

# 달비계 하부에 설치된 집진 장치의 사용에 따른 페인트 입자 비산 저감에 관한 연구

김한준\*, 박진한\*, 엄규영\*\*, 육세진\*<sup>#</sup>

\*한양대학교 기계공학부, \*\* (주)코멕

## A Study on the Reduction of Paint Mist Dispersion by Using a Particle Removal System Attached to a Suspended Scaffold

Han-Joon Kim\*, Jin-Han Park\*, Kyu-Young Eom\*\*, Se-Jin Yook\*<sup>#</sup>

\*Hanyang University, \*\*KOMEC Co. Ltd.

(Received 04 July 2023; received in revised form 12 July 2023; accepted 28 July 2023)

### ABSTRACT

Recently, the exterior walls of apartments are being painted using airless paint spray guns rather than paint rollers. However, despite the fact that a large amount of paint mist spreads into the atmosphere during spray painting and seriously affects workers' health and atmospheric air quality, no research has been conducted on reducing the dispersion of paint particles. In this study, the lower part of a suspended scaffold used for painting the exterior walls of apartments was modified to hold a paint particle dispersion reduction device comprising a cyclone separator, high-efficiency particulate air (HEPA) filter, and Sirocco fan. Experiments were conducted to verify the paint particle dispersion reduction efficiency of the designed device by operating it when a worker sprayed the paint mist toward the exterior wall of an apartment building. The experiments were repeated 10 times by measuring the number concentration of atmospheric particles in the vicinity of the suspended scaffold using an optical particle counter with or without operating the paint particle dispersion reduction device, and the paint particle dispersion reduction efficiency was determined to be 69% on average. Therefore, the designed device is expected to be extremely effective in reducing the dispersion of paint particles generated during painting using airless spray guns.

**Keywords** : Particulate Matter(입자상 물질), Paint Particle(페인트 입자), VOCs(휘발성유기화합물), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Reduction(저감)

### 1. 서 론

최근 들어 대기 중에 떠 있는 입자상 물질 (Particulate Matter; PM)인 미세먼지가 인체에 끼치는 유해성이 알려지면서 여러 산업 분야에서 미세먼지의 발생을 줄이려는 노력이 활발히 이루어지고

있는데, 실외 도장 산업에서 페인트 스프레이에 의해 발생하는 비산먼지를 저감하려는 노력도 그 중 하나이다. 초기 실외 도장 작업은 롤러나 브러시를 이용하여 원하는 표면에 페인트를 직접 바르는 방식이었으나, 현재는 스프레이 도장 방식을 많이 선호한다.<sup>[1]</sup> 이는 작업 속도 측면에서 약 2배 이상 차이 나며, 아파트 외벽에 요철면이 있는 경우에는 최대 4배까지 차이 나기 때문이다. 또한 도장 공사 비용에 있어서 노무비가 큰 비중을 차지하는 것을

<sup>#</sup> Corresponding Author : ysjnuri@hanyang.ac.kr

고려하면, 시간과 비용을 50% 이상 절감할 수 있다는 장점이 있으므로 실외 도장 산업에서는 스프레이 도장 방식을 많이 활용하는 추세이다.

스프레이 도장 시 분사되는 페인트 입자 중 상당량이 물체 표면이나 벽면에 침착되지 못하고 대기 중으로 비산되는데 이를 페인트 비산먼지라고 한다. 대기 오염은 다양한 배출원에 의해 발생하는데, 페인트 비산먼지도 그 원인 중 하나이다<sup>[2]</sup>. 특히 건물 외벽 도장 시 발생하는 페인트 비산먼지는 인체에 유해한 성분인 크로뮴 6가 화합물, 납, 포름알데히드, 톨루엔, 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compound, VOC) 등이 포함되어 있기 때문에<sup>[3]</sup>, 사람의 피부와 호흡기에 닿으면 피부질환, 만성 폐쇄성 폐질환, 신경계 장애 등을 유발할 수 있다<sup>[4,6]</sup>.

