

나노버블을 이용한 지하철용 전기집진기 포집먼지에 대한 세척효율 평가

이형돈¹, 이승환², 박찬규^{1,*}

¹한국산업기술시험원 물환경센터
08389 서울시 구로구 디지털로 26길 87 한국산업기술시험원 물환경센터
²(주)리트코 기술연구소
12653 경기도 여주시 주내로 853 (주)리트코 기술연구소

(2019년 11월 28일 접수; 2019년 12월 18일 수정본 접수; 2019년 12월 18일 채택)

Evaluation of Washing Efficiency of Collective PM by Electrostatic Precipitator in Subway Station Using Nano Bubble

Hyung-Don Lee¹, Seung-Hwan Lee², and Chan-gyu Park^{1,*}

¹Water Environment center, Environmental Technology Division, Korea Testing Laboratory
87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, 08389, KOREA
²Royal Industrial Tech Corp. Ritco
853, Joonae-ro, Yeoo-joo-si, 12653, KOREA

(Received for review November 28, 2019; Revision received December 18, 2019; Accepted December 18, 2019)

요 약

지하역사 내 대기오염물질은 외부에서 유입되거나 또는 지하철 내부의 승객 승·하차 시 발생하는 등 여러 가지 요인에 의해 복합적으로 발생한다. 최근 연구 결과에 따르면, 지하역사 내 터널 및 지하철역에서 발생하는 대부분의 대기오염물질은 열차풍에 의해 발생하는 것과 같이 내부적 요인에 많은 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 이러한 대기오염물질을 제어하기 위해서는 지하철역사 내에 전기집진장치와 같은 집진시설이 필요하며, 집진장치에 의해 제거된 미세먼지를 보다 효율적으로 관리하기 위해서는 집진장치 내부에 지속적인 세척이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 지하역사에 설치할 전기집진장치 내부 집진판에 쌓인 미세먼지를 세척하기 위한 나노버블세척 장치를 개발하였고 나노버블수의 먼지세척효율을 평가하고자 하였다. 실험 결과, 분사압 증가에 따라 세척 효율이 일정하게 증가하였고 나노버블수로 세척할 경우 수돗물로 세척한 경우보다 부착먼지 제거효율이 130.8% 더 증가하였다. 세척횟수 증가에 따라 최대 제거효율은 수돗물에 비해 143.1% 높았지만 적합한 세척횟수는 3회 미만인 것으로 나타났다. 또한 나노버블수 체류시간 변화에 따른 세척효율 실험결과, 나노버블수의 최대 체류시간은 5분 이내로 유지됨을 확인하였다.

주제어 : 나노버블, 미세먼지, 지하역사, 전기집진기, 세척

Abstract : Air pollutants in a subway are complexly caused by outdoor factors such as ventilating opening and indoor factors such as the movement of passengers on the subway. According to recent research results, most of the air pollutants generated in subway tunnels and stations are caused by indoor variables such as train movement. To control air pollutants such as particulate matter (PM), a prevention facility such as the electrostatic precipitator (EP) or bag filter collector was required in a subway station. In particular, the PM removed by the EP must be kept clean continuously to manage PM effectively. Therefore, a nano-bubbling washing system was developed in this study to clean a contaminated collecting plate in an EP at the main subway tunnel in Seoul. Removal efficiency compared with normal water and nano-bubbling water was likewise studied. As a result, the washing efficiency of collective PM increased in accordance with the increasing of injection pressure, with nano bubbling washing being 130.8% higher than tap water. According to increase in washing times, the maximum washing efficiency was 143.1% higher than tap water, but suitable washing times were less than 3 times. According to the results of the washing efficiency by variation of residence time, it was confirmed that the maximum residence time of nano-bubble water was maintained within 5 minutes.

Keywords : Nano bubble, PM, Subway station, Electrostatic precipitator, Washing

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pcg6189@naver.com; Tel: +82-10-7196-2292; Fax: +82-2-860-1639

doi: 10.7464/ksct.2020.26.1.13 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

최근 수도권, 특히 서울특별시로의 인구 유입이 가중됨에 따라 출·퇴근 시간 등을 포함하여 대중교통이용이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 하루 평균 천만 명 이상이 이용하는 지하철은 단순한 교통수단이 아닌 시민들의 생활공간으로서 깨끗하고 쾌적한 대기환경 조성이 매우 중요하다. 1974년 서울시에 1호선 9개역으로 운영을 시작한 이후, 2, 3, 4호선이 1985년 10월에 개통되었고, 이후 수도권, 부산 등 전국 주요 대도시에서 지하철이 운행되고 있다[1,2]. 실제 2016년도 서울시 대중교통 이용객 수는 하루 평균 약 1,349만 명으로 전년 대비 0.6% 감소하였으나, 이에 반해 지하철 이용객 수는 전년 대비 1만 4천명 증가한 것으로 나타났다[3]. 지하철 내부 역사의 대기질 관리에 대한 중요성이 더욱 커지고 있으므로 지하철 대기질 개선을 위해 승강장, 터널, 대합실 등의 환기 시스템설치, 주기적인 물청소 등을 실시하고 있다.

그러나 지하공간에서 빈도 높게 운행되는 지하철의 근본적인 공기질의 문제점, 지하철 승강장에 설치된 스크린도어(platform screen door, PSD)로 인한 본선 터널 내 오염물질의 누적현상, 외부에서 유입되는 고농도 미세먼지(particulate matter, PM) 등으로 인해 지하철 내부 대기환경은 지속적으로 악화되고 있다. 또한 지하철 공간 내 환기시설의 노후화, 활용의 부적절성, 지상의 자동차 배출가스 등 외부오염물질 유입과 더불어 지하철 운행 중 발생하는 레일 및 바퀴 마모, 열차풍에 의한 내부적인 원인이 복합적으로 작용함으로써 지하철사 내부의 오염정도는 심각한 수준이다[3-10].

