

디젤엔진에 있어서 흡기 중에 SO₂혼입이 연소 및 배기배출물 특성에 미치는 영향

Effects of SO₂ Mixture in Inlet Air on Combustion and Exhaust Emission Characteristic in diesel engine

유동훈*†

Dong-Hoon Yoo*†

(Received 20 January 2015, Revision received 27 February 2015, Accepted 02 March 2015)

Abstract: Marine diesel engines with high thermal efficiency and fuel diversity used for propulsive power have been taking charge of important position on marine transport. However, marine environment has recently focused on emissions such as nitrogen oxide and sulfur oxide which is generated from combustion of low grade fuels. EGR(Exhaust gas recirculation) system is one of effective methods to reduce the nitrogen oxide emission from marine diesel engines. In general, it is considered that recirculating gas influences fuel combustion and emissions in diesel engines. However, along with positive effects of EGR, the EGR system using fuels of including high sulfur concentration should be considered about re-combustion and activation of sulfur dioxide in recirculating gas. Therefore, in experimental study, an author investigates effects of sulfur dioxide mixture concentration in intake air on combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection diesel engine. In results, change of sulfur dioxide concentrations in intake air had negligible impact on combustion chamber pressure, rate of heat release and emissions compared with effects of oxygen decreasing and carbon dioxide increasing of EGR.

Key Words : Exhaust Gas Recirculation, Intake Air, Sulfur Dioxide, Emission

1. 서 론

선박용 디젤엔진은 높은 열효율과 사용연료의 다양성 때문에 해상운송 원동기로서 중요한 역할을 담당하고 있다. 하지만 선박에서의 배기배출물에 대한 세계적인 규제가 시행 중이거나 예정되어 있어서 점차적으로 강화되고 있는데, 대표적으로 질소산화물(NOx)에 대한 규제가 2005년의 1차,

2011년의 2차 규제에 이어 2016년부터 3차 규제가 시행 예정에 있다¹⁾.

이러한 NOx 3차 규제에 대한 대처방안 중에 하나로 배기가스 재순환 (EGR, Exhaust Gas Recirculation)방법이 검토^{2,3)}되고 있는데, NOx저감을 위한 가장 쉽고 효과적인 방법 중에 하나로써 실린더에 유입되는 신기 일부를 배기로 치환하여 이산화탄소(CO₂)와 수분의 높은 열용량으로 연소

*† 유동훈(교신저자) : 독립해상법인 해상기술안전연구소
E-mail : komorebi023@gmail.com, Tel : +81-422-3560

*† Dong-Hoon Yoo(corresponding author) : Environment / Power and Energy Department, National Maritime Research Institute.
E-mail : komorebi023@gmail.com, Tel : +81-422-3560

온도를 낮추고 흡기 중의 산소농도를 낮추어 열에 의한 NOx생성(Thermal-NOx)을 억제하는 방법이다. 이러한 EGR을 수행하는 방법에는 외부 EGR(External EGR)과 내부EGR(Internal EGR)로 구분할 수 있는데, 외부EGR은 순환가스 온도에 따라 고온EGR(Hot-EGR)과 냉각EGR(Cooled-EGR)로, 재순환가스의 압력을 기준으로 고압EGR(HPL EGR, High Pressure Loop EGR)과 저압EGR(LPL EGR, Low Pressure Loop EGR)로 분류할 수 있다⁴⁾. 한편 내부EGR은 엔진의 흡기행정에서 배기밸브를 열어 매니폴드의 배기를 실린더에 유입시키는 방법, 배기행정에서 흡기밸브를 열어 흡기 매니폴드에 배기가스를 역류시켰다가 흡기행정에서 연소실로 다시 흡입시키는 방법, 흡배기 밸브의 오버랩 기간을 적절하게 조절하여 배기가스 일부를 연소실에 잔류시키는 방법이 있다⁵⁾. Fig. 1에는 EGR방법의 구분도를 나타낸다.

