

造景樹木의 大氣汚染物質에 대한 防禦機能(I)¹

— SOD 活性을 중심으로 —

金明姬² · 李壽煜³

Resistance Functions of Woody Landscape Plants to Air Pollutants(I)¹

— SOD Activity —

Myung Hee Kim² and Soo Wook Lee³

要 約

造景樹木들의 大氣汚染物質들에 대한 感受性 및 抵抗性을 규명하기 위해서 野外調査와 室內實驗을 통하여 葉內 硫黃含量과 superoxide dismutase(SOD) 含量을 測定 分析하였다. 全 樹種에서 葉內 硫黃含量과 SOD 活性間에 正의 相關을 나타내었다. 植物體가 汚染物質에 대하여 自體防禦를 위하여 初期에는 酵素活性을 增大시키지만, 植物體의 收容限界를 넘을 때는 오히려 酵素의 失活과 함께 植物體가 被害를 받았다. 闊葉樹는 大氣汚染物質의 淨化能力이 큰 반면 針葉樹는 汚染物質에 대한 防禦機能 이 크게 나타났다. 葉內 SOD 活性은 非汚染地域과 汚染地域間에 差異가 뚜렷하였는데, SOD 活性은 闊葉樹에 비하여 針葉樹에서 높게 나타났으며 苗木보다는 盛木에서 높았고, 소나무보다는 잣나무에서 活性이 높았으며, 튜립나무는 은행나무와 양버즘나무보다 낮은 것으로 나타나 SOD 活性이 높은것이 大氣汚染物質에 대한 耐性이 強함을 알 수 있었다. 固有의 SOD 活性이 높은 소나무 2年生잎과 잣나무 1, 2年生잎에서는 SO₂ 處理濃도가 強해질수록 SOD 活性이 增加하였으나, 固有의 SOD 活性이 낮은 樹種은 低濃度(0.5ppm)處理에서는 增加하고 高濃度 處理에서는 減少하는 傾向이었다.

ABSTRACT

This study was conducted to determine the toxic effects of air pollutants on landscaping trees, *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Ginkgo biloba*, *Liriodendron tulipifera*, *Platanus occidentalis* and their resistance to the pollutant toxicity in urban and industrial regions of Seoul and Taejon, Korea. Total sulfur content and superoxide dismutase activity were analysed in tree foliage of *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Ginkgo biloba*, *Liriodendron tulipifera*, *Platanus occidentalis*. In addition, SOD activity was analyzed in the foliage of tree seedlings, i.e. *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Ginkgo biloba*, *Liriodendron tulipifera*, with the fumigation of SO₂ in gas chamber 4 hours a day for six days. In all species total sulfur content and SOD activity had a positive correlation. Air pollutants accumulated in tree tissues were supposed to enhance the enzyme activity like SOD providing with the resistance mechanisms. Trees under the air pollution stress increased enzyme activity to develop internal self-resistance against pollutants, but after a critical point enzyme-activity decreased gradually and resulting in injury after all. Deciduous trees had greater filtration capacity than conifers and coniferous trees showed greater resistance against air pollutants than deciduous

¹ 接受 1992年 4月 3日 Received on April 3, 1992.

² 中部社會産業大學 Chungbu Socio-Industrial College, Majon, Chungnam, Korea.

³ 忠南大學校 農科大學 College of Agriculture, Chungnam National University, Taejon, Korea.

species. Foliage SOD activity was higher in polluted area than in unpolluted area for most species. Coniferous species and mature trees had higher SOD activity than deciduous seedlings. Especially *Pinus koraiensis*, *Ginkgo biloba* and *Platanus occidentalis* had higher SOD activity than other species. The tree species with the high SOD activity showed strong resistance against air pollutants. In 2nd-year needles of *Pinus densiflora* seedlings and current and 2nd-year needles of *Pinus koraiensis* seedlings containing high native SOD activity, SOD activity increased with the increase of SO₂ level. But in seedlings containing low native SOD activity, SOD activity increased at 0.5ppm SO₂ level while it decreased at 1.5 and 2.5ppm SO₂. Changes of SOD activity was different between species and in most species SOD seemed to participate in resistance mechanism.

Key words : Air pollution, Total sulfur content, Superoxide dismutase activity, Resistance mechanism

緒 論

오늘날 人口 增加, 産業化, 都市化 및 科學技術의 發達로 인한 에너지 消費量의 증가는 大氣圈에 각종 大氣汚染物質들을 放出하여 人間과 環境에 被害를 주고 있다. 人間이나 動植物에 被害를 야기시키는 大氣汚染物質 중에서 대표적인 것에는 亞黃酸가스(SO₂), 酸化窒素(NO_x), 弗化水素(HF), 炭化水素(HC), Ozone(O₃), PAN(peroxyacetyl nitrate), Ethylene 및 重金屬類 등이 있다.

이러한 汚染物質들은 植物體에 여러가지 生理的, 生化學的 過程 및 細胞內의 組織構造에 해로운 영향을 미치어^{7,25,18,20,22,28} 植物의 生長과 收穫을 감소시킨다. 즉, 最初의 被害는 光合成, 呼吸, 脂質, 蛋白質, 酵素의 生合成같은 生化學的水準에서 발생하고^{15,19,28,31} 다음은 細胞膜의 disorganization 같은 超微細構造的 水準^{32,35}, 그 다음은 細胞壁, 葉肉細胞, 核破壞 등의 細胞學的水準에서 발생한다. 그리고 최종적으로 chlorosis 또는 necrosis 등 可視被害가 出現하기 시작한다⁵

大氣汚染物質에 노출된 植物은 그 毒性作用을 직접 받기도 하지만, 植物體內에서 여러 경로를 통하여 강한 毒性을 나타내기도 한다^{1,2,3,10,12,13}. SO₂, NO_x 및 O₃ 같은 大氣汚染物質은 細胞內에서 活性酸素(activated oxygen)를 발생시켜 각종의 酸化的 障害를 일으킨다. 이때 발생하는 活性酸素에는 superoxide radical(O₂⁻), 過酸化水素(H₂O₂), 水酸基(OH⁻) 및 singlet oxygen(¹O₂) 등이 있다^{1,2,3,12}. 이러한 活性酸素은 O₃과

SO₂ 自體에 의해서 보다는 生體物質과의 反應性이 높아 葉綠素와 carotenoid 色素의 破壞, 核酸, 蛋白質, 脂質 등의 變性を 일으켜, 최종적으로 植物體를 致死시킨다^{15,19,25,29}.

Shimazaki 等²⁵은 시금치 잎에 SO₂를 處理한 후 생긴 葉綠素의 파괴는 O₂⁻ 때문에 발생하였으며, 過飽和脂肪酸의 過酸化產物인 malondialdehyde는 ¹O₂로 인하여 生成되었다고 하였다. Peiser 等²⁴은 alfalfa가 SO₂에 노출된 후, ethylene과 ethane 生成이 증가하였는데, 이는 결국 活性酸素에 의하여 야기되었다고 하였다. Tanaka와 Sugahara³⁰도 SO₂가 處理된 시금치 잎에서 O₂⁻에 의한 葉綠素 파괴 현상을 관찰하였다. 즉 SO₂에 의하여 생긴 植物의 被害의 일부가 活性酸素 때문임을 시사하였다.

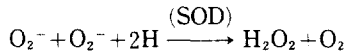
大氣汚染物質에 대한 植物體內의 活性酸素 蓄積의 原因으로서는 (1) 亞黃酸 이온에 의한 連鎖反應의 活性酸素 生成²⁾ (2) 炭酸固定系에의 阻害^{33,34)} (3) 葉綠素 thylakoid 膜의 損傷⁴⁾ (4) 活性酸素 防禦系의 기능 상실³⁰⁾ 등이 있다.

Asada¹⁾는 光條件의 葉綠體에서 sulfite의 酸化作用이 葉綠體에서 生成된 O₂⁻에 의해 개시되며, 그 결과 O₂⁻, OH⁻, HSO₃⁻ radical의 生産이 증대되어 잎 組織의 被害를 야기할 수 있음을 시사했다.

