

아연 폐광산에 식생도입을 위한 유기성 토양 개량제의 처리효과

김대연¹ · 이상환² · 정진호¹ · 김정규^{1*}

¹고려대학교 환경생태공학부, ²한국농촌공사 환경지질사업처 환경복원팀

Effects of Organic Amendments on Introducing Pioneer Herbaceous Plants in the Abandoned Zinc Mine Soil Revegetation

Dae-Yeon Kim¹ · Sang-Hwan Lee² · Jinho Jung¹ · Jeong-Gyu Kim^{1*}

¹Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University

²Environmental Response Team, Office of Environmental Geology, KRC

ABSTRACT

Generally abandoned mine soils have serious problems for introducing vegetation such as nutrient deficiency, poor physical properties, and phytotoxicity due to high levels of heavy metals. It is required to improve soil amenity for revegetation. One of its strategies is using organic materials such as compost manure and sludge. The pot experiments was conducted to evaluate the effects of pig manure and municipal sewage sludge on revegetation of mining area soil surface with *Artemisia princeps* and *Zoysia japonica*. Application rate of pig manure and municipal sewage sludge was 75~225 Mg/ha and 150~450 Mg/ha, respectively. The results showed that the application of manure and sludge increased organic matter about two-fold and total nitrogen contents about five-fold of mine soil and improved the growth of plants in all treatments compared to the control. The result of plant tissue analysis showed that both plants accumulate Cd, Cu and Zn in root tissue rather than shoot tissues. Increased sludge application reduced Zn accumulation in both plant tissue. Sequential extraction results indicated that addition of soil amendment induced increment of organically bound fractions of Cu and Zn. Organically bound fraction of Zn was significantly increased from 7.84% to 13.58% in *Artemisia princeps* planted soil and from 7.84% to 14.16% in *Zoysia japonica* planted soil, thereby bioavailability of heavy metals was reduced. The results suggested that application of organic materials to mine soil can reduce phytotoxicity of heavy metals and be helpful in introducing successful revegetation.

Key words : Phytostabilization, revegetation, heavy metals, soil amendment

요 약 문

휴·폐광산 토양에 안정적인 식생도입 시 고농도의 중금속에 의한 독성과 열악한 물리화학적 토양조건은 주요 제한 인자가 됨은 주지의 사실이다. 중금속의 안정화를 목적으로 도입되는 식물의 안정적인 활착을 위해서는 중금속 급성 독성의 경감 및 토양의 물리화학적 특성의 개량이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구는 썩과 잔디를 이용하여 중금속 오염 토양의 안정화할 때 토양개량제로 돈분퇴비(75~225 Mg/ha)와 도시하수슬러지(150~450 Mg/ha)의 처리효과를 살펴보고자 포트(pot) 실험을 수행하였다. 광산토양에 개량제를 처리한 모든 처리구에서 대조구에 비해 썩과 잔디의 초기 생존율 및 성장량이 크게 증가하였고, 퇴비보다는 슬러지 처리구에서 생육개선 효과가 높았다. 중금속의 식물 체내로의 흡수이행에 있어서는 썩과 잔디 모두 지상부보다는 지하부에 중금속이 축적되는 양상을 보였고, 슬러지 처리 토양에서 재배된 썩과 잔디의 체내 중금속 농도가 낮은 것으로 나타나 개량제간 중금속의 생물학적 유효도에 미치는 영향이 있음을 확인할 수 있었다. 토양 개량제 처리에 의해 카드뮴, 아연, 구리 모두 생물학적 유효도가 낮은 형태로 이행하는 것으로 나타났다. 토양 중 중금속의 존재형태에 있어 식물재배 전후의 변화를 측정할 결과 재배 후

*Corresponding author : lemonkim@korea.ac.kr

원고접수일 : 2005. 10. 21 게재승인일 : 2006. 5. 8

질의 및 토의 : 2006. 8. 31 까지

토양에서 대체적으로 잔류상 형태, 산화물결합 형태, 및 치환성 형태 함량은 고르게 감소하였고, 유기물결합 형태 함량은 증가한 것으로 조사되었다. 특히 아연의 유기물결합 형태의 비율은 썩의 경우 7.84%에서 13.58%, 잔디의 경우 7.84%에서 14.16%으로 증가하여 중금속에 대한 유효도가 낮아지는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 퇴비, 슬러지 등의 토양개량제 처리가 그 자체로서 토양중 중금속의 안정화 효과가 있음은 물론 식물안정화를 위해 도입되는 식물의 생육 개선에 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

주제어 : 식물안정화기법, 식생도입, 중금속, 토양개량제

1. 서 론

휴 · 폐광산의 주변토양과 광미 더미는 식물생육에 불리한 이화학적 성질과 고농도의 중금속 때문에 식피(vegetation cover)가 없는 나대지로 존재하는 경우가 많다. 중금속으로 오염된 토양에 식피가 없으면 비바람에 의해 오염토양입자가 침식되기 쉽고, 노출된 토양으로부터 용탈된 중금속이 지하수를 오염시킬 수 있어서 오염의 확산 가능성이 존재한다(Bleeker et al., 2002). 중금속으로 오염된 폐금속광산 토양을 정화하기 위하여 기존의 이화화학적 방법을 적용하는 것은 정화비용이 제약 되는데 비해, 식물과 적절한 토양개량제를 이용하여 토양 중 중금속의 안정화를 꾀하는 기술인 식물안정화기법(phytostabilization)을 적용하는 것은 비용효율적이라는 측면과 정화과정에 있어 환경교란을 최소화 할 수 있는 등의 정화공법으로서의 장점 이외에도 광산 토양의 환경적, 생물학적 건전성(amenity)를 증진시킨다는 면에서 효율적이라 할 수 있다(Chaney et al., 1997, Baker et al., 1994, Tordoff et al., 2000).

