

## 함정용 디젤엔진의 노즐 직경 변화가 매연 발생에 미치는 영향

손민수<sup>1</sup> · 최재성<sup>2</sup> · 조권희<sup>†</sup>

(Received November 3, 2015 ; Revised December 17, 2015 ; Accepted March 21, 2016)

### Effect of nozzle diameter on the reduction of smoke emission from naval ship diesel engines

Min-Soo Son<sup>1</sup> · Jae-Sung Choi<sup>2</sup> · Kwon-Hae Cho<sup>†</sup>

**요약:** 국제기구 및 각국의 정부는 인간의 건강 및 환경을 보호하기 위해 선박의 배기가스 규제를 엄격히 적용하고 있다. 함정은 이러한 배기가스 규제 적용 대상에서 제외되고 있지만 최근 미국, 영국 등 일부 선진국에서는 함정으로 야기되는 대기환경오염을 방지하기 위해 전기추진체계 시스템을 도입하는 등 다양한 개선 방법을 적용하고 있다. 본 연구에서는 함정용 디젤엔진의 매연 발생 문제 해결을 위해 노즐 직경을 축소 변화시키고 분사압력을 증가시켜 배기가스 발생량 측정과 오염물질조사 방법론을 이용해 저부하시 매연 문제가 개선된 것을 확인하였다. 동시에 그 영향을 유량방정식과 함정시험평가서를 통해 노즐 직경 축소 결과 연료 소비량이 감소되는 것을 확인하였다.

**주제어 :** 함정, 대기환경오염, 매연, 디젤엔진, 노즐직경

**Abstract:** Legislative and regulatory actions regarding the exhaust gas from ships are being strengthened by both international organizations and national governments, to protect human health and the environment. Exhaust gas traps are excluded from exhaust gas regulation applications, but, recently, the United States, Britain, and other developed countries have examined a variety of ways to improve the system, including the introduction of electric propulsion systems to prevent air pollution generated by naval ships. This study investigates a large number of smoke problems of naval diesel engines to verify the effect of improving the nozzle characteristics. An exhaust gas emission measurement method to determine the quality of pollutant exhaust gas generated during low-load operation is proposed through the research methodology of the smoke problem. It was confirmed that the emissions value is improved by decreasing the nozzle hole diameter and increasing the injection pressure. At the same time, the flow rate decrease equation and setting up a test memo based on the nozzle diameter confirmed that the fuel consumption, to which the nozzle diameter in the flow path is related, is reduced.

**Keywords:** Naval ships, Air pollution, Smoke, Diesel engine, Nozzle diameter

### 1. 서론

국제해사기구(IMO)는 유해물질로 인한 대기환경오염 및 기후변화 등의 문제점 해결을 위해 해상운송수단에 의해 배출되는 오염물질에 대한 법적 규제방안을 도입하여 실시하고 있고, 지속적으로 강화하고 있다. 또한 선진국을 중심으로 선박에서 배출되는 유해물질의 양을 줄이고자 선박에서 배출되는 배기가스의 양을 예측하는 방법들(CFD를 적용하여 연료 분사압력, 분사시기, 분무각, 노즐팁 돌출, 노즐 직경, 피스톤 바울 모양, 분무관통 등의 변화에 따른 NOx 발생량을 예측)을 개발하여 운항중인 선박의 배출가스 수준을 예측하

고 있다[1].

함정은 이러한 배기가스 규제 적용 대상에서 제외되고 있지만 최근 미국, 영국 등 일부 선진국에서는 함정으로 야기되는 대기환경오염을 방지하기 위해 전기추진체계 시스템을 도입하는 등 다양한 개선방법을 적용하고 있다.

