

천연가스 이중연료 디젤엔진의 모드별 유해배출가스 성능에 관한 연구

A Study on Modal Emission Characteristics from Diesel Engine with Natural Gas Dual Fuel on sailing

정석호* · 박정민** · 김상원** · 황성철***†
Suk-Ho Jung*, Jung-Min Park**, Sang-Won Kim** and
Sung-Chul Hwang***†

(Received 03 November 2022, Revision received 10 December 2022 Accepted 12 December 2022)

Abstract : Emission data were acquired during sailing in order to demonstrate the emission reduction of dual fuel diesel engines mounted on ships in this study. CO, CO₂ and NO_x were acquired while sailing Cheonghwa 2 of the Korea Marine Environment Management Corporation in diesel mode and gas mode, and acquisition data was compared and reviewed with the data of the NO_x Technical File. As a result, NO_x was emitted slightly less while CO₂, CO and THC were emitted more on sailing than NO_x Technical File data. Comparing the diesel mode and the gas mode, CO₂ and NO_x were less emitted, while CO and THC were emitted more in the gas mode. In the future, it is necessary to continuously secure data according to the age.

Key Words : Emission, Dual Fuel, Diesel Engine, On Sailing, Modal

1. 서 론

전세계적으로 대기오염과 지구온난화에 의한 피해가 커져 가고 있다. 극심한 가뭄과 홍수, 미세 먼지에 의한 질병 증가가 심각해져 가고 있어 이의 원인이 되고 있는 유해배출가스에 대한 각종 규제가 점점 엄격해져 가고 있다. 디젤엔진은 가

솔린엔진에 비해 비출력이 높고 연비가 좋아 온실가스가 적게 배출되는 장점이 있다. 그러나 고온 연소로 인한 질소산화물(NO_x)과 부분 농부 연소에 의한 입자상물질(PM) 등이 더 많이 배출되는 단점이 있다. 이 때문에 자동차 산업에서는 가솔린엔진과 전동 구동장치가 주를 이루게 되었고 디젤엔진은 퇴출되어 가고 있다. 한편, 선박에서

***† 황성철(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3286-8408) : 연구소장, 깃에스씨알(주)
E-mail : hsc000@hanmail.net, Tel : 055-355-9593
*정석호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6268-5864) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공
**박정민(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4917-9924), **김상원(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6676-6303) : 대학원생, 부경대학교 일반대학원

***† Sung-Chul Hwang(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3286-8408) : Director of Research Laboratory, GET-SCR.
*Suk-Ho Jung(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6268-5864) : Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
**Jung-Min Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4917-9924), **Sang-Won Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6676-6303) : graduate student, Pukyong National University.

는 고출력을 요구하기 때문에 여전히 디젤엔진의 활용 가능성은 높다. 대기오염과 지구온난화에 대한 기술력을 겸비하지 않는다면 디젤엔진은 선박 산업에서도 퇴출될 수 있기 때문에 관련 기술력을 증대하기 위해 꾸준한 연구 개발에 투자하지 않으면 안 된다.

2000년대 초반부터 이러한 추세에 맞추어 디젤엔진에 천연가스/디젤 이중연료에 대한 연구 개발이 많이 진행되었고¹⁻⁵⁾ 현재는 양산되고 있다. 현대중공업의 H27DF의 경우, 마린경유(MDO)에 비해 이산화탄소(CO₂)가 약 20% 저감되고 NO_x는 90%가 저감되는 것으로 보고⁶⁾되고 있다. 현재 국제해사기구(IMO)에서 CO₂는 에너지효율설계지수(EIID)와 선박에너지효율관리계획(SEEMP)으로 관리하고, NO_x는 NO_x 테크니컬 코드로 관리하고 있다. 여기에는 실제 선박 운항 중의 데이터보다는 엔진 제조사 공장에서의 테스트로 결정되어 있어 허술한 부분이 있다. 앞으로는 실제 운항 선박에서의 데이터들을 수집하여 좀 더 정밀한 규제를 해야 할 필요가 있다.

