

축상유입식 사이클론 집진기 성능시험에 관한 연구

A Study on the Performance Test of Axial-flow Cyclone Separator

진도훈^{1*}

Do-Hun Chin^{1*}

〈Abstract〉

Along with dust collection efficiency, pressure loss is a very important cyclone operation factor. A severe rise in pressure loss causes the problem of cost. To solve the problem, the method connecting axial-vane type cyclones in parallel is suggested recently. The axial vane type cyclone dust collector applied in this study is a small portable type. Multiple cyclones are installed in a round type. The basic performance test on the axial vane type cyclone dust collector was conducted. As a result, the cut size reduced along with a rise in the wind velocity of the cyclone dust collector inlet. According to the test on dust collection efficiency, the effect of dust collection began to appear in the range of $3\mu\text{m}$ and dust collection efficiency was greatly improved at $5\mu\text{m}$. The noise of the cyclone dust collector well met the fan sound power level of KSB 6361.

Keywords : Vane-axial cyclone, Vortex-finder

^{1*} 정회원, 교신저자, 부산가톨릭대학교 산업보건학과, 조교수 E-mail: chindh@cup.ac.kr

^{1*} Dept. of Industrial Health, Catholic University of Pusan

1. 서론

사이클론은 미세한 입자의 제진에 대해서는 효과적이지 못하나 백필터 등의 전처리 장치로 활용할 경우 유입 더스트 농도를 낮추고 더스트 탈진 주기를 길게 할 수 있기 때문에 백필터의 약점인 여과포의 수명을 연장할 수 있는 등의 장점이 있다.

국내·외 유수의 연구자들에 의해 과거 100년 전부터 현재까지 사이클론의 구조 및 성능예측을 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 국내의 경우 빠른 경제 성장에도 불구하고 기초연구가 매우 부족한 상황이며, 소수의 연구자들에 의해 사이클론 기초 연구들이 이루어져 왔다. 반면 선진국의 경우 유동해석 등의 기법을 활용하여 사이클론의 구조와 형태의 상관관계에 대해 매우 많은 연구가 수행되었으며, 현재에도 활발하게 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 국내·외를 통틀어 사이클론에 관한 연구의 대부분이 접선유입식에 한정되어 있으며, 축상유입식의 경우 앞으로도 많은 연구가 필요하다.

최근 출구 더스트 농도가 극히 낮은 고성능이 요구되는 집진장치에 있어서 사이클론과 같은 전처리 집진장치의 효율을 높이는 것 또한 중요한 인자로 인지되고 있다. 따라서 원심력 집진기의 표준화, 설계최적화 및 집진효율 향상을 위해 많은 연구가 선행되었으며 현재에도 지속적으로 연구되고 있다.[1]

집진효율과 더불어 매우 중요한 사이클론 운영 인자는 압력손실을 들 수 있으며, 압력손실의 심각한 증가는 비용 상의 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 축상유입식 사이클론을 병렬 연결하여 사용하는 방법 등이 제시되고 있다. 이러한 축상유입식 사이클론의 경우 에디(Eddy) 발생을 억제하고 동일 사이즈의 접선유입식 사이클론에 비해 낮은 압력으로 처리 용량을 증가시킬 수 있는 것으로 Zhou[2] 등에 의해 보고되고 있다.

축상유입식 사이클론(vane-axial cyclone)은 나선형 흐름을 인위적으로 만들기 위해 베인이 설치되고 분진을 함유한 가스가 축 상단에서 유입된다. 유입된 가스는 베인의 형태에 따라 아래쪽으로 나선형의 힘을 받게 되고, 가스내의 분진은 원심력과 관성력에 의해 아래로 이동된다. 이러한 원리로 분진은 하단의 분진 퇴적함으로 떨어져 제거된다. 사이클론 하단부에서는 하향하던 가스의 나선형 흐름의 방향이 바뀌어 안쪽에 역류로 상승하는 나선흐름을 만드는데 정화된 가스는 “선회류출구”(vortex-finder)를 통해 위로 배출되고, 분진 입자는 용수철이 달린 flapper valve 또는 rotary valve로 밀봉된 파이프를 통해 사이클론의 아래쪽으로 빠져나온다. Fig. 1은 접선유입식과 축상유입식 사이클론의 구조를 나타내고 있다.[3-7]

