

## 오존 노출에 의한 총총나무의 유전특성 변화

장석성<sup>1</sup> · 이석우<sup>1\*</sup> · 이재천<sup>1</sup> · 한심희<sup>1</sup> · 김홍은<sup>2</sup>

<sup>1</sup>임업연구원 산림유전자원부, <sup>2</sup>충북대학교 산림과학부

(2003년 8월 29일 접수; 2003년 11월 21일 수락)

## Genetic Changes of *Cornus controversa* with Ozone Exposure

Suk-Seong Jang<sup>1</sup>, Seok-Woo Lee<sup>1\*</sup>, Jae-Cheon Lee<sup>1</sup>, Sim-Hee Han<sup>1</sup> and Hong-Eun Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea.

<sup>2</sup>School of Forest Resources, Chungbuk National University, Chungju 361-763, Korea.

(Received August 29, 2003; Accepted November 21, 2003)

### ABSTRACT

To examine the effects of ozone (O<sub>3</sub>), one of the major air pollutants in the city area, on genetic changes in *Cornus controversa* Hemsl., we compared genetic structures between sensitive (S) and tolerant (T) tree groups of *C. controversa* fumigated with ozone using isozyme markers. The genetic structures were measured in terms of allele and genotype frequencies determined at five polymorphic enzyme loci. Marked genetic differences between the two groups were detected at three loci (*Lap-2*, *Mdh-1* and *Skdh-1*). Genetic parameters, genetic multiplicity, genetic diversity and heterozygosity showed that the tolerant group retained greater genetic variation than did the sensitive group. Results of the study were congruent with the general expectation that the more heterozygous individuals and/or populations exhibit higher resistance to various stress factors.

**Key words** : Giant dogwood, air pollutants, resistance, genetic structure, allozymes

### I. 서 론

산업화 이후 지난 100여 년간 대기오염에 의한 산림피해가 가시화 되고 있다. 특히 북미와 유럽지역에서는 대기오염에 의해 대규모 산림면적이 감소되고 있다(Scholz *et al.*, 1989; Giannini, 1991). 대기오염에 의한 수목의 피해는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등에 의한 잎의 직접적(가시적) 피해, 토양 산성화 및 토양 중 중금속 침적에 의한 생장 피해 등 여러 가지 형태로 나타나고 있다. 이 가운데 오존은 산림 생태계에서 임목의 활력에 치명적인 영향을 미치는 오염원(Skelly, 1980)으로, 직접 대기 중에 배출되지는 않지만 공단지역이나 대도시 지역에서 배출된 일차 오염원들이 건조하고

높은 기온 조건에서 태양광선에 의해 광화학 반응이 일어난 후 고농도로 형성되어 오염원이 된다. 이렇게 형성된 오존은 기압골의 영향을 받아서 먼 거리를 이동하는 특성을 지니고 있기 때문에 오염원에서 멀리 떨어져 있는 산림지역에도 피해를 주게 된다(Hayes and Skelly, 1977; Comrie, 1994).

대기오염 등 환경 악화가 임목의 유전적 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 유럽을 중심으로 다양하게 이루어져 왔다. 예를 들어 대기오염원이 선발압으로 작용했을 경우의 대립유전자 및 유전자형 빈도의 변화(Müller-Stark, 1985; Bergmann and Scholz, 1989; Ruetz and Bergmann, 1989), 환경 악화로 인한 유전변이의 감소 및 내성과 감수성 개체 또는 임분간

유전구조의 차이 등에 관한 연구(Müller-Starck, 1985, 1989; Bergmann et al., 1990; Geburek et al., 1987; Oleksyn et al., 1994) 등이다. 지금까지의 연구 결과를 살펴보면 대기오염이나 기타 환경 악화에 대해서 내성을 보이는 개체들이 그렇지 못한 개체들에 비해서 유전적으로 다양하거나 선발 전후에 있어서 대립유전자 빈도 또는 유전자형 빈도에 있어서 차이가 나는 등 환경변화에 따라 유전적 특성이 변화하는 사례가 많은 것으로 알려지고 있는데(Ziehe et al., 1999), Geburek et al.(1986)과 Liu et al.(1990)은 집단의 유전구조와 환경변화 사이에 아무런 연관성도 찾을 수 없다고 보고하기도 하였다. 한편, 국내에서는 대기오염의 피해가 심한 공단 지역(울산)에서 내성을 보이는 산벚나무 개체와 그렇지 않은 개체를 선발하여 두 그룹간의 유전적 차이를 조사한 것(Lee et al., 1998)과 도심에 심겨진 은행나무를 대상으로 대기오염에 대해서 내성 및 감수성을 보이는 개체의 유전적 차이를 조사한 연구사례가 있다(Kim et al., 2001).

