

고온 고압용 세라믹 집진필터의 제조 및 성능평가

우상국, 한인섭, 서두원, 이기성, 배강, 홍기석
한국에너지기술연구원 에너지재료연구팀
박석주, 박영옥
한국에너지기술연구원 집진기술연구센터

Fabrication and Dust cleaning of Ceramic Hot Gas Filter for High Temperature and High Pressure Use

Sang Kuk Woo, In Sub Han, Doo Won Seo, Kee Sung Lee, Kang Bai,
Kee Seok Hong, Joo Seog Park and Young Ok Park
Korea Institute of Energy Research

1. 서 론

최근 에너지와 환경 문제가 대두됨에 따라 석탄의 액화 및 가스화에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 석탄의 가스화 연구 중에서도 특히 가압유동층연소(PFBC)방법이 효율을 높은 청정에너지를 생산할 수 있는 차세대 석탄화력발전 기술로서 제시되고 있다 [1,2]. 연료인 석탄은 슬러리 상태로 탈황제인 석회석이나 백운석과 함께 연소로로 주입되어 연소되며, 연소 배가스는 고온 싸이클론에서 일차적으로 먼지 입자가 제거된 후, 고온, 고압 집진시스템에 유입되어 미세 먼지까지 포집 제거된다. 이 때 배가스의 온도는 약 750~900°C의 고온이며 조업압력은 약 6~10 atm 정도의 범위로서 고온, 고압의 환경 하에서 집진이 이루어지게 된다. 가스터빈으로 유입되는 배가스 중에 먼지 입자가 함유되어 있으면 가스터빈의 날개를 마모 및 부식시켜 가스터빈 수명을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 따라서 이와 같은 고온고압의 환경 하에서 미세한 먼지입자들을 고효율로 포집 제거하여 청정 배가스로 전환하는 세라믹 캔들 필터의 개발은 매우 중요하다.

캔들필터는 특히 집진효율의 향상과 연소 배가스의 투과도를 동시에 향상시키고자 이중막으로 구성된 구조를 이루고 있다[3,4]. 즉 상대적으로 기공크기가 크고 기공율과 강도가 높은 지지층 위에, 기공크기가 미세하고 고온 열 부식 저항성이 높은 소재를 코팅한 구조로 구성되어 있다. 기공크기가 작을 경우 미세한 먼지를 효과적으로 제거할 수 있고 강도가 높은 장점이 있지만, 집진 도중 압력손실이 높아지게 되어 운전동력비가 증가하는 단점이 있다. 반면 기공율이 높거나 기공크기가 클 경우는 기체 투과도가 높아 압력손실이 적은 반면 강도가 낮고 효율적인 집진이 어렵다는 상반성이 있다. 따라서 이중막 구조에 의한 캔들필터의 제조가 보고되고 있고, 당 연구팀에서도 이중막의 탄화규소 캔들필터를 제조한 후 상온상압에서 압력손실과 집진효율을 측정하여 높은 압력손실이 걸리지 않으면서도 효율적인 집진이 이루어짐을 보고한 바 있다[3].

본 연구에서는 고온, 고압의 환경 하에서 그 특성이 상대적으로 우수할 것으로 예상되는 탄화규소 소재를 사용하여 이중막 캔들필터를 제조하였다. 이 때 압출성형법을 이용하여 지지층을 제조하고, 상대적으로 미세한 기공을 함유한 멤브레인 코팅기술의 적용을 통해 집진효율 및 저압력손실 특성이 동시에 우수한 다공질 세라믹 필터를 개발하고자 하였다. 또한 개발된 필터를 고온고압의 환경에서 성능시험할 수 있는 장치를 설계하여 제조된 필터의 압력손실 및 집진효율을 평가하였다.

