

다공성 세라믹 펠렛을 포집재로 사용하는 매연여과장치의 배압 및 재생 특성에 관한 연구

김홍석* · 조규백* · 김진현** · 정용일* · 정인수*** · 박재규***

A Study on the Characteristics of Pressure Drop and Regeneration of a Porous Ceramic Pellet Filter for Diesel Particulate Trap

Hongsuk Kim, Guyback Cho, Jinhyun Kim, Youngil Jeong, Insu Jeong, Jai-Koo Park

ABSTRACT

Diesel particulate trap is a core technology for the reduction of PM from diesel vehicles. This study presents the features and the characteristics of DPF system when using pellet type filters. In comparison with wall-flow filter, the pellet filter has the advantages of cracking free during regeneration and shape flexibility. Experiments are conducted in a test bench simulated as diesel engine exhaust condition. Pressure drop and particle loading rate was compared by using two pellet filters having the porosity of 70% and 0%. Also its regeneration was tested.

Key Words : Diesel Vehicle(경유자동차), Particulate Matter(입자상물질), Porous Pellet Filter(다공성 펠렛 필터), DPF(디젤엔진 매연여과장치)

1. 서 론

경유 자동차에서 배출되는 입자상물질을 저감하기 위한 방안들은 오랫동안 연구되어 왔으며, 매연여과장치(DPF; Diesel Particulate Filter)는 현재 가장 효율적인 방법 중의 하나로 알려져 있다.[1] 매연여과장치의 기술은 크게 입자상물질(PM)을 포집하는 기술과 재생하는 기술로 나누어지며, DPF 시스템은 기본적으로 필터, 재생장치, 제어장치로 구분된다. 이중 필터 기술은 DPF의 성능을 결정하는 중요한 요소로써 다공질의 SiC 또는 magnesia/silica/alumina로 구성된 cordierite 재질의 하니컴형 필터가 현재 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 타입의 필터는 생산 비용이 고가이며, 재생시 이상연

소 현상으로 과열되어 파손되는 단점이 있으며, 이를 극복하기 위하여 세라믹 파이프 필터(ceramic fiber filter), 금속분말필터(metal, fiber filter), 펠렛 필터등이 연구되고 있다. [2,3,4,5]

기존 세라믹 필터 대신에 다공성 pellet을 사용하면 입자상 물질의 불균일 재생으로 인한 필터의 균열과 파손이 없으며, 펠렛의 크기와 다공도를 조정하여 배열함으로써 필터에 의한 배압손실의 조정이 용이할 것으로 판단된다. 또한, DPF형상의 유연성이 커서 차량 장착 적용성이 용이하며 필터 제작비용이 저렴한 장점이 있다.

본 연구에서는 매연여과장치의 포집재로 다공성 펠렛을 사용하는 경우에 필요한 기본 데이터를 확보할 목적으로 펠렛의 크기, 다공도, 배치방법에 따른 배압 및 PM 포집, 재생 특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 다공성 펠렛의

* 한국기계연구원

** 명지대학교 기계공학부

*** 한양대학교 지구환경시스템공학과

† 연락처자 hongsuk@kimm.re.kr

구조를 나타낸다. 펠렛의 내부에는 기공(pore)이 존재하며, 각각의 기공은 채널로 연결되어 있다. 다공 펠렛은 cordierite 재질을 사용하여 발포법으로 제작된다. Fig. 1의 오른쪽은 펠렛 필터의 매연여과 원리를 나타내는 그림으로써 촉매가 코팅된 내부 기공에 작은 크기의 PM이 효율적으로 포집, 재생될 수 있음을 보여준다.

