

## 온도구배챔버에서 온도 상승에 따른 콩의 생육과 수량 반응에 미치는 영향

이윤호 · 조현숙 · 김준환 · 상완규 · 신평 · 백재경 · 서명철\*  
농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과  
(2018년 3월 30일 접수; 2018년 6월 18일 수정; 2018년 6월 20일 수락)

### The Effects of Increased Temperature on Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] Growth and Seed Yield Responses in Temperature Gradient Chamber

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

*Crop Physiology and Production, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181,  
Hyeoksin-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea  
(Received March 30, 2018; Revised June 18, 2018; Accepted June 20, 2018)*

#### ABSTRACT

The seed yield of summer plants is affected by climate change due to high temperature. High temperature during the reproductive growth period decrease pod, seed weight in soybean. This study was conducted at National Institute of Crop Science (NICS) during the growing season. The objective of this study was to determine the effect of high temperature on growth and seed yield responses of soybean varieties using a temperature gradient chamber (TGC). In 2017, the Daewonkong (DWK), Pungsannamulkong (PSNK), and Deapungkong (DPK) were grown in three TGCs. Four temperature treatments, Ta (near ambient temperature), Ta+1 (ambient temperature+1°C), Ta+2°C (ambient temperature+2°C), Ta+3°C (ambient temperature+3°C), Ta+4°C (ambient temperature+4°C), were established by dividing the rows along which the temperature gradient was created. In all three cultivars, beginning bloom (R1) delayed at elevated temperature in Ta+4°C. In addition, the days to beginning of seed fill and maturity were longer under higher temperature. The numbers of pod, 100 seed weight, and seed yield increased at elevated temperature in DWK. In contrast, seed yield components of PSNK and DPK were reduced in Ta+4°C. The results suggest that 100 seed weight and seed size of soybean was low by increased temperature in Ta+4°C of PSNK and DPK.

**Key words:** Climate change, Temperature gradient chamber, Soybean, Phenology, High temperature



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

## I. 서 언

2017년 전 지구의 평균기온은 20세기 평균 기온(14.0°C)보다 0.84°C 높아 1880년 관측 이래 세 번째로 높았다(CIP, 2017). 이러하듯 최근 지구온난화가 지속됨에 따라 홍수, 가뭄, 이상고온 등과 같은 비생물적 스트레스가 빈번하게 발생하고 있으며, 이로 인해 농업 생산성에 부정적인 영향을 주고 있다. 우리나라의 주요 작물들 중 벼, 옥수수, 콩과 같은 여름을 중심으로 생육하는 1년생 작물들은 고온피해에 쉽게 노출되어 있으며, 그 중 콩의 경우 생식생장기간에 고온 피해를 받기가 쉽다.

콩은 C3 작물로 일장과 온도변화에 매우 민감하게 반응을 하는데 37°C를 벗어나게 되면 출아율이 감소하고 40°C에서는 출아가 정지되는 현상이 나타난다(Wallace and Yan, 1998). 또한 40°C 이상 단기간 노출 시 종실 수량이 급격하게 감소를 한다(Kitano *et al.*, 2006). 일반적으로 C3 작물들은 35°C까지는 광합성률이 증가하지만 40°C에서는 광합성률이 불충분하게 이루어지고 호흡만 증가하여 종실 크기와 수량을 감소 시킨다(Yamori *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2016).

생식생장기인 개화기부터 종실비대기사이의 고온 현상과 낮은 토양 수분 함량이 발생하게 되면 높은 불임률로 착협수가 감소되어 립 당 종실무게와 종실 크기 감소를 하게 되는 원인이 되며(Konno *et al.*, 1964; Saitoh *et al.*, 1999; Thoms *et al.*, 2010), 이 기간 동안 야간 온도가 20~25°C 이상 지속하게 되면 종실 크기와 수량 감소로 이어지게 된다(Sato and Ikeada 1979; Zheng *et al.*, 2002). 일반적으로 생식생장기 동안의 온도 범위는 18~26°C(Sionit *et al.*, 1987; Boote *et al.*, 1998)인데, 이 상 한치 이상을 벗어나게 되면 착협과 결실률이 불량하게 되고 종실의 1립 무게에도 영향을 주게 되어 수량을 감소 시킨다(Ferris *et al.*, 1999; Mochizuk *et al.*, 2005; Oh-e *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2010).

