

SO₂에 대한 참나무속 식물의 반응

Responses of *Quercus* spp. to SO₂

이 창 석 · 배 정 오

국립환경연구원 환경보건연구부 환경생물실험실
(원고접수 : 1991. 10. 21)

Chang-Seok Lee, Jung-Ou Bae

Environmental Biology Division, Environmental Health Research Department,
National Institute of Environmental Research
(Received 21, October 1991)

Abstract

Results from study on physiological responses to SO₂ of *Quercus* spp. selected for restoration of vegetation damaged by air pollution in the field study were as follows.

Tolerance of *Quercus aliena*, *Q. acutissima* and *Q. mongolica* used in this study to SO₂ was higher in that order and tolerance of these plants to SO₂ was high comparatively among trees composing of major forest vegetation of Korea including natural forests and plantations. Stomatal resistance of these plants was increased after exposure to SO₂ and range of increase was different among species. From discrepancy between order of tolerance to SO₂ and range of increase in stomatal resistance, we were estimated that resistance mechanisms of *Quercus* spp. were different among species as mechanism originated in avoidance and resistance, respectively. Water potential of plant leaves reduced after exposure to SO₂, degree of reduction accorded with order of tolerance to SO₂. Reduction of water potential of plants after exposure to SO₂ was initiated before appearance of visible damage in plant leaves and water potential of plants exposed to SO₂ of low concentration, in which plants were not showed visible damage was also reduced.

1. 서 론

훼손된 식생의 생태학적 복원은 생태학과 농업이 결합하여 발생된 응용생태학의 한 분야로서 (Jordan III, et al., 1987), 이것을 실행하려면 전체적이며 종합적인 대책을 마련하여야 하기 때문에 많은 과학적 원리로부터 정보를 얻어야 한다 (Aber, 1987). 즉, 대기오염과 같이 생태계의 구조와 기능을 변화시키는 요인이 생물군집 및 생태계 전체를 어떻게 변화시키는가를 파악하여 그 대책을 마련하여야 하는데, 그러한 정보는 먼저 야외 현장으로부터 얻어야 한다

(김준호, 1987; 신용석 등, 1988; Aber, 1987; MacMahon, 1987). 따라서 본 연구에서는 대기오염의 영향을 받고 있는 공단지역과 그 주변 지역에서 식생의 구조 및 동태에 관한 연구 결과 (이창석과 배정오, 1991)로부터 오염원으로부터 비교적 멀리 떨어진 공단지역의 제 2 영향권 및 제 3 영향권의 지역과 오염원에 근접해 있지만 오염도가 낮은 일부 제 1 영향권의 지역에서 다음 단계의 식생을 형성할 것으로 판단된 참나무속 식물에 대하여 파괴된 식생의 복원 수종으로서의 적합성을 판정하기 위하여 실내 실험을 통하여 그들의 SO₂에 대한 내성 및 생리적 반응을 측정, 조사하였다.

2. 연구방법

2.1 실험재료 및 재배조건

신갈나무(*Quercus mongolica*)는 임업연구원 중부시험장으로부터, 갈참나무(*Q. aliena*)와 상수리나무(*Q. acutissima*)는 서울대학교 농과대학 임학과 조림학연구실로부터 분양받은 2년생 식물을 실험재료로 사용하였다.

갈참나무와 상수리나무는 1991년 4월 17일, 신갈나무는 4월 20일 각각 상기 기관으로부터 2년생 유식물을 분양받아 화분에 이식하였다. 이식용 토양은 부식토와 산림토양을 1:4(v/v)로 섞어서 직경 20.5 cm, 높이 15.5 cm의 화분에 상부 표면으로부터 1 cm 깊이까지 담았다. 유식물은 화분 당 1개체씩 이식하였고, 수분공급은 1주에 3회 급수하였다. 광조건은 자연광 하에서 재배하였다.