한편, 선박의 노후화에 따라 탑재된 엔진도 같이 노후화되는데 아직 주기적인 배기가스 배출 성분을 수집하고 있지 않은 실정이다. 선박 운항 중의 주기적인 유해배출가스 성분 데이터는 더 좋은 엔진 개발과 선박 연령에 따른 배기가스 규제의 기초 데이터로 꼭 필요하다.

본 연구에서는 실제 선박에 탑재되어 있는 이중연료 디젤엔진의 유해배출가스 저감을 실증하기 위해 운항 중에 데이터를 취득하여 비교 검토하고 IMO에서 관리하는 CO₂ 및 NO_x의 기초 데이터로 제공될 수 있는 것을 목표로 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

운항 중인 선박은 청화2호로 해양환경공단에서 운영하고 있는 친환경 선박이다. 청화2호는 2019년 04월 18일 진수하였고, 항만 정화활동 및 유류 오염사고 대응 선박으로 활용되고 있다. 해양수산부와 해양환경공단이 공동으로 건조한 청화2호는

소형선박으로는 LNG(liquefied natural gas)와 MGO (marine gas oil)의 이중 연료를 사용하는 친환경 엔진을 탑재한 국내 최초의 선박으로 기록되어 있다. Fig. 1에 항만에 접안해 있는 청화2호의 모습을 나타내었다. 청화2호에 탑재된 이중 연료 엔진은 현대중공업의 힘센 엔진(모델명: 5H22CDFP)으로, Fig. 2에는 청화2호에 탑재된 모습을 사진으로 나타내었고, 기본적인 사양은 Table 1에 나타내었다. Fig. 2의 왼쪽 위에 보이는 노란색 파이프는 LNG 공급라인이며 이를 통해 이중연료로 운전이 가능하다. 5기통에 보이는 220 mm이며, 정격 속도 1,000 rpm에서 1,100 kW의 최고 출력을 낼 수 있다. CPP(controllable pitch propeller)를 사용하기 때문에 엔진 회전수는 1,000 rpm으로 고정되며 회전수의 변동 없이 부하의 변동이 가능하다.



Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus



Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

2.2 실험방법

Fig. 3에는 디젤모드와 가스모드에서의 연료 공급 방식에 대한 개념을 나타내었다. 디젤모드에서는 그림의 위쪽에서 알 수 있듯이 파란색 연료분사밸브를 통해 MGO만을 공급하는 일반적인 디젤 엔진과 동일한 개념이고, 가스모드에서는 그림의 아래쪽의 빨간색 과일릿 연료 분사기를 통해 소량의 MGO를 공급하여 착화시킨 후 이 불꽃을 이용하여 노란색 밸브를 통해 공급된 LNG를 연소시키는 개념이다.

Table 1 Specification of test engine

Description	Specification
Number of cylinders	5
Rated speed	1000rpm
Power per cylinder	220kW
Bore/Stroke	220/330mm
Compression ratio	14:1
Mean piston speed	11.0 m/s
Mean effective pressure	21.0 bar
Swept volume per cylinder	12.5 dm ³

