

화력발전소의 회처리장 내 비산먼지 저감을 위한 화학적 먼지억제제 적용 연구

최유림¹ · 최종수¹ · 양재규² · 박선환³ · 주현수⁴ · 장윤영^{1*}

¹광운대학교 환경공학과

²광운대학교 인제니움학부대학

³(주) 선일이앤씨

⁴한국환경정책평가연구원

Application of Chemical Dust Suppressants for Control of Fugitive Dust in Ash pond of Thermal Power Plant

Yu-Lim Choi¹ · Jong-Soo Choi¹ · Jae-Kyu Yang² · Sun-Hwan Park³
Hyun Soo Joo⁴ · Yoon-Young Chang^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

²Ingenium College, Kwangwoon University

³SUNIL Engineering & Consultant Co., LTD

⁴Korea Environment Institute

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate efficiencies of chemical suppressants for control of fugitive dust in ash pond of thermal power plant. In this study, MgCl₂, PAM (polyacrylamide), and PVA (poly vinyl alcohol) that are generally applied to suppression of fugitive dust generated from unpaved road, coal mining, storage piles and etc, were employed as chemical dust suppressants. The coal ash (coal combustion residuals) were sampled from the ash pond of Yeongheung power division in Incheon, South Korea. The characterization of the sample including particle size distribution, pH, pH_{PZC} and pore volume as well as XRF analysis were carried out. The suppressant treated-samples were investigated with the wind tunnel experiments to estimate and compare the effect of suppressants on stabilization of the surface of coal ash samples. According to the results, the stability of suppressant-treated samples were significantly improved compared to water-treated samples. Among the three kinds of suppressants, PAM and PVA showed higher efficiencies and cost saving than MgCl₂.

Key words : Fugitive dust, Coal ash, Pond ash, Dust control, Dust suppressant

1. 서 론

국내의 주요 에너지원별 최종 에너지소비 구조를 살펴 보면, 총량적 측면에서는 2015년 기준 석유가 107,322 천TOE(Tonnage of Oil Equivalent) (49.1%)으로 석탄의 35,147 천TOE(16.1%)에 비해 약 3배 많은 것으로 나타났다. 그러나 석유의 경우 2005년부터 2015년 까지 연평균 증가율이 1.1%인 반면 석탄의 경우 5.5%의 연평균

증가율을 보이고 있다(KEI, 2014). 이러한 석탄화력의 발전량 증대는 발전소 주변 지역의 대기질에 악영향을 끼쳐 지역주민들과 발전소 사이에 마찰을 유발하며 결과적으로 발전설비의 안정적 운영에 지장을 주게 된다(Yoon et al., 1988).

석탄회는 생성되는 장소에 따라 바닥재와 비산재로 구분되나 이후 두 가지 석탄회는 회처리장에서 물과 함께 섞여 pond ash를 이루게 되며 물이 증발되어 pond ash

*Corresponding author : yychang@kw.ac.kr

Received : 2018. 11. 5 Reviewed : 2018. 11. 21 Accepted : 2018. 12. 4

Discussion until : 2019. 2. 28

가 지상으로 노출될 경우 강풍에 의한 비산 현상이 발생된다. 석탄회의 비산은 silt 크기(0.05~0.002 mm)의 구성비와 풍속에 따라 비산되는 양이 결정된다(Sahu, 2010). 석탄회는 원료에 따라 그 성분이 다를 수 있으나 일반적으로 비소, 납, 수은, 카드뮴 등과 같은 유해한 중금속을 함유하고 있어 장기간 노출될 경우 폐질환, 여러 종류의 암, 신경계 손상 등이 유발될 가능성이 있다(Gottlieb et al., 2010). 석탄회의 비산을 방지하기 위해서 방풍망의 설치 등을 시행하고 있으나 매립지 전량을 처리하기는 불가능한 실정이다. 이에 노출지역을 대상으로 살수 처리를 시행하고 있으나 수분 증발에 따라 다시 비산이 발생하게 된다. 한편 미국의 경우 비포장 도로, 야적장, 도심지역 등과 같은 지역에서 발생하는 비산먼지를 저감하기 위한 여러 연구가 진행되어 왔으며 주로 사용되는 먼지억제제의 종류는 물, 염수, 폴리머, 계면활성제, 석유계 혹은 비석유계 기반 유기물이다(US EPA, 1985; USDA, 1999; US EPA, 2004; Amato et al., 2010). US EPA(2004)에 따르면 물은 가장 쉽게 공급 될 수 있고 간편하게 적용이 가능하나 효율이 낮아 자주 분사해야 하는 반면 화학적 먼지억제제는 일반 살수처리에 비해 장기간 비산먼지를 저감할 수 있는 대책이며 광범위한 지역을 대상으로 할 수 있는 것에 장점이 있다.

