



## 기후변화 시나리오에 따른 미래 논벼의 소비수량 및 생산량 변화 분석

### Analyzing Consumptive Use of Water and Yields of Paddy Rice by Climate Change

이태석\* · 최진용\*\*† · 유승환\*\*\* · 이상현\* · 오윤경\*\*\*

Lee, Taeseok · Choi, Jin-Yong · Yoo, Seung-Hwan · Lee, Sang-Hyun · Oh, Yun-Gyeong

#### ABSTRACT

Agriculture is dependable to weather condition and its change so that it is necessary to understand the impacts of climatic change. The aim of this study is to analyze the change of consumptive use of water and rice yield due to climate change using CERES-Rice. In this study, the weather data of three emission scenario of A1B, A2 and B1 created from CGCM (Coupled General Circulation Model) were used from 2011 to 2100, and downscaled daily weather data were simulated using LARS-WG (Long Ashton Research Station Weather Generator). The input data for cultivated condition for simulating CERSE (Crop-Environment Resource Synthesis)-Rice were created referring to standard cultivation method of paddy rice in Korea. The results showed that consumptive uses of water for paddy rice were projected decreasing to 4.8 % (2025s), 9.1 % (2055s), 12.6 % (2085s) comparing to the baseline value of 403.5 mm in A2 scenario. The rice yield of baseline was 450.7 kg/10a and projected increasing to -0.4 % (2025s), 3.9 % (2055s), 17.5 % (2085s) in A1B scenario. The results demonstrated relationships between consumptive use of water and rice yields due to climate change and can be used for the agricultural water resources development planning and cultivation method of paddy rice for the future.

**Keywords:** Climate change; paddy rice; water requirement; CERES-Rice

#### 1. 서 론

인간 활동으로 인한 대기의 성분 변화, 온실가스의 농도 증가로 기온 상승, 해수면 상승 등의 기후변화가 예상되고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 4차 보고서에서 지구 온난화로 인하여 1906년부터 2005년까지 기온이 전 지구적으로 약 0.74 °C 상승하였다고 보고한 바 있다 (IPCC, 2007). 우리나라의 경우 최근 10년 (1996-2005) 평균기온은 14.1 °C로 평년 (1971-2000)보다 0.6 °C 상승한 것으로 분석되었으며, 연평균 강수량은 1,485.7 mm로 평년에 비해 약 10 % 증가한 것으로 나타났다 (KMA, 2008). 농업은 기상조건과 밀접한 관련이 있는 산업으로서, 기후변화는 작물생육환경의 변화를 가져올 것으로 보인다. 국내 주곡 생산량의 90 % 이상을 차지하는

벼는 기온과 강수량, 일조시간 등의 기상조건에 민감하게 반응하며, 각 생육단계별로 정상적으로 생육할 수 있는 적산온도를 가지고 있기 때문에 기후변화로 인한 기상상태의 변화는 벼의 수량과 질에 영향을 미칠 수 있다 (Lee and Lee, 2008).

이에 기후변화에 따른 미래 논벼의 용수량 및 생산량 예측에 대한 다양한 연구들이 지역적 또는 세계적으로 진행되고 있으며, 국내에서도 관심을 가지고 연구된 바 있다. 먼저 용수량에 관한 연구를 살펴보면, Doll (2002)은 기후변화가 세계의 관개 용수량에 미치는 영향을 분석하여 세계 논지의 2/3에서 관개요구량이 증가할 것으로 예측하였으며, De Silva et al. (2007)은 기후변화가 스리랑카의 논 용수량에 미치는 영향에 대한 연구에서 2050s에 강수량은 감소하고 관개용수량은 증가할 것으로 예측하였다. 국내에서는 Hong et al. (2009)이 미래 기후자료를 이용하여 우리나라 논벼의 10년 빈도 증발산량 변화를 예측하였으며, 현재보다 증가할 것으로 예측하였다. Chung et al. (2010)은 SRES (Special Report on Emissions Scenarios, IPCC, 2000) A2 및 B2 시나리오를 선정하여 논 용수량 변화를 추정하였으며, 전체적으로 논 용수량이 감소할 것이며 시간적 공간적 변동성이 클 것으로 예측하였다. Yun et al. (2011)은 A1B 시나리오를 선정하여 기후변화에 따른 논 필요수량을 분석하였으며, 전체적으로 잠재증발산량 및 필요수량이 증가하는 것으로 예

\* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원  
 \*\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수, 농업생명과학연구원 겸 임연구원  
 \*\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 연수연구원  
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583  
 Fax: +82-2-873-2087  
 E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

