

Diesel Particulate Filter의 특성 및 제조방법 (II)

양 진

쌍용중앙연구소 환경자원연구실
(1998년 10월 15일 접수)

Fabrication and Characteristics of Diesel Particulate Filters (II)

Jin Yang

Ssangyong Research Center, Environment & Resources Research Team
100 Shinsung-Dong Yusung-Gu Daejeon
(Received October 15, 1998)

요 약 : 경유자동차에서 발생하는 입자상물질은 대기오염의 주범으로 인식되어 국내외적으로 이의 규제가 점점 강화되고 있다. 본 고에서는 전 호에 이어 이러한 입자상물질을 제거하기 위하여 가장 보편적으로 사용되는 필터인 세라믹 하니컴 필터에서의 기공 및 필터특성의 조절과 설계에 대하여 언급하였다. 또한 그 외 각종 필터, 즉 세라믹 화이버 캔들 필터, 세라믹 폼 필터, 세라믹 크로스 플로우 필터 그리고 금속 필터 등의 성능 및 제조방법을 정리하였다. 이와 같이 후처리장치용 필터로는 수없이 많은 필터들이 개발되어 많은 실증시험을 거치고 있으나 이러한 필터의 본격적인 상용화를 위하여는 재료 측면에서의 보다 많은 연구, 개발이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

Abstract : The emission standards for diesel particulates have been continued to become tighter. This article reviews the pore and how to filtering characteristics and how to design the ceramic honeycomb filter which is generally used for diesel particulate filter. And the properties and fabrication methods of other particulate filters, i.e. ceramic fiber candle filter, ceramic foam filter, ceramic cross-flow filter and metal filter, are presented in this review. The results show that though the various filters have been developed and tested in the field, the more efforts are needed for the commercilaization of the diesel particulate filter.

(전 호에서 계속)

4) 기공 및 필터특성의 조절

하니컴 필터뿐만 아니라 일반적인 필터의 제조시에 가장 중요한 변수중의 하나는 적절한 기공특성이라 할 수 있다. 필터의 경우 여과효율은 크고 배압은 작아야하는데, 일반적으로 기공률이나 기공경이 적을수록 여과효율은 증가하나 배압이 커지며 반대의 경우 배압은 감소하나 여과효율은 적어지는 경향이 있어 이의 적절한 조절이 필요하다. 하니컴 필터의 경우 코

디어라이트만의 소결로는 원하는 기공특성을 얻을 수 없어 통상 기공형성제를 이용하는데 일반적으로 흑연, 수용성 cellulose, 그리고 밀가루 등을 사용한다[47]. 흑연의 경우 압출시 압출물의 유동성(rheology)이 우수할 뿐만 아니라[47] 소결시 세라믹의 균열을 유발시키는 부풀림현상(swelling)이 없이 연소되면서 적당한 기공크기와 기공량을 형성하는 것으로 알려져 있어 가장 많이 사용되어진다[29]. 이러한 흑연은 최대 30 w/o까지 첨가하나 그 양이 많으면 건조시 dielectric drier와 세라믹사이에 arcing 또는 shorting이 발생한다

다. dielectric drying의 경우 건조가 빠르고 균일하게 될 뿐만 아니라 건조크랙을 방지하며 원래의 치수를 잘 유지할 수 있기 때문에 통상적으로 사용되는 건조 방법으로, arcing이나 shorting이 발생시 필터의 연소(burning) 및 이에 따른 균열이 발생하며 또한 건조기에 손상을 줄 수도 있다. 한편 cellulose의 경우 arcing이나 shorting이 없으며 흑연에 비해 낮은 온도에서 타므로 열소모량이 적고 thermal stress가 감소될 뿐만 아니라 같은 양의 흑연에 비해 2배의 기공량을 형성하는 것으로 알려져 있다. 그러나 cellulose의 경우 swelling현상이 있으므로, arcing과 shorting의 위험이 없는 범위내에서는 가능한 많은 흑연을 사용하는 것이 좋은 것으로 보고되어 있다[29].

또한 평균기공경을 증가시키려는 경우 앞의 열팽창계수에서 설명한 바와 같이 조대한 활석을 이용하는 방법이 사용되는데 이는 코디어라이트의 소결시 활석 등 마그네시아 원료입자가 클수록 소결시 액상이 쉽게 형성되고 이러한 물질이 기존의 실리카-알루미나 고상으로 쉽게 확산되면서 액상이 빠져나간 자리가 기공으로 형성되어, 결과적으로 큰 활석입자가 큰 기공을 형성하기 때문이다[33, 29, 54]. 이밖에 기공경을 증가시키기 위한 다른 시도는 pyrophyllite, kyanite, quartz, fused silica로 카울린 등의 점토중 일부나 전부를 대체하는 방법도 있다. Lachmann 등[40]은 이를 이용한 결과 기공경이 10 μm 이상되는 큰 기공들이 30~65% 생성되어 기공경이 증가되었다고 보고하였으나 이 방법을 이용시 열팽창계수가 증가한다는 결과[33]도 제시되고 있다. 아울러 양[54]은 코디어라이트의 기공률 및 기공경에 영향을 미치는 각종 인자의 영향을 정량적으로 파악하였는데, 기공률은 조공제인 흑연의 첨가량에 가장 큰 영향을 받으며 그 외의 공정조건인 활석의 크기, 흑연의 크기, 소결온도 그리고 소결온도에서의 유지시간은 상대적으로 영향을 덜 미침을 보고하였다. 또한 기공경의 경우는 조공제인 흑연의 첨가량이나 흑연의 크기보다는 오히려 활석입자의 크기에 가장 큰 영향을 받는 것으로 보고하였으며 따라서 기공률 및 기공경을 증가시키기 위하여는 흑연의 첨가량을 늘림과 동시에 조대한 활석입자를 사용하는 것이 바람직하다고 제시하였다.

한편 기공특성과 여과효율, 그리고 배압과의 관계를 살펴보면 일반적으로 기공의 크기가 적을수록 높은 여과효율을 갖는 반면 높은 배압을 나타내는 경향이 있다. 그러나 Murtagh 등[28]은 하니컴 필터의 경우 입자의 축적량이 낮을 때(< 0.60 gm/liter)는 높은 여과효율을 가질수록 높은 배압을 가지는 상관관계가 뚜렷한 반면 축적량이 많아지는 경우(> 0.60 gm/liter)

일반적인 예상과는 달리 이런 상관관계는 존재하지 않는다고 보고하였다. 즉 이들은 입자상물질의 낮은 축적도에서는 기공크기가 적으면 배압이 크나 높은 축적도에서는 기공크기가 적은 것이 오히려 배압이 작은 결과를 나타내었으며, 또한 여과효율에 있어서도 낮은 입자축적도에서는 기공크기가 적은 것이 여과효율이 우수하나 높은 입자축적도에서는 여과효율과 기공크기와는 상관관계가 없다고 주장하였다.

