

미래 기후변화 및 그에 따른 재배시기 조정이 벼 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향

이충근*[†] · 광강수** · 김준환* · 손지영* · 양원하*

*국립식량과학원, **농촌진흥청

Impacts of Climate Change and Follow-up Cropping Season Shift on Growing Period and Temperature in Different Rice Maturity Types

Chung-Kuen Lee*[†], Kang-Su Kwak**, Jun Hwan Kim*, Ji-Young Son*, and Won-Ha Yang*

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

**Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea

ABSTRACT This experiment was conducted to investigate the effect of future climate change on growing period and temperature in different rice maturity types as global warming progressed, where Odaebyeo, Hwaseongbyeo, Ilpumbyeo were used as a representative cultivar of early, medium, and medium-late rice maturity type, respectively, and A1B scenario was applied to weather data for future climate change at 57 sites in Korea. When cropping season was not adjusted to climate change, entire growing period and growing temperature were shortened and risen, respectively, as global warming progressed. On the other side, when cropping season was adjusted to climate change, growing period and temperature after heading date were not changed in contrast to growing period and growing temperature before heading which were more seriously shortened and risen as global warming progressed than in not adjusted cropping season. It is supposed that adjusting cropping season to climate change can alleviate rice yield reduction and quality deterioration to some degree by improving growing temperature condition during grain-filling period, but also still have a limit such as seriously shortened growing period indicating that there need to develop actively new rice cultivation methods and varieties for future climate change.

Keywords : rice, climate change, global warming, growing period, growing temperature

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(국립기상연구소, 2004), A1B의 기상시나리오에 따르면 100년 후 전지구적인 기온 상승은 2.8°C인데 비하여(IPCC, 2007), 한반도는 4.0°C 상승(국립기상연구소, 2007) 할 것으로 예측되어 한반도 온난화가 전 지구적 온난화에 비하여 심할 것으로 예상되었다.

온도가 벼의 수량이나 품질에 미치는 영향은 생육기간 중 낮과 밤의 온도 차, 일사조건 등과 밀접히 관계되어 발현되는데, Suzuki(1980)는 일본에서 비교적 더운 지역에서의 벼 수량형성에 대한 연구에서 벼 생육초기의 고온은 분얼과 잎의 생장을 촉진하거나 양분흡수를 증가시켜 벼 수량형성에 긍정적 효과를 주었지만 생육초기의 과잉 생육은 유효경비율이나 벼 생산효율의 저하를 가져와 수량의 감소에 연결되는 측면도 있지만, 벼 생육후기에는 호흡량 증가로 탄수화물 축적이 저하되고, 일찍 노화가 일어나며, 등숙기간이 단축되어 수량형성에 부정적 효과를 준다고 하였다. 또한 여러 연구자들은 벼가 영양생장기에는 고온에 의한 피해가 거의 없지만 생식생장기, 특히 출수기에는 온도에 매우 민감하여 고온에서의 불임에 의한 피해가 우려된다고 하였다(Prasad et al, 2006; Yoshida et al, 1981; Jagadish et al, 2007). Peng 등(2004)은 1992~2003년간 필리핀의 국제미작연구소(IRRI)에서 수행된 실험과 기상자료를 분석한 결

[†]Corresponding author: (Phone) +82-31-290-6717 (E-mail) leegaka@korea.kr

<Received 29 June 2011; Revised 12 August 2011; Accepted 25 August 2011>

과, 생육기간의 최저온도가 1°C 상승함에 따라 벼 수량이 10% 감소하였다고 보고하였다. 또한 최근 우리나라와 기후가 비슷한 일본에서는 한 여름 고온에 의해 벼의 생육 및 품질이 심각하게 저하되는 경우가 종종 발생하고 있어(Kobata & Uemuki, 2004), 등숙기 고온이 쌀 품질 향상을 위한 큰 제한요인이 되고 있다. 이처럼 기후변화에 따른 온도상승은 벼 수량을 감소시키고 품질을 악화시켜 왔으며, 미래 지구온난화가 가속화될 경우 그 피해는 더욱 심각할 것으로 예상되고 있다.

우리나라에서의 벼 최적 등숙온도는 출수 후 40일간의 일평균 기온으로 결정하는데, 우리나라에서 대부분 재배되고 있는 자포니카 벼의 최적 등숙온도는 21~23°C이다(농촌진흥청, 1981). 그러나 미래 기후변화에 따라 온도가 상승한 조건에서도 현재 재배되는 벼 품종을 그대로 재배하게 되면 등숙기간의 생육온도가 최적 등숙온도 보다 높아지므로 수량성이 감소하고 품질이 나빠질 가능성이 크다. Kondo(2009)는 이앙시기를 늦추어 벼 품질에 가장 민감한 시기인 출수기~출수후 20일간의 생육온도를 낮춤으로써 쌀 외관품위를 일정 정도 향상시켰다는 결과를 예를 들면서 파종 및 이앙시기 등 재배시기를 조정하는 것이 미래 기후변화에 따른 여러 대책 중 우선적으로 검토되어야 한다고 하였다. 벼 재배시기는 주로 등숙기 기상조건을 최적 등숙온도에 가깝도록 조정하게 되는데, 이 때 출수전 기상조건 또한 크게 변하는 데도 불구하고 이에 대한 검토는 거의 이루어지지 않았다. 또한 우리나라에서 과거부터 현재까지의 단기간에 걸친 기후변화 양상과 그에 따른 벼 생육기간 및 온도변화에 대한 분석(윤&이, 2001)은 있었으나, 미래 기후변화에 따른 분석은 현재까지 이루어진 바가 없다.

따라서 본 연구는 미래 기후변화 및 그에 따른 재배시기 조정 여부가 현재 우리나라 벼 품종의 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향을 분석하고, 그에 따라 대두되는 문제점을 파악하여 향후 기후변화에 대응하여 벼 연구 방향을 수립하는데 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 조생종인 오대벼, 중생종인 화성벼, 중만

생종인 일품벼를 각 생태형별 대표품종으로 선정하여 작물 모형을 이용 우리나라 57개 지역을 대상으로 미래 기후변화 조건에 따라 재배시기를 고정하거나 조정하여 벼 생육기간 변화를 예측하고 그에 따른 생육온도 변화를 19개 농업 기후지대로 구분하여 분석하였다.

