

2차원 다물리 모델 기반 전기가열식 촉매 필터의 구조 및 가열 전략 해석 연구

김 성 수¹⁾ · 김 홍 석²⁾ · 우 상 혁²⁾ · 이 민 호³⁾ · 노 경 하³⁾ · 김 세 준⁴⁾ · 김 정 환^{*5)}

중앙대학교 에너지시스템공학과¹⁾ · 한국기계연구원 모빌리티동력연구실²⁾ · 한국석유관리원 미래기술연구소³⁾ ·
 한국유미코아촉매 기술개발팀⁴⁾ · 중앙대학교 에너지시스템공학부⁵⁾

Analysis of the Structure and Heating Strategy of Electrically Heated Catalytic Filters Based on a Two-Dimensional Multiphysics Model

Seongsu Kim¹⁾ · Hongsuk Kim²⁾ · Sang-Hee Woo²⁾ · Minho Lee³⁾ · Kyeong-ha Noh³⁾ ·
 Sejun Kim⁴⁾ · Junghwan Kim^{*5)}

¹⁾Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

²⁾Department of Eco-Friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

³⁾Research Institute of Future Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 33 Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Chungbuk 28115, Korea

⁴⁾Product Management, Umicore Catalysis Korea Co., Ltd., 331 Songdogukje-daero, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea

⁵⁾School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

(Received 15 July 2024 / Revised 7 August 2024 / Accepted 25 August 2024)

Abstract : This numerical study aimed to enhance the design and heating method of an electrically heated catalytic gasoline particulate filter(EH-cGPF) using two-dimensional(2D) multiphysics models. This EH-cGPF incorporated a three-way catalyst(TWC) wash coat on porous substrates with electric heaters positioned between silicon carbide substrate plates, chosen for their high thermal conductivity. Initially, the 2D multiphysics model was validated against experimental results. Subsequently, it was used for a parametric analysis focused on variations in filter layer number, heater power, and heating duration. The analysis revealed that employing a heater power of 4 kW for 40 seconds effectively raised the volume average temperature to 143 °C, achieving a 15-second performance gain compared to configurations without electric heating. This study underscores the potential of optimized heating strategies in enhancing the operational efficiency of EH-cGPF systems.

Key words : Electrically heated catalyst(전기가열식 촉매), Three-way catalyst(삼원촉매), Multiphysics modeling(다물리 모델링), heat transfer(열전달), Gasoline hybrid vehicle(가솔린 하이브리드 차량)

Nomenclature

GPF : gasoline particulate filter
 HC : hydrocarbon
 SCR : selective catalytic reduction
 TWC : three-way catalyst
 EH-cGPF : electrically-heated catalytic gasoline particulate filter
 SiC : silicon carbide

1. 서론

세계 각국은 내연기관 자동차의 배기 규제를 만족시키기 위해 촉매 성능 향상을 비롯하여 다양한 전략을 검토하고 있다.

직분사 가솔린 엔진은 입자상 물질 규제를 만족시키기 위해 가솔린 미립자 필터(GPF: Gasoline Particulate Filter)를 장착하는 추세¹⁾이다. 이를 위해 메탈폼(Metal-foam)을 비롯한 다양한 담체를 활용하는 미립자 필터 연구가 진행 중이다.²⁾

*Corresponding author, jkim77@cau.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

또한 강화된 HC(Hydrocarbon), CO 규제 수준을 만족시키기 위해 시동 직후 촉매 비활성 시기에 배출되는 HC와 CO를 저감하고자 하는 전략이 연구되고 있다.³⁾ 삼원 촉매의 전환율은 온도에 비례한다. 활성화 온도(LOT: Light-Off Temperature)는 전환율이 50 %에 도달할 때의 온도로 정의하며 약 200 ~ 250 °C 수준이다.⁴⁾ 특히 냉간 시동 시 발생량이 상당하여 Jiang 등⁵⁾은 하이브리드 차량의 경우 총 CO와 HC 발생량이 각각 14 %와 25 %를 차지할 것으로 추정했다. 이를 위한 방안으로 전기 히터로 삼원 촉매를 예열하는 방법이 제시되고 있다.⁶⁾ Nazir 등⁷⁾은 선택적 환원 촉매(SCR, Selective Catalytic Reduction)의 활성화에 전기 히터 예열 전략의 적용성을 분석하였다. 하이브리드 차량의 경우 전기 주행 모드 시 촉매 비활성화가 발생할 수 있으며, 내연기관 엔진에 비해 상대적으로 대용량 배터리를 장착하고 있어 전기 히터 촉매 예열 방식이 적용 가능하다.⁸⁾

