

산성 강우에 의한 수목의 쇠퇴현상(Ⅱ) - 양이온을 중심으로 -

이충규* · 황진형¹ · 김종갑¹

경상남도산림환경연구원, ¹경상대학교 산림과학부

Decline of Trees by Acid Rain - Especially Cation -

Lee, Chong-Kyu*, Jin-Hyoung Hwang¹ and Jong-Gap Kim¹

Forest Environment Research Institute of Gyeongsang Nam-do, Chinju 660-870, Korea

¹Faculty of Forest Science, Gyeongsang Sang National University, Chinju 660-701, Korea

ABSTRACT: In order to clarify the causal of free decline, which observed around the industrial complex, we analyzed pH, electrical conductivity (EC), and cation in rainfall and throughfall cations concentration in the air in tree areas, suburban and rural area. pH of both rainfall and throughfall was lower in the industrial area than the suburban and rural areas. Among the abiotic and biotic factors analyzed in this study, relations between decline degree of *Pinus thunbergii* and ingredients of rainfall, pH and Ca^{2+} showed negative and positive correlations, respectively.

Key words: Degree of decline, Rainfall, Throughfall

서 론

최근 경남과 울산 지역에서는 산업화, 도시화로 인해 무분별하게 자연환경을 파괴했고 그 결과 환경오염은 심각한 지경에 이르렀으며, 대기오염에 의한 산림 피해가 가시화되고 있다(임업연구원 2003). 지상으로부터 배출된 산성의 1차 오염물질은 대기 중에서 물리·화학적 반응기작을 통해서 2차, 3차의 부산물(산성산화물)로 전환한다. 대기 중의 산성 물질은 에어로졸 상태로 존재하면서 강우시 그 일부가 빗방울에 흡수, 흡착되어 습성 강하물로서 강하한다(Hales 1972).

대기오염에 대한 연구는 최근에 산성 안개 및 구름에 대해서도 연구가 진행되고 있으며(Sheppard *et al.* 1994, 심 1996), 공단 지역의 대기오염이 토양의 산성화에 미치는 영향이 1999, Larssen and Garmichael 2000), 모델식을 이용한 대기오염 물질의 이동(Zunckel *et al.* 2000), 황 화합물의 강하량(Wang *et al.* 2000), 및 인공산성비를 이용한 식물의 생화학적 변화에 관한 연구(Wang *et al.* 2000) 등이 있다.

산성비가 수목에 피해를 일으키는 양상은 엽면 cuticular 층을 파괴시키며(Cape and Fowler 1981, Smith 1990), 기공과 cuticular 층을 통해 침투된 산성물질이 내부 세포에 장해를 주어 물질대사와 생육과정을 저해한다(Guderian 1985). 그리고 수목의 잎에

산성 오염물질이 침착되면 잎 표면의 wax층을 침식시켜, 양이온 중에 Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 용탈을 가속화시키며(Garrec *et al.* 1989), 표피층과 같은 잎의 보호 표면 세포층의 훼손은 수목의 잎, 가지, 줄기에서 양료 용탈을 가속화시키게 된다(Cowling 1982).

이 연구는 경남 지역의 도시 근교 지역(진주), 농촌 지역(함안, 창녕)과 공단 지역(울산 온산, 농소)을 중심으로 산림 내 유입되는 강우에 대한 오염물질의 이온 특성을 분석하고 산성 강하물에 의하여 산림이 쇠퇴해가는 징후를 구명하여 삼림생태계가 파괴되거나 교란되는 현상을 방지하고 그 대책을 수립하기 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

조사지 선정 및 기상개황

현재 대기오염에 노출되어 있는 공단 지역인 울산광역시 온산공단지역의 온산 및 농소 지역과 상대적으로 대기오염에 덜 노출된 도시 근교 지역인 진주시 이반성면, 농촌 지역인 함안 대산면, 창녕 고암면을 조사지로 선정하였으며, 2001년 1월~2003년 12월에 걸쳐 실시되었다.

조사지역의 10년간(1994~2003)의 연평균 기온은 울산이 13.8℃, 진주가 13.1℃, 창녕과 함안의 인접한 마산 기상청이 14.9℃로 거의 비슷하게 나타났으며, 강우량은 울산이 1,275 mm, 진

* Corresponding author; Phone: +82-55-771-6531, e-mail: pro1719@gsnd.net

주가 1,490 mm, 마산이 1,503 mm로 각 지역간의 차이를 나타내었다. 평균 풍속은 울산이 2.2 m/s, 진주가 1.8 m/s, 마산이 2.3 m/s였으며, 평균 상대 습도는 울산이 67.5%, 진주가 71.5%, 마산이 65.2%로서 진주가 가장 높게 나타났다(기상청 2003).

