

인공 황산비 및 질산비가 애기장대의 생장과 종자발아에 미치는 영향

이 석찬·박정안·박종범*

성균관대학교 유전공학과·신라대학교 생명과학과

(2003년 4월 1일 접수; 2003년 6월 16일 채택)

Effects of Simulated Sulfuric and Nitric Acid Rain on Growth and Seed Germination of *Arabidopsis thaliana*

Suk Chan Lee, Jung-An Park and Jong-Bum Park*

Dept. of Genetic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*Dept. of Biological Science, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 1 April, 2003; accepted 16 June, 2003)

The experiment was carried out to investigate the effects of sulfuric acid and nitric acid among the main components of simulated acid rain (SAR) on the growth of vegetative organs and seed germination of *Arabidopsis thaliana*. The *Arabidopsis* treated with SAR supplemented with sulfuric and nitric acids, respectively, showed 28% and 30% decrease of shoot and root growth compared to the control plants, and also many necrotic spots on leaf surfaces after SAR treatment were observed.

The shoot and root length for plants grown with nitric acid rain was 14% and 17% lower, respectively, compared to the control, whereas those grown with sulfuric acid rain was 24% and 25% lower than control plants. When *Arabidopsis* seeds were sown in distilled water, germination rate was 100% after 7 days. However, 80% in SAR medium supplemented with sulfuric and nitric acids, 88% in sulfuric acid rain medium and 93% in nitric acid rain medium. The germination abilities of seeds harvested from SAR supplemented with sulfuric and nitric acids, sulfuric acid rain, and nitric acid rain were 73%, 73% and 94%, respectively. Consequently, sulfuric acids showed more inhibitory effects than nitric acids on the growth of vegetative organs as well as germination rates in *Arabidopsis*.

Key words: Simulated acid rain, Shoot length, Root length, Germination, *Arabidopsis*

1. 서 론

산성비는 공장이나 자동차 배기가스에서 배출되는 아황산가스와 질소산화물이 대기중의 습기와 작용해 황산과 질산으로 변하고, 이 물질이 공중에 부유하고 있다가 비에 섞여 내리는 것으로, 빗물의 정상 수소이온농도(pH)인 5.6보다 낮은 상태의 강산성의 비를 말한다. 대기오염에 의해 발생되는 산성비는 토양의 산성화를 유도하여 간접적으로 식물의 생장에 영향을 미칠 뿐 아니라, 산성비에 직접 노출되는 잎과 줄기의 외부형태와 내부구조에 많은 변화를 일으키는 요인이 되고 있다.^{1,2)} 산성비가 식물

의 생장에 미치는 영향을 조사한 연구는 약 20여년 전부터 시작되었으며 다양한 영향들이 보고되었다. 자연상태에서 산성비는 식물의 잎 표면에 직접 작용하여 큐티클층을 손상시켜 표피에 피해를 주고, 잎을 괴사시키며 엽육조직에 존재하는 엽록소의 상실로 황화현상을 일으켜 광합성작용을 방해할 뿐 아니라, 엽육조직 세포의 과피로 잎조직을 비정상적인 구조로 변화시키는 것으로 보고되었다.^{3~6)} 산성비의 피해로 인한 엽육조직의 구조 변화는 주로 엽맥, 모용, 기공 등이 있는 잎 표면의 특정한 부위에서 나타난다고 보고되어 왔으며,³⁾ 산성비에 의한 잎의 피해는 기공을 구성하는 공변세포의 기능과 구조에도 변화를 일으키는 것으로 보고되었다.⁷⁾ 생장 기간이 긴 수목도 산성비에 오랜기간동안 노출되면 수목의 생장이 감소되거나 고사현상이 일어났음이

Corresponding Author : Jong-Bum Park, Dept. of Biological Science, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone : +82-51-309-5472
E-mail : jbpark@silla.ac.kr

