

酸性비가 植生에 미치는 影響

李宗植* · 金福榮*

Effect of Acid Rain on Vegetation

Jong-Sik Lee* and Bok-Young Kim*

Abstract

In this paper, the current knowledge on the formation of acid rain and its effect on vegetation are reviewed.

The pollutants which were emitted into the air are oxidized by photochemical reaction and affect the vegetation by dry and wet deposition.

Acid rain at pH 4.0 affected sensitive plants and when it was below pH 3.0, visible symptoms developed in most of the crops.

The acid rain treatment at pH 2.0 decreased dry weight, leaf area and chlorophyll contents in soybean but it increased rate of photosynthesis and respiration rate.

Rain treatment at pH 2.8 increased ethylene production, but it's not a suitable indicator of sensitivity to acid rain.

At pH 2.0 treatment, the contents of soluble Mn and Al were increased but the cultivated soil pH at upper layer(0-5cm) was significantly decreased.

The perturbation of glandular trichome which is existed along the vein was developed at all treatment except the control(pH 6.0) and non-treatment.

Histological perturbation of spiked trichome and disintegration of chloroplast were developed only on the leaves of sesame treated with SAR(simulated acid rain) of pH 2.0.

서 론

산업이 발달하고 인구가 증가함에 따라 화석연료 연소시 배출되는 아황산가스와 자동차 및 공장에서

배출되는 질소산화물 등이 대기중으로 많이 방출되는데 이들은 대기중에서 복잡한 화학반응을 거쳐 산성물질이 형성되고^{1,2)} 이러한 산성물질은 Dry deposition과 Wet deposition에 의해 강하되는데 전자

* 農村振興廳 農業技術研究所(Agricultural Sciences Institute, RDA, Suwon 441-707, Korea.)

의 경우는 산성비의 前驅物質인 SO_2 나 NO_x 등이 기체상태로 직접 식물체에 흡수되거나 煙霧質(particulate aerosols)이 중력에 의해 침강되는 것이며, 후자의 경우는 산성 물질들이 강우에 의해 침강되는 것으로 pH 5.6 이하를 산성비라 한다. 이 기준은 비오염지의 대기중 이산화탄소(약 340ppm)가 대기중의 수증기에 의해 용해될 때 생성되는 탄산의 수소이온 농도를 기준으로 한 것이다^{3,4,5}.

이러한 산성비가 식생에 미치는 영향은 비의 산성도⁶, 강우시간, 토양조건, 작물의 종류^{7,8}, 품종, 생육상태^{9,10} 및 기후조건 등 여러 요인들에 따라 상이하하며, 산성비로 인한 작물의 주된 피해로는 上皮組織 피해로 인한 대기오염물질 및 旱魃에 대한 내성 감소, 잎으로 부터의 양분용탈량 증가, 광합성 및 호흡 등 대사작용 교란, 작물의 방어조직 피해에 따른 내병성, 내충성 감소 그리고 토양중 독성물질

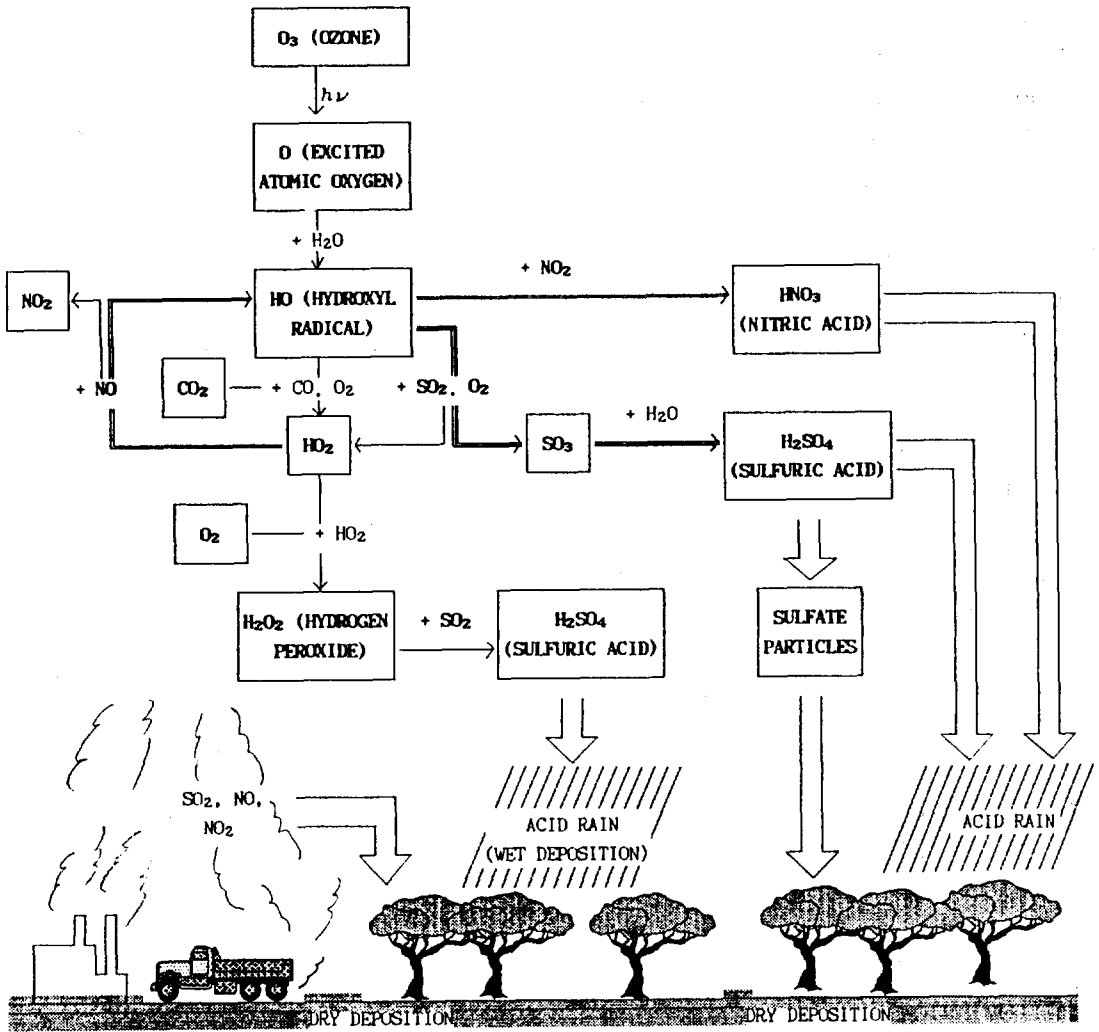


Fig. 1. Atmospheric chemistry generates sulfuric and nitric acids from sulfur dioxides and oxides of nitrogen given off by industry and vehicles.

