

직접분사식 디젤엔진에서 아산화질소의 생성에 관한 실험적 연구

유동훈*

* 국립 해양기술안전 연구소

A Experimental Study on Nitrous Oxide Formation in Direct Injection Diesel Engine

Dong-Hoon Yoo**

* National Maritime Research Institute, Shinkawa 6-38-1, Tokyo, Japan

요 약 : 일반적으로 선박용 디젤엔진의 아산화질소(N_2O)배출률은 이산화황(SO_2)배출률과 밀접한 상관성을 갖고 있고, 선박에서 사용되는 연료의 다양성은 N_2O 배출특성에 영향을 미친다고 받아들여져 왔다. 최근의 연구보고에 의하면 연료 연소에서 발생한 충분한 일산화질소(NO)가 존재할 경우, 배기의 SO_2 배출률이 N_2O 생성에 미치는 영향은 NO 의 영향보다 막대하게 크다. 그러므로 SO_2 성분으로부터 기인하는 N_2O 생성은 NOx 저감을 위한 배기가스 재순환(EGR) 시스템에서 중요한 인자로 작용한다. 본 실험적인 연구의 목적은 SO_2 유량 증가를 갖는 디젤엔진의 흡기가 배기의 N_2O 배출률에 미치는 영향에 대하여 조사하는 것이다. 실험에 사용된 테스트 엔진은 2600rpm에서 12kW의 출력을 갖는 4행정 직접분사식 디젤엔진이고, 운전조건은 75% 부하에서 실시되었다. 0.499%(m^3/m^3)의 SO_2 표준가스는 흡기의 SO_2 농도를 변화시키기 위해 사용되었다. 결과적으로 황 성분을 포함하지 않는 연료는 SO_2 를 배출시키지 않았고, 흡기 중에 SO_2 표준가스의 증가에 따른 배기의 SO_2 배출률은 SO_2 흡입률과 비교하여 거의 같은 비율이었다. 또한, 흡기의 SO_2 유량 상승은 N_2O 배출률을 상승시켜 배기 중의 N_2O 는 흡기의 SO_2 혼합기에 의해 생성되었다. 결국 황 성분을 함유한 연료는 연소 중에 SO_2 를 형성하고 배기 중의 N_2O 는 연소실에 존재하는 NO 와 SO_2 의 반응에 의해 발생된다고 할 수 있다.

핵심용어 : 아산화질소, 지구온난화 계수, 중질유, 디젤엔진, 이산화황

Abstract : It has been generally recognized that N_2O (Nitrous Oxide) emission from marine diesel engines has a close correlation with SO_2 (Sulfur Dioxide) emission, and diversity of fuel elements using ships affects characteristics of the N_2O emission. According to recent reports, in case of existence of an enough large NO (Nitric Oxide) generated as fuel combustion, effect of the SO_2 emission in exhaust gas on the N_2O formation is more vast than effect of the NO . Therefore, N_2O formation due to the SO_2 element operates on a important factor in EGR(Exhaust Gas Recirculation) systems for NOx reduction. An aim of this experimental study is to investigate that intake gas of the diesel engine with increasing of SO_2 flow rate affects N_2O emission in exhaust gas. A test engine using this experiment was a 4-stroke direct injection diesel engine with maximum output of 12 kW at 2600rpm, and operating condition was set up at a 75% load. A standard SO_2 gas with 0.499%(m^3/m^3) was used for changing of SO_2 concentration in intake gas. In conclusion, the diesel fuel included out sulfur elements did not emit the SO_2 emission, and the SO_2 emission in exhaust gas according as increment of the SO_2 standard gas had almost the same ratio compared with SO_2 rate in mixture inlet gas. Furthermore, the N_2O element in exhaust gas was formed as SO_2 mixture in intake gas because increment of SO_2 flow rate in intake gas increased N_2O emission. Hence, diesel fuels included sulfur compounds were combined into SO_2 in combustion, and N_2O in exhaust gas should be generated to react with NO and SO_2 which exist in a combustion chamber.

