

DPF(매연여과장치)용 질화규소 필터소재 개발의 현황과 전망

글 _ 박영조, 김해두 || 한국기계연구원부설 재료연구소 구조세라믹연구그룹
yjpark87@kims.re.kr

1. DPF의 개요

유가 100불 시대의 도래를 기정사실로 예측하는 기사와, 지구온난화 가스인 이산화탄소(CO₂)에 대한 규제가 전 세계적으로 화두인 현 상황을 고찰하건대, 가솔린자동차와 비교하여 높은 열효율과 적은 이산화탄소 배출이 검증된 디젤자동차의 보급 확대에 대한 요구는 시급성을 더해가고 있다¹⁾. 디젤자동차로의 대체를 위한 선결 과제 로써, 미연탄소(soot)가 주성분인 입자상물질(PM)의 배출 저감기술이 우선적으로 필요하며, 이에 따라 매연여과장치(DPF, Diesel Particulate Filter)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 PM의 경우, 기관지 등에 침투하여 장기간 잠재함으로써 폐암의 원인이 될 수 있다는 연구보고서가 최근에 발표됨에 따라 인체 위해성에 대한 논란이 가중되고 있기 때문에 획기적인 저감방법이 필요하다²⁾. DPF는 엔진과 테일파이프 사이에 장착되어 디젤엔진에서 배출되는 PM을 필터로 포집한 후 이것을

태우고(재생), 다시 PM을 포집하여 계속 사용하는 장치로써 매연을 80% 이상 저감할 수 있다(Fig. 1).

2. DPF의 구성

DPF 시스템은 기본적으로 필터, 재생장치 및 제어장치의 3부분으로 구성되어 있다.

2.1 필터

필터는 세라믹 모노리스가 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 외형은 실린더 모양이며 단면은 원형, 타원형 등이며 내부에는 작은 삼각형이나 사각형 모양의 통로(channel)가 벌집모양(honeycomb)으로 배열되어 있다. 채널 입구와 출구가 교대로 막혀 있으며, 채널 입구로 유입된 배출가스는 채널 출구가 막혀있기 때문에 다공질벽을 통과하여 옆 채널 출구로 빠져나가게 되며, 이때 입자상물질은 채널의 내벽에 포집된다(Fig. 2). Table 1에 각종 필터의 장단점을 분석하여 정리하였다.

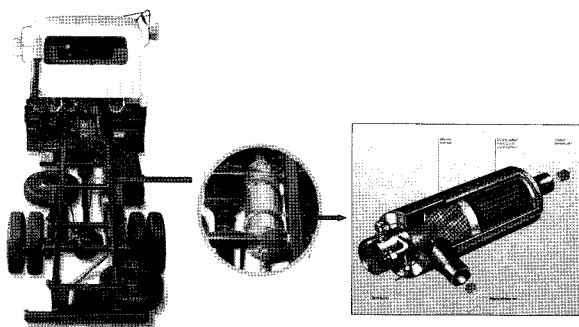


Fig. 1. 디젤자동차 엘(매연여과장치)의 위치 및 형상.