용해로 인한 뿌리 및 기타 조직의 독성피해 등이 있으며, 일반적인 피해증상은 약산성의 비를 맞은 경우에는 눈에 보이지 않는 피해를 일으키나 pH 2.0-3.0의 강산성 비를 맞으면 잎 표면에 백색 또는 적갈색의 피해반점이 나타난다. 또한 산성비의 영향은 풍향과 풍속에 따라 차이는 있으나 수 백 km를 이동하여 주변국가에도 직접 또는 간접으로 영향을 주므로 국제적 차원의 환경문제로 대두되었고, 현재 세계 각국은 산성비 피해에 대하여 공동으로 대처하고 있다¹¹⁾.

우리나라에서도 이미 대도시 및 공업단지 주변에서는 pH 4.5 이하의 산성비가 내리고 있고, 환경에 대한 대중의 인식이 높아짐에 따라 이러한 산성비의 영향과 그 대책수립에 관심을 모으고 있으나 아직은 뚜렷한 대규모 피해지역이 없고, 피해가 우려되는 일부 지역에서도 그 현상이 다른 나라의 경우와 다르기 때문에 이에 대한 정확한 구명이 필요하다. 또한 현재까지 우리나라 육상생태계에서 대기오염 및 산성비로 인한 가시적인 피해가 극히 미미하다 하더라도 pH 5.0 부근에서 벼와 보리 등의 광합성 속도가 저해된다는 Taniyama 등¹²⁾의 보고처럼 잠재적인 피해의 가능성은 충분하다고 생각된다.

따라서 본고에서는 산성비의 생성기작과 이러한 산성비가 식생에 미치는 영향을 지금까지 보고된 연구 결과들을 토대로 고찰해 보고자 한다.

산성비의 생성기작 및 생물에 미치는 영향

산성비의 생성기작은 그림 1에 나타난 바와 같이 오존(O₃)이 광에너지(hν, 290-340nm)에 의해 분해되어 산화력이 강한 산소원자(O)가 생성되고 이 산소원자가 대기중의 수분과 반응하여 hydroxyl기(·OH)가 형성된다. 이 hydroxyl기가 대기 중으로 방출된 이산화질소(NO₂)와 반응하여 질산(HNO₃)이 되며 이것이 강우와 함께 지상으로 떨어지게 된다(Wet deposition). 또한 이산화황(SO₂)과 반응하게 되면 황산(H₂SO₄)이 형성되는데 이 황산은 대

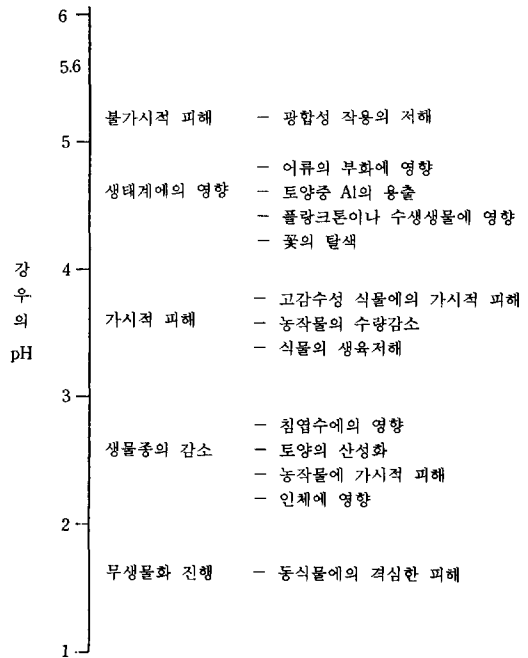


Fig. 2. 강우의 pH에 따른 생물의 영향 (Taniyama¹⁴⁾, '89)

기중에 존재하는 2가 원소(Ca 등)와 반응하여 미세 입자(Particulate : 직경 1μm 이하)의 황산염(MSO₄)을 형성하여 Dry deposition의 형태로 지상에 떨어지고, 두 개의 hydroxyl기가 반응하여 형성된 과산화수소(H₂O₂)와 이산화황이 직접 반응하여 형성된 황산은 질산과 함께 강우의 pH를 낮추어 산성비(Acid rain)의 원인이 된다¹³⁾.

그림 2는 강우의 pH 별 생물에 미치는 영향을 나타낸 것으로 지금까지 조사 보고된 자료를 보면 1973년 pH 2-3의 비가 내린 山梨와 靜岡에서 540명의 피해가 보고되었고 pH 2.5의 인공비로 소나무에 피해가 발생되었으며(谷山, 1988), 1981년에는 pH 2.86의 비로 인해 伊勢崎市에 여러명의 피부질환자가 보고되었다. 1974년에는 pH 3-4의 강우로 동경 등 6개 지역에서 32,546명의 피해자가 보고되었고, pH 3.5의 인공비를 이용한 시험결과 벼의 어린 싹과 뿌리의 생육저해가 보고되었으며(佐藤 등,

1966), Lee 등은 pH 3.5의 인공비로 토마토 외 20종의 작물에 대한 잎의 피해를 조사하였고, pH 4.0에서 대두 등 4개 작물에 대한 잎의 피해를 조사하였다. 또한 Taniyama 등은 pH 4.0에서 벼와 보리의 수량감소를 보고하였고, 野内는 pH 4.2-4.3에서 나팔꽃의 탈색을 보고하였다. pH 5.0의 인공비를 이용한 연구결과를 보면, Schiofield는 하천 및 호수의 피해를 보고하였고, Dickson은 토양중 알미늄의 용탈증가와 어류 및 기타 수생생물에의 영향을 발표

하였으며, Taniyama 등도 벼와 보리의 광합성 저해를 보고하였다.

