

인젝터 및 흡기관 카본 세척이 디젤자동차 배출가스에 미치는 영향에 관한 연구

김종우^{1*}, 홍종인², 윤세영²
¹인하공업전문대학 자동차공학과, ²(주)볼스원 연구소

Effect of carbon cleaning of injector and intake system on diesel vehicle emissions

Jongwoo Kim^{1*}, Jongin Hong², Seyoung Yoon²
¹Department of Automotive Engineering, Inha Technical College
²Technical Center, Bullsone Co. Ltd

요약 미세먼지로 인한 대기오염이 날로 심각해짐에 따라 디젤자동차의 배출가스 규제는 지속적으로 강화되어오고 있다. 이와 같이 강화되는 배출가스 규제 만족을 위해 매연저감장치(DPF), 선택적 환원 촉매(SCR) 장치 등이 디젤자동차에 탑재되어 출시되고 있다. Euro 4, 5 규제 만족 디젤자동차의 경우 질소산화물(NOx)을 줄이기 위해 흡입 공기의 최대 40%까지 배기가스를 흡기관으로 재순환시키는 EGR 방식을 사용하고 있으며 이 경우 배기가스 중에 포함된 다량의 매연 성분들이 흡기계에 축적되어 엔진의 성능저하, 연비 저하, 유해 배출가스를 증가시키는 문제를 발생시키게 된다. 이번 연구에서는 9만km 이상 주행한 디젤 차량의 인젝터, 흡기다기관, 스로틀 플랩, EGR cooler 등을 세척하여 세척 전과 세척 후의 배출가스 및 연비를 측정하여 그 결과를 비교하였다. 시험은 Euro 5 디젤 차량을 대상으로 차대동력계상에서 디젤 운행차 시험모드인 KD-147 모드로 실험하였고, 배출가스 분석기를 통해 NOx, 매연을 측정하여 modal 분석을 하였다. OBD 스캐너를 통해 엔진 및 배출가스 저감장치 데이터를 취득하여 결과 분석에 활용하였다. 시험 결과 인젝터 및 흡기시스템에 축적된 카본을 클리닝 한 후 매연은 89.5% 저감 되었고 연비는 9.8% 향상된 결과를 얻었다.

Abstract To satisfy the stricter emission regulations, diesel vehicles are equipped with a smoke reduction device (DPF) and a selective reduction catalyst device. In the case of Euro 4 and 5 diesel vehicles, the EGR method that recirculates the exhaust gas to the intake manifold for up to 40% of the intake air is used to reduce nitrogen oxide (NOx) emission. In this case, a large amount of soot components contained in the exhaust gas are also recirculated. The soot components accumulate in the intake system and cause problems such as reduced engine performance, reduced fuel efficiency, and increased harmful emissions. In this study, the injector, intake manifold, throttle flap, and EGR cooler were removed and cleaned from a diesel vehicle that covered more than 90,000 km. The exhaust emission and fuel efficiency before and after cleaning were measured, and the results were compared. The test was performed in KD-147 mode, which is an in-used diesel vehicle test mode on a chassis dynamometer for the EURO V diesel vehicle. In this test, the HC, CO, NOx, and soot were measured, and a modal analysis was performed. After the carbon cleaning of the injector and intake system, the amount of soot was reduced by 89.5%, and fuel efficiency was improved by 9.8%.

Keywords : Carbon Cleaning, KD-147, Soot, Fuel Efficiency, OBD

이 논문은 2021년도 인하공업전문대학 산학협력활성화연구사업 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Jongwoo Kim(Inha Technical College)

