

# 고속선박엔진 적용에 관한 프로판과 메탄올 연소특성 해석

## Analysing Combustion Characteristics of Propane and Methanol for Application to High-Speed Marine Engine

윤성진\* · 박권하\*\* †  
Sung-Jin Yun\* and Kweon-Ha Park\*\* †

(Received 20 November 2023, Revision received 22 May 2024, Accepted 25 May 2024)

**초록 :** 기후 문제 해결을 위해 국제해사기구(IMO)는 선박의 온실 가스 배출량 감축 목표를 2030년 30%에서 2050년 100%로 강화하였다. 규제 만족을 위하여 LNG, LPG, 바이오연료, 메탄올, 암모니아, 수소를 선박에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 2톤급 선박에 사용되는 가솔린 선내기 엔진을 대상으로 메탄올(CH<sub>3</sub>OH)과 LPG 연료의 점화시기별 연소 특성과 유해 물질 생성에 대한 연구를 수행하였다. 점화 시점은 BTDC 20°에서 ATDC 20°의 범위로 설정하였으며, 연소실의 온도, 압력, 연료잔량, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 질소산화물(Thermal NO<sub>x</sub>)의 거동을 분석하였다. 해석 결과, 연소성능과 배기배출물을 종합적으로 고려할 때 대상엔진의 점화시기는 BTDC 5°가 최적이다.

**키워드 :** 점화시기, 메탄올, 프로판, 고속선박엔진

**Abstract :** To solve climate problems, the International Maritime Organization (IMO) has strengthened its goal of reducing greenhouse gas emissions from ships from 30% in 2030 to 100% in 2050. To satisfy regulations, research is underway to apply LNG, LPG, biofuel, methanol, ammonia, and hydrogen to ships. In this paper, a study was conducted on the combustion characteristics and generation of harmful substances by ignition timing of methanol (CH<sub>3</sub>OH) and LPG fuel for gasoline marine engines used in two-ton ships. The ignition point was set in the range of BTDC 20° to ATDC 20°, and the behavior of combustion chamber temperature, pressure, remaining fuel amount, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and nitrogen oxides (thermal NO<sub>x</sub>) was analyzed. As a result of the analysis, considering combustion performance and exhaust emissions comprehensively, the optimal ignition timing of the target engine is BTDC 5°.

**Key Words :** Ignition Timing, Methanol, Propane, High Speed Marine Engine

### 1. 서 론

1972년 UN 회의에서 황산화물(Sulphur Oxides :

SO<sub>x</sub>)과 질소산화물(Nitrogen Oxides : NO<sub>x</sub>)에 의한 산성비의 문제점이 제기되었다. 이후 국제해사기구(International Maritime Organization : IMO)를 중

\*\* † 박권하(<https://orcid.org/0000-0001-9460-8399>) : 교수, 한국해양대학교 기계IT학과  
E-mail : [khpark@kmou.ac.kr](mailto:khpark@kmou.ac.kr), Tel : 051-410-4367  
\*윤성진(<https://orcid.org/0009-0002-2094-5784>) : 대학원생, 한국해양대학교 기계IT학과

\*\* † Kweon-Ha Park(<https://orcid.org/0000-0001-9460-8399>) : Professor, Division of Mechanical IT Engineering, KMOU.  
E-mail : [khpark@kmou.ac.kr](mailto:khpark@kmou.ac.kr), Tel : 051-410-4367  
\*Sung-Jin Yun(<https://orcid.org/0009-0002-2094-5784>) : Graduate student, Division of Mechanical IT Engineering, KMOU.

심으로 선박에서의 오염물질 배출에 대한 해양환경보고와 대기질 개선에 대한 규제를 강화해 오고 있다.<sup>1)</sup> 국제해사기구(IMO)의 Third IMO GHG Study 2014에 따르면 국제해운은 2012년에 796백만 톤의 이산화탄소를 배출하였으며, 이는 전 세계 이산화탄소 배출량의 2.2%를 차지하는 것이다.<sup>2)</sup> 국제해사기구(IMO)는 2050년까지 온실가스를 100% 감소하는 규제를 마련하였으며, 탄소 배출량을 줄이기 위한 다양한 에너지 발굴 및 기술 개발이 진행되고 있다. 현재 대표적으로 고려되고 있는 추진에너지는 바이오연료, 메탄올, 수소, 암모니아, 배터리, 신재생에너지 등이 있다.

탄소중립 분야의 시장은 대표 해운사인 Maersk에 의하여 주도되고 있으며, 대체연료를 적용한 신조발주는 LNG가 1위이며, 메탄올이 2위이다. 2030년까지 탄소를 줄이기 위한 중·단기 대안으로 메탄올 연료를 주목하고 있다. 메탄올은 석탄 또는 천연가스와 촉매의 반응에 의해 생산되거나 바이오매스에 의해 생산되며, 옥탄가가 가솔린보다 높아 기관의 고압축비를 통해 연소효율을 향상시킬 수 있으며, 또한 수산기(OH)가 포함된 연료로서 연소를 촉진시킬 수 있다. 특히 증발잠열이 높기 때문에 연소온도를 낮출 수 있어 질소산화물의 배출도 줄일 수 있다.<sup>3)</sup>

현재 IMO환경규제 기준인 소비단계(Tank to Wake) 배출량을 볼 때 메탄올은 저유황유 대비 단위중량당 약 56% 낮으며, LNG 대비 단위중량당 약 44% 낮은 이산화탄소를 배출한다. 또한 상온(20℃)에서 저장가능하기 때문에 연료저장을 위한 에너지소비가 필요 없는 장점이 있다. 그러나 낮은 비중으로 인한 저장효율이 낮기 때문에 약 21% 정도의 연료탱크 공간이 추가로 필요하다.<sup>4)</sup> 선박의 연료로 적용되기 위해서는 연료의 공급망과 에너지 밀도, 연료공급시스템 및 상세한 연소특성의 분석이 요구된다.