보고되었다.^{8~10)} 또한 Evans et al.¹¹⁾은 작물의 생장과 수확량에 미치는 산성비의 효과를 연구한 결과 여러 작물에서 생장과 수확량이 감소되었음을 보고하였으며, pH 3.0~4.0 범위의 인공 산성비(simulated acid rain, SAR)는 초본식물과 송백류 및 강낭콩 등의 식물에서 생장을 감소시켰다.^{12~14)} 인공 산성비에 의한 식물의 구조변화 연구는 주로 잎 표면의 관찰로 이루어졌는데, pH 3.0~3.2의 인공 산성비를 처리한 식물에서는 잎 표피의 큐티클을 손상시켰으며, 잎 속의 칼슘, 마그네슘, 칼륨 성분 등의 결핍증으로 인한 괴사현상이 관찰되었다.^{2,3,5)} 또한 인공 산성비는 염육조직세포를 파괴시켜 잎 조직을 비정상적인 구조로 변화시키는 것으로 보고되었다.⁶⁾ pH 3.0의 인공 산성비를 3주 동안 처리한 옥수수 잎 표면에서는 조직상해로 인한 흰 괴사 반점이 관찰되었는데, 이러한 조직상해는 유관속조직과 기공 근처에서 주로 일어남에 따라 괴사 반점은 잎 표면의 선택적 압착현상에 의하여 형성되는 것으로 보인다.⁵⁾ 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)를 실험재료로 사용하여 인공 산성비를 산도별로 처리하였을 때 나타나는 줄기와 잎의 생장상 및 외형적인 손상과 잎 표면에서의 괴사 반점이 보고되었으며,¹⁾ 인공 산성비 처리 후 식물에 직접적인 피해가 나타나는 줄기, 잎 및 뿌리의 내부 구조 변화에 대한 조직학적 연구결과도 보고된 바 있다.²⁾ 본 연구는 인공 산성비의 주요 성분인 황산과 질산을 각각 애기장대에 처리하여 이들이 줄기 및 뿌리의 생장과 종자발아에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

애기장대의 생태형(ecotype) Col-O 종자는 미국 Ohio State University의 *Arabidopsis* Biological Resource Center (ABRC)에서 분양받아 실험재료로 사용하였다.

2.2. 식물 배양

애기장대 종자를 peat moss와 질석, 펠라이트가 각각 1:1:1로 혼합된 인조 흙이 담긴 묘판에 파종한 후 wrap을 씌워 2일 동안 4°C에서 저온 처리한 다음, 항온항습 배양기에 옮겨서 배양하였다. 배양기 내의 환경조건은 16 시간의 명처리와 8 시간의 암처리로 조정된 광주기하에서 온도는 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도는 60~80%로 유지되도록 조절하여 주었다. 배양 약 2주 후 발아가 되면 wrap을 제거하고 적절한 습도가 유지되도록 3~4일마다 영양액을 Park and Lee¹⁵⁾의 방법에 따라 공급하여 주었다.

2.3. 인공 산성비 처리 및 종자 발아율 조사

파종 후 45일이 경과하여 어느 정도 성숙한 애기장대에 pH 3.0의 3종류 인공 산성비 용액(Table 1)을 각 육묘판에 250 mL씩 하루에 한번, 10일 동안 식물체의 선단으로부터 50 cm 높이에서 분무기로 분무하여 주었다. 산성비 처리 15일 후에 식물의 줄기, 잎, 뿌리의 생장을 각각 측정하였다. 대조구로는 산성비 성분이 첨가되지 않은 영양액만을 사용하였다. 실험데이타는 동일한 실험을 2번 반복하여 평균치를 구한 것이다.

종자 발아율을 측정하기 위하여 애기장대 종자를 종류수로 셋은 다음, 2% sodium hypochloride 용액으로 약 5분간 표면살균하고 멸균수로 5번 세척하였다. 세척된 종자는 질산과 황산성분이 모두 포함된 인공 산성비, 황산성분이 포함되지 않은 인공 질산비, 질산 성분이 포함되지 않은 인공 황산비 3종류와 종류수 5 mL으로 적셔진 여과지가 들어 있는 각각의 petri dish에 50개의 종자를 파종한 후, parafilm으로 밀봉하여 항온항습 배양기에서 배양하였다. 3종류의 인공 산성비를 처리한 식물에서 채취한 종자들도 상기와 똑같은 방법으로 처리하였다. 배양 3일 후부터 매일 발아율을 측정하였고 동일한 실험을 3번 반복하여 평균치를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공 산성비 처리에 의한 줄기와 잎의 생장 비교

성숙한 애기장대 Col-O 식물에 조성을 달리한 3 가지 인공 산성비를 10일 동안 직접 처리한 후, 산성비를 처리한 식물군과 산성비를 처리하지 않은 식물군의 전체적인 줄기 생장을 비교하였다. 그 결과 정상 식물군에 비하여 산성비를 처리한 식물군의 줄기 생장이 평균 약 14~28% 감소되었으며, 산성비를 처리한 식물군 사이에서도 인공 산성비의 조성을 따라 줄기 생장에 차이를 나타내었다(Fig. 1).

