

RCP 8.5 시나리오에 따른 미래 기후조건에서 벼의 품질 및 전분 동화 특성 변화

상완규 · 조현숙 · 김준환 · 신평 · 백재경 · 이윤호 · 조정일 · 서명철*
농촌진흥청 국립식량과학원
(2018년 9월 17일 접수; 2018년 11월 19일 수정; 2018년 11월 20일 수락)

The change of grain quality and starch assimilation of rice under future climate conditions according to RCP 8.5 scenario

Wan-Gyu Sang, Hyeoun-Suk Cho, Jun-Hwan Kim, Pyong Shin, Jae-Kyeong Baek,
Yun-Ho Lee, Jeong-Il Cho and Myung-Chul Seo*

National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181,
Hyeoksins-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

(Received September 17, 2018; Revised November 19, 2018; Accepted November 20, 2018)

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the impact of climate change on rice yield and quality. Experiments were conducted using SPAR(Soil-Plant-Atmosphere-Research) chambers, which was designed to create virtual future climate conditions, in the National Institute of Crop Science, Jeonju, Korea, in 2016. In the future climate conditions(+2.8°C temp, 580 ppm CO₂) of year 2051~2060 according to RCP 8.5 scenario, elevated temperature and CO₂ accelerated the heading date by about five days than the present climate conditions, resulted in a high temperature environment during grain filling stage. Rice yield decreased sharply in the future climate conditions due to the high temperature induced poor ripening. And the spikelet numbers, ripening ratio, and 1000-grain weight of brown rice were significantly decreased compared to control. The rice grain quality was also decreased sharply, especially due to the increased immature grains. In the future climate conditions, expression of starch biosynthesis-related genes such as granule-bound starch synthase(*GBSSI*, *GBSSII*, *SSIIa*, *SSIIb*, *SSIIIa*), starch branching enzyme(*BEIIb*) and ADP-glucose pyrophosphorylase(*AGPSI*, *AGPS2*, *AGPL2*) were repressed in developing seeds, whereas starch degradation related genes such as α -amylase(*Amy1C*, *Amy3D*, *Amy3E*) were induced. These results suggest that the reduction in yield and quality of rice in the future climate conditions is likely caused mainly by the poor grain filling by high temperature. Therefore, it is suggested to develop tolerant cultivars to high temperature during grain filling period and a new cropping system in order to ensure a high quality of rice in the future climate conditions.

Key words: Climate change, Rice, Quality, SPAR Chamber



* Corresponding Author : Myung-Chul Seo
(mcseo@korea.kr)

I. 서 언

기후변화 제 5차 보고서에 의하면 21세기 후반기에 평균기온이 RCP 4.5 기준으로는 1.8°C, RCP 8.5 기준으로는 3.7°C가 증가할 것으로 전망되고 있다. 이처럼 기온과 대기 CO₂ 농도의 증가는 작물의 수량 및 품질 뿐만 아니라 개화시기 등 생물계절의 변화로 인한 재배적지 이동으로 농업생산에 큰 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다(FAO, 2004; Wolfe *et al.*, 2005). 특히 우리나라에서는 최근 20세기 기후 자료를 분석한 결과, 현재까지 평균기온이 전 세계 평균치를 크게 상회하여 지구평균기온 상승치(0.74°C)의 2배 이상인 1.5°C 상승한 것으로 나타나 온난화 속도가 매우 우려되는 수준에 도달했음을 알 수 있다(Kwon, 2005). 또한 전 세계적으로는 2007년 이후 국제 식량 및 곡물 가격 지표는 150이상으로 변동성이 매우 심해지는 양상을 보이고 있어 기후변동에 대비한 작물의 생리 변동의 원인구명, 예측 등 안정적인 식량작물 생산을 위한 기후변화 적응 기술 개발이 매우 필요한 상황이다.

우리나라에서 벼는 식량안보와 직결되는 가장 중요한 식량작물 중 하나로서 이에 대한 기후변화 관련 연구는 생리, 생태, 환경 등 여러 측면에서 광범위하게 이루어져 왔다. 특히 국내에서는 미래 기후에 대한 작물성장모형 연구를 통하여 벼의 수량 감소를 이미 예측한 바 있다(Yun, 2003; Chung *et al.*, 2006). 특히 온도와 CO₂를 동시에 처리할 수 있는 온도구배온실, 간이 챔버를 사용한 실제 재배 실험을 통해 각기 다른 온도와 CO₂ 농도 수준에 따라 생육 변동과 쌀 품질에 관한 연구결과가 보고되었는데 이들 연구결과에 따르면 온도 및 CO₂ 농도 상승에 따라 대체로 식물체 전체 바이오매스는 증가하는 반면 생산성은 오히려 감소하였으며 쌀 품질 또한 크게 악화된다고 하였다(Seneweera and Conroy, 1997; Terao *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 1996a; 1996b; Ziska *et al.*, 1997).