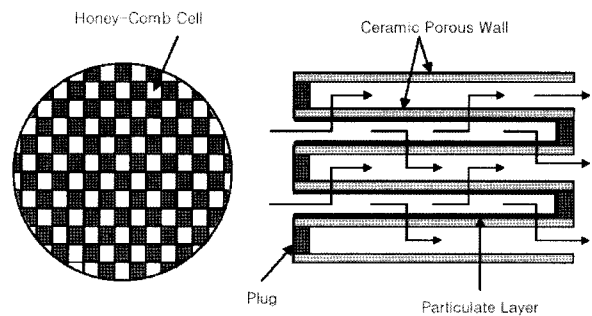


Fig. 2. 허니콤 타입 세라믹 모노리스 필터의 내부 구조

Table 1. DPF용 각종 필터의 장단점

Types of DPF	Advantages	Disadvantages
Ceramic honeycomb filter (wall-flow monolith)	- high efficiency - can be catalyst-coated	- moderately high backpressure - very high backpressure rise rate - cracking due to thermal stress
Ceramic honeycomb filter (flow-through monolith)	- low back pressure - can be catalyst-coated - low cost	- lower efficiency
Ceramic fiber candle filter	- high efficiency - low backpressure - no thermal cracking	- possible large volume requirement - fiber shedding
Ceramic foam filter	- resistant to thermal cracking - low cost - can be catalyst-coated	- high backpressure - lower efficiency
Ceramic fiber mat	- very high efficiency - no thermal cracking	- high backpressure - high backpressure rise rate - fiber shedding
Metal wire mesh filter	- low backpressure rise rate - self-regeneration capability	- moderately high backpressure - lower efficiency, especially at high speeds
Sintered metal	- resistant to mechanical cracking - high efficiency - high thermal conductivity	- high thermal expansion - high cost

2.2 재생장치

포집된 PM은 필터 벽에 케이크 층을 형성하여 DPF 후단에서 감압을 초래하게 되는데, 필터가 다시 정상적으로 작동하기 위해서는 미연탄소인 PM을 산화시키는(태우는) 재생과정을 필요로 한다. 재생과정은 light-off 온도(PM이 타기 시작하는 온도), 공급되는 산소농도, 산소유량, PM의 포집량에 따라 적절하게 조절하여야 하며 크게 세 가지 방법으로 나누어진다.

첫째, 포집된 PM을 soot 점화온도인 550-600°C까지 외부열원을 가열하는 강제재생 방법으로 전기히터, 버너, 트로틀링 등이 사용된다. 둘째, 촉매를 이용하여 soot 점화온도를 약 250°C까지 낮추어 고온의 엔진 배출가스로 점화시키는 자연재생 방법으로, 촉매를 필터 기지에 직접 코팅하는 방법(코팅방식)과 연료에 미리 섞어 필터 전방에서 분사시키는 방법(첨가제방식)이 사용된다. 셋째, 위의 강제재생과 자연재생을 혼합한 복합재생 방법이 연구되고 있다.

2.3 제어장치

상기 재생장치, 즉 외부열원에 의한 강제재생과 촉매를 이용한 자연재생을 제어하는 장치로써, 주행 중 실시간으로 포집된 PM의 양을 측정하여 재생 시기를 결정하

고, 배가스의 온도 또는 가열장치를 제어한다.

3. DPF용 필터소재의 시장 분석

종래의 경우, 디젤엔진은 오프로드(off-road) 차량, 버스 및 트럭 등의 대형차에 주로 장착되어 왔으나, 기술린엔진에 비하여 월등한 연비 및 이에 따른 낮은 이산화탄소 배출량으로 인해 환경친화적인 엔진으로 인식되면서, 특히 서유럽 시장을 중심으로 디젤엔진 탑재 승

용차의 시장 점유율이 급격하게 증가하고 있다(Fig. 3).

필터소재의 시장규모를 도출하기 위해서는 운행차 및 제작차의 정확한 계수와 함께 DPF 탑재율을 추정할 수 있어야 한다. 자동차 대수는 OICA(International Organization of Motor Vehicle Manufacturers)의 최신 데이터를 근거로 하였으며, passenger car, light commercial, heavy commercial, bus & coach의 4개 차량 종류로 구분하였다. 운행차의 경우, 차량성능 대비 DPF 장착비용의 효율성을 고려하여 1997년 이후 출시 차량에 한정함으로써 대상 차량 대수를 계수하였다. 디젤엔진 탑재 차량 수는 총 차량 수에서 passenger car는 10%, 다른 3종의 차량은 50%로 추정하였다. 실제로 미국의 승용차 시장에서 경유자동차

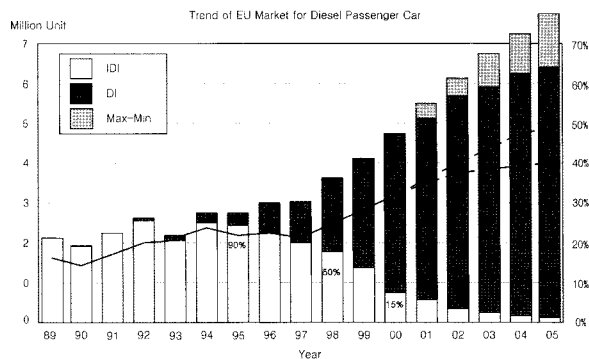


Fig. 3. 유럽에서의 승용차용 경유자동차 보급 추세.

