

## 내열성여과포의 개발 및 기초성능 규명

박영옥 · 구철오 · 임정환 · 김홍룡 · 손재익 · 이영우\*

한국에너지기술연구소 에너지환경연구단  
충남대학교 공과대학 화학공학과\*

### Development and Characterization of High Temperature Filter

Young Ok Park, Cheol Oh Koo, Jeong Hwan Lim, Hong Ryong Kim, Jae Ek Son  
and Young Woo Rhee\*

Energy and Environment Research Department, KIER  
Department of Chemical Engineering, Chungnam National University\*

#### 요 약

산업용 직물여과포의 운전에서 발견되는 다양한 문제점들을 해결하기 위한 일환으로 내열성여과포를 개발하여 성능을 규명하였다. 국내 산업체에서 배출되는 대표적인 네 종류의 먼지들, 즉 제철공정의 코크먼지, 시멘트 제조업체의 시멘트 먼지, 유동층 연소로의 비산회재, 그리고 폐플라스틱 소각로의 연소재에 대하여 여과포의 성능을 시험하였다. 내열성여과포의 물리화학적 특성은 평균 세공흐름압력 및 기포점 세공지름, 평균흐름 세공지름, 세공크기분포, SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 분위기에서의 물성변화의 항목으로 평가되었다. 또한, 벤치규모의 필터시험장치에서 직물여과포에 대한 압력손실, 먼지 통과율, 여과포 성능 평가지수를 조사하였다. 본 연구에서 개발된 직물여과포는 양호한 물리화학적 필터 특성을 지니고 있으며 전형적인 산업체 먼지를 처리하는데 적합하였다.

**Abstract**— A high temperature fabric filter was developed and characterized in order to solve the various problems encountered in the operation of industrial fabric filters. Four kinds of dusts generated in the typical domestic industry were used for its characterization, coke dust from a steel manufacturing process, cement dust from a cement manufacturing process, fly ash from a fluidized-bed combustor, and incinerator ash from a waste plastics incinerator. The physical and chemical properties of the high temperature fabric filter were analyzed in terms of mean flow pore pressure, bubble point pore diameter, mean flow pore diameter, pore size distribution, and the changes in tensile strength and initial elastic modulus under SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> atmospheres. Pressure drop, dust penetration, and figure of merit for the fabric filter were also investigated in a bench-scale filter testing unit. The fabric filter developed in this study had good physical and chemical filter properties and showed a very promising applicability to typical industrial dusts treatments.

#### 1. 서 론

산업이 발전함에 따라 산업활동에 수반되어 발생하는 대기오염물질의 배출량이 증가하였고 종류도 다양해지고 있다. 특히, 산업의 발전과 더불어 대기중으로 배출되는 먼지의 배출량이 증가하여 대기중에 부유하는 입자상물질은 더욱더 증가할 것으로 예상되어 심각

한 대기오염문제로 대두되고 있다<sup>1,2)</sup>. 산업활동, 수송, 난방 및 발전시설에서 배출되는 총부유먼지(total suspended particles)량을 년도별로 보면 산업, 수송 및 발전설비 분야에서 발생하는 입자상물질의 배출량은 해가 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있으나 난방 분야에서 배출되는 입자상물질의 양은 해마다 감소하는 경향을 보이고 있다. 난방분야에서 매년 입자상물질의 배

출량이 감소하는 추세를 나타내는 것은 사무실용, 주택용 등의 연료로 사용되었던 종래의 석탄이나 중유의 사용이 억제되고 가스상 연료인 청정연료로 전환되었기 때문이다. 1993년의 경우 산업활동에서 배출되는 입자상물질의 양은 약 148천톤/년, 발전설비에서 배출되는 입자상물질의 양은 약 132천톤/년이었으나, 1994년의 경우 산업활동에서 배출되는 입자상물질의 양은 약 151천톤/년, 발전설비에서 배출되는 입자상물질의 양은 약 165천톤/년으로 증가 추세를 보였다<sup>4)</sup>. 이와 같은 증가 추세는 산업체의 증가로 인한 대기오염물질 배출량 증가, 집진시설의 노후, 효율적인 관리능력 부족 및 집진장치 고유의 성능 유지가 불가능하기 때문인 것으로 추정된다.

업종별 산업공정에서 배출되는 기체에는 먼지입자와 함께 가스상 유해물질이 다량 포함되어 있다. 그 중에서도 황산화물과 질소산화물이 산성가스로서는 대표적이며, 화석연료의 연소 배기가스에서는 상당한 농도를 나타낸다. 산성가스는 가스상태 뿐 아니라 먼지에 흡착되거나 수분과 응집하여 산성미스트의 상태로도 배출되기 때문에 산성가스나 수분이 많이 함유되어 있는 경우에는 여과포에 치명적인 손상을 초래하여 여과포의 수명이 짧아지는 원인이 된다. 수분이나 유분이 많이 포함된 경우는 여과시 분진과 응집되어 탈진시 여과포와 분리되지 않고 여과포의 공극을 막는 현상이 발생하기 때문에 압력손실이 증가하여 운전을 어렵게 한다.

또한 최근 세계환경문제와 관련하여 그린라운드와 탄소세 등이 제기되면서 고온 배기가스를 재이용하기 위한 고온집진이 절실하게 되었다. 이제까지의 고온집진은 중력침강, 사이클론과 같은 1차 집진시설과 전기집진기, 세정식집진기 등의 2차 집진시설이 주를 이루고 있다. 이들 모두 고온집진이 가능하나 1차 집진시설과 전기집진기는 효율이 다소 떨어지며, 2차 집진시설 중 세정식집진은 장치 부식에 의한 수명 단축, 운전유지비 상승, 수질오염 등의 2차오염 가능성 및 배기가스 온도의 저하 등과 같은 단점이 있다. 따라서 고온이나 화학적 부식성가스에 견딜 수 있는 합성섬유 여과포를 개발하여 여과포 집진장치를 고온집진에 도입하려는 시도가 이루어지고 있으며, 시판되고 있는 고온여과포는 약 250°C 정도까지의 조업에 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 국내 산업체 업종 중에서 먼지 배출량이 가장 많은 산업공정에 적합한 고효율 산업용 국산 여과포를 개발하기 위해 먼저 국내 산업체에 적용되고 있는 기존 여과포의 문제점을 분석하고, 적용 산업공정에서 배출되는 먼지 특성을 분석 검토하였다. 또한 분석 자료를 토대로 실험용 여과포 제조 장치를 이용, 실험용

내열성 고온사여과포를 제조하였으며 제조된 고온사여과포에 대해 물리화학적 특성시험 및 여과포성능 기초시험을 수행하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 여과포의 물성특성