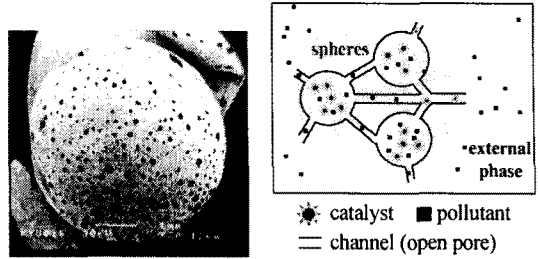
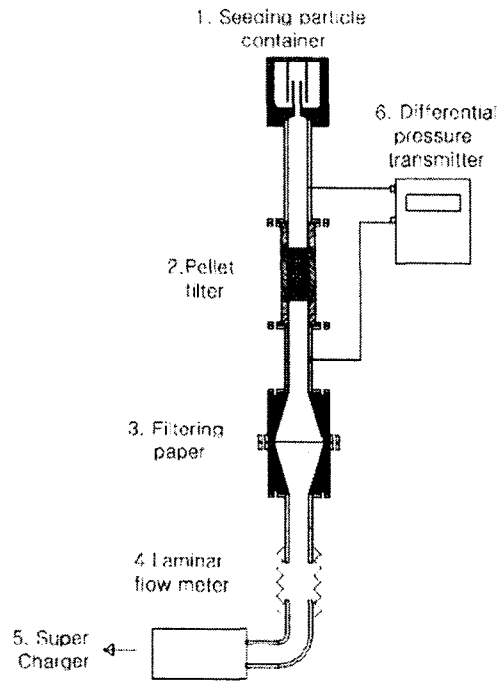


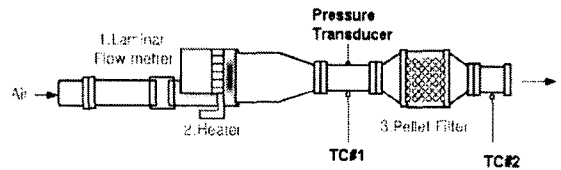
Fig. 1 Pellet and pore structure

Fig. 2는 펠렛 필터의 배압, 포집율 및 재생특성을 측정하기 위해 자체 제작한 시험장치의 개략도이다. Fig. 2(a)는 펠렛 필터의 배압 및 포집율을 측정하기 위한 시험장치로서 입자저장용기, 펠렛 필터, 펠렛 필터에서 포집하지 못하는 미세입자를 포집하고 무게를 재어 포집율을 구하기 위한 여과지 케이스, 층류유량계, 수퍼차저로 구성되어 있다. 유량 조절은 자동차용 수퍼차저를 교류 전동기(220V, 3상, 최대 1720rpm)를 이용하여 구동하였으며 인버터를 이용하여 제어하였다. 필터 양단에 걸리는 차압을 측정하기 위하여 차압계(Dwyer 677)를 설치하였다. 이 밖에, 시험의 편의를 위해서 여과지 양단과 층류유량계의 차압을 측정하기 위하여 차압계를 설치하였으며 (Dwyer 677, 616), 모든 차압계로부터 나오는 전압 신호는 A/D보드와 컴퓨터를 이용하여 취득하였다. Fig. 2(b)는 펠렛 필터의 재생특성을 알아보기 위한 시험장치로서 층류유량계, 히터, 스테인레스 재질로 만든 펠렛 필터등으로 구성된다. 유량은 배압 및 포집시험장치와 동일하게 조정하였다.



(a) Test rig for pressure drop and particle loading

Table 1은 시험 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 직경이 1, 2mm인 두 종류의 펠렛을 사용하였으며, 다공이 있는 펠렛과 없는 펠렛을 고려하였다. 펠렛 필터 케이스의 직경은 10리터급 4행정 엔진에 장착되는 세라믹 하니컴타입 필터 직경의 대략 1/10인 30mm로 하였으며, 펠렛 필터의 길이는 필터의 길이에 따른 배압 및 포집 특성을 알아보기 위하여 75, 100, 125mm의 세 종류를 고려하였다. 시험관에 흐르는 공기의 유량은 기 관회전수 2400rpm으로 운전되는 경우를 가정하여 2.0 l/s까지 0.5 l/s 간격으로 시험하였다. Fig. 3은 길이가 100mm인 필터 케이스에 펠렛을 담은 실제 사진을 보여준다. 좌측 사진으로부터 차례로, 필터에 직경 1mm와 2mm의 다공 코디라이트 펠렛을 반반, 직경 2mm의 다공 코디라이트 펠렛, 직경 1mm와 2mm의 다공이 없는 산화알루미늄(Al_2O_3) 펠렛을 반반, 직경 2mm 산화알루미늄(Al_2O_3) 펠렛을 채운 사진이다.



