

고온여과재의 고온 집진특성에 관한 연구

홍민선 · 이동섭 · 이재춘* · 나진균**

아주대학교 환경공학과

*명지대학교 무기재료공학과

**국립환경연구원 대기공학과

A Study on the High Temperature Filtration Performance of Hot Gas Filtration Medium

Min Sun Hong, Dong Sub Lee, Jae Chun Lee* and Jin Kyun Na**

Department of Environmental Engineering, Ajou University

**Department of Materials Engineering, Myong Ji University*

***Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research*

요 약

고온, 고압하에서 효율적으로 분진을 제거하는 고온 여과재는 IGCC의 Hot Gas Cleaning, 화학공정 등에 유용하게 사용될 수 있으며 전세계적으로 pilot 또는 semicommercial scale로 연구개발 중에 있다. 본 논문에서는 디스크형(50φ×10t) 섬유형 여과재를 제조하여 600°C에서 제철, 유리, 제지 및 석탄화력발전소 배출분진을 이용한 성능시험을 수행하였다. 개발된 여과재의 저항계수는 10^{10} ~ 5×10^{11} 의 범위에 존재하였고 총집진효율은 99.7%이상의 높은 효율을 나타내었다. 또한 분진의 표면여과 속도는 10cm/sec로 기존여과 집진기의 5배이상으로 유지하였고 탈진강도 2기압, 탈진시간 0.1초에서 효율적인 집진 및 탈진이 되었다.

Abstract— Hot gas filtration medium, readily applicable to high temperature and pressure systems such as IGCC and chemical processes, have been developed in most of the world as a pilot and semicommercial scale plants. In this study, disc type(50φ×10t) ceramic fiber filters were vacuum-formed and tested using particulates sampled from steel, glass, paper industries and coal burning power plants. Darcy's resistance coefficients range 10^{10} ~ 5×10^{11} and overall collection efficiencies were over 99.7%.

In this study, filtration velocities were maintained over 10 cm/sec, which is 5 times higher than that of normal industrial bag houses. Also the filtration and detachment of particulates were successful using 2 bar pulse jet with a duration of 0.1 second.

1. 서 론

열악한 환경(~1000°C, 20기압)에서 장시간 포집이 가능한 고온 여과재의 개발과 고온용 여과 집진기의 개발은 지난 20여년간 구미를 중심으로 활발히 진행되어왔다. 고온 여과 집진기는 기존의 산업용 여과 집진기에 비해 2~10배의 여과속도(~6 m/min)로 분진 포집이 가능해 소형의 설비로 다량의 배가스를 처리할 수 있으며 기존의 전기 집진기로 포집이 어려운 분진도 99.99%이상 제거할 수 있다. 또한 고온의 청정 가스를 건조 공정, 난방등에 직접 이용할 수 있고 현재 전세

계적으로 개발중인 PFBC(Pressurized Fluidized Bed Combustion)과 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)등에 Hot Gas Cleaning을 통한 효율 증대와 gas 터빈의 보호로 터빈의 수명을 연장시킬 수 있어 이에 대한 연구 및 투자가 활발하다. 고온 여과재의 개발은 BWF, Heimbach, Didier, Cerel 그리고 3M등의 대기 업체에서 개발중에 있으며 고온 여과 집진기의 개발은 Westinghouse 미) E.P.A. Acourex Corporation, 영국의 University of Surrey, 독일의 Essen대학등에서 연구·개발중에 있다.

