

유리섬유 여과포에 의한 석탄회 포집

I. 분진층 형성과 압력손실 특성

박영옥 · 김영성 · 손재익 · 정태수*

한국동력자원연구소 폐자원연구실

*성균관대학교 화학공학과

(1991년 2월 20일 접수, 1991년 5월 20일 채택)

Coal Fly Ash Collection by Glass Fabrics

I. Growth of Dust Deposition and Pressure Drop Characteristics

Young-Ok Park, Young-Sung Ghim, Jae-Ek Son and Tai-Soo Chung*

Waste Resources Utilization Laboratory, Korea Institute of Energy and Resources,
P.O.Box 5 Deadeok Science Town, Taejeon 305-343, Korea

*Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received 20 February 1991; accepted 20 May 1991)

요 약

산업체 석탄연소 보일러 배가스의 분진처리를 위하여 고온용 유리섬유 여과포의 석탄회 포집특성을 조사하였다. 미국 Burlington사의 수입 여과포와 국내 강남산업에서 최근 개발한 국산 여과포를 대상으로 bench scale 시험장치에서 여과속도와 분진부하 등에 따른 분진층의 형성과정을 관찰하고 압력손실을 측정하였다. 수입여과포에 비하여 국산여과포의 공극형태가 다소 불완전하고 따라서 압력손실도 낮았으나 두 여과포의 상대적 차이는 분진부하가 증가할수록 감소하였다.

Abstract—Collections of coal fly ash by high-temperature glassfiber fabrics were tested aiming at control of particulates from industrial coal-fired boilers. Growth of dust deposition and pressure drop were investigated by varying filtration velocity and dust loading at a bench-scale test unit. Characteristics of fabrics recently developed by Kangnam Ind. Co. (KN-448) were compared by those of imported fabrics manufactured by Burlington Glass Fabrics Co. (BT-448). Pores of KN-448 were not so complete and uniform as those of BT-448 and pressure drop across KN-448 was lower than that across BT-448. However relative difference of pressure drops between the two fabrics was reduced with increasing dust loading.

1. 서 론

여과포 집진은 집진효율이 매우 높을 뿐 아니라 진식집진이라는 특징때문에 분진이 문제가 되는 산업현장에서는 방진수단으로써 언제나 우선적으로 고려되고 있다. 여과포 집진은 사용방법에 따라 작업장 등 대기

중의 부유분진을 대상으로 하는 저온용과 굴뚝에서 200℃가량의 배기가스와 함께 배출되는 오염원 분진을 처리하기 위한 고온용으로 나눌 수 있다. 저온용 여과포는 상당한 부분이 국산화되어 저렴한 가격에 활발히 이용되고 있으나 고온용은 전량을 수입에 의존하고 있어 사용업체나 사용을 준비 중인 업체에 많은 부담을 주고

있는 형편이다.

여과포 집진은 분진의 종류에 관계없이 아주 미립자에 이르기까지 기존에 사용되고 있는 어떠한 집진기술보다 높은 집진효율을 나타내는 우수한 집진기술임에는 틀림없으나 그 핵심부분이 섬유를 이용한 포의 형태(fabric filter)로 이루어졌다는 점 때문에 활용이 까다로운 집진기술이기도 하다[1, 2]. 여과속도, 분진부하, 탈진조건의 설정 등에 유의하여야 하며 고온의 배가스를 처리하기 위한 고온용 여과포 집진에서는 유입가스의 온도도 언제나 점검하여야 한다. 설치 및 운전에서 이들 을 얼마나 잘 고려하였느냐를 나타내는 척도가 바로 여과포의 수명인데, 여과포 집진에서 여과포는 소모품이며 일정시간 간격으로 교체하여야 하기 때문이다. 국내 산업현장의 고온용 여과포의 수명은 3개월을 넘지 못하는 경우가 태반이며[3], 2-3년 심지어는 5년까지 여과포의 수명이 거론되고 있는 외국의 예들과는 큰 차이가 있다[4].

