

울산공단 지역에서의 대기오염이 삼림에 미치는 영향(I) — 대기오염에 의한 곰솔피해 —

The Effect on the Forest by the Air Pollution around Ulsan Industrial Complex(I) — Injury on Black Pine —

이경재 · 배정오¹⁾ · 고강석¹⁾ · 우종서

서울시립대학교 조경학과
¹⁾ 국립환경연구원 환경보건연구부
(원고접수 : 1990. 3. 2)

Kyong-Jae Lee, Jung-Ou Bae¹⁾, Kang-Suk Koh¹⁾, Jong-Seo Woo

Dept. of Landscape Architecture, Seoul City University

¹⁾ Environmental Health Research Department, National Institute of Environment Research
(Received 2 March 1990)

Abstract

To investigate the damage on the black pine (*Pinus thunbergii*) by the air pollution around Ulsan Industrial Complex, forty-six plots were set up and the effects of air pollution were evaluated with the injured index of black pine. The injured index of black pine showing the degree of air pollution from 1987 to 1988 indicated that the central area of Yeochun-dong and Youngjam-dong were heavily damaged. The effective indicators of black pine damage from air pollution in the order of importance were the color change of one-year-old branch, the ratio of fallen needle of two-year-old branch, the degree of reducing needle, and the degree of growing shoot growth. There was a reliable relationship between the content of SO₃ and F in the air and the injured index of black pine. There was no significant correlation between the injured index of the black pine and the content of chemical properties in soil.

1. 서 론

울산공단은 1969년 공단지정법에 의해 세워진 공단으로 이때부터 현재까지 배출된 오염물질이 식물에 많은 영향을 미쳐왔다. 1981년에 이 지역을 조사한 서 등¹⁾은 교목중 곰솔만이 우점종으로 남았음을, 정 등²⁾과 김 등³⁾은 이러한 곰솔도 피해를 입고 있음을 보고하였다.

대기오염의 피해가 있는 지역에서 식물 지표종을 찾아내어 그 피해정도를 관찰하여 대기오염의 상태를 파악하는 방법은 현재까지 많이 시도되어 왔다⁴⁻⁶⁾. 특히 수목을 지표식물로 이용할 때는 재료가 영년식물이기 때문에 몇년동안 오염물질이 식물체 조직내에 축적되어 피해가 나타나기에 관심이 집중되었다. 그러나 지표종에 대한 피해정도를 조사하여 정량화하는 방법론에 대해서는 많은 이론들이 제기되어 왔

다^{7,8)}.

본 연구는 울산공단지역에 우점종으로 잔존하는 곰솔을 지표종으로 하여 대기오염에 의한 피해정도를 밝히고, 아울러 피해를 입히는 환경요소를 규명하여 곰솔에 대한 지표종 이용가능성 검토에 그 목적을 두었다.

2. 실험방법

2.1 조사지 선정

조사지 선정은 울산환경보전협의회에서 측정한 울산지역대기관련자료를 참고로 하여 현지를 답사한 후 1987년에 그림 1과 같이 30개 지역에 설치하였다. 각 조사지는 곰솔의 자생지로서 곰솔 상층수관의 울폐도가 60% 이상이고, 산화 및 벌채 등의 인위적인 간섭이 최근에 가해지지 않은 임분을 택하였다. 1988년에는 1987년의 연구결과에 의해 곰솔의 피해

가 극심하게 나타난 여천동과 용잠동내의 16개 지점에 조사지를 설정하여 2년간 총 46개 조사지를 연구대상지로 선정·조사하였다. 조사시기는 매년 8월초에 실시되었다.

2.2 곰솔의 피해지수 산정

46개 조사지의 삼림군집구조에서 출현빈도가 가장 높으면서 교목층의 우점종인 곰솔(*Pinus thunbergii* Parl.)을 조사수종으로 선정하여 가시적 피해도를 산출하였다. 각 조사지에서 교목상층을 구성하는 평균흉고직경 부근의 곰솔 10주를 선발하여 국립환경연구원³⁾의 방법을 이용, 잎의 변색정도, 낙엽율, 잎의 위축정도, 신초생장, 지수현상, 정아우세, 수관감소, 전체수세의 8개 항목을 점수화하여 총평점을 산정하였으며, 구체적 측정방법은 다음과 같다.

