

# Euro-7 규제 대응 GDI 엔진용 GPF 촉매 코팅 기술 동향 및 코팅 위치에 따른 재생 효율 특성 분석

지용수\*\*, 김한호\*\*, 권태영\*\*, 조진표\*, 현승균\*, 김광희\*  
\*인하대학교 제조혁신전문대학원, 인하대학교 RISE, \*\*희성촉매(주)  
e-mail : hh.kim@inha.edu

## A Study on Catalyst Coating Technology Trends and Regeneration Characteristics of GPFs for Euro-7 Compliant GDI Engines

Yong-Soo Ji\*\*, Han-Ho Kim\*\*, Tae-Young Kwon\*\*, Jin-Pyo Cho\*, Seung-Gyun  
Hyun\*, Kwang-Hee Kim\*  
\*Manufacturing Innovation School, Inha University, \*\*Heesung Catalysts Corp.

### 요약

최근 전 세계적으로 자동차 배출가스 규제가 강화되면서 기술린 직분사(GDI) 엔진에서 발생하는 입자상 물질(Particulate Matter, PM) 및 입자수(Particle Number, PN) 저감을 위한 Gasoline Particulate Filter(GPF)의 적용이 필수적으로 요구되고 있다. 특히 Euro-7 규제에서는 저온 조건 및 실제 주행 환경에서의 배출 저감 성능이 중요해짐에 따라 GPF의 재생 효율 향상이 핵심 기술 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 GPF 촉매 코팅 기술의 개발 동향을 분석하고, 촉매 코팅 위치에 따른 재생 효율 특성을 비교하였다. 기존의 기공 내부 코팅(in-wall coating) 방식은 촉매 분산성이 우수한 장점이 있으나, 기공 막힘 및 soot 접근성 저하로 인해 재생 효율이 제한되는 문제가 있다. 이에 반해 담체 벽 표면에 촉매를 분포시키는 on-wall coating 방식은 soot와 촉매 간 직접 접촉을 증가시켜 산화 반응을 촉진하고 재생 효율을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 촉매 코팅 상태의 정량적 평가를 위해 비디오 현미경(VMS) 기반 이미지 분석과 딥러닝 기술을 활용한 자동 판별 가능성을 검토하였다. 연구 결과, 코팅 위치에 따른 재생 특성 차이는 GPF 성능 최적화에 중요한 영향을 미치며, 향후 코팅 구조 설계 및 품질 관리 기술의 고도화가 필요함을 확인하였다.

