

미연소 연료 배출 (Methane Slip) 감소를 위한 밸브 타이밍 분석

안 성 료¹⁾, 민 승 재¹⁾

한양대학교 미래자동차공학과¹⁾

Analysis of Valve Timing for Reducing Unburned Fuel Emission

Seongryur An¹⁾, Seungjae Min¹⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 047-63, Korea

Abstract : Global efforts to reduce carbon emissions have emphasized the need for decarbonization in the shipping industry. Liquefied Natural Gas (LNG) has emerged as a promising alternative fuel due to its environmental benefits and existing infrastructure. However, "Methane Slip," the release of unburned methane, offsets the greenhouse gas reduction benefits and poses a significant challenge. This study investigates valve timing strategies to mitigate methane slip in LNG engines. Using a single-cylinder model based on the Hyundai Lambda 3.3 T-GDi engine modified for LNG, simulations were conducted via MATLAB/Simulink to analyze the effects of Early Exhaust Valve Closing (EEVC) and Late Intake Valve Opening (LIVO) strategies on unburned methane emissions and engine performance. Results reveal that EEVC reduces methane slip more effectively than LIVO, albeit with a larger impact on engine output. This study provides insights into optimizing valve timing for improved engine efficiency and reduced emissions in LNG-fueled engines.

Key words : LNG(액화천연가스), Combustion(연소), Methane slip(메탄 슬립), Valve timing(밸브 타이밍), Early exhaust valve closing(조기 배기밸브 닫힘), Late intake valve opening(후기 흡기밸브 열림 지연)

Nomenclature

W : work
P : pressure
V : volume
A : area
R : specific gas constant
m : mass
T : temperature
a : crank length
l : connecting rod length
 c_v : specific heat capacity at constant volume
Q : quantity of heat
M : molar mass
LHV : lower heat value
 η : combustion efficiency
h : convective heat transfer coefficient
 ε : emissivity

σ : stefan-boltzmann constant
 ρ : density
D : diameter
L : length of valve lift
 C_d : discharge coefficient
TDC : top dead center
BDC : bottom dead center
EEVC : early exhaust valve closing
LIVO : late intake valve opening

Subscripts

cyl : cylinder
amb : ambient air
dis : displacement
com : combustion
v : volume
conv : convection
rad : radiation
max : maximum

1. 연구 배경

탄소 배출 규제가 전 세계적으로 강화되고 지속 가능한 에너지 사용이 요구됨에 따라, 운송 산업의 탈탄소화가 필수 과제로 떠오르고 있다. 특히, 전 세계 교역량의 약 90%¹⁾를 담당하는 해운 산업은 전체 온실가스 배출량의 약 3%²⁾를 차지하며 심각한 대기오염의 원인으로 지목되고 있다. 또한 선박은 자동차 7만 대에 해당하는 이산화탄소, 200만 대 분량의 질소산화물, 250만 대 분량의 미세먼지 및 발암물질을 배출하는 주요 대기오염원³⁾으로, 이에 대한 규제와 개선이 필요하다.

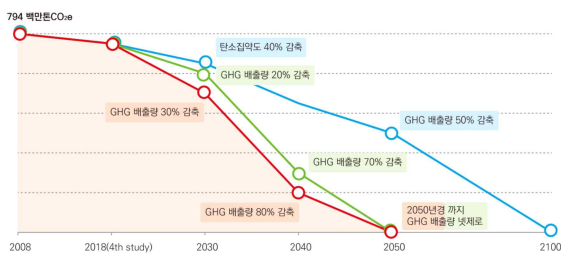


Fig. 1 IMO strategy on greenhouse gas

국제해사기구(IMO)는 2027년부터 시행 예정인 탄소세 도입과 더불어, 2050년까지 온실가스 순 배출량 제로(Net Zero)⁴⁾를 달성하겠다는 목표를 발표하였다. Fig. 1은 해운 산업의 탄소 중립을 위한 장기적 로드맵으로, 이를 달성하기 위해선 Fig. 2에 제시된 것과 같이 여러 기술적 개선을 통한 온실가스 배출을 줄이는 노력이 요구된다. 이 중에서도 친환경 대체 연료로의 전환이 가속화하고 있으며, 현재 암모니아, 수소, 메탄올, 액화 천연가스(LNG)가 주요 대안으로 주목받고 있다.



