

루버 집진기의 성능특성

우 상 희^{1),2)} · 김 종 범¹⁾ · 박 통 일¹⁾ · 육 세 진²⁾ · 권 순 박³⁾ · 배 귀 남^{1)*}

¹⁾한국과학기술연구원 환경복지연구단, ²⁾한양대학교 기계공학부,

³⁾한국철도기술연구원 교통환경연구팀

(2015년 11월 16일 투고, 2016년 1월 27일 수정, 2016년 2월 12일 게재확정)

Performance Characteristics of Louver Dust Collectors

Sang-Hee Woo^{1),2)} · Jong Bum Kim¹⁾ · Tong-Il Park¹⁾ · Se-Jin Yook²⁾ ·

Soon Bark Kwon³⁾ · Gwi-Nam Bae^{1)*}

¹⁾Center for Environment, Health and Welfare Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

³⁾Transportation Environmental Research Team, Korea Railway Research Institute, Uiwang, Korea

(Received 16 November 2015; Revised 27 January 2016; Accepted 12 February 2016)

Abstract

A large amount of wear dust generated during train operation is a major dust source in urban railway tunnels. To check possibility of a louver dust collector for the removal of dust in the railway tunnel, five louver dust collector models were designed and their performance was tested in a wind tunnel. JIS Z 8901 Class 8 dust was used as a test dust. Pressure drop and particle collection efficiency were evaluated with the face velocity ranging from 1 m/s to 4 m/s. At this low velocity range, particle collection efficiency of the louver dust collector was found to be insensitive to air velocity and design parameters. Pressure drop was under 40 Pa, and PM₁₀ and PM_{2.5} collection efficiencies were approximately 50% and 30%, respectively.

Keywords : Dust collector, Louver, Particle collection efficiency, Pressure drop, Urban railway

* Corresponding author.
Tel : +82-2-958-5676
E-mail : gnbae@kist.re.kr

1. 서론

대도시에서 도시철도는 대표적인 대중교통으로 대부분 지하공간에서 운행되고 있다. 전동차가 철로를 운행하면서 휠과 선로의 마찰에 의해 다량의 먼지가 발생되고, 터널 바닥에 퇴적되어 있는 먼지는 전동차에 의해 유도되는 바람에 의해 재비산되어 터널 내부의 공기오염을 악화시키는 것으로 알려져 있다. 철 성분이 많이 포함된 먼지는 터널에서 전동차 객실로 유입되어 승객의 건강에 나쁜 영향을 미칠 뿐만 아니라 전동차 운행 장비의 고장을 일으키는 원인이 된다.

도시철도 운행 터널 내 미세먼지 농도는 51-470 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일반 대기에 비해 매우 높다(Johansson et al., 2003; Branis et al., 2006; Ripanucci et al., 2006; Cheng et al., 2008; Park et al., 2008; Raut et al., 2009; Jung et al., 2010; Kim et al., 2010; Cheung et al., 2011). 도시철도 터널 내 먼지의 대부분은 철(철산화물)이고, 이 외에 망간, 크롬, 구리, 아연, 티타늄, 니켈, 크롬, 주석, 은, 안티몬 등도 일부 포함되어 있는 것으로 알려져 있다(Furuya et al., 2001; Johansson et al., 2003; Chillrud et al., 2004; Aarnio et al., 2005; Karlsson et al., 2008; Raut et al., 2009; Grass et al., 2010). 이 중 철(철산화물) 성분은 산화 스트레스와 독성을 일으킬 수 있다(Karlsson et al., 2004, 2008). 그러므로 터널 내 부유 먼지를 제거할 수 있는 집진 기술의 개발이 필요하다.

먼지를 제거하는데 필터가 많이 사용되어 왔다. 고성능 필터는 100 nm 이하의 작은 입자에 대해서도 높은 집진효율을 나타내지만, 유동저항이 커서 유량을 처리하는데 많은 동력이 필요한 단점이 있다. 터널 내 먼지의 개수농도는 3.3 μm 와 8 μm 에서 피크를 나타내고, 무게농도는 더 큰 입경에서 피크를 나타낸다(Midander et al., 2012). 그러므로 필터보다는 관성 집진기가 터널 내 먼지의 제거에 더 적절할 것으로 생각된다. 관성 집진기로는 루버, 싸이클론이 많이 사용되고 있다. 루버 집진기는 주로 항공기 터빈에서 모래와 같은 큰 먼지를 제거하기 위해 사용되는데, 유동저항이 적어 많은 유량을 경제

적으로 처리할 수 있는 장점이 있다(Musgrove et al., 2012). 루버 집진기는 유동저항이 적으므로 전동차의 운행에 의해 자연적으로 발생하는 주행풍을 이용할 경우 별도의 동력을 사용하지 않고, 먼지를 제거할 수 있는 관성 집진기의 역할을 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

