

## 공기조화기 장착용 축상유입식 사이클론의 압력손실에 대한 수치해석 및 실험적 연구

권순박\* · 박덕신 · 조영민 · 김세영<sup>1)</sup> · 김명준<sup>1)</sup> · 김호중<sup>2)</sup> · 김태성<sup>1),2)</sup>

한국철도기술연구원 철도환경연구실, <sup>1)</sup>성균관대학교 기계공학부

<sup>2)</sup>성균관대학교 나노과학기술원

(2009년 5월 12일 접수, 2009년 6월 15일 채택)

## Numerical and experimental study on the pressure drop of axial-flow cyclone in the air handling unit

Soon-Bark Kwon\*, Duck-Shin Park, Youngmin Cho, Se-Young Kim<sup>1)</sup>,  
Myeoung-Joon Kim<sup>1)</sup>, Hojoong Kim<sup>2)</sup> and Taesung Kim<sup>1),2)</sup>

*Railroad Environment Research Department, Korea Railroad Research Institute (KRII)*

<sup>1)</sup>*Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

<sup>2)</sup>*SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University*

(Received 12 May 2009, accepted 15 June 2009)

### Abstract

Particulate matter (PM) is one of the major indoor air pollutants especially in the subway station in Korea. In order to remove PM in the subway station, several kinds of PM removal system such as roll-filter, auto-washable air filter, demister, and electrostatic precipitator are used in the air handling unit (AHU) of subway stations. However, those systems are prone to operation and maintenance problems since the filter-regeneration unit consisting of electrical or water jet parts might malfunction due to the high load of particulates unless the filter medium is periodically replaced. In this study, the use of axial-flow cyclone was proposed for particulate filter unit in the AHU for its low operation and maintenance cost. Novel shape of axial-flow cyclone was designed by using computational fluid dynamics (CFD). The shape of vortex vane was optimized in terms of pressure drop and tangential velocity. In addition, CFD analysis was validated experimentally through the pressure drop measurement of mock-up model. We found that pressure drop and tangential velocity of fluid through the axial-flow cyclone was significantly affected by the rotating degree of vortex vane and the numerical prediction of pressure drop agreed well with experimental measurement.

**Key words :** Axial-flow cyclone, Air handling unit, Pressure drop, Tangential velocity

---

\*Corresponding author.

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

## 1. 서 론

지하 공간 특히 지하철이 운행하는 지하역사에서 실내 부유 미세먼지에 의한 공기질 악화는 심각한 사회적 문제로 대두되고 있으며, 지하역사에서의 실내 공기질에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. Cheng *et al.* (2008)은 대만 지하철 역사의  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{10}$  농도수준을 평가하여, 역사내 미세먼지 농도가 외기에 크게 영향을 받는다고 보고하였다. Lee (2006)는 지하역사내 오염발생원을 분리하여 관리할 필요가 있음을 강조하였으며, Park *et al.* (2005)은 지하철 1, 2, 4, 5호선 일부구간에 대한  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  조사를 통해  $PM_{10}$  농도에서  $PM_{2.5}$ 가 차지하는 비율이 승강장에서 86.2%로 높게 나타나는 것으로 보고하였다. Cho and Park (2005)은 지하철 승강장에서  $PM_{10}$  및 포름알데히드 농도가 기준치를 초과하는 것으로 보고하였다. 이에 환경부와 범부처간 공동으로 지하역사 공기질 개선을 위한 5개년 계획을 수립하여 시행 중에 있다 (MOE, 2008).