식물을 이용한 중금속 오염토양 정화(phytoremediation)는 국내에서도 많이 연구되고 있으나, 대부분이 중금속 고축적종(hyperaccumulator) 탐색을 위한 실내실험에만 국한되고 있고 현장토양에 대한 연구는 미진한 실정이다(김정규 등; 1997, 강병화 등, 1998; 김현아, 2002). 일반적으로 실제 휴 · 폐광산 토양은 고농도로 존재하는 중금속뿐만 아니라 낮은 유기물 함량, 부족한 질소와 인 등의 화학성과 높은 용적 밀도라는 물리성으로 인해 양·수분 보유능이 낮은 특성을 보인다(Tordoff et al., 2000).

식물안정화기법의 효율을 높이기 위해서는 내중금속성의 식물종 선발과 아울러, 선발된 식물의 식재 방법과 개

량제 처리를 포함한 현장 적용성에 대한 연구가 필요하다. 양수분이 결핍되기 쉬운 조건의 휴 · 폐광산 토양의 특성 때문에 유기성 토양개량제나 석회와 화학비료 투여에 의한 토양개량과 식물생육 개선 · 증진에 관해 연구되고 있다(Wong, 1986; Ye et al., 1999; Pitchel et al., 1994; Sabey et al., 1990). 유기물은 토양에서 중금속 보유에 있어 매우 중요한 인자로 작용하며(Adriano, 1986), 토양개량제 사용에 의한 토양 유기물 증진은 토양 중의 중금속을 비유효태로 전환시키거나, 식물체로의 이행을 지연시키는 등 독성저감 효과도 큰 것으로 알려져 있다(Walter and Cuevas, 1999; Ye et al., 2001; Chang et al., 1984).

본 연구는 폐아연광산 토양의 중금속 안정화에 대한 썩과 잔디의 활용가능성을 평가하고 도시하수 슬러지와 돈분 부숙퇴비가 두 식물의 초기 생육에 미치는 영향을 검토하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험토양의 준비

본 연구에 사용한 토양은 강원도 삼척시 가곡면 풍곡리에 소재하는 제2연화광산에서 채취하였다. 제2연화광산은 1969년부터 납, 아연, 동을 생산하다 1987년 폐광된 광산으로 광산주변의 기반암은 화강편마암이며, 광체의 모암은 석회암으로 이루어져 있다. 제2연화광산 갱구주변의 표층토 20 cm(A horizon)에서 채취한 토양을 음건한 후, 4 mm 체로 거친 입경의 자갈을 사별하여 조제한 토양(토양A)을 실험에 사용하였다. 토양A는 납, 아연광산 지대 토양에서 일반적으로 관찰되는 바와 같이 아연과 카드뮴 함량이 매우 높은 수준의 토양이었다(Table 1). 토양 개량

Table 1. Chemical properties of mine soil, sewage sludge and pig manure

	pH	OM	Water contents	TKN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Zn	Cd	Cu	Pb
		%			mg kg ⁻¹			
soil A	7.9	1.47	-	0.03	18.67	65.33	6780.20	7.35	93.25	21.75
sludge	6.4	17.72	296.63	3.86	217.56	274.22	561.92	5.58	296.05	61.11
manure	5.4	31.02	75.39	2.62	1861.24	139.81	67.944	1.30	32.200	27.33

Table 2. Treatment descriptions for pot experiment

Treatments	Descriptions (samples mixed by w/w ratio)
Control	Non amendments
M3	3% manure (75 Mg ha ⁻¹)
M6	6% manure (150 Mg ha ⁻¹)
M9	9% manure (225 Mg ha ⁻¹)
S6	6% sludge (150 Mg ha ⁻¹)
S12	12% sludge (300 Mg ha ⁻¹)
S18	18% sludge (450 Mg ha ⁻¹)

을 위하여 실험에 사용된 돈분퇴비(pig manure)와 도시하수슬러지(municipal sewage sludge)는 Table 1과 같은 물리화학적 특성을 나타냈다.

토양A에 도시하수슬러지는 150, 300, 450 Mg/ha soil의 수준으로 섞고(시험토양 S3, S6, S9), 돈분퇴비는 75, 150, 225 Mg/ha soil의 수준으로 혼합하였다(시험토양 M6, M12, M18). 혼합 토양들을 1개월 간 포장 용수량의 60% 수준으로 수분을 조절하여 묵힌 것을 시험토양으로 하여 포트(pot) 실험에 사용하였다(Table 2). 또한 토양A도 같은 수분조건으로 묵혀서 대조 토양(control)으로 하였다.

2.2. 식물 재배실험

전국에 산재하며 중금속 흡수능이 우수한 것으로 보고된 바(이상환, 1997) 있는 국화과 다년생 초본인 쑥(*Artemisia princeps*)과 지하경 생장이 활발하고 오염된 광산 주변에 산재하는 벼과 다년생 초본인 잔디(*Zoysia japonica*)를 대상 식물로 선택하였다.

쑥과 잔디는 지하경(rhizome)을 채취하여 깨끗이 세척된 모래에서 발아시키고, Epstein양액(1/4 strength)을 공급하며 4주 간 성장시킨 후, 2.1절에서 준비한 시험토양을 1.3 L(Φ12 cm) 용량의 플라스틱 포트에 1.4 kg씩 가비중 1.2로 조절하여 충전한 후, 균일한 크기의 개체를

선별하여 각 포트 당 개체 1주씩 식재하여 유리온실에서 포장용수량의 60%가 되도록 토양수분을 유지하며 8주간 재배하였다.

2.3. 토양 및 식물체 분석

식물을 수확하고 남은 토양을 채취하여 고루 섞어 음건한 후 2 mm와 0.5 mm체를 통과시켜 시료토양을 조제하고 다음과 같이 분석하였다. pH는 토양과 증류수의 비를 1:5로 하여 유리전극으로 측정하였고, 유기물 함량은 Tyurin법, 무기태질소(NO₃⁻, NH₄⁺)는 1N-KCl로 침출하여 킬달 증류법으로 정량하였고, 유효 중금속함량은 0.1N HCl로 침출한 후 원자흡광광도계로 정량하였다(농업과학기술원, 2000).

