

## RCP 8.5 기후변화 조건에서 콩의 균락 광합성 및 수량 반응 평가

상완규\*, 백재경, 권동원, 조정일

농촌진흥청 국립식량과학원

(2022년 10월 17일 접수; 2022년 12월 17일 수정; 2022년 12월 26일 수락)

### Impact of Climate Change on Yield and Canopy Photosynthesis of Soybean

Wan-Gyu Sang\*, Jae-Kyeong Baek, Dongwon Kwon, Jung-Il Cho

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

(Received October 17, 2022; Revised December 17, 2022; Accepted December 26, 2022)

#### ABSTRACT

Changes in air temperature, CO<sub>2</sub> concentration and precipitation due to climate change are expected to have a significant impact on soybean productivity. This study was conducted to evaluate the climate change impact on growth and development of determinate soybean cultivar in the southern parts of Korea. The high temperature during vegetative period, which does not accompany the increase of CO<sub>2</sub> concentration, increased the canopy photosynthetic rate in soybean, but after flowering, the high temperature above the optimal ranges interrupts the photosynthetic metabolism. In yield and yield components, high temperature reduced both the pod and seed number and single seed weight, resulting in a reduction of total seed yield. On the other hand, the increase in CO<sub>2</sub> concentration dramatically increased the canopy photosynthetic rate over the whole growth period. In addition, high CO<sub>2</sub> concentration increased the number of pods and seeds, which had a positive effect on total seed yield. Under concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration, canopy photosynthesis increased significantly, but enhanced canopy photosynthesis did not lead to an increase in soybean seed yield. The increase in biomass and branch by enhanced canopy photosynthesis seems to be attributed to an increase in the total number of pods and seeds per plant, which compensates for the negative effects of high temperature on pod development. However, Single seed weight tended to decrease rapidly by high temperature, regardless of CO<sub>2</sub> concentration level. Elevated CO<sub>2</sub> concentration did not compensate for the poor distribution of assimilations from source to sink caused by high temperature. These results show that the damage of future soybean yield and quality is closely related to high temperature stress during seed filling period.

**Key words:** Climate change, Soybean, Photosynthesis, SPAR system



\* Corresponding Author : Wan-Gyu Sang  
(wg\_sang@korea.kr)

## I. 서 언

산업화에 따른 화석연료의 사용은 대기 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 농도를 증가시킴으로써 지구온난화의 주요 원인으로 작용하고 있다. IPCC 기후변화 5차 보고서에 따르면 최근 100년동안 대기 이산화탄소 농도는 약 100 ppm이 상승하였으며 이로 인해 기온은 약 0.85도 상승하였다고 하였다. 이러한 추세는 향후에도 지속될 것으로 예상되는데 대표적인 기후변화 시나리오인 RCP 8.5에 따르면 21세기 말까지 평균 기온은 최대 5°C까지 상승하고 대기 CO<sub>2</sub> 농도는 약 800 ppm에 이를 것이라고 전망하고 있다(IPCC, 2014). 이러한 기후변화는 산업 전체로 광범위하게 영향을 미칠 뿐 아니라 특히 농업 부문에서는 보다 심각한 피해가 예상된다.

콩은 오래전부터 전세계적으로 재배되어온 가장 중요한 식량작물 중 하나로써 그 수요가 갈수록 증가하고 있으며 대표적인 식물성 단백질 및 지방 공급원으로 이용 가치가 매우 높은 작물이다. 하지만 향후 기후변화로 인한 재배 환경의 변화는 콩의 생육 뿐 아니라 수량에까지 크게 영향을 미칠 것으로 예상되어 피해 대책 마련이 시급한 실정이다.

대기 온도와 CO<sub>2</sub> 농도는 작물 생육에 가장 크게 영향을 미치는 주요 환경요인으로써 기후변화는 주로 이 두 요소의 상호작용에 의한 결과로 나타난다. 특히 온도 상승은 작물 생육과 생산성에 직접적으로 관련되어 있다. 보통 고온 스트레스는 작물생산성에 악영향을 미치는 가장 중요한 요인인데 생육 적정온도 범위 내에서의 온도 상승은 광합성 및 생육 촉진을 유발하지만 적정 범위 이상의 온도 상승은 심각한 생육 저해 및 생산성 감소를 초래한다고 알려져 있다(Hatfield *et al.*, 2011; Wheeler and von Braun, 2013). 이는 고온 조건에서 성장과 호흡의 증가로 인해 작물의 sink 수요가 커지게 됨에 따라 동화산물의 소모 속도 또한 빨라지기 때문에 나타나는 현상이다(Bowes, 1991; Vu *et al.*, 1997, 2001). 생리적으로는 고온 환경은 화분 활력을 저하시키고 체내 에틸렌 생산을 촉진함으로써 화기 탈락, 엽 노화를 가속시킨다(Djanaguiraman and Prasad, 2010). 보통 광호흡은 고온에 의해 증가하는 경향을 보이는데 콩에서도 고온 스트레스는 광합성 효율을 약 5.8% 저하시킬 뿐 아니라 광합성율을 12.7% 감소시킨다고 하였다(Djanaguiraman and Prasad, 2010).