이에 따라 국내외 여러 나라에서는 도장 작업을 줄이기 위해 환경 기준을 강화하고 있고, 이에 발맞추어 페인트 비산먼지 관련하여 다양한 연구가 이루어지고 있다. Malherbe & Mandin은 도료 및 용제를 사용하는 실외 도장 작업 시 배출되는 VOC에 초점을 두어 VOC의 대기 중 분산에 대하여 시뮬레이션하고, 도장 작업자 및 인근 지역 주민의 VOC 흡입에 의한 위해성을 평가하는 연구를 진행하였다<sup>[7]</sup>. Parmar & Rao는 VOC 처리에 대한 기존 접근 방식을 바탕으로 산화 및 생물학적 혹은 플라즈마 처리, 광촉매, 막 분리 등의 여러 제어 방법을 제안하는 연구를 진행하였다<sup>[8]</sup>. Kinney & Moe는 생물학적 여과 시스템을 이용하여 도장 설비에 적용될 수 있는 VOC 제어 기술을 제안하였다<sup>[9]</sup>. 그러나, 페인트 도장 작업 시 대기 중으로 비산되는 페인트 입자를 직접적으로 저감하는 장치 개발과 관련된 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 실외 도장 작업장에서 사용되는 달비계(suspended scaffold)에 설치될 수 있도록 페인트 비산먼지 저감 장치를 설계하고 그 성능을 파악하였다.

## 2. 실험 방법

Fig. 1은 실외 도장 작업에 사용되는 달비계에 설치될 수 있도록 설계된 페인트 비산먼지 저감 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 에어리스 페인트 스

프레이건(airless paint spray gun)에 연장관을 설치한 뒤 연장관 끝에 싸이클론 집진기와 High Efficiency Particulate Air(HEPA) 필터를 장착하였다. 대기 중으로 비산되는 페인트 입자를 흡입하기 위해 페인트 분무 노즐을 둘러싸는 원통형 유입구를 설치했는데, 노즐의 분사각 68°를 고려하여 분사되는 페인트 미스트가 원통형 유입구 벽에 닿지 않도록 지름과 높이를 각각 250mm 및 150mm로 정하였다. 유입구로부터 흡입된 공기가 달비계 하부에 설치되어 있는 챔버로 들어갈 수 있도록 원통형 유입구의 하단은 지름이 보다 작은 관과 연결되었다. Fig. 2는 실제 제작된 원통형 유입구의 사진을 보여주는 것이다. 원통형 유입구의 경량화를 위해, 뼈대 부분은 poly lactic acid (PLA) 소재를 사용하여 3차원 출력 방식으로 제작하였고 그 둘레 내부에 투명한 얇은 플라스틱 필름을 설치하여 원통형 벽면을 형성하였다. 원통형 유입구를 통해 흡입된 페인트 비산먼지가 달비계 하부에 설치된 챔버로 유입될 수 있게끔 하기 위해, Fig. 2에 보이는 유입구 하단의 좁은 관은 가벼운 플라스틱 소재의 플렉시블 덕트(flexible duct)를 사용하여 챔버와 연결되었다.

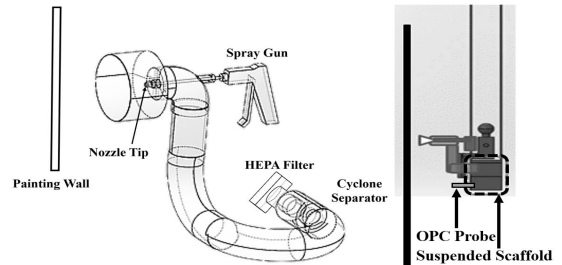


Fig. 1 Schematic of the paint dust reduction device installed on a suspended scaffold