Table 2. DPF 필터의 세계시장 규모

차량 대수 단위 : x1,000,000

차량	운행차				제작차			
	총 차량수	디젤 탑재	DPF 장착	필터 가격	총 차량수	디젤 탑재	DPF 장착	필터 가격
total	456.19	101.63	50.81	11.85조	60.62	17.71	8.85	1.9조
passenger car	316.16	31.62	15.81	2.37조	42.01	8.40	4.20	0.63조
light comm	111.82	55.91	27.95	4.19조	14.86	7.43	3.71	0.56조
heavy comm	23.36	11.68	5.84	4.38조	3.10	1.55	0.78	0.59조
bus & coach	4.85	2.43	1.21	0.91조	0.64	0.32	0.16	0.12조

Table 3. DPF 필터의 국내시장 규모

차량 대수 단위 : x1,000,000

차량	운행차				제작차			
	총 차량수	디젤 탑재	DPF 장착	필터 가격	총 차량수	디젤 탑재	DPF 장착	필터 가격
total	23.29	3.55	1.78	3,210억	3.18	0.78	0.38	667억
passenger car	20.10	2.01	1.01	1,515억	2.77	0.55	0.28	420억
light comm	2.71	1.36	0.68	1,020억	0.36	0.18	0.09	135억
heavy comm	0.25	0.12	0.06	450억	0.03	0.02	0.01	75억
bus & coach	0.12	0.06	0.03	225억	0.02	0.01	0.005	37억

는 2002년 통계로 4% 정도이며 유럽에서는 상당히 보급되어 35% 정도를 점유하고 있다. 규제가 강화될 경우, 운행차 중 위에서 추정된 디젤엔진 탑재차량 중 두 대 중 한 대인 50%의 비율로 DPF를 장착할 것으로 필터 수요를 예측했다. 제작차의 경우, 경유자동차의 보급률이 증가하는 추세를 감안하여 passenger car의 경우, 출시 차량의 20%를 디젤엔진 탑재차로 가정하고 다른 3종의 차량은 운행차와 동일한 50% 비율이라 가정하였다. 운행차량과 마찬가지로 디젤엔진 탑재차량 중 50%의 차량에 DPF를 장착할 것으로 필터 수요를 예측했다. 현재 대형 DPF 장치의 가격은 약 800만원, 소형의 경우 약 200만원 정도이며, 필터소재가 DPF 장치에서 차지하는 가격비중은 각각 100만원과 20만원 정도로 알려져 있다. 상기의 현재 가격과 향후 예상되는 대량생산에 의한 가격 안정화를 고려하여 대형차와 소형차에서 필터 자체의 가격은 각각 75

만원과 15만원으로 책정하여 시장규모를 산정하였다.

Table 2와 Table 3에 2011년 기준으로 각각 세계시장과 국내시장의 필터에 대한 예상규모를 나타내었다.

4. DPF용 필터소재 개발 동향

4.1 해외 연구 동향

매연여과장치의 핵심 요소기술인 필터소재 분야의 경우, 코닝, Ividen, NGK 등의 일부 선발주자에 의해 시장이 선점되어 있다. 필터 재질은 코오디어라이트(cordierite)와 탄화규소(SiC)가 가장 보편적이며, 물라이트(mullite), 알루미늄 타이타네이트(AT), 질화규소(Si₃N₄) 등도 중요한 소재이다. 필터의 성능을 좌우하는 중요한 인자로는 여과용량, 포집효율, 배압발생 등의 성능지수가 포함되고, 이를 뒷받침하는 소재특성으로 강도, 열충격성, 내열성 등이 주요 변수가 되며 이들을 Table 4에 정리하여 비교하였다³⁾.

