

정전형여과집진방식에서 여과특성에 관한 연구

A Study on Filtration Performance Test with Electrostatically Enhanced Fabric Filter

천 중 국 · 박 출 재* · 최 금 찬
동아대학교 환경공학과
*안동전문대학 환경관리과

Jung-Kuk CHUN, Chul-Jae Park*, Kum-Chan CHOI
Dept. of Environmental Eng., Dong-A University
**An-Dong Junior College*

Abstract

This study has been carried out to investigate the filtration performance of Electrostatically Stimulated Fabric Filter(ESFF) at high temperature condition. The electric field was maintained parallel to the fabric surface. The benefits of ESFF are lower residual pressure drop, improvement of fine particle removal efficiency and increasing reduced rate of pressure drop during a filtration cycle, stable operation at higher filtering velocities.

According to the variance of filtering velocities and dust loadings, the results are summarized as follows;

By imposing an electric field on the filter, the reduced rate of pressure drop was 7~18% at room temperature, and when filtering velocity was 1.8m/min and dust loading was 1g/m³, the value of reduced rate of pressure drop was shown the highest. Under the electric field around the filter, the reduced rate of pressure drop was 10~35% at high temperature, and when filtering velocity was 1.8m/min and dust loading was 1g/m³, the value of reduced rate of pressure drop was shown the highest. Most of all, at high temperature, the value of reduced rate of pressure drop was resulted to 25%. Also the collecting efficiency was shown clearly improved. By the SEM photo analysis, the number of penetrated particles at the Conventional Fabric Filter was approximately two times that of Electrostatically Stimulated Fabric Filter.

1. 서 론

1999년 이후 먼지의 배출허용기준은 화력발전소의 경우, 현행농도에서 약 50% 이상으로 더 강화되며, 산업체의 경우는 현행농도보다 약 30~50% 범위에서 강화될 전망이다. 소각시설의 경우도 1995년에는 기준치가 현행의 기준치에 비해 50% 정도로 낮아질 전망이다. 따라서, 이들 시설에 대한 고효율 집진장치의 개발은 필연적

이며, 현재의 방지 시설들에 대한 개선이 더욱 요구되고 있는 실정이다(박영옥, 1991).

건식의 집진장치에서 백필터여과집진이나 전기집진장치는 미세먼지입자의 제거에 효과가 있으며, 현행 강화되고 있는 대기배출허용기준에 비추어 볼때 그 집진효율의 증대에 대한 연구들이 뒷받침되어야 한다. 이 두 장치는 상호 장단점을 가지고 있으며 이를 서로 보완하는 문제가 최근 몇몇 연구에 의해 보고되고 있다. 여과집진의 경우는 미세입자의 제거에는 효과적이나 장시간 운전

시 압력손실이 증가하는 문제점을 가지고 있으며, 반면에 전기집진은 압력손실이 낮고 미세입자를 제거하는데 효율적이나 배가스의 조성이나 조건들이 나쁠 때는 높은 효율을 보장하기가 어렵다. 따라서 이들 단점들을 보완하기 위해 2개이상의 제거메카니즘이 복합된 하이브리드형의 연구개발이 활발히 진행 중에 있다(Frederick, 1980, Viner and et al., 1988).

이와같은 배경하에 기존의 여과집진장치에 전기적인 효과를 부가한 정전여과집진방식이 개발되고 있으며, 그 방식으로는 정전여과의 개발, 입자의 예비하전, 여과포 주변의 전계형성 등이 그 대상이 되고 있다. 이들 방식은 기존의 여과집진이나 전기집진에서 기대할 수 없었던 높은 효율을 보장하며, 압력손실면에서도 장시간 운전시에도 안정한 결과를 나타낸다. 따라서, 대기 및 실내 환기시스템, 원자력산업, 반도체크린룸 등과 같은 고정정 분야에도 그 적용이 확대되고 있다.

