

大氣汚染物質의 山林生態系內 流入과 土壤의 化學的 特性 變化*¹

김동엽² · 유정환³ · 채지석³ · 차순형³

Deposition of Atmospheric Pollutants in Forest Ecosystems and Changes in Soil Chemical Properties*¹

Dong Yeob Kim², Jung Hwan Ryu³, Ji Seok Chae³ and Soon Hyung Cha³

요 약

최근 우리 나라 대도시와 공업지역의 환경오염은 주변 자연생태계의 만성적 피해에 대한 우려를 일으키고 있다. 본 연구는 오염지역 주변의 산림생태계내 물질유입과 환경오염이 토양환경의 변화에 미치는 영향을 구명하기 위하여 이루어졌다. 오염지역으로 서울, 울산, 여천 및 서산을 선정하였고 청정지역으로 평창을 선정하여 이들 지역의 산림에 유입되는 대기강하물을 강우와 임내우(수관통과수, 수간수)를 통하여 측정하였고 각 지역 토양의 화학적 특성을 조사하여 비교하였다. 대도시와 공업지역의 평균 강우 pH는 4.5에서 5.5사이에 분포하여 산악지역의 pH 5.8에 비하여 낮은 수준에 머물렀다. 강우는 임분을 통과하면서 이온농도가 최고 4배까지 증가했으며 대도시와 공업지역에서 임내우 이온농도가 현저하게 증가한 것으로 나타났다. 임내우에서 나타난 물질유입 총량도 대도시와 공업지역이 산악지역에 비하여 2-3배 정도 높았다. 산성강하물의 영향으로 토양산성화가 진행되는 과정에서 가장 많은 영향을 받은 것으로 보이는 대도시의 토양은 산악지역에 비하여 pH 1 정도 낮은 것으로 나타났다. 토양의 양이온 함량은 대도시와 공업지역에서 높게 나타나 양이온 유실은 심하게 이루어지지 않은 것으로 보이지만 산성물질 유입에 의한 토양산성화의 진행은 계속되고 있는 것으로 보인다. 대도시와 공업지대에서 배출되는 오염물질에 의해 주변 산림생태계내 물질유입과 토양환경의 변화가 관측되었으며 앞으로의 생태계의 변화 과정과 식물생육에 미치는 영향은 지속적인 연구를 통하여 밝혀져야 할 과제이다.

ABSTRACT

Environmental pollution has recently been progressed in the metropolitan and industrial areas of Korea and concerns have been evolved against the chronic effects of the pollution on natural ecosystem. This study was carried out to investigate the environmental pollution impacts on ion input into forest ecosystems and soil environmental changes. Study plots were established at Seoul, Ulsan, Yeochon, and Seosan for pollution sites and at Pyungchang for a non-pollution site. Atmospheric deposition was measured with rain, throughfall, and stem flow samples collected in the forest areas. Soil chemical properties were investigated to compare the pollution impacts on the sites. Precipitation acidity in the metropolitan and industrial areas ranged from pH 4.5 to 5.5, showing the levels lower than pH 5.8 of mountain area. Ion concentrations in the precipitation had increased significantly while passing the crown layer in the metropolitan and industrial areas, showing the increase by 4 times at

* 接受 1995年 9月 21日 Received on September 21, 1995.

¹ 이 논문은 1993-1994년도 과학기술처 특정과제개발사업에 의해 수행된 연구결과의 일부임.

² 성균관대학교 조경학과 Department of Landscape Architecture, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Korea.

³ 임업연구원 산림환경부 대기오염연구실 Forestry Research Institute, Forest Air Pollution Laboratory.

the maximum. Total ion input in the metropolitan and industrial areas was greater than that in mountain area by approximately 2-3 times. Soil acidification caused by acidic ion input seemed to be greatest at Seoul, showing pH 1 decrease compared to that of Pyungchang. Soil cation contents were relatively high in the metropolitan and industrial areas. Although the cation leaching loss was not apparent, soil acidification process seemed to be continued by acidic ion input. Environmental pollution in the metropolitan and industrial areas exerted changes in ion input into the forest ecosystems and soil conditions. The chronic effects of environmental pollution should be monitored and investigated further to explain the processes of ecosystem change and the impacts on plant growth.

Key words : Air pollution, atmospheric deposition, acid rain, throughfall, stem flow, soil acidification

서론

산업의 발달과 인구의 도시집중화는 각종 환경오염물질의 증가를 초래하여 오염원 주변은 물론 자연생태계를 위협하는 결과를 가져왔다. 유럽과 북미주지역에서는 1970년대 중반 이후 대기오염과 산성우 등의 영향으로 산림쇠퇴현상이 발생하였으며(Manion and Lachance, 1992; Barnard and Lucier, 1990; Freedman, 1989; MacKenzie와 El-Ashry, 1989; Georgii, 1986) 우리나라에서도 최근 공업이 급속도로 발전하면서 환경오염에 의한 산림피해가 나타나기 시작했다(박재계 등, 1988; 정성웅 등, 1991a, b; 김종갑과 김재생, 1991). 산림피해는 1970년대 후반부터 공업시설이 밀집한 지역 주변에서 관측되기 시작하였으며 전국적으로 나타난 산림의 오염피해는 정도가 심한 편은 아니지만 지역적인 피해가 계속 발생하고 있고 피해면적이 점차 증가하고 있는 것으로 알려져 있다.

대기오염에 대한 수목생장 반응은 많은 보고를 통해 알려져 왔다(김갑태, 1991, 1992; 이웅상, 1994; Smith, 1974; Guderian, 1977, 1985; Darrall, 1989; Bytnerowicz와 Grulke, 1992). 수목의 반응은 수종과 오염물질의 종류 또는 강하량에 따라 다르게 나타나지만 일반적으로 수목은 초본류보다는 대기오염물질에 대한 저항성이 강한 것으로 알려져 있다. 최근에는 오염물질이 생태계에 가시적인 피해를 일으키지 않더라도 장기간 오염물질의 누적으로 인한 피해가 발생할 수 있어 이에 대한 관심과 연구가 집중되고 있는 추세이다. 대기오염물질에 의한 생태계내 토양양분 수준의 변화는 이러한 피해를 예측할 수 있는 중요한 지표이다(Johnson과 Lindberg, 1992). 토양산성화