2.2 SO₂에 대한 내성 및 감수성 조사

조사수목을 SO₂ 농도를 0.2, 0.4, 0.7 및 1.5 ppm으로 조절한 식물환경 조절실의 폭로실에 넣어 매일 오전 9시부터 오후 5시까지 하루 8시간 씩 5일간 접촉시켰다. 본 실험은 1991년 7월 9일부터 14일까지 수행하였다. 폭로실의 체적은 9.27 m³이었고, 시료식물은 신갈나무 8개체, 갈참나무와 상수리나무 각 3개체의 총 14개체를 오염물질 농도를 조절한 각 폭로실에 넣어 실험을 수행하였다. SO₂ 접촉시 접촉실 내의 온도는 주간 25°C, 야간 20°C로 하고, 습도는 주·야간 공히 상대습도 60~70%를 유지하였다. 대조구는 모든 조건을 동일하게 유지하고 SO₂만 주입시키지 않았다. SO₂ 접촉으로 식물체에 나타나는 피해의 관찰은 실험기간 동안 매일 오염물질 접촉 전인 오전 8시와 오염물질의 접촉이 끝난 오후 5시 30분에 조사표에 의하여 실시하였다(한상욱 등, 1989).

2.3 기공 저항치의 측정

autoporometer(LI-1600)를 구경 2.0 cm로 시료식물의 앞에 접촉시켜 측정하였다(LI-COR, Inc., 1982). 변이 폭을 최소화하기 위하여 매일 같은 시간에 같은 식물을 반복하여 측정하였으며, 성숙한 잎을 대상으로(大政, 1979) 3회 측정하여 평균한 값을 측정치로 사용하였다.

2.4 수분포텐셜의 측정

수분포텐셜은 sucrose 용액을 농도 별로 구분하여 2개 1조의 시험관에 넣고, 하나의 시험관에는 시료

를 넣어 6시간 동안 침적시키고 미량의 methylene blue를 넣어 발색시킨 후 그 용액을 스포이드로 취하여 다른 시험관의 용액에 떨어뜨린 후 침전 반응을 통하여 측정하였다(Barrs, 1968).

3. 결과 및 논의

3.1 감수성 및 내성 비교

수종 별 감수성 및 내성을 비교하기 위하여 SO₂ 접촉 후 각 종의 피해도를 접촉 가스 농도와 접촉시간의 2차원 축상에 나타내었다(그림 1).

오전 9시부터 오후 5시까지 하루 8시간 씩 5일간 SO₂ 가스에 접촉시킨 결과 모든 종이 0.2 ppm의 농도에서는 전혀 가지피해를 나타내지 않았다. 0.4 ppm의 농도에서 신갈나무는 104시간 후 가지피해를 나타내었고, 갈참나무와 상수리나무는 가지피해를 나타내지 않았다. 0.7 ppm의 농도에서 신갈나무와 상수리나무는 32시간 이후부터 가지피해가 나타나기 시작하였으며, 갈참나무는 가지피해를 나타내지 않았다. 1.5 ppm의 농도에서 상수리나무는 8시간 이후부터, 신갈나무는 24시간 이후부터, 그리고 갈참나무는 80시간 이후부터 가지피해를 나타내었는데, 식물의 대기오염 물질에 대한 감수성이 오염물질의 낮은 농도에서 피해가 빨리 나타날수록 높다는 사실(김재봉 등, 1984; 1985; 1986; 한상욱 등, 1989)을 감안하면 SO₂에 대한 감수성은 신갈나무, 상수리나무, 갈참나무의 순서로 높은 것으로 판단되었다.

한편, 모든 종이 가지피해 증세를 나타낸 1.5 ppm의 농도에서 5일간 접촉 후 최종 피해도는 신갈나무, 상수리나무 및 갈참나무에서 각각 2.8, 1.6 및 0.4이었는데, SO₂에 대한 내성이 높은 농도의 SO₂를 접촉시켜 최종 피해를 적게 받을수록 강하다는 사실(김재봉 등, 1984; 1985; 1986; 한상욱 등, 1989)을 고려하면 이들 수종의 SO₂에 대한 내성은 그들의 감수성과 역순인 갈참나무, 상수리나무, 신갈나무의 순서로 높았다.

한편, 이들 참나무속 식물 3종의 SO₂에 대한 내성을 한국의 주요 삼림군락을 형성하고 있는 나무 11종 및 조림수종으로 널리 사용되고 있는 3종과 합하여 총 17종의 내성을 비교하여 볼 때(표 1), 갈참나무, 상수리나무 및 신갈나무는 각각 1위, 5위 및 7위를 기록하여 이들이 비교적 높은 내성을 갖는 종으로 인정되어(한상욱 등, 1989) 본 연구에서 종합적으로 계획하고 있는 대기오염으로 훼손된 식생의 복원에 적합한 종으로 판단되었다(신용석 등,

1988). 그리고 참나무속 식물들은 한반도의 거의 전역에 분포하여 소나무(*Pinus densiflora*) 다음으로 넓은 면적을 차지하고(산림청, 1989), 삼림식생의 천이가 진행됨에 따라 그 분포역이 더 확장될 전망이다(이창석, 1989) 생태학적 측면에서도 복원에 적합한 수종으로 판단된다(Jordan III *et al.*, 1987; 오구균, 1991).

