

## Scrubber를 장착한 EGR 시스템이 디젤기관의 성능특성에 미치는 영향

임 재 근\*

### Effects on Performance Characteristics of Diesel Engine by EGR System with Scrubber

J. K. Lim\*

**Key words** : Exhaust Gas Recirculation(EGR)(배기재순환), Specific Fuel Consumption(SFC)  
(연료소비율), Heat Release Rate(열발생률), Equivalence Ratio(당량비), Lean  
Burn(희박연소)

#### Abstract

The effects of exhaust gas recirculation(EGR) on the characteristics of combustion, exhaust emissions and specific fuel consumption(SFC) are experimentally investigated by four-cylinder, four-cycle and direct injection marine diesel engine.

In order to reduce soot contents in the recirculated exhaust gas to intake system of the engines, a novel diesel soot removal system with a cylinder-type scrubber which has water injector (4 nozzles in 1.0 mm diameter) is specially designed and manufactured for the experimental system.

The obtained results are as follows ; The combustion pressure in cylinder is decreased and ignition is delayed with increasing EGR rate. The accumulated quantity of heat release is slightly decreased and the tendency of heat release rate is not constant.

NO<sub>x</sub> and Soot emissions are decreased by maximum 7% and 540% with scrubber than without scrubber in the range of experimental conditions. Those are increased at the lean burn area with increasing equivalence ratio in the constant value of engine speed and EGR rate. Also, those are decreased with increasing EGR rate in the constant value of engine speed and equivalence ratio.

\* 군산대학교 해양과학대학 기관공학과(원고접수일 : 98년 12월)

## 1. 서 론

디젤기관은 다른 기관에 비하여 사용연료의 범위가 넓고 열효율이 높으며, 출력에 비하여 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량이 적기 때문에 에너지 절약과 지구온난화 억제의 차원에서 바람직한 열기관으로 알려져 있다.

그런데 디젤기관에서는 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(HC), 질소산화물(NOx), 매연(Soot) 등의 대기오염물질이 배출되고 있으므로 환경보존을 위하여 이들의 저감대책이 절실히 요구되고 있다. 이들 중 HC 및 CO의 저감대책은 연료의 완전연소와 관련되어, 출력증가 및 연료소비율 감소 등을 기대할 수 있기에 실용적인 여러가지 처리방법이 개발되고 있으며, 매연도 여과장치를 비롯하여 매연 억제용 연료첨가제 등 여러가지 방법이 추진되고 있다.

그러나 NOx의 저감대책은 일반적으로 출력저하, 연료소비율 증가, HC, CO 및 매연(Soot) 등의 배출물이 증가하기 때문에, NOx를 연소기관에서 배출한 후에 처리하는 실용적인 방법의 개발이 간단하지는 않다.

또한, 최근에는 세계 각국의 해양환경보존에 대한 의식의 확대로 국제해사기구(IMO)<sup>1,2)</sup>에서도 2000년 1월 1일부터 선박기관의 질소산화물을 규제할 예정이다.

질소산화물을 저감시키는 여러 방법들 중에서 배기재순환(EGR)방법이 다른 방법에 비하여 시설이 간단하고 비용이 저렴하며, 효율이 높지만, 배기재순환 가스중의 매연의 증가로 엔진 흡기계통의 오손, 부품의 마모 및 윤활유 열화 등의 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 배기재순환가스중의 매연을 효율적으로 저감시킬 수 있는 매연제거장치(Scrubber)를 설치한 배기재순환(EGR) 시스템에 있어서 EGR시의 연소특성과 질소산화물 및 매연 배출물 특성을 분석·고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 Scrubber 제작 및 성능시험

디젤기관에서 효과적인 EGR을 위해서는 기관

의 배기재순환 가스가 흡기와 혼합되어 기관으로 흡입되기 전에 매연을 저감할 수 있는 장치가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이를 저감할 수 있는 대책으로 Fig. 1과 같은 물분사식 Scrubber를 설계·제작하여 실험에 사용하였다.

Scrubber의 몸체는 원통형으로, 강판제로 제작되었고, Scrubber의 하부내에는 구형필터와 원통형필터로 충전되었으며, 그 상부에는 제습기를 2곳에 설치하여 재순환가스중의 습기를 제거하도록 하였다.