植物은 生長過程에 있어서 代謝中 필연적으로 생기는 活性酸素의 毒性에 노출되고 있지만, 그래도 여전히 정상적으로 生命活動을 영위하는 것은 이러한 毒物을 中和하는 기능을 갖고 있기 때문이다. 植物體內에서 生成된 活性酸素은 superoxide dismutase, peroxidase 및 catalase 등의 酸素들과 葉綠體內에 존재하는 ascorbic acid 및

glutathion 等の 酸化, 還元物質들에 의해서 解毒된다^{9,12,14)}.

Superoxide dismutase(SOD)는 superoxide free radical(O₂⁻)를 H₂O₂와 O₂로의 전환을 觸媒시켜주는 metalloprotein이다¹²⁾.



SO₂에 의해 O₂⁻의 生成이 증대되어, 植物體內의 SOD의 處理 能力을 넘는다면 活性酸素에 의해 障害가 나타나게 된다.

O₂⁻를 H₂O₂로 變換시키는 酸素 SOD에 主眼을 두고 Tanaka와 Sugahara³⁰⁾는 SO₂를 처리한 포플라에서 잎 部位別로 SOD 含有量과 SO₂에 대한 抵抗性과를 비교한 결과, 兩者 사이에 平行關係가 있음을 발견했다. 즉 低濃度(0.1ppm) SO₂로 處理된 잎은 SOD 活性이 증대되어 再次 處理된 高濃度(2ppm)SO₂에 대하여 抵抗性이 강하게 나타났다. 이러한 결과는 SO₂에 의한 酸素 毒性的 防禦에 SOD가 중요한 역할을 맡고 있고 大氣中의 SO₂에 노출되어 있는 植物들은 SOD 活性을 증가함에 의해 SO₂ 汚染環境에 適應하고 있음을 의미한다.

植物에 대한 活性酸素의 피해기작은 두가지 형태로서 生體內에서의 生成 速度를 超過하여 活性 酸素가 過剩 生成되는 것과 大氣汚染에 의하여 活性酸素 防禦系에 反應하는 물질들이 變性을 받아 中和機能이 저하됨으로서 活性酸素 濃도가 높아지게 되는 것으로 구분된다⁶⁾.

그동안 國內外에서 大氣汚染物質, 특히 亞黃酸

가스에 의한 可視被害, 黃의 吸收蓄積量 및 葉綠素 含量 變化 등에 관한 연구들은 폭넓게 이루어져 왔다. 그러나 최근 외국에서 깊이 있게 분석되고 있는 被害機作的 國內 연구는 부족한 실정이다.

따라서 本 研究은 大氣汚染物質, 특히 亞黃酸 가스가 造景樹木에 미치는 영향을 superoxide dismutase 같은 防禦系 酸素의 活性과 汚染物質의 吸收量을 조사하여 大氣汚染物質의 毒性에 대한 植物의 生理·生化學的 防禦 機能을 조사 분석하여 大氣汚染의 指標와 淨化에 이용될 수 있는 樹種을 비교 선택하는데 유용한 基礎資料를 提供하고자 한다.

材料 및 方法

1. 野外試料의 採取

試料의 채취 地點으로는 表 1과 그림 1에 나타난 바와 같이 서울市內에서는 交通量이 빈번한 宗廟, 昌慶宮, 德壽宮과 南山 및 洪陵 林業研究院과 大田市內에서는 都心 街路邊 및 大禾公園 地域의 街路 및 인근 야산 地域을 선정하였으며, 對照區 地域으로는 京畿道 光陵 林業試驗場의 樹木園을 선정하였다. 供試樹種으로는 街路樹로 많이 이용되는 은행나무, 양버즘나무, 튜립나무, 잣나무 및 소나무를 선정하였다. 南山 地域의 森林內에서 소나무와 잣나무 잎을 채취하고 大禾公園 地域에서 소나무잎을 채취하였으며, 宗廟, 昌慶宮 地域의 소나무, 잣나무는 공원에서 채취하였고 그 外에는 모두 街路樹에서 標本을 채취하

Table 1. Locations of sample plots of landscaping tree species.

Species	Location		Seoul				Taejon		
	KR	HR	NS	CM	CKK	DSK	TWD	SDJ	THD
<i>Pinus densiflora</i> (<i>P. den.</i>)	0	0	0	0	0		0		
<i>Pinus koraiensis</i> (<i>P. kor.</i>)	0	0	0	0	0		0		
<i>Ginkgo biloba</i> (<i>G. bil.</i>)	0	0	0	0	0	0	0		0
<i>Platanus occidentalis</i> (<i>P. occ.</i>)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Liriodendron tulipifera</i> (<i>L. tul.</i>)	0		0	0			0	0	

KR : Kwangreung

CKK : Changkyongkung

THD : Taehungdong

HR : Hongreung

DSK : Dongsukung

NS : Namsan

TWD : Taehwadong

CM : Chongmyo

SDJ : Sodaejon

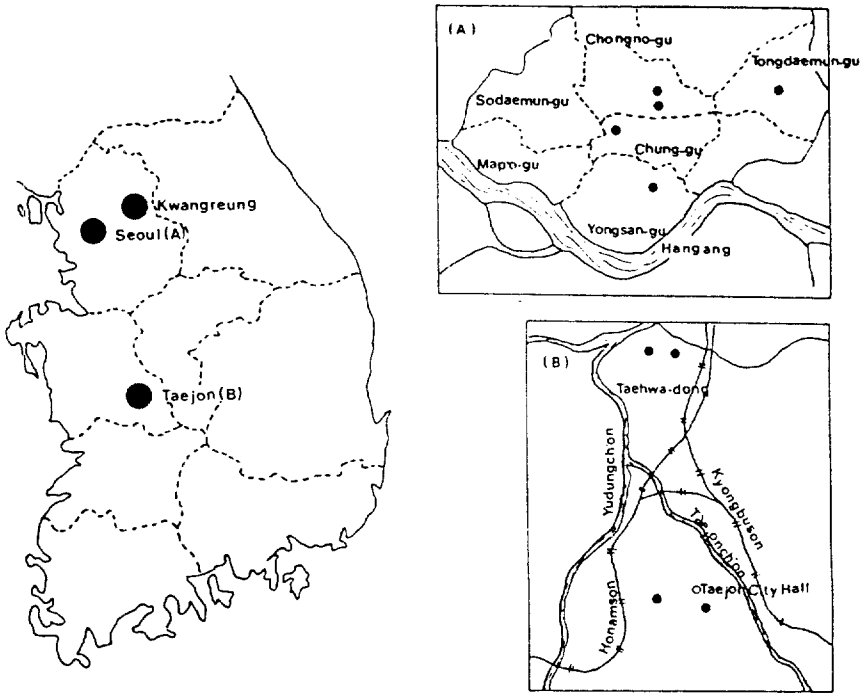


Fig. 1. Sampling sites in Seoul, Taejon and Kwangreung, Korea.

였다. 선정된 각 地點에서의 造景 樹木의 葉試料 채취는 각 樹木의 樹冠 中位部의 葉을 각 地域의 3-5주 나무에서 3잎씩 채취한 것을 혼합하여 試料로 사용하였으며, 試料의 採取時期는 闊葉樹의 경우 1989年 5月 19日, 8月 20日, 10月 1日로 3차례이었고, 針葉樹는 闊葉樹와 같은 採取時期以外에 2月 12日로 4次에 걸쳐 1, 2, 3年生 針葉를 채취하였다. 채취일은 dry ice box에 넣어 보관, 운반하므로써 온도에 의한 酸素의 變異를 최소화하였다. 채취일은 육안적 피해 증상이 없는 健전한 잎을 선택하였으나, 10월 채취시 闊葉樹의 일부 잎은 약간의 黃色斑點 현상이 있는 것도 있었으며, 針葉樹의 3年生 잎의 끝이 黃變 또는 갈변 현상이 출현한 것이 있었다. 落葉 현상은 光陵地域보다 都心地域이 다소 빠르게 나타나고 있었다.

