

Evaluating Efficiency of Coal Combustion Products (CCPs) and Polyacrylamide (PAM) for Mine Hazard Prevention and Revegetation in Coal Mine Area

Se Jin Oh, Seung Min Oh, Yong Sik Ok, Sung Chul Kim¹, Sang Hwan Lee², and Jae E. Yang*

Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

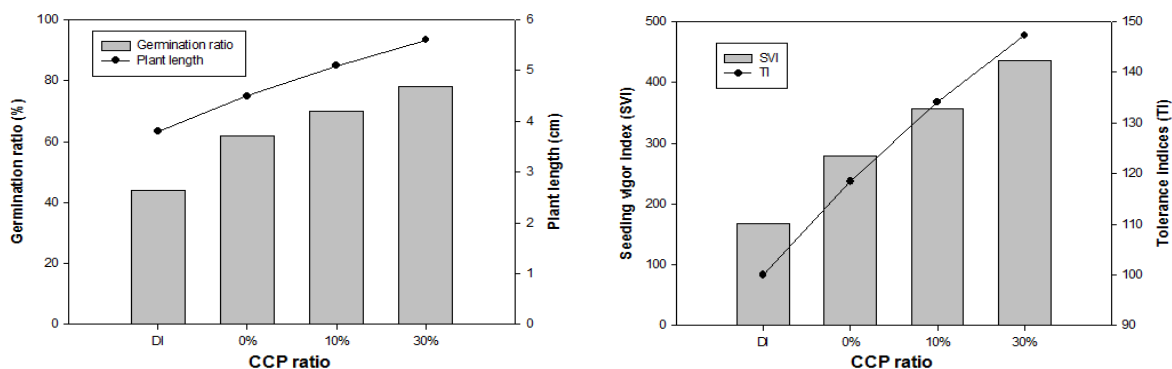
¹Department of Bioenvironmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Technology Research Center, Korea Mine Reclamation Corporation, Cheonan 331-803, Korea

(Received: November 20 2014, Revised: December 15 2014, Accepted: December 16 2014)

Since mine wastes were merely dumped in the mine waste dump, they have produced acid mine drainage (AMD). Therefore, main objective of this study was to evaluate the effect of coal combustion products (CCPs) on heavy metal stabilization and detoxification for mine wastes. Total six treatments for incubation test were conducted depending on mixing method (completely mixing and layered). Also, lysimeter experiment was conducted to examine efficiency of polyacrylamide (PAM) on reduction of mine wastes erosion. Result of incubation test showed that concentrations of soluble aluminium (Al) and iron (Fe) in leachate decreased compared to control. The lowest soluble Al and Fe in leachate was observed in 50% mixed treatment (14.2 and 1.03 mg kg⁻¹ for Al and Fe respectively) compared to control treatment (253.0 for Al and 52.6 mg kg⁻¹ for Fe). The pH of mine wastes (MW) and leachate increased compared to control after mixing with CCPs and ordered as control (MW 6.4, leachate 6.3) < 10% (MW 7.7, leachate 7.1) < 20% (MW 9.0, leachate 7.8) < 30% (MW 9.5, leachate 8.3) < 40% (MW 9.9, leachate 8.5) < 50% (MW 10.5, leachate 8.6). Application of PAM, both in liquid and granular type, dramatically decreased the suspended solid (SS) concentration of CCPs treatments. Reduction of SS loss was ordered as MW70CR30L (24.4 mg L⁻¹) > MW70CR30LPL (6.7 mg L⁻¹) > NT (3.1 mg L⁻¹) > MW70CR30M (1.6 mg L⁻¹) > MW70CR30MPL (1.1 mg L⁻¹) > MW70CR30PGM (0.7 mg L⁻¹) > MW70CR30LPG (0.5 mg L⁻¹) > MW70CR30MPG (0.4 mg L⁻¹). Overall, application of CCPs can be environmental friendly and cost-effective way to remediate coal mine wastes contaminated with heavy metals. In addition, use of PAM could help to prevent the erosion coal mine wastes in mine waste disposal area.

Key words: Coal combustion products, Coal mine wastes, Erosion, Germination, Polyacrylamide



Germination ratio, growth of Perennial ryegrass and seedling vigor index and tolerance indices.

*Corresponding author : Phone: +82332506446, Fax: +82332416640, E-mail: yangjay@kangwon.ac.kr

§Acknowledgement: This research was supported by "Optimum Remediation Technology for Heavy Metal Stabilization and soil Amelioration" through the Mine Reclamation Corporation (MIRECO), funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy.

Introduction

산업혁명과 함께 발전한 광업활동은 인간 삶의 질 향상에 이점을 제공하였지만, 자원 채취 후 발생한 폐석, 갱내수 등은 경관 훼손 및 오염물질 유입에 의한 생태계 교란의 문제점도 발생시켰다. 이들 광산배출 오염원에 함유된 중금속은 다양한 경로를 통해 농경지, 하천 등 인간 삶과 유기적인 관계를 맺고 있는 환경매체로 유입되어 환경오염을 초래하고 있는 실정이다 (Oh et al., 2011).

국내 휴·폐 석탄광산에서 발생하는 광미와 폐석은 약 2억 톤 이상으로 추정되고 이를 인근 산림의 사면에 그대로 방치하여 산림훼손 및 자연경관 훼손 등의 문제점을 발생시키고 있다. 자연환경에 방치된 폐석에 함유된 황철석, 유비철석 등 황화광물은 산화되는 과정에서 수소이온을 방출하며 금속 이온을 함유하는 산성광산배수 (Acid mine drainage)를 발생시켜, 인근 수계에 유입되는 양이 6~10 만톤 day⁻¹ 이상 되는 것으로 보고되고 있다 (Yang et al., 2006; Lee and Song, 2010).