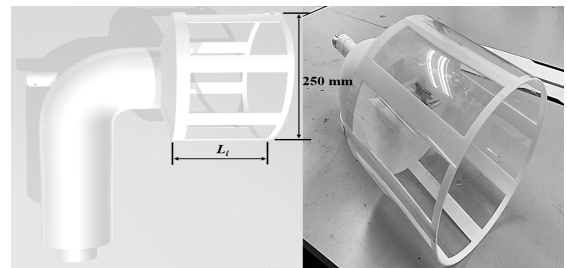


Fig. 2 Photo of the cylindrical inlet

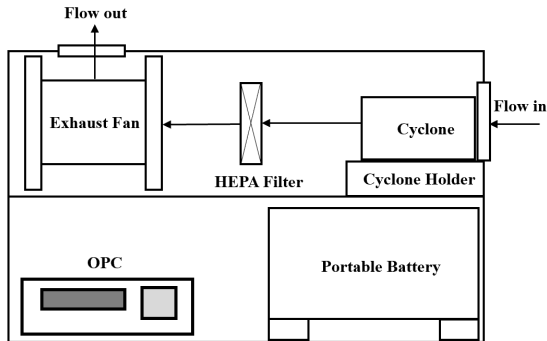


Fig. 3 Schematic of the chamber attached to the bottom of a suspended scaffold

Fig. 3은 달비계 하부에 설치된 챔버의 내부 구조이다. 챔버는 알루미늄 소재의 얇은 판으로 만들어졌고, 챔버의 크기는 550mm×300mm×500mm이었다. 챔버는 달비계 하부에 용접하여 설치되었다. 챔버 내부는 두 개의 층으로 구성되었는데, 위층에는 페인트 입자를 집진하기 위한 시스템이 설치되었고 아래층에는 전원 공급을 위한 배터리 팩과 입자 수농도 측정을 위한 Optical Particle Counter (OPC; Model 1.109, GRIMM, Ainring, Bayern, Germany)가 설치되었다. 페인트 입자 집진 시스템은 축상유입식 싸이클론 집진기(axial flow cyclone separator), HEPA 필터, 그리고 시로코팬으로 구성되었다. 싸이클론 집진기는 절단직경이 2.5 $\mu$ m가 되도록 설계되었기 때문에, 2.5 $\mu$ m보다 큰 입자는 싸이클론 집진기에 포집되었고 그보다 작은 입자는 HEPA 필터에 포집되었다. 싸이클론 집진기와 HEPA 필터에 의해 여과되어 깨끗해진 공기는 시로코팬을 거쳐 챔버 밖의 대기로 배출되었다.

페인트 비산먼지 저감 장치의 성능을 평가하기 위해 모 아파트의 외벽 재도장 작업 현장에서 실험을 진행하였는데, Fig. 1의 오른쪽에 나타난 것처럼 페인트 비산먼지 저감장치가 설치된 달비계에 작업자가 탑승하여 지상으로부터 1.5m 높이에서 아파트 외벽 재도장 작업을 진행하면서 저감장치 사용 여부에 따라 대기 중으로 비산되는 페인트 입자의 수농도를 측정하였다. 원통형 유입구를 통해 흡입되어 싸이클론 집진기와 HEPA 필터를 통해 여과되는 공기의 유량은 800L/min으로 설정하였다. 달비계

하부에 설치된 챔버 밖에 설치된 프로브를 통해 샘플링되어 OPC로 유입된 공기의 유량은 1.2 L/min이었다. 실험이 진행되는 동안 대기의 온도와 상대습도는 각각 25 $\pm$ 1.0 $^{\circ}$ C 및 50 $\pm$ 5%이었는데, 이는 도장시 페인트의 도막 균열과 부착 불량이나지 않는 조건으로 충분하였다.

실험에 의한 페인트 비산 저감효율은 다음의 식을 사용하여 구하였다.

$$Reduction\ Efficiency\ (\%) = \frac{N_{without} - N_{with}}{N_{without}} \times 100(\%)$$

여기서,  $N_{with}$ 는 페인트 비산 저감 장치를 적용하였을 때의 대기 중 입자 수농도이고,  $N_{without}$ 은 페인트 비산 저감 장치를 적용하지 않았을 때의 대기 중 입자 수농도이다.

