

大氣汚染物質과 植物環境  
—亞黃酸에 의한 影響을 中心으로—

李美淳·李瑞來  
(韓國原子力研究所 農業生化學研究室)

Air Pollutants and Vegetation  
—With Special Reference to Sulfur Dioxide—

Lee, Mie-Soon and Su-Rae Lee  
(Korea Atomic Energy Research Institute, Seoul)

ABSTRACT

Effects of air pollutants on vegetation were reviewed and discussed with special reference to sulfur dioxide. Main contents were on the sources, meteorological factors, injury symptoms, relative sensitivity, growth/yield, indicator/diagnosis, combined effects, injury mechanism and effects on plant metabolism, injury diminishing measures, and future research needs.

序 言

地球의 環境汚染이 良質의 食糧, 飼料, 纖維생산 및 인간의 健康과 安寧을 위협하며 動植物의 生活環境에 극심한 被害 및 變화를 주고 있음으로 이에 대한 防止策이 문제시되고 있음은 당연한 일이다(Shaw *et al.*, 1971). 大都市 및 工場지대 부근에서 噴出되는 大氣汚染 물질이 植物環境에 막대한 被害를 준다는 사실은 오래전부터 알려져 왔으며(Brandt and Heck, 1967), 이에 대한 研究가 이미 19세기 中葉부터 시작되어 왔다(Heggstad and Heck, 1971).

현재 알려져 있는 중요한 大氣汚染 물질에는 aldehyde, ammonia, arsine, carbon monoxide, chlorine, ethylene, hydrogen chloride, hydrogen fluoride 및 기타 弗化物, sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), hydrogen sulfide 및 기타 硫黃化合物, hydrogen cyanide, nitrogen oxide, phosgene (carbonyl chloride), hydrocarbon 및 浮遊입자(煤煙, 粉塵) 등이 있다. 一次汚染 물질의 光化學的 반응에 의하여 생성되는 ozone, PAN(peroxyacetyl nitrate) 및 有機酸과 같은 산화물도 식물에 被害를 주는 중요한 大氣汚染 물질이 된다(Wood, 1963; Foy, 1970; Heggstad and Heck, 1971). 그밖에 微量

元素, 重金屬, 農藥 및 acid aerosol 등도 大氣汚染 물질에 포함된다(Heggstad and Heck, 1971; Heck, 1973).

Ozone 및 SO<sub>2</sub>는 널리 분포되어 있고 현재 作物생산에 影響을 주는 가장 중요한 大氣汚染 물질로 알려져 있다(Heggstad and Heck, 1971; Heck, 1973). 미국에서는 ozone이 어떠한 다른 大氣汚染 물질보다 식물체에 많은 被害를 주는 것으로 推定하지만 전 세계적으로 볼 때는 SO<sub>2</sub>의 被害가 더욱 크다는 증거가 있다(Heggstad and Heck, 1971).

최근 우리나라에서는 급진적인 經濟成長과 아울러 大氣汚染이 심각한 社會問題의 하나로 대두되고 있다. 被害狀況에 관하여는 精確한 統計資料가 전여되어 있으나 공식적으로 集計된 被害면적(農耕地)을 보면 1971년도에 1,332 ha로 알려져 있다. 大氣汚染에 의한 作物의 被害면적은 1971년도에 있어서 1968년보다 약 10배의 증가를 보였으며 보고되지 않았거나 누락된 경우를 고려하면 상당한 면적이 被害를 받고 있는 것으로 생각된다. 被害對象 작물은 水稻, 과수 및 채소등의 중요한 經濟作物을 포함한다(鄭 등, 1971; 鄭 등, 1973). 우리나라에서 SO<sub>2</sub>는 가장 被害가 심한 大氣汚染 물질로 思料된다(鄭, 1970).

大氣汚染 물질이 國民保健 및 食糧生産을 해칠 우려가 있는 現時點에서 볼 때 뒤늦은 감이 있지만 우리나라에서도 문제해결을 향한 체계적인 연구가 절실히 요청되고 있다. 따라서 본 綜說은 수집된 문헌의 범위내에서 우선  $SO_2$ 가 식물체에 미치는 被害에 관한 國內外의 研究動向을 살펴프르써 우리나라에서 앞으로 수행되어야 할 研究課題를 제시하는데 그 목적이 있다. 중요한 大氣汚染 물질에 의한 植物의 被害에 관하여는 이미 종합적으로 鄭(1971)에 의하여 記述된 바 있다.

### 發生給源

$SO_2$ 는 주로 石炭의 燃燒, 石油 및 천연가스 등의 생산, 精製, 利用과정, 황산 및 硫黃의 제조와 工業的 利用, 鑛石 특히 銅, 鉛, 亞鉛, 니켈 등의 精製 및 製鍊과정에서 발생한다. 石炭의 燃燒가  $SO_2$ 의 主給源이며  $SO_2$  排出量은 石炭의 硫黃함량에 의한다. 미국에서 石炭의 硫黃함량은 1% 미만으로 부터 6%까지로 평균 2%라고 한다. 가장 중요한  $SO_2$ 의 給源은 火力發電이며 그 다음이 工業過程에서 발생하는 것이다(Wood, 1968).

### 氣象的 要因

風速 혹은 수직상 氣溫의 差와 같은 氣象的 要因은 大氣汚染 물질의 擴散, 즉 공기중의 汚染物質의 농도를 결정하기 때문에 중요하다. 風速은 汚染되는 空氣의 流速을 결정하는 媒介體로써 작용하여 汚染물질의 密集를 막는다. 수직상 氣溫의 差는 공기의 上昇 및 下降에 영향하며 따라서 大氣汚染 물질이 수직방향으로 擴散되는 率을 조정한다. 氣象的 要因은  $SO_2$ 의 酸化率,  $SO_2$ 가 수분을 흡수해서 硫酸微滴을 형성하는 率에 영향한다(Neiburger, 1967).

Leone *et al.*(1962)에 의하면 大氣汚染 물질의 함량은 氣壓과 직접적인 相關관계가 있고 風速 및 視界(visibility)와는 逆相關관계가 있다고 한다.

