

도심 대형사업장의 토양 입자 비산 억제를 위한 Starch와 PVA(polyvinyl alcohol)의 효율성 평가

최종수¹ · 김동수¹ · 최유림¹ · 김정은² · 양재규¹ · 장윤영^{1*}

¹광운대학교 환경공학과

²주식회사 도담홀딩스

Efficacy of Starch and PVA (polyvinyl alcohol) for the Suppression of Soil Dust Emissions from Large-scale Construction Sites in Urban Areas

Jong-Soo Choi¹ · Dong-Su Kim¹ · Yu-Lim Choi¹ · Jung-Eun Kim²

Jae-Kyu Yang¹ · Yoon-Young Chang^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

²Dodam Holdings CO., LTD., Seoul 02118, Korea

ABSTRACT

Soil dust emitted from large scale construction sites in urban areas has posed a significant health threats to local residents by exacerbating air quality. Water-spraying (moistening) is commonly practiced to lower the dust emission in construction sites, but its long term effectiveness is highly questionable. In this study, the utility of starch and PVA (polyvinyl alcohol) was investigated in suppression of the soil dust emissions in construction sites in Seoul areas. The efficiency of the two suppressants was tested with test soil sample in a lab-scale wind tunnel box under different concentrations of suppressants and soil textures. Starch and PVA showed the superior ability to suppress soil dust emission as compared to moistening, resulting in PM₁₀ and PM_{2.5} lower than the daily limit values of 30 and 15 µg/m³, respectively. PVA showed higher suppression capability than starch for all conditions. The test soils mixed with suppressants also showed dramatically enhanced aggregate stability compared to the non-treated soil.

Key words : Soil dust, Suppressant, Starch, PVA (polyvinyl alcohol), Construction, PM₁₀ and PM_{2.5}

1. 서 론

대기환경보전법 제2조에서 정의한 비산먼지는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질인 먼지 가운데 일정한 배출구 없이 대기 중에 직접 배출되는 경우에 해당되는 먼지를 총칭한다(Cohen et al., 2005, Petkova et al., 2013). 일반적인 대기 중의 먼지는 입경범위에 따라 입경 50 µm 이하의 모든 먼지를 TSP(Total suspended Particles), 입경 10 µm 이하의 미세먼지를 PM₁₀(Particulate Matter-10) 그리고 입경 2.5 µm 이하의 초미세먼지를 PM_{2.5}(Particulate Matter-2.5)으로 분류하는데, 2015년도 국립환경과학원의 통계자료에 따르면 대기오염물질 중

TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출은 대부분 비산먼지에 의한 것으로 나타났다. 미세먼지 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대해 환경부(국립환경과학원)가 예보 주체가 되어 수도권 지역(서울, 인천, 경기) 대상으로 예보 등급은 대기환경기준과 건강영향을 고려하여 Table 1과 같이 일일 평균을 기초로 4단계로 구분한다(Park, 2018).

2017년 기준으로 서울시내 토양 입자 비산 발생사업장으로 신고된 사업장은 총 1,805곳 이중 97%인 1,751곳이 건설공사장으로 확인되었으며 토양 입자 비산 관련 민원 또한 대부분이 건설공사현장에서 비롯되었다. 현재 이들 공사장에서 발생하는 토양 입자 비산 대책으로는 간헐적 살수, 수용성 염 살포, 방진 덮개 및 방진 망 등이

*Corresponding author : yychang@kw.ac.kr

Received : 2019. 12. 2 Reviewed : 2019. 12. 3 Accepted : 2019. 12. 13

Discussion until : 2020. 3. 31

Table 1. Daily limit value for PM₁₀ and PM_{2.5}

| Dust Concentration, ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, day) | Good | Normal | Bad | Very bad |
|---|------|--------|--------|----------|
| Ultra fine dust, PM _{2.5} | 0~15 | 16~35 | 36~75 | 76~ |
| Fine dust, PM ₁₀ | 0~30 | 31~80 | 81~150 | 151~ |

있으나 그 효과는 일시적이어서 보다 지속적인 대책마련이 요구되고 있다(Seo, 2011).

