

오존에 의한 두 품종 콩의 가시피해 및 생리적 반응

윤성철 · 박은우

서울대학교 농업생명과학대학 농생명공학부
(2000년 8월 31일 접수)

The Visible Injury and Physiological Responses of Two Varieties of *Glycine max* to Ozone

Sung-Chul Yun and Eun-Woo Park

Graduate School of Agricultural Biotechnology, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea.
(Manuscript received 31 August 2000)

ABSTRACT

A glass chamber experiment was conducted to evaluate the impact of ozone (O_3) on the physiology of two soybean, *Glycine max* L. cultivars, 'Hwanggum' and 'Jangyub'. Thirty-day old plants with 1-2 nodes were exposed to O_3 of <10 and 150 nl l^{-1} in the chambers for 8 h d^{-1} for 3 days. Net photosynthesis, stomatal conductance, chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll contents, and foliar injury (% injured leaves) were measured. Although foliar damage was more severe on Jangyub than on Hwanggum, net photosynthesis was decreased by 60% on Hwanggum and 13% on Jangyub due to the O_3 treatment. Stomatal conductance on Jangyub was twice higher than that on Hwanggum and it was not changed by the O_3 treatment. Whereas, stomatal conductance on Hwanggum was 60-80% decreased by O_3 . Chlorophyll contents did not change due to the O_3 treatment or variety. We can conclude that the reduction of net photosynthesis by O_3 was mainly due to the decreases of stomatal conductance and Rubisco (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) activity on dark reaction. And foliar injury and chlorophyll content did not contribute to the net photosynthetic decrease. The gas-exchange variables measured 24 h after the termination of O_3 fumigation showed that there was no significant recovery within a day. Since the physiological responses on Jangyub were not much affected by the O_3 treatment, this variety could be O_3 resistant.

Key words : chlorophyll, net photosynthesis, ozone, soybean, stomatal conductance

I. 서 론

콩은 클로버, 밀과 함께 작물 중에서 오존에 가장 민감한 것으로 보고되고 있다(Reich and Amundson, 1985; USEPA, 1996). 오존에 의한 콩 잎에서의 광합성 억제(Li and Gupta, 1995; Reich *et al.*, 1986; Sheng *et al.*, 1993)와 이로 인해 발생하는 수확량 감소는 7.9-18.6%에 달한다(Miller *et al.*, 1991; Mulchi *et al.*, 1988). 또한 오존에 의한 콩 뿌리혹의 감소가 보고되었다(Blum and Tingey, 1977). 하지만 'Hodgson'

(Reich *et al.*, 1986), 'Dare'(Sheng *et al.*, 1993)와 같은 몇몇 콩 품종은 오존에 의해 광합성 저해를 받지 않는 저항성 품종이므로 오존 스트레스에 대한 콩 품종간의 반응 차이는 대단히 크다.

우리나라의 경우 서울을 비롯한 수도권 오존 농도의 증가는 식생을 위협할 정도로 심각하며, 최근 2-3년 사이의 서울 동북부 지역의 농도는 현재 캘리포니아를 제외한 미국 도시 평균에 육박하고 있다(윤 등, 1999). 또한 일부 농촌지역의 오존 농도도 심각한 실정이다(윤과 정, 1995). 하지만 우리나라에서 보고된

콩에 발생하는 오존의 피해는 잎에서의 가시증상을 위주로 보고(농업과학기술원, 1998)되고 있어서 가시피해 없이 오존에 의한 광합성 저해에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 콩 생산성과 밀접한 잎의 광합성과 가시피해를 상호 비교함으로써 오존에 의한 콩의 생리적인 피해를 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구는 콩에 발생하는 오존으로 인한 잎의 피해와 엽록소 변화 등 가시적 증상 뿐만 아니라 광합성, 기공 전도도 등 생리적 기능을 측정함으로써 오존에 의한 우리나라 재배 콩 품종의 생육저해를 연구하였다. 특히, 광합성 저해가 가시피해에 의한 광합성 면적의 감소인지, 기공 닫힘에 의한 CO_2 공급감소인지, 아니면 동화작용에 관여하는 효소활성의 억제인지를 알아보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 오존처리 및 식물체 준비

두 개의 $1.2\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.7\text{ m}$ ($L \times W \times H$, 3.06 m^3) 규격의 유리 생장상이 사용되었다. 이 생장상은 식물 생장에 필요한 자연광이 유리를 통하여 들어오도록 고안되었다. 생장상 내부의 온도와 습도는 각각 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 60-80% 상대습도로 유지하였다. 공기는 냉각 및 전열 장치를 거치면서 조정된 일정 온도의 공기가 가습기와 가스 폭로 라인을 통과하여 생장상 하단부에서 내부로 유입되었다. 공기 유입 속도는 약 $1\text{ m}^3/\text{sec}$

