

# 멀티사이클론을 이용한 진공청소기의 최적설계에 관한 연구

하 건 호, 김 응 달, 양 병 선, 안 영 철<sup>†</sup>

LG전자(주), \*부산대학교 건축공학과

## Optimal Design of Vacuum Cleaner with a Multi Cyclone

Gun-Ho Ha, Eung-dal Kim, Byung-Sun Yang, Young-Chull Ahn<sup>†\*</sup>

C&C Engineering Design Department, LG Electronics, Kyeongnam, Korea

\*Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

(Received September 18, 2010; revision received December 20, 2010)

**ABSTRACT:** Cyclone, a type of particle collector widely used in the field of ambient sampling and industrial particulate control, is the principal type of gas-solids separator that uses a centrifugal force. The goal of this study is to design and evaluate the cyclone that can be used for the household vacuum cleaners. A multi cyclone with a 1st cyclone and several 2nd cyclones is designed to improve dust collection efficiency. The dust collection efficiency and the suction power of 1st cyclone are evaluated. And the dust collection efficiency and the suction power of multi cyclone are evaluated according to various sizes of inlet and vortex finder. As a result, a cone shape porous filter has better dust collection efficiency than a cylinder shape porous filter. The dust collection efficiency of a multi cyclone is 3.5% greater than that of a single cyclone.

**Key words:** Multi cyclone(멀티 사이클론), Dust collection efficiency(먼지포집효율), Suction power(흡입일률), Vacuum cleaner(진공청소기)

### 기 호 설 명

$h_s$  : 진공도 [mmH<sub>2</sub>O]  
 $P$  : 흡입일률 [W]  
 $Q$  : 풍량 [m<sup>3</sup>/min]  
 $W_{bin}$  : 먼지포집량 [g]  
 $W_{in}$  : 먼지투입량 [g]  
 $D_{1st}$  : 1차 사이클론의 직경 [mm]  
 $H_{1st}$  : 1차 사이클론의 높이 [mm]  
 $D_{pf}$  : 다공성 필터의 직경 [mm]  
 $H_{pf}$  : 다공성 필터의 높이 [mm]  
 $A$  : 다공성 필터의 기울기 [°]  
 $D_{2nd}$  : 2차 사이클론의 직경 [mm]

$H_{2nd}$  : 2차 사이클론의 높이 [mm]  
 $D_{vf}$  : 보텍스 파인더의 직경 [mm]  
 $a$  : 유입구의 폭 [mm]  
 $b$  : 유입구의 높이 [mm]

### 그리스 문자

$\eta$  : 먼지포집효율 [%]

### 1. 서 론

사이클론은 유동을 선회시킴으로써 원심력에 의해 입자를 분리 포집하는 집진 장치로서 구조가 비교적 단순하고, 장치 내에 기계적 구동부가 없기 때문에 설치비 및 유지비가 저렴하며 고온에서 운전 가능하기 때문에 산업적으로 가장 널리 이용되는 집

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2492; fax: +82-51-514-2230

E-mail address: ycahn@pusan.ac.kr

진 장치 중 하나이며 현재까지 많은 연구자들에 의해 연구가 수행되어 왔고 다양한 형태의 사이클론이 개발되었다.<sup>(1-4)</sup>

사이클론 집진 기술이 발전하면서 최근에 먼지봉투 대신 사이클론 기술을 적용한 청소기들이 등장하기 시작하였는데, 1990년대 중반 영국에서 제품이 출시된 이후 활발한 연구가 현재까지 진행 중이나 학문적으로 연구되어 발표된 것은 많지 않은 상황이다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 진공청소기에 적용하기 위해 낮은 압력손실과 높은 먼지포집효율을 가지는 1차 사이클론과 다수의 2차 사이클론 조합으로 이루어진 멀티 사이클론을 개발하였고, 1차 사이클론의 다공성 필터의 형상에 따른 성능평가 및 2차 사이클론의 입구와 출구의 형상에 따른 성능평가를 수행하여 최적의 설계조건을 도출하였다.