Key Words : Nitrous oxide, Green-house potential, Low-grade fuel, Diesel engine, Sulfur dioxide

† komorebi023@gmail.com, +81-90-6067-2415

1. 서론

선박으로부터 발생하는 배기배출물의 규제가 점차 강화되고 있는데 NO_x, SO_x 뿐만 아니라 화석연료를 사용하면 필수적으로 배출되는 대표적인 지구온난화 물질(GHG, Greenhouse Gas)인 이산화탄소 또한 IMO(International Maritime Organization)에서 배출물 제한이 의결되어 EEDI(Energy Efficiency Design Index)와 EEOI(Energy Efficiency Operational Indicator)의 협정에 의해 점차 강화되고 있다(IMO, 2011).

지구온난화를 일으키는 대표적인 물질로는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등이 있는데, 그중에서도 N₂O는 CO₂에 비하여 배출량이 미량임에도 불구하고 지구온난화 계수가 CO₂의 310배에 달하여 최근의 증가율을 고려했을 때(IPCC, 2007) 지구온난화에 미치는 영향력은 무시할 수 없는 물질로 여겨지고 있다. 특히 최근 미국 해양대기국의 연구팀에서는 N₂O를 오존층을 파괴하는 최고의 물질로 지목하며 N₂O에 의하여 지구온난화는 가속화 될 수 있다고 밝혔다(Ravishankara et al., 2009).

이러한 N₂O생성에 영향을 미치는 것으로 알려진 연료 중의 물질은 질소성분과 황성분으로 알려져 있어 위 두 성분을 비교적 많이 함유한 중질유를 연료로 사용하는 선박의 특성상 N₂O배출량 또한 무시할 수 없을 것으로 예상되는데, Yoo는 2.14%(m/m)의 황성분을 함유한 연료를 사용할 때 N₂O의 환경부하율이 동시에 배출되는 CO₂의 10%에 달한다고 보고하였다(Yoo, 2014a).

Fig. 1에는 보일러와 같은 외연기관에서 연료에 포함된 질소성분이 연소로 인해 변화되는 과정에 대하여 나타내었다(Ots, 2005, Yoo, 2014a). 하지만 디젤엔진과 같은 내연기관에서는 Char-N(석탄연소 시에는 질소를 함유한 미반응 고형물)에 의한 생성은 무시할 수 있기 때문에 Fig. 1에서 휘발성 질소성분(Volatile Matter)만을 고려하면 되는데, 식(1)~(5)에는 이러한 휘발성 질소성분으로부터 생성되는 N₂O의 상세한 생성경로에 대하여 나타내었다.

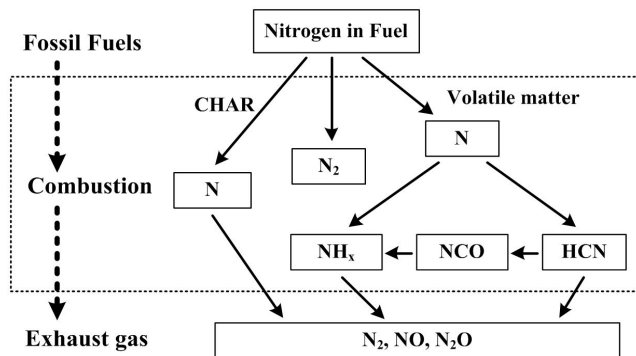
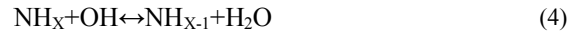


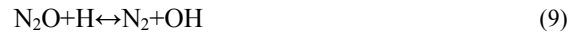
Fig. 1. Reactions of nitrogen component in fossil fuel to external combustion.

- N₂O generation reactions



또한, 식(6)~(9)는 N₂O 분해온도인 1200 K(Glarborg et al., 1994) 이상에서의 N₂O분해반응을, 식(10)은 황성분에 의한 N₂O생성 반응식에 대하여 나타내었다. 식(1)~(5)와 식(10)에서 알 수 있는 바와 같이 N₂O생성에는 연료를 구성하는 물질 중에 질소 또는 황성분이 관여하고 있음을 알 수 있고, 이러한 성분을 많이 함유한 저급의 연료를 사용하는 선박에서의 N₂O발생량은 일반적인 육상동력원보다 발생량이 많을 것으로 추정된다.