토양 중 중금속의 형태별 정량은 Chang et al.(1984)이 슬러지 처리 토양에 사용한 방법을 참고로 하여 Table 3에 정리한 바와 같이 중금속의 존재형태를 조사하였다. 형태별로 분획한 중금속 농도는 원자흡광광도계로 정량하였으며 침출된 중금속의 양은 다음의 식에 의해 구하였다.

$$\text{침출액중의 중금속 함량}(\mu\text{g}) = C \times 25 \text{ g} - C' \times M$$

여기서 C는 침출액중의 중금속의 농도(μg/g), C'는 선행 침출과정의 침출액 중 중금속의 농도(μg/g), M은 토양에 잔류하는 선행침출액량(g)이다.

이식 60일 후에 식물을 지상부와 지하부로 나누어 수확하고, 지하부는 흐르는 물과 증류수에 차례로 세척하였다. 채취한 식물체를 80°C에서 24시간 건조하여 건조량을 측정하였고, 이를 분쇄기로 파쇄하여 Ternary solution (HNO₃: H₂SO₄: HClO₄=10: 1: 4)으로 습식 분해 후, 원자흡광분광광도계로 체내 중금속 함량을 정량하였다(농업과학기술원, 2000).

2.4. 통계분석

실험결과에 대한 데이터는 SAS program을 이용하여 one-way ANOVA(Tukey-HSD test)분석을 실시하였다.

Table 3. Sequential extraction procedure and designated chemical form extracted

Extractant	Conc. of extractant (M)	Density of extractant (gcm ⁻³)	Equilibrating time on shaker (hours)	Designated form
KNO ₃	0.5	1.03	16	Exchangeable
NaOH	0.5	1.02	16	Organically bound
Na ₂ -EDTA	0.05	1.00	6	Oxide/carbonate
HNO ₃	4.0	1.12	16 (not on shaker)	Sulfide/Residual

Table 4. Chemical properties of amended mine soils after 30 days aging

	OM	TN	C/N	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺
%		cmol(+) kg ⁻¹			
Control	1.452	0.045	18.72	0.310	2.529	1.172	0.022
M 3	2.416	0.216	6.49	0.414	3.103	1.992	0.039
M 6	2.662	0.198	7.80	0.396	2.988	1.717	0.029
M 9	3.310	0.263	7.30	0.451	4.970	3.533	0.061
S 6	2.102	0.145	8.41	0.535	3.074	4.642	0.027
S 12	2.227	0.173	7.47	0.491	4.769	2.974	0.037
S 18	2.007	0.273	4.26	0.319	6.033	2.999	0.047
Upland Soil	2.500	0.280	5.18	0.550	5.500	-	1.750

3. 결과 및 고찰

3.1. 공시토양 및 개량제의 물리화학적 특성

대조토양, 개량제 및 시험토양의 물리화학적 특성은 Table 1 및 4와 같다. Table 1에 나타난 바와 같이 실험에 이용된 광산토양은 pH가 7.8인 사양토로 식물의 생장이 제한되는 수준은 아니었다. 그러나 토양유기물은 1.42%로 일반 경작지(농업과학기술원, 2000; 농촌진흥청, 2001)와 비교하여 낮았으며, 전질소 함량은 0.03%로 일반 경작지의 1/10에 불과할 정도로 매우 낮았다. 중금속 함량은 0.1N HCl로 침출했을 경우 카드뮴 7.35 mg/kg, 아연 6,780.2 mg/kg, 구리 93.25 mg/kg, 납 21.75 mg/kg으로 아연은 '나' 지역 토양오염대책기준을 크게 상회하고 있는 것으로 나타났고, 카드뮴은 '가' 지역 대책기준을 초과하고 있었고 구리는 '가' 지역 우려기준을 상회하였으며, 납의 경우만 토양오염기준에 미치지 않는 것으로 나타났다(환경부, 2005).

광산 토양에 개량제를 처리하여 30일 간 묵힌 후 토양의 화학적 특성은 Table 4와 같다. 개량제 처리 후 유기물과 질소 함량이 각각 1.47 및 0.03 %에서 2.10~3.31 및 0.14~0.27%으로 높아진 것을 확인할 수 있었다. 그러나 양분외에도 돈분퇴비와 도시하수슬러지에는 고농도의 구리와 아연이 함유되어 있었으나(Table 1), 광산토양 및 개량된 토양의 pH가 중성에 가까운 수치를 나타내고 있으며, 슬러지에 함유되어 있는 유기물이 구리, 납과의 친화력이 매우 커(Shuman, 1999) 이들 중금속의 이동성은 매우 낮을 것으로 판단된다. 돈분퇴비와 도시하수슬러지는 광산 토양의 유기물, 질소 공급원 및 수분보유력 향상을 위하여 처리하였으며, 두 개량제 모두 충분한 토양 유기물과 질소의 공급원임을 알 수 있었다.

3.2. 썩과 잔디의 초기생육

아연 폐광산 토양에 도입되는 정화식물의 초기 생육조건을 개선하기 위하여 개량제를 처리한 토양에서 재배된 썩과 잔디의 초기 성장량은 Fig 1과 같다. 개량제를 처리하지 않은 토양에서는 썩과 잔디가 1주일 이내에 열악한 토양조건과 고농도의 중금속 독성으로 인하여 고사하였고, 각 개량제의 최저 처리수준인 퇴비 75 Mg/ha와 슬러지 150 Mg/ha를 처리한 시용구에서는 생존율이 80%였고 이 이상의 개량제의 처리구에서는 100% 활착하여 무처리에 비하여 활착율이 현저하게 증가하였고, 생육 또한 양호하게 이루어졌다. 활착율 및 초기성장량이 개량제의 처리에 의해 크게 증가된 이유로는 개량제 처리에 의한 중금속의 급성독성을 경감시키는 효과와 토양수분함량 증가 등의 토양물리성의 개량 효과가 이루어졌기 때문이라 사료된다. Williamson et al.(1982)도 유기성 개량제 처리에 의한 오염토양의 물리성을 효과적으로 개선하여 식물생육을 증진시킨다고 보고한 바 있다.