지난 몇 년간 온도구배하우스에서 온도 상승에 따른 종실 1립중의 무게가 감소한 것으로 알려져 있다(Mochizuki *et al.*, 2005; Oh-e *et al.*, 2007; Tacaridua *et al.*, 2012; Tacaridua *et al.*, 2013). 따라서 생식생장기간 평균 기온이 27.5°C 이상 고온을 유지하게 되면 종실 수량 감소로 이어지게 된다(Heinemann *et al.*, 2006; Rainey and Griffiths, 2005).

콩은 개화기부터 수량구성 요소를 결정하는데, 특히 착협기(R3)에서 종실비대기(R5)까지 환경에 지배적인 영향을 받는다(Kantolic *et al.*, 2013). 따라서 본 연구는 지구온난화가 가속화되고 있는 가운데 온도구배챔버(Temperature Gradient Chamber: TGC)(Horie *et al.*, 1995)에서 자연상태와 유사한 균락 환경을 유지하면서 상승된 온도구간에 따라 콩의 생육 특성과 수량 반응을 구명함으로써 향후 기후변화 대응 자료로 활용하고자 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

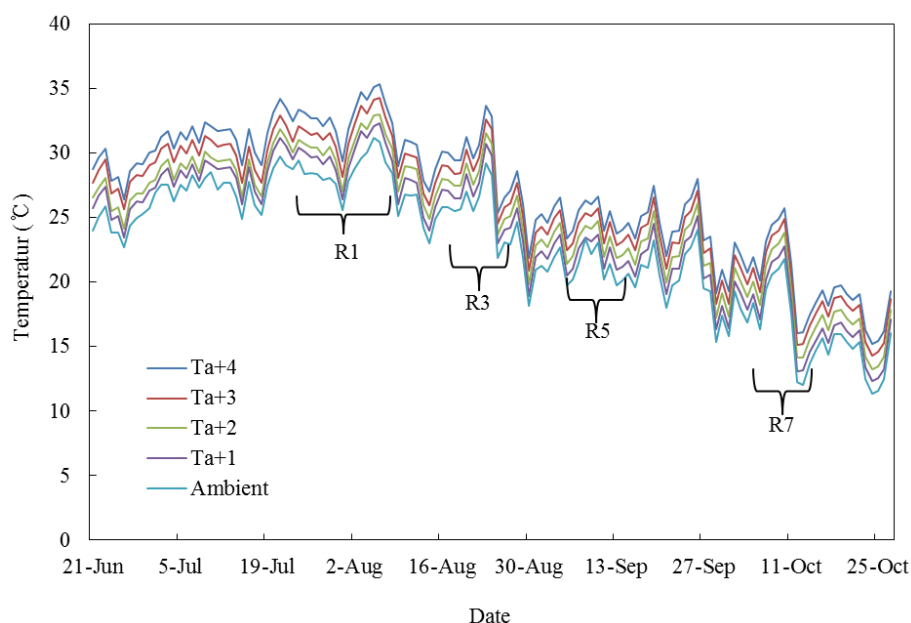
본 연구는 2017년 국립식량과학원 포장에 설치된 가로 2 m × 세로 30 m의 온도구배챔버에서 수행하였으며, 온도구배는 각 구간마다 온도계를 설치하여 Ta+1, Ta+2, Ta+3, Ta+4°C로 온실 입구 쪽부터 외부 온도보다 1°C 높아지면서 안쪽으로 갈수록 외부 온도보다 4°C가 높게 설정되었다. 시험에 사용된 품종은 대원콩, 대풍콩 그리고 풍산나물콩으로 재식거리는 50 cm × 15 cm로 6월 20일에 파종을 하였고, 시비량은 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 10a당 3-3-3.4kg을 하였다. 관수는 파종 후부터 개화시까지 주 2~3회 하였고, 개화기부터 성숙기까지 주 1회 공급하였다. 개화기(R1)부터 성숙기까지(R7)의 조사 방법은 Fehr and Caviness(1977)을 근거로 주 3회 육안 검사를 통해 이루어졌다. 수량 구성요를 위해 각 온도구간 당 20~23개체씩 수확하여 착협수, 10립중을 조사 하였다.