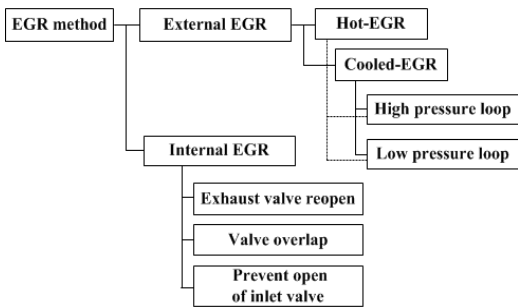


Fig. 1 Classification of EGR methods for marine diesel engine

현재 선박의 사용연료는 IMO(Internal Maritime Organization)에서 연료 황성분 농도를 3.5%로 규정하고 있어 저가인 고유황 연료를 사용하고 있다. 이러한 연료를 사용할 경우에 발생하는 배기 중의 황화합물(SOx)은 이산화황(SO₂)이 대부분을 차지하는데, 연료 중의 황함유율에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있어⁶⁾ 고유황 연료를 사용하는 EGR시스템은 SO₂에 의한 부식이나 연소로 인한 재활성화가 문제화될 수 있다⁷⁾. 특히, 배기의 일부를 실린더 내부에 잔류 또는 역류시키는 내부EGR과 엔진의 배기구와 흡입구를 직접 연결하

는 고온EGR은 EGR율에 비례하여 순환가스 중의 SO₂농도가 상승하게 되므로 SO₂의 재연소 여부는 연소특성과 배기배출물 특성 변화에 중요한 항목이 될 수 있다.

연소 중에 발생하는 이산화탄소와 같은 준 불활성가스는 한번 생성되면 거의 화학반응에 관여하지 않는 반면, 연료과다조건의 화염에 SO₂를 첨가하면 일산화황(SO)이나 황화수소(H₂S)로 환원되거나 H원자와 SO₂반응에 의해 HOSO, HSO₂, SO+OH등으로 재활성화된다는 보고가 있어⁸⁾ 순환되는 SO₂가 연소에 관여할 가능성을 배제할 수 없다.

그러므로 본 실험에서는 직접분사식 디젤엔진에서 EGR시스템을 사용하지 않고 흡기 측에 SO₂만을 직접 공급하여 SO₂의 연소거동에 대해 살펴 보았고, 저유황 연료를 사용한 EGR시스템의 흡기 측에 SO₂를 직접 공급하여 고유황 연료를 사용하였을 때의 순환가스를 재현함으로써 SO₂ 흡기율 변화에 따른 엔진성능과 배기배출물 특성변화에 대하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 엔진은 AVL사의 단기통, 무과급, 직접 분사식 디젤엔진으로써 Table 1에 엔진사양을 나타내었다.

Table 1 Test engine specification

Item	Test Engine (AVL)
Stroke	4
Cylinder	1
Cooling Type	Water
Injection	Direct injection
Bore	112 mm
Stroke length	110 mm
Output	12 kW / 2400 rpm
Compression ratio	18.5

모든 실험의 엔진 운전조건은 100% 부하를 49 N·m/1500 rpm로 설정하여 선박부하 3승 곡선의 75%부하(41 N·m/1362 rpm)만을 실험대상으로 하

였다.

또한, 분사시기(BTDC 8°), 냉각수 온도(58~60°C), 윤활유 온도(65~67°C), 흡입구 온도(10~13°C) 등의 엔진성능 및 배기배출물 특성에 영향을 미칠 수 있는 조건들은 모두 같은 조건에서 실시하였고, 모든 실험에서 부하변동율은 1%이하이다.

Table 2에는 본 실험에 사용된 연료유의 사양을 나타내었다. 표에서 보이는 바와 같이 연료 중의 황성분 농도는 6.8 ppm으로 연료로부터 생성되는 SO₂는 무시 가능할 것으로 판단된다.

