

## 저밀도 원통형 세라믹 필터의 고온 여과 성능시험 연구 A Study of High Temperature Filtration Performance Test on Low Density Cylindrical Ceramic Filters

이 동 섭\*<sup>1)</sup> · 홍 민 선 · 최 종 인

<sup>1)</sup>경운대학교 환경공학과, 아주대학교 환경공학과  
(2000년 9월 28일 접수, 2001년 2월 26일 채택)

Dong Sub Lee\*<sup>1)</sup>, Min Sun Hong and Jong In Choi  
<sup>1)</sup>Dept. of Environmental Engineering, Kyungwoon University  
Dept. of Environmental Engineering, Ajou University  
(Received 28 September 2000; accepted 26 February 2001)

### Abstract

Cylindrical type ceramic filters, that is 60 O.D. × 10 t × 600 L and 60 O.D. × 10 t × 1,000 L were manufactured by vacuum forming processes using ceramic raw materials.

For cylindrical type ceramic filters, porosity and bulk density were measured from 80 to 90% and 0.3 to 0.4 g/cm<sup>3</sup>, respectively at uniform pore size of 41 to 45 μm.

Bench scale candle filters (60φ × 10 t × 600 L) were tested using different dusts collected from many industries including chemical processing, glass processing and metal manufacturing plants. Collection efficiencies found out to range from 99.87% to 99.90%, while resistance coefficients from 1.1 × 10<sup>11</sup>/m<sup>2</sup> to 1.7 × 10<sup>11</sup>/m<sup>2</sup>.

Full scale low density ceramic filters (60φ × 10 t × 1,000 L) were also tested at 1 atm, 600°C to reveal the filtration efficiency, conditioning, and the resistance coefficients using two different types of dust such as chemical processing and metal refined processing. Darcy's law resistance coefficients were measured to range 1.44 × 10<sup>11</sup>/m<sup>2</sup> to 2.74 × 10<sup>11</sup>/m<sup>2</sup>, and collection efficiencies in the range of 99.84 to 99.96%. Finally, results of long term performance test showed that filters were conditioned after 170hrs. Experimental conditions for effective filtration were examined under the condition 10 cm/sec face velocity, 3 kg/cm<sup>2</sup> pulsing pressure, 5 min filtration cycle, and 300msec pulse opening time.

**Key words** : low density ceramic filter, resistance coefficients, conditioning

### 1. 서 론

우리 나라의 환경기술은 1990년대 이후 환경오염

에 대한 관심이 고조되고 각종 규제가 엄격해짐에 따른 환경기술개발에 대한 활발한 투자에 힘입어 여러 분야에서 괄목할 만한 성장과 발전을 보이고 있으나 전반적인 기술수준을 볼 때 아직까지 미국, 일본, 유럽 등 선진국에 비하여는 낙후된 것으로 나타나고 있다(Lee, 1995).

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)54-479-1236, E-mail : dslee@kyungwoon.ac.kr

에너지 이용 증대에 따른 화석연료 사용 급증으로 나타나는 대기오염은 국제적인 현상에서 벗어나, 국가 또는 광범위한 국가간 지역문제로 나타나고 있어 방지기술 개발 및 저감정책 수립은 국내 환경오염 개선뿐만 아니라 지구환경 보호관점에서 매우 중요하다. 특히 각종 산업체의 고온 배기가스에 포함된 먼지 및 유해가스 등을 규제치 이하로 낮추기 위해서는 600°C 이상의 온도에서 장기적으로 사용될 수 있는 고온용 세라믹 여과재 및 이용기술 연구에 대한 산업계의 요구가 급증되고 있다 (홍지형, 1996; 김용진과 정상현, 1995). 고온용 세라믹 필터를 이용한 배기 가스 여과 기술은 600°C 이상의 고온에서 연속적으로 여과·집진을 수행함으로써, 고온가스 냉각 장치를 필요로 하는 기존의 여과 집진기에 비해 많은 장점을 가지고 있고 여러 종류의 산업공정 대기오염 방지시설에 적용될 수 있는 신기술 중의 하나로 고려되고 있다.

국외의 경우, 70년대 말 이후로 에너지 수요증대와 석유자원의 가격 변동으로 석탄 화력발전이 전력생산에 큰 비중을 차지하게 되었다 (Burnard *et al.*, 1993; Chongqing, 1991; Weber, 1988). 따라서 새로운 석탄 이용기술에 대한 고온 (800~1,000°C), 고압 (~27 bar)에서 보다 나은 효율과 전력효율을 높일 수 있는 가스여과에 대한 재료 및 장치개발에 중점

을 두었다. 고온으로 유출된 가스를 고온·고압 상태에서 완전 여과하여 가스터빈으로 이동시킴으로써, 먼지 입자로 인한 터빈 blade 손상을 줄일 수 있다. 또한 기존의 저온 가스여과 장치를 통한 작동보다는 고온 가스여과를 통한 작동온도에서 운전함으로써, 보다 효율적인 전력 생산면에서 5~10%의 효율 증대를 도모하였다 (Seville *et al.*, 1993; Reid *et al.*, 1987). 특히 가압 유동상 연소공정에 있어서 고온여과장치의 성공적인 개발은, 1차 정화 시스템으로 싸이클론(cyclone)을 요구하고 가스터빈의 보호에 따른 추가적인 정화 시스템 설치의 필요성을 제거함으로써 전체 설치 및 운영비의 획기적인 감소를 가져왔다. 또 다른 장점으로는 낮은 압력손실, 가스터빈으로 유입되는 먼지 입자량의 감소와 규모면에서 적어진 여과시스템 공정을 들 수 있다. 고온 여과는 고효율 화력 발전 이외에도 도시 폐기물 소각로, 화학 플랜트공정 등에서 배출되는 먼지입자, 유해가스, 중금속 입자 그리고 다이옥신(dioxin), 퓨란(furan)과 같은 유기 염기화물의 생성배제 및 제거를 위한 방지기술로 이용되고 있다 (Withers *et al.*, 1989).