이에 정부에서는 2차레에 걸쳐 「지하역사 공기질 개선대책(’13~’17)」을 통해 전국 41개 지하역사에 미세먼지 자동측정기를 설치하여 실시간 오염도 추이를 분석하고 있으며, ’17년 2월부터 「실내공기질 통합관리시스템」을 통해 지하철사 미세먼지 농도를 실시간으로 공개하고 있다. 또한 지하철사에 일정 용량 이상 만족하는 환기설비설치를 의무화하고, 공기흡입구와 지하철 제작차량에 대한 공기정화장치를 설치하도록 하는 등 지하철사 공기질을 개선하기 위한 대책을 추진하고 있다. 그럼에도 불구하고, 현재 지하철사 미세먼지 평균농도는 69.4

$\mu\text{g m}^{-3}$ 수준으로 21개 다중 이용시설 중 실내주차장 다음으로 오염도가 높은 수준이다. 또한 학계에서 지하철 내부 환경에서 수행된 공기질 관련 연구로는 대부분 역사와 승강장에서 실내 공기질 관리 대상인 미세먼지(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), 오존, 이산화질소 등을 측정하고 분석하는 연구들이 주를 이루고 있어[11-13], 근본적인 공기질 제어와 관련된 연구는 현재 진행 중이다.

앞서 언급한 바와 같이 지하철사 내 공기질 오염현상은 다양한 원인에 의해 발생되기 때문에 이를 개선하기 위해서는 본선 내 환기, 터널살수, 대용량 공기청정장치 설치 등이 필요하며, 이에 열차풍에서 비산되거나 외부로부터 유입되는 미세먼지를 저감하기 위한 집진장치(여과 및 전기) 설치가 서울교통공사를 중심으로 활발히 진행 중에 있다. 집진장치 중 사이클론 집진장치는 제작, 운전비가 저렴하여 산업 현장에서 널리 사용되고 있으며, 전기집진기는 높은 집진효율을 보이는 것으로 알려져 있으나[13,14], 지하철사 미세먼지에 높은 농도로 포함되어 있는 Fe, Cu 등의 무기성 입자 등이 지속적으로 유입될 경우, 집진셀의 내구성, 불규칙적인 인가전압발생에 따른 집진효율 저하, 스파크(spark) 발생 등 문제를 발생하기 때문에 주기적인 셀 세척과 청소가 필요하다[15]. 현재 셀세정은 고압살수 등을 통해 세척하고 있으나 셀 내부까지 침적해있는 오염물질을 완벽히 세척하기에는 부적합하며 보다 깨끗한 세척을 위해 셀을 직접 수작업으로 분리하여 청소해야 하는 등 관리가 상당히 까다로운 문제점이 있다[16,17].

이에 본 연구에서는 지하철사에 설치예정인 전기집진기에 집진된 셀 내부 미세먼지 등으로 인한 집진효율 감소문제를 해결하고 원활한 유지관리를 위한 Lab scale 세척시스템을 개발하였다. 본 시스템은 나노기포 발생장치 및 집진셀 세척장치로 구성되어 있으며, 나노기포발생장치를 이용해 900 nm 이하 크기의 초미세기포를 생성시켜 일반세척수와 비교실험을 통해 집진셀 부착 미세먼지의 세척효율을 비교·분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 개발된 세척시스템은 Figure 1에 나타난 이동

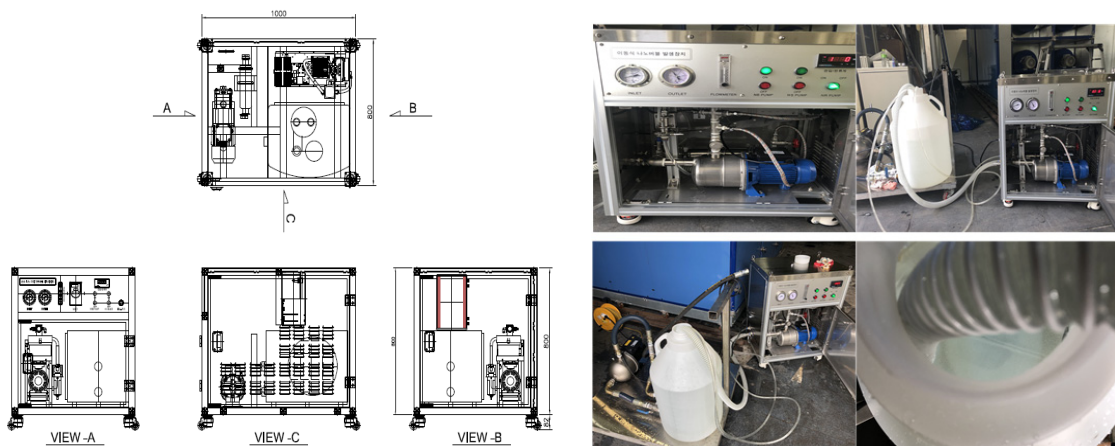


Figure 1. Schematics and picture of nano bubbling generator.