Table 1. Composition of three kinds of simulated acid rain (mg/L)

Compound	Simulated acid rain	Nitric acid rain	Sulfuric acid rain
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	47.40	-	47.40
Na_2SO_4	48.00	-	48.00
KNO_3	27.00	27.00	-
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	35.50	-	35.50
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	22.00	22.00	-
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	72.00	72.00	72.00

인공 황산비 및 질산비가 애기장대의 생장과 종자발아에 미치는 영향

질산성분만 첨가된 인공 질산비를 처리한 식물에서는 약 14%의 생장감소를 나타낸 반면, 황산성분만 첨가된 인공 황산비에서는 약 24%의 생장감소를 나타내었다. 황산과 질산성분이 모두 포함된 인공 산성비에서는 약 28%의 줄기생장 감소를 나타내었다. 이러한 결과는 pH 3.0의 산성비에 의해 애기장대 식물의 줄기 생장이 매우 감소되었으며, 산성비 성분 중에서 황산이 질산보다 식물 줄기 생장에 더 큰 영향을 미쳤음을 나타내고 있다.

3종류의 인공 산성비를 애기장대에 처리한 후 전체적인 잎 생장을 관찰한 결과, 산성비를 처리한 모든 식물에서 잎 표면에 괴사반점이 관찰되었으며 황화현상도 나타났다(Fig. 2). 산성비에 대한 손상정도는 산성비의 조성에 따라 차이를 나타내었는데, 인공 산성비를 처리한 식물의 잎에서 가장 많은 괴사반점과 황화현상이 나타났고, 그 다음으로는 황산비를 처리한 식물 잎에서 많은 괴사반점과 황화현상이 관찰되었다. 반면 질산비를 처리한 식물의 잎에서는 작은 괴사반점과 약한 황화현상이 관찰되었다. 이와 같은 결과는 산성비에 노출된 식물의 잎 생장에서 산성비의 성분 중 황산이 질산보다 식물의 잎 생장에 더 치명적인 영향을 미침을 알 수 있고 산성비에 노출된 식물의 잎에 손상을 일으키는 산성비의 주요 요인으로 황산화물이라는 연구보고와도 일치하였다.^{15,16)} 또한 산성비에 의해 잎의 표피조직에 나타나는 상해현상의 일종인 괴사반점은

작물에 따라 다양한 양상을 보여주는데, 해바라기, 밀, 옥수수 등과 같은 작물의 잎에서는 본 연구 결과와 일치하는 결과를 보여주었다.^{5,17,18)} 산성비 처리에 의해 잎에 형성된 괴사반점은 병원성 미생물에 의한 생물학적 요인이나 오존과 같은 무생물학적인 요인에 의해서 관찰되는 현상인데, 이 과정에 관여하는 유전자의 발현양상과 신호전달물질에 의해서 유도되는 것으로 추측된다¹⁹⁾.

3.2. 뿌리 생장

인공 산성비가 애기장대의 뿌리 생장에 미치는 영향을 조사한 결과, 3종류의 인공 산성비를 처리한 식물에서의 뿌리 생장은 평균 17~30% 감소되었다. 질산과 황산성분이 모두 포함된 인공 산성비를 처리한 식물의 뿌리는 약 31% 생장이 감소되었으나, 인공 질산비를 처리한 식물 뿌리는 약 17%, 인공 황산비를 처리한 식물 뿌리에서는 약 25%의 생장 감소가 관찰되었다(Fig. 3). 이러한 결과를 통해 인공 산성비가 애기장대의 뿌리 생장을 매우 감소시켰으며, 특히 인공 산성비의 성분 중 질산보다 황산성분이 뿌리 생장에 더 나쁜 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과는 황산비에 노출된 여러 작물에서 뿌리의 생장이 감소되었다는 연구보

