

경북 내륙 지역 과거 25년간 기후와 일품벼 수량 변화

신종희^{1,†} · 한채민¹ · 권중배² · 김종수² · 김상국³

Effect of Climate on the Yield of 'Ilpum' Rice Cultivar in Gyeongbuk Province, South Korea over the Past 25 Years

Jong-Hee Shin^{1,†}, Chae-Min Han¹, Jung-Bae Kwon², Jong-Su Kim², and Sang-Kuk Kim³

ABSTRACT 'Ilpum', a Korean short-grain mid-late maturing rice cultivar, was developed in 1990, more than 30 years ago. Despite its age, it has been the most widely grown cultivar in the Gyeongbuk province of South Korea for more than 25 years, making it the most important rice cultivar for the people of the Gyeongbuk province. The aim of this study was to analyze the relationship between the rice yield of "Ilpum", the main rice cultivar in the Gyeongbuk province, and climate elements in the Daegu (southern plain area) and the Andong (inland mountainous area) regions in Gyeongbuk, South Korea. The rice yield over the past five years increased by about 13% and 24%, compared to that produced in the late 1990s in Daegu and the early 2000s in the Andong region, respectively. The number of panicles per hill and the grain ripening rate significantly affected rice yield in the 'Ilpum' cultivars in the Daegu region. The faster heading was a factor in the increase in 'Ilpum' rice yield in the Andong region. The air temperature has been rising and sunshine duration has been increasing from the late 1990s to present in both regions. Rice yield was evaluated to understand the effect of climate factors. The rice yields increased owing to the long sunshine duration during the grain-filling stage in both regions. In Andong, increasing the maximum temperature during the vegetative stage increased rice yield. Rising air temperature during the reproductive stage also increased rice yield. In particular, long sunshine hours throughout the whole rice growing period increased the rice yield of this cultivar in the Andong region.

Keywords : climate, grain yield, rice

일품벼는 1990에 육성된 품종으로 1996년 101천 헥타르 재배를 최대로, 1993년부터 우리나라에서 가장 많이 심은 5개의 품종에 속한다. 특히 경북지역에서 25년간 꾸준히 주요 품종으로 재배되고 있으며, 최근 52천 헥타르로 경북지역 논면적의 54.3% 정도 재배되고 있다(농촌진흥청 통계자료). 온도, 일조시간 등의 기상 요인은 벼의 수량과 쌀 품질에 영향을 미친다. 전 세계적인 기온상승은 중위도 지대와 고위도지대에서 CO₂의 증가, 강수량 변화와 함께 벼를 비롯한 옥수수, 밀 등의 주요 작물의 수량이 증가하고(Easterling *et al.*, 2007),

저위도 지역에서는 기온이 1°C~3°C 상승할 경우 수량이 감소할 것으로 예상된다(Easterling *et al.*, 2007). Sinnerong *et al.* (2019)은 1989년부터 2009까지 태국의 기후변화에 따른 쌀 생산량을 조사한 결과 기온이 높아짐에 따라 평균 생산량은 4.56~33.77% 줄어들고 쌀 생산성 변이 폭은 3.87~15.70% 커진다고 하였다. 사실상 모든 주요 식량작물 생산 증가율이 이미 감소하고 있다(Fischer & Edmeades, 2010).

쌀 수량과 품질은 온도 중에서 특히 벼의 등숙기 평균기온에 영향을 받으며 일조시간이 부족하면 현미 천립중이

¹경상북도농업기술원 작물연구과 농업연구사 (Agriculture Researcher, Division of Crop Research, Gyeongsangbuk-do Provincial Agricultural Research and Extension Services, Daegu 41404, Republic of Korea)

²경상북도농업기술원 작물연구과 농업연구관 (Agriculture Senior Researcher, Division of Crop Research, Gyeongsangbuk-do Provincial Agricultural Research and Extension Services, Daegu 41404, Republic of Korea)

³경상북도농업기술원 생물자원연구소 농업연구관 (Agriculture Senior Researcher, Bioresources Research Institute, Gyeongsangbuk-do Provincial Agricultural Research and Extension Services, Andong 36614, Republic of Korea)

[†]Corresponding author: Jong-Hee Shin; (Phone) +82-53-320-0271; (E-mail) szzong91@korea.kr

<Received 18 August, 2020; Revised 28 October, 2020; Accepted 5 November, 2020>

줄어든다고 하였는데 긴 일조시간이 동화 산물 생산량을 증가시키기 때문이다(Choi *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 1996). 이는 지구 온난화로 고온에 의한 쌀 수량, 품질에 미치는 부정적인 측면뿐만 아니라, 벼의 등숙기간 동안 일조시간 증가에 따른 긍정적인 측면을 보여주는 연구결과라 할 수 있다. 빛은 식물의 광합성과 형태 발생에 필수적인 환경요소로 작물의 수량에 결정적인 영향을 미친다(Evan & Datta, 1979; Yang *et al.*, 2007). 벼의 생육에서 일사량 부족은 분얼 발생 억제 및 지연(Nakano, 2000), 영화 형성 감소(Biswas & Saloheke, 2002; Yao *et al.*, 2000), 등숙비율 저하(Yang *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2014), 엽록소 축적(Makino *et al.*, 1997) 및 물질 분배(Gibson *et al.*, 2004) 등과 연관되어 수량 저하의 주요인으로 보고되고 있다. 변화하는 기후에 대한 작물의 적응은 재배시기와 수확시기 조절, 재배지 변화, 내성품종 도입, 시비량과 시비시기 조절, 물관리, 기상예측을 통한 작물보호 등 광범위한 분야를 포함한다(Howden *et al.*, 2007). 따라서 본 연구에서 경북지역의 주요 벼 품종으로 오랜 기간 동안 재배되어 그 재배법이 정착된 일품의 수량과 수량구성요소, 기상요소 사이의 상관관계를 조사하기 위하여 수년간 동일 포장에서 동일한 재배법으로 생산된 일품벼의 수량을 바탕으로 기후변화가 일품벼 수량에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

