

大氣汚染과 農林業

金 泰 旭*

(1985년 5월 21일 접수)

Air Pollution in Relation to Agriculture and Forestry

Tae-Wook Kim*

緒 論

지구상에 존재하는 모든 생물은 주위의 무기환경과 조화를 이루어 生態系의 균형을 유지하고 있다. 인간도 생태계 구성인자중의 하나로써 자연생태계내에서 제반 생산활동을 함으로써 인간생활에 적합하도록 자연을 이용하고 관리해 왔다. 그러나 이 과정중에서 필연적으로 방출되는 각종 폐기물과 에너지는 때때로 생태계에 직접, 간접의 피해를 주게 되어 급기야는 인간생활에 불리한 環境汚染의 문제를 대두시켰다. 수질오염, 토양오염과 함께 大氣汚染은 산업이 발달하고 인구가 증가함에 따라 점차 심각한 피해를 미쳐 自然生態系의 균형을 교란시키고 있다.

지구의 大氣는 질소, 산소, 아르곤 및 이산화탄소가 전체의 99%를 차지하고 있다. 그러나 최근 자연적, 인위적으로 방출되는 이산화탄소, 분진등은 그 양이 증가되어 대기조성상의 변화가 예견되고 있을 뿐만 아니라 그밖의 각종 大氣汚染物質들은 동식물은 물론 건축물, 인간에게까지 피해를 미치고 있는 실정이다.

大氣汚染은 초기에는 난방과 요리를 위해 연료를 연소할 때 발생하는 매연이나 검댕이 결합된 분진이 주종을 이루었으나 점차 석탄이 연료로 대체되면서 아황산가스(SO₂)가 1600년까지는 주된 오염물질이었다. 19세기에 이르러 석유화학공업이 발달함에 따라 아황산가스는 물론 염화수소, 질소산화물 불화수소등이 대기중에서 대량 검출되었고 오늘날에는 자동차 배기가스의 2차오염물질인 옥시탄트(오존, PAN等)등과 산성

우(acid rain)가 대기오염의 일환으로 부각되고 있다. 따라서 大氣汚染은 초기의 국지적인 현상에서 최근에는 전세계적인 환경오염의 요인으로 손꼽히고 있다.

대기오염의 심각성은 生物系에 대한 영향으로 먼저 나타나기 때문에 이에 대한 파악으로 그 발생상황을 명백히 인식할 수 있다. 비록 식물체에 대한 대기오염의 피해는 복잡미묘해서 평가가 쉽지는 않지만 식물체에서는 다른 무엇보다 피해가 현저하게 일어난다. 대기오염의 피해에 대한 원인과 결과에 대해 반복적이고 지속적인 규명은 식물에서 용이하게 이루어질 수 있어서 환경오염방지에 대한 유용한 자료를 얻을 수도 있다.

본 논설에서는 대기오염물질의 종류와 그 발생현황을 알아보고 나아가서 각종 대기오염물질이 식물 특히 농작물과 수목에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

大氣汚染의 定義 및 現況

1. 大氣汚染의 정의

世界保健機構(World Health Organization)에서는 “大氣汚染이란 대기중에 인공적으로 배출된 오염물질이 존재하여 汚染物質量, 濃度 및 지속시간에 따라 어떤 지역의 주민의 불특정 대다수에게 불쾌감을 일으키거나 해당지역에 공중보건상의 위해를 미치고 인간이나 식물, 동물의 생활에 해를 미쳐서 인간의 생활과 재산을 함유할 정당한 권리를 방해받는 상태”라고 규정하고 있다. 따라서 대기오염은 식물에 생리적 장애를 유발시키고 생장을 둔화시킬 뿐만 아니라 식물군집의

*서울대학교 농과대학 (College of Agriculture, Seoul National University, Suwon)

변화를 유발하여 자연생태계를 파괴시키기도 한다.

2. 국내외의 대기오염 피해현황

유럽에서는 18세기초에 이미 대기오염에 의한 식물 피해가 보고된 바 있다. 1850년경 독일의 銅精鍊工場에서의 배기가스로 인해 식물이 피해를 받아 최초로 이에 관한 연구가 시작되었고 일본에서는 1870년경 尾尾鑛山鑛毒事件은 일본공해 제 1호로 알려져 있다. 그후 別子鑛山의 煙害事件, 大阪의 alkali煙害事件등이 발생하여 큰 관심을 불러 일으켰다. 1907년 미국의 테네시주의 Ducktown의 銅製鍊工場에서 배출하는 아황산 가스는 Copper Hill Basin의 삼림토양을 오염시켜 오늘날까지 불모지로 방치되어 있으며 1927년 캐나다의 銅鉛鑛鍊工場에서 배출된 오염물질이 국경을넘어 미국영토내의 농작물 및 수목에 피해를 입혀 국제공통조사단이 결성되어 피해상황을 조사한 것은 유명한 일이다. 1959년 미국 코네티컷주에서는 많은 식물이 광화학적 피해(photochemical injury)를 입고 있음이 발견되었다. 최근에도 구미제국 및 신흥공업국가들에 있어서 대기오염으로 인한 식물피해는 열거할 수 없을만큼 빈번하게 보고되고 있으며 각종 대기오염물질에 의한 피해상황과 그 기작을 규명하려는 연구가 수행되고 있다. 가스나 분진상의 대기오염이외에 최근에는 산성우가 자연생태계를 교란시키는 주요 원인으로 손꼽히고 있다. 유럽의 공업국에서 배출된 오염물질이 북유럽까지 운반되어 대기중의 수분과 결합한 뒤 酸度가 높은 강수로 지표에 도달함으로써 식물에 직접, 간접의 피해를 미치고 있다. Sweden의 경우 대부분이 강산성인 포트졸트양이어서 토양의 산성화가 가속되고 있으며 독일이 자랑하는 흑림(Schwart Wald)도 대기오염으로 인한 산성우로 수목이 고사하고 생산력이 저하된다는 조사보고가 많다.

