



의 공기를 지속적으로 공급할 수 있는 환기시스템에 관한 연구가 수행되고 있다(Zuraimi *et al.*, 2003; Kim and Park, 2008; Park *et al.*, 2008). 하지만 실외에 발생원을 가지고 있는 입자상 오염물질이 환기량이 증가함에 따라 함께 유입되어 거주자의 심폐질환으로 인한 수명단축이나 호흡기 질환, 시정감소의 원인으로 작용하여 건강에 직/간접적인 영향을미치게 되었다(Riley *et al.*, 2002; Seppänen and Fisk, 2004; Kim *et al.*, 2006; Hoek *et al.*, 2008).

이와 같은 문제를 해결하기 위해서 실내로 유입되는 입자상 오염물질을 제거하기 위해 환기시스템 내에 필터를 설치하는 연구가 진행되었다(Howard-Reed *et al.*, 2003; Wallace *et al.*, 2004). 그러나 필터의 설치 는 환기 시스템의 압력강하(pressure drop)에 따른 팬(fan) 소비전력의 증가로 인해 에너지 문제를 야기 시켰다(Fisk *et al.*, 2002). 따라서 최근에는 압력 강하량을 줄이고 동시에 입자 제거효율을 높이는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Rudnick, 2004; Podgórski *et al.*, 2006).

본 연구에서는 환기 시스템의 에너지 소비량을 줄이기 위해 필터의 압력 강하량을 최소화할 수 있는 필터 설계 변수의 결정 방법을 제시하고자 한다. 필터의 충전율(solidity)과 섬유직경(fiber diameter)을 이용하여 이론적인 압력 강하량과 입자 포집 효율을 계산할 수 있다는 점에서 시작하여 입자 포집 효율의 값이 결정되었을 경우 최소 압력 강하량을 가지는 필터 설계변수를 제시할 수 있는 방법에 대해 연구하였다.

## 2. 이 론

필터의 압력 강하량은 필터 설계에 중요한 변수이며, 식은 Davies (1973)가 만든 실험식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \left[ \frac{32\pi}{Re} \cdot \alpha^{0.5} \cdot (1+56\alpha^2) \right] \cdot \left( \frac{2\rho U_0^2}{\pi g} \right) \cdot \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \cdot \left( \frac{t}{d_f} \right) \quad (1)$$

위 식에서  $\Delta P$ 는 필터의 압력 강하량,  $Re$ 는 필터의 섬유직경 기준의 레이놀즈 수(Reynolds number),  $\alpha$

는 충전율,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $U_0$ 는 필터 내 유체의 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $t$ 는 필터의 두께,  $d_f$ 는 필터의 섬유직경이다.

입자 포집 효율에 대한 식은 포집 메커니즘 중에서 가장 영향이 큰 확산(diffusion)과 차단(interception)에 대한 효과만 고려하였다. 확산과 차단에 의한 단일 섬유의 포집 효율에 대한 식은 다음과 같다(Kirsch and Fuchs, 1968; Lee and Ramamurthi, 1993).

$$E_D = 2Pe^{-2/3} \quad (2)$$

$$E_R = \frac{(1+\alpha)R^2}{Ku(1+R)} \quad (3)$$

위 식에서 사용한 무차원 수는 다음과 같다.

- Peclet number ( $Pe$ ) =  $\frac{d_f U_0}{D}$ ; (4)

- Kuwabara number ( $Ku$ ) =  $-\frac{\ln \alpha}{2} - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4}$ ; (5)

- Interception parameter ( $R$ ) =  $\frac{d_p}{d_f}$ ; (6)

위 식에서  $D$ 는 확산 계수(diffusion coefficient),  $d_p$ 는 입자의 직경이다. 확산과 차단을 입자 포집의 주 메커니즘으로 가정하였고, 여기서 총 단일 섬유의 포집 효율,  $E_{\Sigma}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{\Sigma} = 1 - (1 - E_R) \cdot (1 - E_D) \quad (7)$$

다음 단계로 총 단일 섬유 포집 효율을 이용하여 필터의 입경 별 입자 포집 효율,  $\eta_{theory}$ 을 구할 수 있으며, 그 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\eta_{theory} = 1 - \exp \left[ -\frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \cdot \left( \frac{t}{d_f} \right) \cdot E_{\Sigma} \right] \quad (8)$$

