

GCM 2×CO₂ 기후변화시나리오에 따른 벼 생산량 변화

심교문*, 이양수, 신용광, 김건엽, 이정택
농업과학기술원 환경생태과

Changes in simulated rice yields under GCM 2×CO₂ climate change scenarios

K. M. Shim*, Y. S. Lee, Y. K. Shin, K. Y. Kim, and J. T. Lee

Environment and Ecology Division, National Institute of Agricultural Science and Technology

(Correspondence: kmshim@rda.go.kr)

1. 서 언

많은 과학자들은 가까운 미래의 심각한 지구온난화를 예측하고, 이는 화석연료의 사용 급증으로 나타나는 대기 중 이산화탄소와 미소기체의 증가 때문이라고 하였다. 또한, 수문체계도 엄청난 변화가 동시에 일어날 것이라고 보고하였다(IPCC, 1996). 따라서 이와 같은 변화가 농업부문에 미치는 잠재적 영향을 해석하는 것이 중심 연구과제가 되고 있다. 왜냐하면, 농업은 21세기에 약 90억 명으로(1996년 현재 58억 명) 추정되는(UN, 1996) 세계인구에게 식량을 제공해야하기 때문이다. 우수한 품종육성과 관개시설 확충 등 기술적 진보에도 불구하고, 기상과 기후는 여전히 농업생산성에 주요한 요인들이다.

최근에 기후변화의 작물생산성에 미치는 영향에 대한 연구는 지역적 또는 전 세계적 인 관점에서 많은 연구가 되었고, 국내에서도 일찍이 관심을 가지고 연구된 바 있다. 지난 200년 동안 지구의 온난화를 주도해 온 온실가스 중 64%가 탄산가스 때문인 것으로 분석되고 있으며, 벼에서 탄산가스 농도가 배증되면 온도가 적온일 때 약 30%의 건물생산이 많아지며, 이는 주로 광합성 작용이 증진되기 때문으로 물이용 효율이 증진된다고 한다. 반면 작물생산성에 미치는 온도의 영향은 매우 복잡하여 작물의 생산 시스템 전체에 영향을 미치고 기온이 상승함에 따라 작물 생산기간이 급격히 줄어들고 이 작물 생산기간은 곡물의 생산이나 등숙에 매우 큰 영향을 미친다. 벼에서 32℃이상의 온도에서는 임실율을 크게 낮추는 요인이 된다. 특히 GCM의 시나리오들은 강수량의 증가와 에어로졸 현상이 증가함을 예측하고 있으며 이는 일조시간의 감소를 말하며 광은 작물의 물질생산에 직접 관여하는 에너지원으로서 중요한 역할을 하게 되므로 작물생산에 많은 영향을 미치게 된다(신 등, 2000).

따라서 본 연구는 미국에서 개발되어 IBSNAT(International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) 사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 DSSAT 패키지의 CERES-Rice 모형의 최근 윈도우 버전(DSSAT v4)을 국내에 도입하여 우리나라 품종에 맞게 수정하는 과정에서, 농업과학기술원 시험포장에서 조사한 벼 생육자료와 일 기상자료, 그리고 농업과학기술원 정밀토양자료 등을 근거로 출수생태형별 유전모수를 추정하여 검증하였다. 또한 GCM 기후시나리오들에 따른 벼 생산량의 변동을 시뮬레이션 방법으로 평가하여보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 벼 재배시험 및 농업기상 측정

농업과학기술원은 일본의 농업환경기술연구소와 지난 5년 동안(2000~2004년) “한일양국의 이상기상발생조건과 기후변화에 대응한 벼 생산모형 연구”라는 제목으로 공동연구를 수행하였다. 수행과정에 벼 재배시험도 병행하였는데, 기후조건이 다른 한국의 수원(당수 시험포장)과 일본의 스쿠바[야와라(谷和原) 시험포장]에서 동일한 품종과 시비관리 및 조사방법으로 벼 재배시험을 하여 생육단계별로 벼의 질적생장(발육과)과 양적생산(생장)에 미치는 기상조건을 분석하고 벼의 생태형차이와 기후적응성을 구명하였다. 고시히카리, 기누히카리, 동안(Dongan), 대안, 니혼바레, 일품 등 한국과 일본의 재배품종 3품종씩 총 6품종을 공시하였으며, 일본은 0.1ha의 시험포장을 세로로 2개로 나누어, 각각을 한국시비수준(다비, N-P-K:11-7-8)구와 일본시비수준(소비, N-P-K:8-6-8)구로 해서 3반복배치를 하였고, 한국은 0.2ha의 시험포장을 가로로 2개로 나누어, 시비법별로 난피법 3반복배치를 하였다. 한국과 일본 모두 시험포장 옆에 농업기상관측장비를 설치하여 농업기상을 측정하였다.

