

선박용 엔진에서 배기가스 재순환에 의한 소기 특성 예측을 위한 수치해석

A Numerical Analysis for Predicting Scavenging Characteristics under Exhaust Gas Recirculation in Marine Engines

공경주* · 성연모** †
Kyeong-Ju Kong* and Yon-Mo Sung** †

(Received 21 January 2026, Revision received 06 February 2026, Accepted 11 February 2026)

초록 : 배기가스 재순환 시스템이 적용된 선박용 2행정 엔진의 소기 특성을 예측하기 위한 빠른 수치 해석적 방법을 제안하고자 한다. 동적 격자를 이용한 연소실 모델링을 사용자 정의 함수를 적용하고 격자 수를 감소시킨 단순화 모델링으로 대체하였으며, 전산유체역학을 이용한 수치해석과 실험 데이터 간의 시간 간격을 일치시키기 위한 시간 동기화 알고리즘을 도입하여 계산 시간을 수 분 이내로 단축하였다. 수치해석 결과를 실험 결과와 비교한 결과, 최대폭발압력과 최대압축압력은 각각 4.60%와 0.98% 이내의 오차로 타당한 결과가 나타났다. 또한 소기 온도, 소기 압력 및 역류압에 대해서도 부하 조건에 따른 실험 결과의 경향을 재현할 수 있었다. 일부 특정 부하 조건에서 편차가 나타났으나, 이 연구에서 제안한 방법은 배기가스 재순환 조건에서의 소기 거동과 실린더 압력을 타당하게 예측할 수 있음을 확인하였으며, 향후 배기가스 재순환과 엔진 매칭 및 질소산화물 배출 예측 기법을 개발하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 배기가스 재순환, 빠른 수치적 방법, 2행정, 선박용 엔진, 수치해석

Abstract : This study proposes a fast numerical approach to predict scavenging characteristics of a marine two-stroke engine equipped with an EGR system. The dynamic mesh combustion model was simplified using user-defined functions (UDFs) and a reduced mesh, and a time step synchronization algorithm was introduced to match CFD and experimental timing, reducing the computation time to within a few minutes. Validation showed that the predicted maximum combustion pressure (Pmax) and maximum compression pressure (Pcomp) agreed with experiments within 4.60% and 0.98%, respectively. Scavenging temperature, pressure and blowback pressure were also examined, demonstrating overall agreement with load dependent experimental trends. Although some deviations appeared at specific loads, the proposed method effectively predicts scavenging behavior and in-cylinder pressure under EGR conditions and can support future EGR-engine matching and NOx emission prediction development.

Key Words : Exhaust Gas Recirculation, Fast Numerical Methods, Two-Stroke, Marine Engines, Numerical Analysis

** † 성연모(<https://orcid.org/0000-0001-6982-9974>) : 부교수,
경상국립대학교 스마트에너지기계공학과
E-mail : ysung@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9115
*공경주(<https://orcid.org/0000-0002-7659-9035>) : 조교수,
국립부경대학교 기계시스템공학전공

** † Yon-Mo Sung(<https://orcid.org/0000-0001-6982-9974>) :
Associate professor, Department of Smart Energy and
Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.
E-mail : ysung@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9115
*Kyeong-Ju Kong(<https://orcid.org/0000-0002-7659-9035>) :
Assistant professor, Major of Mechanical System Engineering,
Pukyong National University.

1. 서 론

국제적으로 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 및 미세먼지(Particulate Matter, PM)의 배출에 관한 규제는 MARPOL 협약 부속서 VI인 선박으로부터의 대기오염 방지에 의해 규정된다. 질소산화물 배출 규정에 따르면, 2016년 1월 1일 이후에 건조된 선박에 설치된 모든 선박용 엔진은 NOx 배출 규제 해역 내에서 운항할 경우, Tier III 기준을 충족해야 한다.

