

ORIGINAL ARTICLE

상동 중석 폐재댐 토양 오염평가 및 관리 방안 연구

정병학*

석정여자중학교

A Study on the Pollution Evaluation and Management of Tungsten Waste Dam in Sangdong

Byoung-Hak Jung*

Suhck Chung Girl's Middle School, Yongwol 26239, Korea

Abstract

As a result of analyzing the tungsten tailings accumulated in the tungsten waste dam and the soil within 5 meter around the waste dam in this study, the pollution coefficient (C_p) of the tungsten tailings of the waste dam was in the order of $Pb < Zn < Cu < Cd < Cr < As$, and the pollution coefficient (C_p) of the soil within 5 meters of the waste dam was in the order of $Zn < Pb < Cd < Cu < Cr < As$. In the pollution degree evaluation, the pollution degree (C_d) of the tungsten tailings of the waste dam was 117.27 and the pollution degree (C_d) of the soil within 5 meters of the waste dam was 34.85, which was quite high in the pollution degree evaluation. As for the pollution index, PI, the pollution index of the tungsten tailings of the waste dam was evaluated as high as 10.67, and in the soil within 5 meters of the waste dam, the pollution index was evaluated as being contaminated at a moderate level of 2.57. Tungsten tailings contain large amounts of heavy metals and low concentrations of nutrients, making it difficult to naturally introduce plants into waste dam. Therefore, if the natural introduction of plants is induced by mixing low pH and rich in organic nutrients with tungsten tailings to improve the soil environment, it is thought that the growth experimental treatment mixed with tungsten tailings and coal waste has a survival rate of 2.17 times, stem length growth of 2.50 times, colony diameter size growth of 1.78 times, colony population differentiation of 2.60 times, and fresh weight of 3.45 times. If the natural introduction of plants is induced by mixing low pH and rich coal waste with tungsten tailings, which are basic soil and nutrient deficient, it will be possible to prevent erosion of tailings by utilizing the plant ecosystem around the tungsten tailings and waste dam.

Key words : Tungsten tailings, Pollution coefficient, Pollution degree, Pollution index

1. 서론

상동 중석 폐재댐은 광물찌꺼기, 중석 광미를 쌓아 놓은 지가 40여 년이 지났음에도 식물이 잘 자라지 않아 장마철 집중호우나 봄과 가을의 강풍에 많은 양의 광미가 유실되고 있으며 하천이나 주변 농경지, 생활공간

에 피해를 주고 있다. 일반적으로 금속광산 광물찌꺼기 토양은 유기양분 부족으로 활알구조로 되어있어 물리적으로 취약한 구조를 이루고 있다. 금속광산 광미나 폐석에는 다량의 중금속과 낮은 유기물 및 수분함량, 식물 생육에 벗어나는 pH로 인해 식물이 정착하기에 열악한 토양환경을 가지고 있다. 국내 금속광산의 광물찌꺼기

Received 5 November, 2024; Revised 12 December, 2024;

Accepted 17 December, 2024

*Corresponding author : Byoung-Hak Jung, Suhck Chung Girl's Middle School, Yongwol 26239, Korea
Phone : +82-33-370-4503
E-mail : jungbh10@hanmail.net

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 As와 Zn의 중금속 오염 농도가 높은 편이며(Jun et al., 2009; Lee et al., 2015), 이외에 Cd, Pb, Cr, Cu, Hg, Ni 등의 다량의 중금속을 함유하고 있다. 석탄폐석의 경우, 황화합물을 포함하고 있어 이들이 풍화될 경우, 지하수 및 우수와 연쇄반응으로 산성광산배수(AMD; Acid mine drainage)를 지속적으로 생산하여 계곡 생태계와 주변 토양을 산성화시키며 중금속 이온의 용출로 생명체에 치명적 피해를 주고 있다. 휴·폐광산 중에서 금·은 광산이 대부분을 차지하는데, 금·은 광산 폐석지 토양은 여러 종류의 중금속 농도가 토양 우려 기준을 초과하고 있다(Jung and Jung, 2005). 광물찌꺼기에는 과량의 독성 중금속을 함유하고 있어 관리가 이루어지지 않을 경우, 주변 농경지나 생태계에 큰 피해를 주고 있어 관리가 절실히 요구되고 있다. 광물찌꺼기에 대한 초기 연구는 토양 내 중금속 함량 조사와 식물을 이용한 중금속을 제거하는 연구가 주류를 이루었다. 중금속 제거 식물로는 쑥, 고사리, 갈대 등 초본식물을 이용하여 폐석 내 중금속을 제거하는 연구가 2000년을 전후로 활발한 연구가 있었다. 식물을 이용한 폐석 내 중금속 제거방법은 연구용 주제로 잘 맞아 떨어졌지만, 많은 폐석에서 식물로 토양 내 독성물질을 흡수하여 제거하는 방법에는 한계를 보이고 있어 오염된 토양 현장 적용에는 효과면에서 비효율적이었다. 식물을 이용한 토양에서 중금속 축출법은 폐석지에 토착식물을 이용하여 토양오염 복원에 활용이 가능한 식물을 이용하여 실내에서 실험 위주의 연구가 있었으며(Ok et al., 2003), 식물재배를 통한 토양 정화법에 관한 연구가 높아지면서 폐석지 오염 현장에서 조사된 야생식물의 중금속 축적 능력과 중금속에 관한 내성식물 연구가 활발하게 진행되었다. 그러나 쑥과 고사리 등은 중금속 축적량은 우수하나 성장 속도가 느리고 생중량이 작아 오염된 토양에 적용했을 때 식물이 제거할 수 있는 중금속 총량을 평가할 때 효율성이 적다고 보고하였다(Ok et al., 2004). Phytoremediation를 이용한 토양복원방법에는 식물을 이용하여 토양에서 오염물질을 식물체에 농축하여 오염 토양을 정화시키는 Phytoextraction, 오염 토양에 식물을 피복시켜 근권에 오염물질을 고정시켜 오염물질의 이동량을 줄이는 Phytostabilization, 오염 토양에 식물이 물질대사를 이용하여 오염물질을 기체 상태로 변환하여 대기 중으로 방출하는 Phytovolatilization이 있으며 이러한 복원방법은 오염 토양에서 자생하는 토착식물 중에서 오염물질에 내성력이 강한 식물 선정이

