

## 麗川産業團地 사방오리나무의 公害 防禦 機作에 關與하는 酵素들의 活性比較<sup>1\*</sup>

禹秀泳<sup>2</sup> · 李敦求<sup>3</sup>

## Antioxidant Enzyme Activities of *Alnus firma* to Air Pollution in Yochon Industrial Complex<sup>1\*</sup>

Su-Young Woo<sup>2</sup> and Don Koo Lee<sup>3</sup>

### 요 약

사방오리나무(*Alnus firma*)가 공해에 대해서 내성을 가지는 이유를 구명하기 위해서 광합성 등 생리적인 특성과 몇 가지 antioxidant 관여 효소를 분석하였다. 이를 위해서 공단이 많은 오염지역(여천 산업단지)에서도 잘 자라는 사방오리나무 개체목과 피해를 받은 개체목을 각각 선발하였다. 그리고 비교를 위해서 오염원이 거의 없는 청정지역(수원)에서도 비슷한 생장을 하고 있는 개체목을 각각 1997 년도에 선발하였다.

광합성능력, 기공전도도, 증산량, 엽록소함량, Rubisco, Antioxidant 효소(Superoxide dismutase (SOD) 그리고 Glutathione reductase(GR))의 활성 모두, 오염지역에서 잘 자라며 가시적인 피해를 보이지 않는 개체목의 경우 가시적인 피해가 있는 개체의 경우보다 높은 것으로 조사되었다. 이는 오염 물질로부터 자신을 보호하여 정상적인 생장을 유지하기 위한 생물학적인 보상(Biological compensation)을 하는 것이라고 추정된다.

### ABSTRACT

This study measured the seasonal changes in physiological characteristics and antioxidants of *Alnus firma* to compare several enzyme activities(Rubisco, Superoxide dismutase(SOD) and Glutathione Reductase(GR)) between resistant and sensitive *Alnus firma* trees. Resistant and sensitive *Alnus firma* individuals near Yochon industrial complex were selected to conduct this study in 1997.

Photosynthetic capacity, stomatal conductance, transpiration, Rubisco, SOD and GR activities of resistant trees which had no visible damages to air pollution were higher than those of sensitive trees in same area. All physiological results supported that biochemical process to be one of the important key features to understand resistance to air pollution. Increases of photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activity in resistant trees in response to air pollution were the results of biological compensation to stress.

*Key words* : *Alnus firma*, antioxidant enzyme, air pollution, photosynthesis, biological compensation

<sup>1</sup> 接受 1999年 1月 28日 Received on January 28, 1999.

<sup>2</sup> 상주대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Sangju National Univ., Sangju, 742-711, Republic of Korea.

<sup>3</sup> 서울대학교 농업생명과학대학 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Seoul National Univ., Suwon 441-744, Korea.

\* 이 논문은 한국 과학재단이 지원하는 post doc 수행 연구비로 수행된 연구결과의 일부입니다.

## 서 론

공해에 저항성을 나타내는 수종의 선발은 개체목들의 공해에 대한 반응, 그리고 방어기작을 이해하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 대기오염에 적응하는 내공해 수종은 그 기작이 아직까지 정확하게 알려져 있지 않다. 특히 지금까지는 외형적으로 건전한 수목을 선발하여 오염지역에 식재하거나, 실내의 제어된 환경 아래서 선별한 묘목을 공해지역에 식재하는 것이 지금까지의 선발의 개념이었다(Taylor와 Johnson, 1994). 그러나 이러한 저항성을 나타내는 저항수종이 왜 저항성을 나타내지는 알지 못한다. 예를 들어서, 대기오염에 노출된 수종의 대다수는 낙엽율을 높여 자신의 필요 없는 조직을 제거함으로써 오염에 대한 호흡률을 낮추어서 생존력을 높이는 것이 보통인데, 여기에 관여하는 여러 효소들의 변화를 알지 못하는 실정이다(Kangasjarvi 등, 1994). 공해물질에 대해서 저항성을 나타내는데 관여하는 이런 효소들과 이와 관련된 抗酸化物에 대한 연구는 은행나무 등 몇 가지 조경수종에 대해서 방어 기능을 조사한 것이 있으나(김명희와 이수욱, 1992a ; 1992b) 그 중요성에 비해서 국내에서는 별로 행해진 결과가 없다.

