

고온·고압 조건에서 바이오디젤의 가연한계 예측

임영찬* · 정준우* · 서현규†

A Prediction on the Flammability Limits of Biodiesel Fuel in the High Temperature and Pressure Conditions

Young Chan Lim, Jun Woo Jung and Hyun Kyu Suh

Key Words: Ambient condition(분위기 조건), Biodiesel(바이오디젤), Diesel(디젤), Flammability limits(가연한계), Homogeneous combustion(균질 연소), HCCI(균질혼합 압축착화)

Abstract

This numerical study was analyzed to predict the flammability limits of biodiesel and diesel fuels in the high temperature and pressure conditions. To achieve this, the biodiesel fuel was simulated with the chemical species of n-heptane ($n-C_7H_{16}$), methyl decanoate ($C_{11}H_{22}O_2$), and methyl-9-decenoate ($C_{11}H_{20}O_2$), and the diesel fuel was substituted the chemical species of n-heptane. The closed 0-D homogeneous reactor model which was employed the 1100 K of ambient temperature and 35 atm of ambient pressure was used for the simulation of constant volume combustion, and the equivalence ratio was changed from 0.3 to 2.5 conditions. In addition, a comparative analysis study was conducted with the results of HCCI engine simulation and flammability limits according to the changes of equivalence ratio. The results of combustion temperature, pressure, and ignition delay were increased when the equivalence ratio elevated from 0.3 to 1.3 conditions because the increase in fuel oxidation rate affects the chemical reaction of the overall combustion process. Furthermore, the CO and NO_x production under the rich combustion conditions are considered to have a trade off relationship since the OH radicals and O_2 chemical species are greatly affected the CO and NO_x production and oxidation processes.

기호설명

BD 100 : 바이오디젤
D 100 : 디젤
R : 기체 상수
 w_i : i 화학종 생성 속도
 X_i : i 화학종 몰농도

1. 서론

내연기관에 적용되고 있는 압축착화 연소를 바탕으로 다양한 방법의 연소 기법을 활용하여 엔진 내부에서 발생하는 배기 배출물 저감, 엔진 성능 및 효율 증진과 관련된 엔진 연소 전략에 대한 선행 연구가 활발히 수행되었다⁽¹⁻³⁾. 이와 관련된 선행 연구는 대체 연료 연소(Alternative fuel combustion), 균질혼합 압축착화(HCCI) 연소, 혼소 연소(Dual fuel combustion), 배기가스 재순환(EGR)을 사용한 저온 연소(LTC) 기법 등 배기 배출물 저감 및 엔진 성능 향상과 관련된 실험적 연구와 수치 해석적 연구로 활발히 수행되었다⁽⁴⁻⁷⁾.

특히, 대체 연료 연소 기법에 적용되는 바이오 연료는 기존 내연기관의 엔진 시스템 변화 없이 적용 가능하여

(Received: 23 Aug 2019, Received in revised form: 2 Oct 2019, Accepted: 21 Oct 2019)

*공주대학교 기계공학과 대학원

†책임저자, 회원, 공주대학교 기계자동차공학부

E-mail : hksuh@kongju.ac.kr

TEL : (041)521-9264 FAX : (041)555-9123

다양한 형태의 선행 연구가 수행되었다. 또한, 바이오 연료는 일반적으로 연료의 화학 구조(Chemical structure)상 11-15% 산소를 포함하고 있기 때문에 압축착화 엔진에서 발생하는 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC), 입자상 물질(PM)과 같은 배기 배출물을 저감할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁻⁶⁾. 이러한 장점을 갖는 바이오디젤 연료와 낮은 연소 온도를 바탕으로 NO_x 저감이 가능한 HCCI 연소 모드를 기존의 CI 엔진에 동시 적용하면 디젤 연료 연소시 발생되는 대표적인 배기 배출물을 저감 할 수 있을 것으로 사료된다.