중요하다. Phytoremediation은 소량의 오염 토양에서 중금속 제거는 가능할 수 있지만, 중석 폐재덤과 같은 수백만 톤에 이르는 광물찌꺼기에서 유해물질을 식물 흡수를 이용하여 제거한다는 것은 인적, 경제적 측면에서 비효율적이다. 문제는 우리나라와 같이 집중호우 지역에서는 침식으로 인해 오염물질이 하천으로 쓸려가거나 주변으로 흩어져 확산된다는 것이다. 더구나 식물량이 부족하여 폐석의 침식이 쉽게 이루어지고 있다는 점이다. 광물찌꺼기에서 중금속을 제거하는 것보다 광물찌꺼기가 기상 현상에 의해 주변으로 확산하는 것을 방지하는 것이 우선일 것이다. 본 연구에서는 점오염원인 광물찌꺼기가 주변으로 흩어지거나 침식하지 않게 식물 생태계를 복원시켜 폐석을 관리하는 식물을 이용한 안정화 공법을 선택하였다. Phytostabilization은 오염된 토양에서 유해물질을 폐석으로부터 영구히 제거하는 것은 아니라, 폐석과 함께 유해물질을 식물의 뿌리와 줄기가 집중호우와 강풍에 완충작용으로 폐석의 침식을 방지하려는 시도이며 주변 지역으로 오염물질이 확산을 감소시킴으로써 생태계 피해를 줄일 수 있다고 제시했다(Raskin and Ensley, 2000). Phytostabilization 기술이 안착하기 위해서는 그 지역의 토양에 적응하면서 자생하고 있는 토착식물 중에서 유해물질에 대한 내성에 효과가 있는 식물을 선정하는 것이 무엇보다 중요하다(Mun et al., 2020). 광산주변 오염지역에는 벼과의 식물 중에 억새가 우점을 이루고 자생하고 있다(Jun et al., 2011). 특히, 억새는 근락형태로 자생하며 생명력이 길기며 광산폐석지와 같은 통기성과 투수성이 약하고 영양분이 척박한 토양에서도 적응력이 뛰어나 광산 폐석지 식생복원에 적합한 식물이라 알려졌다(Jun et al., 2011). 본 연구에서는 중석 광미의 폐재덤과 폐재덤 주변에 식물량이 부족하여 강풍과 여름철 집중호우에 많은 양의 광물찌꺼기 침식을 방지하여 식물을 이용하여 폐재덤 및 가장자리 주변을 식물 생태계를 이용하여 안정시키는 것이다. 본 연구의 목적은 폐재덤에 쌓여 있는 중석 광미와 폐재덤 가장자리 5 m 이내의 토양에 함유한 중금속을 분석하여 식물의 자연도입 한계를 탐색하고, 광물찌꺼기 내에 존재하는 중금속에 대한 오염을 평가하고, 생육실험을 통해 식물이 잘 자라지 못하는 폐석지에 식물도입에 대한 가능성을 평가하여 중석 광미 폐재덤의 관리 방안을 제시하고자 하였다.



Fig. 1. 1st Tungsten tailings waste dam.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지 개요

상동광산(37°8'7"N, 128°50'3"E) 지질은 캄브리아기에 형성되었으며, 광상은 열수작용에 의해 변성내지 재결정 작용이 일어났거나 두 가지 작용을 동시에 받았을 것으로 보이는 고온고대광상이다. 상동광산은 1916년 4월에 기반암이 지표면에 노출된 부분에서 발견하였고, 채광되는 중석 광의 종류에는 흑 중석(Black tungsten)이라고 하는 철망관중석(Wolframite: (Fe, Mn)WO₄)과 백중석(White tungsten)이라고 하는 회 중석(Scheelite: CaWO₄)등 두 가지가 있는데(Seo et al., 2017) 상동광산에서 발견한 광종의 종류는 흑중석이며 원암은 석회암에 해당한다고 하였다(Jung et al., 2006). 상동광산은 일제강점기에 채광하여 오다가 1948년 상공부 직할 기업체로 운영하게 되었으며 1951년부터 세계에서 가장 많은 생산하는 중석 광산으로 알려졌지만 1992년부터 값싼 수입 텅스텐에 밀려 휴광되었다. 상동광산에서 텅스텐을 채취하기 위해 광석을 제련 후, 부산물로 생겨난 광물찌꺼기로 경제성이 떨어지고 다량의 유해물질과 중금속이 함유한 것으로 알려져 있다. 제1 폐재댐(구폐재댐)은 강원도 영월군 상동읍 내덕리에 자리잡고 있으며 폐재댐과 접해 흐르는 옥동천은 남한강 최상류로 한강 상수원으로 중요한 역할을 하고 있다. 중석 광미를 폐재댐에 적치시킨 기간은 1974년 3월부터 1981년 4월까지 이루어졌으며 용적량은 1,700,000 m³, 높이 40 m, 광미량 400만 톤에 해당하며 광미 적치상태는 평지형에 해당한다. 폐재댐 관리하는 2000년 이전에는 하천과 접하는 부분은 벽돌을

쌓아서 관리하였고, 폐재댐 정상은 전혀 관리가 이루어지지 않다가 2000년부터 비닐 덮개, 명석, 벽돌 등 물리적인 방법으로 주기적으로 보수가 이루어지면서 현재 까지 관리하여 오고 있다.

2.2. 시료채취 및 분석

시료채취는 지역은 제1 폐재댐과 폐재댐에서 5 m 이내에 떨어진 가장자리 토양에서 불순물을 제거 후 20~30 cm 깊이에서 토양 시료 7곳을 채취하였고, 배경토양(대조토양)은 광물찌꺼기가 쌓여 있는 폐재댐과 광산활동 등에 의해 영향을 받지 않고 오염되지 않았을 것으로 추정되는 곳으로 폐재댐과 상동광산으로부터 2~5 km 떨어진 산림지역에서 20~30 cm의 깊이의 토양을 7곳을 채취하였다. 중금속은 토양환경보존법에서 토양오염 물질로 정해져 있는 중금속인 Pb, Cr, As, Zn, Cu, Cd 원소를 토양오염 공정시험법에서 요구하는 절차에 따랐다(Ministry of Environment, 2013). 토양 내 중금속의 총량은 진한 염산과 질산을 3:1로 혼합한 용액을 이용하여 토양을 완전히 분해하여 전처리한 후, 여과지 No. 5B로 여과한 액체를 유도결합플라즈마 발광광도기(ICP-OES)로 측정하였다. 폐재댐의 광물찌꺼기 중석 광미 및 주변 토양의 중금속 오염 수준(Table 10)을 알아보기 위해 Hakanson(1980)가 연구한 오염계수(C_f ; Contamination factor, (1))는 분류 범위와 수준을 4단계로 나누었고, 오염도(C_d ; Contamination degree, (2)) 분류 범위와 수준을 3단계로 나누었으며, 오염지수(PI; Pollution index, (3)) 평가는 Kloke(1979)가 개발한 산출 방식으로 4단계로 분류하여 오염수준을 평가하였다. 중금속 원소 간 상관 분석은 SPSS (Statistical package for the social sciences, ver. 20)를 이용하여 Pearson's correlation analysis를 실시하였으며, 유의수준(Significance level, α) 0.05에서 분석하였다. p 값이 0.05 미만인 것은 상관계수(P), P*, 0.01 미만은 P**, 0.001 미만은 P***로 표기했다.

$$C_f = \frac{C_{heavy\ metal}}{C_{background}} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \dots\dots\dots (2)$$



Fig. 2. The appearance of *miscanthus sinensis* growth in April at each growth experiment treatment.

$$PI = \frac{\sum_i^n \left(\frac{\text{mean concentration by heavy metal element}}{\text{heavy metal concentration warning criteria}} \right)}{n(\text{number of heavy metal analysis element})} \dots\dots\dots (3)$$

본 연구에서는 중석 광미와 폐재댐 가장자리 토양에 대한 오염을 평가한 후, 여름철 집중호우에 식물이 부족해서 나타나는 중석 광미의 침식을 줄여보고자 식물 생육실험을 통해 식물도입 가능성을 평가하였다. 중석 광