이들은 이러한 현상을 연구한 결과 그 원인을 다음과 같이 설명하였다. 즉 기공크기가 적은 경우 입자상물질이 필터의 벽으로 침투하는 것이 적은 반면 기공이 큰 경우 입자가 필터의 벽에 많이 축적되어 soot membrane을 형성하게 되며, 이러한 막자체가 필터의 역할을 함으로써 결국 기공크기와 무관하게 같은 여과효율을 나타내게 된다. 한편 배압에 있어서도 작은 기공을 갖는 필터의 경우 필터 벽안으로의 입자의 침투가 최소화됨에 따라 침투시간이 짧고 기공분포나 기공량의 변화는 크지 않은 반면, 기공이 큰 필터의 경우 입자가 계속 필터벽으로 침투함에 따라 침투시간이 길게 되어 기공량의 많은 부분이 입자로 막혀지고 기공크기가 더욱 작아진다. 즉 입자가 축적됨에 따라 필터의 고유한 기공크기와 기공량은 감소되어지나 이러한 감소율은 큰 기공에 있어 더 크고 기공량의 많은 부분이 입자로 막혀지게 되어 결과적으로 기공의 크기를 더 작게 만들고 기공량도 더 많이 감소시킨다. 따라서 큰 기공을 갖는 필터는 여과효율이 향상되어 작은 기공을 갖는 필터와 여과효율이 비슷해지고 배압에 있어서는 더 커지며, 작은 기공을 갖는 필터는 입자가 축적되더라도 필터벽으로의 침투가 최소화됨으로써 배압의 증가율이 적어진다. 결론적으로 이들은 여과효율과 배압은 필터제조시의 기공특성뿐만 아니라 입자상물질이 축적됨에 따른 기공특성의 변화와 생성되는 soot membrane의 특성에 더욱 의존하게 되며, 재생주기가 길어 축적량이 많을 경우 작은 기공을 가지는 필터가 낮은 배압과 높은 여과효율을 나타내게 된다고 하였다[28].

기공특성과 필터특성에 관한 다른 중요한 보고로 J. Kitagawa 등[55]의 것이 있다. 즉 이들은 높은 여과효율과 낮은 배압을 얻기 위해서는 평균기공경이 증가되어야 하나 이 경우 일정 크기 이상의 기공의 부피는 일정하게 유지되어야 한다고 하였다. 이에 따라 이들은 평균기공경은 13 μm 에서 20 μm 으로 증가시키면서 100 μm 이상의 기공의 부피는 8%로 일정하게 유지시킨 필터를 제조한 결과 기존제품과 여과효율은 같으면서 배압은 감소하였다고 보고하였으며, 결과적으로 큰 기공의 부피를 감소시키고 평균기공크기를

증가시키면 여과효율을 증대시키면서 배압을 감소시킬 수 있다고 하였다.

그 외에 2 μm 이하의 기공경을 갖는 작은 기공은 여과효율에 영향을 미치지 못하고 입자들에 의해 쉽게 막힘으로써 배압을 증가시키는 것으로 알려져 있어 앞서의 큰 기공의 조절과 함께 작은 기공의 조절도 중요함을 알 수 있다. 즉 Hamaguchi 등[30]은 2 μm 이하의 작은 기공경을 갖는 기공량이 0.01 g/cc 이하이면 같은 여과효율과 배압을 갖더라도 배압상승속도가 낮은 필터를 만들 수 있다고 보고한 바 있다. 또한 Shinozaki 등[56]도 여러 종류의 필터를 사용하여 흥미있는 결론을 내렸는데 이들은 높은 여과효율을 갖는 필터가 항상 높은 배압을 갖는 것은 아니며 높은 여과면적을 갖는 필터가 낮은 배압을 갖게 된다고 주장하였다.

아울러 이러한 기공특성은 재생방법과도 밀접한 특성이 있어 리버스 펄스 에어방식의 경우 압축공기의 분사에 의한 입자의 탈리가 중요한데 적은 기공크기를 갖는 필터가 재생이 잘되는 것으로 보고되어 있으며 이를 위해 하니컴 필터의 기공크기를 감소시키거나[57] 또는 멤브레인을 코팅한 하니컴 필터[15-18]를 사용하기도 한다.

한편 기공특성을 조절함으로써 열충격저항성을 향상시키는 방법도 실제 적용되고 있다. 즉 열충격저항지수(thermal shock resistance parameter)는 파괴강도에 비례하고 열팽창계수 및 탄성계수에는 반비례하므로 파괴강도가 클수록, 그리고 열팽창계수 및 탄성계수는 적을수록 내열충격성이 우수하다. Murtagh 등[28]은 기공크기를 감소시키고 기공분포를 좁게 할 경우 곡강도는 증가하고 탄성계수는 감소하여 결과적으로 strain tolerance(곡강도 대 탄성계수의 비)가 증가함으로써 열충격저항성이 증진된다고 보고하였으며 이 방법과 더불어 열팽창계수를 낮춤으로써 기존에 비해 열충격저항지수를 3~5배 향상시킨 하니컴필터를 개발한 것으로 보고하였다.

5) 하니컴 필터의 설계

앞서 언급한 바와 같이 하니컴 필터는 높은 용점과 낮은 열팽창계수 등으로 말미암아 매우 높은 열구배(thermal gradient)에도 잘 견딜 수 있지만 재생조건을 잘 조절하지 못하면 필터가 녹거나 과도한 열구배로 인하여 파괴될 수 있다. 일반적인 하니컴 필터의 경우 축 방향으로의 열구배는 250 $^{\circ}\text{C}/\text{inch}$, 그리고 반경방향으로는 100 $^{\circ}\text{C}/\text{inch}$ 이하의 열구배가 권장되어진다[1]. 또한 가능한 한 재생을 자주하여 재생시 발열온도가 높지않도록 조절하여야 한다. 그러나 이러한 빈번한

재생주기는 자동차에서의 한정된 에너지를 고려시 적절한 조절이 필요하며 2.5 liter(지름 5.66 inch \times 길이 6 inch) 필터의 경우 입자상물질의 최대허용 축적량은 15g 정도로 추천되고 있다[1]. 아울러 일반적인 하니컴 필터의 최고온도는 제조회사의 경우 800 $^{\circ}\text{C}$ 로 추천하고 있으며 Higuchi 등[58]은 실험을 통해 약 1000 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 균열이 발생하고 1200 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 용융이 일어나는 것으로 보고하였다.

한편 하니컴필터의 주요 특성중의 하나인 배압에 영향을 주는 인자로는 하니컴 필터의 직경, 벽의 두께 그리고 aspect ratio(길이 대 직경의 비) 등을 들 수 있다. 직경의 경우 10%의 직경증가는 조건에 따라 다르나 약 32%의 배압을 감소시키는 것으로 알려져 있으며[59] 벽 두께의 감소 역시 배압을 줄여주고 필터의 무게를 감소시키나 이의 감소는 또한 필터의 기계적강도를 저하시킨다. Aspect ratio의 경우 같은 부피일 경우 직경이 크고 길이가 짧을수록 배압은 감소되어진다. 그러나 이러한 aspect ratio의 경우 그 값은 0.7~1.4로 제한되며 통상적으로 이 값은 1에 가깝게 제조되어진다. 이는 aspect ratio가 너무 작아 큰 직경과 짧은 길이를 가진다면 과도한 열구배가 발생시 이 필터는 직경방향으로 파괴가 일어나는 face crack이 발생하고, 만약 aspect ratio가 너무 커 길이방향으로 긴 필터의 경우 배압이 증가하게 될 뿐만 아니라[57] 길이방향과 수직으로 파괴가 일어나는 ring-off crack이 발생하기 때문이다[1]. Fig. 4[1]는 이러한 face crack과 ring-off crack을 도식적으로 나타낸 그림이다. 한편 Ichikawa[14] 등은 하니컴 필터의 리버스 펄스 에어방식에서 aspect ratio가 클수록 재생효율이 증가한다고 보고하여 aspect ratio는 재생방법과도 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

또한 필터의 열충격을 감소시키기 위한 방법으로 필터의 구조를 변경시키는 방법도 있는데, Howitt 등[60]은 큰 직경의 코디어라이트 필터를 작은 부분으로 조각화한 후 각각의 필터를 고온 접촉체를 이용하거나 또는 단순히 압력만에 의하여 연결시킨 필터를 사용할 경우 각 조각들이 미세하게 움직일 수 있어 열충격에 강한 것으로 보고하였다. 아울러 필터내에서 입자상물질의 균일한 축적 또한 앞서 언급한 바와 같이 중요한데 이를 위하여 필터트랩내부에 diffuser를 설치하는 경우도 많다.

