

선박용 디젤엔진에서 아산화질소의 배출특성에 대한 연구

유동훈[†]

(Received August 28, 2014 ; Revised October 7, 2014 ; Accepted November 11, 2014)

Investigation on emission characteristics of nitrous oxide from marine diesel engine

Dong-Hoon Yoo[†]

요약: 아산화질소(N_2O , Nitrous Oxide)는 박테리아의 물질대사와 같은 생물학적인 활동에 의하여 자연적으로 발생한다. 하지만, 최근의 대기 중 N_2O 는 산업의 성장과 같은 인간의 활동에 의하여 증가되어져 왔다. 이 중에 대기 중의 N_2O 농도를 증가시키는 요인들 중에 하나는 선박용 연료 연소로부터 발생하는 N_2O 이다. 현재 해상 운송은 국제 물류의 99퍼센트 이상을 담당하고 있고, 선박척수는 물동량의 증가와 함께 증가하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 4행정 선박용 디젤엔진을 사용하여 다른 성분 농도들을 포함하는 연료의 연소가 N_2O 배출물에 미치는 영향에 대하여 실험적인 조사를 실시하였다. 또한, 연소실 내의 연료 연소 패턴이 N_2O 배출물에 미치는 영향에 대하여 평가하였다.

주제어: 아산화질소, 선박용 디젤엔진, 지구온난화 가스, 다단 분사, 배기배출물

Abstract: Nitrous oxide (N_2O) is naturally generated from biological activity, such as bacteria's material exchange. However, recent N_2O concentration in the atmosphere has being increased by the human activities such as industrial growth. One of factors to increase N_2O concentration in the atmosphere is a N_2O emission caused by the combustion of marine fuel oils. The marine transportation presently handles over 99 percent of the international freight cargoes and the number of ship is continuously increasing with increment of cargoes.

In this study, author conducted a series of the experimental investigations on which combustion of fuels containing different element concentrations used in a 4-stroke marine diesel engine affect N_2O emissions in the exhaust gas. Moreover, it is assessed on the extent to which fuel combustion patterns in the combustion chamber affect N_2O emissions.

Keywords: Nitrous oxide, Marine diesel engine, GHG, Multi-injection, Emission

1. 서론

지구온난화물질(GHG, Green House Gas)에 관한 기상농도 관측은 세계적인 연구그룹인 GAW(Global Atmosphere Watch)의 WDCGG(World Data Centre for Greenhouse Gases)에 의해 이루어지고 있으며, 수집된 데이터들은 인터넷으로 공개되고 있다[1]. 이 데이터베이스에는 N_2O (N_2O , Nitrous Oxide)의 대기 농도도 포함되어 있는데, 현재의 전 지구상 관측뿐만 아니라 과거 만년 이상의 빙하 중의 용존 가스로부터 채취·분석한 결과도 볼 수 있다. 이들의 데이터에 의하면, 최근의 지구상의 N_2O 의 농도는 급격한 속도로 증가하고 있으며, 특히, 산업혁명 이후에는 가파르게 상승하고 있다는 것을 알 수 있다.[2]

디젤엔진에 있어서 배기가스의 배출과 저감에 대한 연구

가 여러 가지방법에 의하여 진행되고 있는 한편[3][4], 최근의 IMO(International Maritime Origination)의 EEDI(Energy Efficiency Design Index)나 EEOI(Energy Efficiency Operational Indicator)와 같은 CO_2 배출제한과 더불어 CO_2 이외의 GHG에 대한 관심도 증가하고 있는 상황이다.