촉매를 예열하는 방식은 크게 둘로 나누어진다. 첫째는 촉매 전단에 전기 히터를 장착하고 압축기로 가열된 공기를 공급하여 촉매를 가열하는 방식이다.⁹⁾ 이 경우 기존 촉매를 그대로 활용하며 전기 히터와 압축기를 추가한다. Canè 등¹⁰⁾은 4 kW 전력과 70 kg/h의 압축 공기로 디젤 산화 촉매는 20초 안에 활성화됨을 해석적으로 도출하였다.

두 번째 방식은 촉매 내부에 전기 히터를 설치하여 촉매 담체를 직접 가열한다.¹¹⁾ 이 경우 담체를 직접 접촉하는 전도 방식으로 가열하여 대류를 이용하는 첫 번째 방식보다 높은 열전달율을 기대할 수 있다.¹²⁾ 또한 압축기가 필요하지 않아 촉매 활성화에 필요한 전력 소모량이 적을 것으로 분석된다. 현재 다양한 방식으로 전기 히터를 내장한 촉매를 개발하고 있다.¹³⁾

본 연구에서 제안하는 촉매는 다공성 물질인 SiC를 담체로 활용하여 입자상 필터의 역할을 하면서 표면을 백금 등의 귀금속 Washcoat로 코팅하여 삼원 촉매 반응을 유도한다. 또한 전기 히터를 내장하여 종합적으로 전기 히터 내장식 촉매 필터(EH-cGPF: electrically heated catalyzed particulate filter)이다.

다물리 해석 모델은 이러한 EH-cGPF의 내부 구조 적 합성 및 예열 전략을 검증하는데 효과적이었다. 통상적인 Flow-through 타입의 원통형 삼원 촉매(TWC, Three-Way Catalyst)와는 달리 사각형의 다공성 담체를 히터와 함께 적층하고 히터 전력 등을 고려하여 형상 및 유동 구조를 새롭게 최적화해야 했다. 이를 위해 본 연구에서는 실험을 통해 검증된 촉매 내부의 열전달 구조를 적용한 2차원 다물리 해석모델을 구축하여 상당한 연산 속도를 확보하였다. 본 해석모델을 활용하여 전기 가열 촉매식 가

솔린 미립자 필터(EH-cGPF) 설계 최적화에 상당한 시간과 비용을 절감할 수 있었다.

2. 연구 방법

2.1 검증 실험

히터의 가열 성능을 확인하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구축하였다. EH-cGPF의 전단에 위치한 압축기로 20 °C 공기를 공급하였다. EH-cGPF의 후단에 열전대를 위치시켜 촉매 필터를 통과해 나오는 공기의 온도를 측정하였다.

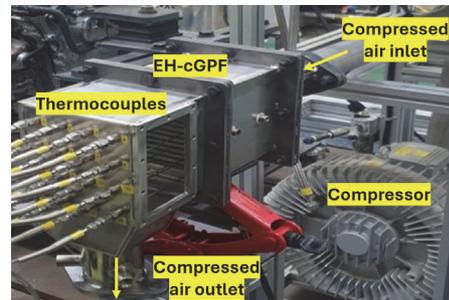


Fig. 1 Experimental apparatus

2.1.1 실험 조건

EH-cGPF는 SiC(Silicon carbide)로 제작되었다. SiC는 높은 다공성 물질로 디젤 입자상 물질 필터(DPF: diesel particulate filter)에 사용되고 있다. 판 표면은 대상 차량의 삼원 촉매와 동일한 방식으로 처리되어 삼원 촉매의 기능을 한다. 즉, 판 표면을 흐르며 HC, CO, NOx를 처리하며 다공성 물질인 판을 통과하며 입자상 물질을 정화하도록 설계되었다. 각 판은 Fig. 2와 같이 2층 구조로 되어 있고 120×120×120 mm³의 하우징에 총 19개가 적층되어 있다. 각 촉매 필터 판 사이에 히터가 위치한다.

