

## 造景樹木의 大氣汚染物質에 대한 被害反應(III)

— Malondialdehyde 含量을 중심으로 —<sup>1</sup>

金明姬<sup>2</sup> · 李壽燮<sup>3</sup>

## Injury Responses of Landscape Woody Plants to Air Pollutants

— Malondialdehyde content —<sup>1</sup>

Myung Hee Kim<sup>2</sup> and Soo Wook Lee<sup>3</sup>

### 要 約

大氣汚染物質에 의한 造景樹木들의 被害의 感受性 정도를 조사하기 위하여 서울, 대전 등 大都市 지역과 光陵지역을 선정하고 소나무, 잣나무, 은행나무, 튼나무 및 양버즘나무 잎을 채취하여 MDA 含量을 측정하였다. 또한 소나무, 잣나무, 스트로브잣나무, 은행나무 및 튼나무에 無處理, 0.5, 1.5 및 2.5 ppm의 SO<sub>2</sub> 가스를 각각 하루에 4時間씩 6日間 處理한 후, 잎의 MDA 含量을 測定, 分析하였다. 은행나무, 양버즘나무 및 튼나무의 MDA 含量은 非汚染地域보다 汚染地域에서 높았으며, 調査對象 樹種中 튼나무의 MDA 含量이 제일 높았다. 소나무와 잣나무에서는 葉齡이 높아질수록 MDA 含量이 증가하였다. SO<sub>2</sub> 處理時 튼나무는 處理濃度가 높아질수록 MDA 含量이 증가하였으나 다른 수종에서는 處理濃度에 따라 큰 差異가 나타나지 않았다. SO<sub>2</sub>를 6日間 處理했을 때 5樹種 모두 處理日이 경과함에 따라 MDA 生成이 증가하였으며, 특히 튼나무는 MDA 生成이 뚜렷하게 높았으며, 處理 개시 후 점점 증가하여 處理 4일 만에 最大值를 나타내다가 그 후에는 감소하였다.

### ABSTRACT

This study was conducted to investigate sensitivity of woody plants growing in urban and industrial regions of Seoul and Taejon, Korea. Malondialdehyde(MDA) contents were analyzed in tree foliage of *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Ginkgo biloba*, *Liriodendron tulipifera* and *Platanus occidentalis*. In addition, MDA contents were analyzed in the foliage of tree seedlings, i.e. *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Ginkgo biloba* and *Liriodendron tulipifera*, with the fumigation of SO<sub>2</sub> in gas chamber 4 hours a day for six days. MDA contents of leaves in *Ginkgo biloba*, *Platanus occidentalis* and *Liriodendron tulipifera* in polluted regions were higher than those in unpolluted region and among them *Liriodendron tulipifera* had the highest. MDA contents of *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* increased with the increase of needle age. MDA contents of *Liriodendron tulipifera* seedlings were increased with the higher concentrations of SO<sub>2</sub> but MDA contents in other seedlings showed no changes with SO<sub>2</sub> treatment concentrations. MDA contents in all species were increased with the passage of exposure day. Especially, *Liriodendron tulipifera* had higher MDA content than other

<sup>1</sup> 接受 1993年 10月 15日 Received on October 15, 1993.

<sup>2</sup> 中部大學 Joongbu University, Majon, Chungnam, Korea.

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

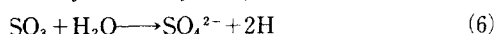
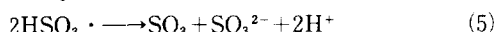
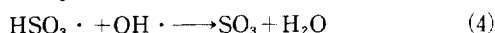
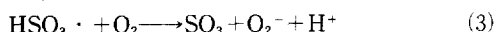
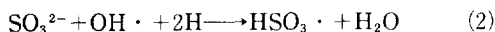
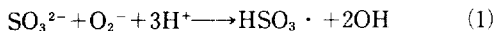
species. In *Liriodendron tulipifera* the MDA production increased with the passage of exposure day until the fourth day after that decreased.

