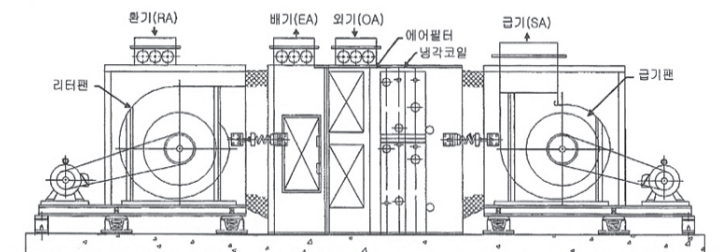


축상유입식 사이클론 형태의 지하역사 공기조화기 에어필터

기존 지하역사 공기조화기 에어필터를 대체하기 위한 새로운 형태의 에어필터인 패널형 축상유입식 사이클론 에어필터에 대해 소개하고자 한다.

최근 실내공기질에 대한 관심이 증가하면서 많은 사람들이 이용하는 대중교통수단인 지하철의 실내공기질 또한 주목을 받고 있다. 지하철 및 지하역사는 지하공간을 사용하고 동적인 이용객이 많기 때문에 미세먼지 등의 오염물질에 취약한 환경을 가지고 있으며, 이로 인해 다른 다중이용시설과 비교하여 환기의 중요성이 더욱더 두드러진다는 특징을 지니고 있다. 현재 지하역사의 환기는 그림 1의 공기조화기를 통해 이루어지고 있다. 외기를 통해 공급된 실외 공기와 재순환된 실내공기는 서로 혼합되어 미세먼지를 제거하는 장치인 에어필터를 거쳐 역사 내로 공급되도록 되어 있다. 이 과정에서 외기의 도입은 역사 밖에 설치되어 있는 환기구를 통해 이루어지는데, 지하역사의 대부분이 도심지역, 도로변 등 공기질이 좋지 않은 곳에 위치하며, 도심지역의 혼잡도 및 상권의 시야 확보 등의 이유로 환기탑이 낮게 설치되어 미세먼지 등의 오염물질이 쉽게 유입될 수 있는 문제를 지니고 있다. 재순환 공기의 경우에도 브레이크시 발생하는 전동차의 바퀴 마모 입자, 터널 내의 먼지 등 다양한 오염물질



[그림 1] 지하역사 공기조화기의 구조

김태성

성균관대학교 기계공학부

부교수

tkim@skku.edu



자동흡입형 필터



자동세정형 필터



전기집진기

[그림 2] 기존 공기조화기 에어필터 현황

이 포함되어 있기 때문에 신선한 공기를 급기하기 위해서는 외기와 재순환 공기에 포함된 미세먼지를 제거하는 장치인 에어필터의 역할이 매우 중요하다.

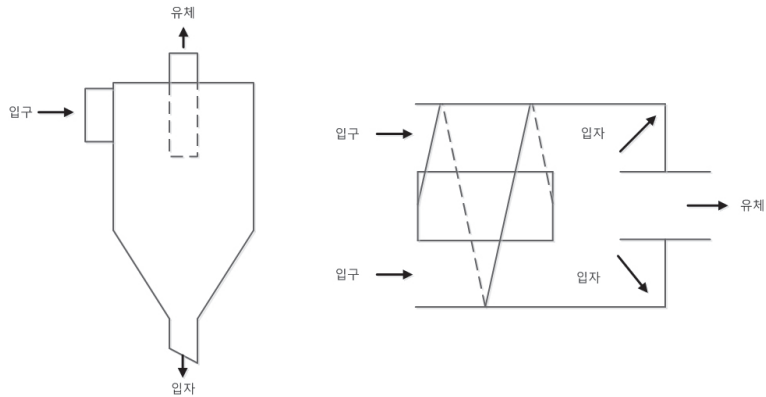
현재 한국의 지하역사 공기조화기에 사용되는 에어필터는 크게 여재교환용 에어필터인 롤필터, 백필터, 부직포필터 등과 자동세척형 에어필터인 자동흡입형, 자동세정형 필터, 그리고 기타 형태로 전기집진기 등으로 나뉜다. **그림 2**는 이들 필터 중 대표적으로 사용되고 있는 자동흡입형 필터와 자동세정형 필터 그리고 전기집진기의 모습이다.

