

가스상 대기오염물질에 대한 활엽수의 정화능력 평가인자

金貞圭* · 高康錫**

Parameters for Evaluating the Sink Capacity of Broad Leaves Trees for the Gas Phase Air Pollutants

Jeong-Gyu Kim* and Kang-Suk Koh**

Abstract

It was conducted to compare the availabilities of parameters for evaluating the sink capacity of the broad leaves trees such as *Acer saccharium*, *Ailanthus altissima*, *Ginkgo biloba*, *Platanus occidentalis* and *Salix pseudolasiogyne*. These trees, reported as resistant species to air pollutants, were exposed to SO₂, NO₂ and CO within a phytotron at 25°C with 70% of relative humidity. Since the amount of ad- or absorbed gas does not always agree with the amount of accumulated pollutants in leaves and with the stomatal density, it is assumed that the amount of ad- or absorbed gas is the most basal index to evaluate the sink capacity of trees. The stomatal diffusive resistance, which has a good agreement with the amount of ad- or absorbed gas, is also available for evaluating the sink capacity of broad leaves trees.

서 론

환경오염은 대기, 물, 토양 등의 환경구성요소 내에서의 어떤 물질의 평균체류시간과 관련이 깊다¹⁾. 즉 어떤 환경구성요소의 물질이 다른 구성요소로 전이되는 자연적인 반응속도보다 더 빠른 속도로

인입되었을 때 야기되는 악영향이 환경오염이라고 정의할 수 있다. 연소로 인한 CO₂의 방출속도가 광합성 등에 의하여 CO₂가 대기로부터 제거되는 속도보다 빨라서 생기는 지구온난화는 환경오염현상의 대표적인 예이다.

인공 및 자연 발생원으로부터 대기중으로 방출되

* 고려대학교 자연자원대학 농화학과, Dept. of Agricultural Chemistry, College of Natural Resources, Korea University (Seoul, 136-701, Korea)

** 국립환경연구원 환경생물과, National Institute of Environmental Research (Seoul, 122-041, Korea)

는 여러 가지 대기오염물질들을 제어하기 위한 방법으로는 발생량을 삭감하기 위하여 공정을 개선하거나, 배출가스 처리효율을 향상시키거나, 밀집된 발생원을 분산시키는 방법들이 주로 이용되고 있다²⁾. 이러한 방법으로는 이미 대기중으로 배출된 오염물질을 제어할 수는 없다. 식물은 대기중의 오염물질들을 흡수할 수 있는데^{3~8)}, 식물의 이러한 성질을 적극 이용하려는 것이 열대림 보존과 정부에서 시행하고 있는 대기 정화수의 식재 권장정책이다. 정화수의 선정에는 여러 가지 요인이 검토될 수 있다. 즉, 가스상 대기오염물질에 의한 장해나 영향이 적어 내연성이 있어야 하고, 식물엽면의 가스흡수능력이나 분진흡착력, 물질생산량이 커야하며, 성장속도가 빠르고 우리나라 기후 풍토에서 생육이 양호해야 한다.

따라서 본연구에서는 수목의 대기오염물질 收着(吸收·吸着)能力을 평가하기 위한 편리한 측정인자를 찾아내고자, 대기오염 정화수로서의 기본적인 조건에 부합되는 활엽수종을 대상으로하여 가스상 대기오염물질 收着能力을 식물환경조절실에서 직접 측정하고, 그 결과와 오염물질의 식물체내 축적량·기공밀도·증산속도변화·기공확산저항 등과의 관계를 조사 분석하였다.

재료 및 방법

1. 공시식물

시험대상 수종은 필자 등^{9~10)}이 조사한 대기오염물질에 대한 수목의 내연성 비교결과를 기초로하여 가중나무, 능수버들, 양버즘나무, 은행나무, 은단풍나무를 택하였다. 환경조절실에서의 가스흡수력 시험에는 실험실시 1년 전에 수고 1.3 m 이하되는 묘목들을 화분에 옮겨심고, 화분제료 토양에 묻어 월동시킨 후에 사용하였다. 생장 및 생산량을 조사하기 위한 수목은 조사대상 수목들 중 활엽수는 한국 종합조경포장의 10~15년생 수목을 대상으로 비교적 흉고직경이 비슷한 수목을 택하여 조사하였다.

