

## 기후변화에 따른 중산간지 조생종 벼 품종의 연도별 생육 및 수량성 변화

김정주<sup>1</sup> · 김우재<sup>1</sup> · 박현수<sup>1</sup> · 신운철<sup>2</sup> · 광도연<sup>1</sup> · 조준현<sup>1,†</sup>

### Changes in the Growth and Yield of Early-Growing Rice Varieties in Mid-Mountain Areas Based on Climate Change

Jeong Ju Kim<sup>1</sup>, Woo Jae Kim<sup>1</sup>, Hyun Soo Park<sup>1</sup>, Un Cheol Shin<sup>2</sup>, Do Yeon Kwak<sup>1</sup>, and Jun Hyeon Cho<sup>1,†</sup>

**ABSTRACT** To review active climate change responses, especially adjustments to the transplanting time, seven varieties of early-maturing ecotypes grown at Sangju sub-station, located in a mid-mountainous region, were studied from 2007 to 2022. During the ripening stage (July 29 to October 17), the average temperature was 23.2°C, which was a relatively disadvantageous environment compared to the optimal ripening temperature of 20 to 22°C. The heading date of early-growing cultivars was greatly shortened by 10 days for both normal (May 20) and late (June 5) transplanting. In an analysis of the growth characteristics and yield components, the culm and panicle length, number of spikelets/panicles, and the ripening rate showed high variation without a constant tendency over the study period. However, the number of panicles/plants and the ratio of brown rice increased, regardless of the transplanting time, while the 1,000-grain weight tended to decrease. There were no significant differences in yield observed between the two transplanting times, except for some years. Therefore, based on various variables, such as growth, yield, and quality (although not assessed in this study), the shift in transplanting time for early-maturing varieties in the mid-mountainous region from the current time (May 20) to a later time (June 2) needs to be considered to cope with the future impacts of climate change.

**Keywords** : agronomical characteristics, climate changes, early maturing ecotype, mid-mountain area

최근의 기후변화는 농림수산업 및 에너지 소비 등 다양한 사회 분야에서 심각한 영향을 미치고 있는 것으로 인식되고 있다. 특히 농업은 기후 의존성이 매우 높으며, 따라서 재배작물의 적지 선정과 재배양식 및 병해충과 품질관리 등에 세심한 주의가 필요하다. 벼의 생육은 고온보다는 저온에 더 민감한 것으로 알려져 있으나(Kim *et al.*, 2021), 최근까지 많은 연구들에 의하면 지구온난화가 진행되면서 벼 생육기간 온도상승으로 인해 생육기간이 단축되고 등숙률 및 천립중 등의 감소로 수량성 감소와 품질 저하가 일어나는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2011). 이러한 지구온난화는 특히 한반도에서 그 변화가 큰 것으로 보고되고 있는데 최근 2019년까지 10년간 한반도 평균기온은 평년(1981~2010)에 비해 0.5°C 높아진 것으로 보고되었으며(KMA, 2020), 1906~2005년간 100년 동안 세

계 평균기온은 0.74°C 상승한 반면, 1904년 이후 2000년까지 우리나라 평균기온은 1.5°C 상승한 것으로 보고되었다(NIMS, 2004).

Kim *et al.* (2020)은 벼 이앙 후 생육주기(5월말~9월말)에 걸쳐 북부, 중부 및 남부지역으로 지대를 선정 후 18년(2000~2017)간에 걸친 수량성과 기상자료를 수집하였는데, 3개 지역 모두에서 강수와 극한 기상에 비하여 기온변수가 큰 중요 변수로 선정되었다고 하였다. 또한 기온변수가 명확히 영향력을 미치는 시기가 북부지역에서는 없었던 반면 중부지역에서는 등숙기, 남부지역에서는 유수형성기 이후에서 출수·개화 전까지 수량성에 긍정적으로 기여하는 시기로 판정하였다. 특히 남부지역은 모든 생육 주기에 걸쳐 고온에 대한 취약성을 보였으며, 등숙기 고온 조건이 수량성에 부정적인 영향을 끼친 선행연구(Lee *et al.*, 2013)와

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립식량과학원, 농업연구관 (Senior Researcher, NICS, RDA, Jeonju 55365, Korea)

<sup>2</sup>농촌진흥청, 농업연구관 (Senior Researcher, RDA, Jeonju 54875, Korea)

<sup>†</sup>Corresponding author: ; (Phone) +82-55-350-1185; (E-mail) [hy4779@korea.kr](mailto:hy4779@korea.kr)

<Received 5 June, 2024; Revised 23 July, 2024; Accepted 25 July, 2024>

일치하였다. 이러한 기후변화에 따른 막대한 경제적 피해를 최소화하기 위한 농업인 인식 및 대응 방안 분석에서 기후변화에 대한 정보제공 및 대응기술개발과 교육 등을 제시한 바 있다(Jeong & Han, 2022).

기후변화에 따른 급격한 온도상승은 벼 수량을 감소시키고 품질을 악화시켜 왔으며, 이러한 추세가 지속될 경우 그 피해는 점점 더 클 것으로 예상되며, 이러한 급격한 기후변화에 대응하고자 온실가스 방출 및 다양한 기후모형 모델을 이용 작물의 생산성 및 병해충 관련 연구들이 보고되었다(Richard, 2009; Okada *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2011; Lee & Kim, 2018). 수량성과 관련하여 Lee *et al.* (2013)은 이산화탄소 농도 증가에 따른 긍정적 효과가 고온에 따른 등숙률 저하, 천립중 감소 등 부정적 영향에 의해 벼 수량성이 상쇄한다고 하였다. 또한 기후변화 시나리오에서 출수 이전의 기후에 비해 등숙기 기상환경이 벼 수량을 결정하는데 더 크게 작용함으로 기후변화에 대응하기 위해서는 작물의 재배 시기 조절이 유효하다고 보고하였다(Lee *et al.*, 2012). Peng *et al.* (2004)은 벼 수량성과 평균 최저 온도 간의 강한 연관관계를 보고하였는데, 건기 때 평균기온 1°C 증가마다 수량은 10% 감소하였으나 최고온도의 효과는 차이가 없었으며, 특히 야간 온도의 상승이 벼 수량을 감소시킨다고 하였다. 또한 점진적인 온도상승은 저온스트레스를 완화 시키고 고온 스트레스를 증가시키는 것으로 보고되었으며(Zhang *et al.*, 2014), 이러한 온도 증가에 따른 저온스트레스 감소 및 수량성 변화가 한국에서도 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 1996). Okada *et al.* (2011)은 기후변화 시나리오에서 온도상승이 등숙기간을 단축 시키며 분상질립 발생의 원인이 된다고 하였으며, 온도상승 및 일사량 증가는 출수기를 앞당긴다고 보고하였다. 벼 수량성과 지역간 변이 분석을 위해 GCM 시나리오와 벼 생산성 변동을 연구한 결과, 탄산가스 농도가 1.5배 증가 시 평균 18.3%의 수량 증가를 보였으나 온도상승에 따라 수량은 급격히 감소하는 것으로 나타났다(Shin *et al.*, 2000). 또한 지구온난화와 탄산가스 증가에 의한 우리나라의 벼 수량성을 조사한 결과 중부지방에서는 약간 증가하고 남부지방은 감소하는 경향을 보였고 전체적으로 약 11%의 수량 감소를 예측한 바 있는데, 이러한 이유는 생육 일수 단축으로 잠재 수량성이 낮아지는 것으로 판단하였다. 한편 Kim(2010)은 쌀 생산의 기상 영향을 분석한 결과 기술적인 요인들(육종, 보급, 재배, 정치 등)보다 기후요소의 영향이 크다고 하였으며, 이러한 경향은 1980년대 대비 2000년대에 들면서 점점 더 커지는 것으로 보고하였다. Chung *et al.* (2006)은 예측기후 평균값을 적용 지구온

난화에 따른 국내 벼 재배지의 생산성을 분석한 시도에서 평년 기후(1971~2000) 대비 인접한 미래(2011~2040)에는 출수기가 7일 정도 단축되고 3구간의 평년(2011~2040, 2041~2070, 2071~2100) 기후 시나리오에서는 중만생종의 등숙률 및 이삭수 감소가 현저하였고, 평야지 수량에서 조생종(오대)은 6~25%, 중생종(화성)은 3~26%, 중만생(동진)은 3~25%까지 감소하는 것으로 보고하였다. 이러한 기후변화에서 벼 수량성 하락의 주요 원인은 고온에 의한 불임을 지적하기도 하였다(Jagadish *et al.*, 2010).