① 잎의 변색정도: 엽록소에 의한 황색 또는 갈색변화의 정도를 측정하였으며, 당년생잎의 변색은 대기오염에 민감하므로 평점을 높게 주어 극심(4), 심(3), 경(2), 무(0)로 하고, 작년생잎은 낮게 하여 극심(3), 심(2), 경(1), 무(0)로 하였다. 변색의 정도는 전체수관의 잎중 변색비율이 0~25%를 무, 26~50%를 경, 51~75%를 심, 76~100%를 극심으로 판정하였다.

② 낙엽율은

$$\text{낙엽률(\%)} = \frac{\text{미착엽부위 길이(cm)}}{\text{전체가지 길이(cm)}} \times 100$$

으로 계산하여 낙엽율에 따라 81~100%(4), 61~80%(3), 41~60%(2), 21~40%(1), 0~20%(0)로 평점을 주었다.

③ 잎의 위축정도는 전체수관의 잎중 활력이 약하여 밑으로 처진 비율 따라 심한 위축(76~100%), 중간(51~75%), 경미(26~50%), 정상(0~25%)으로 나누고 각각 4, 3, 2, 0의 평점을 산정하였다.

④ 신초생장의 평점은 전체수관의 신초중 생장에 지장을 받고 있는 신초의 비율에 따라 극심한 지장(76~100%), 심(51~75%), 경미(26~50%), 정상(0~25%)으로 나누어 각각 4, 3, 2, 0으로 하였다. 소지(twig)의 상태는 전체수관의 소지중 고사비율에 따라 3/4고사(4), 1/2

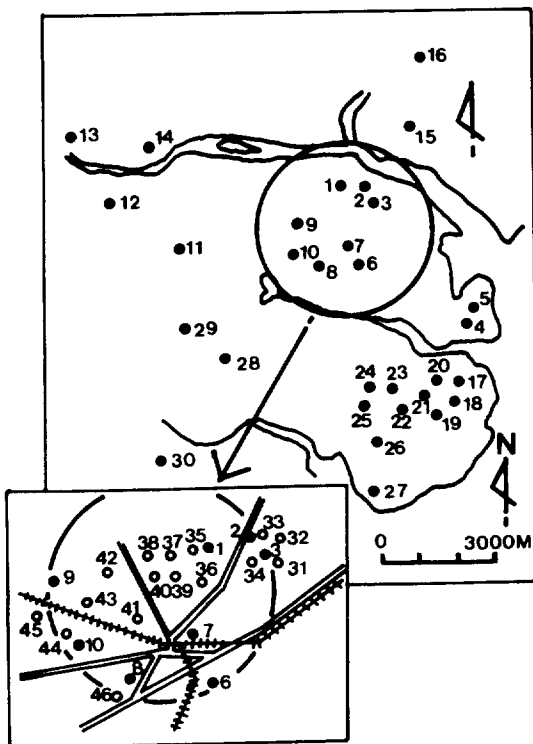


Fig. 1. Location of studied sites around Ulsan Industrial Complex.

평지로서 경사도는 10~15°로서 완경사지이다. 토양수분은 적(適)인 보통상태이며, 낙엽층의 두께는 2cm 내외로서 A₀층의 발달이 미약하다. 각 조사지의 교목상층의 평균수고는 조사지 1, 4, 8, 17, 21, 22의 3~4m를 제외하고는 전체적으로 5~7m이며, 교목상층의 평균울폐도는 대체로 50~70%이었다.

