

[Research Paper]

## 활성탄 입자 조건에 따른 정화통의 압력손실 특성에 관한 연구

김민욱 · 김영수\* · 박용환†

호서대학교 소방방재학과, \* (주)산청

### Pressure Loss in Canisters with Conditions of Activated Carbon Particles

Min-Wook Kim · Young-Soo Kim\* · Yong-Hwan Park†

Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University, \*Sancheong Co., Ltd

(Received July 18, 2017; Revised August 9, 2017; Accepted August 14, 2017)

#### 요 약

각종 화재, 폭발, 누출, 테러 사고 시 발생하는 유해가스로부터 작업자나 소방대원들의 안전을 확보하고 원활한 구조활동을 위하여 입자형 활성탄을 여과재로 사용하는 특수 방독면의 필요성이 크게 증가하고 있다. 본 연구에서는 CFD 유동해석을 통하여 활성탄 정화통에 대한 압력손실 특성을 규명하였으며, 해석 결과 호흡유량에 대한 압력손실은 유속이 빠를수록, 여과재의 입자가 작을수록, 공극률이 작을수록 커지지만, 특정 조건 이상에서는 그 변화가 매우 크게 나타나 활성탄 여과재의 선택 시 이를 충분히 고려하여야 하는 것으로 분석되었다.

#### ABSTRACT

The use of special gas masks such as PAPR is strongly required for the safe and efficient work of fire-fighters in removing fire residue and rescue activity. Special gas masks commonly use canisters with carbon activated particles. This paper analyzed the pressure distribution, velocity distribution and pressure loss characteristics in canisters using CFD simulation, and showed pressure drops are affected by inlet air velocity, canister geometry and increase dramatically especially with the decrease of particle diameters and volume fractions.

**Keywords :** Gas Mask, Canister, CFD, Pressure Loss, Activated Carbon Particle

### 1. 서 론

통상 건물 화재 시에 발생하는 유해가스 중에는 일산화탄소와 이산화탄소가 많은 비중을 차지하는 반면 산업현장에서 화재, 폭발, 누출에 의한 유해가스는 현장별로 종류 및 특성이 서로 다르다. 다만, 국내 화학사고 유형 중 약 33%가 화재사고, 약 24%가 폭발사고와 연관되어 있을 만큼 상호 연관성은 매우 깊다. 현재 국내에서는 각종 화재사고, 유독가스 누출사고 또는 테러에 의한 독가스 살포 상황 등에 대비하여 각각 산업용, 화재용, 전쟁용(일반, 또는 군용) 방독면이 생산 판매되고 있다.

각 방독면에는 용도별로 유해가스를 제거하기 위한 여과재가 들어 있는 정화통이 필수이며, 경량이면서도 4시간 이상 사용할 수 있는 전동식 호흡보호구(Powered Air Purifying Respirator, PAPR) 및 소방용 및 산업용 겸용으로 사용할 수

있는 복합 방독면의 개발도 추진 중이다. 하지만 방독면의 핵심 부품인 정화통은 제대로 된 설계 기술 없이 외산 제품을 모방 제조하거나 수입하여 사용하고 있는 실정이다.<sup>(1-3)</sup>

본 논문에서는 정화통 독자 설계 기술을 확보하기 위한 차원에서 착용자의 호흡에 영향을 미칠 수 있는 정화통의 호흡저항을 제어하기 위하여 CFD 전산유동해석 기술을 활용하였다.

