한국환경농학회지 제17권 제4호(1998)
Korean Journal of Environmental Agriculture
Vol. 17, No. 4, pp. 352~357

N-P-K 양분 수준이 토마토의 오존 감수성에 미치는 영향

안주원 · 구자형
충남대학교 농과대학 원예학과

Influence of N-P-K Nutrient Levels on Ozone Susceptibility of Tomato Plants

Joo-Won Ahn and Ja-Hyeong Ku *(Dept. of Horticulture, Coll. of Agriculture, Chungnam National University. Taejon 305-764, Korea)*

Abstract : This experiment was conducted to find out the effects of major nutrient levels(N, P, K) on ozone susceptibility of tomato plants(*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Pink Glory). Plants were grown in water culture system. A half-strength of Hoagland's nutrient solution was considered as a standard formulation(N_{100} P_{100} K_{100}). The levels of major nutrients were adjusted through addition or removal of several fertilizer salts from the standard solution. Top growth was significantly decreased at the low nitrogen level or phosphorus removal condition. P- and K-contents of leaves were greatly decreased by removal of salts containing P and K from the nutrient solution. The rate of ozone injury was significantly increased when potassium was removed. However, the influence of nitrogen and phosphorus levels or high potassium level on injury occurrence did not show statistical significance compared to the standard solution. Ozone exposure resulted in reduction of chlorophyll, and increase of ethylene production, electrolyte leakage and malondialdehyde(MDA) contents. These changes were much more enhanced in plants grown at the potassium removal solution. Whereas the activity of superoxide dismutase(SOD) was low at the potassium removal treatment and this tendency remained after ozone exposure. These results indicated that potassium nutrient level in tomato plants is closely associated with the susceptibility to ozone injury.

Key Words : N-P-K level, tomato, ozone injury, ethylene, MDA, electrolyte leakage, SOD.

서 론

오존은 화석연료에 의하여 생성된 hydrocarbon이 대기중에 존재할 때 광화학 반응에 의하여 질소산화물이 분리되었다가 다시 산소와 재결합하는 과정을 방해함으로써 공기중에 적체되는 2차적인 대기오염물질로 알려지고 있다. 우리 나라에서도 차량의 급격한 증가와 함께 오존에 의한 대기오염의 피해가 차츰 큰 문제로 대두되고 있다. 작물의 재배관리 측면에서 불량환경에 대한 내성을 증대시키는 일은 우선 비료성분의 균형시비에 의해 작물을 건강하게 키우는 일이라 할 수 있다. 일반적으로 비료의 3요소중 질소와 인산의 과다[1,2], 칼륨의 결핍[3], 과다한 수분공급등[4,5]은 오존에 대한 식물의 내성을 감소시켜주는 것으로 보고되고 있다. 또한 낮은 인산수준[6]과 칼륨수준은[7] 토마토의 내성을 증대시키고 칼륨의 과다가 은단풍나무에서 피해를 증가시킨다는 보고[8]도 있다.

본 시험은 비료의 주성분인 질소, 인산, 칼륨의 조성을 달리하여 오존에 대한 감수성이 비교적 강한 토마토를 수경재배 하였을 때 양분차이에 따른 오존 감수성 정도를 비교하였다. 아울러 ethylene발생, superoxide dismutase(SOD)의 활성변화, 전해질의 유출량(Erectrolyte leakage), 생체내 지질 과산화의 생성물인 malondialdehyde(MDA)의 축적을 측정하고 이들 생리적 변화와 오존으로 유발되는 가시피해율과의 관계를 구명코자 실시하였다.

재료 및 방법

공시재료

토마토(*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Pink Glory) 종자는 흙:모래:부엽 (1:1:3 by volume)을 혼합한 토양에 파종하여 20일 후 균일하게 생육한 묘를 선발하여 수경재배상에 정식하였다. 그 후 양액을 보충하면서 35일간 재배

한 묘를 실험재료로 사용하였다.