미에 식물 자연도입 한계를 알아보기 위해 양분분석을 하였다. 토양의 pH(1:5)는 활산성을 측정하였고, 유기물함량(Organic matter)은 작열손실량(Loss on ignition)을 이용하여 토양을 600℃의 전기로에서 4시간 동안 연소시켜 탄소와 같은 유기물을 제거한 후, 회분의 질량과 전기로에 들어가기 전의 질량을 이용하여 측정하였다. 유효인산(Available nutrient, P₂O₅)을 측정하기 위하여 과황산칼륨으로 인화합물을 분해하여 인산이온(PO₄⁻³) 형태로 변화시킨 후, 몰리브덴산암모늄((NH₄)₆Mo(MoO₄)₆)을 첨가(Sim al et., 2014)하여 산성 조건에서 인몰리브덴산암모늄((NH₄)₃PO₄ 12(MoO₃)₃)이 합성되며, 여기에 아스코르빈산(C₆H₈O₆)으로 환원시키면 몰리브덴청((NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O)이 생성되고 청색을 띠었고, 분광도계로 880 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였다. 토양 속에 존재하는 총질소(Total nitrogen)는 토양 시료를 진한 황산을 넣고 가열(400~420℃)하면 황산은 토양을 완전 분해하고, 산화 및 환원 반응을 거쳐 황산암모늄을 생성하고, 여기에 수산화나트륨을 첨가되어 암모늄염이 암모니아로 전환하여 역적정을 통해 질소의 양을 결정하는 방법으로 측정하였다(Kjeldahl, 1883). 생육실험에 적용할 식물은 폐재댐 주변 및 가장자리에 우점종으로 자생하고 있는 토착 식물인 억새(*Miscanthus sinensis*)로 생육

Table 1. Method of evaluating heavy metal contamination of abandoned mine waste soil and classification of contamination level (Hakanson, 1980; Kloke, 1979; Lee et al., 2019)

Contaminated items	Scope of classification	Contamination level
C _f	C _f < 1	LC
	1 ≤ C _f < 3	MC
	3 ≤ C _f < 6	CC
	6 ≤ C _f	VHC
C _d	C _d < 8	LDC
	8 ≤ C _d < 16	MDC
	16 ≤ C _d < 32	CDC
PI	PI < 1	NC
	1 ≤ PI < 2	SP
	2 ≤ PI < 3	MP
	3 ≤ PI < 4	HP

C_f: Contamination factor, C_d: Contamination degree, PI: Pollution index, LC: Low contamination, MC: Moderate contamination, CC: Considerable contamination, VHC: Very high contamination, LDC: Low degree contamination, MDC: Moderate degree contamination, CDC: Considerable degree contamination, NC: Not Contaminated, SP: Slightly polluted, MP: Moderately polluted, HP: Highly polluted

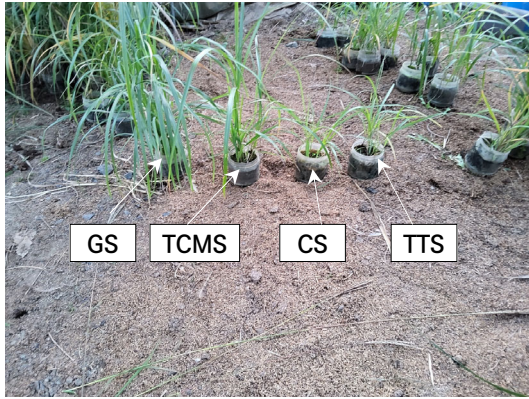


Fig. 3. The growth comparison of *miscanthus sinensis* plants treated with growth experiments (TTS, Tungsten tailings soil; CS, Coal waste soil; TCMS (3:1), Tungsten tailings and coal waste soil are mixed 3 : 1; GS, General soil).

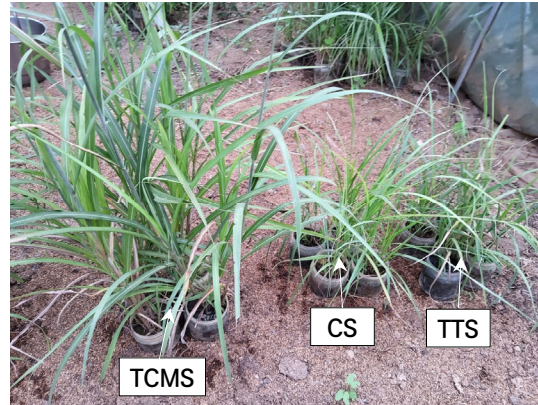


Fig. 4. The appearance of *miscanthus sinensis* growth in May at each growth experiment treatment.

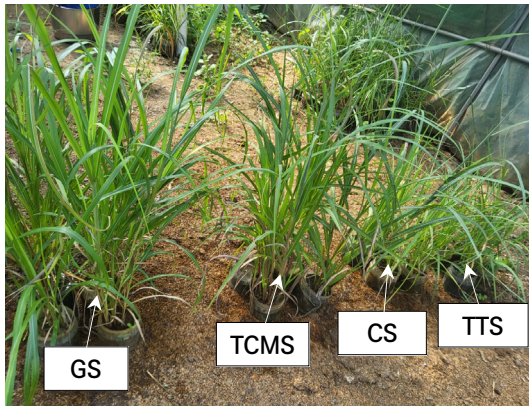


Fig. 5. The appearance of *miscanthus sinensis* growth in July at each growth experiment treatment.

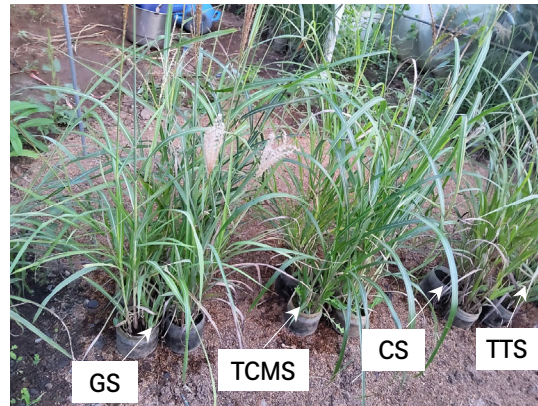


Fig. 6. The appearance of *miscanthus sinensis* growth in September at each growth experiment treatment.

