

온도 조건에 따른 벼 수량 및 수량 관련 요소 반응의 품종간 차이

이규종¹ · 김동진² · 반호영² · 이변우^{2*}

¹서울대학교 농업생명과학연구원, ²서울대학교 식물생산과학부
(2015년 10월 5일 접수; 2015년 10월 28일 수정; 2015년 11월 4일 수락)

Genotypic Differences in Yield and Yield-related Elements of Rice under Elevated Air Temperature Conditions

Kyu-Jong Lee¹, Dong-Jin Kim², Ho-Young Ban² and Byun-Woo Lee^{2*}

¹Research Institute of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Gwanakro 1, Gwanakgu, Seoul 08826, Korea

²Department of Plant Science, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Gwanakro 1, Gwanakgu, Seoul 08826, Korea

(Received October 5, 2015; Revised October 28, 2015; Accepted November 4, 2015)

ABSTRACT

An experiment in a controlled environment was conducted to evaluate the genotypic differences of grain yield and yield-related elements of rice under elevated air temperature. Eight rice genotypes included in three maturing group (early, medium, and medium-late maturing group) were grown with 1/5,000 a Wagner pots at four plastic houses that were controlled to the temperature regimes of ambient temperature (AT), AT+1.5°C, AT+3.0°C, and AT+5.0°C throughout the rice growing season in 2011. Ripened grain ratio and 1000 grain weight showed the most susceptible and tolerant responses to elevated air temperature, respectively. The grain yield reduction was attributable to the sharp decrease of ripened grain ratio. Grain yield was significantly decreased above the treatment of AT+1.5°C and AT+3.0°C in early maturing group and the others, respectively. Highly correlation to average temperature from heading to 20 days was revealed in yield ($r = -0.69$), ripened grain ratio ($r = -0.82$), fully-filled grain ($r = -0.70$), and 1000 grain weight ($r = -0.31$). The responses of yield and yield-related elements except number of spikelets and panicle to elevated air temperature were fitted to a logistic function. The parameters of logistic function for each elements except grain yield could not be applied to the other varieties. In conclusion, yield and yield-related elements responded differentially to elevated air temperature according to maturity groups and rice varieties. Ongoing global warming is expected to decrease the grain yield not only by decreasing the grain weight but also decreasing the ripened grain ratio in the future. However, the yield reduction would be mitigated by adopting and/or breeding the less sensitive varieties to high temperature.

Key words: Rice, Temperature, Yield, Yield component, Fully-filled grain, Fertility

I. 서 론

온도는 작물의 생육에 가장 큰 영향을 미치는 기상

요인 중 하나이다. 일반적으로 작물은 호흡을 통해 생육에 필요한 에너지를 생산하게 되는데, 호흡은 온도가 높아짐에 따라 증가한다. 그러나 생육한계 범위를



* Corresponding Author : Byun-Woo Lee
(leebw@snu.ac.kr)

벗어나는 높은 온도 환경은 작물 조직의 장해 유발, 호흡 저해 등의 피해를 야기하기도 한다(Rosenzweig *et al.*, 1997). 생육이 가능한 고온 한계는 작물별로 다르지만, 대부분의 연구에서 약 40°C까지는 온도가 올라갈수록 호흡은 지속적으로 증가를 한다고 보고하고 있다. 옥수수 잎의 호흡은 45°C, 사탕무의 잎은 35°C 정도까지 호흡이 증가하는 것으로 알려져 있다(Nevins *et al.*, 1970). 콩, 목화, 수수와 같은 작물은 40°C의 온도 수준까지 잎의 호흡이 지속적으로 증가한다고 하였다(Brown *et al.*, 1980). 평균 온도 뿐만 아니라 야간 온도 또한 생육에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 일반적으로 벼의 경우 낮과 밤에 관계없이 생육 적온을 벗어나는 높은 온도 환경에서 수량 및 등숙률이 감소하지만, 야간에 고온처리를 할 경우 영화의 발육 속도가 낮아지고 생육기간의 감소가 발생하며, 결국 주간에 고온처리를 할 경우보다 영화의 무게가 더 낮아진다고 하였다(Satoshi *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2004). 야간 온도가 상승함에 따라 발생하는 수량감소의 원인으로는 광합성량의 감소나 형태학적인 이상에 의한 영향은 미미하고 광호흡의 증가, 수정물의 감소가 주요 요인으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2009).