미국 Corning사에서 상용화한 코오디어라이트는 낮은 열팽창계수와 우수한 내열충격성 등의 장점을 가지고 있고 경제성도 우수한 재료이지만, 기계적 특성이 약하고 재생 시 이상 온도에 의해 부분적으로 용융되어 채널

Table 4. 필터소재의 물성 비교

	Cordierite	SiC	Mullite	AT	Si ₃ N ₄
Strength (A,B,C in MPa)	1/0.1/0.1	6/5/1.5	30		18/9/2
Solid Thermal Shock Resistance (ΔT)	600	300			500
Heat Resistance (°C)	1200	2000	1500	1650	1600
Solid Thermal Conductivity (W/mK)	2	60	1	1	40
Solid Thermal Expansion (/10 ⁻⁶ °C)	1	4	3	0.5	3
Modulus (GPa)	4	60	30	1	30
Melting Point (°C)	1450	2400	1850		(1800)
Bulk Density (g/cm ³)	2.5	3.2	3.2	3.2	3.2
Electrical Resistivity (Ωcm)	10 ¹⁴	10 ²	10 ¹⁴		10 ¹⁴

이 막히는 문제를 노출하고 있다⁵⁾. 또한, 보조촉매로 사용되는 CeO_2 와 반응하여 저융점 화합물을 형성하는 등 DPF 소재로서 다소의 문제점을 보여 왔다. 이러한 내열성과 기계적 특성, CeO_2 와의 화학적 반응성을 크게 개선한 재료로 재결정 탄화규소 소재가 일본의 Ividen사에 의해 개발되었다⁴⁾. 그러나 재결정 탄화규소는 내열충격성이 낮고, 고경도의 탄화규소 분말을 사용하므로 하니컴 제작 시 사용되는 압출금형의 마모가 심하며, $2000^\circ C$ 이상의 고온에서 소결되므로 고가격화 한다는 문제점이 있다. 이와 같은 탄화규소의 내열충격성과 가격경쟁력을 향상시키기 위하여 일본의 NGK사에서는 규소와 탄소의 반응소결에 의한 반응소결 탄화규소 필터를 개발하였다⁵⁾. 이 시스템에도 여전히 보완할 점이 존재하며, 반응소결 탄화규소는 반응소결 질화규소와는 달리 규소가 용융(융점 $1413^\circ C$)된 후 탄소와 반응하여 제작되기 때문에 미반응 규소가 잔류하며 이에 의한 화학적, 기계적 특성의 열화 가능성이 지적되고 있다. 한편, 일본의 Asahi Glass사에서는 규소분말을 출발원료로 하여 반응소결법에 의해 질화규소 필터를 개발하는 연구를 수행하였는데, 반응소결 질화규소는 잔류규소가 없고 내열충격성 등이 우수한 장점으로 평가되나, 동 회사의 필터는 질화규소 고유의 침상입자의 미세구조가 아니고 주로 입상의 결정립과 상대적으로 작은 종횡비(aspect ratio)의 입자로 구성되어, 강도, 내열충격성 및 포집성능이 떨어지므로 이를 개선할 필요가 있다⁶⁾.

최근, DEER(Diesel Engine Efficiency & Emission Research) conference 등을 통해 새롭게 소개되는 소재로써, 열팽창계수가 극도로 작기 때문에 열충격특성이 우수한 AT(aluminum titanate, Corning사)계 산화물, 하니컴의 셀 벽 전체가 조대한 주상의 입자로 구성되어 배압을 극소화 할 수 있는 물라이트계 세라믹스(Dow chemical사)가 이미 완성차 업계에서 테스트를 완료하고 상용화의 전 단계에까지 연구가 진행되고 있다. 이와 같이, 현재까지는 표준이 되는 소재가 규격화되어 시장을 장악하고 있는 성장완료의 시장이 형성되어진 단계는 아니고, 계속적으로 새로운 물질이 연구되고 실차에 장착되어 평가를 거치면서 성능과 가격 양면에서 최적합의 소재가 선별되는 과도기를 지나고 있다고 판단된다.

