

온도구배야외챔버를 이용한 고온에서의 벼 생육반응 및 수량성 평가

오도혁¹, 류재현¹, 조윤형¹, 김원식², 조재일^{1*}

¹전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과, ²일본국립연구개발법인 농업식품산업기술융합연구기구
(2017년 9월 27일 접수; 2018년 2월 6일 수정; 2018년 2월 8일 수락)

Evaluation of yield and growth responses on paddy rice under the extremely high temperature using temperature gradient field chamber

Dohyeok Oh¹, Jae-Hyun Ryu¹, Yunhyeong Cho¹, Wonsik Kim² and Jaeil Cho^{1*}

¹Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Gwangju 61186, Republic of Korea

²National Agriculture and Food Research Organization, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba-ken, Ibaraki-ken, 305-8604 Japan

(Received September 27, 2017; Revised February 6, 2018; Accepted February 8, 2018)

ABSTRACT

The effect of elevated temperature on temperate paddy rice will be significant for dependable food supply in East Asia. Using temperature gradient field chamber (TGFC), which was designed to make the horizontal air temperature gradient by 0°C to 3°C higher than outside, we examined the measurement to understand the effects of extremely high temperature on paddy rice. In particular, the data of the year 2016, the worst heat wave in over 22 years, was analyzed in this study. The rice height in the relatively warmed condition was rapidly increased during early growth stage. However, the average grain weight and number of spikelet per panicle in the warmed chamber condition were gradually declined with increasing air temperature averaged for 40 days after first heading in each chamber. In particular, the grain yield was more dramatically decreased by the raising temperature because the percent ripened grain was quickly dropped as getting over the threshold temperature for pollination. Therefore, the surplus photosynthetic product by such lower grain filling rate may disturbed the decreases of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and SPAD chlorophyll values after first (normal) heading. In addition, the late-emerging head grain were appeared. However, this yield was too small to recover the normal yields decreased by extremely high temperature condition. Our result represented that the warmed condition in 2016 would be the critical limit for the stable yield of temperate paddy rice.

Key words : Paddy rice, Global warming, Yield, Heat stress, Temperature gradient field chamber (TGFC)



* Corresponding Author : Jaeil Cho
(chojaeil@gmail.com)

I. 서 언

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따르면 지구온난화 추세는 세계 평균 기온을 21세기 말 까지 2.6~4.8°C 상승시킬 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2014). 현재 우리나라도 연평균 기온이 지속적으로 상승하고 있으며, 특히 2016년은 5월의 이른 고온 현상과 함께 6~8월 평균기온이 24.8°C로 평년 대비(1981~2010년) 1.2°C 상승하였다. 이는 7월과 8월 후반까지 이어져 8월 전국 평균 기온과 평균 최고기온이 28.0°C, 33.6°C를 기록하였고, 전국 폭염 일수가 16.7일을 기록하여 1973년 이래 가장 높은 수치를 보인 이례적 폭염이 발생하였다(KMA, 2016).

이와 같은 작물재배 기간 동안의 평균기온 상승과 이상고온 현상은 작물의 생리·생육 상태에 영향을 미친다. 예를 들어 온도에 민감하게 반응하는 광합성과 호흡은 작물의 총생물량에 영향을 주고 최종 수확량 변동으로 까지 이어질 수 있다(Peng *et al.*, 2004). 일반적으로 고온에 의해 작물 수확량이 줄어드는 경우는 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 첫째, 고온에 의해 빨라진 생육반응과 이삭의 노화는 영양생장기와 등숙기를 단축시키기 때문에 광합성 산물의 생산과 축적이 충분히 이루어 지지 못하고 낮아진 수용 능력(sink activity)은 종실의 개수와 무게를 감소시킬 수 있다(Kim *et al.*, 2011; Shon *et al.*, 2015). 둘째, 출수 개화기에 특정 임계온도를 넘어서면 수분·수정 과정에서 불임이 되어 종자가 형성되지 않아 생산량이 크게 감소하는 경우가 있다(Matsui *et al.*, 2005). 이러한 적정 온도 이상의 고온 환경에서 기인하는 고온 스트레스(heat stress)는 정상적 작물 생육을 위한 생리적 반응을 저해하는 요인으로 정의되는데, 이는 생산량뿐만 아니라 품질에 크게 영향을 미치는 중요한 비 생물학적 스트레스(abiotic stress) 중 하나이다(Stone, 2000).