Key words : Malondialdehyde, SO<sub>2</sub> treatment concentrations

## 緒 論

大氣汚染物質에 의한 膜의 傷害는 植物 細胞의 初期 傷害로서 극히 중요한 것이다. 生體膜을 구성하는 물질은 주로 脂質과 蛋白質로 되어 있는데 이 중 특히 膜脂質에 대한 작용으로서, 脂質을 구성하는 不飽和脂肪酸의 파괴가 시사되어 왔다<sup>4,6,15,16</sup>. 大氣汚染物質중 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 및 PAN 등은 不飽和脂肪酸의 不飽和 結合 부위에서 化學反應을 잘 일으키는 것으로 알려져 있다<sup>3,11</sup>. 植物細胞의 原形質膜과 細胞內의 膜脂質을 구성하는 脂肪酸에는 多價不飽和脂肪酸이 다량 함유되어 있는데 이는 膜의 疏水性 成分으로서 膜構造의 維持와 膜의 流動性에 중요한 역할을 한다. 따라서 膜構造의 파괴는 하찮은 것일지라도 細胞內의 生理作用에 현저한 손실을 초래하며, 또한 植物의 膜脂質 合成系를 저해하기도 한다<sup>14</sup>.

葉綠體에서 O<sub>2</sub><sup>-</sup>는 光條件下에서 生成되기 때문에 SO<sub>2</sub>와 superoxide의 相互作用으로 인하여 SO<sub>2</sub>에 의한 植物의 被害는 밤보다 낮에 더 크게 나타난다<sup>2</sup>. Asada<sup>21</sup>는 光條件의 葉綠體에서 sulfite의 酸化作用이 葉綠體에서 生成된 O<sub>2</sub><sup>-</sup>에 의해 개시되며, 그 결과 O<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> radical의 生産이 증대되어 잎 組織의 被害를 야기 할 수 있음을 시사했다. 그 反應式은 아래와 같다.



O<sub>2</sub><sup>-</sup> 以外에 OH<sup>-</sup>· 또한 反應을 開始할 수 있다. (1), (2), (3), (4) 式은 chain propagating reactions 이다. 이때 O<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>·, HSO<sub>3</sub>·는 chain carriers로 작용한다. (5) 式은 HSO<sub>3</sub>의

分解過程이고 chain terminating 反應이다. (6) 式은 SO<sub>2</sub>가 hydration되어 sulfate가 형성되는 反應이다. Sulfite에서 sulfate로의 酸化는 sulfite의 毒性을 경감시키므로써 SO<sub>2</sub>의 被害를 경감시킬 가능성도 있다<sup>9</sup>. SO<sub>2</sub>는 chain reaction을 통하여 sulfite를 aerobic oxidation 시켜서 O<sub>2</sub><sup>-</sup>의 生産을 증가시키며, O<sub>2</sub><sup>-</sup>·는 葉綠素를 파괴할 뿐만 아니라 脂質의 過酸化에 관여하는 <sup>1</sup>O<sub>2</sub>를 생산한다<sup>14,15</sup>.

生體內에서 脂質의 過酸化는 O<sub>2</sub><sup>-</sup>로부터 生成된 <sup>1</sup>O<sub>2</sub>와 不飽和脂肪酸의 相互作用으로 형성된 malondialdehyde의 量을 측정하여 조사되는데<sup>4,15</sup>, SO<sub>2</sub> 處理에 의해 可視障害를 받은 잎중에 MDA가 生成되고 있기 때문에, SO<sub>2</sub>가 脂質의 過酸化 反應을 일으키고 있음이 알려져 있다<sup>6</sup>.

細胞가 生命現象을 營爲하는 反應의 場, 예를 들면 光合成을 일으키는 葉綠體(chloroplast)와 呼吸을 하는 mitochondria는 lamella 構造를 갖고 있다. 이 lamella 構造의 構成成分인 脂質(lipid)의 破壞는 膜의 生理機能 障害로 이어진다.

