

대기오염과 수목 피해

김영걸 · 임주훈 · 김용석 · 김수진 · 배상원
(국립산림과학원 산림수토보전과)





이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

● 발간사 ●

우리 지구는 하나의 생명체입니다. 우리와 함께 공생하고 있는 지구는 지금도 인간에 의해서 많이 훼손되어 가고 있습니다. 인류문명의 발달과정에서 수반되어온 산업화와 도시의 인구집중 등은 위기적으로 대기오염을 유발시키고 있습니다.

대기오염은 지구가 탄생하였을 때부터 자연적인 발화 등으로 발생하였으나 그 영향은 극히 적었습니다. 역사적으로 대기오염이 문제가 된 것은 13세기부터라고 하는데, 1273년 영국에서는 매연취급규칙이 제정되었습니다. 그리고, 1850년경 독일의 동제련공장에서는 배기 가스로 인해 수목이 피해를 입어서 최초로 이에 관한 연구가 시작되었습니다. 1927년에는 캐나다의 동, 아연 제련공장에서 배출된 오염 물질이 국경을 넘어 미국의 농작물 및 수목에 피해를 입혀 국제적으로 문제가 된 적이 있습니다.

현재는 오염원 부근에서 나타나는 국소적인 피해보다는 오염물질이 국경을 넘어 다른 먼 지역으로 이동하여 대면적으로 나타나는 피해가 대부분입니다. 우리하고 가까운 이웃인 중국의 급속한 산업 및 경제발전에 따른 에너지 자원 충족을 위한 화석연료 사용량이 증가함으로써 대기오염 피해는 증가 일로에 있습니다. 매년 편서풍을 타고 우리나라로 넘어오는 황사에는 대기오염으로 인한 중금속이 많이 함유되어 있어 막대한 피해를 주고 있습니다. 우리나라는 1970년대부터 세계적으로 팔목할만한 경제 성장을 이루었지만 이에 따른 부작용으로 우리 생활주변의 환경오염이 심화되어 도시나 공단주변의 산림생태계 파괴 등 심각한 문제가 야기되고 있습니다.

대기오염은 산림생태계와 아주 밀접한 관계에 있습니다. 산림은 대기를 정화시키는 공익적인 역할을 담당하기 때문입니다. 이미 고도의 성장을 이룩한 유럽과 북미지역에서는 대기오염과 산성비 등에 의해 많은 산림 피해를 겪은 바 있습니다. 그로 인해 80년대 중반부터 전 세계적으로 국경 없는 대기오염 문제를 공동으로 대처하고자 모니터링 연구를 계속하고 있습니다.

우리 국립산림과학원에서는 90년도부터 전국 규모의 모니터링 시스템을 구축하여 대기오염과 산림생태계의 변화를 모니터하기 시작하였고 최근에는 중국, 몽골, 러시아 등 주변국가들과 공동연구를 수행할 정도로 연구범위가 확장되었습니다.

이 연구자료는 그간 축적된 자료와 연구결과를 기본으로 하여 대기오염으로 인한 수목피해에 대해 집중적으로 고찰함으로써 향후 관련연구를 더욱 발전시키고 임업정책 수립에 귀중한 자료가 될 것으로 생각합니다.

2012년 12월

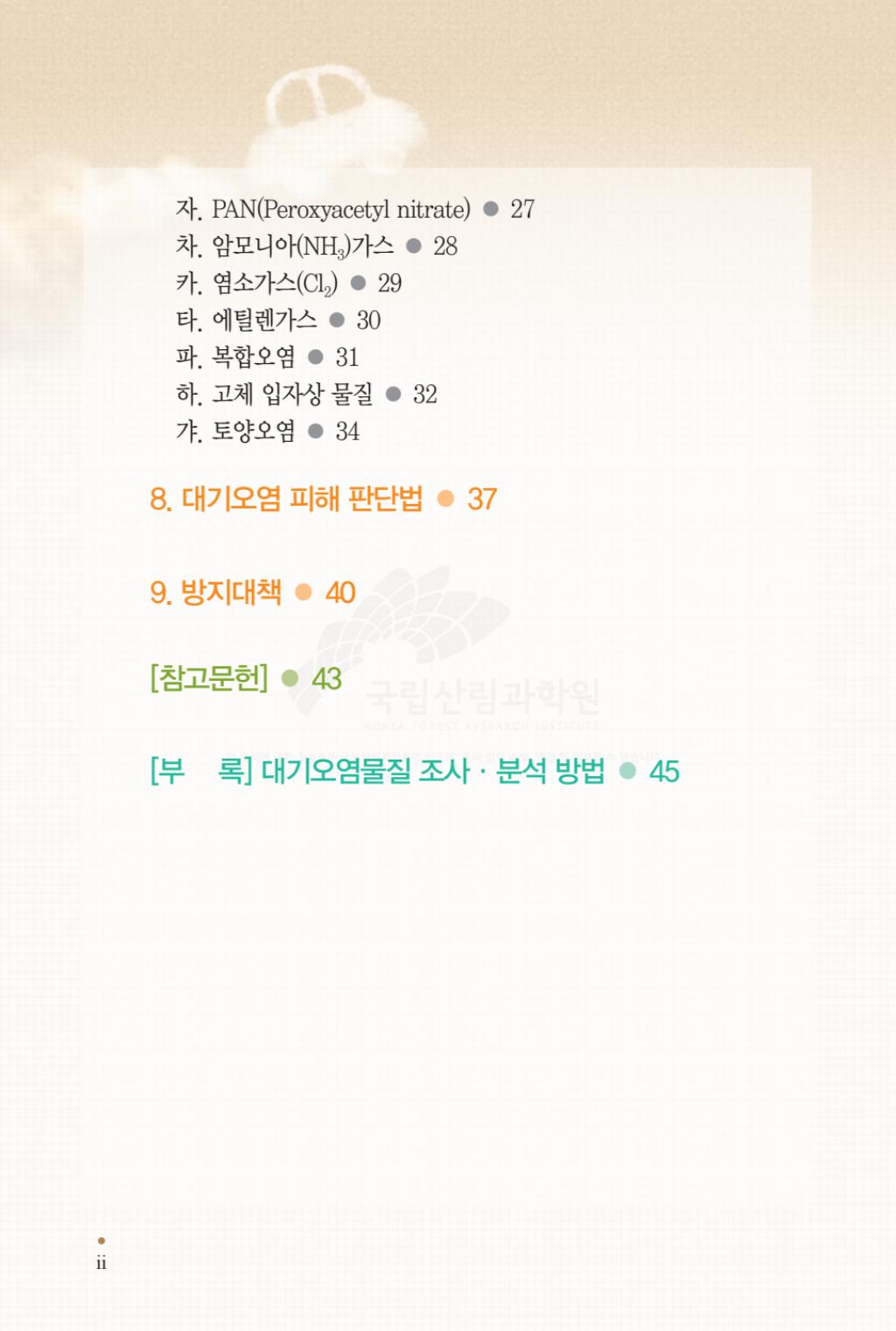
국립산림과학원장 구길본



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 동의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

목 차

1. 서 언 ● 1
2. 대기오염의 정의와 측정단위 ● 2
3. 대기오염 물질의 종류와 발생원 ● 3
 - 가. 대기오염물질의 종류 ● 3
 - 나. 대기오염물질의 발생원 ● 4
4. 우리나라의 오염배출 실태 ● 5
 - 가. 에너지 소비 현황 ● 5
 - 나. 대기오염물질 배출량 ● 6
5. 우리나라의 산림피해 실태 ● 7
6. 대기오염현상 ● 9
 - 가. 산업적 스모그와 광화학적 스모그 ● 9
 - 나. 지역기후 및 스모그 ● 10
 - 다. 도시 열섬 현상 ● 12
7. 대기오염 물질이 수목에 미치는 영향 ● 13
 - 가. 일반적인 사항 ● 13
 - 나. 가시적인 피해 ● 13
 - 다. 비가시적인 피해 ● 14
 - 라. 아황산가스(SO₂) ● 15
 - 마. 불화수소가스(HF) ● 18
 - 바. 질소산화물(NO_x) ● 20
 - 사. 오존(O₃) ● 21
 - 아. 산성비 ● 23

- 
- 자. PAN(Peroxyacetyl nitrate) ● 27
 - 차. 암모니아(NH₃)가스 ● 28
 - 카. 염소가스(Cl₂) ● 29
 - 타. 에틸렌가스 ● 30
 - 파. 복합오염 ● 31
 - 하. 고체 입자상 물질 ● 32
 - 갸. 토양오염 ● 34

8. 대기오염 피해 판단법 ● 37

9. 방지대책 ● 40

[참고문헌] ● 43

국립산림과학원
KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

[부 록] 대기오염물질 조사 · 분석 방법 ● 45

그림 목 차

- 〈그림 1〉 울산공단 주변의 산림(해송) ● 8
- 〈그림 2〉 여천공단 주변의 산림(졸참나무) ● 8
- 〈그림 3〉 도시지역의 대기오염 및 스모그 현상(울란바토르) ● 10
- 〈그림 4〉 아황산가스에 피해 입은 수엽 ● 17
- 〈그림 5〉 불화수소에 피해 입은 은행나무와 잣나무 ● 19
- 〈그림 6〉 질소산화물에 의한 가로수 피해 ● 21
- 〈그림 7〉 단풍나무 수엽 피해 ● 21
- 〈그림 8〉 오존에 의한 엽 피해 조직 모식도 ● 22
- 〈그림 9〉 오존에 의한 수엽 피해 ● 22
- 〈그림 10〉 산성비 생성 모식도 ● 25
- 〈그림 11〉 산성화된 산림토양 회복 실연지(영취산) ● 36

이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 번역 및 배포할 수 없습니다.

표 목 차

- 〈표 1〉 연도별 대기오염물질 배출량 ● 6
- 〈표 2〉 아황산가스에 강한 수종 ● 18
- 〈표 3〉 불화수소에 강한 수종 ● 20
- 〈표 4〉 질소산화물에 대한 식물의 민감도 ● 21
- 〈표 5〉 오존에 강한 수종 ● 23
- 〈표 6〉 산성비에 의한 수목 피해 ● 26
- 〈표 7〉 염소가스에 대한 감수성 ● 29
- 〈표 8〉 에틸렌에 대한 감수성 ● 30
- 〈표 9〉 복합 대기오염에 강한 수종 ● 31
- 〈표 10〉 입자상 물질의 분류 ● 33
- 〈표 11〉 분진 흡착력이 높은 수종 ● 34
- 〈표 12〉 각종 대기오염물질에 의한 수영의 피해 증상 ● 38
- 〈표 13〉 수목 피해 쇠퇴도 평가 기준 ● 39
- 〈표 14〉 대기환경기준 ● 41
- 〈표 15〉 지역별 환경림 조성 수종 ● 42

오늘날 지구상에서 우리가 직면하고 있는 위기적인 문제는 인구증가, 환경오염, 자원고갈의 세 가지로 구분할 수 있다. 인구증가는 스스로 직접 자원을 소모하고 환경을 오염시키는 동시에 산업화와 도시화를 촉진시켜 다시 간접적으로 자원 소모와 환경을 악화시키는 근원적 요인이 되고 있다. 이와 같이 산업 발달과 도시로의 인구 집중은 필연적으로 대기오염을 유발시키게 된다. 대기오염은 특히 에너지를 이용하는 과정에서 주로 발생하게 되는데, 예를 들면 교통 수단, 공장 지대, 주택 지역 등에서의 화석 연료 사용으로 인한 발생을 들 수 있다. 또한 에너지를 이용하는 연소 외에 화학이나 석유 공업의 제품 제조 공정 중에 가스가 누출되어 나타나는 경우도 있다.

대기오염은 초기에는 생활을 위한 연료 연소 시 발생되는 매연이나 분진이 주종을 이루었으나 점차 석탄이 산업연료로 대체되면서 아황산가스가 주된 오염물질이 되었다. 산업혁명 이후 유럽에서는 공장 주변 산림에 대기오염으로 인한 피해가 나타나기 시작하였는데, 최근에는 오염원과 관계가 없어 보이는 청정 지역의 산림에서도 오염원 주변 산림과 유사한 형태의 피해가 나타나고 있다. 이런 현상을 유럽에서는 과거의 공장 주변 즉, 오염원 부근 산림 피해하고는 다른 「새로운 형태의 산림 고사」라고 정의한 바 있다. 오늘날에는 교통수단의 계속적인 증가와 산업 구조가 다양해지면서 2차 오염물질인 옥시던트 등과 산성비가 주된 대기오염으로 심각하게 부각되고 있다. 또한 대기오염은 초기의 국소적인 현상에서 지역적인 현상으로, 나아가 최근에는 전 세계적인 환경오염 문제로 확산되고 있다. 여기에서는 우리나라에서 발생하는 대기오염물질 종류와 그것이 수목과 산림에 미치는 영향, 발생 메커니즘, 방지 대책 등에 대하여 논하고자 한다.

KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

이 문서에 대한 소유권은 국립수목과학원에 있으며, 무단 복제 및 배포를 금합니다.

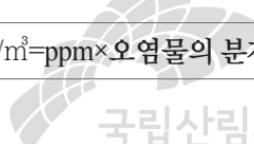


대기오염의 정의와 측정단위

세계보건기구(World Health Organization)에서는 「대기오염이란 대기 중에 인공적으로 배출된 오염물질이 존재하여 오염물질량, 농도 및 지속시간에 따라 지역 주민의 불특정 대다수에 불쾌감을 일으키거나 해당지역에 공중보건상의 위해를 미치고 인간이나 식물, 동물의 생활에 해를 미쳐서 인간생활과 재산을 향유할 정당한 권리를 방해받는 상태」라고 규정하고 있다.

대기오염물질 중 기체상태 오염물질의 농도는 ppm(parts per million) 단위로 표현되는 것이 보통인데, 1ppm은 공기와 오염물질을 합한 전체부피 10^6 중에서 오염물의 부피가 1인 경우의 농도를 뜻하며, 백분율로 나타내면 0.0001%의 농도에 해당한다. 또한 대기오염물질의 농도는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 단위로도 표현되는데, 기온 25°C , 기압 760mmHg의 상태에서 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 ppm 단위 간에는 아래와 같은 관계가 성립된다.

$$\mu\text{g}/\text{m}^3 = \text{ppm} \times \text{오염물의 분자량} / 24.5 \times 10^3$$



국립산림과학원

KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.



대기오염 물질의 종류와 발생원

가. 대기오염물질의 종류

대기오염물질은 대기, 물, 토양 등을 오염시켜 생태계를 변화하게 하고 더 나아가서는 생물의 서식 환경을 위협하여 사회적으로도 많은 문제를 야기한다. 대기오염은 특히 수목에 피해를 주는데, 가스 상태의 오염 물질이 기공을 통하여 흡수되어 체내에 장해를 주며, 분진의 경우에는 엽면에 부착되어 기공을 폐쇄하거나 차광함으로써 탄소 동화 작용 및 호흡 작용을 저해하여 결과적으로 생장 감소 및 고사를 유발한다. 또한 대기오염으로 인하여 생성되는 산성비의 경우는 직·간접적인 영향으로 산림생태계를 파괴하며, 중금속류의 미립자 역시 산림 지역에 유입되어 토양을 오염시킨다. 그 장해의 내용을 화학적으로 구분해 보면 아래와 같다.

- 산화적 장해 : 오존(O₃), PAN(peroxyacetyl nitrate) 및 동족체, 이산화질소(NO₂), 염소(Cl₂) 등
- 환원적 장해 : 아황산가스(SO₂), 황화수소(H₂S), aldehyde류, 일산화탄소(CO) 등
- 산성 장해 : 불화수소(HF), 사불화규소(SiF₄), 염화수소(HCl), 황산화물(SO₃, SO₂, 황산미스트), 질산미스트, 시안화수소(HCN) 등
- 알칼리성 장해 : 암모니아가스(NH₃)
- 기타 유기계 가스 : ethylene, propylene, butylene, acetone
- 고체입자상물질 : 매진, 분진, 부유입자상 물질(Cd, Zn, Pb 등), 금속연기와 산화물
- 산성비 : 산도가 pH 5.6 이하인 강우

나. 대기오염물질의 발생원

대기오염 발생원은 고정 오염원과 이동 오염원으로 구분되며, 고정 오염원은 다시 점 오염원과 비점 오염원으로 분류된다.

- 고정 오염원
 - 점 오염원 : 배출업소
 - 비점 오염원 : 주택지
- 이동 오염원 : 자동차, 기차, 항공기 등



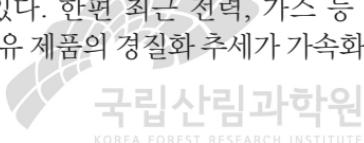
이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

4

우리나라의 오염배출 실태

가. 에너지 소비 현황

우리나라는 지난 반세기 동안 급속한 경제 개발로 인하여 에너지 다소비형 구조로 발달하였다. 즉 1970년대부터 산업 구조가 경공업 중심에서 중화학 공업 중심으로 전환되면서 시멘트, 석유화학, 철강, 금속을 비롯한 에너지 다소비 업종이 크게 성장하였다. 국내 에너지 소비의 심화는 선진국에 비해 국내 경차 보급 비중이 매우 낮은 상황을 미루어 보아도 짐작할 수 있다. 2007년 현재 우리나라의 1차 에너지 총 소비는 236,454 천TOE(Ton of oil equivalent)로서 1981년부터 연평균 9% 이상의 높은 증가율을 보여 왔다. 1인당 총 에너지 소비량의 경우 1997년도에는 3.93 TOE이었으나, 2007년에 이르러 4.86 TOE로 증가되었다. 특히 석유는 해외에서 전량 수입되고 있는 실정이며 1차 에너지 소비의 석유 의존도는 2007년 기준 45%나 되어 매우 높은 의존도를 보이고 있다. 한편 최근 전력, 가스 등 고급 에너지 수요가 급증하고 있으며 석유 제품의 경질화 추세가 가속화되고 있다.



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

나. 대기오염물질 배출량

〈표 1〉 연도별 대기오염물질 배출량

(단위:톤/년)

구분 연도	아황산가스 (SO ₂)	질소산화물 (NO _x)	먼지 (TSP)	일산화탄소 (CO)	휘발성 유기화합물 (VOC)
2002	501,753	1,106,269	89,019	860,584	723,857
2003	499,010	1,167,329	90,643	857,952	730,653
2004	446,804	1,377,526	80,084	816,954	797,240
2005	408,462	1,306,724	88,909	788,917	756,421

대기오염물질 배출량 산정의 기본이 되는 연료 사용량을 2007년도 기준으로 살펴보면, 석유가 794,946 천TOE, 석탄이 74,128 천TOE, 가스가 26,664 천TOE이었다. 1차 에너지원별 구성비 추이를 보면 석유가 44.6%, 석탄이 25.2%, LNG가 14.7%, 원자력이 13.0%, 수력이 0.5% 그리고 기타가 2.0%였다(표 1).

최근 연도별 대기오염물질 배출량을 보면, 총 연료 사용량이 매년 증가함에도 불구하고 저공해 연료 공급 확대 등의 노력으로 총 오염물질 배출량은 감소하고 있으나 자동차의 급속한 증가로 질소산화물 배출량은 점차 늘어나고 있는 실정이다. 특히 질소산화물은 도시 지역의 오존 함량을 증가시키는 주된 원인으로 볼 수 있다.

한편 발생원 별로 대기오염물질 배출량을 보면, 2007년 기준으로 산업 부문이 전체의 57.5% (104,327 천TOE)를 차지 하였으며, 이어서 수송 부문, 가정·상업 부문, 공공·기타 부문 순으로 나타났다. 부문별로 대기오염물질 배출비율을 분석하여 보면 먼지와 아황산가스의 배출량은 연료를 다양으로 소비하는 산업 부문에서 가장 많았고, 대도시 지역의 주요 대기오염 물질인 질소산화물과 탄화수소는 주로 수송 부문에서 배출되고 있음을 알 수 있다.

5

우리나라의 산림피해 실태

우리나라에서 대기오염 피해가 문제가 된 첫 사례는 1930년대 홍남에 있는 질소비료공장에서 배출된 매연 낙하진과 아황산가스가 주위 수십 km에 이르는 경작지에 막대한 피해를 입힌 사례였으며, 실제로 대기오염이 사회문제로서 주목받게 된 것은 1960년대에 들어서라고 할 수 있다. 1950년에 서울 송인동 역청 공장에서 배출된 매연이 인근에 피해를 입혀 공장을 다른 곳으로 이전한 기록이 있으며, 1965년에는 경기도 화성군 반월의 유황제조 공장에서 배출된 매연으로 인해 인근 리기다소나무림이 고사되어 공장이 철거된 사례가 있다. 1967년에는 경남 울산의 석유화학공단 부근의 과수원에서 개화결실이 이루어지지 않은 기록이 있으며, 1969년에는 강원도 삼척의 동양시멘트공장에서 배출된 분진으로 인근 소나무, 과수, 농작물이 큰 피해를 입은 사례가 있다. 1970년대에 들어서는 울산, 여천 등에서 대규모의 공업단지들이 건설되면서 주변 산림 피해가 증가하였으며, 현재는 급격한 인구 증가와 더불어 대도시화가 이루어지면서 도시의 가로수 및 조경수, 주변 도시림 등이 만성적인 대기오염과 산성비의 피해에 노출되어 피해를 입고 있는 실정이다(그림 1, 2).

국립산림과학원에서는 1986년부터 전국 주요 산림 지역을 대상으로 대기오염도 조사를 실시해왔으며, 1991년부터는 전국을 $40\text{km} \times 40\text{km}$ 로 격자화한 65개소의 고정 산림 지역 조사구에서 대기오염도 및 산림생태계 변화조사를 실시하고 있다.

국립산림과학원

KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

이 출판물은 국립산림과학원이 있으며, 동의 없이 소스, 내용 및 인용할 수 없습니다.



〈그림1〉 울산공단 주변의 산림(해송)



〈그림 2〉 여천공단 주변의 산림(졸참나무)
이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

가. 산업적 스모그와 광화학적 스모그

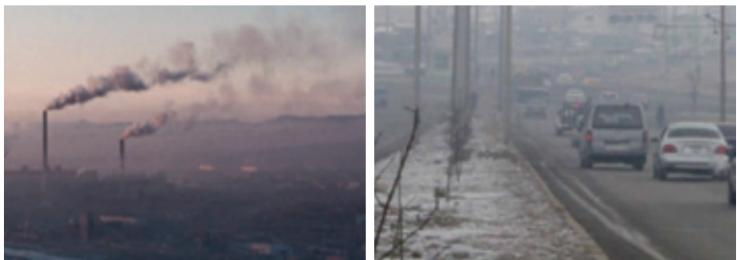
산업적 스모그는 아황산가스와 부유입자상 물질 및 아황산 가스로부터 형성된 황산 액적(黃酸 液滴) 등의 혼합물이다. 이는 주로 도시 지역 대기 중에 안개 형태로 나타나며, 특히 겨울철 이른 아침에 많이 발생한다. 세계적으로는 주로 영국의 London, 미국의 Chicago, Philadelphia 등 겨울이 매우 춥고 공중습도가 높으며 난방, 제조, 발전에 화석연료를 많이 사용하는 도시에서 발생하고 있다.

광화학적 스모그는 ① CO, NO, HCs 등의 1차 대기오염 물질들과 ② 이러한 1차 대기오염 물질들이 자외선의 영향 하에 서로 반응하여 형성되는 NO_3 , HNO_3 , O_3 , PANs 및 HCHO 등의 2차 대기오염 물질들이 결합되어 형성되는 스모그를 지칭한다. 광화학적 스모그가 자주 발생하는 도시지역 기후는 일반적으로 맑은 날이 많고 기온이 높고 건조한 것이 특징이다. 또한 이들 도시들은 대부분 대기오염 물질을 많이 방출하는 산업이 비교적 적은 반면, 상대적으로 대기오염 물질의 주요 근원인 자동차가 많은 것이 특징이다. 대표적인 도시로는 미국의 Los Angeles, Denver, 호주의 Sydney, 멕시코의 Mexico City 및 아르헨티나의 Buenos Aires 등이 있다. 광화학적 스모그의 가장 심한 형태는 여름철 정오에서 오후 4시 사이에 주로 발생한다. 광화학적 스모그의 첫 단계는 이른 아침 교통량 밀집 시간에 발생하는데, 숨을 막히게 하는 냄새가 나는 등 자극성이 있는 황갈색의 기체가 형성되며 도시 대기를 특징적인 갈색의 안개 형태로 변화시킨다. 두 번째 단계로 여기에 햇빛이 비치면 자외선에 의해 HNO_3 , PANs, Aldehyde 및 O_3 등이 발생하는데 이들은 사람의 눈이나 기관지를 자극시키며 또한 수목에도 많은 피해를 야기한다. 일반적으로 산업적 스모그를 겪는 대부분의 도시들은 여름철에 광화학적 스모그를 함께 경험하게 된다.

나. 지역기후 및 스모그

도시 지역에서의 산업적, 광화학적 스모그의 발생 빈도 및 정도는 그 지역의 기후와 지형, 인구 밀도 및 산업 규모, 그리고 주요 연료의 종류 및 양에 따라 결정된다(그림 3). 높은 연평균 강수량은 대기 중의 오염물질을 제거하는데 도움을 주며, 바람은 오염물질을 확산시키는 역할을 한다. 또한 언덕이나 산들은 도시 지역의 대기를 가두는 역할을 하여 대기오염을 심화시키기도 하고, 도시의 많은 고층 빌딩은 풍속을 감소시켜 공기의 회석과 확산에 의한 오염물질 농도의 저감을 방해할 수 있다.

