

도심지 은행나무 가로수의 엽록소 함량 및 유전변이 특성*

김판기¹ · 구영본² · 이재천² · 배상원² · 이용섭¹ · 정용문³

¹서울대학교 농업과학공동기기센터,

²임업연구원, ³공주대학교 조경학과

(2001년 5월 10일 접수)

Chlorophyll Content and Genetic Variation of *Ginkgo biloba* L. Planted on the Street in Seoul*

Pan-Gi Kim¹, Yeong-Bon Koo², Jae-Cheon Lee², Sang-Won Bae²,
Yong-Sub Yi¹ and Yong-Moon Cheong³

¹National Instrumentation Center for Environmental Management,
Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

²Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

³Dept. Landscape Architecture, Kongju National University, Yesan-gun, Chungnam 340-800, Korea

(Manuscript received 10 May 2001)

ABSTRACT

Ginkgo biloba L. has been planted in the city as street trees because reported as resistant species to air pollutant. Especially, the trees planted on the street of 'Cheongro', Mt. 'Nam', and 'Jamsil' have been exposed to air pollutant for a long time. This study was conducted to examine chlorophyll contents and genetic variation of *Ginkgo biloba* in the areas. Chlorophyll contents measured in the above three areas were variable although the the diameter at breast height measured in 'Cheongro' and Mt. 'Nam' were constant. In addition, the result showed positive relation between chlorophyll contents and DBH in this study. Eight enzyme systems were analyzed in megagametophytes which were collected in the areas and separated to two groups based on chlorophyll contents. All the enzymes appeared to be polymorphic : Got-2, Pgi-2, Pgm, Acon, Mnr, Mdh, Skdh, and 6Pgd. The sensitive (S) groups varied from 1.253 to 2.571 in the genetic diversity and the tolerant (T) groups ranged from 1.416 to 2.825. The observed single locus heterozygosities (H_o) ranged from 0.056 to 0.611 in the S groups, and from 0.179 to 1.643 in the T groups. The expected heterozygosities (H_e) ranged from 0.208 to 0.629 in the S groups and from 0.321 to 0.658 in the T groups. In addition, the H_o values averaged over all loci were 0.326 for the T groups and 0.299 for the S group, respectively. A difference between the two groups was 0.027. The T groups had the unique alleles and genotypes and all the parameters for genetic diversity showed that the T groups had higher genetic diversity than the S groups.

Key words : *Ginkgo biloba* L., megagametophytes, chlorophyll contents, heterozygosity, alleles

I. 서 론

도시·산업지역에서 생육하고 있는 식물은 NO_x, SO_x, O₃ 등과 같은 대기오염물질 및 고온, 수분부족 등의 각종 환경 스트레스 요인에 의한 성장장애를 받

기 쉽다. 특히, 도로에 근접한 공간에서 생육하고 있는 가로수는 자동차로부터 배출되는 대기오염물질에 장시간 노출되어 각종 생리적 장애를 받기 쉬운 조건에 있다. 대기오염물질에 노출된 식물은 기공, 큐티클라(cuticular)층, 뿌리 등을 통하여 대기오염물질을 흡

수하는데, 기공을 통한 흡수는 식물의 가장 기본적인 代謝活動인 光合成作用, 蒸散作用과 더불어 이루어지며 가장 주된 흡수경로가 된다. 큐티클라층을 통한 흡수는 1차적으로 큐티클라층 外皮의 epicuticular wax가 酸性 降下物에 의하여 침식되어(Riding and Percy, 1985; Baker and Hunt, 1986), 대기오염물질이 체내에 침투하기 쉬운 조건이 형성되면서 시작된다. 그러나 잎의 큐티클라층을 통하여 흡수되는 대기오염물질은 극히 미량이다(Hallgren et al., 1982; Omasa et al., 1983). 뿌리를 통한 흡수는 건·습성의 대기오염물질이 강하되어 토양에 용해된 후, 식물이 수분 및 양분을 흡수할 때 함께 흡수되는 것으로 그 양은 기공을 통한 흡수량에 비하여 매우 적으나, 오염물질과 뿌리의 접촉 시간이 장기화되면 식물의 생장에 많은 피해를 끼친다(Yoneyama et al., 1980).