성장량에 있어 개량제간 차이도 확인할 수 있었는데 전반적으로 돈분퇴비를 처리한 광산토양에 비해 도시하수슬러지를 처리한 토양에서 재배된 썩과 잔디의 성장량이 높게 나타났고 돈분퇴비의 경우 시용량의 증가에 따른 식물 성장량의 증가가 유의적으로 나타나지 않은 반면($P < 0.05$), 도시하수슬러지를 사용한 토양의 경우 시용량이 증가함에 따라 식물성장량의 증가가 이루어진 것으로 조사되었다.

돈분퇴비처리구에 있어 퇴비 시용량이 증가함에 따라 오히려 성장량이 감소되는 경우(M9)도 확인되었는데 퇴비의 시용량의 증가에 수반되는 염류 직접의 부작용에 의한 것이라 추정되며 이는 개량제의 시용량을 결정하는데 있어 시사하는 바가 크다고 할 수 있는데, 광산 토양의 토양개량 시 개량제의 시용량을 결정함에 있어 개량제 투입

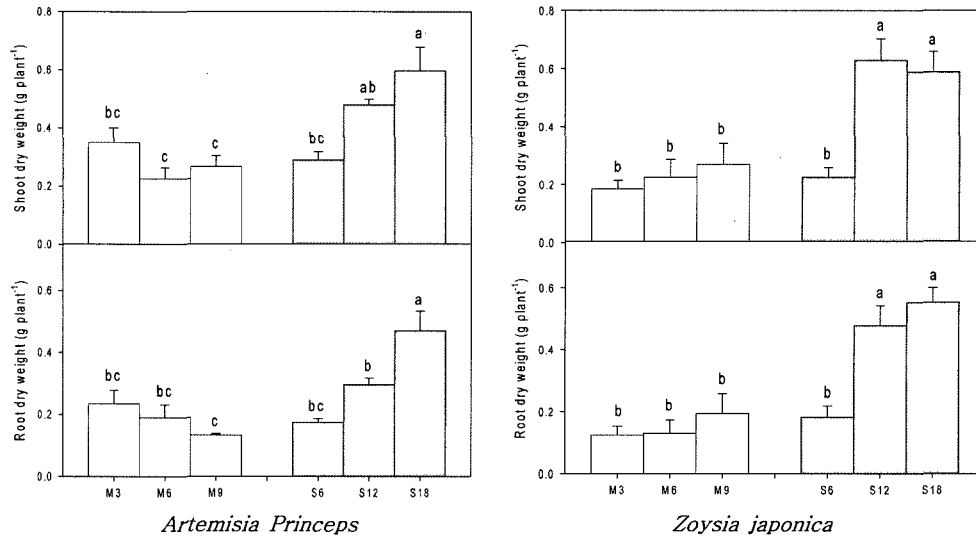


Fig. 1. Shoot and root dry weight of *Artemisia Princeps* and *Zoysia japonica* grown in mine soil amended with pig manure (M) and sewage sludge (S) for 60 days (vertical bars are standard errors; n = 5 and different letters above bars indicate a significant difference at p ≤ 0.05 by Tukey test).

Table 5. Concentration of heavy metals in shoot and root tissue of *Artemisia Princeps* at the end of experiments

	M3	M6	M9	S6	S12	S18
.....mg kg ⁻¹						
Shoot						
Cd	28.5 ± 6.7 X	32.0 ± 9.8 X	46.7 ± 17.0 XYZ	58.3 ± 11.4 YZ	41.2 ± 12.8 XY	63.4 ± 12.1 Z
Cu	8.6 ± 1.5 A	24.7 ± 6.8 BC	17.0 ± 7.2 AB	32.3 ± 8.8 C	18.5 ± 9.9 AB	22.1 ± 6.7 BC
Zn	704.6 ± 78.1 a	1296.7 ± 337.2 cd	1438.2 ± 118.0 d	1105.4 ± 108.1 bc	1060.3 ± 38.8 bc	961.8 ± 108.8 ab
Root						
Cd	72.1 ± 18.3 X	79.3 ± 12.9 XY	86.1 ± 22.7 XY	106.1 ± 44.1 X	65.1 ± 15.1 Y	139.0 ± 28.4 Z
Cu	105.1 ± 0.1 AB	99.8 ± 5.4 AB	133.8 ± 31.1 BC	154.2 ± 29.4 C	78.4 ± 22.2 A	107.9 ± 22.0 AB
Zn	3209.1 ± 301.7 a	4098.0 ± 305.5 ab	3688.3 ± 383.4 ab	7389.9 ± 1083.4 c	4616.2 ± 841.9 b	3279.3 ± 407.1 a

* n = 5 and different letters indicate a significant difference at p ≤ 0.05 by Tukey test.

시 수반되는 염류의 수준도 고려되어야 한다는 것을 의미한다고 할수 있다.

3.3. 썩과 잔디의 체내 중금속 흡수농도

광산토양에 돈분퇴비와 도시하수슬러지를 처리한 후 썩과 잔디의 체내 중금속 흡수 양상을 알아본 결과, 체내 중금속 함량에 있어 식물종간, 개량제간의 차이가 존재함을 확인할 수 있었다(Table 5, 6).

