

## 폐광산 주변에 발생하는 잡초 식생의 특징

홍선희<sup>1</sup>, 이용호<sup>1</sup>, 나채선<sup>1</sup>, 김대연<sup>1</sup>, 김정규<sup>1</sup>, 강병화<sup>1</sup>, 심상인<sup>2,3\*</sup>

### Analysis of Weed Vegetation in Vicinity of Abandoned Mines

Sun Hee Hong<sup>1</sup>, Yong Ho Lee<sup>1</sup>, Chae Sun Na<sup>1</sup>, Dae Yeon Kim<sup>1</sup>  
Jeong Gyu Kim<sup>1</sup>, Byeung Hoa Kang<sup>1</sup> and Sang In Shim<sup>2,3\*</sup>

**ABSTRACT** Field study to find appropriate species for phytoremediation and phytomonitoring with higher plants was carried out at four abandoned metalliferous mines. In order to know the tolerant degree of plant resources collected at heavy metal polluted sites, soil and plants were sampled at same sites and metal concentrations were determined. Most serious heavy metal polluted in the sites was As that showed range from 29.1 to 1372.2 mg kg<sup>-1</sup> in investigated area. The dominant species were *Oenothera biennis*, *Commelina communis*, *Persicaria senticosa*, *Conyza annuus*, *Artemisia princeps*, and *Erigeron canadensis*. These species were predominant species that were proliferated in any survey area. Compared with other sites, vegetational characteristics of Dal-Seong, a mine site abandoned early in 1973, showed higher diversity index and lower dominance index. Distributions of weed species according to life cycle indicated that the proportions of perennial plants were lowered in every investigated site. Although the polluted areas were distant from each other, similarity indices among these vegetation were relatively similar. These results means the vegetations of abandoned mine areas were beginning stage of vegetational succession, and the vegetations were adversely affected by disturbance with heavy-metals and lack of water in soil.

**Key words:** biomonitoring; heavy metal; phytomonitoring; pollution; weed vegetation.

<sup>1</sup> 고려대학교 생명과학대학(Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea).

<sup>2</sup> 경상대학교 농업생명과학대학 농학전공(Dept. of Agronomy, College of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea).

<sup>3</sup> 경상대학교 농업생명과학연구원(Institute of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea).

\* 연락저자(Corresponding author) : Phone) +82-55-751-5423, Fax) +82-55-751-5420, E-mail) sishim@gsnu.ac.kr

(Received January 22, 2010; Examined February 20, 2010; Accepted March 15, 2010)

## 서 언

토양 오염은 인간 활동에 의하여 생겨나는 여러 가지 물질이 토양에 들어감으로써 환경구성요소로서의 토양이 그 기능을 상실하는 것으로 정의된다(조 등 2002). 토양 오염은 대체로 지하자원의 이용으로 암석 중의 무기성분이 지표에 쌓이거나, 제련소, 산업체, 대기로부터의 침착물, 농업자재, 폐기물 등으로부터 유래된다. 토양 오염은 오염물질의 특성에 따라서 중금속, 준금속, 혹은 방사성 물질에 오염된 토양과 유기화합물에 오염된 토양은 정화가 필요하며 그 정화방법은 오염물질의 종류에 따라 근본적인 차이가 있다. 여러 오염 물질들 중 중금속은 독성이 강하고 분해되지 않으며 생태계 먹이연쇄로 인간에게까지 영향을 줄 수 있기 때문에 그 심각성이 부각되어져 왔다.

여러 중금속의 오염원 중 특히 폐광산은 광산폐기물로 인한 주변 환경을 위협하는 오염원으로서의 관심이 집중되고 있다. 특히 폐광산은 많은 수가 농경지 주변에 위치하고 있어 농업생태계와 밀접한 연관이 있다. 국내에는 전국적으로 약 1,870개소의 광산이 산재되어 있으며, 이들 중 금속광산이 318개, 석탄광이 379개, 그리고 비금속광산이 1,173개소이며, 이들의 약 80%가 휴광 또는 폐광된 상태이다(환경부 2005). 이들 휴광산 또는 폐광산에는 광미와 광재 그리고 갱도가 그대로 방치되고 있어 갱내수의 하천유입, 비산먼지, 광미 유실 등으로 인하여 인근지역의 농토, 임야 및 생활환경이 오염될 가능성이 상존하고 있다(박 1994).