물은 4개의 노즐을 통하여 분무되도록 하여, 송풍기를 설치하지 않으므로 동력손실을 줄일 수 있으면서 배압에 악영향을 미치지 않도록 기존의 Scrubber를 개조 하였다.

기관에서 배출되는 가스를 Scrubber로 통과시키기 전후의 배출가스를 보쉬형(Bosch type) 매연 측정기를 사용하여 매연농도를 측정하였다. 전부하 상태에서 기관 회전수를 1400, 1600, 1800

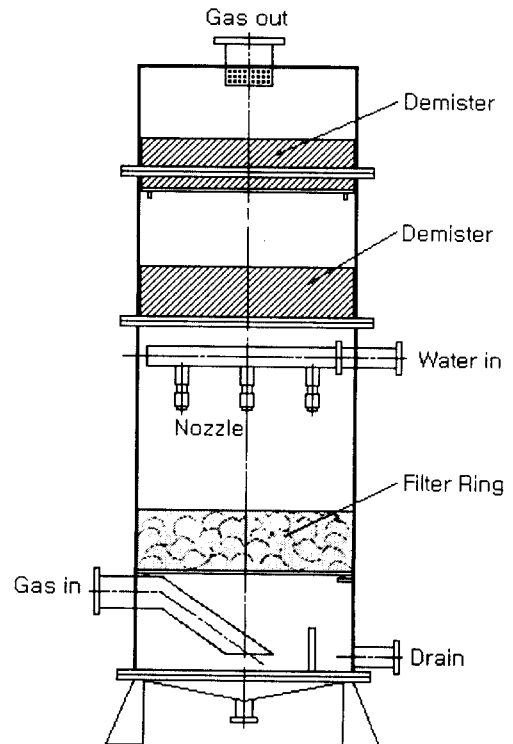


Fig. 1 Assembly of a cylindrical scrubber

Table 1. Results of soot measurement at full load

R P M	Scr. IN (BN)	Scrubber OUT(BN)/ Reducing rate(%)					A V B (%)
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
		kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	
1400	1.9	0.9/ 52.6	0.8/ 57.9	0.9/ 52.6	0.9/ 52.6	0.9/ 52.6	53.7
1600	1.9	0.9/ 52.6	0.9/ 52.6	0.9/ 52.6	0.9/ 52.6	0.9/ 52.6	52.6
1800	2.1	1.1/ 47.6	1.0/ 52.4	1.0/ 52.4	1.1/ 47.6	1.1/ 47.6	49.5
AVG (%)		50.9	54.3	52.5	50.9	50.9	51.9

rpm, 그리고 물 분사 압력을 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 kg/cm<sup>2</sup>로 설정하여 실험을 하였다.

이때 배출가스의 매연 측정 결과는 Table 1과 같으며, 물분사 압력별, 회전수별 조건에서 매연농도를 나타내었는데, 물분사 압력이 1.5 kg/cm<sup>2</sup>일 때 최고 약 54.3% 감소되었고, 평균 51.9%의 감소를 나타냈다.

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치 구성도는 Fig. 2와 같으며, 실험기관은 선박용 기관으로 주요 제원은 Table 2와 같다.

기관의 출력 측정은 와류형 전기동력계를 사용하였고, 연소실의 압력측정을 위하여 압전식(Piezo-electric type) 압력변환기를 첫번째 실린더

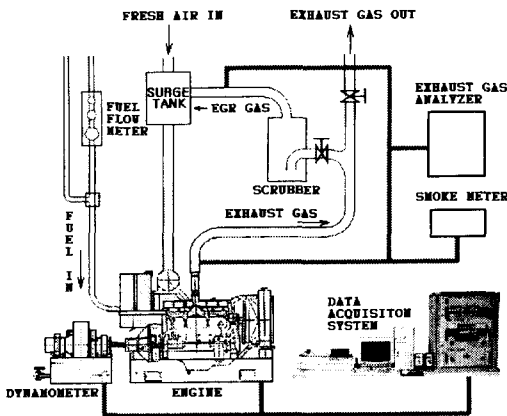


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2. Specification of test engine

