

초미세기포 water jet을 이용한 도로 시설물 분진 제거 효율 평가

김현진*, 박일건

(주)평화엔지니어링 기술연구원
14056 경기도 안양시 동안구 학의로 250 관양두산벤처다임

(2020년 12월 23일 접수; 2021년 1월 13일 수정본 접수; 2021년 1월 15일 채택)

Evaluation of Dust Removal Efficiency on Roadway Structures Using Ultrafine Bubble Water Jet

Hyun-Jin Kim*, and Il-gun Park

Pyunghwa Engineering Consultants Inc. R&D Institute
Gwangyang Doosan Venture Dime, 250 Hagui-ro, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 14056 South Korea

(Received for review December 23, 2020; Revision received January 13, 2021; Accepted January 15, 2021)

요 약

4 HP, 80 LPM 급 초미세기포수 발생장치를 탑재한 도로 구조물 세척차량을 이용하여 도시 내 아파트 단지 주변 차량 통행이 많은 터널 내 콘크리트 표면과 타일 벽면을 세척하였다. 초미세기포 생성은 대기 중 공기를 2~3 LPM 으로 기액혼합 자흡펌프로 가압된 공기를 임펠러 회전력을 이용하여 마이크로 크기의 미세기포(fine-bubble)를 생성한다. 생성된 기포를 다단충돌판과 회전 노즐을 통과하면서 평균 직경 크기는 164.5 nm, 6.81×10^7 particles mL⁻¹의 초미세기포(ultrafine bubble)를 생산하였다. 생산된 초미세기포를 함유한 세척수는 압력 150 bar, 토출량 30 LPM 으로 도로 구조물 표면에 흡착된 분진을 고압세척 분사하여 제거하였다. 분석실험은 세척 전과 후로 구분하여 표면에 흡착된 분진을 ISO 8502-3의 표면 오염 측정방법을 적용하였으며, 테이프 흡착으로 분진 입자를 채취하였다. 수집된 테이프는 중량법과 소프트웨어 ImageJ를 적용하여 분진의 무게와 입자 개수에 대한 제거율을 산정하였다. 실험 결과, 타일 벽면 표면에 흡착된 분진 입자 개수는 세척 전과 후로 각각 3,063 ± 218 particles mL⁻¹, 20 ± 5 particles mL⁻¹, 중량은 580 ± 82 mg, 13 ± 4 mg 으로 나타났다. 콘크리트 구조물 표면에서의 입자 개수는 세척 전과 후로 각각 8,105 ± 1,738 particles mL⁻¹, 39 ± 6 particles mL⁻¹이었으며, 중량은 1,448 ± 190 mg, 118 ± 32 mg 으로 나타났다.

주제어 : 분진, 초미세기포, ImageJ, 터널 세척, 워터젯

Abstract : A road structure washing vehicle equipped with a 4 HP, 80 LPM ultrafine bubble generator was used to clean a tunnel wall and the surface of the surrounding structure, consisting of concrete and tiles, in a heavy traffic area around an apartment complex in the city. Ultrafine bubbles were generated by supplying air at 2 to 3 LPM and using a specially designed nozzle, whereas fine bubbles made by an impeller in a gas-liquid mixing self-priming pump were produced with an average diameter of 165.4 nm and 6.81×10^7 particles mL⁻¹. Using a high pressure washer gun that can perform high-pressure cleaning at 150 bar and 30 LPM, ultrafine bubbles were used to wash dust adsorbed on the surface of the road structures. The experimental analysis was divided into before and after washing. The samples were analyzed by applying ISO 8502-3 to measure surface contamination of dust adsorbed on the surface. Using the transparent tape attached to the surface, the removal rate was calculated by measuring the weight of the dust, and the number of particles was calculated using the gravimetric method and the software, ImageJ. The results of the experiment showed that the number of dust particles adsorbed on the tile wall surface before and after washing were 3,063 ± 218 particles mL⁻¹ and 20 ± 5 particles mL⁻¹, respectively, with weights of 580 ± 82 mg and 13 ± 4 mg. Particles on the surface of the concrete structure before and after washing were 8,105 ± 1,738 particles mL⁻¹ and 39 ± 6 particles mL⁻¹, respectively, with weights of 1,448 ± 190 mg and 118 ± 32 mg.

Keywords : Dust, Ultrafine bubble, ImageJ, Tunnel cleaning, Water jet

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hjkim0126@pec.kr; Tel: +82-31-420-7263; Fax: +82-31-420-7331

doi: 10.7464/ksct.2021.27.1.39 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서론

21세기에 들어서 중국발 황사와 미세먼지가 편서풍을 따라 우리나라에 직간접적으로 영향을 미치고 있다. 또한, 국내 제조산업의 급격한 발달, 도심지 내 고층건물 밀집, 그리고 자동차 수요의 증가로 미세먼지가 증가추세에 있으며, 생활 환경 주변에 미세먼지의 비산으로 도로 주변에 거주하고 있는 거주자들의 인체 건강을 위협하고 있다[1-5]. 미세먼지(fine dust)는 미세입자 상에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 로 일반적으로 구분되는데, 특히 초미세먼지에 장기간 노출 시, 사람의 호흡기와 심장순환계에 심각한 타격을 주어 수명 8% 이상이 감소된다는 연구 결과가 있다[2]. 미세먼지의 구성은 황사를 포함한 여러 가지 금속물질, 유기물질, 바이러스, 조류 및 곰팡이 등이 존재할 뿐만 아니라 발암성 물질도 포함하고 있다[3-5]. 미세먼지는 연무나 박무 현상이 동반될 때, 미세입자 농도가 급격히 증가되는 현상이 관찰되었는데, 국내의 경우 겨울과 봄에는 생체연소배출원, 연료연소, 비산먼지에 의한 고농도 미세먼지가 관찰되었으며 여름철에는 자동차 배출원이 가장 큰 원인으로 추정되고 있다[6-8]. 자동차에서 발생하는 미세먼지는 주로 $PM_{2.5}$ 가 대부분이며 도로 비산먼지의 대상물질로 도로표면이나 주변 시설물 표면에 쌓였다가 자동차의 주행 혹은 바람에 의해 재비산 된다[9,10]. 비산먼지를 포함한 미세먼지는 터널이나 지하차도와 같이 주로 차량운행이 많고 먼지입자들이 흡착할 수 있는 매개체가 존재하는 도로 구조물 표면에 흡착하여 쌓이는데 이는 미세먼지와 비산먼지의 저장소 역할을 하고 있다[11].