3.2 곰솔의 피해지수

각 조사지에서 선정된 곰솔의 표본목에 대한 10개 항목에 대한 피해지수를 측정된 결과 전체의 값이 1.1~31.0이었다. 1987년도 측정치는 조사지 1~30에서 피해지수가 높은 곳은 여천동 지역인 조사지 1, 2, 3, 6, 8, 9, 장생포동 지역인 조사지 4, 5, 용잠동 지역인 조사지 17, 18, 19, 20로서 이들 조사지에서는 곰솔의 피해가 가시적으로 나타났으며, 조사지 11~16, 조사지 26~30에서는 외형적으로 피해가 거의 감지되지 않았다. 1988년도 측정치인 조사지 31~46은 1987년도 조사지 1~10의 지역의 범위내에 속하여 있으나 1987년도에 비해 1988년도의 피해지수의 증가폭이 현저하였다. 그림 2는 1987년의 조사지 피해지수와 또한 인근에 위치하는 1988년도의 조사지의 값을 비교하였으며, 아울러 1981년도 정 등²⁾이 측정한 자료중 본 조사대상지의 인근에 위치하는 지역의 자료를 함께 비교한 것이다.

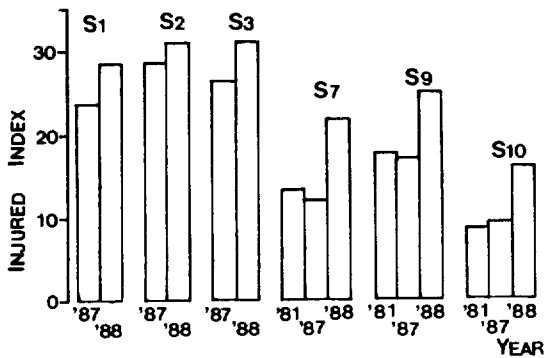


Fig. 2. Comparison of injured index of *Pinus thunbergii* for each site by year.

조사지 1~3에서는 '88년도 값은 '87년도 값보다 2.2~4.8가 증가하였으며, 조사지 7, 9, 10에서는 '87년도 값은 '81년도의 것과 차이가 거의 없었으나 '88년도 값은 '87년도보다 6.5~10.0의 큰 폭으로 증가하였다. 이러한 현상은 조사지 7, 9, 10이 위치하는 지역이 곰솔의 피해가 '87년까지는 중간정도가 되었으나 '88년도에 들어서서는 피해가 심하게 나타났음을 설명해주는 것이다. 곰솔은 대기오염에 대한 내성이 강한 수종이나^{1,11)}, 오염물질의 한계농도까지는 일정기간동안 내성을 갖게 되지만, 그 기간이 지나게 되면 피해현상이 출현하게 되므로¹²⁾, '88년에 피해지수가 '87년에 비해 큰 폭으로 증가된 것으로 판단된다.

그림 3은 울산지역환경보전협의회에서 측정된 대기중의 SO₂, F의 농도를 본 연구자들이 도시화한 것이며, 아울러 본 연구에서 측정된 곰솔피해지수 '81년부터 측정되었는데, '81년의 최고농도치는 1.1mg/100cm²·day이었으나 '83년에는 1.9mg/100cm²·day까지 증가하였고 '86년 이후부터는 감소하여 '88년도에는 최고농도치가 0.7mg/100cm²·day에 이르고 있다. 또한 최고농도곡선으로 둘러싸인 최고농도지역도 '82년 이후부터는 여천동의 핵만 남아 있다가 '87년 이후부터 용잠동까지 확장된 정유공장으로 인하여 여천동의 핵은 여천동, 용잠동, 달동등 3지역으로 분리되었다. F농도는 '84년부터 측정되었는데, '84년도의 최고농도치는 25μg/50cm²·day이었으며, '85년 이후부터 감소하여 '88년도에는 5μg/50cm²·day에 이르며, 여천동에 형성된 최고농도의 원핵은 계속 유지되어 오고 있다. 위의 농도측정지점은 벼와 배나무의 수확감소현상을 측정하기 위한 기초자료인바 본 연구 대상지외의 표본추출지점이 다르기 때문에 대기중의 오염물질농도와 곰솔 피해지수와와의 상관성을 계산할 수는 없었으나, 곰솔의 피해지수를 등농도곡선으로 나타낸 결과 대기중 SO₂, F 등농도곡선과 같이 여천동과 용잠동에 최고농도곡선의 원핵이 위치하였다. 위와 같은 사실로 보아 곰솔은 울산공단지역에서의 대기오염에 대한 지표식물(indicator species)로 사용할 수 있을 것이다. 원래는 대기오염에 대한 지표식물로는 감응성이 민감한

