

## 탄광 폐석지내 자생 수종의 생리적 피해 및 내성\*

이재천<sup>1</sup> · 한심희<sup>1</sup> · 장석성<sup>1</sup> · 김판기<sup>2</sup> · 허재선<sup>3</sup> · 염규진<sup>4</sup>

<sup>1</sup>임업연구원, <sup>2</sup>서울대학교, <sup>3</sup>순천대학교, <sup>4</sup>(주)코엔바이오

(2003년 7월 10일 접수; 2003년 8월 6일 수락)

## Physiological Tolerance of Native Tree Species in Abandoned Coal Mine Spoils

Jae-Cheon Lee<sup>1</sup>, Sim-Hee Han<sup>1</sup>, Suk-Seong Jang<sup>1</sup>, Pan-Gi Kim<sup>2</sup>,  
Jae-Seoun Hur<sup>3</sup> and Kyu-Jin Yum<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

<sup>2</sup>Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>3</sup>SunChon National University, SunChon 540-742, Korea

<sup>4</sup>Coenbio Co. Ltd., Suwon 445-743, Korea

(Received July 10, 2003; Accepted August 6, 2003)

### ABSTRACT

This study was conducted to assess the physiological tolerance of native tree species for successful restoration and revegetation of abandoned coal-mine spoils. Study sites were two coal-mine spoils (Sododong and Ssarijae) in Taebaek, Kangwon Province, Korea. Five individuals of *Betula costata* and of *B. schmidtii* were analyzed for malondialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) content, nitrate reductase (NR) and superoxide dismutase (SOD) activity, and for carbohydrate concentration in the leaves. Trees in the abandoned coal-mine spoils were influenced by deficiencies expressed by MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content in the leaves of two species being higher at the coal-mine spoils than in the surrounding forest. Low NR activity indirectly represented nitrogen deficiency in the soil of the coal-mine spoils; an unmanageable SOD activity implied that tolerant functions didn't act against a certain stress of the coal-mine spoils. Decreased glucose and increased starch concentration especially showed the inhibition of the carbohydrate metabolism by inadequate factors. Consequently, low nitrogen content in the coal-mine soils might increase damage in trees as a result of inhibiting the expression of tolerance mechanisms against stress. Therefore, trees in coal-mine spoils need ample nitrogen to use as a metabolic energy source in order to prevent damage and increase tolerance against stress.

**Key words** : coal mine spoil, *Betula*, restoration, revegetation, MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NR, SOD, carbohydrate

### I. 서 론

우리나라의 석탄광은 대부분 갱내 채굴(Tunnel mining·underground coal mining)로 노천 채굴(surface

mining·open-cut mining)에 비하여 실제 훼손 면적은 적은 편이나, 석탄광(coal mine)을 개발하기 위해 설치한 시설물과 채굴하는 과정에서 부수적으로 나오는 많은 폐석들이 산림 훼손을 일으키는 주요한 요인이

Corresponding Author : Sim-Hee Han(inyasio@hanmail.net)

\*본 논문은 2001년도 농림기술개발사업 첨단과제(과제관리번호 201089-032)의 연구비로 수행한 연구 결과의 일부임

되어 왔다. 더욱이 갱내에서 유출된 폐석이 폐석탄 경석장(abandoned coal-mine spoils, 이하 폐석지)에 장기간 방치됨으로써 자연환경을 훼손시킬 뿐만 아니라 호우가 내리는 경우 폐석이 유입되거나, 폐석탄 경석장의 사면이 붕괴되어 하천이나 도로의 파손 및 농경지 등이 매몰되어 막대한 경제적 피해를 주고 있다(Woo, 2000). 우리나라의 경우, 석탄합리화사업단(CIPB: Coal Industry Promotion Board)에서 1995년 이후 폐광 방치된 사택촌 및 각종 폐시설물, 폐갱구에서 유출되고 있는 폐수, 폐갱도 붕괴로 인한 지반 침하 등 재해를 방지하기 위해 복구사업과 함께 채굴 활동으로 훼손된 산림과 폐석지의 녹화사업을 시행중이다. 그러나 이들 지역의 입지여건이 좋지 못하고, 특히 토양 조건이 열악하여 녹화공사를 통한 산림 복구에 어려운 점이 많아 주변 환경과 조화를 이루면서 효과적으로 폐석지를 녹화할 수 있는 공법개발이 요구되고 있다(Kim et al., 2000; Kim and Nam, 2000).