한편 필터를 포장하는 캐닝 시스템(canning system)의 설계도 필터와 재생과정에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 Fig. 5[1]는 전형적인 하니컴 필터의 캐닝 시스템을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 하니컴 필터와 금속제 캔 사이에는 필터를 고정하는

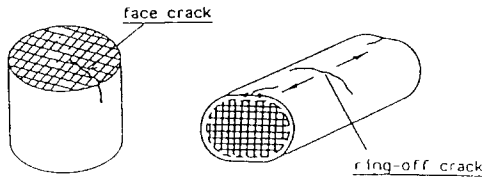


Fig. 4. Schematic of face and ring-off crack.

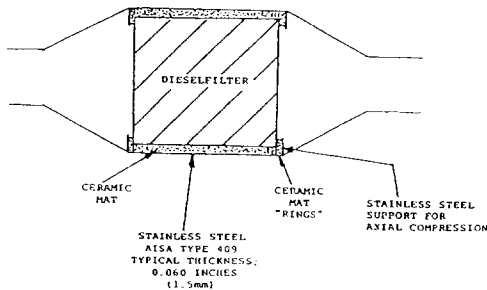


Fig. 5. Typical canning system of diesel particulate filter.

mounting물질이 삽입되며, 이의 재료로는 압축가능한 세라믹 매트(compressible ceramic mat)나 금속 와이어 메쉬가 사용되어진다. 주로 사용되어지는 세라믹 매트와 ceramic fiber, vermiculite, 무기 충전재(inorganic filler), 그리고 유기 결합제로 만들어지는데 이들은 필터의 외부를 단열시켜 가능한 한 필터 반경 방향의 열구배를 줄여줌으로써 재생시 발생하는 열충격을 감소시키며 아울러 필터의 외부에 압축응력을 가함으로써 필터를 강화시킨다[26, 61]. 또한 매트는 충격이나 진동으로부터 필터를 보호하며 가스의 실링 재료로서의 역할도 한다. 아울러 매트는 캔과의 마찰계수를 줄여 캔의 축방향으로 발생하는 shear stress의 필터로의 전달을 감소시킬 뿐만 아니라 반경방향으로의 금속 캔과 필터의 열팽창계수의 차를 완화시킨다[61]. 실제 후처리장치의 실험시 온도가 상승함에 따라 금속제 캔의 높은 열팽창계수로 필터와 캔사이의 반경방향의 간격은 증가하게 된다. 그러나 세라믹 매트는 온도가 상승함에 따라 팽창하는 특성을 지니고 있으며 일단 팽창된 매트는 다시 축소하지 않음으로써 필터에 일정압력을 가하여 압축응력을 유발시키고 앞서 언급한 매트의 여러 특성을 만족하게 된다[61].

4.2. Ceramic Fiber Candle Filter

Fig. 6[62]은 세라믹 화이버 캔들 필터의 모양을 나

타낸 도식적인 그림이다. 그림에서와 같이 이 필터는 구멍이 난 스테인레스스틸 튜브에 세라믹화이버 실(strand)을 다이아몬드모양으로 감아서 만든 캐트리지이다. 이 때 실사이의 공간은 세라믹 화이버 필라멘트(filament)로 채워져 입자상물질이 이 필라멘트사이를 통과시 여과되는 구조로 되어 있다. 이 필터의 장점은 화이버로 제작되어 있기 때문에 열적이나 기계적충격에 강하고 따라서 커다란 열구배에도 견딜 수 있다는 것이다. 또한 캐트리지의 크기나 수의 변경이 용이하고 또한 이들을 배치할 수 있는 방법이 다양하다는 장점이 있다[63]. 이 필터의 경우 차량탑재시의 소형화와 화이버의 내열성이 문제점으로 지적되는데[64] 장기간 사용시 열화 등으로 화이버의 조각이 생성되어(shedding 현상) 여과효율이 감소할 뿐만 아니라 2차공해의 위험성이 우려된다는 주장도 제기되고 있다. 이 필터의 일반적인 크기는 외경 70 mm, 길이 470 mm로 재생을 행하기 위하여 종류에 따라 전기히터를 내장하여 제조되기도 하는데 히터의 장입위치에 따라 외장히터 카트리지와 내장 히터 카트리지로 분류된다[63].

이러한 필터에 일반적으로 사용되는 화이버의 직경 및 조성은 각각 8~12 μm , alumina(62%)-boria(14%)-silica(24%)이며 연속사용가능온도의 경우 1250 $^{\circ}\text{C}$ 으로 알려져 있으나[65] 엔진오일의 재(ash)에 의한 용융이나 화이버끼리의 붙는 현상을 방지하기 위하여 950 $^{\circ}\text{C}$ 이하에서 사용할 것을 권장하고 있다[62] 이러한 화이버의 제조방법은 알려져 있지 않으나 특허[66] 등으로 추정시 다음과 같다. 즉 silica hydrosol, aluminum formacetate, 그리고 boric acid를 PVP (polyvinylpyrrolidone), polyvinyl alcohol, lactic acid 또는 glucose 등의 첨가제와 혼합한 후 이 용액을 multihole spinnerette를 이용, 압출하여 겔상태의 화이버를 제조한 후 이를 하소함으로써 화이버를 제조한다. 이 화이버의 경우 전연체로서 일반적인 섬유제조 장비로 쉽게 취급되어질 수 있는 것으로 알려져 있다.

이 외의 세라믹화이버를 이용한 것으로 mullite나 silica의 미세화이버(microfiber)를 직조하여 불균일한 다공성구조를 만든 것도 있는데 이러한 필터의 여과효율은 95%정도이며, 1200 $^{\circ}\text{C}$ 까지 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 이 필터의 경우 경제적인 뿐만 아니라 기계적, 열적, 열충격저항성 등에서 우수한 것으로 보고되어 있다[36].

4.3. Ceramic Foam Filter

Fig. 7[67]은 전형적인 세라믹 폼 필터의 구조를 나

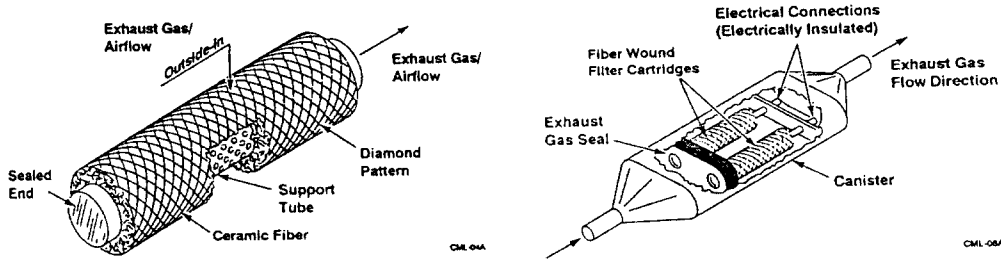


Fig. 6. Schematic of ceramic fiber candle filter cartridge and electrically regenerable cartridge assembly.

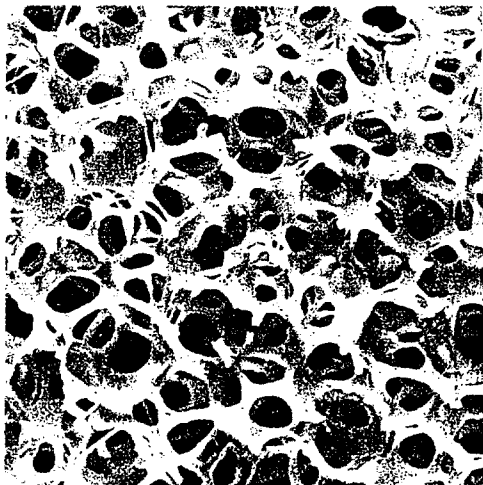


Fig. 7. Typical structure of ceramic foam filter.