연구 결과의 통계분석은 SAS 9.1(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) 통계패키지를 이용하여 수행하였으며, ANOVA(P<0.05)로 유의성 분석을 하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1 생육기간 온도변화와 생물계절

재배기간 동안의 온도변화는 Fig. 1과 같다. 대원콩과 풍산나물콩 그리고 대풍콩의 개화시(R1)는 7월 26일부터 8월 16일이었고, 종화기는 8월 22일~9월 2일이었다. 착협기(R3)는 8월 13일에서 8월 26일 사이였으며, 종실비대기(R5)는 8월 26일부터 9월 4일이었다. 성숙기(R7)는 10월 7일부터 10월 16일로 온도 상승에 따라 온도구배와 품종간에 차이를 보였다. 특히 고온인 구간이 개화기가 지연되었다.



Ta+1 : ambient temperature+1°C, Ta+2°C : ambient temperature+2°C, Ta+3°C : ambient temperature+3°C,  
Ta+4°C : ambient temperature+4°C.

R1 : Beginning bloom, R3 : Beginning pod, R5: Beginning seed, R7 : Beginning maturity

**Fig. 1.** Daily changes in mean air temperature at different temperature in a temperature-gradient chamber in 2017.

**Table 1.** Duration and average temperature of VE-R1, R1-R5, R5-R7, and VE-R7 periods of three soybean cultivars grown to increased temperature

Culti vars <sup>z</sup>	Treat ment <sup>y</sup>	VE-R1 <sup>x</sup>		R1-R5		R5-R7		VE-R7	
		Duration (days)	Temperature (°C)	Duration (days)	Temperature (°C)	Duration (days)	Temperature (°C)	Duration (days)	Temperature (°C)
DWK	Ta		27.1		27.3		20.5		24.6
	Ta+1	32	28.0	31	28.2	43	21.4	106	25.5
	Ta+2	31	28.7	32	29.2	42	22.7	105	26.5
	Ta+3	31	29.8	33	30.0	42	23.4	106	27.4
	Ta+4	32	31.0	35	30.6	44	23.8	111	28.1
PSNK	Ta		27.1		26.2		20.3		24.4
	Ta+1	38	28.0	31	27.1	39	21.2	108	25.3
	Ta+2	37	28.3	32	27.7	39	21.8	108	25.9
	Ta+3	37	29.8	34	28.7	37	23.1	108	27.3
	Ta+4	38	31.0	34	29.6	40	23.3	112	27.9
DPK	Ta		27.8		23.9		19.9		24.1
	Ta+1	43	28.8	19	24.9	41	20.9	103	25.1
	Ta+2	43	29.6	19	25.8	41	21.8	103	26.0
	Ta+3	43	30.6	22	26.9	40	22.8	105	27.0
	Ta+4	43	31.7	22	28.0	41	23.4	106	27.8

<sup>z</sup>DWK : Daewonkong, PSNK : Pungsannamulkong, DPK : Deapungkong.

<sup>y</sup>Ta : near ambient temperature, Ta+1 : ambient temperature+1°C, Ta+2°C : ambient temperature+2°C, Ta+3°C : ambient temperature+3°C, Ta+4°C : ambient temperature+4°C.

