

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

한양대학교 미래자동차공학과
4학년 안성률
지도교수: 민승재

논문 배경 및 목적

- 내연기관 차 → 전기차
- 내연기관 배 → 전기 추진 선박? - **한계**
 - 배터리 수명 한계 - 선박 수명은 최소 30년, 교체 여러 번 필요
 - 배터리 충전 인프라 - 고전력 충전 시설 항만 설치 · 운영 어려움
 - 배터리 가격 - 기존 디젤 선박 대비 선가 30~100% 높음
 - 에너지 밀도 적어 단거리만 가능

- LNG로 더 원활히 전환되기 위해 개선해야 할 문제
⇒ 메탄 슬립 = 연소되지 않은 메탄이 대기중으로 방출되는 현상

- 메탄슬립 감소 방안
 - 연소 개선을 위한 엔진 설계 개선과 전자제어 적용기술
 - 배기가스 재순환 기술
 - 연소 후처리 촉매 기술
 - 직접 연료분사 기술

- 친환경 선박?
 - LNG - 95% 이상
 - 암모니아
 - 수소
 - 메탄올



Fig 2. 메탄슬립 발생 요인

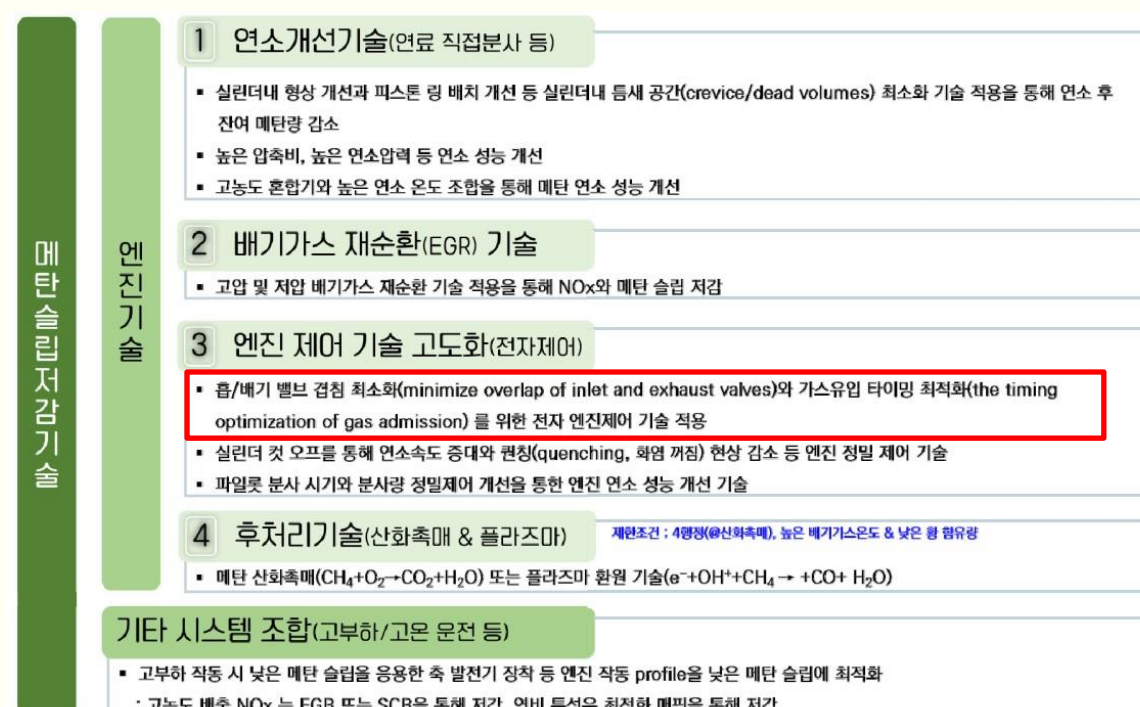


Fig3. 메탄슬립 저감기술 현황

논문 내용

Hyundai Lambda 3.3 T-GDi 엔진 단기통 LNG 연소 모델링

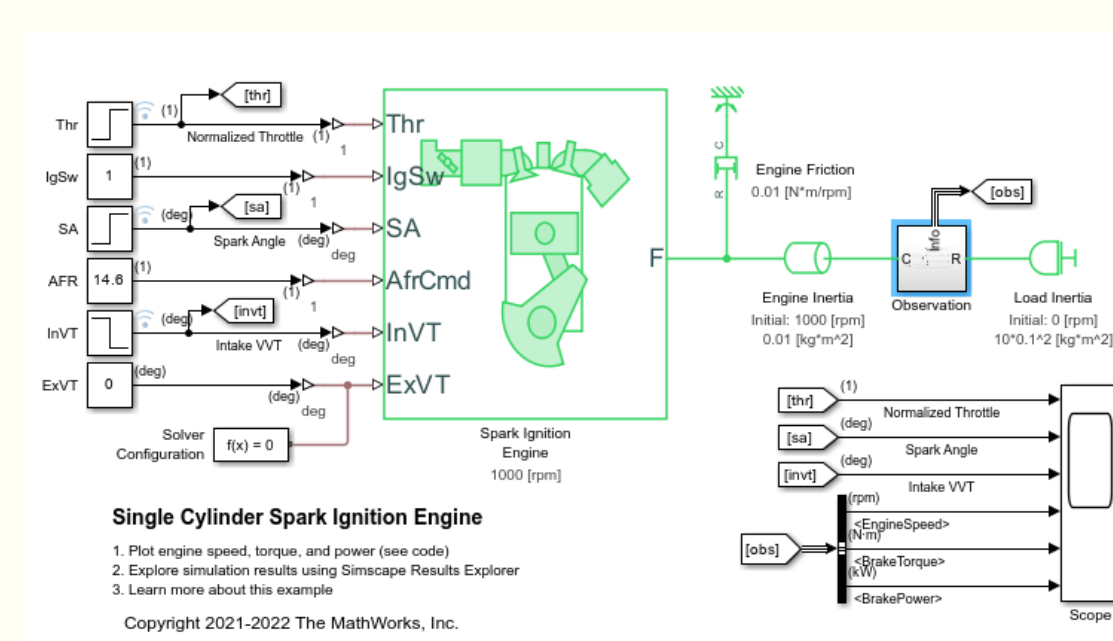


