

흡연집진기 내 스트레이너 및 카본필터 압력투과 해석 Dust collector strainer and carbon filter pressure permeation analysis

이치우*†

Chi-Woo Lee*†

(Received 31 December 2014, Revision received 04 August 2015, Accepted 05 August 2015)

Abstract : Dust collector is one of the most widely used equipment among the method of separating particles, it filters exhaust gas having various kinds of dusts through several filters installed on parallel. This research investigated the moving characteristic of Honeycomb-type carbon filter in pressure drop of smoking collector's ventilation system. It also compared pressure transmission coefficient through pressure drop according to flow velocity change.

Key Words : dust collector, Honeycomb, pressure transmission coefficient

1. 서 론

집진기는 대기오염 방지장치의 근간을 이루는 장치로 환경부하의 저감이나 고품질의 제조업에 대응하는 등 다양한 현장에서 활용되어 오고 있으며, 전력철강분야의 대용량 가스처리에서 중소 공장 등의 국소적인 분진대책까지 산업 각 방면에서 사용되어 오고 있다. 대기 중에 방출되는 분진 등의 미세먼지(PM)는 그 자체로 유해하며, 거기에 질소산화물(NOX) 등이 추가되면 더욱 유해성이 높아지며, 집진기는 각종 제조공정이나 소각로, 분쇄기 등에서 발생하는 PM을 흡수해 공기를 정화시킨다. 적용되는 프로세스에 대응한 다양한 방식이 있는데, 최근 집진기 메이커는 환경 대응 강화에 의한 수요확대를 예상하며, 중국 등 신흥국의 환경장치 시장에 주목하고 집진기의 수요처로 제조업에서는 철강, 기계, 비철금속, 화학, 요업, 석유화학, 펄프, 종이 등이 비제조업에서는 전

력, 광업 등이 있다. 또 집진 방식이나 적용되는 프로세스에 대응해 원심력집진기(사이클론), 전기 집진기 등 다양한 방식이 있다.¹⁾

관세 및 관련 규제는 HS Code 8508.60 및 하위 항목 등 모두 관세율 0%이며, 전기식 집진기의 경우 일본 전기용품 안전법이 적용되고 있다. 환경장치는 생산설비가 아닌 점에서 수요자의 도입 의욕보다 환경규제의 제정, 강화나 보조금 제도의 영향을 크게 받는 경향이 있으며, 상기 시장점유율에서도 알 수 있듯이 일본 환경장치는 대기업 중심의 업계 구조를 가지고 있다.²⁾ 공장 등에서의 대기오염을 방지하는 일본의 대기오염방지법은 2004년 최종개정 이후 변경이 없으나, 일본 자동차 업계에는 올해 10월 세계 최고수준의 배출가스(PM, NOX)규제인 '포스트 신장기 규제'가 강제 적용될 예정이어서 집진기에 대한 전반적인 인식은 높아지고 있다. 본 연구는 집진기에 대한 최적 설계 자료를 도출하기 위해 집진기 내 스크린 및

*† 이치우(교신저자) : 경남과학기술대학교 자동차공학과
E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-4106

*† Chi-Woo Lee(corresponding author) : Automobile Engineering,
Gyeongnam National University of Science and Technology.
E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-4106

카본필터 압력투과 유동해석에 관한 연구이다.

2. 압력강하에 대한 연구

2.1.1 스크린 수학적 모델

본 연구에서는 카본필터와 헤파필터 및 Mesh타입의 Strainer를 통과하는 유체에 대한 압력분포를 다공성 물질로 상사되어 모델링되고 있으며, 필터에 의한 배압의 증가를 구현하기 위해서 일반적으로 다음 식 (1)과 같은 압력증가 항이 사용되고 있다.

$$-K_i u_i = \frac{\partial p}{\partial \xi_i} \quad (1)$$

여기서 $\xi_i (i=1,2,3)$: 유동 방향

K_i : 투과율

u_i : ξ_i 에서의 면적속도

투과율 K_i 는 식 (2)와 같은 형태의 면적속도 크기의 함수로 나타낼 수 있다.

$$K_i = \alpha_i |\bar{v}| + \beta \quad (2)$$

필터 내부에서의 유동은 길이방향에 대하여 작용하고 나머지 방향에 대해서는 작용하지 않는다. 따라서 ξ_i 는 배기가스 배출방향인 x_i 로 나타낼 수 있다. 따라서 위의 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같이 필터 내에서의 압력강하를 나타낼 수 있다.