일반적으로 폐석지는 유기물 함량이 낮고, 양료가 결핍되어 있으며, 토성이 거칠고, 완충능력이 나빠며, 수분보유력(water holding capacity)이 낮다(Hossner and Hons, 1992). 이러한 폐석지 내에서 나타나는 다양한 스트레스 요인들은 식물의 생장에 부정적인 영향을 준다(Logan, 1992). 따라서 이러한 척박한 지역의 성공적인 식생 복원을 위해서는 토양 특성을 개선하고, 폐석지 환경에 내성을 보이는 수종을 선발하여 복원하는 것이 바람직하다. 최근 성공적인 폐석지의 식생 복원을 위하여 폐석지 위에 복토를 실시하거나 하수슬러지를 이용한 양료 공급 및 토질 개선에 관한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다(Voeller et al., 1998; Yum et al., 1999).

본 연구는 폐석지의 성공적인 식생 복원을 위하여 대상지역 내에서 자생 수종을 선발하고(Lee et al., 2002), 폐석지 내 다양한 스트레스에 의해 나타나는 선발 수종의 피해 수준을 평가하고자 하였으며, 또한 스트레스에 대한 내성 개체의 특성을 구명하여 폐석지 내 식생을 복원하기 위한 해결방안을 제시하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지 개황

연구 조사지는 강원도 태백시 소도동 북동사면과 싸

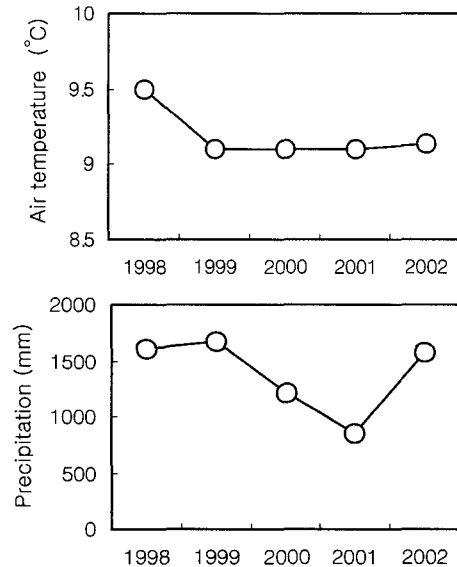


Fig. 1. Mean air temperature(left) and precipitation(right) at Taebaek area in Korea from 1998 to 2002.

리재 북동사면 2개 지역으로(Lee et al., 2002), 1998년부터 2002년까지 강원도 태백지역의 연평균 기온은 9.2°C였으며, 연평균 강수량은 1380 mm 였다(Fig. 1). 강원도내 탄광 폐석지는 복구공사를 실시하였지만, 인위적으로 식생이 조성되지 않은 탄광 폐석지에서는 주변 산림 구성종의 종자가 자연적으로 침입하여 개척종의 역할을 하고 있었다(Lee et al., 2002).

### 2.2. 공시재료

본 조사는 2002년에 태백지역 폐광지의 환경친화적인 식생 복원에 이용하기 위하여 이미 선발한 거제수나무(*Betula costata*)와 박달나무(*B. schmidtii*)를 대상으로 하였다(Lee et al., 2002). 분석에 이용할 잎 시료를 채취하기 위하여, 폐석지내와 폐석지 주변 산림 내에서 수종 당 각각 5개체씩을 선정하고, 8월 중순경에 거제수나무와 박달나무 대상목으로부터 잎 시료를 채취하였다. 채취된 잎 시료는 4°C에 보관하여 실험실로 운반한 후 생리생화학적 특성 분석에 이용하였다.