강우의 채취 및 분석

강우의 채취는 산성우 조사법(환경청 1993)에 의하여 수관통과우(throughfall)는 20 L의 폴리에틸렌 용기에 이물질의 유입을 막기 위하여 그물망을 씌워 사용하였으며, 지면으로부터 튀어 오르는 강우를 방지하기 위하여 채취 장치를 수관 아래 지상 60cm의 높이에 철근으로 고정하였다. 임외우는 자동 강우 채취기를 이용하여 수목의 간섭이 없는 조사지 인접 지역의 민가 옥상에서 채취하였다. 조사 시기는 연구기간 동안 월 2회씩 각각 200 mL씩 시료분석용으로 채취하였으며, 채취한 시료는 화학성분의 변화를 최소화하기 위하여 실험용 채취병에 담아 실험실로 옮겨서 4°C 냉장고에 보관하여 분석용으로 이용하였다.

조사지역의 남부지방 주요 분포 우점종인 곰솔(*Pinus thunbergii* Parl)림에서 수관통과우를 채취하였다. EC는 EC meter (CM-14P, TOA, Japan)로 측정하였으며, Cation(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})은 ion chromatography에 의하여 분석하였다. 시료분석은 수용성 membrane filter 0.45 μ m(MFS)로 여과한 다음 분석에 이용하였다.

곰솔의 가시적 쇠퇴도 분석

곰솔의 쇠퇴도 조사는 산림피해의 동태 및 관리 조사 방법(임업연구원 1993)에 따라 잎이 완전히 성숙한 시기인 8월에 조사하였으며, 강우의 채취 조사지에서 인접한 지역의 산림에 쇠퇴도 조사구를 설정한 후, 그 중심점을 기준으로 하여 동서남북의 4 방위로 각각 15m 되는 곳에 조사지점을 설정하여 조사 지점에서 제일 가까이 있는 상층목 5본을 선정하였다.

낙엽율은 곰솔의 수관 전체를 100%로 하고, 잎이 100% 중에서 10% 미만 낙엽된 것을 0 등급, 10%에서 24% 낙엽된 것을 1 등급, 25%에서 59% 낙엽된 것을 2 등급, 60% 이상 낙엽된 것을 3 등급으로 판정하였다.

변색율은 곰솔의 지엽 전체에서 곰솔 고유의 진녹색이 가장 선명하게 나타나지 않고, 연황색, 회백색, 연적색이 나타나는 색조의 비율을 100% 중에서 10% 미만을 0등급, 10%에서 24%를 1 등급, 25%에서 59%를 2 등급, 60% 이상을 3 등급으로 판정하였다.

곰솔의 쇠퇴도(Table 1)는 낙엽율과 변색율의 두 요인에 의하여 판정한 등급을 점수화하여 상호 교차되는 점수에 의거 방위별로 선정된 5본의 곰솔에 대하여 쇠퇴도를 산출하였다.

각 분석 항목 간의 상관분석

임외우, 수관통과우의 강우 성분과 곰솔의 쇠퇴도와의 상관관계를 SAS 통계 프로그램에 의하여 분석하였다.

결과 및 고찰

Table 1. The degree of decline by rate of fallen leaves and change color

Class of fallen leaves	Class of change color			
	0	1	2	3
0	0	0	1	2
1	0	1	2	2
2	1	2	3	3
3	2	3	3	3

양이온의 지역 및 계절별 변화

도시 근교 지역, 농촌 지역과 공단 지역으로 구분하여 임외우(rainfall) 및 수관통과우(throughfall)에 대한 Na^+ 을 분석한 결과는 Fig. 1 및 2와 같다.

임외우에 대한 지역별 강우의 Na^+ 는 도시 근교 지역이 8.2~30.7 mg/L, 공단 지역이 23.9~40.2 mg/L였으며, 농촌 지역에서의 임외우는 12.0~25.3 mg/L로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났으나 큰 차이는 없었다(Fig. 1).