경상북도 지역 주요 벼 품종인 일품벼의 쌀 수량 변화 추이를 분석하고, 기온과 일조시간 등의 기상요소가 쌀 수량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 지난 25년(1995~2019)간 대구와 안동 지역 작황, 지역적응시험에서 도출된 쌀수량과 그 기간 기상자료를 분석하였다. 벼의 수량성에 관련된 수량구성요소 및 기상요소와의 상관성을 조사하기 위해서 지역별, 생육단계별 기상요인을 분석하여 비교하였다.

기상자료 분석

기상청이 제공하는 1995부터 2019년까지 25년간의 대구, 안동지역의 기상자료를 농업기상자료로 이용하였다. 벼이앙이 이루어진 5월 하순부터 10월 상순까지의 기온, 일조시간 및 강수량을 기본 자료로 활용하였다. 각 지역 작황 포장에서 시험 재배된 일품벼의 평균 출수기를 참고하여 영양생장기, 생식생장기, 등숙기로 구분하여 생육단계별 기온과 일조시수가 수량에 미치는 영향을 조사하였다. 대구의 경우 본포 생육 시작되는 6월 1일부터 7월 10일까지를 영양생장기로, 8월 15일까지를 생식생장기, 출수이후 50일

정도를 등숙기로 기온(평균, 최고, 최저), 누적일조시간, 강수량을 분석하였다. 안동지역 5월 21부터 7월 10일까지를 영양생장기, 7월 11일부터 8월 15일까지를 생식생장기, 8월 16일부터 10월 5일까지를 등숙기로 구분하여 기상자료를 분석하였다.

시험재료 재배 조건

대구지역의 경우 동일한 조건에서 동일재배법으로 25년간 시험 재배한 일품벼의 수량을 분석하였으며, 안동지역의 경우는 19년간의 수량을 수집하여 분석하였다. 벼 재배는 대구광역시 북구에 위치한 경상북도농업기술원 논 포장과 안동시 북후면에 위치한 경상북도농업기술원 생물자원연구소의 논 포장에 농촌진흥청 표준재배법에 따라 대구는 5월 30일, 안동은 5월 20~25일에 재식거리 30×14~15 cm로 이앙하여 표준시비(1999년~2004년: N-P₂O₅-K₂O = 11-4.5-5.7 kg/10a, 2005년~2018년: N-P₂O₅-K₂O = 9-4.5-5.7 kg/10a)하였다. 수확과 동시에 잔여 식물체는 파쇄하여 토양에 재투입 하였으며, 별도의 유기물은 사용하지 않았다.

농업적 형질 및 수량 구성요소

포기당 이삭수, 이삭당 낱알 수, 등숙률, 정현비율, 현미 천립중 및 백미 수량 등의 특성은 농촌진흥청 연구조사 분석기준에 따라 조사하였다. 출수 후 50~60일이 경과한 시점에서 각각의 품종을 수확한 후 수분함량을 15%로 조절하여 현미기(SYTH-88, 쌍용)를 이용하여 제현 하였고, 백미기(Satake, Japan)를 이용하여 10분도로 도정하여 수량분석 시료로 사용하였다. 모든 시료는 3반복으로 측정 하였다. 동일한 포장에 동일한 재배기술로 생산한 일품벼의 백미 수량에 대하여 해당년도의 수량구성요소 또는 기상요소에 대해 회귀분석을 통하여 각 요소의 상관관계를 분석 하였다.

결과 및 고찰

과거 25년간 경북 내륙 지역 기후변화

영남 내륙지역에 포함된 대구와 경상북도 안동 지역 벼 재배기간 중 기후변화와 이에 따른 일품벼 수량성 변화를 조사하기 위하여 1995년부터 2019년까지 25년간 영남평야 지인 대구지역과 남부중산간지인 경상북도 안동지역의 기온, 강수량 및 일조시간의 변화를 분석하였다. 과거 25년간 대구, 안동지역의 강수량은 감소한 반면 누적 일조시수는 현저하게 증가하였는데 특히 안동지역의 일조시수의 증가 폭이 컸다(Fig. 1). 일품벼 평균 출수기를 기준으로 생육 시

