

선박용 주기용 4행정 디젤엔진의 배기배출물 배출 특성에 관한 실험적 연구

· 김 현 규*, 김 종 기*, 전 충 환**, 장 영 준**

A Experimental Study on the Emission Characteristics in 4 Stroke Propulsion Diesel Engine for Ship

Hyun-Kyu Kim, Jong-Gi Kim, Chung-Hwan Jeon, Young-Jun Chang

* 주식회사 STX, 기술연구소

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

Abstract : Environmental protection on the ocean has been interested and nowadays the International Maritime Organization(IMO) has advanced on the prevention of air pollution from ships. This study presents the emission characteristics of 4 stroke propulsion diesel engine in E2 cycle (constant speed) and E3 cycle (propeller curved speed). Also the effects of important operating parameters in terms of intake air pressure and temperature, and maximum combustion pressure are described on the specific emissions. Emissions measurement and calculation are processed according to IMO Technical Code. The results show that NOx emission level in E3 cycle is higher than E2 cycle due to lower engine speed and lower maximum combustion pressure by retarding fuel injection timing. Intake air temperature has strong influence on NOx emission production. And CO, HC emissions are not affected by maximum combustion pressure and intake air pressure and temperature.

Key words: Exhaust Emission(배기배출물), Propulsion Diesel Engine(주기용 디젤엔진), Maximum Combustion Pressure(연소최고압력), Injection Timing(분사시기), Intake Air Pressure(흡입공기압력), Intake Air Temperature(흡입공기온도)

1. 서론

원고는 지구환경보호가 세계적으로 대두됨에 따라 국제기구와 각 나라는 환경규제를 강화 또는 신설하고 있다. 선박용 엔진에 관한 국제적인 규제, 승인기구인 국제해사기구 (IMO, international maritime organization)도 선박으로부터의 대기오염을 방지하기 위해 대기오염방지협약을 채택, 기존의 해양오염방지 협약인 73/78 MARPOL 의정서에 부속서-VI을 추가시켰으며, 디젤엔진과 관련해서 NOx 관련 기술적 코드(NOx technical code)를 만들었다(1), 2).

부속서-VI에는 2000년 1월 1일 이후 건조되는 선박에 탑재되는 출력 130kW이상의 디젤엔진에 대해서 엔진회전속도에 따라 질소산화물(NOx)의 배출율을 규제하고 있으며, NOx 코드는 사용승

인을 위한 기술보고서의 작성방법, 시험방법 및 승인방법에 대해 상세히 서술하고 있다. 기술보고서에는 엔진의 운전변수 및 부품 중에 NOx 배출에 영향을 줄 수 있는 모든 사양, 선상에서 엔진의 NOx배출이 규제를 만족하는지의 입증방법 및 NOx 측정결과를 포함하도록 되어 있다.

특히 IMO 규제의 초점이 되고 있는 선박용 디젤기관에서 배출되는 질소산화물은 연소실내에 고압으로 분사된 연료분무가 공기와의 혼합, 증발, 연소의 과정에서 생성된다. 따라서, NOx 배출수준은 엔진에 공급되는 공기의 온도와 압력에 의해 영향을 받으며 연료분사시기에 기인한 연소최고압력의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다(3). 또한 연소실에 공급되는 공기의 온도와 압력은 대기의 온도와 압력, 과급기의 성능, 공기냉각기의 열교환 성능 및 공기냉각기에 공급되는

선박용 주기용 4행정 디젤엔진의 배기배출물 배출 특성에 관한 실험적 연구

냉각수의 온도 등에 영향을 받는다4), 5). 대기의 온도와 압력은 운전장소와 계절에 영향을 받고 냉각수의 온도는 운전계절과 운전설비에 영향을 받기 때문에 기관의 운전조건에 의한 NOx 배출의 변동정도를 확인하여야만 한다6), 7). Fig. 1은 현재 IMO에 의해 제정된 선박용 엔진의 배출가스 규제 기준을 나타낸다.

