⊙ 研究論文

박용 디젤기관의 NOx · COx 배출특성과 NOx 측정법에 관한 실험연구

안숙헌* · 최재성** · 西田修身*** · 藤田浩嗣***

An Experimental Study on the Characteristics of NOx · COx Emissions and the Measuring Technique of NOx in Marine Diesel Engines

S. H. Ahn · J. S. Choi · O. Nishida · H. Fujita

Key words : NOx(질소산화물), COx(탄소산화물), Chemiluminescence Detector(CLD, 화학발광법), Electrochemical Cell(ECC, 정전위전해법), Marine Diesel Engine(박용 디젤기관)

Abstract

In this paper, the emission characteristics of the ship' s diesel engine with CPP(Controllable Pitch Propeller) were investigated under the passage test on the sea.

As the results, it is confirmed that the NOx · CO_x concentrations increase as the engine speed increases and the torque decreases. But the amount of NOx, COx emissions[g/kWh] decrease as the torque increase regardless of the engine speed. Also it is compared with the NOx concentrations measured by the two methods-ECC(Electrochemical Cell) and CLD(Chemiluminescence Detector) for the correct measurement, and the ECC indicated higher value than the CLD.

1. 서 론

대기오염 문제가 심각하게 대두되고 있고, 지구온난화의 방지를 위한 국제회의가 계속되고 있지만, NOx, SOx에 의한 산성비로 인하여 유럽에서는 산림의 30%가 고목이 되고, 유럽의 전체 호수중 약 50%의 호수에는 어류가 완전히 사멸되었다는 보도가 있다. 최근에는 해양환경보존에 대한 의식의 확대로 국제해사기구(IMO)에서도 2000년 1월 1일부터 선박엔진으로부터의 NO x 배출량을 규제할 예정인 것으로 알려져있다.

여러 가지 대기오염 물질 중에서 배기배출물내의 분진, 황산화물 등은 후처리시설을 통하여 제거가 가능하나, 질소산화물(NOx)은 아직까지 후처

* 정회원, 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 98년 7월)
** 정회원, 한국해양대학교
*** 일본 고베상선대학

리기술이 충분하게 실용화단계에 이르지 못하여 연소과정에서 제어하는 것이 바람직한 단계이다. 따라서 그동안 육·해상용 디젤기관을 대상으로 이에 대한 많은 연구가 이루어지고, 성과 또한 적지 않았다. 특히 선박에 있어서 중·저속 디젤기관을 이용하여 각 운전조건하에서 배기가스 유해 물질들의 배출특성을 파악한 연구[1)2)3)4)]와, 육지에 직접적인 영향을 미치는 주요 항구에서의 오염물질 배출량에 대한 연구[5)] 등이 있다. 또한 NOx 계측에 있어서 화학발광법(CLD), 정전위 전해법(ECC), 비분산형 적외선법(NDIR), 비분산형자외선법(NDUV) 등 측정원리의 차이에 따른 계측값의 차이에 대해 비교·분석한 연구[6)]도 있었다. 선박 디젤기관의 경우, 세계 저질중유 소비의 대부분을 차지하고 있기 때문에, 이러한 대기오염 문제뿐만 아니라, 자원 절약이라는 대과제 아래 이러한 연구가 지속되어야 할 것으로 생각된다.

본 논문에서는 일본 고베 상선대학의 실습선 Fukae-Maru(深江丸)를 이용하여, 실제 해상에서 각 운전조건에 따른 배기의 배출특성을 조사한 내용을 보고하고자 한다. 즉, 추진 성능시험시 기관 회전수와 토오크 등의 운전조건의 변화에 따른 NOx, COx 등의 배출경향을 조사하고, NOx 측정원리에 따른 계측치 차이에 대하여 비교·분석하였다.