는 산림지역에서 자연적으로 일어나는 현상이지만 오염으로 유입되는 산성물질은 토양산성화를 가속시킨다. 토양산성화가 일어나면 토양내 양분이 용탈될 뿐 아니라 Al^{+++} 이온을 활성화시키고 식물 뿌리에 피해를 주어 식물생장을 저해한다. 토양산도의 변화는 토양미생물의 활동을 억제하여 양분의 공급 등과 같은 정상적인 기능을 약화시킨다. 유럽과 북미주에서 나타나고 있는 산림쇠퇴 현상은 토양산성화에 의한 수목생장 장애가 그 원인중의 하나인 것으로 알려져 있다. 대기로부터 강하에 의한 산성물질의 집적과 토양양분 결핍은 산림쇠퇴를 진단할 수 있는 수단이며 이는 1차 대기오염 물질과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Cape와 Fower, 1981). 우리나라에서도 대기오염등 산성강하물이 산림에 미치는 영향에 관한 연구가 공업지역과 중부지방의 산림을 중심으로 수행된 바 있다(이경재 등, 1993; 이수옥, 1990, 민일식, 1989).

환경오염이 산림에 미치는 영향을 파악하려면 산림생태계내 물질순환의 변화를 알아야 한다. 특히 만성적인 산림피해는 오랜 기간에 걸쳐 토양과 식물체에 오염물질이 누적된 결과 발생하기 때문에 오염물질의 유입과 생태계 변화에 관한 조사가 계속되어야 한다. 본 연구에서는 환경오염이 산림생태계에 미치는 영향을 물질순환 및 토양양분의 관점에서 구명할 목적으로 오염으로 인한 산림피해 예상지인 대도시 및 공업지역 주변의 산림생태계에 유입되는 오염물질을 측정하였고 오염에 의한 토양변화를 조사하였다.

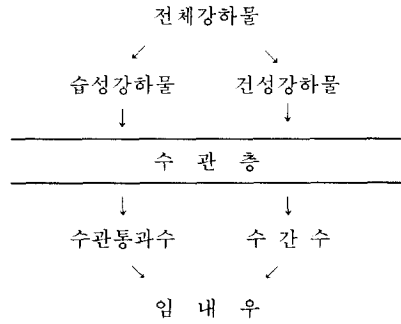
재료 및 방법

대기오염에 의한 산림생태계내 물질 유입의 변화를 조사하기 위하여 대도시(서울), 공업단지

(울산, 여천, 서산) 및 산악(평창) 지역을 구분하여 이들 지역에 대기로부터 유입되는 물질과 수관층을 통과한 강우성분의 변화를 측정하였다(그림 1). 도시지역의 산림으로는 서울 남산과 홍릉수목원내에 분포하고 있는 침, 활엽수림을 대상으로 하였다. 울산지역은 울산시 남구 두왕동에 위치하고 있는 침, 활엽수림에 조사구를 설치하였다. 여천지역은 여천시 중흥동 홍국사 내에 있는 침, 활엽수림에 조사구를 설치하였다. 서산지역은 대산읍 대죽리 속호지마을의 침엽수림 및 침활혼효림에 조사구를 설치하였다. 환경오염의 지역적인 영향권에서 격리된 지역으로 생각되는 강원도 평창군 대화면 대화리를 청정지역으로 선정하고 대도시 및 공업지역과 비슷한 토양, 식생 특성을 갖는 침, 활엽수림에 조사구를 설치하였다. 이곳에서 측정된 결과는 다른 지역의 측정치와 비교하여 오염에 의한 물질 유입의 차이를 판별하는 기준으로 하였다.

산림의 수관은 주변 환경과 연결되어 유입과

유출의 조절 역할을 하게 되며 산림생태계를 구성하는 중요한 요소로 존재한다(그림 2). 본 연구에서는 산림의 수관층을 건성 및 습성 대기강하물이 포집되는 표면으로 간주하여 임내우(수관 통과수와 수간수)를 측정함으로써 산림지역에 대기오염물질이 유입되는 경향을 파악하고자 하였다(Mayer와 Ulrich, 1974 ; Nicholson 등, 1977).



