

공기조화기 장착용 축상유입식 사이클론의 입자제거효율에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Particle Collection Efficiency of Axial-flow Cyclone in Air Handling Unit

김세영^{1,2)} · 권순박^{2)*} · 박덕신²⁾ · 조영민²⁾ · 김진호³⁾ · 김명준¹⁾ · 김태성¹⁾

¹⁾성균관대학교 기계공학부, ²⁾한국철도기술연구원 도시철도공기질개선연구단

³⁾한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단

(2011년 4월 4일 접수, 2011년 4월 26일 수정, 2011년 5월 24일 채택)

Seyoung Kim^{1,2)}, Soon-Bark Kwon^{2)*}, Duck-Shin Park²⁾, Youngmin Cho²⁾,
Jinho Kim³⁾, Myungjoon Kim¹⁾ and Taesung Kim¹⁾

¹⁾*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

²⁾*Urban Transit Research Department, Korea Railroad Research Institute*

³⁾*Urban Transit Standardization Corps, Korea Railroad Research Institute*

(Received 4 April 2011, revised 26 April 2011, accepted 24 May 2011)

Abstract

A novel particle removal system for air handling unit (AHU) of subway station was evaluated experimentally. The novel system was designed in order to minimize the maintenance cost by applying axial-flow cyclones. The system consists of multiple cyclone units and dust trap. Based on our previous numerical study, it was found to be effective for removal 1~10 μm sized dust particles. In this study, we manufactured the mock-up model and evaluated the model experimentally. Liquid and solid test particles were generated for evaluating collection efficiency of the system and the pressure drop was monitored. The collection efficiency was varied from 41.2% to 85.9% with increasing the sizes of particle from 1 to 6.5 μm by particle count ratio of inlet and outlet. The pressure drop was maintained constant less than 20 mmH₂O. In addition, the collection efficiency was estimated by total mass for solid test particles. It was found that the collection efficiency was 65.7% by particle mass ratio of inlet and outlet. It shows that present system can replace current pre-filters used in subway HVAC system for removing particulate matters with minimal operational cost.

Key words : Axial-flow cyclone, Particle matters, Air handling unit, Indoor air quality, Subway station

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-460-5375, E-mail : sbkwon@krii.re.kr

1. 서 론

사람이 생활하는 공간의 실내공기질(IAQ, Indoor Air Quality)이 인체의 건강에 미치는 영향은 실내의 유해물질 배출량, 기상조건과 실내 환기의 조건, 실내 오염물질의 제거 기능 등의 여러 가지 요소에 의하여 좌우된다. 또한, 현대인은 하루 중 거의 90% 이상을 실내 환경에서 생활하고 있으며, 실외보다 실내에서의 공기오염이 사회적 문제로 대두되고 있다. 최근 대중교통수단 중 지하철의 이용 승객수가 증가함에 따라 지하생활공간인 대규모 지하철역 및 지하상가 등의 실내공기질 관리에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 이를 대변하듯 환경부는 지하철역사 공기질 개선을 위한 5개년 계획을 수립하여 관련 기관들과 협의를 거쳐 개선사업을 실시하고 있다.

지하공간 특히 지하철이 운행되는 역사는 미세먼지 등에 의하여 공기질이 악화되고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 외부에서 유입되어 역사 내를 순환하는 공기질을 개선하는 근본적인 방법과 내부에서 발생 또는 순환(비산, 확산)하는 오염원을 최소화시키는 방법이 있다. 이와 관련하여 지하철역사의 실내공기질에 관한 연구는 지하철 역사의 PM_{2.5} (2.5 μm 이하의 미세먼지)와 PM₁₀ (10 μm 이하의 미세먼지) 농도 수준을 평가하는 연구(Park *et al.*, 2005), 지하공간의 실내 입자의 특성을 분석하는 연구(Kang *et al.*, 2008), 지하철역사 내 미세먼지 농도의 모니터링을 위한 측정방법 보정실험(Kim *et al.*, 2010) 및 공기조화기 에어필터의 성능평가 연구(류재식, 2001) 등이 진행되었으나, 실질적인 미세먼지의 농도를 저감하려는 연구는 시도되지 않았다.

대부분의 지하철역사의 경우 터널구간의 차량운행과 지상에서 유입되는 먼지 등을 배출하기 위하여 자연 환기나 공기조화설비인 공기조화기(air handling unit: AHU)에 의존한 강제 환기를 통하여 실내공기를 관리하고 있다. 하지만 입자 발생원이 다양하고 입자의 특성상 중력의 영향을 크게 받아 중력 반대 방향으로의 환기가 어렵기 때문에 지하철역사의 입자농도는 지상의 입자농도보다 높은 경향을 가지게 된다. 뿐만 아니라 최근의 연구에 따르면 지하철역에서 발생하는 미세먼지는 지상에서 발생하는 미세먼지보다 호흡기관에 8배 이상의 독성을 지닌다고 알려져 있으며, 이

는 지하철역사 내의 입자가 주로 전동차와 선로의 마찰로 인해 발생하는 금속성 입자와 지상의 도로 근처에 위치한 환기구를 통해 유입되는 디젤 입자 등으로 구성되어 있기 때문이다(Nieuwenhuijsen *et al.*, 2007).