## 2. 성능평가 장치 및 방법

### 2.1 멀티사이클론

일반적으로 싱글 사이클론의 경우는 먼지포집 효율이 90~95% 수준으로 미세먼지까지 분리하는 데에는 다소 한계가 있다. 특히 진공청소기에서는 사이클론에서 걸러지지 못한 먼지들이 청소기의 모터로 바로 흡입되어 청소기의 배기부로 배출되기 때문에 배기필터의 분진부하 증가 및 미세분진의 실내 토출 등의 문제가 야기되기도 하였다. 그래서 사이클론 시스템을 적용한 초기 진공청소기의 모델은 사이클론 분리가 이루어지는 먼지통 내부에 Vortex finder 대신 필터를 적용하여 포집되지 않은 먼지들이 필터에 포집되도록 하여 전체 시스템의 포집효율을 유지하였다. 그러나 필터에 먼지가 쌓여 갈수록 청소기의 흡입일률이 떨어지는 이른바 Clogging 현상이 발생하여 고객의 불만 대상이 되고 있다. 특히, 청소기 시장 중 주요 시장인 유럽시장을 공략하기 위해서는 싱글 사이클론의 성능으로는 무리가 있어, 이를 개선하기 위해 Fig. 1에 보이는 바와 같은 멀티사이클론을 적용하게 되었다. 그림과 같이 기존 시스템과 유사하게 1차 사이클론을 채용하고, 1차 사이클론과 흡입 모터 사이에 다수의 2차 사이클론을 적용하여 1차 사이클론에서 걸러지지 못한 먼지들을 고효율로 포집할 수 있는 멀티사이클론을 디자인하였다.

본 연구에서는 1차 사이클론의 직경과 높이, 먼지

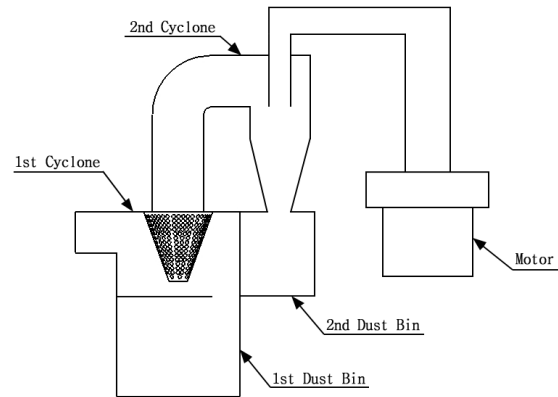


Fig. 1 Schematic diagram of a multi cyclone.

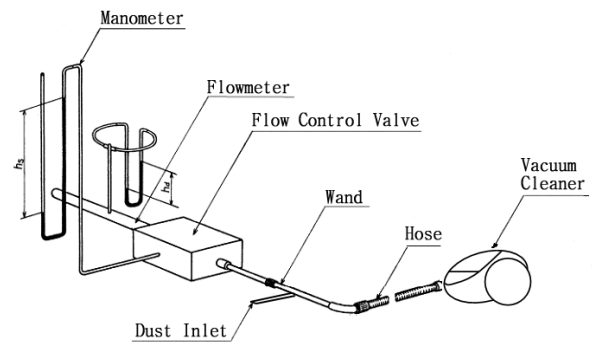


Fig. 2 Schematic diagram of the performance evaluation system for the vacuum cleaner.

유입구 형상은 고정하고, 내부의 다공성 필터의 형상에 따른 먼지포집효율과 흡입일률의 2가지 청소 관련 특성인자에 대해 실험 및 평가를 실시하였고, 2차 사이클론의 직경과 높이를 고정하고, 유입구의 폭과 높이, vortex finder의 직경에 따른 먼지포집 효율과 흡입일률에 대한 평가를 실시하였다.