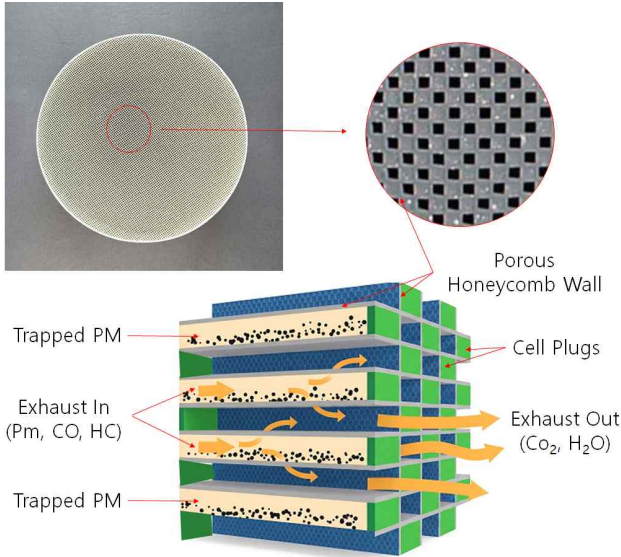
### 1. 서론

최근 전 세계적으로 자동차 배출가스 규제가 강화됨에 따라 내연기관 차량의 배출가스 저감 기술에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 특히 유럽을 중심으로 추진되고 있는 Euro-7 규제는 기존 규제 대비 입자상 물질(Particulate Matter, PM) 및 입자 수(Particle Number, PN)에 대한 기준을 더욱 엄격하게 적용하고, 실제 도로 주행 조건(RDE)과 저온 시동 구간까지 포함하여 관리 범위를 확대하고 있다. 이러한 규제 환경 변화는 다양한 운전 조건에서도 안정적인 배출 저감 성능을 확보할 수 있는 후처리 기술의 고도화를 요구하고 있다. 기술린 직분사(GDI) 엔진은 연료를 연소실 내부에 직접 분사함으로써 연비 향상과 출력 증가 측면에서 우수한 성능을 가지지만, 연소 과정에서 불균일 혼합기 형성 및 벽면 충돌 현상으로 인해 미세 입자(soot) 발생이 증가하는 단점이 있다. 이에 따라 GDI

엔진 차량에서는 입자상 물질 저감을 위해 Gasoline Particulate Filter(GPF)가 필수적으로 적용되고 있으며, GPF는 다공성 세라믹 기반의 wall-flow 구조를 통해 배출가스 내 입자를 물리적으로 포집하고, 이후 산화 반응을 통해 제거하는 복합적인 기능을 수행한다. 그러나 soot의 지속적인 축적은 필터 내부 압력 손실을 증가시켜 엔진 성능 저하를 유발하기 때문에, 효율적인 재생(regeneration) 특성 확보가 GPF 설계의 핵심 요소로 작용한다.

최근 GPF 촉매 기술에서는 재생 효율 향상을 위해 촉매 코팅 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 기공 내부 코팅(in-wall coating) 방식은 촉매 분산 측면에서는 유리하지만, 기공 내 유효 단면적 감소 및 soot 접근성 저하로 인해 재생 효율이 제한되는 문제가 있다. 이에 반해 담체 벽 표면에 촉매를 집중적으로 분포시키는 on-wall coating 방식은 soot와 촉매 간 접촉 효율을 향상시켜 산화 반응을 촉진하고 재생 성능 개선에 유리한

것으로 보고되고 있으며, 산업계에서도 해당 방향의 기술 개발이 진행되고 있다. 그림 1에는 GPF 필터의 구조를 보여준다. GPF는 벌집형(honeycomb) 다공성 구조와 교차 막힘 채널(cell plug)을 이용하여 배기가스를 벽을 통과시키는 필터이다. 배기가스가 다공성 벽을 통과하는 과정에서 입자상 물질(PM, soot)은 벽 표면에 포집되고, 기체 성분만 통과한다. 이후 정화된 배기가스는 배출되며, 포집된 soot는 촉매 반응을 통해 재생된다.



[그림 1] Gasoline Particulate Filter(GPF) 구조

한편, 이러한 촉매 코팅 구조의 성능은 코팅 위치뿐만 아니라 코팅 상태의 균일성 및 품질에 크게 의존한다. 기존의 SEM 기반 분석은 높은 정밀도를 제공하지만 공정 적용성이 낮다는 한계가 있으며, 이를 대체하기 위한 비파괴 검사 기술의 필요성이 증가하고 있다. 최근에는 비디오 현미경(VMS) 기반 영상과 인공지능 기술을 결합한 자동 판별 방법이 제안되고 있으며, 이는 촉매 코팅 상태를 고속으로 분석하고 생산 공정에 적용할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 GPF 촉매 코팅 기술의 개발 동향을 분석하고, 코팅 위치에 따른 재생 특성을 고찰함과 동시에, 코팅 상태 판별을 위한 영상 기반 분석 기술의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 이론적 배경 및 GPF 기술 동향