최근 환경부와 전국 17개 시도는 미세먼지 계절관리제의 하나로 도로 미세먼지 집중관리도로를 지정하고 도로 청소차를 확대 운영하고 있는데 도로 지면 위주의 청소차량 운영으로 도로 노면인 측구 및 중앙선 구조물에 흡착된 미세먼지 청소 시행이 미흡한 실정이다[12]. 본 연구에서는 초미세기포(ultrafine bubble)을 이용하여 표면에 흡착된 입자, 유기물, 무기물, 금속산화물 등을 화학약품 없이 제거가 가능하고, Park et al. [13]의 선행연구 결과를 바탕으로 초미세기포 고압 세척수를 이용하여 시흥시 내 복합터널의 타일벽면과 콘크리트 구조물 표면 세척에 대한 실험을 실시하였다. 이때 제거된 표면 분진의 입자수와 중량을 분석하여 초미세기포수 생성장치(ultrafine bubble generator,

UFBG)의 표면 분진 제거 효율성을 평가하고자 한다[13-18].

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험 장소 및 조건

본 실험은 2020년 9월 22일 경기도 시흥시 능곡동에 위치한 능곡선사유적공원 능곡지하차도 내에서 실시되었으며, 실험 대상은 지하차도 내 타일 벽면과 보행도로 웬스 기초 콘크리트 구조물을 선정하였으며, Figure 1과 같이 세척면적을 각각 $2,500\text{ cm}^2$ 구획으로 나누어 4지점씩 임의로 선정하여 실험하였다. 실험하는 동안 기온은 $21.2\sim 22.2\text{ }^\circ\text{C}$, 실험 대상군인 타일 벽면과 콘크리트 구조물의 표면 온도는 각각 $19.8\text{ }^\circ\text{C}$, $17.4\text{ }^\circ\text{C}$ 으로 나타났으며, 바람은 서풍(249°)에서 2 m s^{-1} 의 풍속으로 미세먼지(PM_{10}) 농도 $15\sim 25\text{ ppm}$ 를 동반하였다. 날씨 인자 값은 The Norwegian Meteorological Institute [19]에서 제공된 데이터를 참조하였고, 미세먼지(PM_{10}) 농도값은 한국환경공단의 도로 재비산먼지 관리시스템[20]의 도로 먼지지도 측정정보와 현장에서 광산란방식 분진 측정기 DUST-MON (Sentry, Korea)를 이용하여 5분 간격으로 실시간 관측하였다.

2.2. 초미세기포 생성 및 세척 장치

본 연구에서 개발된 초미세기포 생성장치(UFBG)는 Figure 2와 같이 제작되었고, 직경 $1,000\text{ nm}$ 이하 크기의 초미세기포를 생산하여 세척차량(Figure 3)의 200 L 수조에 저장하였다. 초미세기포 발생 장치는 기액 혼합펌프, 공기유량계, 압력계, 압력 밸브, 노즐 등으로 구성되었으며, 기액 혼합비 $0.08\sim 0.1$ 에서 캐비테이션 현상을 이용하여 제조하였다. 기액 혼합펌프는 유입된 기체와 액체를 펌프 실린더에 음압(negative pressure)을 가해주는데, 이때 대기 중의 공기 $2\sim 3\text{ LPM}$ 로 흡입하여 압력 $2.5\sim 3\text{ bar}$ 로 가압한다. 그 후, 다단충돌판과 회전충돌 붕괴노즐을 통과하면서 미세(fine) 크기에서 초미세(ultrafine) 크기로 잘게 쪼개지면서 초미세기포수가 생성된다[13]. 기포의 직경 $10\text{ }\mu\text{m}$ 이하일 때, 브라운 운동(brownian motion)과 함께 $-30.51 \pm 0.82\text{ mV}$ 의 제타 전위값을 갖는 안정화된 콜로이드 형태로 존재하게 된다[18]. 제타 전위를 갖는 초미세기포는 세정제 효과를 나타내어 표면에 흡착된 유기·무기성 입자를 제거할 수 있다[14-16]. 또한, 초미세기포가 응집되었다가 팽창하면



Figure 1. The surface area of roadway underpass structure for dust cleaning between (a) tile wall; (b) concrete pad foundation; (c) pressurized water jet cleaning.

