

슬러리 코팅형 촉매 소성 공정 표면 얼룩의 영상 분석 및 딥러닝 적용 가능성 연구

권태영**, 지용수**, 김한호**, 조진표*, 현승균*, 김광희*
 *인하대학교 제조혁신전문대학원, 인하대학교 RISE, **희성촉매(주)
 e-mail : hermesen29@inha.edu

Vision-Based Analysis of Surface Stains in Slurry-Coated Catalysts during the Firing Process and Applicability of Deep Learning

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

요약

자동차 및 산업용 배기가스 정화 촉매는 환경 규제 대응을 위한 핵심 부품으로, 슬러리 코팅 및 소성 공정을 통해 제조된다. 이 과정에서 촉매 표면에 발생하는 얼룩(stain)은 촉매의 기능적 성능에는 큰 영향을 미치지 않으나, 외관 품질 저하로 인해 고객 신뢰도 저하 및 품질 클레임의 주요 원인이 된다. 특히 소성 공정에서 발생하는 얼룩은 위시코트 조성, 건조율, 소성 온도, 공기 유동 등 다양한 공정 변수의 복합적인 영향으로 발생하는 것으로 알려져 있다.

기존 생산 현장에서는 이러한 얼룩을 육안 검사 또는 색상 및 밝기 기반 영상처리 방법을 통해 평가하고 있으나, 촬영 각도, 조명 조건, 허니컴 구조에 의한 격자 패턴, ID Mark 영향 등으로 인해 정량적이고 일관된 검출이 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 슬러리 코팅형 촉매의 소성 공정 중 발생하는 표면 얼룩을 대상으로 영상 분석 기반 검출 방법을 적용하고, 필터링, 마스크 처리 및 통계적 연산을 통해 얼룩 영역을 정량화하였다.

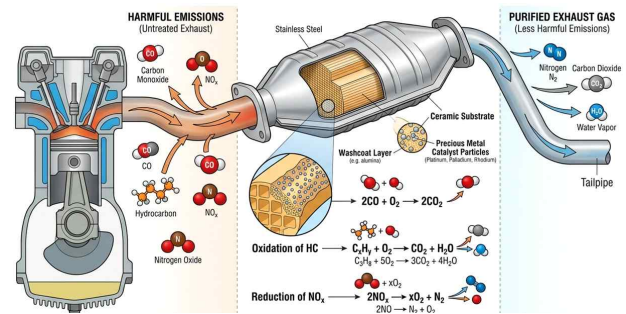
그러나 기존 영상처리 기반 방법은 촬영 조건 변화에 민감하여 검출 정확도가 저하되는 한계를 보였으며, 특히 격자 구조와 얼룩을 명확히 구분하기 어려운 문제가 확인되었다. 이에 따라 본 연구에서는 딥러닝 기반 영상 분석 기법의 적용 필요성을 도출하고, 향후 자동 검사 시스템 구축을 위한 적용 가능성을 검토하였다. 또한 소성 온도, 풍량, 건조율 및 위시코트 조성에 따른 얼룩 발생 특성을 분석하여 공정 변수와 표면 품질 간의 상관관계를 도출하였다.

본 연구 결과는 촉매 제조 공정에서 발생하는 표면 얼룩 문제를 정량적으로 평가하고, 향후 AI 기반 품질 검사 시스템 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

자동차 및 산업용 내연기관에서 배출되는 배기가스는 대기오염의 주요 원인 중 하나로, 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC) 등 다양한 유해 물질을 포함하고 있다. 이러한 배출가스를 저감하기 위해 배기가스 정화 촉매가 필수적으로 적용되고 있으며, 환경 규제 강화에 따라 촉매 기술의 중요성은 더욱 증가하고 있다. 배기가스 정화 촉매는 일반적으로 세라믹 허니컴 구조의 담체에 슬러리 형태의 위시코트를 코팅한 후 건조 및 소성 공정을 거쳐 제조되며, 이 과정에서 촉매의 성능뿐만 아니라 외관 품질 또한 중요한 관리 요소로 인식되고 있다. 그림 1에 자동차 배기가스 정화 장치인 삼원촉매 변환기의 구성도를 나타내었다.

최근 촉매 제조 공정에서는 소성 공정 이후 촉매 표면에 색상 불균일이나 얼룩(stain)이 발생하는 문제가 지속적으로 보



[그림 1] 자동차 배기가스 정화장치(삼원촉매)

고되고 있다. 이러한 표면 얼룩은 촉매의 기능적 성능에는 직접적인 영향을 미치지 않는 경우가 많지만, 제품 외관 품질 저하로 인해 고객사의 품질 신뢰도를 저하시킬 수 있으며, 실제 생산 현장에서 품질 판정 기준이 모호한 주요 요인으로 작용하고 있다.