### 2.1 GPF 구조 및 작동 원리

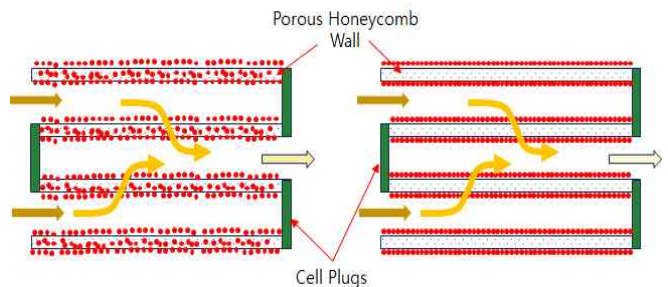
Gasoline Particulate Filter(GPF)는 가솔린 직분사(GDI) 엔진에서 발생하는 입자상 물질(Particulate Matter, PM)을 저감하기 위한 후처리 장치로, 다공성 세라믹 기반의 wall-flow 구조를 통해 물리적 여과와 화학적 반응이 동시에 이루어지는 복합 시스템이다. 자세한 구조는 그림1에 나타내었다. GPF는 벌집 형태의 허니컴(honeycomb) 모노리스 구조로 구성되며, 다수의 평행 채널이 형성되어 있다. 이때 인접 채널의 입구와 출구가 교차

로 막힌 구조(cell plug)를 가지기 때문에 배기가스는 직선으로 통과하지 못하고 다공성 벽을 통과해야 한다. 이 과정에서 기체 성분은 미세 기공을 통해 통과하는 반면, 입자상 물질은 벽 표면 및 기공 내부에 포집된다.

입자 포집은 확산(diffusion), 충돌(interception), 관성 충돌(impaction) 등의 메커니즘에 의해 이루어지며, 초기에는 벽 내부 기공에서 포집이 발생하고 이후 soot가 축적되면서 표면 필터링(surface filtration) 효과가 증가하여 여과 효율이 향상된다. 그러나 soot가 지속적으로 축적될 경우 필터 내부 압력 손실(back pressure)이 증가하여 엔진 출력 저하 및 연비 악화를 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위해 GPF는 포집된 soot를 산화 반응을 통해 제거하는 재생(regeneration) 과정을 필요로 한다. 가솔린 엔진의 경우 상대적으로 높은 배기 온도로 인해 수동 재생이 가능하지만, 저온 조건에서는 산화 반응이 제한되므로 촉매를 활용한 재생 효율 향상이 중요하다. 따라서 GPF의 성능은 구조적 특성과 더불어 촉매 코팅 상태에 크게 의존하며, 특히 soot가 주로 축적되는 벽 표면 영역에서의 반응 특성이 중요한 설계 요소로 작용한다.

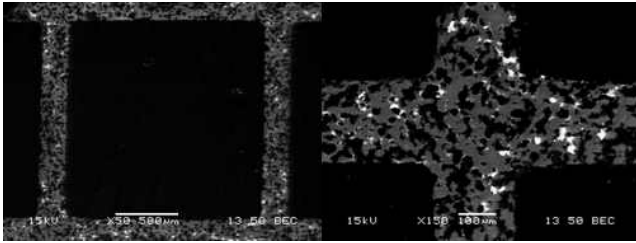
### 2.2 GPF 촉매 코팅 기술 동향 (In-wall vs On-wall)

그림 2에 GPF 필터 코팅 구조도를 나타내었다. GPF의 재생 성능을 향상시키기 위해서는 촉매 코팅 기술이 필수적으로 적용되며, 최근에는 촉매의 분포 위치에 따른 성능 차이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 촉매 코팅 방식은 주로 다공성 기공 내부로 촉매 슬러리를 침투시키는 in-wall coating 방식이 사용되어 왔다. 이 방식은 촉매가 기공 내부에 균일하게 분포되어 높은 분산성을 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 기공 내부 공간을 점유함으로써 유효 유동 단면적 감소 및 압력 손실 증가를 유발할 수 있다. 또한 soot 입자가 주로 벽 표면에 축적되는 특성상, 촉매와 soot 간의 직접 접촉이 제한되어 재생 효율 측면에서 한계를 보일 수 있다.