실험 식물 종으로 선정하였다. 억새는 내건성 식물로 균락을 이루며 다년생 식물로 토양을 잡아주는 능력이 뛰어나고 토양의 영양 상태가 열악한 광산폐석지에 자생하고 있는 초본식물로 알려져 있다(Jun al et., 2011). 생육실험 방법은 중석 광미 폐재뎀 근처에 있는 석탄폐석을 중석 광미에 혼합(중석광미:석탄폐석, 3: 1)하여 식물생육 범위의 약산성 토양으로 개선시켜 생육실험 처리구를 제작하여 생육실험을 진행하였다. 생육실험을 위해 사용한 중석 광미와 석탄폐석은 20~30 cm 정도의 오염된 걸 폐석을 걷어내고 토양을 채취하여 플라스틱 함지에 담아 생육실험지로 옮긴 후, 생육실험 처리

구(한 종류)와 대조구(세 종류)를 제작하였다. 생육실험에 사용한 화분은 지름이 170 mm, 높이 150 mm의 플라스틱 통에 토양은 1,600 g을 사용하였다. 생육실험은 중석광미와 석탄폐석의 혼합(3:1)으로 중석 광미 1,200 g에 석탄폐석 400 g을 혼합하여 생육실험 처리구를 제작하였다. 생육실험 대조 처리구는 중석광미, 석탄폐석, 일반토양으로 각각 15개를 제작하여 3월 초부터 생육실험을 시작하여 9월말까지 생육 측정실험을 진행하였다. 생육실험 시 햇빛이 균등하게 받을 수 있도록 1주일 간격으로 주기적으로 생육 처리구 위치를 순환시켜 주었으며 수분 공급은 1주일 간격으로 일정량

Table 2. Analysis of heavy metal concentrations in tungsten tailings of sang-dong tungsten waste dam

Site	Parameter	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn
Unit		mg/kg					
TTSWD	Mean	807.50	41.22	101.64	144.02	86.07	819.88
	Standard deviation	21.31	2.18	8.06	6.88	6.71	37.36
	Standard error	8.06	0.82	3.05	2.60	2.54	14.12
	Geometric mean	807.26	41.17	101.35	143.89	85.84	819.15
	Minimum	780.56	38.93	87.67	137.30	75.56	760.56
	Median	800.45	40.86	100.50	140.80	86.50	820.45
	Maximum	840.78	45.45	112.45	155.67	95.40	870.45
WC		25	4	200	150	5	300
CWC		32.30	10.31	0.51	0.96	17.21	2.73

TTSWD, Tungsten tailings soil in sang-dong mine waste dam, ; WC, Warning criteria, ; CWC, Comparison with warning criteria

Table 3. Analysis of soil heavy metals within 5 meters of sang-dong tungsten waste dam

Site	Parameter	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn
Unit		mg/kg					
TTWM(5m)	Mean	172.89	7.76	34.78	66.11	24.40	325.70
	Standard deviation	23.18	1.19	5.51	7.71	4.26	42.91
	Standard error	8.76	0.45	2.08	2.91	1.61	16.22
	Geometric mean	171.42	7.67	34.43	65.70	24.08	323.38
	Minimum	128.17	5.63	29.34	55.38	19.76	278.19
	Median	178.74	8.05	32.89	70.20	24.76	310.45
	Maximum	197.27	9.28	45.00	74.71	29.45	390.52
WC		25.00	4.00	200.00	150.00	5.00	300.00
CWC		6.92	1.94	0.17	0.44	4.88	1.09

TTWD(within 5 meters), Tungsten tailings waste dam edge within 5 meters

Table 4. Analysis of soil heavy metals 2~5 km away from tungsten tailings waste dam as background soil

Site	Parameter	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn
Unit		mg/kg					
TTD(2~5 km)	Mean	14.35	1.95	46.11	16.94	2.39	205.29
	Standard deviation	1.08	0.25	4.74	1.07	0.47	15.88
	Standard error	0.41	0.09	1.79	0.40	0.18	6.00
	Geometric mean	14.31	1.94	45.89	16.91	2.35	204.78
	Minimum	12.45	1.50	39.89	15.37	1.89	187.45
	Median	14.50	2.00	46.81	16.54	2.45	201.60
	Maximum	15.60	2.22	52.50	18.24	3.20	230.50
WC		25.00	4.00	200.00	150.00	5.00	300.00
CWC		0.57	0.49	0.23	0.11	0.48	0.68

TTD, Soil heavy metals 2~5 km from tungsten tailings dam

(100 mL)을 공급하였다. 생육실험 처리구별 생존율을 비교하였고, 생육 처리구별 생육량은 줄기 길이, 근락의 개체 수, 근락의 퍼짐 정도(직경의 크기), 생중량을 각각 생육실험 처리구별 3개를 측정하여 평균값을 비교하였다. 식물체의 근락 퍼짐의 크기는 식물체를 위에서 연직 아래로 보았을 때, 큰 원을 그렸을 때 지름의 크기를 측정하였고, 생중량은 뿌리와 줄기를 상하지 않게 채취한 후, 뿌리에 묻은 토양을 물로 씻은 후에 식물체에 묻은 물기를 그늘에서 말린 후에 중량을 측정하였다. 본 연구에서 생육량은 뿌리, 줄기, 잎 등 모든 부위에서 생육이 일어나기 때문에 총 생중량 비교는 가장 중요한 생육적으로도 활용하였다. 아래 사진(Fig 2-6)은 각 생육실험 처리구별 생육 모습으로 Fig. 2은 4월말의 생육 모습, Fig. 3은 생육실험 처리구별 각각 하나의 생육 모습, Fig. 4는 5월말의 생육 모습, Fig. 5는 7월말의 생육 모습, Fig. 6은 9월말에 생육 모습으로 일반토양 처리구와 혼합 토양 처리구는 억새의 꽃순이 활착되어 있는 반면에 중석 광미와 석탄폐석의 생육실험 처리구는 꽃을 피우지 못한 모습이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐재덤 중석 광미와 폐재덤 가장자리 토양 중금속 분석결과

중석 광미 중금속 총량 분석결과(Table 2), 중금속별 평균과 범위는 As 807.50(780.56 ~ 840.78) mg/kg, Cd 41.22(38.93 ~ 45.45) mg/kg, Pb 101.64 (87.67 ~ 112.45) mg/kg, Cu 144.02 (137.30 ~ 155.67) mg/kg, Cr 86.07 (75.56 ~ 95.40) mg/kg, Zn 919.88 (760.56 ~ 870.45) mg/kg로 분석되었다. 중석 광미의 중금속 함량과 토양오염 우려기준(Shin et al., 2021)과 비교했을 때, As는 32.30배, Cr은 17.21배, Cd는 10.30배로 높은 농도 수치였고, 표준오차는 As 8.06, Cd 0.82, Pb 3.05, Cu 2.60, Cr 2.54, Zn 14.12 mg/kg로 Cd가 다른 중금속보다 표준오차가 가장 적은 것으로 보아 Cd가 토양 시료를 채취한 지역 간의 중금속 농도 차이가 가장 적은 것으로 나타났다.

중석 광미 폐재덤의 가장자리(폐재덤에서 5 m 이내) 토양을 중금속 분석결과(Table 3), 중금속 평균과 범위를 살펴보면, As 172.89 (128.17~197.27) mg/kg, Cd 7.76 (5.63~9.28) mg/kg, Pb 34.78 (29.34~45.00) mg/kg, Cu 66.11 (55.38~74.71) mg/kg, Cr 24.40

(19.76~29.45) mg/kg, Zn 325.70 (278.19~390.52) mg/kg로 분석되었다. 중금속의 토양오염 우려 기준과 비교했을 때, As는 6.92배, Cr은 4.88배, Cd는 1.94배로 폐재덤 가장자리의 토양 내 존재하는 중금속의 함량이 높은 것으로 나타났으며, 표준오차는 As 8.76, Cd 0.54, Pb 2.08, Cu 2.91, Cr 1.91, Zn 16.22 mg/kg로 Cd가 토양을 채취한 시료 사이에 중금속 농도 차이가 가장 적은 것으로 나타났다. 폐재덤의 중석 광미의 C_f 와 C_d 를 평가하기 위해 배경토양의 중금속 분석 결과(Table 4), 중금속별 평균과 범위를 살펴보면, As 14.35 (12.25~15.60) mg/kg, Pb 46.11 (39.89~52.50) mg/kg, Cu 16.94 (15.37~18.24) mg/kg, Cr 2.39 (1.89~3.20) mg/kg, Zn 205.29 (187.45~230.50) mg/kg로 분석되었다. 상동 폐재덤의 2~5 km에서 채취한 배경토양의 중금속 토양오염 우려 기준과 비교했을 때, As 0.57배, Cd 0.49배, Pb 0.23배, Cu 0.11배, Cr 0.47배, Zn 0.68 배로 모든 중금속 함량이 토양오염 우려 기준보다 낮은 것으로 분석되었다.