선박용 2행정 엔진에서는 NOx 배출을 저감하기 위해 다양한 기술이 적용되고 있으며, 그중 배기가스 재순환(Exhaust Gas Recirculation, EGR)은 연소 과정에서 NOx 생성을 효과적으로 억제하는 대표적인 기술이다. EGR은 배기가스 일부를 흡기계통으로 재유입시켜 연소실 내 산소 농도와 최고 연소온도를 감소시키며, 이를 통해 연소실 내의 고온 조건에서 생성되는 NOx를 저감한다.

EGR은 가스 흐름 방식에 따라 외부 EGR(External EGR)과 내부 EGR(Internal EGR)로 구분된다. 외부 EGR은 배기 시스템에서 배출되는 배기가스를 별도의 밸브 및 배관 계통을 통해 흡기 시스템으로 재순환시키는 방식이며, 내부 EGR은 흡기 밸브와 배기 밸브의 타이밍 조절을 통한 밸브 겹침(Valve Overlap)을 이용하여 연소 후 배기가스 일부를 실린더 내에 잔류시키는 방식이다. EGR을 적용하면 흡기 혼합기 내의 산소(O₂)의 비율이 감소하고, 이산화탄소(CO₂)와 수증기(H₂O)의 비율이 증가함에 따라 최대 연소온도가 낮아져 NOx 배출이 저감된다. 하지만 연소 속도를 저하시키고 연소 기간이 길어져 엔진의 열효율이 감소하게 된다. 또한 미연탄화수소(Unburned Hydrocarbon, UHC) 및 일산화탄소(CO) 배출 증가 등의 부정적인 영향도 발생하므로 이에 대한 정량적 해석이 필요하다.

기존의 EGR 시스템은 선박용 엔진의 NOx 저감 목적으로만 적용하였는데, 최근에는 친환경 선박인 LNG 추진 선박에서 발생하는 메탄(CH₄) 슬립을 감소하기 위해서도 EGR이 적용되고 있다. 이와 같이 EGR 시스템은 다양한 선박용 엔진에

확대 적용됨에 따라 EGR 조건이 엔진 및 소기 특성에 미치는 영향과 NOx 배출을 예측하기 위한 수치해석이 필요하다.

EGR이 선박용 엔진에서 연소 과정에 미치는 영향을 분석한 연구¹⁾ 등에서 에너지 효율과 대기오염물질 배출을 고려한 EGR 비율이 제안되고 있으며, NOx를 저감하기 위한 EGR 이외에도 온실가스, SOx, PM 등 다양한 대기오염물질들을 저감하기 위한 방법과 기술에 관한 연구가 진행되고 있다. 연료량을 기준으로 계산한 이산화탄소(CO₂)의 배출량과 실험으로 측정된 CO₂ 배출량을 비교한 연구,²⁾ 디젤엔진의 배기가스에서 배출되는 PM, NOx를 저감하기 위한 후처리장치에 관한 연구³⁾ 등이 보고되고 있다. 이와 같이 대기오염물질 배출 저감을 위한 다양한 연구들이 수행되고 있으나, 2행정 엔진의 소기 특성과 연관된 결과는 제한적이었다. 이 연구에서는 선박용 엔진에서 EGR에 의한 소기 특성을 예측하기 위한 수치해석적 방법을 제안하고, 대기오염물질 배출 저감 연구에 적용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

EcoEGR 시스템이 적용된 선박용 엔진에서 EGR 조건에 따른 NOx 배출 특성을 수치적으로 예측하는 것을 목적으로 실제 운항 조건에서 EGR 비율, 터보차저 매칭 등 다양한 요소가 엔진에 미치는 영향을 분석하였다. 상용 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 코드인 Ansys Fluent를 이용하여 여러 EGR 운전 조건을 적용하기 위한 소기 및 연소실을 모델링하였다. 그리고 CFD 기반으로 선박 엔진의 소기 특성을 빠르게 예측하기 위한 수치해석적 접근법을 제안하였다.

