

인공 산성비가 소나무와 잣나무 잎의 수분상태에 미치는 영향

윤의수

공주대학교 자연과학대학 생물학과

Effect of Simulated Acid Rain on Water Status of *Pinus densiflora* and *P. koraiensis*

Eui-Soo Yoon

Department of Biology, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

ABSTRACT

The water status of *Pinus densiflora* and *P. koraiensis* was observed after the treatment of simulated acid rain for every month August 1997 to March 1998. Both of the species showed increase of dry weight, water saturation deficit and epidermis transpiration after treatment of simulated acid rain (pH 3.5) for first three months. On the contrary, water content was decreased in both the species after three month of simulated acid rain treatment. The effect of simulated acid rain, however, became weaker after that and no big difference was observed after seven month of treatment. Water potential of the leaf of both species became lower than that of the control(pH 5.6) after seven month treatment of simulated acid rain. The cuticle layers of the epidermis and Floring ring were damaged seriously and the size of the gap between stomata became bigger after the treatment of simulated acid rain.

Key words : *Pinus densiflora*, *P. koraiensis*, Acid rain

서론

과거의 빗물은 대기중의 이산화탄소가 녹아 탄산을 형성하여 pH 5.7 정도의 약산성을 띠나, 점점 산업화가 되어감에 따라 화석연료의 소비가 증가하고 대기중의 이산화황과 질소산화물이 높아짐에 따라 빗물이 이것들과 반응하여 각각 황산과 질산을 형성하여 강산을 띠게 되었다. 영국의 공업단지인 Manchester의 빗물에서 황산과 황산염이 검출되었고, 스칸디나비아에서 산성비가 생태계에 해로운 영향을 미친다는 것이 처음 밝혀졌다. 북미에서

는 점점 산도가 증가하여 평균 pH 4.0 이하의 산성비가 내리고 있다는 것이 밝혀 졌으며(Likens *et al.*, 1979) 우리나라에서도 대도시와 공업 단지는 물론 중소 도시에 있어서도 산성비가 내리는 것으로 조사되었다(김, 1990).

또한 산성비는 육상생태계 식물의 성장감소(Ferenbaugh 1976, Hindawi *et al.* 1980), 잎의 상해(Fairfax and Lepp 1975, Hindawi *et al.* 1980, Kelly and Strickland 1986), 잎으로부터 엽록소와 기타 물질의 세탈 등을 통해 직접적인 피해를 주며(Tukey 1975, Evans 1980, Cape 1986), 식물의 수분이나 수경과정에 영향을 준다는 것이 알려졌다.

또한 산성비에 의한 강낭콩, 노란 자작나무의 생장(Ferenbaugh 1976; Hindawi et al., 1980), 송백류의 종자 발아와 유식물의 발생에 대한 영향(Braekke 1976; Raynall et al., 1982), 은행나무와 곰솔의 산성비에 대한 생장 반응(Kim and Soh 1995; Kim and Soh 1994), 미생물들의 효소활성에 미치는 산성비의 영향(Beweley and Stotzky 1984; Hovland 1981) 등의 많은 연구들이 있다.

한편 인공 산성비에 의한 유식물의 생장에 대해서는 촉진과 억제가 상반되게 보고되어지고 있다. Wood 와 Bormann(1977)은 *Pinus strobus*에서는 산성도 값이 낮아짐에 따라 생장이 촉진된다고 보고하였으며 Kim 과 Soh는 *Pinus thunbergii*에 있어서 pH4 이하에서 생장이 억제 된다고 보고하였다(1994). 또한 대두는 낮은 pH에서 생장이 촉진되지만 (Irving and Miller 1980) 강낭콩은 생장이 감소한다 (Ferenbaugh 1976)고 하였다. Lee와 Weber(1979)는 11종의 목본 식물의 생장이 산성상하물의 pH에 따라 종에 따른 다양한 반응을 하고 있음을 보고하였다.

산성비가 소나무속에 있어서 생장반응에 미치는 영향에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어지고 있다(Haines et al. 1985; Maurice and Crang 1986; Kim 1991; Kim and Soh 1995; Powell et al. 1995; Yoon 1997). 이와 같이 산성비가 식물에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 되어지고 있으나 산성비에 대한 종별 감수성에 대한 연구는 충분하지 못하다. 또한 소나무류의 종별 감수성을 이해하기 위하여는 산성비가 수분상태의 변화에 미치는 영향을 확인 하는 것이 중요한 과제이다. 따라서 본 연구에서는 인공산성비를 장기간 처리하였을때에 소나무와 잣나무 잎의 수분함량, 수분포화결차, 표피 증산률, 수분포텐셜등 수분상태와 잎의 표면의 구조에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

재료

본 실험에 사용된 소나무(*Pinus densiflora*) 와 잣나무(*P. koreaiensis*)는 공주대학교에서 성장하고있는

식물중에서 키가 2m 정도 되는 것을 6그룹씩 택하였다.

1996년 8월부터 1997년 5월 까지 3그룹에는 pH 3.5인 인공산성비를, 다른 3그룹은 pH 5.6인 인공비를 매주 월, 수, 금요일 오전 10시경에 각각 2L를 5분씩 분무하였다.