2. 室内 Pot 苗木의 SO₂ 處理

1) 供試材料

SO₂ 處理를 위한 pot 實驗에 사용된 樹種은 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*P. koraiensis*) 및 스트로브잣나무(*P. strobus*) 3種의 針葉

樹와 은행나무(*Ginkgo biloba*), 튜립나무(*Liriodendron tulipifera*) 2種의 闊葉樹로서 이들 苗木은 忠南大 演習林 試驗 포장에서 養育된 것으로 잣나무, 스트로브잣나무, 은행나무 및 튜립나무는 2年生 苗木이었고 소나무는 3年生 苗木이었다. 培養土는 황토(2) : 모래(2) : vermiculite(0.5) : perlite(0.5) : peatmoss(0.5) (V/V)의 混合土壤으로서 이를 넣은 直徑 13cm의 vinyl pot에 75-85주씩 苗木들을 이식하여 vinyl house內에서 5個月 동안 生育시킨 후, 7月末-8月末에 가스를 接觸시키고 시료를 채취하였다.

植物體에 대한 SO₂ 接觸時 적용된 接觸箱의 溫度는 28±2°C, 濕度는 60-70%였으며, 光源은 水銀燈과 白熱燈을 사용하여 PAR 180μmol m⁻² s⁻¹로 調節하였다. 모든 樹種은 각 樹種別로 生育 狀態에 따라 3群 혹은 4群으로 均등히 나눈 후 各 群에서 5-6 個體씩 선정하여 1個 處理區에 18個體 또는 21個體로 하여 가스를 接觸시켰다. SO₂ 處理濃度 水準은 無處理, 0.5, 1.5 및 2.5ppm으로 각각 하루에 4時間씩 6日間 處理하였다. 가스 處理時 接觸箱內의 SO₂ 濃度는 Pulsed fluorescent analyzer(Thermo. electron

Co.)를 사용하여 측정하였다.

3. 調査方法

1) 酸素의 活性 測定

a) Superoxide dismutase(SOD; EC 1, 15, 1, 1) 分析: SOD 分析은 MaCord & Fridovich²¹⁾와 Fridovich^{12,13)}의 分析法에 의하여, 일정 部位에서 채취한 生體試料 0.5g을 冷蔵 保管된 mortar에 넣고 10ml의 Phosphate buffer(pH 7.8)를 첨가하여 마쇄한 다음 12,000rpm으로 30分間 遠心分離한 후, 上澄液을 助酵素로 사용하였다. 이런 모든 과정은 4°C 以下에서 실시하였으며, 0.1 M Na-Phosphate buffer(pH 7.8), 10⁻⁴M EDTA, 10⁻⁵M Cytochrome C, 6×10⁻⁵M Xanthine의 反應混合液에 助酵素를 첨가하여 총량 3ml로 하여 分光分析機로 측정하였다. 反應開始는 6×10⁻⁹M Xanthine oxidase(약 0.03 unit)를 첨가시켜, 550nm에서 0.025A가 되게 조정하였고 減少率은 2分間 10초 간격으로 읽었으며, SOD activity 1 unit는 이런 條件下에서 Cytochrome C의 減少率을 50% 억제시킨 量으로 定意하였다.

b) 葉內 全硫黃含量: 각 조사대상 地域에서 樹種別, 葉令別로 葉試料를 채취하여 實驗室로 운반한 후 통풍이 잘 되는 그늘진 곳에서 氣乾시킨 후, dry oven에서 80-85°C로 24-48시간 건조시킨 후, 粉碎하여 分析用 試料로 사용하였다. 粉碎試料 1g을 Sulfur-determinator에 넣고 연소시키면서 자동 측정하였다.

結果 및 考察

1. Superoxide dismutase(SOD)의 活性

汚染物質에 대한 植物體의 耐性은 氣孔 抵抗性에 따른 汚染物質의 체내 흡수 차이와¹¹⁾ 植物體內에서의 毒性物質에 대한 中和能力의 차이에 기인한다고 할 수 있다⁹⁾. Free radical scavenger는 O₃ 또는 SO₂ 등에 의하여 발생하는 毒性 free radical를 中和하므로써 2次的으로 발생하는 酸素毒性을 경감시키는 것으로 알려져 있다.

植物體內에서 毒性物質에 대한 中和作用을 하는 물질로서는 free radical scavenger인 superoxide dismutase, peroxidase, catalase 및 ascorbic acid 등을 들 수 있는데^{9,16,30)}, 특히

superoxide dismutase의 역할이 중요시 되고 있다.

Tanaka³⁰⁾는 포플라에 SO₂를 慢性 接觸시켰을 때 SOD 活性이 계속 증가되었다고 하였으며, 이들은 葉內의 SOD 含量이 포플라의 營養條件, 氣象條件 等에는 비교적 영향을 받지 않기 때문에 慢性的인 大氣汚染에 노출된 野外에 있는 高等植物 잎의 SOD 活性을 측정하여 微量指標로 SO₂ 가스의 汚染 평가에 이용할 수 있을 것이라 하였다.

우선 SOD가 大氣의 汚染狀況과 연관이 있는지를 알아보기 위하여 본 연구에서는 大氣汚染의 指標로서 측정한 硫黃含量과 SOD와의 相關關係를 2차 回歸式으로 알아본 결과 葉內 全硫黃含量과 SOD 活性이 서로 밀접한 相關關係가 있음이 나타났다(그림 2). 잣나무(그림 2-2)와 은행나무(그림 2-3)에서는 葉內 全硫黃含量과 SOD 活性間에 高度의 正의 相關을 나타내었으며, 소나무(그림 2-1), 튜립나무(그림 2-4) 및 양버즘나무(그림 2-5)에서는 95% 수준에서 正의 相關을 나타내었다.

소나무(그림 2-1)에서는 全硫黃含量이 그다지 높지 않을 때는 SOD 活性의 범위가 매우 다양하게 나타나고는 있지만 대체적으로 硫黃含量이 증가함에 따라 酵素活性이 증가하고 있다. 그러다 硫黃含量이 0.35ppm 이상의 앞에서는 오히려 SOD 活性이 떨어지고 있다. 소나무의 3年生 針葉은 3年間 大氣中의 SO₂를 계속적으로 吸收蓄積함에 따라 SOD를 유도하여 植物自體에서 防禦作用을 하다가 汚染物質의 축적이 어느 한계를

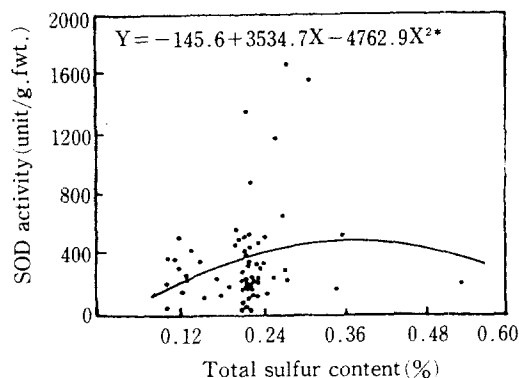


Fig. 2-1. Correlations between total sulfur content and superoxide dismutase in *Pinus densiflora* exposed to air pollutants in the fields.

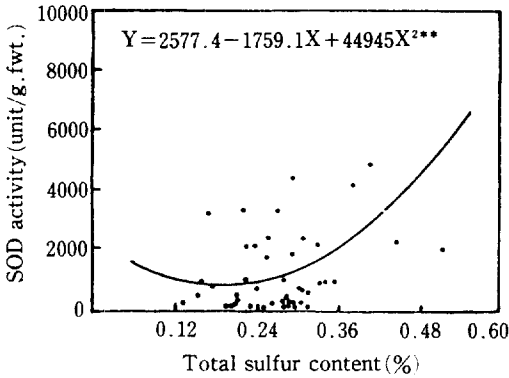


Fig. 2-2. Correlations between total sulfur content and superoxide dismutase in *Pinus koraiensis* exposed to air pollutants in the fields.