온도 상승에 따른 벼의 생육 반응은 작물 생산기간의 단축에 따른 출수 및 등숙 특성의 급격한 변화로 대표할 수 있는데 특히 자포니카 품종의 경우 출수기의 평균온도가 32°C 이상에서는 임실율이 크게 저하되며 등숙기의 평균온도가 26°C 이상에서는 극심한 등숙 불량 현상을 겪게 된다고 알려져 있다(Yamakawa, 2011). 반면 대기 CO₂ 농도의 상승은 벼의 광합성 속도를 증가시킬 뿐만 아니라 분얼수, 지상부 건물중, 수량을 증가시킨다고 하는데(Ziska *et al.*,

1997; Sakai *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2003) 특히 Baker and Jr. Allen(1993)는 CO₂ 상승에 따라 벼의 근락광합성은 유수분화기, 분얼기, 개화기에 각각 36%, 51%, 38% 증가하였다고 보고하였다. 다만 Sakai *et al.* (2001)은 대기 CO₂ 농도의 상승으로 인하여 출수기까지 순광합성은 증가하지만 출수기 이후로는 야간 호흡의 증가로 인하여 순탄소고정량이 감소한다고 하여 대기 CO₂ 농도에 따른 작물 생육 반응은 생육단계에 따라 매우 상이하게 나타난다고 하였다.

이처럼 온도 및 CO₂ 농도에 따른 작물 생육 반응은 각 환경요소들 간의 수준 및 상호작용에 따라 매우 다양하게 나타날 수 있는데 지금까지의 연구결과들은 대부분 제한적인 처리와 재배 조건을 적용하고 있기 때문에 보다 정확한 영향평가 결과를 위해서는 기후변화 시나리오에 따른 가상의 미래 기후조건하에서 실제로 수행된 재배 시험 결과를 얻을 필요가 있다.

본 연구는 SPAR 시설을 활용하여 RCP 8.5 시나리오에 따른 전주 지역 가상의 미래 기후 조건에서 직접 재배 시험을 실시한 후 벼의 생육과 쌀 품질의 변화를 분석하고 수량 및 품질 저하 현상을 전분 대사 유전자 발현을 통해 해석함으로써, 기후변화 적응 대책 수립에 활용할 수 있는 실질적인 근거 자료로 활용하기 위해 수행되었다. 이를 통해 기후변화에 따른 벼의 생리, 환경적 영향을 보다 정밀하게 분석함으로써 작물 모형의 개발 및 환경 피해 지표 확립 등의 연구에 도움이 될 것으로 기대한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 환경 조건 및 재배 관리

본 시험은 전주 국립식량과학원 본원에 설치한 SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) 시설을 활용하여 수행하였다. SPAR는 실제 재배 환경(자연광, 대형 토양상) 조건에서 온도, CO₂ 등의 동시 조절을 통해 가상의 기후조건을 구현해 낼 수 있는 옥외환경 조절 챔버의 하나로서 다양한 기상 환경 조건하에서 근락 단위의 작물 생육 영향평가를 수행할 수 있다는 장점이 있다(Reddy *et al.*, 2001).

본 시험을 위해 2016년도에 전주 평년 기후 대비 미래 기후 조건에서 벼 적기 재배에 대한 영향평가 시험을 진행하였다. 온도 값 설정은 2001~2010년 전주 지역 최고, 최저 온도에 대한 일별 자료를 일주일 단위로 평균값으로 산출한 후 현재 기후 조건으로 적

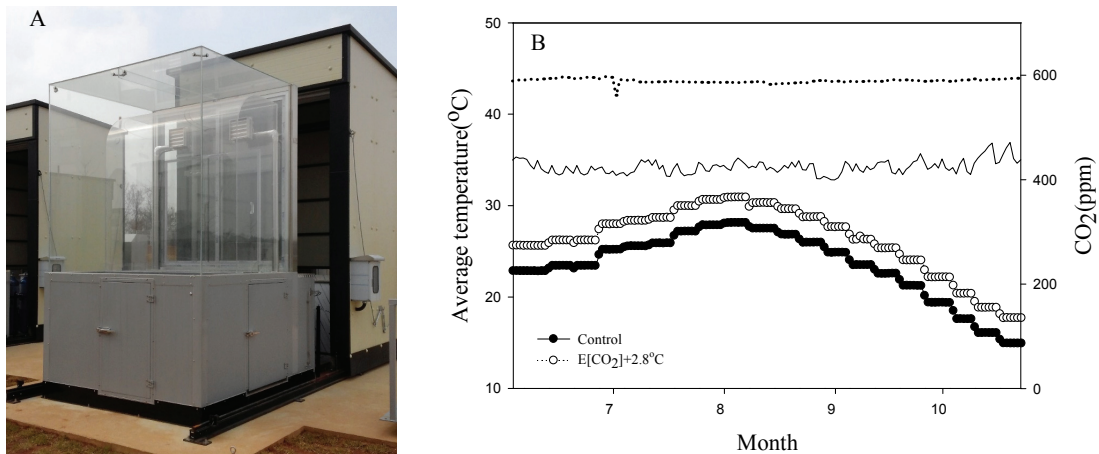


Fig. 1. A SPAR unit (A) and experimental condition(average temperature, air CO₂ concentration) during the growth period of rice (B).