인공 산성비의 성분은 1N 황산(H₂SO₄)과 질산(HNO₃)을 3:1(v/v)의 비율로 혼합하여 2차 증류수로 조제하였다. 인공 산성비의 pH는 증류수로 희석하여 HI 8314 membrane pH meter로 pH 3.5와 pH 5.6으로 조정하였으며 pH 5.6을 오염되지 않은 강우인 대조구로 하였다. 1개월 간격으로 1년차의 잎을 각각의 개체에서 채취하여 본 실험에 이용하였다.

수분상태 측정

1개월 간격으로 잎을 채취하여 수분함량(water content, WC)과 수분포화결차(water saturation deficit, WSD)를 Barrs와 Weatherley(1962)의 방법에 따라 다음과 같이 측정하였다. 생중량(f.w)을 측정 후 지하수에 넣고 500W sodium lamp 로 12시간 방치하여 수분을 침윤시킨후 표피에 묻은 수분을 제거 후 침윤무게(t.w)를 측정하였다. 침윤무게 측정 후 80℃로 건조기에서 72시간 건조후 건조중량(d.w)을 측정하였다.

$$WC = (f.w) - d.w / d.w$$

$$WSD = t.w - f.w / t.w - d.w$$

또한 표피증산율(Epidermis transpiration, Et)은 생중량을 측정후 8℃ 암실에서 시료를 7일간 방치 후 생중량(f.w1)을 측정하였다.

$$ET = f.w - f.w1$$

잎의 수분포텐셜(Water potential, WP)의 측정은 인공비 살포 5개월후에 채취한 잎을 2일간 생장실에서 재배하면서 급수를 충분히 한 상태에서 수분포텐셜을 비교하였다. 급수를 중단하고 2, 4, 6, 8, 10, 12 일 째에 각각 수분포텐셜을 비교하였다. 잎의

수분 포텐셜은 잎을 5mm 길이로 토막내어 leaf chamber(Wescor, C-52)에 넣어 1시간 수분평형이 되도록 한 후 microvoltmeter (Wescor, HR-33T)로 각 처리구 마다 3개씩 측정하였다.

잎표면 구조의 관찰

기공의 관찰을 위해 인공우를 7개월째 처리한 소나무와 잣나무의 잎을 50% glutaldehyde에 실은에서 2시간 고정후 alcohol series에 따라 탈수시키고, 동결건조기(JFD-300)로 건조시킨 재료를 stub에 부착하고 ion sputter(SPI suoolies)로 gold coating하여 주사전자현미경(TSM-5410)으로 관찰하였다. 공변세포를 포함한 기공의 길이와 폭을 주사전자현미경하에서 30회 반복하여 측정하여 그 평균값을 취하였다.

결 과

잎의 수분 상태

시간의 경과에 따른 생체 1g당 건조중량의 변화는 소나무의 경우 pH 3.5 인공산성비를 처리한 구에서는 처리 3개월째인 11월에는 379mg에서 408mg으로 약 8%의 건조중량이 증가되었으나 대조구는 382mg에서 358mg으로 약 7% 감소하였으며 대조구와 인공산성비 처리구 사이에는 50mg의 차이로 14%의 차를 나타내었다.

그러나 인공비 처리 4개월째 인 12월 이후로는 두 구사이의 건조중량에 큰 차이를 보이지 않았다. 잣나무의 경우에는 대조구는 인공비 처리 3개월째인 11월 까지는 시간의 변화에 따라 큰차이를 보이지 않았으나 인공산성비를 처리한 구는 처음의 건조중량에 비하여 증가하는 경향을 보이다가 인공 산성비 처리 3개월째인 11월에는 처음 건조중량의 348mg 에 비하여 438mg 으로 25% 이상의 증가율을 보였다. 대조구와 인공산성비 처리구 사이에는 70mg 이상의 차이를 보여 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 26%이상 건조중량이 무거웠다. 그러나 잣나무의 경우에 있어서도 4개월째 이후로는 대조구와 산성비 처리구 사이에 큰 차이가 보

여지지 않았다. 전체적으로 소나무의 대조구는 382mg에서 인공비 처리 7개월째인 3월에는 462mg으로 약 20% 증가하였으며 인공산성비 처리구에서는 379mg에서 463mg으로 역시 약 20% 증가를 하여 대조구와 인공산성비 처리구 모두 처리 7개월째인 3월에 약 20% 정도의 건조중량의 증가를 보여 장기간에 걸친 인공비의 처리는 pH에 따라 차이를 보이지 않았다. 또한 잣나무의 경우에는 대조구에서 352mg이었던 것이 7개월째인 3월에는 438mg 으로 약 25% 증가하였으며 인공산성비 처리구는 348mg에서 440mg으로 역시 약 25% 증가하여 대조구와 인공산성비 처리구 모두 인공비 처리 7개월째인 3월에 약 25%의 건조중량이 증가하였나 장기간에 걸친 인공비의 처리는 pH에 따라 차이는 보이지 않았다. 공통적으로 소나무와 잣나무 모두 인공산성비를 처리한 3개월째인 11월에는 대조구에 비하여 건조중량이 증가하나 4개월째인 11월 이