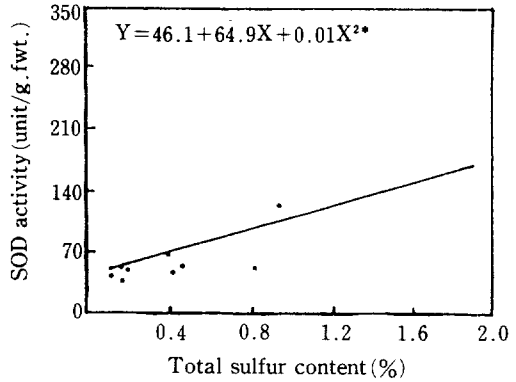


Fig. 2-4. Correlations between total sulfur content and superoxide dismutase in *Liriodendron tulipifera* exposed to air pollutants in the fields.

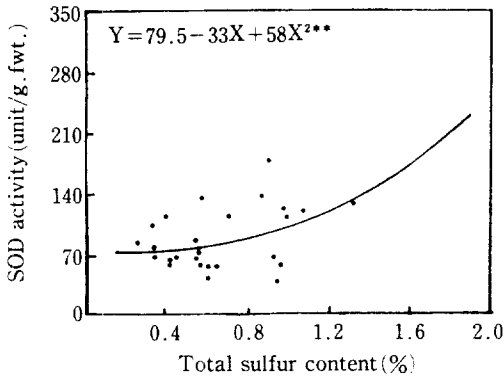


Fig. 2-3. Correlations between total sulfur content and superoxide dismutase in *Ginkgo biloba* exposed to air pollutants in the fields.

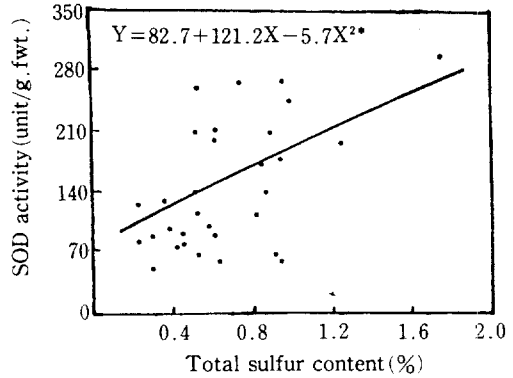


Fig. 2-5. Correlations between total sulfur content and superoxide dismutase in *Platanus occidentalis* exposed to air pollutants in the fields.

냄을 때는 오히려 酵素의 活性이 급격히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 잣나무의 SOD 活性은 소나무보다 최고 5배 정도 높았으며, 0.6ppm까지 SOD 活性이 계속 증가하고 있는 것으로 보아 大氣汚染에 대한 耐性이 소나무보다 강한 것으로 사료된다.

植物이 SO₂에 의한 活性酸素가 원인이 되어 障害를 일으키는 것은 生體內에서의 防禦物質의 生成 속도를 초과하여 活性酸素가 생성되는 것과, SO₂에 의하여 活性酸素 防禦系의 物質이 변성을 받아 活性酸素 濃도가 높아지게 되어 그 毒性이 發見되는 것이다. 따라서 植物의 SO₂에 대한 抵抗性의 강약은 活性酸素 防禦物質을 얼마만큼 갖고 있는가로 판단할 수 있다. Jäger 等¹⁶⁾은 완두콩에 SO₂를 處理한 결과 SO₂ 濃도가 높아질

수록 葉內의 硫黃含量이 증가하였으며, 또한 SOD의 活性이 높아졌다고 하였다.

本 調査地域에서 채취한 각 樹種別로 季節別, 地域間의 SOD 活性은 그림 3과 같다. 소나무의 SOD 활성(그림 3-1)은 모든 지역에서 잣나무보다 낮았으나, 闊葉樹보다는 3-4배 높았다. 5, 8, 10월에는 地域間의 SOD 活性 차이가 뚜렷하지 않았으나, 2월에는 光陵에 비하여 汚染物質이 모두 높은 活性을 나타내었다. 時期別 SOD 活性이 光陵은 220.5-401.4unit/g.fwt.로 별 차이가 없었으나, 大禾洞地域은 최저 212.9unit/g.fwt.에서 2월에 최고 1,072.3unit/g.fwt.까지 5배 증가하였다. 汚染地域의 SOD 活性 증가는 汚染物質에 대한 소나무의 防禦機作으로 생성된 것으로

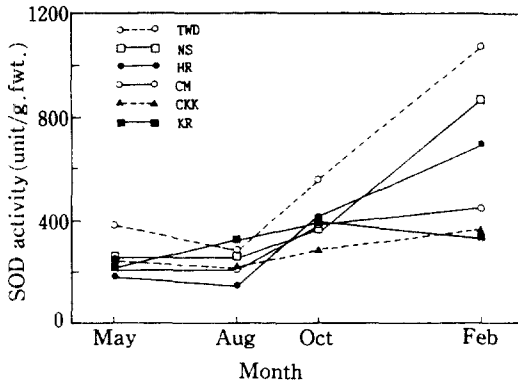


Fig. 3-1. Seasonal changes of superoxide dismutase activities of *Pinus densiflora* needle between six sample plots.

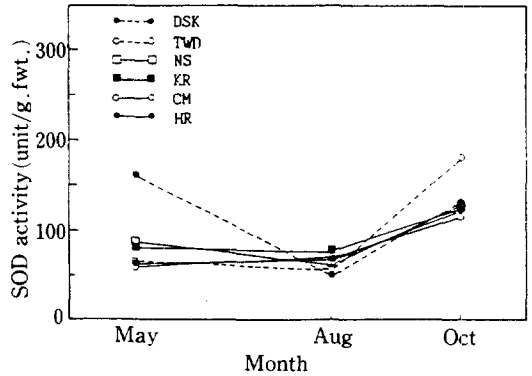


Fig. 3-3. Seasonal changes of superoxide dismutase activities of *Ginkgo biloba* leaves between six sample plots.

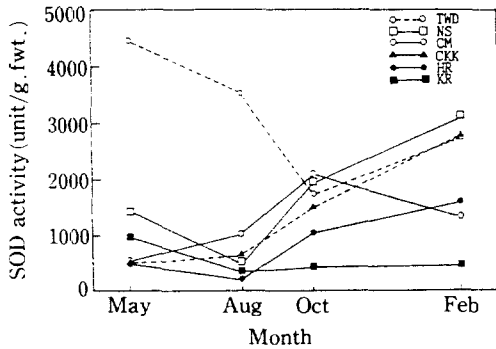


Fig. 3-2. Seasonal changes of superoxide dismutase activities of *Pinus koraiensis* needle between six sample plots.

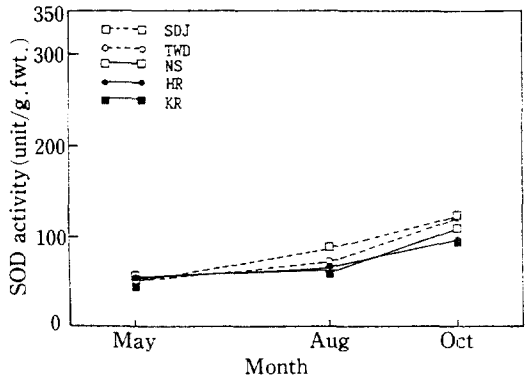


Fig. 3-4. Seasonal changes of superoxide dismutase activities of *Liriodendron tulipifera* leaves between five sample plots.

