

## 필터여재의 성능평가

### Performance Test of Air Filter Media

안 강 호\*, 배 귀 남\*\*  
K. H. Ahn, G. N. Bae

**Key words** : Filter Media Test(필터여재 성능평가), Filtration Efficiency(포집효율), Pressure Drop(압력강하), Electret Filter(정전필터), HEPA Filter(고성능필터), ULPA Filter(초고성능필터)

#### Abstract

Filter media performance was evaluated using monodisperse NaCl particles with Differential Mobility Analyzer and Ultrafine Condensation Particle Counter. Low or medium performance filters show that the most penetrating particles size(MPPS) is around  $0.3\mu m$  in diameter and is shifted to smaller sizes as the filter face velocity increases. However, HEPA and ULPA filters show MPPS is around  $0.15\mu m$  in diameter and is also shifted to  $0.1\mu m$  in diameter as the face velocity increases. In case of electret filter, the MPPS is found around  $0.04\mu m$  region for Boltzmann charge equilibrium particles. There is a tendency of strong collection efficiency decrease for large particles as the face velocity increases on the contrary to the other filters. One of the medium performance filter efficiency was compared with filtration theory and the good agreement was found in the experimental range.

#### 기 호 설 명

$$C_c \left( = 1 + \frac{\lambda}{D_p} \left[ 2.514 + 0.8 \exp\left(-0.55 \frac{D_p}{\lambda}\right) \right] \right)$$

: Cunningham 미끄럼 보정계수

$D$  : 입자의 확산계수

$D_p$  : 입자의 직경

$D_f$  : 필터 섬유들의 직경

$E_D$  : 단일섬유의 확산포집 효율

$E_{DR}$  : 단일섬유의 확산에 의한 접촉포집 효율

$E_I$  : 단일섬유의 충돌포집 효율

$E_R$  : 단일섬유의 접촉포집 효율

$E_T$  : 단일섬유의 총합포집 효율

$$K_u \left( = -\frac{1}{2} \ln \alpha - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \right) : \text{Kuwabara 상수}$$

$n$  : 필터 하류 측의 입자농도

$n_0$  : 필터 상류 측의 입자농도

$P$  : 입자통과율

$\Delta P$  : 압력강하

$$Pe \left( = \frac{D M_0}{D} \right) : \text{Peclet 수}$$

$q_f$  : 필터 성능지표(Filter quality)

$R \left( = \frac{D_p}{D_f} \right) : \text{차단변수(Interception parameter)}$

$$St \left( = \frac{C_c D_p^2 \rho_p u_0}{18\mu D_f} \right) : \text{Stokes 수}$$

$t$  : 필터두께

$u$  : 필터 면속도

$u_0$  : 필터내의 유속

\* 생산기술연구원, 생산설비개발센터

\*\* 한국과학기술연구원, 기전연구부

- $u_n$  : 접선방향의 유체속도  
 $u_r$  : 반경방향의 유체속도  
 $\alpha$  : 필터의 충전율(solidity)  
 $\lambda$  : 기체의 평균자유행로  
 $\rho_p$  : 입자의 밀도  
 $\mu$  : 유체의 점성계수  
 $\psi$  : stream function

## 1. 서 론

대기오염 입자의 제거 및 청정환경의 요구로 공기 필터의 사용은 산업체 뿐만 아니라 일반 가정용품에서도 증가일로에 있다. 필터는 전기집진기, 싸이클론, 스크러버 같은 집진 장치로는 제거하기 어려운  $1\mu m$  이하의 미세 입자를 매우 효과적으로 제거할 수 있으며, 특히 섬유 필터는 가격이 저렴하고 설치 및 운전이 쉬워 그 사용범위는 점차 확대되고 있다. 그러나 필터에 관한 국내 연구결과<sup>1)</sup>는 극히 미약하며 특히 필터여재의 성능평가는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

국내에서 사용되는 대부분의 고성능 필터 여재는 외국에서 수입하여 사용하고 있으나, 최근 들어 중·저성능 및 정전 필터여재는 국산화를 마쳐 양산단계에 진입하였다. 그러나 이의 성능시험기법이나 시험장치의 제작은 아직 미흡하여 대부분 외국에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 중·저성능 및 고성능 필터여재 성능을 시험할 수 있는 시험기법을 개발하였으며, 아울러 유리섬유 필터여재의 성능시험 결과를 기존의 이론과 비교 검증하였다.

## 2. 이론적 배경

필터여재에 의한 입자의 포집 작용은 크게 3가지로 구분한다. 첫번째 포집작용으로는 큰 입자가 필터섬유 주위를 통과할 때 유선의 급속한 변화로 입자 자체 관성에 의해 유선을 벗어나 섬유에 부딪혀 부착하게 된다. 이를 관성포집이라 하며 섬유 주위에 흐르는 유체운동을 해석함으로써 입자크기에 따른 포집효율을 예측할 수 있다. 두번째 포집 작용은 미세한 입자가 브라운 운동에 의해 필터 섬유에 부착되는 것이며 이를 확산포집이라 한다.

세번째로는 입자가 유선을 따라 움직이다 필터섬유와 접촉되어 포착되는 것이다. 이외의 다른 포집작용으로 입자나 필터섬유가 정전기를 띄었을 경우 이들 물체간에 작용하는 정전기력에 의해 포집되는 것이 있으며, 중력침강에 의한 포집은 일반적으로 입자가 매우 클 경우에만 작용한다.