백필터의 성능향상과 압력손실의 저감방법으로 백필터 전단에서 입자를 하전하거나 필터표면에 전계를 가한 정전백필터 등이 개발 실험중에 있으며 이로 인해 여과집진의 결정인 압력손실의 감소와 미세입자들의 포집에 높은 효율을 나타냄이 확인되었다. 그리고 여과집진에서 소각등의 분야에서 여과의 내열특성이 요구되면서 방향족폴리머의 뛰어난 내열특성으로 각종 내열성 나이론, 사화화에틸렌계섬유와 유리섬유를 혼용함으로써 내마모성과 내굴곡성을 개선한 필터와 세라믹소재를 사용한 필터 등이 개발되어 고온상태에서도 고효율 집진이 가능하게 되었다(花田 1988, 富澤 1988). 본 연구에서는 새로운 소재들에 대한 여과성능의 검토에 앞서 기존의 상온용 필터와 온도상승에 따른 필터에 대한 전체효과를 검토하였다. 구체적인 방법으로는 온도변화에 따른 각종 조건하에서 필터 표면에 전계를 형성함으로써 여과속도 및 분진부하의 변화에 따른 미세분진의 제거 효율과 압력손실의 변화를 비교고찰하였다.

2. 정전형여과집진방식의 차압감소메카니즘

기계적여과에 있어서 중력에서 확산, 확산에서 중력, 관성에서 중력으로 이동하는 과도영역에 있어서는 입자의 포집효율은 최소가 된다. 따라서 높은 포집효율을 얻기 위해서는 세가지중의 어느 하나의 메카니즘이 지배적으로 되는 조건하에서 운전할 필요가 있다. 정전기는 이와같은 기계적인 여과의 결점을 극복하기 위해 이용되며 입자나 섬유간에 작용하는 정전기력을 적극적으로 이용하여 기계적 여과에서 달성하기 어려운 낮은 압력손실과

높은 포집효율을 목적으로 한다. 입자를 하전시키거나 여포주변에 전계를 인가함으로써 여재표면에 덴드라이트 구조(dendrite structure)로 인한 압력손실의 감소와 여재의 가교형성을 촉진시켜 분진의 통과량을 감소시킬 수 있다. Felt 여포를 사용한 여과집진에서의 문제점은 입자가 여재의 공극을 통과하거나 여재의 틈에 붙어 탈진시 여재가 케이지쪽으로 수축할 때 깨끗한 반대방향으로 빠져나오거나 미세입자는 scrim지역을 통과해 여포에 영구히 머물면서 탈진되지도 않고 여재의 눈막현상을 초래하여 높은 압력손실을 일으킨다. 따라서 고전압을 이용하여 방전선과 여포사이에 강한 전계를 형성시키면 이는 하부로부터 들어오는 가스중에서 백의 선단에서 입자만을 선택 포집하게 되고 이는 백 선단더스트층 표면의 바늘상의 형태로 인해 여재내로 미세입자의 침투에 기인하는 눈막힘을 감소시키고 동시에 집진효율을 향상시킨다. 또한 백의 상단에는 분진이 거의 쌓이지 않아 그 결과 하부로부터 들어오는 가스는 상부로 빠져나가게 되는 형태가 되기 때문에 압력손실은 훨씬 줄어들게 된다. 입자를 예비하전 했을때 깨끗한 여포는 하전된 입자의 정전기력에 의해 분극화되고 하전된 입자와 분극화된 여재 사이에 작용하는 쿨롱력에 의해 유도되어 필터표면에 포집된다. 집진된 입자는 같은 극성의 전하에 의한 쿨롱력으로 서로 반발하지만 입자에 적절한 질량과 기류의 관성력에 비해 쿨롱력이 훨씬 작으므로 입자는 여재상에 바늘상의 형태로 표면에 부착된다. 따라서 필터의 표면은 불규칙하고 느슨하며 여과표면적이 상대적으로 커지게 되어 압력손실이 줄어들게 된다.