2011년 10월 28일 투고  
 2011년 12월 14일 심사완료  
 2011년 12월 14일 게재확정

측하였다. 생산량 측면에서는 Timsina and Humphreys (2006) 이 CERES-Rice 모델을 이용하여 기후변화가 아시아 여러 나라의 벼 생산량에 미치는 영향을 조사하였는데, 기온상승은 생산량을 감소시키고 CO<sub>2</sub> 농도증가는 생산량을 증가시켜 전체적으로는 생산량이 증가한다고 예측하였다. Han (2007)과 Shim et al. (2008)은 CERES-Rice 모델을 이용하여 우리나라 장래 벼 생산량을 모의하여, 장래에는 우리나라 벼 생산량이 감소할 것으로 예측하였다. Chung (2010)은 AquaCrop 3.1 모델을 이용하여 기후변화에 따른 벼 증발산량과 생산량의 변화를 예측하였는데, 증발산량 및 생산량은 증가한다고 하였다. 그러나 위와 같은 연구들은 미래 기상요소의 변화에 따른 용수량 또는 작물 생산량에 관한 영향 예측에 초점을 둔 연구로서 용수 관리 측면에서 기후변화 대응책을 수립하기 위한 자료로는 한계가 있다. 앞으로의 기후변화 현상에 대응하기 위해서는 단순히 용수량, 생산량의 변화를 분석하는데 그치는 것이 아니라 두 요소 간의 관계를 함께 분석하여, 미래에도 충분한 수확량을 확보할 수 있는 적절한 용수관리 방법에 관한 연구들이 필요할 것으로 판단된다. 또한 미래 기후변화는 기후변화 시나리오에 의한 불확실성을 내포하고 있으므로 다양한 기후변화 시나리오를 적용한 연구도 필요하다.

이에 본 연구에서는 다양한 기후변화 시나리오 기상자료와 작물생육모형을 활용하여 기후변화에 따른 미래 논벼의 소비수량 및 생산량의 변화를 분석하고자 하였다. 이를 위해 A1B, A2, B1 시나리오 기상자료를 CERES-Rice 모델에 적용하여 2010년부터 2100년까지의 논벼의 소비수량 및 생산량을 산정하고 시기별 변화를 분석하였으며 이는 미래 논벼 재배에 있어서 농업용수의 관리계획 수립 및 영농 방법에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## II. 재료 및 방법

본 연구에서 기후변화에 따른 미래 논벼의 소비수량과 생산량을 분석하기 위한 연구 방법은 다음과 같다. 첫 번째로 온실가스 배출시나리오에 따른 GCM (Global Climate Model) 결과를 바탕으로 기후변화 시나리오를 작성하고, 이를 바탕으로 통계적 상세화 방법을 이용하여 미래 기상자료를 생성하였다. 두 번째로 농촌진흥청과 국립식량과학원에서 제시하고 있는 표준영농법을 참고하여 모형 구동을 위한 입력자료를 구축하였다. 마지막으로 앞에서 생성한 기상자료와 입력자료를 기반으로 작물생육모형을 이용하여 논벼의 소비수량과 생산량을 산정하고 분석하였다.

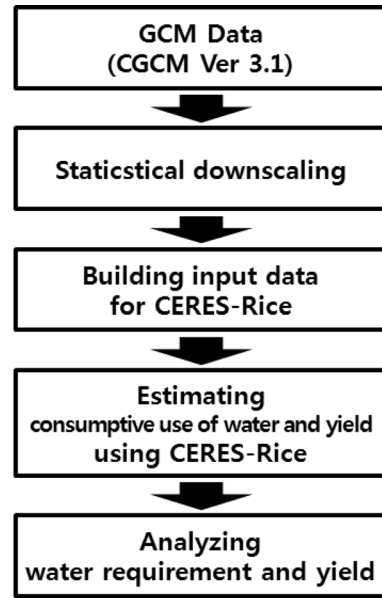


Fig. 1 Flow Chart

### 1. 미래 기상자료 생성

본 연구에서는 수원 측후소를 기준으로 하여 CCCma (Canadian Center for Climate Modeling and Analysis)의 세 번째 버전인 CGCM 3.1 (Coupled Global Climate Model Ver.3.1)의 T63 버전 결과를 활용하였다 (IPCC, 2007). GCGM 3.1 T63 버전은 위·경도 2.8 °와 31개층 (level)의 대기해상도와 경도 1.4 °, 위도 0.94 °의 해양해상도를 가지고 있으며, 우리나라는 4개의 격자에 포함된다 (Yoo, 2009).

SRES (Special Report on Emissions Scenarios)에는 인구, 사회, 경제, 기술, 환경 개발 등에 따라 4가지 골격의 온실가스 배출 시나리오를 제시하고 있는데, 이는 크게 A-B축 (경제지향-환경지향), 1-2축 (지구주의지향-지역주의지향)으로 분류된다. 본 연구에서 선택한 시나리오는 A1B, A2, B1 시나리오이며, A1B 시나리오는 '고성장 사회 시나리오' 중 급속한 경제 발전을 가정하고 있으며 에너지 자원의 시스템 개발이 균형있게 발전한다고 가정하고 있다. A2 시나리오는 '다원화 사회 시나리오'로 세계의 경제나 정치가 블록화 되는 것을 가정하고 있으며, 환경에의 관심은 상대적으로 낮은 편이다. 마지막으로 B1 시나리오는 '지속발전형 사회 시나리오'로 환경의 보전과 경제의 발전이 양립하도록 가정하는 시나리오이다 (IPCC, 2000). 이러한 시나리오를 바탕으로 과거 30년 (1981-2010년)을 기준으로, 미래 90년 동안을 2011-2040년 (2025s), 2041-2070년 (2055s), 2071-2100년 (2085s)으로 구분하여 기후변화 시나리오에 따른 미래 기상자료를 발생하였다.