일반적으로 낮이 되면 햇빛에 의해 가열된 지표면 근처의 대기가 상승하면서 오염물질을 함께 위로 가지고 올라감으로써 결과적으로 지표면 부근 대기의 오염물질 농도를 감소시킨다(대류현상). 그러나 도시지역의 경우, 일반적인 경우와 다르게 차가운 공기가 따뜻한 공기 아래쪽에 위치하여 고도가 증가할수록 온도가 상승하는 경우가 있는데, 이를 기온 역전(氣溫 逆轉)이라 한다. 이러한 기온역전 상황에서는 지상에서 발생한 각종 대기오염 물질이 위쪽으로 상승, 확산되지 못하여 결과적으로 지표면 가까이에 고농도로 유지되는데, 이 경우 사람을 포함한 여러 가지 생물, 특히 수목에 악영향을 미치게 된다. 대부분의 대기오염 사건은 스모그현상과 함께 이러한 기온역전현상의 결합으로 발생한다.



〈그림 3〉 도시지역의 대기오염 및 스모그 현상(울란바토르)

(1) 전선 역전

비교적 높은 고도에서 발생하며, 따뜻한 공기가 찬 공기 위로 지나갈 때 발생한다. 이 때 역전은 주로 두 개의 공기층 사이의 혼합층에서 일어난다. 이 역전은 전선(front)과 관련이 있으며, 비교적 약한 바람을 동반하기 때문에 전선 지역에 존재하는 혼합 조건에 충분한 영향을 주지는 못한다.

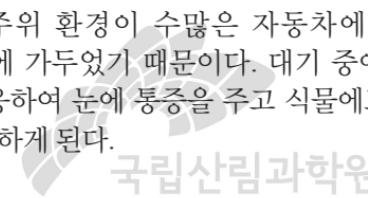
(2) 침강 역전

침강 역전은 정체 고기압 지역과 관련이 있으며, 고기압 내의 공기 침하 운동에 의해서 일어나는데 이것은 넓은 지역에 오염물질을 축적시킬 수 있다.

미국의 Los Angeles는 1950년대 초반부터 광화학 「스모그」 현상이 빈번하였는데 이것은 침강 역전 주변을 감싼 산지 및 약한 해안풍 등으로 구성된 주위 환경이 수많은 자동차에서 배출된 오염물을 제한된 대기공간에 가두었기 때문이다. 대기 중에 누적된 탄화수소와 질소산화물은 반응하여 눈에 통증을 주고 식물에도 유해한 푸르스름한 박무(薄霧)를 생성하게 된다.

(3) 복사 역전

늦은 아침이나 오후에 태양 복사열이 많아 지표온도가 상승하는 반면, 밤에는 복사열이 적어 지표 온도가 감소함으로써 발생하는 현상이다. 특히 사막 지역에서는 아침에 90% 이상 복사 역전이 발생하는데, 아침에 햇빛이 비치면 쉽게 파괴되는 것이 특징이다. 복사 역전은 비교적 낮은 고도에서 발생하고 수백 m 상공에서는 거의 발생하지 않으며 다른 역전 현상에 비해 상대적으로 빠르게 사라진다. 또한 맑고 바람이 없는 날씨에 복사 냉각에 의해 지표면이 빨리 냉각되면서 발생하기도 한다.



다. 도시 열섬 현상

대도시의 대기는 여러 가지 면에서 농산촌의 대기와는 많이 다르다. 대형 건물 및 공장들은 불규칙한 지면을 형성하여 자연적인 대기의 흐름이나 바람을 방해하고 지연시킨다. 높은 건물과 도로가 밀집된 도심 지역은 열을 보유할 수 있는 비열이 높아서 낮에는 농산촌 지역보다 태양 에너지 흡수열을 많이 보유하고, 열 배출량도 많아서 기온은 농산촌 지역보다 높다. 도심 지역의 따뜻한 공기는 오염물질을 동반, 상승하고 팽창하여 외곽 지역으로 흐르면서 냉각되어 찬 공기가 도시 중심 지역의 지표 부근으로 흐른다. 이렇게 독립적인 순환 시스템이 형성되는 현상을 열섬 현상(heat island)이라 한다. 이 열섬 현상은 주로 바람이 없는 날에 형성되며 강한 바람에 의해서만 변화되거나 파괴된다. 만일 도심이 먼지 등에 의해 심하게 오염되었을 경우, 열섬 현상으로 형성된 지붕 형태의 먼지들이 태양 에너지의 지표 가열을 방해한다. 이에 따라 대기의 수직 흐름은 감소되고 도심은 더욱 더 심하게 오염된다.



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 동의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

가. 일반적인 사항

대기오염에 의한 수목 피해는 가시 해(可視 害)와 비가시 해 (非可視 害)로 크게 구분할 수 있다. 가시 해는 수체에 나타나는 피해 증상을 육안으로 판단할 수 있는 것이며 비가시해는 육안으로 피해를 판단할 수는 없으나 수목의 생리 작용에 영향을 미쳐 생육을 감소시키는 것을 말한다. 가시 해는 다시 급성 피해와 만성 피해로 구분할 수 있는데 급성 피해는 고농도 오염물질이 단시간 동안 피해를 입히는 것이며 만성 피해는 비교적 저농도 오염물질이 장시간에 걸쳐 피해를 입힘으로써 결국에는 가시적 장해가 발생하는 것을 말한다. 근래에는 도시의 인구 집중과 교통수단의 증가로 발생되는 2차적인 대기오염 물질로 인한 피해가 많이 나타나고 있다. 수목에 영향을 미치는 가스의 유해농도는 가스의 종류, 접촉시간, 접촉시 자외선의 강도, 온도, 습도, 수종, 생육 기간 등에 따라 다르나 대개 가스농도와 접촉 시간에 비례한다.

나. 가시적인 피해

구름산림과학원

수목에 발생하는 피해가 급성 또는 만성을 막론하고 눈에 보이는 증상으로 오랫동안 대기오염으로 인한 수목 피해를 파악하는데 유용한 것으로 인식되어 왔다. 이는 특히 수목이 입는 경제적 손실을 추정하는 기초수단이 될 뿐 아니라 인간 활동이 주위 환경에 미치는 영향을 파악하는 데에도 이용된다. 그러나 수목 생육과 발달에 대한 대기오염의 제반 영향이 가시 증상에 의해서만 나타나지는 않기 때문에 이러한 추정이 전적으로 타당하지는 않다고 생각된다. 그럼에도 불구하고 역사적으로 미루어 볼 때 대기오염에 의한 경제적 손실 피해가 노출된 후에야 그 방지 대책이 이루어졌기 때문에 수목에 발생하는 가시증상은 그 원인 물질에 대한 적극적 판단 수단이 될 수도 있다.

일반적으로 수목의 각 기관 중에서도 엽은 주변의 대기와 가스를 교환하기 때문에 가장 먼저 피해를 입는다. 가스 상 오염물질은 CO_2 나 O_2 와 같이 기공을 통하여 엽내에 흡수된 후 독성을 띠게 되며 유해 분진이 엽면에 부착되어 Cuticle층을 용해시키고 용액상태로 기공을

통하여 흡수되어 피해를 주게 된다. Cuticle과 외피층을 통과한 가스상 대기오염물질은 체내 간극층의 수분과 결합하여 용액 상태가 되어 엽 조직 내의 세포벽을 손상시킨다. 가스의 용해능은 세포에 의해 흡수되는 정도를 파악하는 결정적 요인이다. 수분과 반응하여 산을 형성하는 유해 가스는 흡수가 용이하며 독성이 매우 강한 반면 CO_2 나 NO_2 는 물에 쉽게 녹지 않기 때문에 독성이 비교적 약하다.

대기오염물질에 의한 가장 극심한 피해는 엽조직의 고사이며 이 외에 위황증, 잎마름 등이 있는데 피해 부위는 점차 건조되고 표백되어 황갈색 또는 백색으로 변한다.

고농도의 유해 가스에 의한 피해 증상은 처음에는 피해 부위가 회녹색으로 변하고 세포액이 세포간극을 따라 확산되면서 피해 부위는 담녹색에서 수분에 젖은 것처럼 광택을 띠며 투명해지다가 뒤이어 탈수에 의해 표백되고 때로는 쉽게 부스러지기도 한다. 고사 부위는 정상 부위와 뚜렷이 구별되고 위황증이 고사 부위와 정상 부위 사이에 과도 부위(transition zone)를 형성하거나 엽 전체에 발달되기도 한다. 위황증은 가끔 피해를 야기하는 농도와 치사농도 사이에 분진 상 물질이 축적된 엽 조직에서 발생한다. 또한 엽록소가 파괴됨에 따라 위황증을 나타낼 수도 있다. 그리고, 급성 피해를 입은 수목은 때로는 조기낙엽을 일으킨다. 엽의 탈락증은 고농도의 대기오염 물질과 신속히 반응하여 그 발달이 촉진되어 뚜렷한 가시증상이 나타나지 않고도 심한 낙엽 현상을 보인다.

다. 비가시적인 피해

엽 변색이나 반점 등의 가시증상이 나타나는 피해의 감정은 수월하다. 그러나 대기오염지역에서 가시 증상이 나타나지는 않지만 수목 생육이 불량한 경우가 있다. 특히 활력이 저하되어 병충해의 침입이 용이해지거나 재적 생장이 감소되어 생산력이 떨어지는 경우가 많다. 이렇게 저농도의 대기오염 물질이 장시간에 걸쳐 식물과 접촉함으로써 생리적 장해를 일으키는지의 여부가 최근 연구의 대상이 되고 있다.

침엽수나 활엽수를 저농도의 SO_2 에 장시간 접촉시키면 호흡에 이상이 생기고 엽록소의 광합성 능력이 떨어지거나 영양소의 일부가 감소하는 등 생리적 장해가 일어난다. 단기간에 생육하는 농작물에서는 만성적

대기오염 물질을 저농도로 접촉시키면 엽 내 호흡량과 광합성량이 일시에 저하되었다가 시간이 경과함에 따라 정상을 되찾아 식물 생육에 큰 지장을 초래하지 않는다고 보고되는 경우도 있다. 그러나 이와 같은 상황은 실제 공단이나 대도시 주변에서 빈번히 발생되므로 수목에서는 무시할 수 없는 요인이다.

알팔파는 0.25ppm의 SO₂를 1시간 접촉시키면 2%의 CO₂ 흡수저하가 생기고 0.5ppm의 SO₂에 1시간 접촉시키면 21%까지 저하된다고 한다. 또한 소나무의 경우 엽의 건중량이 저하되거나 엽록소의 함량이 낮아지기도 한다. 따라서 육안 판단이 가능한 가시 증상이 없다 할지라도 대기오염 지역의 수목은 생리적인 피해를 끊임없이 입고 있다고 할 수 있을 것이다.

라. 아황산가스(SO₂)

(1) 수목에 미치는 영향

아황산가스에 의한 수목 피해는 크게 급성 피해와 만성 피해로 분류되고 있다. 급성 피해는 sulfate나 sulfurous acid에 의하여 나타나며, 만성 피해는 sulfate의 축적에 의해서 나타난다. 일반적으로 만성적인 피해를 입은 엽에서는 황산염이 누적되어 다량의 황산염이 검출된다. 그러나 급성 피해가 발생될 경우 황산염의 증가는 소량이나 단시간 내에 많은 황산염이 흡수되어 급성 피해를 유발할 뿐만 아니라 만성적 피해와 마찬가지로 엽에서 황산염이 검출된다.

(2) 피해 기작

급성 피해 증상은 대체로 조직 내에 다량의 아황산염이나 sulfurous acid가 생성되면서 발생한다. 아황산가스를 다량 흡수하면 황산염이 축적되고 계속해서 sulfurous acid가 형성되어 조직을 괴사시키는 것이다.

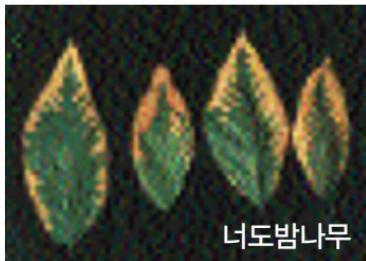
아황산가스는 기공을 통하여 엽 내부에 들어온 후 광합성 부산물인 산소에 의하여 황산염을 만들게 되며 이 황산염은 증산작용에 따라 이동하여 엽의 끝이나 가장자리에 축적된다. 급성 피해는 고농도의 아황산가스를 단시간에 흡수했을 때 나타나며 엽록소의 급격한 파괴나 세포괴사 등의 증상이 나타난다. 침엽수는 엽 선단부가 담녹색, 회녹색으로 변색되고 피해가 계속되면 갈색 또는 적갈색으로 변하며 때로는 엽

중심부에 띠를 형성하기도 한다. 활엽수는 엽 주위부터 피해를 입기 시작하여 내부로 확산되며 엽맥 사이에 연반이 형성되기도 한다(그림 4). 아황산가스 피해는 수종 기타 여러 가지 조건에 따라서 다르나 민감한 수종은 0.3~0.6ppm에서 약 3시간, 1.0~1.5ppm에서 5분 정도면 피해가 발현이 된다. 그리고 낙엽송은 0.3~0.4ppm에 7~8시간 접촉하면 피해 증상이 나타나고 가문비나무는 3ppm에서 15시간 정도 접촉하면 급성 피해가 나타난다. 일반적으로 오랜 기간 엽이 붙어 있는 침엽수가 활엽수보다 피해를 입기 쉽다.

