

ORIGINAL ARTICLE

상동광산 폐재담의 식생복원을 위한 광미-하수슬러지 혼합토에서 역새 생육 특성에 관한 연구

정병학*

석정여자중학교

Study Examines Growth Characteristics of *Miscanthus sinensis* in Tailings-Sewage Sludge Mixed Soil for Vegetation Restoration of at Sangdong Mine Tailings Dam

Byoung-Hak Jung*

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

Abstract

This study investigated the factors limiting for plant establishment in the Sangdong tungsten mine tailings and evaluated the potential of sewage sludge for vegetation restoration. The findings revealed that tungsten mine tailings significantly affected agricultural land, residential environments, and adjacent ecosystems. Soil analysis of the mine waste dam revealed conditions unsuitable for plant growth, characterized by a pH of 7.78, low moisture content (1%), minimal available phosphorus (1.05 mg/kg), and heavy metal concentrations far exceeding soil contamination thresholds, particularly for arsenic (32.07 times higher the threshold), and cadmium (2.27 times the threshold). Conversely, the sewage sludge used as a soil amendment exhibited favorable properties, including high organic matter and phosphorus content, sufficient moisture, and acceptable concentrations of heavy metals, except for zinc, which exceeded the threshold by 2.20 times. Vegetation experiments demonstrated substantial improvements in plant establishment and growth, with survival rates increasing from 30% in tailings-only soils to 90% in sludge-amended and forest soils. Moreover, growth parameters such as stem length, canopy spread, plant density, and biomass were significantly enhanced in sludge-amended soils. These findings indicate that sewage sludge serves as an effective soil amendment for enhancing the physical and nutritional properties of mine-affected soils, thereby increasing biomass production. This suggests that the application of sewage sludge could facilitate vegetation establishment and support to the restoration of plant ecosystems in tungsten mine tailings dams.

Key words : Tungsten tailings, Sewage sludge, Mine waste, Mineral waste soil, *Miscanthus sinensis*

1. 서론

광산은 60~90년대까지 채광활동 후, 경제성이 떨어지는 광물찌꺼기를 산 계곡, 산사면, 평지 등에 쌓아 놓아 주변 생태계에 지속적으로 피해를 주고 있다. 이러한

광물찌꺼기에는 다량의 중금속 및 유해물질, 식물 생육대에서 벗어난 pH, 빈약한 양분으로 인해 식물이 잘 못 살아 자연 재해로 광물찌꺼기는 주변 농경지나 일상생활에 직·간접적으로 피해를 주고 있다(kwon et al., 2019).

Received 11 June, 2026; Revised 9 July, 2026;

Accepted 12 July, 2026

*Corresponding author : Byoung-Hak Jung, Suhck Chung Girl's Middle School, Yongwol 26239, Korea
Phone : +82-33-370-4502
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.

무엇보다 광물찌꺼기에는 식물의 자연도입이 어려워 식물이 부족으로 우리나라와 같이 여름철 집중호우에 유해한 물질을 함유하고 있는 광물찌꺼기는 침식에 크게 노출되어 있다. 자연 재해로 흩어지는 유해물질들은 동물의 먹이사슬 및 연쇄로 인해 우리 인간에게까지 영향을 주고 있다. 이러한 피해를 줄이기 위해 광물찌꺼기 관리 초기에는 침식을 방지하기 위해 벽돌, 돌담, 비닐 명석 등 물리적인 관리방법으로 오랫동안 관리해 왔다.

물리적인 관리방법은 주기적 교체와 보수하는 과정에서 큰 경제적 비용이 소요되고 있어 원천적인 관리방법이 절실히 요구되고 있다. 광물찌꺼기의 기존 관리방법 대안으로 식물을 도입하여 식물의 삶과 뿌리의 힘으로 광물찌꺼기의 침식을 방지하는 생태학적 선순환적 관리가 필요하다. 광산이 점차 폐광되는 1990년 전의 광물찌꺼기 관리는 관리라기보다는 거의 방치 수준이었다. 광물찌꺼기 내에 함유하고 있는 유해물질의 심각성이 알려지면서 2000년 전후로 광물찌꺼기 내 유해물질들을 식물을 이용하여 제거하는 연구가 크게 붐을 일으켰다(Lee, 2001; Ok et al., 2003). 식물을 이용한 유해물질 제거는 유해물질이 소량일 때 가능하지만 대량으로 집적되어 있는 광물찌꺼기에서 유해물질을 제거한다는 것은 거의 불가능하다는 한계점에 이르게 되었다.

이러한 광물찌꺼기에 식물의 자연도입이 어려워 집중호우에 무방비 상태로 침식을 받아 계속하천이나 주변 농경지와 생활공간으로 확산되면서 주변 생태계에 큰 피해를 주고 있다. 식물에 의한 토양 복원 방법으로는 식물을 이용한 유해물질을 제거하는 방법과 식물을 이용하여 오염물질을 토양과 함께 이동을 제한하는 방법이 있다. Ok and Kim(2004)이 제시한 식물정화(phyto-remediation) 방법은 식물의 생물학적 기능을 활용하여 토양 오염을 해결하는 방법으로, 크게 네 가지 원리로 구분할 수 있다.

먼저 토양 속 중금속 등의 오염물질을 식물이 흡수하여 체내에 농축시킨 뒤 해당 식물을 제거함으로써 토양을 정화하는 식물 추출법(phyto-extraction)이 있으며, 식물이 생육 과정에서 물질대사를 통해 오염물질을 기체 상태로 전환하여 대기 중으로 배출하는 식물 휘발법(phyto-volatilization)과 식물체가 직접 오염물질을 분해하는 식물 분해법(phyto-degradation)이 있다.

또한, 식물의 뿌리 근권에서 미생물의 활동을 도와

유기물질을 분해함으로써 토양 환경을 개선하는 식물 자극법(phyto-stimulation)을 통해 토양 정화를 할 수 있다.

본 연구에서는 오염된 토양을 점오염원에 묶어 놓는 방법에는 오염된 토양에 식물로 피복시켜 오염물질의 이동량을 줄이는 방법인 식물안정화(phyto-stabilization) 방법은 오염 토양에서 오랫동안 자생하여 자라온 토착 식물 중에서 오염물질에 내성력이 강하고 오염물질을 농축시키는 데 효과가 있고 생물량이 큰 식물 선정이 무엇보다 중요하다.

식물안정화 방법은 식물의 뿌리 영역 내에서 오염물질을 고정시키고 오염물질의 이동을 저감시키는 것을 목적으로 하며(Adriano et al., 2004), 주로 강풍과 집중호우에 침식 및 침출, 비산으로 인해 오염 물질의 이동을 줄이고자 하는 복원 방법으로 토양 개량제를 사용하여 식물이 잘 살지 못하는 토양에 식물량을 증가시켜 식물의 잎과 뿌리로 집중호우로부터 식물이 토양 사이에서 완충 작용으로 유해물질 침식을 방지할 수 있다.

식물안정화 방법은 식물정화 방법보다 적용하기에 수월하고(Bolan et al., 2011), 오염 현장을 평가하여 적합한 토양 개량제와 식물량이 많은 식물종 선택이 중요하다.