(b) Test rig for regeneration

펠렛 필터의 배압 측정시에는 carbon 입자 저장용기를 제거하고, 공기 유동에 대한 필터 전후 단 압력차를 측정하였다.

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

본 실험에서 펠렛 필터의 포집을 측정을 위하여 0.5g의 carbon 입자를 입자저장용기에 넣고 입자 저장용기에 작용하는 부압을 이용하여 필터에 입자를 이송하였으며, 입자저장용기에 들어있던 입자가 전부 관을 통하여 이송된 후 펠렛 필터에 포집되지 않고 통과하여 여과지에 쌓인 입자의 무게를 정밀 저울로 측정하여 펠렛 필터의 포집율을 구하였다. 이 때 투입된 모든 양의 carbon 입자가 입자저장용기를 빠져나오도록 유체역학적으로 용기를 설계하였다.

실험에 사용된 입자는 크기가 약 20nm인 상용 카본(Carbon) 입자이다. 이들 입자들은 대기 중의 습한 조건에서 서로 응집되기 때문에 온도를 250℃까지 올릴 수 있는 진공 오븐을 이용하여 입자들의 수분을 제거하여 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions

Diameter of pellet (mm)	1, 2
Porosity of pellet (%)	0 or 70
Length of filter (mm)	75, 100, 125
Flow rate (ℓ/s)	0.5~2.0

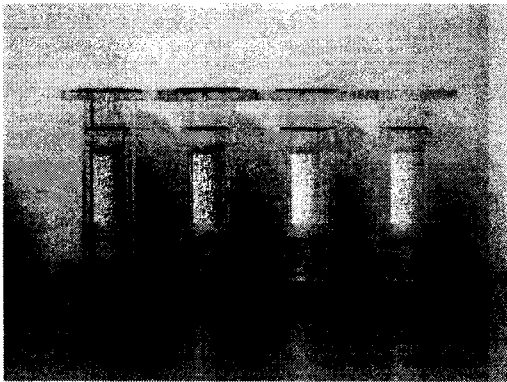


Fig 3 Testing pellet filter

3. 실험결과

3.1 펠렛 필터 배압 시험

본 연구에서는 다공성 재료의 펠렛을 사용하여 필터 양단에 걸리는 배압을 최소화하고자 하였다. 그러나 Fig. 4에서 얻어진 실험 결과에 의하면 다공 펠렛 필터는 다공이 없는 필터보다 약 3%의 배압 감소 효과 밖에 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 4의 실험 조건은 필터 길이 125 mm, 펠렛 직경 1mm, 유량 2ℓ/s이었다. 이러한

결과가 나타나는 이유를 알아보기 위하여 Fig. 5에서는 펠렛 절단면의 구조를 SEM (Scanning Electron Microscope)으로 촬영 비교하였다. Fig. 5 (a)는 다공이 없는 펠렛의 경우로서 절단면에 기공이 존재하지 않으며, Fig. 5 (b)는 다공 펠렛인 경우로서 펠렛 내부에 다공이 많이 존재함을 알 수 있으나 기공과 기공을 연결하는 통로(open channel)는 많지 않음을 알 수 있다. 또한, Fig. 5 (b)의 그림으로부터 기공의 크기는 직경이 약 50~100μm이며, 기공을 연결하는 통로의 크기는 5μm이하임을 알 수 있다. 이상으로부터 다공 펠렛을 DPF에 사용하여 적절한 배압특성을 얻기 위해서는 펠렛 내부의 기공 간의 연결통로가 많아야 함을 발견할 수 있었으며, 이를 토대로 본 연구에서는 기공간 연결이 원활하도록 개선된 Fig. 5 (c)의 다공성 펠렛을 제작하여 사용하였다.