폐광산 주변 지역의 중금속 오염 토양에 대한 복원 기법 중 기존의 물리, 화학적인 토양정화기술(Montero 등 1997; Banerjee 등 1997; Bolton 등 1996; Fann 등 1998; 최 등 2004)은 막대한 자금, 에너지 및 노동력이 필요할 뿐 만 아니라, 환경교란 등의 2차 오염피해 등을 수반하므로 오염토양을 경제적이면서도 환경친화적으로 정화시킬 수 있는 기술들이 개발되고 있다. 이 중 토양으로부터 유해한 오염물질을 제거, 안정화 또는 무독화시키기 위해 식물을 이용하는 기법인 식물정화법(phytoremediation)이 있다. 이 방법은 태양

에너지에 의하여 가동되는 청정기술이라는 점과 환경교란을 최소화시키는 수동적이며 현장성이 높은 기술이라는 점, 그리고 환경적인 친밀감이 있어서 대중이 좋아하는 기술이며, 경제적이란 점 등의 이점이 있다(Cunningham과 Ow 1996). 그러나 이 방법의 성패는 효율적인 식물종의 선택에 달려 있다고 볼 수 있다.

폐광지의 식생 복원은 오염지역의 환경 개선 측면에서 중요한데, 이를 위해서는 자연적인 식생복원보다는 인위적이고 적극적인 복원작업이 이루어져야 한다. 이에 적합한 식물종들은 서식처가 특정지역에 국한되는 것이 아니라 다지역에 대면적으로 풍부하게 발생하는 우점 잡초종이라 할 수 있다. 또한 대부분의 휴·폐광지가 산간 고지대에 분포하고 보수성이 낮은 토양이기 때문에 내건성이 요구되며 지속적인 피복 상태를 유지해야 하기 때문에 일년생보다는 다년생이 적합하고, 건물생산량이 많은 식물이 우선적으로 요구된다고 할 수 있다. 또한 그 지역의 식물종을 이용한 외국의 연구 결과는 단지 참고로 해야 할뿐 국내 기후 및 지형에 적합하지 않을 수 있고, 더욱이 일출되었을 경우 생태계교란 등의 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려가 있어야 한다.

우리환경에 적응하여 자라는 자생식물은 환경에 대한 가소성이 있으나 역치 이상의 환경 변화에 처할 경우 그 발생 양상이 변하게 된다. 폐광산 주변 지역은 인위적인 훼손에 의해 토양의 완충 및 양·수분 공급 기능이 현저히 상실된 지역이므로 주변 지역과 상이한 식생구조를 보인다. 시간이 흐를수록 오염물질에 대해 내성인 종들이 그렇지 못한 종들이 있던 자리를 차지하게 되고, 독특한 식생구조를 가지게 된다. 따라서 폐광산 지역에 자생하는 잡초 조사는 오염지 복원에 있어서 요구되는 가장 기초적인 자료라 할 수 있다.

본 연구는 국내 주요 폐광산 지역의 식생구조를 식물사회화학적 방법으로 분석하여 폐광산 지역에 대한 적응성이 큰 식물종을 밝히고 이를 향후 오염지 식생 관리에 요구되는 기초 자료로 이용하고자 실시하였다. 더불어 본 연구에서 확인된 폐광지의 우점 식물종은 중금속 오염지에서 적용이 모색되는 식물정

화법 소재 개발의 기초 자료로 활용이 가능하다.

Pielou 1966), 우점도(dominance index, Simpson 1949)를 산출하였다.

### 재료 및 방법

#### 오염지 현지 조사

환경부 기초조사자료(환경부 2005)를 근거로 중금속 오염의 심각성이 예상되는 금정, 제2연화, 달성, 군북광산 등 4개 지역에 대해 2년에 걸쳐 식물 발생이 왕성한 5월부터 9월까지 조사하였다. 식생조사는 조사지역의 넓이가 갱구 주변 및 광미 더미, 침출수 주변수로에 한정하여 조사하였으므로 방형구를 사용하지 않고, 전체 조사지점에 대한 피복도를 Domin의 피도계급을 기초로 달관으로 평가하였다(Bannister 1966).

