

커먼레일 디젤엔진의 운전조건이 나노크기 입자상 물질 배출특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

이형민¹ · 명차리² · 박심수^{*}

(원고접수일 : 2010년 2월 5일, 원고수정일 : 2010년 5월 10일, 심사완료일 : 2010년 5월 12일)

Experimental Investigation of Nano-sized Particulate Matter Emission Characteristics under Engine Operating Conditions from Common Rail Diesel Engine

Hyung-Min Lee¹ · Cha-Lee Myung² · Sim-Soo Park^{*}

요약 : 본 논문은 커먼레일 디젤엔진의 정속운전시 배출되는 나노크기의 입자상 물질을 분석하는데 초점을 두었다. 디젤산화촉매 후단에서 나노입자상 물질의 개수농도 저감수준은 크지 않았으나 매연여과장치 후단에서 분석한 결과 1,000배 정도 저감되는 결과를 확인하였다. 고속·고부하 조건에서는 매연여과장치의 자연재생 효과로 인해 입자상 물질은 증가하였다. 연료분사시기를 BTDC 6°CA 에서 ATDC 4°CA까지 지각시킨 결과 입자상 물질의 개수농도는 감소하였지만 최지각 조건인 ATDC 9°CA에서는 증가하는 결과를 확인하였다. EGR 적용시 핵화모드 입자상 물질은 저감되는 경향을 보였으며 축적모드 입자는 증가하였다.

주제어 : 입자상 물질, 디젤산화촉매, 매연여과장치, 핵화모드, 축적모드

Abstract: The objective of this work presented here was experimental study of steady-state and cold start exhaust nano-sized particle characteristics from common rail diesel engine. The effect of the diesel oxidation catalyst (DOC) on the particle number reduction was insignificant, however, particle number concentration levels were reduced by 3 orders of magnitude into the downstream of diesel particulate filter (DPF). In high speed and load conditions, natural regeneration of trapped particle occurred inside DPF and it was referable to increase particle number concentration. As fuel injection timing was shifted BTDC 6°CA to ATDC 4°CA, particle number concentration level was slightly reduced, however particle number and size was increased at ATDC 9°CA. Nucleation type particle reduced and accumulation type particle was increased on EGR condition.

Key words: Particulate matter, Diesel oxidation catalyst, Diesel particulate filter, Nucleation mode, Accumulation mode

1. 서 론

자동차, 기관차, 선박 등에 탑재되는 디젤엔진의 기술 발달이 인류의 문명생활을 급속도로 발전시켰

다는 것은 부인할 수는 없다. 문명생활의 발전과 더불어 수송수단에서 배출되는 유해 배출가스에 의한 대기오염 및 인체위해성에 대한 논란이 계속되

^{*} 교신저자(고려대학교 기계공학부, E-mail:spark@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3368)

1 해군사관학교 함정기관학과

2 고려대학교 기계공학부

고 있다. 선진국에서 추구하는 대기환경관련 목표 및 방향은 대기 중의 유해물질이 인체위해성에 어떤 영향을 미치는가에 중요성을 두고 있으며 입자상 물질(PM)을 포함하는 디젤엔진의 배출가스를 줄이는 문제를 수송수단에 초점을 두고 정책을 수립하고 있다[1-2].

디젤엔진에서 배출되는 나노 크기의 입자상 물질은 인체 및 대기환경에 부정적인 영향을 미친다는 연구결과들이 지속적으로 발표됨에 따라 그 저감방안에 대한 기술적인 방법들이 연구되고 있다^{[3][4]}. 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질을 저감시키기 위해 매연여과장치(DPF, Diesel Particulate Filter)와 같은 후처리 장치 개발, 고압연료공급방식인 커먼레일 시스템 등 다양한 기술개발이 진행되어 입자상 물질의 중량 저감에는 상당한 기여를 했지만 중량 저감이 나노크기의 입자상 물질의 저감을 의미하지 않는다는 연구결과들이 정설로 받아들여지고 있다[5-6].

나노 크기의 입자상 물질의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 엔진운전조건이며 정속 및 천이 운전조건에서 핵화모드 입자(Nuclei particles, $D_p < 50\text{nm}$)는 천이운전에서 생성되며 축적모드 입자(Accumulation particles, $50\text{nm} < D_p < 1000\text{nm}$)는 고속·고부하 조건에서 대부분 배출된다는 연구결과도 발표되었다[7-8].

