

선박엔진에서 배기재순환이 연소과정에 미치는 영향

The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Combustion Process in a Marine Engine

박권하**† · R. Prosser**
Kweon-Ha Park**† and R. Prosser**

(Received 07 March 2023, Revision received 14 June 2023, Accepted 15 June 2023)

초록 : 선박에서 배출되는 이산화탄소에 대한 규제가 강화되고 저탄소 또는 무탄소 연료에 대한 기술이 개발되고 있다. 그러나 현재 중유로 작동하는 선박용 디젤엔진은 계속 사용될 것으로 예상되며 중유를 이용한 선박용 디젤엔진의 성능향상에 대한 연구가 지속되어야 한다. 본 연구에서는 배기가스재순환기술(EGR)이 연소거동에 미치는 영향을 분석하였다. 연소실에서 연료, 화염, 온도 및 연소 생성물 거동과 같은 연소과정에 대한 EGR의 영향을 분석하였다. 질소산화물 배출은 EGR 비율이 증가함에 따라 기하급수적으로 감소된다. 그러나 EGR율이 증가하면 연료분무의 전파거리가 증가하고 저온 상태에서 다량의 연료가 연소실 하부면에 분포하게 되면서 미연소 연료량은 13.3%까지 크게 증가한다. 에너지 효율과 기타 배출가스를 종합적으로 고려할 때 EGR율은 23% 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

키워드 : 선박엔진, 장행정, 배기재순환, 연소

Abstract : Regulations on carbon dioxide emitted from ships have been strengthened, and technologies for low-carbon or carbon-free fuel have been developed. However, marine engines currently operating on heavy fueled oil are expected to continue to be used. Therefore, it is necessary to continue research on the performance improvement of marine diesel engines using heavy fueled oil. This study analyzed the effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion behaviors. The effect of EGR on the combustion process such as fuel, flame, temperature, and combustion products behavior in the combustion chamber was analyzed. The emission of nitrogen oxides is reduced exponentially with the increase of the EGR rate. However, when the EGR rate increases, the propagation distance of the fuel spray increases and a large amount of fuel is distributed on the lower surface of the chamber in a low temperature state with the increase of the EGR rate. Therefore, the amount of unburned fuel is greatly increased up to 13.3%. Considering both energy efficiency and other emissions, it is desirable to keep the EGR rate below 23%.

Key Words : Marine Engine, Long Stroke, Exhaust Gas Recirculation, Combustion

*† 박권하(<https://orcid.org/0000-0001-9460-8399>) : 교수, 한국해양대학교 기계공학부

E-mail : khpark@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4367

**R. Prosser(<https://orcid.org/0000-0001-5591-2056>) : University of Manchester.

*† Kweon-Ha Park(<https://orcid.org/0000-0001-9460-8399>) : Professor, Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University.

E-mail : khpark@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4367

**R. Prosser(<https://orcid.org/0000-0001-5591-2056>) : University of Manchester.

1. 서 론

전세계 화물의 75%를 운송하는 선박은 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소, 탄화수소, 매연미립자 등의 많은 유해배출물을 대기 중에 배출한다. 이들은 기후변화와 대기오염에 많은 영향을 미친다.¹⁾

현재 관심이 집중되고 있는 배출물은 이산화탄소이며 가장 중요한 온실가스 중의 하나이다. 선박에서의 이산화탄소 배출규제는 국제해사기구의 제62차 MEPC회의에서 에너지효율설계지수를 의무화하면서 본격적으로 시작되었다.²⁾ 국제해사기구는 2018년 해운에서 발생하는 온실가스를 2050년까지 2008년 대비 50% 이상 감축하는 초기국제해사기구대책(Initial IMO Strategy)을 채택하였다.³⁾

국제해사기구에 의한 질소산화물 규제는 단계적으로 강화되었다. 2000년 적용된 1단계 규제와 비교하여 2011년 적용된 2단계 규제는 20%, 2016년 적용된 3단계 규제는 80%가 강화되었고, 황산화물 규제 역시 단계적으로 급속하게 강화되고 있다. 전 해상에서 선박연료 중의 황 함유율 규제가 2005년 4.5%에서, 2012년 3.5%로 강화되었으며 2020년부터 0.5%로 강화되었다.^{4,5)} 일산화탄소, 탄화수소 및 매연미립자의 경우는 아직 공식적인 규제가 이루어지고 있지 않지만, IMO 57차 회의에서 MEPC는 오존층 파괴 물질을 포함하여 HC 배출 및 PM에 대한 수정된 규정 14조를 제시하였다.⁶⁾

이렇게 강화되는 규제에 대응하기 위하여 많은 신기술들이 개발되고 있다. 이산화탄소저감기술은 에너지효율을 개선하기 위한 기술들과 탄소저감 대체연료기술로 크게 구분된다.⁷⁾ 선체크기, 혈형상, 경량화재료, 공기운환, 하이브리드 동력, 폐열회수 등의 에너지효율개선 기술의 경우 이산화탄소배출 저감의 잠재력이 1%에서 35%로 조사되었으며 액화천연가스, 수소, 암모니아, 메탄올, 에탄올, 바이오 연료, 전기 등의 대체해양연료는 잠재력이 80%인 것으로 나타났다.⁸⁾ 질소산화물의 저감방법은 연소실 내의 기술과 배기후처리기술로 구분된다.⁹⁾ 연소실 내의 기술은 흡입공기 중에 습