수관통과우(throughfall)에 지역별 강우의 Na^+ 는 도시 근교 지역이 23.9~32.1 mg/L, 공단 지역이 31.5~91.6 mg/L이었으며, 농촌 지역에서의 수관통과우는 21.6~32.4 mg/L으로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났다(Fig. 2).

계절별 변화는 공단 지역과 도시 지역의 겨울과 봄은 대체로 Na^+ 이 높았으나, 여름인 7월과 8월에 낮은 결과였다. 이러한 결과에서 공단 지역의 Na^+ 이 높다는 보고(Shimohara et al. 1993)와

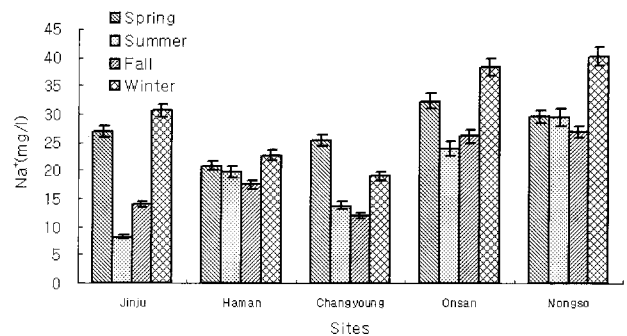


Fig. 1. Changes of Na^+ concentration of rainfall collected at survey areas.

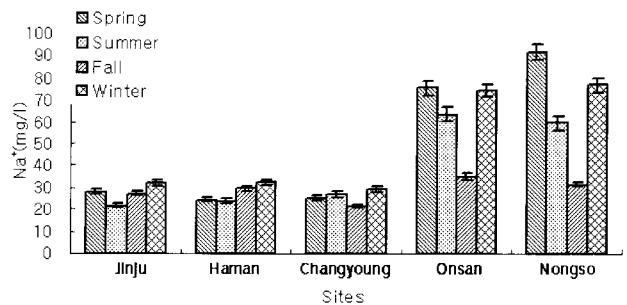


Fig. 2. Changes of Na^+ concentration of throughfall collected at survey areas.

비슷하였고, 공단 지역에서 산성 강하물에 의하여 Na^+ 이 오히려 용탈되어 토양속의 무기영양소로 순환되는 것으로 사료된다.

도시 근교 지역, 농촌 지역과 공단 지역으로 구분하여 임외우(rain fall) 및 수관통과우(throughfall)에 대한 NH_4^+ 을 분석한 결과는 Fig. 3 및 4와 같다.

임외우(rainfall)의 NH_4^+ 는 도시 근교 지역이 2.5~9.2 mg/L, 공단 지역이 8.2~19.7 mg/L이었으며, 농촌 지역은 3.2~10.6 mg/L로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났다(Fig 3). 수관통과우(throughfall)의 NH_4^+ 는 도시 근교 지역이 14.9~26.6 mg/L, 공단 지역(온산, 농소)이 19.0~39.0 mg/L이었으며, 농촌 지역에서의 수관통과우는 13.6~24.7 mg/L으로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났다(Fig. 4).

계절별 변화는 공단 지역과 도시 지역의 겨울과 봄에 대체로 NH_4^+ 이 높았으나, 여름인 7월과 8월에 낮은 결과였다. 7월과 8월에는 집중강우에 의하여 수목에 부착된 산성강하물이 희석된 때문으로 추측할 수 있었으며, 도시 근교 지역, 농촌 지역은 계절별 경향이 뚜렷하게 나타나지 않아 산성 강하물의 영향을 받지 않는 것으로 생각되었다.

공단지역에서의 NH_4^+ 의 과도한 유입은 삼림 내에서 산성 강하물에 의한 토양의 무기영양소 체계에 불균형을 초래하여 수목의 쇠퇴에 관여할 것으로 생각된다.

도시 근교 지역, 농촌 지역과 공단 지역으로 구분하여 임외

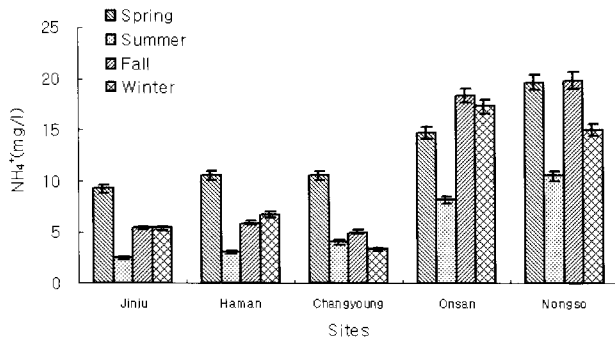


Fig. 3. Changes of NH_4^+ concentration of rainfall collected at survey areas.

