Check for updates

동력시스템공학회지 제26권 제6호 pp. 91-100 2022년 12월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online)
Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.6.091
Vol. 26, No. 6, pp. 91-100, December 2022

CPP 추진 선박의 운전 모드에 따른 기관성능 및 배기배출물 특성에 관한 연구

A Study of Engine Performance and Exhaust Emission Characteristics of CPP Propulsion Ship with Operating Mode

김상암* · 왕우경**†
Sang-Am Kim* and Woo-Gyeong Wang**†

(Received 14 November 2022, Revision received 15 December 2022, Accepted 15 December 2022)

Abstract : The engine performance and exhaust gas emissions of a ship equipped with a controllable pitch propeller and a medium-sized medium-speed diesel engine were compared according to the engine load in constant and combined mode. The cylinder pressure diagram, indicated mean effective pressure, specific fuel consumption, navigation distance to unit fuel consumption and air ratio were used to evaluate the engine performance and the emission rates of carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides and smoke concentration were used to evaluate the exhaust gas emissions. According to the results, the engine performance and exhaust emission characteristics under a high load were similar in constant mode and combined mode. In the case of operating an engine under medium load, it was possible to reduce the fuel consumption and carbon dioxide emission rate by setting the operation mode of a controllable pitch propeller to the combined mode, but the emission rate of nitrogen oxides was slightly increased. It is thought that results of this study can provide the reference data that can reduce the carbon dioxide emission to prevent global warming and that can also improve the engine performance when selecting the operating mode of a controllable pitch propeller on the ship with a controllable pitch propeller equipment.

Key Words : Engine Performance, Exhaust Gas Emissions, Controllable Pitch Propeller, Indicated Mean Effective Pressure, Specific Fuel Consumption

1. 서 론

가변피치 프로펠러(CPP : Controllable pitch propeller)는 기관의 회전수를 일정하게 한 상태에서 프로펠러 날개의 피치각을 조정하여 추력과 선속을 조정할 수 있는 추진장치이다. 따라서 기관의 회전수를 변경하지 않고도 추력을 조정할 수 있어 속도 변경 시의 응답성이 좋고 미세조정

**† 왕우경(ORCID:https://orcid.org/0000-002-2558-3615) : 교수, 전남대학교 기관시스템공학과
E-mail : wangwk@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7136
*김상암(ORCID:https://orcid.org/0000-002-1569-9964) : 기관장, 전남대학교 실습선

**† Woo-Gyeong Wang(ORCID:https://orcid.org/0000-002-2558-3615) : Professor, Department of Power System Engineering, Chonnam National University.
E-mail : wangwk@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7136
*Sang-Am Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-002-1569-9964) : Chief engineer, Training ship, Chonnam National University.

이 가능하므로 선박의 조정성능과 위치제어 성능이 우수하고 축발전기를 설치할 수 있는 장점이 있다. 또한 추진효율이 가장 좋은 상태로 기관회전수와 추력을 조절함으로써 모든 운전 범위에서 연료소비율을 감소할 수 있으므로 예인선, 중·대형 트롤선, 페리, 쇄빙선, 해양작업선 뿐만 아니라 여객선, 화물선 등에도 널리 사용[1]되고 있으나, 장치가 복잡하고 고가이므로 CPP 장비를 설치하기 위한 초기비용과 보수유지 비용이 증가하는 단점[2]이 있다고 알려져 있다.

CPP 운전방식으로는, 모든 선속에서 최적의 추진효율을 얻을 수 있도록 프로그램에 따라 기관회전수와 피치를 조정하는 조합방식(Combined mode), 기관의 정격회전수 하에서 피치만을 조정하는 일정회전수방식(Constant mode) 및 기관회전수와 피치를 각각 조정하는 독립방식(Separate mode) 등이 있다.[3,4] 그리고 축발전기를 설치하는 선박에서는 일정회전수방식을 선택하여 운항하지만, 축발전기를 설치하지 않고 조정성능과 연료소비를 절감하는 측면에서 CPP를 설치한 선박에서는 특별한 기준이 없이 통상의 관례 및 제조사의 추천에 의해 CPP 운전모드를 선택하여 운항하는 경우가 많다.

그러나 기관의 출력이 동일한 상태에서도 CPP 모드에 따라 기관의 기관성능, 연소특성 및 배기가스특성이 다르기 때문에 그에 따른 정량적인 자료들을 참조하여 CPP 운전모드를 선택하는 것이 필요하나 제조사 측의 개방된 기술적 자료들은 출력-회전수-피치각-선속과의 관계, 공장 시운전 및 해상 시운전시의 Constant mode 자료에 한정적이고 실제 선박을 이용한 CPP 운전모드 관련 연구결과들도 거의 찾아볼 수 없다.

