

식물정화재배법을 이용한 석탄폐석지 식생복원에 관한 연구

전상호¹⁾·이종규²⁾ · 박길옥¹⁾·최남희¹⁾ · 홍성욱¹⁾·정병학¹⁾

¹⁾ 강원대학교 환경과학과²⁾ 강원대학교 산림환경보호학과

A Study on Management of Vegetation and Restoration in Abandoned Coal-Mine Waste Areas by Phytoremediation

**Jun, Sang-Ho¹⁾ · Lee, Jong-Kyu²⁾ · Park, Kill-Ok¹⁾ · Choi, Nam-Hee¹⁾
Hong, Sung-Wook¹⁾ and Jung, Byoung-Hak¹⁾**

¹⁾ Department of Environmental Science, Kangwon National University,

²⁾ Department of Forest Environment Protection, Kangwon National University.

ABSTRACT

In Okdong coal mine abandoned area, every year large amount of mine wastes have been swept away due to heavy rains in summer. Because pH of coal-mine waste is in the early 4, plant naturally does not grow there due to unfavorable condition for growing plant. This study had an experiment to grow plant for 6 months using *Mycorrhizae* which can be adapted well in acid soil. As a result of Experiment, In the infected experiment pot, 90% of the plants survived but in case of uninfected experiment pot, only 25% were alive. From Growth Experiment, it appeared that average stem length increase (cm/month), average fresh weight increase (g^{fw} /month), average dry weight increase (g^{dw} /month) were increased by 60%, 21%, 31% respectively. Especially, *Mycorrhizae* plays an important role in providing nutrients and water when seeding are established. *Mycorrhizae* prevents death caused by lack of nutrients and water and helps growth and development of plant when seeding are established in the early stage. This study proved that *Mycorrhizae* is comparatively effective in plant growth and prevention of erosion in coal-mine abandoned area.

First author : Jun, Sang-Ho, Div. of Environmental Science, Kangwon National University,
Tel : +82-33-250-8573, E-mail : junsang@kangwon.ac.kr

Corresponding author : Jung, Byoung-Hak, Div. of Environmental Science, Kangwon National University,
Tel : +82-33-250-8573, E-mail : jungbh10@hanmail.net

Received : 22 September, 2011. **Revised** : 28 October, 2011. **Accepted** : 8 November, 2011.

Key Words : *Abandoned Mine waste, Mycorrhizae, infected plant, Phytoremediation, Erosion, Miscanthus sinensis.*

I. 서 론

2000년대 접어들면서 광산폐석에 의한 피해가 심각하게 사회문제로 대두되었다. 광산폐석내 유해물질인 중금속 원소 함량 분석과 오염에 대한 연구는 1980년대 후반부터 시작되었고(이서래·송기준, 1986; 유홍일 등, 1988), 1990년대부터는 광산폐석에 대한 환경오염평가 활발하게 진행되었다(김경웅 등, 1995; 민정식 등, 1997; 정명채·전효택, 1998). 이러한 연구는 주로 폐석내 성분분석과 오염도 조사와 평가에 한정되어 있었고, 2000년 이후에 오염 토양의 복원이나 정화와 관련된 연구는 물리·화학적 복원시스템에 국한되어 있었다(환경부, 2005; 봉화군, 2003; 정선군, 2005). 환경부는 대대적인 복원사업 일환으로 광해방지 사업단을 발족시켜 전국에 흩어져 있는 광산의 피해 정도를 조사하여 복원을 물리적인 방법으로 광산에 의한 피해를 줄여보고자 노력하였다. 광해방지사업단이 실시한 사업은 주로 복토에 의한 폐석 및 광미 유실방지 사업이었고, 사면보호방지, 침출수 처리시설 설비, 식재 조성공사, 공사 정비, 지반침하방지, 배수시설, 폐수정화시설, 폐시설 철거, 배수시설, 분진 비산방지 등에 사업비가 투자되었다. 이렇게 보수된 현장에서는 시간이 지나면서 부실공사가 일어나면서 그 피해가 반복되고 있다(2005, 환경부). 환경부(2005) 자료에 의하면 광산폐석에 대한 외국의 관리방법을 보면, 미국의 경우에는 광미장 하부에 400m PVC line 포설 시공과 광미장 내부에 배수시스템 설치 및 광미장 상부는 mine waste rock(폐석)과 광미로 매립하는 방법으로 폐석을 관리하고 있다. 캐나다는 폐석 및 광미로부터 산성광산배수(acid mine drainage) 침출수 발생을 억제하는 관리와 폐석 및 광미를 정비하고 일반 토양으로 복토 처리하는 관리를 하고 있다. 또한

폐석 위에 복토방법 연구와 기반암 부분 차수재를 포설하기도 하고, 광미 및 상부 토양 피복 후 식생을 통해 폐석지를 관리하고 있다. 노르웨이와 스웨덴은 광미를 주변 호수에 이동 침수시킨 후에 주변토양으로 피복하고 호수의 뚝을 높여 광미와 폐석을 관리하기도 하며 차수재 포설 후 토양을 피복시키는 방법으로 관리하고 있다. 그 외에 나라에서는 산성침출수가 생성되는 광산폐기물을 배수시스템이 설치된 곳에 적치하고, 점토로 복토 매립 등으로 폐석을 관리하고 있다. 이와 같이 외국은 폐석 및 광미 보호를 위하여 물리적, 화학적, 생태학적 방법으로 관리가 다양하게 이루어지고 있다. 기존의 물리·화학적 토양정화 기술은 막대한 자금과 노동력을 필요로 할 뿐만 아니라 생태적인 복원과는 거리가 있는 반면에 식생을 심는 phytostabilization 복원 방법은 정착 시간이 짧고 가격이 저렴한 초본을 심거나 목본을 심는 등의 방법 등을 적용하는 기초연구 단계에 있다(양운진, 1990). 광산 식생복원에 이용되는 미생물들은 보통 질소를 고정할 수 있는 박테리아와 공생균을 말한다(Thorne *et al.*, 1998). 미생물과 토양과 식물은 유기적인 연결체이며 서로에게 많은 영향을 주고 있으며 미생물은 그들의 생존 활동으로 토양을 비옥하게 만들며 식물과의 공생관계를 유지하기도 한다(Paul and Francis, 1989). 식생복원의 미생물 처리에 대해서는 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 그러나 같은 중금속 광산의 광미라도 포함하고 있는 중금속의 양이나 부족한 양분의 종류, 광미 입자의 크기, 강수량, 온도, 주변에서 자라는 식생의 종류 등에 따라 적용할 수 있는 물질과 양이 다르며 각 광산마다 식생 복원을 위해 효과적인 물질을 찾아내는 것이 선행되어야 한다(Bergholm and Steen, 1989). 식물을 이용한 복원은 많은 시간이 소요되고 오염이 심각한 지점에서는 적용에

한계가 있다는 단점이 있지만 친환경적에 큰 의미가 있다(Bergholm and Steen, 1989).

