

## 무복토 직파에 의한 석탄 폐광지의 생태적 복원 기술 개발

정용호 · 임주훈 · 이임균 · 김혜수

국립산림과학원 산림복원연구과

### Development of the Ecological Restoration Technique using Direct Seeding without Soil Molding in Abandoned Coal Mine Areas

Jeong, Yongho · Lim, Joocheon · Lee Imkyun and Kim, Hyesoo

Div. of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute.

#### ABSTRACT

This study was carried to select the proper vegetation base materials which improve soil quality in abandoned coal mine areas. Also, we aimed at the feasibility of the direct seeding method without soil molding for the ecological restoration in those areas. We set total eight plots within the study site established on an abandoned coal mine area near Taebaek city, Gangwon province in April 2006. The plots were classified as two groups(straw mats mulching and no mulching), and the four treatments (C; control, MI; microbial inoculation, WC; wood chip, OF; organic fertilizer) were applied in each two groups for the soil conditioning. The survival of *Pinus densiflora* was highest among other species(*Betula platyphylla* var. *japonica*, *Amorpha fruticosa* and *Arundinella hirta*). For the non straw mat, the survival rate of *Pinus densiflora* seedlings was highest in the WC treatment(1,756trees/m<sup>2</sup>). For the straw mat, survival rate of *Pinus densiflora* seedlings was also highest in the WC treatment (1,622trees/m<sup>2</sup>). In addition, for the non straw mat, the height growth of *Pinus densiflora* seedling was highest in the OF treatment(12.4±3.9cm). For the straw mat, the height growth of *Pinus densiflora* seedling was also highest in the OF treatment(18.7±5.3cm). In general, organic fertilizer treatment with the straw mat was most effective for seedling growth. Also, we suggested that the direct seeding

---

**Corresponding author** : Jeong, Yongho, Div. of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute, 57, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 130-712, Korea,  
Tel : +82-2-961-2631, E-mail : green@forest.go.kr

**Received** : 26 October, 2009. **Accepted** : 7 December, 2009.

method without soil molding could be sufficiently possible for revegetating abandoned coal mine, Korea.

Key Words : *Minelands, Mulch, Organic fertilizer, Phytoremediation, Pinus densiflora.*

## I. 서론

국내 석탄 산업은 1980년대 말 이후 에너지산업의 여건이 변화됨에 따라 급격하게 쇠퇴하였다. 실제 석탄산업의 최대 부흥기인 1987년에는 총 363개소의 탄광이 있었으나 10년 뒤인 1996년에는 11개소로 급감하였고, 2005년에는 단 8개소만이 정상적으로 가행(可行)됨에 따라 갱도 및 광산폐기물 상당수가 그대로 방치되었다(양재의, 2004; 에너지경제연구원, 2007). 그 결과, 휴·폐탄광지에 널리 산재되어 있는 광산폐기물은 직접적으로 주변 토양환경을 오염시키고 있으며, 갱내수와 폐석에서 용출되는 산성의 광산배수(AMD; acid mine drainage)는 2차적으로 지하수와 하천을 광범위하게 오염시키고 있다. 이 밖에도 도로변과 민가 부근에 폐석이 적재 상태로 방치됨으로써 분진이 날리는 등 광산폐기물로 인한 피해는 유형과 영향 범위 등의 면에서 매우 다양한 특성을 보이고 있다(정재춘·이무춘, 1997). 이렇게 석탄광산의 휴·폐광으로 인해 많은 문제가 제기되자 정부는 1995년에 광해복구 전담기관으로 신설한 석탄합리화사업단(현 한국광해관리공단)을 통해 폐공가 및 폐시설물 철거, 폐석 유실방지 및 녹화, 갱도 유출수 정화, 지반 침하방지 등 다각적인 광해방지 사업을 실시하고 있다(이재천 등, 2003).

석탄광의 기반암인 흑색 셰일은 쇄설성 변성퇴적암이며 점토광물을 다량 함유하고 있다(Turekian and Wedepohl, 1961; Vien and Tourtelot 1970; 김명희 등, 1998). 이로부터 풍화된 폐석은 유기물 함량이 낮고 양료가 결핍되어 있으며, 토성이 거칠고 완충능력이 나빠며 수분보유력(water holding capacity)이 낮다(Hossner and Hons, 1992).

게다가 이화학적 성질의 불량, 고열, 건조 및 높은 산도(낮은 pH)는 식생의 정착을 어렵게 하고, 조성이 굵으며 중금속 함유량이 많은 토양조건은 식물의 뿌리활착 및 생장에 매우 불리하다. 이렇게 척박한 지역에서의 성공적인 식생복원을 위해서는 토양 특성을 개선하고 폐석지 환경에 내성을 갖는 수종을 선발하여 복원하는 것이 바람직 한데, 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(Logan, 1992).