기존 에어필터들의 가장 큰 문제점은 사용시간에 따라 성능이 변한다는 것이다. 입자가 집진됨에 따라 필터가 막히면서 에어필터 전후의 차압이 증가하게 되고 이는 공기조화기 송풍기에 부하를 발생시켜 결과적으로는 급기량의 감소와 공기조화기 운전비용의 상승을 초래하게 된다. 이를 방지하기 위해 현재 지하역사에서는 주기적으로 에어필터의 여재 교체 또는 세척을 진행하는데, 여재 교체의 경우 주기적인 교체비용이 크게 소모되며, 세척의 경우 물을 사용한다는 특징으로 인해 여름철 미생물 번식 및 겨울철 동파 등이 발생하는 문제점을 지니고 있다. 전기집진기의 경우 상대적으로 큰 입자에 대한 포집효율이 떨어지고 전기를 지속적으로 소

모하기 때문에 작동비용이 비싸다는 단점을 지니고 있다.

접선유입식 사이클론과 축상유입식 사이클론

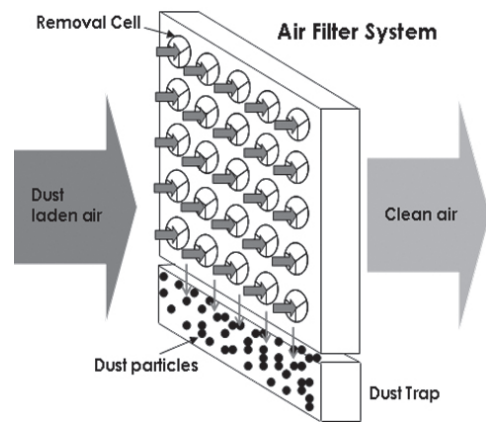
최근 이러한 문제점들을 지닌 기존 에어필터들을 대체하기 위한 새로운 에어필터로 반영구적이며 유지보수가 간편한 집진 장치인 형태의 에어필터가 논의되기 시작하였다. 사이클론은 원심력을 이용하여 작동유체로부터 입자를 분리하는 장치로 작동유체의 유동 방향이 갑자기 변할 때 유체에 비해 상대적으로 밀도가 큰 입자가 관성에 의해 유동을 따라가지 못하는 현상을 응용한 집진 장치이다. 사이클론은 집진된 입자가 기기 성능에 영향을 끼치지 않기 때문에 교체나 세척의 과정이 없이도 늘 일정한 성능을 지니며, 별다른 동력부가 없고 구조가 간단하기 때문에 유지보수가 거의 필요 없다는 장점을 지닌다. 사이클론은 그 형태에 따라 **그림 3**과 같이 접선유입식 사이클론과 축상유입식 사이클론으로 나뉜다. 접선유입식 사이클론은 입구와 출구의 유동 방향이 직각인 형태의 사이클론으로 통상적으로 널리 사용되고 있는 형태의 사이클론이다. 접선유입식 사이클론의 입구로 들어온 작동유체는 기기의 구조로 인해 회전을 하면서 아래 부



[그림 3] 접선유입식 사이클론(좌)과 축상유입식 사이클론(우)

분으로 내려간 뒤 상부의 출구를 통해 빠져나가도록 되어 있다. 회전하는 과정에서 입자들은 원심력에 의해 작동유체를 벗어나 사이클론 벽면에 집진되어 아래부분의 집진통으로 모이게 된다. 축상유입식 사이클론은 입구와 출구가 평행한 형태의 사이클론으로 나선형 흐름을 인위적으로 만들어 주는 날개가 설치되어 있는 것이 특징이다. 날개를 통과하면서 원심력을 얻은 입자는 날개 후단에서 출구로 빠져나가는 작동유체를 따라가지 못하고 집진되도록 설계되어 있다.