산성비가 작물의 생육 및 토양에 미치는 영향

주 3회 5mm/hr의 속도로 매회 2시간씩 9주간 인공산성비를 처리한 콩의 처리 pH 및 처리형태에 따른 수량구성을 조사한 결과는 표 1과 같이 강우

Table 1. Effects of addition of simulated acid rain in the cultivated soil on the seed yield characteristics of soybean plants. (Kobayashi et al.^{15), '92)}

Yield component	Plant and soil				Soil			
	pH 5.6	pH 4.0	pH 3.0	pH 2.0	pH 5.6	pH 4.0	pH 3.0	pH 2.0
Seed dry weight per plant (g/plant)	4.82b	4.81b	4.30ab	4.18a	4.77a	4.44a	4.85a	4.89a
Seed number per plant (seeds/plant)	23.6b	24.2b	22.0b	17.5a	24.4a	24.3a	23.9a	24.8a
Pod number per plant (pods/plant)	13.0ab	13.4b	13.0ab	10.0a	14.2a	13.0a	13.4a	14.0a
Stem dry weight (g/plant)	0.90b	0.96b	0.85ab	0.72a	0.91a	0.82a	0.84a	0.85a

Table 2. Response of beans to pH 3.2 solutions applied in two dose patterns as rain or a soil drench. (Johnston^{16), '82)}

Parameter	Method	pH		
		5.6	3.2 constant	3.2 average*
Shoot weight (g)	Rain	8.7a	8.3a	7.9a
	Soil	8.7a	8.8a	9.5a
Root weight (g)	Rain	2.2ab	1.9ab	1.7b
	Soil	1.9ab	2.0ab	2.6a
Pod weight (g)	Rain	3.5ab	2.8ab	2.6b
	Soil	3.1ab	2.9ab	3.7a
Pod number	Rain	12a	11a	10a
	Soil	11a	10a	11a

* acidity of the solution decreased in a stepwise fashion from 2.8 to 3.1 to 3.4 to 3.6 to 4.0 in 8 min intervals such that the average acidity and total H⁺ dose during the 40 min rain event was identical to the treatment in which the pH was held constant at 3.2

형태로 처리한 경우에는 pH 5.6 처리구에 비하여 pH 2.0 처리구에서 콩의 건물중이 유의성 있게 감소하였으나 토양에 처리한 경우에는 인공산성비 처리에 따른 콩의 수량저하는 인정되지 않았다.

따라서 pH 2.0에 있어서의 생육 및 수량저하는 인공산성비의 콩의 지상부에 대한 직접적인 영향의 결과로 생각된다. 또한 강우처리나 토양처리 모두 pH 2.0 처리구의 콩중 염기원소(P, Cu, Mn, Zn 등)의 함유율이 pH 5.6 처리구의 콩에 비해 유의성 있게 증가하였다.(자료생략)

pH 5.6 및 3.2의 인공비를 이용하여 처리방법간에 콩에 대한 영향을 조사하여 표 2에 나타내었다. pH에 따라서는 pH 3.2 처리구의 콩의 줄기, 뿌리 및 꼬투리의 무게는 pH 5.6 처리구에 비해 낮은 경향이였다. 또한 pH는 3.2의 동일한 인공산성비를 계속 처리한 경우보다 평균 pH는 3.2로 같지만 pH 2.8에서 4.0까지 단계별로 처리된 작물에서 더욱 낮은 경향을 보였으나 유의성은 없었다. 처리된 인공비의 pH가 일정할 때는 처리방법에 따른 작물의 생장에 차이가 없었으나 인공비의 pH 변화가 있었던 처리구에서는 강우의 형태로 직접 작물에 살포하는 것이 토양에 처리하는 것에 비해 뿌리와 꼬투리 무게를 유의성 있게 감소하였다.

작물 생육단계 및 처리된 산성비의 pH별 콩의

엽면적 차이를 보기 위하여 주당 2회 5mm/hr의 속도로 매회 1시간씩 7주간 인공산성비를 처리한 결과, 콩의 엽면적은 표 3에서 보는 바와 같이 pH 3.0까지는 대조구(pH 5.6)와 차이를 발견할 수 없었으나 pH 2.0 처리구의 엽면적은 pH 3.0 이상의 처리구에 비해 유의성있는 감소를 보였다. 그러나 6/7엽에서는 처리된 인공비의 pH에 따른 차이를 발견할 수 없어 작물의 생육 단계별로 산성비에 대한 반응이 상이함을 보였다.

표 4는 인공산성비 처리에 따른 작물의 엽록소 함량, 호흡율 및 광합성율의 변화를 나타낸 것이다. 처리간에 엽록소 함량에 대한 상관성이 매우 높게 나타났으나 이는 주로 pH 2.0 처리구의 낮은 엽록소 함량에 기인한 것으로 pH 2.0 처리를 배제할 경우, F값은 73.46에서 3.67로 감소되어 대부분의 변이가 pH 2.0 처리에 따른 necrosis의 결과임을 나타내었다. 또한 pH 2.0 산성비 처리로 엽록소 함량은 감소하였으나 광합성율이 현저히 증가하여 탄수화물 생성에는 큰 영향이 없다는 Evans¹⁹⁾의 보고와 같은 결과를 보였으며, 광합성율에 비하여는 낮으나 호흡율 또한 증가함을 보였다.

산성 안개 처리에 따른 작물 부위별 탄수화물양을 조사한 결과, 대조구에 비하여 pH 2.75의 산성안개 처리로 어린 잎에서 동화산물의 저장물질인 전분과

Table 3. Leaf area of soybean plants as affected by simulated acid rain (Kohno et al¹⁷⁾, '88)

Exposure period (weeks)	Rain pH	Leaf position			
		1	2	3	6/7
5	5.6	73.5c	81.9b	93.3b	37.8a
	4.0	70.4bc	79.3b	96.4b	54.8a
	3.0	59.1b	73.7b	89.2b	47.9a
	2.0	38.8a	50.2a	50.5a	44.2a
7	5.6	73.3b	81.3b	96.6b	47.5a
	4.0	71.7b	78.9b	97.9b	68.1a
	3.0	67.7b	78.8b	94.0b	48.6a
	2.0	38.8a	55.7a	49.3a	55.9a

Table 4. Chlorophyll content, respiration rate, and rate of photosynthesis for control and acid-treated plant. (Ferenbaugh¹⁸⁾, '76)

Treatment	Chlorophyll content ¹	Respiration rate ²	Photosynthesis rate ³
Control	1.96	445	230
pH 3.5	1.87	438	467
pH 3.0	2.02	495	544
pH 2.5	1.86	598	676
pH 2.0	1.24	529	7860
F(treatment)	73.46	11.47	14.97
Significance(p)	.001	.001	.001

