

산성강하물이 털깃털이끼(*Hypnum plumaeforme*)의 질산 환원효소와 광합성에 미치는 영향

이점숙 · 임병선* · 임현빈*

군산대학교 생물학과, 목포대학교 생물학과*

The Effect of Acidic Deposition on Nitrate Reductase Activity and Photosynthesis of *Hypnum plumaeforme*

Lee, Jeom-Sook, Byung-Sun Ihm* and Hyun-Bin Ihm*

Department of Biology, Kunsan National University

Department of Biology, Mokpo National University*

ABSTRACT

The acidic deposition (wet) was collected at three different locations; representative industrial (Kun-Jang industrial areas), semiindustrial (Kunsan City) and nonindustrial (Daeya areas) region between March, 1991 and June, 1993. Samples were analyzed for major chemical components along with pH. Also the responses of *Hypnum plumaeforme* to the acidic deposition adjusted to pH 4.6, 3.6 and 2.6 with 1:4 molar ratio of nitric to sulfuric acid were investigated.

Seasonal variation of pH showed the lowest in early spring and the highest in summer. The annual mean concentrations of SO_4^{2-} , NO_3^- and NH_4^+ were 2.94 (81.0%), 0.48 (13.2%) and 0.21 (5.78%) mg/l in industrial region and 0.61 (64.21%), 0.25 (26.3%) and 0.9 (9.5%) mg/l in nonindustrial region, respectively. SO_4^{2-} contents of industrial region was 4 times higher than those of nonindustrial region. The ratio of SO_4^{2-} to NO_3^- was 4.75~7.35 in industrial region and 0.69~6.36 in nonindustrial region. The acidic deposition near industrial region was associated with excess ions, especially SO_4^{2-} . Nitrate reductase activity(NRA) of mosses was inhibited by acidic deposition in both regions. The time required for the maximum NRA induction by 2mM KNO_3 was shortened in mosses collected from industrial region. Photosynthesis of *H. plumaeforme* began to decrease with acidic deposition by pH below 4.6, and was completely inhibited at pH 2.6 in both regions. Water potential of mosses treated with acidic deposition was almost constant during 18 days, however after withholding the supply of acidic deposition, it was rapidly decreased.

Key words: Acidic deposition, Industrial and nonindustrial region, *Hypnum plumaeforme*, Nitrate reductase activity, Photosynthesis, Water potential.

* 이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지방대학육성과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

서론

산성강하물(acidic deposition)은 대도시나 공단에서 화석연료의 사용으로 발생한 대기중의 오염물질이 도시나 공단 주변 뿐만 아니라 오염원으로 부터 멀리 떨어진 곳까지 영향을 미쳐 심각한 환경문제를 일으키고 있다.

산성강하물의 주원인 물질은 황과 질소산화물로, 이들의 조성비는 지역적인 차이를 보이며 (Tang *et al.* 1986), 그 강하량과 화학적 조성은 대기오염의 2차적인 피해를 규명하는데 중요시 되고 있다(Erisman *et al.* 1989). 최근 대기 중의 황산화물은 유럽 각국이 황함량이 낮은 화석연료를 사용하고 적극적인 개선 노력으로 계속 감소되고 있으나(Robert *et al.* 1983), 대기와 빗물 중의 질소산화물(NO_x)과 암모니아(NH_4^+)는 도시의 자동차 배기가스, 농촌의 집약적인 경작 및 축산폐기물로 인하여 크게 증가하고 있다(Salmon *et al.* 1978, Brimblecombe and Stedman 1982, Erisman *et al.* 1989). 대기중으로부터 질소원의 유입량이 증가하면서 과거에 질소원이 제한요인이 되었던 생태계는 식물의 생장이 일시적으로 촉진되나 점차로 질소원이 포화상태에 이르게 되면 식물의 성장을 억제하므로 산성강하물 중의 질소원의 증가에 대한 관심이 고조되고 있다(Heil and Diemont 1983, Marie and Ormrod 1984, Bobbink *et al.* 1988, Lee *et al.* 1989, Lee 1993).

지금까지 산성강하물에 대한 연구는 고등식물의 잎을 대상으로 양이온 세탈과 흡수 및 성장반응(Evans and Curry 1979, Chappelka *et al.* 1985)이 주로 이루어졌으나 고등식물 잎은 산성강하물을 중화시키는 소수성인 큐티클층이 발달되어 있고, 빗물의 화학적 조성을 변화시키므로 산성강하물의 직접적인 피해를 관찰하기 어려웠다(Adams and Hutchinson 1984, Hutchinson *et al.* 1986). 선태식물은 큐티클층이 결여되어 대부분 지상부로 부터 영양염류를 흡수하기 때문에 산성강하물에 대하여 민감한 반응을 보일 것으로 예상되나 이에 관한 연구는 미진한 상태이다.