3. 실험

3. 1 실험장치의 구성

본 실험에 사용된 실험장치는 열풍발생장치, 분진발생장치, 고전압발생장치, 탈진장치, 흡입식 송풍기로 구성된다. 그림 1은 실험장치의 전체 흐름도를 나타내었다. 분진발생장치는 정량의 분진을 주입하기 위해 screw feeding 방식으로 정량주입하였으며, 고전압발생장치는 단과정류의 직류 고전압을 발생시켜 0~15KV 범위로 가변시켰다(한재균, 1992). 파이러트 여과포 실험장치는 그림 2에 나타난 바와 같다. 실험에 사용된 분진은 부산시 소재 감천화력발전소의 전기집진기 1, 2호기 호퍼에서 채취한 한국산 무연탄의 fly ash이다. 실험용 먼지의 입경분포는 0.5~10 μ m이며 Dp_{50} 은 7.0 μ m이다. 실험에 사용된 여과포는 내열성이 뛰어난 방향족 polyamid수지인 NOMEX로서 우수한 내열특성과

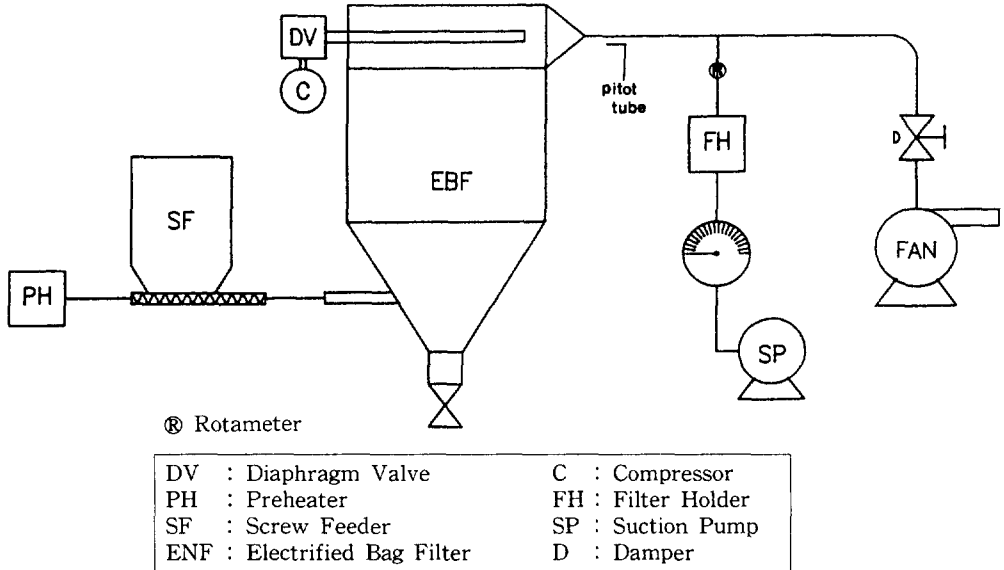
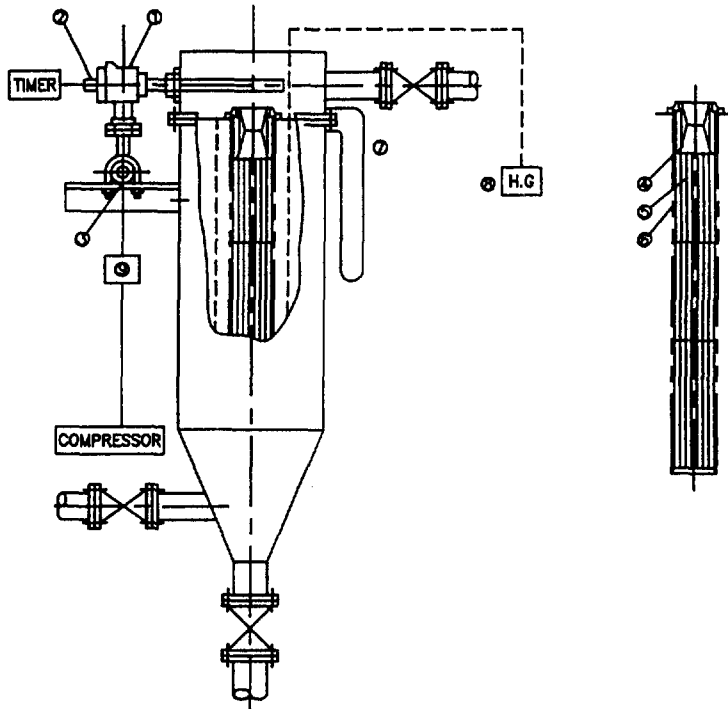


Fig. 1. Experimental apparatus for fundamental performance test of Electrified Bag Filter.