또한 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 MARPOL 협약에 의한 선박환경 규제는 점점 강화되고 있으며, 특히 MARPOL 부속서Ⅵ에 의한 선박온실가스 감축조치 규제[5]를 강화함으로 인해 2020년부터는 2단계 규제가 적용되어 2008년 기준으로 탄소배출량을 약 20% 감축하여야 한다. 그리고 2022년 3단계에서는 기준대비 30% 및 2030년 4단계에서 40% 그리고 2050년에는 5단계 규제가 시행되어 기준대비 50～70%를 감축해야 한다.[6]

이러한 규제강화에 대비하여 LNG 추진선박 등 친환경연료를 사용하는 선박, 고효율 선체 선박개조 및 연료효율개선설비 등이 연구개발되고 있으나, 현재 운항 중인 선박들은 이산화탄소(CO_2) 배출량을 줄이기 위해 연료사용량을 줄일 수 있는 최적의 운전조건을 규명하여 효율적인 운항관리를 하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 중형 중속 디젤기관을 탑재한 CPP 추진선박인 전남대학교 실습선 새동백호를 이용하여 선박에서 실제로 많이 사용하는 Combined mode와 Constant mode로 운전할 때의 부하에 따른 실린더압력선도, 평균유효압력, 연료소비율, 단위연료소모량에 따른 항해거리 및 공기비 등의 기관성능과 배기가스 측정을 통해 배기배출물 중의 이산화탄소(CO_2), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)의 배출률 및 매연(Smoke) 농도 등을 비교 분석하였다.

본 연구의 결과들은 CPP 장비를 설치한 실제 선박에서 CPP 모드를 선택할 때 기관성능을 향상시키면서 지구온난화의 원인인 CO_2 배출을 줄일 수 있는 운전기준에 대한 자료를 제공할 수 있다고 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치의 구성은 실습선 새동백호의 주기관(Main engine; HYUNDAI, HIMSEN H/32/40P), 기관의 회전수와 추진기의 피치를 제어하여 선속을 조절하는 주추진제어장치(Main propulsion control system; WÄRTSILA, C.P.P. & LIPSTRONIC 7000), 축마력을 측정하기 위한 축토크미터(Shaft torque power meter; Specs, TPM), 및 주기관의 상태를 나타내는 압력, 온도, 기관의 축마력, 연료사용량 및 각종 자료들을 제어하고 감시하는 통합제어감시시스템(Integrated control & Monitoring system;

HYUNDAI, ACONIS- DS) 등으로 이루어져 있다.

그리고 실린더 내 압력을 측정하기 위한 휴대용 전자 지압계(Portable electronic indicator; IMES, EPM-XP), 배기가스 성분의 농도를 측정하기 위한 배기가스분석기 (Exhaust gas analyzer; HORIBA, PG350) 및 배기가스 중의 그을음 농도를 측정하기 위한 광투과식 매연측정기(Opacimeter; BOSCH, RTM 430) 등으로 구성되어 있으며, Table 1과 Fig. 1은 실험용 기관의 주요제원 및 실험장치의 개략도를 각각 나타낸다.

2.2 실험방법

실험 시의 연료유는 선박용 저유황 경유(MGO)를 사용하였으며, 기관운전조건은 실험기관의 연속최대출력(MCR, 3,500 kW, 750 rpm)을 전부하로 하여 본선의 운항 시에 주로 사용되는 부하의 범위인 90%에서 35% 사이를 5단계로 구분하였으며,

Table 1 Specification of test engine

Type	Turbo-charged, 4 stroke DI diesel engine water cooling type
Number of cylinder	7
Bore × Stroke	320 × 400 mm
Compression ratio	15
Injection pressure	37.5 MPa
Injection nozzle	Multi-hole nozzle (12 holes, ϕ 0.3 mm)
Output × Speed [MCR]	3,500 kW × 750 rpm

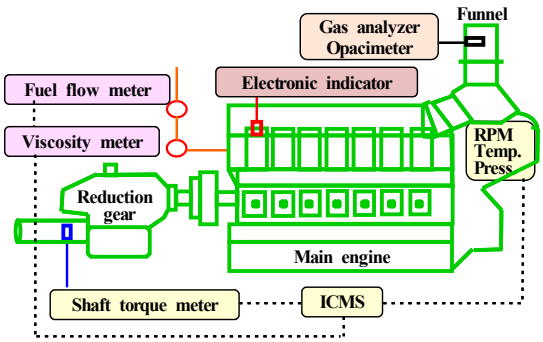

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

각 부하에서 Constant mode와 Combined mode로 운전하여 필요한 자료들을 수집하였다.

Table 2는 실험 시의 각 출력에서의 운전조건을 나타내며, Table 3은 사용 연료유의 성상을 나타낸다. 기관의 상태를 나타내는 각종 온도, 압력, 회전수, 연료 질량 소비율과 축출력 등의 자료들은 각 운전조건 하에서 통합제어감시시스템(ICMS)을 통해 20분간의 자료들을 수집하여 평균하였다.

연소압력은 휴대용 전자식지압계를 통해 크랭크각 0.5 deg.마다 1사이클에 1,440개씩 10사이클 연속 수집되었으며, 7기통을 각각 측정하여 그 평균값을 취하여 기관성능을 규명하는데 이용하였다.