Table 1. A comparison of degree of injury after exposure to 1.5 ppm SO₂ among major trees composing of natural forests and artificial forests(배정오·고강석, 1990).
*data obtained from this study

Species	Degree of injury	Order of resistance
<i>Quercus aliena</i> *	0.4	1
<i>Pinus koraiensis</i>	0.8	2
<i>Celtis sinensis</i>	1.0	3
<i>Acer palmatum</i>	1.3	4
<i>Quercus acutissima</i> *	1.6	5
<i>Abies holophylla</i>	1.7	6
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	2.3	7
<i>Quercus mongolica</i> *	2.8	8
<i>Pinus rigida</i>	3.3	9
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	3.7	10
<i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i>	3.7	11
<i>Cornus controversa</i>	3.8	12
<i>Fraxinus mandshurica</i>	4.0	13
<i>Zelkova serrata</i>	4.0	14
<i>Larix leptolepis</i>	4.3	15
<i>Pinus thunbergii</i>	4.3	16
<i>Pinus densiflora</i>	4.3	17

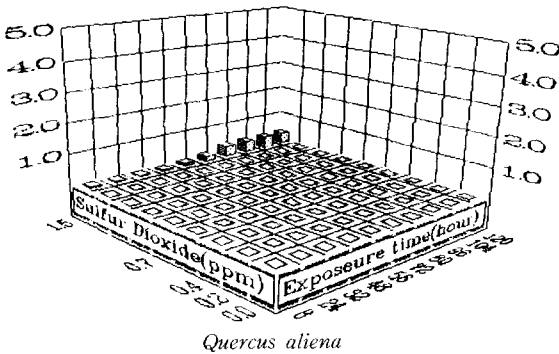
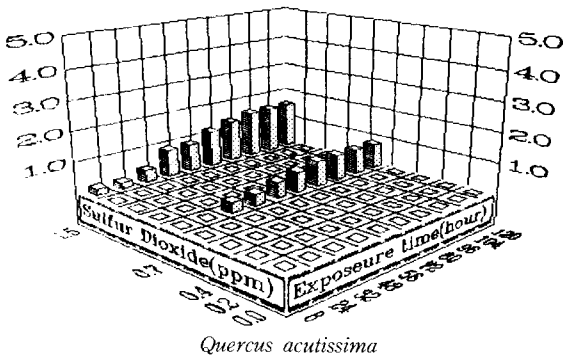
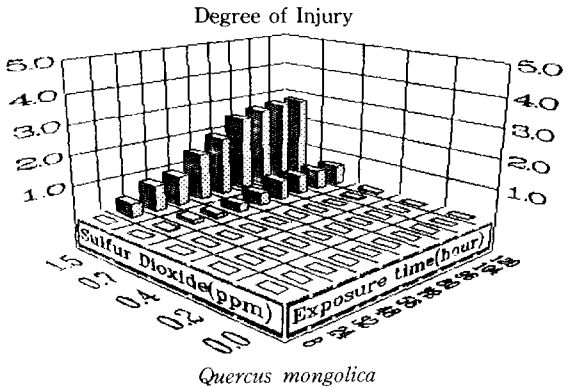


Fig. 1. Changes of degree of injury along time exposed to SO₂ by concentration.

3.2 기공 저항치 비교

신갈나무, 갈참나무 및 상수리나무를 각각 0.2 ppm, 0.4 ppm, 0.7 ppm 및 1.5 ppm의 SO₂에 8시간 동안 접촉시킨 후 오후 5:30~6:00 사이에 대조구를 포함하여 접촉가스 농도 별 각 종의 기공저항치를 측정, 비교하였다(그림 2).