기를 공급하는 기술, 연료중에 물을 혼합하는 에멀전기술, 물을 연소실에 직접 분사하는 기술¹⁰⁻¹²⁾과 연료분사시스템을 개선하는 기술^{13,14)} 및 배기가스재순환기술^{15,16)}이 있다. 배기후처리기술로 가장 널리 보급된 기술은 SCR(Selective Catalytic Reduction)이다. 이 기술은 배기가스에 암모니아나 요소수를 주입하여 질소산화물을 환원시켜 제거하는 기술이다.^{17,18)}

이런 기술들은 대부분 각각의 규제를 만족하기 위하여 개발되었으며, 다른 배출물에 대한 영향을 종합적으로 분석한 연구는 부족하다. 질소산화물의 생성을 저감하기 위해서는 연소속도를 지연시켜 국부적인 화염의 온도를 낮게 유지해야 한다. 많은 선박에 적용되고 있는 배출가스재순환시스템 역시 연소가 완료되어 배출되는 가스를 흡입공기에 혼합하여 산소농도를 낮춤으로써 연소속도를 지연한다. 연소속도가 지연되면 화염온도가 낮아지고 연소효율에 좋지 않은 영향을 미친다.

본 논문에서는 당분간 계속 사용될 것으로 예상되는 중유를 사용하는 선박디젤엔진에 대한 성능향상연구의 중요성을 상기시키고 운항 중인 선박에 적용된 EGR기술이 연소효율 및 다른 배출가스에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 장행정 디젤선박기관에서 배출가스재순환이 연소실 내의 연료와 화염의 생성 및 소멸, 화염온도, 연소생성물 등의 연소과정에 미치는 영향을 분석하며, 질소산화물 등의 배출물과 연소효율을 종합적으로 고려한 배출가스재순환율을 제시하고자 한다.

2. 수학적 모델 및 계산조건

본 연구는 현재 사용 중인 선박엔진의 성능개선을 위하여 실린더 내의 연소거동을 분석하는데에 목적이 있다. 따라서 내연기관의 연소계산에서 가장 넓게 사용되고 있는 상용코드 중의 하나인 KIVA프로그램을 이용하였다. 이 코드는 엔진 연소, 분무, 난류 등의 모델들을 개별적으로 실험결과와 비교하여 검증하였으며,^{19,20)} grid의 영향에 대한 평가도 수행하였다.²¹⁾ 코드를 엔진연소에 적용하여 스웰유동과 난류유동, 분무와 연소, 실린

더 압력의 변화와 열발생률, soot와 질소산화물의 생성 등의 모든 연소거동에 대하여 계산결과와 실험결과를 비교하였으며, 실험결과와 잘 맞는다는 것을 검증하였다.^{22,23)} 이렇게 검증된 이 코드는 수많은 디젤엔진의 개발과 개선을 위하여 사용되었다.^{24,25)}

2.1 수학적 모델

엔진연소해석에 사용된 전달방정식은 다음과 같다.²⁶⁾

화학종 m에 대한 연속방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u) = \nabla \cdot [\rho D \nabla (\frac{\rho_m}{\rho})] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}_m^s \delta_{m1} \quad (1)$$

여기서, ρ_m 은 화학종 m의 질량밀도이며, ρ 는 전체질량밀도를 나타내고, u는 유동속도, D는 확산계수를 나타낸다.

모든 화학종을 포함한 전체 유체에 대한 연속방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = \dot{\rho}^s \quad (2)$$

모멘텀방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\frac{1}{\alpha^2} \nabla p - A_o \nabla^2 / 3 \rho k + \nabla \cdot \sigma + F^s + \rho g \quad (3)$$

여기서 점성응력텐서는 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\sigma = \mu [\nabla u + (\nabla u)^T] + \lambda \nabla \cdot u I \quad (4)$$

여기서 μ 와 λ 는 각각 첫째, 둘째 점성계수이다. 내부에너지방정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u I) = -\rho \nabla \cdot u + (1 - A_o) \sigma : \nabla u - \nabla \cdot J + A_o \rho \epsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (5)$$

여기서 열유속 J는 다음과 같이 주어진다.

$$J = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla (\frac{\rho_m}{\rho}) \quad (6)$$

난류운동에너지와 그 소산율은 식 (7), (8)과 같다.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u + \nabla \cdot \sigma : \nabla u + \nabla \cdot [(\frac{\mu}{\rho \nu_t}) \nabla k] - \rho \epsilon + W^s \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \epsilon) = -(\frac{2}{3} c_{\epsilon_1} - c_{\epsilon_2}) \rho \epsilon \nabla \cdot u + \nabla \cdot [(\frac{\mu}{\rho \nu_t}) \nabla \epsilon] + \frac{\epsilon}{k} [c_{\epsilon_1} \sigma : \nabla u - c_{\epsilon_2} \rho \epsilon + c_{\epsilon_3} W^s] \quad (8)$$

2.2 계산조건

Fig. 1은 크랭크각이 0도, 30도일 때의 격자형상을 나타낸다. 이 격자는 대상엔진의 연소실 형상 데이터를 입력하고 K3VPREP에 의하여 생성되었으며 격자수는 28,300개이다.