위 식의 결과를 통해서 입경 별 입자 효율은 계산할 수 있지만, 입자 분포에 따른 전체 효율을 쉽게 보기 위해 다음 식을 이용하여 총 입자 포집 효율을 계산하였다.

$$\eta_{overall} = \frac{1}{C_T} \sum_{i=1}^n [C_i(d_p) \times \eta_i(d_p)] \quad (9)$$

여기서  $C_T$ 는 입자의 총 농도,  $n$ 은 측정 채널의 총 개수,  $i$ 는 각 측정 채널의 번호이다. 위 식은 각 입경 별 수 농도와 효율의 곱으로 이루어진 식으로 필터

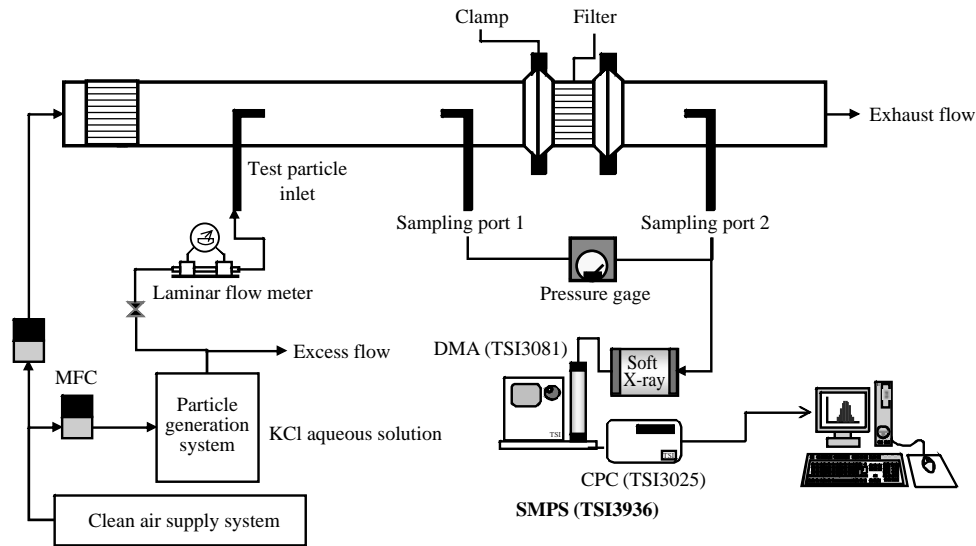


Figure 1. Experimental setup.

전단과 후단의 총 수 농도에 대한 포집 효율과 같은 의미이다.

앞에서 정리한 식을 이용하여 필터의 ① 압력강하량, ② 입경별 입자 포집 효율, ③ 총 입자 포집 효율을 계산하였으며, 이 결과는 실험을 통해 얻은 결과와 비교하였다. 또한 (1), (8) 두 식을 이용하여 필터를 설계하는 방법을 제안하고자 한다.

### 3. 실험

필터 최적화에 이용하고자 하는 이론식이 실제 결과와 잘 일치하는지 확인하기 위하여 상용필터에 대한 압력강하량 및 입자 포집 효율 측정 실험을 진행하였다. 실험은 그림 1과 같이 입자 발생 장치 및 측정 장치, 시험 덕트로 구성된 시스템에서 수행되었다.

시험 덕트는 400×400 mm 정사각형 단면을 가지는 길이 1m의 아크릴덕트로 구성되어 있다. 덕트의 전단에는 시험 입자의 공급이 이루어지는 입자 공급 포트를 설치하였으며 중앙에는 시험대상 필터를 고정할 수 있는 필터 고정부가 위치한다. 필터의 전단과 후단에는 샘플링 포트가 있어 시험입자의 측정할

Table 1. Information of test filters.

Filter	Grade	Material	Fiber diameter (d <sub>f</sub> ), μm	Solidity (α)
A	Medium	Glass fiber	7	0.025
B	Medium	Glass fiber	5	0.009

수 있도록했다. 시험 덕트의 유량은 MFC (mass flow controller)를 이용하여 조절하였으며, 덕트 내 유속이 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s가 되도록 변경하며 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 필터의 정보를 표 1에 나타냈다. 필터는 그림 2와 같이 평균 5~7 μm의 유리섬유(glass fiber)로 만들어진 부직포(nonwoven fabric) 필터이다. 총 2종류의 필터를 사용하였으며 모두 미디엄(medium) 필터이다.