Fig. 6에는 개선된 다공 펠렛 필터와 다공이 없는 펠렛 필터의 유량 변화에 따른 배압의 변화를 비교하였다. 필터의 길이는 100mm이다. 펠렛의 직경이 작을수록 큰 배압이 걸리며, 유량이 증가할수록 배압은 지수함수적으로 증가한다. 그리고 다공 펠렛 필터의 경우가 다공이 없는 펠렛 필터보다 배압이 적게 걸리며, 특히 유량이 증가할수록 그 차이는 증가함을 알 수 있다. Fig. 7은 필터의 길이 변화에 따른 배압의 변화를 나타낸다. 필터에 흐르는 유량은 2ℓ/s로 일정하게 유지하였다. 펠렛 필터의 길이가 증가할수록 배압이 증가함을 알 수 있으며, 다공도 70%인 펠렛 필터와 다공도 0%인 펠렛 필터의 배압차는 필터 길이가 짧을수록 크게 나타났다. 그 이유는 필터 길이가 길어지면 펠렛 내부 기공을 통해 유동이 통과해야 할 경로가 길어지므로 상대적으로 필터 내부의 기공 통과효과보다는 펠렛과 펠렛 사이의 통과효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

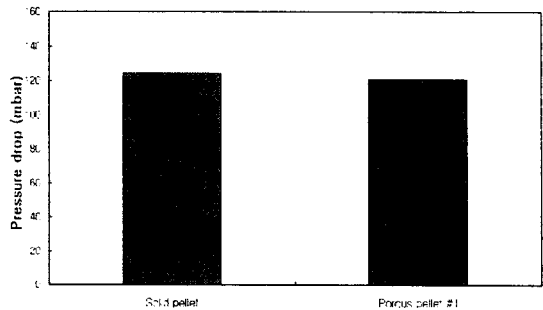


Fig. 4 Pressure drop of a porous pellet filter having a few open channels

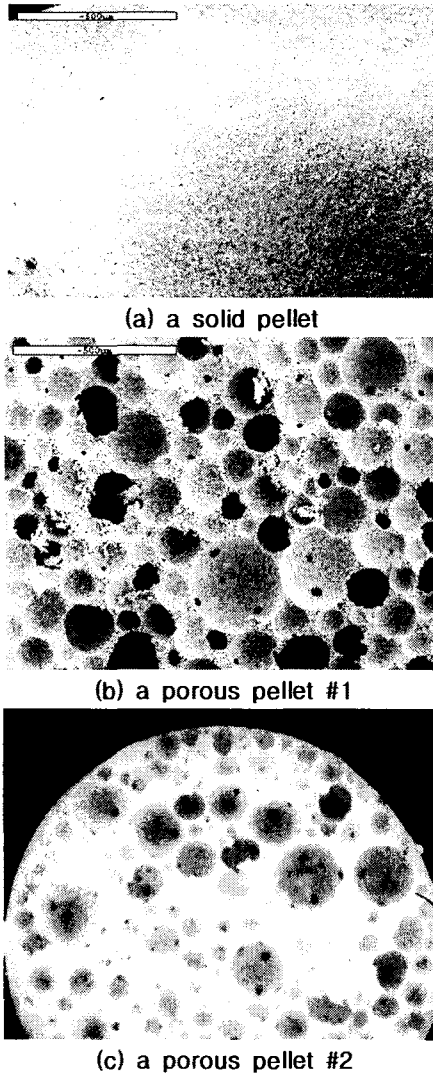


Fig. 5 Pore structure inside pellets

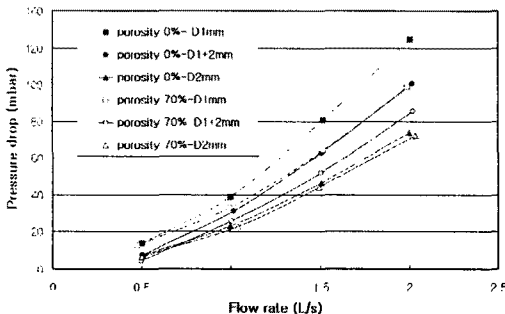


Fig. 6 Pressure drop with respect to flow rate (Filter length 100mm)

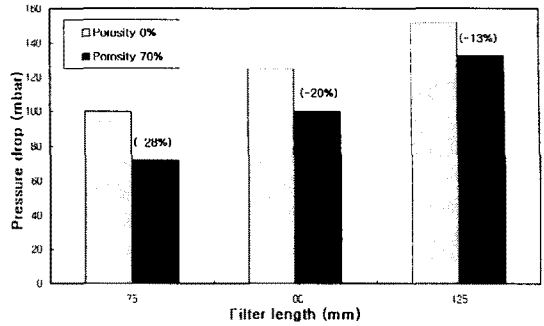


Fig. 7 Effect of porosity on pressure drop (Flow rate 2 l/s, pellet dia.=1mm)

