

LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정

Estimation of Paddy Rice Evapotranspiration Considering Climate Change Using LARS-WG

홍은미* · 최진용**† · 이상현* · 유승환* · 강문성**

Hong, Eun Mi* · Choi, Jin Yong**† · Lee, Sang Hyun* · Yoo, Seung Hwan* · Kang, Moon Seong**

ABSTRACT

Climate change due to global warming possibly effects the agricultural water use in terms of evapotranspiration. Thus, to estimate rice evapotranspiration under the climate change, future climate data including precipitation, minimum and maximum temperatures for 90 years (2011 ~ 2100), were forecasted using LARS-WG. Observed 30 years (1971 ~ 2000) climate data and climate change scenario based on SRES A2 were prepared to operate the LARS-WG model. Using these data and FAO Blaney-Criddle method, reference evapotranspiration and rice evapotranspiration were estimated for 9 different regions in South Korea and rice evapotranspiration of 10 year return period was estimated using frequency analysis. As the results of this study, rice evapotranspiration of 10 year return period increased 1.56%, 5.99% and 10.68% for each 30 years during 2011 ~ 2100 (2025s; 2011 ~ 2040, 2055s; 2041 ~ 2070, 2085s; 2071 ~ 2100) demonstrating that the increased temperature from the climate change increases the consumptive use of crops and agricultural water use.

Keywords: Climate change; LARS-WG; A2 scenario; FAO blaney-criddle; 10 year return period; rice evapotranspiration; paddy rice

1. 서 론

산업혁명 이후 인간의 활동이 증가하면서 대기의 성분 변화 및 온실가스 농도 증가에 따른 지표와 대기의 기온 상승, 해양 상승의 온도 변화 그리고 해수면 상승 등 기후변화 (Climate Change) 현상이 증가하고 있다 (KMA, 2008). 최근 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서 (2007)에 따르면 지난 100년간 (1906 ~ 2005) 지구 평균상승온도는 과거 IPCC 3차 보고서 (2001)에서 발표한 1901 ~ 2000년 평균 상승온도보다 0.14 °C 증가한 0.74 °C로 기후변화에 따른 지구온난화 현상이 점차 빨라지고 심각해지고 있

음을 알 수 있다. 우리나라 역시 최근 10년 (1996 ~ 2005) 평균기온은 14.1 °C로 평년 (1971 ~ 2000)보다 0.6 °C 상승한 것으로 분석되었으며, 평균 연강수량은 1,485.7 mm로 평년에 대해 약 10%, 호우일수는 28일로 평년 호우일수 20일보다 8일 증가한 것으로 나타나 기후변화로 인한 세계적인 경향을 상회하는 것으로 보고되었다 (KMA, 2008).

기후변화는 생태계 변화, 작물생육, 식량문제 등 많은 분야에 영향을 미치게 된다. 특히 지구온난화에 따른 기온상승, 강수량의 규모, 빈도 및 패턴의 변화는 수문순환과 유출량 변화 등 수자원의 변화에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 기후변화에 따른 기온상승은 증발산량 증가의 원인이 되며, 강수량이 증가한다 할지라도 집중호우와 증발산량의 증가로 인하여 토양수분 및 유출량의 잦은 변화가 예상되어 전체 물 사용량의 47%를 차지하는 농업용수에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 즉, 홍수, 농업가뭄 등의 재해 증가로 인하여 관개기의 농업용수의 안정적 공급과 관리의 어려움이 예상되어 결과적으로 농업용수의 안정성을 위협받을 수도 있다.

최근 기후변화가 국내 수자원에 미치는 영향에 대한 연구는 지속적으로 진행되어왔다. Bae et al. (2007)와 Jung et al.

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학부·농업생명과학연구원 겸임 연구원

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4583

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: iamchoi@snu.ac.kr

2009년 3월 23일 투고

2009년 5월 1일 심사완료

2009년 5월 18일 게재확정

(2007)은 LARS-WG (Long Ashton Research Station - Weather Generator)를 이용하여 유역별 시나리오를 생산하고 관측치와 비교하였으며, 이 시나리오에 따른 국내 유출량의 변화를 추정하였다. 이 연구에 따르면 한강유역의 유출량은 기후 변화에 따라 증가하지만 다른 유역은 향후 감소할 것으로 예측되었다. Lee et al. (2008)과 Ahn et al. (2008) 등은 기후 변화 및 토지이용 변화에 따른 수문분석을 하였으며, Im et al. (2006)은 과거 30년 기온 및 강수량에 대한 시나리오를 생산하여 미래 30년에 대한 시나리오를 생산하고 미래 기후변화를 전망하였다. 그러나 기후변화와 수자원의 연관성에 대한 연구는 기온과 강수 시나리오 산정, 토지이용 변화에 따른 수문분석 또는 유역에서의 유출량 추정에 관한 연구가 대부분이며, Lim et al. (2006)이 증발산량추정에 관한 연구를 진행하였으나, 기상인자들의 1%, 3%, 5% 증가율에 따른 증발산량 모의연구였으며, Chung (2009)의 기후변화가 낙동강 권역의 논 관개용수 수요량에 미치는 영향에 관한 연구에서 진행되었으나 초기 연구 진행 단계로서 기후변화에 따른 증발산량 추정 및 농업수자원 분야에 미치는 영향 등에 대한 연구는 지속적으로 진행되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 9개 지역을 연구 대상 지역으로 선정하고, 기준기간 30년 (1971 ~ 2000)동안의 기상자료 (강수량, 최저기온 및 최고기온)와 국립기상연구소에서 제공하는 A2 시나리오에 따른 기후변화 예측 결과를 바탕으로 LARS-WG 일 기상 생성모형을 이용하여 미래 90년간 (2025s; 2011 ~ 2040, 2055s; 2041 ~ 2070, 2085s; 2071 ~ 2100)의 일별 기상자료를 모의하였다. 또한, 이 모의 결과를 바탕으로 미래 기후변화 추이를 살펴보고, 이에 따른 관개 기간 동안의 논벼의 작물증발산량을 산정하였다. 그리고 이를 바탕으로 논벼의 10년 빈도 작물증발산량을 산정하여 기후변화에 따른 변화를 살펴보았다.

II. 이론적 배경

1. 기후변화 시나리오

IPCC SRES (Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emission Scenario)는 크게 4개 (A1, A2, B1, B2)로 나뉘며, 인구 통계, 경제 및 기술변화에 대한 결과로써 온실가스 배출을 다룬다. A, B는 경제 지향적, 환경 지향적 성향을 각각 표시하고, 1, 2는 전지구적 지향과 지역주의적 지향을 각각 표시한다. 본 연구에서 활용된 A2 시나리오는 인구증가율이 높고 기술 변화가 느린 세계를 다루고 있으며, IPCC SRES 중에서 대기의 이산화탄소가 급격하게 증가하여 2100년

에는 830 ppm에 이를 것으로 예상하는 시나리오이다 (KMA, 2008).