수용성 천연 고분자 물질인 starch는 수백 단위로 이루어진 중합체 구조로 이루어져 있다. 중합체중 아밀로오스(Amylose)는 직쇄(straight chain)로 연결되어 있으며, 아밀로펙틴(Amylopectin)은 나뭇가지 모양의 가지형태의 측쇄(branched chain)로 연결되어 있는데 아밀로오스의 경우 냉각시키면 쉽게 퇴화(retrogradation)하고 침전하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 구조적 특성으로 생분해성과 무독성의 특징을 가지고 있다(Lu et al., 2018; Wang et al., 2015). 한편, 수용성 계면활성 중합체인 PVA(polyvinyl alcohol)는 필름형성 및 접착특성이 뛰어나고 양쪽 친매성 특성에 따른 계면 활성 기능을 통해 토양 입자에 적용 시 토양 입자간의 접착효과와 더불어 비산 먼지내 모세관 현상을 증가시켜 수분 유지력을 향상시킨다(Sadhu et al., 2014). 이러한 특성들로 인하여 starch와 PVA가 본 연구의 먼지억제제로 선정되었다.

본 연구에서는 실험실 규모의 소형 풍동 실험 장치를 고안하여 다양한 적용조건 및 현장조건을 모사하여 starch와 PVA의 토양먼지억제효과를 알아보았다. 또한 먼지억제제의 작용으로 인한 토양미세입자의 입단화의 변화와 먼지억제 효율과의 상관관계를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험토양시료

실험에 사용된 토양시료는 2019년 6월 11~12일 총 2일간 현재 사업이 진행 중인 서울지역 건설현장 6곳을 선정하여 환경부 토양오염공정시험법에 따라 대상지역 공사 현장 내 야적토를 대상으로 1개 중심 지점과 주변 4방위의 5~10 m 거리에 있는 1개 지점씩 총 5개 지점의 표토층(0~15 cm)에서 채취하였다(Adhikari et al., 2016). 토양시료의 토성은 미농무성(USDA)의 체분석법과 침강실험 및 Stokes' Law의 계산식을 이용하여 분석하였다.(Stokes, 1901) 현장에서 채취한 토양은 먼저 약 4~5 mm 이상의 굵은 자갈 및 이물질들을 제거하고 교반기에서 충분히 혼합한 후 상온에서 안정화하였다. 다음 오븐에서 건조한 토양을 상온에서 식힌 후 압축스프레이로 먼지억제제를 토양표면에 고르게 살포하고 8시간 이상의 건조기간을 가진 후 실험에 사용하였다(Fig. 1).

2.2. 풍동시험장치 및 운전

먼지억제제 적용에 따른 토양 입자 비산 발생 정도를 알아보기 위해 사용한 풍동 시험 장치 박스(L650 mm × W380 mm × H300 mm)는 내부에 크게 송풍기, 송풍강도를 조절하기 위한 전압조절기(slidacs, 0~250 V), 풍속측정

**Fig. 1.** Preparation of soil samples for wind tunnel tests.

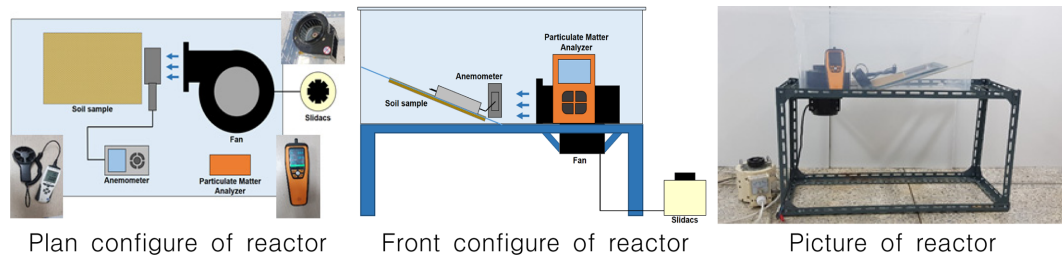


Fig. 2. Apparatus for wind tunnel test.