이러한 각종 경로를 통하여 흡수된 대기오염물질은 식물체내에서 많은 단계의 害毒過程을 거치게된다. 잎의 기공을 통하여 흡수된 SO_2 의 경우는 세포질에서 그 대부분이 SO_3^{2-} 로 용해되고 일부는 HSO_3^- 의 형태로 용해된다. 용해된 SO_3^{2-} 는 아황산산화효소(sulfite oxidase)에 의해서 엽록체에서 생성된 활성산소(O_2^-)와 산화 반응하여 비교적 독성이 낮은 SO_4^{2-} 로 변화한다. 이 과정에서 부수적으로 생성되는 O_2^- 는 강력한 毒性을 나타내는데(近藤, 1994), 세포내에 있는 superoxide dismutase(SOD), glutathione reductase(GR)등의 효소에 의하여 H_2O_2 로 되고, H_2O_2 는 H_2O 로 변환된다. 이러한 반응으로 독성이 높은 O_2^- 가 세포 내에서 낮은 수준으로 유지되는데, 다량의 SO_2 가 식물체내로 흡수되면 세포내의 O_2^- 조절이 불가능하게 되어 엽록소가 파괴된다(Shimazaki et al., 1980). 한편, NO_2 와 O_3 를 흡수한 식물체내에서도 SO_2 와 마찬가지로 O_2^- 와 같은 2차 독성물질이 형성되고 이를 해독하는 효소의 기능이 활성화되어 2차 독성물질의 양을 조절하나, 체내에 흡수된 양이 과다한 경우 엽록소가 파괴되어 세포가 괴사하는 등의 가시적 피해증상이 나타난다(Hallgren, 1987).

본 연구는 대기오염물질에 의한 엽록소 감소현상을 지표로 하여 도시지역에 생육하는 가로수의 생리적 활력 정도와 개체간 적응도의 차이를 유전적으로 구명하기 위하여 가로수로 식재된 은행나무를 대상으로 엽록소함량을 조사하고 각 개체간의 유전적 변이를 조사하기 위하여 동위효소분석을 실시하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 엽록소 함량조사

본 연구는 교통량이 많아 대기중의 오염물질인 SO_2 농도가 비교적 높은 종로, 남산, 잠실을 조사 대상으로 선정하였다. 그리고 이들 지역의 개체와 대조구로 비교하기 위하여 SO_2 함량이 낮은 태능지역의 은행나무 가로수에 대해서도 조사하였다. 조사지역의 가로수는 관리자료의 수집이 곤란하여 흉고직경 15 cm 이상 되는 개체를 대상으로 조사하였으며, 최근 식재된 것으로 간주되는 개체는 조사에서 제외시켰다. 종로시험지는 교보문고를 중심으로 267본을 조사하고, 남산은 우회도로를 따라 204본, 잠실은 올림픽공원을 중심으로 162본, 그리고 태능은 91본을 조사하였다(Fig. 1).

4개소의 시험지역에 식재된 은행나무 가로수를 대상으로 엽록소 함량(chlorophyll contents)을 조사하였다. 엽록소 함량 조사는 김판기 등(1999)과 염규진 등(1999)이 사용한 방법을 이용하였다. 이 방법은 휴대용 엽록소 측정기기(SPAD-502, Minolta Co.)를 사용하여 잎을 파괴시키지 않고 엽록소 함량을 추정하는 간접적인 방법이다. 卍下 등(1991)은 이 기기를 이용하여 엽록소를 측정하였는데 조사된 수치는 잎의 엽록소 함량과 높은 상관관계가 있음을 입증하였다. 엽록소 함량은 1개체에 대하여 20개의 잎을 측정하였다. 측정 잎은 도로에 가장 인접한 측면의 樹冠잎으로 병충해에 의한 가시적인 피해가 없는 잎을 택하여 측정하였다. 측정된 값은 평균하여 계산하였다.

