

음파를 이용한 연료 입자 운동성 향상에 관한 연구

민선기
아주자동차대학 자동차계열

A Study of Improving Fuel Droplet Movement with Sonic Wave Radiation

Sunki Min
Division of Automotive Engineering, Ajou Motor College

요약 자동차 배기가스에 포함된 질소산화물은 심각한 대기 오염을 일으키는 주요한 요인 중의 하나이다. 질소산화물은 연소가 고온 조건에서 진행되는 경우에 생성되므로 일반적으로 배기가스 재순환 방법을 사용하여 연소 온도를 낮추어 저감시킨다. 배기가스 재순환 비율이 높아질수록 질소산화물의 양은 감소하나 연소가 불안정하게 되어 일산화탄소와 연소실 내의 연료가 연소 되지 않고 나오는 미연탄화수소의 양이 증가하여 오히려 오염물질을 증가시킨다. 본 논문에서는 연소 안정성 향상을 위해 연료 입자에 음파를 조사하여 연료 입자의 움직임을 증가시키는 방안 및 배기가스재순환 비율의 증가에 따른 엔진 성능 향상에 대하여 연구하였다. 이에 대한 기본 연구로, 유동해석 소프트웨어를 사용하여 여러 주파수의 음파를 연료 입자에 조사하여 연료 입자의 속도 변화에 대한 연구를 진행하였다. 해석 결과, 연료 입자의 크기가 크면 저주파의 음파에 의해, 연료 입자의 크기가 작으면 고주파의 음파에 의해 영향을 많이 받음을 알 수 있었다. 또한 연소 안정성 향상이 엔진 성능에 미치는 영향에 대해 엔진 해석 모델을 사용하여 연구하였다. 해석 결과, 배기가스 재순환 비율을 15% 증가시킨 경우, 질소산화물의 농도가 45% 저감되고, 열효율이 10% 향상됨을 확인하였다.

Abstract NOx (Nitrogen oxide) in the exhaust gas from vehicle engines is considered one of the most harmful substances in air pollution problems. NOx is made when combustion occurs under high temperature conditions and EGR (exhaust gas recirculation) is normally used to lower the combustion temperature. As the EGR ratio increases, the NOx level becomes low, but a high EGR ratio makes the combustion unstable and causes further air pollution problems, such as CO and unburned hydrocarbon level increase. This study showed that fuel droplets could move more freely by the radiation of sonic wave for the stable combustion. In addition, the engine performance improved with increasing EGR ratio. As a basic study, the effect of sonic wave radiation on the velocity of fuel droplets was studied using CFD software. The results showed that the velocity of small droplets increased more under high frequency sonic wave conditions and the velocity of the large droplets increased at low frequency sonic wave conditions. In addition, an engine analysis model was used to study the effects of the increased combustion stability. These results showed that a 15% increase in EGR ratio in combustion resulted in a 45% decrease in NOx and a 10% increase in thermal efficiency.

Keywords : NOx Level, Exhaust Gas Recirculation, Engine Analysis Model, Sonic Wave, Fuel Droplet

1. 서론

요사이 환경과 관련하여 가장 큰 이슈인 미세먼지의
주요 요인 중 하나로 자동차에서 배출되는 질소산화물

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구과제로 수행되었음.
(No. 2018R1D1A1B07049705).

*Corresponding Author : Sunki Min(Ajou Motor College)

