

산성비가 전동싸리의 생장과 질소 고정 활성에 미치는 영향

송승달 · 정화숙* · 송종석** · 노광수*** · 김인선*** · 서봉보 · 박재홍 · 박태규

경북대학교 자연과학대학 생물학과, 경북대학교 사범대학 생물교육과*,
안동대학교 자연과학대학 생물학과**, 계명대학교 자연과학대학 생물학과***

Effect of Simulated Acid Rain on the Growth and Nitrogen Fixation of *Melilotus suaveolens*

Song, Seung-Dal, Hwa-Sook Chung*, Jong-Suk Song**, Kwang-Soo Rho***,
In-Sun Kim***, Bong-Bo Suh, Jae-Hong Pak and Tae-Gyu Park

Department of Biology, Kyungpook National University, Taegu 701-701, Korea

Department of Biological Education, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea*

Department of Biology, Andong National University, Andong 763-749, Korea**

Department of Biology, Keimyung University, Taegu 704-701, Korea***

ABSTRACT

Various effects of simulated acid rain by HNO₃ and H₂SO₄ with pH 3.2, 4.2 and 5.6 were investigated in *Melilotus suaveolens* Ledeb, a biennial legume dominating the disturbed and poor soil vegetations. The nitric acid treatment of pH 3.2 resulted in 121% increase of the plant height compared to that of pH 5.6 during early growth, although 17% decrease was detected with the sulfuric acids. During 14 days of treatment, leaf biomass and chlorophyll content increased 168% and 133% with pH 3.2 nitric acid rain but decreased 20% and 38%, respectively, with sulfuric acid rain. Nitrogen content in various organs was also determined after 42 days of nitric acid treatment. It increased 480% and 387% by pH 3.2 and 4.2 in leaves, 212% and 214% in stems and 247% and 249% in roots. However, the same treatment with the sulfuric acid showed a considerable reduction in this content, indicating that the nitric acid was a nitrogen source. Nodule formation assayed revealed 15% decrease with pH 3.2 in contrast to 157% increase in pH 4.2, further suggesting an enhancement effect by the additional nitrogen source. Contrary to this, the nodule formation was reduced up to 43~71% by sulfuric acid rains. Specific nitrogen fixation activities of nodules estimated at pH 3.2, 4.2 and 5.6 nitric acid rain were 36.7, 42.8 and 47.3 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$, while those of sulfuric acid rain were 41.1, 82.5 and 111.7 respectively. The total nitrogen fixation analysed with the nitric acid rain exhibited 1 $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ with pH 3.2, 177 with pH 4.2 and 179 with pH 5.6 μet it increased 2, 115 and 286 respectively corresponding to the three sulfuric acid concentrations. Further implications of the simulated acid rain were also discussed in the study.

Key words : Simulated acid rain, HNO₃, H₂SO₄, *Melilotus suaveolens*, Growth, Nitrogen fixation.

서론

대기권의 산성비 또는 산성 강하물은 삼림이나 초지, 농경지 등의 육상생태계와 호수나 하천 등의 수계생태계를 파괴하는 중요한 환경요인으로 되고 있다. 이는 화석연료의 연소와 자동차의 배기가스 및 각종 산업체의 생산과정에서 발생되고, 한편 화학비료, 화산폭발, 산불, 미생물의 유기물 분해활동 등에 의해서 생성되는 질산화물과 황산화물로서 대기 중에 배출되어 확산 이동하게 된다. 산성비는 1950년대 이후 유럽에서 대기환경문제로서 대두되었고, 우리나라에서도 1980년대 이후 각종 대기오염이 증가하여 환경파괴가 확산됨으로써 많은 연구자들에 의해 산성비의 영향과 대책에 대한 연구가 진행되고 있다(김 등 1985, 정 등 1991, 이 등 1993, 장 등 1993, Rhyu *et al.* 1994).

생태계에 대한 산성비의 영향은 기후환경에 따라 광역적이며 장기적으로 진행하여 많은 수계생태계와 육상생태계에 심각한 피해를 초래하게 되며, 최근에는 미국 동부의 호수 중 56%와 북유럽 스웨덴의 호수중 22%가 산성화되어 어류 등 수중생물이 사멸되었다고 보고되고 있다(Chalson and Rodhe 1982). 육상생태계에서는 토양의 침착력과 중화능력에 따라 차이가 있으나, 가스나 미립자가 강하하는 건성침착과 강수에 의한 습성침착에 의해 토양이 산성화되고 미생물의 활성을 감소시켜 생태계의 물질순환에 불균형을 초래한다. 또한 부식층의 영양염의 세탈이 가속화되고 비옥도가 감소하여 식물뿌리의 무기물 흡수를 저해하며 생산성을 저하시키고, 특히 유독성의 알루미늄과 망간이 다량 용출되어 식물생장을 저해하게 된다(Porter and Sheridan 1981, Johnston *et al.* 1982, Smith *et al.* 1991, 이 등 1993a, b, 최 등 1993, 김 과 소 1994, Rhyu and Kim 1994a, 유와 김 1993, 김 1994).

