

# 음파를 이용한 연소 안정성 개선에 관한 연구

민선기  
아주자동차대학 자동차계열

## A Study of Improving Combustion Stability with Sonic Wave Radiation

Sun-ki Min  
Division of Automotive Engineering, Ajou Motor College

**요약** 자동차에서 배출되는 배기가스 중 질소산화물은 요사이 문제가 되는 미세먼지의 주요 요인 중 하나이다. 질소산화물(NOx)은 고온 조건에서 연소가 진행될 때 발생하므로 연소시 온도를 낮추는 방법으로 발생을 억제하고 있다. 자동차에서는 일반적으로 배기가스 재순환(EGR)을 사용하여 연소 온도를 낮추는 방법으로 감소시킨다. 그러나 EGR 비율이 높아질수록 NOx의 양은 저감되나 연소 안정성의 하락으로 인한 불완전연소 가능성의 증가로 일산화탄소와 미연탄화수소의 양이 증가하여 오히려 오염물질이 증가하는 문제를 발생시킬 수 있다. 여기에서는 연료 입자에 음파를 조사하여 연료 입자의 운동성을 향상시켜 연소가 원활히 진행되게 하여 연소의 안정성을 향상시키는 방안에 대하여 해석적 및 실험적 방법으로 연구하였다. 해석적 방법으로는 유동해석 소프트웨어를 사용하여 연료 입자에 다양한 주파수의 음파를 조사하여 연료 입자의 움직임 변화에 대한 연구를 진행하였다. 해석 결과, 작은 연료 입자의 조건에서는 고주파의 음파에 의해 영향을 많이 받고, 연료 입자가 큰 조건에서는 저주파의 음파에 의해 영향을 많이 받아 운동성이 증가함을 알 수 있었다. 실험적 방법으로는 연소실을 구성하여 정해진 당량비 조건에서 연소시키며 다양한 주파수의 음파를 조사하며 연소실내 압력을 측정하는 연구를 진행하였다. 측정된 압력으로부터 열방출량을 계산하면 연소의 진행 상황에 대한 정보를 얻을 수 있는데, 실험 결과 초기 연소시 상대적 저주파 조사 조건에서 열방출량이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

**Abstract** NOx (nitrogen oxide) in the exhaust gas engines causes severe air pollution. NOx is produced under high-temperature combustion conditions. EGR (exhaust gas recirculation) is normally used to reduce the combustion temperature and NOx production. As the EGR ratio increases, the NOx level becomes low. On the other hand, an excessively high EGR ratio makes the combustion unstable resulting in other air pollution problems, such as unburned hydrocarbon and higher CO levels. In this study, the improvement of fuel droplets moving by the radiation of sonic waves was studied for the stable combustion using analytic and experimental methods. For the analytical study, the effects of the radiation of a sonic wave on the fuel droplet velocity were studied using Fluent software. The results showed that the small droplet velocity increased more under high-frequency sonic wave conditions, and the large droplet velocity increased more under low-frequency sonic wave conditions. For the experimental study, the combustion chamber was made to measure the combustion pressure under the sonic wave effect. The measured pressure was used to calculate the heat release rate in the combustion chamber. With the heat release rate data, the heat release rate increased during the initial combustion process under low-frequency sonic wave conditions.