email: jwkim@inhac.ac.kr

Received July 13, 2021

Accepted November 5, 2021

Revised October 18, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

자동차 배출가스로 인한 대기오염이 날로 심각해짐에 따라 디젤자동차의 배출가스 규제는 지속해서 강화되어 오고 있다[1]. 이처럼 강화되는 배출가스 규제 만족을 위해 디젤자동차에는 디젤 산화 촉매(DOC), 배기가스재순환장치(EGR), 매연저감장치(DPF), 선택적 환원 촉매(SCR) 장치 등이 탑재되어 출시되고 있다[2-5]. Euro 4, 5 규제 만족 디젤자동차의 경우 질소산화물(NOx)을 줄이기 위해 흡입 공기의 최대 40%까지 배기가스를 흡기관으로 재순환시키는 EGR 장치를 사용하고 있으며 이 경우 배기가스 중에 포함된 다량의 매연 성분들이 흡기계에 축적되어 엔진의 성능저하, 연비 저하, 유해 배출가스를 증가시키는 문제를 발생시키게 된다[6]. 또한 디젤 엔진 특성상 압축행정 말기에 연료를 분사하게 되고 이로 인해 불균일 혼합기가 만들어져 연소 과정에서 매연이 다량 발생하고[7] 이것이 고온 고압하에서 주행거리가 늘어날수록 인젝터 노즐 안쪽에 축적되어 분사 패턴에 영향을 주어 연소를 악화시키는 문제를 발생시키게 된다[8]. 국토교통부 자동차등록현황을 보면 2021년 5월 기준 국내 등록된 2,450만대 차량 중 디젤자동차가 990만대로 전체 등록 차량 중 40%를 차지하고, 이중 NOx 저감을 위해 EGR 장치만을 사용하고 제작차 보증 연한이 지난 Euro 3, 4, 5 만족 디젤 차량이 700만대를 차지하여 이에 대한 해결방안 마련이 필요하다[9]. 이번 연구에서는 9만km 이상 주행한 디젤 차량을 대상으로 인젝터, 흡기다기관, 스로틀 플랩, EGR cooler 등을 엔진에서 탈거하고 이곳에 축적된 카본 성분을 세척 하여 세척 전과 세척 후의 배출가스 및 연비를 측정하여 그 결과를 비교하였다. 시험은 Euro 5 디젤 SUV 차량을 대상으로 차대 동력계에서 디젤 운행차 검사 모드인 KD-147 모드로 실험하였고, 배출가스 분석기(Met 6.3)를 통해 NOx, 매연을 측정하여 modal 분석을 하였다. OBD 스캐너를 통해 엔진 및 배출가스 저감장치 데이터를 취득하여 실험 결과 분석에 활용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 차대 동력계는 운행차 배출가스 측정에 사용되는 제품으로 최대 500마력까지 측정할 수 있다. Maha사(독일), MET6.3 배출가스 측정 장비를 사용

하여 실험대상 차의 매연과 NOx를 측정하였다. 자세한 분석기 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Technical data of MET 6.3

| Model | Met 6.3 (Maha) |
|---------------------|--|
| Measuring principle | -NO, NO2: Electrochemical cell -Smoke: opacity |
| Measurement range | -NO: 0-5,000ppm -NO2: 0-500ppm -Smoke: 0-100% |

2.2 실험 방법

인젝터 클리너 500ml를 연료 70L에 섞어 주입한 후 700km 실도로 주행 후 인젝터를 엔진에서 탈거하여 인젝터 유량 시험과 분사 패턴 시험을 진행하였다. 디젤 운행차 검사 모드인 KD-147 모드를 주행하면서 인젝터 및 흡기관 클리닝 전, 후 배기가스를 3회씩 측정하여 평균을 내어 그 결과를 비교하였다. 또한 엔진 주행데이터 취득을 위해 OBD 스캐너(오토비즈사, Hi-Scan CM)를 사용하였다. 흡기관 세척은 모터툴사의 고압세척기(MT-500)를 사용하였다. Table 2는 세척전, 후 흡기시스템 내부 모양이다.

Table 2. Comparisons of intake system between before cleaning and after cleaning

| | Before cleaning | After cleaning |
|-----------------|--|---|
| Throttle flap |  |  |
| Intake Manifold |  |  |
| EGR Cooler |  |  |

3. 결과 및 고찰

3.1 시험 차량

본 연구에서 사용한 차량은 9만2천km 주행한 Euro 5 디젤 SUV 차량으로 차량 제원은 Table 3과 같다.

Fig. 1은 차대 동력계 상에서 주행하는 광경이다.

Table 3. Technical spec. of test vehicle

| | |
|-----------------|--------------------|
| Vehicle | SUV, MY2013 |
| Powertrain | 2.0L E-VGT, AT6 |
| Mileage | 92.179km |
| Emission system | DOC+DPF, LP/HP EGR |
| Emission level | Euro 5 |



Fig. 1. View of emission test of test vehicle driving with kd-147 mode

3.2 인젝터 유량 시험

인젝터 클리너 주입 후 700km 주행한 디젤 차량에서 탈거한 인젝터를 대상으로 세정제 사용 전, 후의 인젝터 유량을 측정 그 결과를 비교하였다. 유량 측정 시험기는 모터툴사의 MT-5600 장비를 사용하였으며 장비의 제원과 시험 장면은 Table 4, Fig. 2와 같다.

