

48-볼트 가솔린 하이브리드 차량 초기 시동 시 배기 정화 성능 분석을 위한 1차원 전기 히터 촉매 해석 모델 개발

김성수* · 김정환**†

Development of a One-dimensional Numerical Model of the Electrically Heated Three-Way Catalyst For Start-up Heating in a 48-V Gasoline Hybrid Vehicle

Seongsu Kim and Junghwan Kim

Key Words: Electrically heated catalyst(전기 가열 촉매), Gasoline engine(가솔린 엔진), Three-way catalyst(삼원 촉매), Conversion efficiency(전환 효율)

Abstract

Cold-start emissions are given great importance under the Euro-7 emission standard due to their significant impact on overall vehicle emissions. When an engine is started from a cold state, the combustion process is not yet optimized, leading to higher emissions. Hybrid vehicles, in particular, may face additional challenges, as their engine may remain inactive for extended periods, causing their catalysts to cool down and potentially become less effective in reducing emissions. In the present study, the performance of an electric heater was investigated as a means to enhance the catalyst heating during the start-up time. A simulation tool was utilized to develop a model for the gasoline exhaust aftertreatment system. The result indicates that the heater was able to increase the three-way catalyst temperature to 500°C in 4 s using 20 kW power. In addition, the implementation of a secondary air supply resulted in reduced temperature overshoot and improved conversion efficiencies.

기호설명

EHC : 전기 가열 촉매(Electrically heated catalyst)
HC : 탄화수소(Hydrocarbon)
SCR : 선택적 환원 촉매(Selective catalytic reduction)
CC : Close couple
UF : 차량하부(Underfloor)
 λ : 공기과잉률

T_{CC1_in} : CC1 입구 온도
T_{heater} : heater 표면 온도
MAF : 흡기 질량유량(Mass air flowrate)
NOx : 질소 산화물(Nitrogen oxides)

1. 서론

유럽에서 2023년 발표된 새로운 자동차 배기규제(Euro-7 standards)는 초기 시동 시 발생하는 유해배출물(cold emissions)의 획기적인 저감을 요구하고 있다. 이는 특히 하이브리드 차량에 큰 부담으로 작용할 것으로 보인다. 차량 운행 시 엔진 정지가 장기간 지속될 경우 촉매가 비활성화로 이어지게 된다. 이에 대응하기 위해 세계 각국의 업체에서는 촉매를 전기히터로 가열하여

(Received: 11 Sep 2023, Received in revised form: 20 Sep 2023, Accepted: 20 Sep 2023)

*중앙대학교 에너지시스템공학과

**중앙대학교 에너지시스템공학부

†책임저자, 회원, 중앙대학교 에너지시스템공학부

E-mail : jkim77@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5381 FAX : (02)3820-5867

활성온도를 유지하는 전략을 연구하고 있다.

전기 히터 가열 방식은 Euro-III에 대응하기 위해 90 년대에 처음 시도되었다. Pfalzgraf et al.⁽¹⁾은 100 g의 촉매의 온도를 1.1 kW의 전력으로 300°C 상승하는데 15 초 소요됨을 실험적으로 확인했다. 이때 보조 공기 펌프를 통해 시동 시 공기를 추가하여 가스 유량을 증대시켰다. Ramanathan et al.⁽²⁾은 가솔린 하이브리드 차량을 대상으로 이론적으로 2 kW의 예열이 필요하다고 결론을 얻었다. Son et al.⁽³⁾의 연구에서는 FTP75 모드에서 EHC(Electrically heated catalyst)가 CO와 HC(hydrocarbon)의 전환효율 개선에 필요하다는 결론을 발표했다.

촉매 가열 전략은 디젤 엔진 후처리에도 적용하고자 개발되고 있다. Moon et al.⁽⁴⁾은 초기 저온시동 시 urea 증발을 촉진하고 SCR(Selective catalytic reduction) 활성화를 위해 SCR 전단에 전기 히터를 장착하고 목표 온도에 도달하기 위한 전력을 이론적으로 도출하고 실험적으로 검증하였다. Nazir et al.⁽⁵⁾도 유사한 전기 히터의 성능을 실험적으로 분석하였다. 전력 인가 후 히터 내부에 배치한 열전대를 통해 시간별 온도 변화를 측정하였다. Duan et al.⁽⁶⁾은 디젤 엔진과 산화 촉매 사이에 EHC를 위치시켜 실험을 진행한 결과 EHC를 12V 전압으로 1.8 kW를 인가하여 산화 촉매 후단에서의 배기가스 온도의 100°C 도달시간을 약 200초 앞당겼다.