특히 소성 공정에서 발생하는 얼룩은 단순한 표면 결함이 아니라 위시코트 내 유기 성분의 열분해, 불완전 연소, 금속 산화 상태 변화 및 소성로 내부의 온도 및 유동 불균일 등 다양한 공정 인자가 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 이해된다.

기존 생산 현장에서는 촉매 표면 얼룩을 작업자의 육안 검사 또는 영상처리 기반 방법을 통해 평가하고 있다. 영상처리 기반 방법은 촉매 이미지의 색상 및 밝기 정보를 활용하여 임계값 처리 및 필터링을 통해 얼룩 영역을 검출하는 방식으로 적용되고 있으나, 촬영 각도 및 조명 조건 변화, 허니컴 구조의 격자 패턴, 제품 식별을 위한 ID Mark 등의 영향으로 인해 얼룩과 정상 영역을 명확히 구분하기 어려운 한계를 가진다. 이러한 문제는 검사 결과의 재현성과 객관성을 저하시켜 공정 품질 관리의 신뢰성을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다.

따라서 본 연구에서는 슬러리 코팅형 촉매의 소성 공정에서 발생하는 표면 얼룩을 대상으로 영상 분석 기반 검출 방법을 적용하고, 기존 방법의 한계를 체계적으로 분석하였다. 또한 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 딥러닝 기반 영상 분석 기법의 적용 가능성을 검토하고, 향후 자동화된 품질 검사 시스템 구축을 위한 기반을 마련하고자 한다. 더 나아가 소성 온도, 풍량, 건조율 및 위시코트 조성과 같은 주요 공정 변수와 얼룩 발생 간의 상관관계를 분석함으로써 촉매 제조 공정의 품질 개선 및 공정 최적화에 기여하고자 한다.

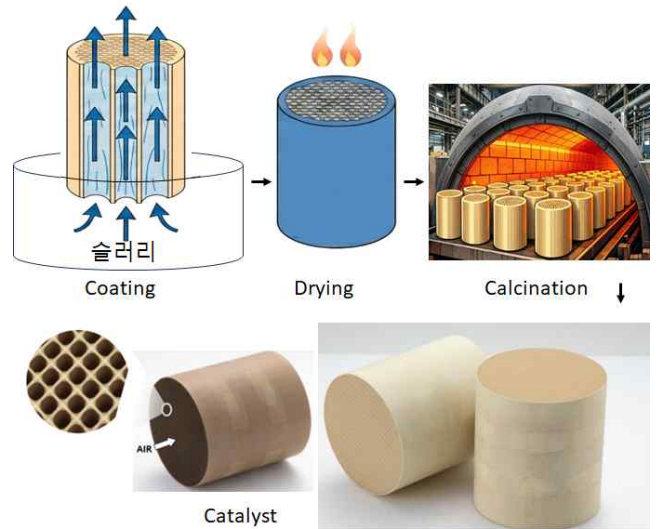
2. 이론적 배경

2.1 촉매 제조 공정 및 소성 공정 특성

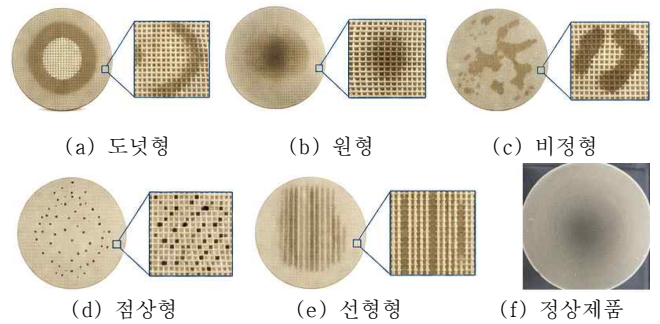
슬러리 코팅형 촉매는 일반적으로 허니컴 구조의 담체에 촉매 활성 성분을 포함한 슬러리를 코팅한 후 건조 및 소성 공정을 거쳐 제조된다. 슬러리 코팅 공정에서는 촉매 지지체 물질과 바인더, 분산제 등이 혼합된 슬러리를 담체 표면에 균일하게 도포하며, 이후 건조 공정을 통해 수분 및 일부 유기 성분을 제거한다. 이어지는 소성 공정은 촉매 제조에서 핵심적인 단계로, 코팅층의 구조적 안정화와 촉매 활성 성분의 고정을 담당한다. 그림 2에 촉매 제조 공정을 나타내었다.