루버 집진기는 입자의 관성을 이용하므로 집진효율은 입구와 출구의 레이놀즈(Re) 수에 영향을 받으나, 입구 Re가 높으면 집진효율은 Re에 영향을 받지 않는다(Poulton and Cole, 1981). Re가 증가할수록 유동저항이 증가하며, 입경이 클수록 집진효율도 증가한다(Gee and Cole, 1969). 루버 집진기의 집진효율은 루버의 각도, 길이 및 위치에 따라 달라진다. Zverev(1946)와 Poulton and Cole(1981)에 따르면, 루버의 각도는 집진효율에 10% 이상 영향을 미친다. 루버의 각도가 커질수록 유동저항은 줄어든다. Gee and Cole(1969)은 루버의 길이가 2배 이상 늘어나면 압력저항이 40% 이상 증가한다고 보고하였다. Poulton and Cole(1981)은 루버의 두께가 집진효율에 10% 이하의 영향을 미친다고 보고하였다.

이러한 연구들은 강제 유동에 놓인 루버 집진기의 성능에 대한 결과이며, 무동력 상태로 운전되는 루버 집진기가 열린 유동에 놓였을 때 집진기로 유입되는 유량 및 성능은 연구된 바가 없다. 본 연구팀에서는 서울도시철도 5호선 구간에서 운행하는 전동차의 하부에 풍속계와 입자측정기를 장착하여 운행 중 유속 및 먼지 농도를 측정할 바 있는데(Bae et al., 2015), 직선구간과 곡선구간에서 전동차의 평균 운행속도는 각각 18.8, 15.4 m/s이고, 전동차의 하부에서 유속은 각각 4.9, 4.1 m/s이었다. 즉, 전동차 하부에서 유속은 전동차 운행속도의 약 1/4 수준이었다. 또한, 수치해석을 통해 전동차 하부의 유동 분포를 상세하게 분석한 바 있다(Lee et al., 2015). 본 연구에서는 5가지 루버 집진기 모형을 제작하여 루버 집진기가 전동차 하부에 부착되어 열린 공간에서 주행풍만으로 작동될 때 생기는 유입유량, 유동저항 및 집진효율을 풍동실험을 통해 조사하였다.

2. 실험

본 연구에서는 루버 집진기가 열린 공간에서 무동력으로 작동할 때 각 형상변수가 유동저항과 집진효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 1과 같이 5개의 모델을 설계하여 제작하였다. 실험에 사용된 형상변수는 루버의 각도, 길이 및 개수이다. 모델 2를 기준으로 형상변수의 값을 변화시켰다. 모델 1, 2, 3은 루버의 개수를 8개로 유지하며, 루버 각도가 42°, 52°, 62° 순으로 커지도록 설계하였다. 모델 4, 2, 5는 루버의 길이가 24, 37.5, 46 mm 순으로 길어지고, 루버의 개수가 10개, 8개, 5개 순으로 적어지도록 설계하였다.

그림 2에 풍동 시험장치의 전체적인 개략도, 시험단면에 설치된 루버 집진기 및 측정기의 위치를 나타내었다. 전동차의 주행풍에 의해 작동하는 루버 집진기의 성능을 시험하기 위해 루버 집진기 모형을 시험단면적(test section)이 600 mm × 600 mm인 풍동의 중앙에 설치하였다. 루버 집진기 모형의 단면적은 200 mm × 300 mm로 폐쇄비(blockage ratio)가 1/6이다. 풍동 시험단면의 유속은 전동차 하부에서 측정되는 2-5 m/s 범위로 설정하였다(Bae et al., 2015). 송풍기 모터의 주파수를 변경하여 풍동으로 공급되는 시험유량을 조절하였다. 풍동의 출구에 Balometer(TSI)를 부착하여 유량을 측정하였다. 루버 집진기 모형은 상하 2단으로 구성하였으며, 입구에 설치한 풍속계(Velocimeter, TSI)와 입구와 출구 근처에 설치한 압력공에 연결된 디지털차압계(Micromanometer, Furness Controls Inc.)로 루버 집진기 모형으로 유입되는 유량과 압력손실(유동저항)을 측정하였다.

루버 집진기 모형의 2,900 mm 상류에 먼지 발생기(Solid Aerosol Generator, TOPAS SAG410)를 설치하고, 시험먼지를 공급하여 집진효율을 평가하였다. 풍동의 단면에서 Re가 33,000-168,000으로 난류 영역이기 때문에 시험먼지가 시험단면에서 비교적 균일하게 분포하였을 것으로 추정하였다. 모형의 입구와 출구에 1차 샘플링관을 설치하여 먼지농도를 측정하였다. 입구에 분기관을 이용하여 Optical Particle Counter(OPC, Grimm 1.109)와 Aerodynamic Particle Sizer(APS, TSI 3321)를 사용하여 동시에 측정하였고, 출구에서 동일 모형의 OPC로 먼지농도를 측정하였다. OPC로 측정된 자료는 루버 집진기의 입경별 집