하지만, 바이오디젤 HCCI 연소 적용 및 성능 분석을 위한 선행 연구⁽⁸⁻¹⁰⁾ 결과를 통해 바이오디젤 연료의 HCCI 연소 모드 적용에 따른 배기 배출물 저감 가능성이 보고되었지만, 고온·고압의 착화 특성을 갖는 CI (Compression ignition) 연소 환경에서 바이오디젤 연료의 균질 연소 및 배기 배출물 특성을 비교 분석하기 위한 가연한계(Flammability limits) 예측 연구는 매우 부족한 실정이다. 이에 따라 바이오디젤 HCCI 연소 및 배기 배출물 특성을 비교 분석하기 위해 엔진 연소 조건인 분위기 온도 및 압력, 당량비 변화 등 최적의 연소 조건을 파악하기 위한 연구가 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 균질 연소(Homogeneous combustion) 시뮬레이션을 바탕으로 고온·고압 연소 조건에서 바이오디젤 연료 및 디젤 연료의 균질 연소 특성 변화와 가연한계를 파악하기 위한 수치 해석적 비교 분석 연구를 수행하였다. 이를 위해 압축착화 연소 조건인 고온·고압의 분위기 조건(Ambient condition)을 고려하여 당량비 변화에 따른 연소 온도, 연소 압력, CO, NO_x 생성 결과를 가연한계 분포 결과로 정리하였다. 또한, 엔진 연소 및 배기 배출물 특성을 예측하기 위해 HCCI 엔진 해석 연구를 수행하여 얻어진 엔진 해석 결과와 가연한계 분포 결과의 비교 분석 연구를 통해 가연한계 예측 가능성 및 균질 연소 특성 변화를 확인하였다.

2. 수치 해석적 연구 방법

본 연구에서는 고온·고압 조건에서 바이오디젤 및 디젤 연료의 균질 연소 해석을 위해 상세화학반응 메커니즘⁽¹¹⁾을 바탕으로 수정 보완된 연소 메커니즘⁽¹²⁾을 적용하여 해석 연구를 수행하였다. 해석에 적용된 메커니즘은 바이오디젤(BD 100) 및 디젤(D 100) 연료를 모사하기 위해 3,303개의 화학종과 10,818개의 화학반응으로

구성되어있으며, NO_x 배기 배출물을 예측하기 위한 메커니즘은 화학종 4개, 화학 반응식 12개로 축소된 GRI 3.0 메커니즘을 해석 모델에 적용하였다. 또한, 고온·고압 조건의 가연한계 예측을 위해 정적 연소 해석 모델(Closed 0-D homogeneous reactor model)을 사용하여 분위기 온도(T_{amb}) 1100 K, 분위기 압력(P_{amb}) 35 atm, 당량비 0.3 조건에서 2.5 조건까지의 균질 연소 및 배기 배출물 특성을 가연한계 결과로 정리하였다.

가연한계 결과는 각각의 연소 과정에서 나타나는 연소 온도, 연소 압력, CO, NO_x 생성 특성 결과를 바탕으로 바이오디젤 및 디젤 HCCI 엔진의 연소 및 배기 배출물 특성 결과를 비교 분석하였다. HCCI 엔진 해석 연구에 사용된 모델은 선행 연구⁽¹²⁾를 통해 검증된 Multi-zone 엔진 해석 모델을 적용하였고, 이를 통해 당량비 0.5~2.0 조건 변화에 대한 해석 연구를 수행하여 가연한계 결과와 비교 분석하기 위한 데이터로 사용하였다.

정적 연소 해석 및 엔진 해석 모델은 챔버 내부에 연료와 공기가 균질한 상태로 혼합되어 연소 화학반응을 통해 바이오디젤 및 디젤 연료의 연소 과정을 계산한다. 또한, 혼합기의 연소 과정 중 챔버 내부의 물질 이동과 열전달은 고려되지 않으며, 화염 전파가 없는 기상 연소 화학반응 과정을 따른다. 정적 연소 해석 과정은 체적 변화가 없기 때문에 시스템 에너지 보존 방정식을 통해 시간 변화에 따른 내부 에너지 계산식인 식 (1)과 엔탈피-온도 함수의 관계식인 식 (2)를 통해 화학종 생성 속도(\dot{w}_i), 몰농도(X_i)를 고려하여 식 (3)과 같이 시스템 내부의 에너지 보존 식으로 정적 연소 과정을 계산한다.