지하역사 실내공기는 공기조화기 (air handling unit: AHU)를 통해 관리되고 있으나, 현재까지 지하역사 공기조화기의 주된 기능은 미세먼지 저감이라기보다는 급기, 배기 및 냉방에 초점이 맞추어져 있다. 공기조화기내에 먼지저감을 위해 세정이 가능하거나 교체가 가능한 에어필터가 설치되어 있으나, 유지보수의 어려움으로 인해 관리가 미흡한 실정이다. 공기조화기는 공기조화를 필요로 하는 공간의 요구에 따라 그 온도, 습도, 청정도, 기류 등을 동시에 조절하기 위한 기기로 공조기라고도 한다. 공기조화기에서는 외기 급기, 내부공기 재순환, 배기 기능을 통해 승강장, 대합실 및 기능실 등의 실내공기를 제어하는데, 최근 지하철 터널과 승강장을 공간적으로 분리하여 안전사고를 예방할 수 있는 승강장 스크린 도어 (platform screen door: PSD)가 전 지하철 역사를 대상으로 설치되면서 공기조화기를 통한 승강장 공기의 재순환 비율이 높아지고 있다. 특히, 여름철 고온 다습한 외기공기를 급기하여 실내에 공급하는 대신, 실내공기의 재순환을 통한 냉방이 에너지 절감에 효율적이기 때문에 재순환률이 증가하는 추세에 있다. 따라서, 외기 및 내부순환 공기 중 포함되어 있는 미세먼지 저감을 위해서 공기조화기내 에어필터의 중요성이 증

대되고 있으나, 에어필터에 대한 체계적인 연구와 성능개선 사례가 극히 부족한 실정이다.

공기조화기 내에 적용중인 에어필터의 종류는 지하철 운영처 및 설치시기에 따라 다양한 방식이 적용되고 있다. 재진원리에 따라 정전식, 건성여과식, 점착식으로 구분되며 보수관리방식에 따라 자동세정형, 자동재생형, 자동갱신형, 정기세정형, 여재교환형, 유닛교환형 등으로 다양하게 구분되고 있다 (Cho, 2004). 지하철 역사 공기조화기에 널리 보급되어 있는 에어필터는 판넬형 프리필터, 자동세정형 데미스터, 오토필터가 대표적이다. 판넬형 프리필터의 경우 재생이 불가능하고 교체주기가 짧은 단점이 있으며, 자동세정형 데미스터의 경우 물을 사용하기 때문에 동파, 세균번식, 추가적 급배수 설비가 요구되는 단점이 있고, 오토필터의 경우 낮은 먼지흡입률과 이송장치 오작동 문제가 제기되고 있다 (Kang *et al.*, 2008). 이에, Kwon *et al.* (2006)은 지하역사 공조설비에 적용될 수 있는 축상유입식 (axial-inlet) 싸이클론 연구를 통해 기존 에어필터를 대체할 수 있는 미세먼지 저감방식을 제안하였다. 축상유입식 싸이클론의 경우 공기조화기내 공기흐름과 일직선상에 위치하기 때문에 설치공간을 최소화할 수 있는 장점이 있으며, 장치의 교체가 불필요하며, 유지보수 비용을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 싸이클론의 분급기는 공기를 회전시켜 소용돌이를 만드는 방식에 따라 크게 두 가지로 분류된다. 소용돌이 분급기 (vortex classifier)는 정지된 베인이나 접선방향으로의 공기 유입을 통해 공기의 회전을 발생시키는 방식이고, 회전체 분급기 (rotor classifier)는 회전하는 블레이드를 이용하여 공기의 회전을 만든다 (Song *et al.*, 2008).

본 연구에서는 축상유입식 싸이클론 개발을 위해 수치해석을 이용하여 핵심 장치인 소용돌이 분급기의 최적설계를 수행하고 설계된 싸이클론을 제작하여 차압평가 실험을 수행함으로써, 수치해석 결과를 검증하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 수치해석 연구방법

축상유입식 (혹은 축류형) 싸이클론의 이론적 접근은 Maynard (2000)에 의해 수행되었으며, 층류 (lami-

nar flow)조건에서 작동하는 축류형 사이클론 모델이 제안되었다. 축류형 사이클론을 이용한 초미세입자의 분리기술은 Hsu *et al.* (2005)이 제안하였다. Brunazzi *et al.* (2003)은 축류형 사이클론의 보다 정확한 실험적인 평가기법을 제안하였으며, 축류형 사이클론의 이론적 입경분리효율을 예측하였고 실험적으로 검증하였다. 국내에서는 Kim *et al.* (2006)에 의하여 상용 전산유체역학 프로그램을 이용한 축류형 사이클론의 수치해석적 연구가 수행되었다. 본 연구는 수치해석을 위하여 상용코드(Fluent)를 이용하였다. 난류해석에는 SST k-w 난류모델을 적용하였으며 입자계적해석방법은 Fluent 내 DPM(discrete phase model)을 이용하였다. 이 모델은 Euler-Lagrangian 방법으로 일차적으로 Eulerian법으로 해석된 유동장에 Lagrangian법으로 입자계적을 추적하는 방법이다. 이때 입자에 적용하는 외력과 관성력의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