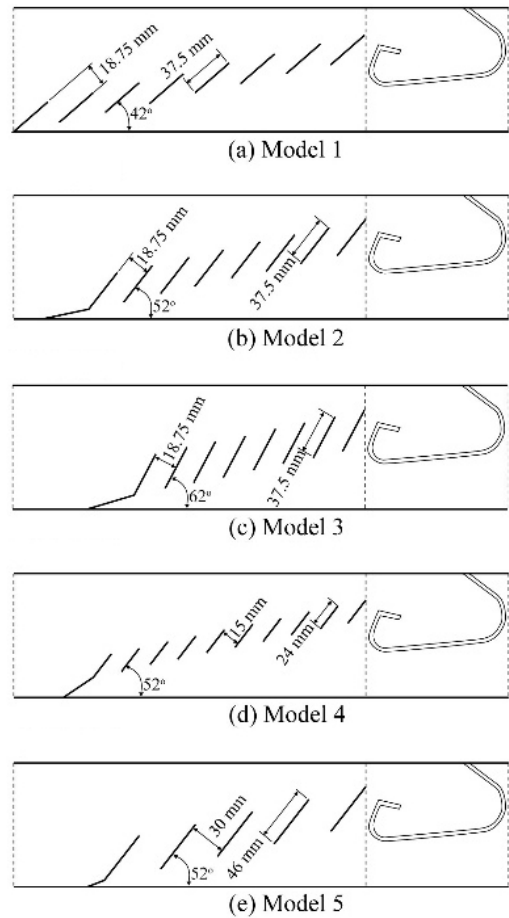


Fig. 1. Five models of louver dust collectors.

진효율을 계산하는데 사용되었고, APS로 측정된 자료는 시험먼지의 공기역학적 입경분포와 광학적 입경분포의 차이를 비교하는데 사용하였다.

시험먼지로는 JIS Z 8901 Class 8을 사용하였다. 그림 3(a)를 보면, OPC와 APS로 측정된 시험먼지의 피크 개수농도는 각각 약 0.7, 0.9 μm 에서 나타났다.

OPC의 경우 광학적으로 입경을 측정하므로 시험먼지의 밀도가 반영되지 않지만, APS의 경우 밀도가 1 g/cm^3 인 공기역학적 입경으로 크기를 측정하므로, 시험먼지의 밀도가 3 g/cm^3 으로 1 g/cm^3 보다 커서, 기하학적으로 작은 먼지가 큰 먼지로 간주되어 측정되었기 때문이라고 판단된다. 그림 3(b)를 보면, OPC로 측정된 시험먼지의 피크 무게농도는 약 5.6 μm 에서 나타났고, APS로 측정된 피크 무게농도는

약 2.7 μm 와 12 μm 에서 나타났다.

그림 3(a)에서 보듯이 10 μm 이상인 먼지의 개수가 상대적으로 매우 적어 시간에 따른 먼지 발생량의 편차가 크기 때문에 무게농도의 계산에서 제외하였다. 밀도를 알고 있는 JIS Z 8901 Class 8의 공기역학적 입경과 광학적 입경의 크기를 맞추어 APS와 OPC의 측정자료에서 일정 크기 이상의 입자만 포함시켰다. APS는 0.542 μm 이상인 먼지의 개수만 포함시켰으며, OPC는 0.425 μm 이상인 먼지의 개수만 포함시켰다. 무게농도에서는 10 μm 이상의 먼지를 제외하였다.

실험이 진행되는 동안 시험먼지 발생의 안정성을 점검하기 위하여 10분 동안 측정된 데이터를 그림 3(c)에 나타내었다. 10분 동안 OPC와 APS의 개수농도가 1,300-1,800개/ cm^3 로 유지되었으며, 10 μm 이하인 먼지의 무게농도가 2,500-3,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유지되었다. 그림 3(c)에서 10분 이상 발생시킨 먼지농도의 표준편차가 평균의 10% 이하이므로($CV < 10\%$), 시험먼지가 10분 이상 일정하게 발생되었다고 생각된다.