이들 입자크기에 따른 포집효율은 섬유주위에 흐르는 유체 유동장의 예측에 의해서 가능하다. 그러나 필터를 형성하고 있는 섬유의 배열은 매우 불규칙하게 엉켜있어 유체운동의 예측은 매우 어려웠으나, 이를 해석하기 위해 Albrecht<sup>2)</sup>, Langmuir<sup>1)</sup> 등이 이에 관해 연구하였다. 그후 Happel,<sup>3)</sup> Kuwbara<sup>4)</sup>는 불규칙적으로 놓인 실린더 주위에 유체가 횡단하여 흐를 때 형성되는 유속분포를 cell 모델을 이용하여 실린더 주위에 점성유체가 흐를 때의 Navier-Stokes 방정식을 풀어 보다 실제 조건에 근접한 해를 다음과 같이 구하였다.

$$\psi = \frac{u_0 D_p}{4Ku} \left[ 2 \ln R - 1 + \alpha + R^{-2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\alpha R^2}{2} \right] \sin \theta \quad (1 a)$$

$$u_r = \frac{u_0}{2Ku} \left[ 2 \ln R - 1 + \alpha + R^{-2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\alpha R^2}{2} \right] \cos \theta \quad (1 b)$$

$$u_n = \frac{u_0}{2Ku} \left[ 2 \ln R + 1 + \alpha - R^{-2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) - 3 \frac{\alpha R^2}{2} \right] \sin \theta \quad (1 c)$$

여기서  $Ku = -\frac{1}{2} \ln \alpha - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4}$  이다. 이를 이용하여 Stechkina 등<sup>5)</sup>은 필터 단일 섬유의 입자포집 효율을 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$E_T = E_I + E_R + E_D + E_{DR} \quad (2 a)$$

$$E_I = \frac{St}{2Ku} \left[ (29.6 - 28\alpha^{0.63})R^2 - 27.5R^{2.8} \right] \quad (2 b)$$

$$E_R = \frac{1}{2Ku} \left[ 2(1+R) \ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{(1+R)} \right] \quad (2 c)$$

$$E_D = 2.7Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (2\ d)$$

$$E_{DR} = 1.24Ku^{-\frac{1}{2}}Pe^{-\frac{1}{2}}R^{\frac{2}{3}} \quad (2\ e)$$

여기서  $St = \frac{C_c D_p^2 \rho_p u_0}{18\mu D_f}$ ,  $Pe = \frac{DM_0}{D}$  이며,  $R = \frac{D_f}{D}$  이다.

섬유주위를 흐르는 유체의 속도  $u_0$ 는 필터 면의 면속도  $u$ 보다 더 빠르게 흐른다. 그 이유는 섬유 자체에 의해 유체가 흐를 수 있는 단면적이 줄어들기 때문이며,  $u_0$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$u_0 = \frac{u}{(1-\alpha)} \quad (3)$$

식(2)에서 구한  $E_T$  값은 단일 섬유에 대한 입자 포집효율을 나타내며, 두께  $t$ 인 필터의 입자 통과율은 다음과 같이 나타낸다.

$$P = \exp\left(-\frac{4^{\alpha} E_T t}{\pi D_f}\right) \quad (4)$$

한편, 필터의 입자 통과율은 필터 상류 측의 입자농도에 대한 하류 측의 입자농도 비를 의미하므로 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{n}{n_0} \quad (5)$$

전술한 이론식(4)와 실험으로 구한 필터의 입자 통과율식(5)를 비교함으로써 이론과 실험결과를 검증할 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 필터여재 성능평가장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

압축공기는 입자발생 장치인 입자분무기(Atomizer)내에 유입되어 NaCl 용액을 분무시킨다.<sup>8)</sup> 이들 분무입자는 실리카겔이 들어있는 수분건조 장치인 확산 건조기(Diffusion Dryer)를 통과하면서 건조된다. 이렇게 생성된 입자는 다분산체(poly-disperse) 이므로 입자 크기에 따른 필터 성능 시험에는 적합하지 않다. 이에 일정한 크기의 입자만을 선택할 수 있는 장치인 Differential Mobility Analyzer (DMA, TSI Model 3701)<sup>9)</sup>를 이용하여 단분산체(mono-disperse) 입자만을 발생시킨다. 이때 DMA의 운전조건으로 Sheath Air 및 Excess Air의 유량은 각각 3 lpm, 다분산체와 단분산체 입자공급 공기의 유량은 각각 0.3 lpm으로 유지하였다. 단분산체 공급 공기의 유량이 작아 추가로 청정 공기를 유입시켜 필터 성능 시험에 충분한 공기를 공급하도록 하였다. DMA에서 나온 입자는 전기를 띄고 있어 필터 성능시험시 입자와 필터여재 섬유들과의 정전작용에 의하여 성능평가에 영향을 미칠 수 있다. 이에 정전기를 제거하기 위하여 입자를 Kr<sup>85</sup> 방사능 발생기를 통과시켜 전기적으로 중화시켰다. 이렇게 발생된 입자의 최대 농도는 수만개/cm<sup>3</sup>로 본 필터 성능연구에 충분하였다. 입자의 농도를 측정하기 위하여 응축핵계수기(Ultrafine Condensation Particle Counter, CNC 혹은 UCPC, TSI Model 3025)<sup>10)</sup>를 사용하였으며 CNC로 유입되는 유량은 5cm<sup>3</sup>/s로 일정하게 유지되었다. 입자의 농도는 필터 홀더의 상류 부와 하류 부에서 각각 측정하였다. 이 때 필터

