

집진용 세라믹 필터의 제조 및 공기 투과 특성

Preparation of Ceramic Foam Filter and Air Permeability

박재구 · 이승인 · 이정식 · 신희영¹⁾ · 정재화²⁾

한양대학교 지구환경시스템공학과

¹⁾한국자원연구소 활용부, ²⁾한국전력공사 전력연구원

(2000년 1월 4일 접수, 2000년 6월 16일 채택)

Jai-Koo Park, Seung-In Lee, Jung-Shick Lee,
Hee-Young Shin¹⁾ and Jae-Hwa Chung²⁾

Geosystem Environmental Engineering, Hanyang University,

¹⁾*Div. of Utilization, Korea Institute of Geology, Mining and Materials,*

²⁾*Korea Electric Power Research Institute*

(Received 4 January 2000; accepted 16 June 2000)

Abstract

Ceramic foam prepared with cordierite as a starting material by foam method was tested to evaluate the feasibility as a filter for the dust collection in hot gas. Two different types of agents, Benzethonium chloride (BZTC, $C_{27}H_{42}NO_2Cl$) and Sodium Lauryl Sulfate (SLS, $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$) were used as foaming agents in foaming process. Porosity of ceramic foam was about 80% and mean pore size were $100\ \mu m$ for SLS agent and $200\ \mu m$ for BZTC. It was observed that ceramic foam was composed of continuous macro-pore structure with opening windows interconnecting macro-pores. The surface of ceramic foam support of was coated with cordierite particles ranged from $20\ \mu m$ to $50\ \mu m$. Meso-pore size in the coating layer on ceramic foam was below $10\ \mu m$. While air permeability of the support increased with increasing macro-pore size, coated ceramic filters showed a constant permeability without regard to the macro-pore size of the support. The permeabilities of supports varied in the range of $600 \times 10^{-13} m^2$ to $1000 \times 10^{-13} m^2$. For the case of coated ceramic filter, it was about $200 \times 10^{-13} m^2$. As a result of particle trapping test by using fly ash, the particle removal efficiency was over the 99.9%.

Key words : ceramic foam, opening window, permeability, particle trapping, ceramic filter

1. 서 론

폐기물의 소각처리 과정에서 발생하는 산성가스, 황화합물, 질소화합물 그리고 분진 등은 대기오염의 요인이 되고 있다. 국내 소각로에서 발생하는 배기 가스는 주로 습식법과 반건식법으로 처리되고 있

다. 습식법은 알칼리 용액과 같은 액상 흡수제를 이용하여 배기가스를 세정하는 방법으로, 유해가스 제거효율이 높은 이점이 있으나 처리과정에서 폐수가 발생하는 문제점이 있다. 한편, 건식 및 반건식법은 석회석 등의 분말형태의 흡수제를 이용하게 되므로 반응율이 낮을 뿐만 아니라 집진시설의 보완 등 설비의 대형화 등이 문제점으로 지적되고 있다(송호

철 등, 1998; 유경선 등, 1997). 따라서 미세분진을 표면에서 포집하고 내부에서는 담지된 촉매를 이용하여 유해가스를 동시에 처리 할 수 있는 세라믹 필터의 개발이 요구되고 있다.

한편, 석탄가스화 복합발전(IGCC) 시스템은 발전 효율이 높고, 공해물질 배출이 적은 차세대 발전시스템으로 알려져 있다. 선진국에서는 이미 70년대부터 IGCC 기술 개발을 활발히 진행하여 왔으며, 국내에서도 우리 실정에 맞는 IGCC 공정개발에 관한 연구가 진행되고 있다(정진도와 최주홍, 1995). 이러한 IGCC 시스템에 있어서도, 가스터빈의 손상을 방지하기 위한 고온·고압의 석탄가스에 포함되어 있는 미세분진 제거용 세라믹 필터에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 국내에서는 독일 Schumacher 사의 SiC 캔들형 필터를 수입하여 IGCC 공정개발에 이용하고 있으나, 국내의 IGCC 전용 고온 세라믹 필터의 제조에 관한 연구는 매우 드문 상태이다.

