

## 폐탄광지의 식생 복원·녹화공법 개발을 위한 기초 연구

김혜주<sup>1)</sup> · 김보현<sup>1)</sup> · 김두하<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>삼성에버랜드주식회사 환경개발사업부

## Research for Development of Restoration and Revegetation Technology in the Abandoned Coal-mine Lands

Hyea-Ju Kim<sup>1)</sup>, Bo-Hyun Kim<sup>1)</sup> and Doo-Ha Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Environmental Development Div., SAMSUNG EVERLAND Inc.

### ABSTRACT

This study was carried out to develop technologies of restoration and revegetation through monitoring the change of vegetation after setting up 3 type experimental sites on abandoned coal-mine lands. According to the results of 7 month's monitoring, sown species and a variety of invading species appeared at experimental sites. Moreover, the number of species, individuals and the ratio of coverage increased as time passed on. After 5 months, each experiment sites showed the result of successful revegetation. The most effective sites was treated by overspreading 1 cm loam soil on coal minesoil. As a result of this study, it is considered that the revegetation of abandoned coal-mine lands can be achieved effectively by making the minimum of foundation layer and improving the efficiency through mechanized construction. Besides, it is recommended to use native and early stage-succession species adapting themselves to coal minesoil, such as Gramineae, Leguminosae, Compositae and etc..

Key words : *experiment sites, native species, minimum foundation, mechanized construction*

### 1. 서 론

우리나라의 석탄산업은 1896년부터 시작되었으며, 1950년 대한석탄공사를 설립한 이래 증산체재를 갖추어 총석탄 채굴량(1973~1998)이 41,304만톤으로, 지난 30여년간 국가경제발전과 산림환경보전에 크게 기여해 왔다(오구균, 2000). 그러나 에너지소비구조가 변화되면서 무연탄의 소비가 급격히 감소하여 1988년도에는 347개소의 탄광에서 24,295천톤을 생산했으나 1998년

현재 11개 탄광에서 4,361천톤을 생산하고 있다(석탄산업합리화사업단, 2000; 우보명, 2000).

폐석은 채탄 후 연료로 사용할 수 없는 석탄의 찌꺼기로 전체 채탄량의 60% 이상이 폐석으로 처리된다. 폐탄광경석지(Abandoned coal-mine spoils)는 이러한 폐석들을 모아둔 폐석더미로 자연경관을 훼손시키는 물론, 지반침하와 폐석유실, 황화철이 pH 3~3.5로 강산성의 황화수소로 산화되어 지하수 및 하천오염을 유발하는 등 복합적인 환경문제와 막대한 경제적 손실을

주고 있다. 우리나라에서 폐탄광지에 대한 녹화사업은 주로 부분적인 개토 및 복토와 묘목 식재에 의한 단순녹화공사나, 30cm 이상 전면 복토 후 재래식파종공법과 묘목식재공법, 신탄 불이기, 줄베심기공법 등 주로 인력에 의한 녹화공법에 치중하여 왔다(우보명, 2000). 그러나 자연환경복원 목표설정 및 체계적인 복구녹화 계획 수립의 미비, 적절한 시공법 개발의 미숙, 시공 후 사후 관리의 미흡 등으로 인해 복구공사 후 녹화목표를 달성하지 못하고 다시 황폐화 되는 결과를 가져왔다. 우리나라보다 앞서 산업화한 독일의 폐탄광지 녹화역사를 살펴보면 19세기부터 1967년까지(녹화 1세대)는 뾰족한 원추형으로 폐석산을 쌓아 경사가 급하여 녹화하기 어려운 조건이었다. 이때에는 주로 구덩이에 양토를 넣어 자작나무, 아까시나무, 개암나무, 오리나무류 등을 식재하였다, 그러나 대부분 화분에 식재한 것과 같이 뿌리가 더 이상 발달하지 못하여 수목이 고사하기 일수였다. 1967년부터 1980년까지(녹화 2세대)는 폐석더미를 계단식으로 쌓아올린 후 양토를 25~50cm 두께로 복토하고 식물을 식재하였는데 식물의 뿌리가 깊이 내리지 못하여 바람과 건조 피해가 발생하였다. 이와 같이 독일의 1980년대 이전까지의 폐탄광지 녹화방법은 현재 우리나라에서 널리 사용하고 있는 공법과 유사하였다. 1980년 이후(녹화 3세대) 독일에서는 탄광업자들에게 폐석산을 훑날의 이용성을 고려하여 쓸모 있는 산으로 만들도록 의무화하였다. 특히 환경을 보호하는 측면에서 폐석을 처리하도록 하는 등 경관적인 측면뿐만 아니라 토양 개량대책과 자연 및 환경의 보전 및 복원에 대한 문제까지 접근하여 폐석산을 주변환경에 어울릴 수 있는 형태의 자연적인 산의 모습으로 설계하여 침식을 줄이고 녹화효과를 최대한 올릴 수 있도록 하였다. 폐탄광지 녹화에 관한 연구결과에 의하면 폐석을 오래동안 방치하지 않고 다년생의 콩과 초본류를 많이 포함한 식물종자를 기계력으로 습식파종하면 이들이 스스로 폐탄광지의 토성을 개선하여 식물생장에 유리한 환경을 조성하게 되며, 다음단계로 그 지

역의 식생을 고려하여 선구식물인 목본식물을 파종·식재함으로써 효과적인 녹화성과를 얻을 수 있다고 보고하였다(Hiller, 1997; Wipf, 1993; Schulz, 1991).