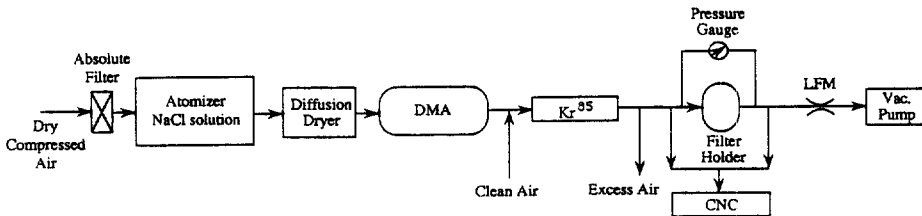


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system.

DMA : Differential Mobility Analyzer, CNC : Condensation Nucleus Counter  
LFM : Linear Flow Meter.

통과시 발생하는 압력강하도 동시에 측정하였다. 유량의 변화에 따른 필터 성능을 평가하기 위하여 유량측정 장치인 선형유량계(linear flow meter, LFM)을 설치하였으며, 진공펌프와 밸브를 이용하여 필터 홀더를 통과하는 유량을 조절하였다.

실험은 먼저 자체 제작한 내경 52mm, 유효 내경 40mm인 필터홀더의 스텐레스 스크린 위에 필터 여재를 설치한다. 이때 필터여재는 직경 50mm의 편칭날을 이용 필터에 손상이 없도록 잘라낸 것이다. 이렇게 준비된 필터 홀더를 실험장치에 설치한다. DMA에서 일정한 크기의 입자를 발생시켜 농도가 안정되었을 때 CNC로 필터홀더 상류 측의 입자 농도를 먼저 측정하고 바로 필터홀더 하류 측의 입자 농도를 측정한다. 이때 필터에 걸리는 압력강하도 동시에 측정한다. 다시 DMA의 전압을 바꿔 다른 크기의 입자를 발생시킨 후 상류측 및 하류 측의 입자농도를 측정한다. 이 과정이 끝나면 필터 통과 유량을 원하는 양으로 조절한 후 위와 같은 방법으로 입자크기를 바꿔가면서 필터의 입자통과율과 압력강하를 측정한다. 실험에 사용된 필터의 여재는 중·저성능 필터 여재 3종류, 정전필터 여재 1종류, 그리고 고성능 필터 여재 3종류 이었다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig2 (a)와 (b)는 본 연구에 사용된 유리섬유 필터 여재 A와 정전필터 여재 E의 전자현미경 사진이다.

Fig2 (a) 및 (b)의 확대 비율은 각각 1000배, 150 배이다. 사진에서와 같이 여재 A는 직경이 1~2  $\mu\text{m}$ 에서 10 $\mu\text{m}$ 에 이르는 다양한 굵기의 원형 단면을 갖는 섬유들로 이루어져 있으나 갯수 상으로는 가는 섬유가 더 많다. 반면 여재 E는 30~80 $\mu\text{m}$  굵기의 직사각형 단면의 섬유들로 구성되어 있으며, 이들 섬유는 정전기를 띄도록 제조되었다.

Fig3은 중·저성능필터 여재 A에 대한 입자 통과율을 실험적으로 측정된 결과와 Stechkina등<sup>7)</sup>의 이론과 비교한 것을 나타낸 것이다.

Fig3의 종축은 입자 통과율(Fractional Penetration ( $n/n_0$ ))을 나타내며, 이는 상류측 입자농도( $n_0$ )에 대한 하류측 입자 농도( $n$ )의 비이다. 실험은 필터



(a) Glass fiber filter media A, Magnification : 1000.



(b) Electret filter media E, magnification : 150.

Fig.2 SEM photographs of filter media

면을 통과하는 4가지 유속조건, 즉 0.4, 1.2, 2.0, 2.8 cm/s에 대해 수행하였다. 실험결과와 비교하기 위해 사용된 이론식의 변수로는 섬유의 굵기  $D_f=4\mu\text{m}$ , 필터의 두께  $t=0.37\text{mm}$ , 필터의 충진율  $\alpha=0.1$ 을 사용하여 계산하였으며, 계산결과는 실선 및 점선으로 각각의 유속에 대해 표시하였다. Fig3에서 보는 바와 같이 계산결과와 실험결과가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 실험결과중 입경 0.457 $\mu\text{m}$  값이 이론치 보다 크게 나타났으나 이는 실험 중에 사용된 입자의 농도가 50개/cm<sup>3</sup> 이하로 통계적으로 충분한 샘플링을 못해서 발생한 편차라고 생각된다. 이론계산식 (2) 및 (4)의 결과를 Table 1에 각각의 유속에 대해 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 면속도가 증가할