Hutchinson과 Scott(1988)는 산림내에서 5년동안 산성강하물을 처리하여 깃털이끼류인 *Pleurozium schreberi*의 피도, 성장, 광합성을 측정한 바 있고, Press 등(1986)과 Lee(1988)는 산성강하물중의 질소원 증가가 *Sphagnum*속의 질산환원효소의 활성에 미치는 영향을 조사한 바 있으나 국내에서는 이 분야에 관한 연구가 전혀 없는 실정이다.

본 연구는 공단과 비공단지역에서 계절에 따른 산성강하물의 pH와 화학적 조성의 변화를 측정하여 오염 정도를 파악하고, 대기중으로 부터 오는 산성강하물이 공단과 비공단 지역에 생육하는 털깃털이끼(*Hypnum plumaeforme*)의 NRA, 외부로 부터 질소원의 공급에 의한 그 유도 및 광합성과 수분포텐셜에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

재료 및 방법

빗물의 채취는 공단지역(군장 공단)과 이곳으로부터 남동쪽으로 각각 약 5 km 떨어진 준공단 지역(군산대학) 및 약 20 km 떨어진 옥구군 발산면 비공단지역(대야농촌지역)에서 1991년 3월부터 1993년 6월까지 월별로 실시하였고, 다만 1월과 2월 및 그 밖의 일부 달은 빗물의 채취가 불가능하여 제외시켰다. 또한 이는 지상으로 부터 약 6~20 m 높이의 건물옥상에서 바닥으로 부터 1.5 m 높이에 2차 증류수로 2회 씻은 플라스틱 깔대기와 채수통을 설치하여 우기동안 이루어졌다. pH는 빗물을 채취한 즉시 실험실로 운반하여 pH meter(Orion-520A)로 측정하였다. 빗물의

분석용 시료는 공단과 비공단 지역에서 1992년 7월부터 1993년 6월까지 1년동안 수집하여 Whatman-41 filter paper로 여과한 후 측정전까지 4°C 냉장고에 보관하였다. NO_3^- 은 Cadmium reduction법, NH_4^+ 는 Prenate법, 전기전도는 S-C-T meter (YSI-33)로 각각 측정하였고, SO_4^{2-} 는 10 ml의 시료에 25% HNO_3 5 ml를 넣고 여과하여 50% acetic acid 5 ml, H_3PO_4 1 ml, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 g을 넣고 10회 정도 흔들어 혼합한 후 10 ml gum acacia 용액을 다시 넣고 50 ml로 정용한 다음 1.5시간 후 470 nm에서 흡광도를 측정하였다. 또한 빗물의 pH와 전기전도도(EC), NO_3^- , NH_4^+ 및 SO_4^{2-} 와의 상관관계는 단순 상관관계식(Choi 1981)으로 구하였다.

식물재료는 공단지역(군장공단 인근 월명산 서사면 주변)과 비공단지역(옥구군 발산면 인근 고봉산 주변)에 공통적으로 분포하는 털깃털이끼를 선정하였다. 채집한 털깃털이끼를 실험실로 운반한 후 줄기 끝으로부터 4cm의 길이로 절단하고 플라스틱 용기(직경 20cm, 높이 9cm)안의 그물망 위에 자연상태와 유사한 밀도로 이식하였다. 식물 재배는 1/10로 희석한 Long Ashton 용액을 매일 2ml씩 살포하여 20일동안 생육실(Conviron, SH-10)내에서 낮과 밤의 주기를 14/10h, 온도를 20/15°C, 광도를 60Wm^{-2} 로 적용시켰다.

재배식물의 산성강하물 처리는 0.1M HNO_3 와 H_2SO_4 의 비를 1:4로 혼합한 용액을 인공빗물(Evans *et al.*, 1985)에 첨가하여 pH 4.6, 3.6 및 2.6으로 조정한 다음 대조구(인공빗물)를 포함한 4개구의 식물에 매일 10:00시에 2ml씩 24일간 살포하였다. 식물의 NRA와 2mM KNO_3 에 의한 그 유도, 광합성 및 수분포텐셜은 임파 이(1992)에 따라 실시하였다.

결과 및 고찰

공단, 준공단 및 비공단지역에서 빗물의 pH 범위는 각각 3.4~6.6, 4.4~7.8 및 5.7~8.7이었으며 공단지역의 것이 가장 낮고 다음으로 준공단, 비공단 순이었다. 공단지역은 이른 봄과 가을 이후에 pH 5.6 이하의 산성강하물이, 비공단지역은 년중 pH 5.7 이상을 유지하였으나 연차적으로 감소하는 경향성을 보였다(Fig. 1). 공단지역의 대기오염물질은 준공단지역에 직접적인 영향을 미치며, 비공단지역에도 장기적으로 영향을 미치는 것으로 사료된다. pH의 월변화는 모든 지역에서 3월에 가장 낮고, 그후 증가하여 7월과 8월에 가장 높았으며, 9월 이후 낮아졌다. 빗물의 pH가 3월 이후 증가하는 것은 봄철에 중국으로부터 알칼리성 황사가 날려와 빗물에 섞이고, 그후 우기인 여름철에 빗물에 의한 산성원인물질의 세척효과(washout effect)에 기인한 것으로 생각된다(Khemani *et al.*, 1989). 계절적으로 빗물의 pH는 지역에 따라 차이를 보이는데 유럽은 겨울, 미국은 여름에 가장 낮은 것으로 보고되고 있으며(Endlich *et al.*, 1988), 본 조사지의 결과는 유럽지역과 일치하였다.