### 2.2 성능평가 장치

Fig. 2는 먼지포집효율과 흡입일률을 측정하기 위한 실험장치도이다. 성능평가에 사용된 표준 분진은 유입 파이프의 분진 투입구를 통해 공급된다. 먼지포집효율 실험방법은 청소기의 실제 사용 조건을 맞추기 위해 오리피스 직경을 19 mm로 맞추고 50 g/min의 유량으로 표준 분진을 투입한다. 오리피스 직경 19 mm는 실제 청소기의 흡입구로 청소할 때의 압력 손실과 동일한 조건이다. 흡입 일률의 측정은 실온 20±5℃, 상대습도 60±20% 및 대기압 760±20 mmHg에서 수행한다. 청소기를 표준 측정 상태

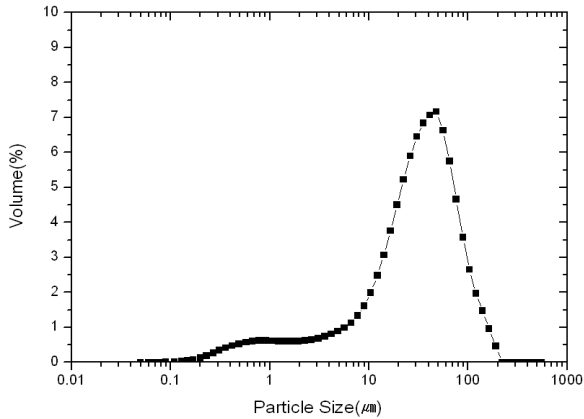


Fig. 3 Particle size distribution of DMT 08 standard test dusts.

로 하여 일정한 운전상태가 되도록 30분 간 연속 운전 후, 측정 장치 공기의 밀도를 일정하게 유지하도록 접속한 다음 풍량 제어 밸브를 여는 방향과 닫는 방향으로 순차적으로 0.5도의 각 피치로 돌리고, 각 밸브각도에서 정지하고 3초 후에 풍량과 진공도를 측정한다. 측정은 각 밸브각도마다 5초 간 50회로 하고, 각각의 평균치를 구하여 측정치를 만든다.

실험에 사용한 표준 분진 DMT 08은 독일의 Deutsche Montan Technologie에서 생산하는 표준분진이며 유럽에서 청소기의 표준 인증시에 사용하는 분진이다. DMT 08분진의 성분은 중량으로 미네랄 더스트 70%, 셀룰로우스(Arbocell) 20% 그리고 면(Cotton) 10%로 구성되어 있다. 이 분진은 실생활 먼지와 매우 비슷하게 만들어졌고, 0.1 μm에서 1,000 μm까지 다양한 크기 분포를 가지며 1 μm 이하가 약 2%를 차지한다. Fig. 3에 DMT 08표준분진의 입경 분포를 나타내었다.<sup>(3)</sup>

### 2.3 성능평가 방법

먼지포집효율은 진공청소기에 투입된 먼지가 집진부에서 얼마나 잘 포집되어 밖으로 방출이 되지 않는가를 표현한다. 진공청소기에 대한 먼지포집효율을 정의하는 특정한 규격은 없으나, 일반적으로 분진의 무게를 기준으로 표현하는 중량법을 많이 사용한다. 즉, 일정량의 분진을 투입했을 시, 사이클론 시스템이 포집하는 먼지량을 정량적으로 비교하여 백분율(%)로 표시한다.

$$\eta = \frac{W_{bin}}{W_{in}} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $W_{bin}$ 은 먼지포집량을,  $W_{in}$ 은 먼지투입량을 나타낸다. 먼지포집량은 먼저 먼지통의 무게를 측정한 후, 일정량의 분진을 흡입시켜 먼지가 포집된 먼지통과의 무게 차이로 계산된다. 본 연구에서는 표준 50 g/min의 양으로 2분간 투입하였다.

원심력을 이용하여 먼지를 분리하는 사이클론의 특성상 먼지포집효율이 높아지면, 압력 손실이 증가하게 되며 흡입일률은 저하된다. 흡입일률의 저하는 청소능력의 저하로 직결되므로 최적의 먼지포집효율과 흡입일률 관계를 도출하는 것이 매우 중요하다. 흡입일률은 진공청소기를 정격 주파수, 정격 전압으로 운전하였을 때 선단 개구부에서 공기 역학적 동력의 최대값으로 정의되며, 이는 청소기의 소비전력이 단위 시간당 할 수 있는 일의 양을 나타내는 것으로 풍량과 진공도에 의해 결정되고 그 크기는 와트(W)로 표현된다.

$$P = 0.1634 \times Q \times h_s \quad (2)$$

여기서, Q는 풍량을 나타내며  $h_s$ 는 진공도를 나타낸다. 계수 값 0.1634는 단위 변환에 따른 보정치이다.