용하였고 실험구는 RCP 8.5 시나리오에 따른 2051~2060년대 기후 조건에 따라 현재기후조건에 온도는 2.8°C 상승, 대기 CO₂ 농도는 580ppm을 처리하여 시험을 진행하였다. 일별 온도 처리는 최고, 최저 온도를 사용하여 시간 별 일주기 값을 모의한 후 적용하여 최대한 실제 일주기 환경과 유사하게 모의하도록 하였다(Fig 1).

벼 재배 방식은 일반 재배 시험과 동일하게 수행하였으며 재배품종은 남평벼를 5월 6일에 성묘 포트에 파종하여 5월 30일에 각 처리구 별로 적기 이양하였다. 재식 밀도는 생육 조사 및 샘플 채취 등을 고려하여 30×12cm 간격으로 두 줄씩 이양하여 첩벼당 총 30주를 확보하였으나 실제로는 Border effect에 대한 양쪽 4개체를 제외한 26개체를 생육 조사 및 분석 샘플로 활용하였다. 질소 시비 조건은 질소를 성분비로 10a당 9kg을 기비, 분얼비, 수비로 각각 50, 20, 30%로 사용하였으며 인산은 성분비로 10a 당 4.5kg을 전량 기비로, 가리는 5.7kg을 기비와 수비로 각각 70%와 30%로 나누어 사용하였다.

2.2. 벼 수량 및 품위 분석

벼 수량 조사는 출수 후 45일에 각 처리 별 SPAR 내 2m×0.6m에 해당하는 전 식물체를 수확하여 수량 및 수수, 수당립수, 천립중 등 수량구성요소 조사에 이용하였다. 현미 및 백미 외관품위조사는 수량 조사 샘플과는 별도로 각 처리 별 5포기씩 수확하여 음건한 후 탈곡하여 벼품위판별기(RN-300, Kett, Japan)를 이

용하여 처리당 5반복 분석하였다.

모든 데이터의 통계 분석은 SPSS statistics (Ver. 19)를 사용하였으며, 던컨 다중범위검정(Duncan's multiple range test)으로 5% 유의수준에서 처리 평균 간 유의성 검정을 수행하였다.

2.3. 종실 전분 대사 관련 유전자 발현 분석

등숙 중 전분 대사 관련 유전자 발현 변화 분석은 출수 후 20일에 해당하는 시기에 각 시험구의 이삭을 채취해 종자의 total RNA를 추출한 후 Real-time PCR (Abi 7300)에서 전분 대사 관련 유전자들의 특이적 primer를 이용하여 발현 정도를 4반복 분석하였다. 분석 유전자 종류 및 기능은 Table 1과 같으며 구체적으로 ADP-glucose pyrophosphorylase, Starch synthase 과 같은 전분 합성 관련 유전자 13종, 대표적 전분 분해 효소인 Alpha-amylase 유전자 4종 등 총 17종을 분석에 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 미래 기후 조건에서 고온 및 고CO₂에 따른 벼 생육환경 및 수량구성요소 변동

벼 수량구성요소를 살펴보면 보통 대기 CO₂ 농도의 증가는 벼의 단위면적당 수수의 증대를 통하여 수량 증대 요인으로 작용하는 반면 고온 조건은 수당립수의 감소 및 등숙률 저하를 유발하여 수량 감소 요인으로 작용한다고 알려져 있다(Baker and Jr. Allen, 1993;

Table 1. List of starch metabolism-related genes used for RT-PCR gene expression analysis

Property	Synonymous	Gene accession	Description
ADP-glucose pyrophosphorylase	<i>AGPS1</i>	Os09g0298200	ADP-glucose pyrophosphorylase small subunit.
	<i>AGPS2</i>	Os08g0345800	Glucose-1-phosphate adenylyltransferase small subunit
	<i>AGPL1</i>	Os05g0580000	Glucose-1-phosphate adenylyltransferase large subunit 1
	<i>AGPL2</i>	Os01g0633100	ADP-glucose pyrophosphorylase large subunit
Starch synthesis	<i>GBSSI</i>	Os06g0133000	Granule-bound starch synthase I
	<i>GBSSII</i>	Os07g0412100	Granule-bound starch synthase I
	<i>SSI</i>	Os06g0160700	Starch synthase I
	<i>SSIIa</i>	Os06g0229800	Starch synthase isoform
	<i>SSIIb</i>	Os02g0744700	Starch synthase isoform
	<i>SSIIc</i>	Os10g0437600	Soluble starch synthase
	<i>SSIIIa</i>	Os08g0191500	Starch synthase isoform
	<i>BEI</i>	Os06g0726400	Starch-branching enzyme I
Starch degradation	<i>BEIIb</i>	Os02g0528200	Starch-branching enzyme
	<i>Amy1A</i>	Os02g0765600	1,4-alpha-D-glucan glucanohydrolase
	<i>Amy1C</i>	Os02g0765300	1,4-alpha-D-glucan glucanohydrolase
	<i>Amy3D</i>	Os08g0473900	Alpha-amylase type B
	<i>Amy3E</i>	Os08g0473600	1,4-alpha-D-glucan glucanohydrolase