우리나라 석탄 채광방법은 노천채굴방법이 아닌 갱내채굴로서 산림훼손 면적은 적지만 채굴 후 잔존하는 폐석을 광산 주변 산림에 방치하여 다양한 환경문제가 발생하고 있다 (Min et al., 2005). 이러한 문제를 해결하기 위해 정부는 광산지역의 산림훼손지 복원을 위해 복토, 녹화 등의 단순한 공법을 적용하고 있다. 하지만 복토, 녹화 등의 방법은 식물의 생육배지 역할에 필요한 기초적인 특성에 대한 조사도 거의 실시하지 않고 적용하기 때문에 식생의 생육저하, 고사와 같은 문제를 발생시킨다. 산림복원은 지역 특이성을 갖는 공법을 적용하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해서는 필요한 영양분의 충족, 식물 생육에 필요한 악조건의 개선이 시급히 이루어져야한다.

휴·폐광산 주변의 수질과 토양오염 등 환경 문제를 해결하기 위해 다양한 물리적, 화학적, 및 생물학적 복원방법이 연구되고 있지만, 대부분의 복원기술은 국내 석탄광산과 같은 급경사지의 산간지역의 복원에 적용하는 것은 생태적 교란, 기능의 상실 등의 측면에서 적용이 불가능한 실정이다. 국내의 경우 석탄광산 주변 폐석의 안정화 및 식생도입에 관한 연구는 지난 10년간 지속적으로 개발되었다. 이들 연구의 주요 핵심은 알칼리 특성을 갖는 안정화물질 (석회석, 석회, 백운석, 제강슬래그, 석탄부산물 등)을 이용하여 원위치에서 중화하여 1) 산성배수의 발생을 억제하고, 2) 오염물질을 불용화하고, 3) 자체적으로 함유하는 영양분의 공급 등을 통한 개량법이 사용되고 있다 (Oh et al., 2011; Yang et al., 2006).

우리나라를 비롯하여 전 세계적으로 석탄은 가장 풍부하고 널리 보급된 화석에너지 자원으로 알려져 있다. 전력생산을 위해 화력발전소에 대한 의존도가 지속적으로 증가하고

있고, 그에 따라 화력발전소에서 발생하는 석탄부산물의 발생량도 꾸준히 증가하고 있다 (Armesto and Merino, 1999; Gupta et al., 2007; Singh et al., 1997). 석탄부산물은 석탄의 연소될 수 없는 부분을 지칭하는 것으로 일반적으로 비산재와 바닥재를 통칭하기도 한다.

바닥재는 입자가 영성한 형태의 재료로서 색과 입자크기는 다양한 편이며, 비산재는 입자가 매우 고운 구형의 분말 형태를 띠는 고체입자로 두 가지 모두 알칼리 특성을 나타낸다. 석탄부산물은 비결정형 Fe-Al-Si (ferro-alumino-silicate) 화합물질로서 상당량의 Si, Al, Fe, Ca, K 및 Na 등을 포함하고 있으며 아울러 다양한 종류와 농도의 미량원소를 포함하여 화학적 특성을 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Mitra et al., 2005; Rai et al., 2004; Sajwan et al., 2003). 이러한 특성을 이용하여 광해방지용으로 개발할 경우 다양한 이점이 제공될 수 있을 것으로 판단된다.

2011년을 기준 국내에서 발생하는 석탄부산물은 약 860 만 톤에 이르고 이의 재활용률은 68% 수준인 것으로 보고되고 있다. 미국이나 유럽 등의 선진국에서는 석탄회가 폐기물로는 지정되어 있으나 유용활용 (beneficial use) 기준에 충족할 경우 재활용할 수 있는 방안을 마련하고 있다. 유럽의 경우 총 재활용 비율이 88.3%에 달하며, 특히 광해 방지용으로 23.7백만 톤 (36%)을 재활용하고 있는 것이 특징이다.

본 연구는 자원의 재활용 측면에서 시급히 방안이 마련되어야 하는 석탄부산물을 이용하여 휴·폐 석탄광산에 적치되어 있는 폐석으로부터 발생하는 다양한 문제점 (예; 중금속을 함유한 산성광산배수, 식생불량)을 예방할 수 있는 방안을 모색하는데 목적이 있다. 특히, 석탄부산물의 경사지에서의 적용 효율성을 높이고자 PAM (Polyacrylamide)을 함께 적용하여 유실방지 방안까지 모색하였다.

Materials and Methods

폐석 및 석탄부산물 연구에 사용한 폐석은 전남 화순 군에 소재한 화순광업소의 폐석 적치장에서 채취하였고, 석탄부산물은 경남 고성군에 소재한 삼천포화력발전소에서 발생하는 비산재 (fly ash)를 사용하였다. 시험에 사용한 폐석 및 석탄부산물의 광물조성 분석은 X-ray diffractometry (D/Max-2500V, Rigaku, Japan), 원소조성 분석은 X-ray fluorescence (ZSX-100e, Rigaku, Japan)을 이용하였다 (Moon et al., 2010; Skoog and Leary, 1991). 시료의 화학적 특성 분석은 토양 및 식물체분석법 (NIAST, 2000), 토양오염공정시험법 (ME, 2002)에 준하여 실시하였다.