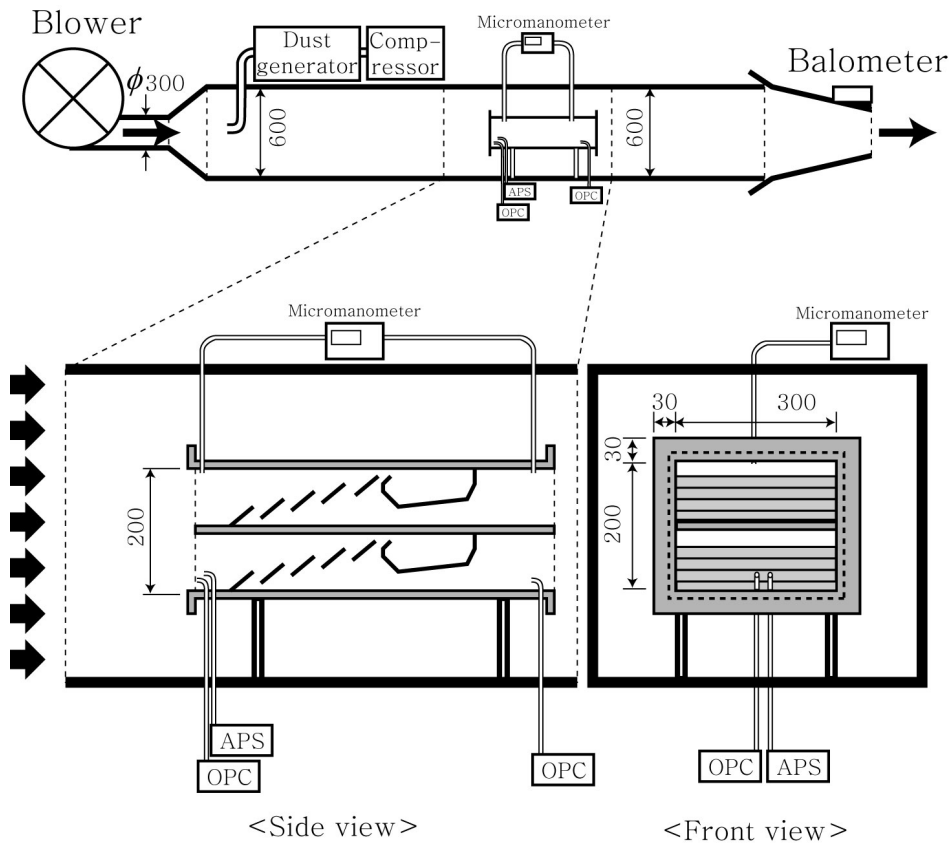


Fig. 2. Schematic of a wind tunnel used in this study.

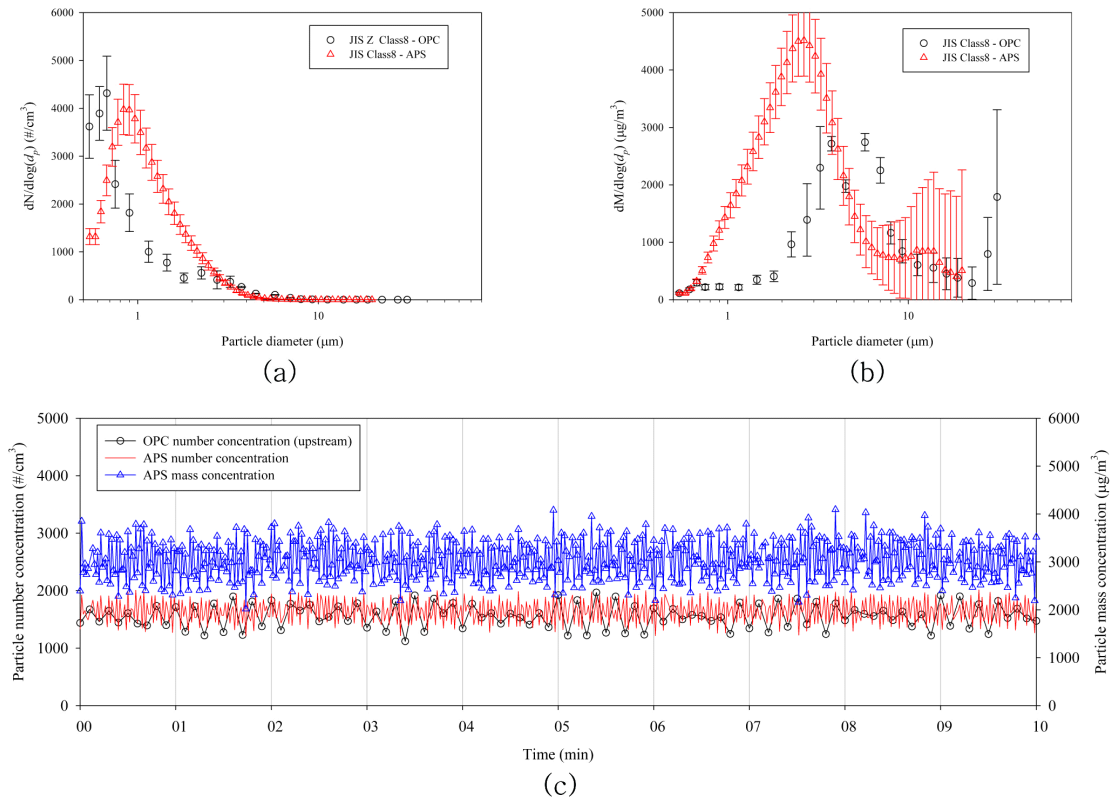


Fig. 3. Characteristics of test dust. (a) Number-based particle size distribution, (b) mass-based particle size distribution, and (c) stability of dust generation.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력손실 특성

풍동에서 열린 유동에 놓인 루버 집진기 모형의 내부로 유입되는 유동의 유속에 따른 압력손실을 측정하여 그림 4에 나타내었다. 전동차의 하부에서 평균 유속이 4-5 m/s 이므로(Bae et al., 2015), 풍동 시험단면의 유속을 4가지(2, 3, 4, 5 m/s)로 설정하여 시험하였으며, 이때 루버 집진기 모형의 유입 유속은 유동저항의 차이에 따라 1.2-3.5 m/s로 분포하였고, Re 는 12,000-35,000 범위에 해당하였다. 루버 집진기의 유속은 풍동 시험단면 유속의 약 70-75%이었다. 압력손실은 8-40 Pa 범위로 나타났다. 모델별 유동저항을 비교하면, 모델 1, 2, 3 중에서 루버의