Fig 4. Simulink Model

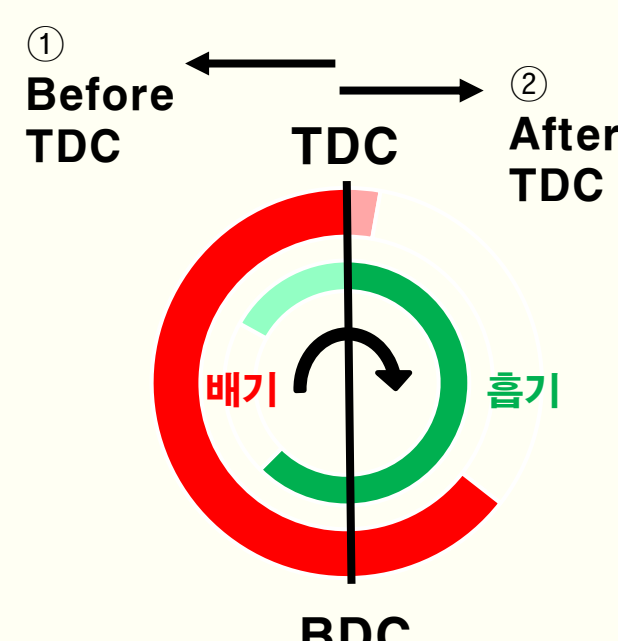


Fig 5. Intake · Exhaust Angle

Category	Parameter	Value
Ambient	Ambient pressure	101.325 kPa
	Ambient temperature	298.15 K
	Ambient air density	1.225 mg/cm ³
	Specific gas constant of dry air	288.1965 J/(K·kg)
Air Intake	Compute air intake dynamics	On
	Throttle response time constant	0.1 s
	Throttle rest angle	3 deg
	Throttle plate diameter	5 cm
	Throttle leakage area	1 cm ²
	Intake manifold volume	500 cm ³
Combustion	Spark input type	Fixed
	Spark advance BTDC	20 deg
	Combustion duration	50 deg
	Cylinder pressure slow decay time constant	60 s
	Cylinder temperature slow decay time constant	600 s