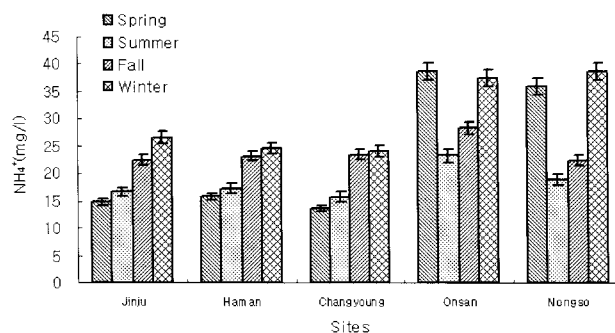


Fig. 4. Changes of NH_4^+ by concentration of throughfall collected at survey areas.

우(rainfall) 및 수관통과우(throughfall)에 대한 K^+ 을 분석한 결과는 Fig. 5 및 6과 같다.

임외우(rainfall)의 K^+ 는 도시 근교 지역이 1.4~6.1 mg/L, 공단 지역이 5.8~8.9 mg/L이었으며, 농촌 지역에서 임외우는 2.2~8.2 mg/L로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 높게 나타났다(Fig. 5). 수관통과우(throughfall)의 K^+ 는 도시 근교 지역이 2.6~13.0 mg/L, 공단 지역이 8.1~18.9 mg/L이었으며, 농촌 지역에서 수관통과우는 1.9~12.4 mg/L으로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타나 계절별 및 지역간의 큰 차이가 없었다(Fig. 6). 도시 근교 지역, 농촌 지역과 공단 지역으로 구분하여 임외우(rainfall) 및 수관통과우(throughfall)에 대한 Mg^{2+} 을 분석한 결과는 Fig. 7 및 8과 같다.

임외우(rainfall)의 Mg^{2+} 는 도시 근교 지역이 1.0~1.8 mg/L, 공단 지역이 2.5~6.7 mg/L이었으며, 농촌 지역에서는 0.7~2.9 mg/L로, 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났다(Fig. 7). 수관통과우(throughfall)의 Mg^{2+} 는 도시 근교 지역이 1.9~2.7 mg/L, 공단 지역이 6.3~17.0 mg/L이었으며, 농촌 지역에서는 1.6~3.1 mg/L으로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났다(Fig. 8). 공단 지역에서 Mg^{2+} 의 농도가 높은 것은 무기염을 용탈시키는 작용이 강산성 물질일수록 활발하며, 수간류와 수관통과우가 수목조직에서 여러 가지 양료들을 세탈시키는 것으로 사료되며, 이것은 산성 강하물에 의하여 잎이나 줄기에 부착되었다가 산성비가 내릴 때 용탈시키는 현상이 크다는 보고(Parker, 1987)와 유사하였다.

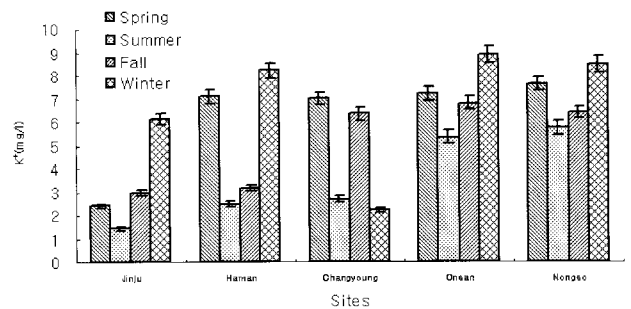


Fig. 5. Changes of K^+ concentration of rainfall collected at survey areas.

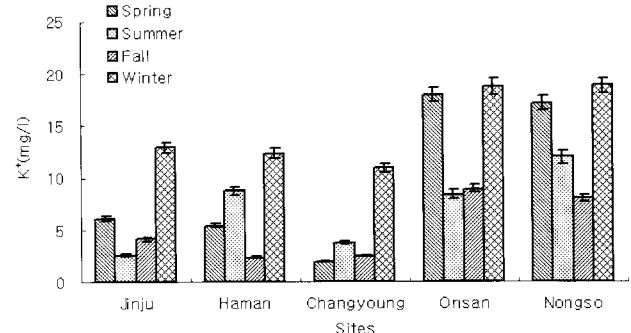


Fig. 6. Changes of K^+ concentration of throughfall collected at survey areas.

