

고온 집진용 Fail Safety 소결 필터의 통기도와 분진제거 특성

배승열 · 안인섭[†] · 정우현 · 최주홍*
경상대학교 재료공학부 및 공학연구원
*응용화학공학부

The Properties of Permeability and Ash-Removal of Sintered Fail Safety Filter of Dust Collector in High Temperature

S-Y Bae, I-S Ahn[†], W-H Jung and J-H Choi*

Division of Materials Science & Engineering, and ERI

*Division of Chemical & Engineering, and ERI, Gyeongsang National University,
Gazwadong 900, Jinju, 660-701, Korea

(2004년 5월 4일 받음, 2004년 6월 30일 최종수정본 받음)

Abstract The fail safety filter is an assistant filter element to be mounted in order to intercept the particles leaked when the main filter elements are broken. So it should have two contrary functions of being plugged easily to meet the purpose of dust sealing and a high permeability to save the space. The permeability of the metal filter elements were effectively controlled by the following factor: powder size(53-840 μm) and applied pressure(1000-2000 kgf/cm^2), and then the compact were sintered for 1 hour at 1200°C in vacuum sintering furnace. The sintered metal filters was evaluated for the function of the fail safety filter in an experimental unit. The maximum allowable particle size was 420-840 μm , when a CIP pressure of 1500 kgf/cm^2 was applied reveals a permeability of about $1.2 \times 10^{-10} \text{m}^2$ and pore size of about 60 μm . The metal filter produced with stainless steel powder of 480-840 μm size, which presented excellent permeability than commercial ceramic filter element and plugged with in 3 minutes with the leak of the maximum particle size less than 3 μm .

Keywords Fail Safety Metal Filter, Stainless Steel, IGCC, Permeability, Pore-size

1. 서 론

필터는 환경 위생분야를 비롯한 여러 공학 분야에 요구되는 유해물질 및 기타 여러 가지 물질의 여과나 정화에 필수적인 매체이다. 그중에서도, 화력발전소의 발전 설비는 집진 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있다.¹⁻⁵⁾

일반적인 발전설비에서의 금속필터의 기술은 필터 집진기의 신빙성의 확보를 위한 방법으로 운전 시에 하단부에 위치한 메인필터의 일부가 파손이 되더라도 과도한 분진이 가스터빈에 유입되는 것을 방지함으로써 석탄가스화복합발전(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)시스템의 이용률(availability)을 높이고자 하는 기술이다.⁶⁻⁸⁾ 필터 집진기의 신빙성이 확보되면 IGCC 시스템의 가동률이 100% 유지되기 때문에 필터의 파손으로 인한 시스템의 중단에 대한 우려가 줄어들 뿐만 아니라 필요 이상의 집진 설비를 추가로 설치할 필요가 없기 때문에 전반적인 시스템의 설치비와 운전비를 절감할 수 있

고,^{9,10)} 고압 발전설비 등에서의 배출 가스에는 H₂S를 비롯한 반응성이 강한 가스들이 존재하기 때문에 이에 내구성이 강한 필터의 재질 선정과 fail safety 필터를 활용한 효율적인 필터 집진기의 설계가 중요한 과제이며, 이를 활용한 집진기의 개량설계에 대한 연구가 진행되고 있다.^{11,12)} 기존의 금속필터의 경우에는 청동이나 스테인리스 스틸 분말이나 금속섬유를 이용한 필터의 제조가 주종을 이루었으나, 최근에는 특수한 목적에 이용하기 위한 Fe-Cr-Co, 고내식성 스테인리스 스틸, 고온용 Ni-base alloy이나, 고내식성합금인 Hastelloy등을 이용한 금속필터가 개발되고 있다.¹³⁾

금속 분말의 경우에는 초기의 입자 크기에 비하여 상당한 소성변형을 나타내므로 소결이전에 성형 밀도를 높이기 위해서 CIP(cold isostatic press)등을 이용하여 고압을 가하여 성형체를 제조하고 소결로를 이용하여 필터를 제조한다. 일반적으로 필터의 소결에서는 소결중에 발생하는 수축은 필요하지 않기 때문에, 1100°C 이내에서의 적정한 온도가 소결결합에 적합하다고 알려져 있다.¹⁴⁾ 소결분위기의 부적절한 제어는 부식저항을 상당히 저하

[†]E-Mail : ais@gnsu.ac.kr

시킬 수 있으므로¹⁵⁻¹⁷⁾ 탄소, 질소, 산소에 의한 오염은 크롬과 반응하여 화합물을 형성하고 크롬으로 인한 부식 방지를 감소시키기 때문에 피해야 한다. 따라서 일반적인 스테인리스 스틸 분말의 소결방법으로는 크롬이 완전히 소모될 정도로 압력이 낮지 않는 범위에서 진공소결이 유리하다.¹⁴⁾