본 연구의 목적은 옥동석탄 광산폐석지 토성의 물리적, 화학적 특성 때문에 식물의 자연 도입이 불가능하다. 이러한 석탄폐석지에 식물 공생균인 균근균(*Mycorrhizae*)를 이용하여 옥동탄광 석탄폐석지 주변에 자생하는 우점식물을 선별하여 균근균을 감염한 유묘가 광산폐석지에 정착에 효과가 있는지를 검토하고 석탄폐석지에 식물도입이 폐석 침식보호에 대한 가능성을 평가하는데 목적이 있다.

II. 연구 조사지 개요

옥동석탄 폐석지는 식물이 살지 못해 여름철 집중 호우에 많은 폐석이 유실되고 있다. 현재 관리는 이루어지지 않고 있어 그대로 방치될 경우 많은 폐석이 계속 침식을 받을 우려가 있어 옥동석탄 폐석지를 연구지로 설정하였다. 영월은 과거 석탄탄광의 밀집지역으로 지층은 고생대층으로 고생대하부는 주로 석회암, 백운암과 같은 탄산염암으로 구성되며, 쇄설성 퇴적암이 협재한다. 상부고생층은 하부고생대층을 평행부정합으로 덮혀 있다(이현구 등, 2007). 상부고생대층의 하부는 해성층으로 석회암을 협재하며, 상부고생대층은 모두 육성환경에서 쌓인 퇴적암으로 구성

된다. 남한 지역에서 데본기와 하부 석탄기 지층이 결층인 것이 특징이다. 영월지역에서는 하부 고생대층이 남북방향으로 길게 대상 분포하며 지질은 구성암석과 산출되는 화석상이 있어 태백 지역의 동시대 지질과 많은 차이가 있으며 영월 지역에 분포하는 하부고생대 지층은 하부로부터 삼방산층, 마차리층, 와곡층, 문곡층, 영흥층으로 나누어진다(대한지질학회, 1995).

옥동탄광의 위치는 영월군 하동면 주문리(북위 37°8'25", 동경 128°37'8")에 위치하고 있으며 1953년에 개광하였다. 옥동탄광에서 생산되는 무연탄의 열량은 5,000 cal 내외로 질은 우수하였고, 8·15광복 후에 태백선이 부설되어 영월탄전뿐만 아니라 정선탄전의 무연탄을 수송해 왔고, 1956년 영월선의 개통으로 수송이 한결 원활해지면서 개발이 활발하였다(대한광업진흥공사, 1985). 한때에는 종업원이 1,749명, 연간 생산량이 285,000톤(1961년)이었다. 1987·1988년에는 약 40만 톤을 생산해 냈으나 가스 사용과 아파트 건립, 환경오염문제 의식 향상으로 석탄 사용량이 감소됨에 따라 1989년에 폐광하였다. 폐광후 20여 년간 방치에 가까운 관리가 지속되었고 갭구에서는 하루에 60-70톤의 산성광산배수가 유출되고 있어 주변 자연경관에 큰 피해를 주고 있다. 현재 폐석지 전반에 걸쳐 식물이 거의 살지 못하고 있으며 폐석



Figure 1. Sites of Okdong coal mine waste areas(Google Earth).



Figure 2. Acid mine drainage and sites in abandoned Okdong mine areas.

지 가장자리에서 소규모로 식물이 자생하고 있다. 현재 옥동석탄 폐석지 가장자리에서 자생하는 식물은 소나무, 자작나무, 아카시아, 오리나무 등의 목본류와 억새, 사철쭉, 강아지풀, 망초 등 초본식물이 소규모로 자생하고 있어 여름철 집중호우에 많은 침식이 있고 침식방지를 위해 식물복원이 절실히 요구되고 있다.

III. 실험재료 및 연구방법

본 연구는 옥동석탄 광산폐석지 주변을 대상으로 하였는데 석탄 폐석지 가장자리에는 자생하는 식물분포도를 조사하였다. 식물분포도 조사는 옥동석탄 폐석지 가장자리에서 식물이 고르게 분포한 지역을 사방 5 m, 넓이가 25 m²인 두 지역을 선정하여 식물분포도(plant distribution)를 조사하여 우점식물(dominant plant)을 선별하여 실험



Figure 3. Site (A and B) of plant distribution in Okdong mine waste areas.

후보 식물을 선정하여 균근균(Mycorrhizae) 감염 실험과 생육실험을 하였다.

옥동석탄 폐석지 인근에서 나타나는 수계 오염 현상의 원인은 주로 폐 갭도에서 발생하는 산성광산배수이며, 부수적으로 폐석장에서 강수로 인해 용해되는 중금속에 의해서도 수계가 오염되는데(Allen, 1978; Powell, 1988), 갭내 산성광산배수(AMD)의 수질을 분석하였다. 분석항목은 수소이온 농도(pH), 부유물질(SS), 황산염이온(SO₄²⁻), 철(Fe), 수은(Hg), 망간(Mn), 시안(CN), 비소(As), 구리(Cu) 등 총 14개 항목을 분석하였고, 수질오염공정시험법을 적용하여 물질을 분석하였다. 주요 분석기기 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)와 IC(Ion Chromatography)를 사용하였다. 석탄 폐석의 조성성분 분석을 위해 그늘에서 일주일 동안 말린 후, 폐석들을 잘게 부수어 주면서 칭량하여 U. S. No. 10 체로 통과시켜 통과부분과 통과하지 않은 부분으로 구분하여 2 mm 이상 부분만 남을 때까지 반복하고 각 단계에서 남아 있는 양을 칭량하였다. 석탄폐석의 토성분석은 0-10 cm, 10-20 cm으로 구분하여 시료를 채취하고 그늘에서 일주일 간 말린 후, 2 mm 체를 통과한 토양을 이용하여 토성, 총질소량, 식물에 필요한 유효 인산함량, 유기물을 등을 분석하였다. 토양의 삼상(three phase)분석을 통해 식물생장에 대한 가능성을 평가하였고, 밀도측정을 위해서는 토양시료는 100 cc 비이커에 채취한 후, 105 °C에서 질량이

변하지 않을 때까지 건조시켜 측정하였다. 토성은 비중계법, pH value는 활산성과 잠산성을 측정하였다. 이 중 잠산성은 풍건토 5g에 1.0 N KCl 용액 25 ml를 가하여 활산성의 경우와 동일하게 조작하여 1시간 교반 후에 pH meter(Orion 1230)로 측정하였다.