공기조화기는 승강장과 대합실을 구분하여 2구역으로 나뉘어 설치하여 외부에서 유입되는 공기와 내부순환 공기를 정화하고 있으며, 공기조화기용 에어필터는 재진원리에 따라 정전식, 건성여과식, 점착식으로 구분되고, 보수관리 방식에 따라 자동세정형, 자동재생형, 자동갱신형, 정기세정형, 여재교환형, 유닛교환형 등으로 구분된다. 통상 전단 프리필터와 후단 자동필터의 2단으로 구성되어 있고, 전단 프리필터는 여재교환용(부직포 필터, 롤필터, 백필터 등) 에어필터, 후단 자동필터는 자동세정형, 자동흡입형, 전기집진기 등 다양한 종류의 에어필터가 사용되고 있으며, 최근 개통된 역사나 냉방공사를 한 역사의 경우, 여재교환용 필터를 사용하는 대신 자동세정형 필터를 사용하고 있다(강중구 등, 2008).

여재교환용 에어필터의 경우 미세먼지를 포집할수록 차압이 증가하고 필터 사이의 공극이 막힘으로써 공기조화기 틈새로 공기가 순환하게 되어 포집효율이 급격히 떨어지며, 잦은 교체에 따른 높은 유지비가 소요되는 문제점이 있다. 자동세정형 방식의 경우 물을 이용하여 필터를 세척하는 과정에서 전기장치에 대한 영향이 발생하고, 추가적으로 폐수처리 설비가 필요하다. 또한, 세척된 먼지에 의해 배수구가 막히는 현상으로 공기조화기 내부에 물이 고이며, 이로 인해 미생물 번식에 의한 2차 오염이 발생한다. 자동흡입형 필터는 오염된 여재를 자동 진공청소기를 이용하여 타이머 스케줄에 의해 자동적으로 재생시켜주는 필터로, 필터 교체주기가 일반 여재교환용 에어필터에 비해 긴 장점이 있지만, 흡입장치 부분의 잦은 고장과 필터 교체 시 높은 비용이 소요되는 등 유지관리에 문제가 있다. 전기집진기는 초기 투자비용이 높고, 집진부의 자동세정 장치가 추가적으로 필요하다는 문제를 가진다. 또한, 국내에 에어필터에 관한 성능 및 관리 기준이 없는 실정으로 실제 현장관리자의 재량에 의해 필터 교체주기와 세척주기가 이루어지고 있으며, 잦은 필터의 교체에 따른 높은 유지비가 소요되는 실정이다. 최근 연구에 따르면 기존의 에어필터들이 가지는 문제점을 해결하기 위하여

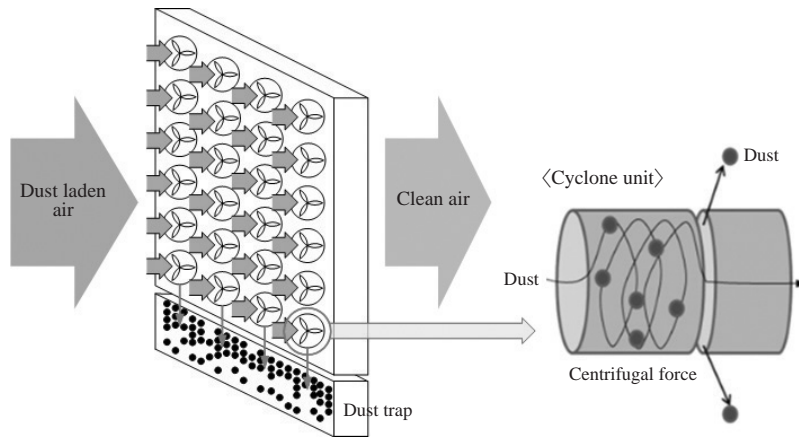


Fig. 1. Concept of axial-flow cyclone.

유지보수가 쉬운 에어필터의 개발이 필요하고, 프리필터 개념의 사이클론 시스템이 제안되기도 하였다(권순박 등, 2006).