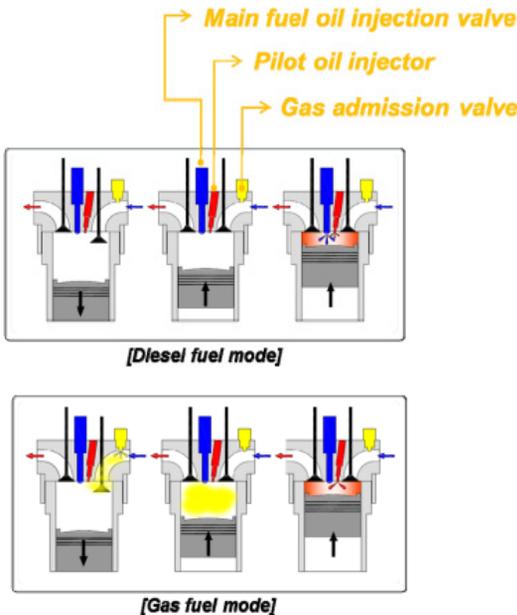


Fig. 3 Concept of dual fuel operation⁷⁾

실험은 엔진 제조사의 공장에서 실시된 NOx 검사결과를 작성한 보고서인 NTF(NOx technical file)와 비교하기 위해서 동일한 부하를 적용하여 운전하였다. 이는 NTC의 E2모드로 정격속도는 1,000 rpm으로 동일하고, 부하는 100, 75, 50, 25% 부하에서 실험이 진행되었다. 실제 운항에서는 가스모드의 경우, 79%의 부하까지만 운전이 가능하며 100%의 운항은 실시할 수 없었다.

CO₂, NO_x, CO, THC와 같은 유해배출가스의 성분을 분석하기 위한 계측장비로 MRU에서 제작한 NOVA prime을 사용하였다. 터보차저 배기가스 라인의 출구로부터 6 m 정도 떨어진 배관 중간에 드레인 라인을 설치하였고, 이곳에서 계측 장비의 흡입부를 연결하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 NTF 성능 분석

2008년 개정된 NTC에 따라 선박에 탑재되는 출력 130 kW 이상이 엔진은 정해진 성능평가를 선급으로부터 인정받아야 한다. 따라서 청화2호는 한국선급으로부터 엔진의 NTF를 발급받았으며, 디젤모드에서는 7.8 g/kWh, 가스모드에서는 7.8 g/kWh의 NO_x를 배출하여 각각 TierⅡ와 TierⅢ를 만족하였다. 그리고 운항 중의 성능과 비교하기 위하여 NTF 결과로부터 CO₂, NO_x, CO의 성능을 분석하였다.

Fig. 4에는 NTF에 계측된 CO₂의 발생량을 나타내었다. 가로축은 엔진의 부하를, 세로축은 CO₂의 발생량(%)을 나타낸다. 빨간색 실선은 NTF 디젤모드를 나타내고, 파란색 점선은 NTF 가스모드를 나타낸다. 25% 부하에서는 디젤모드의 CO₂ 발생량이 4.01%로 가스모드의 CO₂ 발생량이 5.63%보다 훨씬 적었다. 그러나 50% 부하에서는 5.41%와 5.53%으로 거의 대등하게 배출되다가 75% 이상에서는 디젤모드의 발생량이 훨씬 많아졌다. 특히 선박에서 가장 많이 사용하는 부하인 75%에서는 8.78%과 5.29%로 디젤모드의 발생량이 약 60% 증가하였다. 이는 저부하에서는 천연가스의 연소가 완전히 일어날 수 있는 주위 온도가 낮아 불완