국내의 경우는 비교적 최근에 공업발달과 함께 대기오염이 발생되어 사회문제화되고 있으나 역사적으로 식물피해가 사회문제화된 것은 1930년대 흥남질소비료공장에서 배출된 매연과 분진이 주위 10여km에 이르는 경작지에 피해를 입힌 사건이 최초이다. 이어서 1950년 서울 승인동 역청공장에서 내뿜는 매연과 악취가 인근에 피해를 입혀 현재의 면목동으로 이전한 사례, 1965년 경기도 화성군 반월의 유황제조공장에서 배출된 매연으로 인해 인접 리기다 소나무림이 고사되어 이공장이 철거된 사례, 1967년 경남 울산의 석유화학공단 부근의 과수원에서 개화결실이 이루어지지 않은 사례, 1969년 강원도 삼척의 동양시멘트공장의 분진으로 인근 소나무, 과수, 농작물이 큰 피해를 입은 사례등이 있다. 1970년대에 이르러서는 포항, 울산, 온산, 여천

등지에 대규모 공업단지들이 건설되면서 농작물 및 산림피해는 해마다 증가되고 있으며 서울과 같은 대도시에서는 가로수와 조경수들이 만성적인 대기오염의 피해를 받고 있다. 이외에도 화력발전소와 증소공단등지에서 대기오염에 의한 식물피해가 나타나고 있으나 이에 대한 피해규모의 연구등은 미흡한 실정이다.

大氣汚染物質의 종류 및 發生源

자연현상에 의해 발생하는 분진, 화산재, 휘발성물질이외에 에너지를 이용하려는 인간의 제반 생활활동에서 필연적으로 대기오염물질이 배출된다. 즉 가정에서의 취사와 난방, 각종 운송수단 및 다양한 산업시설에서 사용하는 화석연료의 연소시 부산물로 발생하는 것과 화학공업 및 제조공업에서 제품생산공정에서 누출되는 물질등이 있다. 대기중에 배출되는 주요 오염물질을 열거하면 다음과 같다.

- 1) 동력, 난방, 가열, 소각등의 소각로에서 화석연료의 불완전연소에 의해 배출되는 매연
- 2) 연료중에 함유된 유황화합물의 산화에 의해 발생하는 SO₂, SO₃등의 유황산화물
- 3) 화력발전소 cement공장등에서 집진기를 통과하여 배출되는 분진 및 fly ash
- 4) 금속정련소등에서 배출되는 fume상의 금속산화물
- 5) 인산비료공장 및 도자기공장등에서 배출되는 HF (불화수소)
- 6) 유황제조 및 기타화학공정의 배기가스중에 함유되어 있는 유황산화물, 질소산화물(NOx), 암모니아, 할로젠화합물
- 7) 자동차의 배기가스로 배출되는 일산화탄소, 질소산화물 및 각종 유기화합물
- 8) 석유의 정제장치, 저장시설, 급유시설등에서 증발되는 유기화합물
- 9) 태양광선에 의해 2차적으로 생성되는 오존, PAN 등의 옥시단트

이와같이 다양한 대기오염물질의 배출원은 고정배출원(stational source)와 이동배출원(mobile source)로 나누고 그 형태에 따라 단순오염(공장형)과 복합오염(도시형)으로 나누기도 한다. 또한 대기오염물질은 반응상태에 따라 1차 대기오염물질(primary air pollutants)과 2차 대기오염물질(secondary air pollutants)로 구분된다. 1차 대기오염물질은 다음과 같이 7種의 화합물질 및 고형물질로 구분된다.

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1) 큰 입자(직경 100 μ 이상) | 탄소알갱이
CaCO ₃ , ZnO |
| 2) 작은 입자(직경 100 μ 이하) | |

- 3) 유황 산화물 : SO₂, H₂S, mercaptan 등
- 4) 질소 산화물 : NO, NO₂, N₂O₅, NH₃ 등
- 5) 유기화합물 : HC, ketone, 유기산, tar 등
- 6) Halogen화합물 : HF, Cl₂, F₂, HCl 등
- 7) 탄소화합물 : CO, CO₂ 등

2차 대기오염물질은 대기중에 배출된 오염물질간의 상호작용, 대기정상성분과의 반응, 태양에너지에 의한 광화학적 반응등에 의해 원래의 성질과는 상이한 물질을 형성하는 것으로 오존 PAN, 산성우등이 이에 속한다.

