

바이오디젤 혼합연료를 사용하는 함정추진디젤기관의 배출계수를 이용한 배기가스 배출량 예측

이형민[†]

(원고접수일 : 2013년 3월 26일, 원고수정일 : 2013년 5월 6일, 심사완료일 : 2013년 5월 14일)

Emission factors based estimation of exhaust emissions with biodiesel blended fuel from naval vessel propulsive diesel engine

Lee Hyungmin[†]

요약: 대기오염으로 인한 기후변화, 에너지 자원의 고갈 및 에너지 안보 등의 이유로 세계 각국에서는 신재생 에너지 연구 개발에 국가적 노력을 아끼지 않고 있다. 신재생 에너지 중 바이오디젤 연료는 기존의 디젤연료를 대체할 친환경 에너지로써 각광을 받고 있으며, 일정한 비율로 디젤연료와 혼합 시 기존 디젤기관의 개조 없이 사용가능하다. 다양한 연구결과에 의해 선박의 배기가스 배출계수는 지속적으로 예측되고 있지만 특수선박으로 분류되는 함정의 배출계수 연구결과는 부족한 실정이며, 특히 바이오디젤 혼합 연료에 대한 배기가스 배출계수는 함정뿐만 아니라 선박에서도 연구 실적이 부족한 상황이다. 본 논문에서는 해군함정에 탑재되어 있는 추진 디젤기관에 바이오디젤 혼합 연료를 적용시켰을 때 배출되는 이산화황 및 이산화탄소의 배출계수를 연료성분 분석 결과를 이용하여 구하고, 연료소비율 계산을 통하여 배출량을 정량적으로 예측하였다.

주제어: 에너지 안보, 신재생 에너지, 바이오디젤, 이산화황, 이산화탄소

Abstract: National investment was performed in the research and development of renewable energy because of climate change by air pollution, exhaustion of energy sources, energy security, and so on. Biodiesel fuel of the renewable energy is highlighted as friendly environment energy, it is possible to operate in regular diesel engines when it is blended with invariable ratios without making any changes. Emission factors have been estimated for commercial ship from various research institutes; however, it is difficult to develop emission factors for military vessels. In this work, biodiesel blended fuel emission factors for sulfur dioxide and carbon dioxide were quantitatively estimated from propulsive diesel engine installed on naval vessel using fuel property analysis. In addition, exhaust emissions were quantitatively calculated on the basis of fuel consumption rate with biodiesel content by percentage.

Keywords: Energy security, Renewable energy, Biodiesel, Sulfur dioxide, Carbon dioxide

1. 서 론

압축착화 방식의 디젤기관은 불꽃점화 기관에 비하여 높은 열효율과 우수한 연비성능을 보유하고 있기 때문에 군함을 포함한 해상운송수단, 자동차, 산업시설 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.

그러나 기후변화, 제한된 화석 에너지 자원, 연료의 가격 상승 및 에너지 안보 등의 이유로 선진국을 중심으로 화석연료를 대체할 신재생 에너지 개발에 대한 관심이 커지고 있으며, 신재생 에너지 중 현재 사용되고 있는 디젤기관에 기존의 디젤연

[†] 교신저자: (645-797) 경상남도 창원시 진해구 중원로 1 사서함 88-4-5번지

해군사관학교 함정추진체계학과, E-mail: hmsj1226@korea.ac.kr, Tel: 055-549-1443

료와 혼합하여 사용할 수 있는 연료는 다양한 바이오매스 자원으로부터 추출 가능한 바이오디젤 연료이며, 가장 보급이 활성화 되어 있다[1][2].

바이오디젤 연료는 선박, 자동차, 산업시설 뿐만 아니라 군함에도 사용될 수 있다. 국제해사기구를 중심으로 해상수송수단에서 대기 중으로 배출되는 오염물질을 저감시키기 위해 선박에 엄격한 배출가스 규제가 적용되고 있으며, 이러한 규제에 대응하기 위하여 다양한 신기술 개발, 연료속의 황함량 저감, 바이오디젤 사용 등 배출가스 저감을 위한 노력을 아끼지 않고 있다[3][4].