#### 토양 분석

토양 분석은 핸드오거(hand auger)를 이용하여 표토(A horizon, 20cm)에서 유기물 층을 걷어낸 후 채취하였다. 채취한 토양을 음건한 후 2mm 체를 통과시킨 토양을 토양오염공정시험법(환경부 2005)에 준하여 As, Cu, Cd, Zn을 ICP-OES(Varian PRO, USA)을 이용하여 정량하였다.

#### 자료의 분석

조사된 광산별 식생은 식물 생활환을 기준으로 일년생, 이년생, 다년생으로 나누어 그 비율을 구하고, 조사된 식생의 피도를 기준으로 종 풍부도(species richness, Margalef 1968), 종 다양성(species diversity, Shannon-Wiener 1949), 균등도(species evenness,

$$■ Da(\text{종 풍부도}) = (s-1) / \log N$$

s는 출현종수, N은 총개체수

$$■ H'(\text{종 다양성}) = -\sum pi \log pi$$

pi = ni / N (pi는 전체 출현종 중에서 i번째의 종이 차지하는 비율)

$$■ C (\text{우점도}) = \frac{\sum ni (ni-1)}{N (N-1)}$$

또한 조사된 모든 종에 대해서 각각 종의 출현빈도, 상대빈도, 평균피도, 상대피도를 구하여 이를 중요치(important value, Curtis와 McIntosh 1951)로 환산하여 광산식생을 이루는 초종의 대표성을 평가하였다. 각 광산 초본식생 사이의 군집유사도지수(similarity index)는 Sørensen 계수(Sørensen 1948)를 이용하였다.

### 결과 및 고찰

폐광산의 갱구와 광미 적체지를 중심으로 토양시료를 채취하여 0.1N HCl 추출물내 가용성 중금속(Cd, Cu, Zn, As) 함량을 조사한 결과는 표 1과 같다. 조사대상 폐광산 토양에서 비소의 경우 모두 오염 농도가 대책기준을 초과하는 축적량을 보였다. As는 급성 혹은 만성으로 사람에게 중독현상이 나타나는데 pH와

**Table 1.** Heavy metals concentration in soils from 4 abandoned mine soils in Korea.

Mine	Abandoned year	Location	Element	Heavy metal concentration(mg kg <sup>-1</sup> )			
				Cd	Cu	Zn	As
Geum-jeong	1988	Gyungbuk Bonghwa	Ag, Au	2.8	15.0	183.7	1372.2
Yeon-Hwa 2	1987	Gangwon Samchok	Cu, Pb, Zn	10.0	100.9	1263.5	29.1
Dal-Seong	1973	Gyungbuk Dalseong	W, Mo	3.4	29.2	8.3	67.5
Gun-buk	1977	Gyungnam Haman	Ag, Au, Fe	0.3	45.5	6.7	34.1