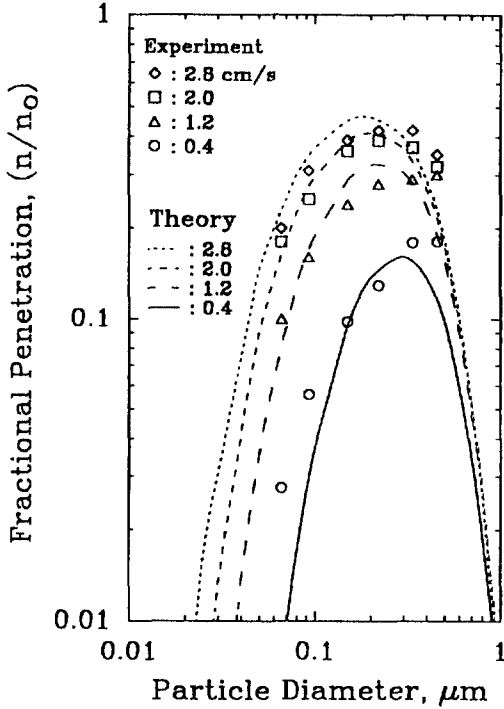


Fig. 3 Theoretical and experimental particle fractional penetration efficiency of filter media A.

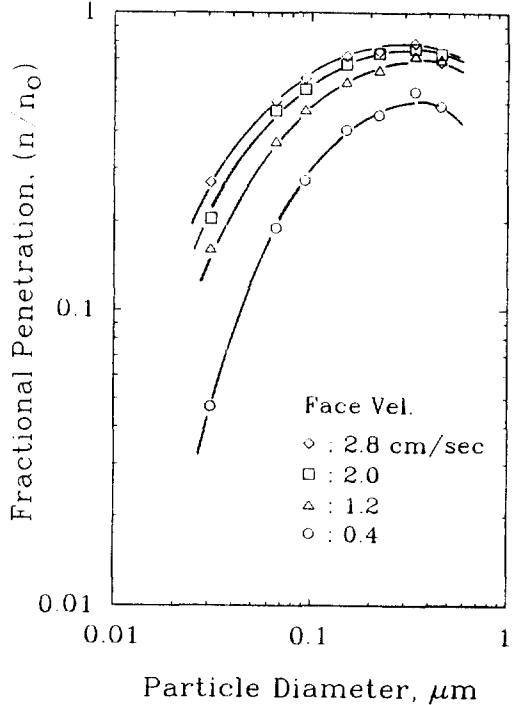


Fig. 4 Experimental particle fractional penetration efficiency of filter media B.

수록 확산에 의한 포집효율( $E_D$ )은 감소하는 반면, 관성에 의한 포집효율( $E_I$ )은 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 접촉포집효율( $E_R$ )은 유속에 관계없이 일정한 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 5는 중·저성능 필터여재 B와 C에 대한 실험결과를 나타낸 것이며, 그림에 나타난 곡선은 운영자를 사용하여 실험값들을 연결한 것이다.

또한, 정전필터 여재 E에 관한 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 그림내 곡선은 운영자를 사용하여 실험값들을 연결한 것이다.

필터여재 A, B, C의 최대통과입자크기(Most Penetrating Particle Size, MPPS)가  $0.3\mu m$  전후로 나타나고 있으며, 유속이 증가할수록 입자의 포집효율은 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 확산포집작용이 우세한  $0.1\mu m$  이하의 입자의 통과율은 유속이 증가할수록 현저히 증가하는 것을 볼 수 있다. 정전필터 여재 E는 앞의 중·저성능 여재 A, B, C와는 달리 MPPS가  $0.04\mu m$  근처에 존재하며,  $0.3\mu m$  부근에서 상당히 높은 포집효율을 보여주고 있다. 정전필터 여재 E 또한 유속이 증

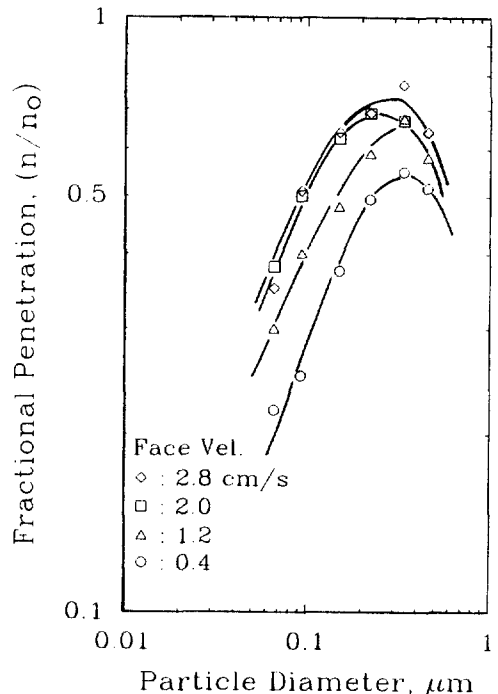


Fig. 5 Experimental particle fractional penetration efficiency of filter media C.