쌀은 전 세계 인구의 약 40~50% 정도가 주식으로 이용하는 곡물이며, 약 144백만 ha의 토지가 벼 재배를 위해 이용되고 있다(FAO, 2010). 벼는 비교적 환경에 대한 적응력이 높은 작물로서 북위 53°의 고위도로부터 적도부근을 포함하여 남위 35°까지, 저지대로부터 해발 2,000m의 고지대까지 널리 재배된다. 우리나라는 북위 33°와 45° 사이에 위치하고 있으면서 지형과 지세가 복잡하고 다양한 농업기후대를 가지고 있어서 벼의 경우에도 재배환경적 차이에 의한 재배품종이나 재배기술이 매우 다양하다(Yoshida 1981). 일반적으로 벼는 20°C 이상 35°C 이하의 온도에서 정상적인 생육이 이루어지는데(Lee *et al.*, 2009), 15°C에서는 화기유도가 가능하지만, 12°C 이하나 40°C 이상에서는 화기유도가 되지 않는다(Vergara *et al.*, 1965). 인디카 계열의 고온 저항성 및 민감성 품종을 대상으로 한 실험에서 33°C 이상의 온도처리에서 고온 민감성 품종은 이삭 및 영화의 결실률이 현저히 감소했으며, 수량의 감소는 출수 후 10일까지의 고온 처리에 기인하였다(Cao *et al.*, 2009). 한편, 벼 등숙기 이후의 고온환경은 등숙 기간을 단축시키고, 그 결

과로 영화의 무게와 수량의 감소로 이어진다고 보고되었다(Kim *et al.*, 2011).

기후 온난화가 벼 재배에 미치는 영향은 광범위한 지역에 걸쳐 다양한 양상으로 나타날 것이며, 우리나라 역시 벼의 재배 양식, 생육, 수량 등 다방면으로 기후 온난화의 영향이 미칠 것으로 예상되고 있다. 지금까지 많은 연구자들에 의해 온난화에 따른 기온상승이 벼의 생육 및 수량성에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구가 수행되어 왔으나, 다양한 생태형 및 품종을 대상으로 수량 구성 요소 각각에 대한 온도의 영향을 규명한 연구는 드문 실정이다. 이에 본 연구는 온도상승 환경에서 우리나라 조생, 중생, 중만생 벼 품종들의 수량 및 수량 구성요소와 그 밖의 수량 관련 요소들이 어떠한 반응을 보이는지 규명하기 위해 수행되었다.

II. 재료 및 방법

2.1. 재배 정보 및 환경 조건

본 실험은 2011년 5월부터 11월까지 서울대학교 부속농장(경기도 수원시)에 위치한 온도조절 플라스틱 하우스에서 수행되었다. 공시품종은 조생종 3품종, 중생종 2품종, 중만생종 3품종으로 상세 품종명은 Table 1과 같다.

파종은 2011년 5월 20일에 실시하였으며 파종량은 모판당 180g으로 하였다. 이앙일은 6월 2일이며 1/5000a Wagner 포트를 이용하여 1주 3본식 어린 모이앙으로 하였다. 플라스틱 하우스별로 품종 당 5반복, 재식거리는 포트 크기에 맞추어 30×16cm이 되도록 배열하였다. 시비량은 포트 환경을 고려하여 표준 시비량보다 많은 N-P-K=18-9-11.4kg/10a 수준으로 처리하였으며, 기비-분얼비-수비를 5:2:3의 비율로 분시하였다.

이앙된 벼는 이앙 후 15일(6월 17일)까지는 대기온 상태의 온실에서 재배되었으며, 이후 설정 온도로 제어되는 4개의 플라스틱 하우스로 각각 옮겨져 재배되었다. 플라스틱 하우스 내부의 기온은 외부 기온과 동

Table 1. Eight rice varieties in different maturity groups

Early maturing group	Medium maturing group	Medium-late maturing group
Odaebyeo Unkwangbyeo Jinmibyeo	Andabyeo Hwaseongbyeo	Nokyangbyeo Chucheongbyeo Donganbyeo

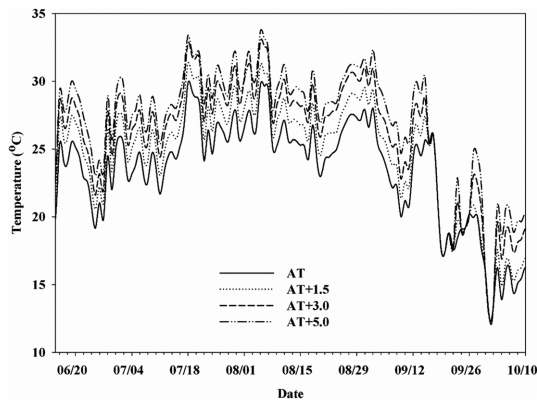


Fig. 1. Daily mean temperature under different temperature regimes during rice growing season in 2011.

일한 대기온 상태(ambient temperature, AT), 대기온 대비 1.5°C 높은 상태(AT+1.5°C), 대기온 대비 3°C 높은 상태(AT+3°C), 대기온 대비 5°C 높은 상태(AT+5°C)로 설정 및 유지되었으며, 이를 위해 CR10X (Campbell Scientific Inc., USA) 데이터 로거를 이용하여 플라스틱 하우스 내부의 기온을 측정 및 기록하고 동시에 측면 창 및 환풍기와 전기온풍기를 자동 제어하여 설정 온도 조건을 유지하였다. 실험 기간 동안 각 온실별 평균 온도는 Fig. 1과 같다.