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{m} \left[\sum_i \left(\bar{u}_i \frac{dN_i}{dt} \right) + \sum_i \left(N_i \frac{du_i}{dt} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{h}_i}{dt} = \frac{\partial \bar{h}_i}{\partial T} \frac{dT}{dt} = \bar{c}_{p,i} \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(Q/V) + RT \sum_i \dot{w}_i - \sum_i (\bar{h}_i \dot{w}_i)}{\sum_i [X_i] (\bar{c}_{p,i} - R)} \quad (3)$$

자세한 정적 연소 해석 및 엔진 해석 조건은 Table 1, 2와 같다.

엔진 해석 연구의 검증은 앞서 언급한 선행 연구 결과⁽¹²⁾를 바탕으로, 균질 연소를 유도하기 위해 초기 분사시기 전략(t_{inj}=BTDC 25 deg)을 적용한 단기통 압축착화 엔진 실험 결과와 HCCI 엔진 시뮬레이션 결과를 비교 분석하여 엔진 해석 연구 결과의 신뢰성을 확인하였

Table 1 Constant volume combustion conditions

Numerical program		ANSYS CHEMKIN-PRO 18.0		
Reactor model		Closed 0-D homogeneous reactor model		
Equivalence ratio (ϕ)		0.3~2.5		
Ambient temperature (K)		1100		
Ambient pressure (atm)		35		
Fuel		n-heptane	Methyl decanoate	Methyl 9 decenoate
Mixing ratio	D 100	1	0	0
	BD 100	0.5	0.25	0.25
LHV (MJ/kg)	D 100	44.92		
	BD 100	38.03		

Table 2 HCCI engine analysis conditions

Type	Multi-zone engine	
Bore × Stroke (mm)	75 × 84.5	
Connecting rod length (mm)	140	
Compression ratio	17.8:1	
Equivalence ratio (ϕ)	0.5~2.0	
Initial pressure (MPa)	0.1~0.105	
RPM	1200	
Valve timing	IVC (deg)	BTDC 128
	EVO (deg)	ATDC 172

다. 엔진 실험에 적용된 분사시기 BTDC 25° 조건은 압축 행정에서 피스톤이 상승하는 동안 분사된 연료가 피스톤 보울 림(Piston bowl rim) 부분에 충돌하여 실린더 내부의 균질 혼합기 형성 가능성과 엔진 시뮬레이션 결과와 가장 유사한 경향을 보였기 때문에 실험 검증 결과로 적용하였다. 이러한 효과를 통해 실린더 내부로 공급된 연료의 충분한 미립화(Atomization) 및 기화(Vaporization) 시간 확보와 균질 혼합기(Homogeneous mixture) 형태를 유지할 수 있는 연소 기간을 갖는 것으로 판단하였다^(13,14).

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 당량비 변화에 따른 HCCI 엔진 연소 특성

Figure 1(a), (b)는 당량비 변화에 따른 바이오디젤 및

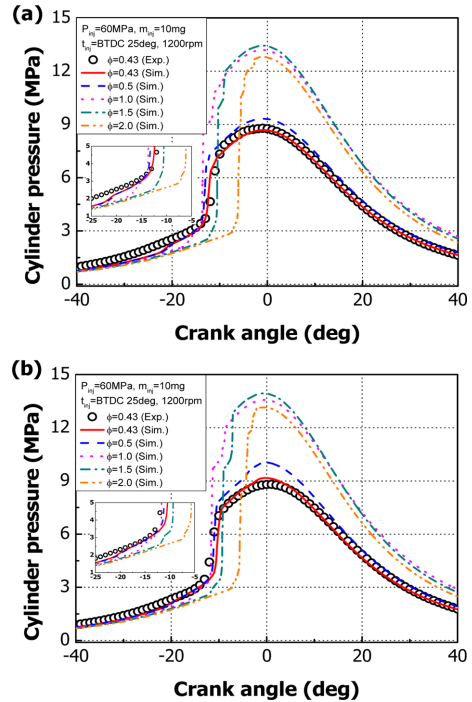


Fig. 1 Comparison of the cylinder pressure on the bio-diesel (a) and diesel (b) HCCI engine simulation in accordance with changes of the equivalence ratio