국내에서 고온에서의 분진처리가 문제가 되는 것은 주로 산업체 유연탄연소 보일러의 배가스처리 부분이다. 1980년대 초반부터 중반에 이르기까지 고유가시대를 지나며 국내 산업체에 유연탄 보일러들이 앞다투어 설치되었으나 가장 곤란을 겪은 어려움 중의 하나가 바로 석탄연소에 따른 분진배출이었다[5]. 1990년 초반 현재는 유가가 낮아 석탄사용이 다소 주춤한 상태이나 에너지의 수급구조가 취약한 우리나라로서 석탄은 언제나 준비하지 않으면 아니될 제 1, 최소한 제 2의 대체에너지이며, 이 경우 환경문제 그 중에서 분진문제는 가장 기본적으로 해결하여야 할 과제이다.

본 연구는 현재 국내 산업체 석탄연소 보일러에서 대표적으로 사용되고 있는 여과포의 하나인 수입 유리섬유 여과포와 이를 대체하기 위하여 국내에서 개발된 고온용 국산 유리섬유 여과포의 특성을 상온의 bench scale 성능시험장치에서 비교하여 분석하고자 한 것이다. 이를 통하여 여과속도 및 분진부하, 분진의 입도들에 따른 두 여과포의 압력손실과 집진효율 등 기초성능이 파악되며, 실제 석탄연소조건을 모사한 pilot plant에서는 탈진방식과 고온에서의 내구성 등 주로 운전유지에 관련된 사항들이 조사될 예정이다. 본 논문은 bench scale 성능시험의 첫번째 부분으로 각 시험여과포에서의 분진층 형성과정을 관찰하고 압력손실 특성을 살펴본다.

2. 실험

2-1. 시험여과포의 특성

수입여과포로는 미국 Burlington Glass Fabrics Co.의 Fabric #448을 사용하였으며 국내 개발품으로는 강남

Table 1. Physical characteristics of test fabrics

Physical characteristics	KN-448, domestic woven glass fabric	BT-448, imported woven glass fabric
Weave pattern	sateen	sateen
Air permeability(m ³ /min/m ² at 12.7 mmH ₂ O)	12.0	6.096-13.116
Finish	Teflon B*	Teflon B*
Tensile strength		
Warp (kg/25 mm)	136.0	136.2
Filling (kg/25 mm)	113.0	113.5
Mullen burst (kg/cm ²)	42.0	42.2
Weight (g/m ²)	550.0	581.0
Thickness (mm)	0.579	0.500
Fiber diameter (mm)	0.14	0.12
True density (g/cm ³)	2.2	2.2
Bulk density (g/cm ³)	0.95	1.552
Void fraction (-)	0.57	0.47
Media uniformity	Fair	Excellent

* Du Pont's formulation designed to lubricate glass fabric for gaseous filtration in corrosive or high temperature environments.

산업의 KN-448을 사용하였다. 국내 제품인 KN-448에 대하여 본 연구에서는 Burlington의 Fabric #448을 편의상 BT-448이라 지칭하였다. Table 1은 두 시험여과포의 물리적 성질을 비교한 것인데 국내 제품인 KN-448 역시 Burlington의 yarn을 원료로 동일한 주자식 직조(sateen weave)방식에 의하여 만들어진 것이나 물리적 성질이 약간씩 차이를 알 수 있다.

두 여과포의 섬유와 섬유사이 공극의 형태를 알아보기 위해 역광(substage lightening) 조건에서 광학현미경으로 40배 확대하여 시험여과포를 관찰하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 KN-448의 공극은 타원형이나, BT-448의 공극은 사각형과 비슷한 형태이며, 각 여과포의 공극내에는 가느다란 섬유 filament들이 서로 교차되어 있다. 전체적으로 BT-448의 짜임새가 KN-448에 비하여 촘촘하였을 뿐 아니라 보다 균일한 인상을 주었으며 Table 1에서 BT-448이 KN-448에 비하여 단위면적당 무게가 무겁고 겉보기 비중이 크며 공극율이 작은 원인으로 생각되었다.

2-2. 시험분진

시험분진에 관한 일본공업규격(JIS)[6]을 참조하여 제 10종 및 제 17종 분진의 입자 크기에 상응하는 시험분진을 석탄회로부터 제조하였다. 석탄회는 역시 일본공업규격[7]에 의하여 삼천포 화력발전소 전기집진장치의 포집회를 이용하였는데 포집회의 최대입자크기가