본 연구에서는 소형고속엔진의 친환경 연료로 사용되는 LPG와 메탄올의 연소거동을 상세히 분석하고자 한다. 점화시기변화에 따른 온도, 압력, 잔류연료 및 연소생성물을 분석하였고 최적의 점화시기를 제시하였다.

## 2. 수학적 모델 및 계산조건

### 2.1 수학적 모델

전산유체해석을 위하여 ANSYS FLUENT V17.2를 이용하였고, 연소해석을 위한 지배방정식<sup>5)</sup>은 다음과 같다.

임의의 화학종  $i$ 의 질량분율에 대한 전달방정식은 식 (1)과 같다.  $R_i$ 는 화학반응에 의한 종의 순생성 속도이며,  $S_i$ 는 분산단계와 사용자 정의 생성항으로부터 추가로 주어지는 생성속도이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

화학종  $i$ 에 대한 질량 확산방정식은 식 (2)와 같다.  $Sc_i$ 는 난류 슈미트 수,  $\mu_t$ 는 난류점도 그리고,  $D_t$ 는 난류 확산도이다.

$$\vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i}) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (2)$$

화학종의 순 생성속도는 아래의 두 식 중 더 작은 값으로 계산된다.

$$R_{i,r} = \dot{v}_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_R \left( \frac{Y_R}{\dot{v}_{i,r} M_{w,R}} \right) \quad (3)$$

$$R_{i,r} = \dot{v}_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \left( \frac{\sum_P Y_R}{\sum_J \dot{v}_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 화학반응 속도는 와류동 혼합 시간 척도인  $\frac{k}{\epsilon}$ 에 의해 결정된다.

순반응률 (R)은 다음 식 (5)로 계산된다.

$$C_{j,r} \text{은 반응 } r \text{에서 종 } j \text{의 몰 농도 (kmol/m}^3\text{),}$$

$$\eta'_{j,r} \text{는 반응 } r \text{에서 반응물 중 } j \text{에 대한 속도 지수,}$$

$$\eta''_{j,r} \text{는 반응 } r \text{에서 생성물 중 } j \text{에 대한 속도 지수,}$$

$v'_{j,r}$ 는 반응 r에서 반응물 i에 대한 화학양론계수,  $v''_{j,r}$ 는 반응 r에서 제품 i에 대한 화학양론계수, 그리고,  $k_{b,r}$ 는 반응 r에 대한 역방향 속도 상수이다.

$$\hat{R}_{i,r} = |\Gamma(\ddot{v}_{i,r} - \dot{v}_{i,r})(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{n'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{n''_{j,r}})| \quad (5)$$

반응 r에 대한 순방향 속도 상수 ( $k_{f,r}$ )는 다음 아레니우스식에 의하여 계산된다.  $A_r$ 은 반응상수,  $B_r$ 은 온도지수,  $E_r$ 은 반응에 대한 활성화 에너지 ( $J/kmol$ ) 그리고  $R$ 은 표준 기체상수 ( $J/kmol - K$ )이다.

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \quad (6)$$

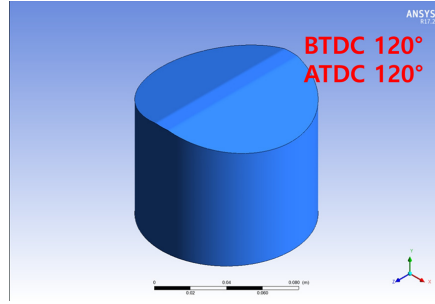
## 2.2 계산조건

점화시기에 따른 메탄올과 프로판의 연소특성 분석하기 위하여 가변격자(Dynamic mesh)를 이용하였고, 2등급 선박에 적용되는 가솔린 선내기 엔진을 대상으로 하였다.<sup>6)</sup> Table 1은 대상엔진의 제원을 나타낸다. Stroke/Bore Ratio가 0.94로 고속엔진에 유리하며 엔진 설계 시 엔진 높이를 줄일 수 있는 장점이 있다.<sup>7)</sup> 행정체적이 3,100 cc, 최대속도 5,000 rpm, 출력 225 kW인 엔진이다.

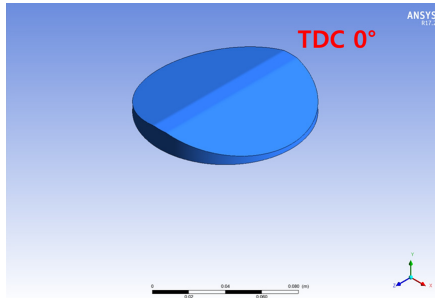
연소실 형상과 격자는 Fig. 1과 같다. 펜트루프형의 연소실이며, 사용된 격자수는 723,997개이다. 압축이 시작되는 BTDC 120°와 배기가 시작되는 ATDC 120°는 동일한 격자를 가지며 Fig. 1 (a)과 같고, 압축이 완료된 상사점에서의 격자는 Fig. 1

Table 1 Target engine specification

Item	Value	Unit
Displacement volume	3,100	cc
Number of cylinder	4	ea
Stroke × Bore	95.25 × 101.6	mm
Stroke / Bore ratio	0.94	-
Maximum speed	5,000	rpm
Rated output	225	kW



(a) BTDC 120° and ATDC 120°



(b) TDC

Fig. 1 Combustion chamber shape and grids

Table 2 Initial conditions

Item	Value	Unit	
Analysis type	Transient	-	
Turbulence model (viscous)	k-epsilon	-	
Mixture (Ideal gas)	Propane-air / Methanol-air	-	
NOx model	Thermal NOx	-	
Special mode	Model	Species transport	
	Turbulence-chemistry interaction	Finite-Rate/Eddy-Dissipation	
Initial conditions	Pressure	1.5	atm
	Temperature	318	K
	Equivalence ratio	1	-

(b)와 같다.