2. 실험

2.1. 필터 제조 및 특성분석

약 200 μm 의 크기로 선별된 탄화규소(SiC) 출발분말을 소결용 무기결합제, 성형보조제와 함께 혼합한 후 외경 60 mm, 내경 40 mm의 튜브형으로 압출성형하였다. 특히 기공을 형성시키고 압출성형시 윤활성을 돕기 위해 탄소분말(carbon black, L30, LG카본)의 첨가량을 0~20 vol%로 서로 다르게 조절하여 성형체를 제조하였다. 한편 캔들형 필터를 제조하기 위하여 압출성형법에 의해 제조된 튜브형의 성형체의 양단에 부착되는 성형체를 동일한 원료를 사용하여 일축가압성형 하였다. 제조된 일축가압 성형체들은 압출 성형체의 양단에 부착하기 위해 실리카 졸(silica sol)과 증류수를 1:1의 비율로 혼합용액을 접촉면에 도포한 후 상온에서 접착시켰고, 건조기에서 충분히 건조시켜 결합되도록 하였다. [그림 1]에 완성된 캔들필터의 성형체 형상을 나타내었다



[그림 1] 탄화규소 캔들필터의 형상.

제조된 캔들필터의 길이는 1 m 이었으며 성형된 필터를 충분히 건조시킨 후, 미리 제조한 평균 14 μm 의 크기의 탄화규소 분말이 분산된 현탁액을 자동으로 분무코팅하였다. 코팅된 필터를 24시간 이상 자연 건조시킨 후 최고 온도 1375 ~ 1450°C 으로 대기 중에서 소성하였다.

제조된 필터의 중간부분을 파쇄하여 밀도, 기공률 및 꺾임 강도를 측정하였으며 이들의 미세구조는 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 시편의 파단면을 관찰하였다. 밀도 및 기공률은 각 시험편을 수중에서 3시간 이상 끓인 후, 현수무게, 포수무게 및 건조무게를 칭량하여 계산하였다. 꺾임 강도는 다이아몬드 절삭기를 통해 40 mm x 10 mm x 5 mm의 크기로 절단한 후 만능강도시험기에서 3점 꺾임강도법으로 측정하였다.

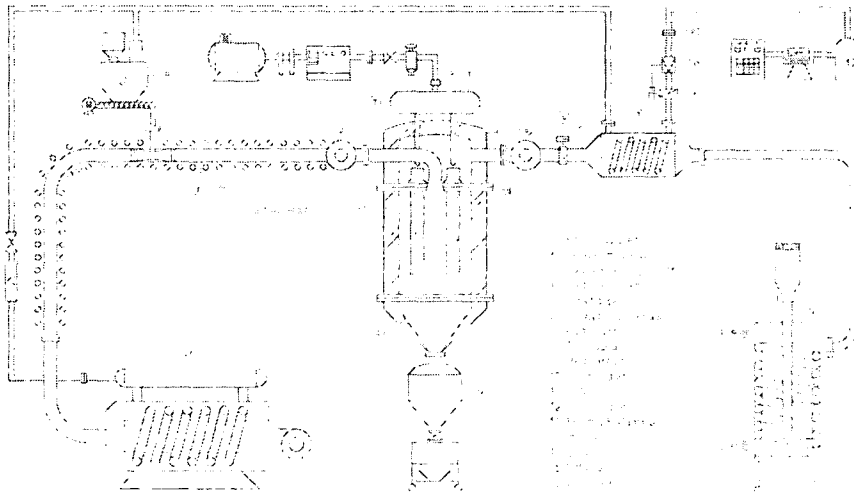
2.2. 필터 성능 시험

제조된 필터의 성능시험을 위해 실험실 단위의 성능 시험장치를 [그림 2]와 같이 제작한 후 제조된 필터의 성능시험을 수행하였다. 가압유동층 연소배가스 조건을 모사한 bench-scale 고온고압 배가스 처리용 시험장치의 주요 구성은 [그림 2]에 나타낸 바와 같이 상온의 고압공기를 간접방식으로 가열시켜 고온고압의 공기로 제작하는 열풍 발생장치, 고온의 기체 내에 먼지농도를 조절하기 위한 실험용 먼지 공급 및 분산장치, 개발된 필터의 여과성능을 실험하기 위한 filter vessel, 탈진성능을 규명하기 위한 pulse jet cleaning system, 고온으로 배출되는 기체의 냉각을 위한 cooler, 자료획득 및 처리부분등으로 구성되어 있다.

본 실험에 사용된 먼지는 평균 입자크기 17.2 μm , 비중 2.22g/cm³ 인 fly ash를 분쇄하여 평균 8.7 μm 의 입자크기를 갖는 실험용 먼지로 제조하여 사용하였다.