접선유입식 사이클론은 오랜기간 많은 연구자에 의해서 연구가 되었으며 Shepherd와 Lapple (1939, 1940)에 의해 최적 형태의 사이클론 치수가 연구되어 오늘날까지도 사용되고 있다. 축상유입식 사이클론은 접선유입식 사이클론에 비해 연구가 미진한 편으로 아직 보편화된 형태가 없고 수행된 연구의 대부분은 공조용 미세먼지 제거 장치가 아닌 특정 입경을 지닌 입자의 포집 장치로서 축상유입식 사이클론을 사용하였다. 그러나 한정된 선행 연구에도 불구하고 축상유입식 사이클론은 공기조화기용 에어필터로서 매력적인 특징을 지니고 있다. 접선유입식 사이클론은 그 특유의 형태로 인해 넓은 공간이 필요로 되어, 한정된 공기조화기 내부에 에어필터로 설치하기에 부적합한 특성을 지닌다. 반면 축상유입식 사이클론은 입구와 출구가

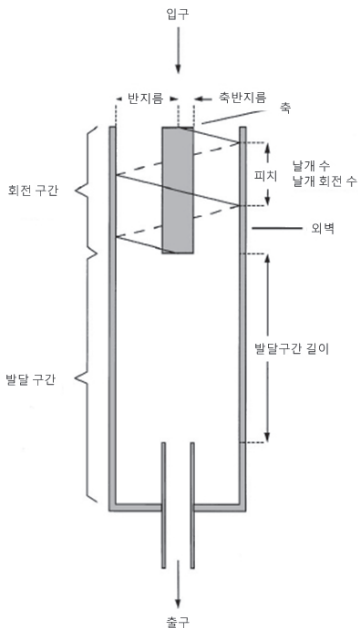


[그림 4] 패널 형태의 축상유입식 사이클론

평행한 일자 형태의 장비라는 점에서 공간효율이 좋다. 특히 그림 4와 같이 병렬로 여러 개의 축상유입식 사이클론을 연결할 경우 패널 형태의 에어필터로 제작이 가능하다. 축상유입식 사이클론의 숫자를 조절하여 면적을 조절할 수 있으므로 서로 다른 환경의 공기조화기라고 하더라도 큰 설계의 변경 없이도 적용할 수 있다. 패널 방식의 에어필터는 공기조화기내의 송풍기에 발생한 공기흐름을 그대로 이용하기 때문에 날개를 회전시키는 등의 입자에 원심력을 부가하는 동력장치가 필요하지 않다. 필터에 의해 집진된 입자는 하단의 분진통으로 모이므로 고장, 교체, 세척 등의 유지보수 없이 장시간 사용이 가능하다는 장점을 지닌다.