히터 전력당 출구 온도를 도출하고자 Table 1과 같이 다양한 전력을 히터에 인가하였다. 출구 온도 안정화를 위해 최소 60초 간격으로 전력을 변화하였다. 공기 유량

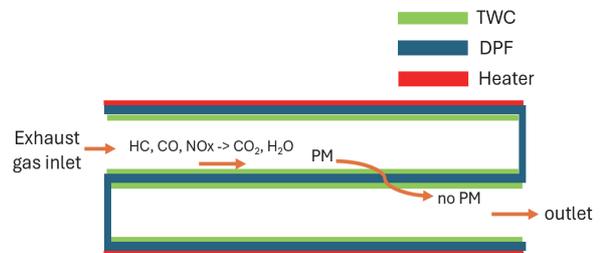


Fig. 2 Internal structure of the 2-layer EH-cGPF

Table 1 Electrical power to the heater

Time (sec)	Voltage (V)	Current (A)	Power (kW)
70	10	22.9	0.23
130	20	47.7	0.95
180	30	72.7	2.18
430	40	98.7	3.95
550	48	118.6	5.70

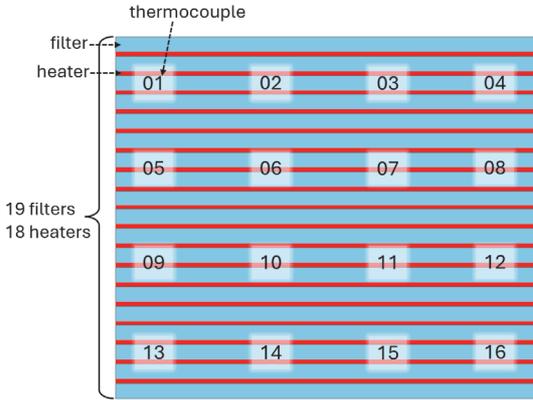


Fig. 3 Front view of EH-cGPF and 16 thermocouples

은 13 kg/h로 고정하였다. 출구에서 가스 온도는 4×4로 위치한 16기의 열전대(Thermocouple)로 측정하였다. 16기의 열전대는 Fig. 3과 같이 번호를 부여하였다.

2.2 해석 모델 구축

2.2.1 해석 모델 형상 및 구조

다양한 열전달 과정을 해석할 수 있는 다물리모델을 구축하기 위해 상용 해석 프로그램(COMSOL Multiphysics 6.1., COMSOL AB, Sweden)을 활용하였다.

히터에 의한 촉매 필터 가열 특성을 확인하기 위해 유동 방향과 수직인 면의 형상을 2차원적으로 구축하였다. 배기가스가 통과하는 사각형 관은 내부유동에 의한 대류를 적용하고, 상하부에 히터로부터 전도 열전달을 모사하기 위한 Heat flux가 적용되었다.

Fig. 4는 필터-히터 구조의 영향을 분석하기 위해 준비한 세 종류의 구성을 보여준다. EH-cGPF는 동일한 하우징 체적에서 38개의 1층 필터와 37개의 히터로 구성하거나 19개의 2층 필터와 18개의 히터로 구성할 수 있다. 13개의 3층 필터와 12개의 히터로도 유사한 수준의 체적으로 제작할 수 있다.

모든 히터에 병렬식으로 전력을 인가하기 때문에 히터가 많으면 개당 인가 전력이 낮아지고 반대의 경우 히

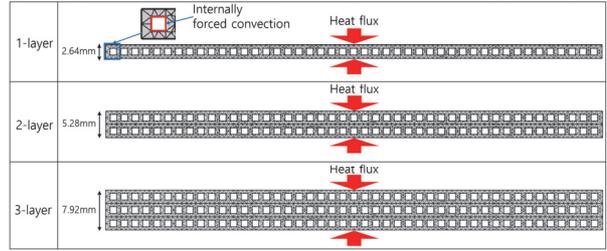


Fig. 4 Internal structures of 1-layer, 2-layer, 3-layer filters

터당 전력이 높아진다. 따라서 필터의 면적당 유입되는 열에너지는 필터와 히터 개수와 무관하게 일정하다.

가열 특성을 평가하기 위한 대표값으로 체적 평균 온도를 활용하였다. 체적 평균 온도는 구조물 내 모든 격자에서 도출한 온도의 산술 평균이다.

