

고온 집진용 탄화규소 세라믹 캔들 필터의 특성 연구

홍민선 · 문수호 · 김순태 · 이동섭*

아주대학교 환경공학과, *경운대학교 환경공학과

A Study on Characteristics of SiC Ceramic Candle Filters Applicable to Hot Gas Filtration

Min-Sun Hong, Su-Ho Mun, Soon-Tae Kim and Dong-Sub Lee*

Department of Environmental Engineering, Ajou University

*Department of Environmental Engineering, Kyungwoon University

요 약

최근 세라믹 필터에 대한 연구는 열악한 환경 및 산성가스에 대한 저항성으로 인해 고온 가스 여과에서 가장 전망 있는 기술로 부각되는 시점에 있다. 본 연구의 목적은 탄화규소(SiC) 세라믹 캔들 필터를 사용하여 IGCC와 PFBC의 새로운 전력생산 공정에서 배출되는 먼지를 제거하기 위한 필터성능을 조사하기 위함이다. 필터의 성능 평가는 고온·고압, 고온·상압 조건에서 이루어졌으며 필터의 압력강하, 먼지 제거효율, 저항 계수, 그리고 열적·기계적 저항성 등을 파악하였다. 길이 30 cm, 60 cm 필터에 2종류의 먼지(코크스와 물유리 공정)를 이용하여 나타난 먼지 제거효율은 99.9% 이상을 보였으며 필터의 평균 기공 크기가 감소함에 따라 압력강하가 증가함을 확인하였다. 또한 탄화규소 세라믹 필터의 성능은 내부압력이 증가할수록 압력강하가 감소하고 유량이 증가할수록 압력강하가 증가함과 특히 유체에 대한 압력강하 변화는 온도의 영향보다는 상대적으로 내부압력에 더 많은 영향을 받음을 확인하였다.

Abstract— Rigid ceramic filters have emerged as the most promising technology for hot gas cleaning due to their resistance to attack by aggressive gases and high temperature. In this study, Silicon Carbide (SiC) ceramic candle type filters able to remove fine dust particles from exhaust gas stream at brand-new type of coal-combustion power generators such as IGCC and PFBC were examined under the high temperature - high pressure (800°C and 10 atm : HTHP) and high temperature - 1 atm conditions, respectively with operating parameters like pressure drop, dust removal efficiency, filter resistance coefficient, and thermal & mechanical resistance. The results from dust particles removal treatment over two sorts of dust from cokes and water-glass processes using SiC ceramic filters (600.D×10Thick×300Long) at 600°C and 1 atm showed high removal efficiencies. As expected, pressure drop increased when mean pore size decreased. Other treatments with the elongated SiC ceramic filter (600.D×10Thick×600Long) under the same condition showed that pressure drop had the values in the range of 187~391 mmH₂O as a linear function of temperature and flow rate, satisfying Darcy's law. Under HTHP conditions, performance results with the SiC ceramic filters showed that pressure drop decreased as vessel internal pressure (3~9 atm) increased and increased linearly as air flow rates increased. Especially in case of large vessel internal pressure, it is that influence of vessel internal pressure on the pressure drop were larger than that of temperature.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 대기오염의 주종을 이루는 인체에 가장 유해한 먼지 입자는 산업공정의 유류 및 화

석연료, 보일러, 자동차, 제철/제강, 시멘트 제조 및 폐기물 소각 등의 각종 연소, 생산 제조공정에서 발생되고 있다. 또한 산업체에서는 먼지 배출허용농도의 강화에 대응하는 대기오염 방지 측면과 인간의 호흡기에 유

입되는 미세먼지의 포집, 제거를 위해 고효율 집진 기술을 필요로 하고 있다. 기존의 사용된 사이클론을 병합한 백 필터, 전기 집진기, 습식 스크러버 등은 좁은 온도 한계 범위, 이로 인한 배가스의 냉각장치 필요성과 요구되는 배출 기준을 맞추기 어려운 단점들을 지니고 있어 더욱 효율적인 비투과성 여과(Barrier Filtration) 기술이 요구된다. 따라서 고온 가스 여과 기술 (Hot Gas Cleanup Technology)의 발전은 입자상 오염물질의 배출 규제에 대체하고 고온 고압의 혹독한 환경의 배출조건을 극복 할 수 있는 barrier 형태의 필터 즉 세라믹 필터가 요구에 부응하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 고온 가스 여과 기술은 고온 여과 조건의 필수적인 냉각장치나 열교환기 등이 필요 없는 장점과 고온에서 먼지를 제거함으로써 배기 시설의 후처리를 간단히 하고 배가스를 고온에서 폐열 활용으로 전환 할 수 있는 점에서, 에너지 절약과 환경오염 저감이 절실히 요청되는 차세대에 필수적인 기술로써의 장점을 지닌다^{[8][16]}. 그리고 최근 세계적으로 전력 에너지에 대한 요구와 증대성이 점증되는 바 석탄화력 발전이 연료, 에너지의 source로써 새로운 중요성을 가지게 되었고, 유동층 연소(Fluidized Bed Combustion)와 석탄의 유동층 가스화(Fluidized Bed Gasification)는 고온(1000°C), 고압(20 atm)의 혹독한 환경에서 보다 나은 효율과 경제성을 제공할 수 있는 가스여과에 대한 재료의 개발이 필요하게 되었다^[2]. 또한 최근 환경기준 강화에 따른 각종 소각로 및 산업체의 고온배기가스(용해로, 제철소의 용광로, 화력발전소, 화학 plant 공장 등)에 포함된 입자상 오염물질과 SO_x, NO_x, CO 등을 규제치 이하로 낮추기 위해서 세라믹 고온 필터에 대한 산업체의 요구가 커지고 있다. 현재 화력발전의 경우, 보다 나은 효율을 위해 PFBC와 IGCC 시스템에서 고온·고압 상태로 배출되는 먼지에 의한 가스 터빈의 마모와 부식을 방지하기 위하여 고온 필터에 대한 연구개발이 또한 활발히 진행되고 있다^{[9][11]}. 그래서 현재는 국외의 고온 필터 적용대상의 대표적인 공정인 PFBC(Pressurized Fluidized Bed Combustion)와 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)의 공정에 적용되고 있는 고온 필터의 성능시험 자료를 분석하여 고효율 고온 필터 개발을 위한 기초자료로의 활용이 증대되고 있는 실정이다. 효율적인 PFBC 공정에서 배출가스 증기는 고농도의 먼지와 증기화된 알칼리 Sulfates와 같은 다양한 오염물을 운반하여 만약 배가스의 정화(cleaning) 없이 가스 터빈에 도달되는 것이 허용되면 이 부하 오염물들은 가스터빈 blade 수명을 악화시키는 등 전체 process에 악 영향을 미칠 것이므로^[10] 고온·고압에 적용 가능한 탄화규소 세라믹 필터의 사용은 널리 증대될 전망이다. 이에 본 연구는 고밀도 탄화규소(Silicon

Carbide) 세라믹 필터를 제조하여 고온·상압과 고온·고압 조건의 실험을 통해 필터의 집진 효율, 압력강하, 열적·기계적 저항성 등의 파악을 통해 탄화규소 필터의 적정 제조 조건을 도출하여 고온 고압용 먼지 제거 시스템의 기초자료로서의 활용을 증대하는데 그 목표를 두었다.