빗물의 화학적 조성(Fig. 2)은 공단과 비공단지역에서 NH_4^+ 가 각각 0.111~0.359와 0.011~0.215 mg/l, SO_4^{2-} 가 각각 0.446~0.765와 0.100~2.178 mg/l, NO_3^- 가 각각 0.09 ~ 1.037과 0.040~0.625 mg/l의 범위이었고 이들의 월 평균은 NH_4^+ 가 각각 0.21 (5.78%)와 0.09 (9.47%) mg/l, SO_4^{2-} 가 각각 2.94 (80.99%)와 0.61 (64.21%) mg/l, NO_3^- 가 각각 0.48 (13.22%)와 0.25(26.30%)mg/l로 비공단 지역에 비하여 공단지역에서 모두가 높았는데, 특히 SO_4^{2-} 의 조성비가 80.99%로 가장 높았다. 이들 이온의 월 변화는 양 지역에서 3월에 가장 높고, NH_4^+ 가 겨울에, SO_4^{2-} 와 NO_3^- 가 여름에 낮았다. EC는 공단지역과 비공단지역에서 각각 7.0 ~ 26.0과 1.1 ~ 13.3 mmho/cm의 범위로 공단지역에서 높았고, pH변화와 유사한 경향성을 보였다. 빗물의 pH와 NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- 및 EC와의 상관계수는 각각 0.22, 0.38, 0.16 및 0.77

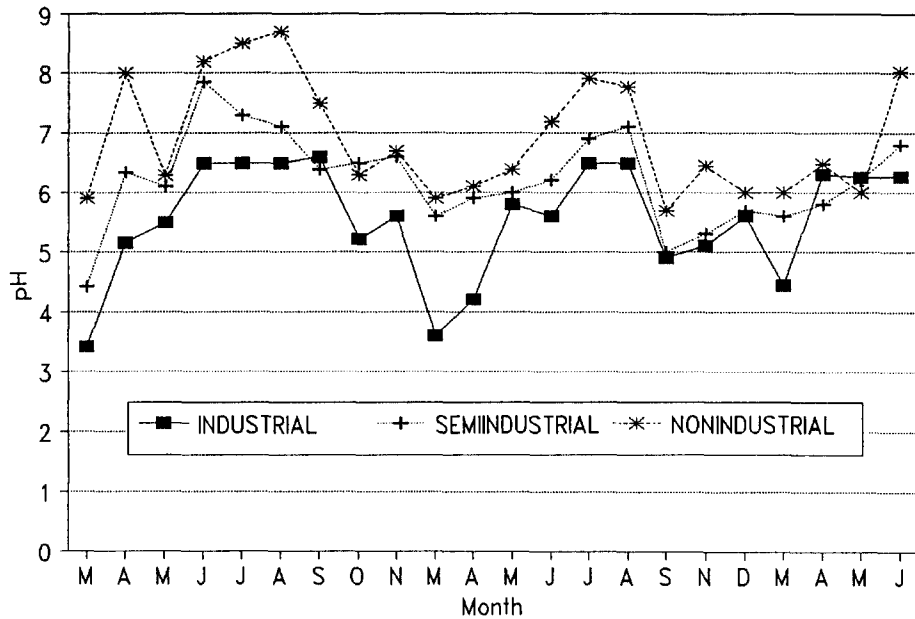


Fig. 1. The monthly variation in pH of wet deposition collected from industrial (Kun-Jang industrial complex), semi-industrial (Kunsan University) and non-industrial (Daeya rural district) region from Mach, 1991 to June, 1993.