개발된 여과포의 산업체 적용 가능성을 확인하기 위하여 온도 및 산성가스에 의한 여과포의 섬유물리학적 특성과 환경노출시 여과포의 물리적인 성질인 인장강도, 파열강도, 초기탄성계수 등의 물성변화를 관찰하였다. 또한 개발 여과포의 고온 및 산성분위기에서의 물성변화를 관찰하기 위하여 원형 파이렉스 유리관을 반응기로 사용하였으며, 외부에 전열선을 감아 반응기를 가열하여 온도를 일정하게 유지시킨 후 고농도의 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 가스를 반응기내에 주입하여 산성가스와 온도에 의한 여과포의 물성 경시변화를 관찰하였다. 사용된 가스의 농도는 10,000 ppm, 유량은 50 ml/min이며 약 30분간 주입한 후 입·출구를 닫은 상태에서 일정 시간까지 유지시켰다. 반응기는 직경 4 cm, 길이 60 cm로 직경이 작아 여과포를 동심원형태로 말아서 넣었기 때문에 내부와 외부의 온도에 차이가 있었으나, 직경이 작은 관계로 ±10°C 이내로 온도유지가 가능하였다.

### 2-2. 여과포의 기초 성능 측정

#### 2-2-1. 실험여과포

기초성능 측정실험에 사용된 여과포는 국내 여과포 제조업체인 W에서 직조된 고온사 여과포(High Temperature Fabric; polyimide)로서 물리적 특성을 Table 1에 정리하였다. 실험여과포의 직조형태는 needle felt이며 침(needle)을 사용하여 기포와 섬유, 또는 섬유만을 felt상으로 성형시킨 것이다. 일반적으로 여과포의 강도를 유지하기 위해 성글게 짜여진 심(芯)이 되는 기포(基

Table 1. Physical characteristics of test fabrics.

Materials	Polyimide	
Woven type	Needle Felt	
Mean flow pore diameter (μm)	22.3	
Mean flow pore pressure (psi)	0.415	
Basin fabric	Plain weave	
Apparent density, g/m <sup>3</sup>	0.24	
Air permeability, cc/cm <sup>2</sup> sec	16	
Finish	Singed	
Tensile force	Length, kg	183
	Width, kg	167
Tenacity, g/denier	4.3	
Weight, g/m <sup>2</sup>	545.0	
Porosity	74	

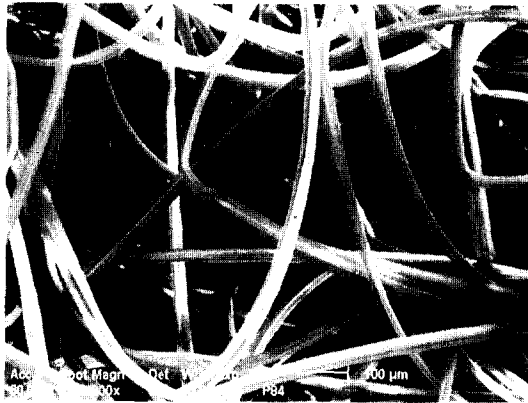


Fig. 1. SEM photograph of high temperature fabric filter.

布)의 양면으로 직조된 밀도가 균일한 섬유층(web)을 올려놓고 갈고리가 달린 침으로 기포와 섬유를 서로 얽히게 하여 직조하는 방식이다. Needle felt의 구조는 비교적 섬유밀도가 작은 섬유층을 침에 의해서 기계적으로 서로 엉키어 놓은 것으로서 평면적으로 보면 단일섬유를 무작위로 엉켜 펼쳐져 있으며, 두께방향의 단면에 대해서는 비교적 평면을 따른 단일섬유와 침의 가시에 의해 평면에 대해 어떤 각도(대개의 경우 90°)로 이동된 단일섬유가 복잡하게 얽혀 있다<sup>8)</sup>.

여과포 표면에 형성된 먼지층의 유리(遊離)를 좋게

할 목적으로 표면의 잔털을 제거하고 매끈하게 하기 위해 표면을 gas burner로 태우는 처리(singed)를 했다. 실험여과포 직조형태 및 단일섬유의 형상을 전자현미경(scanning electron microscope)으로 배율 200배로 확대하여 Fig. 1에 나타냈다. 고온사 여과포의 단일섬유 형상은 단면으로 보면 Y형상을 갖고 있으며, 단일섬유의 직경은 약 17 μm 정도로 추정되며, 내부에 굵은 단섬유(직경이 약 45 μm 정도)를 갖고 있다.

2-2-2. 실험용 먼지

실험용먼지는 제철, 제강, 시멘트제조, 열공급시설, 및 폐기물 소각공정 등 4개 업종을 선정하여 각 공정의 여과포집진장치에서 포집된 먼지이다. 제철, 제강업과 시멘트제조업은 현실적으로 먼지배출이 다른 업종에 비해 많다는 점을 고려하여 선정하였고, 열공급시설은 석탄 화력 발전소에 고효율 여과포 집진기술 적용과 이에 적합한 고효율 여과포개발을 목적으로 선정하였으며, 폐기물 소각시설은 폐기물 소각시 발생되는 유해기체, 미량의 중금속 및 먼지의 동시제거 기술개발과 향후 수율을 고려하여 선정하였다.

제철·제강업종의 coke dust는 국내에서 가장 규모가 큰 제철공장을 방문하여 coke plant의 주요공정인 CDQ(coke dry quenching)공정에 설치된 여과포집진장치에 포집된 먼지(coke dust)를 채취했으며, 시멘트 제조업에서 가장 규모가 큰 시멘트회사를 방문하여 크링커 분쇄공정에 설치된 여과포집진장치에 포집된 먼지

Table 2. Characteristics of the test dusts tested<sup>8, 9)</sup>.

