장 크게 나타났다. 이는 GCMs에 따라 월별 기상 인자의 특성이 다르게 나타남에 따라 기준증발산량 추정에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 GCMs 다중모델 앙상블을 고려하여 10개 GCMs의 평균값을 사용하였지만, GCMs별 특성을 고려하여 계절별 물

관리의 중요도가 다를 경우 적절한 GCM을 선정할 수 있는 근거로 사용할 수 있다.

5개의 방법에 따른 불확실성을 분석하기 위해 과거 기간(1976-2005)의 관측 자료와 10개 GCMs 결과로 추정한 기준증발산량에 BMA 기법을 적용하여 5개의 방법의 사후 확률을 산정하였다. 5개의 방법의 사후 확률은 BC: 0.1792, HS: 0.1775, MK: 0.2361, MS: 0.2054, PM: 0.2018로 산정되었다. Hargreaves-Samani 방법의 사후 확률이 가장 작게 산정된 이유는 기온에 따른 불확실성이 커서 우도함수의 값이 작게 산정되어 결과적으로 사후 확률이 작게 산정된 때문으로 사료된다. Makkink 방법의 사후 확률이 제일 크게 산정된 이유는 기상 변수로 일사량이 추가됨에 따라 전체적인 불확실성이 감소하여 사후 확률이 크게 산정된 때문으로 사료된다. BMA 기법을 이용하여 산정한 사후 확률 값을 기준으로 평가하면 최고, 최저기온만을 사용하는 방법보다 다른 기상 변수를 고려하는 방법을 사용하는 것이 전체적인 불확실성을 감소시킬 수 있다고 볼 수 있다. 5개의 방법으로 한정해서 살펴보면 최고, 최저기온에 일사량만을 추가한 Makkink 방법의 불확실성이 제일 작은 것으로 분석되었다. BMA 기법을 사용하여 산정한 사후 확률을 가중치로 적용하여 5개의 방법으로 추정한 기준증발산량의 가중평균값을 산정하였다. 또한 농업 등의 분야에서 활용성을 높이기 위해 Penman-Monteith 방법으로 추정한 기준증발산량을 따로 구분하여 제시하였다.

본 연구를 통해 10개 GCMs와 5개의 기준증발산량 추정 방법에 따른 기준증발산량의 변동성을 분석하여 전체적인 특성을 파악하였다. 본 연구의 결과는 향후 기후변화를 고려한 물관리 방법을 도출하기 위한 기준증발산량 표준 산정 기법을 마련하는 데 기초자료로 활용할 수 있다. 5개의 방법을 모두 고려하여 기준증발산량을 산정하거나 유역에 따라 적절한 방법을 선정하는 데 활용할 수 있다. 이러한 결과를 우리나라 유역단위 수문모델링의 입력 자료로 활용하여 장기유출량 산정을 통한 수자원장기종합계획 수립에 반영할 수 있다. 또한 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)와 같이 기준증발산량을 사용하는 가뭄지수를 산정하는 데 있어 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.
본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17AWMP-B083066-04).