기존 에어필터의 경우 고가의 초기 설치비용과 지속적인 필터의 교체에 따른 유지비용이 높은 단점이 있지만, 사이클론의 경우 구조가 간단하고 작동부위를 가지지 않으므로 초기 설치비용이 적으며, 분진통으로 미세먼지를 분리하는 방식으로 필터 교체가 필요 없어 교체비용이 없는 장점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 현재 적용되고 있는 에어필터의 유지관리 문제를 해결함과 동시에 기존 에어필터의 성능을 향상시킬 수 있는 프리필터 개념의 축상유입식 사이클론 방식의 미세먼지 저감 시스템을 제안하고, 실제 목업(mock-up)모델을 제작한 후, 실험을 통해 압력강하와 입자포집효율에 대한 성능평가를 수행하였다.

2. 축상유입식 사이클론

2.1 개요

사이클론 집진기의 미세먼지 제거 원리는 입자의 원심력을 이용하여 공기 중의 미세먼지를 분리하여 제거하는 원리로 미세먼지 제거에 있어서 저비용으로 효과적인 성능을 발휘하는 오염방지 장치로 널리 사용되고 있다. 사이클론은 크게 접선식(tangential)과 축상유입식(axial-flow)의 2가지로 나눌 수 있다.

접선식 사이클론의 경우 유입된 공기는 축의 접선방향(90°)으로 회전하면서 축 상부로 빠져나가고, 일정 원심력 이상을 가진 미세먼지를 공기중에서 분리하여 제거하는 방식으로 입자포집효율은 좋으나 압력강하가 크고 부피가 큰 단점을 지닌다. 축상유입식의 경우 접선식에 비해 입자포집효율은 떨어지지만 유동 방향이 일정해 압력강하가 낮고 부피가 작아 협소한 장소에 설치하기 용이하다.

축상유입식 사이클론의 이론적 접근은 Maynard(2000)에 의해 수행되었으며, 층류(laminar flow, Reynolds number < 2,000)조건에서 작동하는 축상유입식 사이클론 모델이 제안되었다. Tsai *et al.* (2004)은 저압상태에서 축상유입식 사이클론의 입자포집효율에 대한 연구를 수행하였으며, 축상유입식 사이클론을 이용한 초미세입자의 분리기술은 Hsu *et al.* (2005)이 제안하였다. 최근들어 Hsiao *et al.* (2011)은 기하학적 형상(날개형상 및 날개간격 등 8가지 모델)에 대하여 축상유입식 사이클론의 입자포집효율에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제안된 축상유입식 사이클론의 경우 유입부와 출구부의 공기흐름이 동일 선상에 있기 때문에 공기조화기와 같은 축류형 설비 내부에 설치가 용이한 축류방식의 사이클론을 사용함으로써 필터의 두께 및 부피를 줄이고 적용성을 높였다. 그림 1과 같이 유체가 사이클론 날개 형상에 따라 이동하면서 원심력에 의하여 미세먼지를 분리하며, 다수의 축상유입식 사이클론을 패널 방식으로 조립하여 에어필터 시스템을 구성할 수 있다. 또한,

사이클론 하단부에 분진통(dust trap)을 설치하여 분리된 미세먼지를 이송하기 때문에 분진유지 용량은 무한대로 볼 수 있으며, 기존 에어필터의 단점중 하나인 미세먼지 포집 시간에 따른 차압 증가로 인해 발생하는 필터 교체비용 문제를 해결할 수 있다.

2.2 공기조화기 및 에어필터

현재 지하역사 공기조화설비는 크게 외부공기를 도입하는 환기기와 도입된 공기와 실내 공기를 혼합하여 공급하는 공기조화기로 구성된다. 공조기 내부에는 여름철 냉방을 위한 냉각코일과 외부에서 도입되는 공기와 내부에서 순환되는 공기중의 미세먼지를 제거하기 위한 에어필터가 설치되어 있다. 외부공기의 경우 지상에 설치되어 있는 환기구를 통해 지하역사로 유입하게 되는데, 국내의 경우 도심지역의 혼잡도와 주변 상가의 민원으로 인해 환기탑의 높이가 낮게 설치되어 오염물질이 쉽게 유입될 수 있는 문제점이 있다. 공기조화기 내부에 설치되어 있는 에어필터 역시 외부에서 도입되는 공기가 오염되어 있을 경우 쉽게 막히고, 이로 인해 에어필터의 세척주기 및 교체주기가 짧아지기 때문에 유지보수가 어려운 문제점이 있다. 지하역사 공기조화기 내부에 적용되고 있는 에어필터의 종류는 지하철 운영기관, 구축시기 및 역사규모에 따라 다양한 방식이 적용되고 있다. 미디엄필터(백필터, 롤필터), 자동세정형필터, 자동흡입형필터, 전기집진기 등이 사용되고 있으나, 기존 에어필터의 경우 미디엄필터의 잦은 교체에 따른 비용과 물을 이용하여 세정함에 따른 전기장치에