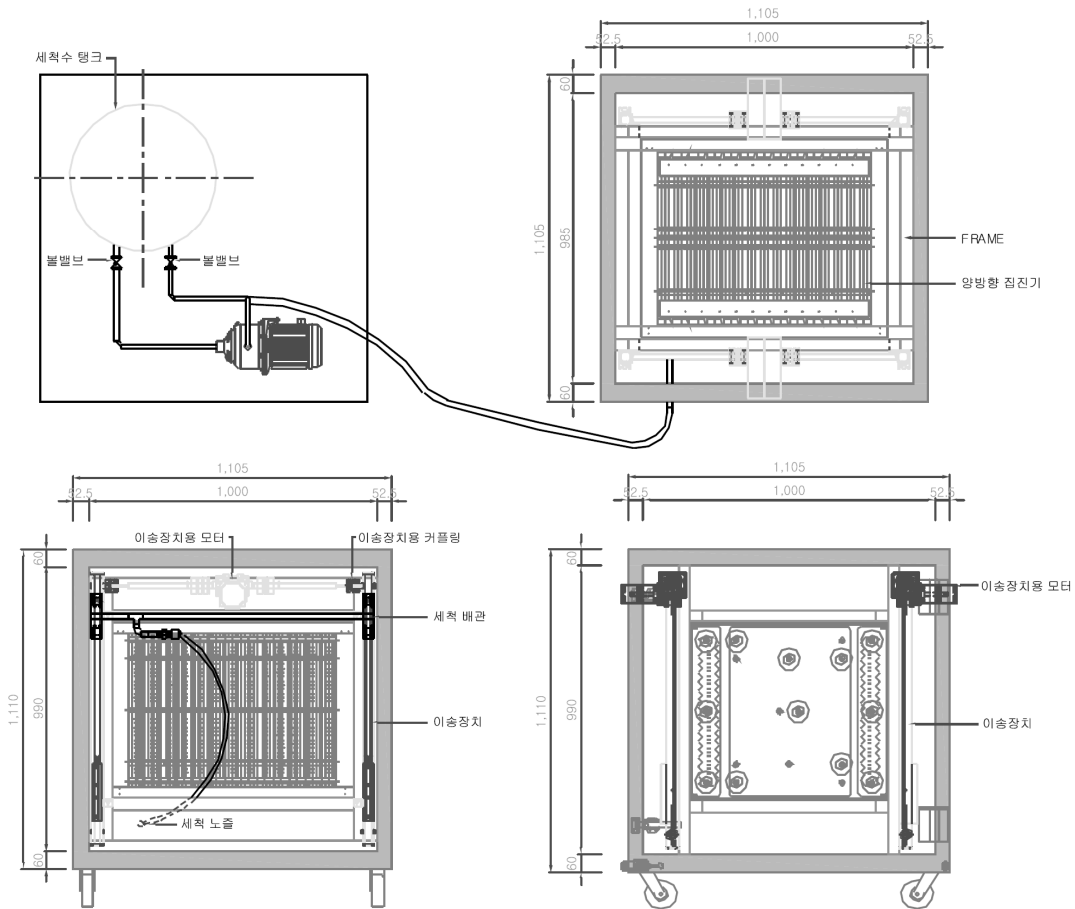


Figure 2. Schematics of washing system using nano bubble for removing PM.

식 나노기포발생장치와 Figure 2에 나타난 세척장치로 구분할 수 있다. 먼저 나노기포발생장치는 일반 수도물을 이용해 900 nm 이하 크기의 나노버블(초미세기포)을 생성시켜 5~10분 이내의 나노버블기포가 체류할 수 있도록 하는 장치로서 기체를 순간적으로 액체에 용해시킨 나노버블을 생성하여 그 크기가 작을수록 비표면적의 증가로 인해 물질전달 및 흡수 세정 효율이 증가하게 되는 원리로 기포 내부압력 증가와 함께 용해율을 증가시키는 기술이다. 또한 나노버블은 표면전하 증가와 버블이 파열되는 순간 높은 에너지 및 라디칼이 생성됨으로서 수질정화, 세정, 살균, 해수 설비 등 다양한 응용분야에 적용되어 연구되고 있다[18]. 본 연구에서 사용된 나노버블발생장치는 산소제너레이터, 순환펌프, 압력계, 유량계, 발생장치로 구성되며, 발생한 나노버블크기분석은 나노입자 크기 및 농도시각화 측정장비인 NS300 (Malvern, UK)장비를 사용하였으며, 분석결과는 Figure 3에 나타내었으며, 평균 크기분포가 278 ± 114.5 nm로 나타났다.

집진셀 세척장치는 셀 장착 본체, 세척노즐, 세척노즐 이송용 모터, 세척배관, 세척수 탱크, 세척수 이송펌프 및 밸브, 펌프류 등으로 구성되어 있다. 또한 집진된 셀이 세척장치 내부에 장착되고 세척수가 새어나가지 않도록 완벽한 개폐장치를 설치하였으며, 세척 후, 세척수 샘플링을 위한 드레인 포트 설치하였다. 세척노즐은 이송장치용 컨트롤러에 의해

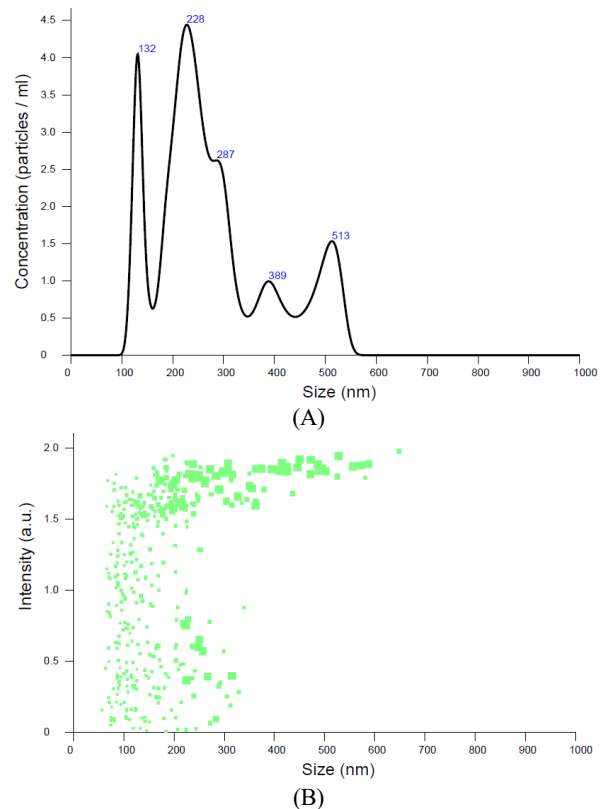


Figure 3. (A) Nano bubble concentration and (B) intensity.



Figure 4. Picture of wind tunnel system (A) and PM spray experiment equipment (B).

위아래 방향으로 이동하며 기본 1회 세척되도록 설계하였으며, 분사노즐과 세척수 탱크에는 각각 압력계와 유량계를 설치하여 노즐압과 세척수 용량을 정량적으로 확인할 수 있도록 구성하였다.

2.2. 실험재료

집진셀에 포집될 미세먼지 발생을 위해 ISO 12103-1 Standard PM(이하 ISO PM)과 Diesel Generator를 사용한 먼지(이하 Diesel PM)를 단독 또는 혼합해 사용하였으며, 이때 미세먼지 최대 농도는 약 $25,000 \mu\text{g m}^{-3}$ 전·후로 발생되도록 송풍량을 설정하였다.

2.3. 실험조건 및 방법

미세먼지 발생과 집진을 위해 A사 모의풍동실험실에서 실험을 수행하였고, 전체적인 풍동장치는 내부 유속 조절 Fan, 미세먼지 발생장치, 미세먼지 샘플링 관, 차압계, 미세먼지측정기기인 1.109 Aerosol Spectrometer (Grimm, USA)으로 구성되어 있다. 인가전압은 대전부 SPIKE판에 대전부용 POWER PACK으로 최대 13 kV DC를 공급하여 대전부를 통과하는 미세먼지에 (-)전기를 전하하고, 다른 집진부용 POWER PACK으로 집진부에 유도전압 5 kV DC를 공급하여 (-)전기를 띤 미세먼지를 (+)집진판에 포집하도록 구성하였다.