(그림 2) 산림생태계내 물질유입 경로

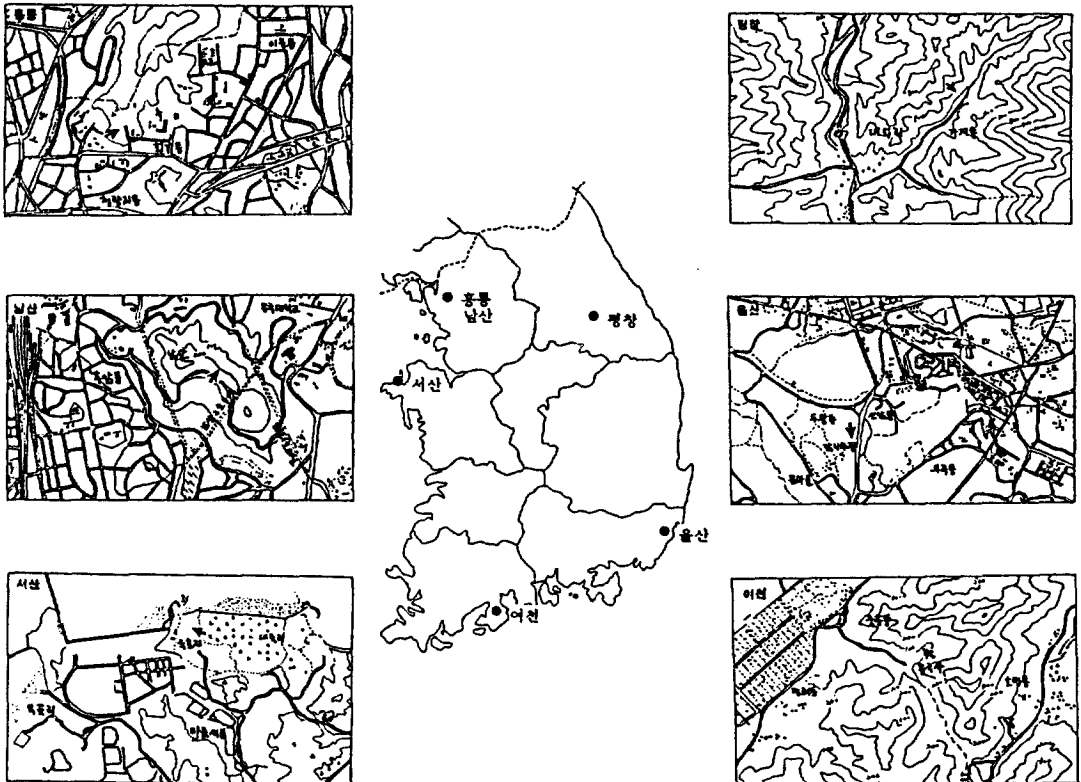


Fig. 1. Location of the study sites

각 지역에 소나무로 대표되는 침엽수림과 참나무류가 우점종인 활엽수림에 10m×10m 크기로 방형구를 설치하였다. 조사구에는 직경 20cm 깔때기와 용량 10L 폴리에틸렌 용기를 이용하여 강우채취장치를 만들어 지상 1.2m 높이에 설치하고 2주 간격으로 강우를 채취하였다. 임분내에서 일어나는 강우의 화학적 변화를 측정하기 위하여 임내우를 채취하였다. 수관통과수는 각 조사구의 임분내에 강우채취장치를 5반복으로 설치하고 2주 간격으로 채취하였다. 수간수는 조사구내의 표본목 5본을 대상으로 알루미늄판, 폴리에틸렌튜브, 폴리에틸렌 용기를 이용하여 흉고높이에 갓모양의 수간수 채취장치를 설치하고 2주 간격으로 채취하였다. 채취되는 강우시료가 야외에서 녹조류 등 미생물의 활동에 의해 변질되는 것을 막기 위하여 채취시 HgCl₂ 0.01M 용액 2-3 방울을 야외에 설치한 용기에 처리하였다. 채취한 시료는 강우산도와 전기전도도를 측정하였고 Ion Chromatograph를 이용하여 음이온(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻)과 양이온(NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺)을 분석하였다. 조사지역의 입지조건을 조사한 후 대표 지점을 선정하여 토양단면조사를 하였고 조사된 단면에서 A층과 B층 토양 시료를 채취하여 토성, 유기물, 양이온치환용량, Total N, P, K, Na, Ca, Mg, Al을 분석하였다(한기학 등, 1988).

조사된 자료를 통하여 각 지역의 강우와 임내우 성분을 비교하였고 강우량을 함께 계산하여 전체 임분에 유입된 이온량을 계산하였다. 전성강하물, 안개 등에 의한 물질의 유입은 직접 측정되지는 않았으나 대부분 수관에 집적되어 있는 것으로 가정하고 강우와 임내우 그리고 오염지역과 청정지역의 비교를 통하여 간접적으로 추정되었다. 식물체 표면에서의 이온의 흡수, 용탈작용으로 인한 강우 성분의 변화요인은 측정된 임내우 성분에 포함되어 있으나 지역간 임내우 성분 변화의 비교에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다. 조사지역의 대기로부터 유입된 물질에 의한 토양변화를 비교하기 위하여 조사구는 모암의 조성이 주로 화강암과 화강편마암인 지역에서 가급적 지형적으로 비슷한 곳에 선정되었고, 임분의 구조와 임령 등이 주어진 범위 내에 들도록 하였다.

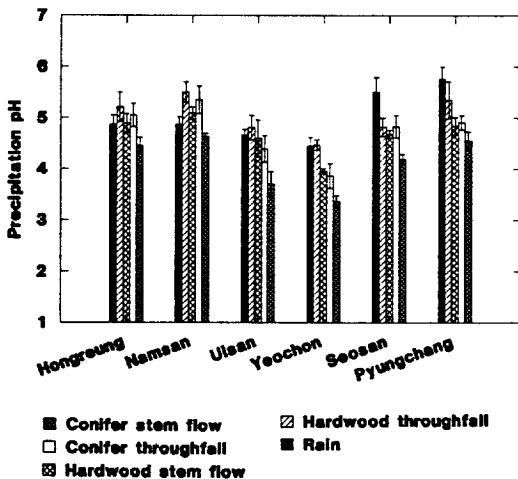
결과 및 고찰

조사지역

조사지역의 임분은 소나무와 참나무류를 우점종으로 하여 구성되어 있으며 임령은 26년-37년의 분포를 보였다(표 1). 토양은 USDA 토양분류 기준으로 Inceptisols와 Alfisols의 두 종류를 이루고 있었으며 각 지역의 수목 생장은 큰 차이를 보이지 않았다. 서울은 우리 나라에서 최대 인구밀집지역으로 경기도 인접지역을 포함하여 수도권을 이루며 점차 그 면적이 확장되고 있다. 1960년대 이후 공업화가 시작되면서 서울에는 대기뿐만 아니라 환경오염이 점차 가속되어 왔고 산업시설과 인구의 분산정책에도 불구하고 환경오염 문제는 가중되고 있다. 최근에는 자동차의 급증으로 인한대기오염과 수질환경문제가 증대되고 있다. 울산공업센터는 제1차 경제개발계획(1962-1966)의 시작과 때를 같이 하여 건설이 시작되었고 이후 2차, 3차 경제개발계획이 진행되면서 화학, 화섬, 기계, 장비, 금속, 전력 등 각종 기간산업이 추가되어 우리 나라 산업의 요람으로서 국가경제 발전에 중추적인 역할을 담당해 왔다. 울산은 유공울산정유공장과 울산석유화학공업단지의 석유화학계열 공장 그리고 관련 화학공장을 중심으로한 화학공업과 현대자동차와 현대중공업을 중심으로한 기계공업이 발달해 있다. 초기에는 중금속오염으로 농작물에 피해를 일으키는 등 환경문제가 있었지만 공장 이전과 오염물질 배출규제 등 환경보전을 위한 노력으로 많은 성과를 거두었다. 그러나 화석연료 및 화학원료의 사용량 증가에 따른 대기오염 문제는 여전히 남아있어 울산은 우리 나라 공업지역중 환경오염의 우려가 가장 높은 지역이다. 여천공업단지는 1973년에 건설이 시작되어 1979년에 본격적으로 가동된 석유화학단지로서 주요업종은 비료, 정유, 석유화학계열이다. 규모로는 우리 나라 석유화학 관련산업 생산액의 35%에 달하는 절대적인 비중을 차지하고 있다. 여천공업단지는 광양의 제철공업단지와 함께 광양만 일대를 공업단지화하며 성장하고 있다. 이 지역은 공업단지 면적의 확대와 함께 환경오염에 대한 우려도 또한 가중되고 있다. 서산지역은 대산읍 대죽리 속호지마을의 침엽수림 및 침활혼효림에 조사구를 설치