층층나무(*Cornus controversa* Hemsl.)는 한국, 일본의 온대, 중국의 아열대 지방에 분포하는 낙엽활엽 수로서 우리나라에 자생하는 층층나무는 수고 18~20m 까지 자라는 교목수종으로 해발 1,400m 이내의 산록과 계곡부위의 적운한 토양에서 서식하는 2차 천이 수종이다(Cornelissen, 1993; Masaki et al., 1994; Kim, 2000; Um and Lee, 2001). 층층나무는 우리나라의 산림 환경에 적응한 생태적으로 안정된 수종으로 조림수종으로서의 기대 가치가 높을 뿐만 아니라(Kim, 2000), 풍부한 밀원(蜜源)을 가지고 있으며 경관 활엽수로도 이용 가치가 큰 경제수종이다(Um and Lee, 2001). 또한, 층층나무는 고려시대 목판 대장경의 재료로 사용된 것으로 밝혀짐으로서(Park and Kang, 1996) 고급 목재 및 목공예적 용도개발도 예상되고 있다. 이렇게 다양한 용도 가운데 특히 경관수종으로서의 개발이 유망한데, 대기오염이 심각한 도심지 등에 조경수로 심겨지기 위해서는 대기오염에 대해서 내성을 보이는 개체의 선발이 선행되어야 하며, 육종 프로그램 등을 통해 계속적으로 이러한 형질을 개량하기 위해서는 내성을 보이는 개체와 그렇지 못한 개체간의 유전적 특성이 구명되어야 한다.

본 연구에서는 제어된 환경 아래서 층층나무를 도심지 주요 대기 오염원 가운데 하나인 오존에 폭로시킨 뒤 내성을 보이는 개체와 그렇지 못한 개체를 선발한

후 동위효소 분석에 의한 유전변이를 조사한 후 두 그룹간의 유전적 차이를 비교하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

본 실험에 사용된 재료는 점봉산 등 9개 지역에서 채취한 종자를 이른 봄 온실에서 파종하여 사용하였다. 발아 후 펠라이트와 피트모스를 1:1(v/v)로 혼합한 배양토를 채운 2ℓ 포트에 450분을 이식하여 임업연구원 산림유전자원부 환경제어실내의 자연광 온실에서 5주간 육묘하였다. 오존 처리를 위하여 생장과 활력이 비교적 균일한 171분을 최종 선발하여 실험에 사용하였다(Jang et al., 2003).

### 2.2. 오존처리 및 내성개체 선발

오존 처리는 인공광 챔버를 이용하였는데, 처리 구분은 대조구인 clean room과 우리나라 오존의 1시간 평균 환경기준인 100ppb 처리구로 하였으며, 처리 기간은 오전 9시부터 오후 5시까지 하루 8시간 씩 총 10주 동안(5월 20일~7월 28일) 실시하였다. 실험기간 동안 대조구와 처리구 챔버 내의 평균 오존 농도는 각각  $5.1 \pm 1$ ppb,  $98.5 \pm 5$ ppb로 기록되었다(Lee et al., 2001).

동위효소 분석에 이용할 개체는 Jang et al.(2003)의 선행 연구에서 선발된 민감성 30개체와 내성 30개체를 사용하였다.