작물모형 및 발육단계 예측

본 연구에서는 2000년 국제미작연구소와 네덜란드 Wageningen 대학에서 개발한 벼 생육모델 ORYZA2000(Bouman 등, 2001)을 이용하였으며, 이(2008)가 추정된 오대벼, 화성벼, 일품벼의 품종별 발육속도 파라미터를 적용하여 각각 조생종, 중생종, 중만생종의 발육단계를 예측하였다. ORYZA2000에서 벼의 발육단계를 예측하는 방법은 다음과 같다. 우선 벼의 발육단계를 기본영양생장기(파종기~기본영양생장 초기)와 일장감응기(기본영양생장기~유수분화기), 생식생장기(유수분화기~출수기), 등숙기(출수기~성숙기)로 나눈 후, 기본영양생장기부터 시작해서 각 발육단계별 발육속도를 누적하여 누적된 값이 주어진 값보다 크면 다음 발육단계로 발육이 진전되고, 다시 그 단계의 발육속도를 누적하여 누적된 값이 주어진 값보다 크면 다음 발육단계로 누적되는 과정이 반복되어 결국 성숙기에 이르러 발육이 정지된다. 여기에서 발육속도는 품종별 발육단계에 따른 발육속도 파라미터와 기상요인에 의해 결정되는데, 기본영양생장기에는 기상요인 중 온도만이 관여하고, 일장감응기에는 온도와 일장이 함께 관여하며, 이후 생식생장기와 등숙기는 다시 온도만 관여한다.

또한 벼 생육모델 ORYZA2000에 의한 벼 발육단계 예측의 정확도를 검증하기 위하여 농촌진흥청(2004)의 자료를 이용하였다. 여기에서 오대벼, 화성벼, 일품벼 모두 2002년부터 2004년 까지 3년간 10일 간격으로 4시기에 걸쳐 파종한 후 출수기를 조사하였는데, 오대벼는 4개 지역, 화성벼는 11개 지역, 일품벼는 3개 지역에서 수행되었다.

대상지역 및 기상자료

대상 지역은 30년 평년의 기상자료가 구축되어 있는 기

Table 1. Data set for validation of development stage estimation by ORYZA2000.

Cultivar	Year	Local site	Sowing time	No. of treatment
Odae	2002~2004	Suwon, Chuncheon, Cheolwon, Jecheon	4 time with 10 days interval	48
Hwaseong	2002~2004	Suwon, Chuncheon, Cheolwon, Cheonju, Jecheon, Daejeon, Yesan, Iksan, Imsil, Naju, Haenam	4 time with 10 days interval	132
Ilpum	2002~2004	Suwon, Chuncheon, Cheolwon	4 time with 10 days interval	36

Table 2. Agroclimatic regions and local sites analyzed in this study.

Agroclimatic region	Local sites in each agroclimatic region	Codes of Agroclimatic region
Taebaek alpine	Daegwallyeong, Taebaek	1
Taebaek semi alpine	Inje, Hongcheon, Jecheon	2
Sobaek mountainous	Boeun	3
Noryeong-Sobaek mountainous	Imsil, Jangsu	4
Yeongnam inland mountainous	Mungyeong, Andong, Yeongju	5
Northern-central inland	Yangpyeong, Chuncheon, Cheolwon	6
Central inland	Ichon, Wonju, Chungju	7
Western Sobaek inland	Cheongju, Geumsan, Daejeon, Cheonan	8
Noryeong east-western inland	Namwon, Sancheong, Geochang	9
Honam inland	Gwangju, Suncheon, Jangheung	10
Yeongnam basin	Daegu, Gumi, Yeongcheon, Uiseong	11
Yeongnam inland	Milyang, Jinju, Hapcheon	12
Eastern central plain	Seoul, Incheon, Suwon, Seosan, Boryeong	13
Southern Charyeong plain	Jeonju, Gunsan, Buan, Jeongeup	14
South-western coastal	Mokpo, Haenam, Goheung	15
Southern coastal	Yeosu, Busan, Masan, Geoje, Namhae	16
North-eastern coastal	Gangleung, Sokcho	17
Central-eastern coastal	Yeongdeok, Uljin	18
South-eastern coastal	Ulsan, Pohang	19
Total	57 sites	

상대 또는 관측소가 있는 지역 중 도서지역을 제외한 57개 지역을 선정하였으며, 이들 지역을 19개 농업기후지대(농촌진흥청, 1987)로 구분하여 분석하였다(표 2).

미래 기후변화를 대변하는 기상자료는 기상청에서 제공한 A1B 기후시나리오에 근거한 기상자료를 이용하였는데, 이는 전구결합모델 ECHO-G로부터 산출된 전지구 기후변화 시나리오를 입력 자료로 지역기후모델인 MM5를 이용해서 산출한 것으로 최고기온, 최저기온, 강수량 및 상대습도만을 제공한다. A1B 기후시나리오는 여러 기후시나리오 중에서 균형적 발전사회를 가정한 시나리오으로써(IPCC, 2007) 우리나라의 사회 수준과 가장 유사한 조건으로 판단되었기 때문이다. 지역별 기상자료는 1971년부터 2000년까지의 30년 평년 기상자료를 현재의 기후조건으로 설정하였으며, 2011년부터 2040년, 2041년부터 2070년, 2071년부터 2100년까지의 30년 평년기상을 미래의 기후조건으로 설정하였다. 우선 기상청으로부터 2011부터 2100년까지의 월별 편차자료(A1B 시나리오)를 입수하였는데, 이들 월별 편차자료는 한반도 영역에서 위도와 경도 모두 0.2432°(약 27 km) 간격으로 구성되어 있었다. 따라서 위도 경도를 기준으로 생육모의 지역(57개 지역)의 월별 편차자료를 추출하였

다. 지역별로 추출한 월별 편차자료는 2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년의 30년 평년으로 계산하고 이를 다시 일별 편차자료로 변환하였다. 이렇게 구한 일별 편차자료를 각 지역별로 1971년부터 2000년까지 30년간 일 평년자료(기상청 제공)에 더하여 기후시나리오에 따른 지역별 일 최고 및 최저온도 자료를 생성하였으며, 이를 다시 일 평균온도[평균온도 = (최고온도+최저온도)/2]로 변환하였다.

생성된 기상자료를 분석한 결과 기준년도(1971~2000)에 비하여 온난화가 진전될수록 평균기온이 점점 높아질 것으로 나타났다. A1B의 기상시나리오에 따르면 100년 후의 전 지구적인 기온상승은 2.8°C인데 비하여, 우리나라는 4.2°C 상승하는 것으로 예측되어 한반도 온난화가 전 지구적 온난화에 비하여 심할 것으로 예상되었다(표 2).