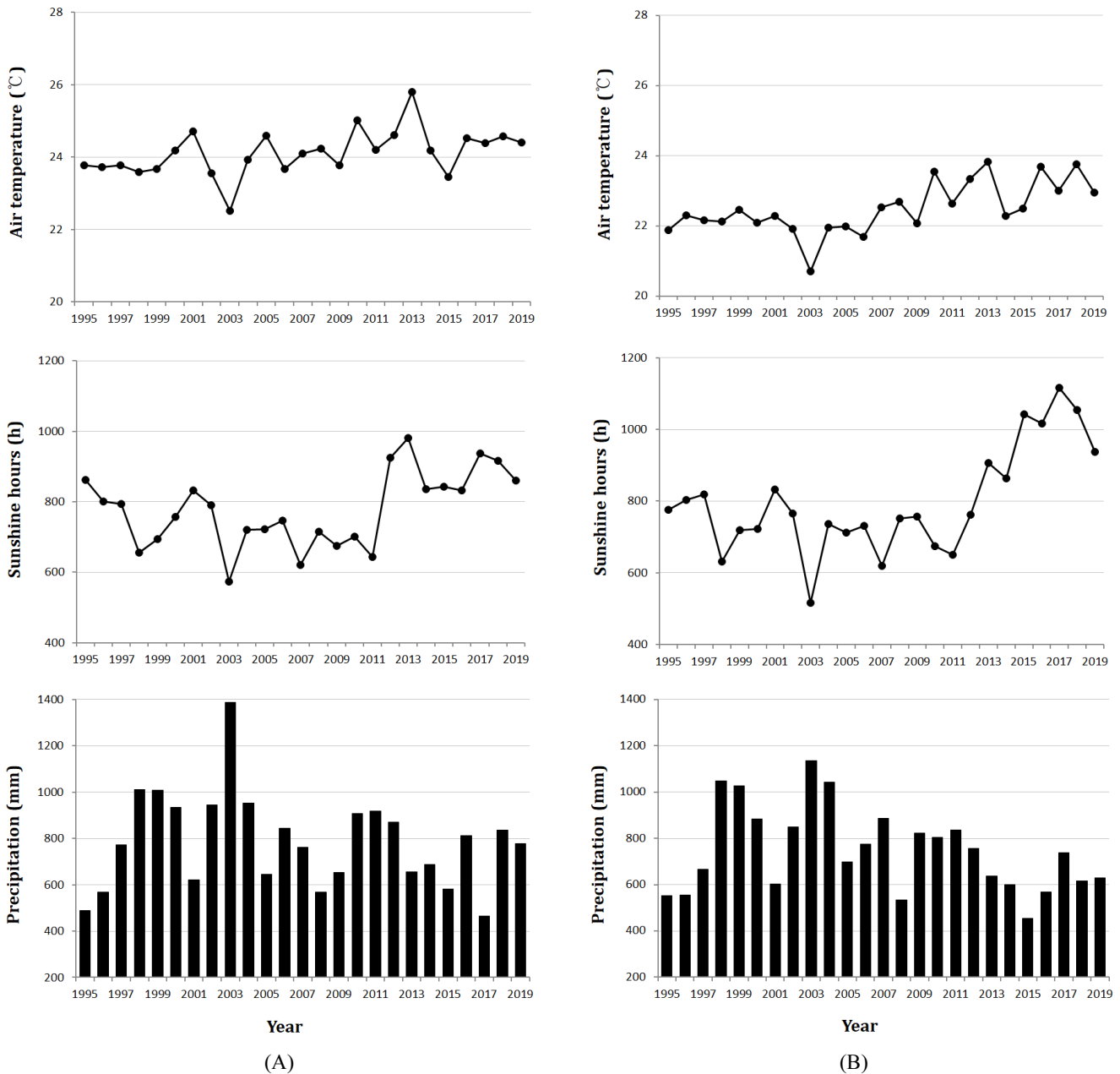


Fig. 1. Changes in air temperature, accumulated sunshine hours, and precipitation amount during the rice growth period in the Daegu (A) and Andong (B) regions over 25 years.

기별 기온 변화를 분석한 결과(Fig. 2), 대구지역의 경우 벼 생육기간인 6월 1일부터 10월 10일까지 평균기온이 0.4°C/10년 정도로 증가하였는데, 생식생장기간(7월 11일~8월 15일)의 최고기온 상승폭이 0.9°C/10년으로 가장 컸다. 반면 등숙기 기온은 과거 25년간 0.1°C/10년으로 변화 폭이 적었다. 비교적 기온이 높은 대구지역에서 등숙기 기온의 상승폭이 그다지 높지 않았다는 점이 전반적인 기온상승에도 불구하고 이지역의 수량이 감소하지 않은 주요 요인으로

평가 되었다. 안동의 경우는 대구지역보다 기온 상승 폭이 커서 벼 생육기간 평균기온이 0.6°C/10년으로 대구 보다 상승폭이 컸다. 생식생장기(7월 11일~8월 15일) 최고기온의 상승폭이 1.0°C/10년으로 컸고, 이 기간 최저기온의 상승폭도 0.8°C/10년으로 대구에 비해 컸다. 안동지역의 등숙기 기온은 영양생장기와 생식생장기보다는 상승폭이 적었지만 대구지역보다는 컸는데, 대구지역보다 등숙기 평균기온이 2~3°C정도 낮은 안동지역의 경우 등숙기의 기온상승