2. 측정장치 및 기관 운전방법

대상선박의 추진시스템은 CPP(Controllable Pitch Propeller)가 설치된 디젤기관으로 Table 1에 선박과 주기관의 제원을 나타낸다. Fig. 1에 배기분석을 위한 실험장치의 배치를 개략적으로 나타낸다. 주기관의 과급기 출구직후 배기온도 측정홀(Hole)에 동제관을 연결하고, 배기가스가 가열관을 통해서 각 계측기에 이르도록 하였다. CLD의 시료채취는 분석계 시스템의 ISO 8178에서 추천하는 가열 유로 방식(55℃)을 채택하여 습한 상태의 가스분석이 가능하도록했다. ECC의 시료는

Table 1 Specifications of Test Ship

Length(Overall)	49.95 m
Breadth	10.0 m
Gross Tonnage	449 ton
Speed	14.28 knot
Date of Delivery	Oct, 1987
Type	6DLM-26S, 4 cycle
Output	1100 kw
Engine Speed	720 rpm
Bore×Stroke	260 mm×340 mm
Comp. Ratio	12.6
Fuel	Bunker A Oil
Propeller	No.of Blade=4,
	CPP=2100 mm
Injection Timing	BTDC 16~17deg

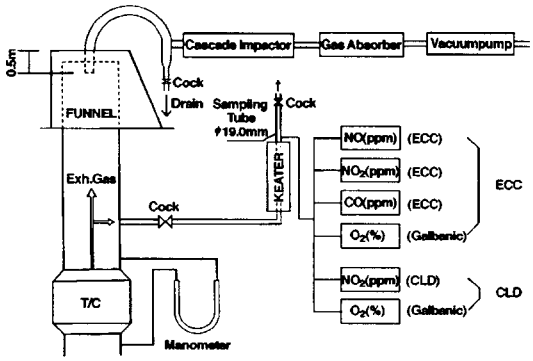

Fig. 1 Schematic diagram of exhaust gas sampling system

Table 2 Specifications of Detector

CLD		
	Measuring Method	Range of Measurment
NOx	Chemiluminescence	0~2500
	Detector	ppm
O_2	Galvanic Cell	0~25 vol%
Sample Gas Flow Rate : 200~300 cc/min		
ECC		
	Measuring Method	Range of Measurment
NO	Electrochemical Cell	0~2000 ppm
NO_2	Electrochemical Cell	0~100 ppm
CO_2	Electrochemical Cell	0~8000 ppm
CO	Galvanic Cell	0~21 vol%
Sample Gas Flow Rate : 500~1000 cc/min		

Table 3 Test Conditions of the Passage Test

		PPA(deg.)						
		12	13	14	15	17	19	20
Engine Speed (rpm)	503	①		②	③		④	
	530	⑤		⑥		⑦		⑧
	552	⑨		⑩		⑪		⑫
	600		⑬		⑭	⑮		⑯
	673		⑰	⑱		⑲	⑳	

전처리장치에서 배기 중의 수분 불순물 등을 제거하여 채취하였다. Table 2는 두 가스분석기의 사양을 나타낸다. Table 3은 운전조건을 나타낸다. 추진성능시험시 운전조건으로서 기관 회전수와 PPA(Propeller Pitch Angle)를 조정하여 부하를 설정하고, 이때 각 운전조건하에서 5~10분간 배기를 연속 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 추진 성능시험시 설정된 각 운전조건으로서, 시간 경과에 따른 기관 회전수, PPA, 토크 및 부하변동을 보여주고 있다.

Fig. 3과 4는 Fig. 2에서 보여준 추진 성능 시험시의 운전조건 변화에 따라 ECC와 CLD에 의하여 계측한 각 배기 성분의 변화를 시간 경과에 대하여 보여주고 있다. Fig. 2와 비교해 볼 때, NOx(NO, NO_2)와 CO_2 농도는 부하의 증가에 따라 증가하고, CO와 O_2 농도는 반대 경향을 나타내고 있음을