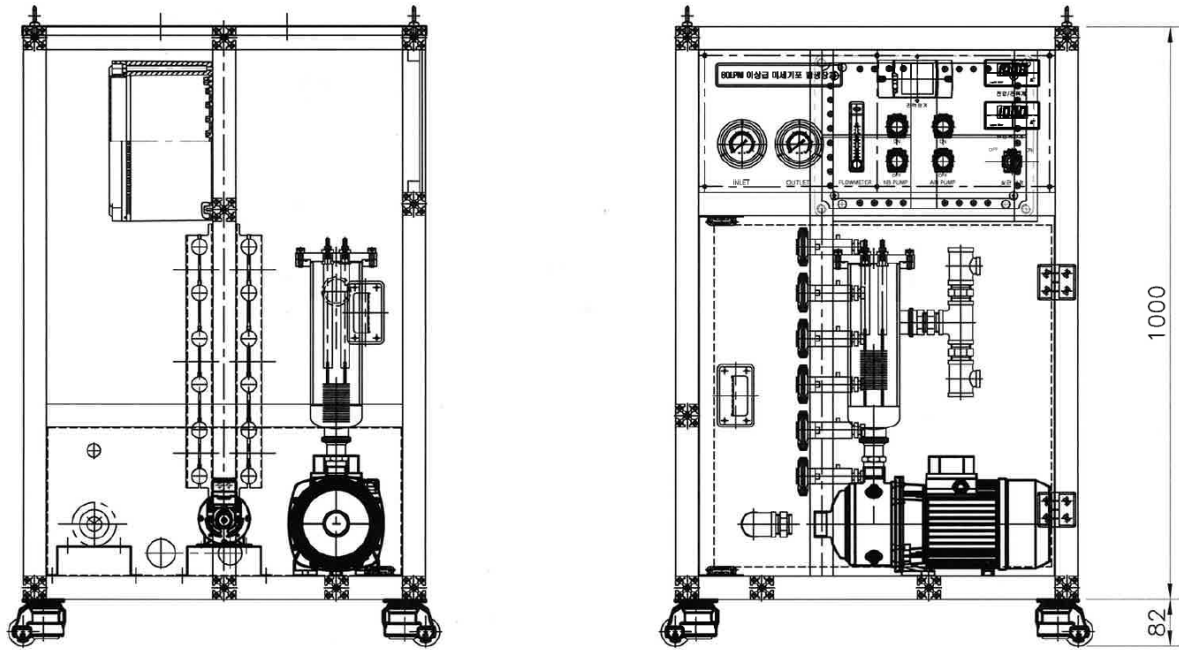


Figure 2. A schematic diagram of the ultrafine bubble generator.

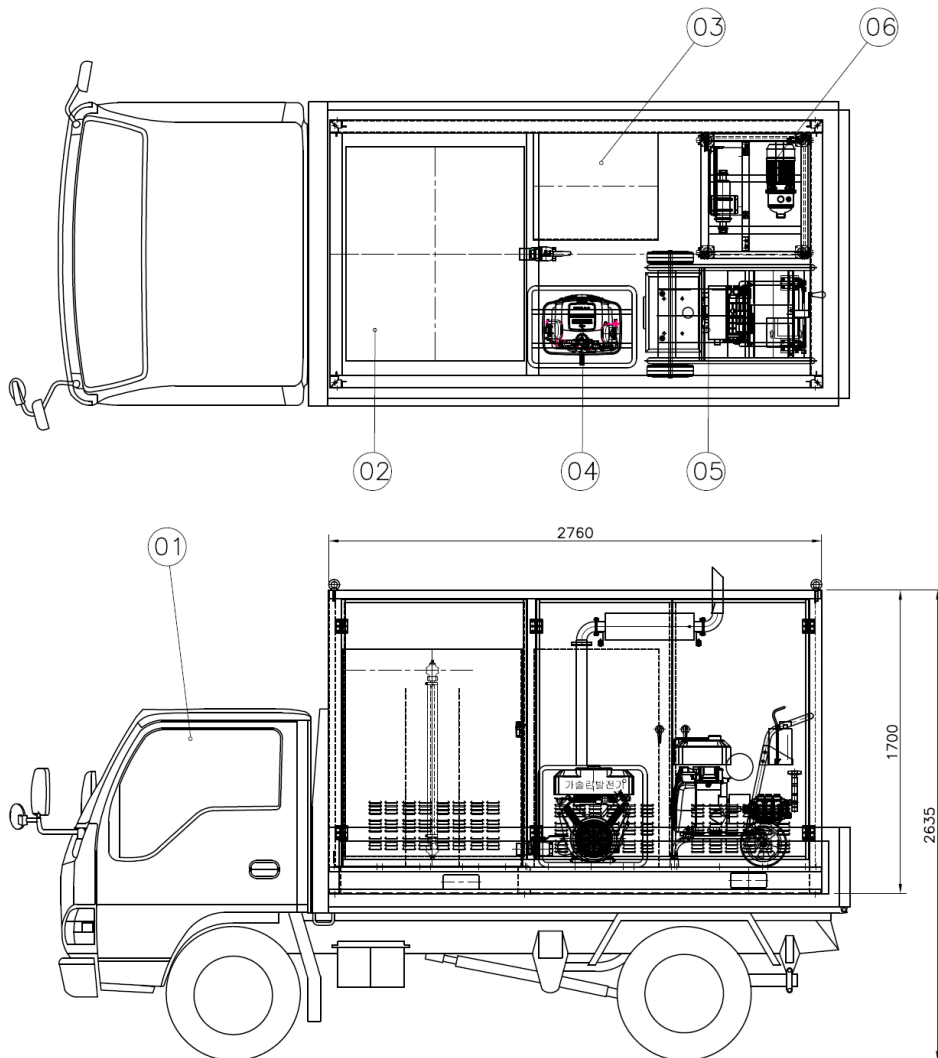


Figure 3. A schematic diagram of roadway structure washing vehicle.

Table 1. A schematic diagram of roadway structure surface dust washing vehicle

#	Unit name	Description
01	Cargo truck	1 ton
02	Supply water tank	800 L
03	UFBW ⁺ storage tank	300 L
04	Power generator	3 KVA / 220 V / Gasoline
05	High pressure washer	150 bar / 30 LPM / 18 HP
06	UFBG	80 LPM / 2.2 kW / 4 HP

* UFBW: ultrafine bubble water

서 파열될 때, 전단력과 충돌력이 순식간에 나타나는데, 이때 발생하는 에너지로 표면에 부착된 오염물질들을 세정한 다[17,18].

Figure 3은 UFBG가 포함된 이동식 도로 시설물 고압세척 시스템 차량이다. 시스템 제원은 Table 1과 같이 1톤 트럭, 원수 탱크, 초미세기포수 저장탱크, 발전기, 고압 세척기, UFBG로 구성되었다. 지정된 실험구인 타일 표면과 콘크리트 구조물 표면에 흡착되어 있는 분진을 제거하는 실험을 위해 초미세기포수 생성장치를 In-line 방식으로 약 3분 정도 가동하였다. 이때 제조된 생산수는 고압 세척기를 통과하면서 150 bar로 노즐 분사되어 표면 분진 세척을 하였다. 세척총과 세척 표면과의 거리는 약 50 cm, 분사 속도 1 m s⁻¹로 Figure 1과 같이 5회씩 실험구 표면을 세척하였다.