SO<sub>2</sub>에 의하여 lamella 構造의 파괴 및 酵素活性의 低下에 관해서 가장 중요한 관점으로 이것의 構成 成分인 蛋白質의 S-S 結合이 亞黃酸에 의하여 解裂되는 反應(RSSR + SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> → RS<sup>-</sup> + RSSO<sub>3</sub><sup>-</sup>)은 이미 알려진 사실이다<sup>11,7</sup>. 최근 Miszalski 等<sup>10</sup>은 SO<sub>2</sub>에 의하여 thylakoid 膜의 -SH 基가 증가함을 관찰하였는데 이는 lamella 蛋白質이 공격받고 있음을 암시해 준다.

따라서 본 연구는 대기오염물질에 의한 조경수목의 감수성 정도를 MDA 함량을 측정하여 調査, 分析하였다.

## 材料 및 方法

### 1. 野外試料의 採取

試料의 채취 地點으로는 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 大禾工團 地域의 街路 및 인근 야산 地域을 선정 하였으며, 對照區 地域으로는 京畿道 光陵 林業 試驗場의 樹木園을 선정하였다<sup>7)</sup>. 供試樹種으로는 造景樹로 많이 이용되는 은행나무, 양버즘나무, 튜립나무, 잣나무 및 소나무를 선정하였다. 南山 地域의 森林內에서 소나무와 잣나무 잎을 채취하고 大禾工團 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 채취하였다. 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 地域內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 채취하였다. 채취잎은 dry ice box에 넣어 보관, 운반하 드로서 온도에 의한 酵素의 變異를 최소화하였다. 채취잎은 육안적 피해 증상이 없는 건전한 잎을 선택하였으나, 10월 채취시 闊葉樹의 일부 잎은 약간의 黃色斑點 현상이 있는 것도 있었으며, 針葉樹의 3년생잎의 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. 室內 Pot 苗木의 SO<sub>2</sub> 處理**

SO<sub>2</sub> 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 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 SO<sub>2</sub> 接觸時 적용된 接觸箱의 溫度는 28±2℃, 濕度는 60-70%였으며, 光源은 水銀燈과 白熱燈을 사용하여 PAR 180μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-2</sup>로 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 후에 각 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. SO<sub>2</sub> 處理濃度 水準은 無處理, 0.5, 1.5 및 2.5 ppm으로 각각 하루에 4時間씩 6日間 處理하였다. 가스 處理時 接觸箱內의 SO<sub>2</sub> 濃度는 Pulsed fluorescent analyzer(Thermo. Electron Co.)를 사용하여 측정하였다.

**3. 調査方法**

1) Malondialdehyde(MDA) 測定

脂肪 酸化物의 指標物인 MDA 측정은 0.5% Thiobarbituric acid와 20% Trichloroacetic acid 混合液(3 : 2 V/V) 6ml에 助酵素 3ml를 첨가한 混合液을 95℃ Water bath에서 30分間 incubation 시킨 다음 꺼내어 冷却시킨 후, 거름 종이에 걸른 溶液으로 532nm, 600nm의 吸光度를 측정한다(A532-600nm)값을 155mM<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>의 吸光係數를 사용하여 계산하였다<sup>4)</sup>.

2) Protein 測定

蛋白質量은 Lowry 等<sup>8)</sup> 法에 의하여 측정하였다. 助酵素 0.5ml에 CuSO<sub>4</sub> reagent 5ml를 혼합하여 室溫에서 10分間 둔 다음, 1N Phenol reagent 0.5ml를 첨가하여 잘 혼합하고, 30分間 放置 후, 550nm에서 分光分析機로 吸光度를 측정하였다.