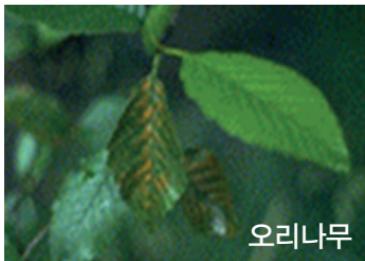
만성 피해는 저농도의 아황산가스에 장기간 노출되어 엽록소가 서서히 봉괴되어 황화 현상을 나타내는 경우를 말한다. 이는 급성의 경우와는 달리 세포는 파괴되지 않아 그 생명력을 유지하고 있으며, 급성 피해와 같은 탈색이나 표백이 나타나기까지는 수 일 혹은 수 주일 이상의 기간이 소요된다. 황화 현상의 피해 정도가 가장 심한 경우에는 엽록소가 완전히 소멸되어 엽은 황록색이나 갈색으로 변하며 때로는 급성 및 만성의 구분이 불가능해져서 가끔 두 가지 증상이 동시에 나타나기도 한다.



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 동의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.



너도밤나무



오리나무

〈그림 4〉 아황산가스에 피해 입은 수엽

(3) 피해에 미치는 환경 요인

아황산가스에 대한 수체의 반응은 온도, 상대습도, 토양습도, 광도 등에 의하여 크게 영향을 받는다.

- 온도 : 식물은 일반적으로 5°C 이하에서는 아황산가스에 대한 저항성이 훨씬 높아지는 것으로 알려져 있다. 또한, 겨울철에는 식물체의 저항성이 매우 커진다는 보고가 많이 발표되고 있는데 이는 식물의 생리적 활동이 매우 낮기 때문이다. 따라서 봄에는 아황산가스에 대한 감수성도 높아지는 것이다.
- 상대습도 : 대체로 광도나 토양습도가 적당할 때는 상대습도가 높아짐에 따라서 아황산가스에 대한 감수성도 점차 높아진다.
- 토양습도 : 토양 내에 수목 생장에 충분한 만큼의 수분이 함유되어 있으면 가스 접촉 시 토양수분의 미세한 변화는 수체의 감수성에 아무런 영향을 미치지 않는다. 수목이 건조 할수록 저항성은 충분한 수분을 공급받고 자라는 수목은 수분 결핍 상태 하의 수목보다 더 큰 감수성을 보인다.
- 광도 : 암 조건에서는 아황산가스에 대하여 매우 저항성이 크지만 광도가 3,000cd 이상이 되면 점점 약해진다. 또한 유해 가스에 노출되기 직전에 음지에서 생육했던 수목이 일광 하에서 생육했던 수목보다 더 큰 감수성을 나타낸다.

(4) 아황산가스에 강한 수종

아황산가스에 내성이 강한 수종을 침엽수와 활엽수로 구분하여 나열해 보면 표 2와 같다.

〈표 2〉 아황산가스에 강한 수종

침엽수	활엽수
화백 · 향나무 · 편백 · 측백 · 섬잣나무 · 노간주나무 · 해송 · 은행나무 · 낙우송 · 메타세콰이아	양버즘나무 · 포플러 · 중나무 · 오동나무 · 벽오동 · 밤나무 · 떡갈나무 · 졸참나무 · 굴참나무 · 은단풍 · 자작나무 · 물푸레나무 · 멀구슬나무 · 틀립나무 · 회화나무 · 풍나무 · 일본목련 · 목련 · 때죽나무 · 주엽나무 · 칠엽수 · 푸조나무 · 매실나무 · 가시나무 · 종가시나무 · 무궁화 · 쥐똥나무 · 이팝나무 · 사스레피나무 · 개나리 · 철쭉 · 박태기나무 · 석류나무 · 배롱나무 · 광나무 · 후피향나무 · 돈나무 · 식나무 · 태산목 · 면나무 · 아왜나무 · 사철나무

마. 불화수소가스(HF)

국립산림과학원
KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

(1) 수목에 미치는 영향

불화수소는 기공을 통해 엽 내에 흡수되면 수분에 용해되어 엽 내 조직을 괴사시키는데 독성이 매우 강해 대기 중에 약 5ppb만 존재해도 식물에 피해를 입히기 때문에 특히 중요하다. 수엽에 흡수된 불화수소는 유세포간극을 따라 도관에 도달하여 엽의 선단과 주위에 신속히 운반되어 피해가 발생한다. 또, 불화수소는 Sol상의 규산과 결합하여 규불화수소산을 형성하고 이것과 나머지 불화수소산이 세포막을 침입하여 원형질과 엽록소 등을 분해하여 세포를 괴사시킨다.

피해 증상은 아황산가스와 비슷하지만 괴사 조직과 건전 조직 간의 차이가 아황산가스에서보다 훨씬 뚜렷하고 주로 엽 선단과 주위에 발생한다. 불화수소에 접촉된 수목은 수 시간 동안 건조 현상을 나타내며 점차 녹색에서 황갈색으로 변해 나중에는 갈색이 된다(그림 5).

불화수소에 대한 일반 식물의 감수성 실험에 의하면 1.48ppm에서 거의 모든 식물이 심한 피해를 입었고 0.67ppm에서는 정도 차이는

있으나 약간의 피해를 입었다. 가장 감수성이 큰 식물은 0.07ppm에서도 연반이 발생했다. 또 불화수소에 의한 수목의 발현 농도는 1~60ppb 노출에서 수 시간 또는 수 일 간이면 나타난다. 침엽수에 있어서는 봄에 침엽이 급속히 신장할 때 피해가 가장 크게 발생하는 점이 아황산가스의 경우와 다르다. 괴사 현상은 침엽선단에서 시작되어 하부로 진행되며 피해 부위는 위황증을 보이다가 곧 적갈색 또는 연한 갈색을 나타낸다. 불화수소에 의해서 침엽수가 영향을 받은 사례는 노르웨이의 알루미늄 공장에서 발생한 불화수소가 12km 떨어진 *Pinus sylvestris*림을 황폐화시킨 것으로 나타났는데 최대 32km 이상 떨어진 산림까지 영향을 미친다.

불화수소에 대한 식물의 저항성은 대개 아황산가스의 저항성과 일치하는 경향을 보인다. 피해가 발생하면 불소의 화학 분석에 의해 엽에 축적된 함량을 알 수 있으며 같은 잎이라도 엽 중앙부와 엽 주위는 불소 함량의 차이가 나타난다.



〈그림 5〉 불화수소에 피해 입은 은행나무와 잣나무

(2) 불화수소에 강한 수종

불화수소에 강한 수종을 침엽수와 활엽수로 구분하여 나열하면 표 3과 같다.

〈표 3〉 불화수소에 강한 수종

침엽수	활엽수
소나무 · 향나무 · 전나무 · 일본전나무	가중나무 · 양버즘나무 · 아까시나무 · 떡갈나무 · 벼드나무류

바. 질소산화물(NO_x)

(1) 수목에 미치는 영향

질소산화물은 주로 자동차 배기ガ스에서 발생이 되기 때문에 고농도의 질소산화물은 도로 주변에 나타난다(그림 6, 7). 수목에 대한 피해는 아황산ガ스보다 덜 하지만, 다른 가스와 반응하면 시너지 효과를 일으켜서 더 강하게 피해를 준다. 기공을 통해서 흡수된 이산화질소는 세포간극을 통해서 엽 내에 축적되면 불규칙적인 반점이 발생하여 광택을 떠다가 회색이나 백색으로 변한다. 이산화질소에 대한 엽 조직의 감수성은 낮은 광도에서도 높게 나타난다. 그리고 수목에서는 낮은 성장률과 조기 낙엽을 보고 피해를 추정할 수 있다. 일반적으로 침엽수는 엽 주위가 적갈색으로 변색이 되며 고사된 부위와 건전한 부위의 경계가 뚜렷하고 활엽수는 초기에는 회녹색 반점이 생기다가 엽맥 사이의 조직이 괴사한다. 민감한 수종의 피해발현 농도는 1.6~2.6ppm에서 2일간, 20ppm에서 1시간, 1ppm에서 100시간동안 접촉하면 발생하며, 질소산화물에 대한 식물의 민감도는 표 4와 같다.

NO_x 의 농도가 $47\text{mg}/\text{m}^3$ 인 경우에 한 시간 정도의 접촉으로 대부분의 식물은 SO_x 에 의한 경우와 같이 급성 피해를 입게 되는데, 이러한 영향은 질산 공장의 주위에서 흔히 일어난다. NO_2 의 농도가 약 $470\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 되면 수개월 내에 만성 피해 현상이 일어난다.



〈그림 6〉 질소산화물에 의한 가로수 피해



〈그림 7〉 단풍나무 수엽 피해

〈표 4〉 질소산화물에 대한 식물의 민감도

구 분	식 물 종
강	오이 · 수박 · 벼 · 옥수수 · 감나무 · 포도 · 소나무 · 해송 · 편백 · 삼나무
중	피망 · 완두콩 · 부추 · 토란 · 메밀 · 글라디올러스 · 나팔꽃 · 배나무 · 밤나무
약	대두 · 깨 · 토마토 · 가지 · 시금치 · 장미 · 국화 · 쑥 · 딸기 · 벚나무 · 단풍나무

이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

사. 오존(O_3)

(1) 수목에 미치는 영향

오존의 피해는 일반적으로 그 강력한 산화 작용에 의한 것으로 엽의 표면에 한정되며 책상조직이 오존에 대하여 가장 약하여 제일 먼저 공격을 받고 다음이 내부 해면조직, 마지막으로 엽 하부 해면조직이 손상을 입는다. 그러나 손상을 입은 책상조직 상부 표피세포나 공변세포는 상당한 기간 동안 피해를 입지 않고 견디며, 유관속 조직은 가장 저항성이 커서 주위 조직들이 모두 죽기 전에는 피해를 입지 않는다(그림 8).



〈그림 8〉 오존에 의한 엽 피해 조직 모식도

활엽수는 엽 표면에 작은 반점이 형성되고 반점이 점점 합쳐져서 표면이 백색이 되며, 침엽수는 엽 주변부터 괴사가 되기 시작하고 황화 현상으로 반점이 생기고 왜성화되는 경향이 있다(그림 9). 또, 동화 작용의 억제, 효소 작용의 저해를 발생시키기도 하는데 일반적으로 신엽보다는 구엽이 약하며 피해 정도는 기공의 개폐, 증산 작용의 대소 등에 관계된다. 민감한 수종에서는 60~170ppb에서 4시간, 200~510ppb에서 1시간 접촉을 하면 피해가 발현된다고 한다.

오존은 일반적으로 대기 중 농도가 0.03ppm 이상(8시간 기준)이 되면 수목에 피해를 준다. 대기오염에 민감한 식물 그리고 생태계는 대기 중 오존 농도가 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 8시간 이상, $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 4시간 이상이면 위험 한계치인데 이런 농도는 독일에서 식물 보호를 위한 오존의 극한값으로 제정된 것이다.



〈그림 9〉 오존에 의한 수엽 피해

(2) 오존에 강한 수종

오존에 내성이 강한 수종을 침엽수와 활엽수로 구분하여 나열하면 표 5와 같다.

〈표 5〉 오존에 강한 수종

침엽수	활엽수
삼나무 · 해송 · 편백 · 화백 · 서양측백 · 은행나무	버즘나무 · 굴참나무 · 졸참나무 · 누리장나무 · 개나리, 사스레피나무 · 금목서 · 녹나무 · 광나무 · 돈나무 · 협죽도 · 태산목

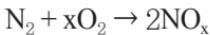
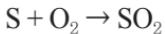
아. 산성비

(1) 발생원 및 생성 기작

산성비는 각종 공장이나 자동차 등에서 배출되는 가스 상 오염물질이 대기 중에 있는 수분과 결합되어 생성되는 것으로 산성화된 물방울은 구름이 되어 오랜 시간을 공중에 머물며 수 백 또는 수 천 km를 이동하여 공해와는 무관한 산림 지역까지 피해를 준다. 강수의 산성 여부를 판단하는 기준으로 산도(pH)를 사용하고 있는데 이것은 강수 중 포함되어 있는 수소 이온(H^+) 농도를 나타내는 것이다. 오염되지 않은 대기 중에는 CO_2 가 약 355ppm 정도가 함유되어 있어 대기 중의 수분과 반응하여 탄산을 만들기 때문에 자연적으로 산성이 된다. 그러므로 강수는 탄산 외 산성 물질이 없을 경우 중성인 pH 7이 아닌 pH 5.6의 약산성을 나타내지만, 산업화와 도시화로 인한 대기오염 물질들이 많이 섞여 있으면 이것들과 결합하여 pH가 5.6이하로 떨어지게 되는데 이러한 강수를 산성비라고 한다.