항온배양시험을 통한 중금속 안정화 효율성 폐석에 석탄부산물을 0~50% (w/w)까지 단계적으로 혼합한 후 증류수를 첨가해 고액비 1:10 (solid:liquid)으로 항온진탕기

(25°C, 180 rpm)에서 1주일간 배양하며 반응시켰다. 반응 후 감압여과장치를 이용해 고상과 액상을 분리하였다. 여과지에 남은 고상 시료는 pH 및 0.1 M HCl 추출법으로 가용성 중금속 함량을 분석하였고, 액상 시료는 채취한 후 즉시 Inductively coupled plasma - optical emission spectrometer (Thermo, iCAP 6000)로 중금속함량을 분석하였다.

발아 및 재배시험 석탄부산물 적용이 식물생육에 미치는 영향을 평가하기 위해 발아 및 재배시험을 진행하였다. 폐석에 석탄부산물을 무게비로 0, 10, 30% 혼합하고 증류수를 40% (w/v) 첨가하여 24시간 반응 후 감압여과장치를 이용해 채취한 용액을 배양액으로 petri dish에 담아 작물생육실 (낮 26°C/밤 23°C, 상대습도 65%, 광주기 16/8 시간)에서 3주간 페레니얼 라이그라스 (*Lolium perenne*)의 발아 및 생육을 평가하였다. 발아시험에서 도출된 발아율 및 성장량 결과는 식 (1)과 식 (2)를 이용해 식물활성도 (seeding vigor index)와 내성지수 (tolerance indices)를 평가해 석탄재의 영향을 평가하였다 (Lee et al., 2010; Yun and Lee, 1992). 발아시험에서 수확한 식물체 (뿌리와 줄기 구분하지 않았음)는 표면의 배양액을 증류수로 제거한 후 건조하여 분석용 시료로 하였다. 식물체의 분석은 토양 및 식물체 분석

법 (NIAST, 2000)을 참고하여 습식분해 (HNO₃-HNO₃ digestion) 후 액상으로 조제된 시료를 ICP-OES로 정량 분석하였다.

$$SVI = \text{Mean of plant length} \times \text{Percentage of seed germination} \quad (1)$$

$$TI = \frac{\text{Mean plant length in CCPs leachate}}{\text{Mean plant length in distilled water}} \times 100 \quad (2)$$

PAM 적용을 통한 유실방지 시험 석탄부산물의 경사지 적용은 유실에 대한 문제점을 야기할 수 있고, 경사지 유실방지 해결을 위해 PAM (Polyacrylamide)의 적용이 다양하게 연구되어 왔다 (Choi et al., 2009; Lee et al., 2011). PAM의 적용에 따른 유실저감 효율성은 Fig. 1과 같이 아크릴로 제작한 라이시미터 (경사도 20%)에 석탄부산물과 폐석을 혼합한 시료를 충전하고 인공강우장치로 강우를 발생시켜 수행하였고 PAM은 선행연구에서 제시된 20 kg ha⁻¹로 처리하였다 (Lee et al., 2011). 석탄부산물 및 PAM을 적용한 처리는 Table 1과 같이 구성하였고, PAM의 처리는 입상 및 액상 형태로 처리해 효율성을 비교하였다. 인공강우시험은 강우량 60 mm hr⁻¹로 10분씩 10회 강우 처리 후 모니터링 하였고, 시험과정에서 수거된 유거수는 부유물질 (suspended

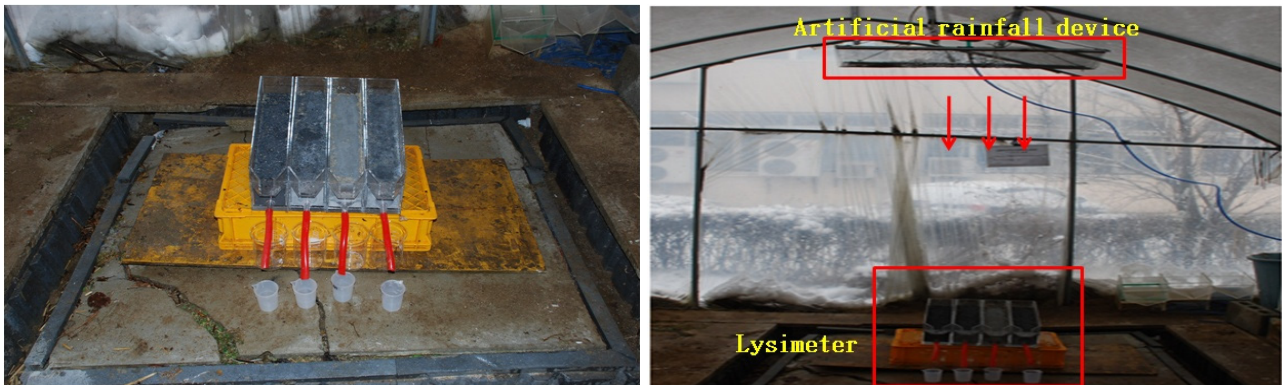


Fig. 1. Lysimeter test using artificial rainfall.

Table 1. Coal mine waste (CMW), coal combustion products (CCPs), and polyacrylamide (PAM) treatment for lysimeter experiment.

Name	Treatment	PAM [†] application
NT (Control)	Only CMW [‡]	no
MW70CR30M	CMW 70% and CCPs [§] 30% complete mixed	no
MW70CR30L	CMW and CCPs layered by 2 cm interval	no
MW70CR30MPL	CMW 70% and CCPs 30% complete mixed	liquefied, applied on the surface
MW70CR30LPL	CMW and CCPs layered by 2 cm interval	liquefied
MW70CR30MPG	CMW 70% and CCPs 30% complete mixed	granular
MW70CR30LPG	CMW and CCPs layered by 2 cm interval	granular
MW70CR30PGM	CMW 70%, CCPs 30% and PAM complete mixed	granular, applied on the surface and in the bulk

[†]PAM: Polyacrylamide, [‡]CMW: coal mine wastes, [§]CCPs: coal combustion products

solid, SS), pH, 중금속 및 양이온 함량을 측정하였다.

