대한조선학회논문집 Research Paper
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
eISSN:2287-7355, Vol. 63, No. 1, pp. 42-49, February 2026
https://doi.org/10.3744/SNAK.2026.63.1.42

Check for updates

2-EHN 첨가제 분율과 분위기 조건에 따른 메탄올 자발화 연소

이승원[1] · 김현수[1] · 김도형[2] · 배충식[1] · 황준식[1,†]
한국과학기술원 기계공학과[1]
맨체스터대학교 기계공학과[2]

Effects of 2-EHN Additive Fraction and Ambient Conditions on Methanol Auto-Ignition

Seungwon Lee[1] · Hyunsoo Kim[1] · Dohyeong Kim[2] · Choongsik Bae[1] · Joonsik Hwang[1,†]
Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology[1]
Department of Mechanical Engineering, The University of Manchester[2]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Methanol is a promising renewable synthetic fuel for achieving carbon neutrality and has attracted attention as a future marine fuel due to its liquid phase storage capability, low sulfur emissions, and high latent heat of vaporization, which reduces nitrogen oxide emissions. However, its application in compression-ignition engines is limited by its high auto-ignition temperature. Although methanol-diesel dual-fuel combustion has been widely adopted, the use of diesel fuel prevents complete elimination of regulated emissions. As an alternative, cetane boosters have been proposed to enable fully auto-ignited methanol combustion. In this study, the auto-ignition characteristics of methanol blended with 2-Ethylhexyl nitrate (2-EHN) were experimentally investigated in a constant-volume combustion chamber. The additive volume fraction was varied from 0 to 10%, and combustion behavior was evaluated using ignition delay, lift-off length, flame visualization, and accumulated heat release rate derived from chamber pressure measurements. Increasing the 2-EHN fraction significantly shortened ignition delay and reduced lift-off length, indicating enhanced auto-ignition stability. A notable increase in accumulated heat release rate was observed above 5% additive fraction under low-temperature conditions. Ambient temperature showed a stronger influence on methanol auto-ignition than additive fraction, with saturation behavior above approximately 1150 K. These findings demonstrate the feasibility of stable auto-ignition combustion of additive blended methanol for high compression ratio compression-ignition engines.

Keywords : Methanol(메탄올), 2-Ethylhexyl nitrate(2-EHN, 2-에틸헥실 질산염), Auto-ignition(자발화), Volume fraction(부피 분율), Ambient temperature(분위기 온도)

1. 서 론

최근 급격히 증가하는 온실가스 배출량으로 지구 온난화가 가속화되고 있으며, 2023년 International Maritime Organization (IMO) (IMO, 2023)는 선박 분야에서 2050년까지 온실가스 순배출량 0을 목표로 하는 2023 IMO GHG Strategy를 채택하였다. 이러한 규제에 대응하기 위하여 LNG, 메탄올, 암모니아, 수소 등 선박 대체 연료에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 암모니아와 수소의 경우, 분자 내에 탄소가 존재하지 않기 때문에 연소 시 이산화 탄소가 배출되지 않는 장점이 있다. 하지만 Angolo Belgian Corporation NV (2022)는 천연가스, 암모니아, 수소는 기체 연료이기 때문에 부피가 매우 크고 저장이 어렵기 때문에 선박에서 사용하기 위해서는 모두 액화시켜 사용해야하는 단점이 있음을 밝혔다.

반면, 메탄올은 상온에서 액체 상태로 존재하기 때문에 보관 및 운송이 매우 수월한 장점이 있다. 메탄올 분자 내에 탄소를 포함하고 있어 연소 시 이산화 탄소를 배출하지만, 대기 중으로부터 포집한 이산화 탄소와 재생에너지 기반 전기를 사용하여 생산

Received : 2 January 2026 | Revised : 16 January 2026 | Accepted : 29 January 2026
† Corresponding author : Joonsik Hwang, jhwang@kaist.ac.kr
It is noted that this paper is a revised edition based on the proceedings of SNAK 2025 in Changwon.

된 그린 수소를 합성하여 생산한 e-메탄올을 사용할 경우, 이산화 탄소 순 배출량 0을 달성할 수 있다. 또한, 메탄올의 높은 증발 잠열 특성으로 인해 연소 온도가 상대적으로 낮아 적은 질소 산화물이 생성되는 장점이 있다. 하지만, 메탄올은 낮은 세탄가(cetane-number)를 가지고 있어 낮은 자발화 특성을 가져, 압축착화 방식을 사용하는 기존의 선박 엔진에서 메탄올 전소는 불가능한 문제점이 있다. 지금까지는 메탄올-디젤 이종 연료 엔진 기술을 활용하여 소량의 디젤을 분사 후 압축 착화시키고 이를 점화원으로 사용하여 주 연료인 메탄올을 연소시키는 전략이 대세적이었다(Karvounis et al., 2020; Dierickx et al., 2023; Sun et al., 2023). 이종 연료 엔진 기술은 디젤을 소량 사용하기 때문에 온실가스 배출에서 완전히 자유로울 수 없다. 따라서, 최근에는 메탄올의 낮은 세탄가를 향상시킬 수 있는 첨가제를 추가하여 메탄올을 전소시키는 방안이 떠오르고 있다. 첨가제 적용 시 연료의 자발화성이 향상되는 연구 결과가 있으며, 디젤 엔진에서의 첨가제 적용 메탄올 연소 성능에 대한 연구도 수행되었다(Dempsey et al., 2013; Lee et al., 2025; Sementa et al., 2025;). 크게 Di-tertiary-butyl peroxide (DTBP)와 2-EHN이 세탄가 향상을 위한 첨가제로 많이 사용되어 왔으며, 세탄가 향상에는 2-EHN이 DTBP 보다 더 우수한 성능을 보였으며, 2-EHN 분자 내의 질소 원자로 인해 질소 산화물 배출이 더 많다는 단점이 존재한다는 연구 결과가 있었다(Dempsey et al., 2013; Schwab et al., 1999). 2-EHN을 첨가한 메탄올의 경우 DTBP를 첨가한 경우보다 자발화 성능 개선 효과가 더 크게 나타났으며, 이러한 경향은 가솔린과 에탄올에 비해 메탄올에서 더욱 두드러지게 보고되었다. 따라서, 본 연구에서는 첨가제 적용 시 메탄올의 자발화 연소의 개선 정도를 파악하기 위해 2-EHN 첨가제 분율과 다양한 분위기 조건에 따른 메탄올 자발화 연소에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과, 첨가제 분율이 증가할수록 화염의 Lift-off length가 짧아지는 경향을 보였으며, 화염의 밝기는 더 밝아지는 결과를 보였다. 첨가제 적용에 따라 관측된 lift-off length 감소한 것은 착화제에 의해 저온 산화 반응이 촉진되어 점화 지연이 단축되고, 그 결과 연료 제트가 인젝터로부터 이동하는 동안 누적되는 체류시간이 자발화에 요구되는 반응 시간과 일치하는 지점이 더 짧은 거리에서 형성되었음을 의미한다. 이는 자발화가 인젝터에 더 가까운 위치에서 개시되어 화염이 보다 빠르게 안정화되었음을 나타내며, 메탄올의 자발화 반응성이 향상되었음을 시사한다(Pickett et al., 2005). 화염 밝기 증가는 자발화 이후 연소 반응 강도와 반응 영역의 확장을 시사하며, 동일한 조건에서 연소 과정이 보다 활성화되었음을 의미한다.