위 식의 우변에서 첫 번째 항은 항력, 두 번째 항은 부력을 나타내며  $F_x$ 는 추가적인 브라운확산, 열영동력(Thermophoretic force) 등의 외력을 나타낸다. 본 연구에서는 중력, 브라운확산 및 열영동력 등은 수 마이크로미터 크기의 미세입자의 특성 상 무시하고 유체에 의한 항력만 고려하였다. 주요 해석입자가 수 마이크로미터 크기를 가지므로 Stokes 항력법칙이 적용된다. 이때 항력  $F_D$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (2)$$

위 식에서  $C_c$ 는 Cunningham 미끄럼 보정계수를 나타내며, 이는 입자가 수 마이크로미터보다 작아지게 되면 입자 표면에서 유체의 상대속도가 미끄러짐으로 인해 변하는 것을 보정하기 위한 계수이며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{(-1.1 d_p/2\lambda)}) \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 는 유체의 평균자유행로(mean free path)를 나타낸다.

수치해석에서 입구부분 평균유속은 실제 공기조화기의 평균 유속인 2.5 m/s로 선정하였으며, 사이클론 내부의 모든 벽면에서 입자가 부착되는 것으로 가정하였다. 기본적인 소형돌이 분급기의 형상은 그림 1과 같으며 회전날개(blade)의 최적형상을 선정하기 위하여 다양한 형상에 대해 압력강하와 원심력의 지표가 될 수 있는 접선방향 유속을 수치해석적으로 검토하였다. 그림 2에서 Case A1은 그림 1의 기본형상이며 Case A2는 중심축의 형상을 유선형으로 변형한 형태이며, Case B는 회전날개깃을 중심축을 기준으로 90° 회전한 경우로 B1은 A1과 동일한 중심축을 B2는 A2와 동일한 중심축이다(Case A는 모두 180° 회전한 경우임). 본 연구에 적용된 회전날개깃은 모두 중심축과 외부 케이스에 부착되어 고정되어 있으며, 유체가 통과하면서 원심력을 발생시키는 소용돌이 분급방식이다. 소용돌이 분급기 형상의 설계

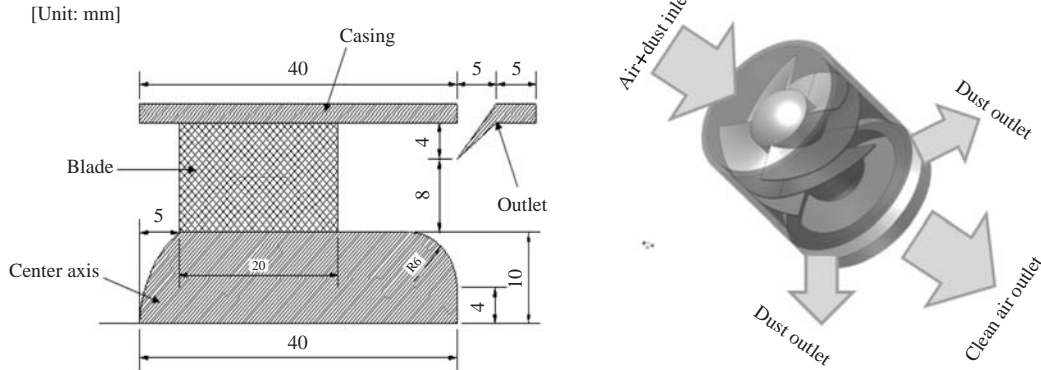


Figure 1. Basic design of axial-flow cyclone.