**Table 2.** Ranking of important plant species occurred in 4 abandoned mine area.

Species	Coverage <sup>1)</sup>				F <sub>i</sub> <sup>2)</sup>	RF <sub>i</sub> <sup>3)</sup>	RC <sub>i</sub> <sup>4)</sup>	IV <sup>5)</sup>
	Kum-jung	Yeon-Hwa	Dal-Sung	Ham-an				
<i>Oenothera biennis</i> (달맞이꽃)	5	5	6	4	1	0.029	0.038	0.068
<i>Commelina communis</i> (닭의장풀)	5	4	5	6	1	0.029	0.038	0.068
<i>Persicaria senticosa</i> (머느리밀씻개)	4	4	4	6	1	0.029	0.034	0.064
<i>Erigeron annuus</i> (개망초)	4	4	4	5	1	0.029	0.033	0.062
<i>Conyza canadensis</i> (망초)	5	3	3	4	1	0.029	0.029	0.058
<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i> (쑥)		6	6	6	0.75	0.022	0.034	0.057
<i>Humulus japonicus</i> (환삼덩굴)	5		6	5	0.75	0.022	0.031	0.053
<i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>purpurascens</i> (억새)	5		6	5	0.75	0.022	0.031	0.053
<i>Pueraria thunbergiana</i> (쑥)		4	4	6	0.75	0.022	0.027	0.049
<i>Youngia denticulata</i> (이고들빼기)	4		5	4	0.75	0.022	0.025	0.047
<i>Melandryum firmum</i> (장구채)	4		3	4	0.75	0.022	0.021	0.043
<i>Equisetum arvense</i> (쇠뜨기)		4	4	3	0.75	0.022	0.021	0.043
<i>Corydalis speciosa</i> (산괴불주머니)	4	2		4	0.75	0.022	0.019	0.041
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (냉이)	2	3	4		0.75	0.022	0.017	0.039
<i>Ambrosia artemisiifolia</i> var. <i>elatior</i> (돼지풀)		6	5		0.5	0.015	0.021	0.036
<i>Cassia mimosoides</i> var. <i>nomame</i> (차풀)			6	5	0.5	0.015	0.021	0.036
<i>Artemisia capillaris</i> (사철쑥)		5		5	0.5	0.015	0.019	0.034
<i>Youngia sonchifolia</i> (고들빼기)		4	5		0.5	0.015	0.017	0.032
<i>Artemisiaiwayomogi</i> (더위지기)	4	5			0.5	0.015	0.017	0.032
<i>Boehmeria spicata</i> (쭈깨잎나무)			5	4	0.5	0.015	0.017	0.032
<i>Hemistepta lyrata</i> (지칭개)	4		4		0.5	0.015	0.015	0.030
<i>Chrysanthemum boreale</i> (산국)			4	4	0.5	0.015	0.015	0.030
<i>Plantago asiatica</i> (질경이)		5	3		0.5	0.015	0.015	0.030
<i>Rumex crispus</i> (소리쟁이)	4		4		0.5	0.015	0.015	0.030
<i>Glycine soja</i> (돌콩)			4	3	0.5	0.015	0.013	0.028
<i>Setaria viridis</i> (강아지풀)		3	4		0.5	0.015	0.013	0.028
<i>Oplismenus undulatifolius</i> (주름조개풀)		3	4		0.5	0.015	0.013	0.028
<i>Persicaria filiforme</i> (이삭여뀌)	3		4		0.5	0.015	0.013	0.028
<i>Chelidonium majus</i> var. <i>asiaticum</i> (애기똥풀)	3	3			0.5	0.015	0.011	0.026
<i>Lactuca indica</i> var. <i>laciniata</i> (왕고들빼기)			3	2	0.5	0.015	0.01	0.024
<i>Carpesium macrocephalum</i> (여우오줌)	2	3			0.5	0.015	0.01	0.024
<i>Chenopodium album</i> var. <i>album</i> (흰명아주)	0.5	3			0.5	0.015	0.007	0.021
<i>Agrimonia pilosa</i> (짚신나물)		5			0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Carduus crispus</i> (지느러미영경귀)		5			0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Lespedeza cuneata</i> (비수리)				5	0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Phragmites communis</i> (갈대)			5		0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Rosa wichuraiana</i> (돌가시나무)				5	0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Rumex obtusifolius</i> (돌소리쟁이)				5	0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Taraxacum officinale</i> (서양민들레)	5				0.25	0.007	0.01	0.017
<i>Bidens frondosa</i> (미국가막사리)			4		0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Chenopodium album</i> var. <i>centrorubrum</i> (명아주)	4				0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Lepidium apetalum</i> (다닥냉이)			4		0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Aquilegia flabellata</i> var. <i>oxysepala</i> (매발톱꽃)	4				0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Artemisia montana</i> (산쑥)	4				0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Aster koraiensis</i> (별개미취)	4				0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Boehmeria tricuspis</i> (거북꼬리)		4			0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Bupleurum falcatum</i> (시호)		4			0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Clematis fusca</i> var. <i>violacea</i> (종덩굴)		4			0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Galium verum</i> var. <i>japonicus</i> (솔나물)			4		0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Ixeris chinensis</i> var. <i>strigosa</i> (선쑥마귀)	4				0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (담쟁이덩굴)				4	0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Taraxacum platycarpum</i> (민들레)		4			0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Trifolium pratense</i> (붉은토끼풀)			4		0.25	0.007	0.008	0.015

Table 2. Continued.