처 리 방 법

수경재배를 위한 양액은 1/2농도의 Hoagland 용액을 기준으로 표준용액을 조제하였으며, 표준용액에 포함된 N, P, K함량의 비율을 각각 100%로 정하고 N_{100} P_{100} K_{100}으로 표기하였다. 표준용액에서 가감된 비료의 수준은 순수함량을 계산하여 백분율로 표시하였다. 정식 2일 후부터 10일 간격으로 3회 공급하였다. 각 처리간의 양분 혼합조성은 표 1과 같이 하였다. KNO_3를 $NaNO_3$로 대체한 것은 Wooley[9]의 보고에 근거하였다. 수경재배상은 스치로폼으로 만들어 담액식으로 재배하였으며 양액은 pH 5.0-6.5, EC 1.0-1.5 ㎛hos/cm로 조절하였고, 용존산소 공급을 위하여 기포발생 장치를 설치하였다. 오존가스의 발생은 오존발생기(GO, Model 3000SS, USA)를 사용하였으며, 접촉은 온도 25± 2C, 상대습도 70±5%, PAR, 180㎛os/s/㎡의 생장상 내에서 0.25㎕ L/L로 1일 8시간씩 2일간 처리하였다. 오존의 농도는 U.V Photometric O_3 Analyzer(TEI, Model 49, USA)를 사용하여 측정하였다.

Table 1. Formulation of nutrient solution used in water culture of tomato plants.

N-P-K treatment	Kinds and amounts of fertilizer salts combined in nutrient solutiony			
	Addition		Removal	
	Fertilizer salts	g/ton	Fertilizer salts	g/ton
N_{100} P_{100} K_{100}z	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	294.2	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	472.4
N_{47} P_{100} K_{100}			$NH_4H_2PO_4$	57.5
N_{93} P_0 K_{100}	$NaNO_3$	255.0	KNO_3	303.3
N_{100} P_{100} K_0	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_20$	57.5	472.4	
N_{153} P_{100} K_{100}	$NH_4H_2PO_4$	303.3		
N_{107} P_{200} K_{100}	KNO_3			
N_{140} P_{100} K_{200}				

zValues represent the percentages of fertilizer concentration compared with nutrient level of half-strength Hoagland's solution.

yHalf-strength Hoagland's solution(weight/ton): KNO_3(303.3g), $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$(472.4g), $NH_4H_2PO_4$(57.5g), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$(246.5g),Fe-EDTA(11.4g), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$(0.905g), H_3BO_3(1.4g), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$(0.1g), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$(0.04g), $(NH4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$(0.02g)

측정 및 분석방법

식물체의 성분 분석은 농촌진흥청 토양화학 분석법에 의거하였다[10]. 오존가스에 의한 피해율은 가스접촉 3일 후에 각 잎마다 가시피해를 0에서 100%(0 = 피해 없음, 100 = 100% 피해)로 나누어 조사하였다. 엽록소 함량은 직경 0.7cm의 cork borer를 사용하여 선단부로부터 제 3엽에서 10개의 disc를 취하여 80% acetone 10ml에 넣고 4℃의 암조건에서 48시간 추출한 후 spectrophotometer를 사용하여 645, 663nm에서 흡광도를 측정하고 Arnon법[11]에 의하여 함량을 계산하였다.

Ethylene 생성량은 가스접촉 전과 후에 제 3엽을 채취한 다음 30ml 시험관에 넣고 parafilm으로 밀봉하여 암조건인 25℃의 항온기에서 4 시간 보관한 후 syringe로 채취한 1 ml의 가스를 gas chromatograph를 사용하여 FID로 정량하였다.

SOD의 활성은 제 3엽에서 0.5g의 생체시료를 취하여 McCord & Fridovich[12]방법으로 측정하였다. 전해질의 유출(Electrolyte leakage)은 제 3엽에서 직경 0.7 cm의 cork borer을 사용하여 10개의 disc를 채취한 다음 100 ml의 증류수를 넣은 비이커에 담아 25℃에서 2시간 동안 증류수에 유출되어 나오는 양을 conductance meter (YSI, Model 32)로 측정하였다[13]. MDA측정은 제 3엽에서 0.25g을 취하여 Heath and Packer[14]의 방법으로 분석하였다.

