생육모의 연구에 의한 한반도에서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응기술 평가

이충근¹ · 김준환¹ · 손지영¹ · 양운호¹ · 윤영환¹ · 최경진¹ · 김광수^{2*}

¹농촌진흥청 국립식량과학원, ²서울대학교 농업생명과학대학

(2012년 10월 15일 접수; 2012년 11월 16일 수정; 2012년 11월 26일 수락)

Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptation Method in Korea as Evaluated by Simulation Study

Chung-Kuen Lee¹, Junwhan Kim¹, Jiyoung Shon¹, Woon-ho Yang¹, Young-Hwan Yoon¹,
Kyung-Jin Choi¹ and Kwang-Soo Kim^{2*}

¹National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

²Department of Plant Science, Seoul Nat'l Univ. Seoul 151-742, Korea

(Received October 15, 2012; Revised November 16, 2012; Accepted November 26, 2012)

ABSTRACT

Air temperature in Korea has increased by 1.5°C over the last 100 years, which is nearly twice the global average rate during the same period. Moreover, it is projected that such change in temperature will continue in the 21st century. The objective of this study was to evaluate the potential impacts of future climate change on the rice production and adaptation methods in Korea. Climate data for the baseline (1971~2000) and the three future climate (2011~2040, 2041~2070, and 2071~2100) at fifty six sites in South Korea under IPCC SRES A1B scenario were used as the input to the rice crop model ORYZA2000. Six experimental schemes were carried out to evaluate the combined effects of climatic warming, CO₂ fertilization, and cropping season on rice production. We found that the average production in 2071~2100 would decrease by 23%, 27%, and 29% for early, middle, and middle-late rice maturing type, respectively, when cropping seasons were fixed. In contrast, predicted yield reduction was ~0%, 6%, and 7%, for early, middle, and middle-late rice maturing type, respectively, when cropping seasons were changed. Analysis of variation suggested that climatic warming, CO₂ fertilization, cropping season, and rice maturing type contributed 60, 10, 12, and 2% of rice yield, respectively. In addition, regression analysis suggested 14~46 and 53~86% of variations in rice yield were explained by grain number and filled grain ratio, respectively, when cropping season was fixed. On the other hand, 46~78 and 22~53% of variations were explained respectively with changing cropping season. It was projected that sterility caused by high temperature would have no effect on rice yield. As a result, rice yield reduction in the future climate in Korea would result from low filled grain ratio due to high growing temperature during grain-filling period because the CO₂ fertilization was insufficient to negate the negative effect of climatic warming. However, adjusting cropping seasons to future climate change may alleviate the rice production reduction by minimizing negative effect of climatic warming without altering positive effect of CO₂ fertilization, which improves weather condition during the grain-filling period.

Key words: Rice, Climate change, Yield, Warming, CO₂ fertilization, Cropping season

* Corresponding Author : Kwang-Soo Kim
(luxkim@snu.ac.kr)

I. 서 론

기후변화란 기후 특성의 평균이나 변동성의 변화를 통해 확인 가능하고 수십 년 혹은 그 이상 오래 지속되는 기후상태 변화를 뜻하는데, 자연적 변동성 때문이든 인간 활동에 따른 결과이든 시간경과에 따른 모든 기후변화를 일컫는다(IPCC, 2007). 최근 100년간(1906~2005년) 세계의 평균기온이 0.74°C 상승한 반면, 1904년 이후 2000년까지 우리나라의 평균기온은 1.5°C 상승하였으며(NIMR, 2004), A1B의 기상시나리오에 따르면 100년 후 전지구적인 기온상승은 2.8°C 인데 비하여(IPCC, 2007), 한반도는 4.0°C 상승(NIMR, 2007) 할 것으로 예측되어 한반도 온난화가 전 지구적 온난화에 비하여 심할 것으로 예상되었다.

농작물의 생장과 발육에 관련된 근본적인 과정들은 기후조건에 영향을 받기 때문에 농업은 기후변화에 가장 취약한 시스템 중에 하나이다. 따라서 최근 농작물에 대한 기후변동성의 효과, 농작물 생산성에 대한 기후변화 영향 등 기후변화와 농작물의 관계를 다루는 연구들이 폭넓게 진행되고 있다. 벼 생산성 또한 기후변화 주요 변동 요인인 온도와 CO_2 농도 조건에 크게 영향을 받는다. CO_2 농도 증가가 벼 생산성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 많은 연구들이 수행되었는데, 그 결과 CO_2 농도 증가는 벼 생산성을 향상시키는 효과가 있었다(Yoshida, 1973a,b; Baker *et al.*, 1992; Ziska *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2003; Baker, 2004; Yang *et al.*, 2006; Sakai *et al.*, 2006; Sasaki *et al.*, 2007). 반면 많은 다른 연구에서는 CO_2 농도가 증가하더라도 고온조건에서는 벼 생산성이 저하된다고 하였으며(Kim *et al.*, 1996; Matsui *et al.*, 1997; Ohe *et al.*, 2007; Krishnan *et al.*, 2007; Jagadish *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2009), Peng *et al.*(2004)은 필리핀에서 1979년부터 2003년까지 IR72를 비롯한 여러 벼 품종들의 생산성과 기상과의 상관관계 연구를 통해 지구온난화에 따른 야간의 온도 상승이 벼 생산성 저하의 원인이라고 보고하였다. 결론적으로 기후변화에 따른 CO_2 농도의 증가는 벼 생산성에 긍정적 효과를 주는 반면, 온도 상승은 지역 및 상승 정도에 따라 다소 차이는 있지만 부정적 효과를 주는 것으로 보인다. 따라서 미래 기후변화 조건에서도 벼 생산성을 유지하기 위해서는 벼 생산성에 대한 온도와 CO_2 농도의 상호작용효과를 분석하는 것이

필요하다.

작물모형은 모형예측 오차, 입력자료 및 기후시나리오의 적합성 등 여러 불확실성이 존재하지만(Shen *et al.*, 2011), 시공간의 제약이 없이 다양한 조건에서 분석이 가능하므로 기후변화 연구에 있어 매우 유용한 수단이다(Matthews *et al.*, 1995; Sheehy *et al.*, 2006). 작물모형을 이용하여 기후변화에 따른 미래 벼 생산성을 예측한 연구는 지역적 또는 전 지구적인 관점에서 많이 수행되어 왔다(Bachelet *et al.*, 1995; Matthews *et al.*, 1995; Mall and Aggarwal, 2002; Horie *et al.*, 2000; Sheehy *et al.*, 2006; Krishnan *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2011). 국내에서도 일찍이 작물모형 연구가 수행된 바 있으나(Lee *et al.*, 1991; Shin and Lee, 1995 2010), 적용된 품종, 작물모형 및 기후변화 시나리오 등에 많은 변화가 있어서 현재 수준에서 적용하기는 어려울 것으로 판단된다. 최근 Jung *et al.*(2006)과 Shim *et al.*(2010)은 국제적으로 널리 보급된 DSSAT 패키지의 벼 모델인 CERES-rice를 이용하여 미래의 여러 기후변화 시나리오 조건에서 우리나라의 벼 생산성 변화 연구를 수행하였는데, 이들의 연구에서는 기후변화 주요 변동 요인인 온도 및 CO_2 농도와 적응 수단인 재배시기가 벼 생산성에 미치는 영향 및 상호작용 효과 등에 대한 분석이 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 2000년 국제미작연구소와 네덜란드 Wageningen 대학에서 공동 개발한 벼 모델 'ORYZA2000'을 일부 개선한 모델을 이용하여 기후변화(SRES A1B 기후 시나리오)에 따른 우리나라의 벼 생산성 변화를 생육모의 하고, 추가로 기후변화 주요 변동요인인 온도 및 CO_2 농도와 적응수단인 재배시기에 변화를 주어 다양한 조건에서의 생육모의를 통해 벼 생산성에 미치는 이들 요인들의 개별 및 상호작용효과를 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 벼의 생태형별 대표품종으로 선정하여 작물모형(ORYZA2000)을 이용 남한 56개 지역을 대상으로 미래 기후변화 건(SRES A1B 기후 시나리오)에 따라 재배시기를 고정하거나 조정하여 벼 생산성 변화를 19개 농업기후지대 및 3개 기후지대로 구분하여 생육모의 한 후 분석하였다.