대한 영향과 추가적인 설비(폐수설비, 동파방지설비 등)로 인한 초기비용이 높은 문제점을 가지고 있다(김세영 등, 2010). 본 연구에서 제시하는 축상유입식 사이클론의 경우 현재 운영중인 공기조화기 내부에 쉽게 적용될 수 있고, 전원공급이 없는 형태이며, 기존의 에어필터의 큰 문제점인 필터교체주기 및 필터 재생 문제를 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 연구방법

3.1 목업(mock-up) 모델 제작

기존 선행연구로 축상유입식 사이클론의 초기 모델에 대한 설계가 진행되었으며, 수치해석 프로그램인 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 최적의 압력강하와 입경별 입자포집효율이 고려된 블레이드 개수와 회전각에 대한 연구(Kim *et al.*, 2009)가 수행되었다. 선행연구의 결과를 바탕으로 목업모델을 결정하였으며, 압력강하와 입경별 포집효율이 최적의 값을 가지는 멀티유닛을 선정한 후, 설계도를 바탕으로 수치해석 모델의 치수와 같은 크기로 목업모델을 제작하였다. 사이클론 직경은 120 mm, 전체 길이는 256 mm이며, 목업 모델을 제작하기 위한 최종 디자인으로 크게 4개의 구조로 구분하여 설계를 하였다. 그림 2의 (a)에서 보는 바와 같이 입구부의 포집효율을 높이고 사이클론 전체를 고정시킬 수 있는 전면 고정틀(1), 사이클론 날개를 고정시키는 역할을 가지고 있는 본체(2), 그리고 사이클론 날개 부

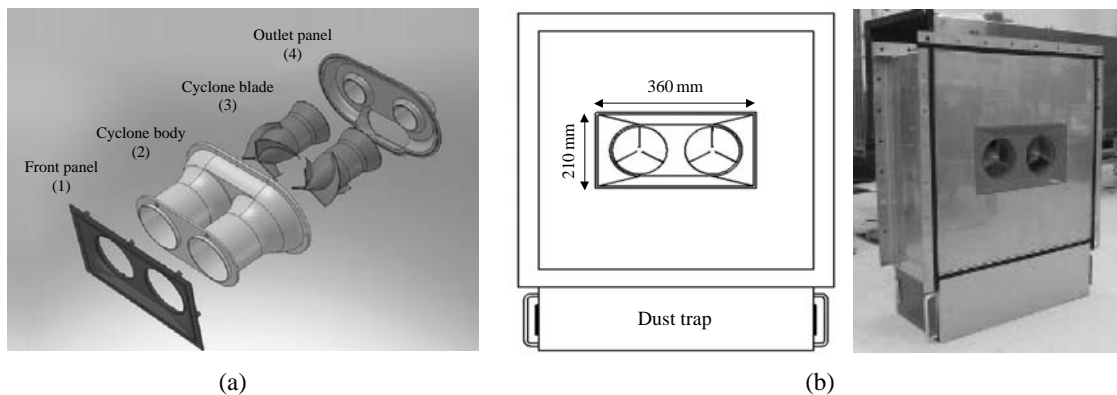


Fig. 2. (a) 3-dimensional design of mock-up model and (b) actual mock-up model for performance evaluation in wind tunnel.

분(3)과 출구 부분(4)으로 나눌 수 있으며, 출구 부분은 분리된 입자를 포집하는 부분과 깨끗한 공기를 배출하는 배출부로 구분된다. 또한 성능평가를 위하여 그림 2의 (b)에서 보는 바와 같이 풍동장치에 연결할 수 있는 판넬 형태로 제작하였다.

3. 2 목업 모델의 성능평가 방법

제작된 목업 모델의 성능평가는 ASHRAE 규격에 맞게 제작한 풍동장치 내에 장착하여 수행하였다. 먼저, 싸이클론의 입구 면적부(210 mm × 360 mm)가 풍동장치의 단면적(600 mm × 600 mm)에 비해 작은 점을 고려하여 싸이클론 전단과 후단의 덕트 면적을 전면 고정틀 면적에 맞게 아크릴 덕트(높이 220 mm, 폭 370 mm, 길이 1,000 mm)를 추가 제작하여 설치하였다.