2. 기공밀도

조사대상 수목의 잎을 채취하여 곧바로 잎 뒷면에 adhesive paste를 얇게 바르고 굳은 후 셀로판 테이프를 그 위에 붙여서 잎과 분리한 후 기공수를 현미경으로 관찰하여 단위면적 당 기공수를 계측하였다.

3. 오염물질 흡수·흡착량

식물환경조절실에서 각 수목에 SO₂, NO₂, CO를 접촉시켰다. 오염물질들이 접촉되는 동안에는 조절실 내외의 가스유출입은 없도록 하였고, 온도는 25℃, 습도는 70% 내외로 유지하였다. 환경조절실 내의 가스농도가 일정한 수준(SO₂와 NO₂는 400 ppb; CO는 10 ppm)으로 유지된 후에, 수목 1본씩을 환경조절실 내에 넣고 가스 농도의 변화를 2~3 시간 동안 측정하였다. 조절실 내에 수목이 없을 경우의 농도로부터 수목이 있을 경우의 농도를 감하여 전체 농도감소량을 계산하고 이 농도감소량에 조절실의 용적(9.72m³)을 곱하여 흡수·흡착된 오염물질량을 구하였다.

4. 대기오염물질 접촉에 의한 엽중 황함량

인공조절실에서 SO₂를 0.2 ppm으로 오전 9시부터 오후 5시까지 5주간에 걸쳐서 접촉시켰다. 이때 온도는 주간 25℃, 야간 20℃로 하였고, 습도는 70% 내외를 유지하도록 하였다. 수목에 SO₂를 접촉시키면서 2주후부터 1주간격으로 잎의 일부를 채취하여 흐르는 물로 세척하고 말린 후 분쇄하고 Total Sulfur Analyzer로 전황함량을 분석하였고,¹¹⁾ 수용성황함량은 김 등⁹⁾의 방법에 따랐다.

결과 및 고찰

1. 가스소비량

1) SO₂ 가스 소비량

단위엽면적 당의 SO₂ 가스 소비량은 Fig. 1에 나

타낸 바와 같다. SO₂ 소비량은 가중나무와 은행나무에서 높게 나타났으나, 양버즘나무는 낮게 나타났다. 가중나무와 은행나무는 각각 30분 및 60분을 최고점으로하여 그 후에는 소비량이 감소되는 경향을 나타냈다. 이는 초기에 식물체 외부표면으로의 SO₂의 흡착이 활발하게 일어나는데 기인한다고 생각된다. 이러한 결과는 Elkley와 Ormrod가 가스접촉 초기 2~3시간 동안은 흡수속도가 증가하다가 점차 감소한다고 한 보고(12)와 Roberts가 *Pyracantha*의 1년생 묘목에 1.0 ppm의 SO₂를 접촉시켰을 때 30분 이후 서서히 흡수소비량이 감소된다고 한 사실(13)과도 일치한다.

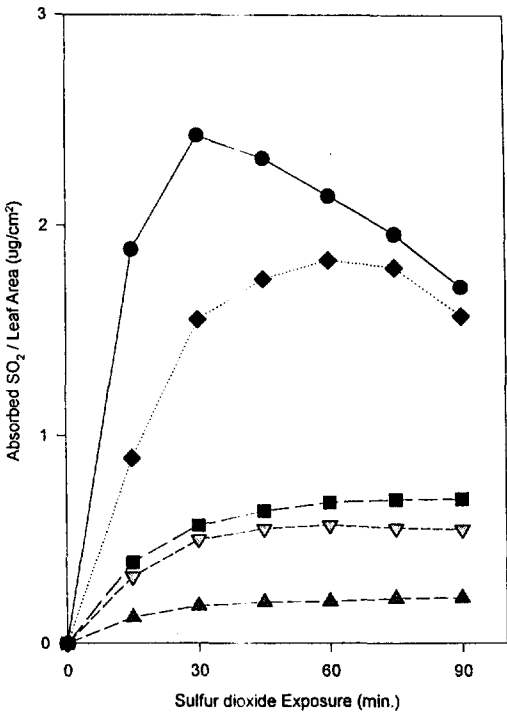


Fig. 1. The amount of ad- and absorbed SO₂ gas to the leaf area of trees (400 ppb of initial SO₂ concentration). *Ailanthus altissima* (●-●), *Acer saccharum* (▼-▼), *Ginkgo biloba* (◆-◆), *Platanus occidentalis* (▲-▲), *Salix pseudosioygne* (■-■)