표 1은 세라믹 필터가 적용되고 있는 고온·고압 또는 상압 공정을 나타내고 있는데 표에 나타난 제공정의 경우, 고온·상압, 고온·고압에서의 환경규

Table1. Summary of applications and operating requirements of potential high-temperature gas filter.

Application	Operating		Gas environment	Filterdevice requirements
	Temperature (°C)	Pressure (bar)		
<b>Power generation</b>				
· Pressurized fluidizedbed combustion	800	10	Oxidizing with alkali	Turbineprotection; meet environmental standards,
· Integratedgasifi-cation combined cycle	600~800	10~30	Reducingwithalkali, H <sub>2</sub> S	Turbine protection; meet environmental standards protect sulphur capture beds
· Conventional	< 700	1	Oxidizing	Meetenvironmental standards; lowAP
<b>Chemical process</b>				
· Metal refining				
· Calcination/drying				
· Catalytic cracking	300-750	1~3	Varied, canbe severe	Enhanced product recovery; reduced environmental emissions; resource recovery; energy recovery
· Preciousmetal recovery				
<b>Incineration</b>				
· Hazardous waste				
· Municipal waste	up to 1000	1	Oxidizing, containing reactive chemical species	Reduce environmental emissions Improveinc ineration process Protect downstream equipment
· Kiln furnaces				

제에 대한 배출량 감소측면과 에너지 회수측면이 대두된 고온여과(Hot Gas Filtration)공정들이다. 고온용 세라믹 필터의 개발은 구미 선진국에서 많은 연구가 진행되고 있는데 BWF, Heimbach, Didier, Schumacher, Cerel 그리고 3M 등의 대기업에서 개발 중에 있다. 또한 고온 여과 집진기의 개발은 미국의 Westinghouse, E.P.A., Acourex Coporation, 영국의 University of Surrey, 그리고 독일의 Essen 대학 등에서 연구·개발이 진행 중에 있다(Lippert *et al.*, 1986).

본 연구에서는 알루미늄 실리케이트 재질의 한쪽 끝이 막힌 원통형 세라믹 필터(cylindrical ceramic filter : 60φ×10t×600L)를 제조하여 집차 길이변화를 통한 필터 표면적을 넓힘으로써 현재 실적용 규모(1,000 mm)로 그 크기를 확대, 제조하여 필터여과 성능실험을 수행하였다. 세라믹 필터의 제조에 있어서, 안정적으로 장시간 최대의 여과효율을 가지기 위한 연구로 세라믹 원재료의 물성 분석 및 진공성형 제조시에 나타나는 구조적 결함을 단계적으로 보완하여 실적용에 필요한 최적영향인자 도출실험을 수행하였다(이재춘과 홍민선, 1996, 1995, 1993).

## 2. 실험방법

### 2.1 고온용 원통형 세라믹 필터 성형기술

본 연구에 사용된 한쪽 끝이 막힌 원통형 세라믹 필터(cylindrical low density ceramic filter)는 명지대 무기재료 공학과에서 제조한 것으로 원판형(disc type) 세라믹 시편공정을 통해 얻어진 진공성형공법(vacuum forming process)을 통하여 제조되었다. 먼저 용융공정을 통하여 제조된 알루미늄 실리케이트( $Al_2O_3-SiO_2$ ) 세라믹 섬유기지(fiber matrix)와 유리 섬유, 소성시 필터기공형성을 위한 유기 결합제, 그리고 필터자체 강도를 높이기 위한 무기 결합제를 원료로 슬러리 형태를 만든다. 대부분의 원통형 세라믹 필터는 먼지가 함유된 유체를 필터의 외부에서 내부로(inward) 혹은 내부에서 외부로(outward) 흐르게 사용하는 것으로 섬유 슬러리 속에 다공성 성형틀(mendrel)을 삽입시킨 뒤 성형틀 내부에 진공을 가하는 진공 성형법으로 제조한다. 진공이 다공성 성형틀에 가해지므로 성형틀 표면에 섬유가 달라붙게 되며, 성형 완료 후에 성형 틀로부터 성형 원통체를 제거시켜 원통형 필터를 제조하였다. 그림

1은 필터 성능실험에 사용된 60φ×10t×600L 규모의 세라믹 필터를 나타내었다.

본 연구에서는 세라믹 섬유 생산업체인(주)가람에서 blowing 공법으로 제조된 지름이 3μm인 알루미늄 실리케이트 세라믹 섬유를 chopper기를 통해 1~2mm 길이로 분쇄시킨 것을 원료로 사용하였다. 원통형 세라믹 필터 성형은 원료 고상 농도가 1 wt%인 슬러리 속에 성형틀을 넣고 진공을 가한 후 설정온도 1,250°C까지 10°C/min의 승온 속도를 유지하여 설정온도에서 3시간동안 지속시킨 후 냉각하였다.

진공성형에 의해 제조되는 세라믹 섬유 필터의 포집효율은 세라믹 섬유가 형성하는 기공크기 및 진공 성형된 필터 여과재의 기공율에 의해서 좌우된다. 기공크기는 세라믹 필터의 제조에 사용되는 섬유의 직경과 밀도에 의해서, 기공율은 세라믹 필터의 밀도에 의해서 결정된다. 길이 600mm에 이은 scale-up된 1,000 mm 길이의 진공 성형된 세라믹 필터에 있어서 밀도와 기공율은 각각 0.33~0.37 g/cm<sup>3</sup>, 86~88%로 조사되었다. 필터기공크기 분포 측정은 수은 주입 시험결과 median pore가 41~45 μm로 나타나 세라믹 섬유에 있어 비교적 균일한 크기의 기공이 형성되었음을 보였는데 이는 필터 반복 제조시에 각 필터 자체 물성의 동일성을 의미하며 여과효율 조사에 대한 악영향을 배제할 수 있음을 나타낸다.