이와 같이, 국제 해운 분야에서 탄소중립 달성을 위해 메탄올 전소가 가능한 압축착화 엔진 기술의 개발은 필수적인 과제로 부각되고 있다. 기존의 메탄올-디젤 이종연료 전략은 디젤 사용에 따른 온실가스 배출 한계를 가지므로, 이를 대체할 수 있는 첨가제 기반 메탄올 전소 전략에 대한 체계적인 연구가 요구된다. 본 연구는 2-EHN 첨가제 분율과 분위기 조건 변화에 따른 메탄올 자발화 연소 특성을 화염 가시화 및 연소 지표 분석을 통해 규명하고, 첨가제 기반 메탄올 전소 전략의 적용 가능성을 평가하고자 한다. 또한, 본 연구는 첨가제 적용 메탄올의 자발화 연소를 화염 가시화 기법을 통해 직접 관찰하고, 다양한 분위기 압력과 착화제 분율 조건에서 화염 구조와 발달 거동을 정량적으로 분석함으로써, 착화제에 의한 자발화 성능 향상이 실제 연소 과정에 어떻게 반영되는지를 규명하였다는 점에서 기존 연구와 차별화된다.

2. 실험 장비 및 실험 조건

2.1 다양한 분위기 조건에서의 분무 실험 장치 및 실험 조건

연소 가시화에 앞서, 메탄올과 디젤의 분무 특성을 비교하기 위해 정적 연소실 내부에서 메탄올, 디젤의 분무 가시화 실험을 수행하였고, Fig. 1에 분무 가시화에 대한 실험 장비에 대해 나타내었다. 가시화에는 총 2대의 초고속 카메라(VEO 710L, VEO 410L, Phantom)를 사용하였다. 2대의 초고속 카메라 중 1대는 Mie 산란 기법을 활용하여 액상 연료의 분무만을 가시화하였다. 기체 상태의 연료 분무 특성을 가시화하기 위해서 기상 연료에 의해 발생하는 밀도 구배를 가시화하기 위해 Z 타입 Schlieren 기법을 사용하였다. 슐리렌 기법은 기체 내 밀도 변화로 인한 굴절률 변화가 빛의 진행 방향을 미세하게 편향시키는 현상을 이용한다. 카메라로 들어오는 빛의 일부를 knife-edge로 가려 굴절률 변화로 인한 빛의 편향을 광량 변화로 변화시켜, 기상 연료로 인해 발생하는 밀도 구배를 시각화하였다. 분무 실험은 저온/저압 조건과 고온/고압 조건, 총 2가지 조건 하에서 수행되었으며 Table 1에 실험 조건에 대해 나타내었다. 저온. 저압 분위기 조건 모사를 위해서 질소 가스를 정적 연소실 내에 공급하여 분위기 압력을 1 MPa로 유지하였으며, 분위기 온도는 정적 연소실의 6면에 삽입된 히터를 PID 제어 기법을 사용하여 473 K으로 유지하였다. 반면, 고온, 고압 분위 조건은 삽입된 히터만으로 분위기 온도를 조성하는 것은 매우 많은 전력이 필요하여 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 고온, 고압 분위기 조건을 모사하기 위해서 예연소(Pre-burn) 방식을 활용하였다. 예연소 방식이란, 수소, 산소, 아세틸렌, 질소 가스를 정적 연소실에 미리 혼합을 시

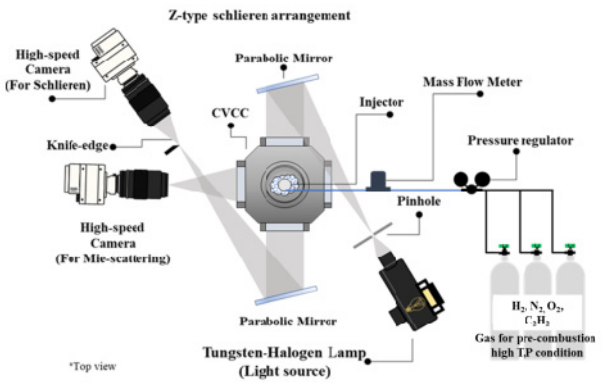

Fig. 1 Spray visualization experimental set up

Table 1 Experimental conditions for Methanol & Diesel spray

Parameters	Value
Injection pressure	50 MPa
Injection duration	700 μs
Injector type	Diesel injector (single hole modification)
Ambient gas	N2 (Low T,P condition) N2+H2O+CO2 (pre-burn, High T,P condition)
Ambient condition	Low T/ Low P case: 473 K, 1 MPa
	High T/ High P: 973 K, 5 MPa (pre-burn)
Fuel type	Diesel, Methanol
Mie-scattering	Liquid phase
Schlieren	Gas+Liquid phase