**Keywords** : NOx Level, Exhaust Gas Recirculation, Sonic Wave, Fuel Droplet, Combustion Stability

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 May 28, 2020

Accepted August 7, 2020

Revised July 8, 2020

Published August 31, 2020

## 1. 서론

최근에 환경 문제를 유발하는 미세먼지를 저감하기 위한 다양한 노력이 행해지고 있다. 미세먼지를 발생시키는 주요한 원인으로 자동차 배기가스 중 일부인 질소산화물(NOx)이 거론되고 있다. 이러한 질소산화물 성분을 저감하기 위하여 일반적으로 배기가스재순환(EGR : Exhaust gas recirculation) 방법을 사용한다. 배기가스재순환은 엔진의 연소실에서 연소된 후 배출되는 배기가스를 다시 흡기로 재순환시켜 새로 유입되는 공기와 혼합하여 연소실에 유입시킨 후, 다시 연소시키는 방식이다. 배기가스 재순환 방식을 사용하면 질소산화물 저감과 더불어 엔진의 펌핑 손실(Pumping loss)을 감소시켜 연비 개선을 동시에 달성할 수 있다. 질소산화물은 고온에서 연소가 진행될 때 많이 생성되는데, 이미 연소 완료된 배기가스를 다시 흡기 과정에서 공기와 혼합하여 연소실 내로 유입시켜 연소시키게 되면 연료와 반응 가능한 산소의 양이 저감되고, 배기가스에 포함된 이산화탄소의 비율이 증가하여 연소시 발생하는 열을 흡수하여 전체적인 연소 온도를 낮춰 질소산화물을 감소시키게 되는 것이다[1-6]. 질소산화물의 생성을 저감하기 위하여 흡기에 섞는 배기가스재순환 비율을 높이면, 질소산화물 저감 효과는 증가하나 재순환되는 배기가스는 연소가 완료된 불활성 가스이므로 일정량 이상으로 비율이 증가하면 연소가 불안정해져 불완전연소 가능성이 높아져 미연탄화수소(unburned hydrocarbon) 및 일산화탄소(CO) 등 유해가스의 배출이 증가하는 문제가 발생한다[7-10]. 기존에 진행된 연구에 의하면 약 25%의 배기가스재순환 비율 조건에서 연소시 75% 질소산화물의 감소 효과가 있었으나 미연탄화수소는 역으로 약 20% 증가하는 결과가 나왔다[11]. 그러므로 이러한 연소에 불리한 조건에서 연소를 안정화시키기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 연소의 안정성을 향상시키기 위하여 음파를 이용하는 방안에 대해 연구하였다. 음파를 활용하는 방안에 대해서는 연료에 초음파를 조사하여 연료를 개질하는 것과 같은 연구와 음파를 이용하여 연료 입자의 운동성을 향상시키는 연구가 진행되어 왔다[12,13,14]. 또한 연소의 안정성과 관련하여 초기 연소 속도가 연소의 안정성에 미치는 영향에 대해서도 연구가 진행되었다[15]. 본 논문에서는 연료 입자에 음파를 조사하여 연료 입자의 운동성을 높여 연소가 좀 더 활발하게 진행되도록 하여 연소의 안정성을 향상시키는 방안에 대해 해석적 방법과 실험적 방법으로 연구하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 해석적 연구

배기가스 재순환 비율을 높여서 연비를 높이고 배출가스 중의 질소산화물을 감소시키기 위하여는 배기가스 재순환 비율 증가로 인한 연소의 불안정성 문제를 개선할 필요가 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법의 하나로 다양한 주파수의 음파를 연소실 내에 조사하여 연료 입자의 활동성을 향상시켜 연료 입자가 산소와 좀 더 쉽게 반응할 수 있도록 하는 방법을 고안하였고, 이를 해석적 방법으로 연구하였다. 상용 소프트웨어인 Ansys Fluent를 사용하여 연소실 모델을 제작하고 다양한 조건에서 해석을 진행하여 연구하였다. Table 1 조건과 같이 엔진의 실린더와 유사한 형상의 연소실 해석 모델을 제작하고 연료 입자를 분사한 후, 연소실 내로 음파를 조사하게 되면 공기와 재순환된 배기가스는 연료 입자에 비하여 상대적으로 질량이 작으므로 음파의 주파수 등에 주로 반응하여 움직일 것으로 예상되나 연료 입자는 공기에 비하여 부피와 질량이 상당히 크므로 점성 및 관성에 의하여 영향을 받아 음파의 주파수 및 음파 강도와는 다르게 움직일 것으로 예상된다. 여기서 연소의 진행이 안정적이기 위해서는 연료 입자의 거동이 향상되는 것이 유리하다고 판단하고, 연료 입자의 위치 및 속도에 대한 해석을 진행하였다. 해석에 사용한 입자의 크기는 연료 입자의 크기를 측정된 논문의 데이터를 참조하여 선정하였다[16,17].

Table 1. Conditions of fuel droplet injection

Item	Data
Bore * Stroke	700 * 500 mm
mesh size	2 * 2 * 2 mm <sup>3</sup>
mesh No.	35,700
Turbulence model	k-ε model
Injection Velocity	15m/s
Injection angle	30deg
injection duration	5ms
Droplet size	20, 30, 40, 50 micron

### 2.2 실험적 연구 및 결과 Correlation

Fig. 1에 본 연구에서 사용된 실험 장치의 전체적인 구성이 나타나 있다. 음파가 연소에 미치는 영향을 확인하기 위하여 엔진의 연소실을 모사한 연소실을 구성하였다. 엔진의 연소실은 피스톤의 움직임에 따라 체적이 변화하나 본 연구에서는 고정된 체적의 연소실을 제작하여

