

高速道路의 大氣汚染이 소나무科 樹木에 미치는 影響*

權肅杓** · 鄭 勇** · 朴英美** · 李錫來***

(** 延世大學校 環境公害研究所)

(*** 韓國道路公社 造景課長)

Plant Damages Due to Air Pollution in the Highway - on the Pinaceae*

Kwon, Sook Pyo** · Chung, Yong** · Park, Young Mie** · Lee, Seog Rae***

(** *The Institute for Environmental Research, Yonsei University*)

(*** *Korea Highway Corporation*)

= ABSTRACT =

The pinus trees planted by the road in the Seoul - Suwen high - way was surveyed on the damages due to air pollution during April and May in 1984.

The results were as follows;

The concentration of SO₂ was ranged from 0.003 to 0.05ppm, NO_x from 0.03 to 0.1ppm and the amount of dust fall, from 10 to 110ton/km²/month. While the concentrations of gaseous pollutants such as SO₂ and NO_x were not significantly different in the type of road and with in the distance of 20 meters from the road the dust falls were decreased as remoted from the road.

The tissue damages of leaves were determined by the microscopic observation. The higher concentration of dust fall on the leaf, the more severe damage observed in the stomata.

The attached dust of the leaves were ranged from 11 to 75mg/g of leaf, and those were significantly increased as near from road. The sulfur contents of leaves were measured at 0.15g/100g of leaf in the 5 meters located and at 0.064g /100g of leaf in the 20 meters, and the lead contents, 45ug/g of leaf in the 5 meters and 24ug/g in the 15 meters.

The appparent damages of plant were very much corelated to the attached dusts of leaves the sulfur contents and the amount of dust fall, and the multiple

* 1984年 8月 20日 接受된 論文임.

regression analysis between the damages and factors of air pollution were undertaken.

As increment of vehicle in future, the air pollution was predicted and the plant damages were estimated.

序 論

고속도로가 우리나라의 經濟成長과 產業發展에 크게 이바지하고 있음은 周知의 事實이다.

1969年 京釜間 高速道路의 開通이래 해마다 車輛의 高速道路利用度는 매우 增加하고 있다. 즉 開通初年에 서울~水原間의 走行車輛臺數는 年間 98.5萬臺이었으나 10年後인 1979年에는 約 20倍 增加한 2,000萬臺로 增加하였고, 1983年度末에는 約 2,600萬臺로 增加하였다. 이러한 增加趨勢는 계속될 것이라 豫想된다.

車輛增加에 따라 高速道路 周邊의 大氣汚染度도 역시 增加하고 있다. 特히 延世大學校 環境公害研究所가 19807에 報告한 資料¹⁾에 따라서 서울~水原間 高速道路의 中央分離帶 樹木이 大氣汚染物質로 因하여 枯死함으로 中央分離帶를 콘크리트壁으로 施設하게 되었다.

高速道路周邊의 樹木은 주로 造景目的으로 移植된 것으로 이들 樹木들의 環境條件은 좋지 않다고 하겠다. 即, 土壤은 自然의 인 狀態가 아닌 覆土로서 樹木의 生長을 考慮한 土壤成分이 아닌 것이 대부분이며 車輛에서 내뿜는 各種 大氣汚染物質과 車輛들이 진주함으로서 일으키는 強風은 또한 樹木의 生長을 크게 阻害하고 있다.

本 調査研究은 特히 造景目的으로 植栽한 高速道路 周邊의 소나무 科樹木들이 大氣汚染에 依하여 그 生育에 미치는 影響을 알아보기 위함이다.

소나무 科樹木들은 常綠樹로서 落葉樹에 比하여 汚染에 露出되는 期間이 길뿐 아니라 이들은 大氣汚染에 感受性이 큰 것으로 알려져 있다²⁾. 따라서 高速道路 周邊 소나무 科樹木의 生育狀況과 이에 미치는 諸般要因은 調

査, 分析함으로서 이들 樹種들의 植栽의 妥當性과 앞으로 樹木被害를 防止하기 위한 適切한 方案의 提示와 對策을 마련하기 위하여 試圖되었다.

調査研究의 範圍 및 方法

1. 調査對象地域

高速道路의 大氣汚染이 소나무 科樹木에 미치는 影響을 調査하기 爲해 對象으로 택한 地域은 서울에서 수원 인터체인지까지 23.7 km 區間이다.

이 地域을 道路類型別로 7가지로 나누었는데 그 基準과 地形의 斷面圖는 表 1 같다.

그리고 各 地點別 海 高度와 從斷勾配는 아래와 같다.

表 1. 道路類型 區分

類型	內 容	斷面圖
A	從斷勾配(비탈)區間으로 兩側에 切土部가 있는 類型	
A-1	從斷勾配(비탈)區間으로 한쪽만 切土部가 있는 類型	
A-2	從斷勾配(비탈)區間으로 切土部가 없는 類型	
B	水平(평탄)區間으로 兩側에 切土部가 있는 類型	
B-1	水平(평탄)區間으로 한쪽만 切土部가 있는 類型	
B-2	水平(평탄)區間으로 切土部가 없는 類型	
I. C	Interchange	

表 2. 各 調査地點의 海拔高度 및 從斷勾配

道路類型 調査地點	A		A-1		A-2		B	B-1			B-2	I. C	
	상행	하행	상행	하행	하행	하행	상행	상행	하행	상행	하행		
項目	13.2km	24km	23.6km	14.5km	13.0km	7.0km	14.7km	22.5km	16.0km	28.7km	10.1km	20km	수원
海拔高度(m)	124	84	82	81	24	77	69	50	61	59	41	59	59
從斷勾配(%)	45	2.0	1.0	3.0	4.8	3.0	0.93	0.5	-1.1	-0.1	0.67	59	59

※ 調査地點은 서울 Tollgate 를 기점으로 하여 떨어진거리.

2. 調査時間
 試料採取日 氣象은 表 3 과 같다.
 이 時期에 서울 tollgate 에서 調査한 車輛通行量은 表 4 와 같다.

3. 測定項目

1) 大氣汚染度 調査

大氣試料은 各 地點別 道路走行路 끝부터 5m, 10m, 15m 떨어진 地點의 樹木試料를 採取한 同一地點의 空氣를 採取하였고, 降下粉塵은 中央分離帶와 上記 5m, 10m 地點에 deposit gauge 를 15日間 設置하여 採取하였다.

(1) 亞黃酸가스 (SO₂: ppm)

各 測定地點에서의 亞黃酸가스 測定은 環境汚染公定試驗法 (環境廳: 1983)³⁾의 pararosaniline method 에 準하여¹⁾ 試料大氣를 sodium tetrachloromercurate 溶液에 1ℓ/min로 30분간 吸收시켜 pararosaniline 및

formaldehyde 溶液으로 發色시켜 560m μ 에서 吸光度 (spectrophotometer, Hitachi Co 製)를 測定하여 定量하였다.

(2) 窒素酸化物 (Nox: ppm)

各 測定地點에서의 窒素酸化物은 環境汚染公定試驗法³⁾의 Saltzman method 에 準하여 試料大氣를 吸收發色液에 0.4ℓ/min로 30分間 吸收通過시켜 生成된 澄赤色の azo 色素를 550m μ 에서 吸光度를 測定하여 定量하였다.

(3) 降下粉塵 (ton/km²/month)

各測定地點에서 deposit gauge 法에 準하여 降下粉塵을 plastic 桶에 15日間 採取하고 赤外線燈으로 蒸發 乾固하여 粉塵量을 測定하였다⁴⁾.

(4) 降下粉塵中 重金屬 含有量 (Pb: %)

採取한 降下粉塵을 窒素으로 分解시켜 原子吸光度計 (atomic absorption spectrophotometer, Shimadzu 650 製)로 測定하여 定量하였다³⁾.

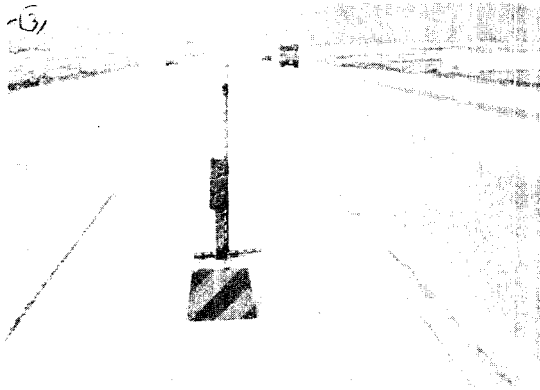
表 3. 試料採取日과 氣象 ('84. 4. 1~4. 16)

시료채취일		4月															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
기상	雲 量	2.8	3.3	7.5	3.3	5.3	4.3	4.5	5.9	9.5	6.8	6.0	4.0	7.8	10.0	9.3	6.8
	氣 溫 (°C)	10.6	6.3	3.2	6.0	11.5	15.2	15.3	15.9	17.7	20.4	17.2	15.6	18.2	14.3	10.2	12.3
	風速 (m/sec)	3.3	5.6	2.3	3.6	2.7	3.7	2.5	2.0	1.8	2.6	2.2	2.5	2.3	3.1	5.1	4.2
시료채취	SO ₂ NOx	←—————→															
	강 하 분 진	←—————→															
	수 목 시 료	←—————→															
	토 양 시 료	←————→															

註: 雲量 0.0~2.4 (맑음), 2.5~7.4 (개임), 7.5~10.0 (흐림)

表 4. 車種別 通行量

구분	일 자	차종별통행량 (대/日)					비 고
		계	1종 (소형차)	2종 (버스)	3종 (10톤트럭이하)	4종 (10톤트럭이상)	
상행	4.2	15,181	6,508	3,440	4,729	504	
	4.6	16,872	7,429	3,416	5,447	580	
	4.10	17,179	7,398	3,332	5,638	811	
	4.15	25,202	15,908	5,059	3,909	326	
하행	4.2	15,645	7,063	3,602	4,472	508	
	4.6	16,247	7,546	3,446	4,698	557	
	4.10	16,904	7,676	3,334	5,256	638	
	4.15	23,306	14,900	4,381	3,608	417	



寫眞 1. Deposit gauge 설치.



寫眞 2. 樹木試料採取 下行 11.5km P. koraiensis (15m, 20m).

表 5. 樹木의 生育狀況 調査

수 종	도로유형 거리	A	A-1	A-2	B	B-1	B-2	I. C
<u>P. koraiensis</u>	5 m	D	D		B	B	C	C
	10 m	C	C	B	B	B	C	B
	15 m	B	B	B	B	A	C	B
	20 m	C		B	B	A	C	A
<u>P. strobus</u>	5 m	B	C	B		B	D	
	10 m	A	C	B	B	B	B	
	15 m	B	B	B	B	B	B	B
	20 m	A	B	B	A		B	B
<u>P. rigida</u>	5 m	D	D	D	C	D		C
	10 m	D	D	D	B	B		C
	15 m	C	C	C	C	B		B
	20 m	A	B	C	C	A		B
<u>P. densiflora</u>	5 m		D	C				
	10 m	C	D	C		B	C	
	15 m		D	C	A	C	C	
	20 m		D				C	
<u>P. banksiana</u>	5 m	B			C	D		D
	10 m	B	C		B	D		C
	15 m	B	C			B		
	20 m	B	C					
<u>Abies holophyla</u>	5 m				D	D	D	
	10 m				D		D	C
	15 m				C		C	
	20 m				C			

※ 測定되지 않은 것은 그 지점에 식생되지 않았기 때문이다.

- A : 生長이 良好한 狀態.
- B : 生長이 약간 不良한 狀態.
- C : 生長이 정지된 不良한 狀態.
- D : 生長이 不良하여 枯死前의 狀態.

2) 樹木被害度 調査

本 調査研究에서 對象으로한 樹種은

잣나무 : *Pinus koraiensis* Sieb et Zucc.

스트로브잣나무 : *Pinus strobus* Linne.

리기다소나무 : *Pinus rigida* Miller.

소나무 : *Pinus densiflora* Sieb et Zucc.

방크스소나무 : *Pinus banksiana* Lamb.

젓나무 : *Abies holophylla* Max.

이들 이들을 類型別 道路로 부터 距離別, 樹種別로 區分하여 한 그루에서 上·中·下·後面으로 各 한가지씩 合計 4가지씩 採取하였다.