고온 스트레스에 따른 작물의 피해 정도는 그 유전적 잠재능력에 따라 다르지만, 생육단계에 따라 고온 민감도 및 반응 특성이 달라지므로 특정 생육기간 동안에 어느 정도의 고온 스트레스를 받았는지에 따라 최종 수확량에 다른 영향을 줄 수 있다(Wahid *et al.*, 2007). 따라서 온도에 대한 작물의 반응을 이해하고 수량성을 평가하는 연구들이 다양한 작물에서 수행되었다(Baker *et al.*, 1993; Tian *et al.*, 2012). 특히 벼는

우리나라뿐만 아니라 세계적인 중요 식량작물로서 온난화에 따른 생산량 변화에 대해 지속적으로 연구가 수행되어 왔다(Ziska *et al.*, 1996; Baker, 2004). 기후변화 시나리오와 벼의 생육모델을 이용한 예측 연구에서는 온난화에 의해 출수기가 빨라지고 생산량이 감소되었다(Shim *et al.*, 2010). 또한 재배 실험을 통해 고온이 벼의 출수 및 개화시기를 단축 시키고 개화기 평균 35°C의 온도에 4시간만 노출되어도 수정 장해로 인해 불임이 유발된다는 것이 밝혀졌다(Satake and Yoshida, 1978). 최근에는 보다 정확한 생산량 추정을 위한 매개변수 설정을 위해 불임을 가져오는 명확한 온도 조건 및 시기를 규명하는 연구들이 수행되고 있다(Jagadish *et al.*, 2007; Maruyama *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2015).

자포니카 벼의 경우 종자 등숙기 적온이 출수·개화 후 40일 평균 21~23°C이고, 이보다 1°C가 낮아지면 수확량이 7% 감소, 1°C가 높아지면 5%가 감소되는 보고가 있다(Yun *et al.*, 2001). 이와 같이 벼의 출수 이후 생식생장기의 고온 스트레스는 벼의 생산성과 직결되기 때문에 다양한 연구와 실험이 요구된다. 더불어 영양생장기의 고온 스트레스가 동화산물 축적에 어떻게 영향을 미치는지 이해가 필요하다. 하지만 대부분의 실험이 실내 인공기상 환경에서 진행되었고 실제 기상을 기반으로 한 고온 재배 실험은 드물다. 이에 본 연구는 지구온난화 환경에서의 벼의 생육 반응과 수량성을 평가하기 위해 온도구배야외챔버(Temperature Gradient Field Chamber, TGFC)를 이용하였으며 기록적 폭염을 기록한 2016년에 수행되어 고온의 영향도 함께 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 실험 조건 및 재배 관리

본 실험은 전남대학교 광주캠퍼스 농업실습교육원 논에 설치된 TGFC에서 2016년 6월 3일에 중묘를 이양하여 10월 13일 수확 때까지 수행되었다. 벼 품종은 중만생종인 일미였으며 재식 거리는 관행 농업인 15 × 30 cm 로 하였고, 1주(포기)에 3~4본을 재식 하였다. 실험에 사용한 TGFC는 3개(A, B, C 챔버)였으며 각 시설당 43.2m² (1.8 × 24m)의 면적에 960주(12 × 80 주)의 벼를 재배하였다. 비료는 시설 면적당 N(질소) 9kg, P(인) 4.5kg, K(칼륨) 5.7kg을 기준으로 처리하였으며, 밀거름과 분얼거름을 5:2 비율로 분시하였다.

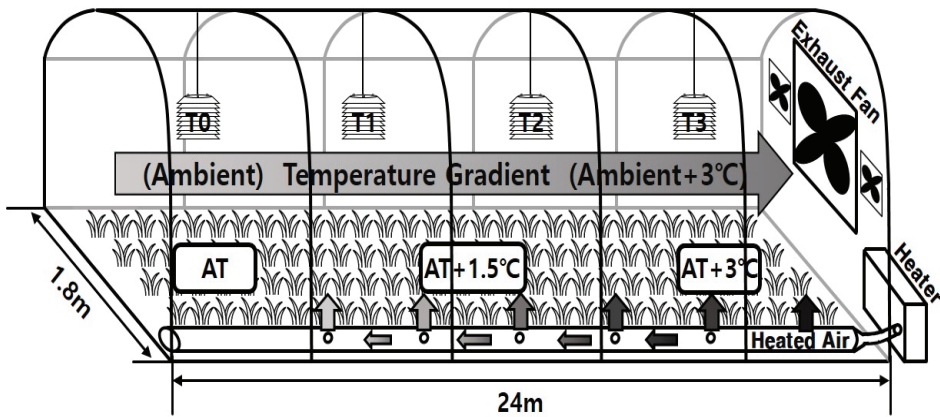


Fig. 1. A schematic illustration of Temperature Gradient Field Chamber(TGFC) for exposing rice to the gradient warmed condition by 0°C to 3°C.