본 연구에서는 선박 주기용으로 사용되는 4행정 디젤엔진에 대해, 가변피치프로펠라 운전을 위한 정속운전모드(E2 운전 사이클)와 고정피치프로펠라 운전을 위한 변속운전모드(E3 운전 사이클)시에 발생하는 운전모드차이에 의한 배기 배출특성을 계측하고, 계측된 배기의 농도(ppm, %)를 IMO 기술적 코드에 적합한 배출율(g/kWh)로 보정한 후, 흡입공기의 온도와 압력 및 연소최고압력의 변화가 배기 배출특성에 어떻게 영향을 끼치는지를 밝히고자 한다.

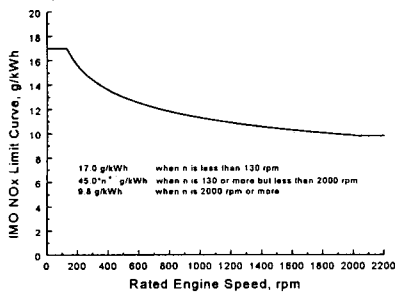


Fig. 1 The IMO emission regulation limits for marine diesel engine

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

원고 실험에 사용된 디젤엔진은 선박 주기용으로 사용되는 4행정, 과급기 부착, 흡기냉각식 디젤엔진이다. Table 1에는 시험에 사용된 디젤엔진의 주요사양을 나타내었다.

주요 실험장치로는 엔진 토오크의 제어 및 측정을 위한 동력계, 연료소모량 측정을 위한 질량식 유량계 및 배기가스 중에서 NOx, CO, CO₂, O₂, THC등의 농도 계측(ppm, Volume %)을 위한 배기분석기 등이다. Table 2는 사용된 배기분석기의 주요사양을 나타낸다. 온·습도센서와 대기압력계를 이용, NOx의 대기 온도와 습도에 대해 보정하였으며, 그 외 엔진 각 부위의 온도와 압력을 계측하였다. Fig. 2에는 배기가스 농도 측정을 위한 흐름도를 나타낸다.

Table 1 The specification of the test diesel engine

Item	Unit	Value
Power/cyl. at MCR	kW	245
Engine speed	rpm	775
No. of cylinder	-	8
Bore	mm	280
Stroke	mm	320
Compression ratio	-	13.9
Max. cylinder pressure	bar	145

Table 2 The specification of exhaust gas analyzer

Meas. item	Instrument type	Meas. range
NOx	CLA-150M (CLD)	0~2000 ppm
CO	AIA-120 (NDIR)	0~1000 ppm
CO ₂	AIA-120 (NDIR)	0~10 %
O ₂	MPA-120 (PMD)	0~25 %
THC	FIA-126D (HFID)	0~500 ppmC ₁

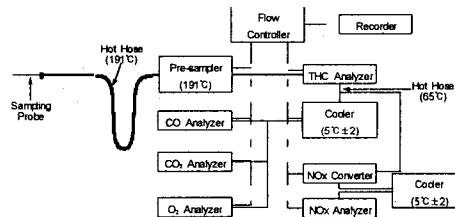


Fig. 2 Flow diagram of emission measurement

Table 3 Specification of Fuel Oil

Physical property	Units	Value
Specific gravity @15°C	-	0.8296
Viscosity @40°C	-	2.70
LHV/Hu	kcal/kg	10266
Hydrogen	%mass	13.12
Carbon	%mass	86.62
Nitrogen	%mass	0.022
Surfer	%mass	0.038
Oxygen	%mass	--

측정된 배기가스 농도를 질량기준의 배출율(g/kWh)로 표시하기 위해서는 사용된 연료의 정확한 성분분석이 필요하다. Table 3은 사용된 연료의 주요성분에 대한 분석결과이다.