3.2 펠렛 필터 포집시험

필터 성능에서 가장 중요한 펠렛 필터의 포집율을 측정하였다. Fig. 8는 직경 1mm의 다공 펠렛을 채운 길이 100mm 필터를 대상으로 한 포집 시험에서 얻은 필터 배압, 여과지 배압 및 유량 데이터를 나타낸다. 유량은 시험시작시 0 l/s에서부터 약 1 l/s까지 증가시켰으며 그 후 필터 내에 carbon 입자가 포집되면서 유량이 감소하는 경향을 보인다. 필터 배압은 초반에 시험 유량의 증가와 입자의 포집으로 인해 급격히 증가하며 배압이 약 110mbar에 도달한 이후에는 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 여과지에 걸리는 배압은 9mbar까지 상승한 후, 유량이 감소됨에 따라 약 7mbar로 감소되었다.

Fig. 9는 필터 및 여과지에 포집된 carbon 입자를 보여준다. Fig. 9(a)는 100mm의 필터에 직경 1mm와 2mm의 펠렛을 반씩 2단으로 채운 필터에 포집된 carbon 입자를 보여주는 그림으로서 다음 두가지 사실을 알 수 있다. 첫째, 직경 2mm 펠렛단과 1mm 펠렛단 사이의 경계면에 많은 양의 carbon 입자가 포집된다. 직경 2mm 펠렛과 1mm 펠렛을 적층했을 때 펠렛 사이의 공간으로 통과할 수 있는 입자의 이론적 최대 크기는 각각 0.31mm와 0.157mm인데 시험 시료 중의 0.31mm보다는 작고 0.157mm보다 큰 입자들이 직경 2mm의 펠렛단을 통과하여 직경 1mm 펠렛단의 상층부에 적층되는 것으로 판단된다. 둘째, 다공이 없는 펠렛 필터의 경우 필터의 길이 방향 전체에 걸쳐 carbon 입자가 고르게 포집되어 존재하는 반면 다공 펠렛 필터의 경우 직경 1mm 펠렛단의 아래부분에는 carbon 입자들이 많이 존재하지 않음을 알 수 있다. 이로부터 다공이 없는 펠렛 필터에서는 펠렛 사이의 공간으로 입자들이 많이 빠져 나가지만 다공 펠렛 필터의 경우 1mm 펠렛단의 상층부에서 많은 양의 입자들이 펠렛 내부 기공속으로 포집됨을 유추할 수 있

다. Fig. 9(b)는 여과지에 포집된 carbon 입자를 보여준다. 다공이 없는 펠렛 필터의 경우가 다공 펠렛 필터를 사용하는 경우보다 많은 carbon 입자들이 쌓인 것을 알 수 있다.

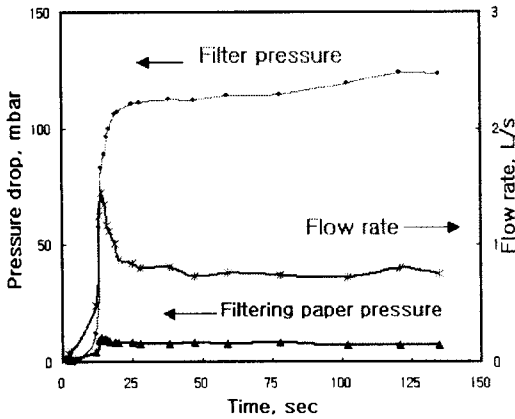
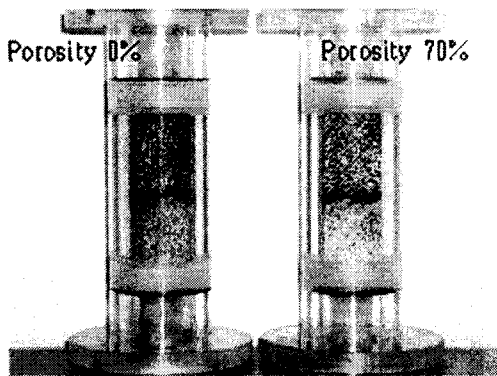
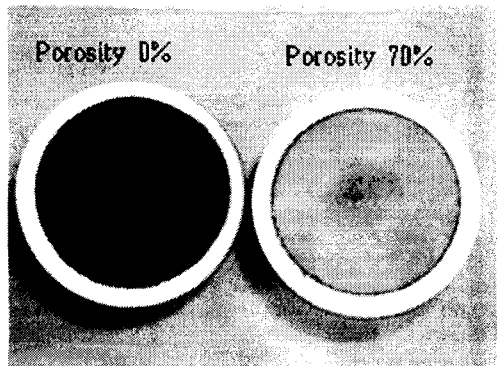