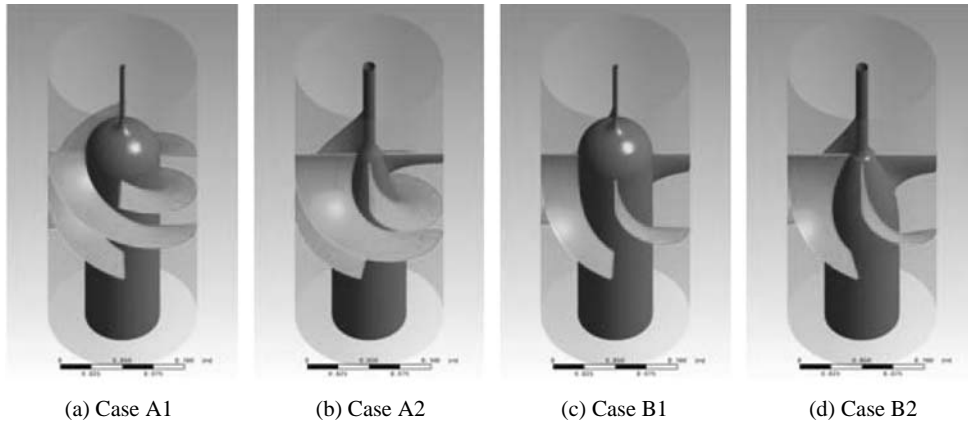


Figure 2. Type of vortex classifier.

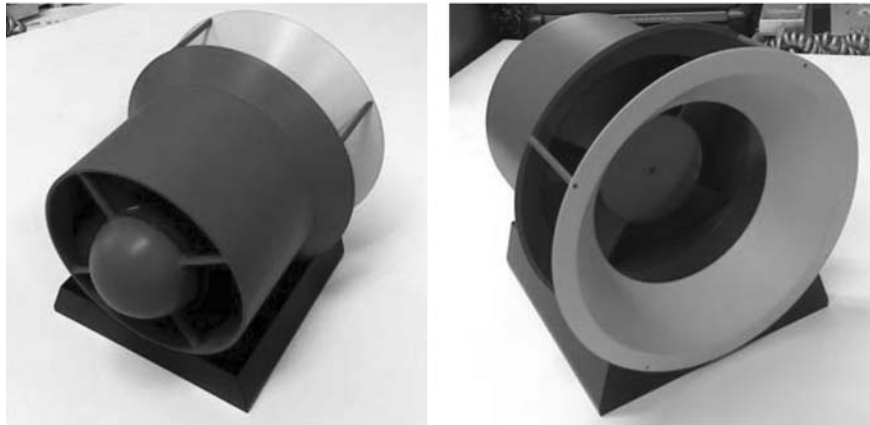


Figure 3. Mock-up model of axial-flow cyclone.

는 상용소프트웨어인 ANST사의 Blade Modeler를 사용하였으며, 주요 검토 변수는 압력강하와 회전날개 통과직후의 원심방향 접선속도이다. 입구부분 중심축에서 접선방향 가속도가 무한대가 되는 것을 방지하기 위하여 막대형 보조물을 설치하여 해석하였다.

## 2.2 실험적 연구

수치해석을 활용하여 결정된 디자인을 실물크기의 목업(mock-up)모델로 제작하였다(그림 3). 참고로 목업모델은 우선 Case A1을 대상으로 제작하였으며 향후 Case B나 개선된 디자인에 대해 추가적으로 제

작할 계획이다. 제작한 목업모델의 실험적 평가를 위해 유입부와 출구부를 추가로 제작하여 공기유입부(A), 축류형 싸이클론(B), 출구부(C) 순서로 설치하였으며, 압력강하를 각 위치에서 측정하였다(그림 4). 입구부분 유량공급은 송풍기(TB-150, 최대풍량 480 m<sup>3</sup>/h)와 인버터를 사용하여 제어하였다. 입구 중심부에 유속계(TSI 8324)를 삽입하여 유속을 측정하였으며 각 지점에서의 압력은 디지털차압계(Testo사, 454 Model)를 이용하였다(그림 5).