$$\frac{dp}{dx_i} = -(\alpha_i |\bar{v}| + \beta) u_i \quad (3)$$

2.1.2 지배방정식

필터 내를 흐르는 유동을 3차원 정상상태의 층류 유동으로 가정하였다. 그 이유는 각각의 필터 자체에 대한 압력강하를 구하기 위함이다. 필터에

서의 속도 분포 및 압력을 계산하기 위해서 사용된 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식이 사용되었으며, 순수한 압력강하를 계산하기 때문에 열전달 문제는 고려하지 않았다. 식 (4)~(5)는 본 연구에 사용된 지배방정식을 나타내고 있다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i u_j \right\} + SR \quad (5)$$

해석에 대한 변수는 입구속도를 0.1~5 m/s까지 0.5 m/s씩 증가시켰고, 카본필터와 Strainer에 따라 수치해석을 수행하였다.

2.2 수치기법

수치해석 기법으로는 지배방정식의 대류항 차분은 2차 정확도를 가지는 MARS(Monotone Advection and Reconstruction Scheme)기법을 사용하였으며, 또한 압력과 속도의 연결은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였으며, 본 연구에는 상용 열·유체 프로그램인 STAR-CCM+를 사용하여 계산을 수행하였다. 해석 결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 정상상태에서 반복 계산 시 종속변수들의 수렴 판정은 잔차값이 10⁻³ 이하에 도달하면 수렴한 것으로 간주하였다.

3. 압력강하 해석

3.1 Strainer 압력투과계수

Strainer에 대한 압력투과계수를 확인하기 위해 Fig. 1과 같이 4개의 타공이 된 모델을 계산하여 압력강하를 계산하였다. 계산된 압력강하를 통해

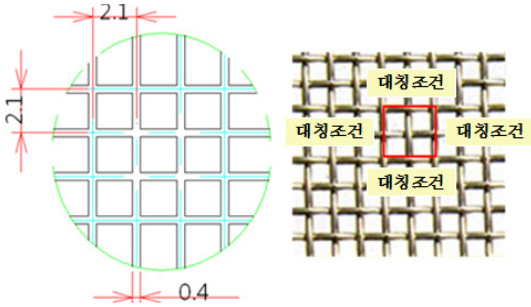


Fig. 1 Mesh analysis category for CFD analysis

압력투과계수를 확보하고자 한다. 그 이유는 Strainer의 경우 압력투과계수에 대한 정보가 없기 때문에 CFD를 통해 구하는 방법을 선택하였다. 계산 결과 앞서 언급한 바와 같이 Strainer 전체를 모델링하여 해석하는 것은 불가능하기 때문에 규칙적으로 배열되어 있고, 사방이 대칭조건으로 이루어져 있기 때문에 Fig. 1과 같이 타공된 4개의 영역에 대해서 유동해석을 수행하여 압력특성을 파악하였다.

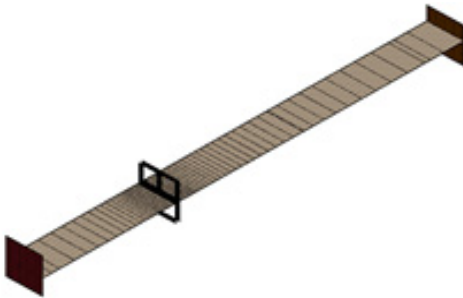
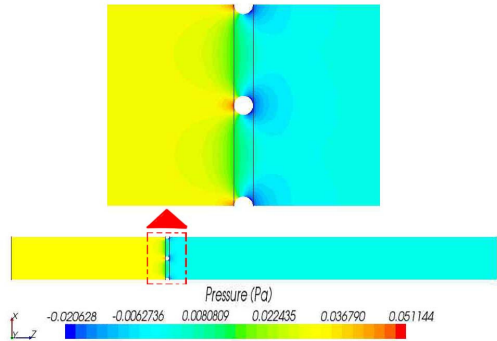
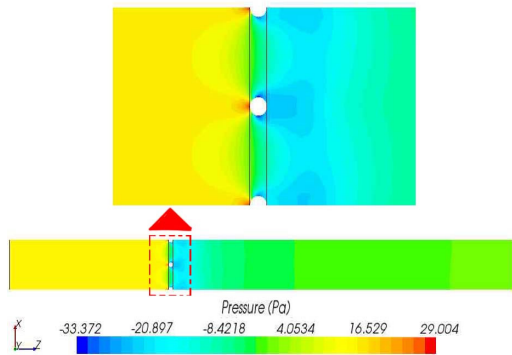


Fig. 2 Mesh-type strainer analysis category for CFD analysis

Fig. 2는 Strainer 압력강하를 계산하기 위해 생성된 형상과 계산격자를 나타내고 있다. 계산에 사용된 계산격자는 약 9만 개의 육면체격자가 적용되었다. 다면체 격자는 일반 사면체 격자에 비해 거의 동일한 계산 결과를 취득하는데 2배 이상의 격자를 절약할 수 있는 장점을 가지고 있다. 계산모델에서 Strainer 입구 쪽은 수력반경의 3배를 확장하여 안정적인 유동이 유입될 수 있도록 하였고, 출구의 경우 6배를 확장하여 토출유동에 대한 안정성을 부여하였다.