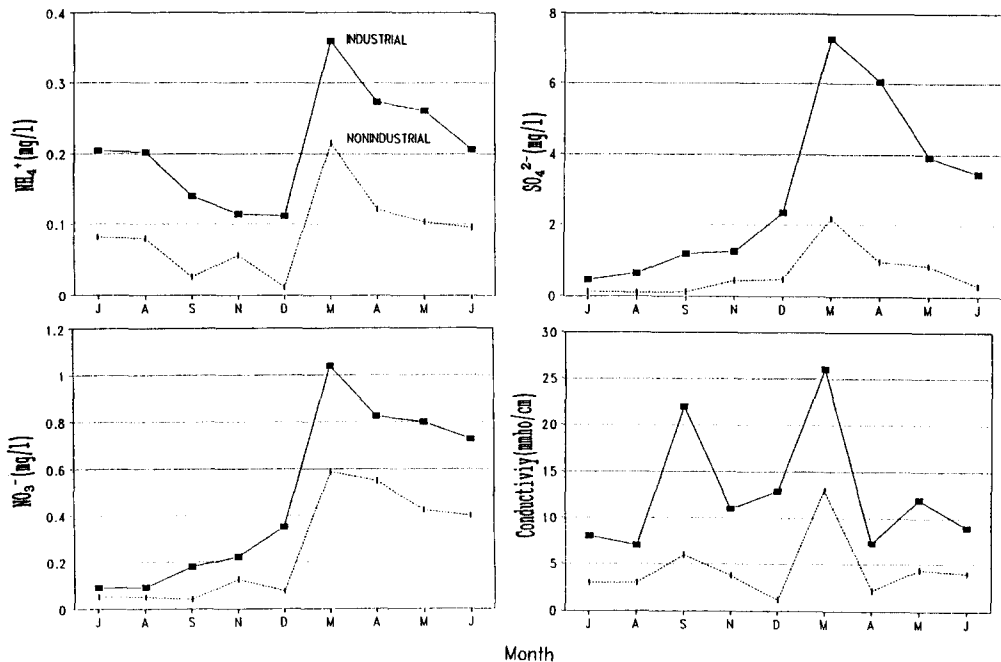


Fig. 2. The monthly variation in ammonium, nitrate, sulfate ion and conductivity of wet deposition collected from industrial and non-industrial region from July, 1992 to June, 1993.

로 EC와 가장 높은 상관을 보였고 다음으로 SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 순이었다. Dasch와 Cadle (1985), Khemanai(1985) 및 Gatz(1991)에 의하면 빗물의 pH는 이온함량과 밀접한 관계를 보이며, H^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- 등의 산성이온 이외에 토양으로부터 유리된 Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} 및 Na^+ 등의 염기성 이온과 연관된다고 하였는데, 본 조사에서도 pH는 이온함량을 나타내는 EC와 가장 밀접함을 보였고 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 이외에 다른 염기성 이온과 관계되는 것으로 사료된다. $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 의 비는 공단지역이 4.75~7.35, 비공단지역이 0.67~6.36의 범위에었고 그 비의 월평균은 각각 6.1과 2.5로 공단지역이 훨씬 높았다(Fig. 3). 산성강하물의 주요 원인 물질인 황과 질소산화물의 조성비는 2:1에서 5:1의 범위이나(Tang et al. 1986, Vong 1990), 본 조사지의 공단지역은 상한값보다 높았고 비공단지역은 하한값과 유사하였다. 최근 유럽 각국은 황산화물의 농도가 계속 감소되고 있으나(Robert et al. 1983), 질소산화물(NO_x)과 암모니아(NH_3)는 크게 증가하고 있는데(Salmon et al. 1978, Brimblecome and Stedman 1982, Erisman et al. 1989) 본 조사지의 공단지역은 높은 SO_4^{2-} 농도를 유지하였다.

공단지역과 비공단지역에 생육하는 털깃털이끼의 NRA(대조구)와 산성강하물로 24일 동안 처리한 후 이들의 NRA를 측정하여 Fig. 4에 표시하였다. 대조구에서 공단지역의 털깃털이끼의 NRA는 비공단지역의 것보다 반 이상 낮아, 자연상태에서 털깃털이끼의 NRA는 공단지역에서 억제되는 것으로 생각된다. 또한 비공단지역의 NRA는 pH 3.6과, pH 2.6에서 낮아졌으나 공단지역의 NRA는 변화가 거의 없었다.

외부로부터의 산성강하물중의 질소원의 증가가 털깃털이끼의 NRA에 미치는 영향은 Fig. 5에 표시하였다. 공단지역에 생육하는 털깃털이끼의 NRA는 대조구가 9시간만에 최대치인 $1.18 \mu\text{molNO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{d.wt.}$ 에 도달하였고 pH 3.6과 2.6이 각각 9시간 및 6시간만에 각각 최대치인 0.80 과 $0.69 \mu\text{molNO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{d.wt.}$ 에 이른 후 낮아졌다. 비공단지역의 털깃털이끼의 NRA는 대조구가 6시간만에 최대치인 $2.21 \mu\text{molNO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{d. wt.}$ 에 도달하였고 pH 3.6과 2.6이 각각 9시간 및 12시간만에 각각 최대치인 1.20 과 $1.24 \mu\text{molNO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{d. wt.}$ 에 이룬 후 서서히 감소하였다. 공단지역과 비공단지역에서는 털깃털이끼의 NRA는 낮은 pH에서 억제되는 것은 동일하였으나 공단지역에서는 NRA가 최대치에 이룬 후 크게 감소되고 pH 2.6에서 유도가 적게 일어났다. 이는 공단지역에서 생육하는 털깃털이끼는 산성강하물의 낮은 pH에 의하여 NRA의 유도가 억제될 뿐만 아니라 외부로부터 유입되는 질소원에 대하여 이미 포화상태에 이르렀기 때문에 민감한 반응을 보이지 않은 것으로 사료된다(Woodin et al. 1985).