Results and Discussion

공시재료의 특성 시험에 사용한 폐석과 석탄부산물의 화학적 특성은 Table 2에 기술하였다. 폐석과 석탄부산물의 pH는 6.1과 11.4, 전기전도도는 0.09와 1.48 dS m⁻¹으로 나타났다. 석탄부산물의 유기물함량, 유효인산 및 교환성 칼슘은 4.73 g kg⁻¹, 48.07 mg kg⁻¹과 4,550 mg kg⁻¹으로 폐석에 처리할 경우 화학적 특성을 개선하고, 식물영양소 제공 등의 이점이 있을 것으로 판단된다 (Mitra et al., 2005; Oh et al., 2013; Rai et al., 2004; Singh et al., 1997). 또한 석탄부산물의 처리는 비중, 수분보유력, 토성 등의 물리적 특성 개선을 위한 물질로도 활용 가능성이 큰 것으로 다수의 선행 연구자들은 보고하고 있다 (Sharma et al., 2012;

Ziemkiewicz and Skousen, 2000). 석탄부산물에 함유된 칼슘이온의 경우 대부분 Ca(OH)₂로 알려져 있으며 (Furr et al., 1977; Iyer, 2002), 이는 오염토양에 처리할 경우 금속이온과 반응하여 흡착 (adsorption), 복합체형성 (complexation), 침전 (precipitation) 등의 메카니즘으로 이동성 및 독성을 낮게 변환할 수 있다고 보고하였다 (Kumpiene et al., 2008; Majumdar and Singh, 2007; Oh et al., 2012). 석탄부산물에 함유된 중금속 함량은 토양환경보전법에서 정하는 기준치를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 본 논문의 결과에 기술하지 않았지만 석탄부산물의 광물조성 및 원소조성 분석 결과 주 광물구성은 Quartz (SiO₂), Mullite (Al₆Si₂O₁₃)로 되어 있는 것으로 나타났으며, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO 등의 원소조성을 갖고 있어 토양과 유사한 조건으로 토양 교란을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다 (Oh et al., 2011).

Table 2. Physical and chemical properties of coal mine wastes and coal combustion products (Metal extraction using 0.1 M HCl).

	pH	EC	CEC	OM	T-N	P ₂ O ₅	Ca
		dS m ⁻¹	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	g kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	
CMW	6.3	0.09	12.67	51.6	0.00	6.34	1,862
CCPs	11.4	1.48	20.39	47.3	0.02	48.04	4,550

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Al	Fe
	mg kg ⁻¹						
CMW	0.87	28.34	4.72	12.61	11.83	89.90	53.44
CCPs	ND	ND	0.23	0.20	ND	4.07	0.53

Table 3. pH and metal concentrations in coal mine wastes and leachate after seven days incubation time.

CCPs ratio	pH	Metal concentrations in coal mine waste				
		Cd	As	Pb	Al	Fe
%	1:5	mg kg ⁻¹				
0	6.4	0.27	0.01	3.69	90.59	12.14
10	7.7	0.06	0.05	3.10	187.35	34.51
20	9.0	0.05	0.10	2.33	288.93	64.27
30	9.5	0.05	0.15	1.90	458.07	101.19
40	9.9	0.06	0.19	1.22	542.11	119.84
50	10.5	0.06	0.27	0.39	665.85	118.26

CCPs ratio	pH	Metal concentrations in leachate				
		Cd	As	Pb	Al	Fe
%	1:5	mg L ⁻¹				
0	6.3	ND	ND	2.11	252.51	52.61
10	7.1	ND	ND	0.91	95.62	5.16
20	7.8	ND	ND	0.82	45.47	4.59
30	8.3	ND	ND	0.53	19.51	3.42
40	8.5	ND	ND	0.41	12.14	1.26
50	8.6	ND	ND	ND	14.21	1.03

중금속 안정화 효율성 배양시험 결과 폐석과 혼합한 석탄부산물의 영향으로 폐석 및 반응 용액의 pH는 대조구에 비해 50% 혼합시 4.1과 2.3 수준 혼합량과 비례하여 증가하는 것으로 나타났고, 알칼리 조건에서 생육이 원활한 잔디의 생육에 이점이 있을 것으로 보인다 (Table 3). 이는 석탄부산물에 함유된 치환성 양이온 (Ca, Mg 등)의 활성화에 의해 수산기가 방출되며 발생한 것으로 판단된다 (Hearing and Daniels, 1991; Oh et al., 2011; Ziemkiewicz and Skousen, 2000). 대조구 폐석의 Cd, Pb 함량은 0.27과 3.69 mg kg⁻¹이었지만, 석탄부산물의 처리에 따라 50% 처리구에서 0.06과 0.39 mg kg⁻¹로 감소하였고, As의 경우 대조구 0.01 mg kg⁻¹에서 50% 처리구에서 0.27 mg kg⁻¹로 증가하였다. 이는 pH 변화에 민감한 Cd, Pb과 같은 수용성 금속이온 함량의 감소에 의한 것으로 판단되고, As의 경우 석탄부산물로부터 일부 용출되어 나타난 결과로 판단된다 (Kim, et al., 2007; Oh et al., 2012). 철, 구리, 니켈 및 알루미늄 함량의 경우 석탄부산물 처리수준에 비례하여 증가하는 것으로 나타났고, 이는 석탄부산물에 함유한 성분에 기인한 것으로 보인다. 이러한 금속성분의 증가는 석탄광산 주변 하천에서 발생하는 황화현상 및 백화현상 유발물질로 사용에 대한 주의가 필요할 것으로 판단되지만, 폐석에서 침출된 용액 중의 수용성 철과 알루미늄은 석탄재 처리 수준에 반비례하는 것으로 나타났다. 철과 알루미늄은 pH가 5.5 이하의 산성조건