Table 1은 엔진제원과 계산조건을 나타낸다. 대상엔진은 현존선박에서 많이 사용되고 있는 행정보어비가 3.2인 장행정 디젤엔진이다. 엔진부하는 선박의 일반적인 운항부하를 고려하여 MCR의 70%인 500 kW/cyl로 설정하였다. 엔진의 성능개선을 위하여 배출가스재순환시스템을 분석하였으며, 계산에 사용된 재순환율은 0%부터 40%까지 10% 간격으로 변화된다. 상세한 내용은 주어진 표와 같다.

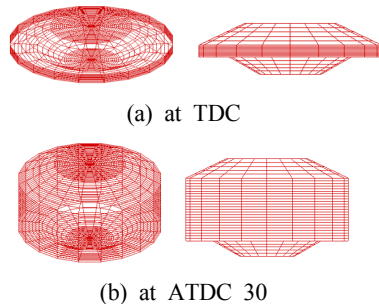


Fig. 1 Calculation grids

Table 1 Engine specification and calculation conditions

Cases	Parameter	Value	Unit
Target engine & conditions	Type of target engine	2-stroke cycle	-
	Operating output	500	kW/cyl
	Engine speed	180	rpm
	Bore×Stroke	42×136	cm

	Crank angle at compression start	ATDC 120	CA
	Crank angle at exhaust valve open	BTDC 120	CA
	Number of nozzle hole	1	EA
	Mass flow of fuel injection per stroke	8	g/stroke
	Fuel injection pressure	40	MPa
	Fuel spray angle	30	deg
	Injection duration	10	CA
	Wall temperature	150	℃
	Initial air temperature	60	℃
	Initial air pressure	0.15	MPa
	Length of connecting rod	182	cm
	Compression ratio	28.6	-
Exhaust gas recirculation variation	EGR rate	0	%
		10	%
		20	%
		30	%
		40	%

3. 결과 및 고찰

3.1 연료분무의 거동

Fig. 2는 배기재순환가스가 0%에서 40%까지 변화할 때 크랭크각에 따른 연료분포를 나타낸다. 연료분사가 종료되는 상사점까지는 분사된 연료가 연소실 중앙으로 전파되고 분무선단에서 연소가 진행되는 과정이다.

EGR 10%까지는 분무선단의 빠른 연소에 의하여 분무의 진행거리가 줄어들면서 연소실 중앙에 고농도의 분포를 나타내지만, EGR율이 20% 이상이 되면 분무의 진행거리가 점점 증가되고 고농도의 분포영역도 연소실 하부까지 진행된다. 연소가 가장 활발하게 진행되는 크랭크각 10도에서는 EGR 0%의 경우 연료가 연소실 중앙에 분포되고 그 중심에 고농도의 영역을 형성한다. EGR율이 증가하면서 연료가 연소실 하부에 넓게 분포되며 고농도의 영역도 연소실 하부에 형성된다. 크랭크

각이 60도 이상 증가하면 EGR 10%까지는 연료의 분포가 크게 감소되는 반면, EGR율이 그 이상으로 증가하면 잔류연료가 연소실 하부에 넓게 분포된다. 이러한 현상은 배기밸브가 열리는 크랭크각 120도까지 유지되어 EGR 40%의 경우에

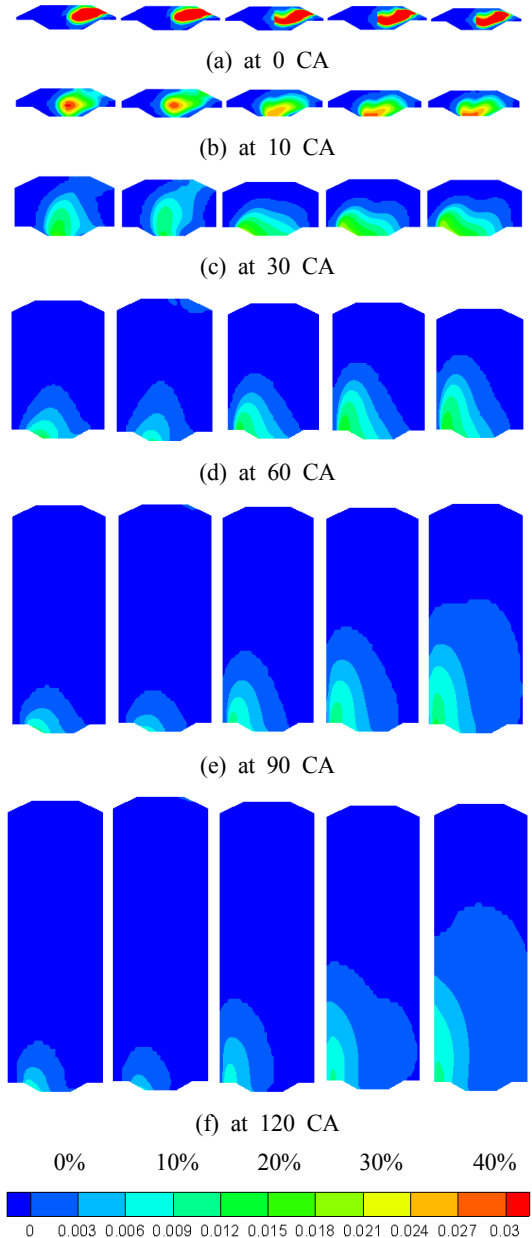


Fig. 2 Fuel ($C_{16}H_{34}$) distributions on the center section

넓은 영역에 연소되지 못한 잔류연료가 분포된다.