¹ Reported as milligrams of chlorophyll per gram of fresh weight

² Reported as microliters of oxygen taken up per gram of fresh weight per hour

³ Reported as microliters of oxygen evolved per milligram of chlorophyll per hour

Table 5. Effect of fog pH on the concentration of carbohydrate (mg/g d.w) and ¹⁴C label(10⁶ dpm/g d.w) in various plant parts. (Mengel et.al²⁰⁾, '90)

Plant parts	Starch		Sucrose		Glucose		Fructose		¹⁴ C label	
	2.75	5.0	2.75	5.0	2.75	5.0	2.75	5.0	2.75	5.0
Young needles	8.2	17.0**	1.9	1.7	28.4	32.4**	25.2	28.9*	2.65	2.91
Older needles	1.3	2.5	0.5	0.4	1.1	1.0	1.4	1.9	0.1	0.02
Roots	5.5	5.7	2.8	1.6	29.9	32.0	21.8	21.7	1.61	1.70
	1.1	1.5	0.6	0.4	0.9	1.6	0.6	0.9	0.13	0.04
	12.6	17.7*	25.1	25.9	12.5	12.8	9.9	9.7	3.76	3.44
	1.0	1.4	0.5	1.0	0.3	0.5	0.3	0.4	0.08	0.16
Total tree									2.66	2.70
									0.18	0.11

포도당 그리고 과당의 함량과 뿌리의 전분함량이 유의성 있게 낮아져 산성안개에 의한 용탈을 보였으나 산성 안개 처리로 용탈된 탄수화물의 양이 일중 총 탄수화물 함량에 비하여 1% 이하의 극히 적은 양이므로 이로 인한 나무의 탄수화물이나 에너지상태에 어떠한 영향을 미치리라고는 생각되지 않는다. 이의 확인을 위해 24 시간동안 Assimilation chamber내에서 ¹⁴C을 접촉 시킨 후, 7일간 온실에서 재배한 가문비 나무의 동화 산물은 처리된 pH 간에 유의성 있는 차이를 볼 수 없었다. (표 5).

표 6은 산성비 처리에 따른 감자와 무 잎의 Eth-

Table 6. Mean ethylene production by potato and radish foliage in response to rain treatment (Arny²¹⁾, '86)

Treatment pH	Potato	radish
2.8	2.81* ¹⁾	3.22
3.8	2.59	3.01
4.6	2.63	2.99
5.6	2.38	3.03
S.D.	0.39	0.34
C.V.(%)	15.18	11.01

¹⁾ unit : log(nl/g d.w.)

ylene 생성량을 조사한 것으로 Ethylene은 과실의 성숙 촉진, 잎의 황화 및 早期落葉 등 식물의 생리 성장에 중요한 역할을 하는 물질로 주로 성숙기에 발생하나 기계적 자극, 물리적 상해나 냉해 그리고 염소가스, 오존, 아황산 가스 및 중금속 등에 의하여 발생이 촉진되며, 가시적 피해가 나타나기 전에 발생량이 최대가 된다.

처리된 pH에 상관없이 무의 잎에서 감자 잎보다 높은 함량의 Ethylene이 발생되어 작물간에 상이한 Ethylene 생성을 보였다. 처리된 인공비의 pH별로는 비록 pH 2.8의 인공산성비 처리로 Ethylene 생성이 증가되었다. 그러나 들깨의 경우 Ethylene의 생성량이 증가하였으나 오이의 경우에는 반대로 생성량이 감소하였다는 이⁸⁾의 보고와 같이 산성비 처리에 따른 작물의 Ethylene 생성 결과가 모든 작물에서 일치되지 않으므로 Ethylene 생성은 산성비의 일차적인 반응이 아니고 따라서 산성비에 대한 예민성 판별인자로도 적합하지 않다.

주당 2회 5mm/hr의 속도로 매회 1시간씩 인공비를 처리하여 작물을 재배한 후 재배토양의 pH 및 EC 변화를 보면 표 7과 같다. 시험전 토양의 pH는 약 6.0 이었으며, 비료 시용으로 5.4 정도로 낮아졌다. 3주 처리 후에는 처리된 인공비의 pH별로 토양의 pH 변화를 볼 수 없었으나 7주 처리 후에는 대조구(pH 5.6)와 pH 4.0 이하의 인공산성비 처리구

Table 7. The pH and EC of cultivated soils as affected by acid rain treatment
(Kohno et al.¹⁷⁾, '88)

Exposure period (weeks)	Rain pH	pH (1 : 2.5)	EC (μS/cm)
Initial		5.89	80.5
Fertilized		5.37	478.7
3	5.6	5.47a	287.5a
	4.0	5.45a	261.0a
	3.0	5.54a	312.2ab
	2.0	5.39a	374.5b
7	5.6	5.93c	97.7a
	4.0	5.83b	94.2a
	3.0	5.79b	113.1a
	2.0	5.69a	159.8b

간에 토양 pH 변화는 0.1로 극히 적지만 유의성 있는 차이를 발견하여 산성비로 인한 토양의 산성화를 보였으며, EC 또한 pH 2.0 처리구에서 다른 처리구와 비교하여 높은 전기전도도를 나타냈다.

표 8은 각 pH별 인공산성비를 처리하여 콩을 재배한 후, 표토층 0.1N-HCl 가용성 원소함량을 나타낸 것이다. 알미늄의 증가는 산성비로 인한 생태계의 큰 피해중 하나로서 알미늄은 칼슘과 경쟁하여 식물에 칼슘공급을 악화시키고, Aluminum phosphate 형태로 침전되어 인산유효도에 영향을 주며,

Table 8. Contents of soluble mineral elements in 0.1N HCl¹⁾ and in the upper layer (0-5cm)²⁾
(Kobayashi et al.¹⁵⁾, '92)

Element	pH of simulated acid rain			
	5.6	4.0	3.0	2.0
Ca	2.421a ³⁾	2.562a	2.366a	2.442a
K	0.293a	0.328a	0.290a	0.362a
Mg	0.240b	0.223a	0.228ab	0.207a
Mn	0.116a	0.117a	0.123a	0.188b
Al	11.565a	12.070b	12.198b	11.939b

¹⁾ soil : HCl=1 : 5

²⁾ soybean cultivated soil which was exposed to simulated acid rain

³⁾ unit : mmol/100g

수중에서 0.2ppm의 농도로 어류에 독성을 준다. 본 시험의 결과, 표토중 0.1N-HCl 가용성 알루미늄은 pH 4.0 이하의 인공산성비 처리로 pH 5.6의 대조구에 비해 유의성 있게 증가되었다.