- N₂O decomposition reactions



- N₂O generation reactions with SO₂



Yoo는 저유황 MDO(Marine Diesel Oil)를 사용하는 실제 선박에서의 N₂O배출물은 동시에 계측한 SO₂배출물과 큰 상관성을 갖고 있고(Yoo et al., 2012, Yoo et al., 2013), 선박용 중속 디젤엔진에 있어서 MDO와 HFO(Heavy Fuel Oil)의 사용연료의 차이는 N₂O배출물에 큰 영향을 미친다는 것을 증명하였다(Yoo, 2014b). 또한, 고온·고압의 연소실은 갖는 디젤엔진에 있어서 N₂O배출에 큰 영향을 미치는 연료 중의 성분은 질소성분 보다 황성분에 의존하는데 식(1)~(5)로부터 생성된 N₂O는 식(6)~(9)에 의해 분해되어 NO 또는 N₂로서 배출되는 반면 농후하게 NO가 존재하는 배기에서는 식(10)에 의해 SO₂배출물의 지배를 받는다고 보고하였다.

이상의 보고로부터 윤활유 중의 황성분을 무시하였을 경우 SO₂배출물은 연료의 황성분에 의존하기 때문에 결국 N₂O배출물 또한 연료의 황성분 함유율에 의존한다고 말할 수 있다. 하지만 Yoo의 보고에서는 식(10)의 반응이 연료의 황성분 농도에만 의존하는지 흡기 중의 SO₂ 증가에도 의존하는지에 대한 명확한 근거를 제시하지는 못하고 있다. 이러한 흡기의 SO₂에 의한 N₂O 발생에 대한 고찰은 선박에 있어서 최근의 NO_x규제의 대처방안으로 주목받고 있는 배기가스 재순환(EGR, Exhaust Gas Recirculation) 시스템에서 배기에

서 흡기로 연결되는 재순환가스가 SO₂를 포함하고 있기 때문에 중요한 논의점이 될 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 소형 디젤엔진에서 연료 중에 황 성분을 거의 함유하지 않는 옥상용 경유를 사용하고 SO₂ 표준가스를 흡기 중에 공급하였을 경우에 SO₂흡입률이 배기 중의 N₂O배출률에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험에 사용된 엔진은 AVL사의 단기통, 무과급, 직접분사식 고속 디젤엔진을 사용하였다. 모든 실험은 100% 부하를 49 N·m/1500 rpm으로 설정하여 선박부하 3층 곡선의 75% (41 N·m/1362 rpm) 부하를 운전조건으로 하였는데 선박용 중속 디젤엔진을 모의하기 위함이고, 실험 중의 부하 변동률은 1% 미만이다. 또한, 연료의 분사시기(BTDC(Before Top Dead Center), 10도), 윤활유 온도(65~67°C), 흡입 혼합기온도(10~13°C) 등은 엔진성능과 배기배출물에 영향을 미칠 수 있기 때문에 충분한 예열운전을 시행하고 실험간격을 조정하여 실험상 오차를 최소화 하였다. Table 1에는 본 실험에 사용된 엔진 사양을 나타내었다.

Table 1. Test engine specification

Test engine	AVL
Stroke	4
Cylinder	1
Cooling type	Water
Injection method	Direct injection
Bore	112(mm)
Stroke	110(mm)
Output	12 kW/2400 rpm
Compression ratio	18.5

전술하였듯이 N₂O의 생성에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 알려진 연료 중의 물질은 황성분과 질소성분인데, 디젤엔진에서의 N₂O배출률은 황성분 함유율에 의존한다고 알려져 있기 때문에, 흡기중의 SO₂농도를 변화시켜 연료기인 아닌 흡기 중의 SO₂가 N₂O배출률에 미치는 영향에 대하여 고찰하기 위해 극히 낮은 황성분 함유율을 갖는 연료를 사용할 필요성이 있다. 그러므로 본 실험은 옥상 디젤엔진용 저유황 연료를 사용하였는데 Table 2에 연료유 성상에 대하여 나타내었다. 표에서 보이는 바와 같이 연료 중의 황성분 함유율은 6.8 ppm이고, 질소성분 함유율은 측정한계치인 5 ppm 이하로써 연료 중의 황성분과 질소성분에 의한 N₂O생

성은 무시할 수 있다. 또한, 엔진의 윤활유 소비율을 고려했을 때 윤활유 중에 함유하고 있을지 모르는 황성분과 질소성분에 의한 생성 또한 무시 가능할 것으로 판단된다.