필터의 층을 결정하기 위해 내부 온도 편차를 우선적으로 고려하지만, 구조적 안정성과 히터 최대 온도도 고려해야 한다. 1층 필터는 필터 내 온도가 가장 균일하게 분포하지만 2.64 mm의 두께로 인해 강성 측면에서 불리하다. 반대로 층이 너무 많으면 각 히터에 인가하는 전력이 커서 히터가 과열될 수 있다. 본 연구에서는 1~3층 구조의 필터의 가열 특성을 분석하였다.

또한 시간에 따른 온도 변화를 확인하기 위해 Time-dependent solver¹⁴⁾를 사용하였다.

2.2.2 히터 운용 전략

히터에 인가하는 전력과 인가 시간은 필터에 공급하는 총 열에너지를 결정한다. 엔진 시동 전에 필터를 예열하고자 하므로 전력 인가 시간은 시동 전 운행 준비 기간에 해당한다. 이 기간은 운전자에 따라 편차가 있지만 본 연구에서는 30초 정도가 최대 허용 시간으로 보고 10, 15, 20, 30초 예열과 10초간 시동 후 추가 가열 전략을 평가하였다.

EH-cGPF를 장착할 대상인 가솔린 하이브리드 차량은 1.5 kWh 배터리를 장착하고 있다. 7 kW로 60초 동안 전력을 공급하면 총 116.7 Wh의 에너지를 인가하는 것이며 이는 대상 차량의 배터리 용량을 고려할 때 충분히 적용할 수 있는 수준이다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 2~7 kW 전력을 최대 40초를 인가하여 최적 전략을 도출하였다. 또한 7 kW 60초 케이스를 통해 최대 가열 시 내부 온도 분포를 분석하였다.

2층 필터의 경우 총 18개의 히터가 위치한다. 따라서 3 kW는 히터당 166.7 W의 전력이다. 그리고 각 히터는 상하 접촉면으로 동일하게 전력이 분산된다고 가정할 수 있다. 따라서 본 모델에서는 83.3 W의 전력을 상하부면에 각각 인가했다.

Table 2 Energy (J) supplied on the single heat flux in the 2D model

# layer	Time (s)	Power (kW)					
		2	3	4	5	6	7
1-layer	20	541	811	1,081	1,351	1,622	1,892
	25	676	1,014	1,351	1,689	2,027	2,365
	30	811	1,216	1,622	2,027	2,432	2,838
	40	1,081	1,622	2,162	2,703	3,243	3,784
2-layer	20	1,111	1,667	2,222	2,778	3,333	3,889
	25	1,944	2,917	3,889	4,861	5,833	6,806
	30	1,667	2,500	3,333	4,167	5,000	5,833
	40	2,222	3,333	4,444	5,556	6,667	7,778
3-layer	20	1,667	2,500	3,333	4,167	5,000	5,833
	25	2,917	4,375	5,833	7,292	8,750	10,208
	30	2,500	3,750	5,000	6,250	7,500	8,750
	40	3,333	5,000	6,667	8,333	10,000	11,667

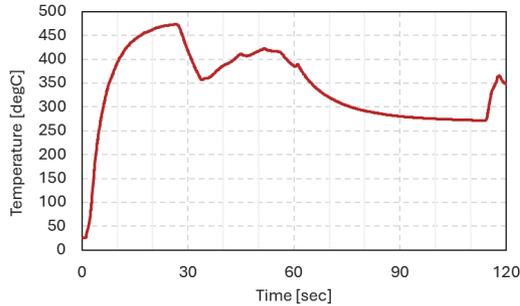


Fig. 5 Exhaust temperature at idling with respect to time

Table 2는 전력(kW), 인가 시간(s), 필터 구조(Layer)의 영향을 분석하기 위해 수행한 케이스의 에너지를 보여 준다. 전체 인가 시간 중 마지막 10초에 엔진 시동이 걸렸다. 따라서 마지막 10초는 배기가스와 히터에 의해 가열되었다. 예를 들어 40초 케이스는 30초의 예열과 10초의 시동 후 추가 가열이다. 촉매 필터 체적당 에너지는 필터 층 수와 무관하게 일정함을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 대상 차량의 시동 후 측정된 배기가스 온도 그래프이다. 배기 온도 측정 열전대는 엔진 배기 매니폴드 후단과 삼원 촉매 입구 사이에 위치하였다. 엔진은 120초간 공회전(Idle) 상태를 유지하고 있었다. 이 가스 온도를 Fig. 4의 촉매 필터 유동 공간의 내부 강제 대류(Internally forced convection)에 적용했다.