2.2 작물모형 입력자료 생산

2.2.1 품종 유전모수

작물모형(CERES-rice)을 이용하여 벼의 생육을 모의할 경우, 기상, 토양, 재배관련 정보 등 최소 입력 자료가 필요하다. 또한, 각 품종별 유전적 특징을 결정하는 품종 유전모수 추정값도 요구된다. 따라서 한국포장에서 지난 5년 동안 연속적으로 재배한 품종들 가운데 등숙조만성(登熟早晚性)에 따라 한 품종씩 총 3품종(고시히카리, 대안, 일품)을 선택하여 Hunt *et al.*(1993)의 방법대로 CERES-Rice 모형에서 요구하는 품종유전모수를 추정하였다.

2.2.2. 토양자료

토양자료는 농업과학기술원에서 작성한 토양도(1:5,000)에서 토양통(soil series)을 동정하고 이로부터 토성(soil texture)과 토심(soil depth)을 알아낸 다음, USDA 토양특성 조건표(Ritchie, 1990)에 의해 계산하였다. 이렇게 해서 얻어진 자료를 IBSNAT 포맷으로 작성하여 작물모형 구동에 이용하였다.

2.2.3. 기상자료

우선, 품종 유전모수 추정 및 검증에 필요한 기상자료는 벼 재배 시험포장에서 직접 측정된 일별 최고기온, 최저기온, 강수량 일사량 자료를 이용하였으며, 벼 생산성 변화를 평가하는데 필요한 기상자료는 시험포장 인근 기상청산하 수원기상대의 월별 평년 기후값(30년 평균 : 1971-2000년)을 수집하여 평년 기상자료로, 월별 평년 기후값에 GCMs에서 예측한 증가된 온도와 강수량을 더해줌으로 GCM 2×CO₂ 기후변화 시나리오에 따른 기상

자료로 활용하였다. 이러한 월별 기상자료(월별 최고/최저기온, 강수량, 강수일수)는 일별 최고/최저기온, 강수량을 생성하는데(Climate Generator 활용) 필요한 입력자료로, 일별 최고/최저기온, 강수량은 일별 일사량을 추정하는데(MTCLIM v4.3 활용) 필요한 입력자료로 이용하면서 모형 구동에 요구되는 일별 기상자료를 준비하였다.

2.3 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오는 미국 고더드우주연구소(GISS, Goddard Institute for Space Studies), 미국 지구물리유체동력연구실(GFDL, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), 그리고 영국 기상국(UKMO, United Kingdom Meteorological Office)에서 모의한 CO₂ 배증에 따른 전 지구의 온도와 강수량 변화 자료를 이용하였다. 위 연구소의 GCMs에서 예측한 온도증가는 4.0~5.2°C 범위로, IPCC에서 예측한 CO₂ 배증시 전 지구온난화 범위(2~5°C)와 비교하였을 때 높은 쪽에 속하였다. 따라서 중간정도(2°C 상승)의 온도증가조건을 추가하여 총 4가지 CO₂ 배증시 향후 기후변화 시나리오를 선정하여, 벼 생산량 변화를 평가하는데 이용하였다. 강수량은 전 지구 기후모델에서 8~15% 범위로 증가하는 것으로 예측하였다 (Table 1).

Table 1. GCM climate change scenarios used in this study (Rosenzweig, C. and A. Iglesias, 1998).

