

대기오염과 산성비가 생태계에 미치는 영향

The Effect on the Terrestrial Ecosystem by the Air Pollution and Acid Rain

이 경 재

서울시립대학교수, 응용생태연구회장

Kyong-Jae Lee

1. 서 론

대기오염물질이 식물에 미치는 영향에 대한 기록은 1920년대부터 나타난다. 1924년 대기오염물질의 피해로 영국 런던의 Kew식물원 일부를 Kent지방으로 이동하였거나 1925년 Canada의 한 제련소에서 배출된 유독오염물질이 미국에까지 영향을 미쳐 수목, 농작물에 피해를 주어 국제적인 문제가 된 사실 등은 수목에 대한 대기오염물질의 피해 심각성을 보여 주는 사례이다(임경빈 등, 1979a, 1979b). 우리나라에서는 1930년 이후 홍남질소비료공장에서 배출된 매연물질이 주위 30리까지의 경작지에 피해를 끼쳤다는 사실이 최초로 기록되어 있다(김태욱, 1976).

대기오염물질에 의한 식물의 피해가 점차 늘어나자 식물이 어떤 피해기작을 거쳐 피해가 유발되는지의 연구가 시작되었다. 1934년 Jennings은 육안적 관찰에 의해 오염피해에 대한 수종별 저항성을 밝혔는데, 이러한 연구를 통해 대기오염물질과 식물의 관계는 실내의 gas chamber를 이용하는 것이 보다 확실한 자료를 얻을 것이라고 생각하였다. 그리하여 Costonis(1969, 1971)는 이에 대한 광범위한 연구를 실시하여 gas chamber내에서 저항성 정도가 판정된 10년생의 *Pinus strobus*의 각 개체를 강, 중, 약으로 구분하여 식물체의 부분별 피해양상을 발표하였다. 또한 Berry(1974)는 주로 SO₂, O₃, HF등의 오염물질을 이용한 접촉실험을 통해 피해기작을 관찰하였다. 그러나 이러한 접촉실험은 고농

도의 대기오염물질을 단시간내의 인공혼연하는 것이기 때문에 저농도의 대기오염물질이 장시간 수목에 영향을 미치는 대도시지역에서의 피해현상과 차이가 문제되었다. 1980년대에 들어와 유럽의 많은 국가에서 저농도의 대기오염물질을 배출할 수 있는 open-top-chamber를 설치하고 2~3년간씩 수목의 인공혼연처리를 하여 피해기작을 연구하고 있다(Cape and Fowler, 1981; Cape, 1983).

그러나 gas chamber내에서의 접촉실험은 주로 어린 묘목에만 적용할 수가 있어 도시에서 자라고 있는 큰 나무에 대해서는 그 지역에 자라고 있는 가로수나 조경수에 대한 실태조사에서 얻은 결과로 그 피해에 대한 해석을 내리는 것이 일반적이다(임경빈 등, 1979a). 이외에도 대기오염물질이 삼림생태계에 영향을 미쳐 식물종다양성의 변화에 관한 조사자료로서 생태계 복구에 대한 연구를 시도하였다(McCleanahen, 1979; Smith, 1990).

우리나라에서는 대기오염물질에 의한 식물의 피해연구는 농작물에서 처음으로 이루어진후(정영호, 1970; 정영호 등, 1973), 수목에서는 조경수목을 대상으로 하여 최초로 연구가 진행되었다(김문홍, 1974). 연구초기에는 국내에서 제작한 gas chamber에서 수목피해연구가 진행되었으나(김태욱, 1976; 임경빈 등, 1979a), 1984년에 국립환경연구원에서 자동 gas chamber가 도입된 후 이 분야연구가 본격적으로 진행되었다(국립환경연구원, 1987, 1988, 1989). 그리고 최근에는 대기오염과 산성비에 의한 식물군집에 대한 피해연구가 보고되었다

(류창희와 이경재, 1992; Lee et al, 1992).

본고에서는 우리나라에서 지금까지 조사연구된 대기오염물질과 산성비가 식물과 생태계에 미치는 영향을 중심으로 연구내용을 파악하여 앞으로 진행되어야 할 연구방향을 제시하려 한다.

2. 실험적인 연구

묘목을 키워 gas chamber에서 인공혼연시킨 연구는 김태욱(1976)이 최초로 수행하였다. 간이 gas chamber는 직육면체(가로 1.30m×세로 0.95m×높이 0.90m)를 각목으로 만들어 0.1mm비닐막을 씌우고 환저후라스크에서 SO₂개스를 발생시켜 투입시켰다. 실험대상수종은 은행나무(*Ginkgo biloba*), 일본잎갈나무(*Larix leptolepis*), 리기다소나무(*Pinus rigida*), 수수꽃다리(*Syringa dilatata*), 개나리(*Forsythia koreana*), 무궁화(*Hibiscus syriacus*)이었으며 6월16일과 9월 27일에 1, 3, 5, 7, 9 mg/ℓ의 SO₂가스를 각각 60분간 처리하였다. 실험에서 얻어진 결과는 SO₂가스에 대한 내성은 무궁화와 은행나무가 강하였고, 리기다소나무와 일본잎갈나무는 약했으며, 수수꽃다리와 개나리는 중간으로 밝혀져 우리나라에서 대기오염물질에 의한 저항성이 큰 수종에 관한 연구의 기본이 되었다.