(a) 0.1m/s

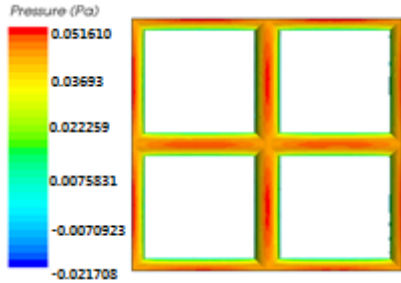


(b) 5m/s

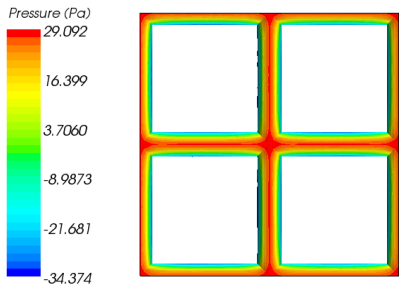
Fig. 3 Mesh type Strainer pressure distribution

Fig. 3은 Strainer에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 입구유속이 0.1~5 m/s까지 0.5 m/s씩 증가시켜 Strainer에 발생하는 압력강하를 예측하였다. 우선 (a)의 경우 가장 낮은 입구유속인 0.1m/s에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 여기서 Strainer에 유입되기 전-후에 압력변화가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Strainer 구조상 Mesh 형태로 되어 있기 때문에 철심의 직경이 유동장의 측면에서는 장애물이 된다. 결국 Strainer에서 유동장의 단면적이 좁아지기 때문에 속도 차가 발생하게 되어 Strainer 입·출구에서 압력강하가 발생하게 된다. (b)의 경우는 가장 높은 유입속도인 5 m/s에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 계산에 사용된 형상이 동일하고, 단지 입구유속만 다르기 때문에 압력분포 형태는 거의 유사하다. 단지 Strainer를 통과하는 속도 차가 크기 때문에 압력강하가 크

게 발생하는 것을 알 수 있었다. 특히, Strainer를 구성하는 Mesh 철심 단면에서 Fig 4와 같이 0.1 m/s일 경우 약 0.05 Pa의 압력을 받는 것에 비해 5 m/s일 경우 약 30 Pa의 압력을 받는 것으로 나타났다.



(a) 0.1m/s



(b) 5m/s

Fig. 4 Pressure distribution in Strainer surface

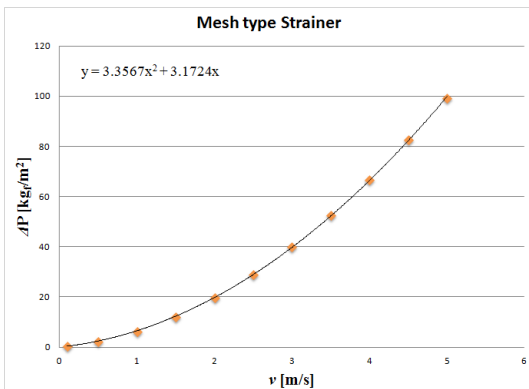


Fig. 5 Mesh-type Strainer pressure drop And permeability relationship

Fig. 5는 Strainer가 유속변화에 따른 압력강하를

나타낸 것이다. 결과에서 보면 유속이 증가할수록 압력강하는 크게 발생하였다. 여기서 확보하고자 하는 것은 단순히 압력강하가 아니라 이 압력강하 값을 통해 Strainer의 압력특성을 앞서 전술한 식 (3)을 통해 구할 수 있기 때문이다. 식 (3)의 α 는 1차측 압력투과계수[kg/m^4]이고, β 는 2차측 압력투과계수[$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$]이다. 이 두 계수를 통해 Strainer에 대한 압력 특성을 알 수 있다. 따라서 유동해석시 Strainer에 대한 영역은 Porosity로 가정하고, 이에 대한 특성계수인 α 와 β 값을 부여하여 압력차로 유동이 발생하도록 계산하게 된다. 결론적으로 Strainer에 대한 1차측 압력투과계수 $\alpha = 3.36\text{kg}/\text{m}^4$ 이고, 2차측 압력투과계수 $\beta = 3.17\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ 로 나타났다.