초기조건은 Table 2와 같다. 난류계산은 k-epsilon모델, 질소산화물생성은 Thermal NOx 모델을 적용하였으며, 초기조건으로 압력 1.5 atm,

Table 3 Spark and calculation condition

Item		Value	Unit
Spark	Number of spark	2	ea
	Initial radius	0.05	mm
	Energy	0.015	J
	Duration	0.0005	s
	Location (x, y, z)	Spark 1 : 0, 100, +2.5 Spark 2 : 0, 100, -2.5	mm
	Ignition angles	-20, -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15, +20	deg. (°)
Calculation Condition	Time step	0.0000925926	s
	Number of time steps	240	-
	Iteration	10	-

온도 318 K, 그리고 당량비 1을 적용하였다.

Table 3은 계산조건을 나타낸다. 점화시기는 -20°, -15°, -10°, -5°, 0°, +5°, +10°, +15°, +20° 로 시점을 달리하였다. 스파크 에너지는 0.015 J, 점화반경은 0.05 mm, 점화위치는 2곳이다. 시간구간 (Time Step)은 1,800 rpm 기준으로 크랭크 각 1°회전하는데 걸리는 시간인 0.0000925926초로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 연소실 온도의 거동

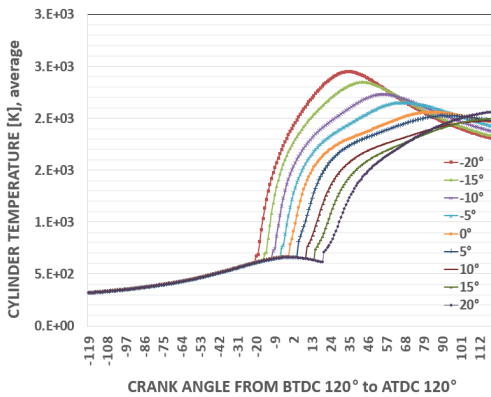


Fig. 2 Cylinder temperature variation with ignition angles

Table 4 Maximum temperature with ignition angles

	-20°	-15°	-10°	-5°	0°
Max. Temp. [K]	2,450	2,349	2,231	2,149	2,060
	5°	10°	15°	20°	Remarks
Max. Temp. [K]	2,026	1,973	2,002	2,064	-

실린더 내의 온도의 거동은 Fig. 2와 같다.

BTDC 120°에서 압축이 시작되어 점화가 시작되는 시점까지의 온도변화는 압축에 의하여 동일하게 증가된다. 점화가 시작되면 급격하게 온도가 상승하며 일정 시간이 지나면 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 점화와 함께 활발하게 연소가 진행되어 일정시간이 지나면 연소가 완료되고 피스톤의 팽창과 함께 온도가 감소되기 때문이다. 그러나 점화시기가 매우 늦은 ATDC 10° 이후의 경우에는 초기 연소가 부진하여 잔류연료가 계속적으로 연소됨으로써 배기가 시작되는 시점인 ATDC 120°까지 온도가 증가된다.

Table 4는 점화시기에 따른 실린더 최고 온도를 나타낸다. 점화시기가 크랭크 각도 BTDC 20°일 때 최고온도가 가장 높으며 점화시기가 늦어지면서 최고 온도가 감소한다. 그러나 점화시기가 ATDC 10° 이후의 경우에는 오히려 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 초기 연소의 부진으로 많은 연료들이 늦게까지 연소된다는 것을 나타낸다.

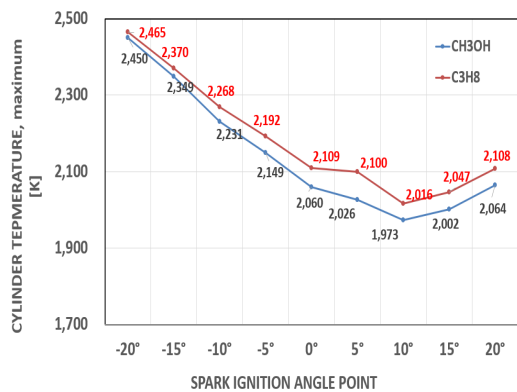


Fig. 3 Maximum temperature with ignition angles

Fig. 3은 메탄올과 프로판 최대온도를 비교한 것이다. 프로판의 경우도 메탄올과 같이 ATDC 10°까지는 최대온도가 감소되지만 이후에는 증가하는 경향을 나타낸다. 모든 영역에서 프로판이 메탄올보다 높은 온도를 나타내며, 최대온도는 2,000 K에서 2,500 K 구간 내에서 형성된다.

Fig. 4는 점화시기 BTDC 15°인 경우의 크랭크 각에 따른 연소실 내의 온도분포를 나타낸다. 점화가 시작되기 전인 BTDC 16°까지는 연소실 내의 온도가 매우 낮은 것을 알 수 있다. 점화가 시작된 직후인 BTDC 15°에서는 실린더 중앙에서 외벽으로 연소의 열이 구형화염 형태<sup>8)</sup>로 확산된다. 이후 고온영역이 급격히 증가되어 BTDC 5°에서 연소실 전체영역으로 분포되고 TDC에서는 분포 영역의 변화는 없지만 온도가 증가된다.