GCM 모형자료를 이용하기 위해서는 상세화 과정 (downscaling) 또는 지역화 (regionalization)와 통계적 조정을 거쳐야 한다. 상세화는 GCM자료의 격자가 너무 크기 때문에 지역기후를 모의하는 데는 한계가 있으므로 작은 격자 자료로 조정하는 과정이다. 상세화 방법은 크게 경험적/통계적 방법과 역학적 방법으로 나뉘는데, 본 연구에서는 통계적 상세화 기법 중 Racsco et al. (1991)이 개발한 추계학적 기상발생기, LARS-WG (Long Ashton Research Station Weather Generator)를 이용하는 방법을 사용하였다. CGCM 자료의 경우 일별자료를 제공해 주고 있으나, 연평균 강우일수가 약 250일로 실제 수원 지역의 연평균 강우일수 90~120일과 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 지역적인 특성을 반영한 기상자료를 생성하기 위해 강우일수와 무강우일수, 월별 강수량, 최저기온 및 최고기온의 빈도분포와 평균 및 표준편차 등을 매개변수로 활용하여 일 기상자료를 생산하는 LARS-WG 모형을 사용하였다. Semenov et al. (1998)은 대표적인 통계적 기상발생기인 LARS-WG를 유럽, 미국, 아시아 등 상이한 기후지역에 적용하여 모의 정확성을 평가한 결과 적용성이 높다고 제시하였으며, Bae et al. (2007)은 우리나라 56개 기상관측소를 대상으로 적용하여 기후모형에서 모의하지 못하는 지역적인 기후특성을 잘 반영하는 것으로 분석하였다.

## 2. 작물생육모형을 이용한 소비수량 및 생산량 산정

### 가. CERES-Rice 모형

벼 생육모형 가운데 CERES (Crop-Environment Resource Synthesis)-Rice는 미국에서 개발되어 IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) 사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 것이다. 이 모형은 벼의 생장과 발육에 영향을 주는 기상, 토양, 수분, 질소 등 재배환경구성요소간 상호작용을 종합적으로 고려한 것으로서, 실험실 수준을 벗어나 실용화 단계에 있는 것으로 평가된다 (Kim et al., 2002). 우리나라에서도 지구온난화에 따른 쌀 생산량 추정, 북한 183개 시군의 농업기후지원 평가 (Yun and Lee, 2000), 읍면별 작황 예측 (Yun and Cho, 2001) 등에 활용되었다.

CERES-Rice 모형의 구동을 위해서는 기상자료 외에 토양자료, 영농 방법에 관한 자료들이 필요하다. 본 연구의 토양자료는 토양환경정보시스템에서 제공하는 토양통, 토층별 입경분포 및 수분장력 등을 포함하는 토양의 물리적 특성을 참고하였다. 영농 방법은 국립식량과학원에서 제공하는 지역별 적용 품종을 참고하여 중부평야지에 적합한 품종 중 고품질 품종에 속하는 추천벼를 대상으로 작성하였다. 추천벼는 중만생종으로 이앙시기는 5월 중순이다. 따라서 이앙일은 5월 20일, 육묘일수와 재식거리의 각각 30일, 30×15 cm로 하여 입력자료를 구축하였다.

### 나. 벼 품종 유전모수 (Genetic coefficient)

CERES-Rice를 어떤 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 실제 재배되고 있는 품종의 생장 및 발육 관련 유전적 특성을 모형에 반영시켜야 한다. 즉 벼의 발육 및 생장의 주요특성을 몇 개의 유전모수로 표현하고 각 품종별로 서로 다른 값을 부여하는 것이다. 따라서 생육모의의 성공을 위해서는 각 품종의 유전모수 값을 추정하는 일이 전제되어야 한다. CERES-Rice의 경우 발육 관련 4개 (P1, P2O, P2R, P5), 생장 및 수량 관련 4개 (G1, G2, G3, G4)로 이루어진 품종별 유전모수를 조정해 주면 된다 (Yun and Lee, 2000; Kim et al., 2002).

P1은 기본영양생장기간으로 우리나라 품종의 경우 주로 못자리기간을 포함, 100~200도일 정도이다. P2O와 P2R은 유수분화기까지의 기간에서 나타나는 값으로 최적일장과 지연율을 뜻하며, 우리나라의 재배조건에서 이 시기의 일장은 14시간 이상 이므로 최적일장을 10시간 내지 12시간으로 설정하고 지연율을 적절히 조절해주면 조만성을 표현할 수 있다. P5는 등숙기간으로 400에서 600도일 정도의 비교적 균일한 값을 갖는다. 또한 G1은 주간 건물중당 최대립수, G2는 한 개의 영화가 저장할 수 있는 최대의 양분, 즉 최대립중, G3 최고분얼기의 결가지수를 대조품종 IR64와 비교한 상대분얼 능력, G4 벼 재배지역이 열대부터 냉대에 이르기까지 지리적으로 다양한 것을 수용하기 위한 온도반응성을 나타낸다 (Kim et al., 2002).

### 다. 생육모의

준비된 기상, 토양, 재배관리정보를 CERES-Rice 모형에서 요구하는 양식으로 편집하여 추정된 모수와 함께 입력자료를 구축하였다. 시나리오에 따라 미래 기상자료의 온도, 강수량 등의 추세는 변화하나 품종 특성이나, 이앙일 등의 영농 방법은 변화하지 않는다고 가정하고 논벼의 소비수량과 생산량을 모의하였다. 소비수량은 작물의 생장에 필요한 수량으로 증발산량과 작물생체수량의 합으로 이루어지는데, 작물생체수량의 경우 거의 무시할 수 있는 수량이므로 일반적으로 증발산량과 같게 취급한다 (Chung et al., 2007). 증발산량의 경우 국제식량농업기구에서 추천한 Penman-Monteith 공식을 사용하여 산정하도록 하였다. 생산량의 경우 기온 및 강수량 외에 CO<sub>2</sub> 농도 변화에도 영향을 받기 때문에 IPCC SRES database에서 제공하는 시나리오 별 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 고려하여 생산량을 모의하였다.