본 연구에서는 전지구 기후모델 (GCM, General Circulation Model) ECHO-G로 생산된 IPCC SRES A2 시나리오 결과를 국립기상연구소에서 지역기후모델인 (RCM, Regional Climate Model) NCAR/PSU MM5에 적용하여 27 km 해상도로 제작한 기후변화 예측자료를 활용하였다. 국립기상연구소의 기후변화 예측자료는 한반도 격자별 과거 30년 (1971 ~ 2000)의 월별 평균값에 대한 2001 ~ 2100년까지의 기온 (°C) 및 강수 (%)의 편차자료로 구성되어있다 (NIMR, 2008).

2. LARS-WG 모형

일 기상자료를 생성하기 위한 여러 가지 모형이 있으나 대표적인 추계학적 모형에는 WGEN (A Model for Generation Daily Weather Variables)과 LARS-WG (Long Ashton Research Station - Weather Generator)가 있다. LARS-WG 모형이 WGEN에 비해 적용성이 높은 것으로 알려져 있으며 (Sermentov et al., 1998), 기후모형에서 모의하지 못하는 지역적인 기후 특성을 보다 현실성 있게 반영하여 수자원 영향 평가에 좋은 것으로 알려져 있어 (Bae et al., 2007) 본 연구에서는 일별 강수량, 최저기온 및 최고기온을 모의하기 위해 LARS-WG 모형을 활용하였다

LARS-WG 모형은 Racsko et al. (1991)이 개발한 추계학적 일 기상생성모형을 기본으로 하여 강우일수와 무강우일수, 월별 강수량, 최저기온 및 최고기온의 빈도분포와 평균 및 표준편차, 최저기온이 0 °C 보다 낮은 날의 분포, 최고기온이 30 °C 이상인 날의 분포 등을 매개변수로 활용하여 일 기상자료를 생산한다. Table 1은 LARS-WG에서 일별 기상자료를 모의하기 위해 활용된 분포형 및 모의 방법을 나타낸 것이다. 모의된 기상자료의 매개변수 검 · 보정에는 Q-Test가 사용되며, 이는 기후자료의 평균과 분산이 실측치와 동일한 모집단에서 생성된 자료인지 분석한다 (Sermentov and Barrow, 2002).

3. 작물 증발산량

본 연구에서는 과거 및 모의된 미래 일 기상자료를 활용하여 기준작물증발산량 (reference evapotranspiration, ET_0) 및 작물 증발산량 (crop evapotranspiration, ET_c)을 산정하였다. 기준작물증발산량을 산정하기 위하여 평균기온과 주간시간 백분율을 이용한 FAO Blaney-Criddle 식을 사용하였다. Blaney-Criddle 식은 온도의 함수로써 나타내며 FAO 추천식은 Eq. (1)와 같다.

Table 1 The input parameters used in LARS-WG to generate each weather variable (Sermenov et al., 1998)

	Weather variables	Description
Precipitation status	Definition of wet day	Precipitation > 0.0 mm
	Determine of precipitation status for a given day	Lengths of alternate wet and dry sequences chosen from a semiempirical distribution fitted to the observed series. Separate parameters are calculated for each month.
Precipitation	Daily distribution	Semi-empirical distribution
	Parameters	Separate parameters are calculated for each month
Minimum temperature	Daily distribution	Normal distribution
	Parameters	The mean and standard deviation of the normal vary daily. These parameters are obtained by fitting Fourier series to the means and standard deviations of the observed data throughout the year.
	Conditioned on precipitation status	Separate Fourier series are fitted for wet and dry days.
	Correlation	Constant lag 1 auto-correlation. Pre-set-cross-correlation between maximum and minimum temperature.
	Maximum temperature	Same procedure as for minimum temperature.

Table 2 Crop coefficient (K_c) of paddy rice for FAO Blaney-Criddle (MAFF, 1986)

10-Days	6-E	6-M	6-L	7-E	7-M	7-L	8-E	8-M	8-L	9-E
Central regions	0.71	0.76	0.73	0.69	0.76	0.87	1.02	0.86	0.84	0.76
Southern regions	0.83	0.70	0.64	0.77	0.90	0.90	1.11	0.95	0.91	0.92

$$ET_0 = C[P(0.46T + 8.13)] \quad (1)$$

여기서, C 는 보정계수, P 는 연주간시간에 대한 일평균 주간 시간 백분율(%), T 는 평균 기온(°C)이다.

작물 증발산량은 Table 2의 작물계수(K_c)를 사용하여 산정하였다(Eq. (2)). 본 연구에서는 이앙일을 5월 말일, 관개기간은 6월 초순 ~ 9월 초순으로 가정하였다(Yoo et al., 2007).

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

4. 논벼의 10년 빈도 작물 증발산량

논벼의 10년 빈도 작물 증발산량을 산정하기 위해선, 논벼의 일별 작물 증발산량의 합을 시계열로 작성하여 2변수 Gamma 분포형 (GAM2), 3변수 Gamma 분포형 (GAM3), GEV 분포형 (GEV), Gumbel 분포형 (GUM), Normal 분포형 (NOR), 2변수 Log-normal 분포형 (LN2), 3변수 Log-normal 분포형 (LN3) 등의 분포에 대하여 매개변수를 추정하였다. 그리고 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정, χ^2 (Chi-Square) 검정, 확률도시 상관 계수 검정 (PPCC, Probability Plot Correlation Coefficient) 3가지 방법으로 적합도 검정을 하여 최적확률분포형을 구한 후, 빈도계수법을 이용하여 산정하였다(Yoo et al., 2007).

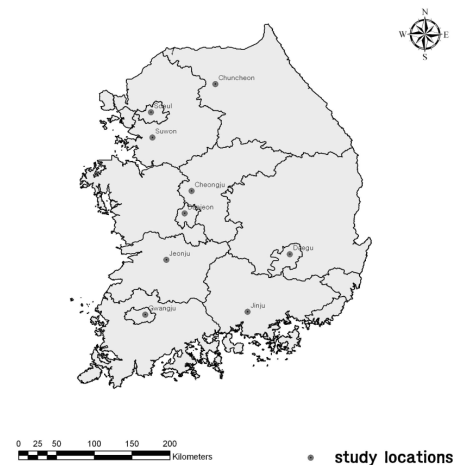


Fig. 1 Location map of 9 study sites

III. 재료 및 방법

1. 대상지역

본 연구의 대상지역은 한반도의 중부지방과 남부지방에 분포하는 주요 도시로서 논벼의 증발산량 및 소비수량 산정 연구가 이루어졌던 춘천, 서울, 수원, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주 및 진주 등 9개 지역이며 Fig. 1과 같다 (Chung, 1987).