Item	Dust	Coke dust	Cement dust	Fly ash	Incineration ash
Proximate analysis (%)					
Moisture		0.2	0.1	3.3	11.5
Volatile matters		2.6	35.2	6.2	32.8
Ashes		13.9	64.7	56.4	20.6
Fixed carbon		83.3	0.01	34.1	35.1
Calorific analysis (kcal/kg)					
		6,820	-	3,060	-
Density (g/m <sup>3</sup> )					
True density		1.9~2.3	3.01~3.25	2.1~2.4	2.0~3.0
Bulke density		0.12~0.4	0.94~1.28	0.82~1.3	0.35~0.6
Ash analysis (%)					
SiO <sub>2</sub>		5.86	10.88	33.30	2.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2.06	3.15	16.91	1.63
TiO <sub>2</sub>		0.06	0.21	0.44	5.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.69	1.92	2.03	0.79
CaO		1.00	44.93	1.33	0.13
MgO		-	2.45	2.40	0.39
Na <sub>2</sub> O		0.08	0.09	0.23	0.04
K <sub>2</sub> O		0.15	0.66	0.28	1.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.14	0.15	0.34	1.66
MnO		0.01	0.12	0.02	0.02

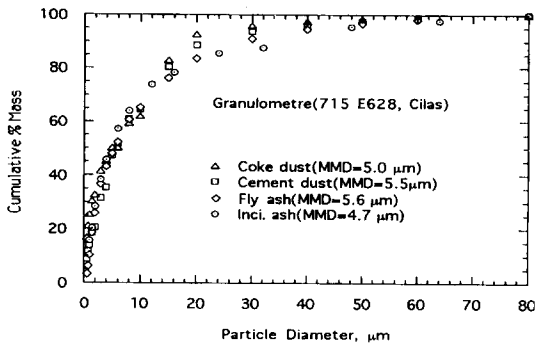


Fig. 2. Particle size distribution of test dusts.

(cement dust)를 채취했다. 열공급시설에서는 유연탄과 제지슬러지를 혼소시키는 유동층연소 보일러를 설치하여 열원으로 사용하는 제지공장하여 방문하여 보일러 배가스 처리용으로 설치된 여과포집진장치에서 포집된 회(fly ash)를 채취했으며, 폐기물소각로에서는 폐합성수지를 건류하여 열원으로 사용하는 합성수지 제조공장을 방문하여 소각로 배가스 처리용으로 설치된 여과포집진장치에서 포집된 회(incinerator ash)를 채취하였다. 업종별로 채취한 먼지의 공업분석 및 성분분석을 Table 2에 나타냈다.

각 공정에서 채취된 먼지는 서로 다른 입자크기분포를 갖고 있기 때문에 그 자체로는 실험용먼지로 사용할 수 없으며, 먼지 종류별 먼지포집특성을 고찰하기 위해서는 실험용먼지의 입자크기분포를 일정하게 유지할 필

요가 있다. 일본공업규격(JIS) Z 8901에서는 고성능집진장치 및 제진장치의 시험용 먼지로 9종에서 12종까지 활석, 비산회(fly ash), 관동지방의 양토(壤土; loam), carbon black들에 대해 별도의 평균입자크기를 규정하고 있다<sup>7)</sup>. 본 연구에 사용된 실험용먼지는 일본공업규격 시험용 먼지 제10종인 비산회재의 평균입자크기인 4.8~5.7 μm에 준하여 채취된 4종의 먼지를 진동mill에서 5~7시간 분쇄하여 일정한 입자크기분포의 실험용 먼지를 제조하였다. 실험용 먼지로 제조된 4종류 먼지의 입자크기 분포를 Fig. 2에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 실험용 먼지의 평균입자크기 범위는 4.7~5.6 μm로 4종류 모두 거의 유사한 입자크기분포를 가지고 있다.

2-2-3. 실험장치

Fig. 3에 bench scale 실험장치의 흐름도를 나타냈다. 실험장치는 실험용먼지 공급 및 분산부분, 실험먼지 확산실 및 실험여과포 설치부분, 실험용먼지 포집부분 및 공기유량 조절 및 흡인부분으로 구성되어 있다. 실험용 먼지 정량공급은 주사기형 먼지정량공급기(A; syringe type dust feeder)에 의해서 정량되어 혼합형 먼지분산기(B; mixer type dust disperser)에서 분산된 후 확산실(diffusion chamber)로 유입된다. 먼지분산기에서는 실험용먼지의 분산효과를 일정하게 유지하기 위해 impeller의 회전수를 일정하게 하였다. 확산실은 실험용먼지의 확산상태 및 거동을 관찰할 수 있도록 투명한 pyrex glass로 제작하였으며, 상단 확산실(C)의 길이 510 mm, 하단의 길이 240 mm로 총길이가 760 mm이다. 실험여

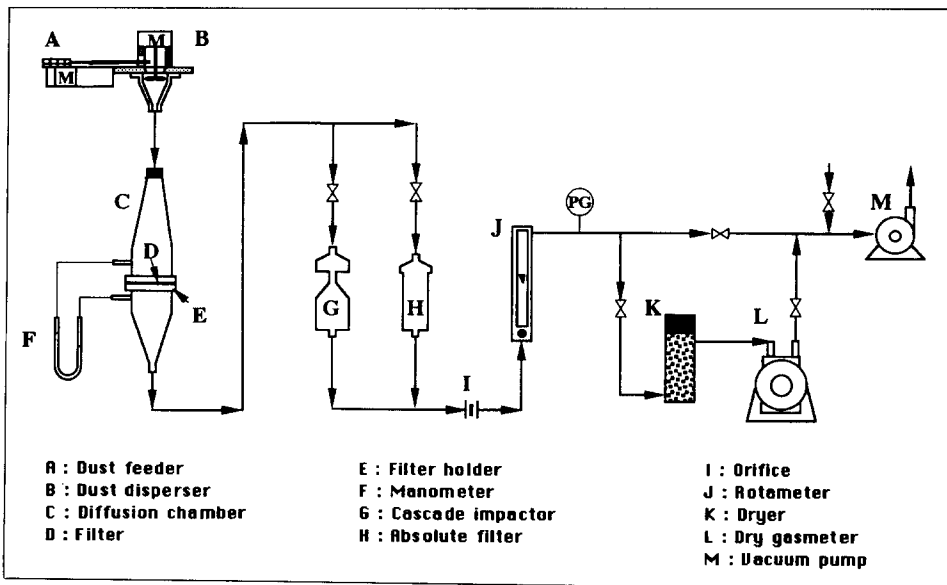


Fig. 3. Schematic diagram of bench scale filter testing system.

과포는 확산실 상단과 하단사이에 설치하도록 되어 있으며, 실험여과포(D) 하단에는 실험여과포가 압력손실 증가로 인한 변형을 방지하기 위해 100 mesh stainless steel screen을 설치하였다.