2.1. 작물모형

ORYZA2000은 2000년 국제미작연구소와 네덜란드 Wageningen 대학에서 공동 개발한 것으로 품종특성 모수, 기상 및 재배관련 정보자료를 입력자료로 하여 논벼의 성장과 발육을 모의하는 벼 전용 작물모형이다 (Boumann *et al.*, 2011). 본 연구에서는 Cui and Lee(2002)가 개발한 영화수 예측 모델을 도입하여 기존 ORYZA2000의 영화수 추정능력을 개선하였고, Seo *et al.*(2010)이 개발한 고온에 의해 유발되는 입실을 예측모델을 도입하여 기존 ORYZA2000의 입실을 추정능력을 개선하였다. 또한 기존 ORYZA2000에서 수량은 총 건물생산량 중 이삭에 분배되는 것으로 결정되는데, 이 때 분배비율은 품종특성 모수로써 고정된 값을 이용한다. 그러나 이 방법에 의한 수량은 출수전 생육량을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 Table 1과 같이 벼 종실중 및 등숙을 계산모델을 추가하였으며, 수량은 계산된 영화수와 등숙을 및 입실율에 의해 결정되도록 기존 ORYZA2000을 개선하였다. 여기에서 벼 종실중은 출수기 경엽중과 영화수, 등숙기 적산일사량 및 평균온도에 의해 결정되고, 등숙율은 등숙립중과 비립중 및 계산된 종실중에 의해 결정되며, 수량은 다시 등숙립중, 영화수, 등숙율 및 입실율에 의해서 결정된다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 ORYZA2000은 크게 3가지 서브모델로 구성되어 있는데, 동화산물의 생산 및 식물체 각 기관으로의 동화산물 분배를 모의하는 동화산물 서브모델(B), 그리고 식물체 및 토양의 수분

과 질소 영양동태를 모의하는 수분 서브모델(A)과 질소동태 서브모델(C)이 있다. ORYZA2000은 잠재수량 생산수준에서는 서브모델 B만 가동되며, 수분이 부족한 조건에서는 A와 B, 질소가 부족한 조건에서는 B와 C, 수분과 질소가 모두 부족한 조건에서는 세가지 서브모델이 모두 가동되어 벼 생육을 모의한다. 품종 고유의 성장과 발육 특성은 품종특성 모수에 의해 반영된다. 벼의 발육속도는 일장에 의하여 결정되며, 성장속도는 온도와 일사량 및 수분과 질소 영양상태에 의하여 결정된다. 동화산물 서브모델에서는 매일의 온도와 일장을 이용하여 발육속도 및 발육단계를 계산하며, 최종 건물생산량은 매일 광, 온도, 엽면적지수를 이용하여 계산된 광합성량에서 호흡량을 뺀 동화산물이 엽, 줄기, 이삭 뿌리 등 각 기관에 분배 과정을 거치면서 결정한다. 이 때 분배되는 비율은 발육단계에 영향을 받는다. 이렇게 계산된 건물 생산량을 잠재 건물생산량이라고 하며, 수분 및 질소영양동태 서브모델에서 식물체 및 토양의 수분과 질소동태를 모의해서 계산된 매일의 수분 및 질소 결핍요인을 잠재건물 생산량에 반영된다. 이렇게 하여 계산된 값을 실제 건물 생산량이라 한다. 실제 건물 생산량은 수분 및 질소 모두가 완벽하게 충족되는 경우는 드물기 때문에 일반적으로 잠재 건물생산량보다는 작다. 그러나 우리나라는 일부 천수답을 제외하고는 수리시설이 잘 갖추어 있기 때문에 논벼에서 수분이 생육제한 요인이 되는 경우 또한 매우 드물며 대부분 질소부족에 의해 생육이 제한되므로 본 연구에서는 건물생산과 질소동태 서브모델을 이용하여 생육모의를 실시하였다.

Fig. 1. A schematic representation of the model ORYZA2000, where boxes are state variables, valves are rate variables, circles are intermediate variables, solid lines are flows of materials, and dotted lines are flows of informations.

2.2. 품종특성 모수

작물모형을 이용해서 벼 생육을 모의하기 위해서는 입력자료로 벼 품종의 특성을 반영하는 품종특성 모수가 필요하다(Boumann *et al.*, 2011). 우리나라에서 재배되는 벼는 크게 생태형별로 조생종, 중생종 및 중만생종으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 Lee *et al.* (2011)의 연구와 같이 조생종인 오대벼, 중생종인 화성벼, 중만생종인 일품벼를 선정하여 대부분은 이들의 품종특성 모수를 사용하였으나, 벼 생육 및 수량에 가장 크게 영향을 미치는 발육속도 관련 품종특성 모수는 농촌진흥청 국립식량과학원에서 수행되고 있는 벼 작황조사사업 시험품종의 생태형별 평균값을 이용하였다. 벼 작황조사사업은 전국 17개 지역에서 수행되고

Table 1. Modified modules and their contents in the rice simulation model 'ORYZA2000'

Module	Contents
Grain weight	$GWMAX = a * (WLVGH + WSTH)^b * (GNO)^c * (ARDDAH)^d$
	$FTI = EXP(-((TAVAH - d)/e)^2/2)$
	$GW = GWMAX * FTI$
Filled grain ratio	$FGR = (GWFI - GWUF) / (GW - GWUF)$
Yield	$WRR14 = GNO * GWFI * FGR * FERTIL / 10000$

*GWMAX: maximum grain weight, WLVGH: leaf dry-weight at heading
 WSTH: stem dry weight at heading, GNO: grain number
 ARDDAH: accumulated radiation during grain-filling period
 FTI = factor determining temperature effect
 TAVAH: average temperature during grain-filling period
 GW : grain weight, FGR : filled grain ratio
 GWFI : filled grain weight
 GWUF : unfilled grain weight, WRR14 : Dry-weight rough rice (14% moisture)