본 연구에서는 스테인리스 스틸 금속을 사용하여 입자의 크기, CIP 성형압력, 소결온도에 따른 소결 필터의 기공도를 제어할 수 있는 방법과 분진을 이용한 집진 특성에 관하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 분말은 수분사법에 의해 제조되었으며, Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 불균일한 형태의 SUS310L과 SUS316L 스테인리스 스틸(Ametek Co.) 분말을 53 μm 이하, 53, 63, 120, 120-180 μm 의 시브를 이용하여 분급을 행하였다. 조대한 입자에 의한 통기도 및 기공도를 조사하기 위해 Fig. 1(b)의 420-840 μm SUS316L 분말을 이용하였다. 균일한 성형압력을 가하기 위하여 정수압성형(cold isotatic press, CIP, KCIP-120, 고려진공)를 이용하였으며, 캔들 형태의 금속필터를 제조하기 위하여 중앙에 금속 코어를 장입한 몰드를 설계하였다. 가압을 위한 몰드는 고무경도가 50도인 우레탄 몰드를 이용하였다. 가압력에 의한 변화를 알아보기 위하여 CIP 조건은 1000, 1500, 2000 kgf/cm^2 의 압력을 가하였으며, 가압시간은 일정하게 100sec씩 행하였다.

CIP를 행한 후의 성형체는 분말의 산화를 방지하기 위하여 2×10^{-3} torr 이상의 진공분위기에서 1100-1200°C의 온도에서 각각 1-2시간씩 고상소결을 행하였으며, 소결되어진 필터의 내부의 기공의 변화를 조사하기 위하여 polishing을 행한 후에 내부기공을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 기공도는 점 분석법을 이용하여 관찰하였다. 그리고 필터의 통기성과 분진 제거능을 조사하기 위하여 Fig. 2의 실험 장치를 사용하였다. 본 장치에는 외경이 60 mm인 튜브형 필터를 설치하였으며, 질량유속(V_f)조정기를 사용하여 필터를 통한 압력손실(pressure drop: ΔP)에 무관하게 일정한 여과 속도에서 실제 여과 속도 15 cm/sec 까지 높이면서 필터의 투과성과 누출 분진의 입도분포를 on-line으로 측정할 수 있으며, 주입되는 환경에서 필터의 집진 특성을 측정이 가능하고, 배출구에 질량 흐름 조정기(mass flow controller, MFC)를 설치하여 시간에 따른 필터를 통한 압력손실이 증가할 때도 동일한 여과속도를 유지하면서 실험을 수행할 수 있게 하였다.^{18,19)} 그리고 필터를 통하여 분진이 투과되는 실험을 위하여 배출 sampling port를 통하여 나오는 가스를 분진 입자크기 자동분석기(API Aerosizer)에 유입시

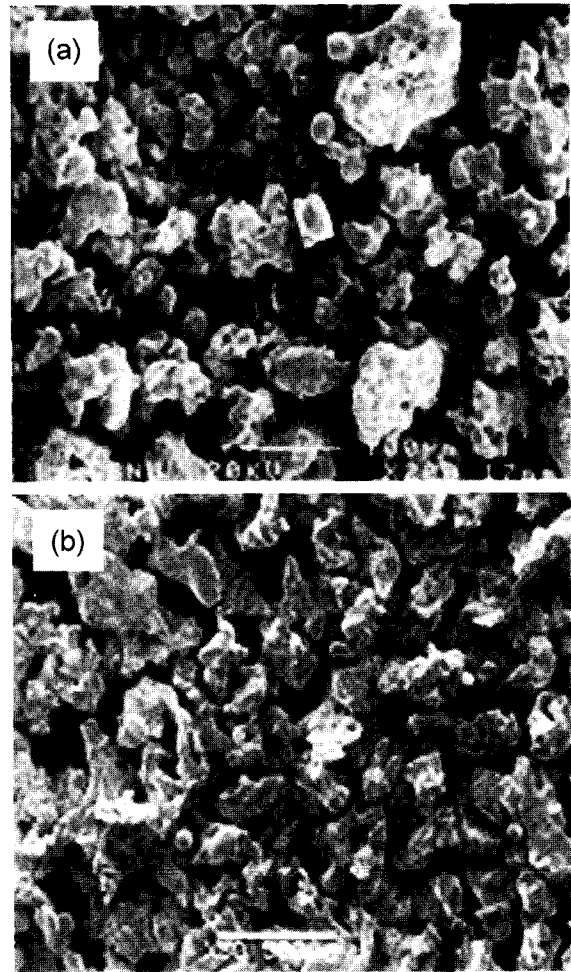


Fig. 1. SEM images of stainless steel powder. (a) below 180 μm and (b) 420-840 μm