Fig. 2 Key technologies of eco-friendly ships

특히 LNG는 풍부한 매장량과 안정적인 공급망, 이미 구축된 인프라를 활용할 수 있는 장점 덕

분에 단기간 내 상용화가 가능하며, 현재 가장 널리 사용되고 있다. 황산화물을 배출하지 않는 것은 물론, 질소산화물과 온실가스 배출량을 각각 약 20%까지 감소시킬 수 있는 환경적 이점을 제공한다.⁷⁾ 기존 내연기관 설비에도 추가적인 하드웨어 변경 없이 적용 가능해 경제적이고 효율적인 연료로 평가받고 있다.

밸브 오버랩 (overlap)	화염면 냉각
착화 실패 (실화, misfiring)	미세 틈 (crevice) 미연소 메탄 발생

Fig. 3 Main causes of methane slip

그러나 LNG 연료 사용 시 연소되지 않은 메탄 가스가 대기 중으로 배출되는 메탄 슬립 (Methane Slip) 현상이 Fig. 3에 제시된 여러 원인으로 발생하며, 이는 LNG의 친환경적 장점을 오히려 상쇄시킨다. 이를 해결하기 위해 배기가스 재순환(EGR) 기술, 후처리 촉매 기술, 직접 연료 분사 기술, 엔진 제어 소프트웨어 조정 등 다양한 기술적 접근법이 연구되고 있다. 이 중 소프트웨어 기반 밸브 타이밍 조절 기술은 하드웨어 변경 없이 적용이 가능하여 경제적이고 실용적인 방법으로 주목받고 있다.

본 연구는 LNG 선박 도입 과정에서의 주요 기술적 과제인 메탄 슬립 문제를 해결하기 위한 엔진 개선 방안을 제시하고자 한다. 특히 엔진 제어 소프트웨어를 활용한 밸브 타이밍 조절을 통해 메탄 슬립 감소에 중점을 두고 연구를 진행하였다.

2. 해석 모델

본 연구는 현대 람다 3.3 T-GDi 엔진의 단기통 모델을 기반으로 진행되었다. 당초 실제 선박 엔진⁵⁾ (MAN L28/32DF, 보어 280mm, 스트로크 320mm, 실린더 8~10개)을 활용하고자 하였으나, 선박 엔진은 밸브 타이밍 및 연료 성능 변화에 따른 미세한 입력 차이가 결과에 유의미하게 반영되지 않아 정밀한 분석이 어려운 한계가 있었

다. 더불어, 차량 엔진에 비해 선박 엔진의 제원 데이터 확보가 제한적이어서 직접적인 분석에 제약이 있었다. 이에 따라, 경향성 분석을 목적으로 실린더 간 간섭 효과를 배제할 수 있는 단기통 모델을 설정하여 연구를 수행하였다.

연료는 LNG로 변경하여 모델링하였으며, 발열량, 압축비, 공연비, 연료 분무량 등 주요 연료 특성을 LNG에 적합하도록 조정하였다. LNG는 높은 옥탄가로 인해 압축비를 상승시키기 용이하며, 이를 통해 액체 연료 대비 낮은 체적효율과 에너지 밀도의 한계를 보완할 수 있다. 또한, 실제 선박 엔진에 대한 실험은 제작 및 운영에 있어 막대한 비용⁸⁾과 큰 규모로 인한 접근성 한계가 존재한다. 이러한 점을 고려하여, 본 연구는 소형 엔진 모델을 활용하여 실험적 접근성을 높이고, 경제적이고 실용적인 데이터 분석을 가능하게 하였다. 주요 제원은 Table 1에 제시하였다.

