Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 24, No. 6, pp. 834-840, October 31, 2018, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2018.24.6.834

선박용 소형 엔진에서 연료유 내 황 함유량이 운전 조건에 따라 대기오염물질 배출에 미치는 영향에 관한 연구

이경열* · 노범석** · 이원주*** · 최재혁****†
* 선박안전기술공단, ** 한국해양수산연수원, *** 한국해양대학교 기관공학부, **** 한국해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Effect of Sulfur Content in Fuel Oil on the Emission of Air Pollutants According to Operating Conditions of Small Ship Engines

Kyeong-yeol Lee* · Beom-seok Rho** · Won-Ju Lee*** · Jae-hyuk Choi****†
* Division of Marine Environment Research, Korea Ship Safety Technology Authority, Korea
** Education & Management Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea
*** Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea
**** Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea

요 약 : 본 연구에서는 선박용 엔진을 활용하여 E2, E3 사이클 시험 결과로부터 연료 내 황 함유량 변화에 따른 대기오염물질 배출 특성을 조사하였다. 테스트를 위해 사용된 엔진은 360 PS의 엔진(Doosan L126TIH engine)을 활용하였고, 동력계로는 Horiba-Schenck사의 400㎾급 동력계인 W400을 사용하였다. 엔진에서 발생되는 대기오염물질 계측을 위해서는 오스트리아 AVL사의 FTIR과 SPC 장비를 배기라인 후단에 장착해서 사용하였다. 실험 결과로는 E2, E3 사이클 모두에서 연료 내 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO의 단위 출력 당 배출량은 감소하고 입자상물질은 증가하였다. 연료의 황 함유량이 증가할수록 동점도가 증가되어 엔진의 연료소모율이 좋아지는 것을 확인하였다. 이는 본 연구에 사용된 엔진의 경우 연료 분사압력이 일정한 상태에서 동점도 증가에 따른 분무입자의 평균입경이 커짐에 따른 연소상태가 개선되었기 때문이라 생각되어진다. 질소산화물의 경우 이번 연구에서는 황함유량의 변화에도 배출량에서는 큰 변화를 보이지 않았다.

핵심용어 : 선박엔진, 대기오염, 질소산화물, 연료소모율, 입자상물질, 황산화물

Abstract : *In this study, the characteristics of air pollutant emissions from ships' engines have been investigated by conducting E2 and E3 cycle mode tests. A engine 360Ps (Doosan L126TIH engine) and 400kW dynamometer Horiba-Schenck were utilized for engine tests. The FTIR analyzer and SPC were used to measure exhaust gas (NOx, SOx etc.) and PM (particulate matter), respectively. The results showed that the emissions of THC and CO produced from engine were increased with the increase of sulfur content in fuel oils at E2 and E3 cycle modes. The kinetic viscosity of the fuel increased as the sulfur content of the fuel increased, thereby the specific fuel oil consumption (SFC) of the engine improved. This result is considered to be due to improved combustion conditions due to increased average diameters of sprayed particles and due to increased kinetic viscosity under constant fuel injection pressure in this study. In the case of NOx emission, this study showed no significant change in amount of sulfur content.*

Key Words : *Ship engine, Air pollutant, Nitrogen oxide, Specific fuel oil consumption, Particulate matter, Sulfur oxide*

1. 서 론

국제해사기구(IMO)는 2008년 10월 해양환경보호위원회(MEPC) 회의에서 선박 연료유의 황 함유량에 관한 MARPOL 규정을 개정하여 황 함유량이 2012. 1. 1. 이후 3.5 %, 2020. 1. 1. 이후 0.5 %를 초과하는 연료유를 사용할 경우, 별도의 성능기준에 충족하는 배기가스정화장치를 의무적으로 설치하도록 하였다. 황산화물(SOx) 배출규제와 함께 질소산화물(NOx) 배출규제를 시행하고 있다. 아울러, 블랙카본(Black Carbon; B.C)이 극지방 등 환경에 미치는 악영향이 부각되면

* First Author : leeky@kst.or.kr, 044-330-2252
† Corresponding Author : choi_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

서 블랙카본(Black Carbon; B.C)을 배출규제 범주에 새롭게 포함시키고자하는 논의가 IMO PPR(해양오염방지전문위원회) 및 MEPC에서 논의됨에 따라 국제항해에 종사하는 선박에서 규제되는 대기오염물질의 범위가 점차적으로 확대될 것으로 전망된다.

