

인공산성비가 돌콩의 생육과 잎의 수분상태에 미치는 영향

윤의수

공주대학교 자연과학대학 생물학과

Effect of Simulated Acid Rain on Water Status and Growth of *Glycine soja* S. et Z.

Eui-Soo Yoon

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

ABSTRACT

The effects of the simulated acid rain on the growth response and water status of *Glycine soja* was observed in 2 months-old seedlings. The seedlings were treated with acid rain(pH 3.5), three times per week. *Glycine soja* showed significant reduction in the total length, total weight, dry weight, water contents and top/root ratio after treatment of simulated acid rain(pH 3.5) for 56 days. The growth of shoot was more susceptible to acid rain than that of roots. On the contrary, Number of lateral roots, water saturation deficit and epidermis transpiration was higher than that of control(pH 5.6) after 56 days treatment of simulated acid rain.

Key words : Simulated acid rain, *Glycine soja*, growth response, water status

서론

대기의 오염 물질에 의해 형성되는 산성비는 이미 1960년대부터 큰 환경 문제로 대두되고 있다. 특히 산성비는 육상 생태계에 직접 혹은 간접으로 영향을 미친다. 산성비가 인간생활에 미치는 영향은 황산을 물에 얹게 희석할 때 해리된 수소와 똑같은 작용을 갖는다고 한다. 따라서 산성비는 식물체에서 세포생화학적, 생리학적으로 많은 변화를 유도한다. 산성비는 양이온의 용탈과 식물체내의 구성비를 변

경시키며, 잎의 조직을 변성시키고 수분 수정을 저해할 뿐 아니라 토양의 미생물 종조성을 바꾸거나 저해한다. 한국에서는 1980년 이전부터 이미 산성비가 내리고 있으며(박 등, 1983) 서울 뿐만이 아니고 중도시인 청주나 대전에서도 산성비가 내리고 있다(이 와 장 1987). 일본에서는 산성비에 의해 삼나무의 쇠퇴징후가 일어난다는 것이 밝혀졌으며(Yamanaka, 1989), sankei 신문은(1986.10.6) 일본의 거의 모든 지역에서 pH5.0 이하의 비가 내린다고 발표하였다. 산성비가 식물체에 미치는 영향에 대하여는 pine-birch 숲에서의 반응(Shevtsova and

Corresponding author: 윤 의 수, 우.314-110, 충남 공주시 신관동 공주대학교 생물학과
E-mail: yes@knu.kongju.ac.kr

Neuvonen, 1997), 강남콩, 노란 자작나무의 생장(모, 1995, Hindawi et al., 1980), flowering Dogwood에 있어서 인공산성비의 영향(Britton et al., 1996), 산림계에서의 장기적 산성비의 영향(Likens et al., 1996), 송백류의 종자 발아와 유식물의 발생에 대한 영향(Braekke 1976, Raynall et al., 1982), pH에 따른 토양속의 Al농도의 영향(Muhlenberg, 1990)등의 많은 연구들이 있다.

이와 같이 산성비가 식물에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 되어지고 있으나 산성비에 대한 종별 감수성에 대한 연구는 충분하지 못하다. 또한 종별 감수성을 이해하기 위해서는 산성비가 식물의 생장과 수분상태의 변화에 미치는 영향을 확인하는 것이 중요한 과제이다. 따라서, 이전의 연구에서는 목본류인 성장한 소나무류에 장기간 인공산성비를 처리하여 수분상태와 잎의 표면구조를 조사하였다(Yoon, 1999). 본 연구에서는 목본류와 비교하기 위하여 초본류 중 돌콩을 대상으로 생육이 왕성한 생장초기의 유식물체에 있어서 산성강하물이 생육과 잎의 수분함량, 수분포화결차, 표피증산률 등 수분상태에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

재료 및 방법

재료

본 실험에 사용된 돌콩(*Glycine soja* S. et Z.)은 1998년도에 공주대학교 자연과학대학 주변에서 종자를 채취하였으며 1998년 10월부터 1999년 4월까지 3회에 걸쳐 바미큐라이트에 종자를 파종하여 25℃에서 발아 시켰다.