3. 결과 및 토의

3.1 해석모델 검증

Fig. 6과 같이 실험에서 16개의 열전대로 측정된 온도는 위치에 따라 상당한 차이를 보였다. 최대 전력을 인가

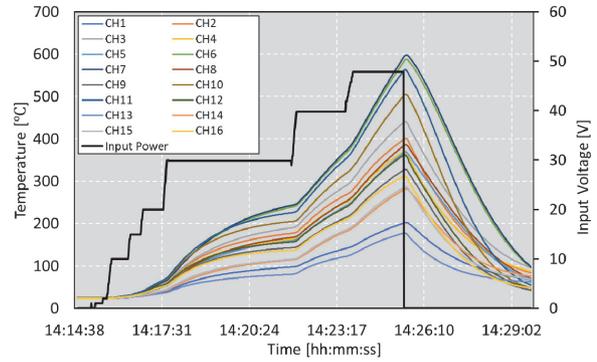


Fig. 6 Measured temperatures and heater input voltages

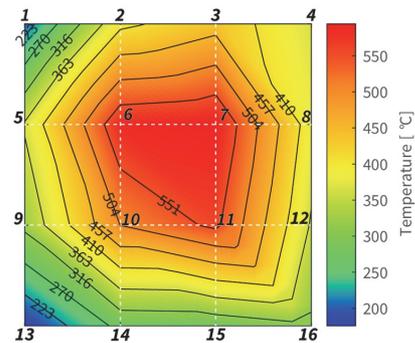


Fig. 7 Exit gas temperature distribution measured by 16 thermocouples at 5.7 kW

Table 3 Statistics of the measured temperatures at 5.7 kW from 16 thermocouples

Parameters	Units	Nominal values
Maximum	°C	597
Minimum	°C	177
Average	°C	386
Standard deviation	-	127
Max-Average difference	%	55
Min-Average difference	%	54

했을 때 출구에서 측정된 온도는 최소 177도에서 최대 597도까지 확인되었다.

Fig. 7은 가장 높은 온도를 기록한 시점에서 16개의 열전대가 측정된 온도이다. 촉매 중심부에 고온부가 형성되었다. 이 온도는 20 °C의 공기가 가열된 촉매를 통과하며 형성된 온도이다. 촉매 내부에서는 중심부에서 높은 유동량이 형성되었을 것으로 추정된다. 또한 촉매 하우징 표면에서 열 발산, 히터와 필터 접촉면 간 편차 등이 내부 온도 편차에 영향을 준 것으로 분석한다.

Table 3에 나오듯이 촉매 중심부에서 평균 대비 최대

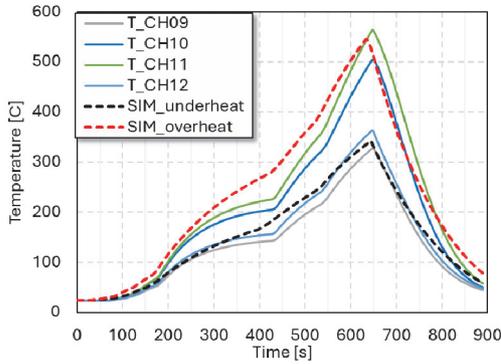


Fig. 8 Measured and predicted temperatures

55 % 높고, 꼭지점 부분에서 54 % 낮은 온도가 형성되었다.

Fig. 8은 해석모델을 검증하기 위해 측정 온도와 해석 결과를 보여준다. 실험에서 확인된 불균일한 가열을 모사하기 위해 분석한 결과 고온부는 Table 1의 전력에 1.5 배(SIM_overheat), 저온부는 0.8배(SIM_underheat) 적용했을 때와 유사한 결과를 보였다. 2차원 해석모델 결과가 전력의 변화에 대한 온도 상승 시점이나 온도 범위를 고려할 때 실험 결과와 적절한 수준으로 일치함을 보여준다.