여천산업단지는 남해화학과 같은 화학공장이 몰려있는 대규모 공업단지로서 많은 대기오염물질이 배출되어서 인근의 산림지역에 서식하고 있는 수목집단에 많은 부정적인 영향을 미치고 있다(문형태 등, 1998). 그러나 이 공단이 설립되면서 식재된 사방오리나무는 공장주변으로 군락을 형성하고 있어서 공해물질에 대해서 적응하고 있던지, 아니면 어느 정도 내성을 가지고 있는 수종이라고 추정된다. 그렇기 때문에 공업단지주변의 사방오리나무의 생리적인 특성을 조사하면 이들 수목이 대기오염에 대해서 반응하는 경향을 알 수 있다. 여천공업단지의 대기오염원이 무엇인지 확실하게 밝혀지지 않은 상태이지만 화학공장이 많은 것으로 미루어 SO<sub>2</sub>와 이와 반응하여 생성될 수 있는 O<sub>3</sub>일 것이라고 추측되고 있고 강우에 섞여서 내리는 산성우로 인해서 이루어지는 토양의 산성화일 것으로 짐작하고 있다(문형태 등, 1998).

사방오리나무(*Alnus firma*)는 비두과 수목이지만 질소고정을 하여 척박하고 황폐한 지역의 빠른 복구를 위해서 활용되고 있는 수종으로서, 고

속도로 절개사면이나 탄광 폐석지등의 복구를 위해서 조림 가치가 높은 수종이다. 또한 오리나무류는 공해에 강한 수종으로 알려져 있다. *Franksia*를 인공 접종한 *Alnus glutinosa*와 *A. hirsuta*의 묘목은 인공산성우 처리 후 토양에 나타나는 알루미늄 독성을 완충시켜서 뿌리와 생육 피해 현상을 줄이는 것으로 알려져 있다(Cha와 Lee, 1996 ; Lee 등, 1993). 그러나 대기오염물질을 해독하는 Antioxidant 효소들과 사방오리나무 성장과의 관계는 아직 명확한 구명이 없는 실정이다.

따라서, 이 연구의 목적은 여천공단지역에서 자라는 사방오리나무가 대기 오염물질에 대해서 나타내는 antioxidant에 관련되는 효소 활성을 조사하여 청정지역에서 자라는 사방오리나무의 활성과 비교하고 저항성 개체가 가지는 특성을 구명하는 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 여천산업단지 사방오리나무의 서식지 개황

사방오리나무가 식재되어 있는 여천 산업단지는 광양제철소를 앞으로 두고 해안을 따라서 대규모로 형성되어 있는 공단이고, 1974년부터 가동한 남해화학공장이 위치하고 있어서 대기 오염이 심한 지역 가운데 하나이다(Fig. 1). 이 지역의 년 평균 강수량은 1,220mm이고 해풍의 영향을 많이 받는 지역이기 때문에(기상청, 1997) 오염물질이 바람을 타고 이동할 수 있다.

### 2. 공단지역, 청정지역 사방오리나무 임분 선발(실험대상개체 선정)

공해에 대해서 내성을 가지는 이유를 구명하기 위해서 여러 가지 효소(Rubisco, Superoxide dismutase, Glutathione 등) 분석을 위해서 공단이 많은 오염지역에서도 잘 자라는 사방오리나무 건전목과 피해를 받은 사방오리나무 피해목을 각각 선발했다. 그리고 비교를 위해서 오염이 거의 없는 청정지역에서도 비슷한 성장을 하고 있는 개체목을 대조목으로 선발하였다(Table 1).

1) 공해피해지역 : 전남 여천 남해화학 주변에 자라고 있는 사방오리나무를 대상으로 효소 분석을 위한 건전목(Resistant trees), 피해목(Sensitive trees)을 비슷한 크기로 성장하는 개체들을 선발하였다.

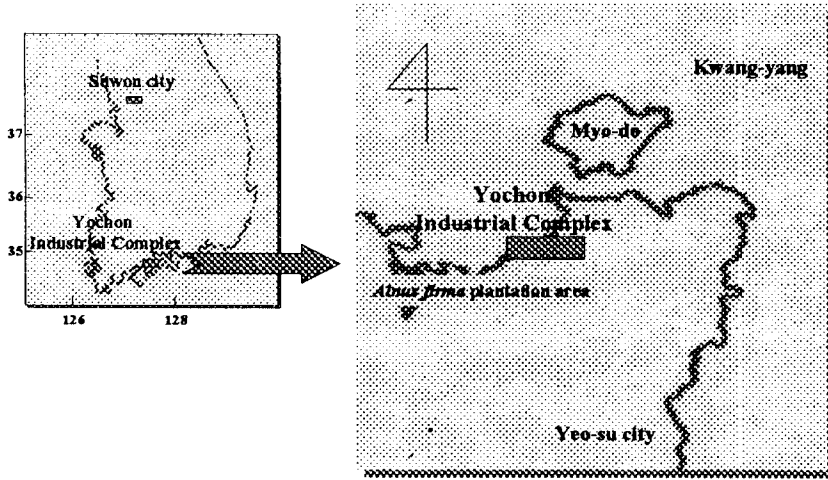


Fig. 1. Location of study area

Table 1. Height and DBH of *Abies firma*

Place	Visible damage	Percentage of damage(%)	Height(m)	DBH(cm)
Yochon industrial complex	No visible damage	0	4.9±0.6*	8.9±2.4
	Necrosis	20	4.2±0.8	6.7±1.3
Suwon	No visible damage	0	4.7±0.9	8.0±1.2

\* Indicates standard deviation

2) 청정지역 : 경기도 수원시 권선구 서울대학교 칠보 연습림내에 오염지역의 개체와 비교할 사방오리나무를 선발하였다.