세라믹스는 내구성, 내열성 그리고 내화학성 등이 우수하여, 선진국에서는 이미 오래 전부터 유해가스와 분진을 동시에 제거할 수 있는 고온 세라믹 필터에 대한 연구를 수행해 왔다. 국내에서도 소각로용 세라믹 필터 제조 및 Cu, Mn, Co 등의 촉매를 이용한 유해가스 제거에 관한 연구가 보고된 바 있다(홍민선 등, 1998; 홍성수 등, 1998; 이재춘 등, 1995).

일반적으로 세라믹 필터는 내부의 기공구조 및 분진제거를 위한 표면여과층의 특성이 매우 중요하게 되며, 특히 기공크기 및 기공과 기공사이의 연결부(opening window)의 크기는 유체의 투과율 및 분진제거율에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 슬러리 발포법을 이용하여 다공성 세라믹 필터를 제조하였으며, 이를 소각로 및 IGCC용 분진 제거 시스템에 응용하기 위한 유체의 투과특성 및 집진효율에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 다공성 세라믹 필터 제조

그림 1은 본 연구에서 실행한 시제품 제조공정을 나타낸다. 집진용 다공성 필터 시제품은 슬러리 발포법과 겔캐스팅법을 이용하여 제조하였다. 슬러리 발포법은 세라믹 슬러리에 발포제를 첨가하여 발생

시킨 기포를 성형·소성공정 후 기공으로 이용하여 다공체를 제조하는 방법이다. 겔캐스팅법은 세라믹 슬러리에 수지와 경화제를 첨가하여 이들의 겔화반응을 이용한 성형방법으로, 다양한 형상의 제품을 제조하는데 유리하다(Sepulveda, 1997; Young *et al.*, 1991). 시제품 제조용 출발원료는 평균입경 2~3 μm의 cordierite (內外세라믹스(日))를 이용하였다. Cordierite는 열팽창율이 작으며 산화환경에서의 내구성이 크다. 또한, 화학적 안정성이 커서 고온 필터의 원료로써 매우 유리할 뿐만 아니라, 소성온도가 비교적 낮다(Seville, 1993; Ismail, 1990). 슬러리 발포법으로 다공체를 제조할 경우, 발포제의 종류와 양, 그리고 발포시간 등을 조절하여 기공률과 기공크기를 제어할 수 있다(박재구와 이정식, 1998).

슬러리 발포공정에서는 서로 다른 2종류의 발포

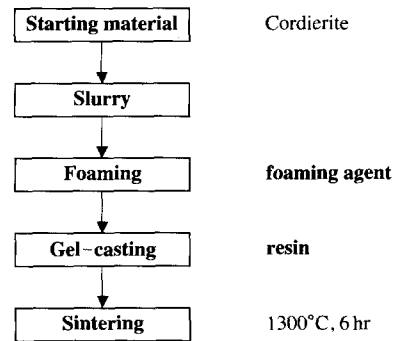


Fig. 1. Flow chart of processing for open-porous ceramic filter.

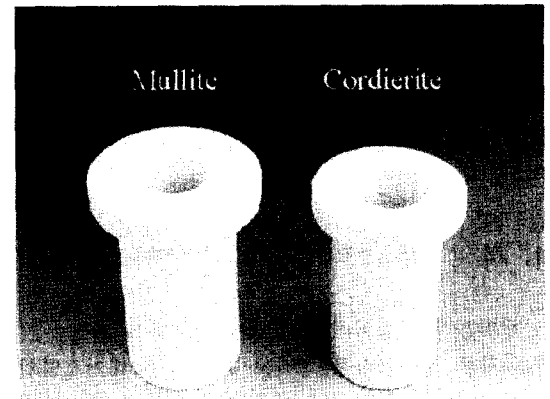


Fig. 2. Candle filter prepared by foaming method.