### 2.3. 생리적 특성 분석

수목이 자라는 토양 내 질소의 수준을 파악하기 위해서 실시한 잎의 질산환원효소(nitrate reductase; NR) 활성 측정은 Högberg et al.(1986)의 방법을 변

형하여 실시하였으며, 540 nm에서 흡광도를 측정하여 결정하였다.

잎의 Malondialdehyde(MDA)와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량은 수목의 피해 수준을 파악하기 위해서 분석하였다. MDA 함량은 45°C에서 N-methyl-2-phenylindole(NMPI)과 MDA와의 반응을 기초로 한 Esterbauer and Cheeseman(1990)의 방법을 따라 586 nm에서 흡광도를 측정하여 결정하였다. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량은 436 nm에서 시료의 흡광도와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 표준물질의 흡광도를 비교하여 결정하였다(Bernt and Bergmeyer, 1974).

수목의 내성 반응을 파악하기 위해 분석한 잎 내 항산화효소(superoxide dismutase; SOD) 활성은 nitro blue tetrazolium(NBT)-xanthine oxidase법에 의거하여, 530 nm에서 120초 동안의 흡광도 증가를 측정하여 결정하였다(Beauchamp and Fridovich, 1971). 탄수화물 분석은 methanol/chloroform/중류수를 12/5/3의 비율로 혼합한 용액에 건조된 잎 시료 0.1 g를 넣고 원심 분리한 후, glucose oxidase법(Hendry and Price, 1993)에 따라 460 nm에서 흡광도를 측정하여 결정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 잎 내 MDA와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량 차이

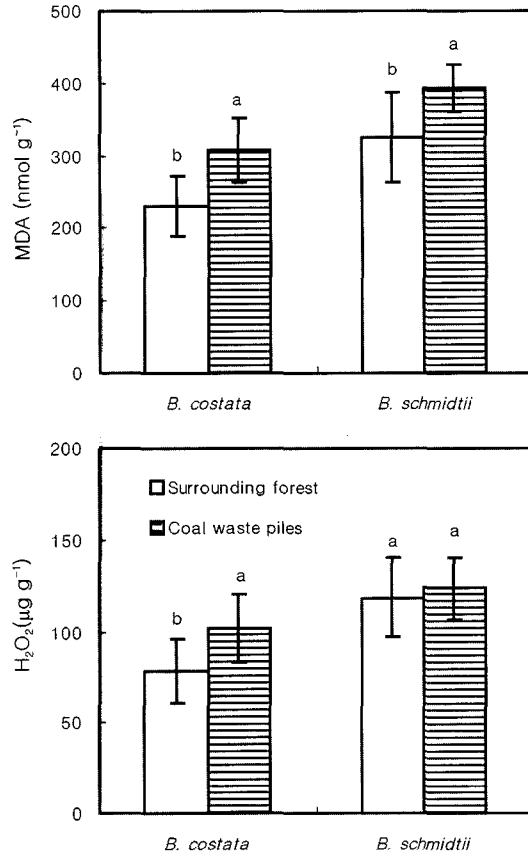
MDA는 생체 내 지질의 과산화반응에 의해 생성되는 물질로 여러 가지 스트레스에 의한 피해 수준을 나타내는 지표로 이용된다(Kim and Lee, 1994; Davis and Swanson, 2001).

거제수나무와 박달나무의 잎에서 측정된 MDA 함량은 수종간 뿐만 아니라 지역간에도 큰 차이를 보여 주었다(Table 1). 특히 폐석지 내에서 자라는 거제수

**Table 1.** F-values for analysis of variance and significance levels for nitrate reductase(NR) activity, superoxide dismutase(SOD) activity, hydrogen peroxide content and malondialdehyde(MDA) content in the leaves of *B. costata* and *B. schmidtii* selected on the coal waste piles and forests of Taebaek area.