폐석의 유기물함량(organic matter contents)은 105°C에서 24시간 건조시킨 것을 다시 600°C 진기로부터 4시간 동안 회화시킨 후 연소후소실가능량(LOI, loss on ignition)으로부터 계산하였다.

인은 chlorostannous-reduced molybdophosphoric blue color method로 발색시켜 spectrophotometer (SHIMAZU UV-2401PC)로 측정하였으며 총질소량은 Kjeldahl법을 이용하여 측정하였다(Helmke et al., 1996).

공생균(Mycorrhizae)의 효과 성장실험을 위해 석탄폐석을 고압 멸균시켰다. 멸균방법과 멸균기는 121°C에서 1.0-1.1 kg/cm²의 압력을 가하고, 3시간 동안 멸균 (Auto clave, Vision Scientific Co)시켰다. 억제 씨앗은 75% 에탄올로 멸균하여 발아시켜 균의 감염을 방지하였다.

억제의 근권(rhizosphere) 토양에서 분리한 spore (Daniels and Skipper, 1982)의 동정은 GLOMALES 목의 속분류 key(Morton and Benny, 1990)를 활용하였고 분리한 spore(300-400)개를 유묘와 함께 식재하여 유균실험구를 제작하였다. 실험을 위한 석탄폐석 토양시료는 외부에 오염이 적게 된 폐석지 중심부근에서 10-20 cm 깊이의 석탄

토양을 채취하여 실험용 플라스틱 pot에 사용하였다. 사용한 실험용 화분은 원통형 플라스틱(지름 100 mm, 높이 150 mm) 통을 사용하였다. 실험 화분은 빛의 양을 고려하여 일주일을 기준으로 위치를 바꾸어 가며 생육실험을 하였다. 측정요소는 억세의 줄기길이, 생중량(fresh weight), 건조중량(dry weight)을 측정하였다. 생중량은 식물체 전체를 손실되지 않게 채취한 후 하루 정도 풍건 후 생중량을 측정하고, 건조중량은 105°C에서 건조하여 질량이 변하지 않을 때(항량), 건조중량을 측정하였다. 생육실험이 끝난 후, 뿌리에 감염여부를 관찰하기 위하여 사용한 염색시약은 CBE (Chlorazol Black E)와 Trypan blue로 하였으며 현미경(CX40RF200, Olympus Optical)으로 관찰하였다.

IV. 연구결과 및 고찰

1. 옥동석탄 폐석지 식생분포도 조사결과

옥동석탄 폐석지에 가장자리에서 자생하고 있는 초본식물 분포도를 조사한 결과(표 1) 5종의 식물종이 자생하고 있었다. 옥동석탄 폐석지 가장자리 식물 개체수 조사에서 site A와 site B의 개체수가 각각 18개와 22개의 개체수였고, 그 중 *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens* Rendle(억새)의 개체수가 67%를 차지하였고, *Artemisia capillaris*(사철쭉)은 12개로 17%, *Setaria viridis*(강아지풀)은 5개로 7%를 점유하고 있었다.

Table 1. Plants distribution of the Okdong coal mine waste areas.

Plant species	Areas			Sum
	Site A	Site B		
<i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>purpurascens</i> (Andersson)Rendle	18	22		40(67%)
<i>Artemisia capillaris</i>	5	7		12(17%)
<i>Setaria viridis</i>	3	2		5(7%)
Other grass	3	3		6(9%)
Total	29	34		63(100%)

2. 식물분포도 조사에 의한 억새를 생육실험 후보 식물 선정

옥동광산 석탄폐석지 식물분포도 조사 결과(표 1), 옥동석탄 폐석지의 우점식물이 억새(*Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*(Andersson) Rendle)로 조사되었다. 일반적으로 억새는 근락 형태를 이루고 있으며 뿌리는 다년생이고 토양을 잡아주는 능력과 석탄폐석지와 같은 건조하고 양분이 부족한 토양에서도 잘 견디는 식물로 알려져 있다(백수진·박은영, 2005; 전상호 등, 2011). 옥동석탄 폐석지에 자생하는 억새의 근권(rhizosphere) 토양에서 균근균 포자(*Mycorrhizae* spore)가 많이 발견되었고 균근균 포자는 건조하고 양분이 부족한 토양에서 효과가 있다는 연구 결과가 있다(Shrestha *et al.*, 1996). 억새가 광산 폐석지에 폐석 침식을 방지할 적합한 초본식물(herbaceous plant)로 판단되어 생육실험 후보식물로 선정하였다.

3. 옥동석탄 폐석 입자크기 분석결과

폐석의 크기 분석결과(표 2), 직경이 5 cm 이상의 입자 5.96%, 2-5 cm 사이의 입자 10.96%, 2cm-2mm 사이의 입자가 30.64%, 2 mm 이하의 입자가 52.45% 구성되어 있었다. 입자가 2 cm 이하가 80% 이상으로 나타났다.

4. 옥동석탄폐석 물리화학적 분석결과

옥동폐석 토성의 크기 분포를 보면(표 3), Sand 62-63%, Silt 30-31%, Clay 4-6%로 구성되어 사양토에 가깝고 고체, 액체, 기체상을 나누어 볼 때 공극으로 인한 기체 부피는 27-29%, 액체 부피는 10-11%, 고체 부피는 약 60%를 차지하고

있다. 고체, 액체, 기체의 차지하는 비율이 표토(0-10 cm)와 심토(10-20 cm)에서 고체상의 비율이 높은 반면에 액체상과 기체상이 고체상에 비해서 현저히 낮았다. 토성의 용적 밀도는 표토 1.68 g/cm³, 심토 1.72 g/cm³로 일반산림 토양(0.8-1.2g/cm³) 보다 높아 뿌리 발육이 불리한 상태로 평가할 수 있다(표 4). 폐석의 pH value 값은 활성성(active pH)이 4.0 초반 이었고, 잠산성(potential pH)이 3.0 중반으로 차이가 약 0.5 정도 잠산성이 낮은 것으로 나타났다. 토양의 pH는 식물에게 중요하므로 잠재해 있는 수소이온까지 측정되는 잠산성을 중요하게 다룰 필요가 있다(전상호 등, 2011). 폐석은 보통 초기에는 약산내지 약염기성을 나타내지만(Van Rensburg, 1998) 황철광이 대기 중에 노출되면서 산소와 결합하여 pH가 낮아지면서 산성으로 변화 수증 생태계를 교란시켜 큰 피해를 준다고 보고한바 있다(William, 1978). 이러한 pH는 식물이 정착하더라도 산성 때문에 폐석에서 중금속이 용출되고 수소이온이 뿌리의 발육을 저해하고 식물생장을 억제한다. 이렇게 식물생장에 불리한 토양에 식물생장에 유용한 균근균(*Mycorrhizae*)을 감염시켜 식재하면 정상적인 생육을 기대할 수 있다. 또한 토양의 pH 조절을 하여 식물의 정상적인 생육을 위해서 석회나 하수오니를 이용할 필요가 있다. 폐석의 토양 pH의 교정이 어려울 경우 강한 산성에서도 잘 적응하는 균근균을 이용해 식물도입이 필요하다. 폐석내 총질소와 식물이 필요한 유효인산의 함량은 일반 산림토양과 크게 차이가 없어 식물생장에는 한계요인이 되지 않는다고 판단한다. 유기물함량(organic matter)은 연소후소실가능량(LOI, loss on ignition)으로 측정한 결과(표 4), 유기물함량