온실가스의 하나인 N_2O 가스는 연료의 엔진연소 중에 생성된 다른 온난화 가스들보다 열분해하기 쉬운 반면, 빛에 의한 분해는 어렵기 때문에, 한번 배출된 N_2O 는 150년에 걸쳐 온실효과를 유지한다. 또한, N_2O 는 CO_2 보다 310배의 지구온난화 계수를 갖고 있기 때문에 배출량이 적음에도 불구하고 대기에 미치는 영향력은 무시할 수 없다. 이러한 N_2O 에 대한 연구는 보일러와 같은 연속연소를 갖는 외연기관에서 많이 연구되고 있는데, An[5][6]은 저급연료를 사용하여 화염 중의 N_2O 분포를 조사하여 화염 말기에서

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9169-9659>): Environment / Power and Energy Department, National Maritime Research Institute, 6-38-1, Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo, JAPAN, 181-0004, E-mail: komorebi023@gmail.com, Tel: 81-422-41-3560

는 감소하는 경향을 갖는다고 보고하였다.

육상 디젤엔진의 경우, 연료 중의 질소분과 황분이 극히 미량임을 참작할 때, 엔진으로부터 배출되는 N₂O의 배출량은 극히 소량으로 추측된다. 이 때문에, 육상의 디젤엔진에서 N₂O에 대한 연구는 NO_x 저감을 목적으로 설치한 SCR(Selective Catalytic Reduction) 장치에서 촉매노화로 인한 N₂O의 발생에 초점이 맞추어져 연구되고 있다[7]. 하지만, 박용 디젤엔진의 경우, 사용하는 연료가 육상디젤엔진보다 저급의 연료를 사용하기 때문에 연소 시에 직접적으로 발생하는 N₂O의 양 또한 무시 될 수 없다고 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 직접 분사식 중속 디젤엔진에서 MDO(Marine Diesel Oil)와 HFO(Heavy Fuel Oil)의 상이한 두 연료가 N₂O 배출물에 미치는 영향에 대하여 조사하였고, 연료의 분사패턴을 변경하여 N₂O 배출물 저감을 위한 최적 연소방법에 관한 실험적 검토를 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험연료

Table 1은 본 실험에 사용된 MDO와 HFO의 연료조성을 나타낸다. 연료분석에 사용한 연료는 실험 엔진에 투입되기 직전의 공급탱크에서 채취하였고, 연료분석 전문기관에 의뢰하여 분석을 실시하였는데, 본 실험에 크게 영향을 미칠 수 있는 4성분(탄소, 수소, 산소, 질소)에 대해서는 별도의 분석을 3회 실시하였다. 단, 본 실험에서는 문헌조사를 통해 N₂O 생성에 영향을 미칠 수 있는 연료 중의 물질로서 황과 질소성분을 예상하였기 때문에, 저 유황 MDO (LSA, Low Sulfur bunker A)를 사용하였다.

2.2 실험기관 및 연료분사 시스템

실험에 사용된 엔진은 직접분사식 중속 디젤엔진으로 Table 2에 엔진요목을 나타낸다. 실험엔진은 캠에 의한 기계식 분사시스템을 가지고 있으며, 분사시기의 변경이 가능하도록 설계되어있다. 또한, 분사패턴을 변경하기 위해서는 주 분사 전의 보조 분사 (Pre-Injection)나 후의 보조 분

Table 1: Components for test fuel

Fuel type	Unit	MDO	HFO
Density(15°C)	g/cm ³	0.869	0.974
Flash point	°C	87	122
Viscosity	mm ² /s	2.528	182.3
Pour point	°C	-27.5	-7.5
Ash	mass%	0.53	11.9
C	mass%	87.2	85.9
H	mass%	12.3	11.02
O	mass%	<0.1	<2.5
S	mass%	0.068	2.14
N	mass%	0.0015	0.26
Calorific Value	MJ/kg	43.2	44.63

Table 2: Test engine specification

Engine name	MU323DGSC(Matsui)
Cylinder	3
Stroke	4
Injection method	Direct injection
Bore×stroke (mm)	230×380
BMEP (MPa)	1.78
Compression ratio	13
Continuous output	257.4kW/420rpm

사(After-Injection)를 시행할 필요가 있기 때문에, 기존의 기계식 분사시스템에 전자제어식 연료 분사시스템을 추가 설치하였다.