실험에 사용한 시험 입자는 분무형 입자발생기(Collision type atomizer)와 확산 건조기(diffusion dryer)를 이용하여 생성된 KCl 입자를 사용했다. 청정공기가 분무형 입자 발생기로 공급되면 분무형 입자발생기 내부에 있는 KCl 수용액(5wt.%)이 빠른 속도로 유입된 청정공기에 의한 압력차이로 인해 미세 입자로 분무된다. 분무된 입자는 확산 건조기를 통과하여 수분이 제거되고 KCl 입자만 남게 된다. 발생된

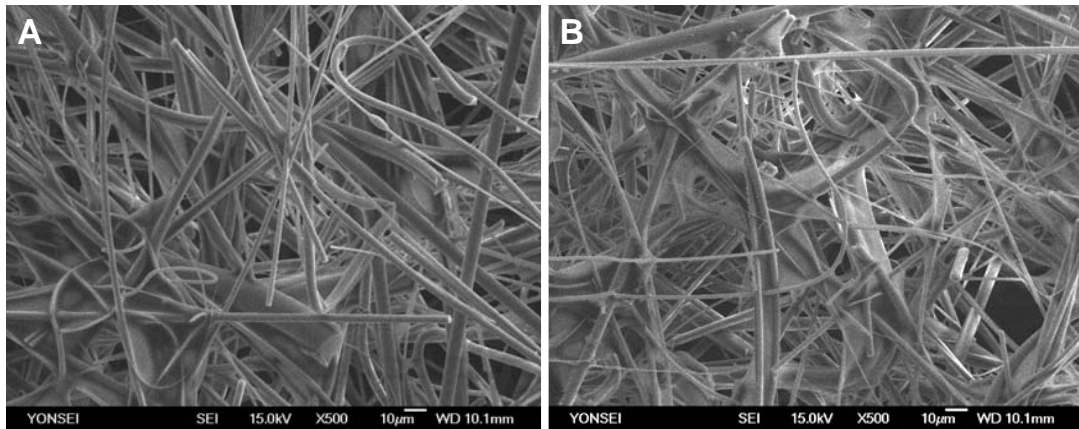


Figure 2. Scanning electron microscope images of test filters.

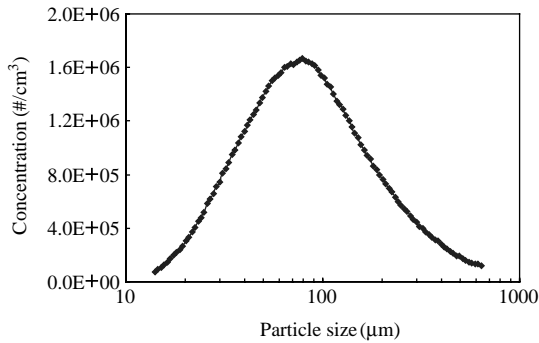


Figure 3. Size distribution of test particles.

KCl 입자의 일부는 외부로 배출시키고 나머지는 층류 유량계 (laminar flowmeter)를 통해 시험 덕트 내부로 수 농도를 조절하여 지속적으로 공급했다. 측정 결과 발생한 시험입자는 25 nm ~ 1 µm 범위의 크기이며, 총 수 농도는 약  $5.2 \times 10^4 \text{ #/cm}^3$ 였고, 100 nm에서 최대 수 농도(약  $9.5 \times 10^2 \text{ #/cm}^3$ )를 나타냈다.

시험 입자의 수 농도 측정은 에어로졸 중화기(aerosol neutralizer, soft x-ray HCT), DMA (differential mobility analyzer, TSI 3081) 및 CPC (condensation particle counter, TSI 3022A)로 구성된 SMPS (scanning mobility particle sizer, TSI 3936)을 이용하였다. 시험 덕트 내부에 설치된 샘플링 프로브를 통해서 0.3 L/min의 유량을 샘플링 하여 입경이 10 nm ~ 1 µm 범위의 시험 입자의 수 농도를 측정했다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 압력 강하량의 비교