임경빈 등(1989b)은 위의 연구를 더욱 발전시켜 비닐로 만든 chamber대신 1×1×1m 크기의 acryl chamber를 제작하여, 처리수종을 양버즘나무(*Platanus occidentalis*), 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 사철나무(*Euonymus japonica*), 향나무(*Juniperus chinensis*), 회양목(*Buxus microphylla var. koreana*)을 추가하여 실험하였다. 연구결과중 SO₂가스의 인공접촉결과로 나타난 피해현상중에서 가장 뚜렷한 사실은 처리된 수종간, 개체간에 그 피해정도가 크게 다르다고 보고하였다. 특히 양버즘나무에서 각 가계별로 양묘된 개체간에 피해정도가 달라 대기오염에 대한 내연성이 수목자체의 유전적 소질의 차이에 크게 영향을 받는다고 하여 내성이 강한 수목 및 개체의 선발육종의 가능성이 매우 높음을 시사하였다. 그러나 위의 연구가 이루어진지 17년이 지났지만 대기오염에 대한 내성수종 및 개체 선발육종은 지속적인 연구비투자가 이루어지지 않아 아직 담보상태를 면하지 못하고 있다. 그리고 SO₂가스농도에 따른 묘목의 피해현상에 있어서 0.3mg/ℓ~0.4mg/ℓ를 한계농도로 하여 그 이하의 농도에서는 수종 개체간에 내성의 차이를 구분하기 어려운 정도로 피해가 커지고 있어 gas chamber내에서 발생한 급성피해와 시내에 식재된

수목에서 발생하는 만성피해와의 관계를 규명하는 것이 앞으로의 과제라고 제시하였다.

1984년에 자동 gas chamber가 환경청 국립환경연구소에 도입되면서 그때까지 조립식으로 만들어 사용하던 gas chamber의 연구를 마감하였다. 국립환경연구소 환경생물담당관실 연구팀은 은행나무, 개나리 등 14개 수종을 대상으로 SO₂가스는 0.7, 1.5, 3.0ppm, O₃가스는 150ppb로 매일 8시간씩 5일간 폭로시켰다. 연구결과 SO₂가스에 대해 피해가 심한 수종은 겹철쭉, 산철쭉, 쥐똥나무, 리기다소나무, 독일가문비나무, 개나리였고, 피해가 적은 것은 서양측백, 회양목, 전나무, 눈향나무순서였으며, 은행나무, 옥향, 황금편백, 선향은 중간정도로 밝혀졌다. 그리고 O₃가스에서는 쥐똥나무와 개나리만이 피해를 입었다고 보고하였다. 또한 본 실험에서 14수종 모두 SO₂가스는 1.5ppm에서만 피해를 보였다고 발표하였다(김재봉 등, 1985).

위의 연구팀은 1986년에는 대상수종을 31종으로 늘려 '85년과 같은 조건으로 가스처리를 하였다(김재봉 등, 1986). SO₂가스에 의한 가지피해형태를 반점(斑點), 긴반점, 대상(帶狀)등으로 구분하여 수종별로 나타나는 특징을 설명하였다. 특히 본 연구에서 수종별로 SO₂ 및 O₃가스에 대한 저항성과 정화능력을 밝혀 후일 정화수의 좋은 자료를 제공하게 된다. 정화능력이 강한 수종은 옥향나무, 잣나무, 누운향나무, 가이쓰카향나무, 서양측백, 독일가문비나무, 회양목, 가중나무, 은행나무, 양버즘나무, 벽오동, 산철쭉, 쥐똥나무이었다. 다만 독일가문비나무는 유럽대륙에 많이 식재된 수종으로 대기오염과 산성비의 피해로 현재 별채되고 대신 다른 나무로 식재되고 있는데, 필자의 조사로도 현재 수도권 지역에서 대기오염과 산성비의 영향으로 가장 피해를 받는 수종이다. 그러나 국립환경연구원의 gas chamber실험에서는 저항성이 강하였는데 이는 접촉농도가 SO₂가스 0.7, 1.5, 3.0ppm으로 서울 연평균농도 0.046ppm(환경처, 1991)보다 매우 높은 고농도이므로 농도차이에 따른 수목생리의 기작이 달라 이러한 결과를 보인 것으로 추측된다.

우리나라도 속히 대도시지역의 대기오염물질농도로 2~3년간 처리할 수 있는 open-top-chamber를 도입하여 위와같은 문제를 해결하여야 참된 정화수종을 밝혀낼 것이다.