한편 기후변화에 따른 고온성 병원충의 밀도 증가 및 돌발적인 증가 등이 보고되기도 하였다(Cho, 2009; Lee, 2014). Lee & Kim(2018)은 국제미작연구소에서 개발된 EPIRICE 모형을 도입하여 국내 벼 도열병 발생 위험도를 예측할 수 있는 EPIRICE-LB모형을 분석한 결과 향후 근 미래까지는 도열병 발생에 알맞은 온도 범위로 기온이 상승함에 따라 태백 고랭지 지역에서 도열병 발생이 증가하는 것으로 예측되었으나 태백 준고랭지대를 제외한 모든 농업 기후대에서 도열병 발생 위험도가 점차 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구는 남부 중산간지에 위치한 상주출장소에서 2007년부터 2022년까지 ‘오대’ 등 조생종 7품종을 재배하면서 연도별 기상요소의 변화와 그에 따른 농업적 주요 형질 및 수량성을 비교하고, 이앙기 재조정 등 기상변화에 대한 대응 방안을 도출하고자 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 시험재료 및 방법

2007년부터 2022년까지 국립식량과학원 상주출장소 전 시포장에서 재배된 벼 품종들의 생육 및 수량 관련 성적을 이용하였다. ‘오대’, ‘운광’을 포함 상주출장소에서 육성된 ‘상주’, ‘중화’, ‘상주찰’, ‘상미’, 및 ‘금영’ 등 조생종 7품종을 대상으로 하였으며 중생종 ‘대보’ 및 중만생종 ‘일품’을 함께 조사하였다. 상주출장소는 해발고도 285 m의 중산간지로 신품종 개발 공동연구 공시 지대에서 IV-1(북부평야지 및 중산간지) 지대에 속하며, 보통기 재배는 5월 20일 이앙을 표준으로 조생종이 추천·재배 되는 지역이다(농촌진흥청, 2022). 주요 재배양식은 재식거리 30 × 12 cm로 보통기(5월20일) 및 만기(6월5일) 이앙을 하였고 시비(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)는 9-4.5-5.7 kg/10a 수준으로 재배하였다. 간장, 수장 및 수수 등 생육 조사를 제외한 시험성적은 매년 단일 시험구 재배에서 반복 없이 조사하였으며, 잡초 및 병해충 방제 등 기타 재배관리는 표준재배법에 준하여 관리하였다(RDA, 2022).

온도, 강수량 및 일사량 등 기상자료는 농촌진흥청 상주출장소 내에 설치된 기상자료를 활용하였다. 또한 벼 조생종의 평균 출수기를 기준으로 영양생장기(5.21~6.24), 생식생장기(6.25~7.28), 그리고 등숙기(7.29~9.17)로 구분하여 생육 단계별 기후변화에 따른 생육 및 수량성 등을 비교·분석하였다.

### 농업적 형질 및 수량구성요소

주요 농업적 특성 조사는 출수기, 간장 및 수수 등 기본적인 생육 특성과 함께 등숙률, 천립중, 및 쌀수량 등을 농촌진흥청 조사 기준(RDA, 2022)에 준하여 조사하였다.

### 성적 처리

2007년부터 2022년 매년 단일 시험 재배구에서 반복 없이 조사된 성적으로 분석을 위한 별도의 통계 처리는 수행하지 않았으며, 주요 농업적 형질들의 분석은 Microsoft Office 2016을 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 중산간지대 상주출장소 기후변화

Kim *et al.* (2016)은 작물의 생육과 수량에 크게 영향을 미치는 기후요소로 구분한 농업기후지대와 달리 6개의 지형적 특성을 고려한 농업기후지대를 구분하였는데, 상주출장소는 1월 평균기온이 0°C 이하이며 대부분 1월 최저기온이 -10°C 이하에 속하는 4 지대(Zone 4)에 포함되지 않고 우리나라의 평균기온과 강수량을 보인 2 지대로 구분하였다. 그러나 조생종은 일반적으로 4, 5, 및 6 지대에 주로 재배되고 있으며, 상주출장소는 태백산맥 남쪽과 소백산맥의 줄기에 위치하고 있어 2 지대와 4 지대의 공통적인 농업기후지대로 구분할 수 있을 것으로 판단되었다.

2007년부터 2022년까지 중산간지대인 상주출장소의 연평균 온도 변화를 살펴보면 1월 평균기온이 -3.3°C로 가장 낮고 12월과 2월이 영하의 온도를 보였으며, 5월 20일 이양 이후 6, 7월과 8월 평균기온이 각각 21.1, 23.9 및 24.2°C를 기록하였다(Table 1). 작물 생육기간인 5월~9월 중의 평균 온도는 점차 증가하는 추세를 보였으며 특히 생식생장기 및 등숙기 평균 및 최고온도가 증가하면서 조생종의 분얼은 증가하였으나 천립중 감소 등 최근의 급격한 온도상승이 작물 생육에 크게 영향을 미치는 것으로 판단되었다(Tables 2, 3, Fig. 1). 한편 만기 재배에서 수량이 크게 낮았던 2015년에는 생식생장기 평균기온이 22.5°C로 다른 해 보다 상대적으로 낮은 온도를 보였다(Table 2).

상주출장소에서 보통기(5.20)에 이양하는 조생종 벼의 영양생장기, 생식생장기, 및 등숙기 등 생육 단계별 평균온도는 각각 20.1, 23.7, 및 23.2°C를, 평균 일조시간은 230.3, 147.1, 및 245.4시간을, 평균 강수량은 125.3, 291.2, 및 375.8 mm를 기록하였다(Table 2). 벼 생육 기간중(5월~10월) 일조량에 비해 강수량은 연차간 변이가 큰 편이었으며(Table 2, Fig. 1), 특히 등숙기 연평균 기온은 23.2°C로 이는 일반계 최적 등숙온도 20~22°C(Kim *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2011)에 비해 상대적으로 불리한 등숙 환경에 노출되어 있음을 알 수 있었다. Choi *et al.* (2011)은 등숙기 온도 변이가 중만생종의 벼 품질과 식미에 끼치는 영향을 분석한 결과 출수 후 30일간 평균 21.0°C보다 낮으면 등숙이 불량하고, 따라서 출수 후 30일간 평균기온 22~23°C를 추천한 바 있다. 또한, 평야지 재배 일반계의 경우 출수 후 40일간 일 평균기온이 21~23°C일 때 등숙이 알맞은 조건으로 보이지만 표고 280 m인 남부 중산간지 상주 화서지역에서 일반계 조생종의 경우 23.5°C가 가장 알맞은 온도로 나타나기도 하였다(Yun, 1986).

한편, An *et al.* (2011)은 1990년 이후 여름철 평균 강수는 그 이전에 비해 15% 증가하였으며, 이는 8월 강수량 증가에 기인한 것이라 하였는데 상주출장소의 경우에도 등숙기(7.29~9.17) 연평균 강수량이 375.8 mm로 영양생장기 및 생식생장기에 비해 크게 높은 것을 알 수 있었다(Table 2).

### 기후변화에 따른 중산간지대 조생종의 주요 농업적 형질과 수량 구성요소 변화

상주출장소에서 재배된 조생종들의 출수기는 2012년 이후 크게 단축되는 경향을 보였는데, 5월 20일 보통기 이양 재배에서 2007~2011년 5개년간 7월 30일~8월 6일의 출수기가 최근 2022년에는 7월 25일로 5일에서 12일까지 크게 단축되는 것으로 나타났다. 6월 5일 만기 재배의 경우에도 2012~2013년 8월 14일~8월 16일 출수기가 2022년에는 8월 4일로 12일 정도 크게 단축되는 결과를 보였다. 특히 생식생장기 평균온도가 상대적으로 낮거나 혹은 평균온도 상승에도 불구하고 강수량이 많았던 해에는 출수 지연이 관찰되었다(Table 2, Fig. 2). 또한 보통기 및 만기 재배 모두에서 출수기가 크게 단축되는 경향을 보였는데, 이러한 결과는 주로 생식생장기(6.25~7.28) 평균 및 최고온도가 상승하면서 출수기가 단축되는 것으로 판단되었다(Tables 2, 3, Supplementary Table 1). 기후 온난화 관련 출수기 단축은 여러 연구에서 보고되었는데, Lee *et al.* (2011)은 기후변화 및 재배 시기 조정에 따른 생육기간과 온도의 영향분석에서 재배 시기를 고정할 경우 지구온난화가 진전될수록 출