Table 1 Particle Penetration and Single Fiber Collection Efficiencies for Various Face Velocities and Particle Sizes

	$D_p(\mu m)$	$P$	$E_T$	$E_D$	$E_{DR}$	$E_R$	$E_I$
$u = 0.4\text{cm/s}$	0.01	2.13E-22	4.2368	4.148	0.089	0.000	0.000
	0.02	1.20E-09	1.7444	1.673	0.071	0.000	0.000
	0.03	3.89E-06	1.0578	0.994	0.063	0.000	0.000
	0.05	1.11E-03	0.5780	0.522	0.055	0.001	0.000
	0.08	1.67E-02	0.3476	0.296	0.049	0.003	0.000
	0.10	3.72E-02	0.2795	0.228	0.047	0.005	0.000
	0.15	9.52E-02	0.1997	0.145	0.044	0.011	0.000
	0.20	1.37E-01	0.1688	0.108	0.042	0.019	0.000
	0.30	1.61E-01	0.1551	0.073	0.041	0.041	0.000
	0.50	9.81E-02	0.1972	0.047	0.042	0.108	0.001
	0.80	1.92E-02	0.3357	0.032	0.043	0.257	0.004
$u = 1.2\text{cm/s}$	1.00	4.36E-03	0.4614	0.027	0.044	0.384	0.007
	0.01	3.45E-11	2.0454	1.994	0.051	0.000	0.000
	0.02	4.73E-05	0.8456	0.804	0.041	0.000	0.000
	0.03	2.33E-03	0.5149	0.478	0.036	0.000	0.000
	0.05	3.54E-02	0.2838	0.251	0.032	0.001	0.000
	0.08	1.30E-01	0.1735	0.142	0.028	0.003	0.000
	0.10	1.89E-01	0.1414	0.110	0.027	0.005	0.000
	0.15	2.87E-01	0.1059	0.070	0.025	0.011	0.000
	0.20	3.26E-01	0.0951	0.052	0.024	0.019	0.000
	0.30	3.07E-01	0.1004	0.035	0.024	0.041	0.001
	0.50	1.57E-01	0.1574	0.022	0.024	0.108	0.003
$u = 2.0\text{cm/s}$	0.80	2.62E-02	0.3093	0.015	0.025	0.257	0.012
	1.00	5.41E-03	0.4432	0.013	0.025	0.384	0.021
	0.01	3.47E-08	1.4583	1.419	0.040	0.000	0.000
	0.02	8.12E-04	0.6042	0.572	0.032	0.000	0.000
	0.03	1.30E-02	0.3687	0.340	0.028	0.000	0.000
	0.05	9.02E-02	0.2042	0.178	0.025	0.001	0.000
	0.08	2.26E-01	0.1261	0.101	0.022	0.003	0.000
	0.10	2.95E-01	0.1037	0.078	0.021	0.005	0.000
	0.15	3.90E-01	0.0801	0.050	0.020	0.011	0.000
	0.20	4.15E-01	0.0748	0.037	0.019	0.019	0.000
	0.30	3.66E-01	0.0853	0.025	0.018	0.041	0.001
$u = 2.8\text{cm/s}$	0.50	1.76E-01	0.1475	0.016	0.019	0.108	0.005
	0.80	2.68E-02	0.3074	0.011	0.019	0.257	0.020
	1.00	5.11E-03	0.4479	0.009	0.019	0.384	0.035
	0.01	1.07E-06	1.1671	1.134	0.034	0.000	0.000
	0.02	3.33E-03	0.4843	0.457	0.027	0.000	0.000
	0.03	3.06E-02	0.2960	0.272	0.024	0.000	0.000
	0.05	1.44E-01	0.1646	0.143	0.021	0.001	0.000
	0.08	2.99E-01	0.1024	0.081	0.019	0.003	0.000
	0.10	3.68E-01	0.0848	0.062	0.018	0.005	0.000
	0.15	4.54E-01	0.0671	0.040	0.017	0.011	0.000

	$D_p(\mu m)$	$P$	$E_T$	$E_D$	$E_{DR}$	$E_R$	$E_I$
	0.20	4.68E-01	0.0645	0.029	0.016	0.019	0.000
	0.30	4.00E-01	0.0778	0.020	0.016	0.041	0.001
	0.50	1.85E-01	0.1434	0.013	0.016	0.108	0.007
	0.80	2.58E-02	0.3105	0.009	0.016	0.257	0.029
	1.00	4.59E-03	0.4572	0.007	0.016	0.384	0.049

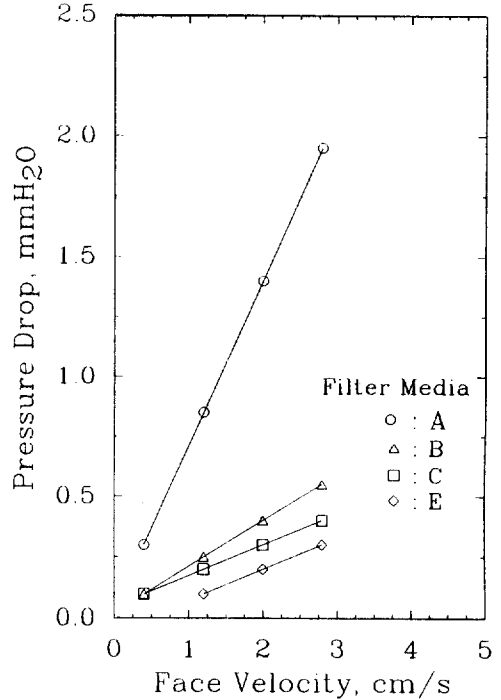
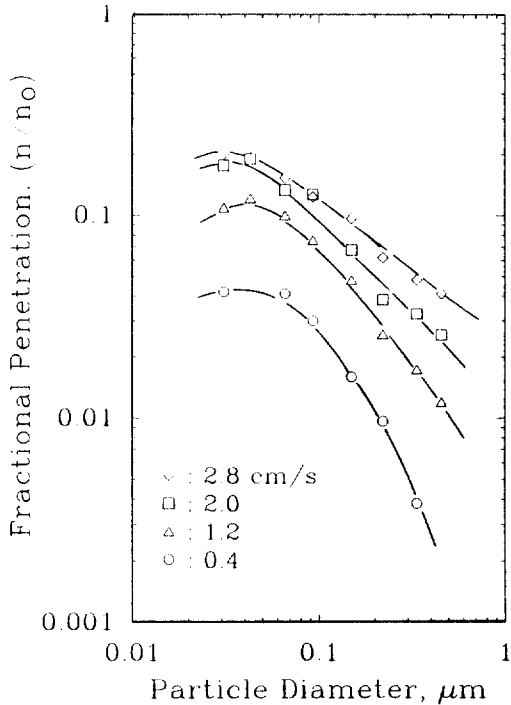