본 실험에 사용한 돌콩(*Glycine soja* S. et Z.)의 종자는 24시간 수돗물에 침적시킨후 바미큐라이트를 채운 40×25×15cm의 plastic pot에 각각 150개 썬의 종자를 파종하여 25℃에서 발아 시켰다. 각 처리구당 3개씩의 pot를 배치하고 종자를 파종 한 직후부터 pH 3.5인 인공 산성비와 pH 5.6인 인공비를 매주 월, 수, 금요일 오전 10시경에 충분히 분무하였으며 파종후 14일째부터 2개월간 온실에서 재배하였다.

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. 파종 후 14일 간격으로 각 처리구에서 15개체 씩을 채취하여 본 실험에 이용하였다.

생육상태 측정

유식물의 총 생중량, 지상부와 지하부의 중량, 건중량, 잎의 길이와 폭, 전체의 길이, 줄기와 뿌리의 길이를 측정하고 측근의 수를 조사하였다. 각 개체당의 측정은 15개체를 측정하였으며 3반복하였다.

또한 자엽으로부터 첫 번째잎이 황화되어 줄기로 부터 낙엽되는 시기를 조사하였다.

전체 길이와 전체의 무게는 한 개체의 정단부에서 뿌리 끝까지를 측정하였으며, 잎 길이와 잎 폭의 조사는 자엽으로부터의 첫 번째 잎을 사용하였다.

잎의 표면적은 다음 등식(Constantinidou and Kozlowski, 1979)을 사용하여 계산하였다.

$$A=0.1981 + 0.5674(L) \times (W)$$

A: 잎의 표면적, L: 잎의 길이, W: 잎의 폭

Top/Root율은 유식물을 취하여 총 중량과 지상부와 지하부의 중량을 측정하고 지상부의 중량을 지하부의 중량으로 나누어 나타내었다.

수분상태 측정

파종 후 14일 간격으로 자엽으로부터 첫번째 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 lamp로 12시간 방치하여 수분을 침윤시켰다. 표피에 묻은 수분을 제거한 후 침윤무게(t.w)를 측정하였다. 침윤무게를 측정한 후 80℃로 건조기에서 72시간 건조하여 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 생

중량을 측정하고 8℃ 암실에서 시료를 7일간 방치한 후 생중량(f.w1)을 측정하였다.

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

결과

생육

돌콩의 전체 길이 변화는 pH 3.5인 인공산성비를 처리한 구에서는 파종후 14일 째에 98.5mm에서 56일 째는 455mm로 3.6배, pH 5.6의 인공비를 처리한 대조구에서는 파종후 14일 째에 125mm에서 56일 째에는 753.6mm로 5배의 생장이 보여졌다. 대조구와 인공산성비 처리구 사이에서 성장 초기에는 성장에 큰 차이가 없지만 시간이 경과됨에 따라 인공산성비 처리구의 생장이 대조구에 비하여 66% 정도의 성장 둔화가 보여 졌다(Fig. 1).

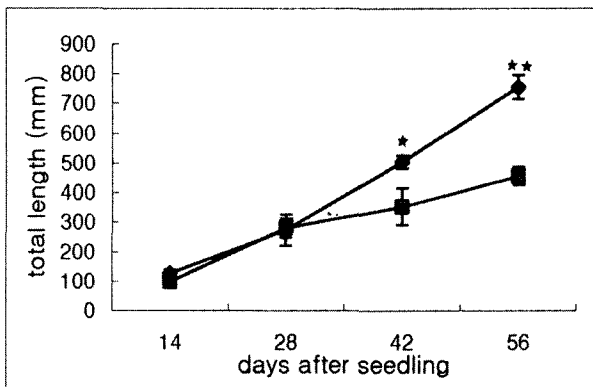


Fig 1. Changes of total length of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

전체 무게의 경우는 대조구에서 37.2mg에서 146.7mg으로 약 3배 증가하였으며, 인공산성비 처리구에서는 31.9mg에서 115.7mg으로 2.6배 증가하였다. 인공산성비 처리구는 발아 후 성장 초기인 28일까지는 대조구에 비해 전체 무게의 생장이 대조구에

비하여 약간 빨랐으나 그 이후로 그 성장 속도가 저해 되었다. 전체적인 생육은 인공산성비 처리에 의해 생장의 초기에는 약간 촉진되는 경향이 보였으나 시간이 지날수록 성장 속도가 둔화되었다(Fig. 2).