타낸 것이다. 이러한 필터는 주로 용융금속의 불순물 제거용 필터(molten-metal filter), 각종 내화물 등으로 주로 사용되는 제품으로 이의 다공성을 이용하여 후처리장치용으로의 적용이 시도되고 있다. 이 경우 세라믹 폼을 기존의 원기둥 모양뿐만 아니라 파이프 모양, 링(ring)모양 등 다양한 형태로 제조하여 사용하는데 폼 필터는 일반적으로 하니컴필터에 비해 재생온도가 낮은 것으로 알려져 있으며 이는 입자상물질들이 서로 연결되게 축적되어 flame의 전파가 빠르기 때문이다[68]. 또한 폼 필터는 기계적강도가 우수하고 열충격에 강하며 제조원가가 싼 장점이 있을 뿐만 아니라, 촉매를 코팅했을 경우 가스의 체류시간이 길어 촉매에 의한 연소가 잘 일어나며, 이에 따른 배기가스의 온도가 상승하여 재생에 도움을 준다고도 보고되어 있다. 그러나 통상 폼 필터는 여과효율이 낮고 배압이 크게 걸려 연비의 악화 및 엔진출력저하가 발생하는 것이 문제점으로 지적되어 왔다. 그럼에도 불구하고

세라믹 폼은 앞서 언급한 여러 장점을 지니고 있어 세라믹폼을 후처리장치에 적용하려는 많은 연구들 [68-70]이 시도되고 있으며 세라믹폼에 멤브레인을 코팅하여 적용하려는 시도[71]도 있다.

이러한 세라믹폼의 제조공정은 크게 polymeric-sponge method와 forming method로 나누어진다[72, 36] 먼저 일반적으로 많이 사용되어지는 polymeric-sponge method의 제조방법은 세라믹 슬러리를 폴리머 스폰지에 함침한 후 이를 소결하여 폴리머를 연소시킴으로써 세라믹 폼을 제조하는 방법이다. 이 때 스폰지의 기공크기가 세라믹 폼의 기공크기를 좌우하는데 일반적인 기공크기는 2~25 pores/linear cm이다. 이 방법에서 사용되는 폴리머의 종류는 polyurethane, cellulose, polyvinylchloride, polystyrene, 그리고 latex 등이 있는데 이 중 대부분의 경우 polyurethane을 사용한다. 폴리머의 선택조건은 세라믹의 소결온도보다 낮은 온도에서 휘발해야 하고 탄성이 좋아 슬러리에 함침한 후에도 원형으로 쉽게 복귀되어야 한다.

세라믹 슬러리의 원료는 응용분야에 따라 결정되는데 일반적인 용융금속용 필터로서 가장 많이 사용되는 것은 SiC이다. 그러나 제품의 원하는 성질에 따라 각종 산화물, 질화물, 탄화물 등 다양한 원료의 사용이 가능하다. 이러한 원료분말은 일반적으로 물과 각종 첨가제와 혼합되는데, 이 때 사용되는 물의 양은 총 슬러리아량의 10~40%이다. 한편 첨가제로서는 결합제, 소포제 등 다양한 물질이 사용된다. 결합제는 건조시 성형체의 강도를 유지하고 스폰지의 휘발시 형상을 유지하는 역할을 하며 주로 potassium silicate나 sodium silicate, aluminum orthophosphate, 그리고 magnesium orthoborate 등을 사용한다. 또한 슬러리의 thixotropy를 향상시켜 슬러리가 스폰지를 골고루 함침시키기 위한 점도를 조절하기 위한 rheological agent로서는 bentonite 및 kaolin 등을 사용한다. 그 외 스폰지 셀의 구멍을 막아 통기성을 저하시키는 막(window)을 제거하기 위한 antifoaming agent, 슬러리

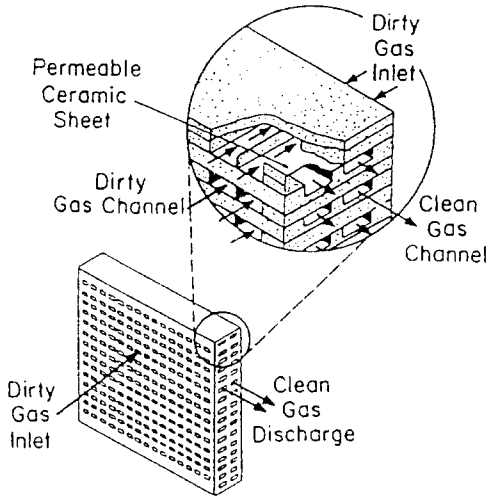


Fig. 8. Schematic of a ceramic cross-flow filter.

의 스펀지에 대한 부착성을 향상시키기 위한 flocculating agent 등이 첨가되어진다. 이와 같이 세라믹 슬러리가 제조되면 그 다음 스펀지를 함침시키는데 이 경우 일반적으로 스펀지의 공기를 제거하기 위하여 먼저 스펀지를 압축시킨 후 슬러리에 함침시킨 다음 압축을 해제한다. 그 후 함침된 슬러리의 일부를 제거하기 위하여 롤러 등을 이용 스펀지를 압착, 통과시킴으로써 슬러리의 25~75%를 제거하고 건조 후 소결한다. 소결시 슬러리의 유기물과 스펀지는 휘발되고 세라믹의 치밀화가 일어남으로써 세라믹 폼이 제조되어진다.

또 다른 방법인 foaming method의 경우 다양한 방법이 사용되는데 대부분의 경우 바라는 세라믹조성과 유기물조성의 혼합물을 제조한 후 발생하는 가스를 이용함으로써 다공성의 세라믹폼을 만드는 방법이다. 이 방법은 polymeric-sponge방법에 비해 다양한 형태의 제조가 가능하고 조성 및 밀도의 변화가 용이한 장점이 있는 것으로 알려져 있다[72].

4.4. Ceramic Cross-Flow Filter

Fig. 8[73]은 크로스 플로우 필터의 모양을 도식적으로 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 이 필터는 돌출된 부위에 의해 형성된 통로를 가지고 있는 다공성의 얇은 판을 서로 직각으로 돌려서 쌓은 후 소결함으로써 일체화시킨 필터이다[74]. 따라서 입자상물질을 지닌 배기가스가 통로를 통하여 들어오면 그 통로의 위나 아래에 있는 다른 판의 다공성벽을 통과한 후 직각으로 꺾인 다른 통로로 나가는 구조로 되어 있다.

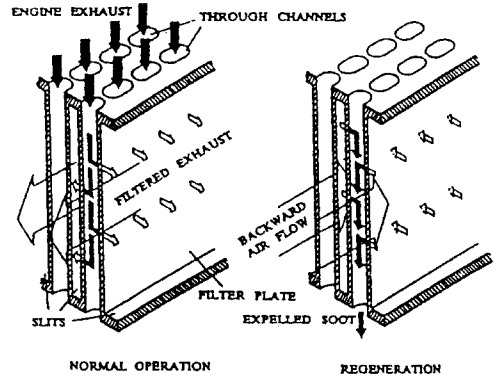


Fig. 9. Schematic of gas flow of cross-flow ceramic filter block.