Table 2 Fuel properties

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)	-
Carbon	% (mass)	85.84
Hydrogen	% (mass)	13.85
Nitrogen	ppm (mass)	0.5 (limit)
Oxygen	% (mass)	0.7
Sulfur	ppm (mass)	6.8
Calorific value	MJ/kg	45.84

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다. EGR을 수행할 경우 엔진으로부터 발생한 배출가스는 가스송풍기(Gas Blower)의 흡입력에 의해 가스냉각기, 드레인 체임버를 거쳐 새로운 흡입공기와 혼합된다. 이때 신기와 섞이는 순환가스의 양은 송풍기 입·출구의 우회밸브와 가스송풍기 후단에 설치한 전자식 EGR 밸브에 의해 제어된다. 또한, 엔진으로 공급되는 혼합가스는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 신기와 순환가스가 혼합된 하류에 질소희석 0.499% SO₂표준가스를 0~20 L/min 흘려보내 엔진에 SO₂를 공급하였고, EGR을 수행하지 않은 실험에서는 EGR냉각기의 입구밸브와 가스 송풍기 상하단의 밸브를 닫아 순환가스를 차단한 상태에서 SO₂만을 공급하였다.

본 실험의 EGR율은 20%로 고정한 상태에서 이루어졌는데, 엔진흡기와 배기의 CO₂ 농도의 비를 사용하였다.

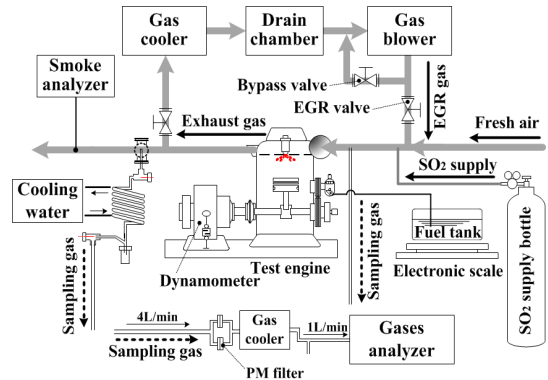


Fig. 2 Schematic diagram of exhaust gas sampling

모든 표본 배기가스는 연소실의 배기구로부터 약 3 m의 배기관 중심에서 채취하였는데, 연소가스에 직접 접촉하는 채취관은 재질이 SUS316인 6 mm관을 사용하여 고온 촉매작용에 의해 샘플가스가 변형되는 것을 방지하였고, 채취관 다음에는 재질이 SUS314인 코일형 이중관 열교환기를 설치하여 수증기의 제거와 가스들 간의 상호반응을 방지하였다. 또한 전처리장치(Gas Cooler)에서는 샘플링 가스를 4°C 이하로 냉각하여 건조가스로 전환하였으며, 전처리장치의 출구에는 적외선 분석법(NDIR, Non-Dispersive Infra-Red)을 사용하는 5성분 동시 측정기(Thermo Scientific, Model 60i)를 표준가스를 사용하여, 0점 보정, Span보정, 가스들 간의 보간성 검사를 시행한 후 측정을 시행하였다. 엔진흡입 혼합가스는 신기, 순환가스, SO₂표준가스가 완전히 혼합된 가스를 엔진흡입구 직전에서 채취하였는데, 배기가스의 채취방법과 동일하지만 온도에 의한 표본가스들의 상호반응이 없기 때문에 이중관 열교환기는 사용하지 않았다. 또한, 스모크 농도는 광 반사식 스모크미터(Sokken사, GSM-3)를 사용하였고 배출가스 측정지점으로부터 약 1 m 하류에서 채취하였다.

엔진의 혼합흡기와 배기가스의 농도는 IMO의 Technical code와 JIS 8008의 탄소 밸런스법(Carbon Balance Method)을 사용하여 mg/kWh 또는 g/kWh로 변환하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 SO₂ 흡입을 변화가 엔진성능에 미치는 영향

본 연구는 EGR을 수행하고 SO₂표준가스를 신기와 혼합하여 공급하였기 때문에 이로 인한 흡기의 비열비 변화가 발생하였으므로 열발생량 계산에는 흡기의 조성분석을 통하여 질소, 산소, 이산화탄소를 대상으로 비열비를 조정하였고, 대략적인 디젤유 자착화 온도에서의 비열비를 사용하였으며, 연소 중의 비열비 변화는 고려하지 않았다. 또한, CO, SO₂, NO등의 미량성분은 고려하지 않았다.