이었으며, 순수 산소를 사용하여 오존 발생 장치에서 만들어진 오존이 가스폭로 라인을 통해 공기와 섞여 생장상 내부로 유입되었다(Fig. 1). 오존 농도는 생장상 내부의 샘플라인을 통해 실시간으로 자외선(UV) 흡광 오존 측정기(Model 1008-AH, Dashibi, Galendale, CA)로 측정하고 동시에 컴퓨터로 자동 조절되었다. 오존 측정기는 zero/span 보정기(Model 5008, Dashibi, Galendale, CA)로 처리 직전에 조정되었다. 실험에 사용된 식물체는 노출 24시간 전에 생장상에 미리 배치하여 순화시켰다. 처리 오존 농도는 $150 \pm 20\text{ nl l}^{-1}$ 로 3일간 매일 8시간씩(9.00 - 17.00 h)이었다.

본 연구에서 공시된 콩 품종은 황금콩과 장엽콩 두 품종인데, 이들은 장류 콩으로 유전적인 배경이 비슷한 품종이었다(박 등, 1981; 최 등, 1979). 10 cm 직경 포트에 상토와 모래를 각각 1:2(v/v)로 혼합한 토양에 콩을 재배하였다. 실험에 사용된 식물체는 파종 후 약 1달 된 것으로써 1-2개의 복엽이 완전히 생장한 것이었다.

2.2. 광합성 및 기공전도도 측정

순광합성(Net photosynthesis; $\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)과 기공 전도도(Stomatal conductance; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 측정을 위해서 Li-Cor 6400 광합성 측정 장치(Li-Cor, Lincoln, NE)로 가스교환 속도를 측정하였다. 이들 측정은 오존 처리 전, 3일간 오존을 처리한 직후, 그리고 오존 처리 24시간이 지난 후에 측정하여 오존

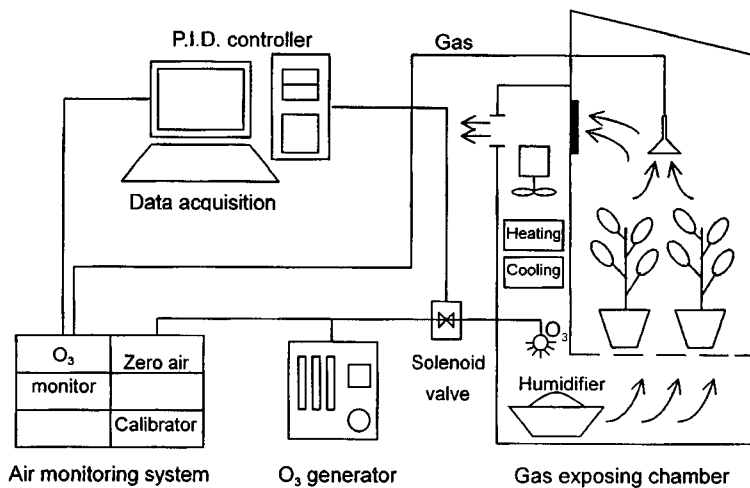


Fig. 1. Diagram of the gas exposing system using the natural sunlight source.

처리 직후 및 처리 24시간 후 회복을 알아보았다. 동일한 잎을 3차례에 걸쳐 연속적으로 측정하였다. 측정 앞은 2 cm×3 cm 크기의 광합성 측정 큐벳에서 측정되었고, 측정 조건은 1,500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 light emitting diode (LED) 인공광으로 조절되었으며, 380 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO₂ 농도, 그리고 25°C로 조정되었다. 두 품종에 대해서 오존을 처리한 것과 무처리에 대해서 각각 5 개씩 잎을 측정하였다.

광 강도 변화에 따른 광합성 속도는 측정 큐벳 내의 LED 빛(photosynthetically active radiation, PAR)을 2000, 1500, 1000, 700, 500, 300, 150, 50, 0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 7단계로 광 강도를 점차 줄이면서 측정하였다. 광 강도에 따른 광합성 변화는 두 품종의 광합성 변화 뿐만 아니라 콩의 광 포화점을 알 수 있으므로, 오존처리 전에 실시되었다. 측정 큐벳은 380 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO₂, 25°C, 그리고 30-60% 상대습도로 유지되었다.

광합성 측정 장치에 부착된 CO₂ 주입 시스템(Li-Cor 6400-01, Li-Cor)은 액체 CO₂를 사용하여 측정 큐벳 내로 공급되는 이산화탄소 농도 변화에 따른 광합성 변화를 측정하였다. 큐벳 내의 이산화탄소 농도(C_a)는 1000, 700, 400, 200, 100, 50, 0 $\mu\text{l l}^{-1}$ 로 조절되었으며, 잎 내부의 CO₂ 농도(C_i)는 Farquhar and Sharkey (1982)가 보고한 식에 적용하여 계산하였다. 측정 큐벳 내부의 조건은 1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR, 25°C, 그리고 30-60% 상대습도였다.