이에 선박에서 발생하는 오염물질의 규제에 대응하기 위한 많은 활동과 연구들이 이루어지고 있으며, 특히 선박용 디젤 기관에서의 배기 물질 특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

선박의 추진용 디젤기관은 특히 저부하에서 연소상태가 좋지 않아 열효율이 낮고, 입자상물질(Particulate matter, PM) 발생량이 증가하는 경향이 높은데 이 점을 개선하기 위하여, Choi et al.(2016)은 650 kW의 선박용 디젤 엔진을 활용하여 저부하 조건에서 다양한 연료첨가제가 엔진의 성능 및 배기가스 배출에 미치는 영향을 파악하였으며, 그 결과로 첨가제 활용에 따른 입자상물질의 저감에 대하여 확인하였다.

또한, 엔진 실린더 내부로의 연료분사시기와 분사압력을 전자적으로 제어함으로서 연소상태를 최적화하는 기술을 적용하여 열효율 및 PM 발생량을 개선하는 연구도 진행되었다(Takasugi et al., 2000).

디젤기관에서 발생되는 PM, NOx 및 SOx을 별도의 후처리과정을 통하여 제거하는 연구도 진행되고 있는데, Balachandran et al.(2015) 등은 마이크로웨이브 플라즈마(Microwave plasma)를 활용한 후처리장치를 통하여 디젤기관에서 나오는 PM을 90 %, NOx을 100 % 제거하는 연구를 수행하였다. SOx의 제거를 위하여 설치·운용에 있어 대형 공간을 요구하는 스크러버(Scrubber)를 소형화하고 PM과 NOx도 동시에 제거할 수 있는 배기가스세정장치(Exhaust gas cleaning device)가 개발되고 있다(Son, 2017, Nishida, 2014).

선박에서 발생하는 대기오염물질을 저감하는 기술의 개발 에 대한 중요성 뿐만 아니라 배출량 산정의 중요성 또한 함께 강조됨에 따라 배출량 산정에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 실제 선박의 운항정보와 디젤기관의 대기오염물질 배출정보를 조사한 자료를 토대로 PM, NOx, SOx 등의 대기오염물질들에 대한 산정하는 방법이 제시되고 있으며(Defra, 2010; EEA, 2016), 다양한 활동지표를 활용한 배출량 전망방법론이 개발되고 있다(Trozzi, 2010). 최근에는 선박자동 식별장치(AIS)를 통하여 수집되는 정확도 높은 선박별 운항정보를 활용하여 배출량을 실시간으로 산정하는 방법이 제시되고 있다(Rakke, 2016).

우리나라에 등록된 선박의 척수 기준으로 전체의 약 50 %가 디젤기관을 추진기관으로 사용하고 있으며, 이 중 약 90 % 정도가 500 ㎾ 이하 고속디젤기관을 사용하고 있다.

이러한 국내 사정을 고려하여 본 연구에서는 국내 연안 선박에서 사용빈도가 높은 500 ㎾ 이하 고속디젤기관을 선정하고 엔진시험 및 배기가스측정이 가능한 테스트베드를 활용하여 연료유 내 황 함유량 변화 및 엔진 부하 변화가 대기오염물질 배출에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연료유 분석

2.1 연료유 확보 및 사용 연료유 물성치

본 연구에서는 소형선박용 고속디젤기관의 배기가스 내 대기오염물질을 측정하는 시험을 실시하기에 앞서 시험에 사용될 연료유 샘플을 확보하고 시험분석을 실시하였다.

연료유 샘플 확보에 앞서 자동차용 경유와 선박용 경유의 가장 큰 차이점이 황 함유량이고, 이는 2차 미세먼지 유발물질로 알려진 황산화물(SOx)의 발생과 밀접한 연관성이 있을 것이라고 판단하여 다양한 종류의 고유황유를 엔진시험에 활용하고자 하였다.

Table 1은 실험에 사용된 황함유량이 각기 다른 3가지 경유를 나타내고 있다. 간단히 설명하면, ULSD(Ultra low Sulphur Diesel)는 일반적으로 육상 교통에 사용되고 일반주유소에서 판매되는 저유황 경유이고, MGO A는 일반적으로 국내선박에서 사용하는 선박용 경유이다. 그리고 MGO B는 황이 포함된 연료첨가물을 ULSD(Ultra low Sulphur Diesel)에 투입하여 별도로 제조한 고유황 경유이다.