**Table 1.** Average temperature, rain, and sunlight at sangju sub-staion by years (2007-2022).

Group	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Avg.	
Temp. (°C)	Jan.	-1.8	-2.8	-3.9	-5.0	-7.8	-3.5	-5.0	-2.2	-2.0	-3.3	-2.7	-4.9	-2.2	0.5	-3.5	-3.1	-3.3
	Feb.	1.8	-3.2	1.7	-0.7	-0.1	-3.6	-1.8	0.2	-0.5	-0.7	-0.9	-2.8	0.1	1.2	1.4	-2.3	-0.6
	Mar.	4.6	5.2	5.0	2.9	2.8	3.7	4.8	5.7	4.7	5.4	4.6	6.3	5.5	6.2	7.2	6.0	5.0
	Apr..	10.0	11.6	11.0	8.0	10.0	11.1	8.4	5.7	10.8	12.7	12.6	11.8	10.6	9.3	12.0	12.9	10.5
	May	16.4	16.2	16.9	15.9	16.3	17.1	16.8	17.2	17.5	17.7	17.5	16.9	17.4	16.8	15.2	17.3	16.8
	Jun.	20.5	19.2	20.9	21.5	21.7	21.0	21.8	20.7	21.1	21.7	21.1	21.2	20.4	22.2	21.0	21.7	21.1
	Jul.	22.1	24.9	22.3	24.0	24.3	24.2	24.8	23.6	23.1	24.0	24.8	25.6	23.5	21.4	25.4	25.0	23.9
	Aug.	24.4	22.9	22.7	25.4	24.0	24.8	25.3	21.9	23.7	25.4	23.7	26.1	24.8	25.3	23.4	24.0	24.2
	Sep.	19.5	19.4	19.1	19.9	19.1	18.3	18.8	18.8	18.4	19.9	18.5	18.5	20.1	18.5	19.7	19.6	19.1
	Oct.	12.6	12.9	12.6	12.0	11.5	11.6	13.0	12.0	12.9	13.6	13.3	10.3	13.3	11.4	13.0	12.2	12.4
	Nov.	4.5	5.2	5.0	4.6	8.4	4.0	4.2	6.1	7.7	5.2	4.1	5.3	6.4	6.2	6.3	7.9	5.7
	Dec.	0.3	-1.0	-2.2	-2.0	-2.2	-4.9	-1.0	-3.9	1.2	0.5	-2.9	-1.7	0.0	-2.4	-0.2	-4.1	-1.6
<b>Mean</b>	<b>11.3</b>	<b>10.9</b>	<b>10.9</b>	<b>10.5</b>	<b>10.7</b>	<b>10.3</b>	<b>10.8</b>	<b>10.5</b>	<b>11.5</b>	<b>11.8</b>	<b>11.1</b>	<b>11.1</b>	<b>11.7</b>	<b>11.4</b>	<b>11.7</b>	<b>11.4</b>	<b>11.1</b>	
Rain (mm)	Jan.	7.5	41.5	9.0	30.0	2.5	9.5	53.0	10.0	24.5	20.2	9.0	23.5	0.0	82.5	15.0	3.0	21.3
	Feb.	48.0	5.0	29.0	45.0	50.5	5.5	39.0	5.0	35.0	77.2	46.0	36.0	40.5	78.5	12.0	2.5	34.7
	Mar.	110.0	31.5	45.5	74.0	19.0	82.5	56.0	84.5	44.0	45.5	19.5	119.5	28.5	16.0	94.0	112.5	61.4
	Apr..	49.0	42.0	41.0	68.0	125.0	115.5	82.0	84.5	98.5	161.0	56.0	161.5	100.0	26.0	68.5	65.5	84.0
	May	105.5	62.0	134.0	128.0	175.0	65.5	129.0	40.0	28.0	69.5	26.0	128.5	49.5	88.0	175.0	5.0	88.0
	Jun.	163.6	127.0	202.3	38.5	410.5	69.0	154.5	133.0	103.5	44.5	46.5	76.0	85.5	214.0	83.5	123.5	129.7
	Jul.	290.5	176.5	445.5	205.5	562.5	319.0	168.5	27.5	43.5	442.5	491.0	175.0	212.5	515.0	189.5	193.0	278.6
	Aug.	438.5	208.0	108.5	415.5	456.0	442.0	151.0	213.0	29.0	85.0	177.0	367.5	99.5	375.5	271.5	330.0	260.5
	Sep.	364.5	63.0	57.0	133.5	120.0	289.5	128.0	93.0	46.0	117.5	95.5	116.5	189.5	184.5	210.5	89.5	143.6
	Oct.	21.5	39.5	22.5	29.5	62.5	65.0	32.5	190.0	129.5	262.8	40.5	147.0	132.5	1.5	31.5	82.0	80.6
	Nov.	11.5	8.5	43.5	13.0	112.5	60.5	70.5	53.5	0.0	24.5	10.0	42.5	45.5	37.5	41.5	34.0	38.1
	Dec.	18.0	13.5	36.5	41.0	13.5	60.0	24.5	16.5	64.5	51.0	24.5	28.5	26.0	0.5	1.0	2.5	26.4
<b>Mean</b>	<b>135.7</b>	<b>68.2</b>	<b>97.9</b>	<b>101.8</b>	<b>175.8</b>	<b>132.0</b>	<b>90.7</b>	<b>79.2</b>	<b>53.8</b>	<b>116.8</b>	<b>86.8</b>	<b>118.5</b>	<b>84.1</b>	<b>135.0</b>	<b>99.5</b>	<b>86.9</b>	<b>103.9</b>	
Sun- light (Hour)	Jan.	159.7	133.4	158.5	167.7	217.0	160.6	144.9	174.5	155.3	155.1	168.2	164.1	192.4	121.1	159.0	193.4	164.1
	Feb.	176.3	198.6	122.9	127.6	168.2	166.3	140.1	125.2	143.0	156.1	193.8	180.2	168.7	155.7	183.5	194.4	162.5
	Mar.	149.0	182.6	190.9	126.5	256.1	161.5	228.6	188.4	240.5	199.5	214.7	193.5	192.2	222.8	185.9	162.9	193.5
	Apr..	211.0	198.0	208.3	174.0	206.5	229.1	182.7	188.4	157.8	193.0	229.5	214.3	175.3	253.8	208.5	237.4	204.2
	May	227.3	233.3	240.4	216.5	175.8	226.0	236.8	286.5	272.7	267.6	266.2	193.4	281.0	207.5	176.8	299.7	238.0
	Jun.	195.0	151.0	71.0	210.5	187.3	161.3	157.3	151.1	187.9	185.7	238.7	192.7	204.0	196.2	190.2	185.0	179.1
	Jul.	96.3	137.1	112.0	118.7	93.1	147.7	96.7	142.3	144.5	133.8	116.3	230.1	132.7	81.1	207.7	148.3	133.6
	Aug.	137.1	181.1	133.9	102.8	84.3	119.6	202.6	94.5	180.3	248.3	162.7	196.6	196.9	135.6	112.4	115.5	150.2
	Sep.	87.6	168.6	174.5	134.6	145.5	133.4	155.0	170.0	197.2	112.5	193.2	153.9	120.1	142.9	123.8	159.9	148.3
	Oct.	173.4	182.5	223.9	163.0	177.3	207.9	198.3	202.7	162.9	110.2	157.0	189.0	168.9	204.8	171.8	180.2	179.6
	Nov.	156.8	143.1	122.4	204.8	126.0	125.2	139.1	149.7	62.5	145.5	178.7	151.5	164.7	159.7	152.5	173.1	147.2
	Dec.	94.9	158.2	137.2	173.9	194.3	152.3	130.4	138.9	123.2	133.6	163.3	159.3	151.4	166.7	156.6	141.1	148.5
<b>Mean</b>	<b>155.4</b>	<b>172.3</b>	<b>158.0</b>	<b>160.1</b>	<b>169.3</b>	<b>165.9</b>	<b>167.7</b>	<b>167.7</b>	<b>169.0</b>	<b>170.1</b>	<b>190.2</b>	<b>184.9</b>	<b>179.0</b>	<b>170.6</b>	<b>169.0</b>	<b>182.6</b>	<b>170.7</b>	

수기 및 생육 일수가 빨라지고, 조생종보다 중만생종에서 크게 짧아지는 경향을 보고하였다. 출수기 및 생육 단축은 본 연구의 조생종에서도 출수기가 크게 단축되는 결과와 일치하였는데, 조생종 재배기간인 5월에서 10월까지 연도별 평균온도가 점차 증가하고 특히 7월중의 최고온도가 크게 상승하면서 출수기가 크게 단축되는 것으로 판단되었다. 이러한 온도 증가에 따른 출수기 단축은 일본에서도 보고되었는데, Hasegawa *et al.* (2009)은 1980년 이래 일본에서

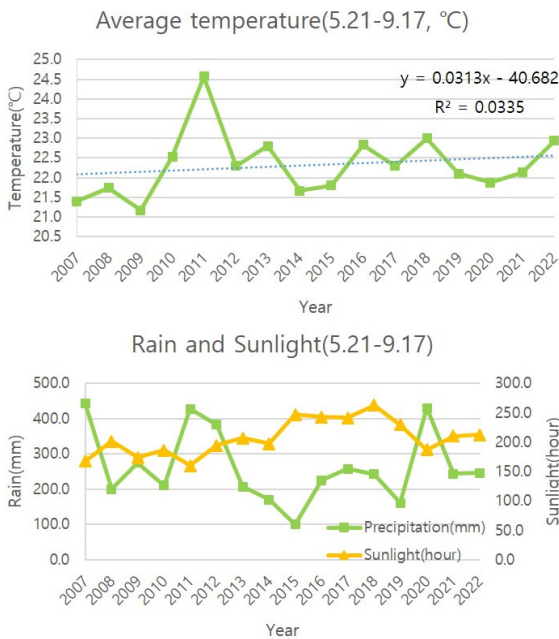
의 온도는 1~2°C 증가하는 경향이었으며 온도상승 변화는 북부(Tohoku)보다 서부(Kyushu)에서 더 흔한 것으로 보고하였다. 또한 포장시험에서 지난 25년간 출수기는 약 1주일 정도 짧아진 것으로 나타났으나 곡물 수량은 큰 변화가 없었으며 1등급 품위의 곡립(kernel) 비율은 감소하는 경향이라고 하였는데, 본 시험에서도 10일 정도의 출수기 단축에도 불구하고 분얼은 증가하고 천립중은 감소하여 수량성은 유의적인 변화가 없었다.