그리고 배기가스 성분 및 매연 측정은 배기가스분석기와 매연측정기를 통해 1분마다 측정하여

Table 2 Power & operating condition[4] with CPP mode

CPP mode	power	rpm		torque	pitch
	kW	eng.	shaft	kN·m	deg.
Constant	3045	747	217.15	134.0	20.38
	2719	751	218.31	119.0	19.38
	2308	751	218.31	101.0	17.83
	1785	751	218.31	78.0	15.45
	1260	753	218.89	55.0	12.0
Combined	3055	755	219.47	133.0	20.8
	2769	728	211.62	125.0	20.8
	2328	674	195.93	113.5	20.8
	1703	604	175.58	92.6	20.8
	1252	542	158.43	76.0	20.8

Table 3 Properties of test fuel

Fuel	M.G.O
Density (kg/m³ at 15℃)	850
Kinematic viscosity (cSt at 40℃)	3.0
Flash point (℃)	65
Sulfur wt (%)	0.04
Water & sediment wt (%)	0.01
Energy density (MJ/kg)	42.8

20분간의 평균값을 이용하였으며, 농도의 단위(ppm)를 배출률 단위(g/kWh)로 환산[7]하였다. 그리고 선박이 운항 중에 바람, 파고 및 조류 등의 해상조건이 변하므로, 부하에 따라 CPP 모드별로 동일한 시간대와 동일한 해역에서 실험을 행하여 두 모드에서의 외력 차이가 되도록 작게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관성능

Fig. 2는 고부하(2,625 kW 이상) 및 저부하(1,750 kW 이하)에서 CPP 운전모드에 따른 실린더 압력과 압력상승률을 나타낸다. 그림을 보면, 고부하에서는 Constant mode 및 Combined mode의 실린더압력 및 압력상승률의 형상이 거의 일치하였다. 이는 기관의 회전수와 토크가 비슷하므로 1사이클당 연료분사량이 거의 동일하여 열발생율 형상이 거의 일치하기 때문이라 생각된다. 그러나 저부하에서는 양 모드의 실린더압력 및 압력상승률의 형상이 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 2의 운전조건에서 알 수 있듯이, 양 모드의 부하는 거의 비슷하지만 기관회전수와 토크의 차이가 있음을 알 수 있다. Constant mode에서는 기관의 회전수가 높아 압축행정 중의 실린더압력은 높게 나타났으나, 1사이클당 분사량은 작아 연소초기의 압력상승률이 낮고 연소최고압력(p_{max})도

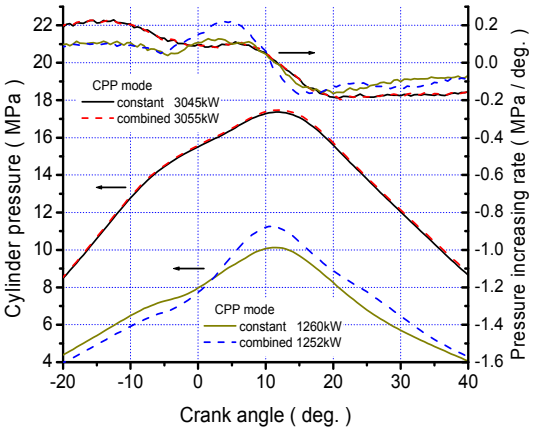

Fig. 2 Cylinder pressure and pressure increasing rate at high and low load

낮게 나타났다. Combined mode에서는 기관의 회전수가 낮아 압축행정 중의 실린더압력은 낮게 되었으나, 1사이클당 분사량이 많아 연소초기의 압력상승률이 높고 p_{max}도 높게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 3은 Constant 및 Combined mode에서의 출력에 따른 7실린더의 IMEP 평균값, 7실린더의 압력평균값으로 구한 IMEP 평균값 및 각 실린더의 도시평균유효압력(IMEP)의 변동계수(COV : Coefficient of variation)를 나타낸다. 그림에서 보면, 3,000 kW 부근의 고부하에서 양 모드의 IMEP가 2.466 MPa 및 2.528 MPa이며, 그 차이가 0.062 MPa로 비슷하였다. 이는 Table 2에서 나타낸 바와 같이 고부하에서는 양 모드의 기관회전수와 토크가 유사하기 때문이라 생각된다. 1,250 kW 부근의 저부하에서의 IMEP는 1.039 MPa 및 1.454 MPa로서 0.415 MPa 정도의 차이가 있었다. 이는 Combined mode에서는 저부하가 될수록 기관의 회전수가 낮아지므로, 동일한 출력을 나타내기 위해서는 사이클 당 공급연료량을 증가하여 일량을 증가시켜야 하기 때문에 IMEP가 크게 된다고 생각된다. 그리고 각 실린더의 IMEP 평균값과 각 실린더압력을 평균한 압력 평균값으로 구한 IMEP 값은 양 모드에서 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 다기통의 기관에서는 각 실린더의 압력 평균값으로 구한 IMEP 값으로 도시마력(IHP : Indicated horse power)을 구하는 것이 계산상 합리적이라고 생각된다.