식물안정화 방법은 토양의 중금속과 같은 무기 오염물질은 고정되고 점오염원 지역에서 외부로의 이동을 최소화하는 방법으로 식물 뿌리와 관련된 미생물 군집 활동을 통해 탄화수소와 같은 유기 오염물질의 분해를 촉진할 수 있으며, 이러한 오염물질을 물질대사를 통해 무독성 형태로 분해하여 토양 내에 존재시키기도 하고 식물체내로 유입하여 저장하기도 한다.

식물안정화 방법은 식물을 이용하여 오염물질을 체내에 농축하거나, 근권 내에서 오염물질을 화학적으로 고정(immobilization)하여 불용화시킴으로써 외부 확산을 방지하는 것을 목표로 하며, 오염된 토양 표면에 식물 피복으로 강풍과 호우 등에 완충작용을 통해 토양의 침식으로 인한 토양 유실을 저감시키는 관리방법이다.

식물안정화 방법은 중금속 및 높은 수준의 오염물질에 내성이 강한 식물종과 식생을 활용한 오염 토양의 안정화 기법에 있어, 효과적인 토양 개량제의 도입 및 활용이 시급한 실정이다. 식물안정화 방법은 추가 처리가 필요한 오염된 2차 오염물질을 생성하지 않으며 토양 비옥도를 증가시켜 식물생태계 복원을 이룰 수 있다. 일부 유기 오염물질은 미생물 또는 화학적 분해를

Table 1. Comparison between Sangdong Tailings Dam No. 1 and No. 2

Category	Tungsten Tailings Dam No. 1	Tungsten Tailings Dam No. 2
Geo Loc	Naedeok-ri, Yeongwol	Cheonpyeong-ri, Yeongwol
Dist. from SM	3.4 km	3.7 km
Dep. Period	1974. 3. - 1981. 4.	1981. 5. - 1993. 5.
Topo. Type	Flat Type	Valley Type
Area	89,300 m ²	315,510 m ²
Stor. Vol.	1,700,000 m ³	6,075,000 m ³
Dam Ht.	40 m	98 m
Tail. Wt.	4,000,000 tons	8,000,000 tons
Surr. Env.	Adjacent to the Okdong Stream	Located in a mountain valley area

Geo Loc: Geographic Location, Dist. from SM: Distance from Sangdong Mine, Dep. Period: Period of Deposition, Stor. Vol.: Storage Volume, Dam Ht.: Dam Height, Tail. Wt.: Tailings Weight, Topo. Type: Topographical Type, Surr. Env.: Surrounding Environment

거쳐 새로운 물질을 생성하지만(Jun et al., 2011), 중금속과 같은 무기 오염물질은 식물의 물질대사가 일어나더라도 변하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 광미댐의 식생 도입은 중금속 및 무기 오염물질의 식물체 내 이동·축적보다는 식물안정화(phytostabilization) 기법을 통해 식물이 오염 토양을 오염지로부터 토양 침식과 이탈을 줄이고 토양 생태계를 회복시키고자 식물 식생 회복에 목적을 두었다.

식물 도입을 위해 영양 양분이 풍부한 토양개량제(Ministry of Environment, 2007; Ahn, 2010)를 중석 광미에 혼합하여 식물 생태계를 회복시켜 광물찌꺼기 오염지역을 안정화시키고자 하였다. 생육실험에 앞서 광물찌꺼기에 식물이 잘 못사는 요인을 광물찌꺼기 토양분석을 통해 식물도입 한계 요인을 탐색한 후, 하수슬러지를 활용하여 생육 실험을 통해 식물이 잘 못사는 광물찌꺼기 적치지역에 식물도입 가능성을 알아보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구지 개요

상동광산은 강원특별자치도 영월군 상동읍에 자리 잡고 있는 텅스텐 광산 중 하나로 1993년 생산을 중단하였다(Seo et al., 2017). 상동 중석 제1 폐재댐은 상동광업소에서 중석을 제련 후, 발생한 광미를 옮겨서 모아 놓은 곳으로 3.4 km 떨어진 상동읍 내덕리에 위치하고 있다(Fig. 1).



Fig. 1. The first waste dam with a pile of Sangdong tungsten mineral debris.

Table 1 (Jung and Jung, 2005)에 의하면, 제1 폐재댐의 적치기간은 1974. 3.-1981. 4., 적치상태는 평지형이며 면적은 89,300 m²이고, 용적량은 1,700,000 m³이며, 댐 높이는 40 m, 폐재 중량은 4,000,000 ton에 달하며, 댐에 인접하여 옥동천이 흐르고 있다. 제2 폐재댐은 상동광업소에서 3.7 km 떨어진 상동읍 천평리에 위치하며, 적치기간은 1981. 5.-1993. 5., 적치상태는 계곡형으로 면적은 315,510 m²이고, 용적량은 6,075,000 m³이며, 댐 높이는 98 m, 폐재 중량은 약 8,000,000 ton에 이른다고 하였다.

2000년 전후로 벽돌, 명석, 비닐 덮개, 방수용 덮개 등으로 광물찌꺼기 침식과 날림을 방지하기 위해 노력해 오다가 2015년부터 광물찌꺼기 위에 일반토양으로

복토하여 관리하고 있지만 식물의 부족으로 여름철 집중호우에 토양의 침식으로 폐재댐 관리에 어려움을 겪고 있다. 폐재댐에서 많은 양의 침출수가 유출되지는 않지만, 소량이 하천으로 유입되고 있다. 무엇보다 폐재댐에 식물량이 부족하여 여름철 집중호우에 침식이 우려되고 있는 실정이다. 폐재댐 사면은 일반 토양의 복토로 식물의 도입이 이루어지고 있지만 폐재댐 정상에는 여전히 식물의 자연 도입이 이루어지고 있지 않아 폐재댐 관리가 절실히 요구되고 있다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 현장 조사 및 식물분포도 조사

상동 중석 제1 폐재댐 주변에서 나타나는 피해조사 계곡, 농작물, 주민생활 공간, 주변생태계 등을 현장답사를 통해 알아보고, 폐재댐 주변에 자생하는 우점식물을 확인을 위해 식물분포도 조사를 실시하였다. 식물분포도 조사는 제1 폐재댐 가장자리의 식물들이 고르게 분포하고 있는 지역에서 가로(5 m) × 세로(5 m), 25 m²에서 자라고 있는 식물종 및 개체수를 조사하는 방법으로 실시하였다.

2.2.2. 시료채취 및 분석방법

본 실험에 사용된 모든 토양 시료는 땅이 얼기 전인 11월 중에 각 시료군별로 3개 지점에서 채취하였다. 중석 광미는 오염이 비교적 덜 된 광미댐 중앙 부근에서 지점 간 20 m 간격으로 채취하였으며, 산림토양은 광미댐의 영향이 없는 약 4~5 km 거리의 산림지역에서 채취하였다. 토양 채취 시에는 모종삽으로 잡초와 유기물 등 표토의 불순물을 제거한 후 10~20 cm 깊이의 토양을 취하였으며, 오염 방지를 위해 폴리에틸렌 백에 밀봉하여 암실에 보관하였다. 하수슬러지는 하수종말처리장에서 생산된 후 처리공장에서 안정적인 부숙화 과정을 거친 것을 사용하였다. 이를 6개월간 노지에 방치한 후, 식물 생육을 위한 녹생토(Hyun, 2009; Jun et al., 2009) 재료를 활용하였다. 최종 생육실험군 토양은 중석 광미와 하수슬러지를 4:1 비율로 균일하게 혼합한 혼합시료로 조제하여 사용하였다.