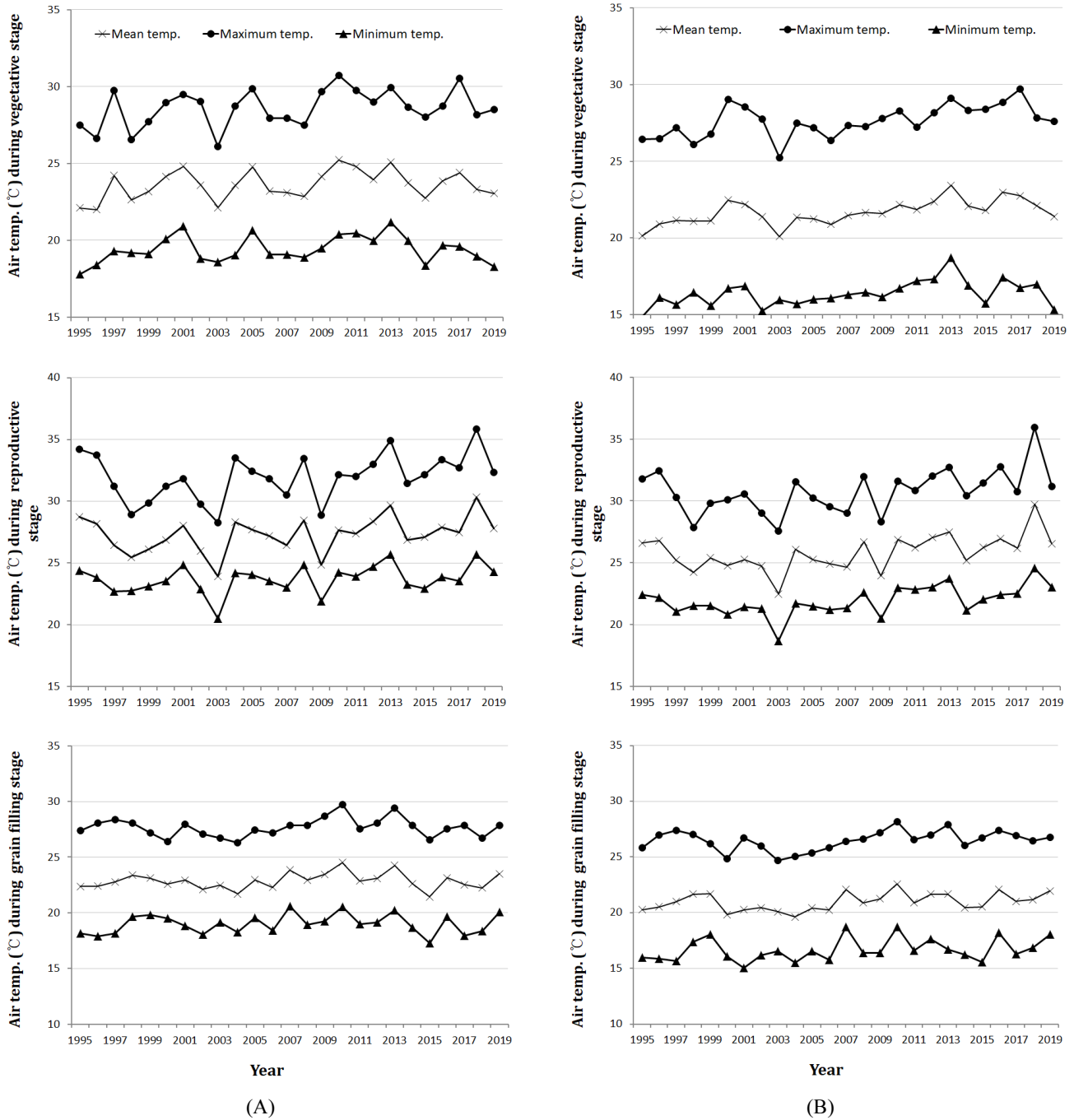


Fig. 2. Air temperature changes by growth stage of mid-late maturing rice cultivars in the Daegu (A) and Andong (B) regions over 25 years.

은 수량의 증가에 긍정적인 영향을 미쳤고 또한 앞으로 일정기간 동안 수량의 증가에 기여할 것으로 예측되었다. 벼 생육단계별로 누적 일조시수를 분석한 결과(Fig. 3), 두 지역에서 모두 증가하였다.

Peng *et al.* (2004)은 1992~2003년 동안 필리핀의 국제미작연구소(IRRI)에서 수행한 실험 결과, 생육기간 최저온

도가 1°C 상승함에 따라 벼 수량이 10% 감소했다고 보고한바 있지만, Easterling *et al.* (2007)은 전 세계적인 기온상승은 중위도 지대에서 고위도지대에서 CO₂의 증가, 강수량 변화와 함께 벼를 비롯한 옥수수, 밀 등의 주요 작물의 수량이 증가한다고 하였다. 우리나라에서의 벼 최적 등숙온도는 출수 후 40일간의 일평균 기온으로 결정하는데, 자포니