References

- 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, Rome.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., and Jensen, M., 2005, The ASCE standardized reference evapotranspiration equation, ASCE-EWRI Task Committee Report.
- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H., 2011, Future Korean Water Resources Projection Considering Uncertainty of GCMs and Hydrological Models, Journal of Korea Water Resources Association 44(5): 389-406.
- Cho, J., Ko, G., Kim, K., and Oh, C., 2016, Climate Change Impacts on Agricultural Drought with Consideration of Uncertainty in CMIP5 Scenarios, Irrigation and Drainage 65(S2): 7-15.
- Choi, S.-K., Kim, M.-K., Jeong, J., Choi, D., and Hur, S.-O., 2017, Estimation of Crop Yield and Evapotranspiration in Paddy Rice with Climate Change Using APEX-Paddy Model, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 59(4): 27-42.
- Climate information portal, 2017, <http://www.climate.go.kr/index.html>, Accessed 25 Sep. 2017.
- De Bruin, H.A.R. and Lablans, W.N. 1998, Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation, Hydrological Processes 12, 1053-1062.
- Eum, H.-I. and Cannon, A.J., 2017, Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble, International Journal of Climatology 37: 3381-3397.
- FAO, 1998, Crop FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985, Reference crop evapotranspiration from temperature, Applied Engineering in Agriculture 1(2): 96-99.
- Hoeting, J.A., Madigan, D., Raftery, A.E., and Volinsky, C.T., 1999, Bayesian model averaging: A tutorial, Statistical Science 14: 382-401.
- Hong, E.M., Choi, J.Y., Lee, S.H., Yoo, S.H., and Kang, M.S., 2009, Estimation of Paddy Rice Evapotranspiration Considering Climate Change Using LARS-WG, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 51(3): 25-35.
- Hur, S.-O., Jung, K.-H., Ha, S.-K., and Kim, J.-G., 2006, Evaluation of Meteorological Elements Used for Reference Evapotranspiration Calculation of FAO Penman-Monteith Mode, Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 39(5): 274-279.
- IPCC, 2014, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Lee, B.H., and Kim, D.J., 2013, Evaluation on the Impact of Extreme Droughts in South Korea using the SPEI and RCP8.5 Climate Change Scenario, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 13(2):97-109.
- Kim, S.J., Kim, M.-I., Lim, C.-H., Lee, W.-K., and Kim, B.-J., 2017, Applicability Analysis of FAO56 Penman-Monteith Methodology for Estimating Potential Evapotranspiration in Andong Dam Watershed Using Limited Meteorological Data, Journal of Climate Change Research 8(2): 125-143.
- Kim, T., Suh, K., Nam, W.-H., Lee, J., Hwang, S., Yoo, S.-H., and Hong, S.-O., 2016, Design and Implementation of Reference Evapotranspiration Database for Future Climate Scenarios, Journal of Korean Society of Rural Planning 22(4): 71-80.
- Kingston, D.G., Todd, M.C., Taylor, R.G., Thompson, J.R., and Arnell, N.W., 2009, Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 36 L20403.
- 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* 28(6B): 675-681.
 20. McMahon, T., Peel, M., Lowe, L., Srikanthan, R., and McVicar, T., 2012, Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9: 11829-11910.
 21. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2016, Long-Term Comprehensive Water Plan (2001-2020), 11-1613000-001716-13, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Republic of Korea.
 22. Mishra, V., Kumar, R., Shah, H.L., Samaniego, L., Eisner, S., and Yang, T., 2017, Multimodel assessment of sensitivity and uncertainty of evapotranspiration and a proxy for available water resources under climate change, *Climatic Change* 141: 451-465.
 23. Oh, N.S. and Lee, K.-H., 2004, Calculation of Evapotranspiration Based on Daily Temperature, *Journal of Korea Water Resources Association* 37(6): 479-485.
 24. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C., 2005, Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling, *Journal of Hydrology* 303: 290-306.
 25. Priestly, C.H.B. and Taylor, R.J., 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Monthly Weather Review* 100(2): 81-92.
 26. Prudhomme, C. and Williamson, J., 2013, Derivation of RCM-driven potential evapotranspiration for hydrological climate change impact analysis in Great Britain: a comparison of methods and associated uncertainty in future projections, *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 1365-1377.
 27. Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., and Polakowski, M., 2005, Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles, *Monthly Weather Review* 133: 1155-1174.
 28. Shuttleworth, W. and Wallace, J., 2009, Calculating the water requirements of irrigated crops in Australia using the Matt-Shuttleworth approach, *Transactions of the ASABE*, 52, 1895-1906.
 29. Valiantzas, J.D., 2013, Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data, *Journal of Hydrology* 505: 13-23.
 30. Yoo, S.-H., Choi, J.-Y., and Jang, M.-W., 2006, Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman Method, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(1): 13-23.
 31. Yoo, S.-H., Kim, T., Lee, S.-H., and Choi, J.-Y., 2015, Trend Analysis of Projected Climate Data based on CMIP5 GCMs for Climate Change Impact Assessment on Agricultural Water Resources, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 69-80.
-
- Received 16 October 2017
 - First Revised 7 November 2017
 - Second Revised 23 November 2017
 - Finally Revised 24 November 2017
 - Accepted 24 November 2017