한국마린엔지니어링학회지 제36권 제6호, pp. 788~793, 2012. 9(ISSN 2234-8352 Online) / (ISSN 2234-7925 Print)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.6.788

정속항해 시 함정 주 추진 디젤엔진의 배기가스 배출량 예측

이형민† · 박랑은[1]

(원고접수일 : 2012년 6월 15일, 원고수정일 : 2012년 8월 6일, 심사완료일 : 2012년 8월 21일)

Emission Prediction from Naval Ship Main Propulsive Diesel Engine under Steady Navigation

Hyungmin Lee† · Rangeun Park[1]

요 약 : 본 연구는 해군함정에 탑재되어 있는 주 추진 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질, 황산화물, 이산화탄소 및 질소산화물의 배출량 예측에 초점을 두었다. 국제사회 및 각국의 정부는 인간의 건강 및 환경을 보호하기 위해 선박의 배기가스 규제를 엄격히 적용하고 있으며 선박 제작사들은 이러한 법규에 대응하기 위해 다양한 기술을 선박에 적용시키고 있다. 엄격히 적용되는 배기가스 법규는 선박의 크기에 따라 차이를 보이고 있지만 함정은 규제대상에서 제외된다. 다양한 연구결과에 의해 선박의 배기가스 배출량 계수(emission factor)는 지속적으로 최신화되고 있으나 함정의 배출량 계수는 그 특성의 차이 때문에 설정이 어려운 실정이다. 본 논문은 함정 엔진의 연료소모량과 함정에서 사용하고 있는 연료의 황성분 함량을 분석하여 항해 시 선박에 적용되고 있는 오염물질 기여도 조사(emission inventory) 방법론을 해군함정에 적용시켜 정속항해 조건에서 배기가스 총 배출량을 예측하는 것이다.
주제어 : 함정시험평가서, 배기배출물, 정속항해, 디젤엔진, 오염물질 기여도 조사

Abstract: This study was focused on the estimations of air pollutants, such as PM(Particulate matters), SOx(Sulfur Oxides), CO_2(Carbon diOxides) and NOx(Nitrogen Oxides), from a diesel propulsion engine installed on a naval vessel. Legislative and regulatory actions for exhaust emissions from ships are being strengthened in international communities and national governments to protect human health and the environment. In this context, various technologies have been developed from all of the nations of the world to meet strict standards. These regulations are based on commercial ship applications and according to size, but are not suitable for military naval vessels, which have much different engine operating conditions and hull architectures. Additionally, there is no international emission control system for military ships. Emission factors have been updated for commercial ship types from work at various research institutes; however, it is difficult to develop emission factors for military vessels because of their characteristics. In this paper, exhaust emissions from diesel engines installed on naval vessels under steady navigation condition were estimated with emission inventory methodology applied to ocean going vessels using fuel-based methods and fuel sulfur content analysis.
Key words: Test memo, Exhaust emissions, Steady navigation, Diesel Engine, Emission Inventory

1. 서 론

해상수송수단에서 대기 중으로 배출되는 오염물질이 수년간 국제사회의 관심의 대상이었으며 현재도 이러한 문제점 즉, 유해물질에 의한 대기환경 오염, 기후변화 등을 해결하기 위해 국제해사기구를 중심으로 규제설정에 박차를 가하고 있다.

† 교신저자(해군사관학교 함정추진체계학과, E-mail: hmsj1226@korea.ac.kr, Tel: 055-549-1443)
1 해군사관학교 함정추진체계학과, E-mail: hipparchos@naver.com, Tel: 055-549-1288