산성비가 작물 잎조직의 형태변화에 미치는 영향

1) 잎의 毛茸(Trichome)의 변화

Evans 等^{19,22,23}은 산성비에 의한 작물의 피해는

대부분 氣孔 및 毛茸(trichome) 주위에 형성되며, 특히 잎 피해의 75%가 毛茸 주위에 형성된다고 보고하였는데 毛茸(trichome)의 기능은 첫째, 잎으로부터 鹽類放出의 통로가 되어 식물체내의 독성 염류축적을 억제하며, 둘째, 열에 의한 mesophyll의 피해를 방지하며, 그리고 셋째, 해충에 대한 방어가 작으로서의 역할로 볼 수 있는데 그 형태는 작물에 따라 다양하다²⁴.

이 등²⁵은 人工酸性비를 10회 처리한 후, 각 pH 별 참깨 잎의 표면조직을 走査電子顯微鏡(SEM)을

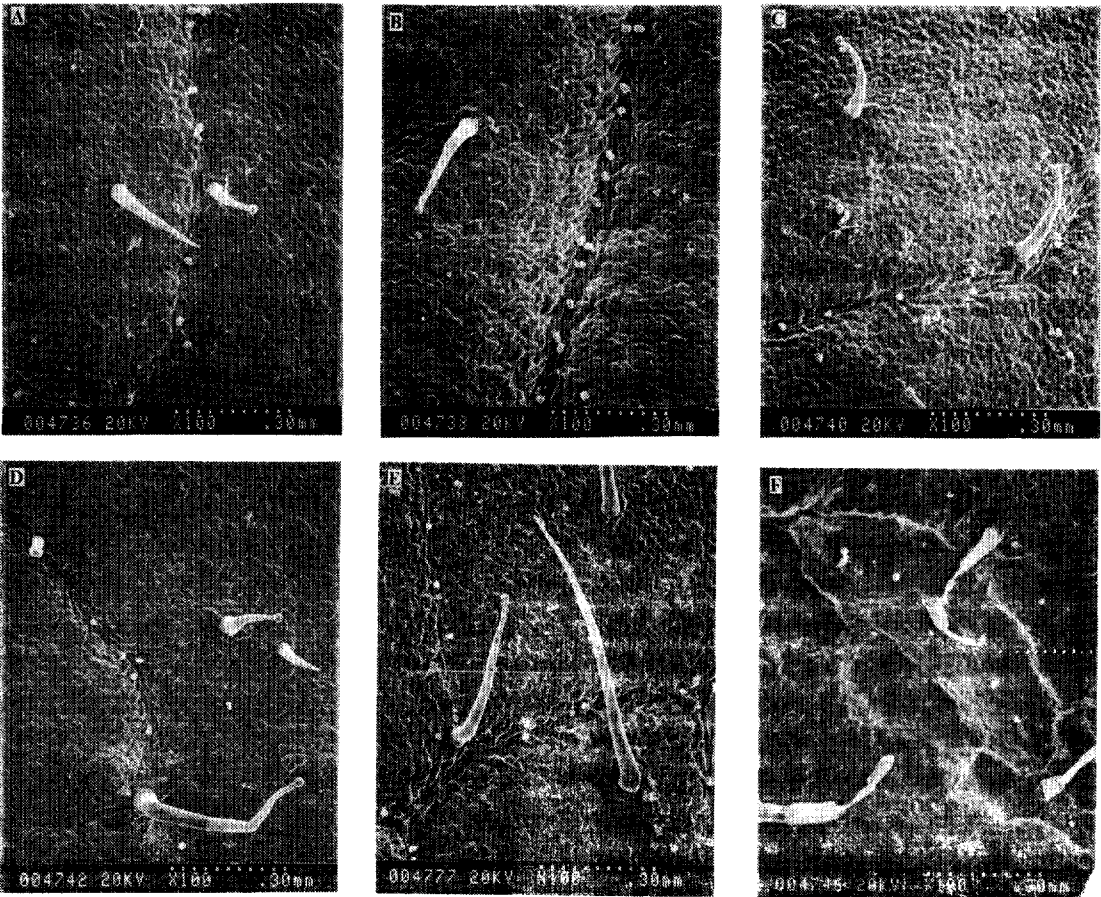


Fig. 3. Scanning Electron microphotographs of spiked trichomes of sesame leaves treated with simulated rain. $\times 100$. A : Non-treated with simulated rain. B : Control(pH 6.0), C : SAR(simulated acid rain) of pH 5.0, D : SAR of pH 4.0, E : SAR of pH 3.0, F : SAR of pH 2.0.

이용하여 毛茸(trichome)을 조사한 결과, 그림 3에서와 같이 참깨 잎의 긴 형태의 毛茸(spiked trichome)은 人工酸性비의 pH 3.0까지는 변화가 없었으나 pH 2.0의 人工酸性비가 처리된 참깨 잎에서는 심한 피해증상을 발견하였으며, 참깨 잎 표면의 작은 葉脈을 따라 존재하는 작은 크기의 腺毛(glandular trichome)의 경우에는 그림 4에 나타난 바와 같이 pH 2.0 처리구는 물론 spiked trichome에는 피해가 발견되지 않았던 pH 5.0, 4.0 및 3.0 처

리구에서도 glandular trichome의 변형이 발견되었다. 이는 降雨遮斷區와 自然降雨區에 대해 참깨 잎의 표면조직을 조사한 결과, 자연강우구에서 葉脈을 따라 존재하는 작은 크기의 腺毛(glandular trichome)의 변형을 발견한 李 등²⁶⁾의 報告와 같은 결과이며, 아울러 대조구와 같은 pH 6.0의 人工비를 葉面撒布하지 않고 동일량을 토양에만 공급한 무처리구에서 동일하게 피해가 발견되지 않음은 단순히 잎 표면의 수분상태로 인한 피해가 아님을 알 수