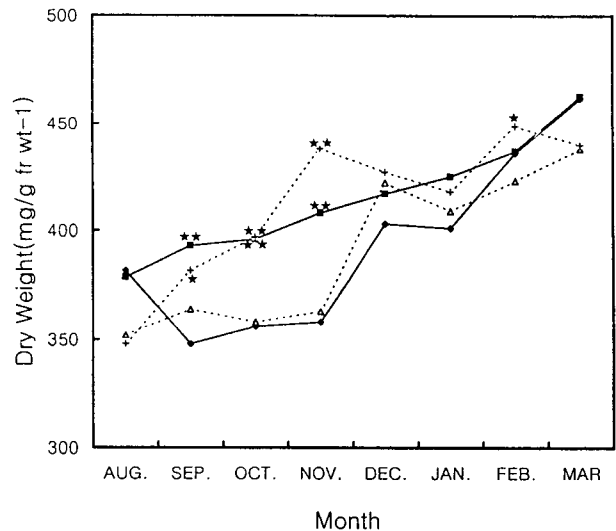


Fig. 1. Seasonal changes of dry weight of *P. densiflora* and *P. koraiensis* needles growing from August, 1997 to March, 1998. The needles growing were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5 or pH 5.6. ◆; pH 5.6 *P. densiflora*, ■: pH 3.5 *P. densiflora*, △: pH 5.6 *P. koraiensis*, × pH 3.5 *P. koraiensis*. ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

후로는 큰 차이를 보이지 않게 되었다(Fig. 1).

시간에 따른 수분함량의 변화는 소나무의 경우 인공비 처리 초기에는 큰차를 보이지 않았으나 인공비처리 2개월째인 10월부터 pH 5.6 인공비를 처리한 구가 pH 3.5 인공산성비를 처리한 대조구에 비하여 함수량이 증가하기 시작하고 3개월째인 11월에는 대조구 180%에 대하여 인공산성비를 처리한 구는 145%로 35%의 차이를 보였다. 잣나무의 경우에도 인공비 처리 초기에는 소나무와 마찬가지로 수분함량에 큰 차이를 보이지 않았으나 3개월째인 11월에는 대조구의 176%에 대하여 128%로 인공산성비를 처리한 구가 대조구에 비해 수분함수량이 50%나 적었다. 전체적으로는 소나무의 대조구는 162%에서 7개월째인 3월에는 117%로 약 45% 감소하였으며 인공산성비 처리구에서는 167%에서 116%로 역시 약 50% 감소하여 대조구와 인공산성비 처리구 모두 처리 7개월째인 3월에 약 45~50% 정도의 수분함량의 감소를 보였으나 두 구사이에는 큰 차이를 보이지는 않았으며

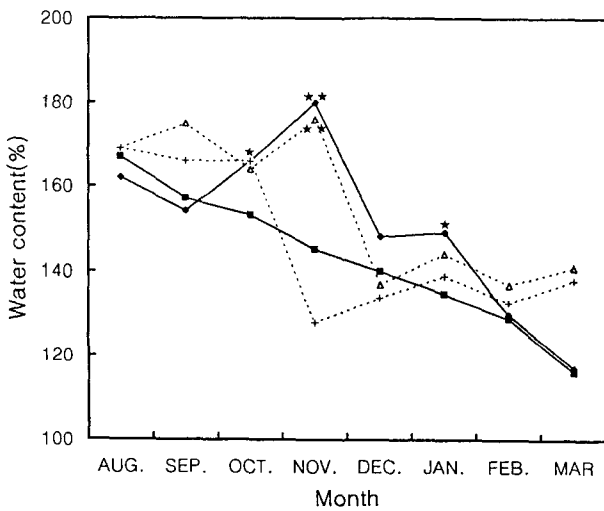


Fig. 2. Seasonal changes of water content of *P. densiflora* and *P. koraiensis* needles growing from August, 1997 to March, 1998. The needles growing were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5 or pH 5.6. ◆; pH 5.6 *P. densiflora*, ■; pH 3.5 *P. densiflora*, △; pH 5.6 *P. koraiensis*, × pH 3.5 *P. koraiensis*. ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

pH 3.5 가 pH 5.6 보다 함수량이 일반적으로 낮은 경향을 보였다. 또한 잣나무의 경우에는 대조구에서 169%이었던 것이 7개월째인 3월에는 141%로 28% 감소하였으며 인공산성비 처리구는 169%에서 138%로 역시 약 30% 감소하였다. 대조구에 비하여 인공산성비 처리구가 일반적으로 수분함량이 낮았으나 큰 차이는 보이지 않았으며 특히 소나무가 잣나무보다 감소율이 컸다(Fig. 2). 소나무의 시간에 따른 수분포화결차의 변화는 인공비 처리 2개월째까지는 대조구와 인공산성비 처리구 모두 큰 차이를 보이지 않았으나 인공산성비 처리 3개월째인 11월에는 인공산성비 처리구와 대조구가 18.7%와 12.7%로 6.0%의 차를 보였고 그 이후로는 두 구 사이에 큰차이는 보여지지 않았으나 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 일반적으로 높은 수분포화결차를 유지하였다. 잣나무의 경우에는 인공비 처리 2개월째 부터 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 수분포화결차가 높아지기 시작하여 3개월째인 11월에는 인공산성비 처리구 10%에 대하여 대조구는 1.5%로 큰차이를 보였으나 인공비 처리 4개월째인 12월부터는 두 구 사이에 큰 차이를 보이지 않았다. 전체적으로 소나무의 인공산성비 처리구는 15.8%에서 7개월째인 3월에는 21.6%로 약 6% 증가하였으며 대조구에서는 15.5%에서 20.5%로 역시 약 5% 증가를 하여 대조구와 인공산성비 처리구 모두 처리 7개월 후에 약 5~6% 정도의 수분포화결차의 증가를 보였으나 대조구와 인공산성비 처리구 사이에 큰 차이는 보이지 않았으며 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 약간 높은 수분포화결차를 보였다. 또한 잣나무의 경우에는 인공산성비 처리구에서 11.5%이었던 것이 7개월째인 3월에는 18.2%로 6.7% 증가하였으며 대조구는 11.6%에서 16.2%로 4.6% 증가하여 인공산성비 처리구와 대조구 모두 인공비 처리 7개월 후에 약 4~7%의 수분포화결차가 증가하였다. 소나무와 마찬가지로 잣나무에 있어서도 인공산성비 처리구가 대조구에 비해 약간 높은 수분포화결차를 유지하였다. 소나무와 잣나무 모두 전체적으로는 대조구가 인공산성비 처리구에 비하여 낮은 수분