디젤 연료의 HCCI 엔진 실린더 압력 결과를 나타낸 그래프이다. 당량비 0.43 조건의 검증 연구 결과⁽¹²⁾를 바탕으로, 실린더 내부 혼합기 당량비를 0.5 조건에서 2.0 조건까지 변경하여 계산된 엔진 실린더 압력 결과는 이론 반응(Stoichiometry) 및 농후 조건에서 바이오디젤, 디젤 HCCI 연소 결과 모두 약 1.5배 이상의 실린더 압력 갖는 것으로 나타났다. 이는 당량비가 증가함에 따라 실린더 내부의 질량 분율(Mass fraction) 증가로 산화 반응이 가능한 연료의 양이 상대적으로 증가하기 때문에 이를 바탕으로 실린더 압력이 증가된 것으로 사료된다. 하지만, 당량비가 증가함에 따라 점화지연(Ignition delay)이 증가하는 결과를 야기하였다. 당량비가 증가함에 따라 연소되기 이전의 실린더 혼합기에 존재하는 산소(O₂) 화학종의 질량 분율이 감소하게 되고, 이를 통해 초기 연소 반응이 시작되는 주 연료의 산화 반응 및 저온 연소 반응에 영향을 끼쳐 점화지연이 증가한 것으로 판단된다⁽¹⁵⁾. 이러한 결과는 알케인(Alkane) 계열의 n-heptane (n-C₇H₁₆) 화학종이 갖는 화학반응 연소 특성으로, 냉염(Cool flame) 및 NTC (Negative temperature coeffi-

cient) 영역 특성이 주 연소가 일어나기 이전의 연료 산화 반응에 관여하기 때문에 나타난 결과이다. 또한, 주 연소 이전의 저온 연소 반응은 실린더 내부의 온도 및 압력 상승을 야기하기 때문에 BTDC 20° 이전의 압축 행정 동안 실린더 압력이 먼저 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 연소 특성은 모든 당량비 조건의 해석 결과에서 주 연소 이전의 BTDC 20°일 때 저온 연소가 발생하여 실린더 압력이 변화된 결과를 통해 확인 가능하며, n-heptane 화학종 비율이 높은 디젤 연료와 NTC 영역 반응성이 상대적으로 높은 당량비 1.0 이하의 조건에서 뚜렷한 경향성을 나타내는 것으로 사료된다⁽⁶⁾.

3.2 고온·고압 분위기 조건에 따른 가연한계 예측

Figure 2는 고온·고압 분위기 조건에서 당량비 변화에 따른 연소 온도 가연한계 결과를 나타낸 그래프이다. HCCI 엔진 연소 온도 및 고온·고압 조건의 가연한계 예측 결과 경향이 잘 일치하는 것으로 나타났고, 당량비 1.0~1.3 조건일 때 가장 높은 연소 온도를 보였다. 이는 앞서 언급한바와 같이, 당량비가 증가함에 따라 연료 산화 반응률이 증가하고, 전반적인 연소 화학반응 과정에 영향을 미치기 때문에 연소 온도가 증가된 것으로 사료된다. 또한, 동일한 분위기 조건에서 상대적으로 산소 농도와 반응 가능한 연료양이 가장 높은 조건이기 때문에 최대 연소 온도 결과가 나타난 것으로 판단된다.

