한국생태학회지 26(3):143~150, 2003 Korean J. Ecol.

〈종설〉

한국에서 수분수지의 생태적 중요성과 대기오염 및 토양 산성화로 인한 식물의 수분스트레스 증대 효과

이창석* · 이안나
서울여자대학교 환경 · 생명학부

적 요: 한국은 양적으로 강수량이 풍부하지만 강우현상이 편중되어 매년 일정기간의 가뭄기를 겪는다. 더구나 그 토양은 대부분 화강암에서 유래한 거친 입자의 것으로서 보수력이 낮다. 수 종의 참나무류와 소나무의 수분스트레스에 대한 반응 결과는 수분수지가 식생의 분포를 결정하는 주 요인임을 보여주었다. 뿐만 아니라 몇몇 상록식물의 월동기간 중 내한성 기작에 기인한 탈수 정도는 자연상태에서 그들의 분포와 밀접하게 관계되었다. 수분스트레스 처리 실험 결과 소나무는 건조에 대해 강한 내성을 보였지만 그 유식물은 가뭄기에 높은 고사율을 나타내었다. 그 고사율은 지소의 토양수분함량에 비례하는 경향이었다. 가뭄이 심한 6월 중 삼림토양의 수분함량과 수분스트레스 처리 실험에서 소나무 유식물이 영구위조점에 도달한 시점에서 배지토양의 수분함량을 비교한 결과는 가뭄기에 소나무 유식물의 높은 고사율이 수분부족에 기인함을 입증하였다. 대기오염물질 폭로실험 중 측정된 시료식물의 수분포텐셜은 시료식물에서 가시피해의 발생과 그 내성에 수분요인이 관계될 가능성을 보여주었다. 야외 현장 조사와 실내실험 결과 둘 다에서 심한 대기오염에 노출된 식물은 그렇지 않은 것과 비교하여 수분소실이 빠르게 일어나는데, 그것은 오염물질에 의한 잎 표면의 손상 정도와 관계되었다. 산성 토양에서 높은 함유량을 보이는 알루미늄은 식물의 뿌리생장을 억제하거나 비정상적 분포를 가져와 수분스트레스를 유발하였다. 대기오염과 토양 산성화에 기인한 이러한 수분스트레스 효과는 한국의 기후와 토양이 가지는 기존의 수분결핍효과에 덧붙여져 삼림쇠퇴를 유발하는 주 요인으로 작용할 가능성이 있다. 토양의 유기물 함량을 높여 포장용수량 증가에 기여할 수 있는 sludge는 산성토양을 개량하는데 기존의 개량제 못지않은 효과를 보였고, 낙엽추출물 또한 알루미늄에 의한 수분스트레스 효과를 완화시키는데 기여하였다. 이러한 결과를 종합하여 한국에서 삼림쇠퇴를 유발할 수 있는 스트레스요인들의 잠재적 상호작용을 모식화하였다. 나아가 그것을 완화할 수 있는 복원방안을 토양개량과 식생복원의 측면에서 제시하였다.

검색어: 건조, 대기오염, 삼림쇠퇴, 수분스트레스, 토양산성화, 포장용수량, Sludge

서 론

물은 지구상에서 가장 보편적이고, 중요한 물질 중의 하나이다. 그것은 생물의 생존에 필수적인 요인이고, 세계의 여러 지역에서 식생의 종류와 생산량은 유용한 물의 양에 의해 결정된다. 물의 중요성은 인류문명 초기부터 인식되어 고대의 우주론과 신화에서 그것은 중심적인 위치를 차지하였다. 그리고 오늘날 유용한 물은 식물의 생장을 결정할 뿐만 아니라 도시와 산업의 규모도 결정한다.

식물의 수분관계(water relation)의 중요성은 물의 생태적, 생리적 중요성으로부터 알 수 있고, 물의 생태적 중요성은 그것의 생리적 중요성의 결과이다. 물과 같은 환경요인이 식물의 생장에 영향을 미칠 수 있는 유일한 방법은 생리적 과정과 조건에 대한 영향을 통해서이다. 거의 모든 식물의 대사과정은 직·간접적으로 수분공급의 영향을 받는다. 이러한 영향 중 많은 것은 세포와 식물의 대사활동 한계 내에서 그들의 수분함량과 밀접하게 관계된다.

식물의 생장은 세포의 분열과 생장속도, 그리고 새로운 원형질과 세포벽의 합성에 필요한 유기, 무기화합물의 공급에 의해 조절된다. 특히 세포의 생장은 세포의 팽압과 관계되고, 줄기와 잎의 신장은 수분부족에 의해 억제된다(Salisbury and Ross 1992). 수분함량의 감소는 광합성을 억제하고, 호흡률과 기타 효소관련 대사속도를 감소시킨다. 즉, 수분함량의 감소는 팽압의 소실과 위조, 세포생장의 중지, 기공폐쇄, 광합성량 감소 및 여러 가지 기초대사활동의 감소를 수반한다. 식물의 수분상태(water status)는 야외조건, 특히 수분스트레스를 받았을 때 식물의 생리적 반응을 나타내는 척도가 된다. Slatyer와 Tayler(1960)가 식물세포의 수분상태를 나타내는 척도로서 수분포텐셜(water potential)의 사용을 제안한 이후 수분포텐셜이 수분상태의 척도로 이용되어 왔다(Fanjul and Rosher 1984). 계속되는 탈수는 궁극적으로 원형질의 붕괴를 가져오고, 대부분의 생물의 죽음을

*Corresponding author; Phone: 82-2-970-5666, e-mail: leecs@swu.ac.kr

가져온다. 따라서 다양한 생태학적 연구의 여러 부분에서 수분수지에 대한 고찰은 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 적은 양의 강수량이나 토양수분의 부족, 많은 증발산으로 인한 수분소실속도의 증가, 또는 이들 두 조건의 합에 의해 건조한 환경이 조성되면, 식물이 탈수되고 수분포텐셜이 낮아진다(Hsiao 1973, Jones and Turner 1978, Jones 1983, Morgan 1984).