2.3. 초미세기포 측정 방법

초미세기포는 미세기포와는 달리 육안 식별이 불가능하고 수중에 콜로이드 형태로 존재하고 있어서 레이저 회절법(laser diffraction, LD), 동적 산란법(dynamic light scattering, DLS)과 나노 입자 추적 분석법(nanoparticle tracking analysis, NTA)으로 분석이 가능하다. 이 분석방법들은 레이저로부터 산란광 각도와 강도에 따라 입자 크기로 변환하는 방식으로 ‘스톡스-아인슈타인 방정식(1)’을 적용하여 입자의 브라운 운동(brownian motion)을 측정하는 분석 방법이다[21]. 나노 입자 추적 분석법(NTA)은 나노 입자의 브라운 운동을 실시간 추적하며 산란광의 강도를 측정하는 방법으로 최근 동적 산란법보다 우수하다는 연구 결과가 있다[22].

$$D_h = \frac{k_B T}{3\pi\eta D_t} \quad \text{Equation (1)}$$

따라서, 본 연구에서는 NTA 측정방법을 적용하여 초미세기포의 직경 크기와 밀도를 측정하였고, 초미세기포 분석기 Nanosight NS300 (Malvern, UK)를 사용하여 UFBG에서 생성된 초미세기포수를 분석하였다. 측정범위는 10 ~ 2,000 nm이며, 532 nm 파장의 녹색 레이저를 이용하여 분석하였다.

2.4. 표면 분진 샘플링

지하차도 내 콘크리트 구조물 및 타일표면에 흡착된 분진은

ISO 8502-3 [23]의 표면 먼지 측정 방법을 참조하여 채취하였다. 초미세기포 세척 전 분진 시료는 표면 분진 측정 키트 SP3200 (TQC, Netherlands)의 측정 테이프(SP3209)를 임의 지점에 20 × 2.5 cm의 일정한 길이로 절삭하여 5지점에서 샘플링하였다. 테이프를 표면에 접촉시키는 압력은 4 ~ 5 kg f cm⁻²으로 일정하게 손으로 3회 눌러서 부착하였다. 세척 후에도 동일한 방법으로 샘플링을 하였다.

2.5. 표면 분진 분석

2.5.1. 분진 입자 분류

테이프(SP3209)에 흡착한 분진은 10배율 돋보기를 사용하여 Figure 4와 Table 2를 참조하여 분포 정도와 분진 입자크기를 분류하였다[23].

2.5.2. 분진 입자 개수

디지털 이미지는 1,200 DPI (1,200 × 1,200 pixel) 해상도를 갖는 평판형 스캐너 Sindoh-D430 (Sindoh, Korea)를 사용하여 수집하였고, 투명한 스캐너 유리판 위에 분진용 테이프가 부

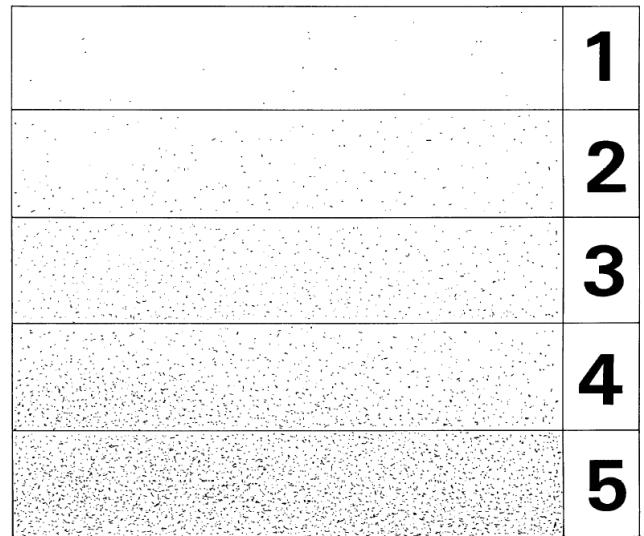


Figure 4. Pictorial references corresponding to dust quantity rating (Class A).

Table 2. Classification by dust size (Class B)

Class	Description of dust particles
0	Particles not visible under × 10 magnification
1	Particles visible under × 10 magnification but not with normal or corrected vision (usually particles less than 50 μm in diameter)
2	Particles just visible with normal or corrected vision (usually particles between 50 μm and 100 μm in diameter)
3	Particles clearly visible with normal or corrected vision (particles up to 0.5 mm in diameter)
4	Particles between 0.5 mm and 2.5 mm in diameter
5	Particles larger than 2.5 mm in diameter

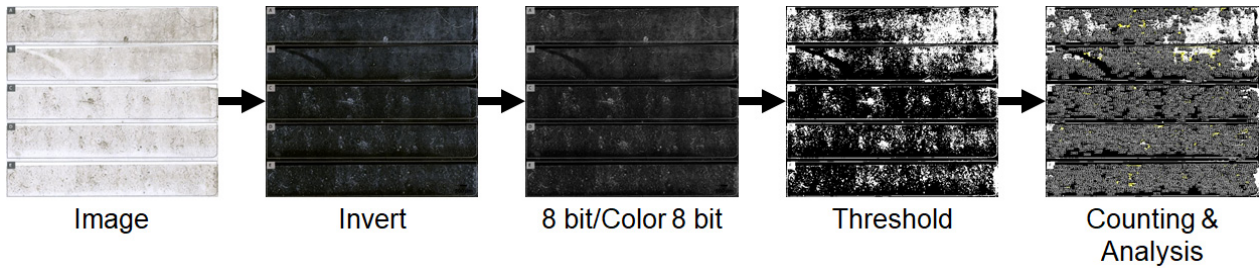


Figure 5. Flowchart of developed plug-in to analyze number of particles.