소성 공정에서는 온도 상승에 따라 슬러리 내 유기 바인더와 첨가제가 열분해되며, 약 200~400°C 구간에서 급격한 물질 변화가 발생한다. 특히 약 300°C 전후에서 유기 성분의 분해 및 연소가 활발히 일어나며, 이 과정에서 국부적인 열 및 물질 이동 불균일이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 코팅층의 수축, 기공 형성 및 표면 상태 변화로 이어지며, 결과적으로 촉매 표면 품질에 영향을 미친다.

또한 소성로 내부의 온도 분포, 공기 유동, 제품 적재 방식 등은 촉매의 열이력(thermal history)에 영향을 주며, 동일한



[그림 2] 촉매 제조공정



[그림 3] 촉매 표면얼룩 유형

공정 조건에서도 위치에 따라 서로 다른 결과를 초래할 수 있다. 특히 풍량 및 열풍 분포가 균일하지 않을 경우 촉매 내부와 외부의 온도 차이가 발생하여 코팅층의 건조 및 소성 상태에 차이를 유발한다. 따라서 소성 공정은 단순한 열처리 과정이 아니라 열전달, 유체 흐름, 화학 반응이 복합적으로 작용하는 공정으로 이해할 필요가 있다.

2.2 촉매 표면 얼룩 발생 메커니즘 및 영상 분석 기술

촉매 표면에서 발생하는 얼룩(stain)은 단순한 외관 결함이 아니라 공정 조건과 물질 특성이 복합적으로 작용한 결과이다. 소성 공정 중 슬러리 내 잔류 유기 성분이 불균일하게 분해되거나, 국부적인 산화 반응 차이가 발생할 경우 표면 색상 변화가 나타날 수 있다. 특히 위시코트 내 포함된 특정 전구체 성분은 열분해 과정에서 잔류물을 형성하거나 발열 반응을 유발하여 국부적인 색상 차이를 발생시키는 원인이 된다. 그림 3에 촉매 표면얼룩 유형을 나타내었다.

소성로 내부의 온도 분포와 공기 유동이 균일하지 않을 경우, 촉매의 상·하부 또는 가장자리와 중심부 간 열전달 차이가 발생하여 얼룩의 위치 및 형상이 달라질 수 있다. 실제로

얼룩은 도넛형, 원형, 비정형, 점상형 등 다양한 형태로 나타나며, 이는 공정 조건과 밀접한 관련이 있다.

기존의 촉매 표면 검사에서는 주로 육안 검사 또는 영상처리 기반 방법이 사용되어 왔다. 영상처리 방식은 촉매 이미지의 색상 및 밝기 정보를 활용하여 필터링 및 임계값 처리를 통해 얼룩 영역을 추출하는 방식이다. 평균값, 표준편차, 히스토그램 분석 등을 통해 얼룩 영역을 정량화할 수 있으나, 허니컴 구조의 격자 패턴과 촬영 조건 변화에 민감하여 검출 정확도가 저하되는 문제가 있다.

최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 딥러닝 기반 영상 분석 기술이 적용되고 있으며, 복잡한 패턴과 비선형적인 특징을 학습하여 보다 안정적인 검출이 가능하다. 따라서 기존 영상처리 방법의 한계를 분석하고, 딥러닝 기반 분석 기법의 적용 가능성을 검토하는 것이 중요하다.

3. 실험 방법 및 분석 방법

3.1 촉매 표면 이미지 획득 및 실험 조건

본 연구에서는 슬러리 코팅형 촉매의 소성 공정 이후 표면에 발생하는 얼룩(stain) 현상을 분석하기 위해 촉매 표면 이미지를 획득하고, 이를 기반으로 영상 분석을 수행하였다. 분석 대상은 다양한 소성 조건에서 제조된 촉매 제품으로, 소성 온도, 풍량, 건조율 및 위시코트 조성 등의 공정 변수를 고려하여 샘플을 선정하였다.

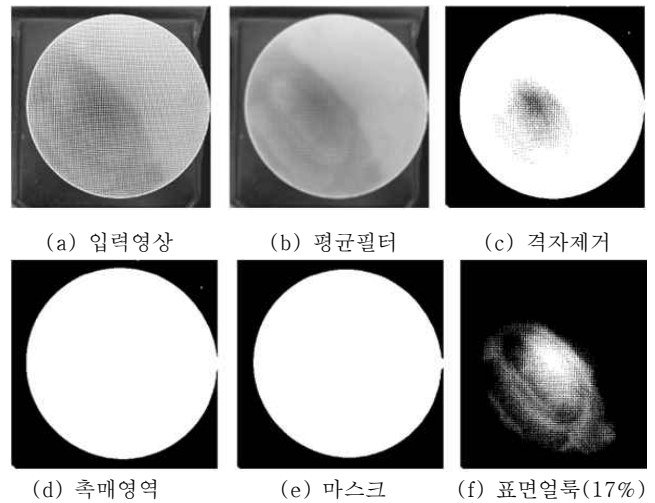
촉매 표면 이미지는 비전 카메라를 이용하여 촬영하였으며, 촬영 시 조명 조건에 따른 영향을 최소화하기 위해 균일한 조명을 제공하는 환경을 구성하였다. 또한 촬영 거리 및 카메라 각도를 일정하게 유지하기 위한 지그를 사용하여 반복 촬영 시 조건의 일관성을 확보하고자 하였다.