수치해석적 접근법을 이용하여 EGR을 적용한 소기 특성을 분석하고, 빠른 계산이 가능한 수치해석 기법을 개발하고자 하였다. 또한 동일 엔진의 여러 운전 조건에서 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 오차 발생 상황을 확인하고, 그 원인을 분석하였다. 최종적으로 이 연구에서 개발한 수치해석 기반 예측 기법을 EGR 시스템이 적용된 선박의 NOx 배출 특성 예측 및 향후 엔진 설계와 운전 조건 최적화 연구의 기초 자료로 활용

하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치해석 대상

수치해석 대상은 MAN ES에서 제작한 선박용 2행정 엔진 5S35ME-B9.5 모델이다. 연속최대출력은 3475 kW, 167 rpm이며,⁴⁾ 실린더 직경은 350 mm, 행정은 1,550 mm로 상세 사양을 Table 1에 나타냈다.

해당 엔진의 EGR 시스템은 배기가스를 냉각 및 정화한 후 그 일부를 소기 리시버(scavenge air receiver)로 재순환시키는 방식이며, 약 30~40%의 배기가스가 재순환된다. 이 과정에서 소기의 산소 일부가 연소과정 중에 생성된 이산화탄소로 대체되며, 이러한 과정을 통해 NOx 형성을 억제한다.

NOx 저감 효과는 재순환되는 배기가스 비율이 증가할수록 선형적으로 증가한다.

선박용 엔진에서 사용되는 EGR 매칭 방식은 Bypass matching, Turbocharger cut-out matching 및

EcoEGR matching으로 세 가지 방식이 있다. 이 연구의 대상 엔진에는 EcoEGR matching 방식이 적용되어 있다. Bypass matching 방식으로 구성된 EGR 시스템은 메인 라인과 EGR 라인의 두 경로를 통해 소기 리시버로 유입되는 소기를 Tier II 또는 Tier III 운전모드에 따라 조절하는 구조이다.⁵⁾ 이러한 EGR Bypass 개념과 유사한 방식으로 EcoEGR matching 및 EcoEGR system이 구성되고 향해 구역과 관계없이 항상 EGR 상태로 운전되는 특징이 있다. EGR 비율은 해당 해역의 NOx 규제 수준에 따라 조정되며, 질소산화물 배출 규제 해역인 NECA(NOx Emission Control Area) 내에서는 Tier III 모드, NECA 외에서는 Tier II 모드로 운전된다.

2.2 모델링

2.2.1 동적 격자를 이용한 연소실 모델링

EGR 조건이 실린더 내부의 유동특성과 연소 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 연소실을 대상으로 모델링하였다. Fig. 1은 연소실 형상을 모델링한 것으로 아래쪽으로 소기가 들어오고, 위쪽으로 배기가스가 빠져나가는 단류 소기(Uniflow scavenging) 방식이다. 대칭 형상으로 구성되어 있으며, 격자의 품질을 향상시키기 위해 소기공의 형상은 단순화되되 경계조건을 실제 엔진의 작동 조건과 동일하게 적용하여 결과의 타당성을 확보하고자 하였다.

Table 1 Specifications of the marine engine for numerical analysis

Parameters	Value	Unit
Manufacturer	Man ES	-
Type	2-stroke, cross head	-
Model	5S35ME-B9.5	-
Output at MCR	3,475	kW
Speed at MCR	167	rpm
Bore	350	mm
Stroke	1,550	mm
Number of Cylinder	5	-
Con-rod length	1,550	mm
Mean effective pressure at MCR	16.8	bar
Using fuel oil	HFO 700 cSt/50°C	-
Specific fuel oil consumption at MCR	173.0(Tier II mode) 176.0(Tier III mode)	g/kWh