2.2 실험방법 및 실험조건

IMO의 NOx 기술적 코드에는 선박 주기용 디젤엔진의 운전모드를 가변피치프로펠라 운전을 위한 정속운전모드(E2 운전 사이클)와 고정피치 프로펠라 운전을 위한 변속운전모드(E3 운전 사이클)로 구분되어 있어, 실험에서는 E2 운전 모드와 E3 운전 모드에 대해 각각 실험하였다. Table 4는 E2 운전 모드와 E3 운전 모드의 실험조건 및 가중계수를 나타낸다.

Table 4 IMO test mode and weighting factors

Test Cycle	E2 CYCLE			
Load, %	100	75	50	25
Speed, %	100	100	100	100
Weighting factor	0.2	0.5	0.15	0.15
Test cycle	E3 CYCLE			
Load, %	100	75	50	25
Speed, %	100	91	80	63
Weighting factor	0.2	0.5	0.15	0.15

본 연구에서 흡기 공기의 온도와 압력 및 연료 분사시기 조정에 의한 연소최고압력이 배기 배출에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 공기냉각기에 공급되는 냉각수의 온도를 허용최대온도인 36℃로 전 부하영역에서 일정하게 제어하고 흡입공기 온도를 증가시켜 흡입공기온도가 배기 배출에 미치는 특성을 측정하였고, 흡입공기압력은 흡기매니폴더에 공기배출밸브를 설치하여 엔진부하율 100%기준에서 0.2 bar를 감소시켜 흡입공기압력이 배기 배출에 미치는 영향을 살펴보았다.

연소최고압력은 연료분사시기를 2도 진각시켜, 연소최고압력을 100% 부하에서 6 bar(4%) 정도 증가시켜 연소최고압력이 배기 배출에 미치는 영향을 살펴보았다. Table 5은 실험조건을 나타낸다.

Table 5 Experimental conditions

Mode	Experimental condition	Test No.
E3 Cycle	Lab. condition	E3-1
	Charge air press. down	E3-2
	Charge air temp. up	E3-3
	Max. combustion press. up	E3-4
	Worst condition	E3-W
E2 Cycle	Lab. condition	E2-1
	Worst condition	E2-W

2.3 배기배출율(g/kWh) 계산

배기분석기를 이용하여 측정된 가스의 농도는 부피농도(ppm 또는 %)이며, THC를 제외하고는 수분이 포함되지 않은 dry 기준이다. 그러나 질량

농도로의 변환을 위해 필요한 보정 및 환산 방법은 다음과 같다.

① 각 실험조건에서 계측을 시작하기 위한 연소 안정을 THC값으로 확인한 후, 그 때부터 1분간 연속 측정하여 평균농도를 계산한다.

② dry기준의 농도를 wet기준으로 보정한다.

$$\text{conc(wet)} = K_w \times \text{conc(dry)} \quad (1)$$

$$K_w = 1 - \frac{1.608 \times H_a}{1000 + (1.608 \times H_a)}$$

여기서, H_a 는 습증기선도상의 절대습도(g/kg)이다.

③ NOx에 대해서는 식(2)에 따라 온도(T_a)와 습도(H_a) 보정을 한다.

$$\text{conc(IMO, wet)} = K_{HDIES} \times \text{conc(wet)} \quad (2)$$

$$K_{HDIES} = \text{fn}(T_a, H_a)$$

④ 질량유량을 계산하기 위해 배기유량(GEXHW)은 연료소비율과 배기가스 중의 O₂와 CO₂농도를 이용하여 NOx 기술적 코드에 있는 C/O₂ 평형법을 사용하여 구한다.

$$M_{GAS}(g) = u \cdot \text{conc(IMO, wet)} \cdot G_{EXHW} \quad (3)$$

여기서, u 는 변환계수이다.