세척실험을 위해 ISO PM과 Diesel PM을 각 실험 회차별로 조건을 맞춰 수행하였고, 세척수는 두 가지로 일반 수도물과 나노버블수를 이용해 비교실험을 수행하였다. 주요 실험조건으로는 먼지 종류, 세척수 종류, 분사압, 세척횟수, 그리고 버블발생 체류시간 변화를 통해 발생하는 폐수를 샘플링하고 각 샘플수의 SS농도, 탁도값을 비교하여 효율을 평가하였다. SS는 GF/C 필터를 이용한 감량감량법, 탁도는 Hach 2100AN 측정장비를 활용하였으며, 먼지 분사와 세척실험 등 전체 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Washing experimental condition

	Condition	1 st	2 nd	
Wind tunnel	Applied voltage	13 kV		
	Velocity	$1 \sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$		
PM	Kind	Diesel PM	ISO + Diesel PM	
	Amount	-	500 g	
	Concentration	Max $18,000 \mu\text{g m}^{-3}$	Max $25,000 \mu\text{g m}^{-3}$	
Spray	Time	30 min		
	Method	Automatic		
Washing	Temp.	10 °C		
	Pressure	1, 2, 3, 4 bar		
	Kind	Tap water, Nano-bubble water		
	Number	Max 3		
	Bubble detention time		5 min	1, 3, 5, 10 min

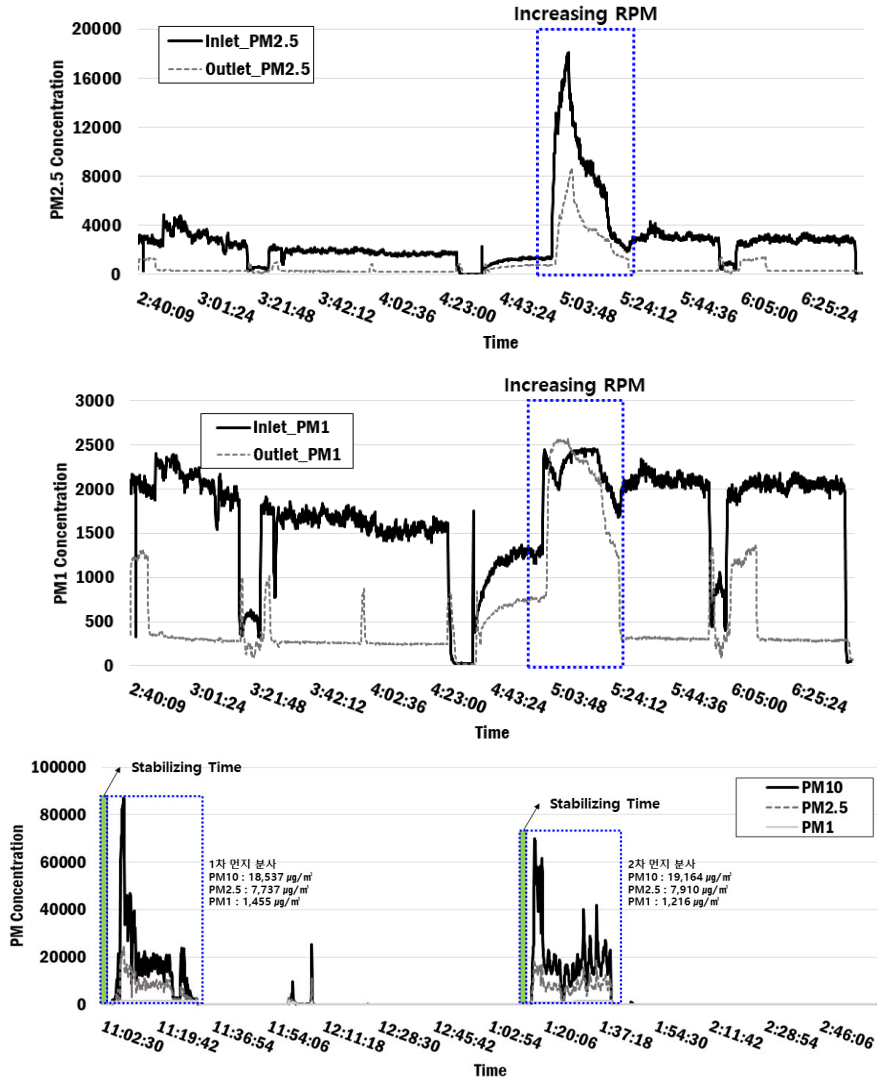


Figure 5. PM Concentration distribution during 1st and 2nd experiment.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지 발생 및 집진실험

1.109 Aerosol Spectrometer (Grimm, USA)를 이용하여 1~2차 실험에 분사된 먼지 농도 추이를 Figure 5에 나타내었다. 1차 실험의 경우, 디젤발전기 shut down으로 인해 미세먼지 농도가 감소하는 경향을 나타내어, 발전기 RPM을 다시 높이는 과정에서 순간최대농도가 다소 높게 나왔으나, 실험이 진행되는 시간 동안에 비교적 일정한 농도추세가 유지되는 것으로 분석되었다. PM_{2.5} 최대 농도는 전단 18,139 µg m⁻³, 후단 8,897 µg m⁻³, 평균농도는 전단 2,871 µg m⁻³, 후단 746 µg m⁻³, PM₁의 평균농도는 전단이 1,717 µg m⁻³, 후단 574 µg m⁻³으로 분석되었다.

2차 실험의 경우, 초반 약 30분간 1회 먼지를 분사하였으며, 2회 먼지 분사를 위해 집진셀을 교체하고, 마찬가지로 약 10분간 안정화시킨 후, 이후 30분간 동일한 방법으로 먼지를 혼합·분사하였다. 1회와 2회의 미세먼지 농도는 PM_{2.5}는 최대 농도가 각각 24,366 µg m⁻³, 19,102 µg m⁻³, PM₁은 최대

농도가 각각 1,741 µg m⁻³, 1,725 µg m⁻³로 분석되었고, 평균농도는 각각 PM_{2.5} 7,737 µg m⁻³, 7,910 µg m⁻³ PM₁ 1,455 µg m⁻³, 1,216 µg m⁻³으로 나타나, 그 농도 분포가 일정하게 유지됨으로서 미세먼지 분사량에 대한 객관성은 확보된 것으로 판단하였다. 미세먼지 분사 후, 집진셀에 부착된 셀사진은 Figure 6과 같다.