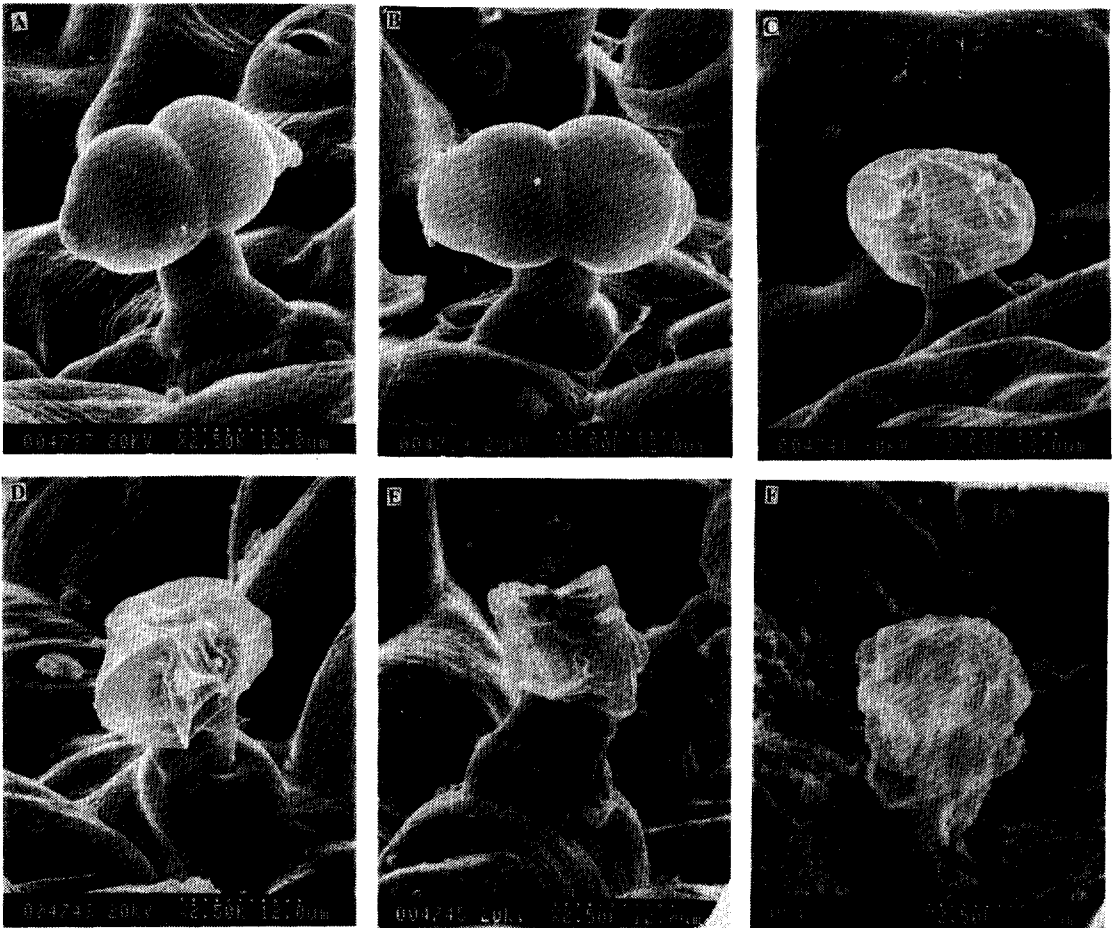


Fig. 4. Scanning Electron microphotographs of spiked trichomes of sesame leaves treated with simulated rain. $\times 2,500$. A : Non-treated with simulated rain, B : Control(pH 6.0), C : SAR (simulated acid rain) of pH 5.0, D : SAR of pH 4.0, E : SAR of pH 3.0, F : SAR of pH 2.0.