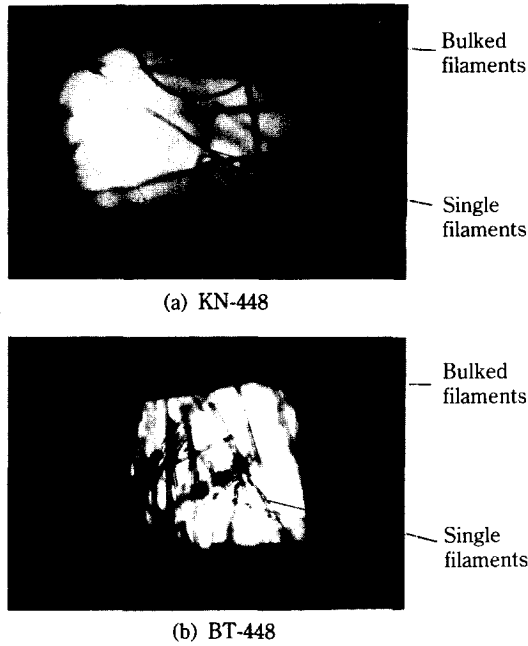


Fig. 1. Pores of test filter media (substage illumination, 40× magnification).

Table 2. Particle size distribution of test dusts

No. 10 test dust		No. 17 test dust	
Size, (μm)	(wt % less)	Size, (μm)	(wt % less)
48.0	100.0	12.0	100.0
32.0	99.9	8.0	90.2
24.0	99.9	6.0	83.1
16.0	96.9	4.0	68.3
8.0	70.9	3.0	61.5
6.0	54.2	2.0	42.6
4.0	28.1	1.5	23.1
3.0	18.0	1.0	15.3
1.5	9.5		
1.0	8.2		
Mass median diameter = 5.7 μm		Mass median diameter = 2.4 μm	

75 μm이고 평균입자크기(mass median diameter)는 11.3 μm이었다. Table 2는 본 연구에서 사용한 시험분진의 입도분포를 나타낸 것이다. 일본규격협회 규정 제 10종의 평균입도분포 범위는 4.8-5.7 μm인데 비하여 Table 2 No. 10의 평균입도는 5.7 μm이며 일본규격협회 규정 제 17종의 평균입도분포 범위는 1.9-2.4 μm인데 비하여 Table 2 No. 17의 평균입도는 2.4 μm이다. Fig. 2는 Table 2 No. 10 및 No. 17 시험분진을 전자현미경(scanning electron micrograph)으로 2020배 확대하여 관찰한 것

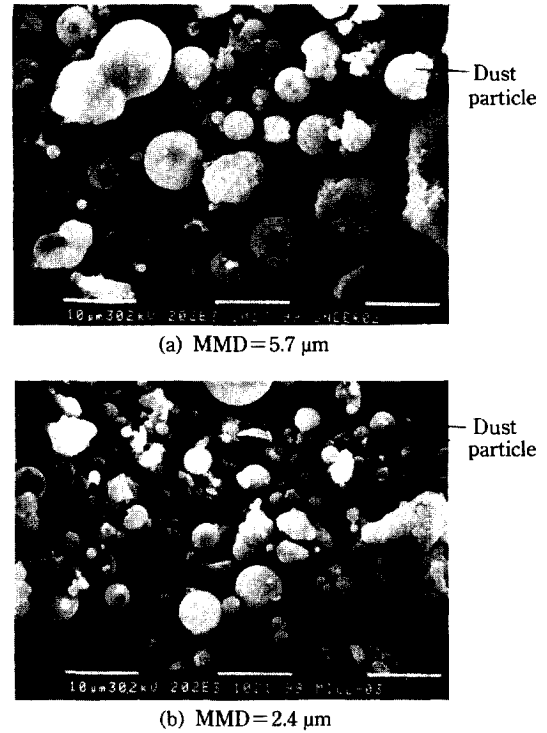


Fig. 2. Scanning electron microscopy of test dust (2020× magnification).

인데 그 형상들이 거의 완전한 구형임을 알 수 있다.

2-3. 실험

시험분진은 110℃로 유지되는 convection oven에서 1시간동안 가열 건조한 후 desiccator내에서 상온에 이르도록 충분한 시간동안 냉각하여 사용하였다. 시험여과포와 원통여지는 실험실내에서 1시간동안 방치하여 실험실내의 조건과 평형이 되도록 하였다. Fig. 3은 bench scale 여과포 성능시험장치의 흐름도를 보여준 것이다.