기, 비산된 토양의 입자 농도 측정기, 시료를 넣는 시험부로 구성되어 있으며, 송풍기는 DLD사의 LD-B 118 모델로 최대 풍량은 $4.3 \text{ m}^3/\text{min}$, 풍속은 최대 24 m/s 까지 안정적으로 송풍이 가능하다. 풍속계는 Flus사의 ET-955모델로 풍속 측정범위는 $0.3\text{--}45.0 \text{ m/s}$ 이며 분석능은 0.01 m/s 이다. 미세먼지 농도측정기는 Temtop사의 M2000모델로 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 모두 측정범위는 $0\text{--}999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 분석능은 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다(Fig. 2).

풍동시험은 먼저 가변 변압기(slidacs)를 이용하여 송풍기의 전압을 조절하여 사전에 운전조건의 풍속을 세팅한다. 이때 풍속계는 송풍기와 토양 트레이 사이에 고정시킨 후, 1분가량의 작동기간 동안 안정된 풍속 값을 측정한다. 시험대상 토양시료를 실험용 stainless재질의 트레이(길이 125 mm , 폭 150 mm , 높이 7 mm)에 담은 후 풍동장치내부에 설치하고 풍동장치의 덮개를 닫아 밀봉한 후 풍속을 고정된 송풍기를 가동시켜 비산을 발생시키면서 내부의 미산먼지 측정계를 이용하여 내부의 먼지농도를 일정간격으로 연속 측정한다. 이때 송풍기의 공기는 내부에서 환류하여 운전한다.

먼지억제제의 적용농도가 너무 크면 점도에 의하여 분사가 쉽지 않으며 토양 표면 침투력이 떨어져 적용성이 떨어지고, 먼지억제제의 적용농도가 너무 작으면 토양표면에 방진막의 형성속도가 너무 느리거나 형성자체가 불완전하여 토양입자의 응집력이 떨어질 수 있다. 따라서 예비 선정된 먼지억제제의 적용 농도별 토양입자(PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$)의 비산농도를 측정하였다.

먼지억제제 용액은 starch와 PVA(Samchun chemical) 고형물 10 g 에 증류수를 넣어 총 부피가 1 L 가 되도록 각각 제조하였다. 먼지억제제 용액의 투입량은 토양시료 250 g 의 pore volume에 해당하는 60 mL 로 정하였으며, 각 먼지억제제의 적용농도는 $0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 \text{ g/L}$ 로 정하였다. 풍속조건은 서울시 최근 5년간 평균풍속 2.3 m/s , 평균 최대풍속 7.8 m/s , 평균최대순간풍속 14.2

m/s 자료를 바탕으로, 평균최대순간풍속인 14 m/s 조건에서 풍동시험을 수행하였다. 토양시료가 담겨진 트레이는 바닥에서 20° 각도로 세워 현장 토사터미의 기울기와 유사하게 설치하였다.

2.3. 입단화 안정성 시험

먼지억제제의 장기적 효과를 알아보기 위하여 실내온도 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $45 \pm 5\%$ 조건의 실내에서 먼지억제제를 토양대비 0.05 g/L 로 적용한 12개의 현장 토양시료에 대해 1주일 간격으로 총 12주간 입단화 안정성 시험을 진행하였다.