원판형 세라믹 필터의 자체 물성 실험 연구에서 얻어진 시편자체가 가지는 물성, 결합능력, 온도상승

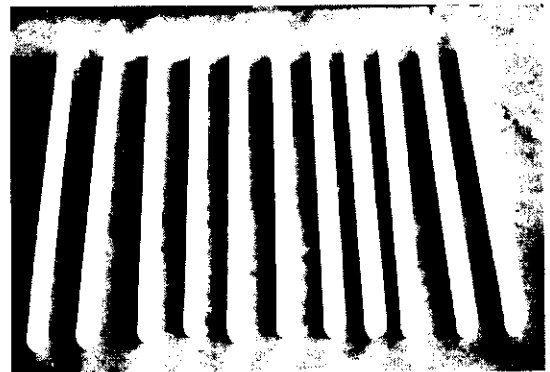


Fig. 1. Ceramic fiber candle filter (L: 600 mm, O.D: 60 mm, I.D: 40 mm).

에 따른 기계적 강도에서의 연구결과를 토대로 본 연구에서는 실제 현장에서 이용되고 있는 원통형 세라믹 필터(외경 60mm, 내경 40mm, 두께 10mm)를 길이 600mm, 1,000mm로 점차 scale-up시켜 제조하였다. 제조된 각기 다른 물성을 갖는 세라믹 필터는 최대 여과효율을 갖기 위한 제반 조건 즉 탈진강도, 먼지 주입량, 유입 속도, 탈진주기, 안정화에 걸리는 시간 등에 치중하여 필터 각각의 여과특성을 실험 조사하였다.

**2.2 원통형 세라믹 필터 성능 시험 장치**

세라믹 시편 (50φ×10t) 성능시험 장치를 통하여 얻어진 자료를 기초로 원통형 세라믹 필터에 대한 성능시험 장치를 설계·제작하였다. 본 연구에서 설계된 성능시험 장치는 외경 60mm, 내경 40mm, 길이 600mm, 1,000mm (flange 부분 25mm포함)의 원통형 고온용 세라믹 필터를 장착하여 집진 특성을 파악할 수 있는 성능 시험장치로 설계·제작하였으며 작동특성은 표 2에 나타나 있다.

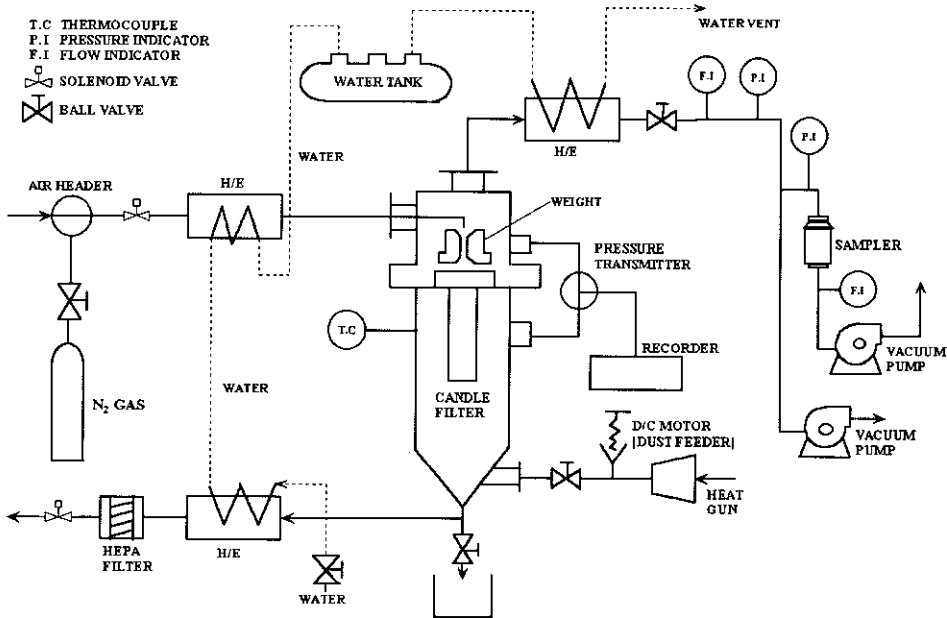
성능 시험장치의 흐름도는 그림 2에 나타나 있는데 크게 원통형 세라믹 필터를 장착할 수 있는 몸체, 먼지 주입을 위하여 D/C 모터와 슬라이드스틀

이용한 먼지 공급장치, 원통형 세라믹 필터가 장착된 몸체의 온도를 600°C로 유지시켜 주고, 흡입구로 유입되는 가스의 예열과 먼지 이송을 원활히 하기 위한 Heat tube와 Heat gun이 있다. 그리고 진공 펌프와 열 교환기를 이용한 고온가스의 이송장치와 질소가스를 이용한 탈진장치, 온도와 차압을 자동 기록하는 계기장치 및 전체 시스템을 통한 시간 조절과 온도 조절을 위한 main control board, 분진의 입경별 농도를 측정하는 Andersen sampler를 이용한 분석장치로 크게 나눌 수 있다.