GCM	Change in average global		Remark
	Temperature	Precipitation	
GISS	+4.2°C	11%	Goddard Institute for Space Studies
GFDL	+4.0°C	8%	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
UKMO	+5.2°C	15%	United Kingdom Meteorological Office
TEMP+2°C	+2.0°C	-	Climatological normals(1971-2000) + 2°C

3. 결과

CERES-Rice 모형의 구동을 위해 필요한 자료를 IBSNAT 포맷으로 작성하여 입력하고, 모형을 구동하여 실제 포장시험에서 조사한 결과와 모의한 결과를 비교하여 보았다. 출수생태형에 따라 3품종을 선택하여서, CERES-Rice 모형의 발육단계 및 수량추정의 적합성을 조사하였다. 우선, 출수기의 추정치와 실측치를 비교하여보았는데, 3품종 모두 1:1 직선에 모여 있는 모습을 나타내고 있다(Fig. 1 left). 일품($r^2=0.99$)과 동안($r^2=0.96$)은 상관이 아주 높게 모의하였으나, 조생종인 고시히카리($r^2=0.52$)는 상대적으로 낮았다.

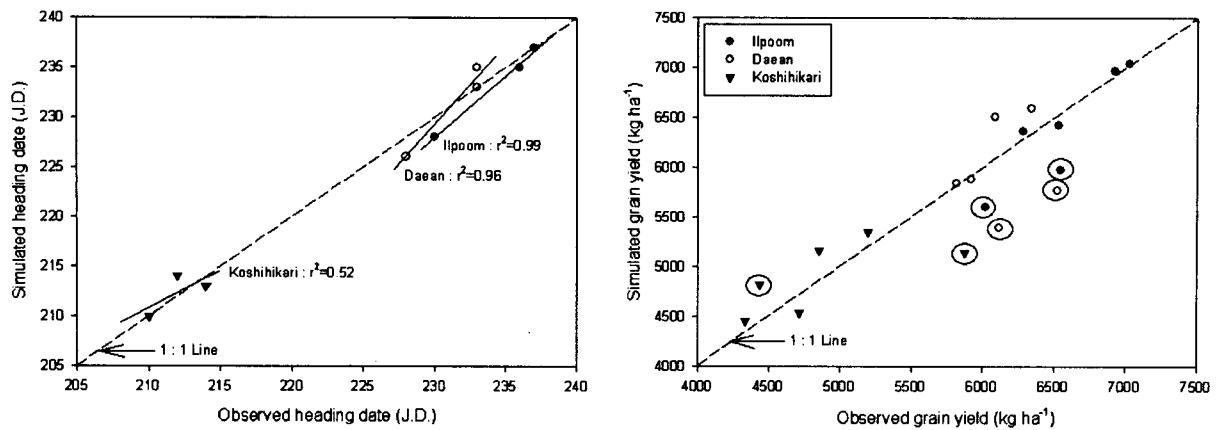


Fig. 1. Comparison between simulated and observed heading date (left) and rice grain yield (right) over a period of three years (2002~2004). Circles mean rice grain yield conducted in 2002.

다음으로 단위면적당 정조수량을 서로 비교해 보았다(Fig. 1 right). 정조수량도 출수기의 결과와 마찬가지로, 대체로 1:1 직선에 모여 있는 모습을 보였다. 다만, 2002년도 수량은 품종 및 시비조건 모두에서 다른 연도에 비하여 정확도가 낮았다. 2002년은 잦은 강수로 일사량이 다른 연도에 비하여 적었으며, 특히 출수기인 8월 초순의 집중호우로 인하여 벼 불임율이 높았다. 여기에 벼 도복현상까지 발생하여 지난 5년간에 한국포장에서 가장 낮은 벼 수량을 보였다. 따라서 CERES-Rice 모형을 기후변화에 대응한 작물모형으로 활용하기 위해서는 이와 같은 기상재해 부분에 대한 모의 결과를 향상시킬 수 있는 파라미터 수정 등 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단되었지만, 전체적으로 기후변화에 따른 생산량 변동을 예측하는 도구로 이용하는 데는 큰 무리가 없을 것으로 사료되었다.

따라서, 본 연구에서는 이 모델을 이용하여 GISS, GFDL 및 UKMO 기후시나리오에 따른 벼 생육단계와 수량 변화를 추정하였다. 벼 생육기간은 GCM 시나리오에 따라 -16~-36일 범위로 단축되는 것으로 모의되었다. 벼 생육단계별로 보면, 출수기간은 -13~-18일 범위로 짧아지는데 온난화 정도가 다른 GCM 시나리오에 따라 차이를 보였는데 반하여, 등숙기간은 -3~-18 범위로 출수생태형에 따라 차이가 나타났다. 다음으로 벼 수량은 다비(多肥)조건에서는 출수생태형에 따라 -1.6~-18.2% 범위로 감소하고, 소비(少肥)조건에서는 -4.4~-20.1% 범위로 감소하여 소비조건에서 약간 컸다. 출수생태형별로 살펴보면, 생육기간이 긴 만생종이 온난화 조건에서 더 크게 감소하는 것으로 모의되었다(Fig. 2).