### 3. 공단지역, 청정지역 오리나무의 생리적인 특성

#### 1) 광합성 능력

사방오리나무의 광합성능력(Net photosynthesis; 순 광합성량( $A_n$ ))은 Licor-6400 Portable Photosynthesis System(Li-cor Inc., USA)를 이용하여 광 포화점에 가까운  $1000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광도에서 측정하였다.

#### 2) Stomatal conductance(기공전도도)와 증산량

기공의 전도도는 사방오리나무의 Leaf plastochron index 5 - 6의 잎에서 측정하였다. 공기압력(flow rate)은  $500\mu\text{mol s}^{-1}$ 을 유지하였고, 외부에서 주는  $\text{CO}_2$ 의 농도는 360 - 370ppm을 유지하였다. Li-6400 Portable Photosynthesis System의 기본 엽면적은  $6\text{cm}^2$ 였고, 기공 전도도 측정시의 leaf cuvette의 온도는  $25^\circ\text{C}$ , 상대습도는 35%,

광량(Photosynthetically Active Radiation; PAR)은  $1000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 를 유지하도록 하였다.

#### 3) 엽록소 함량

엽록소 함량은 SPAD-502로 측정하였다. 잎의 엽록소 측정은 30개 잎의 측정치를 평균하여 계산하였다. 최근에 이 기계에 의한 방법으로 엽록소의 함량을 추정을 많이 하고 있다(김갑태와 엄태원, 1995).

#### 4) 효소의 활성 측정

##### ① Rubisco 활성

Rubisco(EC 4.1.1.39) 활성은 Spectrophotometer 분석방법으로 측정하였다(Sharkey 등, 1991).  $25\mu\text{l}$ 의 분석용 용액과  $0.6\text{mM}$  RuBP를  $25^\circ\text{C}$ 에서 주사해 줌으로서 측정을 시작하였다. 활성은  $340\text{nm}$ 의 파장에서 측정하였다.

##### ② Superoxide dismutase(SOD) 활성

SOD(EC 1,15,1,1) 활성은 잎  $0.5\text{g}$ 을 냉장보관된 mortar에 넣고 phosphate buffer  $10\text{ml}$ 을 첨가하여 마쇄한 후 pH 7.8에 맞춘다.  $4^\circ\text{C}$  이하의 온도조건에서 원심분리기를 이용하여  $12,000\text{rpm}$ 으로 약 20분간 원심분리후 상층액을 조효소로 사

용하였다(MaCord와 Fridovich, 1969; 김명희와 이수욱, 1992a). 0.1M Na-phosphate buffer(pH 7.8),  $10^{-4}$ M EDTA,  $10^{-5}$ M Cytochrome C,  $6 \times 10^{-5}$ M Xanthine의 반응 혼합액에 준비해둔 조효소를 첨가하여 총량 3ml로 하여 spectrophotometer로 측정하였다. 반응개시는  $6 \times 10^{-9}$ M Xanthine oxidase를 첨가하여 550nm에서 흡광도가 0.025가 되도록 하고 감소율은 2분간 10초 간격으로 읽고 SOD 활성은 이런 조건하에서 Cytochrome C의 감소율을 50% 억제시킨 양으로 정의하였다.

### ③ Glutathione reductase(GR)활성

GR(EC 1.6.2.4)은 340nm에서 NADPH의 흡광도가 줄어드는 양을 추정하여 산출하였다(Carlberg와 Mannervik, 1985). 1 unit의 효소는 25°C에서 1분에 NADPH를 1 $\mu$ mol을 산화시키는 양으로 정의하였다(Koricheva 등, 1997).

## 4. 통계처리

모든 결과는 통계 프로그램 SPSS PC+를 이용하여 유의수준 5%에서 LSD 검정을 하여 비교했다.