Table 2. Fuel properties for experiment

Item	Unit	Light oil
Density(15°C)	g/cm ³	0.8359
Flash point	°C	76
Viscosity	mm ² /sec	3.554
Pour point	°C	-17.5
Ash	mass %	-
C	mass %	85.84
H	mass %	13.85
N	mass ppm	5 (limit)
O	mass %	< 2.5 (0.7)
S	mass ppm	6.8
Calorific value	MJ/kg	45.84

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 시험엔진에 공급되는 흡입가스의 SO₂농도를 변경하기 위해 질소희석 0.499% SO₂ 표준가스를 사용하여 0, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 25.5 L/min를 흘려보내 혼합흡기 중의 SO₂농도를 조정하였다. 또한, 연료소비량은 전자식 저울을 사용하여 약 10분간에 소비된 연료무게를 측정하여 g/kWh의 단위로 환산하였다.

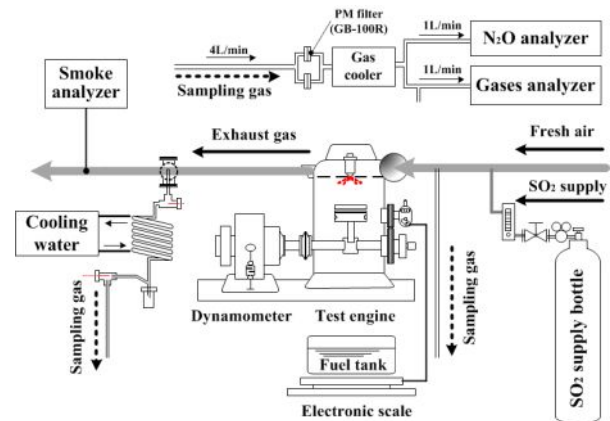


Fig. 2. Schematic diagram of exhaust gas sampling.

모든 샘플 배기가스는 연소실의 배기구로부터 약 3m의 배기관 중심에서 채취하였는데 연소가스에 직접적으로 접촉하는 채취관은 배기가스의 온도에 의한 고온 촉매작용으로 샘플가스가 변형될 수 있기 때문에 6mm의 SUS316을 사용하였으며, 채취관 다음에는 코일형 이중관 열교환기를 설

치하여 수증기의 제거와 가스들 간의 상호반응을 방지하였다. 또한, 전처리장치(Gas Cooler) 입구에는 0.3 μm의 입자상 물질을 99.99% 포집 가능한 두 개의 필터(GB-100R, Advantec)를 설치하여 샘플가스 중의 입자상 물질로 인한 측정장치의 오염과 입자간섭을 회피하였고, 전처리장치에서는 가스를 4°C 이하로 냉각하여 건조된 가스로 전환하였으며, 전처리장치 가스출구에서는 관을 분기하여 적외선 분석법(NDIR)을 사용하는 5성분 동시 측정기(Thermo Scientific, Model 60i)와 N₂O 전용분석기(Thermo Scientific, Model 46C)에 건조 샘플링 가스를 공급하였다. 이때 필터에 공급되는 가스유량은 4 L/min이며 각각의 측정기에 공급되는 가스유량은 1 L/min이다. 또한, 각각의 측정기는 표준가스를 사용하여 0점 보정, Span보정, 가스들 간의 보간성 검사를 시행한 후 측정을 실시하였는데, N₂O 전용측정기에서 9.901%의 CO₂표준가스를 사용하였을 경우 0.48 ppm이, 1483 ppm의 CO표준가스에 대하여 -0.4 ppm의 간섭이 확인되어 각각의 CO₂, CO 실험결과들에 해당하는 N₂O 간섭치를 보정하였다.

엔진흡입 혼합가스는 신기와 SO₂표준가스가 완전히 혼합된 가스를 엔진흡입구 직전에서 채취하였는데, 배기가스의 채취 및 분석방법과 동일하지만 온도에 의한 샘플가스간의 상호반응이 없기 때문에 이중관 열교환기는 사용하지 않았다. 또한, 스모크 농도는 광 반사식 스모크메터(Sokken사, GSM-3)를 사용하여 반사율을 측정하였고, 측정지점은 배기의 측정지점으로부터 약 1 m 하류이다.