Figure 1은 본 실험에 사용된 연료 공급시스템을 나타낸다. 이 방법은 기계식 연료공급 펌프와 연소실내의 연료 분사노즐의 중간에 보조 분사용 전자제어식 분사노즐을

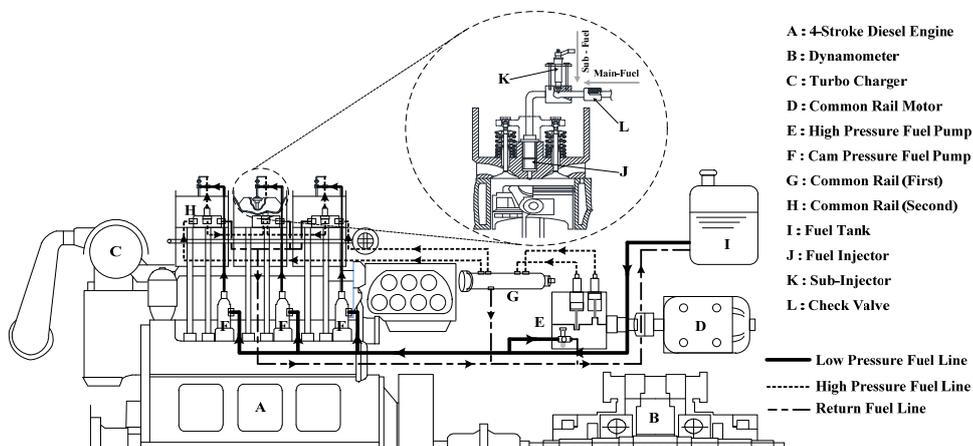


Figure 1: Experimental apparatus for changing fuel injection patterns

설치하여 고압의 연료를 주 연료관 내부에 주입함으로써 주 노즐의 분사패턴을 변경하는 방법이다. 추가된 분무시스템에 의한 연료분사 과정을 보면, 주 분사용 연료의 압력은 캠으로 구동되는 기계식 연료 펌프 「F」에 의하여 발생하여, 체크밸브 「L」을 통과한 후 분사노즐 「J」에 도달한다. 한편, ECU(Engine Control Unit)에 의해 분사시기와 분사기간이 제어된 보조연료가 전자제어 노즐 「K」로부터 주 연료관에 공급되는데, 이때 보조 연료 공급관의 압력은 주 연료 공급관보다 매우 높은 압력으로 공급되기 때문에, 연소실 분사노즐인 「J」는 연료 개방압력을 초과하여 연료를 분사시킨다. 이로써 전자제어 노즐의 분사시기 및 분사기간을 제어하여, 연소실 내부의 연소패턴 제어가 가능하게 된다. 연소실분사용 노즐 「J」는 직경이 0.32mm이며, 7개의 분사구를 갖고, 연료분사 개시압력은 약 26MPa이다. 체크밸브 「L」의 역할은 주 연료가 공급되기 전후에 전자제어 노즐 「K」로부터 주입된 연료가 기계식 연료펌프 「F」와 체크밸브 「L」 사이의 관에 역류하여 연소실 분사노즐 「J」의 제어에 영향을 미치는 것을 방지하기 위함이다. 보조 분사용 전자제어 연료분사장치는 6기통, 15.7리터, 최고압력 180MPa의 자동차용 디젤엔진 시스템을 사용하였다.

실험조건으로는 박용엔진운전 3승 곡선의 25% 부하(64kW/265rpm), 50% 부하(129kW/333rpm), 75% 부하(193kW/382rpm) 그리고 100% 부하(257.4kW/420rpm)에서 조사하였는데, MDO와 HFO의 배출량 조사에서는 모든 부하에 대하여, 연소 패턴의 변경이 N₂O 배출에 미치는 영향에 관한 조사에서는 25% 부하만을 수행하였다.

2.3 연료분사 패턴

Figure 2는 연료 분사패턴에 대한 용어를 정리하고, 본 실험에서 수행한 연료 분사패턴의 이해를 돕기 위한, 보조 분사에 의한 주 연료 공급관 압력변화의 개략도이다.