본 연구에서는 각기 다른 비산 억제 메커니즘을 가지고 있는 3종류의 화학적 비산먼지 억제제를 선정하였으며 선정된 먼지억제제는 $MgCl_2$ (염수), PAM(Polyacrylamide)(폴리머), PVA(Polyvinyl alcohol)(폴리머-계면활성제)이다. $MgCl_2$ 는 조해성(deliquescence) 물질로서 대기 중의 상대습도(RH_i)가 임계 상대습도(RH₀=32%)보다 높을 때 대기 중 수분을 흡수하고 용해되어 용액이 됨으로써 입자 표면에 water film을 형성한다(Byrn et al., 2017). 폴리머는 긴 체인모양의 분자구조를 가지는 유기고분자 물질로 토양의 하중 지지력을 증가시켜 비산을 억제되는 것으로 알려져 있다(Seo, 2011). 음이온성 PAM은 수용성 고분자물질로써 강력한 흡착 관능기를 가지며 이를 통해 토양 입자간의 결합력을 증가시킨다(Choi et al., 2009). Jala and Goya(2006)에 의하면 비산재의 대부분의 물리적, 화학적 특성은 토양과 비슷하기 때문에 토양에 적용하였을 때와 같은 메커니즘으로 석탄재 표면 안정화에 효과를 가져다 줄 것으로 기대된다. 계면활성제는 한 분자 내에 친수성과 소수성을 모두 가진 화학적 구조를 지니고 있으며 PVA 또한 높은 수용성과 양쪽 친매성을 보유하고 있다(Amato et al., 2010; Li et al., 2015). 석탄회의 비산 억제를 어렵게 하는 원인은 석탄재 표면이 발수성으로 수

분에 의한 친수성이 낮은 특성을 가지고 있기 때문이다(Valenic, 2013). Kang et al.(2007)의 연구에 의하면 PVA를 석탄화력발전소 내 저탄장내 비산먼지 억제에 적용한 결과 저탄기간에 관계없이 지속적으로 효과를 발휘하는 것으로 확인되었다.

본 연구를 통해 석탄화력발전소의 석탄회에 대한 특성 분석을 실시하고 성능이 입증된 여러 화학적 먼지억제제의 적용에 따른 표면 안정화 효율을 풍동실험을 통해 평가하여 비산먼지를 효과적으로 억제 할 수 있는 관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취 및 특성평가

본 연구에서 사용된 시료는 남동발전 영흥화력본부 내 회처리장에서 채취하였으며 회처리장의 비산재와 바닥 배출구 사이의 지점에서 두 가지의 석탄회가 혼합된 pond ash를 채취하였다. 채취한 시료는 2 mm으로 체거름 후 토양 용 교반기로 균질하게 섞은 뒤 실내에서 3일 동안 건조 후 사용하였다. 시료의 특성분석을 위해 Particle size analyzer(ELS-Z PLUS, Otuka Electrons, Japan)을 이용한 입도분석, X-선 형광분석(ZSX Primus II, Rigaku, USA), pH, point of zero charge(pH_{PZC}), 공극률을 측정하였다. pH와 공극률은 토양오염공정시험기준에 준하여 시행하였다. pH_{PZC} 측정은 Babic et al.(1999)가 제시한 방법을 사용하였다(Babic et al., 1999).

2.2. 화학적 먼지억제제

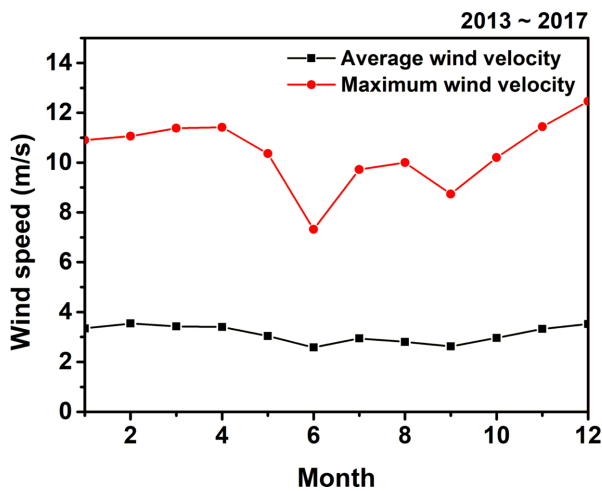
본 연구에서 사용된 $MgCl_2$ (Magnesium chloride hexahydrate)은 Daejung Chemicals(South Korea)에서 구입하였고, PAM은 BASF(USA)의 Zetag®4125(음이온성)를 사용하였으며 PVA(Polyvinyl alcohol #2000)은 Samchum Chemicals(South Korea)에서 구입하였다. 각 먼지억제제는 적용 비율에 따라 적절한 농도가 되도록 증류수와 혼합하였으며 완전히 용해 되도록 12시간 동안 교반하였다.