<sup>x</sup>VE : Vegetative stage emergence, R1 : Beginning bloom, R5 : Beginning seed, R7 : Beginning maturity.

재배기간 동안 생육 시기별 일수와 평균 온도에 대한 결과는 Table 1과 같다. 출현기에서 개화기까지의 평균 소요일수는 대원콩이 32일, 풍산나물콩이 38일 그리고 대풍콩이 42일로 품종 간 최대 차이는 일주일 정도를 보였다. 온도 변화는 외기 온도가 27.1°C이었으며, 같은 기간 동안 Ta+4°C가 30°C 이상으로 가장 높았다. 개화기에서 종실비대기까지의 평균 소요일수는 대원콩이 33일, 풍산나물콩이 33일 그리고 대풍콩이 21일이었으며, 이 기간 외기의 온도가 8월 중순과 하순에 찬 공기와 강수로 인해 무더위가 누그러 지면서 온도 차이가 나타나 온도구배간에 있어서 약 2~4일 차이를 보였다. 그러나 종실비대기에서 성숙기까지 소요일수는 대원콩이 43일, 풍산나물콩이 39일, 그리고 대풍콩이 40일로 품종 간 차이를 보이지 않은 이유는 같은 기간 동안 평균 온도가 20.9~23.8°C 사이로 온도가 급속하게 내려가면서 모든 온도구간에서 생육 적정 온도 범위에 속한 것으로 판단된다. 총 생육기간 일수는 103일에서 112일로 3개 품종 중 Ta+4°C구간이 다른 온도구간보다 약 3~4일 길었다. 같은 기간 동안 온도구배의 평균 온도는 25.1~28.1°C 사이로 재배기간 동안 Ta+4°C가 가장 높게 유지 하였다.

본 연구에서 주목 할 것은 개화기부터 종실비대기까지 Ta+1, Ta+2, Ta+3°C까지는 소요 일수는 비슷하였으나, Ta+4°C에 약 4일 정도 지연된 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 Ta+4°C 구간에서 개화기에서 종화기 사이에 35°C 이상 넘어가는 일수가 2일간 지속되어 개화기간이 지연된 것으로 판단된다. 일반적으로 개화기에 35°C 이상의 고온이 지속되면 꽃눈 형성이나 개화기간이 지연되고 꽃이나 어린 꼬투리가 감소하는 비율이 증가한다고 보고하였다(Mochizuki *et al.*, 2005; Kumari *et al.*, 2016).

### 3.2 상승된 온도와 종실 수량 구성과의 관계

콩 종실의 수량 반응은 온도에 따라 민감하게 변화를 보이는데, 특히 생식생장기에 취약하다(Puteh *et al.*, 2013). Table 2는 온도 상승에 따른 수량구성요소와 종실의 수량 결과이다. 콩의 수량은 개화기, 착형기 그리고 종실비대기에 결정되는데(Jiang and Egli, 1995), 이 기간 동안 온도가 상승하게 되면 수량 구성요소 중 착형과 결실이 불량해지고 종실의 1립중이 작아지는 경향을 보인다고 보고하였다(Mochizuki *et al.*, 2005). 본 연구에서는 개체당 협수는 온도가 상승

