

고압 디젤엔진을 이용한 폐회로 시스템의 운전특성에 관한 고찰

An Investigation on Operating Characteristics of the Closed Cycle System Using High Pressure Diesel Engine

김인교*, 박신배*
Ingyo Kim, Shinbae Park

ABSTRACT

The closed cycle diesel system is operated in closed circuit system where there is non air breathing with working fluid consists of combination of oxygen, argon and recycled exhaust gas for obtaining underwater or underground power sources. Experimental apparatus using the MTU8V183SE92 high pressurized engine adapted for closed cycle running, capable of operating at the system pressure of maximum 5 bar is constructed with ACAP as data acquisition system in order to operate equally in the open cycle in surface or the closed cycle in submerged conditions. The general features and the characteristics of combustion of HP(high pressure) diesel engine, specially designed and manufactured only for CCDE, are investigated. The test results of performance of HP diesel engine in closed cycle system are presented with respect to power and boost pressure and compared with those of low pressure diesel engine. The oxygen concentration and specific heat ratio are investigated with its deviation

주요기술용어 : Closed cycle system(폐회로 시스템), High pressure diesel engine(고압디젤엔진), Low pressure diesel engine(저압디젤엔진), Open cycle(개회로), Closed cycle(폐회로), boost pressure(시스템 운전압력)

1. 폐회로 디젤엔진

일반 상용 디젤엔진은 가솔린 엔진에 비하여 열효율이 높고 대출력을 얻을 수 있기 때문에 차량 및 선박 등 교통수단의 동력기뿐만 아니라 산업용 원동기로서 폭넓게 이용되고 있으며 모두 대기중의 공기를 이용하여 작동된다. 그러나 이러한 디젤엔진을 공기의 공급이 불가능한 수

중 또는 지하 같은 환경에서 작동하기 위해서는 특별한 시스템이 요구된다.

폐회로 시스템은¹⁾ 디젤엔진에서 나온 배기가스의 이산화탄소를 일부 흡수 제거한 후 산소와 아르곤을 첨가하여 대기의 공기조성과 유사한 인공적인 혼합기를 만들어 작동유체로 사용함으로써 외부의 공기 공급없이 폐회로 사이클 운전이 가능하다. 이와 같은 폐회로 시스템은 21세기 세계 자원의 고갈에 대비한 해양탐사에 필

* 회원, 국방과학연구소

수적인 해저잠수정 등에 실용될 수 있다.

Asada 등²⁾은 리사이클 및 폐회로 사이클 디젤엔진을 사용하여 공기가 희박한 지하의 발전기, 수중에서 작동하는 잠수정의 동력원 등에 적용하기 위한 여러 가지 기술적인 문제점을 연구하였다. Uchida 등³⁾은 단기통 4 행정사이클 직접분사식 디젤엔진을 사용하여 연료소비율의 증가 없이 배기오염물질의 저감을 위해 EGR과 흡기과급을 병행하여 연구를 수행하였으며, Mitchell 등⁴⁾은 레이저를 이용한 광학적 해석이 가능한 직접분사식 디젤엔진을 제작하여 모의 EGR시험을 하였다. Shen 등⁵⁾은 높은 고지대에서 디젤엔진의 연소에 관한 연구를 수행하였다. 고지대에서는 대기압이 낮기 때문에 공기의 밀도가 낮아 흡입공기량이 줄어든다. 해발 2000m 정도의 고지대에서 디젤엔진의 출력은 일반 평지보다 24% 정도가 낮고, 연료소비율은 5% 정도 증가하며, 뿐만 아니라 디젤엔진으로 들어가는 공기과잉률이 낮아 엔진의 열부하가 매우 높게 되고, 배기가스중의 매연이 증가한다는 사실을 언급하였다.

폐회로 디젤엔진은 대기상태에서 공기를 이용하여 운전하는 일반적인 상용 디젤엔진과는 달리 여러 가지 해결해야 할 문제점을 가지고 있다. 즉 폐회로 디젤엔진의 작동유체 조성과 그 조성들이 엔진성능에 미치는 영향, 재순환되는 배기가스의 냉각, 재순환가스와 산소와 혼합, 연소에 의해 발생하는 이산화탄소의 효과적인 흡수 제거 등이다. 또한 효율을 증대하고 고출력을 얻기 위해서는 일반적인 디젤엔진으로는 한계가 있으며, 이를 해결하기 위해 특별히 개선된 고압디젤엔진(MTU8V183SE92)을 이용하였다.

본 연구에서는 MTU8V183SE92 고압디젤엔진을 이용하여 폐회로 시스템을 구성하고 데이터 계측장비로서 ACAP 시스템을 설치하였으며, 시스템 고압운전에 따른 고압디젤엔진의 특성을 조사하고, 시스템 성능에 관련된 영향을 주는 폐회로 엔진출력, 흡기압력, 산소농도 및

비열비 등의 데이터를 실험적으로 획득하여 분석하였다.