사용하였다. 연소실 상부에 스피커를 장착할 수 있는 어댑터를 설치하여 실험을 진행하였다. 음파에 의한 영향 실험시 스피커는 연소 중 발생한 압력과 화염에 의해 손상을 입으므로 매 시험 후 교체하여야 하였다. 연소시 데이터는 압력센서를 장착하여 압력을 측정하였고 보조적인 데이터로 CO<sub>2</sub> 센서와 온도센서를 장착하여 활용하였다. 연료는 정확한 양의 실험을 위하여 전자식 인젝터를 장착하여 원하는 공기와 연료 비율의 양을 분사하고, 연소 후 CO<sub>2</sub> 센서를 활용하여 연료량에 대해 검증하였다. 엔진에서와 달리 공기와 연료의 혼합기를 압축하지 않고 연소시켜야 하므로 엔진에서 일반적으로 사용하는 스파크 플러그로는 점화가 어려워서 연소실 내에 전극을 삽입하여 점화를 시켰다.

실험은 당량비 (Equivalence ratio) 1과 희박 연소 조건인 당량비 0.7 조건에서 음파 조사 없는 일반 연소 조건 및 음파 주파수 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz 조건에서 각각 5회씩 진행하여 압력 데이터를 취득하는 것으로 진행되었다. 음파 조사 연소 조건에서는 압력이 어느 정도 상승하게 되면 스피커가 압력에 의해 파손되어 압력 데이터에 교란이 발생하므로, 점화 후, 0.15 sec 동안의 연소 초기 데이터를 측정하여 연소해석을 진행하였다.

실험은 연소실에 일정한 양의 연료를 분사한 후, 음파 조사 없이 연소시키는 방법과 음파를 조사하며 연소시키는 방법으로 진행되었다. 주요한 실험 데이터로는 압력을 측정하여 활용하였다. 압력 데이터는 연소시 연소 과정의 속도를 추정하는데 사용하였다. 음파 조사에 의해 연료의 운동성이 향상되어 연소 속도가 향상되어 단위 시간당 열방출량 (Heat release rate) 이 향상되는 것을 확인한다. 열방출량 식은 아래의 Eq. (1)과 같다[18].

$$\delta Q_{ch} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p dV + \frac{1}{\gamma-1} V dp + \delta Q_{ht} - h_{inj} dm_{inj} \quad (1)$$

where,

- $\delta Q_{ch}$  heat release rate,
- $\gamma$  specific heat ratio,
- $p$  pressure,
- $V$  volume
- $\delta Q_{ht}$  heat transfer rate,
- $h_{inj}$  injected fuel enthalpy,
- $dm_{inj}$  injected fuel mass,

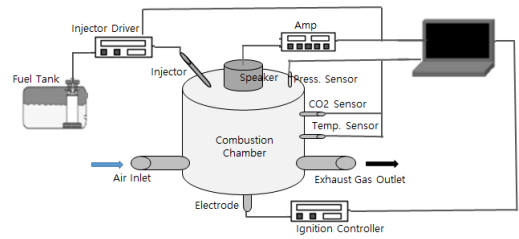


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

마지막으로 이러한 실험을 통하여 취득한 열방출량 결과를 활용하여 상용 소프트웨어를 활용한 엔진 성능 해석을 진행하여 연소 압력 변화를 해석함으로써 음파 조사가 연소에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 해석적 연구 결과

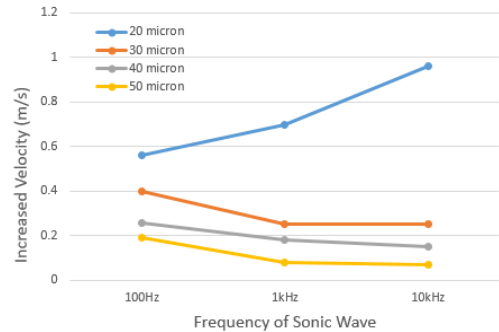


Fig. 2. Increased velocity at the condition of various sonic frequency

Fig. 2에는 연료 입자 크기별 음파 조사에 의한 속도의 증가가 나타나 있다. 음파 조사에 의해 연료 입자의 속도가 증가한 정도를 음파 주파수에 대하여 나타낸 것으로, 연료 입자의 크기가 작을수록 속도는 많이 증가했음을 알 수 있다. 또한 20 micron과 30, 40 및 50 micron의 입자 결과를 비교해 보면 음파 주파수가 100 Hz에서 10 kHz로 증가함에 따라 속도 증가의 경향이 달라짐을 알 수 있다. 연료 입자 크기 20 micron의 경우, 속도 증가폭이 0.56 m/s에서 0.96 m/s으로 증가되었으나 연료 입자 30 micron의 경우는 속도 증가의 폭이 0.4 m/s에서 0.25 m/s으로 감소하였고, 50 micron의 경우, 속도 증가의 폭은 더욱 감소하여 0.19m/s에서 0.07m/s으로 감소하였음을 알 수 있다. 이는 20

micron 크기의 연료 입자는 음파의 주파수가 높아짐에 따라 속도가 점점 더 증가하였음을 의미하나, 연료 입자 30 micron 이상의 입자인 경우, 음파의 주파수가 증가하였어도 음파 주파수의 증가만큼 입자의 속도가 증가하지 못한 것을 의미한다. 이는 연료 입자의 경우 무게의 증가로 인한 관성력의 증가로 인해 고주파의 음파에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