Table 2. The geographical locations of the simulated 56 stations

Station	Lat. (N)	Long. (E)	H (m)	Station	Lat. (N)	Long. (E)	H (m)
Sokcho	38°15'	128°34'	17.8	Hongcheon	37°41'	127°53'	263.2
Daegwallyeong	37°41'	128°46'	842.5	Jecheon	37°09'	128°12'	263.2
Chuncheon	37°54'	127°44'	76.8	Boeun	36°29'	127°44'	174.1
Gangneung	37°45'	128°54'	25.9	Cheonan	36°47'	127°07'	24.9
Seoul	37°34'	126°58'	85.5	Boryeong	36°19'	126°34'	15.3
Incheon	37°28'	126°38'	68.9	Buyeo	36°16'	126°55'	11.3
Wonju	37°20'	127°57'	149.8	Geumsan	36°06'	127°29'	171.3
Suwon	37°16'	126°59'	33.6	Buan	35°44'	126°43'	10.7
Chungju	36°58'	127°53'	69.1	Imsil	35°37'	127°17'	246.9
Seosan	36°46'	126°59'	25.9	Jeongeup	35°34'	126°52'	44.1
Ulsan	36°59'	129°25'	49.4	Namwon	35°24'	127°20'	89.7
Cheongju	36°38'	127°27'	57.4	Jansu	35°39'	127°31'	407
Daejeon	36°22'	127°22'	68.3	Suncheon	35°04'	127°14'	74.4
Andong	36°34'	128°43'	139.4	Jangheung	34°41'	126°55'	45.2
Pohang	36°02'	129°23'	1.9	Haenam	34°33'	126°34'	13.7
Gunsan	35°59'	126°42'	25.6	Goheung	34°37'	127°17'	53.3
Daegu	35°53'	128°37'	57.6	Yeongju	36°52'	128°31'	210.2
Jeonju	35°49'	127°09'	53.5	Mungyeong	36°37'	128°09'	170.4
Ulsan	35°33'	129°19'	34.7	Yeongdeok	36°32'	129°25'	41.2
Masan	35°11'	128°34'	11.3	Uiseong	36°21'	128°41'	81.1
Gwangju	35°10'	126°54'	70.5	Gumi	36°08'	128°19'	47.9
Busan	35°06'	129°02'	69.2	Yeongcheon	35°58'	128°57'	94.1
Mokpo	34°49'	126°23'	37.9	Geochang	35°40'	127°55'	220.9
Yeosu	34°44'	127°45'	66.1	Hapcheon	35°34'	128°10'	32.7
Jinju	35°12'	128°07'	21.3	Miryang	35°29'	128°45'	12.6
Yangpyeong	37°29'	127°30'	47	Sancheong	35°25'	128°53'	138.6
Icheon	37°16'	127°29'	77.8	Geoje	34°53'	128°36'	45.3
Inje	38°03'	128°10'	198.6	Namhae	34°49'	127°56'	44.4

있으며, 각 지역별로 80% 이상 재배되고 있는 4~6개 품종을 시험품종으로 하고 있다.

2.3. 생육모의 지역

생육모의 지역은 기상청 소속 기상대와 관측소가 소재하는 지역 중에 30년 이상 기상관측자료를 보유하고 있는 56개 지역을 대상으로 생육모의를 수행하였고(Table 1), 이들 56개 지역을 19개 농업기후지대 및 북부, 중부, 남부의 3개 기후지대로 구분하여 분석하였다(Table 2). Shim *et al.*(2011)은 본 연구에서와 같이 동일한 지역 및 농업기후지대를 이용하여 기후변화에 따른 보리의 생산성 변화를 예측하였는데, 차령남부평야지대(XIV)와 영남분지지대(XI)를 중부지역으로, 노령동서내륙지대(IX)를 남부지역으로 분류한 것과 달리, 본 연구에서는 기상

에 따른 벼 생육반응을 고려하여 차령남부평야지대(XIV)

Fig. 2. Average temperature for 40 days after heading at different cropping season (Midium-late maturing type at Suwon). Arrows in figure indicates optimum cropping season when growing average temperature for 40 days after heading become 22.5.

와 영남분지지대(XI)를 남부지역으로, 노령동서내륙지대(IX)를 중부지역으로 수정해서 분류하였다.

2.4. 생육모의 파종기 설정

우리나라에서 재배되고 있는 벼 품종 중 중만생종은 비교적 최적파종기에 근접해서 파종을 하고 있으나 조생종 및 중생종 품종은 대체적으로 최적파종기에 비해 일찍 파종되고 있으며 지역별로 최적파종기를 준수하는 정

도가 매우 다르게 나타나고 있다. 따라서 현재의 파종기 조건을 적용해서 분석할 경우에는 기후변화에 따라 재배 시기를 조정할 때 벼 생태형별로 비교 기준이 달라지므로 본 연구에서는 객관적인 평가를 위해 벼 생태형별로 최적 파종기를 기준으로 분석하였다. 본 연구에서는 Lee *et al.*(2011)의 선행연구와 동일한 방법으로 최적파종기를 설정하였는데, Fig. 2와 같이 지역별로 파종기를 3월 14일부터 9월 간격으로 7월 18일까지의 파종기 조건에서 작물모형을 이용하여 출수기를 추정한 후 그로부터 40일간의 평균온도가 22.5가 되는 파종기를 지역별 최적파종기로 설정하였다. 이와 같은 방법으로 추정된 수원지역 중만생종의 최적파종기는 1981~2010년에는 4월 26일, 2011~2040년에는 5월 10일, 2041~2070년에는 5월 29일, 2071~2100년에는 6월 7일로 추정되었으며, 생육모의 연도 및 벼 생태형별 56개 지역의 평균 최적파종기를 나타낸 것이 Table 4이다. 전체적으로 최적파종기는 생육기간이 짧은 조생종에서 비교적 늦고, 생육기간이 긴 중만생종에서 빠른 경향이었으며, 벼 생태형에 관계없이 지구온난화가 진전될수록 파종기가 늦어지는 경향이였다(Table 4).

2.5. 기상자료

벼의 생육을 모의하는 데 필요한 기상자료는 30년 평년기상(1981~2010년)을 기준년도로 하고, A1B 기

Table 3. The division of climatic zone and agro-climatic zones

Climatic zone*		Agro-climatic zone
Northern	I	Taebaek alpine
Northern	II	Taebaek semi-alpine
Northern	III	Sobaek mountainous
Central	IV	Norheong sobaek mountainous
Central	V	Yeongnam inland mountainous
Northern	VI	Northern central inland
Northern	VII	Central inland
Northern	VIII	Western sobaek inland
Central	IX	Noryeong eastern & western inland
Southern	X	Honam inland
Southern	XI	Yeongnam basin
Southern	XII	Yeongnam inland
Central	XIII	Western central plain
Southern	XIV	Southern charyeong plain
Southern	XV	South western coastal
Southern	XVI	Southern coastal
Northern	XVII	North eastern coastal
Central	XVIII	Central eastern coastal
Southern	XIX	South eastern coastal

Table 4. The optimum cropping season of different rice maturing type estimated by the method such as in Fig. 2

Year	Optimum sowing date (month.day)		
	Early	Middle	Middle-late
1981~2000	5.31	5.12	4.27
2011~2040	6.08	5.22	5.09
2041~2070	6.18	6.07	5.29
2041~2100	6.23	6.14	6.07

후시나리오에서 예측한 기후조건을 3단계로(2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년) 나누어 미래의 30년 평년기상자료를 구축하였다. 기준년의 기상은 기상청으로부터 제공된 1981~2000년까지의 30년 평균의 일별 일조시수(hr), 최저 및 최고기온(°C), 강수량(mm) 자료를 ORYZA2000의 기상파일 양식에 맞추어 작성하였다.