이에 본 실험은 폐석산의 자연환경을 식물에 의해 변화시킬 수 있다는 전제 하에 최소한의 기반층으로 식생을 활착시켜 시공의 경제성 및 효율을 높이고, 생태계 천이 초기 단계에 출현 빈도가 높은 벼과, 콩과, 국화과 위주의 식물종을 파종하여 녹화효과를 높이고 식생의 자연이입이 원활하게 이루어지게 함으로써 폐탄광지를 주변식생과 유사한 형태의 식생으로 발전시킬 수 있는 녹화공법을 개발하기 위한 것이다.

## II. 연구재료 및 방법

### 1. 실험대상지

실험대상지로는 강원도 태백시 소도동 유다래미골에 위치한 함태탄광 폐광지를 선정하였다. 함태탄광은 태백산도립공원의 북서쪽 경계부에 위치하고 있으며 태백시와 영월을 연결하는 국도변에 접해있다. 함태탄광은 1978년에 개광한 후 1993년 12월에 폐광하였으며, 폐광한 후 방치되어 있는 폐탄광지를 1995년~1996년 사이에 산돌쌓기, 돌수로공법과 함께 아까시나무 등을 식재하여 부분적으로 복구공사를 실시(석탄산업합리화사업단, 1995)한 상태로 실험시공 대상지는 북서향(330°)으로, 비탈면의 경사는 30° 이었다.

실험대상지의 연평균기온은 8.8℃, 연평균강수량은 1,280mm로서 식생기후대상 온대중부기후대에 속하였다. 표 1은 실험시공(2000. 4) 후

표 1. 실험시공 후 강수량 및 월평균기온

구분	강수량(mm)	평균기온(℃)
4월	53.5	8.1
5월	80.5	14.2
6월	115.5	18.0
7월	99.5	21.9
8월	290.5	20.8
9월	469.0	14.7
10월	18.5	10.5

\*자료 : 기상청(www.kma.go.kr)

부터 2000년 10월까지 연구대상지의 강수량 및 월평균온을 나타낸 것이다. 강수량은 9월이 496mm 최고값을 나타내었으며, 월평균기온은 7월이 21.9℃로 가장 높았다.

폐탄광지의 토양산도는 일반적으로 처음에는 pH6~8정도의 약산성·약알칼리성을 나타내지만(Bussler etc., 1984; Van Rensburg, 1998; 김정규, 1999) 시간이 흐르면서 황철광(Pyrite)이 대기중에 노출되어 산화되어 pH3~3.5정도의 강산성으로 변화게 되는데(Williams etc., 1978; 임경빈, 1979) 본 실험대상지의 토양산도는 pH 7.4로 약알칼리성을 나타내었다. 유기물함량은 2~3%로서 선행 폐탄광지의 연구결과(김정규와 이상환, 1999)와 유사하였으며, 유효인산은 11.0ppm, CEC는 14.3cmol/kg 이었다. 카드뮴(Cd)은 거의 검출되지 않았으나 납(Pb) 함량이 9.22ppm으로 함백탄광 지역의 납(Pb) 함량 4.62ppm(현정오, 1997)보다 높은 값을 나타내었다(표 2). 토양분석은 서울시립대학교 원예학과 토양환경연구실에 의뢰하였다.

표 2. 실험시공지 폐석의 토양특성

구 분	측정치
pH	7.4
EC( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	46.3
Organic matter(%)	2.7
Avail-P(mg kg <sup>-1</sup> )	4.1
Total-N(%)	0.2
CEC(cmol kg <sup>-1</sup> )	9.5
Ca(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.17
Mg(cmol kg <sup>-1</sup> )	6.87
K(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.03
Na(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.03
Pb(mg kg <sup>-1</sup> )	13.26
Cd(mg kg <sup>-1</sup> )	0.08

## 2. 실험재료

1) 식물종 : 식생천이 초기에 출현빈도가 높은 다년생 초본으로 건조와 산성에 강하고, 질소고정을 통해 척박한 토양환경을 개선시킬 수 있으며, 침식을 억제하고 경관을 개선할 수 있는 자생종을 표 3과 같이 선정하였다. 또한 자

생종의 초기 피복상태가 낮은 점을 보완하기 위하여 돌나물(*Sedum sarmentosum*)과 섬기린초(*Sedum takesimense*) 삽수(길이 3cm)를 흩어뿌리기(10개/m<sup>2</sup>)하였다.