분진공급기(A)는 변속모터에 연결된 스크류의 회전 에 의하여 저장조(hopper)내의 시험분진을 정량으로 분진분산기(B)에 공급한다. 분진분산기는 시험분진의 분산을 양호하게 하기 위하여 mixer형을 택했고, impeller의 회전수를 항상 일정하게 함으로써 분산효과를 일정하게 유지하였다[8, 9]. 여기서 분산된 시험분진은 확산실(C)내로 유입된다. 시험분진 확산실은 내경이 72 mm이며 2단으로 구성되는데, 상단은 기울기 20°의 원통형으로서 시험분진이 충분히 확산될 수 있도록 길이를 510 mm로 제작했고 하단의 길이는 240 mm이었다. 시험분진 확산실은 실험시 시험분진의 확산 및 거동을 관찰할 수 있도록 투명한 pyrex 유리로 제작하였다.

시험여과포(D)는 확산실의 상하단 사이에 놓이게 되며

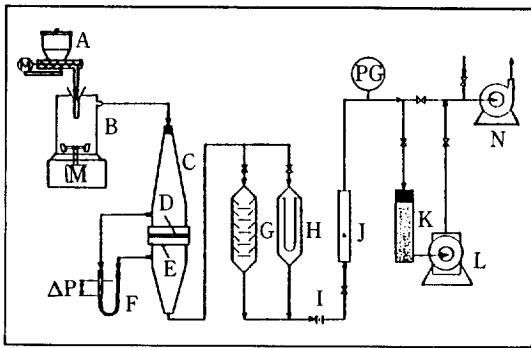
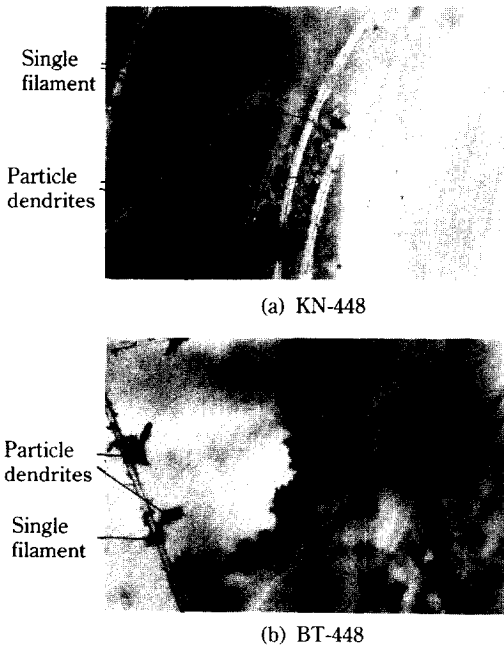


Fig. 3. Flow diagram of bench-scale fabric filter test unit.

- A : test dust feeder B : dust disperser
 C : diffusion chamber D : test fabric
 E : fabric holder F : U-type manometer
 G : cascade impactor H : absolute filter
 I : orifice J : rotameter
 K : dryer L : dry gasmeter
 M : motor N : vacuum pump
 PG : pressure gauge

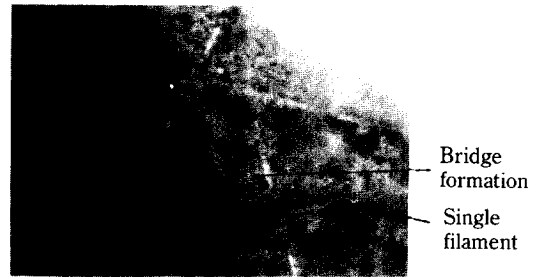


(a) KN-448

(b) BT-448

Fig. 4. Particle dendrites on a single filament ($V=0.86$ m/min, $W=1.00$ g/m²; 80× magnification).

압력손실 증가로 인한 여과포의 변형을 방지하기 위해 하단에 100 mesh stainless steel grid를 설치했다. 실험시 외부공기의 유입을 차단하기 위해 각단과 실험여과포, 스텐레스강망 사이에는 두께 5 mm인 실리콘 고



(a) KN-448



(b) BT-448

Fig. 5. Growing of particle dendrites and bridge formation ($V=0.86$ m/min, $W=2.55$ g/m²; 40× magnification).

무팩킹을 삽입시켜 holder(E)에 의해 완전히 조일 수 있도록 하였다. 분진부하 및 여과속도에 따른 실험여과포와 분진층의 압력손실은 상하단의 pressure tap에 연결된 U자 manometer(F)로써 측정하였다.