미래 기후변화를 대변하는 기상자료는 기상청에서 제공한 A1B 기후시나리오에 근거한 기상자료를 이용하였는데, 이는 전구결합모델 ECHO-G로부터 산출된 전 지구 기후변화 시나리오를 입력 자료로 하여 지역기후 모델인 MM5를 이용해서 산출되며, 최고기온, 최저기온, 강수량 및 상대습도만 제공한다. 56개 지역별 미래 기후조건에 해당하는 3단계 미래 기후(2011~2040년, 2041~2070, 2071~2100년) 평년기상을 생성하기 위해서, 한반도 A1B 기후시나리오의 기준년도 대비 월별 기상 편차자료를 추출하여 3단계 미래 기후의 30년 평균값을 계산하였다(Table 5). 위에서 계산된 기준년도

Table 6. The change of carbon dioxide concentration projected by A1B Scenario

Period	ISAM*	BERN	Average
1981~2000	361	362	361
2011~2040	434	438	436
2041~2070	542	552	547
2041~2100	655	666	661

*ISAM and BERN are carbon cycle model (IPCC, 2007)

대비 3단계 미래 기후의 월별 평균 변동 값을 일별로 가감해 줌으로써 A1B 기후시나리오에 해당하는 3단계 미래 기후의 일별 기상자료를 생성하였다. 강수량의 자료를 평년의 일평균 자료를 이용하면 수분이 중요한 요인인 발작물에서는 일반적으로 수량을 과대 추정하게 되지만 앞서 언급한 바와 같이 우리나라는 일부 천수답을 제외하고는 수리시설이 잘 갖추어 있기 때문에 논벼에서 수분이 생육제한 요인이 되는 경우가 거의 없으므로 평년자료를 그대로 사용하였다. 단, 한반도 A1B 기후시나리오에서 제공되는 월별 기상 편차 자료에는 일조시간이 없기 때문에 현재 평년기상(1981~2000년)의 일조시간을 미래 기후에도 그대로 적용하였고, 대기 중 이산화탄소 농도 변화는 ISAM과 BERN의 평균값을 이용하였다(Table 6).

2.6. 생육모의 조건

본 연구에서는 작물모형 중 개선된 ORYZA2000을 이용하여 기후변화에 따른 벼 생산성 변화를 분석하

Table 5. The difference in temperature and precipitation between current (1981~2000) and future (2011~2040, 2041~2070, and 2071~2100) projected by A1B Scenario in suwon station

Month	Maximum temperature (°C)			Minimum temperature (°C)			Precipitation (mm)		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
1	0.2	2.4	4.3	0.7	2.6	4.3	-4.5	20.3	51.3
2	-0.1	0.6	3.7	0.0	0.6	3.6	32.9	21.1	57.6
3	0.2	2.0	3.6	0.4	2.1	3.5	26.8	8.9	12.5
4	1.0	2.3	3.8	1.0	2.3	3.3	8.0	11.4	28.5
5	0.4	1.6	2.7	0.8	2.1	2.8	-11.1	4.7	-4.8
6	0.8	1.8	3.3	1.8	2.6	4	5.8	29.7	14.8
7	0.9	2.5	3.7	0.8	2.2	3.2	-45.6	-23.7	-36.3
8	0.5	2.2	3.9	0.4	2.0	3.6	9.7	38.1	19.9
9	0.2	1.9	3.6	0.7	2.1	3.6	-5.9	36.1	29.2
10	-0.2	1.6	2.6	0.3	1.9	3	4.1	46	13.4
11	0.4	1.8	3.8	0.9	2.2	3.7	2.0	-1.5	10.7
12	1.1	2.7	4.4	1.6	3.1	4.5	18.4	0.4	18.4
Ave.	0.5	2.0	3.6	0.8	2.2	3.6	40.6	191.5	215.2

Table 7. Simulation conditions used in this study for analyzing contribution of environments such as cropping season, Climatic warming and CO₂ fertilization to yield, where the yield of early, middle, middle-late maturing type was analyzed

Conditions	Cropping season	Climatic warming	CO ₂ fertilization
C1	Fixed	Fixed	Fixed
C2	Fixed	Fixed	Changed
C3	Fixed	Changed	Fixed
C4	Fixed	Changed	Changed
C5	Changed	Changed	Fixed
C6	Changed	Changed	Changed

고자 하였다. 우선 작물모형에서 온도 효과를 분석하기 위해서 기준년도(1981~2010)의 기상조건보다 일 최고 및 최고온도의 온도를 1~6°C까지 1°C 간격으로 상승한 조건에서 생육모의를 하였으며, CO₂ 농도 효과를 분석하기 위해서는 기준년도의 CO₂ 농도인 362ppm보다 100~600ppm까지 100ppm 간격으로 증가한 조건에서 생육모의를 하였다. 이 때 온도 및 CO₂ 농도의 순수한 효과를 분석하기 위해서 벼 생태형 별로 기준년도를 기준으로 재배 가능 지역만 분석(온도상승에 따라 재배가 가능하더라도 분석에서 제외)하였는데, 조생종은 54개, 중생종은 49개, 중만생종은 44개 지역이 분석되었다. 기후변화에 따른 벼 생산성 변화는 A1B 기후변화 시나리오에 근거하여 Table 7과 같이 여러 조건에서 생육모의를 하였다. 일반적으로 기후변화는 온도상승과 CO₂ 농도 증가가 동반하므로 기후변화에 따른 벼 생태형 및 기후지대별 벼 생산성 변화에 대해서는 Table 7에서의 C4와 C6 조건에서 생육모의한 자료를 분석하였으며, 이 때 기후변화에 따라 벼 생태형별로 재배지역이 늘어나는 것도 포함하였다. 그러나 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 대한 재배시기, 기후 온난화 및 CO₂ 비료효과의 기여도를 분석하기 위해서 일반적인 기후변화 조건은 아니지만 온도를 고정한 조건(C2)과 CO₂ 농도 농도를 고정한 조건(C3, C5)을 추가하였다. C1은 기준년도의 생육모의 조건이다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 온도 상승 및 CO₂ 농도 증가가 벼 수량에 미치는 영향

벼 생육에 미치는 온도효과를 분석하기 위해서 기준

Fig. 3. Rice yield change ratio as temperature rise. The point values in the figure are average of included total local sites within same temperature condition, where 54 sites for early, 49 sites for middle, and 44 sites for middle-late maturing type, respectively.

년도(1981~2010)의 기상조건보다 일별 최고 및 최저 온도를 1~6°C까지 1°C간격으로 상승한 조건에서 생육 모의를 하는데, Fig. 3에서 보는 바와 같이 온도 상승에 따라 벼 수량은 선형적으로 감소하였으며, 1°C 온도가 상승할 때마다 벼 수량은 생태형 및 기후지대에 따라 6.7~10.6%까지 감소하였다(Table 8). 이 결과는 온도 상승이 벼 생산성에 부정적 영향을 준다는 많은 연구 결과(Kim *et al.*, 1996; Matsui *et al.*, 1997; Ohe *et al.*, 2007; Krishnan *et al.*, 2007; Jagadish *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2009)와 일치하였다. 여기에서 조생종과 중생종에 비해 중만생종이, 남부지대와 중부지대에 비해 북부지대의 수량 감소가 큰 것으로 나타났다. 이것은 온도 상승에 따라 벼의 생육기간 중 기상환경 및 이에 따른 영하수와 등숙율 변화가 벼 생태형과 기후지대별로 다르게 나타났기 때문인데, 특히 출수후 온도가 중만생종 및 북부지대에서 크게 상승하였고, 이에 따른 등숙율이 중만생종과 북부지대에서 크게 감소하였기 때문이다(Table 8).

