

## 세라믹 필터 집진기의 유동 해석

### Analyze the Fluid Inside the Ceramic Filtration Dust Collection System

장성철\*, 최동순\*\*

Sung-Cheol Jang\*, Dong-Soon Choi\*\*

#### 〈Abstract〉

This study aimed to analyze the fluid inside the ceramic filtration dust collection system which was assumed to be a stationary 3-dimensional turbulence. The fluid dynamics data necessary for performance curves were obtained based on the analysis results. The governing equations used to compute the velocity distribution and pressure inside the catalyst converter were expressed with continuity and momentum equations. Furthermore, the  $k-\varepsilon$  turbulence model, already validated by the industry (coal factory, high temperature dust collector) was used for the study. Of a total of three computational models employed, Model-1 served as the basis for CFD analysis which took measurements in increments of 70mm.

*Keywords : ceramic filtration dust collection, CFD analysis,  $k-\varepsilon$  turbulence model*

---

\* 교신저자, 정회원, 한국폴리텍IV대학 충주캠퍼스 기계시스템과  
E-mail : jsc@kopo.ac.kr, Tel : 043-850-4280

\*\* 한국폴리텍IV대학 충주캠퍼스 교양

\* corresponding author, Department of Mechanical System Engineering, Polytech4, Chungjoo Camp.

E-mail : jsc@kopo.ac.kr, Tel : 043-850-4280

\*\* Dept. of Cultural Studies, Polytech4, Chungjoo Camp.

## 1. 서 론

섬유상 필터는 대부분이 PTFE Membrane으로 Laminating된 복합섬유 필터 미디어의 형태를 지니며, 필터백 시장의 대부분을 차지하고 있다. 폴리머 분리막은 200°C 이하의 온도 한계와 낮은 화학적 안정성, 여과대상 배출분진의 특성에 따라 가혹한 운동조건에서는 적용이 불가능하다. 이로 인해 소각로와 보일러 등 고온의 배출분진을 전처리 공정을 통해 낮은 온도로 바꾸어야 만이 섬유상 필터백을 사용할 수 있어 순수한 폐열에너지의 이용을 저해 하는 요인이 되어왔다.

고온 여과 집진공정의 필터소재 및 기계적 한계성과 향후 강화되는 국내외 환경규제에 대한 대응력을 향상시키기 위해서는 기존보다 효율적이면서 간단한 공정을 요구하고 있다. 열적, 화학적, 기계적 내구성이 강한 고효율 집진필터 소재를 필요로 하고 있으나 섬유상 필터의 경우 인화성 불꽃이나 온도가 상승할 경우 집진기에 화재가 발생 하는 사례가 있다<sup>1~3)</sup>.

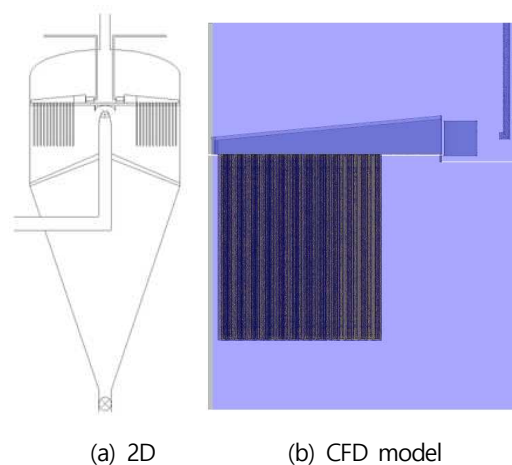
본 연구에서는 세라믹 필터 집진기 내부를 흐르는 유동을 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하여, 해석된 결과를 바탕으로 성능곡선에 필요한 유동정보를 획득하고자 한다. 촉매 변환기에서의 속도분포 및 압력을 산출하기 위해서 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이며, 난류 모델은 이미 산업계에서 타당성을 검증받은  $k-\epsilon$  모델을 사용하고자 한다. 본 연구에 적용되는 계산모델은 총 3가지로 Model-1을 기준으로 70mm씩 증가시켜 유동특성을 분석하였다.