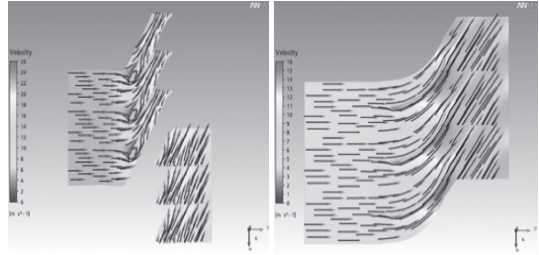
축상유입식 사이클론의 설계

그림 5는 축상유입식 사이클론의 구조이다. 축상유입식 사이클론은 크게 날개를 이용하여 작동 유체와 입자에 원심력을 가하는 부분인 회전 구간과 회전 구간과 출구 사이의 공간인 발달 구간으로 나눌 수 있다. 회전 구간의 설계 변수는 입구의 직경, 축의 직경, 날개의 피치, 날개의 형태, 날개의 수, 날개 회전수 등이 있으며, 발달 구간의 설계 변수는 구간의 길이가 있다. 입구의 직경은 축상유입식 사이클론의 전체 크기를 결정짓는 변수이자 설계의 기준이 되는 변수로, 보통 다른 변수들은 입구 직경과의 비로 설계를 한다. 날개는 축상유입식 사이클론 설계에 있어 가장 핵심이 되는 부품으로 형태, 피치, 회전 수, 개수 등을 다양한 변수를 조절하여 설계가 가능하다. 날개에 따라 압력강하와 입자 제거효율이 대부분 결정되기 때문에 축상유입식 사이클론 설계에 있어 가장 신경 써야 되는 부분 중에 하나이다. 원통의 안쪽 부분은 반지름이 작아 날



[그림 5] 축상유입식 사이클론의 구조

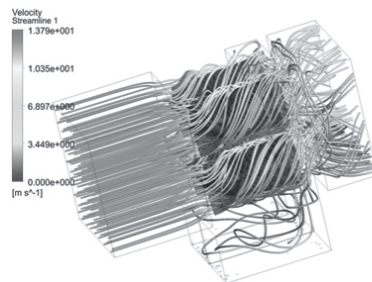
개에 의해 원심력을 받기가 힘들기 때문에 축을 두어 해당 부분에 유동이 형성되는 것을 방지한다. 이때 축의 직경이 커지면 날개 부분의 유속이 빨라지므로 축의 직경을 결정하는 것도 중요한 설계 변수가 된다. 날개 뒤에는 바로 출구를 두지 않고



[그림 6] 축상유입식 사이클론 날개에 따른 유속 분포

유체가 발달구간을 거쳐 출구로 나가도록 설계가 되어 있다. 날개를 통과한 뒤에도 유동은 한동안 회전을 하며 진행하기 때문에 좀 더 효율적으로 입자를 분리하기 위해서는 발달구간이 필요하다. 그러나 발달구간이 지나치게 길어지게 되면 유동이 가지고 있는 원심력이 약해져 이후 출구부분에서 입자도 유체와 함께 출구쪽으로 빠져나갈 가능성이 커지므로 적절한 길이의 발달구간을 설정하는 것이 중요하다.

선행 연구 중에 이론적인 방법으로 축상유입식 사이클론을 설계한 예가 있으나, 해당 연구에서는 층류 조건에 아주 단순한 형태의 날개를 이용하여 설계를 하여, 난류 조건이며 복잡한 형태의 날개를 사용하는 실제 환경에서의 설계와는 다소 차이가 있다. 따라서 최근의 연구에서는 수치해석적인 방법을 이용하여 축상유입식 사이클론을 설계한 후 이를 실험적인 방법으로 검증하는 방식으로 연구가 진행되고 있다. **그림 6**은 축상유입식 사이클론의 날개를 수치해석적 방법으로 설계한 예이다. 코

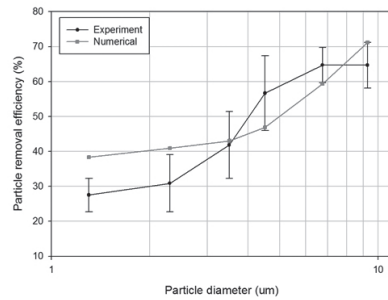


[그림 7] 4개의 축상유입식 사이클론이 병렬 연결된 형태에 대한 수치해석

일 형태의 날개와 유선형 형태의 날개에 대해 연구를 진행한 결과 코일 형태의 날개에서는 날개 시작 부분에서 와류가 발생하는 문제점이 발견된 반면 유선형 날개에서는 유동이 자연스럽게 형성되는 것을 볼 수 있다. 날개뿐만 아니라 다른 설계 변수도 이와 마찬가지로 수치해석적 방법을 이용해 압력강하와 입자제거효율에 대해 평가가 진행되었으며, **그림 7**과 같이 여러 개의 축상유입식 사이클론을 병렬로 연결했을 경우에 대한 연구도 진행되고 있다.