최적파종기 설정

실제로 우리나라에서 재배되고 있는 품종 중 중만생종은 비교적 최적파종기에 근접해서 파종을 하고 있으나 조생종 및 중만생종 품종은 대체적으로 최적파종기에 비해 일찍 파종되고 있으며 지역별로 최적파종기를 준수하여 파종하는

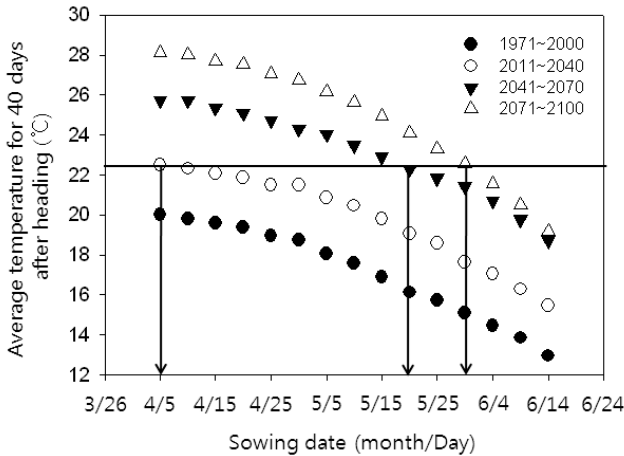


Fig. 1. Average temperature for 40 days after heading at different sowing date (medium-late rice maturity type in Cheolwon), where there was no optimum sowing date in 1971~2000 because of cold weather. Arrows in figure indicates optimum sowing date when average temperature for 40 days after heading become 22.5°C.

정도가 매우 다르게 나타나고 있다. 따라서 현재의 파종기 조건을 적용해서 분석할 경우에는 기후변화에 따라 재배시기를 조정할 때 벼 생태형별로 조정 기준이 달라지므로 본 연구에서는 객관적인 평가를 위해 벼 생태형별로 최적파종기를 기준으로 분석하였다. 농촌진흥청(2004)은 벼 품종 및 재배지역에 따라 등숙기 냉해 등 기상재해에 대한 안정성을 고려하여 최적 등숙온도를 22.5°C로 설정하여 최적 출수기를 산출한 후 '02~'04년간 매년 4회의 이앙시기에 따른 출수기 변화의 회귀분석을 통한 각 지대별 이앙적기를 역으로 추정하였다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 지역별로 파종기를 4월 5일부터 5일 간격으로 6월 14일까지의 파종기 조건에서 작물모형을 이용하여 출수기를 추정한 후 그로부터 40일간의 평균온도가 22.5가 되는 파종기를 지역별 최적파종기로 설정하였다. 그림 1에서 보논바와 같이 철원에서는 현재(1971~2000) 조건에서 등숙기 온도가 낮아 최적파종기를 설정할 수 없었는데, 이와 같은 지역에서는 기후변화에 따른 생육기간 및 그에 따른 온도변화를 정확하게 분석하기 위해 지구온난화 진전에 따라 온도가 상승하여 최적파종기를 설정할 수 있더라도 추가로 최적파종기를 설정하지 않았다.

결과 및 고찰

과거자료를 이용한 벼 발육단계 예측

벼 생육모델 ORYZA2000을 이용하여 오대벼, 일품벼,

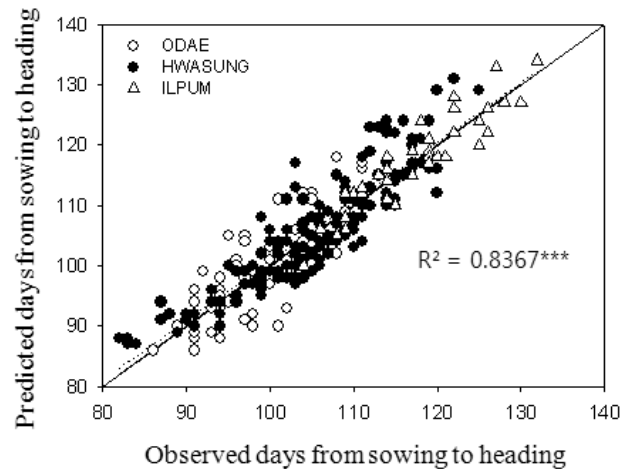


Fig. 2. Relationship between observed and predicted days from sowing to heading date, where days from sowing to heading date were estimated by using development stage estimation module in the rice simulation model 'ORYZA2000'.

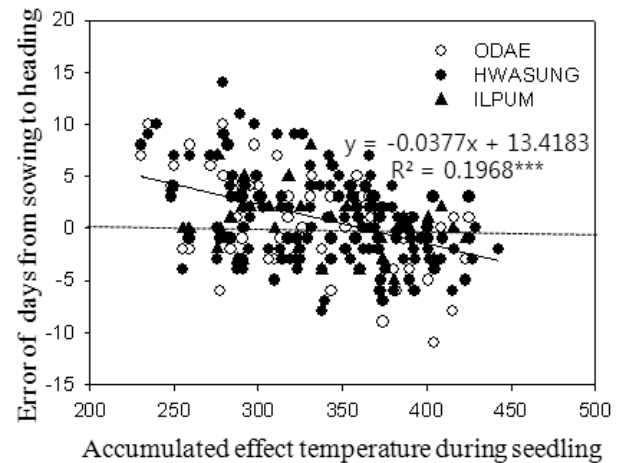


Fig. 3. Relationship between accumulated effect temperature during seedling and error of days from sowing to heading which is difference of days from sowing to heading between observed and predicted in Fig. 2.

화성벼의 파종부터 출수기까지의 생육기간을 예측한 값과 관측값의 관계를 나타낸 것이 그림 2이다. 전체적으로 보았을 때 예측값이 관측값의 약 84% 정도만 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 3은 육묘기간 중 유효적산온도와 파종부터 출수기까지의 생육기간 예측 오차, 즉 관측값과 예측값의 차이와의 관계를 나타낸 것이다. 여기에서 육묘기 유효적산온도가 낮을수록 예측값이 과다 추정되었고, 유효적산온도가 높을수록 예측값이 과소 추정되는 경향이었는데, 화성벼에서는 심지어 15일까지 예측값이 과다 추정되었

으며, 오대벼에서는 10일까지 예측값이 과소 추정되었다. 우리나라에서는 거의 모든 일반 농가에서 육묘기 저온 피해를 막기 위하여 비닐 또는 부직포로 보온을 하는데, 산간 및 중북부지대와 같이 저온 지역이나 육묘기 때 저온이 지속되는 해에는 오랫동안 보온상태를 유지하는 반면, 우리나라 남부 평야지대와 같이 비교적 온도가 높은 지역이나 육묘기 때 온도가 일찍 상승하는 해에는 일찍 비닐 또는 부직포를 제거하는 경우가 많다. 그러나 이에 대한 정확한 정보가 없으며, 있더라도 작물모형에 입력변수로 넣는 것은 사실상 불가능하다. ORYZA2000에서는 비닐 또는 부직포로 보온할 경우 일률적으로 외부온도보다 5.0~9.5°C 올려주는 방법으로 보온효과를 고려하는데, 이 때 육묘기 유효적산온도가 낮을 경우에는 보온효과를 과소 적용하며, 반대로 유효적산온도가 높을 경우에는 보온효과를 과대 적용하게 된다. 따라서 앞서 ORYZA2000에 의한 파종기~출수기까지의 생육기간에 대한 예측오차 중 상당부분은 작물모형 자체의 문제보다는 육묘기 생육온도에 대한 정보부재 또는 불확실성 때문으로 판단된다. 또한 그림 2에서 보는바와 같이 예측값과 관측값의 1:1선(실선)과 회귀직선(점선)이 거의 일치하기 때문에 ORYZA2000을 이용한 벼 발육단계 예측은 비교적 적용 범위가 높아 다른 요인에 대한 불확실성이 매우 큰 미래 기후변화 조건에서의 벼 발육단계를 예측하는데 있어 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다.