그림 2의 성능시험장치 본체에 장착되는 원통형 세라믹 필터는 여과속도가 증가할 시 (30 cm/sec 최

**Table 2. Operating conditions of the test facility.**

	Operation range	Reference
Material	SUS 304	Other parts
	SUS 310S	Main body
Operating temperature (°C)	20~1200	~600°C continuous
Operating pressure (bar)	0.5~1.5	Timer control
Pressure drop (mmH <sub>2</sub> O)	0~2500	Filter top & bottom
Flow rate (NI/min)	0~25	Continuous flow
Pulse pressure (bar)	0~10	N <sub>2</sub> gas
Pulse cleaning time (sec)	0.1~1.0	Timer control
Face velocity (cm/sec)	0~30	Flow controller



**Fig. 2. Bench scale test facility of high temperature filter (60φ×10dt×600L, 1,000L).**

대) flange 부분에서의 유동이 문제점으로 예상되었다. 그러나 필터 flange 하단부에 세라믹 paste와 세라믹 가스켓을 도포하고 weight를 장착해 작동 시 기계적 충격을 완화시켰으며, 본체와 세라믹 필터 사이에 두께 2~3 mm 정도 세라믹 섬유를 썬워서 집진 또는 탈진 시 상호 마찰에 의한 세라믹 필터 마모 손실을 최소화하였다. 또한 SUS 310S로 제작한 weight를 고온용 세라믹 필터 상부에 설치하여 본체와 필터 사이에서 기밀을 극대화 시켰으며 필터의 유동 또한 최소화 되게 고정시켰다.

열전대 (K-type)는 kanthal열선을 병렬 연결하여 6 kw전력 용량으로 설계되었으며 최고 1,200°C까지 올릴 수 있고 온도 control board에서 자동 통제되어지게 장치되었다. 본체 상부와 원형 도가니 표면은 상승된 온도의 일정한 유지를 위하여 두께 50 mm와 30 mm의 단열재로 덮어씌워 몸체 바깥으로의 열 손실을 차단했다.

먼지주입 장치로는 D/C 모터에 연결된 스크루 (screw)가 작동하여 먼지 주입시 heat gun의 앞쪽에서 먼지를 연속적으로 공급하도록 설계하였다. 모터의 rpm조절에 따른 먼지 공급량도 조절이 가능하여 막힘 현상없이 원활한 실험을 수행할 수 있었으며 집진 시간에 따른 보다 정량적인 효율 분석이 가능하게 되었다. 먼지공급기는 원추형으로 제작되었으며 cone의 중심부에 D/C 모터와 연결된 스크루가 설치되어 있어서 슬라이드스crew를 조절하여 모터 회전수 조절에 따라 먼지 주입량의 일정한 유입이 조절 가능하게 제작되었다. 또한 먼지 주입구 앞쪽에 ball type 유량조절 밸브를 설치하여 개·폐를 조절함으로써 탈진 시 압축공기의 분사로 인하여 탈진된 먼지와 배출암이 먼지 유입구로 배출되는 순간 역류 현상을 방지하여 물질수지를 거의 100%

유지할 수 있도록 제작하였다.

세라믹 필터를 통해서 관통된 먼지의 종말 집진 효율과 입경별 집진 효율을 조사하기 위하여 본 연구에서 사용된 Andersen sampler는 최고 유량이 28 l/min으로 전체 유량의 5~10%에 불과하여 주 배출관에 따로 먼지 포집관을 설치하였으며, 등속 흡인이 가능하도록 유량조절기를 따로 부착하였다. 여과장치를 통과한 배가스의 배출관은 여과시간 조정에 따른 solenoid 밸브, 유량조절용 밸브, 유량계 (float ball type), 진공게이지, 먼지 포집관, Andersen sampler 순으로 설치되었으며 주 배출 진공펌프와 Andersen sampler용 진공펌프 두개를 사용하였다. 또한 600°C 고온이 solenoid valve, 차압계, 주 배출 진공펌프 등을 손상시키지 않도록 배출구에서의 온도를 평균 50°C로 맞추어 먼지 포집관 부분, 탈진장치 부분과 HEPA filter로 배출되는 부분 3곳에 수냉방식의 열교환기를 설계, 제작했으며 차압계 연결부분은 동파이프를 이용한 공냉방식을 취하였다. 고온인 600°C의 열원이 직접 공급되는 주 본체의 경우는 내열 합금인 SUS 310S로 제작되어 장기 실험시 심한 온도 변화에 따른 열팽창과 부식 및 내 마열성을 최소화하였고 나머지 부분은 SUS 304로 제작되었다.

2.3 원통형 세라믹 필터 성능실험 적용먼지

여과필터의 경우, 배출원에서의 먼지 성상 및 화학적 성질, 물리적 특성에 따라 여과효율에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Burnard *et al.*, 1993). 따라서 다양한 먼지종류에 대한 최적 여과효율은 필터표면에 생성되는 cake형태, 탈진정도, 제거효율에 대한 실험으로 조사하였다. 세라믹 필터 여과실험에 사용한 먼지는 각기 다른 배출공정에서 채집 후 성

Table 3. Size distribution of dust particles.

Dust diameter (μm)	1	1.5	2	3	4	6	8	12
D-Chemical ash (%)	4.9	0.7	0.7	3.2	3.3	5.8	5.2	10
D-Glass ash (%)	16.4	0.5	0	8.7	15.4	3	0.8	2.1
U-Metal ash (%)	21.8	4.8	5.7	4.4	4.3	4.1	4.1	6.7

Dust diameter (μm)	16	24	32	48	64	96	128	192
D-Chemical ash (%)	6.4	6.0	4	6.3	5.7	5.6	24.1	8.1
D-Glass ash (%)	2.6	7.8	0	0	8.8	3.7	22.6	7.6
U-Metal ash (%)	7.7	10.9	5.3	12.3	0.7	7.2	0	0

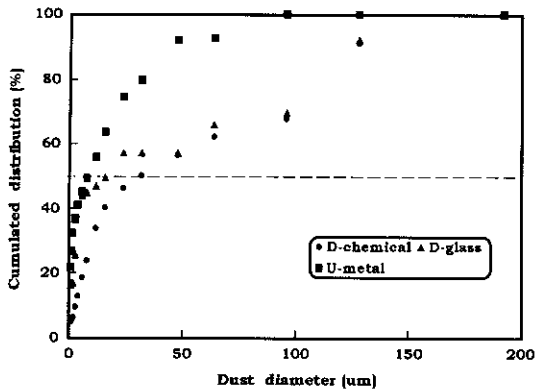


Fig. 3. Particle size distribution for each samples.