- | | | | | |
|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 1 : Diaphragm Valve | 2 : Pilot valve | 3 : Air header | 4 : Venturi | 5 : Retainer |
| 6 : Fabric filter | 7 : Manometer | 8 : High voltage generator | 9 : Filter regulator & mist separator | |

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Physical characteristics of test fabric.

Area Weight (g/m ²)	Thickness (at 22g/cm ²) mm	Air Permeability (m/min)	Breaking Strength (kg/5cm)	Elongation (5.0kg/5cm)	Bursting Strength (kg/m ²)
500	2.0	170	150	3	60

방염특성을 지니고 있으며 200~400°F의 높은 온도범위에서도 연속운전이 가능한 특성을 지니고 있다. Table 1은 실험용 여과포의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

3. 2 실험방법 및 실험조건

온도변화에 따른 동일한 조건에서 각각의 여과속도와 분진부하에 대해 전계형성의 유무에 따른 압력손실의 경시변화 및 입도분포의 변화에 실험의 중점을 두었다. 압력손실의 측정은 여과집진기의 전후에 U자 마노메타로서 측정하였으며, 유입부와 유출부 사이에서의 벽면의 정압차로 나타난 수두치를 취하였다. 풍량결정을 위한 가스의 유속측정은 피토크관(피토크계수 0.83)에 연결된 경사마노메타(Dwyer No. 400)로 측정된 값으로 구하였다. 전계형성의 유무에 따른 미세입자에 대한 제거의 효과를 검토하기 위해 출구쪽에서 유리섬유필터를 사용하여 등속흡인샘플링 하였으며 SEM 사진으로 미세입자의 제거효율 및 제거된 입자의 입도분포를 조사하였다. Table 2에는 본 실험의 조건 및 실험장치의 사양을 나타내었다.

Table 2. Specifications of Electrified Bag Filter and experimental conditions.

Bag dimension	1000mm(L)×150mm(φ)
Dust feeding rate	1~4g/m ³
Filtering velocity	3~5cm/sec
Electric field strength	0~2kV/cm
Temperature condition	20~240°C
Fabric	NOMEX

4. 결과 및 고찰

4. 1 정전형여과집진장치의 압력손실

정전형여과집진방식과 기존의 일반여과집진방식의 압력손실을 비교하기 위해 PDR(Pressure Drop Ratio)이란 개념으로 압력손실의 변화를 비교하였으며 이것은 운전시작점에서 한번의 탈진 주기까지의 압력손실변화를 전계형성의 유무에 따라 비교하는 것으로 다음의 식(1)과 같이 정의된다.

$$PDR = \frac{(\Delta P_f - \Delta P_f)_{ESFF}}{(\Delta P_f - \Delta P_f)_{Control}} \quad (1)$$

ΔP_f : 탈진직전의 압손

ΔP_f : 탈진후 잔류압손

Control : 정전기력이 존재하지 않는 상태

이상적인 탈진 주기에 있어 압력손실은 시간에 따라 직선적으로 증가하고 아래와 같은 식(2)로 달리 표현할 수 있다.

$$PDR = \frac{(K_2)_{ESFF}}{(K_2)_{Control}} \quad (2)$$

여기서 K_2 는 분진의 비저항(Specific cake resistance)이고 많은 연구자들에 의해 K_2 factor에 대한 관계식이 나타내어지는데 여과집진장치의 운전과 성능에 대한 변수는 탈진방식과 여과포의 종류에 따라 대단히 넓은 범위를 차지하고 있으며 정전여과에서도 동일하게 적용되며 Donovan(1982) 등에 의하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_2 = \frac{\Delta P_f - \Delta P_f}{C_i V^2 T_f} \quad (3)$$

C_i : 유입분진농도(kg/m³)

V : 여과속도(m/min)

T_f : 운전시간(min)