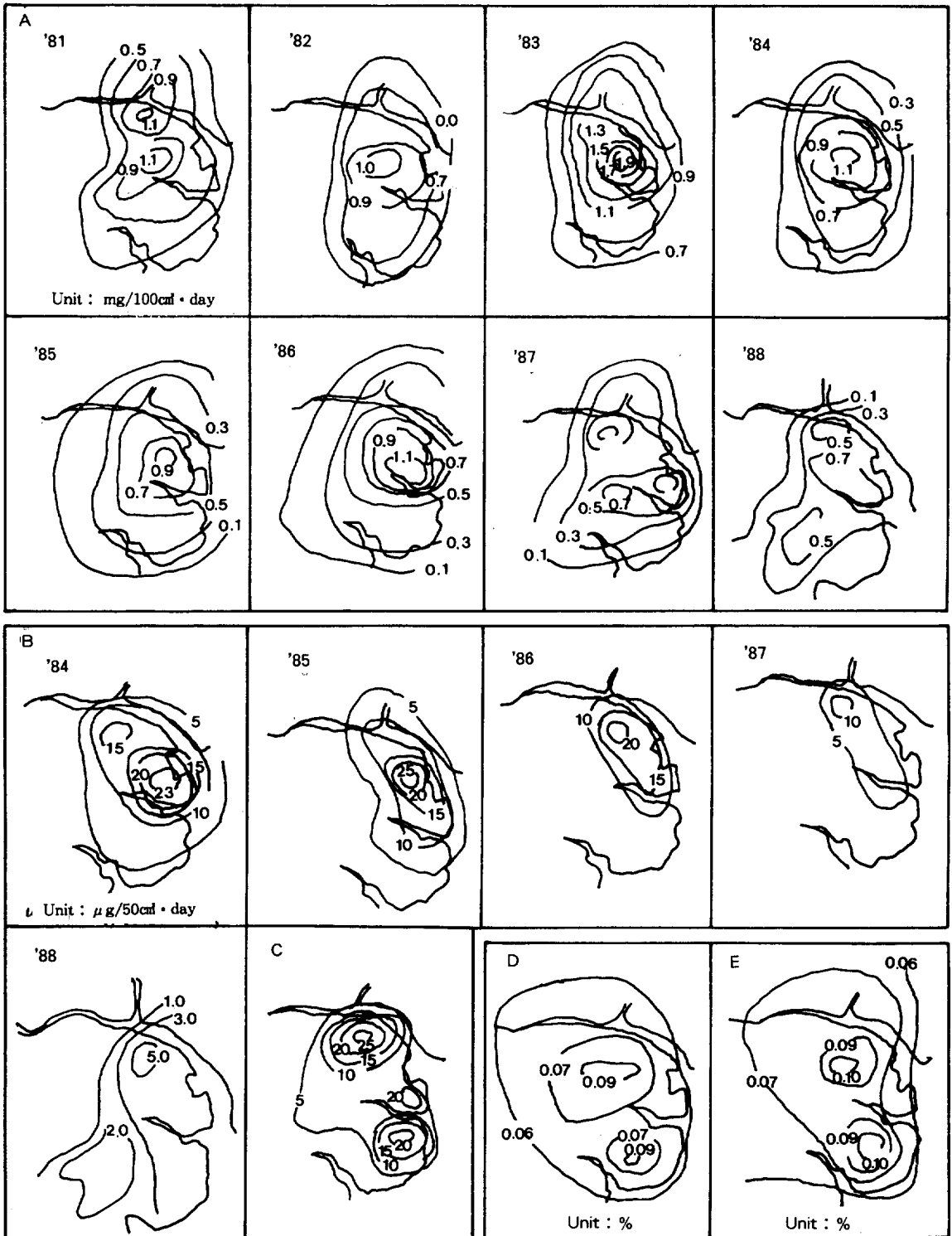


Fig. 3. Concentrations of SO₃(A) and F(B) in air during 1981-1987, injured index of *Pinus thunbergii*(C), concentrations of the water soluble sulfur in one-year-old(D) and two-year-old needles(E) of *P. thunbergii*.