본 연구의 목적은 함정 운항 중 문제가 된 다량의 매연(smoke)발생을 줄이기 위해 사용된 제작사의 노즐직경 개선 실험결과를 함정에서의 제한된 조건들을 고려하여 본 연구자가 시뮬레이션을 통한 유량방정식 계산과 배기가스 측정을 통해 매연 감소효과를 검증하고 아울러 질소산화물(NOx)에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1539-655X>): Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: khcho@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4252

1 Department of Marine System Engineering Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: sp10069@hanmail.net, Tel: 051-410-4819

2 Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jschoi@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4262

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 2. 합정특성 및 시험조건

합정은 운용 특수성을 고려해 장비의 개별적인 성능 보장과 동시에 합정의 종합적인 성능 발휘도 요구된다. 따라서 합정 건조 시 종합적인 성능 만족을 위해 일부 특수조건(소음/진동, 출력, 톤수 등)들이 추가적으로 지정된다.

본 연구는 군사적 상황과 제작사의 특성을 고려하여 일부 측정 자료들과 성능 값의 데이터를 일부 상대적 수치로 변환하여 그 값을 표기하였다. 또한 해상시운전 조건(해상상태, 톤수 등)은 항해 일자별 일부 차이는 있지만 개선 전·후 결과 측정은 해상상태 2(파고 0.1m~0.5m)와 계약된 만재톤수(00톤) 상태 조건으로 측정하여 해상상태 및 주변조건 변화로 인한 매연 발생량 변화는 무시하였다. 제시된 측정 자료는 합정 기술자료, 정박시운전 및 항해시운전 결과를 바탕으로 작성되었으며, 합정에 탑재된 엔진의 일반적인 제원과 연료 특성은 **Table 1**과 같다.

**Table 1:** Specifications for the selected engine and properties of diesel fuel

Compression ratio	17.1 : 1	
Injection type	Direct injection	
Supercharging	Exhaust gas	
Cooling	Water(S.W.)	
Bore x Stroke	250 mm x 330 mm	
Density	833.9(15℃ kgf/m <sup>3</sup> )	
Specific gravity	0.8339(15/4 ℃)	
Flash point	64.0(PMCC ℃)	
Valve Timing CA(degree of crank angle)	IVO	BTDC 6.5
	IVC	ABDC 8.1
	EVO	BBDC 69.5
	EVC	ATDC 78.8
Fuel consumption	91 ~ 529 kgf/h	
Output	2,900 kW	
Sulfur	0.64(wt %)	
Cetane number	54	
Kinematic viscosity	2.822(40℃ mm <sup>2</sup> /S)	

대상 합정은 시운전 중 다량의 매연 발생이 시각적으로 식별되어 합정 운용자로부터 문제가 제기 되었다. 합정 엔진의 특성을 변경하는 것은 합정 요구 특수성능 조건 중 합정 출력/속력에 영향을 줄 수 있기 때문에 제한된다. 따라서 엔진 성능개선은 합정 요구 성능인 톤수에서 속도 기준을 만족시킬 수 있도록 개선이 되어야 한다. 또한 합정은 앞서 언급한 것처럼 운용합정에서의 매연 개선 결과를 직접적으로 측정하는 것은 많은 제한이 있기에 제작사가 제공한 노즐직경 변화 값, 분사압력 변화, 합정에서 실제 측정 유류탱크의 보유량 변화, 기존 시험성적서 및 항해시운전 결과 등을 활용해 검증해야 했다.

## 3. 엔진의 배기배출물 예측인자 이론

엔진의 배기배출물 저감과 연료소비율 관련 인자[1]로는

①연료 분사압력 ②분사시기 ③분무사각도 ④노즐팁 돌출 ⑤노즐공 직경 ⑥피스톤 바울 모양 ⑦분무관통 ⑧물 주입량 등이 있으며, 대부분의 경우 열효율과 상반관계인 NOx 발생의 감소는 연소의 질을 악화시킴으로써 미립자(PM)를 증가하게 한다. 본 합정에서 고려할 수 있는 인자는 다음과 같다.

### (1) 연료 분사압력의 효과

분사량을 일정하게 하고 분사압력을 높이면 분사기간은 감소되고 분사율은 증가한다. 증가된 분사율은 예혼합기간과 초기 확산연소기간에 열발생율을 더 높게하여 가스압력과 온도를 높여 NOx 발생을 높이거나 연료소비율을 향상시킨다.