국립환경연구원은 1986년부터 3년동안 "환경오염생물지표법의 개발연구"라는 연구과제에 대한 연구비지원을 과학기술처에게 받게 된다. 이기간동안 gas chamber에서 16종 17품종의 초본식물을 0.4, 0.7, 1.5ppm의 SO₂가스와 150ppb의 O₃가스로 처리

하여 gas chamber내에서 지표식물(指標植物: indicator species)로 가능성이 높은 식물로서 들깨를 첫째에 찾아 낸다(과학기술처, 1987). 다음해 들깨 13개 품종을 다시 gas chamber에서 인공혼연시켜 수원 22호인 들깨품종을 지표종으로 찾아내고 현장에 배치, 실험검정까지 마친후 배양조건과 잎이 5~8장이 나왔을때 감수성이 가장 예민한 것으로 판정되어 매우 훌륭한 성과를 올렸다. 그러나 이러한 귀중한 연구는 정책기관의 적극적인 뒷바침이 없어 사장되어 버렸다. 일본에서 나팔꽃을 지표종으로 찾아내어 육종하여 품종을 정착시킨 후 주요도시에 심어 대기오염과 산성비에 의한 피해상황을 국민에게 적극 홍보하는 상황과는 매우 대조적이다.

김정규(1987)는 위의 연구를 더욱 진행시켜 SO₂ 가스에 의해 파괴될때 관여하는 주요인자는 햇빛과 O₂-임을 밝혔으며, 또한 엽내의 과산화물 전이효소(SOD)의 동태까지 규명하여, 들깨를 지표식물로 사용할 수 있는 이론적인 면을 거의 밝힌 셈이다.

실험적인 연구방법은 가스에 의한 것만 아니라 인공강우에 의한 방법까지 연구되었다. 국내에서 산발적으로 이루어졌던 인공강우에 의한 식물피해연구를 김갑태(1986)는 은행나무묘목의 실험을 통해 체계화시켰다. 은행나무의 종자발아율, 유묘의 생장, 생리적 특성 및 엽조직, 토양의 주요 화학적 성질에 미치는 영향을 구명하기 위해 인공산성우의 농도를 pH 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0과 수도물(pH 6.4)로 처리하였다. 묘목의 생장, 생리적 특성이 pH 2.0 처리구에서는 급격히 감소했으나, pH 3.0이상의 처리구에서는 큰 차이가 없었다. 또한 토양의 성질에서는 pH값이 낮을 수록 치환성 Ca 및 Mg함량과 염기포화도가 낮아 진다고 하였다.

정용문(1987)은 소나무 및 개나리의 묘목에 대하여 인공산성우가 식물생장, 식물체내 함유성분 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향에 대하여 연구 발표하였다. 식물체의 생장 및 함유성분의 변화점은 pH 2.0임이 밝혀져 김갑태(1986)의 연구와 동일한 경향이였다. 토양 역시 산성우의 pH값이 감소함에 따라 치환성 K, Ca, Mg의 함량과 염기포화도가 낮아짐을 밝혔다. 이성희(1990)는 배추, 무우, 시금치 등 농작물을 대상으로 인공산성우를 처리하여 식물생육의 반응, 생리적, 생화학적 및 형태적 변화의 특징을 파악하였다. 특히 생화학적 특성변화에서 nitrate reductase activity 와 plasma membrane의 ATPase activity에 관한 현상과 malondialdehyde 함량변화를 구명하여 지금까지 우리나라에서 취약한 생화학적 특성을 밝히는 역할을 하였다.

이상으로 실험적 방법을 통한 대기오염물질 및

산성비에 의한 식물피해현상을 살펴 보았다. 최근 외국에서의 연구추세는 저농도의 SO₂, NO_x, O₃의 대기오염물질을 2~3년간 처리할 수 있는 open-top-chamber의 연구, 생화학적 성질의 변화에 관한 연구로 나가고 있다(Smith, 1990). 그리고 인공산성우실험도 자동조절장치의 기계를 이용하고 있다. 우리나라는 아직 고농도의 대기오염물질을 단시간동안 식물에 처리하고 수동적인 방법에 의해 인공강우실험을 하고 있으므로 이에 대한 집중적인 투자와 전문가의 육성이 시급하다.

3. 현장연구

3.1 생리적 연구

대기오염 및 산성비에 의한 식물에 대한 영향의 현장연구중 생리적인 방법은 식물체내의 오염물질 함량과 식물조직의 관찰이다.

식물체내의 오염물질함량의 초기연구에서 식물체내에 오염물질이 많을 수록 정화능력과 내공해성이 강하다고 판단하였다. 이러한 연구를 수목을 대상으로 본격적으로 시작한 학자는 김지홍(1974)으로서 서울에서 주요 간선도로변의 SO₂의 상대적 오염도와 가로수의 SO₂정화량을 조사하기 위해 가로수 잎조직내의 총유황량을 정량분석하였다. 연구결과 광화문을 중심으로 2km 이내의 지역은 수목의 SO₂흡수량이 많았고, 미류나무, 푸라타너스, 은행나무가 SO₂의 흡수량이 높은 것으로 발표되었다.