**Table 2.** Average temperature, rain, and sunlight during the rice growing stage by years (2007-2022).

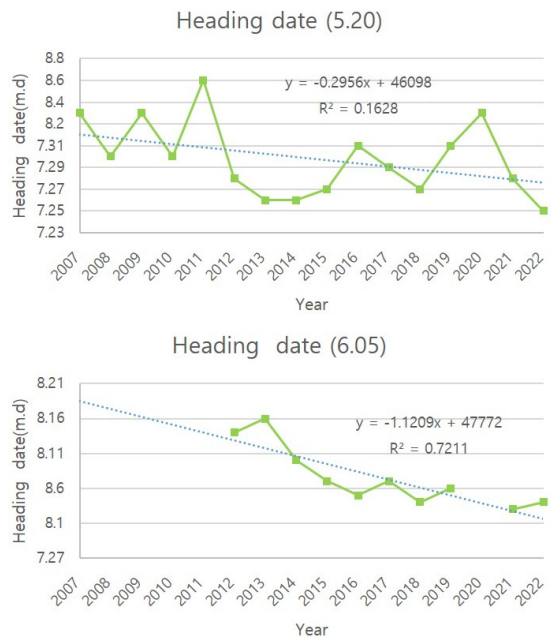
Group		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Mean	St. Dev.	CV	
Vegetative (5.21~6.24)	Temp. (°C)	19.3	18.8	19.3	19.5	22.1	20.3	20.7	20.2	20.7	20.9	20.2	19.9	19.5	21.0	19.2	20.6	20.1			
	Sunlight (Hour)	176.7	121.5	135.9	245.1	211.4	227.8	209.9	202.3	282.1	243.0	316.8	260.8	283.7	268.2	213.2	286.5	230.3			
	Rain (mm)	242.4	167.8	215.5	96.5	269.5	56.5	205.5	145.0	36.5	58.5	42.5	31.0	69.0	123.5	135.0	110.5	125.3			
Reproductive (6.25~7.28)	Temp. (°C)	22.2	24.0	22.5	23.6	26.0	23.4	24.5	23.4	22.5	23.5	24.6	24.9	22.9	21.1	24.6	25.0	23.7			
	Sunlight (Hour)	124.4	174.5	112.9	131.6	104.7	142.4	122.3	173.6	149.4	154.6	141.3	224.6	130.7	97.0	217.5	152.9	147.1			
	Rain (mm)	302.4	191.0	488.8	21.5	566.5	362.5	164.0	130.0	158.0	440.0	449.5	249.5	251.5	515.0	184.5	184.0	291.2			
Ripening (7.29~9.17)	Temp. (°C)	22.7	22.4	21.7	24.5	25.6	23.2	23.2	21.4	22.2	24.1	22.1	24.2	23.9	23.5	22.6	23.2	23.2			
	Sunlight (Hour)	202.8	308.8	273.0	181.5	163.3	213.9	288.4	216.9	309.8	331.6	266.6	302.8	273.9	195.3	200.4	197.8	245.4			
	Rain (mm)	786.5	243.0	120.5	512.0	446.5	728.5	251.5	237.0	105.5	179.5	282.0	449.0	162.5	652.0	413.5	443.5	375.8			
Mean (5.21~9.17)	Temp. (°C)	21.4	21.7	21.2	22.5	24.6	22.3	22.8	21.7	21.8	22.8	22.3	23.0	22.1	21.9	22.1	22.9	22.3	0.83	3.70	
	Sunlight (Hour)	168.0	201.6	173.9	186.1	159.8	194.7	206.9	197.6	247.1	243.1	241.6	262.7	229.4	186.8	210.4	212.4	207.3	31.3	15.1	
	Rain (mm)	443.8	200.6	274.9	210.0	427.5	382.5	207.0	170.7	100.0	226.0	258.0	243.2	161.0	430.2	244.3	246.0	265.3	106.7	40.2	

**Table 3.** The highest and lowest temperatures(°C) during the rice growing period by years (2007-2022).

Groups	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.	High. Low.
May	22.7 10.7 23.3 9.5 24.4 9.9 23.0 9.0 22.2 10.8 23.6 11.2 23.4 10.5 24.3 10.5 24.4 10.2 24.9 10.6 24.8 10.4 22.8 11.0 25.0 9.5 23.2 11.0 21.1 9.5 24.5 9.7															
Jun.	26.0 15.9 24.8 14.8 27.2 15.2 28.2 15.5 27.6 16.7 26.2 16.6 26.9 17.4 25.6 16.5 26.9 15.8 27.3 16.7 27.8 15.0 27.1 16.2 26.6 15.1 28.1 17.4 26.5 16.5 27.3 16.8															
Jul.	26.0 19.2 30.0 21.3 27.4 18.6 28.8 20.7 28.6 21.2 28.6 20.8 29.1 21.8 28.2 20.1 27.4 19.6 29.0 20.2 29.4 21.7 30.8 21.3 28.0 19.9 25.3 18.4 30.9 21.2 29.8 21.5															
Aug.	28.9 21.3 28.4 18.6 28.0 18.6 30.3 22.3 28.3 21.2 29.2 21.6 30.5 21.2 25.6 19.2 29.2 19.6 31.5 20.7 28.4 20.1 31.5 21.7 30.1 20.7 30.2 22.0 28.2 20.3 28.3 20.7															
Sep.	23.6 16.3 26.0 14.3 26.0 13.7 26.1 15.5 24.7 14.6 23.4 14.0 24.4 14.3 24.6 14.1 25.0 12.7 24.7 16.1 24.7 12.8 23.4 13.8 25.0 16.1 24.0 13.9 24.4 16.0 25.5 14.9															
Mean	25.4 16.7 26.5 15.7 26.6 15.2 27.3 16.6 26.3 16.9 26.2 16.8 26.9 17.0 25.7 16.1 26.6 15.6 27.5 16.9 27.0 16.0 27.1 16.8 26.9 16.3 26.2 16.6 26.2 16.7 27.1 16.7															



**Fig. 1.** Changes of annual average temperature, rain and sunlight during the growing period by year. Trend(slope) is represent of annual average temperature in normal transplanting (5.20) according to the linear trend line.



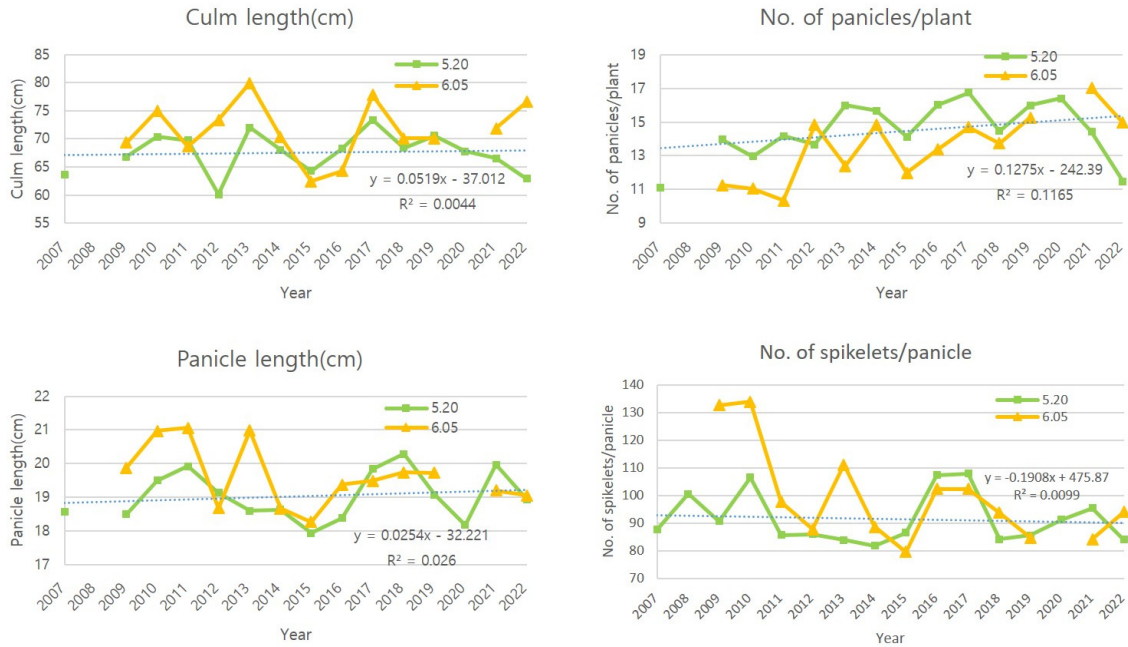
**Fig. 2.** Changes of heading date based on transplanting time by year. Trends (slopes) are represent of heading date in normal (5.20) and late (6.05) transplanting according to the linear trend line.