본 연구는 디젤엔진의 나노 입자 배출특성에 영향을 미치는 다양한 엔진운전조건, 후처리 장치의 영향 등에 대해서 고속 PM 분석기(DMS500)를 사용해 배기관에서 직접 샘플링 하여 입자상 물질의 개수농도 및 입경분포의 특성을 규명하는데 초점을 두었다.

2. 시험 장치 및 방법

2.1 엔진 시험장치

Figure 1은 커먼레일 디젤엔진의 운전조건에 따라 나노 크기의 입자상 물질 배출특성을 분석하기 위한 시험장치의 구성도이다. 시험장치의 주요 구성은 커먼레일 소형 디젤엔진, EMS(Engine Management System), 고속 입자상 물질 분석장치(Differential Mobility Spectrometer, DMS500) 등으로 구성되어 있으며 시험엔진의 제원

은 Table 1과 같다. 시험연료는 저유황 경유를 사용하였으며 연료의 주요 물성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 나노 입자상 물질 분석 장치

본 시험에 사용된 입자상 물질 측정 장치는 입자상 물질의 입경분포 및 개수 농도측정이 가능한 DMS500이다. DMS500의 측정 반응시간은 최대 200 ms로 엔진의 천이운전 조건에서 정밀하게 측정할 수 있을 뿐만 아니라 엔진의 배기파이프에서 직접 측정할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 열선(heated line) 내부에 1000 nm 이상인 입자를 분리할 수 있는 사이클론이 내장되어 있으며, 별도의 가열 희석장치(heated diluter) 없이 열선 내부에서 입자들이 제거된 공기와 희석시킬 수 있다. Figure 2는 DMS500 측정 장비 및 샘플 흐름도를 나타낸 것이다.

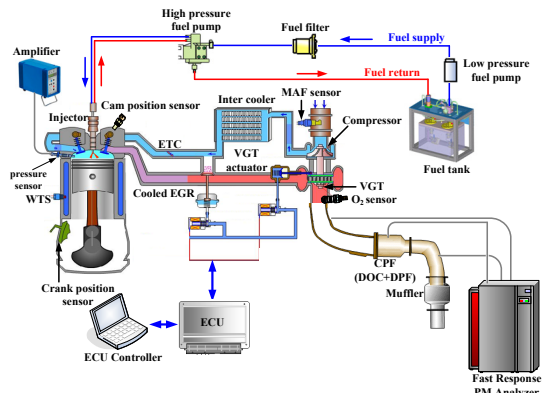


Figure 1: Schematic diagram of common rail diesel engine experimental system

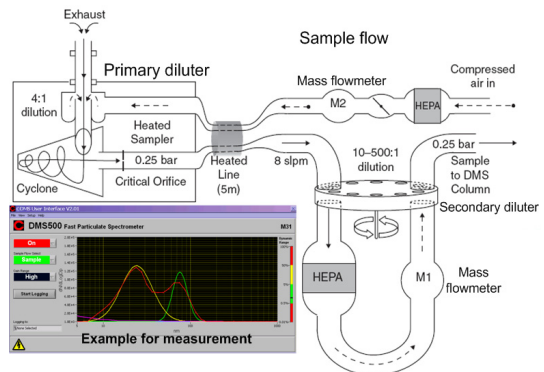


Figure 2: Sample flow for DMS500

Table 1: Specifications of test engine

Engine type	In-line, SOHC
Displacement	2,497 cc
Injection type	Common Rail Direct Injection
Compression ratio	17.7 : 1
Exhaust system	Catalyzed Particulate Filter (DOC+DPF)

Table 2: Properties of diesel fuel

Properties	Unit	Results
Sulfur	mg/kg	6
Cetane number	-	55.2
Density@15°C	kg/m ³	826.9
10% residual carbon	Weight%	0.02
Ash content	Weight%	0.007

2.3 시험 방법

시험엔진의 나노 입자상 물질 측정은 냉시동, 완전 워밍 조건하에서 엔진부하 및 엔진회전수를 변경시키면서 진행되었고 연료분사시기 및 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 변경은 아이들 상태에서 이루어졌다.