특히, Man B&W, WÄRTSILÄ, Caterpillar 등과 같은 선박 디젤기관 제작사들은 차사 보유 디젤엔진에 바이오디젤 연료를 적용하여 다양한 실험을 통해 바이오디젤 연료의 사용 가능성을 입증하였다[5].

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 1은 군함을 포함한 전 세계 주요 대형 선박 및 주 추진기관을 분류한 결과이다[6]-[8].

Table 1: Ship profiles including engine types

| Ship Type | Number of ships | Engine type |
|--|-----------------|---------------|
| Bulk carrier | 12,930 | SSD and MSD |
| Container | 4,318 | SSD and MSD |
| Cruise | 499 | MSD |
| General cargo | 18,475 | SSD and MSD |
| Ro-Ro cargo | 1,711 | SSD and MSD |
| Tanker | 12,528 | SSD and MSD |
| Naval | 19,646 | SSD, MSD, G/T |
| ※ SSD: Slow speed diesel, G/T: Gas turbine MSD: Medium speed diesel | | |

유럽, 미국 등 주요국에서는 선박에서 배출되는 오염물질의 정도를 파악하고자 오염물질 기여도 조사 방법론을 적용시켜 항해중인 선박의 배기가

스 배출계수를 계산하여 오염물질 수준을 예측하고 있다. 해군함정은 배기가스 규제 대상에서 제외되지만 선진국을 중심으로 전기추진체계와 같은 친환경 고효율 함정을 개발하고 있다.

본 연구의 목적은 합산소 연료인 바이오디젤 연료를 현재 해군함정에서 사용하고 있는 디젤연료와 체적비로 혼합하여 혼합된 연료(BD10: 바이오디젤10% + 디젤90%, BD20: 바이오디젤 20% + 디젤80%)의 성분 분석을 통해 황산화물의 주성분인 이산화황(SO₂) 및 지구온난화의 주범인 이산화탄소(CO₂)의 배기가스 배출계수를 파악하여 배출량을 예측하는 것이다.

2. 배출계수 계산 방법

디젤연료를 사용하는 기관에서 배출되는 황산화물은 연료속에 포함된 황성분의 함량에 따라 배출수준이 달라지며, 이산화탄소는 연료의 탄소성분 함량 및 연료소모량에 따라 그 수준이 결정된다.

선박에서 배출되는 배기가스 수준을 예측하는 방법으로 오염물질 기여도 조사 방법론(emission inventory methodology)이 가장 일반적으로 사용되고 있으며 이 방법론 적용 시 핵심적인 사항은 배출계수를 계산하는 것이다. 일반적으로 배출량 계수는 g/kWh로 표시되며, 단위 시간 및 출력 당 배출되는 수준으로 해석한다[9][10].

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[11].

이러한 한계를 극복하고자 2002년 Entec은 다양한 종류의 선박 추진기관 및 사용하는 연료로부터 배출량 정보를 확보해 배출량 계수를 설정하였으며, 선박의 배출량 예측 시 가장 일반적으로 활용되고 있다. Table 2는 Entec의 배출계수 연구결과 중 디젤엔진 부분만 나타낸 것이다[12].

바이오디젤 연료의 혼합비율에 따라 배기가스 배출계수를 예측하고자 하는 대상엔진은 MSD로 분류되고 MGO(marine gas oil)를 사용하는 함정용

디젤엔진이다. 일반적으로 MGO를 사용했을 때 이산화황 및 이산화탄소의 배출계수는 Table 3의 식을 적용하여 예측할 수 있다[13].

그러나 발열량이 MGO보다 낮고 황함량이 거의 없는 바이오디젤이 혼합된 연료가 사용된다면 Table 3의 연료소모량, 황함량 및 탄소함량이 변경되어야 하며, 이러한 변수들은 바이오디젤 혼합 연료 성분 분석을 통해 적용하였다.