전기 히터를 구동하는데 필요한 전력 소모량을 최소화하기 위해 인가 시간과 타이밍을 최적화하기 위한 연구도 진행되었다^(7,8).

앞선 연구를 통해 전기 히터 가열 방식이 촉매의 전환효율을 높이는 효과는 검증되었다. 가열 시간을 단축하기 위해 추가 공기를 사용하는 전략의 효과 및 최적화가 필요하다⁽⁹⁾.

2. 해석 모델 및 조건

2.1 전기 히터

Figure 1의 전기 히터는 EHC용으로 제작되었으며 형상 및 제원은 본 연구의 대상차량의 배기가스 용량을 고려하여 선정하였으며 48 볼트 전압을 인가할 수 있게 제작되었다.

2.2 공기 압축기

본 연구에서는 초기 시동 시 충분한 유량을 확보하기 위해 추가 공기(secondary air)를 공급하는 압축기를 모



Fig. 1 Electric heater

Table 1 Specifications of the CC1 and CC2 catalysts

Parameters	CC1	CC2
Element	cerium	PGM
Active site density [mol/m ³]	250	10
Atomic weight [g/mol]	140	195

델에 포함하였다. 추가 공기는 배기가스를 희박하게 하므로 지나친 압축기 작동은 삼원 촉매의 전환 효율을 오히려 낮추기 때문에 최적화가 필요하다.

2.3 삼원 촉매

Table 1은 본 연구에서 해석한 삼원 촉매의 주요 제원을 보여준다. 촉매의 화학 반응 구조는 Ramanathan et al.⁽²⁾의 메커니즘을 적용하였다.

2.4 대상차량

1.6리터 가솔린 하이브리드 차량을 대상 차량으로 선정하였다. 해당 차량은 48 볼트 전력 시스템이 구축되어 있다. 삼원 촉매는 Fig. 2와 같이 CC(Close couple)와 UF(Underfloor) 촉매로 구성되었다. 이 중 CC는 CC1과

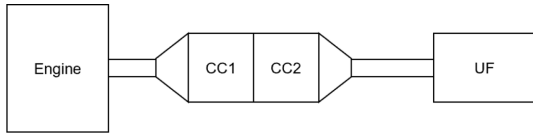


Fig. 2 Engine and aftertreatment system

CC2로 나누어져 있다. 본 연구에서는 초기 시동 시 작동해야 하는 CC1만을 대상으로 모델을 구축하였다.

2.5 해석 모델 구조

본 연구에서는 상용 해석 코드(GT-SUITE, Gamma Technologies, U.S.A.)로 가솔린 차량용 삼원 촉매에 전기 히터와 공기 압축기를 장착한 1차원 해석모델을 구축하였다. 해석 모델을 활용하여 전압, 전류, 전압 인가 시간 등 다양한 운영 조건에서 촉매 성능 특성을 분석하였다.

해석 모델은 2개의 유동로를 기반으로 한다. Fig. 3에서 보듯이, EHC와 삼원 촉매를 지나는 배기가스가 주 유동로(flow circuit 1)이고 압축기를 통해 확보한 추가 공기를 독립적인 유동로(flow circuit 2)로 구축되었다. 압축기 배기구에서의 압축공기 정보는 배기 flow circuit 1으로 전달되어 유량을 증대시키고 배기가스의 화학 구성을 변화시킨다. 압축기와 히터는 배터리로부터 전력을 공급받아 두 장치가 소모하는 전력을 파악할 수 있다.

히터 제어부는 히터 표면 온도와 CC1 입구에서의 가

스 온도를 모니터링하며 전압과 인가 시간을 조절한다. 피드백 제어를 통해 CC1 입구 온도가 목표 온도에 도달했을 때 자동으로 히터를 작동 중지시킨다. 또한 히터