3.2 형상 구조 영향

Fig. 9는 40초(30초 예열)간 4 kW의 전력을 인가했을 때 세 타입의 촉매 내 온도 분포를 보여준다. 최대 및 최소 온도는 세 타입이 동일한 수준이나 3층 촉매의 경우 중심부 온도가 최대 온도 대비 1 °C 낮다.

Table 4는 전력과 인가 시간에 따른 촉매 필터의 체적 평균 온도를 보여준다. Table 2에서 보듯이 촉매 체적당 인가한 전력량은 같으므로 1-layer, 2-layer, 3-layer 모두 정확히 동일한 값을 얻었다. 최대 전력 케이스인 7 kW로 30초 예열과 10초 추가 가열을 통해 179 °C에 도달하였다. 촉매가 활성화되기 시작하는 온도로 분석된다.

앞서 검증 실험을 통해 촉매 중심부에서 평균 대비 최대 55 % 높은 온도에 도달하는 것을 확인하였다. 따라서 촉매 중심부에서는 Table 4의 평균 온도보다 더 높은 온

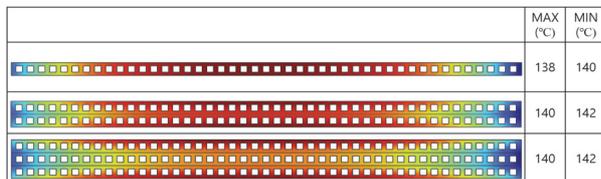


Fig. 9 Temperature distributions of 1-layer, 2-layer, and 3-layer catalyst plates under 4-kW heating for 40 s

Table 4 Predicted volume average temperatures (°C) at 10 s after engine start under various heating powers and durations

Total heat duration (s)	Preheat duration (s)	Power (kW)					
		2	3	4	5	6	7
20	10	88	98	108	113	123	129
25	15	87	100	112	121	133	145
30	20	92	109	124	140	153	162
40	30	102	121	140	164	175	179

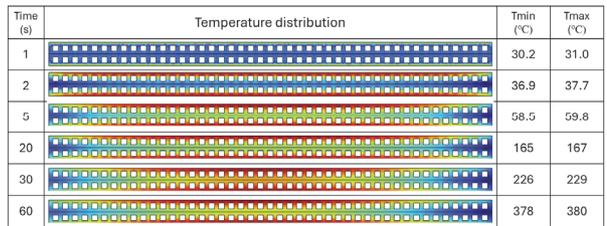


Fig. 10 Temperature distribution in the two-layer catalytic filter

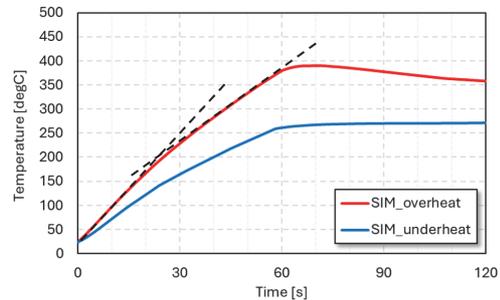


Fig. 11 Predicted temperature traces of the overheat and underheat cases under 7 kW for 60 s

도에 도달할 것으로 보인다. 예를 들어 4 kW-40초의 경우 촉매 내 최대 온도는 평균 온도 140 °C보다 55 % 높은 217 °C가 될 수 있다. 또한 실제 촉매가 활성화되었을 때 산화 과정에서의 발열에 의한 추가적인 온도 상승도 고려해야 한다.

Fig. 10은 2층 구조 촉매를 7 kW로 60초간 가열했을 때 시간에 따른 내부 온도 분포이다. 가열 초기부터 내부 온도 차이는 3 °C 이내이다. 가열 후 30초에 촉매 필터 내부 전 영역에서 촉매 활성화 온도(200 ~ 250 °C)에 도달한다. 배기가스가 30초부터 공급되었기 때문에 전기 히터로 촉매 활성화가 가능함을 보여준다.