email: skmin@motor.ac.kr

Received August 7, 2019

Revised October 8, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

(NO_x)이 거론되고 있다. 이러한 질소산화물 성분을 엔진 연소 단계에서 줄이는 방법 중 효과적인 것이 배기가스 재순환(Exhaust gas recirculation, EGR) 방법이다. 배기가스 재순환은 배출가스 중의 질소산화물 성분 감소 및 연비개선을 위하여 배기 가스의 일부분을 다시 흡기로 보내서 새롭게 유입되는 공기와 혼합하여 연소시키는 방식이다. 엔진에서 질소산화물은 고온의 연소 조건에서 많이 생성되는데, 이미 한번 연소된 배기가스를 다시 흡기 과정에서 공기와 섞어 연소실 내로 유입시켜 연소시킴으로 연료와 반응 가능한 산소를 줄이고, 배기가스에 포함된 이산화탄소가 연소 반응 중 발생하는 열을 흡수하여 전체적인 연소 가스의 온도를 낮춰 질소산화물의 발생량을 감소시키는 것이 가능하다[1-7]. 여기서 흡기에 섞는 배기가스 재순환 가스의 비율을 높일수록 질소산화물 저감 효과는 증가하나 배기가스 재순환 가스는 이미 연소가 끝난 불활성 가스이므로 일정량 이상으로 비율이 증가하게 되면 연소가 불안정해져 불완전연소에 의한 미연탄화수소(unburned hydrocarbon) 및 일산화탄소(CO)의 배출이 증가하는 문제가 발생한다[8-10]. 진행된 연구에 따르면 약 25%의 배기가스 재순환 비율에서 질소산화물은 75%의 감소 효과가 있었으나 미연탄화수소는 20% 증가하는 결과가 나왔다[11]. 그러므로 높은 배기가스 재순환 조건에서 연소를 안정화시키기 위하여 많은 연구가 행하여져 왔다. 본 연구의 목표는 높은 배기가스 재순환 비율의 연소 조건에서 실린더 내에 분사된 연료 입자에 음파를 방사하여 연료 입자의 활성도를 높여 연소가 좀 더 활발하게 진행하도록 하여 연소의 안정성 향상을 도모하는 것이다. 음파를 엔진에 적용하는 것에 대해서는 연료개질 등과 관련하여 연구가 진행되어 왔으나[12, 13], 본 연구에서는 음파를 연료 입자에 직접 조사하여 진동 에너지를 전달하여 연료 입자의 움직임을 향상시켜 공기와 접촉하기 용이하도록 한 것이다.

2. 본론

2.1 엔진 성능 해석

2.1.1 엔진 해석 모델 제작

엔진의 사이클은 흡입-압축-폭발-배기의 4개의 행정으로 구성되어 있고, 이 과정을 GT Power 소프트웨어를 이용하여 엔진 해석 모델을 제작하였다. 이러한 모델을 활용하여 엔진의 실린더 내로 들어가는 흡기 조건, 배

기가스 재순환 비율 등에 의하여 엔진의 성능이 어떻게 변화하는지 예측할 수 있다. 엔진 해석 모델 제작이 완료된 후에는 실제 엔진 시험 결과와 비교하여 정확도에 대해 검증을 하였다.

Table 1. Test engine specification

Item	Specification
Bore * Stroke	82 * 93.5mm
Compression ratio	10.1
Intake valve timing	BTDC 9° / ABDC 43°
Exhaust valve timing	BBDC 50° / ATDC 10°
Valve overlap	15°

2.1.2 배기가스 재순환 비율에 따른 엔진 성능해석

배기가스 재순환 가스는 배기 매너폴드에서 흡기 매너폴드로 다시 유입되고 이 때 유량은 ECU로부터 전자제어 배기가스 재순환 밸브를 통하여 제어된다. 앞에서 만든 엔진 해석 모델을 활용하여 배기가스 재순환 비율에 따른 엔진의 성능, 연비 및 배출 가스에 대한 해석을 진행하였다. 이러한 과정을 통하여 배기가스 재순환 비율에 따라 연비와 배출가스 측면에서 어느 정도의 이득을 얻을 수 있는지 예측할 수 있다. 일반적으로 배기가스 재순환 비율을 높이면 엔진에서의 흡기시 손실 (pumping loss)을 감소시킬 수 있어 효율이 향상된다. 또한 실린더 내 가스의 열용량의 증가로 질소산화물이 발생하는 것을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 배기가스 재순환 가스는 이미 연소가 끝난 불활성 가스이므로 연소를 방해하게 되어 어느 정도 이상의 비율에서는 오히려 연소가 불안정하게 되어 연비가 하락하고 배출가스의 유해성분이 증가하게 된다. 해석 모델에서는 이러한 제약 조건을 고려하지 않는 것이 가능하므로 배기가스 재순환 비율 증가만에 의한 효과를 확인할 수 있다.