大氣汚染과 農林業

1. 大氣汚染物質이 식물에 미치는 영향

대기오염에 의한 식물피해는 가시해(visible injury)와 불가시해(invisible injury or subtle injury)로 대별된다. 가시해는 식물체에 나타나는 병적 정후를 육안으로 관찰할 수 있는 것이며 불가시해는 육안으로 피해를 관찰할 수는 없으나 식물의 생리작용에 영향을 미쳐 생육을 저해시키는 것을 말한다. 가시해는 다시 급성해와 만성해로 구분되는데 급성해(acute injury)는 고농도의 오염물질이 단시간동안 피해를 입히는 것이며 만성해(chronic injury)는 비교적 저농도의 오염물질이 장시간에 걸쳐 피해를 입힘으로써 가시적 장애가 발생하는 것을 말한다. 앞서 열거한 각종 대기오염물질들은 각기 화학적 특성이 다르기때문에 식물에 미치는 영향도 다르다. 따라서 여러 대기오염물질이 식물에 발생시키는 피해의 특색을 규명하는 것은 중요하다 하겠다. 식물에 피해를 입히는 유해물질은 분진과 가스가 있다. 분진에는 불에 불용성인 것과 가용성인 것이 있는데 불용성인 것은 그 양이 매우 많을 때 식물의 광합성 및 호흡등의 생리작용을 방해하지만 일반적으로 크게 고려되지 않는다. 그러나 가용성 유해물질은 느리기는 하지만 생육장애를 일으킨다. 분진의 피해가 경미하고 느린 반면 가스상 유해물질은 급속하고 격심한 피해를 미친다. 유해가스에는 SO₂를 필두로 H₂S, Cl₂, HF, NO₂, O₃, 암모니아등이 있으며 이들 중 SO₂는 배출원이 많아 식물피해의 대부분을 차지하고 있다. HF는 독성이 매우 강하기 때문에 주목을 받고 있으며 그 이외의 가스는 발생원의 수가 적어 큰 문제를 야기시키지는 않는다. O₃는 자동차에서 배출되는 탄화수소가 강한 태양광선을 바탕으로 형성되는데 대기층에서 발생하는 시간은 짧으나 산화력이 매우 높다. 식물에 영향을 미치는 가스의 유해농도는 가스의 종류, 접촉시간, 접촉시의 태양광선의 강도, 온도, 습도, 온도, 식물의 종류, 생육기간등에 따라 다르나 대개 가스농도 X 접촉시간에 비례한다.

2. 可視害

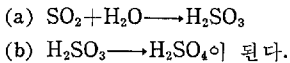
식물에 발생하는 피해가 급성이건 만성적이건간에 가시증상은 오랫동안 대기오염으로 인한 식물피해를 파악하는데 유용한 것으로 인식되어 왔다. 이는 특히 농작물과 수목이 받는 경제적 손상을 추정하는 기초수단이 될뿐 아니라 인간활동이 주위의 환경에 미치는 영향을 파악하는데에도 이용되어진다. 그러나 식물의 생육과 발달에 대한 대기오염의 제반 영향이 식물의 가시증상에 의해서만 나타나는 않기때문에 이러한 추정이 전적으로 타당하지는 않다. 그럼에도 불구하고 역사적으로 미루어볼 때 대기오염에 의한 경제적 손상피해가 노출된 후에야 그 방지대책이 이루어졌기때문에 식물에 발생하는 가시증상은 그 원인물질에 대한 적극적인 판단수단이 될 수 있다. 즉 야외에서 단순한 식물군집내에서도 種間 또는 個體間 변이가 있고 한 개체내에서도 생육단계에 따라 감수성에 차이가 있을뿐 아니라 주위 환경조건에 따라 생육상태 및 반응조건도 변화되기는 하지만 피해정후군을 신중하게 파악하면 특정 오염물질에 의해 발생하는 가시증상에 대해 신뢰할 만한 평가근거를 수립할 수 있다.

식물의 각 기관중에서도 잎은 주변의 대기와 가스를 교환하기때문에 가장 먼저 피해를 받는다. 가스상 오염물질은 CO₂나 O₂와 같이 엽면의 기공을 통하여 엽내에 흡수된 후 독성을 띄게 되며 유해분자는 엽면에 부착되어 cuticle층을 용해시키고 용액상태로 기공을 통하여 흡수되어 피해를 미친다. cuticle과 외피층을 통과한 가스상 대기오염물질은 체내 간극층의 수분과 결합하여 용액상태가 되어 엽내 조직의 세포벽을 손상시킨다. 가스의 용해능은 세포에 의해 흡수되는 정도를 파악하는 결정적 요인이다. 수분과 반응하여 酸을 형성하는 유해가스는 흡수가 용이하며 독성이 매우 강한 반면 CO₂나 NO₂는 물에 쉽게 녹지않기 때문에 독성이 비교적 약하다. 대기오염물질에 의한 가장 극심한 피해는 엽조직의 고사이며 이외에 위황증, 잎마름등이 있다. 피해부위는 점차 수분을 잃고 표백되어 황갈색 또는 백색으로 변한다. 고농도의 유해가스에 의한 피해증상은 처음에는 피해부위가 회록색으로 변하고 세포액이 세포간극을 따라 확산되면 피해부위는 담녹색이 다가 물에 젖은 것처럼 광택을 띄며 투명해지다가 뒤이어 탈수에 의해 표백되고 때로는 쉽게 부스러지기도 한다. 피사부위는 정상부위와 뚜렷이 구별되고 위황증이 피사부위와 정상부위사이에 과도부위(transition zone)을 형성하거나 잎 전체에 발달되기도 한다. 위황증은 가끔 피해초발농도와 치사농도사이에 분진상 물질이 축적된 엽조직에서 발생한다. 또한 엽록소가 파괴