**Table 2.** Yield components and seed yield of three soybean cultivars grown to temperature

Cultivars <sup>z</sup>	Treatment <sup>y</sup>	No. of node (plant <sup>-1</sup> )	No. of pod (plant <sup>-1</sup> )	No. of seed (plant <sup>-1</sup> )	No. of seed (pod <sup>-1</sup> )	Seed yield (g plant <sup>-1</sup> )
DWK	Ta+1	14a <sup>x</sup>	75.7b	121.7b	1.7a	39.4c
	Ta+2	14a	79.8b	139.3b	1.8a	43.4c
	Ta+3	13b	83.7b	143.5ab	1.7a	46.2ab
	Ta+4	13b	102.0a	167.4a	1.7a	58.3a
	<i>P</i> value	0.017	0.0002	0.015	0.935	0.0002
PSNK	Ta+1	16b	117.4c	234.8b	2.2a	32.3b
	Ta+2	18a	164.3a	304.2a	1.9b	39.5a
	Ta+3	19a	144.7ab	286.5ab	2.0ab	37.8a
	Ta+4	17ab	124.7bc	248.9b	1.8b	30.9b
	<i>P</i> value	0.015	0.0048	0.0697	0.0655	<0.001
DPK	Ta+1	15.5a	57.4b	103.1a	1.8b	24.0b
	Ta+2	15.4a	53.3bc	106.6a	2.0a	27.1a
	Ta+3	15.0a	61.0a	115.0a	1.9ab	28.6a
	Ta+4	15.3a	55.4b	115.0a	2.0a	26.2ab
	<i>P</i> value	0.632	0.0004	0.4916	0.004	0.0281

<sup>z</sup>DWK : Daewonkong, PSNK : Pungsannamulkong, DPK : Deapungkong

<sup>y</sup>Ta+1 : ambient temperature+1°C, Ta+2°C : ambient temperature+2°C, Ta+3°C : ambient temperature+3°C, Ta+4°C : ambient temperature+4°C.

<sup>x</sup>Means separation within columns by Duncan's multiple ranges at 5% level of significance.

될 수록 대원콩은 증가하였으나, 풍산나물콩은 온도에 민감하게 반응하여 Ta+3°C와 Ta+4°C에서 감소를 하였고, 대풍콩은 Ta+4°C에서 급속히 감소를 하였다. 이러한 결과는 감수분열기인 화분 성숙기에 30°C이상의 고온의 피해를 받으면 수정 할 수 있는 능력이 저해되어 착협수가 감소한다고 보고 하였으며(Kaushak *et al.*, 2016), 고온에 의한 피해는 화분세포보다 배낭세포가 민감하게 반응을 한다고 보고하였다(Sage *et al.*, 2015). 개체당 종실 수는 온도가 상승 할 수록 대원콩은 증가하였고, 풍산나물콩은 Ta+3°C와 Ta+4°C에서는 감소하는 경향을 보였다. 반면 대풍콩은 온도 상승에 따라 유의한 차이가 나타나지 않았다. 헵 당 종실 수는 대원콩과 풍산나물콩은 유의한 차이가 없었으나, 대풍콩은 Ta+1°C에서만 낮을 뿐 다른 온도구배간에서는 차이를 보이지 않았다. 종실 수량을 보면 대원콩은 온도 상승과 함께 수량이 증가 하고 있는 반면 풍산나물콩과 대풍콩은 Ta+4°C에서 감소하였다. 이는 대원콩은 고온에 대한 내성이 높은 반면 풍산나물콩과 대풍콩은 온도에 민감하게 반응을 보인 것으로 판단된다. 따라서 등숙기 동안 온도 변화는 종실 수량에 매우 중요한 요인 중의 하나로 판단된다.

### 3.3 상승된 온도와 종실 크기 분포

Table 3은 상승된 온도에 따른 100립중과 종실 크기 분포를 보면 대립종인 대원콩은 온도가 상승 될수록 100립중이 증가되는 현상을 보였고 특히 Ta+4°C에서 가장 높았다. 그러나 소립종인 풍산나물콩과 중립종인 대풍콩은 Ta+4°C에서 감소를 보였다. 개화기에서 성숙기의 평균 온도와 백립중은 부의 관계를 보였으며(Matsuda *et al.*, 2011), 같은 기간에 평균 온도가 25°C까지는 종실 수량과 1립중이 증가 하지만 이 온도를 벗어나면 감소하는 경향을 보였다고 하였다(Uchikawa *et al.*, 2003). 최근 고온 저항성 유전자형과 고온 감수성 유전자형을 연구한 결과 36/24°C(주/야간)에서 고온 저항성은 고온 감수성에 비해 100립중이 낮았으나 42/26°C(주/야간)에서는 모두 감소하였다고 보고 된바 있다(Chebroly *et al.*, 2016). 따라서, 생식생장기에 극한의 고온 현상을 받게 되면 종실 무게와 크기는 급격하게 감소한다고 보고된바 있다(Kumari *et al.*, 2017).