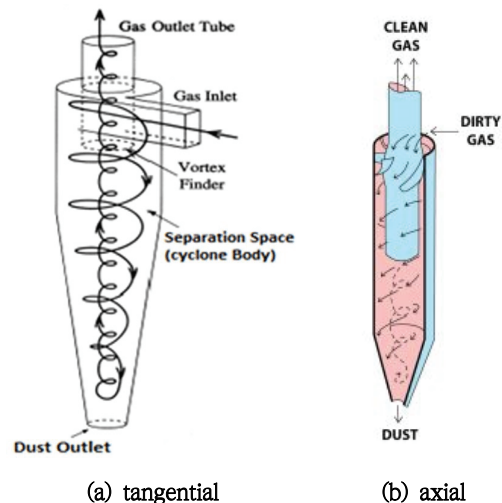


Fig. 1 Comparison of tangential and axial flow cyclone separator

2. 성능시험 방법

본 연구에 적용되는 축상유입식 사이클론 집진

기는 Fig. 2와 같이 소형 포터블 방식으로 다수의 사이클론이 원형으로 설치된 것이다. 또한 성능시험에 사용된 실험장치는 크게 분진 발생장치, 축상유입식 사이클론 및 파티클 카운트 (Lighthouse, Handheld 3016) 시스템으로 구성되며, Fig. 3은 실험 장치 개략도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 파티클 카운터는 0.3, 0.5, 1, 3, 5 그리고 10 μm 의 입자 측정이 가능하다. 측정 장비를 사용하여 유입구 및 출구덕트 내의 입경별 입자수를 측정하고 아래 식 (1)을 사용하여 집진효율을 계산하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 C_i 는 유입구 더스트 농도(g/m^3), C_o 는 출구 더스트 농도(g/m^3)를 나타낸다.

계산된 집진효율로부터 식 (2)을 이용하여 50% 집진효율을 갖는 입자의 직경 즉, 절단입경을 계산하였다.

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pj})^2} \quad (2)$$

여기서, η_j 는 j번째 크기영역의 집진효율, d_{pj} 는 j번째 크기영역의 직경을 나타낸다.

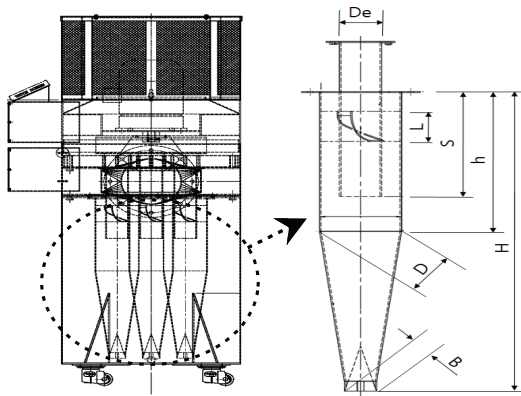


Fig. 2 Schematic diagram of axial-vane type cyclone

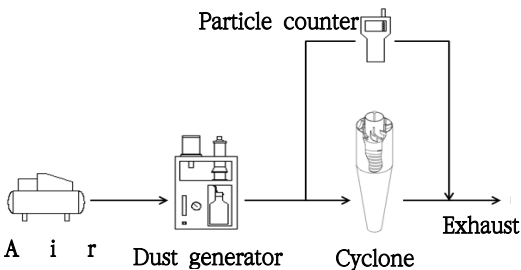


Fig. 3 Schematic diagram of particle count system

Table 1. Geometry of axial-vane type cyclone (unit : mm)

De	L	S	h	H	D	B
64	60	210	280	600	124	56

3. 성능시험 결과 및 고찰

3.1 집진성능시험

Fig. 4는 축상유입식 사이클론의 입구유속에 따른 절단입경 및 압력손실 값의 변화를 나타내고 있다.

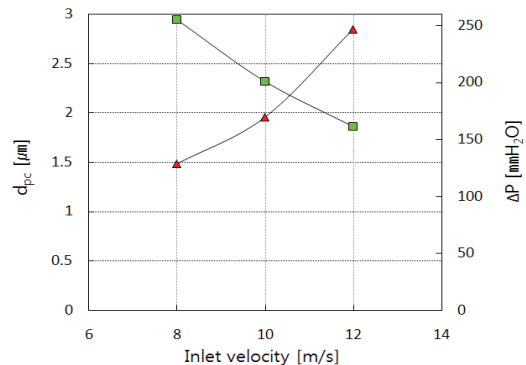


Fig. 4 Cutting diameter and pressure drop according to inlet velocity

본 연구에서 주목하고자 하는 더스트의 절단입경은 식(3)과 같이 Lapple과 Shepherd가 제시한 수식을 적용하였다.[8] 여기서 $\tan\beta_2'$ 의 값은 유동해석을 통해 구한 다음 절단입경을 최종적으로 확인하였다.

$$d_{pc} = 3 \frac{r_1}{\sqrt{2H_s}} \left\{ 1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \right\} \tan\beta_2' \times \sqrt{\frac{\mu}{\rho_p v_0}} \quad (3)$$

매우 잘 알려진 바와 같이 입구 유속이 증가함에 따라 절단입경이 비례하여 감소하였고, 압력손실의 경우 속도가 증가할수록 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 축상유입식 사이클론에서 입자크기에 따른 입구에서의 입자사이즈별 입자개수와 토출유량을 4 CMM, 5 CMM 그리고 6 CMM으로 변화시켰을 때 출구에서의 입자 개수 변화를 나타내고 있다. 기본특성은 유량이 증가할수록 출구에서의 입자 개수가 감소하여 사이클론내에서 집진성능이 향상됨을 알 수 있었고, 절단입경이 클수록 집진성능이 급격하게 향상됨을 확인할 수 있었다.