Table 2. Grain size range of coal mine waste areas in Okdong, Youngwol, Gangwon province, Korea(mean±S.D).

Size	More than 5 cm	2 cm-5 cm	2 cm-2 mm	Under 2 mm	Sum
Mass(g)	564.8 ± 12.9	882.1 ± 10.30	2628 ± 11	4480 ± 10	8556 ± 6
Rate(%)	5.96 ± 0.85	10.96 ± 0.54	30.64 ± 1.33	52.45 ± 2.00	100.00 ± 0.02

Table 3. Grain size distribution and three phase of coal mine waste areas in Okdong, Youngwol, Gangwon province, Korea. (mean±S.D)

Depth	Grain-size distribution(%)			Three phase (%)			Bulk density (g/cm ³)
	Sand	Silt	Clay	Pore	Water Content	Solid	
0-10 cm	63.9 ± 1.6	31.6 ± 0.7	4.53 ± 0.15	29.5 ± 0.9	10.3 ± 0.9	60.2 ± 1.0	1.68 ± 0.10
10-20 cm	62.5 ± 2.3	30.7 ± 1.5	6.80 ± 0.46	27.8 ± 1.8	11.3 ± 1.2	60.9 ± 1.7	1.72 ± 0.08

Table 4. pH and nutrients analysis of coal mine waste areas in Okdong, Youngwol, Gangwon province, Korea(mean±S.D).

Depth	pH Value		OM (%)	T-N (%)	Available P ₂ O ₅ (mg/kg)
	Active pH	Potential pH			
0-10 cm	4.12 ± 0.07	3.65 ± 0.10	10.56 ± 1.00	0.15 ± 0.02	16.00 ± 0.50
10-20 cm	4.06 ± 0.04	3.53 ± 0.14	11.34 ± 0.16	0.12 ± 0.02	2.10 ± 0.01

은 산의 토양(6-8%)과 비교하여 볼 때 석탄폐석은 10% 이상으로 식물이 살기에는 충분한 양으로 나타났다.

5. 옥동석탄 폐석의 산성광산배수 분석결과

옥동광산 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD) 분석결과(표 5), pH value 값은 4.0 초반으로 나타났다. 해로운 유해물질이나 중금속 함량은 검출되지 않았거나 기준 이하의 함량을 보였다. pH가 낮은 이유는 SO₄⁻²와 Fe⁺²의 화학반응에서 유래되었다고 판단한다. 광물에 포함되어 있

는 철 황화물인 pyrite(FeS₂)가 대기 중에 O₂와 결합하여 산화되어 철(Fe⁺²)와 황산염(SO₄⁻²) 이온으로 이온화되면서 수소이온(H⁺)을 증가시켜 pH를 낮추게 되는 원인이 된다(과학기술부, 1999; Stumm and Morgan, 1981). 갱내 산성광산배수는 암석층을 스며들어가 중금속을 용출시키고 황산염과 같은 유해물질이 하천으로 유입되면 주변 수계가 황갈색 침전물로 오염시킨다(박영구, 2003). 또한 수소이온 pH가 4.0 이하에서는 하천에서 서식하는 물고기 및 미생물의 생존이 어렵고, 하천의 콘크리트 구조물을 부식시키기도 한

Table 5. Acid mine drainage analysis of Okdong coal mine areas. (unit : mg/L, mean ± S.D)

Item	pH	SS	SO ₄ ⁻²	Fe	Hg	Mn	CN	
Okdong mine AMD	No.1	4.12	11.00	1,450	136.5	ND	13.50	ND
	No.2	4.11	12.10	1,349	127.5	ND	12.56	ND
	No.3	4.35	12.62	1,446	135.5	ND	13.70	ND
	Average	4.19 ± 0.14	11.9 ± 0.8	1,415 ± 57	133.2 ± 4.9	ND	13.25 ± 0.61	ND
Item	Ca	Cd	Al	Pb	Cr	As	Cu	
Okdong mine AMD	No.1	95.40	ND	8.10	0.003	ND	0.001	0.06
	No.2	96.23	ND	8.82	0.004	ND	ND	0.07
	No.3	94.43	ND	8.25	0.004	ND	0.001	0.07
	Average	95.4 ± 0.9	ND	8.39 ± 0.38	0.004 ± 0.001	ND	0.001 ± 0.001	0.07 ± 0.01

다(박영구, 2003). 또한, 관리의 소홀로 인해 갯도와 폐석 및 광미의 폐석장으로부터 침출되는 폐수가 토양 및 수계를 통해 이동하여 지하수, 하천, 토양 및 농작물 등 다양하게 오염시키는 광해가 발생하게 되었고(Davies, 1983), 광미 분진의 비산으로도 확산되는데, 폐석내에 함유되어 있는 유해광물 이화학적 풍화를 통하여 황산이온(SO_4^{2-})나 중금속 이온(M^{+X})들을 내어 놓고 이로 인해 주변의 하천수와 지하수 오염, 토양의 산성

화 및 기준 이상의 중금속 오염 등의 환경문제를 일으키게 된다(Jung *et al.*, 1996 ; Cidu *et al.*, 1997).

6. 균근균 감염을 이용한 역새(*Miscanthus sinensis*) 생육실험 결과

1) 광산폐석지 식물의 근권토양에서 포자 분리 결과

폐석지 역새의 근권토양(rhizosphere)에서 포자

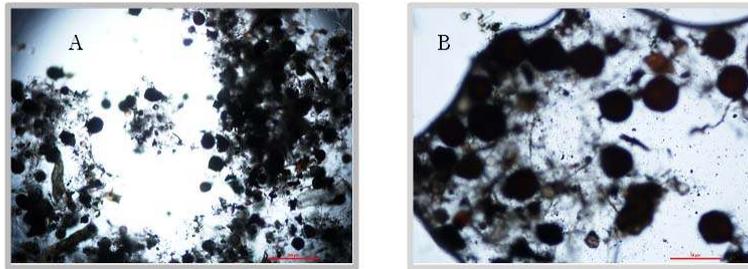


Figure 4. Spores collected from *Miscanthus sinensis* rhizosphere soil in mine waste areas (A : X10, B : X100).