한편, 각 실린더의 IMEP 변동계수는 2,700~3,000 kW의 고부하에서는 4.33~6.24% 정도이며 Constant mode에서 약간 낮게 나타났다. 1,250~1,750 kW의 저부하에서의 각 실린더의 IMEP 변동계수는 2.68~8.16% 정도로 그 차이가 크게 나타났으며. Combined mode의 저부하에서 변동계수가 작게 되었다. IMEP 변동계수는 인디케이터로 실린더 압력을 순차적으로 측정할 때 시간경과에 대한 선체 외력의 변화와 각 실린더의 분사특성 및 연소특성에 영향을 받을 수 있으며, 본 실험의 결과에서는 고부하와 저부하에서의 양 모드의 IMEP 변동계수의 경향이 반대로 나타났다.

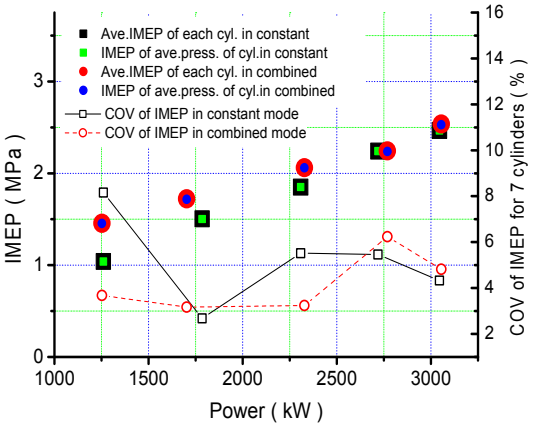

Fig. 3 Indicated mean effective pressure and COV of IMEP according to shaft horse power

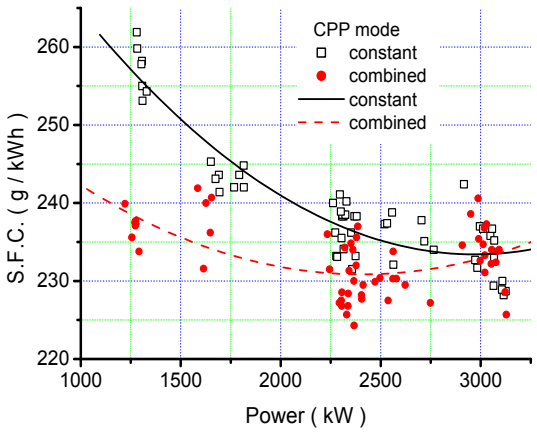

Fig. 4 Specific fuel consumption according to shaft horse power

Fig. 4는 양 모드에서 출력에 따른 연료소비율을 나타낸다. 본 연구에서는 감속기에 근접한 중간축에 설치된 토크미터로 토크를 측정하였기 때문에 제동마력(B.H.P)이라기보다는 축마력(S.H.P)으로 구한 연료소비율이다. 그림에서 보면, 고부하를 제외한 나머지 부하에서 Combined mode에서의 연료소비율이 Constant mode의 연료소비율보다 낮게 나타났으며, 특히 저부하에서 그 차이가 크게 나타났다.

그리고 Combined mode에서는 2,250～2,550 kW의 중부하에서 연료소비율이 가장 낮았으며, Constant mode에서는 2,850～3,050 kW의 고부하에서 연료소비율이 가장 낮게 나타났다. 부하가 낮아질수록 Combined mode에 비해 Constant mode의 연료소비율이 높은 것은 동일한 출력에서 Combined mode보다 기관의 분당회전수가 높아 단위 시간당 사이클 수가 많으므로 인해 실린더 주변으로의 열손실 및 배기손실이 증가하고, 또한 연료분사펌프 등의 연료누설에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 기관출력 3,000 kW 부근의 고부하에서는 기관의 분당 회전수가 비슷하므로 양 모드의 연료소비율의 결과가 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 5는 양 모드에서 출력에 따른 단위연료소모량(1 kg)에 대한 항해거리(m)를 나타내며, GPS (Global positioning system)에서 구한 선속과 연료소비량으로 구하였다. 그림에서 보면, 출력 3,000 kW 부근의 고부하에서는 Constant mode와 Combined mode의 연료소모량에 대한 항해거리가 39～42 m/kg로 거의 비슷하였으며, 출력 2,500 kW 이하부터는 Combined mode의 연료소모량에 대한 항해거리가 증가하였으며, 출력 1,250 kW 부근에서는 Combined mode가 70 m/kg로 Constant mode의 42～45 m/kg에 비해 현저하게 증가하였다.

이는 Table 2의 운전조건에서 알 수 있듯이, 3,000 kW 부근의 고부하에서는 해상조건이 유사한 상태에서 양 모드의 기관회전수가 747～755 rpm으로 비슷하므로 추진효율이 거의 일치하기 때문이라 생각된다. 그러나 Combined mode에서는 피치는 일정하고 출력이 감소할수록 기관회전수가 낮아지므로 인해 추진효율이 높아져[8] 단위연료소모량에 대한 항해거리가 길어진다고 생각된다. 그리고 Constant mode에서는 모든 출력범위에서 기관회전수가 750 rpm 정도로 거의 일정하고 출력이 낮아질수록 피치가 작아지므로 인해 추진효율이 낮아져 단위연료소모량에 대한 항해거리가 짧아진다고 생각된다. 그러므로 해양조사선 또는 트롤선 같이 저속으로 운항할 빈도가 높은 선박에서는 Combined mode로 운항하면 연료소비를 저감할 수 있다고 생각된다.