大氣中の  $SO_2$  함량은 계절에 따라 형태는 다르지만 週期的인 사이클을 나타낸다고 보고 되었다. 겨울철에는 하루중 낮시간에 농도가 높고 황혼두렵에 낮아졌으며 다른 계절에는 이른 오후에 낮아졌는데 이것은 하루중 그 시간의 風向과 관계된 듯 하다. 일주일을 週期로 볼 때는 일요일과 월요일에 농도가 낮고 목요일 및 금요일에 최고로 증가했으며 연중으로 보면 겨울철이 여름철보다 3배이상 높았다고 한다(Youden, 1941). 여름 3개월 동안 측정된 결과에 의하면  $SO_2$  함량이 7월중순경 최고치에 도달했다고 한다(Reinert *et al.*, 1970).

大氣中の  $SO_2$  함량에 대한 바람의 영향을 조사한 바

에 의하면 工場이 密集된 지역으로 부터 바람이 불어 올때엔 郊外 혹은 住宅街의 방향으로 부터 바람이 불어올때 보다 大氣中에  $SO_2$  함량이 높았다고 한다. 特定한 4시간을 기준으로 할 때 大氣中の  $SO_2$  함량이 0.1 ppm을 초과하는 대부분의 경우는 風速이 8 m.p.h 이하일 때였다고 한다(Leone *et al.*, 1966).

Smith(1938)는 大氣中 汚染 물질이 晝間, 夜間 및 흐린날씨에 發生給源으로 부터 분포하는 전형적 패턴과 아울러 하루중의 농도 및 氣象要因의 變異를 그림으로 표시하였다. 大氣汚染 물질에 의한 植物의 反應은 실험실에서 얻은 결과를 그대트 圃場에 적용하기란 곤란하다. 理想的인 실험을 위해서는 植物體가 노출된 大氣中の 汚染물질의 함량을 圃場에서 측정해야 하지만 氣象조건만 세밀히 안다면 發生量을 고려해서 大氣中の 汚染물질의 함량을 대략 추정할 수 있다.

### 被害症狀

$SO_2$ 에 의한 植物葉의 被害는 急性(acute) 被害 및 慢性(chronic or chlorotic) 被害로 大分된다(Katz, 1949; Adams 1956). 急性被害는 毒性을 誘發할만한 다량의  $SO_2$ 를 신속히 흡수하므로써 발생하는데 植物의 品種 및 잎의 成熟度에 의한다. 被害는 葉緣 및 葉脈間에 壞死부위트써 나타나며 葉脈을 받은 부위는 처음에 칙칙한 濃綠色의 水浸狀 斑點을 보이다가 전조하면 대부분의 種에서 脫色되어 상아색을 띄우며 少數의 種에서 褐色 및 赤色을 띄운다. 壞死부위는 全葉을 통해 확대되는데 氣孔이 거의 없고 細胞간격이 대단히 제한되어 있는 葉脈 바로 주위의 부분은 被害를 잘 받지 않는다. 보통 葉脈은 綠色을 띄우고 健全하나 시간이 경과해서 被害가 심해지면 葉脈도 침입을 받아 脫色된다. 충분히 발육된 幼葉이  $SO_2$ 에 가장 敏感하며 成葉이 다음이고 단장 자라는 잎은 急性被害를 잘 나타내지 않는다(Brandt and Heck, 1967; Daines, 1968).

單子葉植物의 잎은 低濃度에 노출한 경우 잎 先端만 被害를 입고 高濃度에서는 완전히 脫色된다. 幼植物의 잎은 먼저 先端에서 被害를 보이며 농도 및 노출시간이 증가할수록 아래로 확대된다. 草本性植物은 平行脈을 가지고 있으므로 葉肉全葉이 脫色패턴을 보이는 경우가 많은데 이때 보통 中央에 있는 主葉脈은 被害를 입지 않는다. 草本性植物은 柵狀조직을 갖고 있지 않으므로 葉肉全葉이 균일하게 脫色된다(Brandt and Heck, 1967; Daines, 1968).

針葉樹類의 老葉은 中間농도의  $SO_2$ 에서 黃化하며 일찍 脫落한다. 高濃度에 노출하면 잎에 水浸狀 斑點이

나타났다가 즉시 先端이 赤褐色을 띄우며 壞死한다. 壞死部位는 먼저 잎주위에 帶狀으로 나타난다. 完全展開葉이 가장 심한 壞死를 보이나 老葉이 먼저 脫落한다. 幼葉은 氣孔의 不活性때문에 被害를 입지 않는다고 알려져 있다. 針狀葉은 가을 및 겨울보다는 봄 또는 여름에 더욱 많은  $SO_2$ 를 흡수하며 훨씬 被害에 敏感하다는 보고도 있다(Daines, 1968).

針葉樹類의 잎은 內部葉構造가 草本性 혹은 기타 植物과 相異하여  $SO_2$ 에 노출되면 細胞가 죽어 構造的 성질을 잃지만 붕괴는 잘 일어나지 않는다.  $SO_2$ 에 의해 致死하게 되면 물론 細胞의 水분이 消失되며 綠色の 葉綠素가 파괴된다. 低濃度의  $SO_2$ 에 장기간 慢性的으로 노출시킨 경우에 關葉植物의 잎은 全面的인 黃化현상을 나타낸다(Brandt and Heck, 1967).

$SO_2$  被害에 있어서 細胞의 崩壞現象은 먼저 海綿조직 및 裏面의 表皮細胞에서 나타나며 다음에 바로 위에 있는 柵狀조직이 침입을 받아 葉綠體가 파괴된다. 上部의 表皮細胞는 마지막으로 붕괴된다(Brandt and Heck 1967; Solberg and Adams, 1956).

### 相對的 敏感度

$SO_2$ 의 被害에 대한 敏感度는 植物의 種에 따라 상당한 變異가 있다. 이 變異는 잎에서의  $SO_2$  흡수율이 상이한 때문으로 간주된다. Alfalfa, 곡류, 호박, 목화, 포도 등과 같이 生理작용이 활발한 柔軟한 잎을 가진 식물체는 일반적으로 예민하다. 옥수수나 하루종 대부분의 시간동안 기공이 꼭 닫혀 있으므로 예외에 속한다. 多肉性 잎을 가진 식물체나 針葉植物은 튼튼해지기 전에 새로 잎이 형성될 때를 제외하고는 둔감하다. 감귤류나 소나무가 이에 속한다(Thomas, 1961).