제, Benzethonium chloride (BZTC, $C_{27}H_{42}NO_2Cl$)와 Sodium Lauryl Sulfate (SLS, $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$)를 사용하여, 기공크기가 다른 두 종류의 필터 지지체를 제조하였다. 이때 발포 슬러리는 겔캐스팅법을 통해 성형하였으며, 성형체는 건조 후 1300°C에서 6시간 소성하였다. 한편, 필터의 표면여과층은 지지체 표면에 20~50 μm의 입자로 구성된 저농도 슬러리를 표면코팅하여 제조하였다. 코팅용 결합제로는 Polyvinyl Alcohol을 사용하였다(Kajihara *et al.*, 1998; Brinker *et al.*, 1991). 그림 2는 본 연구실에서 제조한 길이 150 mm × 외경 60 mm × 내경 40 mm의 캔들형 필터 시제품을 나타낸 것이다.

2. 2 기공크기 및 기공구조 분석

다공체의 기공구조는 공기의 투과특성과 밀접한 관계가 있으므로, 필터로 응용 시 매우 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 화상해석 시스템과 SEM을 이용하여 다공체의 기공크기 및 기공구조를 평가하였다. 즉 비디오 카메라를 통하여 입력된 다공체 시료의 화상을 대상으로 화상해석용 소프트웨어를 이용하여 기공크기 등을 측정하였다(Ehtezazi *et al.*, 1999). 한편, 다공성 세라믹스는 제조방법에 따라 비교적 조대입자의 충전공극을 이용하는 방법과 스폰지를 슬러리에 함침하는 방법, 그리고 슬러리를 발포시키는 방법 등으로 나눌 수 있다. 입자 충전공극을 이용하는 다공체의 경우, 원료 입자들은 다공체 골격(strut)을 이루고 입자 사이의 간극이 유로가 되므로, 유체의 투과저항은 이러한 비구형 단면을 가진 다수의 채널크기에 영향을 받게 된다. 한편, 발포 다공체는 입의로 생성시킨 기포를 기공으로 이용하게 되므로, 유로의 단면은 구형에 가까우며 유

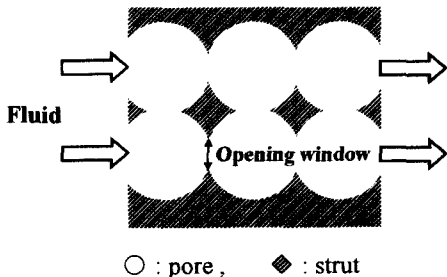


Fig. 3. Schematic illustration of the pore structure of foam ceramics and the pathway of fluid.

체저항은 독립된 기공의 연결부, 즉 opening windows의 크기에 의존하게 된다. 그림 3은 발포법으로 제조한 다공체에 형성된 기공 및 유로의 구조를 나타낸다.

2. 3 투과율 측정

투과율 측정실험은 두께 10 mm × 직경 60 mm의 원판형 다공체를 이용하여 실시하였다. 표면을 코팅하지 않은 지지체 부분과 표면여과층을 형성한 필터로 나누어 측정하였다. 그림 4는 다공체 시제품의 투과율을 측정하기 위한 실험장치로 고압공기 주입부, 차압계, 필터 하우징 부분으로 구성되어 있다(조영민과 홍성창, 1998; Jo *et al.*, 1997).

다공체 내에서 유체의 흐름은 Reynolds number (Re)에 따라 층류와 난류상태로 구분된다. 일반적으로, $Re < 1$ 이면 유체는 층류상태이며, $Re > 100$ 이면 난류, 그리고 $1 < Re < 100$ 의 영역에서는 층류 및 난류가 공존하는 상태가 된다. Re는 식 (1)로부터 계산된다(Linoya *et al.*, 1997; 狩野武, 1995). 한편, 식 (1) 중의 d 값은 본 연구에서 사용된 다공체 시제품의 경우, 기공 사이의 골격 두께에 해당하며, 입자 충전공극을 이용한 다공체의 경우에는 충전입자의 직경에 해당한다.

$$Re = \frac{\rho \cdot d}{\mu} \cdot v \tag{1}$$

여기서, ρ : 유체의 밀도 [kg/m³] v : 유속 [m/s]

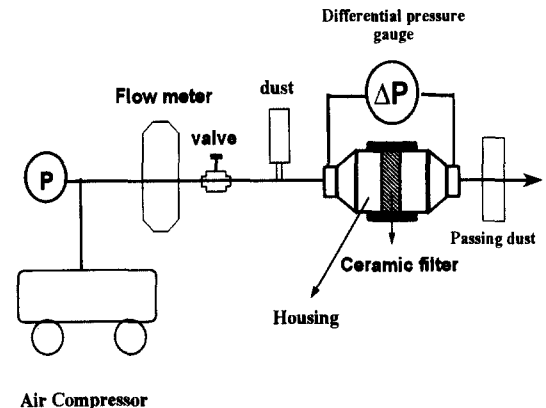


Fig. 4. Schematic diagram of the apparatus for measuring permeability.