Source	F values			
	MDA	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	NR	SOD
Species	52.86***	40.54***	336.1***	15.69**
Sites	35.57***	8.12*	10.1*	0.79
Species×Sites	0.09	3.52	5.2	2.09

\*, \*\*, and \*\*\* are represented significant differences at 0.01, 0.001 and 0.0001 respectively.



**Fig. 2.** MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content in the leaves of *B. costata* and *B. schmidtii* selected on the coal waste piles and forests of Taebaek area. Each bar represents the mean and standard deviation of five replicates. The different letters within the same species indicate significant differences between sites at p<0.05 by Duncan's multiple range test.

나무와 박달나무 개체들의 MDA 함량은 폐석지 주변 산림 내에서 자라는 개체들보다 높았다(Fig. 2). 이러한 결과는 폐석지 내 환경이 여러 가지 스트레스 요인들을 가지고 있으며, 폐석지 내 수목들은 여러 가지 스트레스 요인들에 의해 피해를 받고 있음을 보여준다.

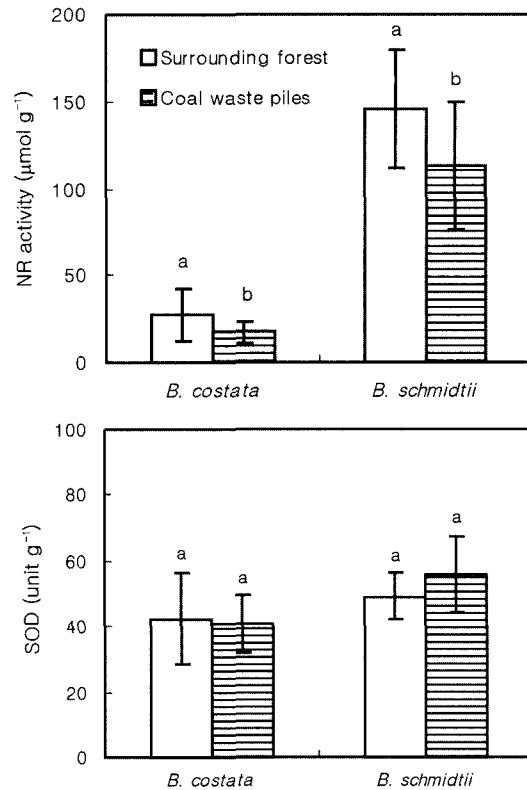
잎 내에서 측정된 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량은 수종간과 지역간 차이를 보여 주었으나, 지역간 차이는 수종간 차이만큼 크지 않았다(Table 1). 즉 거제수나무 잎의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량은 지역간 차이를 보인 반면, 박달나무 잎의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량은 지역간 차이가 없었다(Fig. 2). H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 강력한 산화제로서 틸라코이드 막에 붙어 있는 SOD에 의해 O<sub>2</sub><sup>-</sup>가 분해되어 생성되며(Cadenas, 1989) 생물계에서 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도는 catalase와 peroxidase에 의

해 조절되어 적정 수준으로 유지되는데 식물이나 광합성 조류의 경우 ascorbate peroxidase(APX)가 부가적으로 존재하며, 특히 이 효소는 광합성 기구인 엽록체에서  $H_2O_2$  제거에 중요한 역할을 한다(Foyer, 1993). 또한  $H_2O_2$ 는 특징적인 막투과성과 비교적 긴 수명으로 PSI와 PSII를 포함하는 광합성기구는 물론 세포 전반에 영향을 미칠 수 있으며, 특히 APX에 의해 보호를 받지 못하는 PSII의 경우  $H_2O_2$ 의 축적에 의해 심각한 손상을 받을 수 있다(Prasad et al., 1994). 즉, 잎 내  $H_2O_2$ 의 증가는  $H_2O_2$ 가 체 내 축적되어 나타난 것으로, 본 조사지역의 거제수나무는 박달나무보다  $H_2O_2$ 에 의해 더 큰 피해를 받을 수 있음을 알 수 있었다. 즉 거제수나무는 박달나무보다 스트레스에 더 민감한 수종인 것으로 판단되는데, 오존에 노출시킨 자작나무류의 내성 능력을 조사한 결과, 거제수나무가 스트레스에 가장 민감한 수종인 것으로 보고한 바 있다(Lee et al., 2002; Han et al., 2002).