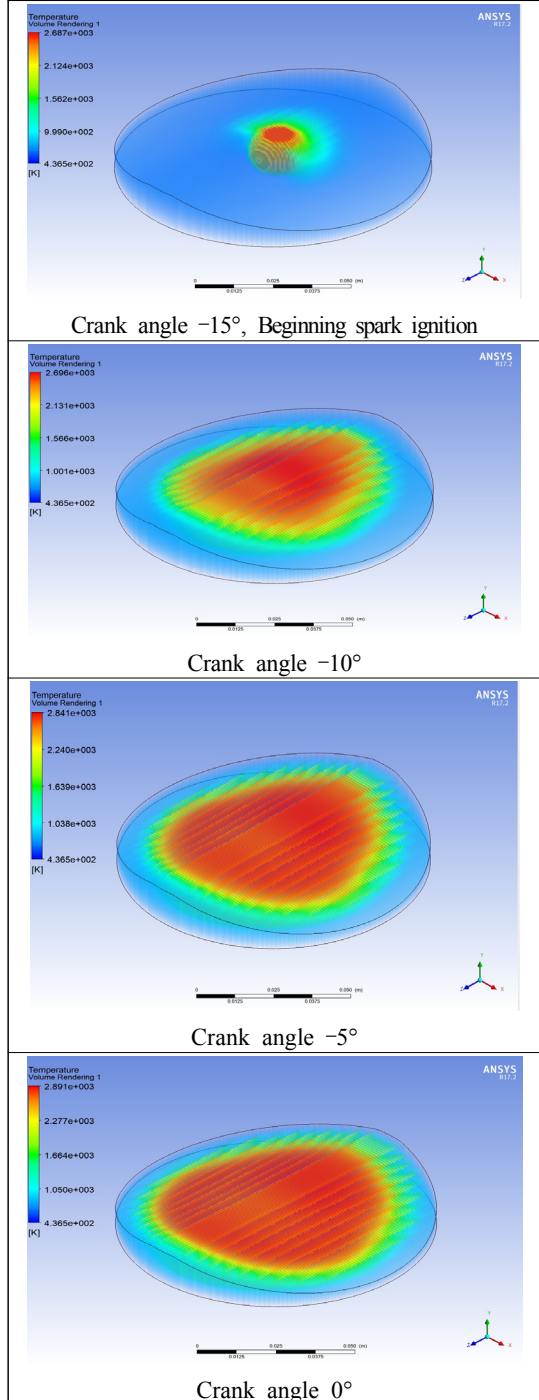
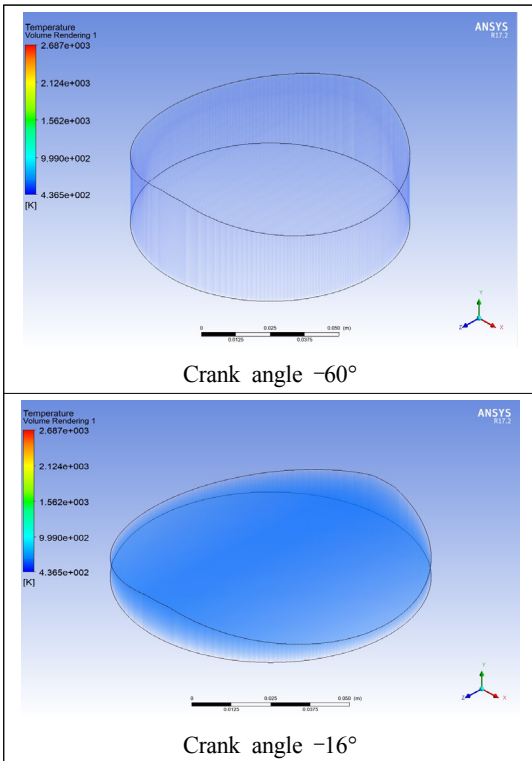


Fig. 4 Temperature distribution with crank angle variation

### 3.2 연소실 압력의 거동

Fig. 5는 점화시기가 변화할 때 크랭크 각에 따른 연소실 압력변화를 나타낸다. BTDC 120°에서 압축이 시작되어 점화가 시작되는 시점까지의 압력변화는 압축에 의하여 동일하게 증가된다. 점화가 시작되면 급격하게 압력이 상승하며 일정 시간이 지나면 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 점화와 함께 활발하게 연소가 진행되어 일정시간이 지나면 연소가 완료되고 피스톤의 팽창과 함께 압력이 감소되기 때문이다. 최대압력은 점화시기에 따라 크게 변화되는데, 점화시기가 늦어지면 감소된다.

Table 5는 점화시기에 따른 최대압력을 나타낸다. 점화시기가 BTDC 20°의 경우, 연소실 최대압력이 가장 높은 13.59 MPa까지 상승한다. 점화시기가 BTDC 15°에서 12.45 MPa로 낮아지며, 이후 점화시기가 늦어지면서 급격하게 최대압력이 감소된다. TDC 이후에는 30% 이상 감소되고 ATDC

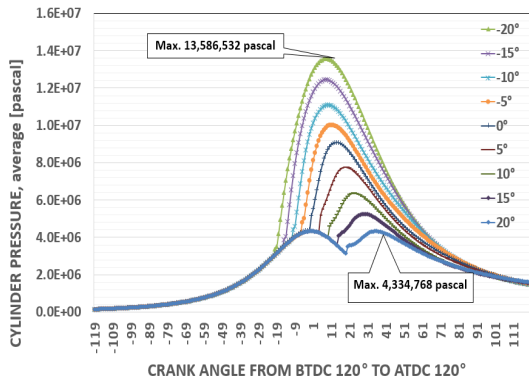


Fig. 5 Cylinder pressure variation with ignition angles

Table 5 Max pressure with ignition angles

	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	
Max. Pressure [MPa]	13.59	12.45	11.10	10.04	9.09	
	5°	10°	15°	20°	Remarks	
Max. Pressure [MPa]	7.76	6.36	5.26	4.33	-	

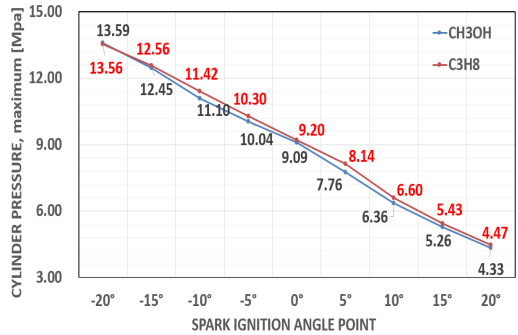


Fig. 6 Maximum pressure comparison with ignition angles

20°에서는 4.33 MPa로 사실상 엔진동력이 상실됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 메탄올과 프로판의 연소실 최대압력을 비교한 것이다. 같은 조건 하에서 프로판의 경우가 대체적으로 약간 높은 압력을 나타낸다.