μ : 유체의 점도 [Pa · s]
 d : 충전입자의 직경 또는 골격의 두께 [m]

다공체의 투과율은 유속에 대한 압력손실량 그래프로부터 구한다. 층류상태에서의 투과율은 식 (2)의 Darcy's law에 의해서, 난류상태 또는 층류와 난류가 공존할 때는 식 (3)의 Forchheimer equation을 이용하여 계산할 수 있다 (Innocentini *et al.*, 1998; Dake, 1995; Philipse와 Schram, 1991; Kim과 Lu, 1988).

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\mu}{k} \cdot v \tag{2}$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L \cdot v} = \frac{\mu}{k_1} + \frac{\rho}{k_2} \cdot v \tag{3}$$

여기서, ΔP : 압력손실량 [Pa]
 ΔL : 필터의 두께 [m]
 k, k_1 : Darcian Permeability [m^2]
 k_2 : Non-Darcian Permeability [m]

일반적으로, 다공체의 투과율은 Darcian permeability (k, k_1)를 비교하여 나타낸다. Darcy's law에서는 v 와 $\Delta P/\Delta L$ 에 대한 그래프의 기울기로 투과율 k 를 계산할 수 있으며, Forchheimer equation에서 투과율 k_1 은 v 와 $\Delta P/\Delta L/v$ 의 그래프에서 y절편으로부터 구할 수 있다. 한편, 시제품의 표면여과층에 대한 투과율은 코팅한 필터와 코팅처리하지 않은 지지체의 압력손실 차이를 이용하여 계산하였다.

2. 4 집진효율 평가

원판형 필터의 집진효율 평가를 위한 기초실험을 실시하였다. 이 때 분진으로는 플라이애쉬를 사용하였으며, 평균입경은 21.0 μm 이다. 필터 표면부에 형성된 분진케익의 입도분포 및 필터를 통과한 미세분진의 농도를 측정하여, 집진효율을 평가하였다 (박영욱 등, 1996; 정진도 등, 1996).

한편, 분진의 입도분석은 광회절 원리를 이용한 SHIMADZU사(日)의 SALD-2001을 사용하여 측정하였으며, 측정기의 입도측정 범위는 0.03 ~ 700 μm 이다. 미세분진의 농도측정은 SIBATA사(日)의

Particle Mass Monitor Model GT-331을 이용하였으며, 측정농도 허용범위는 0.5 ~ 10.0 μm 크기의 입자에 대해 0 ~ 1 mg/m^3 이다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 지지체의 기공률 및 기공크기

지지체의 기공률 ϵ 은 출발원료 cordierite 입자의 밀도 ρ_a 와 지지체의 벌크밀도 ρ_b 로부터, $\epsilon = 1 - (\rho_b/\rho_a)$ 로 구할 수 있다. 지지체의 기공률은 약 80%로써, 이는 비중병을 이용하여 측정된 cordierite의 밀도 (2.5 g/cm^3) 및 직경 60 mm \times 두께 10 mm인 원판형 시제품의 질량으로부터 계산하였다.