O'Gara는 alfalfa를 기준으로 해서  $SO_2$ 에 대한 상대적 敏感度의 係數를 100개의 식물체에 대하여 조사하였다. 係數는 각 식물에 相異한 농도의 개스를 한시간 동안 燻蒸해서 被害症狀가 나타나기 시작하는 농도를 구한 것이다. Prunus와 같은 식물은 매우 일정한 係數를 갖지만 針葉樹類, gladiolus 및 장미와 같은 種에서는 敏感度가 品種에 따라 대단히 相異하다. 그러므로 O'Gara의 係數는 참고는 되지만 氣候, 品種 및 生長시기가 相異하면 變異를 나타낸다.

Zimmerman and Hitchcock (1956)에 의하면 chicory, alfalfa, geranium, buttonbush, eggplant 등은  $SO_2$ 에 대단히 敏感하고 Jerusalem cherry, tulip, maize, Ixora, field and sweet corn, stevia 등은  $SO_2$ 에 대단히 鈍感한 것으로 나타났다.

Adedipe *et al.* (1972)은 花壇植物 중에서 begonia 및 petunia가  $SO_2$ 에 가장 敏感하고 coleus 및 snapdragon은 약간 敏感했으며 marigold, celosia, impatiens 및 salvia는 抵抗力이 있다고 보고하였다. 花壇植物로써 가장 보편적인 begonia 및 petunia는  $SO_2$  및 기타 大氣汚染 물질에 대한 각 品種의 敏感度가 相異하다고 보고 되었으며 (Feder *et al.*, 1969; Leone and Brennan, 1969), petunia의 品種間 反應 결과에 의하면 한가지 大氣汚染 물질에 抵抗力이 있는 品種은 다른 여러가지 大氣汚染 물질에도 抵抗力이 있다는 것이 나타났다(Feder *et al.*, 1969). 그러나 大豆品種에 있어서는  $SO_2$  및 ozone에 대한 敏感度가 일치하지 않았다(Miller *et al.*, 1974). 잔디 品種의  $SO_2$ 에 대한 反應을 보면 red fescue 및 bentgrass는 대단히 敏感하며 Bermuda grass 및 zoysia는 抵抗力이 있고 blue grass 및 rye grass는 그 중간에 속한다고 보고되었다(Brennan and Halisky, 1970).

$SO_2$  피해에 대한 敏感度에 영향을 주는 要因중 가장 중요한 것은 다음과 같다.

溫度: Setterstrom and Zimmerman (1939)에 의하면 植物體는 高溫에서 보다  $4.4^{\circ}C$  혹은 그 이하의 온도에서  $SO_2$ 에 대해 抵抗力을 갖는다. 그러나  $18-40^{\circ}C$  범위 이내가 아닌 한  $4^{\circ}C$  이상에서는 敏感度에 큰 變異가 없다.  $SO_2$ 의 毒害작용은 일정한 범위내에서는 온도가 상승함에 따라 증가하며 이러한 영향은 針葉樹類가 低溫에서 抵抗力이 있음을 보아 명백하다(Katz, 1949).

濕度: 일반적으로  $SO_2$ 에 대한 抵抗力은 相對濕도가 증가함에 따라 감소한다. 상대습도 40% 이상의 범위에서 지어도 20%의 차이가 눈에 별만한 敏感度의 차이를 나타내는 데에 필요한 것 같다(Setterstrom and Zimmerman, 1939). 萎凋植物은 膨潤된 식물체보다  $SO_2$ 에 더욱 저항성이 있다.

土壤條件: 토양 濕도가 생장에 적당한 경우 植物體가  $SO_2$ 에 노출될 때 土壤濕度の 微微한 변화는 敏感度에 영향을 주지 않는다. 그러나 식물체가 萎凋係數에 近接할 때는 抵抗力이 현저히 증가한다.  $SO_2$ 에 露出時의 土壤水分 함량이 동일하다고 해도 충분한 수분공급 하에서 생성한 植物體가 불충분한 수분공급 하에서 생성한 植物體보다  $SO_2$  被害에 대하여 훨씬 敏感하다. 또한 척박한 토양에서 성장한 植物體는 肥沃한 토양에서 성장한 植物體보다  $SO_2$  피해에 대하여 훨씬 敏感하다(Setterstrom and Zimmerman, 1939).

光度: 그늘에서 자란 植物體는 그늘 아닌 곳에서 자

란 植物體보다 SO<sub>2</sub>에 대한 피해에 더욱 敏感하다 (Setterstrom and Zimmerman, 1939). SO<sub>2</sub> 피해와 적어도 3000 ft-c 까지의 노출 光度의 증가사이에는 正의 相關관계가 있다고 보고되었다. SO<sub>2</sub>에 敏感한 植物體 른 야간동안 低濃度인 SO<sub>2</sub>에 노출하는 것은 慢性的 피해를 초래하는 요인이 될 수 있다 (Heggestad and Heck, 1971).

植物體의 成熟度: 어린 식물체가 성숙한 식물체보다 SO<sub>2</sub> 피해에 대하여 더욱 抵抗性을 갖는다. 그리고 幼葉이나 老葉보다 中間葉이 가장 敏感하다 (Zimmerman and Crocker, 1934; Setterstrom and Zimmerman, 1939).

露出時間 및 濃度: 다른 요인이 동일한 경우 SO<sub>2</sub>의 피해는 물론 노출시간 및 농도가 증가함에 따라 심해진다 (Zimmerman and Crocker, 1934). Alfalfa에 短時間 여러번 燻蒸한 결과 1922년에 O'Gara는 露出시간 (t=시간)과 최대로 敏感한 조건하에서 약간의 被害를 일으키는 농도 (c=ppm) 사이에는 다음과 같이 逆比例 관계가 성립한다고 결론지었다.

$$(c=0.33) t=0.92$$

일정한 0.33 ppm은 무한히 걸릴 수 있다고 추정되는 농도를 나타낸다. 물론 이것은 短期露出時와 다른 조건을 포함하는 長期露出時에는 적용되지 않는다. 한시간 노출시에 c는 1.25 ppm이다 (Thomas, 1961).

O'Gara의 數式 [(c-a)t=b]은 비교적 단기간에 발달된 急性被害만을 對象으로 한 것이며 parameter a 및 b는 식물의 種 및 品種과 被害정도에 의존한다. 이상의 數式은  $c=b/t+a$ 로 變形한 수 있으며 c때 1/t을 plot 하면 직선이 된다. Parameter a는 1/t이 0이거나 1가 無限大일 때의 intercept이다. 이 intercept는 피해를 이트키는 최저 농도라고 할 수 있다 (Brandt and Heck, 1967; Heggestad and Heck, 1971).