현재 우리나라에서 시행하고 있는 폐석터미 녹화방법은 폐석 위에 절취시 발생한 표토나 표토와 유사한 일반 흙을 최소 30cm 이상 복토를 한 다음 파종과 식재를 하는 것이 마치 표준화된 것처럼 되어 있다. 그러나 현장에서 파종 및 식재 전 복토를 위한 토양 확보가 점차 어려워지고 있으며, 토양을 무리하게 확보할 경우 2차적인 환경 훼손의 우려도 높다(양재의 등, 2007). 또한 복토 후 식재한 식물이 뿌리를 깊게 내리지 못하여 건조 피해를 입기도 하며(김혜주 등, 2000), 실제로 복토한 토양의 유실, 식재목의 성장불량 및 고사가 심하여 보식을 하는 현장을 어렵지 않게 볼 수 있다. 현재 흔히 적용되고 있는 이러한 복토방법은 실효성이 낮기 때문에 복토를 포함한 녹화방법 전반에 걸쳐 개선이 필요한 것으로 사료된다. 따라서 폐광지의 식생녹화시 복토를 하지 않거나, 하더라도 복토 깊이를 낮추고 복토량의 최소 투입이 가능한 저비용·고효율인 친환경적 공법으로의 전환이 필요하다고 판단된다(정용호, 2008; 2009a; 2009b).

문헌 및 현장조사를 통해 볼 때, 석탄 폐석지와 같은 식물 생육에 열악한 환경에서의 적응력이 다른 수종에 비해 높아 식생복원시 성공가능

성이 높은 식물로는 소나무, 자작나무, 국수나무, 참싸리, 족제비싸리, 병꽃나무, 산딸기 등(민재기 등, 2004; 2006)과 박달나무, 물박달나무, 산딸기, 조록싸리, 참싸리, 호랑버들 등(김보현 등, 2000)의 목본류와 역새, 새, 솔새 등의 초본류 등을 들 수 있다(민재기 등, 2004; 2006). 본 연구의 목표는 이러한 식생복원 기능 수종에 대한 기존 연구 결과들을 참고하여 소나무, 자작나무, 족제비싸리 등 3종의 목본과 새(안고초) 1종의 초본 종자를 무복토 환경에 파종한 후, 몇 가지 식재기반체를 처리, 이에 따른 종묘의 활착율 및 성장 효과를 비교함으로써 폐광지의 식생복원 시 복토량을 최소화하고 주변경관과 조화를 이루며 생태적 일체화도 가능한 저비용·고효율의 식생 생육기반 조성 및 착생기술을 개발하는 것이다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 조사 지역은 강원도 태백시 황지동 산 173-1번지(N 37°11' 21.88", E 128°58' 59.48")에 위치하고 있다(그림 1). 이 지역은 연평균 기온 8.5℃, 연강수량 1307.6mm로서 온대북부기후에 해당한다. 시험구의 사면경사는 25~30°, 방위는 남서사면으로 모암이 노출된 노암지가 많고 전반적으로 토양 발달이 빈약하며, 조사지 주변에는 천연림인 소나무 군락과 인공림인 일본잎갈나무 군락이 분포하고 있다.

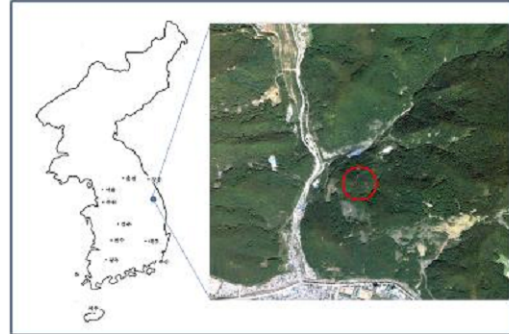


Figure 1. Location of the study site(O) in Taebak city, Gangwon province, Korea.