TGFC는 입구가 막힘없이 개방되어 있으며 가장 안쪽은 항시 환풍기를 작동시켜 공기가 입구에서 시설 안쪽으로 이동하여 환풍기를 통해 배출되도록 설계되었다. 이에 따라 시설 입구에서 안으로 들어갈수록 기온이 올라가 구배가 형성된다(Horie *et al.*, 1995). 이러한 구배 구간 별로 온도/습도 간이백엽상 4개를 설치하고 그 명칭을 T0, T1, T2, T3로 명명하였다. T0지점 온도는 챔버 바깥 온도(AT, Ambient Temperature)와 같고, 시설 가장 안쪽의 T3 온도가 AT 보다 3°C 높은 환경(AT+3°C)이 유지되도록 시스템을 설정하여, T0와 T3 두 백엽상의 온도차가 +3°C 이하일 때는 히터 바람이 주입되며 +3°C 이상일 때는 환풍기의 회전

속도를 증가시켜 안쪽의 공기를 더 배출시킴으로써 일정한 구배를 유지하였다. 이러한 자동화 과정은 5초마다 수행되며, 관측된 온도/습도 자료는 데이터 로거(CR10X, Campbell Scientific Inc., USA)에 5분간격으로 기록된다. TGFC 시설의 상세 모습은 Fig. 1과 같다.

TGFC 3개 중 A, B 챔버에서는 이양부터 수확까지의 전 기간에 AT+3°C 조건을 유지하였다. 나머지 C 챔버는 출수시작(First heading) 이전까지는 AT+3°C의 온도 구배 조건을 형성하다가 이후에는 온도 구배를 만들지 않고 챔버의 모든 구간을 AT로 유지하였다(Fig. 2). 이러한 차별 조건을 통해 고온에 따

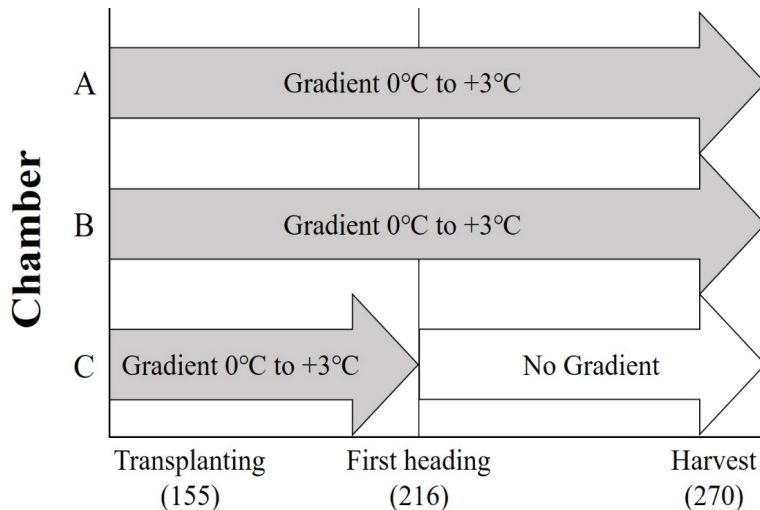


Fig. 2. Each chamber operation regimes for different temperature condition for growth duration. Day of Year (DOY) are given in brackets.

른 생육기간 단축과 출수시작 이후 고온에 의한 생육 및 생리적인 변화가 수량에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2.2. 벼 생육 및 수량 조사

생육조사는 이앙 후 14일째부터 일주일 마다 발육 상태 및 생육단계를 파악하기 위해 초장 및 분얼수를 측정하였다. 수확 후 건물중 및 수량 조사는 T0, T1, T2, T3 지점에서 랜덤으로 샘플을 예취하여 잎, 줄기, 이삭으로 분리한 후 건조기에 80°C 온도조건으로 72 시간 건조 후 무게를 측정하였다. 이삭은 정상이삭과 늦이삭으로 구분하여 등숙률(percent ripened gain, %), 평균 종실중(average grain weight, mg), 단위 면적당 수량(grain yield, g m⁻²), 이삭당 낱알수(spikelets per panicle)를 조사하였다. 정상이삭과 늦이삭의 구분 기준은 1개의 유효분얼에서 1차로 이삭이 출수한 뒤 추가적으로 기부 또는 마디에서 출현한 이삭은 늦이삭으로 간주하였다.

출수 이후 잎의 엽록소 함량 변화를 엽 수준에서 조사하기 위해 엽록소계 (SPAD-502, Minolta Camera Co., Osaka, Japan)를 이용하여 상위엽을 대상으로 한번 조사에 10개의 샘플을 2반복하여 관측하였고, 군락 수준에서는 다중분광방사계(CROPSCAN Inc., Rochester, MN, USA)를 이용하여 맑은 날 12시부터 14시 사이에 660 nm(ρ_{660})와 800 nm(ρ_{800}) 파장의 군락 반사도를 측정하여 NDVI(정규식생지수, Normalized Difference Vegetation index, $(\rho_{800}-\rho_{660})/(\rho_{800}+\rho_{660})$)를 계산하였다. 엽록소계와 다중분광방사계 둘 다 7~14일의 동일한 간격으로 관측이 수행되었다.