그림 3은 실험장치의 모식도와 실제 실험모습을 나타낸 그림으로 실험장치는 크게 입자발생장치와

풍동장치로 구성되어 있으며, 풍동장치는 내부 유속을 조절할 수 있는 팬, 성능평가 대상인 싸이클론, 입자의 농도를 측정할 수 있는 샘플링 관 및 차압계로 구성되어 있다. 풍동장치의 내부 유속 조건은 실제 공기조화기 내부의 유속(필터 면속도 기준 2.5 m/s)과 같은 조건으로 설정하기 위해 TSI社の 직독식 풍량계(EBT 721)를 풍동장치 입구에 설치하여 팬의 회전 주파수에 따른 유량을 측정하여 싸이클론 입구부의 유속을 설정하였다. 입구부에서 발생한 표준입자의 농도는 싸이클론 전단과 후단에서 20 cm 떨어진 지점에 샘플링 관을 설치하여 측정하였고, 전단과 후단의 아크릴 덕트 중앙부를 기준으로 4면(상, 하, 좌, 우)의 평균 압력을 측정하여 압력강하를 산출하였다.

성능평가에 사용된 표준 시험입자는 PALAS社の MAG 3000 장비(액체입자)와 TOPAS社の SAG 401(고체입자) 장비를 이용하여 발생시켰다. MAG 3000

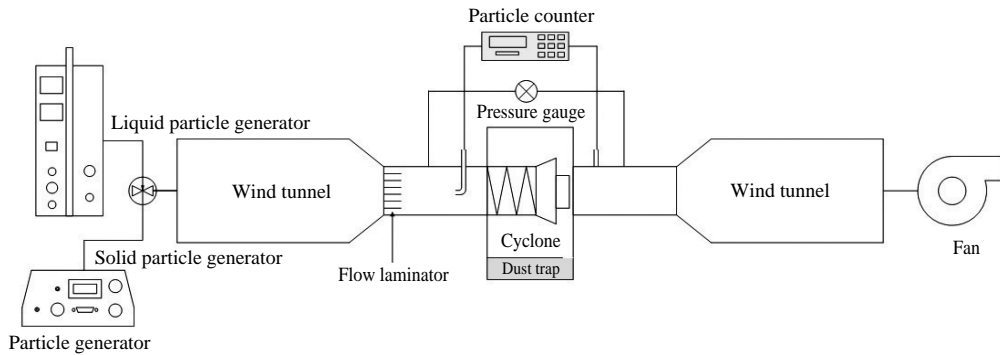


Fig. 3. Experimental setup for particle collection efficiency and pressure drop measurement.

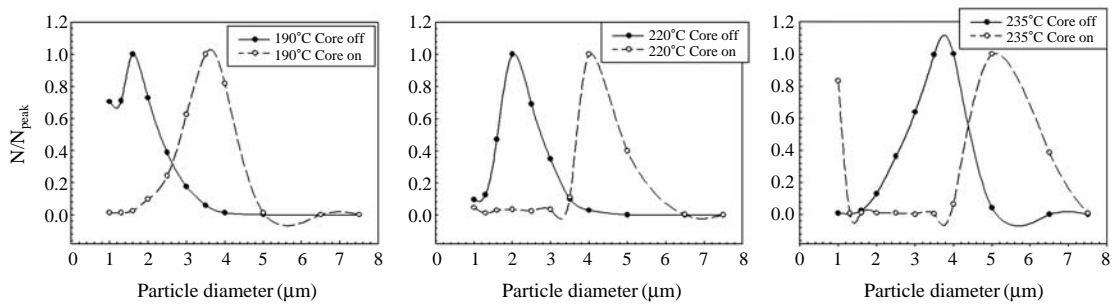


Fig. 4. Frequency distribution of generated particles for different saturator temperature and core source on/off using by MAG3000.

은 DEHS(Di-Ethylhexyl-Sebacate, 밀도=912 kg/m³) 물질을 이질응축(heterogeneous condensation) 원리를 이용하여 입자직경이 0.5~8μm 사이의 단분산(mono-disperse, σ_g=1.15 이하) 액체입자를 약 10⁶ cm⁻³ 농도로 발생시킬 수 있는 장비이며, MAG 3000 장비는 크게 입자발생 용액을 가열하여 증발시킬 수 있는 포화장치(boiler), 증발된 가스를 응축시킬 수 있는 응축장치(condensation flue) 및 이질응축을 위한 재가열장치(reheater)로 구성된다. 발생된 입자의 크기는 포화장치의 온도(140~235°C) 변화와 각 온도에서 core source (NaCl) pass on/off에 의해서 제어가 가능하다. 본 실험에 앞서 MAG3000에서 생성되는 입자의 정확한 사이즈 분포를 알기 위해 검교정을 실시하였으며, 입자의 생성 조건은 포화장치 온도(190, 220, 235°C)와 core source on/off를 변화시켜 수행하였다. 그림 4는 MAG 3000의 포화장치 온도와 core source on/off에 따른 생성 입자의 빈도곡선을 보여준다. 검교정을 통해 실제 생성되는 입자의 최대 크기는 5~6μm로 나타났다.