Table 1: Profile of world fleet

Ship Type	Number of ships	% of fleet	Number of Main Engines	% of Main Engines	Installed Power(MW)
Cargo Fleet					
Container vessels	2,662	2	2,755	2	43,764
General Cargo	23,739	22	31,331	21	72,314
Tankers	9,098	8	10,258	7	49,386
Bulk/combined carriers	8,553	8	8,781	6	51,251
Non-Cargo Fleet					
Passenger	8,370	8	15,646	10	19,523
Fishing vessels	23,371	22	24,009	16	18,474
Tugboats	9,348	9	16,000	11	16,116
Other(research, supply)	3,719	3	7,500	5	10,265
Registered fleet total	88,660	82	116,280	77	280,093
Military vessels	**19,646**	**18**	**34,633**	**23**	**172,478**
World fleet total	108,306	100	150,913	100	452,571

현재 전 세계적으로 배기가스 저감이 이슈화 되고 있으며 각국은 감축목표를 달성하기 위하여 국가적 역량을 아끼지 않고 있다. 온실효과의 주범인 배기가스는 과거에는 주로 자동차에서 큰 비중을 차지하였지만 국가 간 무역량이 주로 해상 운송수단으로 이루어지기 때문에 선박에서 배출하는 배기가스 배출량도 무시할 수 없는 수준에 도달했으며 전 세계 함정이 차지하는 비율이 점차 증가함에 따라 함정에서 배출하는 배기가스의 수준도 무시할 수 없는 수준에 이르렀다고 판단된다. **Table 1**은 전 세계 선박 중 100톤 이상의 선박을 선종별로 구분한 결과이며 이중 함정이 차지하는 비율이 상당히 높음을 알 수 있다[1].

이러한 국제사회의 노력의 일환으로 선박에서 배출되는 유해물질의 양을 줄이고자 현재 선진국을 중심으로 선박에서 배출되는 배기가스양을 예측하는 방법론을 개발하였으며, 이러한 방법론을 바탕으로 항해중인 선박에서 배출되는 배기가스의 수준을 예측하고 있다.

해군함정은 배기가스 규제 적용 대상에서 제외되지만 미국, 영국 등 선진국에서는 배기가스 저감 및 함정의 생존성 향상을 위해 전기추진 등 다양한 배기가스 저감기술을 함정에 적용시켜 운용하고 있다. 본 연구의 목적은 정속항해 모드에서 해군함정에 탑재된 디젤엔진의 배기가스 배출량을 선박에 적용되고 있는 오염물질 기여도 조사 방법론적 해석을 통하여 그 수준을 예측하는 것이다.

2. 오염물질 기여도 조사 방법론

대기오염은 수많은 오염원의 배출로 인한 것이다. 오염물질 기여도 조사(emission inventory)는 전체적인 오염상황에 대한 구체적인 배출원(source)이 차지하는 비중을 파악하기 위하여 수행하는 것으로 해석될 수 있다. 여기서 구체적인 배출원이란 선박, 자동차, 기차 등 화석연료를 사용하는 모든 장치를 일컫는 것이나 본 연구에서는 해상용 디젤엔진으로 한정한다.

디젤엔진에서 배출되는 유해물질로는 입자상 물질(PM), 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 탄화수소(HC) 등 다양한 유해물질들이 있을 수 있으나 디젤엔진은 전체적인 오염물질 중 질소산화물과 입자상 물질이 차지하는 비중이 가장 크다.

Table 2: Emission factors for ocean going vessel

Engine type	Fuel type	Sulfur(%)	Emission factors(g/kWh)				
			NOx	PM_{10}	SOx	CO_2	BSFC
SSD (~130rpm)	RO	2.70	18.10	1.42	10.29	620.62	195
	MDO	1.00	17.00	0.45	3.62	588.79	185
	MGO	0.50	17.00	0.31	1.81	588.79	185
	MGO	0.10	17.00	0.19	0.36	588.79	185
MSD (130~1400rpm)	RO	2.70	14.00	1.43	11.24	677.91	213
	MDO	1.00	13.20	0.47	3.97	646.08	203
	MGO	0.50	13.20	0.31	1.98	646.08	203
	MGO	0.10	13.20	0.19	0.40	646.08	203

Table 3: Emission factors calculating methods for ocean going vessel under steady condition