실험으로 측정된 압력강하 값과 수치해석 결과를 비교하기 위하여 그림 2와 동일한 형상에 대해 수치해석을 수행하였으며, 격자구조는 tetrahedral 형태로

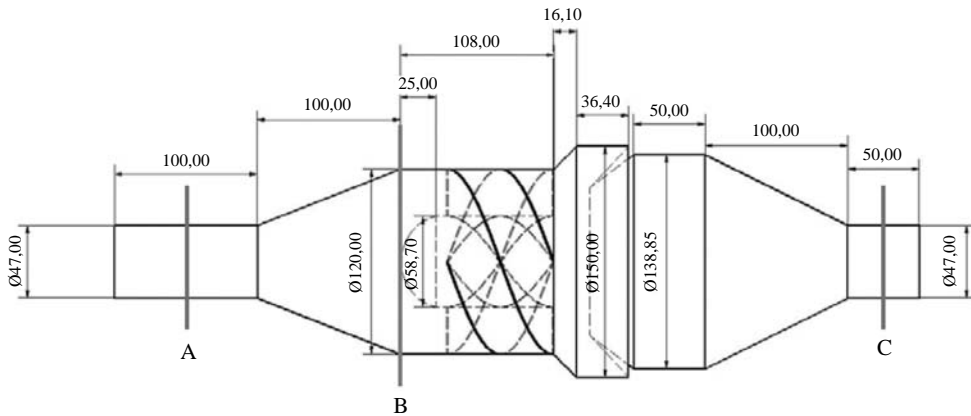


Figure 4. Inlet-outlet assembly for pressure drop measurement.

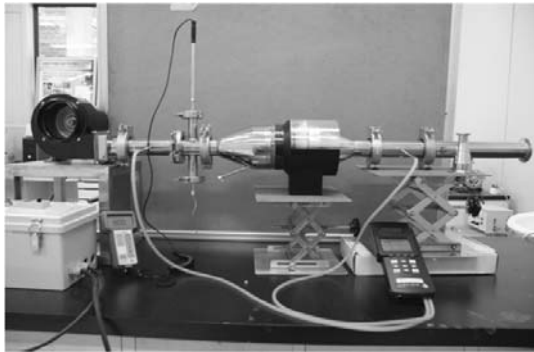


Figure 5. Experimental setup for pressure drop measurement.

Table 1. Pressure drop and tangential velocity (inlet velocity =2.5 m/s).

Case	Pressure drop (Pa)	Tangential velocity (m/sec)
A1	85	12.5
A2	68	12.9
B1	8	9.7
B2	8	10.7

800,000개 가량을 사용하였다. 모든 형상들의 경계조건은 실험조건과 동일하게 설정하였고, 입구경계 조건은 축류싸이클론 통과 직전 단면B에서 평균유속 1.2~2.5 m/s로 변화시키면서 해석하였다. 출구조건은 대기압 조건으로 난류해석모델은 SST k- $\omega$ 를 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 최적 날개형상 결정

회전날개 통과전후의 압력강하와 통과직후 접선방향 속도 모두 기본모델인 Case A1에서 가장 높게 나타났다으며, Case B1의 경우 압력강하와 접선방향 속도가 가장 낮게 나타났다(표 1). 날개길이 180° 회전

하며 중심축에 부착되어 있는 A의 경우에 비하여 90° 회전된 B의 경우 90% 정도 감소하는 것으로 나타났다으나 접선 방향속도 역시 약 20% 감소하는 것으로 나타났다.

Case A1과 B1이 날개깃 형상에 따른 속도벡터를 살펴보면 그림 6과 같다. Case A1의 경우 날개깃 유입부분의 급격한 형상에 따라 Case B1에 비하여 와류생성 등 균일하지 못한 속도벡터장을 보여주고 있다. 이에 따라 날개깃 도입부 부근에서 높은 압력손실이 나타나게 된다.