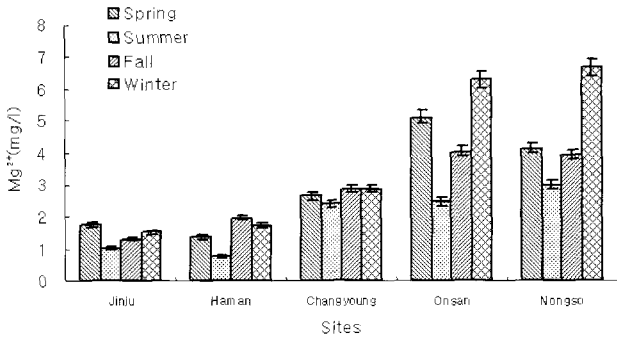


Fig. 7. Changes of Mg²⁺ concentration of rainfall collected at survey areas.

도시 근교 지역, 농촌 지역과 공단 지역으로 구분하여 임의우(rainfall) 및 수관통과우(throughfall)에 대한 Ca²⁺을 분석한 결과는 Fig. 9 및 10과 같다.

임의우(rainfall)의 Ca²⁺는 도시 근교 지역이 1.6~12.7 mg/L, 공단 지역이 8.6~19.7 mg/L이었으며, 농촌 지역에서 임의우는 3.3~17.8 mg/L로, 공단 지역과 도시 근교 지역, 농촌 지역 사이에 큰 차이가 없었다(Fig. 9). 수관통과우(throughfall)의 Ca²⁺는 도시 근교 지역이 11.5~13.8 mg/L, 공단 지역이 15.2~26.5 mg/L이었으며, 농촌 지역에는 8.8~19.1 mg/L으로 공단 지역보다 도시 근교 지역, 농촌 지역에서 낮게 나타났다(Fig. 10).

이러한 결과는 Ca²⁺이 양이온 중에서 가장 농도가 높게 측정되어 산성비에 의한 수목의 수관과 수간으로 세탈이 많은 것

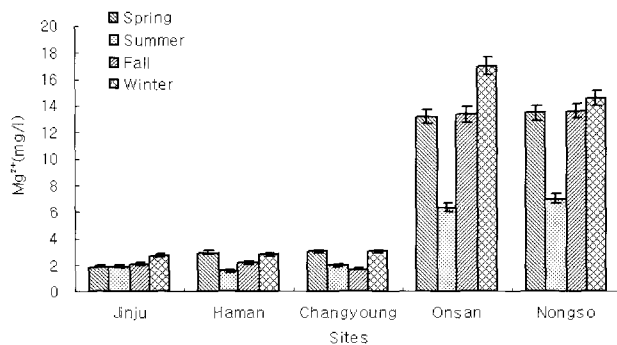


Fig. 8. Changes of Mg²⁺ concentration of throughfall collected at survey areas.

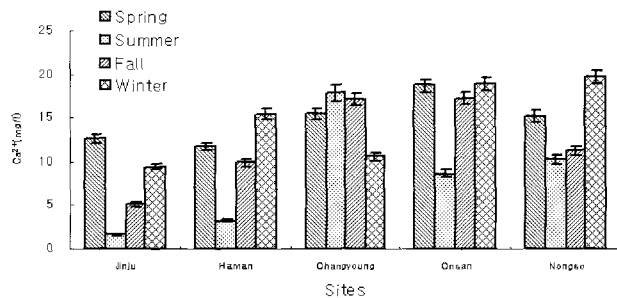


Fig. 9. Changes of Ca²⁺ concentration of rainfall collected at survey areas.

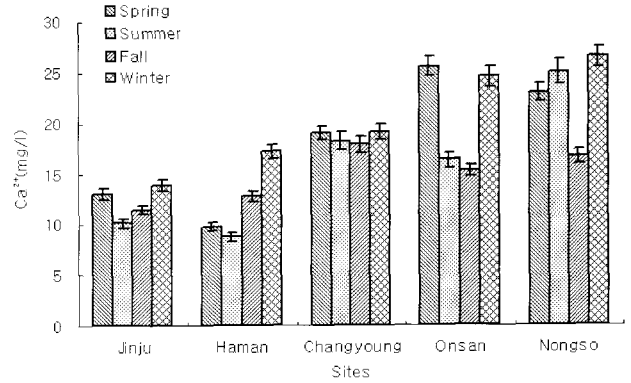


Fig. 10. Changes of Ca²⁺ concentration of throughfall collected at survey areas.