고온 여과재는 기공율에 따라 세라믹 입자를 결합한

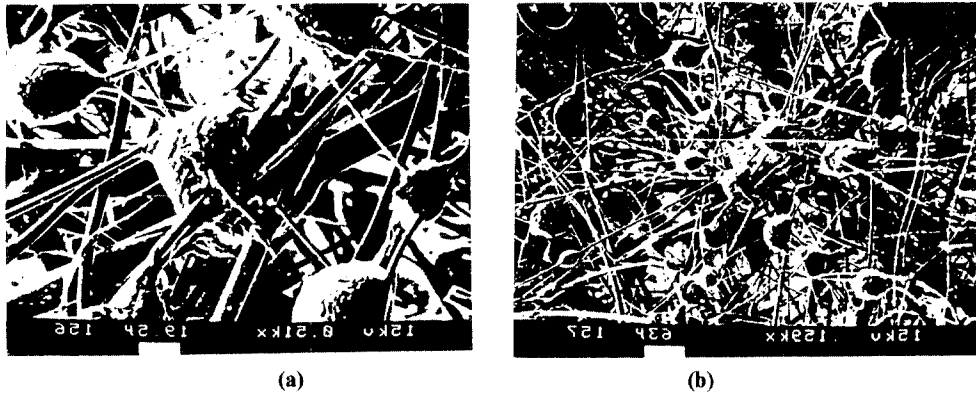


Fig. 1. Micrographs of ceramic fiber filters : (a) Overall networks of ceramic fibers(배율 159배)
(b) Fibers bonded with glassy phase(배율 510배).

기공율 40% 내외의 고밀도 입자형 여과재와 세라믹 섬유를 결합한 기공율 80~90% 내외의 저밀도 섬유형 여과재로 대별되는데 고밀도 입자형 여과재는 여러 분야 및 조건에 실험이 수행되었으나 비교적 새로운 저밀도 섬유형 여과재는 입자형 여과재에 비해 여러 가지 장점을 갖고 있다. 섬유형 여과재는 통기 저항이 적고 유연성을 갖고 있어 순간적인 파열이나 사고를 유발하지 않아 안전한 것으로 알려져 있다. 현재까지 개발된 섬유형 여과재인 alumina-silica 섬유는 1200°C 까지 안정적으로 운전되고 있고 3M에서 개발된 NE-XTEL은 아직 시험중에 있는 상태다.

본 연구에서 개발된 섬유형 여과재는 상기한 석탄 화력 발전 이외에 화학 폐기물 소각로¹⁾, Aluminum Scrap Melting 공정²⁾, Smokeless Fuel Production³⁾ 등 여러 공정에 운전이 가능하여 향후 막대한 잠재 시장을 갖고 있다. 본 논문에서는 섬유형 디스크 타입의 세라믹 필터를 제조, 상압·600°C에서 여러 종류의 분진을 주입시켜 필터의 입경별 집진효율, 통기 저항 등의 자료를 도출하였다. 본 연구에서는 제철소, 유리 제조, 제지 공장 그리고 석탄 화력 발전소의 분진을 채취, 성분 분석을 수행한후 실험을 수행하였다.

2. 고온여과재의 개발 및 성능시험 장치

2-1. 고온여과재의 제조 및 제원

2-1-1. 진공성형에 의한 섬유여과재의 제조

본 연구에서 사용한 고온여과재는 분진을 포집할 수 있는 여과재의 비표면적이 입자형 여과재(granular filter)보다 상대적으로 큰 섬유 여과재이다. 섬유 여과재는 세라믹 섬유를 주 구성성분으로 하며 진공성형 기법으로 제조하였다. 진공성형이란 세라믹 섬유, 유기

및 무기결합재 등의 고상성분을 물과 혼합시켜 얻은 슬러리 상태의 원료를 다공성 망을 통해 배출시켜 케이크 상태의 성형체를 제조하는 방법이다. 원료 고상입자의 장단경비(aspect ratio)가 매우 큰 섬유 원료를 가압성형 혹은 slip casting 등의 방법으로 성형하기 어려운 경우에, 섬유 구조물 제조를 위해 진공성형 기법이 종종 이용되고 있다.⁴⁾

섬유여과재의 주 구성성분으로 사용한 세라믹 섬유는 명목상 직경이 3 μ m, 밀도가 2.56g/cm³인 알루미노 실리카계 섬유이다. 고온에서 용융되어 세라믹 섬유를 결합시키는 무기결합재 역시 섬유상으로 직경은 10 μ m, 밀도는 2.61g/cm³인 유리섬유를 사용하였다. 세라믹 섬유와 유리섬유의 무게비가 7:3이 되게 원료섬유의 조성을 백하여, 고상 섬유농도(concentration of solid fiber)가 0.1wt% 되게 물과 혼합하여 슬러리를 준비하였다. 이 슬러리에 진공성형후 건조 강도를 부여하기 위해서 유기결합제로 starch를 0.25wt%(슬러리 중의 물을 기준으로) 첨가하여 일정시간 강력히 교반시킨 다음, 진공성형을 실시하여 ϕ 50mm, 두께 10mm의 고온 여과시험용 섬유여과시편을 성형하였다. 건조된 시편은 1100°C에서 1시간 30분동안 소성시켜 용융된 유리섬유로 세라믹 섬유를 상호결합시킨 미세구조의 섬유여과재를 제조하였다.