Table 4. Technical spec. of injector tester

| | |
|--------------------|--------------------|
| Model | MT-5600(Motortool) |
| Injection pressure | 0-2,000bar |
| Motor | 3 phase, 3 HP |



Fig. 2. Injector tester

인젝터 유량 시험 결과는 Table 5와 같다. 인젝터 세정 후 유량 측정값이 규정 값을 만족시키는 결과를 보인다. 여기서 규정 값은 인젝터 생산회사(보쉬)에서 해당 엔진에 맞게 설정한 값이다.

Table 5. Summary

(unit: cc)

| | Idle | Pilot | Middle | Max |
|-----------------|------|-------|--------|------|
| Standard | 2.7 | 3.0 | 10.0 | 15.8 |
| #3 before clean | 3.0 | 3.0 | 10.2 | 16.0 |
| #3 after clean | 2.6 | 3.0 | 10.0 | 15.7 |

3.3 인젝터 노즐 홀 비교

인젝터 세정제 효과 검증을 위해 전자현미경을 이용하여 인젝터 노즐 홀을 비교하였다. 시험에 사용한 전자현미경 사양과 측정 사진은 Table 6, Fig. 3과 같다.

Table 6. Technical spec. of electron microscope

| | |
|---------------|---------------------------|
| Model | AIS2300C(SERON) |
| Magnification | 10X-1,000,000X |
| Resolution | 3.0nm@30kV SE/4.0nm @ BSE |

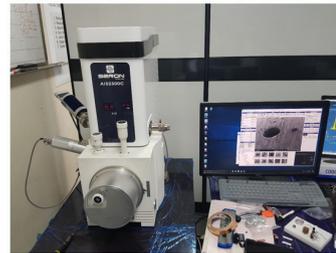


Fig. 3. Scanning electron microscope

시험 결과는 Fig. 4와 같다. 세정 후 인젝터 노즐 홀 비교에서 노즐 홀 주변의 카본이 제거된 모양을 확인할 수 있고 노즐 홀 안쪽의 카본도 제거된 모양을 확인할 수 있다.

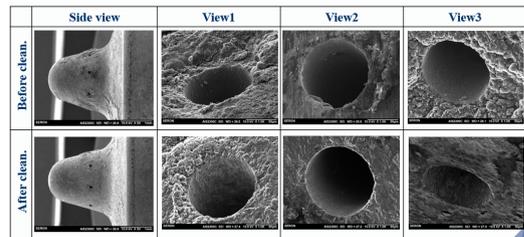


Fig. 4. Comparisons of injector nozzle hole between before cleaning and after cleaning

3.4 분사 패턴 비교시험

연료 세정제 사용 전후의 분사 패턴을 비교하기 위해 노즐을 엔진에 장착하여 분사 시험을 진행했다(Fig. 5-6). 세정제 사용 후의 분사 패턴이 사용 전보다 일정함을 확인할 수 있다. 이를 더 세부적으로 분석하기 위해 분사 각을 비교한 결과는 Fig. 7과 같다.



Fig. 5. Comparisons of injection pattern between before cleaning and after cleaning

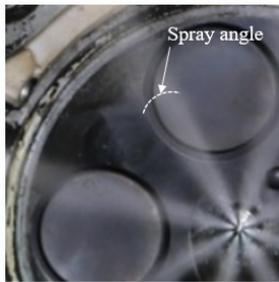


Fig. 6. Spray angle

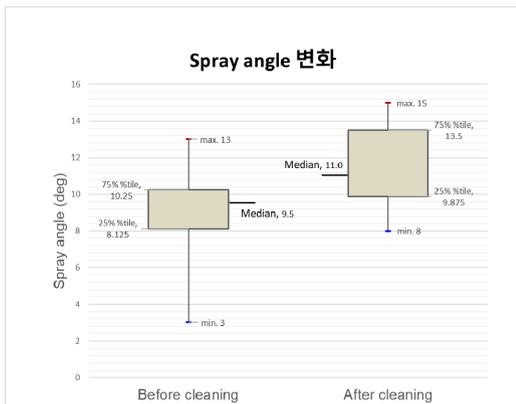


Fig. 7. Comparisons of spray angle between before cleaning and after cleaning

세정 전의 분사 각 표준 편차는 2.97도이고, 세정 후의 분사 각 표준 편차는 2.55도이다. 세정 후 14% 개선된 결과를 보였다.