500°C, 5kgf/cm²의 고온 고압조건에서 먼지부하량에 따른 압력손실특성, 총괄 집진효율등을 측정 분석하였다. 먼지부하량에 따른 입, 출구에서의 압력손실은 pressure transmitter와 manometer를 이용하여 측정하였으며, 먼지농도 측정은 APS를 사용하여 측정하였다. 한편 탈진에 사용되는 압축공기의 게이지 압력은 15kgf/cm²이며, 분사시간은 100

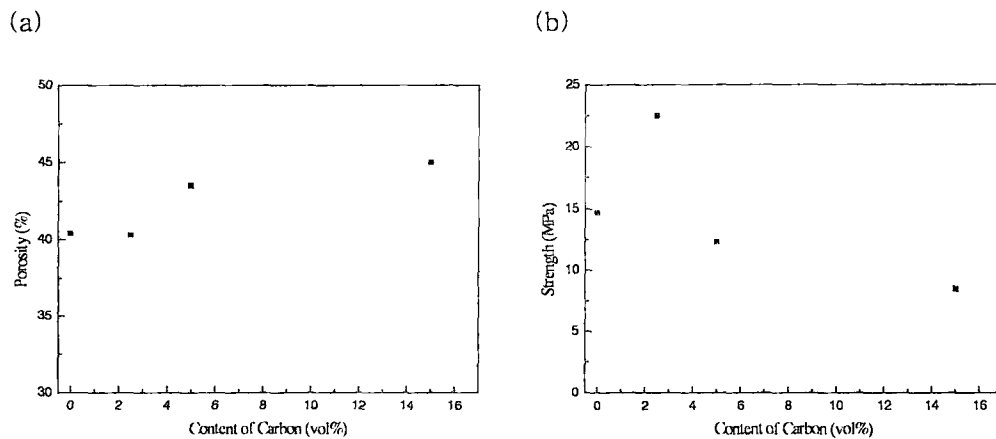
msec로서 세라믹 캔들필터의 압력손실이 500 mmH₂O에 도달하였을 때 자동으로 탈진조작을 수행하였다.



[그림 2] 고온고압 집진성능 시험장치 모식도.

3. 결과 및 고찰

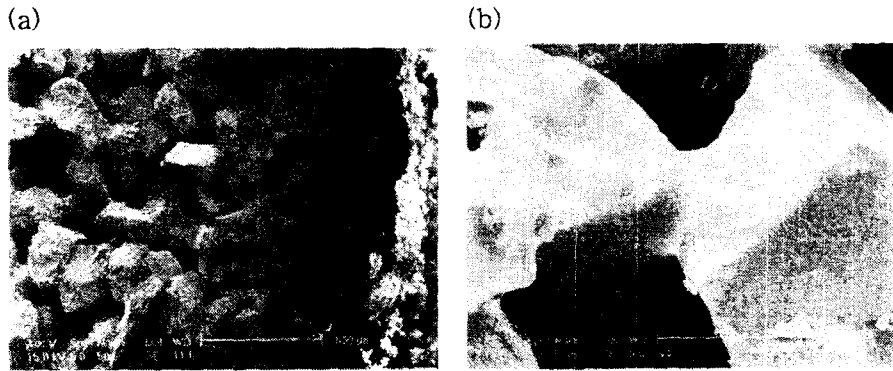
[그림 3]에 압출성형시 기공을 형성시키고 성형성을 향상시킬 목적으로 첨가한 탄소의 첨가량에 따른 강도와 기공율과의 관계를 그래프로 나타내었다. [그림 3]의 (a)에서와 같이 탄소첨가량이 증가함에 따라 기공율이 증가하는 경향을 보인 반면, [그림 3]의 (b)에서와 같이 그 강도값은 2.5 vol%의 탄소량에서 최대값을 보이다가 이후 증가된 기공율에 의해 감소되는 경향을 보였다. 따라서 최종적으로 캔들필터를 제조할 때의 탄소 첨가량은 부피비로 2.5%로 고정하였다.



[그림 3] 탄소첨가량에 따른 (a) 필터의 기공율 및 (b) 강도 측정결과.