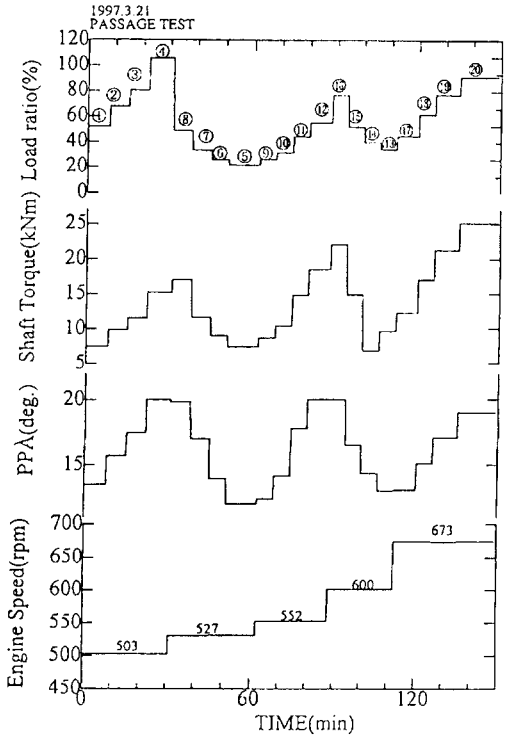

Fig. 2 Engine conditions during the passage test

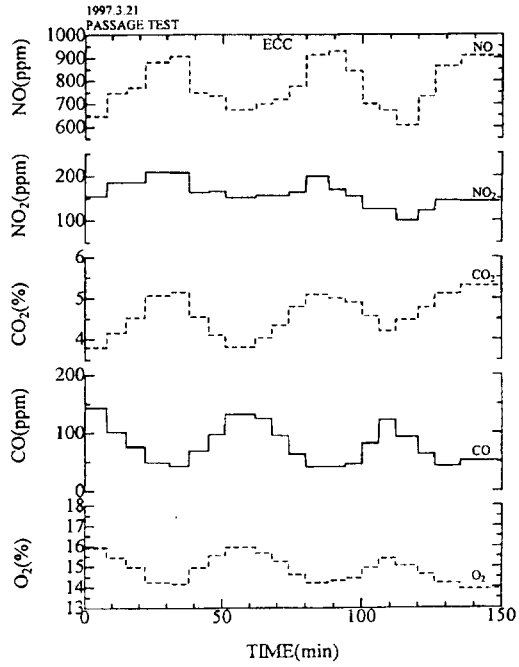

Fig. 3 Time history of each exhaust gas compositions by ECC methods

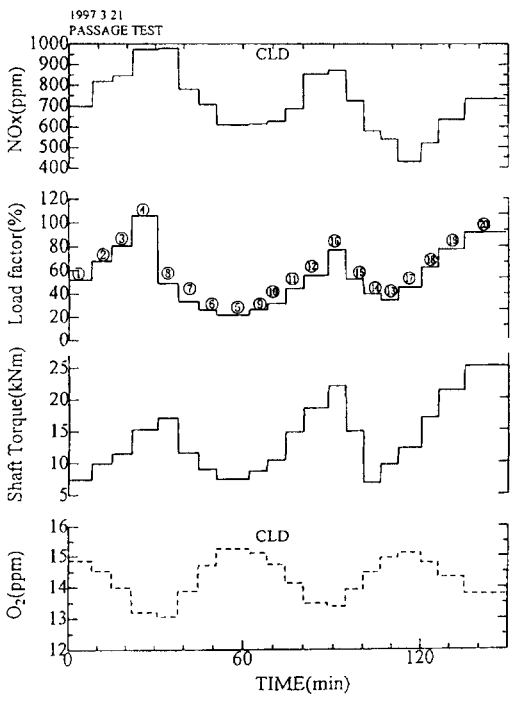

Fig. 4 Time history of each exhaust gas compositions by CLD methods

알 수 있다. 그리고 두 계측방법(ECC, CLD)에 따른 NOx 계측치가 부하의 증가에 따라 변화하는 정성적인 경향이 같음을 볼 수 있다.

현재 IMO에서 추진중인 배기 규제 단위는 [g/kWh]를 요구하고 있다. Fig. 5에서는 각 배기 성분의 단위출력당 배출량(g/kWh)을 토크의 증가에 대하여 나타내고 있다. 앞에서 NOx와 CO_2 농도는 부하의 증가에 따라 증가하고, CO 농도는 반대 경향을 나타냄을 보여 주었다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 단위출력당 배출량은 NO, NO_2, CO, CO_2가 모두 부하의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다.