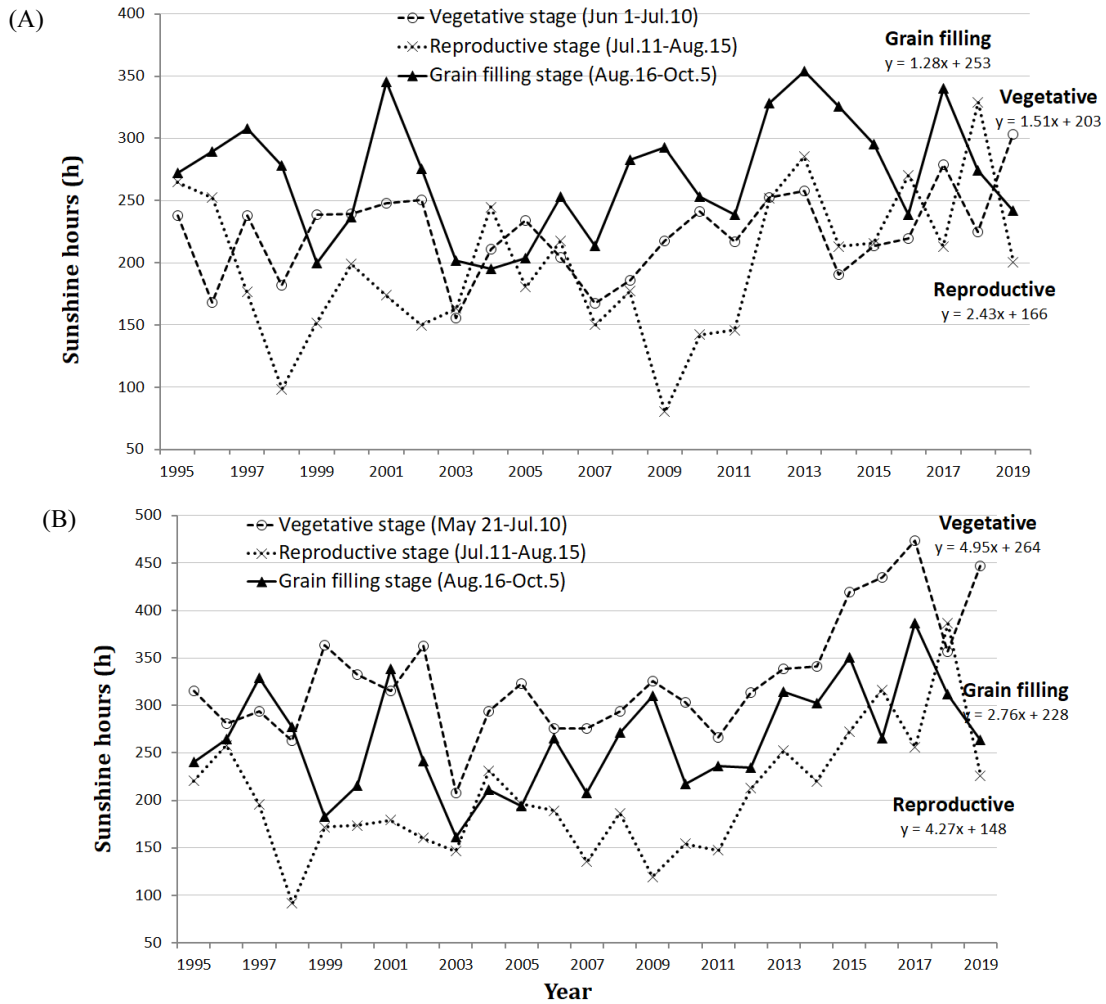


Fig. 3. Changes in accumulated sunshine hours by growth stage of mid-late maturing rice cultivars in the Daegu (A) and Andong (B) regions over 25 years.

카 벼의 최적 등숙온도는 21~23°C이다(Rural Development Administration, 1981). 그러나 앞으로 기후변화에 따라 온도가 상승한 조건에서도 현재의 벼 품종을 지속적으로 재배하게 되면 최적 등숙온도 보다 높아지므로 수량성이 감소하고 품질은 나빠질 가능성이 크다. 이는 등숙기 평균기온이 22~24°C 정도인 대구지역의 경우 우려되는 요소이며, 반면 등숙기 평균기온이 19~22°C 정도인 안동의 경우는 등숙기 기온상승에 따른 수량과 미질 상승효과가 기대된다.

과거 25년간 경북 내륙 지역 일품벼의 수량변화

대구지역의 경우 1995년부터 2019년까지 25년간, 안동지역의 경우 2001년부터 2019년까지 19년간 동일 포장에서 동일 재배법으로 재배된 일품벼의 수량 변화를 조사한 결과(Fig. 4), 대구지역에서 일품벼의 수량성은 최근 10년 수량성이 증가하여 1990년대 후반부의 5년 평균보다 최근

5년 간 평균수량이 13% (616 kg/10a) 정도 현저한 수량 증가를 보였다. 안동에서의 수량 증가폭은 대구지역보다 컸으며 2000년대 초반보다 최근 5년간 평균수량이 24% 정도 증가하였다. 2003년과 2007년의 저온과 강우에 따른 수량성 저하는 대구지역보다 안동지에서 현저하였는데, 기상재해로 인한 이들 년도의 수량 성적을 제외한 수량 자료로 판단하더라도 2지역 모두 수량성이 유의하게 증가하였다. 시험지역의 질소 시비량이 2005년을 기점으로 11 kg/10a에서 9 kg/10a로 감소된 점을 고려한다면 최근 기상변화에 따른 수량 증가효과는 더욱 큰 것으로 평가할 수 있다. 과거 20년간 기온상승과 더불어 출수기의 변화도 관찰 되었는데 (Fig. 5), 지역과 벼 성숙특성에 관계없이 출수기가 빨라지는 경향이었다. Easterling *et al.* (2007)은 세계적인 기온상승은 중위도 지대와 고위도지대에서 CO₂의 증가와 함께 벼의 수량을 높인다고 하였다.