토양의 입단화는 여러 개의 분산형태의 토양입자들이 서로 응집하여 큰 덩어리를 형성하는 것으로 토양에 적용한 먼지억제제의 미세토양의 입단화 효과가 클수록 토양 미세 먼지의 비산을 효과적으로 방지할 수 있다. 일반적으로 입단화 효과는 입단 안정성(aggregate stability) 값을 구해 판단할 수 있는데, 입단 안정성은 Kijkelkamp wet sieving apparatus(Kemper and Rosenau method, 1986)를 이용하여 다음과 같이 입단화 정도를 분석한 후, 입단 안정성(%) 식에 대입하여 계산하였다(Reinhart et al., 2016). 먼저 $1\text{--}2 \text{ mm}$ 입경범위의 토양시료를 채로 분리한 후 풍진된 4 g 의 토양(총 입자의 무게)을 wet sieving apparatus의 체(0.26 mm)에 넣은 후 최초 물에 의해 분산된 입단을 제거하고 남아 있는 입단은 분산제를 이용하여 모두 분산시킨다. 이때 사용되는 분산제의 경우 토양의 pH가 7 이상일 때는 0.2% sodium hexametaphosphate를 사용하며 pH가 7 이하 인 경우에는 0.2% NaOH를 사용한다. 본 연구에서 사용한 사양토(Sandy loam)는 pH 7.6으로 0.2% sodium hexametaphosphate를 분산제로 선정하였다. 처음 물에 의해 분산되고 남은 무게가 잔존무게이며, 분산제에 의해 제거되고 남은 무게가 입자의 질량이 되고 이상 측정된 값을 아래의 식에 대입하여 입단안정성을 계산하였다.

입단안정성(%) =

$$\frac{\text{잔존무게(g)} - \text{입자의 질량(g)}}{\text{총입자의 무게(g)} - \text{입자의 질량(g)}} \times 100$$

3. 결 과

3.1. 토성분석

채취한 6곳의 토양의 토성분석 결과 5곳은 사양토로, 1 곳은 양질사토로 판별되었다(Table 2). 5곳의 사양토 중 A지점과 양질사토인 F지점을 먼지억제제의 성능 테스트 대상으로 선정하였다. 입자분포 분석기(Fraunhofer.rf780f 모델, 측정가능범위:0.375 μm ~2000 μm)를 이용한 실험 샘플로 선정된 A 지역의 입도분포결과를 보면, 비산되어 대기오염물질로 분류되는 비산먼지인 TSP와 PM₁₀, PM_{2.5} 입자의 분포는 각각 17.0%, 6.5%, 3.0%를 나타내었으며, F 지역 양질사토의 입도분포결과는 각각 11.2%, 3.0%, 0.8%를 나타냈다(Fig. 3).

3.2. 먼지억제제 적용 효과

먼저 사양토를 대상으로 각각의 먼지억제제의 적용 농도별로 PM₁₀의 비산억제 효과를 보면(Fig. 4), 물만 주입한 대조군에 비해 starch와 PVA의 모든 적용농도조건에서 월등한 비산 억제 효과를 보여주었으며, 환경부에서 제

시한 미세먼지 일평균기준의 “좋음” 범위(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 내에 해당하는 비산된 토양 입자농도를 보여 주었다. Starch와 PVA의 경우에 전체적으로 적용농도가 높을수록 먼지 억제 효율이 증가하였으며 0.05 g/L 이상에서는 큰 차이를 보여주지 않았다.

다음으로 양질사토를 대상으로 PM₁₀의 비산억제 효과를 보면(Fig. 5) 물만 주입한 대조군에 비해 starch의 경우 농도가 증가함에 따라 우수한 비산 억제 효과를 보여주었으며, 0.5 g/L 이상의 농도에서 미세먼지 일평균기준의 “좋음” 범의 내에 해당하는 비산된 토양 입자 농도를 보여주었다. 반면 PVA의 경우 실험 조건으로 선정한 모든 농도 조건에서 물만 주입한 대조군에 비해 월등한 비산 억제 효과를 보여주었으며, 이는 미세먼지 일평균기준의 “좋음” 범위(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 내에 해당하는 비산된 토양 입자농도를 보여 주었다.