Fig. 6은 양 모드에서 출력에 따른 공기비(air ratio)와 급기압력을 나타내며, 공기비는 배기가스

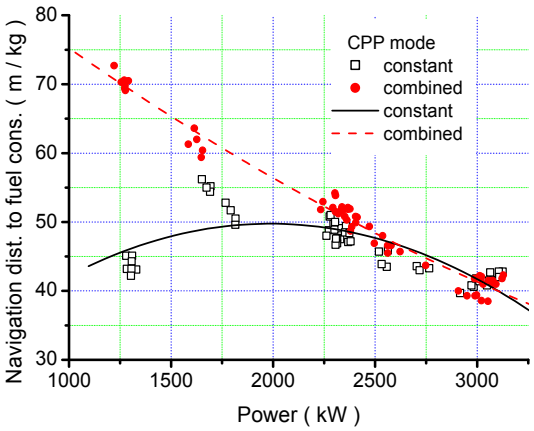

Fig. 5 Navigation distance to fuel consumption according to shaft horse power

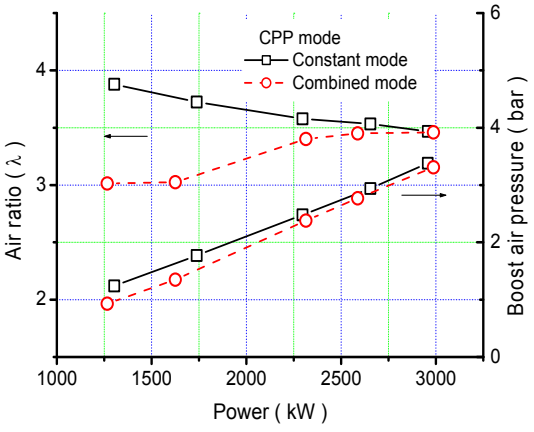

Fig. 6 Air ratio & boost air pressure according to shaft horse power

분석을 통한 질소평형에 의한 계산법[9-10]으로 구하였다. 실험에 이용된 기관은 배기가스 과급기가 설치된 기관으로, 기관부하가 증가할수록 급기압력이 선형적으로 높아졌으며, 동일한 부하에서 Combined mode에 비해 Constant mode에서 급기압력이 약간 높게 나타났다. 그리고 Combined mode에서는 공기비가 3.01～3.46 정도로 저부하보다 고부하에서 공기비가 약간 높았으며, Constant mode에서는 3.47～3.88 정도로 고부하에 비해 저부하에서 공기비가 높게 나타났다.

이는 저부하의 경우에 Combined mode에서 급기압력은 낮고 사이클당 연료분사량은 많아 공기비가 작아지고, Constant mode에서는 급기압력이 Combined mode에 비해 약간 높고 사이클당 분사량은 작기 때문에 공기비가 높아진다고 생각된다. 그리고 양 모드에서 부하의 증가에 따라 급기압력과 사이클당 연료분사량이 증가하지만, Constant mode의 경우에는 기관회전수가 거의 일정한 상태에서 급기압력 상승에 따른 흡입공기량 증가에 비해 연료분사량의 증가가 크기 때문이며, Combined mode의 경우에는 기관회전수가 동시에 증가하여 체적효율이 개선되어 공기비가 증가한다고 생각된다. 그러나 모든 운전범위에서 공기비가 3.0 이상으로 연소에 필요한 충분한 공기가 공급된다고 생각된다.

3.2 배기배출물 특성

Fig. 7은 출력에 따른 양 모드에서의 이산화탄소 배출률을 나타낸다. 그림에서 보면, 3,000 kW 부근의 고부하에서는 CO_2 배출률이 운전모드에 관계없이 약 958～959 g/kWh로 거의 비슷하였으나, 1,250 kW 부근의 저부하에서 CO_2 배출량은 974～1,082 g/kWh로 Constant mode에서 CO_2 배출률이 높게 나타났다. 그리고 고부하를 제외한 운전범위에서 Combined mode에서의 CO_2 배출률이 낮게 나타났다. CO_2 배출률이 낮다는 것은 동일한 출력을 발생하기 위해 공급되는 연료소비량이 적다는 것을 의미하며, 즉 연료소비율이 적다고 할 수 있다.

Fig. 8은 출력에 따른 양 모드에서의 일산화탄소 배출률을 나타낸다. Constant mode의 CO 배출률의 범위는 0.74～1.06 g/kWh 정도이며 저부하에서보다 고부하에서 CO 배출률이 약간 높게 나타났다. Combined mode의 CO 배출률 범위는 0.90～1.52 g/kWh 정도이며, 고부하에 비해 저부하에서 CO의 배출률이 특히 높게 나타났다.