Fig. 3은 EGR율이 0%에서 40%까지 변화할 때 크랭크각에 따른 연소실 내의 잔류연료질량을 나타낸다. 연료분사가 완료되는 상사점까지는 연료의 양이 급격히 증가하며 이후에는 급격히 감소한다. EGR 0%에서는 상사점까지 분사된 연료의 40%가 연소되었으며 크랭크각 35.8도에서는 90%의 연료가 연소되었다. EGR 10%에서는 90% 연소 시점이 크랭크각 34.6도로 다소 빨라졌지만 이후 EGR율이 증가하면서 매우 늦어져서 EGR 30%에서는 크랭크각 87.3도였고 40%인 경우는 배기 밸브가 열릴 때까지 90% 연소에 도달하지 못하였다.

배기밸브가 열리는 시점에서 연소가 완료된 연료량은 Fig. 4와 같다. EGR율이 0%인 경우에 99.0%의 연료가 연소되었으며, EGR 10%에서 다소 증가하여 99.5%가 연소되었고, EGR 40%에서는 85.8%가 연소되었다.

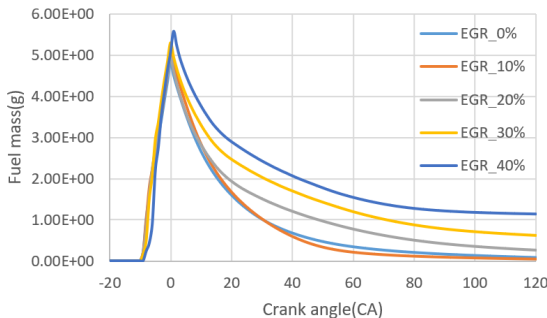


Fig. 3 Residual fuel mass in cylinder

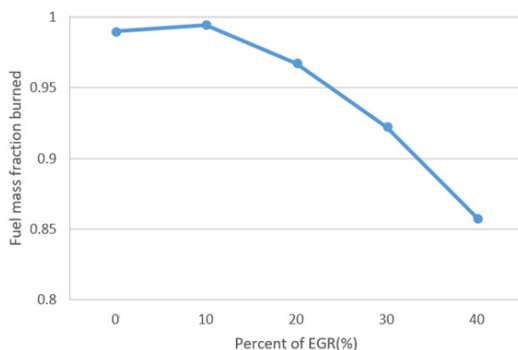


Fig. 4 Fuel mass fraction burned at exhaust valve open

배출가스재순환은 연소가 완료된 가스인 이산화탄소와 수증기 및 불활성가스인 질소가 흡입공기에 혼합되는 것으로, EGR율이 증가하면 연소실내의 산소농도가 감소한다. 연료가 분사되면서 연소가 진행되는 상사점까지 EGR율이 증가하면서 연료의 진행거리가 증가하는 것은 연료분무의 선단에서 이루어지는 연소속도가 감소되면서 상대적으로 낮은 연소실 압력의 형성과 낮은 연소율에 의한 것으로 판단된다. 이러한 특성은 크랭크각이 증가되어도 계속 유지된다. 배기밸브가 열리는 크랭크각 120도에서 EGR 40%인 경우 미연소 연료가 매우 넓은 영역에 분포하며, EGR 0%와 비교하면 13% 이상 증가한다. 배기시점에서 연소된 연료의 퍼센트는 EGR 10%까지는 99% 이상이며 EGR 20%에서 96.7%, EGR 30%에서 92.3%이다.

3.2 화염진행 및 거동

Fig. 5와 6은 EGR율이 0%에서 40%까지 변화할 때 연소가 활발히 진행되는 크랭크각 0도에서 30도까지의 OH와 O₂ 분포를 나타낸다. OH 라디칼은 연소의 중간생성물로 화염면의 거동을 나타내는 요소이며, O₂는 연소속도를 결정하는 중요한 반응물이다. EGR율의 증가는 연소실 내의 산소농도에 영향을 주어서 분사된 연료선단의 화염거동에 영향을 미친다. 연료분사가 종료되는 상사점에서 OH라디칼은 분무선단 주변으로 분포하는데, EGR 0%인 경우는 매우 높은 농도를 나타내는 반면, EGR율이 증가하면 농도가 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다. 산소농도 역시 EGR 20%까지는 높은 농도를 나타내지만 이후 급격한 감소를 나타낸다. 모든 EGR율에서 크랭크각 10도까지는 높은 농도의 OH분포를 나타내지만 주연소가 끝나가는 크랭크각 30도가 되면 EGR율 30% 이상에서는 OH 농도가 매우 낮아진다. 따라서 EGR 0%에서는 연료분사 초기부터 두터운 화염면을 형성하면서 높은 연소속도를 나타내며, 주연소가 이루어지는 기간 동안 활발한 연소특성을 나타내는 반면, EGR율이 30% 이상 증가하면 매우 느린 연소속도로 약한 화염이 형성될 것으로 판단된다.