## 결과 및 고찰

### 1. 대상선발목의 특성조사(오염원, 수고, 직경)

사방오리나무를 선발한 여천지역은 많은 공단이 밀집해 있어서 대기오염이 심한 것으로 보고되고 있다(김용표 등, 1997). 특히 선발목이 서식하고 있는 여수시의 남해화학 주식회사에서 배출하는 유해 가스와 인근지역의 공단시설에서 배출되는 가스가 일반적으로 아황산 가스(SO<sub>2</sub>)로 알려져 있어서 특정오염원에 대해서 사방오리나무의 효소의 활성 반응을 알 수 있는 좋은 임지였다. 특히 이 지역은 석유화학, 비료업체 등 대규모의 화학공장에서 배출되는 에틸렌, 프로필렌 등의 저탄소 알켄으로 인해서 황화합물이 많이 생성되는 지역이기도 하다. 반면에 수원시에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 부속 칠보 연습림은 인근에 큰 공단시설이 없고 비교적 사람의 간섭이 없었던 지역이므로 위에서 언급했던 지역에서 서식하는 개체들과 비슷한 크기의 개체목을 선발하여(Table 1) 같은 효소의 활성을 조사 비교하면 대기오염물질로 인해서 사방오리나무가 받은 피해정도를 알 수 있기 때문에 유용한 비교지역으로 활용할 수 있다.

Table 1에서 보듯이 수원지역의 사방오리나무 개체는 가시적인 피해 현상이 없었다. 여천공단 지역에 서식하는 개체들 중 공해 피해를 받은 개체들은 20-30% 정도의 necrosis를 보였고 건전한 생장을 보이는 개체들은 가시적인 피해현상을 찾을 수 없는 개체를 선발하였다. 연령이나 크기에서 오는 차이를 피하기 위해서 수고는 4.5m 정도, 흉고 직경은 7-9cm 정도의 균일한 개체를 선발하였다.

### 2. 광합성능력, 기공개도, 증산량, 엽록소함량

여천공단, 수원지역에서 성장하고 있는 사방오리나무의 생리적인 특성을 비교하고 Antioxidant에 관여하는 효소활성 비교를 위한 기초자료를 제공하기 위해서 이들 선발한 개체를 대상으로 광합성, 기공전도도, 증산량, 엽록소함량을 조사 비교한 결과가 Fig. 2-5에 나타나 있다.

광합성능력은 수원지역(비오염지역)에서 서식하는 사방오리나무와 여천 산업단지에서 건전한 생장을 유지하는 사방오리나무가 공단지역에서 생장이 좋지 않은 사방오리나무에 비해서 각각 높은 것으로 나타났다(Fig. 2). 특히 4월에 광합성능력이 다른 사방오리나무가 시간이 지나면서 수원지역에 서식하는 비교목 개체(control)와 공단에서 건전한 생장을 보이는 건전 개체(resistant)간에 광합성능력에 차이가 없어진 것을 볼 수 있다. 이것은 아마도 건전목 개체는 대기오염물로부터 자신을 보호하며 생장을 유지하기 위해서 광합성능력을 높이는 생물적인 보상을 한다는 것을 알 수 있다(우수영, 1997a; 1997b).

거의 모든 수목은 외부의 스트레스를 받으면 스트레스를 극복하려고 환경에 적응하는 것으로 알

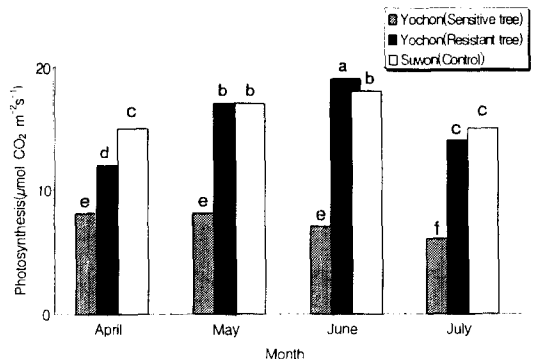


Fig. 2. Seasonal changes in photosynthesis of *Alnus firma* leaves

려져 있다(Mooney와 Winner, 1991). 대표적인 적응 방법 중에 하나가 단위 면적당 광합성능력을 높이든지(우수영, 1997b) 호흡률을 줄이든지 하여 피해를 최소로 하려는(Winner, 1994) 현상이다. 사방오리나무도 대기오염이 심한 여천 산업단지에서 건전한 생장을 유지하기 위해서 이와 같이 광합성률을 높인 것으로 짐작된다. 그렇기 때문에 오염지역에서도 피해를 받지 않고 건전한 생장을 유지한 것으로 보인다.

기공이 열려서 가스교환이 어느 정도 이루어지는가와 수분의 손실량은 Fig. 3-4에 나타나 있다. 기공이 열리고 닫히는 정도는 증산량에도 영향을 미친다. 기공이 열리는 정도는 증산량에도 영향을 주어서 stomatal conductance의 경향과 증산량의 정도가 비슷한 모양으로 나타나는 것을 알 수 있다.