(1) 樹木의 生育狀況 調査

調査對象 樹木을 樹高, 樹形, 葉枯死有無등의 外觀上 狀況을 고려해서 다음 表 5와 같이 被害等級을 定하여 觀察하였다.

調査對象 樹木의 대부분은 移植된 것으로 植栽年度는 주로 1973年이고 그의 1977年, 1981年에 植栽한 것이다. 他 植生으로는 아카시아, 개나리, 벚나무, 느티나무, 향나무, 참나무類 등이 있다.

(2) 樹木의 內部組織 觀察

採取해 온 樹木試料가 마르지 않도록 注意하면서 (4℃ 暗室에 保管) 葉을 깨끗이 洗滌한 後 切片을 만들어 광학현미경 (American Optical Co. 製) 下에서 ×100 × 200 배율로 觀察하였다.

觀察部位는 stomata (氣孔), mesophyll (葉肉組織), resin duct (樹脂道), endodermis (內皮) transfusion tissue (轉移組織), vascular bundle (維管束) 등이며

이들 部位를 異物質의 침투정도와 組織損傷程度에 따라 3等級으로 나누었다.

#: 정상적인 狀態

+ : 異物質의 침투가 있고 組織에 약간의 損傷을 보인 狀態

- : 異物質의 침투가 두드러지고 組織의 損傷이 심화된 狀態

(3) 葉 附着粉塵量

採取해 온 試料를 조심스럽게 葉과 가지를 分離시켜 10g씩 秤量한 다음 비이커에 넣고 蒸溜水로 충분히 洗滌한 後 이 液을 filter paper (Toyo. No. 5B) 로 濾紙를 건조시킨 後 重量秤量法에 의해 前後 重量差로 求하였다.

(4) 葉中 硫黃, 납, 카드뮴, 칼슘 含有量 測定

粉塵을 제거한 葉試料를 dry-oven에서 完全히 乾燥한 後 1g 秤量하여 일단 炭化시킨 다음 450℃ 以下의 炭化爐에서 灰化시킨다. 試料가 完全히 白色이 되면 여기에 熱鹽酸 (1:1) 을 加하여 溶解시킨 後 여과하여 탈이온수로 50ml 로 희석시켜 分析 試料로 한다⁵⁾.

葉中 硫黃 含有量은 上記 前處理한 試料 一定量을 取하여 ethylalcohol; glycerin (2:1) 溶液을 加한 後 BaCl₂ 를 넣고 잘 흔들어 방치시킨 다음 420m μ 에서 吸光度를 測定하여 定量하였다.

葉中 납, 카드뮴, 칼슘 含有量은 上記 前處理 試料를 取해 칼슘은 I.C.P (Inductively coupled argon plasma emission spectrometry: Labtest Model V-25) 로 定量했고 납과 카드뮴은 atomic absorption spectrophotometer 로 定量하였다.

表 6. 各 調査地點 高速道路上의 大氣汚染度

도로유형	A		A-1		A-2		B	B-1		B-2	I.C			
	상행	하행	상행	하행	하행	하행	상행	상행	하행					
Sampling 지점 거리 항목	13.2km	24km	23.6km	14.5km	13.0km	7km	14.7km	22.5km	16.0km	28.7km	10.1km	10km	수원	
SO ₂ (ppm)	5m	0.050	N.D	0.033	0.017	0.017	0.008	0.004	0.012	0.046	N.D	0.059	N.D	0.036
	10m	0.043	N.D	0.037	0.001	0.001	0.002	N.D	0.012	0.021	N.D	0.032	N.D	0.115
	15m	0.015	N.D	0.021	0.001	0.001	trace	N.D	0.016	0.014	N.D	0.032	N.D	0.026
	평균	0.036	N.D	0.027	0.006	0.006	0.003	0.001	0.013	0.027	N.D	0.041	N.D	0.059
NOx (ppm)	5m	0.1185	0.040	0.032	0.098	0.077	0.069	0.130	0.100	0.073	0.040	0.054	0.058	0.100
	10m	0.090	0.060	0.057	0.060	0.112	0.098	0.069	0.133	0.034	0.058	0.028	0.063	0.100
	15m	0.109	0.039	0.042	0.102	0.097	0.103	0.045	0.132	0.042	0.033	0.035	0.040	0.053
	평균	0.106	0.046	0.043	0.087	0.095	0.090	0.081	0.122	0.050	0.044	0.039	0.054	0.084

N.D: 불검출.

調查研 結果

1. 大氣汚染 狀況

1) SO₂ 와 NO_x

各 調查地點의 SO₂ 와 NO_x 의 測定 結果는 다음과같 다.

몇몇 예외는 있지만 各 類型別로 道路邊 5m 距離에 서 SO₂ 와 NO_x 의 最大値가 나타났다. 水原인터체인지 에서 높게나온 것은 車輛速度가 減速되면서 多數의 車輛이 減速 또는 滯留하여 排氣濃度가 높아지기 때문으로 推定된다.

車輛에 의한 大氣汚染은 排氣가스에 의한 것이므로 道路의 從斷勾配(비탈)가 排氣量에 영향을 미친다. 따라서 대체로 비탈구간과 道路兩邊에 切土面이 있는 곳 즉 A, A-1, B, B-1이 비교적 汚染度가 높았다. 또한 일출적은 아니나 道路邊으로부터 멀리 떨어질 수록 汚染度는 낮았다.

2) 降下粉塵量과 粉塵中の 납 含有量

調査를 위해 선정한 道路類型中 5개類型 9地點에서 다같이 도로로부터 떨어질 수록 粉塵量은 減少되고 납 함유량은 증가하는 경향을 보이는데 이는 Pb의 飛散이 5m, 10m 範圍의 距離에서는 분진량만큼의 差가 없을 것으로 推測된다.

道路 類型別 汚染程度의 差異에 대한 統計的 有意性은 本 調査에서 판단할 수가 없었다.

2. 樹木被害度 狀況

1) 內部組織 顯微鏡的 觀察

樹木組織損傷의 程度를 3等級으로 分類하여 觀察하였다.

樹種別 組織損傷의 等級을 觀察한 結果는 다음 表 8 ~12와 같다.

갓나무의 경우는 조적을 관찰한 表8과 같이 A나 B等級에서는 損傷받기 쉬운 기공이나 葉肉組織도 비교적 양호하다. B-1(5m) B級은 73年 3월에 植栽된 것으로 規格은 3.5×2.0m 정도이며 外形으로는 비교적 良好한 편이었으나 內部組織은 납이 損傷된 것으로 나타났다. 특히 葉肉組織의 異物침착이나 部分的 파괴는 光合成作用에 影響을 미쳐 productivity를 감소시켜 生育에 被害를 줄 것으로 예상된다. 損傷은 下位葉에서 심하게 나타났다.

表 8에 나타난 結果로 各 部位別 耐性을 비교해 보면 R.D>V.B, Endo>T.T>Tto. >Meso 순이었다.

表 9 스트로브갓나무의 경우에 나타난 2그룹은 모두 81年 3월에 植栽된 것이고 規格은 3.5×2.0, 3.5×1.5m이다. B級은 많은 損傷을 받을 것으로 특히 葉肉組織의 損傷은 앞으로의 生育에 많은 지장이 있을 것이 예상된다.

各 部位別 耐性을 비교해 보면 V.B>R.D>Endo>T.T>Sto >Meso 순으로 갓나무와 유사한 순서이다.

리기다소나무는 表 10과같이 氣孔의 被害가 심하였다. 소나무類의 氣孔은 表皮面 깊이 陷入하여 있으므로

Stomata (Sto)	[<ul style="list-style-type: none"> #: 氣孔에 異物이 거의 없는것 +: 전체 氣孔의 開口가 異物로 막혀 있는것 -: 氣孔의 대부분이 異物로 막혀 있는것
Mesophyll (Meso)	[<ul style="list-style-type: none"> #: 組織狀態가 良好하고 異物이 없는것 +: 組織內 異物이 있는것 -: 組織狀態가 不良하고 異物이 비교적 많은것
Resin duct (R.O.)	[<ul style="list-style-type: none"> #: 樹脂道가 뚜렷이 드러나는것 +: 樹脂道 가장자리 세포에 異物이 없는것 -: 樹脂道가 잘 보이지 않거나 막혀 있는것
Endodermis (Endo.)	[<ul style="list-style-type: none"> #: 內皮가 뚜렷이 보이고 異物이 없는것 +: 內皮細胞에 약간의 이상이 보이고(세포크기가 고르지 않음) 異物이 보이는것 -: 內皮組織의 구별이 어렵고 異物이 많이 있는것
Transfusion Tissue (T.T)	[<ul style="list-style-type: none"> #: 轉移組織이 뚜렷이 보이는것 +: 組織이 약간 형성하고 異物이 있는것 -: 組織이 형성하고 異物이 비교적 많은것
Vascular Bundle (V.B)	[<ul style="list-style-type: none"> #: 組織이 뚜렷이 보이는것 +: 組織이 약간 형성하고 異物이 보이는것 -: 組織이 형성하고 異物이 비교적 많은것

表 7. 降下粉塵量과 粉塵量의 納 含有量 (單位 : 강하분진 : ton/km²/월, 분진중 Pb %)

도로유형 거리	A		A-1		B-1		B-2		수원 I.C (A Ramp)	
	강하분진	분진중 Pb	강하분진	분진중 Pb	강하분진	분진중 Pb	강하분진	분진중 Pb	강하분진	분진중 Pb
중앙분리대			62.380 (0.16)		21.566 (0.6)		48.100 (0.51)			
5 m	111.597 (0.008)		31.158 (0.14)						13.920 (0.45)	
10 m	21.776 (0.42)		24.966 (0.36)						10.923 (1.17)	

表 8. 잣나무 (P. koraiensis S. & Z.) 의 組織損傷

道路類型 (distances)	被害等級	試料區分	Sto.	Meso.	R. D.	Endo.	T. T.	V. B.
A-1 (20m)	A	상	#	+	#	#	#	#
		중	#	#	#	#	#	#
		하	+	+	#	#	#	#
		후	+	+	#	#	#	#
A-1 (15m)	B	상	+	#	#	#	#	#
		중	+	#	#	#	#	#
		하	+	+	#	#	#	#
		후	+	#	#	#	#	#
A-2 (15m)	B	상	+	+	#	#	#	#
		중	+	+	#	#	#	#
		하	#	+	#	#	#	#
		후	#	+	#	#	#	+
B-1 (5m)	B	상	+	-	#	+	+	#
		중	+	-	+	-	+	+
		하	+	-	-	+	+	+
		후	#	+	#	+	+	#
B-2 (5m)	C	상	+	+	#	+	+	+
		중	#	+	#	#	+	+
		하	#	+	-	-	-	-
		후	+	-	+	+	-	-

表 9. 스트로브잣나무 (P. strobus Linne) 의 組織損傷

道路維型 (distances)	被害等級	試料區分	Sto	Meso.	R.D.	Endo.	T. T.	V.B
A (10m)	A	상	+	+	#	#	#	#
		중	+	+	#	#	#	#
		하	+	+	#	#	#	#
		후	#	#	#	#	#	#
A-2 (15m)	B	상	+	-	+	+	+	+
		중	-	-	+	-	-	+
		하	-	-	-	+	-	+
		후	+	-	+	-	-	+

氣孔이 막히기 쉬우며 이는 CO₂ 흡수를 低下시켜 광합성을 방해한다. B-1(20m)는 自生한 것이고 나머지는 73年 3月에 植栽한 것이다. 外形에 의한 等級과 內部組織狀態는 반드시 일치하지는 않았다.

部位別 耐性順位는 Endo > V.B. > T.T. > R.D. > Meso >

Sto. 이었다.

소나무는 81年 3月에 植栽한 것으로 3×2.0m, 3×1.8m 규격이다. 소나무의 氣孔은 크기가 비교적 작은 편이었다(表 11).