에서 용해도가 커져 유효태 함량이 증가하는 특징이 있는데, pH가 8 수준의 알칼리성조건에서는 이동성이 감소하기 때문인 것을 보인다. 이러한 결과는 석탄부산물의 처리가 폐석으로부터 발생하는 침출수 내 오염원의 이동성을 감소시켜 안정화할 수 있다는 가능성을 제시한다 (Oh et al., 2011; Rios et al., 2008; Yeheyis et al., 2009).

식물 발아율 및 생육 석탄부산물과 증류수를 반응시켜 추출한 배양액은 pH 8이상, EC의 경우 2 dS m⁻¹ 이하로 분석되었다. 독성 중금속의 경우 낮은 수준의 농도가 검출되었고, 철과 알루미늄이 각각 폐석에서 6.24와 1.34 mg L⁻¹ 검출되었다. 또한, 식물영양원소인 칼슘, 마그네슘 등이 석탄재 혼합량에 비례하여 용출되었다. 석탄부산물에 함유된 영양원소의 경우 식물 생장에 유익한 이점을 제공할 수 있을 것으로 판단된다 (Adriano et al., 1980; Carlson and Adriano, 1993). 이러한 이유로 Fig. 2와 같이 증류수를 이용한 발아시험에 비해 폐석 및 석탄부산물 혼합물에서 침출한 용액을 배양액으로 했을 때 발아율이 최대 80% 증가하였으며, 생장량 또한 최대 50% 증가한 것으로 나타났다. 또한 식물활성도 (SVI)와 내성지수 (TI)는 배양액을 증류수로 사용한 대조구 (SVI 170, TI 100)에 비해 석탄부산물 처리량 10% (SVI 360, TI 135)와 30% (SVI 430, TI 147)에서 점차 증가하여 식물의 생육환경이 개선되는 것으로 평가되었다

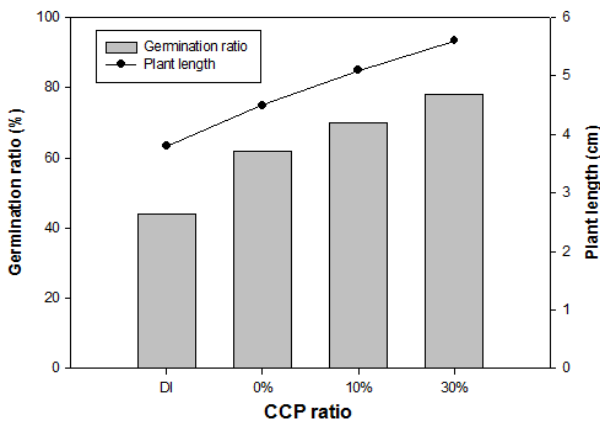


Fig. 2. Germination ratio and plant growth of Perennial ryegrass.

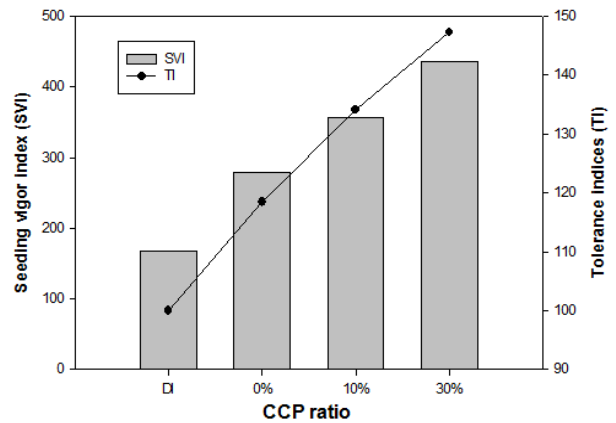


Fig. 3. Seedling vigor index (SVI) and tolerance indices (TI).

Table 4. Concentrations of soluble toxic and nutrient elements in culture liquid prepared by leachate of the mixture of mine waste and coal combustion products, tested for seed germination.

CCPs ratio	pH	EC	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Ca	Mg	K
%	1:5	dS m ⁻¹	-----					mg L ⁻¹	-----				
DI [†]	6.8	0.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0	6.3	0.23	ND	ND	ND	ND	ND	0.04	6.24	1.34	15.7	16.2	1.9
10	8.1	0.88	ND	ND	ND	ND	0.01	0.03	0.38	0.45	116.0	72.8	2.0
30	9.6	1.38	0.01	ND	ND	ND	0.02	ND	0.04	0.06	205.3	71.2	2.7

[†]DI: Distilled water

(Fig. 3). 이는 Cd, Pb과 같은 독성 중금속을 이용해 평가한 Lee et al. (2010)과 Yun and Lee (1992)의 연구와 반대의 결과로 석탄부산물에서 용출되어 배양액에 함유된 식물영양소의 영향에 의한 것으로 판단된다. 향후 석탄광산 산림 복원을 위한 물질로 석탄부산물의 사용은 식물 생육조건 개선을 위한 개량제 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 사료된다 (Oh et al., 2011; 2013; Yang et al., 2007). 식물체 분석결과 Cd, Pb 및 As와 같은 독성 중금속은 검출되지 않았지만 Cu, Zn, Fe과 같은 식물영양소는 검출되는 것으로 나타났다 (Table 5). 이는 석탄부산물의 처리가 식물생육에 대해 영양원 공급원으로서의 역할 수행이 가능하다는 선행 연구의 결과와 상응하는 결과로 해석된다 (Oh et al., 2013; Mitra et al., 2005).