### 3.2. 잎 내 질산환원효소와 항산화효소의 활성 차이

잎 내 질산환원효소의 활성은 수목이 자라는 토양 중 질소 이용도를 간접적으로 판단하는 기준으로 사용되며, 환경 스트레스에 의한 식물의 반응을 판단하는데도 이용된다(Srivastava, 1980; Högberg et al., 1986). 폐석지에서 측정된 거제수나무와 박달나무의 질산환원효소의 활성은 수종간은 물론 지역간에도 큰 차이를 나타냈다(Table 1). 질산환원효소의 활성은 박달나무가 거제수나무보다 높은  $129.5 \mu\text{mol g}^{-1}$ 이었으며, 폐석지 주변 산림 내에서 자라는 박달나무와 거제수나무 개체가 폐석지 위에서 자라는 개체보다 활성이 높게 나타났다(Fig. 3). 수종간 질산환원효소의 활성 차이가 크게 난 것은 각 수종이 자라는 토양 조건의 차이와 질소 이용 효율이 수종간에 다르기 때문인 것으로 판단된다(Adams and Attiwill, 1982; Crick and Grime, 1987). 또한 폐석지 내 수목의 질산환원효소 활성이 낮게 나타난 것은 폐석지 토양의 적은 질소 함량과 관계가 있으며, 폐석지 토양의 부적당한 환경 조건이 폐석지 위에서 자라는 수목에 스트레스로 작용하여 효소 활성에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다(Srivastava, 1980).

항산화효소인 SOD 활성은 수종간에는 차이가 있었지만 지역간에는 차이가 없었다(Table 1). 그러나 폐석지 내의 수목들은 여러 가지 스트레스에 의해 영향



**Fig. 3.** NR activity and SOD activity in the leaves of *B. costata* and *B. schmidtii* selected on the coal waste piles and forests of Taebaek area. Each bar represents the mean and standard deviation of five replicates. The different letters within the same species indicate significant differences between sites at  $p < 0.05$  by Duncan's multiple range test.

을 받고 있는 것으로 나타났다(Fig. 3). 그럼에도 불구하고 스트레스에 대한 대표적인 방어 반응인 SOD 활성이 증가하지 않은 것은 방어 작용에 이용할 수 있는 에너지원이 충분히 공급되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 즉 폐석지 수목의 잎 내 질산환원효소의 활성 저하에서도 나타난 것과 같이, 폐석지 토양의 적은 질소함량은 스트레스 해소에 관여하는 효소 생산에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

### 3.3. 잎 내 탄수화물 농도의 차이

폐석지와 폐석지 주변 산림의 거제수나무와 박달나무의 잎에서 측정된 탄수화물의 농도는 수종간 차이가 없었으나, 지역간 차이는 나타났다(Table 2). 그러나 거제수나무의 잎내 탄수화물은 박달나무와는 달리 지역간에도 차이가 없었다(Fig. 4). 박달나무의 경우, 잎

**Table 2.** F-values for analysis of variance and significance levels for glucose, starch and total non-structural carbohydrate (TNC) concentration in the leaves of *B. costata* and *B. schmidtii* selected on the coal waste piles and forests of Taebaek area.