아연은 돈분퇴비의 처리 토양에서 재배한 썩과 잔디의 지상부, 지하부 모두 시용량 증가에 따라 체내농도가 증가한 반면, 슬러지는 반대의 경향을 보였고 썩과 잔디 모두 개량제의 처리에 의해 지상부로의 이행정도가 낮아 주

로 지하부에 축적되는 경향을 보였다. 개량제 처리에 따른 체내 중금속 함량에 있어 상반된 경향을 보이는 것은 개량제내의 유기물의 특성 차이에서 기인하는 것으로 보여진다. Shuman(1988, 1999)은 아연의 경우 토양 중에서의 존재 형태가 퇴비 등의 유기물 투여 효과에 의해 비유효태 혹은 불용태로의 이행 정도가 큰 것으로 보고한 바 있다. Fig. 1의 성장량 조사결과와 Table 5, 6의 체내 축적량에서 알 수 있듯이 퇴비보다 슬러지 시용량의 증가가 연화광산 토양 중 고농도로 존재하여 식물체의 초기 활착 및 생육에 있어 제한인자로 작용한다고 판단되는 아연의 식물체내로 흡수이행의 완화 즉 아연의 급성독성저감으로 식물체들의 초기활착율을 증진시키는 물론 궁극적

Table 6. Concentration of heavy metals in shoot and root tissue of *Zoysia japonica* at the end of experiments

	M3	M6	M9	S6	S12	S18
.....mg kg ⁻¹						
Shoot						
Cd	28.5 ± 17.0 XY	56.9 ± 13.1 Z	30.3 ± 5.0 XY	40.4 ± 2.9 YZ	15.4 ± 8.1 X	15.3 ± 4.8 X
Cu	17.1 ± 6.9 A	38.4 ± 4.6 B	15.2 ± 1.2 A	47.3 ± 19.6 B	16.3 ± 4.5 A	17.5 ± 2.1 A
Zn	936.0 ± 192.9 a	842.2 ± 256.6 a	1432.8 ± 240.0 c	1219.7 ± 290.7 bc	1087.1 ± 106.0 ab	876.1 ± 96.0 a
Root						
Cd	129.6 ± 26.0 X	140.0 ± 13.1 X	104.1 ± 10.9 X	112.0 ± 39.5 X	201.7 ± 31.8 Y	245.2 ± 28.2 Y
Cu	97.0 ± 12.6 A	164.4 ± 15.6 ABC	228.6 ± 72.4 BC	269.1 ± 144.2 C	124.5 ± 19.5 AB	86.1 ± 11.4 A
Zn	3461.3 ± 470.5 a	4353.5 ± 705.4 a	7039.0 ± 1768.9 b	6273.1 ± 913.6 b	4254.7 ± 829.6 a	3671.2 ± 255.9 a

* n=5 and different letters indicate a significant difference at p≤0.05 by Tukey test.

으로는 생장량 증대 등의 생육개선효과가 나타난 것을 알 수 있었다. 따라서 본 아연광산 토양에 대해서는 돈분퇴비 보다는 하수슬러지의 처리효과가 큰 것을 알 수 있었다.

카드뮴의 경우 썩과 잔디 모두 돈분퇴비와 도시하수슬러지 사용 시 지상부로의 이행정도가 낮아 주로 지하부에 축적되는 것이 일반적인 양상이었다. 지상부로 이행된 카드뮴의 양에 있어서 식물종 간 개량제 처리효과는 다소 상이하게 나타났는데, 썩의 경우 사용량 및 개량제의 종류에 영향을 받지 않은 것으로 나타난 반면, 잔디의 경우 도시하수슬러지 처리에 대해서 사용량이 증가함에 따라 1229.7 mg/kg에서 876.1 mg/kg으로 체내흡수와 지상부로의 이행이 현저히 감소되는 것으로 나타났다. 김 등 (1999)은 제2연화광산 지역 썩의 지상부의 체내 카드뮴 함량을 조사한 결과 체내에 26.85 mg/kg 함유된 것으로 보고한 바 있는데 본 실험의 퇴비처리 중 가장 사용량이 적은 처리구의 썩 중의 체내 카드뮴 함량이 28.5-46.7 mg/kg으로 유사한 결과였다.

구리는 체내 이동성 및 토양 중 이동성이 낮은 구리의 화학적 특성에 기인하여 지하부에 비해 지상부로 이행된 양이 아연과 카드뮴보다 낮은 것으로 조사되었고 토양 중 농도대비 식물체내 농도비 역시 가장 낮은 것으로 나타났다.

개량제 간의 차이도 확인되었는데, 퇴비처리구의 경우 사용량의 증가에 따라 지상, 지하부 모두 구리의 함량이 증가된 것으로 나타난 반면, 슬러지처리의 경우 처리량이 5%에서 10%로 증가되었을 때 체내 구리의 함량이 썩의 경우 지상부 및 지하부가 각각 57.3 및 50.8%, 잔디의 경우 지상부 및 지하부가 각각 34.5 및 46.3% 감소되는 것으로 나타났다. Table 1에 나타난 바와 같이 당초 개량제에 함유되어 있는 구리의 수준은 슬러지의 경우가 돈분