⑤ 배출율(g/kWh)은 출력을 이용하여 구한다.

$$M_{GAS}(g/kWh) = \frac{\sum_{i=1}^n M_{GAS,i} \cdot W_{Fi}}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot W_{Fi}} \quad (4)$$

여기서, P_i 는 엔진출력(kW)이며, W_{Fi} 는 가중계수로 Table 4에 있는 값이다.

3. 실험 결과 및 고찰

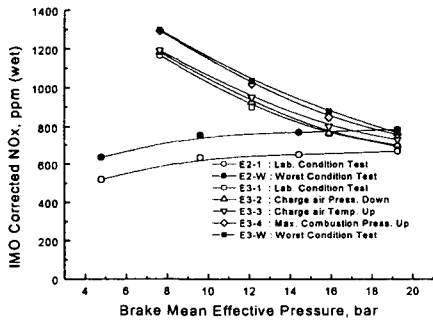
3.1 질소산화물과 산소의 배출 특성

Fig. 3, 4는 운전조건에 따라 질소산화물(NOx)과 산소(O₂)의 배출 농도(ppm, %)와 배출율(g/kWh)을 엔진 부하 변화에 따라 나타내었다.

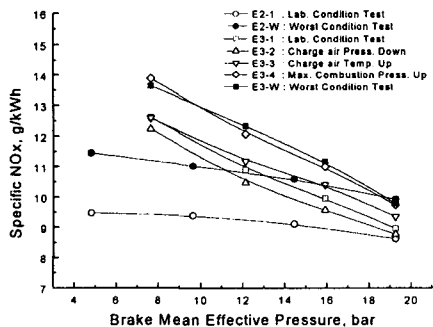
엔진 부하가 증가함에 따라 엔진회전속도가 일정한 E2 운전모드(○, ●)에서, NOx는 농도(ppm)로는 엔진 부하의 증가에 따라 증가 경향을 보이지만 배출율(g/kWh)로는 감소 경향을 보인다. O₂는 농도(%)와 배출율(g/kWh) 모두 엔진 부하 증가에 따라 감소 경향을 나타낸다. NOx가 농도(ppm)로는 증가하는 것은 엔진 부하의 증가에 따라 연소성능이 향상되기 때문이며, O₂가 엔진 부하 증가에 따라 감소하는 것에서 확인할 수 있다.

그러나, 배출율(g/kWh)이 감소하는 것은 연료량과 공기량에 의한 배기량의 증가율이 엔진 부하의 증가율과 비교할 때 상대적으로 작기 때문이다. 따라서 농도계측에서 나온 결과로 배출율의 증감을 단순히 판단해서는 안된다.

엔진 부하의 증가에 따라 엔진회전속도가 증가하는 E3 운전모드에서, NOx는 농도(ppm)와 배출율(g/kWh)가 엔진 부하 증가에 따라 감소하는 경향을 뚜렷하게 보인다. 모든 변화가 농도에서는 증가하지만 질량에서는 흡입압력의 저하는 NOx 질량 감소를 가져왔다. O₂는 엔진 부하율 75%까지 크게 증가하는 경향을 보인 후 일정해진다. NOx가 감소하는 것은 엔진 부하가 증가함에 따라 엔진회전속도가 증가하여 NOx생성에 큰 영향을 미치는 NOx 생성 반응시간이 짧아지기 때문이며⁸⁾, O₂가 증가하는 것은 엔진회전속도의 증가에 의해 공기량이 증가하기 때문이다. 또, 공기량의 증가는 고온연소시 연소가스의 온도저하에도 영향을 주므로 NOx량이 더욱 감소되는 것으로 생각한다.