우리나라는 연 강수량이 약 1,300mm로서 비교적 많은 편이지만 연 강수량의 대부분이 7~8월에 집중되고 있어 식물의 생장초기인 3~6월에 심한 건조현상이 나타난다. 그리고 수분보유능이 떨어지는 화강암 유래의 토양이 큰 비중을 차지하는 것도 식물의 수분수지에 불리한 요인으로 작용한다.

따라서 식물의 수분관계에 대한 검토와 그것에 영향을 미치는 요인에 대하여 검토하는 것은 이와 같이 특수한 환경에 있는 한국의 자연환경의 보전과 다양한 인위적 활동으로 나타나는 환경변화에 대처하여 자연환경 보전계획을 수립하는데도 반드시 필요한 연구라고 생각한다. 본 연구는 한국의 기후특성과 수분관계, 식생의 분포와 정착 등 자연환경에 미치는 수분의 영향, 그리고 인위적 활동에서 비롯된 환경변화의 예로서 대기오염과 산성비, 그리고 그것에 기인한 토양 산성화와 수분수지 사이의 관계를 고찰하는데 하나의 목적을 두고 있다. 나아가 이러한 요인들의 상호작용을 통해 예견되는 삼림쇠퇴의 발생기작을 모식화하고, 그것을 방지하기 위한 복원계획을 수립하는데 또 하나의 목적을 두고 있다.

한국의 기후와 수분결핍

한국의 기후는 전형적인 대륙성 기후로서 겨울은 한랭, 건조하고 여름은 무더우며 강수량이 많다(이 2000). 한국의 몇몇 지역에서 강수량과 잠재증발량(potential evaporation) 사이의 관계를 검토하였다(Fig. 1). 강수량은 장마기인 6~8월과 태풍의 영향을 받는 9월에 집중되고, 나머지 달은 대부분의 지역에서 100mm/월 이하로서 극심한 편향적 분포를 보이고 있다. 그리고 강수량과 잠재증발량 사이의 관계를 보면, 대부분의 지역에서 상기한 장마 및 태풍기간을 제외한 나머지 달에는 잠재증발량이 강수량을 넘어서는 것을 볼 수 있다.

강수량의 이와 같은 편향적 분포는 식물의 수분수지에 불리하게 작용한다. 특히 식물의 생장기인 3~6월은 연례적인 가뭄현상으로 잠재증발량과 강수량 사이의 차이가 심하여 식물의 생장이 지장을 받을 뿐만 아니라 유식물의 정착에도 막대한 지장을 초래하여 엉성한 숲(coarse stand)을 형성하고, 교란 후 식생회복 속도를 느리게 하는 원인이 되고 있다.

한편, 증발량이 기온과 밀접하게 관계된다는 사실(Kijne 1973)을 고려하면, 앞으로 지구온난화 현상과 도시열섬 현상에 의한 증발량의 증가효과도 중요한 생태적 변수로 작용할 것으로 생각된다(Fig. 2).

수분수지와 식생의 분포

포트에서 재배한 참나무류 유식물에 수분공급을 중단하고 수분포텐셜의 변화를 측정한 결과에서 보면(김 1990), 신갈나무, 떡갈나무, 상수리나무, 졸참나무 및 갈참나무는 급수를 중단하고 9일 뒤부터 수분포텐셜이 감소하였으나 굴참나무는 급수중단 후 20일까지 뚜렷한 변화를 보이지 않았고 그 이후에 감소하였다. 한편, 졸참나무와 떡갈나무는 급수를 중단하고 18일, 갈참나무와 신갈나무는 19일, 상수리나무는 20일 이후부터 수분포텐셜이 급격히 감소한 반면에 굴참나무는 이들보다 늦은 24일 이후부터 급격한 감소를 보였다. 이러한 결과는 다른 참나무속 식물이 굴참나무보다 수분결핍에 대해 예민한 반응을 하고 저항성이 떨어지는 것을 의미한다. 자연환경에서 이들 참나무속 식물들의 분포를 보면, 졸참나무와 갈참나무는 산지 계곡이나 저지대, 떡갈나무는 산복 이하의 저지대, 신갈나무는 산복 이상의 적습 지소에 주로 분포하고, 상수리나무는 숲 내부보다 적습한 숲 가장자리, 그리고 굴참나무는 남사면의 암석지나 급 경사지에 주로 분포하여 그 분포가 수분결핍에 대한 반응과 관련됨을 입증한다(강 등 1988, 김 및 임 1988, Kim and Yim 1987, 1988, 이 1989).

한편, 이러한 결과를 후술하는 소나무 유식물의 결과와 비교하면, 소나무는 급수를 중단하고 20일(자엽) 또는 30일(제1엽 및 제2엽) 이후부터 수분포텐셜이 낮아지기 시작하였고, 40일 이후부터 급격히 감소하기 시작하였다(Lee and Kim 2003). 이러한 결과로부터 소나무는 참나무속 식물과 비교하여 건조저항이 강함을 알 수 있는데, 실제로 소나무는 주 분포지가 산지 능선부나 정상부의 노암지로서 이러한 사실을 입증하고 있다(이 1989, 이 1995a, 1995b).