수종이 적당하나⁷⁾, 본 조사지역은 공단이 1970년대초부터 가동하기 시작하여 18년이 지나는데 동안 식생조사결과 민감한 교목이 거의 절종되어¹⁾ 현재 우점종이면서 대기오염에 대한 내성이 강한 곰솔을 지표종으로 택할 수밖에 없었다.

3.3 곰솔잎의 수용성황 함량

조사지별로 선정된 곰솔 표본목중 3주에서 채취한 1, 2년생 솔잎속에 함유된 수용성황을 정량분석한 결과 1년생 침엽에 함유된 농도는 0.046-0.109%, 2년생은 0.051-0.153%이었다. 전반적으로 2년생 솔잎의 수용성황량이 1년생의 그것보다 높았는데, 이는 대기중의 SO₂ 개스가 1년간 더 흡수되어 잎속에 축적되었기 때문이다. 그러나 2년생 및 1년생 솔잎속의 수용성황함량간에는 상관관계가 인정되지 않아(표 2), 곰솔의 개체별의 대기중의 오염물질의 흡수 및 축적의 능력이 다른 것으로 판단되었다. 한편 그림 2와 같이 곰솔잎속의 수용성황

농도를 등농도 곡선화하였는데, 1년생 및 2년생의 솔잎 모두 여천동과 용잠동에서 최고농도치의 핵이 형성되어 대기중의 SO₃ 농도와 관련이 있는 것으로 판단된다. 그러나 대기중의 오염물질을 흡수하게 되면 식물체내의 대사작용의 차이로 분해·축적되는 양이 달라져^{6, 13, 14, 15)} 본 조사에서는 곰솔의 피해지수와 곰솔 솔잎내의 수용성유황함량간에는 상관관계가 인정되지 않았다(표 3).

Table 3. Correlation between environmental factors and injured index of *Pinus thunbergii*.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
X ₂		•								
X ₃		•	•							
X ₄		•	•	++						
X ₅		•	•	•	•					
X ₆		•	•	++	++	•				
X ₇		•	•	•	•	++	•			
X ₈		•	•	•	•	++	•	+		
X ₉		•	•	•	•	•	•	•	++	
X ₁₀		•	•	•	•	•	•	•	+	++
X ₁₁		•	•	•	•	++	•	++	•	•

1. X₁ : S content of soil, X₂ : S content of needles for 1st branch, X₃ : S content of needles for 2nd branch, X₄ : pH of soil, X₅ : Organic matter content of soil, X₆ : Total nitrogen of soil, X₇ : Soluable P₂O₅ of soil, X₈ : Ca content of soil, X₉ : Mg content of soil, X₁₀ : Base saturation of soil, X₁₁ : Total injured index.
2. 2-tailed signifi.; -, + : 5%, --, ++ : 1% level.

Table 2. Correlation between total and each factor for injured index of *Pinus thunbergii*.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
X ₂		++								
X ₃		++	++							
X ₄		++	+	•						
X ₅		++	++	++	++					
X ₆		++	++	++	++	++				
X ₇		++	++	++	++	++	++			
X ₈		++	++	++	•	+	++	+		
X ₉		+	++	++	•	++	++	+	++	
X ₁₀		++	++	++	+	++	++	++	++	+
X ₁₁		++	++	++	++	++	++	++	++	++

1. X₁ : Color of needle for 1st branch, X₂ : Color of needle for 2nd branch, X₃ : Ratio of litter fall for 1st branch, X₄ : Ratio of litter fall for 2nd branch, X₅ : Degree of reducing needle, X₆ : Degree of growing shoot, X₇ : Degree of hanging branch, X₈ : Degree of terminal bud, X₉ : Degree of reducing canopy, X₁₀ : Degree of total tree vigor, X₁₁ : Total injured index.
2. 2-tailed signifi.; -, + : 5%, --, ++ : 1% level.