Table 1. Fuel Items used for engine test

No.	Items	Method of securing
1	ULSD	Diesel sold at general gas station in domestic land
2	MGO A	Diesel for Ship handled by ship fuel oil supplier
3	MGO B	Diesel produced by dopping liquid additives into ULSD

Table 2는 사용된 연료들의 물성치를 나타낸다. 주요 물성치에 대해서 살펴보면, 저위발열량(Lower Heat Value, LHV)은 크게 차이가 없는 것을 알 수 있으며, 동점도(Kinetic viscosity)는 황 함유량 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 황(S) 함유량은 각각 6 mg/kg, 1,014 mg/kg, 10726 mg/kg으로 최대 180배 이상 차이가 있다. 황 함유량과 동점성계수와 관계에 있어서는 Lee(2017)의 연구에 의하면 저유황경유(황 함유량 100 ppm 미만)와 고유황 경유(황 함유량 360 ppm)의 40℃ 동점도(Kinetic viscosity)를 분석한 결과, 저유황경유는 2.894 cSt, 고유황 경유는 3.596 cSt로 나타나 고유황경유가 저유황

경유에 비해 0.709 cSt 높은 것으로 분석되었다. 선박용 엔진과 같은 압축착화엔진에서는 연료의 착화 특성을 나타내는 세탄가(Cetane index)의 값이 커질수록 압축 착화가 용이하게 일어나 연소 특성이 좋아지며 소음 및 연비, 배출가스 특성에도 영향을 주는데, 이번 연구에서는 대상 연료 모두 세탄가 50 전후로 비슷한 값을 가지므로 3종의 연료 모두 엔진상에서 착화 및 연소에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 연료의 물성치는 한국석유관리원 석유기술연구소에 의뢰하여 분석하였다.

Table 2. Properties of fuels used for engine test

Property	Unit	ULSD	MGO "A"	MGO "B"
LHV	MJ/kg	42.799	42.684	42.326
HHV	MJ/kg	45.726	45.519	45.134
Density	kg/m^3	824.5	850.4	864.2
Ash	%	0.001	0.001	0.003
C	%	85.66	86.35	85.33
H	%	13.79	13.36	13.24
N	%	<0.75	<0.75	<0.75
O	%	0.48	0.27	-
S	mg/kg	6	211	10,726
Cetane number	-	54.6	52.5	49.1
Kinematic viscosity	mm^2/s at 40℃	2.468	3.791	4.555
Pour Point	℃	-9	-6	-6

3. 실험 방법 및 장치

3.1 실험 방법

ISO 8178은 다양한 비도로용 엔진에서 배출되는 대기오염물질의 배출량 및 배출 특성을 평가하기 위해 국제적으로 사용하는 시험 모드로 엔진 동력계를 이용한 정상상태 운전을 통해 가스상 물질과 입자상 물질을 모두 측정하는 시험방법이다.

그 중 ISO 8178-4(E 모드)는 선박용 엔진에 대상으로 한 것으로 E2 사이클은 선체 크기에 관계없이 일정한 엔진회전수를 기준으로 시험하는 방법이며, E3 사이클은 선박 엔진의 성능곡선을 고려하여 시험하는 방법이다. 따라서 이번 연구에서는 소형 선박 엔진에서 엔진 동력계 상 시험 평가 모드에 하나인 ISO 8178-E2 사이클과 ISO 8178-E3 사이클을 엔진시험모드로 선정하였다.

3.2 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치 개략도를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 소형 고속디젤엔진은 현재 연근해 선박에서 사용하는 정격출력 360 PS의 두산 L126TIH 엔진이다. 실제 선박에 설치되어 운전해 오던 엔진을 소모품 교체 및 분해 정비하여 엔진시험에 활용하였다. 두산 L126TIH 엔진은 무부하 최대 엔진회전수 2,200 rpm에 아이들 운전 시 연료 분사타이밍 BTDC 14±1 CAD를 적용하고, 해수를 냉각수 열교환기로 공급하여 엔진을 냉각하는 간접 냉각 방식의 선박 주기용 6기통 고속 엔진이다.

Table 3은 엔진시험 및 배기가스측정 장치를 구성하는 세부장비를 정리한 것이다.