토양 시료의 pH는 환산성 측정을 위해 풍건 시료와 증류수를 1:5 (w/v) 비율로 혼합하여 30초간 교반한 후, 표준 완충용액으로 보정된 pH 미터를 사용하여 측정하였다.

중석 광미, 하수슬러지 및 산림토양, 혼합시료에 대한 중금속 함량 분석은 토양오염공정시험기준(Ministry of Environment, 2006)에 의거하여 수행하였고, 풍건 후 2 mm 체를 통과한 시료 1 g에 왕수(HCl : HNO₃ = 3 : 1, v/v)를 첨가하고 시료 내 유기물의 완전 산화를 위해 상온에서 2시간 이상 정치한 뒤 70℃에서 2시간 동안 가열 추출하였다. 추출액에 증류수 6 mL를 가하여 교반하여 0.45 μm 여과지로 여과하였으며, 최종 여과액 내 중금속 농도는 ICP-MS를 이용하여 분석하였다.

하수슬러지는 산업 시설이 없는 중소 도시 소재 하수처리장에서 채취하여 오염되지 않게 밀봉하여 운반함으로써 시료의 변질을 방지하고 48시간 이내에 분석을 완료하였고, 수분함량은 105℃에서 4시간 동안 건조 후 함량에 도달한 도가니의 중량 변화를 이용하여 산출하였고, 유기물 함량은 건조 시료를 550~650℃ 전기로에서 4시간 동안 연소시킨 후 잔열감량(loss on Ignition)법으로 연소 전과 후의 무게 차이를 이용하여 측정하였으며(Son, 2006; Kim, 2015), 유효인산 함량은 몰리브덴청법(chlorostannous-reduced molybdophosphoric blue color method)으로 발색시킨 후 분광광도계(spectrophotometer)를 사용하여 농도를 측정하는 방식으로 외부 전문 분석기관에 의뢰하여 분석을 수행하였다.

2.2.3. 포트제작 및 생육방법

생육 포트 실험을 위해 사용할 중석 광미와 산림토양은 오염된 걸 토양을 걸어내고 채취하여 고무 합지에 담아 실험지로 이동시킨 후, 오염되지 않게 비닐로 싸아서 보관하였다. 식재 용기는 6개월간의 생장 정도를 고려하여 지름이 120 mm, 높이 150 mm인 원통형 둥근 플라스틱 화분을 사용하였다. 생육실험을 위한 처리구는 순수한 중석 광미(1,500 g)로 제작한 대조구 10개와 산림토양(1,500 g)으로 제작한 대조구 10개, 중석 광미(1,200 g)와 하수슬러지(300 g)를 혼합한 실험구 10개를 제작하였다(Table 2).

생육 식물종은 주변에 우점종으로 자생하는 *Miscanthus sinensis*(억새)를 선정하고 씨앗을 받아 시켜 자란 유묘를 식재 식물로 이용하였다. 중석 광미와 하수슬러지를 혼합한 식생토의 하수슬러지 혼합 비율은 토양 유기양분 적정범위(25~35 g/kg; Ketterings et al., 2002)을 유지하기 위하여 20%로 정하였다.

Table 2. No of growth pots per experimental treatment

Types of growth treatment	TT	FS	TTSS
No. of growth treatments	10	10	10

TT: Tungsten tailings, FS: Forest soil, TTSS: Mixing tungsten tailings and sewage sludge in a 4:1 ratio

Table 3. Results of the investigation of the damage type shown by the first waste dam of Sangdong Tungsten

Type of damage	Contents of the damage	Note
Damage to natural scenery	The bottom of the valley was stained with yellowish brown, and the smell of sulfur was so severe that it was extremely inconvenient to live.	Damage caused by acid mine drainage.
Damage to crops and living spaces	When the wind blows, the fine particles of tungsten tailings are causing great damage to agricultural crops, and they fly into living spaces, causing damage to laundry and crocks.	Damage caused by fine particles in tungsten tailings.
Ecosystem destruction	When we looked at the valleys where AMD flows, we found no creatures like fish or worms, no aquatic ecosystems were found, and the water ecosystem was destroyed.	Judging by the influence of low pH.

생육실험 시 처리구별 포트마다 1개의 역새 유묘를 식재하고 주기적으로 햇빛의 양을 최대한 균등하게 받을 수 있도록 하기 위해 3~4일 간격으로 처리구의 위치를 순환시켜 주었으며, 수분 공급은 일주일 간격으로 모든 처리구에 일정량(100 mL)을 공급하였고, 생육실험은 4월 초부터 시작하여 9월 말까지 비닐하우스에서 진행하였다.

처리구별 식재 유묘의 생존율을 비교하였고, 처리구별 생육량은 줄기 길이, 군락의 퍼짐 정도 크기는 매월 말에 측정하였고, 군락의 개체수와 생중량은 9월 말에 각각 처리구별 균일한 생육 상태를 보이는 포트로 줄기 길이, 퍼짐의 크기, 분얼 수, 잎의 수 등이 전체의 평균값과 유사하게 보이는 식물체 포트 3개를 선정하여 생육 지표를 측정하여 평균값을 이용하여 SPSS (statistical package for the social sciences, ver. 20) 통계 프로그램으로 처리구별 유의성 검증을 하였다.

생육 지표인 줄기길이 측정은 역새 포트에서 처음에 식재하였던 원줄기를 측정하였고, 세 개의 포트를 같은 방법으로 측정하여 평균값을 활용하였다. 군락의 퍼짐은 식물체를 위에서 수직 아래로 보고 원을 그렸을 때, 식물체를 중심으로 가장 큰 허리 부분의 지름의 크기를 측정하였고, 생중량은 포트에서 분화되어 자란 총개체수를 뿌리와 줄기가 유실되지 않게 채취하여 뿌리에 묻은 토양을 털어내고 물로 씻은 후에 식물체 겉에 묻은 물기를 그늘에서 말린 후(24시간)에 중량

을 측정하였다.

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 중석 광미 폐재댐 주변 피해 현황

중석 광미로 적치된 제1 폐재댐 현장답사를 통해 피해를 조사한 결과(Table 3), 피해는 크게 세 가지 유형으로 나타났다. 주로 피해는 자연경관 훼손과 농작물 피해, 주민의 일상생활 공간에 피해를 주고 있는 것으로 조사되었다. 중석 광미 폐재댐에 적치되어 있는 광미의 입자는 100 μ m 이하의 세립질의 흙알갱우로 약한 바람에도 쉽게 대기 중으로 비산되어 인근 생활공간과 농작물에 피해를 주는 것으로 나타났다. 특히, 중석 광미 폐재댐은 식물의 피복이 극히 부족하고 광미내 물리적 구조가 약해 장마철이나 집중호우 시 중석 광미의 광물찌꺼기는 쉽게 침식 받을 가능성이 커 보였다. 지역 주민의 피해 호소로 폐재댐 관리를 위해 비닐 명석, 벽돌 및 돌담을 쌓는 등 다양한 방법으로 피해를 예방하려고 노력하여 왔지만 영구적인 관리 방법으로는 큰 실효성 얻지 못하고 있다. 폐재댐의 광물찌꺼기 관리는 식생을 살려 식물에 의한 선순환적 관리가 타당할 것으로 판단되었다.