### 3.3 연소실의 잔류연료

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 메탄올과 프로판의 잔류연료의 질량분율을 나타낸다. 메탄올과 프로판 모두의 경우에 점화가 시작되면서 활발한 연소와 함께 질량분율이 급격하게 감소되며 일정시간이 지나면 감소율이 낮아진다. 점화시점이 늦어지면 연소속도의 지연과 함께 질량분율의 감소율도 줄어든다.

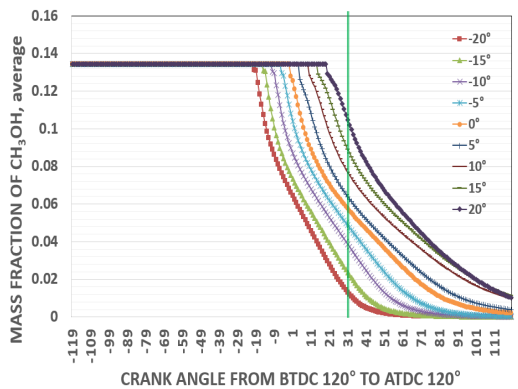


Fig. 7 Mass fraction of methanol with ignition angles



Fig. 9는 연료의 90%가 연소되는데 필요한 크랭크 각을 나타낸다. 즉, 점화시점에서 90% 연소가 완료된 시점까지의 크랭크 각을 의미한다. 메탄올의 점화시기가 BTDC 20°인 경우, 90%의 연료가 연소되는데 걸리는 크랭크 각은 51°이며, 프로판의 경우, 56°이다. 점화시기가 빠른 경우 메탄올이 상당히 빠른 연소를 나타내지만, 점화시기가 늦어지면서 메탄올과 프로판의 연소기간이 유사하게 된다. 점화시기 TDC 이후에는 오히려 프로판이 메탄올보다 빠르게 연소되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 ATDC 31°에서 점화시기에 따른 잔류 연료의 질량분율의 분포를 나타낸다. ATDC 31°는 점화시기가 BTDC 20°인 경우의 90% 연소완료 시점으로, Fig. 8에 표기된 수직 기준선을 의미한다. 실린더 내 중심에 위치한 스파크 점화로 인해 연소가 시작되고 실린더 외벽으로 열의 발생 및 확

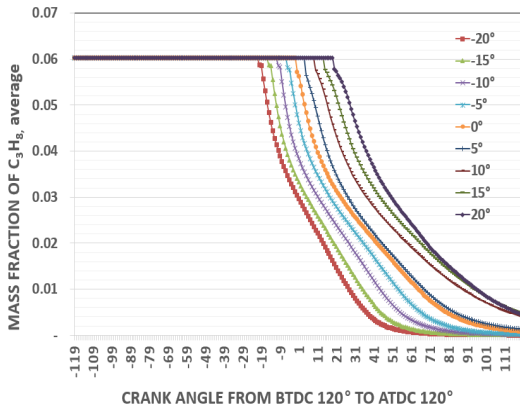


Fig. 8 Mass fraction of propane with ignition angles

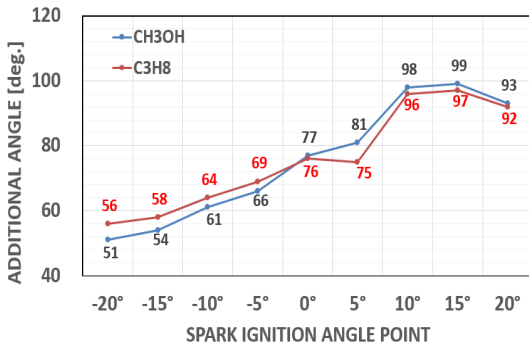
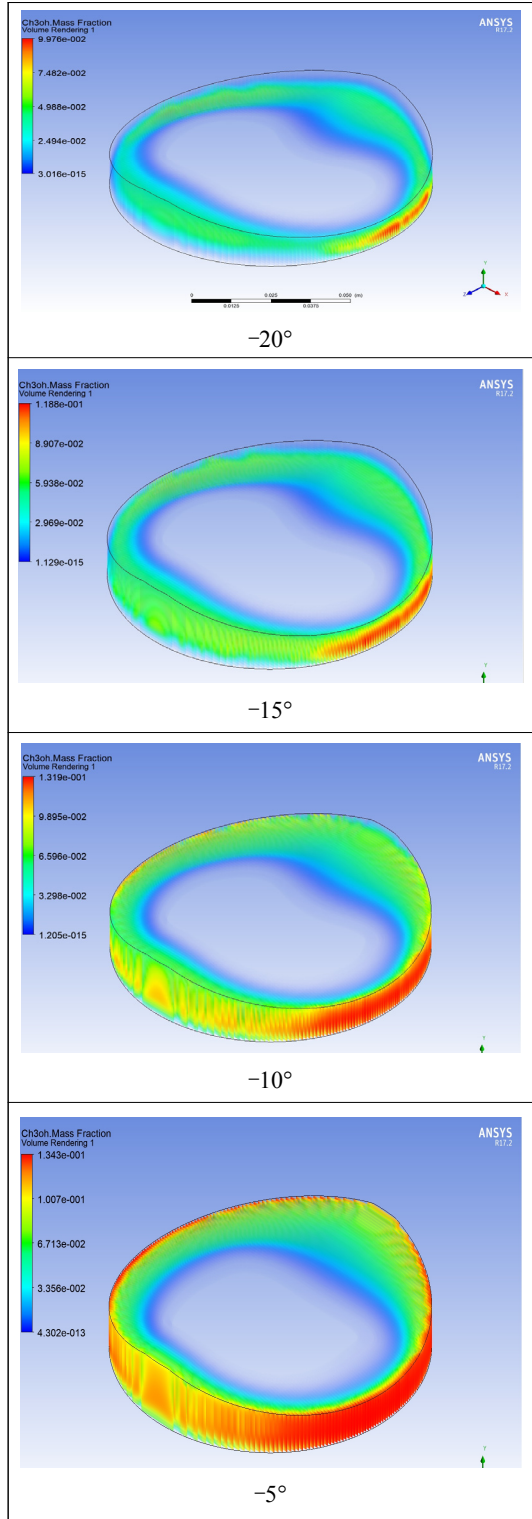