### 3.2 실험적 연구 결과

Fig. 3에는 당량비 1과 0.7 조건에서 음파를 조사하지 않는 일반 연소 조건에서 측정된 압력 데이터와 이를 이용하여 계산한 열방출량 데이터가 나타나 있다. 그래프를 보면 당량비 0.7 조건에서의 연소가 당량비 1 조건에서의 연소에 비해 압력이 낮고 압력 증가를 느릴 수 있다. 또한 압력을 이용하여 계산한 열방출량도 증가가 완만하고 오랜 기간 지속됨을 알 수 있다. 이러한 결과로 공연비가 희박하면 연소가 불안정해지는 것을 알 수 있다.

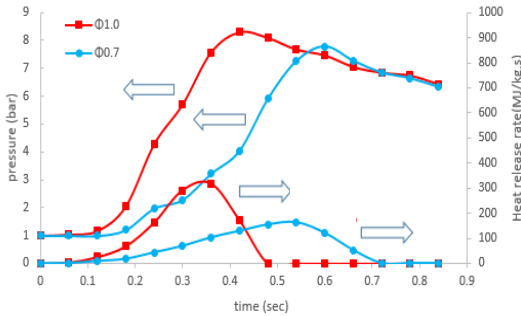


Fig. 3. Combustion pressure and heat release rate under equivalence ratio 1 & 0.7 condition

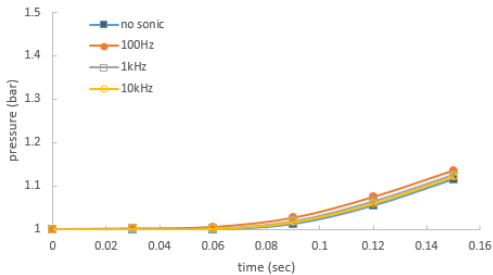


Fig. 4. Initial combustion pressure for equivalence ratio 0.7 under various sonic frequency

당량비 0.7 조건에서 연소 상태를 개선하기 위하여 100 Hz, 1 kHz 및 10 kHz의 주파수 음파를 조사하며 연소한 경우의 압력 데이터가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4에는 당량비 0.7 조건에서 일반 연소 조건과 음파 조사 연소 조건에서의 초기 연소기간 동안의 압력 데이터가 나타나 있는데, 그래프를 보면 각 조건에서의 압력 데이터의 차이가 크지 않아 음파에 의해 개선된 것을 확인하기 어렵다.

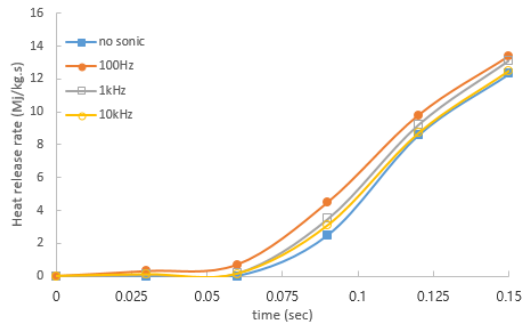


Fig. 5. Initial heat release rate for equivalence ratio 0.7 under various sonic frequency

Fig. 5에는 압력 데이터로부터 계산한 열방출량 데이터가 나타나 있다. 열방출량 그래프를 보면 조사 주파수에 따라 열방출량의 차이가 있음을 알 수 있다. 100 Hz 음파 조사 연소 조건에서 열방출량이 다른 음파 주파수 조건에 비해 증가 속도가 빠르고, 일반 연소 조건에 비해 0.15sec까지의 누적 열방출량이 0.52MJ/kg에서 0.59MJ/kg로 증가하여 약 14%의 증가를 보였음을 알 수 있다. 1 kHz 와 10 kHz 음파 조사 조건에서는 일반 연소 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 실험 결과를 해석 결과와 비교해 보면 인젝터에서 분사된 연료 입자가 상대적으로 크기 때문에 판단된다. 본 실험에서 GDI용 고압 인젝터가 아닌 일반 흡기 포트용 인젝터를 사용하였기 때문에 연료 입자는 30 ~ 50 μm 크기 사이에 주로 분포하므로 상대적으로 저주파인 100 Hz 음파 조사에 의해 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.