**Table 4.** Major agronomic characteristics of seven early heading cultivars by years (2007-2022).

Trans-planting (m.d)	Year	Heading date (m.d)	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. of panicles/plant	No. of spikelets/pan.icle	Ripening ratio (%)	Weight of 1,000 grains (g)	Rate of brown rice (%)	Yield (kg/10a)
5.20	2022	7.25	63	19	11	84	82.8	23.1	82.5	485
	2021	7.28	67	20	14	95	83.1	22.7	80.6	632
	2020	8.03	68	18	16	91	77.8	21.3	81.0	511
	2019	7.31	71	19	16	85	88.6	21.6	81.9	571
	2018	7.27	68	20	14	84	90.5	21.1	80.5	559
	2017	7.29	73	20	17	108	77.2	23.0	81.8	636
	2016	7.31	68	18	16	107	85.4	21.6	81.7	669
	2015	7.27	64	18	14	87	87.3	20.6	82.4	592
	2014	7.26	68	19	16	82	82.6	23.5	78.9	602
	2013	7.26	72	19	16	84	78.7	22.3	81.6	561
	2012	7.28	60	19	14	86	76.9	21.3	79.6	450
	2011	8.06	70	20	14	86	90.0	24.9	81.0	530
	2010	7.30	70	20	13	106	69.7	21.8	75.6	503
	2009	8.03	67	19	14	91	81.3	22.7	83.6	685
	2008	7.30	-	-	-	100	92.3	24.2	82.7	577
2007	8.03	64	19	11	88	86.0	22.4	81.9	507	
	<b>Mean</b>	<b>7.3</b>	<b>68</b>	<b>19</b>	<b>14</b>	<b>92</b>	<b>83.1</b>	<b>22.4</b>	<b>81.1</b>	<b>567</b>
6.05	2022	8.04	77	19	15	94	79.9	22.1	82.9	537
	2021	8.03	72	19	17	84	82.8	22.4	81.0	630
	2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	8.06	70	20	15	85	87.3	22.9	81.9	565
	2018	8.04	70	20	14	94	84.1	21.7	80.8	560
	2017	8.07	78	19	15	102	87.8	23.4	83.1	633
	2016	8.05	64	19	13	102	87.9	21.6	80.9	539
	2015	8.07	62	18	12	80	89.2	22.2	82.0	458
	2014	8.10	70	19	15	89	87.2	23.2	78.0	619
	2013	8.16	80	21	12	111	90.4	23.4	82.4	565
	2012	8.14	73	19	15	88	76.4	22.5	78.5	462
	2011	-	69	21	10	98	89.6	24.7	81.4	456
	2010	-	75	21	11	134	66.4	21.8	74.3	517
	2009	-	69	20	11	133	78.3	22.7	83.4	624
		<b>Mean</b>	<b>8.08</b>	<b>72</b>	<b>20</b>	<b>14</b>	<b>99</b>	<b>83.6</b>	<b>22.7</b>	<b>80.8</b>

출수기 이외 주요 농업적 형질에서도 많은 변화를 보였는데, 간장의 경우 연차간 변이는 큰 것으로 나타났고 2015년과 2016년을 제외하면 5월 20일 보통기 이앙에 비해 6월 5일 만기 재배에서 간장이 오히려 큰 것으로 나타났다. 반면 이삭 길이는 2014년 이전까지 만기 재배에서 큰 편이었으나 그 이후는 이앙기에 따른 차이가 크지 않았는데, 이는 만기 재배의 출수기가 크게 단축되면서 차이가 적어지는 것으로 보였다(Table 4, Fig. 3). 한편 수당 영화수의 경우 조사된 형질들중 2011년 이후 재배 시기간 변이가 적은 것으로 나타났으며, 2014년 이전까지는 보통기 이앙보다 6월5일 만기 이앙에서 높은 영화수를 보이다가 2014년 이후부터는 이앙 시기에 상관없이 비슷한 경향을 보였다(Table 4, Fig. 3).

수량을 결정하는 형질들은 이삭수와 이삭 당 영화수를 제외하면 대부분 출수 이후 기후에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있는데(Kwak & Yeo, 2004), 본 시험의 경우 수당립수는 뚜렷한 증가를 보이지 않았으나, 최근 2년을 제외하면 이삭 수는 이앙기와 관계없이 증가하는 경향이었으며 보통기 재배에서 많은 경향을 보였다(Table 4, Fig. 3). 등숙률의 경우 2011년 이후 뚜렷한 증가나 감소 경향은 보이지 않았다(Table 4, Fig. 4). Suzuki (1980)에 의하면 더운 지방에서 벼 생육후기 호흡량 증가에 의한 탄수화물 축적 감소로 인해 노화가 진행되며 등숙기간이 짧아져 수량에 부정적인 영향을 준다고 보고하였는데, 상수출장소에서 재배된 조생종의 보통기 재배에서는 연차간 변이가 큰 것



**Fig. 3.** Changes of culm and panicle length, No. of panicles/plant and spikelets/panicle by year. Trends (slopes) are represent of agronomical characteristics in normal transplanting (5.20) according to the linear trend line.



**Fig. 4.** Changes of rate of brown rice, ripening ratio, weight of 1,000 grains and yield by year. Trends (slopes) are represent of agronomical characteristics in normal transplanting (5.20) according to the linear trend line.

로 나타났으나 등숙률의 감소 정도가 매우 미미하였고 상대적으로 만기 재배에서는 연차간 변이가 적었다. 특히 2010년의 경우 상대적으로 매우 낮은 등숙률을 보였는데 이는 평년 대비 8~9월 등숙기 최고기온이 상대적으로 높았

던 것으로 판단되었다(Table 3, Fig. 4).

정현비율은 재배 시기에 상관없이 연차간 변이가 적고 미세하게 증가하는 반면 천립중은 점차 감소하는 경향으로 만기 재배보다 보통기 재배에서 천립중 감소 경향이 큰 것



으로 나타났다(Table 4, Fig. 4). 중산간지대 상주출장소에서 재배된 조생종 품종들의 수량성을 보면 연차간 수량성 변화가 큰 편이었고, 2015~2016년 보통기 재배에서 상대적으로 높은 쌀 수량을 보인 것을 제외하면 보통기와 만기 재배간 수량은 비슷한 것으로 나타났다(Table 4, Fig. 4). Shin *et al.* (2019)은 최근 5년간 대구 및 안동 지역에서 중생 및 중만생종의 수량성이 2000년 초반 5년 평균보다 7~18%까지 증가하였으며, 이삭수 및 등숙률이 수량 증가에 크게 영향을 미쳤다고 보고하였다. 또한 20년간의 수량변화 추적에서 대구의 경우는 등숙기 일조시간 증가가 수량을 크게 증가시켰고, 안동에서는 영양생장기 최고온도 증가가 조생 및 중만생종의 수량을 증가시켰다고 하였다. 특히 대구 및 안동 지역의 20년간 평균 수량 증가는 누적 일조시수의 현저한 증가로 보였으며, 다만 평균기온의 상승에 따른 수량 증수가 크지 않았던 이유는 등숙기 평균기온의 상승폭이 크지 않았다고 하였다. 이러한 결과는 본 시험에서와 같이 동일한 품종을 대상으로 성적을 추적한 것이 아니라 지역간 품종이 다르고 육성 계통을 이용한 두 지역의 작황 및 지역적응성시험에서 도출된 자료를 사용한 것으로 판단되었다. Lee & Lee (2008)은 1988~2006년까지 지역별 작황 자료를 분석 결과 안동지역의 조생종 벼 수량에 주요한 효과로 작용하는 수량구성요소는 없으나 기온과 날알 무게와는 유의한 상관성이 있다고 하였는데, 본 시험에서도 온도상승에 따라 수수가 증가하였으나 천립중의 감소로 수량성의 뚜렷한 변화가 없었던 것으로 판단되었다. 생육 시기에 따른 온도와 출수기 및 생육 특성 등 수량에 크게 영향을 미치는 상호 형질간 상관 분석 결과 대부분의 형질에서 뚜렷한 상호 관련성을 보이지 않은 것으로 나타났다. 그러나 영양생장기 온도가 높을수록 수수가 증가하였고 생식생장기 온도 증가는 출수기를 크게 단축시켰으며, 등숙기 온도 증가에 따라 천립중은 미세하게 감소하는 경향을 보였으며, 특히 등숙기 온도 증가에 따른 수량의 감소가 컸다(Fig. 5).