킨뒤, 점화 플러그를 통해 완전 연소시킨 후, 연소 생성물이 냉각되는 과정 중 특정 시점에서 연료를 분사함으로써 고온, 고압 분위기 환경을 재현하는 것을 말한다. 연소실 내 압력은 piezo-resistive 타입의 압력 센서를 사용하여(6043A, KISTLER) 100kHz의 측정 속도로 5초 동안 데이터를 취득하였다.

Fig. 2에 고온, 고압 분위기 조건을 위한 예연소 압력 곡선과 분사 시기 시점에 대해 나타내었다. 분사 시기 선정을 위해 총 5번의 예연소 압력 곡선을 취득하였으며, 예연소 압력 데이터를 평균을 낸 후 분사 시기를 선정하였다. 분사 시기의 온도는 측정의 한계로 인하여, 측정된 압력 데이터를 기반으로 이상기체 방정식을 사용하여 추정하였다.

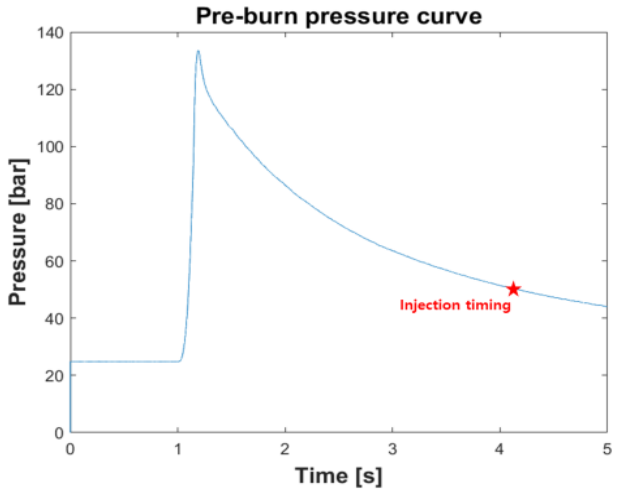

Fig. 2 Pre-burn pressure curve of high ambient pressure & high ambient temperature condition

$$P_1 V_1 = n_1 R T_1 \quad (1)$$

$$P_2 V_2 = n_2 R T_2 \quad (2)$$

여기서 P는 정적 연소실 내부 압력, V는 정적 연소실 내부 부피, n은 정적 연소실 내 기체의 몰수, T는 정적 연소실 내부 온도를 뜻한다. 1지점은 예연소 전, 2지점은 예연소 후를 나타낸다. 예연소는 정적 연소실 내부에서 일어나므로 예연소 전과 후의 기체 부피는 동일하다. 예연소 과정은 몰 수 기준으로, 혼합 가스의 70%~90%가 반응에 참여하지 않는 질소로 이루어진 혼합기에서 이루어지며, 아세틸렌과 수소가 완전 연소 되었다는 가정하에, 분무 실험 조건에서는 예연소 후의 전체 혼합기 몰 수가 예연소 전 대비 1.85% 감소하고, 연소 실험 조건에서는 1.75% 감소하여 몰 수 변화는 무시 가능한 수준이다. 따라서 식 (3)과 같은 조건이 만족되며, 최종적으로 분사 시기의 분위기 온도는 이상기체 방정식을 변형한 식 (4)를 통해 추정하였다.

$$V_1 = V_2,\ n_1 = n_2 \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{P_2}{P_1} T_1 \quad (4)$$

또한, 고온, 고압 분위기 환경에서의 디젤, 메탄올의 분무 형상을 가시화하기 위해 고온, 고압 분위기 조건에서 연료가 착화되는 것을 방지해야한다. 해당 분위기 조건 조성을 위해 Sandia National Laboratory (1997)가 제시하고 있는 몰분율 기준 질소 88.05%, 산소 8.25%, 수소 0.5%, 아세틸렌 3.2%의 비율로 예연소 전 혼합기를 제어하였다. 실험의 반복성을 확보하기 위해 각 조건 당 3회 반복 실험하였다.

2.2 다양한 분위기 조건에서의 착화제 적용 메탄올 연소 가시화 실험 장치 및 실험 조건

착화제 적용 메탄올 전소 화염 가시화를 위해서 컬러 카메라(VEO 410L, Phantom)를 사용하여 직접 화염 가시화를 수행하였으며, 화염 밝기가 saturation 되는 것을 방지하기 위해 카메라 exposure time은 21.74 μs로 설정하였다. 연료 분무 가시화 실험과 동일한 예연소 방식을 사용하여 분위기 환경을 조성하였으며 Fig. 3에 연소 가시화 실험 장치를 나타내었다. 착화제 분율에 따른 메탄올 연소 특성을 파악하기 위해 착화제 부피 분율을 0~10% 범위에서 변경하며 실험을 수행하였으며, 분위기 조건에 따른 연소 특성을 가시화하기 위해 분위기 온도를 1000~1200 K 범위에서 변경하였다. 메탄올의 분사 압력은 50 MPa로 고정하였으며, Common-rail 시스템을 사용하여 메탄올을 가압하였다. 자세한 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

분위기 압력과 착화제 분율에 따른 메탄올 연소의 정량적 분석을 위하여 연소압 측정을 기반으로 계산한 누적 열방출율(accumulated Heat Release Rate)과 인젝터 팁에서 화염까지의 거리로 추정한 lift-off length 값을 활용하였다. Lift-off length는 인젝터 팁으로부터 화염이 평균적으로 안정화되어 존재하는 위치까지의 거리로 정의되며, 고온 연소의 지표인 310nm 파장대의

