

# 대전된 입자의 영상효과에 의한 필터효율 향상에 관한 실험적 연구

이창선\* · 정해영\* · 김상수\*\*\*  
(1999년 1월 12일 접수)

## An Experimental Study on Enhancement of the Filter Efficiency by the Image Effect of Charged Particle

Chang-Sun Lee, Hae-Young Jeong and Sang -Soo Kim

**Key Words :** Photoelectric Charging (광대전), Charged Particle (대전입자), Filter Efficiency (필터효율), Image Effect(영상효과), Peclet Number (페클릿수)

### Abstract

Filter efficiency of electrically charged particle in uncharged fibrous filter was measured. In previous studies, the effect of charged particle on filter efficiency was investigated but there was difficulty in measuring of image effect that is appeared at the charged small particle. We could easily measure the image effect with charging small particles by photoelectric charging. The spark discharge aerosol generator and a differential mobility analyzer (DMA) were used to generate sub-micron monodisperse particles ( $\leq 200$  nm). The generated particles were charged in photoelectric charging process using ultraviolet lamp and electric field. The filter efficiency of the charged particles, classified by another DMA, was measured in filter tester using a condensation nucleus counter (CNC) as function of particle diameter, particle charge and airflow velocity. It is shown that the filter efficiency increases with increasing charge number of the particle and is affected by particle size and flow velocity. Single fiber filter efficiency mainly depends on image force parameter and peclet number. The peclet number was not considered at previous other papers. We propose a modified experimental correlation as function of image force parameter and peclet number.

### 1. 서론

점점 산업현장에서 고정밀화, 고정정화, 고품질화가 요구됨에 따라 고효율 필터에 대한 요구가 증대되고있다. 고효율 필터의 경우 가격이 높고 압력손실이 큰 단점 때문에, 필터와 포집 입자간의 전기적 효과를 이용하여 중성능 필터의 성능을 높이려는 시도가 오랫동안 다양하게 이루어져 왔다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 이유로 필터효율에 미치는 다양한

전기적 효과에 관한 연구가 필요하게 되었다.

필터효율의 전기적 효과에 대한 연구분야는

- 1) 대전된 필터와 대전되지 않은 입자
- 2) 대전된 필터와 대전된 입자
- 3) 대전되지 않은 필터와 대전된 입자 등으로 크게 나눌 수 있다.

그 중에서 본 연구는 대전된 입자가 섬유필터를 통과할 때 전기적으로 중성인 포집 섬유의 근처에서 일어나는 영상력에 의한 포집 효과에 관한 연구를 수행하였다.

일반적으로 공기 중에 부유된 입자는 다양한 경로에 의해 대부분 대전되어 있다. 액체의 미립화 과정에서 만들어진 입자는 크기가  $2.5 \mu\text{m}$  일 때는  $200e$ 의 대전량율,  $0.5 \mu\text{m}$  일 때는  $20e$ 의 대전

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sskim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-3210

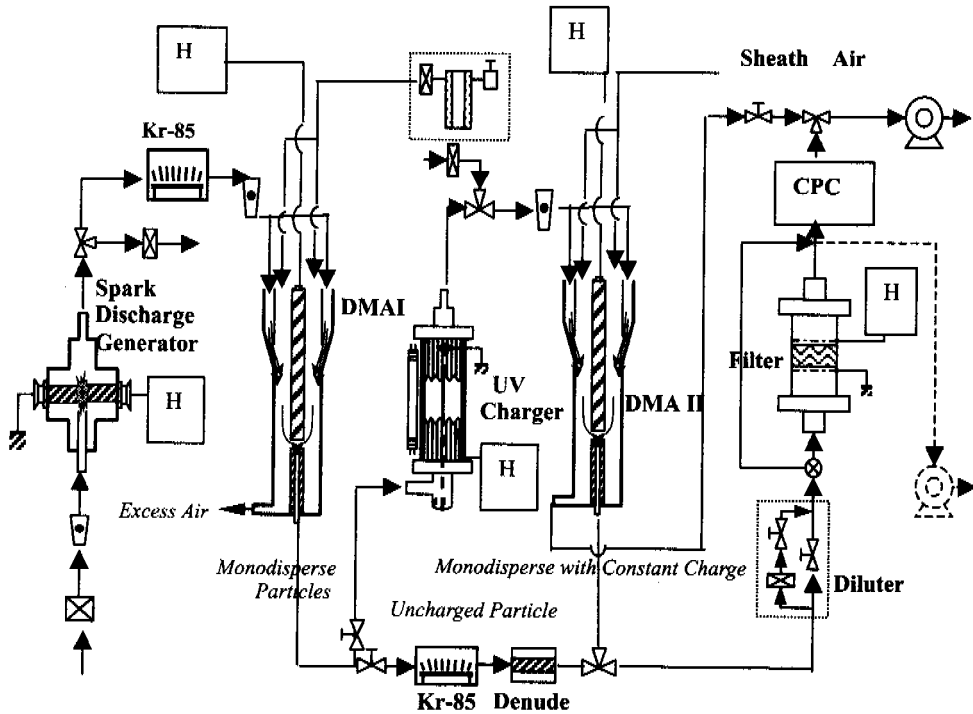
량을 가지며, 기화법에 의해 만들어진 입자는 0.65  $\mu\text{m}$  에서 45e, 0.18  $\mu\text{m}$  에서 15e 의 대전량을 가진다.<sup>(3)</sup> 이러한 입자의 전기적 특성은 필터효율에 크게 영향을 미치며, 인위적으로 입자를 대전시켜서 필터의 성능을 높이고자 하는 연구도 이루어져 왔다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 자외선을 사용하여 입자를 대전시키는 광대전을 이용하여<sup>(10-12)</sup> 대전된 입자가 섬유필터의 필터효율에 미치는 영향에 관한 연구를 수행 하였다. 필터에서 포집 효율이 가장 낮은 입자크기(MPPS)에 해당하는 0.1-0.5  $\mu\text{m}$  범위의 입자들의 제거효율을 높이기 위해 인위적인 입자의 대전이 유력한 방법으로 알려져 있다. 그러나 입자의 크기가 작은 영역에서는 입자를 효과적으로 대전시키는 것이 매우 어렵기 때문에 관련 연구가 많이 이루어 지지 못했다. 광대전은 입경이 1 $\mu\text{m}$  이하인 입자를 효과적으로 대전시킬 수 있기 때문