표 3. 실험시공에 사용된 식물종 및 배합비

종 명	발아율 (%)	파종량 (g/m <sup>2</sup> )	립수 (No./g)
<b>Gramineae</b>			
<i>Miscanthus sinensis</i>	40	3.1	2,000
<i>Spodiopogon sibiricus</i>	40	1.6	25,000
<b>Leguminosae</b>			
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonica</i>	28	10.9	800
<i>Lespedeza cuneata</i>	75	10.4	210
<b>Caryophyllaceae</b>			
<i>Dianthus sinensis</i>	39	13.6	1,000
<b>Compositae</b>			
<i>Chrysanthemum boreale</i>	65	1.7	2,200
<i>Aster yomena</i>	65	2.5	2,500

2) 비료 : 폐탄광지 녹화의 장해요인으로 경석의 산도와 양료부족을 들수있다(Costigan etc., 1981). 식물생장에 직접적인 영향을 미치는 요소 중 초본이 활착하는데 필요한 최소한의 비료량인 질소 6.7g/m<sup>2</sup>, 인 11.1g/m<sup>2</sup>(Wills, 1981)을 시비하였다.

표 4. 실험구에 포설한 양토의 토양특성

구 분	측정치
pH	4.8
EC( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	32.0
Organic matter(%)	2.6
Avail-P(mg kg <sup>-1</sup> )	3.3
Total-N(%)	0.1
CEC(cmol kg <sup>-1</sup> )	10.8
Ca(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.03
Mg(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.36
K(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.04
Na(cmol kg <sup>-1</sup> )	0.03
Pb(mg kg <sup>-1</sup> )	8.45
Cd(mg kg <sup>-1</sup> )	0.03

3) 양토 : 식물이 생육할 수 있는 최소한의 식생기반층을 형성시켜주기 위해 양토를 포설하였다. 양토는 대상지 인근 산지의 심토층

에서 채취하여 다른 식물종자의 유입을 최대한 억제시켰다. 표 4는 실험구에 사용한 토양의 분석결과로 우리나라의 산림토양의 평균치(김계훈 등, 1995)와 유사하였다.

4) 식생기반재 : 경사가 급한 폐탄광지의 침식을 방지하고 식생이 활착할 수 있는 기반을 제공하기 위해 낙엽, 볏짚, 톱밥 등을 코이어펠트(coir fiber)와 혼합하여 코이어펠트(coir-felt)를 제작하였다(실험구B, C에 적용).

5) 토양안정제 : 토양의 유실 및 침식방지와 보수력 유지를 위해 생분해성 접착제인 Terra-Control(T/C)을 사용하였다.

6) 버드나무섣단 : 생물공학적인 녹화공법으로 폐탄광지 비탈면의 안정 및 녹화효과를 높이기 위해 버드나무가지로 섣단을 제작하여 설치하였다(건설신기술 제201호 참고).

**3. 실험구 설치방법**

폐탄광지 녹화공법의 현장 적용실험을 위해 2000년 3월 예비답사를 통하여 실험시공지를 선정 후 4월에 실험구를 설치하였다. 실험구는 그림 1과 같이 3m×6m(18㎡)크기로 기존의 소단 활용하여 설치하였으며, 각각의 실험구별로 9반복 설치하였다. 실험구의 배치는 실험구별로 3m를 이격시켜 공법상호간 영향을 최소화하였다.

그림 1. 실험구 배치도

실험구A는 폐석층 위에 최소한의 식생기반층을 조성하여 녹화하는 공법으로 면고르기 후 양토를 1cm 두께로 포설하면서 Sedum류 삼수

를 흩어뿌리기 하였다. 다음 단계로 고운 흙과 종자를 1:1 비율로 혼합하여 파종하였으며, 종자파종 직후 토양안정제(Terra Control)와 비료를 물에 희석하여 살포하였다.

실험구B는 면고르기한 폐석층위에 코이어펠트를 설치한 후 양토를 1cm 두께로 포설하면서 Sedum류 삼수를 흩어뿌렸다. 다음으로 고운 흙과 종자를 1:1 비율로 혼합하여 파종하고, 토양안정제와 비료를 물에 희석하여 살포하였다.