대기 CO<sub>2</sub> 농도는 일차적으로 광합성과 기공 기능에 직접적인 영향을 주어 작물 생리 과정에 영향을 미친다고 알려져 있다(Drake *et al.*, 1997). 대부분의 C3 작물들에서 CO<sub>2</sub> 농도의 단독 상승은 광합성을 촉진시킴으로써 건물중 및 수량 상승에 기여한다고 보고되고 있다(Connor, 2018; Long, 1991). 생리적으로는 광합성 과정의 RuBP 카르복실화율을 높이는 반면 광호흡을 줄임으로써 순광합성 증대 효과를 가져올 뿐만 아니라 기공전도도가 감소하여 수분이용효율과 광이용효율이 개선되는 효과를 보인다고도 하였다(Baker *et al.*, 1997; Long, 1991). 이로 인해 콩의 경우 800 ppm의 CO<sub>2</sub> 환경에서는 건물중이 대략 57% 상승한다고 하였으며(Madhu and Hatfield, 2016) 수량성 또한 550 ppm의 CO<sub>2</sub> 환경에서 벼는 12%, 밀은 13%, 콩은 14% 증대된다고 하였다(Kimball *et al.*, 2002). 또한 대기 CO<sub>2</sub> 농도 상승은 고온에 의한 피해를 경감 및 보상하는 효과가 있다고도 하였다(Hogan *et al.*, 1991; Masuda and Goldsmith, 2009).

기후변화에 따른 작물 생육을 제대로 이해하기 위해서는 온도와 대기CO<sub>2</sub> 농도 간의 상호작용에 관한 정밀한 연구가 매우 중요하다. 그러나 두 환경 요인 간 상호작용에 따른 영향 정도는 작물, 품종 별로 매우 상이해 일반화하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 RCP 기후시나리오에 따른 미래 기후 조건에서의 재배 시험을 통해 콩의 군락 광합성 및 생육에 미치는 영향을 알아보고 고온과 고CO<sub>2</sub> 농도의 각 환경요인에 대한 영향 분석을 실시함으로써 향후 기후변화 적응 대책 수립에 기여하고자 실시하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 기상 및 재배 환경 설정

본 연구는 2018년 전주에 위치한 국립식량과학원 내 SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) 시스템을 사용하여 수행되었다. SPAR는 대기 온도와 CO<sub>2</sub> 농도 등을 동시에 조절 가능한 옥외 챔버로써 상부는 2×2×4m (length×width×height) 투명 Plexiglas로 이루어져 있고 하부는 2×0.6×1.5m 크기의 대형토양상으로 이루어져 있다. 각 챔버는 실시간 CO<sub>2</sub> flux 측정을 위한 순환식 밀폐형 구조로 구성되어 있으며 각 챔버 별로 독립적인 infrared gas analyzer (LI-810)을 갖추고 있다. 군락 광합성 속도는 챔버 입구와 출구의 CO<sub>2</sub> 농도를 30초 간격으로 교번 측정하며 이 차이 값

을 CO<sub>2</sub> exchange rate (CER)값으로 계산한다(Eq. 1). 이때 Flow rate는 단위시간당 풍량, P는 절대 압력, delta CO<sub>2</sub>는 챔버 입출입구 간 CO<sub>2</sub> 농도 차, R은 이상 기체 상수, T는 챔버 내 절대온도이다(Sang, 2019).

$$\text{CER}(\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) = \text{Flow rate} * P * \frac{\text{deltaCO}_2}{R * T} \quad (\text{Eq. 1})$$

기상 환경은 4기의 SPAR 챔버를 사용하여 대조구(control), 고CO<sub>2</sub>(HC), 고온(HT), 고온+고CO<sub>2</sub>(HTHC)의 4개 처리구를 설정하였다. 현재 기후인 control은 전주지역 2001~2010년 일 최고 및 최저 온도를 산출한 후 10일 평균한 값을 사용하였고 낮 CO<sub>2</sub> 농도 조건은 400ppm으로 설정하였다. 기상청에서 제공하는 한반도 RCP 8.5 시나리오에 따르면 2071~2100년 전주 지역의 온도는 현재 대비 +4.7도, 대기 CO<sub>2</sub> 농도는 800ppm에 이를 것이라고 전망하였다. 이를 바탕으로 고온 단독 처리구, 고CO<sub>2</sub> 농도 단독 처리구, 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 동시 처리구를 Table 1과 같이 설정하였다. 온도 설정은 매 10일 간격으로 조정하였으며 일중 온도는 매 시간당 변화하도록 하여 오후 2시에 최고점, 오전 4시경에 최저점에 도달하도록 실제 기후조건과 유사하게 모의하였다. 시험 중 온도는 최대 0.2도 범위의 오차 내에서 유지되었고 낮 CO<sub>2</sub> 농도는 최대 10%의 오차를 보이도록 관리하였다. 또한 재배 기간 중 낮 동안의 습도는 40~60% 사이를 유지하도록 하였다.

콩 식물체는 6월 20일에 챔버당 30개체를 0.15×0.10m 밀도로 파종하였다. 시비는 파종 3일 전 N, P<sub>2</sub>O 및 K<sub>2</sub>O를 30-60-40 kg·ha<sup>-1</sup>의 양으로 전면 시비하였다. 관수는 수분 스트레스가 없도록 점적 관수로 매일 오전 10시, 오후 3시 두번씩 실시하였으며 토양수분 센서(Sentek Drill&Drop, Australia)를 사용하여 지표로부터 10~20cm 깊이가 30% VWC 수준을 유지하도록 관리하였다.