3. 실험 결과

흡기 중의 SO₂가 N₂O생성에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위해서는 흡기와 배기조성을 정량적으로 파악할 필요가 있으므로, 본 연구에서는 IMO의 Technical code와 JIS 8008의 탄소 밸런스법(Carbon Balance Method)을 사용하여 각각의 농도로부터 mg/kWh 또는 g/kWh로 변환하였다.

식(10)에 의한 N₂O배출률에 대하여 조사하기 위해서 먼저 흡기와 배기의 SO₂변화율에 대하여 검토하였는데, Fig. 3에 SO₂ 표준가스를 0 L/min부터 22.5 L/min까지의 유량으로 디젤엔진에 공급하였을 때의 SO₂ 흡·배기율에 대하여 나타내었다. 진술하였듯이 연료와 윤활유로부터 공급되는 황성분은 무시할 수 있으므로 SO₂배기율은 오직 흡입구로부터 공급되는 SO₂의 공급률에 의존하여 변화한다.

그래프로부터 흡기에 SO₂공급률을 증가시킬수록 SO₂배출률 또한 증가하여 각각의 유량에서 SO₂흡입률과 SO₂배출률의 차이는 0~0.03 g/kWh로 거의 일치하고 있음을 알 수 있는데, 흡기 중으로 공급하는 SO₂는 디젤엔진의 고온·고압의 분위기를 거쳐도 소실되거나 다른 물질로 변화하지 않은 것으

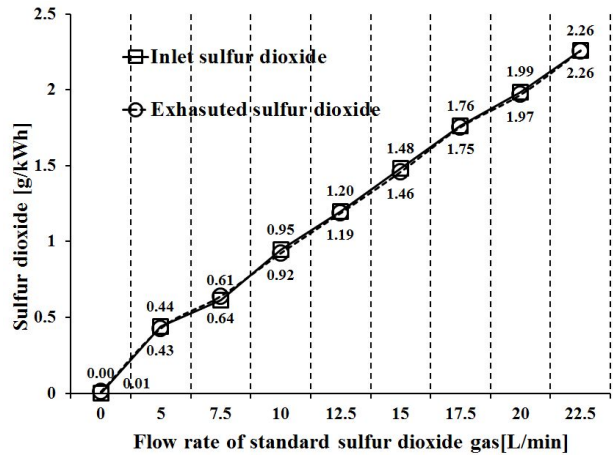


Fig. 3. Sulfur dioxide rate in inlet gas and exhaust gas according as increasing of the amount of standard sulfur dioxide gas (0.499%, dilution gas : nitrogen).

로 사료된다. 즉 SO에서 SO₂로의 변화와 SO₂에서 SO₃로의 산화는 인정되지만 역반응은 일어나기 어렵고, 흡기로부터 유입된 SO₂가스는 안정하여 연소실 내부의 고온·고압의 분위기를 거쳐도 SO₃로 산화되지 않기 때문에 결국 흡기로 공급된 SO₂는 배기로 그대로 배출된 것으로 판단된다. 그러므로 디젤엔진에서 황성분이 많이 함유된 저급 중질유를 사용하면서 EGR시스템을 적용할 경우에는 순환가스 중의 SO₂농도가 증가되고, EGR율을 증가시킬수록 흡기로 유입되는 SO₂의 농도는 더욱더 증가할 것으로 판단되므로, 장기간동안 EGR시스템을 사용할 경우에는 실린더 내부에서의 고온부식이나 순환가스가 통과하는 부분에서의 저온부식 발생이 염려되어 습식이나 건식 스크러버와 같이 황화합물을 제거하는 장치의 설치가 필수적이라고 생각된다.