본 논문에서는 기계식 연료 펌프에 의한 주 분사를 Cam-Main (Main-injection)로, 주 분사 전후의 보조 분사를 각각 Sub-Pre (Pre-injection) 과 Sub-After (After-injection)으로 표기하였다.

Sub-Pre와 Sub-After의 분사량은 전자제어 노즐의 분사기간을 조절함으로써 이루어졌으며, 보조 분사 연료공급관의 압력은 150MPa로 일정하게 유지하였는데, Cam-Main의 분사량에 4~10%(V/V)에 해당한다. 단, 보조 분사용 연료와 주 분사용 연료는 항상 같은 연료를 사용하였다.

기계식 연료 펌프에 의한 메인분사의 분사시기는 ATDC(After Top Dead Center) 10도로 고정하였고, Sub-Pre의 분사기간은 3.0, 3.25, 3.5ms, Sub-After의 분사기간은 3.0과 3.5ms로 하였다. 또한, 보조 분사 개시시기는 Sub-Pre가 ATDC -22.5, -20.0, -17.5, -15.0 및 -12.5도이며, Sub-After는 ATDC 5, 10 및 15도의 조건을 갖는다.

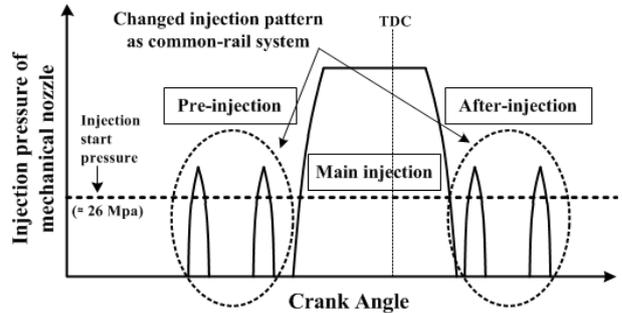


Figure 2: Fuel injection patterns

또한, 사용 연료의 변화가 N₂O의 배출률에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위해, MDO와 HFO의 연료를 사용하였을 때, 25%, 50%, 75% 및 100%의 각각의 부하조건에서 N₂O농도를 측정하였다. 단, MDO로부터 HFO의 연료변환 중에는 50% 부하로 일정하게 유지하였다. 보조 분사 실험 중의 연료소비율의 변동률은 2% 이하, 엔진의 출력 변동률은 3% 이하이다.

2.4 배기가스의 측정

Figure 3은 배기가스 측정시스템의 개략도이다. 배기가스는 과급기로부터 3.5m 떨어져 있는 연통의 중심에서 채취하였는데, 샘플링 가스 중의 수증기를 제거함과 동시에 N₂O와 다른 가스들과의 반응을 동결하기 위하여 채취관의 말단에 2중관식 열 교환기를 설치하였다. 또한, 가스 분석기 전에는 페르체 소자를 이용한 가스 전처리장치를 설치하여 4도 이하로 냉각함으로써 샘플가스의 수분제거를 통해 분석기 내부에서의 가스간의 간섭을 방지하였다. 채취관은 고온의 배기가스 중에 노출되어 있어 촉매반응이 일어나기 쉽기 때문에 이를 방지하기 위해, 촉매반응 개시온도가 배기가스 온도보다 높은 SUS316을, 열 교환기는 SUS314를 사용하였다. 본 실험에 사용된 N₂O 분석기는 적외선 상관 분석방법을 사용하는 Thermo Scientific사의 Model 46C를 사용하였다. 또한, 여타의 배기가스는 Testo사의 Testo350XL을 표준가스를 사용하여 보정 후 사용하였다.

