

## 아황산가스(SO<sub>2</sub>)와 오존(O<sub>3</sub>)에 대한 지표식물의 가시적 피해 발현시간 조사

허재선 · 허용균 · 이충일\*  
산업과학기술연구소 대기환경연구팀

### Evaluation of SO<sub>2</sub> or O<sub>3</sub> Exposure Durations Requiring Foliar Damage Development by Using Bioindicating Plants

Jae Seoun Hur, Yong Kyun Hur and Choong Il Lee\*  
Air Pollution Research Team, Research Institute of Industrial Science and Technology,  
Chunnam 544-090, Korea

**ABSTRACT :** *Perilla* (*Perilla frutescens* 'Suwon 25'), 3 cultivars of tobacco (*Nicotina tabacum* 'L8', 'KF109' and 'NC82'), morning glory (*Ipomoea purpurea*) and spinach (*Spinacia oleracea* 'Yipchu') were exposed to 140 ppb/hr SO<sub>2</sub> or 150 ppb/hr O<sub>3</sub> for 24 hrs per day for 10 days in indoor fumigation chambers. *Perilla* and 'L8' tobacco were revealed to be sensitive to SO<sub>2</sub> and may be used as bioindicating plants of SO<sub>2</sub>. Ozone exposure caused very severe symptoms on 'L8' tobacco and morning glory, which can also be used as very sensitive bioindicating plants to O<sub>3</sub>. When the exposure period requiring that half of the tested plants show symptoms was employed as a critical exposure duration (CED) in this study, the CEDs to O<sub>3</sub> were 24 hrs for tobacco 'L8', 72 hrs for morning glory, 144 hrs for tobacco 'KF 109' and 216 hrs for spinach, respectively. Sulfur dioxide exposure produced much milder symptoms on the foliage of the tested plants and resulted in longer CEDs as following; 240 hrs for tobacco 'L8' and more than 240 hrs for the rest of the plants.

**Key words :** bioindicating plants, perilla, tobacco, morning glory, spinach, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, critical exposure time.

대기오염측정은 대기환경관리를 위하여 선결되어야 할 문제이며, 주로 이화학적 방법에 의하여 행하여지고 있지만 측정기기가 고가이고 지속적인 관리와 유지가 필요할 뿐만 아니라 측정 지점에 대한 정보만을 제공하는 등 광범위한 지역에 걸쳐 동시에 측정하기에는 많은 어려움이 있다. 반면에 대기오염원에 대한 반응정도가 다르고 특이성을 지닌 다양한 생물지표를 이용한 생물학적 대기환경측정은 이화학적 방법보다 경제적이고, 광범위한 지역에 걸쳐 동시에 실시할 수 있으며, 관리가 용이하다는 장점을 지니고 있다. 또한 이화학적 방법에 의해서는 대기오염원의 존재 여부나 농도에 관한 정량적인 자료를 얻을 수 있지만 생물지표를 이용할 경우 특정 대기오염원의 존재 유무나 농도뿐만 아니라 생체에 작용하는 대기오염원의 양이나 영향에 관한 정확한 정보를 얻을 수 있

으며 오염원에 의해 유발될 수 있는 환경영향 평가가 가능하고 다른 생물체에 대한 오염원의 잠재적인 위험성도 유추할 수 있다.

대기오염원에 대한 대표적인 생물지표로는 lichen을 들 수 있는데, SO<sub>2</sub>에 매우 민감한 수종 lichen의 멸종에 따른 사막화(lichen desert) 현상이 유럽지역에서 확인되었으며(15), 영국에서는 lichen을 이용한 아황산가스 오염지도가 작성되기도 하였다(3). 이외에도 담배(품종; Bel-W3)와 O<sub>3</sub>(5, 9), 들깨(품종; 수원25호)와 SO<sub>2</sub>(21), 나팔꽃과 O<sub>3</sub> 및 질소산화물(12), *Azolla pinnata* 공생체와 SO<sub>2</sub>(6) 등에 대하여 조사가 되어져 있다.

대기오염원에 대한 지표식물의 반응은 1) 거시적 피해인 가시적 병징, 2) 미시적 피해인 세포피해, 3) 생리, 생화학적 변화 등을 조사하여 평가한다(19). 가시적 피해는 잎에 나타나는 고사나 괴저병반과 색의 변화 및 형태적 기형을 판정하며, 세포피해는 세포 내용

\*Corresponding author.

물의 축소와 엽록체의 변형 또는 파괴 등을 판정하는 것이다. 최근에는 전체적인 대기오염원 농도의 감소로 가시적 피해가 경미하게 나타나고 있고 특정 대기오염원에 대한 영향을 보다 정확하게 판정하기 위하여 생리, 생화학적 반응을 조사하는 작업이 활발히 진행되고 있지만(16) 일반적으로 판정이 쉬운 가시적 피해를 판단 근거로 많이 이용하고 있다.

대기오염원에 의한 식물피해는 노출된 대기오염원의 양(농도×시간)에 의하여 좌우되므로 지표식물을 이용한 실용적인 대기환경관리를 위해서는 대상으로 하는 특정 대기오염원에 대한 노출농도와 노출시간에 따른 지표식물의 반응에 대한 정확한 자료의 확보가 필요하다.

본 연구는 자체 선발한 대기오염원 지표식물들을(22) 이용하여 현실적인 대기환경관리를 하는데 필요한 기초자료를 확보하기 위하여 SO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>에 의하여 지표식물에 나타나는 가시피해를 기준으로 대기오염원의 총량에 따른 한계노출시간을 규명하기 위하여 실시하였다.