에, 대전된 입자에 관련된 필터효율을 연구하기 위해 이용될 수 있다. 그래서 대전된 입자가 필터가 대전되지 않았을 때 나타나는 필터의 영상효과에 관한 실험적 연구에 광전전을 도입하였다.

필터의 영상효과는 대전된 입자와 대전되지 않은 필터 사이에 생기는 전기적 힘에 의해서 입자가 포집되는 것이다. 일반적으로 전기장이 걸린 필터나, 정전전하를 보유한 필터의 경우에는 다른 필터효과에 비해 영향이 작아 무시한다. 그러나, 일반 섬유필터의 필터효율 실험에서는 그 영향이 크고, 전기적인 영향을 무시한 필터실험에서 필터효율의 증가가 잘 설명되지 않는 경우에 영상효과로 설명할 수 있는 경우가 많다.

필터의 영상효과(image effect)에 대한 연구는 Natason 에 의해 영상효과에 관한 해석적 해가 제안되었고<sup>(3)</sup> Yoshioka 와 Lundergran 에 의해 실험에 의한 실험식과 수치해석적 해가 제안되었다.<sup>(3,5)</sup> 그



- : Flowmeter
- : Filter
- : By-pass
- : Valve
- : High-Voltage DC Power Supply
- CPC : Condensation Particle Counter
- DMA : Differential Mobility Analyzer
- DMA I : in the Overpressure Mode
- DMA II : in the Underpressure Mode

Fig. 1 Experimental setup

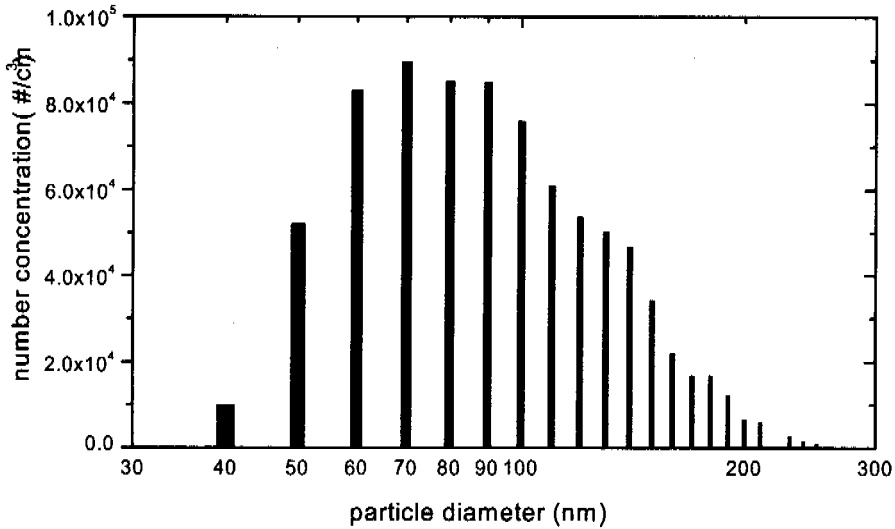


Fig. 2 Number concentration of monodisperse particles generated by DMA and Spark discharge generator

리고 Brawn 은 실험에 의해  $1 \mu\text{m}$  이하의 입자에 대한 영상력, 분극력, 쿨롱힘에 의한 효과를 실험으로 정성적 영향을 측정하였고<sup>(6)</sup> Wu는 새로운 이론식을 제안 하였다.<sup>(7)</sup>

이론식의 유도를 위하여 상대편 필터에 분극된 전기적 영상대전분포가 나타난다고 생각한다. 영상효과는 필터섬유에 매우 가까운 곳에서 나타나므로 입자가 작은 경우 평판에 점전하가 있는 경우로 가정하고 다음과 같은 힘을 구할 수 있다.

$$F_i(r) = \left( \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \right) \frac{n^2 e^2}{16 \pi \epsilon_0 (r - R_f)^2} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_f$ 는 섬유필터의 유전율,  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전상수,  $e$ 는 단위 전하량,  $n$ 는 입자의 전하량,  $R_f$ 는 단섬유의 반지름이다.