2.2. 수량 및 수량 관련 요소 조사와 온도반응 분석

본 실험에서는 벼의 수량 구성 요소(단위면적당 이삭수, 이삭당 영화수, 등숙률, 천립중)와 임실률 및 완전발육미율을 포괄하여 수량 관련 요소로 지정 하였다. 수확은 포트별로 이삭의 성숙상태를 확인한 후 이루어졌으며, 포트당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중, 등숙률,

임실률, 완전발육미율, 포트당 수량 등을 조사하였다.

수량 및 수량 관련 요소들의 출수기 및 출수 후 온도에 대한 반응을 분석하기 위해 출수 후 기간을 출수 후 10일(10 Days after heading, 10 DAH), 출수 후 20일(20 DAH), 출수 후 30일(30 DAH), 출수 후 11일부터 20일(1120 DAH), 출수 후 21일부터 30일(2130 DAH)로 나누고 해당기간 동안의 평균 기온에 대한 수량 및 수량 관련 요소들의 반응을 분석하였다. 다만, 임실률의 경우에는 출수기 전후의 온도에 영향을 받기 때문에, 출수 전후 7일간의 최고 기온에 대한 반응을 분석하였다.

수량 및 수량 관련 요소들의 온도에 대한 반응은 비선형 관계를 보이며 식 (1)의 로지스틱 함수와 잘 부합하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2014). 식 (1)의 α 값에 대해 품종 간 동질성 여부를 검증하여, 수량 관련 요소들의 품종 간 온도 반응 특성에 차이가 있는지를 분석하였다.

$$Y = \frac{100}{1 + \exp\{\alpha(T - T_c)\}} \quad (1)$$

식 (1)에서 Y 는 수량, 천립중, 임실률, 완전발육미율이 되며, T_c 는 각 수량 관련 요소들이 50%로 감소할 때의 온도이다. α 는 각 요소에 대한 로지스틱 함수의 파라미터 값이다. 로지스틱 함수의 각 값들은 SAS 9.3의 NLIN procedure를 이용하여 구하였으며, 그 밖의 본 연구에서 실시한 상관분석 및 분석분석 등의 통계분석 또한 SAS 9.3을 이용하였다.

III. 결 과

Table 2는 각 온도 조건 하에서 생태형 및 품종별

Table 2. Heading date averaged over all the panicles of five pots exposed to different temperature regime in eight rice varieties

Maturity group	Variety	Heading date (Julian day)			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	212.0	210.4	209.2	209.4
	Unkwangbyeo	207.6	206.2	206.0	205.0
	Jinmibyeo	218.0	216.2	215.4	216.8
Medium maturing	Andabyeo	220.8	219.0	217.2	217.6
	Hwaseongbyeo	229.6	228.2	226.8	226.6
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	229.4	230.2	231.4	226.8
	Chucheongbyeo	237.0	236.4	235.2	235.4
	Donganbyeo	234.2	233.8	232.6	232.4

Table 3. Number of spikelet per pot as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	No. of spikelet			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	461.0	515.8	512.6	483.6
	Unkwangbyeo	587.2	637.6	717.2	808.2
	Jinmibyeo	582.2	561.8	568.6	608.2
Medium maturing	Andabyeo	635.2	719.2	719.8	890.0
	Hwaseongbyeo	527.8	523.2	510.6	481.6
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	503.6	565.0	532.6	639.0
	Chucheongbyeo	514.4	586.2	579.0	573.2
	Donganbyeo	399.8	545.2	492.8	532.4
F-value	Temp		7.86**		
	Var(MG)		22.80**		
	MG		57.76**		
	Temp × MG		1.28ns		
	Temp × Var(MG)		2.83**		

– Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group
 – ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.
 – Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG

Table 4. 1000 grain weight (g) as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	1000 grain weight (g)			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	29.5	27.7	29.4	24.9
	Unkwangbyeo	26.4	27.4	26.8	24.8
	Jinmibyeo	22.9	23.6	23.3	22.1
Medium maturing	Andabyeo	28.5	26.9	27.4	24.1
	Hwaseongbyeo	26.3	25.5	24.0	20.2
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	32.5	31.8	30.3	28.4
	Chucheongbyeo	25.0	24.2	21.6	21.2
	Donganbyeo	27.3	25.2	26.7	22.7
F-value	Temp		64.5**		
	Var(MG)		8.15**		
	MG		111.83**		
	Temp × MG		3.81**		
	Temp × Var(MG)		2.46**		

– Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group
 – ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.
 – Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG

출수일이다. 온도처리에 따른 평균 출수일은 미미하게 짧아지지만 변화는 크지 않았으며, 일반적인 생태형 및 품종에 따른 출수 경향을 나타냈다.