한편 일부 년도에서 재배가 되지 않았거나 출수기나 수량 등 일부 형질에서 조사가 진행되지 않아 분석에 어려움이 있었으나 중생종 ‘대보’ 및 중만생 ‘일품’ 벼에서도 출수기는 보통기 대비 만기재배에서 빠르게 단축되는 경향이었고 간장, 수장, 수수, 및 천립중은 연차간 변이가 있었으나 보통기 및 만기 재배양식 간에 뚜렷한 경향은 보이지 않았다. 또한 대부분의 형질에서 중생종인 ‘대보’보다는 중만생인 ‘일품’에서 재배 양식간 변이가 큰 편이었고 두 품종 모두 연차간 차이는 최근 들면서 감소되는 경향을 보였다(Table 5).

### 기후변화 대응 중산간지대 이양기 재조정에 대한 고찰

벼의 경우 기후변화에 따른 수량 관련 연구에서 재배 시기의 고정과 조정 모두 영화수 및 등숙률에서 수량 관련 기여도는 큰 차이를 보였으나 입실률은 벼 수량에 거의 영향을 주지 못한 것으로 보고 되었다(Lee *et al.*, 2012). 이러한 결과는 고온에서의 벼 수량 감소는 고온에 의한 불임 증가(고온장해)라고 보고한 결과들(Krishman *et al.*, 2007; Jagadish *et al.*, 2007)들과 상반된 결과로서 이는 우리나라의 한여름 단기간에 고온이 집중적으로 발생함으로 개화기 고온장해를 회피할 기회가 많으나, 필리핀 등에서는 장기간 고온이 지속되는 기후양상을 보여 고온장해를 피하기 어려운 것으로 판단되었다. 또한 벼의 생육기간중 온도상승에 따라 영화수와 등숙률은 벼 생태형과 기후지대별로 다르게 나타났다. Lee *et al.* (2012)은 조·중생종에 비해 중만생종이 남부지대와 중부지대에 비해 북부 지대의 수량 감소가 큰 것으로 보고하였는데 이는 특히 출수 후 온도가 중만생종 및 북부 지대에서 크게 상승하였고 이에 따른 등숙률이 중만생종과 북부 지대에서 크게 감소하였기 때문으로 분석하였다. Lee *et al.* (2014)은 ‘오대’와 ‘새추청’을 이용 CO<sub>2</sub> 농도와 온도상승이 생육과 생산량에 미치는 영향을 분석한 결과 ‘새추청’은 온도 상승구에서, ‘오대’는 CO<sub>2</sub> + 온도 상승구에서 생육과 생산량이 증가하였다고 보고하였다. 이러한 결과는 일반적으로 온도가 높아짐에 따라 벼 수량성이 감소된다는 보고 및 본 시험 결과와도 다른 결과를 보였다. 또한 Lee *et al.* (2012)은 기후변화 조건별 최적 파종기를 조정하여 분석한 결과 기후변화 초기에는 오히려 수량이 증가하기도 하지만 벼 수량은 온도가 상승함에 따라 직선적으로 감소하지만, CO<sub>2</sub> 농도 증가에 따라서는 직선적으로 증가하여 벼 수량에 대한 온도 상승효과보다는 상대적으로 CO<sub>2</sub> 농도의 실제적 영향이 큰 것으로 보았다. 온대지역의 농산물은 온도가 1~3°C 높아지면 생산량이 증가하지만 그 이상으로 높아지면 감소한다고 하였으며(IPCC, 2007), 지구온난화로 벼 등숙기 온도상승으로 곡물 수확량이 20~30% 감소할 것으로 예측하였다(Yun *et al.*, 2001). Lee *et al.* (2012)은 ORYZA 2000/AIB 기후 시나리오에서 온도상승에 따른 벼 생육을 모의한 결과 온도가 상승함에 따라 벼 수량은 직선적으로 감소하였으며, 온도가 1°C 오를 때 생태형이나 기후지대에 따라 벼 수량성은 6.7~10.6%까지 감소하는 결과를 보고하였다. 한편 Kim *et al.* (2015)은 ORYZA 2000 모델을 이용 내륙 평야지 수량성 시뮬레이션 결과 2020년 이전까지는 벼 수량이 증가하는 경향이었으나 2020년 이후 작물 수량은 급격히 감소할 것이라 하였는데, 그러한 수량 감소는 출수전 생육기간이 짧아지는 영



**Table 5.** Major agronomic characteristics of mid (Daebo) and late (Ilpum) heading cultivars by years (2007-2022).

Trans-planting (m.d)	Year	Heading date (m.d)		Culm length (cm)		Panicle length (cm)		No. of panicles/plant		No. of spikelets/panicle		Ripening ratio (%)		Weight of 1,000 grains (g)		Rate of brown rice (%)		Yield (kg/10a)	
		Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum	Daebo	Ilpum
5.20	2022	8.15	8.22	65	71	19	20	15	12	91	88	90.7	93.0	22.6	21.3	84.6	82.4	572	474
	2021	-	-	64	69	20	20	16	15	85	81	90.3	92.7	21.6	22.0	83.8	82.2	651	631
	2020	-	8.15	-	56	-	19	-	15	-	83	-	85.0	-	22.0	-	83.5	-	641
	2019	8.11	8.15	62	69	20	21	16	15	83	84	84.2	82.9	23.1	22.7	83.8	82.3	659	623
	2018	8.07	8.14	64	69	19	20	15	15	105	90	77.0	81.4	24.6	24.0	-	-	-	-
	2017	8.09	8.14	71	78	20	21	18	18	118	83	81.1	89.9	22.4	22.2	84.2	83.1	784	732
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	8.10	8.14	57	65	17	20	15	12	67	79	93.3	93.0	22.8	22.4	84.0	82.6	532	494
	2014	8.12	8.20	60	64	19	20	16	14	81	74	91.8	95.1	22.6	22.5	82.9	83.1	576	543
	2013	8.13	-	64	-	18	-	14	-	90	-	85.7	-	22.6	-	84.8	-	585	-
	2012	8.11	8.23	66	-	21	-	17	-	106	92	72.1	-	21.8	-	80.3	75.0	611	557
	2007	-	8.18	-	68	-	19	-	12	-	75	-	84.7	-	23.8	-	82.1	-	644
	<b>Mean</b>	<b>8.11</b>	<b>8.17</b>	<b>64</b>	<b>68</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>92</b>	<b>83</b>	<b>85.0</b>	<b>89.0</b>	<b>23.0</b>	<b>23.0</b>	<b>84.0</b>	<b>82.0</b>	<b>621</b>	<b>593</b>
6.05	2022	8.24	8.24	63	62	19	18	14	14	68	81	86.0	83.3	21.4	21.3	83.0	82.6	457	441
	2021	-	-	64	67	19	21	12	13	82	78	91.1	92.0	22.6	22.2	83.1	81.6	645	627
	2020	-	8.15	-	56	-	19	-	15	-	83	-	85.0	-	22.0	-	83.5	-	641
	2019	8.17	8.19	60	66	19	19	14	16	90	94	86.6	89.5	23.7	23.0	82.2	82.1	569	632
	2018	8.16	8.22	68	71	22	23	12	14	-	114	86.1	82.8	22.0	22.5	-	-	-	-
	2017	8.21	8.24	72	79	20	20	17	17	116	111	71.7	72.4	22.2	21.3	83.9	82.7	708	710
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2015	8.20	8.21	57	64	17	20	15	12	82	83	89.8	89.5	23.5	22.6	82.9	81.6	525	418
	2014	8.25	8.30	63	64	20	19	16	12	87	82	90.2	90.2	23.1	21.8	81.1	76.1	675	533
	2013	-	-	72	-	20	-	11	-	136	-	69.4	-	20.1	-	80.8	-	552	-
	2012	8.21	-	68	73	20	20	15	14	95	92	73.6	74.4	23.8	27.1	79.5	75.0	558	557
		<b>Mean</b>	<b>8.21</b>	<b>8.22</b>	<b>65</b>	<b>67</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>94</b>	<b>91</b>	<b>82.7</b>	<b>84.3</b>	<b>22.5</b>	<b>22.6</b>	<b>82.1</b>	<b>80.7</b>	<b>586</b>

향이라 하였다. 또한 등숙기간의 온도상승으로 등숙률이 낮아지면서 수량 감소가 클 것으로 예상하였다. 이러한 보고는 일반벼 최적 등숙온도 20~22°C보다 클 경우 천립중 감소를 보고한 결과(Yoshida, 1981)와 일치하였다.