## 2.1. 생육 및 수량 분석

군락 광합성 분석은 재배 기간 중 매일 5분 간격으로 수집된 순광합성량(Pn)을 일별로 합산하여 사용하였다. 또한 전 생육기간에 걸친 누적 순광합성량은 보정된 Gompertz growth equations (Eq. 2)을 이용해 다음과 같이 회귀식 모형으로 계산하였다(Fleisher *et al.*, 2008).

$$X = X_0 * e^{(\ln(\frac{Xf}{X_0}))} (1 - e^{-Dt}) \quad (\text{Eq. 2})$$

이때 X<sub>0</sub>는 발아 후 0일째의 순광합성량, Xf는 수확 시기의 최종 누적 순광합성량, X는 해당 시점의 누적 순광합성량, D는 절대 상수, t는 발아 후 경과 일수이다.

수량 분석을 위해서는 식물체 샘플링을 7월 30일부터 9월 28일까지 14~15일 간격으로 5회 실시하였는데 매회 3개체씩 전 식물체를 수확하였으며 최종 수확시는 15개체가 남도록 하였다. 샘플은 잎, 줄기, 종실, 험으로 나눈 후 건물중 측정을 위해 65°C 오븐에 2일간 건조한 후 사용하였다. 수확 후 수량 조사는 챔버당 15개체에 대해 각 개체 별 험수, 립수를 조사한 후 수분 14% 기준으로 수량을 계산하였다. 종실 크기는 크기 별 4종류(4.7, 5.6, 6.75, 8mm)의 mesh를 활용해 분류한 후 분석하였다. 모든 데이터들은 R version 3.5, Sigmaplot version 10.0 소프트웨어를 사용하여 통계 처리하였고 주성분 분석은 R의 PCAtools 패키지를 사용하여 수행하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 미래 기후 환경

2001~2010년 전주지역 평균 온도 기준으로 콩 생육 기간인 6~10월간 일 평균기온은 22.6도였다. 처리 온도는 전 생육기간 중 16~27.5°C 범위였다. 반면 고온, 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 처리구의 일 평균기온은 현재와 비교해 상대적으로 4.7°C 상승한 27.3°C였으며 20.7~32.2°C 범위였다. 현재 기후인 Control의 생육단계별 평균온도는 영양생장기에 해당하는 late June~middle July 기간은 24.7°C, 개화 및 험 형성기에 해당하는 late July~middle August 기간은 27.0°C, 종실등숙기에 해당하는 late August~middle October 기간은 21.0°C였다(Table 1).

### 3.2. 고온, 고CO<sub>2</sub> 농도에 따른 콩의 군락 광합성 반응 분석

생육 시기별 기후조건에 따른 군락 광합성 영향을 알아보기 위해 영양 생장기, 개화 및 험 형성기, 종실 등숙기에 해당하는 출아 후 23, 49, 87일의 일순광합성속도를 Fig. 1에 나타내었다. 보통 콩의 영양 생장기 최적 온도 범위는 25~37°C 사이라고 하였는데 이 생

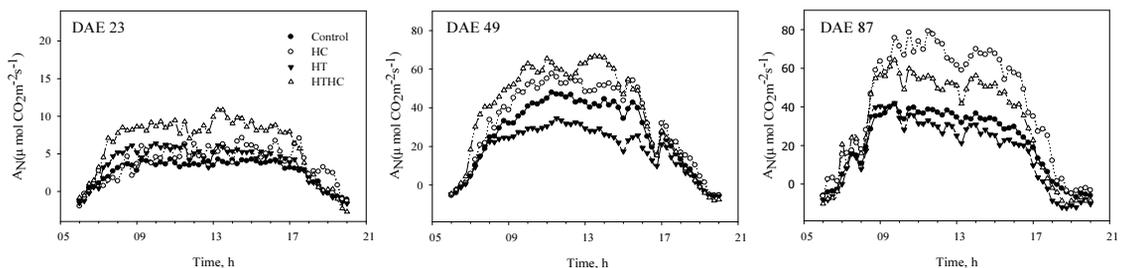
**Table 1.** Mean air temperature and CO<sub>2</sub> concentration in the SPAR chambers for environment treatments, ambient (Control), High air CO<sub>2</sub> concentration (HC), High temperature (HT) and Concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration (HTHC) conditions during the growing season

Treatment	Mean air temperature (°C)												Air CO <sub>2</sub> concentration (ppm)		
	June			July			August			September				October	
	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle			
Control	23.8	24.7	25.6	27.0	27.5	26.4	25.2	24.0	22.7	20.1	17.8	16.0	400		
HC	23.8	24.7	25.6	27.0	27.5	26.4	25.2	24.0	22.7	20.1	17.8	16.0	800		
HT	28.5	29.4	30.3	31.7	32.2	31.1	29.9	28.7	27.4	24.8	22.5	20.7	400		
HTHC	28.5	29.4	30.3	31.7	32.2	31.1	29.9	28.7	27.4	24.8	22.5	20.7	800		

육 온도 범위 내에서의 온도 상승은 광합성 및 생육을 촉진한다고 하였다(Boote *et al.*, 1997; Hatfield *et al.*, 2011). 본 연구에서 이 시기 대조구의 기후조건은 일 평균 온도 24.7°C, 일최고온도는 28.9°C였으며 고온처리구는 이보다 4.7°C 높은 일 평균 온도 29.4°C, 일 최고 온도 33.6°C를 보였다. 이에 따라 고온 처리구라 하더라도 온도 환경이 보고된 적정 온도 범위 내에 있어 이 시기의 고온 환경에서는 오히려 광합성 속도가 증가하여 생육이 촉진되는 반응을 보였다. 또한 고온과 고CO<sub>2</sub> 농도 동시 처리는 생화학적 대사 반응을 촉진시키고 세포분화 및 발달에 유리하게 작용한다고 하였는데 특히 콩은 벼와 다르게 온도 상승에 따라 고CO<sub>2</sub> 농도에서의 광합성 증대효과가 선형으로 커지는 경향을 보인다고 하였다(Geethalakshmi *et al.*, 2017; Masuda and Goldsmith, 2009). 본 연구결과에서도 고온과 고CO<sub>2</sub> 농도의 동시 처리구에서 광합성 속도 증가는 더욱 커지는 시너지효과를 보였다.