## 2. 집진기 유동해석

### 2.1 수치해석 방법

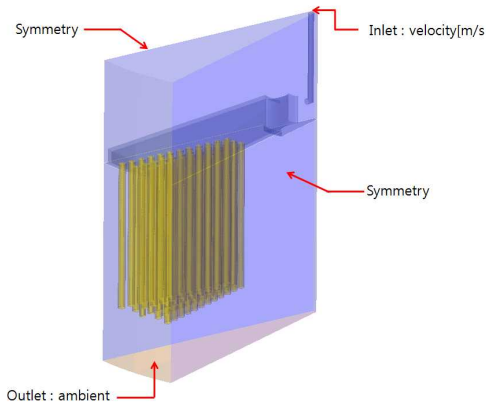
수치해석기법을 통한 일반적인 검증은 기업에서 정확한 자료공유가 수반되어야 한다. 수치해석 결과의 신뢰성 확보를 위해서는 해석 모델의 적절한 모델링과 해석에 적절한 난류모델의 선정, 계산 격자의 신뢰성 확보가 필요하다. 이와 더불어 Solver의 선택 또한 계산 정확도에 미치는 영향이 크기 때문에 상용 S/W는 CD-adapco사의 STAR-CCM+를 사용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 1은 2D 개략도를 통해 CATIA V5를 이용하여 CFD 모델을 재생산한 것을 비교한 것이다. 입구와 출구에서의 경계조건은 입구에서 5%의 난류강도와 배기관 직경의 10%인 난류 혼합거리를 설정하여 압력 5bar일 때 속도는 실험<sup>4)</sup>을 통해 확인하여 경계조건으로 부여하였다. 또한 출구의 경우 대기압으로 부여하여 입구에서 분사되는 유속이 필터를 거쳐 출구로 빠져나가는 조건으로 되어있다. 또한 집진기는 원통으로 구성되어 있고



(a) 2D

(b) CFD model



(c) Boundary condition

Fig. 1 Ceram filiter collector

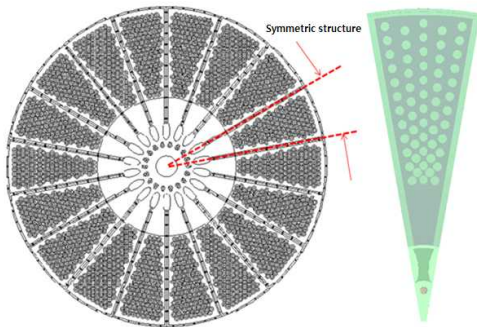


Fig. 2 Analytical area

Fig. 2와 같이 축대칭이기 때문에 하나의 모듈만 유동해석을 수행하였다. 작동유체는 공기로 설정하였으며 이상기체 상태방정식을 만족하도록 Ideal Gas로 지정하여 유동해석을 수행하였다.

### 2.2 세라믹 필터 DML 수학적 모델

본 연구에서는 세라믹 필터를 통과하는 유체에 대한 압력분포를 다공성 물질로 상사되어 모델링 되고 있으며, 필터에 의한 배압의 증가를 구현하기 위해서 일반적으로 아래의 식과 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,  $u_i$  :  $\xi_i$ 에서의 면적속도를 나타낸다.

투과율  $K_i$ 는 아래의 식과 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  $\xi_i$ 는 배기가스 배출방향인  $x_i$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 위의 정리하면 아래의 식과 같이 필터 내에서의 압력강하를 나타낼 수 있다.

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

### 3. 계산모델

본 연구에 적용되는 계산모델은 총 3가지로 Fig. 3과 같이 Model-1를 기준으로 70mm씩 증가시켜 유동특성을 분석하고자 한다. Fig. 4는 설계모델을 유동해석에 맞게 제작된 유동해석 계산 모델과 비교한 것이다. 전반적인 형태는 동일하게 구성하였고, 필터 배열에 대한 도면치수가 없는 이유와 계산격자에 대한 부담을 줄이기 위해 일정 배열만 모델링하여 유동해석을 수행하였다.