즉 처리가스의 유로와 청정가스의 유로가 서로 직각이 되어 있는 형태로서, 비체적이 1~10 m³이 되어 우수한 표면적을 갖고 있기 때문에 필터의 소형화가 가능한 장점이 있다. 이러한 필터는 경유차량의 후처리 장치뿐만 아니라 각종 고온 배기가스의 집진을 위하여 개발되었는데 기존의 분진제거용 백필터 대응으로 뿐만 아니라 발전소, 소각로 등의 응용이 연구되고 있으며[75], FBC(fluidized bed combustion)나 PFBC(pressurized fluidized bed combustion), 그리고 IGCC(integrated gasification combined cycle)에서 실증시험이 진행된 바 있다[74]. 특히 IGCC 등에서는 환경문제 때문만이 아니라 증기터빈과 연결된 가스터빈 blade의 입자상물질과의 충돌로 인한 장애를 방지하기 위하여 고온 고압에서 건널 수 있는 필터의 채택이 필수적이며, 이러한 용도에서의 크로스 플로우 필터의 채택이 연구되고 있다[75]. 크로스 플로우 필터는 각각의 판을 압출[73]이나 가압성형 또는 테이프캐스팅 방법을 이용하여 제조하는 것으로 알려져 있는데 제조시나 사용시 delamination과 모서리(flange)의 균열발생 등의 문제점이 보고되고 있다[73, 74]. 그러나 이 필터는 앞서 언급한 바와 같이 넓은 표면적을 가지고 있어 소형화에 유리하며 하니컴 필터에 비해 플라잉공정이 필요없고 한 번의 소결만으로 제품이 되는 등의 장점이 있어 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

Fig. 9[20]는 앞서의 필터와 유사한 모양의 필터로 후처리장치용 필터로 개발된 것이다. 이 필터 역시 코디아라이트를 주성분으로 하는 필터로 배기가스가 통과하는 많은 타원형의 채널(channel)을 갖는 다공성의 얇은 판을 적층함으로써 제조되어진다. 각각의 판을 압출에 의해 제조되는데[64] 이 판의 위와 아래쪽 선

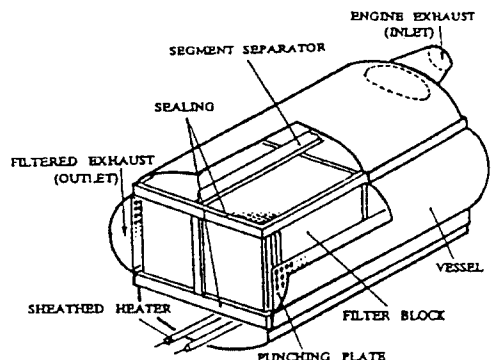


Fig. 10. Schematic drawing of inside vessel of cross-flow filter block.

단을 일정 두께(1 mm)를 갖는 세라믹 페이스트(paste)로 접합시킴으로써 각 판 사이에는 가스가 통과할 수 있는 통로(slits)가 형성되어 있다. 따라서 위에서 배기가스가 타원형의 채널로 들어오면 좌우의 다공성벽을 통과하게 되고 이 때 여과가 이루어지며 여과된 청정가스는 slit을 통하여 나오게 된다. 재생시 이와 반대로 slit부분에 압축공기를 불어 넣으면 타원형의 채널로 들어가고 다공성벽에 포집되어 있던 입자상물질이 탈리하게 된다. Fig. 10[20]은 이 필터를 장착한 후처리장치를 나타낸 그림으로 필터는 금속제의 캔내에 존재하며 캔과 세라믹 필터사이에는 완충작용과 밀봉작용을 하는 세라믹 매트를 삽입한다. 그림에서 배기가스가 입구(inlet)을 통하여 필터의 위에서 아래방향으로 통과시 필터의 아래부분은 캔에 의해 막혀 있기 때문에 배기가스는 좌우 면의 다공성벽면을 통해 slit으로 빠져 나간 후 출구(outlet)로 향하게 된다. 이 과정에서 입자상물질의 여과가 일어나고, 재생은 여과와 반대방향으로 구멍을 낸 판(punched plate)을 통해 강한 펄스 에어를 주입하여 벽면에 포획되어 있는 입자상물질들을 털어냄으로써 이루어진다. 이 때 탈리된 입자는 연소가스의 흐름으로 말미암아 캔의 바닥에 쌓이게 되며 이러한 입자들을 캔 바닥에 위치한 히터로 주기적으로 가열함으로써 재생이 완료된다. 이러한 방법은 필터의 모양과 재생방법이 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것으로 이 방법의 장점은 필터에 직접적으로 열을 가할 필요가 없기 때문에 필터의 열충격에 의한 파손 및 용융 등을 방지할 수 있다는 것이며, 또한 입자상물질을 일정 부분에 쌓은 후 연소시키기 때문에 이에 사용되는 에너지 즉 전기 등의 사용을 최소화할 수 있다는 장점도 있다[19-21]. 한편 이 필터의 파제는 필터의 제조

기술과 배기계의 장착성으로 알려져 있다[64].

4.5. Metal Filter

금속을 이용한 필터는 재료의 형태에 따라 소결 금속(sintered metal), 와이어 메쉬(wire mesh), 그리고 금속 화이버 필터로 구분되는데, 금속필터의 경우 일반적으로 세라믹에서 일어나는 취성파괴가 없을 뿐만 아니라 열전도도가 높고 아울러 가공이 용이한 장점이 있다. 그러나 금속필터의 경우 고온에서의 부식이 문제시되며 열팽창계수가 세라믹에 비해 큰 단점도 가지고 있다.

우선 소결 금속 필터(sintered metal filter)는 일반적인 분말야금 공정을 이용하여 제작되는데 통기도 조절을 위하여 균일한 크기의 구형분말이 사용되며 필터의 특성에 따라 분말을 프레스에 의해 성형하거나 또는 몰드(mold)에서 가압하지 않는 상태로 소결하여 제작하는 것으로 알려져 있다[76]. 또한 와이어메쉬와 금속분말을 같이 소결하여 제조하는 경우도 있는데, 후처리장치용으로는 연료첨가제방식을 이용한 소결금속필터가 연구되었으나 연료첨가제에 의한 2차 공해와 필터의 가격이 고가인 점이 문제인 것으로 알려져 있다.

와이어 메쉬 필터의 경우 인발에 의해 제조된 금속 와이어를 일정한 형태로 직조한 mesh net를 이용한 필터로서, 와이어의 직경 및 직조방법에 따라 여과할 수 있는 입자크기의 조절이 가능하며 통기도가 우수한 특성을 가지고 있다[76]. 이러한 필터의 후처리장치에의 적용 역시 활발히 진행되고 있는데 일반적으로 스테인레스스틸 메쉬를 이용하여 튜브형상으로 제조된다. 또한 메쉬의 밀도가 안쪽으로 갈수록 증가하도록 설계되어 있으며[26], 배기가스가 필터의 바깥에서부터 안쪽으로 이동하면서 입자상물질이 포획되어 제거되고 청정가스는 중심에 있는 공간으로 배출되는 방식으로 되어 있다. 아울러 이 필터는 귀금속 등의 촉매로 코팅되어서도 사용되는데 촉매는 배기가스중에 포함된 hydrocarbon과 CO를 산화시키고 냄새를 제거하며 입자상물질의 착화온도를 350~400℃까지 낮추어 재생을 용이하게 하는 역할을 한다[26]. 또한 촉매의 사용은 hydrocarbon과 CO를 산화시켜 발열을 일으킴으로써 재생에 필요한 열을 일부 공급해줄 수도 한다.