Ziska *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2003). 본 실험에서는 대기 CO₂ 농도의 상승에 따른 주당 수수 증가에 대한 효과와 온도상승에 따른 수수 및 수당 입수의 감소 효과가 서로 복합적으로 작용하여 결과적으로 미래기 후 조건에서 단위면적당립수는 다소 증가하였으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 수량에 큰 영향을 미치는 주당 수수, 수당립수와 같은 수량구성 요소들은 기온과 대기 CO₂ 농도의 수준, 조합에 따라 그 영향이 매우 다양하게 나올 가능성이 높아 기후변화 시나리오 조건에 따라 수량 및 품질 변동 폭이 매우 클 것으로 보인다. Matsui *et al.*(1997; 2001)은 자포니카 품종에 따라 출수 개화 시기의 35°C 이상의 지속 고온이 영화 불임을 유도하여 수량 감소를 초래할 수 있다고 하였고 Satake and Yoshida(1978)은 개화 및 출수 시기에 평균 온도 32°C에 4시간만 노출되어 있어도 극심한 불임이 유발될 수 있다고 하였는데 본 시험에 사용한 남평벼의 경우 출수기 고온에 의한 입실률 저하 정도는 그리 크지 않았다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 수량 감소의 가장 큰 원인은 결과적으로 단위면적당립수의 감소보다는 등숙률 및 천립중의 저하가 가장 큰 요인인 것으로 나타났는데 전주지역의 2051~2060년 미래 기후 조건에서 현미 천립중은 현재 대비

약 12%, 등숙률은 약 24% 감소하였다. 이러한 결과들로 인해 벼 수량 또한 크게 감소하였는데 전주지역 현재 대비 50년 후에는 현재보다 수량은 약 33% 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 2).

벼 생육환경 또한 크게 달라지게 되는데 고온 및 고CO₂의 미래 기후조건에서는 벼의 생육 및 노화가 촉진되어 출수기가 현재 대비 약 5일 이상 빨라지는 등 생육기간이 단축될 뿐 아니라 이로 인해 등숙 시기에 처해지는 대기 온도 조건이 크게 달라져 고온 등숙 환경에 노출될 위험성이 매우 높아지게 됨을 알 수 있었다(Table 2). 이러한 벼 생육환경의 변화는 CERES-Rice 등 기존의 벼 생육 모형을 활용한 생물계절 변동 예상 결과와도 대체로 일치되는 결과이다 (Shim *et al.*, 2010). 벼의 개화, 출수 후 40일간의 평균 온도 21~23°C가 최적 등숙 온도라고 알려져 있으며 이보다 높아지거나 낮아지면 급격한 수량 감소의 원인이 된다고 하였는데(Yun and Lee, 2001), 본 실험에서 출수 후 40일간의 평균 온도를 처리별로 비교해 보면 현재기후에서는 등숙기 평균온도가 약 24.1°C인 반면 50년 후 미래기후에서는 약 27.8°C로 약 3°C 이상 높아지는 결과를 보임을 알 수 있었다(Table 2). 결론적으로 미래 기후 조건에서는 고온 등숙에 의한 심각한