기공은 외부가스의 출입구 역할을 하는데 관여하기 때문에 대기오염물질이 얼마나 흡수될 것인가를 간접적으로 판단하는 기준이 될 수 있다(우수영, 1998). 기공이 열려있는 정도를 판단할 수 있는 stomatal conductance는 공해의 피해를 받

은 개체들이 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 여기는 두 가지 이유가 있을 수 있는데 첫째, 대기오염의 흡수를 최소화하기 위해서 수목 스스로 기공을 닫아 대기오염 물질의 흡수를 최소화했을 수 있고 둘째, 가스의 출입을 조절하는 공변세포가 대기오염물질로 인해서 피해를 받아 기공을 개폐하는 고유의 기능을 발휘하지 못해서 stomatal conductance가 낮은 것으로 추측할 수 있다(Reich, 1987).

또한 광합성능력이 낮은 개체들이 공통적으로 stomatal conductance가 낮은 것으로 미루어 이들 개체들은 광합성에 필요한 CO<sub>2</sub> 가스가 교환을 받아서 광합성을 교란했을 수 있다. 원활한 가스교환이 이루어지지 않고 광합성에 필요한 CO<sub>2</sub>를 기공이 닫힘으로 인해서 충분히 확보하지 못해 결국 광합성능력에 지장을 주었을 것이다(Reich 등, 1985). 또한 이들 개체는 일반적으로 Rubisco 활성이 건전한 생장을 유지하는 개체보다 낮은 것으로 나타나서 이산화탄소를 고정하는 광화합적인 과정이 피해를 받은 것이라는 추측을 할 수 있게 해 준다(Fig. 6).

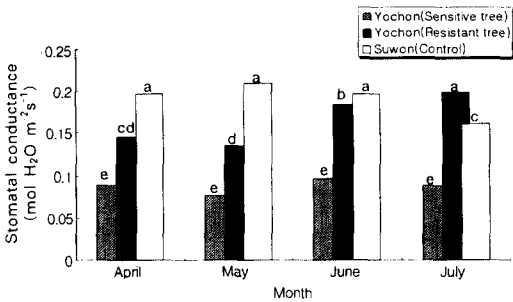


Fig. 3. Seasonal changes in stomatal conductances of *Alnus firma* leaves

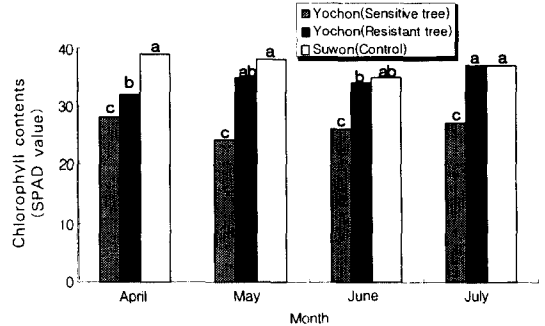


Fig. 5. Seasonal changes in chlorophyll contents of *Alnus firma* leaves

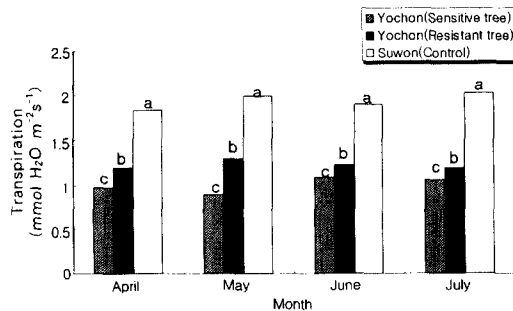


Fig. 4. Seasonal changes in transpiration of *Alnus firma* leaves

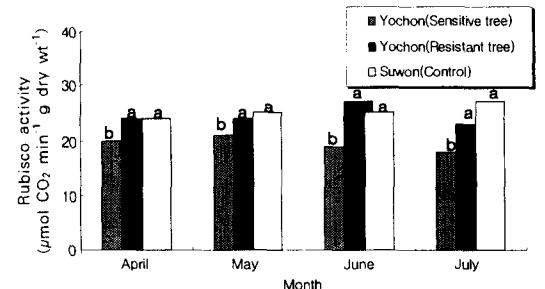


Fig. 6. Seasonal changes in Rubisco activity of *Alnus firma* leaves

과거에는 엽록소의 함량측정에 시료를 채취하여 아세톤을 이용한 회귀식으로 추정하였지만 현재는 비 파괴적 방법으로 측정하고 있고(SPAD 502이용), 이는 회귀식을 이용한 엽록소함량 측정방법과 경향이 비슷하게 나타나기 때문에 시료를 파괴하지 않고 이 방법으로 간편하게 엽록소 함량을 측정하여 사용하고 있다.