2.2 음파에 의한 영향 해석

연비를 높이고 배출가스 중의 질소산화물을 저감하기 위해서는 배기가스 재순환의 비율을 높이는 것이 유리하다. 그러나 배기가스 재순환의 비율이 높을 경우, 연소가 불안정해지는 단점이 있으므로 이러한 문제를 해결하는 방법의 하나로 연료 입자의 움직임을 높여서 연료 입자가 산소와 좀 더 쉽게 반응을 하도록 하는 방법을 고안하였고, 이를 구현하는 방법으로 음파를 연소실 내에 방사하는 방법을 고안하여 상용 소프트웨어인 Ansys Fluent를 사용하여 연구하였다. Fig. 1 (a)와 같은 연소실 해석

모델을 만들어 Fig. 1 (b)와 같이 연료 입자를 분사한 후, 연소실 내로 초음파를 방사하게 되면 공기를 구성하는 N₂, O₂ 등과 재순환된 배기가스를 구성하는 CO₂ 등은 질량이 작으므로 초음파의 주파수와 강도에 비례하여 움직일 것으로 예상되나 연료 입자는 이에 비해 질량과 부피가 상당히 크므로 관성과 점성에 의하여 영향을 받아 음파의 주파수와 강도와는 다르게 움직일 것으로 예상된다. 여기서 연소가 안정적으로 진행되기 위해서는 연료 입자의 움직임이 강화되는 것이 유리하다고 가정하고, 연료 입자의 속도에 대해 해석을 진행하였다. 이 때 실제 엔진에서 분사된 연료 입자의 크기를 고려하여 연료 입자 직경 10~30micron에 대하여, 주파수 0.1~10kHz의 음파를 조사하는 조건으로 해석을 진행하였다.

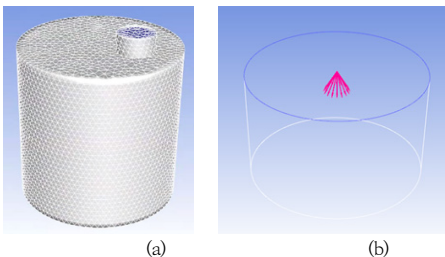


Fig. 1. Analysis model of sonic wave radiation (a) Chamber model (b) Injection model

Table 2. Conditions of fuel droplet injection

Item	Data
Injection Velocity	15m/s
Injection angle	30deg
injection duration	5ms
Droplet size	10, 20, 30 micron

3. 해석 결과

3.1 엔진 해석 모델 제작 결과

엔진 해석 모델은 Fig. 2와 같이 상용 소프트웨어인 GT Power를 활용하여 제작하였다. 실제 엔진의 흡배기 형상, 연소실 형상 및 밸브 타이밍 등을 참조하여 제작하였고, 이의 검증을 위하여 Fig. 3에서와 같이 실제 엔진의 성능 결과와 비교하였다. 비교 결과 2500rpm까지의 영역에서는 해석 결과가 약 5% 가량 낮은 것으로 나타났고, 5000rpm 이상의 영역에서는 해석 결과가 3% 정도 높은 것으로 나타나 해석을 진행하여도 오차는 적을 것으로 판단되었다.

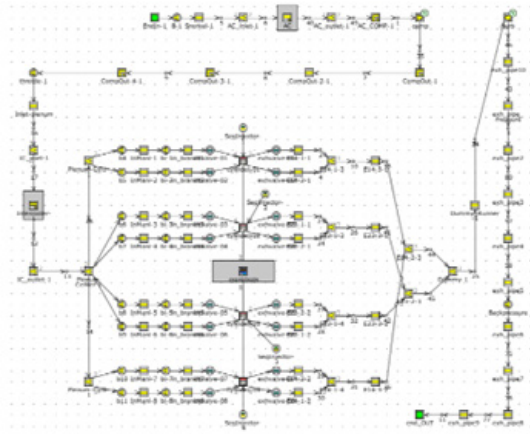


Fig. 2. Engine performance analysis model

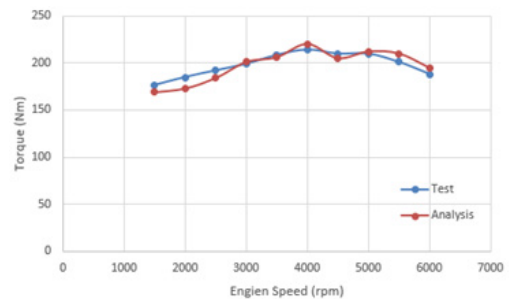


Fig. 3. Performance validation of engine model

3.2 배기가스 재순환 비율에 따른 엔진 성능 해석

배기가스 재순환 비율을 5%와 15% 조건에서 해석을 진행하여 결과를 비교하였다. Fig. 4에서와 같이 배기가스 재순환 비율이 5%에서 15%로 증가됨에 따라 질소산화물(NO_x)의 농도는 대략 2,750ppm에서 1500ppm으로 45% 가량 저감되었고, 열효율(Thermal efficiency)은 33%에서 36%로 10% 가량 향상되었다.