### 2. 방독면 정화통

방독면에서 가장 핵심 구성품인 정화통은 입자필터와 가스필터로 구성되어 있다. 외부에서 들어온 오염된 공기가 입자필터를 통하여 작은 액체나 고체 입자를 제작 방식에 따라 1차적 혹은 2차적으로 여과하고 활성탄으로 구성된 가스필터는 활성탄을 사용한 물리적 흡착과 활성탄 표

† Corresponding Author, E-Mail: [yhpark@hoseo.edu](mailto:yhpark@hoseo.edu), TEL: +82-41-540-5733, FAX: +82-41-540-5738

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

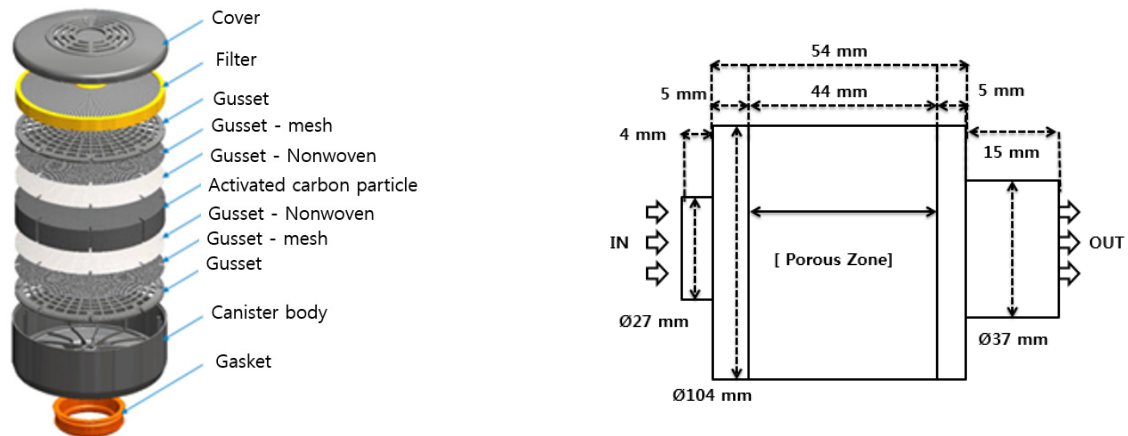


Figure 1. Structure of canisters.

면에 금속이온을 코팅하여 가스의 직접적인 화학반응을 이용한 화학적 흡착을 이용하여 방독면 내분배에 여과된 공기를 공급하는 역할을 한다.

정화통은 외부공기를 정화하여 방독면 내부로 공급하여 주며, 숨을 내실 때는 정화통을 통하지 않고 바로 배출하기 때문에 숨을 들이 쉴 때의 정화통 흡기저항이 매우 중요하다. 정화통의 개략적인 구조는 Figure 1과 같다.<sup>(2)</sup> 정화통은 여러 가지 구성품으로 이루어져 있으나, 본 논문에서는 활성탄 여과재의 입자크기, 공극률 등을 설계 변수로 정화통 내에서의 압력분포와 속도분포를 분석하고 주어진 호흡유량에 대한 압력손실 특성을 규명하였다.

### 3. CFD 해석 및 결과

입자형 활성탄은 다공성 매체로 볼 수 있으며, 다공성 매체의 유동해석 계산은 표준 유체 유동방정식에 운동량 조건을 더해 계산한다. 여기에 더하는 운동량 조건은 점성손실과 관성손실이다. 다공성 매체의 압력변화 계산식은 난류모델의 경우 식(1)의 Ergun 방정식으로 나타낼 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu(1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v + \frac{1.75\rho(1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} v^2 \quad (1)$$

여기서,  $\Delta p$ 는 압력손실,  $L$ 는 다공성 매체 두께,  $\mu$ 는 점성계수,  $D_p$ 는 입자 평균 직경,  $\epsilon$ 은 공극률,  $v$ 는 유속이다.

정화통의 공기 유입 유속은 KS M 6674<sup>(5)</sup>에 명시되어 있는 두 가지 기준호흡유량 조건인 30 lpm, 95 lpm과 정화통의 유입구 면적  $5.73 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 으로부터 구하였으며, 호흡유량 30 lpm일 때의 유속은 0.873 m/s, 95 lpm일 때의 유속은 2.76 m/s로 계산되었다.