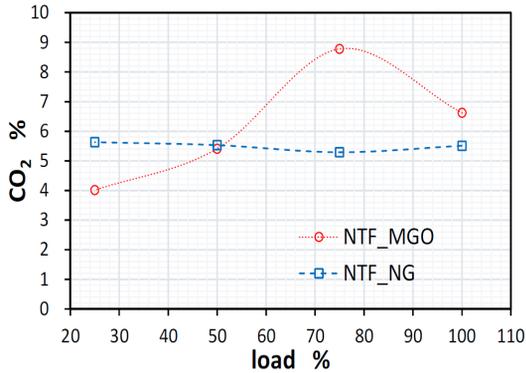


Fig. 4 CO₂ emission concentration in diesel mode and gas mode at NTF

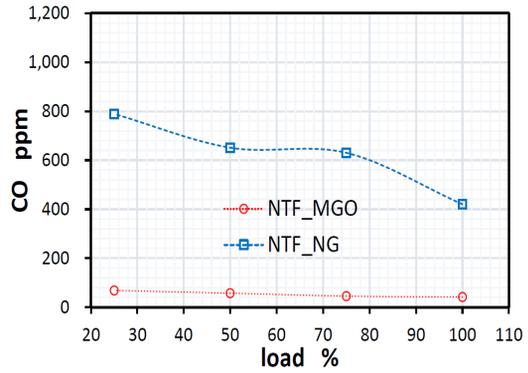


Fig. 6 CO specific concentration in diesel mode and gas mode at NTF

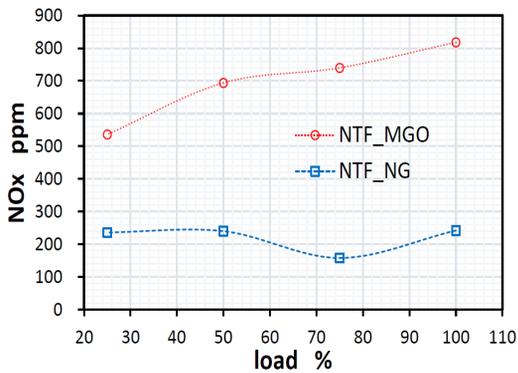


Fig. 5 NO_x specific concentration in diesel mode and gas mode at NTF

전 연소에 의해 연료량이 더 필요한 반면 고부하로 갈수록 주위 온도가 높아져 연소가 잘 이루어질 수 있기 때문이다.

Fig. 5에는 NTF에 계측된 NO_x의 발생량을 나타내었다. 디젤모드의 경우, 부하의 증가에 따라 NO_x의 발생량이 지속적으로 증가하는 현상을 나타내는 반면 가스모드에서는 부하의 증가에 따라 75% 부하를 제외하면 거의 일정하게 발생하는 현상을 알 수 있다. 이는 부하의 증가에 따라 폭발적인 연소를 일으키는 디젤모드에서는 연소가스의 온도가 증가하기 때문에 당연히 NO_x의 발생량이 증가하게 된다. 반면 가스모드의 경우에는 천연가스가 가솔린엔진처럼 희박연소 조건에서의 화염전파에 의해 연소를 일으키기 때문에 연소압

력이 급격하게 증가하지 않으므로 연소온도가 저하하고, 이는 NO_x의 발생량 감소로 이어지게 된다. 한편, 디젤모드는 가스모드에 비해 약 2.3~4.7배 많이 배출되었다.

Fig. 6에는 NTF에 계측된 CO의 발생량을 나타내었다. 디젤모드에서는 저부하에서 68 ppm으로 시작하여 고부하에서는 41 ppm으로 낮아지는 경향을 나타내고 있다. CO는 불완전 연소에 의해 배출되는 물질이기에 고부하로 갈수록 주위 온도가 높아져 적게 배출되며, 디젤모드에서는 특히 적게 배출된다. 반면 가스모드에서는 저부하에서 875 ppm을 배출하고 부하가 증가하면서 점점 줄어들다가 고부하에서 420 ppm이 배출되었다. 가스모드에서는 가솔린엔진처럼 화염전파로 인한 낮은 화염온도, 연소실 벽면 근처의 쿨링 등의 특성 때문에 디젤모드에 비해 CO의 배출이 많아진다. 그리고 부하의 증가할수록 연소압력과 주위 온도가 증가하기 때문에 연소가 잘 일어나 CO의 배출량이 줄어든다.

3.2 선박 운항 중 특성

Fig. 7에는 선박의 운항 중에 계측한 CO₂의 배출량을 나타내었다. 앞서 설명한 것처럼 가스모드의 경우는 운항 중에는 출력이 79%의 부하까지만 가능하여 가스모드에 대해서는 100%의 부하는 없고 79%의 부하만 있다. 빨간색 실선은 항해 중 디젤모드를 나타내고, 파란색 점선은 항해 중 가스