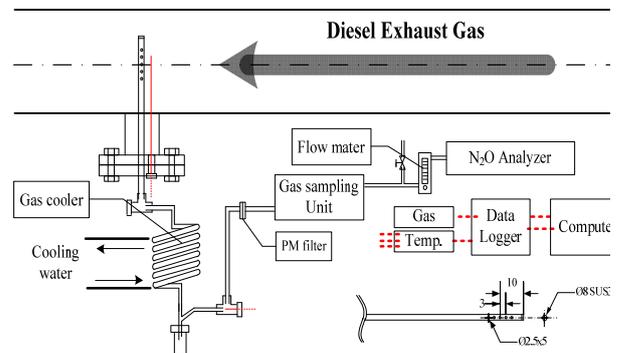


Figure 3: Sampling schematic diagram of exhaust gas

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 연료특성이 배기가스 중 N₂O의 배출물에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위해, ① MDO로부터 HFO 연료전환 중의 N₂O 배출농도, ② MDO와 HFO의 두 연료에 대한 N₂O 배출률, ③ 연료의 분사패턴 변경이 N₂O 배출률에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 위 항목의 ①과 ②는 3.1절에서, 항목 ③에 관한 실험 결과는 3.2에서 기술한다.

3.1 연료 종류에 따른 N₂O 배출특성

Figure 4는 MDO로부터 HFO로 연료 전환 중에 N₂O 배출농도를 측정 한 결과이다. 연료 전환 중의 엔진 부하는 50% (175.5kW/333rpm)으로 고정하였고, 주 분사의 분사시기와 보조 분사에 의한 연료 패턴 변경은 하지 않고, 연료 캠의 기계식 연료분사만을 실시하였다. 본 연구에서는 탄소 균형법(Carbon Balance Method)으로 배출물 환산을 수행하였기 때문에, 연료의 조성이 수시로 변하는 연료변환 중에는 [ppm] 농도로 표시하였다.

결과에 의하면, 측정 개시점의 N₂O 농도는 5ppm 정도였지만, 연료가 HFO로 변환되어갈수록 N₂O 농도는 증가하여 거의 모든 연료가 HFO로 변환된 30분 후에는 약 27ppm까지 상승하였다. 이러한 N₂O 농도의 증가는 HFO로 전환될수록 연료의 밀도, 동점도 등의 물성치가 변화되어 N₂O의 발생률에 영향을 미쳤을 가능성도 있지만, 기관출력과 회전수를 일정하게 유지하였기 때문에, 여러 요인들 중에서 연료 중 N₂O의 배출에 영향을 미치는 물질(질소, 황)의 증가가 원인으로 생각된다.

Figure 5는 엔진 부하 25%, 50%, 75% 그리고 100%에서 MDO와 HFO 사용에 따른 N₂O 배출률에 대하여 나타내고 있는데, 모든 부하에서 HFO를 연료로 사용할 때의 N₂O 배출률이 MDO를 연료로 할 때보다 큰 폭으로 상승하였고, 최고 10배 이상의 배출률 증가를 보였다. Table 3은 이렇게 얻어진 각 엔진 부하에서의 N₂O 배출률을 CO₂를 기준으로 한 환경부하율(N₂O의 지구온난화계수(GWP, Global-warming potential)는 310이다.)로 나타낸 표이다. MDO를 사용할 때의 N₂O의 환경부하율은 1% 미만이지만, HFO를 사용하면 10%까지 증가함을 알 수 있다.

일반적으로, N₂O는 연료중의 질소성분이 연소하여 발생하는 Fuel NO 또는 Prompt NO의 중간 생성물질로서, 고온 연소시에는 N₂O에서 빠르게 NO로 전환된다고 알려져 있다[8]. 그러므로 Figure 5의 부하증가에 따른 다소의 N₂O 배출률 감소는 연소실의 온도증가가 원인으로 생각된다. 즉, 부하의 증가에 따른 연료 중 질소량의 증가보다 연소실의 온도상승에 따른 분해량이 우세했다고 생각된다.