Species	Coverage <sup>1)</sup>				F <sub>i</sub> <sup>2)</sup>	RF <sub>i</sub> <sup>3)</sup>	RC <sub>i</sub> <sup>4)</sup>	IV <sup>5)</sup>
	Kum-jung	Yeon-Hwa	Dal-Sung	Ham-an				
<i>Trifolium repens</i> (토끼풀)			4		0.25	0.007	0.008	0.015
<i>Chenopodium ficifolium</i> (좁명아주)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Kummerowia striata</i> (매듭풀)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Lactuca indica</i> var. <i>dracoglossa</i> (용설채)	3				0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Agropyron repens</i> (구주개밀)	3				0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Arenaria serpyllifolia</i> (벼룩이자리)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Draba nemorosa</i> var. <i>hebecarpa</i> (꽃다지)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Stellaria media</i> (별꽃)		3			0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Youngia japonica</i> (보리쟁이)	3				0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Asperula odorata</i> (선갈퀴)		3			0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Asparagus schoberioides</i> (비짜루)		3			0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Chrysanthemum indicum</i> (감국)				3	0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Coreopsis lanceolata</i> (큰금계국)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Descurainia sophia</i> (재쑥)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Dryopteris crassirhizoma</i> (관중)	3				0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Galium spurium</i> (갈퀴덩굴)		3			0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Lilium tigrinum</i> (참나리)				3	0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i> (별노랑이)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Potentilla fragarioides</i> var. <i>major</i> (양지꽃)	3				0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Prunella vulgaris</i> var. <i>lilacina</i> (꽃풀)		3			0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Rubia akane</i> (꼭두서니)				3	0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Sasa borealis</i> (조릿대)	3				0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Viola mandshurica</i> (제비꽃)			3		0.25	0.007	0.006	0.013
<i>Alopecurus aequalis</i> (뚝새풀)	2				0.25	0.007	0.004	0.011
<i>Cardamine flexuosa</i> (황새냉이)	2				0.25	0.007	0.004	0.011
<i>Dipsacus japonicus</i> (산토끼꽃)		2			0.25	0.007	0.004	0.011
<i>Rorippa islantica</i> (속속이풀)	2				0.25	0.007	0.004	0.011
<i>Agastache rugosa</i> (배초향)			2		0.25	0.007	0.004	0.011
<i>Nepeta cataria</i> (개박하)	2				0.25	0.007	0.004	0.011
<i>Impatiens textori</i> (물봉선)	1				0.25	0.007	0.002	0.009
<i>Lepidium virginicum</i> (콩다닥냉이)	1				0.25	0.007	0.002	0.009
<i>Cerastium holosteoides</i> var. <i>hallaisanense</i> (점나도나물)	0.5				0.25	0.007	0.001	0.008

<sup>1)</sup>coverage : 1~0%, 10~100%, <sup>2)</sup>F<sub>i</sub> : frequency, <sup>3)</sup>Rf<sub>i</sub> : relative frequency index, <sup>4)</sup>RC<sub>i</sub> : relative coverage, <sup>5)</sup>IV : importance value.

관련이 깊다고 알려져 있다(Das 1996; Hamel 1998; Ruby 1999; Yang 2002). As의 경우 산화, 환원조건에 따라 주로 As<sup>3+</sup>와 As<sup>5+</sup>의 형태로 존재하는데 이중 독성이 보다 강한 As<sup>3+</sup>는 환원상태에서 독성이 유발되므로 발상태 보다는 논상태에서 더욱 위험하다고 알려져 있다(Bissen와 Frimmel 2003). 조사된 폐광산 지역의 하류에서는 대부분 논농사를 주로 실시하므로 As<sup>3+</sup> 용출에 의한 토양 및 농작물의 오염이 우려되었다. 아연의 경우 아연광산인 제2연화광산을 제외한 모든 광산에서 우려기준 이하로 존재하고 있었고, 나머

지 중금속들은 우려기준을 초과하지 않았다.