벼 생태형별 지역별 최적파종기 설정

지역에 따라 미래 기후조건별로 파종기를 5일 간격으로 다양하게 변화를 주어 발육단계를 예측한 후 출수후 40일간의 평균기온이 22.5°C가 되는 파종기를 최적파종기로 설정하였다(그림 1, 표 3).

조생종에서는 전체 57개 지역 중 기온이 낮은 태백 고냉지대인 태백과 대관령을 제외한 55개 지역에서 최적파종기가 설정되었다. 지구온난화 진전에 따른 최적파종기는 현재 조건(1971~2000)에서 5월 3일~6월 11일(평균 5월 25일)부터 2001~2040년에는 5월 22일~6월 23일(평균 6월 7일), 2041~2070년에는 6월 2일~7월 2일(평균 6월 18일), 2071~2100년에는 6월 14일~7월 9일(평균 6월 25일)이었다. 중생종은 전체 57개 지역 중 태백 고냉지대인 태백과 대관령,

태백 준고냉지대에서 인제, 노령소백 산간지대에서 장수, 동해안 남부지대에서 울진을 제외한 51개 지역에서 최적파종기가 설정되었다. 지구온난화 진전에 따른 최적파종기는 현재조건(1971~2000)에서 4월 16일~6월 1일(평균 5월 13일)부터 2001~2040년에는 5월 12일~6월 14일(평균 5월 30일), 2041~2070년에는 5월 29일~6월 26일(평균 6월 12일), 2071~2100년에는 6월 7일~7월 3일(평균 6월 20일)이었다. 중만생종은 57개 전지역 중 태백 고냉지대, 태백 준고냉지대, 소백 산간지대, 노령소백 산간지대, 동해안 북부, 중부 및 남부지대 등 17개 지역을 제외한 40개 지역에서 최적파종기가 설정되었다. 지구온난화 진전에 따른 최적파종기는 현재조건(1971~2000)에서 3월 28일~5월 18일(평균 4월 27일)부터 2001~2040년에는 5월 4일~6월 4일(평균 5월 20일), 2041~2070년에는 5월 23일~6월 16일(평균 6월 4일), 2071~2100년에는 6월 2일~6월 24일(평균 6월 13일)이었다. 전체적으로 최적파종기는 생육기간이 짧은 조생종은 비교적 늦고, 생육기간이 긴 중만생종이 빠른 경향이였으며, 벼 생태형에 관계없이 지구온난화가 진전될수록 파종기가 늦어지는 경향이였다. 또한 중부지역에 비해 남부지역에서 최적파종기가 매우 늦게 추정되었으며, 중만생종의 최적파종기는 기존에 알려진 최적파종기와 비교적 잘 일치하였으나 중생종 및 중만생종의 최적파종기는 기존에 알려진 최적파종기에 비하여 약간 늦은 경향이였다(표 3).

미래 기후변화에 따른 벼 생육온도 및 생육기간 변화

기후변화에 관계없이 재배시기를 현재(1971~2000)의 조건에서 고정하였을 때와 기후조건에 맞게 최적파종기로 재배시기를 조정하여 기후변화에 따라 벼 생태형별로 출수기, 출수전 및 출수후의 생육기간과 생육온도의 변화를 나타낸 것이 각각 표 5와 표 6이다.

기후변화에 관계없이 재배시기를 현재로 고정하였을 경우 지구온난화가 진전되면서 벼 생태형에 관계없이 출수기가 빨라졌으며, 그에 따라 출수전 생육기간은 조생종이 현재(1971~2000) 83일에서 100년 후에는 78일로 5일, 중생종은 96일에서 88일로 8일, 중만생종은 114일에서 104일로 10일 단축되었으며, 조·중생종에 비해 중만생종의 생육기간이 크게 단축되는 경향이였다. 출수후 생육기간 또한 10

Table 3. Change of average temperature which were calculated by climate change scenario ‘A1B’ as global warming progresses. The values in the table are average values of 57 local sites for 30 years.

Weather factor	Weather conditions				Difference		
	1971~2000(A)	2011~2040(B)	2041~2070(C)	2071~2100(D)	B-A	C-A	D-A
Average temperature (°C)	12.6	13.8	15.3	16.9	1.2	2.7	4.2

Table 4. Optimum sowing dates and local sites in each agroclimatic region, where optimum sowing dates could be calculated by the method such as in Fig. 1.