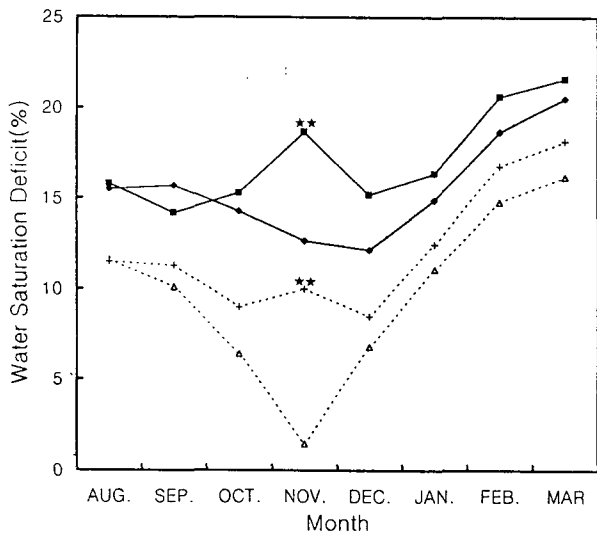


Fig. 3. Seasonal changes of water saturation deficit of *P. densiflora* and *P. koraiensis* needles growing from August, 1997 to March, 1998. The needles growing were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5 or pH 5.6. ◆: pH 5.6 *P. densiflora*, ■: pH 3.5 *P. densiflora*, △: pH 5.6 *P. koraiensis*, × pH 3.5 *P. koraiensis*. ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

포화결차를 유지하였으며 잣나무가 소나무에 비하여 약간 낮은 수분포화결차를 나타내었다(Fig. 3).

표피증산율은 소나무와 전나무 두종이 모두 전 기간에 걸쳐 산성비의 영향을 받지 않았으며 두 수종 사이에도 모든 처리 기간에 걸쳐 비슷한 경향을 보였으나 잣나무가 소나무에 비하여 약간 낮은 표피증산율을 나타내었다. 전체적으로 소나무의 대조구는 39%에서 7개월 짜인 3월에는 50.4%로 인공산성비 처리구에서는 36.7%에서 50%로 증가를 하여 대조구와 인공산성비 처리구 모두 처리 7개월 짜인 3월에 약 12~13% 정도의 표피증산율을 보였으며 시기적으로는 인공산성비 처리 2~3개월째까지는 pH 3.5가 pH 5.6 보다 표피증산율이 높았으며 특히 11월에는 9% 이상의 차이를 나타내었으나 차츰 차가 줄어들어 처리 7개월째에는 큰차이를 보이지 않았다. 잣나무의 경우에는 대조구에서 28.7%이었던 것이 7개월 짜인 3월에는 41.9%로 인공산성비 처리구는 28.8%에서 42%로 증가하여 역시

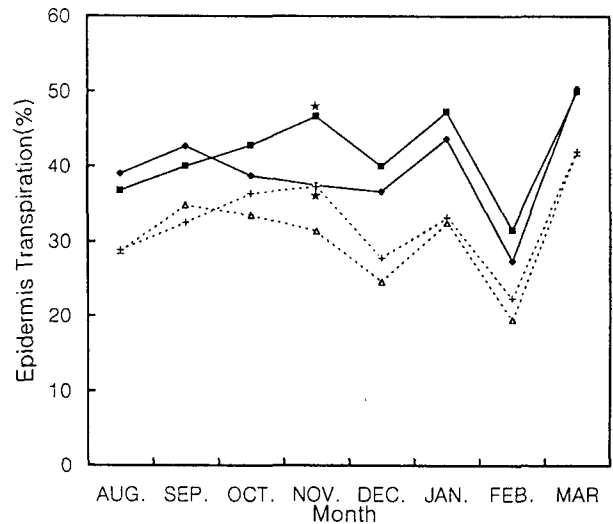


Fig. 4. Seasonal changes of epidermis transpiration of *P. densiflora* and *P. koraiensis* needles growing from August, 1997 to March, 1998. The needles growing were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5 or pH 5.6. ◆: pH 5.6 *P. densiflora*, ■: pH 3.5 *P. densiflora*, △: pH 5.6 *P. koraiensis*, × pH 3.5 *P. koraiensis*. ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

약 13~17% 표피증산율이 증가하였으며 인공산성비 처리 2~3개월째 까지는 pH 3.5가 pH 5.6 보다 표피증산율이 높았으며 특히 11월에는 6% 이상의 차이를 나타내었으나 차츰 차가 줄어들어 처리 7개월 짜인 3월에는 큰차이를 보이지 않았다(Fig. 4).