일반적으로, 작물에 있어서 다른 조건 즉 비료와 물과 같은 자원이 충분히 갖추어 졌을 때 기상변이에 따른 수량성의 변동은 우선적으로 그 작물의 생육기간과 가장 관계가 깊다. 즉 온난화에 따라 발육속도가 빨라지고 전체적으로 생육기간이 단축되므로 생산성이 급격하게 감소되는 것으로 생각된다. 따라서 생육기간을 적당히 조절하면 수량이 높아질 가능성도 있을 것이다.

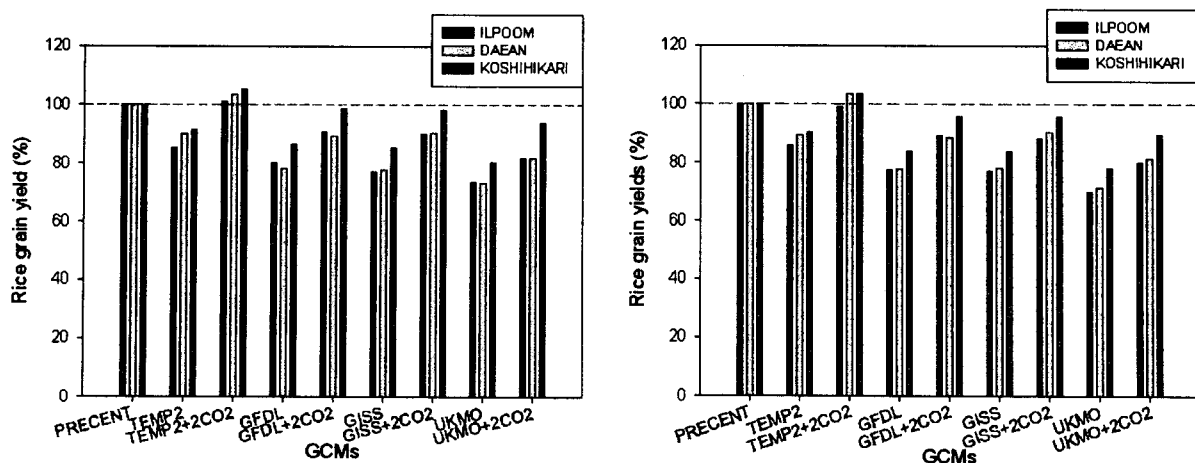


Fig. 2. Changes in simulated rice yield (left : high fertilizer, right : low fertilizer) under GCM 2×CO₂ climate change scenarios, with and without the direct effects of CO₂.

인용문헌

신진철, 이충근, 윤영환, 강양순, 2000: 기후변화에 따른 작물 생산성반응과 기술적 대응, 기후변화에 대응한 농작물 생산관리. 한국작물학회 · 한국농림기상학회 · 한국농업정보과학회 공동심포지엄 및 학술발표회 초록집, 12-27.

Hunt, L. A., S. Pararajasingham, J. W. Jones, G. Hoogenboom, D. T. Imamura, and R. W. Ogoshi, 1993: GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy Journal*, 85, 1090-1094

IPCC, 1996: *Climate change 1995: the science of climate change*. Houghton J. T., L. B. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Ritchie, J. T., D. C. Godwin, and U. Singh, 1990: Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models. In: *Proceedings of IBSNAT Symposium: Decision Support System for Agrotechnology Transfer*. University of Hawaii, Honolulu, USA.

Rosenzweig, C. and A. Iglesias, 1998: The use of crop models for international climate change impact assessment. *Understanding Option for Agricultural Production*, G. Y. Tsuji et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, London, UK, 267-292.

UN, 1996: *World population prospects: the 1996 Revision*. United Nations Department for Economic and Social Information and Policy Analysis Population Division, New York, USA.