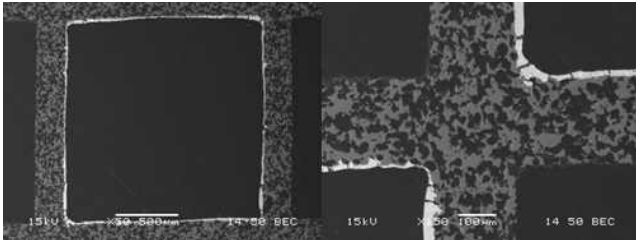


(a) In Wall Coating (b) On Wall Coating

[그림 2] GPF 필터 코팅 구조도



(a) In Wall Coating(좌 50µm, 우 100 µm)



(b) On Wall Coating(좌 50µm, 우 100 µm)

[그림 3] GPF 필터 격벽 SEM 사진

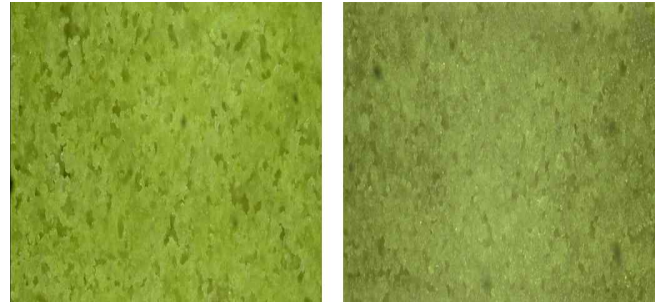
이에 반해 최근에는 담체 벽 표면에 촉매를 집중적으로 코팅하는 on-wall coating 방식이 주목받고 있다. 이 방식은 soot가 축적되는 표면 영역에 촉매가 위치함으로써 반응물 간 접촉 확률을 증가시키고, 산화 반응을 촉진하여 재생 효율을 향상시키는 데 유리하다. 일부 실험 결과에서는 표면 코팅 방식이 내부 코팅 대비 높은 soot 재생률을 나타내는 경향이 보고되고 있으며, 산업계에서도 이러한 방향으로의 기술 개발이 진행되고 있다. 그러나 on-wall coating 방식은 코팅 균일성 확보 및 장기 내구성 측면에서 추가적인 검증이 필요하며, 코팅 두께 및 분포 최적화에 대한 연구가 요구된다. 따라서 현재 GPF 촉매 기술은 in-wall 방식에서 on-wall 방식으로의 전환 가능성을 모색하는 단계로, 성능 향상과 구조적 안정성 간의 균형을 고려한 최적 설계가 중요한 연구 과제로 제시되고 있다.

### 3. GPF 촉매 코팅 상태 분석 방법 및 적용 가능성

#### 3.1 VMS 기반 표면 이미지 분석

본 연구에서는 GPF 촉매 코팅 상태를 비파괴 방식으로 분석하기 위해 Video Microscope System(VMS)을 활용한 표면 이미지 분석을 수행하였다. 그림 3에는 GPF 필터 격벽 SEM 사진을 나타내었다. 기존의 Scanning Electron Microscopy(SEM)는 높은 해상도를 제공하지만 시료 전처리 과정이 복잡하고 분석 시간이 길어 생산 공정에 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 이에 따라 비교적 간단한 측정 환경에서 빠르게 이미지를 획득할 수 있는 VMS를 활용하여 GPF 표면의 미세 구조 및 질감 변화를 관찰하였다.

VMS로 획득된 이미지는 기공 구조, 표면 거칠기, 코팅 입



(a) In Wall Coating (b) On Wall Coating

[그림 3] GPF 필터 격벽 VMS 사진

자의 분포 상태 등을 시각적으로 확인할 수 있으며, 코팅 방식에 따라 서로 다른 질감 패턴을 나타내는 경향을 보인다. 그림 4에 VMS로 찍은 사진을 나타내었다. 내부 코팅의 경우 기공 입구가 부분적으로 막히는 형태를 나타내며, 표면 코팅의 경우 비교적 균일한 입자 분포가 관찰된다. 이러한 차이는 이미지의 밝기 및 텍스처 패턴 변화로 표현되며, 정성적 수준에서 코팅 상태를 구분할 수 있는 가능성을 확인하였다.