### 2. 방법

#### 1) 시험지 조성 및 처리

직파시험지 내에서 식재기반개량처리 효과를 구명하기 위하여 폐석 위에 미생물(MI; microbial inoculation), 목질칩(WC; wood chip), 유기질비료(OF; organic fertilizer) 등을 처리하였으며, 무처리구를 대조구(C; control)로 하였다. 2006년 4월 19일에 폐석터미를 사면고르기 한 상태에서 2m×2m 크기의 방형구를 4개 설치하고 직파법으로 파종을 실시하였다. 파종량은 소나무 26.56g/m<sup>2</sup>, 자작나무 2.96g/m<sup>2</sup>, 족제비싸리 10.10g/m<sup>2</sup>, 새(안고초) 40g/m<sup>2</sup> 등으로 하였으며 모래와 섞어 양이 고르게 뿌려지도록 파종하였다. 미생물 처리구는 배양토에 포함된 모래발버섯균(*Pisolithus thinctorinus*)을 지표에 고루 살포하였으며, 목질칩 처리구는 파종 후 활엽수칩을 2cm 두께로 덮어 주었고, 유기질비료 처리구는 중금속 이온의 교환·흡착으로 오염지 토양에 대한 개량효과가 입

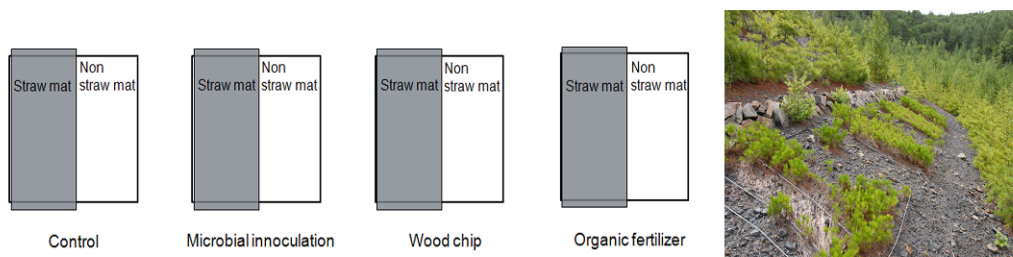


Figure 2. Plots classified by the treatments and straw mat.

증된 유기질비료(N : P : K : OM : 수분=1.67 : 1.70 : 1.62 : 43.76 : 44.01) 5kg을 폐석 위에 살포한 다음 파종하였다. 한편 식생의 발아, 생존, 생장에 대한 멀칭처리 효과를 구명하기 위해 각 처리구를 반으로 나누어 한쪽은 벗길거적 처리를 하고 다른 한쪽은 그대로 두었다(그림 2).

### 2) 파종식물 선정

목본은 복구현장을 구성하는 식생의 주축으로서 장차 생태계를 만들어갈 주역이므로 주변 식생과 이질적이어서는 안 된다. 소나무(*Pinus densiflora*)는 대부분의 폐광지역에 주로 출현하여 많은 면적에 분포하고 있고, 자작나무(*Betula platyphylla* var. *japonica*)와 족제비싸리(*Amorpha fruticosa*)는 복구수종으로 많이 사용되고 있으며, 특히 족제비싸리는 건조에 강한 수종으로 알려져 있다. 초본은 비와 바람에 노출된 상태에 있는 복토토양의 침식·유실을 방지하는 데 중요한 기능을 하므로 폐광지와 같은 복구현장에서 식생도입 초기 적용에 필수적이다. 새(*Arundinella hirta*)는 건조하고 양분이 빈약한 땅에서 잘 착생하는 초본으로서 우리나라 황폐지 복구시기에 지표를 고정하는 유용한 식물로서 검증된바 있기 때문에 공시식생으로 선정하였다. 소나무, 자작나무, 족제비싸리, 새(안고초) 등의 순량률은 각각 97.3%, 87.3%, 55.5%, 88.4%이었으며 실내 발아율은 각각 49.4%, 11.6%, 10.2%, 17.2%였다.

### 3) 폐석의 이화학성 분석

폐석의 조성분석을 위해 실내에서 일주일 동안 음건 시킨 다음 토괴를 잘게 부수어 주면서 0.1g까지 평량하여 전시료량으로 기록한 다음 U.S. No. 10체로 체별하여 통과부분과 잔존부분으로 구분하여 놓고, 잔존부분은 다시 부수어 가면서 직경 2mm 이상 부분만 남을 때 까지 계속 반복하였으며 각 단계에서 체 위의 잔존부분을 평량하였다.

이화학성 분석용 폐석은 깊이 0~15cm, 15~

30cm로 나누어 채취하였으며 실내에서 1주일 동안 음건 시킨 후, 2mm체를 통과한 시료를 이용하여 토성, 유기물, 전질소, 유효인산, 양이온치환용량, 치환성양이온 등을 분석하였다. 삼상과 가비중은 토양시료 채취용 100cc 캔에 시료를 채취한 후 105℃ 건조기에서 항량이 될 때까지 건조시켜 측정하였다. 토성은 비중계법, pH는 pH meter(Orion 720A)를 이용하여 1 : 5중류수법으로 측정하였으며, 전질소 함량은 Kjeldahl법, 유기물 함량은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 측정하였다. 양이온치환용량은 Brown법으로 측정하였으며, 치환성양이온인 칼슘과 마그네슘은 EDTA법 그리고 나트륨과 칼륨은 Flame photometer를 이용하여 측정하였다.