3.2. 제1 폐재댐 가장자리 지역의 식물분포도

Table 4. A Study on the plant distribution at the edge of the 1st Tungsten Tailings Dam

Species / Area	Area A	Area B	Sum(%)
<i>Miscanthus sinensis</i>	13	16	29(50 %)
<i>Artemisia princeps</i>	7	9	16(28 %)
<i>Setaria viridis</i>	5	3	8(15 %)
<i>Ipomoea nil</i>	2	2	4(7 %)
Sum	27	30	57

Table 5. Results of analysis of tungsten tailings nutrient and heavy metals

Measurement item	pH (1 : 5)	OM g/kg	Av. P ₂ O ₅ mg/kg	Pb	Zn	Cr _t	Cd	As
				----- mg/kg -----				
Average	7.78	0.98	1.05	19.41	258.13	35.27	9.09	801.83
Standard deviation	0.11	0.08	0.10	1.29	3.84	0.77	0.27	5.95
Standard error	0.05	0.04	0.04	0.58	1.72	0.35	0.12	2.66
Minimum	7.65	0.90	0.97	18.10	253.10	34.28	8.75	795.91
Maximum	7.95	1.10	1.20	21.21	262.20	36.26	9.50	810.34
WC				200	300	5(Cr(VI))	4	25

OM: Organic matter, Av. P₂O₅: Available phosphorus P₂O₅, WC: Warning Criteria, Cr_t: Cr(0) + Cr(III) + Cr(VI), 5(Cr(VI)); The warning criterion for Cr(VI) is defined as [Cr(VI)] ≤ 5ppm

중석 광미 제1 폐재댐 가장자리 주변에서 자라고 있는 초본식물 분포도 조사 결과(Table 4), 3-4종의 식물 종이 자생하고 있었고, *Miscanthus sinensis*(억새)와 *Artemisia princeps*(쑥)이 각각 50%, 28%였고, *Setaria viridis*(강아지풀)이 15%, 그 외 *Ipomoea nil*(나팔꽃)이 7%로 조사되었으며, 우점식물이면서 토착 식물인 다년생 초본식물인 억새를 생육 후보 식물로 선정하였다.

억새는 군락을 이루고 뿌리는 여러 해 식물로서 토양을 잡아주는 능력이 다른 식물보다 우수하며 광물찌꺼기와 같은 척박한 토양에서도 견디어 내는 내건성 식물로 알려져 있다고 보고하였다(Baek and Park, 2005; Heo, 2008).

또한, 억새는 지대가 높은 구릉이나 언덕에 자생하는 식물로 토양 환경이 열악한 광물찌꺼기가 적치되어 있는 광산지역에서 균근균과 함께 공생하면서 자생하는 식물로 보고한 바 있다(Jun et al., 2011). 이러한 억새는 광물찌꺼기가 적치되어 토양에서 자생하는 토착식물로 영양 양분을 적극적으로 공급한다면 식물이 부족한 오염 토양에 초본식물로 피복시키는데 유리한 식물

로 판단되어 생육 후보 식물로 선정하였다.

3.3. 식생토별 물리화학적 성상

3.3.1. 중석 광미

폐재댐의 중석 광미를 분석한 결과(Table 5), pH는 평균 7.78, 유기물 함량은 평균 0.98 g/kg로 빈약해 유기물이 부족하여 폐알구조를 형성하기 어려운 토양환경이며, 유효인산(available phosphorus P₂O₅) 함량은 1.05 mg/kg로 분석되었다.

또한, 중석 광미는 Pb, Zn, Cd, As 등 다량의 중금속을 함유하고 있었으며, 각각의 중금속 함량을 토양 우려기기준과 비교했을 때, Cd (9.09 mg/kg)는 2.27배, As (801.83 mg/kg)는 32.07배로 크게 오염되어 있었지만, Pb와 Zn은 기준치 이하임을 분석결과로 알 수 있었다. 또한, 총크롬(Cr_t) 함량은 35.27 mg/kg으로, 이는 국내 토양오염우려기준에서 총크롬 함량에 대한 자체 기준은 없는 상태이다. 크롬의 화학적 거동 특성상 자연 토양에서 금속 상태인 Cr (0)의 존재는 극히 희박하며, 50여 년이 경과한 폐재댐의 환경적 산화-환원 반

Table 6. Results of analysis of sewage sludge nutrient and heavy metals

Measurement item	pH (1 : 5)	OM g/kg	Av. P ₂ O ₅ mg/kg	Pb	Zn	Cr _t	Cd	As
-----mg/kg-----								
Average	5.94	166.55	2015.60	10.30	661.18	4.07	1.65	6.99
Standard deviation	0.04	5.62	59.38	0.61	7.57	0.22	0.17	0.09
Standard error	0.02	2.51	26.56	0.27	3.39	0.10	0.08	0.04
Minimum	5.89	160.35	1950.76	9.50	653.20	3.87	1.45	6.86
Maximum	6.00	175.05	2112.23	11.14	670.60	4.45	1.85	7.11
WC				150	300	5(Cr(VI))	4	15

Table 7. Results of analysis of forest soil nutrient and heavy metals

Measurement item	pH (1:5)	OM g/kg	Av. P ₂ O ₅ mg/kg	Pb	Zn	Cr _t	Cd	As
-----mg/kg-----								
Average	5.84	8.68	25.05	44.95	188.33	2.23	2.11	14.55
Standard deviation	0.06	0.13	0.81	4.13	37.91	0.24	0.18	0.97
Standard error	0.02	0.05	0.31	1.56	14.33	0.09	0.07	0.37
Minimum	5.75	8.53	24.00	39.45	105.90	1.95	1.90	13.45
Maximum	5.90	8.90	26.45	50.43	220.76	2.58	2.45	15.90
WC				150	300	5(Cr(VI))	4	15

응을 고려할 때, 광미 내 잔류하던 Cr(VI)은 우수에 용출되거나 환경 내 전자를 수용하여 안정한 고체 상태인 Cr(III)로 전환되었을 가능성이 커 보인다. 따라서 분석된 총크롬 함량의 대부분은 Cr(III) 형태일 것으로 사료되나, 토양 안전성 확보와 위해성 평가를 위해 Cr(VI)의 정량적 함량을 위해 정밀 분석이 사료된다.

중석 광미 제1 폐재택에서 식물의 자연 도입이 어려운 이유는 광미의 낮은 유기물 함량과 유효인산 함량, 다량의 중금속 함량으로 식물이 도입에 불리한 토양환경의 조건임을 분석 결과를 통해 알 수 있었다.

일반적으로 금속광산 광미에는 유기물과 유효인산의 농도가 대체로 낮으며(Mun et al., 2020), 중금속에 의한 독성을 띠며, 중석 광미는 유기물의 부족으로 인해 입자가 홀알구조(Ye et al., 1999)로 구성되어 있어 식물의 뿌리 생육에서도 열악한 토양 환경을 가지고 있었다. 이러한 중석 광미는 식물생장에 적합하지 않은 토양 환경을 개선하기 위해 영양 양분이 풍부한 보완제를 광물찌꺼기에 공급하여 식물도입을 위해 인위적인 지원이 필요하다고 판단된다.