2.3. 풍동실험

연구에 사용된 풍동실험장치는 송풍기, 송풍강도를 조절하기 위한 전력조절기(Slidacs, 단상 1 KVA), 풍속측량계(ET-955, FLUS, China), 시료를 담은 tray를 고정하는 시험부로 구성되어 있으며 풍동실험장치의 외관은 stainless steel 재질이다. 송풍기와 시험부 사이에는 난류

Table 1. Summary of wind tunnel experiments

Surfactant	Concentration of solution (%)	Application rates (g/m ²)	Velocity (m/s)	Duplicates
Water (raw)	-	-		
MgCl ₂	2.5	232		
	5	464		
	10	928		
	15	1,393		
PAM	0.05	2.2	3, 6, 9, 12	3
	0.1	4.4		
	0.2	8.9		
PVA	0.05	2.2		
	0.1	4.4		
	0.2	8.9		

**Fig. 1.** Average wind velocity and maximum wind velocity for each month in the past 5 years (2013~2017).

강도를 축소시키기 위한 honeycomb 형태의 diffuser가 설치되어 있다. 풍동실험은 시험 중에 발생하는 외부의 환경변화 요소를 제거하고자 연구실 인근 컨테이너 내부에서 진행되었다. 풍동실험의 풍속조건은 영흥화력발전소가 위치한 인천시의 과거 5년 동안의 월별 평균 풍속 및 최대풍속을 고려하여 설정하였다. Fig. 1와 같이 인천시의 평균 풍속은 2.6~3.5 m/s이며 최대 풍속은 7.3~12.5 m/s로 나타났다(KMA, Hompage). 따라서 본 풍동실험의 풍속조건은 3, 6, 9, 12 m/s로 설정하였다. 풍동실험 방법은 다음과 같다. 시험부에 고정되는 tray(180 × 250 × 20 mm)에 약 675 mL의 시료를 채우고 105°C dry oven에서 한 시간 동안 완전 건조하여 수분을 모두 제거 시켰다. 그 후 시료의 포화공극부피 50%에 해당되는 약 200 mL의 비산먼지 억제제 용액을 균일하게 살포 하였다. 일반 살수 처리한 시료 또한 대조구로써 풍동실험에 사용되었다.

살포된 용액 중에 포함된 수분의 비산억제 영향을 최소화 하기 위하여 상온에서 시료의 무게변화가 없을 때 까지 방치한 후 시험에 사용하였다. 적용된 먼지억제제의 표면 안정화 효율 측정을 위해 송풍기 가동 전과 가동 후 1, 3, 5, 10, 15분 후의 무게를 달았다. 먼지억제제의 표면 안정화 효율(%)은 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{Control efficiency (\%)} = \frac{W_3 - W_2}{W_1 - W_2} \times 100 \quad (1)$$

여기서 W_1 는 송풍기 가동 전 시료와 tray의 무게(g), W_2 는 tray의 무게(g), W_3 는 송풍기 가동 후 시료와 tray의 무게(g)를 나타낸다. 풍동실험은 조건별로 3회 반복 수행 하였으며 평균값을 결과로 하여 먼지억제제별 효율을 비교 평가 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄회의 특성평가

입도분석기를 통해 채취한 석탄회 시료의 입경 분포도를 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2와 같이 일반적으로 비산먼지의 원인이 되는 입경이 50 μm 이하인 석탄회는 약 9% 인 것으로 확인 되었다. 한편 비산재의 입지는 평균적으로 직경 10 μm 이하인 미세한 입자로 발생되나 미세한 입자들은 서로 뭉쳐 직경이 ~100 μm 인 구형태의 micron 또는 sub-micron 형태가 된다(Jala and Goya, 2006; Davison et al., 1974). 이때 sub-micron 입자들은 큰 구형태 입자들에게 갖히게 된다(Paulson and Ramsden, 1970; Fischer et al., 1978). 토양오염공정시험법 기준으로 분석한 석탄회 시료의 공극률과 pH는 각각 62%와 9.6으로 나타났다. 석탄회 시료의 주요 성분 중

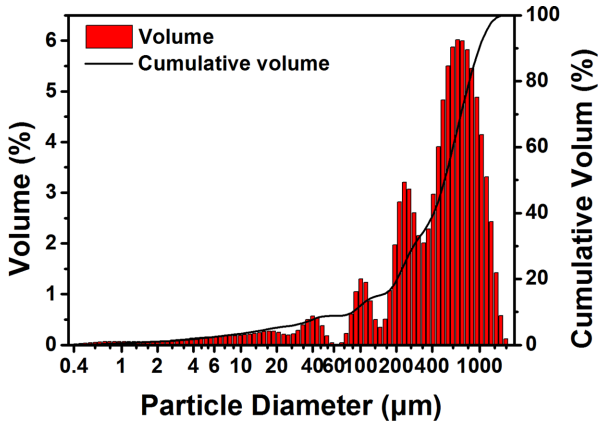


Fig. 2. Particle size distribution of the coal ash sample.