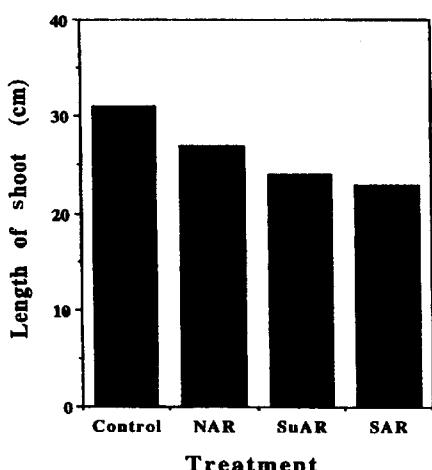


Fig. 1. Effects of simulated acid rains on shoot growth of *Arabidopsis thaliana* 10 days after acid rain treatments on whole plant. Control, normal shoots; NAR, shoots treated with nitric acid rain; SuAR, shoots treated with sulfuric acid rain; SAR, shoots treated with simulated acid rain.

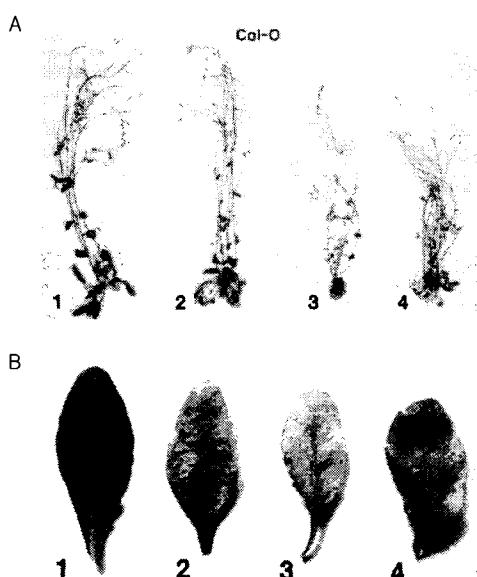


Fig. 2. Effects of simulated acid rains on shoot development (A) and necrotic lesion development (B) of *Arabidopsis thaliana* 10 days after acid rain treatments on whole plant. 1, normal leaves; 2, leaves treated with nitric acid rain; 3, leaves treated with SAR; 4, leaves treated with sulfuric acid rain.

고와 일치하였다.¹⁶⁾ 한편 본 실험 결과와는 상반된 결과로서 사탕단풍의 유식물에서 측근의 수와 길이는 산도 수준에 영향을 받지 않으며 측근의 길이는 오히려 pH 3.0에서 가장 길게 나타났다는 보고도 있다.²⁰⁾ 그러므로 인공 산성비 처리가 뿌리에 미치는 영향은 식물종에 따라 다양한 양상을 나타내는데, 이는 산성비 저항성 종과 감수성 종간의 차이에 따른 것으로 보여진다.⁶⁾

특히 산성비내의 산성물질은 토양내에 축적되면 토양의 pH가 낮아지게 되고, 독성물질로 작용하여 뿌리의 생장을 억제하는 것으로 보고되었다.^{21,22)} 또 한 산성비는 토양 미생물의 활동을 저해하여 낙엽이나 토양생물의 사체를 분해하지 못하게 함으로써 산성비에 의한 직접적인 피해보다는 장기적으로 더 큰 생장저해 효과를 나타내기도 한다.^{23,24)} 본 연구 결과를 토대로 볼 때 질산비보다 황산비에 의해 뿌리의 생장이 더 억제되는 현상이 황산비에 의해서 토양 중금속의 용해도가 더 높아진 때문인지 아니면 황산비에 의해서 토양미생물의 생육이 영향을 더 받았기 때문인지 정확하게 알 수 없으므로 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다고 본다.

3.3. 종자 발아율

3종류의 인공 산성비가 애기장대의 종자발아에 미치는 영향을 조사한 결과, 대조구로 사용한 종류수 배지에서는 파종 3일 후 96%의 발아율을 나타내었으며 5일 후부터 100% 발아되었다(Fig. 4). 그러나 3종류의 인공 산성비 배지에서는 파종 4일 후부