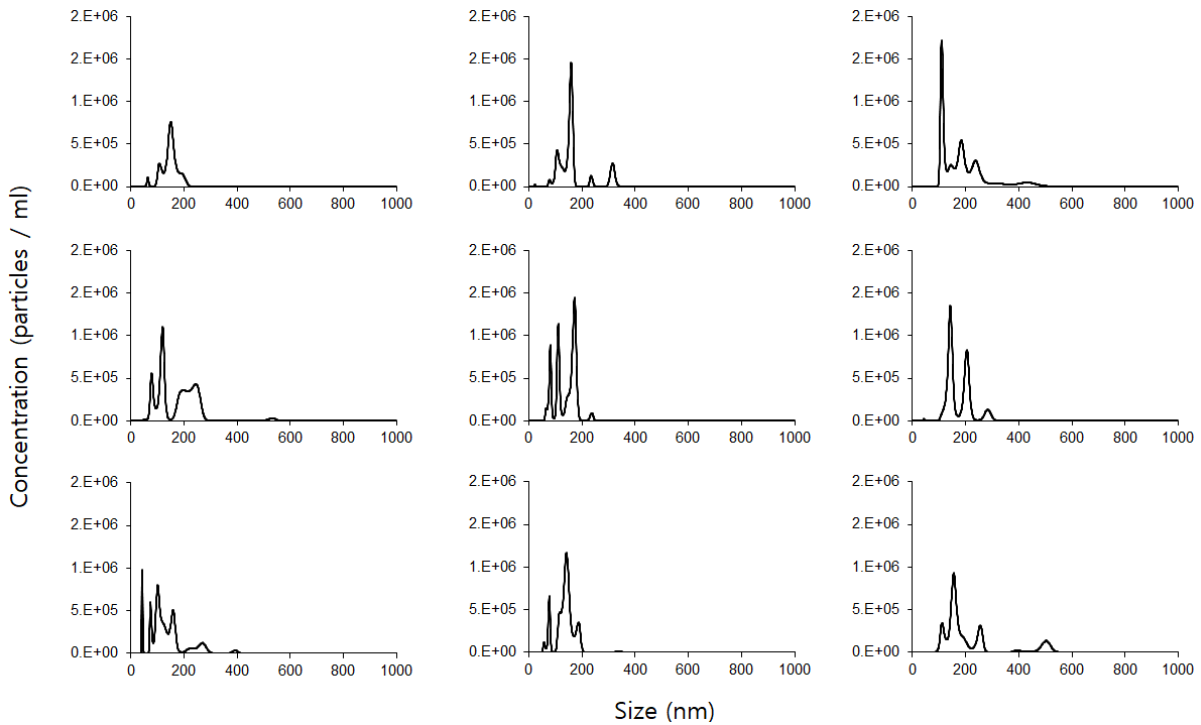


Figure 6. Distribution of ultrafine bubble concentrations and size in water.

착된 흰색 A4용지를 스캔하였는데 바탕색은 흰색으로 설정하였다. 이미지 파일은 ‘*.jpg’ 확장자로 저장하였고, 저장된 파일은 ‘ImageJ bundled with 64-bit for Windows’ [24]에서 열어서 Figure 5와 같이 Invert - 8 bit / Color 8 bit - Threshold - Counting - Analyze particles 순서로 이미지를 변환하여 분석하였다[24-26].

2.5.3. 분진 입자 중량

표면의 흡착된 분진의 제거율 산정을 위해 테이프 무게(W_t), 세척 전 분진 테이프 무게(W_b), 세척 후 분진 테이프 무게(W_a)를 전자식 저울 PAG4102C (OHAUS, USA)로 오차범위 0.01 g로 각각 측정하여 식 (2)와 같이 분진 제거율(%)을 구하였다. 단, 테이프 무게(W_t)는 분진용 테이프 길이 15 cm로 절삭하여 각각 측정하였는데, 오차범위 3 mg은 무시하고 220 mg으로 고정하여 제거율을 산정하였다.

$$Dust\ remval\ rate(\%) = \left(1 - \frac{W_a - W_t}{W_b}\right) \times 100 \text{ Equation (2)}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 초미세기포 측정 결과

초미세기포 측정 결과는 최소값 19.5 nm, 최대값 593.5 nm, 평균 직경 165.4 nm으로 분석되었고, Figure 6과 같이 초미세기포 직경 200 nm 이상이 전체 분포의 약 70% 이상을 차지하고 하였으며, 평균 밀도는 6.81×10^7 particles mL⁻¹였다. 생성된 기포의 크기는 Park et al. [13]의 결과와 유사하게 나왔지만, 밀도는 1/2배로 떨어졌다. 이는 UFBG의 펌프용량이 커짐에 따라 노즐 개수가 많아지면서 유체학적 캐비테이션 현상에 영향을 주어 기포 생성능이 변화되었다고 사료된다[18].

3.2. PM₁₀ 측정 결과

초미세기포 세척수로 타일벽면과 콘크리트 구조물 표면 세척하는 15분 동안 PM₁₀을 실시간으로 측정한 결과, 15.21 ~ 24.48 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났으며 기온이 떨어짐에 따라 PM₁₀ 값도 조금씩 감소하는 추세였다. 세척 직후에 22.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 에서 15.75 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 약 6.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 대기 중의 미세먼지가 저감되는 결

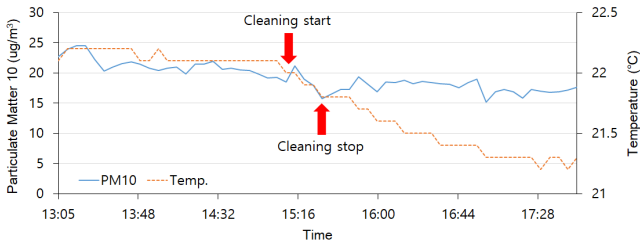


Figure 7. Results of realtime PM₁₀ and temperature by PM₁₀ measurement.