추가적으로, 다수의 날개깃을 포함하는 소형들이 분급체의 제작시 A의 경우와 같이 날개깃이 180° 회전하는 경우에 비하여 90° 회전하는 B의 경우가 제작 용이성이 뛰어난 장점이 있다. 또한, A2와 B2의 경우와 같이 중심축의 모양이 유선형인 경우보다 A1과 B1의 경우와 같이 원기둥 형태의 제작이 용이하다. 따라서, B1의 경우를 최적모델로 선정하되 접선방향 속도를 더욱 증가시킬 수 있는 설계개선이 요구된다. 이에, 날개깃의 회전각도를 120°로 증가시켜 접선속도를 증가시키고 날개깃의 개수를 4개에서

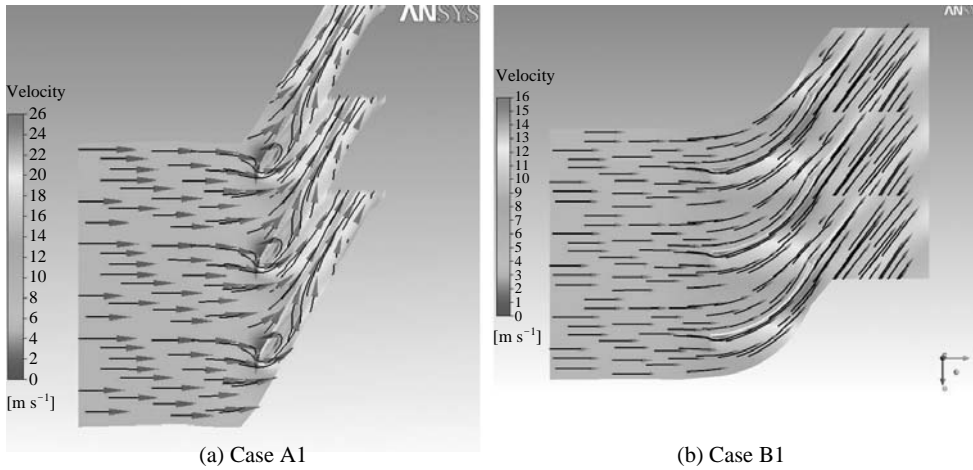


Figure 6. Velocity vectors at 50% span for case A1 and case B1.

Table 2. Numerical and experimental pressure drop between A and C.

Inlet velocity (m/sec)	Pressure drop ( $\Delta P$ )			
	Numerical estimation		Experimental data	
	(Pa)	(mmH <sub>2</sub> O)	(Pa)	(mmH <sub>2</sub> O)
1.2	47.93	4.89	46.43	4.73
1.51	74.98	7.65	76.42	7.79
1.82	107.59	10.97	106.57	10.87
2.28	167.41	17.07	161.97	16.52
2.5	202.11	20.61	194.73	19.86

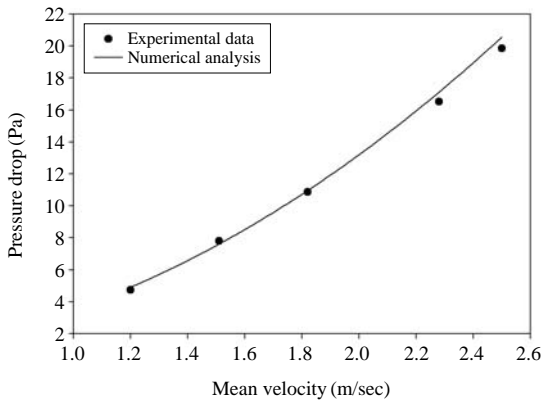


Figure 7. Experimental and numerical data of pressure drop change with inlet velocity.

3개로 감소시켜 제작의 용이성을 증대시키는 방안이 검토되고 있다.

### 3. 2 수치해석과 실험결과의 비교

목업모델을 이용하여 A지점과 C지점 사이의 유속별 압력강하에 대한 수치해석 결과와 실험결과를 표 2와 그림 7에 정리하였다. 수치해석 결과와 실험결과는 잘 일치하였으며, 속도 증가에 따른 압력강하는 속도의 제곱에 비례하는 것으로 나타났다.