식물체에 대한 산성비의 직접적인 영향에 대한 연구로서는 자작나무나 소나무의 잎의 생산력 감소, 전나무의 종자 발아력 저해, 참나무잎의 왁스층의 파손, 영양염류(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+})의 세탈 등을 일으키고, pH 3 이하의 산성비에서는 엽록소를 파괴하여 엽반점의 출현 및 광합성의 암반응이 저해되는 것으로 알려지고 있다(Lee *et al.* 1981, Neufeld *et al.* 1985, Percy 1986, Reich *et al.* 1987, 이 등 1993, Rhyu and Kim 1994b). 한편 식물의 종류에 따라서는 산성비로부터 황산염과 질산염을 식물체 내에 공급함으로써 엽록소 함

량을 증가시키고, 생산성을 증가시킨다는 보고도 있다(Feder and Campbell 1968, Ferenbaugh 1976, Lee and Weber 1979, Irving and Miller 1980, Raynal *et al.* 1982, 김 1992, 이 등 1993b).

최근 산업단지나 시가지 등의 각종 대기오염 및 산성비에 대한 감수성 식물이나 내성의 식물종을 선별 이용함으로써 대기오염에 대한 정화 및 개선을 목적으로 하는 연구가 축적되고 있으며, 이들 연구는 주로 침엽수를 위주한 수목에 치중되고 있다(강 등 1993, 고 등 1993). 각종 파괴된 생태계에서 우점하고 식생의 천이과정에서 선구적인 역할을 담당하는 1~2년생 초본류인 콩과식물의 생장과 질소고정 기능에 대한 산성비의 영향을 구명하는 것은 이들 생태계의 식생발달과 환경개선에 대한 기초적 이해를 증진하는데 매우 중요하다고 생각된다. 본 연구는 교란된 생태계나 비교적 오염된 지역에 주로 출현하는 2년생 콩과식물인 전동싸리의 생육과정을 통해 식물체의 생장 특성과 질소고정 활성에 미치는 질산화물과 황산화물에 의한 인공 산성비의 영향을 규명하고자 한다.

재료 및 방법

전동싸리의 생육과 산성비의 처리

하천변이나 해안사구 및 파괴된 환경의 나지 등에 분포하고 근류균 *Rhizobium* sp.와 공생하는 근류를 형성하여 대기질소를 고정함으로써 토양의 식생환경을 개선하고 천이를 촉진하는 선구식물인 중국 원산의 콩과식물인 전동싸리(*Melilotus suaveolens* Ledeb.)를 재료식물로 하였다. 경북대학교 구내 및 팔공산 등지에서 야생하는 전동싸리 군락에서 충실한 종자를 채집하여 0.1% $HgCl_2$ 에 10분간 표면살균한 후 멸균 증류수로 세척하여 30℃ 항온기에서 48시간 발아시키고 뿌리가 1~2 cm로 신장되었을 때 직경 10 cm의 화분에 5개체씩 이식하여 성장실에서 모래:질석을 3:1로 배합하여 사경재배하였다. 성장실의 광도와 광주기는 20,000 lux와 명암 14/10 시간으로 조절하였고, 온도와 상대습도는 각각 $25 \pm 5^{\circ}C$ 와 70%로 유지하였다. 배양액은 무질소 Hoagland 용액을 이용하였고 근류균의 접종은 이식 직후와 1주일 후에 각각 서식토양의 진탕 상층액(1 g soil/2.5 mL H_2O)을 식물체당 20 mL로 접종하였다.

유식물은 두 그룹으로 분리하여 산성비 처리는 각각 HNO_3 과 H_2SO_4 에 의해 pH 3.2, 4.2 및 5.6으로 조절한

Hoagland 용액의 인공 산성비를 화분당 매일 50 mL 씩 5분간 분무기로 엽면 살포하였다. 인공산성비 처리후 14일째부터 1주 간격으로 성장상태가 균일한 3개체를 선별하여 각 처리별로 생장의 변화를 측정하였다. 분석용 식물체는 신장 생장을 측정한 후 각 기관별로 분리하여 생체량을 측정하고 70°C 건조기에서 3일간 건조시켜 건량을 측정하였다. 잎의 엽록소 함량은 DMSO (dimethyl sulfoxide)법으로 추출하고 spectrophotometer에서 흡광도(A₆₆₃ 및 A₆₄₅)를 측정하여 Arnon식으로 정량하였다(Arnon 1949, Hiscox and Israelstam 1979). 각 기관별 시료는 분말화하여 micro-Kjeldahl 법으로 질소 함량을 측정하였다(Song and Kim 1992).