Item	Specification
Cylinder number	4
Cooling type	Water-cooled
Cycle	4
Injection type	Direct injection
Bore × Stroke	102 mm × 100 mm
Piston displacement	3,268 cc
Max. output	31.63 KW/1800 rpm
Compression ratio	17 : 1
Fuel injection timing	BTDC 18°
Fire order	1 - 3 - 4 - 2

에 설치하였다. 연료소비율은 용적식 유량계를 사용하였고, 흡입공기량의 계측은 오리피스식 공기 유량계를 사용하였다. 그리고 기관의 흡기측에 서지탱크(Surge tank)를 설치하여 신선한 공기와 재순환가스의 혼합이 잘 이루어지도록 하였다.

배기배출물은 배기분석기(Signal EMIRAK RAG 4873)와 보쉬(Bosch)형 매연측정기를 사용하여 측정하였으며, 디지털 습도계와 온도계를 설치하여 흡입측 공기의 습도와 온도를 측정하였다.

2.3. 실험방법

본 연구에서는 기관회전속도를 1400, 1600 및 1800 rpm의 3가지 경우에 대해서 기관부하를 0%에서 100%까지 25% 간격으로, EGR율을 0%에서 30%까지 5% 간격으로 변화시키면서, 기관회전속도, 기관부하 및 EGR율의 3개 파라미터중 2개를 고정한 상태에서 하나만을 변화시키는 실험을 하였다.

실험을 하는 동안 수냉식 열교환기를 사용하여 기관의 냉각수와 윤활유 온도를 일정하게 유지하였고, 기관의 작동 및 연소 상태를 파악하기 위하여 지압선도, 연소실 압력상승률, 열발생률 등을 검토하였으며, 각 부위(Scrubber 입·출구, 배기관, 냉각수 입·출구, 윤활유, 흡입공기 등)의 온도를 측정하였다.

또 배기분석기와 매연측정기를 “0” 점 조정과 표준가스(측정범위의 80 %인 보정용 가스)농도와 일치하도록 보정실험을 한 후에 각종 배기배출물을 측정하였고, 동력계는 표준중량(5 kg)의 추를

**Table 3 Compositions and properties of diesel oil**

Item	Value
Carbon residue	0.08 wt%
Calorific value	42.8 MJ/kg
Stoichiometric ratio	14.44 kg/kg
Evaporation heat	180 kJ/kg
Cetane number	54
Sulfur	400 ppm
Flash point	49 °C
Viscosity	2.67 cSt @ 40 °C
Water & sediment	0.00 %
Specific gravity	0.8342 @ 4 °C

사용하여 압축·인장 보정실험을 하여 정확한 토크값을 확인한 후 동력을 측정했다.

그리고, EGR율은 일반적으로 많이 사용되고 있는 아래의 식으로 계산하여 사용하였다.

$$\text{EGR율} = \frac{\text{CO}_2(\text{EGR}) - \text{CO}_2(\text{w/o EGR})}{\text{CO}_2(\text{exh})}$$

여기서 CO<sub>2</sub>(EGR)는 EGR시 흡기중의 이산화탄소 농도, CO<sub>2</sub>(w/o EGR)는 EGR을 하지 않았을 경우 흡기중의 이산화탄소 농도, CO<sub>2</sub>(exh)는 EGR시 배기관내의 이산화탄소 농도이다.

Scrubber 물 분사 압력은 가장 효율이 좋은 1.5 kg/cm<sup>2</sup>로 고정하여 본 실험을 하였으며, 실험에 사용된 연료유의 화학적 성분과 물리적 성질은 Table 3과 같다.

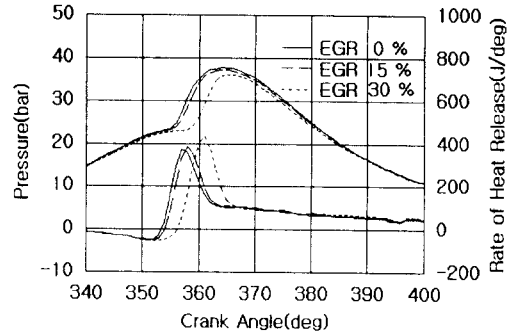
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 연소특성

디젤기관에 있어서 EGR율의 변화가 연소특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각 실험 조건에서 실린더내의 연소압력을 측정하여 열발생률을 계산해서 그래프로 나타낸 것이 Fig.3이다.