(a) Volume concentration



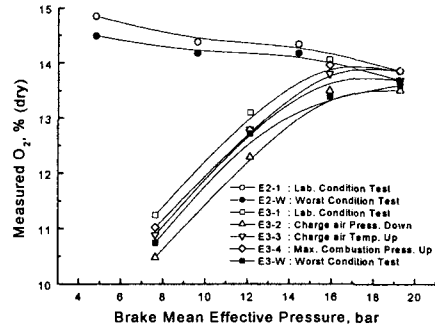
(b) Corrected specific emission

Fig. 3 NOx emission characteristics

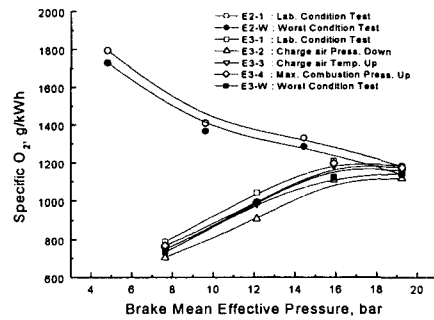
동일 엔진 부하에서, NOx 배출은 엔진회전속

도가 낮게 설정된 E3 운전 사이클이 E2 운전 사이클보다 높게 나타나고 있다. 이것은 E3 운전 사이클의 경우가 E2 운전 사이클의 경우보다도 엔진회전속도가 낮아, 착화시연이 증가하여 초기 연소가 증대하기 때문에 상사점 근방에서의 연소 온도가 높고, 상대적으로 고온연소기간이 길기 때문에 연소기간중의 열발생량의 감소로 Thermal NOx의 감소에 의해 NOx 농도가 감소된다고 생각한다⁹⁾.

흡입공기압력(Pair)을 엔진 부하 100% 기준에서 Lab. Condition보다 0.2 bar 감소시켰을 때 (Δ), NOx의 배출농도(ppm)는 약간 증가하지만, 배출율(g/kWh)은 약간 감소한다. O₂의 배출 농도(%)와 배출율(g/kWh)은 감소한다. NOx의



(a) Volume concentration



(b) Corrected specific emission

Fig. 4 O₂ emission characteristics

배출농도(ppm) 증가는, O₂의 배출 감소에서 알 수 있는 것처럼, Pair의 감소에 의한 공기량의 감소로 공기의 고온연소가스의 냉각효과가 감소한 것으로 생각되며¹⁰⁾, 배출율(g/kWh)의 증가는 공기량의 감소에 의해 배기량이 감소 하였기 때문이라고 생각된다.

흡입공기온도(Tair)를 엔진 전체 부하영역에서

공기냉각기에 공급되는 냉각수를 36°C로 제어하여 증가시켰을 때(▽), NOx의 배출농도(ppm)와 배출율(g/kWh)은 증가하고, O₂의 배출 농도(%)와 배출율(g/kWh)은 감소한다. NOx의 증가는 Tair의 증가에 따라 연소시 화염온도의 증가 때문으로 생각되며, O₂의 감소는 흡입공기 온도가 증가함에 따라 공기밀도의 감소에 의해 실제 공기량은 감소하였기 때문이라고 생각한다.

연료분사시기를 2도 진각시켜 연소최고압력(Pmax)을 엔진 부하 100%에서 6bar 증가시켰을 때(◇), NOx 배출 농도(ppm)와 배출율(g/kWh)은 전체 부하 영역에서 Lab. Condition(□)보다 증가하며 O₂의 배출 농도(%)와 배출율(g/kWh)은 감소한다. NOx의 증가는 연료분사시기의 진각에 의해 착화지연기간이 증가하여, 착화지연기간동안 분사된 연료가 일순간 연소함에 따라 Pmax가 증가하고 연소온도도 증가하기 때문이다. 또, 주연소기간이 상사점쪽으로 당겨져 실린더 내 가스온도가 더욱 높고, 또 연소가스의 고온 유지시간도 증가하기 때문에 NOx 생성은 더욱 증가하는 것으로 생각된다. O₂의 감소는 Pmax의 발생이 상사점으로 당겨짐에 따라 과급기 전의 배기압력이 낮아짐에 따라 과급율이 떨어져 흡입공기량이 감소하는 것이 원인으로 생각된다.