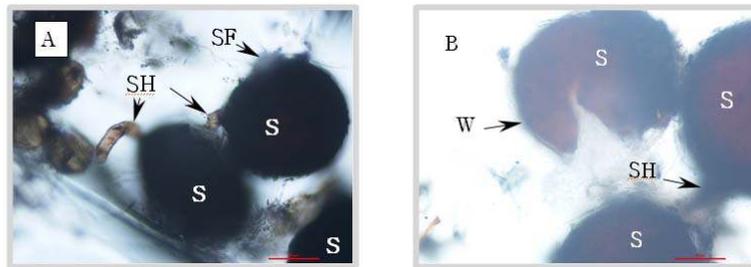


Figure 5. Chlamydo-spore of *Glomus* sp. (A : X400, B : X1000)
(S : spore, SH : subtending hyphae, SF : surface fine, W : wall layer)

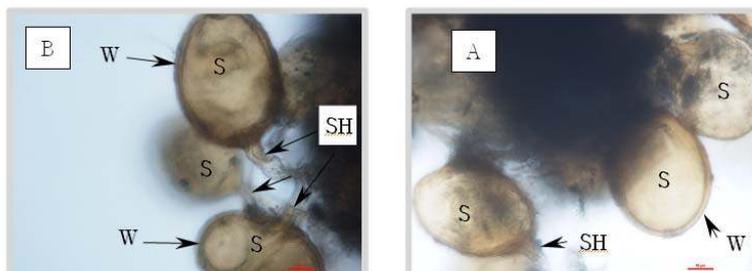


Figure 6. Intact spores in sporocarp of *Sclerocystis* sp. glebal hyphae and smooth surface ornamentation (A and B : X1000).

(S : spore, SH : subtending hyphae, SF : surface fine, W : wall layer)

(spore)를 분리하여 포자의 형태, 포자벽의 구조, 포자벽의 수, 균사(subtending hyphae)와 포자(spore)와의 부착점 등으로 동정한 결과, *Glomus*와 *Sclerocystis*의 두 가지 속이 발견되었다(그림 4, 5, 6, 7). 고등식물과 공생하는 Arbuscular Mycorrhizal Fungi(AMF)는 양분이 부족한 토양, 거칠은 토성, 완충능력 부족, 수분보유력(water holding capacity)이 낮은 곳에서 유용하다(Hossner and Hons, 1992). 특히, 척박하고 건조한 한 환경인 광산폐석 주변의 교란지에는 *Glomus*가 많고(Rose, 1981; Daft and Nicolson, 1974), 사구에

사는 식물에는 *Gigaspora*와 *Acaulospora*가 있다(Koske and Halvorson, 1981).

2) 균근균 감염을 이용한 역세의 생육실험 결과 역세 근권 토양에서 균근균 포자(*Mycorrhizae* spore)를 분리하여 (그림 8)과 같이 거름종이에 붙은 균근균을 300-400개를 유묘와 함께 식재하여(그림 9) 생육실험을 하였다. 유균과 무균처리 생육실험은 3월-8월까지 이루어졌으며 줄기길이 측정은 월말에 측정하고, 생중량(fresh weight, fw)과 건중량(dry weight, dw)은 8월말에 식물체

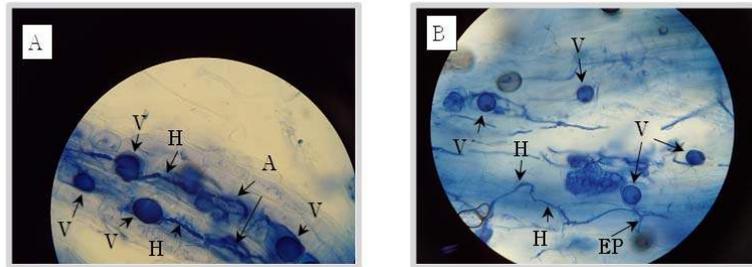
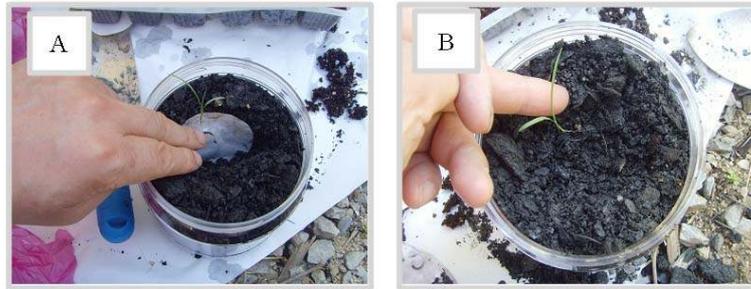


Figure 7. Characteristics of *Glomus* sp. in Roots. Oval vesicles, which usually form between root cortex cells, are present in many cases. These vesicles persist in roots and often develop thickened and/or multilayered walls. (A and B : X400, V : vesicle, H : hyphae, A : arbuscular, EP : entry point)



Figure 8. Separation process of spore from the mine waste rhizosphere.

A and B : Picks the soil where the plant lives in the abandoned mine waste edge.
 C : During 30 minute, puts the soil in the water, and skips the soil in sieve.
 D : Mixes the particle and the water which comes to skip in sieve, and separates during 5 minutes (2,000 rpm) with the centrifugal machine. Throws away debris and again separated during 2minutes with the centrifugal machine for 2000 rpm of putting sugar aqueous 50%.
 E and F : Skips the liquid with the filter paper, and the particle which is caught to the filter paper is the spores.



A : Infected experimental pot

B : Uninfected experimental pot

Figure 9. Experiment pots of infected and uninfected *Miscanthus sinensis*.

A : Infected experimental plant

B : Uninfected experimental plant

Figure 10. Experiment pots of infected and uninfected *Miscanthus sinensis*.

A : Experiment site (May)

B : Experiment site (July)

Figure 11. Experiment sites of *Miscanthus sinensis*.

의 각 기관이 소실되거나 상하지 않게 하여 채취한 후에 측정하였다.