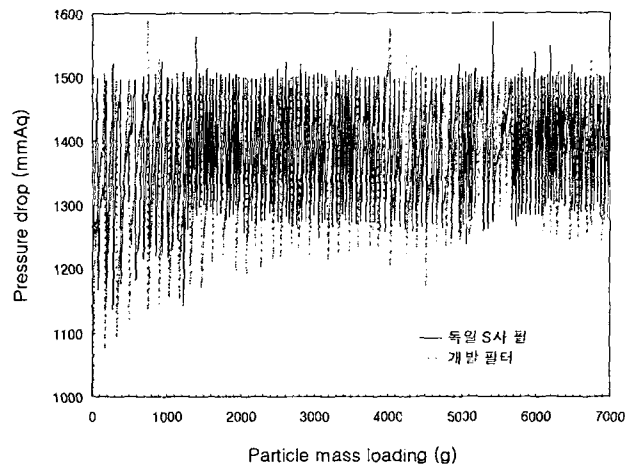
압출성형에 의해 제조한 원통형 캔들필터의 분무코팅을 행한 소결체의 중앙 부위를 파쇄한 후 그 단면을 SEM으로 관찰한 사진을 [그림 4]에 나타내었다. [그림 4]의 (a)에서와 알 수 있듯이 그 코팅 두께는 200~250 μ m로 균일하게 코팅되었고, 코팅층의 기공내에서 먼

지집진이 이루어지도록 지지층에 비해 상대적으로 크기가 작고 균일한 분포의 기공을 갖는 층이 형성되도록 제조되었다. 한편 [그림 4]의 (b)와 같이 지지층의 탄화규소 입자간 경계부위(grain boundary)를 확대 관찰한 결과 입자와 입자간이 첨가된 소결조제에 의하여 잘 결합되어 있음을 확인할 수 있었으며 이로 인하여 20 MPa이상의 높은 강도값을 나타낸 것으로 생각된다.



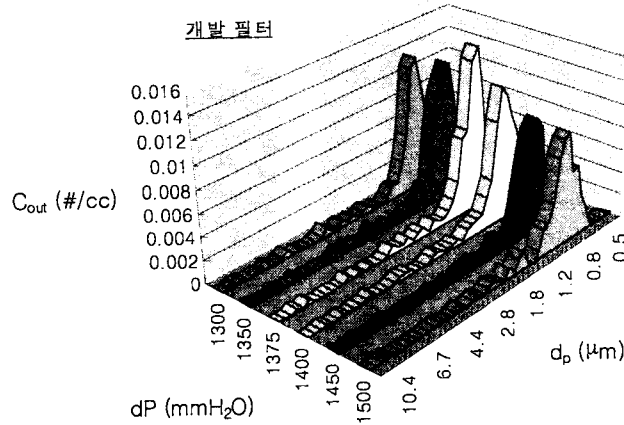
[그림 4] 탄화규소로 코팅된 원통형 탄화규소 캔들필터의 (a) 단면 및 (b) 지지층의 탄화규소 입자간 neck 부위.

[그림 5]에서 부터는 제조된 캔들필터의 집진성능을 평가한 결과를 나타내었다. 온도가 500°C, 압력이 5kgf/cm²의 고온고압 조건이 이루어지면 집진용기 내로 10g/Nm³의 입구농도 분포로 분진이 공급되며, 이 때 먼지입자 공급량에 따른 압력손실의 변화를 살펴보면 [그림 5]와 같다. 비교실험을 위해 평가한 독일 S사의 상용필터의 측정결과를 그림에 삽입하였으며, 결과에서 알 수 있듯이 개발필터의 압력손실이 상대적으로 다소 낮아 운전동력비에 의한 에너지 절감이 가능할 것으로 평가되었는데 이는 무기결합제와 성형방법의 차이에 의해 강도가 높으면서도 기공율이 높은 필터의 제조가 가능하였기 때문이다.