Fig. 9 Duration angle until 90% fuel burned



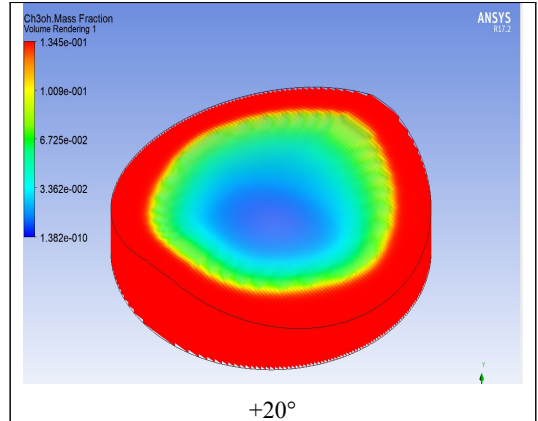
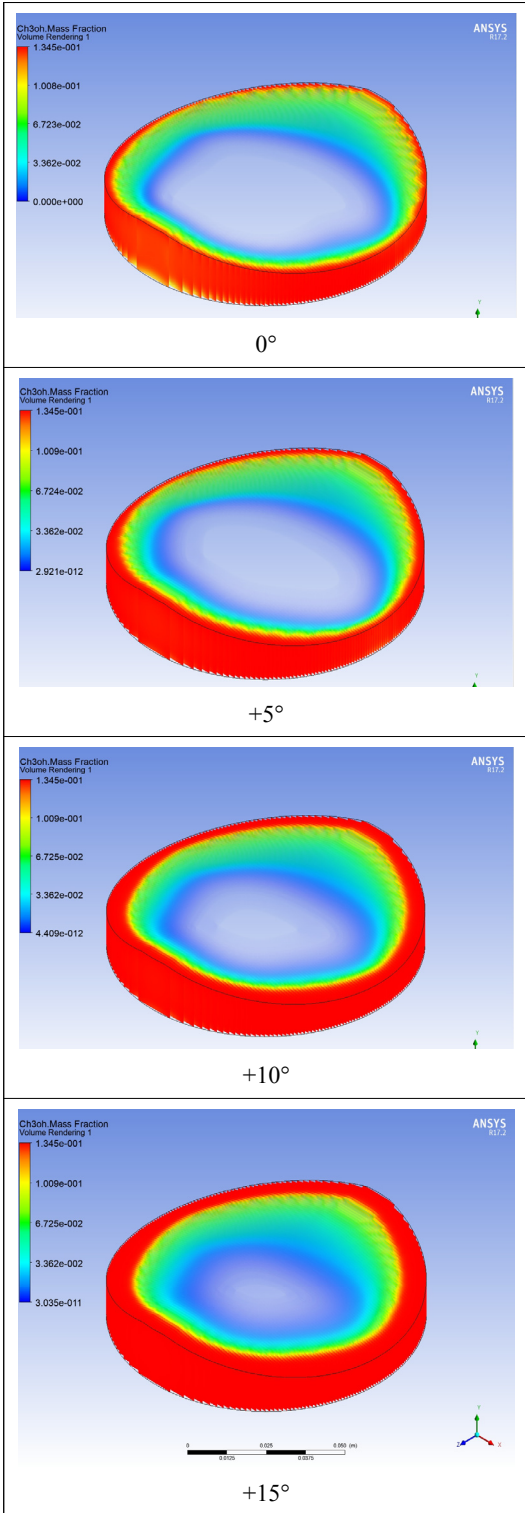


Fig. 10 Residual mass fraction distribution at ATDC 31° with ignition angles

산이 일어나게 되고, 이는 곧 메탄올과 산소가 실린더 중심에서 실린더 외벽으로 확산되며, 연소반응이 일어남을 의미한다. 점화시기 BTDC 20°인 경우는 거의 모든 연소가 완료되어 우측 선단에만 미세하게 연료가 분포된다. 점화시기가 늦어지면서 잔류연료도 증가되며 점화시점 TDC 이후 농후한 분포를 나타낸다.