2.1 엔진 모델

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Mechanical	
Number of cylinder	Single Cylinder
Bore	92 mm
Stroke	86 mm
Connecting Rod	153 mm
Compression ratio	13
Fuel	
Lower Heat Value for LNG	50 MJ/kg
Air-fuel Ratio	15
Injector slope	3.02 mg/ms
Simulation	
At speed	700 rad/s
Initial Engine Speed	720 rpm
Speed limit	8000 rpm
Combustion duration	50 deg
Initial intake manifold pressure	1.7 bar

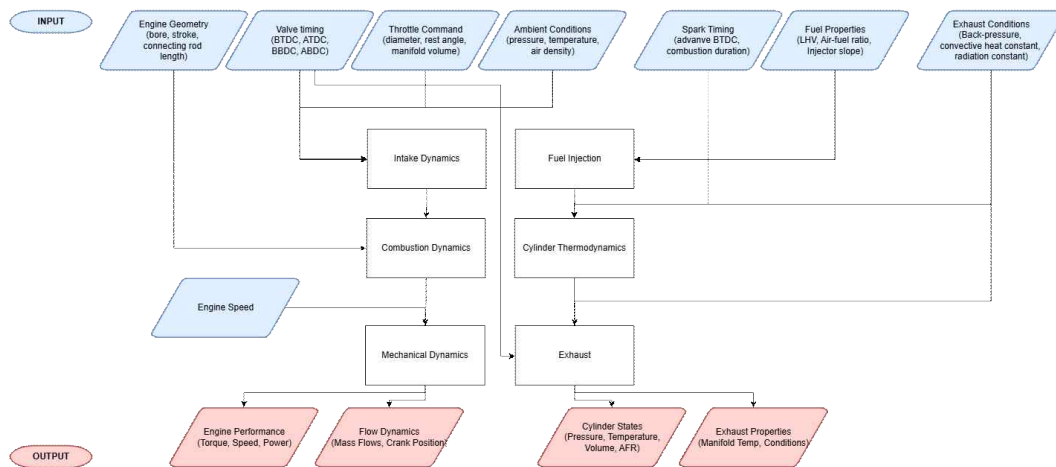


Fig. 4 Flowchart for simulink spark ignition engine module

2.2 Simulink 모델

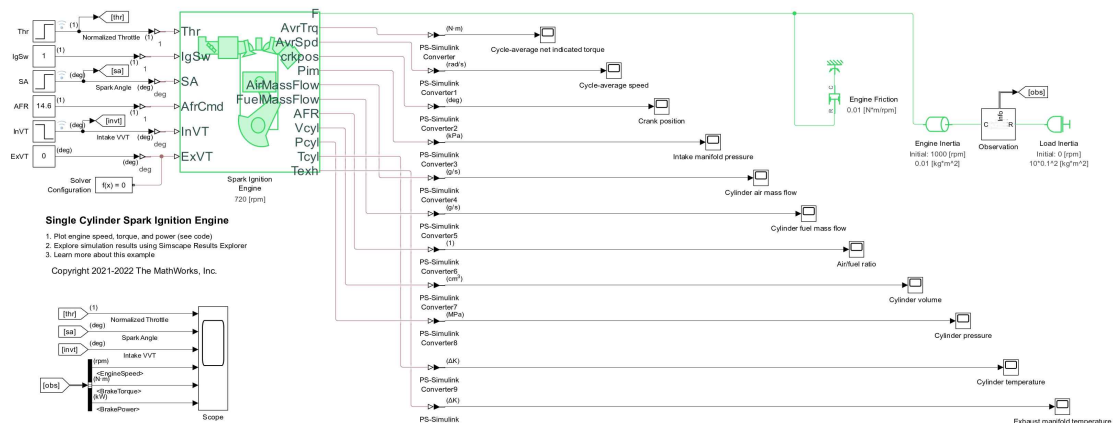


Fig. 5 Simulink model : single cylinder combustion engine

Fig. 4는 본 연구의 Simulink 모델에 사용된 입력과 출력 사이 관계에 대한 순서도를 나타낸다. Fig. 5는 스파크 점화 엔진(Spark Ignition Engine)의 모든 물리적 출력을 스코프(scope)에 연결하여 시각화하였다.