2.3. 엽록소 측정 및 가시적인 피해 조사

가스 교환 측정에 사용되었던 잎을 마지막 가스 교환 측정 직후 0.8 g 취하여 7 ml의 dimethyl sulfoxide에 담근 후, 65°C 항온수조에서 3시간 두어 엽록소를 추출하였다(Hiscox and Israelstam, 1979). 엽록소 a, b, 총 엽록소의 양은 645, 652, 663 nm 영역의 흡광도를 재어 알려진 공식에 대입하여(MacKinney, 1941) 콩 잎의 단위 생중량에 대한 무게(mg chlorophyll/gm fresh weight)로 구하였다. 잎의 가시적인 피해는 무처리와 비교하여 오존처리에서 발생된 잎의 이상증상을 자세히 육안으로 관찰한 후, 각 포트의 피해 발생 잎의 수를 퍼센트(number of injured leaves/total number of leaves)로 환산하였다. 피해조사는 오존 처리시작 후 3일, 4일, 그리고 7일째에 실시하였다. 각 처리별 로 5개씩 총 20개 포트가 사용되었다.

2.4. 통계분석

광합성, 기공 전도도 등 가스 교환 변량들은 3차례에 걸쳐 측정하여 각 측정일 별로 처리와 품종에 대한 2요인의 분산분석(two-way ANOVA)을, 엽록소 함량(엽록소 a, b, 총 엽록소)들은 한번 측정시의 2요인에 대한 분산분석을 실시하여 오존처리, 품종, 그리고 오존처리와 품종의 상호작용에 대한 효과를 분석하였다. 광합성에 측정된 잎이 그대로 엽록소 분석에 이용되었으므로 이들 이변량의 광합성과 엽록소 함량의 상관계수를 구할 수 있었다. 가시피해는 오존 처리에서만 발생하므로, 품종 간의 효과를 알아보기 위해 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 그런데, 가시피해 지수인 incidence는 퍼센트 값이므로 이들 값을 arcsine으로 전환 후 통계처리하였다. 통계 프로그램은 IBM PC에서 작동하는 Minitab (ver. 10xtra, Mini-tab Inc., State College, PA)을 사용하였다.

III. 결 과

3.1. 오존 처리 및 잎의 가시피해

오존 처리 3일 동안 1분 간격으로 모니터링된 오존 처리의 일별 평균 농도는 각각 145.5±8.8, 147.3±11.7, 145.3±14.0 nl l^{-1} 여서 목표인 150 nl l^{-1} 에 약 10% 미만의 오차범위를 나타냈다. 한편, 활성탄 필터가 사용된 무처리의 오존 농도는 10 nl l^{-1} 이하였다. 오존 처리에 의해 콩잎에 발생하는 피해 양상은 잎 표면(adaxial)에 미세한 구릿빛 반점으로 나타났는데 이는 기존에 보고된 콩에 발생된 오존 피해 증상과 같은 것이었다(농업과학기술원, 1998; Miller *et al.*, 1991). 피해 증상은 오존 처리 2일째 오후(오존 처리 후 12-16시간)부터 발생하기 시작했으며, 가시피해가 뚜렷한 3일째의 오후 12시경 광합성 측정이 완료된 직후에 오존 처리를 중지하였다.

가시적 피해 조사는 오존 처리를 완전히 끝낸 후 당일, 그 다음날, 그리고 3일 후에 각각 실시하였는데, 처리 후 24시간까지는 잎에서의 피해가 증대되다가 그 후에는 증가되지 않았다(Table 1). 오존 처리 후 7일째 incidence가 4일째에 비해 감소된 것은 콩 성장에 따른 총 엽수 증가에 기인한 것이다. 장엽종이 대체로 황금콩에 비해 약 2배 더 높은 피해를 보였지만, 샘플간의 변이가 대단히 심하여서 두 품종의 가시피해는

Table 1. Incidence of foliar injury in Hwanggum and Jangyub soybean (*Glycine max*) varieties. P-values of one-way ANOVA were showing the statistical difference in the incidence between the two soybean varieties

Days after initiation of ozone fumigation	Hwanggum	Janyub	P-values
3	15.0 (33.5)	26.7 (34.1)	0.627
4	22.5 (33.5)	53.3 (20.9)	0.139
7	18.7 (27.2)	47.3 (10.7)	0.066

통계적으로 차이가 없었다(Table 1).

3.2. 가스 교환

광합성은 오존 처리 전부터 장엽콩이 황금콩보다 높았다(Table 2). 황금콩 품종은 오존 처리 후에 광합성의 저해가 뚜렷이 나타났으며, 오존 처리가 종료된 후 24시간이 지났음에도 광합성 감소가 회복되지 않고 지속되었다(Table 2). 반면에 장엽콩은 오존에 의한 광합성의 저해가 없었을 뿐만 아니라 경시적인 광합성 변화도 없었다. 통계처리에서 나타난 오존 처리 효과는 주로 황금콩 품종의 피해에 기인한 것이다(Table 3).