앞에서는 시간의 경과에 따라 잎 길이와 잎의 폭 그리고 잎의 표면적은 인공 산성비 처리구가 대조구

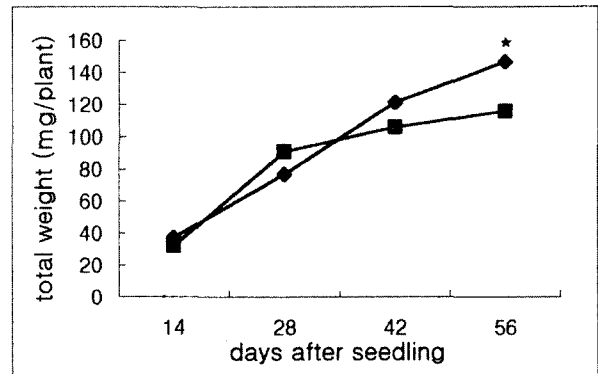


Fig 2. Changes of total weight of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

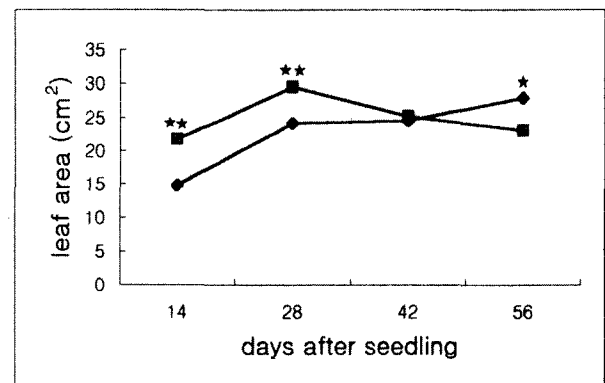


Fig 3. Changes of leaf area of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

에 비하여 생장의 초기에 5% 수준에서 통계적 유의성이 인정되었다(Fig 3). 그러나 생장의 진행에 따라 인공 산성비의 처리구에서 생장이 둔화되고 발아후 56일째에는 대조구가 인공산성비의 구에 비하여 1% 유의 수준에서 생장이 촉진되었다.

또한 인공산성비를 처리한 구는 대조구에 비하여 잎의 낙엽속도가 빨라 발아후 56일 째에는 줄기에 거의 붙어있지 못하고 대부분 낙엽화 되었다. 즉, 발아 후 생장 초기에는 인공산성비를 처리한 구에서의 잎의 생육은 대조구에 비하여 빠르지만, 생장이 진행됨에 따라 생장 후기로 갈수록 대조구에 비하여 빠르게 잎의 생장이 억제 되거나 퇴화되었다.

뿌리의 길이는 인공산성비를 처리한 구가 대조구에 비하여 초기의 생장에 있어서 5%의 수준에서 유의성을 보이면서 빠른 성장을 하지만 파종 28일 이후로는 생장이 억제되며 56일째에는 거의 생장이 멈추게 된다.(Fig. 4).