3.2. 중석 광미 폐재덤 및 폐재덤 가장자리 지역의 토양 내 중금속 오염 분석

폐재덤의 중석 광미와 폐재덤 가장자리(5 m 이내) 토양의 오염평가 결과(Table 5), 폐재덤에 쌓여 있는 중석 광미에 존재하는 각각의 중금속의 오염계수, C_f 는 폐재덤에서 2~5 km 떨어진 토양 중에서 인위적인 간섭을 적게 받은 토양(배경토양)에 존재하는 중금속으로 나눈 값으로 As 56.27, Cd 10.30, Pb 2.20, Cu 8.50, Cr 36.01, Zn 3.99이며 C_f 의 크기 순서는 Pb < Zn < Cu < Cd < Cr < As 순이었다. As, Cr, Cd, Cu의 오염계수는 6 이상으로 매우 높은 오염계수(Very high contamination)로 나타났고, Zn과 Cu는 C_f 의 값이 1이상 3미만으로 보통 수준의 오염계수(Moderate contamination factor)를 나타냈으며, 오염계수 합을 바탕으로 산출된 오염도, C_d 는 128.11로 높은 수치로 오염도 분류 범위 수준에서 크게 벗어난 것으로 평가되었다. 오염지수(PI)는 토양 우려 기준치로 폐재덤의 중석 광미에서 분석된 중금속을 나눈 값의 합을 중금속 수로 나누어 산출한 값으로 오염지수(PI)가 10.7로 평가 범위 분류에 크게 벗어나 평가 자체가 어려울 정도로 높게 오염된 것으로 평가할 수 있었다. 중석 광미 폐재덤으로부터 5 m 이내의 토양을 분석한 결과(Table 5), 중금속별

Table 5. Contamination assessment using contamination factor(C_f), contamination degree(C_d), pollution Index(PI)

Site	Parameter	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn	C_d	PI
Unit		mg/kg							
TTSWD	Mean	807.50	41.22	101.64	144.02	86.07	819.88		
	C_f	56.27	21.14	2.20	8.50	36.01	3.99	128.11	10.67
	Mean/WC	32.30	10.31	0.51	0.96	17.21	2.73		
TTWD(5m)	Mean	172.89	7.76	34.78	66.11	24.40	325.70		
	C_f	12.00	3.88	1.85	3.91	11.62	1.59	34.85	2.57
	Mean/WC	6.92	1.94	0.17	0.44	4.88	1.09		
BS		14.35	1.95	46.11	16.94	2.39	205.29		
WC		25.00	4.00	200.00	150.00	5.00	300.00		

BS, Background soil; C_f , Mean/BS, Contamination factor; C_d , Contamination degree; PI, Pollution Index; WC, Warning criteria; CWC, Comparison with warning criteria

Table 6. Correlation analysis between heavy metals in tungsten tailings in waste dam

HM	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn
Pcc/p-value					
As	.941** / .002	.520 / .232	-.118 / .801	.692 / .085	.586 / .166
Cd		.532 / .219	-.330 / .469	.725 / .065	.728 / .063
Pb			.274 / .552	.774* / .041	.725 / .065
Cu				-.028 / .952	-.205 / .660
Cr					.502 / .251

HM, Heavy metal; Pcc, Pearson correlation coefficient; p-v, p-value; Pcc*, p-value<0.05; Pcc**, p-value<0.01

Table 7. Correlation analysis between heavy metals in soil within 5 meters of tungsten waste dam

HM	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn
Pcc / p-v					
As	.889** / .007	-.483 / .272	-.176 / .706	.832* / .020	-.746 / .054
Cd		-.466 / .292	-.347 / .446	.708 / .075	-.714 / .071
Pb			.277 / .547	-.058 / .901	.444 / .318
Cu				-.153 / .743	.539 / .212
Cr					-.669 / .100

오염계수, C_f 는 As 12.00, Cd 3.88, Pb 1.85, Cu 3.91, Cr 11.62, Zn 1.59이며 C_f 의 크기 순서는 Zn < Pb < Cu < Cd < Cr < As이었다. As, Cr은 C_f 가 6 이상으로 매우 높은 오염계수(Very high contamination)로 나타났고, Cd와 Cu는 상당히 오염된 토양의 오염계수(Considerable contamination)로 나타났고, Pb와 Zn은 1 이상 3 미만으로 보통 수준의 오염계수(Moderate

contamination factor)로 평가할 수 있었다. 오염계수 합을 바탕으로 산출한 오염도 평가 결과, 오염도, C_d 는 34.85로 오염도가 높아 오염도 분류 범위에서 높은 오염도(Highly polluted)에 해당하며, 오염지수는 2.57로 2이상 3미만에 해당하는 중간 정도의 오염지수(Moderately polluted)로 평가되었다. 상동 폐재택의 중석 광미와 주변 토양의 중금속 오염평가를 한 결과, 특

Table 8. Soil analysis for growth experiment treatment

Types of soil	pH(1:5)	OM(%)	T-N(%)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)
TTS	8.53±0.15	1.30±0.05	0.10±0.01	0.15±0.01
CS	4.12±0.10	18.18±0.70	0.16±0.01	16.15±0.31
TCMS(3:1)	6.35±0.22	4.45±0.18	0.12±0.01	3.98±0.10
GS	5.82±0.11	4.38±0.16	0.19±0.01	20.29±0.89

TTS, Tungsten tailings soil; CS, Coal waste soil; TCMS(3:1), Tungsten tailings and coal waste soil are mixed 3 : 1; GS, General soil; OM, Organic matter; T-N, Total nitrogen; Av. P₂O₅, Available nutrient P₂O₅

Table 9. Results of survival rate by growth experiment treatment

Type of treatments	No of treatments	No of Survival	Survival rate(%)	Compared to TTS
TTS	15	6	40	.
CS	15	5	33	0.82
TCMS(3:1)	15	13	87	2.18
GS	15	14	93	2.33

히, As, Cr, Cd의 중금속 농도가 다른 중금속보다 크게 높아 C_f와 C_d, PI의 산출 값에 큰 영향을 준다는 사실을 알게 되었다. 또한, 오염도, C_d는 측정된 중금속의 수가 많을수록 오염도, C_d값을 증가시키는 원인이 되며 오염도 평가에서도 높은 수준의 평가를 받게 되는 원인이 되었다. 오염지수는 산출식에 참여하는 중금속 수에 따라 오염지수가 달라져 중금속의 수가 많을수록 오염지수 평가는 높은 오염 수준의 평가를 받을 수 있어 중금속의 수를 한정시켜 오염지수를 평가하는 것이 타당하다고 생각하며, C_f와 C_d는 배경토양의 중금속 농도에 따라 크게 달라진다는 사실을 알 수 있었다.