3.2. 분사압 변화에 따른 세척효율

실험차수별 일반 수돗물과 나노버블수에 의해 세척된 폐수를 이용해 세척수 종류, 분사압, 먼지종류, 세척횟수, 나노버블 체류시간에 따른 SS, 탁도값을 각각 비교·분석하였다. 먼지 분사압에 따른 먼지종류별 세척실험을 실시한 결과는 Figure 7~8과 같다. 세척수 종류와 분사압변화에 따른 SS와 탁도값을 비교분석결과, 전체적으로 세척수 종류에 관계없이 분사압 증가에 따라 세척효율이 증가되는 것으로 나타났다.

Figure 7에 나타낸 Diesel PM만 집진된 셀을 대상으로 수돗물로 세척했을 경우, 분사압에 따른 SS농도는 0.036~0.80 g L⁻¹로 분석되었으며, 분사압 상승에 따른 효율증가 폭은 1.31

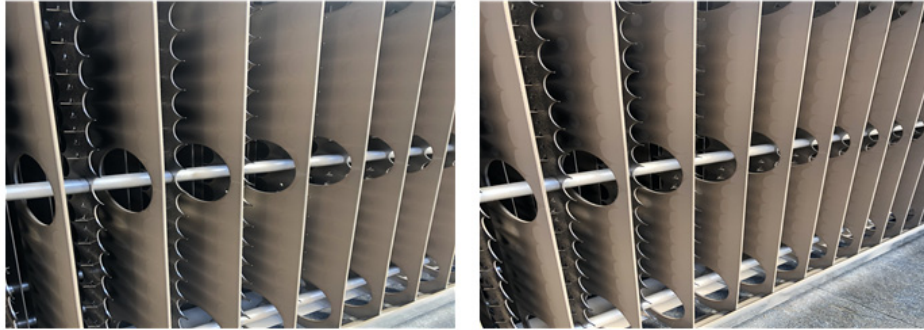


Figure 6. Picture of collecting cell by PM.

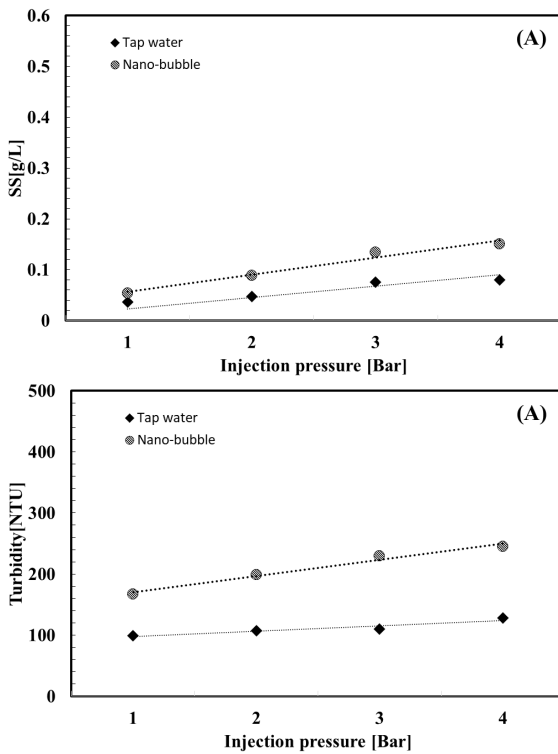


Figure 7. Variety of SS and turbidity by injection pressure with regard to (A) diesel PM.

~2.22배를 보였다. 나노버블수로 세척했을 경우, 분사압에 따른 SS농도가 0.054~0.151 g L⁻¹로 분석되었으며, 분사압 상승에 따른 효율증가 폭은 1.65~2.80배를 보였다. 이를 토대로 처리수별 세척효율을 비교·분석한 결과, 나노버블 세척 시 수돗물에 비해 분사압 1 bar 시 50% 증가, 2 bar 시 89.4% 증가, 3 bar 시 78.7% 증가, 4 bar 시 88.8% 증가되는 것으로 평가되었다.

Figure 8에 나타난 혼합먼지가 집진된 셀을 대상으로 수돗물로 세척 시, 분사압에 따른 SS농도는 0.156~0.253 g L⁻¹로 분석되었으며, 분사압 상승에 따른 효율증가 폭은 1.06~1.62 배를 보였다. 나노버블수 세척시, 분사압에 따른 SS농도가 0.289~0.523 g L⁻¹로 분석되었으며, 분사압 상승에 따른 효율증가 폭은 1.13~1.81배를 보였다.

이를 토대로 처리수별 세척효율을 비교·분석한 결과, 나노

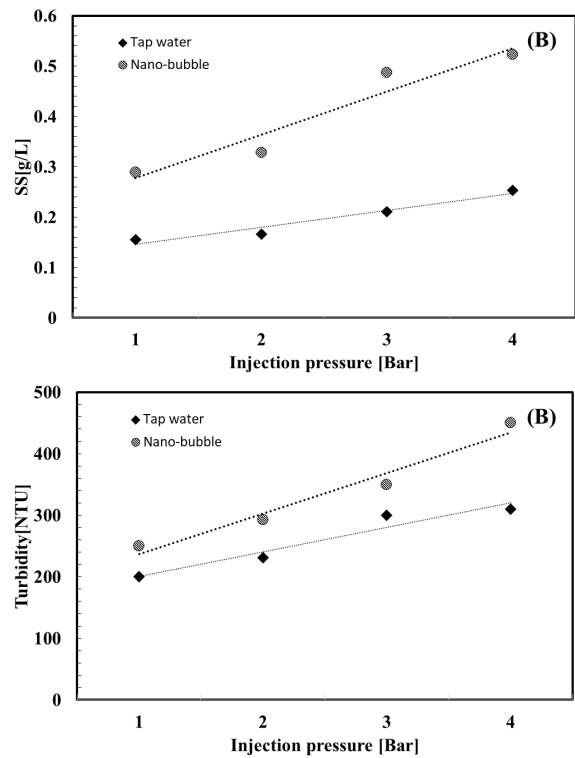


Figure 8. Variety of SS and turbidity by injection pressure with regard to (B) ISO and diesel PM.