로 생각된다. Hoffman(1980)은 수간류에서 Ca²⁺ 농도가 수관통과우가 임의우보다 높은 것은 엽 세포에서 H⁺과 Ca²⁺, Mg²⁺에 의한 산성비에 의한 이상현상의 원인이라고 보고했으며, 월별 변화는 공단 지역에서 여름인 7월과 8월에 농도가 낮아 계절별의 차이가 있었다. Hiraki 등(1985)은 강우 성분 중 Ca²⁺는 도시 지역과 농촌 지역간에 차이가 커서 대기 오염의 지표로서 유용하다고 하였다. 본 조사에서도 공단 지역과 그 외 지역간의 차이가 있어 이를 뒷받침하고 있다.

곰솔의 가시적 쇠퇴도 분석

곰솔의 쇠퇴도 조사를 낙엽율과 엽변색율의 2가지 요인에 의하여 분석한 결과(Fig. 11)는, 도시 근교 지역인 진주의 쇠퇴도는 1.1, 농촌 지역인 함안은 1.3, 창녕은 1.2로 나타났으며, 공단 지역인 온산의 쇠퇴도는 2.8, 농소는 2.1로서 공단 지역이 도시 근교 지역, 농촌 지역보다 약 2배 정도 높게 조사되어 곰솔의 변색율과 낙엽율이 심각하였고, 해송의 신초 부분이 조기낙엽 및 고사가 되고 있어, 대기오염의 영향으로 곰솔림의 쇠퇴가 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

수목의 쇠퇴도와 pH, EC, 강우 성분 사이의 상관 분석

도시 근교 지역, 농촌 지역과 공단 지역에서 수목의 쇠퇴도와 pH, EC, 강우 성분 사이의 상관 관계를 분석한 결과는 Table 2와 같다.

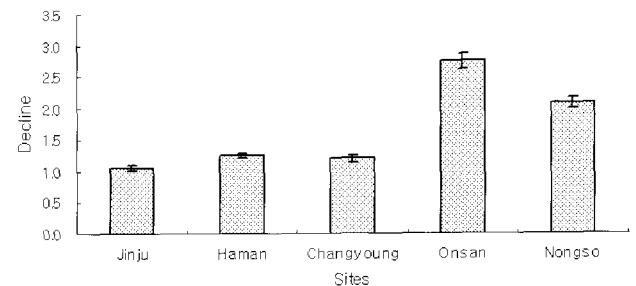


Fig. 11. Degree of decline of Pinus thunbergii at the different survey areas.

Table 2. Correlation coefficient matrix among the analyzed factors at survey areas

Factor	pH	EC	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
pH	1						
EC	0.6517*	1					
Na ⁺	0.6186*	0.2381	1				
NH ₄ ⁺	0.0631	-0.3164	0.4516	1			
K ⁺	0.2109	0.0534	0.7471**	0.3778	1		
Mg ²⁺	0.4379	0.0493	0.2433	0.3729	0.0273	1	
Ca ²⁺	0.7245**	0.3755	0.8336**	0.4671	0.7196	0.2688	1
DOD	-0.8374**	-0.4774	0.6015*	-0.2729	-0.3527	-0.6225*	-0.7901**

Note 1) ** ; $p < 0.01$, * ; $p < 0.05$, - ; NS, 2) DOD : Degree of decline, 3) pH (Data from Korean J. Ecol. 27(6): 347-353. 2004).

해송의 쇠퇴도와 강우의 이온성분의 상관분석 결과 pH와 Mg²⁺ ($r = -0.62$) 또는 Ca²⁺ ($r = -0.79$)는 부의 상관관이 나타났다. 이러한 결과는 공업 지역과 일반지역에서 해송의 쇠퇴도와 강우 이온 상호간에 상관 관계가 있어 해송의 쇠퇴가 진행되고 있다는 결과와 비슷하였으며(이 등 1998), 해송의 쇠퇴에 영향을 주는 요인 중 빗물의 pH와 높은 양의 상관 관계가 있음을 알 수 있었다.