질소고정 활성의 분석

인공 산성비 처리에 따른 전동싸리의 생육 과정에서 근류 형성량의 변화를 측정하고 근류의 질소고정 비활성의 변화를 ARA(acetylene reduction assay)법으로 다음과 같이 분석하였다. 근류 일정량을 신선한 상태로 10 mL의 반응병에 넣고 30°C에서 10분간 전처리한 후 아세틸렌(C₂H₂) 가스를 10% 용적으로 주입하여 30분 내지 1시간 반응시키면서 1 mL 주사기로 가스시료 0.5 mL를 채취하여 Porapak R Column (182cm×0.32cm)을 이용한 Gas chromatograph (Shimadzu 8A)에서 불꽃 이온화 검출기(FID)에 의해 환원된 에틸렌(C₂H₄)량을 정량하여 질소고정 활성으로 산출하였다(Patterson *et al.* 1979).

결과 및 고찰

산성비에 의한 전동싸리의 성장 변화

인공 산성비의 처리구배에 따른 전동싸리 유식물의 신장 생장과 엽록소 함량 및 토양 pH의 변화는 Table 1과 같다. 질산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 생육 14일째에 신장생장은 각각 5.1, 4.6 및 4.2 cm 였고, 생육 42일째에는 각각 7.2, 10.4 및 11.2 cm로서 pH 3.2와 4.2의 산성비 처리구에서 pH 5.6 처리구에 비해 각각 초기 생장의 122%와 110% 촉진을 보였고 후기에는 64%와 94%로 감소하였다. 황산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서는 14일째에 신장생장이 각각 3.0, 3.9 및 3.6 cm 였고 처리 42일째에는 각각 6.5, 7.6 및 8.5 cm로서 pH 3.2처리구는 pH 5.6에 비해 83~76%로 생장이 감소되었다. 이는 소나무와 리기다소나무에서 pH 3.0의 산성비 처리시에 나타나는 초기 신장 생장의 촉진 현상과 유사한 결과였다(김 1992, Rhyu and Kim 1994a). 그러나 김과 소(1994)는 12주간 인공산성비로 처리한 은행나무와 곰솔의 유식물의 신장 생장은 pH 변화에 대해 유의한 차이를 보이지 않았다고 보고하였다.

인공산성비 처리에 따른 전동싸리 잎의 엽록소 함량의 변화는 질산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 생육 14일째에 각각 2.23, 1.91 및 1.68 mg Chl·g fw leaf⁻¹ 였고, 42일째는 각각 3.89, 3.80 및 2.96 mg Chl·g fw leaf⁻¹ 로서 pH 3.2와 4.2 처리구에서 pH 5.6에 비해 각각 초기에 133%와 114% 그리고 후기에 131%와 128%로서 증가를 보였다. 이는 Ferrelbaugh (1976)가 지적한 바와 같이 질산화물이 식물체에

Table 1. Changes of plant height, chlorophyll contents and soil pH during growth period of *Melilotus suaveolens* treated with simulated acid rain

Treatments	Nitric acid						Sulfuric acid				
	pH	Days					Days				
		14	21	28	35	42	14	21	28	35	42
Height (cm)	3.2	5.1	6.3	6.6	7.0	7.2	3.1	4.3	5.1	5.5	6.5
	4.2	4.6	6.1	6.4	8.4	10.4	3.8	5.0	5.8	6.4	7.6
	5.6	4.2	5.2	6.3	8.6	11.2	3.6	5.1	5.9	6.1	8.6
Chlorophyll (mg/g. FW)	3.2	2.23	2.60	2.19	3.93	2.11	1.23	1.90	2.97	2.23	2.81
	4.2	1.91	2.16	2.88	3.79	3.90	1.36	1.65	2.92	2.40	2.54
	5.6	1.68	2.23	2.93	2.81	2.94	2.00	2.28	3.69	2.73	2.60
Soil pH	3.2	6.63	6.68	7.04	6.77	6.63	5.88	6.01	6.63	6.24	5.81
	4.2	6.17	6.57	7.17	7.13	6.99	6.38	6.19	6.80	6.93	6.93
	5.6	6.34	6.58	7.23	7.31	6.95	6.18	7.20	7.13	7.01	7.03

대해 질소원을 제공하여 엽록소 합성을 촉진시킨 것으로 사료된다. 황산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 엽록소 함량의 변화는 생육 14일째에 각각 1.23, 1.36 및 1.99 mg Chl · g fw leaf⁻¹였고, 28일째에는 각각 2.97, 2.92 및 3.69 mg Chl · g fw leaf⁻¹, 42일째에는 2.81, 2.54 및 2.60 mg Chl · g fw leaf⁻¹로서 pH 3.2와 4.2 처리구에서는 pH 5.6에 비해 각각 61~80%와 68~80%로 감소하였고 수종의 침엽수에서 황산화물에 의한 산성비 처리에서 보고된 엽록체 형성 저해의 결과와 일치하였다(Lee *et al.* 1981, 이 등 1993b, 김과 소 1994).