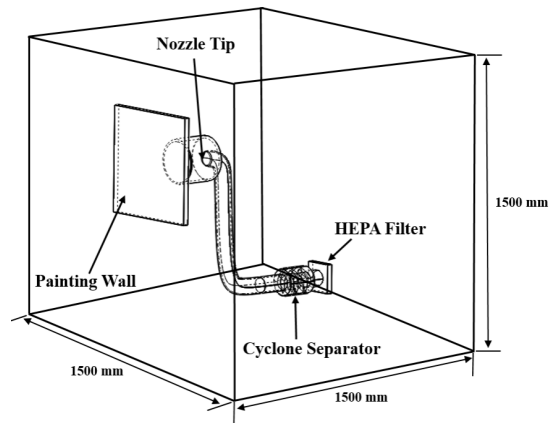


Fig. 4 Schematic of CFD domain and boundary conditions

Table 1 Design parameters for the cylindrical inlet

Case	Cylindrical Inlet Length $L_i$ (mm)	Sampling Flowrate (L/min)
1	100	400
2	100	800
3	100	1200
4	150	400
5	150	800
6	150	1200

### 3. 수치해석 방법

페인트 비산먼지의 흡입에 영향을 주는 원통형 유입구의 길이( $L_i$ )와 집진을 위한 흡입 유량을 결정하기 위해, Table 1에 보인 바와 같이 6개의 경우에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 4와 같이 페인트 스프레이 노즐, 원통형 유입구, 싸이클론 집진기, 그리고 HEPA 필터를 고려하여 수치해석을 진행하였다. 격자를 구성하고 경계 조건을 설정하기 위해 Gambit을 사용하였다. Tetra/Hybrid TGrid를 사용하여 격자를 구성했는데, 페인트 스프레이 노즐 팁 부분에는 간격을 0.1로 그리고 축상유입식 싸이클론 집진기의 각 베인(vane) 부분에는 간격을 3으로 설정하였다. 그 외의 나머지 부분에 대해서는 Tetra/Hybrid TGrid 타입으로 간격을 10으로 설정하여 격자를 생성하였다.

격자 생성 이후, 공기의 유동과 페인트 입자의 거동을 해석하기 위해 ANSYS FLUENT Release 19.1을 사용하였다. 압력과 온도를 각각 101.3kPa 및 25°C로 설정하였다. 공기의 유동은 정상상태, 비압축성, 난류인 것으로 가정하였다. 난류 해석을 위해 standard  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였다. 해석에 사용된 pressure-velocity coupling scheme, momentum equation scheme으로는 각각 PRESTO와 QUICK를 사용하였다. 모든 방정식에 대한 수렴 조건은  $10^{-5}$ 으로 설정하였다. 원통형 유입구와 싸이클론 집진기 내부의 모든 벽면에 no-slip 조건을 적용하였다. 유동 해석을 위한 경계 조건은 다음과 같다. 스프레이건의 노즐 팁에 대하여서는 실험에 사용된 에어리스 페인트 스프레이와 동일한 분사 속도인 550 m/s를 velocity inlet 조건으로 부여하여 페인트 입자가 분사되는 것을 구현하였다. 싸이클론 집진기에 mass flow outlet 조건을 부여하여 필요한 흡입 유량을 구현하였다. HEPA 필터 하류에는 공기 토출을 위해 pressure outlet 조건을 설정하였다.

페인트 비산 저감장치의 성능을 예측하기 위해 FLUENT에 내장된 입자 해석 코드인 Discrete Phase Models(DPM)을 사용하였다<sup>10)</sup>. 대기 에어로졸의 일반적인 수농도를 고려하여 저감 장치로 유입되는 입자의 수농도는 충분히 낮다고 가정하였고, 이에 따라 입자의 거동이 유동에 미치는 영향은 무시하