성능평가

수치해석적 방법을 이용한 설계를 바탕으로 현재 패널 형태의 축상유입식 사이클론 에어필터에 대한 실험적 검증이 수행되고 있다. **그림 8**의 좌측 그림은 실험실 단위에서 이루어지고 있는 실험 모습으로 수치해석적 연구의 신뢰도를 검증하고 다양한 조건에서의 성능 평가를 진행하고 있다. 실제 공기조화기 가동 조건에서 실험 및 수치해석을 진행한 결과 압력강하의 경우 실험은 15 mmH₂O, 수치해석은 12.51 mmH₂O로 현재 가동되는 필터들의 수준인 20 mmH₂O보다 낮게 나타났으며, 입자 제거효율은 **그림 9**와 같은 형태로 대략 4~5 마이크론 입자에 대해 절단 직경(cut off diameter, 효율이 50%가 되는 직경)이 나타났다. **그림 8**의 우측 그림은 이촌역 공기조화기에 실제로 설치되어 가동 실

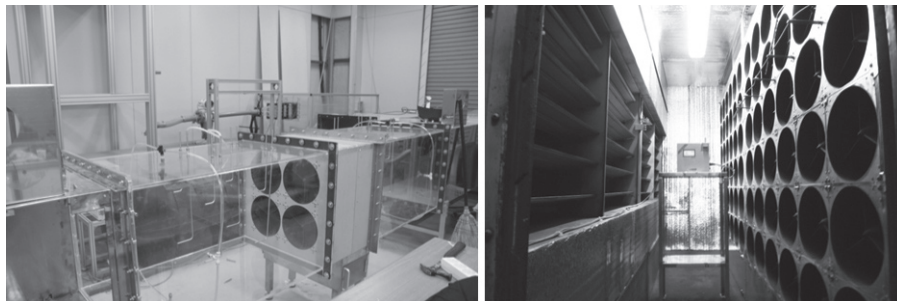


[그림 9] 실험 및 수치해석에서의 입자 제거 효율

험중인 패널형 축상유입식 사이클론 필터이다.

결론

현재 지하역사 공기조화기에 설치되어 사용하고 있는 에어필터는 유지보수의 어려움과 작동 비용의 증대로 인해 제대로 관리되지 않고 방치되는 경우가 많은 실정이다. 패널형 축상유입식 사이클론 에어필터는 이러한 문제점을 해결하고자 개발된 에어필터로 작동시간과 관계없이 성능이 일정하게 유지되고, 동적으로 작동하는 부품이 없어 고장의 염려가 적으며, 동력이 필요하지 않고, 주기적인 물 세척이 필요 없는 등 유지보수 기능이 특화된 형태의 에어필터이다. 아직 입자제거효율을 좀 더 향상시키고 집진된 분진을 모으는 방식에 대한 연구가 좀 더 필요한 상황이지만 지속적인 연구를 통해 이러한 점들을 보완하면 지하역사 공기조화기 뿐만 아니라 다른 다중이용시설 공기조화기에도



[그림 8] 축상유입식 사이클론 에어필터의 실험실(좌) 및 현장(우) 테스트

널리 적용 가능한 에어필터로 개발 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Shepherd, C.B. and Lapple, C.E. 1939. "Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors", *Industrial and Engineering Chemistry*, 31(8), 972-984.
2. Shepherd, C.B. and Lapple, C.E. 1940. "Flow pattern and pressure drop in cyclone dust

collectors cyclone without intel vane", *Industrial and Engineering Chemistry*, 32(9), 1246-1248.

3. Hsiao, T.C., Chen, D.R., Greenberg, P.S. and Street, K.W. 2011. "Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones", *Journal of Aerosol Science*, 42(2), 78-86.

4. Kwon, S.B., Kim, S., Park, D.S., Cho, Y., Kim, J., Kim, M. and Kim, T. 2011. "Novel air filtration device for building air handling unit", *Aerosol and Air Quality Research*, 11(5), 570-577. 