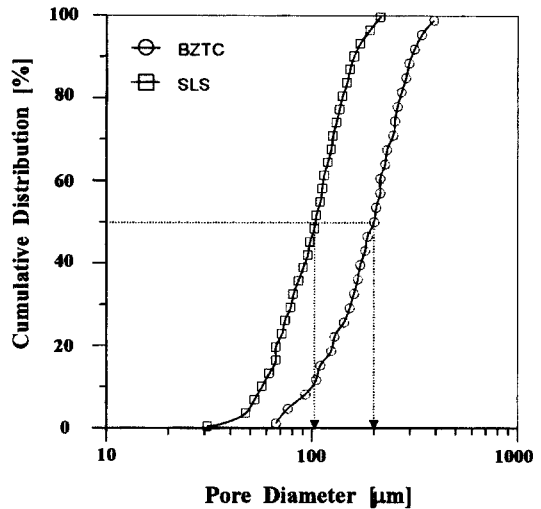


Fig. 5. Pore size distribution of support.

그림 5는 SLS 및 BZTC를 이용하여 제조한 지지체의 기공크기 분포를 나타낸 그래프이다. SLS로 제조한 지지체의 부피기준 평균 기공크기는 약 100 μm 이며, BZTC의 경우에는 약 200 μm 로 측정되었다. 그림 6은 지지체 및 표면여과층의 SEM사진을 나타낸 것으로, 지지체의 내부는 20 ~ 200 μm 의 opening windows로 연결된 연속성 기공구조를 지닐 수 있다. 또한, 화상해석 시스템을 통하여 평가한 골격의 두께는 BZTC 지지체의 경우 50 ~ 80 μm , SLS의 경우 40 ~ 60 μm 로 나타났다. 한편, 표면여과

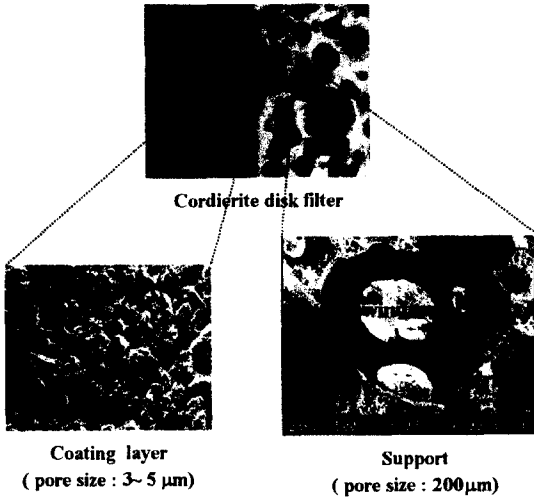


Fig. 6. Microstructure of open-porous ceramic foam.

층의 경우에는 수 μm의 크기를 갖는 미세기공으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

3.2 투과율

그림 7은 Darcy's law에 의해 지지체, 표면여과층 그리고 표면여과층이 형성된 필터의 투과율을 구하기 위해, 유속에 대한 압력손실량의 변화를 나타낸 그래프이다. 표면여과층이 형성된 필터의 압력손실량 ΔP는 지지체의 압력손실량 ΔP₁과 표면여과층의 압력손실량 ΔP₂를 이용하여, ΔP = ΔP₁ + ΔP₂로 나타낼 수 있다.

지지체와 필터의 경우, 유속에 따른 압력손실량은 실험범위 내에서 식 (2)의 Darcy's law에 근사함을 알 수 있다(그림 7(b) 참조). 이로부터 BZTC 지지체 및 SLS 지지체 내에서의 유체의 흐름은 층류상태라고 생각되며, 이때 Reynolds number는 0.1 < Re < 1.3 이었다. 그림 7(b)로부터 지지체의 투과율을 계산한 결과, BZTC 지지체의 경우 900 ~ 1000 × 10⁻¹³ m²이었으며, SLS 지지체는 600 ~ 700 × 10⁻¹³ m²로 나타났다. 여기서 기공률이 같은 지지체의 경우, 투과율은 지지체의 기공크기에 비례하는 관계가 있음을 알 수 있다.

