

운항 중 EGR이 2행정 사이클 디젤 엔진의 성능에 미치는 영향 Effect of EGR on Performance of Two-stroke Cycle Diesel Engine on Sailing

문재성* · 제민아* · 정석호***

Jae-Sung Moon*, Min-A Je* and Suk-Ho Jung***

(Received 11 July 2023, Revision received 27 October 2023, Accepted 27 October 2023)

초록 : 본 연구에서는 NOx Technical File에 기재된 공장 시험 결과와 운항 중의 성능을 취득하였고 EGR 유무에 따른 성능을 비교 분석하였다. 우리 나라에서는 처음으로 EGR 도입한 선박이기 때문에 운항 중의 데이터는 앞으로 2행정 사이클 디젤 엔진의 최적화에 매우 도움이 될 것으로 사료되며 다음과 같은 결과를 얻었다. EGR이 없는 경우가 EGR이 있는 경우에 비해 Pmax가 3~8bar 정도 높게 나타났지만 연료 인덱스의 경우 EGR의 영향은 거의 없었다. 앞으로 운항 중의 데이터를 더 많이 취득한다면 운항에 더욱 최적화된 2행정 디젤기관의 개발에 도움이 될 것으로 보인다.

키워드 : 배기가스재순환, 개폐율, 2행정 사이클, 디젤 엔진, 운항 중

Abstract : In this study, the factory test results described in the NOx Technical File and the performance obtained during sailing were compared and analyzed according to the presence or absence of EGR. Since it is the first ship in Korea to introduce EGR, it is considered that the data obtained from sailing will be very helpful in optimizing the two-stroke cycle diesel engine in the future, and the following results were obtained. In the case without EGR, the Pmax was 3 to 8 bar higher than in the case with EGR. in the case of the fuel index, EGR had little effect. Acquiring more data during operation will help develop a two-stroke diesel engine that is more optimized for operation in the future.

Key Words : EGR, Open Rate, Two-stroke Cycle, Diesel Engine, On Sailing

1. 서 론

전 세계적으로 대기오염과 지구온난화에 의한 피해가 커져 가고 있다. 혹서와 혹한, 극심한 가뭄과 홍수, 미세먼지에 의한 대기오염으로 질병 증

가가 심각해져 가고 있다. 이들의 원인이 되고 있는 유해 배출가스에 대한 각종 규제가 점점 엄격해져 가고 있다. 선박에서 대기로 방출된 이후 미세먼지를 유발하는 질소산화물(NOx)의 배출에 대해서 2016년 1월 1일부터 TierIII 단계로 규제를

*** 정석호(<https://orcid.org/0000-0002-6268-5864>) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*문재성(<https://orcid.org/0009-0008-1296-7098>) : 대학원생, 부경대학교 일반대학원

*제민아(<https://orcid.org/0009-0006-5623-3585>) : 대학원생, 부경대학교 일반대학원

*** Suk-Ho Jung(<https://orcid.org/0000-0002-6268-5864>) : Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*Jae-Sung Moon(<https://orcid.org/0009-0008-1296-7098>) : Graduate student, Pukyong National University.

*Min-A Je(<https://orcid.org/0009-0006-5623-3585>) : Graduate student, Pukyong National University.

강화하였다. 내연기관에서 배출되는 NOx의 규제에 대응하기 위해 사용되고 있는 저감 장치는 주로 SCR(Selective Catalytic Reduction)이다. SCR의 개발은 2010년 초반부터 개발되어 4행정 사이클 디젤 엔진에는 문제없이 도입¹⁻³⁾이 되었다. SCR은 요소수의 가수분해와 촉매의 활성화를 위해서 배기가스의 온도 범위는 대략 280~540℃를 요구한다. 2행정 사이클 디젤 엔진은 배기 가스의 온도가 낮고 저질유의 사용 등으로 SCR 도입에는 어려움이 많이 있었다. SCR을 대신하여 TierIII를 만족시킬 장비로 EGR(Exhaust Gas Recirculation)이 도입⁴⁻⁷⁾되었다. EGR은 내연기관에서 발생하는 배기가스에 포함된 비열이 높은 성분(CO₂ & H₂O)을 연소실에 흡기와 함께 공급하여 연소실 온도를 낮춤으로써 고온의 연소가 잘되는 분위기에서 생성되는 NOx를 저감시킨다.