한편, 주목, 전나무, 소나무, 잣나무 및 회양목을 대상으로 수분포텐셜의 연 변화를 조사한 결과(김 및 이 1986)에서 보면, 이들 상록식물의 수분포텐셜은 겨울에 낮아지고, 봄에 상승하였다가 가뭄기에 다시 낮아지는 경향을 보였다. 그 중 회양목은 겨울동안 수분포텐셜이 지속적으로 낮아졌지만 주목, 전나무, 잣나무 및 소나무의 침엽수들은 11월 하순부터 12월 중순까지 낮아지고, 그 후 2월말 또는 3월 초까지는 그 상태에서 평형을 유지하였다. 이러한 상록 침엽수들의 수분포텐셜이 평형을 유지하고 낮아지지 않은 것은 이들의 내한성 기작과 관련되고(Marchand and Chabot 1978, Kincaid and Lyons 1981), 내한성 기작은 건조내성기작과 밀접하게 관계된다(Larcher 1980). 회양목은 침엽식물과 달리 수분포텐셜값이 평형을 이루는 내한기를 갖지 않고 저온기간에 지속적으로 수분포텐셜이 감소하였다. 따라서 회양목은 저온기간이 더 지속된다면 수분포텐셜이 계속적으로 낮아져 수분부족의 위기를 맞게 될 것이고, 이것이 회양목이 이들 침엽식물보다 더 온난한 곳에 분포하게 하는 원인이 될 것이다. 한편, 침엽수에서 수분포텐셜값의 평형을 유지하는 내한기의 수분포텐셜을 보면, 전나무와 주목은 -23bar, 잣나무와 소나무는 -12bar를 유지하여 앞의 두 식물의 수분포텐셜이 낮게 유지됨을 알 수 있다. 이러한 수분포텐셜 차이는 상록 침엽식물의 수직 또는 지리분포에 제한요인이 될 것이다(Burke *et al.* 1976). 실제로 전나무와 주목은 한반도 남부에서는 해발 1,300m 이상(강 198

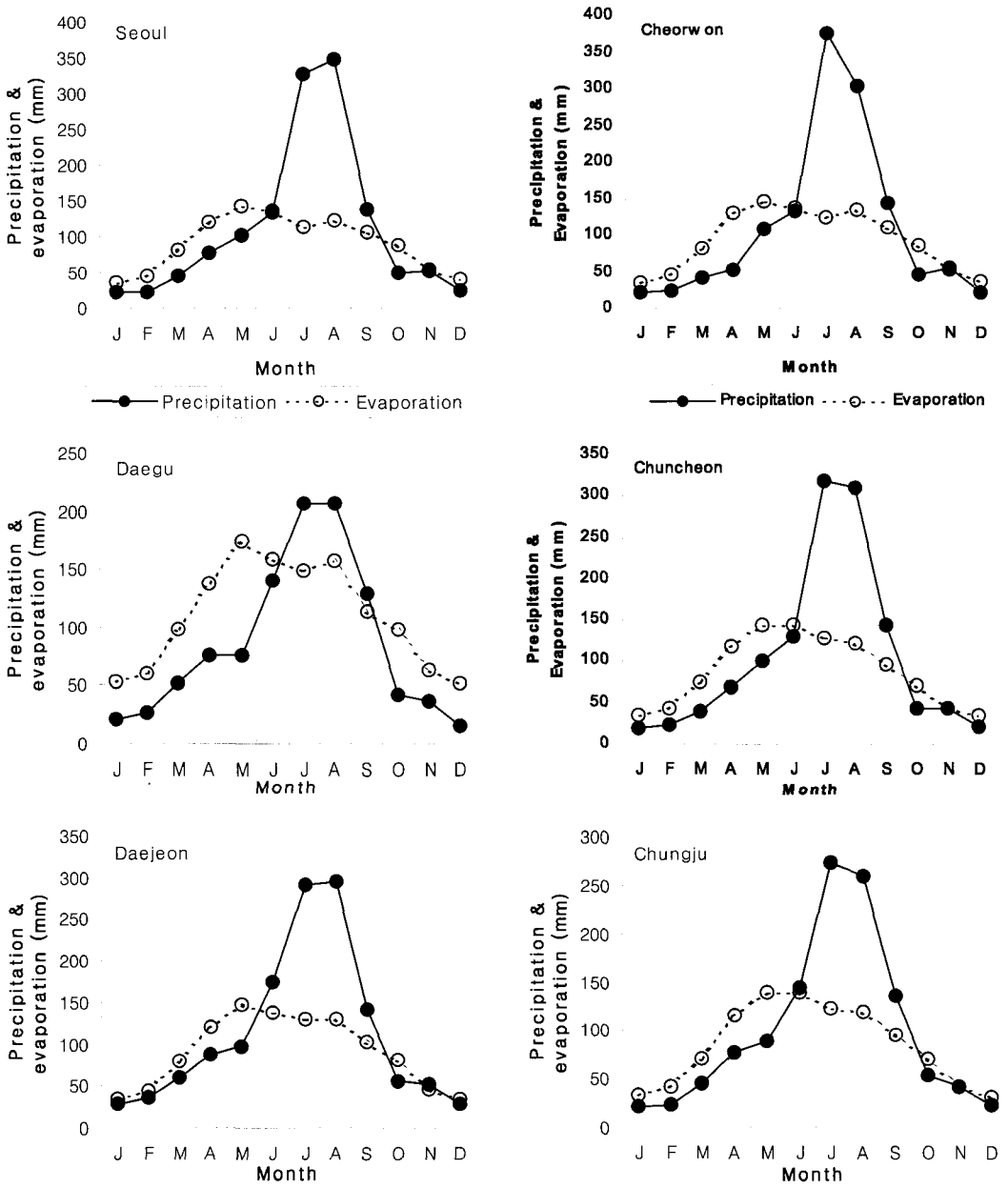

Fig. 1. Annual changes of precipitation and potential evaporation in several locations of Korea. Parts of oblique line show the period of water deficit.

4a, 1984b), 북부에서는 1,200m 이상에 분포하는 한대성 식물이고, 잣나무와 소나무는 남부에서 600~1,200m, 북부에서는 그보다 고도가 낮은 곳에 분포하는 아한대성 식물이다(정 및 이 1965). 이러한 결과로부터 내한기의 수분포텐셜 값은 이들 식물의 고도나 지리분포의 특성을 반영함을 알 수 있다.

유식물의 정착에 대한 수분스트레스의 영향

서로 다른 조건의 소나무림에 종자를 파종하여 얻은 유식물의 생존곡선에서 유식물의 생존율은 관수한 대조구, 닫힌 수관구, 열린 수관구 및 나지구의 순서로 높았다 (Lee and Kim 2003). 토양의 건조가 심한 장마 전 6월중의 토양수분함량(Lee and Kim 2003))은 대조구, 닫힌 수관구, 열린 수관구 및 나지구의 순서로 높았다. 즉, 토양수분함량이 유식물의 생존율과 비례관계를 나타내었고, 관수한 대조구에서 유식물의 생존율은 100%를 유지하였는데, 이는 토양수분이 유식물의 생존과 밀접하게 관계됨을 반영하고 있다.