Fig. 8 Change of pressure drop and flow rate with time



(a) Collected particles in a pellet filter



(b) Collected particles in a filtering paper

Fig. 9 Carbon particles collected in a pellet filter and filtering paper

Fig. 10은 필터의 길이가 100mm인 경우 다공도에 따른 포집율을 비교한 그림이다. 직경 1mm 다공 펠렛의 경우 96%의 포집율을 보이는 반면 다공이 없는 펠렛 필터의 경우 83%의 포집율을 보여준다. 직경 2mm 펠렛 필터의 경우 직경 1mm 펠렛 필터보다 포집율이 현저히 감소하였으며, 다공 펠렛 필터와 다공이 없는 펠렛 필터의 포집율 차이는 증가하였다. Fig. 6의 경우를 상기할 때 다공 펠렛 필터는 배압 특성이 양호할 뿐 만아니라 펠렛 내부 기공 사이로 유동이 형성되면서 carbon 입자 포집 성능도 양호해지는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 필터의 길이가 100mm인 경우 다공 펠렛의 직경에 따른 포집율을 보여준다. 직경이 1mm인 펠렛을 사용하는 경우와 1mm 펠렛과 2mm 펠렛을 섞어 사용하는 경우 포집율은 큰 차이가 없이 약 95%이상의 입자가 포집됨을 알 수 있다. 직경이 2mm인 펠렛 필터의 포집율은 약 70%로써 직경이 1mm인 펠렛 필터에 비하여 현저히 포집성능이 저하되고 있다. 이상으로부터 1mm 펠렛과 2mm 펠렛을 반씩 섞어 만든 필터는 포집특성과 배압특성이 우수하여 디젤 매연 여과용 필터로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

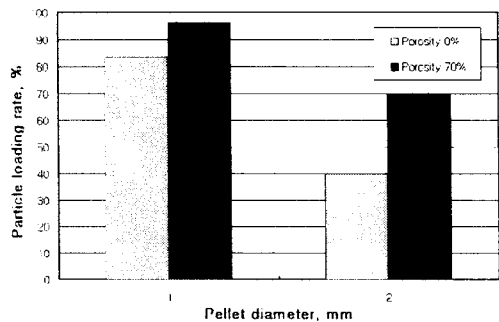


Fig. 10 Effect of porosity on particle loading rate (Filter length 100mm, pellet dia. 1mm)

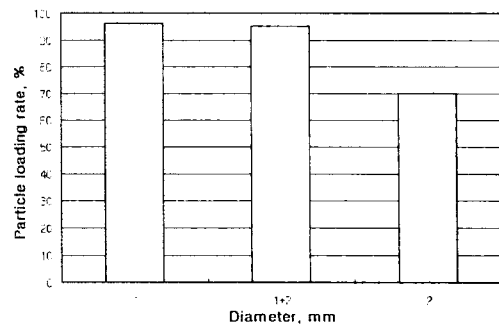
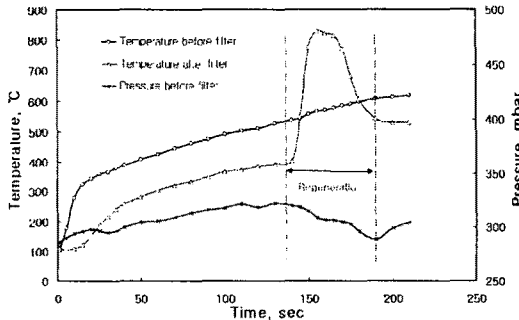


