

CO₂를 포함한 Simulated-EGR 압축착화엔진에서 당량비 변화에 따른 성능 예측

서 현 규[†]

Performance Prediction according to Equivalence Ratio Change in Simulated-EGR Compression Ignition Engine Containing CO₂

Hyun Kyu Suh

Key Words: CO₂ mole fraction(CO₂ 몰분율), Equivalence ratio distributions(당량비 분포도), Fuel mass fraction distributions(연료질량분율 분포도), Indicated specific soot(ISSoot, 도시유효 매연), Indicated specific nitrogen oxide(ISNO, 도시유효 질소산화물), Simulated-EGR(모사 EGR)

Abstract

The objective of this work is to numerically reveal the effect of equivalence ratio change on the simultaneous reduction of NO_x and soot emissions from the simulated-EGR compression ignition engine containing CO₂. An experiment was conducted by using a single-cylinder common-rail injection system engine, an intake control system, and exhaust emissions analyzers. The numerical analysis results were validated under the same experimental conditions. To investigate the effect of equivalence ratio by simulated-EGR containing CO₂, the O₂, N₂, and CO₂ mole fraction were changed in the initial air conditions to the cylinder. The results were analyzed in terms of peak cylinder pressure, indicated mean effective pressure, indicated specific nitrogen oxide, and indicated specific soot. It was revealed that ignition delay characteristics and heat release rate (ROHR) characteristics were not significantly different according to the equivalence ratio. However, as the equivalence ratio increased from 0.68 to 0.83, the maximum combustion pressure and IMEP decreased by about 6.5% and 9.4%, respectively. In the case of ISFC, as is well known, the trend is opposite of IMEP. In the case of ISNO, as the equivalence ratio increased, less NO was generated, and as the equivalence ratio increased by 0.05, the ISSoot value of about 10% increased.

기호설명

- a : 실린더 내 공기몰값
- n_{N₂} : 실린더 내 N₂ 몰분율
- n_{CO₂} : 실린더 내 CO₂ 몰분율
- φ : 당량비

1. 서 론

배기가스 재순환 (EGR)은 NO_x 배출을 감소시키는 대표적인 방법으로 알려져 있다. 하지만, EGR을 압축착화 엔진에 적용시 실린더 내의 산소 (O₂) 농도를 감소시키고, 결국에는 연소성능이 악화된다.⁽¹⁻⁴⁾ 특히, O₂ 농도의 감소는 연소에 의해 생성된 Soot이 산화되는 것을 억제하기 때문에 Soot 생성량이 증가한다. 이러한 이유로, HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 및 PCCI (Premixed Charge Compression Ignition)^(5,6)와 같은 선행연구들이 수행되었으나, 연소 단계 및 점화시기를 제어하기 어려운 단점이 있었다^(7,9).

(Received: 23 Feb 2020, Received in revised form: 3 Mar 2020, Accepted: 4 Mar 2020)

[†]책임저자, 회원, 공주대학교 기계자동차공학부
E-mail : hksuh@kongju.ac.kr
TEL : (041)521-9264 FAX : (041)555-9123

따라서, PCCI에 Simulated-EGR을 적용하여 NO_x와 Soot을 동시에 저감하려는 선행 연구들이 있었다^(10,11). 다만, 이 연구들에서는 N₂ 가스만을 Simulated-EGR에 적용하였으나, 실제 EGR gas는 탄화수소 연료의 연소에 의해 밀도, 비열 등의 서로 다른 물성치를 가진 N₂ 및 CO₂ 등으로 구성된다. 따라서, CO₂가 포함된 Simulated-EGR을 연구하는 것이 실제 결과에 가까운 연구 결과를 기대할 수 있다.

따라서, 실험으로는 한계가 있는 실제 EGR을 보다 잘 모사하고, NO_x 및 Soot과 같은 배기가스를 동시에 저감하기 위해 Simulated-EGR에 N₂와 CO₂를 적용하여 본 연구를 수행하였다. Simulated-EGR을 표현하기 위해, 동일한 연료 분사량 조건에서 실린더 내의 초기 공기의 조성을 O₂, N₂ 및 CO₂를 변경하여 실린더 내 당량비(ϕ)를 제어하였다. 또한, 이에 따른 배기 배출물의 감소 영향을 확인하기 위하여 연소 및 배기 배출 특성을 연료 질량 분율 및 배기 배출의 분포, IMEP (indicated mean effective pressure), ISNO(indicated specific nitrogen oxide) 및 ISSoot (indicated specific soot)의 측면에서 분석 비교하였다.