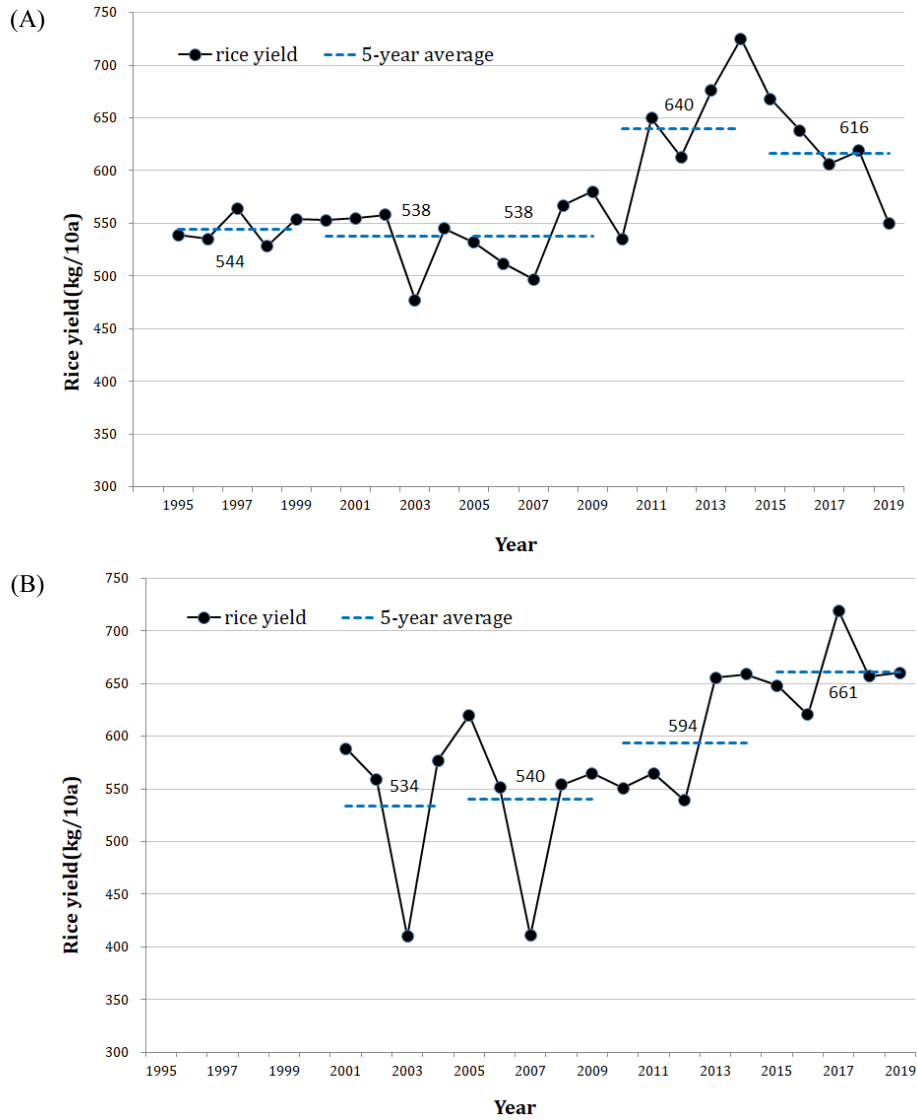


Fig. 4. Changes in the milled rice yield of the ‘Ilpum’ rice cultivar grown in the Daegu(A) and Andong(B) regions over the past 19-25 years.

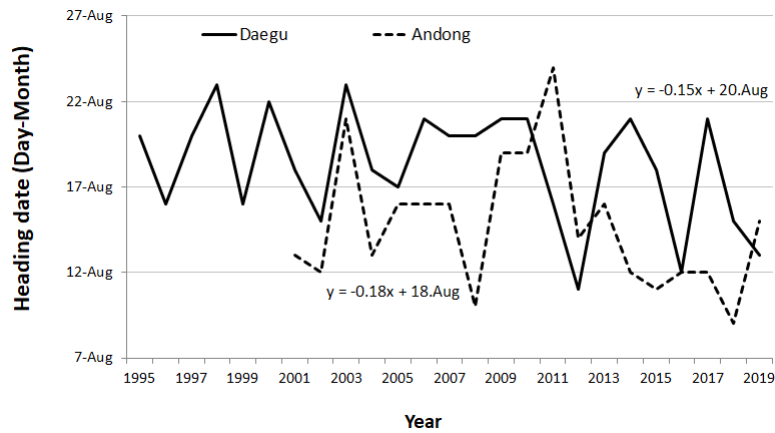


Fig. 5. Changes in the heading date of the ‘Ilpum’ rice cultivar grown in the Daegu and Andong regions over the past 19-25 years.

경북 내륙 지역 일품벼 쌀 수량과 수량구성요소의 상관관계
 쌀 수량은 포기당 이삭수, 이삭당 낱알수, 낱알 무게, 등숙비율의 수량구성요소로 이루어진다. 과거부터 현재까지 대구와 안동지역 일품 벼 수량에 유의하게 영향을 미친 수량구성요소를 파악하기 위하여 쌀 수량과 수량구성요소와

의 관계를 분석하였다(Table 1). 대구지역의 경우 포기당 이삭수와 등숙율의 증가가 수량증가의 주요 요인으로 작용하였으며, 안동의 경우 정현비율의 증가가 주요 요인이며, 빨라진 출수기도 수량성 증가에 5% 유의수준에서 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 1. Yield components affecting milled rice yield of the ‘Ilpum’ rice cultivar in the Daegu and Andong regions over the past 19-25 years.

Region	Heading date	Panicle length	Panicles per plant	Spikelets per panicle	Percent ripened grain	Husking recovery	1,000 grain weight of brown rice
Daegu	- 0.27 [†]	0.13	0.45*	0.32	0.43*	0.36	0.39
Andong	- 0.48*	0.09	0.37	- 0.22	0.33	0.54*	0.40

[†]The values are correlation coefficients of each yield component affecting rice yield.

*, ** Significant at the 5% and 1% levels, respectively, compared with each component and milled rice yield.

Table 2. Comparison of climate factors during the rice growth period affecting milled rice yield and yield components of the ‘Ilpum’ rice cultivar in the Daegu region over the past 25 years.