3.3.2. 하수슬러지

하수슬러지 분석 결과(Table 6), 하수슬러지의 pH는 5.94, 유기물 함량은 166.55 g/kg, 유효인산 함량은 2015.60 mg/kg로 식물에게 필요한 양분이 풍부하게 분석되었다. Table 5에서 중석 광미는 유기양분(Organic matter)이 0.98 g/kg, 유효인산(Available phosphorus P₂O₅)함량이 1.05 mg/kg으로 부족한 영양 양분을 인위적인 방법으로 식물 생존과 생육에 필요한 영양분을 공급할 필요가 있다고 사료된다. 이러한 문제점을 해결하기 중석 광미가 함유하지 못한 대부분의 성분과 양분을 하수슬러지가 과량 지니고 있어 하수슬러지를 중석 광미에 혼합함으로써 식물 생장을 위한 토양 조건을 개선할 수 있다고 판단된다.

하수슬러지의 중금속 분석 결과(Table 6), 토양오염 우려기준 대비 Pb 0.07배, Zn 2.20배, Cd 0.41배, As 0.47배로 나타났다. 아연(Zn)을 제외한 모든 항목이 우려기준 이하로 나타났으나, 저농도 오염원의 장기적 누적 가능성을 고려할 때 지속적인 주의와 관리 체계 유지가 필요하다고 사료된다.

최근 환경오염 심화에 따라 오염 기준이 점차 강화되

Table 8. Analysis of the moisture content of soil used in this study

Soil depth	Tungsten tailings	Forest soil	Sewage sludge
Unit	----- % -----		
5-10 cm	0.92 ± 0.02	18.03 ± 0.04	70.58 ± 0.22
10-15 cm	0.97 ± 0.01	18.18 ± 0.04	71.92 ± 0.12
15-20 cm	1.15 ± 0.03	18.44 ± 0.06	72.75 ± 0.33
Average	1.01 ± 0.02	18.21 ± 0.05	71.75 ± 0.22
OR		20 ~ 25	

Av±SE: Average ± Standard error, OR: Optimal range

Table 9. Nutrient analysis of soil mixed with tungsten tailings and sewage sludge

Types of growth treatment	pH (1:5)	OM (g/kg)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	MC (%)
TTSS	6.63 ± 0.04	35.12 ± 0.36	591.87 ± 4.10	15.08 ± 0.10

OM: Organic matter, Av. P₂O₅: Available phosphorus P₂O₅; MC: Moisture content

는 추세이며, 미량의 중금속이라도 먹이사슬을 통해 생물 농축(bioaccumulation)을 유발하여 생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 하수슬러지의 중금속 함량이 토양 오염 기준치 이하라도 관리에 각별한 주의가 요구된다. 현행법상 하수슬러지의 농업용 퇴비 및 비료 활용은 제한적이나(Ryu et al., 2010), 풍부한 유기물 함량을 고려할 때 식생 기반이 취약한 토양의 녹생토 소재로 적극 활용하는 방안을 고려할 필요가 있다.

3.3.3. 산림토양

산림토양의 양분과 중금속 분석 결과(Table 7), 산림토양의 pH는 5.84로 약산성으로 나타났고, 유기물 함량은 8.68 g/kg, 유효인산 함량은 25.05 mg/kg이었다. 중금속 함량을 토양 우려기준과 비교했을 때, Pb는 0.30, Zn은 0.63, Cd는 0.52, As는 0.97배로 모든 중금속은 토양 우려기준 이하인 것으로 나타났다.

산림토양의 중금속 함량은 토양오염 우려기준 이하의 수준이나, pH, 유기물 함량, 유효인산 등의 토양 이화학적 특성을 고려할 때 식생 기반으로서의 한계가 분명하다. 따라서 본 연구의 목적인 폐재담 내 식물생태계 복원과 숲 조성을 성공적으로 달성하기 위해서는 산림토양 또한 적절한 토양 개량 과정이 필요하다는 것을 시사한다.

각 식생토별 수분함량 분석 결과(Table 8), 중석 광미의 수분함량은 토양의 깊이 20 cm까지 평균 1.00% 내외로 토양 수분의 적정 범위(20~25%; Rural

Development Administration, 2005)에 크게 못 미친 것으로 나타났고, 산림토양은 18.21%로 적정범위와 비교했을 때 70~90%에 해당되며, 하수슬러지는 71.75%로 적정범위와 비교했을 때 3~4배 높은 것으로 나타났다. 중석 광미는 수분함량이 너무 낮아 식물 생존과 생육에 어려움이 클 것으로 판단된다. 식물 생육에 있어서 유기양분과 유효인산, pH도 중요하지만 토양의 수분함유 능력은 식물 생존과 생육에도 큰 영향을 미친다. 중석 광미에 영양 양분과 수분보유 능력을 보습해 줄 수 있는 능력을 인위적으로 공급해 줄 필요가 있다고 사료된다. 이런 측면에서 중석 광미에서 부족한 다양한 영양 양분과 수분함유 능력을 충족하고 있는 하수슬러지의 공급은 식물의 생존과 생육 문제를 해결해 줄 수 있을 것으로 판단된다. 중석 광미의 극히 낮은 수분함유량이 중석 광미 폐재담에 식물 도입이 어려웠던 주요 원인 중 하나였을 것으로 사료된다. 중석 광미의 크게 부족한 수분함량을 보완하기 위해 수분함량이 풍부한 하수슬러지를 혼합하여 중석 광미의 보수력을 개선할 필요가 있으며, 이는 식물의 생존과 생육을 촉진하는데 효과가 있을 것으로 사료된다.

3.4. 역사의 생육실험 및 고찰

3.4.1. 혼합토양 처리구 토양분석 및 생육상태

혼합 처리구의 토양 분석 결과(Table 9), pH 6.63 ± 0.04, 유기물 함량 35.12 ± 0.36 g/kg, 유효인산 함량 591.87 mg/kg, 그리고 수분 함량 15.08 ± 0.10%



Fig. 2. Survival rate experiment for each growth experiment treatment.

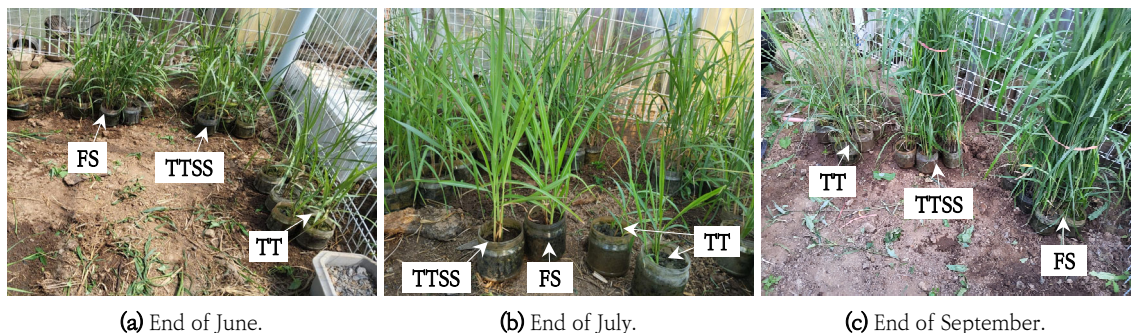


Fig. 3. Comparison of plant growth according to treatment and time. (a) End of June, (b) End of July, (c) End of September. [TT, Tungsten tailings; FS, Forest soil; TTSS, Mixing tungsten tailings and sewage sludge in a 4:1 ratio]

로 분석되었다. 본 생육 실험의 재료인 중석 광미 (Table 5), 하수슬러지 (Table 6), 산림토양 (Table 7) 및 수분함량 (Table 8) 분석치와 비교한 결과, 중석 광미에 하수슬러지를 20% 혼합했을 때 중석 광미의 결핍된 양분이 하수슬러지 혼합으로 영양 양분 및 수분함량에서 효과적으로 보완되는 것으로 나타났다.