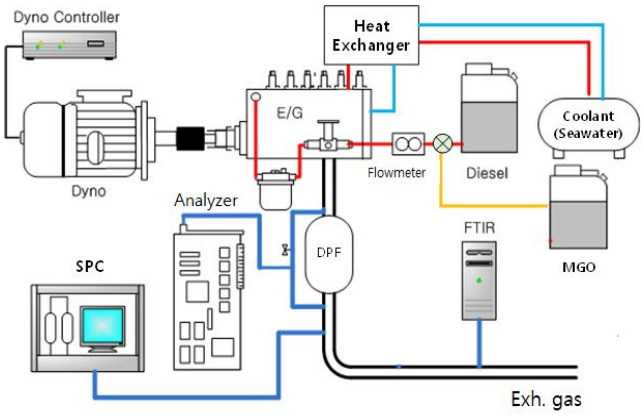

Fig. 1. Schematic of experimental setup for engine test.

Table 3. Lists of L126TIH engine and exhaust gas instruments

No	Items	Models	Company
1	Dynamometer	W400	Schenck Horiba
2	Dynamometer controller	DCON 3100	Dasan R&D
3	SPC	SPC 478	AVL
4	FTIR	SESAM i60 FT	AVL
5	Throttle controller	DTA-000	AVL
6	Flowmeter	FM-1500	Ono Sokki
7	Intake Air Flow meter		Eldridge production Inc.

특히 엔진으로부터 배출되는 대기오염물질의 양과 PM의 양을 측정하기 위해 엔진시험 시스템에 오스트리아 AVL사의 FTIR(Fourier Transformation Infra Red)과 SPC 장비를 배기

라인 후단에 각각 장착해서 사용하였다. FTIR은 레이저를 이용한 가스성분 분석을 통해 NOx, SOx, CO, CO_2 등을 측정할 수 있으며 별도의 FID 모듈을 장착하여 THC 역시 측정이 가능한 장비이다. SPC는 샘플링한 배기가스를 희석한 후 여지를 통과시켜 걸러진 PM의 무게를 측정하는 PM mass 측정 장비로 유럽과 미국의 배출가스 법규/기준에 만족하는 인증된 장비이다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

연료 조성에 따른 대기오염물질 배출량 및 배출패턴을 비교, 분석하기 위해 E2, E3 사이클의 각 모드별 운전 조건(엔진회전수 및 출력)을 ULSD와 황 211 ppm이 포함된 MGO A, 황 10,726 ppm이 포함된 MGO B 모두에 대해 동일하게 적용하였다. 이번 연구에서 사용한 두산 L126TIH 엔진이 노후된 중고엔진인 점을 고려하여 정격 출력과 정격 출력에서의 엔진회전수를 각각 75 %, 85 % 수준으로 낮추었고, E2, E3 사이클의 각 모드별 엔진회전수 및 출력에 대한 조건을 Fig. 2와 같이 정리하였다. E2 사이클의 경우 엔진 rpm을 1700으로 고정하여 시험을 수행하였다.

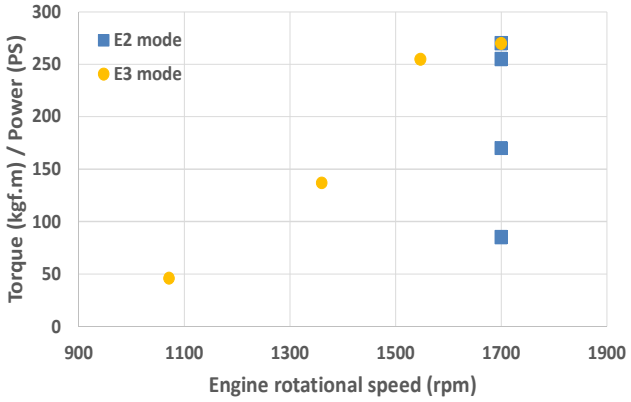

Fig. 2. ISO8178 E2/E3 cycle conditions for L126TIH engine.

이러한 조건으로 E2 및 E3 사이클 운전에 따른 대기오염물질 측정결과는 다음과 같다.