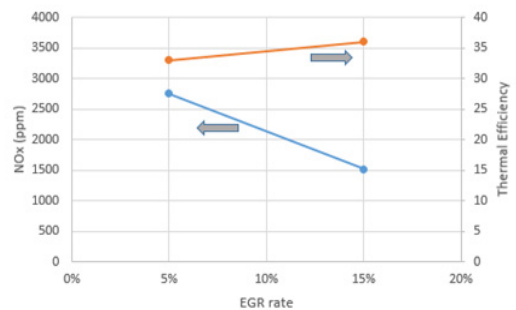


Fig. 4. EGR effect on NOx & fuel economy

3.3 초음파 영향 해석

Fig. 5에 분사 시작 후 5ms 이후의 연료 입자 분포도가 나타나 있다. 음파를 조사한 경우와 조사하지 않은 경우를 비교해 보면 음파를 조사한 경우 저속의 속도 범위가 0.4m/s에서 0.45m/s로 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 보면 음파에 의해 연료 입자의 속도가 증가함을 알 수 있다.

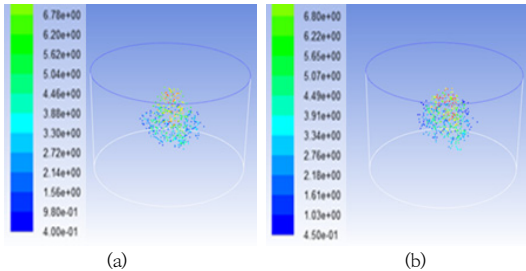


Fig. 5. Analysis result of fuel injection (a) No sonic effect result (b) Sonic effect result

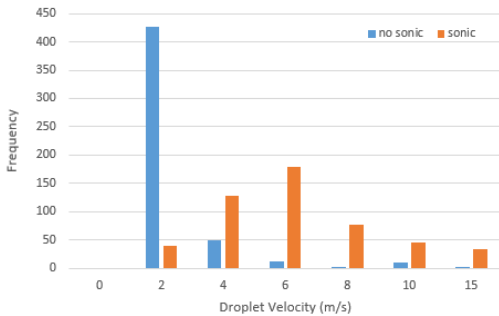


Fig. 6. Histogram of fuel droplet velocity

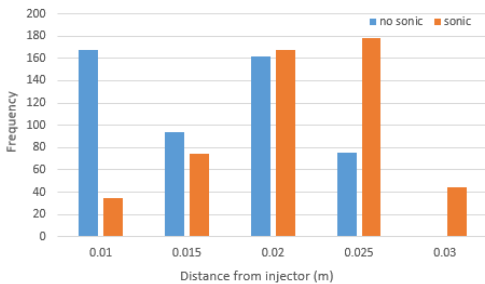


Fig. 7. Histogram of fuel droplet location

좀 더 자세히 확인하기 위하여 Fig. 6과 같이 각 연료 입자의 속도에 대한 히스토그램 그래프를 작성하여 보면 속도 분포가 변화하였음을 알 수 있다. 음파가 조사되지 않은 경우, 대다수의 연료 입자의 속도는 0~2m/s의 범위에 분포하였으나, 음파가 조사된 경우에는 좀 더 넓은

범위의 속도 분포를 가짐을 알 수 있었다. 또한 연료 입자의 분사 후 이동한 거리에 대한 히스토그램 Fig. 7을 보면 음파가 조사된 경우, 연료 입자가 더 먼 거리까지 이동하였음을 알 수 있다. 입자가 더 먼 거리를 이동하였다는 것의 의미는 연료 입자가 모여있지 않고 넓은 영역에 걸쳐 분포함으로써 공기와 접촉할 확률이 높아짐을 의미한다.