### (2) 분사시기의 효과

분사압력을 너무 올리면(약 135% 정도) 연소폭발압력도 설계수락최고압력을 상회하게 되므로 설계최고폭발압력을 유지한 채 분사시기를 늦추어 적용한다. 분사시기의 지연은 연소과정을 지연시키고 상사점 이전의 연소비율을 낮추어 연소압력과 온도를 낮추게 됨으로 NOx 발생을 낮추나 연료소비율을 저하시킨다.

### (3) 분무각의 효과

일반적으로 분무각이 작으면 보다 좁아진 분무통로와 보다 적은 혼합으로 인해 분출연료에 공기혼입이 감소하며, 이러한 연소 초기의 과잉공기 이용의 제한은 활성혼합의 발생을 저하시킴으로, 연소압력과 온도는 보다 낮아져서 NOx 발생을 감소시키고 연료소비율을 저하시킨다. 반면에 분무각을 증가하면 연소초기에 분출연료에 공기혼입이 증가하여 반대의 결과를 보여준다.

### (4) 노즐 팁 돌출

노즐 팁을 돌출시키면 분무가 바울 벽에 가까워져 분사각을 작게 할 때처럼 NOx 발생을 감소시키고 연료소비율을 저하시킨다.

### (5) 노즐공 직경

분사량과 분사압력을 일정히 유지한 채, 노즐 구멍의 직경을 키우면 분사 기간이 짧아져서 결과적으로 분사율이 증가한다. 분사압력에 변화를 주는 경우에 있어서, 보다 큰 노즐 구멍(보다 증가된 분사율)은 예혼합기간과 확산연소의 초기에 높은 열발생율을 보이며, 이는 실린더 압력과 온도를 보다 높게 한다. 따라서 NOx 배출은 증가하고 연료소비율은 향상된다.

반면에, 노즐 구멍 직경을 감소시키면 보다 낮아진 분사율은 보다 낮아진 열발생율로 이끌며, 실린더 압력과 온도가 보다 낮게 되어 NOx 농도는 저하하고, 열발생율은 저하하게 된다.

## 4. 매연 측정 및 개선 결과

### 4.1 매연 측정 방법

Figure 1은 함정에서 제기된 매연 문제 개선 효과를 검증하기 위해 측정한 위치를 표시한 것이다. 매연의 측정은 함정 특성을 고려하여 연돌 관측부분을 개방하여 배기가스를 직접 포집하여 그 값을 계측기로 측정하였다. 해당 계측기는 Bosch사의 매연측정기로 포집된 배기가스를 해당 측정 용기에 분사 후 분광기를 이용하여 가스의 농도를 0~10까지 측정값을 측정하는 장비이다.

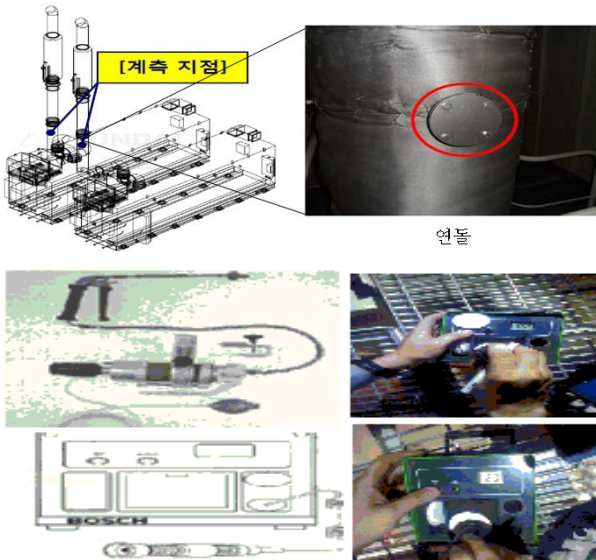


Figure 1: BSN (Bosch Smoke Number) measurement position and measurement instrument.