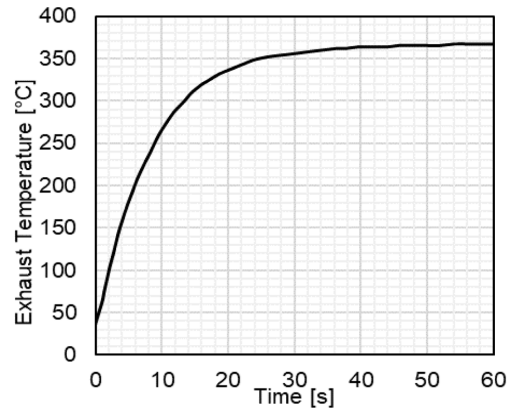


Fig. 4 Exhaust temperature trace with respect to time

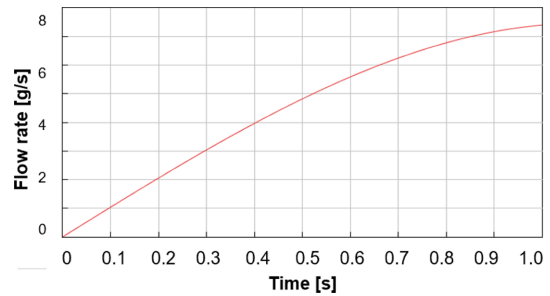


Fig. 5 Exhaust mass flow rate with respect to time

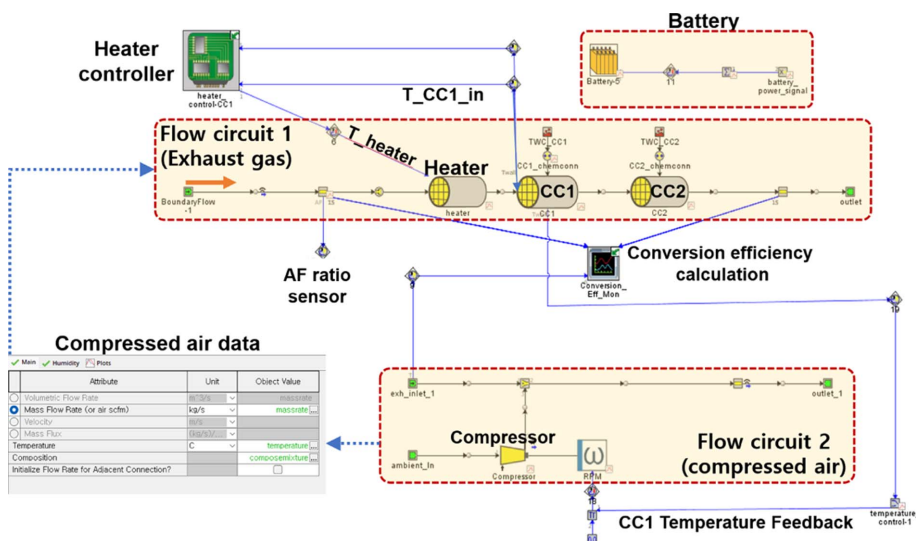


Fig. 3 Schematic of the 1D aftertreatment system model

를 보호하기 위해 히터 표면 온도가 작동 온도를 넘게 되면 작동 중지시키는 기능도 포함한다.

Figures 4-5는 초기 시동 시 배기 가스 온도와 질량 유량 곡선이며 대상 차량과 동급의 가솔린 차량의 배기 정보를 기반으로 한다. 배기가스 온도는 CCI 전단에서 측정하였다. 배기 유량은 차량에 장착된 흡기 유량(MAF: Mass air flowrate) 센서로 측정된 흡기 공기량과 ECU의 연료량 정보를 기반으로 계산하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 히터-압축기 조합 성능 분석

히터와 압축기의 운전 특성을 비교하기 위해 아래 Table 2와 같은 두 케이스를 비교하였다. 히터와 압축기를 모두 작동하는 방식(Case A)과 히터만 작동시켜 배기가스를 가열시키는 방식(Case B)의 성능 차이를 분석하고자 하였다.

전기 히터에는 20 kW의 전력을 20초간 작동시켜 총 약 400 kJ의 에너지를 인가하였다. 이로 인해 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 히터 출구에서의 온도는 45초만에 550°C에 도달함을 확인했다.

Figure 7에서 보듯이 Case A는 가스 유량이 10.3 g/s으로 이는 배기가스에 약 3 g/s의 공기를 추가했음을 알 수 있다. 압축기는 초기 3초만 구동하여 시동 후 약 10