소나무와 잣나무 모두 인공비를 7개월간 처리후 시간 경과에 따른 잎의 수분포텐셜을 측정 한 결과 6일째 부터 감소하기 시작하여 10일째 이후로는 급격히 감소하였다.

소나무의 대조구와 인공산성비 처리구의 수분포텐셜은 2일째에 각각 -3.8과 -3.7bar 이었으나 10일째에는 -8.3과 -9.6 bar, 12일째에는 각각 -15.9와 -20.8bar로 대조구에 비하여 인공산성비를 처리한 잎이 더욱 빨리 낮아졌다. 잣나무의 대조구와 인공산성비 처리구에 있어서도 2일째에 각각 -4.4와 -4 bar 였으나 10일째에는 -9.8과 -11.2, 12일째에는 -17.2과 22.4 bar 로 대조구의 잎에 비해 인공산성비 처리구의 잎이 더욱 빨리 낮아 졌다. 또한 소나무에

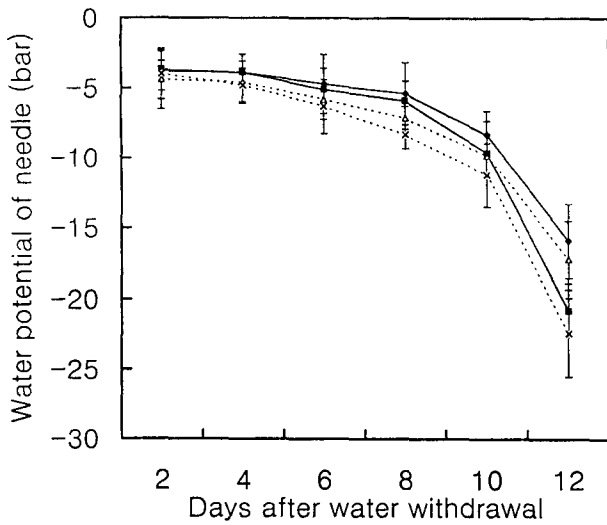


Fig. 5. Decline trends of water potential of needles of *P. densiflora* and *P. koraiensis* after withdrawal. The needles were cultured under condition of spraying with pH 3.5 or pH 5.6 of simulated rain for 7 months. ◆; pH 5.6 *P. densiflora*, ■: pH 3.5 *P. densiflora*, △: pH 5.6 *P. koraiensis*, × pH 3.5 *P. koraiensis*.

비하여 잣나무의 수분포텐셜이 더욱 빨리 낮아졌다(Fig. 5).

소나무의 잎은 Floring ring을 포함하는 경우 대조구의 기공의 길이가 $35.2\mu\text{m}$, 폭은 $31.4\mu\text{m}$ 였으며 pH3.5 인공산성비의 처리시에는 길이가 $36.4\mu\text{m}$, 폭은 $31.3\mu\text{m}$ 였으며 Floring ring을 제외한 공극의 길이는 대조구의 경우 길이는 $6.3\mu\text{m}$, 폭은 $6.0\mu\text{m}$ 였으며 인공산성비를 처리한 경우 공극의 길이는 $7.0\mu\text{m}$, 폭은 $6.0\mu\text{m}$ 이었다. 대조구의 경우 기공의 길이와 폭의 비는 거의 둥근원이나 산성비 처리의 경우 길이가 약 16% 길었으며 기공의 공극의 크기가 크게

나타났다.

잣나무 잎의 기공의 길이는 Floring ring을 포함한 경우 대조구에서 $47.2\mu\text{m}$, 폭은 $31.3\mu\text{m}$, pH3.5 인공산성비의 처리시에는 길이 $47.2\mu\text{m}$, 폭은 $36.4\mu\text{m}$ 였으며 Floring ring을 제외한 공극의 길이는 대조구의 경우 $27.1\mu\text{m}$, 폭은 $8.5\mu\text{m}$ 이며 인공산성비 처리구의 경우에는 길이는 $27.2\mu\text{m}$, 폭은 $11.5\mu\text{m}$ 이었다. 기공의 길이와 폭의 비는 거의 긴 직사각형으로 인공산성비의 처리시 길이에는 영향이 없었으나 폭이 대조구에 비하여 약 35% 증가하였고 기공의 공극의 크기가 크게 나타났다(Table 1). 소나무와 잣나무 모두 산성비 처리구의 경우 기공의 Floring ring과 주변 표피세포의 왁스층이 심하게 침식되었