다만 본 분석은 제한된 시편과 조건에서 수행된 예비적 검토로, 조명 조건, 촬영 각도 및 해상도에 따른 영향이 존재할 수 있으며, 정량적 기준을 설정하기에는 추가적인 데이터 확보가 필요하다. 따라서 VMS 기반 분석은 초기 상태 판별 및 공정 모니터링에 활용 가능한 기술로 판단되며, 향후 보다 정교한 이미지 처리 및 데이터 분석 기법과의 결합이 요구된다.

#### 3.2 딥러닝 기반 코팅 상태 판별 가능성 검토

GPF 촉매 코팅 상태의 자동 판별을 위해 최근에는 딥러닝 기반 영상 분석 기술의 적용 가능성이 제안되고 있다. 기존의 FFT 기반 주파수 분석 방법은 이미지 내 질감 변화를 정량적으로 표현할 수 있으나, 특징값을 수동으로 설계해야 하는 한계와 복잡한 비선형 패턴을 충분히 반영하지 못하는 문제가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN)을 기반으로 한 딥러닝 모델을 활용하여 코팅 상태 판별 가능성을 검토하였다.

딥러닝 모델은 이미지의 국부적 질감 정보를 자동으로 학습하여 기공 구조 및 코팅 입자의 분포 패턴을 특징으로 추출할 수 있으며, 특히 어텐션 메커니즘을 적용할 경우 코팅 상태 판별에 중요한 영역에 집중하여 분석 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 다중 스케일 특징 추출 구조를 적용하면 미세 입자 수준의 질감과 전체적인 코팅 분포를 동시에 고려한 분석이 가능하다. 초기 분석 결과에서는 코팅 방식에 따른 이미지 패턴 차이를 기반으로 분류 가능성을 확인할 수 있었으나, 학습 데이터 수가 제한적이고 다양한 공정 조건을 반영하지 못한 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서 제안한 딥러닝 기반 판별 기법은 GPF 촉매

코팅 상태 분석의 가능성을 확인한 초기 단계로, 향후 데이터셋 확장, 모델 구조 최적화 및 공정 환경 적용성 검증이 필요하다. 이러한 기술이 고도화될 경우, 기존 SEM 분석을 대체할 수 있는 실시간 비파괴 품질 검사 시스템으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Euro-7 규제 대응을 위한 가솔린 직분사(GDI) 엔진용 Gasoline Particulate Filter(GPF)의 기술 동향을 분석하고, 촉매 코팅 위치에 따른 재생 특성 및 코팅 상태 분석 기술의 적용 가능성을 검토하였다. GPF는 다공성 세라믹 기반의 wall-flow 구조를 통해 배출가스 내 입자상 물질을 효과적으로 포집하며, 포집된 soot는 산화 반응을 통해 제거되는 재생 과정을 거친다. 이러한 재생 성능은 GPF의 지속적인 운용과 엔진 성능 유지 측면에서 매우 중요한 요소로 작용한다.

촉매 코팅 기술 측면에서는 기존의 기공 내부 코팅(in-wall coating) 방식과 최근 주목받고 있는 담체 벽 표면 코팅(on-wall coating) 방식의 특성을 비교하였다. 분석 결과, in-wall coating 방식은 촉매 분산성 확보 측면에서는 유리하나, 기공 내부 공간을 점유함으로써 유효 유동 단면적 감소와 soot 접근성 저하를 유발할 수 있는 한계를 가진다. 반면 on-wall coating 방식은 soot가 주로 축적되는 벽 표면에 촉매를 집중적으로 배치함으로써 반응물 간 접촉 효율을 향상시키고, 결과적으로 soot 산화 반응을 촉진하여 재생 효율 개선에 유리한 것으로 판단된다. 일부 실험적 결과에서도 표면 코팅 방식이 내부 코팅 대비 높은 재생 성능을 나타내는 경향이 확인되었으며, 산업계에서도 이러한 방향의 기술 개발이 진행되고 있다. 다만 코팅 균일성 및 장기 내구성 확보 측면에서 추가적인 검증이 필요하며, 코팅 두께 및 분포 최적화를 위한 연구가 요구된다.