4.1.1 ISO 8178-E2 cycle 운전 시 측정결과

E2 사이클 운전 후 얻은 엔진 회전수, 출력, NOx 측정 결과를 시간에 따라 Fig. 3과 같이 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 엔진 회전수(1,700 rpm)와 각 모드별 출력값이 잘 유지하는 것을 확인할 수 있었다. NOx 역시 각 모드별로 배출량이 변화하는 모습을 관찰할 수 있었으며 부하가 증가할수록 더 많은 NOx가 배출됨을 확인할 수 있었다.

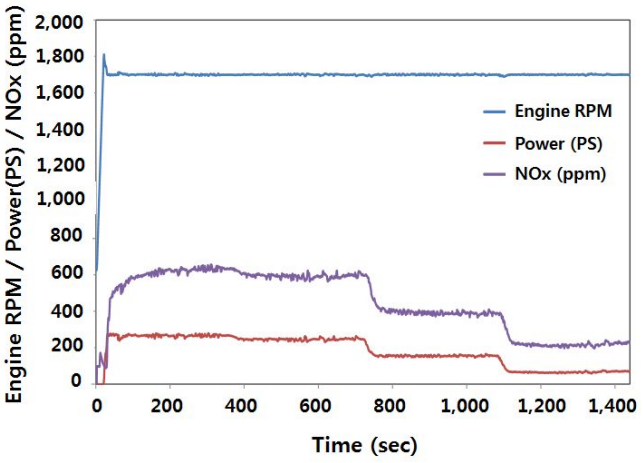

Fig. 3. Measurement of engine speed, power and NOx at E2 cycle.

다음은 각 연료에 대해 E2 사이클 운전 시 측정된 대기오염 물질인 THC, CO, PM에 대해 각 모드별 가중치를 고려하여 얻은 배출량 및 배출 패턴 결과를 Fig. 4와 같이 정리하였다. 대기오염물질 배출량의 경우 시험 당일의 온도, 압력, 습도 등의 주위 환경에 민감한 영향을 받기 때문에 이를 보정하기 위해 "제작자동차배출허용기준·소음허용기준검사방법 및 절차에 관한규정"(환경부고시 제2008-151호)에서 규정하고 있는 배기가스 측정량 습도 보정방법을 적용하여 K_W 계수를 계산하고 배출량 산정에 반영하였으며, 추후 DD6CAM 엔진의 배출량과 정량적으로 비교하기 위해 단위 출력당 배출량인 g/kWh로 환산하였다.

Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 연료 내 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO가 감소하는데, 이는 황이 더 많이 포함된 고유황유일수록 점도가 증가하기 때문에 연료분사 후 착화되기까지 더 많은 시간이 걸리고 그로 인해 예혼합 정도가 증가하기 때문이다. 연료분사시기가 최적화되어 있는 전자식 엔진의 경우 이 같은 착화지연은 예혼합도를 증가시키는 효과보다 연소가 지연되어 효율이 감소하는 부정적인 효과가 발생할 수도 있으나, 대상엔진과 같은 기계식엔진의 경우 연료분사시기가 최적화되어 있지 않기 때문에 예혼합도 증가가 연소특성을 향상시켜 THC와 CO가 감소하는 방향으로 작용한 것으로 판단된다.

입자상물질(PM)의 경우 황 함유량이 증가할수록 크게 증가하여 ULSD에 비해 MGO A는 약 1.12배, MGO B는 약 1.84배 더 많이 배출하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 증가된 황성분에 의해 황산염(Sulfate) 성분이 증가되어 입자상물질의 생성에 기여하였기 때문이다.

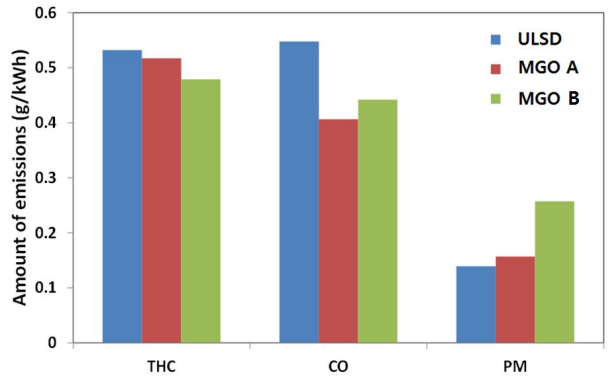

Fig. 4. Amount of emissions of THC, CO, PM for different fuels at E2 cycle.