Natason 은 유도된 힘에서 Lamb 의 유동장을 간략화하여 해석적 단섬유효율을 구했다.<sup>(3)</sup>

$$\eta_i = \left( \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \frac{n^2 e^2 \beta}{4 \pi \epsilon_0 R_f^2 u_0 La} \right)^{1/2} = \frac{2}{La^{1/2}} K_M^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는 전기이동도,  $u_0$ 는 섬유필터에서의 유속,  $La$ 는 Lamb 의 계수이며, 영상힘에 의한 입자 제거효율을 나타내는 무차원수,  $K_M$ 는 다음과 같다.

$$K_M = \left( \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \right) \frac{n^2 e^2 \beta}{16 \pi \epsilon_0 R_f^2 u_0} \quad (3)$$

위 식에서 영상효과에 의한 필터효율은 대전량에 대하여 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 필터섬유의 반경에 반비례 관계에서

고효율 필터(HEPA filter)에서 더 효과가 크고 유속이 작은 영역에서 효과가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 이론식을 바탕으로 실험된 기존의 실험식은 판성효과가 있는 영역인 입경이  $1 \mu\text{m}$  정도를 가지고 구하였다.<sup>(3,5)</sup>

본 연구는 확산효과가 있는 입경이  $0.2 \mu\text{m}$  이하의 입자를 광대전하여 대전된 입자의 영상효과에 관하여 연구했다. 이러한 연구를 통하여 확산영역에서의 영상효과를 이해하려 한다. 여기에 사용되는 실험방법은 대전된 미소입자의 전기적 운동과 포집등 다양한 분야의 연구에 유용하게 사용될 수 있다. 특히 입자의 크기가 작아서 확산에 지배되는 영역의 전기적 효과에 관한 연구에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험 장치와 실험 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 입자의 대전량에 대한 필터효율 변화를 측정하기 위한 실험개략도이다. 실험장치는 입자 발생부, 입자 대전부, 필터효율 측정부 등으로 크게 나눌 수 있다.

입자 발생부는 Spark discharge aerosol generator<sup>(9)</sup>로 은(Ag) 입자를 발생시키고 DMA I (Differential Mobility Analyzer, TSI 3071A)에서 단분산의 입자(monodisperse particle)를 발생시킨다. Fig. 2는 각각의 입자 크기에 대해 발생된 입자농도를 나타낸 것이다.

입자 대전부에서 DMA I 을 이용하여 발생시킨 균일한 크기의 입자를 광대전 장치를 통과시켜서 입자를 대전한다. 대전된 입자는 광대전의 특성에

의해 다양한 대전량을 가진다. 광대전된 입자를 중화기가 없는 DMA II (TSI 3071A)를 이용하여 광대전량분포를 측정한다. 광대전 장치에서 대전된 입자의 크기에 따른 대전량 분포는 Fig. 3 과 같다. 여기서 각각의 농도는 각 경우의 최대 농도에 대하여 상대적으로 나타내었다.

필터효율 측정부는 응축핵계수기 (Condensation Particle Counter, TSI 3010S)를 이용하여 대전된 입자의 농도가 약  $10^3 \text{ \#}/\text{cm}^3$  가 되도록 희석하여 필터효율을 측정한다.

2.2 필터효율 측정 실험방법

입자 발생기에서 발생시킨 은(Ag) 입자를 DMA I 을 이용하여 단분산의 입자를 발생시킨 후, 광대전부에서 대전시키고 다시 DMA II 를 이용하여 균일한 대전량을 가진 입자를 분리 발생시킨다. 이 대전된 입자를 가지고 필터실험을 행한다.

각각의 대전량을 가진 입자는 다음과 같이 대전 시킨다. 대전되지 않은 즉 대전량이 0 인 입자는 DMA I 에서 생성된 입자를 중화기(Neutralizer, TSI 3012)를 통과시킨 후 중화된 입자 중 대전된 입자를 전기장에 의해 제거하는 일종의 전기집진기인 Denuder 를 통과시켜서 생성시킨다. 1 가 이상의 대전량을 가진 입자는 DMA I 에서 나온 입자를 광대전 장치에서 대전한 후 중화기가 없는 DMA II 에서 분리하여 생성시킨다. 여기에서 생성, 분리된 입자는 크기와 대전량을 정확히 알 수 있다.