### 4) 현존본수 조사

본 연구에서는 m<sup>2</sup>당 파종 입수에 대해 발아되어 현재까지 생육을 지속하고 있는 것을 현존본수라고 정의하였다. 시험지 처리 후 3년이 경과된 2009년 9월 15일에 30cm×30cm 방형구에 대하여 3반복 이상 처리구별 소나무 실생묘 개체수와 발생치수의 수고 및 근원경을 조사하였다. 자작나무와 족제비싸리의 경우 직파 후 3년간의 조사결과 소나무에 비해 현존본수가 극히 적어 발생치수의 성장상태에 대한 조사 대상에서 제외하였다.

### 5) 통계분석

생존율, 수고생장 및 근원경에 대하여 처리간의 차이를 ANOVA를 이용하여 검정하였으며, 처리구간 통계적 유의성을 파악하기 위하여 Duncan의 다중검정을 실시하였다. 모든 통계처리는 STATISTIX 7.0(1985, 2000 Analytical Software)을 사용하였고 유의성 판단기준은 P=0.05였다.

본 연구는 폐광지의 식생녹화를 위한 저비용·고효율의 생육기반 조성 및 착생 기술 개발의 1단계 시도로 무복토 조건에서 직파를 통한

식생복원 가능성을 모색하였으며, 제시한 연구결과는 3년간의 자료를 정리한 것이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 폐석의 이화학적 특성 및 조성

본 시험지내 폐석의 입도분석 결과 2mm 이하의 폐석이 49.68%로 가장 많았으며 2cm~2mm는 32.98%로(표 1) 식생이 착생하기에 비교적 양호한 환경이었다. 토성은 모래의 비율이 매우 높은 사양토로 나타났으며, 삼상은 표토(0~15cm)와 심토(15~30cm) 모두 고상의 비율이 높았고 식물생육에 필수조건인 액상과 기상의 비율이 현저히 낮았다(표 2). 용적밀도는 표토 1.51g/cm<sup>3</sup>, 심토 1.61g/cm<sup>3</sup>로서 일반 산림토양의 범위(0.8~1.2g/cm<sup>3</sup>) 보다 높은 상태에서 식물의 뿌리발달에 매우 불리한 상태이다.

폐탄광지의 폐석산도는 일반적으로 처음에는 pH 6~8 정도의 약산성·약알칼리성을 나타내지만(Bussler et al, 1984; Van Rensburg, 1998; 김정규·이상환, 1999) 시간이 흐르면서 황철광(pyrite)이 대기 중에 노출·산화되어 pH 3~3.5 정도의 강산성으로 변화한다(William, 1978; 임경빈, 1979). 시험지의 폐석의 산도(pH)는 표토와

**Table 1.** Size range of abandoned coal mine land in Taeback city, Gangwon province, Korea.

Over 5cm	2~5cm	2cm~2mm	Under 2mm
658.95g	769.43g	2,715.1g	4,090.2g
8.00%	9.34%	32.98%	49.68%

심토 모두 pH 4 이하로서 강산성이었다. 이러한 상태에서는 식물이 활착 되더라도 독성 물질의 용출에 의하여 뿌리발달이 억제되고 식물생장에 유용한 토양 미생물의 증식이 저해되므로 정상생육을 위해서는 토양산도의 교정이 필요하다. 유기물 함량은 일반 산림토양에 비해 높은 것으로 나타났으며, 전질소와 유효인산은 일반 산림토양과 크게 차이가 없었으나 양이온 치환용량을 비롯한 치환성 양이온 함량은 매우 낮은 수준인 것으로 나타났다.

#### 2. 생육기반재 처리별 현존본수

직파처리 후 3년이 경과한 시점에서 생육기반재 처리별 현존본수를 조사한 결과, 소나무의 경우 거적덮 처리를 하지 않은 시험구의 현존본수는 목질칩 처리구(1,756본/m<sup>2</sup>), 유기질비료 처리구(996본/m<sup>2</sup>), 미생물 처리구(526본/m<sup>2</sup>), 대조

**Table 2.** Physical and chemical properties of abandoned coal mine land in Taeback city, Gangwon province, Korea.

Depth	Particle distribution(%)				Three phase(%)			Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
	Sand	Silt	Clay	Soil texture	Liquid	Solid	Gaseous	
0~15cm	59.7	33.1	7.2	Sand Loam	11.7	57.0	31.3	1.51
15~30cm	59.7	34.2	6.1	Sand Loam	12.6	60.8	26.6	1.61