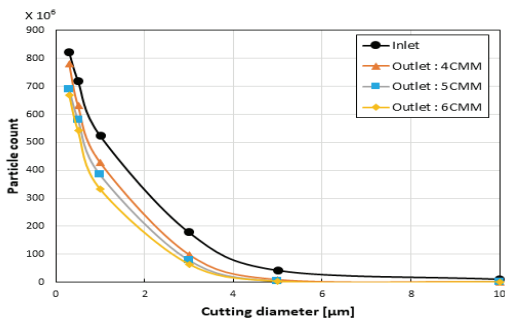


Fig. 5 Particle counts of inlet and outlet.

Fig. 6은 입구와 출구에서의 입자개수를 통해 축상유입식 사이클론에 대한 집진효율을 나타내고 있다. 절단입경이 5μm를 기준으로 이하에서는 집진효율이 급격하게 감소하는 경향을 나타내고 있

으며 그 이상에서는 집진효율 증가 기울기가 완만 해짐을 확인할 수 있었다. 또한 토출유량 5 μm에서 4 CMM일 경우 약 80%이지만 5 CMM 이상에서는 약 90%의 집진효율을 나타내고 있어 축상유입식 사이클론 집진기의 성능이 일반적인 접선유입식 사이클론 집진기에 비해 우수한 것을 확인할 수 있었다.

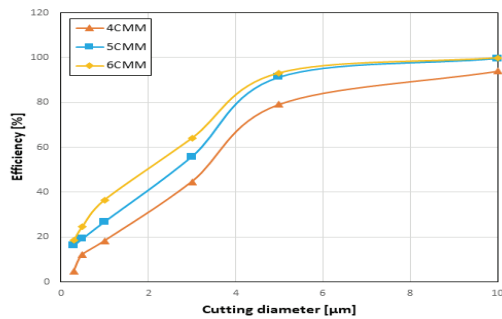


Fig. 6. Distributions of dust collection efficiency.

3.2 집진기 소음측정

Fig. 7은 축상유입식 사이클론 집진기에 대한 소음은 평가하기 위하여 그림과 같이 집진장치 배 출구에서 1m 떨어진 지점에서 ACO社 소음계 TYPE6226(측정범위 28~130dB)을 사용하여 측정하였다.



Fig. 7 Sound pressure level test

소음 측정기준은 KSB 6361의 송풍기 소음측정 규정에 따라 실시하였다. 정확한 실험을 위하여 KSB 6361에 명시된 조건과 측정환경의 일치 여부를 검토하였는데 암소음이 대상소음(대표길이에서 측정)보다 평균 20.3 dB 낮은 것으로 확인되어, 암소음이 10 dB 이상 낮아야 한다는 조건과 만족한다.

Table 2. Result of sound level test

	Min. (dB)	Max. (dB)	Mean (dB)	Remark
Background sound	39.6	40.9	40.25	
1/2 representative length	65.8	66.5	66.15	
representative length	60.0	61.1	60.55	with filter
representative length	64.1	65.3	64.70	without filter

또한 대상소음 거리와 1/2소음 거리에서의 측정값 평균이 5.6 dB로 확인되어 그 차이값이 5 dB 이상이어야 한다는 조건과 일치함으로써 신뢰할 수 있는 실험 조건임을 확인하였다

Fig. 8은 집진기의 소음을 저감시키기 위해 상용화된 흡음제로 계란판형 스펀지 흡음재를 나타내고 있다.



Fig. 8 Sound absorption material

본 연구에서는 집진장치의 발생 소음을 저감하

기 위해 장치 내부는 25 mm 두께의 계란판형 스펀지를 적용하였고, 배출구에는 50 mm 두께의 필터 폼을 적용하였다.

배출구는 차압상승 등의 문제로 인해 클로즈셀 형태의 스펀지는 적용이 불가하기 때문에 공기흐름을 원활하게 유지할 수 있는 필터폼을 선정하였다. 이러한 조건으로 실험을 수행한 결과 필터를 부착하였을 때 소음의 평균값은 60.55dB.이고, 필터를 부착하지 않았을 경우도 64.70dB.의 결과를 얻었다.