## III. 결과 및 고찰

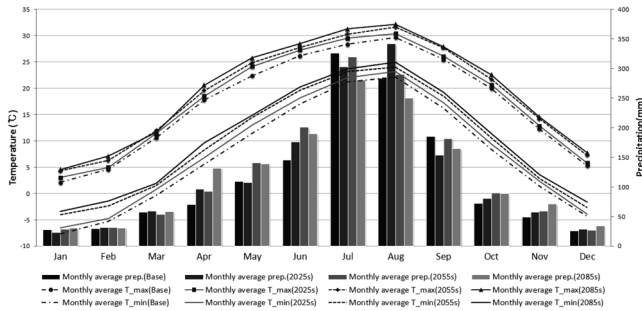
### 1. 연구대상지

본 연구에서는 지역 내 측후소가 존재하고, 농촌진흥청에서

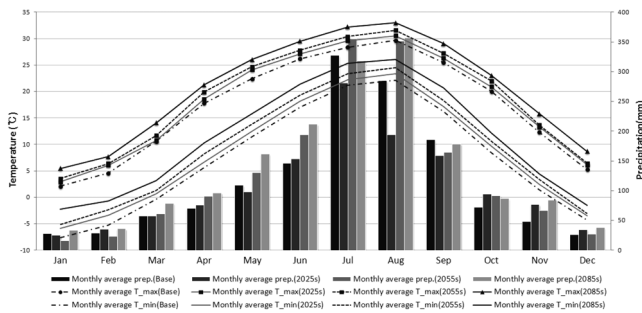
**Table 1** The annual average temperature and precipitation on study area by climate change

	A1B		A2		B1	
	Temp. (°C)	Prep. (mm)	Temp. (°C)	Prep. (mm)	Temp. (°C)	Prep. (mm)
Baseline	12.2	1383.1	12.2	1383.1	12.2	1383.1
2025s	13.1	1459.6	13.3	1285.2	13.2	1576.1
2055s	14.3	1515.4	14.2	1571.9	13.7	1410.3
2085s	15.0	1470.4	16.0	1680.9	14.1	1577.2

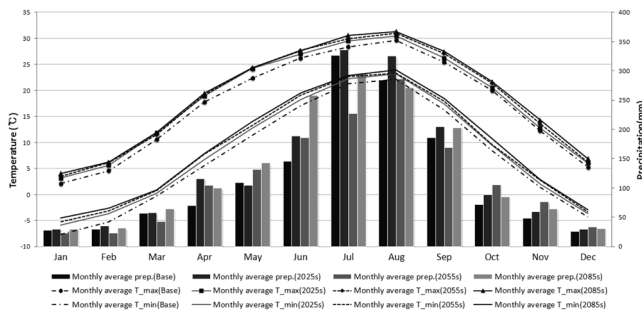
\* Temp.: Temperature, Prep.: Precipitation



**Fig. 2** Comparison of monthly average climate data during baseline period and future period (A1B)



**Fig. 3** Comparison of monthly average climate data during baseline period and future period (A2)



**Fig. 4** Comparison of monthly average climate data during baseline period and future period (B1)

다년간 수행한 작물시험 등으로 토양자료 및 품종에 관한 자료가 풍부한 수원지역을 대상으로 벼 생육모의를 수행하였다. 수원지역은 벼 재배 지대구분에 의해 중부평야지에 속하며 추청벼와 같은 중만생종의 경우 5월 10일에서 5월 25일 사이에 이앙을 한다. 기후변화 시나리오에 따른 미래 기상자료의 특성을 살펴보면 Table 1과 같이 온도와 강수량 모두 증가하는 추세를 보였으며, A2 시나리오에서 가장 크게 증가하였다.

## 2. 벼 품종 유전모수의 추정

벼 품종 유전변수를 추정하기 위한 자료로서 경기도농업기술원에서 경기도 이천의 시험포장에서 Lee et al. (2007)이 제시한 ‘추청벼 고품질 생산 매뉴얼’에 의해 실험한 결과를 참고하였다. Lee (2007)가 실증시험포장과 관행포장에서 추청벼의 생산량을 조사한 결과 각각 507 kg/10a, 520 kg/10a로 나타났으며, Lee et al. (2007)은 추청벼의 단위면적당 생산량을 506 kg/10a으로 제시하고 있다. 이에 본 연구에서는 추청벼의 분당 생육일수 130일, 평균 생산량 506 kg/10a을 기준으로 하여, 과거 30년 (1981-2010) 동안의 생산량을 모의하였다. 그 결과 508.9 kg/10a의 생산량이 모의되었으며, 이는 기존의 연구결과와 비교하여 적절한 예측 값으로 판단된다. 품종 유전모수는 기존의 연구 결과 (Kim et al., 2002; Shim et al., 2010; Jeong et al., 2011)를 참고하였다.