### 2.3. 동위효소 분석

동위효소 분석은 오존 처리에 대해서 내성인 개체와 그렇지 않은 개체로부터 유엽(幼葉)을 채취하여 Lee et al.(2002)의 방법에 의해 실시하였는데, 조사된 효소는 aspartate amino-transferase(AAT, E.C. 2.6.1.1), glu-tamate de-hydrogenase(GDH, E.C. 1.4.1.2), isocitrate de-hydrogenase(IDH, E.C. 1.1.1.42), leu-cine amino-peptidase(LAP, E.C. 3.4.11.1) malate de-hydrogenase(MDH, E.C. 1.1.1.37), 6-phospho-gluconate de-hydrogenase(6-PGD, E.C. 1.1.1.44), phospho-glucose isomerase(PGI, E.C. 5.3.1.9), phospho-glucomutase(PGM, E.C. 5.4.2.2), shikimate de-hydrogenase(SKDH, E.C. 1.1.1.25)의 9개였다. 이 가운데 다형성을 보인 4개 동위효소 5개 유전자좌(*Lap-2*, *Mdh-1*, *Pgi-3*, *Pgi-4*, *Skdh-1*)가 유전분석에 사용되었다. 각 동위효소별 유전양식은 교배차대

가 없었기 때문에 직접 추정할 수는 없었으나, 다른 유사 식물로부터 보고된 자료 및 효소의 기능과 생화학적 구조(Weeden and Wendel, 1989)를 고려하여 간접적으로 추정하였다.

#### 2.4. 통계분석

각 유전자좌별로 대립유전자 빈도 및 유전자형 빈도를 구한 후 두 그룹간 통계적 차이를 G-test(log likelihood test; Sokal and Rohlf, 1981)에 의해 검정하였다. 두 그룹의 유전적 다양도를 비교하기 위해서는 유전자좌당 대립유전자수( $A_L$ ), 유전자좌당 유전자형수( $G_L$ ), 이형접합도의 기대치( $H_e$ ), Gregorius(1978)의 유전적 다양도( $v$ ), 배우자 다수 유전자좌 다양도(gametic multi-locus diversity,  $v_{gam}$ ; Gregorius, 1978)를 구했으며, 각 유전자좌별로 총 대립유전자수와 유효 대립유전자수의 차이를 구한 후 모든 유전자좌에 대해서 더해준 값인 latent genetic potential(LP; Bergmann *et al.*, 1990)을 구하였다. 이상의 모든 통계분석은 BIOSYS-1(Swofford and Selander, 1989)과 GSED(Gillet, 1994) 컴퓨터 프로그램에 의해 수행되었다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 대립유전자 빈도 및 유전자형 빈도 분포

오존처리에 대해서 내성을 보인 개체군과 감수성을 보인 개체군에 대한 유전자좌별 대립유전자 빈도와 유전자형 빈도는 Table 1과 같다. 비교된 5개의 다형적 유전자좌 가운데 *Lap-2*, *Mdh-1*, *Skdh-1*의 3개 유전자좌(60%)에서 대립유전자 빈도 분포가 두 그룹간에 차이를 나타냈다. 유전자좌 *Lap-2*에서는 감수성 그룹에서 발견되지 않은 대립유전자 *a*가 이형접합체(*Lap-2<sub>a2b</sub>*)의 상태로 내성 그룹에서만 발견되었다. *Mdh-1*의 경우 대립유전자 *c*가 0.117의 높은 빈도로 내성그룹에서만 발견되었으며, 감수성 그룹에서는 대립유전자 *b*가 주대립유전자(0.600)로 나타난 반면 내성 그룹에서는 대립유전자 *a*가 주대립유전자(0.633)인 것으로 나타났다. *Skdh-1*에서는 감수성 및 내성 그룹 모두에서 대립유전자 *b*가 주대립유전자인 것으로 나타났으나, 감수성 그룹에서는 대립유전자 *c*(0.100:0.052), 내성 그룹에서는 대립유전자 *a*(0.138:0.017)가 상대편 그룹에 비해서 그 빈도가 높은 것으로 나타났다.