산성비의 주된 원인 물질은 황산화물과 질소산화물인데 그것들이 대기 중에서 황산이나 질산으로 되어가는 화학적 과정에 대해서 알아보고자 한다.

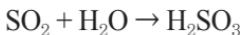
아황산가스와 질소산화물은 물질이 연소할 때 생기는데, 물질 속에 함유되어 있는 유황이나 질소가 산화되어 생긴다. 또한 질소산화물은 연료를 고온에서 연소시킬 때 공기 중의 질소분자가 산화되면서도 생기는데 이것이 주된 질소산화물의 생성이다.



아황산가스는 공기 중의 산소분자나 산소 원자, 오존 등으로 인하여 산화되어 삼산화황으로 되고, 이것이 수분에 용해되면 황산 수용액으로 된다.



또한, 아황산가스 상태에서 수분에 용해하여 아황산으로 된 후 물방울 속에서 산화되어 황산이 생성되는 경우도 있다.

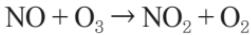


질소산화물의 경우도 대기 중에서의 반응을 거쳐 최종적으로 질산(HNO_3) 용액으로 된다. 그리고 질소산화물의 대부분이 석유, 석탄, 천연가스 등의 고온 연소 시에 대기 중의 질소가 산화되어 생성되는데 생성된 질소산화물의 주성분은 일산화질소(NO)이다.



이 문서에 대한 저작권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

이렇게 하여 생성된 일산화질소는 대기 중의 산소 원자, 산소 분자나 오존과 반응하여 이산화질소(NO_2)를 만든다.



이산화질소는 하이드록실 라디칼(OH)과 반응하여 질산을 만든다.



이산화질소가 오존에 의해 산화되어 삼산화질소를 생성하는 반응도 일어난다.

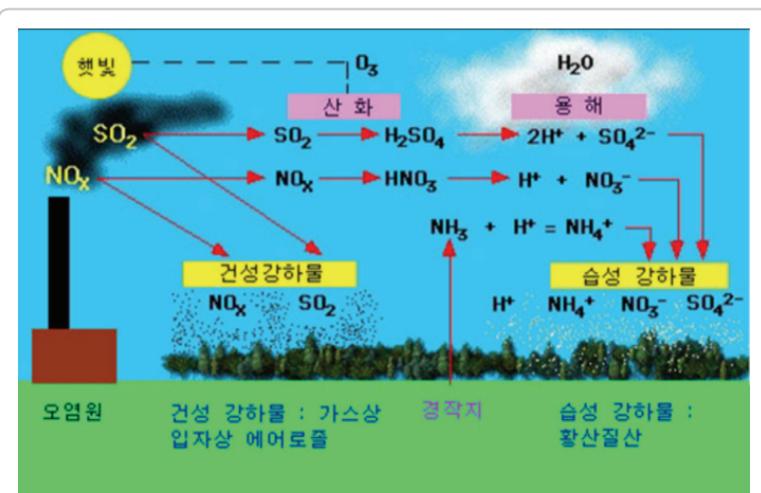


그리고, 삼산화질소와 이산화질소가 반응하여 오산화이질소를

생성하고 이것이 대기 중의 수분과 반응하여 질산으로 되는 과정도 일어난다.



이산화질소(NO_2)나 일산화질소는 생물 활동으로 생긴다. 이들 화합물도 산화반응에 의하여 최종적으로 질산 생성에 관여하게 된다. 이상과 같은 과정을 거쳐 대기 중으로 방출된 아황산가스나 질소산화물은 황산이나 질산으로 되어 산성비를 내리게 하는 원인이 된다(그림 10).



〈그림 10〉 산성비 생성 모식도

(2) 산성비의 피해 증상

(가) 수목에 미치는 피해

강수의 산도가 pH 3.0 전후로 내려가면 활엽수에서, pH 2.0 이하로 내려가면 침엽수에서 가시적인 피해가 나타난다. 수목이 직접적으로 피해를 입으면 엽의 표피조직이나 세포가 파괴되어 조직이 고사하게 되므로 엽 주변이나 엽맥 간에 갈색, 황갈색의 반점이 생기며 Ca, Mg, K과 같은 체내의 양료 성분을 용탈시켜 양료 결핍을 초래한다. 그리고, pH 4.0~5.5 정도의 약산성비도 간접적인 피해를 준다. 그 피해는 엽록소를 감소시켜 광합성을 저해하고, 생장 장해를 초래하여 발아나 개화가 지연되고 그로 인해서 엽이나 꽃이 작아진다. 그 밖에 병해충, 부적합한 생육 환경에 대한 내성이 약화되어 피해를 유발한다. 산성비를 pH별로 수목에 미치는 영향을 구분하여 보면 표 6과 같다.

〈표 6〉 산성비에 의한 수목 피해

강수산도	피해 정도
pH 3.0 이하	수목 가시적 피해 - 엽의 황색 반점 및 조직 파괴
pH 3.1~4.5	수목 간접적 피해 - 엽록소 파괴 - 엽내 양료 용탈
pH 4.6~5.5	수목 간접적 피해 - 엽록소 감소 - 광합성 저해 - 종자 발아 및 개화 지연
pH 5.6 이상	정상

(나) 토양에 미치는 피해

건·습성 강하물이 장기간 토양 내에 유입되어 산성 물질이 축적되면 토양이 산성화된다. 토양산도가 pH 4.2 이하로 내려가면 토양 중의 칼슘, 마그네슘 같은 염기성 양료가 산성 물질인 수소 이온(H^+)과 치환되어 용탈되므로 지력이 떨어지게 되며 또한, 산성 물질을 중화시키는 이온이 고갈되면 완충능이 없어져서 토양산도가 급격히 내려가게 되므로 수목에

독성이 강한 성분인 알루미늄, 망간 등이 활성화되어 뿌리에 해를 끼쳐 고사되거나 생육이 불량해진다.

(3) 수목의 산성비 저항성 순위

주요 수종 15종의 묘목에 대해서 황산, 질산 및 염산으로 조제한 인공 산성비를 살포하여 내성시험을 한 결과 침엽수와 활엽수의 저항성을 아래와 같이 구분할 수 있었다.

- 침엽수 : 해송 > 소나무 > 리기다소나무 > 리기테다소나무 > 전나무 > 편백 > 삼나무 > 낙엽송
- 활엽수 : 자작나무 > 참나무 > 느티나무 > 포플러 > 밤나무 > 양버즘 > 은행나무

자. PAN(Peroxyacetyl nitrate)

(1) 수목에 미치는 영향

PAN은 공장 연료의 불완전 연소 가스나 자동차의 배기ガ스의 광화학 반응 생성물인 n-butylene과 질소산화물이 반응을 하여 생성된다.

대표적인 가시 증상은 엽 하부에 은색 반점이 나타나고, 피해가 지속되면 상부로 확대되어 결국에는 괴사 현상이 나타난다. 미성숙엽에서는 피해가 크고 성숙엽에서는 피해 발생이 억제되기 때문에 결국 엽이 왜소해지거나 기형이 된다. PAN의 피해 현상은 반드시 자외선에 노출될 때 발생하는 것이 특징이다.

활엽수에서는 다른 종류의 가스 피해와는 달리 피해 초기에는 엽 뒷면이 은회색으로 변하고 심해짐에 따라 갈색으로 변하면서 엽 표면에도 피해가 나타난다는 것이다. 침엽수에서는 엽이 광화 현상이 나타나며 초기 낙엽이 된다. 0.2~0.8ppm에서 8시간을 노출하면 민감 수종에서는 피해가 발현되기 시작한다.

또, PAN에 의한 피해 증상은 온도, 노출 시간, 엽 조직의 성숙도 등에 따라 매우 다양하며 0.5~1ppm의 비교적 고농도에서 30분간 처리하면 엽에 횡적으로 대상의 증상이 다소 넓게 분포된 후 이곳의 조직은 완전히 파괴된다.

알팔파는 PAN에 가장 감수성이 큰 식물의 하나로서 엽의 작은 엽맥 사이에서 반점이 나타나며 정도는 엽의 성숙도에 따라 다르다. 즉 신엽에서는

선단부에서, 성숙엽에서는 기부에 표백현상이 나타나며 생육이 왕성한 엽에서는 좁게 표백된 띠의 형태로 나타나기도 한다. 이런 증상은 클로버에서도 관찰되나 피해가 나타나는 농도는 알팔파보다 다소 높고, 농도가 0.1ppm 정도 되면 조직의 일부가 완전히 파괴된다. 표백된 흰 상흔은 엽의 선단부에서 가장 많이 발견되며 엽록부가 표백되거나 구부러지는 현상도 발견되었다.

차. 암모니아(NH_3)가스

(1) 수목에 미치는 영향

암모니아가스가 수목에 접촉되었을 경우 기공이나 표피 조직을 통하여 체내에 침투하며 엽면에 흑색 반점이 생기거나 엽 전체가 백색 혹은 황색으로 변하는 등 피해 증상을 나타내고 경우에 따라서는 급격히 회백색으로 퇴색하기도 한다. 이는 암모니아 가스가 세포 내에 흡수되어 알칼리 반응을 나타내므로 색소를 파괴하기 때문이다. 과잉의 암모니아는 엽록체를 파괴하여 광합성 작용을 저하시키고, 또 수체 내의 pH를 상승시켜 뿌리의 수분 흡수도 억제한다. 낮은 농도의 암모니아도 과실과 채소의 표면 색깔을 변화시키는데 과수 등의 피해는 자주 보고되고 있다.

활엽수에서는 엽맥을 따라서 변색된 괴사가 아황산가스 피해와 비슷하게 나타나며, 침엽수에서는 엽의 끝부분이 갈변하고 괴사한다. 민감한 수종은 55ppm에서 1시간 노출시키면 피해가 발현되기 시작한다. 토마토 등의 경우 40ppm으로 1시간 접촉하면 현저한 피해 증상이 나타나고, 8.3ppm으로 5시간 접촉하면 약간의 피해가 나타난다.

KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

국립산림과학원
국립산림과학원은 국립산림과학원에 있다. 동의 브랜드 수상, 변경 및 인증할 수 있다.

카. 염소가스(Cl₂)

(1) 수목에 미치는 영향

수엽에 접촉되면 미세한 회백색의 반점이 표면에 무수히 나타나고 심한 경우에는 적갈색의 대형 반점으로 나타난다. 음지에 있는 엽은 피해가 경미한데, 이는 가스 접촉 시 광도가 엽의 피해에 크게 작용했음을 의미한다. 또한 염소피해의 주된 것으로는 엽의 괴사, 탈색이 있다. 괴사된 엽은 점차로 백색에서 갈색으로 변하며 괴사는 엽 주변이나 엽맥 간에 나타난다. 염소에 노출되어 1~2일 지나면 나타나는 수가 많고 구엽은 신엽보다, 상엽은 하엽보다 피해를 입기 쉽다.

식물에 대한 독성은 아황산가스보다 2~3배나 강하다는 것이 여러 가지 살포 시험에서 발표되고 있다. 활엽수에서는 엽에 괴사가 일어나고 오존 피해 경우와 같은 엽상부에 작은 반점이 나타나며 침엽수에서는 엽의 끝부분이 변색하고 괴사가 된다. 0.5~1.5ppm을 30분에서 3시간가량 노출시키면 예민한 수종은 피해가 발현된다. 식물에서 무나 알팔파에 대한 한계 농도는 0.1ppm에서 1시간이며, 보다 저항성인 해바라기 등은 0.1ppm에서 4시간 접촉으로 피해를 입는다(표 7).

〈표 7〉 염소가스에 대한 감수성

구 분	식 물 명
감수성	알팔파 · 사과 · 메밀 · 밤나무 · 코스모스 · 갓 · 양파 · 앵초 · 무 · 장미 · 해바라기 <small>이 분서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 불의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.</small>
중간성	진달래 · 강낭콩 · 다알리아 · 제라늄 · 포도 · 복숭아 · 소나무 · 호박 · 토마토
저항성	베고니아 · 가지 · 솔송나무 · 올리브 · 작장초 · 명아주 · 대두

타. 에틸렌가스

(1) 수목에 미치는 영향

민감한 식물체는 매우 낮은 농도에서도 피해를 입을 수 있다. 피해의 주된 증상은 상편생장(上便生長), 황화 현상과 조기 낙엽, 줄기의 신장 저해, 성장 감퇴 등이다.

0.1ppm의 저농도에서도 sweet pea와 토마토에 상편 생장을 일으키며 0.05ppm에서 동일한 증상이 나타난다. 신엽은 에틸렌이 사라지면 상편 생장에서 회복되나 성숙 엽은 회복되지 못하였으며, 때로는 신지의 새눈 형성이 촉진되기도 한다.