개화 및 협 형성기인 출아 후 49일째의 군락 광합성 반응은 영양생장기와는 다른 양상을 보였다. 고온 조건은 현재에 비해 낮은 광합성 속도를 보이는데 이는

여름철 대기 온도 상승과 관련이 있어 보인다. 이 시기의 온도 조건은 control은 평균 온도 27.5°C, 최고 온도 32.5°C인 반면 고온처리구는 평균 온도 32.2°C, 최고 온도 37.2°C를 보였다. 보통 종실 수량과 크기 형성에 최적인 온도는 영양생장기의 최적온도범위보다 작다고 하였는데 생식생장기간의 최적 온도는 25~29°C 범위를 나타낸다고 알려져 있다(Egli and Wardlaw, 1980; Grimm *et al.*, 1994). 또 다른 연구결과에서도 개화시기에 낮 최고 온도 35°C, 야간 최저 온도 28°C 이상은 개화 및 협 발달에 악영향을 끼친다고 보고되고 있다(Whigham and Minor, 1978). 이시기 본 시험의 고온 처리구 온도 환경은 낮 최고 온도 37.2°C, 야간 최저온도 28.5°C로 위에 명시한 고온스트레스 유발 환경에 매우 근접하였다. 이에 따라 개화시기 고온처리구에서는 순광합성 속도 감소뿐 아니라 낙화, 협 발생 불량 등 다양한 생육 저하 현상이 발생하였다. 반면 고온과 고CO<sub>2</sub> 농도의 동시 처리시에는 고온에 의한 광합성 저하가 상쇄될 뿐만 아니라 오히려 증대되는 경향을 보였다. 이는 콩의 경우 고CO<sub>2</sub> 농도에 의한 광합성 증대 정도가 온도상승에 따라 더욱 커진다고



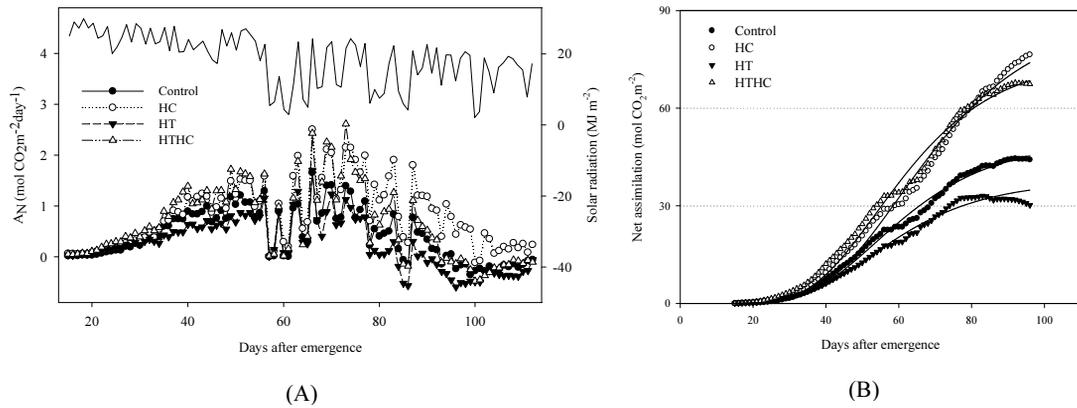
**Fig. 1.** Daily net photosynthetic rate of soybean canopies at vegetative (DAE 23), flowering (DAE 49) and Seed ripening (DAE 87) stages for environment treatments of elevated air temperature and CO<sub>2</sub> concentration.

한 기존 결과와도 일치되는 경향이였다(Masuda and Goldsmith, 2009).

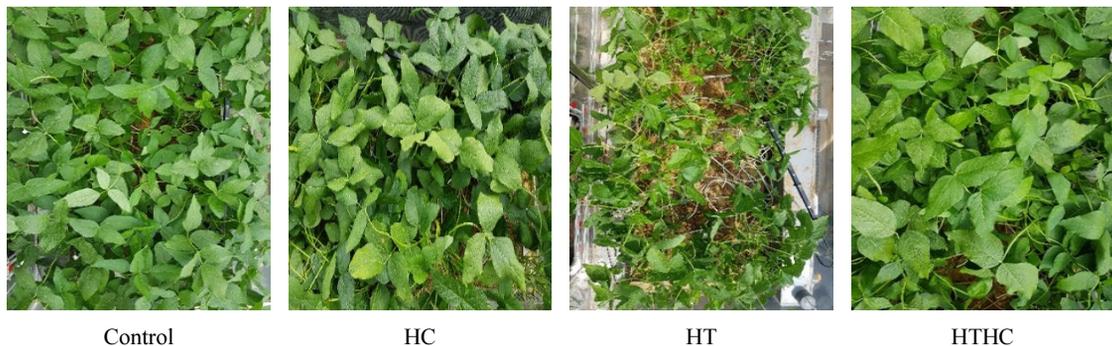
종실 등숙기에 해당하는 출아 후 87일에는 기온이 점차 낮아지면서 고온에 의한 광합성 저하 정도가 여름철 개화시기에 비해 다소 좁혀진 경향이였다. 다만 이 시기 종실 크기와 발달의 최적 온도는 23°C로 알려져 있어 고온 처리구에서는 광합성 속도와는 관계없이 여전히 심각한 등숙 불량 현상이 일어날 것으로 예상할 수 있다(Egli and Wardlaw, 1980).