뿌리의 측근의 수는 생장의 초기에는 대조구가 인공산성비의 처리구에 비하여 약간 많으나 파종 후 56일째에는 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 측근의 수가 높게 나타났다(Fig. 5). 즉, 대조구의 경우 발아초기나 후기나 뿌리의 생장 속도에는 큰 차

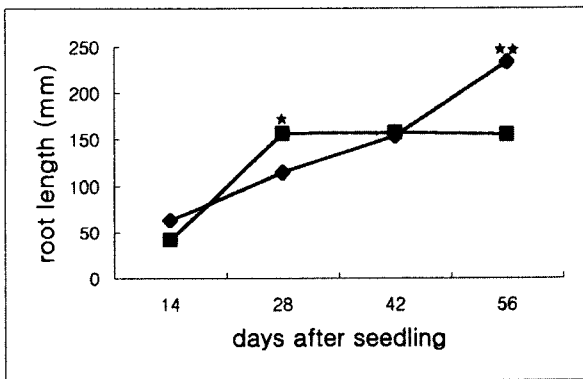


Fig 4. Changes of root length of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

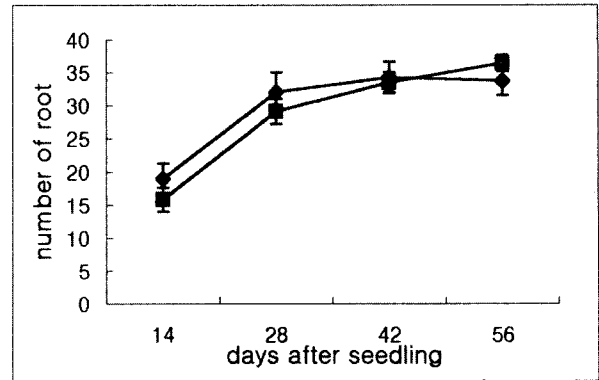


Fig 5. Changes of root number of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆).

이가 없었으나, 인공산성비를 처리한 구에서는 생장 초기에는 부터 대조구에 비하여 빠른 성장을 보이다가 시간의 경과에 따라 차츰 억제되면서 측근의 수가 증가하였다.(Fig. 4, 5).

Top-Root의 비율은 대조구는 차츰 지상부의 생장이 지하부보다 약간 커지는 경향이 보였으나 인공산성비 처리구는 시간이 지남에 따라 지상부의 생장이 억제되는 경향이 보였다(Fig. 6).

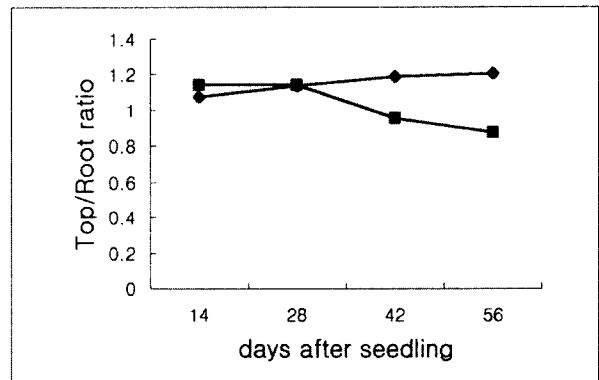


Fig 6. Changes of top/root ratio of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆).

잎의 수분상태

자엽으로부터 첫 번째 잎의 생체 1g당 건중량의 변화는 대조구의 경우 파종 후 14일 째에 6.9mg에서 파종 후 56일째에는 11.8mg으로 71% 증가하였으며 인공산성비를 처리한 구에서는 파종 후 14일째의 8.4mg에서 파종 후 56일째는 10.6mg으로 26% 증가하는데 그쳤다. 인공산성비를 처리한 구에서의 건중량도 초기에는 생장이 빠르나 시간의 경과에 따라 차츰 저해되고 있음을 나타낸다(Fig. 7)

시간에 따른 수분함량은 초기의 대조구의 경우, 시간의 경과에 따른 수분의 함량에 큰 변화가 없으나 인공산성비 처리구는 성장 후기에 급속도로 감소하였으며(Fig. 8), 인공산성비 처리구가 대조구에 비하여 수분함량이 일반적으로 훨씬 낮았다.