인공 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리에 따른 토양의 pH 변화는 처리 42일째에 질산성 산성비 처리구는 각각 pH 5.63, 5.99 및 5.95였고 황산성 산성비 처리구는 각각 pH 5.81, 6.93 및 7.03으로 변화하여 대체로 중성화되었으나 질산성에서 약간 산성의 경향을 보였다.

인공 산성비 처리에 따른 각 기관별 생체량의 변화는 Fig. 1과 같다. 질산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 생육 21일째의 엽생장은 각각 32, 28 및 19 mg dw · plant⁻¹로서 pH 3.2와 4.2의 산성비 처리구에서 pH 5.6 처리구에 비해 각각 168%와 147%로서 현저히 증가되었다. 이는 질산성 인공 산성비가 식물체에 대해 질소원으로 이용된 효과로 사료되며 대두와 당단풍에서도 이와 유사한 엽생장 촉진의 결과가 보고되었다(Feder and Campbell 1968, Ferenbaugh 1976, Lee and Weber 1979, Irving and Miller 1980, Raynal *et al.* 1982). 그러나 처리 28일 이후에는 강산성에서 생장이 억제되었고 처리 42일째에 pH 3.2, 4.2와 5.6 처리구의 잎은 각각 37, 129 및 135 mg dw · plant⁻¹, 줄기는 각각 33, 77 및 63 mg dw · plant⁻¹, 뿌리는 각각 29, 73 및 69 mg dw · plant⁻¹로서 pH 3.2의 산성비에서 pH 5.6에 비교하여 각 기관별로 잎 73%, 줄기 48% 및 뿌리 58%의 저해를 보였다. 황산성 산성비 처리에 따른 생체량의 변화는 처리 14일째에 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 엽생장은 각각 8, 9 및 10 mg dw · plant⁻¹였고, 줄기는 각각 7, 7 및 7 mg dw · plant⁻¹, 뿌리는 각각 5, 6 및 7 mg dw · plant⁻¹로서 pH 3.2의 강한 산성에서 잎과 뿌리는 각각 20%와 30%의 저해를 보였다. 처리 42일째에는 엽생장이 각각 50, 110 및 114 mg dw · plant⁻¹, 줄기에서 35, 44 및 62 mg dw · plant⁻¹, 그리고 뿌리에서 86, 74 및 87 mg dw · plant⁻¹로서 pH 3.2의 강한 산성비에서 pH 5.6 처리구

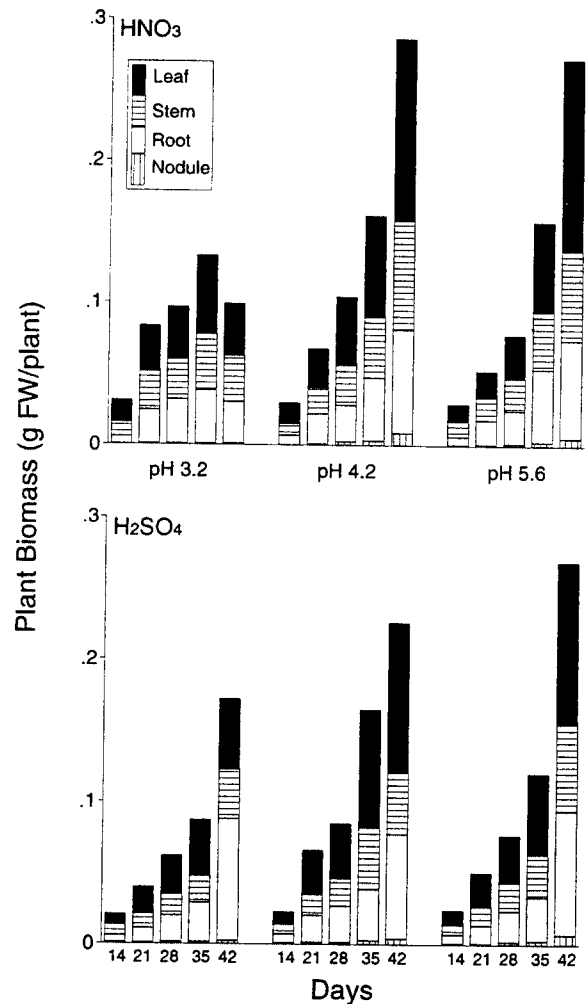


Fig. 1. Changes of fresh weight of *M. suaveolens* seedlings treated with the simulated acid rain of pH 3.2, 4.2 and 5.6 by HNO₃ and H₂SO₄.