와이어 메쉬 필터는 하니컴 필터에 비해 초기배압이 약간 낮고 압력의 증가속도가 완만하며 스테인레스스틸 재질의 경우 필터의 파괴가 없고 용융온도도 하니컴필터에 필적할 만 하다. 그러나 와이어 메쉬 필터는 입자상물질의 여과효율이 낮고 황산염(sulfate)을

형성하는 경향이 있으며 일반적으로 하니컴 필터에 비해 가격이 비싸다는 것이 단점으로 알려져 있다[26]. 이 중 sulfate의 형성은 중요한 문제로 산화촉매가 SO₂를 SO₃로 산화시키고 이것이 물과 반응하여 황산을 형성하는 과정을 거쳐 생성되는 것으로 알려져 있는데 이를 방지하기 위한 촉매의 개선이 이루어지고 있지만 환경문제를 일으킬 소지가 있는 것으로 알려져 있다[26]. 또한 이 필터의 경우 차량에 탑재시 중량면에서 문제가 있다는 보고도 있다[64].

금속 하이버필터는 직경 10~25 μm 의 가는 금속화이버를 이용하는데 이러한 화이버는 웹(web)이라는 매트(mat)형태로 성형된 후 소결 및 압연공정을 거쳐 필터로 제작된다. 화이버의 재료로는 스테인레스 스틸, inconel 등이 주로 사용되며 필터의 강도를 높이기 위하여 와이어 메쉬와 함께 소결하여 사용되기도 한다[76]. 스테인레스스틸 화이버의 경우 1450°C가 용점이나 425°C에서 강도가 10%정도 떨어지는 것으로 보고되어 있으며[75] 일반적인 금속 하이버 필터는 기공률이 60~80%로 매우 높아 통기성이 우수한 것으로 보고되고 있다[76] 후처리장치용으로 보다는 분진제거용으로 많이 사용되며 시멘트 제조시의 clinker cooler나 ferro alloy 제조용 전기로 배기가스 등에 적용되어 99.9% 전후의 여과효율을 얻었다는 보고가 있다[75].

그 외 금속필터로 세라믹폼의 제조방법과 유사한 방법으로 제조되는 필터도 후처리장치에 적용하기 위하여 연구되고 있다. 이러한 필터는 polyurethane foam에 도체를 코팅한 후 Ni 등을 전착(electroplating)시킨 후 열처리하여 제조되는데 기공률이 90% 이상으로 매우 높고 주로 battery 등의 음극에 사용되어진다[77]. 이 필터를 후처리장치에 사용하기 위하여 튜브형상으로 가공하여 실험한 결과, 여과효율은 하니컴 필터와 비슷한 결과를 얻었으나 배압의 경우 그 값이 높아 필터의 기공크기를 구배를 두어 변화시킨 결과 배압이 감소한 것으로 보고되고 있다. 또한 이 필터의 재질에 대한 연구에서는, 고온에서의 부식을 방지하기 위한 재질로 Ni-33Cr-1.8Al의 합금이 우수한 것으로 보고하였다[78].

4.6. 기타 필터

앞서 언급한 세라믹 하이버 실을 감은 형태가 아닌 세라믹 캔들 필터(ceramic candle filter) 역시 정수기에서부터 폐수처리, 정유 및 석유화학공정, 맥주제조시 효모의 여과, 방사성물질의 여과, 그리고 고온고압의 발전소까지 다양하게 쓰이고 있는 필터이다. 이러한 캔들 필터는 일반적으로 세라믹분말 및 섬유 중 하나 또는 이들을 혼합한 후 압출, slip casting, 진공성형

등의 성형방법을 이용하여 제조되는데 캔들의 길이가 길지 않을 경우 가압성형하는 방법도 사용되어진다. 이 중 고온고압의 용도에 쓰이는 캔들 필터의 경우 일반적으로 SiC를 주원료로 하여 alumino-silica 결합체를 사용하여 제조되며 알루미늄나트륨염과 함께 멤브레인을 코팅한 것도 많이 사용된다[79, 80]. 이 용도로서의 제품 크기는 1~1.5 m, 외경 60 mm, 그리고 벽두께 10~15 mm의 것이 통상적으로 사용된다. 이러한 캔들 필터는 크로스 플로우 필터와 마찬가지로 PFBC, IGCC발전소 등의 용도에서 많은 실증시험을 거친 것으로 알려져 있으며[74, 79, 80], Jalovaara 등[81]은 PFBC에 이러한 캔들 필터를 이용하여 99.9% 이상의 여과효율을 보이는 등 만족할 만한 결과를 나타내었다고 보고하였다[81]. 그러나 이러한 캔들 필터는 그 표면적이 작은 것이 단점으로 경유차량의 후처리장치용으로는 거의 사용되지 않는다.

그 외 후처리장치용으로 개발된 필터로 mullite corrugation filter를 들 수 있다. 이 필터는 직경 3 μm mullite(3Al₂O₃ · 2SiO₂) 화이버[56]와 silica-alumina 점토를 이용하여 제조된 필터로, 이 때 점토는 화이버의 결합제 역할을 하며 종이를 만드는 공정과 유사한 방법으로 제작된다. 즉 위의 원료를 이용하여 최대 두께 1.0 mm의 시트모양으로 제조한 후 편평한 시트와 골판지모양인 corrugate상으로 성형된 시트를 동시에 적절한 모양으로 말아 alumina-silica분말을 이용하여 접합한다. 그 후 하니컴 필터와 유사하게 각 셀의 입구와 출구를 교대로 밀봉하여 1000°C 이상에서 소성함으로써 제조되는데, 이 필터의 기공률과 평균기공경은 각각 80%, 28.1 μm 으로 보고되어 있다[82]. 플라이트의 경우 용점이 1850°C로 코디어라이트에 비해 매우 높으나 열팽창계수가 높은 것(5.0×10⁻⁶/°C)이 단점으로 지적되고 있다. 그러나 Mihara 등[82]은 이러한 단점은 이 필터의 높은 기공률과 섬유구조로 말미암아 열충격저항성이 향상됨으로써 극복될 수 있다고 하였으며, 이러한 필터를 적용한 결과 여과효율이 높고 초기배압도 적은 장점을 가질 뿐 아니라 경량이며 1200°C까지 사용이 가능한 것으로 보고하였다. 이 필터를 이용한 또 다른 결과는 이 필터가 매우 높은 여과효율이 요구될 때 가장 적합한 것으로 보고[56]한 바 있으나 필터의 기계적강도와 접합제로 사용되는 점토의 내열성이 문제라고 제시한 결과도 보고되고 있다[64].

이 밖의 또 다른 필터로는 기존 필터의 변형을 들 수 있다. 이의 대표적인 예가 하니컴필터에 멤브레인을 코팅한 필터로, 일반적인 멤브레인의 두께는 50 μm 이며 평균기공경은 0.5 μm [83] 또는 0.2 μm [18]로 알려져 있다. 이 필터의 경우 리버스 펄스 에어를 이

용, 재생하는 실험에 여러 번 사용된 바 있는데 다른 필터에 비해 여과효율이 99%로 가장 우수하며 재생 또한 가장 우수한 것으로 보고된 바 있다[83, 18].