산성강하물로 처리한 기간동안 대조구의 광합성은 공단지역과 비공단지역이 각각 $3.40 \sim 3.50$ 과 $3.92 \sim 4.11 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{g dry wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 범위로 거의 일정하였으나 공단지역이 낮게 나타났다(Fig. 6). 산성강하물로 처리한 구의 광합성은 공단지역과 비공단지역이 pH 3.6에서 각각 12일과 25일 만에 최소치인 1.96 과 $2.82 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{g dry wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달한 후 24일만에 대조구에 비하여 각각 85와 80%로 회복되었으나, pH 2.6에서 모두가 15일만에 각각 최소치인 1.12 와 $1.70 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{g dry wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달한 후 각각 66과 56%로 회복되었다. 이처럼 공단지역에 생육하는 털깃털이끼는 비공단지역의 것에 비하여 회복률이 더욱 높았다. Hutchinson과 Scott(1988)는 자연상태에서 *Pleurozium schreberi*를 산성비로 5년 동안 처리하여 광합성을 측정 한 결과 대조구가 $2.29 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{g dry wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 이었으나, pH 3.5에서 $2.41 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{g dry wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 오히려 5% 증가되고, pH 2.5에서 $1.85 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{g dry wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 으로 20% 감소되었다. 이처럼 본조사의 결과와 차이를 보인 것은 산성강하물에 의하여 식물의 광합성이 단기적으로는 억제되나 장기적으로 이에 적응하여 서서히 회복 또는 촉진된 결과로 생각된다.

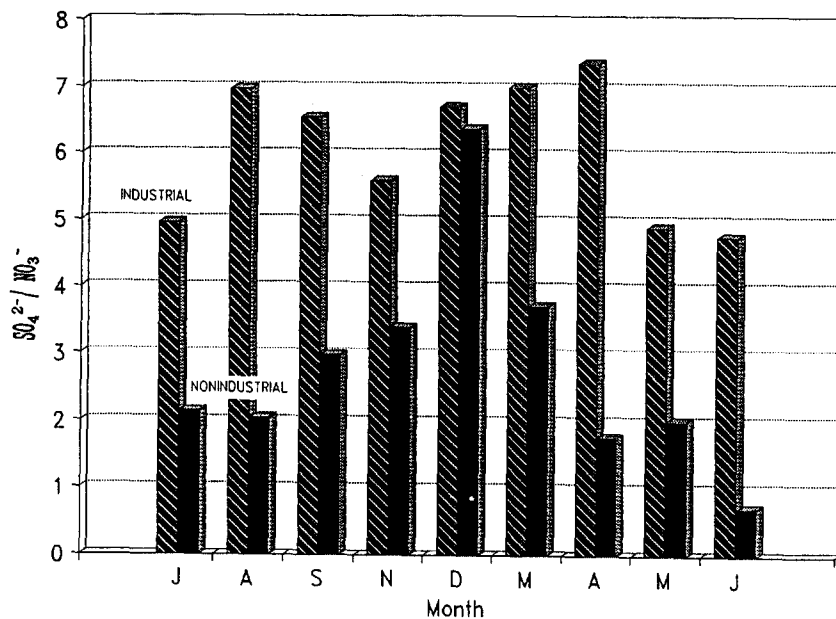


Fig. 3. The monthly variation in sulfate to nitrate ion of wet deposition collected from industrial and nonindustrial region from July, 1992 to June, 1993.

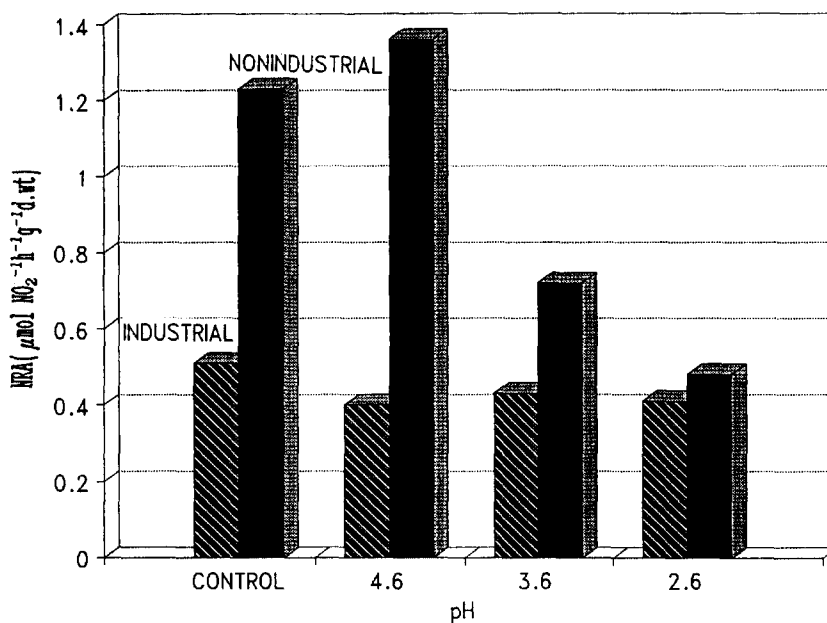


Fig. 4. Nitrate reductase activity of *Hypnum plumaeforme* collected from industrial and nonindustrial region after spraying with acidic deposition adjusted to pH 4.6, 3.6 and 2.6 derived from 1:4 molar ratio of nitric to sulfuric acid for 24 days.