실험시 외부공기 유입을 차단하기 위해 각단과 실험 여과포 및 stainless steel screen 사이에 두께 5 mm 실리콘 고무패킹을 삽입시켜 실험여과포 체결기(E; test fabric holder)에 의해 조일 수 있도록 제작했다. 먼지부하의 변화와 여과속도의 변화에 따른 실험여과포의 압력손실은 확산실 상단과 하단의 압력측정공(pressure tap)과 연결된 경사manometer(F)를 설치하여 미세한 압력변동도 판독할 수 있도록 했다. 확산실에 유입된 실험용먼지와 실험용 여과포를 통과한 먼지는 원통여지(H; absolute filter, Whatman, silica glass microfibre thimbles)에서 완전히 포집되고 확산실에서 분산된 실험용먼지의 입자크기와 실험여과포를 통과한 먼지의 입자크기는 cascade impactor(G; Andersen Mark III particle sizing stack sampler)에 의해 측정한다. 실험용 여과포에서 먼지부하의 증가로 인한 유량변화를 방지하기 위해 유량계(J; Matheson Model 605) 전단에 압력변화 완충용 오리개형 오리피스(I; throttle type orifice)를 설치하였다. 같은 조건의 실험 중 실험용 여과포를 통과한 총유량을 측정하기 위해 건식 기체유량계(L; dry gasmeter)를 설치했으며, 최종단에 진공pump(M; TSI Model 3033)를 설치하여 실험용 여과포를 통과하는 유량을 조절하였다.

2-2-4. 실험방법

실험용먼지는 고온건조기(convecting oven)에서 110°C로 12시간 동안 가열건조한 후 상온건조기(desiccator) 내에서 실험실내의 온도와 같도록 24시간 냉각하여 사용했다. 실험실내와 실험장치내로 유지되는 공기의 온도측정은 디지털 온도계(Yokogawa 2455 series digital thermometer)를 이용하였다. 실험여과포는 실험실내에서 24시간 동안 방치하여 실험실내의 온도 및 습도조건과 같도록 하여 무게를 측정한 후 사용했으며, 원통여지는 고온건조기에서 110°C의 일정한 온도에서 1시간 동안 가열건조한 후 상온건조기내에 항상 방치해 놓고 필요할 때 꺼내어 무게를 분석용천칭(Satorious analytical balance, R200D)으로 측정된 후 사용했다.

실험용먼지는 먼지정량공급기의 syringe내로 충전시켜 실험조건에 적합한 먼지량을 조절하여 먼지분산기에 공급시킨 후 분산시켜 확산실내로 유입시켰다. 먼지분산기에서 분산된 실험용먼지는 분산으로 인해 발생하는 정전기를 중화시키기 위해 중화기(Kr-85 Aerosol Neutralizer, TSI, Model 3012)에 통과 시킨 후 확산실로 유입하였다. 확산실내로 유입된 먼지의 농도와 실험여과포를 통과한 먼지의 농도는 원통여지에 포집된 먼지의

Table 3. Experimental conditions.

Experimental variables	Experimental ranges
Face velocity	1.1~2.5 m/min
Test dust feed rate	46~100 mg/min
Upstream dust concentration	10 g/m <sup>3</sup>
Dust loading	0~600 g/ft <sup>2</sup>

무게로 환산하였으며, 실험여과포에 퇴적된 먼지의 무게는 분석용천칭으로 측정된 후 청정여과포의 무게와의 차로써 계산하였다. 먼지부하와 여과속도 변화에 따른 압력손실은 경사manometer로 측정하며, 여과포를 통과하는 유량은 유량계로 조절했다. 실험여과포의 형상과 여과포내부에서 먼지입자의 포집상태는 전자현미경(Philips 505 XL-30)을 사용하여 관찰했다.

실험범위를 Table 3에 나타냈다.

3. 결과 및 분석

3-1. 기존 여과포집진장치의 문제점

국내 산업체에 설치되어 운전하고 있는 여과포집진장치의 성능 측정 및 문제점을 파악하기 위해 산업체 현장을 직접 방문하여 측정하였으며, 또한 현장의 여과포 집진장치의 운전상태 점검자료와 운전자와 대화를 통한 여러가지 문제점을 수집 분석하였다.

유동층 석탄 연소 공정에 설치하여 운전중인 연속 충격기류 탈진방식 여과포집진장치의 성능 측정 및 점검 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 이 장치에 적용된 여과포는 유리섬유 여과포로서 직포이었다.
- ② 탈진조작이 정상적으로 수행되지 않아 압력손실은 7.0 mmH<sub>2</sub>O/min 속도로 증가하여 정상적인 연속 운전이 불가능하였다.
- ③ 운전시간이 50일 경과 후 출구먼지농도는 110~135 mg/Sm<sup>3</sup> 정도로 높게 유지되었다.
- ④ 운전시간이 70일 경과 후에는 대부분의 먼지입자가 여과포를 통과하여 운전이 불가능하였다.
- ⑤ 이 장치에서 문제점은 탈진방법 및 조건에 적합한 여과포가 적용되지 않았고, 부대 장치의 구조 및 운전에서의 문제점도 많이 포함되어 있었다.

스토커 석탄 연소 공정에 설치하여 운전중인 연속 충격기류 탈진방식인 여과포집진장치의 성능 측정 및 점검 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 이 장치에 적용된 여과포는 유리섬유 여과포로서 직포이었다.
- ② 탈진조작은 정상적으로 수행되었으며 운전시간이 경과함에 따라 압력손실은 계속 감소하였으며, 75일 경

과 후의 압력손실은 40.0 mmH<sub>2</sub>O 정도로 유지되었다.

③ 출구먼지농도는 운전시간이 경과함에 따라 계속 증가하였으며, 75일 경과 후에는 380 mg/Sm<sup>3</sup>을 유지했다.

④ 여과포 설치 100일 경과 후 여과포는 파손되었으며, 파손 부분은 여과포 지지틀과의 접촉 부분 및 여과포의 하단 부분이었다.

⑤ 여과포의 파손 원인은 탈진방법 및 조건에 적합한 여과포가 사용되지 않았기 때문이며, 운전 조건과 장치 구조상의 문제도 여과포의 파손에 크게 기여하였다.

Coke 먼지 포집 공정에 설치하여 운전중에 있는 연속 충격기류 탈진방식인 여과포집진장치의 성능 측정 및 점검 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 이 장치에 적용된 여과포는 합성섬유 부직포 여과포이었다.

② 탈진조작시에만 여과포 먼지가 통과되는 현상이 stack에서 육안으로 확인되었다.

③ 포집 먼지는 비중이 낮고 미세하여 탈진효율이 극히 낮아 탈진 강도를 강하게 적용하기 때문에 여과포의 조직이 변형되어 먼지 통과가 심하게 발생되었다.

④ 여과포의 표면에 포집 먼지의 집착력을 약화시키는 처리를 하지 않은 여과포를 사용하였다.

동광석 제련 공정에 설치하여 운전중에 있는 연속 충격기류 탈진방식인 여과포집진장치의 성능 측정 및 점검 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 이 장치에 적용된 여과포는 aromatic polyamide계 섬유이다.