Table 3: Engine steady operating conditions

Case	Engine speed(rpm)	Load(Nm)
A	1000	50
B	1500	100
C	1750	150
D	2000	175

정속운전조건에서 입자상 물질의 배출특성을 디젤산화촉매(DOC, Diesel Oxidation Catalyst) 전·후단 및 SiC(Silicon Carbide) 재질의

300cpsi 셀밀도를 가지는 매연여과장치 후단에서 측정하여 분석하였고, 후처리 장치는 일체형으로 구성되어 있다. Table 3은 정속운전시 엔진 시험 조건을 나타낸 것이다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 엔진 운전조건에 따른 입자상 물질의 배출특성

엔진 운전조건에 따른 입자상 물질의 특성을 분석하기 위하여 배기가스 샘플은 후처리 장치의 전·후단에서 이루어졌으며 디젤산화촉매 및 매연여과장치가 입자상 물질의 저감에 미치는 영향도 동시에 분석되었다.

Figure 3은 엔진운전조건에 따라 디젤산화촉매 전단(engine out)에서 측정된 입자상 물질의 개수농도 및 입경분포 특성을 나타낸 결과이다. 입자상 물질의 개수농도는 10⁷ particles/cm³ 수준으로 엔진 회전수 및 부하조건에 따라 차수(order)가 변할 정도로 편차는 심하지 않다. 입자상 물질의 입경분포 특성을 보면 엔진회전수 및 부하가 증가함에 따라 핵화모드(nucleation mode) 및 축적모드(accumulation mode)의 개수농도는 증가하는 경향을 나타냈다.

핵화모드 입자는 고속·고부하 조건인 Case D 영역에서 가장 많이 배출되었으나 축적모드 입자는 Case B 영역에서 배출되는 수준보다 적게 배출되었고 Case C 조건에서 배출되는 수준과 유사한 수준으로 배출되었다. Case B 영역에서 배출되는 핵화모드 입자들의 수준은 Case D 조건보다 적게 배출되지만 축적모드 입자들은 상대적으로 많이 배출되었다는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 디젤산화촉매 후단에서 측정된 입자상 물질의 개수 및 입경분포 특성을 나타낸 결과이다. Figure 3의 결과와 비교했을 때 핵화모드 입자들이 엔진운전조건에 상관없이 디젤산화촉매를 통과하면서 저감되었다는 것을 알 수 있다. 디젤엔진에서 배출되는 유해물질을 저감시키기 위하여 사용되는 후처리 장치로 디젤산화촉매, 매연여과장치, Lean NOx trap 또는 선택적환원촉매(SCR, Selective Catalytic Reduction) 장치 등을 예로 들 수 있다.

디젤산화촉매는 일산화탄소(CO) 및 탄화수소(HC)를 저감시키는데 사용되고 매연여과장치는 입자상 물질 중 고체입자(solid particle)를 포집하는데 효과가 크다. 디젤산화촉매는 가스상으로 존재하는 유기물질(organic fraction)을 저감시켜 입자상 물질로의 생성을 억제하며 특히, 핵화모드 입자를 저감시키는데 효율적이라고 알려져 있다 [9].

시험결과에서 Case A 조건에서는 핵화모드 입자의 개수농도가 최대 2배 정도 저감되었으며, 엔진회전수 및 부하가 상승할수록 가장 많이 배출되었던 10 nm 부근의 입자개수농도가 최대 10배(a order of magnitude) 정도 저감되었다. Case B 조건에서는 디젤산화촉매 전단에서 측정된 결과와 유사한 경향으로 Case D 조건에서 배출되는 수준보다 높게 측정되었다. 축적모드 입자의 경우 Case A 조건에서는 저감되는 결과를 얻지 못하였으며 Case B, Case D 조건에서 개수농도수준은 일부 감소된 경향을 확인할 수 있었으나 핵화모드 입자의 저감효과 만큼 기대하기는 어려울 것으로 판단된다. 디젤산화촉매의 온도가 상승할수록 축적모드 입자도 일부 산화되는 것으로 생각되나 관통형 촉매의 특성상 입자상 물질의 체류시간이 매우 짧기 때문에 대부분 디젤산화촉매를 통과하는 것으로 판단된다.

Figure 5는 매연여과장치의 후단에서 엔진운전 조건에 따른 입자상 물질의 개수농도 및 입경분포의 특성을 나타낸 것이다. Figure 3 결과의 수준과 비교했을 때 1000배 (3 order of magnitude) 정도로 저감되었다.