Fig. 2는 Gompertz growth equations에 의해 일별 누적 순광합성량을 모형화한 것이다. 최대 일 동화율(Maximum daily assimilation rate)은 control이

0.9molCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>인 반면 고온은 이보다 약 10% 감소, 고CO<sub>2</sub>, 고온+고CO<sub>2</sub> 농도는 약 40% 증가된 수치를 보였다. 전 생육기간 동안의 총 누적 순광합성량 또한 고온 처리구는 현재 기후에 비해 약 40% 적은 수치를 보인 반면 고CO<sub>2</sub> 농도가 동반된 환경에서는 약 56% 증가된 결과를 나타내었다. 이는 고CO<sub>2</sub> 농도는 엽 발달 촉진으로 인한 균락의 조기 형성, 광합성능 증가 등 긍정적 영향을 미치는 반면에 지나친 고온은 엽 발달 저하로 균락 크기 감소, 호흡량 증가로 인한 동화산물 소모 증가 등 생육에 부정적 영향을 미친다는 것을 나타내는 것이다(Fig. 3).



**Fig. 2.** Analysis of cumulative net assimilation rate by high temperature and elevated CO<sub>2</sub> concentration treatment. (A) Daily canopy net photosynthesis and solar radiation throughout the growth period (B) Gompertz growth model fit to canopy cumulative net assimilation data from each treatment during the entire growing season.



**Fig. 3.** Soybean canopy at 50 days after emergence under (A) ambient (Control), (B) High air CO<sub>2</sub> concentration (HC), (C) High temperature (HT), (D) Concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration (HTHC) conditions.

3.3. 고온, 고CO<sub>2</sub> 농도에 따른 콩의 수량 반응 분석

Fig. 4는 식물체 부위별 건물중 비고를 통해 광합성 동화산물의 분배 비율을 시기별로 나타낸 것이다. 이를 보면 고온 처리가 포함된 처리구에서 공통적으로 개화 이후 종실중 비율이 크게 낮아짐을 알 수 있었다. 이와 함께 등숙 시작 시기 또한 control에 비해 최소 10일 가량 지연되는 현상을 보였다. 이는 고온 처리구에서는 협 형성 불량으로 등숙 기간이 짧아짐과 동시에 광합성 동화 산물 전류 또한 고온 등숙 환경으로 인해 크게 장애를 입었기 때문인 것으로 보인다. 이로 인해 최종 수확 지수는 control이 대략 45% 내외인 반면 고온과 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 환경에서는 35% 내외로 약 10% 적은 결과를 보였다.

각 처리구별 최종 수량 및 수량구성요소는 Table 2에 나타내었다. 대조구와 비교해 고온 처리구와 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 동시 처리구는 종실 수량이 각각 58.2, 25.5% 감소하였다. 일반적으로 콩 수량은 협수, 립수

와 단위 립중에 의해 결정된다고 알려져 있다(Ohyama *et al.*, 2013). 그 중 협수와 립수는 VE~R5시기의 온도조건에 크게 영향을 받는데 이 기간 중 최적 온도 조건은 대략 26.5°C라고 하였다(Kumagai and Sameshima, 2014). 반면 단위 립중은 R3 이후 종실 비대기의 온도에 영향을 받으며 대략 29°C 이상의 온도에서 크게 감소한다고 보고되고 있다(Kumagai and Sameshima, 2014). 본 연구에서 현재 기후인 Control의 VE~R5시기 평균온도는 25.5°C인 반면 고온 처리구의 평균온도는 약 30.2°C로써 협수, 립수 및 종실중 확보에 불리한 환경이었다. 다만 협수와 립수는 고온 단독 처리에 의해서만 감소하였으며 고CO<sub>2</sub> 농도와 동시 처리시에는 대부분의 피해를 상쇄하는 보상 효과를 보였다. 이는 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 동시 처리구에서는 높은 광합성능으로 인한 바이오매스의 증가로 분지 수가 증가하여 협수와 립수 확보에 유리하게 작용했기 때문인 것으로 보인다.