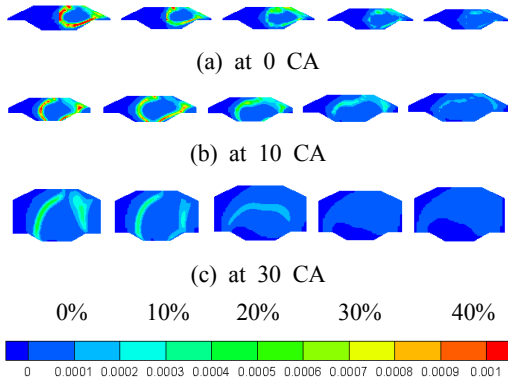


Fig. 5 OH radical distributions on the center section

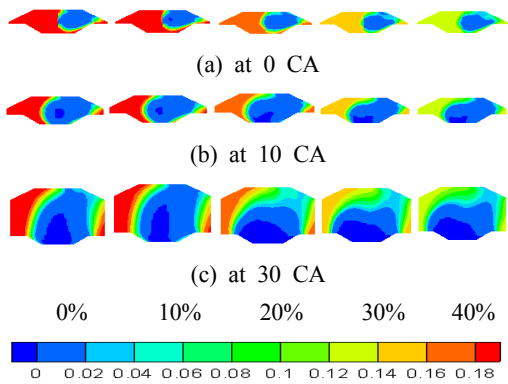


Fig. 6 Oxygen distributions on the center section

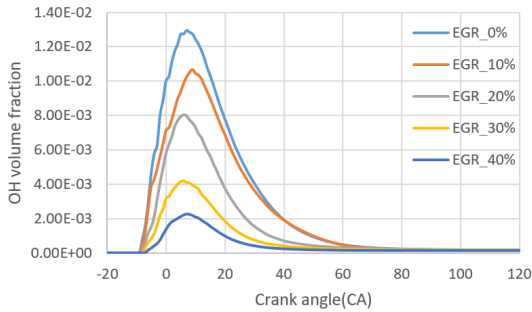


Fig. 7 OH volume fraction with crank angle

Fig. 7과 8은 EGR율이 0%에서 40%까지 변화할 때의 크랭크각에 따른 OH체적분율과 최대값을 나타낸다. OH분율은 분사 직후 급속히 증가한 후에 크랭크각 10도 부근에서 가장 높은 값을 나타내고 이후 급격히 낮아진다. 산소농도가 가장 높

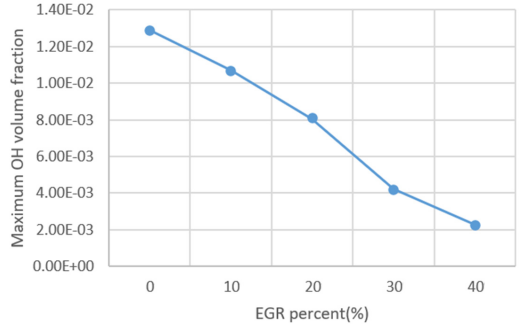


Fig. 8 Maximum OH volume fraction with EGR

은 EGR 0%에서 가장 높은 농도를 나타내며, EGR율이 증가하면서 급격하게 저하된다. EGR 40%에서 OH 체적분율의 최대값은 EGR 0%일 때의 최대값과 비교하면 17.6%로 매우 낮은 값을 나타낸다.

3.3 일산화탄소 생성 및 거동

일산화탄소는 연소의 중간생성물이지만 완전연소가 되지 않으면 배출되는 유해배출가스이다.

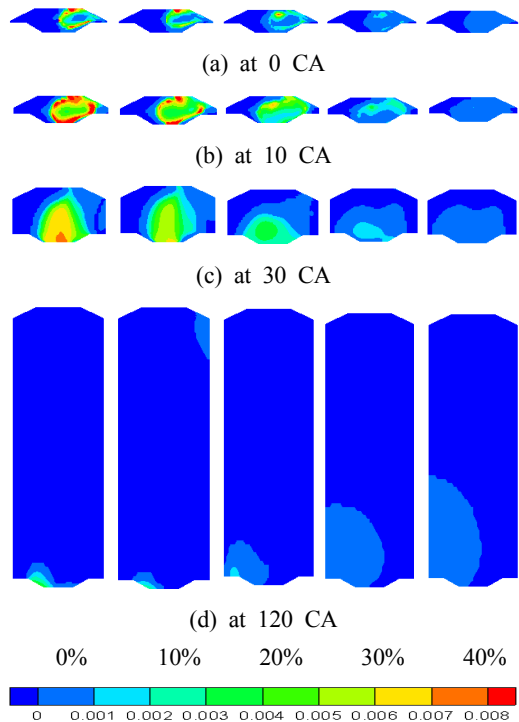


Fig. 9 CO distributions on the center section

Fig. 9는 EGR율에 따른 일산화탄소의 분포를 나타낸다. EGR 0%인 경우 연소가 본격적으로 진행되는 상사점에서 화염면 후류에 높은 농도의 일산화탄소가 분포하며, 이는 더욱 증가하여 가장 연소가 활발한 크랭크각 10도에서 매우 높은 농도의 일산화탄소 분포를 나타내고, 이후에 농도가 줄어들어 배기가 시작되는 120도에서는 적은 양만 남는다. EGR 10%에서는 EGR 0%와 유사한 거동을 나타내지만 전반적으로 일산화탄소의 농도가 더 낮은 분포를 나타낸다. EGR율이 증가하면서 일산화탄소의 생성이 급격히 줄어들면서 매우 낮은 농도의 분포를 나타낸다.