## 재료 및 방법

식물준비 및 관리. 본 실험에 사용된 들깨(*Perilla frutescens*) '수원25호' 종자는 원예시험장으로부터, 담배(*Nicotina tabacum*) 'L8', 'KF109', 'NC82' 종자는 인삼연초연구원 대기시험장에서 분양받았으며, 시금치(*Spinacia oleracea*) '입추'와 나팔꽃(*Ipomoea purpurea*)은 종자회사로부터 구입하였다. 각 식물의 종자는 광양제철소 단지안에 있는 산업과학기술연구소 실험온실에서 부엽토, 모래 및 질석을 3:1:1(v/v)로 섞어서 조제한 혼합토양을 채운 직경 21 cm 화분에 파종하여 재배하였다. 담배의 경우 일반 재배법에 따라 1차 가식한 후 본엽이 4-5엽 정도 자랐을 때 화분에 정식하였다.

식물생장 정도에 따라 1/4×, 1/2×, 1× 농도의 토마토 수경재배용 양액(16)을 매일 관수하였다. 온실 내의 주간온도는 22±5°C, 야간온도는 최저 17°C로 유지하였다. 담배를 제외한 식물재료는 파종 후 한달 정도 자란 유묘를 이용하였으며, 담배의 경우 파종 후 60일이 경과한 식물을 이용하였다.

대기오염원 농도 및 처리. 본 실험에 사용된 지표식물들에 대한 대기오염원별 한계노출시간(critical exposure duration : CED)을 규명하기 위하여 SO<sub>2</sub>의 경우 환경기준치인 24시간 평균농도 140 ppb, 오존의 경우 1994년 여름 우리나라 전국 대도시 지역에서 종종 측정되었던 시간당 평균농도 150 ppb(환경기준치의 1.5

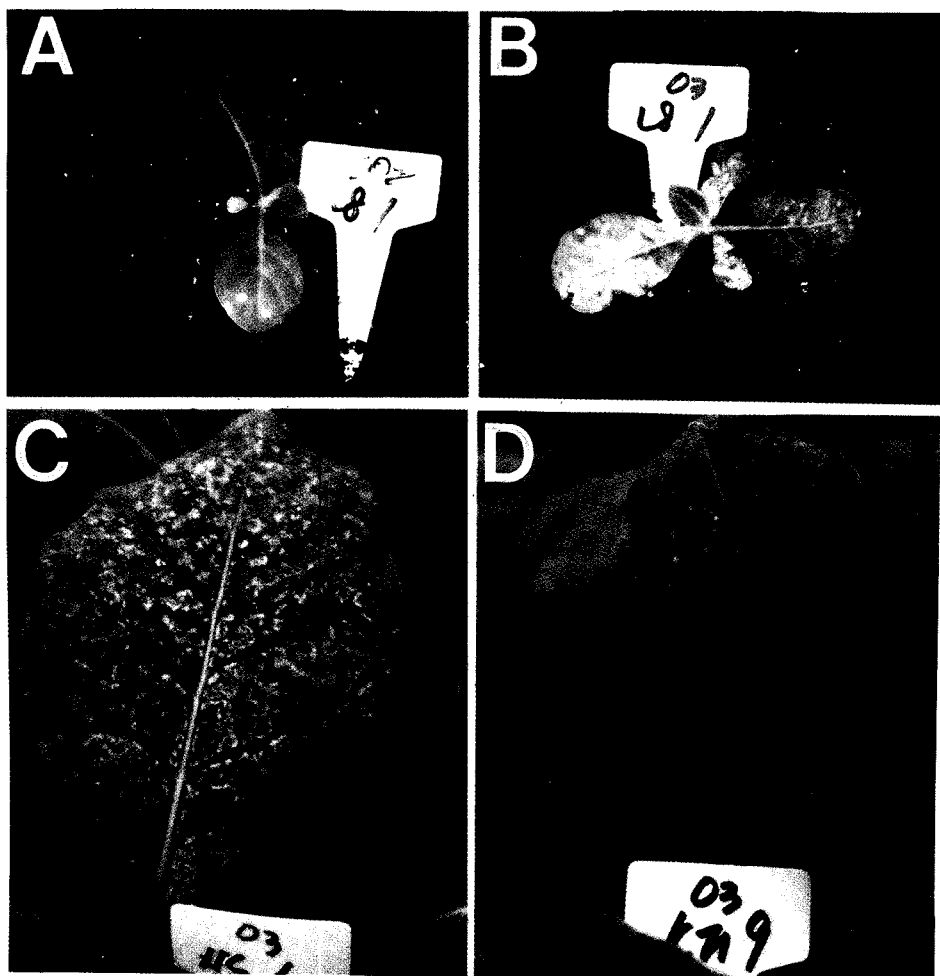
배)를 기준으로 하여 하루 24시간씩 10일간 노출시켰다.

대기오염원의 노출은 식물생장상 기능을 지닌 밀폐된 유리 노출상(fumigation chamber)에서 실시하였으며 노출상의 크기는 2.5 m×2.0 m×1.8 m(가로×세로×높이)였다. 대기오염원 노출상, 대기오염 농도조절장치, 대기오염원 농도측정시스템 및 시스템 운영장치는 (주)동양전기에 주문 제작하여 사용하였다. 여과된 공기를 가스혼합장치(gas generation system)에서 대기오염원과 혼합하여 노출상 안으로 유입시킨 후 노출상 내의 대기를 5분 간격으로 채취하여 SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 측정기로 노출상 내의 대기오염원 농도를 측정하고 설정농도와 비교한 후 농도 조정이 필요할 경우 자동 농도조절장치에 의하여 설정 농도로 유지하였으며, 매 1분 간격으로 노출상 내의 평균농도를 출력시켜 확인하였다. 질소가스에 1%로 혼합된 SO<sub>2</sub>가스는 (주)동진무역에 주문하여 사용하였으며 가스저장통(gas cylinder)에서 공급되는 SO<sub>2</sub>량은 유량조절기에 의하여 조절(200 cc/min)하였다. 오존은 오존발생기를 이용하여 산소가스저장통에서 공급되는 산소가스를 방전시켜 사용하였으며 산소량은 유량조절기에 의하여 조절(500 cc/min)하였다. 노출상 내의 대기는 시간당 5회 교환되어 활성탄(activated charcoal filter)을 통하여 여과된 후 대기 중으로 방출되었다.