그림 7(a)로부터 표면여과층에 대한 압력손실량도 Darcy's law에 의한 직선에 잘 일치함을 알 수 있다. 이로부터 표면여과층을 통과하는 유체가 층류

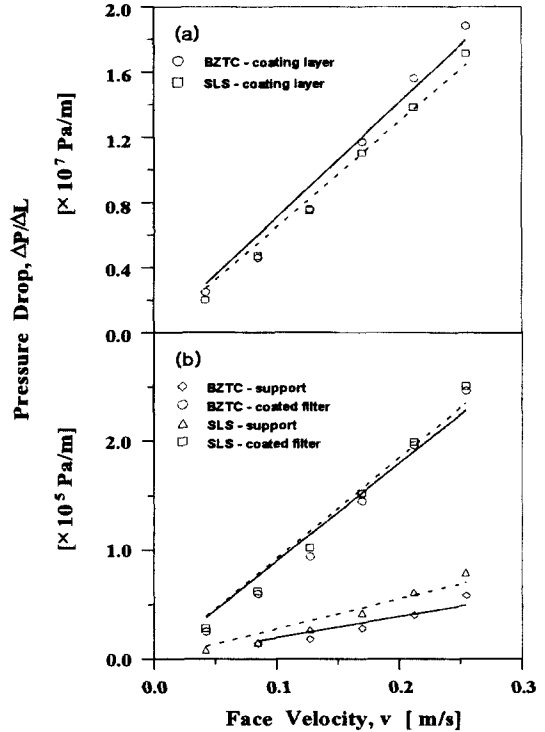


Fig. 7. Pressure drop as a function of face velocity.

상태임을 알 수 있으며, 이때 Reynolds number는 0.05 < Re < 0.7이었다. 또한, 두께가 약 100 μm인 표면여과층의 투과율은 2.5 ~ 3.0 × 10⁻¹³ m²로 나타났다. 한편, 그림 7(b)로부터 표면여과층이 있는 두께 1 cm 필터의 투과율은 지지체의 종류와 관계없이 약 200 × 10⁻¹³ m²로 나타났으며, 이는 표면여과층 투과율의 약 100배에 해당된다. 따라서 필터의 투과율은 표면여과층의 투과율이 지배적임을 알 수 있다.

한편, 유속 0.1 m/s 이하의 실험조건에서 Darcy's law에 의해 계산된 기존의 고온필터 투과율의 경우, 독일의 Schumacher사에서 제조한 SiC 캔들형 필터의 투과율은 100 × 10⁻¹³ m² 이하이며 (Durst *et al.*, 1996), 국내에서 제작된 섬유세라믹 필터의 투과율도 100 × 10⁻¹³ m² 이하인 것으로 알려져 있다 (환경부, 1997).

3.3 집진효율

표 1은 집진실험 장치 내에 투입된 플라이에쉬와

Table 1. Size distribution of flyash feed and dust cake on the surface.

	Feed	Dust cake support	Dust cake coated filter
D25 (μm)	9.3	9.7	8.9
D50 (μm)	21.0	23.4	21.7
D75 (μm)	45.5	48.7	45.0

BZTC 필터의 표면여과층에 형성된 분진 케익, 그리고 표면을 코팅하지 않은 BZTC 지지체 표면의 분진 케익을 이루고 있는 플라야쉬의 입도를 비교한 것이다.

표면여과층이 코팅된 필터 표면에 형성된 분진 케익의 입도는 투입된 플라야쉬의 입도와 매우 유사한 것으로 보아, 투입된 플라야쉬 입자는 필터를 거의 통과하지 못한 것으로 생각된다. 반면, 표면여과층이 없는 지지체의 경우 분진의 평균입도가 약간 증가한 사실로부터 소량의 미세분진이 지지체를 통과하였음을 알 수 있다. 그림 8은 평균기공 200 μm의 지지체에 대해, 투입된 플라야쉬 필터 표면에 형성된 분진 케익 그리고 지지체를 통과한 플라야쉬의 입도분포를 나타낸 그래프이다. 10~50 μm 크기의 입자들은 지지체를 통과하였음을 알 수 있다. 한편, 10 μm 이하의 미세한 분진의 경우에는 상대적으로 관성이 낮기 때문에 기공 내부에 부착·포집되어 지지체를 통과하지 못한 것으로 사료된다.