Rice maturing type	Code of agroclimatic region	Local sites in each agroclimatic region	Optimum sowing date(month.day)			
			1971~2000	2011~2040	2041~2070	2071~2100
Early	2	Inje, Hongcheon, Jecheon	5.06	5.22	6.06	6.14
	3	Boeun	5.12	5.26	6.08	6.16
	4	Imsil, Jangsu	5.02	5.24	6.09	6.18
	5	Mungyeong, Andong, Yeongju	5.20	5.31	6.11	6.18
	6	Yangpyeong, Chuncheon, Cheolwon	5.17	5.29	6.11	6.18
	7	Ichon, Wonju, Chungju	5.22	6.02	6.12	6.18
	8	Cheongju, Geumsan, Daejeon, Cheonan	5.27	6.06	6.16	6.22
	9	Namwon, Sancheong, Geochang	5.25	6.06	6.16	6.23
	10	Gwangju, Suncheon, Jangheung	6.04	6.15	6.23	6.29
	11	Daegu, Gumi, Yeongcheon, Uiseong	5.27	6.06	6.15	6.22
	12	Milyang, Jinju, Hapcheon	6.02	6.13	6.21	6.27
	13	Seoul, Incheon, Suwon, Seosan, Boryeong	5.28	6.09	6.21	6.27
	14	Jeonju, Gunsan, Buan, Jeongeup	6.02	6.13	6.22	6.28
	15	Mokpo, Haenam, Goheung	6.08	6.18	6.28	7.03
	16	Yeosu, Busan, Masan, Geoje, Namhae	6.11	6.23	7.02	7.09
	17	Gangleung, Sokcho	5.03	5.24	6.15	6.26
	18	Yeongdeok, Uljin	5.05	5.26	6.13	6.23
	19	Ulsan, Pohang	6.05	6.14	6.25	7.02
			55 sites	5.25	6.07	6.18
Medium	2	Hongcheon, Jecheon	4.16	5.12	5.29	6.07
	3	Boeun	4.16	5.13	5.30	6.09
	4	Imsil	4.20	5.19	6.04	6.13
	5	Mungyeong, Andong, Yeongju	5.03	5.20	6.03	6.12
	6	Yangpyeong, Chuncheon, Cheolwon	4.24	5.17	6.02	6.12
	7	Ichon, Wonju, Chungju	5.06	5.22	6.04	6.11
	8	Cheongju, Geumsan, Daejeon, Cheonan	5.13	5.28	6.09	6.16
	9	Namwon, Sancheong, Geochang	5.13	5.31	6.13	6.21
	10	Gwangju, Suncheon, Jangheung	5.25	6.08	6.18	6.24
	11	Daegu, Gumi, Yeongcheon, Uiseong	5.14	5.28	6.08	6.16
	12	Milyang, Jinju, Hapcheon	5.22	6.05	6.15	6.22
	13	Seoul, Incheon, Suwon, Seosan, Boryeong	5.12	5.31	6.14	6.22
	14	Jeonju, Gunsan, Buan, Jeongeup	5.23	6.05	6.17	6.23
	15	Mokpo, Haenam, Goheung	5.30	6.12	6.23	6.29
	16	Yeosu, Busan, Masan, Geoje, Namhae	6.01	6.14	6.26	7.03
	17	Gangleung, Sokcho	4.27	5.19	6.11	6.20
	18	Yeongdeok	4.25	5.18	6.07	6.18
	19	Ulsan, Pohang	5.23	6.06	6.20	6.28
			51 sites	5.13	5.30	6.12
Medium-late	5	Mungyeong, Andong	4.09	5.07	5.24	6.02
	6	Yangpyeong	3.28	5.04	5.23	6.02
	7	Ichon, Chungju	4.05	5.07	5.24	6.03
	8	Cheongju, Geumsan, Daejeon, Cheonan	4.19	5.14	5.29	6.06
	9	Namwon, Sancheong	5.01	5.25	6.07	6.16
	10	Gwangju, Suncheon, Jangheung	5.07	5.26	6.07	6.15
	11	Daegu, Gumi, Yeongcheon, Uiseong	4.20	5.13	5.28	6.05
	12	Milyang, Jinju, Hapcheon	5.03	5.23	6.04	6.13
	13	Seoul, Incheon, Suwon, Seosan, Boryeong	4.13	5.16	6.03	6.12
	14	Jeonju, Gunsan, Buan, Jeongeup	5.04	5.24	6.06	6.14
	15	Mokpo, Haenam, Goheung	5.12	5.30	6.12	6.20
	16	Yeosu, Busan, Masan, Geoje, Namhae	5.18	6.04	6.16	6.24
	19	Ulsan, Pohang	5.05	5.25	6.10	6.19
			40 sites	4.27	5.20	6.04

Table 5. Growing period and temperature in different rice maturity types as global warming progressed when sowing date was fixed. The values in the table are average value of all local sites, where 55 sites at early, 51 sites at medium and 40 sites at medium-late rice maturity type were analyzed.

Rice maturity type	Year	Sowing date (month.day)	Heading date (month.day)	Growing period(days)			Growing temperature(°C)	
				Before Heading	After Heading	Total	Before Heading	After Heading
Early	1971~2000	5.25	8.16	83	43	127	24.3	22.6
	2011~2040	5.25	8.13	80	38	118	25.4	24.4
	2041~2070	5.25	8.12	78	35	113	26.5	26.5
	2071~2100	5.25	8.11	78	34	112	27.8	28.2
	LSD(0.05)	-	-	2.4	0.2	2.5	0.68	0.08
Medium	1971~2000	5.13	8.17	96	43	139	23.6	22.6
	2011~2040	5.13	8.14	92	38	130	24.6	24.5
	2041~2070	5.13	8.11	89	35	124	25.8	26.8
	2071~2100	5.13	8.09	88	34	122	27.0	28.5
	LSD(0.05)	-	-	3.3	0.3	3.3	0.70	0.13
Medium-late	1971~2000	4.27	8.19	114	44	158	22.7	22.5
	2011~2040	4.27	8.15	110	38	148	23.7	24.7
	2041~2070	4.27	8.12	107	34	141	24.8	27.0
	2071~2100	4.27	8.09	104	34	138	25.9	28.9
	LSD(0.05)	-	-	4.9	0.4	4.9	0.75	0.16

Table 6. Growing period and temperature in different rice maturity types as global warming progressed when sowing date was changed with year. The values in the table are average value of all local sites, where 55 sites at early, 51 sites at medium and 40 sites at medium-late rice maturity type were analyzed.

Rice maturity type	Year	Sowing date (month.day)	Heading date (month.day)	Growing period(days)			Growing temperature (°C)	
				Before Heading	After Heading	Total	Before Heading	After Heading
Early	1971~2000	5.25	8.16	83	43	127	24.3	22.6
	2011~2040	6.07	8.23	77	43	121	26.3	22.6
	2041~2070	6.18	8.31	74	43	117	28.2	22.7
	2071~2100	6.25	9.07	74	43	117	29.8	22.7
	LSD(0.05)	-	-	1.8	ns	1.9	0.46	ns
Medium	1971~2000	5.13	8.17	96	43	139	23.6	22.6
	2011~2040	5.30	8.24	86	44	129	26.0	22.6
	2041~2070	6.12	9.01	81	44	125	28.0	22.6
	2071~2100	6.20	9.08	80	44	124	29.6	22.6
	LSD(0.05)	-	-	2.4	ns	2.5	0.46	ns
Medium-late	1971~2000	4.27	8.19	114	44	158	22.7	22.5
	2011~2040	5.20	8.26	98	44	142	25.5	22.5
	2041~2070	6.04	9.03	91	44	135	27.7	22.5
	2071~2100	6.13	9.10	90	45	135	29.4	22.5
	LSD(0.05)	-	-	3.2	ns	3.3	0.46	ns

Table 7. Change of growing period and growing temperature before heading as global warming progressed when sowing date was changed with year, where change rate was calculated as slope of growing period and growing temperature to year, respectively.