Yoo등[9]은 4행정 중속 디젤엔진을 주기로 하고 MDO (황 함유율 : 0.1%(m/m))를 사용하는 실제 선박에서의 N₂O 배출률에 대해 조사하였는데, N₂O 배출률은 엔진의 모든 부하에 대하여 SO₂ 배출률과 유사한 배출 특성을 갖고 있고, 고 부하 영역으로 이동할수록 N₂O의 배출률은 감소한다고

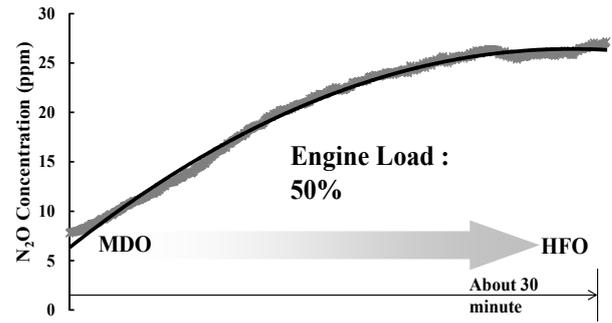


Figure 4: N₂O concentration for fuel conversion

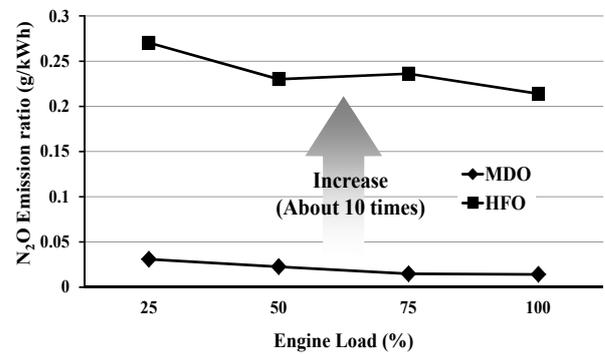


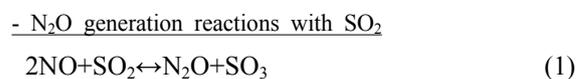
Figure 5: N₂O emission by fuel species

Table 3: N₂O emission and environmental load

Fuel	Load	N ₂ O	CO ₂	N ₂ O*/CO ₂
		g/kWh	g/kWh	%
MDO	25%	0.031	831.26	1.16
	50%	0.023	762.68	0.93
	75%	0.015	732.58	0.63
	100%	0.014	720.37	0.60
HFO	25%	0.270	842.96	9.93
	50%	0.230	701.91	10.16
	75%	0.236	682.38	10.72
	100%	0.214	662.28	10.02

*N₂O [g/kWh] = Exhaust rate of N₂O[g/kWh]×310(GWP)

보고하였는데, 본 실험의 결과와도 일치한다. 또한, HFO의 경우 MDO보다 N₂O가 10배 정도 증가한 원인은 연료 중 황 성분의 농도 변화에 있다고 생각된다. 식 (1)은 연료연소 중, 또는 연소 후에 SO₂에 의한 N₂O 생성 반응식을 나타낸다.

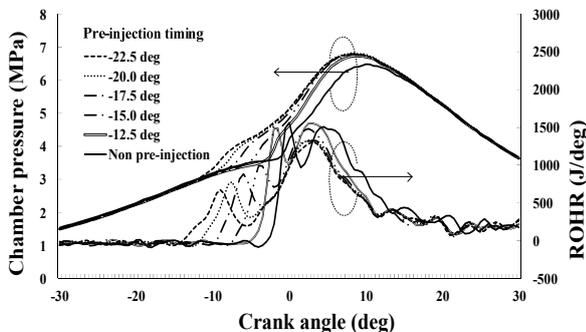


3.2 연료의 분사패턴 변경에 의한 N₂O의 배출 특성

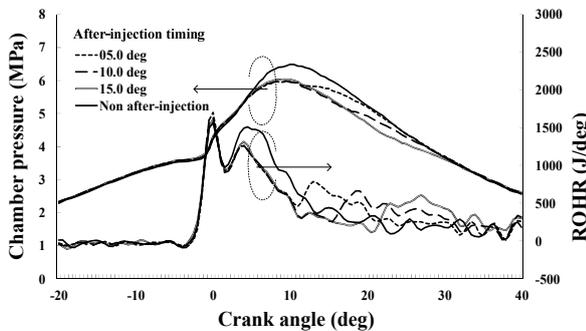
본 논문에는 연소실 압력 및 열발생율 선도의 대표치로서 보조연료 분사시간 3.0ms만을 기재한다.