### 3.3 실험적 연구 결과를 활용한 엔진 성능 해석

Fig. 6에는 초기 열방출량 증가 결과를 반영한 엔진 성능 해석 결과가 나타나 있다. 당량비 0.7의 조건에서 측정된 연소 압력으로부터 계산한 열방출량과 음파에 의해 향상된 초기 열방출량 결과를 반영하여 계산한 엔진 연소 압력 결과로, 초기 열방출량 증가에 따라 음파 조사

조건에서 연소 압력이 보다 빠르게 상승하여 최대 압력이 1.5도 진각되는 결과를 알 수 있다. 엔진에서 연소가 진행될 때, 연소의 안정성에 초기 연소 속도가 많은 영향을 미치므로, 본 실험 및 해석 결과로 미루어 음파 조사 조건에서 연소의 안정성이 향상될 것으로 판단된다.

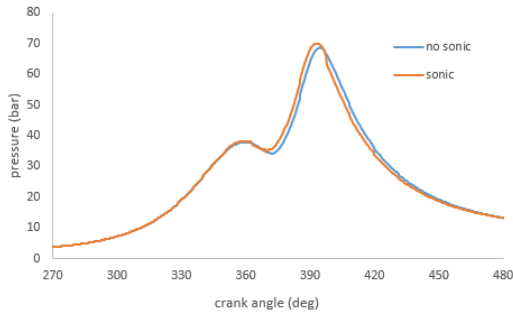


Fig. 6. Combustion pressure for equivalence ratio 0.7 from engine performance analysis

#### 4. 결론

본 연구에서는 해석적 방법 및 실험적 방법을 이용하여 음파를 연소실 내에 조사하여 연료 입자의 거동 및 연소 과정을 개선할 수 있는가에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 음파를 조사하여 연료 입자 움직임 속도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이는 연료 입자가 공기와 접촉할 확률이 높아지고, 안정적으로 연소가 진행될 확률이 증가하였음을 의미한다.
2. 분사된 연료 입자의 크기에 따라 움직임에 영향을 미치는 음파의 주파수가 다를 수 있었다. 작은 크기의 연료 입자의 경우, 음파의 주파수가 증가함에 따라 연료 입자의 속도 증가폭도 같이 증가하는 경향을 보였으나, 큰 크기의 연료 입자의 경우에는 음파의 주파수가 증가하여도 속도의 증가폭은 감소하였다. 이는 연료 입자의 크기 증가에 따라 질량이 증가하고 관성력이 증가하여 음파의 주파수 증가에 의한 영향을 상대적으로 적게 받은 결과인 것으로 생각된다.
3. 실험을 통하여 당량비 0.7 조건에서 연소시 당량비 1 조건에서의 연소 보다 최대 압력이 낮고 열방출량이 느림을 알 수 있었다.

4. 당량비 0.7 연소 조건에서 음파를 조사함에 따라 초기 열방출량이 증가됨을 알 수 있었다. 이러한 결과를 이용하여 엔진 성능 해석을 진행하여 초기 연소 압력의 상승 속도가 향상된 것을 확인할 수 있었고, 연소의 안정성이 향상될 것으로 판단된다.

#### 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 oxgenate 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
- [14] S. Min, "A Study of Improving Fuel Droplet Movement with Sonic Wave Radiation", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 12, pp. 608-613, 2019  
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.608>
- [15] Y. Cho, "A Study of spark ignition and early flame kernel growth of propane-air mixture", *Transactions of KSAE*, Vol 7, No 4, pp. 68-75, 1999.
- [16] S. Kim, H. Hiroyasu, "Comparison of the Sauter Mean Diameter Measured by Fraunhofer Diffraction Method and Phase Doppler Method", *Transactions of KSAE* No. 99370004, 1999.
- [17] J. Woo, Y. Choi, D. Kim, J. Lee, "Effect of Swirl Angle on the Spray Characteristics in Twin-Fluid Swirl Nozzle", *Proceedings of Spring KSAE Conference*, KSAE, Korea, pp.381-388, May 2008.
- [18] S. Lee, K. Jeong, C. Jeon, Y. Chang, "A Study on the Comparison of the Combustion Characteristics among an IDI, a HSDI Diesel Engine and a SI Engine using One-Zone Heat Release Analysis", *Transactions of KSAE*, Vol 13, No 6, pp. 21-30, 2005.

---

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