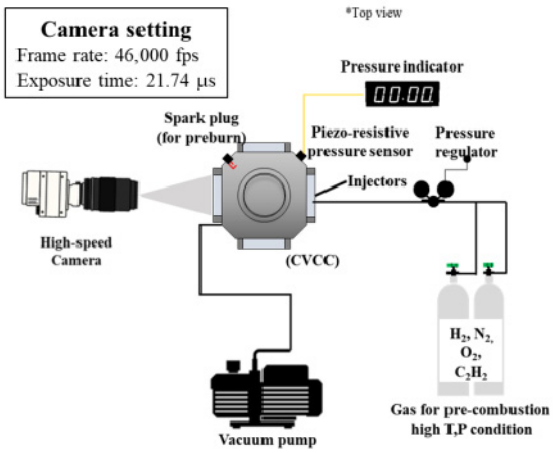

Fig. 3 Methanol combustion visualization experimental set up

Table 2 Experimental conditions for Methanol with Cetane booster combustion

Parameters	Value
Injection pressure	50 MPa
Injection duration	2500 μs
Fuel supply	Common-rail Direct Injection
Ambient gas composition	Air (after pre-burn)
Ambient temperature	1000~1200 K
Cetane-booster volume fraction	0, 3, 5, 7, 10%

빛을 방출하는 OH 라디칼이 관측되는 지점부터 인젝터 팁까지의 거리로 측정된다(Higgins and Siebers., 2001). Lift-off length 이전에는 연료와 공기의 혼합만이 이루어지며, lift-off length 이후부터 연소가 이루어지게 된다. Lift-off legnth가 짧을수록 연소가 더 빠르게 안정화됨을 의미하며, 메탄올의 경우에는 자발화 성능이 더 개선되었음을 의미한다. 누적 열방출율은 연료의 연소 과정에서 얼마나 많은 에너지가 방출되었는지를 의미하며, 본 연구에서는 정적 연소실에서 측정된 압력 데이터를 기반으로 이상기체 방정식과 에너지 보존 법칙을 사용하여 계산하였다. 부피가 일정한 정적 연소실에서 연소가 이루어지고 연소 전과 연소 후의 질량은 보존되므로 식 (5)와 식 (6)을 만족한다. 본 연구에서는 열 손실량 측정의 한계로 정적 연소실의 각 6면에 단열재를 삽입하여 열손실을 최대한 방지하고자 하였으며, 열방출율 계산 시에는 열 손실을 무시하였다. 이러한 가정은 연소가 매우 짧은 시간 스케일에서 발생하고, 동일한 연소실 및 단열 조건 하에서 동일한 연료 분사량을 기준으로 상대 비교를 수행하는 경우에 합리적이라고 할 수 있다. 하지만, 실제 연소 과정에서는 가스-벽 간 열전달이 존재하므로, 압력 기반 누적 열방출율은 연료의 화학적 발열량을 과소평가할 수 있다. 또한 연소 지속 시간이 길어지거나 분위기 온도가 높아질수록 열손실의 영향은 증가할 수 있으므로, 본 연구에서 제시된 누적 열방출율은 정량적인 에너지 수치 해석보다는 자발화 연소 특성 및 연소 강도 비교를 위한 지표로 해석하는 것이 바람직하다. 식 (5)와 식 (6)을 조합하여 식 (7)을 통해 시간에 따른 열방출율을 계산하였고, 열방출율을 시간에 대해 적분하여 누적 열방출율을 계산하였다.

$$\triangle Q = \triangle U = c_v m \triangle T \tag{5}$$

여기서, Q는 메탄올 연소로 인해 발생한 열(kJ), c_v는 정적 연소실 내 가스의 정적 비열(kJ/kg), m은 정적 연소실 내 가스의 질량(kg), T는 정적 연소실 내 온도 (K)를 의미한다.

$$\triangle P V_{CVCC} = mR \triangle T \tag{6}$$

△P (kPa)는 메탄올 연소로 인한 정적 연소실 내 압력 변화량으로 정적 연소실에 설치된 압력 센서로부터 얻을 수 있다. V_{CVCC}(m^3)는 정적 연소실 내 체적, R (kJ/kg·K)은 정적 연소실 내 가스의 기체 상수이다.

$$\frac{\triangle Q}{\triangle t} = \frac{c_v}{R} V_{CVCC} \frac{\triangle P}{\triangle t} \tag{7}$$

동일한 분위기 조건에서 각 착화제 분율 조건마다 동일한 분사기간동안 연료를 분사하였기 때문에 동일한 연료양이 분사되었음을 의미하며 동일한 연료가 분사되었을 때 더 많은 양의 누적 열방출율이 관측된다면, 메탄올의 자발화 성능이 개선되었음을 알 수 있다. 분무 실험과 마찬가지로, 실험의 반복성을 확보하고자 각 조건당 4회 반복 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 메탄올 분무 실험 결과

메탄올 연소 가시화에 앞서, 메탄올의 증발 특성을 파악하기 위해 분무 실험을 진행하였으며, 비교를 위해 디젤 분무 가시화 또한 수행하였다. Fig. 4에 메탄올과 디젤의 분무 가시화 결과를 나타내었다. 액체 상태의 연료 가시화 결과인 Mie scattering 이미지를 보았을 때, 디젤과 메탄올 모두 증발이 잘 일어나지 않는 것을 확인할 수 있으며 분무 도달 거리가 긴 특징을 나타내었다. 액상과 기상의 연료를 모두 가시화한 Schlieren 이미지에서도 메탄올과 디젤의 증발 특성이 큰 차이가 없음을 확인되었다.