실험여과포를 통과한 시험분진은 원통여지(H; Whatman 88RH silica fiber)에 의해 완전히 포집되는데, 필요한 경우 cascade impactor(G; Andersen Mark III Particle Sizing Stack Sampler)에 의해 분진분산기에서 분산된 시험분진의 입도분포와 실험여과포를 통과한 시험분진의 입도분포를 측정하였다. 유량계(J; Matheson Model 605) 전단에는 압력변화 완충용 throttle-type orifice(I)를 설치하여 여과포의 압력손실 증가에도 불구하고 유량이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 건식유량계(L; dry gasmeter)로써 실험여과포를 통과하는 기체의 적산유량을 측정하였으며, 장치의 마지막에는 공기흡인용 진공펌프(N; TSI Model 3033)를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 분진층의 형성

분진부하가 각기 다른 조건에서 MMD 2.4 μm인 석탄회가 KN-448과 BT-448위에 포집된 모습을 광학현미경(Nikon HFX-II)으로 관찰하였다. Fig. 4는 여과속

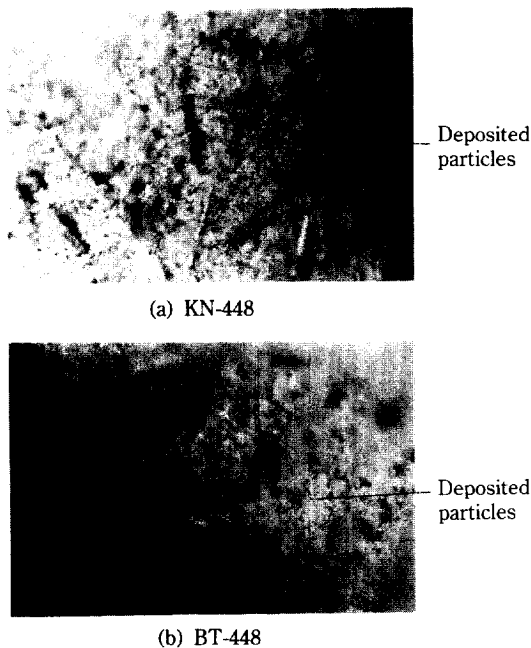


Fig. 6. Beginning of uniform deposition of particles on test fabrics ($V=4.31$ m/min, $W=27.05$ g/m²; $40\times$ magnification).

도 0.86 m/min와 분진부하 1.00 g/m² 조건에서 공극내 단일섬유 주위에 분진입자가 부착된 모습을 80 배로 확대하여 살펴본 것이다. 공극내에 서로 교차되고 있는 단일섬유 주위에 분진입자가 몇개씩 부착되어 응집된 입자들이 나뭇가지 모양(dendrite)으로 자라는 모습을 볼 수 있다. KN-448의 공극을 구성하는 단일섬유의 직경은 약 $6.67\ \mu\text{m}$, BT-448의 공극을 구성하는 단일섬유 직경은 약 $5.0\ \mu\text{m}$ 였으며 공극내 섬유형태가 아직 분명한 분진층이 채 형성되지 못한 상태이다.

Fig. 5는 여과속도 0.86 m/min와 분진부하가 2.55 g/m² 조건에서 여과포에 포집된 분진의 모습을 보여준 것이다. 각 여과포 공극내 단일섬유 주위를 분진입자들이 완전히 뒤덮었을 뿐 아니라 나뭇가지 모양으로 자란 분진응집군들이 섬유와 섬유사이에서 가교(bridge)를 형성하기 시작하고 있다. 이러한 모습이 분진층 형성의 2단계인데 Leith와 First[10]는 현재까지는 분진의 관성충돌(inertial impaction)과 직접차단(direct interception)이 분진포집의 주요 원리라고 설명하고 있다.