Fig.6 Experimental particle fractional penetration efficiency of electet filter media E.

Fig.7 Pressure drop of the filter media at different face velocities.

가할수록 포집효율은 점점 감소하는 경향을 보여주고 있다. 특히 0.2, 0.3 $\mu m$  보다 큰 입자의 포집효율이 유속이 증가할수록 급격히 떨어지고 있는데 이는 여재 A, B, C와는 다른 특징이다. 이러한 이유는 유속이 증가할수록 입자의 관성력이 증가하여 정전기력에 의한 포집효과가 상대적으로 감소함으로써 발생하는 것으로 사료된다. 즉, 정전필터의 주된 입자포집 방법은 정전기력에 의한 것으로 판단되며, 관성력이 우세하거나, 즉, 유속이 빠르거나 입자가 클 때, 혹은 필터 여재의 정전력이 감소된 경우는 입자의 포집효율이 낮아질 것으로 예측된다.

이들 필터 여재 A, B, C와 E의 4가지 유속에 대한 압력강하를 Fig.7에 나타내었다.

4종류의 필터여재 모두 면속도가 증가함에 따라 압력강하도 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 중·저성능 여재의 경우 여재 A의 압력 강하는 B, C에 비해 4배 정도 큰 압력강하를 보여주지만 Fig.3 (여재 A)와 Fig.4 (여재 B), Fig.5 (여재 C)의 포집효율을 비교할 때 여재 A는 2배 정도의 높은 효율을 보여주고 있다. 이에 비하여 정전필터 E는 중·저성능 필터 여재 A에 비해 면속도 2.8cm/sec에서 1/6정도의 매우 작은 압력강하를 보이지만 0.3 $\mu m$  입자 포집효율면에서는 약 10배 정도의 고

효율을 보여주고 있다. 그러므로 작은 에너지 손실로 고효율의 집진 성능을 얻는다는 정전필터가 매우 유리할 것으로 여겨진다. 그러나 정전필터는 사용중 정전기력이 감소되며 필터성능이 급격히 떨어지므로 이에 대한 보충연구가 필요하다고 사료된다.

고성능 및 초고성능 필터여재 H, W, U에 대한 실험 결과를 Fig.8, 9, 10에 각각 나타내었으며 그림내 곡선은 운영자를 사용하여 그린 것이다.

이들 여재는 고청정 환경을 요구하는 반도체 제조용 클린룸에 사용되는 필터여재들이다. 그림에 나타나 있는 것과 같이 입자의 포집효율은 유속이 증가할 수록 매우 급격히 떨어진다. 특히, 유속이 증가할 수록 MPPS가 0.15 $\mu$ m에서 0.1 $\mu$ m으로 천이하는 것을 쉽게 볼 수 있다. 또한, 이들 고성능 필터여재의 MPPS가 중·저성능 필터여재의 MPPS 0.3 $\mu$ m보다 작은 것을 알 수 있다.

Fig.11은 고효율 및 초고효율 필터 여재 U, W, H의 면속도에 대한 압력강하를 나타낸 것이다.

그림에 나타난 직선들은 1차 선형방정식에 의해

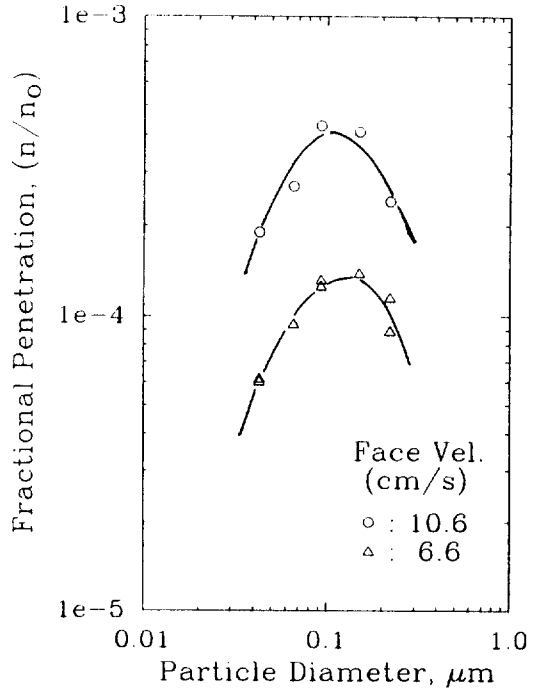


Fig.9 Experimental particle fractional penetration efficiency of filter media W.