유전자형 빈도의 경우 유전자좌 *Lap-2*와 *Mdh-1*에

서 두 그룹간에 통계적으로 유의한 차이가 관측되었다. *Lap-2*의 경우 감수성 그룹에서 관측되지 않은 유전자형 *Lap-2<sub>a2b</sub>*가 0.100의 빈도로 내성 그룹에서만 발견되었다. 유전자좌 *Mdh-1*의 경우 두 그룹간에 많은 차이가 있었는데, 감수성 그룹에서는 유전자형 *Mdh-1<sub>a1b</sub>*의 빈도가 0.733으로 가장 높았으나 내성 그룹에서는 유전자형 *Mdh-1<sub>a1a</sub>*, *Mdh-1<sub>a1b</sub>*, *Mdh-1<sub>a1c</sub>*가 각각 0.333, 0.367, 0.233의 빈도로 유사하였다. 특히 유전자형 *Mdh-1<sub>a1c</sub>*의 경우 감수성 그룹에서는 전혀 관측되지 않았으며, 유전자형 *Mdh-1<sub>a1a</sub>*의 경우 감수성 그룹에서는 관측빈도(0.033)가 매우 낮았다. 또 유전자형 *Mdh-1<sub>b1b</sub>*의 경우 감수성 그룹에서는 0.233으로 빈도가 높았던 반면, 내성 그룹에서는 0.067로 빈도가 낮았다.

한편, 유전자좌 *Pgi-3*의 경우 통계적 유의성은 없었으나 대립유전자 *b*의 빈도가 내성 그룹(0.583)에 비해서 감수성 그룹(0.750)에서 높았으며, 대립유전자 *a*의 빈도는 감수성 그룹에 비해 내성 그룹에서 높게 나타났다.

본 연구에서 두 그룹간에 통계적으로 유의한 차이를 보인 효소 가운데 MDH는 생물체의 대사과정에서 citric acid cycle에 관여하는 주요 효소로 대기오염 물질에 대해서 내성을 보이는 식물체와 그렇지 못한 식물체에서 서로 다르게 반응함이 여러 연구자에 의해 이미 보고된 바 있다(Rabe and Kreeb, 1980; Bergmann and Scholz, 1989; Ziehe *et al.*, 1999). LAP는 아미노산 대사과정에 관여하는 효소로 SO<sub>2</sub> 오염원에 대해서 특히 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있는데(Rabe and Kreeb, 1980), 가문비나무(Bergmann and Scholz, 1989)와 너도밤나무(Ziehe *et al.*, 1999)에서 대기오염에 대해 내성을 보인 개체와 그렇지 못한 개체간에 대립유전자 및 유전자형 빈도 분포에서 차이가 나는 것으로 보고되고 있다. SKDH는 플라보노이드 등을 합성하는 방향성 아미노산(aromatic amino acid) 대사에 관여하는 효소인데 유럽산 너도밤나무에서도 환경 스트레스에 대해서 내성을 보이는 개체와 그렇지 못한 개체가 서로 다르게 반응하는 것으로 보고되었다(Ziehe *et al.*, 1999).

유전자좌 *Lap-2*, *Mdh-1*, *Skdh-1*에서 대립유전자 빈도 및 유전자형 빈도에서 두 그룹간에 통계적으로 유의한 차이가 관측된 것은 오존에 대한 선분(도태)효과가 두 그룹에서 차이가 나기 때문인 것으로 추정된

**Table 1.** Allele and genotype frequencies at five enzyme loci in the sensitive(S) and the tolerant(T) groups of *Cornus controversa* fumigated with ozone.

Locus	Allele	Genotype	Frequency S group (No. of trees)	Frequency T group (No. of trees)	G-test	
<i>Lap-2</i>	<i>a</i>		0.000	0.050	4.236*	
			1.000	0.950		
	<i>b</i>	<i>ab</i>	0.000(0)	0.100(3)	4.317*	
		<i>bb</i>	1.000(30)	0.900(27)		
<i>Mdh-1</i>	<i>a</i>		0.400	0.633	21.802***	
	<i>b</i>		0.600	0.250		
	<i>c</i>		0.000	0.117		
		<i>aa</i>	0.033(1)	0.333(10)		24.931***
		<i>ab</i>	0.733(22)	0.367(11)		
		<i>ac</i>	0.000(0)	0.233(7)		
		<i>bb</i>	0.233(7)	0.067(2)		
<i>Pgi-3</i>	<i>a</i>		0.150	0.267	3.844 n.s.	
	<i>b</i>		0.750	0.583		
	<i>c</i>		0.100	0.150		
		<i>aa</i>	0.067(2)	0.133(4)		3.529 n.s.
		<i>ab</i>	0.167(5)	0.267(8)		
		<i>bb</i>	0.633(19)	0.433(13)		
		<i>bc</i>	0.067(2)	0.033(1)		
	<i>Pgi-4</i>	<i>a</i>		0.483		0.518
<i>b</i>			0.517	0.482		
		<i>aa</i>	0.367(11)	0.429(12)	0.353 n.s.	
		<i>ab</i>	0.233(7)	0.179(5)		
		<i>bb</i>	0.400(12)	0.393(11)		
<i>Skdh-1</i>	<i>a</i>		0.017	0.138	7.543*	
	<i>b</i>		0.883	0.810		
	<i>c</i>		0.100	0.052		
		<i>aa</i>	0.000(0)	0.069(2)		7.372 n.s.
		<i>ab</i>	0.033(1)	0.103(3)		
		<i>ac</i>	0.000(0)	0.034(1)		
		<i>bb</i>	0.767(23)	0.724(21)		
		<i>bc</i>	0.200(6)	0.069(2)		