Table 1. Properties of dusts.

(A) water glass process

분석 항목	먼지종류	물 유리 공정 먼지
Proximate analysis (wt %)		
Moisture		1.01
Volatile		30.03
Ash		68.96
Fixed carbon		0.00
Heating Value (Kcal/Kg)		454.7
Elemental composition (wt %)		
SiO ₂		13.04
Al ₂ O ₃		0.07
Fe ₂ O ₃		1.06
CaO		2.13
MgO		0.21
K ₂ O		0.17
Na ₂ O		35.6
TiO ₂		0.08
MnO		ND
SO ₃		43.01

ND : 검출되지 않음

(B) Cokes process

분석 항목	먼지종류	코우크스 공정 먼지
Proximate analysis (wt %)		
Moisture		0.21
Volatile		2.55
Ash		13.93
Fixed carbon		83.31
Heating Value (Kcal/Kg)		6818
Elemental composition (wt %)		
SiO ₂		5.86
Al ₂ O ₃		2.06
Fe ₂ O ₃		1.69
CaO		1.00
MgO		ND
K ₂ O		0.15
Na ₂ O		0.08
TiO ₂		0.06
MnO		0.01
P ₂ O ₅		0.14

ND : 검출되지 않음

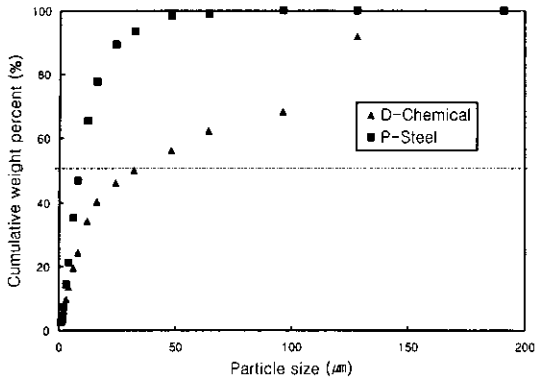


Fig. 1. Dust size distribution.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 적용 먼지

실험에 적용된 먼지는 국내 산업체에서 발생하는 P-Steel Co.의 코우크스 공정과 D-Chemical Co.의 물유리 공정 먼지를 사용하였는데 각기 다른 배출공정에서 채집 후 성상 및 입경분포 조사를 거친 후 적용되었다. 사용먼지의 성상은 Table 1에, 입도 분포는 Fig. 1에 나타

나 있다. 물유리 공정 먼지의 질량 평균 크기(mass median diameter)는 31.6 μm이고 먼지의 입경분포 중 96~128 μm가 24%로 가장 많이 차지하고 1.0 μm 이하가 약 5% 함유되었다. 그리고 코우크스 공정 먼지의 질량 평균 크기는 8.7 μm이고 4~20 μm의 입경분포가 약 70%, 미립자인 1.0 μm 이하인 것이 약 2.5% 함유되었다. 각각의 먼지는 실험에 사용하기 전에 건조기에서 완전 건조 후 항온·항습기에서 보관하다가 실험시 필요량만큼 정량하여 사용하였다.

2-2. Pilot plant 장치 및 실험방법

본 연구는 고온·고압용 Pilot Plant 실험장치를 사용하여 SiC 세라믹 필터의 먼지제거 효율 및 필터 특성에 대하여 조사하였으며, 실험장치는 먼지공급, ceramic filter 장착 본체, 공기압 발생, 저장 및 이송장치, pulse-jet 탈진 시스템 장치, 가스 배출장치 등으로 구성되었다 (Fig. 2). 고온·고압용 Pilot Plant의 본체는 캔달(kanthal) 열선이 내장된 도가니를 이용한 10kw 용량의 전기히터로 온도를 800°C 이상으로 올릴 수 있게 하였으며 열 손실이 없도록 5~10 cm 두께로 석면 단열재를 housing과 함께 설치하여 빠른 가열을 도모하였고, main controller 판넬에 제어장치가 설치되어 설정 온도 조절을 가능케

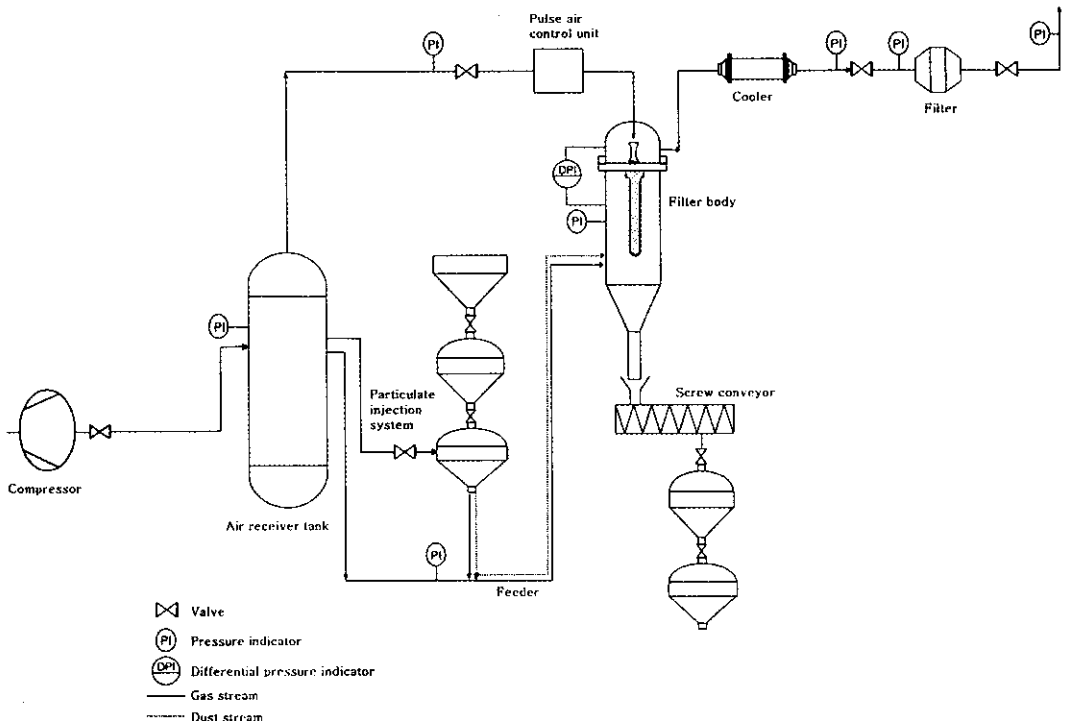


Fig. 2. Flow diagram of pilot plant apparatus.

Table 2. Operation conditions of pilot plant apparatus.