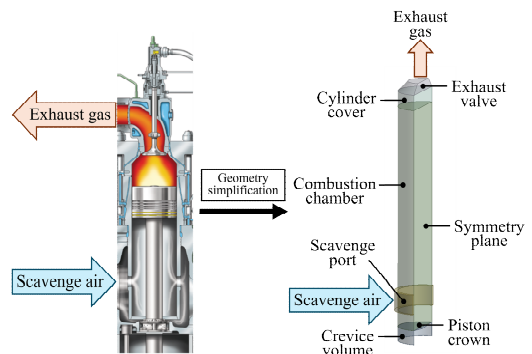


Fig. 1 Combustion chamber geometry model

EGR 조건에 대한 모델링은 EcoEGR 작동 상태를 모사하였다. 배기 리시버, 소기 리시버, 터보차저, EGR Cooler 등 EGR 프로세스와 관련된 구성 시스템은 형상 모델링에서 제외하였으며, 연소실 형상만을 모델링하여 소기 조건과 배기 조건에 따른 연소실 내부 특성 변화를 분석하도록 구성하였다.

Fig. 2는 연소실의 격자 모델링을 나타낸 것으로, 격자의 모양은 동적 격자를 구현하기 위해 피스톤 헤드 부분을 제외하고 육면체 격자로 생성하였다. 동적 격자의 Layering 기법을 적용하여 피스톤이 하사점(Bottom Dead Center, BDC)에서 상사점(Top Dead Center, TDC)으로 이동할 때 격자가 한 층씩 소멸되고, 반대로 TDC에서 BDC로 이동할 때 한 층씩 생성되도록 설정하였다. 또한 BDC 상태를 기준으로 전체 격자 영역에 대한 격자 의존성을 확인하였다.

동적 격자를 이용하여 연소실을 모델링하면 실제 엔진의 연소실 상태를 모사할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 고성능 워크스테이션을 활용하여도 계산에 매우 오랜 시간이 소요되는 문제점 때문에 실시간으로 데이터를 분석하여 EGR이 소기 특성에 미치는 영향을 예측하는 데는 한계가 있었다. 이와 같은 문제점을 해결하고 계산에 소요되는 시간을 최소한으로 줄이고자 격자의 수를 최대한 줄이는 대신 사용자 정의 함수(User-Defined Functions)를 적용하는 방식으로 재모델링하였다.

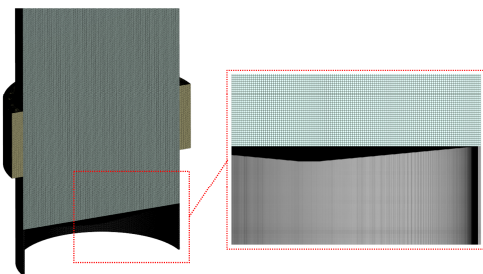


Fig. 2 Mesh modeling for combustion chamber

2.2.2 사용자 정의 함수를 이용한 연소실 모델링

Fig. 3은 사용자 정의 함수를 이용하여 수치해석한 연소실 모델링을 나타낸 것이다. 동적 격자

를 사용하는 기존 방식의 계산 시간이 매우 오래 걸리는 문제를 해결하기 위해 피스톤 운동에 의한 압축 효과를 사용자 정의 함수로 대체하고, 형상 및 격자를 단순화하였다. 형상의 단순화는 BDC 상태의 연소실에서 소기공 위의 격자를 생략하는 방식으로 장행정 엔진에서 큰 부피를 차지하는 연소실 영역을 축소하였다.

연소실 형상은 정확한 좌표에 경계조건을 적용하기 위해서 3차원 원통형 모양으로 모델링하였다. 대칭 형상인 반원통형으로 모델링하면 격자의 수를 감소시킬 수 있는 장점이 있지만 형상 단순화로 인한 오차를 최대한 줄이기 위해서 원통형으로 형상을 결정하였다. 연소실의 압력 프로파일은 실험을 통해 측정된 압력 프로파일을 입력하는 방식으로 하였는데, 이는 향후 운전 중인 엔진의 실시간 압력 데이터를 입력받아 수치해석에 적용하는데 활용할 수 있는 형태이다. 출구 경계조건은 배기가스가 빠져나가는 실린더 커버 영역에 Pressure-far field 조건을 적용하였으며, 입구 경계조건은 배기가스 물성과 배기가스 순환 조건을 고려하여 질량유량 입구로 설정하였다.⁶⁾ 이 연구에서는 앞서 설명한 내용대로 사용자 정의 함수를 이용하여 연소실을 모델링하고 수치해석한 결과를 이용하여 고찰하였다.