노출상 내의 온도는 공조시설에 의하여 항온 유지되었으며(25±3°C) 자연광을 이용하였고 일몰시간 이후나 흐린 날에는 인공조명을 추가적으로 공급하였다(인공조명포함 일조시간 : 오전 8:00~오후 6:00). 습도는 고압 분사장치에 의하여 상대습도 80%이상으로 유지하였다. 아황산가스 측정기는 자외선 형광법을 적용한 KIMOTO제품인 Sulfur Dioxide Analyzer Model-368을 사용하였으며 오존 측정기는 자외선 분광법을 적용한 KIMOTO제품인 Ozone Analyzer Model-806을 사용하였다. 질소가스에 7%로 혼합된 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)가스를 오존측정기 운영가스로 이용하였다. 표준가스를 이용하여 영점조정을 하였으며 정기적인 검사 및 영점조정을 실시하여 측정기의 정확성 여부를 계속적으로 확인하였다. 또한 정기적으로 zero gas 발생기의 filter를 교환하여 대기오염원이 제거된 공기를 가스 혼합장치에 공급하였다.

대기오염원을 노출하기 24시간 전에 공시 식물들을 노출상 안에 배치하여 적응시킨 후 대기오염원 노출을 실시하였다.

가시적 피해 조사. 노출 후 평균 4시간 간격으로 식물체 앞에 발생하는 병징의 발생부위, 색, 모양 등의 가시피해 유형과 시간경과에 따른 피해 진행 상황을



**Fig. 1.** Foliar damages caused by the exposure of  $\text{SO}_2$  or  $\text{O}_3$ . (A) Tobacco leaves of L8 cultivar at the late stage of  $\text{SO}_2$  injury, showing chlorotic spots at the tip of leaf. (B) L8 tobacco exposed to  $\text{O}_3$ , showing much more severe injury than  $\text{SO}_2$ . By  $\text{O}_3$ , initially white or chlorotic spots appeared on leaves, but at the late stage most leaves were blighted. (C) & (D) NC82 and KF109 tobacco plants at the late stage of  $\text{O}_3$  injury, showing interveinal chlorotic spots.

계속적으로 조사하였다. 최초 병반발현은 육안으로 확인할 수 있는 병징이 나타나는 것을 기준으로 하였으며 병징이 확인된 부위를 반복적으로 관찰하여 병진전 정도를 조사하였다. 조사항목으로는 최초 병반발현시간, 병반발현빈도(전체 실험식물 중에서 병징이 하나라도 존재하는 식물 개체 비율), 노출 종료시 병반발현빈도를 식물체별로 조사하였다.

## 결 과

$\text{SO}_2$ 와  $\text{O}_3$ 에 노출된 식물의 피해 증상. 자체 선정

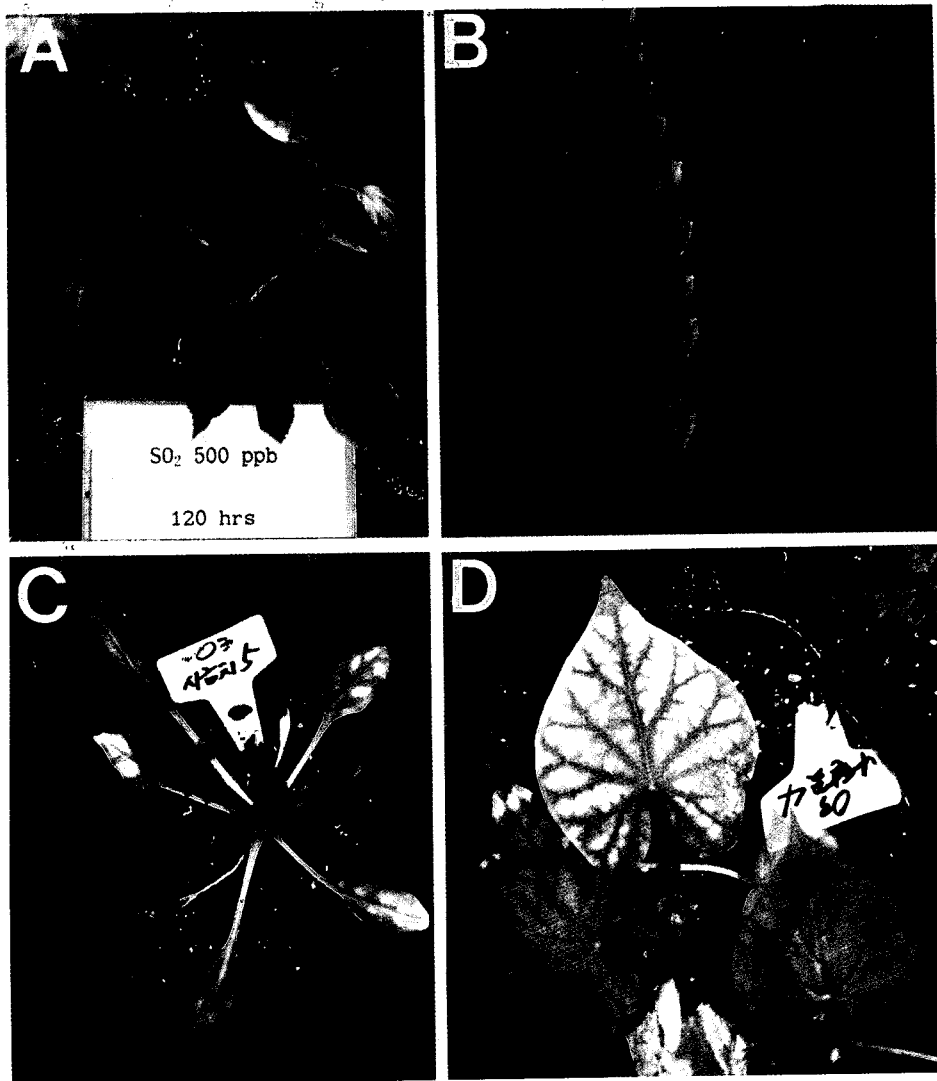
한 지표식물(22)을 이용하여 아황산가스와 오존에서 10일간 노출한 결과 식물체에 나타난 피해 증상은 다양하였다(Figs. 1 & 2). 일반적으로 들깨 '수원25호'를 제외한 다른 식물은 모두 아황산가스보다 오존에 의한 피해증상이 심하게 나타났다.