SAG 410은 아리조나 분진(arizona dust), 탄소검댕

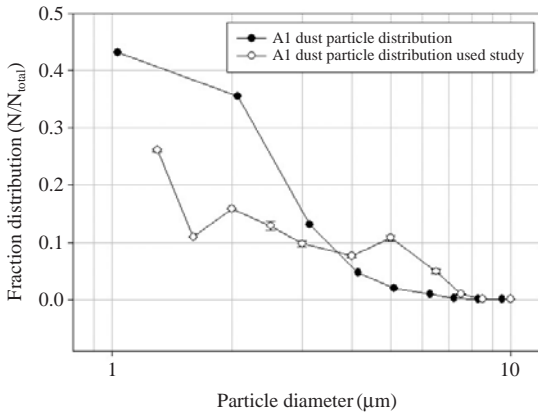


Fig. 5. Fraction distribution of A1 dust used in this study.

(carbon black), 섬유류(fiber) 등의 구성물로 이루어진 합성분진혼합물을 일정한 농도로 분사시켜 주는 장비로 크게 분진통(powder reservoir), 이송벨트(feeding belt), 분사구(injector)로 구성되어 있다. 분진통 내에 scraper가 설치되어 분진을 혼합시켜 줌과 동시에 일정 농도의 분진을 이송벨트로 보내며, 분사구에서 공급되는 압축공기(compressed air)의 압력에 의해 분진이 발생된다. 본 실험에서 사용된 입자는 0.683~12.55 μm의 입경분포를 가지는 A1 dust(밀도=2,650 kg/m³)로, 그림 5는 1~10 μm 범위의 입경분포로 A1 dust 입자의 bulk 상태의 입경분포와 입자발생장치를 통해 공기중으로 부유된 측정된 입경분포를 나타낸 그림이다. A1 dust 사양서에 제시된 입경분포와 입자발생장치 SAG 410을 통해 발생된 입경분포 사이에 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데 이는 발생장치의 입자분사 특징인 것으로 판단된다.

입자 포집효율에 사용된 측정장비인 Grimm社의 dust spectrometer (1.108 v)는 입자의 광학적 성질을 이용하여 개수농도(number concentration)와 질량농도(mass concentration)를 측정할 수 있는 장비이다. Dust spectrometer는 1.2L/min의 흡입유량으로 0.25~32 μm 범위의 입자를 32채널로 구분하여 각 입경범위별 개수농도를 측정하고, PM10(10 μm 이하의 미세먼지), PM2.5(2.5 μm 이하의 미세먼지), PM1(1 μm 이하의 미세먼지)의 질량농도를 측정할 수 있다. 측정간격은 6초로 설정하여 전단과 후단의 입자 농도가 안정화되는 시점을 기준으로 2분간 측정하였다.

3. 3 성능평가 결과

액체입자와 고체입자를 사용하여 축상유입식 사이클론의 목업 모델에 대한 압력강하, 입자포집효율을 산출하기 위해 성능평가를 수행하였으며, 그 결과는 표 1에 나타내었다. 압력강하의 경우 20 mmH₂O의 값으로 실험을 수행하는 동안 일정한 값을 나타냈다.

Table 1. Collection efficiency of axial-flow cyclone for liquid and solid particles.

Number concentration based - liquid particle (DEHS)		Mass concentration based - solid particle (A1 dust)		Pressure drop (mmH ₂ O)
Size range (μm)	Collection efficiency (%)	Size range (μm)	Collection efficiency (%)	
1~1.6	41.3	1~10	65.7	20
2~3	59.9			
3~4	67.2			
5~6.5	87.0			

액체입자(DEHS)의 경우 실험에 사용된 입경분포는 1~6 μm의 범위로 검교정에 사용된 온도(190, 220, 235)와 core source (NaCl) pass on/off를 변화시켜 발생시켰으며, 싸이클론의 전단과 후단에서 발생한 입자의 계수농도는 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 각 입경별 전단과 후단에서 측정된 농도는 1~1.6 μm에서 $4.33 \times 10^8 / m^3$, $2.55 \times 10^8 / m^3$, 2~3 μm에서 $4.31 \times 10^8 / m^3$, $1.73 \times 10^8 / m^3$, 3~4 μm에서 $8.52 \times 10^7 / m^3$, $2.79 \times 10^7 / m^3$, 5~6.5 μm에서 $5.81 \times 10^7 / m^3$, $7.57 \times 10^6 / m^3$ 로 나타났다. 각각의 입자포집 효율은 41.2%, 60.8%, 68.4%, 85.9%로 평가되었고, 분리입경(50% 포집효율을 가지는 입경, cut-off diameter)은 약 1.9 μm로 산출되었으며, 액체입자의 밀도($912 \text{ kg}/m^3$)를 고려하여 중량농도로 환산할 경우