Case D 조건에서는 다른 운전조건보다 배출수준이 다소 높은 경향을 확인할 수 있는데, 이는 매연여과장치 내부 온도 상승으로 포집된 입자상 물질이 일부 부분 재생되었기 때문이라고 판단된다.

3.2 연료분사시기에 따른 입자상 물질의 배출특성

Figure 6은 연료분사시기에 따른 입자상 물질의 배출수준을 나타낸 결과이다. 핵화모드 입자의 경우 연료분사시기가 BTDC 6°CA에서 ATDC 4°CA까지 지각될수록 핵화모드 입자의 배출수준

은 저감되며 축적모드 입자의 배출수준은 미미하지만 증가하는 것을 확인할 수 있다.

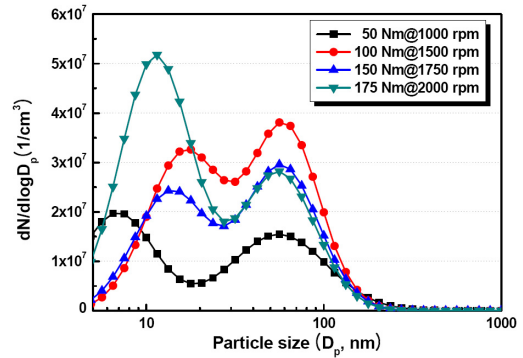


Figure 3: Particle number and size distribution characteristics at upstream of DOC with various engine operations

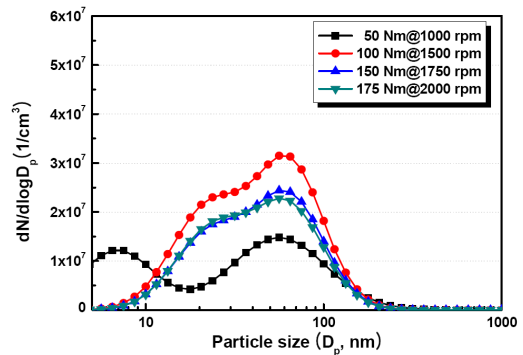


Figure 4: Particle number and size distribution characteristics at downstream of DOC with various engine operations

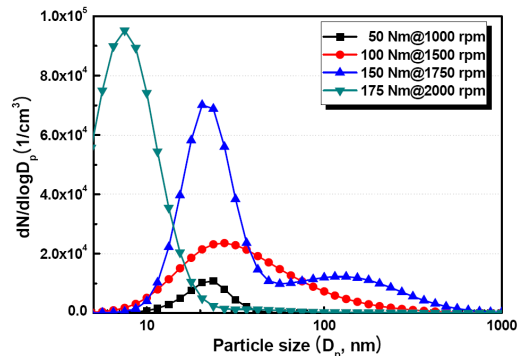


Figure 5: Particle number and size distribution characteristics at downstream of DPF with various engine operations

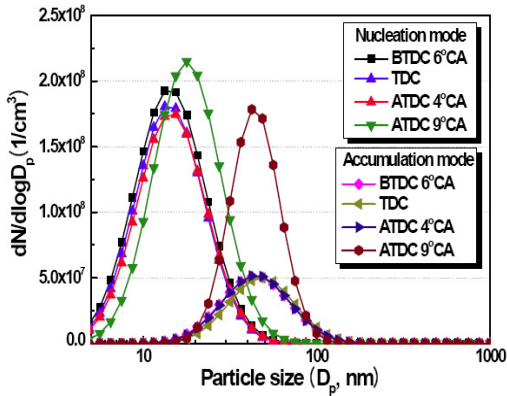


Figure 6: Particle emission characteristics with different injection timings

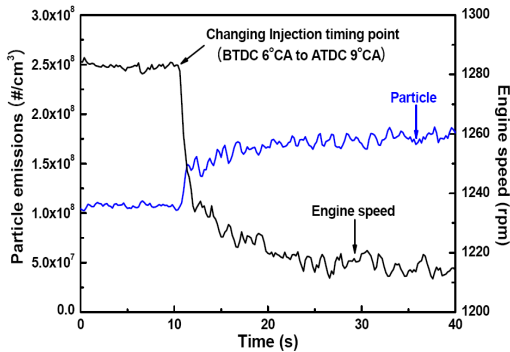


Figure 7: Time resolved particle emission behavior during injection timing transient

이는 연소이후 핵화모드 입자가 응집되어 큰 입자로 성장했거나 solid primary 입자에 흡수 및 부착되어 축적모드 입자의 배출수준이 증가했다고 판단된다.