## 3. 작물 생육환경의 변화

Horie (1993)는 기온이 상승하게 되면 작물 생육기간이 급격히 줄어들고, 벼의 경우 32 °C 이상의 온도는 임실율을 크게 낮추어 생산량 감소의 요인이 된다고 하였으며, Kim et al. (2000)

**Table 2** Genetic coefficients for estimating value of the Rice

Classification	P1	P20	P2R	P5	G1	G2	G3	G4
Kim et al. (2002)	200.0	11.5	105.0	465.0	65.0	0.026	0.60	1.00
Shim et al. (2010)	390.0	12.0	20.0	520.0	55.0	0.025	0.61	1.00
Jeong et al. (2011)	220.0	11.5	105.0	520.0	68.0	0.026	0.60	1.00
Estimating value	230.0	12.0	135.0	530.0	55.0	0.026	0.60	1.00

- \* P1: Degree days above 9 °C vegetative period
- \* P20: Critical photoperiod or the longest daylength in hours
- \* P2R: Extent to which phasic development leading to panicle initiation is delayed for each hour increase in photoperiod above P20
- \* P5: Degree days above 9 °C from beginning of grain filling to physiological maturity
- \* G1: The number of spikelets per gram of main culm dry weight
- \* G2: Single grain weight(g) under ideal growing conditions
- \* G3: Tillering coefficient relative to IR64
- \* G4: Temperature tolerance coefficient

**Table 3** Factors that affects rice yield for baseline and future period

Factor	Unit	Scenario	Period			
			Baseline	2025s	2055s	2085s
Duration	days	A1B	131	120	112	107
		A2		119	112	102
		B1		120	116	113
Day above 32 °C	days	A1B	8	14	23	31
		A2		15	25	35
		B1		16	20	24
Mean temperature	°C	A1B	23.0	24.2	25.4	26.2
		A2		24.3	25.6	27.3
		B1		24.3	24.9	25.3
CO <sub>2</sub> ppm	ppm	A1B	353.1	472.1	623.8	789.0
		A2		495.7	662.2	911.6
		B1		429.4	475.3	522.6

은 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하면 탄소동화작용이 증가하여 생산량이 증가한다고 하였다. 따라서 미래 논벼의 소비수량 및 생산량의 변화를 분석하기에 앞서 생육기간, 생육기간 내에서 최고 기온 32 °C 이상을 기록한 날의 수, 평균기온, CO<sub>2</sub> 농도 등 작물 생육환경의 변화를 살펴보았으며 그 결과는 Table 3과 같다.

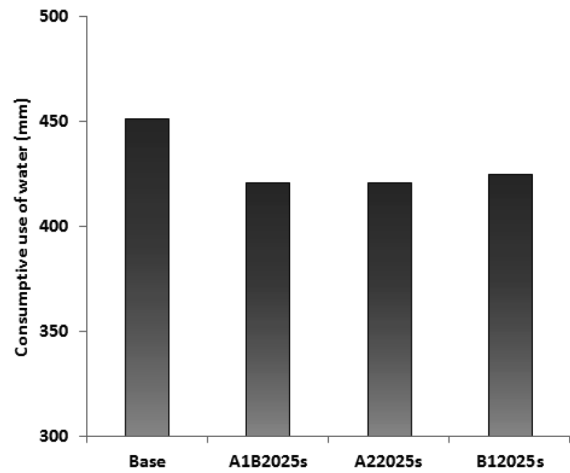
먼저 생육기간의 변화를 살펴보면 기준년도 (1981-2010년)에 비해 세 가지 시나리오에서 모두 감소했음을 알 수 있다. 이를 생육기간 내 평균기온과 함께 살펴보면 평균기온이 증가함에 따라 생육기간이 감소했다는 것을 확인할 수 있었고, 평균기온이 가장 크게 증가하였던 A2 시나리오에서 다른 시나리오보다 생육기간이 짧게 나타났다. 또한 생육기간 내 평균온도의 상승으로 생육기간 동안 최고기온이 32 °C를 넘는 날의 수도 많이 나타났다. CO<sub>2</sub> 농도의 경우 IPCC SRES datadase에서 제공하는 수치에 따라 2100년에는 A1B, A2, B1 시나리오 별로 각각 789.0 ppm, 911.6 ppm, 522.6 ppm의 수치를 나타낼 것으로 예측되었다.

#### 4. 소비수량의 변화

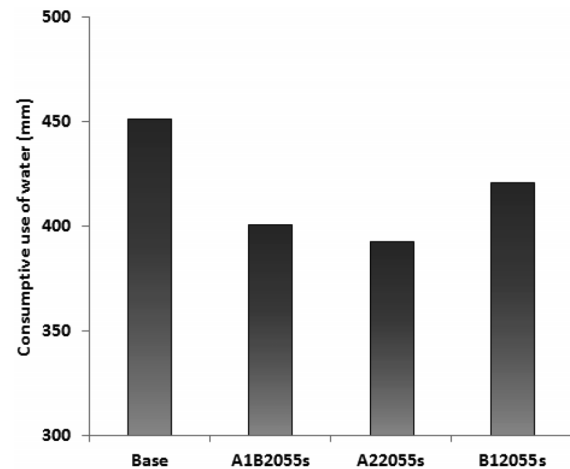
기준년도 (1981-2010년)의 소비수량은 451.6 mm으로 나타났다. 이는 Hong et al. (2009), Chung (2010)이 수원지역을 대상으로 산정한 증발산량 값 487.9 mm, 464 mm과 비교하였을 때 적절한 예측 값으로 판단된다. 미래의 소비수량 모의치는 2025s, 2055s, 2085s에 대해 각각 A1B 시나리오에서는 421.0 mm, 401.0 mm, 392.2 mm의 값을 나타내어, 기준년도에 비해 6.8 %, 11.2 %, 13.2 % 감소할 것으로 예측되었다. A2 시나리오에서는 6.7 %, 13.1 %, 19.1 % 감소할 것으로 예측되었으며, B1 시나리오의 경우 5.9 %, 6.8 %, 8.6 % 감소할 것으로 예측