2) NO₂ 가스 소비량

NO₂ 가스 소비량은 Fig. 2에 나타낸 바와 같은데, 가스접촉 초기에 가중나무에서 현저하게 높은 소비량을 보였고, 은행나무, 은단풍나무, 능수버들, 양버즘나무의 순으로 낮아졌다. 능수버들을 제외한 4종에서 SO₂ 소비량보다 낮은 NO₂ 소비량을 나타냈는데, 이러한 결과는 다른 연구자들(12,13)도 수종에 따라 가스종류별로 다른 소비량을 보인다고 한 점으로 미루어 수종마다 가스 종류별로 소비량이 다른 것으로 판단된다.

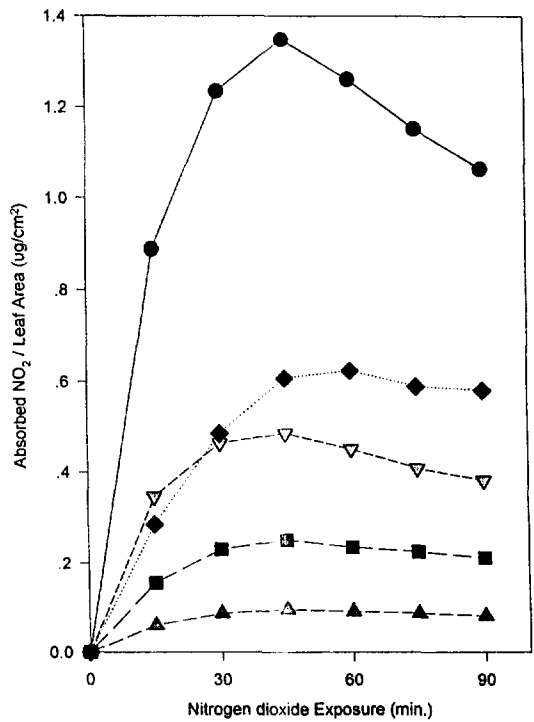


Fig. 2. The amount of ad- and absorbed NO₂ gas to the leaf area of trees (400 ppb of initial NO₂ concentration) *Ailanthus altissima* (●-●), *Acer saccharum* (▼-▼), *Ginkgo biloba* (◆-◆), *Platanus occidentalis* (▲-▲), *Salix pseudosioygne* (■-■)

3) CO 가스 소비량

Fig. 3에서 보는 바와 같이 가중나무, 은행나무,

은단풍나무, 능수버들의 4개 수종은 CO 가스 소비량이 높았고, 양버즘나무는 낮았다. CO의 경우에는 SO₂와 NO₂ 가스 접촉 시와는 달리 최고소비량을 나타내는 시간이 늦어졌다. 가스접촉을 개시하고 120분이 지나서도 은행나무와 은단풍나무에서는 최고소비량을 나타내지 않았다. 이러한 결과는 SO₂, NO₂에 비하여 CO의 흡수소비가 지속적으로 일어난 것은 접촉된 가스의 농도가 CO의 경우 10 ppm으로 낮았기 때문에 일어난 현상이라고 생각된다.