상 및 입경 분포 조사를 거친 포집 먼지와 조합하여 실험하였고, 표 3과 그림 3에 사용먼지의 입경별 중량 분포율을 나타내었다. 각각의 먼지는 실험에 사용하기 전에 건조기에서 완전 건조 후 항온·항습기에서 보관하다가 실험직후 필요량만큼 정량하여 사용하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 Pilot Scale (60 O.D. × 10 t × 600 L)

##### 원통형 세라믹 필터를 통한 압력변화

본 연구에서는 600°C의 고온 설정 온도에서 60 O.D. × 10t × 600L (flange 포함)의 세라믹 필터 3종류와 길이 1,000 mm의 세라믹 필터 4종류를 제조하여 물성 실험을 거친 후 그림 2에 나타난 고온 세라믹 필터 실험장치를 이용하여 여과 성능을 조사하였다.

사용전 세라믹 시편을 통과하는 가스유량을 통한 차압변화에서 보여 질 수 있는 시편 자체 통기저항값 ( $K_1$ )은 실험에 사용한 각각의 시편에 대하여 적용 온도 600°C에서 계산되었다. 사용하지 않은 깨끗한 필터를 통한 가스흐름에 연관되어진 차압변화에서 필터자체 결정구조, 온도, 압력은 식(1)에서 계산되어진다. 또한 필터 재질에 따른 통기저항은 기공성 여과재를 통한 유체흐름을 기술하기 위하여 온도의 영향은 Darcy's law가 점도의 변화로부터 기인한다는 일반적인 결과에서부터 시작한다(Seville *et al.*, 1988).

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

$-\frac{dp}{dz}$  : pressure gradient of gas flow

$U$  : face velocity

$\rho$  : gas density

$\mu$  : gas viscosity

$K_1$  : flow resistance for a gas viscosity

$K_2$  : flow resistance for a gas density

식(1)의 오른쪽 첫째항은 가스점도( $\mu$ )의 영향을 받고 그리고 둘째항은 가스밀도( $\rho$ )의 영향을 받는데 두 저항 구분은 여과재 자체 구조에 의해 좌우된다. 실험적으로는 흔히 고온에서 필터를 통과하는 유체의 통기저항은 가스점도에 의한 영향이 우세하여 가스밀도에 의한 영향은 무시한다(Seville *et al.*, 1993; Cooper and Alley, 1990).

Thick-walled cylindrical candle을 통한 유량흐름을 고려한 차압에서 Darcy's law 적용은 원통형 세라믹 필터의 외경( $D_0$ ), 내경( $D_i$ )이 포함된 식(2)으로도 표현되어진다(Seville *et al.*, 1993).

$$\Delta P = \left[ \frac{K_1\mu UD_0}{2} \right] \times [\ln(D_0/D_i)] \quad (2)$$

$D_0$ : Outside diameter

$D_i$ : Inside diameter

본 연구에서도 앞선 디스크형 필터실험에서의 필터보다 외형 부피가 커진 고온용 세라믹 필터의 통기저항 영향을 조사하기 위하여 온도를 증가시키면서 유속 변화에 따른 차압변화를 조사하였다. 외형적으로 커진 표면적을 감안하여 필터자체가 가지는 통기 저항값이  $1.1 \times 10^{11} \sim 1.7 \times 10^{11}/m^2$ 로 조사되었다.

#### 3.2 Pilot Scale (60 O.D. × 10 t × 600 L)

##### 원통형 세라믹 필터의 집진효율

표 4는 실험에 사용한 pilot scale 세라믹 필터별 총 집진 효율과 입경별 집진효율을 나타내었다. 여과속도 10 cm/sec에서 세라믹 필터(1)은 총 운전시간이 4시간 진행되었고, 세라믹 필터(2)는 24시간, 세라믹 필터(3)은 90시간의 운전시간에서 총 입경별 집진 효율이 조사되었다. 실험에 사용한 각각의 먼

Table 4. Collection efficiency of 60 cm long ceramic filter.

Dust	Diameter (μm)	Size distribution (%)	Removal efficiency (%)
D-Chemical ash	≥ 16	59.8	99.97
	6 ~ 16	21.6	99.85
	3 ~ 6	9.1	99.67
	1 ~ 3	4.6	99.68
	≤ 1	4.9	99.30
Filter 1.			99.87
D-Glass ash	≥ 16	50.5	99.99
	6 ~ 16	5.5	99.91
	3 ~ 6	18.4	99.99
	1 ~ 3	9.2	99.97
	≤ 1	16.4	99.53
Filter 2.			99.88
U-Metal ash	≥ 16	36.4	99.98
	6 ~ 16	18.5	99.96
	3 ~ 6	8.4	99.92
	1 ~ 3	14.9	99.99
	≤ 1	21.8	99.22
Filter 3.			99.90

지입자에 있어서 MMD (Mass Median Diameter)는 D-화학 포집회 (31.6 μm), D-유리 포집회 (16.5 μm), U-금속 포집회 (8.5 μm)로 총 집진효율에서 U-금속 포집회의 MMD가 가장 작음에도 불구하고 가장 높은 집진 효율을 보였다. 또한 1 μm 이하의 미세 입자 분포에서는 U-금속 포집회의 입도 분포율이 21.8%로 가장 많은 분포율을 가짐에도 99.22%의 높은 효율을 가지는 반면, D-유리 포집회는 16.4%에 있어서 88.18%의 낮은 집진 효율을 보였다. 이러한 결과는 점착성 및 점성과 같은 입자 자체가 가지는 물리적 특성, 세라믹 필터 재질과 먼지와 상호 작용등에 대한 연구의 필요성을 암시한다. 또한 전체 필터를 통하여 입자의 입경이 적어질수록 집진 효율도 감소하는 집진기의 전형적인 결과도 나타내었다.