기공 전도도 측정결과, 황금콩은 장엽콩에 비해 30% 정도 기공을 덜 열었으며, 특히 오존 처리는 대조구에 비해 약 40-60% 밖에 기공을 열지 않았다(Table 4). 반면에 장엽콩은 기공 전도도가 황금콩보다 높을 뿐만 아니라 오존 처리 전과 후에 기공 전도도 변화가 거의 없었다. 특히 3일간의 처리가 끝난 다음 24시간 후 오히려 기공 전도도가 높아졌다. 오존 처리 후 황금콩 품종에서 기공 전도도의 변화는 평균값

Table 2. Net photosynthesis (A: $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) in Hwanggum and Jangyub soybean on before, the last day, and one day after fumigation with $150 \text{ nl l}^{-1} \text{ O}_3$ between 9.00 and 17.00 h

Days after initiation of ozone fumigation	Hwanggum		Jangyub	
	Control	Ozone	Control	Ozone
0	8.80 (5.88)	6.60 (4.66)	14.64 (6.50)	12.95 (4.19)
3	11.83 (4.31)	4.53 (3.14)	14.90 (1.93)	12.90 (0.94)
4	11.08 (4.09)	5.72 (3.34)	12.94 (1.52)	13.16 (1.65)

Net photosynthesis was determined at $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ light, $380 \mu\text{mol CO}_2$, 25°C in the controlled measurement cuvette. Numbers in parentheses indicate the standard deviation of the five replicate samples.

의 감소 뿐만 아니라 반복간의 변이도 $0.04\text{-}0.06 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 현저히 줄었다.

3.3. 광 강도 및 내부 CO_2 변화에 따른 광합성 곡선

가스 교환 측정 장비를 사용하여 챔버 내의 빛의 강도 변화에 따른 광합성의 곡선을 작성하였다(Fig. 2). 이 곡선은 광이 충분한 조건에서 두 품종의 광합성 능력을 비교할 수 있으므로 품종간의 최대 광합성 차이를 알 수 있다. 장엽콩은 황금콩에 비해 약 2배 이상 높은 광합성율을 광포화점인 $1,000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 보다 높은 광 강도에서 보였다(Fig. 2). 또한 본 실험의 광합성 측정 조건인 $1,500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 은 광강이 제한요인으로 작용할 수 없는 충분한 광조건으로써 오

Table 3. Two-way analyses of variance table of the gas exchange variables, i.e. net photosynthesis (A: $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) and stomatal conductance (g_s : $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Two soybean varieties were Hwanggum and Jangyub. They were treated with O_3 (150 nl l^{-1} for 8 h day^{-1}) for 3 days. The controlled plants were kept in charcoal-filtered air

Gas exchange Variables	Source	DF	3 days after O_3 fumigation			4 days after O_3 fumigation		
			MS	F	P	MS	F	P
Net photosynthesis	Treatment effect	1	101.56	23.37	<0.001	31.05	6.94	0.019
	Variety effect	1	154.00	35.43	<0.001	101.91	22.77	<0.001
	Interaction	1	32.93	7.58	0.015	36.59	8.17	0.012
	Error	15	4.35			4.48		
Stomatal conductance	Treatment effect	1	0.175	18.61	0.001	0.187	13.12	0.003
	Variety effect	1	0.215	22.87	<0.001	0.153	10.74	0.005
	Interaction	1	0.008	0.87	0.365	0.022	1.52	0.236
	Error	15	0.009			0.595		

Table 4. Stomatal conductance (g_s: mmol H₂O m⁻²s⁻¹) in Hwanggum and Jangyub soybeans before and after the ozone fumigation with 150 nl l⁻¹ O₃ between 9.00 and 17.00 h

Days after initiation of ozone fumigation	Hwanggum		Jangyub	
	Control	Ozone	Control	Ozone
0	0.12 (0.10)	0.10 (0.12)	0.47 (0.26)	0.22 (0.15)
3	0.21 (0.11)	0.06 (0.04)	0.46 (0.16)	0.23 (0.04)
4	0.35 (0.21)	0.08 (0.06)	0.46 (0.15)	0.33 (0.07)

Stomatal conductance was determined at 1500 μmol m⁻² s⁻¹ light, 380 μmol CO₂, 25°C in the controlled measurement cuvette. Numbers in parentheses indicate the standard deviation of the five replicate samples.

존 피해를 나타내기에는 적절한 수준이다.