部位別 耐性順位는 V.B. > T.T. > R.D. > Endo > Meso >

表 10. 리기다소나무 (*P. rigida* Miller)의 組織損傷

道路類型 (distances)	被害等級	試料區分	Sto.	Meso.	R. D.	Endo.	T.T.	V.B.
B-1 (20m)	A	상	-	+	+	#	#	#
		중	-	+	+	#	#	#
		하 후	-	+	+	#	#	#
B-2 (10m)	C	상	-	+	+	#	+	#
		중	-	+	+	+	+	+
		하 후	-	-	+	+	+	+
B (20)	C	상	-	#	#	#	#	#
		중	+	+	#	#	#	#
		하 후	-	+	+	#	#	#
B-1 (5m)	D	상	+	+	#	#	+	+
		중	-	+	#	#	#	#
		하 후	-	-	+	#	#	#
A-1 (5m)	D	상	+	+	-	#	+	+
		중	-	-	+	#	+	+
		하 후	-	-	-	-	-	-
A-1 (5m)	D	상	+	+	-	#	+	+
		중	-	-	+	#	+	+
		하 후	-	+	+	-	-	-

表 11. 소나무 (*P. densiflora* S. & Z.)의 組織損傷

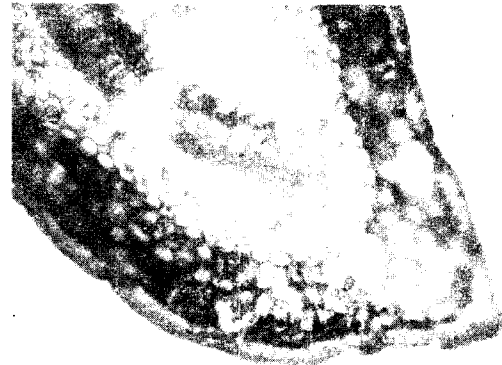
道路類型 (distances)	被害等級	試料區分	Sto.	Meso.	R.D.	Endo.	T.T.	V.B.
A-2 (15m)	A	상	+	#	#	#	#	#
		중	#	+	+	#	#	#
		하	+	+	+	#	#	#
		후	+	#	#	+	+	#
A-1 (5m)	D	상	-	-	#	-	+	+
		중	-	-	+	+	#	#
		하	-	-	+	#	#	#
		후	-	-	#	+	+	#

表 12. 방크스소나무 (*P. banksiana* Lamb) 의 組織損傷

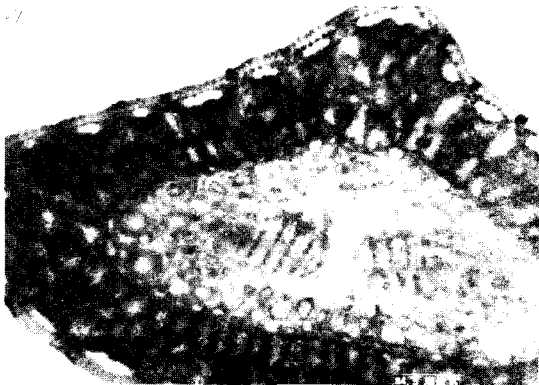
Model (distances)	Grade	구 분	Observation of Micro					
			Sto.	Meso.	R.D.	Endo.	T.T.	V.B
B (5m)	C	상	+	+	#	#	+	#
		중	+	+	#	#	+	#
		하	+	-	+	+	-	+
		후	+	+	+	#	+	#
A-1 (10m)	C	상	+	+	+	+	#	#
		중	+	+	+	+	#	#
		하	-	-	-	+	+	+
		후	+	+	+	+	#	#



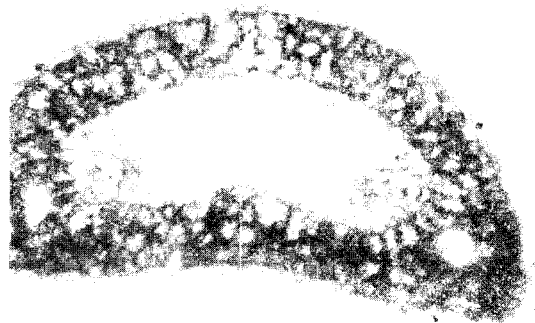
寫眞9-1. 리기다송 (5 m) D級 上行 14 km A-1 中位葉 (×100).



寫眞10. 스트로브잣나무 (15 m) B級 下行 14.9 km A-2. 中位葉 (×200). Mesophyll부분의 Chlorophyll 파괴가 보인다.



寫眞9-2. 리기다송 (5 m) D級, 上行 14 km A-1 後面葉.



寫眞11. 방크스소나무 (5 m) C級, 上行 10.9 km B級 下位葉 (×100) Mesophyll조직이 형성해져있고 전이조직에 異物이 침투해져 있다.

Sto. 이었다.

表 12에서 볼 수 있는 것과 같이 방크스소나무의 下位葉의 損傷이 심하였으며 部位別 耐性順位는 V.B. > Endo > T.T. > R.D. > Sto. > Mseo. 이었다.

이것으로 볼 때 部位別 損傷의 정도는 樹木에 따라 다르며, 대체로 物質의 移動器管의 耐性이 크며 葉表

面이나 表面 가까운 部分의 被害가 심하고 内部로 들어 갈 수록 被害정도는 輕해진다. 樹木의 枯損을 肉眼으로 判別할 정도인 것은 深化된 内部組織의 損傷이 이 때 있었다.

위의 寫眞은 損傷된 内部組織의 현미경 사진이다.

表 13. 葉 附 着 粉 塵 量 (mg/g, Crude weight)

Road type	Distances from the road	장 나 무 (P. koraiensis)			스트로브자나무 (P. strobus)			리기다소나무 (P. rigida)			소 나 무 (P. densiflora)			뱅크소나무 (P. banksiana)			깃 나 무 (Abies holophylla)			평균					
		상	중	하	후	상	중	하	후	상	중	하	후	상	중	하	후	상	중		하	후			
A	5m	8.4	7.9	11.0	5.4	5.8	9.7	6.0	6.4	6.6	8.9	8.8	2.3	2.8	8.7	9.2	4.0					6.99			
	10m	6.4	5.2	4.1	8.4	3.5	3.6	4.2	2.8	5.2	6.3	7.3	8.0	5.5	5.1	6.4	4.4					5.67			
	15m	4.4	2.0	2.6	2.2	4.6	5.0	4.6	4.8	4.2	3.0	3.1	2.6	5.9	7.1	5.8	4.9					4.17			
	20m					3.8	2.8	4.0	2.7	3.8	2.4	1.8	2.5	4.3	4.5	4.4	5.2					3.51			
A-1	5m	10.4	28.3	23.8	14.3	16.4	18.7	27.2	10.0	13.5	39.1	56.6	6.2	25.8	31.3	45.8	7.3					18.73			
	10m	4.5	4.1	11.0	4.6	5.7	16.4	16.8	5.9	22.6	14.5	31.9	10.4	21.2	16.7	16.3	5.7					10.22			
	15m	1.2	2.4	2.5	1.2	1.9	2.2	3.4	5.6	5.0	4.4	5.1	6.3	3.0	3.2	6.5	5.0					4.56			
	20m	3.0	1.7	4.4	2.5	0.6	0.8	1.0	0.5	4.7	5.3	4.3	6.0	7.1	3.9	4.4	7.2					3.76			
A 2	5m					8.1	35.2	24.0	7.2	5.5	3.8	5.9	4.7	17.0	20.7	15.7	11.2					18.6			
	10m					6.4	6.8	13.5	4.6	12.7	16.0	22.9	6.7	6.1	5.5	8.5	2.0					9.65			
	15m	5.0	6.4	8.5	6.4	4.5	8.3	14.2	6.1	7.2	6.5	8.4	6.8									6.99			
	20m	7.3	7.9	7.4	4.4	8.3	9.6	13.6	7.8	6.8	5.5	11.2	6.1									7.93			
B	5m	9.6	17.0	39.0	11.6	2.4	3.6	4.1	2.5	6.8	5.5	11.2	6.1	16.4	26.5	45.2	5.0					15.82			
	10m	10.0	5.2	5.1	6.3	1.8	2.4	3.0	4.4	8.2	8.7	7.9	12.4	7.1	12.1	28.2	5.2					8.32			
	15m		3.9	7.7	7.1	1.4	0.5	1.0	0.8	8.4	9.8	18.3	5.4									8.50			
	20m	6.1	6.3	4.7	4.1	4.2	5.8	7.1	6.0	10.7	14.5	27.4	10.2	6.1	13.4	28.3	6.3					5.87			
B-1	5m	30.1	38.7	48.4	8.1	4.2	2.6	5.8	4.7	3.8	4.4	2.8	3.1	5.3	6.2	6.8	5.1					21.37			
	10m	5.9	4.6	4.4	4.3	3.5	3.7	5.7	5.4	2.7	2.7	3.7	2.3	1.4	2.6	3.1	3.0					6.31			
	15m																					4.63			
	20m	1.8	1.9	3.3	3.9	13.8	11.2	11.2	17.3	23.3	6.6	24.2	7.5	3.2	4.5	1.0						2.80			
B-2	5m	7.6	8.7	6.7	3.5	2.2	3.8	8.2	1.6	2.7	2.7	3.7	2.3									11.66			
	10m																					12.87			
	15m	6.8	11.2	5.5	5.7	6.9	7.9	11.8	6.5	2.5	3.1	4.0	4.4									4.95			
	20m	5.5	7.7	2.1	3.8	4.5	3.3	3.5	4.5	4.5	3.3	4.5	2.9									5.52			
수원 I. C	5m	5.5	5.4	10.8	6.7	4.5	3.3	4.5	2.9	4.3	3.4	2.7	3.7									5.45			
	10m	6.8	7.2	5.8	6.6	5.3	3.4	2.7	3.7	4.3	3.5	3.1	3.1									5.45			
	15m	5.4	5.1	5.6	4.4	2.8	3.3	3.5	4.5													4.48			
	20m					7.22	8.58	10.20	5.70	5.67	7.62	8.84	5.07	7.55	7.97	10.86	5.24	10.2	10.97	12.76	6.0	6.56	9.55	15.60	5.42
평균																						11.52	12.3	17.54	7.44

寫眞 9-1은 Stomata가 Clogging되어 있으며 Mesophyll 부분에도 상당한 異物이 침착되어 있다.

寫眞 9-2는 아치형의 공변세포로 형성된 氣孔은 表皮面 깊이 함입되어 있고 유관속과 전이조직에도 異物이 침투해 있다.

2) 葉 附着粉塵量

葉 附着粉塵量은 葉의 形狀 및 葉面의 物理的, 機械的 特性에 의해 左右된다. 소나무 科樹木은 葉이 대개 針形이고 葉表面이 매끈하므로 附着되는 粉塵量은 비교적 적은 편이다. 서울~수원간 고속도로변 葉 附着粉塵量의 測定結果는 表 13과 같다.

圖 2는 거리별, 도로 유형별 葉 附着粉塵量을 graph로 나타낸 것인데 道路에서 멀리 떨어질 수록 附着粉塵量은 減少하였고 各 道路類型別 差異는 없었다. 葉附着粉塵量은 최소 2.80mg/g에서 최고 21.37mg/g이었다.

粉塵에 의한 樹木의 被害 mechanism을 명확히 밝히는 어렵지만 한 보고에 의하면 粉塵中에 있는 酸性成分(acidity)에 의해 necrotic spotting이 일어나고, 氣孔을 막히게 한다고 알려져 있다²⁾. 또한 粉塵은 葉表面이 받는 光線量을 감소시켜 光合成量을 低下시킨다.

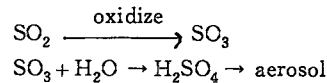
(1) 葉中 硫黃 含有量

各 樹種別 硫黃 含有量은 圖3과 같다. 잣나무, 스트로브잣나무, 소나무는 비교적 硫黃 含有 範圍가 크고 (~0.50g/100g) 리기다, 방크스, 잣나무는 작다 (~0.35g/100g) 특히 방크스는 매우 좁은 範圍(~0.15g/

100g)을 보여 주고 있다. 거리별 樹木의 葉中 硫黃 含有量은 圖 4와 같다.

葉中 硫黃을 0.1g/100g 以上 含有하고 있는 것이 5m 내 植栽된 것에서는 65%, 10m내 植栽된 것에서는 45.5%, 15m 내 植栽된 것에서는 28%, 20m 떨어져 植栽된 것에서는 10%만이 0.1g/100g 以上 含有하고 있었다. 즉 道路에 가까이 植栽되어 있을 수록 葉中 硫黃 농도가 높았다. 이들의 평균치를 비교해 보면 5m내 植栽된 樹木이 0.186g/100g, 20m 떨어져 植栽된 樹木이 0.066g/100g으로 5m에 비해 약 1/3 정도 含有하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 道路類型別 차이는 거의 볼 수 없었다.