필터효율 측정은 응축핵계수기를 사용하고 총 필터효율  $E_T$  는 다음과 같이 정의한다.

$$E_T (\%) = \left( 1 - \frac{n_1}{n_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

이식에서  $n_0$  는 필터를 통과하기 전의 입자농도이고,  $n_1$  는 필터를 통과한 후의 입자농도이다.

대전된 입자의 입자크기에 따른 필터효율 실험은 각각 대전량을 가진 입경이 60, 90, 120, 150, 180 nm 인 입자에 대해서 유량이 1 lpm (0.85 cm/sec)인 조건에서 필터효율을 측정한다.

유량의 변화에 따른 필터효율 실험은 입경이 90, 150 nm 인 입자를 각각의 대전량에 대하여 유량이 1 lpm (0.85 cm/sec), 1.5 lpm (1.275 cm/sec), 2.35 lpm (2 cm/sec), 4.7 lpm (4 cm/sec)에 대해서 필터효율을 각각 측정한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 입자의 크기와 대전량의 변화에 대한 실험

Fig. 4 는 입자의 대전량 변화에 따른 필터효율의 영향에 대하여 실험한 결과이다. 여기에 사용된 대전된 입자는 확산이 주 포집기구가 되는 영역인 입경이  $0.2 \mu\text{m}$  이하의 입자들이다.

먼저 입자가 대전되지 않은 즉 대전량이 0 인 입자는 크기가 클수록 필터효율이 감소하고 있다. 이것은 입자가 크면 확산계수가 작아져 Pe 수 (Peclet number)가 커지므로 확산효과가 작아져 필터효율이 감소하는 것이다. 이것은 기존의 이론과 잘 일치한다.<sup>(8)</sup>

대전량을 변화시키면서 필터효율을 측정한 결과는 대전량이 증가할수록 필터효율이 증가함을

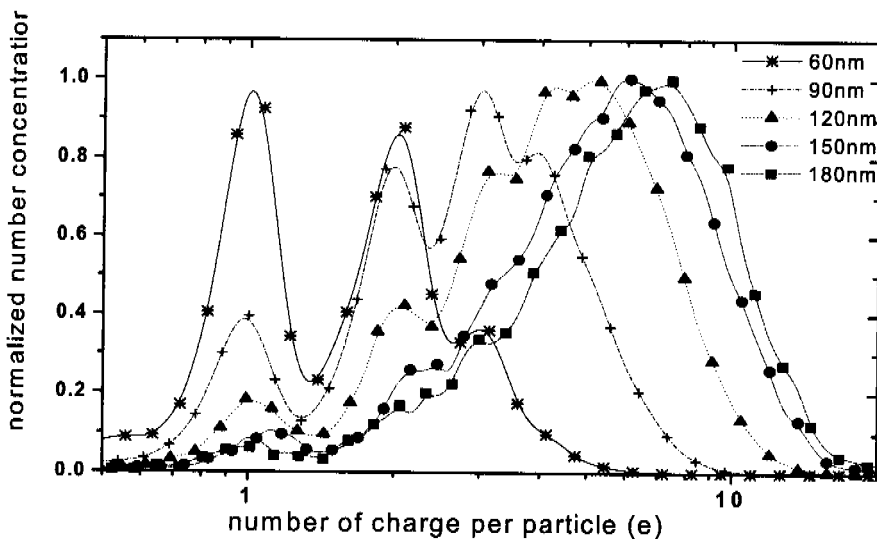


Fig. 3 Charge distributions of an Ag aerosol for various particle diameters charged by U.V irradiation

보인다. 그리고 입자의 크기가 작을수록 대전량에 따라 필터효율의 증가율이 커진다. 이것은 입자가 작을수록 전기적 이동도(electrical mobility)가 증가하므로 필터효율의 증가 폭이 커지는 것이다.

본 실험에 사용된 필터 유리섬유는 여러 가지의 원인으로 인하여 미리 대전되어 있을 수가 있기 때문에 필터 전체의 대전량의 측정을 시도하였다. 그 결과 필터의 대전량은 측정하기 힘들 정도

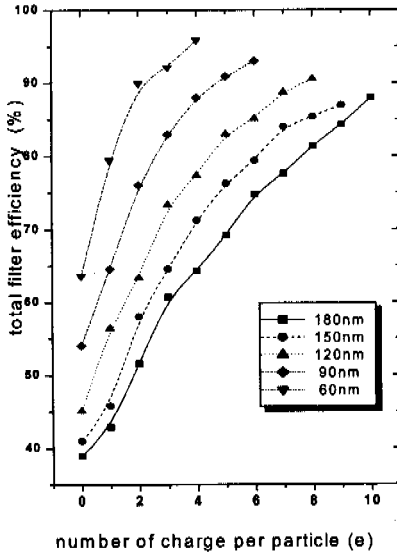


Fig. 4 Filter efficiency as function of charge number for various particle sizes

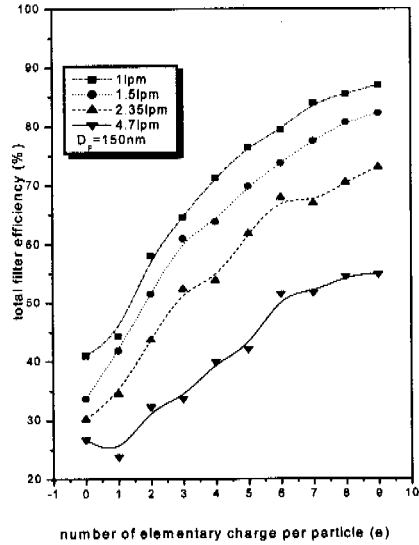


Fig. 5 Filter efficiency of 150nm particle as function of charge number for various flowrates