온도 상승은 벼 생산성을 감소시키는데 반하여 CO₂ 농도 증가는 벼 생산성을 증가시키는 것으로 나타났는데(Table 9, Fig. 4), 이것은 기후변화에 따른 CO₂ 농도 증가가 벼 생산성에 긍정적 효과를 주는 많은 연구들의 결과(Yoshida, 1973a,b; Baker *et al.*, 1992; Ziska *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2003; Baker, 2004; Yang *et al.*, 2006; Sakai *et al.*, 2006; Sasaki *et al.*, 2007)와 일치하였다. 그러나 온도 상승에 따른 벼 생

Table 8. Change rate of rice yield, yield components such as grain number and filled grain ratio, and growing temperature when temperature rise by 1. The values in the table are average of included total local sites, where 54 sites for early, 49 sites for middle, and 44 sites for middle-late maturing type, respectively

Rice maturing type	Climatic zone	Yield	Grain number	Filled grain ratio (%)	Growing temperature (°C)	
					Before Heading	After Heading
Early	Northern	-8.8	-4.2	-6.1	4.1	5.0
	Central	-8.0	-3.0	-6.2	4.0	4.6
	Southern	-6.7	-1.8	-5.6	3.8	4.0
	Average	-7.7	-2.9	-5.9	3.9	4.4
Middle	Northern	-9.7	-4.6	-7.1	4.1	5.7
	Central	-9.1	-3.8	-6.9	4.1	5.5
	Southern	-8.1	-3.3	-6	4.0	4.6
	Average	-8.8	-3.7	-6.5	4.1	5.1
Middle-late	Northern	-10.6	-3.8	-8.8	3.8	6.6
	Central	-9.8	-3.7	-7.8	3.9	6.2
	Southern	-9.0	-3.3	-7.1	4.1	5.2
	Average	-9.5	-3.5	-7.6	4.0	5.7

Table 9. Change of rice yield as CO₂ concentration increase. The values in the table are average of included total local sites, where 54 sites for early, 49 sites for middle, and 44 sites for middle-late maturing type, respectively

Rice maturing type	Climatic zone	control	+100 ppm	+200 ppm	+300 ppm	+400 ppm	+500 ppm	+600 ppm	Change rate/
									100 ppm
Early	Northern	7,366	7,761	8,019	8,160	8,247	8,301	8,336	2.0
	Central	7,157	7,574	7,838	7,993	8,088	8,143	8,178	2.2
	Southern	6,525	6,963	7,230	7,410	7,527	7,599	7,648	2.7
	Average	6,942	7,362	7,626	7,788	7,890	7,952	7,993	2.4
Middle	Northern	7,802	8,174	8,459	8,639	8,755	8,831	8,884	2.2
	Central	7,830	8,239	8,507	8,674	8,791	8,870	8,925	2.2
	Southern	7,022	7,495	7,778	7,955	8,067	8,145	8,199	2.6
	Average	7,446	7,878	8,156	8,330	8,444	8,522	8,577	2.4
Middle-late	Northern	7,977	8,382	8,544	8,551	8,514	8,559	8,618	1.0
	Central	8,169	8,479	8,734	8,914	9,035	9,120	9,175	2.0
	Southern	7,516	7,941	8,209	8,390	8,508	8,585	8,638	2.4
	Average	7,801	8,185	8,434	8,591	8,688	8,764	8,818	2.0

산성은 선형적으로 감소하는데 반하여 CO₂ 농도 증가에 따른 벼 생산성은 곡선적으로 증가하였으며, CO₂ 농도가 100ppm 증가할 때 벼 생산성은 1.0~2.7% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 A1B 기후변화 시나리오에서 CO₂ 농도가 100ppm 증가할 때 온도가 1°C 가량 증가하는 것을 감안할 때 벼 생산성에 대한 온도의 부정적 효과가 CO₂ 농도의 긍정적 효과보다 큰 것으로 보인다.

벼 생태형별로 조, 중생종에 비해 중만생종에서, 기후대별로 중, 남부지대에 비해 북부지대에서 CO₂

농도 증가에 따른 벼 생산성 증가가 적었는데, 이것은 조, 중생종이 중만생종에 비해 생장속도가 빠르기 때문에 CO₂ 농도 증가 효과가 크며, 중, 남부지대에 비해 북부지대의 생육 온도가 낮아 광합성효율이 떨어지기 때문으로 판단된다.

3.2. 기후변화에 따른 벼 생태형 및 기후대별 생산성 변화

기후변화에 따라 기상환경이 변하면 벼 재배방법에 있어서 많은 변화가 발생할 것으로 예상되는데, 특히

Fig. 4. Rice yield change ratio as CO₂ concentration increase. The point values in the figure are average of included total local sites within same CO₂ concentration condition, where 54 sites for early, 49 sites for middle, and 44 sites for middle-late maturing type, respectively.

파종 및 이앙 등 재배시기 변경이 대표적인 기후변화 적응기술이다(Matthews *et al.*, 1995; Kondo, 2009). 본 연구에서는 기후변화 조건별로 최적파종기를 추정하고 이를 적용해서 재배시기를 조정하였다. Table 10은 기후변화 조건에서 기준년의 최적파종기를 적용, 즉 기후변화에 관계없이 재배시기를 고정하여 생육모의 한 결과를 나타낸 것이며, 이 결과를 기준년도 대비 기후변화에 따른 수량 변화율로 표현한 것이 Fig. 5이다. 기후변화에 따른 벼 수량은 조생종에서 0.3~23.4, 중생종에서 1.9~27.3, 중만생종에서 1.7~28.6% 감소하여 조,

중생종에 비해 중만생종의 수량 감소율이 컸으며, 조, 중생종은 중부지대에서 중만생종은 남부지대에서 수량 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다(Table 10). 이 결과는 앞서 분석한 온도상승에 따른 벼 생산성 변화(Table 8)와 다소 차이가 있었는데, Fig. 5에서 보는 바와 같이 기후변화에 따라 조, 중생종에 비해 중만생종에서 북부지대의 재배 가능지역이 많이 늘어났기 때문이다. 본 연구에서는 기후변화에 따라 재배 불가능 지역에서 재배 가능지역으로 전환되었을 경우 수량 증가율을 100%로 간주하여 분석하였다.

각 기후변화 조건별로 최적파종기를 적용, 즉 기후변화에 따라 재배시기를 조정하여 생육모의 한 결과를 나타낸 것이 Table 11이며, 이 결과를 기준년도 대비 기후변화에 따른 수량 변화율을 표현한 것이 Fig. 6이다. 기후변화에 따라 벼 수량은 조생종에서 3.3~0.2, 중생종에서 1.8~5.9, 중만생종에서 2.3~7.4%의 수량 변화를 보였는데, 벼 생태형에 관계없이 기후변화 초기(2011~2040)에는 오히려 수량이 증가하다가 기후변화 후기(2071~2100)에는 수량이 감소하는 경향을 보였다. 조, 중생종에 비해 중만생종의 수량 감소가 컸고, 조생종은 북부지대, 중생종은 중부지대, 중만생종은 남부지대에서 비교적 수량증가율은 적고 수량감소율은 컸으며, 기후지대별로 다소 차이가 있었으나 대체로 재배시기가 고정되었을 때와 비슷한 경향이였다(Table 11). 그러나 기후변화 초기에는 오히려 수량이 증가하기도 하였는데, 이것은 Fig. 4와 5에서 보는 바