함정은 배기가스와 관련된 별도의 제한은 없으나 특정 해역에서는 매연에 대한 객관적인 평가와 규제를 위해 링겔만 차트 기준을 적용하여 매연을 규제하는 경우도 있다. Figure 2는 매연의 기준치를 상대적인 수치로 나타낸 기준이다.

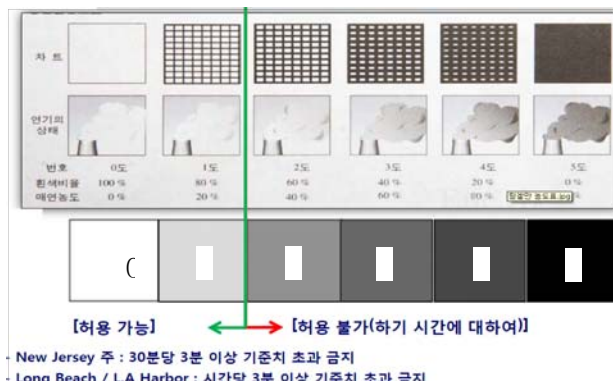


Figure 2: Ringelmann chart

Figure 3은 대상 함정에서 노즐 개선 전 두 번에 걸쳐 매연을 측정한 결과로 저부하(25%이하)에서 매연 측정값이 상대적으로 높게 측정되었다.

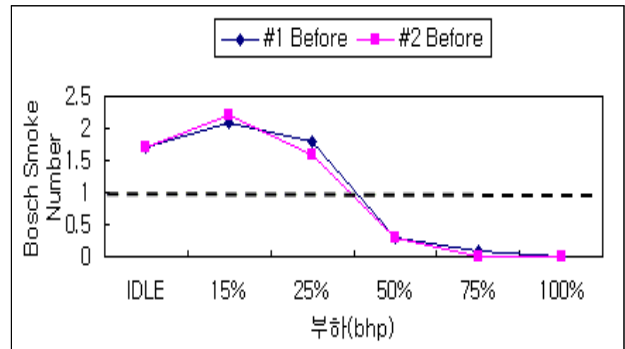


Figure 3: Soot parameter at each mode

### 4.2 개선 결과 및 점검

매연 저감을 위한 방안으로 연료부분에서는 발생원인인 탄소성분을 저감하는 방법이 있고 연소부분에서는 공기공급량 증대, 탄소연소 촉진 증대, 혼합 촉진 등의 방법이 있다. 또한 유회계통에서 유회율 소비를 절감하고 배기계통에서 후처리를 하는 방법들도 있다[2].

이중 해당 함정에서 적용된 개선 방법은 연소방안 중 혼합 촉진 방법의 하나인 노즐공의 단면적 변화를 통해 분사 압력을 조절하여 유량의 평균 입자크기를 작게 해 배출되는 미립자를 저감시키는 방법이다[3][4].

본 연구시 제작사가 함정 적용 전 육상 시험용 엔진에서 노즐 직경 조건(나머지 조건은 동일하게 적용)을 4가지 형태의 값 즉, 100%, 94.7%, 92%, 89.4%로 선정하여 BSN 값을 측정된 결과 100%, 88%, 88%, 84%로 감소하는 것을 확인하였다. 이렇게 선정된 4가지의 노즐을 흡·배기 밸브의 열부하 조건과 연료 분무 가시화 장비를 사용해 평가결과 Table 2와 같이 기존대비 94.7%를 최적의 노즐로 선정하였다. 나머지의 경우는 엔진의 연속운전이 가능한 최대 연료분사 압력의 3~10%를 초과하여 함정 적용이 불가하였다.

Table 2: Specification of nozzle

Properties	Before	After
Nozzle length	the same as before	
Hole angle	the same as before	
Hole number	the same as before	
Nozzle diameter	100 %	94.7 %
Spray pressure	100 %	127.3 %

Figure 4는 함정 노즐 개선 적용 전·후 매연 측정 결과값으로 저 부하(25% 이하)에서 다량의 매연(BSN 값이 1.7 ~ 2.1)이 발생된 문제가 노즐 개선 후에 매연 발생이 개선(BSN 값이 1.0~0.75) 된 것을 확인하였다. 또한 노즐 변경 후 함정 속력을 100% 부하로 측정 결과 출력과(100%→97.7%, 2.3%) 속력(100%→98.6%, 1.4%)은 일부 감소하였으나 함정의 특수성능 요구 조건은 충족하였다.