SO₂ 접촉 후 신갈나무, 갈참나무 및 상수리나무의 기공저항치는 광도, 온도, 습도 등 그 날의 환경조건에 따라 일간 변화를 보였다(그림 2). 따라서 일별로 폭로실내 식물의 기공저항치를 대조구의 것과 비교하였다. SO₂ 접촉 후 0.2 ppm 폭로실내 식물의 기공저항치는 대조구의 것과 큰 차이를 보이지 않았으나, 0.4 ppm 이상의 SO₂를 접촉시킨 폭로실내의 식물들은 모두 대조구의 것보다 기공저항치가 증가하여 이 식물들이 주로 기피기작(avoidance mechanism)을 통하여 SO₂에 대한 내성을 갖는 것으로 판단되었다(Levitt, 1972). 그러나 0.2 ppm의 SO₂에 접촉시킨 이 식물들의 기공저항치는 대조구의 것과 비교하여 크게 증가되지 않으므로 저농도에서는 이 식물들이 저항기작(resistance mechanism)을 통한 내성(tolerance)도 갖는 것으로 생각할 수

있겠다(Levitt, 1972).

일간 변화를 고려하여 기공저항치의 중간 차이 및 접촉가스 농도 별 차이를 일 별로 비교하였다. SO₂ 접촉 전 기공저항치는 전반적으로 갈참나무-신갈나무-상수리나무의 순서로 높았다. 1일 동안 접촉 후 각 폭로실내의 식물에서 기공저항치는 접촉 전의 순서와 유사하였는데, 접촉 후 2일째부터 그 순서는 접촉가스 농도 및 접촉시간이 증가함에 따라 갈참나무-신갈나무-상수리나무의 순서에서 갈참나무-상수리나무-신갈나무, 상수리나무-갈참나무-신갈나무의 순서로 변하여 상수리나무의 기공저항치가 다른

두 종에 비하여 높아지는 경향을 나타내었다. 이러한 기공저항치의 순서는 내성의 순서, 즉 갈참나무-상수리나무-신갈나무의 순서와 다소 다른 경향을 보였는데, 그 원인은 식물의 오염물질에 대한 반응기작이 기피기작과 저항기작으로 구분되는데 기인하는 것으로 판단된다(Levitt, 1972).

즉, SO₂ 접촉 후 본 연구에 사용된 식물들처럼 기공 저항치를 증가시키는 종은 기피기작을 통하여 오염물질에 견디는 기피종(avoidance species)으로 인정되며, 기공저항치를 크게 증가시키지 않고 견디는 종은 저항종(resistance species)으로 인정되는