그러나 ATDC 9°CA로 지각시킨 경우 입자상 물질의 배출수준은 증가하는 것으로 확인되었다. 연료분사시기가 최지각인 경우 배출가스 온도는 후연소 효과에 의해 상승되지만 연소속도 및 연소물질 상태는 떨어지고 후연소에 의한 산화효과는 기대하기 어렵기 때문에 입자상 물질의 배출수준이 증가되었다고 판단된다.

Figure 7은 정속운전조건(Idle 1280 rpm, 완전유휴)에서 연료분사시기를 최진각에서 최지각으로 변경시킬 경우 입자상 물질의 배출특성을 실시간으로 나타낸 결과이다.

연료분사시기가 최진각에서 최지각으로 변경되었을 때 엔진회전수는 떨어지고 입자상 물질의 배출수준은 증가한다. 최지각조건에서 실린더내 연소압이 최진각 조건보다 떨어지기 때문에 엔진회전수는 낮아지며 이때 연소속도가 매우 느려지기 때문에 soot 입자들이 산화될 수 있는 체류시간이 진각조건보다 짧아 입자상 물질 증가의 결과를 가져온다.

3.3 EGR 적용에 따른 입자상 물질의 배출 특성

EGR은 배출가스중 일부를 다시 흡기에 재유입시키는 것으로 혼합기 중에 비열이 큰 이산화탄소 농도의 증가로 연소 때의 온도 저하에 의해 NOx 저감이 가능한 기술이며 소형, 대형 및 선박용 디젤엔진에 널리 사용되고 있다. 그러나 EGR 사용은 NOx 저감에는 효과적이지만 입자상 물질 증가의 원인으로 작용된다.

Figure 8은 입자상 물질의 입경분포별 개수농도를 나타낸 것이다. EGR 시험에서는 EGR 비율에 따른 입자상 물질의 배출특성은 분석하지 않았고 경향을 파악하기 위해 ON/OFF 조건에서 시험이 이루어졌다.

시험결과 EGR ON에서 OFF 조건과 비교했을 때 핵화모드 입자는 줄어들고 축적모드 입자는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 배출가스가 일부 재유입되면서 핵화모드 입자배출 비율이 줄었기 때문에 핵화모드 입자의 개수농도는 미미한 수준으로 저감되었다고 판단된다.

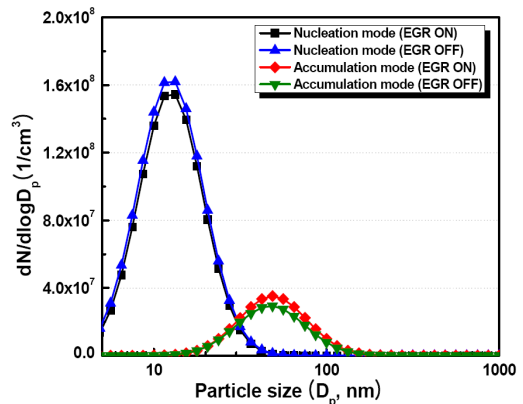


Figure 8: Effect of EGR on particle emission

축적모드 입자의 경우 재유입된 핵화모드 및 축적모드 입자들이 신기와 혼합되면서 휘발성 입자의 급격한 냉각작용으로 응축 또는 흡수되어 축적모드 입자의 증가 원인으로 작용된다고 판단된다.

EGR이 적용되면 신기속에 포함되어 있는 산소 농도가 줄어들기 때문에 EGR이 적용되지 않은 조건보다 연소시 생성된 soot 입자들이 산화되는 조건이 떨어져 축적모드 입자의 증가 원인으로 작용한다[10].