3.5 배출가스 시험

인젝터 세정제 사용 전후의 배출가스 특성 비교 시험을 운행차 배출가스 시험모드인 KD-147 모드에서 수행하였다. 인젝터 세정 후 매연은 세정 전과 비교해 평균 43.6% 감소한 결과를 보이고 흡기관과 인젝터를 모두 클리닝한 경우 클리닝전 대비 89.5% 감소한 결과를 보인다(Fig. 8). 이 결과를 엔진 부하별, rpm 별로 분석하면 인젝터만 세정한 경우 고속 고부하 영역에서 세척전과 비교해 매연이 감소하고, 흡기관까지 세척한 경우 전 운전영역에서 매연이 감소함을 알 수 있다(Fig. 9). Fig. 10은 클리닝 전후, 엔진 흡입공기량을 비교한 것이다. 클리닝 전과 비교해 클리닝 후의 엔진 흡입공기량이 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 연소가 촉진되고 매연이 감소한 것으로 판단된다.

인젝터 세정 후 NOx는 세정 전과 비교해 평균 23.5% 감소한 결과를 보이고 흡기관과 인젝터 클리닝한 경우 클리닝전 대비 55.6% 증가한 결과를 보인다(Fig. 11). 인젝터만 세정한 경우 고속 고부하 영역에서 세척전과 비교해 NOx가 감소하고, 흡기관까지 세척한 경우 고속 고부하 운전영역에서 NOx가 증가함을 알 수 있다(Fig. 12).

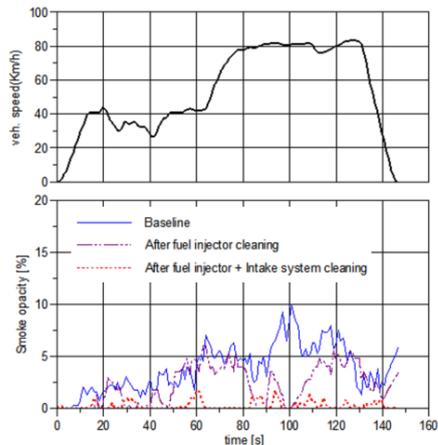


Fig. 8. Comparisons of smoke between before cleaning and after cleaning

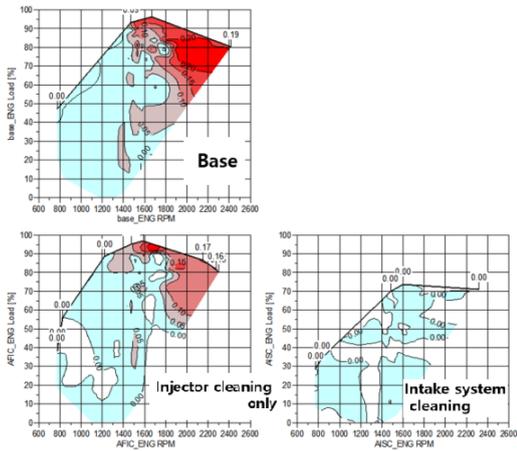


Fig. 9. Comparisons of smoke contour map between before cleaning and after cleaning

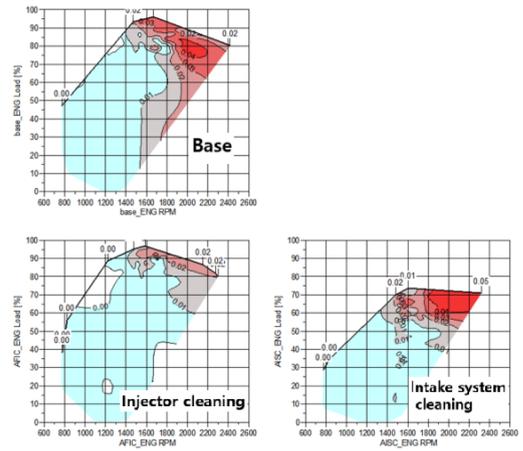


Fig. 12. Comparisons of NOx emission contour map between before cleaning and after cleaning

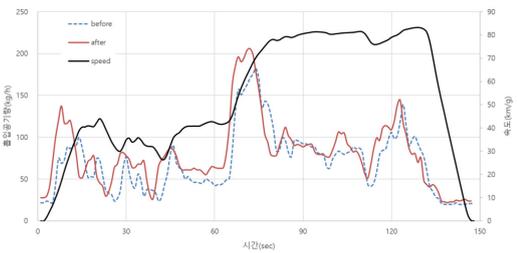


Fig. 10. Comparisons of intake air mass between before cleaning and after cleaning