각도가 62° 로 가장 큰 모델 3의 유동저항이 가장 컸다. Poulton and Cole(1981)이 언급한 경향과는 반대이지만, 본 연구에서는 루버의 각도가 커지면서 공간적인 제약으로 유로도 함께 좁아져 유동저항이 증가한 것으로 추정된다. 그림 1에서 보듯이 5개 모델 중에서 모델 3의 유도가 가장 좁다. 모델 2, 4, 5 중에서 루버의 길이가 가장 길고 개수가 적은 모델 5의 유동저항이 가장 컸으며, 이것은 기존 결과와 일치한다(Gee and Cole, 1969). 단, 루버의 길이가 더 긴 모델 2가 모델 4보다 유동저항이 작는데, 이것은 본 연구에서는 루버의 길이가 증가함에 따라 루버의 개수가 감소하기 때문에 생긴 결과라고 추측된다.

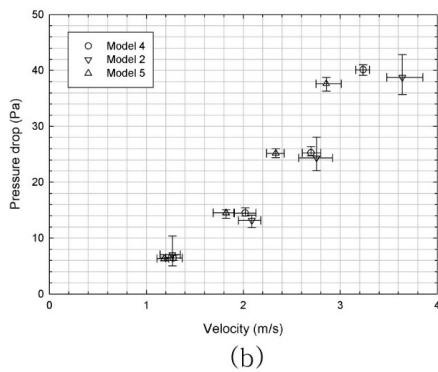
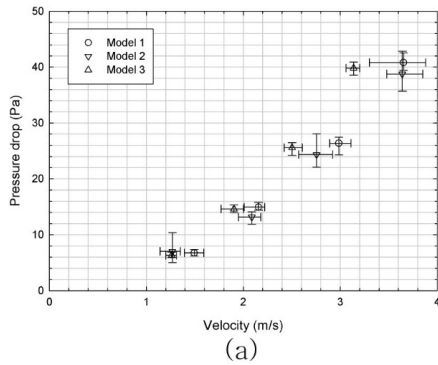


Fig. 4. Pressure drop characteristics for five models, (a) Effect of louver angle and (b) effect of louver length and number of louvers.

3.2 집진효율 특성

풍동 시험단면의 유속 4 m/s인 조건에서 모델 2의 상류와 하류에서 OPC로 10분 동안 측정된 JIS Z 8901 Class 8 시험먼지의 개수농도 및 무게농도에 대한 입경분포를 그림 5에 나타내었다. 입경이 작아짐에 따라 개수농도는 증가하지만, 입경이 클수록 상류와 하류의 개수농도 차이가 커지는 경향을 나타낸다. 무게농도는 입경이 클수록 증가하다가 약 5 μm 이후에는 감소하는 경향을 나타내고, 1 μm 이상에서 상류와 하류의 무게농도 차이가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 10 μm 이상인 경우 먼지의 개수가 적고 시간에 따른 변동도 크므로, 시험먼지의 개수농도가 1개/cm³ 이상인 10 μm 이하인 먼지만 집진효율의 계산에 사용하였다.

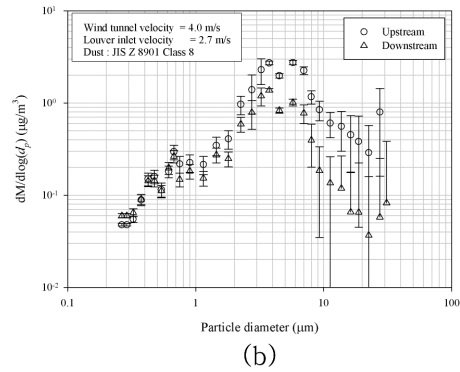
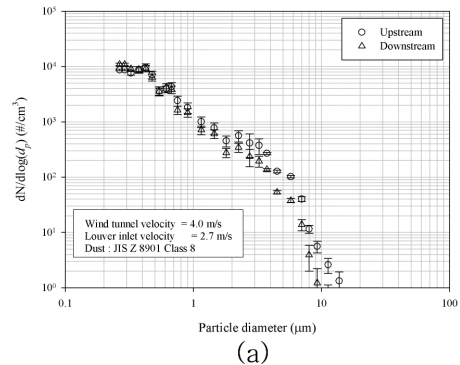


Fig. 5. Comparison of particle size distributions both at upstream and downstream, (a) Number and (b) mass.

10 μm 먼지를 OPC가 1.2 L/min으로 10분간 샘플링하면 12,000개 이상의 입자가 측정되므로 집진효율을 계산하는데 충분한 양의 데이터이다.