3.4 곰솔의 피해지수와 환경요인과의 관계

각 조사지에서 채취한 토양시료의 이·화학적 분석을 실시하였는데, 토양산도, 유기물함량의 범위는 각각 4.03-5.10, 0.84-8.16% 이고 그 평균치는 각각 4.46과 3.58%로서 1988년에 조사된 100-200년생의 서어나무가 우점종인 온대중부림의 극상림의 표본이라 생각되는 광릉산림¹⁶⁾의 값인 5.25 및 6.42%보다 매우 낮은 값을 보였다. 전질소함량과 유효인산함량의 범위는 각각 0.137%, 7.32ppm으로서, 광릉삼

림에서의 각각의 측정치인 0.271%, 57.15ppm 보다 매우 낮았다. 치환성 염기인 Ca이온의 함량의 평균치는 울산과 광릉이 각각 0.52m.e./100g, 1.42m.e./100g이었다. 이상의 측정치로 보아 본 조사지의 토양의 성질은 매우 열악함을 알 수 있다.

표 2는 곰솔의 피해지수의 각 조사항목간의 상관관계를 보인 것이다. 1년생 가지와 2년생 가지의 낙엽율간, 2년생가지 낙엽율과 정아우세정도간, 2년생가지 낙엽율과 지수현상간만을 제외하고 각 항목간에는 상관성이 인정되었고, 또한 각 항목과 피해지수합계간에도 고도의 상관성이 인정되었다. 이러한 결과는 김과 이¹⁷⁾가 발표한 여천공단에서의 연구 결과와 일치되었다.

전체피해지수에 대한 각 항목의 기여정도를 계산한바 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = 3.7107 + 1.7110X_1 + 1.6402X_5 + 1.5843X_6 + 1.0469X_7 + 0.8873X_3 \quad (R^2 = 0.91)$$

(단, Y : 전체피해지수, X₁ : 당년솔잎의 변색정도, X₃ : 당년까지 낙엽율, X₅ : 잎의 위축정도, X₆ : 신초생장정도, X₇ : 지수현상정도)

결정계수(R²)는 0.91로서 고도의 유의성이 인정되었으며, 곰솔의 전체피해지수에 기여하는 항목은 당년생 솔잎의 변색정도, 당년까지 낙엽율, 잎의 위축정도, 신초 생장정도의 순이었다.

곰솔에 피해를 주는 환경요소중 토양의 화학적 성질과 곰솔피해지수간의 상관관계를 표 3에 나타냈다. 토양의 화학적 성질중 유효인산의 함량과 곰솔피해지수간의 고도의 상관성이 인정되었는데, 이는 울산공단에 위치하는 비료공장으로부터의 영향일 것으로 판단된다. 이러한 유효인산의 함량을 제외하고는 곰솔의 피해지수에 영향을 미치는 토양의 화학적 성질은 없는 것으로 밝혀져 곰솔에 대한 피해의 기여율은 대기오염원이 매우 높은 것으로 추론되어 울산공단 지역에서 대기오염의 정도를 감지할 수 있는 지표종으로는 곰솔이 적당하다고 판단되었다.

4. 결 론

울산공단에서 대기오염물질에 의하여 곰솔에 나타나는 피해를 조사하기 위하여 1987년 30개소, 1988년에 16개소의 조사지를 선정하였으며, 곰솔의 피해지수 및 환경요인을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 곰솔의 피해지수를 등농도곡선화한 결과 여천동과 용잠동 지역에 최고농도의 원모양의 핵이 조성되었다. 또한 1988년도의 곰솔 피해지수가 1987년보다 증가되었다.