Table 10. Change of rice yield as climate change progressed when cropping seasons were fixed regardless of years. The values in the table are average of included total local sites within climatic zone

Rice maturing type	Climatic zone	Yield (kg/ha)				Yield change ratio (%)		
		1981~2010	2011~2040	2041~2070	2071~2100	2011~2040	2041~2070	2071~2100
Early	Northern	7,362	7,408	6,430	5,620	0.6	-12.7	-23.7
	Central	7,152	7,105	6,216	5,296	-0.7	-13.1	-26.0
	Southern	6,525	6,483	5,898	5,116	-0.6	-9.6	-21.6
	Average	6,939	6,919	6,142	5,314	-0.3	-11.5	-23.4
Middle	Northern	7,805	7,859	6,848	5,791	0.7	-12.3	-25.8
	Central	7,816	7,576	6,560	5,474	-3.1	-16.1	-30.0
	Southern	7,021	6,799	6,059	5,104	-3.2	-13.7	-27.3
	Average	7,441	7,298	6,421	5,406	-1.9	-13.7	-27.3
Middle-late	Northern	7,977	8,289	7,076	6,038	3.9	-11.3	-24.3
	Central	8,166	7,907	6,821	5,671	-3.2	-16.5	-30.5
	Southern	7,516	7,196	6,298	5,179	-4.2	-16.2	-31.1
	Average	7,800	7,669	6,664	5,565	-1.7	-14.6	-28.6

Fig. 5. Change of rice yield as climate progressed when cropping season was fixed with years. Maps in the figure were interpolated with point data of local sites using spline method of spatial analysis in the ArcView3.2 program.

Table 11. Change of rice yield as climate change progressed when cropping seasons were changed with years. The values in the table are average of included total local sites within climatic zone

Rice maturing type	Climatic zone	Yield (kg/ha)				Yield change ratio (%)		
		1981~2010	2011~2040	2041~2070	2071~2100	2011~2040	2041~2070	2071~2100
Early	Northern	7,362	7,569	7,240	7,125	2.8	-1.7	-3.2
	Central	7,152	7,326	7,133	7,038	2.4	-0.3	-1.6
	Southern	6,525	6,804	6,745	6,711	4.3	3.4	2.8
	Average	6,939	7,167	7,000	6,928	3.3	0.9	-0.2
middle	Northern	7,805	8,178	7,665	7,327	4.8	-1.8	-6.1
	Central	7,816	7,853	7,515	7,189	0.5	-3.8	-8.0
	Southern	7,021	7,007	6,819	6,644	-0.2	-2.9	-5.4
	Average	7,441	7,577	7,258	6,999	1.8	-2.5	-5.9
middle- late	Northern	7,977	8,577	8,084	7,627	7.5	1.3	-4.4
	Central	8,166	8,282	7,879	7,472	1.4	-3.5	-8.5
	Southern	7,516	7,418	7,096	6,768	-1.3	-5.6	-9.9
	Average	7,800	7,979	7,599	7,220	2.3	-2.6	-7.4

와 같이 벼 수량은 온도 상승에 따라 직선적으로 감소하는데 반하여, CO₂ 농도 증가에 따라서는 곡선적으로 증가하므로, 기후변화 초기에는 온도 상승과 CO₂ 농도 증가가 비교적 적어 벼 수량에 대한 CO₂

농도의 긍정적 효과가 상대적으로 컸기 때문으로 판단된다. 전체적으로 재배기를 고정했을 때에 비해 기후변화에 따른 생산성 감소율이 현저히 적었는데, 이것은 재배시기 조절을 통해 출수전 생육온도는 크게 상

Fig. 6. Change of rice yield as climate change progressed when cropping season was changed with years. Maps in the figure were interpolated with point data of local sites using spline method of spatial analysis in the ArcView3.2 program.

Table 12. Results of analysis of variation for investigating the contribution of maturing type, cropping season, temperature, CO₂ concentration and their interrelationship to rice yield in the climate condition

Source	DF	SS	Partial R-Squar	MS	F Value	Pr > F
Maturing type (MT)	2	7109.5	0.017	3554.8	197.2	<.0001
Cropping season (CS)	1	49964.5	0.118	49964.5	2771.1	<.0001
Climatic warming (CW)	3	253342	0.598	84447.4	4683.6	<.0001
CO ₂ Fertilization (CF)	3	41242.3	0.097	13747.4	762.5	<.0001
MT*CS	2	197.8	0.000	98.9	5.5	0.0042
MT*CW	6	1441.2	0.003	240.2	13.3	<.0001
MT*CF	6	182.9	0.000	30.5	1.7	0.1192
CS*CW	2	6406.6	0.015	3203.3	177.7	<.0001
CS*CF	3	2098.2	0.005	699.4	38.8	<.0001
CW*CF	3	714.2	0.002	238.1	13.2	<.0001
MT*CS*CW	4	77.3	0.000	19.3	1.1	0.3691
MT*CW*CF	6	11.4	0.000	1.9	0.1	0.9958
MT*CS*CF	6	38.3	0.000	6.4	0.4	0.9079
Model	47	382457	0.902	8137.4	451.3	<.0001
Error	2304	41542.1	0.098	18		
Corrected Total	2351	423999	1.000			

승하였지만, 등숙기 생육온도는 적정온도로 등숙기 기상환경이 개선되었기 때문이다. Lee *et al.*(2011)의

선행연구에서 기후변화에 따른 재배시기 조정은 기상환경을 개선하지만 출수전 기상환경 특히 생육온도의

Table 13. Results of regression analysis for investigating the contribution of yield determination related traits such as grain number, filled grain ratio, and fertility to rice yield in the climate condition, where regression analysis was conducted separately by rice maturing type and cropping season

Variable	Partial R-Square					
	Fixed cropping seasons			Changed cropping seasons		
	Early	Middle	Middle-late	Early	Middle	Middle-late
Grain number	0.4583	0.1358	0.2519	0.7097	0.7826	0.462
Filled grain ratio	0.5310	0.8620	0.7383	0.2728	0.2161	0.5341
Fertility	0.0002	-	0.0004	0.0020	-	-
Total	0.9895	0.9978	0.9906	0.9845	0.9987	0.9961

급격한 상승으로 생육기간을 크게 단축시켜 벼 생산성에 대한 악영향을 우려했다. 그러나 본 연구결과에 따르면 등숙기 기상환경이 출수전 기상환경에 비해 벼 수량 결정에 크게 작용하므로써 기후변화에 따른 재배시기 조정이 효과적임을 보여주었다.

3.3. 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 대한 관련 요인의 기여도 분석

본 연구에서는 기후변화 주요 변동요인인 온도 상승 및 CO₂ 농도 증가와 적응수단인 재배시기의 변화가 기후변화에 따른 벼 생산성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 앞서 언급하였듯이 여러 조건에서 생육모의를 하였으며, 이 결과를 분산분석(GLM procedure, SAS institute) 한 것이 Table 12이다. 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 영향을 미치는 요인 중 기후온난화가 59.8%(Partial R-Square 0.598)로 가장 크며, 다음으로는 재배시기 11.8, CO₂ 비료효과 9.7, 벼 생태형 1.7%의 순이었다. 기후온난화와 재배시기의 상호작용 효과는 1.5%이었으며, 그 외 모든 상호작용 효과는 1% 이내로 생산성 변화에 거의 영향을 주지 못하였다. 앞서 온도 상승과 CO₂ 농도 증가에 따른 벼 생산성 변화의 분석 결과와 마찬가지로 기후온난화의 부정적 효과가 CO₂ 비료효과의 긍정적 효과보다 훨씬 컸으며, 재배시기 변화를 통해 기후온난화의 부정적 효과를 상당부분 경감시킬 수 있음을 알 수 있다.