3. 3 Pilot Scale (60 O.D. × 10 t × 600 L)

원통형 세라믹 필터의 안정화

그림 4는 장시간 연속 운전 시에 세라믹 필터의 차압변화를 보이는 것으로 최대 집진 효율을 갖기 위한 세라믹 필터의 안정화 (conditioning) 진행단계를 나타내고 있다. 장시간 여과 및 탈진을 반복한

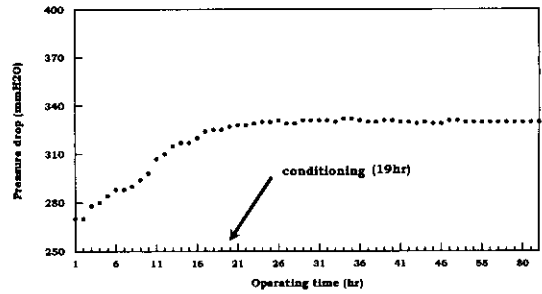


Fig. 4. Conditioning of the ceramic fiber filter.

후에도 탈진 직후의 baseline 차압이 큰 변화가 없이 차압을 일정하게 유지하여 이를 ‘안정화 (conditioning)’ 상태라고 한다. 이렇게 안정된 상태에도 달된 필터는 장시간 (1년 이상) 사용이 가능한데 이는 표면 여과 (surface filtration)가 이루어졌기 때문이다. 세라믹 필터에 있어서 불안정화 (non-conditioning)의 원인은 매우 다양하다. 즉, 표면여과 속도가 필터 여과체 안으로 입자를 관통시킬 만큼 충분히 크거나, 탈진 시스템이 잘못 설계되어 적당한 탈진이 이루어지지 않을 때, 그리고 cake의 점착성이 탈진을 막을 만큼 충분히 클 때 주로 발생한다. 또한 불안정한 상태를 보여주는 탈진직후 baseline 차압이 계속적으로 증가하는 데는 여러 가지 이유가 있다. 즉, 너무 높은 여과 속도를 선택했을 때, 펄스 압력이 충분하지 않을 때, 먼지 유입량이 너무 많아 원활한 여과가 이루어지지 않을 때, 실험에 사용되어진 입자 자체가 너무 미세하여 필터 여과체의 기공 속으로 들어가 기공을 막는 침투여과를 일으킬 때, 그리고 입자 특성상 부착성이 너무 강하여 원활한 탈진이 이루어지지 않을 때로 분석되어진다. 이러한 각각의 원인들은 단독으로 좋지 않은 안정화 상태를 보이는 때도 있지만 통상 여러 원인이 복합적으로 작용하여 세라믹 필터의 효율상태를 나쁘게 한다 (Berbner and Pilz, 1996). 본 실험에서는 탈진직후 차압이 260 mmH<sub>2</sub>O를 시작으로 19시간까지 계속 5~10 mmH<sub>2</sub>O씩 증가하는 값을 보이다가 320 mmH<sub>2</sub>O의 차압에서 탈진직후 차압이 거의 변화가 없는 안정화 상태를 90시간 운전까지 보였다. 90시간 운전 후에 몸체로부터 분리되어진 세라믹 필터는 전체 필터를 통하여 일정한 두께의 cake이 형성

**Table 5. A comparison of characteristics of the low density ceramic filter.**

Spec.	Filters	KE 85/60* × 985	KE 85/60* × 1515	Project
Outside diameter $\Phi_o$ [mm]		60	60	60
Inside diameter $\Phi_i$ [mm]		42	42	40
Length of element L [mm]		985	1,515	1,000
Length of collar $L_1$ [mm]		10	10	37
Weight/Element [g]		300	450	500
Thickness [mm]		9	9	10
Density [ $g/cm^3$ ]		0.18	0.18	0.26
Pore volume [%]		93	93	90
Surface area/Element [ $m^2$ ]		0.19	0.28	0.19
Collection efficiency [%]		99.9	99.9	99.7
Baseline $\Delta P$ [ $mmH_2O$ ]		200	200	250

\*Pyrotex®KE85 from BWF Co, FRG

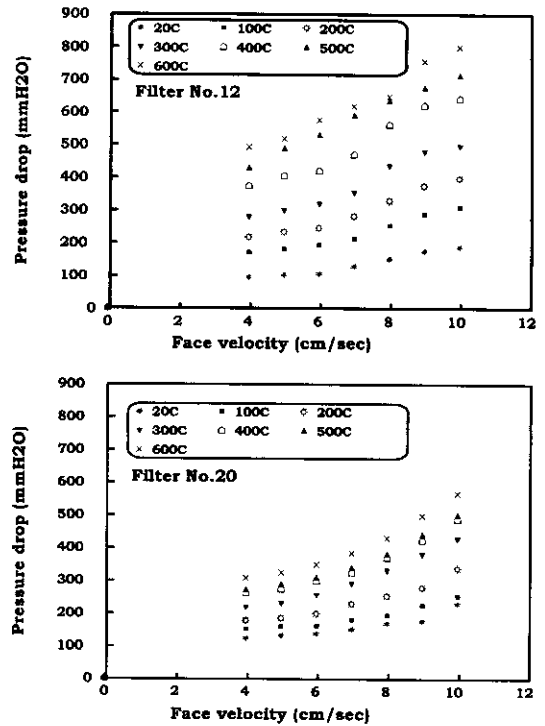
되었으며 열적·기계적 충격에 의한 손상은 나타나지 않았음을 육안 관찰로 확인할 수 있었다.