Fig. 11은 검증 실험에서 확인한 촉매 필터 내부의 가열 불균형을 모사하기 위해 2층 구조 필터에 7 kW 전력

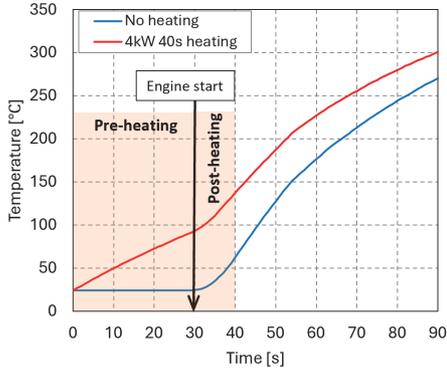


Fig. 12 Predicted temperatures of 4 kW - 40 s heating and no-heating

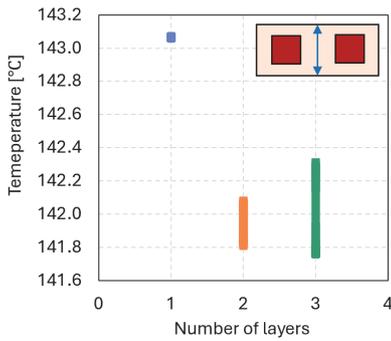


Fig. 13 Predicted temperature variations along the vertical plane by the number of layers

의 150%, 80%를 30초 동안 인가했을 때 온도를 비교한다. 가열 후 30초 시점부터 배기가스에 의해 온도 상승이 다소 낮아진다. SIM_underheat 케이스는 다소 낮게 가열되는 촉매 영역도 30초에 활성화될 수 있음을 보인다.

Fig. 12는 1-layer 촉매의 체적 평균 온도로 4 kW 히터의 가열 성능을 보여준다. 30초 예열 후 93 °C에 도달하고 엔진 시동 후 23초에 200 °C에 도달한다. 이는 4 kW 히터가 촉매 활성화를 15초 단축할 수 있음을 보인다.

Fig. 13은 4 kW로 40초 가열 시 촉매 필터 내부에서 발생하는 온도 분포를 보여준다. 촉매 필터의 층이 많아질수록 온도 폭이 커지지만 3층 구조도 0.6 °C 수준으로 촉매 활성화에 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

4. 결론

삼원 촉매 활성화에 소요된 시간을 단축시키기 위해 전기 히터를 내장한 촉매 필터를 개발하고자 한다. 본 연구에서는 촉매-히터 구조와 예열 전략의 타당성을 검토하였다. 다음은 본 해석 연구의 결론이다.

1) 실험을 통해 다양한 히터 전력에서 출구 온도를 도출

하였다. 또한 16개의 열전대를 통해 출구 단면에서 온도 편차를 확인하였다. 촉매 중심부에서의 온도는 평균 대비 55 % 높았고, 외곽에서는 52 % 낮은 온도가 확인되었다.

- 2) 해석 모델을 통해 SiC계열 담체는 촉매 필터 1판을 3층 구조로 하여도 내부 온도 차이가 최대 2도 정도로 우수한 열전달 특성을 확인하였다. 3층 촉매 필터의 중심부 온도는 1, 2층 구조보다 1 °C 정도 낮았다. 단, 층수가 증가하면 촉매 체적당 같은 에너지를 인가하기 위해 히터당 전력을 향상해야 한다. 따라서 히터 최대 허용 온도를 고려해서 층수를 결정해야 한다.
- 3) 해석 결과 촉매 필터 층수와 무관하게 4 kW 전력으로 30초 예열했을 때 시동 후 23초 만에 체적 평균 온도는 200 °C에 도달할 것으로 예측했다. 이는 히터 없이 배기열에 의해 가열되는 것보다 15초 정도 빠르다. 그리고 실험에서 확인한 대로 촉매 중심에서 고온부가 형성될 경우 부분적이거나 더 빨리 촉매의 LOT에 도달할 것으로 분석한다.
- 4) 활성화된 표면의 면적과 분포를 정확히 평가하기 위해 추후 3차원 모델을 개발할 계획이다. 본 연구의 2차원 모델은 히터로부터 수직 방향 열전달 결과를 기반으로 내부 구조와 가열 전략을 분석했지만, 실제로는 접촉면의 표면 온도를 기반으로 활성화가 결정되기 때문에 3차원 형상이 필요하다. 3차원 모델을 기반으로 최대한 넓고 균등하게 가열되는 방안을 연구하고자 한다.
- 5) 추후 3차원 해석모델에 촉매의 화학 반응을 추가하여 더 정확한 초기 가열 성능 분석을 연구하고자 한다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: 20019072).