그리고 2,300 kW 정도의 중부하 이상에서는 양 모드의 CO 배출률이 거의 비슷하였다. 이와 같은 결과는 IMO 기술적 코드의 선박용 디젤 주기관의 운전모드인 E2 및 E3 모드에서 실험한 결과[11]와 유사한 경향을 나타내었다. CO는 국소적으로 연료가

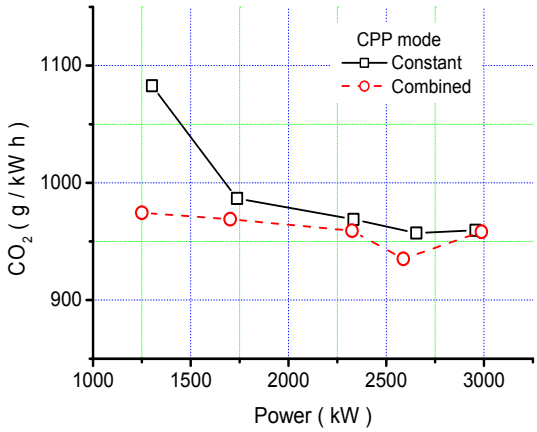

Fig. 7 Specific carbon dioxide emissions according to shaft horse power

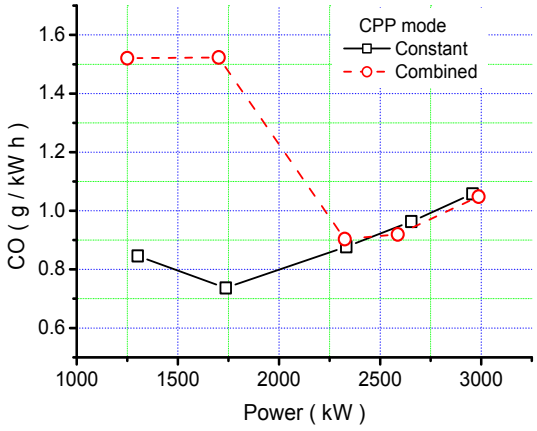

Fig. 8 Specific carbon monoxide emissions according to shaft horse power

농후한 혼합기에서 산소부족으로 인한 불완전 연소로 인해 주로 발생하며, 배기가스 중의 CO를 줄이기 위해서는 화염영역에서 발생한 CO를 팽창행정 초기에 산화시키는 것이 중요하다고 알려져 있다.[12] 따라서 Combined mode의 저부하에서는 연소실의 낮은 분위기 온도 및 동일한 부하의 Constant mode에 비해 사이클당 연료분사량이 많아 농후한 혼합기영역에서 산소부족으로 인한 불완전연소량이 많아지고 또한 기관회전수가 낮아 공기유동이 적절치 못하여 팽창행정 중에 충분히 산화하지 못하기 때문이라 생각된다.

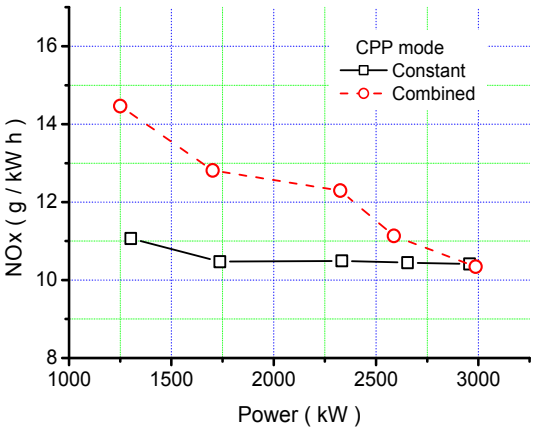

Fig. 9 Specific nitrogen oxide emissions according to shaft horse power

Fig. 9는 양 모드에서의 출력에 따른 질소산화물 배출률을 나타낸다. 그림에서 보면, Constant mode의 NOx 배출률은 10.41～11.07 g/kWh로 출력에 따른 큰 차이가 없었으나, Combined mode에서의 NOx 배출률은 10.34～14.47 g/kWh로 저부하에서 높게 나타났으며, 출력 3,000 kW의 고부하에서는 양 모드의 NOx 배출률이 거의 같았다. NOx의 대부분은 일산화질소(NO)로서 연소초기에 고온의 연소가스에서 생성되고 있으며, 초기 연소온도는 분사시기와 예혼합연소량에 많은 영향을 받는다[13] 고 알려져 있다. 따라서 Combined mode의 저부하에서는 동일한 부하의 Constant mode보다 사이클당 분사량이 많아 예혼합연소량이 증가하여 국소적 연소가스의 온도가 높아져 NO 생성량이 많아지고, 특히 저부하에서는 NO의 소멸반응속도가 기관의 팽창행정에 의한 온도저하 속도에 비해 느리므로 인해 고온에서발생한 NO농도가 동결된 상태로 기관에서 배출되기 때문[14]이라 생각된다.