2.2. 동위효소분석

시료는 엽록소 함량 조사지역인 종로에서 가로수로 식재된 은행나무 46개체의 종자를 채취하여, 1개월간 상온에서 성숙시켜 실험 전까지 4°C에 저장하였다. 동위효소는 분석을 위하여 조사지역에 식재된 은행나무의 엽록소 함량을 기준으로 내성(T), 민감성(S) group으로 나누어 개체 당 6개 이상의 megagametophyte가 조사되었다. 사용한 buffer는 0.2 M phosphate buffer, pH 7.5이다. 전기영동은 starch gel(12%, sigma)을 이용하여 실시하였고, 전기영동이 끝난 gel은 수평 절단한 후 각각의 동위효소별로 정색반응을 시켰다(Kim et al., 1993). 정색 반응에 사용한 동위효소는 glutamate-oxaloacetate transaminase(GOT, E.C.2.6.1.1.), phosphoglucose isomerase(PGI, E.C.5.3.1.9), phospho-

Fig. 1. Areas of sample collected by chlorophyll contents: Cheongro (A), Mt.Nam (B), Jamsil (C), Tanung (D) Sample sites collected (dot line).

gluco mutase(PGM, E.C.2.7.5.1.), aconitase(ACON, E.C.1.1.1.1.), menadion reductase(MNR, E.C.1.6.49.2), malate dehydrogenase(MDH, E.C. 1.1.1.37), shikimate dehydrogenase(SKDH, E.C.1.1.1.25), 6-phosphogluconate dehydrogenase(6PGD, E.C.1.1.1.44.)로 총 8 종류이다. 분석에 사용된 8개 효소 GOT, PGI, PGM, ACON, MNR, MDH, SKDH 및 6PGD 모두 활성이 있고 밴드도 명확하고 안정되어 다형적 유전자좌에 대한 유전자형을 조사 분석하였다. 각 유전자의 대립유전자와 유전형의 유전적 구조는 T 및 S 개체 groups에서 조사되었고 contingency table에서 이형접합체의 G-test로 비교되었다. 또한, 위 두 범위의 각 유전자좌로부터 개체별 유전자형 빈도를 토대로 하여 유전적 다형성(유전자좌당 유전자수(A_L), 대립유전자수(G_L)), 이형접합도(관측치(H_o), 기대치(H_e))를 조사하였고, 유전적 다양성(V)은 Bergmann 등(1990)의 방법으로 계산하였다. 이상의 모든 분석은 PC용 program인 GSED

(Gillet, 1994)와 BIOSYS-1(Swofford and Selander, 1989)를 이용하여 실시하였다.

III. 結果 및 考察

3.1. 葉綠素含量

지역별 엽록소 함량은 태능 48.77, 남산 47.90, 종로 46.88, 그리고 잠실 40.92로 태능지역이 가장 높

Table 1. Chlorophyll contents of *Ginkgo biloba* L. planted on the four different streets in Seoul

Region	No. of trees	DBH	SPAD502 Value
Cheongro	267	23.4 ± 0.07	46.88 ± 0.46
Mt.Nam	204	23.8 ± 0.02	47.90 ± 0.51
Tanung	91	23.3 ± 0.02	45.77 ± 0.77
Jamsil	162	21.6 ± 0.02	40.92 ± 0.65

± : Standard deviation

게 나타났다(Table 1). 각 지역별 흉고직경은 남산 23.8 cm, 종로 23.4 cm, 태능 23.3 cm, 잠실 21.6 cm로 조사지역간 흉고직경이 거의 일치하였으나, 잠실지역이 다른 3개 조사지와 비교하여 낮았다. 일반적으로 대기오염물질의 농도가 높은 대기환경에서는 엽록소 함량이 저하된다(김갑태, 1988). 조사된 남산, 종로, 태능지역의 대기오염에 대한 가로수 은행나무의 엽록소 함량은 남산과 종로의 경우 흉고직경과 같은 경향을 보이고 있다. 그러나 대조구로 조사된 태능의 경우 두 요인간의 상관을 보이지는 않았다. 이것은 대기오염물질이 수목의 생장을 저해하는 직접적인 요인보다는 엽록소를 파괴하는 인자로 볼 수 있다. 잠실지역의 경우 은행나무의 흉고직경과 엽록소 함량이 낮는데, 이 지역의 은행나무 조성시기는 올림픽을 앞두고 조성된 지역으로 다른 지역보다 오래되지 않은 지역이다.