**Table 4** Comparison of consumptive use of water for the baseline and future periods (unit: mm)

	A1B		A2		B1	
	consumptive use of water	%	consumptive use of water	%	consumptive use of water	%
Baseline	451.6					
2025s	421.0	- 6.8	421.3	- 6.7	424.8	- 5.9
2055s	401.0	- 11.2	392.6	- 13.1	420.7	- 6.8
2085s	392.2	- 13.2	365.5	- 19.1	412.7	- 8.6



**Fig. 5** Comparison of consumptive use of water (2025s)



**Fig. 6** Comparison of consumptive use of water (2055s)

되었다. 소비수량은 세 가지 시나리오에서 모두 감소하는 경향을 보였는데, 이는 미래 논벼의 생육기간이 단축되면서 나타나는 현상으로 판단된다. A2 시나리오에서는 2085s에서 생육기간이 다른 시나리오에 비해 5일, 10일 더 짧아지면서 소비수량이 가장 많이 감소하였으며, B1 시나리오의 경우 2085s에서 생육기간이 가장 길게 나타났고 소비수량의 감소폭도 작게 나타났다.

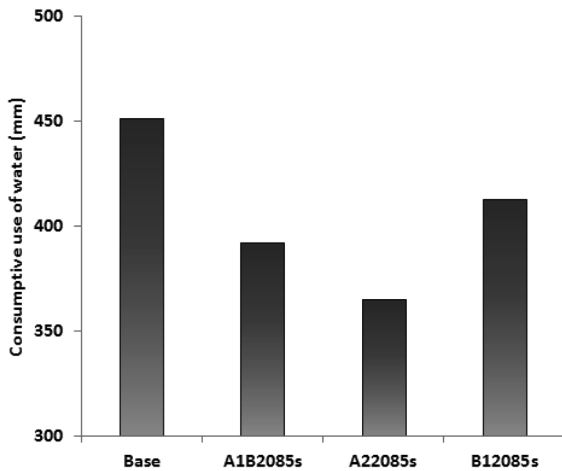


Fig. 7 Comparison of consumptive use of water (2085s)

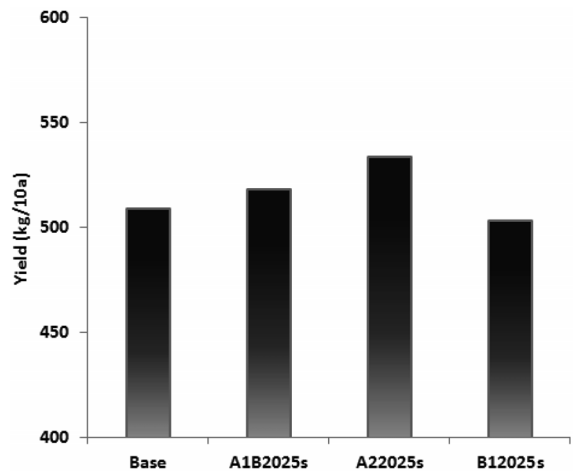


Fig. 8 Comparison of rice yield (2025s)

### 5. 벼 생산량의 변화

CERES-Rice 모형을 통해 예측한 미래의 논벼 생산량은 Table 5와 같았으며 전체적으로 생산량이 증가할 것으로 예측되었다. 기준년도의 생산량 모의 결과는 508.9 kg/10a로 나타났다. 이는 Lee (2007)가 시험포장과 관행포장에서 추청벼를 대상으로 조사한 생산량, 507 kg/10a, 520 kg/10a와 비교하였을 때 적절한 예측 값으로 판단된다. 이에 본 생육모형을 적용하여 미래의 논벼 생산량을 모의한 결과, 2025s, 2055s, 2085s에 대해 각각 A1B 시나리오에서는 517.9 kg/10a, 524.6 kg/10a, 569.9 kg/10a의 값을 나타냈으며, 이는 기준년도 생산량과 비교했을 때 1.8 %, 3.1 %, 12.0 % 증가한 값이다. A2 시나리오에서는 4.9 %, 4.6 %, 8.3 % 증가할 것으로 예측되었으며, B1 시나리오의 경우 -1.1 %, 5.0 %, 2.3 % 증가할 것으로 예측되었다.