3.2 카본필터 압력투과계수

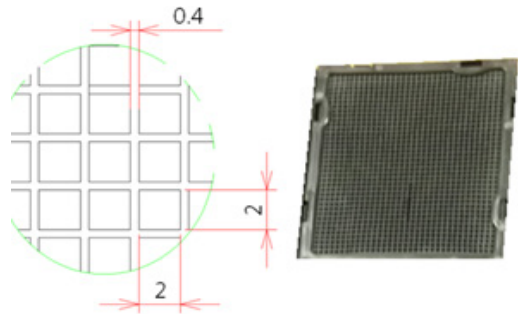


Fig. 6 Carbon filter shape

카본필터에 대한 압력투과계수를 확인하기 위해 Strainer의 유동해석과 동일한 절차를 가진다. 아래의 Fig. 6과 같이 Honeycomb 타입의 필터이다. 이러한 모델 역시 앞서 계산된 Strainer와 같이 압력투과계수에 대한 정보가 없기 때문에 CFD를 통해 구하는 방법을 선택하였다. 타공이 된 모델을 계산하여 압력강하를 계산하여 압력투과계수를 확보하고자 한다.

카본필터 역시 전체를 모델링하여 해석하는 것은 불가능하기 때문에 규칙적으로 배열되어 있고, 사방이 대칭조건으로 이루어져 있기 때문에 Fig. 7과 같이 타공된 4개의 영역에 대해서 유동해석을 수행하여 압력특성을 파악하였다.

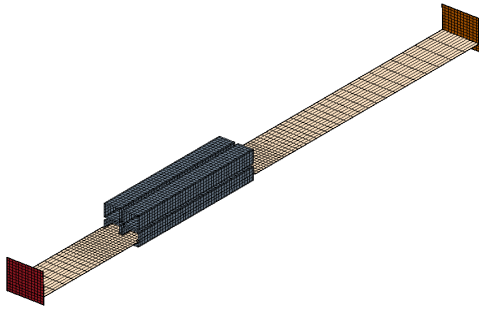


Fig. 7 Honeycomb type for the CFD analysis
Carbon Filter Analysis of area

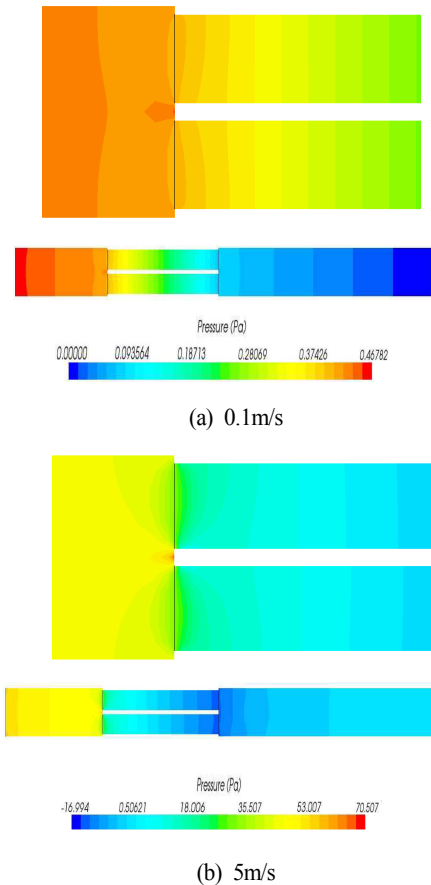


Fig. 8 Carbon filter pressure distribution

Fig. 8은 카본필터에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 입구유속을 0.1~5 m/s까지 0.5 m/s씩 증가시켜 카본필터에 발생되는 압력강하를 예측하였다. 우선 (a)의 경우 가장 낮은 입구유속인 0.1 m/s에

대한 압력분포를 나타내고 있다. 여기서 카본필터에 유입되기 전-후에 압력변화가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 카본필터의 구조는 Honeycomb 형태로 되어 있기 때문에 지지대의 두께가 유동장의 측면에서는 장애물이 된다. 결국, 카본필터 중심으로 본다면 유동장의 단면적이 좁아지기 때문에 속도 차가 발생하게 되고, 길이가 길어질수록 카본필터 입 출구에서 압력강하가 크게 발생하게 된다. (b)의 경우는 가장 높은 유입 속도인 5m/s에 대한 압력분포를 나타내고 있다.