2. LARS-WG 입력자료 구축

가. 과거 기상자료

본 연구에서는 LARS-WG 모형을 활용하여 일별 기상자료를 모의하기 위하여 대상지역의 기준년도 (1971 ~ 2000) 동안의 강수량, 최저기온 및 최고기온을 구축하였다. 과거 기상자료의 분석 결과 전반적으로 춘천, 수원, 서울의 기온은 낮은

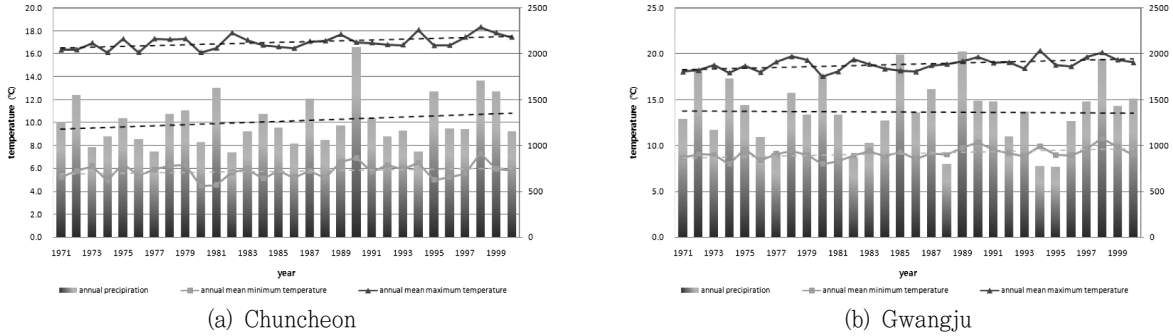


Fig. 2 Annual changes of precipitation, minimum and maximum temperature in Chuncheon and Gwangju

반면 대구, 광주, 광주의 기온은 높았다. 그리고 진주, 전주는 많은 강수가 발생하는 반면, 대구, 춘천, 충주는 강수 발생량이 상대적으로 적었다. 9개 지역 기상인자들의 월별 패턴을 분석해 보면 가장 많은 강수가 발생하는 8월에 최저기온 및 최고기온도 가장 높았으며, 월평균 최저 강수량은 12월에 25.2 mm, 최저 평균온도는 1월에 최저기온 $-6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 최고기온 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 으로 나타났다. 그리고 기준년도 동안의 연도별 패턴을 분석해 보면, 광주의 경우 강수량은 감소하고 기온은 상승하는 경향을 나타내었으나, 광주를 제외한 8개 지역의 경우 춘천과 같이 강수와 기온 모두 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2). 기준년도 동안 연평균 강수량은 최소 1225.1 mm (청주) ~ 최대 1490.0 mm (진주), 연평균 최저기온은 $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (춘천) ~ $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (광주)의 범위를, 연평균 최고기온은 $16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (서울) ~ $19.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (진주, 대구) 범위로 나타났다.

나. 기후 시나리오

국립기상연구소에서 제공하는 한반도 전체가 36×44 개의 격자로 구성되어있는 기후변화 예측자료는 Fig. 3과 같이 한 격자점에 하나의 기상관측소만 포함한다. 따라서, 본 연구에서는 LARS-WG 모형에 적용하기 위한 기후 시나리오를 산정하기 위하여 각각 기상관측소가 포함된 격자의 기후변화 예측자료를 그 지역의 기후변화 예측자료로 가정하여 기준년도 (1971 ~ 2000)에 대한 미래 (2011 ~ 2100)의 월평균 기온 편차 자료($^{\circ}\text{C}$) 및 강수 편차자료 (%)를 추출하였으며, 이 자료를 30년씩 3개의 분석기간 (2025s, 2055s, 2085s)으로 나누고 기간별 평균값 및 편차를 구하여 대상 지역의 기후시나리오를 산정하였다 (Fig. 4).

Table 3은 산정된 기후시나리오 중 대전지역의 기후시나리오으로써, LARS-WG의 기후 시나리오는 과거 기준연도에 대한 월 평균 강수변화, 기온변화 그리고 월 기온편차, 강우일수, 무강우일수, 일사량 시나리오로 구성된다. 강수시나리오는 기준연도에 대한 상대적인 값으로 1이면 과거의 경향과 같으며, 1

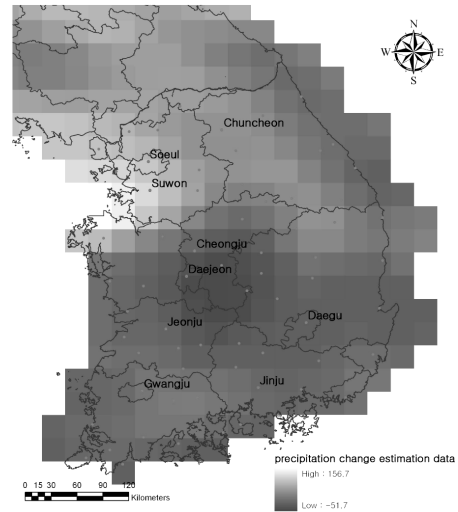


Fig. 3 Example of MM5 climate change estimation data

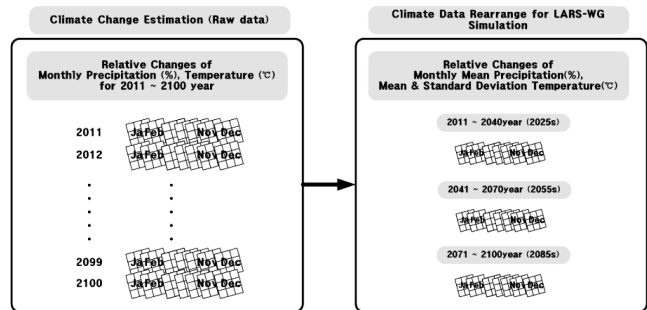


Fig. 4 Flowchart of estimating climate change scenario

보다 크면 과거에 비하여 강수량이 증가, 1보다 작으면 과거에 비해 강수량이 감소함을 의미한다. 월 평균기온 변화 시나리오는 1.20인 경우 기준연도에 비하여 120% 증가함을 의미하며, 월 기온편차 시나리오는 1.88인 경우 해당 월의 기온 편차가 $1.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 임을 의미한다. 강우일수, 무강우일수, 일사량 시나리오의 경우 신뢰할 만한 시나리오자료를 제공하고 있지 않아 과거의 추세와 같이 미래에도 변화한다고 가정하였다.