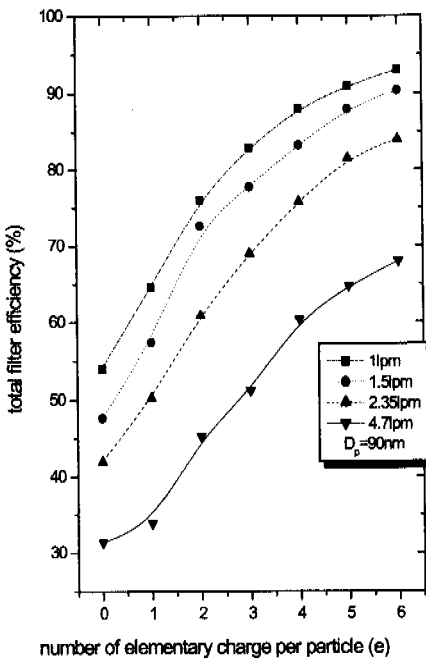


Fig. 6 Filter efficiency of 90nm particle as function of charge number for various flowrates

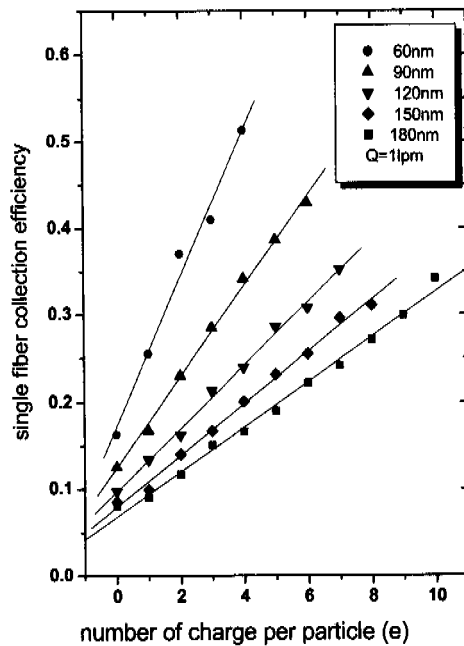


Fig. 7 Single fiber collection efficiency as function of charge number for various particle diameters

로 미세하였다. 따라서 본 연구에서는 필터의 대전에 의한 효과는 무시하였다.

3.2 유량과 대전량에 변화에 대한 실험

Fig. 5 과 Fig. 6 는 각각의 대전량을 가진 입경이 150, 90 nm 의 입자에 대하여 필터효율을 유량을 변화시키며 측정하였다.

대전되지 않은 입자는 유량이 증가하면 필터효율이 감소한다. 그것은 확산이 주 포집기구가 되는 입자영역에서 유속이 커지면 확산되는 시간이 짧아지기 때문이다. 이는 기존의 필터이론과 일치한다.<sup>(7)</sup>

대전량이 커지면 필터효율의 증가가 나타나지만, 유량이 클수록 증가율이 감소하는데 이는 체류시간이 짧아져 전기적 효과가 미치는 시간이 작아지기 때문이다.

90 nm 입자가 150 nm 입자보다 유량에 대한 필터효율의 감소와 전기적 대전량에 대한 필터효율의 감소 폭이 커짐을 알 수 있다. 이는 입자가 작을수록 확산과 전기적 힘이 유량의 변화에 영향을 많이 받기 때문이다.

3.3 단섬유효율의 고찰

섬유필터(fibrous filter)에서 입자의 여과문제에 대한 대부분의 해석적, 수치적 연구는 단섬유에 대한 모델링 및 해석에서 시작한다. 단섬유효율(single fiber efficiency)  $\eta$ 는 섬유에 충돌하는 입자수와 유선이 섬유에 영향이 없을 때 섬유와 충돌하는 입자수의 비로 정의된다.

총필터효율( $E_T$ )은 단섬유효율과 다음과 같은 관계를 가진다.<sup>(3)</sup>

$$E_T = 1 - \exp \left[ \frac{-4\eta\alpha L}{\pi D_f (1 - \alpha)} \right] \tag{5}$$

여기에서  $\alpha$ 는 충전율,  $L$ 는 필터의 두께,  $D_f$ 는 필터 섬유의 지름을 각각 의미한다.