SO₂에 의한 樹木의 損傷 mechanism은 SO₂ gas가 葉에 있는 aldehyde나 sugar 등과 반응하여 sulfurous나 surturic acid로 되어 이것이 서서히 방출되므로 이 과정에서 葉세포에 損傷을 일으킨다.



[大氣中 SO₂의 變遷과정]

損傷症候로는 葉 末端部位에 갈색 band가 생기며 스트로브잣나무에서는 'chlorotic dwarf'라고 하는 葉의 disorder에도 관계하는 것으로 알려져 있다(Dochinger & Heck, 1969). SO₂는 또한 植物葉의 氣孔을 자극해 계속 열려 있도록 함으로서 다른 汚染物質이 쉽게 침투할 수 있도록 한다.

(2) 葉의 重金屬(Pb, Ca, Cd) 含有量·葉中 납 含量

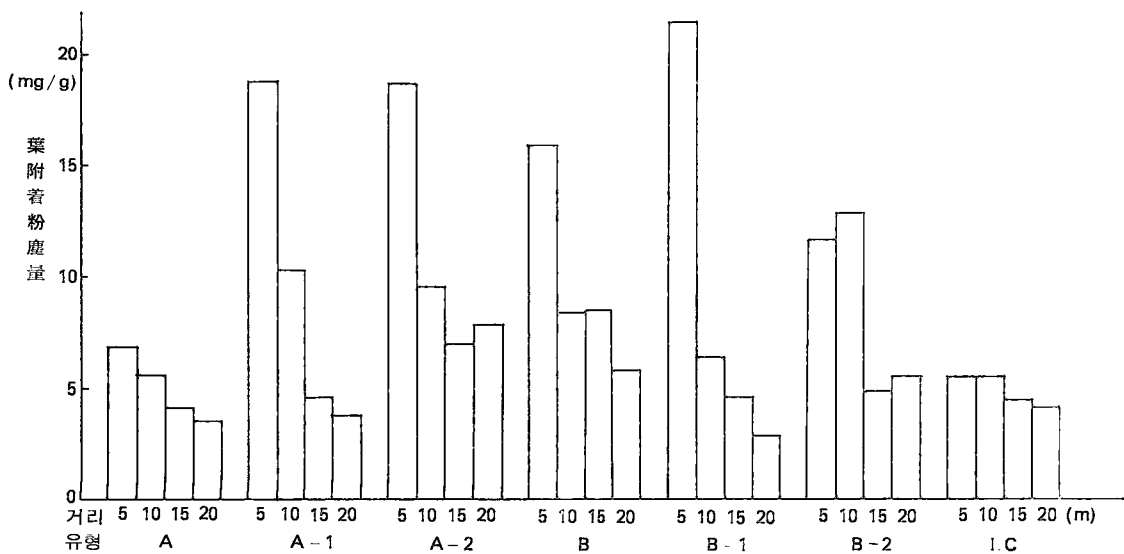


圖 2. 거리별, 道路類型별 葉附着粉塵量

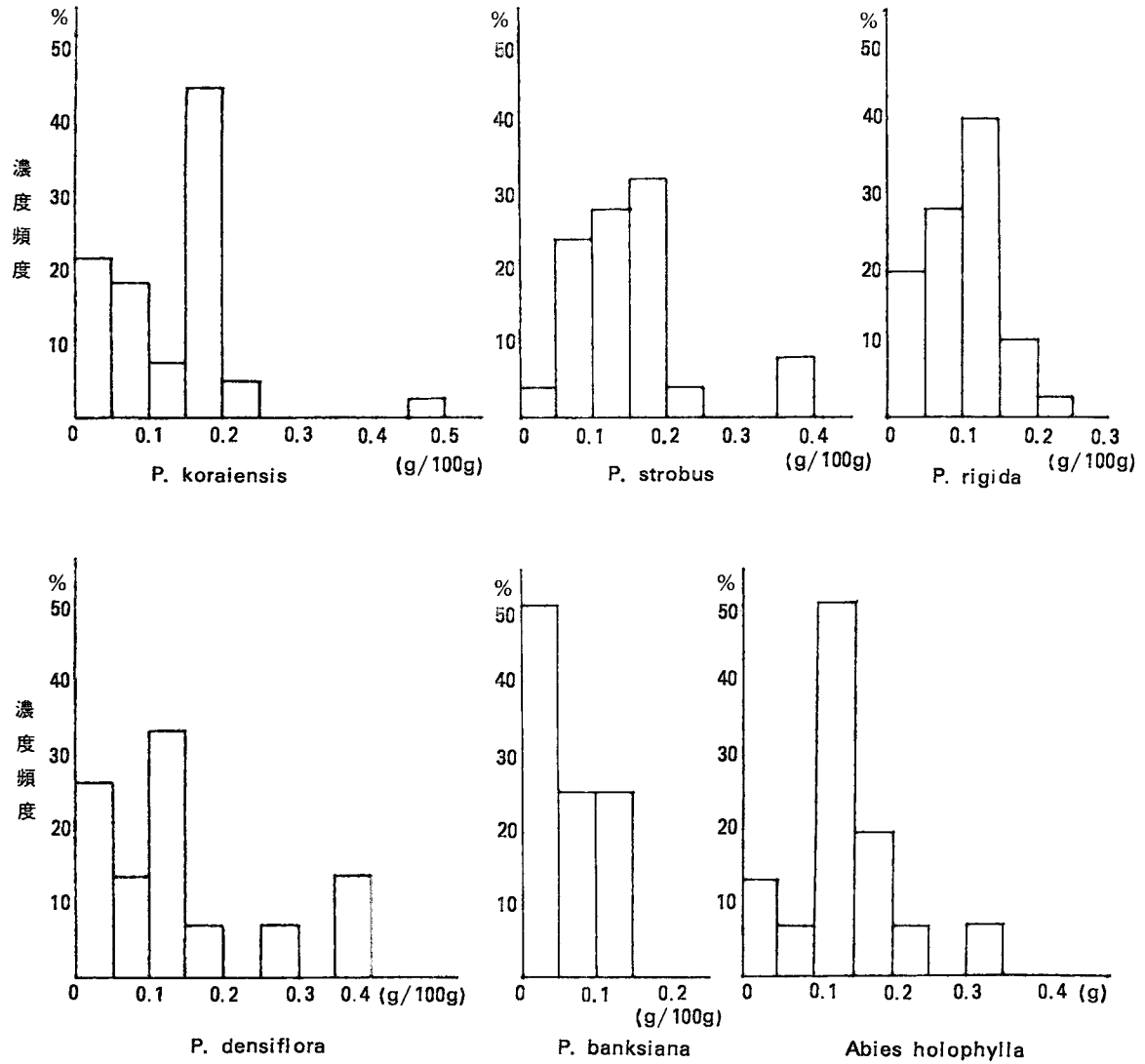


圖 3. 樹種別 葉中 硫黃 含有量.

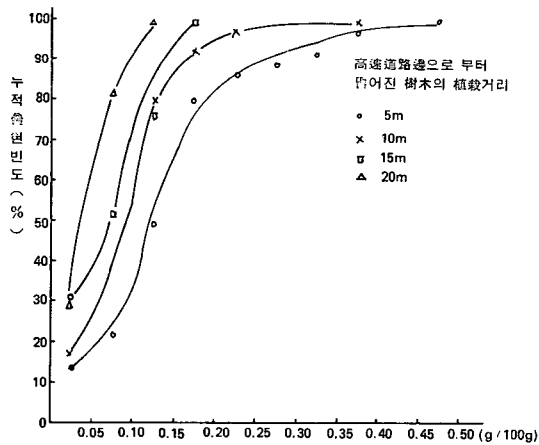


圖 4. 거리별 葉中 硫黃 含有量.

葉中 납 含有量 측정 결과는 다음 圖 5와 같다. 납함량의 範圍를 비교해 보면 리기다와 잣나무는 비교적 含有量範圍가 좁고 (60 $\mu\text{g/g}$) 소나무는 비교적 컸다 (~160 $\mu\text{g/g}$). 평균치는 방크스가 26.21 $\mu\text{g/g}$ 으로 납함량이 방크스의 거의 2배 이상이었다. 그러나 最頻값을 樹木에 관계없이 20~40 $\mu\text{g/g}$ 사이였다.

위의 결과로 葉中 납 含有量은 보통 (50% 이상) 20~40 $\mu\text{g/g}$ 이지만 소나무나 스트로브잣나무에서는 140 $\mu\text{g/g}$ 이상까지 측정됨을 알 수 있다. 거리별 납 含有量을 보면 고농도 (100 $\mu\text{g/g}$ 이상) 로 측정된 樹木은 주로 道路邊 5m 以內 植栽된 것에서 볼 수 있었지만 거리에 따른 현저한 차이는 볼 수 없었다. 도로 유형별 구분에서도 차이를 볼 수 없었다.

납은 gasoline의 Antiknocking agent로 첨가 되어 자동차의 排氣가스 중에서 檢出되는데 이러한 납은 植物에 여러가지 病理現象을 일으키며 植物에서의 病發生率과 납 含有量은 正의 상관관계 (positive-correlation)가 있다는 보고가 있다 (Warren, 1960)⁶⁾.

· 葉中 鉛含量

各 樹種別 葉中 鉛含量은 다음 圖 7과 같다. 葉中 鉛含量은 잣나무의 範圍는 0.1~0.8 (g/100g) 最頻

值 0.65 (g/100g), 스트로브잣나무는 範圍 0.2~0.8 (g/100g) 最頻值 0.4 (g/100g), 리기다 範圍 0.1~0.6 (g/100g) 最頻值 0.25 (g/100g), 소나무 範圍 0.2~0.5 (g/100g) 最頻值 0.35 (g/100g), 잣나무 範圍 0.4~1.0 (g/100g) 最頻值 0.65 (g/100g)로 나타났다.

잣나무는 調査한 소나무 科樹木 중에서 葉中鉛含量이 가장 많은 樹木으로 평균 0.689 (g/100g)으로 다른 수종의 2배 이상이었다. 鉛含量의 거리별, 도로유형별

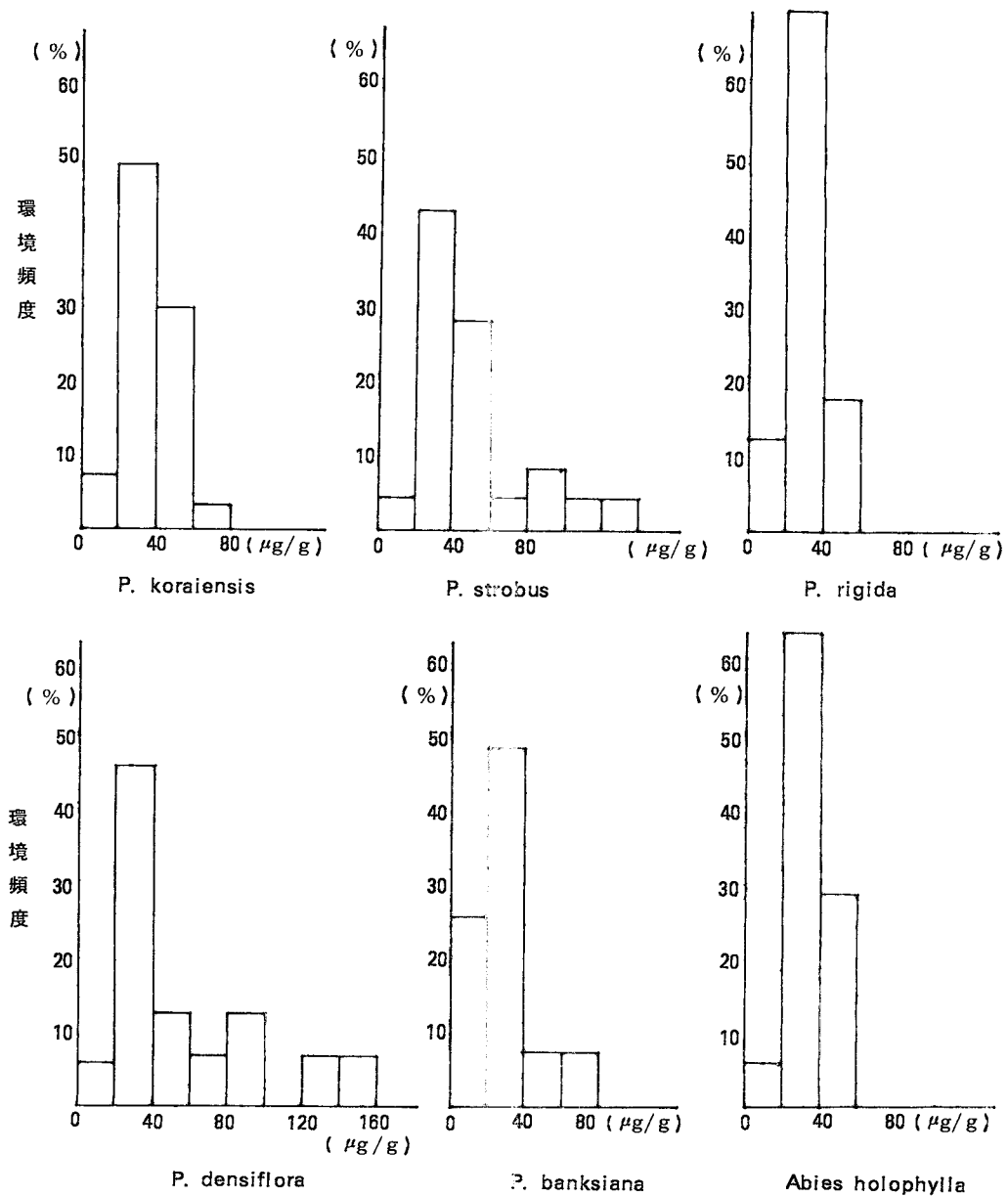


圖 5. 樹種別 Pb 含有量.