Table 1. Characteristics of the study sites

Location	Elevation (m)	Species	Stand age (yr)	DBH (cm)	Tree height (m)	Soil type
Seoul, Hongreung	100	<i>Pinus densiflora</i>	28	19.4	13.5	Coarse-loamy, mixed, acid Lithic Haplumbrepts
		<i>Quercus serrata</i>	31	19.3	11.7	Sandy, mixed
		<i>Q. mongolica</i>				Typic Haplumbrepts
Seoul, Namsan	150	<i>P. densiflora</i>	26	24.0	13.0	Coarse-loamy, mixed, acid Lithic Haplumbrepts
		<i>Q. acutissima</i>	31	26.0	18.0	Coarse-loamy, mixed, acid
		<i>Q. serrata</i>				Typic Hapludalfs
Ulsan	20	<i>P. densiflora</i>	26	22.0	9.0	Coarse-loamy, mixed, acid Typic Haplumbrepts
		<i>Q. mongolica</i>	31	22.0	17.0	Fine-loamy, mixed, acid Typic Hapludalfs
Yeochon	90	<i>P. densiflora</i>	32	16.1	10.5	Fine, mixed, acid Typic Hapludalfs
		<i>Q. variabilis</i>	36	17.0	11.0	Coarse-loamy, mixed
		<i>Q. acutissima</i>				Typic Hapludalfs
		<i>Q. mongolica</i>				Typic Hapludalfs
Seosan	20	<i>P. densiflora</i>	37	16.2	10.2	Coarse-loamy, mixed, acid Typic Hapludalfs
		<i>Q. dentata</i>	37	14.2	9.3	Coarse-loamy, mixed, acid Typic Hapludalfs
Pyungchang	520	<i>P. densiflora</i>	26	20.0	11.0	Coarse-loamy, mixed, acid Typic Haplumbrepts
		<i>Q. variabilis</i>	31	22.0	14.0	Coarse-loamy, mixed, acid Typic Haplumbrepts

**Fig. 3.** Precipitation pH at the study sites

하였다. 서산지역의 공업단지는 울산, 여천지역보다 높은 1980년대에 조성이 시작되었으며 현재 정유공장과 석유화학공장이 가동되고 있고, 앞으로 관련 화학공장이 계속 건설될 예정으로 있다. 이 지역은 산업시설 규모가 타지역에 비하여 작으며 누적된 환경오염의 심각성이 크지는 않지만 다가오는 서해안경제권 시대에는 공업단지의 규모가 훨씬 커질 전망이어서 환경오염에 대한 대비가 필요할 것으로 보인다.

강우산도

강우의 pH는 산악지역에 비하여 대도시에서 현저히 낮은 것으로 나타났다(그림 3). 공업지역에서는 지역에 따라 변이의 폭이 큰 것으로 나타났다. 산악지역의 강우 pH에 비하여 낮았다. 서산의 강우 pH가 높은 것은 조사구가 해안에서

가까운 때문으로 보인다. 서울의 대기중 아황산 가스 농도는 최근 들어 경시적으로 감소하는 경향을 보이고 있지만(염육철 등, 1993; 임업연구원, 1988) 강우 pH가 여전히 낮은 수준에 머물러 있는 것은 대기중에 질소화합물 등 다른 산성 물질이 증가한 때문으로 생각된다. 조사지역별 강우산도의 측정값은 1988년 동일지역에서 측정 한 값에 비하여 각 지역 공통으로 pH 0.2-0.3 가량 낮은 것으로 나타나 조사지 전역에서 강우 pH가 낮아지는 경향을 보였다(임업연구원, 1988). 강우산도는 대도시와 공업지역이 산악지역에 비하여 대기강하물중 산성물질 농도가 높은 것을 반영하고 있으며 조사지역의 산림생태계내 산성 물질의 유입량에 많은 차이가 있음을 나타내고 있다.

강우는 수관층을 통과하면서 화학적 조성이 변하여 서울지역을 제외한 모든 조사구에서 pH가 감소하였으며 서산지역 침엽수림의 수간수에서 최고 pH 1.3의 감소를 보였다. 임내우의 pH는 활엽수림보다 침엽수림에서 더 낮았으며 수관 통과수보다는 수간수가 더 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 수간수는 강우에 비하여 산도가 증가하며(堀田庸, 1991), 수간수를 통한 산성물질 유입이 장기간 지속될 경우 수목 주변의 토양산성화 촉진 원인이 되기도 한다(Beniumino 등, 1991). 서울에서는 침엽수림의 수간수를 제외한 임내우 pH가 증가하여 다른 조사지역과는 다른 경향을 보였다. 도시지역은 분진 농도가 높으며 이에 포함된 염기성 이온이 대기로부터 건강하물의 형태로 수목 표면에 집적되고 이 분진이 수간 통과수 및 수간수와 함께 임분내로 유입되어 높은 H⁺이온농도에 의한 작용과 함께 임내우 pH 증가의 원인이 된 것으로 보인다.

임내우의 화학적 조성 변화

임내우는 화학적 조성이 변하여 자연강우에 비해 산성이온의 농도가 증가했다(그림 4). 임내우의 산성이온농도는 울산지역에서 가장 높았으며 강우에 비하여 3-4배 높은 농도를 나타내었다. 임내우의 이온농도는 침엽수림이 활엽수림에 비하여 수간수가 수관 통과수에 비하여 높았다. 임내우는 대개의 경우 강우에 비하여 이온농도가 높게 나타난다(安田洋, 1988). 임내우의 화학적 조성은 산악지역에서 강우이온 농도의 2배를 넘