김태욱(1976)은 서울의 19개 지점에서 조경수목인 은행나무의 14개 수종을 1974년 6월부터 2개월 간격으로 3회에 걸쳐 잎을 채취하였다. 분석결과 유황 흡수능력이 큰 수종은 능수버들, 은행나무, 가중나무, 양버즘나무, 미류나무이었고 엽중 유황함량이 높은 장소는 서울역전, 아현동고개, 이화여대 등이었고, 적은 장소는 덕수궁, 경복궁, 창덕궁, 창경원, 회화동이었다. 위의 연구를 좀더 발전시켜 1976년에는 서울의 8개지점에서 13개 수종을 3회에 걸쳐 엽내와 토양의 전유황, Pd, Ca함량을 정량분석하였다(임경빈 등, 1979a). 연구결과 아현동 등 몇몇 가로지역은 수목의 피해도가 비교적 큰 반면에 사직공원, 남산공원 같은 곳은 피해가 약하여 서울시내의 대기오염물질의 완충지대로서의 역할이 큰 것으로 추정하였는데, 현재 서울시내의 녹지에서 생육하고 있는 수목의 피해가 거의 전부 극심한 것(류창희와 이경재, 1992)과 비교하면 그동안 서울의 환경조건이 얼마나 악화되었는지를 알 수 있다. 토양내에 존재하는 Pb 및 Ca함량에 있어서 지역간 차이도 인정되지만 동일한 지역내에서 가까운 지점

간에도 함량차이가 크게 나타나 이들 중금속은 국소적으로 오염이 심하고 또 오염원 성분은 다른 곳으로 쉽게 이동하지 않는 것으로 추정하여 대기오염이 심한 오늘날의 상황과는 매우 대조적이어서 흥미롭다.

김재봉 등(국립환경연구소, 1981)은 1981년 포항, 울산, 온산 및 여천공업단지의 대기오염도를 간접적으로 비교하고 생물학적인 환경오염감시체제 수립을 위하여 소나무(*Pinus densiflora*)와 해송(*Pinus thunbergii*)을 택하여 숲잎내의 유허과 불소 함량을 정량하였다. 그 결과 유허은 이들 수종에 있어서 생물학적으로 대기오염도를 측정할 경우 유용할 것으로 추정하고 있으나, 본 연구가 지속적으로 진행되지 않았고 조사지 대부분이 없어지는 등 현재로서는 재검토를 할 수가 없기에 매우 유감스럽다.

이용훈(1985)은 서울시내의 가로수생육에 관한 연구에서 가로수의 외형적인 활력도는 1년생 가지 길이, 토양경도, 엽내의 Pb함량, 엽내 수용성유허함량과 관계가 있었으며, 서울시내 가로수가 자라고 있는 지점의 토양은 화학적 성질은 대부분 일반 삼림토양보다 양호한 것으로 나타나 답압에 의한 토양의 굳어짐이 가로수의 정상적인 생육을 저해하는 것으로 추론하였다. 또한 대기중의 SO₂가스에 대한 흡수력이 강한 수종으로는 능수버들, 은행나무, 가중나무, 양버즘나무, 회화나무이었고, Pb에 대해서는 은행나무, 회화나무, 가중나무, 백합나무가 흡착력이 강한 것으로 발표하였다. 그리고 그는 결론적으로 대도시내의 환경조건에서 식재할 수종으로 은행나무, 회화나무, 양버즘나무, 가중나무, 팽나무, 느릅나무, 능수버들, 느티나무, 목백합, 피나무 등을 추천하였다.

수목잎속의 오염물질축적과 피해현상발현과의 관계는 오염정도가 초기상태일때는 관계가 없고 오염정도가 중기이후부터나 관계가 깊은 것으로 알려지고 있다. 그러므로 대기오염과 산성비에 의해 나타나는 초기증세를 밝혀야 어떠한 대책을 세울 수 있는데 많은 학자들이 이런 구체적인 조사방법을 찾기 위해 노력하였다. 대표적인 학자가 영국의 J.N. Cape로서 그는 침엽수의 잎표면은 내부조직을 보호하기 위해 왁스가 덮고 있는데, 이런 왁스는 미량인 반면 대기오염물질과 산성비에 의해 부식되며 또한 부식량이 매우 적어 정량분석으로는 계량이 불가능하다는 것을 발견하고, 간접적인 방법으로 숲잎표면에 이온수 0.2μl를 떨어뜨려 잎표면과 물방울이 이루는 각도를 contact angle(접촉각)이라하여 측정하였다(Cape, 1981; 1983). 숲잎이 발생하여 왕성

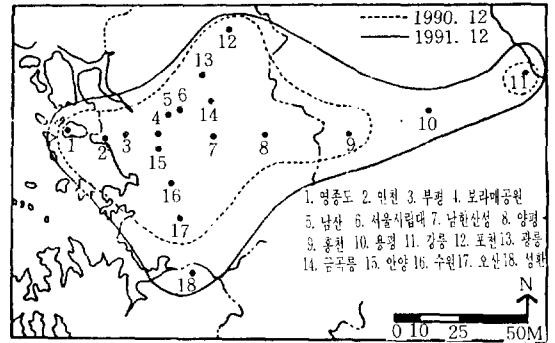


그림 1. 중부권지역의 소나무 등피해도곡선.