구분	설계 및 작동범위	비고
본체	SUS 및 Castable	외부 단열
운전 온도 (°C)	800	상시 운전 온도
운전 압력 (atm)	10	상시 운전 압력
최대 압력 (atm)	13.5	최대 운전압력
유량 (Nm ³ /hr)	100	최대 300
탈진 강도 (atm)	13.5	최대 17
탈진 시간 (sec)	0.1	timer 이용 조절
탈진 주기 (min)	15	timer 이용 조절
제진 방식	screw conveyor	연속가변 rpm

했다. 본 장치는 15 kw의 압축기를 이용하여 1 m³ 용적을 지닌 air tank 내의 압력을 13.5 기압으로 일정하게 유지하며 15기압 이상으로 압력이 올라갈 경우 안전 밸브가 작동하여 탱크의 안정성을 도모하였고, 성능시험 장치 운전 시 압축공기는 감압 밸브를 통해서 10기압으로 낮추어져 본체로 일정하게 유입된다. 배가스는 열교환기를 거쳐 온도가 감소되고 감압 밸브를 통해 3기압으로 감압되어 HEPA 필터와 유량계를 통과한 후 stack으로 배출된다. 먼지 투입은 압력저장 탱크에서 감압 밸브를 거쳐 먼지 저장 탱크 압력을 11기압으로 유지시켜 주며, solenoid/diaphragm 밸브를 이용하여 주요 본체 덕트와 압력차에 의해 밸브 개·폐를 통해 이루어지며, 본체의 온도가 800°C, 압력이 10기압 조건에서 먼지 저장 탱크를 이용 가압하여 먼지가 투입되게 설정하였다. 본체 hopper로부터 먼지 제거는 screw conveyor를 이용하여 제1차 저장 탱크 쪽으로 이송시키며, 제1차 저장 탱크는 10기압을 유지하고 일정한 먼지가 쌓이면 밸브를 조절하여 저압 탱크쪽으로 이송시키는 방식을 취하였다. Table 2는 Pilot Plant의 운전 조건을 보여준다.

3. 탄화규소 필터 제조 및 물성

탄화규소 물질은 다이아몬드의 경도에 달하는 표면을 가지고 침식(abrasion)에 대한 뛰어난 저항성을 가지고

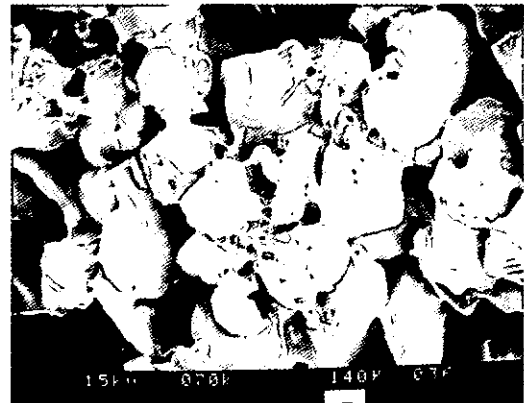


Fig. 3. SEM Photograph of SiC filter (70x).

있는 훌륭한 열적 전도체이다. 유리 입자들의 응결체가 가열될 때 가장 단순한 단상 소결인 점성소결(Viscous Sintering) 방식으로 제조된 탄화규소 세라믹 필터는 SiO₂ 나 Al₂O₃ 등의 세라믹 소재보다 산 및 알칼리에 대한 부식성, 열충격 저항 등이 우수하며 특히 방사성 폐기물 소각로의 먼지 포집용 필터의 소재로 사용되고 있다¹⁾. 고온 고압용 여과재로 사용되는 탄화규소 필터는 일정한 크기(예로 10~150 μm)의 기공이 균일하게 분포되어 있으며 40% 내외의 기공율을 갖고 있다. 이러한 다공질 소재의 제조방법은 치밀한 소결체를 얻기 위한 일반적인 세라믹 제조방법과는 다르다. 또한 탄화규소는 매우 강한 공유결합을 갖는 물질로서(MOS 정도 9), 탄화규소입자를 서로 결합시키기 위해서는 특별한 소결조건, 예로 고온 및 소결 분위기, 소결조제(Sintering Additives) 혹은 결합제(Binding Materials)가 필요하다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 SiC 필터 전자현미경 사진(SEM)으로 70배 확대하여 나타난 필터 내부 성형상태를 보이는데 SiC 입자사이에 무기결합제가 지지체로서 형성되어 있음을 보여준다. 성형 및 건조, 소성기술과 관련장치를 통해 일정기공 크기분포를 갖는 실물크기(길이 30 cm 또

Table 3. Properties of SiC filter with 30 cm length.

물성	필터 번호										
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	
Weight/filtration area (kg/m ²)	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	
Porosity (%)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Mean pore diameter (μm)	72	60	64	83	83	90	77	77	45	43	
Air permeability (cc/min · cm ² · cmH ₂ O)	60	35	54	85	84	80	58	83	41	45	
Firing temperature	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₃	T ₄	T ₁	T ₄	T ₅	T ₁	
SiC particle size (μm)	230	230	230	150	150	150	150	150	300	300	
Type of binder	L	L	L	H	L	L	H	H	H	H	
Amount of binder	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁	W ₂	W ₁	W ₂	W ₁	W ₃	W ₃	

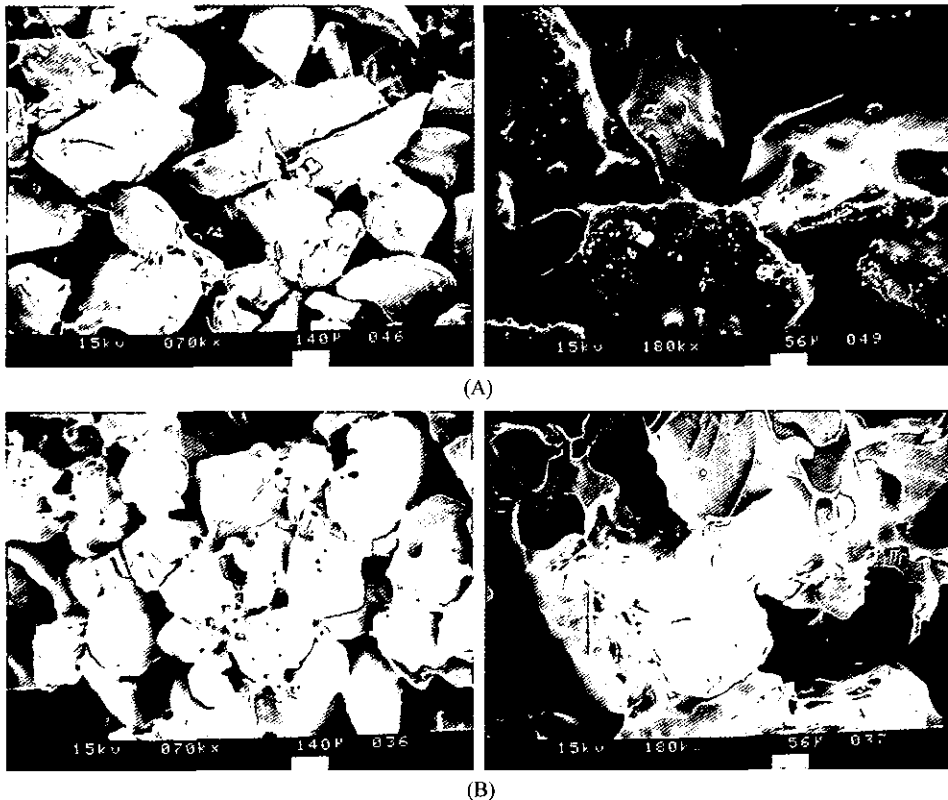
Table 4. Properties of SiC filter with 60 cm length.