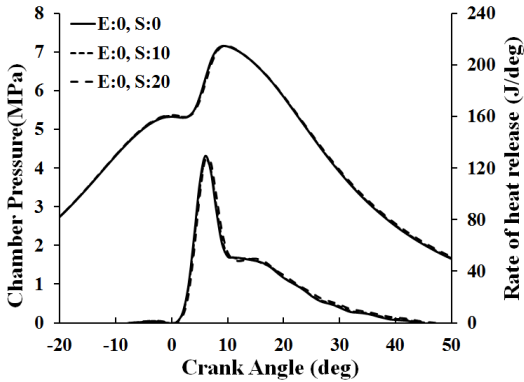


Fig. 3 Change of combustion chamber pressure and rate of heat release for incremental SO₂ flow rate in intake air with non-EGR

Fig. 3에는 EGR시스템을 사용하지 않고 흡기 중에 SO₂표준가스만을 혼합시켰을 경우의 연소실 압력과 열발생률을 표시하였다. 항목 중에 E는 EGR율을, S는 흘려보낸 SO₂의 유량(L/min)을 나타낸다. 그래프로부터 SO₂유량을 증가시킬수록 미소하게 연소실압력이 하락하고 착화 지연 현상이 증가하였는데, Fig. 6에서 거론할 SO₂흡기율과 배출율이 변화가 없기 때문에 SO₂표준가스 중의 질소가 엔진흡기로 공급됨에 따라 상대적으로 산소 농도가 감소하여 나타난 현상으로, 흡입된 SO₂의 영향은 적은 것으로 생각된다.

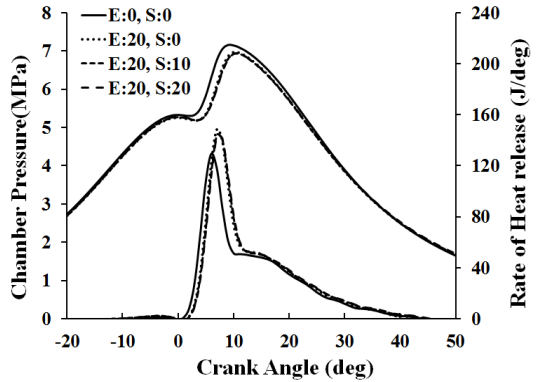


Fig. 4 Change of combustion chamber pressure and rate of heat release for incremental SO₂ flow rate in intake air with EGR 20%

Fig. 4는 20%의 EGR을 수행하면서 흡기에 SO₂를 흘려보냈을 경우의 연소실압력과 열발생률을 나타낸다. Table 2에서 나타내었듯이 연료 중의 황성분은 거의 존재하지 않으므로 순환가스 중의 SO₂ 또한 거의 존재하지 않고, 흡기 중의 SO₂농도는 표준가스로부터 공급된 유량에 의존한다.

EGR을 수행하였을 경우의 연소실압력은 그렇지 않았을 경우보다 착화시기가 늦어지고 최고 연소실압력이 낮아졌음을 알 수 있는데, CO₂의 혼합과 흡입산소의 감소로 인한 연료의 착화성과 연소성 감소로 생각된다. 열발생률 선도에서는 EGR을 수행하면 착화시기는 늦어지는 반면 최고 열발생률은 증가하고 있는 것을 알 수 있는데, 착화 지연기간의 증가로 인하여 증발되는 연료가 늘어나 결국 자착화 시에 큰 화염을 형성하였을 것으로 판단된다. 또한, Fig. 3의 SO₂를 증가시켰을 경우와 마찬가지로 흘려보내는 SO₂양을 증가시키도 표준가스의 질소혼입으로 판단되는 미소한 변화만이 발생하고 커다란 변화는 확인할 수 없었다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 4로부터 디젤엔진에서 흡입구에 공급되는 SO₂의 증가는 연소실의 압력과 열발생률에 크게 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 다만 안전상의 문제로 본 연구에서 실시된 흡입구 최대 SO₂농도는 120 ppm으로써, 연료 중의 유황 함유율 3.5%, EGR을 20%의 실제 시스템에서 실측농도인 약220 ppm보다 약간 낮은 범위

에서 실시되었다. 하지만 Fig. 3와 Fig. 4의 그래프로부터 예상해 볼 때, EGR을 20% 상당의 SO₂를 공급하여도 SO₂로 인한 연소실압력과 열발생률에는 그다지 변화하지 않을 것으로 판단된다.