한편, NOx는 국제해사기구의 MARPOL협약 및 해양수산부령의 '선박에서의 오염방지에 관한 규칙'에 준한 배출규제대상 물질로서, 본 실험에 이용된 기관은 MARPOL 부속서Ⅵ 제13조의 배출허용기준Ⅱ(TierⅡ)를 만족시켜야 한다.[15,16]

따라서 본 기관의 정격출력과 기관회전수는 3,500 kW 및 750 rpm으로 배출허용기준(test cycle

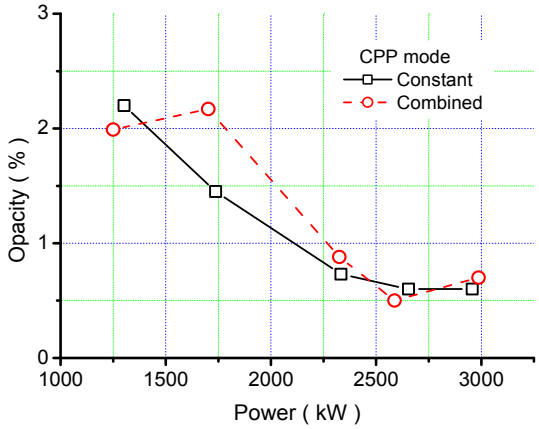

Fig. 10 Opacity of exhaust gas according to shaft horse power

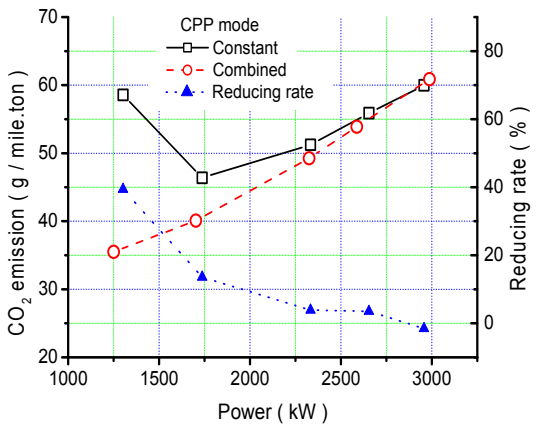

Fig. 11 CO_2 emission per mile · ton & reducing rate according to shaft horse power

: E2)이 9.6 g/kWh 이하이며, 기관제작시의 표본기관의 배출률은 9.1 g/kWh로 국제기관대기오염방지 증서를 발급받은 기관이다.[17] 그러나 본 실험에서의 결과는 배출허용기준을 약간 초과하였으며, 이는 시험방법 및 배출률의 환산방법, 사용연료유(RMA10)와 연료소비율(193.714 g/kWh : BHP기준)이 실제 운항 시의 연료유(MGO)와 연료소비율(약 235.0 g/kWh : SHP기준)과 다르기 때문이라 생각된다.

Fig. 10은 출력에 따른 양 모드에서의 매연농도를 나타낸다. 그림에서 보면, Constant mode에서의 매연농도는 0.6～2.2%, Combined mode에서의 매연농도는 0.5～2.17% 정도로 출력에 따라 거의 유사한 경향을 나타내었으나, 1,700 kW의 저부하에서 Combined mode의 매연농도가 Constant mode의 농도보다 약간 높게 나타났다. 그리고 출력이 증가함에 따라 매연농도가 낮아졌다. 디젤기관에서 발생하는 매연은 화염 중의 연료가 농후한 영역에서 산소부족으로 인해 연료가 열분해되어 주로 생성되며,[18] 연소과정 중에 스월(swirl) 등을 강화하여 앞서 생성된 매연을 재연소시키는 것이 필요하다.[12] 따라서 저부하에서는 연료분사량이 적어 연소온도가 낮고 또한 연소기간이 짧아 앞서 생성된 매연의 재연소를 촉진하지 못하기 때문이라 생각되며, 특히 Combined mode에서는 부하가 감소하면서 기관회전수는 감소하고 분사량은 증가하므로 인해 농후혼합기 영역이 증가하고 스월은 감소하여 매연농도가 높아진다고 생각된다.

Fig. 11은 마일·톤당 CO_2 배출량과 Constant mode 배출량에 대한 Combined mode 배출량의 감소율을 나타낸다. 여기서 마일·톤당 CO_2 배출량은 선속(knot), 출력(kW), 선박의 톤수(ton)와 CO_2 배출률로 구할 수 있으며, 실험에 이용된 선박의 총톤수(Gross tonnage)는 2,996 ton이다. 그리고 Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 CO_2의 배출률에 비해 CO의 배출률은 최고 0.16% 정도로 아주 작으므로 완전연소로 가정해 CO_2 배출률만을 계산에 고려하였다. 그림에서 보면, 3,000 kW 부근의 고부하에서는 Constant 및 Combined mode의 마일·톤당 CO_2 배출량이 비슷하였다. 그러나 출력이 감소하면서 양 모드의 마일·톤당 CO_2 배출량이 감소하였으며, 1,250 kW 부근의 저부하에서 Constant mode의 마일·톤당 CO_2 배출량은 다시 증가하는 경향을 보였다. 그리고 그 감소율은 -1.5～39.39% 정도이며 출력이 감소함에 따라 감소율이 높게 나타났다. 이는 추진효율에 기인한 것이며, 중부하 이하에서 Combined mode를 선택하여 기관을 운전하면 마일·톤당 CO_2 배출량을 줄일 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

중형·중속 디젤기관과 가변피치프로펠러를 장

착한 선박에서 CPP 운전방식을 Constant mode와 Combined mode로 하여 출력에 따른 기관성능 및 배기가스특성을 각각 조사하고 분석한 결과들은 다음과 같다.