Depth	pH	O.M. (%)	T.N. (%)	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	CEC	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
0~15cm	3.76	9.88	0.13	18.41	2.53	0.03	0.04	0.24	0.09
15~30cm	3.45	10.08	0.14	2.68	2.75	0.03	0.04	0.20	0.09

구(119본/m<sup>2</sup>) 순이었다(Figure 3). 거적덮기 처리를 한 시험구의 현존본수는 목질칩 처리구(1,622본/m<sup>2</sup>)에서 가장 높았으며, 유기질비료 처리구(630본/m<sup>2</sup>), 미생물 처리구(589본/m<sup>2</sup>), 대조구(263본/m<sup>2</sup>) 순이었다.

수고 및 근원경에 대한 성장상태는 생립본수가 가장 적은 대조구에서도 1,190천본/ha이나 되므로 본수로 처리결과를 해석하는 것은 적절치 않다고 본다. 일본에서의 소나무 천연갱신의 성공적인 사례를 보고한 후쿠시마현 국유림 자료에 의하면 갱신처리 1년 후 94~151천본/ha이었으며 5년 후의 잔존율은 55~65%였다고 한다(大阪營林局技術開發室, 1981). 또한 일본에서는 소나무를 천연갱신할 때 3~5년이 경과한 시점에서 5,000본/ha 이상이면 숲이 조성될 수 있는 충분한 밀도로 판단한다(辻 五郎, 1986).

자작나무의 경우 거적덮기 처리를 하지 않은 시험구에서는 1본도 생존하지 못하였으며 거적덮기 처리를 한 시험구에서는 목질칩 처리구, 미생물 처리구에서 각각 3본/m<sup>2</sup>, 1본/m<sup>2</sup>으로 자작나무는 무복토 직파시공이 어려운 것으로 나타났

다. 죽제비싸리의 경우도 거적덮기 처리를 하지 않은 시험구에서는 생존하지 못하였으며 거적덮기 처리를 한 시험구에서는 목질칩 처리구, 유기질비료 처리구에서 각각 8본/m<sup>2</sup>, 2본/m<sup>2</sup>으로 자작나무에서처럼 좋지 않은 생존율을 보였는데, 이와 같은 상황은 처리당년에도 유사하였다.

초본인 새(안고초)는 본수를 헤아리기 어려워 피복도를 조사하였다(그림 3). 새(안고초)는 거적덮기를 처리하지 않은 시험구 가운데 유기질비료 처리구에서만 30%의 피복도를 보이고 있으며, 거적덮기 처리한 시험구에서는 유기질비료 처리구(80%), 목질칩 처리구(30%), 미생물 처리구(10%) 및 대조구(1%) 순으로 유기질비료와 거적덮기 효과가 뚜렷하였다.

이와 같이 생육기반재 처리별 현존본수로 보아 자작나무와 죽제비싸리는 무복토 직파수종으로 적용하기에 불가능한 것으로 판단되었으며, 따라서 수고, 근원경 등의 성장분석은 소나무만을 대상으로 하였다. 새(안고초) 또한 2개 처리구에서만 양호한 성장상태를 보이고 3년 동안 초장의 변화도 없어 더 이상의 분석은 생략하였