### 2.4 1차 사이클론의 실험조건

Fig. 4에 1차 사이클론의 구조를 나타내었다. 원통형 사이클론 본체에 사각의 공기 유입구가 설치되어 있으며, 상부 중앙에 다공성 필터(Porous filter)가 있고 후단에 원형의 공기 배출구가 있다. 본 연구에서는 본체의 직경과 높이, 유입구와 출구의 형상을 고정하고, 다공성 필터의 형상을 Table 1과 같은 조건으로 변화시켜가며 청소성능을 분석하였다.

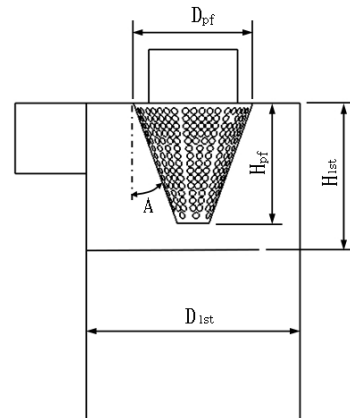


Fig. 4 Schematic diagram of the 1st cyclone.

Table 1 Parameters and dimensions of the porous filter

Test No.	D <sub>pf</sub>	A	D <sub>pf</sub>	A	D <sub>pf</sub>	A
1	0.5D	0°	0.6D	0°	0.7D	0°
2	0.5D	10°	0.6D	10°	0.7D	10°
3	0.5D	20°	0.6D	20°	0.7D	20°

Note) D<sub>1st</sub> : 110 mm, H<sub>1st</sub> : 85 mm, H<sub>pf</sub> : 70 mm.

다공성 필터의 최대 직경과 콘의 각도에 따른 청소성능을 알아보기 위해서, 최대직경과 콘의 각도를 각 3가지 수준으로 조합하여 실험설계를 하였다.

### 2.5 2차 사이클론의 실험조건

Fig. 5에는 전형적인 형상을 갖는 2차 사이클론의 개략도를 나타내었다. 고정된 사이클론의 직경과 높이에서 유입구의 폭과 높이, 보텍스 파인더(Vortex Finder)의 직경에 따른 먼지포집효율과 흡입일률을 평가하였다. 실험조건은 Table 2와 같다.

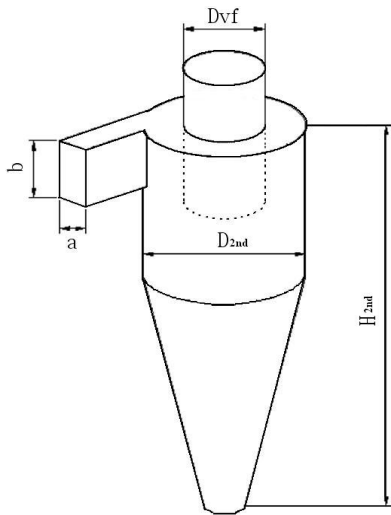


Fig. 5 Schematic diagram of the 2nd cyclone.

Table 2 Dimensions of the 2nd cyclone

Test No.	Inlet width, a	Inlet height, b	Vortex finder dia., Dvf
1	0.2D, 0.25D, 0.3D	0.6D	0.48D
2	0.2D	0.5D, 0.6D	0.48D
3	0.2D	0.6D	0.42D, 0.48D, 0.54D

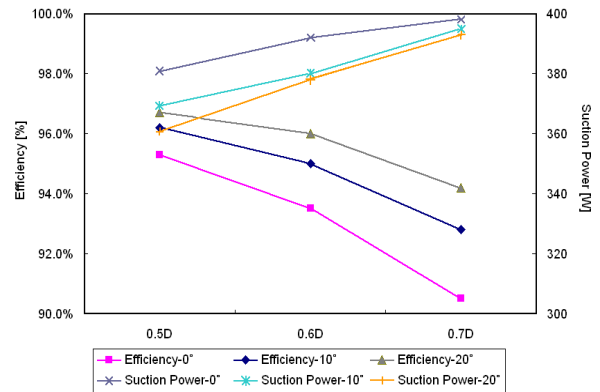
Note) D : 48 mm, H : 140 mm.