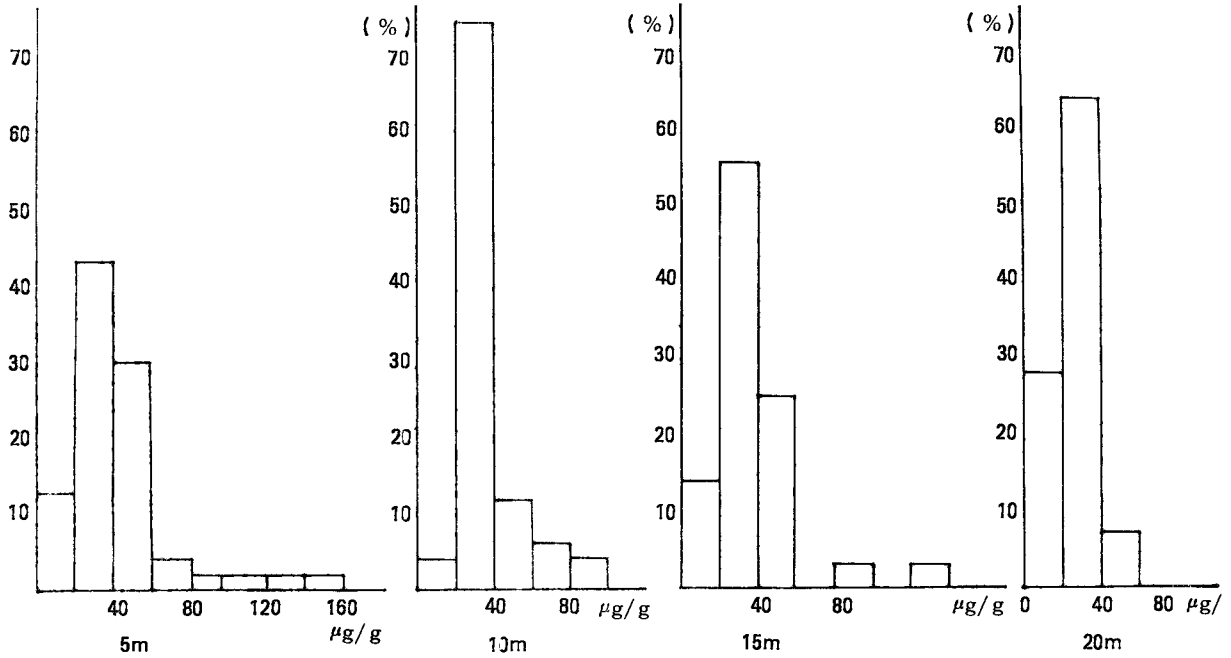


圖 6. 거리별 Pb 含量.

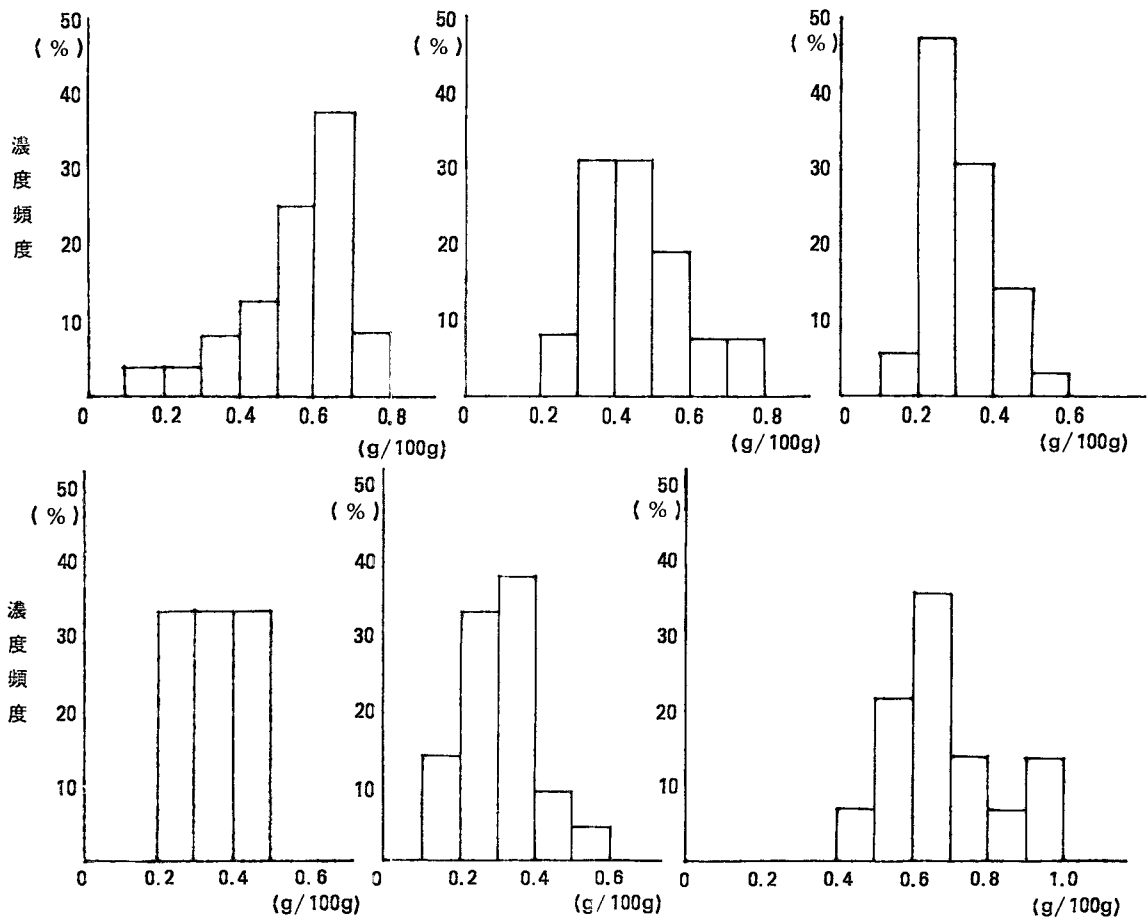


圖 7. 樹種別 Ca 含量.

구분에 의한 조사는 별 차이가 없었다.

· 葉中 카드뮴 함량

葉中 카드뮴 농도는 樹種에 관계없이 비슷한 양상을 보였는데 전체의 약 80%가 0.5~2.0(μg/g)을 함유하고 있으며 거리별, 도로유형별 차이도 볼 수 없었다.

考 察

1. 大氣汚染과 樹木被害와의 相關

高速道路邊에 植栽한 各種 소나무科樹木들의 生育狀態와 大氣汚染度(SO₂, NO_x, 降下粉塵中の 납含有量), 葉의 附着粉塵, 葉中の 硫黃含有量, 葉中の 납 및 카드뮴 含有量과의 關係를 實測值로 부터 分析하여 보면 아래와 같다.

1) 방크스소나무

*P. banksiana*의 生育狀態와 環境條件과의 重回歸 相關을 求하여 보면 다음 表 30과 같다.

MULTIPLE CORRELATION OF DETERMINANT
R-SQUARE=.9984

ADJUSTED R-SQUARE=.9871

F-VALUE=88.6319 D.F=7.1

$Y = 4,837 + 58,980X_1 + 2,953X_2 + 0.037X_3 - 5,845 X_4 - 0.110X_5 - 24,793 X_6 + 0.019 X_7$, 여기서

Y : 수목상태 (1~4: 4 발육양호)

X₁ : 高速道路의 SO₂ 농도 (ppm)

X₂ : 高速道路의 NO_x 농도 (ppm)

X₃ : 高速道路의 降下粉塵 (ton/km²/month)

X₄ : 降下粉塵中の 납 含有量

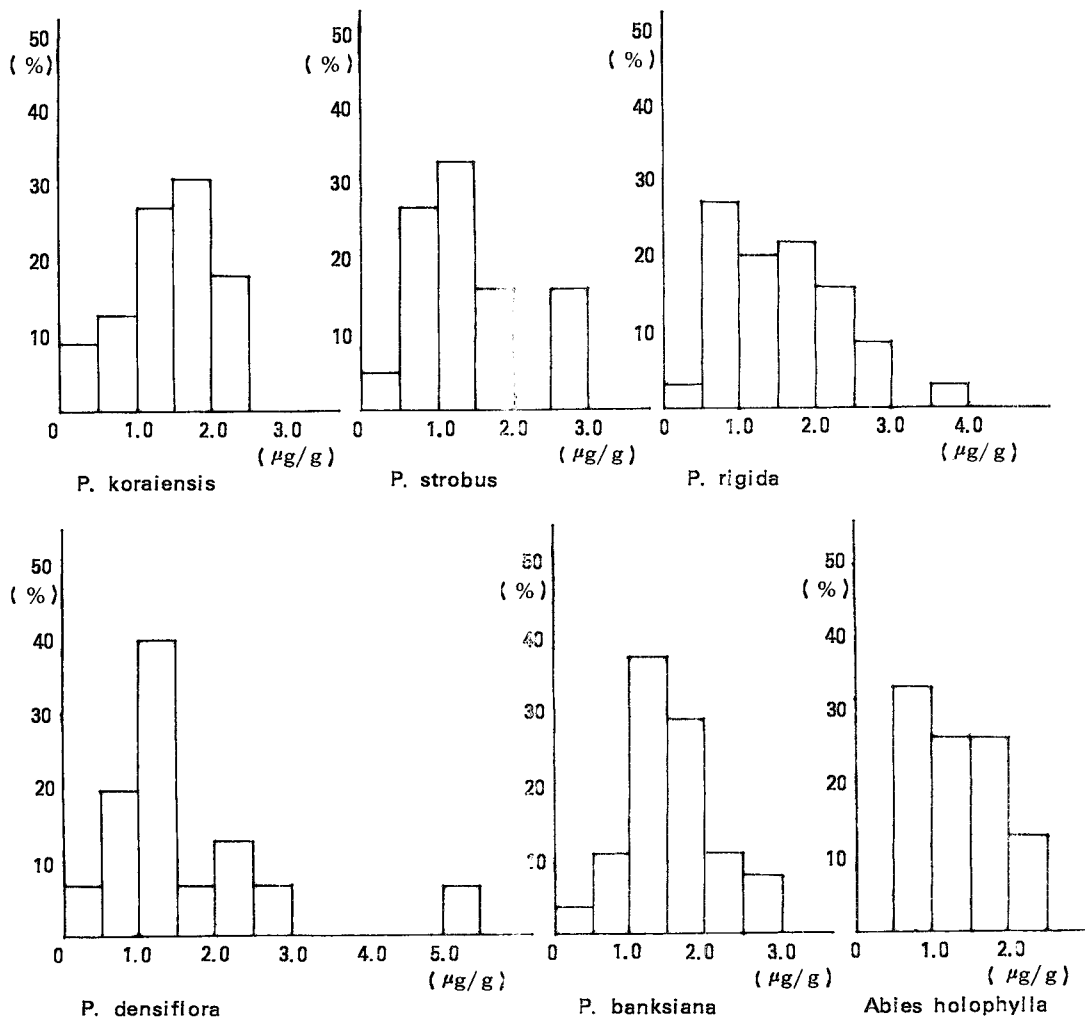


圖 8. 樹種別 葉中 Cd 含量.