Figure 3은 고온·고압 분위기 조건에서 당량비 변화에 따른 연소 압력 가연한계 결과를 비교한 그래프이다. 연소 온도 결과와 마찬가지로 HCCI 엔진 실린더 압력 결과와 연소 압력 가연한계 예측 결과의 경향이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 하지만, HCCI 엔진 해석 결과가

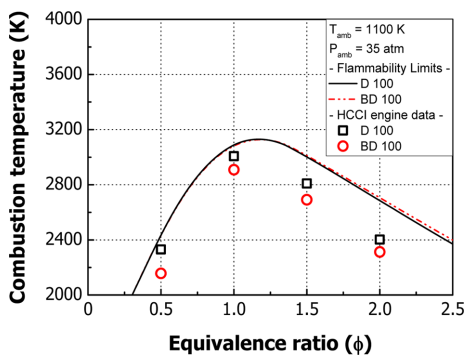


Fig. 2 Comparison of combustion temperature on the flammability limits and HCCI engine results under the high ambient temperature and pressure conditions

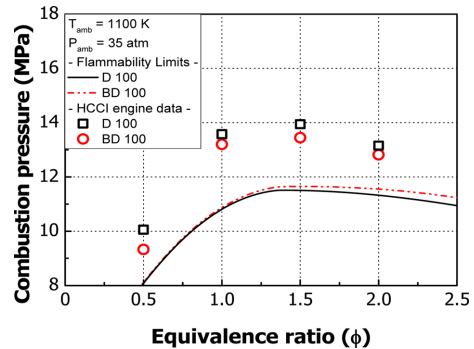


Fig. 3 Comparison of combustion pressure on the flammability limits and HCCI engine results under the high ambient temperature and pressure conditions

정적 연소 해석 결과를 바탕으로 정리된 가연한계 예측 결과보다 높게 발생했다. 이는 정적 연소 해석 조건에서 단위 시간당 압력 변화율인 식 (4)와 이상기체방정식인 식 (5)의 미분 변화를 고려하기 때문에 식 (6)과 같이 연소 온도(T₂) 차이가 작을 경우, 분위기 온도(T₁)에 직접적인 영향을 받게 된다⁽¹²⁻¹⁴⁾.

$$\frac{dP}{dt} = RT \sum_i \dot{w}_i + R \sum_i [X_i] \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

$$P = \sum_i [X_i] RT \quad (5)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}, \frac{T_2}{T_1} = P_2 \quad (6)$$

또한, 엔진 해석의 경우 연소 체적을 고려하기 때문에 계산된 결과에서 연소시 발생한 최대 엔진 실린더 압력이 가연한계 예측 결과보다 높게 나타난 것으로 판단된다. 이외에 당량비 변화에 따른 바이오디젤과 디젤 엔진의 연소 온도 및 압력 결과에서 바이오디젤 연료가 디젤 연료보다 발열량이 낮기 때문에 디젤 연료가 적용된 HCCI 엔진 해석 결과가 상대적으로 높게 나타났다.

Figure 4, 5는 HCCI 엔진 연소 과정의 최대 연소 온도 및 실린더 압력이 발생하는 구간에서 생성된 CO 및 NO_x 결과를 가연한계 예측 결과와 비교 분석한 그래프이다. CO 생성량은 연소 과정 중 산소 농도 변화에 가장 큰 영향을 받기 때문에 희박 연소 조건에서 생성량이 가장 낮은 경향을 보였고, 이와 반대로 당량비가 증가함에 따라 불완전한 연소 생성물인 CO 생성량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 당량비가 증가하지만 오히려 연소 온도가 감소하는 당량비 1.3 조건

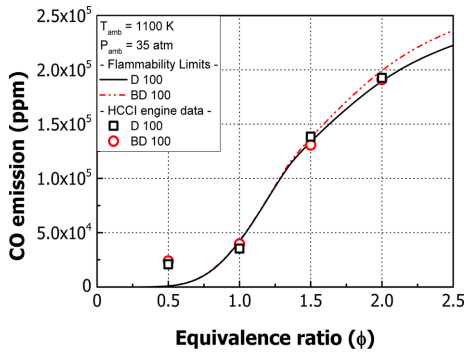


Fig. 4 Effect of the equivalence ratio on the amount of CO emission under the high ambient temperature and pressure conditions