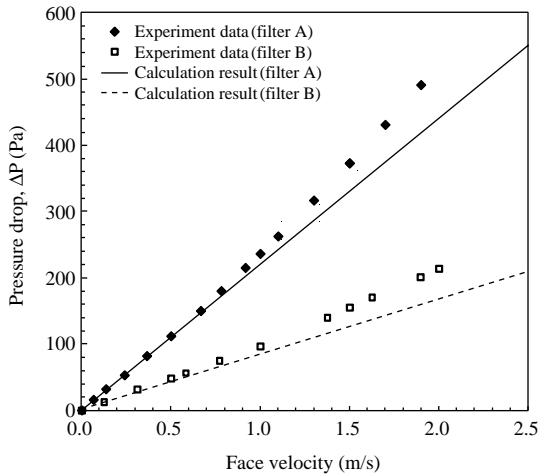
필터 전 후단의 압력 강하량을 압력계를 이용하여 0 ~ 2.0 m/s 유속 범위에 대해서 측정한 결과와 필터 A와 필터 B의 층진율과 섬유직경을 이용하여 계산한 결과를 비교하여 그림 4에 나타냈고, 오차를 계산하여 같이 나타냈다.

필터 A의 경우 0 ~ 0.5 m/s 범위에서는 거의 일치함을 보여주었으며, 유속이 증가함에 따라 오차가 점점 늘어나 2.0 m/s 유속에서 최대 약 15%의 오차를 가지고 있었다. 필터 B의 경우는 필터 A 보다는 오차가 컸지만, 2.0 m/s 유속에서 최대 약 25% 이내의 오차를 보여주어서 계산 결과와 어느 정도 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 두 결과의 오차는 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s의 유속에서 필터 A의 경우 1.7, 6.8, 11.4, 15.6%, 필터 B의 경우는 13.8, 13.8, 19.5, 22.0%였다. 이와 같이 오차가 발생하는 이유는 다음과 같다. 첫째, 식(1)에 제시된 Davies (1973)의 실험식은 필터 섬유직경인  $d_f$ 가 일정한 크기를 갖는다고 가정하였지만 실제실험에 사용된 필터 A와 B의 섬유직경은 3 ~ 15 µm의 다양한 크기를 갖기 때문이다. 둘째, 식(1)은 필터 섬유가 기류에 수직인 것으로 가정하였으나 그림 2에서 보는 바와 같이 기류에 수직하지 않은 경우가 많기 때문이다. 셋째, 유속이 증가함에 따라 오차가 커지는 이유는 식(1)을 모델링할 때

필터 내부의 흐름을 층류가 가정했기 때문에 유속증가에 따른 난류의 영향을 포함하고 있지 않기 때문이다.

#### 4.2 입경 별 입자 포집 효율의 비교

분무형 입자발생기를 통해 발생된 입자를 시험 덕



Face velocity (m/s)		0.5	1.0	1.5	2.0
Error (%)	Filter A	1.7	6.8	11.4	15.6
	Filter B	13.8	16.8	19.5	22.0

Figure 4. Pressure drops of test filters.

트로 공급하고, 시험 필터의 전단과 후단에서 SMPS로 측정하여 효율을 확인하였다. 덕트 내의 유속은 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s에 대해서 실험을 진행하였다. 그림 5는 시험입자의 직경 별 입자 포집 효율 측정 결과와 이론식을 통한 입자 포집 효율을 계산 결과를 비교한 것이다.

모든 유속에 걸쳐 200~300 nm 입자에 대해서 가장 낮은 효율을 나타냈고, 필터 A와 필터 B 모두 실험과 이론이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 100 nm 이하의 입자에 대해서 입자의 크기가 작아짐에 따라 두 결과의 차이가 점점 커지는 것도 확인할 수 있었다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 이론적인 계산에서는 섬유직경이 일정하다고 가정했지만 실제 필터 A와 B의 섬유직경은 3~15 μm의 다양한 크기를 갖기 때문이다. 또한 100 nm 이하의 입자는 확산이 침착의 지배적인 메커니즘이고 식 (2)와 (5)에 나타난 것처럼 확산 포집효율은 필터 섬유직경에 큰 영향을 받는다. 따라서 실제 확산에 의한 입자의 포집효율은 다양한 크기의 섬유직경에 영향을 받기 때문에 이론 결과와 오차가 발생한 것으로 판단된다. 0.5 m/s 유속, 입자 직경 300 nm에 대해서 필터 A는 약 30%의 입자 포집 효율을, 필터 B는 약 20%의 입자 포집 효율을 나타내었다. 유속이 증가함에 따라 효율은 감소하여 각각 1.0, 1.5, 2.0 m/s의 유속, 300 nm의 입자에 대하여 필터 A는 25%, 18%, 17%의 포집 효율을 필터 B는 17%, 13%, 12%의 포