각 처리구에 따른 식물의 생육 변화를 관찰하기 위해 사진으로 Fig. 2와 Fig. 3을 제시하였다. 먼저 Fig. 2는 4월 초, 실험 초기 단계의 모습으로 각 처리구별 생존율을 파악하기 위해 생육 실험 처리 과정이며, Fig. 3은 6월 말부터 7월 말, 그리고 9월 말까지 시간에 따른 생육 과정을 단계별로 생육 상태이다.

관찰 결과, 초기에는 유사하게 출발했던 각 처리구가 시간이 지남에 따라 점진적으로 서로 다른 생육 양상을 보였다. 특히 9월 말에 이르러서는 처리구별로 현저한

생육 차이가 나타났음을 확인할 수 있으며, 이는 생육 실험에서 적용한 각 토양 처리가 식물의 생장에 유의미한 영향을 미쳤음을 알 수 있었다.

3.4.2. 식생 처리구별 억새 생존율

각 처리구별 생육 결과 (Table 10), 중석 광미 처리구에서는 생존율이 30 %였고, 중석 광미와 하수슬러지를 혼합토양과 산림토양 처리구에서 각각 90%의 생존율을 보였다.

중석 광미와 하수슬러지로 혼합한 처리구가 순수한 중석 광미 처리구보다 3배의 생존율이 높은 것으로 나타났다. 중석 광미 처리구가 광미와 하수슬러지로 혼합한 처리구와 산림토양 처리구보다 낮은 생존율을 보인 것은 토양 내에 함유하고 있는 낮은 유기양분 함량 및 수분함량 부족, 낮은 유효 인산 함량, 다량의 중금속 함

Table 10. Experimental results of survival rate growth experiment by experimental treatment

Experimental treatments	No. of treatments	No. of non-survival	No. of survival	survival rate(%)	Compare to TT
TT	10	7	3	30	.
TTSS	10	1	9	90	3.0
FS	10	1	9	90	3.0

Table 11. Comparison of stem length growth of *Miscanthus sinensis* by experimental treatment

Experimental treatments	April	May	June	July	August	September	Compare to TT
Unit	----- cm -----						
TT	2.07±0.06	4.10±0.36	11.10±0.66	16.67±0.58	24.17±1.11	30.10±1.65	.
TTSS	2.17±0.07	8.3±0.78	26.03±1.48	52.03±1.34	87.67±2.12	112.67±3.54	3.77
FS	2.07±0.06	10.33±0.58	31.03±1.12	56.43±1.16	92.07±1.85	134.20±4.81	4.47 (↑19.1%vs.TTSS)
ANOVA	April(F=0.259, p=.780) .05, N.S.)			September(F=769.195, p=.000<.001, S.)			
Tukey test	TT vs TTSS vs FS (N.S.)			TT vs TTSS vs FS(S.)			

N.S.: Not Significant, S.: Significant

량이 생존율을 복합적으로 작용하여 생존율을 크게 낮춘 것으로 사료된다.

특히, 중석 광미는 유기양분 함량이 낮아 광미가 입자가 뭉쳐지지 못해 홀알구조로 존재하여 식물 생존에 분리한 구조를 이루고 있으며 또한, 수분함유량이 유묘의 생존을 더욱 어렵게 했을 것으로 사료된다. 반면에 중석 광미와 하수슬러지 혼합 처리구는 하수슬러지의 풍부한 유기양분, 수분함량이 중석 광미의 부족한 부분을 보완시켜 주었으며 하수슬러지의 혼합으로 pH 측면에서 약산성인 하수슬러지는 약염기성인 중석 광미를 중화시켜 식물이 생육하는데 효과가 있었을 것으로 판단된다.

3.4.3. 식생 처리구별 역세의 생육 특성

순수한 중석 광미, 중석 광미와 하수슬러지를 4:1로 혼합한 토양, 산림토양에서 재배한 처리구에서 매월 말에 역세의 줄기 길이, 군락 퍼짐 크기를 측정하였고, 9월 말에 군락의 개체수와 생중량을 측정하여 비교한 결과(Table 11-14), 아래와 같은 생육 결과를 얻었다.

처리구별 생육실험 초기(4월)의 줄기 길이의 동질성을 알아보기 위해 분산분석(One-way ANOVA)으로 검증한 결과(Table 11), 생육실험 초기의 처리구별 줄기

길이의 크기는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다(F=0.259, p=.780) .05). 또한, Tukey test 검정 결과, 처리구별 비교에서 유의미한 차이가 확인되지 않았다. 6개월간의 생육실험을 거친 후 9월 말에 측정한 처리구별 줄기 길이는 통계적으로 매우 유의미한 차이를 보였다(F=769.195, p=.000<.001). Tukey test 검정 결과, 산림토양 처리구가 134.20±4.81 cm로 가장 길었으며, 이어서 혼합토양 처리구 112.67±3.54 cm, 중석광미 처리구 30.10±1.65 cm 순으로 처리구별 줄기 길이의 평균 차이가 모두 통계적으로 유의미하게 나타났다(p<.001). 이러한 생육 분석결과는 생육실험 기간에 처리구별로 각각 다른 생장 특성이 나타났음을 알 수 있었다.

각 처리구별 줄기 길이의 상대 비교에서 혼합토양 처리구는 순수한 중석 광미 처리구보다 3.77배, 산림 토양 처리구는 중석 광미의 처리구보다 4.47배 더 효과적인 생육을 한 것으로 나타났다.

또한, 산림 토양은 중석 광미와 하수슬러지 혼합토양 처리구보다 19.1% 더 생장한 것으로 나타났다. 중석 광미의 처리구가 혼합토양과 산림토양의 처리구보다 줄기 길이의 생육 효율이 낮았던 이유는 무엇보다 낮은 수분 및 유기양분 함유량, 다량의 중금속 함량, 100 μm 이

Table 12. Comparison of the growth of the spreading size of *Miscanthus sinensis* by experimental treatment

Experimental treatments	April	May	June	July	August	September	Compare to TT
Unit	----- cm -----						
TT	2.03±0.12	3.07±0.12	7.03±0.95	11.97±1.05	17.70±0.61	24.07±0.95	.
TTSS	2.03±0.12	8.03±0.91	15.97±0.95	25.03±0.95	39.30±1.54	53.70±1.47	2.25
FS	1.97±0.15	9.03±1.11	20.03±1.02	29.33±0.58	43.33±1.53	56.03±0.90	2.33 (↑4.3% vs. TTSS)
ANOVA	April(F=0.214, p=0.813>.05, N.S)			September(F=735.378, p=0.000<.001, S.)			
Tukey test	TT vs TTSS vs FS(N.S.)			TT vs TTSS(S.), TT vs FS(S.), TTSS vs FS(N.S.)			