그러나 촉매 표면은 허니컴 구조를 가지는 특성상 촬영 각도에 따라 채널 내부의 음영 및 격자 패턴이 달라지는 특징을 보였다. 이러한 구조적 특성은 영상 내 명암 분포에 영향을 미쳐 동일한 샘플에서도 촬영 조건에 따라 상이한 이미지 결과를 초래하였다. 또한 제품 식별을 위한 ID Mark가 표면에 존재하여 색상 기반 분석 시 얼룩과 혼동될 가능성이 확인되었다.

이와 같은 문제를 고려하여 동일 조건에서 반복 촬영을 수행하고, 다양한 촬영 조건에 따른 이미지 변화를 비교 분석하였다. 이를 통해 촉매 표면 영상이 단순한 색상 정보뿐만 아니라 구조적 및 광학적 영향을 함께 포함하고 있음을 확인하였다.

3.2 영상 분석 기반 얼룩 검출 및 적용 가능성 평가

촬영된 촉매 이미지를 대상으로 기존 영상처리 기반 얼룩



[그림 4] 영상처리기반 표면얼룩 추출 방법

검출 방법을 적용하여 분석을 수행하였다. 먼저 입력 영상에 대해 노이즈 제거를 위한 필터링을 수행하고, 색상 및 밝기 정보를 기반으로 촉매 표면 영역을 분리하였다. 이후 평균 및 표준편차 기반 임계값 처리(thresholding)를 통해 얼룩 후보 영역을 추출하였다. 그림 4에 영상처리기반 표면 얼룩 추출 과정을 나타내었다.

추출된 영역에 대해 형태학적 연산을 적용하여 불필요한 노이즈를 제거하고, 최종적으로 얼룩 영역의 면적을 계산하여 전체 면적 대비 비율을 산출하였다. 이러한 방법을 통해 촉매 표면 얼룩을 정량적으로 평가하고, 품목별 허용 기준 설정 가능성을 검토하였다.

그러나 분석 결과, 기존 영상처리 기반 방법은 다음과 같은 한계를 가지는 것으로 확인되었다. 첫째, 촬영 각도 변화에 따라 허니컴 구조의 격자 패턴 명암이 크게 변하여 동일한 샘플에서도 얼룩 검출 결과가 달라지는 문제가 발생하였다. 둘째, ID Mark와 같은 표면 표식이 얼룩으로 오검출되는 현상이 발생하였다. 셋째, 얼룩의 형태가 비정형적이고 색상 차이가 크지 않은 경우, 단순 임계값 기반 방법으로는 정확한 검출이 어려웠다.

이러한 한계는 촉매 표면 영상이 단순한 색상 정보가 아닌 구조적 패턴, 조명 조건, 공정 특성이 복합적으로 반영된 데이터임을 의미한다. 따라서 기존의 규칙 기반 영상처리 방법으로는 다양한 조건 변화에 대해 안정적인 검출이 어렵다는 결론에 도달하였다.

이에 따라 본 연구에서는 딥러닝 기반 영상 분석 기법의 적용 필요성을 검토하였다. 딥러닝 기반 방법은 대량의 이미지 데이터를 학습하여 복잡한 패턴과 비선형적 특징을 인식할 수 있기 때문에, 허니컴 구조의 격자 패턴과 실제 얼룩을 구분하는 데 효과적일 것으로 판단된다. 또한 다양한 촬영 조건에서도 강건한 특징을 추출할 수 있어 공정 환경 변화에 대한 대응성이 우수할 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 향후 딥러닝 기반 자동 검사 시스템 구축을 위한 기초 단계로서, 기존 영상처리 방법의 한계를 도출하고 딥러닝 적용 가능성을 제시하였다.