3) 균근균 포자 분리 및 채취과정

제작한 유균처리구와 무균처리구 각각 20개를 제작하고 생육과정에서 유균처리구 2개, 무균처리구 15개가 사멸하였다(표 6). 유균처리구 90%, 무균처리구 25%가 생존했다. 유균처리보다 무균

처리구가 더 사멸한 이유는 양분과 수분공급이 부족한 것으로 판단된다. 균근균은 90%가 육상 식물 뿌리에 공생관계를 형성하고 있는데(이관녕, 2010), 수분 및 기타 토양 양분의 흡수효율을 좋아하고 기주식물과 균근의 성장과 생존에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 보고되었다(Smith and Read, 2008). 이러한 감염 균근은 식물의 수분과 양분 흡수능력, 양분고정, 뿌리 병원균에 대

Table 6. Survival rate of *Micanthus sinensis* in coal mine waste.

Treatment pot	No. of treated	No. of failure	No. of survival	Survival rate (%)
Infected plant pot	20	2	18	90
Uninfected plant pot	20	15	5	25

한 내성을 증가시킨다고 하였다(Johnson *et al.*, 2001).

4) 균근균 감염처리에 따른 생육결과

토양에서 분리한 포자(spore)를 유묘와 함께 식재한 유균처리구와 포자와 함께 식재하지 않은 무균처리구를 5개월간 생장 실험한 결과, 줄기길이 생육을 측정 비교에서(그림 13), 균근균(*Mycorrhizae*)을 감염시킨 식물체가 감염시키지 않은 식물체보다 약 1.6배가 더 성장한 것으로 나타났다.

생육한 줄기길이(초장)를 평균 줄기생장 증가율(cm/month)로 환산하여 두 종류의 처리구를 비교한 결과(그림 14), 줄기 길이의 평균 증가율(cm/month)이 무균처리의 식물체는 4.1 cm/month, 유균처리의 식물체는 6.6 cm/month였고, 감염시킨 유균처리 식물체가 2.5 cm/month만큼 더 효과적인 생육을 했다. 균근균에 감염된 식물체가 감염되지 않은 식물체보다 약 60% 평균 생육 속도가 더 빨랐다.

생중량 측정 비교한 결과(그림 15), 균근균을 처리한 식물체에서는 뿌리와 줄기에서 각각 6.134 g, 7.452 g이고 식물체의 총생중량이 13.586 g이었다.

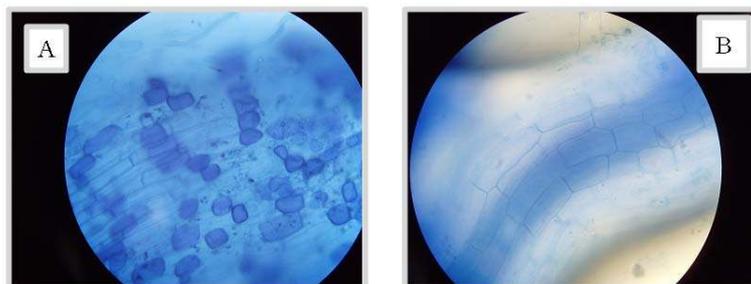
균근균을 처리하지 않은 식물체에서 뿌리와 줄기에서 각각 4.442 g, 6.612 g이고 식물체 총생중량이 11.205 g이었다. 감염된 식물체와 감염되지 않은 식물체의 총생중량 차이는 2.281 g이었다.

평균 생중량 증가율($g^{fw}/month$)을 비교해 본 결과(그림 16), 유균처리한 식물체는 $2.264 g^{fw}/month$ 이고, 무균처리한 식물체는 $1.867 g^{fw}/month$ 이고, 평균 생중량 증가율($g^{fw}/month$)의 차이는 $0.397 g^{fw}/month$ 이다. 유균처리한 식물체가 처리하지 않은 식물체보다 평균 생중량 증가율이 약 21% 더 높았다. 유균처리한 식물체가 생중량을 증가시키는데 효과가 있는 것으로 판단할 수 있다($p \leq .05$).

건중량 측정된 결과(그림 17), 유균처리한 실험구의 식물체의 뿌리와 줄기의 건중량은 1.146 g, 1.752 g이고 식물체 총건중량은 2.934 g이었다. 무균처리한 식물체의 뿌리와 줄기의 건중량은 0.979 g, 1.247 g, 식물 총건중량은 2.211 g이었다.

유균처리한 식물체의 건중량이 무균처리한 식물체의 건중량보다 0.723 g이 더 많은 것으로 나타났다($p \leq .05$).

평균 건중량 증가율($g^{dw}/month$)을 환산해서 비교한 결과(그림 18), 유균처리한 식물체의 평균



A : Root of infected plant B : Root of uninfected plant

Figure 12. Observation of *Micanthus sinensis* root (X400).

건중량 증가율이 0.489 g^{dw}/month이고, 무균처리한 식물체의 평균 건중량 증가율은 0.368 g^{dw}/month였다. 차이가 0.121 g^{dw}/month로 유균처리

한 실험구의 식물체가 무균처리한 식물체의 건중량보다 31% 더 많았다.

본 연구에서 균근균을 처리한 식물체가 평균

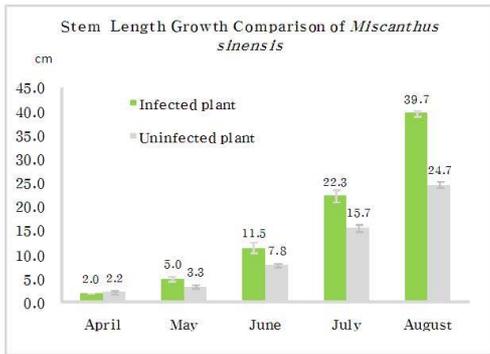


Figure 13. Stem length growth comparison of *Miscanthus sinensis* in coal mine waste.

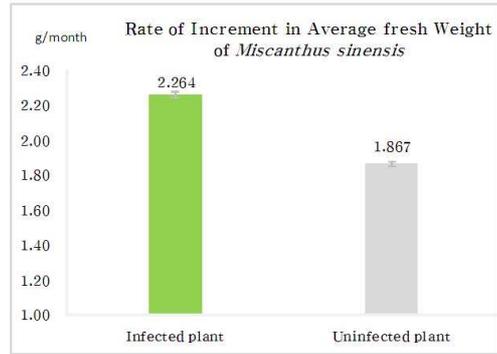


Figure 16. Rate of increment in average fresh weight of *Miscanthus sinensis* in coal mine waste.

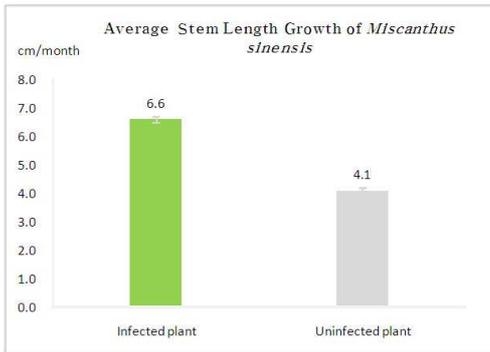


Figure 14. Average stem length growth rate comparison of *Miscanthus sinensis* in coal mine waste.