表 30. 방크스소나무 生育과 環境條件과의 重回歸 相關

	BETA VALUE	VARIANCE	T-VALUE
	1. 4.8371	.0731	17.8855
X ₁ SO ₂ 농도	2. 58.9804001	101.2542	5.8614
X ₂ NOx 농도	3. 2.9528	7.3916001	1.0861
X ₃ 강하분진	4. .0367	1E-04	3.6099
X ₄ 분진중의 Pb	5. - 5.8449	.3691	- 9.62010001
X ₅ 엽부착분진	6. - .1104	1E-04	-14.7564
X ₆ 엽중 S	7. -24.7928	7.0077	- 9.36570001
X ₇ 엽중 Pb	8. - 0.0186	0	3.3235

X₅: 葉附着粉塵 (g/100g)

X₆: 葉中の S 含有量 (%)

X₇: 葉中の Pb 含有量 (μg/g)

위 式에 高速道路의 大氣汚染 및 葉附着粉塵等의 測定資料를 代入하면 방크스소나무의 現在 生育狀態를

把握할 수 있다. 高速道路上的 방크스소나무의 生育에 크게 미치는 因子는 葉의 附着粉塵, 粉塵中の Pb, 그리고 葉中の S 濃度이다. 그리고 위의 式에 各各의 實測值를 다시 代入하였을 때 誤差는 다음 表 31 과 같다.

2) 리기다소나무

P. rigida 生育과 環境條件과 單純回歸 相關을 보면 다음 表 32 와 같다.

DET. OF XX=9.03412596 E+ 13

STANDARD DEVIATION OF REGRESSION=.08253

즉 大氣中の SO₂ 와 葉中 S (硫黃) 含有量과는 비교적 높은 相關(r=0.543)을 나타내고 있다. 그리고 분진중의 鉛(Pb)의 함유량은 葉中の 硫黃含有量과의 相關(r=0.837), 葉中の 鉛(Pb)의 含有量과 相關(r=0.519) 그리고 葉中の 카드뮴(Cd) 含有量과 相關(r=0.886)이 높았으며, 또한 葉中の 硫黃含有量과 葉中の 鉛含有量과 相關(r=0.653), 그리고 葉中の 카드뮴含有量과 相關(r=0.999)도 높았으며 葉中の 鉛含有量은 葉中の 카드뮴 含有量과의 相關(r=0.528)이 컸다. 그리고 리기다소나무의 生育에 크게 좌우하는 인자는 降下粉塵의 濃度이다.

表 31. 重回歸式의 整合度 檢定 (P. banksiana)

측정치수	實測值	理論值	差異
SIMULATION			
1	3	3.0267	-.0267
2	4	3.9297	.0703
3	2	1.9856	.0144
4	2	1.9665	.0335
5	3	3.0665	-.0665
6	1	.9941	5.9E-03
7	3	3.0138	-.0138
8	1	.9852	.0148
9	2	2.032	-.032

SUM OF ERROR SQUARE=.0129.

表 32. 리기다소나무의 生育과 環境條件과의 單純回歸相關

SIMPLE CORRELATION R									
	Y (生育狀態)	2 (SO ₂ 농도)	3 (NOx 농도)	4 (강하분진)	5 (분진중 Pb)	6 (엽부착분진)	7 (엽중 S)	8 (엽중 Pb)	9 (엽중 Cd)
2	.1448	1							
3	-.2126	.1165							
4	-.5937	.1922	.2588						
5	.2576	.1637	.2076	.1446					
6	-.4945	.0713	0	.1782	.0957				
7	.2289	.5434	.2349	.2147	.8366	.1173			
8	-.2623	.3845	.2672	.126	.5185	3E-03	.6531		
9	.1429	.3461	.2079	.2004	.8857	.112	.9194	.9194	

各種 環境條件 및 汚染狀態에 따른 리기다소나무의 生育과의 重回歸 相關을 보면 다음 表 33과 같다.

MULTIPLE CORRELATION OF DETERMINANT
R-SQUARE=.7684

ADJUSTED R-SQUARE=.5038

F-VALUE=2.9035 D.F=8.7

$$Y = 4.712 + 3.661 X_1 + 3.930 X_2 - 0.024 X_3 + 0.569 X_4 - 0.035 X_5 - 4.784 X_6 - 0.040 X_7 - 0.112 X_8$$

重回歸相關關係에서는 葉附着粉塵의 濃度가 리기다 生育에 가장 높은 影響을 주는 因子이었다.

위의 重回歸相關式에 實測值를 代入하여 그 正合度를 檢證한 結果는 다음 表 34와 같다.

3) 스트로브잣나무

P. strobus의 生育에 미치는 影響에 대한 各 汚染物 質의 單純相關을 分析하여 본 結果는 表 35와 같다.

스트로브잣나무의 生育에 크게 좌우하는 因子는 葉 附着粉塵이다. 葉中の 硫黃含有量과 降下粉塵은 서로

表 33. 리기다소나무의 生育과 環境條件과의 重回歸 相關

		BETA VALUE	VARIANCE	T-VALUE
X ₁	1	4.7122	1.6476	3.6711
X ₂	2	3.6611	9.31040001	1.1999
X ₃	3	3.9296	124.5718	.3521
X ₄	4	-.024	2E-04	-1.7913
X ₅	5	.5692	.1381	1.5321
X ₆	6	-.0347	4E-04	-1.7768
X ₇	7	-4.7839	17.0943	-1.1571
X ₈	8	-.112	.0148	-.9215

높은 相關이었다 (r=0.726).

各 汚染因子들과 스트로브잣나무의 生育條件과 重回歸 相關을 求하여 보면 다음 表 36과 같다.

스트로브잣나무의 生育에 미치는 가장 큰 因子는 降下粉塵과 葉附着粉塵이다. 實際로 測定된 各 因子들을 重回歸式에 代入하였을 때의 그 誤差範圍는 다음 表 37과 같다.

4) 잣나무

P. koraiensis의 高速道路 周邊環境 汚染因子와의 關係를 分析하여 보면 아래와 같다. 즉 各 汚染因子들

表 34. 重回歸式의 整合度 檢正 (P. rigida)

측정회수	실측치	이론치	차이
Simulation			
1	1	.4565	.5435
2	2	2.7161	-.7161
3	4	3.1617	.8383
4	1	.894	.106
5	2	2.6734	-.6734
6	3	3.0992	-.0992
7	1	2.1342	-1.1342
8	2	1.9484	.0516
9	2	1.8272	.1728
10	3	2.7291	.2709
11	1	1.2611	-.2611
12	3	3.2277	-.2277
13	4	2.875	1.125
14	4	3.965	.035

Sum of error square = 4.768.

表 35. 스트로브잣나무의 生育과 環境汚染度와의 單純重回歸相關關係

SIMPLE CORRELATION R								
	Y (生育狀態)	2 (SO ₂)	3 (NO ₂)	4 (강하분진)	5 (분진중 Pb)	6 (엽분진부착)	7 (엽중 S)	8 (엽중 Pd)
2	.2775	1						
3	.5578	2E-04						
4	-.1975	.1068	.0751					
5	-.2554	.035	.3212	.1583				
6	-.4973	.2621	.0279	.0805	.043			
7	-.1233	.0504	.1072	.7256	.5344	.0311		
8	-.1995	.0287	.0295	.4604	.3392	.5122	.4125	

DET. OF XX=17.2933664

STANDARD DEVIATION OF REGRESSION=.06795

表 36. 스트로브잣나무의 生育에 미치는 汚染因子와의 重回歸相關

		Beta value	Variance	T-value
X ₁	1	7.6171	17.4218	1.8249
X ₂	2	33.5669	783.7904	1.199
X ₃	3	- 7.9371	490.7063	- .3583
X ₄	4	.0533	2.9E-03	.9974
X ₅	5	- 10.9432	46.2956	- 1.6083
X ₆	6	.0491	4.5E-03	- .735
X ₇	7	- 23.7445	215.4404	- 1.6177
	8	- 6.6E-03	4E-04	- .3125

Multiple correlation of determinant R-square=.9169
 Adjusted R-square=.335
 F-value=1.5757 D.F=7.1

$$Y = 7.617 + 33.567X_1 + 7.937X_2 + 0.053X_3 - 10.943X_4 - 0.049X_5 - 23.745 X_6 - 0.007 X_7$$

表 37. 重回歸式의 整合度 檢定 (P. strobus)

측정치수	실측치	이론치	차 이
Simulation			
1	3	2.8385	.1615
2	4	3.9569	.0431
3	2	2.0816	- .0816
4	3	2.8562	.1438
5	3	3.1964	- .1964
6	3	2.5273	.4727
7	3	3.339	- .339
8	3	3.0354	- .0354
9	1	1.1686	- .1686

Sum of error square=.4618

과의 單純相關關係는 다음 表 38과 같다.

잣나무의 生育에 가장 影響을 주는 因子는 강하분진과 葉中 鉛成分 含有量이다. 그리고 葉中の 硫黃의 含有量은 葉의 附着粉塵量에 의하여 크게 左右된다 (r=0.744). 이들 汚染因子와의 重回歸分析結果를 보면 다음 表 39와 같다.

이 重回歸式에서 잣나무 生育과 가장 相關性이 높은 因子는 SO₂의 汚染濃度이었다.

5) 소나무

P. densiflora의 高速道路周邊에서의 生育狀態에 左右하는 汚染因子는 單純 및 重回歸分析 結果 各己 葉中の 附着粉塵量과 葉中 硫黃含有量이었다. 강하분진과 葉부착분진과 엽중유황성분과는 매우 높은 相關을 보이고 있다.

表 38. 잣나무 生育과 汚染因子들과의 單純回歸相關

Simple correlation R

	Y (生育狀態)	2 (SO ₂)	3 (NOx)	4 (강하분진)	5 (분진중 Pb)	6 (엽부착분진)	7 (엽중 S)	8 (엽중 Pb)	9 (엽중 Cd)
2	.2138	1							
3	-.1726	7E-03							
4	-.8602	.0445	.1057						
5	.6611	.526	.1793	.423					
6	-.1644	.0374	.5293	.0113	4E-04				
7	-.0587	7E-04	.3895	4.9E-03	1.3E-03	.7442			
8	-.5411	.1891	.0549	.2399	.2703	.4843	.3899		
9	-0	.1324	7.7E-03	7E-03	.0105	.0386	.2724	7.3E-03	

이때 소나무의 生育狀態 Y와 汚染因子와의 重回歸 相關式은 아래와 같다.

$Y = 2.831 - 0.012 X_1 - 0.040 X_2 + 2.33 X_3$ 그리고 이 重回歸式의 整合度의 檢定結果는 다음 表 41과 같다.

表 39. 잣나무 生育에 미치는 汚染因子들의 重回歸 相關

	Beta value	Variance	T-value	
	1	.1088	6.1838	-.0438
X ₁	2	-21.4639	229.1075	-1.418
X ₂	3	25.0279	329.6471	1.3785
X ₃	4	-.0157	1E-04	-1.83
X ₄	5	1.6209	1.6295	1.2698
X ₅	6	-.0215	1.4E-03	-.5834
X ₆	7	9.17970001	33.2659	1.5916
X ₇	8	-.0514	2E-03	-1.1586
X ₈	9	.9548	1.0368	.9378

Multiple correlation of determinant R-square = .9162
 Adjusted R-square = .6928
 F-value = 4.1004 D.F = 8.3

즉 $Y = -0.109 - 21.464 X_1 + 25.028 X_2 - 0.016 X_3 + 1.621 X_4 - 0.022 X_5 + 9.180 X_6 - 0.051 X_7 + 0.955 X_8$

表 40. 소나무의 生育과 각종 汚染因子들과의 單純 또는 重回歸關係

Simple correlation R			
Y (生育狀態)	2 (강하분진)	3 (부착분진)	4 (엽중유황)
2	-.7374	1	
3	-.7706	.6937	
4	-.5222	.4824	.6943

Det. of XX = 107424.721
 Standard deviation of regression = .06828

	Beta value	Variance	T-value
1	2.831	.5201	3.9254
2	.0122	8E-04	-.4265
3	.0396	2E-03	-.8781
4	2.33	18.9353	.5355

Multiple correlation of determinant R-square = .6709

Adjusted R-square = .1772

F-value = 1.3589 D.F = 3.2

6) 잣나무

Abies holophylla가 고속도로周邊에서의 生育하는데 作用하는 각종 汚染因子들과의 單純 또는 重回歸 相關을 구하여 본 結果는 다음 表 42와 같다.