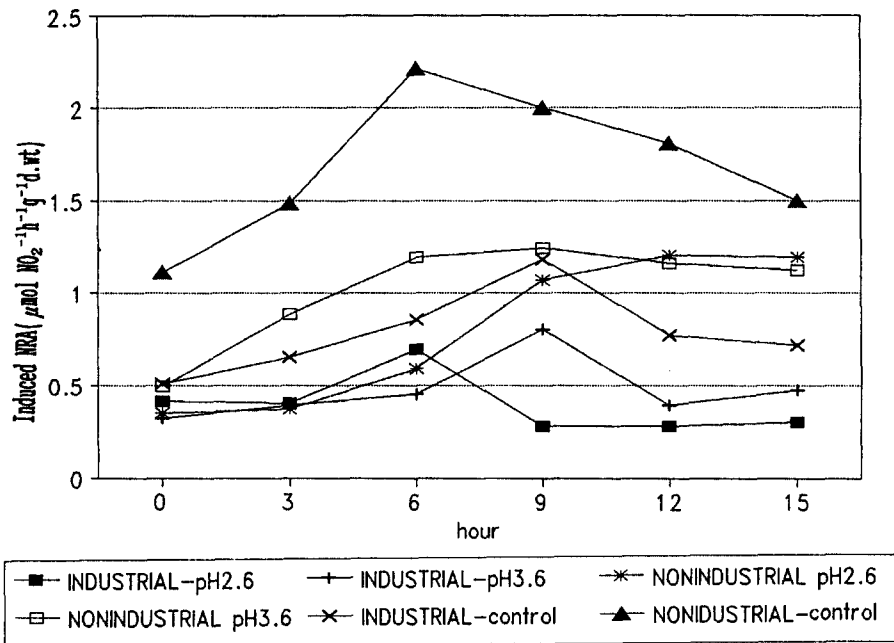


Fig. 5. Induced nitrate reductase activity of *Hypnum plumaeforme* collected from industrial and nonindustrial region over 15h period after spraying with 2mM KNO₃ at the different pH.

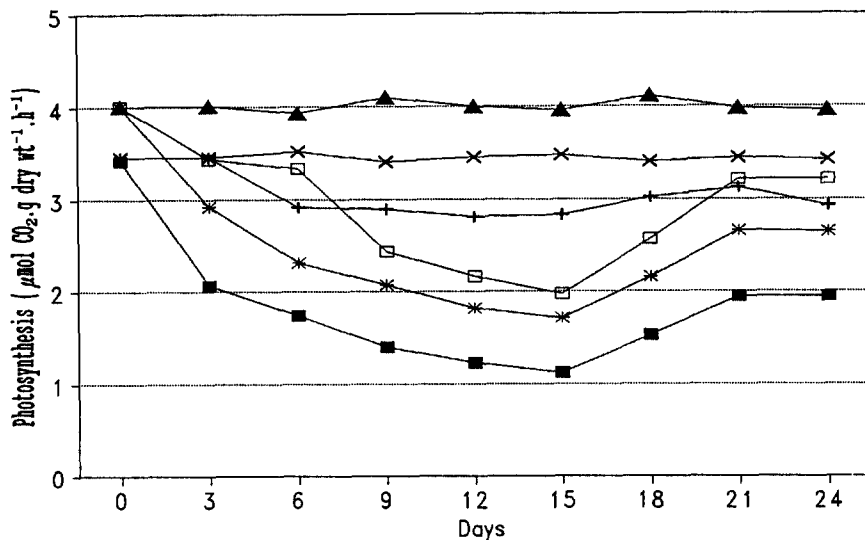


Fig. 6. Photosynthesis of *Hypnum plumaeforme* collected from industrial and nonindustrial region over 24 day period after spraying with acidic deposition adjusted to pH 3.6, and 2.6. Legends are the same as in Fig. 5.