Rice maturity type	Code of agroclimatic region	Growing temperature before heading (°C)					Growing period before heading (days)				
		1971~2000	2011~2040	2041~2070	2071~2100	Change rate	1971~2000	2011~2040	2041~2070	2071~2100	Change rate
Early	2	21.9	24.3	26.7	28.5	0.067	95	84	78	76	-0.19
	3	22.5	24.8	27.0	28.7	0.063	91	82	76	75	-0.17
	4	21.2	24.3	26.7	28.4	0.072	98	83	76	75	-0.24
	5	23.8	25.7	27.6	29.1	0.054	85	80	76	75	-0.11
	6	23.5	25.5	27.5	29.1	0.058	87	80	76	76	-0.12
	7	24.3	26.1	27.9	29.5	0.053	83	79	76	75	-0.08
	8	24.9	26.7	28.4	30.0	0.052	81	77	75	75	-0.07
	9	24.4	26.5	28.2	29.8	0.055	83	77	75	75	-0.08
	10	25.6	27.5	29.1	30.6	0.050	77	74	73	74	-0.03
	11	24.8	26.6	28.4	29.9	0.051	82	77	75	76	-0.06
	12	25.4	27.3	28.9	30.4	0.050	78	75	74	75	-0.04
	13	24.6	26.5	28.3	29.8	0.053	81	75	73	73	-0.09
	14	25.6	27.4	29.1	30.5	0.050	78	75	73	74	-0.04
	15	25.7	27.6	29.2	30.6	0.050	76	72	72	73	-0.03
	16	25.7	27.6	29.2	30.7	0.051	75	71	71	72	-0.03
	17	21.5	23.9	26.7	28.5	0.072	99	85	75	72	-0.28
	18	21.4	23.9	26.5	28.5	0.072	98	84	75	72	-0.27
	19	25.3	26.9	28.7	30.2	0.049	78	74	72	73	-0.05
		Average	24.3	26.3	28.2	29.8	0.055	83	77	74	74
Medium	2	20.6	23.8	26.5	28.4	0.079	116	96	87	84	-0.32
	3	20.4	23.8	26.4	28.3	0.081	115	95	85	83	-0.33
	4	20.7	24.4	26.8	28.6	0.079	112	92	83	81	-0.32
	5	22.5	24.9	27.1	28.9	0.064	103	90	84	82	-0.21
	6	21.6	24.6	27.0	28.9	0.073	109	92	85	82	-0.27
	7	23.0	25.3	27.5	29.2	0.063	99	89	84	82	-0.17
	8	23.9	26.1	28.1	29.7	0.059	95	86	82	82	-0.13
	9	23.6	26.0	27.9	29.5	0.060	95	86	82	82	-0.14
	10	24.9	27.1	28.8	30.3	0.054	88	81	79	80	-0.08
	11	24.0	26.0	28.0	29.6	0.057	95	87	83	82	-0.13
	12	24.7	26.8	28.6	30.1	0.055	89	82	80	80	-0.09
	13	23.4	25.9	27.9	29.6	0.063	96	85	79	78	-0.18
	14	24.9	27.0	28.7	30.2	0.054	89	82	79	80	-0.10
	15	25.0	27.2	28.9	30.4	0.054	85	79	78	78	-0.07
	16	25.0	27.1	28.9	30.4	0.054	85	78	76	77	-0.08
	17	21.9	24.4	27.1	28.8	0.070	107	92	80	78	-0.30
	18	21.2	23.9	26.6	28.6	0.075	109	93	82	79	-0.31
	19	24.5	26.4	28.4	29.9	0.055	89	82	78	78	-0.12
		Average	23.6	26.0	28.0	29.6	0.061	96	86	81	80
Medium-late	5	21.1	24.2	26.6	28.6	0.076	128	106	97	93	-0.35
	6	19.7	23.9	26.6	28.6	0.090	140	109	97	94	-0.47
	7	20.6	24.3	26.9	28.8	0.083	131	105	95	93	-0.39
	8	22.0	25.1	27.4	29.2	0.073	120	101	93	91	-0.29
	9	23.1	26.0	27.8	29.4	0.064	110	96	93	92	-0.18
	10	23.6	26.3	28.2	29.8	0.062	106	94	90	90	-0.17
	11	22.2	25.0	27.3	29.1	0.070	119	102	95	93	-0.26
	12	23.4	26.0	28.0	29.7	0.063	108	96	91	90	-0.18
	13	21.1	24.8	27.3	29.1	0.081	126	100	90	88	-0.38
	14	23.5	26.1	28.1	29.7	0.063	108	95	90	90	-0.18
	15	23.9	26.4	28.3	29.9	0.061	103	93	88	88	-0.16
16	24.2	26.5	28.3	29.9	0.058	101	90	86	86	-0.15	
19	23.4	25.7	27.8	29.5	0.062	108	95	88	86	-0.22	
	Average	22.7	25.5	27.7	29.4	0.068	114	98	91	90	-0.25

일 정도 단축되었으나, 벼 생태형간 차이는 거의 없었으며, 출수전에 비해 출수후 생육기간 단축 정도가 컸다. 이것은 출수전 생육온도에 비하여 출수후 생육온도의 상승폭이 훨씬 컸기 때문이다.

기후변화에 따라 최적파종기를 기준으로 벼 재배시기를 조정하였을 경우 지구온난화가 진전되면서 출수기는 벼 생태형에 관계없이 출수기가 늦어졌으나, 이것은 생육온도가 낮아졌기 때문이 아니라 파종기가 늦추어 졌기 때문이다. 지구온난화 진전에 따라 출수기가 늦어졌음에도 불구하고 오히려 출수전 생육기간이 조생종은 현재(1971~2000) 83일에서 100년 후에는 74일로 9일, 중생종은 96일에서 80일로 16일, 중만생종은 114일에서 90일로 24일 단축되었는데, 재배시기를 고정하였을 때에 비해 출수전 생육기간이 크게 단축되었으며, 중만생종에서 그 경향이 심하였다. 이것은 최적파종기가 출수후 40일간 생육온도를 기준으로 설정되었기 때문에 출수후 생육기간과 생육온도는 기후변화에 따른 차이는 거의 없지만 지구온난화가 진전에 따라 최적 등숙조건을 위한 파종기가 늦추어지면서 벼 생태형에 관계없이 출수전 생육온도가 매우 크게 상승하였기 때문이다.

지구온난화 진전에 따른 전체 생육기간의 단축 정도는 재배시기 조정 여부에 따른 차이가 크지 않았으나, 재배시기를 고정하였을 때는 출수전에 비해 출수후 생육기간이 상대적으로 크게 단축되었으며, 재배시기를 조정하였을 때는 출수후 생육기간의 변동 없이 출수전 생육기간이 크게 단축되었다. 따라서 재배시기를 고정할 경우에는 출수후 생육온도가 크게 상승하기 때문에 등숙기간 단축되어 종실중이 작아지고(Sato & Inaba, 1976), 고온장해에 따른 불임증가(Satake & Yoshida, 1978, Jagadashi et al, 2007)로 수량성 및 품질의 심각한 저하가 우려된다. 반면, 재배시기를 조정할 경우에는 출수전 생육기간 단축에 따라 엽, 줄기 등 공급부위(Source)와 단위면적당 영화수와 같은 수용부위(Sink)가 모두 감소하여 수량이 감소할 가능성이 크다. 재배시기 조정 여부에 관계없이 기후변화에 따라 출수전후 생육기간의 단축이 큰 중만생종의 피해가 가장 클 것으로 예상되었다. 그러나 일반적인 조건에서 벼 종실에 축적되는 탄수화물은 70% 이상이 등숙기간 중 광합성에 의하여 형성되고, 나머지 부분이 출수전 엽, 줄기 중에 저장되었던 동화물질이 등숙기간 중 종실로 전류된다(Yoshida, 1981). 따라서 등숙기간 중의 고온에 의한 수량성 및 품질저하가 출수전 고온에 의한 수량성 감소에 비해 훨씬 심각할 것으로 예상되므로 기후변화에 따른 재배시기 조정은 분명히 필요한 것으로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 기후변화에 따라 재배시기를 조정하는 것이 현재의 조건으로 재배시기를 고정하는 것 보다