2.2.1 수학적 모델

수식 관계를 통해 최종적으로 엔진의 출력 그래프를 스코프(scope)를 통해 확인할 수 있도록 하였다. 순간 발생 출력값에서 압력은 이상기체 방정식, 부피는 크랭크의 회전각에 따른 값이 유도 되도록 식을 구성하였고, 이상기체 방정식의 열량 관계식을 통해 연료 연소에서 발생하는 열량에서 연료의 저위 발열량, 실린더 내 연료 질량, 연소 효율뿐 아니라 배기 면적에 의한 대류 열손실, 배기에서 발생한 복사 열손실도 고려되도록 식을 설계하였다.

과정은 다음과 같다.

1) 최대 엔진 출력값 유도

$$\frac{d}{dt}W = \int \frac{d}{dt}[P_{cyl}(\theta) - P_{amb}] \times V_{cyl}(\theta) d\theta \quad (1)$$

Fig. 9의 엔진 출력 그래프는 최종적으로 식 (1)을 통해 계산하며 여기서 P_{amb} 는 대기압(1 atm, 25°C)을 나타낸다. 압력과 부피는 각각 식 (2)와 (3)을 대입한다.

$$P_{cyl}(\theta) = \frac{m_{air, fuel} \times R \times T_{cyl}(\theta)}{V_{cyl}(\theta)} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{cyl}(\theta) &= V_c(\theta) + V_s(\theta) \\ &= V_c(\theta) + V_{dis} \times \frac{1}{a} l + a - (a \cos \theta + \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \theta}) \end{aligned} \quad (3)$$

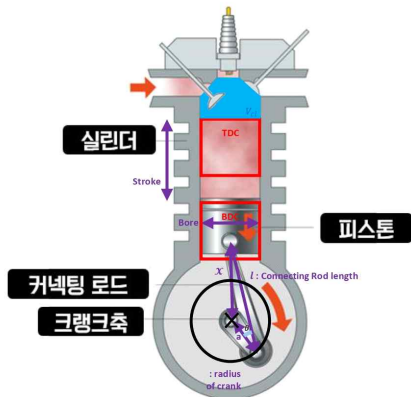


Fig. 6 Volume of cylinder depending on angle

실린더 부피는 Fig. 6에서 표시한 회전축 중심으로부터 피스톤 헤드의 거리, 크랭크와 커넥팅 로드 길이의 관계에 의해 크랭크의 회전각에 따라 변하며 식(3)에서 각각의 체적은 Fig. 7을 통해 나타내었다.

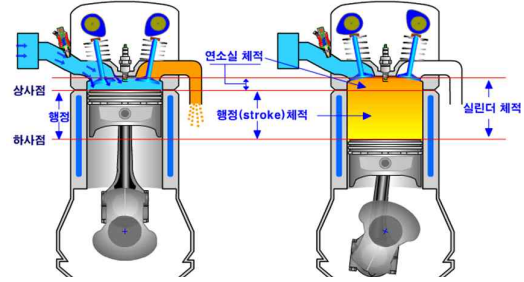


Fig. 7 Volume of stroke, clearance, and combustion chamber

$$T_{cyl} = \frac{Q_{com} - \Delta(P_{cyl} \times V) - Q_{loss}}{m_{air, fuel} \times c_v} \quad (4)$$

식(2)의 $T_{cyl}(\theta)$ 는 연소 반응에 의한 열 발생과 복사 및 대류에 의한 열 손실을 고려하여 열량 방정식인 식(4)를 이용한다.

$$Q_{com} = \eta \times m_{fuel} \times LHV \quad (5)$$

연소에 의한 발열량은 연소 효율을 고려한 것으로서, 연료의 질량과 저위 발열량의 곱으로 구한다.

$$Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (6)$$

열 손실은 배기 매니폴드의 대류에 의한 Q_{con} 과 복사에 의한 Q_{rad} 로 설정한다. 손실량은 다음의 두 식 (7), (8)을 통해 구한다.