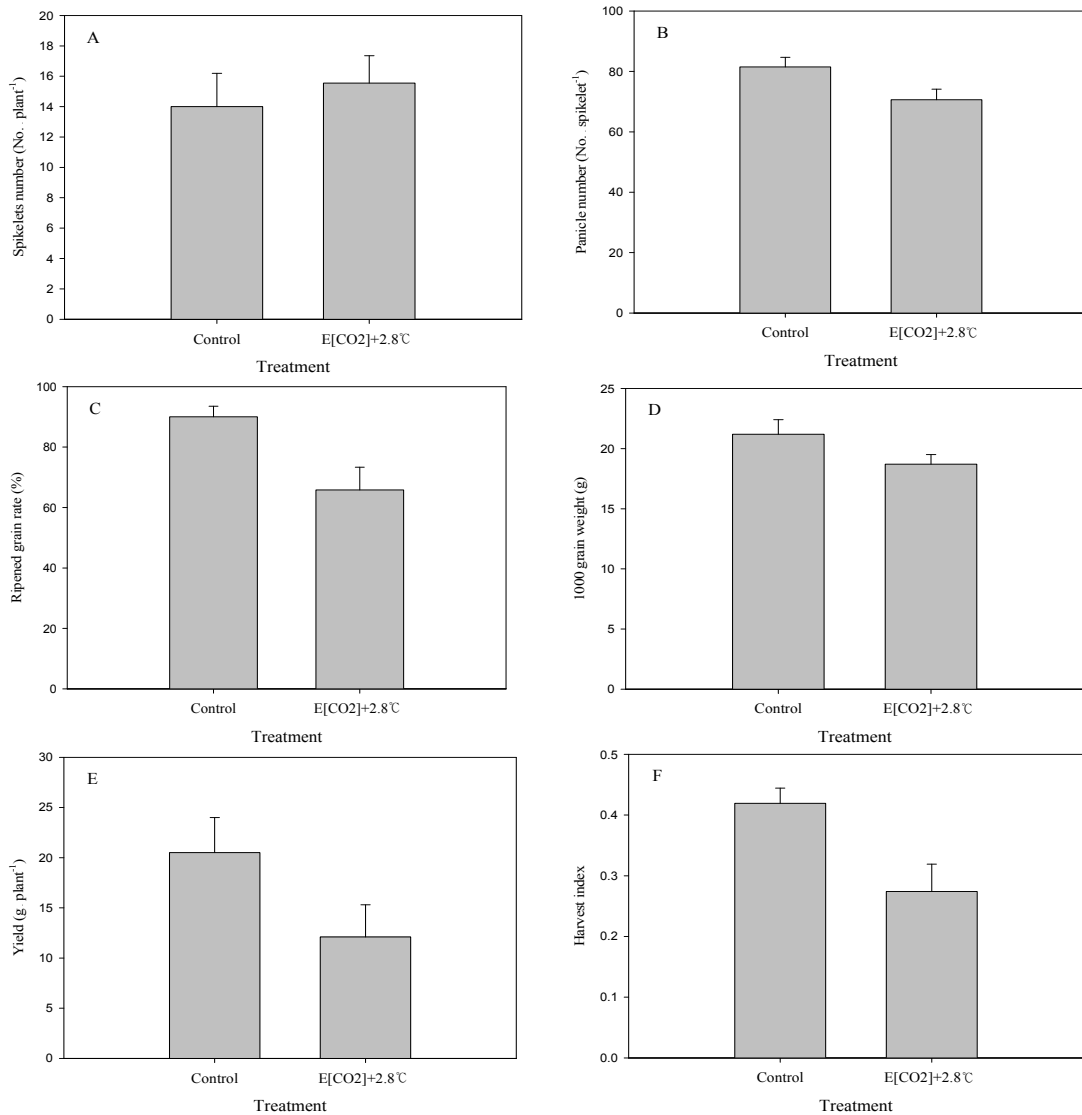


Fig. 2. Yield components and grain yield at present and in the future climate conditions. Spikelets number (A), panicle number (B), ripening rate (C), 1000 grain weight (D), Yield (E), harvest index (F).

Table 2. Present and future climate conditions and heading date

Treatment	Temperature(°C)			Average CO ₂ (ppm)	Heading Date (m.d)
	Average temp.	Maximun temp. at heading stage	Average temp. during ripening stage ³⁾		
Control ¹⁾	23.8	31.7	24.1	425	8.16
E[CO ₂]+2.8°C ²⁾	26.6	35.4	27.8	578	8.10

¹⁾ Present climate(2000~2010) in Joenju

²⁾ Future climate according to RCP 8.5 scenario(2050~2060) in Joenju

³⁾ Average temperature of 40 days after heading date

생리 장애가 예상되는 바 이를 극복 또는 회피하는 방향으로 관련연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

3.2. 미래 기후 조건에서 고온 및 고CO₂에 따른 쌀 품질 변동

처리 별 3반복씩 RN300을 활용하여 현미 외관 품질을 조사한 결과 기후변화 조건에서는 정상립(완전미) 비율이 현저하게 저하된 반면 불완전립은 반대로 크게 증가하였다(Fig. 3). 미래 기후 조건에서 완전미 비율은 현재 대비 약 40% 감소하였고 미숙립, 동할립, 피해립, 사미 등과 같은 불완전립은 약 3배가량 증가하였는데 불완전립 중 미숙립은 약 79%, 피해립은 약 18%, 착색립 및 사미는 약 2% 로 특히 미숙립의 증가가 두드러졌다(Fig. 3). 미숙립의 대부분을 차지하는 유백미와 복백미는 특히 고온조건에서 잘 유발되는 특성으로 고온에 의한 탄수화물 경합 조건에 의해 등숙과정 중 종실로의 탄수화물 전류 및 축적이 억제되어 나타나는 것으로 잘 알려져 있다(Ebata and Tashiro, 1973). 결론적으로 미래 기후 조건에서는 생육기간 단축으로 인해 가중된 고온 등숙 환경이 종실 전분 동화 및 전류 불량 현상을 유발시키고 이로 인해 미숙립의 급격한 증대를 초래하여 쌀 품질을 저하시키는 주요 요인으로 작용한다고 할 수 있다.