본 그림은 기관회전속도 1800rpm과 기관부하 100%에서 EGR율의 증가에 따른 실린더 내 압력 변화 및 열발생률을 비교한 것이다.

內田 등<sup>3)</sup>은 디젤기관에 EGR과 과급을 조합시킨 실험에서 EGR율의 증가에 따라 착화지연기간이 증가된다고 발표하였고, Dürnholz 등<sup>4)</sup>은 흡기온



**Fig. 3 Comparison of cylinder pressure and rate of heat release with EGR at 1800 rpm and load 100%**

도가 일정한 경우에는 EGR율의 증가에 따라 착화지연기간이 증가하나 흡기온도가 일정하지 않으면 착화지연기간은 거의 변화가 없다고 했다.

배 등<sup>5)</sup>도 간접 분사식 무과급 디젤기관에서 EGR의 경우 과부하 영역에서는 착화지연기간이 약간 증가된다고 했다.

본 실험에서도 저부하(25%)에서는 착화지연기간이 약간 증가되나 고부하(100%)에서는 EGR율이 증가할수록 현저하게 착화지연기간이 증가하는 현상이 나타났는데, 그 이유는 EGR시에 실린더내의 혼합가스 온도가 낮아져 상대적으로 산소량이 적기 때문으로 생각된다.

그리고 압력선도에서는 모든 경우에 EGR율이 증가할수록 연소가스 압력이 낮게 나타났는데, 그 이유는 EGR시에 실린더내의 혼합가스(공기+EGR가스)의 열용량이 공기보다 크므로 온도가 낮아져 열팽창율이 상대적으로 적어 압력이 낮아진 것으로 생각된다. 또한, 누적 열발생량은 약간 감소하고 최대 열발생률은 고부하에서는 EGR율이 증가함에 따라 현저히 높아지고, 저부하에서는 약간 낮아지는 경향을 보였는데, 그것은 고부하시에는 착화지연기간이 현저히 길어지고, 많은 연료가 동시에 연소되기 때문에 급격한 연소가 일어나며, 저부하시에는 착화지연기간이 약간 증가하나 연료의 분사량이 적고, 혼합가스가 연소에 미치는 영향이 열발생율을 감소시키는 방향으로 더욱 크게 작용하기 때문으로 생각된다.

### 3.2 연료소비율

Fig. 4는 연료소비율을 조사한 결과로 기관회전수, 부하 및 EGR율의 변화에 따라 나타난 값을 표시한 그림이다.

Walder<sup>6)</sup>는 6기통 직접 분사식과 와류실식 디젤기관을 실험기관으로 평균유효압력과 EGR율을 파라미터로 하여 연료소비량을 고찰했는데, EGR의 증가가 연료소비량에는 큰 영향을 미치지 못했다고 했다.

Nagai 등<sup>7)</sup>은 단기통 소형 디젤기관의 실험에서 EGR율이 증가함에 따라 연료소비율은 약간 증가된다고 했고, Odaka와 Nurusawa 등<sup>8)</sup>은 직접 분사식 대형 디젤기관의 실험에서 흡입산소량이 18%이상인 영역에서는 EGR율의 증가에 따라 연료소비율이 약간 떨어지나 큰 감소는 없었다고 했다.

저자의 연구결과<sup>9,10)</sup>에서도 EGR율의 증가에 따른 연료소비율의 증가 및 감소 경향은 불규칙적이지만, 그 변동율은 아주 작아 EGR을 하지 않을 때의 3% 미만임을 밝힌 바 있다.

금번 Scrubber를 이용한 실험에서 연료소비율의 변동폭은 2.5% 미만으로 조금 더 적게 나타났으며, 변동 경향도 고부하의 높은 EGR율의 영역에서 증가량이 크게 나타났는데, 역시 흡입산소량이 불충분하고 연소가스 온도가 낮기 때문으로 생각된다.