Source	F values		
	Glucose	Starch	TNC
Species	6.33	6.11	7.03
Sites	10.9*	8.04*	9.52*
Species×Sites	0.91	13.0**	0.51

\*, and \*\* are represented significant differences at 0.01 and 0.001 respectively.

내 포도당 농도는 폐석지 주변 산림 내에서 자라는 개체들이 폐석지의 개체들보다 높았으나, 잎 내 전분 농도는 반대로 주변 산림보다 폐석지내 개체들이 높았다.

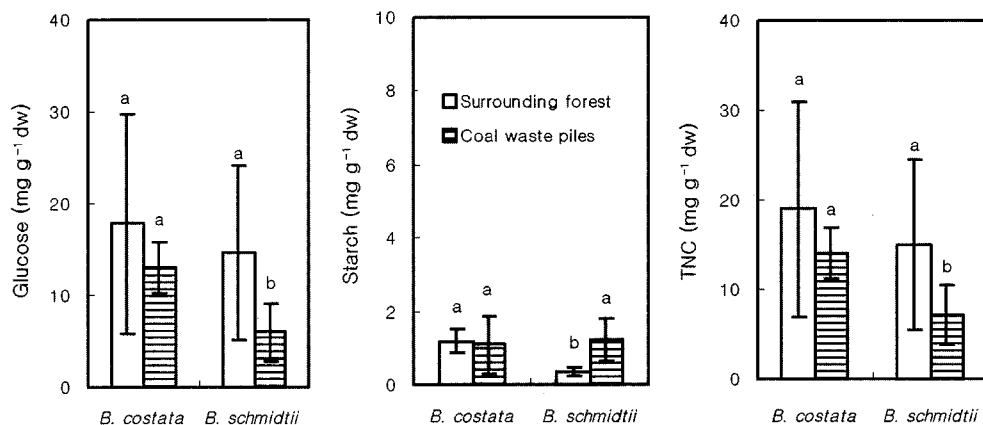
폐석지내 수목의 잎 내 포도당 농도가 감소한 것은 스트레스에 대한 내성반응과 관련된 것으로 판단된다. 즉 포도당 농도의 감소는 포도당이 항산화물질의 양을 유지하기 위해 사용되는 NADPH의 근원으로 사용되었기 때문이며(Robinson and Rowland, 1996), 스트레스 요인이 자당의 가수분해를 저해하여 소모된 포도당을 보충하지 못한 것으로 판단된다. 또한 정상적인 조건하에서 전분은 낮 시간 동안 잎에 축적되며, 밤 시간에는 가수분해된 후 자당으로 전환되어 수용부

(sink)로 수송된다. 그러나 전분과 총 탄수화물의 농도가 오염지에서 증가하는 현상이 종종 발견되는데, 이러한 결과는 전분의 가수분해와 자당의 수송이 오염물질에 의해 저해되기 때문이다(Samarakoon and Rauser, 1979). 특히 질소 공급이 매우 적은 식물에서는 질소 공급이 충분한 식물보다 잎에 전분을 더 많이 축적하는 것으로 알려져 있다(Ericsson, 1979; Balsberg-Påhlsson, 1989).

본 조사의 폐석지 수목들에서 나타난 여러 가지 현상들을 종합해 볼 때, 폐석지 내 수목들은 스트레스에 의해 각종 대사작용 및 내성 발현의 저해로 일시적인 피해를 나타내고 있으며, 폐석지 토양의 낮은 질소함량은 스트레스에 대한 내성 발현에 도움을 주지 못하여 수목의 피해가 증가할 것으로 판단된다. 따라서 폐석지 내 수목의 피해를 막고 스트레스에 대한 내성을 증가시키기 위해서는 각종 대사의 에너지원으로 이용되는 양료 공급이 절실히 요구된다.