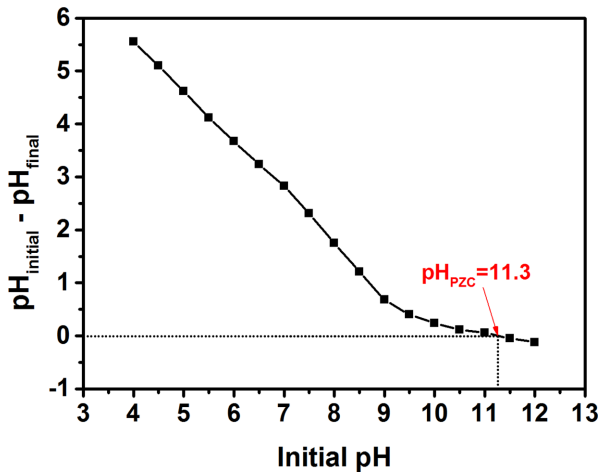


Fig. 3. Point of zero charge measurement for the coal ash sample.

하나인 CaO이 물과 반응하여 Ca(OH)₂를 형성하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 pH_{PZC}는 측정결과 11.3으로 나타나 석탄회 시료의 표면은 중성 pH에서 양하전을 띄는 것으로 확인되었다.

3.2. MgCl₂ 적용에 따른 안정화 효과

먼지억제제의 종류, 풍속 및 적용 비율에 따른 효율을 비교평가 하기 위해 풍동실험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다. 대조구로써 증류수로 처리된 시료는 풍속 3, 6 m/s 조건에서는 비산되지 않았으나 9, 12 m/s에서는 각각 25, 10%의 낮은 안정화 효율을 보였다(Fig. 4). 대조구로써 증류수로 처리된 시료에서도 입자끼리 서로 뭉쳐져 표면이 안정화 되는 것이 관측되었으나 그 강도나 효율은 다른 먼지억제제 의한 것보다 낮은 것으로 나타났다. Fig. 5(a)와 같이 MgCl₂를 232 g/m²의 비율로 적용한 조건에서는 풍속이 ≤9 m/s일 때는 비산이 되지 않는 것

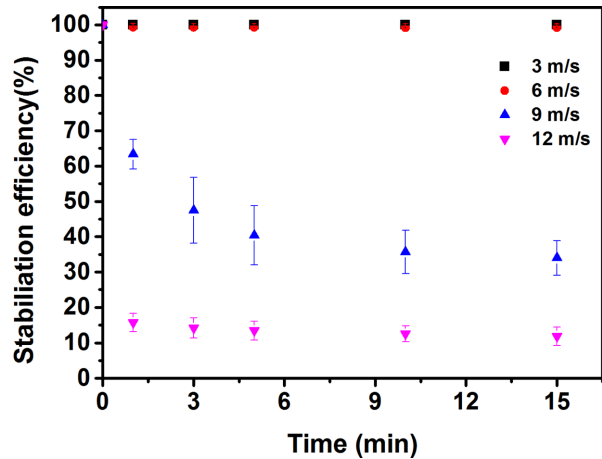


Fig. 4. Stabilization efficiency of the dust after water treatment.

로 확인 되었으나 풍속 12 m/s 일 때는 5분까지는 약 74%의 안정화 효율을 보였고 15분 후에는 약 50%의 안정화 효율을 보였다. 적용 비율이 464 g/m² 이상일 때부터 모든 풍속 조건에서 매우 안정한 효율을 보였다(Fig. 5(b), (c), (d)). 이러한 현상은 실험을 실시하였을 때 상대 습도가 약 74%로 MgCl₂의 임계 상대습도(RH₀=32%)보다 더 높아 대기 중 수분을 흡수했기 때문이다. 또한 MgCl₂ 적용비율이 증가할수록 입자 간에 형성되는 water film의 표면장력 또한 상승되어 건조될 때 더 단단히 다져진 표면을 만들기 때문이다(USDA, 1999). MgCl₂는 표면을 안정화 시키는 효과가 뛰어나 통행량이 많은 비포장도로에서도 적용이 가능하나 지하수의 염소 농도에 영향을 끼칠 수 있으며 토양의 삼투막 현상을 저지하고 식물에 영향을 줄 수 있다(Addo et al., 2004; Muuns, 2002).

3.3. PAM 적용에 따른 안정화 효과

PAM 용액으로 석탄회를 처리한 결과, 적용비율 2.2 g/m² 조건에서 풍속이 ≤9 m/s까지는 95%의 안정화 효율을 보였으나 12 m/s 조건에서는 송풍기 가동 1분, 15분 후 안정화 효율이 각각 43% 이상, 7%로 낮은 효율을 보였다. 적용비율이 4.4, 8.9 g/m² 일 때는 모든 풍속 조건에서 안정화 효율이 각각 93.3, 96.2%으로 높은 효과를 나타냈다. PAM의 토양유실 저감 메커니즘에서 물속의 칼슘 이온과 같은 2가 양이온들은 토양입자를 둘러싸고 있는 확산이중층(diffuse double layer)을 감소시키고, 토양입자들과 음이온성 PAM의 응집을 원활하게 하여 입자간 결합력을 증대 시킨다(Choi et al., 2010; Sojka et al., 2007). XRF 분석결과(Table 2) 칼슘은 석탄재 시료의 주요 성분 중 하나이므로 유사한 기작이 석탄재 표면 안정