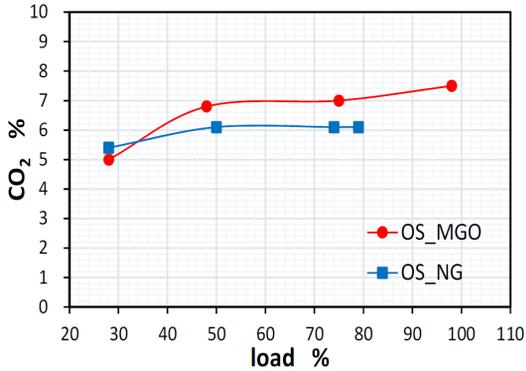


Fig. 7 CO₂ emission concentration in diesel mode and gas mode on sailing

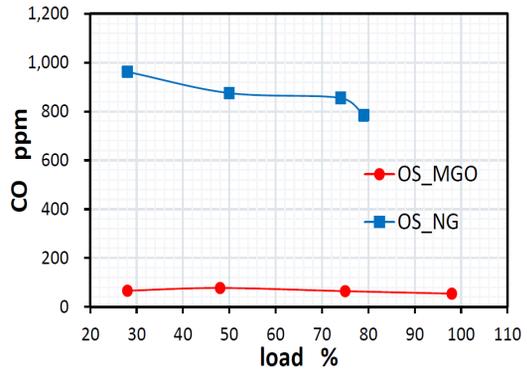


Fig. 9 CO emission concentration in diesel mode and gas mode on sailing

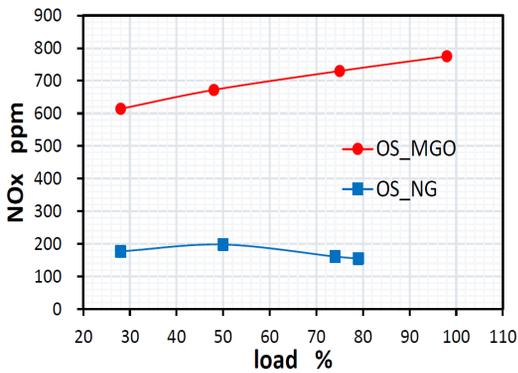


Fig. 8 NO_x emission concentration in diesel mode and gas mode on sailing

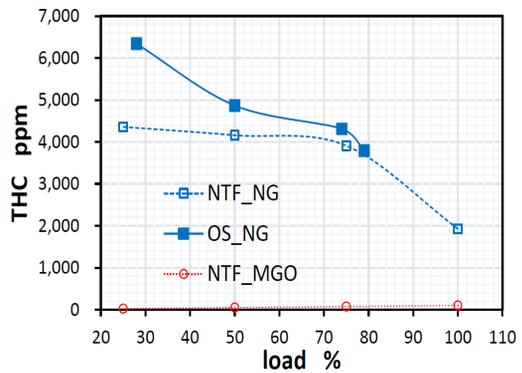


Fig. 10 THC emission concentration in diesel mode and gas mode both at NTF and on sailing

모드를 나타낸다. 먼저 NTF의 결과와 마찬가지로 저부하를 제외하고 가스모드의 경우가 디젤모드에 비해 CO₂가 적게 배출되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 그 차이는 더 적게 나타났다. 또한 Fig. 2의 NTF 결과에 비해 운항 중의 계측 결과가 조금 더 많이 CO₂를 배출하는 결과를 나타내고 있다. 이는 NTF를 계측한 제조사 공장과 실제 해양을 운항할 때의 주위 환경 차이 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 8에는 선박의 운항 중에 계측한 NO_x의 배출량을 나타내었다. Fig. 3의 NTF와 마찬가지로 디젤모드에서는 부하의 증가에 따라 NO_x가 증가하는 반면 가스모드에서는 부하의 증가에 관계없이 거의 일정한 NO_x의 배출량을 보여 주고 있

다. 그리고 NTF의 거의 비슷한 배출량을 나타내고 있다. 한편, 디젤모드는 가스모드에 비해 약 3.4~5.0배 많이 배출되어 NTF보다는 약간 더 많은 배출 차이를 나타내고 있다.