Emission factors(g/kWh)	Equations
PM_{10}	0.23 + BSFC × 7 × 0.02247(fuel sulfur fraction - 0.0024)
$SOx(SO_2)$	BSFC × 2 × 0.97753 × fuel sulfur fraction
CO_2	BSFC × 0.868 × 3.667
NOx	4.25g/kWh × $P^{1.14}$/P(where, P is engine power in kW)

오염물질 기여도 적용 방법에서 가장 중요한 것은 배출량 계수를 설정하는 것이다. 일반적으로 배출량 계수는 g/kWh로 표시되며 단위 시간 및 출력 당 배출되는 양으로 해석한다. 배출량 계수를 설정하기 위한 연구는 다양한 연구기관에 의해 진행되었으며 현재도 배출량 정보를 지속적으로 수집하고 있다.

그러나 항해중인 선박에 대한 배출량 계수를 설정하기 위한 정보 수집이 제한적이어서 오염물질 기여도 조사에 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하고자 2002년 Entec은 다양한 종류의 선박 추진기관으로부터 배출량 정보를 확보해 배출량 계수를 설정하였으며 선박의 배출량 예측시 활용되고 있다[2].

Entec에서 제시한 배출량 계수는 기본적으로 디젤엔진과 터빈으로 구분하여 설정되었으며 디젤엔진은 저속·중속·고속디젤로 구분되고 터빈은 가스터빈 및 증기터빈으로 나누어진다.

또한 엔진 분류에 추가적으로 사용 연료를 RO(residual fuel), MDO(marine diesel oil), MGO(marine gas oil)로 구분하여 배출량 계수를 엔진 분류 및 사용연료에 따라 구분하여 설정되었다. **Table 2**는 Entec의 배출량 계수 연구결과 중 디젤엔진 부분만 나타낸 것이다[2].

본 연구에서 배기가스 배출량을 예측하고자하는 대상엔진은 MSD로 분류되고 MGO를 사용하는 함정용 디젤엔진이다. 대상엔진 배기가스 배출량 예측은 PM_{10}, $SOx(SO_2)$, CO_2 및 NOx에 대해서 대상엔진 탑재 함정의 시험 평가서(test memo) 및 사용 연료의 분석을 통해 정량적으로 도출하였으며 대상엔진의 배출량 계수를 결정하기 위해 **Table 3**의 식을 적용하였다[3-6].

3. 분석 대상 엔진 및 운전 모드

본 연구에서 선정한 배출량 예측 대상 디젤엔진은 해군 전투함에 탑재되는 엔진이며 일반적인 제원과 운전모드를 **Table 4** 및 **Table 5**에 나타내었다.

Table 4: Specifications of the selected diesel engine

Compression ratio	12:1	Valve Timing	IVO	BTDC37°CA
Combustion type	Direct injection		IVC	ABDC61°CA
Supercharging	Exhaust gas		EVO	BBDC67°CA
Cooling	Water		EVC	ATDC39°CA
Bore×Stroke	230mm×230mm	Compression ratio		12:1
Injection pressure	300bar～350bar	Fuel Consumption rate		225g/kWh+5%
		Output		3,525kW

Table 5: Duty cycle of the selected diesel engine

Mode	Ship Speed (% of Rated)	Fuel Injection Rate (% of Rated)	Engine speed (% of Rated)	Shaft speed (% of Rated)	Engine Power (% of Rated)
1	0.226	0.208	0.404	0.404	0.208
2	0.358	0.256	0.404	0.404	0.256
3	0.477	0.317	0.462	0.460	0.317
4	0.641	0.405	0.629	0.627	0.405
5	0.847	0.653	0.840	0.837	0.653
6	1	1	1	1	1

각 운전모드에 해당되는 값들은 운전모드 6을 기준으로 상대적인 값들로 나타내었으며 대상 엔진 탑재 함정 특성상 모드 6이상부터는 일반적으로 가스터빈 엔진을 사용한다. **Table 6**에 나타난 값들은 함정 인수평가 시 보유하고 있는 함정시험평가서를 기준으로 표기한 것이며 동급 함정 인수평가 자료 분석 시 그 오차 범위가 크지 않기 때문에 동급 함정 중 최근에 인수된 함정의 시험평가서에 기초하여 나타내었다.