총필터효율은 실험적으로 측정할 수 있으며 식 (5)로부터 단섬유효율을 구할 수 있다.

Fig. 7~9 은 Fig. 4~6 의 각각의 경우에 대하여 총효율을 단섬유효율로 변환한 결과인데 단섬유효율은 입자의 대전량에 선형적 비례관계에 있다. 입자가 대전된 경우는 해석적 이론에서 선형적 비례관계를 이루므로 이론과 정성적 일치를 이루고 있다. 그리고 각각의 입자 크기나 유속에 따라 선형적 증가의 기울기가 다르게 나타나고 있다.

Fig. 7에서 입자가 작아질수록 기울기의 증가하는데 이는 입자가 작을수록 대전량에 더욱 영향을 많이 받는 것을 보여준다. Fig. 8~9 에서 유량이 클수록 기울기가 감소하는데 이는 입자의 대전효과가 크게 떨어짐을 보여주고 있다.

필터가 대전되지 않고 입자가 대전된 경우에 Natanson 은 단섬유효율에 대한 해석해를 구했는데 식 (2)와 같고 영상 힘의 변수  $K_M$  은 식 (3)과 같다. 이론적 해석해에 대하여 기존의 실험결과는 필터효율이 약간 상승한 것을 보여준다. 다음은 기존의 제안된 영상효과에 관한 단섬유효율  $\eta_i$  의 실험 결과식이다

Yoshioka<sup>(3)</sup>

$$\eta_Y = 2.3 \times K_M^{0.5} \tag{6}$$

Lundgren<sup>(5)</sup>

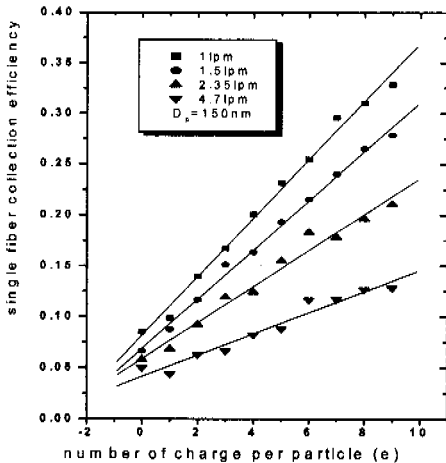


Fig. 8 Single fiber collection efficiency of 150nm as function of charge number for various flowrates

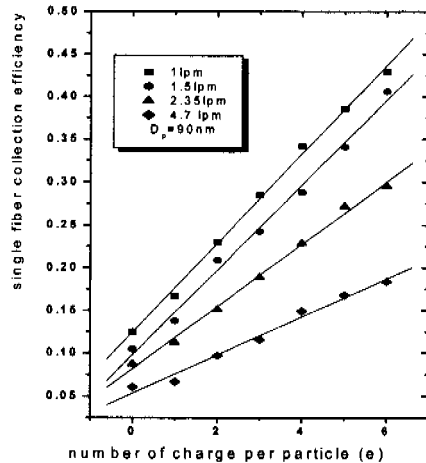


Fig. 9 Single fiber collection efficiency of 90nm as function of charge number for various flowrates

$$\eta_L = 1.5 \times K_M^{0.5} \quad (7)$$

Fig. 10 에서 이번 실험결과는 기존의 실험식과 상당히 많은 차이를 보이고 있다. 영상효과만의 단섬유효율을 구하기 위해서 n 가로 대전된 입자의 단섬유효율  $\eta_n$  에서 대전되지 않은 입자의 단섬유효율  $\eta_{n=0}$  을 뺀 값으로 영상효과에 의한 단섬유효율을 구하였다. 기존의 실험 결과는 1  $\mu\text{m}$  입자를 사용하였기 때문에 관성(inertia)과 차단(interception)이 주 포집기구가 되는 영역이기 때문

에 확산(diffusion)이 주 포집기구가 되는 0.2  $\mu\text{m}$  이하의 입자에서 실험한 이번의 결과와 다르게 나타난 것이다. 그리고 확산의 주요 변수인 Pe 수가 증가할수록 단섬유효율이 감소하여 기존의 실험식에 근접하고 있다.

만일 영상효과가 확산에 의하여 영향을 받는다고 한다면 Pe 수가 실험식에 들어가야 한다.