Fig. 5에는 Mie scattering 이미지로부터 취득한 액상 메탄올, 디젤의 분무 도달 거리와 Schlieren 이미지로부터 취득한 액상, 기상 메탄올, 디젤의 분무 도달 거리를 나타내었다. 분무 도달 거리에서도 저온, 저압 조건에서 메탄올, 디젤 연료의 분무 특성이 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있으며, 액상 분무 도달 거리와 기상 분무 도달 거리가 큰 차이가 나지 않았다.

반면, 고온, 고압 분위기 조건에서는 저온, 저압 분위기 조건과 다르게 두 연료 모두 확연히 증발이 잘 되는 것으로 나타났다. Fig. 6에 고온, 고압 분위기 조건에서의 분무 가시화 결과를 나타

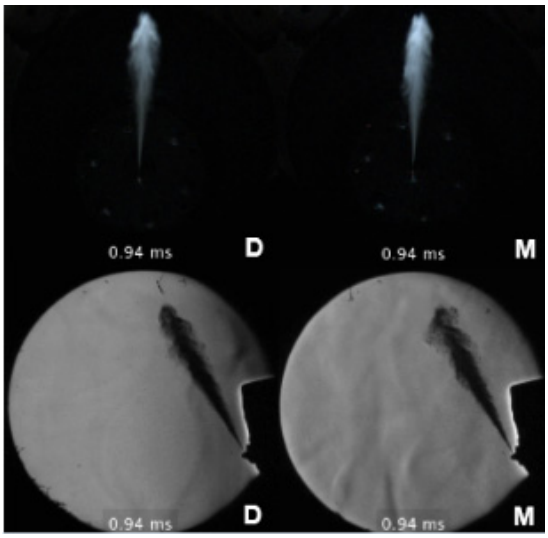

Fig. 4 Mie scattering (top) and Schlieren (bottom) images of diesel and methanol sprays obtained under low-temperature and low-pressure condition

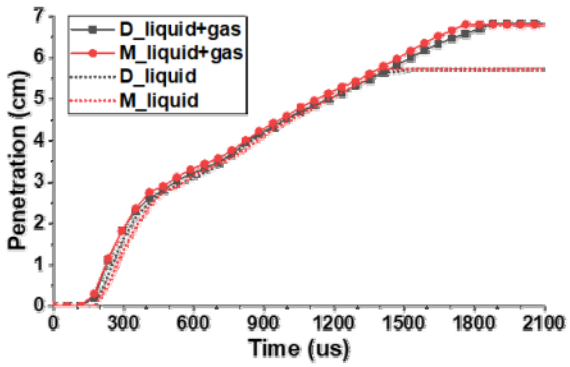

Fig. 5 Spray penetration of diesel and methanol under low-temperature and low-pressure condition

내었다. Mie scattering 이미지로부터 두 연료의 분무 도달 거리가 저온, 저압 조건에 비해 굉장히 짧아진 것을 확인할 수 있다. Schlieren 이미지에서는 디젤과 메탄올 분무 특성 차이가 크게 발견되지 않았다.

분무 도달 거리는 액상의 경우 메탄올이 디젤보다 더 긴 모습을 나타내었다. 이는, 메탄올의 높은 증발 잠열과 낮은 증기압으로 디젤보다 상대적으로 증발이 잘 이루어지지 않기 때문에 액체 상태의 연료가 더 멀리 침투하는 것으로 생각된다. 기상 상태 연료의 도달 거리는 큰 차이가 발견되지 않았다. 저온, 저압 조건과 달리, Fig. 7에서 볼 수 있다시피, 기상 연료의 분무 도달 거리와 액상 연료의 분무 도달 거리의 차이가 많이 나는 결과가 나타났으며, 이는 연료의 증발이 잘 일어남을 의미한다.

3.2 착화제 적용 메탄올 연소 실험 결과

직접 화염 가시화로 메탄올 화염 이미지를 취득한 결과, 저온, 저압 분위기 조건에서는 착화제 적용시, 고온 고압 분위기 조건

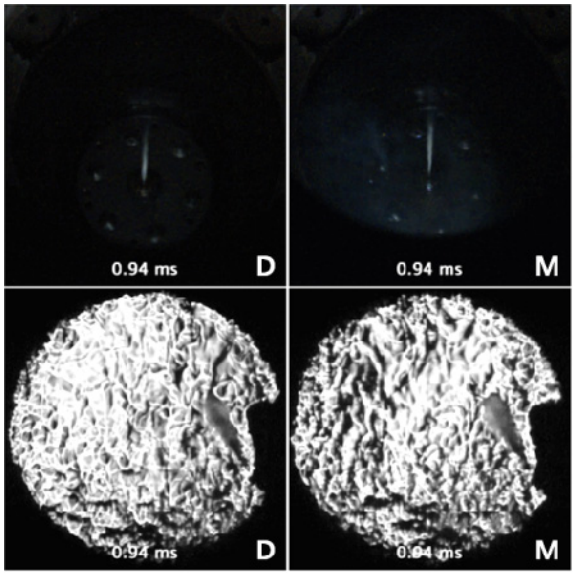

Fig. 6 Mie scattering (top) and Schlieren (bottom) images of diesel and methanol sprays obtained under high-temperature and high-pressure condition

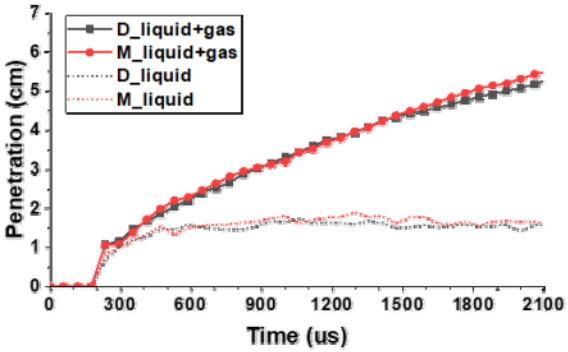

Fig. 7 Spray penetration of diesel and methanol under high-temperature and high-pressure condition