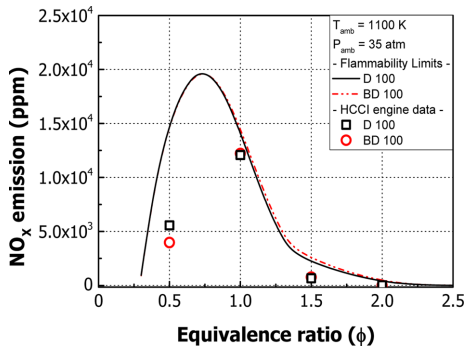


Fig. 5 Effect of the equivalence ratio on the amount of NO_x emission under the high ambient temperature and pressure conditions

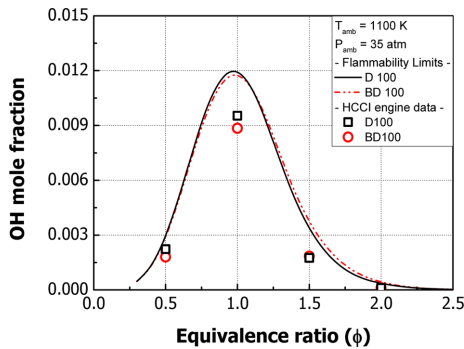


Fig. 6 Effect of the equivalence ratio on the OH mole fraction under the high ambient temperature and pressure conditions

부터 챔버 내부의 낮은 산소 농도로 인해 OH 라디칼의 산화 반응이 감소하여 연소 과정에서 생성된 CO 배출물이 급격히 증가하는 결과를 야기한 것으로 사료된다.

OH 라디칼은 CO 산화 반응뿐만 아니라 Thermal NO_x 생성 과정의 중요한 영향을 미치는 인자이다⁽¹⁷⁾. 따라서 엔진 연소 해석 및 가연한계 예측 결과에서 OH 라디칼의 화학 반응률이 낮아지는 농후한 연소 조건일 때 NO_x 생성량이 감소하는 경향을 Fig. 5, 6에서 확인 가능하다. 또한, 엔진 연소 및 가연한계 예측 결과의 NO_x 생성량은 당량비 1.0 조건과 0.7~0.8 조건에서 각각 최대 NO_x 생성량 결과를 보였다. 이는 앞서 언급한 Thermal NO_x 생성 반응 경로인 $N+O_2 \rightarrow NO+O$ 화학반응을 통해 고온 연소 조건에서 산소 농도가 충분하여 NO 생성률이 증가했기 때문에 연소 과정의 NO_x 생성량이 높게 나타난 것으로 판단하였다. 이와 같이, 연소 과정 중 발생하는 OH 라디칼은 연소시 발생하는 연소 온도 및 압력과 CO 및 NO_x와 같은 배기 배출물 형성에 직접적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 특히, HCCI 연소 과정에 매우 중요한 부분으로 연료-산화제량의 척도인 당량비 변화에 따라 희박, 이론, 농후 영역에서 나타나는 OH mole fraction 결과가 실제 확인하기 어려운 연소 상태 파악 및 가연한계 예측 연구의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온·고압 분위기 조건에서 바이오디젤 및 디젤 연료의 가연한계 예측 및 HCCI 엔진 해석 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 당량비가 증가함에 따라 HCCI 엔진 실린더 압력이 증가하였다. 이는 당량비 증가에 따른 산화 반응이 가능한 연료의 질량 분율이 증가하여 실린더 압력이 증가된 것으로 사료된다.

(2) HCCI 엔진 점화지연 결과는 당량비가 증가할수록 점화지연 또한 증가하였다. 이는 알케인 계열 연료의 저온 연소 및 NTC 영역의 연소 특성으로 인해 발생한 것으로 판단된다.

(3) 엔진 연소 온도 및 가연한계 비교 결과 당량비 1.0~1.3 조건일 때 연소 온도가 가장 높게 나타났다. 이는 연료 산화 반응물의 증가가 전반적인 연소 과정의 화학반응에 영향을 미치기 때문이다.

(4) 당량비 변화에 따른 연소 압력은 연소 온도의 차이가 크지 않을 경우, 이상기체방정식에 의해 분위 온도가 낮을수록 연소 압력이 증가하는 것으로 나타났다.