2-1-2. 섬유여과재의 물성 및 미세구조

아르키메데스 방법에 의한 밀도와 기공률 측정결과, 소성된 여과재의 밀도와 기공률은 각각 0.41-0.48g/cm³, 81~84%의 범위를 나타내었다. 길이가 40mm, 가로, 세로가 각각 10mm인 막대형 섬유여과재를 제작하여 측정된 섬유여과재의 굽힘강도와 탄성계수는 각각 0.20~0.51 MPa와 5.21~15.45 MPa 수준으로써 섬유여과재의 기계적 물성은 밀도 혹은 기공률에 비해서

Table 1. Characteristics of particle emission sources.

업 소 명	사업장규모 (종)	원료 및 연료명	원료 및 연료사용량 (ton/hr)	사용배출시설	방지시설
S 화 력	1	무 연 탄	57.9	화력발전시설	전기집진기
B 화 력	1	B-C oil	23.6	〃	전기집진기
S 제 지	1	유 연 탄	170.0	소각보일러	원심력집진기
H 제 지	1	슬 러 지	5.0	〃	습식전기집진기
D 제 강	1	슬 러 지	8.3	〃	원심력집진기
		목 피	2.5	〃	습식전기집진기
		고 철	41.9	전기아크로	중력집진기
					여과집진기
					세정집진기
U 주 철	1	고철 및 선철	5.7	〃	원심력집진기
					여과집진기
D 유 리	1	규사, 석회석 등등	9.4	유리제품제조	전기집진기
H 유 리	1	〃	59.5	〃	여과집진기

Table 2. Flue gas conditions investigated in this study.

업 소 명	배출가스유량 (Sm ³ /hr)	배출가스온도 온도(°C)	수 분 량 (%)	먼지밀도 (g/cm ³)	먼지농도 (g/Sm ³)	SO _x (ppm)	NO _x (ppm)
S 화 력	394,939	124	9.8	1.97	21.1	1,241	314
B 화 력	613,012	342	10.0	1.96	17.6	520	232
S 제 지	79,724	120	13.3	2.14	2.6	17	-
H 제 지	35,950	116	-	2.14	2.4	50	150
D 제 강	126,203	130	4.1	3.36	5.2	-	-
U 주 철	10,753	137	10.1	3.30	1.04	30	80
H 유 리	68,458	228	9.8	2.14	0.30	1,290	186
D 유 리	17,366	300	10.2	2.20	0.38	800	150

편차가 비교적 큼을 알 수 있다. Fig. 1은 세라믹 섬유여과재의 전자주사현미경 사진으로 원료 섬유인 세라믹 섬유들을 용융된 유리결합체가 결합시키고 있으며, 세라믹 섬유간에 개기공(open pore)들이 비교적 균질히 분포되어 있는 것을 보여주고 있다.

2-2. 고온여과재 적용가능 분진 특성 연구

본 논문에서는 고온여과포(예: Ceramic filter) 개발시 실제 적용 가능한 먼지배출업소를 선정하는 데 필요한 먼지발생원별 먼지나 배출가스의 특성을 조사, 분석하고 각 먼지배출원에 대하여 대표성(표준화) 자료를 확보하였다.

실측대상업소는 환경처에서 조사한 전국의 배출시설조사표를 이용하여 배출가스의 온도가 고온이고,

먼지를 다량 배출하는 업소(1종)중에서 방지시설 입구에 측정구가 있고 일반적으로 작업체를 대표하는 곳을 업정, 선별하였다(S화력, B화력, S제지, H제지, D제강, H주철, D유리, H유리 등). 이와 더불어 고온여과재에 의한 고온여과 집진시 집진기 및 Filter에 대한 특정 가스상 물질과의 화학 반응성을 고려하여 온도, 수분 및 HCl, HF, NO_x, SO_x, CO, CO₂, 먼지중 원소 분석을 실시 하였다.