Umbach and Davis(1984)는 SO₂에 의한 葉組織의 피해를 57개 수종에서 조사하여 樹種間 내성차이가 있음을 밝혔다. Pasuthova(1981)는 침엽의 buffer capacity로 SO₂에 대한 내성이 있음을 발표했으며, 또한 소나무류(*Pinus* spp.)에서 수종간 개체간에 내성차이가 있음을 밝혔다. Scholz and Reck(1977)은 針葉樹의 개체간 산성물질에 대한 내성차이가 있음을 발표하였으며, 이러한 연구결과는 동일한 수종이라도 그 수종 특유의 내재적인 유전적 차이로 인하여 대기오염이라는 stress에 대한 반응의 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 조사한 엽록소함량은 대기오염이라는 인자만이 아닌 다른 내재적인 요인도 수목의 활력에 기여한다고 보여진다. Muller(1985)와 Scholz and Bergman(1984)은 너도밤나무와 포플러를 이용하여 대기오염에 대한 반응을 조사하였는데 수목의 적응성은 수목이 가지고 있는 유전 특성에 의하여 많은 영향을 받으며, 대기오염에 강한 수종이 민감한 수종보다 유전적 다양성이 15%이상 높았고 극한 환경에서도 잘 생육한다고 하였다. 즉, 각각의 수목이 생육환경에 적응하면서 나타나는 현상은 단지 환경인자에 의한 영향뿐만 아니라 수목이 가지고 있는 유전적인 형질이 매우 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다.

조사지역과 개체가 엽록소 함량에 영향을 주는 정도를 분석하였는데 지역간 차이보다는 개체간 차이가 크다(Table 2). 그리고 조사 개체 전체 100% 중에서 집단(지역)이 엽록소 함량의 요소에 기여하는 정도는 11.53%이나, 개체차이가 기여하는 정도는 71.08%를

Table 2. The ratio of factors to content of chlorophyll between sites and individuals

Sources	Mean square	Variance component	Percent of total
Total	75.94	76.98	100.00
Region	2706.42	8.88	11.53
Individuals	171.52	54.71	71.08
Error	13.39	13.39	17.39

차지하였다. 즉, 은행나무의 엽록소함량은 각 개체의 능력에 따라서 대기오염에 대한 반응이 다를 수 있음을 나타낸다. 이것은 식물체가 생화학적 산화환원과정을 통해 葉組織의 酸度를 조정하는 기능을 가지며 (Smith and Raven, 1979), 이러한 특징을 Scholz and Reck(1977)은 동일 수종 내에서도 완충능력의 차이가 있다고 하였으며, 이것은 유전적 형질임을 보고하였다. 이러한 결과는 대기오염에 대한 수목의 耐性이 개체간 또는 개체간에도 차이가 있을 수 있음을 나타낸다.

3.2. 내성(tolerant)개체와 감수성(sensitive)개체 구별 유전적 구조의 특성

조사지역에 식재된 은행나무의 엽록소 함량에 따라 내성(T)과 감수성(S) 두 group으로 나누어 동위효소분석을 실시하였다. 분석에 사용된 Got-2, Pgi-2, Pgm, Acon, Mnr, Mdh, Skdh, 및 6Pgd의 8개 종류의 동위효소분석에서 다형적 유전자좌의 유전자빈도와 대립 유전자빈도 및 유전적 구조를 조사하였다(Table 3). 분석된 8개의 유전자좌 중 유전자에선 Pgi-2와 Mdh가, 대립유전자에선 Pgi-2와 Pgm에서 각각 통계적인 유의성(P<0.01)이 인정되었다. T그룹과 S그룹간 대립 유전자빈도와 유전자빈도에 있어서 주목할 만한 차이는 나타나지 않았으나, 유전자좌당 유전자수는 T그룹이 4.25개로 S그룹 3.5개보다 높게 나타났다. 또한 특이적인 유전자는 T그룹에서 6개가 나타난 반면, S그룹에서는 나타나지 않았으며, 특이적인 대립유전자는 T그룹의 Mnr-1에서만 나타났다.