아황산가스에 노출된 담배 'L8'의 경우 노출 24시간 이내에 잎 선단부에 백색 부정형 병반이 발현되었으나 시간경과에 따른 진전이 매우 느리게 진행되었다(Fig. 1A). 또한 담배 'KF109'의 경우 노출 120시간만에 엽맥 주위에 백화현상이 나타났고, 담배 'NC82'의 경우 노출 48시간 이내에 엽맥간에 백색 병반이 최초

로 발생하였지만 병진전이 느렸으며 피해정도로 경미하였다. 그러나 오존에 대해서는 피해증상 발현이후 병진전이 매우 빨랐으며 피해증상이 아주 심하였다. 담배 'L8'의 경우 노출 24시간 이내에 가시적 피해 발현빈도가 100%로 오존에 대하여 매우 민감하게 반응하였으며, 병징은 흑색 소립 반점보다는 백색 괴점현상이 주를 이루었으며 후기에 피해부위가 갈색이나

백색으로 탈색되어 고사되었다(Fig. 1B). 담배 'NC82'와 'kF09'는 모두 초기에 백색 부정형 반점이 생성되어 점차로 확대되어 잎 전체로 진행되었고, 후기에 갈색반점으로 변화하였다(Figs. 1C & 1D). 이 두 담배품종은 아황산가스에 노출된 담배와 비교시 성장정도는 비슷하였지만 가시적 피해정도는 매우 심하였다.

들깨 '수원25호'의 경우는 아황산가스에 노출되었을



**Fig. 2.** Foliar damages caused by the exposure of  $\text{SO}_2$  or  $\text{O}_3$ . (A) Foliar injury of perilla caused by 500 ppb/hr  $\text{SO}_2$  exposure: brownish spots, interveinal chlorosis and curling of leaves at the end of 120 hrs exposure. (B) Marginal discoloration of perilla leaf induced by 55 ppb/hr  $\text{SO}_2$  at the end of exposure, which is not shown on the leaves of perilla grown in clean air chamber. (C)&(D) Foliar damages caused by ozone exposure. (C) Spinach showing interveinal chlorosis, especially at the lower leaves. (D) Foliar damages of morning glory; interveinal necrosis and chlorosis caused by 97 hrs ozone exposure.

경우 피해증상이 나타났으나 오존에 의해서는 노출 종료때까지 육안 구별이 가능한 병반이 발현되지 않았다. 아황산가스에 의한 들깨의 증상은 24시간 이내에 엽맥 주위에 갈색반점이 나타났고 노출 후기에는 황화현상과 잎가장자리가 탈색되는 증상을 보였다 (Figs. 2A & 2B).

아황산가스에 의해서는 시금치의 경우 노출 종료때까지 병반이 전혀 나타나지 않았으며 식물체가 전반적으로 정상적인 생장을 하였고, 나팔꽃의 경우는 216시간만에 초기 병반이 잎 가장자리에 백색 반점으로 발생하였으나 노출 종료때까지 전체적으로 건전하게 유지되어 피해정도가 경미하였다. 그러나 오존에 의해서는 피해가 심하였다. 시금치의 경우 노출 216시간 경과 후에 모든 식물체에서 병징이 확인되었는데, 병반은 하엽에 주로 발생하였고, 은회색 괴저병반이 발생하여 점차 탈색되면서 백화 또는 황화 병반으로 진전되었다 (Fig. 2C). 나팔꽃의 경우 오존 노출 48시간 이내에 초기 병반이 나타났으며 병진전도 매우 빠르고 심하게 진행되었다. 병징은 잎 전반에 걸쳐 흰색 소립반점이 산재되어 나타났으며 점차 발달되어 후기에는 잎 전체가 백화되었고 (Fig. 2D), 잎말림, 쭈그러짐과 같은 형태적 변화도 노출기간 동안 확인할 수 있었다.