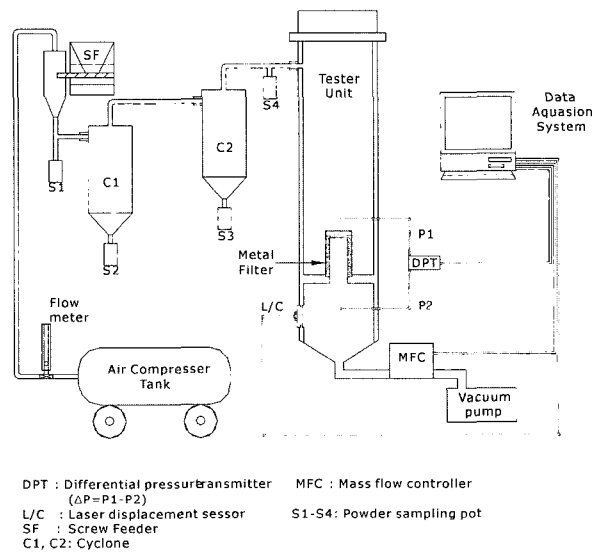


Fig. 2. Schematic of the dust collect unit for the filtration performance.

켜서 투과되는 분진의 입자크기의 변화를 측정하였다. 또한, V_F 와 ΔP 값을 이용하여 아래의 Hagen-Poiseuille식을 이용하여 투기도(permeability)와 기공도(pore size)를 구하였다.²⁰⁾

$$B = \frac{V_F \times \eta \times L}{\Delta P}, \quad d^2 = 32B$$

여기서, V_F 는 표면유속(m/s), η 는 가스의 점도(s/m²), L 은 필터의 두께(m), ΔP 는 압력손실(N/m²)를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

필터의 기공도를 조절할 수 있는 변수는 금속입자의 크기와 성형압력 그리고 소결온도와 소결시간 등이며 소결 변수에 의하여 압력손실을 효과적으로 조절할 수 있음을 보이며, 기공도를 제어하기 위한 우선 조건은 성형압력으로서 압력이 증가함에 따라 소결 활성화도가 높아져 입자와 입자 사이의 계면에서의 결합력을 증가시켜 결합력을 증가시키고자 하였다.

Fig. 3은 평균입도가 63-120 μm 분말을 이용하여 초기의 두께에 따른 성형체의 압축률을 나타내었다. 가압력이 증가함에 따라 압축률이 서서히 증가함을 보이고 있으며 직선적인 형태로 증가하는 것을 보이고 있다. 입자의 크기가 증가하여도 거의 동일한 형태를 나타내는 것을 볼 수 있었다. 그리고 성형체의 압축률이 증가되어짐에 따라, 성형체의 중간부분이 끝부분보다 얇게 나타나는 현상이 발생하였고, 성형체의 강도는 CIP에 의한 가압력에 크게 의존하였고, 1000 kgf/cm²에서는 약 20.2%의 성형 압축비를 가졌으며, 2000 kgf/cm²에서는 약 32.9%의 압축율을 나타내었다. 1200 kgf/cm² 이하의 경우 성형체를 유지할 수 있는 결합력이 아주 낮았으나, 분말의 크기가 420-840 μm 분말의 경우에 낮은 압력에서

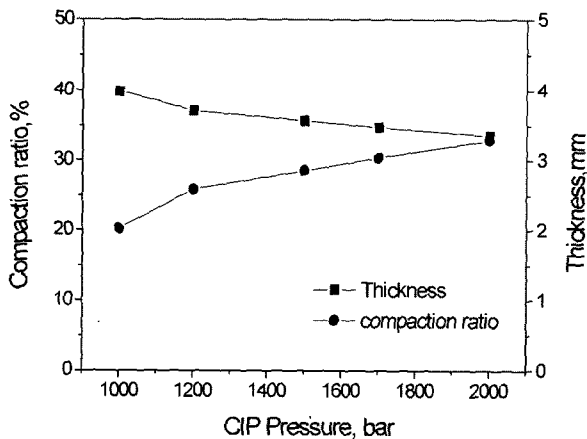


Fig. 3. Compaction ratio of compact as a function of CIP pressure using 63-120 μm powder size.