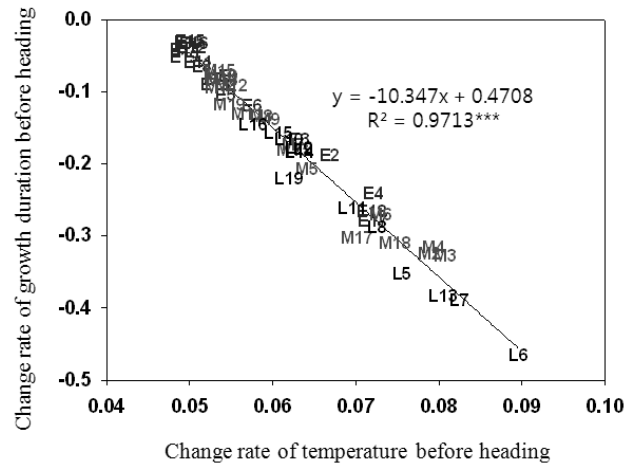


Fig. 4. Relationship between change rate of growing period and their temperature before heading. E, M and L means early, medium and medium-late rice maturity type and numbers mean codes of agroclimatic region in the symbol in the figure. For example, E2 is the value of early rice maturity type in Tabaek semi alpine region.

유리한 것으로 판단되었으나, 출수전 생육기간이 크게 감소하므로써 발생하는 수량감소 또한 간과할 수 없다. 기후변화에 따라 재배시기를 조정하였을 때 지구온난화에 따른 출수전 생육온도 및 생육기간 변화를 농업기후시대별로 나타낸 것이 표 7이며, 이 때 출수전 생육온도 변화율과 생육기간 변화율과의 관계를 나타낸 것이 그림 4이다. 벼 생태형별로 보았을 때 조생종은 지구온난화에 따라 지역별로 출수전 생육온도가 매년 0.050~0.072℃ 상승함에 따라 출수전 생육기간이 매년 0.03~0.28일 단축되었고, 중생종은 출수전 생육온도가 0.054~0.081℃, 출수전 생육기간이 0.07~0.33일 단축되었으며, 중만생종은 출수전 생육온도가 0.058~0.090℃ 출수전 생육기간이 0.15~0.47일 단축되었다. 농업기후시대별로 보았을 때 조생종, 중생종, 중만생종 모두 출수전 생육온도와 생육기간의 변화가 적은 지역은 차령 남부평야지대와 남서 해안지대로 우리나라에서 비교적 온도가 높은 지대이었으나, 출수전 생육온도와 생육기간의 변화가 큰 지역은 조생종에서는 동해안 북부지대 및 중부지대, 중생종에서는 태백 준고냉지대, 소백 산간지대 및 노령소백 산간지대, 중만생종에서는 중북부 및 중부 내륙지대로 비교적 온도가 낮은 지대이었다(표 7). 특히 중부 내륙지역은 현재 우리나라에서 가장 좋은 품질의 벼를 생산하는 지대로써 지구온난화에 따른 그 피해가 클 것으로 예상된다.

기후변화에 따라 재배시기를 조정하였을 때, 벼 생태형 및 농업기후지대에 관계없이 출수전 생육온도와 생육기간

의 변화율은 매우 밀접한 관계를 보였는데, 벼 생태형별로 조생종과 중생종에 비해 중만생종에서 지구온난화에 따른 출수전 생육온도와 생육기간의 변화율이 컸으며, 농업기후 지대별로 출수전 생육온도의 변화율은 큰 차이를 보이지 않았으나, 출수전 생육기간의 변화율은 그 차이가 매우 컸다 (그림 4). 이것은 벼 생태형에 관계없이 출수전 생육기간의 변화가 생육온도 변화에 비해 매우 민감해서 지구온난화에 따른 지역별 출수전 생육온도 변화의 작은 차이가 생육기간 변화에 큰 차이를 유발시킨다는 것을 의미한다.

결론적으로, 지구온난화가 진점됨에 따라 벼 생육온도가 상승하고 생육기간이 단축되어 벼 수량성 및 품질 저하가 우려 되었는데, 특히 생육기간 단축이 큰 중만생종의 피해가 클 것으로 예상되었다. 그러나 현재 우리나라에서 재배되고 있는 벼 품종을 살펴보면 중만생종이 85%를 차지하고 있어 그 피해가 더욱 클 것으로 판단된다. 기후변화에 따른 재배시기 조정은 벼 수량성 및 품질 결정에 영향력이 큰 등숙기간의 온도환경을 개선하여 벼 수량성 감소 및 품질 저하를 어느 정도 경감시킬 수 있지만, 출수전 생육기간이 크게 단축되어 여전히 벼 수량성 감소를 경감시키는데 한계가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 미래 기후변화에 대응하여 더욱 적극적인 재배기술과 품종개발이 요구된다. Kondo(2009)는 기후변화에 대한 벼 적응대책으로 재배기술 측면으로 파종 및 이앙시기 등 재배시기 조정과 더불어 질소시비량 조정과 냉수관개법 등이, 품종육성 측면에서는 등숙기 고온조건에서 외관품질의 저하가 적은 품종개발이 필요하다고 하였다. 또한 Jagadish 등(2010b)은 기후변화에 따른 벼 수량성 감소의 가장 큰 원인으로 고온에 의한 불임임을 지적하면서, 출수기 때 수정시간을 이동하여 고온에서의 불임을 회피할 수 있는 품종과, 고온에서의 불임이 잘 안되는 품종 개발이 필요하다고 제시하였는데, Isumaru 등(2010)은 재배 품종인 고시히카리에 야생종으로부터 고온불임 회피형질을 성공적으로 도입하였으며, Jagadashi 등(2010a)은 고온 불임에 강한 QTL을 확인 후 검증 절차 중에 있다고 하였다.