Fig. 10과 11은 각각 크랭크각에 따른 일산화탄소 체적분율과 배기시점에서의 분율을 나타낸다. 일산화탄소는 연소의 시작과 소멸에 따라 분사직 후에 급속히 증가하며 크랭크각 10도 부근에서 가장 높은 값을 나타낸다. 이후 급격히 낮아져서 소멸되는 것을 알 수 있다. EGR율은 일산화탄소의 생성에 매우 큰 영향을 미치며 EGR 40%의 최대 일산화탄소의 분율이 EGR 0%와 비교하여 7.3%에 불과하다. 배기시점에는 연소의 상태에 따라 다소 변화가 있다.

일산화탄소는 연소 초기에 발생하여 완전연소가 되면서 사라지는 화학종이다. 활발한 연소가 진행되기 위해서는 분위기 온도와 압력 및 적당한 양의 산소가 필요하다. EGR 10%까지는 충분한 산소가 주어지면서 주연소기간 동안 높은 농도의 일산화탄소가 생성되며 이후에 활발한 연소에 의하여 일산화탄소가 빠르게 소멸된다. 그러나 EGR율이 증가하면서 줄어든 산소농도의 영향으로 전체 연소기간 동안 활발한 연소가 이루어지

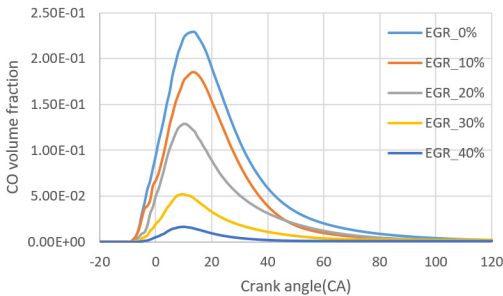


Fig. 10 CO volume fraction with crank angle

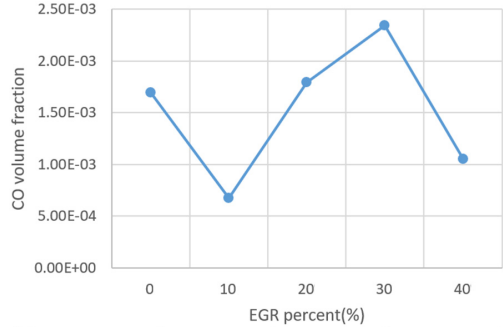


Fig. 11 CO volume fraction at exhaust valve open

지 못하여 낮은 일산화탄소 농도분포를 나타낸다.

3.4 질소산화물 생성 및 거동

질소산화물은 불활성가스인 질소가 고온의 분위기에서 산소와 반응하여 생성되는 화학종이다. 질소산화물의 생성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 온도이며 산소의 농도도 중요한 요소이다. Fig. 12와 13은 EGR율에 따른 일산화질소의 분포와 온도분포를 나타낸다. EGR 0%에서는 상사점부터 높은 농도의 일산화질소가 고온의 화염후류에 넓게 분포하며 크랭크각이 증가해도 계속 유지된다. EGR율이 증가하면 급격하게 화염면의 온도와 일산화질소 생성이 줄어들면서 낮은 농도의 분포를 나타낸다.