도 우수한 성형성을 나타내었다. 이 결과는 Fig. 1과 같이 분말의 형태가 아주 불균일함으로 성형시 압축에 의한 분말상호간의 접촉점의 증가로 보이며, 분말의 크기가 작을 경우에는 구형에 가까운 형태를 지님으로 성형 강도가 낮은 것으로 보여진다. 특히, 구형분말의 경우에는 CIP를 이용하여 성형하였을 경우에 형상을 유지하지 못하였다.

성형압력이 소결에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3의 분말을 이용하여 1200°C에서 1시간 동안 소결하였을 경우의 소결체의 내부 형태를 광학현미경을 이용하여 Fig. 4에 나타내었다. 전반적인 소결공정은 가압성형에 의

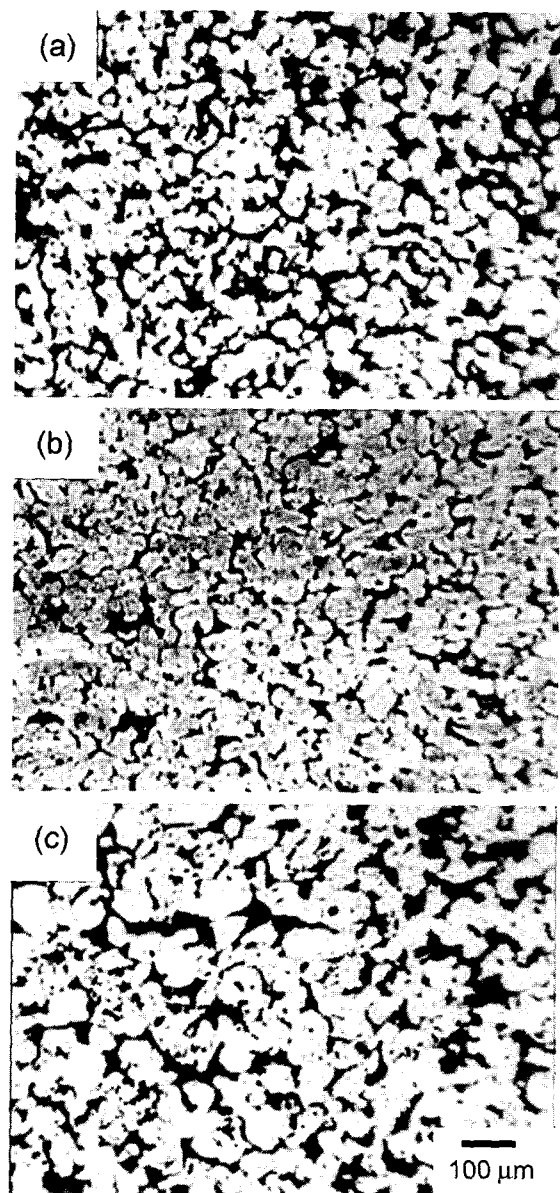


Fig. 4. Optical images of stainless steel filter(63-120 μm) sintered for 1hour at 1200°C after applied pressure at the conditions: (a) 1000, (b) 1500 and (c) 2000 kgf/cm².

한 압력에 의해 분말과 분말사이의 접촉계면에서의 고상 소결에 의존함으로써 소결전과 후의 형태 및 두께 변화는 전혀 발생하지 않았으나, 성형압력이 증가함에 따라 기공 크기가 미소하게 변화되는 것을 볼 수 있다. 성형압력이 1000 kgf/cm²에서 1500 kgf/cm²로 증가함에 따라 성형 압력 증가에 따른 입자 찌그러짐에 의해 내부 기공의 크기가 줄어들었다.^{21,22} 그러나 2000 kgf/cm²는 1500 kgf/cm²에 비하여 기공 크기가 증가됨을 볼 수 있으며, 성형압력이 과다하게 증가함에 따라 분말과 분말간의 접촉점에서의 가압력에 의한 변형에 따른 응력(strain)이 소결 활성화 에너지로 작용하여 소결구동력이 증가되어 분말간 계면에서의 입자 성장이 진행되어져 입자의 성장으로 인한 큰 기공주위의 미세한 기공들의 큰 기공으로 쏠리는 현상에 의해 기공의 크기가 증가되었다.