Table 3 Precipitation and temperature climate change scenario in Daejeon during baseline period (1971 ~ 2000) and 2011 ~ 2100 year

Month	2025s			2050s			2075s			wet & dry series, radiation
	m.prep. (times)	tem. (times)	tsd. (°C)	m.prep. (times)	tem. (times)	tsd. (°C)	m.prep. (times)	tem. (times)	tsd. (°C)	
Jan	1.20	1.56	1.88	1.25	3.93	1.70	1.23	5.27	1.25	1
Feb	1.26	2.13	1.83	1.31	3.98	1.35	0.95	5.43	1.27	1
Mar	0.90	1.54	1.43	0.98	3.41	1.15	1.26	5.30	1.05	1
Apr	1.11	1.42	0.97	0.98	2.69	1.00	1.25	4.57	1.07	1
May	0.96	1.61	0.90	0.81	2.84	0.86	0.90	4.87	0.97	1
June	1.09	1.69	1.02	1.05	3.42	0.78	1.08	5.33	1.03	1
July	0.72	1.28	1.17	0.68	3.00	1.02	1.09	5.03	1.24	1
Aug	0.90	1.60	1.07	1.00	3.65	0.94	1.28	5.75	0.95	1
Sep	1.09	1.54	1.01	1.27	3.64	1.11	1.26	6.06	1.11	1
Oct	0.97	1.71	0.92	1.28	3.38	1.35	1.53	5.81	1.35	1
Nov	0.98	1.47	1.63	0.73	2.97	1.41	0.86	5.18	1.21	1
Dec	0.92	1.79	1.82	1.42	4.25	1.42	0.97	5.27	1.12	1

* m.prep.: relative change in monthly mean precipitation
 * tem.: absolute changes in monthly temperature
 * tsd.: relative changes in temperature standard
 * wet & dry series : relative change in duration of wet and dry spell
 * radiation : absolute changes in radiation (Serrenov and Barrow, 2002)

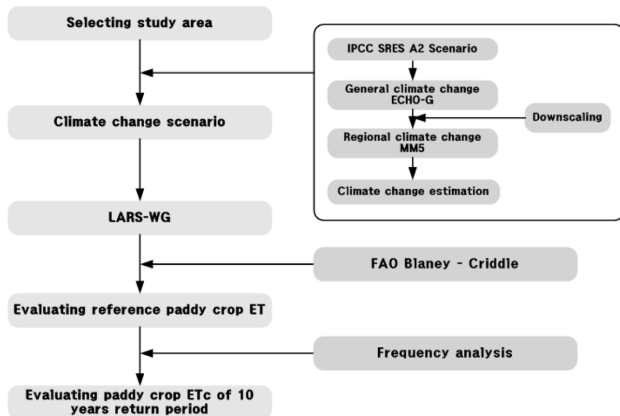


Fig. 5 Flowchart of study procedure

3. 연구 방법

LARS-WG와 기후시나리오를 활용하여 기후변화에 따른 논벼의 10년 빈도 작물증발산량을 산정하기 위한 연구 흐름도는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서는 9개 지역의 기준년도 (1971 ~ 2000) 일 기상자료 및 기후변화 시나리오를 고려하여 모의된 미래 90년 3개 분석기간 (2025s; 2011 ~ 2040, 2055s; 2041 ~ 2070, 2085s; 2071 ~ 2100)의 일 기상자료를 활용하여 기준작물증발산량 및 관개기간 동안의 작물 증발산량을 산정하였으며, 빈도분석을 통하여 논벼의 10년 빈도 작물증발산량을 산정하였다. 또한, 국립기상연구소에서 제공하는 A2 기후변화

예측자료는 각각의 셀에서의 월평균 기온 편차자료 (°C) 및 강수량 편차자료 (%)만을 제공하여 미래 기온 및 강수량 데이터를 확보 및 지역적 특성을 반영하는 데 한계가 있어 지역적 기후 특성을 현실성 있게 반영한 미래 기상자료를 모의하기 위하여 추계학적모형인 LARS-WG를 활용하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. LARS-WG 모형의 적용

LARS-WG 모형을 활용하여 일별 기상자료를 모의하기 위해서는 입력 자료로서 과거 일 기상자료 (강수량, 최저기온, 최고기온) 및 기후시나리오 (강수시나리오, 기온시나리오)가 필요하다. LARS-WG 적용 과정 및 결과는 다음과 같다.

가. 기상자료 생성 및 검증

기후시나리오를 적용하여 미래 일 기상자료를 모의하기 전 LARS-WG 모형의 지역 기후모의 적합성을 분석하기 위하여 9개 지역의 과거 실측 기상자료와 과거 기상자료를 바탕으로 LARS-WG 모형을 통하여 모의된 기상자료를 비교하여 모의 결과의 타당성을 확인하고자 하였다. 관측 자료를 모집단으로 가정하고 모의된 기상자료와 모집단의 평균과 분산에 대한 적합성을 평가하였으며, P-value (probabilities)는 모의된 기상자료와 실측 기상자료의 유의수준을 판단하는 값으로 0.05보다

클 경우 동일한 모집단으로 평가할 수 있는 유의수준으로 판단되며, 0.01보다 작을 경우 유의성이 없다고 판단된다 (Sermentov and Barrow, 2002).

Table 4는 월평균 강수량, 최저기온 및 최고기온에 대한 t-test 결과를 범위별 관측소의 수로 나타낸 것으로, 8월의 경우 1개 지역의 최고기온을 제외한 그 외의 데이터에 대해서는 모의치가 실측치와 유의한 것으로 판단되어 기후시나리오를 활용한 미래 일 기상자료생성의 기초 자료로서 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

나. 미래 기상자료 생성

과거자료로부터 모의된 기상자료와 월별 기후시나리오를 적용하여 2025s, 2055s, 2085s의 일별 기상자료를 추계하였다. 9개 지역에 대한 시기별 연평균 최저기온 및 최고기온과 강수량에 대하여 분석한 결과는 Table 5와 같다. 광주지역의 경우 2025s에는 최저기온 및 최고기온이 기준년도에 비하여 평균적으로 감소하는 경향을 보였지만 그 이후 증가하여 2085s에는 최저기온은 약 2.7 °C, 최고기온은 약 3.1 °C 증가하는 것으로 나타났다. 광주를 제외한 8개 지역의 경우 2025s에는 기준

Table 4 The result of t-test for monthly average minimum and maximum temperature and precipitation (unit: regions)