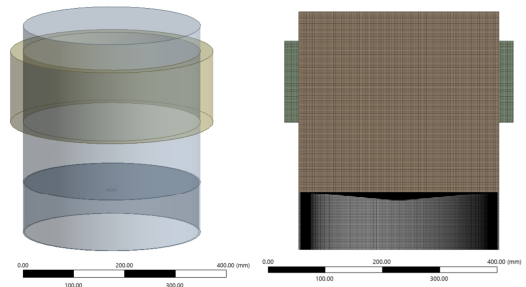


Fig. 3 Simplified geometry and mesh modeling

2.3 수치해석 조건

수치해석의 경계조건은 실험 조건을 기준으로 동일하게 설정하였다. 엔진 속도 167 rpm은 고정되어 있으며, 가변피치 프로펠러(Controllable Pitch Propeller, CPP) 적용으로 인해 속도는 일정하지만 피치 변화에 따라 엔진 부하가 조정된다. 부하 조

Table 2 Setup conditions and parameters of the numerical analysis

Parameters	Setup conditions					Unit
Engine speed	167(fixed, CPP)					rpm
Load	25	50	75	80	100	%
Engine output	869	1,738	2,606	2,780	3,475	kW
Exhaust gas temp' at cylinder outlet	226	259	285	295	323	°C
Exhaust gas press' at cylinder outlet	0.36	0.92	1.62	1.75	2.46	bar
O ₂ concentration of EGR	17.7	17.7	17.5	17.5	17.6	%

건은 25%, 50%, 75%, 80%, 100%를 적용하였고, 각 부하에서의 엔진 출력, 실린더 출구 배기온도 및 배기압력을 경계조건으로 설정하였으며, 주요 매개변수는 Table 2에 나타났다.

2.4 수치해석적 접근법

실험 데이터를 수치해석에 동일하게 적용하기 위해서는 시간 간격의 동기화가 필요하다. 실험 데이터는 계측 간격에 따라 시간 간격이 결정되지만, 수치해석은 격자 크기에 의해 시간 간격이 결정되기 때문에 두 값 사이에 차이가 발생한다. 이를 해결하기 위해 특성곡선법 기반의 시간 동기화 개념을 참고하여 시간 간격 동기화 알고리즘을 생성하였다.⁷⁾

Fig. 4는 시간 간격 동기화를 위한 알고리즘의 개략도를 나타낸 것으로, 각 시간 간격의 진행을 단계별로 ①에서 ⑧까지 나타냈다.

사용자 정의 함수에서 수치해석의 시간 간격 및 크기를 총괄하도록 하였으며, Interface를 기준으로 실험의 시간 간격 크기에 도달하기 전까지 수치해석의 시간 간격을 동일하게 사용하였다. 수치해석의 시간 간격이 실험의 시간 간격을 초과하면 이를 선형보간법을 이용하여 일치시키는 방법으로 시간 간격을 동기화하였다. 이러한 방법은 시간 간격 크기에 따라 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 결과의 타당성을 확보하기 위한 것으로, 각 시간 간격마다 선형보간법 적용으로 인해 발생하는 오차를 줄일 수 있었다.