O'Gara의 數式은 일정한 정도의 葉破損과 일정한 정도의 敏感度에 대하여 一般化되었다. 최고의 敏感度를 가졌을때 다음과 같은 세 식이 성립되었다.

$$(c=0.24) t=0.94 \quad \text{약간의 잎 파괴}$$

$$(c=1.4) t=2.1 \quad \text{50\%의 잎 파괴}$$

$$(c=2.6) t=3.2 \quad \text{100\%의 잎 파괴}$$

산화되지 않은 sulfite로 존재할 때에 잎에 대한 SO<sub>2</sub>의 毒性量은 건조한 조직에서 1,350 ppm S라는 것이 나타났다. 活性細胞 물질이 총 葉物質의 반이라고 하면 이 數値는 細胞內에서 약 2,700 ppm이 될 것이다.

O'Gara의 數式 형태에 理論的인 근거는 없으며 이것은 단지 제한된 시간동안 노출시켰을때 얻은 실험결

과에 부합시킨 數學的 公式일 뿐이다. Guderian *et al.* (1960)은 그들의 실험결과를 잘 記述하는 指數 關係를  $t=ke^{-a(c-r)}$ 이라고 나타냈다. k는 식물의 壽命이며 a는 복잡한 生物學的 要因, r은 피해를 일으키는 최저농도이다. 이들 parameter는 식물의 種 및 피해정도에 따라 변한다 (Brandt and Heck, 1967; Heggestad and Heck, 1971).

최근에 식물체를 SO<sub>2</sub> 및 기타 大氣汚染 물질에 노출시킨 결과 피해를 獨立變數로 하고 시간 및 농도를 從屬變數로 한 linear model과 농도를 獨立變數로 하고 피해 및 시간을 從屬變數로 한 비슷한 model이 발달되었다 (Heggestad and Heck, 1971).

### 生育 및 收量

Barton (1940)은 發芽하는 種子에 대한 SO<sub>2</sub> 및 기타 有害가스들의 毒性을 조사한 결과 건조한 종자보다는 濕潤한 종자가 더욱 敏感했으며 이를 有害물질의 主効果는 發芽의 遲延이라고 보고했다. SO<sub>2</sub>에 의한 毒性이 가장 심하여서 發芽의 遲延과 아울러 發芽率의 減少를 나타냈으며 처리시간이 길면는 모든 종자가 死滅하였다.

花壇植物을 400 ppm에서 2시간까지 SO<sub>2</sub>에 燻蒸하였을때 4일동안은 아무런 被害症狀가 나타나지 않았으나 그 이후로 부리는 상당한 壞死현상이 일어났다. 生長抑制로 인하여 新葉 및 花重이 크게 감소했고 花數는 덜 영향을 받았다 (Adedipe *et al.*, 1972).

Cherry Belle 무우 품종을 5 ppm의 SO<sub>2</sub>에 適當 40시간씩 5週동안 노출했을때 植物生體重, 葉生體重, 根生體重 및 乾物重, 根長 및 根幅 등에 有意的 감소를 보였다 (Tingey *et al.*, 1971).

Tobacco에 있어서 SO<sub>2</sub> 케스로 절곡시킬때 SO<sub>2</sub> 농도의 증가에 따라 生葉乾物重과 生葉 면적이 감소했다 (谷山 및 有門, 1968). SO<sub>2</sub>에 의해 생장이 弱화된 식물은 病虫害에 보다 敏感해지므로 植物 population의 감소를 예측할 수도 있다 (Treshow, 1968).

水稻에 있어서 SO<sub>2</sub>를 減數分裂期 및 出穗開花期에 처리했을때 子實 생산에 미치는 영향에 대해서 조사한 것을 보면 (谷山 및 澤中, 1972), SO<sub>2</sub>를 1일 8시간씩 계속 10일간 처리한 경우 평균 穗當顯花數는 開花중에 처리한 것이 SO<sub>2</sub> 농도에 대해 反應을 보이지 않은 반면 開花전에 처리한 것은 SO<sub>2</sub> 농도가 0에서 5 ppm까지 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 發熱率은 開花중에 처리한 것이 開花전에 처리한 것보다 훨씬 敏感한 반응을 보였는데 후자의 경우 5 ppm 처리시 60% 이상 등숙률의 지연을 나타냈다. SO<sub>2</sub> 처리를 한 水稻

의 發芽率은 5 ppm 이하에서 開花전에 처리한 것은 微細한 감소를 보였으나 開花중에 처리한 것은 보다 현저한 감소를 보였다. 收穫에 있어서 玄米千粒重은 開花중 처리시엔  $SO_2$  농도에 대하여 반응을 보이지 않았으나 開花전에 처리한 것은  $SO_2$  농도의 증가에 따라 급격한 감소를 보였다. 그러나 株當收量으로 볼 때는 처리시기에 상관없이 농도의 증가에 따른 감소를 보였는데 開花중에 처리한 것이 開花전에 처리한 것보다 훨씬 급격한 감소를 보였다.

氣象條件 및 農業活動이 대체로 동일한 大氣汚染地區 및 非汚染地區를 선정해서 非汚染地區의 農作物 收量을 기준으로 하여 大氣汚染에 관한 收量指數를 구했을 때  $SO_2$  및 收量指數 사이엔 반드시 負의 相關 관계만이 존재하지는 않는다(星野, 1972).

우리나라에서  $SO_2$ 가 낮가지 주요작물의 生育 및 收穫에 미치는 영향에 대하여 보고된 바를 보면 다음과 같다. 벼의 生育狀況 및 收量은  $SO_2$ 의 농도 및 노출시간에 따라 다른데 1 ppm 이하 약 10%의 收量이 감소하였고 5 ppm, 10 ppm 이하 각각 30%, 50%의 收량이 감소했다고 한다(金 및 鄭, 1969; 鄭, 1970). 低濃度(1~5 ppm)의 경우에 幼穗形成期에 처리한 것이 가장 被害가 심했다고 한다(鄭, 1970). 보리 및 밀에 있어서  $SO_2$ 의 농도별 被害狀況은 開花期에 처리한 것이 가장 큰 收量감소를 보였고 다음이 伸長期 처리였으며 分蘗盛期 처리시의 被害가 가장 적었다. 무우는  $SO_2$  0.5 ppm에서 통과 되는 1.0 ppm에서 약 50%의 收量감소가 나타났다고 한다(鄭 등, 1972).