물성	필터 번호						
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7
Weight/filtration area (kg/m ²)	23	23	23	23	23	23	23
Weight/element (kg)	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Density (g/cm ³)	1.88	2.04	1.84	1.84	1.89	1.94	1.97
Porosity (%)	39	34	43	42	40	38	35
Mean pore diameter (μm)	68	65	68	68	68	68	66
Air permeability (cc/min · cm ² · cmH ₂ O)	50	10	55	55	50	45	15
Firing temperature	T ₄	T ₄ +30°C	T ₄	T ₄	T ₄	T ₄	T ₄ +30°C
SiC particle size (μm)	230	250	230	230	230	230	250
Type of binder	L	H	L	L	L	L	H
Amount of binder	W ₁	W ₂	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁	W ₂

는 60 cm, 외경 6 cm, 내경 4 cm, 두께 1 cm) 모양의 고온 고압용 탄화규소 필터를 제조한 후 물성을 파악하였다. 효율 및 특성실험에 사용된 각각의 탄화규소 필터의 물성은 Table 3과 4에 나타나 있다. 동일한 결합제 첨가량과 탄화규소 원료 분말을 사용하여 제조된 필터의 경우(1-1,1-2,1-3)의 경우, 소성온도가 필터의 평균기공크기와 공기투과율에 영향을 미쳤다. 필터 1-4와 1-7

의 비교에서, 적정 소성온도라 생각되는 T₄ 보다 상당히 낮은 온도(T₁)와 무기결합제량이 일부 많이 주입된 경우(W₂)에 소성된 필터(1-7)는 용융되지 않은 내열성무기결합제가 덩어리형태로 존재하여 필터 1-4 보다 낮은 기공크기와 공기투과율을 나타냈다(Fig. 4).

Table 4를 통해서, 적정 소성온도 보다 높거나, 무기결합제량이 많은 필터의 경우, 평균기공크기와 공기투과

Fig. 4. SEM Photograph of SiC filter prepared at different firing temperature (A) T₁ (B) T₄.

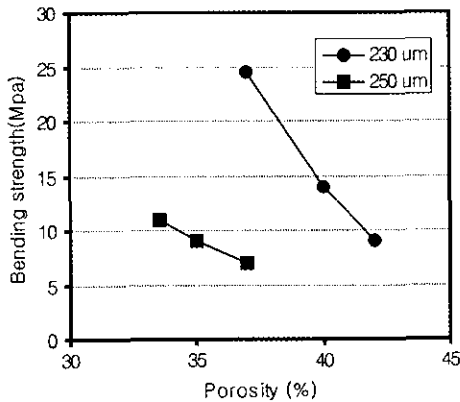


Fig. 5. Room temperature three-point bending strength of SiC filters as a function of porosity.

율이 낮게 나타났다(필터 2-2,2-7). 또한 탄화규소 입자 크기가 클수록 기공률이 작게 나타났는데 이것은 탄화규소 분말입자가 큰 반면, 입도분포가 넓기 때문에 탄화규소 입자가 작은것에 비해 기공률이 작게 나타난 것으로 보이며 기공률이 증가함에 따라 기계적 강도가 작아지는 것을 알 수 있다(Fig. 5).

결국, 평균기공크기와 공기투과율을 제어하는 인자는 원료로 사용하는 탄화규소 입자, 소성온도, 결합제 첨가량, 결합제 종류 등에 의존함을 확인하였다. 이렇듯, 필터의 물성에 변화를 준 이유는 집진 효율, 치압, 케익 형성, 적정 탈진 등 적정 집진 조건과 고온 고압 조건에서 견딜 수 있는 최적의 필터 특성을 도출하기 위해서이다. 실험에 사용된 길이 30 cm SiC 필터 10개 및 길이 60 cm 필터 7개의 제조 특성은 서로 다른 물성값을 지니고 있으므로 실험 결과를 통해 낮은 치압과 좋은 집진 효율을 갖는 필터 선택의 근거를 제시한다.

4. 결과 및 고찰

본 실험은 코우크스 공정, 물유리 공정 먼지를 집진 장치에 공급하여 고온·상압, 고온·고압 조건에서 각기 다른 조건에서(탄화규소 입자크기, 소성온도, 결합제 양과 종류) 제조된 탄화규소 캔들 필터(길이 30 cm, 60 cm)의 여과성능 결과를 도출하였다.

4.1. 고온 상압 실험

4-1-1. 가스 유체에 의한 압력강하

고온 가스 필터에 걸리는 일반적인 전체 압력강하는 주로 필터 vessel과 덕트라인에 의해 일으켜지는 압력강하, 필터의 압력강하(투과된 먼지입자와 잔류하는 먼지층을 포함하여) 그리고 침착된 먼지케익의 압력강하이다^[10]. 일

반적으로 알려진 평면의(planar) 다공성 필터를 통하는 압력강하는 식(1)의 Darcy's 방정식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서 $-dp/dz$ 는 flow의 방향에 압력 구배이며 배가스 점도에 의한 영향과 배가스 밀도에 의한 압력강하로 나누어 계산되어진다. 통상 가스의 점도는 시스템 압력에 독립적이며 실제 주어진 여과속도에서 필터를 가로지르는 압력강하는 시스템 압력과 무관하다. 필터 재질에 따른 통기저항은 기공성 필터를 통한 유체 유동을 기술하기 위하여 온도 영향은 Darcy's law가 점도의 변화로부터 기인한다는 일반적인 결과에서부터 도출되어지고, Ergun equation은 입자형 필터를 통한 유체유동을 식(2)와 (3)으로 표현하였다^[15].

$$K_1 = 150(1 - \epsilon)^2 \epsilon^{-3} (\Phi d)^{-2} \tag{2}$$

$$K_2 = 1.75(1 - \epsilon) \epsilon^{-3} (\Phi d)^{-1} \tag{3}$$

실험적으로 알려진 고온 가스 여과에 적합한 입자형 필터는 $\epsilon = 0.4$, $d = 40 \times 10^{-6} m$, $\Phi = 1$ 로서, 이러한 값들을 대입하여 $K_1 = 5.3 \times 10^{11} m^{-2}$ 그리고 $K_2 = 4.1 \times 10^5 m^{-1}$ 의 값을 얻었고, 이리하여 식(1)에서는 가스점도에 의한 영향이 우세함을 알 수 있다. 이것은 필터를 통과한 유체에 대하여 레이놀드 수는 1 보다 훨씬 작기 때문에 고온 가스 여과의 경우에 잘 맞는다. 식(1)에서 가스 점도에 대한 저항에 비하여 가스 밀도에 대한 저항이 아주 작기 때문에 식(1)은 식(4)로 표현 될 수 있다.

$$\frac{dp}{dz} = K_1 \mu u \tag{4}$$

필터를 만드는 성분 재료의 물성 때문에 식(2)는 더욱 일반적인 Kozeny equation 식(5)로 대체 될 수 있다^[6].