(2) 울산지역환경보전협의회에서 측정된 대기중의 SO₃ 및 F의 등농도곡선의 경향과 본 연구에서 조사된 곰솔의 피해지수, 솔잎내의 수용성함량등농도곡선의 경향이 일치하였다.

(3) 곰솔 솔잎내의 수용성황함량의 분석에서 1년생과 2년생 솔잎간에는 상관성이 인정되지 않았다. 또한 곰솔의 피해지수와 솔잎내의 수용성황함량간에도 상관성이 인정되지 않았다.

(4) 조사지의 토양의 화학적 성질을 분석한 결과 평균치는 pH가 4.46, 유기물 함량 3.58%, 전질소 함량 0.137%, 유효인산 함량 7.32ppm, Ca이온 함량 0.52m.e./100g으로서 토양의 화학적 성질이 매우 열악하였다.

(5) 곰솔의 피해지수의 각 항목간에는 상관성이 인정되었고, 또한 전체 피해지수와 각 항목간에도 상관성이 인정되었다. 곰솔피해지수에 기여하는 항목은 당년생솔잎의 변색정도, 당년까지 낙엽율, 잎의 위축 정도, 신초생장 정도의 순이었다.

(6) 곰솔의 피해지수와 토양의 화학적 성질의 함량간에는 상관성이 인정되지 않아 울산지역에서 곰솔의 피해는 토양인자보다는 대기오염물질이 더 영향을 미치는 것으로 추정된다.

(본 연구는 과학기술처에서 지원한 특정개발사업의 일부임.)

인 용 문 헌

1. 서정현외 7인, (1981), 임해공단 주변의 식생에 관한 연구, 국립환경연구소보, 3, 237

2. 정인명의 9인, (1981), 식물계에 의한 임해
공업단지의 대기오염 평가, 국립환경연구
소보, 3, 271-304.
3. 김재봉외 9인, (1982), 공단지역의 녹지조
성 및 회복에 관한 연구, 국립환경연구소,
pp. 64.
4. Adams, D. F., C. G. Shaw and W. D.
Yerkes, (1966), Relationship of injury
index and fumigation fluoride levels,
Phytopathology, 46 : 587-591.
5. Costonis, A. C., (1971), Effects of ambient
sulfur dioxide and ozone on eastern white
pine in a rural environment,
Phytopathology, 61 : 717-720.
6. Hutchinson, T. C. and M. Haras, (1978), Ef-
fects of acid precipitation on terrestrial
ecosystems, NATO conference series, Ple-
num Press, pp. 654.
7. Legge, A. H. and S. V. Krupa, (1986), Air
pollutants and their effects on the terrestri-
al ecosystem, John Wiley & Sons, Inc., pp.
662.
8. McCleanhen, J. K., (1978), Community
changes in a deciduous forest exposed to
air pollution, *Can. J. For. Res.*, 8 : 432-
438.
9. 작물분석위원회, (1975), 재배작물분석법,
양현당.
10. 임경빈, (1985), 신고조림학, 향문사, pp.
491.
11. Treshow, M., (1975), Environment and
plant response, McGraw-Hill Book Co., 249
-266.
12. Kramer, P.J. and T.T. Kozlowski, (1979),
Physiology of woody plants, Academic
Press, 683-693.
13. Cape, J. N. and P. H. Freer-Smith, (1988),
Early diagnosis of forest decline, Institute
of Terrestrial Ecology, pp. 68.
14. Darrall, N. M. and H. J. Jager, (1984), Bio-
chemical diagnostic tests for the effect of
air pollution on plants. In gaseous air pollu-
tants and plant metabolism, Edited by M. J.
Kozioł and F. R. Whatlev., 333-349,
Butterworths.
15. 임경빈, 김태욱, 이경재, (1979), 환경오염
이 도시수목에 미치는 영향, 서울대학교
농과대학 연습림보고 15 : 103-124.
16. 외 3인, (1990), 광릉삼림의 군집구조에 관
한 연구, 한국임학회지(투고중).
17. 김태욱, 이경재, (1984), 여천공업단지주변
수목피해조사연구, 서울대학교 농과대학
보고서, pp. 80.