#### IV. 적 요

본 연구는 폐석지의 성공적인 식생 복원을 위하여 자생 수종을 대상으로 피해 수준을 평가하고, 내성 특성을 구명하고자 실시하였다. 연구 조사지는 강원도 태백시 소도동과 짜리재에 위치한 폐석지를 대상으로 하였으며, 이미 선발한 거제수나무와 박달나무의 잎을



**Fig. 4.** Glucose, starch and total non-structural carbohydrate(TNC) concentration in the leaves of *B. costata* and *B. schmidtii* selected on the coal waste piles and forests of Taebaek area. Each bar represents the mean and standard deviation of five replicates. The different letters within the same species indicate significant differences between sites at  $p < 0.05$  by Duncan's multiple range test.

채취하여 NR 활성, MDA와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량, SOD 활성, 탄수화물 함량을 분석하였다.

폐석지 내 수목들은 폐석지 주변 산림 내 수목들 보다 MDA 함량과 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 함량이 높아 폐석지 내 부적당한 환경 요인에 영향을 받고 있음을 보여 주었다. 또한 낮은 NR 활성은 폐석지 내 질소원의 부족을 간접적으로 나타냈으며, 폐석지내 수목의 잎에서 항산화 효소인 SOD의 활성 증가가 나타나지 않은 것으로 보아 스트레스에 대한 내성 기능이 적절하게 작용하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 특히 포도당의 감소와 전분의 증가는 탄수화물 대사가 부적당한 환경 요인에 의해 저해되고 있음을 보여 주었다. 결론적으로 폐석지 토양 내 낮은 질소함량은 스트레스에 대한 수목의 내성 발현에 도움을 주지 못하여 수목의 피해가 증가한 것으로 판단된다. 따라서 폐석지 내 수목의 피해를 막고 스트레스에 대한 내성을 증가시키기 위해서는 각종 대사의 에너지원으로 이용되는 양료 공급이 절실히 요구된다.