터 발아되기 시작하였으며 발아율이 약 60~70% 정도로 낮게 나타났고, 7일 후에는 80~93%의 발아율을 나타내었다. 질산과 황산성분이 모두 포함된 인공 산성비 배지에서는 파종 4일 후에는 63%, 7일 후에는 80%의 발아율을 나타내었고, 인공 황산비 배지에서는 4일 후 67%, 7일 후에는 88%의 발아율을 나타내었으며, 인공 질산비 배지에서는 4일 후 70%, 7일 후에는 93%의 발아율을 나타내었다. 따라서 pH 3.0의 인공 산성비에 노출된 애기장대의 종자는 정상적인 종자에 비하여 발아율이 약 20% 감소되었음을 알 수 있었는데, 이는 pH 3.0의 인공 산성비가 pH 5.6의 인공산성비에 비해 약 40% 발아율을 감소시켰다는 보고^{1,25)}와 유사한 결과이다. 인공 질산비에서의 종자 발아율은 정상적인 종자에 비해 발아율이 약 7% 감소되었으나, 인공 황산비에서의 종자 발아율은 약 12% 감소되어 산성비를 구성하는 질산과 황산성분 중 황산성분이 종자 발아에 더 치명적인 영향을 미침을 알 수 있었다. 이러한 결과는 산성비 성분 중 질산보다 황산성분이 애기장대의 줄기와 잎 및 뿌리의 생장에 억제 효과를 미친다는 상기의 결과와 유사한 경향을 나타내 주고 있다.

3종류의 인공 산성비를 처리한 식물(T_0)에서 채취한 종자(T_1)들을 각각 선별하여 종류수 배지에서 발아율을 조사한 결과, 정상식물의 종자는 파종 5일 후부터 100% 발아되었으나, 질산과 황산성분이 모두 포함된 인공 산성비를 처리한 식물에서 채집한 종자는 파종 5일 후 약 65%, 7일 후에는 약 73%의

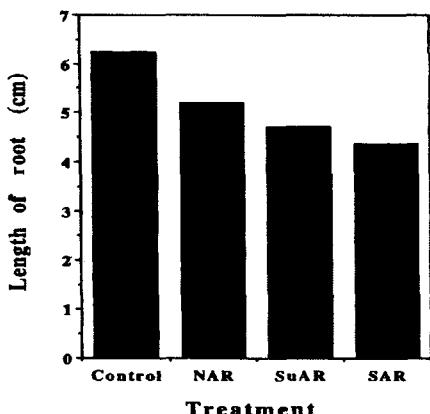


Fig. 3. Effects of simulated acid rains on root growth of *Arabidopsis thaliana* 10 days after SAR treatments on whole plant. Control, normal roots; NAR, roots treated with nitric acid rain; SuAR, roots treated with sulfuric acid rain; SAR, roots treated with simulated acid rain.

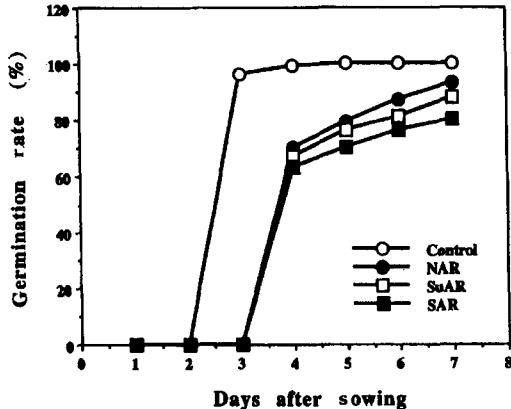


Fig. 4. Effects of simulated acid rains on seed germination of *Arabidopsis thaliana* for 7 days after sowing. Control, normal seeds; NAR, seeds treated with nitric acid rain; SuAR, seeds treated with sulfuric acid rain; SAR, seeds treated with simulated acid rain.

인공 황산비 및 질산비가 애기장대의 생장과 종자발아에 미치는 영향

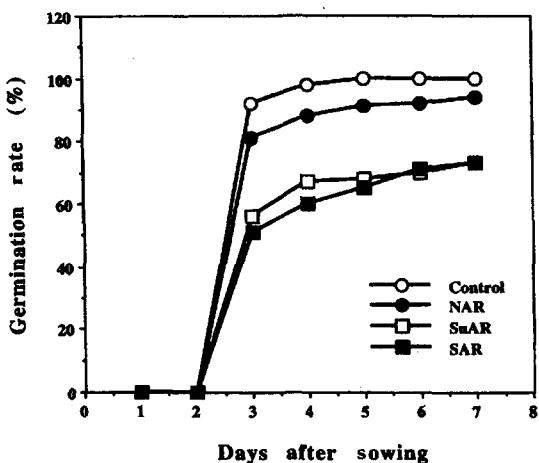


Fig. 5. Germination rates of seeds obtained from *Arabidopsis thaliana* treated with 3 kinds of simulated acid rain. Control, normal seeds; NAR, seeds treated with nitric acid rain; SuAR, seeds treated with sulfuric acid rain; SAR, seeds treated with simulated acid rain.