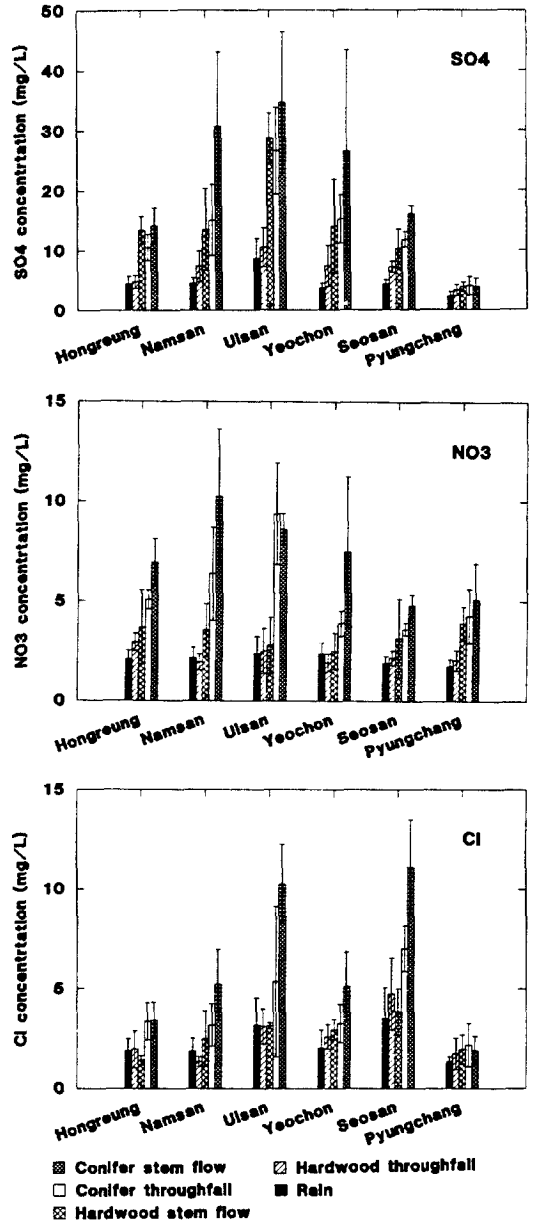


Fig. 4. Acidic ion concentrations in the precipitation of the study sites

지 않은 것에 비하여 대도시와 공업지역에서 상당히 증가하였고 증가폭이 최고 6배까지 달했다. 임내우의 염기성이온농도도 변화하여 7-8배까지 증가한 K를 제외한 다른 이온들은 2배 내외의 증가를 보였다(그림 5). 전반적으로 대도시지역에서는 임내우 질소화합물농도가 공업지역에서는

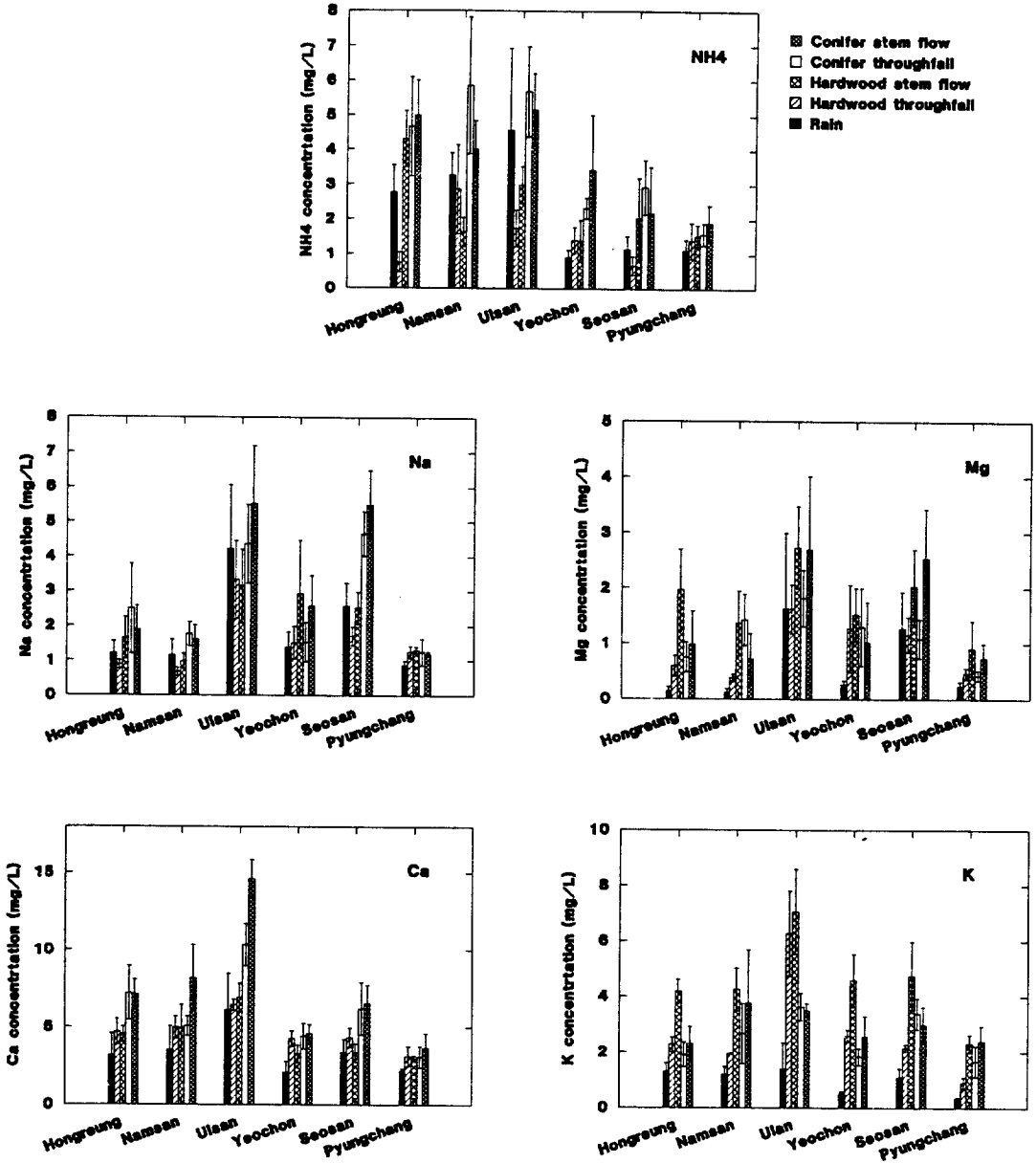


Fig. 5. Basic ion concentrations in the precipitation of the study sites

임내우의 염기성이온농도가 높은 것으로 관측되었으며 산성, 염기성이온의 유입은 울산에서 가장 높은 것으로 나타났다. 임내우의 이온농도 변화는 산악지역에서 가장 낮았으며 이는 산악지역 대기의 청정도가 강우의 성분에 반영된 것으로 보인다.