3.4. 폐재뎀의 중석 광미와 폐재뎀 가장자리 토양 중금속 간 상관관계 분석

폐재뎀에 적지된 중석 광미 내 중금속 간의 상관관계 분석결과(Table 6), As와 Cd의 상관관계가 0.941^{**}, 유의수준 0.002(p-value<0.01)로 99 % 신뢰구간에서 상관관계가 있으며, Pb와 Cr의 상관관계 0.774^{*}, 유의수준 0.04(p-value<0.05)로 95 % 신뢰구간에서 상관관계가 있다고 분석되었으며, 중석 폐재뎀 가장자리(5 m 이내)에 토양을 채취하여 중금속 간 상관관계를 분석 결과(Table 7), As와 Cd의 상관관계 0.889^{**}, 유의수준 0.007(p-value<0.01)로 99 % 신뢰구간에서 상관관계가 있으며, As와 Cr 간의 상관관계 0.832^{*}, 유의수준

0.02(p-value<0.05)로 95% 신뢰구간에서 상관관계가 있는 것으로 보아 오랜 시간이 흐르면서 폐재뎀에 적지된 중석 광미가 여름철 집중호우와 강풍 등 기상 현상의 영향을 받아 주변 지역으로 중석 광미가 확산되어 폐재뎀 주변 토양을 오염시켰다고 판단할 수 있었다.

3.4. 생육실험 처리구별 토양 양분 분석결과

처리구별 토양의 양분 분석결과(Table 8), 중석 광미의 pH는 8.53으로 약염기성, 유기물은 1.30%, 유효인산 0.15 mg/kg, 총질소 0.10%인 반면에 일반토양(산림토양)은 pH는 5.82로 약산성에 해당하며, 유기물은 4.38%, 유효인산 20.29 mg/kg, 총질소 0.19%로 분석되었다. 일반적으로 식물의 생육 범위의 pH는 5.50~6.50 범위로 보고되었다(Chung et al, 2002). 석탄폐석은 pH는 4.12으로 중간 산성에 해당되며 유기물은 18.18%, 유효인산 16.15 mg/kg, 총질소 0.16%로 중석 광미와 석탄폐석의 각각의 pH는 생육 범위에 크게 벗어나 자연도입이 어려울 것으로 판단된다. pH가 염기성인 중석 광미의 경우, 수소이온(H⁺)의 농도가 낮아 토양 내 무기 양분 생산이 부족하고, pH가 낮은 석탄폐석인 경우에는 수소이온의 농도가 높아 토양 내 무기 양분 과량의 생산으로 식물의 생육을 저해하였다고 생각된다. 중석 광미와 석탄폐석을 3:1로 혼합하여 토양의 pH 6.35, 유기물함량 4.45%, 유효인산 3.98

mg/kg, 총질소 0.12%로 식물 생육이 가능하도록 토양으로 개선시켰다고 판단된다. 우리나라 산림토양의 평균 pH 5.52, 유기물 함량 4.49%, 총질소 0.19%로 보고되었다(Chung et al, 2002). 중석 광미 폐재담에 식물의 자연도입이 어려운 이유는 식물생육 범위에 벗어난 토양의 pH, 함량이 낮은 유기와 무기 양분이 식물의 자연도입을 더욱더 어렵게 만들었다고 판단된다.

3.5. 생육실험 결과

생육실험 결과(Table 9~13, Fig. 7~10), (Table 9)는 생육실험 처리구별 중석 광미, 석탄폐석, 중석 광미와 석탄폐석을 3:1 혼합, 일반토양을 활용하여 생육실험을 진행하여 생존율을 측정한 결과, 생존 개체수와 생존율에서 중석 광미 6(40%), 석탄폐석 5(33%), 혼합폐석 13(87%), 일반토양(93%)로 나타났다. 생존율은 혼합한 생육실험 처리구는 순수한 중석 광미보다 47%, 석탄폐석보다 54% 높았고, 일반토양 처리구보다는 5% 낮은 것으로 나타났다. 생존율 생육실험 결과로 볼 때, 중석 광미와 석탄폐석의 혼합으로 식물 생장에 유효한 pH와 양분이 상호 보완되어 토양이 개선되었다. 무엇보다 토양을 혼합으로 pH가 약산성으로 개량되면서 수소이온의 농도가 낮아 중금속을 포함한 토양의 용해도를 감소시켜 중금속이 식물체내로 이동량이 적어 중금속의 스트레스가 식물 생육에 영향을 주지 않은 것으로 생각된다. 토양 혼합을 통해 pH와 양분의 상호 보완으로 토양환경을 개선시켜 식물의 생존율(Table 9)과 생육량(Table 10~13)을 효과있게 증가시킨 것으로 사료된다.

생육실험 처리구별 억새의 줄기 길이 생장을 월별로 비교한 결과(Table 10), 순수한 중석 광미와 석탄폐석, 혼합토양, 일반토양의 생육실험 처리구에서 생육한 줄기 길이는 각각 56, 60, 140, 150 cm로 혼합 생육실험 처리구가 중석 광미 처리구에서 생장한 억새보다는 2.50배 더 생장에 효과가 있었던 것으로 나타났다. 혼합토양과 일반토양 생육실험 처리구 비교에서는 17% 일반토양 처리구에서 생장한 억새가 더 효과 있게 생육했음을 알 수 있었다. 순수한 중석 광미와 석탄폐석으로 처리한 생육실험 처리구에서 생육한 억새의 줄기 길이 비교에서 석탄폐석이 7% 더 생장하였음을 생육실험 결과로 알 수 있었다. 또한, 중석 광미와 석탄폐석에서의 생육이 혼합토양과 일반토양으로 처리한 식물보다 생육 길이가 적은 것으로 생육실험 결

과 나타났다. 광산활동 찌꺼기인 두 토양을 혼합했을 때, 혼합토양으로 처리한 식물체가 중석 광미 처리구보다 2.50배, 석탄폐석 처리구보다 2.33배 더 효과 있게 생육한 것으로 나타났다.

중석 광미 생육실험 처리구는 높은 pH와 영양염류 부족으로 줄기 길이 생육이 빈약했고, 석탄폐석 생육 처리구는 유기양분이 충분함에도 토양의 낮은 pH로 인해 식물 생육을 저해한 것으로 생각된다. 이러한 성분에서 서로 상이한 두 토양이 혼합시켜 pH가 중화되어 식물 생육 범위대로 변화하였고, 영양물질이 섞이고 보완되면서 식물 생장에 양호한 토양으로 개량되어 생육실험 결과, 순수한 중석 광미나 석탄폐석의 생육실험 처리구보다 효과 있는 생육을 한 것으로 실험결과 나타났다.