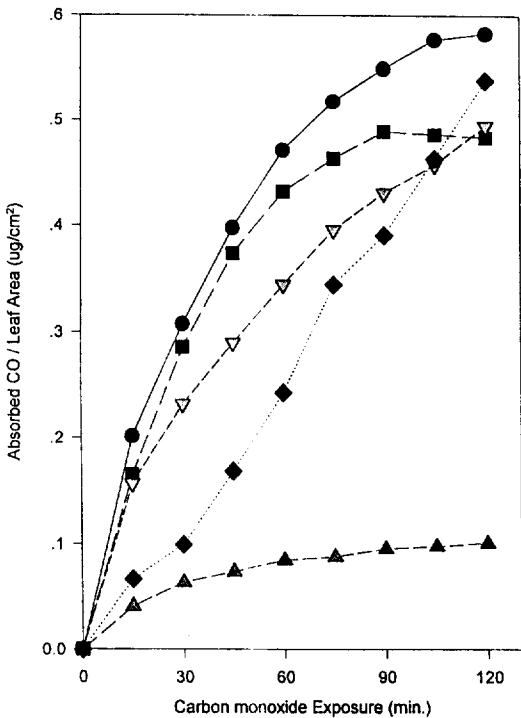


Fig. 3. The amount of ad- and absorbed CO gas to the leaf area of trees (10 ppm of initial CO concentration) *Ailanthus altissima* (●-●), *Acer saccharium* (▼-▼), *Ginkgo biloba* (◆-◆), *Platanus occidentalis* (▲-▲), *Salix pseudosiniensis* (■-■)

2. 가스별 기공확산저항치

본 연구에서는 식물환경조절실을 closed system

으로 운영하였으므로 Rich 등¹⁴⁾이 수립한 초기농도와 최종농도로부터 소비속도를 산출하여 확산저항치를 구하는 방법으로 가스별 기공확산저항값을 계산하면 다음의 table 1과 같다. 본연구에서 접촉실험에 이용된 세 가지 가스의 경우 모두 가중나무에서 가장 낮은 기공확산저항치를 나타내 가장 빠른 흡수속도를 보인 것들을 잘 설명해주고 있고, 양버즘나무는 세 가스에서 모두 가장 높은 확산저항치를 나타내 가스흡수력이 낮은 것으로 나타났다.

가스별로 보면 SO₂가 가장 낮은 기공확산저항치를 보여 수목에 의해서 가장 빨리 흡수·흡착되는 것을 알 수 있다. Bennet 등¹⁵⁾이 CO는 0.001 nmol/ml, SO₂는 1.6 nmol/ml의 수용해도를 보이고 NO₂는 해리된다고 한 바에 따르면 SO₂와 NO₂는 물에 잘 녹는 성질을 가졌으므로 식물체내로의 흡수도 용이할 것이고, CO는 이들보다는 흡수가 상대적으로 어려울 것으로 판단되는데, 본연구에서 SO₂보다 NO₂가 적게 흡수된 것은 靑木 등¹⁶⁾의 결과에서 SO₂ 및 NO₂의 농도에 따른 흡수속도의 변화가 SO₂의 경우가 더 높다고 한 사실과 일치하는 것이며, Hill 등¹⁷⁾이 alfalfa에서 SO₂가 NO₂보다 더 빨리 흡수되었다는 것과는 동일한 경향이였다.

Table 1. Stomatal Diffusive Resistance for SO₂, NO₂ and CO.

Tree	(Name in Korean)	Stomatal Diffusive Resistance (sec/cm)		
		SO ₂	NO ₂	CO
<i>Acer saccharium</i>	(은단풍나무)	0.235	0.165	0.889
<i>Ailanthus altissima</i>	(가중나무)	0.040	0.064	0.708
<i>Ginkgo biloba</i>	(은행나무)	0.077	0.164	0.824
<i>Platanus occidentalis</i>	(양버즘나무)	0.782	0.918	3.987
<i>Salix pseudosiniensis</i>	(능수버들)	0.232	0.460	0.819

본 연구결과의 수치들은 다른 연구자들의 결과들과^{13,14,16,18,19)} 비교할 때 다소 낮은 값을 나타내고 있는데, 이는 식물환경조절실의 내벽의 면적이 상대적으로 컸기 때문에 나타난 오차로 생각한다. 그러나

실험에 이용된 조절실의 외형적 규격은 모두 동일하므로 수종간의 상대적인 비교는 가능할 것으로 생각한다.

3. 기공밀도

수종별 기공밀도는 table 2에서 보는 바와 같이 은행나무가 113 mm^{-2} 로 가장 낮았으며 은단풍나무가 360 mm^{-2} 로 가장 높았다.