n.s. non significant, \*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.001$ 

다. 동위효소 표지자의 경우 도태압에 대해서 중립적인 것으로 보통 이해되고 있으나, 일부 효소의 경우 도태압에 따른 반응이 다른 것으로 나타나고 있으며 (Ziehe *et al.*, 1999), LAP, MDH, SKDH 효소는 위에서 살펴본 바와 같이 여러 수종에서 환경 스트레스에 대해 선발효과를 받고 있는 것으로 알려져 있다. 한편, 본 연구에서 조사된 9개 동위효소 가운데 IDH, AAT, PGM 등의 경우도 대기오염에 대해서 내성을 보이는 개체와 그렇지 않은 개체 사이에 대립유전자

및 유전자형 빈도에서 차이가 나는 효소로 알려져 있는데(Bergmann and Scholz, 1989; Ziehe *et al.*, 1999), 본 연구에서는 이들 효소에서 변이를 발견할 수 없었기 때문에 두 그룹간의 비교가 이루어지지 않았다. 이들 효소는 모두 1차 대사에 관여하는 효소로 major polymorphism(Gillespie and Langley, 1974; Bergmann, 1991)을 나타내는 효소군(Group-I)에 속한다. 일반적으로 Group-I의 효소군은 다형성이 높은 Group-II 효소군에 비해서 변이가 적기 때문에 본 연

구에서는 변이가 발견되지 않은 것으로 추정된다.

### 3.2. 유전적 다양도

내성 그룹과 감수성 그룹의 유전적 다양도는 Table 2와 같다. 감수성 그룹에서는 총 11개의 대립유전자가 관측된 반면 내성 그룹에서는 13개의 대립유전자가 관측되어 유전자좌당 평균대립유전지수는 각각 2.2개와 2.6개였다. 관측된 유전자형수의 경우 감수성 그룹에서는 15개 (유전자좌당 평균 유전자형 수: 3개), 내성 그룹에서는 19개 (유전자좌당 평균 유전자형 수: 3.8개)가 관측되어 내성 그룹에서 더욱 많은 유전자형이 관측되었다. 대립유전자수나 유전자형수가 많다는 것은 예측할 수 없는 환경변화에 대해서 적응되어질 수 있는 잠재 적응력이 크다는 것을 의미한다(Finkeldey and Gregorius, 1994).

Gregorius(1978)의 유전적 다양도( $v$ )의 경우 감수성 그룹에서는 1.000(Lap-2)~1.998(Pgi-4)의 값을, 내성 그룹에서는 1.105(Lap-2)~2.305(Pgi-3)의 값을 보였으며 5개 유전자좌에 대한 평균값은 각각 1.573과 1.795로 내성 그룹이 높은 값을 보였다. 이형접합도의 기대치( $H_e$ ) 역시 내성그룹[0.097(Lap-2)~0.576(Pgi-3), 평균: 0.408]이 감수성 그룹[0.000(Lap-2)~0.508(Pgi-4), 평균: 0.324]에 비해서 높은 값을 나타냄으로서 내성그룹의 유전 다양성이 높은 것으로 나타났다. 이론에 의하면 유전적으로 다양한 생물체는 변화하는 환경압에 대해서 잘 적응하여 유전적 다양성이 낮은 생물체에 비해서 보다 더 오래 생존할 수 있을 것으로 기대된다(Gregorius, 1986; Namkoong, 1991). 이 같은 가설은 환경 스트레스에 의해 피해를 입은 개체 또는 집단과 건강한 개체 또는 집단의 유전적 특성을 비교