### 인용문헌

- Adams, M. A. and P. M. Attiwill, 1982: Nitrogen mineralization and nitrate reduction in forests. *Soil Biology and Biochemistry*, **14**, 197-202.
- Balsberg-Påhlsson, A. M., 1989: Effects of heavy-metal and SO<sub>2</sub> pollution on the concentrations of carbohydrates and nitrogen in tree leaves. *Canadian Journal of Botany*, **67**, 2106-2113.
- Beauchamp, C. and I. Fridovich, 1971: Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, **44**, 276-297.
- Bernt, E. and H. U. Bergmeyer, 1974: Inorganic peroxides. *Methods of Enzymatic Analysis, Vol 4*. (Eds.) H. U. Bergmeyer, Academic Press, New York, 2246-2248.
- Cadenas, E., 1989: Biochemistry of oxygen toxicity. *Annual Review of Biochemistry*, **58**, 79-110.
- Crick, J. C. and J. P. Grime, 1987: Morphological plasticity and mineral nutrient capture in two herbaceous species of contrasted ecology. *New Phytologist*, **109**, 403-414.
- Davis, D. G. and H. R. Swanson, 2001: Activity of stress-related enzymes in the perennial weed leafy spurge (*Euphorbia esula* L.). *Environmental and Experimental Botany*, **46**, 95-108.
- Ericsson, A., 1979: Effects of fertilization and irrigation on the seasonal changes of carbohydrate reserves in different age-class of needle on 20-year-old Scots pine (*Pinus silverstris*). *Physiologia Plantarum*, **45**, 270-280.
- Esterbauer, H. and K. H. Cheeseman, 1990: Determination of aldehydic lipid peroxidation products: malonaldehyde and 4-hydroxynonenal. *Methods in Enzymology*, **186**, 407-421.
- Foyer, C. H., 1993: Ascorbic acid, *Antioxidant in Higher Plants*. (Eds.) R. G. Alscher and J. C. Hess, CRC Press, 31-58.
- Han, S.-H., J.-C. Lee, S.-S. Jang and Y.-P. Hong, 2002: Comparison of the ozone sensitivity of four *Betula* species based on carbon allocation and partitioning patterns. *Journal of Korean Forest Society*, **91**, 449-456.
- Hendry, G. A. F. and A. H. Price, 1993: Stress indicators : chlorophylls and carotenoids. *Methods in Comparative Plant Ecology : A Laboratory Manual*. G.A.F. Hendry and J.P. Grime, (Eds.) Chapman & Hall, 148-152.
- Hossner, L. R. and F. M. Hons, 1992: Reclamation of mine tailings. *Advances in Soil Science. Vol. 17*. (Eds.) B. A. Stewart. Springer-Verlag, New York, 311-348.
- Högberg, P., A. Granstrom, T. Johansson, A. Lundmark-Thelin and T. Näsholm, 1986: Plant nitrate reductase activity as an indicator of availability of nitrate in forest soils. *Canadian Journal of Forest Research*, **16**, 1165-1169.
- Kim, K.-H., H.-Y. Kim and B.-H. Kim, 2000: Development of nature-oriented technology for revegetation of abandoned coal-mine lands - In case study of revegetation experiment in the abandoned coal-mine spoils of Taebaek -. *International Symposium for the Development of Environmental Restoration and Revegetation Technology in the Abandoned Coal-Mine Lands*. 133-161.
- Kim, M. H. and S. W. Lee, 1994: Injury responses of landscape woody plants to air pollutants - malondialdehyde content. *Journal of Korean Forest Society*, **83**, 25-31.
- Kim, N.-C. and S.-J. Nam, 2000: Ecological restoration measure in the coal mine lands - In case study of the revegetation works by natural topsoil restoration methods for the restoration of the abandoned coal-mine spoils -. *International Symposium for the Development of Environmental Restoration and Revegetation Technology in the Abandoned Coal-Mine Lands*. 162-188.
- Lee, J.-C., S.-H. Han, S.-S. Jang, J.-H. Lee, P.-G. Kim, J.-S. Hur and K.-J. Yum, 2002: Selection of indigenous tree species for the revegetation of the abandoned coal mine lands in Taebaek Area. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **4**, 86-94.
- Lee, J.-C., S.-H. Han, S.-S. Jang, K.-J. Cho and Y.-Y. Kim, 2002: Effects of ozone uptake rate on photosynthesis and antioxidant activity in the leaves of *Betula* species. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **4**, 72-79.
- Logan, T. J., 1992: Chemical degradation of soil. *Advances in Soil Science. Vol. 17*. (Eds.) B. A. Stewart, Springer-Verlag, New York, 13-35.
- Prasad, T. K., M. D. Anderson, B. A. Martin and C. R. Stewart, 1994: Evidence for chilling-induced oxidative

- stress in maize seedlings and a regulator role for hydrogen peroxide. *Plant Cell*, **6**, 65-74.
- Robinson, J. M. and R. A. Rowland, 1996: Carbohydrate and carbon metabolite accumulation responses in leaves of ozone tolerant and ozone susceptible spinach plants after acute ozone exposure. *Photosynthesis Research*, **50**, 103-115.
- Samarakoon, A. B. and W. E. Rauser, 1979: Carbohydrate levels and photoassimilate export from leaves of *Phaseolus vullgaris* exposed to cobalt, nickel and zinc. *Plant Physiology*, **63**, 1165-1169.
- Srivastava, H. S., 1980: Regulation of nitrate reductase activity in higher plants. *Phytochemistry*, **19**, 725-733.
- Voeller, P. J., B. A. Zamora and J. Harsh, 1998: Growth response of native shrubs to acid mine spoil and to proposed soil amendments. *Plant and Soil*, **198**, 209-217.
- Woo, B.-M. 2000: Evaluation for rehabilitation counter-measures of coal-mined spoils and denuded lands. *Journal of the Korean Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology*, **3**, 24-34.
- Yum, K.-J., P.-G. Kim and E. W. Park, 1999: Effects of sewage sludge application for restoration of abandoned mine areas. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **21**, 2329-2340.