결과 및 고찰

그림 1은 양분의 수준이 다른 7개의 처리구에서 재배한 토마토의 지상부와 지하부의 생육을 비교한 결과, N-P-K 결핍구에서는 초장이 근장에 비하여 모두 짧은 것으로 나타났다. 특히 인산 결핍구에서는 초장이 극히 억제되었으며 반면 근계의 양은 적었으나 근장은 가장 긴 것으로 나타났다.

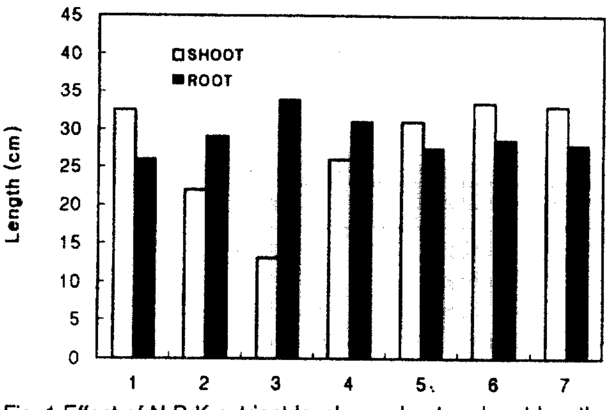

Fig. 1.Effect of N-P-K nutrient levels on shoot and root length of tomato plants grown for 35 days.
1; N_{100} P_{100} K_{100}, 2; N_{47} P_{100} K_{100}, 3; N_{93} P_0 K_{100}, 4; N_{100} P_{100} K_0, 5; N_{153} P_{100} K_{100}, 6; N_{107} P_{200} K_{100}, 7; N_{140} P_{100} K_{200},

표 2는 엽중의 주요성분 함량을 나타낸 것으로 인산과 칼륨을 제거하였던 용액에서 자란 식물체의 인산과 칼륨의 엽중함량이 각각 대조구의 식물체에 비하여 16%와 39%의 함량을 보여 현저히 적은 것으로 나타났다.

오존농도 0.25 ㎕/L에 1일 8시간씩 2일간 접촉시킨 결과

Table 2. Effect of N-P-K nutrient levels on nutrient content of tomato plants.

N-P-K treatment	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	CaO (%)	MgO (%)
$N_{100}P_{100}K_{100}$[z]	5.27	3.09	4.01	1.71	1.25
$N_{47}P_{100}K_{100}$	4.10	2.14	4.16	1.60	1.07
$N_{93}P_{0}K_{100}$	5.11	0.49	3.93	2.26	1.48
$N_{100}P_{100}K_{0}$	4.87	3.24	1.56	1.16	0.99
$N_{153}P_{100}K_{100}$	5.78	4.48	4.93	1.55	0.96
$N_{107}P_{200}K_{100}$	5.39	4.52	4.28	1.61	1.19
$N_{140}P_{100}K_{200}$	5.43	4.07	4.33	1.09	1.09

[z]Values represent the percentages of fertilizer concentration compared with nutrient level of half-strength Hoagland's solution.

표 3에서 보는 바와 같이 질소 감량구와 인산 제거구는 적정 시비구인 대조구와 비슷한 가시피해를 나타낸 반면 칼륨 제거구에서는 대조구에 비하여 33.7%의 피해양상을 나타냈다. 질소 증량구, 인산 2배구, 칼륨 2배구는 대조구와 피해율의 차이가 없었다. 이러한 결과는 인산의 함량이 과다하거나[1,2,6], 칼륨이 결핍될 경우[3] 오존에 대한 감수성을 증가시킨다는 결과와 일치하였다. 그러나 칼륨의 함량이 정상적인 경우에 비하여 낮을 때 토마토에서 오존에 의한 피해가 낮은 것으로 보고한 Leone[7]의 결과와는 다른 경향을 보였다. 가시피해 증상은 0.25 ㎕/L의 오존에 4시간 이상 접촉시키면 칼륨 제거구에서 잎 표면의 가시피해 증상이 아랫잎에서 먼저 발생되었으며 8시간 이상 노출하였을 때에는 성엽과 유엽에서도 chlorosis나 necrosis 등의 초기 증상이 나타나기 시작하였다.