Fig. 9에는 선박의 운항 중에 계측한 CO의 배출량을 나타내었다. 디젤모드에서는 저부하에서 66 ppm으로 시작하여 고부하에서는 54 ppm으로 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 가스모드에서는 저부하에서 962 ppm을 배출하고 부하가 증가하면서 점점 줄어들다가 고부하에서 784 ppm이 배출되었다. Fig. 6에 나타난 NTF와 비교하면, 디젤모드는 거의 비슷한 값을 나타내지만 가스모드에서는 거의 200 ppm 정도 많이 배출하고 있다. 이는 운항 환경이 연소에 악영향을 미치는 것으로 사

료된다. 즉 수증기와 공기의 정압비열이 1.9배 정도 차이가 나기에 수분이 많은 운항 시 연소온도가 낮아지기 때문이다. 수분과 염분이 연소에 미치는 영향을 차후 연구하면 더욱 명확히 밝힐 수 있을 것으로 사료된다.

이는 Fig. 10에 나타낸 NTF와 운항 중 측정한 THC의 결과로도 알 수 있다. NTF의 디젤모드에서는 30ppm 이하였으며, 운항 중에는 거의 측정이 되지 않았다. NTF와 운항 중의 측정이 다른 낮은 THC의 결과값은 확인이 어렵지만, 가스모드에서는 NTF에 비해 운항 중의 THC가 많이 배출되는 것을 확인할 수 있다. 운항 중에는 바다의 특성상 비열이 높은 수증기와 염분 등의 이물질이 주위 공기에 많이 포함될 수 있어 연소가 잘 이루어지지 않는 확률이 높아지는 것이 원인으로 사료된다. 이런 이유로 Fig. 4와 Fig. 7을 통해 제시한 CO₂의 배출량도 운항 중에 더 많이 배출된 것으로 사료된다.

4. 결 론

선박은 운항 중에 여러 가지 데이터를 수집하고 있으나 배기가스의 성분은 아직까지 수집되고 있지 않다. 실제 운항 중에 수집한 배기가스 성분을 주기적으로 분석하면 더 좋은 선박용 엔진을 개발하는데 도움이 될 수 있다. 본 연구에서는 해양환경공단에서 친환경선박으로 운영 중인 청화2호의 주기를 이용하여 디젤모드와 가스모드에서 NTF와 운항 중의 배출가스 성분을 비교 분석하였다.

1) 디젤모드와 가스모드를 비교하면 CO₂와 NO_x는 가스모드가 적게 배출되는 반면 CO와 THC는 가스모드가 많이 배출되었다. 이는 모드별 연소방법에 의한 것이었다.

2) NTF와 운항 중을 비교하면 NO_x는 운항 중에 약간 적게 배출되는 반면 CO₂, CO 및 THC는 운항 중에 더 많이 배출되었다. 이는 주위 환경에 의한 것으로 사료된다.

3) 특히 청화2호의 주기는 디젤모드와 가스모드를 이용할 수 있는 친환경 선박으로 앞으로 주

기적으로 운항 중의 데이터를 수집하여 이중연료 디젤엔진의 발전에 기여할 기초데이터를 수집할 필요가 있다.

후 기

이 논문(또는 저서)은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

S. C. Hwang; Project Administration, J. M. Park and S. W. Kim; data acquisition S. H. Jung; Supervision.

References

1. S. K. Kim, 2005, "The Introduction of MAN B&W M/E and ME-GI Engine for LNG Carrier", Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 29, No. 6, pp. 603-611.
2. J. G. Nam and J. W. Kim, 2005, "The Introduction of Wartsila DF50 Engine for LNG Carrier", Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 29, No. 6, pp. 612-617.
3. A. Hanenkamp et al., 2007, "New Gas Engines from MAN Diesel SE", CIMAC Congress 2007, Paper No. 167, pp. 1-11.
4. I. Nylund, 2007, "Field Experience with the Wartsila 50DF Dual-Fuel Engine", CIMAC Congress 2007, Paper No. 167, pp. 1-10.
5. J. T. Kim et al., 2007, "The First New Gas Engine to Come from Korea", CIMAC Congress 2007, No. 167, pp. 1-7.
6. W. H. Yoon et al., 2016, "Development of HiMSEN Dual Fuel Engine Line-up", CIMAC Congress 2016, No. 201, pp. 1-10.
7. Hyundai Global Service Co. Ltd., 2018, "Instruction Book Volume I - Engine type H22CDFP", Hyundai Heavy Industry, Busan.