먼지 및 배출가스의 측정 및 분석은 대기오염공정 시험법에 준하여 실시하였다. 방지시설 입구에서 채집된 먼지의 원소분석은 Atomic Absorption Spectrometry(AAS, Perkin Elemer, 500) 방법과 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry(ICP MS, VG Elemental Co., VGPQ-II) 방법에 의하여 실시하였다.

Table 3. Particle size distribution of fly ash.

S 화 력		D 제 강		U 주 철		K 제 철	
size(μm)*	(%)	size(μm)	(%)	size(μm)	(%)	size(μm)	(%)
10.1	(55.0)	12.1	(46.8)	8.3	(15.4)	7.4	(19.4)
6.1	(32.3)	7.2	(14.6)	4.9	(6.2)	4.5	(29.6)
2.5	(4.4)	3.0	(3.9)	2.0	(3.1)	1.8	(25.6)
1.5	(3.5)	1.8	(4.5)	1.7	(6.1)	1.1	(11.0)
0.9	(2.2)	1.1	(2.4)	0.79	(7.7)	0.63	(6.2)
0.5	(1.5)	0.6	(13.4)	0.39	(7.7)	0.37	(3.8)
0.3	(0.4)	0.4	(8.1)	0.14	(12.3)	0.18	(1.9)
0.2	(0.4)	0.2	(3.7)	0.09	(10.8)	0.08	(0.9)
0.1	(0.3)	0.1	(2.6)	0.09	(30.7)	0.08	(1.5)

*size는 50%집진효율로 제거되는 입자의 크기(dp,50)를 말한다.

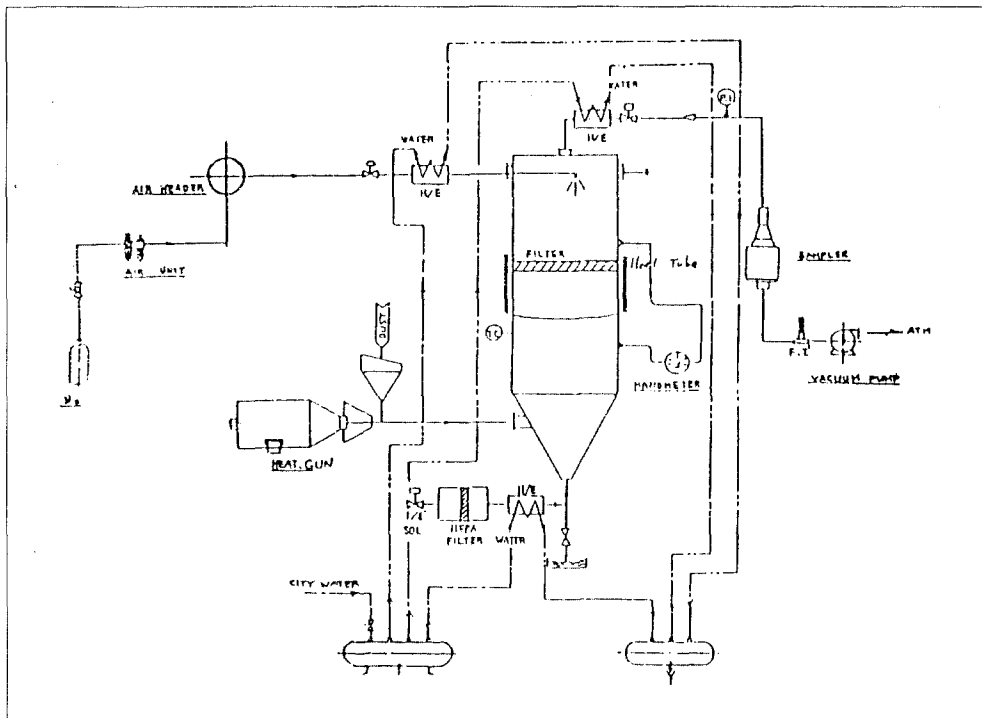


Fig. 2. An experimental apparatus for hot gas filtration.