폐석 유실량 저감을 위한 PAM의 효율성 실내 라이시메터를 이용한 유실저감시험 결과 PAM을 처리하지 않는 NT, MW70CR30M 및 MW70CR30L 처리구에서 부유물질 함량은 각각 평균 3.8 mg L^{-1} , 1.8 mg L^{-1} 과 40.9 mg L^{-1} 으로 PAM을 적용한 MW70CR30LPG (평균 0.6 mg L^{-1}) 처리구보

다 각각 300–630% 많은 유실이 발생하였다 (Table 6). 이는 폐석의 안정화를 위해 사용한 석탄부산물을 폐석에 처리할 경우 금속의 안정화 및 식생 도입을 위한 개량제의 역할은 수행할 수 있으나, 유실에 의한 안정화 효율 저감 및 2차 환경오염 유발에 대한 문제점을 야기할 수 있는 가능성을 보여준다. PAM의 처리는 라이시메터에서 유실량을 저감할 수 있는 것으로 나타났고, 그 효율성은 PAM과 석탄부산물을 혼합 처리한 처리구 MW70CR30MPL, MW70CR30MPG 및 MW70CR30PGM에서 1.0 mg L^{-1} (46%), 0.7 mg L^{-1} (63%)와 1.6 mg L^{-1} (7%)으로 저감 효율성을 보였다. 또한 PAM 무처리구 (MW70CR30L: 40.9 mg L^{-1})에서 많은 양의 유실을 보였던 석탄부산물 층위 처리구 MW70CR30LPL과 MW70CR30LPG에서 14.8 mg L^{-1} (64%)과 0.6 mg L^{-1} (99%)으로 유실량이 감소하였다. 이는 Kwon et al. (2000)과 Lee et al. (2011)의 경사지 토양에 처리한 PAM이 토양 유실량을 50~70%와 67%까지 감소시킨다는 선행연구와 유사한 결과를 보였다. 본 연구에서 PAM의 처리방법에 따른 효율성은 입상처리가 액상처리에 비해 효율성이 높은 것으로 나타났다. 이는 액상 처리의 경우 수용액을 표면에 그대로 처리하였기 때문에 공

Table 5. Metal concentrations in seedlings after seed germination test.

CCPs ratio	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Al	Fe
%	mg kg ⁻¹							
DI	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0	ND	ND	ND	ND	ND	9.23	36.34	ND
10	ND	ND	ND	ND	ND	4.71	41.05	27.23
30	ND	ND	1.00	0.78	ND	5.08	36.17	29.46

Table 6. pH and suspended solid (SS) concentration in runoff during lysimeter experiment using artificial rainfall.

Classification	1 st	2 nd	3 rd	4 st	5 st	6 st	7 st	8 st	9 st	10 st	PAM	
pH	NT	7.4	7.5	7.6	7.6	7.7	8.1	7.8	8.0	7.6	7.6	-
	MW70CR30M	8.1	8.1	8.4	8.4	8.3	8.6	8.4	8.4	8.5	8.3	-
	MW70CR30L	8.6	8.8	8.8	8.9	8.8	8.8	9.0	8.7	8.8	8.6	-
	MW70CR30MPL	7.9	8.0	8.2	8.1	8.1	8.3	8.5	8.3	8.3	8.3	liquefied
	MW70CR30LPL	8.7	8.8	9.0	8.9	8.9	8.7	8.8	8.6	8.8	8.9	liquefied
	MW70CR30MPG	8.2	8.5	8.7	8.7	8.5	8.3	8.2	8.2	8.1	8.0	granular
	MW70CR30LPG	8.5	8.8	9.0	9.2	9.1	8.9	9.1	9.0	8.9	8.5	granular
	MW70CR30PGM	8.1	8.3	8.4	8.5	8.3	8.2	8.3	9.2	8.8	8.4	granular
SS (mg L ⁻¹)	NT	4.2	4.4	4.3	6.7	4.4	3.4	2.4	2.5	2.6	3.1	-
	MW70CR30M	3.4	2.6	1.9	1.9	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.6	-
	MW70CR30L	121.1	106.9	48.5	19.6	15.4	13.5	15.6	28.7	15.3	24.4	-
	MW70CR30MPL	1.2	1.0	1.0	1.6	1.5	0.9	0.9	0.2	0.3	1.1	liquefied
	MW70CR30LPL	23.9	21.0	20.2	24.9	23.8	19.0	12.9	8.3	5.7	6.7	liquefied
	MW70CR30MPG	2.1	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	granular
	MW70CR30LPG	0.6	0.4	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	granular
	MW70CR30PGM	4.1	2.2	2.0	1.9	1.4	1.3	1.2	1.0	0.8	0.7	granular

Table 7. Al and Fe concentration in runoff during lysimeter experiment using artificial rainfall.