이며 이 식(3)을 다시 고쳐 쓰면

$$K_2 = \frac{(\Delta P_f - \Delta P_f)A}{mT V} \quad (4)$$

A : 총 여과면적(m²)

mT : 운전시 부가된 더스트량(kg)

으로 나타낼 수 있다. 본 실험에서는 온도변화에 대한 전계형성의 유무에 따른 여과속도를 1.8~3.0m/min로 변화시켜 이 범위에 있어서 분진부하에 따른 측정에서 계산된 K_2 을 여과속도 1.8m/min 일때 그림 3에 나타내었다. K_2 값은 분진부하가 증가함에 따라 감소하는

경향을 나타내었고 전계를 형성시켰을때 전체적으로 그 값이 감소함을 나타내었다. K_2 값은 여과속도가 1.8 m/min일때 각각 분진부하 1g/m³일때 상온에서는 3.61, 2.58(PDR:0.71), 150°C에서는 15.47, 8.51 (PDR:0.55) 로 나타나 분진부하가 낮을수록 K_2 값은 전계형성유무에 따라 큰 차이를 나타내었다. 분진부하 2g/m³일때 상온에서는 2.32, 1.93(PDR:0.83), 150°C에서는 8.51, 5.67(PDR:0.67), 분진부하 3g/m³일때 상온에서는 3.87, 3.46(PDR:0.89), 150°C에서는 6.87, 4.30(PDR:0.63), 분진부하 4g/m³일때 상온에서는 2.13, 2.00(PDR:0.94), 150°C에서는 6.70, 4.12(PDR:0.61)의 값을 나타내고 있다. 또한 PDR 값으로 보면 상온에서는 분진부하 1g/m³ 일때 PDR값은 0.71로서 낮은 여과속도, 적은 분진부하시 상온에서도 전계의 형성으로 인해 우수한 압력손실 감소율을 보였으며, 150°C에서는 분진부하가 1g/m³ 일때 PDR값이 0.55로 전계의 형성으로 인하여 K_2 의 값이 반정도까지 줄어드는 것을 알 수 있다. 동일한 조건하에서 여과속도를 변화시켜 전계형성유무에 따른 K_2 값을 구한 결과 분진부하가 1g/m³ 일때 각각 상온과 150°C에서 5.91, 5.48(2.4m/min 상온), 11.53, 7.21 (2.4m/min, 150°C), 29, 5.01(3.0m/min 상온), 9.28, 7.05(3.0 m/min, 150°C)로 나타나 분진부하가 낮고 여과속도가 낮을 수록 K_2 의 변화의 폭이 크며, 이것은 전계형성의 효과가 크게 영향을 주고 있음을 의미한다.

L.S.Hovis 등은 K_2 값에 대해 동일한 경향을 보고하고 있으며, 전계강도가 높을수록 K_2 의 값이 상당히 감소함을 나타내었고, 그 값은 대략 예비전장치 사용

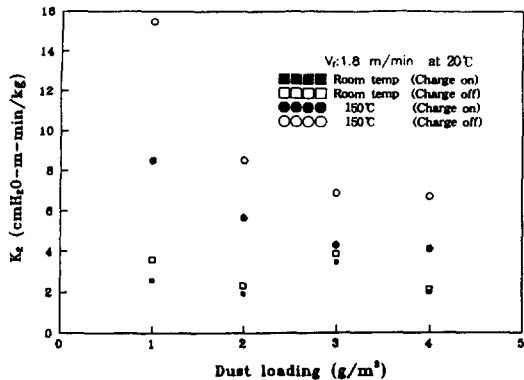


Fig. 3. K_2 values vs. dust loading with gas temperature.

시 전압이 0~20kV 일때 9.2~2.9 cm of H₂O/m/min kg/m²

의 범위에 있음을 보고하고 있다.