$$Q_{conv} = h \times A(T_{cyl} - T_{wall}) \quad (7)$$

$$Q_{rad} = \epsilon \times \sigma \times A(T_{cyl}^4 - T_{wall}^4) \quad (8)$$

2) 유량 및 유동 면적 관계식

위의 과정에서 각도 변화에 따른 실린더 내 연료 질량은 다음과 같이 설정한다.

$$\dot{m}_{throttle} = C_d \times A_{throttle} \sqrt{2\rho_{air} \times (P_{amb} - P_{manifold})}$$

$$\dot{m}_{intake} = C_d \times A_{valve} \sqrt{2\rho_{air} \times (P_{manifold} - P_{cylinder})} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$A_v(\theta) = n \times L(\theta) \times \pi \times D_v \quad (11)$$

여기서, n 은 밸브의 개수, D_v 는 밸브 직경을 의미한다. 식(11)을 통해 구한 유효 유동 면적을 식(9)와 (10)에 대입하여 유량을 구한다.

$$*L(\theta) = \begin{cases} \frac{L_{max}}{2} (1 - \cos \frac{\pi(\theta - \theta_{open})}{\Delta\theta}) & (IVO \leq \theta \leq IVC) \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \quad (12)$$

식(12)를 통해 구한 흡기, 배기 밸브 리프트 길이를 식(11)에 대입한다.

3. 연구 방법

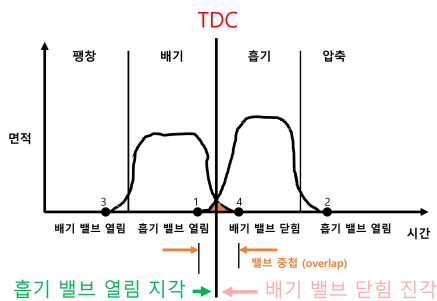


Fig. 8 Valve angle : EVC, IVO

1) 기본 조건 (Base)

IVO(BTDC) 61°	EVO(BBDC) 52°
IVC(ABDC) 45°	EVC(ATDC) 10°

2) 조건 1

IVO(BTDC) 61°	EVO(BBDC) 52°
IVC(ABDC) 45°	EVC(ATDC) 1 -10°

3) 조건 2

IVO(BTDC) 52 -61°	EVO(BBDC) 52°
IVC(ABDC) 45°	EVC(ATDC) 10°

기본 조건을 기준으로 조건 1은 상사점(Top Dead Center) 부근 배기밸브의 닫힘 시점을 1에서 10도로 조정하고, 조건 2는 상사점 기준 흡기 밸브의 열림 시점을 52에서 61도로 조정하였다. Fig. 8은 TDC를 기준으로 흡기 밸브 열림 시각과 배기밸브 닫힘 시각이 일어날 때 그래프의 이동방향과 엔진 행정 과정에서의 밸브 중첩 기간(overlap)의 형성을 설명한다.

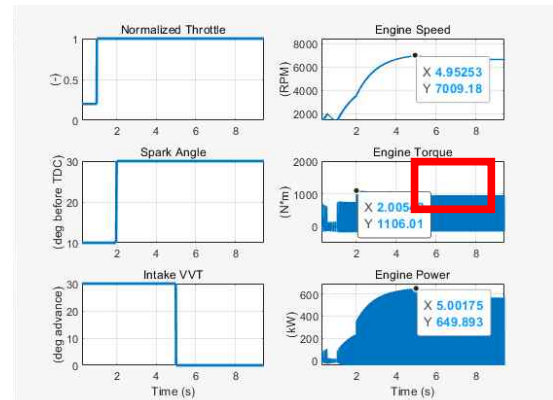


Fig. 9 Engine Power graph from modeling

시뮬레이션 결과로 출력된 그래프 Fig. 9를 통해 각 각도에 대응되는 최대 엔진 출력값을 도출해내었다.