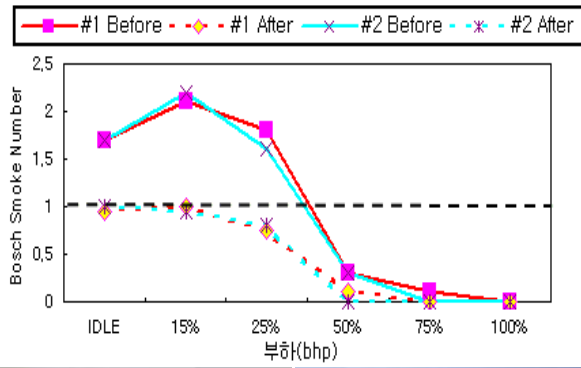


Figure 4: Change of smoke parameter at each mode

연료 공급량 변화는 유량감소 효과 예측 방법 중 하나인 나비에-스톡스 방정식을 통해서 검증하였고, 매연과 관련된 사항은 오염물질 기여도 조사 방법론[5]을 통해 개선 결과를 검증 하였다. 나비에-스톡스 방정식은 유체 속도 형상을 이용한 유량계산 방식으로 함정의 다른 시운전 조건은 동일하다는 전제하에 유량 변화를 연료 분사압력, 출력 및 노즐 특성 변화 등을 활용해 예측하였다.

$$u = \frac{R^2}{4\pi} \frac{\partial P}{\partial x} \left\{ \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_0^R u(2\pi r dr) \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi D^4}{128u} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

( $Q$  유량,  $\vec{V}$  부피,  $D$  노즐직경,  $L$  노즐길이,  $u$  물성치 값)

함정에서 개선 전·후 유량 변화 측정에는 한계가 있어 유량 변화를 예측할 수 있는 나비에-스톡스 방정식을 이용해 유량의 변화를 계산(노즐길이, 물성치 값은 불변)한 결과 유량은 직경과 압력의 변화에 비례하므로 함정에서 적용된 노즐직경(100→94.7%, 5.3%)과 압력변화(100→127.3%, 27.3%)값을 적용하여 저부하(15%)에서 개선 전·후의 연료 소비량을 비교결과 2.5% 감소(100→97.5%) 하는 것으로 예측되었다.

또한 함정 노즐 특성 변화에 따른 배기가스의 변화를 확인하기 위해 오염물질 기여도 조사 방법론을 적용하였고, 매연 배출량 변화를 Table 3 계산식을 이용해 배출계수[Emission

factors(g/kWh) Equations][6]를 설정하여 산출하였다.

Table 3: Emission estimation under low load (15%) condition

Item		Equations
$EF$ (Emission factors)	$PM_{10}$	$0.23 + BSFC \times 7 \times 0.02247$ (fuel sulfur fraction - 0.0024)
	$NO_x$	$4.25g/kWh \times P^{1.14}/P$ (P engine power in kW)
$E$		$P \times LF \times A \times EF$ (P: MCR power, LF: Load Factor, A:Activity)

저부하(15%)에서 노즐 특성 개선결과를 바탕으로 오염물질 기여도 조사 방법론을 이용하여  $PM_{10}$  과 질소산화물 값 변화를 예측해 보았다. 함정에 사용된 고유황 경유는 황 성분분이 0.0028%이고 각 성분별  $EF$  값 산출을 위해 실제 함정에서 측정된 개선 전·후 출력값(100→97.7%)을 적용하여 해당 부하에서의 배기가스 배출량( $E$ )을 연료소비율 감소량(100→97.5%, 2.5%)을 적용해 각 성분별로 산출해 본 결과  $PM_{10}$  (100%→97.8%)은 약 2.2%가 감소되고, 질소산화물은(100%→102.4%)은 약 2.4% 증가되는 것으로 예측되었다.