온도에 대한 평균 종실중과 단위 면적당 수량 값의 분석은 출수기 이후 40일 평균 기온을 이용하였고 (Yun *et al.*, 2001), 늦이삭의 수량 구성 요소는 TGFC 각 구간별 출수기 이후 40일 평균 기온과 정상 이삭의 등숙률을 이용하여 비교 분석 하였다. 본 실험에서 수행한 통계 분석은 SPSS 23.0을 이용하였다.

III. 결 과

3.1. 고온에서의 벼 생육 반응

TGFC에 형성된 온도 구배 환경 하에서 재배된 벼의 초장 변화와 출수 시작 이후의 SPAD와 NDVI의 변화는 Fig. 3과 같다. A, B, C 챔버 AT의 초장은 유묘기와 유효분얼기를 거치면서 급격히 증가하

가 무효분얼기에 들어서면서 둔화된 증가를 보였고, 출수 직전 유수형성에 따른 절간신장으로 다시 빠른 초장 증가를 보이는 일반적 모습을 보였다. 하지만, 모든 TGFC 시설의 AT+3°C는 영양생장기 초장 증가율이 AT 보다 높았고 영양생장기는 짧아졌다. 이는 AT+3°C의 약 9일 빠른 출수에 기여한 것으로 보인다.

영양생장기 이후의 A, B 챔버 AT+3°C의 초장은 출수 시작 전까지 증가없이 일정하였고, 고온 조건을 없앤 C 챔버에서는 이양한지 약 42일여 만에 멈추었던 초장이 다시 증가하여 AT와 비슷한 수준까지 도달하는 모습을 보였다. 이는 고온에 의한 유수분화 후 절간 신장의 저해가 A, B 챔버에서 나타난데 비해, C 챔버는 출수 시작 이후 고온 처리를 중단하면서 정상적인 수수절간 신장이 이루어진 것으로 보인다. 따라서 수확 시 초장은 고온에 의해 낮아 질 수 있을 것으로 사료된다.

SPAD 엽록소계 값은 출수 이후 모든 챔버의 AT 지점에서 감소하는 경향을 보였으나 A, B 챔버 AT+3°C에서는 더디게 감소하거나 일정하여 최종 수확 시의 SAPD 값은 AT+3°C 지점의 엽이 AT 보다 높았다. 하지만 C 챔버에서는 출수 이후부터 수확 시까지 SPAD값에 유의한 차이는 없었다. 군락 수준에서의 NDVI 에서도 A, B 챔버에서는 출수 이후 등숙이 진행됨에 따라 AT의 값이 뚜렷이 감소하는 반면 AT+3°C 지점의 벼는 거의 감소하지 않고 출수기 NDVI 값이 최종 수확까지 이어졌다. 하지만 C 챔버 AT+3°C 지점은 A, B 챔버와 달리 NDVI가 감소하는 모습을 보였으나 그 정도가 AT 지점의 수준에는 미치지 못하였다.

3.2. 등숙기 고온 환경의 영향

고온에 의한 평균 종실중과 단위 면적당 수량의 변화는 선행연구와 마찬가지로 출수 후 40일 평균 기온 값(여기서는 등숙기 평균 온도로 지칭하였음)으로 분석했을 때 가장 유의미한 결과를 보였다(Fig. 4). 평균 종실중과 단위 면적당 수량 모두 등숙기 평균온도가 증가함에 따라 감소하였는데, 특히 평균 종실중은 상대적으로 완만한 감소를 보인 반면 수량은 급격한 감소 경향을 나타냈다. 평균 종실중은 생산 품질을 나타내는 척도로서 등숙기 평균온도가 27~28°C 이상부터 천천히 감소하기 시작하여 30°C 이상부터는 큰 폭으로 감소하였고 31°C에 이르러서는 AT에 비해 약 90%