$$K_1 = K_k (1 - \epsilon)^2 \epsilon^{-3} S_0^2 \tag{5}$$

가스 점성유동(Viscous flow)에서, 고온 고압용 SiC 필터의 압력강하에 영향을 미치는 주요한 요인들은 유체 생성상과 기공 channel을 포함한 필터의 geometry인 것으로 알려져있다^[15]. 필터 자체가 가지는 통기저항값(K_1)과 이로부터 구해진 K_k 값은 필터 물성의 함수이므로, 제품의 대량 생산시에 필터 제품의 일관성에 기준이 되는 원하는 저항 특성을 지닌 필터를 설계하는데 중요한 인자이다. 본 실험에 적용된 탄화규소 캔들 필터에서의 압력강하는 가스유량에 선형적으로 비례하는 것으로 조사되었다(Fig. 6). 길이 30 cm 필터의 경우는 여과속도 6 cm/

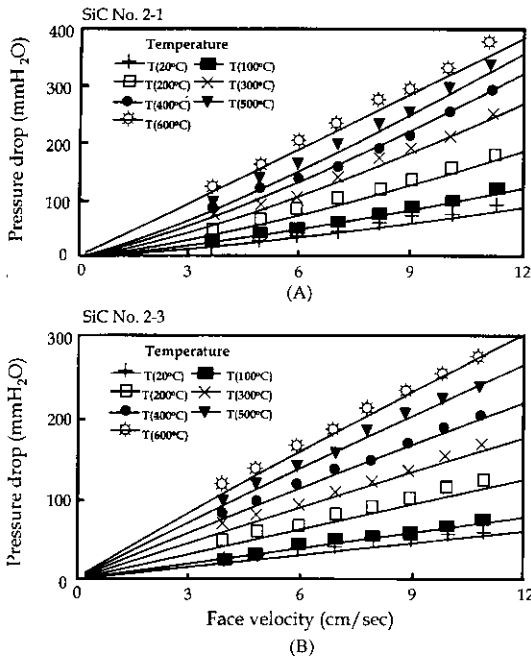


Fig. 6. Pressure drop of SiC filter with 60 cm length in terms of face velocity; (A) SiC No. 2-1 (B) SiC No. 2-3.

sec, 600°C 조건에서 60~140 mmH₂O 범위의 압력강하를(자료 미첨부), 60 cm 필터의 경우는 이 조건에서 150~250 mmH₂O의 값을 나타냈다. 이러한 같은 여과속도에서 필터의 압력강하 차이에 영향을 미치는 인자로는 여과속도와 온도 뿐 만 아니라 필터 자체 물성(기공율, 기공크기, 입자크기, 소성 온도 등에 기인한다고 알려져 있다¹⁴). 도출된 압력강하 결과로부터 30 cm와 60 cm 길이의 각 필터의 저항값은 Table 5에 나타나 있고 대부

Table 5. Filter resistance value of SiC filter with 30 cm and 60 cm length.

필터 번호	K ₁ (m ⁻²)	K ₂ (m ⁻¹)
길이 30 cm 필터		
1-6	3.793×10E10	1.516×10E7
1-7	3.755×10E10	2.081×10E7
1-8	1.150×10E10	4.092×10E7
1-9	1.215×10E10	2.120×10E7
길이 60 cm 필터		
2-1	7.175×10E10	1.139×10E7
2-2	3.514×10E11	7.024×10E7
2-3	6.856×10E10	4.047×10E6
2-4	6.520×10E10	7.469×10E6
2-5	6.419×10E10	1.875×10E7

분의 필터들이 Seville *et al.* 등이 제시한 필터 저항값의 범위(K₁ : 4×10¹⁰~5×10¹⁰ m⁻²)안에 있음을 확인할 수 있었다⁷.

4-1-2. 집진 효율

입자형 세라믹 캔들 필터의 여과효율은 일반적으로 매우 높은 것으로 알려져 있다⁶. 본 실험에 사용된 탄화규소 캔들 필터의 여과효율은 두 종류의 먼지 모두에서 전체적으로 상당히 높음(99.9% 이상)을 확인하였다. 먼지의 입경분포 측정은 Aerosizer(A.P.I Co., Model Mach-II)로 측정하였는데 여과 집진 장치의 유입 유출부에서 먼지입자수(#/m³)와 mass loading(mg/m³)의 두 가지 형태로 자동 흡입을 통한 측정 분석을 통하여 효율을 도출하였다. Fig. 7은 포집 먼지의 집진 효율을 보이고 실험에 사용된 모든 필터의 집진 효율은 Table 6에 나타나 있다. 실험결과 물유리 공정 먼지가 코우크스 공정 먼지보다는 약간 낮은 효율은 지녔는데 이는 필터의 성상 및 포집 먼지의 특성 차이에 기인한 것으로 사료된다. 먼지 포집에 따른 효율은 Table 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 No. 14의 경우 필터 No. 1-2와 No. 1-3 보다 평균 기공크기가(83 μm) 크고, 사용된 물유리 공정 먼지의 입도 분포 중 1.0 μm 이하가 5%로 코우크스 공정 먼지(2.5%) 보다도 많아 미세입자의 투과로 인해 효율이 저하된 것으로 사료된다. 먼지 포집에 따른 총 집진효율은 $\eta_t = [(N_i - N_o)/N_i] \times 100(\%)$ 와 $\eta_m = [(M_i -$

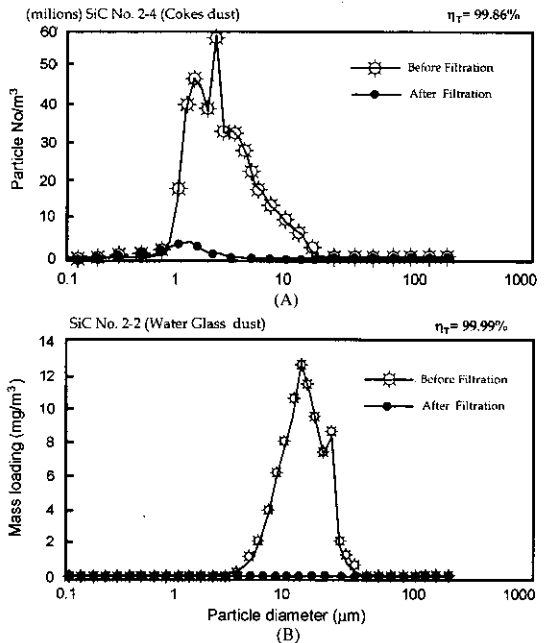


Fig. 7. Dust collection efficiency of SiC filter with 60 cm length; (A) SiC No. 2-4 (B) SiC No. 2-2.

Table 6. Dust collection efficiencies.

필터번호 \ 종류	Particle number 효율 [#m ³] (%)	Particle loading 효율 [mg/m ³] (%)	먼지 종류
길이 30 cm 필터			
1-2	99.87	99.76	물유리공정
1-3	99.95	99.47	코우크스공정
1-4	98.84	99.09	물유리공정
길이 60 cm 필터			
2-1	99.99	99.99	코우크스공정
2-2	99.94	99.99	코우크스공정
2-4	99.86	99.36	물유리공정
2-5	99.99	99.99	코우크스공정

$M_0/M_1 \times 100(\%)$ 로 표현하여 계산하였다^[2].