Kim *et al.* (2021)은 벼 생육기간중 고온은 이삭수, 이삭당 영화수 감소를 초래하며 일조시간은 등숙기에 가장 영향이 크고 등숙립율과 천립중을 감소시킨다고 하였다. 따라서 *japonica* 벼 재배의 가장 큰 제한은 등숙기와 생식생장기의 저온보다는 고온 스트레스임을 암시하였다. 한편 벼의 생육은 저온에 더 민감한 것으로 알려져 있으나 최근의 기후변화에 따른 고온 스트레스가 등숙기와 생식생장기에 가장 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 따라서 고온에 의한 수량 손실은 등숙율 감소가 가장 크며 천립중 감소가 그 뒤를 따른다고 하였다. 반면 영양생장기 고온이 m<sup>2</sup>당 이삭수를 감소 시키지만 이삭당 영화수 증가로 수량이 감소되는 부분을 보상함으로 수량성에 대한 온도효과는 무시해도 좋은 결과를 보고하였다. Yun & Lee (2001)은 평야지

에서 등숙 기온이 21°C보다 1°C 낮은 20°C가 되면 저온의 영향으로 7% 감수하고 23°C 보다 1°C 높은 24°C가 되면 고온의 영향으로 5%가 감수한다고 하였으며, 따라서 기후변화에 대응할 수 있는 품종은 기본영양생장형 출수 형태를 가지고 높은 등숙 온도(25°C 전후)를 요구하는 통일형 품종이 바람직하다고 하였다.

최근의 기후변화에 대응하여 출수기와 수량 및 품질에 크게 영향을 미치는 재배시기 조정에 대한 많은 연구가 보고되었다. Okada *et al.* (2011)은 벼 품질 및 생육 모델을 이용한 기후변화 시나리오에서 일본 남서부 지역(Kyushu)의 벼 품질은 유의하게 떨어지며, 온도상승에 의한 직접적인 효과보다는 등숙기간의 이동에 의한 간접적인 효과가 더 크다고 하였다. 특히 수량성보다는 품질이 이양기 이동에 더 민감하다고 하였으며 결과적으로 이양기를 늦추는 것이 기후변화에 적절히 대응하는 것이라 하였다. 한편 Kobata & Uemuki (2004)는 재배 시기를 조정할 경우 출수 전 생육 단축에 따라 공급과 수용체(Source & Sink) 모두 감소

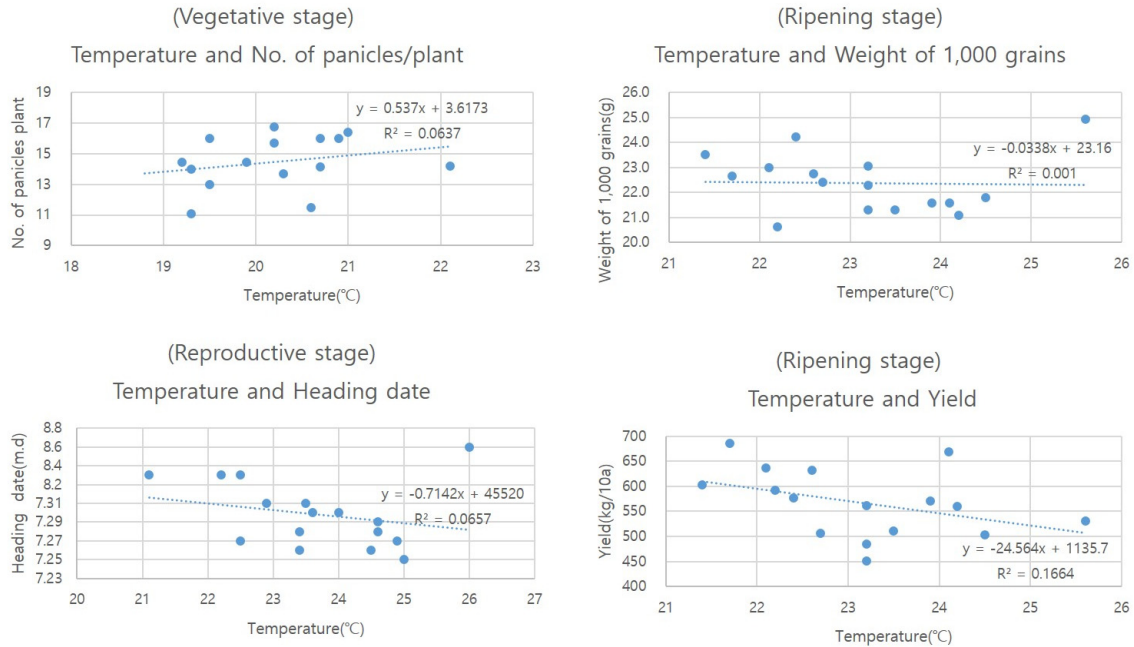


Fig. 5. Correlations of traits during the growth stage. Trends(slopes) are calculated according to the linear trend line.

하여 수량이 낮아질 가능성이 높다고 하였으며, 여러 상황을 고려할 때 재배 시기를 조정하는 것이 현재 조건으로 고정하는 것보다 유리한 것으로 판단되나 출수전 생육기간 감소로 수량 감소가 예측된다고 하였다. Hasegawa *et al.* (2009)은 벼 품질 및 생육 모델(PRYSB I) 시뮬레이션 결과 기후변화에 따른 벼 품질의 감소는 현재보다 이양기를 늦춤으로서 감소시킬 수 있다고 하였으며, 만약 이양기가 그대로 지속된다면 벼 수량은 증가할 것이라고 하였다. 따라서 이양기를 앞당기는 것은 온도상승 정도에 상관없이 벼 수량 감소를 줄이는 것이며, 결론적으로 벼 품질은 벼 수량보다 이양기 이동에 더 민감하기 때문에 이양기를 늦추는 것이 기후변화에 적응하는 적당한 방법이라고 하였다. Lee *et al.* (2011)은 미래 기후변화 및 그에 따른 재배 시기 조정이 벼 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향을 분석한 결과 최적 파종기는 생육기간이 짧은 조생종에서 비교적 늦고 중만생종에서 빠른 경향이였으며, 생태형에 상관없이 지구온난화가 진전될수록 최적 파종기가 늦어진다고 하였다. Kobata & Uemuki (2004)은 ORYZA 2000/AIB 시나리오에서 재배 시기를 고정하면 출수 이전에 비해 출수 이후 생육기간이 상대적으로 많이 짧아지고, 재배 시기를 조정하면 출수 후 생육기간의 변화 없이 출수전 생육기간이 크게 단축되며 등숙기 고온이 쌀 품질 향상을 위한 큰 제한요인이 된다고 하였다. Sato & Inaba (1976)는 재배 시기를 고정할 경우 출수 후 생육온도 상승으로 등숙기간이

단축되어 종실중이 작아진다고 하였으며, 고온장해에 따른 불임 증가로 수량 및 품질이 크게 저하되는 것이 보고되었다(Satake & Yoshida, 1978; Jagadish *et al.*, 2007). 다만, 본 시험에서 품질 관련 조사가 이루어지지 않아 보통기 및 만기 재배에 따른 품질변화 경향을 파악할 수는 없었다. 그러나 현재까지 보고된 기후변화와 관련한 많은 연구들에 기준하여 추정해 보면 중산간지대인 VI-1 지대에서도 점진적인 기온상승과 함께 등숙기 고온에 따른 품질이 낮아지는 경향을 보였을 것으로 판단된다.

본 실험에서 생육 기간중 온도상승과 함께 이양 시기에 상관없이 출수기가 단축되고 이삭수는 증가하나 천립중이 점차 감소 경향을 보였다. 이러한 경향은 6월 5일 이양보다 5월 20일 이양에서 그 변화가 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다(Table 4, Fig. 5). 이러한 결과를 통해 상주출장소가 포함된 VI-1 중산간지대에서는 기온상승에 따라 현재의 고온 등숙이 야기되는 5월20일 보통기 재배 대신 등숙기 온도가 상대적으로 낮은 6월 5일로 이양 시기를 조정함으로써 고품질·다수확 재배 효과를 꾀할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 현재의 보통기 이양기 조정 등에 대한 세부적인 영향 및 효과분석에 대한 시험연구가 필요할 것으로 보인다.

적 요

본 연구는 남부 중산간지에 위치한 국립식량과학원 상주

출장소에서 2007년부터 2022년까지 ‘오대’ 등 조생종 7품종을 재배하면서 생육 특성 및 수량성을 비교하고 재배 시기 조정 등 적극적인 기후변화 대응을 검토하고자 조사분석한 결과는 다음과 같다.