벼 수량은 결국 영화수, 등숙율 및 입실율 등의 생육형질에 의해 결정되므로 기후변화 조건에서 이들 생육형질과 벼 수량과의 관계를 분석하면 기후온난화, CO₂ 비료효과 및 재배시기 등 기후변화 관련요인이 벼 수량에 미치는 영향을 구체적으로 분석할 수 있다. 따라서 기후변화 조건에서 이들 생육형질과 벼 수량과의 관계를 분석하기 위해 다중선행회귀분석(REG

procedure, SAS institute) 하였으며, 그 결과를 요약한 것이 Table 13이다. 기후변화에 따른 벼 생산성은 주로 영화수와 등숙율 변이에 98% 이상 설명되었는데, 재배시기 조건에 따라 큰 차이를 보였으며, 동일한 재배시기 조건에서도 벼 생태형별로 약간의 차이를 보였다. 본 연구에서는 특히 등숙기 온도 변화가 큰 재배시기 고정 조건에서도 입실율은 벼 생산성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 고온에서의 벼 수량 감소는 고온에 의한 불임의 증가, 즉 고온장애라고 지적한 연구들(Krishnan *et al.*, 2007; Jagadish *et al.*, 2007)과는 상반된 결과였다. 이것은 벼 생육환경의 차이에 기인한 것으로 보이는데, 우리나라는 한여름 단기간에 고온이 집중 발생하므로 기후변화에 따라 온도가 상승하더라도 개화기 고온장애를 회피할 기회가 많은 반면, 이들 연구가 이루어진 필리핀과 인도와 같은 경우는 장기간 고온이 지속되는 기후양상을 보이므로 기후변화에 따라 온도가 상승할 경우 고온장애를 피하기 어렵기 때문으로 판단된다. 실제로 일본과 우리나라의 경우 주로 등숙기 고온에 따른 벼 생산성에, 필리핀 소재 국제미작연구소(IRRI)를 중심으로 동남아에서는 개화기 고온장애에 따른 벼 수량감소에 기후변화 벼 연구의 초점이 맞추어져 있다. 기후변화에 관계없이 재배시기가 고정되었을 경우 벼 생산성에 대한 영화수의 기여도는 벼 생태형에 따라 13.5~45.8%인 반면 등숙율의 기여도는 53.1~86.2%로 영화수에 비해 등숙율의 변이가 벼 생산성 변화에 크게 기여하였다. 기후변화에 따라 재배시기를 고정하였을 경우 벼 생산성에 대한 영화수의 기여도는 벼 생태형에 따라 46.2~78.3%인 반면 등숙율의 기여도는 21.6~53.4%로 등숙율에 비해 영화수의 변이가 벼 생산성 변화에 크게 기여하였다. 이처럼 기후변화에 따른 재배시기 조정 여부에 따라 영화수와 등숙율의 생

산성 변화에 대한 기여도 차이가 컸는데, 이것은 기후 변화에 따라 재배시기를 조정할 경우 등숙기 기상환경, 특히 온도 조건을 개선하므로 등숙율의 차이가 크지 않은 반면 출수전 기상환경이 크게 변하여 영화수의 차이가 컸기 때문이다. 기후변화에 관계없이 재배시기를 고정하였을 경우에는 반대로 출수전 기상환경에 비해 등숙기 기상환경이 크게 변하여 영화수에 비해 등숙율의 차이가 크게 나타났기 때문이다.

결론적으로 벼 생산성에 대한 기후온난화의 부정적 효과가 CO₂ 비료효과의 긍정적 효과에 비해 커서 기후변화가 진전될수록 벼 생산성은 크게 저하될 것으로 예상되었다. 그러나 기후변화 조건별 재배시기 조정은 출수전 기상에 비해 벼 생산성에 미치는 영향이 큰 등숙기 기상환경을 개선하므로써 벼의 등숙이 향상되어 CO₂ 비료효과의 긍정적 효과에는 변화를 주지 않으면서 기후온난화의 부정적 효과를 크게 감쇄시키므로 기후변화에 따른 벼 생산성 저하를 경감시키는 효과적인 적응수단으로 판단된다.

본 연구에서는 미래 기후변화조건을 SRES A1B 기후변화 시나리오에 근거하여 설정하였으나 최근 국제사회는 표준 온실가스 시나리오를 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP)로 새롭게 선정하였으며, 우리나라 국립기상연구소는 이와 같은 국제적인 흐름을 반영하여 RCP4.5, RCP6.0 및 RCP8.5 등 우리나라의 새로운 미래 기후변화 시나리오를 개발하였다(NIRM, 2011). 따라서 앞으로 새로 개발된 기후변화 시나리오에 근거한 미래 벼 생산성 변화가 추가적으로 분석될 필요가 있다.

적 요

본 연구에서는 작물모형을 이용하여 기후변화에 따른 우리나라의 벼 생산성 변화를 분석하고, 기후변화 주요 변동요인인 온도 및 CO₂ 농도와 적응수단인 재배시기가 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

작물모형은 영화수 및 입실율 모델을 도입하고, 종실중 및 등숙율 모델을 추가하여 벼 수량결정 방법을 개선한 'ORYZA2000'을 사용하였으며, 모델의 입력자료인 품종특성 모수는 벼 생태형별로 종생종인 오대벼, 중생종인 화성벼, 중만생종인 일품벼의 품종특성 모수를 사용하였으나 발육속도 품종특성 모수는 수

정하여 사용하였다.

생육모의 지역은 기상청 소속 기상대와 관측소가 소재하는 지역 중에 30년 이상 기상관측자료를 보유하고 있는 56개 지역을 북부, 중부, 남부의 3개 기후지대로 구분하여 분석하였으며, 기후변화에 따른 재배시기 조정여부는 최적파종기를 기준으로 설정하였는데, 출수 후 40일간의 평균온도가 22.5가 되는 파종기를 지역별 최적파종기로 설정하였다.

기상자료는 1981~2010년을 기준년도로 하여 기상연구소에서 제작한 2011~2100년 기간의 3개 평년 (2011~2040, 2041~2070, 2071~2100)의 A1B 기후시나리오에 근거하여 일별 기후자료로 작성하였으며, 생육모의 조건은 기준년도(1981~2010)를 기준으로 온도 및 CO₂ 농도만 변화를 주거나 기후변화에 따라 온도, CO₂ 농도 및 재배시기 등 다양한 변화를 주었다.

생육모의 결과 기준년도(1981~2010)를 기준으로 온도만 변화를 주었을 경우 1°C 온도 상승에 따라 벼 수량은 6.7~10.6%까지 감소하였으며, CO₂ 농도만 변화를 주었을 때는 100ppm CO₂ 농도 증가에 따라 1.0~2.7% 증가하였다. 벼 생산성은 벼 생태형 및 기후지대별로 다소 차이가 있었다.