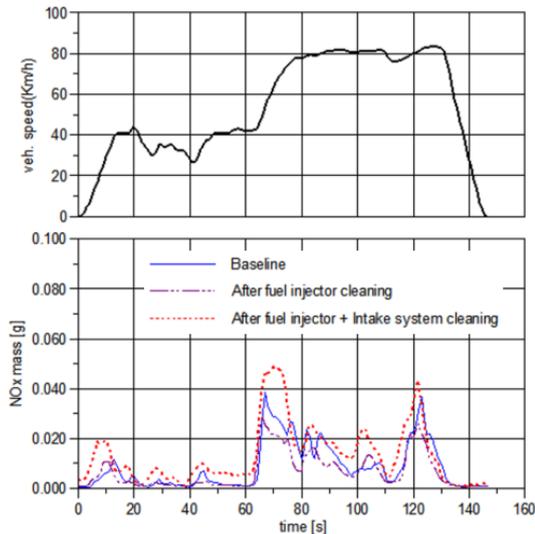


Fig. 11. Comparisons of NOx emission between before cleaning and after cleaning

Fig. 13은 CPF 전단의 배출가스 온도를 나타내는 그래프이다. 인젝터 세척전 대비 인젝터 세정 후 배기가스 온도는 큰 차이가 없었으나 흡기와 인젝터 세척을 모두 한 경우 배출가스 온도가 큰 폭으로 상승함을 알 수 있다. 이것은 흡기관 세정 후 NOx 배출이 증가한 이유가 될 수 있다.

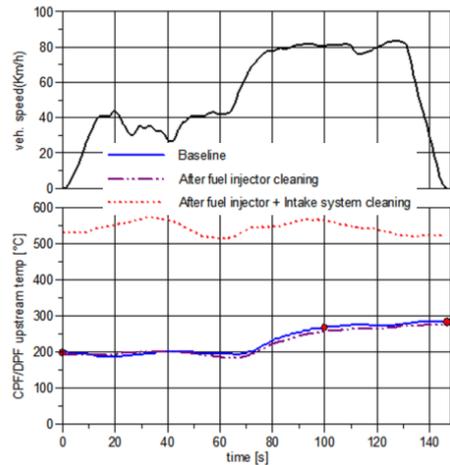


Fig. 13. Comparisons of exhaust temperature between before cleaning and after cleaning

Fig. 14는 클리닝 전후 연료 소모량 비교 그래프이다. 인젝터 클리닝한 경우 클리닝 전과 큰 차이가 없는 반면, 흡기시스템을 클리닝한 경우 최대 엔진 부하가 95%에서 75% 낮아지면서 연료소비율이 9.8% 개선된 결과를 보인다. 이것은 흡기관 클리닝 효과로 공기량이 증가하여

(Fig. 10) 낮은 엔진 부하로도 KD-147모드 주행이 가능하여 고부하 영역에서 연료소모율이 줄어든 것으로 판단된다. 배출가스와 연료소비율 실험 결과는 Table 7과 같다.

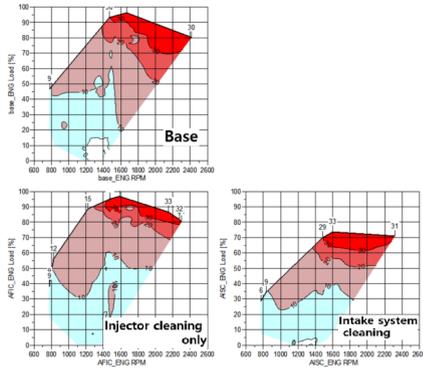


Fig. 14. Comparisons of fuel consumption contour map between before cleaning and after cleaning

Table 7. Summary of test result

| | NOx (g/km) | Smoke (cnts/km) | Fuel economy (km/l) |
|----------------------------|---------------|-----------------|---------------------|
| Before cleaning | 0.58 | 4.60 | 8.9 |
| Injector cleaning | 0.44 (-23.5%) | 2.59 (-43.6%) | 8.8 (-0.1%) |
| Injector & Intake cleaning | 0.90 (103.4%) | 0.27 (-89.5%) | 9.7 (9.8%) |