② 산화공정에서 산 노점에 의한 여과포의 파손이 빈번히 발생되었다.

③ 공정에 적합한 여과포 재질이 적용되지 않았고, 장치의 운전조건을 처리기체의 특성과 적합하게 유지하지 않았다.

### 3-2. 개발여과포의 물리화학적 특성<sup>10)</sup>

#### 3-2-1. 평균흐름세공압력 및 기포점 세공지름

개발여과포의 물성중의 하나인 세공율, 두께, 세공지름을 측정하기 위해 Automated Permporometer(APP-200-AX)를 사용하였다. Fig. 4에 압축공기의 압력변화에 따른 여과포유량 변화를 나타냈다. 이 그림은 평균흐름세공압력(mean flow pore pressure)과 평균유량(mean flow rate)을 결정하기 위해 나타낸 것으로 건공기흐름(dry flow)은 건조상태의 여과포에서 압축공기가 통과하는 유량이고, 습공기흐름(wet flow)은 여과포 시료를 에틸알콜에 적신상태에서 압축공기가 통과하는 유량을 말한다. 습공기유량(Wet flow rate)은 압축공기의 압력을 서서히 증가시키면 여과포 시료에 묻은 에틸알콜이 휘발되어 어느 정도의 압력에서는 건공기유량(dry flow

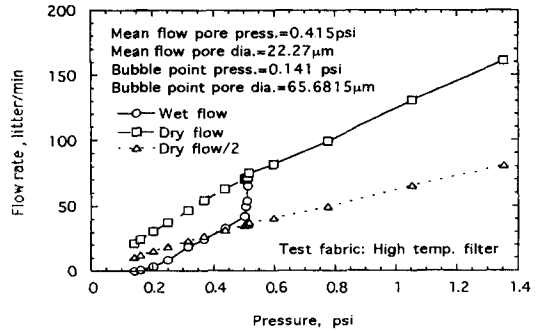


Fig. 4. Flow rate versus pressure for high temperature fabric filter.

rate)과 같게 된다. 습공기유량곡선과 건공기유량의 1/2 값의 곡선이 서로 만나는 점의 압력을 평균흐름세공압력이라 하며, 이때의 유량을 평균유량이라 한다. 기포점 압력(bubble point pressure)은 알콜에 적신 여과포에 압축공기를 통과시킬 때 여과포 세공에서 가장 먼저 기포가 생길 때의 압력을 말하며 이때의 기포직경을 기포점 세공지름(bubble point pore diameter)이라고 한다. Fig. 4에서 구한 평균흐름세공압력은 0.415psi, 기포점압력은 0.141 psi, 기포점세공지름은 65.68 µm이다.

#### 3-2-2. 평균흐름세공지름

Fig. 5에 적산여과흐름(cumulative filter flow)과 세공지름과의 관계곡선을 나타냈다. 여기서 적산여과흐름은 습공기유량에 건공기유량으로 나눈값의 백분율로 나타낸 값을 말하고 세공지름은 압축공기 압력의 변화에 따라 측정된 기포지름을 말한다. Figure에서 적산여과흐름이 50%가 되는 점에서의 세공지름이 평균흐름세공지름(mean flow pore diameter)이다. Fig. 5에서 구한 평균흐름세공지름은 22.28 µm이다.

#### 3-2-3. 세공크기분포

Fig. 6에 평균세공지름(average pore diameter)크기에

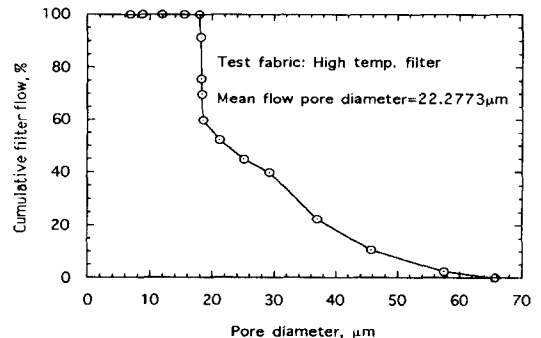


Fig. 5. Cumulative filter flow versus pore diameter for high temperature fabric filter.

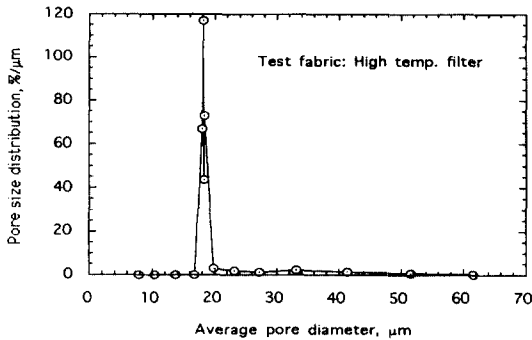


Fig. 6. Pore size distribution versus average pore diameter for high temperature fabric filter.

다른 서공크기분포(pore size distribution)곡선을 나타냈다. 여기서 세공크기분포는 여과흐름백분율(filter flow%)에 최종세공지름에서 다음단계의 세공지름을 뺀 값을 나눈 값을 말하며 여과흐름(filter flow)은 습공기유량에 전공기유량을 나눈 값을 말한다. 평균세공지름은 최종 세공지름에서 다음단계 세공지름을 뺀 값을 말한다. Fig. 6에서 구한 고온사여과포의 세공은 대부분 17~20 μm의 범위에 분포되어 있음을 알 수 있다.

3-2-4. SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 분위기에서의 물성변화

Table 4에 정리한 바와 같이 SO<sub>2</sub> 분위기하에서 150°C의 경우 인장강도는 노출시간에 관계없이 초기측정값의 95% 정도로 감소하였으며, 초기탄성계수도 노출시간에 관계없이 95% 정도로 감소하였다. 250°C의 경우 인장강도는 초기측정값의 노출시간에 관계없이 95% 정도로 감소하여 150°C와 비슷한 값을 나타냈으며, 초기탄성계수는 노출시간에 관계없이 110% 정도로 비슷한 값을 나타냈다.

NO<sub>2</sub> 분위기에서는 150°C의 경우 인장강도는 노출시간에 관계없이 초기측정값의 95% 정도를 나타냈으나,

Table 4. Effects of acidic atmosphere on filter's properties.