해석 시나리오로서 기준호흡유량에 따른 유속은 0.873 m/s와 2.76 m/s의 2가지, 여과재의 입자직경은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm의 6가지, 공극률은 10, 15, 20, 25, 30%의

Table 1. The Variables used in the Analysis ( $\alpha$  and  $C_2$ )

Particle Diameter	Porositie	$\alpha$	$C_2$
1 mm	10 %	1.73E+33	3.2E+06
	20 %	1.73E+30	3.5E+05
	30 %	1.97E+28	9.1E+04
2 mm	10 %	2.70E+31	1.6E+06
	20 %	2.70E+28	1.8E+05
	30 %	3.14E+26	4.5E+04
3 mm	10 %	2.74E+30	1.1E+06
	20 %	2.20E+27	1.2E+05
	30 %	2.70E+25	3.0E+04

5가지로 세분화하여 0.873 m/s에 대한 30개의 시나리오와 2.76 m/s에 대한 9개의 시나리오에 대한 CFD 해석을 수행하였다.

다공성 매질 여과재를 포함하는 정화통의 CFD 유동해석 툴로서는 FLUENT를 사용하였으며,  $k-\epsilon$  난류모델에 대한 입력 조건으로서 각각의 시나리오에 따른 여과재 특성 변수인  $\alpha$ (매체의 투과율)와  $C_2$ (관성저항계수) 값을 식(2)와 식(3)을 이용하여 산출한 후 해석을 수행하였다. Table 1은 해석에 사용한 투과율과 관성저항계수를 나타낸 표이다.

$$\alpha = \frac{D_p^2 \epsilon^3}{150\mu(1-\epsilon)^2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} \quad (3)$$

메쉬 종류는 사면체, 육면체, 피라미드, 썩기모양으로 적절하게 3D 공간을 이룰 수 있는 Tri/hybrid 메쉬로 하였으며, 총 404109개로 형성되었다. Figure 2는 전처리 프로그램

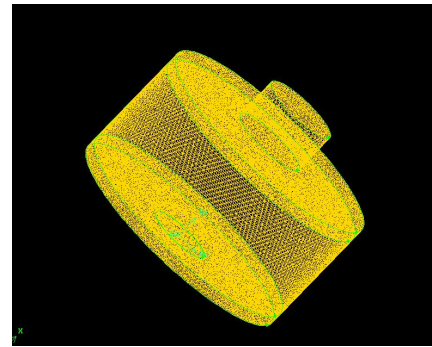
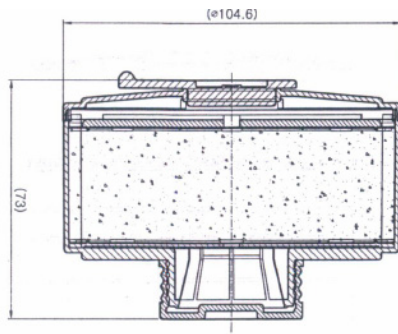


Figure 2. Meshes of canister model.

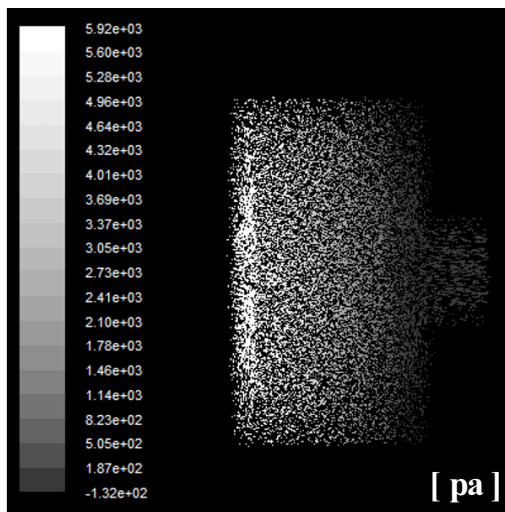


Figure 3. Pressure distribution of canister.