### 汚染의 指標 및 被害의 診斷

植物生育에 관계하는 여러가지 環境 조건중에 大氣汚染의 동향을 정확히 구하려던 다음과 같은 實驗的方法을 사용할 필요가 있다.

植物體에 흡수된 汚染물질의 定量: 식물체에 흡수된 汚染물질의 양은 그 지역의 汚染도와 그 식물의 被害度에 대한 좋은 指標가 된다.  $SO_2$  汚染에 대해서는 S 함량의 분석이 널리 쓰이고 있다.

S함유량은 被害量과의 관계가 아주 명확하지는 않지만 그대로 좋은 指標가 된다. 물론 S는 식물의 必須元素이므로 땅속에서 흡수된다. 그러므로 正常인 함유량은 植物과 土壤에 따라서 다르다. 앞에서 흡수된 S는 대부분이 水溶性 S의 형태로써 축적되고 있으므로 大氣汚染의 指標로서는 전 S함량보다는 水溶性 S의 양이 적당하다고 인정된다.

植物의 S함유량으로부터 汚染과의 관계를 考察하는

경우에는 다음과 같은 實驗결과를 고려하는 것이 필요하다. 可視被害가 發現될 만큼  $SO_2$ 가 흡수되면 흡수능력이 급격히 감소한다. 또 同量(농도×시간이 일정)의  $SO_2$ 에 접촉된 경우에는  $SO_2$  농도의 증가가 반드시 S 흡수량의 증가를 초래하지는 않는다. 이것은 光合成速度와  $SO_2$  흡수량의 관계로 부터 쉽게 설명이 된다(埜田, 1973).

指標植物(Indicator plant): 指標식물을 사용해서 大氣汚染 물질의 濃도를 측정하는 것은 機器分析에 의한 농도측정보다 실제적이다. 植物을 指標로써 이용하기 위해서는 大氣汚染에 敏感해야 하고 病虫害가 적으며 土壤조건에 좌우되지 않아야 한다는 조건이 필요하다(埜田, 1973).

指標植物의 이용은 특수한 大氣汚染 물질에 대하여 선택된 식물의 種이나 品種 혹은 兩者의 敏感성에 주로 의한다. 大氣汚染의 指標로써의 식물의 이용에 대해서는 Heck(1966)에 의하여 자세히 記述되었다. 苔蘚植物類(Gilbert, 1968) 및 地衣類(Hawksworth and Rose, 1970)가 특히  $SO_2$ 에 敏感하다고 보고 되어 있다.

그밖에 蒸氣실현에 의한 感受성의 序列과 野外에 있어서의 被害의 序列을 비교하는 방법도 있다(埜田, 1973).

$SO_2$  汚染의 化學的 分析 방법으로는 West and Gaeke(1956)의 比色法(rosaniline-formaldehyde 방법), 電氣傳導度法(埜田, 1973) 및 二酸化鉛法(日本藥學會, 1957) 등이 가장 널리 쓰인다. 大氣중  $SO_2$ 를 계속 自動採取해서 기록하는 것도 가능하다(Helwig and Gordon, 1958).

### 混合効果

단 한가지의 汚染物質이 공기중에 존재하는 경우가 드문데 植物體에 대한 두가지 혹은 그 이상의 汚染물질의 混合効果에 관하여는 연구된 것이 별로 없다.

$SO_2$ 와 ozone의 할량이 각각 1.5 및 0.3 ppm이었을 때  $SO_2$ 가 ozone의 被害를 阻害하는 효과는 나타나지 않았다. 그러나  $SO_2$ 와 ozone의 비가 4:1 혹은 그 이하일 때 ozone이  $SO_2$ 의 被害症狀를 阻害하는 것 같이 보였다.  $SO_2$ 와 ozone의 비율이 6:1 혹은 그 이상으로 증가했을 때 동일한 일대 두가지 汚染물질의 症狀이 함께 나타났다(Heggstad, 1968).

$SO_2$  및 hydrocarbon 혼합물 사이에 혹은  $SO_2$  및 HF 사이에는 相乘의 혹은 拮抗의 작용이 없다고 보고되었었다. 그러나 Menser 및 Heggstad(1966)는 처음으로 tobacco에서  $SO_2$ 와 ozone이 相乘의 작용을 갖

는 다른 증거를 보고했다. Ozone의 함량은 0.03 ppm이었으며 SO<sub>2</sub>와 ozone의 비는 약 10:1이었다. 잎에 나타난 증상은 ozone의 피해와 비슷하였다. 혼합된 공기에서 존재하는 농도의 각 오염물질에 植物體를 노출했을 때는 눈에 띄는被害가 나타나지 않았다. 低濃度의 SO<sub>2</sub> 및 ozone에 의한 附加的 收量減少 효과가 쿠우에서 보고되었다(Tingey *et al.*, 1971).

SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>는 민감한 Bel W<sub>3</sub> tobacco에 대하여 相乘的 被害효과를 나타냈다고 한다. Tobacco는 0.75 ppm의 SO<sub>2</sub> 혹은 2 ppm의 NO<sub>2</sub>에 4시간 노출시켰을 때 미미한 被害를 보였지만 0.1 ppm의 SO<sub>2</sub>와 0.1 ppm의 NO<sub>2</sub> 혼합물에 노출시킨 경우에 被害가 대단히 심하였다고 한다(Heck, 1968).

#### 被害機作 및 植物代謝에 미치는 영향

SO<sub>2</sub>는 水溶性이므로 식물체의 잎에 쉽게 흡수되어 葉肉細胞의 습한 표면에서 용해한다. 식물에 대한 SO<sub>2</sub>의 毒성은 葉肉細胞에 극부적으로 sulfurous acid가 축적됨에 따른 原形質 分離效果에 의하거나 산화과정 중에 일어나는 sulfite의 還元力에 의한다고 생각되고 있다(Thomas *et al.*, 1950).

Rao and LeBlanc(1965)에 의하면 SO<sub>2</sub>는 地衣類내의 algal cell에 漂白 작용 및 原形質 분리를 일으켰다고 한다. 또한 SO<sub>2</sub>는 葉綠素를 pheophytin으로 전환시켰으며 이것은 SO<sub>2</sub> 흡수에 따른 酸度의 증가에 의한다고 보고되었다.