실험구C는 버드나무 섣단을 설치하여 폐석의 유실을 막고 녹화효과를 높이기 위한 공법으로 각 소단마다 30cm 깊이의 고랑을 낸 후 버드나무 섣단(Ø30cm, L3m)을 설치하고 양토로 되메우기를 하였다. 다음 단계로 면고르기 후 코이어펠트를 설치하고 양토를 포설하면서 Sedum류 삼수를 흩어뿌렸다. 다음으로 흙과 1:1 비율로 혼합한 종자를 파종하고 토양안정제와 비료를 물에 희석하여 살포하였다. 위 3개 유형의 실험시공은 인력으로 시공되었지만 차후 일부공정을 제외하고는 기계력을 이용한 녹화공법으로 전환이 가능하다.

표 5. 실험구별 시공재료 및 순서

시공내용	실험구A	실험구B	실험구C
면고르기	●	●	●
비료	●	●	●
버드나무섣단			●
코이어펠트		●	●
양토	●	●	●
Sedum	●	●	●
자생종 종자	●	●	●
T/C+비료+물	●	●	●
특징	최소한의 식생기반층 조성	코이어펠트 설치	소단에 버드나무 섣단 설치

**4. 조사 및 분석방법**

실험구별 식생활착 및 녹화성과를 평가하기 위하여 총 27개 고정조사구(공법별 9개소)를 설치하였다. 고정조사구는 각 실험구의 식생을 대표할 수 있는 지점에 1㎡(1m×1m) 크기로 설치하였다(단, 버드나무섣단을 설치한 구간은 제

외). 현장조사는 각 고정조사구에 출현한 식물 종수, 개체수, 종별피도, 평균조장 등을 측정하였으며, 피도를 면적으로 환산한 값에 평균조장을 곱하여 녹지용적을 계산하였다. 각 종별 녹지용적 값을 바탕으로 상대우점치(importance value)를 계산하였으며, 모든 실험구에 자연이입한 식물종의 목록을 조사하였다. 현장조사는 시간에 따른 식생의 변화를 모니터링하기 위해 2000년 4월부터 10월까지 1개월 간격으로 실시하였다.

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. 실험구별 출현종의 상대우점치 변화

실험구별 9개 고정조사구의 시간경과에 따른 출현식물종의 상대우점치 변화를 나타낸 것이 표 6~8이다.

실험구A는 시공초기(6월초)에 벌노랑이(45.8%), 쑥(28.6%), 큰수리취(11.9%) 등이 주요 출현종이었으며, 돌나물과 섬기린초의 삽수와 파종한

표 6. 실험구A의 상대우점치 변화

종 명	상대우점치(%)		
	50일 경과	100일 경과	150일 경과
<i>Sedum sarmentosum</i>	2.9	3.3	1.7
<i>Sedum takesimense</i>	6.9	3.0	1.5
<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>	28.6	0.7	2.6
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	45.8	18.4	3.3
<i>Synurus excelsus</i>	11.9	2.2	1.0
<i>Dianthus sinensis</i>	3.5	23.6	9.4
<i>Chrysanthemum boreale</i>	0.5	16.6	32.2
<i>Setaria viridis</i>		9.5	6.7
<i>Erigeron annuus</i>		7.1	1.3
<i>Chenopodium album</i> var. <i>centroru-brum</i>		0.9	1.0
<i>Trifolium pratense</i>		0.1	0.2
<i>Lespedeza cuneata</i>		1.2	1.0
<i>Artemisa capillaris</i>		1.8	2.8
<i>Rubus crataegifolius</i>		4.3	1.5
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>		0.3	2.0
<i>Spodiopogon sibiricus</i>		7.0	28.6
<i>Saussurea pulchella</i>			1.5
<i>Aster yomens</i>			1.5
<i>Digitaria sanguinalis</i>			0.3

패랭이, 산국 등이 활착하였다. 실험시공 100일 후에는 패랭이꽃(23.6%), 벌노랑이(18.4%), 산국(16.6%) 등이 우점하였으며, 큰기름새, 비수리, 강아지풀, 개망초, 산딸기 등이 출현하였다. 실험시공 150일 후(9월중순)에는 산국(32.2%)과 큰기름새(28.6%)가 우점하였으며, 각시취, 쑥부쟁이, 바랭이 등이 새로운 출현종이었다. 실험구A는 시간이 흐름에 따라 벌노랑이, 쑥, 큰수리취 등은 상대우점치가 낮아졌으며, 산국, 큰기름새 등 벼과와 국화과 식물의 상대우점치 및 출현종수가 증가하였다.