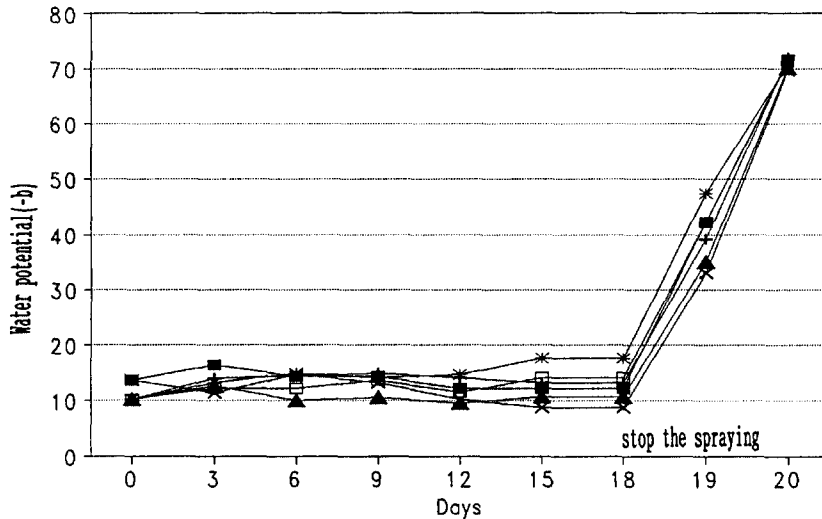


Fig. 7. Water potential of *Hypnum plumaforme* collected from industrial and nonindustrial region over 18 day period after spraying with acidic deposition adjusted to pH 3.6, and 2.6. Legends are the same as in Fig. 5.

털깃털이끼의 수분포텐셜은 공단지역에서 대조구, pH 3.6 및 pH 2.6이 각각 $-0.87 \sim -1.46$, $-10.2 \sim -1.50$ 및 $-1.22 \sim -1.64$ MPa였고, 비공단지역에서 이들이 각각 $-0.96 \sim -1.26$, $-1.02 \sim -1.42$ 및 $-1.02 \sim -1.75$ MPa로, 비공단보다 공단지역에서 pH가 낮을 수록 수분포텐셜이 낮은 경향성을 보였으나 그 차이가 적었다(Fig. 7). 산성강하물로 처리를 중단한 후 공단지역과 비공단지역에서 털깃털이끼의 수분포텐셜은 3일만에 대조구, pH 3.6 및 pH 2.6이 각각 -7.01 과 -6.96 , -7.13 과 -7.22 및 -7.07 과 -7.07 MPa로 그 값이 크게 낮아졌다. 선태식물의 수분포텐셜이 급격히 낮아진 것은 선태식물의 큐티클층 결여에 의한 빠른 수분손실과 연관되는 것으로 사료된다(Rao 1982)

이상의 결과에서 공단지역의 산성강하물은 준공단과 비공단지역의 pH에 영향을 미치며, 이들의 pH는 이른 봄에 낮고 우기인 여름에 높았으며, 이는 이온함량과 밀접한 관계를 보였다. 산성강하물의 낮은 pH와 높은 이온함량에 의하여 공단지역과 비공단지역에 생육하는 털깃털이끼의 NRA와 광합성은 단기적으로 억제되었는데, 비공단지역의 것이 더욱 민감한 반응을 보였다.

적 요

1991년 3월부터 1993년 6월까지 공단, 준공단 및 비공단지역에서 빗물을 채취하여 pH를 측정하고, 공단과 비공단지역에서 NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} 및 전기전도도를 1년동안 측정하였다. 또한 황산과 질산의 비를 1:4로하여 pH 4.6, 3.6 및 2.6으로 조정된 산성강하물이 털깃털이끼의 NRA, 광합성 및 수분포텐셜에 미치는 영향을 조사하였다. 빗물의 pH는 모두 이른 봄에 낮고 여름에 높았으며 공단지역의 낮은 pH는 다량의 이온 특히 SO_4^{2-} 와 관련되었다. 빗물의 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 NH_4^+ 의 월 평균은 공단지역에서 각각 2.94(81.0%), 0.48(13.2%) 및 0.21(5.78%)mg /1이었고, 비공단지역에서는 각각 0.61(64.21%), 0.25(26.3%) 및 0.9(9.5%)mg /1로 공단지역에서 높았

다. 공단지역과 비공단지역에 생육하는 *Hypnum plumaeforme*의 NRA는 비공단지역에 비하여 공단지역의 것이 낮았고, 산성강하물로 24일 동안 처리한 후 NRA를 측정 한 결과 공통적으로 억제되었다. 공단지역과 비공단지역에서 생육한 식물의 광합성능은 산성강하물 처리후 24일만에 pH 3.6에서 각각 85와 80%이상 회복되었으나 pH 2.6에서는 66과 56% 회복되었다. 공단과 비공단의 식물체의 수분포텐셜은 산성강하물에 대한 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 단수후 모두 크게 낮아졌다.