상승된 온도에 따라 종실 크기 분포를 비교해보면 대원콩은 50 % 이상이 6.7 mm에 분포하고 있으며 8 mm 이상에서는 Ta+4°C가 다른 온도구간에 비하여 높았다. 풍산나물콩은 5 mm에서 가장 많은 분포를 보였

**Table 3.** 100-seed weight and seed size distribution of three soybean cultivars grown to increased temperature

Cultivars <sup>z</sup>	Treatment <sup>y</sup>	100-seed weight (g)	Seed size distribution (%)			
			> 4 mm	5 mm	6.7 mm	> 8 mm
DWK	Ta+1	30.5c <sup>x</sup>	0.0	2.1	62.0	35.9
	Ta+2	30.5c	0.0	0.6	77.4	22.0
	Ta+3	31.5b	0.0	0.6	69.2	30.2
	Ta+4	34.0a	0.0	0.2	53.2	46.6
	<i>P</i> value	< 0.001				
PSNK	Ta+1	14.2a	2.6	97.4	0.0	0.0
	Ta+2	12.7b	9.8	90.2	0.0	0.0
	Ta+3	12.8b	10.2	89.8	0.0	0.0
	Ta+4	11.3c	28.1	71.9	0.0	0.0
	<i>P</i> value	< 0.001				
DPK	Ta+1	23.1b	1.0	36.9	62.1	0.0
	Ta+2	24.9a	0.0	29.7	70.3	0.0
	Ta+3	25.2a	0.0	40.6	59.4	0.0
	Ta+4	21.9c	0.4	64.0	35.6	0.0
	<i>P</i> value	< 0.001				

<sup>z</sup>DWK : Daewonkong, PSNK : Pungsannamulkong, DPK : Deapungkong

<sup>y</sup>Ta+1 : ambient temperature+1°C, Ta+2°C : ambient temperature+2°C, Ta+3°C : ambient temperature+3°C, Ta+4°C : ambient temperature+4°C.

<sup>x</sup>Means separation within columns by Duncan's multiple ranges at 5% level of significance.

으나 Ta+4°C에서 가장 낮았다. 대풍콩은 6.7 mm가 50% 이상을 차지하였으나 Ta+4°C가 다른 온도구간에 비해 낮았다. 이와 같이 온도 상승에 따라 대립인 대원콩의 종실 무게는 증가 하였으나, 소립과 중립인 풍산나물콩과 대풍콩은 일정 온도를 벗어나면 종실 무게가 감소하여 종실 수량이 낮아진 것으로 판단된다. Egli and Wardlaw(1980)의 보고에 따르면 33/28°C(주/야간)가 24/19°C(주/야간)에 비해 종실 크기가 약 22%가 감소하였다. 생식생기간 동안 시기별로 30~35°C로 고온 처리를 하였을 때 개화기~종실비대시(14일)가 개화기~개화성(5일)에 비하여 종실의 크기와 무게가 작아 졌다고 보고 하였다(Puteh *et al.*, 2013). 또한 온도구배하우스에서 수행된 결과를 보면 온도 상승에 따른 콩 종실의 1립중이 감소하는 경향을 보였고, 특히 Ta+3°C까지는 종실 수량이 증가 하였으나 Ta+4°C에서 감소한다고 보고하였으며, 등숙기간 평균온도와 100립중은 부의 상관관계가 있다고 하였다(Oh-e *et al.*, 2007).