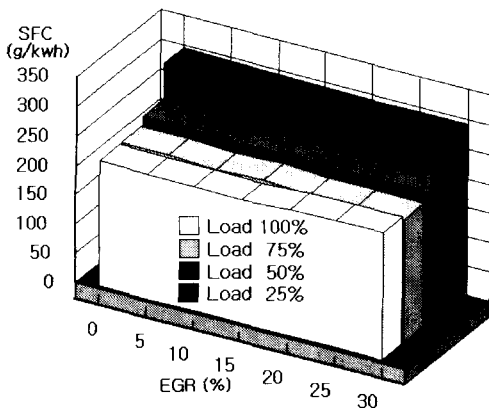


Fig.4 Specific fuel consumption on effect of EGR relative to a given loads at 1800 rpm.

### 3.3 배기 배출물

#### 3.3.1 질소산화물(NOx)

Fig. 5는 각 기관회전속도에 대하여 부하와 EGR율을 변화시킨 경우의 NOx 배출물 특성을 입체적으로 나타낸 것이다.

NOx 배출물은 EGR율의 증가에 따라 현저하게 감소하는데, 특히, 고속 -고부하의 경우에 감소율이 더욱 커서, 기관회전속도 1800 rpm이고 전부하인 경우에는 10%의 EGR율에서 NOx배출물이 33%, 20%의 EGR율에서 NOx 배출물이 64%, 30%의 EGR율에서 NOx 배출물이 87%가 감소되었다.

이 값은 저자 등<sup>9,10)</sup>이 발표한 스크러버를 이용하지 않을 때의 감소율 30%, 60% 및 80% 보다 약간 더 많은 감소량을 나타냈는데, 그 이유는 EGR가스가 스크러버를 통과하면서 온도가 낮아지고, 습도가 증가되었기 때문으로 해석된다.

#### 3.3.2 EGR시 당량비와 NOx의 관계

Fig. 6은 당량비와 NOx 발생량의 관계를 나타낸 그림으로, 기관회전수 1800 rpm의 경우, 부하를 25% 간격으로, EGR율을 0%, 15% 및 30%로 구분하여 표시했다.

日本の“石油産業 活性化 센터”에서 조사한 디젤엔진의 超低 NOx化에 관한 보고서<sup>11)</sup>에서는 디젤기관의 연소에 있어서 당량비가 증가할 수록 NOx 발생량이 거의 직선적으로 증가한다고 했다.

본 실험 결과 1800 rpm에서는 EGR율 30%의 경우 부하 100%에서만 과농연소영역이고 그 외는

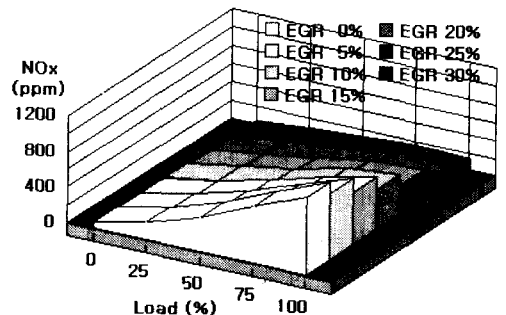


Fig. 5 NOx emission characteristics on effect of EGR relative to engine loads at 1800 rpm.

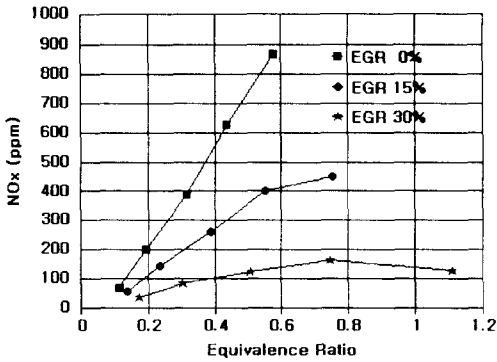


Fig. 6 NOx emission characteristics on effect of EGR relative to equivalence ratio at 1800 rpm.

회박연소영역을 알 수 있으며, EGR 0%에서는 당량비 증가와 함께 직선적으로 증가하였고, EGR율이 15%, 30%에서는 부하 100%에서만 직선적 증가율보다 낮게 나타났으므로 회박연소영역에서는 거의 직선적으로 증가한다고 할 수 있다.

당량비가 증가할수록 NOx 생성량이 증가한 이유는 당량비가 크면 연소한 연료량이 많을 뿐만 아니라 연소가스 온도가 상승했기 때문으로 생각된다.