들어진다. 잣나무는(그림 3-2) 거의 전지역에서 光陵보다 높은 SOD 活性을 나타내었다. 季節的 變化를 보면, 光陵은 연중 큰 차이가 없었고, 大禾洞地域을 제외하고는 봄부터 겨울로 갈수록 SOD 活性이 크게 증가하였다. 2월에 南山의 SOD 活性은 3,129.3unit/g. fwt.로 光陵보다 6.6 배의 차이가 나타났다. 은행나무는(그림 3-3) SOD 活性의 季節別 유의성이 인정되었으며, 地域間에도 차이가 나타났다. 특히 8월에 제일 낮게 나타났는데 이 때에만 光陵보다 汚染地域에서 모두 낮은 活性을 나타내었다. 소나무와 잣나무에서도 8월에 活性이 제일 낮았다. 튜립나무의 SOD 活性(그림 3-4)은 은행나무와 양버즘나무보다 낮은 活性을 나타내었다. 季節別 지역간에는 光陵과 모든 汚染地域들간에 유의차가 인정되었고, 봄보다 가을에 SOD 活性이 더 높았다. 양버즘나무의 SOD

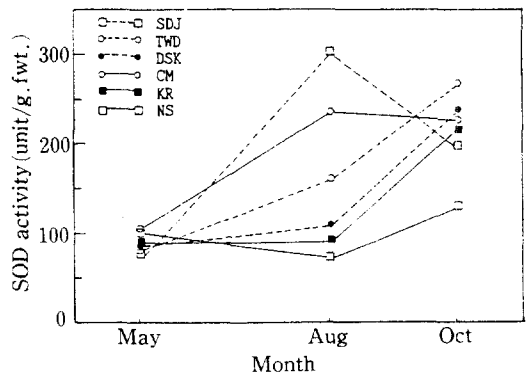


Fig. 3-5. Seasonal changes of superoxide dismutase activities of *Platanus occidentalis* leaves between six sample plots.

活性(그림 3-5)은 季節別로 地域間에 차이가 뚜렷하였으며, SOD 活性의 季節的 變化는 시간의

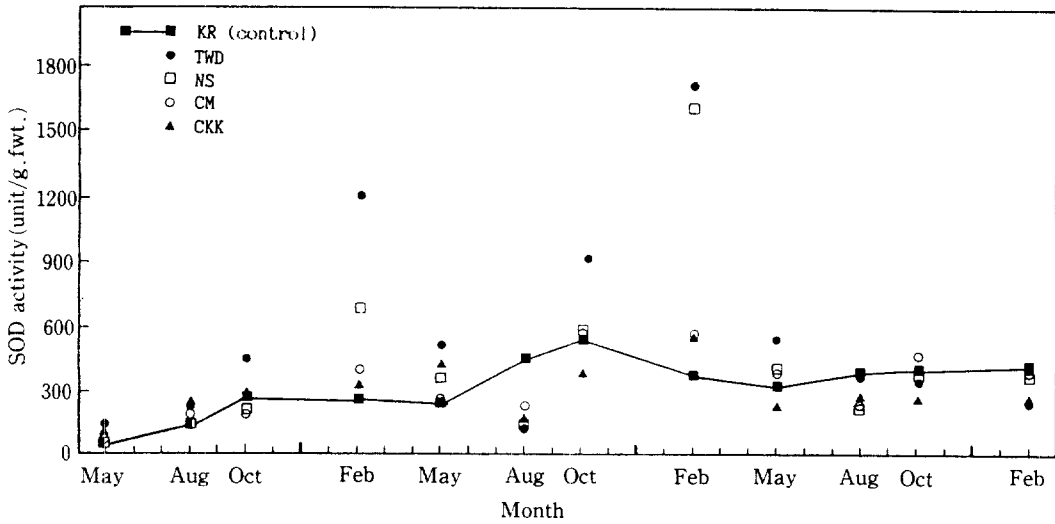


Fig. 4. Seasonal changes of superoxide dismutase activities in time sequence of three needle ages of *Pinus densiflora* between five sample plots.

경과에 따라서 계속 증가하고 있어 大氣中の 汚染物質 흡수 및 蓄積에 대응하는 植物體의 防禦機作으로서의 SOD 유도가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로 볼 때, SOD 活性은 闊葉樹보다는 ① 針葉數에서 높게 나타났으며, 針葉樹 중에서는 소나무보다 잣나무에서 높았다. 闊葉樹에서는 은행나무, 튜립나무 및 양버즘나무 모두 針葉樹만큼 차이가 뚜렷하지는 않았지만 季節別로 有意인 증가를 나타내었다. 특히 양버즘나무는 은행나무와 튜립나무에서보다 SOD 活性이 현저히 높았다. 大氣汚染物質에 대한 吸着能에 있어서는 針葉樹보다 闊葉樹가 더 높았으나 大氣汚染物質의 영향에 대한 防禦能에 있어서는 闊葉樹보다 針葉樹가 더 效果의임을 알 수 있다.

그림 4는 野外에 있는 소나무에서 각 地域에서의 季節別, 葉令間의 SOD 活性을 年度別로 배열하여 나타낸 것이다. 光陵地域에서의 SOD 活性 변화를 보면 新葉이 나서부터 증가하여 10월에 最高值를 이루었다가 2年生잎에서는 봄부터 서서히 증가하여 다시 10월에 最高值를 이루다가 감소하였고 3年生잎에서는 뚜렷한 peak點이 없이 높은 수준을 유지하였다. 반면 南山, 宗廟, 昌慶宮, 大禾洞 等 汚染地域의 SOD 活性은 地域間에 다소 차이가 있지만, 新葉 발생 이후 서서히 증가하여 이듬해 2年生잎에서 2월에 最高의 活性을 나타내었다가 8월에 오히려 光陵地域보다도 낮게

감소하고 있다. 10월부터 다시 活性이 증가하여 3年生잎에서 2월까지 급속도로 증가하여 大禾洞 地域에서는 1,683.5unit/g.fwt.로 光陵보다 4.6 배나 높았다. 3年生잎에서 5월, 8월까지 2年生 잎과 마찬가지로 SOD 活性이 低調한데, 그다음 10월, 2월까지도 SOD 活性 변화가 없었고, 오히려 光陵地域보다 SOD 活性이 낮은 것으로 나타났다. 光陵地域에서의 다소 일정한 SOD 活性 변화를 소나무의 生理的인 活性으로 간주한다면, 汚染地域의 SOD 活性 변화는 매우 다르게 나타나고 있다. 즉 1年生잎에서 5-10월 사이에는 光陵地域과 汚染地域間에 차이가 없다가 2월에 최대 차이가 나타났는데 이는 環境汚染에 의한 樹木自體의 防禦能으로서 酵素의 活性이 증가한 것으로 사료된다. 2年生잎에서는 5월에 生理的으로 다소 떨어지는 것과 汚染 stress로 인하여 樹木自體內의 큰 교란이 생겼다가 점차 樹木의 生理的 活性과 함께 다시 防禦能力을 回生할 수 있었던 것으로 해석되며 3年生잎에서는 잎의 生理的 活力的 부족과 함께 더 以上의 防禦能을 회복할 수 없게 되었던 것으로 思料된다. 松島^{26,27}는 SO₂가 樹木의 早期 落葉을 유발시켰다고 보고하였는데 이는 stress에 대하여 防禦 機能을 하는 酵素의 갑작스런 失活도 그 原因의 하나라고 생각된다.

그림 5는 野外에 있는 잣나무에서 각 地域의 季節別, 葉令間의 SOD 活性을 年度別로 配列하

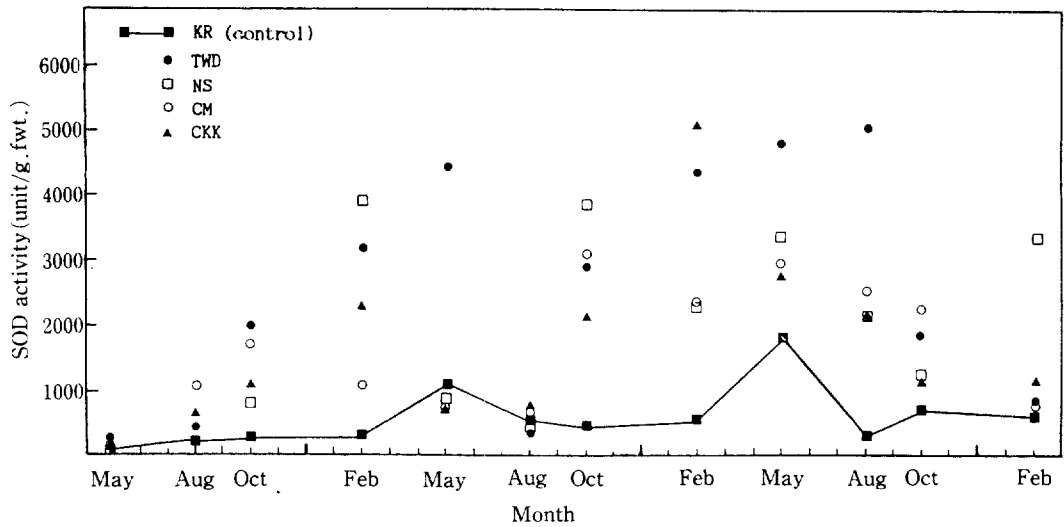


Fig. 5. Seasonal changes of superoxide dismutase activities in time sequence of three needle ages of *Pinus koraiensis* between five sample plots.