## 3. 실험결과 및 분석

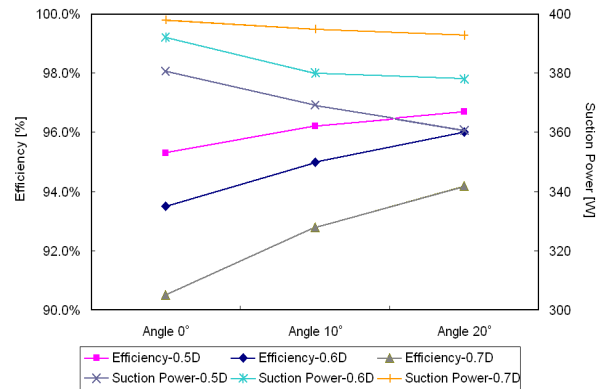
### 3.1 1차 사이클론 분석결과

Fig. 6(a)는 다공성 필터의 최대 직경에 따른 1차 사이클론의 먼지포집효율과 흡입일률을 나타낸 것이고, Fig. 6(b)는 콘의 각도에 따른 1차 사이클론의 청소성능을 나타내었다. 다공성 필터의 직경이 클수록 흡입일률이 향상되나, 먼지포집효율이 감소함을 확인할 수 있다. 콘의 각도가 클수록 흡입일률은 감소하지만, 먼지포집효율이 우수해짐을 알 수 있다.

다공성 필터의 직경이 콘의 각도보다 먼지포집효율에 대한 영향도가 높게 나타난다. 그런데 직경의 먼지포집효율에 대한 영향도가 콘의 각도에 따라 차이가 있는데, 각도가 0°일 때 직경의 영향도가 가장 크다. 그리고 콘의 각도의 영향도도 직경에 따라 차이가 있는데, 직경이 클수록 콘의 각도의 영향도가 커진다. 이는 콘의 각도가 0°이고 직경이 클 때,



(a) Effects of the diameter of vortex finder



(b) Effects of the inclination angle

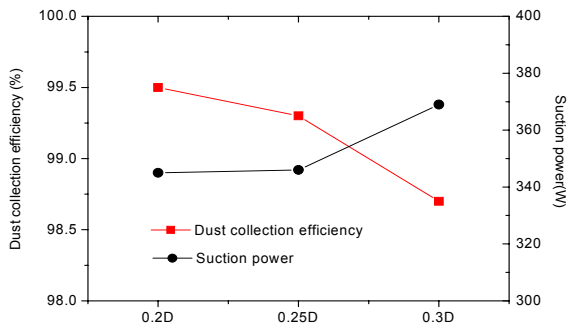
Fig. 6 Dust collection efficiency and suction power for the various types of 1st cyclone.

사이클론의 유입부와 다공성 필터의 유동 간섭부가 커지므로 사이클론 특유의 선회유동에 장애를 유발하면서 먼지포집효율이 현격히 저하되기 때문이다.

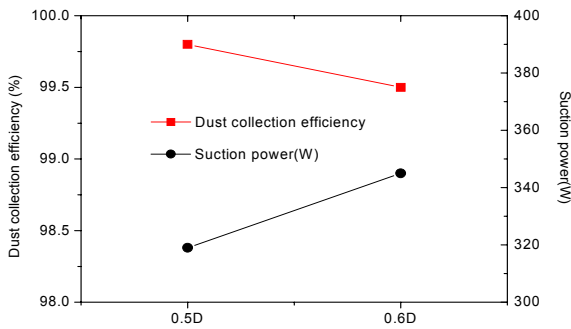
그리고 1차 사이클론의 먼지포집효율과 흡입일률을 모두 고려했을 때, 직경이 0.6D이고 콘의 각도가 20°의 원추형 다공성 필터가 가장 효과적이다.