4-1-3. 먼지 주입 결과

Fig. 8과 9는 먼지 연속 주입 시 집진 조건을 변화시킴으로서 압력강하의 변화를 파악하고 적정운전 조건을 도출하기 위해서 수행된 결과이다. Fig. 8은 온도 600°C, 상압 조건에서 수행된 결과로 길이 60 cm를 가진 탄화규소 필터를 사용하여 높은 여과속도(11~13 cm/sec), 먼지 주입량의 변화(1.0 g/min → 0.5 g/min), pulse 주기 변화(5 min → 7.5 min), pulse opening time 0.5 sec, pulse 압력 5 atm의 조건으로 수행되었다. SET I 구간에서는 급격한 압력강하의 증가를 보여주고 있다. 이는 필터의 안정화 및 표면여과의 전 단계를 의미한다. SET II 구간에서는 유속이 증가(11 cm/sec → 13 cm/sec)했음에도 불구하고 SET I 구간보다 압력강하의 증가폭이 크지 않

았다. SET III 구간에서는 필터 안정화 상태를 고려하여 먼지 주입량 변화(1 g/min → 0.5 g/min)를 적용했고 SET II 구간과 같은 여과속도로 주기적으로 여과/탈진을 수행하였다. 압력강하는 미세한 증가를 이루었고 필터 안정화의 초기 진행을 보였으며 SET IV 구간은 pulse 주기 변화(5 min → 7.5 min)를 통해 압력강하 정도가 탈진압의 강도에는 큰 영향이 없음을 보여 필터 자체에 침투여과를 막는 케이크가 일정부분 형성된 초기라 생각된다. 부족한 레이더로 판단의 근거가 어렵지만, 이 필터는 전체적으로 압력강하가 큰데(600 mmH₂O) 이는 상당히 높은 여과속도에서 여과를 진행한 결과로 보이며 낮은 여과속도에서는 만족할 만한 압력강하를 유지할 수 있음을 유추할 수 있다.

Fig. 9에서 탄화규소 필터 No. 2-4의 실험 결과는 시

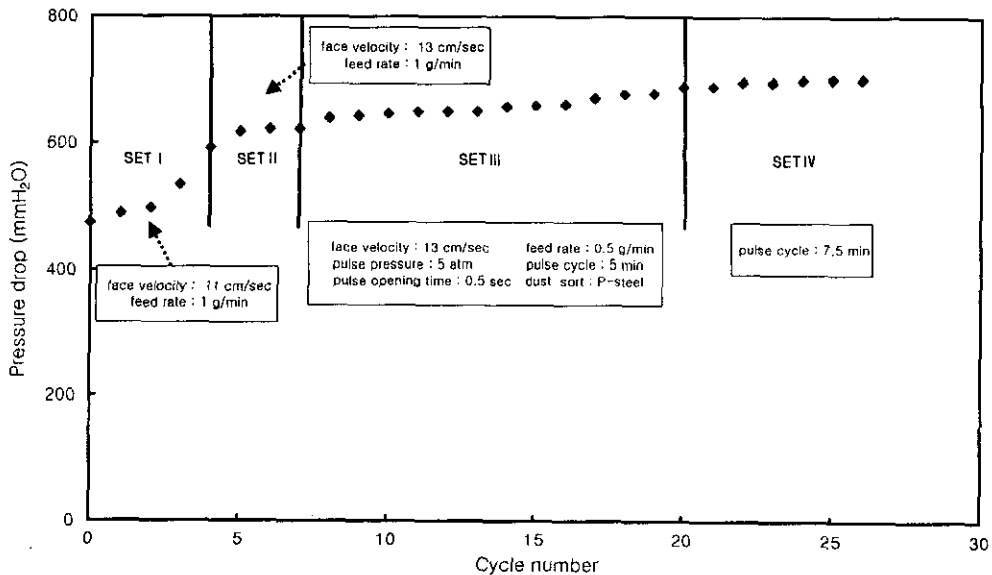


Fig. 8. Pressure drop of SiC filter No. 2-1.

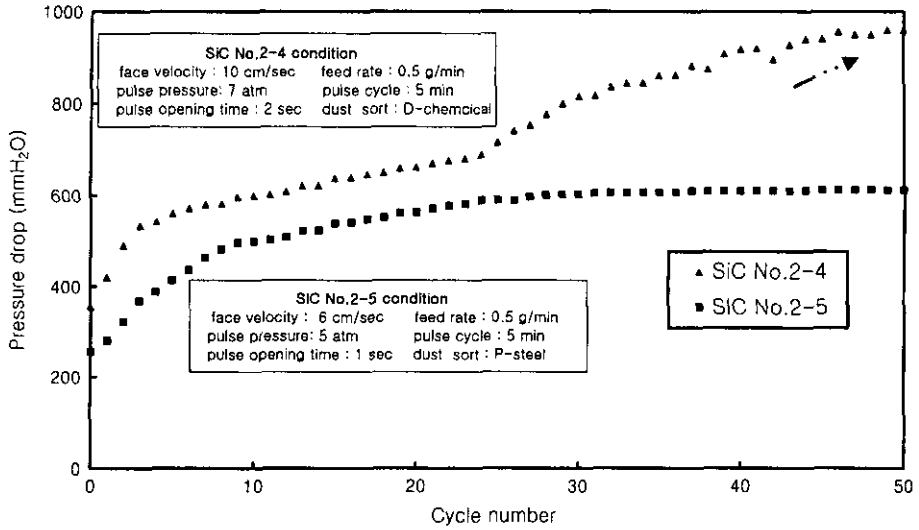


Fig. 9. Pressure drop of SiC filter No. 2-4 and No. 2-5.

간의 흐름에 따라 계속적으로 증가하는 압력강하를 이루어 barrier 필터로서의 역할을 수행하지 못하였다. 이는 실험 시 높은 여과속도는 여과재 내부로의 먼지 입자의 관통에 의하여 필터의 성능이 저하되는 'Depth Filtration' 현상이 나타나 압력강하가 증가되고, 너무 강한 탈진압(7기압)에 의한 필터 표면에 먼지의 케익 형성을 방해하여¹⁶⁾ 탈진 시 hopper로 제거된 먼지의 입자가 정착성이 큰 덩어리나 flake 형태가 아닌 개별적인 입자나 매우 적은 응집덩어리로서 계속적으로 먼지의 재비산이 일어난 것으로 사료된다¹⁷⁾. 필터 No. 2-5의 결과는 No. 2-1, No. 2-4 보다는 낮은 유속인 6 cm/sec의 조건에서 진행되었고 집진, 탈진의 주기적인 반복결과 20 Cycle 정도에서 일정한 압력강하를 유지하였다. 이는 필터의 장기적 성능을 유지할 수 있는 표면여과가 필터에 형성됨을 확인하는 것으로 필터의 안정화 상태를 보여주고 있다.