됨에 따라 위황증을 나타낼 수도 있다. 급성해를 받은 식물의 잎은 때로 조기낙엽(또는 이상낙엽)을 일으킨다. 잎의 탈락층은 고농도의 대기오염물질과 신속히 반응하여 그 발달이 촉진되어 뚜렷한 가지증상이 나타나지 않고도 심한 낙엽현상을 보인다. NO₂, Cl₂ 등은 몇 시간내에 잎을 낙엽지게 하지만 대부분 서서히 노화되어 조기탈락한다. 만성적인 대기오염의 피해증상도 이와 비슷하며 다른 점은 피해부의 괴사진행이 서서히 이루어지는 것이다. 어떤 형태의 가지증상이던 오염물질의 종류에 의해 조금씩 다르기때문에 그 특징을 오염물질별로 살펴본다.

1) SO₂(아황산가스)

SO₂에 의한 식물피해는 다른 대기오염물질에 비해 훨씬 오래 전부터 관찰되고 연구되어 왔다. 기공을 통해 흡수된 SO₂는 엽육조직에 침투하면 물과 반응하여 sulfite이온을 형성하고 이는 다시 sulfate로 산화된다. Sulfite는 sulfate보다 독성이 무려 30배이상 커서 급성인 경우는 sulfite가 만성인 경우는 sulfate가 한계농도 이상 축적될 때 가지증상이 나타난다. 즉 용액상태의 반응은



SO₂는 또한 식물체내에서 형성된 aldehyde와 결합하여 α-oxysulfon산을 형성하고 이는 세포를 파괴시킨다(표 1 참조).

표 1. SO₂의 반응

1. 용액상태의 반응
(a) SO ₂ +H ₂ O→H ₂ SO ₃ pk ₁ =1.76, pk ₂ =7.20
(b) H ₂ SO ₃ →H ₂ SO ₄ pk ₁ =0.40, pk ₂ =1.92
2. 독성 반응
(a) RCOH+NaHSO ₃ →R(OH)CH—SO ₃ Na
(b) RSSR+SO ₃ ⁻² →RS ⁻ +RSSO ₃ ⁻
(c) Pyridimine과 반응
3. 대사작용에 의한 고정
(a) SO ₄ ⁻² →SO ₃ ⁻² →X→X→—S—
(b) SO ₃ ⁻² →SO ₄ ⁻² (sulfite의 산화)

SO₂피해는 생활력이 왕성한 잎에서 많이 발생하며 당년생 잎이 전년생이상의 잎보다 피해가 크다. 그것은 이들이 신진대사가 활발하여 aldehyde의 합성이 많기 때문인 것으로 추측된다. SO₂가 한계농도 이상 엽내에 축적되면 광택을 띤 암록색으로 변하고 피해부위는 투명한 것처럼 보인다. 이것이 발달하여 나타나는 반점의 형상은 환형, 각형, 부정형등이 있으며 이는 기공으로 흡수된 SO₂가 직접 조직을 파괴하기 때문이다.

수도(水稻)의 경우 급성일 때 처음에는 담록색 또는 회록색이다가 피해부위가 탈수되면서 백색으로 표백된다. 또 엽면에 작고 하얀 반점을 형성하거나 신단부가 오무리들기도 한다. SO₂피해를 받는 벼는 화분이 피해를 입어 결실량이 감소된다. SO₂에 의한 벼의 생육반응을 조사한 정영호의 보고에 의하면 1ppm의 처리구는 피해가 없었으나 5~10ppm 처리구에서는 벼잎에 두질서한 황백색 반점이 나타났고 농도가 증가함에 따라 피해도도 증가하였다. 수량은 5ppm에서 30%, 10ppm에서는 50%가 감소되었으며 생육시기별로는 개화기가 제일 심했다. 보리의 경우는 잎이 하얗게 표백되거나 옅은 갈색을 띤다. 비교적 잎이 넓은 야채류의 농작물이나 활엽수에서는 엽연 또는 엽맥간의 위황증과 괴사가 나타난다. Zimmerman은 SO₂에 가장 감수성이 큰 알팔파는 0.4ppm에서 5시간 접촉시켰을 때 연반이 발생하는 것을 관찰하였다. 대맥이나 밀에서는 0.6ppm의 SO₂를 5시간 접촉하면 연반이 발생한다. 농작물 피해에 있어 가장 심각한 것은 개화기의 피해이다. 특히 쌀, 보리, 밀 및 과수에서는 개화기의 피해가 곧 수확에 직결되므로 중요하다 하겠다. 일본의 경우 1910년 四阪島에서 SO₂피해가 발생하여 농민과 공장간에 체결된 계약에서는 쌀, 보리의 개화기에는 40일간 가동량을 감소하고 개화최성기 10일 동안에는 전면 중지시키는 조항이 삽입되어 있다. 일본의 한 황산공장 주변의 농작물 피해조사를 살펴보면 SO₂에 접촉된 벼는 생육상태가 불량할 뿐 아니라 화분피해를 받아 전체의 수확량은 무피해지에 비해 현저히 감소되었다고 보고하고 있다. 과수의 경우 1년생 식물과 마찬가지로 생육이 왕성한 잎에 피해가 발생하며 SO₂농도가 높고 장시간의 영향을 받을 때는 어린 눈과 성엽에까지 피해가 발생한다. 연반의 색은 백색 또는 갈색이 대부분이며 적색을 띠는 경우도 있다. 침엽수에 있어서는 처음에 담록색 또는 회록색이다가 점차 황갈색 내지 적갈색으로 변한다. 피해는 침엽의 선단에 나타나는 것이 많지만 때로 엽신의 중간에 띠모양을 나타내거나 작은 반점이 나타나기도 한다. 소나무는 감수성이 커서 저항력이 약하고 이 짙나무는 조금만 피해를 입어도 이상낙엽이 된다. SO₂ 및 HF에 대한 농작물의 상대적인 저항성은 (표 2)에 나타내었다.