수분포화결차의 변화는 대조구의 경우 4.4%에서 33.8%로 시간의 경과에 따라 차츰 증가를 하였다. 그러나 인공산성비를 처리한 구는 수분포화 결차에 큰 변화를 보이지 않았으며 파종 후 56일째에 62%로 증가하였다. 특히 인공산성비 처리구는 초기 생장기부터 수분포화결차가 40%로 대조구의 4.4%에 대해 월등히 높았으며 그 현상은 성장 후기까지 계

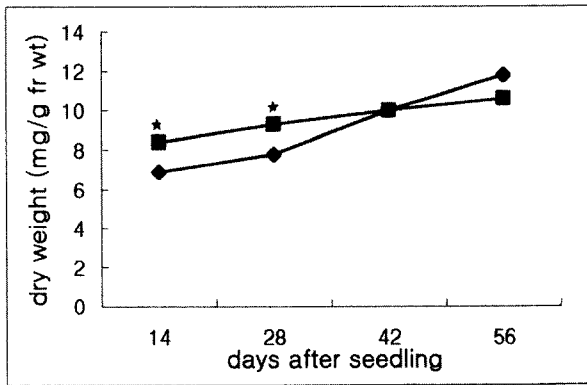


Fig 7. Changes of dry weight of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

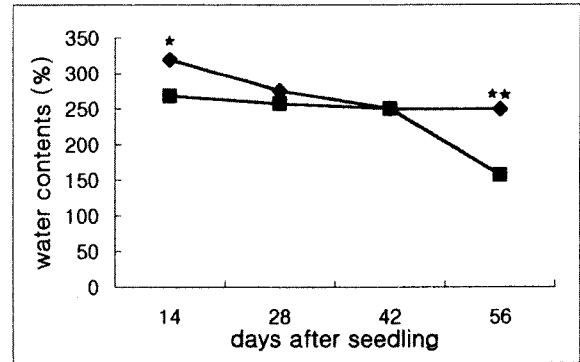


Fig 8. Changes of water content of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

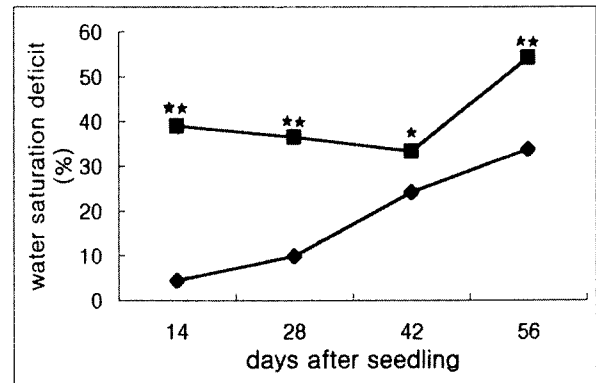


Fig 9. Changes of water saturation deficit of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

속되었다(Fig.9).

표피 증산률은 대조구의 경우 성장 초기에는 큰 차를 보이지 않았으나 파종후 56일째에는 22%로 약간 증가하였다. 그러나 인공산성비를 처리한 구에서는 시간의 경과에 따라 점점 증가하여 27.6%로 증가하였으며 생장의 초기에는 두 구사이에 큰 차가 없

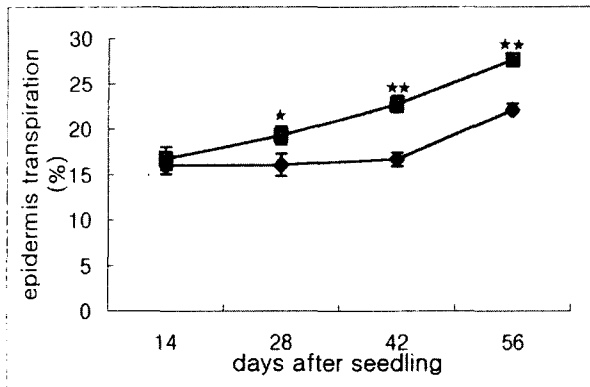


Fig 10. Changes of epidermis transpiration of *Glycine soja* S. et Z. seedlings treated with simulated acid rain for two months. The seedlings were cultured under condition of spraying with simulated rain of pH 3.5(■) or pH 5.6(◆). ★: Significances at 5% levels, ★★: Significances at 1% levels.