였다. 입자는 구형이며 입자의 밀도는  $1,000\text{kg/m}^3$ 으로 가정하여 입자의 공기역학적 크기를 고려하였다. 스프레이건의 노즐 끝에서  $0.1\mu\text{m}$ 부터  $10\mu\text{m}$ 까지 다양한 크기의 입자가 분사되도록 설정하였다. 입자 해석을 위한 경계조건은 다음과 같이 설정하였다. 페인트가 분사되는 노즐 끝에는 escape 조건을 적용하였고 도장면과 그 주변 공간(대기라고 가정한 벽면)에는 trap 조건을 설정하여, 도장면에 부착되는 입자의 수와 공기 중으로 비산되는 입자 수를 따로 계수할 수 있도록 하였다. 싸이클론 집진기와 HEPA 필터에는 trap 조건을 부여하여 입자가 포집되는 것을 구현하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Table 1에 나타난 원통형 유입구의 길이와 흡입 유량에 따른 저감효율을 예측한 시뮬레이션 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 원통형 유입구 길이의 설정에는 노즐 끝과 도장면과의 거리, 작업자의 분사 동작 등이 고려되었다. 시뮬레이션 결과로부터 Case 6의 저감효율이 가장 높게 나타났으나, 흡입 유량을 1200 L/min으로 설정하여 실험을 진행하기 위해 필요한 시로코팬의 크기가 달비계 하부에 설치되기에 적합하지 않은 것으로 파악되었다. 이에, 보다 가볍고 작은 시로코팬으로 구현 가능한 흡입 유량인 800L/min 조건에서 저감효율이 가장 높게 나타난 Case 5를 최적 조건으로 선정하였다. 따라서 원통형 유입구의 길이는 150mm, 흡입 유량은 800L/min으로 최종 선정하여 원통형 유입구를 제작하였다.

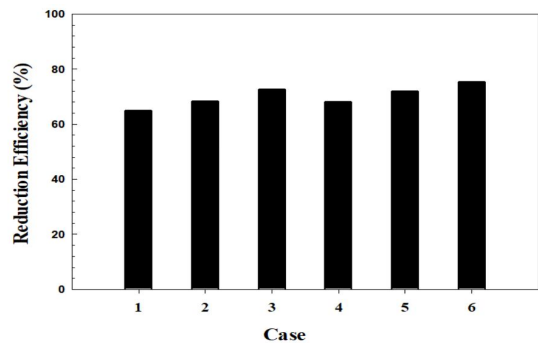
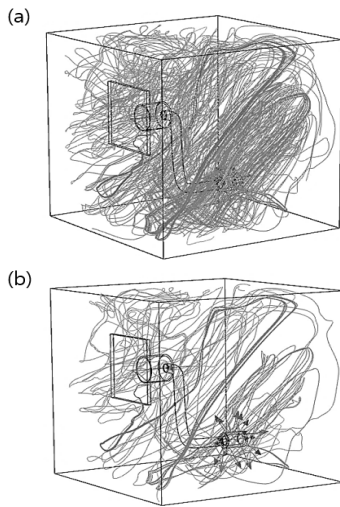
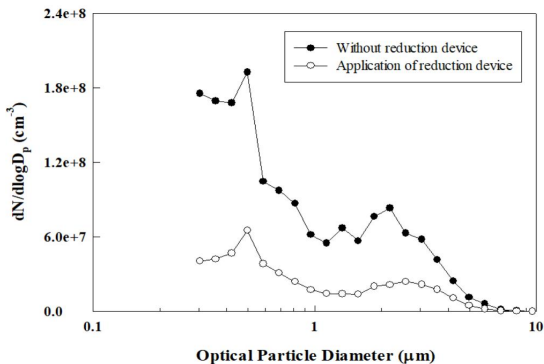


Fig. 5 Simulation results of the reduction efficiencies for the cases listed in Table 1

Fig. 6은 저감 장치의 작동 여부에 따른 페인트 입자의 거동을 예측한 결과를 보여준다. Fig. 6(a)와 같이 저감 장치의 흡입 유량이 0인 경우에는 많은 수의 페인트 입자가 주변으로 비산되는 반면, Fig. 6(b)와 같이 저감 장치의 흡입 유량이 800L/min인 경우에는 분사된 페인트 입자들의 상당수가 저감 장치로 유입되기 때문에 주변으로 비산되는 페인트 입자의 수가 크게 줄어들 것으로 예측되었다.