Data		Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
p<0.01	T_MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01~0.05		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0.05~1.00		9	9	9	9	9	9	9	9	8	9	9	9
p<0.01	T_MAX	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0.01~0.05		0	0	0	4	0	0	0	6	3	0	0	0
0.05~1.00		9	9	9	5	9	9	9	2	6	9	9	9
p<0.01	Prep.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
0.01~0.05		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0.05~1.00		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	1

* T_MIN: minimum temperature, T_MAX: maximum temperature, Prep.: precipitation

Table 5 Comparison of average climate data in 9 regions during baseline period (1971 ~ 2000) and 2011 ~ 2100 year

Region	Prep. mm (mm, variation)				T_MIN °C (°C, variation)				T_MAX °C (°C, variation)			
	base	2025s	2055s	2085s	base	2025s	2055s	2085s	base	2025s	2055s	2085s
Chuncheon	1267 -	1365 (98)	1494 (227)	1627 (360)	5.7 -	7.4 (1.7)	9.3 (3.6)	11.3 (5.6)	17.0 -	18.7 (1.7)	20.6 (3.6)	22.5 (5.5)
Seoul	1344 -	1530 (186)	1634 (290)	1772 (428)	8.3 -	8.5 (0.2)	10.5 (2.2)	12.3 (4.0)	16.9 -	18.8 (1.9)	20.7 (3.8)	22.4 (5.5)
Suwon	1268 -	1525 (257)	1638 (370)	1754 (486)	6.8 -	8.5 (1.7)	10.5 (3.7)	12.3 (5.5)	17.0 -	18.8 (1.8)	20.7 (3.7)	22.5 (5.5)
Cheogju	1225 -	1392 (167)	1493 (268)	1603 (378)	7.0 -	8.4 (1.4)	10.4 (3.4)	12.3 (5.3)	17.9 -	18.7 (0.8)	20.6 (2.7)	22.5 (4.6)
Daejeon	1354 -	1427 (73)	1501 (147)	1649 (295)	7.6 -	9.1 (1.5)	11.0 (3.4)	12.9 (5.3)	18.0 -	19.6 (1.6)	21.5 (3.5)	23.4 (5.4)
Daegu	1028 -	1149 (121)	1117 (89)	1297 (269)	9.0 -	10.5 (1.5)	12.3 (3.3)	14.2 (5.2)	19.3 -	20.5 (1.2)	22.6 (3.3)	24.5 (5.2)
Jeonju	1287 -	1361 (74)	1429 (142)	1590 (303)	8.4 -	8.4 (0.0)	10.2 (1.8)	12.1 (3.7)	18.6 -	18.6 (0.0)	20.4 (1.8)	22.3 (3.7)
Gwangju	1368 -	1373 (5)	1453 (85)	1602 (234)	9.1 -	8.3 (-0.8)	10.1 (1.0)	11.8 (2.7)	18.8 -	18.5 (-0.3)	20.3 (1.5)	21.9 (3.1)
Jinju	1490 -	1542 (52)	1612 (122)	1818 (328)	7.8 -	9.2 (1.4)	11 (3.2)	12.8 (5.0)	19.3 -	20.7 (1.4)	22.5 (3.2)	24.3 (5.0)
average	1292 -	1407 (115)	1486 (194)	1635 (343)	7.7 -	8.7 (1.0)	10.6 (2.9)	12.4 (4.7)	18.1 -	19.2 (1.1)	21.1 (3.0)	22.9 (4.8)

* Prep.: precipitation, T_MIN: minimum temperature, T_MAX: maximum temperature

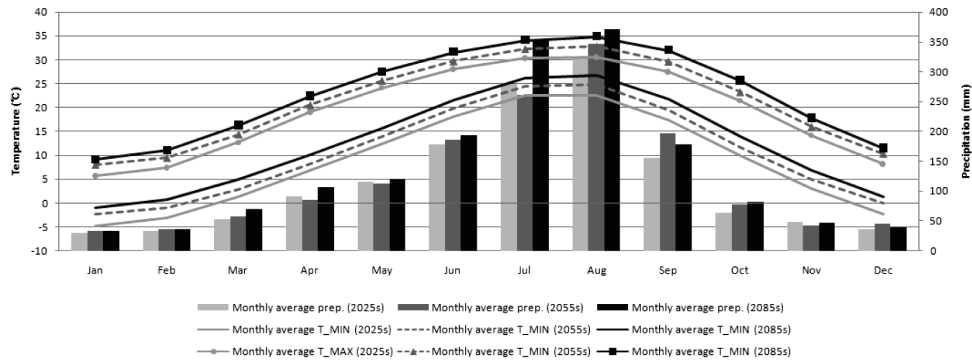


Fig. 6 Comparison of monthly average climate data during baseline period and 2011 ~ 2100 year

년도보다 작게는 0.0 °C 에서 춘천, 수원 지역의 경우 최저기온은 1.7 °C, 최고기온은 1.8 °C 증가할 것으로 추정되었으며, 평균적으로 2085s에는 최저기온은 4.7 °C, 최고기온은 4.8 °C 증가할 것으로 예상되었다. 강수량의 경우, 기준년도에 비하여 평균적으로 2025s에는 115 mm, 2055s에는 194 mm 그리고 2085s에는 343 mm 증가할 것으로 나타났다.

Fig. 6은 기후시나리오에 따른 9개 지역 월 평균 강수량, 최저기온 및 최고기온을 나타낸 것이다. 최저기온과 최고기온은 기후변화에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 강수량은 7월의 경우 2055s에는 감소하는 경향을 보이지만 2085s에는 급속히 증가할 것으로 예상되며, 8월에는 기후변화에 따라 지속적으로 증가할 것으로 추정된다. 그리고 11월 ~ 2월, 5월의 강수량의 경우 기준년도와 비교하여 거의 증감의 변화가 없는 것으로 나타났다.

2. 작물 증발산량 산정 및 추정

가. 기준작물증발산량

모의된 일별 기상자료와 FAO Blaney-Cridle 공식을 이용하여 기준년도 및 2025s, 2055s, 2085s의 기준작물증발산량을 산정하였다. 전체적으로 9개 지역의 기준작물증발산량 증가율은 기준년도에 비해 2025s에는 4.5%, 2055s에는 10.4%, 2085s에는 16.4%로 기후변화에 따라 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, 특히 2025s 보다 2055s, 2085s 시기의 기준작물증발산량 증가 폭이 더 클 것으로 예상되었다.