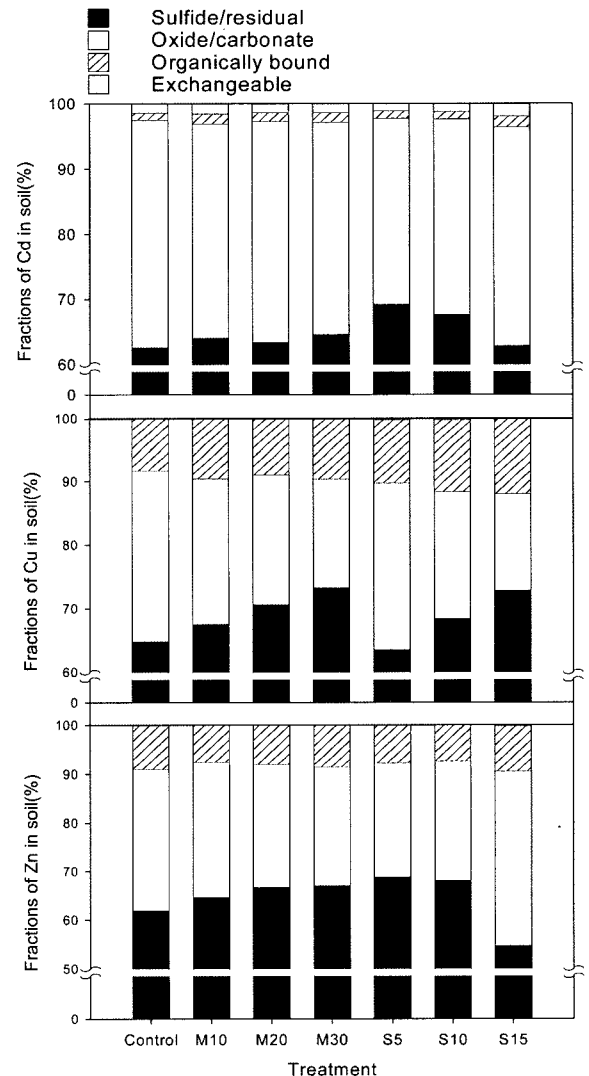


Fig. 2. Chemical speciation of heavy metals in amended soils mixed with organic amendment and aged for 30 days.

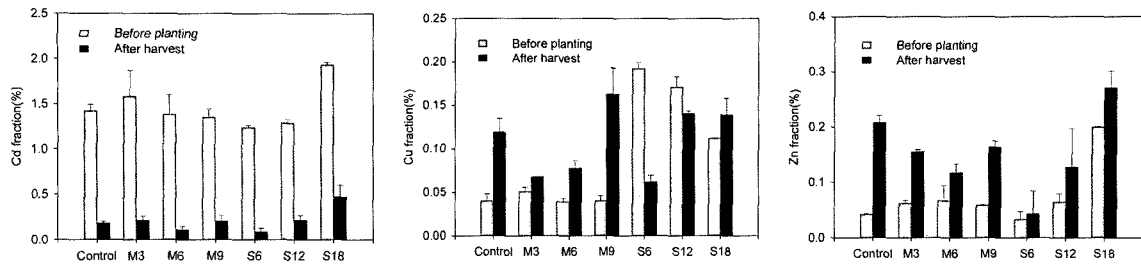


Fig. 3. Changes of exchangeable fractions of heavy metals in amended soils by cultivation with *Artemisia Princeps*.

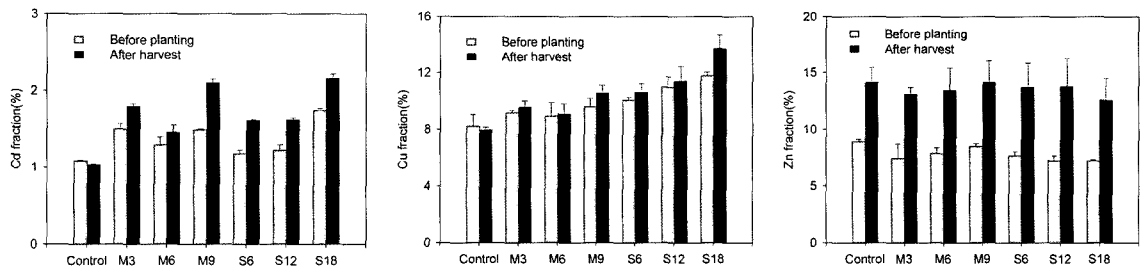


Fig. 4. Changes of organically bound fractions of heavy metals in amended soils by cultivation with *Artemisia Princeps*.

퇴비에 비해 높음에도 불구하고 시용량을 증가시킴에 따라 돈분퇴비 처리구의 경우 체내 구리의 함량이 증가된 반면, 슬러지의 경우 체내 구리의 함량이 증가되지 않은 것은 개량제 내 구리의 존재형태의 차이에서 기인하는 결과라 판단된다.

3.5. 토양 중 중금속의 형태별 정량

공시토양인 제2연화 광산 토양의 중금속의 존재형태는 카드뮴, 구리, 아연 모두에 대해 황화물·잔류상 형태 > 탄산염·산화물결합 형태 > 유기물결합 형태 ≒ 치환성 형태 순이었으며, 광산 토양에 퇴비와 슬러지를 처리한 후 30일 간 묵혀 개량시킨 토양의 중금속의 존재형태는 카드뮴의 경우 개량제 처리 시 유기물결합 형태의 비율이 대조토양의 1.08%에 비해 퇴비와 슬러지가 각각 1.50 및 1.70%로 다소 증가하였다. 구리의 경우 대조토양의 8.22%에 비해 퇴비와 슬러지가 각각 9.60 및 11.79%로 증가하였고, 그에 따른 탄산염/산화물결합 형태의 비율은 감소하였다. 아연의 경우 30일 동안 중금속의 존재형태 비율의 두드러진 변화가 나타나지는 않았다(Fig. 2).

광산토양에 개량제를 처리하여 묵힌 후 60일 동안 썩과 잔디를 재배하여 식물 수확 후, 토양 중 중금속의 유효도에 가장 영향을 미치는 것으로 알려진 치환성 형태 및 유기물결합 형태 중금속의 함량을 조사한 결과는 Fig.

3~6과 같다. 카드뮴의 경우 치환성 형태의 비율은 썩의 경우 1.07~1.45%, 잔디의 경우 1.09~1.37% 씩 각각 크게 감소하였고 유기물결합 형태의 경우 치환성 형태의 경우와는 반대로 썩에 있어서는 모든 처리구들에서 0.29~0.61% 씩 증가하였다. 반면 잔디의 경우는 0.29~0.80% 씩 감소하는 양상을 보였다. 구리의 경우 썩과 잔디에서 S6, S12 처리를 제외한 모든 처리구에서 치환태 비율이 0.02~0.19% 증가하였고, 아연의 경우 썩과 잔디에서 모든 처리구의 치환태 비율이 0.01~0.16% 증가된 것으로 나타났다. 치환태는 다른 형태에 비해 상대적으로 유효도 및 이동성은 높지만 본 연구에 의하면 증가된 유기물 결합태 중금속의 비율에 비해 그 증가 정도는 매우 낮은 것으로 조사되었다. 유기태 결합태의 증가와 식물 흡수 데이터에서 알 수 있듯이 유기물 결합 중금속 함량의 증가가 구리와 아연의 식물에 대한 유효도를 감소시킬 것으로 사료된다. Gerritse et al.(1983)과 Zhang et al. (1997)은 식물의 대한 토양 원소들의 유효도는 토양 용액 중의 각 원소들의 농도 및 치환성 형태 함량에 좌우된다고 하였고, 중금속의 토양 내 존재형태는 토양 pH와 유기물 함량에 크게 좌우한다고 하였다. 한편 McBride (1995)와 Chang et al.(1984)은 치환성 형태, 탄산염 형태 뿐 만 아니라 유기물결합 형태도 장기간의 시간이 지니면 유기물의 분해과정에서 가용태로 전환되어 식물에