전체 부하 영역에서 흡입공기온도와 연소최고압력을 동시에 증가시켰을 때(■, ●), NOx는 전체 부하 영역에서 E3 운전 사이클의 경우는 약 120 ppm, 1.7 g/kWh, E2 운전 사이클의 경우는 140 ppm, 2 g/kWh 증가하여 NOx 배출에 흡입공기온도와 연소최고압력이 운전 사이클에 상관없이 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 5에는 여러 운전조건에서 각 엔진 부하에서 구한 NOx 배출량을 Table 3에 나타낸 가중계수를 이용, 식(4)에 의해 구한 사이클 배출율을 나타낸 것이다. E2 운전 사이클(정속운전)보다는

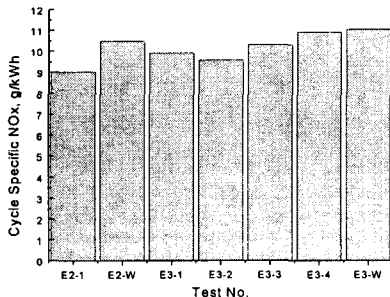


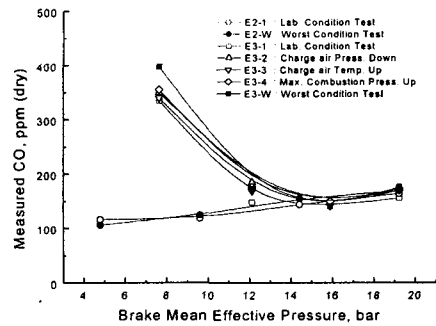
Fig. 5 NOx cycle value at each test condition

E3 운전 사이클(변속운전)에서의 NOx 사이클 배

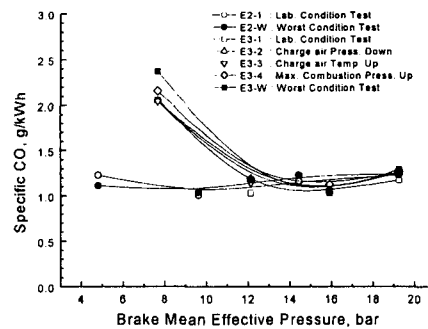
출율이 0.9 g/kWh 높게 나타났다. 또, 흡입공기의 압력과 온도의 증가에 의해 각각 0.3, 0.4g/kWh 높게 나타났다. 연소최고압력의 증가에 의해 약 1g/kWh 증가하였으며, 흡입공기의 온도와 압력, 연소최고압력을 모두 증가시킨 경우는 1.1 g/kWh 증가하였다. 여기서, 연소최고압력의 영향이 NOx 배출에 가장 크게 영향을 끼치는 것을 확인하였다.

3.1 CO, CO₂ 및 THC 배출 특성

Fig. 6, 7, 8에는 여러 운전조건에서 측정된 CO, CO₂ 및 THC의 배출농도와 배출율을 엔진 부하에 따라 나타내었다.