2) HF(불화수소)

HF의 피해에 대한 연구자료는 그다지 많지 않다. 그러나 서부유럽에서는 100여년 전부터, 미국에서는 50여년 전부터 HF피해가 보고되었다. HF는 SO₂와 마찬가지로 기공을 통해 엽내에 흡수되면 물에 용해되어 엽내 조직을 파괴시키는데 HF는 독성이 매우 강해 대기 중에 수 ppb만 존재해도 식물에 피해를 입히기 때문에

표 2. SO₂ 및 HF에 대한 식물의 상대적 저항성

가스종류	피해정도	식물
SO ₂	약	알팔파, 보리, 담배, 상치, 고구마, 무우, 당근, 배밀, 콩, 목화 갓나무, 소나무, 이깔나무, 평나무, <u>빗나무!</u>
	중	사과나무, 배나무, 수수, 포도나무, 살구나무, 수박, 토마토, 곰솔, 북가시나무, 후박
HF	강	단풍나무, 장미, 감자, 옥수수, 쥐똥나무, 비늘나무, 사스레피나무
	약	소나무, 살구나무, 옥수수, 고구마, 포도나무, 복숭아나무
HF	중	보리, 알팔파, 당근, 감자, 시금치
	강	토마토, 담배, 호박, 가지, 양파, 콩, 목화

중요하다. 식물의 잎에 흡수된 HF는 유세포간극을 따라 도관에 도달하여 잎의 선단과 엽연에 신속히 운반되어 피해가 발생한다. HF는 sol상의 규산과 결합하여 규불화수소산을 형성하고 이것과 나머지 불화수소산이 세포막을 침입하여 원형질과 엽록소등을 분해하여 세포를 괴사시킨다. HF에 의한 피해증상은 SO₂와 비슷하지만 HF피해는 괴사조직과 건전조직간의 차이가 SO₂에서보다 훨씬 명료하고 주로 엽선단과 엽연에 발생한다. HF에 접촉된 식물은 수시간동안 시들음 현상을 나타내며 점차 녹색에서 황갈색으로 변하며 나중에는 갈색이 된다. 쌍자엽식물의 엽연에서의 급성피해는 해면조직과 외피세포가 붕괴되고 따라서 책상조직의 세포가 뒤물리게 된다. 붓꽃, 튜립, 글라디올러스와 같이 HF에 감수성이 큰 식물에서는 가늘고 길은 때가 괴사부위와 건전부위를 뚜렷이 구분하며 목본식물에서도 이와 유사한 증상이 나타난다. 불화수소를 무처리구 50 ppm, 500 ppm으로 나누어 벼의 활착기, 최성기, 유삽형성기, 개화기의 4회로 나누어 오전중 1시간만 접촉시킨 결과 50 ppm에서의 피해는 비교적 경미하였으나 100 ppm에서는 극심한 피해를 입어 큰 감수량을 보였으며 개화기가 가장 피해가 심했으며 유삽형성기가 그 다음이었다. 불화수소에 대한 식물의 감수성을 연구한 Zimmerman의 실험에 의하면 1.48 ppm에서 거의 모든 식물이 격심한 피해를 받았고 0.67 ppm에서는 정도의 차이는 있으나 약간의 피해를 받았다. 가장 감수

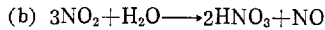
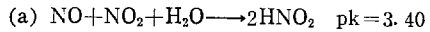
성이 큰 식물은 0.07 ppm에서도 연반이 발생했다. 침엽수에 있어서는 봄에 침엽이 급속히 신장할 때 피해가 가장 크게 발생하는 점은 SO₂의 경우와 다르다. 괴사현상은 침엽선단에서 시작되어 하부로 진행되며 피해부위는 위황증을 보이다가 곧 적갈색 또는 연한 갈색을 나타낸다. 침엽은 1년생 이상이 되면 비교적 피해를 받지 않는다. HF에 대한 식물의 저항성은 대개 SO₂의 저항성과 일치하는 경향을 보인다. (표 2)에서 보는 바와 같이 포도, 복숭아, 살구등은 저항성이 약하며 목화가 제일 강하다. HF에 의한 피해가 발생하면 불소의 화학분석에 의해 엽에 축적된 HF를 알 수 있으며 같은 잎이라도 잎 중앙부와 엽연과는 불소함량의 차이가 나타난다.