Figure 6는 연료의 분사패턴 변경에 의한 연소실 압력과 열발생율을 나타낸다. 연소실 압력을 보면, 보조 분사에 의해 Cam-Main 일부의 압력이 전 또는 후로 이동하는 것을 알 수가 있는데, 보조 분사용 노즐「J」의 분사량 및 분사시기 제어에 의해 연소실에서의 연소패턴이 변경되고 있음을 의미한다. (a)의 열발생율을 보면, Sub-Pre 분사는 착화시기를 앞당겨 예혼합연소 부분의 최고 열발생율을 저하시키고 있는 반면, (b)의 Sub-After 시행에 의한 열발생률에서는 예혼합 연소 부분에는 크게 영향을 미치지 않고, 확산연소의 일부분만이 뒤쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

Figure 7은 연료의 분사패턴의 변경이 NO와 N₂O에 미치는 영향에 대하여 나타내었다. 그래프 (a)에서 볼 수 있듯이, Sub-Pre 분사 시 그렇지 않은 경우와 비교하여 거의 같은 배출률을 나타냈는데, Sub-Pre의 분사시기를 변경하여도 배출되는 NO의 양은 거의 변화하지 않았다. 하지만 Sub-After 경우, 보조 분사의 분사시기를 늦출수록 NO 생성량이 감소하였는데, 화염온도에 크게 영향을 받는 Thermal-NO_x의 생성이 연료 분사의 다단화로 인하여 주 분사 화염의 국부적인 온도상승이 억제되었을 것으로 사료된다. 본 실험항목 중 가장 높은 NO 발생률을 보인 것은 보조 분사 ATDC -12.5도에 Sub-Pre를 시행한 항목으로서

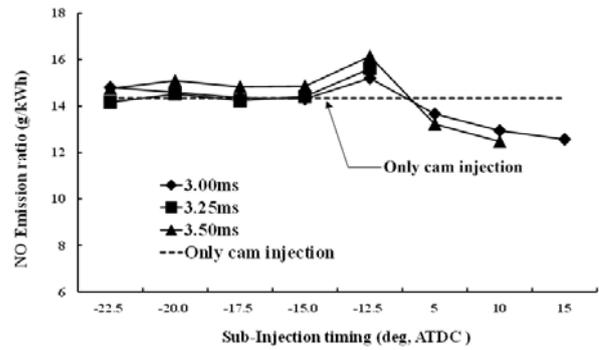


(a) Pre-injection

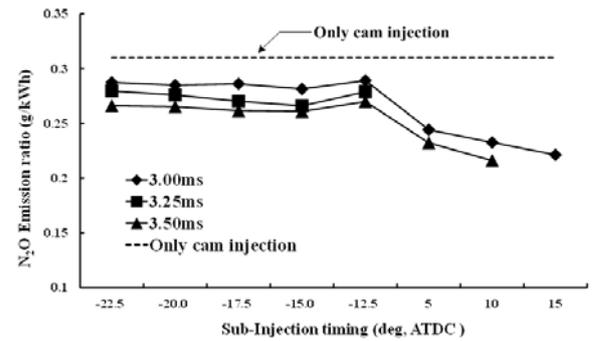


(b) After-injection

Figure 6: Chamber pressure and rate of heat release by changing injection pattern



(a) NO emission



(b) N₂O emission

Figure 7: NO and N₂O emission by changing injection pattern

Cam-Main 분사와 Sub-Pre분사가 겹쳐져 분사되어 화염온도가 상승한 것이 원인으로 생각된다. 또한, 보조 분사량의 증가에 따른 NO 발생률은 다소 증가 하였지만, 큰 차이는 보이지 않았다.