버블 세척 시 수돗물에 비해 분사압 1 bar 시 85.3% 증가, 2 bar 시 97.6% 증가, 3 bar 시 130.8% 증가, 4 bar 시 106.7% 증가되는 것으로 평가되었다. 탁도값도 SS농도 추이와 마찬가지로 분사압 증가에 따라 세척효율이 비례적으로 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 세척효율 차이는 나노버블수가 압력분사를 통해 응집되거나 팽창하여 터질 때, 전단흐름(shear flow)과 사류(jet flow)의 순간적 발생에 따라 표면의 입자들을 국소적으로 세척하는 효과를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 또한 물에 용해되어 있던 버블이 세척압에 의해 파열되는 순간 높은 에너지 생성에 의한 세척효율 상승에 기인한 것으로 사료된다[18-21].

이를 토대로 처리수별 세척효율을 비교·분석한 결과, 나노버블 세척 시 수돗물에 비해 분사압 1 bar 시 85.3% 증가, 2 bar 시 97.6% 증가, 3 bar 시 130.8% 증가, 4 bar 시 106.7%

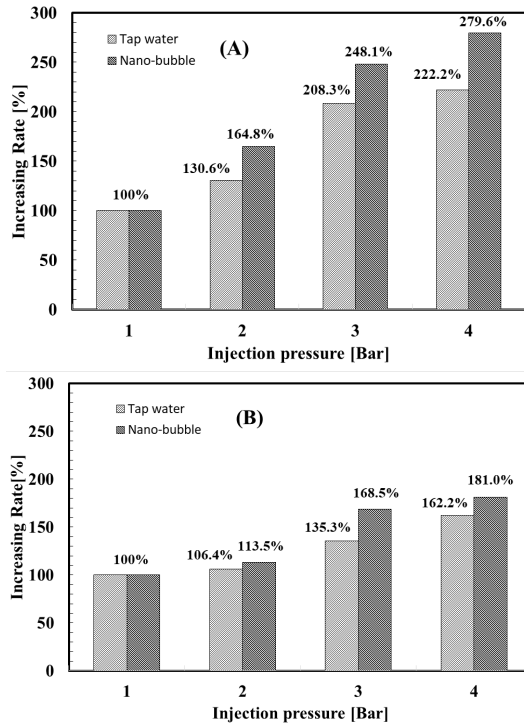


Figure 9. Results of increasing rate with regard to injection pressure : (A) diesel PM and (B) ISO and diesel PM.

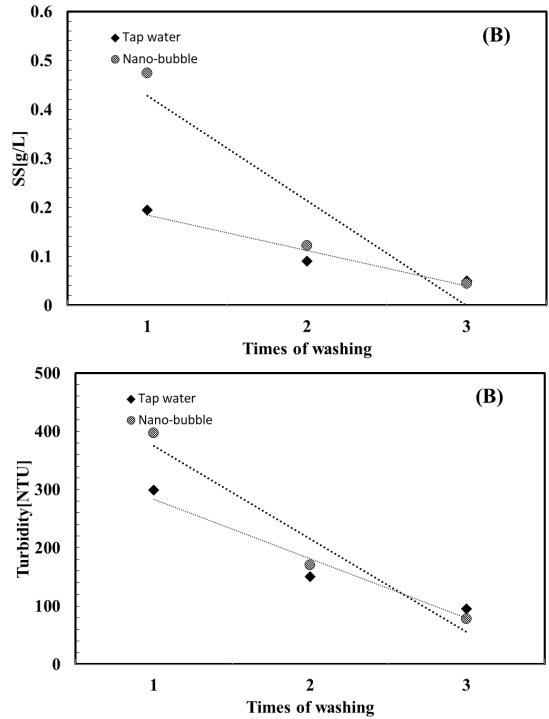


Figure 11. Variety of SS and turbidity by washing times with regard to (B) ISO and diesel PM.

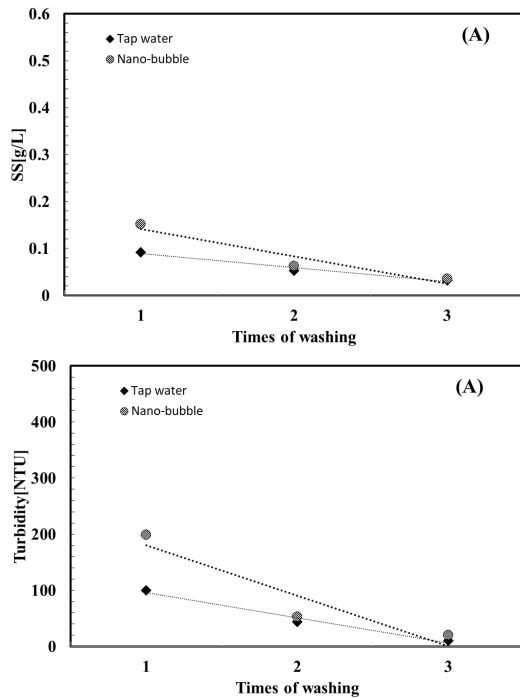


Figure 10. Variety of SS and turbidity by washing times with regard to (A) diesel PM.

증가되는 것으로 나타났다. 탁도값도 SS농도 추이와 마찬가지로 분사압 증가에 따라 세척효율이 비례적으로 상승하는 것으로 나타났다. 1 bar압력을 기준으로 집진된 먼지종류에 따라 세척효율의 증가폭을 Figure 9에 나타난 바와 같이 비교·분석해 보면, Diesel PM만 단독으로 집진된 셀(1차

실험)은 분사압이 높아질수록 세척효율이 일정한 폭으로 증가하였고(100% → 최대 279.6%), ISO PM와 혼합된 집진셀(2차실험)의 경우, ISO PM가 낮은 압력조건에서 대부분 세척됨에 따라 분사압 증가에 따른 세척효율 증가폭(100% → 최대 181.0%)은 다소 감소한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3.3. 세척횟수 변화에 따른 세척효율

세척횟수에 따른 먼지종류별 세척실험을 실시한 결과는 Figure 10~11과 같다. Figure 10에 나타난 Diesel PM만 집진된 셀을 대상으로 수돗물로 세척했을 경우, 횟수 변화에 따라 SS농도는 0.032~0.092 g L⁻¹로 분석되었으며, 세척횟수 증가에 따른 효율 변화폭은 0.35~0.58배로 나타났다. 반면, 나노버블수 세척의 경우, 횟수 변화에 따른 SS농도가 0.035~0.152 g L⁻¹로 분석되었으며, 횟수 증가에 따른 효율 변화폭은 0.23~0.41배를 나타냈다. 처리수별 세척효율을 비교·분석한 결과, 나노버블 1회 세척 시 65.2% 증가하는 것으로 나타났고 2, 3회의 경우 1회 세척 시, 먼지가 대부분 세척되어 그 증가폭이 감소(9.4~17.0%)한 것으로 평가되었다.