었으나 생장 후기로 갈수록 인공산성비 처리구에서 표피증산률이 높게 유지되었다(Fig. 10).

고찰

여우콩의 종자에 인공비를 처리하였을 때, 초기 생육은 pH 3.5의 인공산성비를 처리한 구에서 pH 5.6의 인공비를 처리한 대조구에 비해 약간 증가하였다. 그러나 생장이 진행되면서 후기생육은 인공산성비를 처리한 구에서 크게 감소하였다. 또한 잎의 성장에서도 같은 경향을 보였는데, 잎의 초기생장은 인공산성비를 처리한 구에서 대조구에 비하여 빠르게 진행되었으며, 후기생장에서는 퇴화가 빠르게 진행되었다. 뿌리의 생육은 대조구에 비하여 인공산성비를 처리한 구에서 왕성한 성장을 보이거나 파종후 32일째 이후로는 그 증가율이 감소하여 거의 생장이 정지되었으나 측근의 수는 증가되어 졌다. 건중량에 있어서도 생장 초기에는 인공산성비를 처리한 구에서 대조구에 비하여 높았으나 생장 후기에는 낮았다. 소나무와 잣나무의 연구(Yoon, 1999)에서와 마찬가지로 인공산성비는 초기의 생장과 건중량을 증가시키나 장기간 처리에서는 큰 차이가 없다는 보고

와 같은 결과라고 볼수 있다. Ferenbaugh(1976)나 모(1995)의 강남콩에서 생장이 감소한다고 한 보고와도 일치한다. 그러나 산성비 처리에 의해 은행나무와 곰솔(*Pinus thunbergii*)의 유식물(Kim and Soh, 1994), 붉은 가문비나무(*Picea rubens*)의 유식물(Lee et al., 1991), 테다소나무(*Pinus taeda*)의 유식물(Wright et al., 1990)의 건물량을 증가시킨다는 보고와는 상반된 경향을 보였다. 또한 인공산성강하물의 장기간 처리는 소나무와 잣나무에서와 마찬가지로 pH에 따른 큰 차이를 볼 수 없다고 한 보고나(Yoon, 1999), 스트로부스 소나무 유식물의 건중량이 pH에 따라 차이가 없다는 보고와는 상반되는 것처럼 보여 지지만 본 재료가 일년생 초본이라고 하는 점을 간주한다면 다년생 목본류의 차이가 없다고 하는 보고는 결국 pH에 대한 적응력이 초본에 비해 강하나 초본은 적응기 이전에 스트레스를 이기지 못하고 생장이 억제되는 것으로 생각된다. 이는 산성비가 초기에는 토양내에 N의 증가와 이온을 활성화시켜 생장을 촉진시키나(Aber et al., 1982, Tveite 1991) 오랜기간의 산성비는 잎으로부터 칼륨, 마그네슘과 같은 양이온이 용탈되고(유, 1990) 식물체 내의 각 양이온의 구성비를 변경시키며, 토양내 영양염류를 용출시키고 염기성 이온을 세탈시킬 뿐아니라, 금속이온을 증가시킴으로서 식물의 생장을 억제한다(Abrahamsen and Stuanes, 1986, Zoetl and Huettl, 1986) 결과라고 볼 수 있다.

또한 산성비는 일찍 낙엽이 일어나는 현상이 보여 지는데(Kranse et al., 1986) 본 연구에서도 인공 산성비 처리구에서는 자엽으로부터 첫 번째의 잎이 대조구에 비해 매우 빠른 낙엽화 현상이 나타났다.

인공산성비 처리구는 뿌리의 생장이 억제되면서 측근이 많이 나타나는 현상을 보였다. 이는 Ulrich(1981)는 산성비 처리에 의해 Al이 근단의 생장을 저지함으로 그 옆에서 측근이 나온다고 한 보고나, Al이 뿌리의 세포분열을 억제함으로서 뿌리의 생장을 억제하며 심하면 고사한다(Ohki, 1987, Nosko et al., 1988, Roy et al., 1988)는 보고와 일치하였다.