### 3.2 2차 사이클론 분석결과

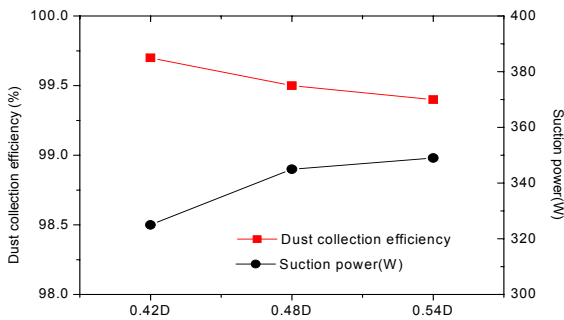
Fig. 7(a)는 유입구 폭에 따른 먼지포집효율과 흡입일률을 나타낸 것으로, 0.2D의 경우가 먼지포집



(a) Effects of the inlet width



(b) Effects of the inlet height



(c) Effects of the diameter of vortex finder

Fig. 7 Dust collection efficiency and suction power for the various types of 2nd cyclone.

효율이 가장 우수하고 흡입일률에 있어서도 0.25D와 비슷한 수준으로 분석되어, 먼지포집효율과 흡입일률을 모두 고려했을 때 0.2D가 가장 우수한 것으로 판단된다. Fig. 7(b)의 유입구 높이에 따른 먼지포집효율과 흡입일률을 보면 0.5D와 0.6D의 먼지포집효율은 약간의 차이를 보이는 반면, 흡입일률의 경우 0.6D가 훨씬 우수한 것으로 분석되었다. Fig. 7(c)의 보텍스 파인더(Vortex Finder) 지름에 따른 먼지포집효율과 흡입일률은 지름이 커질수록 먼지포집효율은 떨어지고 흡입일률은 커지게 되므로 지름 0.48D가 먼지포집효율과 흡입일률 모두 고려했을 때 가장 효과적인 것으로 분석되었다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 진공청소기에 적용하기 위한 최적의 멀티 사이클론을 개발하고자 하였으며 1차 사이클론의 다공성 필터 형상에 따른 성능평가 및 2차 사이클론의 입구와 출구의 형상에 따른 성능평가를 수행하여 최적의 설계조건을 도출하였고 주요 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 1차 사이클론에서는 다공성 필터의 직경의 먼지포집효율에 대한 영향도가 콘의 각도보다 영향도가 크며, 직경과 콘의 각도가 서로 교호작용을 한다. 그리고 먼지포집효율과 흡입일률을 모두 고려했을 때, 직경 0.6D이고 기울기 20°의 원추형 다공성 필터가 가장 효과적이다.

(2) 2차 사이클론에서는 유입구의 폭이 작을수록 보텍스 파인더의 지름이 작을수록 높은 먼지포집효율을 나타냈다.

(3) 1차 사이클론만을 설치하였을 경우 약 96%의 분진 포집효율과 390 W의 흡입일률을 보인 반면 2차 사이클론을 설치한 멀티 사이클론은 포집효율이 99.5%로 매우 향상되었으나 흡입일률은 345 W 정도로 다소 감소한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- Ahn, Y. C., Jeong, H. K., Shin, H. S., Hwang, Y. J., Kim, G. T., Cheong, S. I., Lee, J. K., and Kim, C., 2006, Design and performance evaluation of vacuum cleaners using cyclone technology, Korean J. Chem. Eng., Vol. 23, No. 6, pp. 925-930.

2. Lim, K. S., Kwon, S. B. and Lee, K. W., 2003, Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, pp. 1085-1095.
3. Molhave, L., Schneider, T., Kjagaard, S. K., Larsen, L., Norn, S., and Jorgensen, O., 2000, House dust in seven Danish offices, *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 4767-4779.
4. Murry E. Moore and Andrew R. Mcfarland, 1996, Design methodology for multiple inlet cyclones, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 30, pp. 271-276.
5. Park, Y. G., Yun, C. Y., Yi, J. H., and Kim, H. G., 2005, Numerical simulation of the effects of the design feature of a cyclone and the inlet flow velocity on the separation of CO<sub>2</sub> particles from a CO<sub>2</sub>-COF<sub>2</sub> mixture, *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 22, pp. 697-704.