$$\eta_i = f(K_M, Pe) \quad (8)$$

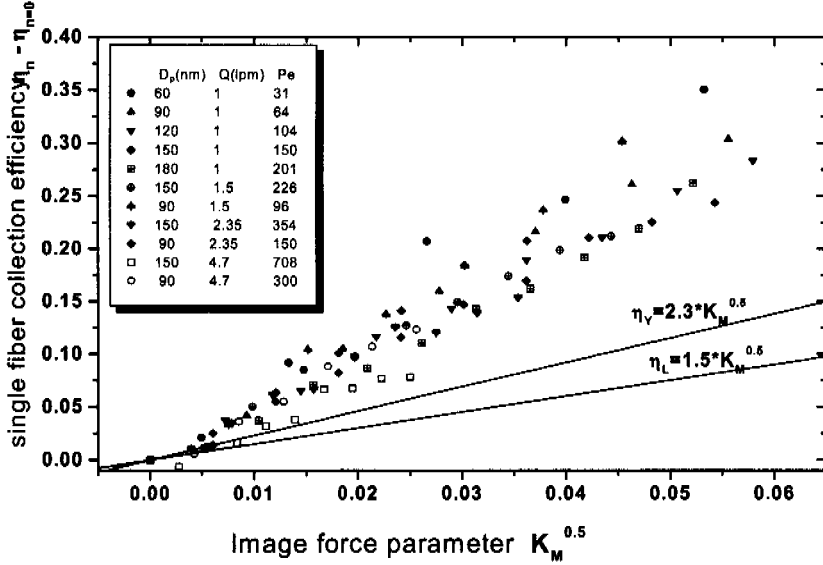


Fig. 10 Single fiber collection efficiency  $\eta_n - \eta_{n=0}$  as function of Image force parameter

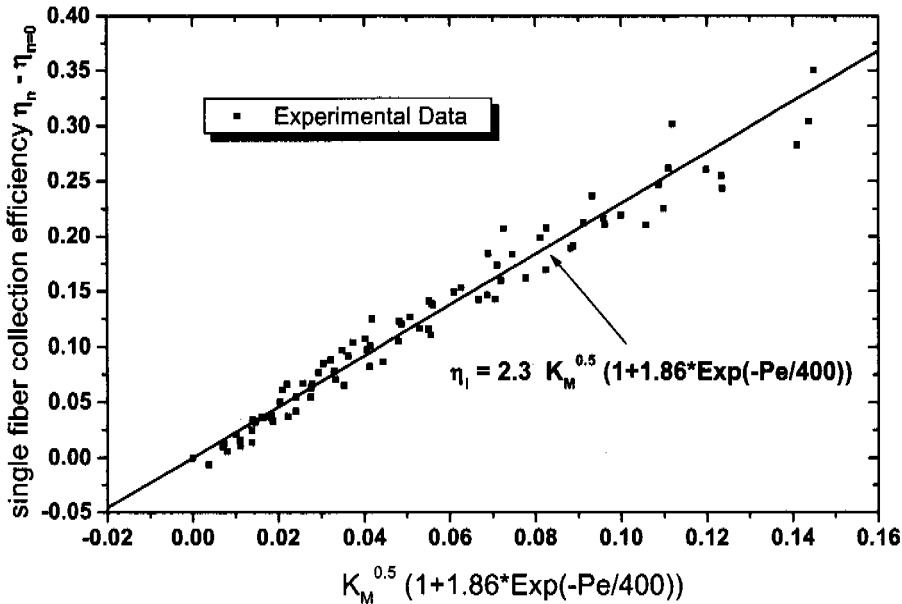


Fig. 11 Single fiber collection efficiency  $\eta_n - \eta_{n=0}$  for charged particle expressed by Image force parameter  $K_M$  and Peclet number  $Pe$

여기서 만일 기존의 실험식이 맞다고 가정하고 Pe 만의 함수와 곱으로 나타난다고 가정하면 다음과 같다.

$$\eta_i = 2.3 * K_M^{0.5} f(Pe) \quad (9)$$

$$\frac{\eta_i}{2.3 * K_M^{0.5}} = f(Pe) \quad (10)$$

실험에서 얻어진 결과에서 Pe 수가 증가할수록 단섬유효율이 급격히 감소하므로 이에 적합한 지수적 감소(Exponential decay)로 표현된 함수를 선택하여 수렴된 curve fitting 을 수행하여 다음과 같은 식을 구하였다.

$$f(Pe) = (1 + A * \text{Exp}(-B * Pe)) \quad (11)$$

$$A = 1.86 \quad B = 1/400$$

$$\eta_i = 2.3 * K_M^{0.5} (1 + 1.86 * \text{Exp}(-Pe/400)) \quad (12)$$

이 식에 의한 결과는 Fig. 10 에 나타나 있다. Pe 수가 증가하여 2000~3000 정도에 이르면 기존의 실험식에 근접하는데 일반적으로 이 영역에서 확산효과가 없어진다고 알려져 있다. 그래서, 확산이 지배적인 영역에서만 Pe 수의 영향을 받고 관성이 나 간섭이 지배적인 영역에서는 기존의 식과 일치하여 두 영역에 모두 적용되는 경험식이 된다.

Brown 의 실험결과<sup>(6)</sup>에서 1 가의 대전된 입경이 0.2  $\mu\text{m}$  이하의 입자들에서 갑자기 영상효과가 커지는 것을 보여주는데 이번 실험과 정성적으로 일치하고 있다. 기존의 제안된 실험식으로 설명이 되지 않는 결과가 이 실험식으로 설명이 된다. 그래서 확산효과를 고려한 새로운 형태의 영상효과에 대한 식이 적용되어야 할 것이다.