여우콩 잎의 수분함량은 대조구에서 인공산성비

를 처리한 구에 비하여 높았으며 인공산성비를 처리한 구에서는 생장 후기에 크게 감소하였다. 수분 부족정도를 나타내는 수분포화결차는 인공산성비를 처리한 구에서 대조구에 비하여 크게 높았으며, 배양 후기로 가면서 크게 증가하였다. 또한 표피 증산률도 같은 경향을 나타냈다. 이러한 이유로는 산성도가 높은 빗물은 표피를 덮는 epicuticular wax를 침식한다는 것이 SEM으로 밝혀 졌으며(Karhu and Huttunen, 1986, Yoon, 1999), 잎 표피에서의 wax의 손실이 표피세포로부터 무기영양소와 대사물질이 세탈되는 직접적인 원인(Kelly and Strickland, 1986)일 수도 있다. 이와 유사한 결과로 *Artemisia tilesii*의 잎과 기공이 산성비에 의해 손상되었다는 보고(Adams et al., 1984)와 인공산성비에 의해 잎표면의 왁스층이 용해 침식되어 기공의 개폐기작에 영향을 준다는 보고(Lee et al., 1993)도 있다. 또한, 소나무와 잣나무에 인공산성비를 처리하였을때도 이와 같은 결과를 나타내었다(Yoon, 1999). 따라서 인공산성비를 처리한 구에서 대조구에 비하여 수분함량이 적고 수분포화결차가 높으며 표피증산률이 높은 이유는 인공산성비를 처리한 돌콩 잎의 기공과 큐티클층의 붕괴로 인한 증산량의 증가때문으로 사료되며(Krause 1983, Cape 1986, Karause and Cannon, 1991) 생장의 둔화를 초래하는 원인으로 생각된다.

Rhyu(1994)와 Lee 등(1990)은 산성비가 식물체의 수분포텐셜을 낮추고, 생장이 이에 민감하다고 보고하였다. 이는 산성비가 초기에는 N의 증가나 토양이온을 활성화시켜 생장을 촉진하지만 오랜기간의 산성비는 잎의 수분함량을 낮추고 수분포텐셜을 변화시키며 수분의 증산을 증대시킴으로서 수분스트레스를 강하게 받게하는 것으로 해석된다. Meyer 등(1988)은 침엽수에서 수분 포텐셜이 낮아지는 원인으로 세포막에서의 물 투과의 억제와 뿌리 신장의 억제가 상승하여 나타난다고 하였다. 따라서 식물의 종에 따라, 또한 성장기에 따라 산성비의 감수성이 다르게 나타나는 하지만 본 연구의 결과와 다른 선행 연구들의 결과를 고찰해 볼 때 산성비는 초기 생육의 경우에는 일시적으로 생장의 촉진이 보여지지만 계속되는 산성비는 잎의 구조의 변화와 식물체

내의 양이온의 구성비를 변경시키며, 토양속의 염기성이온을 세탈시키고 Al과 같은 금속이온을 축적시킴으로서 뿌리의 생장을 저해하여 결과적으로 식물의 생장을 억제한다고 하는 것은 모든 식물에 있어서 공통현상으로 사료된다.

사 사

본 연구는 1998년도 교육부 학술연구 조성비(기초과학, BSRI-98-4442)에 의해 수행되었음.