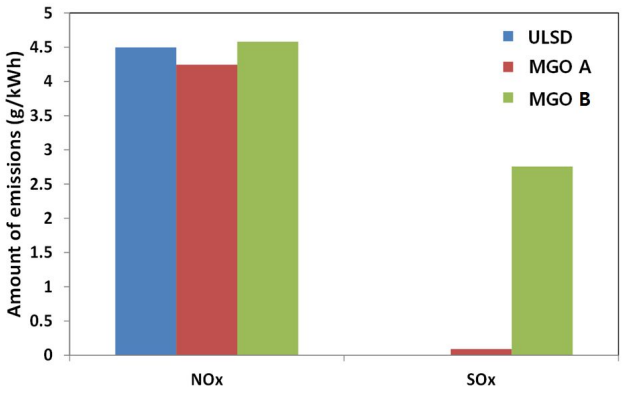

Fig. 5. Amount of emissions of NOx and SOx for different fuels at E2 cycle.

Fig. 5는 각 연료에 대해 E2 사이클 운전 시 측정된 NOx와 SOx 배출량과 배출 패턴을 각 사이클별 가중치를 고려하여 측정한 결과이다. THC, CO 등과 마찬가지로 주위 환경변수를 "제작자동차배출허용기준·소음허용 기준검사 방법 및 절차에 관한규정(환경부고시 제2008-151호)"에서 규정하고 있는 배기가스 측정량 습도 보정 방법을 적용하여 K_W 계수로 보정한 후 단위 출력당 배출량인 g/kWh로 환산하였다.

NOx의 경우 황 함유량과 큰 상관관계가 없는 것처럼 보이는데, 이는 고유황유의 낮은 세탄가는 착화지연을 통해 NOx 발생을 감소시키는 방향으로 작용하는 반면 단위 부피당 더 높은 발열량은 동일 부피의 연료 분사 시 연소온도를 높여 NOx를 증가시키는 쪽으로 작용하기 때문으로 보인다.

약 6 ppm의 황이 함유된 ULSD의 경우 SOx가 거의 배출되지 않지만 약 211 ppm의 황이 함유된 MGO A의 경우 0.09 g/kWh, MGO B의 경우 2.756 g/kWh의 SOx가 배출되었다. 이때 MGO B는 MGO A에 비해 연료 내에 약 50배의 황을 포함하고 있음에도 배출되는 SOx의 양은 약 30배 정도임을 알 수 있는데 이는 나머지 황이 가스상 물질인 SOx가 아닌 입자상 물질인 Sulfate의 형태로 배출된 것으로 추정된다. 왜냐하면 Fig. 4에서 고유황유 사용 시 배출되는 입자상물질이 크게 증가하였기 때문이다.

Fig. 6은 E2 시험 모드에서 연료에 따른 연료소모율(Specific Fuel Consumption, SFC) 변화 결과를 나타낸 그림으로 황 함유량이 증가할수록 연료소모율이 작아짐을 볼 수 있었다. 이는 황함유량이 증가할수록 동점도도 증가하는 경향을 Table 2의 연료유 샘플 분석결과에서 확인할 수 있는데, 본 연구에 사용된 엔진의 경우 연료 분사압력이 일정한 상태에서 연료의 동점도가 증가하면 분무 평균입경이 커져 연소상태 개선에 긍정적인 요인으로 작용한 것으로 판단된다(Kim et al., 2004).

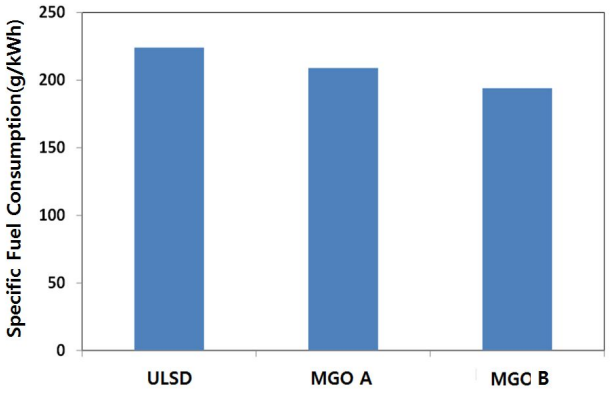

Fig. 6. Specific fuel consumption for different fuel at E2 cycle.