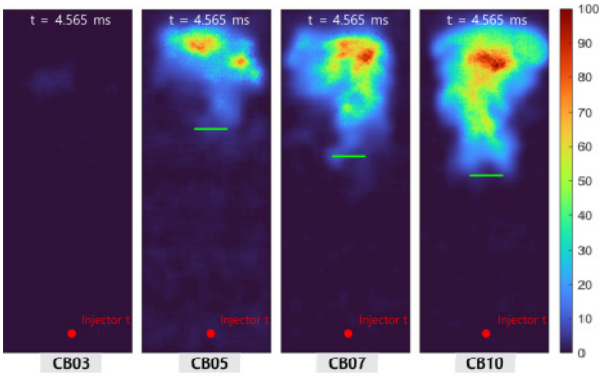

Fig. 8 Direct flame visualization of Cetane-booster added methanol under low-temperature & low-pressure condition

에 비해 메탄올의 자발화 연소 특성 개선이 적었다. Fig. 8에 화염 밝기의 가시화 결과를 나타내었으며, 빨간색 점으로 인젝터

팁의 위치를 나타내었고 Matlab을 이용하여 화염의 끝을 탐지하여 lift-off length를 측정하였다. 모든 착화제 분율 조건에서 화염의 밝기가 굉장히 어두웠으며 특히, 착화제 분율이 낮을수록 더 어두웠다. 착화제 분율이 3%일 경우에는 화염의 밝기가 굉장히 어두워 탐지해내지 못하였다.

Lift-off length의 경우, 착화제 분율이 높을수록 더 빠르게 안정화 되었으며, 길이는 더 짧은 결과를 보였다. 착화제 적용에 따라 관측된 lift-off length의 감소는 착화제에 의해 저온 산화 반응이 촉진되어 점화 지연이 단축된 결과로 해석될 수 있다. 점화 지연의 단축은 연료 제트가 인젝터로부터 이동하는 과정에서 자발화에 필요한 반응 시간이 충족되는 위치를 인젝터에 더 가까운 쪽으로 이동시키며, 이에 따라 화염이 보다 이른 위치에서 안정화됨을 의미하며 Fig. 9에 나타내었다.

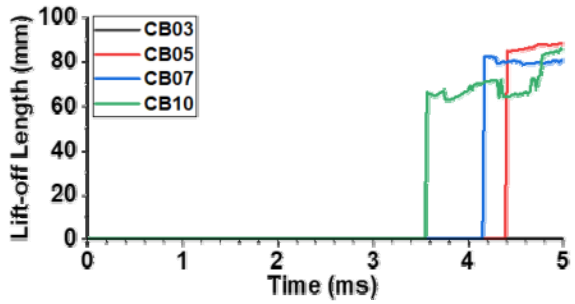

Fig. 9 Lift-off length under low-temperature & low-pressure condition

누적 열방출율 그래프에서도 착화제 분율이 증가할수록 메탄올의 자발화 연소가 개선됨을 확인하였다. Fig. 10에 착화제 분율에 따른 누적 열방출율을 나타내었으며, 착화제 분율이 5% 이상일 때부터 누적열방출율이 급격히 증가하기 시작하였다. 이를 통해, 저온, 저압 조건에서 메탄올 자발화 연소 특성을 개선하기 위해서는 착화제 분율이 5% 이상이 되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다. Ming et al. (2026)은 분위기 온도 950 K, 분위기 압력 0.4 MPa, 분사 압력 30 MPa 조건에서 착화제 분율이 3%만 되더라도 메탄올 자발화 연소가 안정적으로 발생함을 보고하였다. 이러한 차이는 분사 조건의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용된 메탄올 분사 압력은 50 MPa로, Ming et al. (2026) 조건보다 상대적으로 높아 분무 미립화가 더욱 촉진되었으며, 이로 인해 메탄올의 증발이 가속화되었을 것으로 생각된다. 메탄올은 높은 증발 잠열을 가지는 연료로서, 급격한 증발 과정에서 주변 가스의 국부 온도를 저하시켜 lift-off length 이후 형성된 점화원의 안정적인 유지에 불리한 조건을 형성할 수 있다. 또한, 높은 분사 압력은 연료 제트의 속도와 난류 강도를 증가시켜 혼합을 촉진하는 동시에, 국부 체류 시간을 감소시키고 가연 당량비 영역을 빠르게 희석시켜 자발화가 발생할 수 있는 공간, 시간적 구간을 축소시키는 것으로 해석된다. 이러한 조건에서는 평균적인 분위기 온도가 높더라도 점화원의 형성 및 유지가 어려워지며, 이를 보완하기 위해 저온 산화 반응을 보다 빠르게 촉진하고 라디칼 생성을 강화할 수 있는 더 높은 착화제 분율이 요구되는 것으로 판단된다. 결과적으로, 본 연구 조건에서는 착화제 분율이 3%보다 높은 5% 이상에서 메탄올 자발화 연소가 보다 안정적으로 형성된 것으로 해석된다.

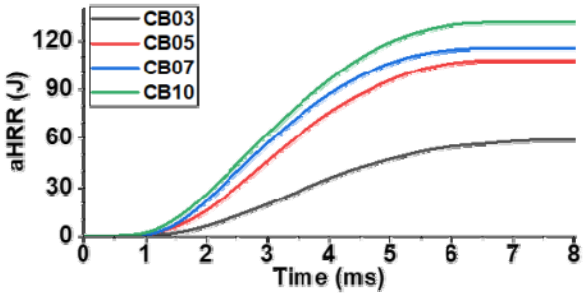

Fig. 10 Accumulated Heat release rate under low-temperature & low-pressure condition

고온, 고압 분위기 조건에서는 모든 착화제 분율 조건에서 저온, 저압 조건에서보다 더 밝은 화염이 관측되었으며, 저온, 저압 조건에서는 관측이 어려웠던 3% 착화제 분율 조건에서도 화염이 관측되었다. Fig. 11에 나타난 가시화 이미지에서도 알 수 있다시피 저온, 저압 분위기 조건에 비해 lift-off-length가 확연히 짧아진 것을 확인할 수 있다. 화염 도달 거리의 경우, 착화제 분율이 증가할수록 더 멀리 화염이 전파되는 특징을 보였다. 이는, 착화제 분율이 높을수록 연료 분사 이후 더 빠르게 화염이 형성되어 상대적으로 더 많은양의 연료가 화염에 공급되며 화염이 더 멀리 전파되는 것으로 생각된다.