3.4. 엽록소 함량

엽록소 a, b, 그리고 총 엽록소 함량 등 세가지를 측정, 통계분석한 결과 오존 처리나 두 품종 차이에 의한 세가지 엽록소 함량은 통계적으로 아무런 차이를 보이지 않았다(Table 5). 오존 처리 앞의 경우 상당부분의 가시피해 병징부위가 엽록소 추출을 위한 표본에 포함되었음에도 불구하고 엽록소 함량에는 차이가 없었으며 오히려 오존 처리한 세가지 엽록소 함량이 약간 더 높았다(Table 5). 두 품종간의 엽록소 함량 차이는 처리간의 차이보다 컸지만 통계적으로 유의한 것은 아니었다.

광합성과 엽록소 함량간의 상관관계(Table 6)는 품종과 처리에 따라 제 각기 다른 경향을 보였다. 오존

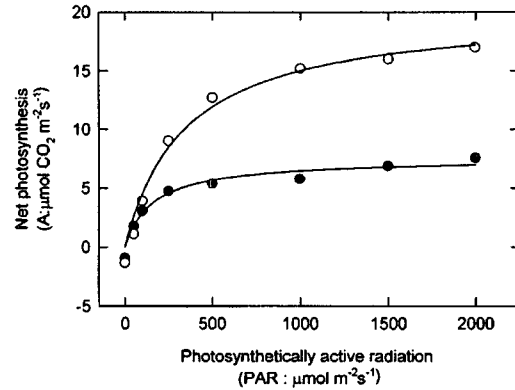


Fig. 2. Photosynthetic responses to variation in photosynthetically active radiation (PAR) in Hwanggum (●) and Jangyub (○) soybean (*Glycine max*) leaves. The levels of PAR were 2000, 1500, 1000, 500, 300, 150, 50, 0 μmol m⁻² s⁻¹. Measurement conditions were; 25°C and 380 μl l⁻¹ CO₂.

처리 24시간 후 광합성과 총 엽록소 함량간의 관계 (Fig. 4)는 오존을 처리한 황금콩의 낮은 광합성량에서도 1.8 mg/g fresh weight의 높은 엽록소 함량을 보였으며, 다른 측정치들에서도 뚜렷하게 엽록소량 증가에 따라 광합성이 증가되는 경향을 볼 수 없었다.

IV. 고 찰

본 실험의 150 nl l⁻¹ 오존농도 처리 수준은 현재 우리나라의 대기 중 농도보다 훨씬 높은 수준이지만, 콩을 사용한 오존 실험이 이 농도와 비슷(Li and Gupta, 1995; Reich *et al.*, 1986)하거나 이보다 더 높은

Table 5. Chlorophyll contents (mg per gram fresh weight) of a, b, and total of Hwanggum and Jangyub soybean (*Glycine max*) varieties exposed to O₃ (150 nl l⁻¹ for 8 h day⁻¹) for 3 days. The controlled plants were kept in charcoal-filtered air

		Chlorophyll a	Chlorophyll b	Total Chlorophyll
Treatment	Control	1.303	0.320	1.622
	Ozone	1.377	0.321	1.670
Variety	Hwanggum	1.312	0.312	1.624
	Jangyub	1.368	0.328	1.696
P-value	Treatment effect	0.460	0.948	0.537
	Variety effect	0.561	0.507	0.548
	O ₃ x variety			
	Interaction	0.647	0.696	0.654

Chlorophyll contents were determined by spectrophotometric absorbance of dimethyl sulfoxide extracts from 0.1 g fresh weight leaf samples which were gas-exchange measured.

Table 6. Correlation coefficients between net photosynthesis (A : $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) and total chlorophyll (mg per gram fresh weight)

Days after initiation of ozone fumigation	Variety	Treatment	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Total Chlorophyll
3	Hwanggum	Control	0.752	0.808	0.767
		Ozone	-0.708	-0.846	-0.739
	Jangyub	Control	-0.158	0.110	-0.104
		Ozone	0.248	0.347	0.265
4	Hwanggum	Control	0.886	0.755	0.863
		Ozone	-0.623	-0.688	-0.640
	Jangyub	Control	0.173	0.408	0.223
		Ozone	0.656	0.736	0.670

Net photosynthesis was measured right after and 24 hours after the ozone treatment terminated. Chlorophyll was extracted from the same leaf using gas-exchange measurement.

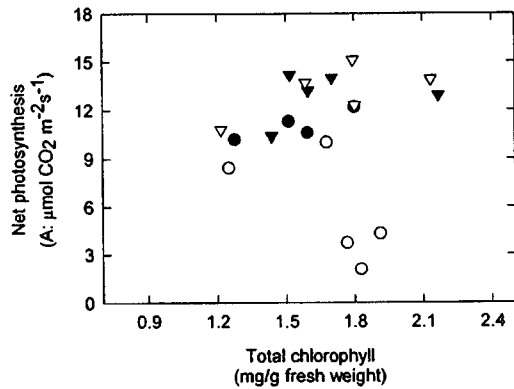


Fig. 3. The relationship between net photosynthesis and total chlorophyll in Hwanggum (control: ●, ozone treated: ○) and Jangyub (control: ▼, ozone treated: ▽) soybean (*Glycine max*) leaves. Gas-exchange measurement was conducted under 25 and photon flux density $1,500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Chlorophyll contents were extracted from 0.1 g fresh weight leaf samples which were gas-exchange measured.