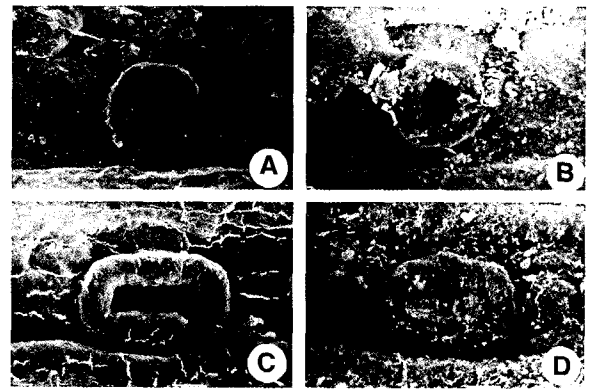


Fig. 6. Scanning electron micrographs of stomata of *P. densiflora* and *P. koraiensis* treated with simulated rain. Bars represent $10\mu\text{m}$. A: Stoma on the abaxial needles surface of *P. densiflora* treated with simulated rain of pH 5.6 B: Stoma on the abaxial needles surface of *P. densiflora* treated with simulated rain of pH 3.5 C: Stoma on the abaxial needles surface of *P. koraiensis* treated with simulated rain of pH 5.6 D: Stoma on the abaxial needles surface of *P. koraiensis* treated with simulated rain of pH 3.5

Table 1. Stomatal characteristic of *P. densiflora* and *P. koraiensis* exposed to simulated acid rain of different pH (unit, μm)

pH	Stomata			Stomatal pore			
	Length	Width	W/L	Length	Width	W/L	
<i>P. densiflora</i>	5.6	35.2 ± 3.28	31.4 ± 2.35	0.89	6.3 ± 0.76	6.0 ± 1.23	0.95
	3.5	36.4 ± 3.67	31.3 ± 3.06	0.86	7.0 ± 1.03	6.0 ± 0.88	0.86
<i>P. koraiensis</i>	5.6	47.2 ± 2.86	31.3 ± 2.76	0.66	27.1 ± 1.21	8.5 ± 1.32	0.31
	3.5	47.2 ± 3.44	36.4 ± 2.88	0.77	27.2 ± 0.80	11.5 ± 1.09	0.42

으며 기공의 개폐기작 기구도 파괴 되어진 것으로 보인다(fig. 6).

고 찰

소나무와 잣나무의 잎에 인공비를 7개월간 장기간 처리 하였을 경우 3월에는 건중량, 수분결차, 표피증산물 모두 pH에 따른 큰 차이를 볼수 없었다. 그러나 인공비를 처리한지 3개월째인 11월에는 건중량, 수분포화결차, 표피증산물은 pH 3.5 인공산성비 처리구가 pH 5.6 인공비처리구에 대하여 크게 높았으며 수분함량은 반대로 매우 낮았다. 소나무와 잣나무 잎에 장기간 인공비를 처리한 경우의 건중량은 pH 3.5의 인공비와 pH 5.6의 인공비 사이에 차이가 없었다. 이러한 결과는 *Pseudotsuga menziesii*을 12주동안 성장시키면서 pH 2.0~5.6의 산성비를 처리한 침엽의 건조 중량에 차이가 없다는 보고(McColl and Johnson, 1983)나 Edwards 등(1991)의 보고와 같은 경향이었다. 또한 스트로부스 소나무 유식물의 건중량이 pH 3.0 과 pH 4.0에서 차이가 없었다는 보고(Wood and Bormann, 1977)와 리기다소나무 유식물의 지상부 건중량이 pH 5.6과 pH 3.5에서 같았다는 보고(Rhyu, 1994)와 같은 경향을 보였다. 그러나 이러한 결과는 산성비 처리에 의해 은행나무와 곰솔(*Pinus thunbergii*)의 유식물(Kim & Soh, 1994), 붉은 가문비나무(*Picea rubens*)의 유식물(Lee et al., 1990), 테다소나무(*Pinus taeda*)의 유식물(Wright et al., 1991)의 건물량을 증가 시킨다는 보고와는 상반되었다. 그러나 본실험에서도 산성비를 처리한 초기 3개월 정도는 소나무나 잣나무 모두 대조구에 비하여 건중량이 촉진되었다. 이는 이미 선행된 실험들이 유식물에 산성비를 3개월 정도 처리한 결과라는 점을 생각하면 산성비의 처리가 초기의 건중량을 증가시킨다는 점에서 같은 결과라고 볼수 있다. 산성빗물에 의한 초기의 성장 촉진은 빗물을 통한 N의 증가와 토양이온의 활성화에 있다(Aber et al., 1982; Tveite et al., 1991). 그러나 오랜기간의 산성비는 토양속에 N과 산성 금속이온을 증가시키고 토양에서의 염기성 이온을

세탈시킴으로서 식물의생장을 억제할 것으로 보인다(Tveite et al., 1991). 따라서 식물의 종에 따라 그리고 성장기에 따라 산성비의 감수성이 다르게 나타나기는 하지만 장기간의 계속되는 산성비는 식물의 생장을 억제 할 것으로 사료된다.