Table 3. Effect N-P-K nutrient levels on injury of tomato plants exposed to 0.25 ㎕/L O_3 for 8 hours daily for 2 days.

N-P-K treatment	Injury rate(%)
$N_{100}P_{100}K_{100}$[z]	4.8 b[y]
$N_{47}P_{100}K_{100}$	8.2 b
$N_{93}P_{0}K_{100}$	7.0 b
$N_{100}P_{100}K_{0}$	33.7 a
$N_{153}P_{100}K_{100}$	6.3 b
$N_{107}P_{200}K_{100}$	5.8 b
$N_{140}P_{100}K_{200}$	5.3 b

[z]Values represent the percentages of fertilizer concentration compared with nutrient level of half-strength Hoagland's solution.
[y]Mean separation within column by Duncan,s multiple range test, 5% level.

오존을 접촉하기 전과 8시간씩 2일간 접촉한 후의 엽록소의 함량을 나타낸 결과는 표 4와 같다. 오존접촉 전에도 양분의 조성에 따라 단위 면적당 엽록소 함량은 차이가 큰 것으로 나타나 질소 감량구와 인산 결핍구에서 현저히 낮았다. 오존접촉 후 엽록소 함량은 모든 처리구에서 낮아지는 것으로 나타났고 적정시비구인 대조구와 질소 증량구, 인산 2배구, 칼륨 2배구, 질소 감량구, 인산 제거구에서는 비슷하게 감소하였다. 그러나 가시피해가 가장 심했던 칼륨 제거구에서 현저하게 낮아져 가스접촉 전의 약 50%까지 감소하였다

Table 4. Effect of N-P-K nutrient levels on chlorophyll content of tomato plants exposed to 0.25 ㎕/L O_3 for 8 hours daily for 2 days.

N-P-K treatment	Chlorophyll content (㎍/㎠)	
	Hour of O_3 exposure	
	Untreated	8 h × 2 d
$N_{100}P_{100}K_{100}$[z]	44.06 a[y]	36.47 a (82.6)[x]
$N_{47}P_{100}K_{100}$	23.70 b	17.78 b (75.0)
$N_{93}P_{0}K_{100}$	13.15 c	10.34 b (78.6)
$N_{100}P_{100}K_{0}$	32.97 b	16.70 b (50.7)
$N_{153}P_{100}K_{100}$	43.85 a	31.34 a (71.5)
$N_{107}P_{200}K_{100}$	45.60 a	35.55 a (78.0)
$N_{140}P_{100}K_{200}$	46.16 a	37.67 a (81.6)

[z]Values represent the percentages of fertilizer concentration compared with nutrient level of half-strength Hoagland's solution.
[y]Mean separation within column by Duncan,s multiple range test, 5% level. Values in parentheses represent the percentage of untreated plants in each treatment.

Table 5. Effect of N-P-K nutrient levels on ethylene production of tomato plants exposed to 0.25 ㎕/L O_3 for 8 hours daily for 2 days.

N-P-K treatment	Ethylene production (㎕/L/kg/hr)				
	Untreated	Hour of O_3 exposure			
		1st day		2nd day	
		4 h	8 h	4 h	8 h
$N_{100}P_{100}K_{100}$[z]	5.873 a[y]	11.190 bc	4.550 a	3.337 a	3.300 a
$N_{47}P_{100}K_{100}$	5.500 a	12.570 bc	4.833 ab	4.080 a	1.533 a
$N_{93}P_{0}K_{100}$	4.480 a	10.770 c	4.833 ab	2.900 a	2.033 a
$N_{100}P_{100}K_{0}$	4.867 a	29.470 a	8.167 a	5.140 a	2.733 a
$N_{153}P_{100}K_{100}$	5.680 a	20.170 b	3.633 b	4.330 a	1.667 a
$N_{107}P_{200}K_{100}$	4.667 a	16.070 bc	3.000 b	3.330 a	2.033 a
$N_{140}P_{100}K_{200}$	5.900 a	18.330 bc	4.800 ab	2.720 a	1.633 a