Fig. 8, 9는 연료 입자 크기에 따른 연료 입자의 속도 그래프가 나타나 있다. 그래프를 보면 연료 입자의 크기에 따라 음파에 의한 영향이 차이가 남을 알 수 있다. 입자의 크기가 작은 경우 (10micron), 음파에 의해 평균 330%의 속도 증가를 보였고, 입자가 큰 경우 (30micron), 속도는 평균 5% 증가함을 알 수 있다.

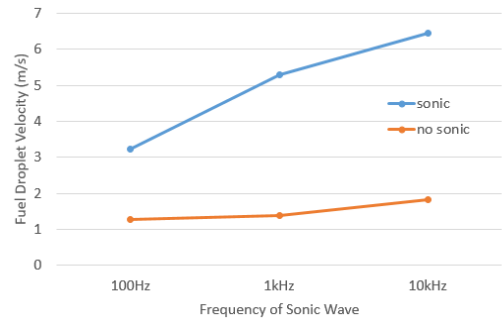


Fig. 8. Fuel droplet velocity at various sonic frequency of 10 micron diameter droplet

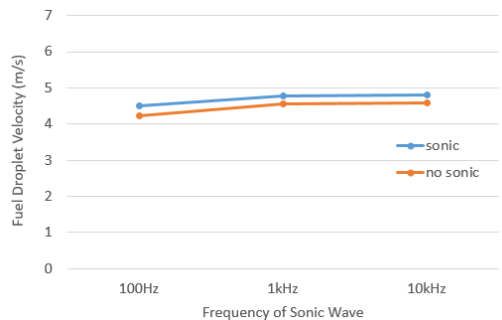


Fig. 9. Fuel droplet velocity at various sonic frequency of 30 micron diameter droplet

Fig. 10는 크기별 입자에 대한 음파 조사의 영향을 나타낸 것이다. 음파 조사에 의한 속도 증가량을 각 음파 주파수별로 나타낸 것으로 속도 증가 폭은 연료 입자의 직경이 작을수록 큼을 알 수 있다. 또한 10micron과 30micron의 결과를 비교해 보면 주파수가 100Hz에서 10kHz로 증가함에 따라 10micron의 경우는 속도 증가

의 폭이 380% 정도 증가하였으나 30micron의 경우는 속도 증가의 폭이 70%로 감소하였음을 알 수 있다. 이는 10micron 크기의 입자는 음파의 주파수가 증가함에 따라 속도가 점점 더 증가하였음을 의미하나, 30micron 입자의 경우는 음파의 주파수가 증가하였음에도 주파수의 증가만큼 속도가 증가하지 못한 것이다. 30micron 입자의 경우 무게의 증가로 인하여 관성력의 증가로 고주파의 음파는 입자의 운동에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

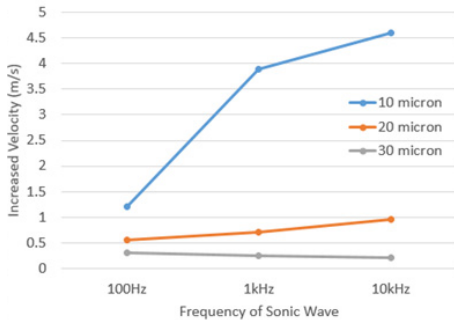


Fig. 10. Increased velocity at various sonic frequency

4. 결론

본 연구에서는 엔진 해석 모델을 활용한 높은 배기가스 재순환 비율 조건에서 NO_x 및 열효율에 대한 연구와 음파를 실린더 내에 조사한 경우 분사된 연료 입자의 거동에 대하여 해석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 엔진 모델의 해석을 통하여 배기가스 재순환비율을 증가시키면 NO_x 저감과 열효율 향상을 동시에 얻을 수 있음을 확인하였다.
2. 음파를 분사된 연료 입자에 조사함에 따라 연료 입자의 속도와 분사 후 이동한 거리가 증가 됨을 알 수 있었다.
3. 분사된 연료 입자에 음파를 조사함에 따라 연료 입자의 속도와 이동한 거리가 증가함을 알 수 있었다. 이는 연료 입자가 공기와 접촉할 확률이 증가하였음을 의미하고 연소가 안정적으로 진행될 확률이 증가하였음을 의미한다.
4. 분사된 연료 입자의 크기에 따라 음파의 주파수에 영향을 받는 특성이 달라짐을 알 수 있었다. 연료

입자의 크기가 작은 경우 음파의 주파수가 증가함에 따라 속도의 증가 폭도 같이 증가하였으나 입자의 크기가 큰 경우에는 음파의 주파수가 증가하여도 연료 입자 속도의 증가 폭은 감소하였다. 이는 연료 입자의 크기가 증가함에 따라 관성력이 증가하여 주파수 증가에 의한 영향을 적게 받은 결과인 것으로 생각된다.