### 3.4 산소와 이산화탄소의 생성

점화시기에 따른 산소와 이산화탄소의 몰분율은 Fig. 11, Fig. 12와 같다. 산소의 몰분율의 변화는 산소와 반응하는 연료의 잔류량 변화와 유사하며, 반응 생성물인 이산화탄소의 몰분율의 변화

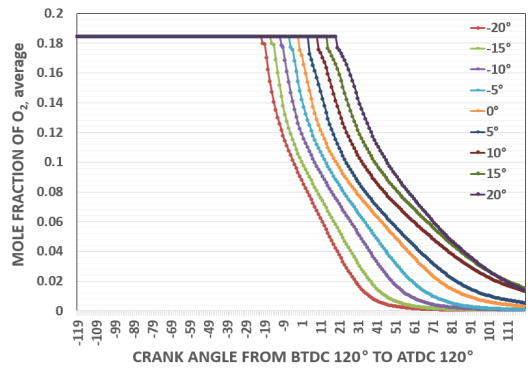


Fig. 11 Mole fraction of O<sub>2</sub> in cylinder with ignition angles



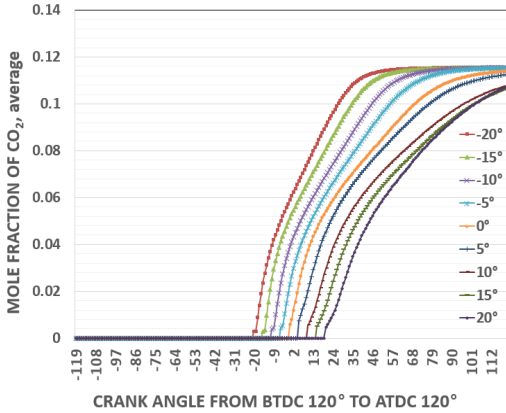


Fig. 12 Mole fraction of CO<sub>2</sub> in cylinder with ignition angles

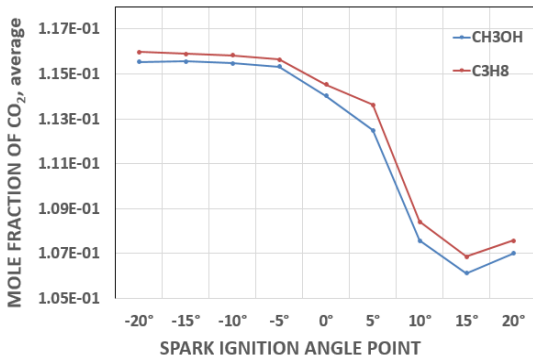


Fig. 13 Maximum mole fraction comparison of CO<sub>2</sub> in cylinder with ignition angles

와는 반대의 경향을 나타낸다. 점화가 시작된 직후에 산소의 몰분율은 급격히 감소되는 반면 이산화탄소의 몰분율은 급격히 증가된다.

최대 이산화탄소의 생성량은 Fig. 13과 같다. 점화시기가 BTDC 20°에서 BTDC 5°까지는 매우 높은 값을 나타내며, TDC부터 급격히 낮아진다. 이는 BTDC 5°까지는 연소가 활발하게 이루어지는 반면 TDC 이후에는 연소가 급격히 악화되는 것을 나타낸다.

### 3.5 질소산화물의 생성

Fig. 14는 점화시기에 따른 질소산화물의 생성율을 나타낸다. 점화되고 크랭크 각 약 5° 회전 이후 급격하게 상승하며, 크랭크 각 약 10° 회전

후 최댓값을 나타내고 급격하게 낮아진다. 이는 연소가 가장 활발하게 진행되는 점화되고 크랭크 각 10°에서 1700℃ 이상<sup>9)</sup>의 고온이 발생하며 다량의 질소산화물이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 메탄올과 프로판의 연소에 따른 최대 질소산화물 농도를 비교한 값이다. BTDC 15°에서 가장 높은 질소산화물이 생성되며, BTDC 20°와 BTDC 10°에서 비슷한 수준의 높은 질소산화물이 생성된다. 점화시기 BTDC 5° 이후부터는 급격히

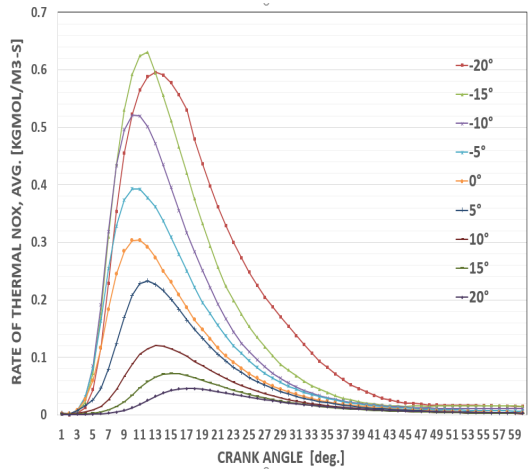


Fig. 14 Thermal NO<sub>x</sub> in cylinder as spark ignition angles (Fuel : CH<sub>3</sub>OH)

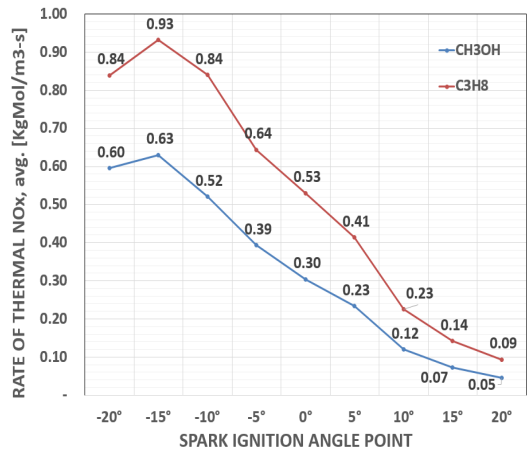


Fig. 15 Maximum rate of NO<sub>x</sub> comparison with ignition angles

질소산화물 생성이 줄어든다. 모든 조건에서 메탄올이 프로판보다 질소산화물 양이 낮으며, 이는 Fig. 6에서 보여 준 메탄올 연소의 온도가 낮아 그에 기인한 것이다.