세 가지 시나리오에서 모두 생산량이 증가한 것으로 보아, 생산량을 감소시키는 기온 상승의 영향보다 CO<sub>2</sub> 농도의 변화가 생산량에 더 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 A1B 시나리오에서의 생산량과 B1 시나리오에서의 생산량을 비교함으로써 확인할 수 있다. A1B 시나리오를 적용한 결과는 B1 시나리오를 적용한 결과보다 생육기간 내 기온이 높게 나타

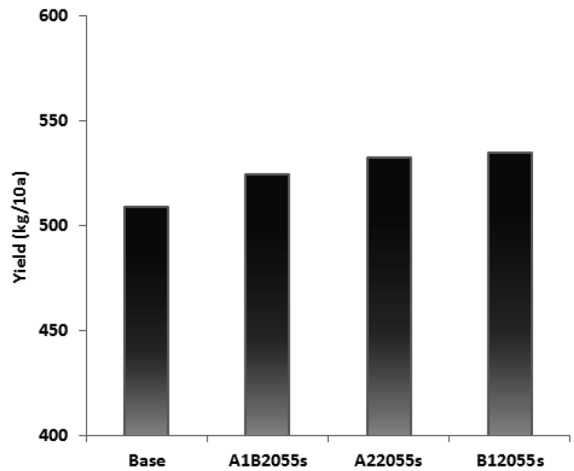


Fig. 9 Comparison of rice yield (2055s)

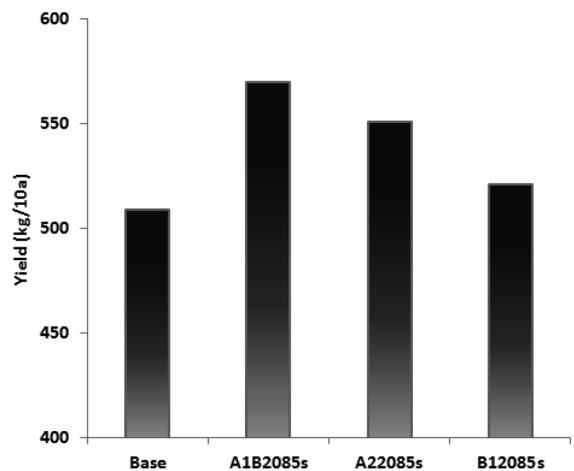


Fig. 10 Comparison of rice yield (2085s)

Table 5 Comparison of rice yield for the baseline and future periods (unit: kg/10a)

	A1B		A2		B1	
	rice yield	%	rice yield	%	rice yield	%
Baseline	508.9					
2025s	517.9	1.8	533.8	4.9	503.1	-1.1
2055s	524.6	3.1	532.2	4.6	534.5	5.0
2085s	569.9	12.0	550.9	8.3	520.8	2.3

났고 그에 따라 생육기간도 짧게 나타났다. 그러나 CO<sub>2</sub> 농도가 크게 증가하여 결과적으로 2085s에서 생산량이 더 많게 모의되었다. A2 시나리오의 경우 CO<sub>2</sub> 농도가 가장 크게 증가하여 가장 많은 생산량을 모의할 것으로 예상되었으나, 기온 상승의 폭이 크고 생육기간 또한 가장 짧게 나타나는 등 기온 상승으로 인한 영향도 크게 나타났기 때문에 가장 많은 생산량을 모의하지는 못했다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구는 CERES-Rice 작물생육모형을 이용하여 기후변화가 미래 논벼의 소비수량과 생산량에 미치는 영향을 분석하였다. SRES A1B, A2, B1 시나리오에 대하여 CGCM 결과를 LARS-WG 모형으로 상세화한 후, 농촌진흥청과 국립식량과학원에서 제시하는 표준영농법에 의해 논벼의 소비수량과 생산량을 모의하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 생육기간, 생육기간 내에서 최고기온 32 °C 이상을 기록한 날의 수, 평균기온, CO<sub>2</sub> 농도 등 미래 작물 생육환경의 변화를 살펴본 결과, 평균기온의 상승으로 생육기간은 감소하고 생육기간 동안 최고기온이 32 °C를 넘는 날의 수는 많아졌다. CO<sub>2</sub> 농도의 경우 IPCC SRES database에서 제공하는 수치에 따라 2100년에는 A1B, A2, B1 시나리오 별로 각각 789.0 ppm, 911.6 ppm, 522.6 ppm까지 증가할 것으로 예측되었다.

2. 논벼의 소비수량은 후기로 갈수록 감소하는 것으로 예측되었다. 기준년도 (1981-2010) 소비수량 451.6 mm에서 A1B, A2, B1 시나리오별로 각각 6.8 %, 6.7 %, 5.9 % (2025s), 11.2 %, 13.1 %, 6.8 % (2055s), 13.2 %, 19.1 %, 8.6 % (2085s) 감소하는 것으로 나타났으며, A2 시나리오에서 가장 크게, B1 시나리오에서 가장 작게 감소하였다.

3. 기준년도의 벼 생산량은 508.9 kg/10a로 나타났다. 각각의 시나리오별로 생산량의 변화 추세는 A1B, A2, B1 순으로 1.8 %, 4.9 %, -1.1% (2025s), 3.1 %, 4.6 %, 5.0 % (2055s), 12.0 %, 8.3 %, 2.3 % (2085s) 증가하였다. 생산량의 경우 후기로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, A1B 시나리오에서 가장 크게, B1 시나리오에서 가장 작게 증가하였다.