2. 실험적 연구 방법

실험 결과와의 비교를 통해 수치 해석 연구의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 실험에 사용된 엔진은 단기통 압축착화엔진, 엔진 제어시스템, 흡기제어 시스템 및 배출가스 측정시스템으로 구성하였다⁽¹⁰⁾. 실험에 사용된 엔진과 연료 분사용 인젝터의 제원을 Table 1에 자세히 나타내었다. 엔진 흡기 제어 시스템은 전체 당량비(ϕ)를 조절하기 위한 유량계와 흡기의 변동을 줄이기 위한 흡기 서지 탱크, O₂와 N₂ 가스를 사전 혼합하기 위한 챔

Table 1 Detailed specification of test engine and injector

| | Item | Specification |
|----------|----------------------|----------------------|
| Engine | Engine type | Single cylinder |
| | Bore / Stroke | 75.0 mm / 84.5 mm |
| | Displacement | 373.25cc |
| | Compression ratio | 17.8 |
| Injector | Nozzle | 6-hole mini-sac type |
| | Hole diameter | 0.128 mm |
| | Inclined spray angle | 156 deg |

버 및 공기 온도 제어기로 구성하였다. 배기 배출물을 측정하기 위해 Emission Bench (MEXA-9100D, HORIBA) 및 Smoke meter (AVL-415S, AVL)를 사용하였다.

3. 수치 해석적 연구 방법

수치해석을 위해 본 연구에 적용된 엔진 Mesh는 전체 실린더 형상의 1/6 만 적용하여 해석 시간을 줄이고, 결과의 정확성을 향상하고자 하였다. 생성된 메시의 영역을 활성 화학 반응과 비활성 화학 반응으로 나누고, 각 길이는 활성 화학 반응 영역의 경우 최대 0.5 mm 및 비활성 화학 반응 영역의 경우 1.0 mm 로 설정하였다. Simulated-EGR의 당량비 변화에 따른 물리적 및 화학적 현상을 표현하기 위해 Sub-model을 Table 2와 같이 적용하였다^(12,13). 실린더로 분사된 연료의 Wall wetting 현상을 모사하기 위해 증착과 스프래시 현상 모두 모사가능한 Mundo-Tropea-Sommerfeld model을 적용하였다.

본 연구에서는 O₂, N₂ 및 CO₂로 구성된 실린더의 초기 공기가 Simulated-EGR을 나타내도록 변경되었으며, 실린더의 물 분율로 조정하였다. 선행 연구를 참고하여⁽¹¹⁾ Simulated-EGR에서 CO₂ 물 분율은 20%로 고정하고, 당량비(ϕ)는 0.68에서 0.83으로 0.05씩 증가하였다. 실린더에서 초기 공기 성분의 변화로 인해 기존의 당량비 모사방정식 (1) 대신 다음과 같이 수정된 당량비 모사방정식을 적용하였다.

$$C_xH_y + a(O_2 + n_{N_2} \cdot N_2 + n_{CO_2} \cdot CO_2) \rightarrow (x + a \cdot n_{CO_2})CO_2 + (y/2) \cdot H_2O + a \cdot n_{N_2} \cdot N_2 \quad (1)$$

여기서, a 는 실린더의 공기물 값이고, n_{N_2} 및 n_{CO_2} 는 각각 실린더에 공급된 총 N₂와 CO₂의 물분율이다. 당량비에 따른 EGR 가스내의 공기 조성을 Table 3에

Table 2 Sub-model for numerical analysis^(12,13)

| Phenomenon | Model |
|------------------|----------------------------|
| Turbulence | k-zeta-f |
| Break-up | Wave |
| Evaporation | Dukowicz |
| Wall interaction | Mundo-Tropea-Sommerfeld |
| Combustion | ECFM-3Z |
| NO | Extended Zel'dovich |
| Soot | Kennedy-Hiroyasu-Magnussen |