위에서 언급한 바와 같이 두 그룹간 대립유전자빈도에서 유의성이 인정된 것은 Pgi-2와 Mdh-1의 유전자좌로, 이중 Pgi-2의 유전자좌의 경우 Pgi-2c의 유전자는 T그룹이 S 그룹보다 7배 정도 높게 나타났다. 그러나 Mdh-3의 경우에 Mdh-3a의 대립유전자빈도는 S 그룹보다 T그룹에서 높게 나타난 반면 Mdh-3b의 대립유전자빈도는 상반되는 경향을 나타내었다. 또한 두

Table 3. Comparisons of the genetic structure at 8 polymorphic loci and of the numbers of alleles and genotypes between the tolerant (T) and the sensitive (S) groups of *Ginkgo biloba* planted on the street in Seoul

Gene locus	Genetic structures G-test of homogeneity		Number of alleles		Number of genotypes		(Frequencies) of unique alleles and genotypes			
	Alleles	Genotypes	T	S	T	S	alleles		genotypes	
							T	S	T	S
Got-2	1.83	3.69	3	3	6	6	-	-	-	-
Pgi-2	7.27*	12.76*	3	3	6	4	-	-	2b2c(1)	-
Pgm	5.24	8.08*	3	3	4	3	-	-	1a1b(6)	-
Acon	1.41	3.29	3	3	4	4	-	-	-	-
Mnr	4.82	4.34	3	2	5	3	1c(4)	-	1b1c(2)	-
									1cc(1)	-
Mdh	6.42*	4.25	2	2	3	3	-	-	-	-
Skdh	0.34	3.60	2	2	3	3	-	-	-	-
6Pgd	0.52	2.05	2	2	3	2	-	-	1b(2)	-
Mean(AL and GL)			2.63	2.5	4.25	3.5				

* $P < 0.01$

그룹간 유전자빈도에서 유의성이 인정된 것은 Pgi-2와 Pgm-1의 유전자좌로 T그룹에서 3개(Pgi-2_{b2c}, Pgi-2_c, Pgm-1_{a1b})의 특이적인 유전자가 발견되었다. 유전자빈도 분포에 있어 유의적인 차이는 인정되지 않았으나 T그룹에서 Mnr-1_{b1b}, Mnr-1_{c1c} 및 6Pgd-1_{b1b}의 특이적인 유전자형을 가지는 효소 유전자좌가 나타났다. 이형접합체 Pgi-2_{a2a}와 Mdh-1_{b1c}는 S그룹보다 T그룹에서 더 높은 빈도를 나타내었으며, 동형접합체 Pgi-1_{a1a}, Mdh-1_{c1c} 및 Mdh-3_{b3b}는 상반되는 경향을 나타내었다. 대립유전자 빈도와 유전자 빈도를 토대로 한 유전자 거리(genic distance)는 0.058에서 0.248의 범위로 나타났으며, 유전적 거리(genotype distance)는 0.071~0.409로 다양하였다. 특히, Pgi-1과 Mdh 유전자좌는 유전자 거리와 유전적 거리에 있어 높은 비율

을 나타내었다. 유전적 다양성은 두 그룹간에 고도의 유의적인 차이가 인정되었으며, S그룹에서는 1.253에서 2.571의 범위를 보인 반면 T그룹에서는 1.416에서 2.825의 범위로 나타났다. 이것은 같은 오염지역에 은행나무가 노출되어도 개체간의 차이가 있을 수 있음을 나타내는 것이다(Scholz and Reck, 1977).

3.3. 내성개체와 감수성개체 그룹간 유전적 이형접합도

은행나무 T와 S그룹의 이형접합도 및 유전적 다양성을 추정하여 조사하였다(Table 4). 유전자좌당 이형접합도의 관측치(H_o)는 S그룹에서 0.056~0.611의 범위로 나타난 반면 T그룹에서는 0.179~1.643의 범위로 나타났다. 이형접합도의 기대치(H_e)는 S그룹에서

Table 4. Heterozygosities and genetic diversities for the tolerant (T) and the sensitives (S) groups of *Ginkgo biloba* in air-polluted trees