**SO<sub>2</sub>에 노출된 식물의 반응지표.** 아황산가스 140 ppb 평균농도에서 피해증상의 발현에 따른 식물의 반응지표는 Table 1과 같다. 아황산가스에 의해서는 노출종료시까지 100%의 병반발현빈도를 보이는 지표식물은 하나도 없어서 조사된 모든 식물의 병반발현빈도 100%(SF<sub>100</sub>)는 모두 240시간을 상회하는 것으로 나타났다. 아황산가스에 의한 최초 병반발현(FST)은 담배 'L8'의 경우는 노출 24시간 이내에 잎 선단부에 백색 소립 병반이 발현되었고, KF109의 경우 노출 120시간만에 엽맥 주위에 백화현상이 나타났으며, NC82의 경우 노출 48시간 이내에 엽맥간에 백색 병반

이 최초로 발생하였다. 또한 식물 중 병반발현빈도 50%(SF<sub>50</sub>)를 기준으로 한계노출시간(critical exposure duration, CED)을 조사하였을 때 L8은 240시간 정도로 조사되었고, KF109와 NC82는 한계노출시간이 240시간 이상으로 조사되었다.

들깨 '수원25호'의 경우 노출 24시간 이내에 엽맥 주위에 갈색반점이 발현되었고, 황화현상과 잎 가장자리의 탈색은 노출종료시에 나타났다. 들깨의 경우 갈색반점에 대한 빈도 SF<sub>50</sub>을 기준으로 할 경우 한계노출시간은 240시간 이상으로 조사되었지만, 잎 전체에 나타난 황화현상을 함께 고려할 경우 SF<sub>50</sub>은 240시간 내외로 추정되었다. 나팔꽃의 경우 216시간만에 초기 병반이 잎 가장자리에 백색 반점으로 발생하였으나, 시금치의 경우 노출종료 때까지 병반이 전혀 나타나지 않아 최초 병반발현은 240시간 이상인 것으로 추정되었다. 나팔꽃은 SF<sub>50</sub>을 기준으로 하는 한계노출시간이 240시간 이상이며, 시금치는 240시간을 훨씬 상회할 것으로 추정되었다.

**O<sub>3</sub>에 노출된 식물의 반응지표.** 오존에 의한 식물의 반응지표는 Table 2와 같다. 오존에 의해서는 들깨를 제외한 모든 식물에 있어서 아황산가스보다 최초 병반발현시간(FST)이 빠르고 병의 진전도 빨라서 노출종료시에는 100%의 병반발현율을 나타내었다. 담배 'L8'의 경우 노출 24시간내에 초기병반이 발현되어 24시간만에 가지적 피해 발현빈도가 100%로 오존에 대하여 매우 민감하게 반응하였고, SF<sub>50</sub>을 기준으로 하는 한계노출시간이 24시간 이내로 조사되었다. 아황산가스에 노출된 담배와 비교시 거의 자라지 못한 상태로 노출종료시는 대부분의 고사 직전에 있었다.

담배 'KF109'의 경우 노출 48시간 이내에 초기 발병이 확인되었지만 이때 발현빈도는 1/12로 매우 낮았으며, 노출 144시간 경과 후에 모든 식물체에서 일시에 발병이 확인되어 병진전이 진행되었다. SF<sub>50</sub>을 기준으

**Table 1.** Response indices of the plants exposed to 140 ppb/hr SO<sub>2</sub> for 24 hrs per day for 10 days

Response index	Tobacco			Perilla	Morning glory	Spinach
	L8	KF109	NC82	Suwon25		Yipchu
FST <sup>a</sup> (hours)	24	120	48	24	216	>240
SF <sub>50</sub> <sup>b</sup> (hours)	240	>240	>240	>240	>240	>240
SF <sub>100</sub> <sup>c</sup> (hours)	>240	>240	>240	>240	>240	>240
FSF <sup>d</sup>	6/12	1/12	1/12	4/12	4/12	0/12

<sup>a</sup> Exposure durations producing first symptom.

<sup>b</sup> Exposure durations requiring 50% symptom frequency. Symptom frequency=No. of diseased plants/No. of total plants.

<sup>c</sup> Exposure durations requiring 100% symptom frequency.

<sup>d</sup> Symptom frequency at the end of 240 hrs exposure.

**Table 2.** Response indices of the plants exposed to 150 ppb/hr O<sub>3</sub> for 24 hrs per day for 10 days.

Response index	Tobacco			Perilla	Morning glory	Spinach
	L8	KF109	NC82	Suwon25		Yipchu
FST <sup>a</sup> (hours)	<24	48	48	>240	48	192~216
SF <sub>50</sub> <sup>b</sup> (hours)	<24	120~144	96~120	>240	48~72	192~216
SF <sub>100</sub> <sup>c</sup> (hours)	24	144	144	>240	72	216
FSF <sup>d</sup>	12/12	12/12	12/12	0/12	12/12	12/12

<sup>a</sup> Exposure durations producing first symptom.

<sup>b</sup> Exposure durations requiring 50% symptom frequency. Symptom frequency=No. of diseased plants/No. of total plants.

<sup>c</sup> Exposure durations requiring 100% symptom frequency.

<sup>d</sup> Symptom frequency at the end of 240 hrs exposure.

로 할 경우 한계노출시간은 144시간 내외가 될 것으로 판정되었다. 담배 'NC82'의 경우도 노출 48시간 이내에 초기 병반이 확인되었지만 발현빈도가 120시간 경과 때까지 42%였으며 144시간이 지난 후에 병반 출현빈도가 100%가 되었다. 본 실험조건에서 SF<sub>50</sub>을 기준으로 할 경우 NC82의 한계노출시간은 120시간 정도 될 것으로 추정되었다.