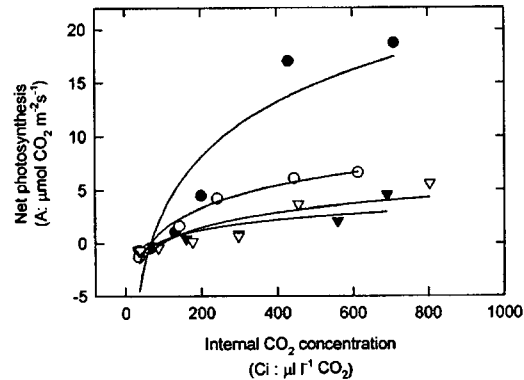


Fig. 4. Ozone effects on the response of photosynthesis to variation in intercellular CO_2 concentration in Hwanggum (control: ●, ozone treated: ○) and Jangyub (control: ▼, ozone treated: ▽) soybean (*Glycine max*) leaves. The curves represent a biochemical model fitted to the data. Measurement conditions were; 25°C and photon flux density $1,500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

300 nl l^{-1} (Chevone and Yang, 1985)도 사용되었다.

오존 피해에 대한 품종간의 저항성 판단 기준은 대부분 단기간 고농도의 오존 처리 후 발생하는 가시피해의 양으로써 판단되었다(Sheng *et al.*, 1993; Smith *et al.*, 1987). 같은 기준으로 본 실험의 두 품종을 판단한다면 장엽콩이 황금콩에 비해 비교적 감수성 품종이라 할 수 있지만, 통계적으로 이들 가시 피해의 차이가 없었을 뿐만 아니라, 생리적 반응 결과 장엽콩이 결코 감수성 품종이라 할 수 없다.

오존 처리에 따른 광합성의 저해율은 대체로 10-30% 정도(Miller *et al.*, 1991; Reich *et al.*, 1986;

Sheng *et al.*, 1993)로서 본 실험의 황금콩 결과인 50-60% 보다는 낮지만, Li and Gupta(1995)가 보고한 50-70%의 광합성 감소보다는 적었다. 그런데, 본 실험의 광합성 감소를 콩 수확량 감소에 적용시켜 예측하는 것은 무리이다. Miller *et al.*(1991)에 따르면 콩 생장 기간 중에서 꽃이 맺히고 꼬투리가 생기는 시기(R2-R3)의 광합성이 수확과 직접 관련이 있다고 보고하였는데, 본 실험의 식물체는 이 시기보다 훨씬 전인 영양생장 단계였으므로 오존에 의한 광합성 감소는 수확량에 간접적으로 영향 줄 것이다.

오존은 기공을 통해 식물체에 유입되므로 잎의 기공

전도도는 매우 중요하다. 콩에서 단기간의 고농도 오존 처리로 인해 기공을 닫는 저항성 반응이 보고된 바 있다(Chevone and Yang, 1985). 본 실험에서는 황금콩에서 오존으로 인한 기공닫힘이 뚜렷한 반면, 장엽콩의 기공 전도도는 오존 처리로도 변화가 없으므로 이들 두 품종의 생리적 반응 차이를 기공전도도로 구별할 수 있다. 특히, 오존 처리후 두 품종에서 기공 전도도 변이가 현저히 줄어들었는데 이는 오존으로 인해 일률적으로 기공이 닫혔다는 증거이다.

잎 내부에 유입되는 오존의 양(ozone flux)은 기공이 열리면서 오존 유입과 증산이 동시에 진행되므로 기공전도도로 추정할 수 있다. 두 품종간의 오존 유입을 비교하면, 같은 외부 오존 농도에서 장엽콩이 황금콩보다 약 3배 이상 오존 유입이 많았다. 결국 황금콩은 오존 스트레스에 민감하게 반응하여 기공을 닫음으로써 오존 유입을 차단함과 동시에 잎 내부의 광합성 관련 기구들을 보호하였다. 그 결과 장엽콩에 비해 황금콩은 가시피해가 약 50% 낮았다. 하지만 기공 전도도가 낮아짐으로 인해 이산화탄소 유입 감소에 따른 광합성 저해가 대단히 낮게 나타났다. 잎에 나타난 가시피해는 작은 반점이 골고루 퍼지면서 옆면적에서 차지하는 비율이 높지 않기 때문에 광합성 감소에 크게 기여하지 않았다. 기공 전도도는 처리 이전부터 이미 뚜렷한 차이가 있었으며, 처리 이후 품종간의 기공 전도도 차이는 더 심화되었다. 장엽콩은 오존에 의한 광합성 저해는 없었지만 기공 전도도는 처리간에 큰 차이를 보이는데, 이는 이산화탄소의 유입감소에도 불구하고 잎 내부의 효율적 광합성 활동이 지속됨으로써 스트레스가 없을 때와 다름없이 높게 유지하는 것을 의미한다. 이렇게 기공 전도도를 낮추면서도 광합성이 일정 수준으로 유지되는 것은 식물이 고농도의 오존환경에서도 필요한 대사를 하면서 생존이 가능한 매우 효율적인 생존전략이라 할 수 있다.