Figure 11에 나타난 혼합먼지가 집진된 셀을 대상으로 수돗물로 세척 시, 횟수 변화에 따라 SS농도는 0.05~0.195 g L⁻¹로 분석되었으며, 횟수 증가에 따른 효율 변화폭은 0.26~0.46배를 보였다. 나노버블수 세척 시, 횟수 변화에 따른 SS농도가 각각 0.045~0.474 g L⁻¹로 세척횟수 증가에 따른 효율 변화폭은 0.09~0.26배를 나타냈다. 처리수별 세척효율을 비교·분석한 결과, 나노버블 1회 세척 시 143.1% 증가하는 것으로 나타났고 앞선 결과와 마찬가지로 1회 세척 시, 먼지가 대



Figure 12. Picture of before and after by washing using tap water (top) and nano-bubble (bottom).

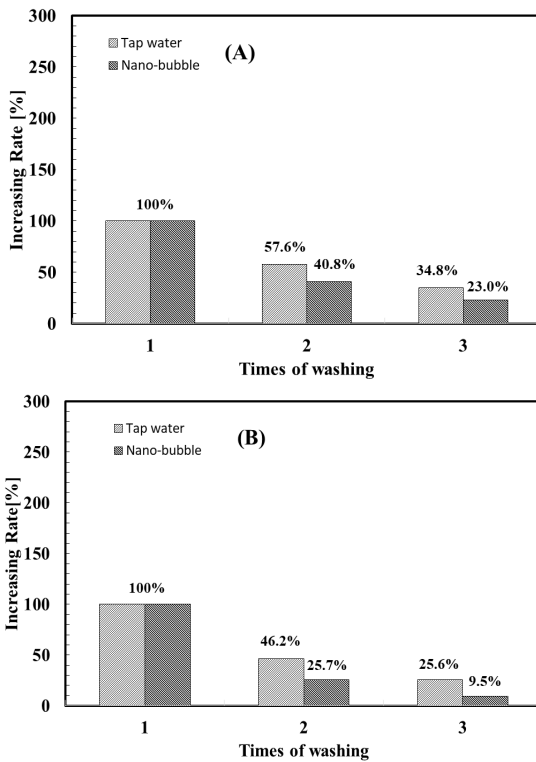


Figure 13. Results of increasing rate with regard to washing times: (A) diesel PM and (B) ISO and diesel PM.

부분 세척됨에 따라 2, 3회 세척효율은 그 증가폭이 감소(-10.0 ~ 35.6%)된 것으로 평가되었다.

1 bar 압력을 기준으로 집진된 먼지종류에 따라 세척효율의 증가폭을 Figure 13에 나타난 결과, Diesel PM만 단독으로 집진된 셀(1차실험)은 세척횟수가 증가될수록 효율이 일정한 폭으로 감소하였고(100% → 최소 23.0%), 혼합먼지 집진셀(2

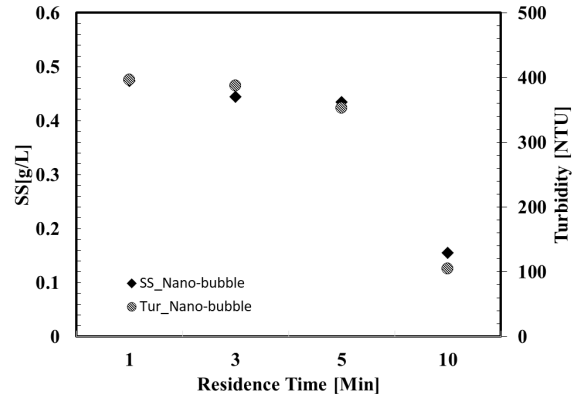


Figure 14. Variety of SS and turbidity by residence time with regard to ISO and diesel PM.

차실험)의 경우, ISO PM가 초기세척실험 시 대부분 제거됨에 따라 세척횟수 증가에 따른 효율감소폭(100% → 최소 9.5%)이 Diesel PM 집진셀에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

3.4. 나노버블수 체류시간에 따른 세척효율

나노버블수 제조 후, 나노버블수가 체류하는 시간 변화에 따른 세척효율에 대한 실험을 실시한 결과를 Figure 14에 나타내었다. 나노버블수의 체류시간이 최대 5분이 경과할 때까지 비교적 안정적인 세척효율을 나타내었으며, 체류시간이 10분 경과할 경우, 나노버블수의 효율이 급격히 감소하는 것으로 분석되어, 나노버블은 최대 5분 내외로 유지되며, 세척효율에 영향을 주는 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 전기집진장치에 집진된 미세먼지제거를 위해 Lab-scale의 나노버블세척시스템을 개발·제작하였으며, 다양한 변수조건에 따라 세척수별 세척효율을 비교분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

분사압 변화에 따른 수돗물과 나노버블수의 SS농도를 비교분석한 결과, 세척수와 먼지종류에 관계없이 분사압 증가에 따라 세척효율이 증가하는 것으로 나타났고, Diesel PM 집진셀의 나노버블 세척 시 수돗물에 비해 분사압이 최대 4 bar 시 88.8% 효율이 증가하였다. 혼합먼지 집진셀은 3 bar 시 최대 130.8% 증가되는 것으로 평가되었다. 또한 분사압 1 bar 기준, 혼합먼지 집진셀의 세척효율 증가폭이 다소 감소한 것으로 나타나 지하역사에서 발생하는 다양한 종류(무기성, 유기성 먼지 혼합)의 먼지세척 시 적정 분사압 고려가 필요하다.