4-2. 고온 고압 실험

4-2-1. 가스 유체에 의한 압력강하

고온·고압 조건에서 탄화규소 캔들 필터 성능 실험 결과는 길이 30 cm 필터의 경우, 600°C와 800°C에서 본체압력을 8.5기압과 10기압으로 변화시키면서 수행되었다. 유량과 온도 변화에 따른 압력강하는 내부 압력이 8.5기압일 때가 10기압에 비해 압력강하가 10% 정도 크게 나타났으며, 이는 본체 내 압력이 낮으면 상대적으로 여과속도가 커지기 때문이고 압력강하는 100~300 mmH₂O로 분포하였다. 같은 압력 같은 유량에서는 온도가 30°C에서 800°C로 증가할수록 압력강하가 증가하는데 이는 온도 증가에 따라 배가스의 점도가 증가하고 밀

도는 감소하여 나타난 결과이고 일반적인 압력강하와 온도, 압력의 관계를 표현하면 가스의 질량이 일정할 시 $\Delta P \propto \mu/\rho \propto T^{1.5} \cdot P^{-1}$ 의 관계를 가진다¹⁸⁾.

고온에서는 pore channel을 통하는 flow의 더 높은 저항성의 결과로 온도에 따른 압력강하 증가가 일어난다. 이는 여과속도 변화와 air의 점도 증가가 원인이다¹⁹⁾. 실험결과는 저온보다 고온 시 여과속도변화에 대한 압력강하 증가폭이 훨씬 컸다. 즉 고온과 큰 여과속도가 모두가 압력강하 증가요인으로 작용하였다. 그러나, 각 필터마다 다른 물성의 차이로 인해 압력강하의 결과는 달리 나타났다.

Fig. 10은 800°C에서 유량의 변화, 내부압력 변화에 따른 압력강하의 변화를 보여주고 있다. 이 결과는 상압 조건의 실험에서 사용된 길이 60 cm 필터를 사용하여 상압 결과처럼 유량변화에 일정한 선형적 증가 경향이 파악되었다. 또한 온도의 증가에 따른 배가스 점도의 증가로 인한 압력강하의 증가 역시 상압 결과와 유사성을 지녔다. 물성이 서로 조금씩 다른 특성을 지닌 필터들의 압력강하 차이는 필터 No. 2-7과 No. 2-1의 비교로부터 확인할 수 있었다. Table 4에서 알 수 있듯이, 필터 No. 2-7은 필터의 물성 중 하나인 기공율이 35%로 비교된 다른 필터보다는 5~8% 정도 낮고 공기투과율도 다른 필터보다 상당히 낮은 15 cc/min · cm² · cmH₂O로 인한 결과로 인해 압력강하가 높았다.

본 실험의 결과 모든 필터가 선형적 차압의 증가를 보여주고 있는데, 이는 유량 증가는 압력강하의 증가를 가져오며 본체 내 압력이 감소하면 여과속도가 증가하므로 압력강하는 증가하는 사실로부터 알 수 있다. Fig.

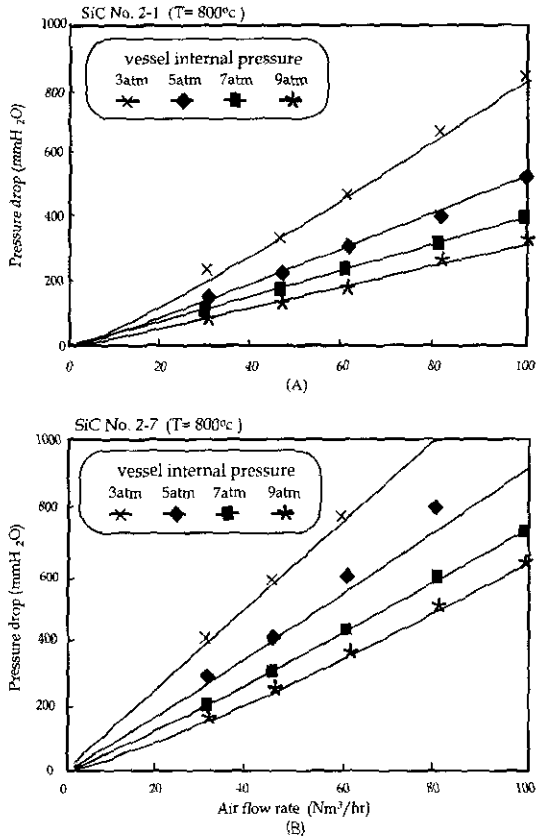


Fig. 10. Pressure drop in terms of vessel internal pressure and flow rate : (A) SiC No. 2-1 (B) SiC No. 2-7.

11(A)는 800°C, 9 atm 조건에서 유량변화에 따른 각 필터별 압력강하 변화를 보여주고 있다. 필터 No. 2-2와 No. 2-7이 다른 필터와 비교하여 상당히 높은 압력강하의 결과는 필터 물성 특성(낮은 기공율, 낮은 공기투과율)에 기인한 결과로 사료된다¹⁴⁾. 그리고 Fig. 11(B)는 최대 유량 100 Nm³/hr에서 필터 No. 2-3의 압력강하 변화를 측정하였는데 결과는 본체 압력이 최대 9 atm일 때 온도에 따른 압력강하 증가 폭이 3 atm의 본체압력 일 때 보다 훨씬 적은 값을 가짐을 보여준다. 이는 유체에 대한 압력강하 변화는 온도의 영향보다는 내부 압력 변화에 더 큰 영향을 받음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

탄화규소 세라믹 캔들필터 성능 실험 결과들은 고온 고압의 조건을 필요로 하는 PFBC, IGCC 시스템에서 고온 고압 상태로 배출되는 먼지 및 가스의 제거를 위한 자료로써 중요한 의미를 가지며 장시간의 운전을 수행

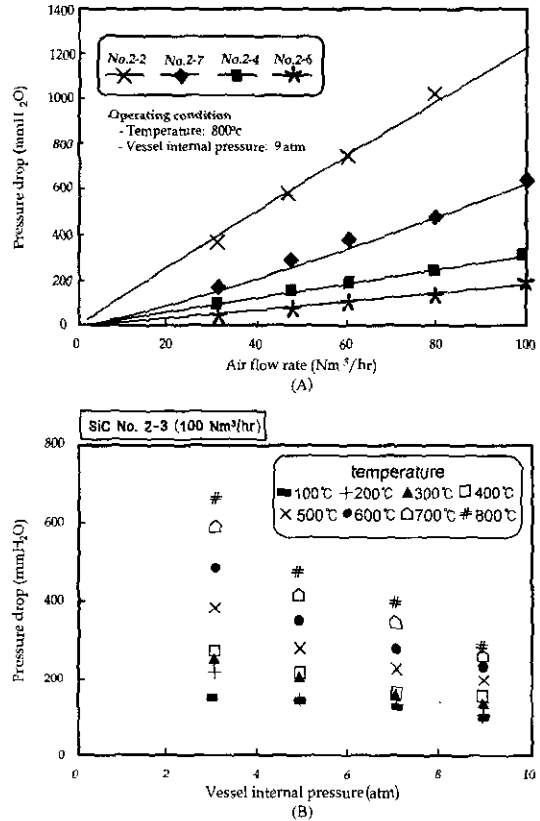


Fig. 11. Pressure drop on HTHP condition : (A) SiC No. 2-2-2-7 (B) SiC No. 2-3.