Table 2: Emission factors for ocean going vessel

| Engine type | Fuel type | Sulfur (%) | Emission factors (g/kWh) | | |
|-------------|-----------|------------|--------------------------|-----------------|-----|
| | | | SO ₂ | CO ₂ | SFC |
| SSD | RO | 2.7 | 10.29 | 620.62 | 195 |
| | MDO | 1.0 | 3.62 | 588.79 | 185 |
| | MGO | 0.5 | 1.81 | 588.79 | 185 |
| | MGO | 0.1 | 0.36 | 588.79 | 185 |
| MSD | RO | 2.7 | 11.24 | 677.91 | 213 |
| | MDO | 1.0 | 3.97 | 646.08 | 203 |
| | MGO | 0.5 | 1.98 | 646.08 | 203 |
| | MGO | 0.1 | 0.40 | 646.08 | 203 |

Table 3: Emission factors calculating methods

| Emission factors (g/kWh) | Equations |
|--------------------------|--|
| SO ₂ | $SFC \times 2 \times 0.97753 \times \text{fuel sulfur fraction}$ ※ SFC = Specific fuel consumption 2 = Ratio of molecular weights of SO ₂ and S 0.97753 = Assuming that 97.753% of the fuel sulfur was converted to SO ₂ |
| CO ₂ | $SFC \times 0.868 \times 3.667$ ※ SFC = Specific fuel consumption 0.868 = Assuming a fuel carbon content of 86.8% 3.667 = Ratio of molecular weights of CO ₂ and C |

특히, 바이오디젤 혼합 연료 적용 시 연료소모량의 경우 정속운전모드에서 MGO를 사용했을 때 발생하는 디젤기관의 출력과 동일한 출력을 발생시키는 것으로 가정하였으며, 출력은 연료의 발열량과 직접적인 관계가 있기 때문에 비례관계를 적용하여 정량적으로 계산하였다.

3. 엔진 운전 모드 및 연료 성상

바이오디젤 혼합 연료 적용 시 이산화황 및 이산화탄소 배출계수 예측을 위해 선정된 함정용 추진 디젤기관은 MTU(Motor Turbine Union) 계열로 연안전투함, 호위함, 구축함 등 해군 전투함의 추진 기관으로 사용되고 있다. Table 4는 대상기관의 일반적인 제원을 나타낸 것이다.

Table 4: Specifications of the selected diesel engine

| | | |
|---------------------------|------------------|-----------|
| Compression ratio | 12:1 | |
| Bore×Stroke | 230mm×230mm | |
| Displacement/cylinder | 9.56ℓ | |
| Fuel injection type | Direct injection | |
| Supercharging | Exhaust gas | |
| Cooling | Water | |
| Injection pressure | 300bar~350bar | |
| Output | 3,525kW | |
| Valve timing | IVO | BTDC37°CA |
| | IVC | ABDC61°CA |
| | EVO | BBDC67°CA |
| | EVC | ATDC39°CA |
| Specific fuel consumption | 225g/kWh | |

해군함정이 임무수행을 위하여 출항 후 빈번한 기관 가.감속 절차를 거쳐 일정한 침로 유지 후 정속항해(cruise navigation) 조건으로 진입하게 되며, 전체 항해시간을 고려했을 때 기관의 가.감속 시간이 차지하는 비율은 현저하게 낮다.

또한, 대형함의 경우 예인선을 이용해 출.입항이 이루어져 기관의 정속항해를 제외하고 기관의 사

용 빈도는 낮아지게 된다. **Table 5**는 대상기관이 탑재된 함정의 일반적인 운전모드를 나타낸 것이다. 대상기관이 탑재된 함정에는 고속항해를 위한 가스터빈이 탑재되어 복합추진체계를 구성하고 있으나 연구목적상 추진 디젤기관으로 한정한다.

각 운전모드에 해당하는 값들은 운전모드 6을 기준으로 상대적인 값들로 나타내었으며, 대상 엔진 탑재 함정 특성상 운전모드 6 이상부터는 일반적으로 가스터빈 기관을 사용한다.