References

- 1) J. Ko, K. Kim, W. Chung, C. -L. Myung and S. Park, "Characteristics of On-road Particle Number(PN) Emissions from a GDI Vehicle Depending on a Catalytic Stripper(CS) and a Metal-foam Gasoline Particulate Filter(GPF)," Fuel, Vol.238, No.1, pp.363-374, 2019.
- 2) S. Baek, J. Cho, K. Kim, S. Ahn, C. -L. Myung and S. Park, "Effect of the Metal-foam Gasoline Particulate Filter on the Vehicle Performance in a Turbocharged Gasoline Direct Injection Vehicle

- Over FTP-75,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.21, No.5, pp.1139-1147, 2020.
- 3) J. Lee, Y. Kim, S. Hwang, G. S. Hong, E. Lee, H. Lee, C. Jeong, C. H. Kim, J. S. Yoo and D. H. Kim, “Toward Gasoline Vehicles with Zero Harmful Emissions by Storing NO at Pd Nanoparticle–CeO₂ Interface During the Cold-start Period,” *Chem Catalysis*, Vol.2, No.9, pp.2289-2301, 2022.
 - 4) G. Mahadevan and S. Subramanian, “Experimental Investigation of Cold Start Emission Using Dynamic Catalytic Converter with Pre-Catalyst and Hot Air Injector on a Multi Cylinder Spark Ignition Engine,” SAE 2017-01-2367, 2017.
 - 5) Y. Jiang, G. Song, Y. Wu, H. Lu, Z. Zhai and L. Yu, “Impacts of Cold Starts and Hybrid Electric Vehicles on On-road Vehicle Emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.126, Paper No.104011, 2024.
 - 6) D. V. Velmurugan, T. McKelvey and J. -O. Olsson, “A Simulation Framework for Cold-start Evaluation of a Gasoline Engine Equipped with an Electrically Heated Three-way Catalyst,” *IFAC*, Vol.54, No.10, pp.526-533, 2021.
 - 7) M. T. Nazir, B. Miles, R. Scholz, Z. Florian, F. Bunar and S. Friedemann, “Electrically Heated Catalyst(EHC) Development for Diesel Applications,” *Int. J. Automotive Engineering*, Vol.6, No.4, pp.127-133, 2015.
 - 8) Y. Umezawa, H. Seto, T. Imamura and T. Namerikawa, “Reducing Air Pollutant Emissions and Optimizing Fuel Economy by Controlling Torque and Catalyst Warm-up in Mild HEV via Cascaded MPC,” *IFAC*, Vol.56, No.2, pp.670-675, 2023.
 - 9) B. Pfalzgraf, E. Otto, A. Wirth, P. F. Küper, W. Held and A. Donnerstag, “The System Development of Electrically Heated Catalyst(EHC) for the LEV and EU-III Legislation,” SAE 951072, 1995.
 - 10) S. Canè, L. Brunelli, S. Gallian, A. Perazzo, A. Brusa and N. Cavina, “Performance Assessment of a Predictive Pre-heating Strategy for a Hybrid Electric Vehicle Equipped with an Electrically Heated Catalyst,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.219, Paper No.119341, 2023.
 - 11) S. -H. Woo, H. Jang, K. Noh, M. Lee, S. Kim and H. Kim, “Reduction of WLTC Emissions of Hybrid Gasoline Engine by Using an Electric Heater Embedded and Three-Way Catalyst Coated Particulate Filter,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.2, pp.159-166, 2024.
 - 12) F. Mianzaravand, A. Shirneshan and M. Afrand, “Effect of Electrically Heated Catalytic Converter on Emission Characteristic of a Motorcycle Engine in Cold-start Conditions: CFD Simulation and Kinetic Study,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.127, pp.453-464, 2017.
 - 13) S. -H. Woo, H. Jang, K. Noh, M. Lee, S. Kim and H. Kim, “Reduction of WLTC Emissions of Hybrid Gasoline Engine by Using an Electric Heater Embedded and Three-Way Catalyst Coated Particulate Filter,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.2, pp.159-166, 2024.
 - 14) COMSOL AB., *Heat Transfer Module: User’s Guide*, COMSOL Documentation, 2022.