분진부하가 증가함에 따라 분진응집군들에 의한 가교는 더욱 발달하고 결국 여과포의 공극은 나뭇가지 모양의 분진층에 의하여 완전히 메워지게 된다. 분진들도 공극내 단일섬유보다는 퇴적된 분진층 자체에 의하여 포집되며 기체는 분진층내 분진입자와 입자사이를 통과

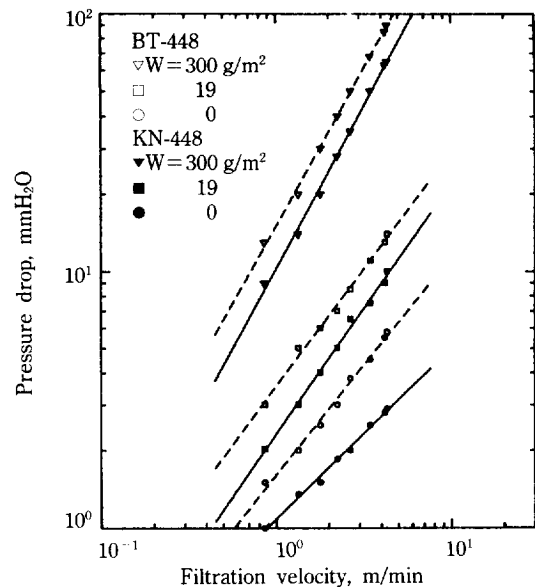


Fig. 7. Effect of filtration velocity on pressure drop across the two test fabrics at various dust loadings (MMD = $2.4\ \mu\text{m}$).

하게 되므로 기류의 통과저항은 현저하게 증가된다. Fig. 6은 여과속도 4.31 m/min와 분진부하 27.04 g/m² 조건을 살펴본 것인데 공극내 단일섬유의 모습을 어렵게 하는 하나 대부분의 공극이 분진층으로 메워져 있다. 분진부하가 $80-100$ g/m²에 이르면 여과포위에는 분진층이 균일한 형태가 되며 시간이 지남에 따라 분진층은 더욱 두터워진다. 연속공정에서 탈진은 균일 분진층이 충분히 발달된 후 실시되는데 대부분의 여과운전은 균일 분진층조건에서 이루어진다.

3-2. 압력손실

3-2-1. 여과속도의 영향

Fig. 7은 MMD가 $2.4\ \mu\text{m}$ 인 석탄회를 KN-448과 BT-448에 의하여 포집할 때 각 분진부하 조건에서 여과속도 증가에 따른 압력손실의 변화를 비교한 것이다. 여과속도가 커짐에 따라 분진부하가 증가함에 따라 압력손실은 당연히 커지며 log-log plot에서 압력손실은 여과속도에 따라 거의 선형으로 증가하였고 그 기울기는 분진부하가 높을수록 컸다. 즉, 분진부하가 높을수록 압력손실은 여과속도에 따라 보다 빠르게 증가하였다.

여과포 자체(clean fabric, $W=0$)의 압력손실은 KN-448의 경우 여과속도 $0.86-4.31$ m/min 범위에서 $1.0-3.0$ mm H₂O인데 반하여 BT-448은 $1.5-6.0$ mm H₂O로 KN-448에 비해 약 2배 정도 높을 뿐 아니라 여과속도의 영향도 컸다. 이같은 현상은 앞의 2-1항에서 이미 살펴본

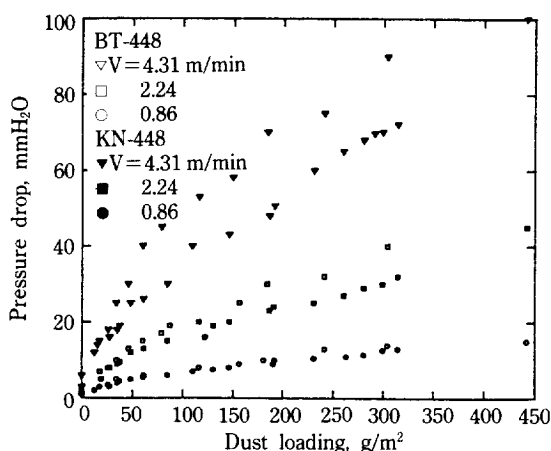


Fig. 8. Effect of dust loading on pressure drop across the two test fabrics at various filtration velocities (MMD = 2.4 μ m).

바와 같이 BT-448이 KN-448보다 직물의 짜임새가 정교하여 공극율이 낮아짐에 따라 여과포의 공극을 통과하는 기류의 저항이 컸기 때문이다.