본 연구는 우리나라 선박에서 처음으로 EGR이 탑재된 백경호의 주기관 운항 중 데이터를 취득하여 공장 시험 데이터와 비교 및 분석하였다. 엔진 제조사에서 개발이나 인증을 위한 실험 데이터는 항상 실제 운항 중의 데이터와는 괴리가 있는 것이 현실이다. 이는 실제 운항 중의 성능 데이터를 앞으로 더 많이 취득하여 분석함으로써 이를 해결할 수 있다고 본다. 따라서 이제 시작하는 단계이지만 본 연구와 같이 공장 시험과 운항 중의 데이터 비교 분석 결과는 EGR을 탑재한 2행정 사이클 디젤기관의 성능 개발에 필요한 기초 데이터로 활용될 것으로 사료된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 백경호에서 진행되었으며 주요 제원은 Table 1과 같다. 백경호는 어업 실습선으로 총톤수는 3,998톤이며 전장은 97 m이다. 그리고 상용출력 선속은 15.27 노트이다. Fig. 1에 백경호의 실물 운항 사진을 나타낸다.

실험에 사용된 백경호의 주기관은 2 행정 사이클 디젤 엔진으로 사양은 Table 2와 같다. 보어가 35 mm이며 기통 수는 5개이다. 최대 연속 출력은

167 rpm에서 3,475 kW로 가변 피치 프로펠러(CPP:Controllable Pitch Propeller)와 연결되어 있다. 그리고 주기관에 적용되어 있는 EGR시스템은 EGRBP로 MAN-ES사에서 개발한 시스템으로 바이패스가 있어 EGR 뒤에 BP를 붙였다.

Fig. 2는 백경호 EGR 시스템의 개념을 나타낸다. 배기가스 리시버 아래의 EGR Shut Off Valve(SOV)와 EGR 블로워 후단의 EGR Blower Throttle Valve(BTV)가 열리고 EGR 블로워가 기동되면서 EGR 운전은 시작된다. EGR 시스템으로

Table 1 Specification of Baekkyung

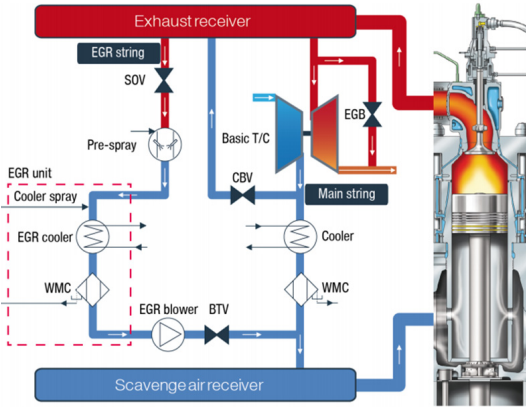
Description	Specification
Kind of ship	Training ship
Gross tonnage	3,998 ton
Length over all	97.00 m
Length between perpendiculars	85.00 m
Breath	15.40 m
Depth	8.30 m
Service speed (NCR, 15%S.M)	15.27 kn
SFC(shop test-EcoEGR mode)	172.1 g/kWh



Fig. 1 Picture of Baekkyung

Table 2 Specification of test engine

Description	Specification
Engine model	5S35ME-B9.5
Number of cylinders	5
Specified maximum continuous rating (SMCR)	167 rpm
Power of SMCR	3,475 kW
Bore/Stroke	350/1,550 mm
Piston speed at SMCR	8.63 m/s
Mean effective pressure at SMCR	16.8 bar



SOV – EGR Shut-off Valve CBV – Cylinder Bypass Valve
 BTW – Blower Throttle Valve EGB – Exhaust Gas Bypass Valve

Fig. 2 Diagram of EGR system in Baekkyong⁸⁾

들어온 배기가스는 Pre-spray와 EGR unit를 거치면서 냉각 및 청정이 된다. 그리고 소기 리시버로 다시 공급되어 터보차저를 거친 소기와 함께 실린더로 공급된다.

EGR 공급량은 총 배기 가스량의 약 40%까지 배기가스 리시버에서 소기 리시버로의 흐름을 생성할 수 있고, EGR 블로워의 rpm은 엔진부하에 따라 주파수 변환기에 의해 제어되어 공급량을 제어할 수 있게 되어 있다.