시험유속 및 루버 집진기의 모델에 따른 입경별 집진효율 곡선을 그림 6에 나타내었다. 시험먼지는 JIS Z 8901 Class 8이었다. 루버 집진기 모형의 상류와 하류에서 OPC로 동시에 측정된 개수농도의 10분 평균으로부터 집진효율을 구하였다. 그림 6을 보면, 루버 집진기의 집진효율은 대체로 입경이 커짐에 따라 증가하고, 50% 집진효율이 되는 입경은 약 3 μm 이다.

루버 집진기는 먼지의 관성을 이용하여 집진하므로, 모델 2에 대해서 풍동의 시험단면에서 유속을 2, 3, 4, 5 m/s로 변화시켰을 때 입경별 집진효율을 그림 6(a)에 나타내었다.

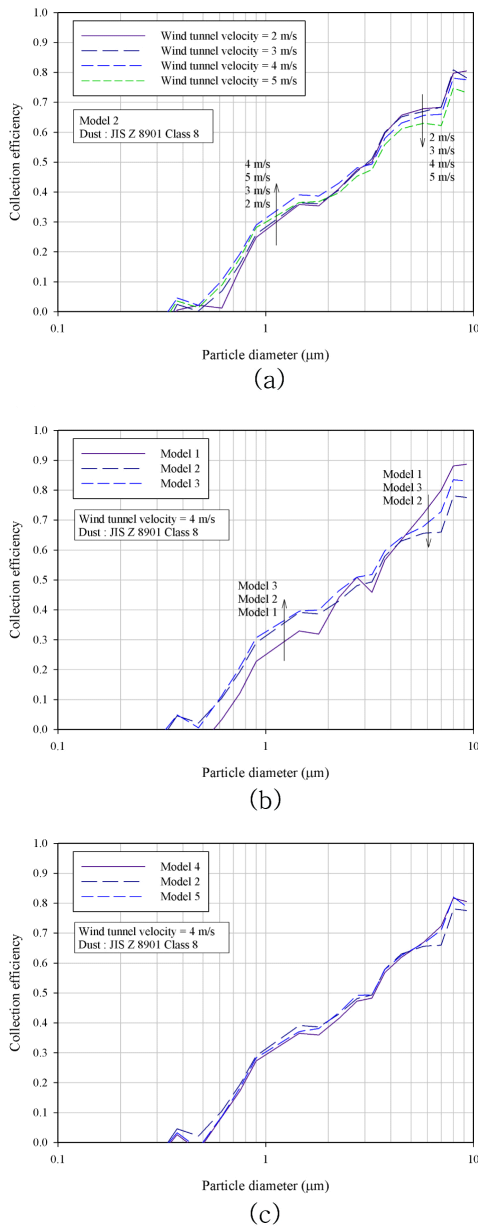


Fig. 6. Fractional particle collection efficiency characteristics. (a) Effect of velocity for model 2, (b) effect of louver angle, and (c) effect of louver length and number of louvers.

입경이 커짐에 따라 집진효율이 증가하지만, 유속에 따른 변화는 크지 않다. 집진효율이 50%가 되는 입경은 약 3 μm이다. 유속에 따른 집진효율은 3 μm

m 전후로 경향이 바뀌는데, 3 μm 이하에서는 미세한 차이이지만 유속이 빠를수록 집진효율이 증가하고, 3 μm 이상에서는 유속이 느릴수록 집진효율이 증가한다. Musgrove et al.(2012)의 실험에 의하면, Re가 20,000 이상에서 집진효율이 거의 일정하며, Re가 증가함에 따라 집진효율이 완만하게 감소하는 경향을 나타낸다. 이 연구에서는 무계농도로 집진효율을 평가하였기 때문에 큰 먼지의 영향이 컸을 것이고, 그림 6(a)에서 3 μm 이상인 먼지의 집진효율 결과와 같은 현상일 것이라 추측된다. 3 μm 이하에서는 주로 순수 관성에 의해 임팩터와 같은 집진원리로 루버 날에 집진되기 때문에, 단순하게 유속이 증가할수록 집진효율이 증가한 것으로 추측된다.

그림 6(b)는 풍동의 유속이 4 m/s일 때 루버의 각도에 따른 집진효율의 차이를 나타낸 것이다. 3 μm 이하인 먼지의 경우 루버의 각도가 증가함에 따라 집진효율이 증가하며, 3 μm 이상인 먼지의 경우 루버의 각도가 증가함에 따라 집진효율이 감소한다. 이것은 유속의 영향과 마찬가지로 루버의 각도가 증가하면 3 μm 이하인 먼지가 루버 날에 부딪히는 각도가 커지므로 충돌 효과가 더 커지기 때문이다. 3 μm 이상인 먼지는 루버의 각도가 커질수록 루버 날에 뿜겨서 뒤 쪽 루버 날로 가는 경로가 길어지기 때문에 감소하는 것으로 추측된다. 그림 6(c)를 보면, 루버의 길이 및 개수에 따른 집진효율의 차이는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 유속이나 루버의 각도는 먼지의 관성에 영향을 미치지만, 루버의 길이는 관성 효과와 거의 무관하기 때문인 것으로 생각된다.