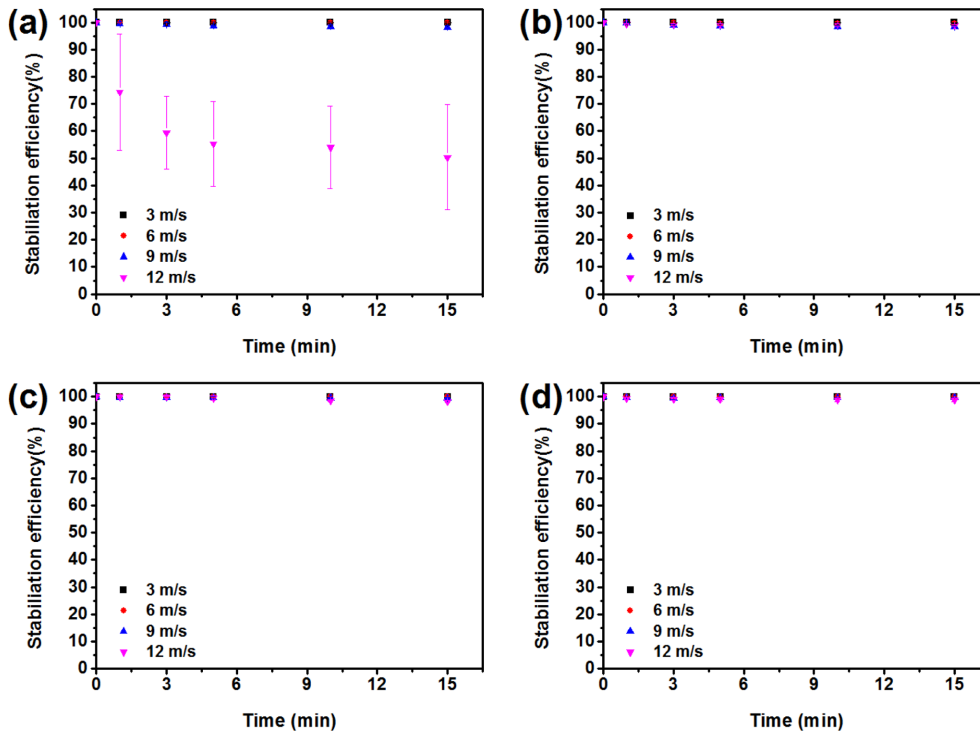


Fig. 5. Stabilization efficiency of the dust after MgCl₂ treatment at different application rates (232 g/m² (a), 464 g/m² (b), 928 g/m² (c) and 1,393 g/m² (d)).

Table 2. Chemical composition of the coal ash sample by XRF analysis

Component	Mass (%)
SiO ₂	52.7
Al ₂ O ₃	24.3
Fe ₂ O ₃	10.3
CaO	5.7
MgO	1.7
Na ₂ O	1.2
TiO ₂	1.1
K ₂ O	1.1
SO ₃	0.5

화에 기여한 것으로 판단된다. 또한 pH가 7.5~7.8인 음이온성 PAM 용액에서 석탄재의 표면은 양이온을 띄므로 (pH_{ZPC}=11.3) 정전기적 결합 또한 석탄재 표면 안정화에 기여할 수 있는 기작으로 판단된다. 한편 음이온성 PAM의 경우 장기적으로 사용하여도 환경에 대해 위해성이 없으며, 수계에도 안전한 물질로 알려져 있다(Barvenik, 1994).

3.4. PVA 적용에 따른 안정화 효과

PVA으로 처리된 석탄재는 적용비율과 관계없이 풍속

≤9 m/s에서 매우 안정적인 효과를 보였다(Fig. 7). PAM의 적용 비율이 2.2 g/m²(Fig. 6a) 일 때 풍속 9 m/s에서 석탄재가 일부 비산된 것과 비교하면 풍속 ≤9 m/s 일 때는 PVA가 PAM에 비해 더 높은 안정화 효과를 가진 것으로 판단된다. 한편 PVA 적용 비율이 2.2, 4.4 g/m² 일 때 풍속 12 m/s에서의 안정화 효율이 같은 실험조건의 PAM에 비해 낮은 것으로 관측되었으며 적용 비율 8.9 g/m² 일 때는 모든 풍속조건에서 매우 안정적인 효과(안정화 효율=99.9%)를 보였다. 앞서 설명한 것과 같이 비산재는 표면이 발수성으로 친수성이 낮은 특성을 가지며 PVA는 양쪽 친매성 물질이다. 계면활성제를 적용한 water spray system 방식은 분진 입자 표면을 변화시키고 입자 간의 반응성을 향상시켜 물을 단독으로 사용하였을 때에 비해 분진의 비산을 효과적으로 감소시킬 수 있다(Dumm and Hogg, 1987). Polat et al.(2001)에 따르면 계면활성제 용액 분사를 이용한 비산먼지 억제 효율은 사용되는 계면활성제의 종류와 농도에 영향을 받으며 분사되는 용액의 하전과 비산먼지 억제 효율사이에는 큰 상관관계가 존재한다고 하였다. 또한 Zeller(1983)의 보고에 따르면 계면활성제는 물의 표면장력을 낮추고 모세관 현상을 증가시켜 물질이 수분에 의해 효과적으로 젖을 수 있도록 한다. PVA는 생체에 적합한 물질이며 생분해 가능한 물