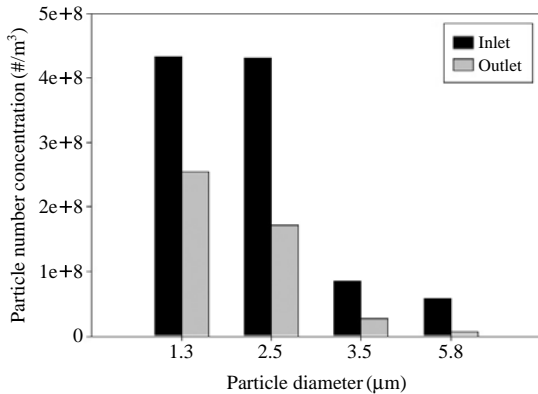
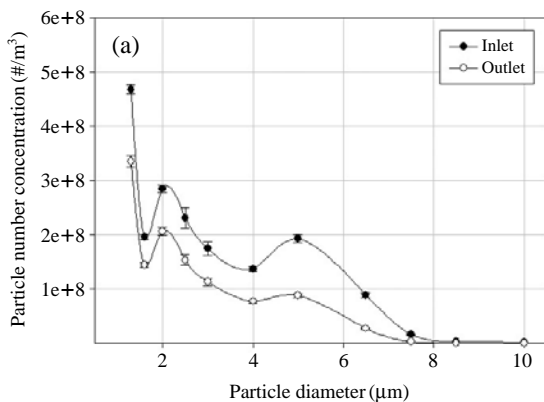


Fig. 6. Particle number concentration at the inlet and outlet of axial-flow cyclone.



전체 입경에 대한 입자포집효율은 약 73.7%로 산출되었다.

고체입자의 경우 A1 dust의 입경분포중 1~10 μm 사이의 입경을 사용하였으며, 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 싸이클론 전단과 후단에서 발생한 고체입자의 입경별 계수농도를 측정 후, 이를 바탕으로 A1 dust의 밀도($2,650 \text{ kg}/m^3$)를 이용하여 그림 7(b)와 같이 입경별 중량농도로 환산하여 전단과 후단에 해당하는 그래프의 면적을 이용하여 입자포집효율을 산출한 결과 65.7%를 나타내었다. 액체입자를 이용하여 실험한 결과와 비교해 보면 입자포집효율이 낮은 경향을 나타내고 있는데, 이는 실제 실험 시 액체입자의 경우 싸이클론 입구의 날개와 내부 표면에 충돌한 모든 면적에 입자가 달라 붙는 반면, 고체입자의 경우 날개와 내부 표면에 충돌하여 달라 붙더라도 입자들이 재비산하게 되는 현상이 발견되었으며, 이로 인해 후단에서 측정된 농도값이 높게 산출되어 나타난 것으로 추정된다. 선행연구로 수행되었던 실제 운영중인 공기조화기 내 에어필터에 대한 성능평가에서 중량법 측정장비(Mini volume air sampler)와 광산란 측정장비(Dust spectrometer, Grimm 1.108)에 의한 에어필터 성능평가 결과 약 33.1%로 나타났다(김세영, 2010). 본 연구의 측정유입식 싸이클론 방식의 경우 질량농도기준 입자포집효율이 약 2배 정도 높은 것으로 산출되었다. 이는 실제 환경과 pilot-scale에서 실험값을 비교하는 데 무리가 있으며, 추후 실제 공기조화기 내부에 장착된 측정유입식 싸이클론의 성능평가 연구가 필요할 것으로 보인다.

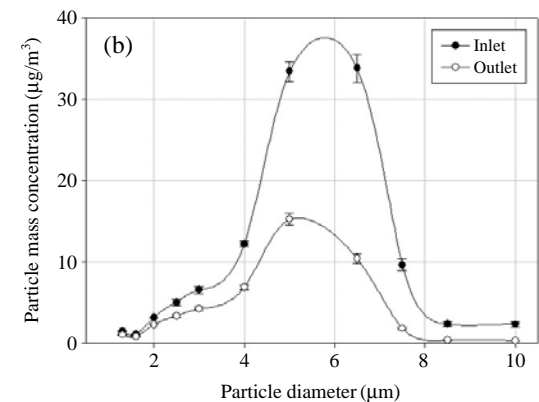


Fig. 7. Size distribution of A1 dust at the axial-flow cyclone inlet and outlet for (a) number distribution and (b) mass concentration (particle density= $2,650 \text{ kg}/m^3$).