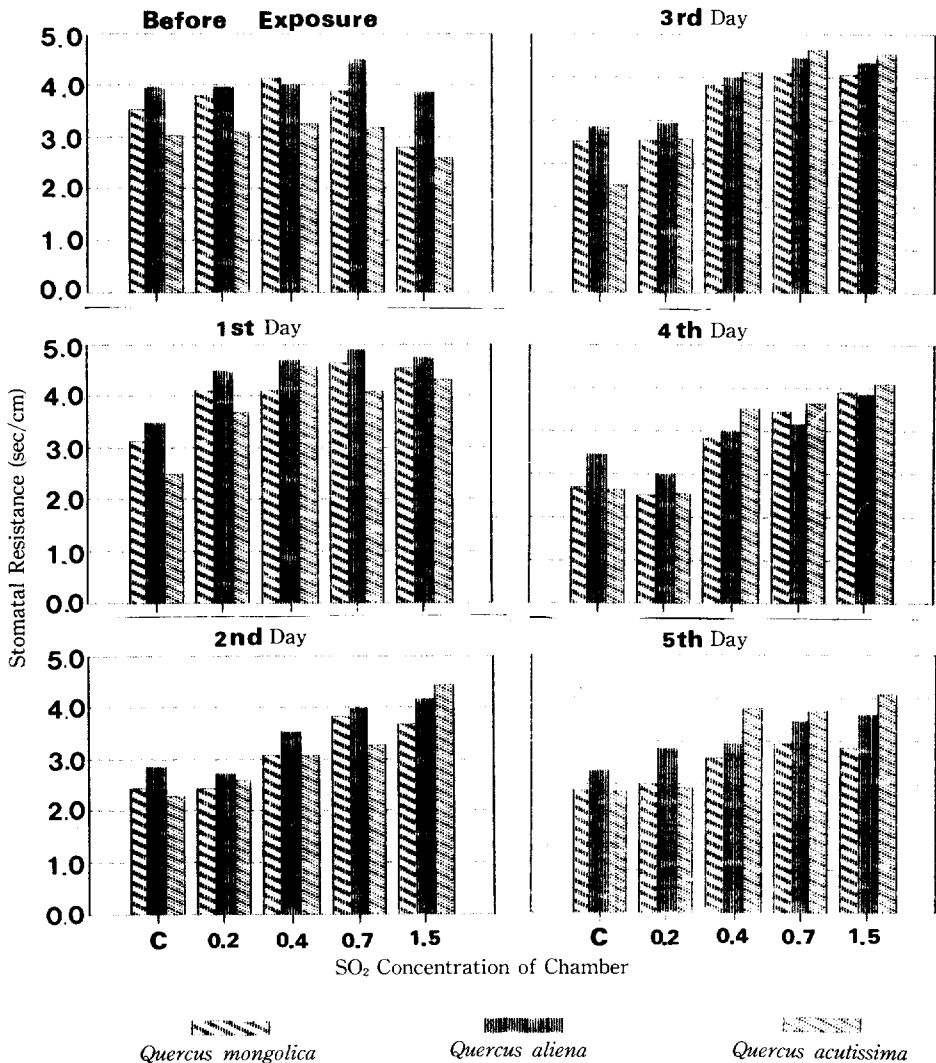


Fig. 2. A comparison of stomatal resistance among species by day after exposure to SO₂.

데, 후자는 식물체 내에 존재하는 효소의 해독작용을 통하여 오염물질로부터의 손상을 막는다(Sugahara, 1990). 따라서 본 연구에서 나타난 결과에서 고농도의 SO₂에 접촉시킬 경우와 접촉시간이 길어짐에 따라 상수리나무가 갈참나무보다 기공저항치가 높아짐에도 피해도가 더 높은 것은 갈참나무가 상수리나무보다 더 나은 저항기작을 갖는데 기인하는 것으로 판단된다.

SO₂에 대한 식물의 반응에 대한 연구에서 식물간의 SO₂에 대한 내성 차이는 그 식물의 SO₂ 흡수율에 기인하여(Thomas and Hill, 1935; Thomas *et al.*, 1950), 기공저항치를 측정하여 SO₂의 흡수정도를 판단할 수 있다는 연구(靑木 等, 1987; 김재봉 등, 1988)가 있는 반면, 식물의 내성이 SO₂ 흡수량과 관계없다는 연구(Hallgren, 1978)도 있는데, 이와같이 상반된 결과는 식물의 오염물질에 대한 내성기작이 종에 따라 다르다는 사실을 뒷받침해주고 있다.

한편, 이러한 결과에서 식생의 복원이 교란된 생태계의 균형회복(Bradshaw, 1987)과 함께 복원된 식생에 의한 오염물질 정화기능도 기대한다면 기피기작에 대한 내성정보보다는 저항기작을 갖는 내성종이 복원수종으로 적합한 것으로 판단되었다(Sugahara, 1990).

3.3 수분포텐셜의 변화

SO₂ 접촉이 계속되는 동안 하루동안의 SO₂ 접촉 완료 후 오후 5:30~6:00 사이와, SO₂ 접촉중단

후 15시간 뒤인 다음날 오전 8:00~8:30 사이에 측정된 신갈나무 잎의 수분포텐셜 변화를 그림 3에 나타내었다.

8, 23, 32, 47, 56, 71, 80, 95 및 104시간 뒤에 측정된 신갈나무 잎의 수분포텐셜은 대조구에서 -1.62, -1.53, -1.37, -1.45, -1.71, -1.45, -1.29, -1.71, -1.53 및 1.53 Mpa로 변동하였고, 0.2 ppm 및 0.4 ppm 폭로실의 것은 접촉 후 56시간 뒤부터, 0.7 ppm 폭로실의 것은 32시간 뒤부터, 그리고 1.5 ppm 폭로실의 것은 8시간 뒤부터 대조구의 것보다 수분포텐셜이 감소하여 대조구와 실험구 사이에 그 차이를 나타내었다. 즉, 접촉가스의 농도가 높을수록 수분포텐셜이 빨리 감소하였고, 감소폭도 대체로 접촉가스 농도의 순서와 일치하였다.