Table 6은 9개 지역의 기후변화에 따른 월별 기준작물증발산량의 변화를 나타낸 것이다. 여름 (6 ~ 9월)에 기준작물증발산량이 가장 많이 발생하며, 기후변화에 따라 2085s에는 약 18.0% 증가할 것으로 분석되었다. 겨울 (12 ~ 2월)에는 기준작물증발산량이 가장 적게 발생하는 반면 증가율은 32.2%로 기후변화에 따라 겨울철 기준작물증발산량의 변화가 가장 클 것으로 예상되었다. 이는 평균적으로는 여름철 기온이 높지만

기후변화에 따라 겨울철 기온의 증가율이 상대적 (relative)으로 높기 때문인 것으로 판단되며, 이런 현상이 지속될 경우 겨울철 토양수분 감소, 유출량 감소 및 겨울 가뭄현상이 증가할 것으로 예상된다.

지역별로 기준작물증발산량을 분석해보면, 기후변화에 따라 2085s에 대구지역에서 월별 최대 증발산량이 발생할 것으로 추정되며, 겨울 (12 ~ 2월)에는 춘천지역, 봄 (3 ~ 5월), 가을 (9 ~ 11월)에는 광주지역, 여름 (6 ~ 8월)에는 광주 및 진주지역에서 최소 기준작물증발산량이 발생할 것으로 예상된다. 또한, 여름과 겨울의 기준작물증발산량의 차이를 분석해본 결과 춘천지역이 2085s에 410.1 mm로 차이가 가장 컸으며, 진주지역이 370.5 mm로 차이가 가장 작을 것으로 예상된다. 이는 춘천지역의 경우 기후변화에 따라 겨울 기온상승이 타 지역에 비해 적어 기준작물증발산량이 9개 지역 중 가장 적은 반면 진주지역의 경우 전반적인 기준작물증발산량의 편차가 가장 적고 겨울의 기준작물증발산량은 대구와 거의 비슷할 정도로 높고, 여름 기준작물증발산량은 평균보다 낮아 전반적으로 다른 지역에 비해 월별 기온차가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

나. 작물 증발산량

기후변화에 따라 추정된 기준작물증발산량을 활용하여 논벼의 관개기간 (6월 초순 ~ 9월 초순)동안의 작물 증발산량을 산정하였다 (Table 7). 기준년도 평균 작물증발산량은 510.9 mm 이었으며, 기후변화에 따라 2025s에는 525.7 mm, 2055s에는 549.2 mm 그리고 2085s에는 572.9 mm 로 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 기준년도 동안에는 춘천에서 최소 작물 증발산량이 발생하였으며, 대구에서 최대 증발산량이 발생하였다. 2085s에 남부지역 작물 증발산량이 평균 592.2 mm 로 예상되어 중부지역보다 더 많이 발생할 것으로 예상된다. 하지만 기후변화에 따라 중부지역에서 과거에 비해 2085s에 작물 증발산량이 12.3% 증가하여 12.0% 증가하는 남부지역보다 빠르게 증가함을 알 수 있다.

Table 6 Monthly average reference evapotranspiration in 9 regions during baseline period and 2011 ~ 2100 year (unit: mm)

Regions	Period	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Chuncheon	baseline	41.9	51.0	84.2	117.1	155.1	176.0	194.7	181.9	141.3	105.4	70.1	48.2
	2025s	51.7	60.0	93.6	121.9	160.5	182.3	201.7	188.8	151.9	114.1	77.5	58.0
	2055s	59.7	66.3	99.6	127.7	166.8	189.0	210.3	198.3	160.0	120.5	83.5	65.4
	2085s	63.6	71.5	107.2	135.8	175.6	197.5	219.2	207.4	169.5	129.3	89.6	69.3
Seoul	baseline	48.4	55.8	88.2	120.0	157.5	177.7	196.4	186.3	148.7	113.5	76.8	54.3
	2025s	56.1	61.4	93.2	122.6	160.6	182.9	203.0	191.1	154.3	116.9	81.4	62.0
	2055s	64.1	68.1	100.0	129.0	167.7	190.1	211.5	200.1	162.0	122.9	87.1	69.2
	2085s	69.0	74.2	107.9	136.0	174.8	197.7	219.5	208.0	169.8	130.3	92.7	73.7
Suwon	baseline	46.5	53.7	85.2	116.3	154.1	175.0	195.8	185.3	146.3	110.0	74.4	52.5
	2025s	56.4	61.6	93.0	122.2	159.9	182.4	202.7	191.0	154.5	117.0	81.5	62.1
	2055s	64.5	68.2	99.7	128.3	166.7	189.4	211.3	200.3	162.4	123.1	87.3	69.4
	2085s	69.1	74.0	107.4	135.7	174.5	197.4	219.5	208.6	171.0	131.1	93.0	73.7
Cheongju	baseline	48.2	55.5	87.3	119.7	156.9	177.1	197.4	185.5	145.9	110.0	75.0	53.3
	2025s	58.3	60.1	93.1	120.0	159.0	181.0	201.9	190.0	154.8	117.7	82.0	61.0
	2055s	66.0	67.2	99.4	125.8	165.2	187.7	210.6	199.7	163.1	124.2	87.7	68.5
	2085s	69.6	72.5	106.9	133.7	173.8	196.3	219.3	208.7	172.5	133.1	93.7	72.7
Daejeon	baseline	51.4	57.8	88.9	120.7	157.0	176.5	196.9	185.6	146.8	111.8	77.3	56.2
	2025s	60.5	64.8	96.2	124.5	163.0	183.2	204.6	192.4	155.4	119.3	84.5	66.1
	2055s	68.7	71.8	102.8	130.2	169.0	189.8	213.2	202.0	163.3	125.5	90.2	73.2
	2085s	72.6	77.1	110.2	138.1	177.7	198.3	221.9	210.9	172.6	134.4	96.2	77.1
Daegu	baseline	58.4	64.5	95.5	125.9	161.0	177.7	198.4	187.5	150.5	117.9	83.2	62.1
	2025s	67.0	70.8	102.5	129.0	165.8	185.1	204.6	192.3	158.4	124.0	89.6	72.3
	2055s	74.9	77.8	109.1	135.0	172.3	192.5	213.4	202.3	167.3	131.1	95.7	78.7
	2085s	78.6	82.7	116.2	142.6	180.9	201.3	222.4	211.3	176.7	140.0	101.9	82.7
Jeonju	baseline	55.7	60.4	90.7	121.3	156.9	176.1	198.4	187.4	149.7	115.2	81.2	60.3
	2025s	56.7	61.1	91.6	120.4	157.0	179.5	200.7	189.3	154.7	117.5	82.1	62.4
	2055s	64.6	67.8	97.9	125.5	162.6	186.1	209.6	199.0	162.8	123.5	87.5	69.1
	2085s	68.1	72.7	105.1	133.4	171.3	194.7	217.9	207.5	172.1	132.4	93.6	73.0
Gwangju	baseline	59.6	63.8	93.1	122.3	156.6	174.8	196.8	186.8	151.0	117.9	84.0	63.5
	2025s	55.9	60.2	91.2	120.0	156.3	178.9	200.5	188.8	154.2	117.2	81.9	62.0
	2055s	63.2	66.7	97.5	125.7	163.2	186.5	209.6	197.9	161.7	122.7	86.7	68.1
	2085s	67.3	71.8	104.1	132.1	170.2	194.5	218.0	205.9	169.3	129.9	92.1	72.1
Jinju	baseline	58.4	64.2	93.8	121.7	155.3	172.5	194.9	185.0	149.1	115.5	81.3	60.7
	2025s	66.7	70.1	100.1	125.2	160.4	180.6	201.3	190.2	158.5	123.5	86.9	71.0
	2055s	74.2	76.5	106.2	130.6	166.2	187.1	209.6	199.1	166.1	129.3	92.3	77.5
	2085s	78.0	81.5	113.3	138.1	174.5	195.6	218.4	207.9	175.0	137.8	98.5	81.5
average	baseline	52.1	58.5	89.7	120.6	156.7	175.9	196.6	185.7	147.7	113.0	78.1	56.8
	2025s	58.8	63.3	94.9	122.9	160.3	181.8	202.3	190.4	155.2	118.6	83.0	64.1
	2055s	66.7	70.0	101.4	128.6	166.6	188.7	211.0	199.9	163.2	124.8	88.7	71.0
	2085s	70.7	75.3	108.7	136.2	174.8	197.0	219.6	208.5	172.1	133.1	94.6	75.1