한 여러 연구결과에서 검증된 바 있으며(Müller-Starck, 1985; Bergmann and Scholz, 1989; Oleksyn *et al.*, 1994; Ziche *et al.*, 1999), 최근에 수행된 국내 연구에서도 유사한 결과가 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2001).

내성그룹과 감수성 그룹에서 배우자 다수 유전자좌 다양도( $v_{gam}$ )와 latent genetic potential(LP)의 값을 구한 결과 각각 12.5와 22.1, 3.13과 4.02로 내성그룹에서 높은 값을 나타냈다. 이 값들은 다음 세대에 유전변이를 형성할 수 있는 집단의 능력을 나타내는 것으로, 그 값이 크면 환경변화에 대한 적응력이 높음을 의미한다(Bergmann *et al.*, 1990).

지금까지 본 연구에서 도출된 결과들은 위에서 제시한 여러 이론이나 가설에 잘 부합하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 외부 환경 스트레스에 대해서 유전구조에 따라 서로 다르게 반응할 수 있음과 한 생물체의 유전 다양성을 유지하는 것이 예측할 수 없는 환경변화에 적응하여 생존·진화하는데 있어서 얼마나 중요한가를 잘 보여주고 있다. 따라서 유전 다양성, 즉 유전자원을 보전하기 위한 대책 마련이 조속히 이루어져야 하며, 지속적인 육종 프로그램의 진행을 위해서도 유전다양성의 유지가 매우 중요함을 알 수 있다. 왜냐하면 대기오염에 대한 저항성 품종 등을 개발하기 위해서는 본 연구의 결과에서 나타난 것처럼 유전 다양성이 높은 개체가 유리하기 때문이다.

## IV. 적 요

도심지 주요 대기 오염원 가운데 하나인 오존이 층층나무의 유전구조에 미치는 영향을 조사하기 위하여

**Table 2.** Genetic multiplisities and genetic diversities for the sensitive(S) and the tolerant(T) groups of *Cornus controversa* fumigated with ozone.

Locus	$A_L$		$G_L$		$v$		$H_e$	
	S	T	S	T	S	T	S	T
Lap-2	1	2	1	2	1.000	1.105	0.000	0.097
Mdh-1	2	3	3	4	1.923	2.095	0.488	0.532
Pgi-3	3	3	5	5	1.681	2.305	0.412	0.576
Pgi-4	2	2	3	3	1.998	1.997	0.508	0.508
Skdh-1	3	3	3	5	1.265	1.474	0.213	0.327
Mean	2.2	2.6	3.0	3.8	1.573	1.795	0.324	0.408

$A_L$  = number of alleles,  $G_L$  = number of genotypes,  $v$  = genetic diversity (Gregorius, 1978),  $H_e$  = expected heterozygosity

오존 처리에 대해서 생장이 건강한 내성 그룹과 피해가 심한 감수성 그룹을 선발한 후 동위효소 분석에 의한 유전구조를 비교하였다. 두 그룹간 유전구조의 차이는 5개 다형적 유전자좌에서 관측된 대립유전자 빈도 및 유전자형 빈도의 비교에 의해서 이루어졌다. 분석 결과 3개 유전자좌(*Lap-2*, *Mdh-1*, *Skdh-1*)에서 두 그룹간에 통계적으로 유의한 차이가 관측되었다. 내성그룹의 경우 유전적 다수도, 유전적 다양도, 이형 접합도 등 유전적 다양성을 추정하기 위한 모든 통계치에서 감수성 그룹에 비해 높은 값을 나타냈다. 본 연구 결과는 유전적으로 다양한 개체 또는 집단이 그렇지 않은 개체나 집단에 비해서 환경 스트레스에 대해 저항성이 크다는 일반적인 가설에 잘 부합하는 것으로 나타났다.