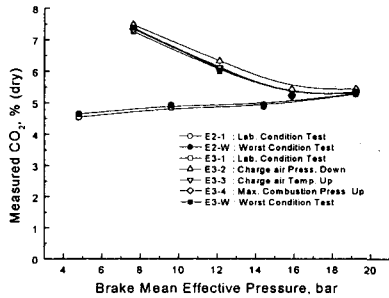
(a) Volume concentration



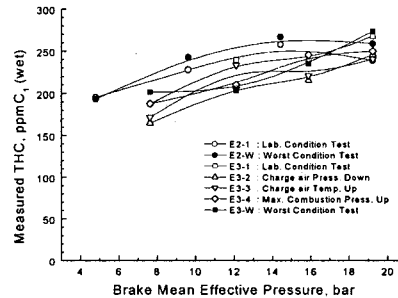
(b) Corrected specific emission

Fig. 6 CO emission characteristics

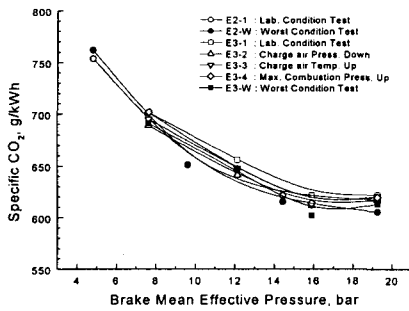
선박용 주기용 4행정 디젤엔진의 배기배출물 배출 특성에 관한 실험적 연구



(a) Volume concentration

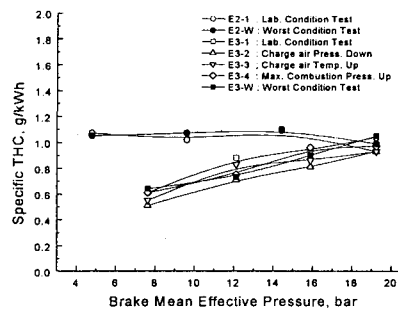


(a) Volume concentration



(b) Corrected specific emission

Fig. 7 CO₂ emission characteristics



(b) Corrected specific emission

Fig. 8 THC emission characteristics

Fig. 6에서 엔진 회전속도가 일정한 E2 운전모드(○, ●)는 엔진 부하 증가에 따라 CO의 배출농도(ppm)와 배출율(g/kWh)은 약간 증가하지만, 엔진 부하의 증가에 따라 엔진 회전속도가 증가하는 E3 운전모드에서는 엔진 부하가 75%까지는 감소하다가 다시 증가하는 특성을 보이고 있다. E2 운전 사이클에서 엔진 부하의 증가에 따라 증가 경향을 보이는 것은 Fig. 4에서 O₂의 엔진 부하에 따른 감소에서 알 수 있는 것처럼, 연소실 전체적으로는 희박연소가 이루어지지만 국소적으로 과농연소가 발생하는 영역의 빈도가 증가하기 때문이라고 생각된다. E3 운전 사이클에서 CO의 엔진 부하에 따른 배출특성은 Fig. 4의 O₂ 배출특성과 정반대의 경향을 보이는데, 이런 CO의 배출특성은 국소 과농연소 영역의 발생에 기인하는 것으로 생각한다.

운전 사이클이 다를 경우, 엔진 부하 75%이상에서는 운전모드에 상관없이 CO의 배출이 비슷한 값을 나타내지만 낮은 부하율에서는 E3 운전 사이클에서의 배출농도가 높게 나타나고 있는데, 앞에서 설명한 바와 같이, 국소적인 과농연소에 의한 것이 일차적으로 일차하고 있다.

Fig. 7에서 CO₂의 배출농도(%)는 E2 운전 사이클에서 엔진 부하 증가에 따라 증가하지만, E3 운전 사이클에서는 감소한다. 그러나, 배출율(g/kWh)은 운전 사이클에 상관없이 엔진 부하 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내며 그 값도 거의 차이가 없다. 여기서, CO₂의 엔진 부하에 따른 배출농도(%) 배출특성은 Fig. 6의 CO의 배출농도(ppm) 배출특성과 같은 경향을 가진다. 또, CO₂의 엔진 부하에 따른 배출율(g/kWh) 배출특성은 운전 사이클에 상관없이 연료소비율의 변화특성에 추종하고 있는 것을 알 수 있는데, CO₂의 저감이 연료소비율의 향상과 관계가 있음을 확인할 수 있다⁹⁾.

Fig. 8에서 THC는 E2 운전 사이클에서 배출농도(ppmC₁)는 엔진 부하가 75%까지 증가하였다가 감소하는 경향을 보이지만 배출율(g/kWh)은 일

정한 값을 유지하다가 감소하는 경향을 보인다. E3 운전 사이클에서는 배출농도(ppmC₁)와 배출율(g/kWh)이 엔진 부하 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다.