하게 생육하는 6월말경의 접촉각은 135° 이나 이후 서서히 감소하지만 대기오염 및 산성비에 의한 감소는 훨씬 빨리 진행된다.

필자는 위의 방법을 도입하여 수도권지역에서 소나무, 전나무, 독일가문비를 대상으로 연구한 결과 매우 좋은 결과를 얻었다(이경재, 1992). 또한 필자는 위의 수종의 접촉각측정결과와 가시적 피해도현상 측정결과로서 소나무의 등피해도곡선을 그린 것이 그림 1과 같다. 그림에 의하며 '90년 12월은 피해범위가 동서측으로는 영종도-홍천, 남북측으로는 포천-오산에 이르고 있으나 '91년 12월에는 그면적이 더욱 확장되어 동서측으로는 영종도-강릉, 남북측으로는 포천-성환에 이르고 있다. 이러한 피해는 초기에 나타나는 증세로 전문가가 아니면 무시할 수밖에 없으나 필자가 판단하기로는 현재 대기오염과 산성비에 의한 식물의 피해가 매우 심각함을 나타내 주는 것이다.

3.2 생태적 연구

유럽의 삼림은 자연생태계가 거의 존재하지 않고 대부분의 임목을 인공식재한 것으로 독일가문비, 전나무 등이 주종인데 이들이 대기오염에 대한 저항성이 매우 약하다. 1987년 현재 유럽대륙에서 대기오염물질과 산성비로 전체 삼림의 50~60%정도가 피해를 입고 있는 것으로 보고되고 있다(Innes, 1987). 그러나 유럽숲은 자연림이 아니기에 대기오염물질과 산성비에 의한 생태계의 피해현상이 거의 밝혀지지 않았다.

우리나라에서는 1980년대부터 울산(김태욱 등, 1982; Lee et al, 1992; 김선희, 1992), 여천(김준선, 1992), 서울 남산과 창덕궁후원(이경재, 1992) 등지에서 대기오염물질과 산성비에 의한 삼림생태계의 구조변화연구가 발표되었다.

김태욱 등(1982)은 울산지역에서 환경오염에 따른 삼림생태의 변화를 조사하기 위하여 울산공단내의 오염원에서부터 거리에 따라 조사지역 5곳을 설정하여 각 조사지역간의 삼림군집구조를 비교하였다. 공단내의 삼림에서의 출현수목종수는 100m²당 3종이고, 7km떨어진 피해가 거의 없는 삼림에서는 20종이었다. 또한 대기오염원에서 거리가 멀어질 수록 출현종수, 개체수, 종다양도, 군재도가 증가되고 유사도지수는 감소되었다. 삼림식생중에서 오염에 강한 수종은 청미래덩굴, 아카시나무 등이었고, 오염에 민감한 수종은 굴참나무, 갈참나무, 떡갈나무, 자귀나무 등이었다. 그러나 울산지역에서의 환경오염에 의한 피해증상은 해가 지날 수록 면적이 확대되어 식물군집구조도 매우 단순화하였다.

울산공단의 숲을 구성하고 있는 우점종(優占種: dominant species)은 곰솔(*Pinus thunbergii*)인데 본 수종은 대기오염에 대한 저항성이 매우 높은 수종으로 알려지고 있다. 그러나 교목상층을 형성하는 곰솔마저 고사되면 교목하층과 관목층에도 영향을 미쳐 식물종수와 개체수가 큰폭으로 감소된다. 우선 대기오염물질과 산성비에 의한 곰솔에 나타난 가지적인 피해를 기본으로 하여 작성한 도면을 그림 2에 나타냈다. 가지적으로 극심한 곰솔림의 피해는 중화학공업단지로부터 1982년에는 0.5km, 1987년에는 1.2km, 1991년에는 2.0km까지 나타나고 있어 피해범위가 점차 시내쪽으로 확산되고 있다. 최근 관찰에 의하면 미국자리공이 공단에서 3.5km까지 출현하고 있다. 미국자리공은 북아메리카가 원산의 1년초로서 키가 1~1.5m이고 보통 적자색을 띄며 가을에 익는 검은색의 열매는 독성이 있어 먹게 되면 설사를 일으킨다. 이 식물은 6.25사변이후 우리나라에 침입한 종으로서 보통 정상적인 삼림에서는 그 세력이 크지 않으나 울산이나 여천과 같이 대기

오염물질농도가 높은 지역의 삼림에서는 그 밀도가 높아진다. 현재 울산의 중화학공업단지에서 3.5km 떨어진 아음동 주공아파트단지의 인근 숲에는 교목상층에 곰솔이 우점종이고 관목층에서는 미국자리공이 우점종인데, 관목층의 경우 미국자리공이외의 식물은 목본, 초본 모두 출현개체수가 매우 적다. 필자가 관찰하기로는 미국자리공은 교목상층군의 우점종인 곰솔이 피해를 입기전에 출현하고, 이후 몇년을 두고 곰솔이 피해를 입기 시작하면서 미국자리공은 쇠퇴하여지고 참역새가 우점종을 이룬다. 현재 울산지역의 숲에서 대기오염의 피해가 심한 지역은 곰솔의 개체수가 100m²당 2~3주에 불과하고 참역새가 2m내외의 키로 자라고 있다.