발아율을 나타내었다(Fig. 5). 인공 질산비를 처리한 식물에서 채집한 종자는 정상식물의 종자가 100% 발아된 파종 5일 후 91%, 7일 후에는 약 94%의 발아율을 보여주었다. 반면 인공 황산비를 처리한 식물에서 채집한 종자는 파종 5일 후 68%, 7일 후에는 73%의 발아율을 나타내었다. 이러한 결과는 인공 산성비에 계속적으로 노출된 상태에서 생장한 식물에서 형성된 종자의 발아율이 인공 산성비에 노출되지 않고 자란 정상식물의 종자 발아율보다 약 30% 감소되었음을 나타내고 있다. 이는 산성비가 종자형성에도 나쁜 영향을 미쳐서 미성숙 종자를 형성하였으며, 산성비 성분 중에서도 질산보다는 황산성분이 종자 형성에 더 큰 영향을 미쳤음을 보여주고 있다. 산성비의 원인 물질로는 화학에너지로부터 유래하는 유황산화물과 주로 자동차 배기ガ스로부터 유래하는 질소산화물이 있는데, 우리나라 생태계에 직접 영향을 미치는 산성비의 주요 요인으로 유황산화물이 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 유황산화물에 의한 육상 생태계의 피해 분석과 함께 식물 성장에 미치는 영향에 대한 정밀 조사가 필요하다.^[16,24,36] 특히 본 연구 결과에서 나타난 식물의 생장과 잎의 괴사 그리고 발아율 감소는 장기적인 산성비 노출이 일시적인 식물 생장의 억제뿐만 아니라 종자의 발아율을 지속적으로 저하시켜 생태계의 파괴를 초래할 가능성이 높음을 시사해준다. 따라서 산성비에 의한 식물의 반응은 산성비의 원인 물질에 따라 직접적인 요인과 간접적인 요인, 그리

고 단기간에 의한 영향과 장기적인 관점에서의 영향을 종합적으로 조사하는 체계적인 연구가 필요하다고 본다.

4. 결 론

애기장대를 재료식물로 사용하여 식물의 생장에 미치는 인공 산성비의 영향을 알아보고 또한 인공 산성비의 주요 성분인 황산과 질산성분이 식물 생장과 종자 발아에 미치는 영향을 비교 조사하였다. 질산과 황산성분이 모두 첨가된 인공 산성비를 처리한 애기장대 식물은 정상식물에 비하여 줄기와 뿌리 생장이 각각 28%, 30% 감소되었고, 잎 표면에는 많은 괴사반점이 관찰되었다. 한편 인공 질산비를 처리한 식물에서는 정상식물에 비하여 줄기와 뿌리 생장이 각각 약 14%, 17% 감소된 반면, 인공 황산비를 처리한 식물에서는 각각 약 24%, 25% 정도 감소되었다. 애기장대 종자는 중류수배지에서 7일 후 100% 발아되었으나 인공 산성비 배지에서는 80%, 인공 황산비 배지에서는 88%, 인공 질산비 배지에서는 93%의 발아율을 나타내었다. 인공 산성비를 처리한 식물에서 채취한 종자의 발아율을 비교해 보면, 인공 산성비와 인공 황산비를 처리한 식물에서 채취한 식물 종자는 모두 73%, 인공 질산비를 처리하여 채취한 종자는 94%의 발아율을 나타내었다. 이와 같이 성분이 다른 3종류의 인공 산성비를 처리하였을 때 식물 생장과 종자발아율은 질산보다 황산성분에 의해서 더 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2002년도 신라대학교 연구비로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- Park, J. B. and S. Lee, 1999, Growth responses of *Arabidopsis thaliana* exposed to simulated acid rain, *J. Kor. Soc. Hort. Sci.*, 40, 146-151.
- Park, J. B. and S. Lee, 2000, Histological effects of simulated acid rain on the necrosis of *Arabidopsis*, *J. Kor. Soc. Hort. Sci.*, 41, 653-656.
- Evans, L. S. and T. M. Curry, 1979, Differential responses of plant foliage to simulated acid rain, *Am. J. Bot.*, 66, 953-962.
- Kelly, J. M. and R. C. Strickland, 1986, Through-fall and plant nutrient concentration response to simulated acid rain treatment, *Water, Air,*