3) NOx(질소화합물)

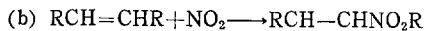
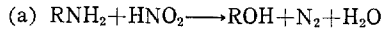
산업활동 및 자동차의 내연기관에서 발생하는 NO나 NO₂ 역시 식물에 피해를 준다. 그러나 NOx의 물발적인 배출이 없는 한 대기중의 NOx로는 식물에 피해를 미치는 경우는 드물다. NO₂가 대기중에서 발생하여 식물에서 독성을 띄고 대사되는 과정은 표 3)과 같다.

표 3. NO₂의 반응

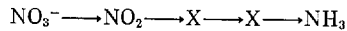
1. 용액상태의 반응



2) 발생가능한 독성 반응



3) 대사작용에 의한 전이



기공을 통해 흡수된 NO₂는 세포간극을 통하여 엽내에 축적되면 불규칙한 반점이 잎에 발생하여 광택을 띠다가 회색이나 백색으로 변한다. NO₂의 농도가 다소 낮을 때는 조그맣고 불규칙적인 검은 반점을 나타내기도 한다. NO₂에 대한 엽조직의 감수성은 낮은 광도에서 높다. 그러나 NO₂의 직접적인 피해보다는 후술할 광화학적 반응에 의한 피해가 보다 심각하다 하겠다.

4) O₃(오존) 및 PAN

O₃는 대기중에 방출된 질소산화물 및 유기화합물이 태양광선에 의해 광화학반응을 일으켜 생성되는 산화력이 강한 오염물질로써 공업지대나 대도시 인근에서 자주 관찰된다. 10 pphm의 O₃를 2시간이상 식물에 접촉시키면 감수성이 큰 식물에서는 급성해가 나타나는데 대개 새잎보다는 오래된 잎에서 피해가 더 심하다. 콩이나 토마토는 0.4 ppm의 O₃를 2시간, 담배나 백송은 0.06 ppm의 O₃를 6시간 접촉시키면 심한 피해를 입는다.

다. O₃의 피해 초기증상은 잎의 뒷면이 매끄럽게 되고 피해가 지속적이면 회색이나 갈색반점이 균일하게 발생한다, 잎 전체에 발달하는 반점은 직경이 수mm에서 수cm에까지 다양하며 엽맥을 거쳐 엽연에까지 발달한다. O₃에 감수성이 큰 식물에는 무우, 면화, 담배, 시금치, 콩, 귀리, 알팔파, 감, 감귤, 포도, 토마토, 상치 등이 있다. O₃는 소나무에 장해현상을 잘 일으켜 조기낙엽이 되는데 이는 특히 미국 Los Angeles지역에서 심하게 발생하고 있다. 식물에 피해를 미치는 광화학산물의 또 다른 하나는 PAN으로 이 물질의 기본 구조는 R-C=O-OONO₂로 알려져 있다. PAN의 대표적인 가지증상은 잎 아랫면에 은빛의 반점이 나타나고 피해가 지속되면 윗부분으로 확대되어 결국 괴사현상이 나타난다. 생육이 왕성한 어린 잎에서 현저한 피해를 받으며 잎의 황색이 빠른 것이 더 큰 피해를 받는다. PAN에 감수성이 큰 식물에는 시금치, 상치, 귀리, 보리, 콩, 담배등이 있다. 수목에 있어서는 엽령에 따라 피해발생 양상이 크게 달라 미성숙엽에서는 피해가 크고 성숙엽에서는 피해발생이 억제되기 때문에 결국 잎이 왜소해지거나 기형이 된다. 잎의 피해부는 O₃와 달리 해면조직의 세포가 위축되고 탈수되기때문에 세포간에 공기가 차게된다. 잎이 은회색으로 보이는 것은 이 때문이다. PAN의 피해현상은 반드시 광선에 노출될 때 발생하는 것이 특징이다. 만일 식물이 비교적 짧은 시간이라도 PAN에 노출될 때 어두운 곳에 방치되었다면 장해는 일어나지 않는다.

5) 그외의 대기오염물질

Cl₂(염소가스)는 소다공장이나 제당공장등에서 배출되며 독성은 매우 높은 편이다. 피해증상은 처음 백색반점을 형성하고 차츰 엽면이 그슬린 것 같이 담황색에서 갈색으로 변한다. H₂S(유화수소)는 독성은 약하나 많은 식물이 10 ppm정도에서 피해를 입으며 어린 잎과 눈에 피해가 나타난다. 탄화수소중 에틸렌은 현화식물에 피해를 주고 식물 호르몬과 생장조절물질의 정상활동을 저해한다. 따라서 에틸렌은 식물의 잎과 줄기의 생육을 저해하여 꽃과 잎의 조기탈락을 유발시킨다. 이외에도 농작물 생육에 물리적피해를 가하는 분진이 있는데 주로 시멘트공장, 연탄제조공장, 석회석 공장등에서 배출되는 원료물질의 미립자의 먼지가 바람에 의해 비산되어 농작물의 잎에 부착되어 광합성과 호흡을 방해한다.