Table 3 Composition of initial air in the cylinder according to the overall equivalence ratio

| CO ₂ mole fraction [%] | O ₂ mole fraction [%] | N ₂ mole fraction [%] | Overall equivalence ratio (ϕ) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 20 | 16.2 | 63.8 | 0.68 |
| | 15.1 | 64.9 | 0.73 |
| | 14.1 | 65.9 | 0.78 |
| | 13.3 | 66.7 | 0.83 |

Table 4 Detailed experimental and numerical analysis conditions

| Contents | Conditions |
|---------------------------------------|-------------|
| RPM | 1,200 |
| Injection pressure [MPa] | 100 |
| Injection mass [mg] | 14 |
| Start of energizing timing [ATDC deg] | -17 |
| Intake temperature [K] | 320 |
| CO ₂ mole fraction [%] | 20 |
| Equivalence Ratio [-] | 0.68 ~ 0.83 |

자세히 나타내었다.

Diesel-D1 (C₁₃H₂₃)연료 물성치는 AVL Fire⁽¹⁴⁾의 라이브러리를 참조하여 적용하였다. 해석에 필요한 연료 분사율은 Bosch⁽¹⁵⁾을 적용하였다. 분사 연료 질량은 모든 조건에서 14 mg으로 고정하였으며, 자세한 수치 조건을 Table 4에 나열하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 당량비 변화에 따른 엔진 성능 특성 비교

Figure 1에 CO₂를 포함한 Simulated-EGR 조건에서 연료의 분사압력은 100 MPa, 분사량은 14 mg, 통전시기는 17 deg BTDC, CO₂의 함유량은 20%로 고정하고, 당량비를 0.68~0.83으로 변경하였을 때, Cylinder pressure와 ROHR을 비교하여 나타내었다. 통전시기(start of energizing timing)는 연료 분사를 위한 인젝터 니들을 들어올리기 위해 솔레노이드에 전류를 공급하는 시간으로 정의된다. 또한, 선행연구의 결과를 참고하여 본 해

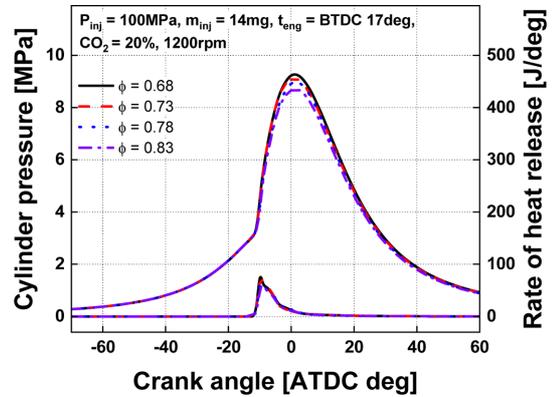


Fig. 1 Effect of equivalence ratio on the cylinder pressure and ROHR in simulated-EGR CI engine containing CO₂

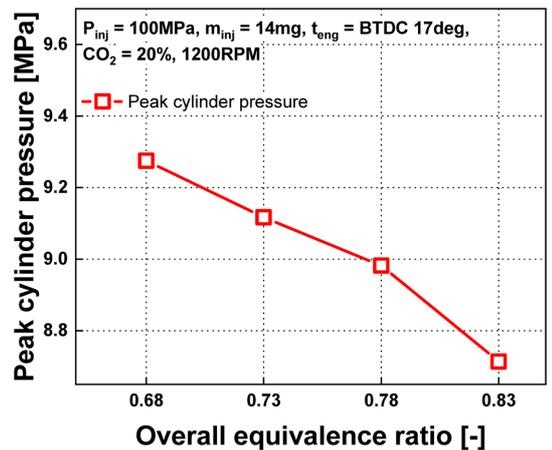


Fig. 2 Effect of equivalence ratio on the max cylinder pressure in simulated-EGR CI engine containing CO₂

석 결과의 신뢰성을 증명하였다⁽¹¹⁾. 기본적으로 당량비 변화에 따른 점화지연(Ignition delay) 특성과 ROHR은 큰 차이는 없었다. Cylinder pressure의 경우에는, 당량비 증가에 따라 최대 연소압력(Max. cylinder pressure)이 조금 낮아지는 결과를 보였다.