1) 출력 3,000 kW 부근의 고부하에서의 연소최고압력, 도시평균유효압력, 연료소비율, 단위연료소모량에 대한 항해거리 및 공기비 등의 기관성능과 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물의 배출률 및 매연농도 등의 배기가스특성들은 Constant mode와 Combined mode의 결과가 거의 유사했다.

2) 출력 2,600 kW 정도의 중부하 이하에서는 Combined mode에서 구한 연료소비율 및 이산화탄소 배출률이 낮게 나타났고, 단위연료소모량에 대한 항해거리가 길었으나, 일산화탄소 및 질소산화물의 배출률은 Constant mode에서 구한 값이 작게 나타났다. 그리고 매연농도는 양 모드에서 비슷한 값을 나타내었으며 기관부하가 증가할수록 매연농도가 낮아졌다.

3) 중부하 이하에서 Combined mode를 선택하여 기관을 운전하면, Constant mode 기준으로 중부하에서는 3.88%, 저부하에서는 39.39%까지 마일·톤당 CO_2 배출량을 줄일 수 있었다.

이상의 결과들은 실제 선박에서 CPP mode를 선택할 때 기관성능을 향상시키면서 지구온난화의 원인인 CO_2 배출을 줄일 수 있는 운전기준을 설정하는 자료로 이용될 수 있다고 생각된다.

Author contributions

S. A. Kim; Data curation, Investigation, Resources, Writing-original. W. G. Wang; Project administration, Supervision, Validation, Writing-review & editing.

References

1. K. M. Park, M. H. Im, S. B. Choe and B. W. Ahn, 2022, "A Study on the Characteristics of Shaft Electric Motive Force of Controllable Pitch Propeller", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 1, pp. 135-140. (https://doi.org/10.7837/kosomes.2022.28.1.135)
2. K. I. Kim, H. J. Jeon, and J. R. Kim, 2001, "Controllable Pitch Propeller", Journal of The Korean Society of Marine Engineers, Vol. 25, No. 5, pp. 974-985.
3. KONGSBERG MARITIME, 2022, "Remote control system for main propellers", data sheet of kongsberg.com.
4. WÄRTSILÄ Installation Planning Instructions, 2018, "Controllable pitch propeller system", WÄRTSILÄ. Helsinki, Filand, pp. 42-44.
5. MEPC(IMO Marine Environment Protection Committee), 2011, "Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto", IMO, London, Resolution MEPC, Vol. 203, No. 62.
6. Korea Ministry of Government Legislation, 2019, "Conventions on the Regulation of the Marine Environment of International Maritime Organization", Legislation Newsletter, Vol.12, pp. 22-37.
7. J. O. Chae, S. K. Ahn and M, S. Hong, 1994, "Combustion engineering", Onechang press, Incheon, pp. 32-36.
8. Technical paper, 2008, "Basic principles of ship propulsion. MAN Marine Engines & Systems", Copenhagen, Denmark, p. 12.
9. B. C. Choi, 2016, "Combustion engineering", Munundang, Seoul, p. 125, 146.
10. Y. T. Oh, G. H. You, D. S. Choi and S. H. Choi, 2011, "Combustion engineering", Mijeon science, Seoul, p. 144.
11. H. K. Kim, C. H. Jeon and Y. J. Chang, 2001, "A Study on the Emission Characteristics in 4 Stroke Large Propulsion Diesel Engine", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers,

Vol. 9, No, 5, pp. 38-45.

12. C. R. Ferguson and A. T. Kirkpatrick, 2001, "Internal Combustion Engines Applied Thermo sciences", John Wiley & Sons, New York, p. 284.
13. L. C. R. Lilly, 1984, "Diesel Engine Reference Book", Butterworths, London, pp. 18/8-18/9.
14. K. OHSAWA, 1999, "Fundamentals of Engine Combustion -Pollutant Emission and Engine Combustion-", Engine technology, Vol. 1, No. 1, pp. 96-101.
15. MEPC(IMO Marine Environment Protection Committee), 2010, "Amendment to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines", resolution MEPC, Vol. 177, No. 58.
16. MOF(Ministry of oceans and fisheries), 2021, "Regulation on the prevention of pollution on ships", No.519. rule of MOF.
17. Korean Register of Shipping, 2018, "SUPPLEMENT TO ENGINE INTERNATIONAL AIR POLLUTION PREVENTION CERTIFICATE", Korean Register of Shipping, Ulsan, Korea.
18. S. G. Cho, 2020, "Effect of Operating Conditions in D.I Diesel on the Characteristics of Exhaust Gas Emission and Combustion", Journal of Power System Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 31-38. (https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.1.031)