2.2 실험방법

Fig. 3에는 백경호의 주기관 운전 모드에 대해서 나타내었다. 먼저 파란색의 콤비네이터 모드는 전후 방향으로 핸들의 포지션이 5까지는 회전수가 정격 회전수인 167 rpm의 절반인 84 rpm으로 유지되면서 피치의 조절로 부하 조절이 되다가 이후에는 정격 회전수까지 피치는 100%로 고정되고 회전수까지 증가되면서 부하를 조절하도록 되어 있다. 백경호의 운항 중에는 주로 이 모드를 사용한다. 빨간색의 고정 회전수 모드는 핸들 포지션에 관계없이 회전수는 정격 회전수가 되고 피치의 조절에 의해 부하가 조절되는 방식이다. 이는 NOx 테크니컬 파일의 데이터 취득 시와 동일한 운전 모드이다.

운항 중의 실험은 백경호 주기관의 회전수를 125 rpm, 프로펠러의 피치는 100%에서 약 30분간

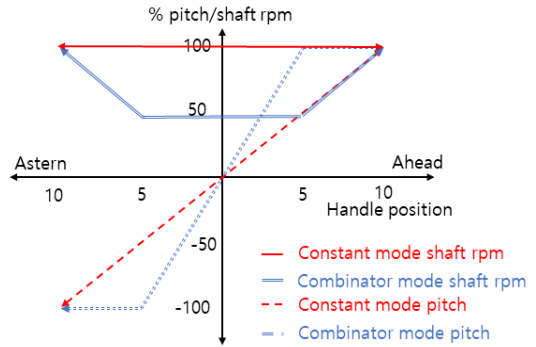


Fig. 3 Combinator curves for shaft rpm and the corresponding propeller pitch combinator and constant speed mode

Table 4 Summary of data at normal operating

Description	Sea trial	Shop test
	Combinator mode	Constant mode
Engine speed (rpm)	125	167
Pitch (%)	100	-
Engine load (%)	28~48%	25~50
Period of test	30 min	30 min
Open rate of BTW (%)	14~19	13~23

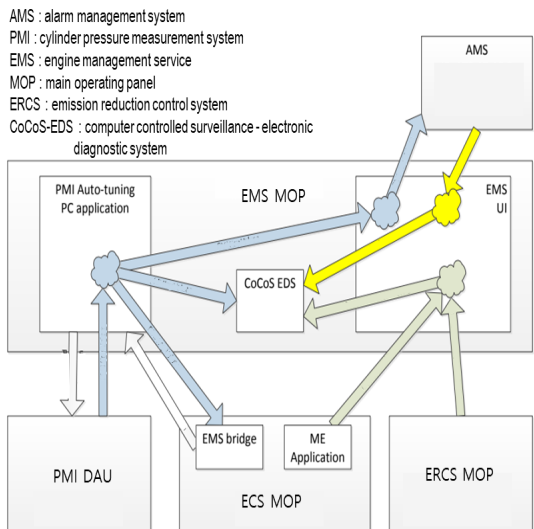


Fig. 4 Overview of main engine data flow in Baekkyong

운전하였으며, 이때의 주기관 부하는 약 28~48% 이고, 선속은 13.6 knots로 축마력이 약 1,400 kW였다. BTV의 개폐율은 Table 4에 요약한 것과 같다.

EGR을 실시하지 않은 운전은 일반 운전 모드로 지칭하고 이 모드에서 EGR 운전 모드로 변경할 때는 ERCS-MOP에서 EcoEGR Tier2 모드를 “AUTO”로 설정하여 변경하였다. 이때 EGR BTV는 자동적으로 부하에 따라 개폐율이 정해져 있다. 운항 중에는 14~19%의 개폐율이었고 공장 시험에서는 13~23%였다.