먼지억제제의 적용 농도별 사양토의 PM_{2.5} 비산억제 효과를 보면(Fig. 6), PM₁₀의 경우와 유사하게 물만 주입한 대조군에 비해 starch와 PVA의 모든 적용농도조건에서 월등한 비산 억제 효과를 보여주었으며, 가장 낮은 적용농도 0.01 g/L를 제외하고 환경부에서 제시한 미세먼지 일평균기준의 “좋음” 범위(0~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 내에 해당하는 농도 값을 보여주었다. PM₁₀에서와 같이 starch와 PVA의 경우에 전체적으로 적용농도가 높을수록 먼지억제 효율이 증

Table 2. Soil texture of collected soil

| Location | Sand (%) | Silt (%) | Clay (%) | Soil texture |
|----------|----------|----------|----------|--------------|
| A | 74.2 | 13.2 | 12.6 | Sandy loam |
| B | 66.0 | 18.5 | 15.5 | Sandy loam |
| C | 69.9 | 15.6 | 14.5 | Sandy loam |
| D | 69.1 | 16.8 | 14.1 | Sandy loam |
| E | 79.6 | 10.4 | 10.0 | Sandy loam |
| F | 85.5 | 4.5 | 9.0 | Loamy sand |

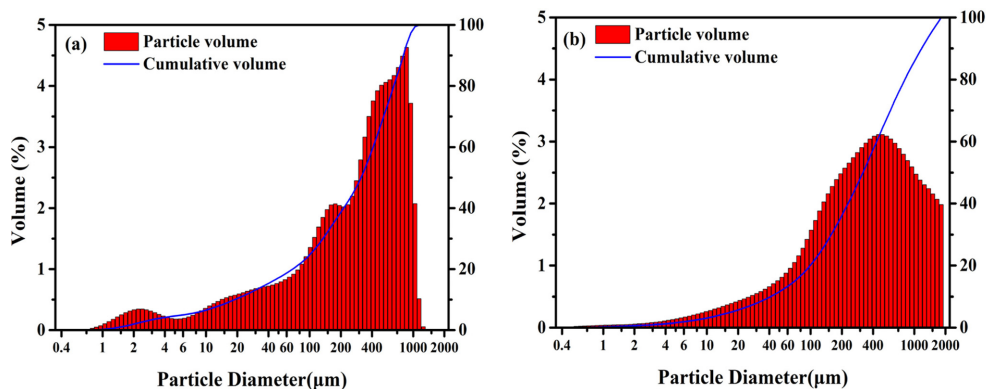


Fig. 3. Size distribution results of selected soils ((a) sandy loam, (b) loamy sand).

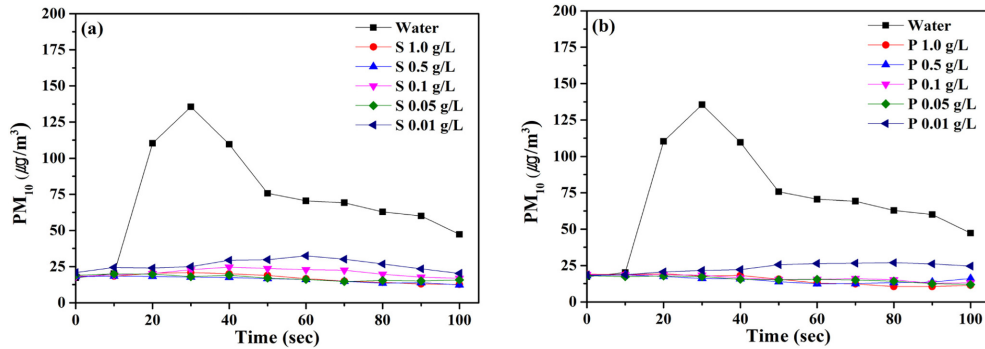


Fig. 4. PM₁₀ emissions of sandy loam soil after treated with dust suppressants ((a) starch, (b) PVA).