에 비해 잎과 줄기는 각각 57%와 44%의 저해를 보였다.

인공 산성비 처리에 따른 전동쌍리의 각 기관별 질소 함량의 변화는 Fig. 2와 같다. 질산성 산성비에 의한 pH 3.2와 4.2 처리구의 각 기관별 질소 함량은 pH 5.6 처리구에 비해 처리 14일째에 각각 잎에서 70%와 84%, 줄기에서 67%와 46%로 감소하였고 뿌리에서는 103%와 97%로서 큰 변화가 없었으나, 처리 42일째에는 각각 잎에서 480%와 387%, 줄기에서 212%와 214%, 뿌리에서 247%와 249%로서 산성에서 크게 증가하였다. 이는 정 등(1991)이 소나무와 개나리에서 pH 3.2, 4.0 및 5.5로 처리하였을 때 강한 산성에서 질소함량이 증가한다고 보고한 결과와 일치하였다. 그러

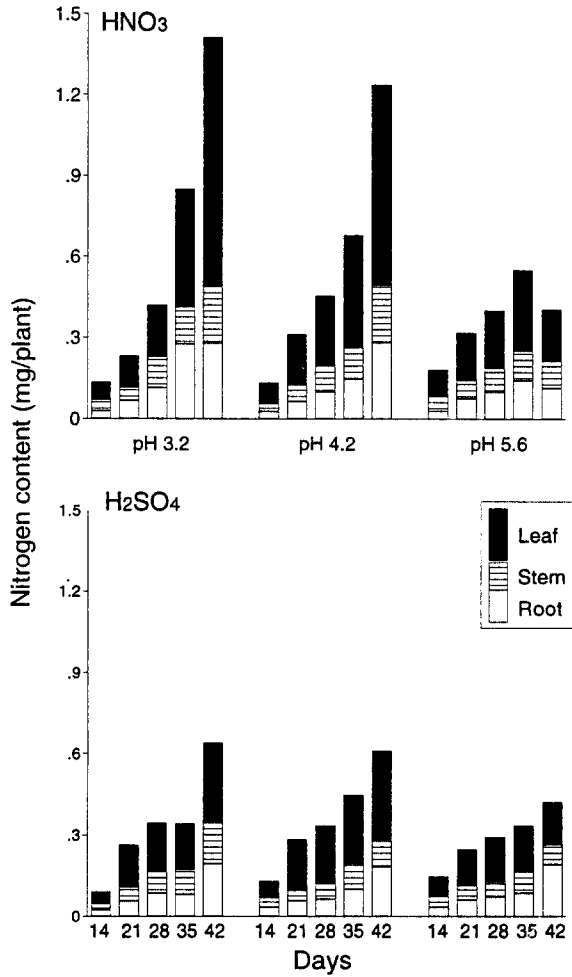


Fig. 2. Changes of nitrogen contents of *M. suaveolens* seedlings treated with the simulated acid rain of pH 3.2, 4.2 and 5.6 by HNO₃ and H₂SO₄

나 황산성 산성비에 의한 pH 3.2와 4.2 처리구는 pH 5.6 처리구에 비해 처리 14일째에 앞에서 각각 60%와 84%, 줄기에서 각각 58%와 90% 로서 감소하였고, 뿌리에서는 각각 71%와 113%로서 변화를 보였으며, 처리 42일째에는 앞에서 각각 65%와 73%로서 크게 감소한 대신 줄기에서는 각각 206%와 129%로 증가하였고 뿌리에서 각각 102%와 95%로 변화하였다.

산성비에 의한 질소고정 활성의 변화

인공 산성비 처리에 따른 전동싸리 유식물의 근류 형성량, 질소고정 비활성 및 총 질소고정량의 생육 단계별 변화는 Fig. 3과 같다. 질산성 산성비에 의한 pH