과를 보였다. 하지만 세척이 끝난 후 서서히 처음과 비슷한 값으로 회복되는 현상을 보였다. 이는 현장 날씨 요건에 따라 일정한 시간이 경과되면 주변 대기 환경에 영향을 받아 비슷해지는 것으로 사료된다. 즉, 바람의 영향을 받는 오픈된 공간에서는 광산란방식의 PM₁₀ 측정하여 초미세기포수 세척 효율을 평가하기에 한계가 있었다.

3.3. 표면 분진 측정 결과

3.3.1. 정성적 분석

ISO 8502-3의 분진 분류표기 방법[23]에 따라 타일 표면의 초미세기포수 세척 전과 후로 나누어 분석한 결과, 세척 전의 타일 표면은 ‘Class A’에서 4~5등급을 보였고 세척 후에는 1등급을 나타냈다. ‘Class B’에서 분진의 크기 등급은 3~5등급으로 분진 입자의 직경이 0.5 mm 이상을 나타내었지만, 세척 후에는 0~1등급으로 분진이 육안으로 거의 보이지 않았다. 1등급 이하에서는 분진 크기가 50 μm 이하로 밝은 장소에서 10배를 돋보기로 여러 번 확인을 해야 분진 입자를 찾을 수 있을 정도로 거의 보이지 않았다. 이러한 정성적 분석방법은 현장에서 간단하게 분진의 흡착 정도를 확인할 수 있어서 도로세척 계획을 수립하기 전에 현장조사에 적용하기에 알맞은 것으로 판단된다.

콘크리트 표면은 타일과는 달리 육안으로 구분이 확실하게 되었고, 분석결과 세척 전은 Class A, Class B 등급이 각각 5등급, 1~2등급으로 나타났는데, 타일에 비해 낮은 등급이 나타난 이유는 수직적 구조물인 타일 벽에 비해 수평적 구조물인 콘크리트 기초 패드는 표면에 비교적 크기가 크고 중량이 많이 나가는 분진 입자들이 흡착하기가 더 용이하기 때문으로 사료된다. 일반적으로 물리·화학적 풍화작용에 의해 콘크리트 표면이 파손되면 육안으로 식별이 가능한 크기인 50 μm 이상의 분진 입자들이 많이 발생하는데, 이 때문에 ‘Class B’의 등급이 콘크리트가 타일보다 더 높게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 자동차 도로 바로 옆에 있어서 자동차 고무 타이어에서 마모되어 떨어져 나올 수 있는 분진 입자들이 접근하기가 타일벽보다 거리상으로 가까웠기 때문으로 판단된다. 이 밖에도 세척 전에 주로 확인되었던 가루형태의 분진보다 세척 후에 비교적 조각형태의 입자들이 보이는 것으로 보아 고압 세척에 따른 파쇄된 입자로 보여진다. Park et al. [13]의 연구결과에 따르면 동일한 세척수 분사압력에서 초미세기포 세척수가 수돗물보다 세척효율이 높게 나타났기 때문에 고압에 의한 물리적 세정력 효과도 있

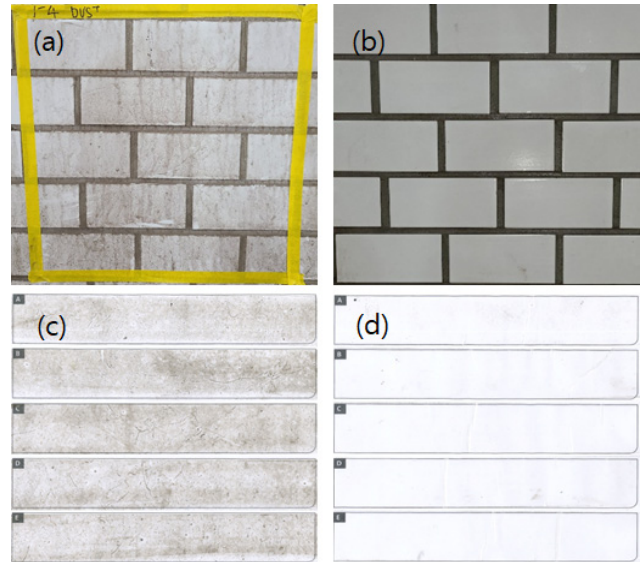


Figure 8. The tile wall surface (a, b) and dust particle collection tapes (c, d) before and after the ultrafine bubble water jet cleaning.

지만, 초미세기포에서 발생하는 라디칼 형성(radical formation)에 의한 세정 효과도 보여진다고 사료된다[18].

3.3.2. 정량적 분석

능곡지하차도 보행도로 타일 벽면과 보행도로 웬스 기초 콘크리트 패드에 흡착되어있던 PM₁₀이 포함된 분진의 제거율은 Table 3과 같은 결과가 도출되었다. 4개 지점의 타일벽면 1-1, 1-2, 1-3, 1-4에 흡착된 분진의 개수와 무게는 각각 2,565~3,647 particles mL⁻¹, 440~850 mg였고, 세척 후에는 입자수 14~29 particles mL⁻¹, 중량 0~20 mg으로 제거율이 각각 99.37%, 97.97%로 산정되었다.

이와 달리, 콘크리트 패드 표면에서 분석된 분진 개수는 5,708~9,531 particles mL⁻¹, 중량 1,190~1,650 mg으로 타일벽면보다 2배 이상의 입자개수와 중량을 나타냈다. 세척 후에는 20~52 particles mL⁻¹, 90~150 mg을 나타냈다. 개수에 대한 제거율과 중량에 대한 제거율 평균은 각각 99.57%, 91.92%를 보였다. 분진 흡착 테이프의 이미지 파일 원본은 ImageJ에서 흑백으로 ‘invert’ 후에 8-bit (0-255)로 변환하였고, 나머지 콘크리트 표면 세척 전 이미지 4개만 8-bit color로 변환하여 분석하였다. 이는 타일벽면에 흡착된 분진과는 달리, Figure 9와 같이 콘크리트 표면에 분진이 높은 밀도로 덮여 있기 때문에 흑백 invert 전처리가 기능이 실행되지 않았다. ‘threshold’ 기능은 8-bit로 변환된 이미지에서 흑백(B&W) 모드로 처리하였고, 분석하고자 하는 입자는 흰색, 배경은 검정색으로 구분하였다. 단, 8-bit 이미지와 color 8-bit 이미지에 대한 threshold 처리는 약간 다르게 적용되었다. 8-bit 이미지에서는 최소값이 45~64 사이였고, 콘크리트는 58~92로 자동 지정되었다. color 8-bit로 변환된 이미지가 설정값이 높게 나타났는데, 분진 입자의 밀도가 높을수록 이미지 전처리를 color 8-bit를 적용한 후 threshold의 최소값을 90~92로 설정해야 분진 입자의 개수가 가장 높