한편, 표면여과층이 형성되어있는 필터를 통과한 공기 중에서는 분진의 확인이 불가능하였다. 10 μm 이하의 분진입자를 대상으로 한 집진 실험 결과, 세라믹 필터를 통과한 입자의 농도 C_o 는 $1.2 \sim 5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이때 투입된 분진농도 C_i 는 $3.3 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 따라서 집진 효율 η 는 식(4)에 의해 99.9% 이상이 된다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기서, η : 집진효율 [%]

C_i : 투입 분진 농도 [g/m^3]

C_o : 배출 분진 농도 [g/m^3]

한편 국내 대기환경기준에 따르면 소각시설의 분

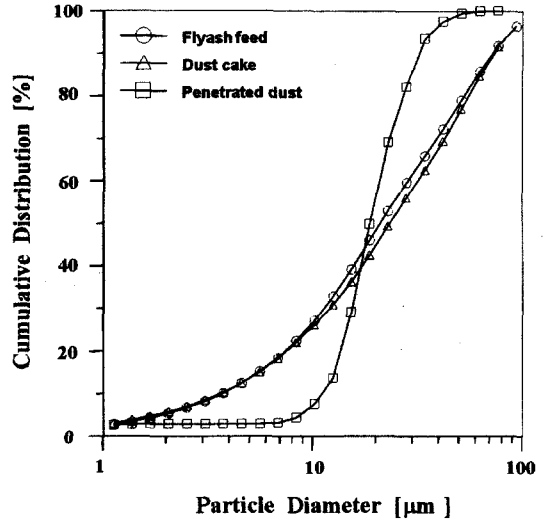


Fig. 8. Size distribution of fly ash as a result of particle trapping test for support.

진배출 허용기준은 $80 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이하이며, IGCC 시스템의 경우에는 10 μm 이상 분진의 완전한 제거와, 배출분진의 농도는 $0.02 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이하가 되어야 하는 것으로 알려져 있다(Durst et al., 1996). 따라서, 본 연구에서 제조된 발포세라믹 필터는 소각로 및 IGCC 시스템의 분진배출허용기준을 만족할 것으로 생각된다.

4. 결 론

세라믹 필터는 소각시설 및 발전시설에서 발생되는 유해가스 및 분진을 동시에 제거할 수 있는 주요한 소재로 생각된다. 본 연구에서는 발포법 및 겔캐스팅법을 이용하여 연속성 기공구조를 갖는 세라믹 다공체를 제조하였으며, 투과율 및 집진효율을 측정하여 필터로의 응용 가능성을 검토하여 보았다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 발포법 및 겔캐스팅법을 이용하여 기공크기가 서로 다른 세라믹 다공성 소재를 제조하였다. 기포제의 종류에 따라 평균기공크기가 각각 100 μm와 200 μm의 다공성 지지체를 제조하였으며, 이때 지지체의 기공률은 약 80% 정도였다.

(2) 발포 세라믹 지지체내의 기공은 서로 연결된

연속성 기공구조를 지니고 있다. 평균 기공크기가 200 μm인 지지체의 경우, 기공 사이의 연결부분 (opening window)은 20~200 μm 정도의 크기를 나타내었다.

(3) 지지체 표면의 여과층은 20~50 μm 미립자로 이루어진 저농도 슬러리를 지지체 표면에 코팅하여 제조할 수 있었다.

(4) 필터의 투과율은 유속 0.25 m/s 이하의 조건에서 약 $200 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ 로 나타났으며, 이는 국내 외의 입자형 또는 섬유형 필터보다 유체의 투과특성이 우수한 것으로 사료된다.

(5) 평균입도가 20 μm인 플라야애쉬를 대상으로 한 필터의 분진제거 실험결과 집진효율은 99.9% 이상으로 나타났다. 이는 소각시설 및 IGCC 시스템에서의 분진제거 조건을 만족시키는 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 세라믹공정연구센터 및 한국전력공사 전력연구원의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

박영욱, 구철오, 임정환, 김홍룡, 손재익 (1996) 승용차용 Cabin Air Filter의 성능, 한국대기보전학회지, 12 (3), 279-287.

박재구, 이정식 (1998) 슬러리 발포에 의한 연속성 무기질 다공체의 제조, 요업학회지, 32(12), 1280-1285.

송호철, 이윤기, 박진원 (1998) 반전식 배연탈황법에 의한 연소폐가스 중 SO₂ 제거에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(4), 273-280.