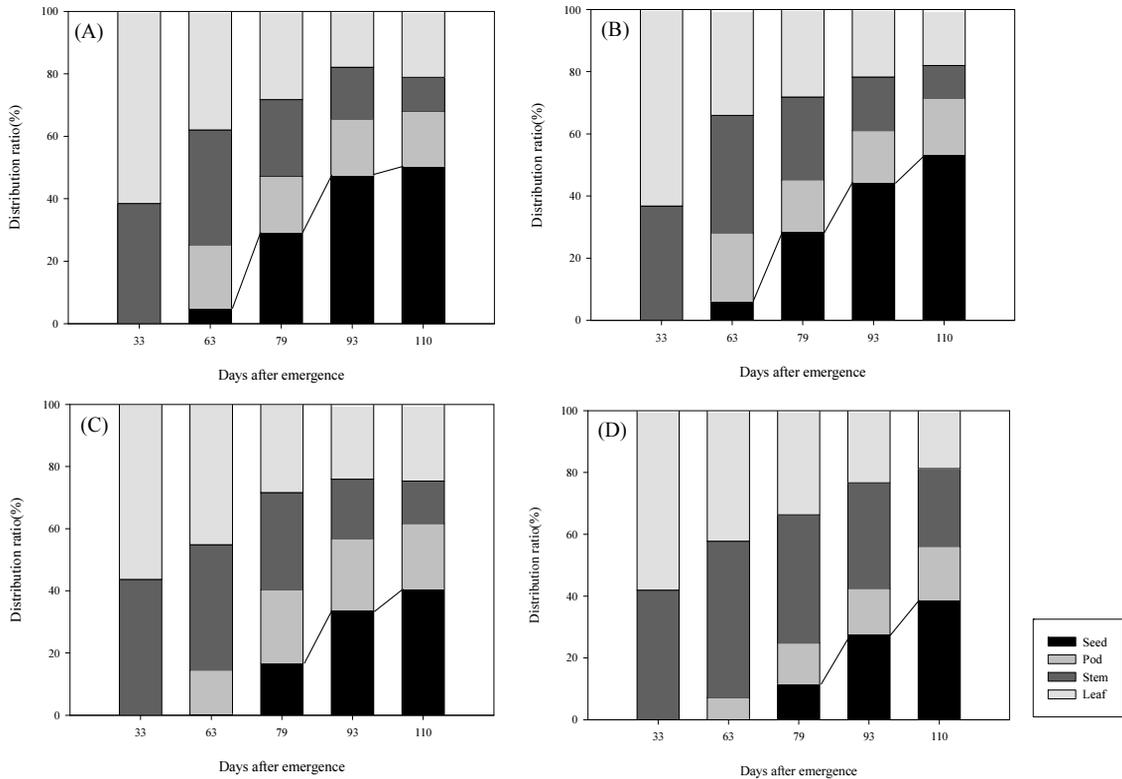
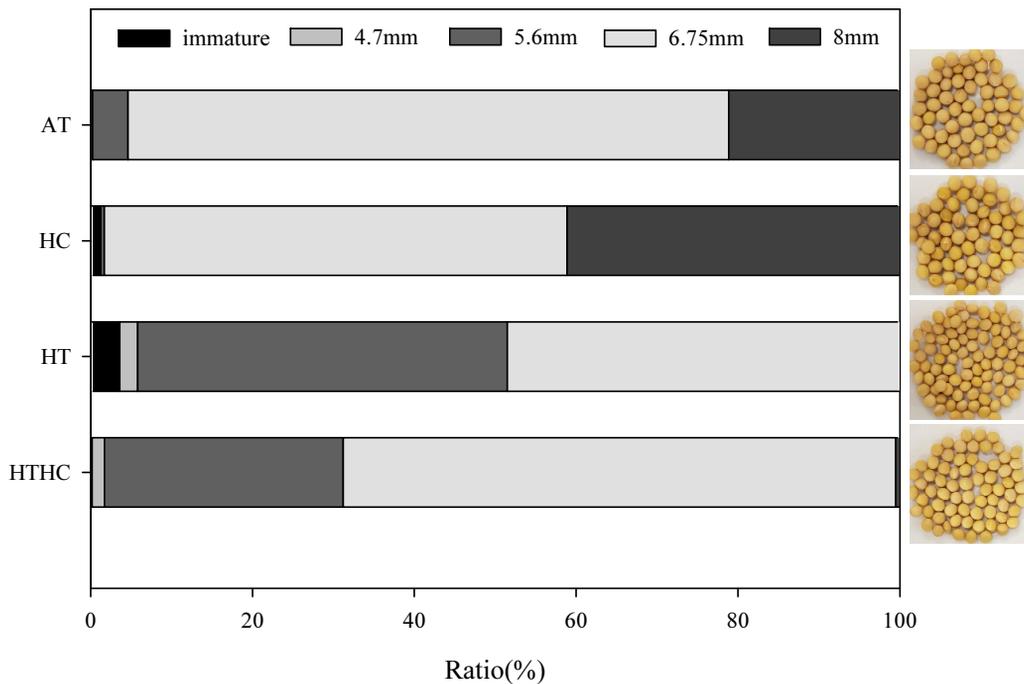


Fig. 4. Time series of distribution of dry mass production for soybean grown under (A) Control, (B) High air CO<sub>2</sub> concentration (HC), (C) High temperature (HT), (D) Concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration (HTHC) conditions.