인용문헌

- 임병선 · 이점숙. 1992. 대기중의 산성강하물의 증가에 따른 *Ctenidium molluscum* 등 4종의 선류의 질산환원효소 활성. 한국생태학회지 15:355-363.
- Adams, C. M. and T. C. Hutchinson. 1984. A comparison of the ability of leaf surfaces to neutralize acidic rain drops. *New Phytol.* 97:463-478.
- Bobbink, R., L. Bik and J. H. Willems. 1988. Effects of nitrogen fertilization on vegetation structure and dominance of *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv. in chalk grassland. *Acta Botanica Neerlandica* 37:231-242.
- Brimblecombe, P. and D. H. Stedman. 1982. Historical evidence for a dramatic increase in the nitrate component of acid rain. *Nature* 298:460-462.
- Chappelka, A. I. III, B. I. Chevone and T. E. Burk. 1985. Growth response of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) seedling to ozone, sulfur dioxide and simulated acidic precipitation, alone and in combination. *Environmental and Experimental Botany* 25:233-244.
- Choi, Y. K. 1981. Microbial distribution in Jinhae-bay. (I). Relationship between microbial distribution and environmental factors. *Kor. Jour. Microbiol.* 19:45-51.
- Dasch, J. M. and S. H. Cadle. 1985. Wet and dry deposition monitoring in southeastern Michigan. *Atmospheric Environment* 19:789-796.
- Endlich, R. M., B. P. Eynon, R. J. Ferek, A. D. Valdes and C. Maxwell. 1988. Statistical analysis of precipitation chemistry measurements over the eastern United States. *J. Appl. Met.* 27:1322-1333.
- Erisman, J. W., A. A. M. Frank, M. Roel and Van Aalst. 1989. Deposition of the most acidifying components in the Netherlands during the period 1980-1986. *Atmospheric Environment* 23:1051-1062.
- Evans, L. S. and Y. M. Curry. 1979. Differential responses of plant foliage to simulated acid rain. *Am. J. Bot.* 66:953-962.
- Evans, L. S., K. F. Lewin, K. A. Santucci and M. J. Patti. 1985. Effects of frequency and duration of simulated acidic rainfalls on soybean yields. *New Phytol.* 100:199-208.
- Gatz, D. F. 1991. Urban precipitation chemistry: A review and synthesis. *Atmospheric Environment* 25:1-15.
- Heil, G. W. and W. H. Diemont. 1983. Raised nutrient levels change heathland into glassland. *Vegetatio* 53:113-120.

- Hutchinson, T. C., C. M. Adams and B. A. Gaber. 1986. Neutralization of acidic raindrops on leaves of crop and boreal forest species. *Water, Air and Soil Pollution* 31:475-484.
- Hutchinson, T. C. and M. G. Scott. 1988. The response of the feather moss, *Pleurozium schreberi*, to 5 years of simulated acid precipitation in the Canadian boreal forest. *Canadian J. Botany* 66:82-88.
- Khemani, L. T. 1985. Characteristics of atmospheric gaseous and particulate pollutants and their influence on cloud microphysics and rain - formation. Ph. D. Thesis. University of Poona, Pune. 152p.
- Khemani, L. T., P. S. Momin, P. D. Prakasa Rao, G. S. Safai and R. K. Kapoor. 1989. Spread of acid rain over India. *Atmospheric Environment* 23:757-762.
- Lee, J. A. 1988. Effects of nitrogen oxides on plants. *In* M. R. I. Purvis (ed.), *The generation and control of nitrogen oxides*. The Institute of Energy. pp. 42-54.
- Lee, J. A., J. A. Baddeley and S. J. Woodin. 1989. Effects of acidic deposition on semi-natural vegetation. *In* *Acidification in Scotland*, Scottish Development Department. pp. 94-101.
- Lee, J. A. 1993. West African strand vegetation. *In* E. Van der Maarel (ed.), *Ecosystems of the World : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, London. in Press.
- Marie, B. A. and D. P. Ormrod. 1984. Tomato plant growth with continuous exposure to SO₂ and NO₂. *Environmental Pollution* 33:257-265.
- Press, M. C., S. J. Woodin and J. A. Lee. 1986. The potential importance of an increased atmospheric nitrogen supply to the growth of ombrotrophic *Sphagnum* species. *New Phytol.* 103:45-55.
- Rao, D. M. 1982. Responses of bryophytes to air pollution. *In* A. J. E. Smith (ed.), *Bryophyte Ecology*. Chapman and Hall, London. pp. 445-471.
- Robert, T. M., N. M. Darrall and P. I. Lane. 1983. Effects of gaseous air pollutants on agriculture and forestry in the U. K. *Advances in Applied Biology* 9:1-142.
- Salmon, L., D. H. F. Atkins, E. M. R. Fisher, C. Healy and P. V. Law. 1978. Retrospective trend analysis of the content of U. K. air particulate matter 1957-1974. *Science of the Total Environment* 9:161-200.
- Tang, A. J. S., W. H. Chan, D. H. S. Chung and M. A. Lusia. 1986. Spatial and temporal patterns of sulfate and nitrate wet deposition in Kutario. *Water, Air and Soil Pollution* 30:263-273.
- Vong, J. 1990. Mid-latitude northern hemisphere background sulfate concentration in rainwater. *Atmospheric Environment* 24:1007-1018.
- Woodin, S. J. and J. A. Lee. 1987. The fate of atmospheric nitrogen pollutants in mires. *Environmental Pollution* 108:35-48.

(1993년 2월 7일 접수)