### 인용문헌

- Bergmann, F. and F. Scholz, 1989: Selection effects of air pollution in Norway spruce (*Picea abies*) populations. *Genetic Effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations*, F. Scholz, H.-R. Gregorius and D. Rudin, (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 143–160.
- Bergmann, F., H.-R. Gregorius and J. B. Larsen, 1990: Levels of genetic variation in European silver fir (*Abies alba*) - are they related to species' decline? *Genetica* **82**, 1–10.
- Bermann, F. 1991: Isozyme gene markers. *Genetic Variation in European Populations of Forest Trees*, G. Müller-Starck and M. Ziehe (Eds.), Sauerländer's Verlag, Frankfurt, 67–78.
- Comrie, A. C., 1994: A synoptic climatology of rural ozone pollution at three forest sites in Pennsylvania. *Atmospheric Environment*, **28**, 1601–1614.
- Cornelissen, J. H. C., 1993: Seedlings growth and morphology of the deciduous tree *Cornus controversa* in simulated forest gap light environments in subtropical China, *Plant Species Biology*, **8**, 21–27.
- Esterbauer, H. and K. H. Cheeseman, 1990: Determination of aldehydic lipid peroxidation products: malonaldehyde and 4-hydroxynonenal, *Methods in Enzymology*, **186**, 407–421.
- Finkeldey, R. and H.-R. Gregorius, 1994: Genetic resources: selection criteria and design. *Conservation and Manipulation of Genetic Resources in Forestry*, Z. S. Kim and H. H. Hattemer, (Eds.), Kwang Moon Kag, Seoul, 322–347.
- Geburek, T. H., F. Scholz and F. Bergmann, 1986: Variation in aluminum-sensitivity among *Picea abies* (L.) Karst. seedlings and genetic differences between their mother trees as studied by isozyme-gene-markers, *Angew. Bot.* **60**, 451–460.
- Geburek, T. H., F. Scholz, W. Knabe and A. Vorneweg, 1987: Genetic studies by isozyme gene loci on tolerance and sensitivity in an air polluted *Pinus sylvestris* field trial, *Silvae Genetica*, **36**, 49–53.
- Giannini, R. (Ed.), 1991: Effects of Pollution on the Genetic Structure of Forest Tree Populations. *Proceedings of Meeting, Rome, April 3, 1990*. pp.195.
- Gillespie, J. H. and C. H. Langley, 1974: A general model to account for enzyme variation in natural populations, *Genetics*, **76**, 837–884.
- Gillet, E.M., 1994: GSED: Genetic structures from electrophoresis data. Version 1.0. Abteilung für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, Universität Göttingen. pp.49.
- Gregorius, H.-R., 1978: The concept of genetic diversity and its formal relationship to heterozygosity and genetic distance, *Math. Biosci.*, **41**, 253–271.
- Gregorius, H.-R., 1986: The importance of genetic multiplicity for tolerance of atmospheric pollution. *Proceedings of 18th IUFRO World Congress, Ljubljana, Voi. I*. 295–305.
- Hayes, E. M. and J. M. Skelly, 1977: Transport of ozone from the northeastern United States into Virginia and its effects on eastern white pine. *Plant Diseases Report*, **61**, 778–782.
- Jang, S.-S., J.-C. Lee, S.-H. Han and H.-E. Kim, 2003: Selection of ozone tolerant individuals of *Cornus controversa*, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **5**, 6–10.
- Kim, P. G., Y. B. Koo, J. C. Lee, S. W. Bae, Y. S. Yi and Y. M. Cheong, 2001: Chlorophyll content and genetic variation of *Ginkgo biloba* L. planted on the street in Seoul, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **3**, 114–120.
- Kim, J. J., 2000: Studies on optimum shading for seedling cultivation of *Cornus controversa* and *C. walter*, *Journal of Korean Forestry Society*, **89**, 591–597.
- Lee, J. C., I. S. Kim, J. K. Yeo, and Y. B. Koo, 2001: Comparing of clonal sensitivity of *Populus deltoides* to atmospheric ozone with use of visible foliar injury, *Journal of Korean Forestry Society*, **90**, 10–18.
- Lee, S. W., F. T. Ledig, and D. R. Johnson, 2002: Genetic variation at allozyme and RAPD markers in *Pinus longaeva*(Pinaceae) of the White Mountains, California. *American Journal of Botany*, **89**, 566–577.
- Lee, S. W., S. Y. Woo, Y. B. Koo and S. K. Lee, 1998: Genetic differences between the tolerant and the sensitive trees in an air polluted *Prunus sargentii* stand. *Journal of Korean Forestry Society*, **87**, 74–81.
- Liu, E. H., E. M. Iglich, R. R. Sharitz and M. H. Smith, 1990: Population genetic structure of baldcypress (*Taxodium distichum*) in a thermally affected swamp forest, *Silvae Genetica*, **39**, 129–133.