Table 13. Comparison of individuals growth of a colony of *Miscanthus sinensis* by experimental treatment

Experimental treatments	No. of individuals	Compare to TT
TT	3.00±1.15	.
TTSS	8.67±0.71	3.00
FS	10.33±0.58	3.33(↑19.2%vs. TTSS)
ANOVA	F=60.167, p=.000<.001, S.	
Tukey test	TT vs TTSS vs FS(S.)	

Table 14. Comparison of fresh weight growth of *Miscanthus sinensis* by experimental treatment

Experimental treatments	Fresh weight	Compare to TT
Unit	----- g -----	.
TT	170.80±05.14	.
TTSS	738.17±16.01	4.32
FS	771.87±07.47	4.51(4.6% vs. TTSS)
ANOVA	F=3027.156, p=.000<.001, S.	
Tukey test	TT vs TTSS vs FS(S.)	

하의 입자로 된 흙알구조 등이 식물 생육을 저해시킨 것으로 사료된다.

처리구별 퍼짐 크기를 분산분석 결과(Table 12), 처리구별 초기 퍼짐 크기는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다(F=0.214, p=.813>.05). Tukey test 검정 결과, 모든 처리구별 사이의 차이가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(p>.05). 6개월간 생육한 후인 9월 말에 처리구별 퍼짐 정도를 분산분석 결과, 처리구별 통계적으로 매우 유의미한 차이가 확인되었다(F=735.378, p=.000<.001). Tukey test 검정 결과, 중석 광미 처리구는 두 처리구에 비해 유의하게 낮은 퍼짐 정도를 보였다. 반면, 혼합토양 처리구와 산림토양 처리구 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없

는 것으로 나타났다(p>.05). 이를 종합하면, 6개월 생육 후, 평균 퍼짐 정도 크기는 중석 광미 처리구 24.07±0.95 cm, 혼합토양 처리구 53.70±1.47 cm, 산림토양 처리구 56.03±0.90 cm로 나타났다.

군락의 퍼짐 생육 크기를 상대비교 결과, 중석 광미와 하수슬러지로 혼합한 처리구는 중석 광미 처리구보다 2.25배, 산림토양 처리구는 중석 광미처리구보다 2.33배의 퍼짐 생육을 하였다.

혼합토양 처리구와 산림토양 처리구의 퍼짐 정도 비교에서 산림토양 처리구가 혼합토양 처리구보다 4.3% 더 생육을 한 것으로 나타났지만 유의미한 차이는 없는 것으로 분석되었다.

생육초기에 개체수는 처리구별 1개로 시작하였다.

9월 말의 처리구별 개체수 차이를 알아보기 위해 분산 분석 결과(Table 13), 혼합토양 및 산림토양 처리구는 중석 광미 처리구와 비교해서 유의미한 차이가 있음이 확인되었다($F=60.167$, $p=.000<.001$). Tukey test 검정 결과, 중석 광미 처리구, 혼합토양 처리구, 산림토양 처리구 사이에는 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 각 처리구별 개체수 평균수는 중석 광미 처리구, 혼합토양 처리구, 산림토양 처리구, 각각 3.00 ± 1.15 개, 8.67 ± 0.71 개, 10.33 ± 0.5 로 나타났다.

처리구별 개체수 상대비교에서 혼합토양 처리구는 중석 광미 처리구보다 약 3.00배, 산림토양 처리구는 중석 광미 처리구보다 3.33배의 개체수 증가를 보였고, 산림토양 처리구는 혼합토양 처리구보다 19.2%의 개체수 분열 생육에 더 효과가 있었던 것으로 판단할 수 있다.

처리구별 생중량의 차이를 알아보기 위해 분산분석 검증한 결과(Table 14), 처리구별 생중량 평균 차이는 통계적으로 매우 유의미하게 나타났다($F = 3027.156$, $p=.000<.001$). Tukey test 검정 결과, 모든 처리구별 생중량 차이가 통계적으로 유의미한 것으로 확인되었다. 생중량 평균값은 중석 광미 처리구, 혼합토양 처리구, 산림토양 처리구는 각각 170.80 ± 5.14 g, 738.17 ± 16.01 g, 771.87 ± 7.47 g으로 나타났다.

처리구별 생중량 상대비교에서 혼합토양 처리구의 경우, 중석 광미 처리구보다 평균 4.32배, 산림토양의 생육 처리구는 중석 광미 처리구보다 평균 4.51배 생중량이 큰 것으로 분석되어 혼합토양 처리구에서 잎, 줄기, 뿌리 등 여러 부분에서 중석 광미 처리구보다 효과적인 생육 활동을 하였다고 볼 수 있다.

또한, 혼합 토양과 산림 토양으로 처리한 처리구를 비교했을 때, 산림토양의 처리구가 혼합 토양 처리구보다 생중량이 4.6% 더 많은 것으로 보아 산림토양이 생육에 있어서 더 효과가 있었던 것으로 판단할 수 있다.

생육실험에서 중석 광미 처리구는 토양 환경이 혼합 처리구와 산림토양 처리구보다 크게 열악한 환경을 가지 있음을 생육실험을 통해 알 수 있었다. 식물 생육은 토양 환경의 영향을 절대적으로 받는다고 생각할 때, 토양의 양분 및 수분함량, 유효인산 함량, 토양의 pH 등의 토양의 환경요인에 의해서 생육에도 큰 영향을 받는다고 판단할 수 있다.

본 연구에서 중석 광미에 유기물이 풍부한 하수슬러

지의 혼합으로 유기물 함량, 유효인산 함량, 수분 보수력, 토양 pH 변화 등 식물 생장에 유의미한 영향을 주었을 것으로 판단된다.

4. 결론

중석 광미와 폐광석을 적치시켜 놓은 폐재덤은 식생 부진으로 나대지가 형성되어 미세입자의 비산에 의한 오염 확산은 물론 여름철 집중 호우 시 침식 우려가 있어 관리가 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 폐재덤 주변에 나타나는 중석 광미에 의한 피해를 조사하고, 중석 광미의 성상을 분석하여 식생 부진의 한계 요인을 알아보고, 중석 광미와 하수슬러지를 혼합한 식생토를 대상으로 생육 실험을 통해 식물도입 가능성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중석 광미를 적치시켜 놓은 폐재덤에 의해 나타나는 피해를 조사한 결과, 농작물 및 주거 생활 활동에 피해, 계곡 수계의 피해가 큰 것으로 나타났다. 광미 입자가 100 μ m 이하라 강풍에 대기 중으로 비산되어 농작물과 주거 공간으로 유입되어 피해가 나타났고, 우수가 광미에 스며들어가 생성된 산성광산배수로 인해 수계에 중금속 유입과 붉은색 침전 물질이 생기는 등 자연환경과 수질에 피해로 나타나 집중적인 관리가 절실히 요구된다.
2. 중석 광미 폐재덤의 토양을 분석한 결과, 중석 광미의 pH가 약염기성 토양이며 유기물 0.98 g/kg, 수분함량 1.01%, 유효인산 함량 1.05 mg/kg 으로 낮았으며, 다량의 중금속 함량은 토양 우려기준에 비해 As는 32.07, Cd은 2.27배 높은 것으로 나타났다. 유효 양분과 수분함량, 식물 생육에 적합한 pH에서 벗어난 토성, 다량의 중금속 함량 등이 식물의 자연 도입을 어렵게 한 것으로 판단된다.
3. 하수슬러지는 pH가 5.94로 약산성이며, 유기물 함량은 166.55 g/kg, 유효인산 함량은 2015.60 mg/kg, 수분함량은 약 70 %, 중금속 함량은 Zn이 2.20배 초과되었고, 그 이외에 중금속들은 토양 우려기준 이하로 식물에 필요한 영양 양분이 풍부하여 중석 광미 폐재덤과 같이 식물이 부족한 지역에 식물 피복을 위한 퇴비로 적극 활용할 수 있음을 확인하였다.
4. 중석 광미 폐재덤에 식물 도입을 위한 생육실험 결과, 중석 광미와 하수슬러지 혼합토와 산림토양에서 억