Fig. 4는 백경호의 엔진 데이터 전송 개념도로 PMI를 통해 얻은 데이터는 그림의 오른쪽 위측 알람 모니터링 시스템(AMS)에 최종적으로 엔진 성능 데이터를 저장하였고 이를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소 최고 압력에 미치는 영향

Fig. 5에는 실린더의 최고 압력(Pmax)을 나타내었다. 주항색은 운항 중의 데이터를 나타내고 파란색은 공장 시험의 데이터를 나타낸다. 그리고 점선은 EGR이 없는 경우, 실선은 EGR을 실시한 경우를 나타내고 있다. 먼저 EGR을 실시한 경우 EGR이 없을 때보다 0.3~0.8 MPa 정도 낮은 최고 압력을 나타낸다. 이는 비열이 높은 이산화탄소와 수증기가 압축 압력을 낮게 하기 때문에 결과적으로 연소 시 최고 압력이 낮아진 것으로 판단된다. 이는 질소산화물의 저감과 연관될 것이다. 운항 중과 공장 시험의 결과를 살펴보면, 공장 시험이 낮게 나타나는데 이는 공장 시험은 주기관 회전수가 167 rpm인 반면 운항 중에는 125 rpm이기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 연료 인덱스에 미치는 영향

Fig. 6은 EGR 유무에 따른 운항 중과 공장 시험 시의 연료 인덱스를 나타낸다. 연료 인덱스는 정확한 연료의 양을 나타내는 것은 아니지만 제조사에서 제시한 사용 연료의 양을 비교할 수 있는 인자이다. 운항 중과 공장 시험 모두 EGR에 따른 연료 인덱스의 차이는 거의 없다. 이는 EGR

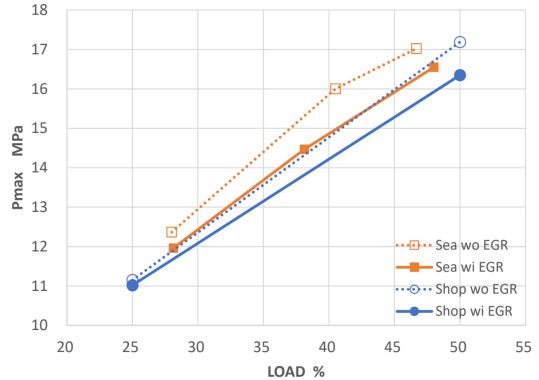


Fig. 5 Pmax on shop test and sea trial with and without EGR

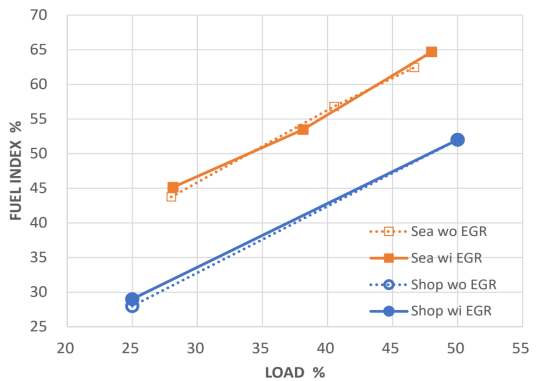


Fig. 6 Fuel index on shop test and sea trial with and without EGR

에 의한 CO₂와 H₂O의 도입량이 연료소비량에 차이를 줄 만한 영향력이 없기 때문인 것으로 판단된다. 특히 H₂O의 공급은 연소에 필요한 활성화기의 생성에 도움을 주기 때문에 적절량의 공급은 연소를 더 잘 되도록 만든다는 연구 결과⁹⁾도 있다. 한편 항해 중과 공장 시험에는 10% 이상의 큰 차이가 있었다. 이는 실험 방법에서 설명한 것처럼 엔진 회전수와 피치가 다른 영향 때문이다.

3.3 배기와 소기에 미치는 영향

Fig. 7에는 배기가스의 온도를 나타내었다. 공장 시험에서는 EGR이 없는 경우가 부하가 올라가면서 높게 나타나는 반면 운항 중에는 교차하는 것을 볼 수 있다. EGR에 의해 압축 압력이 감

소하면서 연소 온도가 낮아지고 이로 인해 배기 가스의 온도도 낮아지는 현상이 일반적이지만 항해 중의 데이터는 운항 시의 조류, 바람 등의 조건들이 달라지기 때문에 이와 다른 경향이 나타날 가능성도 있다. 실험 당시에는 이러한 외부 조건을 파악하지 못했기 때문에 앞으로의 실험에서는 이러한 인자들도 파악하여 분석하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

Fig. 8에는 터보차저의 회전수를 나타내었다. 터보차저의 회전수는 배기가스의 압력과 온도에 영향을 받으며 소기량에도 영향을 줄 수 있다.