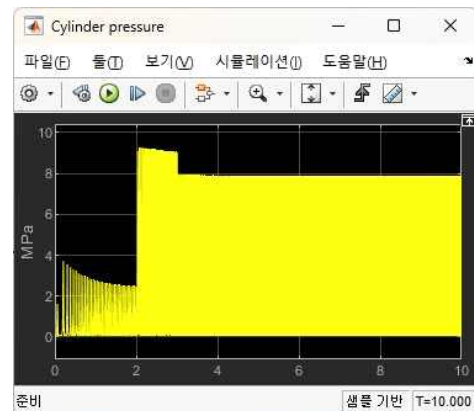


Fig. 10 Cylinder pressure graph from modeling

Fig. 10을 통해서 흡기와 배기 밸브에서 연료 분사시 실린더 내의 압력에 의한 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

4. 연구 결과

4.1 결과 데이터

Table 2 Engine power peak value of EEVC and LIVO

ATDC [°]	Engine Power [kW]	BTDC [°]	Engine Power [kW]
1	651.07	52	644.96
2	651.04	53	645.31
3	650.98	54	644.97
4	649.89	55	645.30
5	649.47	56	646.00
6	649.01	57	645.30
7	647.82	58	645.31
8	647.33	59	645.30
9	646.53	60	644.95
10	644.95	61	644.95

실제 선박 엔진은 기통 수(8~10기통)와 실린더 체적(MAN L28/32DF 엔진 기준 Bore: 280mm, Stroke: 320mm)이 더 커서 출력이 높을 것으로 예상된다. 또한, 각도 변화에 따른 출력 차이도 뚜렷할 것이다. 이번 시뮬레이션은 단기통 모델과 제한된 실린더 체적을 적용하여 한계가 있었으나 결과는 참고 논문과 유사한 경향성을 띄어 유의미한 분석이 가능하였다.

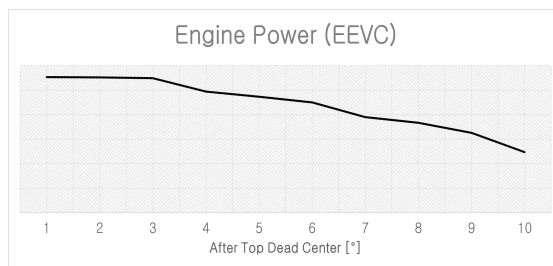


Fig. 11 Graph of engine power peak value of EEVC

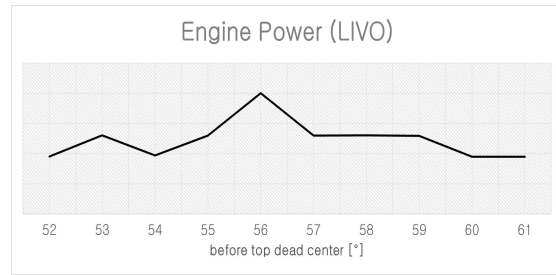


Fig. 12 Graph of engine power peak value of LIVO

4.2 결과 분석

ATDC 1° 에서 엔진 출력은 651.069kW로 가장 높게 나타났으며, ATDC 각도가 증가함에 따라 출력이 점진적으로 감소하여 ATDC 10° 에서는 644.952kW로 측정되었다. 배기밸브 닫힘 시점이 늦어질수록 연소실에 잔류하는 배기 가스가 증가하고, 이로 인해 연소 효율과 엔진 출력이 감소한다.

반면, LIVO 전략에서는 흡기밸브 열림 시점을 BTDC(Before Top Dead Center) 61° 에서 52° 까지 조정하였다. 이 경우 엔진 출력의 변화는 상대적으로 미미하였으며, 출력값은 644.951kW에서 646.004kW 사이로 나타났다. 이는 흡기밸브 열림 시점을 조정하더라도 연소 효율에 큰 영향을 미치지 않으며, 미연소 메탄 배출 감소 효과가 EEVC 전략에 비해 적다는 것을 의미한다.

참고 문헌⁶⁾에 따르면, 흡입 초기에는 밸브오버랩이 클수록, 즉 흡기밸브 열림 지각(LIVO)이 큰 각도로 일어날수록 역류되는 공기량이 증가하여 실린더 내로 유입되는 혼합기 유입량이 감소하지만, 배기 행정에서는 배기밸브 닫힘 지각(EEVC)를 통해 오버랩 기간을 증가한 경우 반대로 실린더 내의 압력이 감소하여 혼합 기체의 유입이 빠르게 일어남을 확인할 수 있었다.