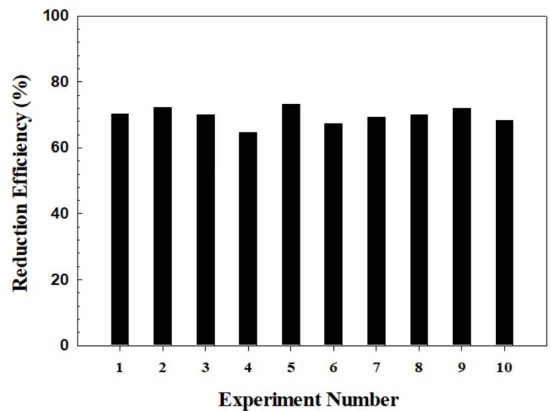


**Fig. 6** Simulation results of particle trajectories : (a) without reduction device (b) with reduction device



**Fig. 7** Comparison of the number concentration of paint particles dispersed in the air according to the application of both cyclone separator and HEPA filter

페인트 비산 저감 장치의 효과를 검증하고자 아파트 외벽 재도장 작업 현장에서 저감 장치 사용 유무에 따른 실험을 진행하였다. 스프레이 분사 전 5분, 분사 시 5분, 분사 후 5분씩 총 15분간 OPC를 사용하여 재도장 작업자 근방에서 대기 중 미세먼지의 수농도를 측정하였다. Fig. 7은 싸이클론 집진기와 HEPA 필터의 설치 유무에 따라 대기 중으로 비산된 페인트 입자의 크기별 수농도를 측정 한 실험 결과이다. 우선 집진장치가 전혀 설치되지 않았을 때에는, 에어리스 페인트 스프레이건을 사용한 도장 작업 시 대기 중으로 비산되는 페인트 입자들이 대부분 10µm보다 작아서 PM<sub>10</sub> 입자가 많이 비산되는 것을 확인할 수 있다. 수농도 분포가 2µm 근방에서 낮은 고점을 형성하였고, 특히 sub-µm 영역에서 상당히 많은 수의 입자들이 비산되는 것으로 나타났다. 한편, 싸이클론 집진기와 HEPA 필터가 함께 설치된 경우에는, 집진기가 전혀 없는 경우와 비교하여 마이크로미터 크기 입자 뿐만 아니라 sub-µm 영역의 입자 크기에 대해서도 페인트 입자 비산 저감 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 마이크로미터 크기 입자들은 싸이클론 집진기에서 주로 포집되고 싸이클론 집진기를 통과한 입자들은 하류에 설치된 HEPA 필터에서 많이 포집되었기 때문이다. 입자 크기별로 저감효율은 다르지만 최대 71%까지 저감되는 것으로 확인되었다.



**Fig. 8** Repeated experimental results of reduction efficiency of paint dust reduction device equipped with both cyclone separator and HEPA filter

Fig. 8은 에어리스 페인트 스프레이건을 사용하여 페인트 도장 작업을 할 때 사이클론 집진기와 HEPA 필터의 동시 사용 여부에 따른 대기 중 페인트 입자 비산 저감효율을 반복 측정된 결과를 보여준다. 실험을 총 10회 반복 진행하였고, 각 반복 시의 저감효율을 나타내었다. 실외에서 실험이 진행되었기 때문에 매 반복 측정 시마다 풍속, 풍향 등 대기 조건이 실시간으로 변화하였고 또한 반복 실험 간의 페인트 도장 작업자의 손동작의 차이 등으로 인해 매 측정 시마다 페인트 입자 비산 저감효율이 조금씩 다르게 측정되었다. 총 10회 반복 진행한 실험 결과로부터, OPC로 측정되는 모든 입자 크기 범위에 대해 페인트 입자 비산 저감효율은 입자 수농도 기준으로 평균 69%인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 고안한 페인트 입자 비산 저감장치를 사용하면 실외 도장 작업 시 대기 중으로 비산되는 페인트 입자의 수를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 아파트 외벽 도장 작업 중에 발생하는 페인트 비산먼지를 저감할 수 있는 방안으로 달비계 구조를 활용한 챔버 내 구성을 제안하였다. 챔버 안에는 싸이클론 집진기, HEPA 필터, 그리고 시로코팬을 사용하여 저감 장치를 구성하였다. 또한편으로는, 에어리스 페인트 스프레이건에 연장관 및 원통형 유입구를 설치하여 페인트 분무 시 대기 중으로 비산되는 페인트 미스트를 흡입할 수 있는 구조를 고안하였고, 이를 플렉시블 덕트를 이용하여 달비계 하부에 있는 저감 장치와 연결하였다. 시뮬레이션 결과를 기반으로 하여 페인트 입자 비산 저감 장치를 설계 및 제작하여 달비계 하부에 설치하였고, 저감 장치 적용 유무에 따른 페인트 입자 비산 저감효율을 실험을 통해 평가하였다. 총 10회의 반복 실험을 진행한 결과, 본 연구에서 제안하는 저감 장치를 활용하면 실외 도장 작업 시 대기 중으로 비산되는 페인트 입자의 수를 평균 69% 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 고안한 저감 장치를 사용하면 건축물 외벽 도장 작업 현장 주변에서 페인트 입자가 대기 중으로