실측업소의 먼지 발생원에 대한 특성은 Table 1와 같다. 실측업소 중에서 S화력, B화력 등 발전시설에서는 전기집진기가 주요 방지시설로 설치되어 있었으며, 연료사용량도 S화력, B화력이 82, 170 ton/hr으로 제일 많았고, 여과집진기는 3개업소(D제강, U주철, H유리)에 설치되어 있었다.

폐열보일러, 공기에열기 등 냉각기관을 통과하기 전의 온도는 모두 500°C 이상이었고, U주철을 제외한

모든 실측업체에서는 폐열을 운수, 지역 냉난방등의 열공급원으로 이용하고 있었다.

Table 2는 배출가스 유량 등 각 배출원의 특성과 먼지농도 및 가스상오염물질 농도를 나타낸 것으로 먼지 농도와 배출가스 유량은 연료 소비량이 많은 화력발전소(S화력, B화력)에서 가장 높게 나타났고, 배출가스 온도는 열교환기, 냉각시설, 폐열보일러를 통과한 다음의 온도를 나타낸 것으로 116~342°C로

나타났으며, 노내의 온도는 대부분 1000°C 이상으로 나타났다. SO_x와 NO_x의 농도는 무연탄과 B-C Oil을 사용하는 S화력에서 높게 나타났고, 규사와 석회석등을 원료로 사용하고 연료로는 중유를 사용하는 H유리 및 D유리공장에서는 의외로 SO_x의 농도가 상당히 높게 나타났기 때문에 앞으로 반복 측정하여 자료검증을 할 필요가 있다.

배출가스중 먼지의 입경분포는 다음 Table 3과 같다. S화력, D제강의 경우 먼지입경은 6-12μm가 전체의 50% 이상을 차지하였으며, U주철의 경우 8.3μm 입자 및 0.14μm 이하의 입자가 전체의 50%이상으로 나타났다으며, K제철의 경우는 1.1-7.4μm의 입자가 많게 나타났다.

배출되는 먼지중의 원소 분석결과 S화력과 B화력에서는 Fe, Mg, Na, Ca 이온들, S제지에서는 Fe, Na, K, Zn, Cr 이온들, H유리 및 D유리에서는 Na, Ca, V, 이온들, U주철에서는 Fe, Zn, Ca, Na, Mn 이온들이 많이 검출 되었다.

2-3. 고온 여과재의 성능 시험 장치

본 연구에서는 직경 50mm, 두께 10mm 의 Disc형 여과재의 기계적, 열적 안정성, 입경별 집진효율, 집

진에 따른 압력 손실 변화, 효과적인 탈진을 위한 탈진 주기 및 탈진 강도 등을 시험할 수 있는 장치를 설계 제작하였다. 장치의 흐름도가 Fig. 2에 나타나 있는데 valve 및 fitting 그리고 측정 기기를 보호하기 위한 수냉자켓을 3군데 설치하였고, 입경별 포집효율 측정하기 위해 8단 Andersen sampler를 이용하였다. 먼지 주입과 가열을 위해 heat gun과 heat tube를 동시에 사용하였고 온도 차압을 연속적으로 수행할 수 있는 timer를 이용한 자동 control board를 설치하여 집진 5분, 탈진 0.1 sec를 연속적으로 수행하였다. 본 장치의 설계사양을 Table 4에 요약하였다.

Table 4에 나타나 있는 장치로 상압 고온에서 고온 필터의 종류, 주입 먼지의 종류, 온도별, 여과속도별, 탈진 주기 및 강도별 효율 및 탈진 특성을 파악할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에 나타나 있는 Bench scale 고온 여과포 성능시험장치를 이용해 여과재의 저항 계수를 구하였고 여과속도 변화에 따른 시편 1의 차압변화가 Fig. 3에 나타나 있으며 고온 필터별 저항 계수 및 전체집진 효율이 Table 5에 나타나 있다.

Fig. 3에 나타나 있는 고온필터의 차압변화는 통상 다음식으로 나타낸다."

$$-\frac{dp}{dz} = K_1 \mu U + K_2 \rho U^2 \tag{1}$$

식(1)로부터 온도변화에 따른 가스의 점도와 밀도의 변화로 K₁, K₂ 값을 구하였고 본 연구에서 계산된 저항 계수는 seville[®]의 cerafil 12H10 필터의 10³ ~ 5×10⁴의 범위에 존재하였다. 또한 Table 5에는 고온 필터별, 분진 종류별 총 집진효율이 나타나 있는데 전체적으로 99.7% 이상의 높은 효율을 나타냈다. 본 연구에서 사용된 분진은 분진의 종류에 따라 cake가 여러가지 형태로

Table 4. Design Criteria of Experimental Apparatus.