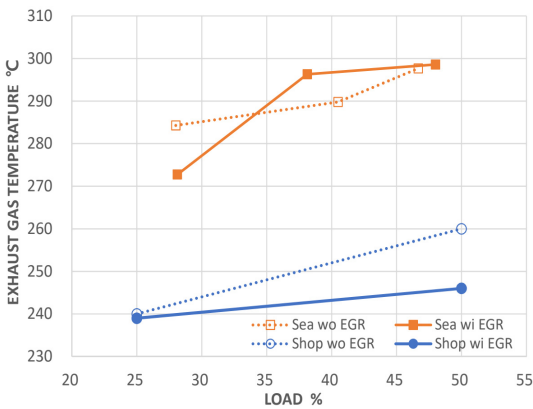


Fig. 7 Exhaust gas temperature on shop test and sea trial with and without EGR

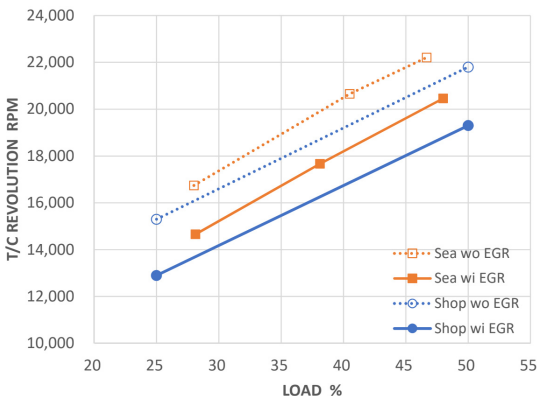


Fig. 8 Turbocharger revolution on shop test and sea trial with and without EGR

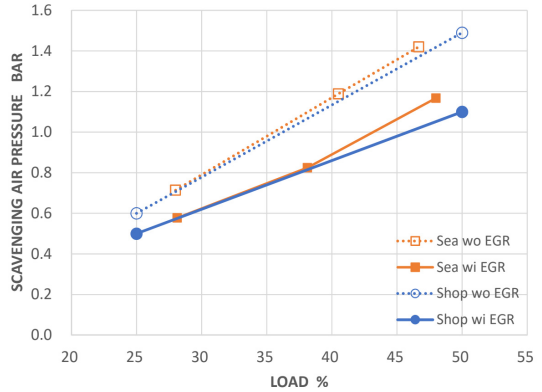


Fig. 9 Scavenging air pressure on shop test and sea trial with and without EGR

동일한 밀도의 배기가스라면 온도가 높을수록 더 많은 에너지를 가지고 있기 때문에 터보차저의 회전수를 높일 수 있다. 항해 중의 데이터가 공장 시험에 비해 터보차저의 회전수가 높고, EGR이 없는 경우가 EGR이 있는 경우에 비해서 높은 것을 알 수 있다. 앞서 설명한 배기가스를 보면 EGR이 없는 경우가 온도가 높기 때문에 터보차저의 회전수가 EGR이 없는 경우가 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에는 소기 압력을 나타내었다. EGR이 없는 경우가 EGR이 있는 경우에 비해 저부하에서는 0.1 bar, 고부하에서는 0.2 bar 이상 높게 나타났다. 그리고 운항 중 데이터와 공장 시험 데이터의 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서 EGR에 의해 낮아지는 소기 압력이 엔진의 성능이나 운전애 악영향이 생길 가능성을 인지하고 유지 보수 시 확인을 할 필요가 있다.

3.4 NOx에 미치는 영향

Fig. 10에는 질소산화물의 배출량을 나타내었다. 공장 실험에서 EGR을 통해 질소산화물은 대략 100~250 ppm의 저감이 이루어졌고, 운항 중에서도 200~500 ppm의 저감이 이루어졌다. EGR의 질소산화물 저감의 효과는 중부하보다 저부하일 때 높은 것으로 나타났다.