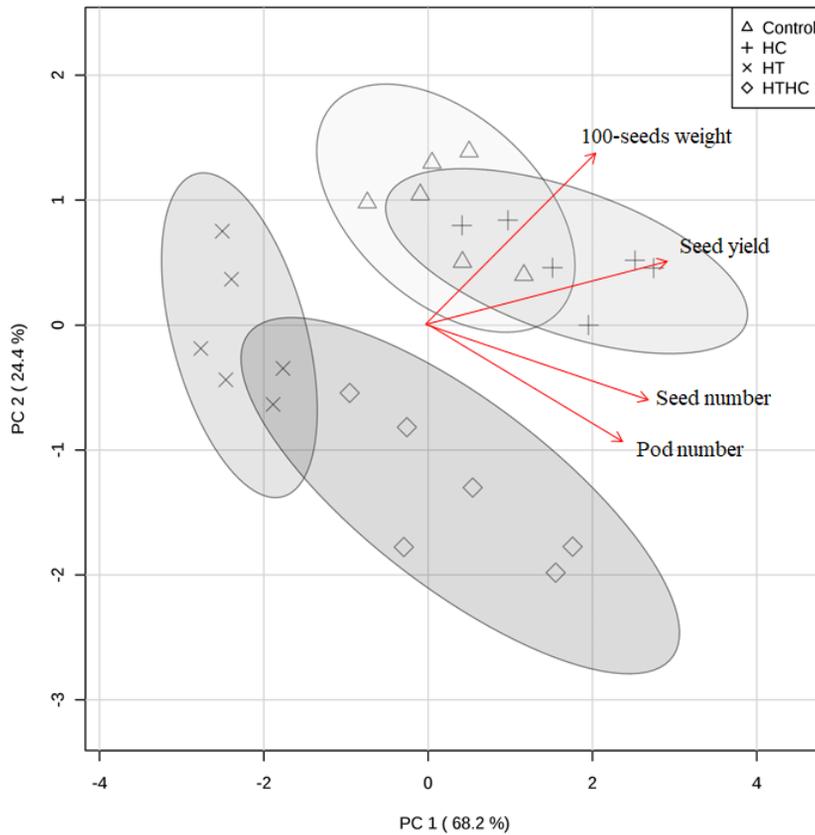
**Table 2.** Response of yield and yield component to the treatments of control, high air CO<sub>2</sub> concentration (HC), high temperature (HT), concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration (HTHC) for Daewon cultivar

Treatment	Branch number (plant <sup>-1</sup> )	Pod number (plant <sup>-1</sup> )	Seed number (plant <sup>-1</sup> )	100 seed weight (g)	Seed yield (g plant <sup>-1</sup> )
Control	5.0 bc	84.5 ns	146.0 a	29.1 a	42.3 b
HC	6.3 ab	90.8 ns	162.9 a	31.7 a	51.3 a
HT	3.8 c	77.3 ns	90.8 b	20.5 b	17.7 d
HTHC	8.0 a	92.2 ns	151.5 a	21.1 b	31.5 c

**Fig. 5.** Analysis of seed size under high temperature and elevated CO<sub>2</sub> concentration treatments. AT, HC, HT, and HTHC indicate control, high air CO<sub>2</sub> concentration, high temperature, concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration treatments, respectively.

이처럼 21세기 말 기후 환경인 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 동반 상승조건에서 협수와 립수는 현재 기후와 비교해 차이가 없거나 오히려 증가하였으나 이러한 효과가 최종 수량 증가로는 이어지지 않았다. 이는 CO<sub>2</sub> 농도 조건과 관계없이 고온 환경이 동반되면 백립중이 모두 크게 감소하였기 때문인 것으로 보인다. 백립중은 대조구와 비교해 고온 처리구와 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 동시 처리구 모두에서 각각 29.6, 27.5% 감소하였다. 또한 Fig. 5와 같이 종실을 크기 별로 분류해 본 결과 고온

조건에서는 5.6mm 이하의 소립 비율이 51.4%가량 차지하였고 이러한 경향은 고온+고CO<sub>2</sub> 농도 환경에서도 31.2%로 여전히 높은 수준을 보임을 알 수 있었다. 이는 개화 이후 종실 등숙 시기의 고온 환경은 종실 발달에 불리하게 작용하며 고CO<sub>2</sub> 농도 환경은 이러한 등숙 불량 장애를 보상해주지 못함을 의미한다. 이러한 결과는 미래 기후 환경에서 종실 수량 감소의 요인이 협수와 립수 보다는 립중의 감소에 의한 것이 크며 이에 대한 대비책을 마련해야 한다는 것을 의미한다.



**Fig. 6.** The PCA interpretation of yield and yield components for the soybeans grown under four different climate treatments of Control, control, high air CO<sub>2</sub> concentration (HC), high temperature (HT), concurrent elevation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration treatments (HTHC).

Fig. 6의 주성분 분석(PCA) 결과는 기후 조건과 수량구성요소(수량, 협수, 립수, 백립중)간의 관계를 보여준다. 두 개의 주성분(PC1+PC2)은 전체 집단 분산을 92.8% 설명할 수 있어 집단간 특징을 시각화하여 보다 직관적으로 분석할 수 있게 해준다. 그 결과 각 처리 집단들은 기후 요소 중 CO<sub>2</sub> 농도 조건보다는 온도 조건에 따라 두 집단으로 뚜렷하게 분리가 이루어짐을 알 수 있었다. 이는 미래 수량과 수량구성요소를 결정하는 기후요인에서 온도가 가장 큰 설명력을 가지는 요인임을 의미한다. 또한 이러한 집단 분리에는 수량구성요소 중 백립중에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 이러한 결과로 미루어 보아 미래 우리나라 남부지역에서 안정적인 콩 생산을 위해서는 특히 등숙 기간 중 고온 스트레스에 따른 립중 감소에 대한 대책을 마련하는 것이 가장 중요할 것으로 보인다.