**結果 및 考察**

細胞 成分中 光合成을 하는 葉綠體와 呼吸을 하는 mitochondria는 lamella 구조를 갖고 있다. 이 lamella 구조의 구성 성분인 脂質의 파괴는 膜의 生理機能에 장애를 일으킨다. 生體內 脂肪의 過酸化酸物로서, 生體膜의 intactness 정도를 나타내는 기준은 malondialdehyde의 生成을 측정함으로써 알 수 있다<sup>4,15)</sup>.

各 樹種別로 野外에서 조사한 地域間의 MDA 變化를 季節別로 나타낸 것은 그림 1-5와 같다. 소나무의 MDA 함량(그림 1)은 光陵地域과 汚染 地域間에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으나 계절에 따라서는 봄에서 겨울로 갈수록 MDA 함량이 증가하였다. 잣나무의 MDA 함량(그림 2)은 宗廟, 南山, 昌慶宮 및 大禾洞 等の 汚染地域이 光陵 地域보다 높게 나타났으며, 季節別 變化는 5

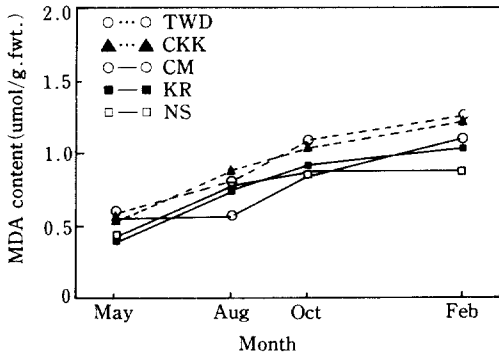


Fig. 1. Seasonal changes of malondialdehyde contents of needles of *Pinus densiflora* between five sample plots.

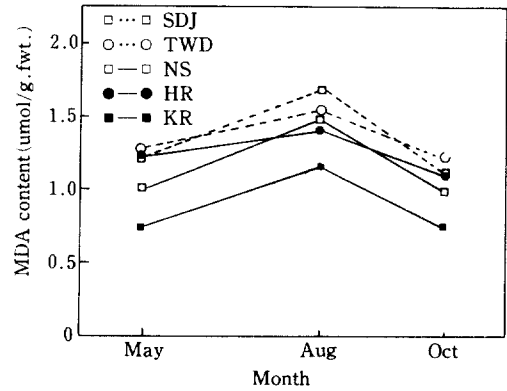


Fig. 4. Seasonal changes of malondialdehyde contents of leaves of *Liriodendron tulipifera* between five sample plots.

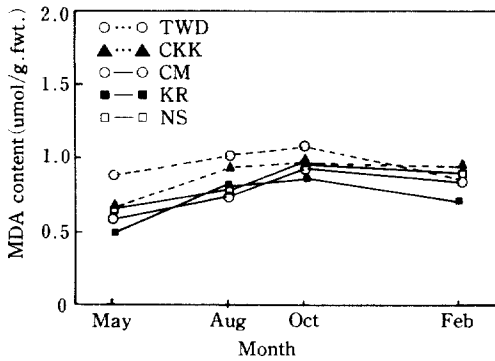


Fig. 2. Seasonal changes of malondialdehyde contents of needles of *Pinus koraiensis* between five sample plots.

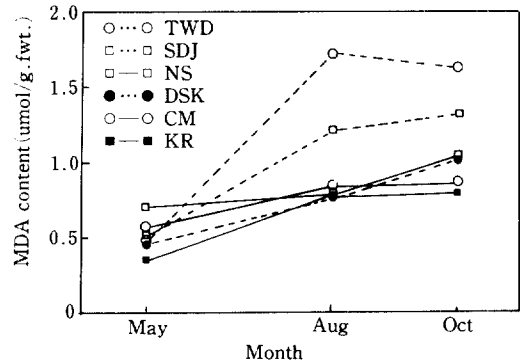


Fig. 5. Seasonal changes of malondialdehyde contents of leaves of *Platanus occidentalis* between six sample plots.