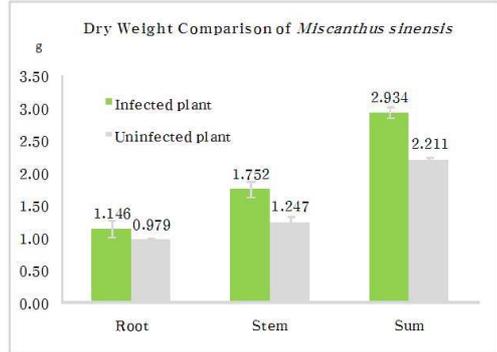


Figure 17. Dry weight comparison of *Miscanthus sinensis* in coal mine waste.

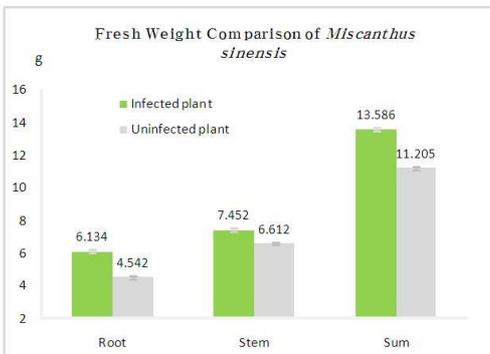


Figure 15. Fresh weight(*f*w) comparison of *Miscanthus sinensis* in coal mine waste.

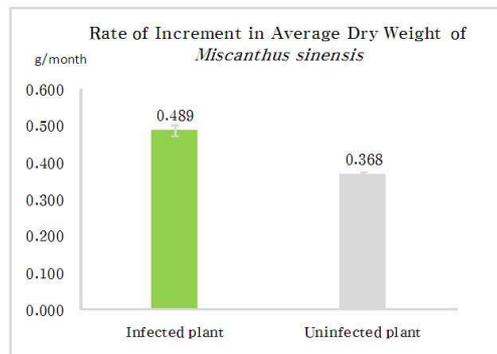


Figure 18. Rate of increment in average dry weight of *Miscanthus sinensis* in coal mine waste.

줄기길이 증가률(cm/month), 평균 생중량 증가률($g^{fw}/month$) 및 평균 건중량 증가률($g^{dw}/month$)이 무균처리한 식물체보다 더 생육을 한 것으로 보아 균근균이 토양 속에 있는 양분 및 수분 등을 식물체에 적극적 이동을 수행했다고 사료된다.

균근균은 대부분 식물의 뿌리와 공생관계를 갖고 수분 및 무기양분 이동을 촉진시킨다고 하였다(Menge, 1981). 또한 인산 흡수는 곰팡이와 숙주식물의 원형질막을 통한 인산 이동이 인산흡수를 촉진시키는 기작일 가능성이 높다고 하였다(Cox and Tinker, 1976).

양과실험에서 균근균을 처리한 식물체가 줄기생장, 생중량, 건중량이 더 높았고, 인산을 높게 시비하였음에도 토양에 인이 결핍되었다고 하였으며 광합성에 의한 증산율도 높았다고 하였다(Nelsen and Safir, 1982; Graham and Syvertsen, 1984).

광미에는 유기양분(organic matter), 인(P), 질소(N), 수분보수능 등이 부족하여(Li and Daniels, 1994), 균근균을 처리하지 않은 식물체는 생장이 둔화되는 현상이 있었지만 균근균에 감염처리한 식물체는 여러부분에서 더 활발하게 성장하였다.

균근균이 토양내에 존재하는 양분과 수분을 균사를 통해 식물체내로 적극적 이동시켰을 것으로 사료된다. 유묘가 폐석지에 정착을 위해서는 균근균의 역할이 매우 중요하다. 생육실험에서 균근균을 유묘에 감염시켜 폐석지 식생도입에 대한 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 환경산업 전문인력 양성 사업으로 지원되었습니다.

VI. 결 론

옥동석탄 광산 폐석지의 폐석분석과 식물의 생육실험을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

폐석에서 흘러나오는 침출수를 분석한 결과, 함유된 중금속은 기준치 이하였지만 식물생육에 중요한 요소인 pH가 4.0 초반으로 식물생육에 어려운 환경을 가지고 있고 여름철 집중호우 시 석탄 폐석의 대량 유출이 우려된다.

본 연구에서 유묘에 균근균으로 감염처리한 시험구에서 90%의 생존율을 보였고, 감염처리하지 않은 시험구에서 25% 이하의 생존율을 보였다. 이러한 결과로 볼 때 식물의 유묘가 정착될 때 균근균의 역할이 중요하게 작용한다고 판단할 수 있다.

또한 균근균에 유균처리한 식물체의 생육실험에서 감염된 식물체의 줄기길이, 평균생장률, 생중량, 평균증가률, 건중량, 평균증가률이 무균처리한 식물체보다 효과적인 생육결과가 있는 것으로 보아 균근균이 식물 생육에도 효과가 있는 것으로 사료되어 균근균으로 광산폐석지에 식물을 도입을 통해 식물로 피복을 한다면 강풍에 광미 날림이나 폭우로 인한 침식에 효과가 있을 것으로 판단된다.

균근균 감염실험에서는 유묘가 토양에 잘 정착하도록 양분과 수분 공급을 도와주며 건조하고 척박한 토양에서도 식물이 생육할 수 있도록 본 연구에서 알 수 있었다. 본 연구에서 활용된 내생공생균(*Endomycorrhizae*)은 현재 기술로는 대량 증식이 불가능하다는 한계점을 가지고 있어 대량 증식을 위한 기술개발이 필요하다. 생태학적 관리가 기존의 광산폐석지 관리인 물리·화학적 관리보다는 식물을 이용한 친환경적인 측면에서 효과적인 관리방법으로 판단된다.

인 용 문 헌

- 김경웅·백성희·이현구. 1995. 유구-광천 금은광화대 지역에서의 토양 및 농작물의 중금속오염. *자원환경지질* 28 : 389-394.
- 과학기술부. 1999. 환경복원 및 재생기술(폐광산 복원기술). 최종보고서.