Experimental Conditions		Test items	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Initial elastic modulus (kg/mm <sup>2</sup> )
Initial value			1.750	4.065
SO <sub>2</sub> (10000 ppm)	150°C	24 hr	1.692	3.785
		72 hr	1.621	3.821
	250°C	24 hr	1.653	4.497
		72 hr	1.632	4.556
NO <sub>2</sub> (10000 ppm)	150°C	24 hr	1.692	3.972
		72 hr	1.668	4.003
	250°C	24 hr	1.687	4.457
		72 hr	1.632	4.584

초기탄성계수는 24시간 노출 후에 95%, 74시간 노출시에는 100% 정도를 나타냈다. 250°C의 경우 인장강도는 노출시간에 관계없이 초기측정값의 95%를 나타냈고, 초기탄성계수도 110% 정도로 노출시간에 관계없이 비슷한 값을 나타냈다.

3-3. 실험 여과포의 특성

3-3-1. 압력손실

먼지부하에 따른 압력손실 변화경향을 여과속도 1.1 m/min 및 2.5 m/min인 경우에 대해 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 보면 먼지 종류별 압력손실은 먼지부하의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 증가기울기는 먼지의 종류에 따라 다르게 나타났다. 먼지부하의 증가에 따른 압력손실은 코크스 먼지와 유연탄 연소회 경우 약 200 g/m<sup>2</sup> 까지의 먼지부하에서는 급격히 증가했으나 그 이상의 먼지부하에서는 거의 선형으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 시멘트 먼지와 폐기물 소각회의 경우 먼지부하의 증가에 따라 계속 증가하는 경향을 나타냈다. 먼지부하의 먼지부하 증가에 대한 압력손실 증가 비는 코크스 먼지와 유연탄 연소회가 거의 비슷한 값으로 나타났으며, 여과속도에 관계없이 시멘트 먼지는 가장 큰 값을 나타냈다. 폐기물 소각회는 여과속도 조건에 따라 차이가 있지만, 여과속도가 빠른 조건에서는 먼지부

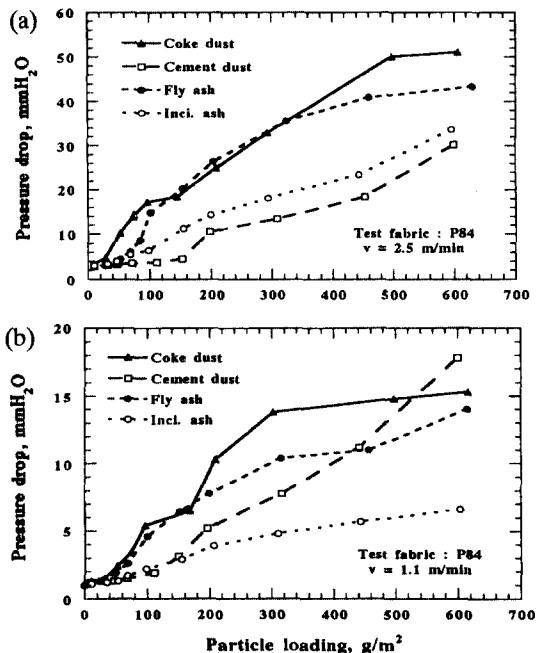


Fig. 7. Pressure drop versus particle loading for test dusts with high temperature fabric filter. (a) face velocity of 1.1 m/min, (b) face velocity of 2.5 m/min.

하의 증가에 따른 압력손실 증가 비는 시멘트 먼지의 경우와 비슷하였고, 코크스 먼지와 유연탄 연소회의 경우에 비해서는 크게 나타났다.

먼지부하가 낮은 범위에서 먼지부하의 증가에 따라 압력손실이 급격하게 증가하는 현상은 여과포에 의한 먼지포집의 초기는 여과포 내부에서 포집된 먼지입자군에 의해 불규칙하게 먼지층이 형성되는 단계(zone of dust cake repair)로서, 이 단계의 먼지층 공극율은 불규칙하다<sup>13)</sup>. 그러나 여과시간이 경과함에 따라 여과포 내부에서 먼지층이 완전히 형성되고 난 후 여과포 표면에서 먼지층의 균일하게 형성되며, 이 단계를 균일먼지층 형성(deposition of homogeneous dust cake)단계라고 한다<sup>12, 13)</sup>. 이 단계에서부터 먼지층의 공극율은 먼지층의 두께가 증가함에 따라 완만하게 선형으로 증가한다. 따라서 먼지층과 여과포를 통과하는 유체의 저항은 먼지층이 형성되는 초기단계에서 어느 정도의 두께까지는 급격히 증가하다가 어느 정도 여과시간이 경과하면 선형으로 증가한다. 고온사 여과포에 의한 코크스 먼지와 유연탄 연소회의 포집에서 먼지층 형성 초기 단계는 먼지부하가 약 200 g/m<sup>2</sup> 까지 정도로 추정할 수 있고, 이 이상의 먼지부하에서 부터는 균일 먼지층 형성단계로 추정할 수 있다. 여과속도가 1.1 m/min(Fig.7 (a)) 조건에서 시멘트 먼지와 폐기물 소각회의 압력손실 변화 경향이 다른 경향을 나타냈으나 여과속도가 2.5 m/min(Fig.7 (b)) 조건에서는 거의 비슷한 변화 경향을 나타냈다. 이와 같이 먼지 종류에 따라 여과속도에 따라 먼지부하의 증가에 따른 압력손실 변화 경향이 다르게 나타나는 것은 먼지의 물리적 특성 및 형상이 서로 다르기 때문에 여과포 내부와 여과포 표면에서 형성되는 먼지층의 구조가 서로 다르기 때문이다<sup>14)</sup>.

3-3-2. 먼지 통과율

먼지부하에 따른 먼지통과율 변화경향을 여과속도 1.1 m/min 및 2.5 m/min인 조건에 대해서 Fig. 8에 나타냈다. Figure에서 보는 바와 같이 먼지통과율은 먼지부하가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 먼지부하가 약 10 g/m<sup>2</sup> 정도 이하인 초기 먼지포집 조건에서 먼지통과율은 시멘트 먼지가 약 0.21 정도로 유연탄 연소회의 먼지통과율인 약 0.09에 비해 높은 것으로 나타났다. 먼지통과율이 일정하게 유지되는 먼지부하는 먼지의 종류에 관계없이 약 100 g/m<sup>2</sup> 이상으로 추정된다. 또한 일정하게 유지되는 먼지통과율은 폐기물 소각회가 다른 먼지종류에 비해 다소 낮은 값으로 유지되었다. 이와 같은 현상은 고온사가 특수한 단일섬유 형상으로 인해 먼지의 종류에 무관하게 먼지포집이 이루어지기 때문인 것으로 추정된다. 또한 폐기물 소각회가 다른 먼지에 비해 먼지부하의 증가에 따라 먼지통과율이 더