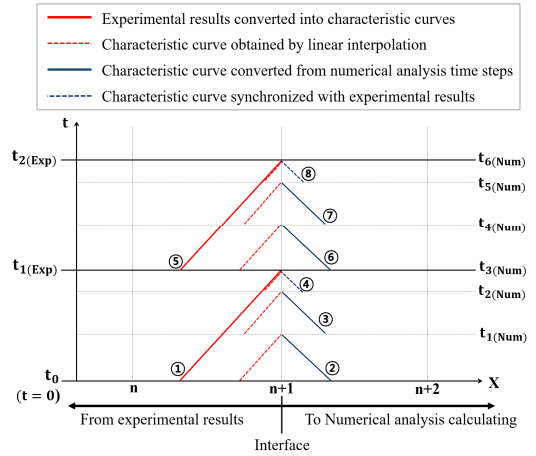


Fig. 4 Schematic diagram of the algorithm for time-interval synchronization

수치해석 영역에서는 격자 크기에 따른 Courant 수를 2.0 이하로 유지할 수 있도록 최대 시간 간격 크기를 제한하였고, 계산 시간 단축을 위해서 최소 시간 간격 크기를 최대 시간 간격 크기 대비 10%로 제한하였다. 이와 같은 시간 간격 동기화 알고리즘을 적용하여 과도 상태 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 활용하여 향후 실험 계측 데이터를 연계한 실시간 성능 예측 수치해석에도 적용할 수 있을 것으로 생각한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과의 타당성 확인

수치해석 결과의 타당성을 확인하기 위해서 연소실 압력에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 Fig. 5에 나타냈다. 엔진의 운전 조건은 80% 부하, CPP 적용, Tier III 운전에서의 EGR 작동 조건이다.

실험 결과에서 최대폭발압력(Pmax)은 ATDC 10 CA°에서 176.1 bar, 최대압축압력(Pcomp)은 ATDC 3 CA°에서 153.8 bar로 나타났으며, 두 압력의 차이(Pmax-Pcomp)는 22.3 bar였다. 수치해석 결과에서는 Pmax가 ATDC 14.3 CA°에서 168.0 bar, Pcomp가 ATDC 0.1 CA°에서 155.3 bar로 나타났다. 이를 실험값과 비교하면, Pmax는 11.3 CA° 늦

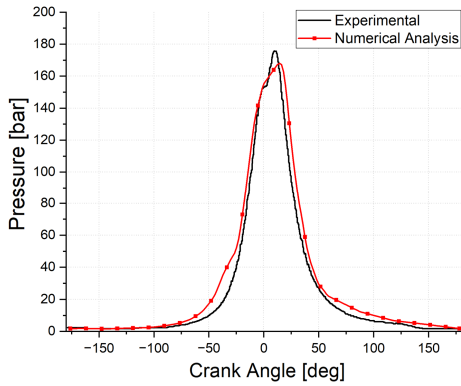


Fig. 5 Comparison of cylinder pressure results between experiment and numerical analysis

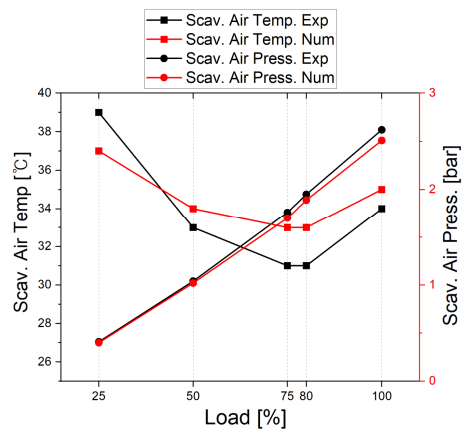
고 8.1 bar 작게 나타나 4.60%의 오차가 발생했으며, Pcomp는 2.9 CA° 빠르고 1.5 bar 크게 나타나 0.98%의 오차가 발생하였다.

이와 같은 오차가 발생한 이유는 소기공과 연소실 형상의 모델링을 단순화하였기 때문이라고 생각하며, EGR 조건에서 소기 특성 및 배출물 예측을 수행할 경우에는 해당 오차 범위를 고려한 해석이 필요하다. 오차를 고려하더라도 계산에 소요된 시간이 수 분 이내로 매우 짧아, 높은 정확도보다는 경향성 파악과 빠른 결과 도출이 요구되는 상황에서는 유효한 접근법으로 활용할 수 있을 것으로 생각한다.