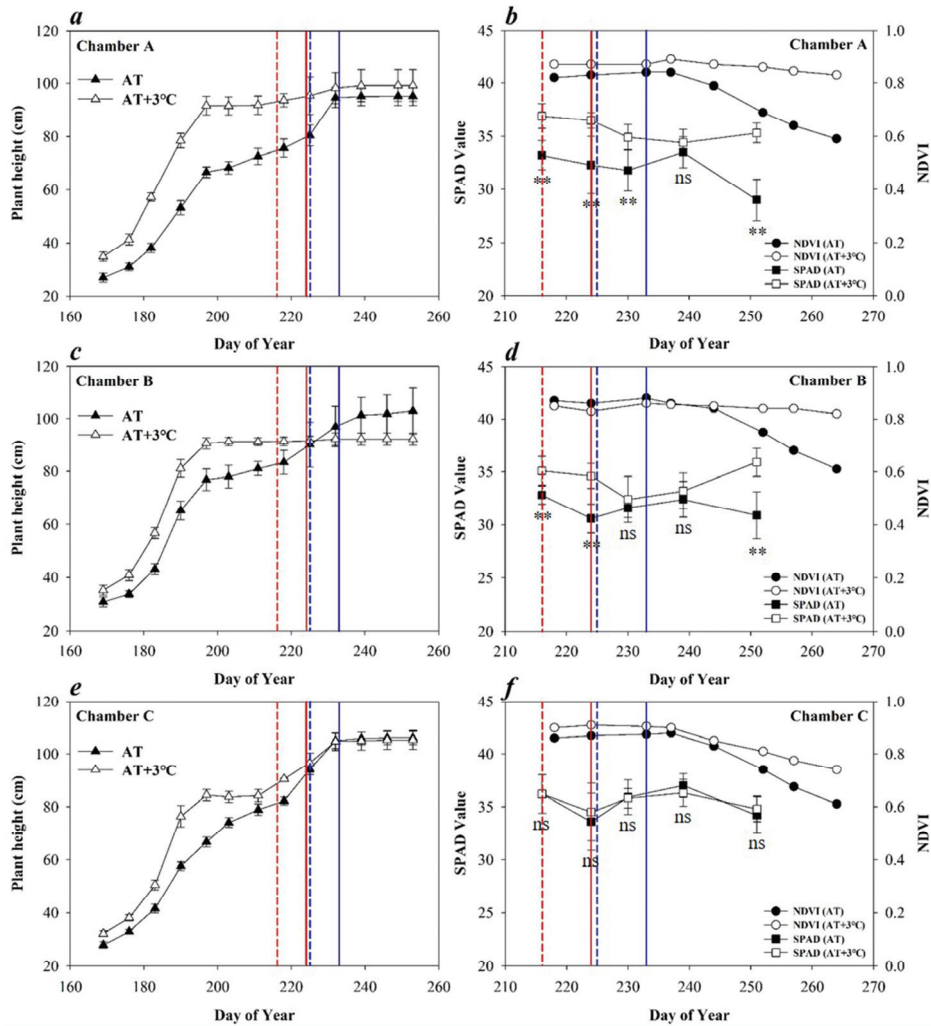


Fig. 3. Change in rice height (cm), SPAD value and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) under different temperature conditions. Dotted and straight vertical lines represent the first heading and heading stage, and blue and red are for AT and AT+3°C. T-test results: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, ns: not significant ($P \geq 0.05$).

가벼워졌다. 챔버별로 살펴보면 A, B 챔버 중간 지점에서 각각 약 5%와 15%의 감소, AT+3°C에서 약 27%와 91%의 감소를 보였다. 하지만 C 챔버의 AT+3°C에서는 평균 종실중은 크게 감소하지 않고 정상 범위 내에 있는 것으로 보아 등숙기 고온 조건이 동화산물의 종실 축적을 저해하는 부정적인 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

단위 면적당 수량은 약 25.7°C에서 급감하기 시작하여 28~29°C에서는 90% 이상의 감소를 보였으며 특히 30°C 이상의 A, B 챔버 AT+3°C 지점은 수량이 거의 0에 가까웠는데 이는 고온에 의한 불임으로 극도

로 낮아진 등숙률이 원인인 것으로 보인다. 한편 A, C 챔버 AT 두 지점은 본 실험의 최저 등숙기 평균 온도인 약 26°C와 최고 등숙률인 약 90%를 가지는 점에서 유사했으나 단위 면적당 수량은 크게 차이를 보였다. 이는 C 챔버의 이삭당 낱알 수가 다른 챔버에 비해 높았기 때문에 비슷한 수준의 등숙률에서 더 많은 단위 면적당 수량을 보인 것으로 사료된다(Fig. 5). 그리고 모든 챔버에서 이삭당 낱알 수는 AT+3°C 지점이 AT 지점보다 낮았는데, 이것은 공통적으로 온도 구배가 유지되었던 유수형성기 고온 조건에 의한 것으로 사료된다.