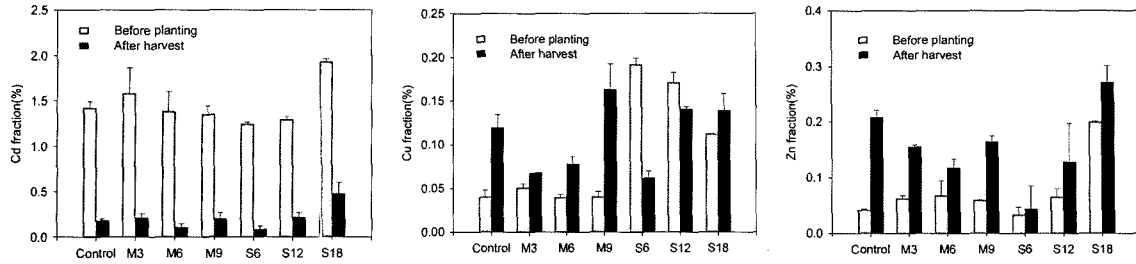


Fig. 5. Changes of exchangeable fractions of heavy metals in amended soils by cultivation with *Zoysia japonica*.

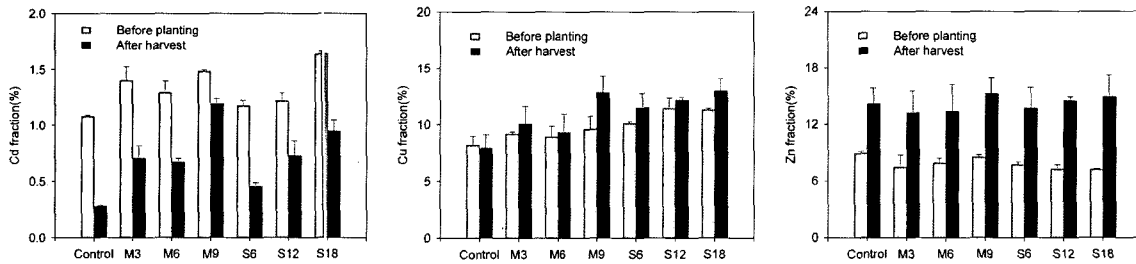


Fig. 6. Changes of organically bound fractions of heavy metals in amended soils by cultivation with *Zoysia japonica*.

유효태로 작용하는 중금속의 형태라 하였으며, Gardiner et al.(1995)은 도시하수 슬러지를 농작물에 사용 시 체내로의 중금속 이행 카드뮴이 아연, 구리보다 이동성이 높아 상대적으로 식물체내로의 이행되는 비율이 높은 것으로 보고하는 등 식물에 유효한 중금속의 형태에 대해서는 다양한 견해들이 존재한다. 본 연구에서는 조사된 중금속들 중 아연의 경우 토양 개량제인 퇴비와 슬러지 사용에 의해 유기물 결합태의 함량 증가가 두드러지게 나타났으며, White and Chaney(1980)에 의하면 토양유기물은 특히 토양 내 유효중금속의 불용화 및 그에 따른 유효도 감소에 매우 효과적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다. Table 5와 6의 체내 중금속 함량 결과에 의하면, 본 공시 토양의 경우 오염 강도에 차이는 있지만 함량 면에서 토양 중 오염정도가 가장 높은 아연의 불용화에 의한 생육 개선 효과도 매우 큰 것으로 사료되었다.

중금속 오염지에 개척종 초본식생을 도입하여 안정화를 피하기 위해서는 적박한 토양에서의 강한 생존력, 긴 생육기간, 왕성한 번식력, 중금속에 내성을 가지는 식물을 선발하여야 하고, 대상오염부지에 정화식물의 초기 적응력을 높일 수 있는 다양한 방안이 강구되어야 한다. 그 방안의 하나가 토양의 물리화학적 특성을 개선하고 중금속의 유효도를 감소시켜 투입식물의 중금속 독성을 경감시킬 수 있는 퇴비, 슬러지 등 유기성 토양개량제의 투입이라 할 수 있겠다.

4. 결 론

폐야연광산에 식물안정화기법의 적용을 위한 식생도입 시 식생의 안정한 초기 활착을 위한 토양개량제 처리 효과 및 그에 따른 중금속의 유효도의 변화를 알아본 결과는 다음과 같다.

1) 개량제를 처리하여 썩과 잔디를 재배한 결과 개량제를 처리하지 않은 토양에서는 썩과 잔디가 1주일 이내에 전부 중금속의 독성으로 고사한 반면, 모든 처리구에서 초기 생육이 양호하게 이루어져 안정한 활착이 이루어졌으며, 성장량에 있어서도 개량제 처리 시 대체적으로 사용량의 증가에 따라 성장량이 증가한 것으로 나타나 개량제 처리의 효과를 확인할 수 있었다.

2) 썩과 잔디 모두 지상부 보다는 지하부에 중금속이 축적되는 양상을 보였으며, 퇴비 처리구 보다는 슬러지 처리구에서 체내 중금속 축적 및 지상부로의 이행이 억제되었다.