3.3 집진기 유량측정

집진기의 유량 측정을 위해서 집진기 배출구에 풍관이 연결된 상태에서 시험을 수행하기 위해 Fig. 9와 같이 측정하였다.

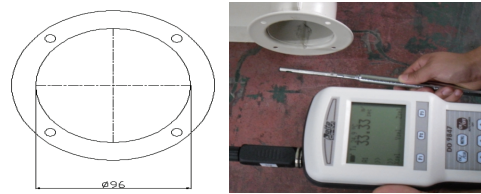


Fig. 9 Measurement of exhaust flow

시험의 기준은 KSF 2807에 따라 진행하였으며, 풍속측정은 규격에 명시된 열선형 풍속계(Deltaohm, DO9847)로 측정하여 식 (4)에 따라 풍량을 산정하였다. 실험에 사용된 열선형 풍속계는 0.01 m/s의 정밀도로 0~40 m/s의 측정범위를 가진다.

$$Q = 60AU \tag{4}$$

여기에서 A는 곧은관 덕트 부분의 단면적 (m²), U는 곧은관 덕트 부분의 평균 풍속 (m/s)을 나타낸다.

Table 3. Result of velocity and air flow rate

	Min.	Max.	Mean
Velocity (m/s)	33.33	35.57	34.45
Air flow rate (m ³ /min)	14.47	15.44	14.96

측정결과 배출 풍속이 33.33~35.57m/s 범위에서 변동하였다. 이는 KSF 2807에 명시된 덕트내 풍속이 최소 4m/s 이상을 만족하므로 측정조건이 신뢰할 만한 수준임을 알 수 있다. 따라서 측정된 풍속과 배출구 면적을 상기 식 (4)에 대입하여 풍량을 계산한 결과 평균 풍량이 14.96m³/min으로 이는 유량 15m³/min을 만족한다고 볼 수 있고, ±0.5m³/min 범위 내에서 오차를 가지는 것으로 확인할 수 있었다.

4. 결론

측상 유입식 사이클론 집진기에 대한 기초적인 성능시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 절단입경의 경우 사이클론 집진기 입구 풍속이 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 집진효율에 대한 실험결과 3 μ m 범위에서 집진효과가 나타나기 시작하면서 5 μ m를 접어들면서 집진효율이 크게 향상되었다.
- 3) 사이클론 집진기 소음의 경우 KSB 6361의 송풍기 소음측정 규정에 잘 만족하는 것을 확인하였다.
- 4) 사이클론 집진기 풍량-풍속의 경우 KSF 2807에 명시된 덕트 내 풍속에 충분히 만족하였다.

참고문헌

- [1] Copper, C. D. and Alley F. C., "Air Pollution Control: A Design Approach", Waveland Press, New York, pp. 138-150, (1994).
- [2] Zhou, L. X. and Soo S. L., "Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator", Powder Technology, Vol. 63, pp. 45-53, (1990).
- [3] J. S. Kim, T. U. Lee, T. H. Kang, I. K. Kim, Y. S. Kim, "A CFD Analysis on Axial Inlet Cyclone using Realizable k- ϵ Turbulence Model", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 1327-1332, (2006).
- [4] J. I. Ju, Y. S. Choi, Y. K. Lee, T. H. Kim and S. Y. Kim, "Numerical S소요 of Turbulent Flow in a Hydrocyclone", Journal of Flow Machinery, Vol. 6, No. 2, pp. 34-40, (2003).
- [5] J. K. Young, C. N. Kim and Y. M. Jo, "A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency for Fine Particles in a Cyclone", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 144-153, (2008).
- [6] Y. S. Cho, S. W. Lee, K. S. Woo, Y. B. Yoon, Y. J. Park, D. Y. Lee, H. C. Kim and B. C. Na, "A Numerical Analysis of Flow Characteristics and Oil Separation Performance for Cyclone Oil separator designs", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 5, pp. 22-28, (2008).
- [7] H. J. Shin, Y. W. Lee, J. H. Park, J. H. Kim, C. W. Lee and S. C. Jang, "A Numerical Study on the Performance Analysis for Design Optimization of Axial-Vane Type Cyclone" Proceedings of the KSMTE Spring Annual Meeting, pp. 537-538, (2011).
- [8] C. E. Lapple and C. B. Shepherd, "Flow pattern and pressure drop in dust cyclone separator", Ind. & Eng. Chem., Vol. 31 No. 8, pp. 972-984, (1939).

(접수: 2020.01.05. 수정: 2020.01.28. 게재확정: 2020.02.10.)