임분내 이온 유입

임분내에 유입되는 이온의 양은 대도시 및 공업지역이 산악지역에 비해 많았으며 예외적으로 질소화합물과 Na의 경우 활엽수림에서 지역적인 경향이 나타나지 않았다(표 2). 여천은 적은 강우량 때문에 타지역에 비하여 이온유입량이 전반적으로 낮았다. 서산의 높은 염기성이온 유입은 조사지가 해안에 근접한 때문으로 보인다. 산성

Table 2. Ion input from atmosphere to forest ecosystems

Ions	Hongreung	Namsan	Ulsan	Yeochon	Seosan	Pyungchang
kg/ha						
(Conifer)						
SO ₄	32.4	47.6	78.2	41.5	62.2	21.0
NO ₃ -N	22.2	26.0	37.0	13.5	19.9	21.8
Cl ⁻	13.8	11.4	38.7	12.1	43.6	7.9
NH ₄ -N	15.9	21.4	15.3	8.4	16.9	10.6
K	10.7	9.0	9.8	5.9	26.8	8.9
Na	7.7	7.2	15.1	6.2	23.9	8.4
Ca	22.1	22.7	39.0	13.9	26.4	15.8
Mg	2.3	6.6	6.2	6.0	4.7	2.5
(Hardwood)						
SO ₄	17.5	28.5	34.5	16.8	38.7	17.8
NO ₃ -N	10.0	8.9	13.1	7.2	11.4	12.9
Cl ⁻	10.7	6.3	10.3	11.3	25.2	6.4
NH ₄ -N	3.3	10.1	7.2	4.2	6.0	6.7
K	15.8	9.5	20.8	10.8	19.8	7.2
Na	7.2	3.1	12.2	6.2	15.3	8.6
Ca	20.0	20.9	27.7	17.6	27.7	18.7
Mg	2.2	2.1	5.7	7.0	7.5	3.2

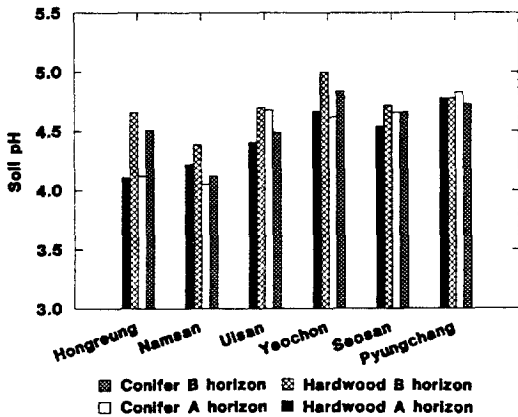


Fig. 6. Surface soil pH at the study sites

이온의 유입량은 활엽수림에 비해 침엽수림에서 많았으며 대도시 및 공업지역에서의 산성물질 유입량은 산악지역의 유입량에 비해 많아 토양산성화를 가속시킬 수 있는 잠재요인으로 나타났다. 그러나 염기성물질의 유입량도 산성물질과 비슷한 경향을 보여 이들 이온들이 토양특성에 미치는 영향에 따라 토양산성화 가속 여부가 결정될 것이며 이는 앞으로의 연구로 밝혀져야 할 과제이다. 결과로 나타난 유입량은 건강하물의 측정이 별도로 이루어지지 않아 습강하물과 건강하물

의 총량에는 미치지 못하나 건강하물의 상당부분이 수관층에 집적된 것으로 가정하여 총강하물에 근접한 양으로 간주된다.

산림토양 산도 및 양분

산림토양 pH는 대도시와 공업지역이 산악지역에서보다 낮았으며 특히 대도시지역의 산림토양 pH는 공업지역에 비하여 낮은 것으로 나타나 강우산도의 지역별 경향과 일치하지 않았다(그림 6). 이는 토양특성이 다른 것 이외에 도시지역의 토양이 장기간 산성오염물질에 의해 받은 영향이 더해진 때문으로 보인다.

토양내 양이온 함량은 대부분 산악지역보다는 대도시와 공업지역에서 높았다(그림 7). 대도시와 산악지역의 산림토양내 양이온 함량이 증가한 것은 대기로부터 유입된 물질의 영향으로 보인다. 토양내 양이온 함량의 증가는 울산과 여천에서 두드러지게 나타난 것으로 보아 이들 지역에서 양이온 유실과 토양산성화가 아직 심하게 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 일반적으로 토양 pH가 낮아지면 토양내 활성알루미늄의 농도가 증가하는데 조사지역에서 이와 유사한 경향이 나타났다. 토양내 활성알루미늄은 대도시와 울산에서 비교적 높았고 그외의 공업지역과 산악지역