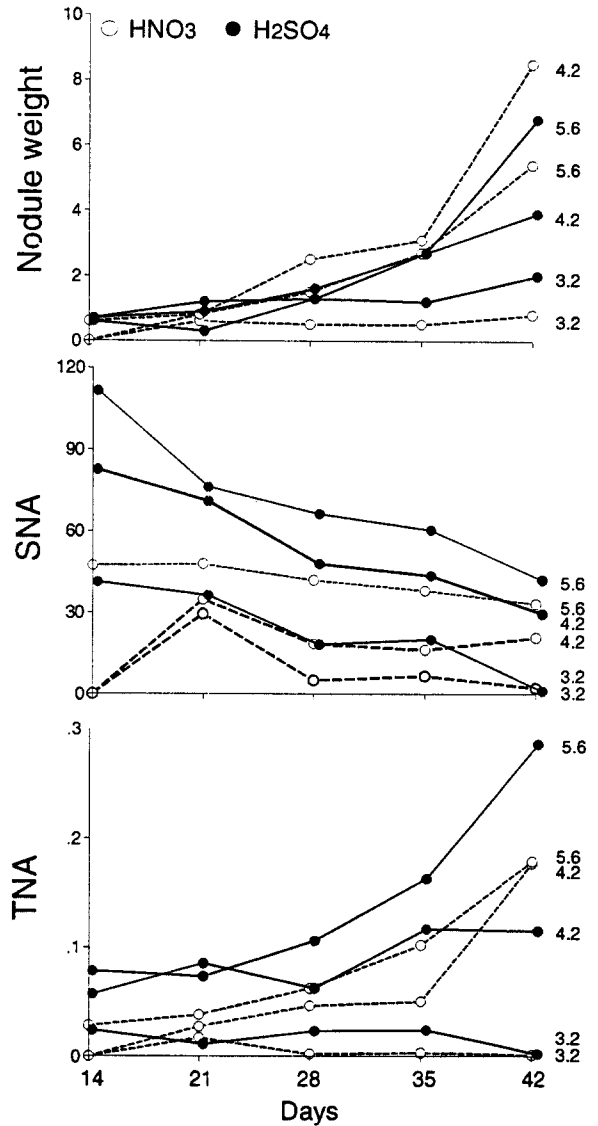


Fig. 3. Changes of nodule fresh weight(mg FW), ARA ($\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \text{ g FW nodule}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) and TNA ($\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \text{ g plant}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) of *M. suaveolens* seedlings treated with the simulated acid rain of pH 3.2, 4.2 and 5.6 by HNO₃ and H₂SO₄.

3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 14~21일째부터 근류가 형성되어 42일째에 각각 0.8, 8.5 및 5.4 mg nodule · plant⁻¹로서 pH 3.2의 강한 산성비에 의해 근류 형성이 pH 5.6에 비해 15% 이하로서 현저히 저해되었으나, pH 4.2에서는 157%로 촉진되었다. 질산성 산성비 처리에서 약한 산성에서는 근류 형성량이 촉진된 것은 식물체에 대한 질소분의 공급원 효과로 생각되며 이는

Srivastava and Ormrod (1986)와 Jessop 등(1984)이 1~3 mM NO₃⁻ 처리시 무질소 처리구에 비해 근류의 형성량이 다소 촉진되었다는 보고와 일치하였다. 그러나 황산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서는 14일째 부터 근류가 형성되어 처리 42일째에 근류 형성량은 각각 2.0, 3.9 및 6.8 mg nodule · plant⁻¹로서 pH 3.2와 4.2의 산성비 처리구는 pH 5.6에 비해 각각 29%와 57%로 근류 형성이 크게 저해되었다.

질산성 산성비 처리에 따른 근류의 질소고정 비활성의 변화는 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 생육초기인 14~21일째에 각각 최대치 36.7, 42.8 및 47.3 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 에서 점차 감소하여 처리 28일째는 각각 5.0, 18.4 및 41.9 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 였고 42일째는 2.2, 20.8 및 33.2 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 로서 pH 3.2와 4.2는 각각 pH 5.6에 비해 7%와 63%로서 특히 강한 산성의 pH 3.2에서 현저한 활성의 저해 현상을 보였다. Lawn과 Brun (1974)도 콩의 질소고정에 대한 질소원 이용의 영향분석에서 유사한 결과를 보고하였다. 황산성 산성비에 의한 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 14일째의 질소고정 활성은 각각 최대치 41.1, 82.5 및 111.7 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 였고, 처리 42일째는 각각 1.1, 29.6 및 42.1 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 로서 pH 3.2와 4.2의 산성비 처리구는 pH 5.6 처리구에 비해 활성이 각각 4%와 60%이하로 급격히 감소하였다.

식물체당 총 질소고정량은 생육 과정에 따라 근류 형성량의 증가와 비활성의 감소에 의해 변화하였고 질산성 산성비의 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서는 42일째에 각각 1, 177, 179 nmol C₂H₄ · plant⁻¹ · h⁻¹로서 강산성의 pH 3.2 처리구는 pH 5.6 처리구에 비해 0.6%에 불과한 질소고정량을 보였으나 pH 4.2 처리구는 촉진된 근류 형성으로 인해 높은 질소고정량을 보였다. 황산성 산성비 처리의 식물체당 총 질소고정량은 처리 42일째에 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 각각 2, 115 및 286 nmol C₂H₄ · plant⁻¹ · h⁻¹로서 pH 3.2와 4.2 처리구는 pH 5.6 처리구에 비해 각각 0.7%와 40%로서 질소고정량의 현저한 감소를 나타내었다.