흡입공기의 온도와 압력 및 연소최고압력은 THC의 배출에 영향을 주고 있지만 그 특성이 분명하지 않다.

4. 결론

선박 주기용 4행정 디젤엔진을 E2 사이클(정속)와 E3 사이클(변속)로 운전하여 배기 배출특성을 조사하였다. 또, 흡입공기의 압력과 온도 및 연소최고압력을 변경하여 NO_x 발생에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) E2 사이클(정속)에서 NO_x의 배출농도(ppm)는 엔진 부하 증가에 따라 증가하지만 배출율(g/kWh)은 감소한다. 그러나, E3 사이클(변속)에서 NO_x의 배출농도(ppm)와 배출율(g/kWh)은 엔진 부하 증가에 따라 감소한다.

흡입공기의 압력과 온도가 높을수록, 연소최고압력이 높을수록, 즉 연료분사시기가 빠를수록 NO_x의 배출량은 증가하며, NO_x 배출에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 연료분사시기 조정에 의한 연소최고압력의 변화이다.

(2) O₂의 배출은 E2 사이클(정속)에서 엔진 부하 증가에 따라 감소하지만, E3 사이클(변속)에서는 증가한다.

또, 흡입공기의 압력은 높고, 온도는 낮을수록, 즉, 공기량이 많을수록 O₂의 배출은 증가한다.

(3) CO의 배출은 E2 사이클(정속)에서는 엔진 부하 증가에 따라 증가하지만, E3 사이클(변속)에서는 감소하는 경향을 보이며, O₂의 배출특성과 반대이다.

(4) CO₂의 배출 농도(%)는 E2 사이클(정속)에서는 엔진 부하 증가에 따라 증가하지만 E3 사이클(변속)에서는 감소 경향을 보인다. 그러나, 배출율(g/kWh)은 운전 사이클에 상관없이 엔진 부하 증가에 따라 감소한다.

(5) THC의 배출은 운전 사이클에 상관없이 엔진 부하 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다.

(6) 흡입공기의 온도와 압력, 연소최고압력의 변화는 CO, CO₂ 및 THC의 배출에 영향이 없다.

참고문헌

- [1] IMO, "Consideration and adoption of the protocol of 1977 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978", MP/CONF. 3/34, 1997.
- [2] IMO, "The Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines", MP/CONF. 3/35, 1997.
- [3] HEYWOOD, J. B. "Internal Combustion Engine Fundamental" McGraw-Hill, New York, 1988.
- [4] T. Tsukamoto, K. Ohe, H. Okada, "Effect of Intake Air Condition on NO_x Emission from Two-stroke Marine Diesel Engine", ISME, Yokohama, pp.76-79, 1995.
- [5] H. KUSHIYAMA, S. Yanase, K. Araki, "Study of Engine Performance Deviation Depend on Conditions", ISME Yokohama, pp.389-393, 1995.
- [6] O. Schnohr, P. Frederiksen, "NO_x Optimizing of Auxiliary Engines", 21st CIMAC Congress, 1995.
- [7] H. Kondoh, T. Kawano, K. Masuda, "Influences of Fluctuation Factors on NO_x Emission From Medium Speed Diesel Engine", 22nd CIMAC Congress, 1999.
- [8] 川上雅由, "ディーゼル機関のNO_x排出濃度の現状とその低減対策", 日本船用機関學會誌, 第26巻, 第9号, pp.80-88, 1991.
- [9] 西田修身 外, "練習船「深江丸」のNO_x, CO_x及びばいじん排出實態", 日本船用機関學會誌, 第32巻, 第12号, pp.915-922, 1997.
- [10] 우석근, 윤건식, 윤영환, "중속 디젤기관의 질소산화물 배출특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제24권, 제4호, pp.526-534, 2000.