시험유속 및 루버 집진기의 모델에 따른 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 집진효율을 비교하여 그림 7에 나타내었다. 모델 2에 대해서 풍동의 유속을 2, 3, 4, 5 m/s로 변화시켰을 때 집진효율을 나타낸 그림 7(a)를 보면, 유속이 빨라질수록 PM₁₀의 집진효율은 50% 근처에서 소폭 감소하지만, PM_{2.5}의 집진효율은 약 30%로 거의 차이가 없다. 풍동의 유속이 4 m/s일 때 5가지 모델의 집진효율을 비교한 그림 7(b)를 보면, 모델별 차이는 크지 않고 PM₁₀의 집진효율은 47-54% 범위이고, PM_{2.5}의 집진효율은 28-34% 범위이다.

풍동의 유속 2-5 m/s 범위에서 PM₁₀의 집진효율이 47% 이상이므로, 루버 집진기는 항공기 터빈뿐만 아니라 주행하는 전동차의 하부에 부착하여 미

세먼지를 제거하는 용도로 사용이 가능할 것으로 생각된다. 또한, 낮은 유속에서 작동하는 경우 소폭의 형상 변화가 집진효율에 미치는 영향이 적다.

그러므로 전동차 부착용 루버 집진기를 개발할 경우 루버의 각도는 52° 내외, 루버의 길이는 37.5 mm 내외, 루버의 개수는 8개 내외로 설정하여 형상을 설계하면, 집진효율이 50%가 되는 입경이 약 3 μm이고, PM₁₀의 집진효율이 50% 이상인 성능을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 전동차가 운행하는 터널의 부유먼지에는 시험먼지보다 큰 밀도(7.874 g/cm³)를 갖는 철 성분이 많이 포함되어 있으므로, 실제 적용환경에서 루버 집진기의 PM₁₀ 집진효율은 풍동 실험을 근거로 추정된 값보다 더 높을 것으로 예상된다.

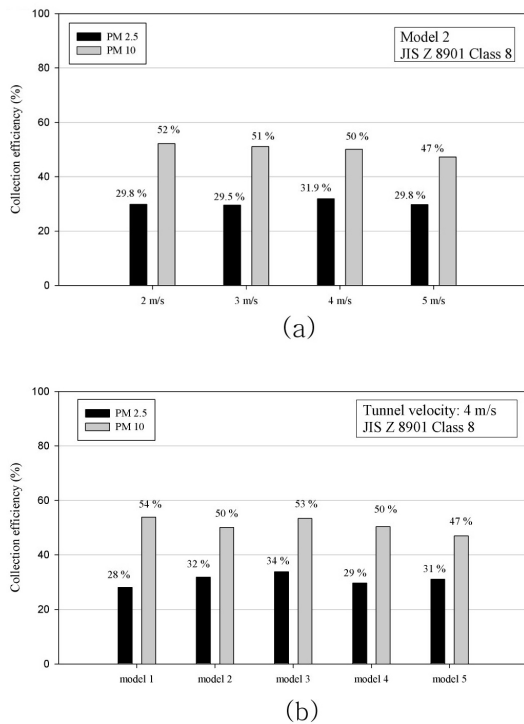


Fig. 7. Particle collection efficiency characteristics for PM_{2.5} and PM₁₀. (a) Effect of velocity for model 2 and (b) effect of louver design parameters for five models.

4. 결론

본 연구에서는 항공기 터빈에 많이 쓰이는 루버 집진기의 적은 유동저항과 큰 먼지에 대한 높은 집진효율에 착안하여, 도시철도 전동차의 주행풍으로 작동하는 경우 주행풍의 열린 유동에 놓인 루버 집진기를 모사하기 위해 단면적이 6배 큰 풍동 내부에 루버 집진기 모형을 설치하여 압력손실 및 집진효율 성능을 평가하였다. JIS Z 8901 Class 8을 시험먼지로 사용하였고, 루버의 각도, 길이 및 개수를 변화시켜 5가지 모델을 설계하였다.

풍동에서 루버 집진기의 모형으로 유입되는 유속은 주행풍 유속의 약 70-75%이고, 압력손실은 풍동의 유속이 2-5 m/s로 변할 때 8-40 Pa 범위이었다. OPC로 측정된 입경별 집진효율은 대체로 유속이 빨라질수록 증가하고, 루버 집진기 모형의 형상에 따른 차이는 크지 않았다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 집진효율은 유속 및 모델에 거의 무관하게 각각 50% 및 30% 근처이었다. 루버 집진기를 전동차의 하부에 장착하여 주행풍으로 미세먼지를 집진하고자 하면, 전동차 하부의 유속이 2 m/s 이상인 조건에서 50% 이상의 PM₁₀의 집진효율을 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 전동차가 운행하는 터널의 부유먼지에는 밀도가 시험입자보다 큰 철이 많이 포함되어 있으므로, 실제 적용환경에서 PM₁₀의 집진효율은 더 높을 것으로 예상된다. 루버 집진기의 설계 시 모델 2를 기준으로 루버의 각도를 ±10°, 루버의 길이를 ±10 mm 변화시켜도 PM₁₀의 집진성능은 별 차이가 없을 것으로 예상된다. 추가로 압력손실을 고려하면, 모델 2의 압력손실이 낮아 더 많은 유량이 루버 집진기로 유입되므로 전체 집진량은 더 많아진다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술 연구사업(15RTRP-B082501-02)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

- Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Makela, T., Hirsikko, Anne., Hameri, K., Ralsanen, M., Hilamo, R., Koskentalo, T., and Jantunen, M. (2005). The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system, *Atmospheric Environment*, 39(28), 5059–5066.
- Bae, G.N., Kim, J.B., Woo, S.H., Yook, S.J., Park, H.K., and Yoon, H.H. (2015). Non-powered dust removal device attached underneath a train cabin in a subway tunnel, *The Built Environment*, 168(1), 325–331.
- Branis, M. (2006). The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmospheric Environment*, 40(2), 348–356.
- Cheng, Y-H., Lin, Y-L., and Liu, C-C. (2008). Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei Rapid Transit System, *Atmospheric Environment*, 42(31), 7242–7249.
- Cheung, K., Kam, W., Daher, N., and Sioutas, C. (2011). Particle concentrations (PM₁₀, PM_{2.5}) in subways, light rail trains and platforms in the Los Angeles metro system, 29th Annual Conference, American Association for Aerosol Research, Abstract number 397.
- Chillrud, S., Epstein, D., Ross, J., Sax, S., Pederson, D., Spengler, J., and Kinney, P. (2004). Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system, *Environmental Science and Technology*, 38(3), 732–737.
- Furuya, K., Kudo, Y., Okinaga, K., Yamuki, M., Takahashi, S., Araki, Y., and Hisamatsu, Y. (2001). Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 19(4), 469–485.
- Gee, D.E., and Cole, B.N. (1969). A study of the performance of inertia air filters, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers – Symposium on Fluid Mechanics and Measurements in Two-Phase Systems, University of Leeds, Leeds, UK, pp.167–176.
- Grass, D., Ross, J., Family, F., Barbour, J., Simpson, H.J., Coulibaly, D., Hernandez, J., Chen, Y., Stavkovich, V., Li, Y., Graziano, J., Santella, R.M., Brandt-Rauf, P., and Chillrud, S.N. (2010). Airborne particulate metals in the New York City subway: a pilot study to assess the potential for health impacts, *Environmental Research*, 110(1), 1–11.
- Johansson, C., and Johansson, P-Å. (2003). Particulate matter in the underground of Stockholm, *Atmospheric Environment*, 37(1), 3–9.
- Jung, H., Kim, B., Ryu, J., Maskey, S., Kim, J., Sohn, J., and Ro, C. (2010). Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea, using quantitative single-particle analysis, *Atmospheric Environment*, 44, 2287–2293.
- Karlsson, H.L., Holgersson, Å., and Moller, L. (2008). Mechanisms related to the genotoxicity of particle in the subway and from other sources, *American Chemical Society*, 21(3), 726–731.
- Karlsson, H.L., Nilsson, L., and Moller, L. (2004). Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells, *Chemical Research in Toxicology*, 18(1), 19–23.
- Kim, Y., Kim, M., Lim, J., Kim, J., and Yoo, C. (2010). Predictive monitoring and diagnosis of periodic air pollution in a subway station, *Journal of Hazardous Materials*, 183(1–3), 448–459.
- Lee, K.R., Kim, W.G., Yook, S.J., Woo, S.H., Kim, J.B., Bae, G.N., Park, H.K., and Yoon, H.H. (2015). Prediction of trajectories of particles generated underneath a subway train running in an underground tunnel, *Particle and Aerosol Research*, 11(1), 21–28.
- Midander, K., Elihn, K., Wallen, A., Belova, L., Karlsson, A.B., and Wallinder, I.O. (2012). Characterisation of nano- and micron-sized airborne and collected

- subway particles, a multi-analytical approach, *Science of the Total Environment*, 427-428, 390-400.
- Musgrove, G.O., Thole, K.A., Grover, E., and Barker, J. (2012). Performance measurements of a unique louver particle separator for gas turbine engines, *Journal of Engine Gas Turbines Power*, 135(1), 012001.
- Park, D-U., and Ha, K-C. (2008). Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environmental International*, 34(5), 629-634.
- Poulton, P., and Cole, B.N. (1981). An experimental and numerical investigation of louvered inertia air filter performance, Proceedings of the Conference on Gas Borne Particles, Institution of Mechanical Engineers, Oxford, UK, June, pp.161-170.
- Raut, J.C., Chazette, P., and Fortain, A. (2009). Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris, *Atmospheric Environment*, 43(4), 860-868.
- Ripanucci, G., Grana, M., Vicentini, L., Magrini, A., and Bergamaschi, A. (2006). Dust in the underground railway tunnels of an Italian town, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(1), 16-25.
- Zverev, N.I. (1946). Shutter-type dust collector of small dimensions, *The Engineers Digest*, 7(11), 353-355.