다. 논벼의 10년 빈도 작물 증발산량
빈도분석을 통하여 산정된 9개 지역의 관개기간동안(6월 초

순 ~ 9월 초순)의 기준년도 및 미래 90년의 논벼의 10년 빈
도 작물 증발산량은 Table 8과 같다. 춘천지역은 최저 10년

Table 7 Average of paddy rice crop evapotranspiration in 9 regions during baseline period and 2011 ~ 2100 year (unit: mm)

Regions		baseline	2025s	2055s	2085s
Central regions	Chuncheon	483.6	502.0	524.5	548.0
	Seoul	491.6	505.9	527.9	548.7
	Suwon	487.9	505.2	527.6	549.3
	Cheongju	490.9	503.0	525.7	549.2
	average	488.5	504.0	526.4	548.8
Southern regions	Daejeon	527.8	548.1	572.2	597.3
	Daegu	532.7	549.7	575.3	601.1
	Jeonju	531.4	538.5	563.0	587.5
	Gwangju	528.7	537.3	562.0	585.1
	Jinju	523.2	541.8	564.9	589.8
	average	528.8	543.1	567.5	592.2
Average		510.9	525.7	549.2	572.9

Table 8 10 year return period ET_c in 9 regions during baseline period and 2011 ~ 2100 year (unit: mm)

Regions		baseline	2025s	2055s	2085s
Central regions	Chuncheon	494.0	508.4	530.6	554.6
	Seoul	504.8	512.1	533.8	555.8
	Suwon	502.0	511.3	533.5	556.1
	Cheongju	503.4	509.2	531.5	555.7
	average	501.1	510.3	532.4	555.6
Southern regions	Daejeon	541.0	554.4	578.1	604.0
	Daegu	548.5	557.6	583.8	610.7
	Jeonju	544.6	545.4	569.7	594.9
	Gwangju	541.6	543.6	567.7	592.3
	Jinju	536.7	548.4	570.8	596.5
	average	542.5	549.9	574.0	599.7
Average		524.1	532.3	555.5	580.1

빈도 증발산량이 발생하였지만, 2085s 시기에 12.3% 증가하여 9개 지역 중 증가 비율은 가장 높다. 최대 10년 빈도 증발산량은 대구지역에서 발생하며, 2085s에는 기준년도에 비해 11.3% 증가할 것으로 예상된다. 증발산량 증가비율이 가장 낮은 지역은 전주지역으로 2085s에 약 9.2% 증가할 것으로 예상되며, 전주와 광주지역은 2025s 증가율이 0.2%, 0.4%로 거의 증가하지 않지만, 2055s, 2085s 시기에 급격하게 증가함을 알 수 있다. 남부지역과 중부지역의 10년 빈도 작물 증발산량을 비교해 보면, 남부지역에서 중부지역보다 2025s에는 39.6 mm, 2055s에는 41.6 mm 그리고 2085s에는 44.1 mm 더 많이 발생하지만, 증가율에 있어서는 중부지역이 시기별로 각각 1.8%, 6.3%, 10.9% 증가하여 남부지역 증가율 1.4%, 5.8%, 10.5%

보다 높을 것으로 예상되었다. 기준기간동안의 9개 지역 평균 10년 빈도 작물 증발산량을 살펴보면 기준년도 동안 평균 524.1 mm이며, 2025s에는 관개기간 동안의 평균 최저기온이 0.93℃, 최고기온이 0.94℃ 증가함에 따라 1.6% 증가하여 532.3 mm, 2055s에는 관개기간 동안의 평균 최저기온이 2.83℃, 최고기온이 2.89℃ 증가함에 따라 6.0% 증가하여 555.5 mm 그리고 2085s에는 관개기간 동안의 평균 최저기온이 4.85℃, 최고기온이 4.90℃ 증가함에 따라 10.7% 증가하여 580.1 mm 발생할 것으로 판단된다.

3. 연구 방법의 한계점

Chung (2009)의 연구에 따르면 기온 및 대기 중 이산화탄소 농도가 작물 생육에 미치는 영향을 고려하지 않고, GCM 모형 및 SRES 시나리오 적용의 한계성 및 불확실성을 분석하지 않아 연구방법에 한계가 있다고 보고되었다. 본 연구 역시 국립기상연구소에서 제공하는 기후변화 예측자료의 한계로 인하여 풍속, 일조시간 등의 변화에 따른 증발산량의 변화를 고려하지 못하였으며, 한 개의 GCM 모형 (ECHO-G)과 SERS 시나리오 중 A2 한 개의 시나리오만을 적용하여 증발산량을 분석하여 다른 GCM 모형과 SRES 시나리오를 적용할 경우 추정된 증발산량이 달라질 수 있다.