### 3. 4 Full Scale (60 O.D. × 10 t × 1,000 L)

#### 원통형 세라믹 필터의 압력변화

부가적으로 고온용 세라믹 섬유형 필터의 실제적용 규모 (60 O.D. × 10t × 1,000L)로 제조하여, 필터 성능시험의 기초 조사를 실시하였다. 또한 외국 유사 세라믹 필터와의 물성 및 성능 비교 조사도 함께 실시하였다. 표 5에서는 본 연구에서 수행되어진 저밀도 세라믹필터와 독일의 BWF사 고온용 세라믹 필터의 제원과 집진 효율 그리고 200시간 연속 운전후의 baseline 차압변화를 비교하였다. 외형 크기, 기공율 그리고 집진 효율은 거의 유사하였고 baseline 차압은 본 연구에서 사용한 필터가 50 mmH<sub>2</sub>O 정도 높지만 타당한 유사 차압을 보이는 것으로 나타났다(Seville *et al.*, 1996).

고온용 세라믹 필터 성능시험의 기초 자료로 실제적용 규모 세라믹필터의 경우 외국 문헌에 조사된 Darcy's law 통기저항 값보다 다소 높게 나타났는데 이는 성능 실험시에 초기 baseline 차압을 높이는 결과로 나타났다. 그림 5는 600°C에서 세라믹 필터 (12), (20), (24), (34)가 갖는 통기 저항값으로 각각  $K_1=2.74 \times 10^{11}/m^2$ ,  $K_1=1.44 \times 10^{11}/m^2$ ,  $K_1=1.62 \times 10^{11}/m^2$ ,  $K_1=2.11 \times 10^{11}/m^2$ 로써 필터를 통한 초기 차압증가는 외국 제품과 비교하여 다소 높지만, 필터 사이에 통기 저항값이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 반복성형에 있어서 필터가 가지는 자체 저항



**Fig. 5. Flow resistance of the filter 12 and the filter 20 at various temperatures.**

의 균일성을 나타낸다.

또한 세라믹 필터의 여과 직후 필터를 본체로부터 제거하여 먼지 여과 및 탈진 상태를 조사한 결과 필터 전 표면에 걸쳐 매우 고르게 집진된 상태를 보였지만 필터 flange부분에서는 하단부보다 더 두꺼운 먼지 Cake이 부착되어 전체 필터를 통하여 효율적인 탈진이 일어나지 않았다.

### 3. 4 Full Scale (60 O.D. × 10 t × 1,000 L)

#### 원통형 세라믹 필터의 집진효율

표 6은 1,000 mm 길이의 고온용 세라믹 필터 종류별, 먼지종류별 총 집진 효율과 입경별부분 집진 효율을 나타내는데 여과속도 10 cm/sec에서 1 μm의 미세입자에 대하여 모든 필터에서 집진효율이 낮게 나타나 미세먼지의 관통 (penetration)이 많음을 보였다. 세라믹 필터 (5)에서는 99.52%의 집진효율을 보였고, 세라믹 필터 (27)에서는 1 μm 이하 입자에 대하여 99.6%의 집진효율을 보였다. 총 집진 효율



Table 6. Collection efficiency of 1 m long ceramic filter.

Dust	Diameter (μm)	Size distribution (%)	Removal efficiency (%) - ①	Removal efficiency (%) - ②
D-Chemical bag filter ash	≥ 16	59.8	99.98	99.96
	6~16	21.6	99.94	99.83
	3~6	9.1	99.90	99.62
	1~3	4.6	99.96	99.62
	≤ 1	4.9	99.52	99.61
①-Filter 5, ②-Filter 20			99.94	99.84
Dust	Diameter (μm)	Size distribution (%)	Removal efficiency (%) - ③	Removal efficiency (%) - ④
U-Metal bag filter ash	≥ 16	36.4	99.97	99.93
	6~16	18.5	99.97	99.88
	3~6	8.4	99.93	99.89
	1~3	14.9	99.98	99.98
	≤ 1	21.8	99.92	99.88
③-Filter 27, ④-Filter 34			99.96	99.92

면에서는 99.84~99.96% 범위의 높은 집진 효율로 조사되었고, 전 단계 실험에서의 동일하게 U-금속 포집회의 MMD가 더 작음에도 불구하고 훨씬 높은 집진을 보였다.

그림 6은 100~200시간 연속 운전한 baseline 차압변화를 보여주는데 제조필터에 있어 최대 여과 효율을 갖기 위한 안정화 진행상태를 나타내고 있다. 외국의 실험 자료에서도 나타났듯이 제조된 필터를 100~200시간 연속 운전하면 안정화가 이루어지는지를 확인할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Seville *et al.*, 1988). 1,000 mm 길이로 제조된 저밀도 세라믹 필터는 BWF 제품과 거의 유사한 baseline 차압을 보여주고 있어 안정화 이후 장시간 운전에 가능성을 크게 하였다. 170시간 후에 안정화됨을 보인 세라믹 필터 (5)의 작동시 실험조건은 여과속도 10 cm/sec, 탈진압 3 kg/cm<sup>2</sup>, 탈진주기 5 min, pulse valve opening time 300 msec로 조정하여 처음 여과시간동안 147 mmH<sub>2</sub>O 차압을 시작으로 5~7 mmH<sub>2</sub>O의 일정한 상승폭을 유지하며 안정화 단계를 거쳐 250 mmH<sub>2</sub>O ± 5 mmH<sub>2</sub>O의 차압을 유지하였다.

세라믹 필터 (24)의 시간에 따른 차압변화에서는 100시간 후에도 baseline 차압이 계속 증가하는 불안정화상태를 보였다. 그림 6에 나타나 있듯이 세라믹 필터 (5)와 동일한 실험 조건에서 안정화실험을 수행하였는데 여과시간동안 baseline 차압이 계속 증

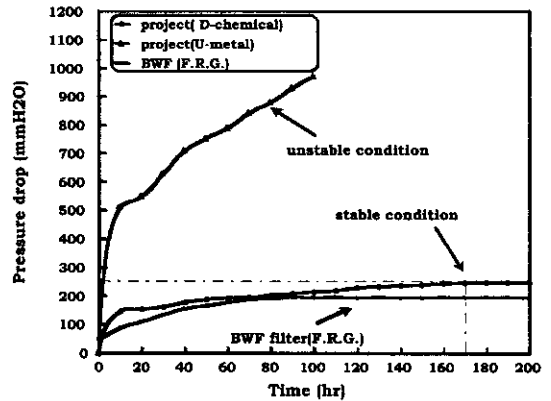


Fig. 6. Comparison of stable and unstable conditioning.