3.3. 고온 및 고CO₂에 따른 종실의 전분 대사 관련 유전자 발현 변화

기후변화에 따른 등숙 불량 현상을 설명하고자 유

숙기~호숙기에 해당하는 출수 후 20일경에 종자내 전분 대사 관련 유전자들의 발현 정도를 분석하였다. 전분은 보통 배유 내 전분체(Amyloplast)에서 합성 및 저장이 되는데 이때 전분 합성을 위한 1차 기질은 ADP-glucose로서 보통 광합성 산물인 자당(sucrose) 으로부터 전환이 되며 이때 ADP-glucose pyrophosphorylase (*AGPS1*, *AGPS2*, *AGPL1* and *AGPL2*)가 대사 과정에서 중요한 역할을 한다 (Yamakawa, 2011). 이처럼 자당으로부터 변환된 ADP-glucose는 *GBSSI*, *GBSSII*, *SSI*, *SSIIa*, *SSIIb*, *SSIIc*, *SSIIIa*, *BEI*, *BEIIb* 등의 Starch synthase에 의해 전분으로 전환된 후 전분립(Starch granule)을 구성하게 되는데 이 때 *GBSSI*, *GBSSII*는 Amylose 합성에, *BEI*, *BEIIb*는 Amylopectin 합성에 관여한다고 알려져 있다(Yamakawa, 2011). 반면 α-Amylase는 배유 내 합성된 전분의 분해 등 이화작용에 관련된 가수분해 효소로서 종자 품질에 중요한 영향을 미친다. 위에 나열한 효소들은 모두 종자내 전분 합성과 분해에 필수적인 대표적 효소로서 이들에 대한 유전자 발현 분석은 등숙 기간 중의 전분 대사과정을 이해하는데 중요한 단서를 제공해 준다.

Fig. 4를 보면 전분 합성 유전자인 *GBSSI*, *GBSSII*, *SSI*, *SSIIa*, *SSIIb*, *SSIIc*, *SSIIIa*, *BEI*, *BEIIb*의 발현 정도는 미래기후에서 현재 대비 각각 약 0.41, 0.50, 1.34, 0.69, 0.74, 1.06, 0.59, 1.04, 0.68배 수준이었으며 유전자에 따라 유의한 차이가 없는 경우도 있었지만 전체적으로 크게 감소하는 경향을 보였다.

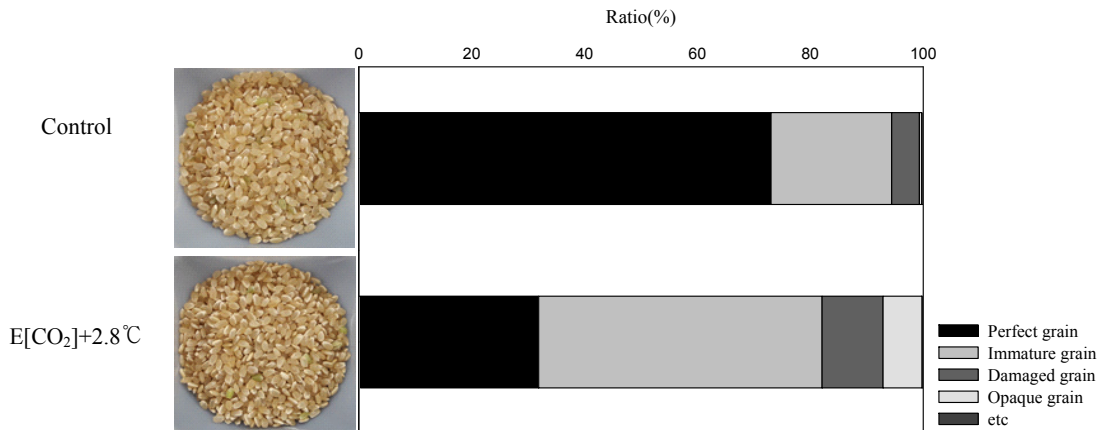


Fig. 3. Physical properties of brown rice under present and future climate conditions. The ratio of perfect, immature, damaged, opaque, and etc. Grain quality was determined by a grain-grading machine, RN-300.

ADP-glucose 합성 과정에 관여하는 *AGPS1*, *AGPS2*, *AGPL1*, *AGPL2* 유전자들의 발현 또한 현재 대비 각각 0.76, 0.86, 1.00, 0.89배 수준으로 전체적으로 감소하는 경향이었으나 전분 합성 유전자들에 비해서 감소 폭은 그리 크지 않았다. 즉 고온 등숙에서의 등숙 불량 은 전분 합성을 위한 주요 기질인 ADP-glucose의 공급 저하와 전분으로 합성, 축적되는 기질의 저하가 함께 관련 되어있다고 여겨진다. 반면 전분 분해와 관계된 α -Amylase 유전자들은 최대 3.2배까지 발현양이 크게 증가하였는데 이는 고온에 의한 광합성 저하 및 호흡 증가로 종실 체내 양분 소모가 크게 증가함을 의미한다.