들깨 '수원25호'의 경우 오존에 의해서는 노출종료 때까지 육안 구별이 가능한 병반이 발현되지 않아 아황산가스와 대조를 보였다. 본 실험조건에서 SF<sub>50</sub>을 기준으로 할 경우 한계노출시간은 240시간을 훨씬 상회할 것으로 추정되었다. 시금치의 경우 노출 216시간 경과후에 모든 식물체에서 병징이 확인되어 최초 병반발현시간은 192~216시간으로 SF<sub>50</sub>을 기준으로 한 한계노출시간도 192~216으로 추정되었다. 나팔꽃의 경우 노출 48시간 이내에 초기병반이 나타났으며 이때 33%의 발현빈도가 조사되었다. 노출 72시간 경과후에 발현빈도가 100%가 되어 병진전이 매우 빠르게 진행되었다. 아황산가스에 노출된 나팔꽃에 비하여 생장이 심하게 억제되었으며 가지적 피해정도도 매우 심하였다. 나팔꽃의 경우 본 실험조건에서 SF<sub>50</sub>을 기준으로 할 경우 한계노출시간은 48시간과 72시간 사이가 될 것으로 추정되었다.

## 고 찰

일반적으로 대기오염원에 대한 지표식물의 반응은 지표식물의 유전적 특성, 성장단계, 환경조건, 대기오염원의 농도 등에 따라 좌우되며 동일 품종일지라도 식물개체에 따라 반응정도가 다르다(1, 2, 4, 5). 본 연구에서도 이와 같은 개체 변이의 편차가 확인되어 단순하게 식물 개체에서의 최초 병반발현시간을 한계노출농도로 설정하는데는 다소 무리가 있으며, 또한 가

시적 피해발현은 식물체가 흡수한 대기오염원의 양이 식물체의 해독 대사능력을 넘어서는 경우에 발생하므로(20), 대기오염원의 피해와 지표식물의 가지적 반응 출현간에는 어느 정도의 시간적 간격이 존재한다. 그러므로 노출된 전 식물개체에서 가지적 피해가 확인되는 시점을(병반출현빈도 100%) 한계노출농도로 설정하는 것은 가지적 피해를 유발할 수 있는 대기오염원의 총량보다 많은 양의 대기오염원에 노출되는 것을 의미하며, 이 측정치를 대기오염원 배출농도 관리를 위한 경보체계에 이용하는 경우에는 심각한 피해를 유발할 수도 있다. 이와 같은 대기오염원에 대한 식물반응을 고려해 볼때, 여타 오염물질의 독성측정치 중의 하나로 이용되고 있는 50% 치사율 농도와 유사한 개념의 50% 병반출현빈도를 기준으로 하여 본 연구에서 한계노출농도를 설정하였다. 이를 위하여 현실적인 면에서 대기환경관리 기준이 될 수 있는 일정농도에서 육안으로 구별이 가능한 가지피해를 기준으로 SO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>에 대한 한계노출시간을 규명한 결과, 24시간 평균농도 140 ppb의 SO<sub>2</sub>에 대해서는 'L8' 담배를 제외하고는 모두 240시간 이상될 것으로 추정되었으며, 시간당 평균농도 150 ppb의 O<sub>3</sub>에 대해서는 고도민감성을 보인 'L8'담배와 나팔꽃의 경우 각각 24시간 이내와 72시간 이내로, 중도 민감성을 보인 'KF109'와 'NC82' 담배의 경우 6~7일 정도로 예상되었으며, 들깨의 경우 O<sub>3</sub>에 강하여 10일 이상될 것으로 추정되었다.

아황산가스 노출기간동안 들깨에 나타난 가지피해에 대한 판정에 있어서 갈색반점과 같은 뚜렷한 병징의 판독에는 어려움이 없었으나 엽맥간에 나타나는 황화현상이나 잎 주변부에 나타나는 탈색현상을 판독하는 데는 어려움이 있었다. 실제로 본 연구에서도 위의 변화들을 오존에 노출된 들깨와 비교하여 판독하였는데 변화가 서서히 진행되었고 육안구별이 쉽지 않아 변화 발현에 대한 정확한 시간산정 및 가지피해