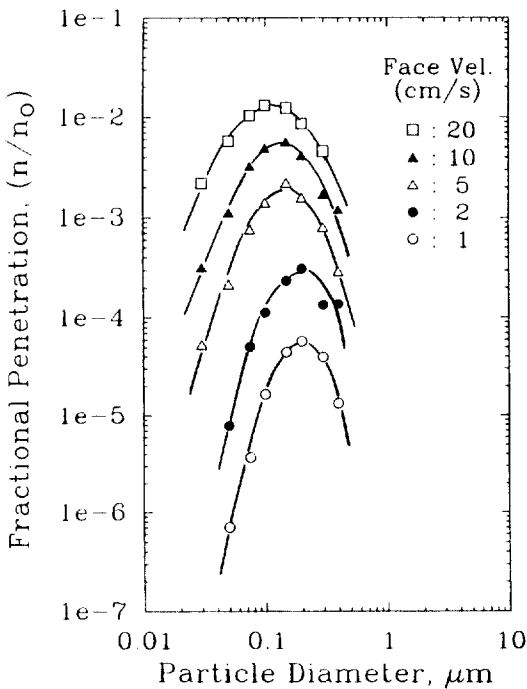


Fig.8 Experimental particle fractional penetration efficiency of filter media H.

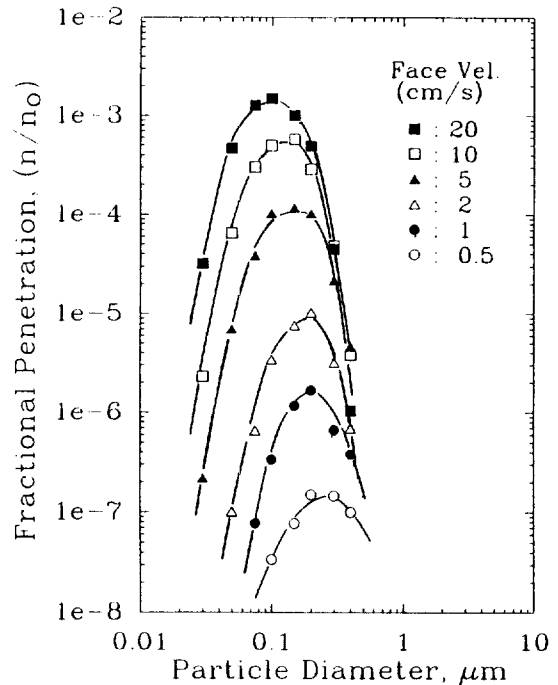


Fig.10 Experimental particle fractional penetration efficiency of filter media U.



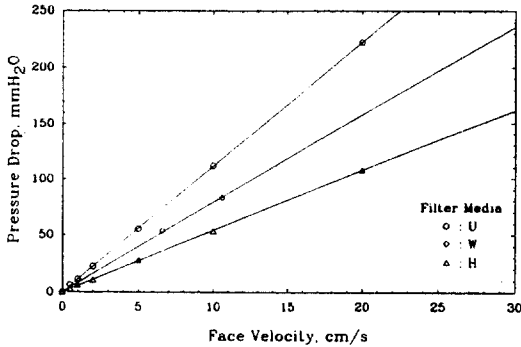


Fig.11 Pressure drop of HEPA and ULPA filter media at different face velocities.

fitting 시킨 것으로 상관계수(correlation coefficient)가 모두 0.999이상이다. 즉, 압력강하율이 필터여재의 면속도에 선형적으로 비례하며, 실험 범위 내에서 층류유동 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

필터의 성능을 입자 포집효율만으로 나타낸다면 여재의 두께  $t$ 를 크게하여 집진효율을 높일 수 있으나 상대적으로 압력손실이 커져 운전비용이 많이 들게 된다. 그러므로 압력손실이 작으면서 입자포집효율이 높은 것이 좋은 필터이고 이를 필터 성능지표, 지표,  $q_f = \frac{\ln \frac{1}{P}}{4p}$ , 로 나타낸다. 지금까지

지 실험한 필터여재 7종류에 대한  $q_f$  값을 Table 2에 입자크기 및 유속에 따라 표시하였다. 표에서 보듯이 정전필터 여재 E가 가장 좋은 성능을 보였으며, 중·저성능 필터중에서 여재 C, B, A의 순으로 좋은 것을 알 수 있다. 또한 고효율 필터에서는 여재 H가 보다 나은 것임을 알 수 있다. 특이한 점은 여재 H의 경우 유속을 2.5배 증가시키면 0.1 $\mu$ m에서  $q_f$  값이 0.849에서 0.235로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

정전필터여재 E를 제외한 6 종류의 여재는 유속이 증가할 수록 입자의 포집효율은 떨어지며, MPPS도 점차 작은 입경쪽으로 천이하는 것을 알 수 있었다. 특히 확산포집작용이 우세한 0.1 $\mu$ m 이하의 작은 입자는 유속이 증가할 수록 포집효율이 급격히 감소하는 것을 이론상으로는 실험상으로 알 수 있었다. 이는 유속이 증가할 수록 관성에 의한 포집효율 증가는 어느 일정유속에서 한계에 이르나,