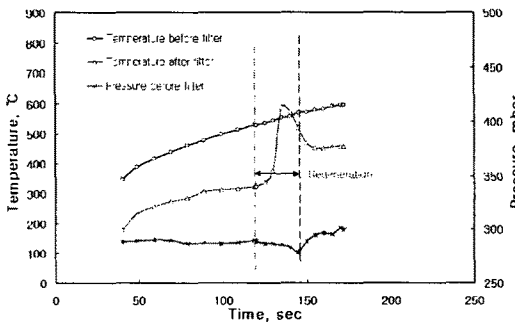
Fig. 11 Particle loading rate with respect to porous pellet diameter (Filter length 100mm)

3.3 펠렛 필터 재생시험

Fig. 12는 다공 펠렛 필터의 재생 특성을 보여준다. 포집 시험장치에서 carbon 입자를 필터에 포집한 다음 필터를 재생 시험기에 장착하였으며, 전기 히터를 이용하여 유입 공기의 온도를 증가시키면서 포집된 입자의 재생 여부를 알아보았다. 필터의 길이는 100mm이며 유량은 2.5 l/s 이었다. Fig. 12(a)는 직경 1mm의 다공 펠렛 필터의 재생 시험 결과이다. 필터로 유입되는 공기의 온도가 530℃일 때 포집된 carbon 입자들이 재생되어 필터 후단의 온도가 830℃까지 상승하고 있다. 필터의 전단 압력은 히터를 이용하여 공기의 온도를 상승시킴에 따라 증가되다가 재생 구간에서는 감소되는 경향을 보인다. Fig. 12(b)는 직경 2mm의 다공 펠렛 필터의 재생 시험 결과이다. 유입 공기 온도가 530℃일 때 포집된 입자들이 재생됨을 알 수 있다. 차후 유입 공기 유량, 산소 농도등에 따른 다공 펠렛을 포집재로 사용하는 필터의 재생 성능을 고찰할 예정이다.



(a) Pellet diameter 1mm



(a) Pellet diameter 2mm

Fig. 12 Change of filter temperature and pressure during regeneration

4. 결론

연구는 디젤엔진 매연여과장치의 포집재로 다공

성 펠렛을 사용하는 경우 필요한 기본 데이터를 확보할 목적으로 펠렛의 크기, 배치 방법, 유량, 필터의 길이에 따른 배압, 포집 및 재생 특성을 고찰하였다.

- (1) 디젤엔진 매연여과장치에 적합한 배압 특성을 갖기 위해서는 펠렛 내부의 기공과 기공이 원활히 연결된 다공펠렛을 제작하는 것이 필요하다.
- (2) 다공도 70%의 개선된 펠렛 필터는 다공이 없는 펠렛 필터보다 배압면에서 우수한 효과가 있는 것을 확인하였으며, 특히 유량이 증가할수록 그 효과는 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 펠렛 필터는 다공이 없는 펠렛 필터보다 포집율이 우수하였으며, 이로부터 작은 크기의 입자들이 펠렛 내부 기공에 효과적으로 포집된 것으로 유추할 수 있다.
- (4) 1mm 펠렛과 2mm 펠렛을 반씩 섞어 만든 필터를 1mm 펠렛만으로 만든 필터와 비교하였을 때 포집특성은 유사하였고, 배압은 크게 감소하였으며 디젤 매연 여과용 필터로 사용 가능성을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부에서 지원한 국가지정연구실(NRL) 사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 정용일, "경유자동차와 입자상물질 저감기술," 기계저널 제38권, 제4호, pp.59-64, 1998.
- [2] O. Kazushige, S. Koji, T. Noriyuki, S. Hong, N. Takeshi, K. Teruo, "Characteristic of SiC-DPF for passenger car," SAE paper No.2000-01-0185, 2000.
- [3] Y. Jeong, "The trend of exhaust emission standard and diesel particulate filter trap technology for diesel powered vehicles," Busan Engine International Symposium 2001.
- [4] N. Taoka, O. Kazushige, S. Hong, S. Hiroki, Y. Yutaka and K. Teruo, "Effect of SiC-DPF with high cell density for pressure loss and regeneration," SAE paper No.2001-01-0191, 2001.
- [5] J. Lee and J. Park, "Preparation of porous ceramic pellets by pseudo double-emulsion method from 4-phase goamed slurry," Journal of Materials Science Letters, 20, pp.205-207, 2001.