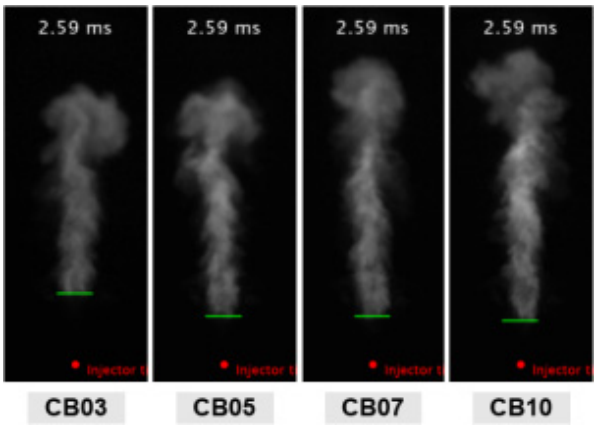

Fig. 11 Direct flame visualization of Cetane-booster added methanol under high-temperature & high-pressure condition

Fig. 12에는 고온, 고압 조건에서의 착화제 분율에 따른 lift-off length를 나타내었다. 저온, 저압 조건과 마찬가지로 착화제 분율이 높을수록 lift-off length가 감소하였지만 착화제 분율이 3%인 조건을 제외하고는 거의 유사한 모습을 보였다.

Fig. 13에 나타난 누적 열방출율 그래프에서도 lift-off length와 동일한 경향이 나타났다. 착화제 분율이 증가할수록 더 높은 누적 열방출율 보였으며 모든 착화제 분율 조건에서 저온, 저압

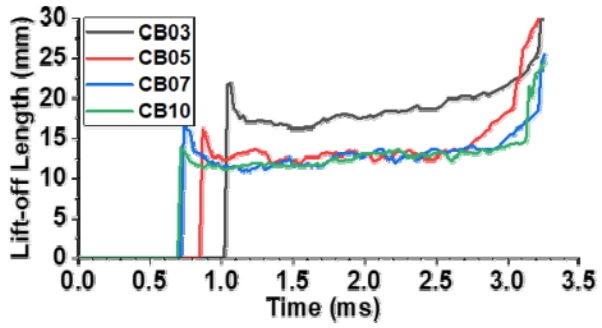

Fig. 12 Lift-off length under high-temperature & high-pressure condition

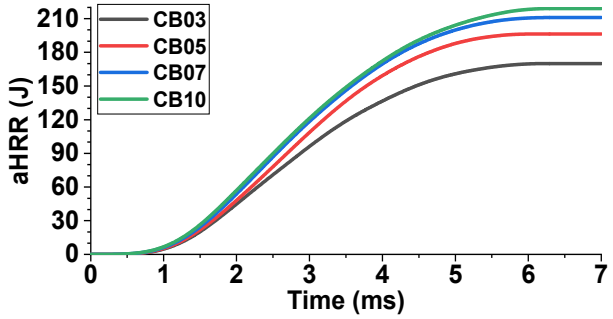

Fig. 13 Accumulated Heat release rate under high-temperature & high-pressure condition

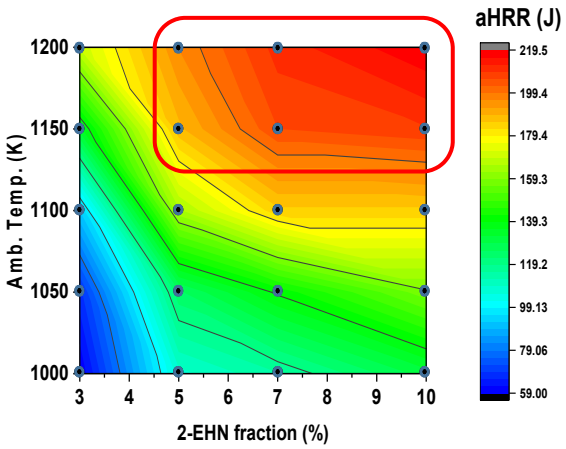

Fig. 14 Contour map of Accumulated heat release rate under various ambient temperatures and volume fractions of Cetane-booster

분위기 조건보다 더 많은 누적 열방출율을 보였다. 이는 분위기 온도 역시 메탄올 자발화 연소 성능 개선에 중요한 영향을 미침을 의미한다. 높은 분위기 온도에서는 메탄올의 증발 및 혼합 과정에서 발생하는 국부 냉각 효과가 상대적으로 완화되며, 동시에 저온 산화 반응과 라디칼 생성이 촉진되어 점화 지연이 단축된다. 그 결과, 연료 제트의 체류 시간이 제한적인 조건에서도 자발화가 발생할 수 있는 공간, 시간적 구간이 확장되어 자발화 연소 성능이 향상된다.