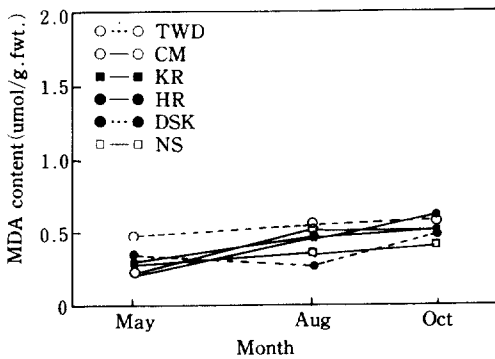


Fig. 3. Seasonal changes of malondialdehyde contents of leavess of *Ginkgo biloba* between six sample plots.

월에서 10월까지 증가하다 2월에 약간 감소하였다. 은행나무의 MDA 함량(그림 3)은 地域間, 季節間 유의차가 인정되지 않았다. 튜립나무(그림 4)는 汚染地域이 모두 光陵地域보다 높은 함량을 보였으며, 8월에 최대치를 나타내었다. 그림 5는 양버즘나무의 MDA 함량인데 光陵地域보다 汚染地域이 대부분 높았으며, 5월에서 10월까지 증가하는 경향을 나타내었다. 튜립나무와 양버즘나무의 MDA 함량은 5樹種中에서 제일 높았으며, 季節別 변화도 뚜렷하였고, 光陵地域과 汚染地域間的 차이도 뚜렷하였다. 調査對象 樹種中 汚染物質에 대한 感受性이 제일 약한 튜립나무의 MDA 含量이 제일 높게 나타났다. Jäger 등<sup>3)</sup>은

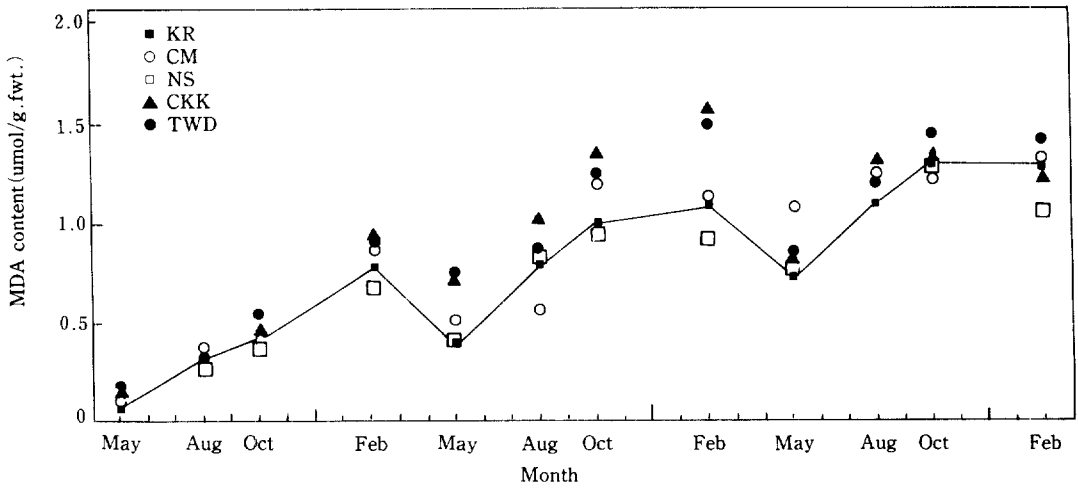


Fig. 6. Seasonal changes of malondialdehyde contents in three needles ages of *Pinus densiflora* between five sample plots.