적 요

과거부터 현재까지 한반도의 온난화는 전 지구적 온난화에 비하여 심하였으며, 미래에도 더욱 심할 것으로 예상되고 있다. 기후변화에 따른 온도상승은 보통 벼 수량을 감소시키고 품질 저하를 야기하는데, 이 양상은 벼 생육기간 및 그에 따른 생육온도에 크게 영향을 받으며, 벼 생육기간 및 생육온도 또한 이앙 및 파종시기와 같은 재배시기에 조정에 의해 크게 달라질 수 있다. 본 연구는 미래 기후변화 및 그

에 따른 재배시기 조정 여부가 현재 우리나라 벼 품종의 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향을 분석하고자 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1. 벼 생육모델 ORYZA2000을 이용하여 오대벼, 일품벼, 화성벼의 파종부터 출수기까지의 생육기간을 예측하였을 때 예측값이 관측값의 약 84% 설명할 수 있는 것으로 나타났는데, 예측오차 중 상당부분은 작물모형 자체의 문제보다는 육묘기 생육온도에 대한 정보부재 또는 불확실성 때문이며, 예측값과 관측값의 회귀직선과 1:1선 거의 일치하기 때문에 미래 기후변화 조건에서의 벼 생육기간 변화를 예측하는데 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다.
2. 조생종은 전체 57개 지역 중 55개, 중생종은 51개, 중만생종은 40개 지역에서 최적파종기가 설정되었는데, 전체적으로 최적파종기는 생육기간이 짧은 조생종에서 비교적 늦고, 생육기간이 긴 중만생종에서 빠른 경향이었으며, 벼 생태형에 관계없이 지구온난화가 진전될수록 최적파종기가 늦어지는 경향이였다.
3. 재배시기를 고정하였을 경우 지구온난화가 진전되면서 벼 출수기와 그에 따른 출수전 생육일수가 빨라졌는데, 조·중생종에 비해 중만생종의 생육기간이 크게 단축되는 경향이었고, 출수후 생육기간은 벼 생태형간 차이 없이 10일 정도 단축되었으며, 출수전에 비해 출수후 생육기간 단축 정도가 컸다.
4. 최적파종기를 기준으로 벼 재배시기를 조정하였을 경우 지구온난화가 진전되면서 출수기는 늦어졌으며, 출수후 생육기간 및 생육온도는 변화가 없었다. 재배시기를 고정하였을 때에 비해 출수전 생육온도는 크게 상승하였고, 생육기간은 크게 단축되었는데, 조·중만생종에 비해 중만생종에서 그 경향이 심하였으며, 생육온도에 비해 생육기간 변화의 지역간 편차가 크게 나타났다.
5. 결론적으로 지구온난화가 진점됨에 따라 벼 생육온도가 상승하고 생육기간이 단축되어 벼 수량성 및 품질 저하가 우려 되었는데, 특히 생육기간 단축이 큰 중만생종의 피해가 클 것으로 예상되었으며, 기후변화에 따른 재배시기 조정은 벼 수량성 및 품질 결정에 영향력이 큰 등숙기간의 온도환경을 개선할 수 있지만 출수전 생육기간이 크게 단축되어 여전히 벼 수량성 감소를 경감시키는데 한계가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 미래 기후변화에 대응하여 더욱 적극적인 재배기술과 품종개발이 요구된다.

인용문헌

- 국립기상연구소. 2004. 기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출 기술개발(III), 권원태 외 12명, 기상연구소보고서 MR040C03. pp. 510.
- 국립기상연구소. 2007. 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술기발(III). 국립기상연구소. pp. 599.
- 농촌진흥청. 1981. 수도냉해실태분석과 종합기술대책. pp. 168.
- 농촌진흥청. 2004. 지역 및 지대별 고품질 쌀 생산을 위한 이앙 적기, 적정 질소시비량 및 수확적기. pp. 5-131.
- 농촌진흥청. 2004. 「고품질 쌀 생산을 위한 재배 및 수확 후 관리기술」, 농촌진흥청. pp. 155.
- 윤성호, 이정택. 2001. 기후변화에 따른 벼 적정 등숙기간의 변동과 대책. 한국농림기상학회지. 3(1) : 55-70.
- 이충근. 2008. 우리나라 환경 및 품종에서 벼 생육예측을 위한 품종모수 추정. pp. 120-134. 「벼 종실중 및 종실질소함량 추정모델 개발 및 적용」, 서울대학교 박사학위논문. pp. 184.
- Bouman, B. A. M, Kropff, M. J., Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., ten Berge H. F. M., van Laar, H. H. 2001. ORYZA2000 : modeling lowland rice. Los Banos (Philippines); International Rice Research Institute, and Wageningen: Wageningen University and Research Centre. pp. 235.
- IPCC. 2007. Climate change 2007 : The physical science basis. Ishimaru, T., Hirabayashi, H., Ida, M., Takai T., San-Oh, Y. A., Yoshinaga, S., Ando, I., Ogawa, T., Kondo, M. 2010. A genetic resource for early-morning flowering trait of wild rice *Oryza officinalis* to mitigate high temperature-induced spikelet sterility at anthesis. Ann. Bot. doi:10.1093/aob/mcq124.
- Jagadish, S. V. K., Muthurajan, R., Oane, R., Wheeler, T. R., Heuer, S, Bennett, J., Craufurd, P. Q. 2010a. Physiological and proteomic approaches to dissect reproductive stage heat tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). J. Exp. Bot. 61 : 143-156.
- Jagadish, S. V. K., Sumfleth, K., Howell, G., Redoña, E., Wassmann, R., Heuer, S. 2010b. Temperature effects on rice: significance and possible adaptation pp. 19-26. In Advanced Technologies of Rice Production for Coping with Climate Change: 'No Regret' Options for Adaptation and Mitigation and their Potential Uptake. Los Banos (Philippines); International Rice Research Institute.
- Jagadish, S. V. K., Craufurd, P. Q., Wheeler, T. R. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). J. Exp. Bot. 58 : 1627-1635.
- Kobata, T., Uemuki, N. 2004. High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. Agron. J. 96 : 406-414.
- Kondo, M. 2009. Effect of global warming on rice culture and adoptive strategies. International symposium 'Rice research in the era of global warming'. pp. 1-9.
- Peng, S. B., Huang, J. L., Sheehy, J. E., Laza, R. C., Visperas, R. M., Zhong, X. H., Centeno, G. S., Khush, G. S., Cassman, K. G. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. Proc. Natl. Acad. Sci. 101 : 9971-9975.
- Prasad, P. V. V., Boote, K. J., Allen, L. H., Sheehy, J. E., Thomas, J. M. G. 2006. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. Field Crops Res. 95 : 398-411.
- Satake T., Yoshida S. 1978. High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. J. Crop Sci. 47 : 6-17.
- Sato, K., Inaba, K. 1976. High temperature injuries to ripening of the rice plant. 5. An early decline of the assimilate storing ability of rice grains under high temperature. Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 45 : 156-161.
- Suzuki, M. 1980. Studies on distinctive patterns of dry matter production in the building process of grain yields in rice plants grown in the warm region in Japan. Bull. Kyushu Nat. Agri. Exp. Sta. 20 : 429-494.
- Yoshida, S., Satake, T., Mackill, D. 1981. High temperature stress. IRRI Res. Pap. Ser. 67 : 1-15.
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. pp. 269.