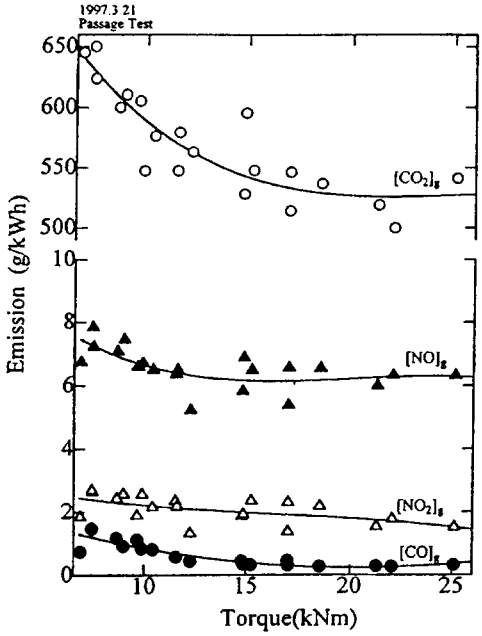

Fig. 5 Variation of NOx, COx with the shaft torque

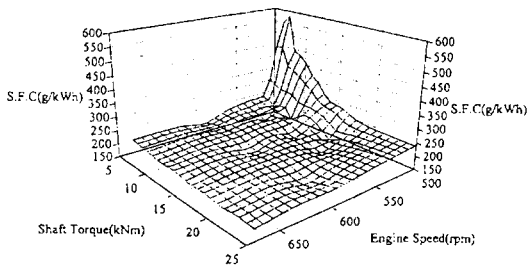

Fig. 6 Variations of specific fuel consumptions on the RPM and shaft torque

Fig. 6과 7은 기관회전수, 토크, 연료소비율(g/kWh) 및 NOx배출량(g/kWh)의 관계를 나타낸 것으로, 두 그림을 비교해 볼 때, 두 그림 모두 저회전, 저토크 영역에서 큰 변화를 나타내고 있어, 이 영역에서의 개선이 필요함을 알 수 있다.

실험에 이용된 선박은 고정피치 프로펠러선과는 달리 PPA를 이용하여 부하를 결정할 수 있는 CPP선박으로서, Fig. 8은 추진성능시험에서 운전파라미터로써 기관 회전수와 PPA를 이용하여 설정된 각각의 부하에서 5~10분간 같은 조건하에서 연속 측정하여 얻은 출력의 평균값을 구하고, 이때 계측한 NOx 농도의 평균치$[NOx]_{13}$를 수치로 기입한 것이다. $[NOx]_{13}$은 계측치를 산소농도