여 나타낸 것이다. 光陵地域의 SOD 活性 변화를 볼 때 소나무와는 다른 양상을 보이고 있는데, 新葉이 나서부터 서서히 SOD 活性이 증가하면서 2月까지 年中 계속 증가하고 그 후 평형을 유지하다가 2年生잎에서는 이듬해 5월에 最大의 活性을 나타내고 그 후 감소하고 있으나 1年生잎보다는 酵素 活性도가 다소 높았다. 3年生잎에서는 다시 5월에 最大의 活性을 나타내고 8월에는 급격히 떨어지고 그 후 年中 유사한 活性을 나타내고 있었다. 反面, 汚染地域인 南山, 宗廟, 昌慶宮 및 大禾洞地域의 SOD 活性은 地域間 차이가 있지만, 光陵地域에서처럼 2月까지 年中 계속 증가하고 있으나, SOD 活性은 光陵보다 높은 경향을 나타내고 있었으며, 2월에 光陵地域과의 SOD 活性 차이가 최대를 나타내고 있었다. 특히 南山地域은 3,868.8unit/g.fwt.로 光陵보다 11.4배나 높았다. 2年生잎의 경우 이듬해 5월 光陵地域에서 SOD 活性이 最高를 이루고 있었으나 汚染地域에서는 5월, 8월에 活性이 급격히 떨어지다가 10월에 높은 活性을 나타내었고 2月까지 계속 증가하여 2월에 光陵地域과 最大의 격차를 나타내고 있다. 그러나 大禾洞地域은 5월에 예외적으로 높게 나타내고 있다. 3年生잎에서는 5, 8, 10월 및 2月 年中 계속 감소하는 경향을 나타내고 있는데 소나무와는 다르게 汚染地域이 光陵地域보다는 SOD 活性이 계속 높은 상태를 유지하고 있

다. 이는 잣나무가 소나무보다 SOD 活性도가 훨씬 높아 같은 大氣汚染 條件下에서는 소나무보다 SOD의 活性이 오래 유지될 수 있어 大氣汚染에 대한 防禦機能을 보다 지속적으로 수행할 수 있는 것으로 사료된다. 定量的으로 소나무와 잣나무의 落葉率은 조사되지는 않았으나, 현지 조사 시 잣나무보다는 소나무 3年生잎의 落葉率이 훨씬 높았던 점도 일부는 이러한 酵素 level에서의 防禦能의 저조 때문인 것으로 해석된다.

그림 4와 5를 볼 때, 野外에서 採取한 針葉樹類의 葉令別 SOD 活性은 소나무, 잣나무 모두 葉令間에 高度의 有意性이 認定되었으며, 2樹種 모두 2年生잎에서 活性이 높게 나타났고 3年生잎에서는 다시 떨어지는 것으로 나타났다. 소나무 1年生 잎의 평균 SOD 活性은 253.6unit/g.fwt.이고 2年生잎은 이보다 2.1배 높게 나타났으며, 잣나무 1年生잎의 평균 SOD 活性은 910.7unit/g.fwt.이고 2年生잎은 이보다 2.0배 더 높게 나타났다. 이는 針葉樹 2年生잎이 大氣汚染物質에 대하여 抵抗性이 제일 강한 반응을 하고 있는 것으로 생각할 수 있다.

그림 6은 室內實驗 결과로서 SO_2 를 각 濃度別로 6日間 처리한 후, 각 苗木의 SOD 活性 변화를 나타낸 것이다. 闊葉樹類 중에서 튜림나무의 경우 無處理區에서 SOD 活性이 45.3unit/g.fwt.로 針葉樹 1年生잎과 유사하며, 각 處理區間에도

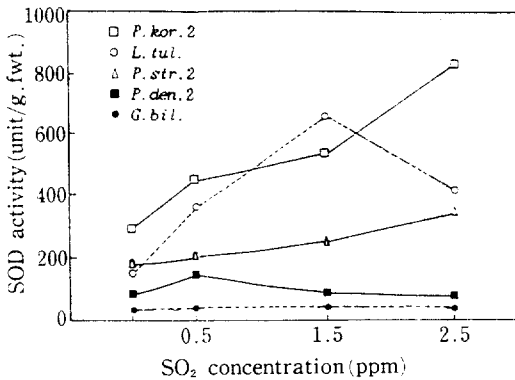


Fig. 6. Superoxide dismutase activities of leaves in five tree species exposed to different concentrations of SO₂.

큰 차이가 나타나지 않았다. 은행나무는 튜립나무보다 無處理區에서 SOD 活性이 3.5배나 높았고 0.5와 1.5ppm 處理區에서는 活性이 계속 증가하였으나 2.5ppm 處理區에서는 감소하고 있다. 針葉樹類의 경우 소나무, 잣나무 및 스트로브잣나무의 1年生잎은 45-80unit/g.fwt. 범주로 苗木間 活性 차이도 크지 않았으며, 處理濃度間의 活性 차이도 크지 않았다. 각 處理區別로 2年生잎에서의 SOD 活性 변화를 볼 때, 無處理區에서의 SOD 活性이 소나무는 67.5, 스트로브잣나무는 171.0, 잣나무는 283.3unit/g.fwt.로 소나무에서 제일 낮았으며, 0.5ppm 處理區에서는 無處理區보다 높아지다가 1.5ppm, 2.5ppm 處理區에서는 다시 낮아졌다. 스트로브잣나무와 잣나무에서는 處理濃度가 강할수록 SOD 活性이 계속 높아지고 있는데 스트로브잣나무보다는 잣나무에서 SOD 活性 변화가 더 큰 차이를 나타내었다. 葉令別 SOD 活性은 1年生잎보다 2年生잎에서 높게 나타났는데, 소나무는 1.9배, 잣나무는 9.8배, 스트로브잣나무는 5.7배 높았다. 野外 試料에서는 소나무와 잣나무가 모두 2年生잎이 1年生잎에 비하여 2배 정도의 活性이 높았는데 苗木에서는 樹種間에 葉令別 차이가 매우 다르게 나타났다.

針葉樹類에서 2年生잎의 SOD 活性이 높은 것은 2年生잎이 生理的으로 活性과 新陳代謝가 가장 왕성한 때이라서 외부에서 오는 stress에 대한 防禦機能이 활발했기 때문이라고 할수 있다. 따라서 같은 水準의 SO₂에 노출될 경우 1年生잎보

다는 2年生잎이 SO₂에 대한 耐性이 강할 것이며, 특히 잣나무의 SOD 活性은 탁월하여 大都市의 公園樹로써 권장할 만하다고 思料된다. Tanaka 等³⁰⁾은 2.0ppm SO₂에 노출된 포플라의 잎에서 新葉이 舊葉보다 더 抵抗性이 강하였으며, 또한 SOD 活性도 舊葉보다 5배 더 높았다고 했는데 SOD 活性이 높은 잎이 抵抗性이 강하게 나타난 것은 일치하나 葉令別 抵抗性에는 차이가 있었다. 이것은 포플라 잎은 落葉性으로 針葉樹의 葉令別 針葉과는 生理的 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 변화를 볼 때, 固有의 SOD 活性이 제일 낮은 針葉樹 1年生잎과 튜립나무에서는 SO₂ 處理區間에 活性 변화가 거의 없었다. SOD 活性이 비교적 낮은 소나무에서는 低濃度(0.5ppm)에서 酵素 活性의 증가로 자체 防禦能力을 갖지만 高濃度(1.5, 2.5ppm)에서는 酵素 活性이 떨어지고 있었다. 잣나무에서는 無處理區에서의 SOD 活性이 제일 높았고, 處理 濃度가 高濃度일때도 酵素의 失活을 초래하지 않고 SOD 活性이 증가하고 있으며 스트로브잣나무와 은행나무에서는 그 중간의 변화를 나타내는 것으로 보아 樹種 固有의 SOD 活性 자체가 외부의 環境汚染 stress에 대한 植物體의 防禦物質 合成을 크게 좌우한다고 思料된다.