	설계 및 작동 범위	비 고
재료	SUS 304	공냉을 위한 동파 이프 제외
작동 온도	20°C ~ 1200°C	600°C 이상에서는 thermal stress 및 부식
작동 압력(bar)	0.5 ~ 1.5	
차압(mmH ₂ O)	0 ~ 2500	고온 필터 상하
유량(Nl/min)	0 ~ 25	순간 유량
탈진 강도(bar)	0 ~ 10	N ₂ 가스 사용
탈진 시간(sec)	0.1 ~ 1.0	timer 사용
여과 속도(cm/sec)	0 ~ 30	

Table 5. Darcy's law resistance & filtration efficiency on coupon specimens.

시 편	기공율(%)	밀 도(g/cm ³)	K ₁ × 10 ³	K ₂ × 10 ⁷	분진 종류별 효율
1	84	0.41	4.34	0.54	K제철(E.P room):99.99%
2	82	0.45	6.52	1.75	S제지:99.99%
3	82	0.47	9.63	1.38	H유리: 99.96% H제지: 99.99%
4	81	0.48	6.57	3.41	K제철(고로주상):99.99% U주철: 99.99%
5	82	0.46	4.64	2.45	H유리: 99.99%

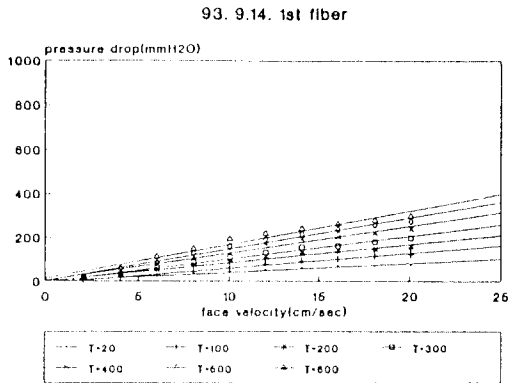


Fig. 3. Variation of pressure drop on face velocity & temperature.

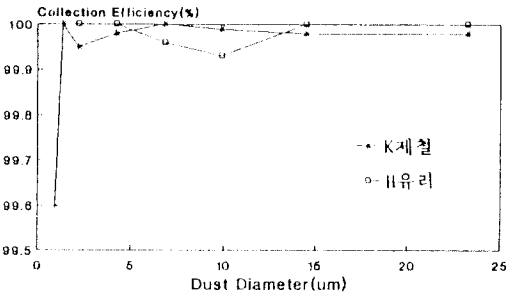


Fig. 4. Filtration efficiency on dust diameter.

형성되었다. 입경별 분진 포집효율은 Fig. 4에 나타나 있는 submicron입자의 경우 99.5%이상의 높은 효율로, 이는 Rogers[®], Reed[®]의 연구 결과와 비슷한 결과이다. Fig. 5는 시간에 따른 차압변화를 나타내고 있는데 K제철(E.P. room), S제지, H유리, H제지, U주철, K제철(고로주상)분진을 고온 섬유형 필터 시편에 통과시킨 것으로 5분 간격으로 2기압의 Pulse를 0.1초 동안 주입시켜 탈진하였다. 4차 시편을 사용한 K제철(고로주상) U주철 분진의 경우는 여과속도를 10 cm/sec로 off-line cleaning을 수행하였는데 각각 약 350-370 mmH₂O의 base line압력강하에서 탈진 20분간 약 50mmH₂O 차압증가를 보였다. 3차 시편을 실험에 사용한 H유리, H제지분진의 경우는 여과속도 6cm/sec로 off-line 탈진 수행시 15분 탈진동안 200-220mmH₂O의 base line압력강하에서 약 20-30mmH₂O의 차압증가를 보였고, K제철(E.P.room), H유리, S제지분진은 역시 6 cm/sec 여과속도로 15분간 탈진 수행결과 base line압력강하가 각각 200, 160, 180mmH₂O에서 20-30mmH₂O 정도의 차압증가를 보였다. 그림 5에 나타낸 base line 차압과 여과 동안 차압의 증가는 여과재의 구조

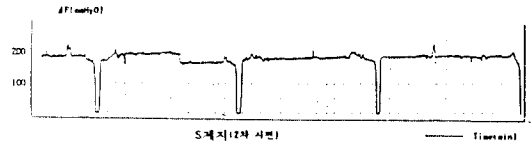


Fig. 5. Variation of pressure drop on hot gas filter & dust.