폐광산 주변의 식생조사는 주로 폐광산의 갱구 주변과 침출수가 흐르는 수로 주변 및 광미 적체지에서 실시하였다. 조사가 이루어진 폐광산 4개소의 식생조사 결과는 표 2와 같이 85종 정도가 발생하였다. 이 중 조사된 광산지역에서 모두 나타난 식물종은 달맞이꽃, 닭의장풀, 머느리밑씻개, 개망초, 망초 등 5개 초종이다. 이들 초종은 주로 개척종이라 알려져 있는 1~2년생 식물들로 주로 교란지에 맨 처음 정착하는 식생천이의 초기종들이다. 조사지역의 폐광시

기(표 1)가 짧게는 약 20년에서 길게는 30년 이상이 지난 시점에서 아직도 개척종들의 비율이 높음은 그곳의 생육환경이 정상적인 식생천이의 단계를 방해하고 있다는 것을 보여주고 있다. 달맞이꽃의 경우 조사지역 전역에 걸쳐 가장 높은 피복도를 보여 중요치(important value)가 가장 높게 나타났다. 이는 척박한 환경에서도 잘 자라는 달맞이꽃 자체의 생육특성과 오염원에 대한 내성 때문으로 생각된다. 특히 Kim(2007)은 비소 오염지와 비오염지에서 자생하는 달맞이꽃 간의 내성도 차이를 검정한 결과 오염원에 대한 내성이 자연선택에 의해 더 강한 개체군으로 발달을 촉진한다고 보고하였다. 따라서 오염지의 달맞이꽃은 그 자체가 갖는 다산성과 높은 적응성 등으로 인하여 오염지에 많이 발생하고 있다고 사료된다.

대부분의 광산지역의 갱구주변이나 광미 적채장은 오염원과 별개로 물리적으로 거친 자갈 형태의 폐잔석들이 표토층을 덮고 있어 식물이 뿌리를 내릴 작토층이 상대적으로 취약하다. 이러한 표토층에 더해 대부분의 지형이 경사를 이루고 있어 수분스트레스에 취약하며, 남사면의 경우 기존 식생이 빈약하여 여름 한낮에 표면 온도가 70°C 이상으로 달궂질 수도 있으며, 북사면의 경우 일조량 부족과 더불어 적산온도의 부족현상을 보일 수 있다. 이런 이유로 중요치 기준 상위 10개 초종의 특징은 척박지에서 잘 자라는 초종이란 특징이 있다. 이들 중 식생관리상의 용이성, 채종작업, 일출시 주변 생태계에 대한 영향 등의 요인을 고려했을 때 달맞이꽃, 쭉, 억새 등이

phytoremediation을 위한 현장적용에 적합한 초종으로 판단되었다.

폐광산 지역에 대한 2년에 걸친 조사에서 확인된 종수와 피도를 근거로 생활사에 의한 분류, 종 풍부도, 종 다양성, 균등도, 우점도는 표 3과 같다. 달성광산에서 가장 많은 초종 및 종풍부도가 나왔으며, 군북광산에서 가장 낮았다. 이는 군북광산의 경우 시멘트 및 폐석으로 갱구 및 광미의 사면을 마감하였기 때문에 식물 생육에 극히 열악한 토양 조건을 가지고 있어 식생 복원이 더딘 것으로 보여진다. 따라서 식생 복원은 식물이 잘 자랄 수 있는 토양 조건이 갖추어진 후 본격적으로 실시하는 것이 합당한 것으로 판단된다. 금정광산의 경우 가장 최근에 복원작업이 이루어진 곳으로 다른 광산에 비해 아직 다년생의 비율이 상대적으로 낮았으나 다른 광산들은 비슷한 비율로 생활사가 편성되어 있었다. 종 풍부도는 달성광산이 가장 높았으며 금정, 연화, 함안광산 순이었으며, 종 다양성도 같은 순서를 보였다.