3.1. 수량 및 수량 관련 요소의 온도 반응

온도 조건에 따른 생태형 및 품종별 포트당 영회수

의 반응은 Table 3과 같다. 포트당 영회수는 생태형 및 품종 간 유의한 차이를 나타냈으나, 온도 증가에 따른 증감 경향은 일관되지 않았다. 조생종 중 윤광벼는 온도가 높아질수록 영회수가 증가하는 경향을 보였으나, 오대벼와 진미벼는 온도 조건에 따른 증감의 경향이 명확히 나타나지 않았다. 중생종의 안다벼의 경

우 온도가 높아질수록 영회수가 증가하는 경향을 보였으나, 화성벼는 온도가 높아질수록 영회수가 감소하여 안다벼와 반대의 경향을 보였다. 중만생종 품종들에서는 온도 조건에 따른 증감 경향이 명확히 나타나지 않았다.

천립중의 온도 반응은 생태형 및 품종에 따라 유의

한 차이를 보였다(Table 4). 천립중은 수량 관련 요소 중 가장 변이가 적은 요소였으며, AT+5°C 조건에서 16~24% 정도의 감소를 나타냈다. 온도 반응은 조생종의 진미벼를 제외하면 모든 생태형 및 품종들은 AT+5°C 조건에서 천립중이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 진미벼는 AT+5°C 조건을 포함한 모든 온도

Table 5. Ripened grain ratio as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	Ripened grain ratio (%)			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	86.4	36.4	52.2	16.1
	Unkwangbyeo	76.5	51.1	51.5	14.3
	Jinmibyeo	81.9	80.4	79.1	47.1
Medium maturing	Andabyeo	94.7	70.1	73.4	4.4
	Hwaseongbyeo	95.3	91.2	73.7	16.0
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	85.5	82.2	84.3	42.7
	Chucheongbyeo	93.4	89.7	78.7	29.6
	Donganbyeo	95.4	96.6	87.5	48.5
F-value	Temp	569.69**			
	Var(MG)	138.54**			
	MG	40.18**			
	Temp × MG	15.18**			
	Temp × Var(MG)	8.5**			

- Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group

- ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.

- Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG.

Table 6. Grain yield per pot as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	Grain yield (g/pot)			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	11.7	4.9	7.9	1.9
	Unkwangbyeo	11.8	9.7	9.9	3.0
	Jinmibyeo	11.0	10.6	10.5	6.3
Medium maturing	Andabyeo	12.4	12.9	12.7	0.9
	Hwaseongbyeo	14.8	9.1	7.8	1.1
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	14.0	14.8	13.6	7.7
	Chucheongbyeo	12.0	12.7	9.9	3.6
	Donganbyeo	10.6	13.2	11.5	5.9
F-value	Temp	183.62**			
	Var(MG)	39.44**			
	MG	20.5**			
	Temp × MG	7.45**			
	Temp × Var(MG)	2.66**			

- Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group

- ns, *, and **: no significance at 5% and 1% probability levels, respectively.

- Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG.

조건에서 천립중이 크게 변하지 않았다.

생태형 및 품종에 따른 등숙률은 온도 조건에 대해 유의한 차이를 나타냈다(Table 5). 등숙률은 천립중과 마찬가지로 모든 생태형 및 품종이 AT+5°C 조건에서 급락하였다. 온도 상승에 대한 감소 정도는 천립중보다 컸으며, 수량 관련 요소 중 가장 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 다만, 동일 생태형 내에서도 품종에 따라 온도 조건에 대한 반응 정도는 달랐는데, 조생종의 오대벼와 운광벼는 AT+1.5°C 조건부터 급락하였고, 진미벼는 AT+3°C까지는 큰 변화를 보이지 않았으나, AT+5°C에서는 대기온 대비 30% 이상 급락하였다. 생태형별로는 중만생종이 조생 및 중생 품종보다는 둔감하였다.

온도 조건에 따라 수량은 생태형 및 품종 간 유의한 차이를 보였으며, AT+5.0°C에서 모든 생태형 및 품종들의 수량은 급감하였다(Table 6). 다만, AT+3°C까지는 온도의 영향이 명확히 나타나지 않았으며, 온도가 상승함에 따라 지속적으로 감소하는 등숙률의 경향과는 달랐다. 이는 온도가 상승함에 따라 대체로 등숙률이나 천립중은 낮아지지만, 이삭당 영회수, 이삭수는 증가 또는 AT와 동일한 수준을 유지하는데 기인한 것으로 사료된다. 예를 들면, 중생종의 안다벼와 중만생종 품종들은 온도가 상승함에 따라 대체로 등숙률이나 천립중이 낮아지지만, 이삭당 영회수, 이삭수는 증

가 또는 AT와 동일한 수준을 유지하여, AT+3°C까지 수량에 대한 온도의 영향이 나타나지 않았다.

그 밖의 수량 관련 요소들의 경우 포트당 이삭수는 생태형에 따른 차이만 유의하였으며, 품종이나 온도 조건에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다(Table 7). 임실률과 완전발육미율은 생태형 및 품종에 따라 유의한 온도 반응을 보였는데, 임실률과 완전발육미율을 곱하면 등숙률이 되기 때문에, 임실률과 완전발육미율의 온도 반응은 등숙률의 그것과 유사한 경향을 나타냈다(Table 8 and 9).