3. 결론

이상의 시험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 인젝터 유량 시험 결과 세정전 보다 세정 후 규정 값을 만족하는 결과를 보였다.
2. 전자현미경 촬영을 통해 세정 후 인젝터 노즐 안쪽의 카본이 제거된 모양을 확인할 수 있었다.
3. 분사 패턴 시험 결과 세정 후 분사 각도 변화가 세정 전보다 14% 안정된 결과를 보였다.
4. 배출가스 시험 결과 인젝터와 흡기시스템 세정 후 매연은 89.5% 감소하는 결과를 얻었으며 주로 고속 고부하 영역에서 감소 폭이 크게 나타났다. 이는 인젝터와 흡기시스템 클리닝 효과로 인한 분사 패턴 향상과 흡입 유량 증가로 인해 연소가 원활하게 진행된 것으로 판단된다.
5. NOx는 인젝터와 흡기관 클리닝으로 인해 55.6%

증가한 경향을 보인다. 이는 클리닝 효과로 인해 연소가 활발해져 배출가스 온도가 상승한 것으로 판단된다.

6. 연료소비율의 경우 인젝터와 흡기시스템 세척 후 9.8% 향상된 결과를 보인다. 이는 흡입공기량 증가로 낮은 엔진 부하로도 KD-147 모드상에서 고속 고부하 주행이 가능하기 때문으로 판단된다.
7. 이번 연구를 통해 Euro 5 이전 노후 디젤자동차의 경우 인젝터와 흡기시스템 클리닝의 필요성을 확인할 수 있었다.
8. 디젤 차량의 흡기 카본 클리닝 효과에 관한 결과를 보다 객관화하기 위해 다양한 차량에 관한 추가 연구와 클리닝의 적정 주기 산정을 위한 연구가 필요하다

References

- [1] Delphi Technologies, "2019-2020 Worldwide emission standards passenger cars and light duty vehicles", July, 2020.
- [2] Johnson, T., "Vehicular Emissions in Review," SAE Int. J. Engines 9(2):1258-1275, 2016
DOI:<https://doi.org/10.4271/2016-01-0919>
- [3] Beutel, T., Dettling, J., Hollobaugh, D., Kumar, S. et al., "The Demands on DOC Technology in Advanced Euro-IV/V Applications," SAE Technical Paper 2005-26-021, 2005.
DOI:<https://doi.org/10.4271/2005-26-021>
- [4] Kwon, C., Lee, J., Kim, S., and Yeo, G., "Control of Diesel Catalyzed Particulate Filter System II (The Optimization of Catalyst in the CPF System)," SAE Technical Paper 2005-01-0672, 2005.
DOI:<https://doi.org/10.4271/2005-01-0672>
- [5] Kumar, A., Kamasamudram, K., Currier, N., and Yezerets, A., "SCR Architectures for Low N2O Emissions," SAE Technical Paper 2015-01-1030, 2015
DOI:<https://doi.org/10.4271/2015-01-1030>
- [6] Gail, S., Nomura, T., Hayashi, H., Miura, Y. et al., "An Intake Valve Deposit (IVD) Engine Test Development to Investigate Deposit Build-Up Mechanism Using a Real Engine," SAE Int. J. Fuels Lubr. 10(3):2017.
DOI:<https://doi.org/10.4271/2017-01-2291>
- [7] John B Heywood, "Internal combustion engine Fundamentals, Second edition", McGraw-Hill education, 2018, pp.491-493
- [8] Birgel, A., Ladommatos, N., Aleiferis, P., Zülch, S. et al., "Deposit Formation in the Holes of Diesel Injector Nozzles: A Critical Review," SAE Technical Paper 2008-01-2383, 2008K.

DOI:<https://doi.org/10.4271/2008-01-2383>

- [9] Total registered motor vehicles of Korea, 2021.05
<http://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRsId=58&hFormId=5409&hKeyWord=자동차등록&hTotalFlag=Y>

김 종 우(Jongwoo Kim)

[정회원]



- 1988년 12월 : Univ. of Michigan, NA&ME (공학 석사)
- 2000년 1월 : Imperial College, 기계공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 2001년 2월 : 대우 자동차 기술연구소 선임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 자동차공학과 교수

<관심분야>

친환경자동차, 배출가스 시험 및 해석

홍 종 인(Jongin Hong)

[정회원]



- 1997년 2월 : 인하대학교 화학공학과 (공학사)
- 1996년 12월 ~ 현재 : ㈜불스원 연구소 수석연구원

<관심분야>

연료 및 윤활유 첨가제

윤 세 영(Seyoung Yoon)

[정회원]



- 2014년 2월 : 고려대학교 화공생명공학과 (화학공학석사)
- 2014년 1월 ~ 현재 : 불스원 연구소 선임연구원

<관심분야>

연료 및 윤활유 첨가제