- 대한지질학회. 1995. 한국의 지질. 시그마프레스. 802p.
- 대한광업진흥공사. 1985. 광업요람.
- 민정식·정영욱·이현주·이동남. 1997. 광산지역 광해조사와 대책연구. 자원연구소, 연구 보고서. KR-97(C)-32, 479p.
- 백수진·박은영. 2005. 역새를 이용한 광산폐석지 침식방지에 관한 연구. 전국과학전람회. 중앙국립과학관.
- 박영구. 2003. 폐광지 갱내산성폐수 처리 기술개발(II). 강원지역환경기술개발센터.
- 봉화군. 2003. 봉화금정광산 수해복구공사 기본 및 실시설계 보고서.
- 양운진. 1990. 환경식물학-토양오염과 식물. 동화기술. pp.34-41.
- 이서래·송기준. 1986. 온산공단 주변 농작물의 중금속 농도조사. 한국환경농학회지 5 : 43-47.
- 이관영. 2010. 생균근균의 접종이 폐광지역에서 소나무(*Pinus densiflora*)의 생장과 균근균의 군집 구조에 미치는 영향. 교원대학교 석사 학회논문.
- 이현구·문희수·오민수. 2007. 한국의 광상. 대우학술총서.
- 유홍일·서운수·전성환·이민효·윤순주·허성남·김수연. 1988. 우리나라 농토양 및 현미중 중금속 자연함유량에 관한 조사연구. 국립환경연구원보 10 : 155-163.
- 정명채·전효택. 1998. 삼보 연-아연광산 주변 농경지에서의 중금속함량의 계절적 변화와 환경오염. 한국자원공학회지 35 : 19-29.
- 정선군. 2005, 2004. 폐금속광산(함창)광해방지 사업기본 및 실시 설계보고서.
- 전상호·박길옥·정병학. 2011. 광산폐석지 식생복원을 위한 하수오니 활용. 한국폐기물학회지 28(4) : 349-357.
- 환경부. 2005. 폐금속광산 표준복원 모델 개발. 최종보고서.
- Allen, J. 1978. Derelict lands of Indiana : A survey to determine the extent and environmental effect of derelict lands resulting from the surface extraction of coal, Indiana Department of Natural Resources.
- Bergholm, J., and E. Steen. 1989. Vegetation establishment on a deposit of zinc mine wastes. Environ. Pollut. 56 : 127-141.
- Cidu, R., Caboi, R., Fanfani, L., and Frau, F. 1997. Acid drainage from sulfides hosting gold mineralization (Furei, Sardinia), Environ. Geol. 30 : 231-237.
- Cox, G., and P. B. Tinker. 1976. Translocation and transfer of nutrients in vesicular arbuscular mycorrhiza. I. The arbuscule and phosphorus transfer : A quantitative ultrastructural study. New Phytol. 77 : 371-378.
- Daft, M. J. A., and T. H. Nicolson. 1974. Arbuscular mycorrhizas in plants colonizing coal wastes in Scotland. New Phytol. 73 : 1129-1137.
- Daniels, B. A., and H. D. Skipper. 1982. In : Methods and principles of mycorrhiza research. Ed. by : Shenck, N. C., The American Phytopathological Society, St. Paul, M. N. pp. 29-35.
- Davies, B. E. 1983. Heavy Metal contamination from base metal mining and smelting : implications for man and his environment. In Applied Environment Geochemistry (Ed., I. Thornton), Academic Press, London, p. 425-462.
- Graham, J. H., and J. P. Syvertsen. 1984. Influence of vesicular arbuscular mycorrhiza on the hydraulic conductivity of roots of two citrus root stock. New Phytol. 97 : 277-284.
- Helmke, P. A., C. T. Johnston, R. H. Loeppert, A. L. Page, P. N. Soltanpour, M. E. Sumner,

- M. A. Tabatabai and D. L. Sparks. 1996. Methods of soil analysis. In D. L. Sparks (ed.) Soil Science Society of America. No. 5. America Society Agronomy 1390p.
- Hossner, S. R., and F. M. Hons. 1992. Reclamation of mine tailings. *Advances in Soil Science*, 17 : 311-348.
- Jung, M. C., and I. Thornton. 1996. Heavy metal concentration of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Kor. *Appl. Geochem* 11 : 35-59.
- Johnson, D. B., R. Stewart, B. H. Kevin and L. Eigil. 2001. Isolation and phylogenetic characterization of acidophilic microorganisms indigenous to acidic drainage waters at abandoned Norwegian copper mine, *Environmental Microbiology* 3(10) : 630-637.
- Koske, R. E., and W. L. Halvorson. 1981. Ecological studies of vesicular arbuscular mycorrhizae in a barrier sand dune. *Can. J. Bot.* 59 : 1413-1422.
- Li, R. S., and W. L. Daniels. 1994. Nitrogen accumulation and form over time in young mine soils. *J. Environ. Qual.* 23 : 166-172.
- Menge, J. A., W. M. Jarrell, C. K. Labanauskas, J. C. Ojala, C. Huszar, E. L. V. Johnson and D. Sibert. 1981. Predicting mycorrhizal dependency of troyer citrange on *glomus fasciculatus* in california citrus soils and nursery mixes. *Soil Sci. Am. J.* 46 : 762-768.
- Morton, J. B., and G. L. Benny. 1990. Revised classification of arbuscular mycorrhizae fungi (Zygomycetes) : A new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomineae. *Mycotaxon* 37 : 471-491.
- Nelsen, C. E., and G. R. Safir. 1982. The water relations of wellwatered, mycorrhizal, and non-mycorrhizal onion plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107(2) : 271-274.
- Powell, J. D. 1988. Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States. *Env. Geol. Water Sci.*, 11 : 141-152.
- Paul, E. A., and E. C. Francis. 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. 394p.
- Rose, S. L. 1981. Vesicular-arbuscular endomycorrhizal associations of some desert plants of Baja California. *Can. J. Bot.* 59 : 1056-1060.
- Shrestha, Y. H., T. Ishii., I. Matsumoto and K. Kadoya. 1996. Effect of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi on satsuma mandarin the growth and water stress tolerance and fruit development and quality. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 64(4) : 801-807.
- Stumm, W., and J. J. Morgan. 1981. *Aquatic Chemistry : An introduction emphasizing equilibria in natural waters*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, p.780.
- Smith, S. E., and D. J. Read. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*, 3rd edition. Academic Press, London.
- Thorne, M. E., B. A. Zamora and A. C. Kennedy. 1998. Sewage sludge and mycorrhizal effect s on secar bluebunch wheatgrass in mine spoil. *J. Environ. Qual.* 27 : 1228-1233.
- William, T. P. 1978. Reclamation of coal-mined land in Appalachia *Journal of Soil and Water conservation*, 33(2) : 58-61.
- Van Rensburg, L., R. De Sousa Correria, J. Booyesen and M. Ginster. 1998. Revegetation on a coal fine ash disposal site in South Africa. *Journal of Environmental Quality*, 27 : 1479-1486.