여과포에 분진층이 충분히 퇴적된 $W=300$ g/m² 조건에서도 BT-448의 압력손실이 KN-448보다 높았으나 그 상대적 차이는 $W=0$ 일 때보다 작았다. 이는 물론 Fig. 7의 scale이 log이므로 절대값으로 보면 다르게 해석될 수도 있겠으나 분진부하에 따라 변화하는 KN-448의 압력변화선의 기울기를 볼 때 KN-448의 분진층 형성과정은 일단 양호한 수준으로 판단되었다. 그러나 그럼에도 절대값이 큰 차이를 보이는 이유는 여과포 자체의 압력손실이 퇴적분진층의 압력손실에 부가되기 때문이며[11, 12], 초기 여과포의 공극차이가 분진층의 형성에도 영향을 미치기 때문이라 생각된다.

3-2-2. 분진부하의 영향

Fig. 8은 여과속도가 일정할 때 분진부하에 따른 KN-448과 BT-448의 압력손실 변화를 살펴본 것이다. 0.86 m/min로 여과속도가 작을 때는 여과포의 종류에 관계없이 압력손실이 거의 비슷하였으나, 여과속도가 증가함에 따라 BT-448의 압력손실이 KN-448에 비해 높아지고 있다. 이는 앞항의 마지막에서 언급한 것과 같이 여과포의 차이가 분진층 형성에도 영향을 미치기 때문인데, Spaitte 등[13]은 단위면적당 무게가 다른 3종의 유리섬유 여과포를 이용한 실험에서 단위면적당 무게가 무거운 여과포가 일정한 여과속도 조건에서 분진부하에 따라 압력손실이 높아진다고 보고하였다.

3-2-3. 입자크기의 영향

Fig. 9는 입도분포가 다른 2종류의 석탄회를 KN-448로 포집할 때 분진부하와 여과속도 증가에 따른 압력

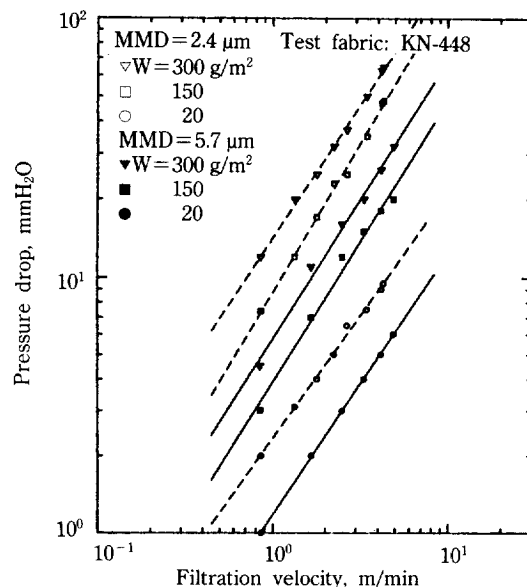


Fig. 9. Effect of filtration velocity on pressure drop across KN-448 at various dust loadings with two types of test dust having different mass median diameters.

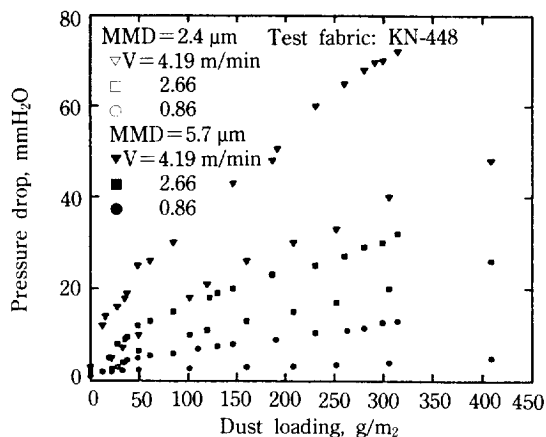


Fig. 10. Effect of dust loading on pressure drop across KN-448 at various filtration velocities with two types of test dust having different mass median diameters.

손실의 변화를 살펴본 것이다. 석탄회의 입도가 작을 때가 입도가 클 때보다 압력손실이 약 1.2-3.0배 높게 나타나고 있는데, 분진의 입도가 작을 경우 여과포위에 퇴적된 분진층의 공극율이 작아 기류의 통과저항이 높아지기 때문이다[14].

Fig. 10은 입도분포가 다른 2종류의 석탄회를 KN-448

로 포집할 때 분진부하의 증가에 따른 압력손실을 조
사한 것이다. 퇴적분진층이 발달하여 분진부하가 증가
할수록 분진입도의 영향이 커짐을 알 수 있으며 여과
속도가 빠를 때 이같은 경향은 더욱 두드러지고 있다.