金¹⁷⁾은 들개에 0.2ppm SO₂를 5日間 處理하였을 때, 無處理區보다 SOD의 活性이 증가되었다고 하였다. Jäger 等¹⁶⁾은 SO₂에 대한 포플라잎의 耐性을 SOD 活性과 관련하여 조사하고, 耐性이 강한 잎이 SOD 活性이 높았다고 했으며, Tanaka 等³⁰⁾도 SO₂를 포플라에 처리한 후, SO₂에 耐性이 강한 포플라잎에서는 SOD 活性이 높았고, 耐性이 약한 잎에서는 SOD 活性이 낮았음을 보고한 바 있는데, SO₂ 處理에 의한 可視被害率 조사에서 잣나무와 은행나무가 被害率이 가장 적게 나타난 것과 비교할 때 SOD가 植物體의 SO₂에 대한 耐性에 관여하고 있음을 알 수 있다. 金¹⁷⁾은 SO₂ 接觸으로 증가되는 SOD의 活性과 SO₂의 毒性作用과의 관계를 알아보기 위하여 가스를 접촉시킨 잎에서 추출된 葉綠素 溶液에 5 unit의 SOD를 첨가했을 때, SOD 첨가로 葉綠素 a의 파괴가 현저하게 감소됨을 관찰하고 SOD가 SO₂의 毒性을 어느 정도 제어하고 있음을 시사하였다. 趙⁸⁾는 free radical scavenger 處理에

의한 양버즘나무의 SO₂ 피해 경감 효과를 조사한 결과, 無處理區에 비하여 free radical scavenger 處理區에서 SO₂의 可視被害가 有意性 있게 경감되었다고 하였다. 또한 그는 양버즘 나무에 SOD 不活性濟인 DDTC(Dihydthiocarbamate)를 處理한 다음, SOD를 조사한 결과 SOD 活性이 DDTC 처리 직후부터 급격히 감소되어, 5時間에는 1-4배 감소되다가 이후에는 一定한 낮은 水準을 유지했다고 하였다.

野外에 있는 喬木의 잎과 室內 實驗에 이용한 苗木 잎의 酵素 活性 차이를 그림 3과 그림 6에서 비교하여 살펴 보면, 喬木과 苗木間의 酵素 活性 차이는 상당히 크게 나타났다. 은행나무를 除外한 3樹種에서는 苗木보다 喬木에서 活性이 더 높게 나타나 소나무는 5.1배, 잣나무는 4.1배, 튜립나무는 1.8배 더 높았다. 따라서 야외에서는 室內實驗에서 處理한 결과 얻은 植物體의 反應 濃度보다 훨씬 더 높은 농도에서도 저항해서 防禦할 수 있다고 생각된다. 은행나무가 예외적으로 苗木의 酵素 活性이 높게 나타났는데, 은행나무에서의 酵素 變異가 다른 樹種에 비하여 더 크게 나타난 것으로 보아 酸素 變異 實驗에 대한 은행나무의 活用은 재검토해야 될 것으로 思料된다.

그림 7은 0.5ppm SO₂를 6日間 處理했을 때, 針葉樹類의 1年生잎과 2年生잎에서 이들 간격으로 SOD 活性을 측정된 것을 無處理區에 대한 比率로 나타낸 것이다. 感受性이 비교적 큰 스트로

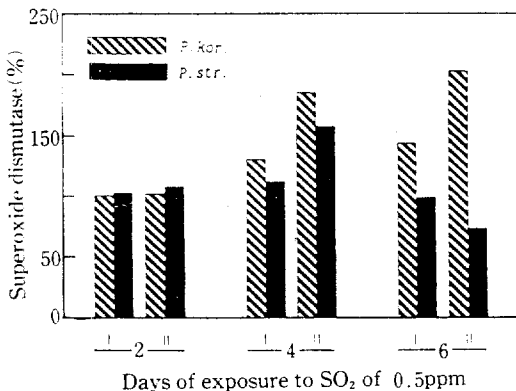


Fig. 7. Superoxide dismutase activities (in percent to control) in current needle (I) and 2nd year needle (II) of *Pinus koraiensis* and *Pinus strobus* exposed to SO₂ of 0.5ppm 4 hours a day for 6 days.

브잣나무는 노출 4일째까지는 SOD 活性 증가를 나타내다가 6일째는 다소 떨어지고 있으며, 抵抗性이 강한 잣나무는 處理 開始부터 점점 증가하여 處理 6日째까지 계속 증가하고 있다. Jäger¹⁶⁾는 抵抗性이 서로 다른 2가지 種 品種에 0.5ppm의 SO₂를 처리한 후, 抵抗性이 강한 種 品種은 SOD 活性이 계속 증가하고 있으나 抵抗性이 약한 品種은 처음에는 비슷한 SOD 活性 증가를 나타내다가 處理日이 경과하자 SOD 活性이 저하되고 있음을 보고한 바 있는데 이는 본 연구 결과와 일치하고 있다.

SOD는 Cu, Zn-SOD와 Mn-SOD 및 Fe-SOD 등 세가지 형태로 존재하는데, 대부분의 植物體에서는 Cu, Zn-SOD와 Mn-SOD 형태로 존재하며^{6,14)}, Tanaka 등³⁰⁾은 copper chelating agents인 DDTC 처리에 의하여 Cu, Zn-SOD가 不活性化된다고 하였다.

結 論

이상과 같은 結果들을 考察해 볼때 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

1. 葉內 硫黃含量과 酵素 活性間에 나타난 相關關係를 보면, 5수종에서 모두 葉內 硫黃含量과 SOD 活性間에 正의 相關을 나타내었다. 이것으로 많은 樹木들은 汚染物質들이 體內에 蓄積함에 따라 SOD 같은 酵素들의 活性을 增加시켜 耐性 機構를 마련함을 알 수 있었다.
2. 闊葉樹에서는 硫黃含量이 增加함에 따라 SOD 活性이 繼續 增加하고 있으나, 3年生까지의 잎을 가진 針葉樹類에서는 硫黃含量이 增加함에 따라 SOD 活性이 增加하는 傾向을 나타내다가 硫黃含量이 어느 限度를 넘을 때는 급격히 SOD 活性이 떨어졌는데 이는 植物體가 汚染物質에 대하여 自體防禦를 위하여 初期에는 酵素活性을 增大시키지만, 植物體의 收容限界를 넘을 때는 오히려 酵素의 失活과 함께 植物體가 被害를 받게됨을 意味한다고 보겠다.
3. 季節別 葉內 硫黃含量이 針葉樹보다 闊葉樹에서 뚜렷이 증가한 것에 비하여 SOD 活性은 闊葉樹보다 針葉樹에서 뚜렷이 增加하였다. 따라서 闊葉樹가 大氣汚染物質의 淨化能力이 큰 반면 針葉樹는 汚染物質에 대한 防禦能力이 큰 것을 알 수 있었다.