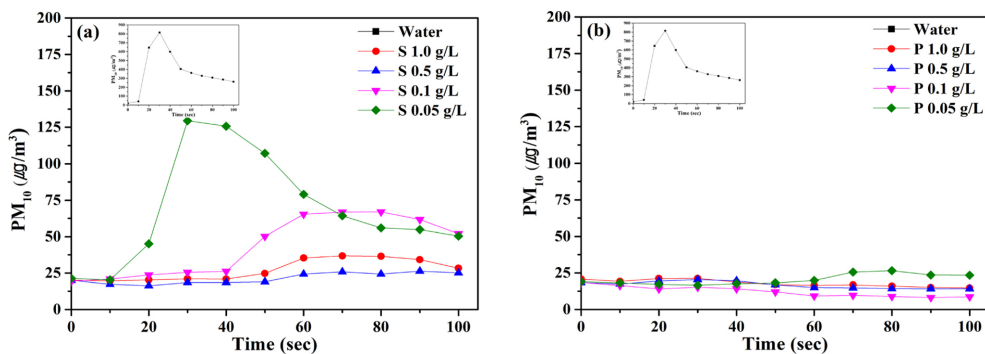


Fig. 5. PM₁₀ emissions of loamy sand soil after treated with dust suppressants ((a) starch, (b) PVA).

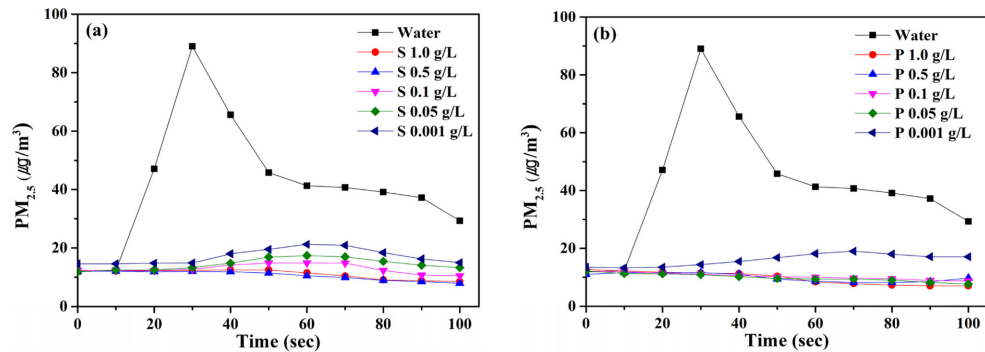


Fig. 6. PM_{2.5} emissions of sandy loam soil after treated with dust suppressants ((a) starch, (b) PVA).

가하였으며 0.05 g/L 이상에서는 큰 차이를 보여주지 않았다.

양질사토의 PM_{2.5} 비산억제 효과를 보면(Fig. 7) 물만 주입한 대조군에 비해 starch의 경우 농도가 증가함에 따라 향상된 비산 억제 효과를 보여주었으며, 0.5 g/L 이상의 농도에서 미세먼지 일평균기준의 “보통” 범위 내에 해당하는 토양 입자의 비산농도를 보여주었다. 반면 PVA의 경우 실험 조건으로 선정된 모든 농도 조건에서 물만 주입한 대조군에 비해 월등한 비산 억제 효과를 보여주었으

며, 이는 미세먼지 일평균기준의 “좋음” 범위(0~15 μg/m³) 내에 해당하는 토양 입자의 비산농도를 보여 주었다.