Fig. 4는 흡기 중의 SO₂표준가스의 유량증가가 CO배출률에 미치는 영향에 대하여 나타내었다. 표준가스의 유량을 증가시킬수록 CO배출률은 조금씩 증가하고 있는데, 표준가스의 희석성분인 질소량의 증가가 원인으로 생각된다. CO₂의 생성과정은 연료 중의 탄소성분이 열에 의해 분쇄되어 CO를 형성하는 과정(C + 1/2O₂ → CO)과, CO가 산소와 반응하여 CO₂를 형성하는 과정(CO + 1/2O₂ → CO₂, CO + OH → CO₂ + H)으로 나눌 수 있는데(Turns, 2005), 연소온도가 낮거나 공급되는 산소가 충분하지 못하면 CO₂까지의 완결된 반응을 하지 못하고 CO로써 배출되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 본 실험에서도 흘러보내는 질소희석 표준가스량을 증가시킬수록 엔진으로 공급되는 질소비율이 증가하고 산소비율은 상대적으로 감소하므로 연료의 열분해로써 생성된 CO가 CO₂까지의 완결된 반응을 하지 못한 채로 배출되어 결국 CO배출률이 다소 상승한 것으로 판단된다.

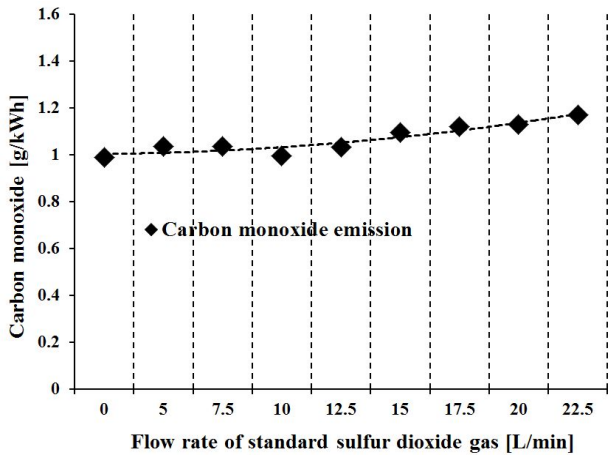


Fig. 4. Carbon monoxide emission according as increasing of the amount of standard sulfur dioxide gas (0.499%, dilution gas : nitrogen).

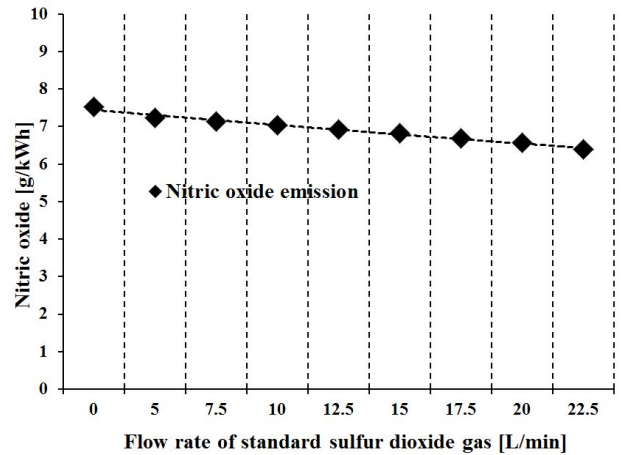


Fig. 5. Nitric oxide emission according as increasing of the amount of standard sulfur dioxide gas (0.499%, dilution gas : nitrogen).

또한, CO배출률의 상승이 N₂O배출률 변화에 영향을 미칠 수 있는데 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 CO배출률 증가폭이 미소하고, 현재까지 알려진 바로는 산화촉매나 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같이 특수한 장치를 부착하지 않는 이상 CO의 증가는 N₂O를 감소시킨다고 보고되고 있어(Kalff et al., 1972) Fig. 6에서 거론될 N₂O배출률의 증가와는 무관하다고 판단된다.

Fig. 5는 흡기 중에 SO₂ 표준가스 유량증가에 따른 NO배출변화에 대하여 나타내었다. SO₂ 표준가스의 유량을 증가시킬수록 NO배출률은 감소하였는데, 이 또한 CO배출률의 감소와 같은 이유로 표준가스 유량증가에 따른 흡입산소 농도의 감소로 생각된다. 즉 연료의 연소 중에 발생하는 NO_x의 대부분은 공기 중의 질소와 산소의 열적반응으로 생성되는 Thermal-NO_x로서 연료 중의 질소로부터 발생하는 연료기원(Fuel)NO_x보다 압도적으로 많기 때문에 공급되는 산소의 감소는 연소실과 연소화염의 온도를 낮추어 NO_x의 생성을 억제한 것으로 생각된다.