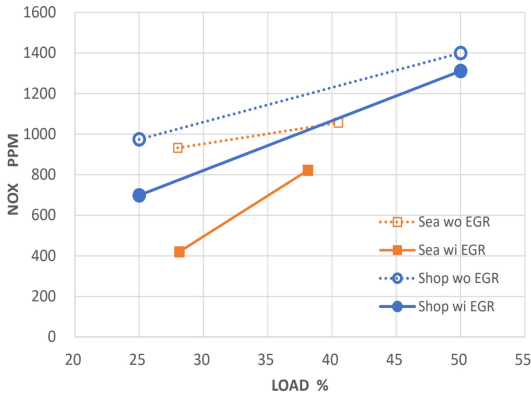


Fig. 10 NOx on shop test and sea trial with and without EGR

4. 결 론

백경호의 2행정 사이클 디젤 엔진에는 NOx 저감 장치로 EGR을 도입하였고 운항 중의 데이터는 거의 알려지지 않았다. 본 연구에서는 NOx 테크니컬 파일에 기재된 공장 시험 결과와 운항 중의 성능을 취득하였고, EGR 유무에 따른 성능을 비교 분석하였다. 우리나라에서는 처음으로 EGR 도입한 선박이기 때문에 운항 중의 데이터는 앞으로 EGR 탑재 2행정 사이클 디젤 엔진의 최적화에 매우 도움이 될 것으로 사료되며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) EGR이 없는 경우가 EGR이 있는 경우에 비해 Pmax가 3~8 bar 정도 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.

2) 연료 인덱스의 경우, EGR의 영향은 거의 나타나지 않았고, 운항 중과 공장 시험에 따른 차이는 기관의 회전수 때문에 나타났다.

3) 공장 시험에서는 EGR이 없는 경우, 부하의 증가에 따라 배기가스 온도가 15℃ 높게 나타난 반면 운항 중의 경우에는 교차가 있었다.

4) 터보차저 회전수는 EGR이 없는 경우가 높았고, 이 영향으로 소기 압력도 높게 나타났다.

5) 공장 실험에서 EGR을 통해 질소산화물은 대략 100~250 ppm의 저감이 이루어졌고, 운항 중에서도 200~500 ppm의 저감이 이루어졌다.

후 기

이 논문은 해양수산부 재원으로 KIMST의 지원(20220568)을 받아 수행된 연구임.

Author contributions

J. S. Moon; data aquisition & Project Administration. M. A. Je; data aquisition. S. H. Jung; Supervision.

References

1. Y. H. Ryu et al., 2015, "A Study on the Installation of SCR System for Generator Diesel Engine of Existing Ship", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 39(4), 412-417. (<https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.4.412>)
2. S. H. Jung, T. Y. Jeong and S. C. Hwang, 2015, "Performance Evaluation of SCR System for Generator Engine on Training Ship KAYA", Journal of the Korean SocietyAdvanced Marine for Power System Engineering, 19(6), 6128-74. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.6.068>)
3. J. W. Yoon, F. Xu and S. H. Jung, 2019, "Numerical Analysis for Temperature Distributions of SCR in Kaya Ship", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 23(1), 63-69. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.1.063>)
4. S. Raptotasios et al., 2015, "Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR", Applied Energy, 157, 814-10823. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.041>)
5. Z. Wang et al., 2017, "Research of NOx reduction on a low-speed two-stroke marine diesel engine by using EGR (Exhaust Gas Recirculation) CB(Cylinder Bypass) and EGB

- (Exhaust Gas Bypass)”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, Issue 30, 19337-193475. (<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.009>)
6. Z. Wang et al., 2020, “EGR modeling and fuzzy evaluation of Low-Speed Two-Stroke marine diesel engines”, *Science of the Total Environment*, 706, 135444, 1-9. (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135444>)
 7. T. Lu et al., 2021, “Improving the fuel/air mixing and combustion process in a low-speed two-stroke engine by the IFA strategy under EGR atmosphere”, *Fuel*, 302, 121200, 1-10 (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121200>)
 8. MAN energy solution, 2021, “Performance evaluation and general operation 706, Instruction Manual Volume 2 Engine type S35ME-B”, 58.
 9. M. Ishida et al., 2006, “Combustion of Alternative Fuels in a Dual Fuel Diesel Engine for Low Emissions”, *Journal of the JIME*, 41, Special Issue, 72-77.