3.2 SO₂ 흡입을 변화가 배기배출물에 미치는 영향

Fig. 5에는 EGR을 수행하지 않고 SO₂표준가스를 흘려보냈을 경우와 EGR을 수행하면서 SO₂표준가스를 흘려보냈을 경우의 배기배출물 중에 NO 배출율과 스모크 농도를 나타낸다.

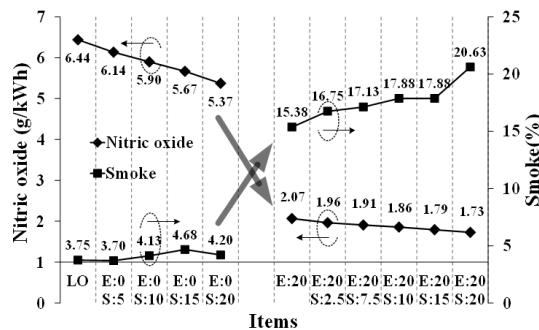


Fig. 5 Nitric oxide emission and smoke rate for incremental SO₂ flow rate in intake air with non-EGR or EGR 20%

NO배출율은 EGR을 수행하지 않았을 때보다 수행했을 경우가 대폭 저감되었고, 스모크 농도는 NO배출율과 반대의 결과를 얻었다. 일반적으로 디젤엔진에서 배출되는 NO_x와 스모크는 Trade-off 관계를 갖는 것으로 알려져 있는데, 연소성이 하락할수록 화염온도는 감소하므로 공기 중의 산소와 질소에 의한 Thermal-NO_x가 감소하는 반면 불완전 연소 시에 발생하는 스모크는 증가한다. 본 실험에서도 EGR을 수행하였을 경우 CO₂의 증가로 인한 연소실 온도하락과 공급산소의 감소로 인하여 NO발생률은 감소하였고 스모크 발생률은 증가한 것으로 사료된다. 또한, 동일 EGR조건에서 SO₂표준가스의 유량증가는 NO_x를 감소시키고 스모크를 증가시켰는데, Fig. 3과 Fig. 4에서 고찰하였던 것과 같이 SO₂표준가스 중의 질소가 흡입

구에 혼입됨에 따라 산소농도가 저하하여 나타난 현상으로 사료된다. 실제로 EGR을 수행하지 않고 SO₂표준가스를 20 L/min 흘려보냈을 경우 흡입구의 산소 농도는 21.0%(v/v)에서 20.0%(v/v)로 1% 하락하였다.

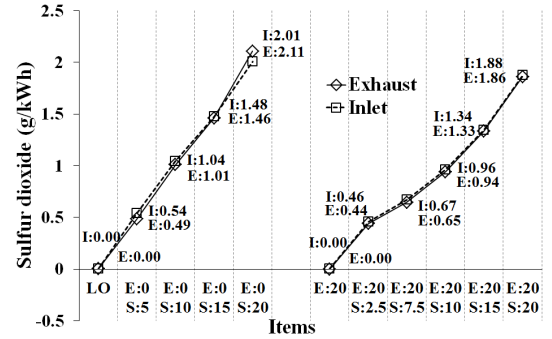


Fig. 6 Sulfur dioxide rate in intake mixture and exhaust gas for incremental SO₂ flow rate with non-EGR or EGR 20%

Fig. 6은 EGR을 수행하였을 경우와 그렇지 않을 경우의 SO₂공급을 증가에 따른 SO₂배출을 변화에 대하여 나타낸다. 그래프로부터 EGR을 수행하였을 경우와 그렇지 않은 경우 모두 SO₂공급율과 배출율은 크게 변화하지 않았기 때문에 디젤엔진에 공급되는 SO₂는 연료연소 중에도 변화하지 않고 그대로 배출하는 것으로 사료된다.