4. 대상엔진 탑재 함정의 항해경로 설정

함정이 임무수행을 위하여 출항후 비교적 복잡한 절차를 거쳐 정속항해(steady navigation) 조건으로 진입하게 된다. 함정이 목적지로 향하는 침로를 설정하기 위해서는 빈번한 엔진 가·감속이 이루어지게 되나 침로를 유지하기 위한 시간은 전체 항해시간을 고려했을 때 차지하는 비율은 낮다.

Figure 1은 함정이 출항하여 침로를 유지하고 다른 목적지로 이동할 경우를 도식화 한 것이며 **Table 6**은 **Figure 1**의 항해경로로 이동할 시 사용되는 디젤엔진의 운전모드를 나타낸 것이다. **Figure 1**의 항해경로는 해군기지 1에서 해군기지 2 또는 해군기지 2에서 해군기지 1로 이동할 때 대부분 해군함정에서 채택하는 최단 항해 경로이다.

5. 배기가스 배출량 예측 결과

함정의 정속항해 조건에서 배기가스 배출량을 도출하기 위하여 **Table 3**의 방법으로 대상엔진의 배출량 계수를 설정하였다. **Table 7**은 대상엔진의 배출량 계수를 설정하기 위해 현재 해군에서 사용하고 있는 함정용 연료를 분석한 결과이다.

Table 6: Diesel engine duty cycle for navigation course between port 1 and port 2

Position	Mode	Ship Speed(% of Rated)	Time Factor
Point A → Point B	4	0.641	0.154
Point B → Point E	5	0.847	0.798
Point E → Point F	4	0.641	0.048

Table 7: Properties of diesel fuel used in Korea naval vessels

Items	Standards	Results	Test methods
Flash point(^{o}C)	40～	63.0	KSM ISO 2719:2003
Viscosity(40^{o}C, mm^{2}/s)	1.5～6.0	3.301	KSM ISO 3104:2008
Sulfur(%)	～1.0	0.028	KSM ISO 8754:2003
Cetane number	40～	53.0	KSM ISO 4264:2003
Density@15^{o}C(kg/m^{3})	815-855	843.6	KSM ISO 12185:2003

Table 7의 시험성적결과에서 주목할 점은 연료의 황성분 함량이 0.028%로서 **Table 2**에 나타나 있는 MGO 황성분 함량 0.1%보다 상당히 낮은 수치를 보이고 있다. 이러한 연료성상 분석 결과 및 대상엔진의 연료소비율(+5%는 고려하지 않음)을 바탕으로 배기가스 각 성분에 대한 배출량 계수를 설정하여 **Table 8**에 나타내었다.

오염물질 기여도 조사 방법론을 적용하여 배기가스 배출량 예측 대상엔진의 배출량 계수를 설정하였으며 이를 이용하여 함정의 정속항해 조건에서 배기가스 총 배출량을 아래와 같은 식을 적용하여 도출하였다[7, 8]. 이때 배기가스 총 배출량 계산은 주 추진 디젤엔진으로 한정하였으며 기타 발전기 등과 같은 보조 장치는 계산 범위에서 제외시켰다.

$$E=P\times LF\times A\times EF \quad (1)$$

여기서, E = Emissions(g)

P=Maximum Continuous Rating Power(kW)

LF=Load Factor(percent of vessels's total power)

A=Activity(h)

EF=Emission factor(g/kWh)

식 (1)을 이용하여 **Figure 1**과 같이 설정한 정속항해 조건에서 배출되는 배기가스 총 배출량 예측치를 **Table 9**에 나타내었다.