Fig. 14과 15는 크랭크각에 따른 일산화질소 체적분율의 변화와 배기시점에서의 체적분율을 나타낸다. 질소산화물의 생성은 화염후류의 온도가

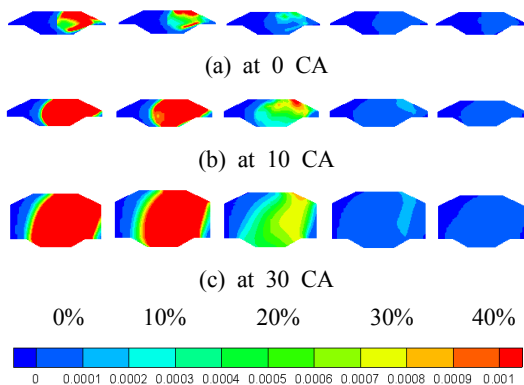


Fig. 12 NO distributions on the center section

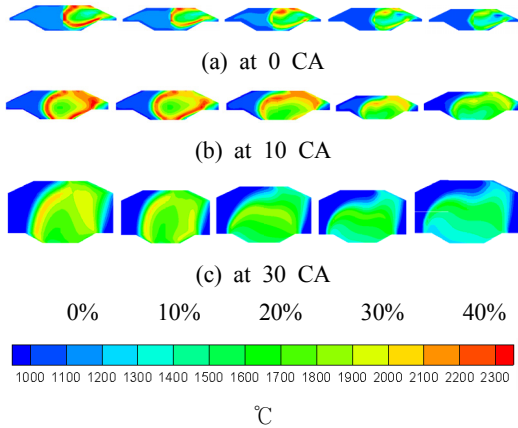


Fig. 13 Temperature distributions on the center section

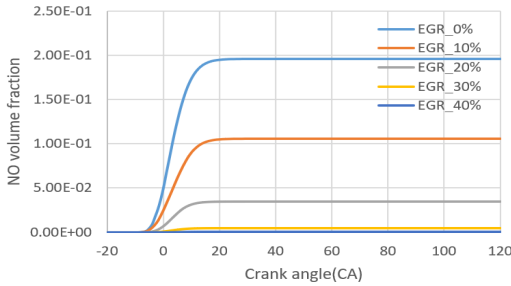


Fig. 14 NO volume fraction with crank angle

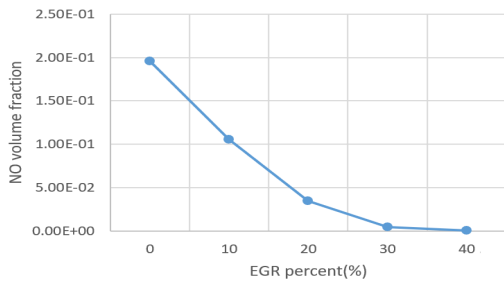


Fig. 15 NO volume fraction at exhaust valve open

본격적으로 상승하는 상사점 부근에서 급격히 증가되며 연소가 가장 활발한 크랭크각 10도 부근에서 최댓값을 나타낸 이후에 배기시점까지 유지된다. EGR의 영향은 매우 커서 배기시점에서 일산화질소의 배출이 EGR율의 증가와 함께 기하급수적으로 줄어든다.

질소와 산소의 반응은 일반적인 연소와는 반대로 흡열반응이기 때문에 상온에서는 반응하지 않고 매우 높은 온도에서 반응이 이루어진다. 내연기관에서는 화염후류의 높은 온도구간에서 주로 발생하며, 발생된 질소산화물은 피스톤의 팽창과 함께 낮아지는 온도 분위기에서 급격하게 고정되어 배출된다. EGR율은 산소 농도에 영향을 미치고 이는 연소속도에 영향을 미쳐서 화염온도에 영향을 미친다. EGR 0%에서 크랭크각 10도까지 2300℃ 이상의 화염면을 형성하면서 급속하게 일산화질소가 생성된다. EGR율이 증가하면 고온 영역이 줄어들면서 질소산화물이 기하급수적으로 급격하게 줄어든다. 따라서 EGR은 질소산화물을 저감하기 위한 매우 효과적인 기술이다.

4. 결 론

선박디젤엔진에서 배출가스재순환이 연소실 내의 연료와 화염의 생성 및 소멸, 화염온도, 연소생성물에 미치는 영향을 분석한 본 논문을 요약하면 다음과 같다.

- 1) EGR율이 증가하면 연료분무의 진행거리가 증가하면서 저온상태인 연소실의 하부표면에 다량의 연료가 분포한다. 따라서 연소되지 못하고 배출되는 연료의 양은 EGR 10%까지는 1% 미만이지만 EGR 20%에서 3.3%, EGR 30%에서 7.7%이며 EGR 40%에서는 13.3%까지 증가된다.
- 2) 화염의 정도를 나타내는 OH라디칼은 연료분사 직후에 급속히 증가하여 크랭크각 10도 부근에서 최댓값을 나타내며 이후 급격히 낮아진다. EGR율이 증가하면서 최댓값이 급속히 저하되어 EGR 40%에서는 EGR 0%의 17.6%로 낮아진다.
- 3) 연소 중간생성물인 일산화탄소 역시 OH의 변화와 유사하게 크랭크각 10도 부근에서 최댓값을 나타내며 EGR율의 증가와 함께 급속히 낮아진다.
- 4) 일산화질소는 상사점 부근에서 급속히 발생되며 크랭크각 10도 부근에서 최댓값을 나타낸 후 배기시점까지 그 값을 유지한다. 일산화질소의 배출량은 EGR의 증가와 함께 기하급수적으로 감소된다.

5) EGR율의 증가는 질소산화물 저감에 매우 효과적이지만 연소 및 효율에 좋지 않은 영향을 미친다. 현재 관심이 집중되고 있는 에너지효율을 고려할 때 미연소 연료가 5% 미만인 23% 이하의 EGR율을 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2022년도 한국해양대학교 연구년 전임교원 교내연구비 지원을 받아 수행되었음.

Author contributions

K. Park; Conceptualization. K. Park; Data curation. R. Prosser; Formal analysis, K. Park; Funding acquisition. K. Park; Investigation. R. Prosser; Methodology. K. Park; Project administration. K. Park; Resources. K. Park; Software. R. Prosser; Supervision. R. Prosser; Validation. K. Park; Visualization. K. Park; Writing-original draft. K. Park; Writing-review & editing.