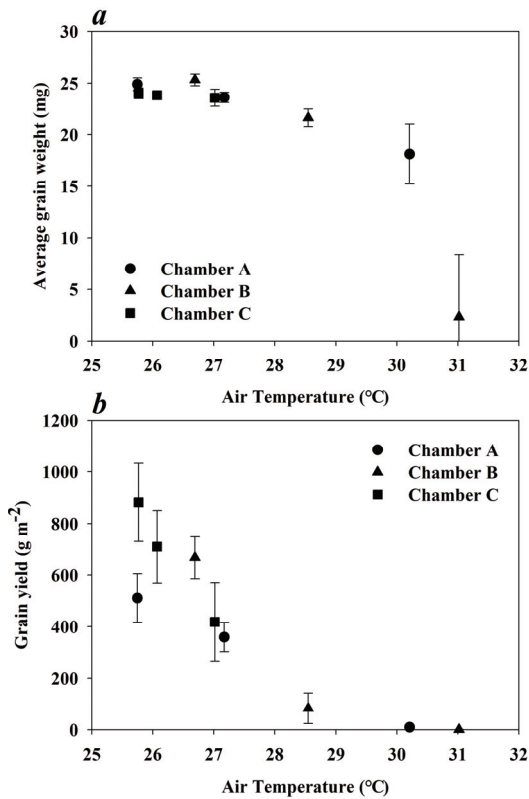


Fig. 4. Rice harvest results to air temperature for 40 days after heading in each chamber. (a) average grain weight (mg), (b) grain yield (g m⁻²).

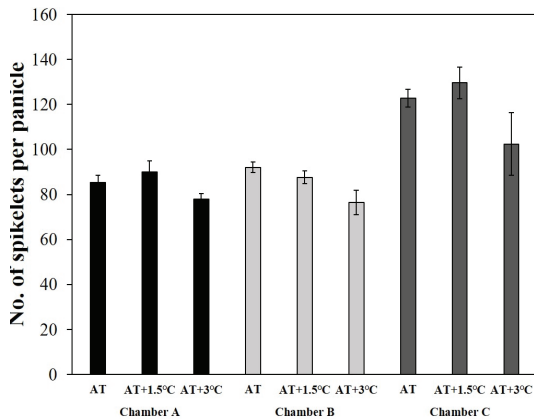


Fig. 5. Number of spikelets per panicle under different temperature conditions in each chamber.

3.3. 고온 환경과 늦이삭 출현

2016년 TGFC 실험에서는 정상이삭 출수 이후 늦이삭이 다시 출수 된 이례적인 모습을 나타냈는데 주로 A, B 챔버의 AT+3°C 지점에서 관찰되었으며, 영양생장기 초장 생장이 거의 없었고, 최종 초장이 AT보다 낮았던 B챔버의 경우 AT+1.5°C에서도 늦이삭이 확인되었다(Fig. 6). 이것은 고온 스트레스에 의한 낮은 잎실율과 등숙 저해로 인해 싱크(sink)인 종실에 동화산물이 축적되지 못하고 소스(source)인 엽과 줄기에 머물면서 높은 엽록소 농도값(e.g., SPAD and NDVI)을 보이다가(Fig. 3) 재출수가 된 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 7을 보면 정상이삭의 등숙률이 낮아질수록 늦이삭의 수량이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 늦이삭의 단위 면적당 이삭수, 이삭당 낱알 수, 평균 종실중, 등숙률, 단위 면적당 수량이 온도 조건과 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났으며, 정상이삭의 등숙률과 늦이삭의 단위 면적당 이삭 수, 이삭당 낱알 수도 통계적으로 유의한 관계를 보였다(Table 1).

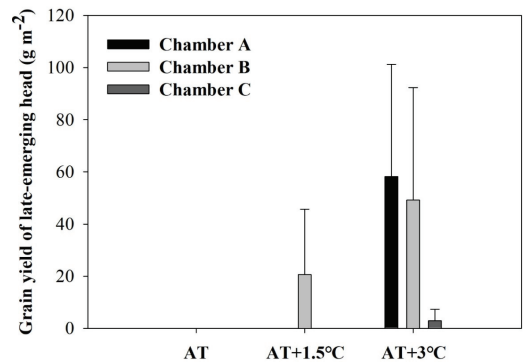


Fig. 6. Grain yield of late-emerging head (g m⁻²) under different temperature conditions in each chamber.

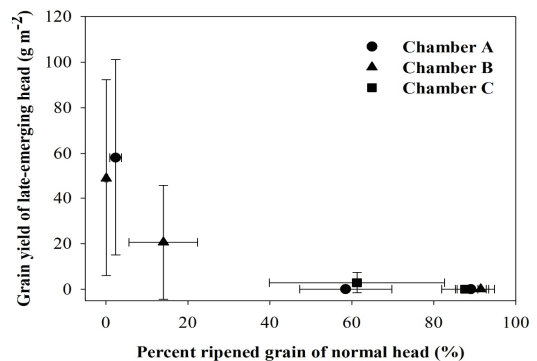


Fig. 7. Relationship between grain yield of late-emerging head (g m⁻²) and percent ripened grain of normal head (%).