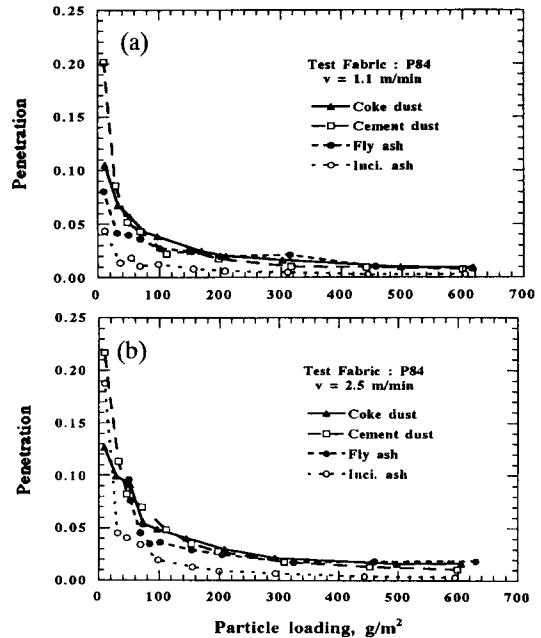


Fig. 8. Penetration versus particle loading for test dusts with high temperature fabric filter (a) face velocity of 1.1 m/min, (b) face velocity of 2.5 m/min.

급격하게 감소되고 다소 낮게 유지되는 것은 먼지포집 초기단계에서 단일섬유에 포집된 먼지입자들이 다른 먼지에 비해 응집효과가 커 가교형성(dendrate structure)이 빠르게 이루어짐으로 인해 유입되는 먼지입자 포집효과가 크기 때문이다. 이와 같은 현상은 여과포의 단일섬유에 먼지입자들이 포집되어 가교형성하는 과정을 먼지부하의 변화에 따라 전자현미경으로 확인하였다<sup>16)</sup>. 따라서 현장의 먼지배출공정에 고온사 여과포를 적용하고자 할 경우 99.9% 이상의 고효율 먼지포집성능을 유지하기 위해서는 여과포에 퇴적된 먼지층이 약 100~200 g/m<sup>2</sup> 정도 유지되도록 운전조건을 적용하여야 한다.

3-3-3. 여과포 성능 평가지수

여과포에 의한 먼지포집 조작에서는 먼지포집효율이 고효율로 유지되고 압력손실이 낮게 유지되는 운전이 가장 이상적인 운전조건이다. 이상적인 운전을 하기 위해서는 포집하고자 하는 먼지종류별 특성에 적합한 여과포 개발 또는 운전조건을 확립하기 위해서는 여과포 성능 평가지수에 의한 분석이 필요하다. 여과포 성능 평가지수는 다음과 같은 관계식을 이용해 구한다<sup>15, 16)</sup>.

$$q_f = \frac{\gamma}{\Delta P} = \frac{\ln(1/P_n)}{\Delta P}$$

여기서 q<sub>f</sub>는 여과포 성능 평가지수이고, γ는 여과포의



단위 두께에서의 먼지입자 포집율,  $t$ 는 여과포의 두께,  $\Delta P$ 는 압력손실이며,  $P_n$ 는 먼지통과율이다. 따라서 위의 식을 토대로 보면 주어진 조건에서 압력손실이 낮고 먼지 통과율이 낮은 여과포는 여과포 성능 평가지수가 높아 고성능 유지가 가능한 여과포로 평가할 수 있다.

먼지부하에 따른 여과포성능 지표 변화경향을 여과속도 1.1 m/min 및 2.5 m/min인 조건에 대해서 Fig. 9에 나타냈다. 먼지포집 초기조건인 먼지부하 범위에서는 여과포성능 지표가 갑자기 증가했다가 먼지부하가 증가함에 따라 급격히 감소한 후 일정하게 유지되는 경향을 나타냈다. 먼지포집 초기단계에서 여과포성능 지표가 높게 유지되는 먼지부하는 폐기물 소각회, 코크스 먼지 및 유연탄 연소회의 경우 약 40 g/m<sup>2</sup> 정도이며, 시멘트 먼지의 경우에는 여과속도 조건에 따라 다소 차이가 있지만 약 100 g/m<sup>2</sup> 정도였다. 여과포성능 지표가 일정하게 유지되는 먼지부하는 폐기물 소각회의 경우 약 300 g/m<sup>2</sup> 정도로 여과속도가 1.1 m/min에서는 약 0.42 L/mmH<sub>2</sub>O, 2.5 m/min 조건에서는 0.1 L/mmH<sub>2</sub>O였다. 코크스 먼지 및 유연탄 연소회의 경우에는 약 200 g/m<sup>2</sup> 정도로 여과속도 1.1 m/min에서는 약 0.15 L/mmH<sub>2</sub>O이고 2.5 m/min에서는 0.04 L/mmH<sub>2</sub>O이었다. 고온사 여과포의 여과포 성능지수는 폐기물 소각회 포집에서 가장 높은 값을 나타내고 있어 폐기물 소각회에 대한 여과포

집진기술 적용에서 고효율 유지가 가능하다는 것을 제시하고 있다.

#### 4. 결 론

고온사여과포는 폐기물 소각공정, 화학섬유 제조공정, 유리용해 공정 등의 고온여과 공정용과 먼지 특성상 여과포 표면에서 먼지층의 유리가 어려운 먼지포집용으로 적용하기 위해 개발되었으며 특성을 정리하면 다음과 같다.

1. 고온사여과포의 평균흐름세공압력은 0.415 psi이며, 기포점세공지름은 65.68  $\mu$ m로 측정되었고 평균세공흐름지름은 22.28  $\mu$ m로 측정되었다. 고온사여과포의 평균세공은 17~20  $\mu$ m 범위에 대부분 분포되어 있다.

2. 고온사여과포의 인장강도는 온도, 노출시간 및 가스종류에 관계없이 초기측정값의 95% 정도를 유지하였으며, 150°C 조건에서는 시간에 관계 없이 초기 탄성계수가 95% 정도로 감소하였다. 고온사 여과포는 약 250°C 이내의 공정에 적용이 가능하며, NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>가 포함된 배출가스의 처리에도 적용할 수 있다.

3. 압력손실은 여과속도와 먼지부하가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 먼지의 종류에 따른 압력손실 증가경향은 다음과 같다.

① 코크스 먼지의 경우 압력손실 증가 기울기가 가장 높게 나타났으며, 먼지부하가 300~400 g/m<sup>2</sup> 까지는 거의 직선적으로 증가하다가 급격히 감소하였다.