Table 2. Stomatal Densities of Trees.

Species	(Name in Korean)	Stomatal Density (mm^{-2})
<i>Acer saccharium</i>	(은단풍나무)	360
<i>Ailanthus altissima</i>	(가층나무)	233
<i>Ginkgo biloba</i>	(은행나무)	133
<i>Platanus occidentalis</i>	(양버즘나무)	265
<i>Salix pseudosiygyne</i>	(능수버들)	270

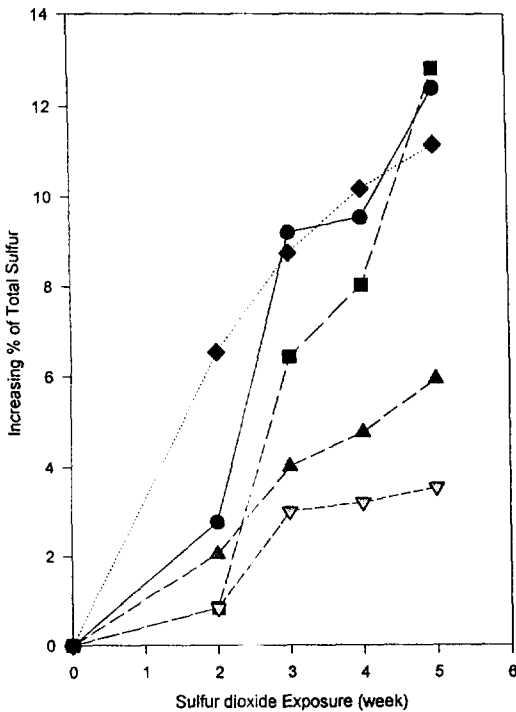


Fig. 4. Accumulation of total sulfur in leaves by 0.2 ppm of SO_2 chronic exposure on trees.

Ailanthus altissima (●-●), *Acer saccharium* (▼-▼), *Ginkgo biloba* (◆-◆), *Platanus occidentalis* (▲-▲), *Salix pseudosiygyne* (■-■)

4. 저농도 SO_2 접촉에 의한 엽내 황축적량

5주간의 접촉기간 중에 시험된 전 수종에서 가시적 피해는 발견되지 않았고, 0.2 ppm의 SO_2 를 5주

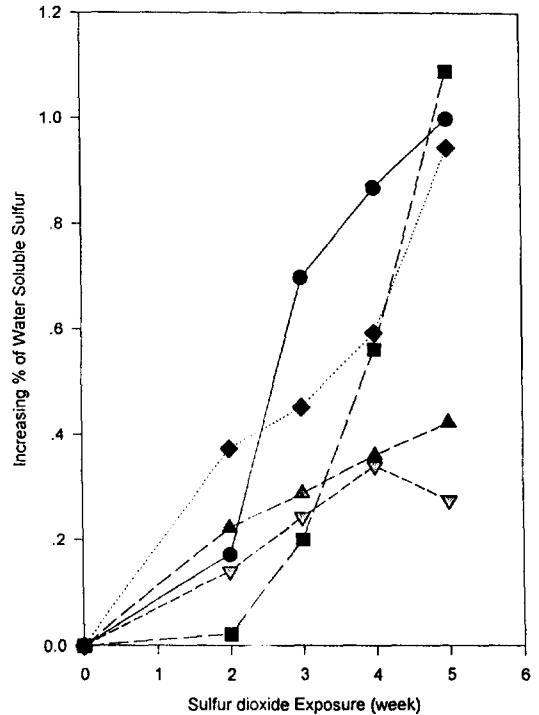


Fig. 5. Accumulation of water soluble sulfur in leaves by 0.2 ppm of SO_2 chronic exposure on trees.