울산의 중화학공업단지에서 0.5km 떨어진 조사구에서 삼림군집구조조사를 한 결과 1982년에는 교목상층에는 1종의 수목이 82개체, 1987년에는 2종의 수목이 50개체, 1992년에는 2종의 수목이 13개체만이 출현하여 개체의 감소가 매우 심하였다. 반면에 관목층은 1982년에 3종의 수목이 49개체, 1987년에는 12종의 수목이 55개체, 1992년에는 5종의 수목이 124개체가 출현하여 관목층에서는 해가 지날 수록 수목의 개체수가 증가하였다. 이는 관목층에 무성히 자란 참역새가 대기오염물질을 차단함에 따라 수목의 개체수가 증가하는 것이다.

이와같이 울산 등 공단지역은 해마다 대기오염에 따른 피해가 확장됨에 따라 삼림생태계의 복구대책이 시급한 실정이다. 그러나 대기오염에 대한 내성수종만을 심게 되면 자연생태계와는 매우 이질적인 군집구조가 되어 대기오염에 대한 내성의 효과내지는 정화기능에 대한 기대는 무리일 것이다. 그러므로 현지에서의 면밀한 관찰로 삼림생태계의 복구공법을 모색해야만 한다.

울산 등 공단지역은 대기오염에 의한 식물피해가 급성피해지역이라 생태계변화의 내용이 뚜렷한데, 수도권지역 특히 서울지역은 만성피해지역으로 그 피해가 확실할지가 문제이다. 그러나 서울지역은 이미 15~20년전부터 대기오염물질 및 산성비의 피해가 삼림생태계에 계속 영향을 미쳐 최근 조사에 의하면 그 피해가 매우 심각하다.

1991년에 조사한 바에 의하면 참나무림의 조사구 면적 1,200m²에서 출현하는 수종수가 창덕궁후원 21종, 남산 25종, 광릉 29종이고, 소나무림에서는 남산 34종, 광릉 39종으로 서울외곽에서 도심으로 향할 수록 출현수종수가 감소하였다(이경재, 1992). 수목의 출현개체수감소도 뚜렷하여 조사구면적 1,200m²에서 참나무림은 창덕궁후원 608주, 남산 899주, 광릉 1,410주이고, 소나무림은 남산 895주,

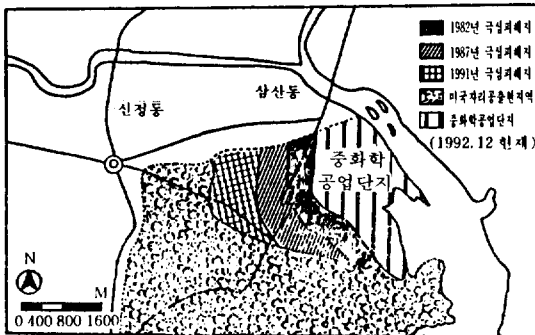


그림 2. 울산 중화학공업단지 인근 숲의 피해상태와 미국자리공의 출현지역.

광릉 1,849주이었다.

또한 서울도심 삼림에서는 해가 갈수록 출현수종수와 개체수가 감소한다는 현상이 밝혀졌다. 즉 창덕궁후원은 참나무림 조사구 500m²에서 1986년에는 27수종, 385개체가 출현하던 것이 1990년에는 13수종, 227개체로 감소하여 수종수는 50%, 개체수는 40%가 감소하였다. 남산의 소나무림 조사구 500m²에서는 1986년 출현수종 26종, 출현개체수 1,179주이던 것이 1990년에는 18종, 294주로 개체수가 75%가 감소되었다. 한편 참나무림 조사구 500m²에서 1986년 출현수종 27종, 출현개체수 1,375주이던 것이 1990년에는 19종, 333주로 감소되어 심한 군집의 변화가 발생한 것이다.

군집구조에서 정량적인 변화뿐만 아니라 정성적인 변화까지 나타나고 있다. 그림 3은 창덕궁후원, 남산, 광릉의 삼림군집구조분석을 한 내용이다. 광릉은 교목상층에서 우점종이 굴참나무, 서어나무이고, 교목하층은 서어나무, 졸참나무, 관목층은 서어나무, 단풍나무이다. 우리나라 온대림에서의 생태적 천이(生態的 遷移)는 자연림이 파괴되면 개웃나무, 짙레, 산딸기, 산초나무→소나무→참나무종류(졸참나무, 갈참나무 등)→서어나무로 진행된다(강윤순과 오계칠, 1982; 이경재 등, 1990). 그림에서 광릉의 참나무림 군집구조에서 생태적 천이가 굴참나무, 졸참나무에서 서어나무로 진행됨을 추정할 수 있다.