소나무와 잣나무 잎의 수분함량과 수분 부족정도를 나타내는 수분포화결차 그리고 표피증산률도 7개월 동안 장기간 처리한 경우에는 pH 3.5의 인공산성비와 pH 5.6의 인공비 사이에 큰 차이가 없었다. 인공비를 처리한 3개월 짜인 11월에는 산성비를 처리한 소나무나 잣나무의 잎 모두 수분함량이 대조구에 비하여 일시적으로 현저히 감소하였다. 또한 수분 포화결차도 인공비를 처리한 3개월 후인 11월에 인공산성비 처리구에 비하여 대조구가 현저하게 낮았으며 표피증산률은 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 높았다. Rhyu(1994)는 리기다소나무 잎의 함수량이 4월 초순에 가장 적으며 수분포화 결차도 이 시기에 가장 높다고 보고하였다. 소나무와 잣나무가 특히 11월에 강수량이 많음(기상청 1987/1998)에도 불구하고 인공산성비를 처리한 구가 대조구에 비하여 수분함량이 적고 수분포화결차가 높으며 표피증산률이 높은 이유는 인공산성비를 처리한 소나무와 잣나무 잎의 기공과 큐티클층이 붕괴로 인한 증산량의 증가 때문으로 해석된다(krause, 1983; Cape, 1986; krause and Cannon, 1991). 소나무와 잣나무 모두 잎 표면은 산성비를 처리한 구에서 심한 왁스층의 침식이 일어났다(Fig. 6). 이러한 왁스층의 침식은 잎에서의 증산량을 증가시킬것으로 예상된다. 유사한 결과로 *Artemisia tilesii*의 잎과 기공이 산성비에 의해 손상되었다는 보고(adams et al., 1984), 인공산성비에 의해 잎표면의 왁스층이 용해 침식되어 기공의 개폐기작에 영향을 준다는 보고(Lee et al., 1993)도 있다. 다른 연구 결과에 의하면 wax 구조의 파괴는 대기오염이 심한 1~2월에 많이 관찰되었으며(Karhu and Huttunen, 1986), 대기오염에의해 나타나는 잎의 상해 상태와 산성비에 의해 나타나는 상해 형태가 비슷하다는(Krause & Cannon, 1991)보고도 있다. Kim 과 Soh(1994)는 은행나무와 곰솔의

Table 2. Monthly mean meteorological information of air temperature, relative humidity, precipitation and duration of sunshine in Taejon(1997/1998)

Year, Month	Air Temperature			Relative Humidity	Precipitation	Duration of Sunshine
	Mean	Max.	Min.			
1997, August	26.0	30.8	22.	80	463.5	228.7
1997, September	20.1	26.1	14.8	71	30.2	245.8
1997, October	13.4	20.1	6.8	63	7.7	248.1
1997, November	8.6	14.5	3.7	72	168.2	164.6
1997, December	1.8	6.9	-2.6	69	44.5	149.4
1998, January	-0.9	3.7	-5.2	69	33.3	145.4
1998, February	3.5	9.1	-1.4	62	36.3	158.9
1998, March	7.3	14.0	1.3	54	31.1	219.4

어린 식물에서 산성비가 기공의 크기와 형태에는 변화를 주지 않으나 기공의 개폐기작에 영향을 미치는 것으로 해석하였으나 본 실험에서는 소나무와 잣나무 모두 산성비처리에 의해 공극의 크기가 커졌으며 Floring ring과 주변 표피세포의 왁스층이 심하게 침식되고 기공의 개폐구조가 손상되어 진 것으로 보아 인공산성비에 의한 기공의 손상이 기공 개폐의 기작에 대해 영향을 미쳐 소나무나 잣나무의 수분포텐셜을 낮추고 수분증산을 촉진시키는 것으로 생각 된다. Rhyu(1994)는 인공산성비가 리기다소나무의 수분포텐셜을 낮추고 수분증산이 약간 증가된다고 보고하였으며, Lee 등(1990)은 산성비와 O₃에 노출된 붉은 가문비 유식물의 생장이 수분포텐셜 변화에 민감하다고 보고하였다. 이러한 결과들은 산성비가 초기에는 N의 증가나 토양이온을 활성화시켜 생장을 촉진하나 오랜기간의 산성비는 잎의 수분함량을 낮추고 수분포텐셜을 변화시키며 기공이나 큐티클층의 구조를 파괴하여 수분의 증산을 증대시킴으로서 수분스트레스를 강하게 받게하는 것으로 해석된다.

사사

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기초과학, BSRI-97-4442)에 의해 수행되었음.

인용문헌

- Aber J. D., hendrey G. R., Botkin D. B., Francis A. J. and Melillo J. M. 1982. Potential effects of acid precipitation on soil nitrogen and productivity of forest ecosystem. *Water, Air, and Soil Pollution* 18:405-412
- Adams C. M., Dengler N. G. and Hutchinson T. C. 1984. Acid rain effects on foliar histology of *Artemisia tilesii*. *Can. J. Bot.* 62:463-474
- Barrs H. D. and Weatherley D. E. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Aust. J. Biol. Sci.* 15:413-428
- Boweley R. J. F. and Stotzky G. 1984. *Soil Sci.* 137:425-418
- Braekke F. H. 1976. Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystem in Norway. SNSF Project, As, Norway, Res. Rep. FR. 6/76 pp111
- Cape J. N. 1986. Effects of air pollution on chemistry of surface waxes of scots pine. *Water, Air and Soil Pollution.* 31:393-399
- Krause C. R. 1983. Diagnosis of ambient air pollution injury to red maple leaves. *Scanning Electron Microscopy III* :203-206
- Krause C. R. and Cannon W. N. 1991. Epistomatal wax injury to red spruce needles(*Picea abies*) grown in elevated levels of ozone and acidified