4.1.2 ISO 8178-E3 cycle 운전 시 측정결과

Fig. 7 에서 볼 수 있는 것처럼 E3 사이클의 경우 각 모드별로 동시에 변화하는 엔진 회전수와 출력이 제대로 따라가는 것을 알 수 있다. 다만 각 모드별 천이과정이 스로틀 개도가 감소한 후 엔진 회전수를 제어하는 순서로 이루어졌기 때문에 먼저 스로틀 감소로 출력이 낮아졌다가 엔진 회전수도 함께 감소하면서 출력을 회복하는 형태의 모드 운전 진행 모습을 보였다. 참고로 NOx의 경우 배기가스 온도가 더 높은 E2 사이클에서 더 많이 배출되었다.

E3 사이클 운전 시 각 연료별 측정된 대기오염물질인 THC, CO, SOx에 대해 각 모드별 가중치 및 환경 보정 계수를 고려하여 얻은 배출량 및 배출 패턴 결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 이는 E2 사이클 시험 결과와 마찬가지로 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO 배출량은 감소하는 반면 SOx 배출량은 증가하는 것을 보여주고 있다.

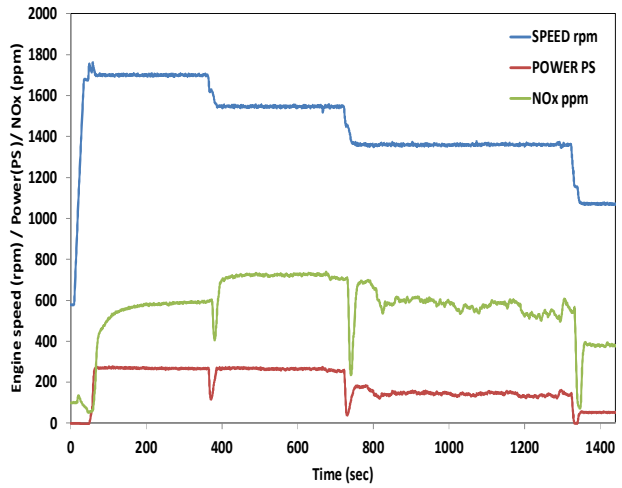

Fig. 7. Measurement of engine speed, power and NOx at E3 cycle.

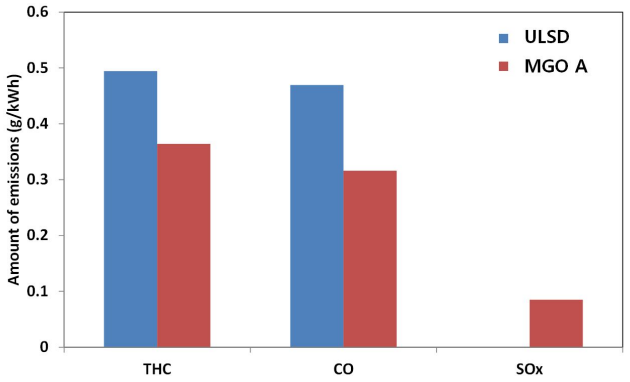

Fig. 8. Amount of emissions of THC, CO and SOx for different fuels at E3 cycle.

상기와 같이 정리한 E2, E3 사이클 시험 결과로부터 연료 내 황 함유량 변화에 따른 연료 물성 및 대기오염물질 배출 패턴을 분석해보면 다음과 같다.

E2 와 E3 사이클 모두에 대해 황이 더 많이 포함된 연료를 사용하면 THC와 CO의 단위 출력 당 배출량은 감소하는 반면 PM과 SOx 배출량은 크게 증가한다.

고유황 연료에 포함된 황 성분은 연료의 점성을 증가시키고 황산염(Sulfate)을 발생시킨다. 특히 고유황 연료 사용 시 증가된 황 성분이 가스상 물질인 황산화물(SOx) 뿐만 아니라 황산염(Sulfate) 성분이 함유된 입자상 물질로도 많이 배출된다. 따라서 실제 황산화물(SOx) 측정량은 연료 내 증가된 황의 양만큼 증가하지는 않는 모습을 보였다.

NOx의 경우 연료의 황 함유량 변화에도 배출량의 큰 변화를 보이지 않았다.