엽록소 함량은 일반적으로 대기오염물질에 의해서 수목개체가 얼마나 피해를 받았는지 판단할 수 있는 간접적도가 될 수 있다(Reich, 1983). 그리고 일반적으로 광합성능력은 엽록소의 함량에 의해서 많이 좌우된다. 대기오염지역에서도 건전한 생장을 유지하는 사방오리나무 개체들은(resistant) 엽록소의 함량이 비 오염지역인 수원에서 성장하는 개체들(control)과 4월만 제외하고는 비슷한 경향을 보인다(Fig. 5). 이들 개체들은 오염이 심해져도 엽록소의 함량이 일정한 수준으로 유지한다는 것을 보여준다. 또한 광합성능력과 비례해서 비슷한 경향을 보여 주는 것을 알 수 있다(Fig 2). 이는 엽록소 함량이 광합성능력에 비례해서 나타나는 보고와 일치하는 것을 알 수 있다(Grimm과 Fuhrer, 1992 ; Reich, 1983).

### 3. 효소활성비교

#### 1) Rubisco 활성

Rubisco 효소는 이 세상에서 가장 흔하고 많은 수목효소 중의 하나이다. 개체마다 또 수종마다 차이는 있지만 식물 잎의 가용성 단백질 가운데 약 30 - 70%를 차지하고 있다. Rubisco는  $C_3$  식물의 경우에는 탄소를 고정하는데 제일 먼저 관여하는 중요한 역할을 하며 효소 활성과 효소량에 따라서 생장과 건물질 생산이 달라지기도 한다. 일반적으로 광합성능력은 Rubisco 활성과 비례의 관계에 있다고 여러 결과에서 보고하고 있다(Dann과 Pell, 1989 ; Landry와 Pell, 1993).

Rubisco활성은 공해의 피해가 거의 없다고 판단되는 청정지역인 수원에서 자라는 사방오리나무 비교목 개체(control)의 경우에 시기별로 다른 지역의 사방오리나무에 비해서 비슷하거나 높은 것을 알 수 있다(Fig. 6). 이것은 아마도 비교목의 광합성능력이 가장 높은 것과 상관이 있을 것으로 짐작된다(Fig. 2). 여천산업단지에서 자라는 사방오리나무의 경우 건전목 개체의 경우(resistant)가 Necrosis 등 가시적인 공해피해가 나타나는 피해목 개체(sensitive)의 Rubisco 활성보

다 높은 것을 알 수 있다. 가시적인 피해를 받은 피해목의 경우 건전 개체보다 광합성능력이 역시 낮은 것을 알 수 있다(Fig. 2).

공해지역에서 대기오염 stress를 받은 경우에도 불구하고 건전한 생장을 유지하는 사방오리나무 건전 개체는 생리, 생태적인 보상을 해서 stress를 극복하고 생장을 그대로 유지하는 것으로 알려져 있는데 여기서의 결과도 생태적인 보상(Ecological compensation)을 하는 것을 보여준다. 수목이 열악한 환경에 처하면 뿌리로 분배되는 탄수화물의 양을 줄여서 지상부의 생장에 이용함으로써 생장을 건전하게 유지하려고 하며(Winner, 1994) 자기의 노화된 조직을 떨어뜨리고 새로운 조직을 만들어 내는 생존전략을 만들어 내는 것, 광합성능력이나 생리적인 활성을 높여서 열악한 환경을 극복하려는 행태를 보여준다(Mooney 등, 1988).

여천산업단지에서 건전한 생장을 유지하는 사방오리나무 개체는 광합성능력과 Rubisco 활성을 수원지역의 개체와 비슷한 수준으로 유지시킴으로서 대기오염 stress를 극복하기 위한 생태적인 보상을 하는 것으로 짐작되는 반면에 공해에 대해서 피해를 나타내는 개체는 여천의 같은 지역에 서식하고 연령이 비슷하더라도 광합성능력과 Rubisco 활성을 높이지 못하여 생태적인 보상을 하지 못하여 생장이 저해되고 necrosis 같은 가시적인 피해현상을 보여주는 것을 알 수 있다.

#### 2) SOD 활성

활성산소( $O_2^-$ )는 수목의 생장을 방해하는 oxidant radical이며 첫째, 성장과정 중에 대사물질로서 생성되는 것, 둘째, 대기오염원을 통해서 유입되는 것 등 크게 두 가지 이유 때문에 수목에 있어서 생리적인 장애를 일으킨다. 그러나 이러한 독성은 식물체내의 여러 가지 효소, 특히 superoxide dismutase(SOD)에 의해서 독성이 약한  $H_2O_2$ (hydrogen peroxide radical)로 전환되어 독성이 완화된다(김명희와 이수옥, 1992a, 1992b ; Koricheva 등, 1997). 그렇기 때문에 SOD의 활성을 조사한다는 것은 수목이 독성을 완화할 수 있는 능력이 어느 정도인가 판단하는 간접적인 지표가 될 수 있다.