3.2. 수량 및 수량 관련 요소의 출수기 및 출수 후 온도에 대한 반응 특성

Table 10은 수량 및 수량 관련 요소와 출수기 이후의 온도에 대한 상관분석 결과를 나타낸 것이다. 천립중, 등숙률, 임실률, 완전발육미율, 수량은 출수기 및 출수 후 기온에 대해 부의 상관을 보여, 위 요소들은 기온이 상승함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 6개 구간 온도에 대한 수량 관련 요소들의 상관분석 결과, 천립중($r = -0.31$), 등숙률($r = -0.82$), 수량($r = -0.69$), 완전발육미율($r = -0.70$)은 출수 후 20일간의 평균기온과 가장 높은 상관을 보였으며, 임실률의 경우 출수기 전후 7일간의 최고 기온과 $r = -0.66$ 의 비교적 높은 상관을 나타냈다.

Table 7. Number of panicle per pot as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	No. of panicle			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	9.0	9.6	8.8	9.2
	Unkwangbyeo	7.6	7.6	9.2	9.0
	Jinmibyeo	8.4	8.8	8.2	8.6
Medium maturing	Andabyeo	9.0	8.0	7.0	8.0
	Hwaseongbyeo	9.4	9.0	9.2	8.6
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	7.6	7.8	6.6	7.6
	Chucheongbyeo	10.6	11.4	11.4	11.6
	Donganbyeo	8.0	8.4	8.4	9.6
F-value	Temp	0.48ns			
	Var(MG)	2.85ns			
	MG	22.25**			
	Temp × MG	1.49ns			
	Temp × Var(MG)	0.94ns			

- Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group
 - ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.
 - Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG

Table 8. Fertility as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	Fertility (%)			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	92.2	42.1	56.1	28.9
	Unkwangbyeo	92.2	65.5	77.8	46.1
	Jinmibyeo	91.6	82.1	84.1	68.0
Medium maturing	Andabyeo	88.3	74.5	72.0	31.8
	Hwaseongbyeo	96.1	94.2	92.8	72.2
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	90.7	85.2	87.5	69.9
	Chucheongbyeo	94.9	92.4	88.3	56.5
	Donganbyeo	97.1	97.1	92.2	73.1
F-value	Temp	194.06**			
	Var(MG)	83.12**			
	MG	50.96**			
	Temp × MG	10.78**			
	Temp × Var(MG)	6.62**			

– Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group

– ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.

– Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG.

Table 9. Fully-filled grain ratio as affected by different temperature regimes in eight rice varieties

Maturity group	Variety	Fully-filled grain ratio (%)			
		AT+0.0	AT+1.5	AT+3.0	AT+5.0
Early maturing	Odaebyeo	93.7	86.5	93.0	55.8
	Unkwangbyeo	82.9	78.1	66.2	31.0
	Jinmibyeo	89.3	97.9	94.0	69.2
Medium maturing	Andabyeo	96.1	97.5	95.9	89.9
	Hwaseongbyeo	99.2	96.9	79.4	22.2
Medium-late maturing	Nokyangbyeo	94.2	96.5	96.4	61.0
	Chucheongbyeo	98.4	97.1	89.1	52.4
	Donganbyeo	98.2	99.4	94.8	66.4
F-value	Temp	292.35**			
	Var(MG)	27.48**			
	MG	43.61**			
	Temp × MG	1.2ns			
	Temp × Var(MG)	13.4**			

– Temp: Temperature, Var: Variety, MG: Maturity group

– ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.

– Var(MG) means nested ANOVA which test whether there is significant variation in means among Var within MG

상관분석 결과를 바탕으로 식 (1)을 이용하여 입실률은 출수기 전후 7일간 최고 온도에 대한 반응 특성을 분석하였고, 완전발육미율, 천립중, 수량은 출수 후 20일간의 평균기온에 대해 분석을 실시하였다. Table 11과 Table 12은 천립중, 입실률, 완전발육미율, 수량의 온도 반응 로지스틱 함수의 파라미터 α 값과 T_c 값

을 산출하고 이에 대한 통계분석 결과를 나타낸 것이다. 품종 이름 우측의 F -value는 해당 품종과 그 외 품종들 간의 온도 반응 특성 차이 유무를 분석한 결과이다. Pooled는 모든 생태형 및 품종의 자료를 통합하여 분석한 결과이다.