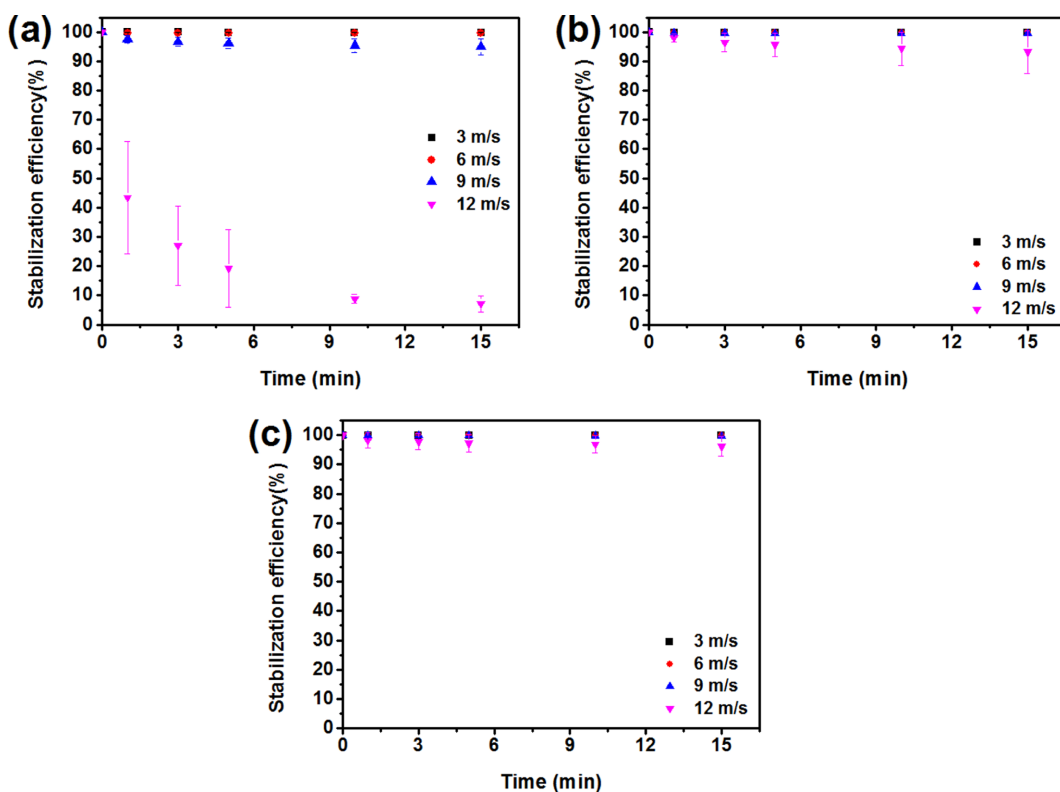


Fig. 6. Stabilization efficiency of the dust after PAM treatment at different application rates (2.2 g/m² (a), 4.4 g/m² (b), 8.9 g/m² (c)).