單純重回歸相關에서 강하분진과 葉中 硫黃含有量과는 매우 깊은 相關이 있었다. 重回歸相關에서 잣나무의 生育과 相關성이 높은 것은 강하분진과 葉附着粉塵이었다. 이때 重回歸式은 다음과 같다.

$Y = 1.736 - 0.059 X_1 - 0.002 X_2 + 6.698 X_3$

이 重回歸式의 整合度는 다음 表 43과 같다.

表 41. 소나무 生育狀態의 重回歸 關係式의 整合度 檢定

측정회수	실측치	추계치	차이
Simulation			
1	2	2.3624	-.3624
2	3	2.6429	.3581
3	1	1.1142	-.1142
4	2	1.7294	.2706
5	3	2.5398	.4602
6	2	2.6123	-.6123
Sum of error square = .9325			

表 42. 잣나무 生育과 汚染因子들과의 單純 및 重回歸關係

Simple correlation R			
Y (生育狀態)	2 (강하분진)	3 (부착분진)	4 (엽중 S)
2	-.7684	1	
3	-.4583	1.3E-03	
4	-.3445	1.7416	.145

Det. of XX = 76246.983

Standard deviation of regression = .01298

	Beta value	Variance	T-value
1	1.7362	.037	9.0213
2	-.059	1E-04	-5.7269
3	-2E-03	0	-.6718
4	6.69780001	3.9732	3.3602

Multiple correlation of determinant E-square = .9859

Adjusted R-square = .9438 F-value = 23.3868

D.F = 3.1

表 43. 잣나무生育과 汚染因子와의 重回歸相關式的 整合度 檢定

측정회수	실측치	추계치	차 이
Simulation			
1	1	1.0075	- 7.5E-03
2	1	.997	3E-03
3	1	1.0124	- .0124
4	2	1.9007	.0998
5	2	2.0824	.0824

Sum of error square=.0169

表 44. 高速道路邊 소나무類의 道路로부터 距離別 生育狀態

樹 種	關係式	相關係數 (r)
Pinus strobus	$y = 0.10 X + 1.78$	0.520
Pinus banksiana	$y = 0.18 X + 0.58$	0.875
Pinus densiflora	$y = 0.13 X + 0.76$	0.647
Pinus rigida	$y = 0.14 X + 0.67$	0.779
Pinus koraiensis	$y = 0.14 X + 1.07$	0.757
Abies holophylla	$y = 0.08 X + 0.56$	0.910

※ y = 樹木의 生育狀態 (1. 매우불량 2. 약간불량, 3. 양호 4. 매우양호)
 x = 高速道路로부터 떨어진 距離 (m)

2. 高速道路周邊으로 부터 떨어진 거리와 樹木의 生育狀態

高速道路周邊 각종 소나무類의 生育狀態를 植栽된 距離別로 分析하여 보면 다음 圖 7 과 같다. 이들 소나무들의 距離別 生育狀態의 關係式을 算出하여 보면 다음 表 44 와 같다.

圖 7 및 表 44 에서 보는 바와 같이 스트로브잣나무, 방크스소나무, 잣나무, 소나무, 리기다소나무 및 잣나무는 高速道路에서 떨어진 距離가 멀수록 그 소나무들

의 狀態는 良好하였다. 특히 스트로브잣나무, 방크스소나무, 소나무, 리기다소나무, 잣나무는 대체로 15 m 이상 떨어진 곳에 植栽한 것은 그 生育狀態가 良好하였다. 그러나 대체로 5m 以內에 있는 樹木들은 그 生育狀態가 不良하였다.

한편 잣나무는 道路로 부터 距離가 멀수록 그 狀態의 程度가 좋다고는 하지만 약 20m 거리까지도 그 狀態가 不良하였다. 이것은 잣나무의 移植에 따른 適應,

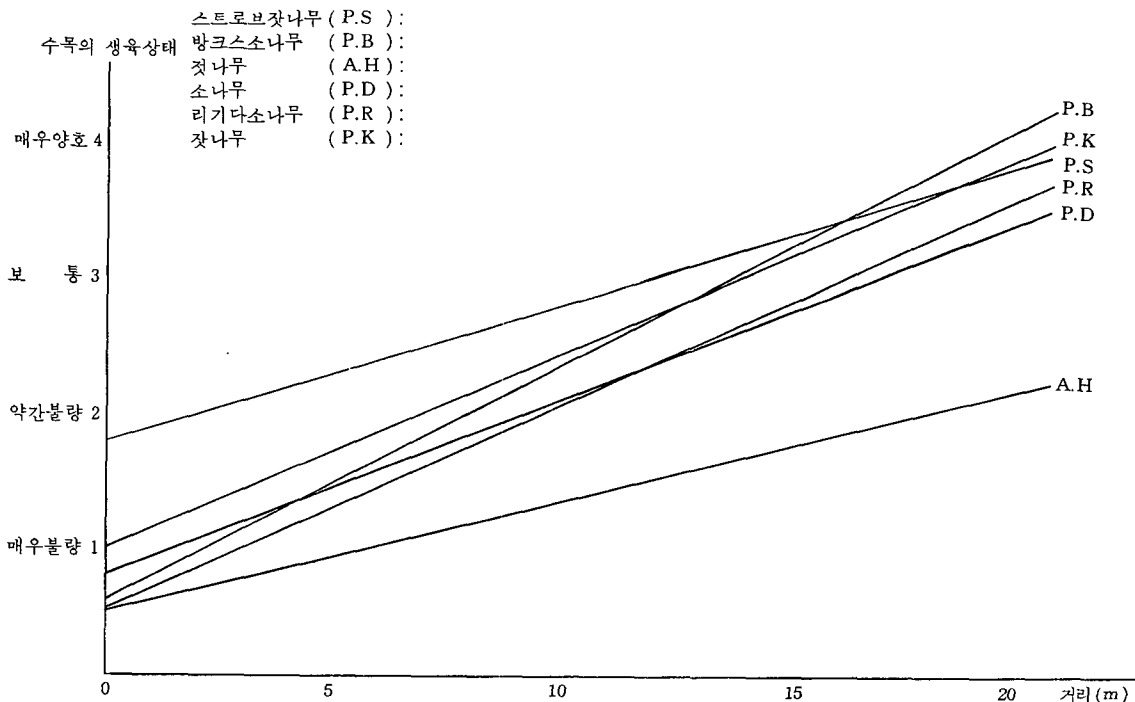


圖 7. 각종 距離別 소나무類들의 高速道路邊으로부터의 生育狀態.

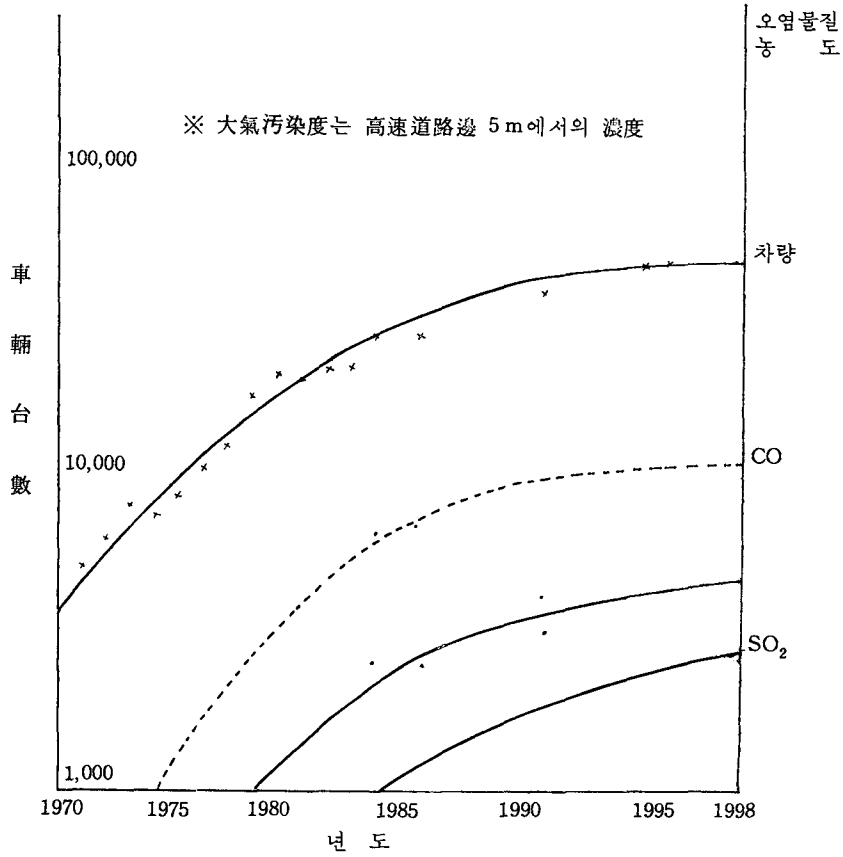


圖 8. 年度別 車輛增加와 大氣汚染度 增加推移.

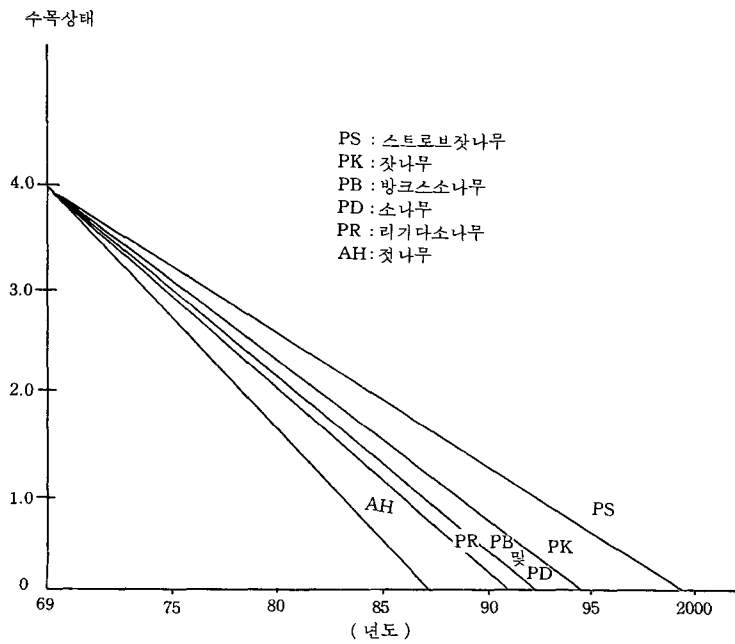
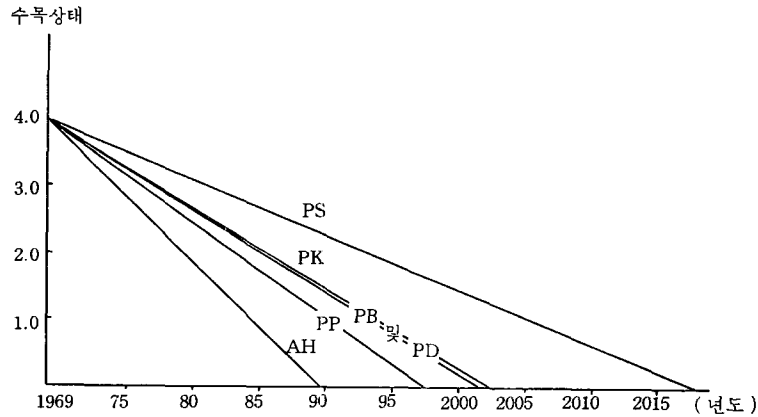


圖 9. 高速道路 5m 地點에서의 소나무類의 豫想壽命.