실험구B의 고정조사구에 대한 상대우점치 분석 결과 시공초기에는 삽수를 흩어뿌리기한 돌나물과 섬기린초가 주요 출현종이었으며, 종자를 파종한 벌노랑이가 소수 출현하였다. 시공 100일 경과 후에는 벌노랑이(41.6%)가 우점하였으며, 섬기린초(20.6%)와 패랭이꽃(11.8%) 등이 주요 출현종이었다. 또한 산국, 비수리, 강아지풀, 도깨비바늘, 개망초 등이 다양한 식물종이 출현하였으나 상대우점치는 낮았다. 시공 150일 후에는 산국(24.6%)의 상대우점치가 가장 높게 나타났으며, 섬기린초, 돌나물, 벌노

표 7. 실험구B의 상대우점치 변화

종 명	상대우점치(%)		
	50일 경과	100일 경과	150일 경과
<i>Sedum sarmentosum</i>	19.9	6.3	9.0
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	4.4	41.6	7.5
<i>Sedum takesimense</i>	75.7	20.6	12.7
<i>Setaria viridis</i>		3.8	6.8
<i>Erigeron annuus</i>		1.2	6.4
<i>Bidens bipinnata</i>		3.4	3.5
<i>Chenopodium album</i> var. <i>centroru brum</i>		0.8	2.9
<i>Digitaria sanguinalis</i>		0.8	7.0
<i>Lespedeza cuneata</i>		2.9	3.6
<i>Chrysanthemum boreale</i>		6.7	24.6
<i>Dianthus sinensis</i>		11.8	6.8
<i>Spodiopogon sibiricus</i>			1.7
<i>Betula schmidtii</i>			1.2
<i>Echinochloa crus-galli</i>			1.4
<i>Amaranthus patulus</i>			1.4
<i>Aster yomens</i>			3.5

랑이, 강아지풀, 개망초, 바랭이 등 다양한 식물종이 10%내외의 상대우점치를 나타내었고, 쑥부쟁이, 큰기름새, 박달나무 등 새로운 식물종이 출현하였다.

실험구C의 9개 고정조사구에 대한 상대우점치 분석결과 시공초기에는 삼수를 훌러뿌린 돌나물과 섬기린초가 비슷한 상대우점치로 활착했으며, 종자를 파종한 벌노랑이, 큰기름새 등이 출현하였다. 시공 100일 후에는 큰기름새(32.4%), 벌노랑이(15.0%), 들깨풀(14.1%), 산국(11.2%) 등이 주요 출현종이었으며, 시공초기에 우점하던 돌나물, 섬기린초는 상대우점치가 낮아졌으며, 강아지풀, 개망초, 비수리, 쥐손이풀, 패랭이꽃 등 새로운 식물종이 다수 출현하였다. 시공 150일 후에는 초장이 높은 큰기름새(40.4%)가 우점하였으며, 산국(14.3%)과 돌나물(14.6%)의 상대우점치가 높게 나타났다. 새로운 출현종으로는 바랭이, 사철쑥, 쑥부쟁이가 있었다.

표 8. 실험구C의 상대우점치 변화

종 명	상대우점치(%)		
	50일 경과	100일 경과	150일 경과
<i>Sedum sarmentosum</i>	37.6	6.5	14.6
<i>Sedum takesimense</i>	44.8	3.4	2.7
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	8.0	15.0	8.8
<i>Spodiopogon sibiricus</i>	9.6	32.4	40.4
<i>Setaria viridis</i>		4.5	6.4
<i>Erigeron annuus</i>		2.8	2.2
<i>Mosla punctulata</i>		14.1	2.7
<i>Lespedeza cuneata</i>		0.5	1.0
<i>Chrysanthemum boreale</i>		11.2	14.3
<i>Geranium sibiricum</i>		2.8	1.0
<i>Dianthus sinensis</i>		6.8	1.9
<i>Digitaria sanguinalis</i>			3.1
<i>Artemisa capillaris</i>			0.1
<i>Aster yomens</i>			0.8

실험구별 시공 후 시간경과에 따른 상대우점치의 변화를 살펴본 결과 3개유형의 실험구 모두 시공초기에는 돌나물, 섬기린초, 벌노랑이 등이 주요 출현종이었으며, 시간이 흐르며 따라

큰기름새, 산국 등 벼과나 국화과 식물의 상대우점치 및 출현종수가 많아지는 경향을 나타내었다.