반면에 창덕궁후원과 남산의 교목상층에서의 우점종은 각각 갈참나무와 신갈나무이지만 교목하층과 관목층에서의 우점종은 산성토양에서 적응성이 강한 때죽나무, 진달래, 아까시나무 등이다. 서어나무는 산성토양에 대한 내성이 약하므로 도태되고 대신 위의 수종들이 출현하는데 이들이 차대림의 우점종이 될 수 있는지가 문제이다. 때죽나무나 진달래는 수목성상(樹木性狀)으로 보아 아교목(亞喬木)으로서 키가 3~4m밖에 자라지 못하므로 결코 삼림생태계상 교목상층에서의 우점종이 될 수가 없으므로 생태적 천이상 퇴보하는 퇴행천이로 진행될 수 밖에 없다. 퇴행천이가 계속 진행될 경우 식물이 살지 않는 황무지로 변할 것으로 추측된다. 이러한 지역이 서울도심에서 출현하고 있어 대기오염과 산성우에 의한 삼림생태계의 피해현상을 단순히 생각해서는 안될 것이다.

그림 4는 창덕궁후원, 남산, 광릉에서 조사구면적이 증가할 수록 샤논(Shannon)의 종다양도지수의 변화를 나타낸 것이다(류창희와 이경재, 1992). 종다양도지수는 생물종다양성(生物種多樣性: Biodiversity)을 표현하는 한 기법인데 여러 학설중

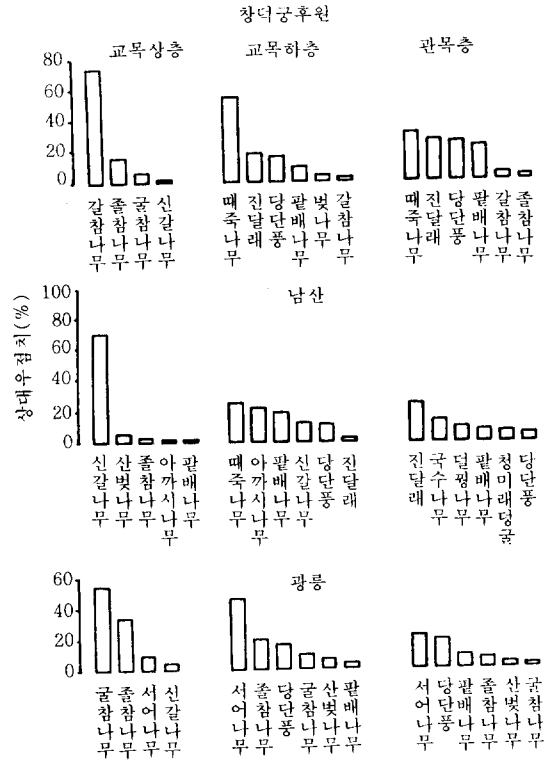


그림 3. 창덕궁 후원, 남산, 정릉의 참나무의 살림 군집구조.

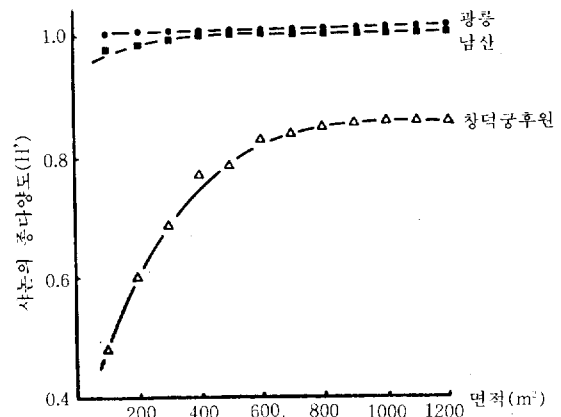


그림 4. 정릉, 남산, 창덕궁후원의 면적증가에 따른 샤논의 종다양도변화.

Shannon의 학설을 택해 계량화한 것이다. 본 다양도지수는 수목의 개체수만을 적용하여 계산한 것으로서 광릉은 면적에 상관없이 대체로 1.0을 나타낸

다. 남산은 처음 면적 100~300m²까지는 값이 증가하다가 이후부터는 0.98에 머물고 있다. 그러나 창덕궁후원은 면적 100~800m²까지 다양도지수가 급히 증가하다가 800m²이후부터는 거의 일정하여 0.83의 값에 머물어 광릉과 비교할때 엄청나게 생물종이 단순화되었음을 알 수 있다.