3. 不可視害

앞서 살펴본 바와 같이 잎의 변색이나 반점등의 가지증상이 나타나는 피해의 감정은 용이하다. 그러나 대기 오염 지역에서 가지증상이 나타나지는 않지만 장시간

동안 농작물의 수확량이 감소하거나 생육이 불량한 경우가 있다. 특히 수목의 경우에는 활력이 저하되어 병충해의 침입이 용이해지거나 재적생장이 감소되어 생산력이 떨어지는 경우가 많다. 이렇듯 저농도의 대기오염물질이 장시간에 걸쳐 식물과 접촉함으로써 생리적 장해를 일으키는 지의 여부가 최근 연구의 대상이 되고 있다. 침엽수나 활엽수를 저농도의 SO₂에 장시간 접촉시키면 호흡에 이상이 생기고 엽록소의 광합성능력이 떨어지거나 영양원소의 일부가 감소하는 등의 생리적 장해가 일어난다. 단기간에 생육하는 농작물에서는 만성적 대기오염물질을 저농도로 접촉시키면 엽내 호흡량과 광합성량이 일시에 저하되었다가 시간이 경과함에 따라 정상으로 되찾아 식물의 생육에 큰 지장을 초래하지 않는다는 보고도 있기는 하다. 그러나 이와 같은 상황은 실제 공단이나 대도시 주변에서 빈번히 발생되므로 다년생작물 및 수목에서는 무시할 수 없는 요인이 된다. 알팔파는 0.25 ppm의 SO₂를 1시간 접촉시키면 2%의 CO₂흡수저하가 생기고 0.5 ppm의 SO₂에 1시간 접촉시키면 21%까지 저하된다고 한다. 또한 소나무의 경우 엽의 진중량이 저하되거나 엽록소의 함량이 낮아지기도 한다. 따라서 육안판단이 가능한 가지증상이 없다 할지라도 대기오염지역의 농작물 및 수목은 생리적인 피해를 끊임없이 입고 있다고 할 수 있을 것이다.

大氣汚染과 生態系

수년에 걸쳐 지속되는 대기오염은 생태계의 변화를 유발시킨다. 특히 삼림은 농경지와는 달리 인위적인 관리가 어려워 퇴행적인 발달을 하게 된다. 삼림생태계의 주요 구성인자인 각종 식물은 대기오염에 대해 종간, 개체간 차이가 있어 그 피해는 삼림군집의 종구성 상태를 변화시키고 대기오염에 강한 식물로 이루어진 단일 군락으로 변화된다. 대기오염피해가 계속됨에 따라 상층인관을 이루는 수목이 고사하거나 수관이 쇠퇴하여 임내 습도 및 광도가 변화하고 이에 따라 대기오염에 강한 관목류나 초본류가 번성한다. 미국의 Los Angeles부근의 침엽수림은 오존의 피해로 우세목인 폰데로사 소나무가 고사함에 따라 군집이 변화되어 전체 삼림생태계가 황폐되고 있다. 이는 일본이나 유럽에서도 큰 관심을 불러 일으키고 있다. 우리나라에서도 여천 및 울산공단 주변의 삼림은 우점종인 소나무, 진달래 등이 쇠퇴하고 참나무류나 청미래덩굴등이 하층으로부터 발달하고 있으며 극심한 피해지에서는 머느리밀렛, 개, 여뀌, 도깨비바늘, 방동사니등의 초본류만이 밀생하고 있다. 식물군집의 변화와 더불어 토양의 산성화

는 유기물을 분해시키는 토양미생물의 활동과 번식을 억제하여 영양원소의 순환을 저해시킨다. 토양의 산성화는 대기중의 산성산화물이 지면에 도달하여 집적되어 일어나는데 일단 토양이 산성화되면 Ca, Mg 등은 토양표면에서 용탈되고 동시에 Al, Mn 등이 용출되어 뿌리로부터의 무기양료흡수를 저해시켜 결국은 수목의 생육에 영향을 미친다. 삼림토양은 원래 산성을 띄는 경우가 많고 농경지에 비해 완충능이 높다. 산성산화물은 황산염, 질산염, 염소이온 기타 음이온이 대부분이다. 최근에는 산성우(acid rain)가 북극 및 미국에서 삼림생태계에 큰 위협으로 대두되고 있다. 산성우는 SO₂ 또는 NOx 등이 대기중에서 수분과 결합하여 각각 황산 또는 질산등을 형성하여 강수로써 지표에 도달하는 것을 말한다. 정상적인 비는 대개 pH 5.6 정도인데 서구에서는 pH 4.5~5.0의 비가 내리고 있다. 미국에서는 pH 5.0 이하의 비가 동부지역에 만연되어 있다. 우리나라의 경우도 최근의 자료에 의하면 서울지에서 pH 5.6 이하의 산성우가 전체의 88%나 된다고 보고되고 있다. 이러한 제반 요인들은 삼림토양의 환경을 바꿀뿐만 아니라 그 토양에 적합한 수종만이 생육하여 대기오염으로 인한 직접적인 식물군집의 변화와 함께 전체 삼림생태계의 정상적인 천이과정에 장애를 일으킨다. 따라서 농작물이나 수목개체의 피해도 중요하지만 육상생태계 전반에 걸친 피해에 대한 연구가 꾸준히 이루어져야 할 것이다.