### 3.6 피스톤에 하여진 일

Fig. 16은 연소실의 압력이 피스톤에 하여진 일을 나타낸다. 즉, 크랭크 각 1도 회전할 때 실린더 압력과 피스톤의 이동거리를 곱한 값이다. 피스톤이 올라오는 동안에는 마이너스 일이 발생하며

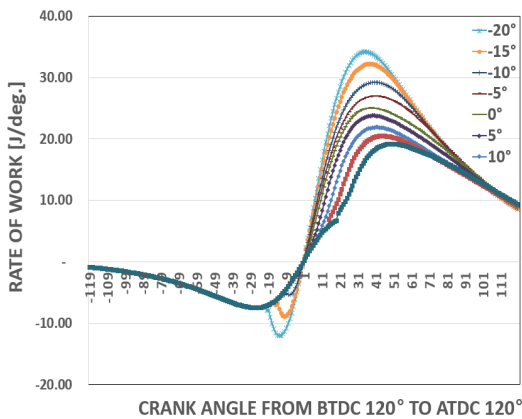


Fig. 16 Rate of work with ignition angles

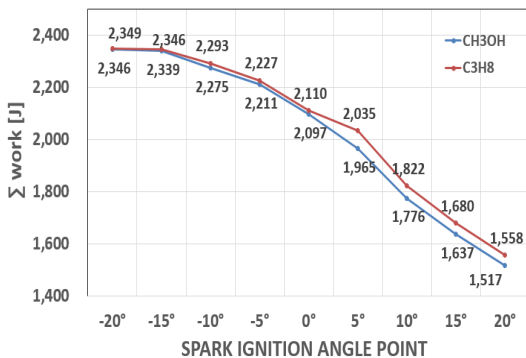


Fig. 17 Work comparison during combustion process with ignition angle

내려가는 동안은 플러스 일이 발생한다. 점화시점이 가장 빠른 BTDC 20°에서는 BTDC 10° 부근에서 가장 큰 손실이 나타나고 ATDC 30° 부근에서

가장 큰 값을 나타낸다.

일율을 전체과정에 대하여 적분한 연소과정동안의 총 일량은 Fig. 17과 같다. 점화시기 BTDC 20°에서 가장 높은 값을 나타내고 점화시기가 늦어지면서 일량도 감소된다. 연료별로는 비슷한 경향을 나타내지만 분사시기가 늦은 경우에는 프로판 연료가 상당히 높은 값을 나타낸다.

## 4. 결론

2톤급 선박용 고속엔진을 대상으로 점화시기에 따른 메탄올과 프로판 연료의 연소특성을 분석한 본 논문을 요약하면 다음과 같다.

1) 점화가 시작되면 활발한 연소와 함께 급격하게 온도가 상승하며 일정 시간이 지나면 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 점화시기가 매우 늦은 ATDC 10° 이후의 경우에는 초기 연소가 부진하여 잔류연료가 계속적으로 연소됨으로써 배기가 시작되는 시점인 ATDC 120°까지 온도가 증가된다.

2) 점화시기가 가장 빠른 BTDC 20°에서 연소실 최대압력이 가장 높은 값을 나타내며, 점화시기가 TDC보다 늦어지면 30% 이상 감소되고, 점화시기 ATDC 20°에서는 4.33 MPa로 사실상 엔진 동력이 상실됨을 알 수 있다.

3) 90% 연소시간은 점화시기가 늦어지면서 증가하고, TDC 이후에는 급격히 증가된다. 점화시기가 빠른 경우는 메탄올의 연소시간이 짧고 TDC 이후에는 프로판이 짧다.

4) 이산화탄소의 생성분석 결과, BTDC 5°까지는 연소가 활발하게 이루어지는 반면 TDC 이후에는 연소가 급격히 악화된다.

5) BTDC 15°에서 가장 높은 질소산화물이 생성되며, BTDC 20°와 BTDC 10°에서 비슷한 수준의 높은 질소산화물이 생성된다. 점화시기 BTDC 5° 이후부터는 급격히 질소산화물 생성이 줄어든다.

6) 피스톤에 하여진 일의 양은 점화시기 BTDC 20°에서 가장 높은 값을 나타내고 점화시기가 늦어지면서 감소된다.

이상에서 분석한 연소성능과 배기 배출물을 중

합적으로 고려할 때 대상엔진의 점화시기는 BTDC 5°가 최적인 것으로 판단된다.

### Author contributions

S. J. Yun; Investigation, Methodology, Visualization, Validation, Writing-original draft. K. H. Park; Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

### References

1. J. U. Lee, C. H. Kim and S. H. Han, 2023, “A Study on the Design and Numerical Analysis of Gas Pressure Regulating Valve for LNG Ship”, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 27(4), 6. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.4.005>)
2. IMO, 2014, Third IMO GHG Study 2014, MEPC. 67/6 - Reduction of GHG emission from ships, 13.
3. S. A. Kim and W. G. Wang, 2018, “A Study on the Combustion Stability and Characteristics for D.O - Methanol Blending Oil in Diesel Engine”, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 22(1), 49. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.048>)
4. H. S. Um, 2023, “Forecast and status for the Methanol of Ship”, *International trend for maritime decarbonization*, 7, 35-38.
5. ANSYS, 2013, “ANSYS Fluent Theory Guide.; Release 15.0”.
6. C. G. Kang, M. R. Ryu and K. H. Park, 2022, “Ignition Timing Analysis for Propane Conversion of High Speed Marine Engine”, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 26, 42. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.3.040>)
7. Short-Stroke versus Long-Stroke engines : which is better, [Online] Available at : <https://www.bikesrepublic.com/featured/short-stroke-versus-long-stroke-engines-which-is-better/> [Accessed 24 Sep 2023].
8. M. Ringel, D. Jörss, C. Fink and B. Buchholz, 2023, “Modeling the Combustion Behaviour of a Spark-Ignition Engine”, 2023 International Interdisciplinary Ph.D Workshop (IIPhDW), Germany, 2. (DOI:10.1109/IIPhDW54739.2023.10124428)
9. B. S. Yoon, 2012, “A study on the Improvement of Marine Fuels for Fuels Saving and NOx Emission Reduction”, Master's thesis, Graduate School of Kangwon National University, 18.