Puckett *et al.*(1973)은 용해된 SO<sub>2</sub>가 地衣類의 photosynthetic <sup>14</sup>C fixation에 미치는 효과에 관해 pH를 달리하여 연구한 결과 SO<sub>2</sub>의 植物에 대한 被害機作을 酸化還元 작용과 結付시켰다. 植物에 대한 SO<sub>2</sub>의 毒성은 pH가 낮을 때 증가했으며 이것은 不可逆的인 酸化 과정에 의한 葉綠素의 파괴와 일부 관련된다고 보고하였다.

상치 leaf disk를 sulfurous acid 및 그 鹽의 수용액에 floating시킨 model system을 사용하여 變色 패턴을 조사한 최근의 보고(Lee *et al.*, 1975)에 의하면 잎 組織은 SO<sub>2</sub> 농도가 증가함에 따라 그리고 光에 노출하였을 때 더욱 심하게 變色되었다. 일정한 SO<sub>2</sub> 농도에서 leaf disk는 pH가 낮을 때 變색이 더욱 심하였다. 變색의 정도는 sulfurous acid가 물분자와 결합할 때 생성되는 발생기 水素의 量과 관련된다고 풀이되었다.

植物體의 잎에 의한 SO<sub>2</sub> 흡수에 영향하는 主要因은 氣孔의 開裂度라고 일반적으로 인정되고 있다(Katz, 1949; Thomas *et al.*, 1950; Spedding, 1969). 많은 作物의 잎에 있어서 SO<sub>2</sub>가 오염된 상태일 때 氣孔이 더

우크게 열린다는 報告도 있다(Unsworth *et al.*, 1972). Zimmerman and Hitchcock(1956)는 氣孔의 수와 SO<sub>2</sub>에 대한 感受性사이에 아무런 관련이 없다고 했으며 SO<sub>2</sub> 흡수는 氣孔에 依存하지 않는다는 見解도 있다(Daines, 1968; Lee *et al.*, 1975).

Sung(1974)은 SO<sub>2</sub>가 植物體內의 物質代謝 결과로 생성되는 過酸化水素와 반응하여 黃酸을 형성하므로써 被害를 일으키며 SO<sub>2</sub>는 catalase의 inhibitor라고 보고하였다.

SO<sub>2</sub>가 1 ppm 이하의 低濃度에서도 光合成작용의 간소를 초래한다는 것은 일찍부터 알려져 왔다(Thomas, 1961). 최근 Sij and Swanson(1974)에 의하면 SO<sub>2</sub> 1, 3 및 5 ppm을 Pinto bean의 第一葉에 노출한 결과 光合成 작용은 葉齡에 관계없이 15, 70 및 90%가 감소되었다고 한다. 일본에서의 보고에 의하면 裸麥의 경우 SO<sub>2</sub> 처리개시 10분후에 추정된 光合成速度는 2 ppm에서 45%, 5 ppm에서 75%, 10 ppm에서 80%였다고 한다(谷山 등, 1970).

SO<sub>2</sub>는 ribulose-1,5-diphosphate carboxylase의 활성을 低下시킨다고 보고되었는데 그 원인은 호소단백질의 SH 基를 SO<sub>2</sub>가 blocking함에 의한지도 모른다고 시사되었다(谷田澤 등, 1972). SO<sub>2</sub> 처리는 양분 흡수보다 오히려 乾物生産 억제에 대하여 영향이 크다고 보고 되었으며 또한 SO<sub>2</sub> 처리에 의하여 水溶性 질소의 함량이 대단히 증가하는 것은 단백질 함량이 심히 阻害되기 때문이라고 推論되었다(鈴木 등, 1972). 최근 Mukerji and Yang(1974)은 phosphoenolpyruvate carboxylase의 작용이 sulfite 이온에 의하여 阻害된다고 보고 하였다.

#### 被害輕減方法

汚染物質에 의한 식물의 被害를 輕減하는 방법은 물론 發生場所에서 汚染물질을 제거하는 것이나 불충분한 설비와 경제적인 이유로 실행하기 어렵다. 加害者 및 被害者의 장방이 되기 때문에 의한 作物의 피해를 최소화함으로써 輕減하도록 조화있는 대책을 강구하는 것이 가장 바람직하다.

汚染물질의 被害를 輕減하는 技術的인 방법으로써 植物의 保護물질에 관한 연구가 보고되고 있다. Cathey 및 Heggestad(1973)는 植物生長調節劑를 撒布함으로써 petunia에 대한 SO<sub>2</sub>의 피해를 輕減시켰다고 보고했다. 그들의 연구에 의하면 ancymidol( $\alpha$ -cyclopropyl- $\alpha$ -(4-methoxyphenyl)-5-pyrimidine methanol) 및 chlormequat [(2-chloroethyl) trimethyl ammonium chloride]가 SO<sub>2</sub> 및 ozone에 의해 誘起되는 可視的 可

해를 輕減시켰다고 한다.

우리 나라에서의 보고에 의하면 1% 및 2% lime water의 葉面撒布가 水稻에 比한 SO<sub>2</sub>의 被害를 감소시켰다고 한다. Potassium 및 Wollastonite (calcium silicate)의 底面施與도 또한 SO<sub>2</sub>의 피해를 輕減시키는 데 효과적이었다(禰, 1973). SO<sub>2</sub>는 토양과 반응시 化學的 작용을 통하여 제거될 수 있다고 보고 되었다(Abeles et al., 1971). 低濃度에서 SO<sub>2</sub>에 의한 種子發芽 및 植物生長에 미치는 被害는 NH<sub>3</sub>와 共存時 60% 까지 감소되었다는 보고가 있다(成, 1973).

앞으로 遂行되어야 할 研究課題

Heck et al.(1973)은 大氣汚染物質이 植物에 미치는 영향에 관해서 앞으로 수행되어야 할 연구과제를 상세히 제시하였다. 이에 의하면 지금까지의 연구는 대개 單一汚染物質을 취급하였으며 短期間에 대단한 高濃度를 사용하였다. 그러나 현재는 植物體가 노출되는 大氣와 類似하게 여러가지 大氣汚染 物질이 複合의으로 나타내는 효과와 低濃度에 長期間 노출된 植物의 反應에 관한 연구가 요청되고 있다. 汚染물질에 대한 抵抗性 系統을 확립하는데 있어서나 環境기준을 설정하는데 있어서도 실제적인 汚染물질의 농도에 대한 植物의 反應과 汚染물질의 混合効果에 대한 자료가 필요하다.