또 EGR율의 증가에 따라 당량비 변화폭은 부하율이 증가할수록 크게 나타났다.

3.3.3 매연(Soot)

Fig. 7은 각 기관회전속도에 있어서 부하와 EGR율을 변화시켰을 때의 매연 농도를 나타낸 것이다.

이 그림에 의하면 동일 기관회전속도에 있어서 부하와 EGR율이 증가할수록 매연 농도가 증가하는데, 저부하에서는 EGR율의 영향이 별로 크지 않지만, 부하가 높아질수록 EGR율의 영향이 현저하게 크다.

1800 rpm의 전부하 상태에서 EGR율 10%에서 매연 생성량 25%, EGR율 20%에서 65%, EGR율 30%에서 110%의 매연 증가를 나타냈다. 이 값은 저자 등<sup>9,10)</sup>이 발표한 스크러버를 이용하지 않을 때의 증가율 25%, 150% 및 650% 보다 현저하게 줄었는데, 그 이유는 스크러버를 사용함으로써 실린더 내로 유입하는 매연의 절대량이 줄었고, 매연이 적은 혼합기가 연료의 연소를 더욱 활성화 시켰기

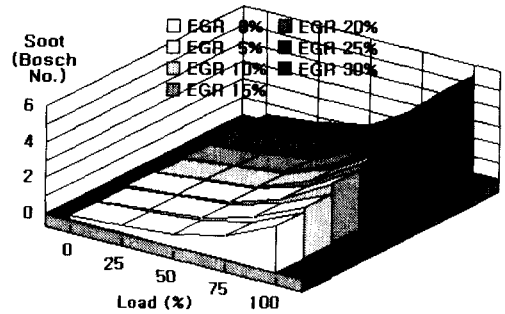


Fig. 7 Soot emission characteristics on effect of EGR relative to engine loads at 1800 rpm.

때문으로 생각된다.

3.3.4 EGR시 당량비와 매연(Soot)의 관계

Fig. 8은 당량비와 매연 농도의 관계를 나타낸 그림으로 기관회전수 1800 rpm의 경우, 부하를 25% 간격으로 하고, EGR율을 0%, 15% 및 30%로 구분하여 표시했다.

당량비의 영향에 대하여 Wersborg 등<sup>12)</sup>은 아세틸렌 - 산소 평면 예혼합 화염에 대한 연구에서, Baumgärtner 등<sup>13)</sup>은 각종 연료를 이용한 대기압 하의 층류 예혼합 화염에 대한 연구에서, 매연 생성량은 당량비의 증가에 따라 증가한다고 밝힌 바 있다.

또 Dyer 등<sup>14)</sup>은 화염온도가 높아지면 매연 배출물이 감소한다고 밝혔는데, 그 이유는 온도가 상승하면 열분해나 입자발생보다도 산화가 더욱 많이 촉진되므로 매연 배출물이 감소된다고 했다.

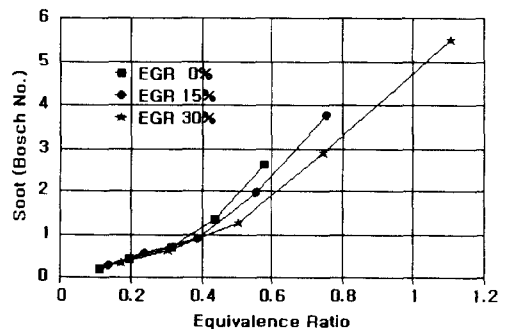


Fig. 8 Soot emission characteristics on effect of EGR relative to equivalence ratio at 1800 rpm

그림에서도 당량비가 증가할수록 매연 배출물이 증가함을 보여주고 있고, 희박연소영역일수록 매연 배출물의 증가율이 적게 나타났다. 그리고 동일 당량비에서는 EGR율이 높을수록 매연 배출물은 감소했는데, 그 이유는 실린더내로 유입된 혼합가스의 산소량이 더욱 감소하므로 상대적으로 연소연료량이 줄어서 매연 배출물의 절대값이 감소된 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

디젤기관은 열효율이 높고 경제성이 우수하며, 출력에 비하여 CO 및 HC 배출량이 적은 장점이 있으나, NO<sub>x</sub> 배출물이 현저히 많은 단점이 있다. 더욱이 앞으로 환경문제가 매우 중요시되어 배출규제가 한층 강화될 것으로 생각된다.