4.2 국내 연구 현황

1990년대 초반, 디젤엔진 배가스 저감기술개발의 일환으로 행해진 DPF의 실용화 개발 및 보급계획이 실패한 이후, 2002년도 월드컵을 대비하여 청정재료인 CNG 연료를 사용하는 디젤차량의 보급을 적극적으로 추진하여 왔다. 그러나 환경문제의 대두 및 글로벌 대세를 반영하여 최근 다시 경유자동차를 둘러싼 논의가 국내에서도 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 그 내용을 살펴보면 주로 재생과 제어에 관련된 시스템 위주로 연구가 진행되고 있으며, 대부분 DPF 필터소재의 경우 해외에서 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. DPF 필터 재료의 중심 기술인 하니컴 세라믹에 대한 연구는 환경분야에서 탈질용 촉매 여과필터 및 담체 등의 분야에서 비교적 많은 연구가 되고 있으며, 세라컴, 나노테크, LG화학 등 일부 기업에서 하니컴 세라믹 구조물을 생산하고 있다. 그러나 이 경우에도 촉매, 여과 필터나 담체 등과 비교하여 DPF용 필터로 사용되어지기 위해서는 디젤엔진의 배가스에 포함되어 있는 PM 및 NO_x 등을 제거하기 위한 새로운 요소기술의 개발이 필요하다. 필터소재 개발에 관한 본격적인 연구는 2004년도부터 시작된 환경부 지원의 “무저공해 자동차 사업단”의 과제를 통하여 본격적으로 이루어지고 있으며, 현재 질화규소 필터를 포함한 3-4개 과제가 진행 중에 있다⁷⁾.

5. DPF용 질화규소 필터소재

질화규소 세라믹스는 열충격 특성, 고온 특성 및 기계적 특성이 다양하게 우수하며 포집효율 및 감압특성 등의 성능면에서도 비교우위의 장점이 기대되므로, 현재 소형차에 가장 많이 장착되고 있는 SiC 세라믹 필터의 단점을 극복할 수 있는 최적의 대안으로 주목을 받고 있다.

5.1 DPF용 필터소재로써의 적합성

일반적으로 널리 알려진 대로 질화규소 세라믹스는 구조 세라믹재료로써 지난 30 여 년 간 각국에서 집중적으로 연구되어 왔다⁸⁾. 종래의 질화규소 관련 연구가 열기관용 부품, 내마모 부품 등의 소재로 사용하기 위하여 치밀한 소결체를 개발하는 것에 집중되었다면, 최근 우수한

기계적 특성의 저밀도 질화규소 세라믹소재가 개발되어 주목을 받고 있다⁹⁾. 특히, 반응소결 질화규소(Reaction Bonded Silicon Nitride, RBSN) 세라믹스 필터는 위에서 열거한 타 세라믹 필터의 사용 중 붕착하게 되는 각종 난관을 극복함과 동시에 가격 경쟁에서도 우위를 점할 수 있는 소재로 기대된다. 일반적으로 질화규소 분말은 매우 고가이며 소결온도가 1850°C 이상으로 가격경쟁면에서 불리하나, 반응소결 질화규소 세라믹스의 경우, 규소 분말을 출발원료로 사용하여 성형한 후 질소 분위기에서 질화반응을 통해 저가의 질화규소 세라믹스 제품을 제조하기 때문에 저비용화가 가능하다^{10,11)}. 참고로 실험실 규모에서 질화규소 분말은 US\$ 150-200/kg, 규소 분말은 US\$ 1/kg 정도에 구매가 가능하다. 이와 같이 제조된 다공성 질화규소 필터의 경우 대부분의 소재특성이 Iridium사의 SiC와 동일 혹은 우수하며, SiC 필터의 경우 낮은 열충격 저항성 때문에 여러 Segment로 나누어 제조한 후