Table 3. Comparison of dust distribution adsorbed on tile and concrete surfaces before and after cleaning

Surface	Site	Condition	Cleaning	Count (pa. mL ⁻¹)	Class*		Removal rate by count (%)	Dry weight (mg)**			Removal rate by weight (%)
					A	B		W_t	W_b	W_a	
Tile	1-1	before	-	3,311	4	5	99.39	1,110	1,690	1,130	96.55
		after		20	1	1					
Tile	1-2	before	-	3,647	5	3	99.28	1,110	1,560	1,111	99.99
		after		26	1	0					
Tile	1-3	before	-	2,565	5	3	99.29	1,110	1,960	1,130	97.64
		after		18	1	1					
Tile	1-4	before	-	2,729	4	4	99.48	1,110	1,550	1,120	97.72
		after		14	1	0					
Concrete	2-1	before	-	9,231	5	5	99.78	1,110	2,580	1,250	90.47
		after		20	1	1					
Concrete	2-2	before	-	7,951	5	4	99.39	1,110	2,760	1,260	90.90
		after		48	1	2					
Concrete	2-3	before	-	9,531	5	5	99.45	1,110	2,300	1,200	92.43
		after		52	1	1					
Concrete	2-4	before	-	5,708	5	4	99.35	1,110	2,590	1,200	93.91
		after		37	1	1					

* Each class A and B is classified by referring to Figure 3 and Table 2.

** W_t : The tape weight (220 ± 3 mg), W_b : The tape weight with dust particles before cleaning, W_a : The tape weight with dust particles after cleaning.

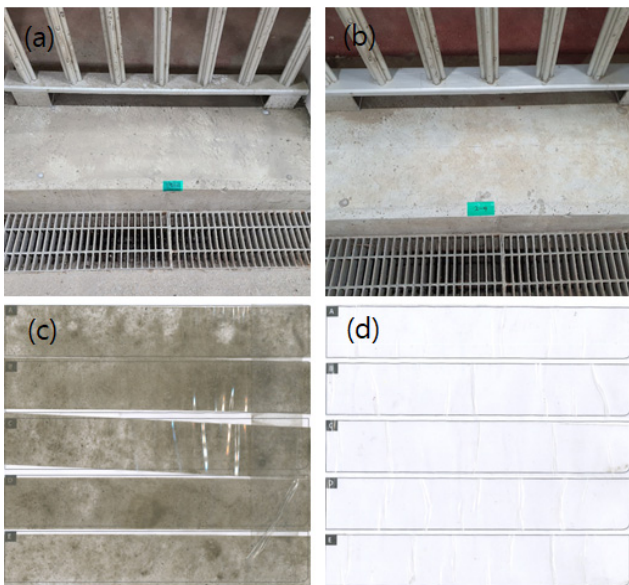


Figure 9. The concrete pad surface (a, b) and dust particle collection sampling tapes (c, d) before and after the ultrafine bubble water jet cleaning.

계 산정되었다. 이미지 픽셀 1개의 크기와 분진 입자 크기에 대한 보정처리가 안 되었기 때문에 threshold 값을 조정하여 입자 개수가 가장 높게 나온 결과값을 Table 3과 같이 채택하여 분석하였다. 하지만, 분진 입자의 밀도가 낮은 세척 후의 결과값은 threshold 값과 상관없이 입자 개수에 큰 영향을 보이지 않았다.

4. 결론

도심지 주변에 건설된 터널이나 지하차도의 구조물은 타일과 콘크리트로 이루어져 있는데, 이번 연구를 통해 초미세기포 고압 세척수를 적용하여 표면 분진 입자의 제거율을 99% 이상 도출되었다. 타일의 경우는 세척 후 비산된 먼지가 젖은 표면에 다시 흡착되는 것으로 관찰되었지만, Table 3과 같이 제거율에 크게 영향을 주지 않았다. 하지만, 콘크리트 표면은 150 bar 이상으로 세척할 때 표면이 쉽게 부서지는 현상이 발생하였으며, 파쇄된 콘크리트 조각과 분진들이 주변 도로구조물에 충돌 후 다시 콘크리트 표면에 떨어지거나 흡착되는 것으로 판단된다. 이로 인해, Table 3에 나타난 결과와 같이 분진의 중량에 의한 제거율이 타일 세척률보다 낮은 경향을 보였는데, 실제로는 표면에 흡착된 분진은 거의 제거되었다고 판단되었다[13-18]. 콘크리트 구조물 표면을 고압 세척할 때, 표면 상태에 따라 초미세기포수 분사 압력을 줄이거나 세척솔 사용하는 것이 2차 오염을 줄일 수 있는 대안이라고 판단된다. 본 연구를 통해 화학약품을 사용하지 않고 도로시설물에 들러붙은 분진을 제거할 수 있는 장치와 그에 대한 성능평가 결과를 토대로 도로시설물 세척 가이드라인[27]을 개선한다면 뉴딜정책의 친환경 정책에 부합되는 스마트한 세척 기술로써 도입될 수 있으며, 각 지자체에서 보유하고 있는 도로변 세척차량에 즉시 적용이 가능하여 앞으로 국내 미세먼지 저감 정책에 부응할 수 있는 기술로 판단된다.