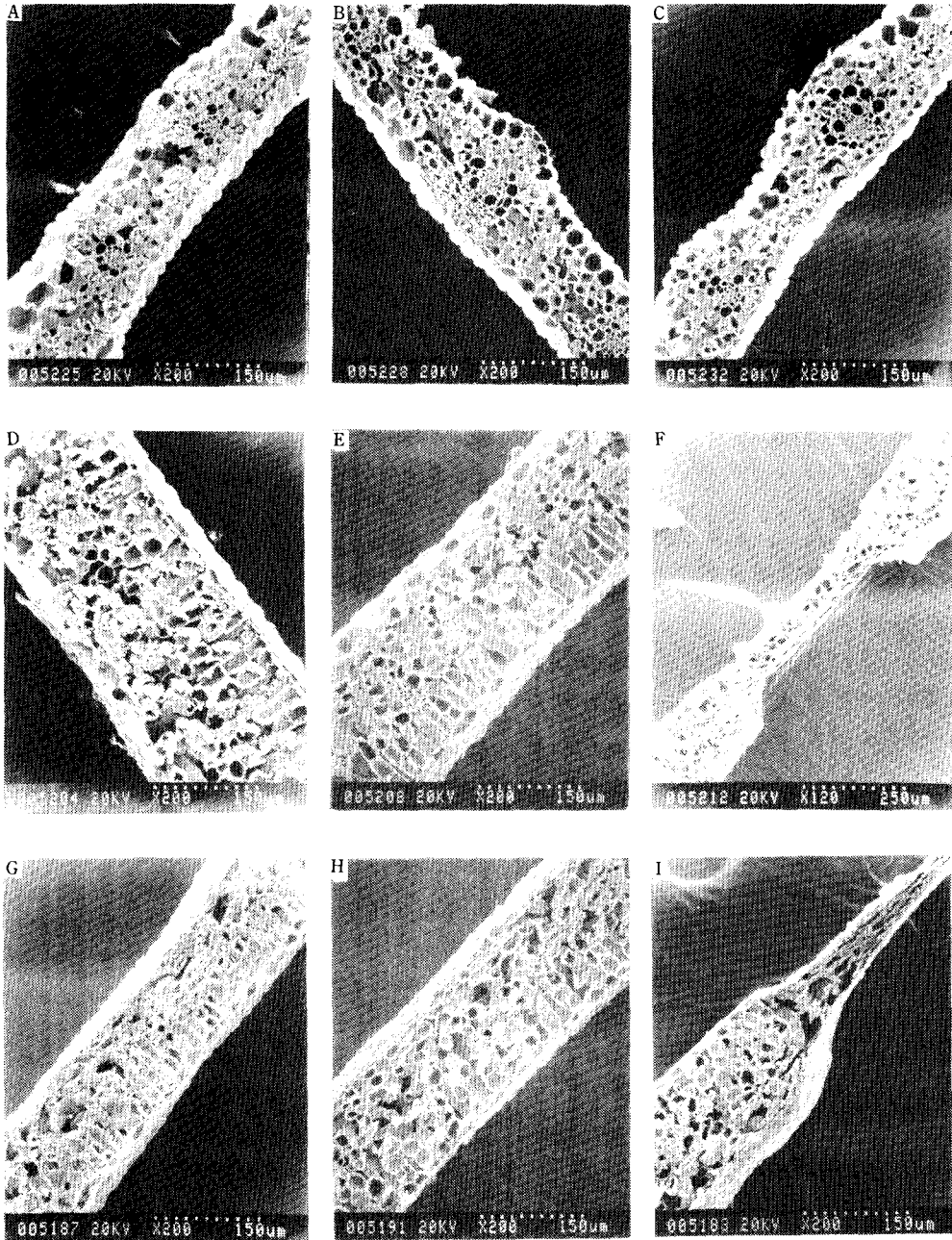


Fig. 5. Cross sections of leaves of barley, radish and c. cabbage after exposure to SAR(simulated acid rain). A-C : Barley treated with SAR of pH 6.0, 3.0, and 2.0, D-F : Radish treated with SAR of pH 6.0, 3.0, and 2.0, G-I : C. cabbage treated with SAR of pH 6.0, 3.0 and 2.0, respectively.

있다. 또한 비의 산성도에 대한 피해가 毛茸의 형태별로 상이함은 각 조직에 따라 산성도에 대한 내성차이도 있겠지만 葉脈에 빗물이 고임으로 인하여 엽맥주위가 가용성물질 흡수가 용이한 부위라는 Evans⁷⁾의 報告처럼 酸性비에 대한 노출이 더 길었기 때문으로 생각된다. 그러나 잎표면의 피해가 작물의 수량에 미치는 영향은 적다는 보고^{7,16)}와 비록 가시적 피해는 없어도 작물의 생육저하가 일어날 수 있다는 보고¹⁷⁾로 볼 때 酸性비에 대한 농작물의 일반적인 피해를 알아보기 위해서는 많은 작물과 다양한 품종에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

2) 잎 단면조직의 변화

인공산성비가 처리된 작물의 잎 단면조직을 살펴본 결과, 그림 5에서 보는 바와 같이 조직의 피해 정도는 pH 3.0의 인공산성비가 처리된 작물에서는 조직의 변화를 발견할 수 없었으나 pH 2.7의 인공산성비가 처리된 배추와 무의 경우는 해면 연조직 (spongy parenchyma)까지 피해를 받았으나 보리의 경우는 표피 세포만이 피해를 보였으며, 또한 잎의 가시적 피해율도 벼와 보리가 참깨, 대두, 배추 및

무에 비하여 낮은 결과(자료생략)를 보였는데 이는 외떡잎 식물이 쌍떡잎 식물보다 산성비에 대한 내성이 크다는 Evans⁷⁾의 보고와 같은 결과이다.

3) 葉綠體(Chloroplast) 변화

인공비의 pH에 따른 작물의 葉綠體 피해를 알아보기 위하여 대조구(pH 6.0), pH 3.0 및 2.0 처리구에 대해 각각의 참깨 잎의 단면을 投射電子顯微鏡 (TEM)을 利用하여 조사한 이 등²⁵⁾은 그림 6에 나타난 바와 같이 뚜렷한 가시적 피해가 없었던 pH 3.0 이상의 처리구에서는 별다른 조직변화를 발견할 수 없었으나 가시적 피해가 컸던 pH 2.0 처리구의 참깨 잎에서는 葉綠體崩壞가 일어났음을 보고하였다.

위의 결과로 볼 때 현재까지 우리나라에서 자연 강우로 인한 농작물의 가시적 피해나 생육 및 수량의 감소 등의 직접적인 피해에 대한 우려는 없으나 앞으로 glandular trichome의 변형 등 불가시적 피해에 따른 병충해 등의 간접적인 피해^{27,28)}에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

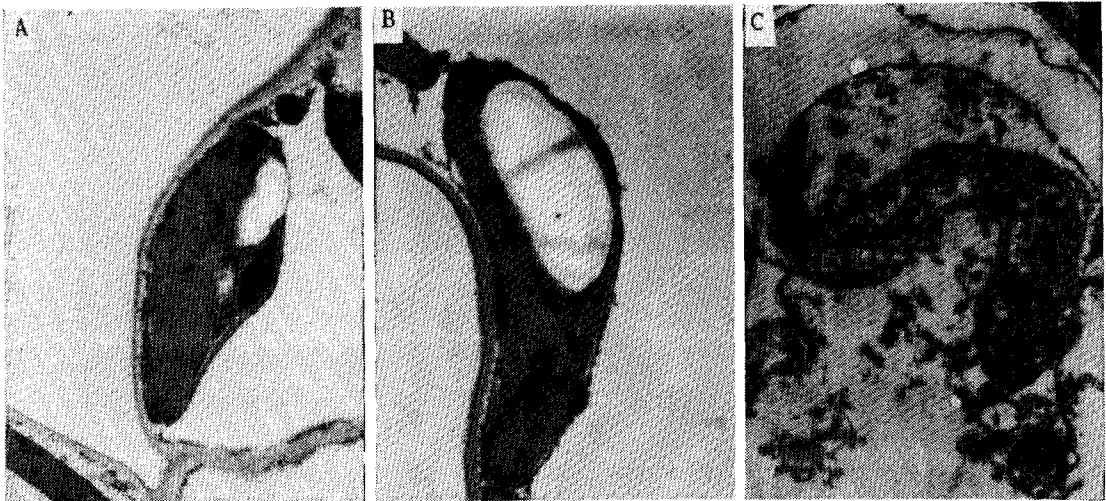


Fig. 6. Transmission electron microphotographs of chloroplast of sesame leaves treated with simulated rain. × 10,000. A : Control(pH 6.0), B : SAR(simulated acid rain) of pH 3.0, C : SAR of pH 2.0.

결과요약

대기오염 물질 증가로 인한 산성비의 생성기작과 산성비가 식생에 미치는 영향 등을 지금까지 연구된 결과들을 토대로 고찰해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대기중에 방출된 오염물질들은 광화학적 반응에 의해 산성물질이 형성되고 이들은 Dry deposition과 Wet deposition의 형태로 식생에 영향을 준다.