한편, 유식물의 고사율은 6월중에 현저히 높았는데, 이러한 현상은 자연적으로 발아된 유식물 집단(Lee and Kim 2003)에서

도 마찬가지로 나타나고 있다.

소나무 유식물에 수분공급을 중단한 후 자엽, 제1엽 및 제2엽의 수분포텐셜을 측정한 결과, 자엽은 20일 이후, 그리고 제1엽과 2엽은 30일 이후 수분포텐셜이 변화하기 시작하여 45일 이후 고사하였다. 급수 중단한 후 45일이 경과되었을 때, 표토로부터 10cm 깊이까지 1cm 간격으로 시료를 채취하여 측정한 포트 내 토양수분함량은 1.7~5.8%로 나타났고, 가뭄이 심한 6월 중 산지 토양의 것은 3.7~6.1%로 나타났다. 이 값을 깊이 별로 비교하였을 때, 표토로부터 3cm 이내의 토양수분함량은 급수를 중단하여 유식물이 고사한 포트의 것이 산지 토양의 것보다 낮았지만 산지에서 발아 후 6월 중순까지 자란 소나무 유식물 뿌리의 평균길이인 6cm 정도 깊이의 토양수분함량을 비교하면, 급수 중단에 의해 유식물이 고사된 포트 내 토양 수분함량과 산지 토양의 수분함량이 의미있는 차이를 나타내지 않았다. 이러한 결과로부터 가뭄기가 지속되는 6월 중 삼림토양의 수분함량은 수분부족으로 유식물이 고사되는 수준의 상태로서 이 시기의 소나무 유식물의 고사가 이러한 수분결핍에 기인함을 알 수 있다(Lee and Kim 2003).

한편, 이러한 수분결핍은 앞서 언급한 바와 같이 소나무에 비해 수분결핍에 대한 저항성이 떨어지는 참나무류에게는 생장과 유식물의 정착 등 여러 가지 측면에서 더 큰 장애요인으로 작용할 것으로 생각된다.

대기오염과 수분스트레스

신갈나무 유식물을 SO_2에 접촉시키며 수분포텐셜의 변화를 측정한 결과, 0.2ppm, 0.4ppm, 0.7ppm 및 1.5ppm의 SO_2구에서 수분포텐셜은 각각 SO_2를 접촉하고 47시간, 47시간, 32시간 및 8시간 이후부터 감소하기 시작하였다. 한편, 104시간 접촉 후 수분포텐셜은 대조구>0.2ppm구>0.4ppm구=0.7ppm구>1.5ppm구의 순서로 높았다. 즉, 수분포텐셜은 접촉한 SO_2농도가 높을수록 빨리, 그리고 크게 감소하여 SO_2가 수분포텐셜을 감소시키고 있음을 알 수 있었다. 한편, 수분포텐셜은 잎의 가시피해 징후(necrosis)가 나타나기 이전부터 감소하기 시작하였고, 가시피해가 나타나지 않은 0.2ppm구에서도 수분포텐셜이 감소하여(이 및 배 1991) 수분소실이 오염피해의 방아쇠 역할을 한다는 연구(Johnson and Siccama 1983, Lee *et al.* 1990a, 1990b) 및 대기오염물질이 수분결핍효과를 가중시킨다는 연구(Pierre and Queiroz 1988)와 맥을 같이 하고 있다.

오염물질 접촉에 의한 수분포텐셜 감소효과는 신갈나무 외에 갈참나무와 상수리나무에서도 나타났으며, 그 감소효과는 SO_2에 대한 내성 정도에 비례하였다(이 및 배 1991).

산성비와 수분스트레스

서울시와 그 주변을 "심"오염지역(인왕산), "약"오염지역(수락산) 및 건전지역(경기도 파주)으로 구분하여 각 지역에 생육하는 소나무(*Pinus densiflora*) 잎에서 오염피해의 지표가 되는(Cape 1986, Steubing and Fangmeier 1991) 물방울의 접촉각(contact angle)을 측정한 결과, 그 각도는 오염 정도에 비례하여 낮아지는 경향이었다(Lee *et al.* 1998a, 1998b). 식물의 잎 표면은 수분소실을 막기 위해 소수성 물질로 이루어진 왁스층으로 덮여 있다. 이러한 식물 잎에서 물방울이 이루는 각도는 잎 표면의 흡습 정도를 나타내고, 그것은 잎 표면에서 수분소실을 차단하는 왁스층의 손상과 관계되므로 그 정도는 잎으로부터의 수분소실량과 직접적으로 관계될 것이다.

상기 지소에서 채취한 소나무 잎의 무게감소 속도로부터 측정한 증산율은 접촉각의 감소에 비례하여 증가하는 경향을 보였다(Lee *et al.* 1998a, 1998b). 즉, 물방울의 접촉각이 감소한 오염지역 소나무 잎에서 비오염지역의 것보다 수분이 빠르게 소실되었는데, 이러한 결과는 Rhyu와 Kim(1994d)의 결과에서도 나타나고 있다. 또한 인공산성 빗물을 조제하여 소나무 유식물에 살포한 결과 인공산성 빗물의 pH와 살포량에 비례하여 물방울의 접촉각이 낮아졌고, 증산률이 증가하였다(Lee *et al.* 1998b). 그 결과 수분공급 차단 후 수분포텐셜의 감소속도(Lee *et al.* 1998b)도 적용된 인공산성 빗물의 pH가 낮을수록 빠르게 감소하여 산성비가 수분결핍효과를 증대시키고 있음을 입증하였다.