식물에 2.5~10.0ppm의 에틸렌을 처리했을 때 감수성이 큰 식물들은 아래쪽 잎에 황화현상이 일어나고 때로는 엽 조직이 사멸하였다. 또한 화아의 이탈, 정단생장의 저해, 마디의 증가, 신엽의 증가 등 현상도 나타났다.

활엽수에는 엽에 황화와 괴사 현상이 나타나며 조기 낙엽이 지기도 한다. 침엽수에서는 엽이 왜성화되고, 조기 낙엽이 된다. 화본과 식물이나 저항성이 강한 다른 식물에서는 뚜렷한 피해를 나타내지는 않았지만 엽의 신장은 많이 저해되었으며 이런 현상은 회복되지 않았다. 어떤 식물에서는 황화 현상이 일어나지 않아도 낙엽이 생겼으며, 잔가지들이 쉽게 떨어지는 경우도 나타났다.

(2) 식물의 감수성

에틸렌에 대한 식물의 감수성을 나열하면 표 8과 같다.

〈표 8〉 에틸렌에 대한 감수성

구 분	식 물 명
감수성	양란·카네이션·장미·스위트피·토마토·완두·복숭아·목화
중간성	진달래·대두·호박·치자나무
저항성	양배추·클로버·상치·양파·무·오트밀

파. 복합오염

대기오염은 오염물질이 특정한 발생원으로 배출되는 단일 물질에 한정되지 않고 2종 이상의 오염물질이 동일 지역에 배출되는 경우가 많아 여러 오염물질에 의해 피해를 입게 된다. 이 때 수목은 단독 가스에 비해 상가적, 상승적 혹은 상쇄적인 피해 증상을 나타내게 되는데, 가스의 성질이 동일하거나 유사한 것이 복합될 경우에는 그 피해가 상가적이거나 상승적으로 나타나며 서로 상반되는 가스가 복합될 경우에는 그 피해가 단독가스 보다 경감되기도 한다. 아황산가스와 PAN이 복합될 경우는 상가적이고 이산화질소, 오존이 포름알데히드와 혼합되면 상승적 작용을 한다. 또한 염화수소, 암모니아 가스가 혼합할 때는 양자가 중화 반응을 일으켜 염화암모늄을 생성하여 식물에 대한 독성은 상쇄적으로 나타난다.

산성 가스인 아황산가스 및 불화수소가스와 알칼리성 가스인 암모니아 가스를 각각 단일 또는 복합적으로 영양 생장기 혹은 개화기에 1시간씩 접촉시킨 결과 단일 접촉했을 때보다 복합 접촉함으로써 대두의 엽 피해율이 감소되었으며 두 가스의 농도가 같거나 저농도일수록 경감 효과가 컸다고 한다. 엽록소 함량도 단일 접촉보다 복합 접촉에서 많았으며 아황산가스 및 암모니아가스 접촉 시에 단일 접촉보다 복합 접촉으로 엽록소 피해가 경감된 것으로 나타났다. 일반적으로 복합 대기오염에 강한 수종은 표9와 같다.

〈표 9〉 복합 대기오염에 강한 수종

침엽수	활엽수
향나무· 가이즈까향나무 · 히말라야시다 · 개비자나무 · 노간주나무· 은행나무	은단풍나무·가중나무·수양버들·대추나무· 떡갈나무·사방오리나무·벽오동·후박나무· 석류나무·쥐똥나무·가시나무·감탕나무· 다정큼나무·먼나무·광나무·식나무·꽝꽝나무· 필손이·녹나무·사스레피나무·사철나무·돈나무· 협죽도·동백·태산목·후피향나무

하. 고체 입자상 물질

입자 상 물질에는 고체와 액체 상태가 있는데 액체는 미스트(mist) 상의 물질이고 고체 입자상 물질은 매진, 분진, 연무가 있다(표 10). 매진의 주 물질은 그을음인데 이것은 탄소 함유물질이 불완전 연소 시에 발생하는 탄소와 타르를 함유한 입자로서 수엽에 부착되어 문제가 발생되는데 주로 화력발전소 주변 임지에 아황산가스 오염과 매연 피해가 동시에 나타나고 있다.

분진 물질은 마쇄, 선별과 기계적 처리나 운반 중에 발생하는 물질로서 통상 dust라고 말하며, fume보다는 입경이 큰 고체 입자를 말한다.

최근 우리나라에서 시멘트 공업의 발달로 석회석 지대인 강원도 삼척, 영월 등지에서 시멘트 공장의 석회 분진이 수목에 축적되어 피해를 주고 있으며, 저탄장 인근에서도 석탄분진 낙하로 수엽에 축적 될 뿐만 아니라 포장이 되지 않은 도로 인근에서도 많은 차량의 통과로 주변 임지에 점토 등 분진이 축적되어 수목생장 등에 영향을 준다는 보고도 있다.

중금속의 연무는 Fe, Mn, Pb, Ni, Zn, Cd 등으로 마이크로 크기의 입자로서 식물표면에 부착되거나 체내에 흡수가 많으면 피해가 발생한다. 휘발류 중에 첨가된 유기납은 자동차 배기ガ스에서 방출되므로 도로 인근의 초목이나 농작물에 납 함량이 증가하는 것이 인정되었고, 금속 제련소 인근의 농작물 중에 납이나 카드뮴 함량이 대단히 높은 경우가 있는데 이는 토양이나 관개수로부터 흡수되는 것 이외에 대기로부터 직접흡수가 이루어지는 것이 밝혀졌다. 철의 경우는 분진이나 fume 상태로 비산되어 과실 표면에 부착되면 색을 변화시켜 품질을 저하시킨다. 아연은 광의 도금과정에서 fume 상태로 비산되어 인근농경지의 표토 중 함량이 약 700~800ppm을 나타내는 경우도 있다. 또 구리의 경우는 동 제련이나 동선 제작 공정 중에서 분진으로 비래되어 농작물에 피해를 가져오는 경우가 있다.

〈표 10〉 입자상 물질의 분류

구 분	내 용
분진 (particulates)	대기 중에 미세한 독립 상태의 액체 또는 고체의 입자 상의 물질
연무질 (aerosol)	연무와 같이 가스 내에 미세한 고체 또는 액체 입자가 분산된 물질
먼지 (dust)	물리적 힘에 의해서 생기는 물질로서 colloid보다 큰 고체 입자로서 공기나 가스 내에서 부유할 수 있는 물질
재 (fly ash)	연소 시 발생하는 미세한 입자로서 불완전 연소한 연료를 포함할 수 있는 물질로 굴뚝으로부터 방출되거나 화로(火爐) 밑에 고임
안개 (fog)	고체 입자를 핵으로 하여 형성된 물방울로 보통 응축에 의해서 생기는데 액체 입자의 크기는 5~50μm임
훈연 (fume)	물질의 연소에 따른 물리화학적 반응 과정에 의해 생긴 고체 입자
박무 (mist)	화학 반응에 의해 핵의 주위에 증기가 응축하여 생기는 경우와 액체가 봉괴하여 생긴 액체 상의 물질
연무(haze)	대기 중에 떠 있는 매우 작고 많은 건조한 입자
매연 (smoke)	연료의 불완전 연소에 의해 생기며 색깔을 띠고 자신의 무게로 가라앉지 않는 입자의 크기는 0.01~1μm정도임
검댕(soot)	탄소화합물의 불완전 연소에 의해 생긴 것으로 tar에 젖은 탄소 입자가 뭉친 것을 의미함

(1) 분진

분진은 자동차, 공장, 화력발전소, 난방 등에 의해 인위적으로 방출되는데 화산재, 도로의 먼지, 산불 등과 같이 자연적인 원인에 의해서도 생길 수 있다. 대기 중의 분진은 화학적 구성과 물리적 상태에 따라 각종 해를 가할 수 있는 성질로 변화된다. 분진 중 시멘트가루는 연무나 이슬비와 함께 존재하는 경우 잎에 딱딱한 표면을 형성하고, 기공을 막하게 해서 해를 가한다. 공장에서 배출되는 분진이 수엽에 부착하면 동화작용, 호흡작용 및 증산작용을 방해하여 생육에 나쁜 영향을 미친다. 이것은 분진 때문에 기공이 막히고 일사가 충분히 엽면에 닿지 않기 때문이다. 부유 입자 중에서도 동(銅)이 심한 독성을 갖는데 토양 중에 성분이 흘러 들어가면 대부분 산림은 거의 고사하게 된다. 분진 흡착력이 높은 수종은 표 11과 같다.

〈표 11〉 분진 흡착력이 높은 수종

침엽수	활엽수
향나무 · 히말라야시다 · 은행나무	벽오동 · 룰립나무 · 양버즘나무 · 진달래류 · 돈나무


국립산림과학원
KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE

가. 토양오염

(1) 토양오염의 정의

토양은 그 자체가 자정능력을 지니고 있다. 그러므로 토양이 오염되었다고 하는 것은 자정능력을 초과하는 방대한 오염물질이 토양에 유입된 것을 의미한다. 토양오염은 대기오염, 수질오염에 이어서 제3의 오염 문제로 대두되고 있으며 수질오염이나 대기오염에 비해 토양오염의 문제성은 뒤늦게 인식되기 시작했다. 이는 토양이 각종 오염물질에 의해 직접 오염될 수도 있으나, 대개는 오염된 대기나 수질에 의해 오염되기 때문이다. 토양오염은 인간에게 직접적인 위해를 끼치지는 않지만 수목 생육을 저해시킬 뿐만 아니라 간접오염도 인간에게 주고 있어서 대기오염이나 수질오염과는 그 성격이 다르다고 할 수 있다. 오염물질이 일단 토양에 유입되게 되면 이를 며칠에서 수십 년까지 장기간 저장시키는 능력을 지니고 있어 오랜 시간에 걸쳐 서서히

오염물질을 배출함으로써 장기간 주위 생태계에 영향을 끼치게 되며, 이로 인해 다시 지하수를 오염시키거나 대기 중으로 방출되므로 모든 오염문제와 관련되는 것이라고 할 수 있다.

최근에 이르러 산업 발달에 따른 도시화와 산업체에서 배출되는 유해 물질량이 크게 증가함에 따라 토양오염은 날로 심각해지고 있다.

(2) 토양오염물질의 종류

토양오염은 농약류, 산업폐수, 생활하수, 방사능 물질 및 기타 오염원에 의해서 이루어지며 원인물질로는 유기물, 무기염류, 중금속 등이다. 이 중에서 중금속은 토양에 장기간 잔류하여 수목을 고사하게 하는데 토양오염의 주된 원인 물질은 중금속이라고 할 수 있다.

(3) 대기오염물질로 인한 토양오염

토양을 오염시키는 물질로는 오존, 불소, 구리 및 니켈과 같은 오염물질이 있으며 이들이 대기로부터 지상 표면에 침적되어 토양과 식물에 영향을 끼치는데, 이들 물질들은 토양 내에서 확산, 흡착, 침전 그리고 고정됨에 따라 토양의 화학적 성질을 변화시킨다. 대기오염물질인 질소산화물(NO_x) 및 황산화물(SO_x) 등은 산성비를 내리게 하여 수목에 직접적인 피해를 줄 뿐만 아니라 토양을 산성화시켜 지역 쇠퇴를 초래한다.

이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

(4) 토양오염의 영향

(가) 토양 산성화

① 토양 산성화의 원인

토양이 산성화되는 현상은 다음과 같이 여러 요인이 있다.

- 과다한 화학비료 사용증가로 토양이 산성화되는데, 이는 황산암모늄, 황산칼륨 및 염화칼륨 등과 같은 비료를 사용하면 NH_4^+ , K^+ 등은 식물에 흡수되고 SO_4^{2-} 및 Cl^- 만 남게 되어 산성화가 된다.
- 유기물질인 화학비료를 과도하게 사용하거나 유기물질 폐수가 방류하게 되면 유기물질은 혼기성 반응의 중간단계에서 산성화가 초래될 수 있으며, 또한 호기성 조건 하에서도 미생물의 작용으로 유기물질 내의 질소의 질산화 과정으로 산성화가 이루어진다.

- 대기 중으로 배출된 SO_x , NO_x 및 CO_2 가스에 의해서 산성비를 수반하여 토양이 산성화 된다.

② 토양 산성화의 영향

토양의 산성화가 수목에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 식물은 중성의 범위에서 가장 잘 성장하며 대체로 pH 5~8 범위에서는 큰 문제가 없으나 토양이 산성화될 경우 뿌리에 산성용액이 흡수되면 식물체 내의 단백질을 응고시키거나 용해시켜 직접적인 피해를 준다.
- 산성 토양에서는 Al^{3+} 과 Mn^{3+} 이 용해되어 수목생육에 피해를 준다. 토양이 산성화되면 Al^{3+} 이 활성화되며 이것이 인산과 결합되어 비용해성인 인 화합물이 형성되고 또, Ca^{2+} 이 Na^+ 과 쉽게 치환되어 유출되므로 Ca^{2+} , Mg^{2+} 이 결핍되기 쉽다.
- 산성 토양에서는 미생물의 결핍으로 토양 단립 구조의 형성이 저해되며 또한 뿌리균과 질소고정균과 같은 유용한 미생물의 활동이 저하된다.