[z]Values represent the percentages of fertilizer concentration compared with nutrient level of half-strength Hoagland's solution.
[y]Mean separation within column by Duncan,s multiple range test, 5% level. Each value is the mean of 5 replicates.

Ethylene은 식물체가 정상적인 상태에서도 소량 발생하고 있으나 기계적 자극, 생리적 상해, 냉해, auxin류의 제초제, 기타 유해한 화학물질에 접하게 되면 많은 양이 발생된다. 따라서 식물에 대한 대기오염물질의 감수성을 ethylene 하나만으로 결정짓는다는 것은 어렵지만 발생의 다소, 발생시간의 조만 등으로 대기오염물질에 대한 피해를 간접적으로 예측할 수 방안으로 판단되고 있다[15,16]. 표

5는 0.25㎕/L의 오존에 0, 4, 8, 16시간 접촉시킨 다음 ethylene 생성량을 조사한 결과로 접촉 전에는 유의차가 없었던 반면 가시피해가 나타나기 직전인 4시간 접촉 후에는 모든 처리구에서 ethylene발생량이 2배 이상 증가하였다. 특히 가시피해가 가장 심했던 칼륨 제거구에서는 6배 이상이 증가하고 질소 증량구에서 다소 높은 발생량을 보여 ethylene의 발생량이 오존에 대한 감수성과 관계가 깊음을 시사하고 있다. 오존접촉 후 가시피해가 나타난 8시간 후부터는 접촉 전보다 ethylene 발생량이 현저히 줄어 대조구 보다 낮은 수준으로 유지되는 경향을 나타냈다.

SOD 활성은 표 6에서 보는 바와 같이 오존접촉 전부터 피해가 심했던 칼륨 제거구에서 효소활성이 유의성 있게 낮았고 접촉중에도 다른 처리구보다 떨어지는 경향을 보였으며 16시간 후에는 현저히 감소하였다. 또한 오존접촉 초기인 4시간 경과 후 모든 처리구에서 활성이 증가되었지만 8시간 접촉시 결핍구에서는 감소되었고 2배 시비구에서는 증가하였다. 16시간 접촉 후에는 모든 처리구에서 활성이 감소하는 경향을 나타냈다. Antioxidant의 역할을 하는 물질들은 오존의 피해를 크게 경감시키는 효과가 큰 것으로 보고되고 있는데[17, 18], 이는 주로 식물체 내에서의 SOD의 활성과 관련하여 고찰되고 있다[19, 20, 21]. 칼륨 결핍이 SOD의 활성저하에 관계하여 오존의 피해를 증가시키는 것으로 판단하기는 본 시험의 결과만으로 명확히 하기는 어려우나 생체내 free radical의 독성에 대한 방어기작을 다소 저하시키고 있음은 분명한 것으로 보인다.

Table 6. Effect of N-P-K nutrient levels on superoxide dismutase (SOD) activity of tomato plants exposed to 0.25 ㎕/L O_3 for 8 hours daily for 2 days.