Fig. 5는 성형압력과 분말 크기에 따른 ΔP의 변화를 나타내었다. 분말 크기가 증가함에 따라 ΔP가 직선적으로 증가되며, 분말의 크기에 의한 효과에 의해 필터 내부 기공의 크기가 증가함에 따라 ΔP가 감소하고, 성형압력이 증가함에 따라 Fig. 4의 내부 기공 크기가 증가되어져 ΔP가 감소되는 것을 볼 수 있다. 표면유속(V_F)의 값이 10 cm/s일 때의 ΔP의 값을 Hagen-Poiseuille식을 이용하여 통기도와 기공의 크기를 계산한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. ΔP의 값과 기공 크기의 값은 반비례하며, 분말의 크기가 커질수록 통기도는 증가하며, 표면 유속이 증가함에 따라 ΔP가 직선적으로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 분말의 평균크기가 90 μm의 경우에는 성형압력에 관계없이 통기도와 기공 크기가 낮게 나타났으며, 분말의 크기가 증가되면 다시 통기도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 90 μm 이하의 경우에는 소결시에 발생하는 분말과 분말과의 접촉점에서의 입자 성장에 의해 기공의 크기가 증가되어지는 것을 알 수 있으나, 90 μm 이상의 경우에는 통기도가 소결시에 발생하는 입자의 성장에 의한 기공의 증가보다는 가압성형에 의해 형성되어진 초기 기공의 크기에 의존함으로써 80 μm 보다 낮은 통기성을 보인다. 그러므로 입자의 크기가 90 μm 이상일 경우에는 필터 내부의 기공은 분말의 크기와 성형압력이 낮을수록 증가되어짐을 볼 수 있으며, 분말의 평균 크기가 150 μm의 경우에는 성형압력이 1500 kgf/cm²일 경우에 2000 kgf/cm²의 경우에서보다 높은 통기성과 내부의 기공의 크기를 가지는 것을 볼 수가 있으며, 이때 기공의 크기는 약 20 μm였다.

일반적으로 사용되어지는 고온용 집진장치의 메인필터인 세라믹 캔들 필터가 요구하는 압력손실은 여과속도 10 cm/sec에서 20 mmH₂O이하가 바람직하다고 알려져 있으므로,^{6,10} Fail safety 필터의 경우에는 CIP를 이용한 가압에 의한 제조방법으로서는 입자의 크기가 180 μm 이하의 분말을 이용할 경우에는 충분한 통기도를 가지지 못

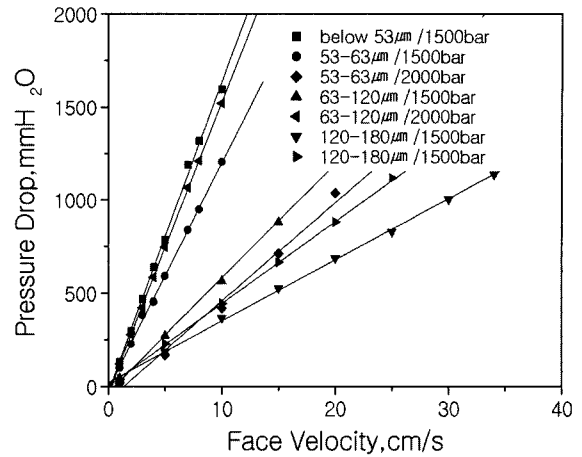


Fig. 5. Change in pressure drop and face velocity through the filter element as a function of powder size.

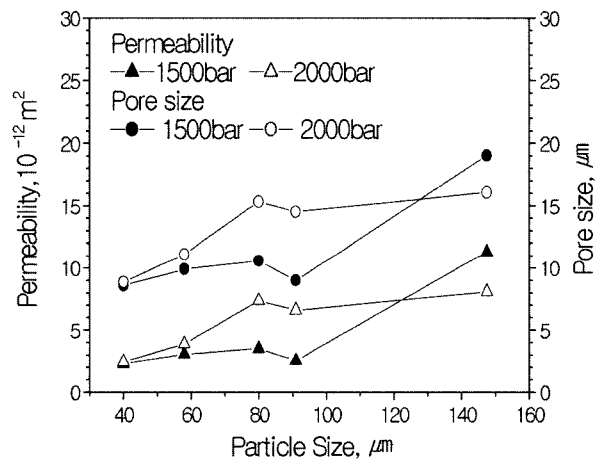


Fig. 6. Change in pore size and permeability of the filters sintered for 1hour at 1200°C after compacted of 1500 kgf/cm² and 2000 kgf/cm² by CIP.

한다. 그러므로 높은 통기도 및 기공을 유지하기 위하여 입자의 크기가 420-840 μm 분말을 이용하여 압력의 변화에 따라 성형한 후에 소결되어진 필터의 내부 미세조직을 Fig. 7에 나타내었다. 가압력이 증가됨에 따라 기공의 크기는 감소되어지는 것을 볼 수가 있으며, 성형압력의 증가에 따라 기공의 크기가 상대적으로 감소하는 것을 보였다.