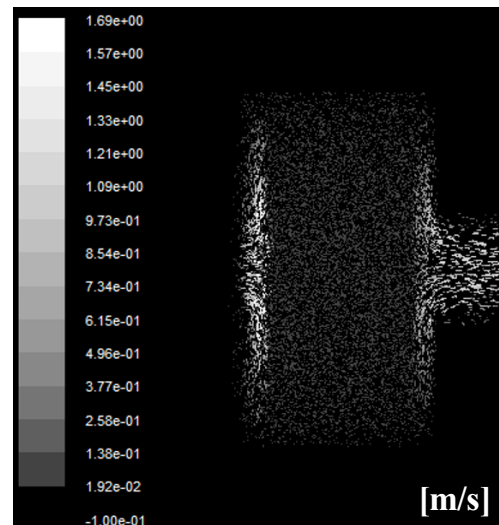


Figure 4. Velocity distribution of canister.

Table 2. Properties of Air

Temperature	-20 °C (Winter)	20 °C	30 °C (Summer)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.395	1.166	1.164
Specific Heat (j/kg·K)	1006.9	1006.43	1007.4
Thermal Conductivity (w/m·K)	0.0225	0.0242	0.0264
Viscosity Coefficient (kg/m·s)	1.62*10 <sup>-6</sup>	1.86*10 <sup>-6</sup>	1.88*10 <sup>-6</sup>

(GAMBIT)을 이용하여 메쉬 생성 작업한 결과이다. 다공성 매체의 입력 조건을 위하여 여과재 부분은 별도로 다공질 영역(porous zone)으로 지정하였다.

호흡을 위해 유입되는 공기의 밀도, 점성 등 물성은 사용 현장의 온도에 따라 달라질 수 있으며, 이에 따른 압력 손실도 약간의 영향을 받을 수 있다. Table 2는 계절별 공기의 물성 변화를 나타낸 것으로 온도가 증가할수록 밀도는 약 16% 감소하나, 점성은 반대로 약 16% 증가하는 것으

로 조사되었다. 식(1)에서 보면 이러한 변화는 서로 상쇄되어 압력손실에 대한 공기 온도의 영향은 크지 않을 것으로 예상되었다. 이에 따라 본 연구에서는 20 °C 공기의 물성을 기준으로 하였다.

Figure 3은 CFD 해석에 따른 정화통내의 압력분포를 나타낸 것으로 시나리오에 관계없이 거의 비슷한 양상을 나타내고 있다. 압력분포는 정화통 입구에서 가장 높고 출구에서 가장 낮으며, 정화통 몸통 내부에서는 점진적으로 감소하는 분포 형태를 보이고 있다. 이는 정화통 내에서 공기 이동 방향에 따라 압력손실이 지속적으로 일어나고 있음을 보여준다. 압력손실의 원인은 크게 공기의 점성에 의한 마찰력과 정화통의 기하학적 형상 변화에 의한 형상손실 때문으로 추정된다.

Figure 4는 정화통내의 유속분포를 나타낸 것으로 입구와 출구에서는 유속이 높고 일정하지 않은 반면, 정화통 몸통 내부에서는 유속이 낮고 비교적 균일한 분포를 보이고 있다. 유입 공기의 속도 변화는 대부분 정화통의 형상과 단면적 변화에 기인한 것으로 볼 수 있으며, 일정 유속으로 유입구로 들어간 공기는 넓은 공간의 정화통 몸통 전체로

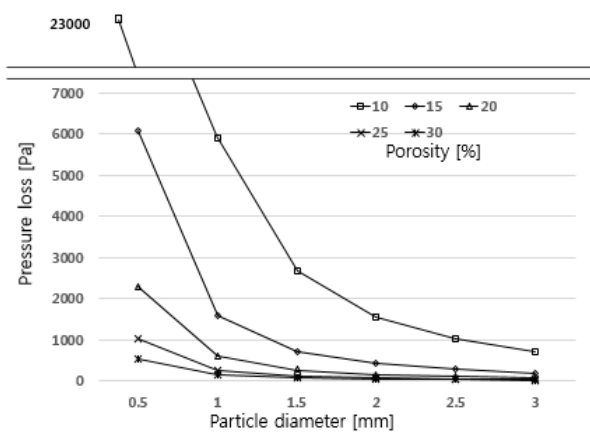


Figure 5. Pressure loss vs. particle diameters ( $v=0.873$  m/s).