가하는 불안정한 상태를 유지하였다. 먼지주입이 없는 동안에도 필터에 형성된 cake으로 인하여 880 mmH<sub>2</sub>O의 차압을 계속 유지하였으며, 탈진압을 4 kg/cm<sup>2</sup>으로 높였을때 약 ±50 mmH<sub>2</sub>O의 차압 감소를 보이고 침투여과에 의한 효율 저하 현상을 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원판형 (50φ×10t) 세라믹 필터 여과 특성결과를 토대로 세라믹 필터 표면적을 증가시킨 외경 60 mm, 내경 40 mm, 두께 10 mm 그리고 600 mm 길이의 필터 여과특성 실험에서도 99%의 높은 집진효율을 보였다. 아울러 장시간 운전에 대한 내구성과 최대 집진효율을 갖기 위한 필터 안정화 진행에서의 차압변화 실험에서도 탈진 직후 baseline 차압이 19시간 후에 320 mmH<sub>2</sub>O를 전후하여 일정하게 유지하여 90시간까지 지속되어 600°C 이상의 고온에서 장시간 안정적으로 사용할 수 있는 고온용 세라믹 필터로서의 가능성을 보였다.

실적용 규모인 길이 1,000 mm 원통형 세라믹 필터 (cylindrical ceramic filter)의 여과 특성 연구에서는 1.4×10<sup>11</sup>~2.7×10<sup>11</sup>/m<sup>2</sup>의 통기 저항값으로 일정한 범위를 유지하여 필터 제품의 균일성을 보였다. 총 여과 효율면에서는 99.8~99.96%의 높은 집진효율을 보였는데 이러한 최대 여과효율을 갖기 위한 안정화 진행 차압변화에서는 170시간 후에 250 mmH<sub>2</sub>O를 전후한 일정한 차압이 지속됨을 보

였다. 안정화 상태에서의 운전조건으로는 적용온도 600°C에서 여과속도 10 cm/sec, 탈진강도 3 kg/cm<sup>2</sup>, 탈진주기 5 min, 탈진시간 300 msec, 먼지유입량 1 g/min으로 실험 조사되었다. 또한 외국의 상용화 제품인 BWF사(독일)의 KE85 Series와의 제원비교 결과 밀도의 증가로 인한 기공율이 다소 낮고, 안정화 상태에서의 차압이 50 mmH<sub>2</sub>O 정도 높게 조사되었다. 그러나 여과 효율면에서는 99.7%로 큰 차이를 보이지 않아 현장적용이 가능한 고온 집진필터로서 탁월한 여과특성을 제시하였다.

### 참 고 문 헌

김용진, 정상현 (1995) 새로운 집진기술 동향, 한국대기보전학회, 11(3), 221-223.  
 이재춘, 홍민선 (1993) 고온 여과재료 개발 및 실용화에 관한 연구, G-7 제 1차년도 연차보고서.  
 이재춘, 홍민선 (1995) 고온 여과재료 개발 및 실용화에 관한 연구, G-7 제 1단계 3차년도 단계보고서.  
 이재춘, 홍민선 (1996) 고온·고압 세라믹 여과재 집진기술 개발 및 실용화에 관한 연구, G-7 제 2단계 1차년도 연차보고서.  
 홍지형 (1996) 먼지규제 정책의 현황과 전망, 입자상 오염물질 처리 신기술 기술강습회.  
 Lee, H.C. (1995) Flue gas desulfurization technology, 환경산업 기술세미나, 한·미산업기술협력 재단.  
 Berbner, S. and T. Pilz (1996) Characterization of the filtration and regeneration behaviour of rigid ceramic barrier filters at high temperature, Powder Technology, 86.  
 Burnard, G.K., A.J. Leitch, J. Stringer, and R.K. Clark (1993) Operation and performance of the EPRI hot gas

filter at Grimethorpe PFBC establishmint: 1987-1992, Gas Cleaning at High Temperatures, Blackie Academic Professional, 88-110.  
 Chongqing, L. (1991) An experimental and analytical investigation on hot gas cleanup for PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion)", Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy.  
 Cooper, C.D. and F.C. Alley (1990) Air pollution control a design approach, Waveland press, Inc.  
 Lippert, T.E., D.F. Ciliberti, O.J. Tassicker, and S.G. Drenker (1986) Test and development woven fabric bag and ceramic candle filters for HTHP application, I Chem E Symp Ser, (99).  
 Reid, R.C., J.M. Prausnitz, and T.K. Sherwood (1987) The properties of gases and liquids McGraw-Hill, New York.  
 Seville, J.P.K., R. Clift. F. Eng. and F.I. Chem (1996) Further tests on Foseco gas filter media : Cerafil 12H10 & EDNEL Commercial in confidence.  
 Seville, J.P.K., R. Clift. C.K. Withers, and W. Keidel (1988) Rigid ceramic media for filtering hot gases, Filtration & Separation, 26, 265-269.  
 Seville, J.P.K., S. Ivatt, and G.K. Burnard (1993) Recent advances in particulate removal from hot gas process gases, High Temperature Gas Cleaning, Blackie Academic Professional, 3-26.  
 Weber, C. (1988) Advances in hot gas filtration technology, Filtration & Separation, 25, 100-103.  
 Withers, C.J., A.A. West, and R.S. Courtney (1989) Improvements in the performance of ceramic media for filtration of hot gases, conference.