생육실험 처리구별 군락의 퍼짐 정도 크기를 비교 분석한 결과(Table 11), 생육실험 처리구별 식물체 퍼짐 정도의 크기는 중석 광미 45, 석탄폐석 50, 혼합토양 80, 일반토양 85 cm으로 중석 광미 생육실험 처리구보다 혼합토양 생육실험 처리구에서 1.78배 더 효과 있게 생장하였음을 알 수 있었다. 이러한 생육실험 처리구별 군락의 퍼짐 크기를 비교하여 볼 때, 혼합토양의 생육실험 처리구와 중석 광미의 생육실험 처리구에서의 군락의 퍼짐 크기를 비교하여 보면, 혼합토양의 생육처리구가 78% 더 생육한 것으로 나타났으며, 일반토양과 비교했을 때, 일반토양 생육처리구가 혼합토양 처리구보다 약 6% 더 생육한 것으로 분석되었다. 중석 광미와 석탄폐석 혼합으로 식물이 생육하는 데 효과가 있는 것으로 나타났다.

생육실험 처리구별 군락의 개체수를 비교한 결과(Table 12), 생육실험 처리구별 분화된 개체수가 중석 광미 5개, 석탄폐석 4개, 혼합토양 13개, 일반토양 처리구 14개로 혼합 생육실험 처리구는 중석 광미 처리구보다 2.60배의 개체수가 더 분화되었고, 일반토양 처리구보다는 개체수 분화가 7.7% 적은 것으로 나타났다. 중석 광미와 석탄폐석을 3:1로 혼합한 생육실험 처리구는 중석 광미와 석탄폐석으로 제작한 생육실험 처리구보다 개체수 분화에서 효과 있게 생육 분화한 것으로 나타났다.

생육실험 처리구별 생중량을 비교 분석한 결과(Table 13), 중석 광미 처리구 155 g, 석탄폐석 처리구 320 g, 혼합토양 처리구 890 g, 일반토양 처리구 920 g으로 혼합 생육실험 처리구가 중석 광미 처리구

Table 10. Comparison of stem length by experimental treatment

Experimental treatment	April	May	June	July	August	September	Compared to TTS
Unit	cm						
TTS	3	8	21	35	47	56	.
CS	3	7	19	37	50	60	1.07
TCMS(3:1)	3	15	45	80	120	140	2.50
GS	3	12	50	85	125	150	2.67

Table 11. Comparison of the spreading size of colonies by growth experimental treatment

Experimental treatment	April	May	June	July	August	September	Compared to TTS
Unit	cm						
TTS	2	5	7	15	25	45	.
CS	2	6	9	17	27	50	1.11
TCMS(3:1)	2	10	20	32	55	80	1.78
GS	2	9	21	35	60	85	1.89

Table 12. Number of individuals by growth experiment treatment

Experimental treatment	No of individual	Compared to TTS
Unit	g	
TTS	5	.
CS	4	0.80
TCMS(3:1)	13	2.60
GS	14	2.80

Table 13. Comparison of changes in fresh weight by experimental treatment

Experimental treatment	Fresh weight	Compared to TTS
Unit	g	
TTS	255	.
CS	320	1.25
TCMS(3:1)	890	3.45
GS	920	3.60

보다 3.45배 더 성장하였고, 일반토양 처리구보다는 15% 더 적게 성장하였다. 각 실험 처리구별 생중량 그래프 비교(Fig. 7)에서 중석광미와 석탄폐석을 혼합한 토양의 생육 처리구가 순수한 중석 광미와 석탄폐석으로 처리한 생육실험 처리구의 생중량이 뚜렷하게 차이가 있음을 알 수 있었다.

식물은 토양에서 무기 양분을 이온 형태로 식물체 내로 흡수하는데 중금속 농도가 높은 토양에서 pH가 낮을 경우, 토양 내 중금속 용해도 증가로 인한 식물체

내로 중금속 이동량 많아 식물 생장에 스트레스로 작용하여 생육을 저해시킬 수 있다고 하였다(Gildon and Tinker, 1981). 또한, 토양 내 높은 수소이온은 식물 생육의 직접적인 저해, 토양 내 공생하는 다양한 미생물의 물질대사를 감소시켜 식물 생육을 둔화(Hayman et al., 1975)시킨다고 알려져 있다.

4. 결 론

본 연구는 점오염원인 중석 광미 폐재덤과 폐재덤 가장자리 지역의 토양에 대한 오염 정도를 오염 계수(C_f), 오염도(C_d), 오염지수(PI)를 평가하고, 폐재덤 주변에서 자생하고 있는 토착 식물인 억새를 이용하여 생육실험을 통해 식물량 부족으로 나타나는 여름철 집중호우에 토양 침식으로 인한 피해를 방지하고자 식물 도입 가능성을 알아보고 폐재덤 관리 방안을 제시하고자 하였다.

- 1) 광산과 폐석지가 밀집되어 있는 남한강 최상류에 지역에 위치하고 있는 중석 광미 폐재덤에는 식물량이 부족하여 여름철 집중호우에 광미의 유실 우려가 있어 유실 보호에 대한 대책 방안이 절실히 필요하다.
- 2) 폐재덤의 중석 광미의 중금속 함량이 As 807.50, Cd 41.22, Cr 86.07, Zn 819.88 mg/kg이며 토양 우려기준과 비교했을 때, As는 32.30배, Cd는 10.31배, Cr은 17.21배, Zn은 2.73배로 분석되었다. C_f 는 2.20~56.27 범위에 해당하며, C_d 는 128.01로 오염도가 높은 것으로 나타났으며, PI는 10.67로 평가 범위를 벗어나 오염지수가 상당히 높은 것으로 나타났다. C_f , C_d , PI의 오염평가에서 As, Cd, Cr의 높은 중금속 농도가 오염 수준을 높이는 데 큰 영향을 미쳤다고 생각된다.
- 3) 중석 폐재덤 주변(5 m 이내) 토양의 중금속 함량이 As 172.89, Cd 7.76, Cr 22.40, Zn 325.70 mg/kg이며 토양 우려 기준과 비교했을 때, As 6.92배, Cd 1.95배, Cr 4.88배, Zn 1.09배이었고, C_f 는 1.59~12.00의 범위에 있었고, C_d 는 34.85로 오염도는 높은 수준이었으며, PI는 2.57로 보통 수준의 오염지수로 평가되었다. 오염물질의 농도가 높은 중석 광미 폐재덤에서 중석 광미가 강풍과 호우에 의해 주변 지역으로 오염물질이 확산되었다고 생각된다. 오염물질의 확산 요인은 중석 광미 폐재덤에 식물량이 부족하여 자연 날씨의 영향을 받아 오염물질이 쉽게 주변으로 확산시키는 원인이 되었을 것으로 사료된다.
- 4) 폐재덤의 중석 광미와 주변 토양의 오염평가에서 오염계수, 오염도, 오염지수가 높은 요인은 As, Cd, Cr의 중금속 농도가 토양 우려 기준치보다

10~30배 높아 오염평가에서 오염 수준을 높게 평가하는 원인이 되었다고 생각한다. 또한, 오염계수와 오염도는 배경 토양의 중금속 함량이 크게 영향을 주었으며, 오염지수는 중금속 토양 우려 기준치에 영향을 받는다. 중금속의 토양 우려 기준치는 점점 높아지고 있다는 것은 토양의 오염이 심화되고 있는 것을 의미한다. 토양 우려 기준치는 과거보다 점점 높아지고 있어 오염계수와 오염도는 배경토양 중금속 농도에 기반을 두기 때문에 토양 우려 기준에 영향을 받는 오염지수 평가보다 중요한 의미를 갖는다고 사료된다.