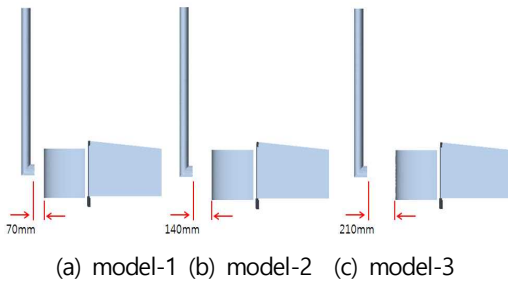


Fig. 3 CFD model of ceram filter collector

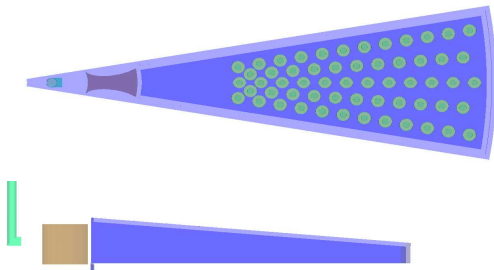


Fig. 4 Flow analysis model

#### 4. 유동해석결과 및 분석

Fig. 5는 X-Z단면에서 5bar(Inlet velocity : 1.06m/s)에 대한 속도벡터를 모델별로 비교한 것이다. 모델별 형상차이는 없고, 분사관과 벤츄리관의 거리가 변수이기 때문에 정성적인 결과를 비교할때 거의 유사한 유동분포를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. Model-1의 경우 분사관이 벤츄리관과 거리가 가장 가까이 설치되어 있기 때문에 벤츄리관을 통과하면서 유동의 직진성이 있는 것으로 나타났다. 또한 분사관에서 토출될 때 주변과 비해 빠른 유속을 가지고 있기 때문에 순간 압력이 감소하면서 주변에 있는 유동장이 벤츄리관으로 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유로 분사관과 벤츄리관과의 거리가 멀어질수록

주변에서 유입되는 유동장의 영향으로 인해 벤츄리관을 통과하면서 아래쪽으로 치우쳐서 유동이 진행됨을 확인할 수 있었다. 이는 분사관과 벤츄리관과의 거리가 가장 먼 Model-3의 경우 보다 심하기 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 유동장의 결과는 나머지 해석변수인 압력변화에 대한 유동장 분포에서 정성적으로 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 유사한 결과를 얻은 이유는 동일 형상에 대한 해석대상에서 단지 분사관에 유입되는 유속만 증가시켰기 때문이며, 일부 국소적인 부분에서 유동장의 차이가 발생하였다. 그러나 이러한 차이는 전체 유동장에 영향을 미치지 못하였기 때문에 나머지 변수에 대한 속도벡터에 대한 분석은 육안으로 비교하기 거의 불가능하기 때문에 생략하기로 한다.

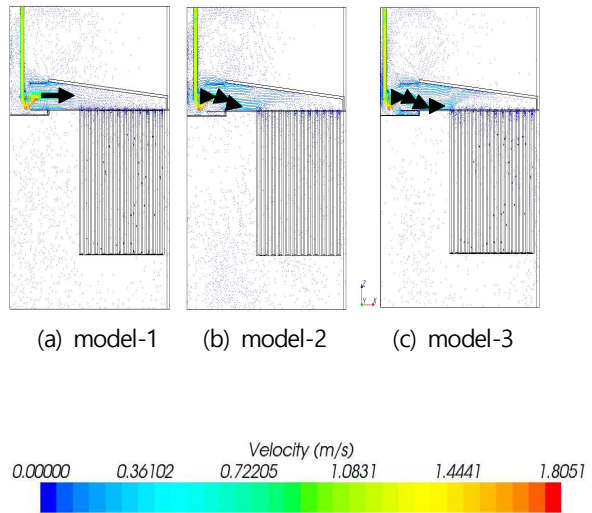
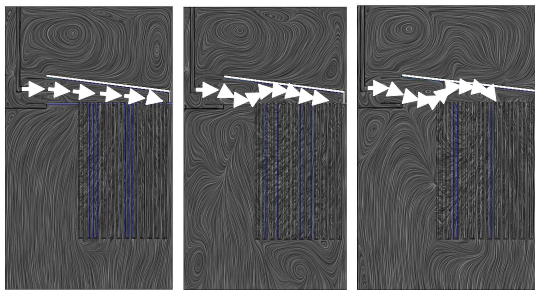


Fig. 5 X-Z velocity distribution(5bar)