토양의 산성화와 수분스트레스

서울의 그린벨트 지역에서 측정한 토양의 pH는 평균 4.58~4.77로서 건전 지역인 강원지역 삼림의 평균 pH(5.3) 및 전국 삼림의 평균 pH(5.1)과 비교하여 심하게 산성화되어 있음을 알 수 있다(차 등 1996, 서울시 1997, 1998). 토양이 산성화되어 있을 뿐만 아니라 그 영향으로 칼슘(Ca^{2+})과 마그네슘(Mg^{2+})함량이 전국 평균치의 1/3~1/2 수준이었고, 알루미늄(Al^{3+})함량은 2~3배로 높았다(서울시 1997, 1998). 이러한 결과는 토양이 산성화되면 Ca과 Mg같은 양이온이 세탈되어 토양 중에서 그 함량이 감소되고, 식물의 뿌리생장을 저해하는 독성이온인 Al함량이 증가한다는 연구결과(김 1991, 류 1994, Rhyu and Kim 1994a)와 일치한다.

한편, Rhyu와 Kim(1994b, 1994d)은 토양의 산성화로 인한 Al 함량의 증가로 서울 주변의 리기다소나무식분에서 세근이 표층부에 한정되는 비정상적 분포를 보여 건조기에 더 심한 수분스트레스를 받게 되고 그 결과 생장이 감소되거나 쇠퇴징후를 보임을 밝혔고, Al용액을 처리한 리기다소나무 유식물이 대조구의 것보다 수분스트레스에 예민함을 밝혔다(Rhyu and Kim 1994c). 이러한 결과로부터 토양의 산성화는 식물체에 수분스트레스를 유발하는 대기오염물질이나 산성비의 직접적 효과에 더하여 그 간접적 효과로도 식물체에 수분스트레스를 유발하고 있음을 알 수 있다.

종합고찰

한국의 기후는 강수량은 충분하지만 강수현상이 몇 개월에 집중되는 편향적 분포를 보여 매년 일정기간의 건조기를 유지

한다(Fig. 1). 소나무 유식물의 정착과정에서 조사된 생존곡선에서 볼 수 있듯이 유식물은 이러한 건조기에 주로 고사되었다(Lee and Kim 2003). 따라서 이러한 기후 조건에 있는 한국에서 수분관계는 식물의 분포(강 등 1988, 김 및 임 1988, Kim and Yim 1987, 1988, 이 1989), 정착(Lee and Kim 2003) 및 생장(Lee and Kim 1987)에 주 요인으로 작용한다. 같은 위도상의 주변국들과 달리 참나무류가 천이 후기종으로 자리잡고 있는 경우도 이러한 요인과 관계될 수 있다. 그리고 몇몇 토지극상으로 유지되고 있는 산지 능선부나 정상부의 척악지를 제외한 곳에서 인위적 간섭에 의해서 넓은 면적으로 유지되고 있는 것으로 알려져 있는(Lee and Hong 2001) 소나무림도 인위적 간섭의 영향은 인정하지만 이러한 건조기의 영향도 크게 작용하였을 것으로 판단된다(이 2003).

한편, 지속되고 있는 대기오염의 영향은 그 직접적 효과로 식물 잎의 표면을 손상시켜 수분결핍을 유도하고(Lee *et al.* 1998a, 1998b), 토양산성화를 통한 이차적 영향으로 뿌리생장을 억제하는 알루미늄이온을 유리시켜 식물의 근계에 이상을 초래하여 수분흡수를 저해하고 있다(Rhyu and Kim 1994c, Rhyu and Kim 1994d). 따라서 자연적인 조건으로도 수분스트레스의 영향을 받고 있는 한국의 삼림생태계에 생육하는 많은 식물들은 대기오염의 영향으로 가중된 수분결핍의 영향을 받게 될 것이다. 이러한 영향은 우리나라보다 일찍, 그리고 분명하게 삼림쇠퇴를 경험한 외국에서도 널리 인정되고 있다(Smith 1990). 한국에서는 극심한 대기오염지역인 울산, 여천 등 일부 공업단지와 서울, 부산 등 대도시 주변을 제외하면, 아직 뚜렷한 삼림쇠퇴의 징후가 발견되지 않고 그 징후 또한 차이를 보이고 있다(환경부 1996, Lee 1996, 2001). 그러나 전국적인 강우의 pH분포나 토양의 pH 분포(Lee 1996, 차 등 1996) 등은 가까운 장래에 보다 넓은 면적에 걸쳐 삼림쇠퇴징후가 나타날 가능성을 강하게 예측케 하고 있다.

그 징후는 단일 요인보다는 여러 가지 요인이 복잡하게 상호작용하여 발생할 것으로 기대된다(Fig. 2). 대기오염 및 산성비의 직접적 영향과 그것에서 비롯된 수분스트레스에 기인한 징후를 우선 생각할 수 있고(이 및 배 1991, Lee *et al.* 1998a, 1998b), 산성강하물에 의한 토양의 산성화와 그것에 기인한 독성 알루미늄의 용출에 따른 근계의 이상으로 인한 수분스트레스에서 비롯된 징후도 생각할 수 있다(Rhyu and Kim 1994c, Rhyu and Kim 1994d). 이에 더하여 도시의 인구집중과 그것으로 인한 과도한 개발이 가져온 열섬현상으로 증가된 증산율을 통해 수분스트레스를 유발하는데, 이 또한 삼림쇠퇴를 유발하는 주된 요인이다(Smith 1990).