감사

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호: 18CTAP-C143623-01-000000)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chun, Y., Kim, J., Choi, J. C., Boo, K. O., Oh, S. N., and Lee, M., "Characteristic Number Size Distribution of Aerosol During Asian Dust Period in Korea," *Atmos. Environ.*, **35**(15), 2715-2721 (2001).
- Gowers, A. M., Miller, B. G., and Stedman, J. R., Estimating local mortality burdens associated with particulate air pollution, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Public Health England (2014).
- Na, D. J., and Lee, B. K., "A Study on the Characteristics of PM₁₀ and Air-borne Metallic Elements Produced in the Industrial City," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **16**(1), 23-35 (2000).
- Park, E. J., Kang, M. S., You, D. E., Kim, D. S., Yu, S. D., Chung, K. H., and Park, K. S., "Health Risk Assessment of Heavy Metals in Fine Particles Collected in Seoul Metropolitan Area," *Environ. Health and Toxicol.*, **20**(2), 179-186 (1986).
- Jeong, H. R., Choi, J. Y., and Ra K. T., "Study on Heavy Metal Pollution Sources to Shihwa Lake: Characteristics of Heavy Metal in Size-fractionated Road Dust from Urban Area and He Impacts to Marine Environments," *J. Korean Soc. Marine Environ. & Energy*, **23**(2), 70-80 (2020).
- Choi, G. H., Kim, K. H., Kang, C. H., and Lee, J. H., "The Influence of the Asian Dust on the Metallic Composition of Fine and Coarse Particle Fractions," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **19**(1), 45-56 (2003).
- Kim, C. H., Park, I. S., Lee, S. J., Kim, J. S., Jin, H. A., and Sung, H. G., "On the Recent Air Pollution Levels Observed in the Regional Air Monitoring Network-High Air Pollution Concentration Episodes and Their Meteorological Characteristics in 2002," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**(2), 215-224 (2004).
- Park, S. M., Moon, K. J., Park, J. S., Kim, H. J., Ahn, J. Y., and Kim, J. S., "Chemical Characteristics of Ambient Aerosol During Asian Dusts and High PM Episodes at Seoul Intensive Monitoring Site in 2009," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **28**(3), 282-293 (2012).
- Jung, Y. W., Han, S. H., Won, K. H., Jang, K. W., and Hong, J. H., "Present Status of Emission Estimation Methods of Resuspended Dusts from Paved Roads," *J. Korea Soc. Environ. Eng.*, **28**(11), 1126-1132 (2006).
- Lee, M. H., Shin, J. S., Shin, W. G., Lee, S. G., Kim, C., and Lee, C., "Road Dust Emissions from Paved Roads Measured by Road Dust Monitoring Vehicle and Analysis of Trace Elements," *Particle and Aerosol Res.*, **8**(2), 47-54 (2012).
- Nicholson, K. W., and Branson, J. R., "Factors Affecting Resuspension by Road Traffic," *Sci. Total Environ.*, **93**, 349-358 (1990).
- Ministry of Environment, "Study on Non-point Pollutant Management Feasibility by Road Cleaning," (2012).
- Park, G. I., Lee, J. H., Park, H. J., Kim, H. J., Kim, H. R., and Cho, I. H., "Removal of Calcium Chloride in Road Structure Using Ultra-Fine Bubble Washing Machine," *J. Korean Appl. Sci. Technol.*, **36**(4), 1281-1289 (2019).
- Liu, G., Wu, Z., and Craig, V. S., "Cleaning of Protein-Coated Surfaces Using Nanobubbles: An Investigation Using a Quartz Crystal Microbalance," *J. Physical Chem. C.*, **112**(43), 16748-16753 (2008).
- Zhu, J., An, H., Alheshibri, M., Liu, L., Terpstra, P. M., Liu, G., and Craig, V. S., "Cleaning with Bulk Nanobubbles," *Langmuir*, **32**(43), 11203-11211 (2016).
- Ahmed, A. K. A., Sun, C., Hua, L., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, W., and Marhaba, T., "Generation of Nanobubbles by Ceramic Membrane Filters: The Dependence of Bubble Size and Zeta Potential on Surface Coating, Pore Size and Injected Gas Pressure," *Chemosphere*, **203**, 327-335 (2018).
- Ohl, C. D., Arora, M., Dijkink, R., Janve, V., and Lohse, D., "Surface Cleaning from Laser-Induced Cavitation Bubbles," *Appl. physics letters*, **89**(7), 074102 (2006).
- Yasui, K., Tuziuti, T., and Kanematsu, W., "Mysteries of Bulk Nanobubbles (Ultrafine Bubbles); Stability and Radical Formation," *Ultrasonics sonochem.*, **48**, 259-266 (2018).
- The Norwegian Meteorological Institute and NRK, "Yr Weather Application," <https://www.yr.no/en/> (accessed Oct 2020).
- Korea Environment Corporation (KECO), "Clean Road," <https://www.cleanroad.or.kr/> (accessed Oct 2020).
- Malvern, "Laser diffraction," <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/technology/light-scattering/laser-diffraction/> (accessed Oct 2020).
- Ferraro, G., Jadhav, A. J., and Barigou, M., "A Henry's Law Method for Generating Bulk Nanobubbles," *Nanoscale*, **12**(29), 15869-15879 (2020).
- International Organization for Standardization, "Preparation of steel substrates before application of paint and related products - Tests for the assessment of surface cleanliness ISO Standard No. 8502-3," (1992).
- Rasband, W. S., "ImageJ," U.S. National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html> (accessed Oct. 2020).
- Ferreira, T., and Rasband W., "ImageJ user guide - IJ 1.46r," <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/> (accessed Oct. 2020).
- Papadopoulos, F., Spinelli, M., Valente, S., Foroni, L., Orrico, C., Alviano, F., and Pasquinnelli, G., "Common Tasks in Microscopic and Ultrastructural Image Analysis Using ImageJ," *Ultrastruct. pathol.*, **31**(6), 401-407 (2007).
- Choi, Y. J., and Kim, Y. E., "A Study on Road Cleaning to Reduce Resuspension of Road Dust," The Seoul Institute (2018).