5. 결 어

경유자동차의 후처리장치에서 사용되는 각종 필터의 특성 및 제조방법에 대하여 알아보았다. 이러한 필터중 가장 보편적으로 사용되는 것은 세라믹 하니컴 필터라고 할 수 있으나, 그 외 세라믹 화이버 캔들 필터, 세라믹 폼 필터, 세라믹 크로스 필터, 소결 금속 필터 그리고 와이어 메쉬 필터 등의 수없이 많은 필터가 개발되고 있다. 이들 각각은 실제 많은 실증시험을 거치고 있으며 필터의 특성을 향상시키기 위한 노력도 다각도로 진행되고 있다. 그러나 이러한 필터를 이용한 후처리장치의 상용화는 아직 본격적으로 이루어지지 않았는데 그 원인으로는 여러 가지가 있을 수 있으나 재생시 고온발생으로 인한 필터의 파손 및 필터가격이 고가인 점이 중요한 원인중의 하나라 할 수 있다. 따라서 이러한 필터의 문제점을 보완하기 위한 재료측면에서의 각종 노력, 즉 적절한 여과효율과 배압특성 및 열적특성을 지니면서 그 가격이 저렴한 필터의 개발이 이루어질 때 후처리장치의 본격적인 상용화는 좀 더 가까워질 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Corning Brochure, "Corning - Imagine what we can do together," 1992.
2. 김상환, "디젤자동차의 배기가스 정화기술," *화학공업과 기술*, **10**(2), 76~88 (1992).
3. L. M. Sheppard, "Ceramics for Controlling Diesel Emissions," *Am.Ceram. Soc. Bull.*, **72**(6), 28~33 (1993).
4. K. J. Baumgard and J. H. Johnson, "The Effect of Fuel and Engine Design on Diesel Exhaust Particulate Size Distribution," *SAE(Society of Automotive Engineering)* 960131, 37~50 (1996).
5. K. Hironari, "디젤기관에서의 배출물질 측정," *첨단환경기술*, **4**, 35~41 (1996).
6. J. H. Johnson, S. T. Bagley, L. D. Gratz and D. G. Leddy, "A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effects," *SAE* 940233, 1~35 (1994).
7. K. Yoshinori 외, "디젤차 배출가스에 의한 폐발암성," *첨단환경기술*, **4**, 30~34 (1996).
8. 조강래, "국내 자동차 배출가스 저감대책 및 기술개발 현황," *첨단환경기술*, **4**, 2~11 (1996).
9. 황의상, 신동길, "경유자동차 후처리장치 기술현황," *기계와 재료*, **10**(1), 49~60 (1998).
10. J. S. Howitt and M. R. Montierth, "Cellular Ceramic Diesel Particulate Filter," *SAE* 810114, 493~501 (1981).
11. Y. Kumagai, N. Nakashima, O. Miyata and T. Ikeda, "Development of PM Trap System for Urban Buses," *SAE* 960470, 141~150 (1996).
12. T. Yamada, M. Machida and Y. Ichikawa, "Development of Wall-Flow Type Diesel Particulate Filter System with Reverse Pulse Air Regeneration," *SAE* 940237, 67~74 (1994).
13. Y. Ichikawa, S. Yamada and T. Yamada, "Development of Wall-Flow Type Diesel Particulate Filter System with Efficient Reverse Pulse Air Regeneration," *SAE* 950735, 155~164 (1995).
14. Y. Ichikawa, I. Hattori and Y. Kasai, "The Regeneration Efficiency Improvement of the Reverse Pulse Air Regenerating DPF System," *SAE* 960127, 1~10 (1996).
15. Y. A. Levendis, T. Panagiotou and M. E. Taslim, "Development of a Self-Cleaning Particle Trap for Diesel Engine Particulate Control," *SAE* 900601, 195~201 (1990).
16. N. Khalil and Y. A. Levendis, "Development of a New Diesel Particulate Control System with Wall-Flow Filters and Reverse Cleaning Regeneration," *SAE* 920567, 217~231 (1992).
17. S. H. Kim and Y. A. Levendis, "Design of a Diesel Particulate Trap-Incinerator with Simultaneous Filtration and Compressed Air Regeneration (CAR)," *SAE* 930367, 183~194 (1993).
18. S. Mehta, F. Oey, C. Sumbung, C. Li and Y. A. Levendis, "An Aerodynamically Regenerated Diesel Particulate Trap with a Flow-Through Soot Incinerator Section," *SAE* 940461, 235~248 (1994).
19. K. Takesa, T. Uchiyama and S. Enamito, "Development of Particulate Trap System with Cross Flow Ceramic Filter and Reverse

- Cleaning Regeneration," *SAE* 910326, 109~120 (1991).
20. T. Uchiyama, S. Enamito, K. Takesa, S. Muramoto and S. Tanii, "Development of Particulate Trap System with Cross Flow Ceramic Filter and Reverse Flow Cleaning Regeneration 2," *SAE* 940463, 249~260 (1994).
 21. A. Matsunuma, T. Takizawa, K. Takeuchi and K. Yokota, "Status of Particulate Trap System for a Heavy Duty Diesel Truck," *SAE* 910132, 29~35 (1991).
 22. F. B. Walton, P. J. Hayward and D. J. Wren, "Controlled Energy Deposition in Diesel Particulate Filters During Regeneration by Means of Microwave Irradiation," *SAE* 900327, 131~140 (1990).
 23. 김은옥 외, "자동차(가솔린, 디젤)배기가스 저감 장치 기술개발에 관한 연구," 동서산업 신소재 연구소, 1992.
 24. 조강래 외, "자동차 배출가스 저감기술 보고서", 국립환경연구원 자동차공해연구소, 1993.
 25. W. R. Wade, J. E. White and J. J. Florek, "Diesel Particulate Trap Regeneration Technique," *SAE* 810118, 502~523 (1981).
 26. C. Weaver, "Trap-Oxidizer Technology for Light-Duty Diesel Vehicles: Status, Prospects, and Current Issues," *SAE* 831713, 1~18 (1983).
 27. W. H. Pitcher, Jr., "Honeycomb Filter and Method of Making It," *USP* 4,417,908, 1983.
 28. M. J. Murtagh, D. L. Sherwood and L. S. Socha, Jr., "Development of a Diesel Particulate Filter Composition and Its Effect on Thermal Durability and Filtration Performance," *SAE* 940235, 43~53 (1994).
 29. D. L. Guile, "Method of Making Diesel Particulate Filters," *USP* 5,183,608, 1993.
 30. K. Hamaguchi, T. Harada and T. Hamanaka, "Porous Ceramic Honeycomb Filter and Method of Producing the Same," *EP* 0,354,721 (1990).
 31. W. H. Pitcher, Jr., "Diesel Particulate Trap," *USP* 4,329,162 (1981).
 32. R. I. Frost, I. M. Lachman and P. H. Rieth, "Method of Preparing Crack-Free Monolithic Polycrystalline Cordierite Substrates," *USP* 4,001,028 (1977).
 33. T. Matsuhisa and S. Soejima, "Cordierite Ceramic," *USP* 4,280,845 (1981).
 34. R. I. Frost and M. R. Montieth, "Diesel Particulate Filters for Use with Smaller Diesel Engines," *USP* 4,415,344 (1983).
 35. A. Itoh, K. Shimato, T. Komori, H. Okazoe, T. Yamada, K. Niimura and Y. Watanabe, "Study of SiC Application to Diesel Particulate Filter (Part 1): Material Development," *SAE* 930360, 111~119 (1993).
 36. L. M. Sheppard, "Porous Ceramics: Processing and Applications," pp. 3~23, *Porous Materials*.
 37. H. Okazoe, T. Yamada, K. Niimura, Y. Watanabe, A. Itoh, K. Shimato and T. Komori, "Study of SiC Application to Diesel Particulate Filter(Part 2): Engine Test Results," *SAE* 930361, 121~128 (1993).
 38. C. W. Fritsch, Jr. and S. T. Buljan, "Low Thermal Expansion Coefficient Synthetic Cordierite-Containing Ceramic Bodies and Method for Producing Same," *USP* 3,979,216 (1976).
 39. I. M. Lachmann and R. M. Lewis, "Anisotropic Cordierite Monolith," *USP* 3,885,977 (1975).
 40. I. M. Lachman and R. D. Bagley, "Pore Size Control in Cordierite Ceramic," *USP* 3,950,175 (1976).
 41. R. I. Frost and R. J. Paisley, "Method for Selectively Charging Honeycomb Structures," *USP* 5,021,204 (1991).
 42. R. T. Bonzo, "Method for Selectively Manifold Honeycomb Structures," *USP* 4,557,773 (1985).
 43. Y. Ogawa and S. Yamada, "Method of Sealing Open End of Ceramic Honeycomb Structural Body," *USP* 4,559,193 (1985).
 44. R. J. Beals and R. L. Cook, "Low-Expansion Cordierite Porcelains," *J.Am.Ceram.Soc.*, **35**(2), 53~57 (1952).
 45. E. A. Bush and R. I. Frost, "Expansion Reduction of Cordierite," *USP* 5,275,771 (1994).
 46. I. M. Lachman, R. D. Bagley and R. M. Lewis, "Thermal Expansion of Extruded Cordierite Ceramics," *Am.Ceram.Soc.Bull.*, **60**(2), 202~