인용문헌

- 박봉규, 이인숙, 최형선, 1983. 서울시에서의 산성강우에 관한연구. 논총. 한국생활과학연구원. 32: 137-142.
- 모기식, 1995. 강남콩(*Phaseolus vulgaris* L. var. *humilis* Alef.) 뿌리의 발생 생장에 미치는 인공산성비의 영향. 전북대. 박사학위논문
- 유태철, 1990. 인공산성 빗물의 산도에 따른 토양과 식물로부터 이온 세탈량의 변화. 서울대학교 석사논문. p.65
- 이수옥, 장관순, 1987. 한국내 산성우의 장거리 오염원(Distant pollution source)에 관한 연구. 환경연구보고. 충남대. 5:1-14
- 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
- Abrahamsen G. and Stuanes A. O. 1986. Lysimeter study of effects of acid deposition on properties and leaching of gleyed dystic brunisollic soil in Norway. *Water, Air and Soil Pollution* 31:865-878
- 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
- Brakke F. H. 1976. Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystem in Norway. SNSF Project. As, Norway, Res. Rep. FR. 6/76 pp111
- Britton K. O., Berrang P. and Mavity E. 1996. Effect of pretreatment with simulated acid rain on the severity of dogwood anthracnose. 80:646-649
- Cape J. N. 1986. Effects of air precipitation on

- chemistry of surface waxes of scots pine. *Water, Air and Soil Pollution*. 31:393-399
- Constantinidou H. A. and Kozłowski T. T. 1979. Effects of sulfur dioxide and ozone on *Ulmus americana* seedlings. I. Visible injury and growth. *Can. J. Bot.* 57:170-175
- Ferenbaugh R. W. 1976. Effect of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L.(Fabaceae). *Am. J. Bot.* 63:283-288
- 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
- Karhu M. and Hutlunen S. 1986. Erosion effects of air pollution on needle surface. *Water, Air and Soil Pollution* 31: 417-423
- Kelly J. and Strickland R. C. 1986. Throughfall and plant nutrient concentration response to simulated acid rain treatment. *Water, Air and Soil Pollution* 29: 219-231
- Kranse G. H. M., Arndt U., Brandt C. J., Bucher J., Kenk G. and Matzner 1986. Forest decline in Europe: Development and possible causes. *Water, Air and Soil Pollution* 31:647-668
- 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
- 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
- Lee K. H., 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
- Likens G. E., Driscoll C. T. and Buso D. C. 1996. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. *Science* 272: 244-246
- Meyer J. B., Schneider B. U., Werk K., Oren R. and Schulze E.-D. 1988. Performance of two *Picea abies*(L.) Karst. stands at different stages of decline IV. Xylem sap concentration of magnesium, calcium, potassium and nitrogen. *Oecologia* 77: 1-6
- Muhlenberg W. 1990. High aluminum concentration in well water of southern lower saxony sandy soil areas caused by acid precipitation-evaluation from the public health and ecologic viewpoint. *Offen λ Gesundheitswes* 52:1-8
- Nosko P. P., Brassard P., Kramer J. R. and Kershaw K. A. 1988. The effect of aluminium on seed germination and early seedling establishment, growth, and respiration of white spruce(*Picea glauca*). *Can. J. Bot.* 66:2305-2310
- Onki K. 1987. Aluminium stress on the sorghum growth and nutrient relationships. *Plant and Soil* 98: 195-202
- Raynal D. J., Roman J. R. and Eichenlaub W. M. 1982. Response of tree seedlings to acid precipitation II. Effect 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. 219pp
- Roy A. K., Sharma A. and Talukder G. 1988. Some aspects of aluminium toxicity in plants. *The Botanical Review* 54:145-177
- Shevtsova By A. and Neuvonen S. 1997. Responses of ground vegetation to prolonged simulated acid rain in sub-arctic pine-birch forest. *Nerc Phytal.* 136:613-625
- Tveite 1990/1991. Liming and wet acid deposition effects on tree growth and nutrition: *Experimental*

- results. *Water, Air and Soil Pollution* 54:409-422
- Ulrich B. 1981. Eine okosystemare hypothese uber die ursachen des tannensterbens(*Abies alba* Mill).- forstwiss. Centralbl. 100:228-236
- 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
- Yoon E. S. 1999. Effect of Simulated Acid Rain on Water Status of *Pinus densiflora* and *P. koraiensis*. *Korean J. Plant Res.* 12(1):10-19
- Zoettl H. W. and Huettl R. F. 1986. Nutrient supply and forest decline in Southwest-Germany. *Water, Air and Soil pollution* 31: 449-462
- (접수일 2000. 2. 20)
- (수리일 2000. 5. 20)