본 연구결과는 고온 조건에서 전분 합성 관련 유전자들의 발현은 감소하는 반면 분해 관련 유전자들의 발현은 증가함으로써 종실내 전분 구조 및 조성이 크게 변화하여 종자 품질에 영향을 미친다고 한 Yamakawa *et al.*(2007)와 Asaoka *et al.*(1984)의 연구

내용과 대체로 비슷한 경향을 보였다. 다만 본 실험이 고온과 고CO₂ 복합 환경에서 이루어졌음에도 불구하고 기존의 고온 단독 환경에서의 유전자 발현 양상과 비슷한 결과가 도출된 것으로 보아 50년 후 CO₂ 수준인 580ppm에서는 전분 대사에 미치는 영향력이 대기 CO₂ 농도보다는 온도 요인에 의해 더 크게 작용하는 것으로 보인다.

적 요

본 연구는 기후변화에 따른 쌀 품질 저하 요인을 기상 환경과 종실 전분 대사 기능면에서 평가하기 위해 수행하였다. 본 연구를 위해 활용한 옥외환경조절 시설(SPAR)은 대형 토양상에서 온도와 CO₂ 동시 처리가 가능한 시설로서 최대한 포장 수준에 가까운 조건에서 미래 기후에 대한 정밀한 환경영향평가를 가능하게 해준다. 2001~2010년 전주 지역 현재 기후 기준

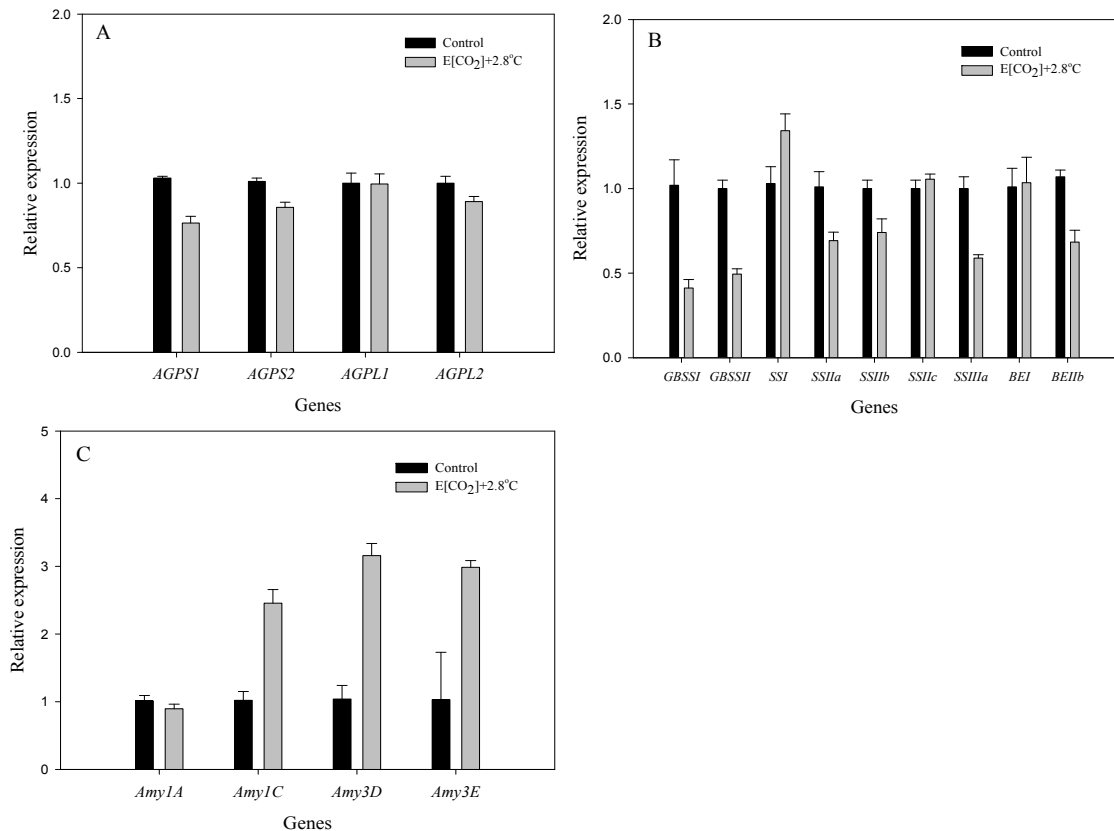


Fig. 4. Expression of genes for starch metabolism at present and in the future climate conditions. Genes coding for ADP-glucose pyrophosphorylase (A), starch synthase (B) and α -amylase (C).