Classification	1 st	2 nd	3 rd	4 st	5 st	6 st	7 st	8 st	9 st	10 st	PAM	
	mg L ⁻¹											
Al	NT	0.15	0.23	0.11	0.30	0.37	0.14	0.32	0.24	0.29	0.44	-
	MW70CR30M	ND	ND	ND	ND	0.02	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08	-
	MW70CR30L	ND	ND	0.03	0.06	0.20	ND	ND	0.03	ND	0.06	-
	MW70CR30MPL	ND	0.23	0.17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	liquefied
	MW70CR30LPL	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	liquefied
	MW70CR30MPG	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.03	0.04	0.03	0.03	granular
	MW70CR30LPG	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.03	ND	0.02	granular
	MW70CR30PGM	ND	ND	ND	ND	0.01	0.05	0.03	0.07	0.09	0.09	granular
Fe	NT	0.07	0.06	0.03	0.07	0.10	0.04	0.09	0.07	0.08	0.12	-
	MW70CR30M	ND	ND	ND	ND	ND	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	-
	MW70CR30L	ND	ND	ND	0.01	0.09	ND	ND	ND	ND	0.01	-
	MW70CR30MPL	ND	ND	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	liquefied
	MW70CR30LPL	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	liquefied
	MW70CR30MPG	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	ND	0.01	0.01	granular
	MW70CR30LPG	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	granular
	MW70CR30PGM	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	ND	0.02	0.02	0.02	granular

극을 통해 손실이 발생한 것으로 판단되고, 입상처리의 경우 표면에 살포 후 비산방지를 위해 수분을 공급하는 작업이 수반되었기 때문에 PAM의 효율성이 증가한 것으로 판단된다. 향후 유사한 연구에 PAM을 적용할 경우 표면에 입상처리를 하는 것이 용이성 및 경제성 측면에서 이로울 것으로 판단된다. 유거수 중 Cd, Pb, As 등과 같은 독성 중금속은 모든 처리구에서 검출한계 이하로 안전성이 검증되었고, 수용성 철 및 알루미늄 함량도 대조구에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 석탄부산물의 적용은 폐석 사면의 안정화와 금속이온의 유출방지에 이점이 있고, PAM의 적용은 안정화를 위해 처리한 석탄회유실을 방지하여 효율성을 증대할 수 있는 유용한 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 석탄광산 채광 후 방치된 폐석의 영향으로 발생하는 광산배수, 유실 및 산림 피해를 복구할 수 있는 방안으로 자원의 재활용 측면에서 석탄부산물 적용성을 평가하였다. 석탄부산물을 이용해 수행한 실내시험의 결과 요약은 다음과 같다.

1. 석탄부산물은 토양과 유사한 구조를 갖는 물질로 강알칼리성 (pH 11.4)의 특징을 이용하여 중화제로서의 사용이 가능할 것으로 판단되고, 자체적으로 유기물, 인산, 칼슘 등을 함유하여 화학적 특성 개선을 위한 개량제로 유익하게 사용 가능할 것으로 판단된다.

2. 폐석과 혼합한 석탄부산물의 인큐베이션시험 결과 반응 7일 후 폐석의 Cd, Pb과 같은 독성 중금속함량은 감소하였고, 철과 알루미늄의 함량은 증가하였다. 하지만, 반응 후 채취한 용액의 수용성 철과 알루미늄은 감소하였으며, 이는 알칼리조건에서 수용성 함량이 감소한 것으로 판단된다.
3. 실내 인큐베이션시험과 동일한 방법으로 채취한 용액을 배양액으로 발아시험을 수행한 결과 증류수에 비해 발아율과 성장량이 각각 80%와 50% 증가하였으며, 식물활성도와 내성지수도 증가하였다. 이러한 결과는 석탄부산물이 식물 생육에 유익한 환경을 제공할 수 있다는 선행연구와 일치하며, 생육 약조건을 개량하는데 사용 가능할 수 있을 것으로 판단된다.
4. PAM (polyacrylamide)을 이용해 석탄부산물의 유실저감 효율성을 라이시미터 시험으로 수행한 결과 PAM 무처리에 비해 최대 99%의 저감효과를 나타냈다. 석탄부산물과 PAM의 복합사용은 2차 환경문제 발생 억제에 대한 효율성이 검증되었고, 입상형태로 처리할 경우 경제성, 용이성 및 효율성에 근거하여 유용하게 적용 가능할 것으로 판단된다.

이러한 결과로 유추할 때 석탄폐석이 방치되어 발생하는 환경오염 및 식생불량지역의 복원 및 개간을 위한 물질로 석탄부산물은 매우 용이하게 적용이 가능할 것으로 판단되고, 석탄부산물의 단일처리가 아닌 PAM 도입을 통한 2차 오염 방지 측면에서도 기여도가 높을 것으로 사료된다.