디젤엔진에서 이러한 산소감소로 인한 연소화염의 냉각효과를 이용한 NO_x 저감방법이 EGR시스템의 적용인데, 흡입산소의 일부를 순환가스 중에 포함된 CO₂로 치환함으로써 디젤엔진으로 흡입되는 산소의 비율을 낮추는 방법으로, 순환가스의 양을 증가시킬수록 CO₂로 치환되는 비율이 높아져 NO_x배출률은 급격히 낮아진다. 또한, 최근에는 이러한 EGR 시스템을 적용하고 물 에멀전 연료를 동시에 사용함으로써 IMO의 NO_x배출기준에 만족하는 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만 지나친 화염의 냉각은 Fig. 4에서 보이는 것처럼 CO의 증가, 열효율의 감소로 인한 연비의 상승, 매연의 증가로 나타날 수 있기 때문에 주의가 필요할 것이다.

식(10)에서 보이는 바와 같이 NO배출률의 변동은 N₂O배출에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Yoo, 2014c). 하지만 표준가스를 흘려보내지 않았을 경우와 22.5 L/min를 흘려보냈을 경우를 비교하였을 때 감소된 N₂O배출률은 1 g/kWh이내로써 총량에 비교하여 적은 수준임으로 N₂O배출률 감소에는 미치지 못하고 있다고 판단되지만, EGR시스템의 사용과 같이 NO배출률을 큰 폭으로 저감시키는 시스템에서는 N₂O 또한 저감시킬 가능성이 있다.

Fig. 6에는 흡기 중의 SO₂흡입률에 따른 N₂O에 대하여 나타내었는데, Fig. 3의 SO₂의 공급량 증가에 따른 SO₂배기율 증가와 유사한 배출곡선을 갖고 있음을 알 수 있다. 식(10)에서 SO₂와 NO의 반응은 2:1의 몰비율로 반응하는데 진술하였듯이 연소실 내부에서는 SO₂가 변화하지 않기 때문에 흡기로부터 공급된 SO₂는 연소 시에 생성된 NO와의 반응으로서 N₂O가 생성됐고, Fig. 5에서처럼 N₂O가 생성되기 위한 NO는 충분이 많은 반면 SO₂는 충분하지 않아 결국 SO₂배출률을 따라 N₂O배출률이 변화하였다고 생각된다.

하지만, 식(10)의 NO와 SO₂의 반응에 의해 N₂O배출률이 증가하였다면 SO₂가 감소하여야 하지만 Fig. 3에서 검토하였듯이 SO₂의 흡입률과 배출률은 변화하지 않고 있다. 이것은 연소실 내부에서 NO와 SO₂의 체류시간이 짧기 때문에 극히 일부분의 SO₂만이 반응에 소요되었기 때문으로 사료되지만, 뚜렷한 원인규명을 위해서는 상세한 반응과정을 포함한 포괄적인 반응 동역학적 해석이 필요하다고 생각된다.

이상으로부터 Yoo(Yoo et al., 2013)가 언급한 연료 중의 황 성분 농도증가와 N₂O배출률 증가의 관계뿐만 아니라, Fig. 6 으로부터 흡기 중의 황산화물의 증가 또한 N₂O배출에 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 3에서 볼 수

있듯이 흡·배기의 SO₂공급률과 배출률이 거의 같고 Fig. 6에서 공급률을 증가시킬수록 N₂O배출률은 증가하였으며, N₂O의 열적 분해온도가 1200K임을 감안하였을 때 연료 중의 황성분은 연소 도중에 N₂O를 직접적으로 생성하기보다 연소로 인해 SO₂로 산화된 다음 N₂O를 생성시킬 가능성이 높다고 하겠다.