4. 결 론

유리섬유 여과포는 흡수성이 거의 없고 화학적 내구
성이 크며 고온분위기에서도 가열수축되지 않을 뿐 아
니라 표면이 매끈하여 탈진성능이 우수하다는 장점들을
지니고 있다. 그러나 polyacryl amide계통의 nomex와
같은 부직포가 아닌 직포이기 때문에 고속여과에 상대적
으로 불리하며 동일한 이유로 국내에서 이용되는 pulse-
jet 탈진방식의 집진기에서는 pulse-jet의 사용에 세심한
주의가 요구된다는 단점도 있다[1-4]. 본 논문에서는 일
차적으로 석탄회의 포집에서 국내 개발 유리섬유 여과포인
KN-448의 분진층 형성과 압력손실 등 기본 특성을 수
입여과포인 BT-448과 비교 분석하였다.

(1) KN-448의 공극은 타원형태로 공극의 크기가 일
정하지 않은 반면, BT-448의 공극은 사각에 가까웠고
공극의 크기도 거의 일정하였다. 각 여과포의 공극내
에는 가느다란 단일섬유(filament)들이 서로 교차하고
있었는데, KN-448의 단일섬유 직경은 6.7 μm , BT-448의
단일섬유 직경은 5.0 μm 이었다.

(2) 여과포위에 퇴적분진층은 공극내 단일섬유 주위
에 나뭇가지(dendrite) 모양으로 분진입자들이 응집되
면서 시작되었다. 응집군들이 자라며 섬유와 섬유사이의
공간에 가교(bridge)가 형성되고 점차 공극이 메워지며
결국에는 여과포의 전체표면에 분진층이 균일하게 퇴
적되었다.

(3) 여과속도가 커짐에 따라 분진부하가 증가함에 따
라 압력손실은 증가하였고 입자크기가 작은 석탄회를 포
집할 때의 압력손실이 보다 높았다. KN-448에 비해 BT-
448의 압력손실이 동일한 조건에서 높게 나타났는데
BT-448의 직조형태가 보다 조밀하기 때문이었으며 그
러나 두 여과포의 압력손실의 차이는 분진부하가 증가
하여 퇴적분진층이 충분히 발달한 후에는 상대적으로
감소하였다.

NOMENCLATURE

V : filtration velocity [m/min]
W : dust loading [g/m²]
MMD: mass median diameter

REFERENCES

1. 박영옥, 손재익, 김영성, 구철오, 임정환: "Pulse-Jet식 여과포 집진장치의 여과포 성능시험 연구(I)", 한국동력자원연구소 연구보고서, 과학기술처(1989).
2. 박영옥, 손재익, 김영성, 구철오, 임정환: "Pulse-Jet식 여과포 집진장치의 여과포 성능시험 연구(II)", 한국동력자원연구소 연구보고서, 과학기술처(1990).
3. 손재익, 김영성, 박영옥, 최정후, 박영철, 구철오, 임정환: "유연탄활용과 환경공해 방지대책 연구(III)", 한국동력자원연구소 연구보고서, KE-87-18(1987).
4. 손재익, 박영옥, 김영성, 구철오, 임정환: "유연탄활용과 환경공해 방지대책 연구(V)", 한국동력자원연구소 연구보고서, KE-89-9(1989).
5. 김영성, 구철오, 박영옥, 손재익: 에너지 R&D, 9(4), 40(1987).
6. JIS Z 8901: 日本規格協會(1984)
7. JIS A 6201: 日本規格協會(1977)
8. Masuda, H., Fushiro, S. and Iinoya, K.: *J. Res. Assoc. Powder Tech.*, 14(1), 3(1977).
9. Yamashita, K.: *J. Pulverization Tech.*, 22, 91(1977).
10. Leith, D. and First, M.: 68th Annual APCA Meeting, Boston, Paper No. 75-57.1(1975).
11. Billings, C. E. and Wilder, J. E.: Technical Report, EPA-APTD 0690(NTIS PB-200-648), 1.1(1970).
12. Kimura, N. and Iinoya, K.: *Kagaku Kogaku*, 23(12), 792(1959).
13. Spaite, P. W., Norgmart, R. H. and Harrington, R. E.: *J. Air Pollution Control Assoc.*, 20, 387(1968).
14. 山下憲一, 荒川正文, 青木隆一, 大塚昭信, 三輪茂雄: "粉體物性圖說(改訂増補)", 日本粉體工業技術協會(社)編(1985).