- 205 (1981).
47. G. A. Merkel and M. J. Murtagh, "Fabrication of Low Thermal Expansion, High Porosity Cordierite Body," *USP* 5,258,150 (1993).
 48. 北川 潤, "自動車排氣ガス浄化用セラミックスハニカム" *工業材料*, **38**(9), 49~53 (1990).
 49. 色川秀勇, "セラミックスの製造プロセス-壓出成形法とその應用," *セラミックス*, **18**(8), 699~705 (1983).
 50. K. Inoguchi, T. Nakanishi and M. Asano, "Method for Producing a Cordierite Body," *USP* 4,434,117 (1984).
 51. 황운석, 권오양, 오태성, 김우진, "재료과학의 이해와 응용," pp. 456~458, 반도출판사, 1997.
 52. T. H. Elmer, "Ultra-Low Expansion Ceramic Articles," *USP* 3,958,058 (1976).
 53. T. Harada, T. Hamanaka, K. Hamaguchi and S. Asami, "Cordierite Honeycomb-Structural Body and a Method for Producing the Same," *USP* 4,869,944 (1989).
 54. 양 진, "Cordierite의 기공률 및 기공경조절에 관한 연구," *요업학회지*, **35**(4), 399~405 (1998).
 55. J. Kitagawa, S. Asami, K. Uehara and T. Hijakata, "Improvement of Pore Size Distribution of Wall Flow Type Diesel Particulate Filter," *SAE* 920144, 81~87 (1992).
 56. O. Shinozaki, E. Shinoyama and K. Saito, "Trapping Performance of Diesel Particulate Filters," *SAE* 900107, 1~5 (1990).
 57. A. G. Konstandopoulos and J. H. Johnson, "Wall-Flow Diesel Particulate Filters-Their Pressure Drop and Collection Efficiency," *SAE* 890405, 421~443 (1984).
 58. N. Higuchi, S. Mochida and M. Kojima, "Optimized Regeneration Conditions of Ceramic Honeycomb Diesel Particulate Filters," *SAE* 830078, 1~10 (1983).
 59. N. S. Kulkarni, "Cellular Ceramic Products helps curb Diesel Engine Emissions," *Automotive Engineering*, **100**(1), 21~25 (1992).
 60. J. S. Howitt, W. T. Elliott, J. P. Morgan and E. D. Dainty, "Application of a Ceramic Wall Flow Filter to Underground Diesel Emissions Reduction," *SAE* 830181, 131~139 (1983).
 61. S. T. Gulati and R. P. Merry, "Design Consideration for Mounting Material for Ceramic Wall-Flow Diesel Filters," *SAE* 840074, 25~34 (1984).
 62. R. Bloom, "The Development of Fiber Wound Diesel Particulate Filter Cartridges," *SAE* 950152, 37~46 (1995).
 63. 3M brochure, "Nextel Ceramic Fiber Filters For Diesel Emission Control."
 64. 中村 孝夫, 北川 潤, "ディーゼルパーティキュレートフィルタについて," *自動車技術*, **48**(5), 35~40 (1994).
 65. A. Mayer, A. Buck and H. Bressler, "The Knitted Particulate Trap: Field Experience and Development Progress," *SAE* 930362, 129~141 (1993).
 66. K. A. Karst and H. G. Sowman, "Non-Frangible Alumina-Silica Fibers," *USP* 4,047, 965 (1977).
 67. L. M. Sheppard, "Corrosion-Resistant Ceramics for Severe Environments," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **70**(7), 1146~1150 (1991).
 68. T. Mizrah, A. Maurer, L. Gauckler and J. P. Gabathuler, "Open-Pore Ceramics Foam as Diesel Particulate Filter," *SAE* 890172, 19~27 (1989).
 69. J. J. Tutko, S. S. Lestz, J. W. Brockmeyer and J. E. Dore, "Feasibility of Ceramic Foam as a Diesel Particulate Trap," *SAE* 840073, 15~24 (1983).
 70. K. Takama, K. Kobashi, K. Oishi, T. Inoue and T. Kogiso, "Regeneration Process of Ceramic Foam Diesel-Particulate Traps," *SAE* 841394, 1~10 (1984).
 71. R. L. Heflerich and R. C. Schenck, "Evaluation of a Stacked Element Diesel Particulate Trap Using a Newly Developed Membrane Covered Ceramic Foam Filtering Media," *SAE* 890787, 159~170 (1989).
 72. J. S. Woyansky, C. E. Scott and W. P. Minnear, "Processing of Porous Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **71**(11) 1674~1682 (1992).
 73. R. J. Vass, N. R. Brown, J. J. Brown, Jr. and J. Sawyer, "Corrosion and Degradation of Ceramic Particulate Filters in Coal Combustion Environments," *Ceram. Trans.*, **10**, 41 1~23 (1990).
 74. M. A. Alvin, T. E. Lippert and J. E. Lane,

- "Assessment of Porous Ceramic Materials for Hot Gas Filtration Applications," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **70**(9), 1491~1498 (1991).
75. 田林行男, "여과집진 기술의 최근의 동향," *첨단 환경기술*, 7, 2~9 (1993).
76. 송인혁, 한유동, 박주환, "여과용 급속 Fiber 필터 제조기술," *기계와 재료*, **9**(2), 134~144 (1997).
77. Sumitomo Electric Industries, Ltd. Pamphlet, "Celmet: High-Porosity Metal."
78. S. Ban, T. Ihara, S. Okamoto, O. Shinozaki and E. Shinoyama, "Development of Porous Metal for Diesel Particulate Filter," *SAE* 950739, 187~193 (1995).
79. O. J. Tassicker, G. K. Burnard, A. J. Leitch and G. P. Reed, "Performance of a Large Filter Module Utilizing Porous Ceramics on a Pressurized Fluidized Bed Combustor," Proc. 10th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion, San Francisco, USA, pp. 479~486, May 1989.
80. K. Schumacher and M. Durst, "Advantages of an Integrated System for Hot Gas Filtration using Rigid Ceramic Elements," *Filtration & Separation*, Jan./Feb. 25~28 (1994).
81. J. Jalovaara, I. Hippinen and A. Jahkola, "Experiences of a Fibrous Ceramic Candle Filter for Hot Gas Cleaning in Pressurized Fluidized Bed Combustion," Proc. 2nd Int. Symp. Gas Cleaning at High Temperatures, UK, pp. 158~172, Sep. 1993.
82. T. Mihara, S. Kuwano, T. Kusuda, M. Yonemura, M. Nakamoto and M. Takigawa, "Diesel Particulate Trap of Corrugated Honeycomb Fabricated with Mullite Fiber Ceramics," *SAE* 860010, 31~39 (1986).
83. I. K. Pavlatos and Y. A. Levendis, "Recent Development on the N.U. Rotating Self Cleaning Particulate Trap - Retention of PAC's and HC Emissions," *SAE* 920568, 233~247 (1992).