References

- [1] Y. Cho, J. Koo, J. Kim, S. Kim, C. Bae, S. Oh, K. Kang, "Performance and emission characteristics in a spark-ignition LPG engine with exhaust gas recirculation", *Proceedings of Fall KASE Conference 2000-03-2153*, KSAE, Korea, pp.211-216, Nov. 2000.
- [2] H. Ha, J. Shin, S. Pyo, H. Jung, J. Kang, "A study on the strategy if fuel injection timing according to application of exhaust gas recirculation for off-road engine", *Transactions of KSAE*, Vol. 24, No. 4, pp.447-453, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.4.447>
- [3] C. Park, C. Kim, "A study on operating condition for gasoline-hybrid engine with EGR", *Proceedings of Fall KASE Conference KASEE07-F0010*, KSAE, Korea, pp.60-65, Nov. 2000.
- [4] I. Park, S. Hong, M. Sunwoo, "Gain-schedules EGR control algorithm for light-duty diesel engines with static-gain parameter modeling", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.18, No.4, pp.579-587, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-017-0058-9>
- [5] T. Kim, C. Ha, H. Lee, J. Lee, K.Chun, "Effects of the intake venturi and throttle adaption on EGR rates and emissions in a HSDI diesel engine", *Proceedings of Spring KSAE Conference KSAE03-S0032*, KSAE, Korea, pp.197-202, May 2003.
- [6] B. Baek, S. Jang, O. Lim, "Fuel injection characteristics analysis based on fuel ratio of gasoline-biodiesel blended fuel by experiment", *Proceedings of Spring KSAE Conference*, KSAE, Korea, pp.332, May 2019.
- [7] B. Kim, N. Miyamoto, "A study on the combustion characteristics of diesel fuel droplet with additive oxygenate and paraffin", *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.2, pp.49-56, 2006.
- [8] H. Kwak, C. Myung, S. Park, D. Chun, "Effect of EGR on engine performance and exhaust emission characteristics in LPLi engine", *Proceedings of Industry-Academia Conference 2002*, KSAE, Korea, pp.77-82, Nov. 2002.
- [9] Y. Cho, J. Koo, J. Jang, C. Bae, "Performance and emission characteristics in a spark-ignition LPG

- engine with exhaust gas recirculation”, *Transactions of KSAE*, Vol.10, No.1, pp.24-31, 2002.
- [10] I. Park, S. Hong, M. Sunwoo, “Model-based gain scheduling strategy for air-to-fuel ratio control algorithm of passenger car diesel engines”, *Transactions of KSAE*, Vol.23, No.1, pp.56-64, 2015.
DOI : <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2015.23.1.056>
- [11] M. Lee, T. Lee, J. Ha, S. Chung, “A study on characteristics of soot formation in free fuel droplet array”, *Transactions of KSAE*, Vol.7, No.2, pp.116-125, 1999.
- [12] S. Im, Y. Jung, D. Choi, S. Cho, J. Ryu, “A Study on the application characteristics of ultrasonically irritated methane blended fuel in gasoline engine”, *Proceedings of Spring KSAE Conference KSAE06-S0029*, KSAE, Korea, pp.178-183, May. 2006.
- [13] B. Lee, Y. Kim, “Effects of the smoke reduction of diesel engine operated with ultrasonic reformed fuel”, *Transactions of KSAE*, Vol. 18, No. 3, pp. 88-94, 2010

민 선 기(Sunki Min)

[정회원]



- 1992년 2월 : 연세대학교 연세대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 1999년 8월 : 연세대학교 연세대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 1999년 9월 ~ 2012년 2월 : 한국지엠 부장
- 2012년 3월 ~ 현재 : 아주자동차대학 자동차계열 교수

<관심분야>

내연기관, 열유체공학, 대체에너지