한편, 0.4 ppm, 0.7 ppm 및 1.5 ppm 폭로실내의 식물에서 SO₂ 접촉 후 수분포텐셜의 감소시기는 가시피해 증상의 출현에 앞서 출현하였고(3.1항 참조), 가시피해 증세를 보이지 않은 0.2 ppm 폭로실내의 것들도 수분포텐셜이 대조구의 것보다 감소하여 오염물질 접촉과 수분손실 사이 및 수분손실과 오염피해 사이의 관련성을 추정할 수 있었는데, 수분손실이 오염피해의 방아쇠역할을 한다는 연구(Johnson and Siccama, 1983; Lee *et al.*, 1990a, b), 대기오염물질이 수분결핍의 효과를 증가시킨다는 연구(Pierre and Queiroz, 1988) 등이 이러한 사실을 뒷받침해주고 있다. 그러나 1.5 ppm 폭로실내의 시료에서 가시피해 정도가 증가함에 따라 수분포텐셜

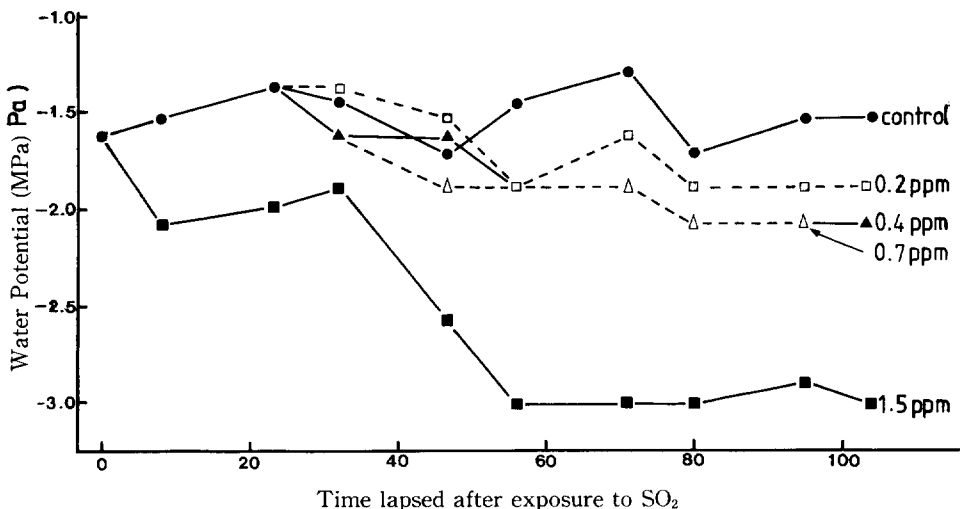


Fig. 3. Changes of leaf water potential of *Quercus mongolica* along time lapsed after exposure to SO₂.

의 감소가 현저해지는 사실로 보아 오염물질에 의한 피해로 잎이 괴사되는 부위를 통한 수분소실도 생각할 수 있겠다. 이러한 수분포텐셜의 변화를 기공저항치와 관련시켜 볼 때(3.2항 참조), 기공저항치가 증가하는데도 수분포텐셜이 감소하는 사실을 보면, 기공 외의 장소를 통해서도 수분 손실이 일어난다는 사실을 알 수 있고(Omasa *et al.*, 1985), SO₂ 접촉 후 낙엽이 발생하는 뽕나무(*Morus alba*)의 경우는 이층형성에 의한 수분공급 감소 효과도 생각할 수 있는데, 식물이 오염물질 접촉 후 노화촉진 호르몬인 에틸렌방출량을 증가시킨다는 사실(Cauhan, 1990)이 이러한 판단을 뒷받침해주고 있다.

한편, 5일 동안 SO₂에 접촉시킨 후 대조구 및 SO₂ 처리 폭로실내의 식물을 종 별로 구분하여 수분포텐셜을 측정 한 후 종간의 수분포텐셜 감소상태를 비교하였다(그림 4).

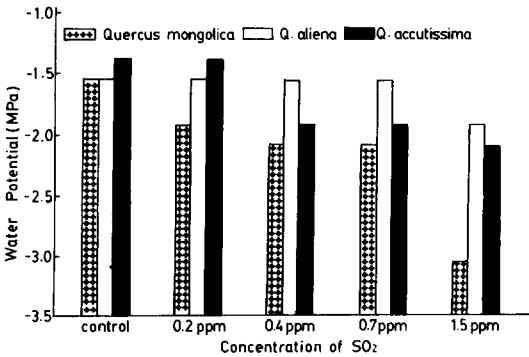


Fig. 4. A comparison of leaf water potential among species after exposure to SO₂ for 5 days.