4. 2 온도변화에 따른 압력손실 변화특성

상온에서 전계형성 유무에 의한 각각의 여과속도 및 분진부하에 따른 압력손실의 변화 특성을 조사하였으며, 여과속도 1.8m/min 일때 시간경과에 따른 압력손실변화를 그림 4에 나타내었다. 여과속도 1.8m/min 일때 분진부하 1, 2, 3, 4g/m³에 따라 압력손실감소율은 각각 17.2, 11.4, 8.3, 7.1%로 나타났으며, 그림 4에는 나타나 있지 않으나 동일하게 실험한 결과, 여과속도

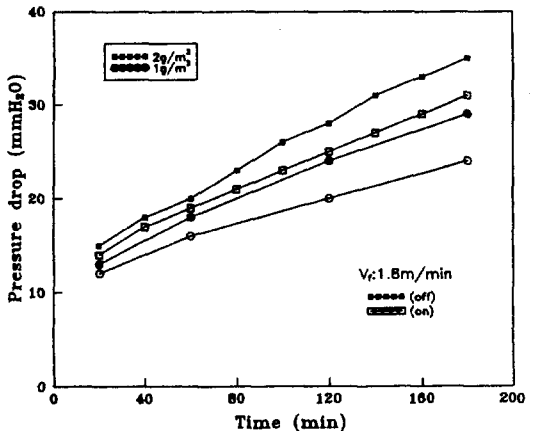
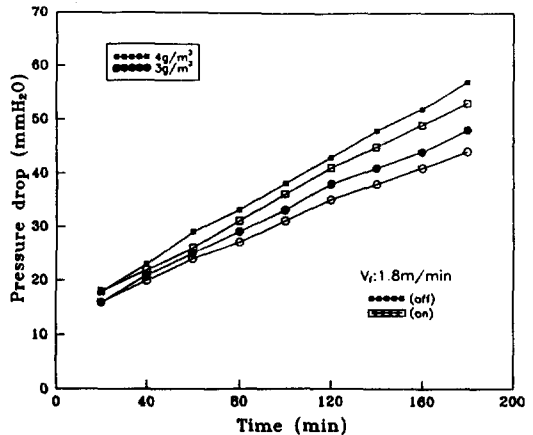


Fig. 4. Pressure drop vs. time for different dust loadings(Room temperature).

2.4m/min 일때 7.7, 10.0, 11.1, 9.5% 로, 여과 속도 3.0m/min 일때는 감소율이 각각 7.9, 4.6, 6.6, 10.6%로 나타나 전체적으로 상온에서의 전계형성의 형성으로 인한 압력손실의 감소율은 그다지 높지 않았으나 여과속도 및 분진부하가 낮았을때 압력손실 감소율이 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

150°C에서 전계형성유무에 의한 각각의 여과속도 및 분진부하에 따른 압력손실의 변화 특성을 여과속도 1.8 m/min(온도 상승 전 20°C 기준)일때 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 분진부하를 각각 상온에서 1, 2, 3, 4 g/m³(150°C로 환산하면 0.65, 1.29, 1.94, 2.58 g/m³)로 각각 33.8, 25.6, 30.0, 32.3% 의 압력손

실 감소율을 나타내었고, 동일하게 여과속도 2.4 m/min(온도 상승 전 20°C 기준)일때도 30.0, 33.3, 25.7, 18.1%로 나타났으며, 여과속도 3.0m/min(온도 상승 전 20°C 기준) 일때의 압력손실 감소율은 각각 18.5, 27.6, 14.4, 10.1%의 값을 나타냈다. 전체적으로 상온일때에 비해 150°C 일때의 압력손실이 전계형성에 따라 여과압력손실을 크게 변화함을 알 수 있다. 여과속도에 따른 압력손실의 변화에서는 상온과 동일하게 여과속도가 낮고 분진부하가 낮을수록 전계형성유무에 따른 압력손실의 변화는 크게 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

4. 3 입자의 포집특성

여과집진의 전계형성유무에 따라 압력손실이 변화함은 더스트층의 부착형태 등에 영향이 있음을 말하며, 이는 입자의 포집특성에 크게 변화를 줄 수 있다.

입자의 제거효율은 전계형성의 유무에 관계없이 99.9% 이상의 높은 효율을 나타내었으며, 중량으로 표시된 입자의 포집효율은 큰 의미를 가지지 못하게 된다.