1. 벼 생육기간(5월~10월) 상주출장소 연평균 기온은 점차 상승하는 경향이었고 영양생장기(5.21~6.24) 보다 생식생장기(6.25~7.29) 및 등숙기(7.29~9.17)에서 온도 상승 경향이 컸다.
2. 조생종 등숙기간(7.29~9.17)의 평균기온은 23.2°C로 일 반계 최적 등숙 온도 20~22°C에 비해 상대적으로 등숙 온도가 높아 불리한 등숙 환경에 노출되어 있었다.
3. 조생종들의 출수기는 2012년 이후 크게 단축되는 경향을 보였으며 보통기(5.20) 및 만기(6.5) 재배에서 10일 정도 크게 단축되었다.
4. 조생종들의 생육 및 수량구성요소 특성에서 간장, 수장, 및 영화수 등 대부분 형질에서 연차간 변이가 크고 뚜렷한 경향은 없었으나, 이삭수는 이양 시기와 상관없이 전체적으로 증가하는 경향이었고 천립중은 감소하는 경향을 보였다.
5. 수량성의 경우 일부 년도를 제외하면 뚜렷한 수량 증감의 경향이 없이 보통기와 만기 재배에서 비슷한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 분얼수는 증가하였으나 천립중의 감소에 따른 결과로 보였다.
6. 기상변화에 따른 생육 및 수량과 품질에 대한 여러 변수들을 고려할 때 조생종 재배 지역인 중산간지역의 경우 현재의 보통기 이양기를 5월 20일에서 6월 5일로 조정하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

## 보충자료

본문의 인용된 보충자료는 한국작물학회지 홈페이지 (<https://www.croplbio.or.kr/>)에서 확인할 수 있습니다.

- Supplementary Table 1

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제명 : 남부지역 적응 밥쌀용 재배 안정성 벼 품종개발(3단계), 세부과제번호 : PJ016067032024)의 지원에 의해 이루어진 결과이며, 그동안 상주출장소에서 수고해 주신 모든 분들께 감사드립니다.

## 인용문헌(REFERENCES)

- An, S. I., K. J. Ha, K. H. Seo, S. W. Yeh, S. K. Min, and C. H. Ho. 2011. A review of recent climate trends and causes over the Korean peninsula. *Clim. Change Res.* 2(4) : 237-251.
- Cho, E. Y. 2009. The effects of climate change on agricultural production. MS dissertation. Sookmyung Women's University. Seoul, Korea. (in Korean with English abstract).
- Choi, K. J., T. S. Park, C. K. Lee, J. T. Kim, J. H. Kim, K. Y. Ha, W. H. Yang, C. K. Lee, K. S. Kwak, H. K. Park, J. K. Nam, J. I. Kim, G. J. Han, Y. S. Cho, Y. H. Park, S. W. Han, J. R. Kim, S. Y. Lee, H. G. Choi, S. H. Cho, H. G. Park, D. J. Ahn, W. K. Jung, S. I. Han, S. Y. Kim, K. C. Jang, S. H. Oh, W. D. Seo, J. E. Ra, J. Y. Kim, and H. W. Kang. 2011. Effect of temperature during grain filling stage on grain quality and taste of cooked rice in mid-late maturing rice varieties. *Korean J. Crop Sci.* 56(4) : 404-412.
- 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.
- Hasegawa T., T. Kuwagata, M. Nishimori, Y. Ishigooka, M. Murakami, M. Yoshimoto, M. Kondo, T. Ishimaru, S. Sawano, Y. Masaki, and H. Matsuzaki. 2009. Recent warming trends and rice growth and yield in Japan. In: *Proceeding of the MARCO Symposium*. Tsukuba, Japan: National Institute for Agro-Environmental Sciences. p. 51.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007 : Mitigation of climate change. contribution working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University press, Cambridge, New York, USA.
- Jagadish S. V. K., K. Sumfleth, G. Howell, E. Redona, R. Wassmann, and S. Heuer. 2010. Temperature effects on rice : significance and possible adaptation (pp. 19-26). In *Advances 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., P. Q. Craufurd, and T. R. Wheeler. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Exp. Bot.* 58: 1627-1635.
- Jeong, H. K., and J. H. Han. 2022. Analysis of farmers perceptions of extreme climate events. *Journal of Climate Research* 13(5) : 649-658.
- Kim, C.G. 2010. Weather impacts on rice production in Korea. *Korean Journal of Agricultural management and Policy* 37(4) : 621-642.
- Kim, H. Y., T. Horie, H. Nakagawa, and K. Wada. 1996. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and high temperature on growth and yield of rice. II. The effect on yield and its components. *Jap. J. Crop Sci.* 65 : 644-651.
- Kim, J. H., W. G. Sang, P. Shin, H. S. Cho, M. C. Seo, B. G. Yoo, and K. S. Kim. 2015. Evaluation of regional climate scenario

- data for impact assessment of climate change on rice productivity in Korea. *J. Crop Sci. Biotech.* 18(4) : 257-264.
- Kim, S. M., J. H. Hwang, J. W. Han, and K. S. Kim. 2020. A panel analysis on the locality of paddy rice yield's response to temperature conditions: The case of South Korean municipalities. *Journal of Climate Change Research* 11(6-1) : 597-607.
- Kim, Y. S., K. M. Shim, M. P. Jung, I. T. Choi, and K. K. Kang. 2016. Classification of agroclimatic zones considering the topography characteristics in South Korea. *Journal of Climate Change Research* 7(4) : 507-512.
- Kim, Y. U., K. H. Moon, and B. W. Lee. 2021. Climatic constraints to yield and yield components of temperate japonica rice. *Agron. J.* 13 : 3489-3497.
- Kobata T. and N. Uemuli. 2004. High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. *Agron. J.* 96 : 406-414.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2020. Climate data portal. <http://www.climata.go.kr/>. Last accessed on June 23, 2020.
- Krishnan P., D. K. Swan, C. Bhaskar, S. K. Nayak, and R. N. Dash. 2007. Impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122 : 233-242.
- Kwak, T. S. and J. H. Yeo. 2004. Varietal variation of yield related and growth analysis related characters in rice based on ecological traits. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 16(2) : 143-149.
- Lee, C. K., J. H. Kim, J. Y. Shon, W. H. Yang, Y. H. Yoon, K. J. Choi, and K. S. Kim. 2012. Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 14(4) : 207-221.
- Lee, C. K., K. S. Kwak, J. H. Kim, J. Y. Son, and W. H. Yang. 2011. Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and temperature in different rice maturity types. *Korean J. Crop Sci.* 56(3) : 233-243.
- Lee, E. P., R. H. Jang, K. T. Cho, and Y. H. You. 2014. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and increased temperature on the growth and crop yield of rice (*Oryza sativa*) cultivars in Korea -cv. Odaebyeo and cv. Saechucheongbyeo-. *Journal of Wetlands Research* 16(4) : 363-370.
- Lee, G. K., J. Y. Son, B. Gu, and Y. J. Mo. 2013. Investigation of rice yield and quality change and development of adjustment technique to climate change (in Korean with English abstract). Jeonju, Korea: Rural Development Administration, Research Report.
- Lee, J. H. 2014. Evaluation of impact on the essential problem according to the new scenario of climate change. RDA Research Report, 2014.
- Lee, S. K. and K. H. Kim. 2018. Predicting potential epidemics of rice leaf blast disease using climate scenarios from the best global climate model selected for individual agro-climatic zones in Korea. *Journal of Climate Change Research* 9(2) : 133-142.
- Lee, Y. S. and S. H. Lee. 2008. The impacts of climate change on rice yield. *Korean J. Geography* 12(3) : 405-416.
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). 2004. Development of technology for calculating regional climate scenarios in response to the climate change agreement (III). Meteorological Laboratory Report, MR040C03. 510p.
- Okada M., T. Ilzumi, Y. Hayashi, and M. Yokozawa. 2011. Projecting climate change impacts both on rice quality and yield in Japan. *J. Agric. Meteorol.* 67(4) : 285-295.
- Peng, S., J. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 101(27) : 9971-9975.
- Richard S. J. Tol. 2009. The economic effects of climate change. *Journal of economic perspectives* 23(2) : 29-51.
- Rural Development Administration (RDA). 2022. Project plant for collaborative research program to develop new variety summer crop. pp. 3-66.
- Satake T. and S. Yoshida. 1978. High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. *J. Crop Sci.* 47 : 6-17.
- Sato K. and K. Inba. 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.
- Shin, J. C., C. G. Lee, Y. H. Yoon, and Y. S. Kang. 2000. Impact of climate variability and change on crop productivity. Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference. The Korean Society of Crop Science, Sangnokresort, Chungju, Korea. pp. 12-27.
- Shin, J. H., C. M. Han, J. B. Kwon, and S. K. Kim. 2019. Effect of climate on the yield of different maturing rice in the yeongnam inland area over the past 20 years. *Korean J. Crop Sci.* 64(3) : 193-203.
- 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. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. 75p.
- Yun, S. H. 1986. Crop research in southern mid-mountain area. Annual research report for 1986. Yeungnam crop experiment station.
- Yun, S. H. and J. T. Lee. 2001. Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3.1 : 55-70.
- Yun, S. H., J. N. Im, J. T. Lee, K. M. Shim, and K. H. Hwang. 2001. Climate change and coping with vulnerability of agricultural productivity. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(4) : 220-227.
- Zhang Z., P. Wang, Y. I. Chen, X. Song, X. Wei, and P. Shi. 2014. Global warming over 1960-2009 did increase heat stress and reduce cold stress in the major rice-planting areas across China. *Eur. J. Agron.* 59 : 49-56.