유경선, 송병호, 김상돈, 김경태 (1997) 흡수제를 이용한 소각로 유해가스 정화기술, 한국폐기물학회지, 14 (6), 611-622.

이재춘, 신경숙, 이덕용, 김병균, 심선자, 임연수, 정윤중 (1995) 탄소섬유 복합 여과재의 제조 및 물성 연구, 요업학회지, 32(9), 989-994.

정진도, 이중범, 김종영 (1996) 세라믹 캔들필터 집진 전후 Ash의 크기 및 분포에 관한 연구, 대한기계학회 논문집, 20(5), 1639-1648.

정진도, 최주홍 (1995) 석탄가스화 및 연소가스 집진을 위한 세라믹 필터 집진기술 평가, 대한환경공학회지, 17(8), 811-822.

조영민, 홍성창 (1998) 배가스 정화용 박형 복합 세라믹 필터의 유체흐름 및 구조적 특성, 대한환경공학회지, 20(2), 255-266.

홍민선, 이동섭, 오필경, 이재춘 (1998) 촉매담지 세라믹 필터를 이용한 황산화물과 질소산화물의 제거에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(5), 455-463.

홍성수, 박종원, 정덕영, 박대원, 조경복, 오광중 (1998) 질소산화물의 촉매반응에 의한 저감기술에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(1), 25-33.

환경부 연구보고서 (1997) 고온고압 세라믹 여과재 집진기술 개발 및 실용화, 21-53.

狩野武 (1995) 粉體輸送技術, 119-163, 技術

Brinker, C.J., G.C. Frye, A.J. Hurd, and C.S. Ashley (1991) Fundamentals of Sol-Gel Dip Coating, Thin Solid Films, 201, 97-108.

Dake, L.P. (1995) Fundamentals of reservoir engineering, 255-260, Elsevier Scientific Pub. Co.

Durst, M., E. Freude, K. Schulz, and A. Walch (1996) SCHUMACHER's Hot Gas Filter Technology, Schumacher.

Ehtezazi, T., C. Washington, C.D. Melia (1999) Determination of the internal morphology of poly (D, L-lactide) microspheres using stereological methods, J. Colloidal Release, 57, 301-314.

Iinoya, K., K. Gotoh, and K. Higashitani (1997) Powder Technology Handbook, 139-149, Marcel Dekker.

Innocentini, M.D.M., P. Sepulveda, V.R. Salvini, and V.C. Pandolfelli (1998) Permeability and Structure of Cellular Ceramics : A Comparison between Two Preparation Techniques, J. Am. Ceram. Soc., 81(12), 3349-3352.

Ismail, M.G.M.U. (1990) Preparation of Mullite Cordierite Composite Powders by the Sol-Gel Method : Its Characteristic and Sintering, J. Am. Ceram. Soc., 73(3), 537-543.

Jo, Y.M., R.B. Hutchison, and J.A. Raper (1997) Characterization of Ceramic Composite Membrane Filters for Hot Gas Cleaning, Powder Technology, 91, 55-62.

Kajihara, K., K. Nakanishi, K. Tanaka, K. Hirao, and N. Soga (1998) Preparation of Macroporous Titania Films by a Sol-Gel Dip Coating Method from the System Containing Poly (ethylene glycol), J. Am. Ceram. Soc., 81(10), 2670-2676.

Kim, K. and Z. Lu (1988) Experimental Determination of the Permeability of a Porous Media, Energy R&D, 10(2), 57-63.

Philipse, A.P., H.L. Schram (1991) Non-Darcian Airflow

through Ceramic Foams, *J. Am. Ceram. Soc.*,
74(4), 728-732.
Sepulveda, P. (1997) Gelcasting Foams for Porous Ceramics,
Am. Ceram. Soc. Bull., 76(10), 61-65.
Seville, J.P.K. (1993) Rigid Ceramic Filters for Hot Gas

Cleaning, *KONA*, 11, 41-56.
Young, A.C., O.O. Omatete, M.A. Janney, and P.A. Mench-
hofer (1991) Gelcasting of Alumina, *J. Am. Ceram.*
Soc., 74(3), 612-618.