Fig. 14에는 착화제 분율과 분위기 온도에 따른 누적 열방출율의 contour map을 나타내었다. Contour map에서 볼 수 있듯이, 착화제 분율보다는 분위기 온도가 메탄올 자발화 연소에 더 지배적인 효과가 있음을 알 수 있다. 분위기 온도가 1100 K 미만인 경우에는, 착화제 분율이 10%가 되더라도 누적 열방출율 값이 착화제 분율이 낮은 조건의 누적 열방출율 값보다 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 하지만, 분위기 온도가 1150 K 이상인 조건부터는, 착화제 분율이 5% 이상이 될 때부터 누적 열방출율 값이 최대값에 도달하기 시작하여 일정해지는 모습이 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 선박 분야에서 온실 가스 배출 Net-zero를 달성하기 위한 암모니아, 메탄올과 같은 새로운 대체 연료의 연소 방식인 이종 연료 연소가 아닌, 연료의 자발화 성능을 향상 시킬 수 있는 첨가제를 적용한 단일 연료의 자발화 연소 성능 개선에 대하여 이루어졌다. 2-EHN 첨가제 적용 메탄올의 자발화 연소 가시화와 정적 연소실 내 압력 측정값을 기반으로 연소 성능을 특정하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 2-EHN 첨가제의 부피 분율이 증가할수록 누적 열방출율 값은 증가하였다. 동일한 양의 연료를 동일한 분위기 조건에서 분사 시, 더 많은 양의 메탄올이 자발화 연소되어 더 많은 양의 에너지를 방출했음을 알 수 있다.
2. 2-EHN 첨가제 분율이 증가할수록 lift-off length (인젝터 팁에서 화염까지의 거리) 길이가 감소하였으며, 이를 통해 점화 지연 시간이 감소한 것을 알 수 있다.
3. 메탄올 분사 시 분위기 온도가 2-EHN 첨가제 분율보다 자발화 연소에 더 많은 영향을 나타내었다. 분위기 온도가 1150 K 이상이 될 경우, 착화제 분율이 5% 이상부터는 누적 열방출율 값이 최대값에 도달하기 시작하였다.
4. 정적 연소실에서의 실험 결과를 기반으로, 엔진 적용시 착화제 분율이 10% 이상이 되더라도 안정적인 자발화 연소를 위해서는 분위기 온도가 1150 K 이상인 조건에서 메탄올 분사가 이루어져야 하며, 높은 분위기 온도가 필요하기 때문에 높은 압축비를 가지는 압축 착화 엔진에 적용이 용이할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2025년 정부(산업통상주원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-02263945, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

본 연구는 2025년 산업통상부의 지원을 받아 수행된 연구임, (자동차용 재생합성연료(eFuel) 활용 원천기술개발, 20024960)

References

Anglo Belgian Corporation NV, 2022. ABC's DZ Dual Fuel Methanol engine, *7th Large Engine Symposium*, 2022, Rosstock, Germany, 15–16 September 2022.

Dempsey, A., Walker, N. and Reitz, R., 2013, Effect of cetane improvers on gasoline, ethanol, and methanol reactivity and the implications for RCCI combustion, SAE International *Journal of Fuels and Lubricants*, 6(1), pp.170–187.

Dierickx, J., Dejaegere, Q., Peeters, J., Sileghem, L. and Verhelst, S., 2023, Performance and emissions of a high-speed marine dual-fuel engine operating with methanol-water blends as a fuel, *Fuel,* 333, Part 1.

Higgins, B. and Siebers, D., Measurement of the flame lift-off location on DI diesel sprays using OH chemiluminescence, 2001, *SAE Transactions,* 110, Section3: JOURNAL OF ENGINES, pp.739–753.

Intertnational Maritime Organization (IMO), 2023. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships: IMO.

Karvounis, P., Theotokatos, G., Patil, C., Xiang, L., Ding, Y., 2020, Parametric investigation of diesel-methanol dual fuel marine engines with port and direct injection, *Fuel,* 381, Part B.

Lee, S., Lopez Pintor, D., Narayanan, A., Mid-IR laser extinction measurements of formaldehyde emissions in a mehtanol mixing-controlled compression ignition engine, 2025, SAE Technical Paper 2025-24-0034

Ming, Z., Jin, C., Liu, H., Yue, Z., Ampah, J., Huang, H., Han, Y., Jia, Z. and Yao, M., 2026, Unravelling the instability mechanism of methanol spray flame and its enhancement by cetane additives, *Combustion and Flame,* 285.

Pickett, L., Siebers, D. and Idicheria, C., 2005, Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets, *SAE Transactions,* 115, Section 3: Journal of Engines, (2005), pp.1714–1731.

Sandia National Laboratory, Details of the composition in the constant volume premixed combustion vessel [Online] (1997) Available at: https://ecn.sandia.gov [Accessed 14 January 2026]

Schwab, S., Guinther, G., Henly, T. and Miller, K., 1999, The effects of 2-ethylhexyl nitrate and di-tertiary-butyl peroxide on the exhaust emissions from a heavy-duty diesel engine, *SAE Technical Paper,* 1999-01-1478, 1999.

Sementa, P., Tornatore, C., Catapano, F., Lazzaro, M., Iannuzzi, S., Kouris, P. and Boot, M., 2025, Lignin as cetane booster for methanol and ethanol, SAE Technical Paper 2025-24-0075.

Sun, W., Jiang, M., Guo, L., Zhang, H., Jia, Z., Qin, Z., Zneg, W., Lin, S., Zhu, G., Ji, S. and Zhu, Y., 2023, Numerical study of injection strategies for marine methanol/diesel direct dual fuel stratification engine, *Journal of Cleaner Production,* 421

Authorship Contribution Statement

Seungwon Lee: Investigation, Data curation, Formal analysis, Software, Visualization, Methodology, Writing-original draft; **Hyunsoo Kim:** Investigation, Data curation, Formal analysis, Software, Visualization, Methodology; **Dohyeong Kim:** Investigation, Data curation, Formal analysis, Software, Visualization; **Choongsik Bae:** Conceptualization, Funding acquisition, Supervision, Project administration, Writing-review & editing; **Joonsik Hwang:** Conceptualization, Funding acquisition, Supervision, Project administration, Writing-review & editing.

이 승 원

김 현 수

김 도 형

배 충 식

황 준 식