따라서, 전계형성의 영향을 고찰하기 위해 출구쪽에서의 통과된 미세입자의 입도분포를 조사하여 그 영향을 살펴보았다. 출구측에서 유리섬유필터로서 샘플링한 결과 전계형성의 유무에 따른 입자의 농도는 상온 및 150°C에서 모두 목측으로도 뚜렷한 확인이 가능하였으며, 사진 1은 상온에서 대표적인 입자의 상태를 촬영한것으로 전계형성으로 갓수면에서 뚜렷한 감소를 나타냄을 알 수 있었다.

SEM사진에서 확인된 입자를 현미경 측정법중 Ferret's diameter를 이용하여 평균입경을 측정하였으며 전계형성 유무에 따른 샘플링된 양측 입자의 평균입경을 보면 그림 6에 나타난 바와 같다. 그림 6에 나타난바와 같이 여과속도 1.8m/min 일때에는 상온 및 150°C에

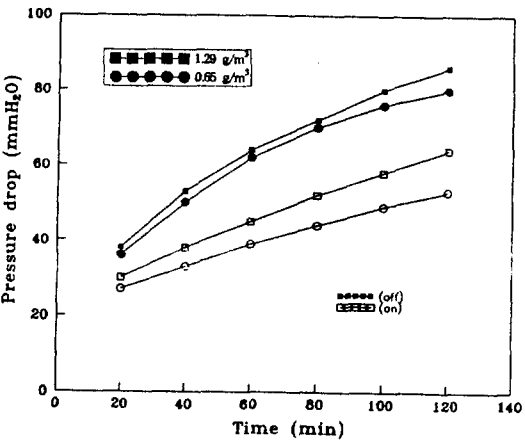
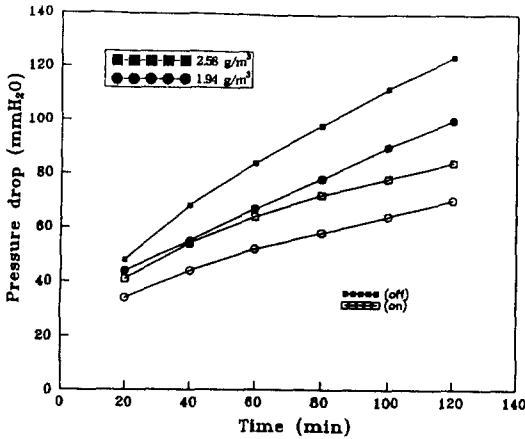


Fig. 5. Pressure drop vs. time for different dust loadings(gas temp. 150°C) (Vf:1.8m/min at 20°C).

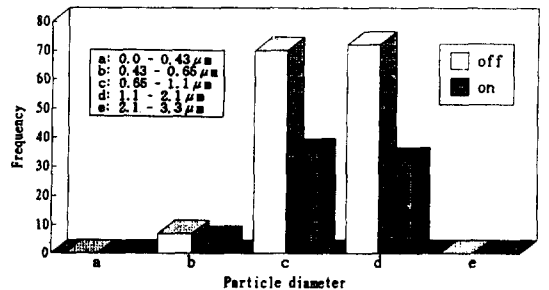


Fig. 6. Histogram of frequency vs. particle size (1.8m/min, 4g/m³, Room temperature).

서 모두 1.1 μm 전후의 값을 나타내었고 최빈발생입경의 범위는 1.1~2.1 μm 를 나타냈으며 전계형성시 갯수 분포는 크게 감소함을 알 수 있다. 그리고 여과속도가 2.4, 3.0m/min 일때에도 동일하게 갯수가 크게 감소하는 경향을 보였으며, 최대빈도는 여과속도 2.4m/min에서 0.65~1.1 μm , 3.0m/min에서 3.3~4.7 μm 의 범위를 나타내었다.