4. 기후변화로 인한 기온 상승은 벼의 발육을 빠르게 하여 등숙기간을 단축시켰으며, 고온으로 인한 임실율을 저하를 유발하여 생산량을 감소시키는 원인이 되지만, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가는 생산량을 증가시키는 원인이 된다. 그로 인해 벼의 생육기간은 단축되고, 소비수량은 감소하지만 생산량은 증가한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 미래에 기온이나 강수량 등이 변하더라도 이양 시기, 재배 방법 등은 변하지 않을 것으로 가정하였으며, 시나리

오의 경우 A1B, A2, B1의 세 가지의 시나리오를 적용하였으나 다양하게 존재하는 GCM 모형 중 CGCM를 이용하였기 때문에 다른 GCM 모형을 이용한다면 본 연구의 결과와 다른 결과가 나타날 것으로 판단된다. 또한 기온, 강수량 등의 기상자료를 중점으로 활용하여 결과를 산출했기 때문에 생산량 감소의 원인이 될 수 있는 병충해 등의 피해는 고려하지 않은 한계가 있다. 따라서 향후 미래 논벼의 소비수량 및 생산량의 변화를 정확하게 예측하기 위해서는 기상조건 외에 다양한 인자를 고려해야 할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 한계점을 고려하더라도 본 연구의 결과는 기후변화가 벼 생육에 미치는 영향을 파악하고, 이양기 및 수확기 등의 생육기간을 조절하여 충분한 생산량을 확보할 수 있는 미래 영농 방법 계획 수립에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### REFERENCES

- Bae, D. H., I. W. Chung 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 the Korea Water Resources Association* 40(3): 191-204 (in Korean).
- Chung, H. W., S. J. Kim, J. S. Kim, J. K. Noh, K. W. Park, J. G. Son, K. S. Yoon, G. H. Lee, N. H. Lee, S. O. Chung, J. D. Choi and J. Y. Choi, 2007. *Irrigation and drainage engineering*. Seoul: Dongmyeongsa.
- Chung, S. O., 2010. Simulating evapotranspiration and yield responses of rice to climate change using FAO-AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(3): 57-64 (in Korean).
- Chung, S. O., J. A. Rodriguez-Diaz, E. K. Weatherhead and J. W. Knox, 2010. Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea. *Irrigation and Drainage* 60(2): 263-273.
- De Silva, C. S., E. K. Weatherhead, J. W. Knox and J. A. Rodriguez-Diaz, 2007. Predicting the impacts of climate change- A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management* 93(1-2): 19-29.
- Doll, P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climate Change* 54: 269-293.
- Han, H. J., 2007. Climate change impact assessment and development of adaptation strategies in Korea

- (III). Korean Environment Institute Report 2007/RE-01, 432 (in Korean).
8. Hong, E. M., J. Y. Choi, S. H. Lee, S. H. Yoo and M. S. Kang, 2009. Estimation of paddy rice evapotranspiration considering climate change using LARS-WG. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 25-35 (in Korean).
  9. Horie, T., 1993. Predicting the effects of climatic variation and elevated CO<sub>2</sub> on rice yield in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* 48: 567-574.
  10. IPCC, 2000. Special Report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 570.
  11. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, adaption and vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
  12. Kim, M. G., S. W. Nam, W. M. Suh, Y. C. Yoon, S. G. Lee and H. W. Lee, 2000. Agricultural structure engineering, 203, Hyangmoonsa, Seoul, Korea (in Korean).
  13. Kim, Y. H., H. D. Kim, S. W. Han, J. Y. Choi, J. M. Koo, U. Chung, J. Y. Kim, and Jin I. Yun, 2002. Using spatial data and crop growth modeling to predict performance of South Korean rice varieties Grown in western coastal plains in North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 4(4): 224-236 (in Korean).
  14. KMA, 2008. Understanding of climate change and application of climate change scenario(1). Korea Meteorological Administration (in Korean).
  15. Lee, J. H., 2007. Applicability of "Manual for high quality rice production (MHQRP) of Chucheongbyeo" on-farm level. Hwasung, Gyeonggi: Gyeonggi-do Agricultural Research & Extension Services.
  16. Lee, J. H., S. U. Han, J. S. Park, J. H. Ji, H. D. Kim and K. Y. Park, 2007. Manual for high quality rice production (MHQRP) of Chucheongbyeo, 3-49. Hwasung, Gyeonggi: Gyeonggi-do Agricultural Research & Extension Services.
  17. Lee, Y. S. and S. H. Lee, 2008. The impacts of climate change on rice yield. *Journal of the Korean Association of Professional Geographers* 42(3): 405-416 (in Korean).
  18. Racsco P., L. Szeidl and M. Semenov, 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modeling* 57: 27-41.
  19. Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. M. Barrow and C. W. Richardson, 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research* 10: 83-97.
  20. Shim, K. M., D. B. Lee, K. A. Noh, K. Y. Kim, H. C. Chung, and J. T. Lee, 2008. The impacts of climate change on agricultural production environment. Proceedings of the 21<sup>st</sup> symposium for Kangwon Agriculture development, 43-71, Kangwondo Agricultural research and extension services (in Korean).
  21. Timsina, J. and E. Humphreys, 2006. Application of CERES-Rice and CERES-Wheat in research, policy and climate change studies in Asia: A review. *International Journal of Agricultural Research* 1(3): 202-225.
  22. Yoo, S. H., 2009. Analyzing agricultural drought affected by climate change. Ph.D. diss. Seoul National University (in Korean).
  23. Yun, D. K., S. O. Chung and S. J. Kim, 2011. Climate change impacts on paddy water requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 39-47 (in Korean).
  24. Yun, J. I. and K. S. Cho, 2001. Yield and production forecasting of paddy rice at a sub-county scale resolution by using crop simulation and weather interpolation techniques. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(1): 37-43 (in Korean).
  25. Yun, J. I. and K. H. Lee, 2000. Agroclimatology of North Korea for paddy rice cultivation: Preliminary results from a simulation experiment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 2(2): 47-61 (in Korean).