## 2. 실험구별 출현 종수의 변화

실험구별 출현종수의 변화를 살펴보기 위해 실험시공 후 50일 간격으로 고정조사구에 대해 출현종수 조사를 실시하였다. 그림 2와 같이 실험시공 50일 후(6월초)의 각 실험구별 1m<sup>2</sup>당 평균출현종수는 실험구A 3.6종, 실험구B 1.7종, 실험구C 2.4종으로 3개 실험구 모두 삼수를 식재한 돌나물과 섬기린초가 주요 출현종이었다. 한편 파종한 식물종 중 벌노랑이, 패랭이꽃, 큰기름새 등만이 소수 출현했을뿐, 파종한 대부분의 종이 출현하지 않았다. 실험시공 100일 후(7월말)에는 실험구A의 1m<sup>2</sup>당 평균출현종수가 9.1종, 실험구B 5종, 실험구C 5.2종으로 모든 실험구의 출현종수가 2배 이상 증가하였다. 실험구A의 새로운 출현종으로는 비수리, 큰기름새, 사철쑥, 강아지풀, 명아주 개망초, 각시취 등이 있었다. 실험구B에는 종자를 파종한 패랭이, 산국, 비수리 등이 출현하였으며, 강아지풀, 도깨비바늘, 바랭이, 명아주 등이 자연이입되었다. 실험구C는 종자를 파종한 패랭이꽃, 산국, 비수리 등과, 자연이입된 강아지풀, 들깨풀, 개망초 등이 출현하였다. 실험시공 후 150일이 경과한 뒤(9월중순)의 실험구별 1m<sup>2</sup>당 평균출현종수는 실험구A 11종, 실험구B 6.4종, 실험구C 7.1종으로 종수 증가추세가 다소 둔화되었으나, 실험구 전체적으로 쑥부쟁이, 바랭이, 각시취 등 벼과와 국화과 식물이 꾸준히 증가하였다. 한편 파종한 참억새는 일부지역에 소수 분포하였으나 출현개체수가 적어 고정조사구에는 포함되지 않았다.

본 실험은 자생종을 이용하여 폐탄광지를 녹화시키기 위한 환경친화적인 녹화공법으로 3개 실험구 모두 초기에는 출현종수가 적었지만 시간이 흐르면서 1m<sup>2</sup>당 평균출현종수가 공법에 따라 6.4종~11종으로 증가해 공법에 따라 다소 차이는 있지만 많은 종들이 출현하였다. 또한 자생종만을 이용하여 주변 산림지역과 조화

되는 식생경관을 형성하였으며, 주변지역으로부터 다양한 식물종의 자연이입이 원활하게 이루어져 주변 산림과 유사한 형태의 식생으로 생태적전이가 활발하게 이루어질 것으로 판단된다.

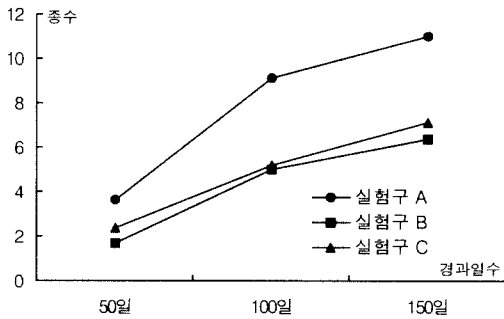


그림 2. 실험구별 출현 종수의 변화

### 3. 실험구별 피도 및 녹지용적의 변화

실험구별 시공초기(50일 경과 후) 1m<sup>2</sup>당 평균 피도는 실험구A 23.5%, 실험구B 4.4%, 실험구C 5.4%로 모든 실험구의 초기 피복율이 낮았다. 실험시공 후 100일이 경과한 시점(7월말)의 평균피도(m<sup>2</sup>)는 실험구A는 69.9%로 비교적 양호한 피복율을 나타냈으나, 실험구B와 C는 각각 20.3%, 20.9%로 피복율이 낮았다. 실험시공 150일 경과 후(9월중순)에는 실험구A가 120.8%로 완전히 피복되었으며, 실험구B와 C는 각각 61.8%와 73.1%이었다(그림 3).

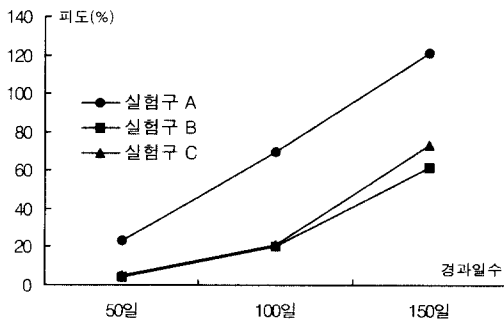


그림 3. 실험구별 피도 변화

실험시공 후 50일이 경과한 시점(6월초)의 실험구별 1m<sup>2</sup>당 평균녹지용적은 실험구A 0.009m<sup>3</sup>, 실험구B 0.002m<sup>3</sup>, 실험구C 0.002m<sup>3</sup>로 초기 피복율과 초장이 낮아 녹지용적이 낮았으며, 실험구에 따른 차이도 거의 없었다. 실험시공 후 100일이 경과한 시점(7월말)의 실험구별 1m<sup>2</sup>당 평균녹지용적은 실험구A는 0.13m<sup>3</sup>, 실험구B와 C는 각각 0.03m<sup>3</sup>, 0.04m<sup>3</sup>로 증가하였다. 실험시공 후 150일 경과 후(9월중순)에는 실험구A의 평균용적(m<sup>3</sup>)이 0.38m<sup>3</sup>로 급격히 증가하였으며, 실험구B는 0.09m<sup>3</sup>으로 비교적 소폭 증가하였다. 실험구C는 0.21m<sup>3</sup>로 높은 증가율을 보였다(그림 4).