Fig. 8은 성형압력의 증가에 따른 ΔP의 변화를 나타내었다. 성형압력이 증가됨에 따라 일정한 기울기를 가지며 ΔP가 증가하는 것을 보여주며, 표면유속이 증가됨에 따라 ΔP의 직선적인 증가를 보여준다. Fig. 9는 표면유속에 따른 ΔP값을 이용하여 통기도와 기공의 크기를 계산한 것으로 기공의 크기가 감소함에 따라 통기도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 기공의 크기는 직선적

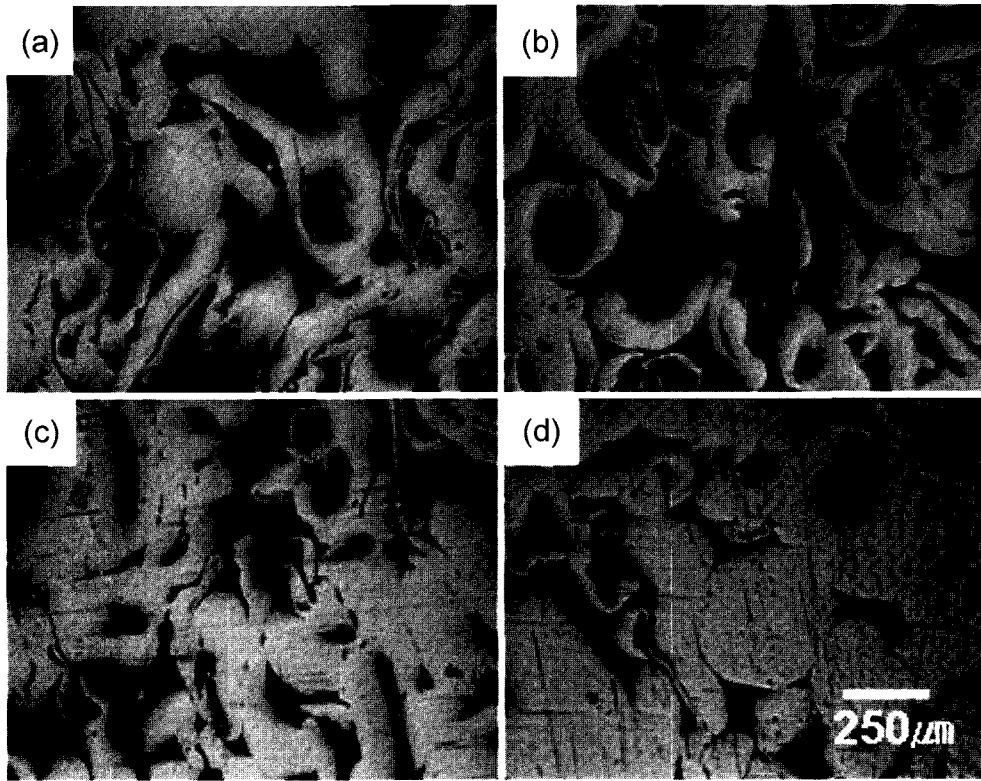


Fig. 7. Optical images of the filters(420-840 μm) sintered at 1200°C for 1hour after CIP pressure as a terms of (a)1200, (b)1500, (c)1700 and (d) 2000 kgf/cm^2 .

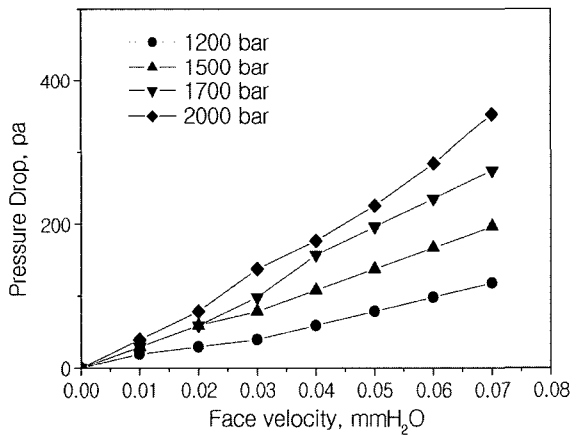


Fig. 8. Changes in pressure drop of sintered filter fabricated as a function of CIP pressure using powder of 420-840 μm size.