천립중에서 품종 간 출수 후 20일간의 평균기온에

Table 10. Correlation of yield and yield-related elements with different temperature regimes and temperature conditions by duration of grain filling

	No. of spikelet	1000 grain weight	Ripened grain ratio	No. of panicle	Grain Yield	Fertility	Fully-filled grain
Temperature regimes	0.16*	0.42**	-0.77**	0.07ns	-0.69**	-0.62**	-0.68**
maxT7	0.16*	-0.37**	-0.64**	0.13ns	-0.58**	-0.66**	-0.42**
10DAH	0.06ns	-0.26**	-0.66**	0.11ns	-0.62**	-0.59**	-0.54**
20DAH	0.23**	-0.31**	-0.82**	0.00ns	-0.69**	-0.67**	-0.70**
30DAH	0.37**	-0.19*	-0.77**	-0.17*	-0.59**	-0.70**	-0.57**
1120DAH	0.33**	-0.30**	-0.77**	-0.10ns	-0.61**	-0.60**	-0.68**
2130DAH	0.24**	0.02ns	-0.46**	-0.27**	-0.31**	-0.40**	-0.36**

- ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.
 - maxT7: Maximum temperature from 7 days before heading to 7 days after heading (DAH).
 - 10, 20, and 30 DAH: average temperature during 10, 20, and 30 DAH, respectively.
 - 1120DAH and 2120DAH: average temperature from 11 DAH to 20 DAH and from 21 DAH to 30 DAH, respectively.

Table 11. Estimated parameters of Eq. 1 for 1000 grain weight and grain yield

	Variety	α	Tc	r^2	F-Value
1000 grain weight	Andabyeo	0.662	31.80	0.42	2.47 ns
	Chucheongbyeo	0.421	31.66	0.33	0.05 ns
	Donganbyeo	0.741	31.45	0.55	5.67 *
	Hwaseongbyeo	0.604	31.76	0.60	2.41 ns
	Jinmibyeo	-0.133	11.95	0.02	10.00 **
	Nokyangbyeo	0.544	32.41	0.50	1.16 ns
	Odaebyeo	0.164	43.50	0.04	2.43 ns
	Unkwangbyeo	0.120	55.31	0.03	3.02 ns
	Pooled	0.339	35.38	0.17	3.37 **
Grain yield	Andabyeo	0.946	28.85	0.43	0.89 ns
	Chucheongbyeo	0.744	28.08	0.48	0.01 ns
	Donganbyeo	0.381	30.23	0.15	3.14 ns
	Hwaseongbyeo	1.031	28.38	0.66	2.73 ns
	Jinmibyeo	0.538	29.10	0.23	0.75 ns
	Nokyangbyeo	0.429	31.22	0.19	2.48 ns
	Odaebyeo	0.927	28.56	0.49	1.05 ns
	Unkwangbyeo	0.832	29.16	0.43	0.25 ns
	Pooled	0.707	28.90	0.38	1.43 ns

- ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.

대한 반응은 품종 별로 유의하게 다른 것으로 나타났으며, 공시품종 중 동안벼의 온도 반응 특성이 다른 품종과 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 11). 즉, 식 (1)을 이용하여 동안벼 천립중의 온도 반응 추정시 동안벼 만의 파라미터 값을 적용해야 할 것이다. 진미벼의 천립중 반응 또한 통계적으로는 다른 품종들과 다른 것으로 나타났으나, 파라미터 값이 비정상적으로 산출되어 천립중의 온도 반응 정도를 판단할 수 없었다. 수량의 경우 각 품종은 출수 후 20일간 평균기온

에 대해 온도 반응 특성에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉, 수량은 품종에 상관없이 동일한 파라미터 값을 이용하여 수량 추정이 가능할 것이다 (Table 11).

Table 12는 임실률과 완전발육미율에 대한 α 값과 Tc값을 나타낸 것이다. 임실률의 경우 추정벼, 진미벼, 녹양벼는 출수 전후 7일간 최고 기온에 대한 반응 특성이 다른 품종들과 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 완전발육미율은 안다벼, 추정벼, 화성벼, 오대

Table 12. Estimated parameters of Eq. 1 for fertility and fully-filled grain ratio

	Variety	α	Tc	r^2	F-Value
Fertility	Andabyeo	0.357	35.91	0.43	1.44 ns
	Chucheongbyeo	0.687	37.02	0.71	6.73 *
	Donganbyeo	0.582	37.73	0.53	2.23 ns
	Hwaseongbyeo	0.583	35.42	0.72	2.41 ns
	Jinmibyeo	0.248	41.02	0.52	6.90 *
	Nokyangbyeo	0.152	43.59	0.21	13.47 **
	Odaebyeo	0.524	35.14	0.75	1.39 ns
	Unkwangbyeo	0.379	36.63	0.68	0.77 ns
	Pooled	0.411	37.26	0.47	4.27 **
Fully-filled grain ratio	Andabyeo	0.351	36.71	0.29	4.74 *
	Chucheongbyeo	1.047	29.53	0.86	9.73 **
	Donganbyeo	0.754	31.02	0.65	0.41 ns
	Hwaseongbyeo	1.293	29.35	0.86	27.80 **
	Jinmibyeo	0.394	33.87	0.20	3.87 ns
	Nokyangbyeo	0.582	31.99	0.50	0.56 ns
	Odaebyeo	0.376	33.70	0.21	5.72 *
	Unkwangbyeo	0.586	29.82	0.66	0.42 ns
	Pooled	0.759	30.76	0.55	6.69 **

- ns, *, and **: no significance, significance at 5% and 1% probability levels, respectively.