大氣汚染 물질의 生物學的 영향을 이해하기 위해서 또는 적당한 土壤管理 program을 발전시키기 위해서는 概念的 및 數學的 model의 設定이 시급하다.

우리나라에서는 大氣汚染 물질이 植物에 미치는 被害에 관하여 栽培學的인 見地에서의 단편적인 연구가 수행되었을 뿐이다. 그러므로 앞으로 수행되어야 할 과제는 環境基準 설정을 위한 기초자료를 제공할 수 있도록 汚染物質이 우리나라에 植生하고 있는 植物의 生理 및 生態에 미치는 영향을 체계적으로 조사함과 아울러 汚染물질에 의한 植物의 被害診斷 기준을 설정하고 汚染物質에 의한 被害를 減少시키는 방안을 강구하는데 역점을 두어야 할 것이다.

감사의 말씀—本 綜說의 작성에 있어서 많은 關心을 가지시고 資料 수집에 협조하여 주신 당연구조 環境管理 연구실장 盧在植 박사에게 감사하는 바이다.

參 考 文 獻

Abeles, F. B., L. E. Craker, L. E. Forrence, and G. R. Leather. 1971. Fate of air pollutants: removal of ethylene, sulfur dioxide and nitrogen dioxide by soil. *Science* 173 : 914—916.

Adams, D. F. 1955. The effects of air pollution on plant life. *Amer. Med. Assoc. Arch. Ind. Health* 14 : 229—245.  
Adeipe, N. O., R. E. Barrett, and D. P. Ormrod. 1972. Phytotoxicity and growth responses of ornamental bedding plants to ozone and sulfur dioxide. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 97 : 341—345.  
Barton, L.V. 1940. Toxicity of ammonia, chlorine, hydrogen cyanide, hydrogen sulphide, and sulfur dioxide gases. IV. Seeds. 1940. *Contrib. Boyce Thompson Inst.* 11 : 357—362.  
Brandt, C. S., and W. W. Heck. 1967. Effects of air pollutants on vegetation. *Air Pollution* 1 : 401—442.  
Brennan, E., and P. M. Halisky. 1970. Response of turfgrass cultivars to ozone and sulfur dioxide in the atmosphere. *Phytopathology* 60 : 1544—1546.  
Cathey, H. M., and H. E. Heggstad. 1973. Effects of growth retardants and fumigations with ozone and sulfur dioxide on growth and flowering of *Euphorbia pulcherrima* Willd. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 98 : 3—7.  
경우섭. 1971. 대기오염에 의한 식물병. *과학과 기술* 4(1) : 9—13.  
Daines, R. H. 1968. Sulfur dioxide and plant response. *J. Occup. Med.* 10 : 516—524.  
Feder, W. A., F. L. Fox, W. W. Heck, and F. J. Campbell. 1969. Varietal responses of petunia to several air pollutants. *Plant Disease Repr.* 53 : 506—510.  
Foy, C. L. 1970. Plants and pollution, p.37—59. In R. E. Blaser(ed.), *Agronomy and Health*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.  
Gilbert, O. L. 1968. Bryophytes as indicators of air pollution in the Tyne Valley. *New Phytol.* 67 : 15—30.  
韓基勳. 1973. 亞硫酸 가스에 依한 農作物의 被害生理, 減收率 및 被害輕減에 關한 研究. *한국농과학회지* 16 : 146—165.  
Hawksworth, D. L., and F. Rose. 1970. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature* 227 : 145—148.  
Heck, W.W. 1966. The use of plants as indicators of air pollution. *Air Water Pollut. Int. J.* 10 : 99—111.  
\_\_\_\_\_. 1968. Factors influencing expression of oxidant damage to plants. *Ann. Rev. Phytopathol.* 6 : 165—188.  
\_\_\_\_\_. 1973. Air pollution and the future of agricultural production, p.118—129. In *Advan. Chem. Ser. No. 122, Air pollution damage to vegetation*, American Chemical Society, Washington, D.C.  
\_\_\_\_\_, O. C. Taylor, and H. E. Heggstad. 1973. Air pollution research needs: Herbaceous and ornamental plants and agriculturally generated pollutants. *J. Air Pollut. Control. Assoc.* 23 : 257—266.  
Heggstad, H. E. 1968. Diseases of crops and ornamental plants incited by air pollutants. *Phytopathology* 58 : 1089—1097.  
\_\_\_\_\_, and W. W. Heck. 1971. Nature, extent, and variation of plant response to air pollutants. *Advan. Agron.* 23 : 111—145.  
Helwig, H. L., and C. L. Gordon. 1958. Colorimetric method for continuous recording analysis of atmospheric sulfur dioxide. *Anal. Chem.* 30 : 1810—1814.