으로 감소하는 반면에 통기도는 필터 내부에서의 공기의 흐름에 따라 내부 입자와의 충돌에 의한 관성모멘트에 의해 기공의 크기가 클수록 통기도는 지수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 10의 경우에는 전술한 결과를 나타내는 것으로서 분말의 크기가 증가할수록 기공의 크기는 직선적으로 증가하는 반면에 통기도는 지수적으로 증가한다. 분말의 크기가 420-840 μm 경우에는 약 60 μm

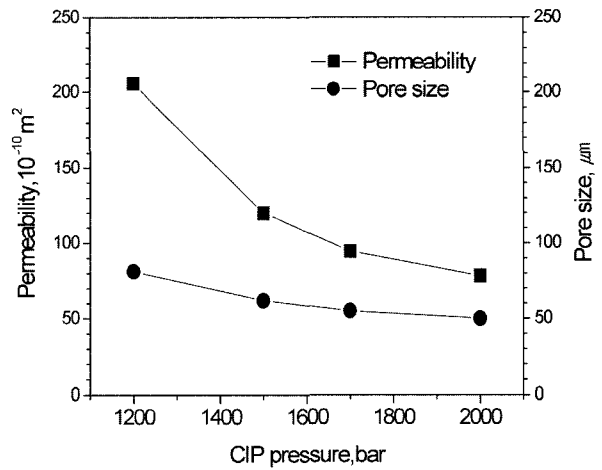


Fig. 9. Change of permeability and pore size as a function of applied pressure of sintered filter produced with powders of 420-840 μm size.

의 기공도를 나타내었으며, 통기도는 $1.20 \times 10^{-10} \text{m}^2$ 으로 높게 나타났다.

Fig. 11은 fly ash가 함유된 분진 공기를 20 cm/s의 속도로 필터에 주입시킨 후에 배출되는 분진 크기를 시간 변화에 따라 API로 측정된 후에 누출분진의 최대 크기를 표시한 것으로서 메인 필터가 파손되면 초기에 분진

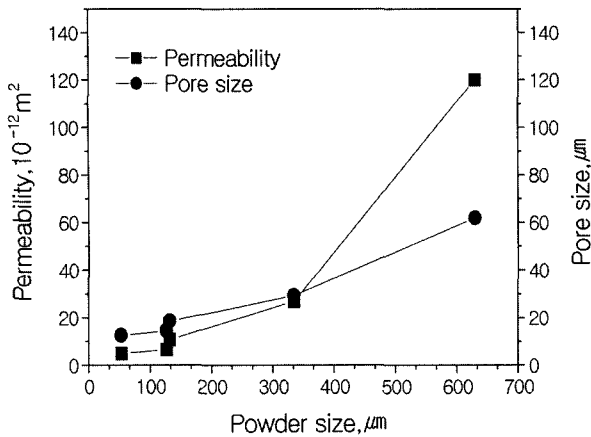


Fig. 10. Change in average pore size and permeability of the filter fabricated as a function of powder size.

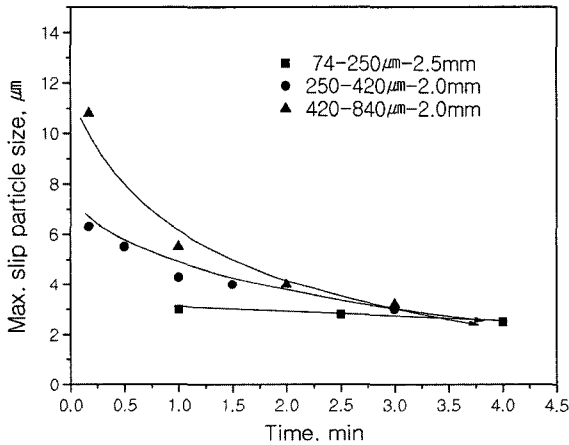


Fig. 11. Change of maximum slip particle size of the ash pass through the metal filter in the dust collect tester.

가스 흐름이 파손된 부위에 집중적으로 매우 빠른 속도로 유입되는 분위기를 가하여 누출되는 분진 크기를 측정하였다. 금속필터를 제조한 분말입자가 작을수록 평균 기공 크기가 감소함에 따라 초기에 누출되는 분진의 크기가 급격히 작아지는 것을 알 수 있다. 가스중의 먼지를 포집하는 집진기능은 기공을 통하여 먼지를 포함하는 가스가 통과되어질 경우에 충돌과 차단 그리고 확산의 원리에 의해 입자들이 여과체 표면에 걸리면서 분진층이 형성되어짐으로,^{23,24)} 시간이 경과되어짐에 따라 필터의 표면 및 내면에 흡착되어진 분진층에 의해 집진이 발생함으로 점차적으로 필터를 통과할 수 있는 분진의 최대 입경의 크기가 감소됨을 볼 수가 있었다. 그러므로 상대적으로 기공의 크기가 작은 240-450 μm 필터의 경우에는 초기에 포집된 분진의 크기는 약 6.5 μm 이었으며, 평균 기공의 크기가 60 μm 인 420-840 μm 로 제조된 필터의 경우에는 초기에 큰 입자가 누출이 되지만, 1분 후에는 누