조립하나, RBSN 필터의 경우 열충격특성이 우수하고 소성공정에서 1-2% 정도의 극히 경미한 수축이 발생하기 때문에 단일 하니컴의 일체형으로 제조가 가능하다. 뿐만 아니라 미세구조적인 관점에서도 기존 필터의 경우, 기공 크기가 상대적으로 조대하여 나노 크기의 PM을 제거하기에 적당하지 않음에 반해, 침상구조로 발달하는 질화규소 세라믹스의 미세구조 특성을 이용하면, 통기성과 포집 성능을 동시에 극대화할 수 있는 슬릿현상을 이용함으로써 신 개념의 필터를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 직경 10 μ m 이상의 조대한 주상정 입자로 구성된 물라이트 소재가 최근에 출시되어, 상대적으로 입자 크기가 작은 침상정 입자의 질화규소 필터에 있어서 기존의 SiC 필터에 버금가는 경쟁상태로 부각되고 있다¹²⁾. Fig. 4에서 침상형(needle-like) 질화규소와 주상형(rod-like) 물라이트의 미세구조 차이를 발견할 수 있다. 입자 크기에 비례하여 기공크기가 결정되므로 후자의 경우 감압특성이 우수하지만 전자의 경우 극미세 입자의 포집특성이 탁월할 것으로 추정된다.

5.2 차세대 필터소재로서의 전망

지적되고 있는 나노 입자의 인체 유해성과 DPF 기술의 발달에 의한 이들 입자의 저감기술 확보에 고무되어, 유럽의 중소형 경유자동차의 매연 규제와 관련된 기준에 종래의 중량기준을 대체하여 나노 입자의 수량기준이 도입될 것으로 전망되고 있다. 따라서 DPF 개발 시 PM의 중량 저감뿐만 아니라 극미세 입자인 나노 크기 PM의 수량 감소도 매우 중요한 경쟁 요인이 될 것으로 확신한다. 즉, 현재 상용화되어 있는 필터소재의 미세구조를 감안하면 나노 크기의 PM 제거가 기술적인 병목(Bottleneck)으로 작용할 가능성이 농후하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 최근의 연구결과에 의하면 매연의 배출이 경미하다고 알려져 있는 가솔린자동차의 경우에도, 나노 PM의 수량기준을 적용하면 디젤자동차와 유사한 정도의 배출량을 나타내는 것으로 측정되고 있기 때문에, 차세대 규제 기준인 Euro 6에서는 매연여과장치의 장착을 고려하여야 할 필요성이 부각되고 있다¹³⁾. 이러한 정황을 고려하면 질화규소 필터소재는 상대적으로 연구개

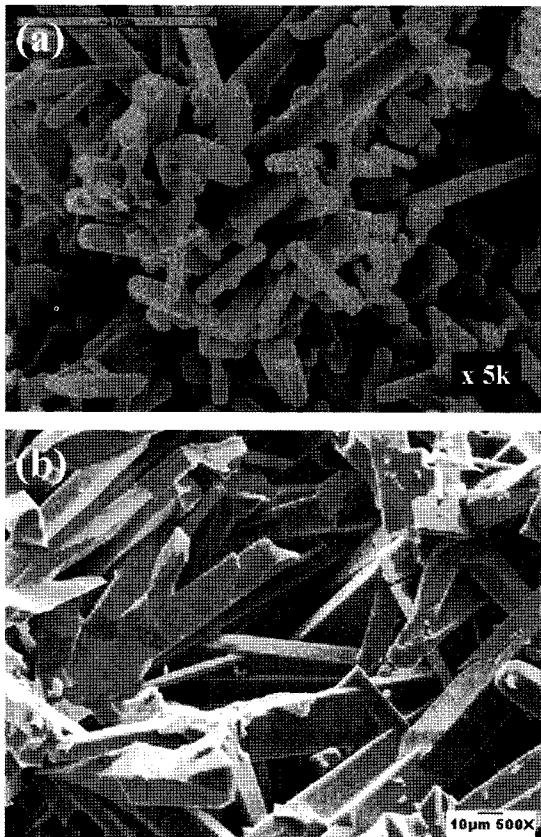


Fig. 4. (a)질화규소(Si₃N₄)와 (b)물라이트(mullite)의 미세구조 비교

발의 후발주자이지만, 기공경로가 복잡하고 비표면적이 큰 3차원 침상구조를 구현하기 때문에 차세대 필터소재로서 매력적이라고 판단된다.