Figure 2에 당량비 변화에 따른 최대연소압력의 변화를 비교하였다. 당량비가 0.68에서 0.83으로 증가할수록 최대연소압력이 약 6.5%정도 감소하였다. 이러한 결과는 당량비가 증가할수록 실린더 내의 O₂의 농도가 낮아지고, 이로 인하여 연소 성능이 악화되어 최고 실린더 압력이 감소한 것으로 판단된다.

Simulated-EGR의 당량비 변화에 따른 IMEP와 ISFC

의 변화를 Fig. 3에 비교하여 나타내었다. 선행 연구결과⁽¹¹⁾, 본 연구에서 고려한 통전시기보다 이른 통전시기 (29 deg BTDC ~ 23 deg BTDC)에서는 당량비에 따른 IMEP의 차이는 없었다. 이는 당량비 증가에 따른 낮은 산소 농도로 인하여 착화지연이 길어지고, 최고 실린더 압력이 낮아져 전체적으로는 IMEP가 동일하게 유지된 것으로 판단된다.

다만, 본 연구에서 고려한 통전시기(17deg BTDC)에서는 당량비가 증가할수록 낮은 산소농도와 늦은 분사 시기로 인하여 착화지연이 길어져 당량비가 증가할수록 IMEP가 약 9.4% 가량 감소하였다. ISFC의 경우에는 잘 알려진 바와 같이 IMEP와 반대의 경향을 보여 증가하는 것으로 나타났다.

Simulated-EGR 조건에서 ISNO와 ISSoot이 당량비 변화에 의해 받는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. ISNO의 경우, 당량비가 증가할수록 실린더 내 낮은 산소 농도로

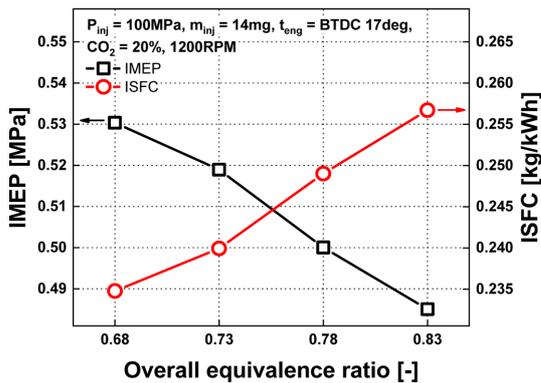


Fig. 3 Effect of equivalence ratio on the IMEP and ISFC in simulated-EGR CI engine containing CO₂

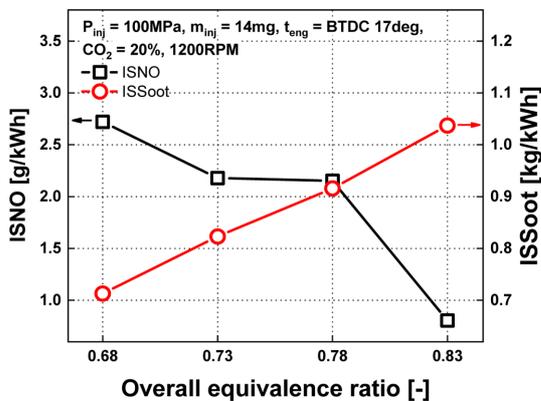


Fig. 4 Effect of equivalence ratio on the ISNO and ISSoot in simulated-EGR CI engine containing CO₂

인하여 연소 성능이 악화되고, 그 결과 실린더 내의 연소 온도가 낮아져 연소온도와 밀접한 관계가 있는 NO가 적게 발생하였다. ISSoot 특성의 결과는 NO_x의 발생과 반대로, 당량비가 0.05씩 증가할수록 약 10%의 ISSoot 값이 증가하는 전형적인 Trade-off 경향을 보였다.