3.3. 시간경과에 따른 먼지억제제의 입단화 변화

Fig. 8은 순수 물을 살포한 토양(무처리구)과 PVA만 적용한 토양에 대한 시간별 토양의 입단 안정성 변화를 분석한 결과를 나타낸 그래프이다. Starch에 비해 PVA의 성능이 상대적으로 우수하여 입단 안정성 변화는 starch를 제외한 무처리구와 PVA의 차이를 비교하였다. 먼지억제

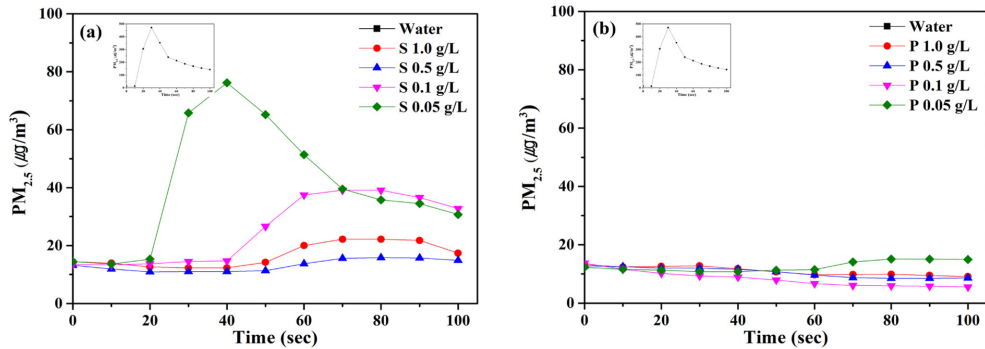


Fig. 7. $PM_{2.5}$ emissions of loamy sand soil after treated with dust suppressants ((a) starch, (b) PVA).

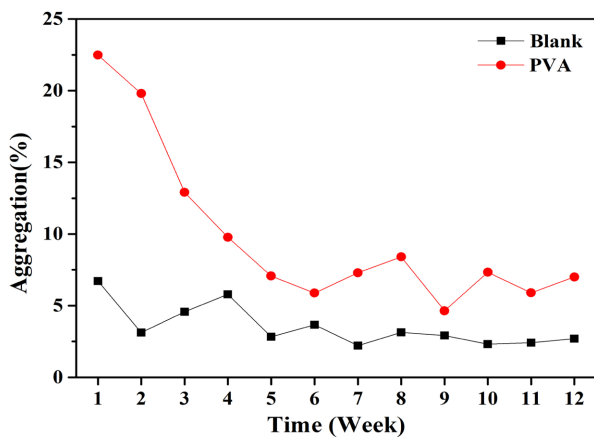


Fig. 8. Change of aggregate stability with time for treated and non-treated soils (Blank) with a dust suppressant.

제를 적용한 토양의 입단화 안정성은 물론 적용한 토양에 비해 크게 상승함을 알 수 있다. 이러한 결과는 PVA의 토양입자 간 필름형성 및 접착반응으로 인해 여러 개의 분산형태의 토양입자들을 서로 응집하여 큰 덩어리를 형성하였기 때문으로 판단된다. Fig. 8에서 보듯이 PVA 처리구의 토양 입단화 안정성은 시간이 지남에 따라 1차 함수로 점차 감소하다가 약 7주 이후에 초기 무처리구의 입단화 안정성 값에 근사한 값을 유지하는 것으로 나타났는데, 이는 시간이 경과함에 따라 PVA 중합체의 분해에 따른 토양입자들과의 필름구조가 해체되어 나타난 결과로 추측된다. 따라서 PVA의 지속적 비산방지 효과를 유지하기 위해서는 적절한 적용주기를 결정하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 서울지역 대형 건설 현장의 토양을 대상으로 starch 및 PVA의 토양미세입자의 비산 방지효과를