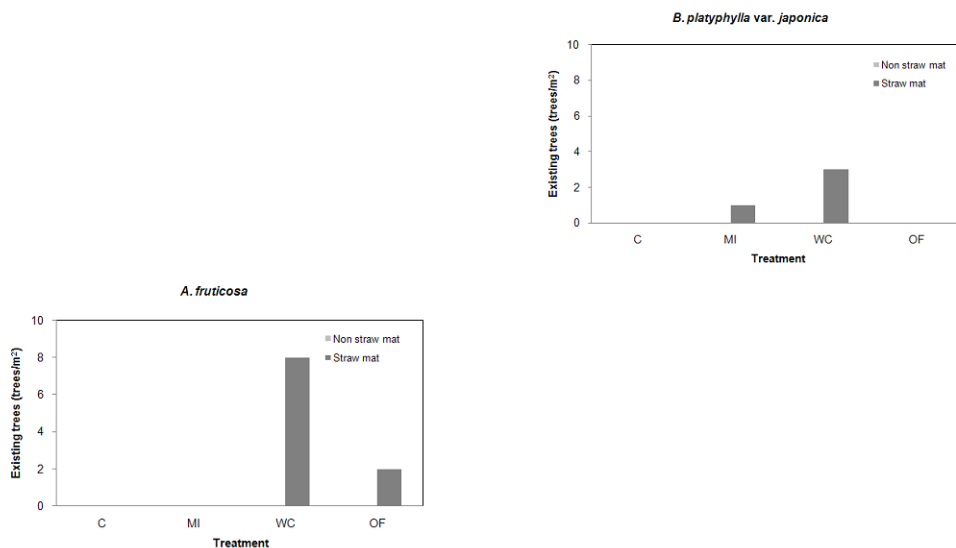


Figure 3. Existing trees of *Pinus densiflora*, *Betula platyphylla* var. *japonica*, *Amorpha fruticosa* and coverage of *Arundinella hirta* seedling by treatments after 3 years(C; control, MI; microbial inoculation, WC; wood chip, OF; organic fertilizer).

다. 다만 건조하고 척박한 환경에서 생존이 우수한 것으로 알려져 있는 새(안고초)가 무복토 환경에서도 생존가능하다는 결과는 큰 성과로 볼 수 있을 것이다.

더불어 고려할 사항은 목질칩을 처리한 시험구에서 3년 경과 후 자작나무, 죽제비싸리, 새(안고초) 등의 생존율이 낮은 결과를 볼 때, 유기질비료 처리구도 일정시간이 경과하여 조사지 내의 양분이 모두 이용되면 식물의 생육이 어려울 가능성도 배제할 수 없으므로 향후 이에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

### 3. 생육기반재 처리별 수고생장

파종 3년 후의 소나무 치수의 수고생장은, 거적덮기 처리를 하지 않은 시험구에서는 유기질비료 처리구(12.4±3.9cm), 대조구(8.4±3.0cm), 미생물 처리구(7.2±2.8cm), 목질칩 처리구(7.1±1.9cm) 순이었다(표 3). 거적덮기 처리를 한 시험구에서는 유기질비료 처리구(18.7±5.3cm), 대조구(13.7±4.4cm), 미생물 처리구(10.6±3.8cm), 목질칩 처리구(8.4±2.2cm) 순이었다.

거적덮기 처리한 시험구와 거적덮기를 하지 않은 시험구 모두 유기질비료 처리구의 수고생장이 가장 좋았으며 가장 생장이 나쁜 목질칩 처리구에 비해 약 2배 이상의 높은 수고생장을 보였

다(그림 4). 이것은 폐석더미의 양분상태가 매우 불량한 점을 고려하면 당연한 결과이지만 거꾸로 폐광지에서 효율적인 생육기반의 조성방법을 시사하는 것이다.

일반적으로 폐탄광지의 폐석과 일부 토양물질은 질소, 인과 같은 주요 양분이온이 결핍되어 있고 낮은 pH로 인하여 치환성 양이온이 상당수 용탈되어 있는 상태이다(민재기 등, 2005). 따라서 생육 환경이 불량한 곳의 식물은 잎 내 질소 함량이 감소하여 광합성 속도를 줄여 성장속도를 조절하게 된다(Osmond, 1983). 토양을 전혀 사용하지 않고 유기질비료 처리만에 의해 수고생장이 이와 같이 양호해진 것은 양료공급 외에도 중금속 이온의 치환·흡착작용으로 치수의 활력이 크게 증가된 때문인 것으로 판단된다.

미생물 처리구의 수고생장은 본수에서와 마찬가지로 그 효과를 인정할 수 없었다. 이는 현지 토착미생물과의 생존경쟁에서 패배 제대로 정착하지 못한 것으로 추측된다.

한편 거적덮기 처리가 수고생장 증대에 효과가 뚜렷한 것으로 나타난 것은, 목질칩과 마찬가지로 거적에 의해 복사열 상승 억제, 지표온도가 저하되었으며 이에 따라 폐석의 수분보유가 유지되었기 때문인 것으로 판단된다.

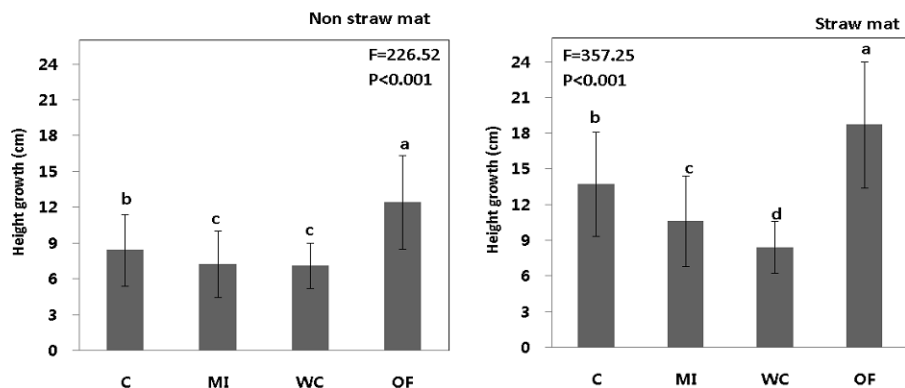


Figure 4. Height growth of *Pinus densiflora* seedlings by treatments after 3 years(C; control, MI; microbial inoculation, WC; wood chip, OF; organic fertilizer).