본 연구에서는 한국의 삼림생태계의 건전한 관리를 목적으로

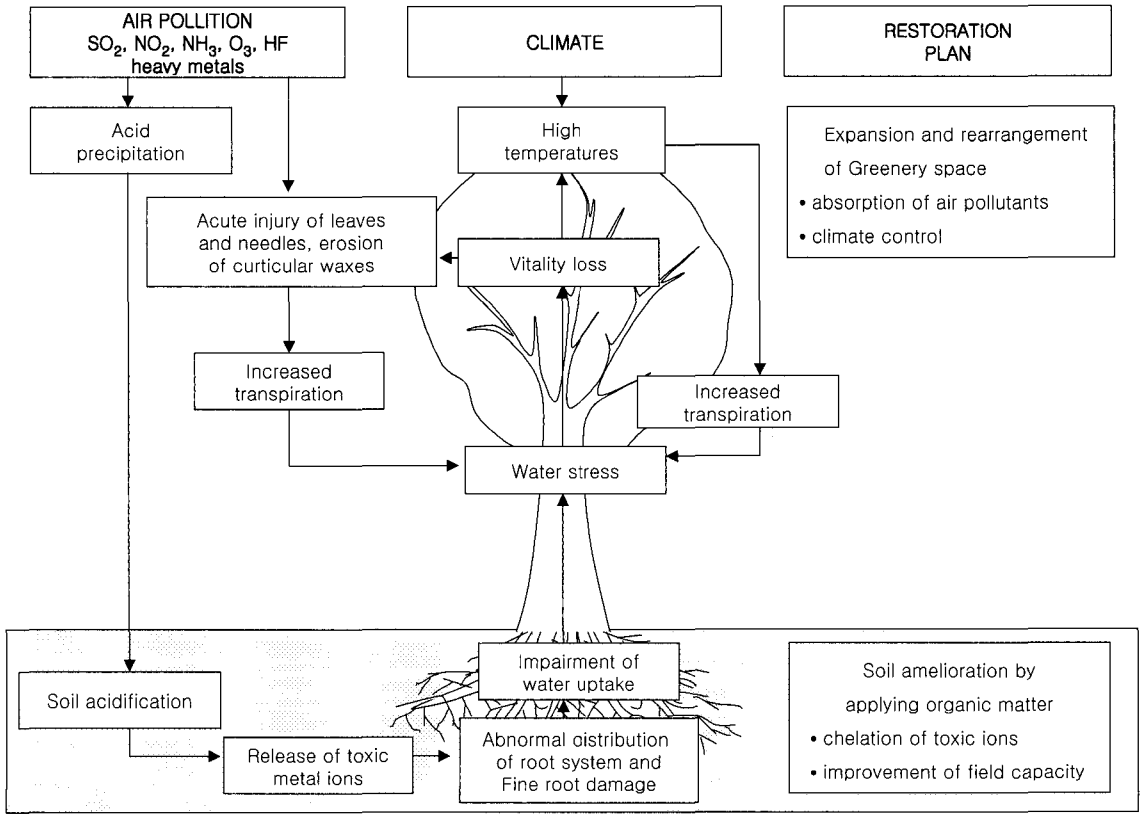

Fig. 2. A model showing the potential interaction of multiple stresses, which can cause forest decline in Korea and restoration plans, which can mitigate the stresses.

이러한 대기오염 및 토양산성화와 그것의 궁극적 결과인 삼림쇠퇴에 대한 대책을 제안하고자 한다. 특히 그것을 유발하는 주 요인으로서 수분수지를 고려한 대책을 제안하고자 한다. 토양수분의 지속적 유지 가능성을 결정하는 요인으로 포장용수량(field capacity)이 중요하게 작용하는데, 이 요인은 풍화의 결정체인 토양의 입자크기와 유기물함량에 의해 결정된다(Lee and Kim 1987). 이러한 사실을 고려하여 저자들은 토양의 유기물함량을 늘려 수분 보유능을 증가시키는 방법을 그 해결방안으로 제안하고 싶다. 실제로 대기오염으로 산성화된 토양에서 유기물이 대부분을 차지하고 있는 슬러지(sludge)가 토양개량제로 널리 사용되어 온 돌로마이트(dolomite) 못지 않은 생장 개선 효과를 보였고(Lee *et al.* 1998c), 낙엽추출물이 알루미늄에 의한 수분결핍효과를 완화시켰는데(Rhyu and Kim 1994c), 이러한 결과가 그러한 제안의 배경을 이루고 있다. 특히 이러한 유기물의 보충은 수분보유능을 증가시킬 뿐만 아니라 독성이온의 불용화를 통한 기여도 기대할 수 있다(de la Fuente *et al.* 1997).

또 하나의 대안은 녹지의 확장과 재배치, 즉 생태학적 복원을 통하여 얻을 수 있다 (Lee *et al.* 2002). Lee 등 (2002)은 서울지역에서 조사한 식생의 종 조성, 천이 경향 및 종 다양성을 대조지역의 것과 비교하여 그 차이로부터 삼림의 쇠퇴징후를 확인하고 있다. 나아가 이러한 자료에 토양오염의 지소 간 차이를 추가로 검토하여 여기에서 나타나는 삼림쇠퇴의 원인을 녹지의 불균등 분포에 기인한 도시기후의 형성과 그것에서 비롯된 오염물질의 집적으로 해석하고 있다. 이러한 일련의 과정에서 도시기후의 형성은 주변지역과 비교하여 도시지역의 기온상승이 그 출발점이 되고 있다. 이런 점에서 그들은 그러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 복원을 통한 녹지의 양적 보충과 그 분포의 균형 회복을 제시하고 있다. 그들이 제시하는 복원계획은 경관차원의 복원(restoration in landscape level)으로서 우선 GIS를 이용하여 그린벨트를 이루는 핵심 녹지와 야생생물의 서식에 중요한 역할을 담당하는 하천으로부터의 거리가 가까운 순서로 단절된 녹지의 연결 우선순위를 정하고 있다. 그 다음에는 도시지역에서 연속성을 가지는 경관요소(landscape element)로서 하천과 도로를 복원하여 그 질을 향상시킴과 동시에 그것을 녹지의 축으로 삼아 단절된 녹지가 연속성을 갖게 하고, 나아가 도심에도 녹지를 보충하여 그 공간분포의 균형을 회복하는 방안을 제시하고 있다. 이 경우 이러한 녹지는 대기오염물질 정화능을 통해 식물이 받는 대기오염의 직접적 오염피해를 줄여 증산률을 낮추고, 기후 조절능력이 또 다른 측면에서 증산률을 낮추는 요인으로 작용하여 삼림쇠퇴의 발생을 억제할 수 있다(Hough 1984, Miller 1997, 이 1997).