Ailanthus altissima (●-●), *Acer saccharium* (▼-▼), *Ginkgo biloba* (◆-◆), *Platanus occidentalis* (▲-▲), *Salix pseudosiygyne* (■-■)

간 접촉시킨 후에 수종별로 잎에 축적된 전황 및 수용성황 함량은 Fig. 4, 5와 같다. 전황 및 수용성황 함량은 모든 수종에서 접촉시간이 늘어남에 따라서 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 것은 대기 중의 SO_2 농도가 높아지면 식물체내의 황함량이 증

가한다는 일반적 결과들과 부합하는 것이다. 그 증가속도는 가중나무와 능수버들이 높았고, 은행나무, 은단풍나무 및 양버즘나무는 완만한 증가속도를 보였다. 특히 은단풍나무는 SO₂의 흡수·축적이 낮은 특성을 나타냈는데 이는 Jensen과 Kozlowki²⁰⁾가 포플라는 잘 흡수하고 은단풍은 잘 흡수하지 못하는 수종이라고 한 바와 일치한다.

5. 대기오염물질 축적량과 소비량과의 관계

Fig. 1, 4, 5에서 살펴본 SO₂ 소비량과 엽내 축적량의 관계를 살펴보면 SO₂의 소비량과 SO₂의 엽내로의 축적량은 반드시 일치하는 것은 아니었다. 또한 SO₂ 소비량과 기공밀도 사이에도 일정한 상관성

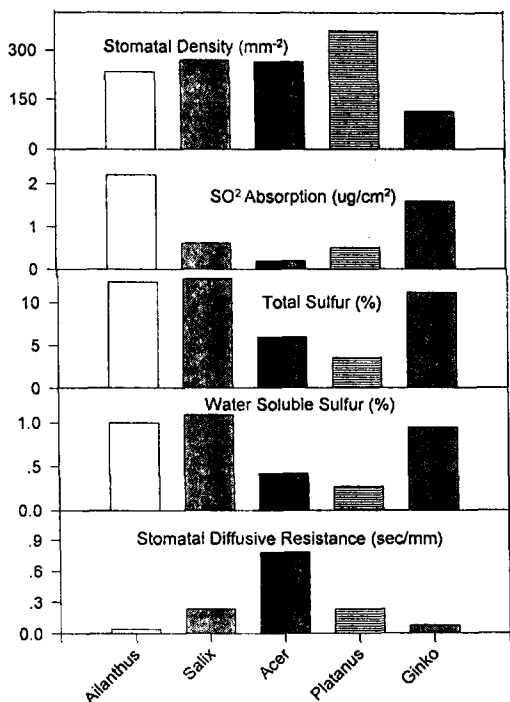


Fig. 6. SO₂ consumption, accumulation, stomatal density, and stomatal diffusive resistance of *Ailanthus altissima* (□), *Acer saccharium* (▨), *Ginkgo biloba* (▧), *Platanus occidentalis* (▩), and *Salix pseudosioygne* (▩).

을 찾을 수 없었다. Fig. 6에 종합한 바와 같이 SO₂의 소비량이 많은 수종이 반드시 체내 축적량이 많거나 기공밀도가 높은 종은 아니다. 즉 엽표면에 흡착되는 양과 엽내로 흡수되는 양을 합한 것이 SO₂ 소비량이기 때문에 수종별로 SO₂ 소비에 대한 SO₂의 흡수와 흡착이 기여하는 정도가 다르다고 하겠다.

이러한 점은 수목의 대기오염 정화능을 비교할 때 오염물질의 확산저항치로 해석²¹⁾할 수 있는 이유를 잘 설명해 준다. 따라서 어떤 수종의 대기정화력을 단순하게 체내에 흡수된 오염물질의 양을 분석하여 비교 평가하는 것은 총체적인 정화력의 비교라고 보기는 어렵고, 체내로 흡수축적된 양에 대한 생리적인 정화력의 비교라고 할 수 있을 것이다. 단위 엽면적에 대한 수종별 SO₂ 정화력으로 비교하려면 식물환경조절실을 이용하여 직접적으로 SO₂ 소비량을 측정하거나 가스의 收着(흡수·흡착)을 포함하여 나타내는 기공확산저항치를 이용하는 것이 바람직하다고 생각된다. 기공확산저항치는 최근 간편하게 측정할 수 있는 장비가 보급되어 있어서 야외에서 편리하게 측정할 수 있다.