5. 결 론

본 연구에서는 선박용 엔진에서 발생한 대기오염물질의 특성을 파악하기 위하여 360 PS 두산 L126TIH 엔진을 이용한 E2, E3 사이클 시험을 수행하였다. 특히 연료 내 황 함유량 변화에 따른 대기오염물질의 배출 특성에 대하여 조사하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 연료 물성치 분석 결과, 연료 내 포함된 황 함유량이 연료의 발열량에 미치는 영향은 없으며, 세탄지수의 감소에 미치는 영향도 미미하였다. 다만, 현재 국내에서 선박에 공급되는 선박용 경유(MGO)와 탈황공정을 거친 자동차용 경유(ULSD)의 동점도가 상이한 점을 미뤄볼 때 황 함유량 증가가 동점도 상승에는 기여한다는 것을 알 수 있다.

2. 본 연구에서 사용된 엔진의 경우 E2, E3 사이클 모두에서 연료 내 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO의 단위 출력 당 배출량은 감소하고 입자상물질(PM)은 증가하였다.

3. 황 함유량이 증가함에 따라 SOx 배출량이 증가하였는데, 이는 배기가스 내 SOx는 모두 연료에서 기인하기 때문인 것으로 판단된다. 아울러 황 함유량이 증가한 양 만큼 배출되는 SOx의 양이 그대로 증가하지는 않은 것으로 확인되었는데, 이는 연료 내 황 성분의 일부가 황산염(Sulfate) 형태로 변하여 입자상물질(PM)로 배출되었기 때문이다.

4. 연료의 황 함유량이 증가할수록 동점도가 증가되어 엔진의 연료소모율(SFC)이 좋아지는 것으로 확인되었다. 이는 연료 분사압력이 일정한 상태에서 연료의 동점도가 증가가 분무 평균입경 증가로 이어져 연소상태가 개선되었기 때문이다.

5. 본 연구에서의 조건하에서는 연료의 황 함유량이 증가할수록 PM의 발생량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 연료 내 황 성분의 일부가 황산염 형태로 변하여 PM의 생성에 기여하기 때문이라 판단된다.

6. NOx의 경우 E2 및 E3의 모드에 따른 변화는 있었으나 황함유량에 따른 큰 변화는 보이지 않았다. 이것은 본 실험에서의 조건에서는 황 함유량이 증가하더라도 연소온도 증가에 미치는 영향이 미미하기 때문이다.

References

[1] Balachandran, W., F. Inst, N. Manivannan, R. Beleca and M. Abbod(2015) Reduction of NOx and PM in marine diesel engine exhaust gas using microwave plasma, Brunel University, UK.

[2] Choi J. H., S. H. Jang, K. W. Lee, J. R. Kim and J. H. Kim (2016), The Combustion Characteristics of Residual Fuel oil Blended with Fuel Additives, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 22, No. 5, pp. 554-563.

[3] Defra(2010), UK Ship Emission Inventory.

[4] EEA(2016), EEA of EU, EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2016.

[5] Kim, H. S., H. Jang and Y. B. Park(2004), A Study on the Diesel Performance at Heating Light Oil, Journal of Korea Society of Mechanical Technology, Vol. 6(2), pp. 79-84.

[6] Lee, I. S.(2017), A study ofsulfurcontentsin fuel on gaseous and particulate emissions emitted from 4-stroke marine diesel engines, Jeonbuk University, Korea

[7] Nishida, O.(2014), Simultaneous removal of NOx and fine diesel particulate matter (DPM) by electrostatic water spraying scrubber, Journal of Marine Engineering & Technology, Vol 8, Issue 9, pp. 45-53.

[8] Rakke, S. G.(2016), Ship emissions calculation from AIS, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

[9] Son, K.(2017), A study on optimal design of wet scrubbers in small and medium sized vessels, Korea Maritime and Ocean University, Korea.

[10] Takasugi, Y., J. Zhang, M. Kuwabara, M. Kikuchi, S. Nishio, E. Ishimura, Y. Nakajima and S. Kan(2000), Exhaust Emission Characteristics of a Marine Diesel Engine with an Electronically Controlled Fuel Injection System, Journal of the Marine Engineering Society in Japan, Vol. 35, Issue 12, pp. 841-847.

[11] Trozzi, C.(2010), Emission estimate methodology for maritime navigation, Techne-consulting srl, Italy.

Received : 2018. 10. 15.
Revised : 2018. 10. 25.
Accepted : 2018. 10. 26.