사방오리나무의 시기별 SOD 활성은 수원지역에서 가장 낮았고 여천지역의 가시적 피해를 보이지 않는 사방오리나무 개체의 SOD 활성이 가장 높은 것을 알 수 있다(Fig. 7). 이 결과도 사

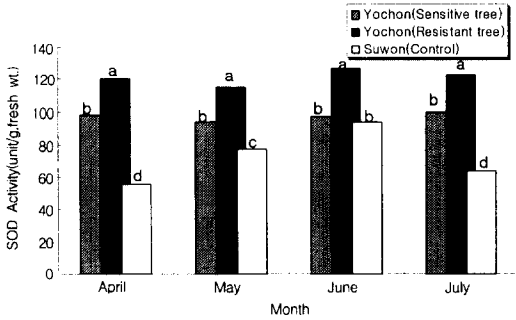


Fig. 7. Seasonal changes in SOD activity of *Alnus firma* leaves

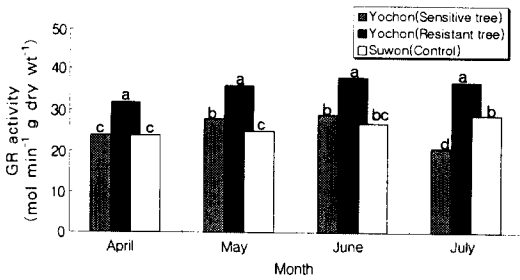


Fig. 8. Seasonal changes in Glutathione reductase activity of *Alnus firma* leaves

방오리나무가 대기오염이란 stress로부터 자신을 보호하기 위해서 생태적인 보상을 한다는 것을 보여주고 있다.

건전한 생장을 유지하는 개체는 시기별로 SOD 활성을 증가시켜 오염원으로 인해서 생성된 독성을 가진 활성산소(O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 독성을 해독하는 능력을 증가시켰다고 추정할 수 있다(Koricheva, 1997). 반면에 가시적인 피해를 나타내는 사방오리나무는 SOD 활성을 증가시키지 못함으로서 오염원으로 생성된 활성산소(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)를 해독하는 능력이 떨어져 대기오염의 피해를 받은 것으로 짐작된다.

### 3) GR 활성

GR의 활성변화는 SOD의 활성과 시기별, 개체별 경향이 거의 비슷함을 알 수 있다(Fig. 8). 비오염 지역인 수원지역에서 사방오리나무의 시기별 GR 활성이 가장 낮았고 여천지역의 가시적 피해를 보이지 않는 사방오리나무 개체의 GR 활성이 가장 높은 것을 알 수 있다.

이 결과도 사방오리나무가 대기오염으로부터 자신의 건전한 생장을 유지하기 위해서 생태적인 보상을 한다는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 비교적 양수인 2년생 *Betula pendula*(Kori-

cheva 등, 1997)에서도 관찰되었다. 인공산성우와 중금속의 독성해독을 위해서 뿌리의 GR 활성이 증가되었다는 결과는 GR에 의해서 오염물질이 해독되었다는 것을 뒷받침해 주는 결과다.

## 결론

오염지역에서 건전한 생장을 유지하는 사방오리나무(*Alnus firma*)의 광합성능력, 기공전도도, 증산량, Rubisco, antioxidant 효소(Superoxide dismutase(SOD)와 Glutathione reductase(GR)) 활성은 가시적인 피해가 있는 개체의 경우보다 모두 높은 것으로 조사되었다. 이는 antioxidant 효소들의 활성이 높아서 오염물질을 해독하는 능력이 컸으며 활성산소를 解毒시켜서 건전한 생장을 유지하는 것으로 짐작된다. 이 같은 결과는 오염물질로부터 개체목의 생장을 유지하기 위한 생물학적인 보상(biological compensation)을 하는 것으로 추정된다.

## 감사의 글

여수까지 동행하여 시료채취한 서울대학교 대학원 박병배, 최은형, 전열, 효소 분석에 많은 도움을 준 임업연구원 육종부 내공해 연구실 모든 분들, 그리고 익명의 심사위원께도 좋은 의견 주셔서 감사합니다.