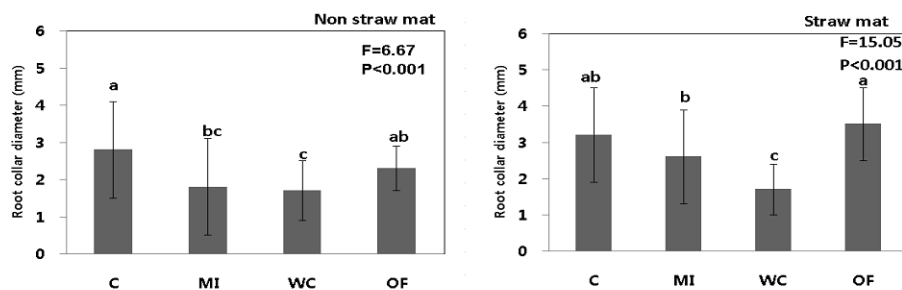


Figure 5. Root collar diameter of *Pinus densiflora* seedlings by treatments after 3 years(C; control, MI; microbial inoculation, WC; wood chip, OF; organic fertilizer).

#### 4. 생육기반재 처리별 발아 개체의 근원경

파종 3년 후 소나무 실생묘의 근원경을 측정 한 결과, 거적덮침 처리를 하지 않은 시험구에서는 대조구(2.8±1.3mm), 유기질비료 처리구(2.3±0.6mm), 미생물 처리구(1.8±1.3mm), 목질칩 처리구(1.7±0.8mm) 순으로 높았으며 거적덮침 처리를 한 시험구의 수고생장량은 유기질비료 처리구(3.5±1.0mm), 대조구(3.2±1.3mm), 미생물 처리구(2.6±1.3mm), 목질칩 처리구(1.7±0.7mm) 순으로 높았다(그림 5).

거적덮침 처리를 한 시험구는 비덮침 처리구보다 근원경 생장에 뚜렷한 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 형성층은 임목내의 수분부족에 이주 민감하며 수분부족으로 인한 광합성량의 감소로 인하여 간접적으로 형성층의 생장이 저조해질 수 있다고 보고한 김재수(1999)의 결과와 일치하는 것이다.

### IV. 결 론

석탄 폐광지의 폐석더미에 4종의 식생기반재 처리를 적용한 무복토 환경에 소나무, 자작나무, 죽제비싸리 등 3종의 목본과 새(안고초) 1종의 초본을 파종하였으나, 자작나무, 죽제비싸리, 새(안고초)의 경우는 현존본수 및 성장 상태가 미흡하여 무복토 직파를 위한 수종으로 제외되었다. 이에 비해 소나무는 현존본수(1,190천 본/ha)가 높고 착생 및 성장 상태 또한 양호하여 석탄

폐광지에 대한 직파수종으로 적합할 것으로 판단되었다. 비록 치수 발생본수가 가장 많았던 목질칩 처리구에서 3년 경과 후 집단적 고사 현상이 발생하였으나, 유기질비료 처리 후 파종하고 거적덮침을 한 구역에서 평균 수고와 근원경이 각각 18.7cm, 3.5mm로 양호한 성장 상태를 보여, 소나무의 경우는 복토하지 않은 토양환경에서도 묘목으로의 성장 및 수림형성도 가능할 것으로 보인다. 이러한 결과를 통해 석탄 폐광지에 대한 식생녹화시공 방법을 적용함에 있어서 무복토 또는 복토 깊이의 최소화를 통한 식생복원이 충분히 가능할 것으로 판단되며, 주변경관과 조화를 이루며 생태적 일체화도 달성할 수 있는 저비용·고효율의 시공이 가능할 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서 제시된 수종 이외의 수종을 대상으로 한 추가적인 연구도 요구된다.