4. 소나무와 잣나무의 葉令間 SOD 活性은 1年生 일보다 2年生일에서 높았고, 3年生 일에서는 減少하였으며, 소나무와 잣나무의 SOD 活性은 2年生일에서 2월에 非汚染地域과 汚染地域 間에 最高의 差異가 나타났다. 이것으로 針葉 樹의 2年生일이 汚染物質에 대한 防禦能이 가장 높음을 알 수 있다.
5. 葉內 SOD 活性은 非汚染地域과 汚染地域 間에 差異가 뚜렷하였는데, SOD 活性은 闊葉樹에 비하여 針葉樹에서 높게 나타났으며 苗木보다는 盛木에서 높았고, 소나무보다는 잣나무에서 活性이 높았으며, 튼튼나무는 은행나무와 양버즘나무보다 낮은 것으로 나타나 SOD 活性이 높은것이 大氣汚染物質에 대한 耐性이 強함을 보여 주었다. 植物體의 大氣汚染物質에 대한 淨化能力和 防禦能力은 樹種別로 차이가 있기 때문에 目的에 適合한 樹種 選擇時 考慮할 問題라고 思料한다.
6. SO₂ 처리실험에서 固有의 SOD 活性이 높은 소나무 2年生일과 잣나무 1, 2年生일에서는 SO₂ 處理濃도가 強해질수록 SOD 活性이 增加하였으나 固有의 SOD 活性이 낮은 樹種은 低濃度(0.5ppm)處理에서는 增加하고 高濃度處理에서는 減少하는 傾向이었다. 따라서 淸淨地域에 있는 樹木의 SOD 活性度로 SO₂ 影響에 대한 樹木의 耐性 差異를 豫測해 볼 수 있는 可能性이 示唆된다.

參 考 文 獻

1. Asada, K. 1980. Formation and scavenging of superoxide in chloroplasts, with relation to injury by sulfur dioxide. Res.Rep.Natl.Inst. Environ. Stud. Jpn. 11 : 165-179.
2. Asada, K. and S.K Kiso. 1973. Initiation of aerobic oxidation of sulfite by illuminated spinach chloroplasts. Eur. J. Biochem. 33 : 253-257.
3. Asada, K., S.K. Kiso and K. Yoshikawa. 1974. Univalent reduction of molecular oxygen by spinach chloroplasts on illumination. J. Biol. chem. 249 : 2175-2181.
4. Athanassious, R. 1980. Ozone effects on radish (*Raphanus Sativus* L. cv. *Cherry Bell*) : Gradient of ultrastructural changes. Z. Pflanzenphysiol. 97 : 227-232.
5. Bell, J.N.B. and C.H. Mudd. 1976. Sulphur dioxide resistance in plants : A case study of *Lolium perenne*. In Effects of Air Pollutants on Plants. Edited by T.A.Mansfield. pp87-104. Cambridge University press, London.
6. Bennet, J.H., E.H. Lee, and H.E. heggstad. 1984. Biochemical aspect of plant tolerance to ozone and oxyradicals. In Gaseous Air Pollutants and Plant Metabolism. Edited by M.J. Koziol and F.R. Whatley. pp413-424. Butterworth, England.
7. Bressan, R.A., L.G Wilson, and P. Filner. 1978. Mechanisms of resistance to sulfur dioxide in the *Cucurbitaceae*. Plant Physiol. 61 : 761-767.
8. 趙正熙. 1991. Uniconazole處理에 의한 酵素 活性增大가 양버즘나무의 SO₂ 耐性에 미치는 影響. 忠南大學校 大學院 碩士學位論文. pp. 1-42.
9. Dass, H.C. and G.M. Weaver. 1968. Modification of ozone damage to *Phaseolus vulgaris* by antioxidants, thiols and sulfhydryl reagents. Can. J. Plant Sci. 48 : 569-574.
10. Elstner, E.F. 1987. Metabolism of activated oxygen species. In the biochemistry of plants. Vol.11. Academic Press. pp.253-315.
11. Fletcher, R.A., N.O. Adedipe, and D.P. Ormrod. 1972. Abscisic acid protects *bean* leaves from ozone induced phytotoxicity. Can. J. Bot. 50 : 2389-2391.
12. Fridovich, I. 1975. Superoxide Dismutases. Annu. Rev. Biochem. 44 : 147-159.
13. Fridovich, I. 1978. The biology of oxygen radicals. Science. 201 : 875-880.
14. Giannopolitis, C.N. and S.K. Ries. 1977. Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. Plant Physiol. 59 : 309-314.
15. Hallgren, J.E. 1978. Physiological and biochemical effects of sulfur dioxide on plants. In Sulfur in the Environment. Edited by J.O. Nriagu, pp.163-209. A willey-Interscience Publication. John willey & Sons, U.S.A.
16. Jäger, H.J., J. Bender, and L. Grunhage. 1985. Metabolic responses of plant differing in SO₂ sensitivity towards SO₂ fumigation. Environ. Pollut. Ser. A. 39 : 317-335.

17. 金貞圭. 1988. SO₂ gas가 들깨(水原 8號)의 生理的 特性에 미치는 影響에 關한 研究. 高麗大學校 大學院 博士學位論文. pp.1-86.
18. Kondo, N. 1979. Physiological responses involved in defense against SO₂ phytotoxicity. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn. NO. 10. : 309-315.
19. Majernik, O. and T.A. Mansfield. 1971. Effects of SO₂ pollution on stomatal movements in *Vicia faba*. Phytopath. Z. 71 : 123-128.
20. Malhotra, S.S. and A.A. Khan. 1984. Biochemical and physiological impact of major pollutants. In air pollution and plant life. Edited by M. Treshow. pp.113-157. John Wiley & Sons Ltd.
21. McCord, J.M. and I. Fridovich. 1969. Superoxide dismutase : an enzymic function for *erythrocytein (hemocuprein)*. J. Biol. Chem. 244 : 6049-6055.
22. Mudd, J.B. 1975. Sulfur dioxide. In responses of plants to air pollution. Edited by J.B. Mudd and T.T. Kozlowski. pp.9-22. Academic Press. New York, San Francisco, London.
23. Olszyk, D.M. and D.T. Tingey. 1984. Phytotoxicity of air pollutants : evidence for the photodetoxification of SO₂ but not O₃. Plant Physiol. 74 : 999-1005.
24. Peiser, G.D. and S.F. Yang. 1979. Ethylene and ethane production from sulfur dioxide-injured plants. Plant Physiol. 63 : 142-145.
25. Shimazaki, K., T. Sakaki and K. Sugahara. 1980. Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO₂-fumigated leaves of spinach. Res. Rep. Natl. Environ. Stud. Jpn. 11 : 91-101.
26. 松島二良・原田學 果樹の亞硫酸カスによる煙害. 第2報. 被害カンキツ樹の實態ならひに營養學的觀察. 園藝學雜誌. 34 : 25-32.
27. 松島二良・原田學 果樹の亞硫酸カスによる煙害. 第五報. 칸キツ類의亞硫酸カスの吸收の落葉ならひに體內成分との關係. 園藝學雜誌. 35 : 25-32.
28. Tager, J.M. and N. Rautanen. 1956. Sulphite oxidation by plant mitochondrial system. Enzymatic and non-enzymatic oxidation. Physiol. Plant. 9 : 665-673.
29. Tanaka, K., N. Kondo, and K. Sugahara. 1982. Accumulation of hydrogen peroxide in chloroplasts of SO₂-fumigated spinach leaves. Plant & Cell Physiol. 23 : 999-1007.
30. Tanaka, K. and K. Sugahara. 1980. Role of superoxide dismutase in the defense against SO₂ toxicity and induction of superoxide dismutase with SO₂ fumigation. Res. Rep. Nat. Inst. Environ. Stud. Jpn. 11 : 155-164.
31. 草原 淳. 1979. 二酸化硫黃の植物に及ぼす生理生化學的影響 國立公害研究所研究報告. (日本). 第10號 : 299-307.
32. Wellburn, A.R., O. Majernik, and F.M.M. Wellburn. 1972. Effects of SO₂ and NO₂ polluted air upon the ultrastructure of chloroplasts. Environ. Pollut. 3 : 37-49.
33. Zelitch, I. 1957. α -hydroxysulfonates as inhibitor of the enzymic oxidation of glycolic and latic acids. J. Biol. Chem. 24 : 251-260.
34. Ziegler, I. 1972. The effects of SO₃²⁻ on the activity of ribulose-1,5-diphosphate carboxylase in isolated spinach chloroplasts. Planta. 103 : 155-163.
35. Siegler, I. 1977. Subcellular distribution of ³⁵S sulfur in spinach leaves after application of ³⁵SO₃²⁻ and ³⁵SO₂. Planta. 135 : 25-32.