기공율, 사용분진의 성상, 분진의 Cake형성 메카니즘, depth filtration등에 따라 달라지는데 이에 대한 연구로 실험에 사용된 시편을 반으로 절단하여 조사한 결과 표면 여과가 일어난 것으로 나타났다. 이것은 본 연구에서 사용된 여과재가 향후 scale-up 될시 우수한 filtration capacity를 나타내리라는 것을 암시한다.

4. 결 론

고온(600°C)이상의 조건에서 효율적으로 유해가스 및 먼지를 장시간 안정적으로 여과시킬 수 있는 세라믹 섬유를 이용한 고온가스 여과재 개발 목적을 위해, 일차적으로 유리섬유를 무기결합제로 응용하여 600°C의 고온여과시험이 가능한 세라믹 섬유 여과재를 제조한 후, 먼지 종류를 다양하게 사용한 고온여과 성능시험 결과, 국외에서 개발된 세라믹 여과재와 비교하여 거의 비슷한 높은 집진효율과 성능을 나타냈다.

이러한 연구는 소각에 의한 폐기물 처리기술, 소각중 발생하는 유해가스 및 먼지 여과기술, 폐열의 적극적 재활용 기술에 관여한 에너지 회수면과 세라믹 고온가스 여과재 제조기술 및 고온가스 여과재 이용기술에 크게 이바지 할 것이다.

현재 국내에서 고온(1000°C이상)과 관련된 각종 산업에서 그 이용이 증가하고 있는 세라믹 섬유 제조 기술의 촉진 및 진공성형(vacuum forming)기술의 선진화를 이룩하며 그 성능면에서 고온가스 여과재의 실용화는 고온 소각로 설계 및 장치제작 그리고 그 이용 기술로써 석탄 화력발전소의 효율증대로 인한 원가절감, 기술 및 제품수출로 인한 외화 획득등 기술 경쟁에서 우위를 점하여 수출로 인한 외화 획득은 물론 제조 및 이용 기술의 발달로 산업 전반에 걸쳐 폭 넓게 영향을 미칠 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 G-7 project 고효율 집진의 세부과제로 수행 하였으며 연구비 지원을 해준 환경저해 감사드립니다.

참고문헌

1. A. J. Statin, P. H. Dyke and C. J. Withers, "Acid Gas Treatment at a Cerafil Pilot Plant", 2nd International Symposium on Gas Cleaning at High Temperature., 27-29 Sep. University of Surrey., (1993).
2. R. Calls : "Integration of Processes and Abatement Techniques to meet EPA Requirements in the Metallurgical Industries", Presented to a Meeting of the Filtration Society, UCL, Sep.(1992)
3. Rogers, P & M. Jones : "The Evaluation of Low Density Ceramic Filters for Gas Cleaning in a Boiler Flue Gas Clean-up System", Presented to 2nd International Symposium on Gas cleaning at High Temperature., 27-29 Sep., University of Surrey., (1993).
4. Reed. G P. Burnard. G K. Tassicker. O J and Leitch. A J.: A Large Ceramic Candle Filter Module on a Pressurized Fluidized Bed Combustor-Description and Preliminary Data. BMFT/VGB International Conference on Advanced Coal Power Plant Technology and Hot Gas Cleaning Dusseldorf (1987).
5. G. C. Wei & J. M. Robin : "Carbon-bonded Carbon Fiber Insulation for Radioisotope Space Power System", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **645** 691-699 (1985).
6. W. Cheung, J. P. K. Seville & R. Clift : "Filtration and Cleaning Characteristics of Ceramic Media" 4th International Fluidized Combustion Conference, London, December. (1988).