- 星野 常雄. 1972. 農作物の 收量と 大氣汚染. 大氣汚染研究 7 : 236.
- 日本藥學會. 1957. 衛生試驗法 注解. 東京金原出版株式會社, 京都. 1105p.
- 정영호. 1970. 벼에 대한 아황산가스의 피해. 농사시험연구 보고(식물환경) 13 : 57-61.
- \_\_\_\_\_, 김복영, 이종길. 1971. 유해물질에 따른 농작물 생육시기별 피해도 기준설정. 시험연구보고서(농촌진흥청 식물환경연구소) I : 76-81.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_. 1972. 유해물질에 따른 농작물 생육시기별 피해기준 설정. 시험연구보고서(농촌진흥청 식물환경연구소) I : 106-116.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, 韓基碩. 1973. 環境汚染에 의한 農作物被害 調査研究, 清國 金泳燮博士 回甲記念論文集 61-72.
- Katz, M. 1949. Sulfur dioxide in the atmosphere and its relation to plant life. *Ind. Eng. Chem.* 41 : 2450-2465.
- 김무결, 정영호. 1969. 공장배출 및 배연이 작물생육에 미치는 영향과 그 대책에 관한 연구. 시험연구보고서(농촌진흥청 식물환경연구소) I : 133-150.
- Lee, M. S., S. W. Park, and S. R. Lee. 1975. Discoloration pattern of lettuce leaf disks as influenced by sulfur dioxide. *Korean J. Botany* 18 : 1-10.
- Leone, I. A., and E. Brennan. 1969. Sensitivity of begonias to air pollution. *Hort. Res.* 9 : 112-116.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and R. H. Daines. 1962. Daily fluctuation of phytotoxic air pollutants in three New Jersey communities as influenced by certain meteorological parameters. *Plant Disease Repr.* 46 : 140-144.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_. 1966. The role of wind parameters in determining SO<sub>2</sub> concentrations in Carlstadt, New Jersey. *Air Water Pollut. Int. J.* 10 : 113-124.
- Menser, H. A., and H. E. Heggstad. 1966. Ozone and sulfur dioxide synergism: injury to tobacco plants. *Science* 153 : 424-425.
- Miller, V. L., R. K. Howell, and B. E. Caldwell. 1974. Relative sensitivity of soybean genotypes to ozone and sulfur dioxide. *J. Environ. Quality* 3 : 35-37.
- Mukerji, S. K., and S. F. Yang. 1974. Phosphoenolpyruvate carboxylase from spinach leaf tissue. *Plant Physiol.* 53 : 829-834.
- Neiburger, M. 1967. Meteorological aspects of air pollution. *Arch. Environ. Health* 14 : 41-45.
- Puckett, K. J., E. Nieboer, W.P. Flora, and D.H.S. Richardson. 1973. Sulphur dioxide: its effect on photosynthetic <sup>14</sup>C fixation in lichens and suggested mechanisms of phytotoxicity. *New Phytol.* 72 : 141-154.
- Rao, D. N., and B. F. LeBlanc. 1965. Effects of sulfur dioxide on the lichen alga, with special reference to chlorophyll. *Bryologist* 69 : 69-75.
- Reinert, R. A., A. S. Heagle, J. R. Miller, and W. R. Geckeler. 1970. Field studies of air pollution injury to vegetation in Cincinnati, Ohio. *Plant Disease Repr.* 54 : 8-11.
- Setterstrom, C., and P. W. Zimmerman. 1939. Factors influencing susceptibility of plants to sulphur dioxide injury. *Contrib. Boyce Thompson Inst.* 10 : 155-181.
- Shaw, W. C., H. E. Heggstad, and W. W. Heck. 1971. Pollution poses threat to man, farms, nature. 1971, *Yearbook of Agriculture (USDA)* 293-299.
- Sij, J. W., and C. A. Snwanson. 1974. Short-term kinetic studies on the inhibition of photosynthesis by sulfur dioxide. *J. Environ. Quality* 3 : 103-107.
- Smith, M.E. 1968. The influence of atmospheric dispersion on the exposure of plants to airborne pollutants. *Phytopathology* 58 : 1085-1088.
- Solberg, R. A., and D. F. Adams. 1956. Histological responses of some plant leaves to hydrogen fluoride and sulfur dioxide. *Amer. J. Botany* 43 : 755-760.
- Spedding, D. J. 1969. Uptake of sulphur dioxide by barley leaves at low sulphur dioxide concentrations. *Nature* 224 : 1229-1231.
- 成敏雄. 1973. 植物의 아황산가스 被害에 대한 알도니아 가스의 影響. 식물학회지 16 : 17-22.
- Sung, M. W. 1974. Effects of sulfur dioxide on catalase activity in plants. *Korean J. Botany* 17 : 3-8.
- 鈴木信隆, 黒澤壽, 和田士. 1972. 各種植物に對する 亞硫酸ガスの 影響(第1報). 大氣汚染研究 7 : 223.
- 谷田深澤彦, 吉禮啓久, 田中啓文. 1972. 亞硫酸ガスによる 植物被害の 實驗的 研究(第6報). 大氣汚染研究 7 : 229.
- 谷山敏郎, 有門博樹. 1968. 作物の 가스障害に 關する研究, 日本作物學會紀事 37 : 366-370.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, 鈴木久光. 1970. SO<sub>2</sub>による 裸麥の 光合成と 葉面蒸散との 關係ならびに 光合成から みた SO<sub>2</sub> 低濃度 限界値. 大氣汚染研究 5 : 154.
- 谷山敏郎, 澤中和雄. 1972. 水稻の 子實生産に およぼす 亞硫酸ガスの 影響. 大氣汚染研究 7 : 227.
- 峠田宏. 1973. 大氣汚染ガ 植物に 與へる 影響と その 調査方法, 日本生態學會誌 23 : 81-89.
- Thomas, M. D. 1961. Effects of air pollution on plants, p. 233-278. In K. Barker(ed.), *Air Pollution*, WHO Monogr. Ser. No. 46. Columbia Univ. Press, New York.
- \_\_\_\_\_, R. H. Hendricks, and G. R. Hill. 1950. Sulfur metabolism of plants-effect of sulfur dioxide on vegetation. *Ind. Eng. Chem.* 42 : 2231-2235.
- Tingey, D. T., W. W. Heck, and R. A. Reinert. 1971. Effect of low concentrations of ozone and sulfur dioxide on foliage, growth and yield of radish. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 96 : 369-371.
- Treshow, 1963. The impact of air pollutants on plant populations. *Phytopathology* 53 : 1103-1113.
- Unsworth, M. H., P. V. Biscoe, and H. R. Pinckney. 1972. Stomatal responses to sulfur dioxide. *Nature* 239 : 458-459.
- West, P. W., and G. C. Gaeke. 1956. Fixation of sulfur dioxide as disulfidomercurae (II) and subsequent colorimetric estimation. *Anal. Chem.* 28 : 1816-1819.
- Wood, F. A. 1968. Sources of plant-pathogenic air pollutants. *Phytopathology* 58 : 1075-1084.
- Youden, W. J. 1941. Fluctuations of atmospheric sulfur dioxide. *Contrib. Boyce Thompson Inst.* 11 : 473-484.
- Zimmerman, P. W., and W. Crocker. 1934. Toxicity of air containing sulphur dioxide gas. *Contrib. Boyce Thompson Inst.* 6 : 455-470.
- \_\_\_\_\_, and A. E. Hitchcock. 1956. Susceptibility of plants to hydrofluoric acid and sulfur dioxide gases. *Contrib. Boyce Thompson Inst.* 18 : 263-279.