- rain. Scanning Microscopy V 1173-1180
- Edwards G. S., Edwards N. T., Kelly J. M. and Mays P. A. 1991. Ozone, acidic precipitation, and soil Mg effects on growth and nutrition of loblolly pine seedlings. *Environmental and Experimental Botany* 31:67-78
- Evans L. S. 1980. Foliar responses that may determine plant injury by simulated acid rain. In *Polluted rain*. Yoribara T. Y., Miller M. W. and Morrow P. E.(eds). Plenum Press. New York. pp239-254
- Fairfax J. A. W. and Lepp N. W. 1975. Effect of simulated acid rain on cation loss from leaves. *Nature* 255:324-325
- Ferenbaugh R. W. 1976. Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae). *Am. J. Bot.* 63:283-288
- Haines B.L., Ternstedt J. A. and Newfeld H. S. 1985. Direct folia effects of simulated acid rain II. Leaf surface characteristics. *New Phytol.* 99:407-416
- Hindawi I. J., Rea J. A. and Griffis W. L. 1980. Response of bush bean exposed to acid mist. *Am. J. Bot.* 67:168-172
- Hovland J. 1981. *Soil Biol. Biochem.* 13:23-26
- Irving P. M. and Miller J. E. 1980. Response of field grown soybeans to acid precipitation alone and in combination with sulfur dioxide. In *Proceedings International Conference on the Ecological Effects of Acid Precipitation*. D. Drablos and A. Tollan(ed.) Sandefjord. Norway. pp170-171
- Karhu M. and Huttunen S. 1986. Erosion effects of air pollution on needle surface. *Water, Air, and Soil pollution* 31:417-423
- Kelly J. M and Strickland R. C. 1986. Throughfall and plant nutrient concentration response to simulated acid rain treatment. *Water, Air and Soil pollut.* 29:219-231
- Kim J. H. 1990. Acid rain. *The Korean Association of Bio. Sci. Symposium of Bio. Sci.* 11:70-97
- Kim G. T. 1991. Effects of artificial acid rain on seed germination and seedling growth of several conifers I. *J. Korean For. Soc.* 80: 237-245
- Kim M. R. and Soh W. Y. 1994. Growth response of *Ginkgo biloba* and *Pinus thunbergii* exposed on simulated acid rain. *J. Plant Biol.* 37:93-99
- Kim M. R. and Soh W. Y. 1995. Effect of simulated acid rain on foliar structural changes of *Ginkgo biloba* and *Pinus thunbergii*. *J. Plant Biol.* 38:79-86
- Korea Meteorological Administration. 1997/1998. Monthly weather report. Korea Meteorological Administration. Seoul Korea.
- Lee J. J. and Weber D. E. 1979. The effect of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species. *Forest Sci.* 25:393-398
- Lee W. S., Chevorn B. I. and Seiler J. R. 1990. Growth response and drought susceptibility of red spruce seedlings exposed to simulated acidic rain and ozone. *Forest Sci.* 36:265-275
- Lee K. H., Chung G. C. and Lee J. S. 1993. Effects of simulated acid rain on stomatal resistance, wettability and anatomical changes in *Quercus acutissima* and *Ginkgo biloba* seedlings. *Jour. Korean For. Soc.* 82:337-346
- Linkens G. E., Wright R.F., Galloway J. N. and Butler T. J. 1979. Acid rain. *Sci. Am.* 241:43-51
- McColl J. G. and Johnson R. 1983. Effects of simulated acid rain on germination and early growth of Douglas-fir and Ponderosa pine. *Plant and soil* 74:125-129
- Naurice C. G. and Crang R. E. 1986. Increase in *Pinus strobus* needle transectional areas in response to acid misting. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 15:77-82
- Powell W., Morgante R., McDevitt R., Vendramin G. G. and Rafalski J. A. 1995. Polymorphic simple sequence repeat regions in chloroplast genomes: applications to the population genetics of pines, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 92: 7759-7763
- Raynal D. J., Roman J. R. and Eichenlaub W. M. 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

- Rhyu T. C. 1994. Mechanism and Recovery of Pinus rigida forest decline by acidic deposition in the metropolitan area of Seoul, Korea. Ph. D. Thesis, Seoul Nat'l Univ. Seoul. pp103
- Rhyu T. C. and Kim J. H. 1994. Water Deficit of pitch pines caused by superficial rooting and air pollutants in seoul and its vicinity. J. Plant Biol. 37:309-316.
- Tukey Jr. H. B. 1975. Regulation on plant growth by rain and mist. proceeding International Plant Propagator's Society 25:403-406
- Tveite. 1990/1991. Liming and wet acid deposition effects on tree growth and nutrition: Experimental results. Water, Air and Soil Pollution 54:409-422
- Wood T. and Bormann F. H. 1977. Short-term effects of a simulated acid rain upon the growth and nutrient relations of Pinus strobus L. Water, Air and Soil pollut. 7:479-488
- Wright L. M., Lockaby B. G., Meldahl R., Thornton F. and Chappelka A. H. 1990/1991. The influence of acid precipitation and ozone on nitrogen nutrition of young loblolly pine. Water, Air and Soil Pollution 54:135-142
- Yoon E. S. 1997. Isozyme variants in genus Pinus by simulated acidic rain. Korean J. Plant Res. 10:305-313
- (접수일:1998.12.30)
(수리일:1999. 2. 6)