Gene Locus	Heterozygosities				Genetic diversities (v)	
	H_o		H_e		T	S
	T	S	T	S		
Got-2	0.643	0.611	0.636	0.629	2.662	2.571
Pgi-2	0.286	0.167	0.658	0.567	4.667	3.767
Pgm-1	0.520	0.056	0.425	0.208	2.825	2.227
Acon	0.321	0.556	0.490	0.541	4.356	2.746
Mnr	0.429	0.444	0.564	0.457	1.717	1.253
Mdh-3	0.179	0.222	0.321	0.508	2.292	1.256
Skdh-3	0.250	0.056	0.493	0.513	1.929	2.111
6Pgd	0.250	0.278	0.321	0.246	2.904	2.842

 H_o : observed heterozygosity H_e : Nei's unbiased expected heterozygosity

0.208~0.629로, T그룹에서 0.321~0.658의 범위로 나타났다. 평균 이형접합도의 관측치는 T그룹과 S그룹이 각각 0.326과 0.299로 나타났다. 또한 평균 이형접합도의 기대치는 T그룹과 S그룹이 각각 0.489와 0.456으로 나타났다. 이상의 결과로 볼 때 T그룹은 S그룹보다 유전적인 변이가 큰 것으로 나타났다. 또한 Got-1과 Pgi-2 유전자좌는 두 그룹간에 있어 어떤 다른 효소 유전자좌보다 유전적 변이가 높은 특이적인 유전자좌인 것으로 나타났다. 유전자좌 Got-2, Pgi-2 및 Pgm-1은 T그룹에서 이형접합도의 기대치와 관측치에서 높은 값을 나타내었으며, 유전자좌 Acon과 Mhd-3은 S그룹에서 높은 이형접합도를 나타내었다. 또한 이형접합체 Got-2_{a2c}, Pgi-1_{a1b} 및 Skdh-3_{a3b}는 2~3배 정도 T그룹에서, 동형접합체 Got-2_{b2b}, Mnr-1_{a1a} 및 Skdh-3_{b3b}는 S그룹에서 더 높게 나타나 이형접합체는 S그룹보다 T그룹에서 더 높게 나타났다. 결론적으로, T와 S 그룹간 유전적 다양성(Vgam)은 각각 35.49와 28.44로 나타났으며, 그룹간 이러한 차이는 대기오염물질, 고온, 수분부족 등의 여러 가지 환경 스트레스에 대한 식물의 적응성 차이로 생각된다(Scholy and Reck, 1977; Gregorius et al., 1986; Hallgren, 1987)

IV. 적 요

대기오염 농도가 높은 종로, 잠실, 그리고 남산지역과 대조구로 태능지역의 가로수로 식재된 은행나무(*Ginkgo biloba* L)를 대상으로 대기오염에 노출되었을 때의 생육상황을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 서울에서 생육하고 있는 가로수 은행나무의 대기오염에 의한 엽록소 함량은 태능 48.77, 남산 47.90, 종로 46.88, 그리고 잠실 40.92로 태능지역이 가장 높게 나타났다. 각 지역별 흉고직경은 남산 23.8 cm, 종로 23.4 cm, 태능 23.3 cm, 잠실 21.6 cm로 조사지역간 흉고직경의 차이는 잠실지역 이외에는 별로 없다.

2. 대조구인 태능지역 보다 조사된 남산과 종로지역의 은행나무 엽록소 함량이 낮았다.

3. 잠실지역의 낮은 흉고직경은 도심지 가로수의 생육상황이 대기오염물질보다는 다른 외부인자에 의해서 영향 받을 수 있음을 나타낸다.

4. 분석에 사용된 Got-2, Pgi-2, Pgm, Acon, Mnr, Mdh, Skdh, 및 6Pgd의 8개 동위효소에서 정색반응이 확인되었으며, 8개의 유전자좌 중 Pgi-2와 Mdh가 대

립유전자에선 Pgi-2와 Pgm에서 각각 통계적인 유의성(P<0.01)이 인정되었다.