비산되어 대기 오염을 유발하는 것을 효과적으로 저감함으로써 도장 작업자뿐만 아니라 도장 공사 현장 인근 거주자들에 대한 위해성 저감 및 시설품 오염 저감 효과가 클 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 환경부 “미세먼지 사각지대 해소 저감 실증화”로 지원받은 과제임 (No. 2020003060010).

## REFERENCES

1. He, Z., Ye, M., Ni, Q. and Ding, J., “Application of aeration spray technology in China and its reduction effects in VOCs control,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 611, pp. 012058, 2019.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/611/1/012058>
2. Bari, M. A. and Kindziński, W. B., “Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: Sources and screening health risk assessment,” Science of the Total Environment, Vol. 631-632, pp. 627-640, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.023>
3. Yue, D., Hu, M, Wu, Z., Wang, Z., Guo, S., Wehner, B., Nowak, A., Achtert, P., Wiedensohler, A., Jung, J., Kim, Y. J. and Liu, S., “Characteristics of aerosol size distributions and new particle formation in the summer in Beijing,” Journal of Geophysical Research, Vol. 114, pp. D00G12, 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2008JD010894>
4. van Valen E., van Thriel, C., Akila, R., Nilson, L. N., Bast-Pettersen, R., Sainio, M., van Dijk, F., van der Laan, G., Verberk, M. and Wekking, E., “Chronic solvent-induced encephalopathy: European consensus of neuropsychological characteristics, assessment, and guidelines for diagnostics,” NeuroToxicology, Vol. 33, pp. 710-726, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuro.2012.03.010>
5. Tse, L. A., Yu, I. T., Au, J. S. K., Qiu, H. and Wang, X., “Silica dust, diesel exhaust, and painting work

- are the significant occupational risk factors for lung cancer in nonsmoking Chinese men,” *British Journal of Cancer*, Vol. 104, pp. 208–213, 2011.  
<https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6606006>
6. Zhou, X., Gao, Z., Wang, X. and Wang, F., “Mathematical model for characterizing the full process of volatile organic compound emissions from paint film coating on porous substrates,” *Building and Environment*, Vol. 182, pp. 107062, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107062>
  7. Malherbe, L. and Mandin, C., “VOC emissions during outdoor ship painting and health-risk assessment,” *Atmospheric environment*, Vol. 41, pp. 6322–6330, 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.018>
  8. Parmar, G. R. and Rao, N. N., “Emerging control technologies for volatile organic compounds,” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 39, pp. 41–78, 2009.  
<https://doi.org/10.1080/10643380701413658>
  9. Kinney, K. A. and Moe, W. M., “Optimization of an innovative biofiltration system as a VOC control technology for aircraft painting facilities,” TEXAS UNIV AT AUSTIN, United States, 2004.
  10. Youn, M. S. and Kim, Y. J., “Optimization of breakup model constants for numerical analyses of a dual-fluid nozzle,” *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 24, pp. 37–43, 2021.