② 시멘트 먼지의 경우 압력손실 증가기울기가 다소 낮게 나타났으며, 먼지부하가 50~100 g/m<sup>2</sup> 까지는 거의 직선적으로 초기상태를 유지하다가 100 g/m<sup>2</sup>부터 급격히 증가하였다. 특히 여과속도가 2.5 m/min일 때는 폐기물 소각회와 비슷한 증가기울기를 보였으며, 압력손실값도 작게 나타났다.

③ 미분탄 연소회의 경우 압력손실 증가기울기가 다소 높게 나타났으며, 먼지부하가 250~300 g/m<sup>2</sup> 까지는 거의 직선적으로 증가하다가 300 g/m<sup>2</sup>부터 서서히 감소하였다.

④ 폐기물 소각회의 경우 압력손실 증가기울기가 가장 낮게 나타났으며, 먼지부하가 300 g/m<sup>2</sup> 까지는 거의 직선적으로 증가하였다.

4. 먼지통과율은 먼지부하가 50~100 g/m<sup>2</sup> 까지는 급격히 감소하며, 100~200 g/m<sup>2</sup>에서 안정상태로 되어 200~250 g/m<sup>2</sup> 이상에서는 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 먼지통과율이 일정하게 유지되는 먼지부하는 먼지의 종류에 따라 차이가 있으며, 코크스 먼지는 약 200~300 g/m<sup>2</sup>, 시멘트 먼지는 약 100~200 g/m<sup>2</sup>, 유연탄 연소회와 폐기물 소각회는 약 100 g/m<sup>2</sup> 정도였다.

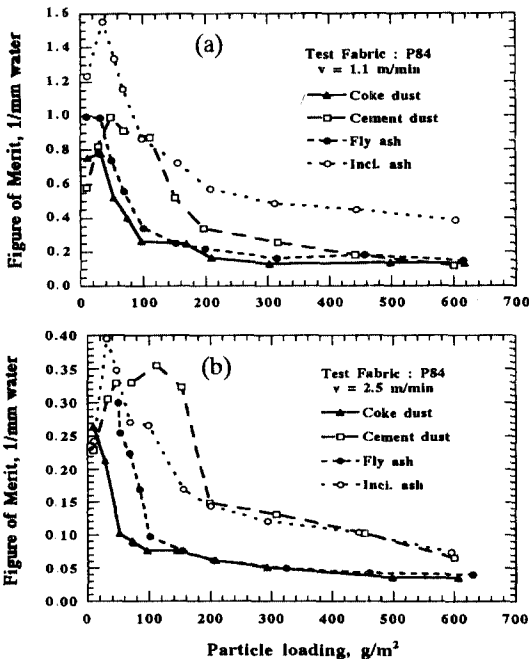


Fig. 9. Figure of merit versus particle loading for test dusts with high temperature fabric filter (a) face velocity of 1.1 m/min, (b) face velocity of 2.5 m/min.

5. 여과포성능 평가지표는 먼지포집 초기단계에서는 증가하다가 먼지부하가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타냈으며, 어느 정도의 먼지부하부터 거의 일정하게 유지되는 경향을 나타냈다. 먼지포집 초기단계에서 여과포성능 평가지표가 가장 높게 나타난 먼지부하는 시멘트 먼지의 경우  $100\sim 150 \text{ g/m}^2$  정도, 폐기물 소각회의 경우  $50 \text{ g/m}^2$  정도, 코크스 먼지와 유연탄 연소회가 약  $20\sim 40 \text{ g/m}^2$  정도 범위로 확인되었다.

## 사용기호

$\Delta P$ : 압력손실, mm water 혹은  $\text{mmH}_2\text{O}$

$P_n$ : 먼지통과율, -

$q_f$ : 여과포 성능 평가지수,  $1/\text{mm water}$   
혹은  $1/\text{mmH}_2\text{O}$

$t$ : 여과포의 두께, mm

$\gamma$ : 여과포의 단위 두께에서의 먼지입자 포집율,  
 $1/\text{mm}$

## 참고문헌

1. 김영성, 경남호, 선도원, 조성호, "에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발(II)", 한국동력자원연구소 연구보고서, KE-91049G, pp. 105 (1991).
2. 김영성, 경남호, 선도원, 조성호, 임정환, "에너지소비에 따른 대기 환경영향 평가기법 개발(III)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KE-92059G, pp. 110 (1992).
3. 강석호, "분진저감기술", 21세기 에너지 관련 기술 워크 발표자료, pp. 47-57 (1990).
4. 환경청, "한국환경연감", (1990, 1993, 1995).
5. "Bag Filter에 관하여", 보고서, 우다산업(주), pp. 36 (1994).
6. 尹伊谷 鋼, "Bag Filter Handbook", 日本粉體工業協會編, pp. 511 (1976).
7. JIS Z 8901, "試験用ダスト", 日本工業標準調査會 (1984).
8. 이재춘, 박영옥, 홍민선, "고온 여과재료 개발 및 실용화에 관한 연구", 환경처, 과학기술처, 환경공학기술개발사업 제2차년도 년차보고서, 9-1-2, pp. 280 (1994).
9. 홍민선, 이재춘, 박영옥, "고온 여과재료 개발 및 실용화에 관한 연구", 환경부, 환경공학기술개발사업 제1단계 단계보고서, 9-1-2, pp. 326 (1995).
10. M.J. Matteson and C. Orr, "Filtration Principles and Practices", Marcell Dekker, Inc., New York and Basel, pp. 736 (1987).
11. W.T. Davis, P.J. LaRosa and K.E. Noll, "The Generation and Evaluation of Fabric Filter Performance Curves from Pilot Plant Data", Filtration & Separation, pp. 555-560. November/December. (1976).
12. R. Dennis and H.A. Klemm, "A Model for Coal Fly Ash Filtration, journal of the Air Pollution Control Association", Vol. 29, No. 3, pp. 230-234 (1979).
13. 박영옥, 김영성, 손재익, 정태수, "유리섬유 여과포에 의한 석탄회 포집, I. 분진층 형성과 압력손실 특성", 화학공학, Vol. 29, No. 4, pp. 463-469. (1991).
14. T.R. Snyder, M.S. Robinson and P.V. Bush, "Characterization and Modification of Particulate Properties to Enhance Filtration Performance", Southern Research Institute, Quarterly Technical Progress Report, SRI-ENV-89-568-6666, pp. 31. (1989).
15. W.C. Hinds, "Aerosol Technology, Properties, Behavior, and measurement of Airborne Particles", John Wiley & Sons, New York, pp. 424 (1982).
16. 손재익, 박영옥, 김영성, 박영성, 구철오, 임정환, "산업용 고효율 여과포집기술 개발", 환경처, 과학기술처, 환경공학기술개발사업 제1차년도 년차보고서, 9-1-2, pp. 190 (1993).