Table 1. Harvest results of late-emerging heads under different temperature conditions

Chamber	Flag		No. of panicles per area (m ²)	No. of Spikelets per panicle	Average grain weight (mg)	Percent ripened grain (%)	Grain yield (g/m ²)
	TR	PN(%)					
A	AT	89.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	AT+1.5°C	58.5	220	12	0.0	0.0	0.0
	AT+3.0°C	2.4	493	24	19.5	24.9	73.4
B	AT	91.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	AT+1.5°C	14.0	554.0	18.0	11.0	9.7	26.0
	AT+3.0°C	0.1	427.0	25.0	16.5	22.3	61.9
C	AT	87.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	AT+1.5°C	88.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	AT+3.0°C	61.3	151.0	11.0	8.5	2.0	3.6
ANOVA	TR		**	**	**	**	**
	PN		**	**	ns	ns	ns

(TR : Temperature Regimes, PN : Percent ripened grain of Normal head)

ANOVA results : **P<0.01, *P<0.05, ns: not significant (P≥0.05)

IV. 고찰 및 결론

본 연구는 이례적인 폭염을 기록한 2016년에 TGFC에서 수행된 벼의 생육 반응 실험으로서 적정 생육 온도보다 다소 높은 조건뿐만 아니라 고온에서의 반응까지 살펴볼 수 있었다. 고온 조건에서는 영양생장 단계가 빠르게 진행되며 출수 및 개화시기도 단축되는 것을 확인하였다. 출수 전의 고온 조건은 모든 챔버의 AT+3°C 지점의 이삭당 낱알 수를 감소시켰으며, A, C 챔버의 AT+1.5°C 지점은 증가, B 챔버의 AT+1.5°C 지점에서는 감소하는 경향을 보이면서 AT+1.5°C 조건에서 이삭당 낱알 수의 변화는 명확하지 않았다. 각 생육 단계의 온도 중에서도 등숙에 민감한 출수 후 40일 평균 온도가 최종 생산량과 유의한 관계를 나타내는 것으로 볼 때 고온에서 벼의 생산량 감소는 빨라진 생육 속도에 따른 생육기간 중 총 광합성량 감소 영향보다는 개화 후 수정 저해 및 등숙 불량 의 원인이 크다고 사료된다.

결과적으로 광합성 동화산물이 고온의 영향으로 종실에 축적 및 소비되지 못하고 등숙기에도 엽록소 함량과 관계 있는 SPAD와 NDVI가 감소하지 않는 모습을 보였다. 이는 고온조건에서 잎 보다 이삭의 노화가 빠르게 진행됨에 따라 등숙 종료 이후 잎과 줄기로의 건물량(dry matter) 분배가 증가 했다는 선행 연구와 관련이 있는 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2011). NDVI

는 위성 기반 생산량 예측에 핵심 변수로 사용된다는 점을 고려할 때, 본 결과와 같이 불량한 등숙기로 인한 정상보다 높은 NDVI값이 생산량을 과대 추정할 수 있을 것이므로 주의가 필요할 것이다. 고온에 의한 이삭의 조기 노화와 불임으로 인한 잉여된 동화산물은 기부 또는 마디에서 새로운 분얼을 출현시키며 일반적인 생육 모습으로 볼 수 없는 늦이삭의 출현을 야기하였다. 이는 이삭의 조기 노화 이후에도 유지된 생산 능력(source activity)에 상응하는 수용 능력을 확보하기 위한 생육반응으로 보인다. 하지만 늦이삭의 생산량이 정상이삭에서 감소한 생산량(AT+3°C 생산량 - AT 생산량)을 만회하기에는 매우 부족한 정도였다.

2016년 기상 조건에서의 생산량이 일반 재배지 평균값 정도를 보였으나 온도 조건이 높아짐에 따라 곧바로 감소하는 경향을 보이는 것을 볼 때 2016년 기상이 온도에 대해 지금까지의 정상적 생산량을 유지할 수 있는 한계로 파악할 수 있다. 즉, 지구온난화로 인해 벼 등숙기 평균 기온이 2016년 조건을 넘어선다면 곧바로 심각한 수확량 감소로 이어질 수 있음을 시사한다. 기후변화로 인해 연 평균기온이 증가하는 것도 문제이지만, 등숙기와 같은 특정 시기의 폭염은 미래의 벼 생산량을 심각하게 저해해 식량안보를 위협할 잠재 요인이 될 것이다. 따라서 온난화 조건에서의 작물 생육 및 생산량 변동을 이해하고 보다 정확한 예측과 평가를 위해 TGFC와 같은 미래의 기상 환경을 조

성하고 실제로 야외에서 재배하여 결과를 분석하는 연구들이 많이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