③ 토양의 중금속 오염

일반적으로 중금속에 의한 피해는 낮은 pH에서 발생하므로 석회 등을 가하여 중화시킴으로써 그 피해를 줄일 수 있다(그림 11). 유해 중금속의 발생원으로는 우선 지표 중에 있던 것이 용출되어 나오는 자연 함유량에 의한 것이 있고, 공단에서 유출되는 오염물질에 의한 인위적인 것이 있는데 최근에는 공단 주변의 산림토양 오염이 심각한 상황이다.



〈그림 11〉 산성화된 산림토양 회복 실연지(영취산)

8

대기오염 피해 판단법

대기오염에 의한 수목 피해 여부를 판단하기 위해서는 먼저 수목의 증상뿐만 아니라 주위 환경 조건도 주의 깊게 관찰하여야 하는데 일반적인 피해의 판단법을 들면 아래와 같다.

- ① 피해가 발생한 수종, 시기와 증상의 확인
- ② 병충해나 기상해 등 기타 요인의 유무
- ③ 피해 발생의 단위(단목, 집단)와 피해의 분포(범위의 크기, 방향성)
- ④ 피해 증상이 발생한 엽의 생육 단계나 수령, 그리고 피해 방향성의 유무
- ⑤ 피해 정도에 있어서 수종 간 차이의 유무(서열) 또는 주변 식물(지표식물)의 피해 유무
- ⑥ 가능성이 있는 오염원의 탐색(유무, 위치와 오염물질의 종류)
- ⑦ 생육 환경의 파악(풍향, 강우, 지형, 토양, 인위적 영향, 주위의 토지 이용 상태)
- ⑧ 성분 분석이나 실험적 수법에 의한 원인의 특성

불화수소나 아황산가스에 의한 피해가 의심스러울 때는 식물체 성분 분석에 의하여 확인 할 수 있다. 특히 불화수소의 경우는 변색부의 불소 함유량이 특히 증가한다. 실제 함유량은 수목의 종류와 계절에 따라 변화하므로 피해가 보인 장소와 그렇지 않은 장소에서 같은 위치의 엽을 채취하여 비교할 필요가 있다. 염소가스, 염화수소 가스에 의한 피해는 염소의 함유량이 많아진다. 또, 바닷가에서 풍해를 받은 엽에도 염소가 많이 발견되는데 나트륨의 함유량을 비교해도 알 수 있다. 질소 산화물이나 광화학 산화물에 의한 피해는 특수한 성분이 남아 있지 않으므로 분석에 의한 방법으로는 잘 판별할 수가 없다. 또한 수목의 연륜 폭을 조사하여 과거의 피해 유무를 알 수 있다. 생장추에 의하여 시료를 채취, 연륜 폭이 좁아지게 된 연대를 조사하여 그 시기에 기상 변화나 큰 병충해가 없었다면 대기오염의 가능성이 크게 된다. 참고로 여러 가지 대기오염에 의한 수엽의 피해 상태에 대해서 간단한 특징으로 구분한 바는 표 12와 같다.

〈표 12〉 각종 대기오염물질에 의한 수엽의 피해 증상

구분 \\ 피해증상	선단 주변의 녹색이 황색, 갈색으로 변함	엽맥 사이에 반점 발생	표면에 작은 반점	잎 뒷면이 온화색- 청동색으로 변함
불화수소 (HF)	++	+	+	
염소 (Cl)	++	+		
오존 (O ₃)		+	++	
PAN	+	+	+	++
아황산가스 (SO ₂)		++	++	
이산화질소 (NO ₂)		++		

++ : 자주 나타난다, + : 때때로 나타난다 FOREST RESEARCH INSTITUTE

이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

〈표 13〉 수목 피해 쇠퇴도 평가 기준

측정 항목	평가기준				
	0	1	2	3	4
수세	왕성한 생육 상태를 보이고 외관 상 피해가 없음	일부 피해의 영향을 받고 있으나 그다지 눈에는 띠지 않음	이상이 명확하게 나타남	생육 상황이 열악하고 회복 가능성성이 없음	고사
수형	자연의 수형을 갖고 있음	약간 흐트러짐이 있으나 자연 수형에 가까움	자연수형의 봉괴가 진행됨	자연 수형이 완전 봉괴되고 기형화되어 있음	고사
가지 생장	정상	일부 적으나 그다지 눈에 띠지 않음	가지가 짧고 가늘음	가지는 극도로 짧고 적은 것이 있음	
초단부 고손	없음	약간 있으나 그다지 눈에 띠지 않음	많음	아주 많음	고사
지엽 밀도	엽 밀도 밸런스를 유지	약간 밀도가 낮음	밀도가 더욱 낮음	죽은 가지가 많고 엽 밀도 저하	
잎의 형태	정상	약간 찌그러짐	변형이 있음	변형이 현저하게 많음	
잎 크기	정상	일부분이 작음	작은 것이 많음	현저하게 작음	
잎 색	정상	약간 이상함	많이 이상함	현저하게 이상함	
잎의 괴사	없음	조금 있음	많이 있음	현저히 많음	

수목의 생육조건은 대기오염 피해의 발생을 좌우하기도 한다. 자외선 및 온도나 토양의 양분, 수분 등이 양호하면 가시적 피해가 발생하기 쉽다는 것이다. 왜냐하면, 이것은 엽의 기공이 충분히 열려 광합성을 하기 위한 생리적인 활동이 활발하므로 오염가스를 엽 내부로 통과시키기 쉬운 것과 대사회로에 침입하기 쉽기 때문이다. 반대로 야간이나 토양수분이 부족할 때에는 기공이 닫혀있으므로 가스 흡수가 어려워 대기오염으로 인한 피해가 발생하기 어렵다. 척박하고 건조하기 쉬운 토양에 생육하고 있는 수목은 수세가 약한 것이 많고 가시적 피해를 발견하기 어려우나, 한번 피해를 입으면 회복이 용이하지 않고 이차적으로 병충해나 건조해를 받기 쉽게 되며 고사율도 높다. 또 도시의 가로수나 녹지 등에는 토양의 물리성이 파괴된 곳이 많아 수목을 쇠약하게 하고 대기오염 피해로부터 회복을 지연시키는 결과가 되므로 물리적인 답답으로부터 뿌리를 보호하는 조치 등이 필요하게 된다.

앞으로 대기오염과 산성비가 계속되는 한 산림지역 및 도시지역을 막론하고 수목피해나 토양오염도 지속될 것이 확실시된다. 이것에 대한 방지대책은 일반적인 대기오염 측면에서는 여러 가지 방법을 사용하고 있으나 여기에서는 임업적인 측면에서 그 대책을 강구해 보면 아래와 같다.

- 오염물질의 종류와 오염원에 따른 산림생태계의 피해정도와 범위를 조사하여 산림피해를 사전에 미리 예측할 수 있는 장기피해 예측모델 개발이 필요하다.
- 특정 오염물질에 대해서 특히 민감한 수목을 조사하여 대기오염도의 판단지표로 활용할 필요가 있다.
- 오염원 부근은 대기오염에 대해 저항성이 큰 임분구조로 전환을 유도하여 피해를 억제시킬 수 있는 식생구성 방법에 의한 피해회복 시업체계 확립이 요구된다.
- 각종 토양증화제(석회, 마그네슘비료 등)를 시비하여 산성화된 토양을 중성화시켜야 하고, 지력회복을 위해 유기물질 또한 투입해서 환경오염에 의한 피해임지 회복방안을 강구해야 한다.

〈표 14〉 대기환경기준

항 목	기 준	측 정 방 법
아황산가스(SO_2) Sulfur Dioxide	<ul style="list-style-type: none"> 연간 평균치 0.02ppm 이하 24시간 평균치 0.05ppm 이하 1시간 평균치 0.15ppm 이하 	자외선행광법 (Pulse U.V. Fluorescence Method)
일산화탄소(CO) Carbon Monoxide	<ul style="list-style-type: none"> 8시간 평균치 9ppm 이하 1시간 평균치 25ppm 이하 	비분산적외선분석법 (Non-Dispersive Infrared Method)
이산화질소(NO_2) Nitrogen Dioxide	<ul style="list-style-type: none"> 연간 평균치 0.03ppm 이하 24시간 평균치 0.06ppm 이하 1시간 평균치 0.10ppm 이하 	화학발광법 (Chemiluminescent Method)
미세먼지 (PM-10)	<ul style="list-style-type: none"> 연간 평균치 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 24시간 평균치 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 	베타선흡수법 (β -Ray Absorption Method)
오존(O_3) Ozone	<ul style="list-style-type: none"> 8시간 평균치 0.06ppm 이하 1시간 평균치 0.1ppm 이하 	자외선광도법 (U.V. Photometric Method)
납 (Pb)	<small>이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 동의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.</small> <ul style="list-style-type: none"> 연간 평균치 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 	원자흡광도법 (Atomic Absorption Spectrophotometry)
벤젠 (Benzene)	<ul style="list-style-type: none"> 연간 평균치 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 	가스크로마토그래프법 (Gas Chromatography)

〈표 15〉 지역별 환경림 조성 수종

지방 별	지역 별	환경 별	수 종
중부 지방	도시 지역	가로수 (12종)	은행나무 · 낙우송 · 가중나무 · 은단풍 · 현사시 · 양버즘나무 · 포플러류 · 수양버들 · 벽오동 · 회화나무 · 칠엽수 · 일본목련
		공원 녹지 (21종)	화백 · 향나무 · 벽오동 · 틀립나무 · 졸참나무 · 굴참나무 · 포플러 · 주엽나무 · 자작나무 · 오동나무 · 대추나무 · 때죽나무 · 누리장나무 · 석류나무 · 무궁화 · 쥐똥나무 · 진달래 · 철쭉 · 배롱나무 · 박태기나무 · 사철나무
		주변 환경림 (16종)	측백 · 향나무 · 노간주나무 · 낙우송 · 은행나무 · 은단풍 · 현사시 · 졸참 나무 · 떡갈나무 · 물푸레나무 · 자작나무 · 가중나무 · 밤나무 · 회화나무 · 벚나무 · 때죽나무
	공원 지역	가로수 (9종)	은행나무 · 낙우송 · 향나무 · 회화나무 · 가중나무 · 수양버들 · 벽오동 · 포플러류 · 양버즘나무
		공원 녹지 (14종)	향나무 · 은행나무 · 화백 · 가이즈까향나무 · 기중나무 · 벽오동 · 은단풍 · 무궁화 · 개나리 · 박태기나무 · 사철나무 · 배롱나무 · 진달래 · 쥐똥나무
		주변 환경림 (12종)	측백 · 향나무 · 소나무 · 은행나무 · 벽오동 · 낙우송 · 현사시 · 밤나무 · 굴참나무 · 떡갈나무 · 졸참나무 · 사방오리
남부 지방	도시 지역	가로수 (16종)	은행나무 · 메타세콰이어 · 히말라야시다 · 낙우송 · 포플러 · 벽오동 · 수양버들 · 양버즘나무 · 틀립나무 · 후박나무 · 대만풍나무 · 이팝나무 · 태산목 · 가시나무 · 멀구슬나무
		공원 녹지 (20종)	편백 · 화백 · 향나무 · 후박나무 · 먼나무 · 철쭉 · 틀립나무 · 목련 · 다정큼 나무 · 매실나무 · 석류나무 · 멀구슬나무 · 녹나무 · 감탕나무 · 동백 · 무궁화 · 팔손이 · 식나무 · 돈나무 · 후피향나무
		주변 환경림 (11종)	해송 · 졸참나무 · 현사시 · 틀립나무 · 벽오동 · 은단풍 · 푸조나무 · 물참나무 · 종가시나무 · 가시나무 · 후박나무
	공단 지역	가로수 (10종)	은행나무 · 화백 · 편백 · 양버즘나무 · 가중나무 · 회화나무 · 가시나무 · 종가시나무 · 광나무 · 멀구슬나무
		공원 녹지 (17종)	향나무 · 화백 · 편백, 해송, 개비자나무, 포플러, 틀립나무 · 회화나무 · 배롱나무 · 사철나무 · 가시나무 · 종가시나무 · 식나무 · 동백 · 애월나무 · 금목서 · 광나무
		주변 환경림 (12종)	화백 · 편백 · 삼나무 · 향나무 · 해송 · 은단풍 · 때죽나무 · 사방오리 · 가시 나무 · 물참나무 · 광나무 · 사철나무

[참고문헌]

- 김복영. 1991. 대기오염에 의한 농작물 피해와 그 대책. 농업환경보전. 한국환경농학회 : 119-143.
- 김영걸. 1997. 대기오염과 산림. 숲과 문화 6(5) : 25-29.
- 김영걸. 1997. 대기오염과 산림. 나무 숲 삶. 한국포플러위원회 : 5-7.
- 김영걸. 1998. 독일의 대기오염과 삼림피해에 관한 고찰(특히 오존을 중심으로). 숲과 문화 7(2) : 25-29.
- 김영걸 외 8인. 2000. 환경오염지의 산림생태계 복원 및 관리기술 개발. 농림부. 27-117.
- 박석환. 1996. 환경생태학. 320pp.
- 오종환. 1983. 대기오염에 의한 수목의 피해. 산림 4 : 76-81.
- 유정환. 2000. 공해방지법. 산림과 임업기술 2 : 478-484.
- 유정환, 변재경, 김춘식, 이충화, 김영걸, 이원규. 1998. 산성화된 산림토양에 석회, 황산고토 및 복합비료 시비가 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 한국임학회지 87(3) : 341-346.
- 이승우. 2003. 임지 산성화의 생태적 의미와 회복을 위한 토양개량. 산지환경 6 : 61-69.
KOREA FOREST RESEARCH INSTITUTE
이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 업무 수첩, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.
- 이승우 외 8인. 2011. 대기오염과 산림생태계 변화. 국립산림과학원 연구보고 11(23) : 148pp.
- 이충화, 유정환, 김영걸, 변재경, 김춘식, 이승우, 이봉수. 1998. 토양산성화가 소나무 묘목의 생장에 미치는 영향. 산림과학논문집 61 : 90-96.
- 이충화 외 8인. 2003. 대기오염 및 산림생태계 변화 모니터링. 임업연구원 연구자료 204. 259pp.
- 정문식 외 3인. 1995. 환경화학. 신광문화사. 716pp.
- 조광명. 1993. 대기오염. 청문각. 320pp.
- 한국산지보전협회. 2006. 나무 건강. 196pp.
- 한국환경농학회. 1991. 대기오염과 농림업. 289pp.
- 환경부. 2008. 환경통계연감. 750pp.