2년에 걸친 식생조사표와의 비교결과 조사가 진행된 네 지점의 식생은 초기 개척종에 의한 우점이 강하고, 다년생 초본 및 관목, 교목 등 2차 침입종들의 우점이 본격화되기 전의 단계로 보이며, 그 천이의 과정이 상당히 더디게 진행되고 있었다. 또한 기록되지는 않았으나 광산 주변이 식생들이 쉽게 갱구나 광미로 침입하지 못하고 있는 상항으로 미루어 보아 우선 객토층 및 중금속 내성 개척종들의 지면 피복이 이루어진 경우 다양한 식생이 정착할 것으로 사료되었다.

**Table 3.** Comparison of weed vegetation feature on four abandoned mine area in Korea.

Area	Geum-jeong		Yeon-hwa 2		Dal-Seong		Gun-buk		
	1st yr	2nd yr	1st yr	2nd yr	1st yr	2nd yr	1st yr	2nd yr	
No. of Species	37	32	32	34	41	44	26	28	
Proportion of Life Cycle(%)	Annual	18.92	21.87	15.63	20.59	24.39	25.00	19.23	17.86
	Biennial	43.24	40.63	28.13	29.41	29.27	29.55	26.92	25.00
	Perennial	37.84	37.50	56.25	50.00	46.34	45.45	53.85	49.14
Species Richness	36.79	31.78	31.79	33.79	40.80	43.81	25.79	27.79	
Species Diversity	3.52	3.37	3.43	3.24	3.68	2.68	3.23	3.28	
Species Evenness	0.97	0.97	0.99	0.92	0.99	0.71	0.99	0.98	
Dominance Index	0.031	0.036	0.033	0.033	0.026	0.025	0.040	0.039	

**Table 4.** Comparison of similarity index among investigated areas.

Area	Geum-jeong	Yeon-hwa 2	Dal-Seong	Gun-buk
Geum-jeong		29.0 → 36.4*	33.3 → 39.5	28.6 → 36.7
Yeon-hwa 2			35.6 → 46.2	34.5 → 38.9
Dal-Seong				47.8 → 50.0
Gun-buk				

\*Changes from 1st to 2nd investigated year.

각 광산별 식생조사를 바탕으로 각 광산 식생간의 군집유사도(similarity index)는 표 4와 같다. 각 광산 별로 서로 상당한 거리를 가지고 있는 점을 고려할 때 광산 지역 식생들간의 유사도는 비교적 높다고 할 수 있다. 이는 광산 식생이 지역적인 특이성을 보여주기 보다는 천이 단계상 초기 침입종들의 우점도가 높기 때문에 각 광산별 특이적인 식생이 아직 형성되지 않은 것으로 사료된다. 향후 주변 식생이 침입하여 각 지역 특이성이 높아지면 식생의 유사도는 낮아질 것으로 생각되지만, 시간이 진행됨에 따라 유사도가 높아진 이유는 현재 초기 침입종 중 몇몇 종에 의한 우점이 본격화 되는 시점으로 폐광 초기에 비해 오히려 광산간 군집 유사도가 더 높아진 것으로 생각되며, 본격적인 천이가 발생하고, 지역 특이적인 목본이 침입할 경우 각 지역별 특색이 나타날 것으로 생각된다.

**요 약**

폐광산 주변의 토양 중금속 오염과 이 지역의 식생 조사를 실시한 결과 As의 오염이 가장 심각하게 나타났다. 조사된 광산에서 모두 나타난 초종은 달맞이꽃, 닭의장풀, 머느리밧새, 개망초, 망초 등 5개 초종이며, 이들은 식생천이의 초기종으로, 중요치(important value)는 달맞이꽃이 가장 높았다. 달성광산은 종풍부도 및 종다양성이 가장 높았으며, 오염의 정도와는 별개로 작토층이 잘 발달한 것으로 밝혀졌다. 조사 지점 사이의 리차가 크에도 불구하고 군집유사도는 비교적 높은 것으로 밝혀졌으며 이는 교란에 의한 천이 초기종들의 우점이 강하기 때문으로 생각된다.