계산에 사용된 형상이 동일하고, 단지 입구유속만 다르기 때문에 압력분포 형태 또한 거의 유사하다. 단지 카본필터를 통과하는 속도 차가 크기 때문에 압력강하가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 카본필터를 구성하는 Honeycomb 지지대 단면에서 받는 압력분포를 보면 0.1 m/s일 경우 중심부에서 약 0.46 Pa의 압력을 받는 것에 비해 5 m/s일 경우 약 71 Pa의 압력을 받는 것으로 나타났다.

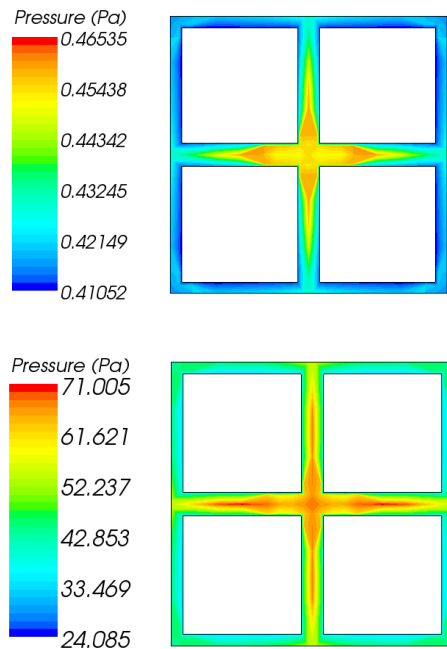


Fig. 9 Pressure distribution on the entrance surface of the carbon filter

Fig. 10은 카본필터가 유속변화에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. Strainer 해석결과와 같이 유속이 증가할수록 압력강하는 2차 곡선을 형태로 발생하였다. 결론적으로 카본필터에 대한 1차측 압력투과계수 $\alpha=13.17 \text{ kg/m}^4$ 이고, 2차측 압력투과계수 $\beta=34.02 \text{ kg/m}^3\text{-s}$ 로 나타났다.

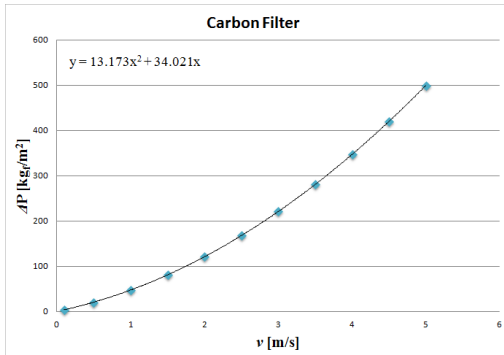


Fig. 10 Pressure drop and permeability relationship of the carbon filter

4. 결 론

본 연구에서는 흡연집진기 필터 내를 흐르는 유동해석을 통해 각각의 필터자체에 대한 압력강하를 구하고 압력투과계수를 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Fig. 3에서 Strainer에서 유동장의 단면적이 좁아지기 때문에 속도차가 발생하게 되어 Strainer 입·출구에서 압력강하가 발생하게 된다.
- 2) Strainer를 통과하는 속도차가 크기 때문에 압력강하가 크게 발생하였다. Fig 4와 같이 0.1 m/s 일 경우 약 0.05 Pa, 5 m/s일 경우 30 Pa의 압력을 받는 것으로 나타났다.

3) Strainer가 유속변화에 따른 압력강하를 통해 Strainer에 대한 1차측 압력투과계수 $\alpha=3.36 \text{ kg/m}^4$ 이고, 2차측 압력투과계수 $\beta=3.17 \text{ kg/m}^3\text{-s}$ 로 나타났다.

4) 카본필터를 구성하는 Honeycomb 지지대 단면에서 받는 압력분포를 보면, 0.1 m/s일 경우 중심부에서 약 0.46 Pa, 5m/s일 경우 약 71 Pa의 압력을 받는 것으로 나타났다.

5) 카본필터가 유속변화에 따른 압력강하를 통해 카본필터에 대한 1차측 압력투과계수 $\alpha=13.17 \text{ kg/m}^4$ 이고, 2차측 압력투과계수 $\beta=34.02 \text{ kg/m}^3\text{-s}$ 로 나타났다.

References

1. S. C. Jang, H. D. Cho and N. K. Kim, 2007, "Development of Gear Type Vane Damper Change Link Type in FD FAN", KSMTE, pp. 104-109.
2. B. W. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, D. K. Song, W. S. Hong and W. H. Shin, 2011, "Characteristics of Charging and Collection of 10nm Class Ultrafine Nanoparticles in an Electrostatic Precipitator", Trans. Korean Soc. Mech Eng. B, Vol. 35, No. 10, pp. 1013-1018.
3. C. W. Lee, 2011, "A Numerical Analysis on Flow Characteristic in a Standard Cyclone Dust Separator", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 97-103.