Table 2 Two cases for comparison

	Heater	Compressor
Case A	On	On
Case B	On	Off

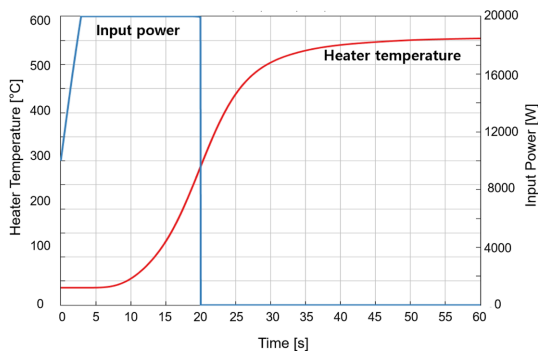


Fig. 6 Heater power and temperature with respect to time

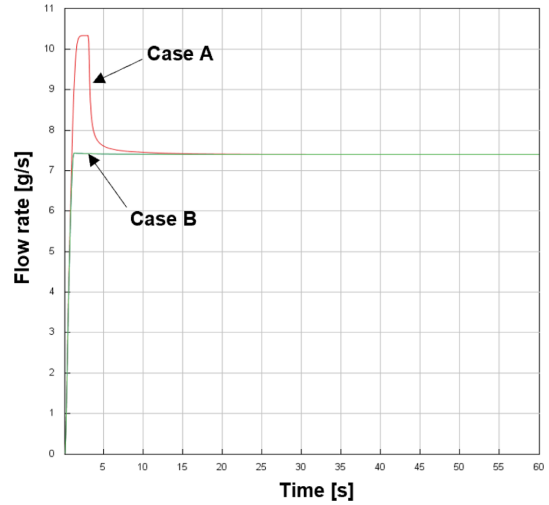


Fig. 7 Gas flow rates of the two cases

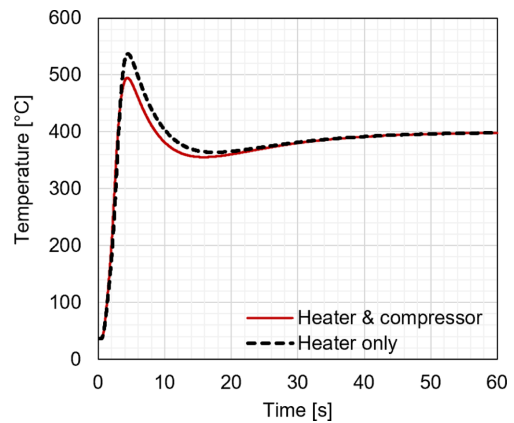


Fig. 8 Gas temperature traces of the two cases

초내에 유량이 Case B의 수준으로 감소하였다.

높은 가스 유량은 대류를 증가시켜서 촉매를 가열하는 데 적합하지만 배기를 희석시키기 때문에 전환 효율에 오히려 악영향을 끼칠 수 있어 최적화가 필요하다.

Figure 8는 목표 온도인 300°C에 3초 내에 도달하여 촉매를 빠르게 활성화시키는데 성공할 수 있음을 확인했다. 이는 배기가스만으로는 17초가 걸리는 것에 비해 훨씬 향상된 결과이다. 가솔린 차량의 HC와 CO의 80% 정도가 시동 시 배출되므로⁽¹⁰⁾ warmup 시간 단축은 배출량을 상당히 감소시킬 것으로 보인다. 또한 압축기를 작동시켰을 때 overshoot 현상을 억제할 수 있음을 보여준다. 추가 공기가 온도 상승 속도를 늦추지 않으면서도

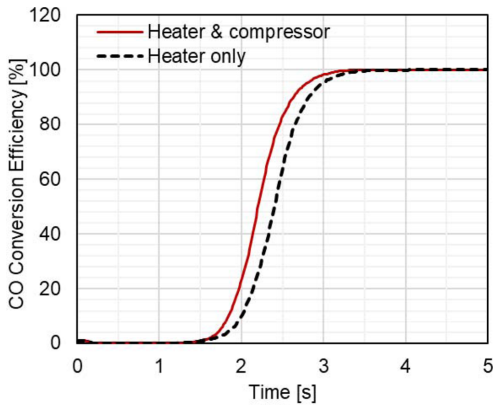


Fig. 9 CO conversion efficiencies of the two cases with respect to time

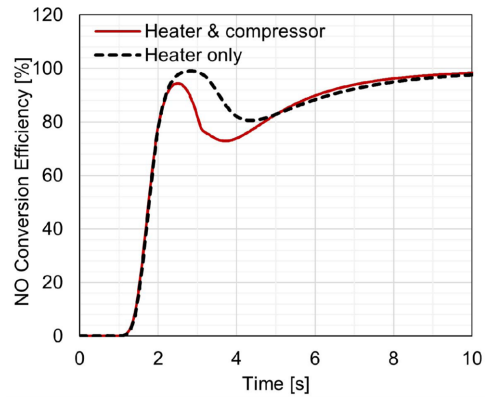


Fig. 11 NO conversion efficiencies of the two cases with respect to time

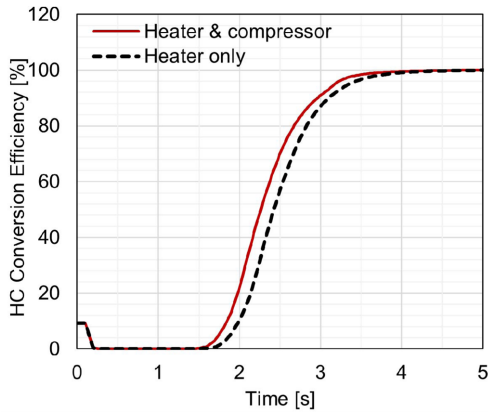


Fig. 10 HC conversion efficiencies of the two cases with respect to time

overshoot을 억제하였다.