요 약

도시지역이나 공단지역과 같은 대기오염이 우려되는 지역의 가로수, 공원수, 녹화수로 널리 사용하고 있는 활엽교목류 중에서 내연성이 있다고 보고된 바 있는 가중나무, 능수버들, 양버즘나무, 은단풍나무, 은행나무를 대상으로 가스상 대기오염물질에 대한 흡수·흡착능력을 간편하게 비교할 수 있는 평가인자를 알아보기 위하여 식물환경조절실에서 SO₂, NO₂, CO 가스 접촉실험을 실시하였다. 가스소비량은 가중나무가 가장 많았고 양버즘나무가 가장 적었다. 기공확산저항치는 가스소비량과 밀접한 관계를 나타내 간편하게 측정할 수 있는 정화능 지표로서의 사용가능성을 확인할 수 있었다. 그러나, 체내에 흡수축적된 전황 및 수용성황 함량과 기공밀도는

가스소비량과 다른 변화경향을 나타내 수목의 종합적인 대기오염정화능을 지표하지는 못하였다.

참고문헌

1. Pierzynski, G.M., J.T. Sims & G.F. Vance, 1993, Soils and Environmental Quality, Lewis Publishers, p. 313.
2. Manahan, S.E., 1984, Environmental Chemistry, 4th ed., W. Grant Press, Boston, p. 612.
3. Adamowicz, S., 1968, Change in afforestation of Upper Silesian industrial basic, Abstract in Open space as an air resources management measure, Vol. 1A, Appendix to sink factors.
4. Faller, N.K. & H. Kuhn, 1970, Assimilation of sulfur dioxide (SO₂) from the air. 1. Influence on the plant yield, Plant & Soil, **33** : 177~191
5. 고강석 등, 1993, 환경개선을 위한 정화식물 개발에 관한 연구 (II), 국립환경연구원보, **15** : 25~39.
6. 김귀곤, 1994, 생태도시계획론, 대학교과서주식회사, pp. 243~244.
7. Rogers, H.H., 1977, Measuring air pollutants uptake by plants : A direct kinetic technique, J. Air Pollut. Control Assoc., **27** : 1192~1197.
8. 戸塚積, 1987, 植物の生産力に基づく各種植物群落のカス吸収量の評價, Res. Rep. NIES, Japan, **108** : 19~24.
9. 김재봉 등, 1985, 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구 (II). 국립환경연구원.
10. 김재봉 등, 1986, 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구 (III). 국립환경연구원.
11. LECO Corp., 1986, Instrumental Manual for Sulfur Titrator LECO Corp. MI, USA.
12. Elkley, T. and D.P. Ormrod, 1981, Sorption of SO₂, NO₂ or their mixture by nine *Poa pratensis* cultivars of differing pollutant sensitivity, Atmos. Environ. **15**(9) : 1739~1743.
13. Roberts, B.R., 1974, Foliar sorption of atmospheric sulphur dioxide by woody plants, Environ. Pollut. **7** : 133~140.
14. Rich, S. et al., 1970, Ozone uptake by bean leaves, Science, **169** : 79~80.
15. Bennet, J.H., and A.C. Hill, 1973, Absorption of gaseous pollutants by a standardized canopy, J. Air Pollut. Cont. Assoc. **23** : 203~206.
16. 青木正敏, 戸塚積, 鈴木義則, 森岡進, 1987, 緑地の 대기汚染浄化能, 國立公害研究所報告, **108** : 41~50.
17. Hill, A.C., 1971, Vegetation : A sink for atmospheric pollutants, J. Air Pollut. Cont. Assoc., **21** : 341~346.
18. 戸塚積, 1980, 植物の大氣汚染環境浄化機能, 産業と公害, **80**(7) : 67~71.
19. Wesely, M.L., and B.B. Hicks, 1977, Some factors that affect the deposition rate of sulfur dioxide and similar gases on vegetation, J. Air Pollut. Cont. Assoc. **27**(11) : 1110~1116.
20. Jensen, K.F. and T.T. Kozlowki, 1974, SO₂ absorption and translocation in forest tree seedlings, Amer. J. Bot., **61**(5) : 28.
21. 藤召康實, 1987, 廣葉樹の大氣浄化能力の評價, 國立公害研究所報告, **108** : 33~40.