지하역사 공기조화기에 설치되는 에어필터의 통상적인 압력강하는 평균유속은 2.5 m/s에서 20 mmH<sub>2</sub>O로 본 연구에서의 압력강하 값(수치해석 20.61, 실험결과 19.86 mmH<sub>2</sub>O)과 거의 유사한 수준이다. 그러나, 본 연구에서 수행된 수치해석과 실험결과는 유입구와 출구부의 단면적 변화에 따른 압력손실이 포함된 것으로 회전체 분급기 자체의 압력손실은 3.1절의 A와 B의 경우처럼 약 8~85 Pa(0.8~8.7 mmH<sub>2</sub>O) 정도 수준으로 기존 공기조화기의 에어필터를 충분히 대체할 수 있는 범위이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 지하철 공기조화기 내 미세먼지 저감장치로 축상유입식의 사이클론을 적용하기 위해 수치해석과 실제 목업모델을 이용한 실험을 수행하였다. 수치해석적 연구를 통해 날개깃의 형상에 따른 압력강하와 접선방향 속도를 네 가지 형상의 모델에 대하여 검토하였으며, 날개깃의 회전각이 90°인 경

우 압력손실이 크게 감소되는 것을 알 수 있었다. 향후, 날개깃 회전각의 증대와 날개깃 개수의 조정을 통해 접선방향 속도를 증가시키고 제작 용이성을 증대시킬 수 있는 추가적인 연구가 요구된다. Case A1의 압력손실에 대한 실험결과는 동일한 시스템에서 수행된 수치해석 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 입구유속이 증가하면서 차압손실이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 축상유입식 싸이클론의 날개깃 형상에 따른 압력손실 및 접선방향 속도에 대한 기본적인 데이터를 얻을 수 있었으며, Fluent를 활용한 수치해석 모델의 압력해석 결과가 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 향후, 낮은 압력손실과 높은 접선방향속도를 가질 수 있는 새로운 형상의 날개깃 설계에 대한 추가적인 연구 수행이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 “도시철도 역사설비 표준화” 연구개발과제의 재원으로 수행된 연구임.

## 참 고 문 헌

- Brunazzi, E., Paglianti, A., and Talamelli, A. (2003). Simplified design of axial-flow cyclone mist eliminators, *AIChE Journal*, 49, 41-51.
- Cheng, Y.H., Lin, Y.L., and Lu, C.C. (2008). Levels of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Taipei rapid Transit system, *Atmospheric Environment*, 42, 7242-7249.
- Cho, Y., and Park, D.S. (2005). The indoor air quality of subway stations, *Proceedings of the 2nd Korean Society for Indoor Environment Conference*, pp. 245-249.
- Cho, Y.Y. (2004). Urban railway almanac(8)-Mechanical facilities of metropolitan subway, *Engineer Book*, pp. 100-108.
- Hsu, Y.D., Hung, M.C., Tzu, M.C., and Tsai, C.J. (2005). Axial flow cyclone for segregation and collection of ultrafine particles: Theoretical and experimental study, *Environmental Science and Technology*, 39, 1299-1308.
- Kang, J.G., Shin, C.H., Bae, S.J., Kwon, S.B., Kim, S.Y., and Han S.Y. (2008). Pres-study for the improvement of air filtration performance in the air handling unit of subway station, *Korean Air-Conditioning and Refrigeration Conference*, pp. 541-545.
- Kim, J.S., Lee, T.U., Kang, T.H., Kim, I.K., and Kim Y.S. (2006). A CFD analysis on axial inlet cyclone using realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model, *Proceeding of The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 1576-581.
- Kwon, S.B., Park, D.S., Cho, Y., Park, H.S., Lim, K.S., and Song, C.B. (2006). Particle collection efficiency of axial-inlet cyclone for high-flow ventilation system in the subway, *Proceeding of Korean Society for Atmospheric Environment*, pp. 241-242.
- Lee, H. (2006). Report on indoor air quality of underground subway station, *Air Cleaning Technology*, 19, 43-53.
- Maynard, A.D. (1998). A simple model of axial flow cyclone performance under laminar flow conditions, *Journal of Aerosol Science*, 31, 151-167.
- Ministry of Environment (2008). 5-years measure for improving indoor air quality of subway stations (2008-2012).
- Park, D.U., Yun, K.S., Park, S.T., and Ha, K.C. (2005). Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> levels inside train and in platform of subway, *Kor. J. Env. Hlth.*, 31, 39-46.
- Song, D.K., Han, B., Kim, H., Kim, Y.J., Jeong, S.H., and Hong, W.S. (2008). Research and development of centrifugal classifiers: A review, *Particle and Aerosol Research*, 4, 37-50.