영상효과는 필터섬유 근처에서 강하게 작용한다. 그렇지만 영상효과가 작용하는 영역을 통과하는 입자는 매우 적어서 입자의 부착에 크게 기여하지 못한다. 하지만 입자의 확산이 동시에 존재하게 되면 확산은 영상효과가 작용하는 영역으로 입자를 공급하게 되어 영상효과가 더욱 크게 나타나게 한다. 또한, 필터섬유의 뒷부분으로 입자가 확산되어 간섭과 관성이 주로 지배적인 큰 입자의 영역보다 영상력이 영향을 미치는 면적이 넓어지고 전기력이 입자의 필터 통과시간을 지연시켜 확산효과가 크게 작용될 수 있어 이런 실험결과가 나온 것으로 사료된다. 그리고, 확산효과와 영상효과는 어느 한 쪽이 지배적이지 않고 필터효율을 증가시키는 쪽으로 동시에 나타난다.

기존의 많은 연구에서 무시하던 영상력의 효과를 확산영역에서는 조심스럽게 다루어야 할 필

요가 있고 수치적 연구와 이론적 연구가 더욱 필요하다.

#### 4. 결 론

미세한 은 입자를 광대전에 의하여 대전한 후 필터효율을 측정하는 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소입자를 광대전에 의해서 대전시켜 균일한 대전량을 가진 입자를 다량 생성시키는 방법은 확산이 지배적인 영역에서 대전된 입자의 포집에 관한 연구를 위한 실험방법으로 유용성이 있다.

(2) 대전량을 변화시키면서 필터효율을 측정한 결과는 대전량이 증가할수록 필터효율이 증가함을 보인다. 그리고 입자의 크기가 작을수록 유속이 작을수록 대전량에 따라 필터효율의 증가율이 커진다.

(3) 200 nm 이하의 대전된 입자는 대전되지 않은 필터에서 대전량이 증가할수록 필터효율이 증가하고 확산효과가 큰 영역에서 그 효과가 더욱 증가한다. 이러한 결과는 확산효과를 고려한 Pe 수를 포함한 다음과 같은 식으로 표현되었다.

$$\eta_i = 2.3 * K_M^{0.5} (1 + A * \text{Exp}(-Pe/B))$$

여기에서 A 는 1.86, B 는 400 으로 구해졌다. 이번 실험에서 제안된 실험식의 변수가 구해졌으나, 실험적 오차가 존재하므로 수치적 연구에 의해서 더욱 정확한 변수를 찾는 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

- (1) Brown, R. C., 1993, Pergamon Press, Air Filtration pp. 139~177.
- (2) 안 강호, 1997, "정전 섬유필터 주위의 입자포집 및 거동에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제 21 권, 제 11 호, pp. 1509~1517.
- (3) Davies, C. N., 1973, Academic Press.London.New York, Air Filtration.
- (4) Nelson, G. O., Bergman, W., Miller, H. H., Taylor, R. D., Richards, C. P. and Biermann, A. H., 1978, "Enhancement of Air Filtration using Electric Fields," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 39, June, pp. 472~479.
- (5) Lundgren, D. A. and Whitby, K. T., 1965, "Effect of Particle Electrostatic Charge on Filtration by Fibrous Filters," *Ind. Eng. Chem. Process des. Dev.*, Vol. 4, pp. 345~349.
- (6) Trottier, R. A. and Brown, R. C., 1990, "The Effect of Particle Charge and Filter Charge on Filtration of Submicrometre Aerosols," *J. Aerosol Science*, Vol. 21, Suppl. 1, pp. S689~S692.
- (7) Wu, Z. and Colbeck, I., 1992, "Experimental Studies of Electrostatically Augmented Fibrous Filtration," *J. Aerosol Science*, Vol. 23, Suppl. 1, pp. S779~S782.
- (8) Lee and Liu, 1982, "Theoretical Study of Aerosol



- Filtration by Fibrous Filters," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 1, pp. 147~161.
- (9) Schwyn, S., Garwin, E., Schmidt-Ott, A., 1988, "Aerosol Generation by Spark Discharge," *J. Aerosol Science*, Vol. 19, No. 5, pp. 639~642.
- (10) Burtcher, H., Scherre, L., Siegmann, H. C., Schmitott, A. and Federer, B., 1982, "Probing Aerosols by Photoelectric Charging," *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 5, pp. 3789~3701.
- (11) Jung, Th., Burtcher, H. and Schmit-Ott, A., 1988, "Multiple Charging of Ultrafine Aerosol Particles by Aerosol Photoemission (APE)," *J. Aerosol Science*, Vol. 19, No. 4, pp. 485~490.
- (12) Matter, D., Mohr, M., Fendel, W., Schmit-Ott, A. and Burtcher, H., 1995, "Multiple Wavelength Aerosol Photoemission by Eximer Lamps," *J. Aerosol Science*, Vol. 26, No. 7, pp. 1101~1115.