벼가 출수 후 20일간 평균기온에 대한 반응 특성이 다른 품종과 차이가 있는 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

본 연구는 고온 환경 조건에서 성숙기가 다른 주요 벼 품종들의 수량과 수량 관련 요소의 반응을 파악하여 미래 기후 온난화가 벼 품종별 생산성에 미치는 영향 정도를 알아보고자 하였다. 이를 위하여 벼 생태형별 8 품종을 온도 조건이 다른 플라스틱 하우스에서 재배하여 온도 조건에 따른 수량 및 수량 관련 요소의 반응 특성을 살펴보았다.

이삭수는 출수 이전의 기후에 영향을 받는 요소로서 본 실험에서는 온도 조건에 따른 유의한 차이가 발생하지 않았으며 온도 반응의 경향성이 나타나지 않았다. 미국의 벼 품종을 대상으로 한 Baker(2004)의 연구에서도 극한 고온 조건을 제외하면 이삭수의 온도 반응은 명확한 경향성을 나타내지 않음을 확인할 수 있었다. 영화수와 천립중은 다른 요소들에 비해 상대적으로 상관계수 값이 낮았는데, 영화수는 이삭수와 마찬가지로 수용부의 크기(sink size)를 결정짓는 요소로서 영양생장기간 동안 주로 결정되기 때문일 것이며, 천

립중은 벼의 상태나 환경의 영향에 대한 변이가 적은 특성에 기인한 것으로 사료된다.

수량 관련 요소 중 등숙률은 고온 조건으로 갈수록 수량 감소에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 조생종의 오대벼와 운광벼의 경우 AT+1.5°C 수준의 온도 상승 조건에서도 상대적으로 큰 등숙률의 감소를 보여 온도 상승에 가장 민감한 반응을 보였다. 반면, 천립중의 경우 AT+5°C 조건에서도 16~24% 수준의 감소 정도를 보여 온도 조건에 따른 영향이 가장 적었다.

수량 관련 요소와 출수기 및 출수 후 기온과의 관계를 분석한 결과, 천립중, 등숙률, 완전발육미율, 수량은 출수 후 20일간의 평균기온과 가장 높은 부의 상관을 보이는 것으로 나타났다. 임실률의 경우 상관분석에서는 출수 후 30일간 평균기온의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났으나, 임실률은 벼의 개화 및 수정과 관련된 요소로서 실질적으로 출수기 전후 최고 기온의 영향이 가장 크게 나타난다. 천립중, 등숙률, 완전발육미율이 온도가 높아짐에 따라 감소하는 원인에 대해서는 다양한 연구가 수행되었으나 아직까지 명확한 원인은 규명되지 않았다. 일부 연구에서는 고온 환경에서 벼 영화의 발육 속도는 높아지지만 등숙 기

간은 짧아지는데, 영화 발육속도가 증가했지만 짧은 등숙 기간을 보상할 만큼 충분치 않기 때문에 완전발육미율과 천립중이 낮아진다고 하였다(Yoshida, 1981; Tohru and Naoya, 2004). 이러한 등숙 기간의 단축은 고온으로 인한 이삭의 조기 노화에 기인하며, 그에 따른 수용부 활성(sink activity)의 감소가 완전발육미율, 천립중 감소의 주요 요인으로 보고하였다(Kim *et al.*, 2011; Sato and Inaba, 1973).

수량 관련 요소들의 온도에 대한 반응은 비선형 관계를 보이며, 이를 표현하는 로지스틱 함수(식 1)의 파라미터(α) 값을 이용하여 품종별 수량 및 수량 관련 요소들의 온도 반응 차이 유무를 검증하였다. 로지스틱 함수(식 1)의 파라미터 값이 품종 간 유의한 차이가 있을 경우 해당 요소의 온도 반응을 추정하기 위해서는 품종에 맞는 파라미터 값을 별도로 적용해야 할 것이다. 천립중의 경우 동안벼와 진미벼, 입실률은 추청벼, 진미벼, 녹양벼, 완전발육미율에서는 안다벼, 추청벼, 화성벼, 오대벼의 온도 조건에 대한 반응 특성이 다른 품종과 차이가 있는 것으로 나타났다. 수량의 온도 반응 추정을 위한 파라미터 값은 품종 간 유의한 차이가 없었으므로 품종에 상관없이 동일한 파라미터 값을 이용하여 수량 반응 추정이 가능할 것이다.