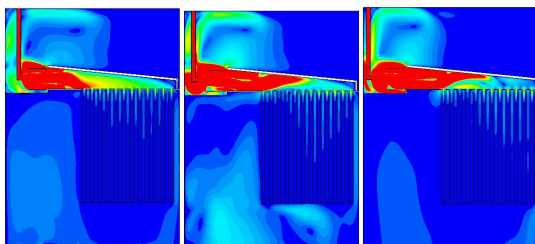
Fig. 6은 X-Z단면에서 1bar(Inlet velocity : 1.06m/s)에 대한 유선을 모델별로 비교한 것이다. 유선의 경우 속도장을 이해하는데 속도벡터보다 유리하기 때문에 이에 대한 분석을 하였다. 전반적으로 보면 분사관에서 토출되는 유동은 세라믹

필터를 통해 출구쪽으로 잘 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Model-1의 경우 필터를 통과 하면서 가장 안정적인 유선분포를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 필터 통과 후 출구로 빠져나갈 때 주변의 유동장에 간섭을 많이 받지 않는 것으로 판단할 수 있다. 또한 벤츄리관을 통과한 후 필터로 유입되는 부분을 살펴보면 Model-1의 유동장이 가장 안정적으로 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 그림에서 흰색 화살표는 유동장의 진행방향을 간략하게 나타낸 것을 보면 확연히 다른 Model과 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 결국 필터로 유입될 때 균일도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(a) model-1 (b) model-2 (c) model-3

Fig. 6 X-Z Stream line distribution(5bar)



(a) model-1 (b) model-2 (c) model-3

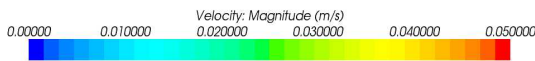


Fig. 7 X-Z velocity(0.05m/s) distribution

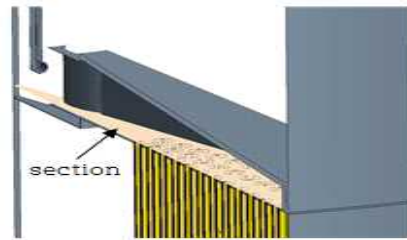


Fig. 8 X-Y in flow

Fig. 7은 최대유속 0.05m/s 이하의 유속에 대한 크기를 나타내고 있다. 분사관에서 유속이 빠르기 때문에 필터에 유입되는 유속을 관찰하기 어려워 이와 같은 방법을 통해 필터부분에서 유속을 확인하였다. 저속에서의 유동장을 살펴 본 결과 벤츄리를 빠져나오면서 필터 입구에 비교적 균일한 유동장을 형성하고 있는 것은 Model-1이 좋았고, Model-3이 다소 복잡한 유동장을 형성하고 필터로 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 추후 입구경계조건이 달라지는 변수에 대해서도 이와 유사한 경향의 유동장을 형성하고 있음을 확인할 수 있었다. 필터에 유입될 때 주변 유동장에 대한 분석을 위해 Fig. 8과 같은 단면을 설정하여 유동장을 분석하였다.

Fig. 9는 X-Y단면에서 5bar(Inlet velocity : 1.06m/s)에 대한 속도크기와 유선분포를 모델별로 함께 비교한 것이다. 이 지점은 필터로 유입되는 면에서 1mm 떨어진 지점의 단면에 대한 유동장을 나타낸 것이다.

Fig. 10은 X-Z단면에서 압력분포를 나타낸 것이고, 압력범위가 분사관에 집중되어 있어 Fig. 11과 같이 0.5Pa 이하의 압력만 나타내어 모델별 압력분포를 비교하였다. 그 결과 Model-1의 경우 분사관이 벤츄리관과 가장 가까운 관계로 유동이 압력분포가 다소 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 반면 Model-2와 Model-3은 거의 유사한 압력분포를 나타내고 있었다. 속도크기에 대한 분포

를 살펴보면 3가지 Model별 다르게 분포함을 확인할 수 있었다. Model-1의 경우 분사관에서 토출되어 벤추리관을 통과할 때 다소 직진성 있게 통과하였기 때문에 벤추리와 벤추리 출구까지 거의 유동이 균일하게 발생하고 있었음 확인할 수 있었다. 반면 Model-2의 경우 벤추리를 통과한 후 유속이 증가되었고, Model-3의 경우 가장 큰 유속이 발생됨을 확인할 수 있었다. 또한 필터 유입구쪽을 살펴보면 Model-1은 전체적으로 골고루 유동장이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면 Model-2와 Model-3은 앞서 X-Z단면에서 설명한 바와 같이 벤추리관을 통과하면서 하부로 치우쳐 이동하면서 하부 판에 부딪쳐 다시 상승하였기 때문에 필터 전단부 보다 후단부에서 유속이 다소 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 필터에 골고루 유동장이 형성되기 위해서는 Model-1이 다소 적합한 것으로 판단된다.