한편, GPF 성능 확보를 위해서는 촉매 코팅 위치뿐만 아니라 코팅 상태의 품질 관리 또한 중요한 요소로 작용한다. 이에 본 연구에서는 VMS 기반 표면 이미지 분석을 통해 코팅 상태에 따른 질감 차이를 정성적으로 확인하고, 딥러닝 기반 자동 판별 기술의 적용 가능성을 검토하였다. VMS 이미지는 코팅 방식에 따른 표면 구조 및 텍스처 차이를 비교적 용이하게 관찰할 수 있는 장점을 가지며, 비파괴 검사 방식으로 공정 적용 가능성이 존재한다. 또한 CNN 기반 딥러닝 모델을 활용할 경우, 미세한 질감 차이를 자동으로 학습하여 코팅 상태를 분류할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 본 연구에서의 분석은 제한된 데이터와 조건에서 수행된 예비적 수준으로, 다양한 공정 변수 및 환경 조건을 반영한 추가적인 검증이 필요하다.

종합적으로 볼 때, GPF 촉매 코팅 기술은 기존의 in-wall 방식에서 on-wall 방식으로의 전환 가능성이 제시되고 있으며, 이는

재생 효율 향상 측면에서 중요한 기술적 방향으로 판단된다. 또한 영상 기반 분석 및 인공지능 기술을 활용한 코팅 상태 판별은 향후 제조 공정의 품질 관리 효율을 향상시킬 수 있는 유망한 접근 방법으로 기대된다. 따라서 향후 연구에서는 코팅 구조 최적화와 더불어 데이터 기반 품질 관리 기술의 고도화를 통해 GPF 시스템의 성능 및 신뢰성을 동시에 확보하는 방향으로 연구가 확대될 필요가 있다.

[후기]

본 논문은 인하대학교 제조혁신전문대학원 프로젝트 진행과 학위논문 제출을 위해 발표한 논문입니다.

참고문헌

- [1] 윤재철, 디젤자동차 배기가스 정화용 하이브리드 백금 촉매의 제조 및 촉매 특성에 관한 연구, 부산대학교 대학원 석사학위논문, 2016.
- [2] Eun Jun Lee, Low Temperature Oxidation Activity and Thermal Stability of Catalysts for Automotive Exhaust Gas Purification, Ph.D. Dissertation, Korea University, 2023.
- [3] 최용현, A study on the exhaust characteristics of catalyst coated GPF in GDI engine vehicle, 한양대학교 대학원 석사학위논문, 2018.
- [4] 이의하, 초희박 GDI 엔진의 GPF 적용에 따른 입자상물질 저감 특성 연구, 석사학위논문, 2014.
- [5] 김재진 외, "1.5리터급 가솔린직분사 터보 엔진의 입자상 물질 저감을 위한 GPF 적용에 관한 실험적 연구," 쌍용자동차 기술보고, 2019.
- [6] 이의형 외, "GPF 종류에 따른 직분사식 가솔린 엔진의 입자상 물질 저감 특성," 대한기계학회 논문집 B, Vol.39, No.4, 2015.
- [7] 안석중 외, "터보과급 GDI 엔진의 PN 배출 특성 분석," 대한기계학회 논문집 B, Vol.43, No.2, 2019.
- [8] 최주환 외, "Honeycomb 형상 변화에 따른 GPF 성능 특성 연구," 한국정밀공학회 학술대회 논문집, 2021.
- [9] 김은석, "탈질 촉매 및 시스템의 기술동향," Auto Journal, 2013.