3.2 전환효율 비교

Figure 9는 추가 공기 공급으로 CO 전환 효율 증가를 확인하였다. 전환 효율 80%에 0.3초 정도 빨리 도달하였으며 이는 과도 기간(1.5~3.5초)에서 20% 효율 증가를 뜻한다. 압축기 작동으로 HC 전환효율도 목표 값에 빠르게 도달함을 Fig. 10에서 확인하였다.

Figure 11에서 보듯이 CO와 HC와는 달리 NOx (Nitrogen oxides)는 압축기의 작동이 더 낮은 효율을 보였다. 이는 압축기로 공급된 추가 공기로 인해 이론 공연비 상태의 배기가스가 희박($\lambda > 1.0$) 하게 된 결과로 보여 진다.

4. 결 론

가솔린 차량의 초기 시동 시 HC와 CO 배출량을 줄이기 위해 전기히터와 공기 압축기로 고온의 가스를 발생시켜 삼원 촉매를 가열시키는 전략의 성능을 평가하기 위한 1차원 해석 모델을 구축하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

배기가스만으로 가열시킬 경우 목표온도 300°C까지 약 17초가 소요되는 데 반해 공기 압축기로 가스량을 증대할 경우 3초만에 목표온도에 도달함으로써 공기압축기의 가열 성능 향상을 확인하였다.

본 연구로 구축한 전기 가열 방식 후처리시스템 해석 모델의 신뢰성을 향상시키기 위해 향후 EHC(Electrically heated catalyst)를 장착한 삼원 촉매를 대상으로 실험적 검증이 필요하다.

후 기

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

참고문헌

(1) B. Pfalzgraf, E. Otto, A. Wirth, P.F. Kuper, W. Held, A. Donnerstag, "The System Development of Electrically Heated Catalyst (EHC) for the LEV and EU-III Legis-

- lation”, SAE Technical Paper, 951072, 1995.
- (2) K. Ramanathan, S. Oh, and E.J. Bissett, “Electrically Heated Catalysts for Hybrid Applications”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, No. 14, 2011, pp. 8444~8467.
 - (3) G.S. Son, Y.R. Lee, and G.Y. Lee, “Theoretical Study for Vehicle Applications of Electrically Heated Catalyst (EHC)”, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 5, No. 3, 1997, pp. 15~26.
 - (4) S. Moon, S. Park, J. Son, K. Oh, S. Jang, “Simplified Modeling and Analysis of Surface Temperature Distribution in Electrically Heated Catalyst for Diesel Urea-SCR Systems”, *Energies*, Vol. 15, No. 17, 2022, pp. 6406.
 - (5) N. Muhammad Tahir, B. Biles, S. Robert, Z. Florian, B. Frank, S. Friedemann, “Electrically Heated Catalyst (EHC) Development for Diesel Applications”, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 6, No. 4, 2015, pp. 127~133.
 - (6) L. Duan, P. Tan, J. Liu, Y. Liu, Y. Chen, D. Lou, Z. Hu, “Emission Characteristics of a Diesel Engine with an Electrically Heated Catalyst under Cold Start Conditions”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 380, 2022, pp. 134965.
 - (7) M.R. Hamed, O. Doustdar, A. Tsolakis, J. Hartland, “Energy-Efficient Heating Strategies of Diesel Oxidation Catalyst for Low Emissions Vehicles”, *Energy*, Vol. 230, 2021, pp. 120819.
 - (8) M. Presti, L. Pace, L. Poggio, and V. Rossi, “Cold Start Thermal Management with Electrically Heated Catalyst: A Way to Lower Fuel Consumption”, SAE Technical Paper, 2013-24-0158, 2013.
 - (9) D. Vilwanathan Velmurugan, T. McKelvey, and J. Olsson, “Data-Driven Near-Optimal On-Line Control for an Electrically Heated Catalyst-Equipped Gasoline Engine”, *SAE Int. J. Engines*, Vol. 16, No. 3, 2022, pp. 335~346.
 - (10) N. Konagai, T. Takeshita, N. Azuma, A. Ueno, “Preparation of Fe-Cr Wires with Dispersed Co_3O_4 as an Electrically Heated Catalyst for Cold-Start Emissions”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 45, No. 9, 2006, pp. 2967~2972.