새의 생존율은 90 %로 중석 광미에서의 생존율 30%에 비해 3.0배 높았다. 또한, 생육상태 실험 비교에서 하수슬러지를 혼합한 처리구가 중석 광미의 광물 찌꺼기로 제작한 처리구보다 생육 척도인 줄기 길이, 군락의 퍼짐, 군락 개체수, 생육량 비교에서 유의미한 생육 효과가 이루어졌음을 알 수 있었다. 이러한 생육실험 결과로 중석 광미의 척박한 토양 환경을 하수슬러지를 혼합함으로써 혼합토양은 중석 광미 처리구보다 토양의 pH, 유기양분, 유효인산 함유량, 수분함량 등 토양 환경의 개선이 식물 생육에 긍정적인 영향을 미쳐 생육을 촉진하는 것으로 나타났다.

REFERENCES

- Adriano, D. C., Wenzel, W. W., Vangronsveld, J., Bolan, N. S., 2004, Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122(2-4), 121-142.
- Ahn, J. W., 2010, Preparation of land treatment measures and sludge management measures in accordance with the prohibition of marine discharge of waste such as sewage sludge, Research report, KIGAM, Daejeon, Korea.
- Baek, S. J., Park, E. Y., 2005, A Study on the erosion prevention of mine waste rock using *Miscanthus sinensis*, Report on the 51st National Science Exhibition, National Science Museum, Daejeon, Korea, https://viewer.science.go.kr:8080/SynapDocViewServer/viewer/doc.html?key=e0ed28bd03a7428baaca20b55ba7735a&convType=img&convLocale=ko_KR&contextPath=/SynapDocViewServer
- Bolan, N. S., Park, J. H., Robinson, B., Naidu, R., Huh, K. Y., 2011, Chapter four - Phytostabilization: A Green approach to contaminant containment, in: Sparks, D. L. (ed.), *Advances in Agronomy*, Vol. 112, Academic Press, New York, USA, 145-204.
- Heo, S. H., 2008, Phytoremediation for heavy metal removal in abandoned mine soil, Master's Thesis, Konkuk University, Seoul, Korea, <http://www.riss.kr/link?id=T11436630>
- Hyun, S. M., 2009, On-site composting of sewage sludge generated in small sewage treatment plants: Basic research for system development, Master's Thesis, Semyung University, Jecheon, Korea.
- Jun, K. S., Hwang, E. J., Kim, H. J., 2009, A Study on drying and carbonization of organic sludge from sewage plant and petrochemical industries for energy and resources recovery, *Clean Technology*, 15(3), 154-164.
- Jun, S., Park, K. O., Choi, N. H., Yoon, B. S., Jung, B. H., 2011, Use of mycorrhizae for vegetation and restoration of the abandoned mine waste areas, *Korean J. Nature Conserv.*, 5(1), 38-47.
- Jun, S. H., Lee, J. K., Park, K. O., Hong, S. W., Jung, B. H., 2011, A Study on management of vegetation restoration in abandoned coal-mine waste areas by phytoremediation, *J. Korean Soc. Environ. Restor. Technol.*, 14(6), 71-85.
- Jung, M. C., Jung, M. Y., 2006, Evaluation and management method of environmental contamination from abandoned metal mines in Korea, *J. Korean Soc. Geosystem Eng.*, 43(5), 383-394.
- Ketterings, Q. M., Czymmek, K. J., Reid, W. S., Wildman, R. F., 2002, Conversion of modified Morgan and Mehlich-III soil tests to Morgan soil test values, *Soil Science*, 167(12), 830-837.
- Kim, M. C., 2015, Characteristics of growth of plants in dredged soils for use of vegetation soils, Ph.D. Dissertation, Chosun University, Gwangju, Korea, <https://www.riss.kr/link?id=T13843674>
- Kwon, H. J., Lee, C. H., Kim, S. Y., 2019, Heavy metals uptake capability and growth of fifteen Compositae plants for phyto-remediation, *J. Korean Plant Res.*, 32(1), 1-8.
- Lee, S. G., 2001, Effects of metal mine tailings on plant germination and growth, Master's thesis, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea, <https://www.riss.kr/link?id=T8427134>
- Ministry of Environment, 2006, Basic plan for sewage sludge management, Gwacheon, Korea.
- Ministry of Environment, 2007, Regulations on the recycling method of organic sludge, etc. for land improvement and reclamation facilities, Publication No. 2007-105, Gwacheon, Korea.
- Mun, H. J., Won, H. J., Jin, S. L., Yang, I. J., 2020, Soil neutralizer selection for phytostabilization using *Miscanthus sinensis* Anderss in heavy metal contaminated soil of abandoned metal mine, *Econ. Environ. Geol.*, 53(5), 517-528.
- Ok, Y. S., Kim, J. G., Yang, J. E., Kim, H. J., Yu, K. Y., Park, C. J., Jung, D. Y., 2004, Phytoremediation of heavy metal contaminated soils using transgenic plants, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 37(6), 396-406.
- Ok, Y. S., Kim, S. H., Kim, D. Y., Lee, H. N., Lim, S. K., Kim, J. G., 2003, Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated abandoned mining area, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 36(5), 323-332.
- Rural Development Administration, 2005, Report on the variation of agricultural environment, Suwon, Korea.

- Ryu, J. H., Park, G. S., Lee, H. G., Lee, S. J., Park, B. H., Lee, J. J., 2010, Effect of fertilizer composed of dam suspended particle sawdust and sewage sludge on soil properties and tree growth, *Korean J. Agric. Sci.*, 37(2), 217-222.
- Seo, J. H., Yoo, B. C., Villa, I. M., Lee, J. H., Lee, T., Kim, C., Moon, 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.
- Son, J. H., 2006, The behavior of hazardous air including dioxins in a pyrolysis/melting facility of MSWs, Master's Thesis, Hankuk University of Foreign Studies, Seoul, Korea, <https://www.riss.kr/link?id=T10777095>
- Ye, Z. H., Wong, J. W. C., Wong, M. H., Lan, C. Y., Baker, A. J. M., 1999, Lime and pig manure as ameliorants for revegetation of lead/zinc mine tailings: A Greenhouse study, *Bioresource Technology*, 69(1), 35-43.
-
- Vice-principal. Byoung-Hak Jung
Suhck Chung Girl's Middle School
jungbh10@hanmail.net