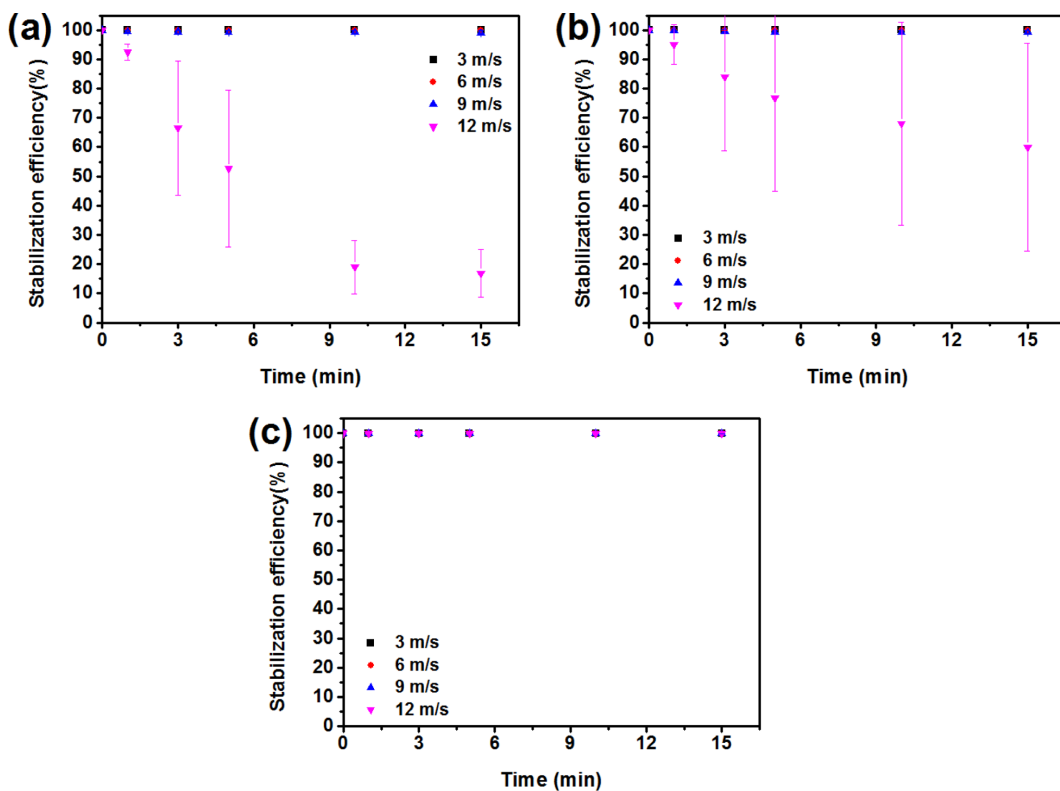


Fig. 7. Stabilization efficiency of the dust after PVA treatment at different application rates (2.2 g/m² (a), 4.4 g/m² (b), 8.9 g/m² (c)).

질로써 환경에 미치는 영향은 없는 것으로 알려져 있다 (LIPSA et al., 2015).

3.5. 처리단가 비교

화학적 먼지억제제의 종류별로 적절한 안정화 효율을 보이는 적용 비율은 464.4 g/m²(MgCl₂), 8.9 g/m²(PAM), 8.9 g/m²(PVA)이다. 각 공급처가 제시한 화학적 먼지억제제 1 ton 당 구입가격을 바탕으로 계산된 1 m² 처리 단가는 1,811원(MgCl₂), 31원(PAM), 62원(PVA)이다. 적정 적용 비율에 따른 처리 단가 순서는 PAM < PVA < MgCl₂ 순으로 나타났다. 한편 해당 가격은 구입처, 제품, 구입 규모 및 운송거리 등에 따라 변동될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 화력발전소 회처리장 내에서 발생하는 비산먼지를 저감하기 위한 화학적 먼지 억제제로써 MgCl₂, PAM, PVA의 석탄재 표면 안정화 효과를 확인하였다. 선정된 3종류의 화학적 먼지억제제의 적용 비율에 따른 효율을 알아보았으며, 적용 비율 증가에 따른 효율 상승 및 종류별 적정 적용 비율을 확인 할 수 있었다. 각 화학적 먼지억제제 종류별 적정 적용비율은 464.4 g/m² (MgCl₂), 8.9 g/m²(PAM), 8.9 g/m²(PVA)으로 확인되었으며 처리 단가 순서는 PAM < PVA < MgCl₂ 순으로 나타났다. 화학적 먼지억제제의 종류별 처리단가와 위해성을 고려하였을 때 PAM과 PVA가 MgCl₂에 비해 더 효율적인 처리제인 것으로 판단된다. 한편 처리단가 측면에서는 PAM이 PVA 보다 약간 더 우수한 것으로 나타났으나 적정 적용비율에서의 안정화 효율은 PVA가 PAM 보다 더 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 PAM과 PVA 모두 적용 가능성이 큰 화학적 먼지억제제로 판단된다. 본 연구에서는 실험실 규모의 풍동실험을 통해 각 화학적 먼지억제제의 경제성, 효율성 및 안정성을 검토하였다. 본 연구의 결과는 현장의 특성(비산먼지 저감효율 목표) 및 예산 범위에 따른 화학적 먼지억제제 선정에 참고자료가 될 것으로 기대된다. 또한 이러한 화학적 먼지억제제를 추후 현장에서 실제 적용하기 위해서 본 연구결과를 바탕으로 한 pilot test 및 현장 모사 실험 등을 통한 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 “화력발전소 회