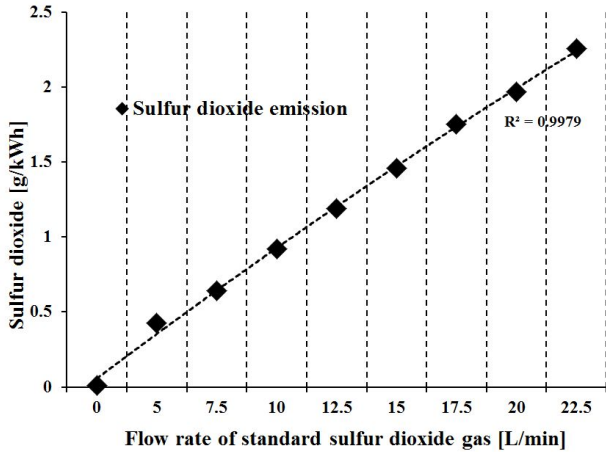


Fig. 6. Nitrous oxide emission according as increasing of the amount of standard sulfur dioxide gas (0.499 %, dilution gas : nitrogen).

4. 결 론

본 실험에서는 직접분사식 고속 디젤엔진에 있어서 N₂O의 생성에 대하여 규명하기 위하여 황성분을 거의 포함하지 않는 경유를 사용하고 흡기에 SO₂를 직접 공급함으로써 흡기 SO₂공급률이 N₂O배출률에 미치는 영향에 대하여 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 황성분을 함유하지 않는 연료는 SO₂와 N₂O를 발생시키지 않았다.
- (2) 흡기에 SO₂공급률을 증가시킬수록 SO₂배출률 또한 증가하여 SO₂의 공급률과 배기율의 큰 차이는 확인할 수 없었다.
- (3) 흡기에 SO₂공급률을 증가시킬수록 N₂O배출률 또한 증가하였는데, N₂O는 흡기의 SO₂와 연소로 인해 생성된 NO와의 반응에 의해 생성되었다.
- (4) 흡·배기의 SO₂공급률과 배출률이 같았고 흡기 SO₂공급률을 증가시킬수록 N₂O배출률은 증가하였으며, N₂O의 열적 분해온도가 1200K임을 감안하였을 때, 고 농도의 황성분을 함유한 연료의 연소는 연소 도중에 N₂O를 직접적으로 생성하기보다 연소로 인해 SO₂로 산화된 다음 N₂O를 생성시킬 가능성이 높다.

References

- [1] IMO(2011), Guidelines for Calculation of Reference Lines for Use with the Energy Efficiency Design Index (EEDI), International Maritime Organization, pp. 1-11.
- [2] IPCC(2007), Climate Change 2007 Synthesis Report, pp. 1-52.
- [3] Ravishankara, A. R., J. S. Daniel and R. W. Portmann(2009), Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century, Science, Vol. 326, No. 5949, pp. 123-125.
- [4] Glarborg, P., J. E. Johnsson and D. J. Kim(1994), Kinetic of Homogeneous Nitrous Oxide Decomposition, Journal of Combustion and Flame, Vol. 99, Issues 3-4, pp. 523-532.
- [5] Yoo, D. H.(2014a), Effect of Fuel Component on Nitrous Oxide Emission Characteristics in Diesel engine, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 1045-1050.
- [6] Ots, A.(2005), Formation and Emission of Compounds Affecting Environment, Oil Shale, Vol. 22, No. 4, pp. 499-535.
- [7] Yoo, D. H., Y. Nitta, M. Ikame, M. Hayashi, H. Fujita and J. K. Lim(2012), Exhaust Characteristics of Nitrous Oxide from Marine Engine, Proceeding of OCEANS'12-Yeosu, pp. 1-6.
- [8] Yoo, D. H., M. Hayashi, Y. Nitta and H. Fujita(2013), Effects of Engine Operating Conditions on Nitrous Oxide Emission Characteristics of Ship, The Japan Institute of Marine Engineering, Vol. 48, No. 5, pp. 692-698.
- [9] Yoo, D. H.(2014b), Investigation on Emission Characteristics of Nitrous Oxide from Marine Diesel Engine, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 1051-1056.
- [10] Turns, S. R.(2005), An Introduction to Combustion, McGRAW-HILL, pp. 160-161.
- [11] Kalf, P. J. and C. Th J. Alkemade(1972), Characteristics of Premixed Laminar CO/N₂O Flames, Combustion and Flame, Vol. 19, Issue-2, pp. 257-265.
- [12] Yoo, D. H.(2014c), Effect of Fuel Injection Timing on Nitrous Oxide Emission from Diesel Engine, Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 106-112.

Received : 2015. 02. 11.

Revised : 2015. 04. 01.

Accepted : 2015. 04. 27.