4. 결 론

본 연구에서는 고속 입자상 물질 분석기(DMS500)를 이용하여 커먼레일 디젤엔진에서 배출되는 나노입자의 입경분포 및 개수농도의 생성과 배출특성을 운전조건에 따라 분석하였다. 엔진시험으로부터 분석된 결과를 정리하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 디젤 엔진의 입자상 물질 배출특성은 전형적인 2-모드(bimodal, 핵화모드+축적모드) 형태로 나타났다. 디젤산화촉매 전단(engine-out) 위치에서 샘플링시 핵화모드 입자상 물질의 개수농도는 Case D 조건에서 가장 많이 배출되었고 Case A 조건에서는 배출수준이 저감되는 경향을 보였다. 입자상 물질은 디젤산화촉매를 통과하면서 핵화모드 입자들이 저감되는 경향을 확인할 수 있었으며 매연여과장치 후단에서 측정된 결과 입자상 물질의 개수농도는 1,000배(3 orders of magnitude)정도 저감되지만 Case D 조건에서는 매연여과장치 내부의 온도 상승으로 포집된 soot 입자들이 산화되어 배출되기 때문에 Case A, Case B 조건보다 배출수준은 높았다.

2. 연료분사시기를 BTDC 6°C에서 ATDC 9°C까지 변경시킨 결과 ATDC 6°C까지는 입자상 물질이 저감되는 경향을 보였으나 최저각 조건인 ATDC 9°C에서는 증가했다.

EGR 적용시 핵화모드 입자는 줄어들고 축적모드 입자는 늘어나는 경향을 보였다. 핵화모드 입자의 경우 생성된 입자들이 재유입되면서 입자의 배출량이 상대적으로 줄었기 때문에 미미한 수준으로 저감되었고 축적모드 입자의 경우 재유입된 입자들

이 신기와 혼합되면서 휘발성 입자의 급격한 냉각작용으로 응축되어 덩어리화가 이루어졌기 때문에 증가했다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 張岳秋, 王建昕, 조행묵, “커먼레일 디젤엔진을 이용한 바이오디젤 연료의 연소 및 배출가스 특성”, 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제2호, pp. 252-258, 2009.
- [2] R. F. Sawyer(Chairman of CARB), Keynote speech, 17th CRC On-Road Vehicle Emission Workshop, 2007.
- [3] J. Schwartz, “Air pollution and blood markers of cardiovascular risk,” Environmental Health Perspectives, vol. 3, pp. 405-409, 2001.
- [4] A. Peters, M. Frohlich, and A. Doring, “Particulate air pollution is associated with acute phase response in Men”, European Heart Journal, vol. 22, pp. 1198-1204, 2001.
- [5] B. Giechakiel, R. Munoz-Bueno, L. Rubino, and J. Anderson, “Particulate measurement programme (PMP): Particle size and number emission before, during and after regeneration events of a Euro 4 DPF equipped light-duty diesel vehicle”, SAE Paper No. 2007-01-1944, 2007.
- [6] J. M. Desantes, V. Bermudez, J. M. Garcia, and E. Fuentes, “Effects of current engine strategies on the exhaust aerosol particle size distribution from a heavy-duty diesel engine,” Journal of Aerosol Science”, vol. 36, pp. 1251-1276, 1998.
- [7] J. D. Andersson and G. A. W. Barbara, “Particle research program: Sampling and measurement experience”, SAE Paper No. 2000-01-2850, 2000.

- [8] J. Pagan, "Study of particle size distribution emitted by a diesel engine", SAE Paper No. 1999-01-1141, 1999.
- [9] D. F. Andrea and M. M. Maricq, "Diesel nucleation mode particles: semivolatile or solid", Environmental Science and Technology, vol. 42, pp. 7597-7962, 2008.
- [10] C. Tornatore, S. S Merola, B. M. Vaglieco, "Particle and nanoparticle characteristics at the exhaust of internal combustion engines", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 222, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008.

저 자 소 개



이형민(李炯敏)

1997년 해군사관학교 해양학과(이학사), 2005년 고려대학교 기계공학과(공학석사), 2009년 고려대학교 기계공학과(공학박사), 현재 해군사관학교 함정기관학과 전임강사



명차리(明嗟理)

1986년 서울대학교 항공우주공학과(공학사), 1988년 서울대학교 항공우주공학과(공학석사), 2004년 고려대학교 기계공학과(공학박사), 현재 고려대학교 기계공학부 교수



박심수(朴深秀)

1977년 서울대학교 기계공학과(공학사), 1979년 서울대학교 기계공학과(공학석사), 1991년 뉴욕주립대학교 기계공학과(공학박사), 현재 고려대학교 기계공학부 교수