온난화에 따른 벼의 생산량 변화는 우리나라뿐만 아니라 동아시아의 식량 수급에 매우 중요한 이슈 중 하나이다. 본 연구에서는 야외 온도보다 0~3°C 높은 환경을 형성해 주는 야외 온도구배챔버(TGFC)를 이용하여 고온이 벼의 생육과 생산량에 미치는 영향을 실험하였다. 챔버는 A, B, C 총 3개를 본 연구에 이용하였으며, C 챔버는 출수기 이후 온도구배 처리를 하지 않았다. 벼 품종은 중만생종인 일미를 증묘로 이양하였으며, 비료는 표준 시비량을 고려하여 N(질소) 9 kg, P(인) 4.5kg, K(칼륨) 5.7kg을 기준으로 처리하였다. A, B, C 모든 챔버에서 영양생장기 동안 고온 조건의 벼가 상대적으로 생육 속도가 빨랐다. 하지만, 출수 후 40일 동안의 평균 온도로 정의한 등숙기 온도가 계속 고온으로 유지될 경우 등숙률과 평균 중실중이 온도에 비례하여 점진적으로 감소하였다. 특히 2016년 기상 조건을 기점으로 등숙기 온도가 증가함에 따라 불임이 증가하여 등숙률은 급격히 감소하였고, 그 영향으로 단위 면적당 수량도 크게 낮아졌다. 결국 동화산물의 분배 불균형을 초래해 출수 이후에도 잎의 엽록소 함량이 낮아지지 않았으며 비정상적인 늦이삭이 출현하였다. 하지만 늦이삭의 생산량이 고온으로 인해 감소한 정상 이삭의 생산량을 만회하기에는 매우 부족한 정도였다. 향후 지구 온난화로 인한 벼 생육기간의 고온은 벼의 생육을 촉진시키고, 출수 및 개화시기를 단축시키며 등숙기에도 고온이 지속될 시 등숙률과 평균중실의 무게를 감소시켜 최종적으로 벼의 생산량 및 품질을 감소시킬 것으로 예측된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(과제번호 : NRF-2016R1D1A1B03933218).

REFERENCES

- Baker, J. T., and L. H. Allen, 1993: Contrasting crop species responses to CO₂ and temperature: rice, soybean and citrus. *Plant Ecology* **104**(1), 239-260.
- Baker, J. T., 2004: Yield responses of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* **122**(3), 129-137.
- Horie, T., H. Nakagawa, J. Nakano, K. Hamotani, and H. Y. Kim, 1995: Temperature gradient chambers for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. *Plant, Cell & Environment* **18**(9), 1064-1069.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, **151**, 74-76.
- Jagadish, S. V. K., P. Q. Craufurd, and T. R. Wheeler, 2007: High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany* **58**(7), 1627-1635.
- Jung, W. S., K. J. Lee, and B. W. Lee, 2015: Responses of spikelet fertility to air, spikelet, and panicle temperatures and vapor pressure deficit in rice. *Journal of Crop Science and Biotechnology* **18**(4), 209-218.
- Kim, J., J. Shon, C. K. Lee, W. Yang, Y. Yoon, W. Yang, Y. Yoon, W. H. 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.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2016: Annual Climatological Report 2016. 10-14.
- Maruyama, A., W. M. W. Weerakoon, Y. Wakiyama, and K. Ohba, 2013: Effects of increasing temperatures on spikelet fertility in different rice cultivars based on temperature gradient chamber experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science* **199**(6), 416-423.
- Matsui, T., K. Kobayasi, H. Kagata, and T. Horie, 2005: Correlation between viability of pollination and length of basal dehiscence of the theca in rice under a hot-and-humid condition. *Plant Production Science* **8**(2), 109-114.

- 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.
- Satake, T., and S. Yoshida, 1978: High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science* **47**(1), 6–17.
- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Journal of Climate Change Research* **1**(2), 121–131. (in Korean with English abstract)
- Shon, J., J. Kim, C. K. Lee, and W. Yang, 2015: Effect of high temperature on leaf physiological changes as chlorophyll composition and photosynthesis rate of rice. *Korean Journal of Crop Science* **60**(3), 266–272. (in Korean with English abstract)
- Stone, P., 2000: The effects of heat stress on cereal yield and quality. *Crop Responses and Adaptations to Temperature Stress: New Insights and Approaches*, A. S. Basra (Eds.), CRC Press, 243–252.
- Tian, Y., J. Chen, C. Chen, A. Deng, Z. Song, C. Zheng, W. Hoogmoed, and W. Zhang, 2012: Warming impacts on winter wheat phenophase and grain yield under field conditions in Yangtze Delta Plain, China. *Field Crops Research* **134**, 193–199.
- Wahid, A., S. Gelani, M. Ashraf, and M. R. Foolad, 2007: Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and experimental botany* **61**(3), 199–223.
- 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. (in Korean with English abstract)
- Ziska, L. H., P. A. Manalo, and R. A. Ordonez, 1996: Intraspecific variation in the response of rice (*Oryza sativa* L.) to increased CO₂ and temperature: growth and yield response of 17 cultivars. *Journal of Experimental Botany* **47**(9), 1353–1359.