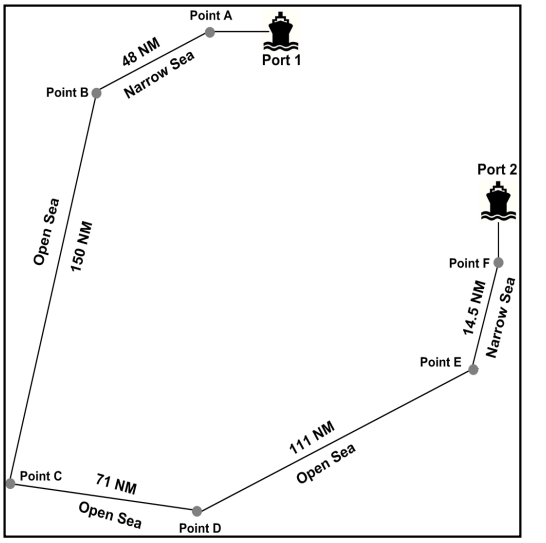

Figure 1: Schematic diagram of navigation course between port 1 and port 2

Table 8: Emission factors from the selected diesel engine

Emission factors(g/kWh)	Results
PM_{10}	0.151
SOx(SO_2)	0.129
CO_2	751.97
NOx	13.335

Table 9: Emission estimation under steady navigation

Position	Emissions(kg)			
	PM_{10}	$SOx(SO_2)$	CO_2	NOx
A→B	1.6	1.4	8,201.7	145.4
B→E	13.8	11.8	68,993.8	1,223.4
E→F	0.5	0.4	2,469.1	43.7
Total	15.9	13.6	79,664.6	1,412.5

6. 결 론

선박에서 배출되는 배기가스 예측 방법인 오염물질 기여도 조사 방법론을 해군함정에 적용시켜 정속항해 조건에서 배출되는 배기가스 배출량을 함정 탑재엔진의 연료소모량과 함정에서 사용하는 연료의 황함량을 분석하여 정량적으로 예측하였다.

입자상 물질과 황산화물의 배출량 계수는 연료의 황성분 함량에 따라서 결정되는 것을 알 수 있으며 이산화탄소의 배출량 계수는 연료소모량과 밀접한 관계가 있다는 것을 확인 할 수 있다. 연소온도의 절대적 지배를 받는 질소산화물의 경우 UNECE/EMEP에 의해 발간된 오염물질 기여도 조사 안내서에서 도출된 계산법을 적용시켜 배출량 계수를 도출하였다.

정속항해 조건에서 해군함정에 탑재되어 있는 엔진은 정속운전상태로 이루어지기 때문에 일반 선박의 항해모드조건에서 사용되고 있는 오염물질 기여도 조사 방법을 적용시켜도 큰 무리가 없다고 판단된다.

그러나 해군함정이 배기가스 규제대상에서 제외되는 특수 선박임을 고려할 때 비교적 정확한 배기가스 배출량 예측을 위해서는 선박용 오염물질 기여도 조사 방법을 함정용으로 변경시키는 연구·개발이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구(논문)는 해군해양연구소의 2012년도 국고 연구비 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

[1] J. J. Corbett and H. W. Koehler, "Updated emissions from ocean shipping", Journal of Geophysical Research, vol. 108, No. D20, 2003.

[2] Quantification of Emissions from Ships Associated with Ship Movements between Ports in the European Community, Technical report, Entec UK Limited, 2002.

[3] Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port Related Emission Inventories, Final report, U.S. Environmental Protection Agency, 2009.

[4] T. Stipa, J. Jalkanen, J. Klli and A. Brink, Emissions of NOx from Baltic Shipping and First Estimates of Their Effects on Air Quality and Eutrophication of Baltic Sea, EU, Technical report, 2007.

[5] J. P. Oliver, "UK surface warships engines exhaust emissions study 1988-2006," Journal of Naval Engineering, vol. 44, no. 2, pp. 317-344, 2008.

[6] EMA/CORINAIR, Emission Inventory Guidebook, 2007.

[7] Ship Emissions Inventory Mediterranean Sea, Final report, CONCAWE, April 2007.

[8] Port of Los Angles Inventory of Air Emissions-2010, Technical report, Starcrest consulting group, July 2011.