5. T(tolerant), S(sensitive) 두 group으로 나누어 분석된 동위효소분석은 유전자당 대립유전자수(A/L)는 T가 2.63, S가 2.5로 나타났다.

인용문헌

김갑태, 1988: SO₂에 대한 내성 수종 선발을 위한 기초연구 - 엽조직실험 - 한국임학회지 77, 223-228.
 김판기, 이갑연, 김세현, 한상섭, 1999: 우리나라에 분포하는 흑오미자과 2속 3종의 잎 형질 및 광합성특성. 한국농림기상학회지 1, 90-96.
 염규진, 김판기, 박은우, 1999: 광해지 식생복원을 위한 하수 슬러지 이용 효과. 대한환경공학회지 21, 2329-2340.
 近藤矩朗, 1994: 植物の大氣汚染耐性の仕組み. 植物細胞工學 別冊 1, 59-68.
 丹下 健, 金 坂基, 佐々木惠彦, 1991: ポプラバイオマス林の樹冠各部の受光條件と葉の生理特性. 바이오マス變換計畫研究報告書 31, 43-56.
 Baker, E. A. and G. M. Hunt, 1986: Erosion of waxes from leaf surfaces by simulated rain. *New Phytologists*, 102, 161-173.
 Bergmann, F., Gregorius, H. -R. and J. B. Larsen, 1990: Level of genetic variation in European silver fir (*Abies alba*)-are they related to species decline? *Genetica*, 82, 1-10.
 Gillet, E. M., 1994: GSED : Genetic structures from electrophoresis data. Version 1.0. Abteilung Fur Forstgenetic und Forstpflanz -enzuchtung, Universitat Gottingen. p49.
 Gregorius, H. -R., J. Krauhausen and G. Muller-Starck, 1986: Spatial and temporal genetic differentiation among the seed in a stand of *Fagus sylvatica* L. *Heredity*, 57, 255-262.
 Hallgren, J. E., 1987: Physiological and biochemical effects of sulphur dioxide on plants. In sulfur in the environmental. Edited by J. O. Nriagu. pp.163-209. wily-Interscience publication. willy & Sons. U.S.A.
 Hallgren, J. E., S. Linden, A. Richter, E. Troeng and L. Granat, 1982: Uptake of SO in shoots of Scots pine : field measurements of net flux of sulphur in relation to stomatal conductance. *Plant Cell Environment*, 5, 75-83.
 Kim, Z. S., S. W. Lee and J. O. Hyun, 1993: Allozyme variation of six native oak species in Korea. *Annual Science Forest*, 50 (Suppl.1): 253-261.
 Muller-Stack, G., 1985: Genetic difference between tolerant and sensitive beeches (*Fagus sylvatica* L.) in an environmentally stressed forest stand. *Silvae Genetica*, 34, 241-247.
 Omasa, K., Y. Hashimoto and I. Aiga, 1983: Observation of stomatal movements of intact plants using an image

- instrumentation system with a light microscope. *Plant Cell Physiology*, **24**, 281-288.
- Pasuthova, J., 1981: Buffer capacity of spruce needles as an indicator of SO₂ resistance. *Prace Vyzkumneho Ustavu Lesniho Hospodarstva Myslivosti*, **58**, 139-151.
- Riding, R. T. and K. E. Percy, 1985: Effects of SO and other air pollutants on the morphology of epicuticular waxes on needles of *Pinus strobus* and *Pinus banksiana*. *New Phytologists*, **99**, 555-563.
- Scholz, F. and F. Bergmann, 1984: Selection pressure by air pollution as studied by Isozyme-gene-systems in Norway spruce exposed to sulphur dioxide. *Silvae Genetica*, **33**, 228-241.
- Scholz, F. and S. Reck, 1977: Effects of acids on forest trees as measured by titration *in vitro*, inheritance of buffering capacity in *Picea abies*. *water, Air and Soil Pollution*, **8**, 41-45.
- Shimazaki, K., T. Sakaki and K. Sugahara, 1980: Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO₂ fumigated leaves of spruce. *Research Report National Environment Study Japan*, **11**, 91-101.
- 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.
- Umbach, D. M. and D. D. Davis, 1984: Severity and frequency of SO₂-induced leaf-necrosis on seedlings of 57 tree species. *Forest Science*, **30**, 587-596.
- Yoneyama, T., T. Yasuda, J. Yazaki and T. Totsuka, 1980: Absorption of atmospheric NO₂ by plants and soils VII. NO₂ absorption by plants : re-evaluation of the air-soil-root route. *Research Report National Environment Study Japan*, **11**, 59-67.