충남 보령(2008년)과 강원도 태백(2009년)에 위치한 석탄 폐석지 식생녹화 현장에는 실제로 본 연구결과를 응용, 토양 환경 개선을 위한 처리를 마친 상태이며 장기적인 모니터링을 실시하고 있다. 이에 가까운 시점에 현행 석탄 폐광지 식생녹화 방법을 발전적으로 개선할 수 있는 새로운 공법을 체계화 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 인 용 문 헌

김명희·송석환·민일식·장인수. 1998. 충남 금



- 산 폐탄광지역의 토양 및 식물체내 알칼리 및 금속원소의 함량. 한국생태학회지 21 : 457-463.
- 김보현 · 김경훈 · 김혜주 · 김두하. 2000. 폐탄광 경석지 식생 복원을 위한 식물군집 조사 · 분석 -강원도 태백시 함태탄광 폐탄광지를 사례로-. 한국환경복원녹화기술학회 3(4) : 33-42.
- 김재수. 1999. 수분요인에 대한 중부 지역 소나무의 생장 반응. 한국환경복원녹화기술학회 2(1) : 66-71.
- 김정규 · 이상환. 1999. 식물을 이용한 토양복원-Phytoremediation. 한국환경농학회 1999년 심포지움 논문집.
- 김혜주 · 김보현 · 김두하. 2000. 폐탄광지의 식생복원 · 녹화방법 개발을 위한 기초 연구. 한국환경복원녹화기술학회 3(4) : 43-51.
- 민재기 · 박은희 · 문현식 · 김종갑. 2005. 문경지역 폐탄광지 주변 산림토양의 화학적 성질 및 중금속 함량. 한국농림기상학회지 7(4) : 265-273.
- 민재기 · 박은희 · 우수영 · 김종갑 · 문현식. 2006. 경북 문경지역 폐탄광지의 식생구조에 관한 연구. 한국임학회지 95 : 23-31.
- 민재기 · 이정환 · 우수영 · 김종갑 · 문현식. 2004. 강원도 태백지역 폐탄광지의 식생구조에 관한 연구. 한국농림기상학회지 6 : 256-264.
- 양재의. 2004. 폐석회 활용 연구결과 현장적용 시험에 관한 연구. 석탄산업합리화사업단.
- 양재의 · 옥용식 · 박용하. 2007. 광산 훼손지역의 생태공학적 산림복구 방안. 광해방지기술 1 : 67-75.
- 에너지 경제연구원. 2007. 에너지 연별통계. [http://www.keei.re.kr/keei/esdb/e\\_cl\\_3.html](http://www.keei.re.kr/keei/esdb/e_cl_3.html).
- 이재천 · 한심희 · 장석성 · 김판기 · 허재선 · 염규진. 2003. 탄광 폐석지내 자생 수종의 생리학적 피해 및 내성. 한국농림기상학회지 5 : 172-178.
- 임경빈. 1979. 임지의 경제적 이용 및 광산촌 녹화에 관한 연구. 대한석탄공사 연구보고서.
- 정용호. 2008. 폐광지의 생태적 복구 방안. 2008 광해방지 심포지움. pp.215-224.
- 정용호. 2009a. 석탄폐광지 생태적 복원을 실현하기 위한 식생생육기반 조성. 복원생태학회 창립총회 및 기념 심포지움. pp.65-103.
- 정용호. 2009b. 석탄폐광지 생태적 복원을 실현하기 위한 식생생육기반 조성. 제3회 광해방지 전문인력양성교육. pp.45-88.
- 정재준 · 이무춘. 1997. 폐광지역의 오염현황 및 환경관리 전략. 폐기물자원화 5 : 71-85.
- Bussler, B. H., W. H. Byrnes, P. E. Pope and W. R. Chaney. 1984. Properties on minesoil reclaimed for forest land use. Soil Science Society of America Journal, 48 : 178-184.
- Hossner, S. R., and F. M. Hons. 1992. Reclamation of mine tailings. Advances in Soil Science, 17 : 311-348.
- Logan, T. J. 1992. Chemical Degradation of soil. Advances in Soil Science, 17 : 13-35.
- Osmond C. B. 1983. Interaction between irradiance, nitrogen nutrition, and water stress in the sun-shade responses of *Solanum dulcamara*. Oecologia, 57 : 316-321.
- Turekian, K. K., and K. H. Wedepohl. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Geological Society of America Bulletin, 72 : 175-192.
- Van Rensburg, L., R. I. 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.
- Vien, J. D., and E. B. Touetelot. 1970. Geochemistry of black shale deposits. A summary report. Economic Geology, 65 : 253-272.
- William T. P. 1978. Reclamation of coal-mined

- land in Appalachia. *Journal of Soil and Water conservation*, 33(2) : 58-61.
- 大阪營林局技術開發室. 1981. ヒノキ天然更新をすすめるにあたって(ヒノキ天然更新現地検討會の成果. 大阪營林局「みやま」NO2. 別刷.
- 辻 五郎. 1986. 天然林地施業と複層林施業 —その考え方と實際—. 日本林業調査會.