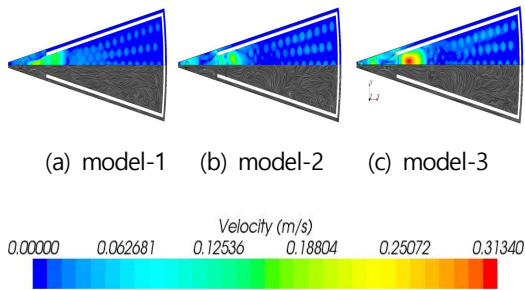


Fig. 9 In flow velocity and stream line distribution(5bar)

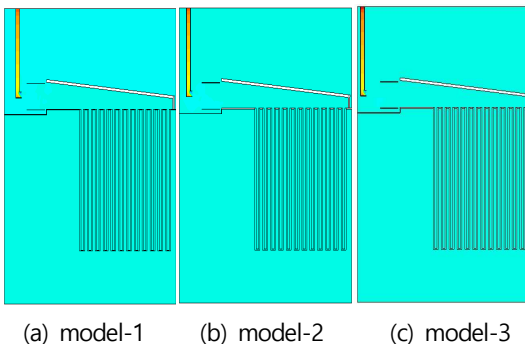


Fig. 10 X-Z of In flow pressure distribution (5bar)

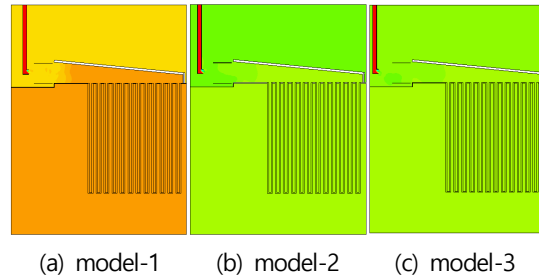


Fig. 11 X-Z of pressure(0.5Pa) distribution

### 5. 결론

본 연구에서는 세라믹 필터 집진기 내부를 흐르는 유동을 3차원 정상상태의 난류유동을 해석하기 위해서 계산모델은 총 3가지로 Model-1를 기준으로 70mm씩 증가시켜 유동특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Model-1의 경우 분사관이 벤추리관과 거리가 가장 가까이 설치되어 있기 때문에 벤추리관을 통과하면서 유동의 직진성이 있는 것으로 나타났다.
2. Model-1이 분사관에서 토출될 때 주변에 비해 빠른 유속을 가지고 있기 때문에 순간압력이 감소하면서 주변에 있는 유동장이 벤추리관으로 유입되는 것을 확인할 수 있었다.

3. 분사관과 벤츄리관과의 거리가 멀어질수록 주변에서 유입되는 유동장의 영향으로 인해 벤츄리관을 통과하면서 아래쪽으로 치우쳐서 유동이 진행됨을 확인할 수 있었다.
4. Model-1의 경우 분사관이 벤츄리관과 가장 가까운 관계로 유동이 압력분포가 다소 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] T.S. Park, S.C. Jang, J.S. Lee, J. S. Cho, Y.J. Choi, "Development of Module Type Ceramic Filter for High Temperature Fine Dust", KSMTE. Spring Conference, pp.84-85. (2015)
- [2] Cooper, C.D., and F. C. Alley, "Air Pollution Control: A Design Approach", Waveland Press, p.500-510 Control for Utility Boilers: Highlight of the EPRI July 1992 Workshop", Journal of the Air Pollution Control Association, Detroit, 42(11), p. 1498, (2004)
- [3] Launder, B. E. and Spalding, D. B., "The numerical computational of turbulence Flows", Computational methods in applied mechanics and engineering, Vol. 3, pp.269-289, (1972)
- [4] Jang, S. C., Han, S. M., Lee, C. K., & Jung H. C., "FSI Analysis of Pneumatic Actuator", KSPSE Spring Conference, pp.81-83. (2016)

(접수:2017.01.15. 수정: 2017.02.13. 게재확정: 2017.02.23.)