재배시기를 고정하였을 때 기후변화에 따른 벼 수량의 증감율은 조생종에서 -0.3~-23.4, 중생종에서 -1.9~-27.3, 중만생종에서 -1.7~-28.6%이었으며, 재배시기를 조정하였을 때는 조생종에서 3.3~-0.2, 중생종에서 1.8~-5.9, 중만생종에서 2.3~-7.4%로 조중생종에 비해 중만생종의 수량 감소율이 컸으며, 재배시기 조정여부에 따른 벼 생산성 변화의 차이가 컸다.

기상환경 및 재배 요인 중 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 대한 기여도는 기후온난화가 59.8%로 가장 크며, 재배시기 11.8, CO₂ 비료효과 9.7, 벼 생태형 1.7%의 순이었다. 온도와 재배시기의 상호작용 효과는 1.5%이었으며, 그 외 모든 상호작용 효과는 1% 이내로 생산성 변화에 거의 영향을 주지 못하였다.

수량관련 생육형질 중 기후변화에 따른 벼 생산성에 대한 기여도는 재배시기가 고정되었을 경우 영화수가 13.5~45.8%, 등숙율이 53.1~86.2%였으며, 재배시기를 변경할 경우 영화수는 46.2~78.3%, 등숙율은 21.6~53.4%로 재배시기 여부에 따른 수량관련 생육형질의 기여도에 큰 차이를 보였으며, 벼 생태형간에도 다소 차이가 있었다. 그러나 입실율은 벼 수량에 거의 영향을 주지 못했다.

REFERENCES

- Bachelet, D., J. Kern, and M. Tolg, 1995: Balancing the rice carbon budget in China using spatially-distributed data. *Ecological Modelling* **79** (1), 167-177.
- Baker, J. T., 2004: Yield responses of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* **122**, 129-137.
- Baker, J. T., L. H. Allen Jr, and K. J. Boote, 1992: Temperature effects on rice at elevated CO₂ concentration. *Journal of Experimental Botany* **43**, 959-964.
- Bouman, B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Tuong, M. C. S. Wopereis, H. F. M. ten Berge, and H. H. van Laar, 2001: ORYZA2000: modeling lowland rice. Los Banos (Philippines); International Rice Research Institute, and Wageningen: Wageningen University and Research Centre. 235p.
- Chung, U., K. S. Cho, and B. W. Lee, 2006: Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4), 229-241. (in Korean with English abstract)
- Cui, R. X., and B. W. Lee, 2002: Spikelet number estimation model using nitrogen nutrition status and biomass at panicle initiation and heading stage of rice. *Korean Journal of Crop Science* **47**(5), 390-394. (in Korean with English abstract)
- Jagadish, S. V. K., P. Q. Craufurd, and T. R. Wheeler, 2007: High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany* **58**, 1627-1635.
- Kim, H. Y., M. Lieffering, K. Kobayashi, M. Okada, M. W. Mitchell, and M. Gumpertz, 2003: Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research* **83**, 261-270.
- Kondo, M., 2009: Effect of global warming on rice culture and adoptive strategies. International symposium 'Rice research in the era of global warming' 1-9pp.
- Krishnan, P., D. K. Swain, C. Bhaskar, S. K. Nayak, and R. N. Dash, 2007: Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **122**, 233-242.
- Lee, B. W., J. C. Shin, and J. H. Bong, 1991: Impact of climate change induced by the increasing atmosphere CO₂ concentration on agroclimatic resources, net primary productivity and rice yield potential in Korea. *Korean Journal of Crop Science* **36**(2), 112-126. (in Korean with English abstract)
- Lee, C. K., K. S. Kwak, J. H. Kim, J. Y. Shon, and W. H. Yang, 2011: Impacts of Climate Change and Follow-up Cropping Season Shift on Growing Period and Growing Temperature in Different Rice Maturity Types. *Korean Journal of Crop Science* **56**(3), 233-243. (in Korean with English abstract)
- Mall, R. K., and P. K. Aggarwal, 2002: Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. *Climatic Change* **52**, 315-330.
- Matsui, T., O. S. Namuco, L. H. Ziska, and T. Horie, 1997: Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. *Field Crops Research* **51**, 213-219.
- Matthews, R. B., M. J. Kropff, T. Horie, and D. Bachelet, 1997: Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. *Agricultural Systems* **54**, 399-425.
- NIMR, 2004: The development of regional climate change scenario for the national climate change report.. NIMR Report, 510p.
- NIMR, 2007: The application of regional climate change scenario for the national climate change report (III). NIMR Report, 599p.
- NIMR, 2011: Climate change scenario report for 5th IPCC report. NIMR NIMR Report.
- Ohe, I., K. Saitoh, and T. Kuroda, 2007: Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. *Plant Production Science* **10**, 412-422.
- Peng, S., H. Jianliang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, Z. Xuhua, H. G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman, 2004: Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **101**, 9971-9975.
- Sakai, H., T. Hasegawa, and K. Kobayashi, 2006: Enhancement of rice canopy carbon gain by elevated CO₂ is sensitive to growth stage and leaf nitrogen concentration. *New Phytologist* **170**, 321-332.
- Sasaki, H., T. Hara, S. Ito, N. Uehara, H. Y. Kim, M. Lieffering, M. Okada, and K. Kobayashi, 2007: Effect of free-air CO₂ enrichment on the storage of carbohydrate fixed at different stages in rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research* **100**, 24-31.
- Seo, B. S., D. N. Nguyen, and B. W. Lee, 2010: A simulation model to predict the stability model induced by high temperature during reproductive stage of rice. Proceeding of 40th biological systems simulation conference.
- Sheehy, J. E., P. L. Mitchell, and A. B. Ferrer, 2006: Decline in rice grain yields with temperature: Models and correlations can give different estimates. *Field Crops Research* **98**, 151-156.
- Shen, S. H., S. B. Yang, Y. X. Zhao, Y. L. Xu, X. Y. Zhao, Z. Y. Wang, J. Liu, and W. W. Zhang, 2011: Simulating the rice yield change in the middle and lower reaches of the Yangtze River under SRES B2 scenario. *Acta Ecologica Sinica* **31**, 40-48.

- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* **1**(2), 121-131.
- Shim, K. M., D. B. Lee, S. H. Min, G. Y. Kim, H. C. Jeong, S. B. Lee, and K. K. Kang, 2011: Assessing impacts of temperature and carbon dioxide based on A1B climate change scenario on potential yield of winter covered barley in Korea. *Climate Change Research* **2**(4), 317-331.
- Shin, J. C., and M. H. Lee, 1995: Rice production in south Korea under current and future climates. In: R. B. Matthews, M. J. Kropff, D. Bachelet, and H. H. van Laar (Eds). Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. IRRI & CAB International, Wallingford, UK. 199-215.
- Yang, L. X., J. Y. Huang, H. J. Yang, G. C. Dong, G. Liu, J. G. Zhu, and Y. L. Wang, 2006: Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research* **98**, 12-19.
- Yoshida, S., 1973a: Effects of temperature on growth of the rice plant (*Oryza sativa* L.) in a controlled environment. *Soil Science and Plant Nutrition* **19**, 299-310.
- Yoshida, S., 1973b: Effects of CO₂ enrichment at different stages of panicle development on yield components and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Soil Science and Plant Nutrition* **19**, 311-316.
- Ziska, L. H., P. A. Manalo, and R. A. Ordonez, 1996: Intraspecific variation in the response of rice (*Oryza sativa* L.) to increased CO₂ and temperature: growth and yield response of 17 cultivars. *Journal of Experimental Botany* **47**, 1353-1359.