적 요

대기오염 및 산성비의 영향을 받고 있는 공단 지역(온산공단) 과 도시 근교 지역(진주), 농촌 지역(함안)으로 나누어 각 산림지역 내의 임외우와 수관통과우에 대한 강우의 이온 특성과 곰솔림의 쇠퇴와의 관계를 분석하였다. 임외우와 수관통과우의 Ca²⁺ 은 공단 지역이 농촌지역에 비해 각각 6배, 2배 이상 높게 나타났다. 해송의 쇠퇴도와 강우의 양이온 성분간의 상관분석을 실시한 결과, 곰솔의 쇠퇴도와 강우의 pH($r = -0.84, p < 0.01$), Ca²⁺ ($r = -0.80, p < 0.01$) 이온 간에는 유의적인 부의 상관관이 인정되었다.

인용문헌

기상청. 2003. 기상연보 20 p.
 심상규. 1996. 우리나라 산성비 특성과 감시망 현황. 첨단환경기술 4(8): 2-9.
 이충규. 1999. 산성강하물이 산림쇠퇴에 미치는 영향. 학위논문. 103 p.
 이충규, 김종갑, 조현서. 1998. 수목 피해와 산성강하물의 관련성에 관한 연구. 환경지 12(2): 131-137.
 임업연구원. 1993. 대기오염에 의한 산림피해의 동태연구 교육 및 연찬회. pp. 3-10.
 임업연구원, 2003. 대기오염 및 산림생태계 변화 모니터링. 259 p.
 환경청. 1993. 산성우조사법. 일본산성우조사연구회. pp.123-171.
 Cape, J.N. and D. Fowler. 1981. Changes in epicuticular wax of *Pinus sylvestris* exposed to polluted air. *Silva Fennica* 15: 457-458.

Cowling, E.B. 1982. Acid precipitation un historical perspetive. *Environ. Sci. Technol.* 16(2): 10-35.
 Garrec, J., C. Kerfourn and E. Laitat. 1989. Etude des surfaces folieres des arbres deperissants. In air pollution and forest decline(eds. J. B. Bucher and I. Bucherwallin proc. 14th Int.) Meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems. IUFRO P2. 05: 141-146.
 Guderian, R. 1985. Air pollution by photochemical oxidants. *Ecological studies* 52. Springer Verlag, Berlin, Germany. 296 pp.
 Hales, J.M. 1972. Fundamentals of the theory of gas scavenging by rain. *Atom. Environ.* 6: 653-659.
 Hiraki, T., M. Tamaki, H. Mitsugi and H. Watanabe. 1985. Estimation of air pollution by rainwater components. *Bull. of Hyogo Pre. Poll. Stat.* 17: 6-11.
 Hoffman, W.A. 1980. Precipitation acidity. The role of forest canopy in acid exchange. *J. of Environmental Quality.* 9(1): 95-100.
 Larssen T. and G.R. Carmichael. 2000. Acid rain and acidification in China : The importance of base deposition. *Environment Pollution* 110: 89-102.
 Parker, G.G. 1987. Uptake and release of inorganic ions by foliage; Evaluation of dry deposition pollutant damage and forest health with throughfall studies. *Natl. council of paper industry air and stream improv. Tech. Bull., New York.* 532: 64-67.
 Sheppard, L.J., I.D. Leith and J.N. Cape. 1994. Effects of acid mist on mature grafts of Sitka Spruce. Part I. Frost hardiness and foliar nutrient concentrations. *Environ. Poll.* 85: 229-238.
 Shimohara, T., O. Oishi, Y. Migita and S. Horai. 1993. Concentration and deposition of acidic components suspended in the atmosphere(1). *J. Japan Soc. Air Poll.* 28(5): 295-307.
 Smith, W.H. 1990. *Air pollution and foersts.* Springer Verlag New York Inc. New York. pp. 117-290.
 Wang, T.J., L.S. Jin, Z.K. Li and K.S. Lam. 2000. A modeling study on acid rain and recommended dmission control strategies in China. *Atom. Environ.* 34: 4467-4477.
 Zunckel, M., L. Robertson, P.D. Tyson and H. Rodhe. 2000. Modelled transport and deposition of sulphur over Southern Africa. *Atom. Environ.* 34: 2797-2808.

(2005년 7월 15일 접수; 2005년 12월 22일 채택)