가스 교환 측정 큐벳 내부의 CO₂ 농도를 임의로 조정하면서 광합성 변화를 나타내는 곡선(A-Ci curve)은 오존 등의 스트레스가 잎 내부의 광합성에 관련된 동화 효소의 파괴를 나타내는 지표로 유용하게 쓰인다(Ball et al, 1987; Flanagan and Jefferies 1989). 그림 3에서 나타나는 황금콩 품종에서 오존 처리에 따른 곡선 기울기의 감소는 CO₂ 동화 효소인 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (rubisco)의 활성

이 저해됨을 나타내고 있다. 한편 장엽콩의 처리와 대조의 두 곡선의 비슷한 기울기는 오존 처리로 인한 rubisco 효소 활성 저해가 일어나지 않았다는 것을 의미한다. 그런데, 장엽콩은 예상과는 달리 두 처리 모두 광합성율이 대단히 낮게 나타났다. 황금콩은 오존 처리로 인한 광합성 저해가 장엽콩보다 심각한데, 암반응의 rubisco 효소 활성의 저해도 이들 두 품종의 오존에 의한 광합성 감소의 원인들 중 하나라 할 수 있다.

엽록소 함량은 광합성의 명반응(Photosystem II)에 관여되므로, 빛 에너지를 화학에너지로 변환시키는데 중요한 역할을 한다. 그러나, 오존 처리에 따른 광합성의 감소를 엽록소 함량이나 가시피해로 인한 잎의 광합성 면적 감소로 설명할 수 없었다. 또한 장엽콩의 약간 높은 엽록소 함량 결과만으로 두 품종의 광합성 차이를 설명하기에는 품종간의 엽록소 함량의 차이가 뚜렷하지 않다. 따라서 본 실험에서는 엽록소 함량 변화로 오존 피해를 설명할 수 없으므로, 명반응계의 손상은 없다고 여겨진다. 이는 Reich et al.(1986)이 보고한 오존에 의한 잎의 엽록소 함량 감소와 광합성 감소가 동시에 일어난다는 결과와는 다른 것이다. 이들의 보고에서는 오존 처리 수준별로 광합성 감소와 엽록소 함량 감소를 비교, 설명했지만 본 실험에서는 각 측정값의 광합성과 엽록소 함량을 같이 측정했기 때문에 더 정확히 분석했다고 판단된다.

반면 암반응의 rubisco와 같은 동화작용에 관여되는 효소 활성의 손상이 뚜렷이 관찰되었다. 따라서 콩의 오존에 따른 광합성의 감소 원인은 가시피해로 인한 광합성 면적의 감소나 엽록소 감소에 따른 저해라기보다는 육안으로 관찰할 수 없는 잎 내부의 동화작용에 관여되는 생화학적 기구들의 손상과 기공 전도도 감소에 기인한다고 할 수 있다.

V. 요 약

광합성이 비교적 안정적인 자연광을 이용한 가스 노출 성장상을 사용하여 황금콩과 장엽콩 두 가지 콩 품종에 3일간 150 nl l⁻¹의 농도로 오존을 처리한 후 잎에 나타나는 가시피해 뿐만 아니라 광합성, 기공 전도도, 엽록소 함량 등 생리적인 반응을 측정하였다. 잎에 나타난 가시피해는 기존의 보고와 마찬가지로 미세한 구릿빛 반점이었는데 장엽콩이 황금콩에 비해 빈