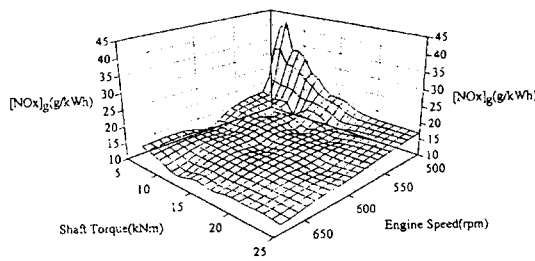

Fig. 7 Variations of NOx emission on the RPM and shaft torque

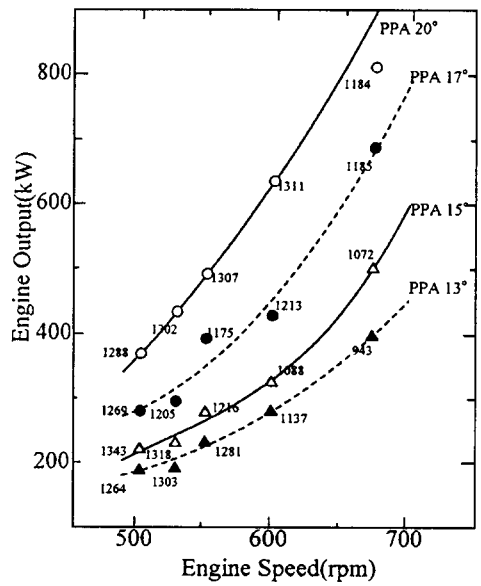

Fig. 8 Variations of $[NOx]_{13}$ during the passage test

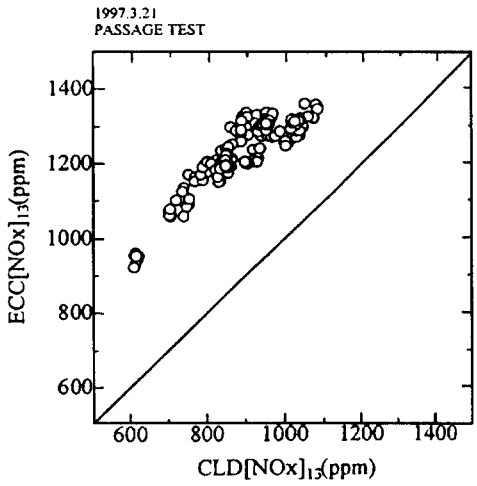

Fig. 9 Comparison of ECC and CLD methods for $[NOx]_{13}$

13%로 환산하여 나타낸 값이다. 그림에서 출력이 약 400 kW로 거의 같고 운전조건이 각각 「552 rpm · PPA17°(토크 14.8 kNm)」과 「673 rpm · PPA13°(토크 12.2 kNm)」인 두점을 비교해 보면, NOx 배출량이 1175 ppm과 943ppm으로 출력이 같을 때는 기관회전수가 낮고, PPA를 증가시켜 토크가 클수록 NOx 배출량이 높음을 나타내고 있다. 그리고 동일한 PPA에 있어서는 저회전 영역에 비해 고회전 영역이 대체적으로 NOx 배출량이 낮음을 알 수 있다. 이상으로부터 가변피치 프로펠러 선박에 있어서 동일출력으로 항해하는 경우 주기관 회전수를 높게 하고, PPA를 낮게 설정하는 것이 NOx 배출량이 적음을 알 수 있다.

Fig. 9와 10은 NOx 계측방법에 따른 차이를 비교하기 위한 것이다. 먼저 Fig. 9는 CLD와 ECC의 13% O_2환산NOx치 $[NOx]_{13}$을 가로축 및 세로축으로 하여 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 측정치가 가로축으로 기울어져 ECC가 높은 결과를 나타냈다. 이와 같은 양자의 차이는 계측원리에 따른 차이가 주된 원인으로, 해상에서의 계측으로 인한 염분의 영향, 간섭가스의 영향 등에 의한 것으로 생각된다. 그리고 현재까지 여러 문헌에 의하면 ECC와 CLD의 계측법에 따른 차이는 약 10~15%로 보고 되고 있으나 금번 실험에서는 약 28% 정도 ECC가 높게 나타나고 있다. 그리고

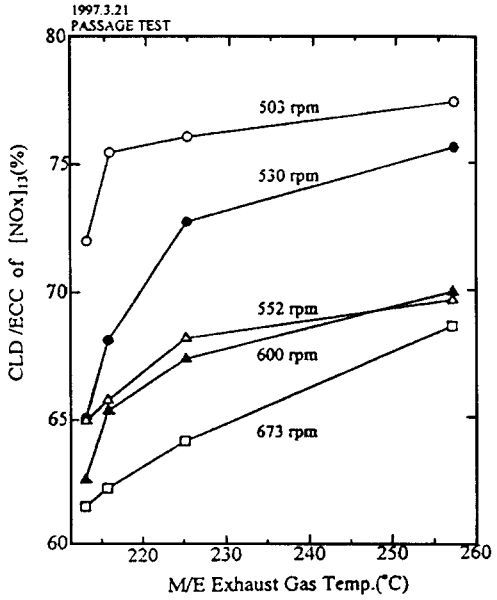

Fig. 10 Comparison of ECC andCLD methods for $[NOx]_{13}$ on the RPM and exhaust gas temperature

Fig. 10은 배기온도와 회전속도에 의한 영향을 나타낸 것으로 가로축은 배기온도, 세로축은 ECC의 NOx 계측치를 분모로 하고 CLD 계측치를 분자로 하여 백분율로 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주기관 회전수가 높고, 배기가스 온도가 낮을수록 차이가 컸다. 즉, 저회전 영역인 503 rpm에서는 CLD의 NOx 농도가 ECC의 농도 계측치의 80% 정도이고, 고회전 영역일수록 계측농도치는 차이가 컸다. 따라서, 현재 IMO에서는 기관회전수별로 NOx 농도 규제치를 정하고자 하고 있는데 계측원리에 따른 차이도 고려해야 된다고 판단된다.