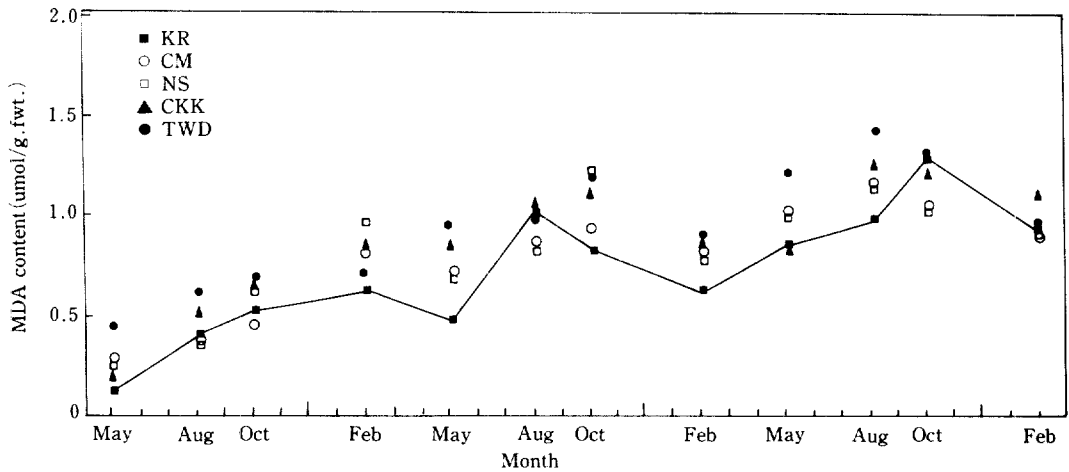


Fig. 7. Seasonal changes of malondialdehyde contents in three needles ages of *Pinus koraiensis* between five sample plots.

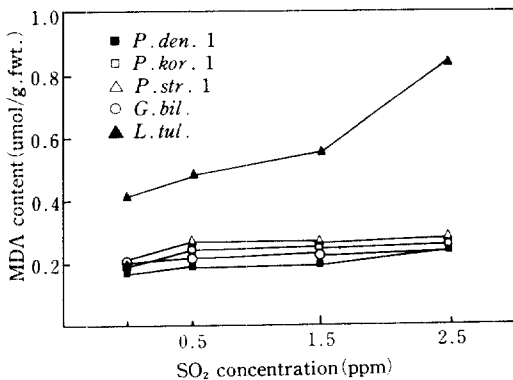


Fig. 8. Malondialdehyde contents of five tree species exposed to different SO<sub>2</sub> concentrations.

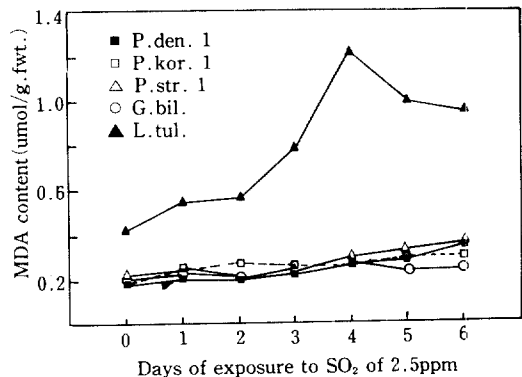


Fig. 9. Malondialdehyde contents of five tree species exposed to 2.5ppm SO<sub>2</sub> 4 hours a day for 6 days.

感受性이 다른 種에 對하여  $SO_2$ 를 處理한 후 MDA 含量을 측정한 결과, 민감한 種은 抵抗性이 강한 種보다 MDA 濃도가 상당히 높았음을 보고하였다.

그림 6은 野外에 있는 각 地域의 季節別, 葉令間의 MDA 含量을 年度別로 배열하여 나타낸 것이다. 光陵地域의 MDA 含量을 보면, 新葉이 나서부터 계속 증가하여 2월에 최대치를 이루다가 2年生잎에서는 이듬해 5월에 크게 떨어졌다가 다시 증가하기 시작하여 2월에 최대치를 이루었다. 3年生잎에서도 비슷하게 5월에 떨어졌다가 2월까지 증가하는 경향이었다. 전체적으로 1, 2, 3年生잎의 MDA 含量은 葉令이 높아질수록 증가하고 있다. 반면 南山, 宗廟, 昌慶宮 및 大禾洞 等の 汚染地域의 MDA 含量은 光陵地域과 뚜렷이 구별되지 않았고 季節別 변화는 光陵地域과 유사하게 나타났다.