연료의 연소는 연료 표면적에 비례하고 용적에 반비례하므로 1회 분사량이 같을 경우 연료 유입의 크기가 작을수록 표면적은 증가하고 화학 반응 속도가 빨라져 착화와 연소도 빨라진다. 또한 정상상태의 디젤기관 배기가스 성분은 주로 공기과잉율, 연료분사시기, 연료분사율, 분사의 상태 및 연소실 구조에 의해 변화된다. 연공비가 증가됨에 따라 매연농도 및 CO는 증가되며, NOx와 HC는 일정부분 증가하다 감소하거나 일정수준을 유지하는 것이 일반적이다 [7][8]. 따라서 질소산화물은 연료소비량이 상대적으로 감소되어 연공비가 감소되고 그로 인해 연소온도가 상승되어 NOx는 증가되고, 반면 입자상 물질은 연료의 분사 압력 증가로 인해 분사연료의 무화가 촉진되고, 연소가 원활히 진행되어 감소된 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 함정에서 저부하 운전 시 발생된 매연을 개선하기 위하여 연료노즐 특성을 개선하였고, 그 효과를 검증하였다. 저부하 운전 시 매연 발생 문제를 개선하기 위해 적용된 노즐의 직경 축소(5.3%) 조치가 효과가 있음을 다음과 같이 확인하였다.

(1) 매연 문제 개선을 위해 적용한 노즐 직경 축소로 함정 출력이 일부 저감(2.3%) 되었으나 함정의 요구 출력 조건은 충족하였다.

(2) 유량방정식과 함정시험평가서를 바탕으로 노즐 직경 축소가 연료 소비량을 감소(2.5%)시키는 것을 확인하였고, 이는 노즐 직경 내 유량 감소와 공급압력 증가(27.3%)로 연소실내 액적의 미립화가 증대되어 완전연소가 증대되었기 때문으로 판단된다.

(3) 배기가스 발생량 측정과 오염물질조사 방법론을 통해 저부하시 발생된 매연 문제는 노즐 직경 축소를 통해 그 값이 개선된 것을 확인하였다.

함정은 국제적으로 배기가스 배출과 관련된 규제에서 일부 예외가 되지만 국제 환경규제 변화를 고려 시 그 개선을 위한 지속적인 검토가 필요하며, 이번 매연 개선을 위한 노즐의 직경 변경은 적합하다고 판단된다.

### References

- [1] A. Al-Sened and E. R. Karimi, "Strategies for NOx Reduction on Heavy Duty Engine," CIMAC Congress, pp. 272-280, 2001.
- [2] J. S. Choi and H. J. Jeon, A Lecture of Internal Combustion Engine, Hyosung, pp. 506-509, 2004 (in Korean).
- [3] H. M. Lee and R. E. Park, "Emission prediction from naval ship main propulsive diesel engine under steady navigation," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 6, pp.788-793, 2012 (in Korean).
- [4] G. Y. Goo, A study on the effect of atomization characteristics according to nozzle hole geometry for diesel engine, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Korea, 2008 (in Korean).
- [5] J. J. Corbett and H. W. Koehler, "Updated emissions from ocean shipping," Journal of Geophysical Research, vol. 108, no. D20, pp. ACH 9-1, 2003.
- [6] K. H. Lee, Effect of Fuel Injection Nozzle Internal Geometry on the Spray Characteristics, M.S. Thesis, Pusan National University, Department of Mechanical and Material System, Korea, 2014 (in Korean).
- [7] J. Y. Kim, W. H. Yoon, and J. S. Ha, "A study on the numerical prediction of heat release rate and NOx production in medium-speed marine diesel engine," ASME ICED/RTD Fall Conference, pp. 137, 2003.
- [8] M. G. Kang, S. J. Kwon, J. P. Cha, Y.K. Lim, S. W. Park, and C. S. Lee, "Effect of air/fuel ratio on combustion characteristics in a compression ignition engine fueled with biodiesel," 42th KOSCO symposium, pp. 325- 330, 2011.