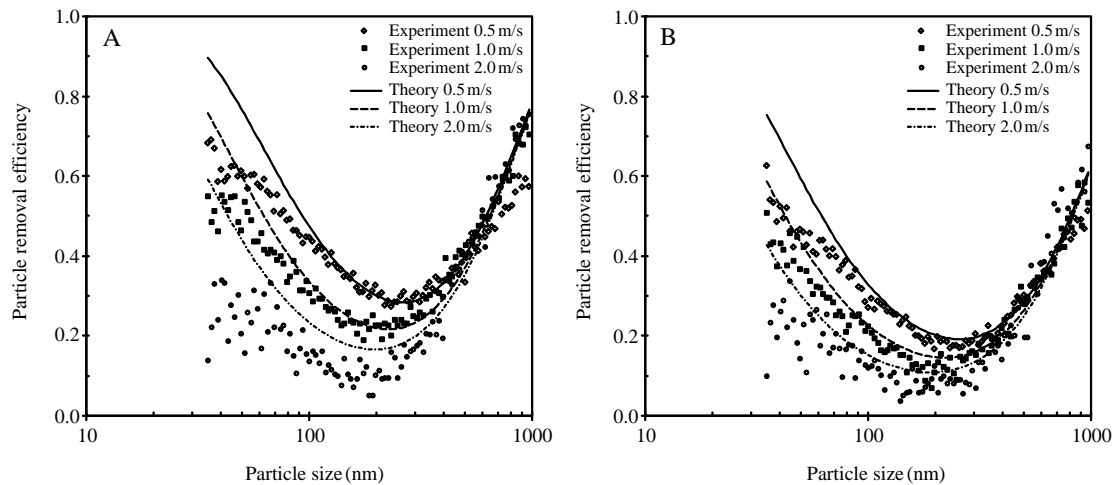
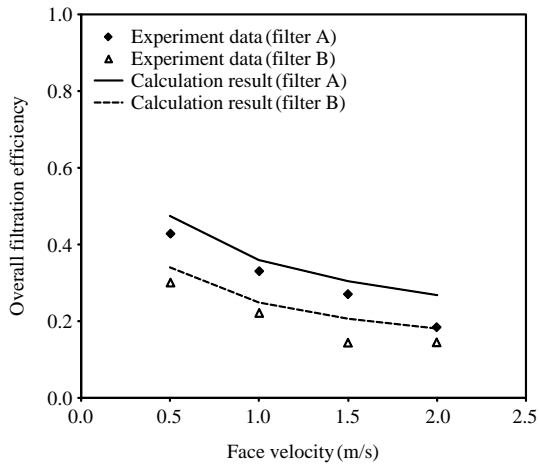


Figure 5. Particle removal efficiency with particle size of filters.



Face velocity (m/s)		0.5	1.0	1.5	2.0
Error (%)	Filter A	9.7	8.2	10.9	31.2
	Filter B	11.8	11.1	30.3	20.1

Figure 6. Overall particle removal efficiency of filters.

집 효율을 나타내었다. 필터 A가 필터 B에 비해서 유속별로 약 5~10% 정도 높은 효율을 보였으며, 유속이 늘어남에 따라 두 필터의 효율 차이는 감소하였다.

### 4.3 총 입자 포집 효율의 비교

시험 입자의 전체 수 농도에 대한 입자 포집 효율을 비교하기 위하여 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s에 대한 총 입자 포집 효율을 계산하여 그림 6으로 나타내었다.

입경 별 입자 포집 효율에서 확인할 수 있었던 것과 같이 이론과 실험 결과 모두 유속이 증가함에 따라 효율은 감소하였고, 필터 A가 필터 B보다 높은 효율을 나타내었다. 위 식을 통해 계산한 이론적인 총 입자 포집 효율은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s 유속에서 필터 A는 47.3, 36.0, 30.3, 26.8%이고, 필터 B는 34.0, 24.9, 20.6, 18.1%였다. 실험의 총 입자 포집 효율은 입경 별 입자 포집 효율 결과와 같이 이론적인 결과보다 약간 낮은 결과를 보였다. 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s 유속에서 필터 A는 42.7, 33.0, 27.0, 18.4%이고, 필터 B는 30.0, 22.1, 14.4, 14.5%였다. 오차는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s 유속에서 필터 A의 경우 9.7, 8.2, 10.9, 31.2%,