3) 연속추출에 의한 중금속의 존재형태별 함량을 통해 중금속의 유효도를 분석한 결과, 썩과 잔디를 재배한 모든 처리구에서 잔류상 형태, 산화물결합 형태, 및 치환성 형태 함량이 고르게 감소하였고, 유기물결합 형태 함량은 증가하였다. 유기성 토양 개량제 처리 시 카드뮴은 토양 중 유효도가 높은 치환성 형태 중금속의 흡수 및 이동성이 구리, 아연에 비하여 높은 것으로 나타났으며, 세 중금

속 모두 유기성 개량제 처리에 의한 중금속의 불용화로 유효도가 낮은 형태로 이행하는 것으로 나타나 궁극적으로는 고농도의 중금속에 의한 식물독성을 경감시키는 효과가 있음을 알 수 있었다.

따라서 퇴비, 슬러지의 유기물이 phytostabilization 기법 도입을 위한 식생의 성장 개선 및 중금속 안정화에 효과적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

강병화, 심상인, 이상각, 김광호, 정일민, 1998, 돼지풀, 단풍잎돼지풀, 소리쟁이를 이용한 중금속오염토양의 식물복원법 (phytoremediation)에 관한 연구, 한국잡초학회지, **18**(3), 262-267.

김정규, 윤영만, 이상환, 임수길, 1997, Zn, Cd 처리토양에서 썩의 중금속 흡수와 생육에 미치는 토양 pH의 영향, 고려대학교 자연자원논집, **37**, 49-56.

김정규, 임수길, 이상환, 이창호, 정창윤, 1999, 휴 · 폐광지역 오염토양의 phytoremediation을 위한 식물자원 검색, 한국환경농학회지, **18**, 28-34.

김현아, 2002, 중금속 오염토양 복원을 위한 내성 식물종 선별 및 자귀풀의 Cd 흡수능에 관한 연구, 이화여자대학교 박사학위논문, p. 50.

농업과학기술원, 2000, 토양 및 식물체 분석법.

농촌진흥청, 2001, 농업환경 변동 조사사업 보고서, p. 10-11.

이상환, 1997, 연화광산지역의 식물체 및 토양 중 중금속분포와 썩의 토양 정화식물로서의 가치평가, 고려대학교 석사학위논문.

환경부, 2005, 토양환경보전법.

Adriano, D.C., 2001, Trace elements in the terrestrial environment, 2nd Ed. Springer-Verlag, New York.

Baker, A.J.M., Mcgrath, S.P., Sidoli, C.M.D., and Reeves, R.D., 1994, The possibility of in situ heavy metal decontamination of pollute soils using crops of metal accumulating plants, *Resour. Conserv. Recycl.*, **11**, 41-49.

Bleeker, P.M., Ana G.L.A., Pedro M. T., Tjarda de K., and Jos A.C.V., 2002, Revegetation of acidic, As contaminated Jales mine spoil tips using a combination of spoil amendments and tolerant grasses, *Sci Total Environ*, **300**, 1-13.

Chang, A.C., Page, A.L., Warneke, J.E., and Grgurevic, E., 1984, Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application, *J. Environ. Qual.*, **13**, 33-38.

Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Angle, J.S., and Baker, A.J.M., 1997, Phytoremediation soil metals, *Current Opinions in Biotechnology*, **8**, 279-284.

Gardiner, D.T., Miller, R.W., Badamchian, B., Azzari, A.S., Sisson, D.R., 1995, Effects of repeated sewage sludge application

on plant accumulation of heavy metals, *Agriculture. Ecosystems. & Environment*, **55**, 1-6.

Gerritse, R.G., Van Driel, W., Smilde, K.W., and Van Luit, B., 1983, Uptake of heavy metals by crops in relation to their concentration in the soil solution, *Plant Soil*, **75**, 393-404.

Mcbride, M.B., 1995, Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective?, *J. Environ. Qual.*, **24**, 5-18.

Pitchel, J.R., Dick, W.A., and Sutton, P., 1994, Comparison of amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands, *J. Environ. Qual.*, **23**, 766-772.

Sabey, B.R., Pendleton, R.L., and Webb, B.L., 1990, Effect of municiple sewage sudge application on growth of two reclamation shrub species in copper mine spoils, *J. Environ. Qual.*, **19**, 580-586.

Shuman, L.M., 1988, Effect of organic matter on the distribution of manganese, copper, and zinc in soil fractions. *Soil Sci.*, **146**, 192-198.

Shuman, L.M., 1999, Organic waste amendments effect on zinc fractions of two soils, *J. Environ. Qual.*, **28**, 1442-1447.

Tordoff, G.M., Baker, A.J.M., and Willis, A.J., 2000, Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes, *Chemosphere*, **41**, 219-228.

Walter, I. and Cuevas, G., 1999, Chemical fractionation of heavy metals in soil amended with repeated seqaqe sludge application, *Sci. Total Environ.*, **226**, 113-119.

White, M.C., and Chaney, R.L., 1980, Zinc, cadmium, and manganese uptake by soybean from two zinc and cadmium amended coastal plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 308-313.

Williamson, N.A., Johnson, M.S., and Bradshaw, A.D., 1982, Mine waste rehabilitation: the establishment of vegetation on metal mine waste, *Mining J. Books*.

Wong, M.H., 1986, Reclamation of waste contaminated by copper, lead and zinc, *Environ. Manage.*, **10**(6), 707-713.

Ye, Z.H., Wong, J.W.C., Wong, M.H., Lan, C.Y., and Baker, A.J.M., 1999, Lime and pig manure as ameliorants for revegetating lead/zinc mine tailing: a greenhouse study, *Bioresour. Technol.*, **69**, 35-43.

Ye, Z.H., Yang, Z.Y., Chan, G.Y.S., and Wong, M.H., 2001, Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings a greenhouse study, *Environ. Intern.*, **26**, 449-455.

Zhang, M., Alvva, A.K., Li, Y.C., and Calvert, C.V., 1997, Fractionation of iron, manganese, aluminium, and phosphorus in selected soils under ditrus production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **61**, 794-801.