대기오염과 산성비에 의한 생태계의 변화는 계량화시킬 수 없을 정도이어서 관찰하기 힘든 것이 일반적이데 서울도심에서는 변화의 폭을 뚜렷하게 계량화시킬 수 있을 정도이다. 이제 생태계의 파괴현상을 그대로 간과해서는 안되고 지속적인 정책당국의 관심과 투자바탕에서 복구대책을 서둘러야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 강운순, 오계철. 1982. 광릉삼림군집에 대한 ordination방법의 적용. 한국식물학회지 25(2) : 82-99.
- 국립환경연구소. 1981. 공단주변의 생태계에 관한 조사연구. 167pp.
- 국립환경연구원. 1987. 환경오염생물지표법의 개발 연구(I). 과학기술처, 서울.
- 국립환경연구원. 1988. 환경오염생물지표법의 개발 연구(II). 과학기술처, 서울.
- 국립환경연구원. 1989. 환경오염생물지표법의 개발 연구(III). 과학기술처, 서울.
- 김문홍. 1974. 수목에 대한 대기오염의 영향에 관한 연구. 한국조경학회지 2(1) : 15-20.
- 김선희. 1992. 울산공단지역의 식물군집구조분석과 환경림조성기법에 관한 연구. 서울시립대학교 석사학위논문. 74pp.
- 김재봉, 배정오, 김정규. 1985. 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구(II). 국립환경연구소보 제 7 권 : 357-370.
- 김재봉, 배정오, 고강석, 김정규. 1986. 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구(III). 국립환경연구보고서.
- 김정규. 1987. SO₂ gas가 들깨의 생리적 특성에 미치는 영향에 관한 연구. 고려대학교대학원 박사학위논문. 86pp.
- 김준선. 1992. 대기오염물질이 여천공단주변 해송의 양묘동태와 군집구조에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위논문. 101pp.
- 김태욱. 1976. 대기오염이 조경수목의 생육에 미치는 영향. 한국임학회지 29 : 20-53.
- 김태욱, 박인협, 이경재. 1982. 환경오염에 의한 울산지역의 삼림생태학적 변화에 관한 연구. 한국임학회지 58호 : 60-69.
- 류창희, 이경재. 1992. 대기오염 및 산성우가 서울지역 삼림군집구조에 미치는 영향. 한국조경학회지 20권 1호 : 80-94.
- 서울특별시. 1976. 대기오염이 조경수목의 생육에 미치는 영향에 관한 조사연구. 130pp.
- 이경재, 조재창, 이봉수, 이도석. 1990. 광릉삼림의 군집구조(I)-classification 및 ordination 방법에 의한 소리봉지역의 식생분석 -. 한국임학회지 79(2) : 173-186.
- 이경재. 1992. 산성우 및 대기오염물질이 삼림에 미치는 피해의 조기판단에 관한 연구. 과학재단 목적기초연구보고서.
- 이성희. 1990. 산성우 피해작물의 생리 및 형태에 관한 연구. 전남대학교대학원 석사학위논문. 45pp.
- 이용훈. 1985. 도시생육환경을 고려한 서울시 가로수 선정에 관한 연구. 서울시립대학교 석사학위논문. 121pp.
- 임경빈, 김태욱, 권기원, 이경재. 1979a. 환경오염이 도시수목의 생육에 미치는 영향(I). 서울대 연습림보고 15 : 80-102.
- 임경빈, 김태욱, 권기원, 이경재. 1979b. 환경오염이 도시수목의 생육에 미치는 영향(II). 서울대 연습림보고 15 : 10-124.
- 정용문. 1986. 인공산성우가 소나무유묘 및 개나리삼목묘의 생장, 식물체내 함유성분 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 동국대학교 대학원 박사논문. 70pp.
- 정영호. 1970. 비에 대한 아류산가스의 피해. 농사시험연구보고 13(9) : 57-61.
- 정영호, 김복영, 이종길, 한기학. 1973. 환경오염에 의한 농작물피해조사연구. 김영섭박사 회갑기념논문집. 61-72.
- 환경처. 1991. 환경백서, 서울.
- Berry, C.R. 1974. Age of seedlings with primary needles affects sensitivity to ozone and sulfur dioxide. Phytopathology 64 : 207-209.
- Cape, J.N. and D. Fowler. 1981. Changes in epicuticular wax in *Pinus sylvestris* exposed to polluted air. Silva Fennica 5 (4) : 457-458.
- Cape, J.N. 1983. Contact angles of water droplets on needles of Scots pine(*Pinus sylvestris*) growing in polluted atmo-

- heres. *New Phytol.* 93 : 263-269.
- Costonis, A.C. and W. A. Sinclair. 1969. Ozone injury to *Pinus strobus*. *JAPCA* 19(11) : 865-878.
- Costonis, A.C. 1971. Effects of ambient sulfur dioxide and ozone on eastern white pine in a rural environment. *Phytopathology* 61 : 717-720.
- Innes, J.L. 1987. Air pollution and forestry. Forest commission Bulletin 70. London, 40pp.
- Jennings, O.E. 1934. Proceeding 10th nature shade tree conference. *Chem. Abst.* 29. 1935.(재인용; 임경빈 등. 1979a)
- Kim, K.T. 1986. Effects of Simulated acid rain on frowth and physiological characteristics of *Ginkgo biloba* L. seedlings and on chemical properties on the tested soil. Seoul National University. PhD Thesis. 46pp.
- Lee, K.J., C.H. Ryu and S.H. Kim. 1992. Effects on the plant community structure by the air pollutants arorond Ulsan Industrial complex in Korea. *Proceedings on Air Pollution and Interactions between Organisms in Forest Ecosystems. Tharandt /Dresden, Germany.* Sep. 9-11. 1992.
- McCleanahan, J.R. 1979. Community changes in a decuduors forest exposed to air pollution. *Can. J. For. Res.* 8 : 423-438.
- Smith, W.H. 1990. *Air pollution and forests.* Springer-Verlag, N.Y.