적 요

척박하고 교란된 토양 환경에서의 1차 초지군락 형성에 있어서 우점종이 되고 있는 2년생 콩과식물인 전농싸리의 생장과 질소고정에 미치는 질산성 및 황산성의

인공 산성비 처리의 영향을 분석하였다. 신장 생장은 질산성 산성비에 의한 pH 3.2 처리구에서 pH 5.6 처리구에 비해 생육초기에 121% 촉진한 반면 황산성 산성비 처리구에서는 83% 저해되었다. 엽생장과 엽록소 함량은 질산성 산성비의 pH 3.2 처리구에서 14일째에 각각 168%와 133%로 증가되었으며, 황산성 산성비에서 각각 80%와 62%로 억제되었다. 질산성 산성비의 pH 3.2와 4.2 처리구에서 잎, 줄기 및 뿌리의 질소함량은 질소원의 이용효과에 의해 pH 5.6에 비해 42일째에 각각 480%와 387%, 212%와 214%, 247%와 249%로서 크게 증가하였으나, 황산성 산성비에서는 각각 65%와 73%, 206%와 129%, 102%와 95%로 변화를 보였다. 근류 형성은 처리 42일째에 질산성 산성비의 pH 3.2 처리구에서 pH 5.6에 비해 85% 저해되었으나, pH 4.2 처리구에서는 157%로 촉진되었는데, 황산성 산성비에서는 각각 71%와 43% 저해되었다. 근류의 질소고정 비활성은 질산성 산성비 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 각각 36.7, 42.8 및 47.3 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 였고, 황산성 산성비에서는 각각 41.1, 82.5 및 111.7 $\mu\text{mol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{fw nodule} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 변화하였다. 식물체당의 총 질소고정량은 처리 42일째에 질산성 산성비 pH 3.2, 4.2 및 5.6 처리구에서 각각 1, 177 및 179 nmol C₂H₄ · plant⁻¹ · h⁻¹였고, 황산성 산성비에서는 각각 2, 115 및 286 nmol C₂H₄ · plant⁻¹ · h⁻¹였다.

인 용 문 헌

- 강인구, 한의정, 신찬기, 한진석, 최덕일, 김상균, 이창기, 권정수, 최수언, 박태술. 1993. 대기오염과 산성비에 의한 피해조사 및 평가에 관한 연구(Ⅲ-I). 국립환경연구원보 15: 109-122.
- 고강석, 강인구, 이우석, 이준배, 서인항, 신정섭, 최덕일, 배정오, 이돈구. 1993. 환경개선을 위한 정화식물 개발에 관한 연구(Ⅱ). 국립환경연구원보 15: 25-39.
- 김갑태. 1992. 인공산성우가 수종의 종자발아, 유근생장 및 묘목생장에 미치는 영향. 한국임학회지 81: 30-39.
- 김명환, 소용영. 1994. 인공산성비 처리에 대한 은행나무와 곶술의 생장반응. 한국식물학회지 37: 93-99.
- 김태욱, 이경재, 김준선. 1985. 여천공업단지의 대기오염이 곶술에 미치는 영향. 대기보전학회지 1: 25-32.
- 유태철, 김준호. 1993. 인공산성 빗물로 인한 잎으로 부터의 양이온 세탈. 한국생태학회지 16: 409-416.
- 이우석, 배정오, 고강석, 최덕일, 이준배, 신정섭, 서민한,