결론적으로 벼의 수량 및 수량 관련 요소들은 생태형 및 품종에 따라 매우 다양한 양상으로 온도에 대해 반응 하였으며, 종합적으로 미래의 기후 온난화로 인한 기온 상승은 벼 수량성에 부정적인 영향을 가지고 올 것으로 예측된다. 다만, 이러한 부정적 영향은 재배지역의 농업기후 조건에 맞는 지역적응성 품종의 도입, 재배시기 이동 등의 재배기술적 방법을 개발하고, 개화기 고온 환경에서도 입실률이 높고, 고온 등숙성을 지닌 고온 적응성 품종의 개발을 통해 완화될 수 있을 것이다.

적 요

생태형이 다른 8개 벼 품종을 대상으로 포트 실험을 실시하여 대기온, 대기온 대비 +1.5°C, +3.0°C, +5.0°C 온도 조건에서의 수량 및 수량 관련 요소의 반응을 분석하였다. 이삭수를 제외한 수량 및 수량 관련 요소들의 온도 상승 조건에 대한 반응은 생태형 및 품종에 따라 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 온도가 높아짐에 따라 영화수는 증감의 경향이 명확하진

않았으나 대체로 대기온보다는 증가하였고, 천립중과 등숙률은 감소하는 경향을 나타냈다. 수량 관련 요소 중 온도 상승에 가장 민감한 반응을 보인 요소는 등숙률이었으며, 가장 둔감한 요소는 천립중이었다. 등숙률의 하락과 맞물려 수량은 고온 조건일수록 낮아졌으나, 영화수 증가 영향으로 수량의 저하 정도는 등숙률의 그것보다 크지 않았다. 생태형 및 품종별 반응은 조생종의 오대벼와 윤광벼가 온도 조건에 가장 민감하였으며, 중만생종 품종들의 반응은 대체로 둔감한 것으로 나타났다. 출수 후 온도의 영향 정도를 분석한 결과 천립중, 등숙률, 완전발육미율, 수량은 출수 후 20일간의 평균기온과 가장 높은 상관관계를 보였으며, 온도가 높아질수록 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 상관분석 결과를 바탕으로 로지스틱 함수를 이용하여 품종 간 온도 반응 특성의 차이를 분석하였다. 수량의 경우 품종 간 온도 반응 특성이 다르지 않은 것으로 나타나, 품종에 상관없이 온도 반응에 대한 추정이 가능할 것으로 사료된다. 이와 달리 천립중, 등숙률, 완전발육미율, 입실률의 경우 품종별로 온도 반응 특성이 달랐으므로, 각 품종에 맞는 온도 반응 추정식을 이용해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ0101072015)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baker, J. T., 2004: Yield responses of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* **122**(3-4), 129-137.
- Brown, K. W. and J. C. Thomas, 1980: The influence of water stress preconditioning on dark respiration. *Physiologia Plantarum* **49**, 205-209.
- Cao, Y. Y., H. Duan, L. N. Yang, Z. Q. Wang, L. J. Liu, and J. C. Yang, 2009: Effect of High Temperature during Heading and Early Filling on Grain Yield and Physiological Characteristics in Indica Rice. *Acta Agronomica Sinica* **35**(3), 512-521.
- FAO, 2010: "Climate-Smart" Agriculture; Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Kim, J. W., J. Y. Shon, C. K. Lee, W. H. Yang, Y. W. Yoon, W. A. Yang, Y. G. Kim, and B. W. Lee, 2011: Relationship

- between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature. *Field Crops Research* 122-3, 207-213.
- Lee, K. J., D. I. Kim, K. S. Kim, and B. W. Lee, 2014: Genotypic difference in spikelet sterility response to air temperature during the reproductive stage of rice. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 17(2), 53-57.
- Lee, T., and A. R. Mohammed, 2009: The Current Situation in the US Rice Industry and the Results from Night Temperature Effects. *The Monsoon Asia-Agro Environmental Research Consortium*, W2-04.
- Nevins, D. J., and R.S. Loomis, 1970: A method for determining net photosynthesis and transpiration of plant leaves. *Crop Science* 10, 3-6.
- 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101(27), 9971-9975.
- Rosenzweig, C., and F. N. Tubiello, 1997: Impacts of global climate change on Mediterranean agriculture: Current methodologies and future directions: An introductory essay. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 1, 219-232.
- Sato, K., and K. Inaba, 1976: High temperature injury of ripening in rice plant: V. On the early decline of assimilate storing ability of grains at high temperature. *Proceedings of the Crop Science Society of Japan* 45, 156-161.
- Satoshi, M., J-I. Yonemaru, and J-I. Takanashi, 2005: Grain Growth and Endosperm Cell Size Under High Night Temperatures in Rice (*Oryza Sativa* L.). *Annals of Botany* 95, 695-701.
- Tohru, K., and U. Naoya, 2004: High Temperatures during the Grain-Filling Period Do Not Reduce the Potential Grain Dry Matter Increase of Rice. *Agronomy Journal* 96, 406-414.
- Vergara, B. S., S. Purababhavung, R. Lilis, 1965: Factors determining the growth duration of rice varieties. *Phyton* 22, 17-185.
- Yoshida, S., 1981: *Fundamentals of rice crop science*. IRRI.