Category	Parameter	Value
Mechanical	Number of cylinders	Single Cylinder
	Spark angle difference	-
	Firing order	-
	Bore	92 mm
Valves	Stroke	86 mm
	Connecting-rod length	153 mm
	Compression ratio	13
	Discharge coefficient for intake valve	0.9
Fuel	Intake valve open before TDC	61 deg
	Intake valve close after BDC	45 deg
	Exhaust valve open before BDC	52 deg
	Exhaust valve close after TDC	10 deg

· 질량 유량 (Throttle, Intake Valve)

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

· 실린더 체적 V_{cyl}

$$V_{cyl}(\theta) = V_{cl} + V_s = V_{cl} + A \cdot x(\theta) = V_{cl} + V_{displa} \frac{1}{a} \cdot (l + a - (acos\theta + \sqrt{l^2 - a^2 sin\theta}))$$

$$\text{압축비 } \varepsilon = \frac{V_{cyl}}{V_c} = \frac{V_c + V_s}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \Rightarrow V_c = \frac{V_s}{\varepsilon - 1}$$

· 엔진 출력 Q_{Engine}

$$\frac{dW}{dt} = \text{출력 } Q_{Engine} = \int (P_{cyl}(\theta) - P_{amb}) \cdot \frac{d}{dt} [V(\theta)] d\theta$$

* 실린더내 압력

$$P_{cyl}(\theta) = \frac{m_{air,fuel} R \cdot T_{cyl}(\theta)}{V_{cyl}(\theta)} \left\{ \begin{array}{l} \text{* 특징기체상수 } R = \frac{R_u}{M_{mix}} = \frac{8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}}{M_{CH_4} + 15M_{air}} \\ \text{* 열량식 통해 } T_{cyl}(\theta) = \frac{Q_{combust} - P_{cyl} \cdot V - Q_{loss}}{m_{air,fuel} \cdot C_v} \\ \text{* } Q_{combust} = \eta \cdot m_{fuel} \cdot LHV \\ \text{* } Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{radi} = h \cdot A \cdot (T_{cyl} - T_{wall}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{cyl}^4 - T_{wall}^4) \end{array} \right.$$

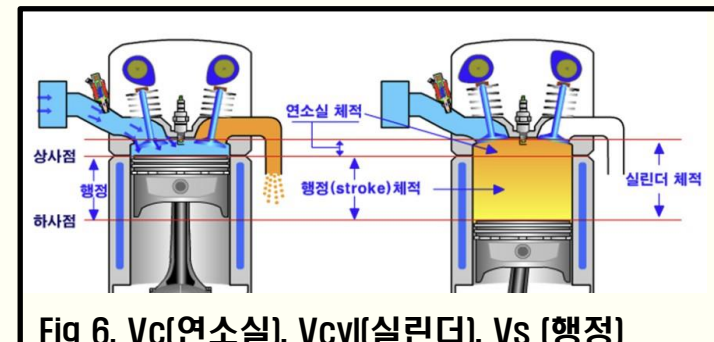


Fig 6. Vc(연소실), Vcyl(실린더), Vs(행정)

논문 결론

- 본 연구는 '메탄 슬립(Methane Slip)' 현상의 요인 중 하나인, 흡기된 연료가 연소되지 않고 배기 포트를 통해 배출되는 현상을 밸브 타이밍 조절을 통해 완화하는 것을 목표로 수행되었다. 하사점(Bottom Dead Center) 부근의 흡배기 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 연료량에 비례한다고 가정하였다.
- 동일한 밸브 타이밍 변화량(0~10°)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 조절은 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 작은 값을 나타낸다. 본 연구를 통해 미연소 메탄 배출 저감을 위한 최적의 밸브 타이밍 전략으로 EEVC 이 적절함을 알 수 있었으며, 이러한 밸브 타이밍 변화에 따른 배출 변화 추이 분석이 향후 엔진 효율 설계 및 배출 저감 기술 개발에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있음을 기대한다.