사 사

본 연구는 2003년도 서울여자대학교 특별연구비에 의해 수행되었음.

인용문헌

강상준. 1984a. 소백산 주목군락의 구조와 동태. 자연보존 48: 31-48.

강상준. 1984b. 지리산 아고산대 침엽수림의 재생과정. 한생태지 7: 185-193.

강상준, 이창석, 김홍은. 1988. 월악산 삼림군집의 분포와 환경경도 분석. 충북대학교 자연과학연구 1(2): 75-84.

김정언, 임양재. 1988. 내장산 식물군집의 식물사회학적 분류. 한식지 31:1-31.

김종욱. 1990. 한국산 참나무속 유식물의 수분스트레스에 대한 조정능의 비교. 서울대학교 석사학위논문, 서울. 62p.

김준호. 1991. 환경오염에 의한 삼림의 쇠퇴징후. 도시 · 산림 · 환경 심포지움, 한국조경학회, 산림청 임업연구원. pp. 3-25.

김준호, 이창석. 1986. 수종 상록식물의 월동 중 수분상태. 한생태지 9: 201-208.

류태철. 1994. 수도권 지역에서 산성강하물에 의한 리기다소나무림 쇠퇴의 기구와 회복. 서울대학교 박사학위논문, 서울. 219p.

서울시. 1997. 서울시 산림생태계 정밀조사. 서울시 산림생태계 정밀조사 1차년도 사업 보고서, 서울.

서울시. 1998. 서울시 산림생태계 정밀조사. 서울시 산림생태계 정밀조사 2차년도 사업 보고서, 서울.

이창석. 1989. 솔잎혹파리 피해 소나무림의 천이에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문, 서울. 106p.

이창석. 1995a. 한국 소나무림에서의 교란체제. 한생태지 18: 179-188.

이창석. 1995b. 한국 소나무림에서의 교란 후 재생과정. 한생태지 18:189-201.

이창석. 1997. (주)진도 시화소각장 주변의 환경림 조성 계획. 서울여자대학교 생태연구소. 73p.

이창석. 2003. 백두대간지역을 보전하기 위한 경관 및 복원생태학적 고찰. 임업연구원 (편) "백두대간의 생태계 현황 및 관리범위 설정"에서, (주)세진기획, 서울. pp. 377-420.

이창석, 배정오. 1991. SO2에 대한 참나무속 식물의 반응. 한국대기보전학회지 7:219-226.

이현영 2000. 한국의 기후. 법문사, 서울.

정태현, 이우철. 1965. 한국 삼림식물대 및 적지적수론. 성대논문집 10: 329-434.

차순형, 채지석, 유정환, 변재경, 이병천, 이경재, 원형규, 권태성, 박현, 박원규, 조병훈,조재형, 박재현, 이원규. 1996. 대기오염에 의한 산림피해 실태조사. 1996년도 임업 연구보고서. 임업연구원, 서울. pp. 250-300.

환경부. 1996. 대기오염 및 산성비에 대한 내성종과 Bioindicator의 선발 · 육종 개발. 환경부, 서울. 353p.

Burke, M.J., L.V. Gusta, H.A. Quamme, C.J. Wieser and P.H. Li. 1976. Freezing andinjury in plants. Ann. Rev. Plant Physiol.

27: 507-528.

Cape, J.N. 1986. Effects of air pollution on the chemistry of surface waxes of scotspine. Water, Air, and Soil Pollution 31: 393-399.

de la Fuente, J.M., V. Ramirez-Rodriguez, J.L. Cabrera-Ponce, and L. Herrera-Estrella. 1997. Aluminum tolerance in transgenic plants by alteration of citrate synthesis. Science 276: 1565-1568.

Fanjul, T.J. and P.H. Rosher. 1994. Effects of water stress on inetrnal water relations of apple leaves. Physiol. Plant 62: 321-328.

Hough, M. 1984. City form and natural processes. Croom Helm, London.

Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. Ann. Rev. Plant Physio. 24: 519-570.

Johnson, A.H. and T.G. Siccama. 1983. Acid deposition and forest decline. Environ. Sci. Technol. 17: 294-305.

Jones, H.G. 1983. Plants and microclimate. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Jones, M.M. and N.C. Turner. 1978. Osmotic adjustment in leaves of sorgham in response to water deficits. Plant Physiol. 61: 122-126.

Kijne, J.W. 1973. Evaporation from bare soils. *In* Physical aspects of soil water and salts in ecosystems. A. Hadas, D. Swartzendruber, P.E. Rijtema, M. Fuchs and B. Yaron (eds.). Springer-Verlag, New York. pp. 221-226.

Kim, J.U. and Y.J. Yim. 1987. Actual vegetation and potential natural vegetation of Seonunsan area, southwestern Korea. Korean J. Ecol. 10: 159-164.

Kim, J.U. and Y.J. Yim. 1988. Actual vegetation and potential natural vegetation of Naejangsan National Park, southwestern Korea. Korean J. Ecol. 11: 145-152.

Kincaid, D.T. and E.E. Lyons. 1981. Winter water relations of red spruce on Mt. Monasnock, New Hampshire. Ecology 62: 1155-1161.

Larcher, W. 1980. Physiological plant ecology, 2nd ed. Springer-Verlag, New York. pp. 18-60.

Lee, C.S. 1996. Effects of acid precipitates on soil and plant community structure. Proceedings of Symposium for the 50th anniversary of the Biological Society of Korea.

Lee, C.S. 2001. Landscape ecological restoration of Seoul Metropolitan area. The Ecological Society of Korea 2001 International Symposium "Development and Roles of Restoration Ecology: Hopes for the Future" Proceedings, Seoul. pp. 101-130

Lee, C.S., J.H. Kil and Y.H. You. 1998a. Effects of acid precipitates on histology, water stress and growth of *Pinus densiflora* around the Metropolitan area of Seoul. Korean J. Ecol. 21: 117-124.

Lee, C. S., J. H. Kil and Y. H. You. 1998b. Histological damage and growth of *Pinus densiflora* around the Metropolitan area of Seoul. Korean J. Ecol. 21:125-131.