그림 7은 野外에 있는 잣나무에서 각 地域의 季節別, 葉令間의 MDA 含量을 年度別로 배열하여 나타낸 것이다. 光陵地域의 MDA 含量은 新葉이 나서부터 계속 증가하여 2월에 최대치를 이루었다. 2年生잎에서는 5월에 약간 떨어졌다가 다시 증가하여 10월에 최대치를 이루고 소나무와는 다르게 2월에 떨어졌다. 3年生잎에서는 봄에도 계속 증가하여 10월에 최대치를 나타내고 2월에 떨어졌다. 1, 2, 3年生잎의 전체적 변화는 소나무와 비슷하게 葉令이 높아질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 잣나무의 光陵地域과 汚染地域간의 MDA 含量 차이는 소나무보다 뚜렷이 나타났으며, 2年生잎에서 8월에, 3年生잎에서 10월을 제외하고 대부분 光陵보다 汚染地域이 높았다.

그림 8은  $SO_2$ 를 각 濃度別로 6일간 처리한 후, 각 苗木의 MDA 含量 변화를 나타내고 있다. 소나무, 잣나무, 스트로브잣나무, 은행나무 및 튼나무에서 공히 處理濃도가 높아질수록 MDA 生成이 증가하였으며, 3種의 針葉樹와 은행나무의 MDA 濃도는 큰 차이가 나타나지 않은 반면, 튼나무의 MDA 含量은 상당히 높게 나타났다.

그림 9는 2.5ppm  $SO_2$ 를 6일간 處理했을 때, 處理日別로 나타낸 각 樹種의 MDA 含量 변화이다. 5樹種 모두 處理日이 경과함에 따라 MDA 生成이 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 튼나무에서는 다른 樹種에 비하여 MDA 生成이

뚜렷하게 나타났으며, 處理開始 후 점점 증가하여 처리 4일만에 最大値를 나타내다가 그 후에는 약간 감소하고 있다. 이상의 결과를 볼 때, 튼나무에서는 MDA 生成이 뚜렷하게 나타났으나, 다른 樹種에서는 處理濃度間에 차이가 뚜렷하지 않았기 때문에 일반적으로 MDA 含量을 大氣汚染의 指標로 이용하기에는 어렵고, 樹種別로 MDA 生成機作에 관한 연구가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

Tanaka와 Sugahara<sup>16)</sup>는 포플라 잎에 2.0ppm  $SO_2$ 를 燻蒸한 후, 葉綠素 파괴와 나란히 MDA 量이 증가함을 관찰하였고, Shimazaki 等<sup>13)</sup>은  $SO_2$  處理한 시금치 잎에서 chlorophyll a 分解와 平行하여 MDA 生成이 진행되는 것을 관찰했다. 그러나 MDA 生成에 관한 活性酸素의 scavenger 效果를 조사한 결과 ' $O_2$ '의 scavenger인 DABCO{1, 4-diazabicyclo-[2, 2, 2]-octane}는 MDA 형성을 억제하였으며, ' $O_2$ '의 壽命延長物質인  $D_2O$ 는 MDA 형성을 증가시켰다고 하였다. 또한 DABCO,  $D_2O$ 는 葉綠素 파괴에 영향을 미치지 않음을 관찰했다. 즉 脂質을 酸化하는 酸化力은 葉綠素의 分解를 일으키는  $O_2$ -에 의한 것이 아니고,  $O_2$ -에서 유래하는 ' $O_2$ '이 지배적으로 작용함을 암시하여 주고 있다고 하였다.