N-P-K treatment	SOD activity (unit/g fresh wt)				
	Hour of O_3 exposure				
		1st day		2nd day	
	Untreated	4 h	8 h	4 h	8 h
$N_{100}P_{100}K_{100}$[z]	202.1 ab[y]	273.3 abc	308.4 a	323.7 a	264.8 ab
$N_{47}P_{100}K_{100}$	198.1 abc	245.3 c	243.5 bc	256.4 b	224.3 cd
$N_{93}P_{0}K_{100}$	193.6 bc	261.4 abc	255.4 bc	258.1 b	234.1 bcd
$N_{100}P_{100}K_{0}$	188.7 c	252.9 bc	226.2 c	243.8 b	205.3 d
$N_{153}P_{100}K_{100}$	215.2 a	291.9 a	309.9 a	325.4 a	268.6 ab
$N_{107}P_{200}K_{100}$	192.9 bc	283.9 ab	301.7 a	318.3 a	275.0 a
$N_{140}P_{100}K_{200}$	190.1 bc	247.3 c	277.4 ab	320.8 a	258.4 abc

[z]Values represent the percentages of fertilizer concentration compared with nutrient level of half-strength Hoagland' s solution.
[y]Mean separation within column by Duncan,s multiple range test, 5% level.

그림 2는 전해질의 유출량을 조사한 결과로 가스접촉 전에는 모든 처리구에서 전해질 유출량이 비슷한 것으로 나타났다. 4, 8, 16시간 접촉 후에는 다른 처리구에 비하여 가시피해가 가장 심했던 칼륨 제거구에서 유출량이 가장 많았다. 접촉시간 별 유출량은 4시간 접촉시에 가장 많아 45 ㎛hos/cm을 보였고 8시간 접촉시에는 다소 감소되어 37 ㎛hos/cm를 나타냈으며 16시간 접촉 후의 유출량은 가스접촉 전과 비슷하였다. 이는 Elkiey와 Ormrod[13]의 결과와 유사한 것으로 전해질 유출(Electrolyte leakage) 양의 다소가 감수성의 강약을 밝힐 지표가 될을 시사한다고 할 수 있다.

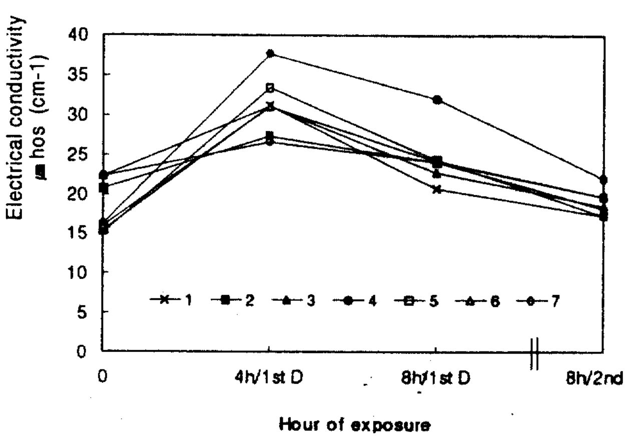

Fig. 2. Effect of N-P-K nutrient levels on electrolyte leakage of tomato plants exposed to 0.25§ㅣ/L O_3 for 8 hours daily for 2 days.
1; $N_{100}P_{100}K_{100}$, 2; $N_{47}P_{100}K_{100}$, 3; $N_{93}P_{0}K_{100}$, 4; $N_{100}P_{100}K_{0}$, 5; $N_{153}P_{100}K_{100}$, 6; $N_{107}P_{200}K_{100}$, 7; $N_{140}P_{100}K_{200}$,