- Braunisch, J. 1990. Luftschadstoffe und ihre Wirkung auf Baeume. Oesterreichischer Forstverein. 49pp.
- Canter, L. W. 1986. Acid rain and dry deposition. Lewis Publishers INC. 370pp.
- Georg, H. W. 1986, Atmospheric Pollutants in Forest Areas, D. Reidel Publishing Company, 287pp.
- Hanisch, B. 1990. Waldschaeden erkennen. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. 334pp.
- Kim, Y. K. 1998. Effects of Air Pollution on Forest Ecosystems in Korea: The Joint German-Korean Symposium on Environmental Forest. 91-99.
- Kim, Y. K. et al.. 2000. Forestry Problems and Air Pollution in China and Korea: Air Pollution and The Forests of Developing and Rapidly Industrializing Countries. CABI Publishing. 121-142.
- Koziol, M. J. 1984. Gaseous Air Pollutants and Plant Metabolism. Butterworths. 466pp.
- Megie, G. 1989. Ozon, Atmosphaere aus dem Gleichgewicht. Springer-Verlag. 177pp.
- Schuett, P., Koch, W. 1983. So stirbt der Wald, BLV Verlagsgesellschaft. 95pp.
- Smith, W. H. 1990. Air Pollution and Forests, Interactions between air contaminants and forest ecosystems. 309pp.
- Ulrich, B. 1983. Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems. D. Reidel Publishing Company. 389pp.
- Yagasaki, Y., Chishima, T., Okazaki, M., Jeon, D. S., Yoo, J. H., Kim, Y. K. 2001. Acidification of red pine forest soil due to acidic deposition in Chunchon, Korea. Water, Air and Soil pollution 130 : 1085-1090.

[부 록] 대기오염물질 조사 · 분석 방법

1. 건성강하물 조사 · 분석 방법

■ Passive sampler(대기물질포집기)

대기 중의 가스상 오염물질(SO_2 , NO_2 , O_3)을 1개월 동안 수동 포집하는 장치

■ 설치 및 교환

가. 장소 선정

- 나무 또는 지주대에 설치(지면으로부터 2~3m 이상의 바람 막힘이 없는 곳)
- 굴뚝 등 특정 오염원에 직접 노출되지 않은 곳

나. 정보 기록

- 포집기 기록란에 설치장소 및 일자를 기록

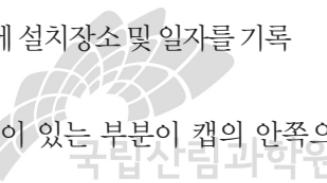
다. 설치

- 샘플러의 라벨이 있는 부분이 캡의 안쪽으로 향하게 하여 단단히 잠금
- 원형 전선에 샘플러를 매달고 나무 또는 지주대 등에 고정시킴
- 흡수여지가 습하지 않도록 설치지역 및 하절기에 유의바람

라. 수거(교체)

- 한달(약 30일) 경과 후에 샘플러를 설치 순서의 역순으로 결합 수거
- 밀봉한 후 수거일자 기록 및 새 passive sampler로 교체

※ SO_2 , NO_2 , O_3 샘플러 3종을 동일 지주대에 동시에 설치 및 수거





〈 Passive sampler 설치 장면 〉

■ 보관 및 주의사항

- 가. 수거한 샘플러는 겉 마개가 완전히 밀봉되었는지 확인 한 후, 비닐지퍼에 담아 실험실로 송부함(냉장보관) - 부득이하게 장기간 보관 시에는 여지만 분리하여 vial에 보관함
- 나. 산불, 쓰레기소각 등 주변에 오염상황이 발생한 경우에는 특이사항을 별지에 기록하여 분석자에게 통지함
- 다. 설치장소 주변에 굴뚝 등 특정 오염원이 새롭게 조성된 경우에는 설치장소를 영향을 덜 받는 다른 곳으로 이동하여 재 설치하고 이를 분석자에게 통지함
- 라. 조사지 거주 주민에게 샘플러 설치 및 수거를 의뢰할 시 이상의 사항을 정확히 설명하고 의뢰인이 바뀌어 인수인계 시 반드시 주지시켜야 함

■ 샘플러 전처리

- 가. 기록사항 확인
 - 수거한 샘플러의 라벨에 기입된 내용(장소, 방치일수)을 기록함
 - 나. 여지 분리
 - 아래 그림과 같이 샘플러 겉 마개를 열고 소수성막을 벗긴 다음 속에 있는 흡수여지를 핀셋으로 꺼냄
- ※ 꺼낸 흡수여지가 젖었을 경우, 샘플러 설치오류가 의심되므로 설치지역을 기록해두고 샘플러 설치자에게 주지시킴(특히, 하절기 주의 요망)

다. 여지 추출 시 주의사항

- 각 이온 별 여지 추출 시는 추출액 양을 늘리고
- 흡수여지를 vial(10mL 용량) 또는 시험관에 넣고 추출액 5mL를 가함
- vial 뚜껑을 닫고 초음파진탕기로 20분간 진탕

〈 대기오염물질별 추출 방법 〉

측정항목	추출액	추출시간	추출온도	추출방법
SO ₂	0.15% H ₂ O ₂	20분	50~60°C	진탕
NO ₂	Pure water	20분	50~60°C	진탕
O ₃	Pure water	60분	상온	진탕

- 추출액을 실린지필터(0.51MPa, MFS 25)로 여과하여 IC 분석용으로 사용

※ 잔여 추출액은 cross checking을 위해 산림과학원으로 송부

※ 이때 Vial내의 흡수여지는 제거 후 송부하며 흡습여지가 젖은 경우 등의 특이 사항도 함께 기록하여 송부(분석치가 비정상적일 경우 참조)

※ 잔여액이 부족할 시 추출액의 양을 늘려 이를 vial에 기록하여 송부함



〈대기물질 포집기(passive sampler) 여지 추출과정 〉

▣ 표준용액 조제 및 검량선 작성

가. 혼합 표준용액(100mg/L)을 이용하여 1, 3, 5, 10ppm 농도 용액 조제

- 표준용액(100mg/L)을 1㎖ 마이크로피펫으로 0.1, 0.5, 1.0㎖씩 정확히 취하여 유리바이얼(10㎖)에 담고 10㎖ 마이크로피펫으로 초순수 9.9, 9.7, 9.5, 9.0㎖씩을 채워 각 Vial이 총 10㎖가 되도록 함

※ 혼합 표준용액(Multi anion Standard Solution, Wako) (Br⁻ 100mg/L, Cl⁻ 20mg/L, F⁻ 20mg/L, NO₂⁻ 100mg/L, NO₃⁻ 100mg/L, PO₄³⁻ 100mg/L, SO₄²⁻ 100mg/L)

나. 이온별 표준원액(Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등) 1000mg/L를 100㎖ 플라스크에 10㎖씩 넣은 후 정확하게 초순수로 100㎖로 fill up하여 Standard 100ppm을 제조함. 1ppm은 1㎖/100㎖, 3ppm은 3㎖/100㎖, 5ppm은 5㎖/100㎖, 10ppm은 10㎖/100㎖으로 희석하여 조제함.

▣ 분석 및 농도 환산

가. 검량선 작성

- 상기 4단계 농도의 표준용액을 Ion chromatography로 검량선 작성

나. IC 분석

이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

- 최종 여과된 추출액을 IC에 주입 후 농도 분석

다. 농도 환산

- IC로 분석한 값은 용액상 농도(mg/L)이므로 이를 가스상 농도(ppb)로 변환하기 위해 아래 식으로 환산

- 환산계수: SO₂ - 344, NO₂ - 458, O₃ - 279.3

$$\text{월평균 대기 중 농도(ppb)} = \frac{\text{용액상 } \text{SO}_4^{2-}, \text{NO}_2 \text{ 및 } \text{NO}_3 \text{ 농도(mg/L)} \times 5(\text{㎖}/\text{추출액량}) \times \text{환산계수}}{\text{방치일수} \times 24(\text{hr})}$$

※ 각 이온의 용액상 농도 적용

SO₂: SO₄²⁻, NO₂: NO₂⁻, O₃: NO₃⁻ 농도를 적용

※ 추출액량: 5mL 또는 10mL 등 실제 추출에 사용한 추출액량

▣ 시료보관

1. 샘플러를 수거한 후 장기간 분석을 못할 경우, 흡수여지만 vial에 담아 완전히 밀봉한 상태로 냉장 보관(추출액은 분석 시 가함).

2. 습성강하물(강우, 강설) 조사 · 분석 방법

▣ 강수(강우, 강설) 채취

- 매 강수 이벤트별로 채취, 수량 기록(mm), 분석 (결측이 없도록 주의)

※ 장마철에 2~3일에 걸쳐 내리는 연속 강우일 경우 1회 강수 이벤트로 간주

▣ pH 측정법

가. Calibration

- pH 4.0, 7.0 표준용액을 준비한 후 먼저 pH 7.0 용액에 pH meter 전극이 2cm 정도 잠기도록 한 다음 표시수치가 7.0이 되도록 조절함

- 전극을 중류수로 세척한 후 흡수지로 전극 표면이 상하지 않도록 물기 제거함

- 전극을 pH 4.0 표준용액에 넣고 지시침 또는 수치가 4.0이 되도록 조절함

- 이와 같은 교정은 pH meter의 감도에 따라 반복회수를 조절하여 실시함

나. 시료 측정

- 강수시료의 pH를 측정하되, 오염방지를 위해 1분 이내에 측정 종료

▣ 강수채취기 및 pH meter 관리

가. 자동강수채취기 관리

- 강수가 없을 때는 덮개를 덮어둠

- 집수깔때기와 채취병을 중류수로 한달에 한번 세척함 (청결 유지)

- 동절기에는 우수채취병이 동파하지 않도록 주의

나. pH meter

- 가급적 고정위치에서 사용하며 이동시에는 1~2시간 안정시킨 후에 사용
- 전극의 수명은 1~2년이므로 pH 변화폭이 클 경우 교체(감응시간 늦어짐)
- 전극은 마르지 않도록 표준용액에 담가두며 전극 내 KCl 용액은 충분히 보충

■ 이온분석(Ion chromatography)

가. 검량선 작성 : 혼합 표준용액으로 Ion chromatography 검량선 작성

나. IC 분석

- 최종 여과된 추출액을 IC에 주입 후 농도 분석
- 음이온 (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), 양이온 (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.

국립산림과학원 연구자료 제486호

대기오염과 수목피해

2012년 12월 인쇄

2012년 12월 발행

발행인 : 구길분

집필인 : 김영걸, 임주훈, 김용석, 김수진, 배상원
Tel 02-961-2641 Fax. 02-961-2649

발행처 : 국립산림과학원

서울시 동대문구 회기로 57

Tel 02-961-2584 Fax. 02-961-2579

인쇄처 : 주필코문화사(Tel. 2269-2466)

♣종이도 나무에서 나옵니다

ISBN 978-89-8176-933-8 (93520)

이 책의 저작권은 국립산림과학원에 있으며 저작권법에 의해 보호를
받는 저작물이므로 무단전재와 복제를 금합니다.



이 문서에 대한 소유권은 국립산림과학원에 있으며, 등의 없이 수정, 변경 및 인쇄할 수 없습니다.