Growth characteristic and yield component	Growth stage	Temperature (°C)			Sunshine hours (h)
		Mean	Max.	Min.	
Heading date	Vegetative [†]	- 0.06 [‡]	- 0.11	0.02	- 0.40*
	Reproductive	- 0.44**	- 0.41	- 0.44*	- 0.41*
Panicle length	Vegetative	0.26	0.31	0.19	0.47*
	Reproductive	0.34	0.30	0.36	0.21
Percent ripened grain	Vegetative	0.12	0.19	0.07	0.41*
	Reproductive	0.09	0.07	0.14	- 0.04
	Grain filling	0.11	0.36	-0.19	0.65**
Husking recovery	Total	0.15	0.27	-0.01	0.43*
	Vegetative	0.21	0.16	0.29	0.39
	Reproductive	0.24	0.18	0.31	0.24
	Grain filling	0.28	0.20	0.21	0.40*
1,000 grain weight of brown rice	Total	0.35	0.26	0.37	0.47*
	Vegetative	0.39	0.44*	0.31	0.36
	Reproductive	0.36	0.39	0.30	0.38
	Grain filling	- 0.09	- 0.03	-0.06	0.07
Milled rice yield	Total	0.34	0.42*	0.23	0.39
	Vegetative	0.35	0.36	0.35	0.22
	Reproductive	0.36	0.38	0.33	0.37
	Grain filling	- 0.06	0.12	-0.20	0.54**
Total	Total	0.34	0.44*	0.19	0.56**

[†]Each growth stage indicates the following periods June 1-July 10 (vegetative stage), July 11-August 15 (reproductive stage), August 16-October 5 (grain filling stage), and June 1-October 5 (total growth stage).

[‡]The values are correlation coefficients of each climate factor affecting rice yield.

*, ** Significant at the 5% and 1% levels, respectively, compared with each climate factor and milled rice yield.

Table 3. Comparison of climate factors during the rice growth period affecting milled rice yield and yield components of the 'Ilpum' rice cultivar in the Andong region over the past 19 years.

Growth characteristic and yield component	Growth stage	Temperature (°C)			Sunshine hours (h)
		Mean	Max.	Min.	
Heading date	Vegetative [†]	- 0.31 [‡]	- 0.44	0.05	- 0.55*
	Reproductive	- 0.46*	- 0.51*	- 0.34	- 0.66**
Panicle length	Vegetative	0.13	0.13	- 0.18	0.39
	Reproductive	0.44	0.36	0.49*	0.28
Percent ripened grain	Vegetative	0.68**	0.64**	0.54*	0.37
	Reproductive	0.32	0.23	0.44	0.05
	Grain filling	0.58**	0.74**	0.28	0.57*
Husking recovery	Total	0.61**	0.61**	0.55*	0.38
	Vegetative	0.55*	0.46*	0.46*	0.36
	Reproductive	0.67**	0.59**	0.72**	0.42
	Grain filling	0.47*	0.50*	0.31	0.40
1,000 grain weight of brown rice	Total	0.70**	0.64**	0.66**	0.47*
	Vegetative	0.52*	0.56*	0.37	0.28
	Reproductive	0.18	0.21	0.17	0.17
Milled rice yield	Grain filling	0.18	0.41	0.04	0.35
	Total	0.34	0.45	0.24	0.31
	Vegetative	0.59**	0.70**	0.22	0.79**
Milled rice yield	Reproductive	0.57*	0.55*	0.56*	0.65**
	Grain filling	0.02	0.34	- 0.24	0.72*
	Total	0.49*	0.66**	0.21	0.86**

[†]Each growth stage indicates the following periods May 21-July 10 (vegetative stage), July 11-August 15 (reproductive stage), August 16-October 5 (grain filling stage), and May 21-October 5 (total growth stage).

[‡]The values are correlation coefficients of each climate factor affecting rice yield.

*, ** Significant at the 5% and 1% levels, respectively, compared with each climate factor and milled rice yield.

경북 내륙 지역 일품벼 쌀 수량과 기후요소의 상관관계

벼 생육단계별 온도와 일조시간이 일품벼 수량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1995년부터 2019년까지 25년간의 일품벼 쌀 수량과 생육단계(영양생장기, 생식생장기, 등숙기)별로 그 기간의 기상요인을 비교 분석하였다(Tables 2 & 3). 대구지역에서 재배된 일품벼의 쌀 수량 증가는 주로 등숙 관련 수량구성요소의 증가에 기인한 것으로 판단되었는데(Table 1), 등숙기의 일조시수 증가와, 생식생장기 기온 상승이 수량성 증가에 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. Lee & Lee (2008)의 보고에서 낱알 무게와 등숙기의 기후요소와의 관계를 분석한 결과 기후요소 중 기온만이 낱알무게와 유의한 관계가 있었다고 보고한 결과와는 다소 차이를 보였다. 통계적 유의성은 없었지만 중만생종인 일품벼의 현미천립중, 쌀수량 등의 요소는 대구지역에서 온

도 상승은 부의 상관관계를 보였는데 이는 생육 전반 높은 기온을 유지하는 대구지역의 경우 등숙기의 온도 상승은 수량을 감소시키는 원인이 된 것으로 판단되었다. 안동지역 일품벼의 수량은 영양생장기의 최고기온과 양의 상관관계를 보이며 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하였다. 생육전반의 일조시수의 증가 또한 수량 증가의 요인으로 판단되었다. 생식생장기의 기온의 상승과 증가한 일조시수는 출수가 빨라지는데 영향을 미친 것으로 나타났다. Lee *et al.* (2013)이 1993년부터 2012년까지 20년간 밀양지역에서 쌀 수량을 분석한 결과, 평균수량을 나타내는 2000년과 이보다 10% 증수한 2001년의 경우 이들 차이는 등숙기 일교차가 크고 일조시간이 많아졌기 때문인 것으로 보고하였고, 이는 등숙비율이 높아 수량이 증가하였다고 하였다.