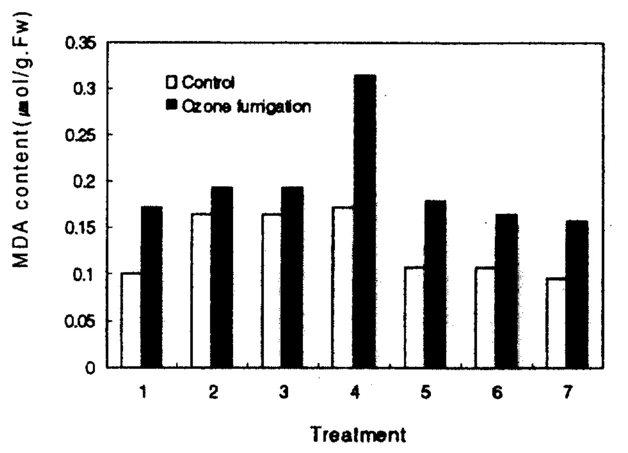

Fig. 3. Effect of N-P-K nutrient levels on malondealdehyde content of tomato plants exposed to 0.25 ㎕/L O_3 for 8 hours daily for 2 days.
1; $N_{100}P_{100}K_{100}$, 2; $N_{47}P_{100}K_{100}$, 3; $N_{93}P_{0}K_{100}$, 4; $N_{100}P_{100}K_{0}$, 5; $N_{153}P_{100}K_{100}$, 6; $N_{107}P_{200}K_{100}$, 7; $N_{140}P_{100}K_{200}$,

그림은 지질의 과산화(lipid peroxidation)정도를 나타낸 것으로 MDA함량이 가시피해가 가장 심했던 칼륨 제거구

에서 다른 처리구보다 오존접촉 시간이 증가함에 따라 현저한 증가를 보여 접촉 16시간 후에는 0.3μmol/g 이상 증가하였고 다른 처리구에서도 누적적으로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 오존의 흡수로 인해 생성된 free radical에 의해 지질의 과산화가 증가되고 있음을 시사하고[22] 칼륨의 결핍은 이에 대한 방어 기작에 결함을 초래하는 것으로 추측할 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 토마토에 있어서 비료 3요소 중에서 칼륨 결핍이 다른 양분에 비하여 오존에 의한 피해를 증가시키는 가장 큰 요인으로 판단되었다. 칼륨 결핍구는 ethylene 생성량이 많았고, SOD의 활성이 낮았으며, 전해질의 유출량, 지질의 과산화를 높혀 생리적인 측면에서도 감수성이 높음을 보여주었다. 특히 antioxidant의 역할을 하는 SOD의 활성증대와 관련지어 볼 때 칼륨 결핍은 오존의 2차적 피해산물인 free radical을 중화시킬 수 있는 능력을 감소시키는 원인이 되는 것으로 추측된다. 따라서 대기오염물질에 대한 식물의 내성을 증대시키기 위해서는 관리적 측면에서 비료의 균형시비, 특히 칼륨에 대한 적정시비가 필요할 것으로 판단된다.

요 약

양액조성의 차이에 따른 토마토의 오존 감수성을 구명하고자 1/2농도의 Hoagland 용액을 표준으로 하여 양액을 조성하였다. N-P-K의 수준을 N_{100} P_{100} K_{100}(대조구), N_{47} P_{100} K_{100}(질소 감량구), N_{93} P_0 K_{100}(인산 제거구), N_{100} P_{100} K_0(칼륨 제거구), N_{153} P_{100} K_{100}(질소 증량구), N_{107} P_{200} K_{100}(인산 2배구), N_{140} P_{100} K_{200}(칼륨 2배구)등으로 나누어 수경재배한 후 0.25 μl/L의 오존에 접촉시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지상부 생육은 질소 감량구와 인산 제거구에서 가장 저조하였고, 인산 및 칼륨 제거구에서 인산과 칼륨의 엽중 함량이 극히 낮았다. 시비수준의 차이에 따른 가시피 해율은 칼륨 제거구에서 가장 심하게 나타났다. 인산 제거구, 질소 감량구 및 증량구 또는 인산과 칼륨 2배구의 피해율은 표준구와 비슷한 경향을 보였다.
2. 오존접촉 후 칼륨 제거구에서 다른 처리구에 비하여 ethylene발생량, 전해질 유출량과 MDA함량이 증가하였으며 엽록소의 함량은 크게 감소였다.
3. 가시피해가 가장 심했던 칼륨 제거구에서 SOD의 활성이 가장 낮았으며 오존접촉 후에도 활성 증가율이 가장 낮게 유지되었다.