Table 2 Filter Quality for Each Filter Media

Media	u(cm/s)	D <sub>p</sub> ( $\mu$ m)	q <sub>f</sub> (1/mmH <sub>2</sub> O)
A	2.8	0.221	0.445
		0.337	0.445
B	2.8	0.221	0.535
		0.337	0.452
C	2.8	0.221	0.927
		0.337	0.653
E	2.8	0.043	5.11
		0.221	9.27
		0.337	10.12
H	2.0	0.1	0.849
		0.15	0.780
	5.0	0.2	0.754
		0.1	0.235
W	6.6	0.15	0.219
		0.2	0.231
	10.6	0.221	0.172
		0.221	0.10
U	2.0	0.1	0.562
		0.15	0.526
		0.2	0.513
	5.0	0.1	0.167
		0.15	0.164
		0.2	0.167

\* $q_f$  값이 클 수록 좋은 필터임.

확산에 의한 입자의 포집량은 유속이 증가할 수록 입자가 필터 여재내에 머무는 시간이 짧아 섬유에 확산포집될 시간적 여유가 적어져 효율이 감소하게 된다.

이상의 실험결과 및 이론계산 결과와 Lee와 Liu<sup>11)</sup>, Liu등<sup>12)</sup>의 실험결과를 비교할 때 본 실험장치 및 필터여재 성능평가 방법은 매우 적합하다고 생각 된다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 중·저성능 필터여재 3종류, 고성능 및 초고성능 여재 3종류, 그리고 정전필터 여재 1종류에 관한 성능평가 장치 및 성능 평가 기법을 개발하였으며, 중·저성능 필터 여재의 포

집효율을 이론값과 비교검증하였다. 중·저성능 필터 여재의 최대통과입자크기(Most Penetrating Particle Size, MPPS)는  $0.3\mu m$  부근에 존재하였으며, 유속이 증가할 수록 필터의 포집효율은 떨어졌다. 또한 MPPS도 작은 입자 쪽으로 천이하였다. 고성능 및 초고성능 필터 여재의 MPPS도 유속이 증가할 수록  $0.15\mu m$ 에서  $0.1\mu m$  부근으로 천이하였다. 한편 정전필터 여재의 경우 MPPS가 기존 필터의  $0.1\sim 0.3\mu m$  보다 매우 작은  $0.04\mu m$  부근에 존재하였으며, 기존의 필터보다 작은 압력손실로 높은 효율의 입자제거가 가능한 것이 증명되었다. 또한 정전필터의 경우 관성이 필터효율에 중요한 영향을 미치는 큰 입자 범위에서는 유속이 증가할 수록 포집효율은 급속히 작아졌으며 기존 필터와 매우 다른 특성을 보였다.

### 참 고 문 헌

- 이재현, 박명식, 1993, "부분적인 필터 교체에 따른 청정실 내부의 유동특성", 대한기계학회 논문집, Vol.17, No.8, pp.2110-2121.
- 이재현, 정상호, 김광영, 오명도, 1991, "절곡 필터에서의 압력강하 및 유동특성에 관한 수치적 연구", 공기조화냉동공학 논문집, Vol.3, No. 3, pp.176-185.
- Albrecht, F., 1931, "Theoretical Investigation of Dust Deposition from Flowing Air and Its Application to the Theory of the Dust Filter", Physik. Z., Vol.32, pp.48-56.
- Langmuir, I., 1942, "Report on Smokes and Filters", Part 4 of The Collected Works of Irving Langmuir(1961), Vol.10, pp.394-436.
- Hapel, J., 1959, "Viscous Flow Relative to Arrays of Cylinders", Am. Inst. Chem. Eng. J., Vol.5, pp. 174-177.
- Kuwabara, S., 1959, "The Forces Experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in Viscous Flow at Small Reynolds Numbers", J. Phys. Soc. Japan, Vol.14, pp.527-532.
- Stechkina, I. B., Kirch, A. A., and Fuch, N. A., 1969, "Studies on Fibrous Aerosol Filters-IV. Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration", Ann. Occup. Hyg., Vol.12, pp.1-8 ; "Investigations of Fibrous Filters for Aerosols-Calculation of Aerosol Deposition in the Region of Maximum Particle Breakthrough", "Kolloidn. Zh. 31 : pp.121-126 : Colloid J. USSR(English translation) Vol.32, pp. 391.
- 안강호, 배귀남, 1994, "새로 개발한 분무입자 발생기의 성능평가", 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집(III), pp.381-384.
- Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1974, "A Submicron Standard and the Primary Absolute Calibration of the Condensation Nuclei Counter", J. Colloid and Interface Sci., Vol.47, No.1, pp.155-171.
- Agarwal, J. K., and Sem, G. J. 1980, "Continuous Flow Single-Particle-Counting Condensation Nucleus Counter", J. Aerosol Sci., Vol.11, pp.343-357.
- Lee, K. W. and Liu, B. Y. H., 1982, "Experimental Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters", Aerosol Science and Technology, Vol.1, pp.35-46.
- Liu, B. Y. H., Rubow, K. L. and Pui, D. Y. H., 1985, "Performance of HEPA and ULPA Filters", Proceedings of 31 Annual Technical Meeting of Institute of Environmental Sciences, Las Vegas, Nevada, April 30-May 2, pp.25-28.