### 적 요

기후변화에 따른 대기 온도 및 이산화탄소 농도의 상승은 농업 생산성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. RCP 8.5 시나리오에 따른 21세기말(2071~2100) 기후조건에서는 전 생육기간에 걸쳐 근락광합성이 크게 증가하였으나 이러한 효과가 종실 수량 증가로 이어지지 않았다. 특히 높은 광합성능으로 인한 바이오매스의 증가는 분지 수 확보에 긍정적으로 작용하여 협수와 립수는 큰 변동이 없었던 반면 립중은 단독 고온 조건과 유사하게 현저히 감소하였다. 이는 등숙 기간 중 고온에 의한 동화산물의 축적 및 전류 불량이 주요 요인으로 판단된다. 이러한 결과는 미래 기후 환경에서 종실 수량 감소가 협수와 립수 보다는 립중의 감소에 의한 것임을 의미한다. 이와 같은 결과들은 우

리나라 남부지역에서 기후변화에 따른 콩 생육의 불확실성을 해소하고 피해 대책을 마련하기 위한 기초자료로써 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제 번호: PJ013574012020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Baker, J., H. Allen, L. K. Boote, and N. Pickering, 1997: Rice responses to drought under carbon dioxide enrichment. 1. Growth and yield. *Global Change Biology* **3**(2), 119-128.
- Boote, K. J., N. B. Pickering, and L. H. Allen, 1997: *Plant Modeling: Advances and Gaps in Our Capability to Predict Future Crop Growth and Yield in Response to global Climate Change. Advances in Carbon Dioxide Effects Research.* American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, 179-228.
- Bowes, G., 1991: Growth at elevated CO<sub>2</sub>: photosynthetic responses mediated through Rubisco. *Plant, Cell & Environment* **14**(8), 795-806.
- Connor, D., 2018: Climate change and global crop productivity. *Crop Science* **42**(3), 978.
- Djanaguiraman, M., and P. V. V. Prasad, 2010: Ethylene production under high temperature stress causes premature leaf senescence in soybean. *Functional Plant Biology* **37**(11), 1071-1084.
- Drake, B. G., M. A. González-Meler, and S. P. Long, 1997: MORE EFFICIENT PLANTS: A consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **48**(1), 609-639.
- Egli, D. B., and I. F. Wardlaw, 1980: Temperature response of seed growth characteristics of soybeans. *Agronomy Journal* **72**, 560-564.
- Fleisher, D. H., D. J. Timlin, and V. R. Reddy, 2008: Elevated carbon dioxide and water stress effects on potato canopy gas exchange, water use, and productivity. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(6-7), 1109-1122.
- Geethalakshmi, V., K. Bhuvaneshwari, A. Lakshmanan, and N. U. Sekhar, 2017: Assessment of climate change impact on rice using controlled environment chamber in Tamil Nadu, India. *Current Science* **112**(10), 2066-2072.
- Grimm, S. S., J. W. Jones, K. J. Boote, and D. C. Herzog, 1994: Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. *Agronomy Journal* **86**, 31-38.
- Hatfield, J. L., K. J. Boote, B. A. Kimball, L. H. Ziska, and R. C. Izaurralde, 2011: Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy journal* **103**(2), 351-370.
- Hogan, K. P., A. P. Smith, and L. H. Ziska, 1991: Potential effects of elevated CO<sub>2</sub> and changes in temperature on tropical plants. *Plant, Cell & Environment* **14**(8), 763-778.
- IPCC, 2014: Climate Change: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Kimball, B. A., K. Kobayashi, and M. Bindi, 2002: *Responses of Agricultural Crops to Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment.* Academic Press, 293-368.
- Kumagai, E., and R. Sameshima, 2014: Genotypic differences in soybean yield responses to increasing temperature in a cool climate are related to maturity group. *Agricultural and Forest Meteorology* **198-199**, 265-272.
- Long, S. P., 1991: Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell & Environment* **14**, 729-739.
- Madhu, M., and J. L. Hatfield, 2016: Dry matter partitioning and growth analysis of soybean grown under elevated CO<sub>2</sub> and soil moisture levels. *Current Science* **111**(6), 981-984.
- Masuda, T., and P. D. Goldsmith, 2009: World soybean production: area harvested, yield, and long-term projections. *International Food and Agribusiness Management Review* **12**(4), 143-162.
- Ohyama, T., R. Minagawa, S. Ishikawa, M. Yamamoto, N. V. P. Hung, N. Ohtake, K. Sueyoshi, T. Sato, Y. Nagumo, and Y. Takahasi, 2013: *Soybean seed production and nitrogen nutrition.* Intech, 13.
- Sang, W. G., J. H. Kim, P. Shin, J. K. Baek, Y. H. Lee, J. I. Cho, and M. C. Seo, 2019: Development of Korean SPAR (Soil-Plant-Atmosphere- Research) system for impact assessment of climate changes and environmental stress. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(3), 187-195.
- Vu, J. C. V., R. W. Gesch, A. H. Pennanen, L.

- Allen Hartwell, and K. J. Boote, 2001: Soybean photosynthesis, Rubisco, and carbohydrate enzymes function at supraoptimal temperatures in elevated CO<sub>2</sub>. *Journal of Plant Physiology* **158**(3), 295-307.
- Whigham, D. K., and H. C. Minor, 1978: *Agronomic characteristics and environmental stress. Soybean Agronomy, Physiology and Utilization*. Geoffrey Norman, A. (Ed.), Academic Press, London, 247.
- Wheeler, T., and J. von Braun, 2013: Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science* **341**(6145), 508-513.