Table 6은 함정의 정속항해 조건에서 배기가스 배출계수 도출하기 위하여 현재 해군에서 사용하고 있는 함정용 연료와 바이오디젤 혼합연료를 분석한 결과이다.

Table 5: Operation mode of selected diesel engine

| Mode | Ship Speed (% of rated) | Engine speed (% of rated) | Engine Power (% of rated) |
|------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 21.0 | 42.4 | 23.9 |
| 2 | 36.7 | 42.4 | 29.6 |
| 3 | 46.2 | 46.1 | 34.9 |
| 4 | 62.2 | 61.9 | 42.5 |
| 5 | 81.7 | 81.6 | 63.6 |
| 6 | 100 | 100 | 100 |

Table 6: Properties of MGO and Biodiesel blended fuel

| Items | MGO | BD10 | BD20 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Density(kg/m ³) | 845.9 | 849.4 | 852.9 |
| Viscosity(40°C) | 3.773 | 3.785 | 3.806 |
| Sulfur(wt%) | 0.0411 | 0.0368 | 0.0326 |
| Flash point(°C) | 77 | 80 | 81 |
| LHV(MJ/kg) | 42.6 | 42.1 | 41.5 |
| Carbon(wt%) | 81.70 | 79.97 | 78.25 |

※ LHV: Lower heating value

4. 배기가스 배출량 예측

바이오디젤 혼합 연료를 함정에 탑재되어 있는

대상엔진에 적용 시 이산화황 및 이산화탄소의 배출계수를 예측하기 위해 고려되어야 할 변수는 연료소비율, 황함량 및 탄소함량이다.

특히, 바이오디젤 혼합 연료의 발열량이 MGO보다 낮기 때문에 MGO 사용 시 발생하는 출력과 동일한 출력을 발생시키기 위해서는 연료분사량이 증가되어야 한다.

따라서 대상기관에서 바이오디젤 혼합 연료 적용 시 연료의 발열량과 출력과의 비례관계를 가정하여 적용시키고, MGO를 사용했을 때와 동일한 출력을 발생시키는 조건으로 단순화 시켰을 때 연료소비율과 이산화황 및 이산화탄소의 배출계수를 **Table 3**과 **Table 6**의 분석된 값을 이용하여 예측하면 **Table 7**과 같이 정량화 시킬 수 있다.

Table 7: Estimated SFC and emission factors

| Fuel type | SFC (g/kWh) | Emission factors (g/kWh) | |
|-----------|-------------|--------------------------|-----------------|
| | | SO ₂ | CO ₂ |
| MGO | 225 | 0.1808 | 674.086 |
| BD10 | 228 | 0.1640 | 668.609 |
| BD20 | 231 | 0.1472 | 662.837 |

정속조건으로 항해하는 선박(ocean going vessel)의 경우 연속최대출력(MCR: maximum continuous rating)의 약 80% 영역에서 운전된다고 알려져 있으며, 항해중인 선박의 배기가스 배출량은 아래와 같은 식을 이용하여 예측할 수 있다.[14]-[19]

본 연구에서는 고속항해를 위한 가스터빈 및 발전기와 같은 보조기관은 제외시켰다.

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

where, E = Emissions(g/h)

P = Maximum continuous rating power(kW)

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

EF = Emission factor(g/kWh)

Table 4에 표기된 대상기관의 경우 연속최대출력의 약 82% 조건으로 운전되는 영역은 mode 5와 mode 6의 중간이며, 함정의 속력은 약 17kts 정도이다. 식 (1)을 이용하여 함정이 약 17kts의 정속조건으로 항해한다고 가정했을 때 바이오디젤 혼합

연료 적용 시 배출되는 이산화황 및 이산화탄소의 배출량은 Table 8과 같이 예측되어진다.