防 止 對 策

대기오염은 이제 외국뿐만 아니라 국내에서도 발생빈도와 장소가 많아지고 있다. 대기오염피해에 대한 농작물보상이 매년 울산, 여천공업단지를 중심으로 실시되고 있으며 수목에 대해서는 필자가 1984년 최초로 여천공단을 중심으로 보상대책을 강구한 바 있다. 그러나 대기오염은 대부분 인간의 사회, 경제적 활동에 의해 발생케 되므로 그에 대한 기술적 방지대책이 수립되어야 한다. 따라서 그 방지대책을 다음과 같이 열거한다.

- 1) 연료의 질이 좋은 것을 사용하는 것이 긴 안목에서 볼 때 저질의 연료를 사용하여 오염을 일으키는 것보다 경제적으로도 유익하다는 것을 인식하고 아울러 가능한 한 연료를 완전연소시킬 수 있는 기계의 개발 및 기술이 이루어져야 한다.
- 2) 각종 대기오염물질이 배출되기 전에 회수할 수 있는 오염방지시설의 확충에 완력을 기해야 한다.
- 3) 정화되지 못하거나 회수되지 못한 오염물질은 연돌을 높여 대기중에 확산시켜 오염물질의 농도를 희석

시킨다.

- 4) 대기오염에 의한 피해가 식물의 생육기중 봄과 여름에 가장 심하므로 이때의 조업을 제한한다.
 - 5) 공장지대나 대도시의 가로변에 대기오염에 강한 수종을 식재하여 식물완충지대를 설치한다. 예를 들면 도로 외측에 초본을 심고 그 다음에 족제비싸리와 같은 관목을 심고 그 외부에는 은행나무, 원사시등의 교목을 식재함으로써 자동차의 배기가스의 확산을 어느 정도 감소시킬 수 있다.
 - 6) 대기오염이 심한 지역에는 저항성이 큰 수종을 식재하고 저항성이 약한 수종의 식재는 피한다.
 - 7) 시비개선통을 통하여 오염에 의한 피해경감효과를 거둘 수 있게 한다. 즉 SO₂, HF, O₃ 등에 대해서는 piperonyl butoxide액의 엽면시비등을 함으로써 다소나마 피해방지에 도움이 되도록 한다.
 - 8) 환경교육을 통해 자연환경의 중요성을 온 국민에게 인식시켜 감시자로서의 역할을 하게 한다.
- 이와같은 방지대책은 결코 최상의 것이 될 수 없음은 자명하다. 그러므로 기술적 방지대책을 실행하기에 앞서 오염방지에 대한 우리 모두의 노력은 자기생존책이라는 인식하에 국민모두가 비록 작은 환경오염의 문제라도 적극적으로 대처해나가야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 한기학 (1973) : 아황산가스에 의한 농작물의 피해생리, 감수 및 피해경감에 관한 연구, 한국농화학회지, 16(3), 1.
2. 日本公衆衛生協會 (1973) : 大氣汚染植物被害寫眞集.
3. 정영호 (1970) : 벼에 대한 아류산가스의 피해, 농사시험연구보고, 13(9), 57.
4. 정영호, 김복영, 이종길, 한기학 (1973) : 환경오염에 의한 농작물 피해 조사연구, 김영섭박사 회갑기념논문집, p. 61.
5. Jensen, K. F., Dochinger, L. S. and Townsend, A. M. (1976) : Pollution Response In *Modern Method in Forest Genetics.* (ed. by J. P. Miksche), p. 189.
6. Health, R. L. (1980) : Initial events of injury to plants by air pollutions, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 31, 395.
7. 김문홍 (1974) : 수목에 대한 대기오염의 영향에 관한 연구. 한국조경학회지, 2(1), 15.
8. 김태욱 (1981) : 환경공업, 대학원 농학계 자 학과별 교과과정에 따른 교재개발, p. 229~275.
9. Mansfield, T. A. (1976) : *Effects of Air Pollut-*

ants on Plants, Cambridge University Press.

28.

10. 門司正三, 内嶋善兵衛 (1979) : 大氣環境の變化と植物, 東京大學出版部.
11. Nagu, J. O. (1978) : *Sulfur in the Environment*, John Wiley & Sons.
12. 山添文雄, 眞弓羊一 (1975) : 大氣汚染による植物被害の 鑑定法に 關する 研究, 農技研報(3), 27,
13. Scurfield, G. (1960) : Air Pollution and tree growth, *For. Abstr.*, 21, 339 & 517.
14. Zimmerman, P. W. and Crocker, W. (1934) : Toxicity of air containing sulfur dioxide gas., *Contrib. Boyce Thompson Inst.*, 6, 455.