그러므로 이상의 결과로부터 디젤엔진에서 내부EGR이나 고온EGR을 수행함에 있어서 흡기 중의 SO₂성분에 의한 연소실 압력변화나 열발생률 변화는 CO₂의 증가나 산소비율 감소의 영향에 비하여 무시될 수 있고, 혼입 SO₂가 다른 배기배출물에 미치는 영향 또한 무시 가능할 것으로 사료된다. 또한, 본 실험결과로부터 서론에서 거론하였던 SO₂가 SO나 H₂S로 환원반응하는 경우나 H 원자와 SO₂반응에 의해 HOSO, HSO₂, SO+OH로 변화하는 경우는 연소화염에 직접적으로 SO₂가 첨가된 경우에 발생하지만, EGR시스템과 같이 흡기에 첨가된 SO₂성분은 변화하기 어렵다고 사료된다.

다만 황성분 함유율이 3.5%인 연료를 사용하고

EGR을 20%가 적용된 실험에서 실험종료 후 드레인 체임버에 응축된 액체의 PH검사결과 1~3의 강산이 검출되어, 냉각EGR시스템을 사용할 경우에는 냉각기와 드레인 체임버등과 같이 순환가스가 체류 또는 통과하는 부분에 대한 황화합물 부식대책이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 디젤엔진에 있어서 내부EGR이나 고온EGR을 수행할 때에 우려되는 흡기의 SO₂ 혼입이 엔진성능과 배기배출물 특성변화에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위해 연료 중의 황성분이 거의 존재하지 않는 육상용 디젤유를 사용하고 20%의 EGR율이 적용되거나 그렇지 않은 디젤엔진의 입구 측에 SO₂를 강제적으로 혼입시켜 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) EGR을 수행하였을 경우가 그렇지 않은 경우와 비교하여 착화시기가 늦어지고, 연소실압력은 감소한다.

(2) 흡기 중의 SO₂양의 증가는 연소실압력과 열발생률에 큰 영향을 미치지 않는다.

(3) EGR시스템은 스모크 발생률을 증가시키지만, NO발생률은 큰 폭으로 감소시킨다.

(4) 흡기의 SO₂공급율은 배기의 SO₂배출율과 거의 동일하여 EGR 수행에 의한 흡기 중 SO₂증가가 연소 및 배기배출물 변화에 미치는 영향은 CO₂증가와 산소농도 감소효과보다 매우 작아 무시될 수 있다.

References

1. IMO, 2013, "Comments to the Approval at MEPC 65 of Amendments to the Effective Date of the NOx Tier III Standards", MEPC 66 Report, Vol. 66, No. 1, pp. 1-21.
2. J. H. Park, J. H. Lim and J. K. Yoon, 2011, "A Study on the Engine Performance and Emission Characteristics in a LP EGR System with Electronic Throttle Control", Journal of the

- Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 379-387.
3. D. H. Yoo, 2014, "Influence of Fuel Injection Pattern on Combustion and Emissions Characteristics of Diesel Engine by Using Emulsified Fuel Applied with EGR System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 1064-1069.
4. K. S. Lee, M. Y. Baek and H. B. Park, 2007, "Study on Low Pressure Loop EGR System for Heavy-duty Diesel Engine to Meet EURO-5 NOx Regulation", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 4 pp. 12-17.
5. K. Fumiya, 2011, "NOx Reduction Technology by EGR (Exhaust Gas Recirculation) in Marine Engines", Journal of the Japan Institution of Marine Engineering, Vol. 46, No. 6, pp. 811-816.
6. D. H. Yoo, 2014, "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.
7. Y. Murakami, 2009, "Progress in Elementary Reaction Kinetics of Combustion by Quantum Chemical Methods", Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 51, No. 157, pp. 192-199.
8. M. R. Zachariah and O. M. Smith, 1987, "Experimental and Numerical Studies of Sulfur Chemistry in H₂/O₂/SO₂ Flames" Combustion and Flame. Vol. 69. pp. 125-139.