2. 강우 pH별 생물의 영향은 pH 4 미만에서 산성물질에 민감한 식물에 피해가 나타나며, pH 3 미만에서는 대부분의 농작물에 가시적 피해가 나타난다.

3. pH별 콩의 피해는 강우 형태로 처리한 경우 pH 2.0 처리로 건물중 및 엽면적에 유의성 있는 감소를 보였으나 토양에 처리한 경우는 인공산성비 처리에 따른 수량저하는 없었다.

4. pH 2.0 인공산성비 처리로 콩 잎의 엽록소 함량은 감소하였으나 호흡을 및 광합성율은 증가하였다.

5. pH 2.8 인공산성비 처리에 따른 Ethylen 생성은 증가 하였으나 산성비에 대한 예민성 판정 인자로는 적합하지 못하다.

6. pH 2.0 인공산성비 처리로 표토중 가용성 알루미늄 및 망간의 함량이 증가하였고, 토양 pH는 낮아졌다.

7. 참깨 잎 표면의 Glandular trichome은 pH 5.0 이하의 인공산성비 처리로 피해가 나타났으나 Spiked trichome 및 엽록체는 pH 2.0 처리구에서만 피해가 발견되었다.

인용문헌

1. Volker, A. M. (1988). The challenge of acid rain, *Scientific American* **259**(2) : 14-22.
2. 内嶋善兵衛. (1986). 地球環境の危機 - 大氣の

變化と酸性雨-, 岩波書店, 204-213.

3. Bill, F. (1986). *Environmental Ecology-The impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function-* : 82.
4. Gene, E. L., Richard F. W., James, N. G. and Thomas, J. B. (1979). Acid rain, *Scientific American* **241**(4) : 39-47.
5. Schindler, D. W. (1988). Effect of acid rain on freshwater ecosystems, *Science* **239** : 149-157.
6. Feret, P.P., Diebel, K. E. and Sharik, T. L. (1990). Effect of simulated acid rain on reproductive attributes of red spruce. *Environmental and Experimental Botany*. **30**(3) : 309.
7. Evans, L. S. (1982). Biological effects of acidity in precipitation on vegetation : A Review. *Environmental and Experimental Botany*. **22**(2) : 155-169.
8. 이성희. (1990). 산성우 피해작물의 생리 및 형태에 관한 연구, 전남대 석사학위논문.
9. Evans, L.S., Gmur, N. F. and Mancini, D. (1982). Effect of simulated acidic rain on yields of *Raphanus sativus*, *Lactuca sativa*, *Triticum aestivum* and *Medicago sativa*. *Environmental and Experimental Botany*. **22**(4) : 445-453.
10. Rinallo, C. (1992). Effects of acidity of simulated rain on the fruiting of 'Summerred' apple trees. *J. Environ. Qual.* **21** : 61-68.
11. 정용승, 김태균. (1991). 한국 서해안에서 관측된 산성비 발원지 추적연구, *한국대기보전학회지* **7**(3) : 203-207.
12. Taniyama, T. and Saito, H. (1981). Effects of acid rain on apparent photo-synthesis and grain yield of wheat, barley and rice plant, *Rept. Environmental Sci. Mie. Univ.* **6** : 87-101.

13. Volker, A. M. (1988). The challenge of acid rain, *Scientific American* **259**(2) : 14-22.
14. 谷山鉄郎. (1990). 地球環境と農業をとりまく諸問題「4」, 農業および園藝 **65**(9) : 38-46.
15. Takuya, K., Yoshishisa, K. and Keiichi, N. (1992). The effects of simulated acid rain on the uptake of mineral elements in soybean plants, *J. Agr. Met.* **48**(1) : 11-18.
16. Johnston, J. W., Shriner, D. S., Klarer, C. I. and Lodge, D. M. (1982). Effect of rain pH on senescence, growth, and yield of bush bean, *Environmental and Experimental Botany* **22**(3) : 329-337.
17. Yoshishisa Kohno. (1989). Effect of simulated acid rain on the growth of soybean. *Water, Air, and Soil Pollution.* **43** : 11-19.
18. Ferenbaugh, R. W. (1976). Effects of simulated acid rain on *Phaseolus Vulgaris L.* (Fabaceae), *Amer. J. Bot.* **63**(3) : 283-288.
19. Evans, L. S., Gmur, N. F. and Costa, F. D. (1977). Leaf surface and histological perturbation of leaves of *Phaseolus vulgaris* and *Helianthus annuus* after exposure to simulated acid rain. *Amer. J. Bot.* **64**(7) : 903-913.
20. Mengel, K., Breining, M. T. and Lutz, H. J. (1990). Effect of simulated acidic fog on carbohydrate leaching, CO₂ assimilation and development of damage symptoms in young spruce trees, *Environmental and Experimental Botany* **30**(2) : 165-173.
21. Arny, C. J. and Pell, E. J. (1986). Ethylene production by potato, radish and soybean leaf tissue treated with simulated acid rain, *Environmental and Experimental Botany* **26**(1) : 9-15.
22. Evans, L. S., Gmur, N. F. and Costa, F. D. (1978). Foliar response of six clones of hybrid poplar. *Phytopathology.* **68** : 847-856.
23. _____, _____, and Kelsch, J.J. (1977). Perturbations of upper leaf surface structure by simulated acid rain. *Environmental and Experimental Botany.* **17** : 145-149.
24. Katherine, E. (1977). *Anatomy of seed plants,* John Wiley and Sons. : 94-97.
25. 이종식, 김복영, 우기대, 정구복. (1993). 인공산성비에 의한 참깨 잎조직의 형태 변화에 관한 연구, 한국토양비료학회지. **26**(4) : 308-313.
26. _____, _____, _____ (1994). 수원지역 강우의 성분조성 및 작물에 미치는 영향, 한국환경농학회지. **23**(1) : 31-38.
27. Khan, M. R. and Khan, M. W. (1994). Effects of simulated acid rain and root-knot nematode on tomato, *Plant Pathology.* **43** : 41-49.
28. Shriner, D. S. (1978). Effects of simulated acidic rain on host-parasite interactions in plant diseases, *Phytopathology.* **68**(Feb.) : 213-218.