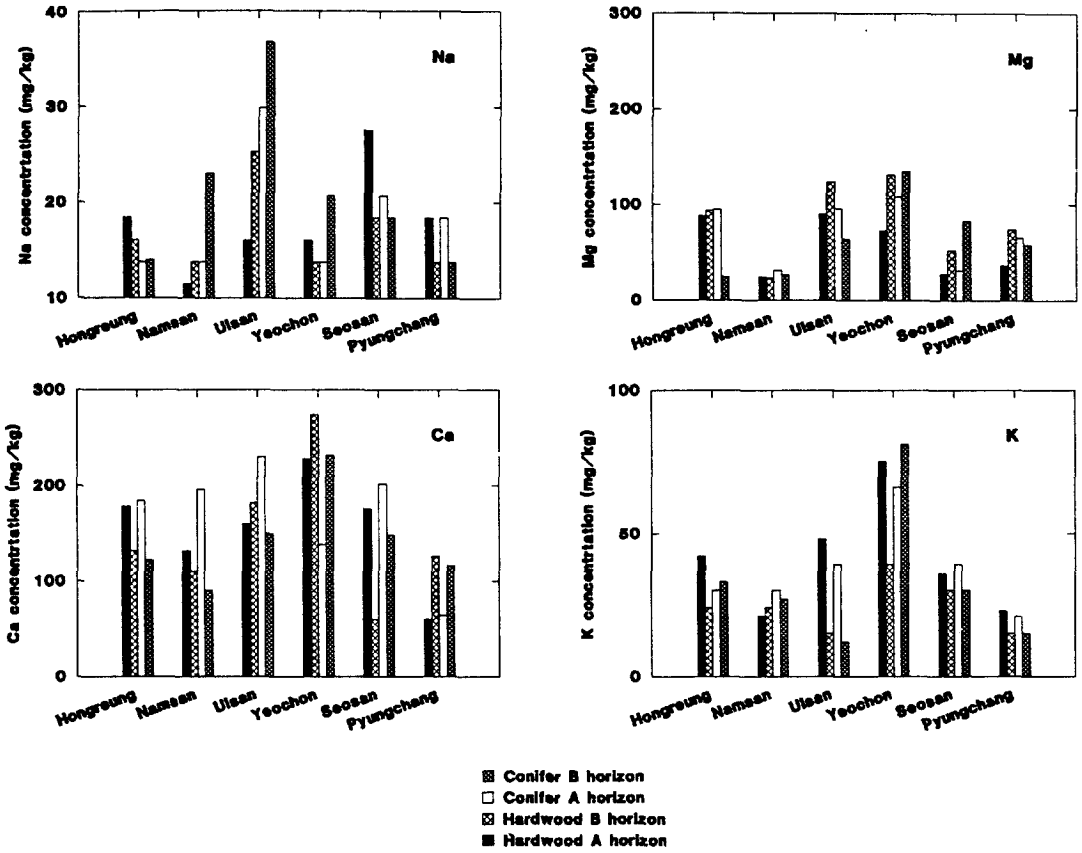


Fig. 7. Cation contents in the soil of the study sites

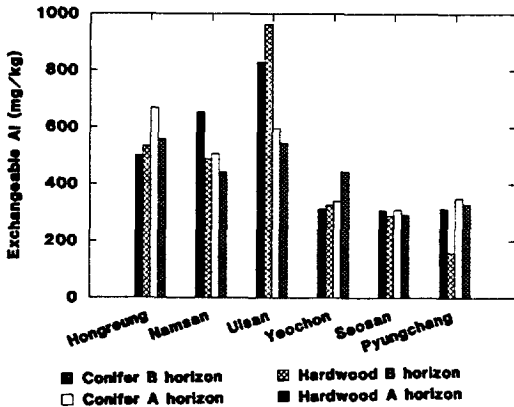


Fig. 8. Exchangeable Al contents in the soil of the study sites

에서는 낮았다(그림 8).

조사지역의 토양에서 일어난 경시적인 변화를 보기 위하여 같은 지역에서 1986년에 조사된 토양 특성(이수욱과 민일식, 1986) 본 연구에서

조사된 결과를 비교하였다(표 3). 서산의 토양은 1986년에 조사가 이루어지지 않아 비교 대상에서 제외되었다. 최근 8년 사이의 변화를 비교한 결과 전 조사지역에서 토양 pH가 약 0.2-0.5 감소되었으며 표토의 pH는 울산에서 가장 많이 감소하였다. 이와 같은 토양의 변화는 1927년부터 1982년까지 55년에 걸쳐 독일의 가문비나무림과 너도밤나무림에서 토양 pH가 0.3-0.9 감소한 것(Tamm과 Hallbacken, 1986)과 비교되며, 다른 지역에서 5-7년 동안 토양 pH가 0.3-0.4 감소한 것과 비슷한 경향을 보였다(Ulrich, 1979). 토양 내 유기물 함량은 최근 8년 사이에 증가했으며 서울의 경우 표토에서 최고 2배까지 늘어났다. 질소를 포함한 토양양분의 함량도 대부분의 지역에서 증가했다. 그러나 인의 함량은 대부분의 지역에서 감소했으며 서울 토양의 A층에서 예외적으로 증가한 것은 시비로 인한 영향 때문으로 보인다. 결과적으로 조사지역에서 토양의 양분유실은 심하게 일어나지 않았으나 전 지역에서 토양

Table 3. Changes in soil chemical properties at the study sites during 1986-1994 period

Horizon	Location	Year ¹	Soil pH	O.M.	TKN	P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	
				%						mg/kg
A	Seoul	1986	4.55	3.47	0.14	54.0	1.03	4.27	1.17	
		1994	4.25	7.29	0.34	224.4	1.28	4.31	2.46	
	Ulsan	1986	4.98	1.41	0.05	20.7	1.20	2.09	1.96	
		1994	4.44	2.71	0.08	11.5	1.86	4.57	3.71	
	Yeochon	1986	4.58	3.19	0.15	28.4	1.12	1.15	0.73	
		1994	4.42	4.86	0.23	26.8	2.53	2.88	1.43	
	Pyungchang	1986	5.40	5.40	0.22	44.0	1.30	6.00	1.30	
		1994	5.12	6.78	0.26	4.6	1.85	13.98	4.68	
	B	Seoul	1986	4.58	1.23	0.05	78.8	1.13	1.61	0.55
			1994	4.49	1.59	0.05	73.4	0.90	2.84	1.73
		Ulsan	1986	5.12	0.82	0.03	21.1	1.08	2.28	1.68
			1994	4.68	1.06	0.04	8.8	1.53	4.55	6.59
Yeochon		1986	4.93	1.32	0.06	14.5	0.95	1.32	0.71	
		1994	4.55	3.28	0.11	16.9	1.48	2.64	1.97	
Pyungchang		1986	5.60	3.50	0.15	51.0	0.60	8.00	1.95	
		1994	5.50	2.93	0.10	3.9	0.95	1.73	3.63	

¹ The data of each site were compared with the data obtained by Lee and Min(1986) who had collected soil samples at the same area.

산성화의 진행은 계속되고 있는 것으로 관측되었다.

결 론

강우 pH는 도시와 공업지역이 산악지역에서보다 낮은 것으로 나타나 대기오염의 영향을 반영하였다. 조사지에서는 1988년에 비하여 강우 pH가 0.2-0.3 가량 낮아졌다. 서울의 경우 대기중 아황산가스 농도의 감소와는 관계없이 강우의 산성화가 진행된 것은 자동차 배기가스 등으로 인해 대기중 질소화합물이 증가한 때문으로 보인다. 강우는 수관층을 통과하면서 화학특성이 변화했으며 활엽수림보다 침엽수림에서 pH가 더 많이 낮아졌다. 수관통과수와 수간수는 강우에 비하여 산성, 염기성이온의 양이 증가하였으며 그 경향은 대도시와 공업지역에서 두드러졌다. 대도시와 공업지역은 산악지역에 비하여 대기오염도가 높은 것으로 나타났으며 특히 울산지역에서 높게 나타났다.