## 結 論

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

1. 은행나무, 양버즘나무 및 튼나무의 MDA 含量은 非汚染地域보다 汚染地域에서 높았으며, 튼나무의 MDA 含量이 제일 높았다.
2. 소나무와 잣나무에서는 葉令이 높아질수록 MDA 含量이 증가하였다.
3.  $SO_2$  處理時 튼나무는 處理濃도가 높아질수록 MDA 含量이 증가하였으나 다른 수종에서는 處理濃도에 따라 큰 差異가 나타나지 않았다.
4.  $SO_2$ 를 6日間 處理했을 때 5樹種 모두 處理日이 경과함에 따라 MDA 生成이 증가하였으며, 특히 튼나무에서는 MDA 生成이 뚜렷하게 높았으며, 處理 개시 후 점점 증가하여 處理 4일만에 最大置를 나타내다가 그 후에는 감소하였다.

引用文獻

1. 安藤萬善男・竹内正辛. 1973. 樹木の葉の硫黄吸収能. 84回 日本林學會大會講演集. 415-416.
2. 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.
3. Brennan, E. and I. Leone. 1968. The response of plants to sulfur dioxide or ozone-polluted air supplied at varying flow rates. Plant Pathol. 58 : 1661-1669.
4. Heath, R.L. and L. Packer. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplast. 1. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Arch. Biochem. Biophys. 125 : 189-198.
5. Jäger, H.J., J. Bender, and L. Grunhage. 1985. Metabolic responses of plant differing in SO<sub>2</sub> sensitivity towards SO<sub>2</sub> fumigation. Environ. Pollut. Ser. A. 39 : 317-335.
6. 井上尙 1974. オゾンによる内生エチレンと樹木の落葉現象の關係. 大氣汚染研究 9 : 375.
7. 金明姬・李壽煜. 1992. 造景樹木の 大氣汚染物質에 대한 防禦機能(II) - POD 活性을 중심으로 -. 한국임학회지 81(3) : 234-246.
8. Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.H. Farr, and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. J.Biol.Chem. 193 : 256-275.
9. Miller, J.E. and P.B. Xerikos. 1979. Residence time of sulphite in SO<sub>2</sub> 'sensitive' and 'tolerant' soybean cultivars. Environ.Pollut. 18 : 259-264.
10. Miszalski, Z. and I. Zigler. 1979. Increase in chloroplastic thiol groups SO<sub>2</sub> and its effect on light modulation of NADP-dependent glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase. Planta. 145 : 383-387.
11. Mudd, J.B. 1976. The role of free radicals in toxicity of air pollutants(Peroxyacyl nitrates). In : Free radicals in biology. Vol. II. Edited by Pryor, W.A. Academic Press, London. 203-211.
12. Mudd, J.B., T.T. Mcmanus, A. Ongun, and T.E. McCullogh. 1971b. Inhibition of glycolipid biosynthesis in chloroplasts by ozone and sulfhydryl reagents. Plant Physiol. 48 : 335-339.
13. Shimazaki, K., T. Sakaki and K. Sugahara. 1980. Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO<sub>2</sub>-fumigated leaves of spinach. Res.Rep.Natl. Environ.Stud.Jpn. 11 : 91-101.
14. Shimazaki, K. and K. Sugahara. 1978. Studies on mechanisms of sulfur dioxide phytotoxicity. I. Effects of sulfur dioxide on photosynthetic electron transport and chlorophyll breakdown in higher plants. Studies on Evaluation and Amelioration of Air Pollution by Plants. Progress report in 1976-1977. R-2-78 : 35-46.
15. Takahama, U. and M. Nishimura. 1976. Effects of electron donor and acceptors electron transfer mediators, and superoxide dismutase on lipid peroxidation in illuminated chloroplast fragments. Plant & Cell Physiol. 17 : 111-118.
16. Tanaka, K. and K. Sugahara. 1980. Role of superoxide dismutase in the defense against SO<sub>2</sub> toxicity and induction of superoxide dismutase with SO<sub>2</sub> fumigation. Res.Rep.Natl.Inst.Environ.Stud.Jpn. 11 : 155-164.
17. 菅原 淳. 1979. 二酸化硫黄の植物に及ぼす生理生化学的影響. 國立公害研究所 研究報告(日本) 10 : 299-307.