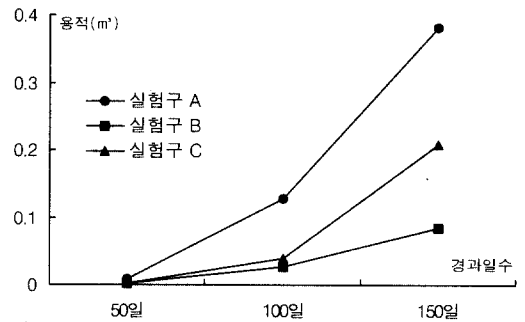


그림 4. 실험구별 녹지용적의 변화

### 4. 실험구별 출현개체수 비교

실험구별 식생의 활착현황을 파악하기 위해 실험시공 100일 후(7월말)에 실험구별로 9개소의 고정시험구를 대상으로 개체수를 조사하였다.

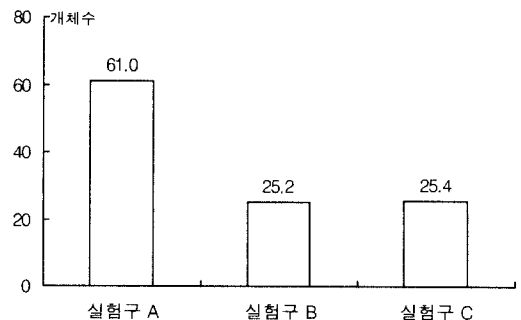


그림 5. 실험구별 출현개체수(시공 100일 경과)

조사결과 실험구A의 평균개체수가 61.0개/m<sup>2</sup>로 실험구B 25.2개/m<sup>2</sup>, 실험구C 25.4개/m<sup>2</sup>에 비해 2배 이상 많이 활착해 있어 실험구A가 식생의 발아 및 활착에 가장 효과적인 것으로 나타났다(그림 5).

한편 실험구C 지역의 소단 상단부에 도입한 버드나무썩단은 실험시공후 약 50일 경과한 뒤 가지가 돋기 시작하였으며, 일부 가지는 약 0.1~0.2m까지 성장하였다. 시공 후 100일이 경과한 시점에는 버드나무가지가 약 0.5~1m까지 성장하였으며, 발생가지수는 평균 4.2개/m로 나타났다. 시공 후 150일 경과한 뒤에는 버드나무의 가지가 0.8~1.5m정도까지 성장하였으며, 발생가지수의 변화는 없었다. 이상의 결과로 볼 때 버드나무썩단을 이용한 버들자연실험구(건설신기술 201호)은 식생활착이 불리한 폐탄광지에서 활착 및 성장상태가 양호한 것으로 나타나 폐탄광지의 침식 및 유실방지 뿐만 아니라 효과적인 녹화성과는 물론 목본의 직접적인 도입으로 식생천이를 촉진할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 실험시공지 자연이입종

표 9는 각 실험구별 실험시공지에 자연이입된 종목록이다. 실험시공지에 이입된 식물종은 총 28종으로 이는 실험시공지에 파종한 식물종수(7종)보다 4배가 많았다. 자연이입된 28종중 목본종은 물박달나무, 물푸레나무, 미역줄, 박달나무, 참싸리, 산딸기, 개쉬땅나무 등 7종이었으며, 귀화식물은 가는털비름, 붉은토끼풀, 개망초, 서양민들레, 겹달맞이꽃 등 5종이었다. 실험구A에 자연이입종 된 식물종은 총19종, 실험구B 12종, 실험구C 12종으로 실험구A에 자연이입된 식물종이 타실험구에 비해 2배정도 많았다. 실험구A에는 박달나무, 물박달나무, 산딸기, 참싸리, 미역줄 등 총 5종의 목본종이 출현하였으며, 실험구B에는 물푸레나무와 산딸기, 실험구C에는 산딸기와 개쉬땅나무가 자연이입되었다. 한편 3개 유형의 시공구에 모두 출현한 종으로는 강아지풀, 바랭이, 산딸기, 각시취, 개망초 등이 있었다.