적 요

본 연구는 경상북도 지역 주요 벼 품종인 일품벼 수량에 영향을 미치는 수량구성요소와 기상요소를 파악하고자 하였다. 과거 25년간 대구, 안동 지역의 기상변화를 분석한 결과 벼 재배기간 중 평균기온은 대구지역은 +0.4°C/10년, 안동지역은 +0.6°C/10년의 상승폭을 보였다. 이는 생식생장기의 기온상승이 주요 원인으로 분석되었다. 강수량은 감소한 반면 누적 일조시수는 현저하게 증가하였는데 특히 안동지역의 일조시수 증가 폭이 컸다. 대구와 안동지역의 일품벼 쌀 수량성은 꾸준히 증가하여 대구의 경우 1990년 후반 5년 평균 수량보다 최근 5년 간 평균수량이 13%, 안동지역은 2000년 초반 수량의 24% 정도 현저한 수량 증가를 보였다.

일품벼 수량과 수량구성요소의 관계를 분석한 결과 대구 지역 수량 증가는 포기당 이삭수와 등숙율의 증가가 주요 요인으로 작용하였으며, 안동의 경우는 정현비율의 증가와 빨라진 출수기가 수량증가의 요인으로 분석되었다. 벼 수량과 기후요소와의 상관관계를 분석한 결과 대구지역에서 재배된 일품벼의 쌀 수량은 등숙기의 일조시수와 높은 상관성을 보였다. 안동지역은 영양생장기 최고기온과 생육전반 일조시수의 증가가 쌀수량에 유의한 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제명: 기후변화에 따른 남부 중산간지대 벼의 적응-비적응 생산량 영향평가 연구, 세부과제 번호 : PJ01508603)의 지원에 의해 이루어진 결과의 일부이며, 본 연구사업 수행에 협조해 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

인용문헌(REFERENCES)

Biswas, P. K. and V. Salokhe. 2002. Effect of N rates, shading, tiller separation, and plant density on the yield of transplanted rice. *Tropical Agric.* 79 : 168-172.

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. Joung, 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.

Easterling, W. E., P. K. Aggarwal, P. Batima, K. M. Brander, L. Erda, S. M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J. F. Soussana, and J. Schmidhuber. 2007. Food, fiber and forest products. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller, eds, *Climate change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, pp. 273-313.

Evan, L. T. and S. K. De Datta. 1979. The relationship between irradiance and grain yield of irrigated rice in the tropics, as influenced by cultivar, nitrogen fertilizer application and month of planting. *Field Crops Res.* 2 : 1-17.

Fischer, R. A. and G. O. Edmeades. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50 : 85-98.

Gibson, K. D., A. J. Fischer, and T. C. Foin. 2004. Compensatory responses of late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*) and rice to resource limitations. *Weed Sci.* 52(2) : 271-280.

Howden, S. M., J. F. Soussana, F. N. Tubiello, N. Chhetri, M. Dunlop, and H. Meinke. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 : 19691-19696.

Kim, K. Y., J. C. Ko, W. C. Shin, H. S. Park, M. K. Baek, J. K. Nam, B. K. Kim, and J. H. Lee. 2014. Effect of low radiation during grain filling stage on rice yield and grain quality. *Korean J. Crop Sci.* 59(2) : 174-180.

Lee, J. I., J. K. Kim, J. C. Shin, E. H. Kim, M. H. Lee, and Y. J. Oh. 1996. Effects of ripening temperature on quality appearance and chemical quality characteristics of rice grain. *RDA. J. Agri. Sci.* 38(1) : 1-9.

Lee, J. S., J. H. Lee, M. R. Yoon, J. Kwak, Y. J. Mo, A. Chun, and C. K. Kim. 2013. Palatability and physicochemical properties in 2001 yield increased by 10% than normal level in 2000. *Korean J. Crop Sci.* 58(3) : 292-300.

Makino, A., T. Sato, H. Nakano, and T. Mae. 1997. Leaf photosynthesis and nitrogen allocation in rice under different irradiance. *Planta.* 2003(3) : 390-398.

Nakano, H. 2000. Effect of early stage shading of directed-seeded rice on growth and yield components. *Jpn. J. Crop Sci.* 69(2) : 182-188.

Peng, S. B., J. L. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. H. 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 : 9971-9975.

Rural Development Administration. 1981. Low temperature damage and its comprehensive technical measures in rice. p. 168.

Sinarong, N., C. C. Chen, B. McCarl, and B. L. Tran. 2019. Estimating the potential effects of climate change on rice production in Thailand. *Paddy and Water Environment* 17 :

- 761-769.
- Yang, W. H., S. Peng, and M. L. Dionsio-Sese. 2007. Morphological and photosynthetic responses of rice to low radiation. *Korean J. Crop Sci.* 52(1) : 1-11.
- Yao, Y., Y. Yamamoto, T. Yoshida, Y. Nitta, and A. Miyazaki. 2000. Response of differentiated and degenerated spikelets to top-dressing, shading and day/night temperature treatments in rice cultivars with large panicles. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46(3) : 631-641.