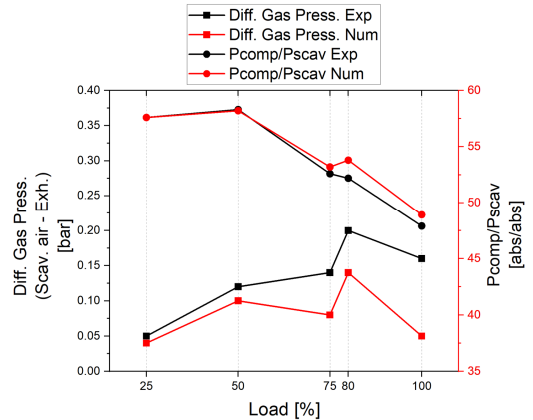
3.2 배기가스 재순환에 의한 소기 특성

빠른 계산이 가능한 수치해석적 접근법을 이용하여 EGR 조건에서의 소기 특성을 분석하였으며, Fig. 6에 결과를 나타냈다. 주요 분석 항목은 소기 온도 및 압력, 소기-배기가스 차압, Pcomp 대비 소기 압력(Pcomp/Pscav), 역류압(Blowback Pressure)이다.⁸⁾

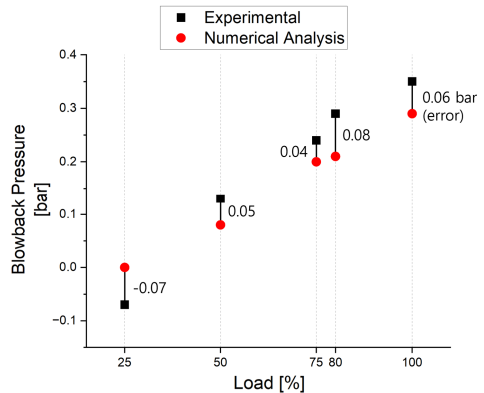
Fig. 6 (a)에서 소기 온도는 25% 저부하와 100% 고부하에서 높게 나타나고, 75% 및 80% 부하에서는 낮게 나타나는 경향이 실험과 수치해석 모두에서 동일하게 나타났다. 부하 증가에 따른 소기 압력의 상승 추세도 두 결과가 유사하게 나타나 전체 부하 범위에서 소기 온도 및 압력 결과는



(a) Scav. air temperature and pressure



(b) Diff. gas pressure(Scav. air-Exh. gas) and Pcomp/Pscav



(c) Blowback pressure

Fig. 6 Comparison of experimental and numerical results related to scavenging characteristics

빠른 계산을 위한 수치해석적 접근법으로도 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각한다. 소기 온도 결과에서 발생한 오차는 기관실의 온도, 습도, EGR Cooler 등 세부 경계조건을 상세하게 반영하면 감소시킬 수 있을 것으로 생각한다.

Fig. 6 (b)의 소기-배기 차압은 고부하일수록 오차가 크게 나타났으며, 이는 부하에 비례하여 증가하는 P_{max} 와 같이 부하 의존적인 경향을 보였다. P_{comp} 대비 소기 압력은 전체 부하에서 실험과 수치해석의 결과가 유사한 추세를 보였다. 이 결과로 빠른 계산을 위한 수치해석적 접근법에서 실린더 압력의 증가와 감소 시점의 정확도가 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

Fig. 6 (c)는 부하 증가에 따른 역류압을 나타낸 것으로, 부하가 증가할수록 역류압이 점진적으로 상승하는 경향을 보였다. 실험에서는 25% 저부하에서 음(-)의 역류압이 발생하였는데, 이는 저부하에서 작동하는 보조 블로워(Air Blower)의 영향이며 수치해석에서는 이 영향을 고려하지 못해 영(0)의 역류압이 발생하였다. 보조 블로워의 영향을 받지 않는 부하 구간에서는 실험과 수치해석 모두 부하 의존성을 가지는 경향이 나타났다.