표 9. 실험시공지의 자연이입종 목록

실험구	A	B	C	생활형 <sup>*</sup>
<i>Setaria viridis</i>	●	●	●	T
<i>Calamagrostis arundinacea</i>	●			H
<i>Digitaria sanguinalis</i>	●	●	●	T
<i>Echinochloa crus-galli</i>		●		T
<i>Betula schmidtii</i>	●	●		P
<i>Betula davurica</i>	●			P
<i>Humulus japonicus</i>	●	●		T
<i>Chenopodium album</i> var. <i>centroru brum</i>	●	●		T
<i>Amaranthus patulus</i>		●		T
<i>Rubus crataegifolius</i>	●	●	●	P
<i>Sorbaria sorbifolia</i> var. <i>stellipila</i>			●	P
<i>Potentilla chinensis</i>	●			H
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	●			P
<i>Trifolium pratense</i>	●			H
<i>Geranium sibiricum</i>			●	H
<i>Tripterygium regelii</i>	●			P
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>		●		P
<i>Oenothera biennis</i>			●	T
<i>Mosla punctulata</i>			●	T
<i>Patrinia villosa</i>			●	H
<i>Saussurea pulchella</i>	●	●	●	T
<i>Artemisia iwayomogi</i>	●			P
<i>Artemisia capillaris</i>	●		●	H
<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>	●			H
<i>Synurus excelsus</i>	●		●	H
<i>Erigeron annuus</i>	●	●	●	T
<i>Bidens bipinnata</i>		●		T
<i>Taraxacum officinale</i>	●			H

\* T : 1~2년초 H : 다년초, P : 목본

## IV. 결론 및 제언

폐탄광지를 주변식생과 유사한 형태의 식생으로 녹화시킬수 있는 방안을 모색하기 위해 폐탄광지에 실험적용한 3가지 유형의 실험구 조사·분석결과 폐탄더미 위에 1cm 두께로 식생기반층을 조성하고 자생종을 파종한 실험구A가 출현종수, 피복율, 출현개체수, 녹지용적, 자연이입종수 등 조사 분석한 모든 부분에서 월등한 효과를 나타냈다. 따라서 향후, 폐탄광지 녹화는 폐탄광지에 적응성이 있는 자생종 사용, 식생활착이 가능한 최소한의 식생기반층 조성, 시공능률 향상을 위한 기계화시공 등 생



태적, 경제적 측면을 고려한 방향으로 녹화공법을 발전시켜나아가야 할 것이다. 또한 폐석산의 환경문제 발생을 최소화하고 주변환경과 조화되게 하기 위해서는 침식을 방지할 수 있는 완만한 경사와 주변환경과 어울리는 자연적인 형태로 조성해야 하며, 아울러 하천 및 지하수 오염의 근본적인 원인인 침출수 문제를 해결해야 할 것으로 사료된다.

## 인 용 문 헌

- 김계훈, 윤주용, 류순호. 1995. 한국토양중 Cs-137과 K-40의 분포. 한국토양학회지 28 : 33-40.
- 김정규·이상환. 1999. 식물을 이용한 토양복원 - Phytoremediation. 한국환경농학회 1999년 심포지움 논문집.
- 석탄산업합리화사업단. 1995. 폐광에 따른 광산지역 환경개선 연구. 석탄산업합리화사업단 연구보고서.
- 우보명. 2000. 폐탄광지의 산림훼손지복구 및 폐석유실방지대책에 관한 연구. 환경복원녹화기술학회지 7 : 24-34.
- 오구균. 2000. 1995년 전·후 폐탄광지 복구시공 비교평가. 폐탄광지의 환경복원녹화기술개발 국제심포지움 자료집.
- 임경빈. 1979. 임지의 경제적 이용 및 광산촌 녹화에 관한 연구. 대한석탄공사 연구보고서.
- 현정오. 1997. 생물공학기술을 이용한 환경오염정화용 포플러의 선발 및 육종. 농림수산특정연구과제 연차실적 및 계획서.
- Bussler, B. H., W. H. Byrnes, P. E. Pope, and W.R. Chaney. 1984. Properties on minesoil reclaimed for forest land use. Soil Sci. Soc. of Am. J. 48 : 178-184.
- Costigan, P. A. 1981. The reclamation of acid colliery spoil. I. Acid production potential. J. Appl. Ecol, 18 : 865-878.
- Hiller, D. A. 1997. Rekultivierung von Bergmaterialhalden des Steinkohlenbergbaues. In : Dt. Inst. f. Fernstudienforschung an der Uni. Tuebingen(Hrsg.) : 383-391.
- Schulz, D. 1991. Begrueungsmassnahmen bis Anfang der 80er Jahre. In : Wiggering und Kerth(Hrsg.) : Berghalden des Steinkohlenbergbaus. Wiesbaden. 163-166.
- Van Rensburg, L., R. I. De Sousa Correia, J. Booyen, and M. Ginster. 1998. Revegetation on a coal fine ash disposal site in South Africa. J. Environ. Qual. 27 : 1479-1486.
- William T. Plass. 1978. Reclamation of coal-mined land in Appalachia. Journal of Soil and Water conservation 33(2) : 58-61.
- Wipf, J. 1993. Rekultivierung von Berghalden, Steinkohlenbergbau an der Ruhr-Leitziele bei Rekultivierungen. In : LA 5 : 37-38
- Wills G. Vogel. 1981. A guide for revegetating coal minesoils in the Eastern United States. Dep. of Agr. Forest Service.

接受 2000年 11月 10日