처리시설 비산먼지 최적관리방안 수립” 연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Addo, J.Q., Chenard, M., and Sanders, T.G., 2004, Road dust suppression: Effect on maintenance, stability, safety and the environment (phases 1-3), Mountain Plains Consortium, North Dakota State University, ND, USA.
- Amato, F., Querol, X., Johansson, C., Nagl, C., and Alastuey, A., 2010, A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods, *Science of the Total Environment*, **408**, 3071-3082.
- Babic, B.M., Milonjic, S.K., Polovina, M.J., and Kaludierovic, B.V., 1999, Point of zero charge and intrinsic equilibrium constants of activated carbon cloth, *Carbon*, **37**, 477-481.
- Barvenik, F.W., 1994, Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Sci.*, **158**, 235-243.
- Byrn, S.R., Zografí, G., and Chen, X., 2017, Solid-State Properties of Pharmaceutical Materials, John Wiley & Sons, 223-234.
- Choi, B.S., Lim, J.E., Choi, Y.B., Lim, K.J., Choi, J.S., Joo, J.H., Yang, J.E., and Ok, Y.S., 2009, Applicability of PAM (Polyacrylamide) in Soil Erosion Prevention: Rainfall Simulation Experiments, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, **28**(3), 249-257.
- Choi, Y.B., Choi, B.S., Kim, S.W., Lee, S.S., and Ok, Y.S., 2010, Effects of Polyacrylamide and Biopolymer on Soil Erosion and Crop Productivity in Sloping Uplands: A Field Experiment, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **32**(11), 1024,1029.
- Davison, R.L., Natusch, D.F.S., Wallace, J.R., and Evans Jr., C.A., 1974, Trace elements in fly ash: dependence of concentration on particle size, *Environ. Sci. Technol.*, **8**, 1107-1113.
- Dumm, T.F. and Hogg, R., 1987, Particle Size Distribution of AirBorne Dust In Coal Mines, *Proceedings of The 3rd US Mine Ventilation Symposium*, 510-516.
- Fischer, G.L., Prentice, B.A., Silberman, D., Ondov, J.M., Bierman, A.H., Ragaini, R.C., and MacFarland, A.R., 1978. Physical and morphological studies of size-classified coal fly ashes, *Environ. Sci. Technol.*, **12**, 447-451.
- Gottlieb, B., Gilbert, S.G., and Evans, L.G., 2010, Coal ash: The toxic threat to our health and environment, <https://www.psr.org/wp-content/uploads/2018/05/coal-ash.pdf> [accessed 18.10.08]
- Jala, S. and Goyal, D., 2006, Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production-a review, *Bioresource Technology*, **97**, 1136-1147.

- Kang H.S., Hwang, J.S., and Yoo, W.Y., 2007, A Decrease of Fugitive Dust on Coal Storage Pile by Treating Polyvinyl Alcohol-surfactant, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **29**(12), 1400-1403.
- KEI, 2014, Minimizing Environmental Impact in Accordance with Thermal Power Plant Ash Management (I), Korea Environment Institute, South Korea.
- KMA, Korea Meteorological Administration Homepage, <https://data.kma.go.kr/cmnn/main.do> [accessed 18.06.19]
- Li, J., Su, L., Li, J., Liu, M.F., Chen, S.F., Li, B., Zhang Z.W., and Liu, Y.Y., 2015, Influence of sucrose on the stability of W1/O/W2 double emulsion droplets, *RSC Adv.*, **5**, 83089-83095.
- LIPȘA, R., TUDORACHI, N., GRIGORAȘ, A., VASILE, C., GRĂDINARIU, P., 2015, Study on poly(vinyl alcohol) copolymers biodegradation, *Memoirs of the Scientific Sections of the Romanian Academy*, **38**, 8-25.
- Muuns, R., 2002, Comparative physiology of salt and H₂O stress. *Plant, Cell and Environment*, **25**(2), 239-250.
- Paulson, C.A.J. and Ramsden, A.R., 1970. Some microscopic features of fly ash particles and their significance in relation to electrostatic precipitation. *Atmospheric Environment*, **4**(2), 175-185.
- Polat, M., Polat, H., Chander, S., and Hogg, R., 2002, Characterization of Airborne Particles and Droplets: Relation to Amount of Airborne Dust and Dust Collection Efficiency, *Part. Part. Syst. Charact.*, **19**, 38-46.
- Sahu, P., 2010, Characterization of coal combustion by-products (CCBs) for their effective management and utilization, National institute of technology, Final thesis, National Institutes of Technology, India
- Seo, Y.H., 2011, A Laboratory Study on Short-Term Efficiencies of Chemical Dust Suppressants to Reduce Fugitive Dust, Final thesis, Inha University. South Korea.
- Sojka R.E., Bjerneberg, D.L., Entry, J.A., Lentz, R.D., and Orts, W.J., 2007, Polyacrylamide in agriculture and environmental land management, *Adv. Agron.*, **92**, 75-162.
- US EPA, 1985, Dust Control at Hazardous Waste Sites, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USDA, 1999, Dust Palliative Selection Application Guide, United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- US EPA, 2004, Potential Environmental Impacts of Dust Suppressants: Avoiding another Times Beach, An Expert Panel Summary, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada.
- Valenic, A., 2013, Dust suppression in coal ash applications, <http://www.flyash.info/2013/098-Valenic-2013.pdf> [accessed 18.05.23]
- Yoon, M.J., Lee, B.H., and Lim, H.J., 1988, The Control Measurement of Fugitive Dust for Coal Storage Pile, *proceedings of Korean Society for Atmospheric Environmental*, **1**, 3-37.