대기의 산성강하물은 토양산도에 영향을 미쳐 도시와 공업지역의 토양이 산악지역에 비하여 낮

은 pH를 보였다. 서울에서 토양 pH가 낮게 나타난 것은 산성강하물에 장기간 노출된 영향 때문으로 보인다. 토양내 양분은 대도시와 공업지역에서 높았으며 울산과 여천에서 특히 높았다. 각 조사지역의 토양이 같지 않아 비교에 한계는 있으나 전반적으로 대도시와 공업지역의 대기오염 및 산성강하물 영향이 토양특성에 반영된 것으로 나타났다.

인 용 문 헌

1. 김갑태. 1991. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향(1). 한국임학회지 80(2) : 237-245.
2. 김갑태. 1992. 인공산성우가 몇 수종의 종자발아, 유근생장 및 묘목생장에 미치는 영향(1). 한국임학회지 81(1) : 30-39.
3. 김종갑·김재생. 1991. Soft X-ray 분석에 의한 대기오염지역에서 자란 해송(*Pinus thunbergii*)의 연륜의 특징. 한국임학회지 80(4) : 351-359.
4. 민일식. 1989. 대기오염 및 산성우가 산림생

- 태계내의 양묘동태 및 토양완충능에 미치는 영향. 박사학위논문, 충남대학교 임학과, 94p.
5. 박재계 외 7인. 1983. 공단지역의 환경오염물질의 축적과 수목성장의 상관관계에 대한 조사 연구. 국립환경연구소보 5 : 237-260.
 6. 염육철 외 6인. 1993. 대기오염에 의한 산림 토양 양묘 및 독성물질 동태. pp.53-71. 임업연구원. 환경오염이 산림생태계에 미치는 영향(I). 과학기술처 특정연구보고서.
 7. 이경재·김갑태·이용범. 1993. 산성우 및 대기오염물질이 산림에 미치는 피해의 조기판단에 관한 연구. 한국과학재단 특정기초연구보고서. 205p.
 8. 이수옥. 1990. 대기오염 및 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. pp.35-54. 식물과 환경오염. 한국생태학회 및 한국식물학회, 1990 심포지움 및 워크샵.
 9. 이수옥·민일식. 1986. 산림생태계와 토양의 양묘순환과 분포조사. pp.49-89. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 임업연구원. 대과학기술처특정연구 제1차년도 보고서.
 10. 이용상. 1994. 산성비와 오존에 대한 두 수종의 성장반응. 한국생태학회지 17(2) : 131-141.
 11. 임업연구원. 1988. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처특정연구보고서. 194p.
 12. 정성웅 외 10인. 1991a. 대기오염 및 산성비에 의한 피해조사와 평가에 관한 연구 : 수목 활력도를 중심으로. 국립환경연구원보 13 : 61-72.
 13. 정성웅 외 10인. 1991b. 대기오염 및 산성비에 의한 피해조사와 평가에 관한 연구 : 삼림 식생 및 생산성을 중심으로. 국립환경연구원보 13 : 73-86.
 14. 한기학 외 6인. 1988. 토양화학분석법 - 토양·식물체·토양미생물. 농촌진흥청 농업기술연구소. 450p.
 15. 堀田庸. 1991. 酸性雨と關東地方のスギの衰退. 森林科學 1 : 11-18.
 16. 安田洋. 1988. スギ林における酸性降下物の動態究明と影響豫測に關する研究. 林業試験場報告. pp.20-23.
 17. Barnard, J.E. and A.A. Lucier. 1990. Changes in forest health and productivity in the United States and Canada. NAPAP Report 16. Washington, D.C.
 18. Beniamino, F., J.F. Bonge and P. Arpin. 1991. Soil classification under the crown of oak trees. 1. spatial distribution. Forest Ecology and Management 40 : 221-232.
 19. Bytnerowicz, A. and N.E. Grulke. 1992. Physiological effects of air pollutants on western trees. pp.183-233. In R.K. Olson, D. Binkley, and M. Böhm (eds.) The response of western forests to air pollution. Ecological Studies 97. Springer-Verlag, New York, NY, USA.
 20. Cape, J.N. and D. Fowler. 1981. Changes in epicuticular wax of *Pinus sylvestris* exposed to polluted air. Silva Fennica 15 : 457-458.
 21. Darrall, N.M. 1989. The effect of air pollutants on physiological processes in plants. Plant, Cell, and Environment 12 : 1-30.
 22. Freedman, B. 1989. Forest decline. pp.124-134. In Environmental ecology : the impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function. Academic Press, Inc., San Diego. CA.
 23. Georgii, H.W. 1986. Atmospheric pollutants in forest areas. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland. 287p.
 24. Guderian, R. 1977. Air pollution, phytotoxicity of acidic gases and its significance in air pollution control. Ecological Studies 22. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
 25. Guderian, R. (ed.) 1985. Air pollution by photochemical oxidants. Ecological Studies 52. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 296p.
 26. Johnson, D.W. and S.E. Lindberg (eds.). 1992. Atmospheric deposition and forest nutrient cycling. Ecological Studies 91. Springer-Verlag, New York, NY, USA.
 27. MacKenzie, J.J. and M.T. El-Ashry. 1989. Air pollution's toll on forests and crops. Yale University Press, New Haven. 376p.

28. Manion, P.D. and D. Lachance. 1992. Forest decline concepts. APS Press, St. Paul, MN. 249p.
29. Smith, W.H. 1974. Air pollution-effects on the structure and function of the temperate forest ecosystem. *Environmental Pollution* 6 : 111-129.
30. Tamm, C.O. and L. Hallbacken. 1986. Changes in soil pH over a 50-year period under different forest canopies in southwest Sweden. *Water, Air & Soil Pollution* 31 : 337-345.
31. Ulrich, R. 1979. Deposition Veon luftverun reinigen und ihre Auswirkungen. pp.58-70. *in Waldöcosystemen im silling. Schriften Fortl. Fac., Univ. Göttingen.*