## 적 요

본 연구는 급격하게 진행되고 있는 기후변화에 따른 콩의 생육과 종실 수량 반응을 온도구배챔버에서 수행하였다. 생식상 장기간의 고온 발생은 농업 생산성을 저해시키며, 인류의 식품안정성에도 영향을 줄 수 있다. 모든 품종이 Ta+4°C에서 개화기간이 지연되는 현상을 보여 영양생장기보다 생식생장기의 고온에 대해 민감하게 반응을 하였다. 온도 변화에 대한 종실 수량 구성 반응을 보면 대원콩은 온도가 상승 할수록 협수, 종실 무게가 높아져 수량이 증가하였다. 반면 풍산나물콩과 대풍콩은 각각 Ta+3°C와 Ta+4°C사이에서 각각 일정 온도를 벗어나게 되면 온도에 민감하게 반응하여 착협수와 100립중이 감소를 하여 수량 감소로 이어졌다. 종자 크기로 보았을 때 대립 품종인 대원콩은 일정 온도 범위까지는 수량이 증가 할 것으로 판단된다. 반면 중립과 소립품종인 대풍콩과 풍산나물콩은 일정 온도를 벗어나게 되면 수량이 감소 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ011952)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Chebralu, K. K., F. B. Fritsch, S. Ye, H. B. Krishnan, J. R. Smith, and J. D. Gillman, 2016: Impact of stress during seed development on soybean seed metabolome. *Metabolomics* **12**(2), 128.
- Egli, D., and I. Wardlaw, 1980: Temperature response of seed growth characteristics of soybean. *Agronomy Journal* **72**, 560-564.
- Ergo, V. V., R. Lascano, C. R. C. Vega, R. Parola, and C. S. Carrera, 2018: Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. *Environmental and Experimental Botany* **148**, 1-11.
- Fehr, W. R., and C. E. Caviness, 1977: Stages of soybean development. Iowa State University of Science and Technology Special Report **80**.
- Ferris, R., T. R. Wheeler, R. H. Eillis, and P. Hadley, 1999: Seed yield after environmental stress in soybean grown under elevated CO<sub>2</sub>. *Crop Science* **39**, 710-718.
- Gibdon, L. R., and R. E. Mullen, 1996: Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Science* **36**, 98-104.
- Heinemann, A. B., A. H. N. Maia, D. Dourado-neto, K. T. Ingram, and G. Hoogenboom, 2006: Soybean [*Glycine max*(L.) Merrill] growth and development response to CO<sub>2</sub> enrichment under different temperature regimes. *European Journal of Agronomy* **24**, 52-61.
- Horie, T., H. Nakagawa, J. Nakano, K. Hamotanl, 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**, 1064-1069.
- Jiang, H., and D. B. Egli, 1995: Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agronomy Journal* **87**, 264-267.
- Kantoli, A. G., G. E. Peralta, and G. A. Slafer, 2013: Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stage in indeterminate soybean. *European Journal of Agronomy* **51**, 91-100.
- Kitano, M., K. Saitoh, and T. Kuroda, 2006: Effects of high temperature on flowering and pod set in soybean. Scientific Reports of the Faculty of Agriculture Okayama University **95**, 49-55.
- Konno, S., J. Fukui, and M. Ojima, 1964: Influence of soil moisture condition on chemical composition