알아보았으며, 살수 또는 무처리구에 비하여 starch 및 PVA 모두 높은 비산억제 효과를 나타내었으며 특히 PVA의 비산억제 효과가 높은 것으로 나타났다. 토양 적용 농도에 따른 starch 및 PVA의 토양 입자의 비산 억제효과를 보면 두 경우 모두 0.05 g/L 이상에서 큰 증가는 나타나지 않아 적정 농도조건이 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 선정된 적정 농도 조건인 0.05 g/L에서 starch 및 PVA 모두 환경부 미세먼지 ‘좋음’에 해당하는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 조건을 만족함을 확인하였다. 현장 토양의 토성변화에 따른 먼지억제 효과에 대한 실험에서는 사양토에 비하여 양질사토의 경우가 무처리구에 비해 토양 입자의 비산 억제 효과가 높게 나타났는데 이는 상대적으로 미세토양이 많고 모래성분이 적은 사양토의 경우에 입자간 응집력이 좋은 반면에 모래성분이 많은 양질사토의 미세입자들은 응집력이 떨어져 쉽게 비산이 발생하여 먼지억제제를 첨가하게 되면 이러한 응집력을 높여져 비산발생이 현저히 떨어지기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

먼지억제제를 적용한 토양의 입단화 안정성은 무처리구에 비해 크게 증가하였으며, 이는 먼지비산 억제 효과와 직접적으로 연관되어 있음을 알 수 있다. 이러한 입단화 안정성은 시간에 따라 감소하는 경향을 나타내었는데 PVA 중합체의 분해에 따른 토양입자들과의 필름구조가 해체되어 나타난 결과로 추측되며 먼지억제제의 지속적 비산방지 효과를 유지하기 위해서는 적절한 적용주기를 결정하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 서울녹색지원센터(SGEC) 2019년도 연구사업(19-01-04-01-15)의 지원받아 작성하였습니다.

References

- Adhikari, M., Kim, S., Yadav, D. R., Um, Y. H., Kim, H. S., Lee, H. B., and Lee, Y. S., 2016, A New Record of *Pseudeurotium bakeri* from Crop Field Soil in Korea, *Korean J. Mycol.*, **44**(3), 145-149.
- Cohen, A. J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., and Smith, K., 2005, The global burden of disease due to outdoor air pollution, *J. Toxicol. Env. Heal. A.*, **68**(13-14), 1301-1307.
- Lu, X., Wang, Y., Li, Y., and Huang, Q., 2018, Assembly of Pickering emulsions using milled starch particles with different amylose/amylopectin ratios, *Food hydrocoll.*, **84**, 47-57.
- Park, H. J., 2018, Distribution characteristics and source identification of ambient PM10 and PM2.5 in Ulsan. Masters dissertation. Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology.
- Petkova, E. P., Jack, D. W., Volavka-Close, N. H., and Kinney, P. L., 2013, Particulate matter pollution in African cities, *Air Qual. Atmos. Hlth.*, **6**(3), 603-614.
- Reinhart, K. O. and Vermeire, L. T., 2016, Soil aggregate stability and grassland productivity associations in a northern mixed-grass prairie, *PloS one*, **11**(7), e0160262.
- Sadhu, S. D., Soni, A., Varmani, S. G., and Garg, M., 2014, Preparation of starch-poly vinyl alcohol (PVA) blend using potato and study of its mechanical properties, *Int. J. Pharm. Sci. Invent.*, **3**(3), 33-37.
- Seo, Y. H., 2011, A Laboratory Study on Short-Term Efficiencies of Chemical Dust Suppressants to Reduce Fugitive Dust. Masters dissertation. Department of Environmental Engineering, Incheon National University.
- Stokes, G. G., 1901, On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, **9**, 1-141.
- Sun, Y., Zhuang, G., Wang, Y., Han, L., Guo, J., Dan, M., Zhang, W., Wang, Z., and Hao, Z., 2004, The air-borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources, *Atmos. Environ.*, **38**(35), 5991-6004.
- Talbi, A., Kerchich, Y., Kerbachi, R., and Boughedaoui, M., 2018, Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria, *Environ. Pollut.*, **232**, 252-263.
- Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., and Wang, S., 2015, Starch retrogradation: A comprehensive review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **14**(5), 568-585.