할 경우 고효율 발전용의 고온 여과 장치 및 고온 고압용 세라믹 필터를 국산화하고 수입대체 효과를 가지는 경제성 증대에 기여자료로서 사용될 것이라고 사료된다. 강도가 높고 여과 효율이 좋은 탄화규소 세라믹 캔들 필터는 IGCC와 PFBC에서 시험되어 장기 사용에 대한 타당성이 검증된 바 있고 이러한 공정에 적용될 수 있는 소재로 유용한 실정이다.

본 연구는 점성소결 방법으로 탄화규소 세라믹 필터를 다양한 물성 조건에 따라 제조하여 차압, 필터 저항 계수, 집진 효율 등 필터 성능 조사를 실시하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 점성소결로 제조된 본 탄화규소 세라믹 필터의 평균 기공크기와 공기투과율을 제어하는 인자는 탄화규소 입자 크기, 소성온도, 결합제 첨가량, 결합제 종류에 따라 영향을 받는 것을 확인하였다.

(2) 길이 60 cm 탄화규소 세라믹 필터의 경우, 기공율, 평균기공크기와 공기투과율이 작을수록 압력강하가 증가하였다. 이것으로부터 기공의 막힘이 빨리 진행됨을 알 수 있었다. 그리고 기공의 막힘이 증가하여도 집진

효율은 증가하였다.

(3) 필터의 물성이 평균기공크기 68 μm , 공기투과율 50 $\text{cc}/\text{min} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmH}_2\text{O}$, 그리고 기공률 40%인 경우, 필터의 집진성능이 가장 우수하였다.

(4) 탄화규소 분말의 입자가 클수록 초기 압력강하가 큼을 확인하였다.

(5) 대다수 필터의 집진 효율은 99.9% 이상이었으며 필터를 통한 압력강하는 Darcy의 법칙에 잘 부합됐다.

(6) 고온, 상압 조건에서 압력강하 실험결과는 기존 상압회되는 필터의 저항계수 값의 범위에 속했다.

(7) 고온, 고압 조건에서 유체에 대한 압력강하 변화는 온도의 영향보다는 본체내부 압력에 더 큰 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

본 결론을 통해, 다양한 여과 parameter의 조합과 장시간 실증테스트를 거치면 열악한 환경에서 배출되는 먼지 저감 기술을 구축할 수 있을 뿐만 아니라 탄화규소 세라믹 캔들 필터 제조 및 고온 가스 여과기술에 요구되는 정보를 제공할 수 있을 것이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 G-7 환경공학 기술개발 사업의 일환으로 환경부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 표명합니다.

사용기호

- d : particle diameter of medium (μm)
- m : dust load (kg/m^2)
- t : time (sec)
- z : thickness of filter (m)
- C : dust concentration (g/m^3)
- L : thickness of dust cake (mm)
- P : pressure (mmH_2O)
- T : temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- U : face velocity (cm/sec)
- K_1 : flow resistance for a gas viscosity (m^{-2})
- K_2 : flow resistance for a gas density (m^{-1})
- K_s : particle sphericity
- M_i, M_o : inlet, outlet mass loading of dust (mg/m^3)
- N_i, N_o : inlet, outlet particle number of dust (particle number/ m^3)
- O.D : outer diameter (mm)
- S_o : specific surface area of the medium (m^{-1})
- ρ : gas density (kg/m^3)
- ρ_p : particle density (kg/m^3)

- μ : gas viscosity ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)
- ϵ : void fraction
- Φ : kozeny parameter
- ΔP : differential pressure (mmH_2O)
- η_c : collection efficiency of dust

참고문헌

1. 이동섭: "고온 집진용 세라믹 필터 개발에 관한 연구", Ph. D. Dissertation, Ajou Univ. Suwon Korea, pp. 86-95 (1998).
2. 지평삼, 박태준, 김종진: "석탄가스화 복합발전 기술", 화학공업과 기술, 제11권, 제2호, pp. 76-86 (1993).
3. 홍민선, 이재춘: "고온 고압 세라믹 여과재 집진기술 개발 및 실용화", G-7 제2단계 2차년도 년차 보고서 (1997).
4. 홍민선, 문수호, 이동섭, 이재춘: "SiC 세라믹 필터를 이용한 고온 고압하에서의 집진기술에 관한 연구", 한국대기보전학회, 11, pp. 76-78 (1998).
5. 홍민선, 나진균, 이동섭, 이재춘: "고온여과재의 고온 집진특성에 관한 연구", 한국에너지공학회, 제3권, 제2호, pp. 172-178 (1994).
6. Stephen, C.M., Grannell, S.K. and Seville, J.P.K.: "Conditioning and Pulse-Cleaning of rigid ceramic filters", High Temperature Gas Cleaning, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe, pp. 207-218 (1996).
7. Duo, W., Seville, J.P.K., Kirkby, NF., Buchele, H. and Cheung, CK.: "Patchy cleaning of rigid gas filters II. Experiments and model validation", Chemical engineering, 52(1) (1997).
8. Seville, J.P.K.: "Rigid ceramic filter elements, in Gas Cleaning in Demanding Applications", Printed in Great Britain by St Edmundsbury Press, UK, pp. 96-129 (1997).
9. Seville, J.P.K. and Clift, R.: "Gas cleaning at high temperature : gas and particle properties, in Gas Cleaning in Demanding Applications", Printed in Great Britain by St Edmundsbury Press, UK, pp. 1-13 (1997).
10. Lu, Chongqing: "An experimental and analytical Investigation on hot gas cleanup for PFBC", Ph. D. Dissertation, New York Univ, pp. 67-76 (1991).
11. Judkins, R.R., Stinton, D.P., Smith, R.G., Fischer, E.M., Eaton, J.H., Weaver, B.L., Kahnke, J.L. and Pyscher, D.J.: "Development of ceramic composite hot gas filters", Journal of engineering for gas turbines and power-ASCE, 118(3) (1996).
12. Xu, S.S.: "A study of correlation between the candle

- ceramic filter and operating factors for hot gas cleanup", Proceeding of the 3rd international symposium on Coal Combustion Science and Technology (1995).
13. Stefan Berbner, and Torsten Pilz: "Characterization of the filtration and regeneration behaviour of rigid ceramic barrier filters at high temperature", Powder Technology, 81(1) (1996).
 14. Gennrich, T.J.: "Evaluation of ceramic fiber filterbags in commercial hot gas environments, High Temperature Gas Cleaning, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe, pp. 106-119 (1996).
 15. Jo, Y.M.: "Characterization and utilization of waste fly hot gas cleaning filters", Ph.D. Dissertation, New South Wales Univ., pp. 146-152 (1996).
 16. Jo, Y.M., Hutchison, R.B. and Raper, J.A.: "Characterization of ceramic composite membrane filters for hot gas cleaning", Powder technology, 91(1) (1997).