채택 여부에 어려움이 있었다. 또한 전체 노출기간이 비교적 짧은 10일간이었다는 점에서도 이들 변화에 대한 정확한 진척상황을 조사하는데 어려움이 있었다. 본 연구에서는 특정 대기오염원에 대하여 빠른 시간 안에 민감하게 반응하여 특이한 반응을 보이는 지표식물을 실험재료로 이용하였다는 점에서 위에서 기술한 황화현상이나 탈색현상은  $\text{SO}_2$ 에 대한 한계노출시간을 산정하는데는 고려하지 않았다. 하지만  $\text{SO}_2$  고농도 단기노출(500 ppb/시간, 8시간/일, 7일)과 저농도 장기노출(55 ppb/시간, 9시간/일, 28일)(22)에서 나타난 가지피해를 비교할 경우, 고농도 단기노출에서는 급격한 가지피해를 노출 9시간 이내에 볼 수 있었지만(Fig. 2A) 저농도 장기노출의 의해서는 잎 전체가 노출종료까지 건전하게 유지되었으며 본 연구에서 관찰할 수 있었던 잎 주변부에 탈색현상이 뚜렷이 나타났다(Fig. 2B). 그러므로 본 연구에서 관찰된 황화현상이나 탈색현상은  $\text{SO}_2$ 에 의하여 유발되는 여타 병징발현과 같은 급속한 반응이라기보다는 식물체 내로 유입된 아황산가스의 독성물질(주로  $\text{SO}_4^{2-}$  또는  $\text{SO}_3^{2-}$ )이 계속적으로 축적되어 식물체 여러 대사과정에 점진적으로 영향을 주어 나타나는 노화촉진과 같은 2차적인 피해(7, 14, 20)일 수 있다는 점에서 한계노출시간을 설정하기 위한 급성피해로 간주하기에는 어려움이 있다라도  $\text{SO}_2$ 에 의한 식물피해라는 관점에서 중요하다. 이들 반응을  $\text{SO}_2$ 에 대한 지표식물의 민감 정도를 판정하는데 고려할 경우, 들깨는 담배보다 민감한 지표식물로 간주될 수 있으며, 이와 같은 추정은 고농도처리에서도 확인할 수 있었다(22). 즉 Fig. 2A에서 볼 수 있듯이 들깨는  $\text{SO}_2$ 에 매우 민감하게 반응하여 가지피해가 짧은 시간 안에 급격히 발현되었지만 'L8'담배의 경우 급격한 가지피해 발현을 관찰할 수 없었다. 또한 본 실험에서 노출종료 후에 실시한 건물중 감소에 대한 아황산가스와 오존의 단순비교에 있어서도 오존처리에 비하여 아황산가스처리에 의하여 25% 정도의 건물 중 감소가 확인되었다(자료 제시되지 않음). 본 실험에 있어서는 오염대기에 대한 여과대기의 대조구 처리가 없는 관계로 두 오염원간의 단순 비교를 통한 건물중 차이로 대기오염원에 대한 감수성 정도를 설명하기에는 무리가 있지만 저농도 장기노출(22)에서 가지적 피해가 경미했음에도 불구하고 여과대기에 비하여  $\text{SO}_2$ 에 의한 성장량 감소가 확인되었으므로 '수원25호' 들깨는  $\text{SO}_2$ 에 민감한 지표식물임이 판명되었다.

식물체에 대한 대기오염원의 피해는 대기오염원의 총량에 의하여 결정되는데(10), 본 실험에서 노출된

$\text{SO}_2$  노출총량(농도 $\times$ 시간)은 33,600(ppb $\times$ hours)으로  $\text{SO}_2$  고농도 노출총량인 28,000(ppb $\times$ hours)(22) 보다 많았음에도 불구하고 발현된 가지피해가 훨씬 경미하였다. 위의 사실로부터 들깨에 대한 대기오염원의 피해가 노출총량의 두 요인 중에서 노출농도에 의하여 우선적으로 결정되는 것을 알 수 있었다. 24시간  $\text{SO}_2$  평균농도에 대한 환경기준치를 적용한 본 연구의 경우 환경기준치에 대한 생물학적 검정이라는 점에서 뿐만 아니라 환경기준농도에서 시간경과에 따른 식물피해를 조사했다는 점에서도 중요성이 있다고 하겠다.

본 실험에서는  $\text{SO}_2$  또는  $\text{O}_3$ 의 단일 오염원에 대한 반응을 기준으로 한계노출농도를 추정하였지만 실제로 여러 대기오염원들이 함께 존재하는 자연 대기상태에서는 한계노출농도가 본 연구에서 조사된 시간보다 훨씬 단축될 수 있다. 이것은 단일 대기오염원보다는 복합 대기오염원 조건에서 복합오염원들간의 상승작용으로 동일 농도의 단일 대기오염원에 의한 피해보다는 복합오염원에 의한 피해가 훨씬 심하며, 동일한 수준의 피해를 유발할 수 있는 오염원의 농도도 단일 대기오염원보다는 복합오염원의 경우 훨씬 낮다는 여러 연구 결과로부터 충분히 예상할 수 있다(13).

본 연구에서 노출된 대기오염원의 총량은  $\text{SO}_2$ 의 경우 33,600(ppb $\times$ hours),  $\text{O}_3$ 의 경우 36,000(ppb $\times$ hours)으로 이들 수치를 다른 식물체의 가지적 피해 발현이나 식물반응 비교를 위하여 직접 적용하는데는 많은 주의가 요청된다. 즉 식물체내로의 대기오염원 유입은 거의 대부분이 잎 표면의 기공을 통하여 이루어지므로(11) 대기 중에 존재하는 오염원의 양과 실제 식물체에 영향을 줄 수 있는 대기오염원의 양간의 관계를 조사할 경우 기공 개폐와 관련된 환경조건을 반드시 고려하여야 한다. 이런 이유로 광합성 작용에 따라 기공이 열리는 주간의 노출농도(유효농도; effective dose)를 근거로 노출총량을 산출하는 것이 보다 현실적이라고 할 수 있겠다. 이럴 경우 실제로 본 실험조건을 전제로 할때 보조 조명을 포함한 광주기 시간을 오전 8:00에서 오후 6:00까지의 하루 10시간으로 하여 계산한 노출기간 동안의 유효농도는  $\text{SO}_2$ 의 경우 14,100(ppb $\times$ hours),  $\text{O}_3$ 의 경우 15,000(ppb $\times$ hours) 정도로 예상할 수 있다. 또한  $\text{O}_3$ 에 의한 'L8'담배의 경우,  $\text{O}_3$  150 ppb 농도에서 하루만에 모든 식물체에서 가지적 피해를 확인하였으므로 실제로 실험농도에서 10시간 정도 노출에 의하여 뚜렷한 가지적 병반을 유발할 수 있다는 가정을 할 수 있으며 이럴 경우에 노출 총량이 1,500(150 ppb $\times$  10 hrs)인 노출 조건에서는 가지적 병반이 발현될 수 있다는 추측을 할 수 있다. 일반

적으로 동일 대기오염원 총량에 노출되었다고 농도, 단기간 노출 경우의 식물체 피해가 저농도 장기간 노출 경우보다 훨씬 심하다(10, 12, 18). 그러므로 본 실험결과를 이용한 유효 한계노출총량을 적용할 경우 'L8' 담배에서는 총량 1,500에 해당하는 오존에 단기간 노출되는 경우 추정시간보다 짧게 한계노출시간이 정해질 수 있으며, 저농도로 장기간에 노출된 경우 추정시간보다 한계노출시간이 길게 정해질 수 있다.