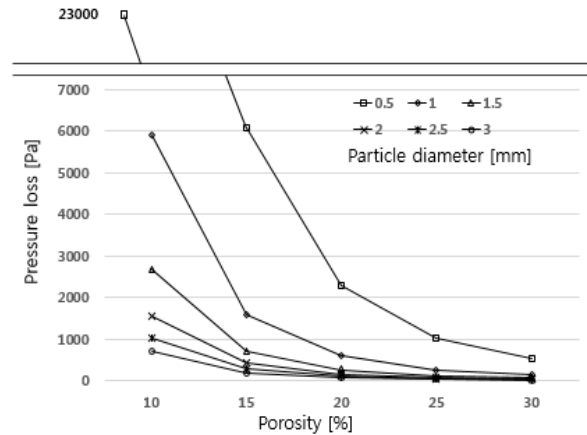


Figure 6. Pressure loss vs. porosities. ( $v=0.873$  m/s).

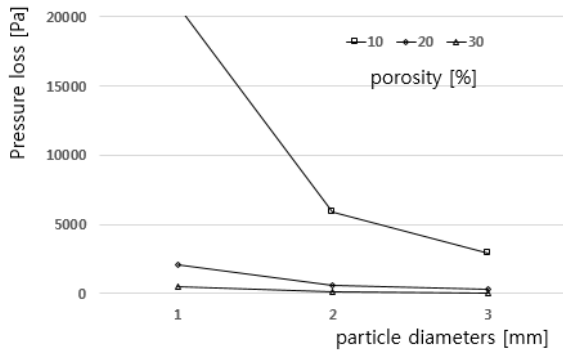


Figure 7. Pressure loss vs. particle diameters ( $v=2.76$  m/s).

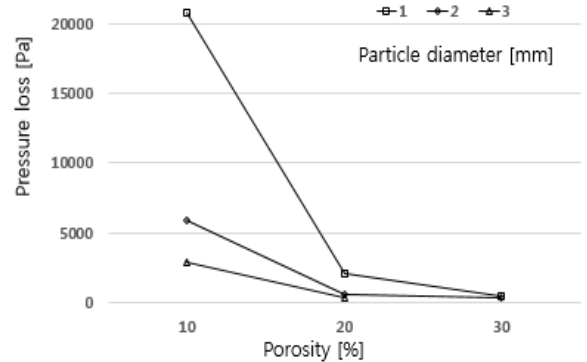


Figure 8. Pressure loss vs. porosities ( $v=2.67$  m/s).

Table 3. Range of Pressure Losses Satisfying Breathing Resistance Criteria

Particle Diameter [mm]	Porositie [%]				
	10	15	20	25	30
0.5	23000	6080	2280	1030	520
1.0	5910	1570	586	265	134
1.5	2680	715	268	121	62.7
2.0	1550	412	151	70	35.8
2.5	1010	270	103	46	24.9
3.0	719	192	72.5	33	17

Particle Diameter [mm]	Porositie [%]		
	10	20	30
1.0	20720	2079	485
2.0	5895	603	145
3.0	2944	306	36

확산되면서 유속이 느려지고 여과재를 통과한 후에는 다시 좁은 출구로 빠져나가게 되므로 유속이 다시 빨라지는 것을 볼 수 있다.

Figure 5~Figure 8은 활성탄 여과재의 입자직경, 공극률, 그리고 유입 공기의 유속 변화에 따른 압력손실 특성 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 관찰할 수 있듯이 입자직경과 공극률이 감소함에 따라 그리고 유속이 증가함에 따라 압력손실은 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Figure 5와 Figure 6에서 보면 압력손실은 입자직경이 작을수록 압력손실이 서서히 증가하다가 일정 직경 이하에서

는 그 증가 속도가 매우 커지는 것으로 나타났다. 공극률 15% 이하에서는 입자직경 1.5 mm 이하에서 압력손실은 매우 크게 증가하였으며, 공극률이 20% 이상일 경우에는 입자직경 1 mm 이하에서 압력손실이 크게 증가하였다. 즉, 정화통 내 압력손실은 입자직경과 공극률 간에 서로 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다.