5. 결 론

EcoEGR 시스템이 적용된 선박용 2행정 엔진(5S35ME-B9.5)을 대상으로 배기가스 재순환 조건에서 소기 특성을 빠르게 예측할 수 있는 수치해석적 접근법을 제안하였다. 계산 시간을 단축하기 위해 연소실 모델링 시 격자의 수를 최소화하였고, 피스톤 운동을 반영한 실린더 압력 프로파일을 사용자 정의 함수로 적용하였다. 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 실험 데이터와 수치해석의 시간 간격 차이를 일치시키기 위한 시간 간격 동기화 알고리즘을 생성하여 계산 시간을 수 분 이내로 단축시키는 수치해석적 접근법을 개발하였다.

2) EGR 조건에서 소기 특성을 분석한 결과, 소기 온도 및 압력, 소기-배기가스 차압, P_{comp} 대비 소기 압력비(P_{comp}/P_{scav}), 역류압 등 주요 소

기 관련 인자들은 실험과 유사한 결과가 나타났으며, 오차는 부하에 의존하여 발생하는 경향이 나타났다.

3) 저부하 조건에서는 보조 블로워의 영향을 수치해석에 반영하지 않아 오차가 발생하였으며, 이는 향후 경계조건을 보다 상세하게 반영함으로써 소기 특성 예측의 타당성을 확보할 수 있을 것으로 생각한다.

이 연구에서 제안한 수치해석적 접근법은 선박용 엔진의 EGR 운전 조건에서 소기 특성을 빠르게 예측할 수 있는 방안임을 확인하였다. 이 수치해석적 접근법은 향후 선박용 엔진의 실시간 해석, EGR 시스템과 엔진의 매칭, NOx 배출 예측 알고리즘의 개발을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의기술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

K. J. Kong; Conceptualization, Data curation, Funding acquisition, Project administration, Software, Supervision, Writing-original draft. Y. M. Sung; Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Validation, Visualization, Writing-review & editing.

References

1. K. H. Park and R. Prosser, 2023, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Combustion Process in a Marine Engine", *Journal of Power System Engineering*, 27(3), 47-56. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.3.047>)
2. J. S. Moon and S. H. Jung, 2025, "A Study on CO₂ Conversion Factor and CO₂ Emissions in Exhaust Gas", *Journal of Power System*

- Engineering, 29(3), 29-34.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2025.29.3.029>)
3. K. H. Ryu and J. K. Park, 2018, “A Study on the Development of an Aftertreatment System for PM/NOx Reduction in Diesel Engines”, *Journal of Power System Engineering*, 22(4), 47-54.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.047>)
 4. MAN Energy Solutions, 2019, “Marine Engine Programme”, 2nd Edition.
 5. Z. Wang, S. Zhou, Y. Feng and Y. Zhu, 2017, “Research of NOx Reduction on a Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine by Using EGR-CB and EGR-Bypass Systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19337-19345.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.009>)
 6. X. Llamas, 2018, “Modeling and Control of EGR on Marine Two-Stroke Diesel Engines”, Linköping University Electronic Press, Ph.D. Thesis.
 7. K. J. Kong, S. H. Jung, T. Y. Jeong and D. K. Koh, 2019, “1D-3D Coupling Algorithm for Unsteady Gas Flow Analysis in Pipe Systems”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(9), 4521-4528.
(<https://doi.org/10.1007/s12206-019-0848-2>)
 8. T. Senčić, V. Mrzljak, V. Medica-Viola and I. Wolf, 2022, “CFD Analysis of a Large Marine Engine Scavenging Process”, *Processes*, 10(1), 141. (<https://doi.org/10.3390/pr10010141>)