(5) OH 라디칼 및 O₂ 화학종은 연소 과정의 CO,

NO_x 생성과 산화 과정에 직접적인 영향을 미치기 때문에 농후 연소 조건에서 CO 및 NO_x 생성량의 결과가 Trade off 관계를 나타낸 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) J. P. Cha, S. H. Park, C. S. Lee, S. W. Park, "Study on Spray and Exhaust Emission Characteristics of DME-Biodiesel Blended Fuel in Compression Ignition Engine", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 1, 2011, pp. 67~73.
- (2) S. H. Park, S. H. Yoon, J. P. Cha, C. S. Lee, "Mixing effects of biogas and dimethyl ether (DME) on combustion and emission characteristics of DME fueled high-speed diesel engine", *Energy*, Vol. 66, 2014, pp. 413~422.
- (3) H. K. Suh, C. S. Lee, "A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, 2016, pp. 1601~1620.
- (4) A. Zehni, R. Khoshbakhti Saray, K. Poorghasemi, "Numerical comparison of PCCI combustion and emission of diesel and biodiesel fuels at low load conditions using 3D-CFD models coupled with chemical kinetics", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, 2017, pp. 1483~1499.
- (5) H. J. Kim, K. S. Lee, C. S. Lee, "A study on the reduction of exhaust emissions through HCCI combustion by using a narrow spray angle and advanced injection timing in a DME engine", *Fuel Processing Technology*, Vol. 92, 2011, pp. 1756~1763.
- (6) Y. Putrasari, N. Jamsran, O. T. Lim, "An investigation on the DME HCCI autoignition under EGR and boosted operation", *Fuel*, Vol. 200, 2017, pp. 447~457.
- (7) A. Nalgundwar, B. Paul, S. K. Sharma, "Comparison of performance and emissions characteristics of DI CI engine fueled with dual biodiesel blends of palm and jatropha", *Fuel*, Vol. 173, 2016, pp. 172~179.
- (8) G. Singh, A. P. Singh, A. K. Agarwal, "Experimental investigations of combustion, performance and emission characterization of biodiesel fuelled HCCI engine using external mixture formation technique", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 6, 2014, pp. 116~128.
- (9) P. Kumar, A. Rehman, "Bio-diesel in homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, 2016, pp. 536~550.
- (10) J. A. Velez Godino, F. J. Jimenez-Espadafor Aguilar, M. Torres Garcia, "Simulation of HCCI combustion in air-cooled off-road engines fuelled with diesel and bio-diesel", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 91, 2018, pp. 549~562.
- (11) O. Herbinet, W. J. Pitz, C. K. Westbrook, "Detailed chemical kinetic mechanism for the oxidation of bio-diesel fuels blend surrogate", *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 893~908.
- (12) Y. C. Lim, H. K. Suh and S. H. Yoon, "Prediction of Biodiesel Homogeneous Combustion and Flammability Limits in Compression Ignition Condition", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 42, No. 11, 2018, pp. 711~719.
- (13) Y. C. Lim, H. K. Suh, "Study on the Combustion Chemical Reaction of Biodiesel Fuel for the Improvement of Compression Ignition Combustion Performance", *ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 2017, ICEF 2017-3565.
- (14) Y. C. Lim, J. W. Jung, H. K. Suh, "Homogeneous Combustion Characteristics of Surrogate Fuels in Compression Ignition Conditions", *Asia-Pacific Conference on Combustion*, 2019, ASPACC2019-1350.
- (15) J. H. Song, K. J. Kang, S. H. Ryu, G. M. Choi and D. J. Kim, "Observation on the Ignition Delay Time of Cool and Thermal Flame of n-heptane/alcohol Blended Fuel at Low Temperature Combustion Regime", *J. Korean Soc. Combust.*, Vol. 18, No. 4, 2013, pp. 12~20.
- (16) H. J. Curran, "Developing detailed chemical kinetic mechanisms for fuel combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, 2019, pp. 57~81.
- (17) J. W. Jung, Y. C. Lim, H. K. Suh, "A Study on the NO_x Formation Characteristics and Detailed Chemical Reaction Pathways of Biodiesel in the Various Ambient Conditions", *J. Korean Soc. Combust.*, Vol. 22, No. 1, 2018, pp. 1~8.