Figure 7~Figure 8은 유입 유속이  $v=2.76$  m/s일 때의 압력손실 그래프로  $v=0.873$  m/s일 때에 비해 유속이 약 3배 증가함에 따라 압력손실은 공극률에 관계없이 전반적으로 약 4-5배 이상 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 3의 표시영역은 KS M 6674 방독마스크의 고농도 특급의 호흡저항 허용기준(30 lpm일 때 280 Pa, 95 lpm일 때 1060 pa)과 비교할 때 선택 가능한 여과재의 입자직경 및 공극률 범위를 나타낸 것이다. 다만, 여과재의 입자직경, 공극률의 크기는 유독가스에 대한 흡착 성능과도 밀접한 관계에 있는 만큼 정화통 설계 시에는 여과재의 호흡저항과 유독가스에 대한 흡착 성능을 모두 고려하여 결정하여야 한다.

공극률이 30%에서 25%로 감소했을 때 압력손실은 1.93배 증가하였으며, 25%에서 20%로 감소했을 때는 2.21배, 20%에서 15%로 감소했을 때는 2.67배, 15%에서 10%로 감소했을 때는 3.75배 증가하였다. 입자직경의 경우 3 mm에서 2.5 mm로 감소했을 때 압력손실은 평균적으로 1.41배 증가하였으며, 2.5 mm에서 2 mm로 감소했을 때는 1.49배, 2 mm에서 1.5 mm로 감소했을 때는 1.74배, 1.5 mm에서 1 mm로 감소했을 때는 2.18배, 1 mm에서 0.5 mm로 감소했을 때는 3.88배로 증가 하였다. 입자직경과 공극률이 작아질수록 다공성 매체 내에서 일어나는 급격한 유속변화와 방향변화 등이 더 크게 작용한 것으로 보여진다.

#### 4. 결 론

다공성 매체인 입자형 활성탄을 여과재로 사용하는 각종 방독면 정화통 내에서의 압력분포, 속도분포 및 압력손실 특성을 CFD 유동해석을 통하여 분석하였다.

그 결과 정화통 내에서의 압력분포는 공기 이동 방향에 따라 점진적으로 감소하였으며, 압력손실은 유속이 빠를수록, 여과재의 입자가 작을수록, 공극률이 작을수록 높게 분포 되었다. 속도분포는 정화통의 형상 및 단면적 크기에 따라 증감하는 것으로 분석되었다.

입자직경 및 공극률의 특정 구간을 통과할 시 증가 속도

는 매우 크게 나타나, 호흡저항 성능기준을 초과하지 않는 적절한 압력손실을 얻기 위해서는 여과재의 입자직경과 공극률이 함께 고려되어야 하는 것으로 분석되었다.

다만, 활성탄 여과재의 입자 크기는 대개 원형이 아닌 불규칙한 형상을 하고 있으므로 계산된 압력손실과는 차이가 있을 것으로 예상되며, 이러한 차이를 최소화하기 위해서는 활성탄 여과재의 입도를 최대한 정밀하게 제어하는 것이 매우 중요하다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술혁신사업(국민안전증진 기술개발사업)의 지원을 받아 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.

#### References

1. H. S Kong, Y. S. Gong and S. H. Kim, "Gas Mask Removal Efficiency of CO, HCl, HCN, and SO<sub>2</sub> Gas Produced by Fire", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 57-60 (2015).
2. Sancheong Co. Ltd, "The Report on the Development of PAPR" (2015).
3. M. W. Kim, Y. S. Kim and Y. H. Park, "CFD Analysis and Experiments on the Pressure Drop for the Design of Canisters in PAPR", Proceedings of 2016 Annual Fall Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 71-72 (2016).
4. ANSYS Co., "FLUENT 6.1 user's guide" (2013).
5. KS M 6674 : 2009, "Gas Mask".