4. 결론

본 연구에서는 슬러리 코팅형 촉매의 소성 공정 이후 표면에 발생하는 얼룩(stain) 현상을 분석하고, 이를 정량적으로 평가하기 위한 영상 분석 기반 검출 방법을 적용하였다. 촉매 제조 공정에서 소성 단계는 코팅층의 구조적 안정화와 촉매 활성 성분의 고정을 담당하는 핵심 공정이며, 이 과정에서 발생하는 표면 얼룩은 제품의 기능적 성능보다는 외관 품질 측면에서 중요한 문제로 작용한다. 특히 고객 요구 수준이 점차 높아지는 상황에서 표면 품질의 정량적 관리 필요성이 증가하고 있다.

본 연구에서는 다양한 소성 조건에서 제조된 촉매 샘플을 대상으로 비전 카메라를 이용하여 표면 이미지를 획득하고, 색상 및 밝기 정보를 기반으로 한 영상처리 방법을 적용하여 얼룩 영역을 검출하였다. 필터링, 마스크 처리 및 통계적 임계값 연산을 통해 얼룩 화소를 선별하고, 얼룩 면적 비율을 산출함으로써 정량적 평가가 가능함을 확인하였다. 또한 이러한 분석 결과를 바탕으로 품목별 허용 기준 설정 및 품질 관리 적용 가능성을 검토하였다.

그러나 실험 결과, 촉매 표면의 허니컴 구조에 의한 격자 패턴과 촬영 각도 및 조명 조건 변화가 영상 내 명암 분포에 영향을 미쳐 동일 샘플에서도 분석 결과의 변동이 발생하는 문제가 확인되었다. 특히 제품 식별을 위한 ID Mark가 얼룩으로 오검출되는 현상과 비정형적 얼룩 패턴에 대한 검출 한계가 존재하였다. 이러한 결과는 기존의 규칙 기반 영상처리 방법이 촉매 표면과 같이 구조적·광학적 특성이 복합적으로 작용하는 대상에 대해 적용하는 데 한계가 있음을 보여준다.

또한 소성 공정 중 얼룩 발생은 단순한 표면 결함이 아니라, 유기 성분의 열분해 및 불완전 연소, 금속 산화 상태 변화, 위시코트 조성 및 두께 불균일, 소성로 내 온도 및 공기 유동 불균일 등 다양한 공정 인자가 복합적으로 작용한 결과로 나타나는 현상임을 확인하였다. 이는 공정 조건과 표면 품질 간의 상관관계를 체계적으로 분석할 필요가 있음을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 기존 영상처리 기반 분석 방법의 한계를 도출하고, 이를 보완하기 위한 대안으로 딥러닝 기반 영상 분석 기법의 적용 가능성을 제시하였다. 딥러닝 기반 방법은 복잡한 패턴 인식과 다양한 환경 변화에 대한 강건성을 확보할 수 있어, 촉매 표면 얼룩 검출의 정확도와 재현성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 다양한 촉매 이미지 데이터셋을 구축하고, 딥러닝 기반 모델을 적용하여 얼룩 검출 성능을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 또한 공정 변수와 표면 품질 간의 데이터 기반 상관

성 분석을 통해 촉매 제조 공정의 최적화 및 품질 관리 자동화를 구현하는 방향으로 연구를 확장할 계획이다.

본 연구 결과는 촉매 제조 공정에서 발생하는 표면 품질 문제를 체계적으로 이해하고, 향후 AI 기반 자동 검사 시스템 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[후기]

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

참고문헌

- [1] P. W. Seo et al., Development of High Cell Substrate for SCR Catalyst Applicable to 4-Stroke Marine Engines, Final Report, SME Technology Development Program, Ceracomb Co., Ltd., Korea, Jan. 2015.
- [2] Korea Automotive Technology Institute (KATECH), Development of High-Efficiency Clean Manufacturing Technology for Automotive SCR Catalysts, Final Report, SME Technology Development Program, Small and Medium Business Administration, Korea, Aug. 2013.
- [3] S. W. Jo, K. M. Lee, J. P. Yoo, and L. Magnus, "Influence of PN Filtration Efficiency by Coating Type and Configuration of Gasoline Particulate Filter (GPF)," in Proceedings of the KSAE Spring Conference, 2022.
- [4] Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI), Technical Trends of Catalytic Converter Systems for Exhaust Gas Purification, Technical Report, Korea, 2020.
- [5] J. H. Kim and S. Y. Lee, "Manufacturing Process and Performance Characteristics of Slurry-Coated Catalysts," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 45, pp. 123-130, 2017.
- [6] A. Trovarelli and P. Fornasiero, Catalysis by Ceria and Related Materials, 2nd ed., Imperial College Press, London, 2013.
- [7] J. R. Anderson and M. Boudart, Catalysis: Science and Technology, Springer, Berlin, 2012.