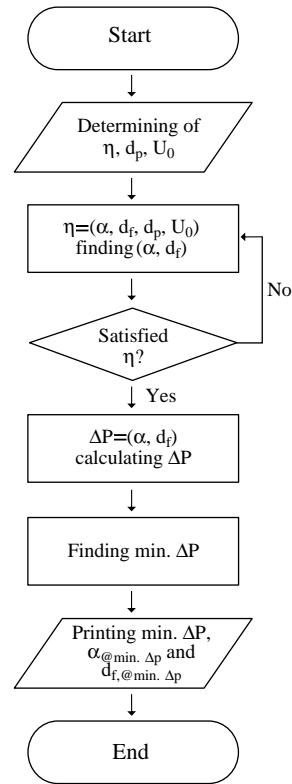


Figure 7. Method of determination of filter design parameters for obtaining minimum pressure drops.

필터 B의 경우 11.8, 11.1, 30.3, 20.1%였다.

### 5. 필터 최적화

앞에서 실험과 비교한 압력 강하량과 입자 포집 효율에 대한 두 식을 이용하여 필터의 효율과 포집 입자의 직경, 필터 내의 유속이 결정될 경우, 최소 압력 강하량을 가지는 설계변수(충진율과 섬유직경)를 결정하는 방법을 제시하고자 하며 순서는 그림 7과 같다.

이 방법을 통하여 필터 A와 B에 대하여 최적화 과정을 적용해 보았다. 입자의 크기는 300 nm, 유속은 0.5 m/s, 입자 포집 효율은 필터 A는 30%, 필터 B는 20%를 대입하여 계산해보았다. 결과는 Table 2에서 확인할 수 있듯이 0.5 m/s 유속에서 필터 A는 110

**Table 2.** Results of optimized design parameter for minimum pressure drops.

Filter	Given parameter				Calculated parameter		
	Particle removal efficiency (%)	In size range (μm)	Face velocity (m/s)	ΔP (Pa)	Solidity (α)	Fiber diameter (μm)	Min. ΔP (Pa)
A	30	0.3	0.5	110	0.005	3.3	39.4
B	20	0.3	0.5	48.5	0.005	3.9	28.2

Pa에서 39.4 Pa로, 필터 B는 48.5 Pa에서 28.2 Pa로 감소하여 두 필터 모두 압력 강하량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 필터 A는 충진율 0.005, 섬유 직경 3.3 μm, 필터 B는 충진율 0.005, 섬유 직경 3.9 μm일 때 같은 효율에 최소 압력 강하량을 가지는 설계 변수 조건이었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 환기 시스템의 에너지 소비량을 줄이기 위해 필터의 압력 강하량을 최소화할 수 있는 필터 설계 변수의 결정 방법을 제시하였다. 필터의 충진율(solidity)과 섬유직경(fiber diameter)을 이용하여 이론적인 압력 강하량과 입자 포집 효율을 계산할 수 있다는 점에서 시작하여 입자 포집 효율의 값이 결정되었을 경우 최소 압력 강하량을 가지는 필터 설계변수를 제시할 수 있는 방법에 대해 연구하였으며 다음과 같은 결과가 나왔다.

1) 0~2.0 m/s 유속 범위에서 압력강하에 대한 이론적인 계산과 실험을 진행하였으며 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s의 유속에 따라 필터 A는 1.7, 6.8, 11.4, 15.6%, 필터 B는 13.8, 13.8, 19.5, 22.0%의 오차를 나타내어 전반적으로 실험과 이론이 일치하는 것은 확인하였다.

2) 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s 유속에 대하여 입경 별 입자 포집 효율을 측정하였다. 이론과 실험의 결과가 전반적으로 일치하였지만, 입자의 크기가 100 nm 이하일 경우 입자의 크기가 작아짐에 따라 두 결과의 차이가 점점 커지는 것도 확인할 수 있었다. 두 결과 모두 200~300 nm 입자에 대해서 가장 낮은 효율을 나타내었다.

3) 전체 효율을 비교하기 위하여 입경 별 입자 포집 효율 결과와 식(9)를 이용하여 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s에 대한 총 입자 포집 효율을 계산하였다. 유속이 증가함에 따라 효율이 감소하는 것과 입경 별 결과

와 같이 이론과 실험이 일치하는 것을 확인하였다. 두 결과의 오차는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s의 유속에 따라 필터 A는 9.7, 8.2, 10.9, 31.2%, 필터 B는 11.8, 11.1, 30.3, 20.1%였다.