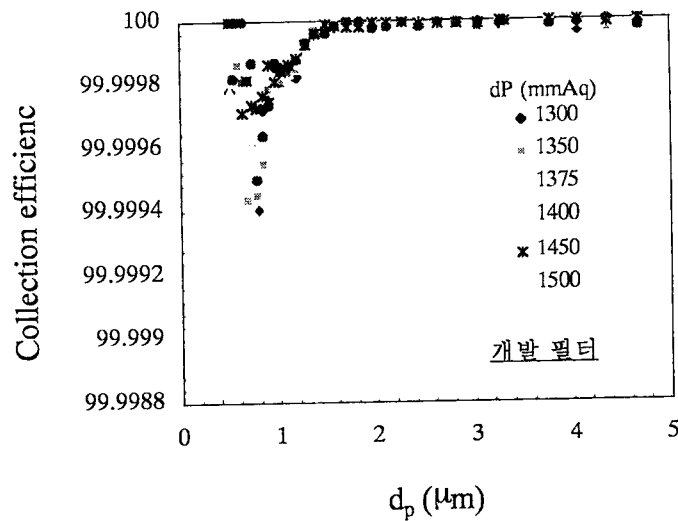
[그림 5] 입자부하량에 따른 캔들필터의 압력손실 변화.

[그림 6]은 개발필터를 설치한 집진장치 출구에서의 입자의 농도분포를 나타낸다. 필터 양단의 압력 차가 증가함에 따라 출구에서의 입자농도가 감소하는 경향을 나타내었지만, 그 감소율은 매우 작음을 알 수 있고 출구에서의 입자농도(cc당 수농도)가 0.014 이하로써 대부분의 먼지가 필터 내에서 집진되고 있음을 보여주고 있다.



[그림 6] 집진용기 출구에서의 입자농도 분포.

[그림 7]에 개발된 캔들필터의 총괄 집진효율을 입자크기별로 나타내었다. 전반적으로 입자크기나 압력손실에 관계없이 99.999% 이상으로 대부분의 집진이 이루어진 것으로 평가되었다. 그래프에서 일부의 입자크기 분포에 있어서 상대적으로 다소 낮은 집진효율을 보였으나, 이는 집진장치로 공급되는 입자의 농도분포중 일부의 입자들의 초기 공급 농도가 상대적으로 매우 적은데 기인한 상대적인 실험오차에 의한 것으로 생각된다.



[그림 7] 개발된 캔들필터의 입자크기별 집진효율.

4. 결 론

가압유동층 석탄 연소 발전 설비에 장착이 가능한 탄화규소 캔들 필터를 압출성형법으로 제조하고 설치기술을 확보하였다. 본 연구에서는 특히 고온, 고압에서 내구성이 우수한 탄화규소 세라믹스를 사용하여 제조하였으며, 미세 먼지 입자 집진특성과 상온강도, 유체투과도가 모두 우수한 필터를 제조하기 위해 상대적으로 미세한 기공이 함유된 탄화규소 멤브레인을 코팅한 이중막 필터를 제조하였다. 탄소함유량이 2.5 vol% 일 때 상온강도값이 20MPa 이상으로 가장 높았고, 500℃, 5kgf/cm²의 고온고압조건에서 먼지부하량에 따른 압력손실 측정결과 세라믹 필터에 의한 집진을 확인하였으며, 집진효율 측정결과 99.999% 이상의 먼지가 제거되었음을 확인, 향후 에너지효율이 높은 청정 화력발전への 적용이 기대된다.

참고문헌

1. J. H. Choi, S. M. Keum and J. D. Chung, "Operation of Ceramic Candle Filter at High Temperature for PFBC Application," *Korean J. Chem. Eng.*, **16** 823 (1999).
2. W. Duo, J. R. Grace, C. J. Lim, C. M. H. Brereton, A. P. Watkinson, and K. Laursen, "The Role of the Filter Cake in Hot Gas Cleaning with Ceramic Filters," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38** 260 (1999).
3. K. S. Lee, D. W. Seo, I. S. Han, S. K. Woo, K. Bai, K. S. Hong, J. H. Lim and Y. O. Park, "Development of Silicon Carbide Filter for Cleaning of Combustion Gas from Coal," The Korean Energy Engineering Soc., Spring Meeting, p159-164 (2000).
4. C. Kanaoka and T. Kishima, "Analysis of Hot Gas Filtration by Rigid Ceramic Candle Type Filter and Dust Release Mechanism," *Proceedings of the 4th Japan-Korea Symposium on Separation Technology*, Vol. 2, 725 (1996).