IMO에서는 NOx 배출량에 대하여 다음과 같은 규제치를 제안하고 있다.

NOx 규제치(g/kWh)$\leq 45 \times n^{-0.2}$

여기서 n은 기관회전수이고, 이에 의한 대상선박기관의 경우 IMO 규제치를 구하면 다음과 같다.

IMO의 NOx 규제치(g/kWh) $\leq$ 12.07

또한, 본 실험에서 각 측정방법에 의한 측정결과를 이용하여 NOx배출량을 구하면 다음과 같다.

ECC에 의한 측정치(g/kWh)=8.58
CLD에 의한 측정치(g/kWh)=7.71

여기서, NOx 배출량은 E3모드로 계산했으며 E3모드의 NOx 배출량 계산식은 다음과 같다.

$$[NOx]_{E3}=0.2\times[NOx]_{100\%}+0.5\times[NOx]_{75\%}+0.15\times[NOx]_{50\%}+0.15\times[NOx]_{25\%}$$

따라서, 대상선박은 최대출력 1100kW, 정격회전수 720 rpm의 선박으로서 ECC, CLD의 계측치 모두 IMO의 규제치 범위를 벗어나지 않았음을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) 박용디젤기관의 NOx배출농도는 토크의 증가에 따라 증가하고, 기관회전수에 대해서는 고회전 영역보다 저회전 영역에서 배출량이 높고, CO_2 농도는 토크의 증가에 따라 증가하고, CO농도는 감소했다. 그러나 기관의 단위출력당 NO, NO_2, CO, CO_2는 모두 토크의 증가에 따라 감소했다.

(2) CPP선박에서 동일한 부하로 운전하는 경우 기관회전수가 높고, PPA가 낮을 수록 NOx 발생량이 낮았다.

(3) ECC, CLD의 NOx 계측결과는 정성적 으로는 같은 경향을 보였지만, 정량적으로는 ECC가 약 28% 높은 값을 나타냈다. 또한, 이 차이는 회전속도와 배기온도에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 규제에 있어서 계측원리에 따른 차이를 고려할 필요가 있다고 생각된다.

(4) 본선 주기관의 NOx 배출량은 ECC, CLD의 두 계측결과가 모두 IMO의 NOx 배출규제치를 벗어나지 않았다.

끝으로 한국에서는 아직까지 운항중인선박을 대상으로 하는 이러한 연구들이 부족한 것 같다. IMO 규제에 대응하기 위해서는 이와 같은 조사·연구가 좀더 체계적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

(1) O. NISHIDA, "Nitric Oxide Formation in Constant Volume Combustion", Technology Reports of the Osaka University, Vol.28, No.1419, pp.225 - 234, 1977

(2) 安達 頻, "各種運轉條件下における舶用 NOx, COx の排出について" 日本舶用機關學會誌,Vol.32 No.1, pp.30 - 36, 1997

(3) 前田 和辛, "舶用から排出されるNOxの 低減方法", 日本舶用機關學會誌", Vol.32, No.3, pp.223 - 231, 1997

(4) 作田朋巳, "練習船[深江丸]のNOx, COx 及びばいじん排出實態", 日本舶用機關學會誌, 第32卷 第12號, pp.915 - 922, 1997.

(5) 西川榮一, "大氣中のNOxおよびSO2濃度の海上計測", 日本舶用機關學會誌, 第31卷, 第10號, pp.748 - 755, 1996.

(6) 船舶大氣汚染抑制檢討委員會, "船舶からのNOx測定における問題點と課題", 日本舶用機關學會誌, 第32卷, 第6號, pp. 416 - 432, 1997

저 자 소 개

안숙헌(安淑憲)
1968년 1월생. 1992년 2월 한국해양대학교 기관공학과졸업, 1998년 8월 동대학 대학원 기관공학과 석사과정졸업, 1999년 현재 (주)동진산업기술

최재성(崔在星)
1952년 5월생. 1974년 한국해양대학교 기관공학과졸업. 1976. 한국해양대학교 대학원 기관공학과 석사과정졸업, 1986. 일본 경도대학 대학원 기계공학과 박사과정졸업, 1974.~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수