4. 결 론

본 논문에서는 기존 지하역사 공기조화기 장착용 에어필터의 문제점을 해결함과 동시에 기존 에어필터의 성능을 향상시킬 수 있는 프리필터 개념의 축상유입식 사이클론 방식의 미세먼지 저감 시스템에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 기존 에어필터들은 가동시간에 따라 압력강하가 증가하고, 이로 인해 필터 교체가 불가피하여 필터 교체에 따른 높은 유지비용 문제와 실제 운행 시 에어필터의 입자포집효율이 낮은 성능을 가지며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 축상유입식 사이클론 방식의 미세먼지 저감 시스템을 제안하였다.

본 연구에서 제안된 축상유입식 사이클론의 성능평가를 위해 목업(mock-up) 모델을 제작하였으며, 제작된 목업 모델은 풍동장치에 설치하여 실험적 연구를 수행하였다. 실험결과 압력강하는 20 mmH₂O 수준으로 나타났으며, 입자포집효율은 계수법 기준으로 1.5 μm에서 41.2%, 2.5 μm에서 60.8%, 3.8 μm에서 68.4%, 5.8 μm에서 85.9%, 분리입경은 약 1.9 μm로 산출되었고 중량법 기준으로 65.7%로 기존 에어필터의 입자포집효율에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다.

최근 관심이 증대되고 있는 지하역사 공기질 문제에 있어 미세먼지는 가장 주요한 관심대상 오염물질로 지목되고 있다. 본 연구를 통해 제안된 축상유입식 사이클론 방식의 미세먼지 저감 시스템은 신개념의 에어필터링 기술로 사용시간 증대에 따른 차압증가 문제를 해결하고, 필터여재의 교환이 필요 없으며, 재생을 위한 추가적인 설비가 필요하지 않다는 점에서 큰 장점이 있다. 향후 실제 지하역사 공기조화기에 적용될 경우 다수의 축상유입식 사이클론을 배열하고 이들을 최적조합할 수 있는 구조적 검토 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

강중구, 신창현, 배성준, 권순박, 김세영, 한석윤(2008) 도시철도 지하역사 공기조화기의 미세먼지 저감성능 개선을 위한 사전연구, 대한설비공학회 동계학술발표대회, 541-545.

김세영, 권순박, 김명준, 김태성, 신창현(2010) 전국 지하역사 공기조화기 에어필터 현황 및 현장 성능평가 방법 개발, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 546-550.

김세영(2010) 공기조화기 장착용 축상유입식 사이클론의 실험적 연구, 성균관대학교 대학원 석사학위 논문.

권순박, 박덕신, 조영민, 박현설, 임경수, 송창병(2006) 지하철 대용량 공조설비에 적용될 축상유입식 사이클론의 입자포집 효율 성능평가, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 241-242.

류재식(2001) 현장측정에 의한 공기조화기 에어필터 성능평가, 한양대학교 대학원 석사학위 논문.

Hsu, Y.D., H.M. Chein, T.M. Chen, and C.J. Tsai(2005) Axial flow cyclone the segregation and collection of ultra-fine particles: theoretical and experimental study, *J. Environmental Science and Technology*, 39, 1299-1308.

Hsiao, T.C., D. Chen, P.S. Greenberg, and K.W. Street(2011) Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones, *J. Aerosol Science*, 42, 78-86.

Kang, S.E., H.J. Hwang, Y.M. Park, S.J. Kang, H.K. Kim, and C.U. Ro(2008) Single-particle characterization of aerosol samples collected at an underground shopping area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 594-603.

Kim, M.J., H.J. Kim, S.B. Kwon, S.Y. Kim, J.K. Kim, C.H. Shin, S.J. Bae, S.H. Hwang, and T.S. Kim(2009) Numerical analysis of axial-flow cyclone separator for subway station HVAC system pre-filter, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 17(3), 94-99.

Kim, S.J., H.S. Kang, Y.S. Son, S.L. Yoon, J.C. Kim, G.S. Kim, and I.W. Kim(2010) Compensation of light scattering method for real-time monitoring of particulate matters in subway stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542.

Nieuwenhuijsen, M.J., J.E. Gómez-Perales, and R.N. Colville(2007) Levles of particulate air pollution, its ele-

- mental composition, determinants and health effects in metro systems, *J. Atmos. Environ.*, 41, 7995-8006.
- Maynard, A.D. (2000) Simple model of axial flow cyclone performance under laminar flow conditions, *J. Aerosol Science*, 31, 151-167.
- Park, D.U., K.S. Yun, S.T. Park, and K.C. Ha (2005) Characterization of PM10 and PM2.5 levels inside train and in platform of subway, *Kor. J. Env. Hlth.*, 31(1), 39-46.
- Tsai, C.J., D.R. Chen, H.M. Chein, S.C. Chen, J.L. Roth, Y.D. Hsu, W. Li, and P. Biswas (2004) Theoretical and experimental study of an axial flow cyclone for fine particle removal in vacuum conditions, *J. Aerosol Science*, 35, 1105-1118.