세척횟수 변화에 따른 수돗물과 나노버블수의 SS농도를 비교분석한 결과, Diesel PM 집진셀의 나노버블 1회 세척 시 65.2% 증가하는 것으로 나타났고 초기에 먼지 대부분이 제거됨에 따라 추가세척에 따른 증가폭이 감소(9.4 ~ 17.0%)하였으며, 혼합먼지도 초기 세척효율이 최대 143.1%였으나, 이후 세척효율의 증가폭은 감소(-10.0 ~ 35.6%)한 것으로 평가되었다. 또한 분사압 1 bar 기준, 혼합먼지 집진셀의 세척효율 감

소폭이 더 크게 나타나 나노버블을 이용에 따른 사용량 조절 (3회 이하)에 대한 고려가 필요하다. 나노버블수 체류시간 변화에 따른 세척실험결과, 나노버블 체류시간이 10분 경과할 경우, 급격한 세척효율감소가 나타나 최대 체류시간은 5분 이내로 유지됨을 확인하였다.

감사

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(FD 170004) “2017년 미세먼지 저감기술개발 지원사업”의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. 이에 감사드립니다.

References

- Lee, T. J., Lim, H. J., Kim, S. D., Park, D. S., and Kim, D. S., “Concentration and Properties of Particulate Matters (PM10 and PM2.5) in the Seoul Metropolitan,” *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**(2), 164-172 (2015).
- Roh, Y. M., Park, W. M., Lee, C. M., Kim, Y. S., Park, D. S., and Kim, S. W., “A Study of PM levels in Subway Passenger Cabins in Seoul Metropolitan area,” *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, **17**(1), 13-20 (2007).
- Son, Y. S., and Ryu, J. Y., “Technological Advances for Particulate Matter Collection in Subway System,” *KIC News*, **21**(2), 24-34 (2018).
- Park, J. H., Park, J. C., and Eum, S. J., “The Estimation of the Diffusion Direction and Velocity of PM10 in a Subway Station - For the Gachwasan Station of Subway Line 5 in Seoul,” *J. Korean Soc. Transp.*, **19**(4), 35-47 (2010).
- Karlsson, H. L., Nilsson, L., and Möller, L., “Subway Particles Are More Genotoxic than Street Particles and Induce Oxidative Stress in Cultured Human Lung Cells,” *Chem. Res. Toxicol.*, **18**, 19-23 (2005).
- Salma, I., Weidinger, T., and Maenhaut, W., “Time-Resolved Mass Concentration, Composition and Sources of Aerosol Particles in a Metropolitan Underground Railway Station,” *Atmos. Environ.*, **41**, 8391-8405 (2007).
- Jung, H. J., Malek, B. A., Koo, Y. S., Jung, J. H., Son, Y. S., Kim, J. C., Kim, H. K., and Ro, C. U., “Chemical Speciation of Size-Segregated Floor Dusts and Airborne Magnetic Particles Collected at Underground Subway Stations in Seoul, Korea,” *J. HAZARD. MATER.*, **213**, 331-340 (2012).
- VMugica-Álvarez, V., Figueroa-Lara, J., Romero-Romo, M., Sepúlveda-Sánchez, J., and López-Moreno, T., “Concentrations and Properties of Airborne Particles in the Mexico City Subway System,” *Atmos. Environ.*, **49**, 284-293 (2012).
- Gustavsson, P., Bigert, C., and Pollán, M., “Incidence of Lung Cancer Among Subway Drivers in Stockholm,” *AM. J. IND. MED.*, **51**, 545-547 (2008).
- Loxham, M., Cooper, M. J., Gerlofs-Nijland, M. E., Cassee, F. R., Davies, D. E., Palmer, M. R., and Teagle, D. A., “Physicochemical Characterization of Airborne Particulate Matter at a Mainline Underground Railway Station,” *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 3614-3622 (2013).
- Kim, K. H., Ho, D. X., Jeon, J. S., and Kim, J. C., “A Noticeable Shift in Particulate Matter Levels after Platform Screen Door Installation in a Korean Subway Station,” *Atmos. Environ.*, **49**, 219-223 (2012).
- Son, Y. S., Dinh, T. V., Chung, S. G., Lee, J. H., and Kim, J. C., “Removal of Particulate Matter Emitted from a Subway Tunnel using Magnetic Filters,” *Environ. Sci. Tehcnol.*, **48**, 2870-2876 (2014).
- Kim, D. Y., Jung, S. H., Shim, S. H., Kim J. T., and Lee, S. S., “Flow Distribution in an Electrostatic Precipitator with a Perforated Plate,” *Clean Technol.*, **25**(21), 147-152 (2019).
- Hyun, D. G., and Chang, H. S., “Theoretical and Computation Analysis on the Pressure Drop in the Cyclone Dust Collector,” *Clean Technol.*, **20**(3), 263-268 (2014).
- Lee, Y. G., “A Study on Reduction Characteristics of Fine Dust in Wet Electrostatic Precipitator for Coal-fired Power Plant,” Master Dissertation, Yonsei University, Seoul (2019).
- Jung, H. J., Kim, B., Ryu, J. Y., Maskey, S., Kim, J. C., Sohn, J., and Ro, C. U., “Source Identification of Particulate Matter Collected at Underground Subway Stations in Seoul, Korea using Quantitative Singleparticle Analysis,” *Atmos. Environ.*, **44**, 2287-2293 (2010).
- Lee, T. J., Jeon, J. S., Kim, S. D., and Kim, D. S., “A Comparative Study on PM10 Source Contributions in a Seoul Metropolitan Subway Station before/after Installing Platform Screen Doors,” *Korean Soc. Atmos. Environ.*, **26**(5), 543-553 (2010).
- Lee, J. M., Lee, S. J., and Park, M. H., “Fine Bubble Technology,” *Polym. Sci. Technol.*, **29**(6), 529-535 (2018).
- Ohl, C. D., Arora, M., Dijkink, R., Janve, V., and Lohse, D., “Surface Cleaning from Laser-Induced Cavitation Bubbles,” *Appl. Phys. Lett.*, **89**(7), 074101-074102-3 (2006).
- Matsuki, N., Ichiba, S., Ishikawa, T., Nagano, O., Takeda, M., Ujike, Y., and Yamaguchi, T., “Blood Oxygenation using Microbubble Suspensions,” *Eur. Biophys.*, **41**(6), 571-578 (2012).
- Temesgen, T., Bui, T. T., Han, M. Y., Kim, T. I., and Park, H. J., “Micro and Nanobubble Technologies as a New Horizon for Water-Treatment Techniques: A Review,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, **246**, 40-51 (2017).