6. 결 론

현재 DPF 장착에 의해 PM을 중량 기준으로 80% 이상 저감시킴으로써 성능면에서는 실용화에 도달하였으나, 내구성 부족과 가격이 비교적 높아 실질적인 의미에서는 개선의 여지가 많은 것으로 사료된다. 또한 중량기준이 아닌 나노 크기 PM의 수량제어 효과능으로 재고한다면 완벽한 기술 수준에 도달하기 위해서는 앞으로도 해결되어야 할 기술적인 과제가 산적해 있다. 이러한 정황을 고려할 때, 질화규소 관련 축적된 고유기술력으로 자체기술의 개발에 성공하면, 차후 DPF 필터 영역의 선점은 물론 경유자동차 제조를 위한 기술력 증진에도 기여 할 것으로 기대된다. 다공성 질화규소는 디젤엔진 배기가스 정화용 필터 및 촉매담체로서의 응용 이외에도, 입자 및 기공 크기의 제어를 통해 탈취용 촉매담체, 반도체 CMP공정의 나노 연마제 입자 제거용 필터, VOC 정화용 필터 등의 각종 환경산업용 필터 및 촉매담체 소재로의 사업화도 기대된다.

참고문헌

1. P. Hawker, N. Myers, G. Huthwohl, T. Vogel, B. Bates, L. Magnusson, and P. Bronneberg, "Experience with a New Particulate Trap Technology in Europe," SAE-paper No. 970182 (1997)
2. A. Mayer, "Definition, Measurement and Filtration

- of Ultrafine Solid Particles Emitted by Diesel Engines," TTM, ATW-EMPA-Symposium 19. April (2002)
3. N. Miyakawa, H. Sato, H. Maeno, and H. Takahashi, "Characteristics of Reaction-bonded Porous Si₃N₄ Honeycomb for DPF Substrate," JSAE Review, 24, 269-276 (2003)
4. K. Ohno, K. Shimato, N. Taoka, H. Santae, T. Ninomiya, and T. Komori, "Characterization of SiC-DPF for Passenger Car," SAE World Congress, Detroit, MI (2000)
5. S. Ichikawa, T. Harada, and T. Hamanaka, "Development of Honeycomb Ceramics for Diesel Particulate Filters(DPF)," Ceramics, 38[4] 296-300 (2003)
6. N. Miyakawa, H. Maeno, and H. Takahashi, "Characteristics and Evaluation of Porous Silicon Nitride Filter," SAE World Congress, Detroit, MI (2003)
7. H. D. Kim et al., Report of phase 2 for "The Development of Si₃N₄ Filter for a DPF Application" Supported by CEFV (2007)
8. G. Petzow, M. Herrmann, "Silicon Nitride Ceramics," Structure and Bonding, Vol. 102, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2002)
9. Y. Inagaki, N. Kondo, and T. Ohji, "High performance Porous Silicon Nitride," J. Europ. Ceram. Soc., 22, 2489-94 (2002)
10. A. J. Moulson, "Reaction-bonded Silicon Nitride : Its Formation and Properties," J. Mater. Sci., 14, 1017-1051 (1979)
11. J. A. Mangles, G. J. Tennenhouse, "Densification of Reaction Bonded Silicon Nitride," Am. Ceram. Soc. Bull., 59, 1216-22 (1980)
12. F. Mao, C. G. Li, R. Ramanathan, "Advanced Ceramic Filter for Diesel Emission Control," DEER Conference (2004)
13. S. S. Park, " UN/ECE/GRPE and PMP Activity," workshop of Center for Environmentally Friendly Vehicle (2007)

●● 박영조



- 1994 서울대학교 무기재료공학과 학사 졸업
- 1996 서울대학교 무기재료공학과 석사 졸업
- 2000 동경대학교 재료학과 박사 졸업
- 2001-2003 Oak Ridge National Lab. (USA), Postdoctor
- 2003-현재, 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임연구원

●● 김해두



- 1979 연세대학교 요업공학과 학사 졸업
- 1980 영국 Sheffield 대학 요업공학과 석사 졸업
- 1983 연세대학교 요업공학과 박사과정 이수
- 1987 독일 Aachen 공대 박사 졸업
- 1997-1998 미국 ORNL, 객원연구원
- 1988-현재, 한국기계연구원 부설 재료연구소 책임연구원