대조구에서 신갈나무, 갈참나무 및 상수리나무의 수분포텐셜은 각각 -1.53, -1.53 및 -1.37 Mpa, 0.2 ppm 폭로실에서 각각 -1.89, -1.53 및 -1.37 Mpa, 0.4 ppm 폭로실에서 각각 -2.08, -1.53 및 -1.89 Mpa, 0.7 ppm 폭로실에서 각각 -2.08, -1.53 및 -1.89 Mpa, 그리고 1.5 ppm 폭로실에서 각각 -3.01, -1.89 및 -2.08 Mpa로 나타났다. 즉, 수분포텐셜은 앞서 고찰한 신갈나무에서와 같이 접촉가스 농도가 증가함에 따라 낮아지는 경향이었으며, 종간에는 신갈나무, 상수리나무, 갈참나무의 순서로 감소 폭이 컸다. 이러한 결과에서 볼 때 오염물질 접촉 후 수분포텐셜의 감소는 그 식물의 오염물질에 의한 피해 발생과 밀접하게 관계되는 것으로 판단되며, 오염지역에 살고 있는 식물의 성장감소의 원인으로 오염물질 접촉에 따른 수분포

텐셜 감소도 생각할 수 있겠다(Lee and Kim, 1987).

4. 요약

현장 조사 결과 대기오염으로 훼손된 지역에서 다음 단계의 식생을 형성할 수종으로 판단된 참나무속 식물의 복원수종으로서의 적합성을 판단하기 위하여 SO₂에 대한 생리적 반응을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

실험재료로 사용한 신갈나무, 상수리나무 및 갈참나무의 SO₂에 대한 내성은 갈참나무, 상수리나무, 신갈나무의 순서로 높았다. 이들의 내성은 자연림과 조림지를 포함하여 한국의 주요 삼림식생을 형성하고 있는 식물종과 비교하였을 때 비교적 높은 편이었다. 참나무속 식물의 기공저항치는 SO₂ 접촉 후 증가하는 경향이었으며, 그 정도는 종에 따라 달랐다. 종 간에 SO₂에 대한 내성과 기공저항치의 증가 정도가 일치하지 않는 사실로부터 SO₂에 대한 내성이 기피기작에 의한 것과 저항기작에 의한 것으로 종 간에 차이를 확인하였다. SO₂ 접촉 후 식물의 수분포텐셜이 감소되었는데, 그 정도는 내성의 순서와 일치하였다. 수분포텐셜은 가시피해가 나타나기 전에 감소되기 시작하였고, 가시피해가 나타나지 않은 저농도의 SO₂에 접촉시킨 식물의 수분포텐셜도 감소되었다.

(본 연구는 한국과학재단에서 지원한 국내 Post-Doc. 연구과제임).

감사의 글

본 연구를 수행하는데 있어서 시료식물의 관리와 실험을 수행하는 과정에서 여러가지로 도움 준 국립환경연구원 환경생물실험실의 김동호씨와 이준배씨에게 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김재봉, 김동한, 박재주, 오재기, 배정오, 남혜옥, 신승극, 김정규(1984) 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구(I). 국립환경연구원.
김재봉, 박재주, 배정오, 김동한, 김정규, 남혜옥, 조성만(1985) 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구(II). 국립환경연구원.