**감사의 글**

본 연구는 환경부 ‘차세대핵심환경기술개발사업 (2006-04003-0009-0 및 2009-09001-0050-1)의 지원으로 수행되었음에 감사드립니다.

**인 용 문 헌**

박용하. 1994. 휴폐광된 금속광산 지역의 오염 관리 대책. 한국환경기술개발원. KETRI/1994/RE-14, 588 p.

조성진, 박천서, 엄대익, 2002. 사정 토양학, 향문사.

최휘문, 조순행, 하동윤, 이상은. 2004. Chemical Extraction을 이용한 폐광산 광미내 비소 용출특성 조사 및 제거효율 평가. 대한환경공학회지 26: 111-118.

환경부. 2005. 토양오염시험공정법.

환경부. 2005. 폐금속광산 토양오염실태조사(156개 광산 종합).

Banerjee, D. K., and M. R. Gray. 1997. Analysis of hydrocarbon contaminated soil by thermal extraction gas chromatography. Environ. Sci. Technol. 31:646-650.

Bannister P. 1966. The use of subjective estimates of cover abundance as the basis for ordination. J. Ecol. 54:665-74.

Bissen, M., and F. H. Frimmel, 2003. Arsenic a review. Part I : Occurrence, toxicity, speciation, mobility. Acta Hydrochim. Hydrobiol. 31:9-18.

- Bolton, H., D. C. Girvin, A. E. Plymale, S. D. Harvey and D. J. Workman. 1996 Degradation of metal-nitrilotriacetate complexes by *Chelatobacter heintzii*. *Environ. Sci. Technol.* 30:931-938.
- Cunningham, S. D., and D. W. Ow. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiol.*, 110:715-719.
- Curtis, J. T., and R. P. McIntosh. 1951. An upland forest continuum in the prairie forest noarder region of Wisconsin. *Ecology* 32:476-496.
- Das, D. 1996. Arsenic in ground water in six districts of West Bengal, India. *Environ. Geochem. Health.* 18:5-15.
- Fann, D., D. Pal, E. Lory, L. Karr, A. P. Mathews and P. A. Price. 1998. Hot air vapor extraction for remediation of petroleum contaminated sites. *Proceeding of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference Canada.* 313-321.
- Hamel, S. C., B. Buckley and P. J. Lioy. 1998. Bioaccessibility of metals in soils for different liquid to solid ratios in synthetic gastric fluid, *Environ. Sci. Technol.* 32:358-362.
- Kim D. Y. 2007. Phytoremediation of Arsenic-Contaminated Soils by Using Evening primrose (*Oenothera odorata*). Ph.D dissertation. Korea University Seoul, Korea.
- Margalef, D. R. 1968. *Perspectives in ecological theory.* The University of Chicago Press, Chicago, Ill.
- Montero, G. A., K. B. Schnelle, Jr. and T. D. Giorgio. 1997. Supercritical fluid extraction of contaminated soil. *J. Environ. Sci. Health. A* 32:481-495.
- Pielou, E. C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J. Theor. Biol.* 13:131-144.
- Ravenscroft, P., J. M. McArthur and B. A. Hoque. 2001. Geochemical and palaeohydrological controls on pollution of groundwater by Arsenic. *In: Arsenic Exposure and Health Effects IV.* W.R. Chappell, C.O. Abernathy & R. Calderon (Eds), Elsevier Science Ltd. Oxford. pp. 53-78.
- Ruby M. V., R. Schoof, W. Brattin, M. Goldade, G. Post, M. Harnois, D. E. Mosby, S. W. Casteel, W. Berti, M. Carpenter, D. Edwards, D. Cragin and W. Chappell. 1999. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment, *Environ. Sci. Technol.* 33:3697-3705.
- Shannon, C. E., and W. Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication.* University of Illinois Press.
- Simpson, E. H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163:688.
- Sørensen T. 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant society based on similarity of species content. *Biologiske Skrifter* 5:1-34.
- Yang J. K., M. O. Barnett, P. M. Jardine, N. T. Basta and S. W. Casteel. 2002. Adsorption, sequestration, and bioaccessibility of As (V) in soils. *Environ. Sci. Technol.* 36:4562-4569.