RCP 8.5 시나리오에 따른 2051~2060년 가상 기후 조건에서 직접 재배 시험을 한 결과 미래 기후 조건에서는 벼 생육 및 노화가 급격하게 촉진되어 출수기가 현재 대비 5일 이상 빨라지는 등 생육기간이 단축될 뿐 아니라 이로 인해 고온 등숙 환경에 노출될 위험성이 크게 높아지게 됨을 알 수 있었다. 이로 인해 벼 수량 뿐 아니라 품질 또한 크게 저하되었는데 미래에는 정상립 비율은 현저히 저하된 반면 불완전립 특히 미숙립이 크게 증가하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 고온 등숙에 의한 전분 합성 관련 유전자들의 발현 감소 및 분해 관련 유전자들의 발현 증가 등 종실 체내 전분 전류 및 축적 양상이 크게 변화하여 나타난 것이다. 따라서 향후 안정적인 고품질 쌀 생산을 위해서는 고온 등숙 내성 벼 품종 개발 및 등숙기 고온 회피를 위한 재배법 개발 등의 방향으로 기후변화 적응 대책 관련 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제 번호: PJ0116842018)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Asaoka, M., K. Okuno, Y. Sugimoto, J. Kawakami, and H. Fuwa, 1984: Effect of environmental temperature during development of rice plants on some properties of endosperm starch. *Starch* **36**, 189-193
- Baker, J. T., and L. H. Jr. Allen, 1993: Effects of CO₂ and temperature on rice: a summary of five growing seasons. *Journal of Agricultural Meteorology* **48**, 575-582
- Chung, U. R., 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**, 229-241.
- Ebata, M., and T. Tashiro, 1973: Studies on white-belly rice kernel. I. Varietal differences in the occurrence of white-belly kernels. *Proceedings of the Crop Science Society of Japan* **42**, 370-376.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2004: Impact of climate change on agriculture in Asia and the Pacific. *Twenty-seventh FAO Regional Conference for Asia and the Pacific*. Beijing, China, 17-21.
- Kim, H. Y., M. Lieffering, K. Kobayashi, M. Okada, M. W. Mitchell, M. Gumpertz, 2003: Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research* **83**, 261-270.
- Kim, H. Y., T. Horie, H. Nakagawa, and K. Wada, 1996a: Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. I. The effect on development, dry matter production and some growth characters. *Japanese Journal of Crop Science* **65**, 634-643.
- Kim, H. Y., T. Horie, H. Nakagawa, and K. Wada, 1996b: Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. II. The effect on yield and its components of Akihikari rice. *Japanese Journal of Crop Science* **65**, 644-651.
- Kwon, W. T., 2005: Current status and prospects of climate change. *Planning and Policy* **3**, 6-18
- Matsui, T., K. Omasa, and T. Horie, 2001: The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Production Science* **4**, 90-93.
- Matsui, T., O. S. Namuco, L. H. Ziska, and T. Horie, 1997: Effect of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. *Field Crops Research* **51**, 213-219.
- Reddy, K. R., H. F. Hodges, J. J. Read, J. M. Mckinion, J. T. Baker, L. Tarpley, and V. R. Reddy, 2001: Soil-Plant-Atmosphere-Research (SPAR) Facility: A tool for plant research and modeling. *Biotronics* **30**, 27-50.
- Sakai, H., K. Yagi, K. Kobayashi, and S. Kawashima, 2001: Rice carbon balance under elevated CO₂. *New Phytologist* **150**, 241-249.
- Satake, T., and S. Yoshida, 1978: High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science* **47**(1), 6-17.
- Seneweera, S. P., and J. P. Conroy, 1997: Growth, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO₂ and phosphorus nutrition. *Soil Science and Plant Nutrition* **43**, 1131-1136.
- 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.
- Terao, T., S. Miura, T. Yanagihara, T. Hirose, N. Nagata, H. Tabuchi, H. Y. Kim, M. Lieffering, M. Masumi, and K. Kobayashi, 2005: Influence of free-airCO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. *Journal of The Science of Food and Agriculture* **85**, 1861-1868.
- Wolfe, D. W., M. D. Schwartz, A. N. Lakso, Y. Otsuki, R. M. Pool, and N. J. Shaulis, 2005: Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in USA. *International Journal of Biometeorology* **49**, 303-309.
- Yamakawa, H., 2011: Omics-based approach for cereal starch biosynthesis: Toward a determination of key factors for quality of rice grain affected by high temperature. *Journal of Applied Glycoscience* **58**, 35-38.
- Yamakawa, H., T. Hirose, M. Kuroda, and T. Yamaguchi, 2007: Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. *Plant Physiology* **144**, 258-277.
- Yun, J. I., 2003: Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agriculture systems* **77**, 23-38.
- 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.
- Ziska, L. H., O. Namuco, T. Moya, and J. Quilang, 1997: Growth and yield response of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. *Agronomy Journal* **89**, 45-53.