Figure 7 (b)의 N₂O발생량을 비교한 그래프를 보면 N₂O는 보조 분사를 시행하거나 보조 분사량을 증가시킬수록 모든 영역에서 감소하는 것으로 나타났다. 특히, Sub-Pre 보다 Sub-After의 보조 분사가 더욱더 효과적이었는데, 고온의 열에는 분해되기 쉬운 N₂O의 성질 때문으로 추측된다. 즉, 보조 분사 혹은 주 분사에 의하여 생성된 N₂O가 그 다음 분무의 화염에 의하여 분해되었을 것으로 판단된다. 이것은 보조 분사의 양을 증가시켰을 때 N₂O의 배출량이 저감되어진 것으로 뒷받침된다.

Rutar[10]등은 연속 연소기를 제작하여, 질소성분을 함유하지 않은 수소연료를 사용하여 N₂O를 함유한 배기가스의 재 연소실험을 실시하였고, N₂O는 재 연소에 의하여 삭감될 수 있다는 것을 보였다. 본 실험에서도 Rutar의 실험과 같이 다음 연료분사로 인한 N₂O의 재 연소 현상이 발생한 것으로 생각된다.

또한, Figure 7 (a)의 NO 배출특성과 (b)의 N₂O 배출특성을 비교하였을 때 유사한 배출곡선을 갖고 있었는데, 식 (1)의 경로에 의해 생성되는 N₂O 또한 무시되어질 수 없을 것으로 사료된다. 다만, 디젤 엔진에 있어서 연소실 내부에서 일어나는 NO와 SO₂의 반응구조에 대한 상세한 정보를

알기위해서는 연소실 내부가스를 직접 채취하는 방법 등이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 MDO와 HFO를 사용하여 중속 직접분사식 디젤엔진에서의 N₂O 발생률에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. HFO를 사용하였을 때의 N₂O 발생률은 MDO를 사용하였을 때보다 전 부하영역에서 10배 정도의 수치를 보였다.
2. 4-행정 중속 디젤엔진에서 Sub-After의 보조 분사를 시행하면 N₂O 배출률을 저감시킬 수 있고, 이때, 보조 분사의 양을 증가시킬수록 저감량은 증가하였다.

References

[1] S. Y. Park, J. G. Park, C. S. Kim, and I. C. Shin, "Clarification of methane emission sources using WDCGG data : Case study of anmyeon-do observatory," Asian Journal Atmospheric Environment, vol. 7, no. 2, pp. 85-94, 2013.

[2] IPCC, Climate Change 2007 Synthesis Report, pp. 1-52, 2007.

[3] J. K. Lim, S. Y. Choi, and S. G. Cho, "Effects bio-diesel fuel on exhaust emission characteristics in diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 27-32, 2008 (in Korean).

[4] J. K. Lim, S. G. Cho, S. J. Hwang, and D. H. Yoo, "Effect on characteristics of exhaust emissions by using emulsified fuel in diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 31, no. 1, pp. 44-50, 2007 (in Korean).

[5] S. H. An, "Emissions of marine heavy fuel oil in the spray flame," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 7, pp. 1030-1035, 2008 (in Korean).

[6] S. H. An, "An experimental study of N₂O concentration profiles in planner premixed flame," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 2, pp. 267-271, 2009.

[7] T. Kaneko, N. Shirabe, T. Kikuchi, K. Shimizu, M. Shimoda, H. Suzuki, A. Fujii, and A. Iimima, "Report of JSAE annual congress," Journal of Engine Review, Society of Automotive Engineers of Japan, vol. 1, no. 2, pp. 1-15, 2011 (in Japanese).

[8] J. A. Miller and C. T. Bowman, "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion,"

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 15, no. 4, pp. 287-338, 1989.

[9] D. H. Yoo, Y. Nitta, M. Ikame, M. Hayashi, H. Fujita, and J. K. Lim, "Exhaust characteristics of nitrous oxide from marine engine," Proceedings of the Ocean'12, MTS-IEEE, 2012.

[10] T. Rutar, J. C. Kramlich, and P. C. Malte, "Nitrous oxide emissions control by reburning," Journal of Combustion and Flame, vol. 107, no. 4, pp. 453-463, 1996.