4) 압력 강하량과 입경 별 입자 포집 효율 식을 이용하여 필터 설계 변수(충진율과 섬유직경)를 결정하는 방법을 제안하였으며, 필터 A와 필터 B에 대하여 최적화 과정을 적용해보았다. 필터 A의 경우, 입자 크기는 300 nm, 유속은 0.5 m/s, 입자 포집 효율은 30%로, 필터 B의 경우 입자 크기와 유속은 같고, 입자 포집 효율은 20%로 계산하였다. 이 결과 압력 강하량이 필터 A는 110 Pa에서 38.4 Pa로 71.6 Pa만큼, 필터 B는 48.5 Pa에서 28.2 Pa로 20.3 Pa만큼 줄일 수 있는 설계 변수를 찾을 수 있었다.

앞에서 제시한 필터의 입자 포집 효율을 정하고 최소 압력강하량을 찾는 방법이 아닌 필터 압력강하량을 정하고 최대 입자 포집 효율에 대한 설계 변수를 찾는 것 또한 가능하다. 이 경우는 필터의 효율을 높이고자 하는 경우 유용한 방법으로 사용될 수 있다. 그리고 이번 연구에서는 입자의 정전하전(static electrification)에 대한 영향을 고려하지 않았으나 추후에는 이를 고려하여 지금보다 정확한 결과를 도출하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(06건설핵심B02)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

Fisk, F.J., Faulkner, D., Palonen, J., and Seppanen, O. (2002). Performance and costs of particle air filtration technologies, *Indoor Air*, 12, 223-234.  
Hinds, W.C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior,*

- and measurement of airborne particles*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 182-205, 9.
- Hoek, G., Kos, G., Harrison, R., Hartog, J., Meliefste, K., Brink, H., Katsouyanni, K., Karakatsani, A., Lianou, M., Kotronarou, A., Kavouras, I., Pekkanen, J., Vallius, M., Kulmala, M., Puustinen, A., Thomas, S., Meddings, C., Ayres, J., Wijnen, J., and Hameri, K. (2008). Indoor-outdoor relationships of particle number and mass in four European cities, *Atmospheric Environment*, 42, 156-169.
- Howard-Reed, C., Wallace, L.A., and Emmerich, S.J. (2003). Effect of ventilation systems and air filters on decay rates of particle produced by indoor sources in an occupied townhouse, *Atmospheric Environment*, 37, 5295-5306.
- Kim, K.W., and Park, J.C. (2008). A field survey of HCHO, VOCs and TVOC concentration levels in the newly unoccupied apartment units, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 5(2), 158-169.
- Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., and Jang, B.K. (2006) Health risk assessment of exposure to indoor air pollutants in house, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 3(2), 180-198.
- Park, J.H., Byeon, J.H., Yoon, K.Y., and Hwang, J. (2008). Lab-scale test of a ventilation system including a dielectric barrier discharger and UV-photocatalyst filters for simultaneous removal of gaseous and particulate contaminants, *Indoor Air*, 18(1), 44-50.
- Podgórski, A., Balazy, A., and Gradoń, L. (2006). Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filter, *Chemical Engineering Science*, 61, 6804-6815.
- Riley, W.J., Mckone, T.E., Lai, A.C.K., and Nazaroff, W.W. (2002). Indoor particulate matter of outdoor origin: importance of size-dependent removal mechanisms, *Environmental Science and Technology*, 36, 200-207.
- Rudnick, S.N. (2004). Optimizing the design of room air filters for the removal of submicrometer particles, *Aerosol Science and Technology*, 38, 861-869.
- Seppänen, O.A., and Fisk, W.J. (2004). Summary of human responses to ventilation, *Indoor Air*, 14(7), 102-118.
- Wallace, L.A., Emmerich, S.J., and Howard-Reed, C.H. (2004). Effect of central fans and in-duct filters on deposition rates of ultrafine and fine particles in an occupied townhouse, *Atmospheric Environment*, 38, 405-413.
- Zuraimi, M.S., Tham, K.W., and Sekhar, S.C. (2003) The effects of ventilation operations in determining contributions of VOCs sources in air-conditioned tropical buildings, *Building and Environment*, 38, 23-32.

페이지 확인해 주세요.