- 김재봉, 배정오, 고강석, 김정규, 박재주, 지준성(1986) 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한 실험적 연구(III). 국립환경연구원.
- 김준호(1987) 파괴된 자연의 회복. 자연보호, 10, 16 — 19.
- 大政謙次(1979) 植物群落の汚染ガス吸收の機能 — 現象の解析モデル化. 國立公害研究所 研究報告, 10, 367 — 385.
- 배정오, 고강석(1990) SO₂가 식물에 미치는 영향. 한국 생태학회 및 한국식물학회 주최 '90 심포지움 및 워크샵. 식물과 환경오염. pp. 55 — 86.
- 산림청(1989) 임업통계요람, No. 19, 422 pp.
- 신용석, 오구균, 최승(1988) 도시경관. 생태론. 기문당. 서울, 308 pp.
- 오구균(1991) 도시 녹지의 생태적 관리. 한국조경학회 및 산림청 임업연구원 주최 도시·산림·환경 심포지움, pp. 86 — 109.
- 李方旻 등(1990) 대기오염에 대한 식물군집의 피해평가 및 유지 방안에 관한 연구(II) — 오염지역 및 비오염지역 식물군집의 구조와 생산력을 중심으로 —. 국립환경연구원, NIER No. 90-02-276.
- 이창석, 배정오(1991) 대기오염으로 훼손된 식생의 구조, 동태 및 복원에 대한 생태학적 연구. 한국대기보전학회지, 7(3)(인쇄중).
- 조재영, 장권열(1989) 실험통계분석법. 향문사, 서울.
- 이창석(1989) 솔잎혹파리 피해 소나무림의 천이에 관한 연구. 서울대학교 박사학위 논문, 106 pp.
- 이창석, 배정오(1991) 대기오염으로 훼손된 식생의 구조, 동태 및 복원에 대한 생태학적 연구(투고중).
- 青木 正敏, 戸塚 績, 鈴木 義則, 森岡 健(1987) 緑地の大氣汚染浄化能. 國立公害研究所報, 108, 41 — 50.
- 한상욱, 김재봉, 배정오, 정성용, 고강석, 김정규, 허인애, 김동호, 김은식(1989) 식물을 이용한 대기오염 정화방안에 관한 연구(III). 국립환경연구원.
- Aber, J.D. (1987) Restored forests and the identification of critical factors in species-site interactions, *In* Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological research, W.R. Jordan III, M.E. Gilpin and J.D. Aber (eds.). pp. 241 — 250. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Barrs, H.D. (1968) Determination of water deficit in plant tissues, *In* Water and plant growth, Vol. 1, T.T. Kozłowski (ed.) Academic press, London. pp. 235 — 368.
- Bradshaw, A.D. (1987) Restoration: an acid test for ecology, *In* Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological research, W.R. Jordan III, M.E. Gilpin and J.D. Aber (eds.). pp. 23 — 33. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Cauhan, A. (1990) Early diagnosis of SO₂-stress by volatile emissions in some crop plants, *Oecologia*, 84, 289 — 294.
- Hallgren, J.E. (1978). Physiological and biochemical effects of sulfur dioxide on plants, *In* Sulfur in the environment, J.O. Nriagu (ed.). John Wiley & Sons, New York, pp. 163 — 209.
- Johnson, A.H. & Siccama, T.G. (1983) Acid deposition and forest decline, *Environ. Sci. Technol.*, 17, 294 — 305.
- Jordan III, W.R., M.E. Gilpin and J.D. Aber (1987) Restoration ecology: ecological restoration as a technique for basic research, *In* Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological research, W.R. Jordan III, M.E. Gilpin and J.D. Aber (eds.). pp. 3 — 21. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Lee, C.S. and J.H. Kim (1987) Relationships between soil factors and growth of annual ring in *Pinus densiflora* on stony mountain, *Kor. J. Ecol.*, 10, 151 — 159.
- Lee, W.S., B.I. Chevone and J.R. Seiler (1990a) Growth and gas exchange of loblolly pine seedlings as influenced by drought and air pollutants, *Water, Air and Soil pollution*, 51, 105 — 116.
- Lee, W.S., B.I. Chevone and J.R. Seiler (1990b) Growth response and drought susceptibility of red spruce seedlings exposed to simulated acidic rain and ozone, *Forest Science*, 36, 265 — 275.
- Levitt, J. (1972) Responses of plants to environmental stresses, Academic press, London.
- LI-COR, Inc. (1982) LI-1600 steady state porometer instruction manual.
- MacMahon, J.A. (1987) Disturbed lands and ecological theory: an essay about a mutualistic association, *In* Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological research, W.R. Jordan III, M.E. Gilpin and J.D. Aber (eds.). pp. 221 — 240. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Omasa, K., Y. Hashimoto, P.J. Kramer, B.R. Strain, I. Aiga and J. Kondo (1985) Direct observation of reversible and sunflower leaves to SO₂. *Plant physiol.*, 79, 153 — 158.
- Pierre, M. and Queiroz, O. (1988) Air pollution by SO₂ amplifies the effects of water stress on enzymes and total soluble proteins of spruce needles, *Physiol. plant*, 73, 412 — 417.

- Sugahara, K. (1990) Effect of air pollutants on plants and amelioration of polluted atmosphere by plants, 국립환경연구원 및 한국환경과학연구협회 주최 “제18회 세계 환경의 날” 기념 심포지움, 쾌적한 환경창조를 위한 생태계의 보존, pp. 75 — 86.
- Thomas, M.D. and G.R. Hill (1935) Absorption of sulfur dioxide by alfalfa and its relation to leaf injury, *Plant physiol.*, 10, 291 — 307.
- Thomas, M.D., R.H. Hendricks and G.R. Hill (1950) Sulfur metabolism of plants: Effect of sulfur dioxide on vegetation, *Ind. Eng. Chem.*, 42, 2231 — 2235.