References

- Adriano, D.C., A.L. Page, A.A. Elseewi, A.C. Chang, and I. Straughan. 1980. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems. *J. Environ. Qual.* 9(3):333-344.
- Armesto, L. and J.L. Merino. 1999. Characterization of some coal combustion solid residues. *Feul.* 78:613-618.
- Carlson, C.L. and D.C. Adriano. 1993. Environmental impacts of coal combustion residues. *J. Environ. Qual.* 22(2):227-247.
- Choi, B., J.E. Lim, Y.B. Choi, K.J. Lim, J.D. Choi, J.H. Joo, J.E. Yang, and Y.S. Ok. 2009. Applicability of PAM (Polyacrylamide) in soil erosion prevention: rainfall simulation experiments. *Korean J. Environ. Agr.* 28(3):249-257.
- Furr, A.K., T.F. Parkinson, R.A. Hinrichs, D.R. Van Campen, C.A. Bache, W.H. Gutenmann, L.E. John, I.S. Pakkala and D.J. Lisk. 1977. National survey of elements and radiocativity in fly ashes. *Environ. Sci. Technol.* 11(13):1194-1201.
- Gupta, A.K., S. Dwivedi, S. Sinha, R.D. Tripathi, U.N. Rai and S.N. Singh. 2007. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus Vulgaris* grown in fly ash amended soil. *Bioresou. Technol.* 98:3404-3407.
- Hearing, C.K. and W.L. Daniels. 1991. Fly ash: characteristics and use in mined land reclamation. *Virginia Coal & Energy.* 3:33-46.
- Kim, K.R., G. Owens, R. Naidu and K.H. Kim. 2007. Assessment techniques of heavy metal bioavailability in soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(4):311-325.
- Kwon, K.S., K.J. Lee, B.J. Koo and J.D. Choi. 2000. Effect of PAM on soil erosion from apline agricultural fields. *Korean J. Agr. Sci.* 11:91-99.
- Kumpiene, J., A. Lagerkvist and C. Maurice. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments. *Waste Manage.* 28:215-225.
- Lee, G.S. and Y.J. Song. 2010. Characterization of leaching of heavy metal and formation of acid mine drainage from coal mine tailings. *J. Korean Inst. Resour. Recyc.* 19(2):54-62.
- Lee, K. K., H.S. Cho and J.Y. Kim. 2010. The effects of cadmium on seed germination and growth of sunflower and rape. *Korean J. Civil Eng.* 30(1B): 101-105.
- Lee, S.S., C.J. Gantzer, A.L. Thompson and S.H. Anderson. 2011. Polyacrylamide efficacy for reducing soil erosion and runoff as influenced by slope. *J. Soil Water Conser.* 66(3):172-177.
- Majumdar K. and N. Singh. 2007. Effect of soil amendments on sorption and mobility of metribuzin in soil. *Chemosphere.* 66:630-637.
- ME (Ministry of Environment). 2002. The Korean standard method of environmental pollutions for soil pollution.
- Min, J.G., E.H. Park, H.S. Moon and J.K. Kim. 2005. Chemical properties and heavy metal content of forest soils around abandoned coal mine lands in the Mungyeong area. *Korean J. Agr. Forest Meteorol.* 7(4):265-273.
- Mittra, B.N., S. Karmakar, D.K. Swain and B.C. Ghosh. 2005. Fly ash-a potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient supply system. *Fuel.* 84:1447-1451.
- Moon, D.H., K.H. Cheong, T.S. Kim, J.H. Kim, S.B. Choi, Y.S. Ok and O.R. Moon. 2010. Stabilization of Pb contaminated army firing range soil using calcined waste oyster shells. *Korean J. Environ. Eng.* 32:185-192.
- NIAST. 2000. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Oh, S.J., S.C. Kim, J.I. Ko, J.S. Lee and J.E. Yang. 2011. Evaluating stabilization efficiency of coal combustion ash (CCA) for coal mine wastes. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6): 1071-1079.
- Oh, S.J., S.C. Kim, R.Y. Kim, Y.S. Ok, H.S. Yun, S.M. Oh, J.S. Lee and J.E. Yang. 2012. Change of bioavailability in heavy metal contaminated soil by chemical amendment. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):973-982.
- Oh, S.J., H.S. Yun, S.M. Oh, S.C. Kim, R.Y. Kim, Y.H. Seo, K.S. Lee, Y.S. Ok, J.E. Yang. 2013. Effect of fly ash fertilizer on paddy soil quality and rice growth. *J. Appl. Biol. Chem.* 56:229-234.
- Rai, U.N., K. Pandey, S. Sinha, A. Singh, R. Saxena and D.K. Gupta. 2004. Revegetating fly ash landfills with *Prosopis juliflora* L. *Environ. Int.* 30:293-300.
- Rios, C.A., C.D. Williams and C.L. Roberts. 2008. Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites. *J. Hazard. Mater.* 156:23-35.
- Sajwan, K.S., A.K. Alva and R.F. Keefer. 2003. Chemistry of trace elements in fly ash. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA, pp.346.
- Sharman, N.K., S. Mitra, V. Sehgal and S. Mishra. 2012. An assessment of physical properties of coal combustion residues wr to their utilization aspects. *Int. J. Environ. Protect.* 2(2):31-38.
- Singh, S.N., K. Kulshreshtha and K.J. Ahmad. 1997. Impact of fly ash soil amendment on seed germination, seeding growth and metal composition of *Vicia Faba* L. *Ecologi. Eng.* 9:203-208.
- Skoog, D.A. and J.J. Leary. 1991. Principles of instrumental analysis. Saunders College Publishing. 357-400.
- Yang, J.E., J.G. Skousen, Y.S. Ok, K.Y. Yoo and H.J. Kim. 2006. Reclamation of abandoned coal mine waste in Korea using lime cake by-products, Mine water and the environ, 25(4):227-232.
- Yang, J.E., H.J. Kim, Y.S. Ok, J.Y. Lee and J.H. Park. 2007. Treatment of abandoned coal mine discharged waters using lime wastes. *Korean J. Geosci.* 11(2):111-114.
- Yeheyis, M.B., J.Q. Shang and E.K. Yanful. 2009. Long-term evaluation of coal fly ash and mine tailings co-placement. *Environ. Manage.* 91:237-244.
- Yun, J.O. and I.S. Lee. 1992. Genetic phenomena for the Pb and Zn tolerance in plants. *Korean J. Ecol.* 15(2): 173-180.
- Ziemkiewicz, P.F. and J. Skousen. 2000. Use of coal combustion products for reclamation. *Greenland.* 30:36-47.