Lee, C.S., H.D. Kim, and A.N. Lee 2002. Restoration planning of the Seoul Metropolitan area, Korea. Proceedings of the International Symposium on Urban forest and Eco-city(DIGEST) held in Shanghai on Sep. 25 to 26, 2002. pp. 5.

Lee, C.S. and J.H. Kim. 1987. Relationships between soil factors and growth of annual ring in *Pinus densiflora* on stony mountain. Korean J. Ecol. 10(3):151-159.

Lee, C.S. and J.H. Kim. 2003. Establishing process of the Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) forest. (submitted).

Lee, C.S., J.Y. Kim and Y.H. You. 1998c. Amelioration of soil acidified by air pollution around the Industrial Complexes. Korean J. Ecol. 21:313-320.

Lee, C.S. and S.K. Hong. 2001. Landscape ecological perspectives in the structure and dynamics of fire-disturbed vegetation in a rural landscape, eastern Korea. *In* D. van der Zee and I.S. Zonneveld (eds.), Landscape ecology applied in land evaluation, development and conservation. Some worldwide selected examples. ITC publication number 81, IALE publication MM-1. pp. 81-94.

Lee, W.S., B.I. Chevone and J.R. Seiler. 1990a. Growth and gas exchange of loblolly pine seedlings as influenced by drought and air pollutants. Water, Air and Soil pollution. 51: 101-116.

Lee, W.S., B.I. Chevone and J.R. Seiler. 1990b. Growth response and drought susceptibility of red spruce seedlings exposed to simulated acidic rain and ozone. Forest Science. 36: 265-275.

Marchand, P.H. and B.F. Chabot. 1978. Winter relations of tree-line plant species on Mt. Washington, New Hampshire. Arctic and Alpine Research 10:105-116.

Miller, R.W. 1997. Urban forestry. Planning and managing urban greenspaces. (2nd ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. pp. 56-69.

Morgan, J.M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 35: 299-319.

Pierre, M. and O. Queiroz. 1988. Air pollution by SO_2 amplifies the effects of water stress on enzymes and total soluble proteins of spruce needles. Physiol. Plant. 73: 412-417.

Rhyu, T.C. and J.H. Kim. 1994a. Cation deficiencies in needles and fine roots of pitch pine in Seoul metropolitan area. Korean J. Ecol. 17: 277-286.

Rhyu, T.C. and J.H. Kim. 1994b. Growth decline of pitch pine caused by soil scidification in Seoul metropolitan area. Korean J. Ecol. 17: 277-286.

Rhyu, T.C. and J.H. Kim. 1994c. Growth response to acid rain, Mg

deficiency and Al surplus, and amelioration of Al toxidity by humic substances in pitch pine seedlings. J. Plant Biol. 17: 301-306.

Rhyu, T.C. and J.H. Kim. 1994d. Water deficit of pitch pines caused by superficial rooting and air pollutants in Seoul and its vicinity. J. Plant Biol. 17: 309-316.

Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1992. Plant physiology. (4th ed.). Wadsworth, Inc., Belmont, California. pp. 27-65.

Slatyer, R.O. and S.A. Taylor. 1960. Terminology in plant and soil-water relations. Nature 187: 922-934.

Smith, W.H. 1990. Air pollution and forests (2nd ed.). Springer-Verlag, New York.

Steubing, L. and A. Fangmeier. 1991. Gaseous air pollutants and forest floor vegetation - a case study at different levels of integration. In G. Esser and D. Overdieck (eds.). Modern ecology: Basic and applied aspects. Elsevier, Amsterdam. pp. 539-569.

(2003년 5월 2일 접수; 2003년 5월 22일 채택)

Ecological Importance of Water Budget and Synergistic Effects of Water Stress of Plants due to Air Pollution and Soil Acidification in Korea

Lee, Chang-Seok and An-Na Lee

Faculty of Environment and Life Sciences, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea

ABSTRACT : Korea has plentiful precipitation but rainfall events concentrate on several months of rainy season in her weather condition. Korea, therefore, experiences drought for a given period every year. Moreover the soil has usually low water holding capacity, as it is composed coarse particles originated from the granite. Response of several oaks and the Korean red pine (*Pinus densiflora*) on water stress showed that water budget was significant factor determining vegetation distribution. In addition, dehydration level due to cold resistance mechanism of several evergreen plants during the winter season was closely related to their distribution in natural condition. Experimental result under water stress showed that the Korean red pine was very tolerant to desiccation but the seedlings showed high mortality during the dry season. The mortality tended to proportionate to soil moisture content of each site. A comparison between soil moisture content during June when it is severe dry season and moisture content of the culture soil when the pine seedlings reached the permanent wilting point due to water withheld proved that high mortality during the dry season was due to water deficit. Water potential of sample plants measured during the exposure experiment to the air pollutant showed a probability that water related factors would dominate the occurrence of visible damage and the tolerance level of sample plants. In both field survey and laboratory experiment, plants exposed to air pollution showed more rapid transpiration than those grown in the unpolluted condition. The result would due to injury of leaf surface by air pollutants. Aluminum (Al^{3+}) increased in the acid soil not only inhibits root growth but also leads to abnormal distribution of root system and thereby caused water stress. The water stresses due to air pollution and soil acidification showed a possibility that they play dominating roles in inducing forest decline additionally to the existing water deficit due to weather and soil conditions in Korea. Sludge, which can contribute to improve field capacity, as it is almost composed of organic matter, showed an effect ameliorating the retarded growth of plant in the acidified soil. The effect was not less than that of dolomite known in widely as such a soil ameliorator. Litter extract contributed also to mitigate the water stress due to toxic Al^{3+}. We prepared a model showing the potential interaction of multiple stresses, which can cause forest decline in Korea by synthesizing those results. Furthermore, we suggested restoration plans, which can mitigate such forest decline in terms of soil amelioration and vegetation restoration.

Key words : Air pollution, Dolomite, Drought, Field capacity, Forest decline, Sludge, Soil acidification, Water stress