아황산가스에 대한 환경기준치인 24시간 평균농도 140 ppb를 적용할 경우 들깨와 같이 민감한 식물에 있어서는 가시적 피해가 경미하다라도 비가시적 피해인 성장저해에 의한 수량감소가 예상되고, 또한 들깨는 생식용 엽채류로 이용되기 때문에 대기오염원에 의한 가시피해는 상품의 질을 저하시킬 수 있다는 점에서도 이들 식물을 재배할 경우 지역 대기 특성을 고려하여야만 할 것이다. 오존의 경우 조사한 대부분의 식물이 민감하게 반응하였으며 특히 상업적으로 재배되고 있는 'KF109'와 'NC82' 담배의 경우 'L8' 보다는  $O_3$ 에 덜 민감하였지만 장기간에 걸쳐 노출될 경우 수량 감소가 예상되었다. 특히 담배 생장기인 여름철 동안에 오존 발생량이 높은 점을 감안한다면, 공단 주변지역이나 교통량이 많은 도로 주변의 담배 생산지에서 오존에 의한 피해가 충분히 예상된다. 정부의 지속적인 대기환경개선 노력으로  $SO_2$  수준은 계속적으로 감소 추세에 있지만  $O_3$  생성에 관여하는 질소산화물이나 탄화수소는 자동차의 급격한 증가에 따라 계속적으로 문제가 될 것으로 예상되고 독성도 강하므로 앞으로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 생각된다.

Krupa 등(8)에 의한 최근의 연구결과에 의하면, 시간당 출현 오존농도가 50 ppb와 90 ppb 사이에 존재하는 경우에 대기환경이 식물체 안으로 대기오염원을 유입시키는데 적합하여 식물 피해가 가장 크고, 오존 농도가 90 ppb 이상 존재하는 대기환경 조건은 오존이 식물체 내로 유입되는데 매우 불리하여 식물체에 크게 피해를 주지 않는 것으로 밝혀졌다. 또한 50 ppb와 90 ppb 사이의 오존 농도는 여름철에 자주 측정되므로 이에 따른 식물 피해 및 작물의 수량감소가 예상된다고 하겠으며 실제로 시간당 평균농도 80 ppb  $O_3$ 을 하루 9시간 4주간 처리했을 경우 나팔꽃 잎에서 노출시작 후 2~3일 안에 가시적 병반이 발현되는 것이 확인 되었으므로(22) 실제 한계노출총량은 본 연구결과보다 낮을 수 있다. 보다 정확한 기준치 설정을 위하여 이에 대한 지속적인 검증이 필요하겠다.

지표식물에 나타나는 가시피해 판정은 생물학적인 대기환경평가라는 점에서는 중요하지만 과거 시간에

존재한 대기환경평가에 불과하므로 지표식물을 이용한 대기오염원 배출관리에 있어서는 아직 실용적이 되지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 지표식물을 이용한 대기환경평가에 근거한 대기오염원 배출관리를 위해서는 가시피해가 육안으로 구별되기 전에 진행되고 있는 변화를 신속하게 진단할 수 있는 방법을 개발하는 것이 우선적으로 해결해야 할 문제이다. 또한 지표식물의 반응에 근거한 대기환경평가를 연중으로 실시하기 위해서는 겨울철에도 생장 가능하면서 대기오염원에 민감한 지표식물을 선발하는 것이 중요하며, 지표식물에 나타나는 생리, 생화학적 변화를 간단히 판독할 수 있는 생물학적 지표를 찾아내는 작업 역시 앞으로 해결해야 할 연구분야라고 여겨진다.

## 요 약

들깨 '수원25호', 담배 'L8', 'KF109'와 'NC82', 시금치 '입추'와 나팔꽃을 생장환경조절이 가능한 대기오염원 노출상에서  $SO_2$  140 ppb/시간 또는  $O_3$  150 ppb/시간의 농도로 하루 24시간 10일 동안 노출시킨 결과 '수원25호' 들깨와 담배 'L8'은  $SO_2$ 에 민감한 반면, 담배 'L8'과 나팔꽃은 오존에 아주 민감한 것으로 판명되었다. 위의 농도에서 가시적 피해가 조사식물의 50%에서 발생하는 병반발생빈도 50%( $SF_{50}$ )를 기준으로 설정한 한계노출시간 조사에서 오존에 대한 한계노출시간은 담배 'L8'의 경우 24시간, 나팔꽃의 경우 72시간, 담배 'NC82'와 'KF109'의 경우 144시간 내외, 시금치의 경우 216시간으로 추정되었으며,  $SO_2$ 에 대한 한계노출시간은 담배 'L8'의 240시간을 제외하고는 모든 조사식물에서 240시간 이상으로 추정되었다.

## 감사의 말씀

본 연구는 포항종합제철주식회사의 1994년도 연구비지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 위하여 종자를 분양해 주신 인삼연초연구원 대구시험장의 조수현 박사님과 수원 원예작물시험장의 이종호 연구사님께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Bender, J., Weigel, H. J., Wegner, U. and Jäger, H. J. 1994. Response of cellular antioxidants to ozone in wheat flag leaves at different stages of plant development. *Environmental Pollution* 84 : 15-21.
2. Darrall, N. M. 1989. The effects of air pollutants on