실린더 내 연료 함량을 의미하는 체적 효율의 값이 상대적으로 EEVC가 높기 때문에 같은 각도 변화량에 대해서 연료의 함량이 크게 변화하였음을 알 수 있었다.

5. 결론

1) 본 연구는 '메탄 슬립(Methane Slip)' 현상의 요인 중 하나인, 흡기된 연료가 연소되지 않고 배기 포트를 통해 배출되는 현상을 밸브 타이밍

조정을 통해 완화하는 것을 목표로 수행되었다. 하사점(Bottom Dead Center) 부근의 흡·배기 각도와 기타 변수들을 일정하게 유지한 상태에서, 배기밸브 닫힘 진각(Early Exhaust Valve Closing, EEVC)과 흡기밸브 열림 지각(Late Intake Valve Opening, LIVO) 전략에 따른 밸브 타이밍 조정이 미연소 메탄 배출에 미치는 영향을 분석하였다. 이 과정에서 엔진 출력은 연소 시 실린더 내 잔류하는 연료량에 비례한다고 가정하였다.

2) 동일한 밸브 타이밍 변화량($0-10^\circ$)에 대해 배기밸브를 늦게 닫았을 때 상대적으로 큰 출력 감소가 관찰되었으며, 이는 EEVC 전략이 LIVO에 비해 더 정밀한 조절이 필요하며, 유출되는 연료량을 더 크게 줄일 수 있다는 점을 시사한다. 배기밸브의 조정은 흡기 포트에서 형성된 압력이 배기 포트에 이동하는 유동을 형성한 후 혼합기가 만들어지는 시간을 단축시켜, 상대적으로 높은 농도의 연료가 배출되는 결과를 초래한다. 반면, 흡기밸브를 일찍 열면 배기 행정 동안 실린더 내 압력이 높아져 흡입 행정 초기에 높은 농도의 연료 혼합물의 유입이 지연되며, 이로 인해 높은 농도의 연료가 배기 포트를 통해 유출되는 현상이 감소한다. 이로 인해 엔진 출력 감소 폭은 상대적으로 작게 나타난다. 본 연구를 통해 미연소 메탄 배출 저감을 위한 최적의 밸브 타이밍 전략으로 EEVC가 적절함을 알 수 있다.

6. 고 찰

밸브 타이밍 변화에 따른 배출 변화 추이 분석이 향후 엔진 효율 설계 및 배출 저감 기술 개발에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있음을 기대한다.

References

- 1) Il-Jong Kong, Sin-Cheol Choi, Soo-Hyun Lee and Kyung-Geun Lee, "Research on Carbon Neutrality Promotion Strategy of Shipping Industry," KAIS Spring Conference, pp.218, 2023.
- 2) IMO, Review of Maritime Transport 2023, <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>, 2024.
- 3) IDTechEx, Electric Boats and Ships 2017-2027 Technologies, Markets, Forecasts, Key Players and Opportunities, <https://www.idtechex.com/ko/research-report/electric-boats-and-ships-2017-2027>

/509, 2024.

- 4) IMO, Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted.aspx>, 2024.
- 5) MAN, L28/32DF Project Guide - Marine, https://man-es.com/applications/projectguides/4stroke/manualcontent/Mobile/PG_M-ILL2832DF.pdf, 2024.
- 6) J. W. Hwang, U. H. Kim, H. J. Hwang, J. H. Han and J. O. Chae, "A Study on Effect of the Valve Overlap Period and Valve Lift on the SI Engine Characteristics," Transactions of KSAE, Vol.9, No.1, pp.28-36, 2001.
- 7) Jong-Min Kim, "선박연료로서 LNG의 현재와 미래," International Trend for Maritime Decarbonization, Vol.05, pp15, 2023
- 8) Myung-Seok Chae, [배 이야기] 하루 연료비가 '억원대?' ... '기름먹는 하마', <https://www.asiae.co.kr/article/2011052916165473016>, 2024.