- 이상협, 한승우, 강인구, 김준호, 김갑태, 김은식, 이웅상. 1993a. 대기오염과 산성비에 의한 피해조사 및 평가에 관한 연구(Ⅲ-2). 국립환경연구원보 15: 41-52.
- 이우석, 배정오, 고강석, 최덕일, 이준배, 신정섭, 서민한, 이상협, 한승우, 강인구, 김준호, 김갑태, 김은식, 이웅상. 1993b. 대기오염과 산성비에 의한 피해조사 및 평가에 관한 연구(Ⅲ-3). 국립환경연구원보 15: 53-62.
- 이흥재, 이민호, 김동현, 김성수, 유정기, 김용훈, 임수길. 1993. 대기오염 및 산성비에 의한 피해조사 및 평가에 관한 연구(Ⅲ-4). 국립환경연구원보 15: 315-328.
- 장남기, 이윤상, 이수진. 1993. 배기가스로 만든 인공산성우에 의한 식물의 형태적 증상. 한국생태학회지 16: 17-26.
- 정성웅, 배정오, 고강석, 최덕일, 허인애, 김동호, 이준배, 이유미, 김준호, 김갑태, 김은식. 1991. 대기오염과 산성비에 의한 피해조사 및 평가에 관한 연구(I-1). 국립환경연구원보 13: 61-71.
- 최덕일, 이우석, 신정섭, 김준호, 이규송, 황보준권, 이창석, 길지현. 1993. 대기오염 및 산성비에 대한 내성종 및 Bioindicator의 선별 육종 개발(I). 국립환경연구원보 15: 425-431.
- Arnon, D.J. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiol. 24: 1-15.
- Chalson, R.J. and H. Rodhe. 1982. Factors controlling the acidity of natural rain water. Nature 295: 683-685.
- Feder, W.A. and F.J. Campbell. 1968. Influence of low levels of ozone of flowering of carnations. Phytopathology 58: 1038-1039.
- Ferenbaugh, R.W. 1976. Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae). Am. J. Bot. 63: 283-288.
- Hiscox, J.D. and G.F. Israelstam. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. Can. J. Bot. 57: 1332-1334.
- Irving, P.M. and J.E. Miller. 1980. Productivity of field grown soybeans exposed to acid rain and sulfurdioxide alone and in combination. J. Environ. Qual. 10: 473-478.
- Jessop, R.S., S.J. Hetherington and E.H. Hoult. 1984. The effect of soil nitrate on the growth, nodulation and nitrogen fixation of chickpeas (*Cicer arietinum*). Plant and Soil 82: 205-214.
- Johnston, J.W.Jr., D.S. Shriner, C.I. Harer and D.M. Lodge. 1982. Effect of rain pH on senescence, growth and yield of bush bean. Environ. Exp. Bot. 22: 329-337.
- Lawn, R.J. and W.A. Brun. 1974. Symbiotic nitrogen fixation in soybeans. I. Effect of photosynthetic source-sink manipulations. Crop Sci. 14:11-16.
- Lee, J.J., G.E. Neely, S.C. Perrigan and L.C. Grethaus. 1981. Effect of simulated sulfuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops. Environ. Exp. Bot. 21: 171-185.
- 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. 2: 393-398.
- Neufeld, H.S., J.A. Jernstedt and B.L. Haines. 1985. Direct foliar effects of simulated acid rain. New Phytol. 99: 389-405.
- Patterson, R.F., C.D. Raper Jr. and H.D. Gross. 1979. Growth and specific nodule activity of soybean during application and recovery of a leaf moisture stress. Plant Physiol. 64: 551-556.
- Percy, K. 1986. The effects of simulated acid rain on germinative capacity, growth and morphology of forest tree seedlings. New Phytol. 104: 473-484.
- Porter, R.J. and R.P. Sheridan. 1981. Inhibition of nitrogen fixation in alfalfa by arsenate, heavy metals, fluoride and simulated acid rain. Plant Physiol. 68: 143-148.
- Raynal, D.J., J.R. Roman and W.M. Eichenlaub. 1982. Response of tree seedlings to acid precipitation. II. Effects of simulated acidified canopy throughfall on sugar maple seedling growth. Environ. Exp. Bot. 22: 385-392.
- Reich, P.B., A.W. Schoettle, H.F. Stroo, J. Troiano and R.G. Amundson. 1987. Effects of ozone and acid rain on white pine (*Pinus strobus*) seedlings grown in five soils. I. Net photosynthesis and growth. Can. J. Bot. 65: 977-987.

- Rhyu, T.C., K.D. Kim and J.H. Kim. 1994. Growth decline and abnormal vertical distribution of fine roots of pitch pine in Seoul metropolitan area. Korean J. Ecol. 17: 261-275.
- Rhyu, T.C. and J.H. Kim. 1994a. Growth response to acid rain, Mg deficiency and Al surplus, and amelioration of Al toxicity by humic substances in pitch pine seedlings. J. Plant Biol. 37: 301-309.
- Rhyu, T.C. and J.H. Kim. 1994b. Growth decline of pitch pine caused by soil acidification in Seoul metropolitan area. Kor. J. Ecol. 17: 287-297.
- Smith, C.R., B.L. Vasilas and W.L. Banwart. 1991. Physiological response of two soybean cultivars to simulated acid rain. New Phytol. 119: 53-60.
- Song, S.D. and B.I. Kim. 1992. Changes of nitrogen fixation activity and environmental factors of growth in *Lespedeza bicolor* Turcz. Korean J. Bot. 35: 317-322.
- Srivastava, H.S. and D.P. Ormrod. 1986. Effects of nitrogen dioxide and nitrate nutrition on nodulation, nitrogenase activity, growth and nitrogen content of bean plant. Plant Physiol. 81: 737-741.

(1997년 11월 27일 접수)