- and seed formation of soybean plant. *Bullet National Institute of Agricultural Science* **11**, 111-149.
- Kumar, J., R. Kant, S. Kumar, P. S. Basu, A. Sarker, and N. P. Sibgh, 2016: Heat tolerance in lentil under field conditions. *Legume Genomics Genet* **7**, 1-11.
- Kumari, S., A. Sehgal, H. HanumanthaRao, R. M. Nair, P. V. V. Prasad, S. Kumar, P. M. Gaur, M. Farooq, K. H. M. Siddique, R. K. Varshney, and H. Nayyar, 2017: Food legumes and rising temperatures: Effects, adaptive functional mechanisms specific to reproductive growth stage and strategies to improve heat tolerance. *Frontiers in Plant Science* **8**, 1658. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01658>
- Matsuda, H., Y. Shibata, S. Mori, and H. Fujii, 2011: Effect of temperature during the ripening period on the 100-grain weight of soybean in Shonai district of Yamagata prefecture. *Japan Journal of Crop Science* **80**, 43-48.
- Mochizuki, A., T. Shiraiwa, H. Nakagawa, and T. Horie, 2005: The effect of temperature during the reproductive period on development of reproductive organs the occurrence of delayed stem senescence in soybean. *Japan Journal of Crop Science* **74**, 339-343.
- OH-e, I., R. Uwagoh, S. Jyo, T. Kurahashi, K. Saitoh, and T. Kuroda, 2007: Effect of rising temperature on flowering, pod set, dry-matter production and yield in soybean. *Japan Journal of Crop Science* **76**, 433-444.
- Park, K. W., T. H. Ahn, and J. W. Cho, 2010: Effect high temperature during reproductive growth period on soybean growth, nitrogen and cation content. *Korean Journal of Crop Science* **55**, 14-18.
- Puteh, A. B., M. ThuZar, M. M. A. Mondal, N. APB. Abdullah, and M. R. A. Halim, 2013: Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seed yield response to high temperature stress during reproductive growth stages. *Australian Journal of Crop Science* **10**, 1472-1479.
- Rainey, K. M., and P. D. Griffiths, 2005: Differential response of common bean genotypes to high temperature. *Journal for the American Society for Horticultural Science* **130**, 8-23.
- Saitoh, K., N. Wakui, T. Mahmood, and T. Kuuroda, 1999: Differentiation and development type of soybean. *Plant Production Science* **2**, 47-50.
- Sato, K., and T. Ikeda, 1979: The growth responses of soybean plant to photoperiod and temperature. 5. The effect of temperature during the ripening period on the yield and characters of seeds. *Japan Journal of Crop Science* **48**, 283-290.
- Sage, T. L., S. Agha, V. Lundsgaard-Nielson, H. A. Branch, S. Sultmanis, and R. F. Sage, 2015: The effect of high temperature stress on male and female reproduction in plants. *Field Crops Research* **182**, 30-42.
- Tacrindua, C. R. P., T. Shirawa, K. Homma, E. Kumagai, and R. Sameshima, 2012: The response of soybean seed growth characteristics to increase temperature under near-field conditions in temperature gradient chamber. *Field Crops Research* **131**, 26-31.
- Tacrindua, C. R. P., T. Shirawa, K. Homma, E. Kumagai, and R. Sameshima, 2013: The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. *Field Crops Research* **154**, 74-81.
- Thomas, J. M. G., K. J. Boote, D. PAN, and L. H. Allen, 2010: Elevated temperature delays onset of reproductive growth and reduces seed growth rate of soybean. *Journal of Agro Crop Sciences* **1**, 19-32.
- Thuzar, M., A. B. Puteh, N. A. P. Abdullah, MB. M. Lassim, and K. Jusoff, 2010: The effects of temperature stress on the quality and yield soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Journal of Agricultural Science* **2**, 172-179.
- Uchikawa, O., Y. Fukushima, and Y. Matusue, 2003: Statistical analysis of soybean yield and meteorological condition in Northern Kyushu. *Japan Journal of Crop Science* **72**, 203-209.
- Wallace, D. H., and W. Yan, 1998: *Plant breeding and whole crop systems, improving adaption, maturity, and yield*. CAB International, Wallingford, UK.
- Yamori, W., K. Noguchi, and I. Terashimal, 2005: Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: analyses of photosynthetic components and temperature dependence of photosynthetic partial reactions. *Plant Cell & Environment* **28**, 536-547.
- Zheng, S. H., H. Nakamoto, K. Yoshikawa, T. Furuya, and M. Fukuyama, 2002: Influences of high night temperature on flowering and pod setting in soybean. *Plant Production Science* **5**, 215-218.