4.2 당량비 변화에 따른 실린더 내 특성 비교

CO₂를 포함한 Simulated-EGR 조건에서 당량비 변화가 실린더 내 온도분포와 NO 질량 분을 분포에 미치는

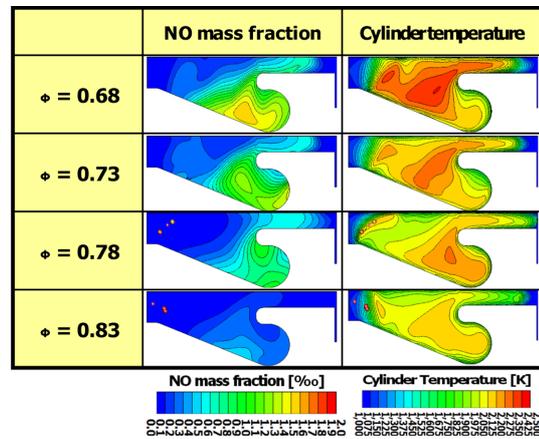


Fig. 5 Relation with NO mass fraction and cylinder temperature under the different equivalence ratio conditions (P_{inj} = 100 MPa, m_{inj} = 14 mg, t_{eng} = 17 deg BTDC, t_{aso1} = 14 deg, CO₂ = 20%, rpm = 1,200)

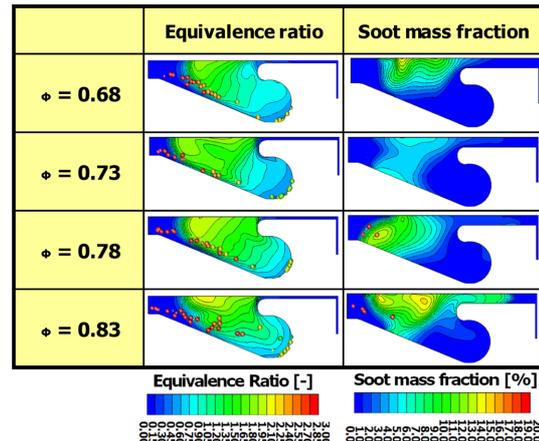


Fig. 6 Relation with equivalence ratio distributions and soot mass fraction under the different equivalence ratio conditions (P_{inj} = 100 MPa, m_{inj} = 14 mg, t_{eng} = 17 deg BTDC, t_{aso1} = 14 deg, CO₂ = 20%, rpm = 1,200)

영향을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 비교 결과, 당량비가 증가할수록 실린더 내의 NO 질량 분율의 분포 농도는 점점 벌어지는 것으로 나타났다. 이는 실린더 내 온도의 분포와 직접적인 연관성을 보이는데, 이미 서술한 바와 같이 당량비가 증가할수록, 실린더 내의 산소 농도 감소로 연소 특성이 나빠지고, 그 결과 실린더 내 온도가 낮아지게 된다. 실린더 온도 분포에 직접적인 영향을 받는 NO 질량 분율 역시 실린더 내 온도 분포 특성과 비례하여 감소하였다.

당량비 증가에 따른 산소 농도의 감소가 실린더내 Soot 질량 분율 분포에 미치는 영향을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 예상한 바와 같이 당량비의 증가는 산소 농도의 감소와 연료 농도의 증가를 의미하고, 이에 따라, 짙은 당량비 분포가 실린더 Bowl 안쪽까지 분포한 것을 확인하였다. 산소 농도의 저하는 결국 연소 성능의 저하를 유발하고, 연소 온도가 낮아져서 NO_x는 감소하나, 불완전 연소로 인해 Soot 질량 분율은 실린더 내에서 증가하는 결과를 직접 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 Simulated-EGR 관련 연구에 N₂만을 고려하던 것을 N₂와 CO₂를 동시에 적용하여 실제 EGR 조건하에 당량비 변경에 따른 배기 배출물들의 감소 영향을 연구하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 당량비 변화에 따른 점화지연(Ignition delay) 특성과 열발생률(ROHR) 특성은 큰 차이는 없었다. 다만, 당량비가 0.68에서 0.83으로 증가할수록 최대연소압력이 약 6.5%정도 감소하였다. 이러한 결과는 당량비가 증가할수록 실린더 내의 O₂의 농도가 낮아지고, 이로 인하여 연소 성능이 악화되어 최고 실린더 압력이 감소한 것으로 판단된다.

(2) 본 연구에서 고려한 통진시기($t_{eng} = 17 \text{ deg BTDC}$)에서는 당량비가 증가할수록 낮은 산소농도와 늦은 분사시기로 인하여 착화지연이 길어져 IMEP가 약 9.4% 가량 감소하였다. ISFC의 경우에는 잘 알려진 바와 같이 IMEP와 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다.