참고문헌

1. Brewer, R. F., F. B. Gullemet and R. K. Creveling(1961). Influence of N-P-K fertilization on incidence and severity of oxidant damage to mangels and spinach. *Soil Sci.* 92 : 298-301.
2. Craker, L. E. (1971). Effects of mineral nutrients on ozone susceptibility of Lemna minor. Can. J. Bot. 49 : 1411-1414.
3. Dunning, J. A. and W. W. Heck(1974). Foliar sensitivity of pinto bean and soybean to ozone as affected by temperature, potassium nutrition and ozone dose. *Water, Air, and Soil Pollution* 3 : 305-313.
4. Khatamian, H., N. O. Adedipe and D. P. Ormrod(1973). Soil-plant-water aspects of ozone phytotoxicity in tomato plants. *Plant and soil.* 38 : 531-541.
5. Menser, H. A and O. E. Street(1962). Effect of air pollution, nitrogen level, supplemental irrigation, and planting spacing on weather fleck and leaf losses of Maryland tobacco. *Tob. Sci.* 6 : 165-169.
6. Leone, I. A. and E. Brennan(1970). Ozone toxicity in tomato as modified by phosphorus nutrition. *Phytopathology* 60 : 1521-1524.
7. Leone, I. A. (1976). Response of potassium-deficient tomato plants to atmospheric ozone. *Phytopathology.* 66 : 734-736.
8. Noland, T. L. and T. T. Kozlowski(1979). Influence of potassium nutrition on susceptibility of silver maple to ozone. *Can. J. For Res.* 9 : 501-503. '
9. Wooley, J. T. (1957). Sodium and silicon as nutrients for the tomato plant. *Plant Physiol.* 32 : 317-321.
10. 농업기술연구소(1988). 토양화학분석법-토양, 식물체, 토양미생물. 농촌진흥청.
11. Arnon, D. I. (1959). Copper enzymes in isolated chloroplast, polyphenoloxidase in *Beta vulgaris. Plant Physiol.* 24 : 1-15.
12. McCord, J. M. and I. Fridovich(1969). Superoxide dismutase : an enzymic function for erythrocuprein (hemocuprein). *J. Biol. Chem.* 244 : 6049-6055.
13. Elkiey T. and D. P Ormrod(1979). Ozone and/or sulfur dioxide effects on tissue permeability of petunia leaves. *Atmospheric Environ.* 13 : 1165-1168.
14. Heath, R. L. and L. P. Pecker(1968). Photoperoxidation in isolated chloroplast. 1. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch. Biochem. Biophys.* 125 : 189-198.
15. Darrall, N. M. and H. J. Jager(1984). Biochemical

diagnostic tests for the effect of air pollution on plants. p. 333-349. In: M. J. koziol and F. R. Whatley(eds.). *Gaseous Pollutants and Plant metabolism*. Butterworths, London, U. K.

16. Ku, J. H., D. T. Krizek and R. M. Mirecki(1996). Alleviation of sulfur dioxide injury in snap bean plants by uniconazole. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 37(6) : 767-772.
17. Rubin, B., J. R. C. Leavitt. D. Penner, and A. W. Saettler(1980). Interaction of antioxidants with ozone and herbicide stress. *Bull. Environm. Contam. Toxicol.* 25 : 623-629.
18. Bisessar, S. (1982). Effect of ozone, antioxidant protection, and early blight on potato in the field. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107 : 597-599.
19. Lee, E. H. and J. H. Bennett(1982). Superoxide dismutase: A possible protective enzyme against ozone injury in snap beans(*Phaseolus vulgaris* L). *Plant Physiol* 69 : 1444-1449.
20. Lee, E H., G. F. Kramer, R. A. Rowland and M. Agrawal(1992). Antioxidants and growth regulators counter the effects of O_3 and SO_2 in crop plants. *Agric. Ecosyst. & Environ. Bot.* 25 : 265-275.
21. Tanaka, K. and K. Sugahara(1980). Role of superoxide dismutase in the defense against SO_2 toxicity and induction of superoxide dismutase with SO_2 fumigation. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn.* 11 : 155-164.
22. Zheng, R. and Z. Yang(1991). Lipid peroxidation and antioxidative defense system in early leaf growth. *J. Plant. Growth Regul.* 10 : 187-189