註) 수목상태 : 4.0 양호, 3.0: 양호, 2.0 약간불량, 1.0 매우불량.

圖 10. 고속도로邊 5m地點에서의 소나무類의豫想壽命.

맞지않는 環境 또는 大氣汚染에 弱한 樹種인 것인지에 대한 것은 보다 조사연구가 되어야 할 것이다.

本 調査結果를 토대로 生育狀態의 良好한 樹木을 比較하면 대체로 스트로브잣나무가 가장 良好하였으며 다음이 방크스소나무, 소나무, 리기다소나무, 잣나무였으며 가장 不良한 것이 잣나무였다.

1) 고속도로邊 소나무 科樹木의 豫想壽命 推定

1969年 高速道路 建設以後 車輛增加에 따라 發生된 大氣汚染物質의 濃度의 增加 趨勢를 보면 대체로 다음 圖 8 과 같다.

大氣汚染度의 增加趨勢와 現在의 樹木狀態를 考慮하여 植樹時의 良好한 狀態로부터 外挿하여 보면 高速道路邊 5m 지점의 스트로브잣나무는 대체로 枯死年度가 2000年, 소나무는 1995年, 방크스소나무와 소나무는 1993年, 리기다소나무는 1991年 그리고 잣나무는 1987年이 될 것이 豫상된다. 또한 高速道路로 부터 10m 떨어진 地點에 있는 樹木의 豫想壽命은 스트로브잣나무는 약 2010年, 잣나무는 2004年 방크스소나무는 2003年 리기다소나무와 소나무는 1999年, 그리고 잣나무는 1990年이 될 것이다. 그러나 不良한 狀態가 되는 것은 방크스소나무가 대체로 2005年 잣나무 등이 1993~95年 사이에 그리고 잣나무는 1984年이 될 것이다.

結 論

高速道路의 開發은 經濟成長과 産業發展에 크게 이바지하고 있음을 周知의 事實이다. 그러나 高速道路 利用車輛에 의한 排氣가스로 因해 高速道路 周邊의 大氣는 汚染되어 있고 이것은 造景樹木에 被害를 입혀 막대한 經濟的 損失을 가져온다. 이러한 事實을 규명하기

위해 本 調査研究은 1984年 3月 30日에서 約 2個月間 서울~水原間 京釜高速道路周邊의 大氣汚染度와 樹木의 被害狀況을 調査分析하여 얻은 結果를 綜合하여 보면 다음과 같다.

1) 高速道路上的 大氣汚染度는 SO₂가 0.003~0.05 ppm으로 크게 汚染되었다고는 볼 수 없으며 NO_x는 0.03~0.1ppm, 降下粉塵量은 10~110t/km²/month 로 큰 差異를 보였다. 大氣汚染度는 道路의 類型別 區分에서는 有意한 差異를 볼 수 없었으며 道路에서 멀어질 수록 汚染度가 줄어든다.

2) 樹木의 內部組織 觀察에서는 비교적 損傷이 적은 部位는 維管束이나 樹脂道등의 物質의 移動通路들이었고 (例, 잣나무, 스트로브잣나무) 가장 損傷이 심한 部位는 葉內組織과 氣孔이었다 (例, 방크스소나무).

3) 葉 附着粉塵量은 11~75 (mg/g)이었고 道路로부터 떨어질 수록 차이가 현저하였고 道路 類型別 有意의 差異는 없었고, 道路에 가까이 植栽되어 있을 수록 附着된 粉塵量은 많았다.

4) 樹木의 硫黃, 칼슘, 납 및 카드뮴 含量은 잣나무에서는 硫黃이 0.02~0.45 (g/100g), 칼슘 0.1~0.7 (g/100g), 납 6.8~68.4 (μg/g), 카드뮴 N.D~1.7 (μg/g)이었다. 스트로브잣나무에서는 硫黃이 0.03~0.3 (g/100g) 납 13.6~130 (μg/g), 카드뮴 N.D~2.9 (μg/g), 이었다. 리기다소나무의 硫黃含量은 0.003~0.2 (g/100g), 칼슘 0.1~0.5 (g/100g), 납 6.8~47.9 (μg/g) 카드뮴 0.4~3.8 (μg/g)이었다. 소나무의 硫黃含量은 0.01~0.39 (g/100g), 칼슘 0.2~0.4 (g/100g), 납 6.8~143.7 (μg/g), 카드뮴 0.4~5.1 (μg/g)이었다. 방크스소나무의 硫黃含量은 0.002~0.13 (g/100g), 칼슘 0.1~0.5 (g/100g), 납 6.8~68.4 (μg/g), 카드뮴 N.D~2.5

($\mu\text{g/g}$)이었다. 잣나무의 硫黃含量은 $0.05\sim 0.38(\text{g}/100\text{g})$, 칼슘 $0.4\sim 0.9(\text{g}/100\text{g})$, 납 $20.5\sim 54.7(\mu\text{g/g})$ 카드뮴 $0.8\sim 2.1(\mu\text{g/g})$ 이었다.

硫黃含量은 道路로부터 5m 以內 植栽된 것은 중간값이 $0.15(\text{g}/100\text{g})$ 이었고, 20m 떨어져 植栽된 것은 중간값이 $0.064(\text{g}/100\text{g})$ 으로 道路에서 떨어진 거리에 따른 含量의 차이를 볼 수 있었다. 칼슘은 樹種에 따른 含量의 差異를 볼 수 있었으며 카드뮴은 樹種別 距離別 有意的 差異가 없었다. 납 含量은 5m에서 약 $45(\mu\text{g/g})$ 이 15m 정도 떨어져면 중간값이 $24(\mu\text{g/g})$ 으로 減少한다.

5) 過去와 같은 趨勢로 高速道路에 車輛이 增加한다고 가정하면 1990년에는 서울~水原間에 약 3,500 萬臺/年 1995년에는 4,400 萬臺/年 그리고 2000년에는 5,200 萬臺/年가 走行할 것이다.

6) 車輛의 增加趨勢로 汚染物排出量은 매우 增加된 것이다. 대체로 現在(1983年)에 대하여 2000년에는 약 2倍의 汚染物質이 車輛들로부터 排出되어 高速道路邊의 大氣汚染을 증가시킬 것이다.

7) 大氣汚染度는 날로 增加할것이 豫想된다. 특히 高速道路 類型에 따라 大氣汚染度를 推計하여 보면 아래와 같다. 중단구배구간으로 양면에 절토비탈면이 있는 道路(A型)에서의 SO_2 濃度는 年間平均 1983年에 0.014ppm , 중단구배구간으로 한쪽면에 절토비탈면이 있는 道路(A-1型)에서는 0.008ppm , 중단구배 구간으로 양면에 절토비탈면이 없는 道路(A-2)에서는 0.04ppm , 平但구간으로 양면에 절토비탈면이 있는 道路(B型)에서는 0.010ppm , 平但구간으로 한쪽에 절토비탈면이 있는 道路(B-1型)에서는 0.006ppm , 平但구간으로 양쪽에 절토비탈면이 없는 道路(B-2型)에서는 0.002ppm , 그리고 Interchange에서는 0.008ppm 이 豫상된다.

앞으로 車輛의 增加로 2000년에는 대체로 1983年度의 汚染度의 2배가 될 것이다. 한편 實測濃度와 差異가 있는 것은 氣候의 變化, 日央車輛 走行量이 推計條件과의 差異에서 비롯된다. 本 推計는 年間 平均值로 算出된 것이다.

8) 實測된 大氣汚染度 및 樹木의 汚染度와 樹木의 生育狀態와는 相關性分析方法에 따라 單純 및 重回歸相關을 求하여 보면 다음과 같다. 대체로 樹木들의 生育狀態는 降下粉塵, 葉附着粉塵 그리고 葉中の 硫黃含有物과 깊은 相關이 있었다.

各 樹木과 各 汚染因子와의 重回歸關係式은 아래와 같다.

$$\text{방크스소나무} : \text{YB} = 4.847 + 58.980 X_1 + 2.953 X_2 +$$

$$0.037 X_3 - 5.84 X_4 - 0.110 X_5 - 24.793 X_6 + 0.019 X_9$$

$$\text{리기다소나무} : \text{YR} = 4.712 + 3.661 X_1 + 3.930 X_2 - 0.024 X_3 + 0.569 X_4 - 0.035 X_5 - 4.784 X_6 - 0.040 X_7 - 0.112 X_8$$

$$\text{스트로브잣나무} : \text{YS} = 7.617 + 33.567 X_1 - 7.937 X_2 + 0.053 X_3 - 10.94 X_4 - 0.049 X_5 - 23.745 X_6 - 0.007 X_7$$

$$\text{잣나무} : \text{YK} = -0.109 - 21.464 X_1 + 25.028 X_2 - 0.016 X_3 + 1.621 X_4 - 0.022 X_5 + 9.180 X_6 - 0.051 X_7 + 0.955 X_8$$

$$\text{소나무} : \text{YD} = 2.831 - 0.012 X_3 - 0.040 X_5 + 2.33 X_7$$

$$\text{잣나무} : \text{YA} = 1.736 - 0.059 X_3 - 0.002 X_5 + 6.698 X_6$$

여기서 Y: 소나무류의 生育狀態 (1 不良, 2 약간 不良, 3 良好, 4 매우 良好)

X_1 : 高速道路에서의 SO_2 汚染度 (ppm)

X_2 : 高速道路에서의 NO_x 汚染度 (ppm)

X_3 : 高速道路에서의 降下粉塵 (ton/km²/month)

X_4 : 粉塵中の Pb 量 (%)

X_5 : 葉附着粉塵 (g/100g)

X_6 : 葉中 S 含量 (%)

X_7 : 葉中 Pb 含有量 ($\mu\text{g/g}$)

X_8 : 葉中 Cd 含有量 ($\mu\text{g/g}$)

9) 高速道路로부터 떨어진 거리에 따라 樹木의 生育狀態는 種類別 距離別로 差異가 있었다. 대체로 道路邊으로부터 5m, 10m, 15m 및 20m로 멀리 떨어져 植栽하였을 경우가 良好하였다. 樹種中에는 스트로브잣나무가 가장 良好한 生育狀態를 나타내었고 잣나무가 가장 低調한 發育狀態를 보였다.

高速道路로부터 떨어진 거리에 따른 各 樹種別 生育狀態와의 相關關係數는

$$\text{YS} = 0.01 X + 1.78 (r = 0.520)$$

$$\text{YB} = 0.18 X + 0.58 (r = 0.875)$$

$$\text{YD} = 0.13 X + 0.76 (r = 0.647)$$

$$\text{YR} = 0.14 X + 0.67 (r = 0.779)$$

$$\text{YK} = 0.14 X + 1.07 (r = 0.759)$$

$$\text{YA} = 0.08 X + 0.56 (r = 0.910)$$

여기서 X는 거리 (m)

10) 高速道路邊 소나무科 樹木의 豫想壽命 앞으로 大氣汚染度가 계속 增加된다고 가정하면 高速道路邊 소나무科 樹木은 약 2000년에 가면 대부분 枯死할 것으로 豫測된다.

11) 以上の 研究結果에 따라 앞으로 高速道路 周邊에서의 大氣汚染物質 排出源 및 排出源單位調査, 大氣汚染防止對策의 研究, 樹木被害의 維續的 調査研究, 樹木管理에 關한 調査研究, 大氣汚染擴散影響의 調査研究 및 事業環境影響評價實施가 보다 徹底히 이루어져야 할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- 1) 延世大學校 環境公害研究所: “高速道路의 大氣汚染이 樹木成長에 미치는 影響” 1980. 7. 道路公社.
- 2) Walter W. Heck and C. Stafford Brandt: “Effects on Vegetation, Native, Corp, Forests”, Air Pollution II, pp. 157~229, Academi Press edited by Arthur C. Stern. 1977.
- 3) 環境廳: “環境汚染公定試驗法”, 1983.
- 4) 保健社會部: “公害公定試驗法”, 1970.
- 5) Tae Wook Kim: “Influences of Air Pullution on the Growth of Environmental Tree Species - Particularly with reference to SO₂ Bulleton of the Seoul National Univercity Forests” pp. 46 - 76, 1975.
- 6) 車鍾煥: “環境汚染과 植物”, p. 62 現代科學新書, 38, 1975.