따라서, 상온 및 150°C에서 전계의 형성으로 인한 샘플링된 입자의 평균입경은 별 차이가 없으나 상온 및 150°C에서 양쪽 모두 제거된 입자의 수에 있어서는 전계의 형성으로 2배 이상의 차이를 보였다. 따라서 이 실험 결과에서도 나타났듯이 전기적인 하드웨어의 추가만으로도 높은 여과속도에서 낮은압력손실을 유지하면서 미세입자의 제거효율이 높은 운전이 가능함을 알 수 있었다. 이것은 기존의 여과집진장치를 소형화할 수 있으며, 처리가스를 증가시키면서도 높은 입자제거효율을 보장할 수 있음을 말하며 점차 강화되는 분진의 배출허용기준과 설비의 유지 관리면에서 불매 현상적용의 가능성이 높은 것으로 보인다.

5. 결 론

본 실험에서의 정전효과를 이용한 각각의 여과속도 및 분진부하에 따른 온도변화에 대한 백필터의 압력손실 및 미세분진의 제거효율에 대한 실험결과는 아래와 같다.

1. 전계를 형성하였을때 상온에서의 압력손실 감소율은 7~18% 전후로 나타났으며 본 실험의 영역에서 각각의 여과속도 및 분진부하의 조건중 가장 낮은 유속인 1.8m/min에서 분진부하는 1g/m³에서 가장 높은 감소율을 나타내었다.

2. 150°C에서의 압력손실 감소율은 10~35% 전후로 나타났으며 역시 본실험영역중 가장낮은 여과속도 1.8m/min(20°C 기준), 분진부하 1g/m³(150°C에서 환산, 0.65g/m³)에서 가장 높은 감소율을 나타내었으며 대부분 25% 전후의 높은 감소율을 나타내었다.

3. 전계형성 유무에 따른 분진의 포집효율에 있어서, 샘플링 결과, 전계형성시에 입자의 제거효율이 향상되는 것으로 나타났으며, 갯수분포비교결과 입자의 수에 있어서도 상온 및 150°C에서 모두 2배 이상의 제거율을 나타내었다.

참 고 문 헌

과학기술처(1989), Pulse-jet식 여과포 집진장치의 여

과포 성능시험 연구(I)

- 박영옥(1991) 산업공정에서 여과포 집진기술의 적용과 운전동향 및 기술적 과제, 한국산업기술 연구원, 집진장치 환경오염방지 대책실무, 11-12.
- 한재균(1992)연소장치를 이용한 소형전기집진장치의 포집효율 및 입경분포 특성에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문.
- 富澤成元(1988) 都市ごみ燃焼排ガス集じんシステムと濾過式集じん機の適用性, 公害と対策, 24(2), 23-28.
- 田森行男(1988) 濾過集じん技術の最近の動向, 公害と対策, 24(2), 3-10.
- 井伊谷鋼一(1980) 集塵工学, 日刊工業新聞社.
- 花田剛, 野口嘉一(1988) 石炭燃焼ボイラーにおけるばいじんの特性と濾過式集じん 技術の進歩, 公害と対策, 24(2), 11-16.
- Calvert S., H.M, Englund(1984) Handbook of Air Pollution Technology, A Wiley-Interscience Publication.
- Davies, C.N.(1966) Aerosol Science, Academic press.
- Donovan R.P., L.S. Hovis, G.H. Ramsey, D.S. Ensor(1982) Electric Field-Enhanced Fabric Filtration of Electrically Charged Fly ash, Aerosol Science and Technology, 1, 385-399.
- Frederick, E.R.(1980) Fibers, Electrostatics, and Filtration: A Review of the New Technology, JAPCA, 30(4), 426-433.
- Greiner, G.P., Furlong, D.A., VanOsdell D.W., L.S. Hovis(1981) Electrostatic stimulation of fabric filtration, JAPCA, 31(10), 1125-1131.
- Humphries W., Madden J.J., Miceli M.(1984) The effect of particle precharging on the performance of a fabric filter collecting lead smelter dust, Aerosol Science and Technology, 381-395.
- Ohtsuka K., M. Shimoda(1986) Mechanism of fabric filtration by electrostatic augmentation, Journal of Electrostatics, 18, 93-102.
- Viner A.S., Greiner G.P., Hovis L.S.(1988) Advanced Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration; Performance and Economics, JAPCA, 38(12), 1573-1582.