- Masaki, T., Y. Kominami and T. Nakashizuka, 1994: Spatial and seasonal patterns of seed dissemination of *Cornus controversa* in a temperate forest, *Ecology*, **75**, 1903–1910.
- Müller-Starck, G., 1985: Genetic differences between tolerant and sensitive beeches (*Fagus sylvatica* L.) in an environmentally stressed forest stand, *Silvae Genetica*, **34**, 241–247.
- Müller-Starck, G., 1989: Genetic implications of environmental stress in adult forest stands of *Fagus sylvatica* L. *Genetic Effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations*. F. Scholz, H.-R. Gregorius and D. Rudin, (Eds.), Springer-Verlag, Berlin. 127–142.
- Namkoong, G., 1991: Biodiversity-issues in genetics, forestry and ethics. *Forestry Chronicle*, **68**, 438–443.
- Oleksyn, J., W. Prus-Glowacki, M. Giertych and P. B. Reich, 1994: Relation between genetic diversity and pollution impact in a 1912 experiment with East European *Pinus sylvestris* provenances, *Canadian Journal of Forest Research*, **24**, 2390–2394.
- Park, S.-J., and A.-K. Kang, 1996: Species identification of tripitaka Koreana, *Mokchae Konghak*, **24**, 80–89.
- Rabe, R. and K. H. Kreeb, 1980: Wirkungen von SO<sub>2</sub> auf die Enzymaktivität in Pflanzenblättern. *Z. Pflanzenphysiol*, **97**, 215–226.
- Ruetz, W. F. and F. Bergmann, 1989: Possibilities of identifying autochthonous high-altitude stands of Norway spruce (*Picea abies*) in the Berchtesgaden Alps. *Forstwiss. Centralbl.* **108**, 164–174.
- Scholz, F., H.-R. Gregorius and D. Rudin (Eds.), 1989: Genetic Effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations. Springer-Verlag, Berlin. 201.
- Skelly, J. M., 1980: Photochemical oxidant impact in mediterranean and temperate forest ecosystem: real and potential effects. *Proceedings of the Symposium on Effects of Air Pollutants in Mediterranean and Temperate Forest Ecosystems*. June 22–27, Riverside, California, U.S.A. 38–50.
- Sokal, R. R. and F. J. Rohlf, 1981: Biometry, 2nd ed. Freeman and Company, New York. 691–778.
- Swofford, D. L. and R. B. Selander, 1989: BIOSYS-1: A computer program for the analysis of allelic variation in population genetics and biochemical systematics. Release 1.7., Illinois Natural Survey, IL.
- 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 and Cell Physiology*, **17**, 111–118.
- Um, T. W., and D. K. Lee, 2001: Site and growth characteristics of *Cornus controversa* growing at Mt. Gariwang and Mt. Joongwang located in Pyungchang-gun, Kangwon-do, *Journal of Korean Forestry Society*, **90**, 363–372.
- Weeden, N. F. and J. E. Wendel, 1989: Genetics of plant isozymes. *Isozymes in Plant Biology*. D. E. Soltis and P. S. Soltis, (Eds.), Dioscorides Press, Portland, Oregon, U.S.A. 46–72.
- Ziehe, M., H. H. Hattemer, R. Müller-Starck and G. Müller-Starck, 1999: Genetic structures as indicators for adaptation and adaptational potentials. *Forest Genetics and Sustainability*, C. Mátiás, (Ed.), Vol. 63. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 75–89.