번히 발생하였다. 하지만 오존 처리후 광합성은 황금콩에서 약 60% 감소한 반면 장엽콩에서는 13% 정도여서 황금콩의 오존 피해가 더 컸다. 오존으로 인한 콩잎의 광합성 감소 원인은 기공 전도도 감소에 따른 이산화탄소 공급량의 감소와 암반응의 동화효소인 rubisco의 활성저해로 설명이 가능하였다. 하지만 오존 처리로 인해 엽록소 함량 저해는 없었고, 가시피해의 면적도 전체 잎면적에 차지하는 비중이 미미하였으므로 이들은 광합성 감소 원인이 될 수 없었다. 한편, 오존 처리 완료 24시간 후에 광합성과 기공 전도도를 측정할 결과 24시간 전과 거의 비슷하므로 오존으로 인한 광합성 저해와 기공 닫힘의 변화가 하루만에 회복되지 않았다. 장엽콩은 무처리에서도 황금콩보다 광합성이 높았고, 오존 처리시 급격한 광합성 감소나 rubisco효소 활성도 크게 영향 받지 않았으며 다만 기공 전도도만 약간 낮아졌을 뿐이었다. 이러한 생리적 결과로 미루어볼 때 장엽콩은 황금콩보다 오존에 저항성 품종이라 여겨진다. 비록 가시피해는 장엽콩에서 황금콩보다 빈번하게 발생되었지만 전반적인 생리적 피해는 황금콩에서 심각하므로 가시피해만으로 오존의 저항성, 감수성을 판단하는 것은 잘못된 것이다.

감사의 글

본 실험의 가스 교환 측정 및 엽록소 측정에 도움을 주신 서울대 농생대 식물병리전공 김종호 학생께 감사드립니다. 또한 본 연구수행에 기기지원을 해 주신 서울대 농생대의 농업과학공동기기센터(National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에도 감사의 뜻을 표합니다.

인용문헌

- 농업과학기술원, 1998: 농작물 환경오염 피해해석. 농촌진흥청 농업과학기술원, 159pp.
- 박근용, 홍은희, 정길용, 황영현, 이영호, 김석동, 함영수, 1981: 콩 신품종 “황금콩”. 농사시험보고서(작물편), 23, 155-158.
- 윤마영, 정용승, 1995: 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존. 한국대기보전학회지, 11, 85-93.
- 윤성철, 박은우, 장영기, 1999: 한계농도 누적 오존지표로 본 1990-1997년의 수도권 오존농도 변화. 한국대기환경학회지, 15, 429-439.
- 최현욱, 함영수, 박근용, 홍은희, 김용욱, 정길용, 황영현, 이영호, 1979: 대두 신품종 “수원 85호” 및 “수원 86호”. 농사시험보고서 (작물편), 21, 117-122.
- Ball, J. T. I., E. Woodrow and J. A. Berry, 1987: A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *Progress in photosynthesis research*, J. Biggins (Ed.), Martinus, 221-224.
- Blum, U. and D. T. Tingey, 1977: A study of the potential ways in which O₃ could reduce nodule growth. *Atmospheric Environment*, 11, 737-739.
- Chevone, B. I. and Y. S. Yang, 1985: CO₂ exchange rates and stomatal diffusive resistance in soybean exposed to O₃ and SO₂. *Canadian Journal of Plant Science*, 65, 267-274.
- Farquhar, G. D. and T. D. Sharkey, 1982: Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 11, 539-552.
- Flanagan, L. B. and R. L. Jefferies, 1989: Photosynthetic and stomatal responses of the halophyte, *Plantago maritima* to fluctuations in salinity. *Plant Cell and Environment*, 12, 559-568.
- Hiscox, J. D. and G. F. Israelstam, 1979: A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, 57, 1332-1334.
- Li, Y. and G. Gupta, 1995: Physiological changes in soybean treated with ozone and molybdenum. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26, 1649-1658.
- MacKinney, G., 1941: Absorption of light by chlorophyll solutions. *Journal of Biological Chemistry*, 140, 315-332.
- Miller, J. E., W. A. Pursley, S. F. Vozzo and A. S. Heagle, 1991: Response of net carbon exchange rate of soybean to ozone at different stages of growth and its relation to yield. *Journal of Environmental Quality*, 20, 571-575.
- Mulchi, C. L., E. Lee, K. Tuttle and E. V. Olinick, 1988: Influence of O₃ stress on growth processes, yields and grain quality characters among soybean cultivars. *Environmental Pollution*, 53, 151-169.
- Reich, P. B. and R. G. Amundson, 1985: Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species. *Science*, 230, 566-570.
- Reich, P. B., A. W. Schoettle, R. M. Raba and R. G. Amundson, 1986: Response of soybean to low concentration of ozone: I. Reductions in leaf and whole plant net photosynthesis and leaf chlorophyll content. *Journal of Environmental Quality*, 15, 31-36.
- Sheng, W. S., B. I. Chevone and J. L. Hess, 1993: Photosynthetic inhibition and superoxide dismutase activity in soybean cultivars exposed to short-term ozone fumigations. *Environmental Pollution*, 80, 45-52.
- Smith, G., B. Greenhalgh, E. Brennan and J. Justin, 1987: Soybean yield in New Jersey relative to ozone pollution and antioxidant application. *Plant Disease*, 71, 121-125.
- USEPA, 1996: *Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants*. EPA-600/P-93/004 a,b,cF. National Center for Environmental Assessment.