그러나 기온, 풍속, 일사량이 증발산량에 영향을 미치나 기온을 제외한 인자들의 경우 그 영향이 미비하다는 연구 (Lim et al., 2006)가 있으며, 기온상승만으로도 장래 증발산량의 변화는 크게 발생할 수 있는 가능성을 볼 수 있다. 또한, 단위용수량 산정 및 농업용수계획에 있어 기본이 되는 논벼의 10년 빈도 작물 증발산량의 증가는 소비수량 및 계획용수량의 증가를 의미하여 본 연구는 여러 한계점을 고려하더라도 기후변화에 따른 농업용수 수요량 산정, 개발 및 관리계획에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 작물증발산량의 변화를 추정하기 위하여 9개 지역의 기준년도 기상자료와 A2 기후시나리오를 바탕으로 국립기상연구소에서 제공하는 기후변화 예측자료를 토대로 LARS-WG 모형에 적용하여 미래 일 기상자료를 모의하고 FAO Blaney-Cridle 공식을 활용하여 기준증발산량 및 관개기간 (6월 초순 ~ 9월 초순)동안의 작물 증발산량 및 10년 빈도 작물 증발산량을 산정하여 기후변화에 따른 변화를 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 과거 기상자료 및 모의된 미래 기상자료를 분석한 결과는

다음과 같다. 광주지역은 기준년도에 비하여 2025s 의 기온은 감소하는 경향을 보였지만 2055s, 2085s에는 기온이 지속적으로 증가할 것으로 예상되었다. 광주를 제외한 8개 지역의 기온은 지속적으로 증가할 것으로 예상되며 강수량은 9개 지역에서 지속적으로 증가하여 2085s에는 기준년도에 비해 연평균 342.0 mm 증가할 것으로 예상된다. 또한, 월별 강수 패턴을 분석해 보면 11월~ 2월, 5월은 과거에 비하여 강수의 증감 변화가 거의 없지만, 8월 강수량은 지속적으로 증가할 것으로 판단된다.

2) 9개 지역의 기준증발산량을 분석한 결과 기후변화로 기온이 증가함에 따라 기준작물증발산량은 지속적으로 증가할 것으로 예상되었으며, 기준년도에 비해 2085s에 최대 기준작물증발산량이 발생하는 여름에는 18.0%, 최저 기준작물증발산량이 발생하는 겨울에는 32.2% 증가할 것으로 추정된다. 대구 지역에서 기준증발산량이 가장 큰 값을 나타내었고, 겨울에는 춘천, 봄과 가을에는 광주, 여름에는 광주 및 전주지역에서 작은 값을 보였다.

3) 논벼의 10년 빈도 작물 증발산량을 살펴보면, 과거 532.3 mm에서 2085s에는 580.1 mm로 약 10.7% 증가할 것으로 예상된다. 최대값은 대구지역에서 발생했으며, 2085s에는 11.3% 증가할 것으로 예상되었고, 최소값은 춘천지역에서 발생하였으며 2085s에는 12.3% 증가하여 증가 비율은 가장 높을 것으로 예상되었다. 남부지역과 중부지역을 비교한 결과 남부 지역이 중부지역보다 2085s에 44.1 mm 더 많이 발생할 것으로 추정되었지만, 증가율에 있어서는 중부지역이 10.9%로 남부지역보다 높을 것으로 예상되었다.

본 연구에서는 기후변화에 따라 기온 및 강수량 특히, 여름철 강수량 그리고 기준증발산량 및 논벼의 10년 빈도 작물 증발산량도 증가할 것으로 평가되었으며, 시기적으로는 겨울철 기준증발산량이 여름철보다 빠르게 증가하고 지역적으로는 중부지역의 작물 증발산량이 남부지역보다 더 빠르게 증가할 것으로 예상되었다. 본 연구를 바탕으로 기후변화에 따른 농업용수 수요량의 변화, 토양수분 및 유출량의 변화에 관한 연구 뿐 아니라 미래 기후변화에 따른 농업 재해 예측, 가뭄지수 산정 및 가뭄 발생 빈도 예측 연구의 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 국립기상연구소의 IPCC SRES A2 온실가스 증가 시나리오에 따른 한반도 기후변화 시나리오를 활용하여 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, S. R., Y. J. Lee, G. A. Park, and S. J. Kim, 2008. Analysis of future land use and climate change impact on stream discharge. *Korean Society of Civil Engineers* Vol. 8 (2B): 215-224 (in Korean).
- Bae, D. H., I. W. Jung, and W. T. Kwon, 2007. Generation of high resolution scenarios for climate change impacts on water resources (I): Climate scenarios on each sub-basins. *Journal of Korea Water Resources Association* Vol. 40 (3): 191-204 (in Korean).
- Chung, H. W., 1987. A study on consumptive use of paddy field. Ministry of Agriculture-Forestry-Fisheries (in Korean).
- Chung, Sang-Ok, 2009. Climate change impacts on paddy irrigation requirement in the Nakdong River basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* Vol. 51 (2): 35-44 (in Korean).
- Im, E. S., W. T. Kwon, and D. H. Bae, 2006. A study on the regional climate change scenario for impact assessment on water resources. *Journal of Korea Water Resources Association* Vol. 39 (12): 1043-1056 (in Korean).
- IPCC, 2001. Climate change 2001: The Scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Jung, I. W., D. H. Bae, and E. S. Im, 2007. Generation of high resolution scenarios for climate change impacts on water resources (II): Runoff scenarios on each sub-basins. *Journal of Korea Water Resources Association* Vol. 40 (3): 205-214 (in Korean).
- KMA, 2008. Understanding of climate change and application of climate change scenario(1), Korea Meteorological Administration (in Korean).
- Lim, H. J., H. J. Kwon, D. H. Bae, and S. J. Kim, 2006. Analysis of hydrological impact using climate change scenarios and the CA-Markov technique on Soyanggang-

- dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* Vol. 39 (5): 453-466 (in Korean).
- Lee, Y. J., S. R. Ahn, B. Kang, and S. J. Kim, 2008. Assessment of future climate and land use change on hydrology and stream water quality of Anseongcheon watershed using SWAT model (II). *Korean Society of Civil Engineers* Vol. 28 (6B): 665-673 (in Korean).
- MAFF, 1986. A study on the water requirement estimation method in paddy field. The Ministry of Agriculture-Forestry-Fisheries (in Korean).
- NIMR, 2008. Information of A2 climate change scenario. National Institute of Meteorological Research (in Korean).
- Racsko P., L. Szeidl, and M. Semenov, 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57: 27-41.
- Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. N. Barrow, and C. W. Richardson, 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research* Vol. 10: 95-107.
- Semenov, M. A. and Barrow, E. M., 2002. LARS-WG: A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual Version 3.0.
- Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2007. Estimation paddy rice evapotranspiration of 10-year return period drought using frequency analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* Vol. 49 (3): 11-20 (in Korean).