따라서 기존의 EGR 시스템에 이용된 Scrubber 보다 더욱 경제적이고, 배압이 걸리지 않으며, 효율적으로 설계·제작된 Scrubber를 설치하여 매연의 재순환량을 현저히 줄였으며, 실험기관으로는 선박용 수냉식 4기통 직접분사식 4행정 기관을 사용하여, 기관회전속도, 부하율 및 EGR율의 3가지 요소중 하나의 파라미터를 바꾸어 가면서 실험하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) EGR율이 증가할수록 실린더내의 연소압력은 감소하며, 착화지연기간은 증가한다.

(2) EGR율이 증가함에 따라 누적 열발생량은 약간 더 감소되나, 열발생률의 변화는 일정치 않다.

(3) Scrubber를 설치할 경우가 설치하지 않는 경우보다 질소산화물 배출량은 최고 7% 더 감소하며, 매연 배출량은 최고 540% 더 감소한다.

(4) 기관 회전수와 EGR율이 일정한 경우에 당량비가 증가할수록 희박연소영역에서는 질소산화물과 매연은 증가한다.

(5) 기관 회전수와 당량비가 일정한 경우에 EGR율이 증가할수록 질소산화물과 매연 발생량은 감소한다.

#### 후 기

본 연구는 군산대학교 해양과학대학 학술연구 기금의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. International Maritime Organization, "Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engine," 1997.
2. 전효중, "선박용 디젤기관의 환경문제." 한국박용기관학회지, 제20권 제3호, pp.187 - 205, 1996.
3. 内田 登, 외 3명, "ディーゼル機関におけるEGR過給の組み合わせによる排出特性の改善." 自動車技術會論文集, 제24권, 제4호, pp.41 - 46, 1993.
4. Dürnholz, M., Eifler, G., and Endres, H., "Exhaust-Gas Recirculation-A Measure to Reduce Exhaust Emissions of Diesel Engines," SAE 920725, pp.151 - 158, 1992.
5. 배명환, 하정호, "스크러버형 EGR 시스템 디젤기관의 연소 및 배기 배출물 특성에 미치는 재순환 배기의 영향," 한국박용기관학회, 추계학술대회 논문집, pp.120 - 126, 1997.
6. Walder, C. J. "Reduction of emissions from diesel engines," SAE 730214.
7. Nagai, T., Kawakami, M. "Reduction of NO<sub>x</sub> emission in medium-speed diesel engines," SAE 891917.
8. Narusawa, K., Odaka, M., Koike, N., Tsukamoto, Y., Yoshida, K., "An EGR control method for heavy-duty diesel engine under transient operations," SAE 900444.
9. 임재근, "선박용 고속 디젤기관의 배기재순환율이 배기배출물에 미치는 영향에 관한 연구," 박사학위논문, 조선대학교, 1992.
10. 임재근, 배명환, 김종일, "소형 고속 디젤기관의 배기배출물에 미치는 배기 재순환율의 영향에 관한 실험적 연구," 한국박용기관학회지, 제16권 제4호, pp.60 - 77, 1992.
11. 石油産業 活性化 センタ(日本), "EGR이 기관의 성능 및 배기가스성분에 미치는 영향," PEC - 89T14, pp.37 - 46, 1989.
12. Wersborg, B. L., 외 2명, "The combustion insti-

tute, 15th Symp. (Int.) on Comb, pp.1439, 1974.

13. Baumgärtner, L., 외 3명, "The combustion institue, 20th Symp. (Int.) on Comb, pp.959, 1984.
14. Dyer, T. M., and Flower, W. L., "Particulate Carbon, Formation During Combustion," pp.363, 1981.

## 저 자 소 개



**임재근 (林載根)**

1950년 4월 3일생. 한국해양대학교 기관공학과 졸업(1972년). 조선대학교 대학원 기계공학과 석사(1983년). 동대학원 박사(1993년). 현재 군산대학교 기관공학과 교수