Table 8: Estimated emissions under steady navigation

| Fuel type | Emissions | |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| | SO ₂ (kg/h) | CO ₂ (ton/h) |
| MGO | 1.045 | 3.897 |
| BD10 | 0.948 | 3.865 |
| BD20 | 0.851 | 3.832 |

5. 결론

바이오디젤 혼합 연료의 성분 분석과 연료소비를 계산을 통해 합정 디젤추진기관에서 배출되는 이산화황 및 이산화탄소의 배출계수를 구하여 아래와 같은 결론을 도출 하였다.

1. 이산화황은 연료의 황성분에 따라서, 이산화탄소의 경우 연료속에 포함된 탄소성분 함량에 따라 배출계수의 수준이 결정된다.

2. 황성분이 없는 바이오디젤 연료를 혼합시켰을 때 연료의 황성분은 바이오디젤 연료의 혼합비율이 증가함에 따라 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이는 황산화물 배출량을 저감시키는 중요한 요인임을 의미한다.

3. 그러나 발열량이 MGO보다 낮기 때문에 동일한 출력을 발생시키기 위해서는 연료소모량이 다소 증가하지만, 바이오디젤 함유량이 증가할수록 이산화탄소 및 황산화물 배출량은 감소하는 것으로 분석되었다.

후 기

본 연구(논문)는 해군해양연구소의 2013년도 국고 연구비를 지원받아 연구되었음.

참고문헌

- [1] T. Elango and T. Senthilkumar, "Performance and emission characteristics of CI engine fuelled non edible vegetable oil and diesel blends," *Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 240-250, 2011.
- [2] Y. Demirel, *Energy*, London: Springer, 2012.
- [3] Global trade and fuels assessment: Future trends and effects of requiring clean fuels in the marine sector, EPA 420-R-08-021, US Environmental Protection Agency, USA, 2008.
- [4] S. Sharma, H. Kumar, M. P. Poonia, and A. S. Jethoo, "Combustion and performance studies of biodiesel fuelled diesel engine: A review," *International Journal of Mechanical Engineering Applied Research*, vol. 3, no. 1, pp. 128-132, 2012.
- [5] Potential of biofuels for shipping, BIONL11332, ECOFYS, Netherland, 2012.
- [6] J. J. Corbett and H. Koehler, "Updated emissions from ocean shipping," *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no. D20, pp. 1-13, 2003.
- [7] Prevention of air pollution from ships: Second IMO GHG study, MEPC 59/INF.10, International Maritime Organization, UK, 2009.
- [8] H. Lee and R. 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).
- [9] Ship emissions inventory: Mediterranean sea, 17900, CONCAWE, Belgium, 2007.
- [10] Review of methods used in calculating marine vessel emission inventories, 38108, SENES Consultants Limited, Canada, 2004.
- [11] Current Methodologies in preparing mobile source port related emission inventories, 09-024, ICF International, USA, 2009.
- [12] Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community, 27191, Entec Limited, UK, 2002.
- [13] Proposal to designate an emission control area for nitrogen oxides, sulfur oxides and particulate matter, EPA-420-R-10-013, US

Environmental Protection Agency, USA, 2010.

- [14] J. Moreno-Gutiérrez, V. Durán-Grados, Z. Uriondo, and J. Ángel Llamas, "Emission-factor uncertainties in maritime transport in the Strait of Gibraltar, Spain," Atmospheric Measurement Techniques Discussions, vol. 5, no. 4, pp. 5993-5991, 2012.
- [15] M. J. Dolphin and M. Melcer, "Estimation of ship dry air emissions," Naval Engineers Journal, vol. 120, no. 3, 2008.
- [16] Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling: Compression ignition, EPA-420-R-10-018, US Environmental Protection Agency, USA, 2010.
- [17] Commercial marine emission inventory development, EPA420-R-02R019, US Environmental Protection Agency, USA, 2002.
- [18] Direct emissions from mobile combustion sources, EPA430-K-08-004, US Environmental Protection Agency, USA, 2008.
- [19] Draft regulatory impact analysis: Control of emissions of air pollution from category 3 marine diesel engines, EPA-420-D-09-002, US Environmental Protection Agency, USA, 2009.