## 인용 문헌

1. 기상청. 1997. 통계연보. 기상청 p.430
2. 김갑태·엄태원. 1995. 인공산성연무의 처리가 몇 침엽수종의 엽피해와 엽조직에 미치는 영향. 상지대학교 석사논문집 p.29
3. 김명희·이수옥. 1992a. 조경수목의 대기오염 물질에 대한 방어기능(I) - SOD 활성을 중심으로 - 한국임학회지 81(2) : 164-176
4. 김명희·이수옥. 1992b. 조경수목의 대기오염 물질에 대한 방어기능(II) - POD 활성을 중심으로 - 한국임학회지 81(3) : 234-246
5. 김용표·이종훈·진현철·문길주. 1997. 여천공단 대기중의 입자상 및 기체상 이온성분과 유기화합물의 농도. 한국대기보전학회 13(4) : 269-284
6. 문형태·표재훈·김준호. 1998. 여천공단 주

- 변지역 토양의 화학적 성질. 한국생태학회지 21(1) : 1-6
7. 우수영. 1998. 오존환경이 잡종포플러의 생장과 기공개폐에 미치는 영향. 한국임학회지. 87(1) : 50-56
  8. 우수영. 1997a. 오존 環境에 對한 雜種 포플러 苗木의 가스 交換과 生長에 關한 研究. 한국생태학회지. 20(4) : 239-244
  9. 우수영. 1997b. 오존에 露出시켰을 때 抵抗性을 갖는 雜種포플러의 生長, 光合成 그리고 Rubisco 活性에 關한 研究 : 樹木의 補償戰略과의 關係. 한국임학회지. 86(1) : 80-86
  10. Carlberg, I. and B. Mannervik. 1985. Glutathione reductase. Methods of Enzymology. 113 : 484-490
  11. Cha, D.H. and D.K. Lee. 1996. Effects of different aluminum levels on growth and root anatomy of *Alnus hirsuta* Rupr. Seedlings. J. Sustainable Forestry. 3(2) : 45-63.
  12. Dann, M.S. and E.J. Pell. 1989. Decline of activity and quantity of ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase and net photosynthesis in ozone-treated potato foliage. Plant Physiology 91 : 427-432
  13. Grimm, A.G. and J. Fuhrer. 1992. The response of spring wheat(*Triticum aestivum* L.) to ozone at higher elevations. III. Response of leaf and canopy gas exchange and chlorophyll fluorescence to ozone flux. New Phytologist 122 : 321-328
  14. Kangasjarvi, J., J. Talvinen, M. Utriainen and R. Karjalainen. 1994. Plant defence systems induced by ozone. Plant Cell and Environment 17 : 783-794
  15. Koricheva, J., S. Roy, J.A. Vranjic, E. Haukioja, P.R. Hughes and O. Hanninen. 1997. Antioxidant responses to simulated acid rain and heavy metal deposition in birch seedlings. Environmental Pollution 95(2) : 249-258
  16. Landry, L.G. and E.J. Pell. 1993. Modification of rubisco and altered proteolytic activity in ozone-stressed hybrid poplar(*Populus maximowiczii* x *trichocarpa*). Plant Physiology 101 : 1355-1362
  17. Lee, D.K., C.H. Yun and M.I. Choi. 1993. Simulated acidic precipitation and aluminum on the growth of *Alnus glutinosa* and *Alnus hirsuta* Seedlings and their Nitrogen Fixation. Journal of Sustainable Forestry. 1(3) : 71-92.
  18. MaCord, J.M. and I. Fridovich. 1969. Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocyperin(homocyperin). J. Biol. Chem. 244 : 6049-6055
  19. Mooney, H.A., M. Kupper, G. Koch, J. Gorham, C. Chu and W.E. Winner. 1988. Compensating effects to growth of carbon partitioning changes in response to SO<sub>2</sub>-induced photosynthetic reduction in radish. Oecologia 75 : 502-506
  20. Reich, P.B. 1983. Effects of low concentrations of ozone on net photosynthesis, dark respiration and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves. Plant Physiology 73 : 291-296
  21. Reich, P.B. 1987. Quantifying plant response to ozone : A unifying theory. Tree Physiology 3 : 63-91
  22. Reich, P.B., A.W. Schoettle H.F. Stroo, J. Troiano and R.G. Amundson. 1985. Effects of O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> and acidic rain on mycorrhizal infection in northern red oak seedlings. Canadian Journal of Botany 63 : 2049-2055
  23. Sharkey, T.D., L.V. Savitch and N.D. Butts. 1991. Photometric method for routine determination of K<sub>cat</sub> and carboxylation of rubisco. Photosynthesis Research 28 : 41-48
  24. Taylor, G.E. Jr. and D.W. Johnson. 1994. Air pollution and forest ecosystems: a regional to global perspective. Ecological Applications 4 : 662-689.
  25. Winner, W.E. 1994. Mechanistic analysis of plant responses to air pollution. Ecological Applications 4(4) : 651-661.