(3) ISNO의 경우, 당량비가 증가할수록 실린더 내 낮은 산소 농도로 인하여 연소 성능이 악화되고, 그 결과 실린더 내의 연소 온도가 낮아져 이와 밀접한 관계가 있는 NO가 적게 발생하였다. ISNO 특성의 결과, 당량비가 0.05씩 증가할수록 약 10%의 ISSoot 값이 증가하

는 경향을 보였다.

(4) 당량비가 증가할수록, 실린더 내의 온도 분포와 NO_x 질량 분율의 분포가 서로간의 직접적인 영향을 확인할 수 있을 정도로 일치하였다. 결국, 당량비 증가에 의한 산소 농도의 저하는 연소 성능의 저하를 유발하고, 연소 온도가 낮아져서 NO_x는 감소하겠지만, 불완전 연소로 인해 Soot 질량 분율은 실린더 내에서 증가하는 결과를 직접 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2017년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(NRF-2017RID1A3B03032337).

참고문헌

- (1) S. Turns, "An introduction to combustion: Concepts and applications", McGraw-Hill Education (Asia), Third Edition, 2012.
- (2) Y. S. Park and C. S. Bae, "Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine", Journal of Applied Energy, Vol. 133, 2014, pp. 308~316.
- (3) D. T. Hountalas, G. C. Mavropoulos and K. B. Binder, "Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions", Journal of Energy, Vol. 33, 2008, pp. 272~283.
- (4) G. K. Kokkulunk, A. Parlak, V. Z. Ayhan and I. Cesur, "Investigation of steam injection with exhaust gas recirculation (EGR) on a diesel engine", Journal of Latest Trends in Sustainable and Green Development Conference, 2012, pp. 41~46.
- (5) S. H. Kook, J. S. Kong, S. I. Park, C. S. Bae and J. H. Kim, "The effect of injection angle and nozzle diameter on HCCI combustion", Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 2, 2007, pp. 1~7.
- (6) J. E. II Parks, V. Prikhodko, J. M. E. Storey, T. L. Barone, S. A. Sr. Lewis, M. D. Kass and S. P. Huff, "Emissions from premixed charge compression ignition (PCCI) combustion and affect on emission control devices", Journal of Catalysis Today, Vol. 151, 2010,

- pp. 278~284.
- (7) B. Rohani, S. S. Park and C. S. Bae, "Effect of injection strategy on smoothness, emissions and soot characteristics of PCCI-conventional diesel mode transition", *Journal of Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, 2016, pp. 1033~1042.
- (8) Z. Peng, H. Zhao and T. Ma, "Characteristics of premixed homogeneous charge compression ignition (HCCI) diesel combustion and emissions", *Journal of Combustion Science and Technology*, Vol. 177, No. 11, 2005, pp. 2113~2150.
- (9) M. Y. Kim and C. S. Lee, "Effect of a narrow fuel spray angle and a dual injection configuration on the improvement of exhaust emissions in a HCCI diesel engine", *Journal of Fuel*, Vol. 86, 2007, pp. 2871~2880.
- (10) J. P. Cha, S. J. Yoon, S. H. Lee and S. W. Park, "Effects of intake oxygen mole fraction on the near-stoichiometric combustion and emission characteristics of a CI (compression ignition) engine", *Journal of Energy*, Vol. 80, No. 1, 2015, pp. 677~686.
- (11) S. H. Min, H. K. Suh and J. P. Chan, "Effect of Simulated-EGR (N₂) on the distribution characteristics of equivalence ratio and the formation of exhaust emissions in a CI engine under early injection conditions", *Journal of Energy*, Vol. 193, 116850, 2020, pp. 1~12.
- (12) AVL GmbH, Fire Version 2013 Combustion Module Manual, 2013.
- (13) AVL GmbH, Fire Version 2013.2 Spray Module Manual, 2013.
- (14) AVL List GmbH, Fire Version 2013 ESE-Diesel (Engine Simulation Environment) Module Manual, 2013.
- (15) W. Bosch, "The fuel rate indicator : A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection", SAE 660749, 1966.