- and Soil Pollut., 29, 219-231.
- 5) Knittel, R. and J. Pell, 1991, Effects of drought stress and simulated acid rain on foliar conductance of *Zea mays* L., Environ. Exp. Bot., 31, 79-90.
 - 6) Kim, M. R. and W. Y. Soh, 1994, Growth response of *Ginkgo biloba* and *Pinus thunbergii* exposed on simulated acid rain, J. Plant Biology, 37, 93-99.
 - 7) Jacobson, J. S., 1980, Effect of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems, Plenum Press, 151-160pp.
 - 8) Pukett, L. J., 1982, Acid rain, air pollution, and tree growth in southeastern New York, J. Environ. Qual., 11, 376-381.
 - 9) Binns, W. O. and D. B. Redfern, 1983, Acid rain and forest decline in West Germany, Forestry Commission Res. Dev. Paper, 131, 13.
 - 10) Zedaker, S. M., N. S. Nicholas and C. Eagar, 1988, Air Pollution and Forest Decline, IUFRO Press, 334-338pp.
 - 11) Evans, L. S., K. F. Lewin, E. M. Owen and K. A. Santucci, 1986, Comparison of yields of several cultivars of field-grown soybeans exposed to simulated acidic rainfall, New Phytol., 102, 409-417.
 - 12) Ferenbaugh, R. W., 1976, Effect of simulated acid rain *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae), Am. J. Bot., 63, 283-288.
 - 13) Hindawi, I. J., J. A. Rea and W. L. Griffis, 1980, Response of bush bean exposed to acid mist, Am. J. Bot., 67, 168-172.
 - 14) Kim, G. T., 1991, Effect of artificial acid rain on seed germination and seedling growth of several conifers, J. Korean For. Soc., 80, 237-245.
 - 15) Mohamed, M. B., 1978, Response of vegetable crops to acid rain under field and simulated conditions, Ph. D. thesis. Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
 - 16) Lee, J. J., G. E. Neely, S. C. Perrigan and L. C. Grothaus, 1981, Effect of simulated sulfuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops, Environ. Exp. Bot., 21, 171-185.
 - 17) Johnston, J. W. Jr. and D. S. Shriner, 1985, Response of three wheat cultivars to simulated acid rain, Environ. Exp. Bot., 25, 349-353.
 - 18) Larsen, B. R., 1986, *In vivo* buffering of simulated acid rain drops on leaves of selected crops, Water, Air, and Soil Pollut., 31, 401-407.
 - 19) Sharma, Y. K. and K. R. Davis, 1994, Ozone-induced expression of stress-related genes in *Arabidopsis thaliana*, Plant Physiol., 105, 1089-1096.
 - 20) Dustin, C. D. and D. J. Raynal, 1988, Effects of simulated acid rain on sugar maple seedling, root growth, Environ. Exp. Bot., 23, 207-213.
 - 21) Amthor, J. S., 1984, Does acid rain directly influence plant growth? Some comments and observations, Environ. Pollut., 36, 1-6.
 - 22) Shafer, S. R., R. I. Bruck and A. S. Heagle, 1985, Influence of simulated acidic rain on *Phytophthora cinnamomi* and *Phytophthora* root of blue lupine, Phytopathology, 75, 996-1003.
 - 23) Shriner, D. S., 1978, Effects of simulated acidic rain on host-parasite interactions in plant diseases, Phytopathology, 68, 213-218.
 - 24) Singh, A. and M. Agrawal, 1996, Response of two cultivars of *Triticum aestivum* L. to simulated acid rain, Environ. Pollut., 91, 161-167.
 - 25) Lee, J. J. and D. E. Weber, 1979, The effect of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species, Forest Sci., 25, 393-398.
 - 26) Galloway, J. N. and D. M. Whelpdale, 1980, An atmospheric sulphur budget for eastern north America, Atmos. Environ., 14, 409-412.