출분진의 최대 입경이 5 μm 이하로 감소되었으며, 2분이 경과되어진 후에는 필터의 내부의 기공의 크기에는 관계없이 비슷한 특성을 보였으며, 3분 경과 되어진 후에는 누출분진의 최대크기가 3 μm 이하로 감소됨을 보였다.

4. 결 론

집진기의 고온 고압용 금속 필터를 제조하기 위한 기초연구로서 입자의 크기에 따른 필터의 기공도 조절과 조대한 입자를 이용한 통기도 개선을 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 통기도의 경우에는 표면 유속이 증가할수록 pressure drop이 직선적으로 증가하였으며, 입자 크기 및 필터의 두께가 감소할수록 pressure drop이 감소하였고, 240 μm 이상의 입자에 의해 제조한 소결 필터의 경우에는 기존의 메인 필터보다 높은 통기성을 나타내었다.

2. 분말의 크기가 증가할수록 기공의 크기는 직선적으로 증가하는 반면에 통기도는 지수적으로 증가하는 것을 보여주었으며, 초기 분말의 크기가 420-840 μm 로 제조된 필터의 경우에는 약 60 μm 의 기공도를 나타내는 것으로 보이며, 이때의 통기도는 $120 \times 10^{-12} \text{m}^2$ 으로 높게 나타났다.

3. 분진 제거 시험의 결과, 통기도가 우수한 420-840 μm 필터의 경우에 초기 통과되어진 분진의 최대입경은 12 μm 이었으나, 3분이 경과하였을 경우에는 통과되어진 분진의 최대입경은 3 μm 으로 감소하였다.

감사의 글

본 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2000-005-E00005)에 의하여 연구되었으며 이에 심심한 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Christopher Dickson : Filter and Filtration Handbook", 3rd ed. FBIM, 180 (1991).
2. K.-J. Shin and D.-H. Lee, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., **35**(3), 367 (1997).
3. Shevlin Thomas S., Ceramic fabric filter, U. S. Patent 4398 931, May 19, (1982).
4. Forester Roger J. and White Lloyd R. uniform minimum-permeability woven fabric, filter, and process therefor, U. S. Patent 4613350, April 24 (1985).
5. R. H. Warring, Filters and filtration Handbook, Gulf Publishing Co., Houston (1981).
6. J.-D. Chung and J.-H. Choi, J. of KSEE, **17**(8), 81 (1995).
7. Jae Chan Lee, Bulletin of the Korean Ceramic Society, **5**(2), 156 (1990).
8. J. H. Raistrick, Filtration and Separation, **23**, 254 (1986).

9. J. E. Oakey and G. P. Reed., High Temperature Technology, **5**, 171 (1987).
10. Pall Corporation, Filtering apparatus. US Patent 5474585, DEC. 12. (1995).
11. Y.-C. Bak and J.-H. Choi. Energy Engg. J, **10**(2), 132 (2001).
12. Y.-C. Bak and J.-H. Choi, J. of KSEE, **23**(7), 1083 (2001).
13. L. D. Weigner and L. J. Gibson, J of Mechanical Sci., **43**, 1061 (2001).
14. Randall M. German. "Sintering Theory and Practice" Dae Woong, Korea, 504 (2000).
15. G. Lei, R. M. German and H. S. Nayar, Prog. powder Met., **39**, 391 (1983).
16. R. H. Shay, T. L. Ellison and K. R. Berger, **39**, 319 (1984).
17. C. Lall, Reviews in particulate Materials, Metal powder Industrials Federation, Princeton, NJ, **1**(A), 75 (1993).
18. International Standard ISO 4200-1977(E).
19. J. P. K. Seville et al, Filtering and Separation, **26**, 265 (1989).
20. Peter R. Johnson, Filtration & Separation, 455 (1998).
21. R. M. German, Met. Trans., **7A**, 1879 (1976).
22. C. C. Fatino and J. S. Hischhorn, Trans. TMS-AIME, **239**, 1499 (1967).
23. M. L. Aguiar and J. R. Coury, Ind. Eng. Chem. Res., **35**(10), 3673 (1996).
24. Richard Dennis, J. of the air pollution control Association, **24**(12), 1156 (1974).