References

1. S. Gossling, C. Meyer-Habighorst and A. Humpe, 2021, "A global review of marine air pollution policies, their scope and effectiveness", *Ocean and Coastal Management*, 212. (<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105824>)
2. IMO, 2011, "Inclusion of Regulations on Energy Efficiency for Ships in MARPOL Annex V-Resolution MEPC.203(62)", International Maritime Organization (IMO): London, UK.
3. IMO, 2018, "Resolution MEPC.304(72), initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships", IMO doc. MEPC 72/17/add.1, annex 11.
4. A. Azzara, D. Rutherford and H. Wang, 2014, "Feasibility of IMO Annex VI Tier III implementation using Selective Catalytic

- Reduction", The International Council on Clean Transportation, Working Paper 2014(4).
5. S. Yang, X. Pan, Z. Han, D. Zhao, B. Liu, D. Zheng and Z. Yan, 2018, "Removal of NOx and SO2 from simulated ship emissions using wet scrubbing based on seawater electrolysis technology", *Chemical Engineering Journal*, 331, 8-15. (<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.08.083>)
 6. IMO, 2008, "Prevention of air pollution from ships", MEPC 57/21, 28-57.
 7. H. Kim, K. Y. Koo and T. H. Joung, 2020, "A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels", *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs and Shipping*, 4(2), 26-31. (<https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1779426>)
 8. E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand and A. H. Strømman, 2017, "State-of-the-art Technologies, Measures, and Potential for Reducing GHG Emissions from Shipping", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421. (<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>)
 9. O. Kuropyatnyk and S. Sagin, 2019, "Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines", *Environmental Science and Engineering*, 66(1), 1-9. (<https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>)
 10. T. Li, M. Susuki and H. Ogawa, 2010, "Effect of two-stage injection on unburned hydrocarbon and carbon monoxide emissions from ultra-high EGR low temperature diesel combustion", *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu*, 76(76), 1004-1009. (<https://doi.org/10.1243/14680874JER585>)
 11. E. V. Belousov, M. S. Ageyev and V. I. Sviridov, 2010, "Exerting influence on operation of medium-speed marine diesel engine by injection of water into the working cylinder", *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 1, 40-43.
 12. M. Zheng, U. Asad, G. T. Reader, Y. Tan and

- M. Wang, 2009, "Energy efficiency improvement strategies for a diesel engine in low-temperature combustion", *International Journal of Energy Research*, 33(1), 8-28. (<https://doi.org/10.1002/er.1464>)
13. S. V. Sagin and O. V. Semenov, 2016, "Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors", *American Journal of Applied Sciences*, 13(2), 200-208.
14. Y. V. Zablotzky and S. V. Sagin, 2016, "Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines", *Indian Journal of Science and Technology*, 9(20), 208- 216.
15. B. R. Kumar and S. Saravanan, 2016, "Partially premixed low temperature combustion using dimethyl carbonate (DMC) in a DI diesel engine for favorable smoke/NOx emissions", *Fuel*, 180(15), 396-406. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.060>)
16. N. K. Miller, G. Nagarajan and S. Renganarayanan, 2008, "LPG fueled diesel engine using diethyl ether with exhaust gas recirculation", *International Journal of Thermal Sciences*, 47(4), 450-457. (<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.012>)
17. P. Koci, F. Plat, J. Stepanek, M. Kubicek and M. Marek, 2008, "Dynamics and selectivity of NOx reduction in NOx storage catalytic monolith, *Catalysis Today*", 137, 253-260. (<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.11.023>)
18. E. Aneggi, C. Leitenburg and A. Trovarelli, 2008, "Diesel soot combustion activity of ceria promoted with alkali metals", *Catalysis Today*, 136, 3-10. (<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.01.002>)
19. S. Singh, R. D. Reitz and M. P. B. Musculus, 2007, "Validation of engine combustion models against detailed in-cylinder optical diagnostics data for a heavy-duty compression-ignition engine", *International Journal of Engine Research*, 8(1), 1-13. (<https://doi.org/10.1243/14680874JER02406>)
20. S. C. Kong, Z. Han and R. D. Reitz, 1995, "The Development and Application of a Diesel Ignition and Combustion Model for Multidimensional Engine Simulation", *SAE Transactions, Journal of Engines*, 104(3), 502-518.
21. K. Sone and S. Menon, 2003, "Effect of Subgrid Modeling on the In-Cylinder Unsteady Mixing Process in a Direct Injection Engine", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125, 435-443. (<https://doi.org/10.1115/1.1501918>)
22. R. D. Reitz and C. J. Rutland, 1995, "Development and Testing of Diesel Engine CFD Models", *Prq Energy Cumhusr. Sri*, 21, 173-196. ([https://doi.org/10.1016/0360-1285\(95\)00003-Z](https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00003-Z))
23. Y. Jeong, Y. Qian, S. Campbell and K. T. Rhee, 1994, "Investigation of a Direct Injection Diesel Engine by High-Speed Spectral IR Imaging and KIVA-II", *SAE Transactions, Journal of Engines*, 103(3), 1789-1799. (<https://doi.org/10.4271/941732>)
24. A. Imren, V. Golovitchev, C. Sorousbay and G. Valentino, 2010, "The Full Cycle HD Diesel Engine Simulations Using KIVA-4 Code", *Powertrains Fuels & Lubricants Meeting*, San Diego California, United States. (<https://doi.org/10.4271/2010-01-2234>)
25. D. Wickman, P. Senecal and R. D. Reitz, 2001, "Diesel Engine Combustion Chamber Geometry Optimization Using Genetic Algorithms and Multi-Dimensional Spray and Combustion Modeling", *SAE Transactions, Journal of Engines*, 110(3), 487-507.
26. A. A. Amsden, P. J. O'Rourke and T. D. Butler, 1989, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", *LA-11560-MS UC-96*, 7-12. (<https://doi.org/10.2172/6228444>)