- 5) 중석 광미 폐재덤에 식물도입을 위해 생육실험을 한 결과, 생육실험 처리구별 생존율은 순수한 중석 광미 처리구보다 혼합 생육실험 처리구가 2.17배 높았고, 억새의 줄기길이, 근락의 개체수, 근락의 퍼짐정도(직경 크기), 생중량 비교에서 혼합 생육실험 처리구는 중석 광미 생육실험 처리구보다 2.50배, 2.60배, 1.78배, 3.45배가 효과있게 생육한 것으로 나타났다. 생육실험 결과로 볼 때, 중석 광미는 높은 pH와 낮은 영양염류, 석탄폐석은 낮은 pH로 인해 식물이 생육하는데 저해요인으로 작용한 것으로 생각된다. 각각의 토양이 식물 성장에서 극단적인 저해요인이 두 토양이 혼합함으로써 상호보완되거나 제거되면서 토양 환경이 개량되어 식물 생육에 긍정적인 효과를 미친 것으로 생각된다. 또한, 혼합토양에서 중금속 농도가 높았음에도 생육량이 일반토양과 차이가 크지 않았던 점은 토양 혼합으로 pH가 약산성으로 개선되면서 중금속 용해도를 감소시켜 중금속을 식물체내로 이동량이 적어 식물 생육에 스트레스를 감소시켰던 것으로 사료된다.
- 6) 중석 광미 폐재덤은 주변에는 광산 밀집 지역이라 식물이 잘 못사는 광물찌꺼기를 물리적 방법으로 관리하고 있어 주기적으로 인력 및 경제적 비용이 소요되고 있어 새로운 대안으로 토성이 다른 광물 찌꺼기를 혼합하여 pH를 조절하여 광물찌꺼기 주변에 자생하고 있는 토착식물로 피복시켜 식물의 뿌리와 줄기, 잎 등이 여름철 집중호우와 토양 사이에서 완충시켜 광물찌꺼기 침식을 방지할 수 있는 생태학적 관리 방안을 제안한다.

REFERENCES

- Jun, S. H., Park, O. K., Kim, H. Y., Jung, B. H., 2009, Recycling of tailings by soilidifications from abandoned metal mine, Korean J. Nat. Cons., 3, 45-52.
- Lee, S. W., Kim, M. J., Park, S. H., Lee, S. H., Kim, S. O., 2015, Human risk assessment of arsenic and heavy metal contamination and estimation of remediation concentration within abandoned metal mine area, J. Miner. Soc. Korea, 28, 309-323.
- Jung, M. C., Jung, M. Y., 2005, Evaluation and management method of environmental contamination from abandoned metal mines in Korea, J. Korean Soc. Geo. Eng., 43, 383-394.
- Ok, Y. S., Kim, S. H., Kim, D. Y., Lee, H., Lim, S., Kim, J. G., 2003, Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated abandoned mining area, Korean J. Soil Sci. Fert., 36, 323-332.
- Ok, Y. S., Kim, J. G., Yang, J. U., Kim, H. J., Yoo, K. Y., Park, C. J., Jeong, D. Y., 2004, Recent research trends on plant purification technology and transformation plants in heavy metal contaminated soils, Korean J. Soil Sci. Fert., 37, 396-406.
- Raskin, I., Ensley, B. D., 2000, Phytoremediation of foxic metals : Using plants to clean up the environment, 1st ed, John Wiley & Sons, Inc., New York, 3-11, 193-229.
- Mun, H. J., Won, H. J., Jin, S. L., Yang, I. J., 2020, Soil neutralizer selection for phytostabilization using *Miscanthus sinensis* Anders. in heavy metal contaminated soil of abandoned metal mine, Econ. Environ. Geol., 53, 517-528.
- Jun, S. H., Lee, J. K., Park, K. O., Choi, N. H., Hong, S. W., Jung, B. H., 2011, A Study on management of vegetation restoration in abandoned coal mine waste areas by phytoremediation, J. Korean. Env. Res. Tech., 14, 71-85.
- Jun, S. H., Jung, B. H., Park, G. O., Choi, N. H., Park, B. S., 2011, A Study on the vegetation restoration of mine waste land using mycorrhizae, Korean J. Nat. Cons., 5, 38-47.
- Seo, J. H., Yoo, B. C., Villa, M., Lee, J. H., Lee, T. H., Kim, C. S., Moo, K. J., 2017, Magmatic-hydrothermal processes in Sangdong W-Mo deposit, Korea: Study of fluid inclusions and ^{39}Ar - ^{40}Ar geochronology, Ore Geology Reviews, 91, 316-334.
- Jung, M. Y., Choi, Y. W., Jung, M. C., 2006, Properties of the tailings from the Sangdong mine and Its recycling, J. Korean Soc. Geo. Eng., 43, 486-497.
- MOE (Ministry of Environment), 2013, Standard analytical methods for soil pollution, Ministry of Environment, Korea.
- Hakanson, L., 1980, An Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach, Water Research, 14, 975-1001.
- Kloke, A., 1979, Contents of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury and nickel in plants grown on contaminated soil, UN-ECE Symposium, Geneva, 51-53.
- Lee, T. G., Kong, M. S., Lee, E. J., Jung, H. J., Kim, Y. K., Jung, G. B., Yang, J. E., Kim, S. C., Kim, G. I., Kim, G. R., Chae, M. J., 2019, Assessment of heavy metal concentrations in the arable soils near industrial complexes in Gangwon, Chungnam, Jeonnam, and Gyeongnam provinces of South Korea, Korean J. Soil Sci. Fert., 52, 541-550.
- Sim, J. I., Choi, S. J., Jeong, J. H., Choi, U. K., 2014, Selection of the coagulant for processing and identification of antibacterial activity on food born pathogens of konjac Jelly, Korean J. Food Nutr., 27, 699-705.
- Kjeldahl, J., 1883, Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen Körpern (new method for the determination of nitrogen in organic substances), zeitschrift für analytische chemie, 22, 366-383.
- Jun, S. H., Jung, B. H., Park, K. O., 2011, The Sewage sludge recycling plan for vegetation restoration in the abandoned mine waste areas, J. Korea Soc. Waste Manag., 28, 349-357.
- Shin, D., Park, S. J., Jo, Y. T., Bong, J., Park, J. H., 2021, Risk assessment for soil contamination warning standard and soil background concentration, J. Soil Groundwater Environ., 26, 37-49.
- Chung, J. H., Koo, K. S., Lee, C. H., Kim, C. S., 2002, Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions, Jour. Kor. For. Soc., 91, 694-700.
- Gildon, A., Tinker, P. B., 1981, A Heavy metal-tolerant strain of a mycorrhizal fungus, Trans. Br. Mycol. Soc., 77, 648-649.
- Hayman, D. S., Johnson, A. M., Ruddlesdin, I., 1975, Plant influence of phosphate and crop species on endogene spores and vesicule-arbuscular mycorrhizal under field conditions, Plant and Soil, 43, 461-495.

• Teacher. Byoung-Hak Jung
Suhck Chung Girl's Middle School
jungbh10@hanmail.net