2. 폐회로 시스템 시험장치

고압 디젤엔진을 이용한 폐회로 시스템은 Fig. 1에서 본 바와 같이 고압 디젤엔진, 배기냉각기, 흡수기, 해수처리장치, 가스혼합기 및 제어계측장치 등으로 구성되어 있으며, 혼합기 조성을 위한 산소와 아르곤 공급장치가 별도로 설치되어 있다. 디젤엔진에서 배출되는 배기가스는 약 350~400℃ 정도의 고온이기 때문에, 바로 흡수기로 들어가면 폴리에틸렌으로 이루어진 내부회전체가 손상되므로 배기냉각기를 통하여 약 80℃ 이하로 제한한다. 흡수기는 해수처리장치를 통하여 공급된 해수에 의하여 배기가스중 CO₂ 가스 일부를 해수에 용해하여 흡수하고 나머지는 다시 재순환되고 가스혼합기에서 산소와 아르곤이 첨가되어 인공적으로 조성된 혼합기가 공기대신 디젤엔진에 공급된다. 이와 같은 과정을 제어계측장치를 통하여 반복함으로써 폐회로 사이클 운전이 가능하게 된다.

본 연구에서 폐회로 시스템의 구성에 사용된 고압디젤엔진은 엔진흡기압력이 5bar까지 운전 가능한 것으로 정의하였으며, 독일 MTU사에서

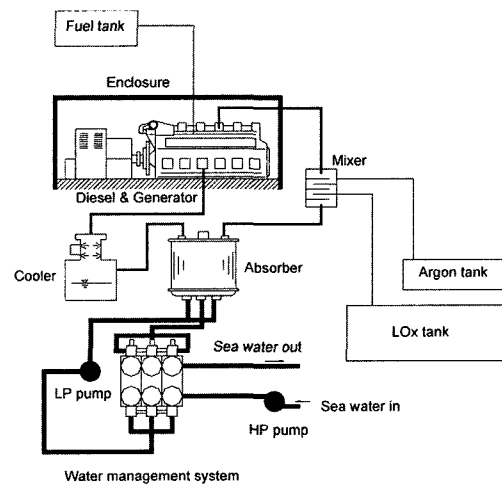


Fig. 1 Schematic diagram for closed cycle diesel system

개발한 모델 MTU8V183SE92로써 주요 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

폐회로 시스템을 적용하기 위한 추가된 고압 디젤엔진의 중요 구성품 및 개선사항을 상용 디젤엔진(MTU8V183TE52)과 비교하면 첫째, 고압 디젤엔진은 개발과정의 원조 모델인 MTU사의 과급기가 부착된 8V183시리즈 디젤엔진보다 압축비를 낮게 함으로써 압축과정의 압력을 낮게(대기압에서는 상대적으로 8V183TE52엔진보다 낮음) 유지하였고 동시에 고압의 흡기압력에서도 연소압력 및 최고 연소압력이 급격히 상승하는 것을 방지하였다. 둘째, 고압 디젤엔진은 과급기를 고려하지 않고 설계되었고 또한 흡기압력의 고압화에 따른 문제점을 해결하기 위하여 과급기가 부착된 디젤엔진(MTU8V 183시리즈엔진)과는 다른 캠샤프트를 채용하여 흡·배기 밸브의 밸브 타이밍을 조절하였다. 셋째, 흡입되는 가스의 압력이 높아짐에 따라 연료분사노즐에서 분사되는 연료의 분사압력을

높였다. 넷째, 고압 디젤엔진은 일반 디젤엔진과는 달리 흡입되는 가스를 예열시키는 예열기가 부착되어 있다. 흡기가스 예열기는 엔진몸체의 상단에 부착되어 있으며 이 장치는 흡입되는 가스의 온도를 높여줌으로서 흡입가스의 밀도를 낮추게 한다. 흡입가스 예열기는 일반 디젤엔진의 인터쿨러와는 반대의 효과를 엔진에 미친다.

실린더내의 연소압력은 실린더헤드에 Kistler사의 6125A11 압력센서를 장착하여 계측하였으며, 압력센서로부터 나온 전기적 신호를 증폭하기 위해 Kistler사의 범용증폭기(Type 5011B)를 사용하였다. 이 증폭기는 압력센서로부터 나오는 전기적신호를 $\pm 10V$ 의 전압으로 증폭하여 데이터 취득장치로 보낸다. 크랭크각도는 회전축에 엔코더를 장착하여 측정하였으며, AVL 364 모델을 사용하였다. 폐회로 시스템 성능을 분석하기 위하여 미국 DSP Technology사의 ACAP(Advanced Combustion Analysis Program) 시스템 장비를 설치하였다. 이 장비는 크랭크각도에 대한 연소압력, 열발생률, 평균유효압력 및 연료소비율 등 여러 가지 데이터를 실시간으로 획득하여 이들 데이터를 디지털 신호처리, 일시저장, 엔진성능 파라메타들의 계산, 컴퓨터로의 전송, 그리고 모니터상의 디스플레이 등 모든 기능을 한꺼번에 수행할 수 있으며, Fig. 2는 장비 구성도를 보여주고 있다.

Table 1 Specifications for test diesel engine

No	Descriptions	High pressure engine	Low pressure engine
1	Model	MTU 8V 183 SE92	MTU 8V 183 TE52
2	General specifications	4-stroke	4-stroke
3	Number of cylinders	8	8
4	Bore	128.0 mm	128.0 mm
5	Stroke	142.0 mm	142.0 mm
6	Connecting rod length	257.0 mm	257.0 mm
7	Compression ratio	12.86	14.25
8	Mean piston speed	8.1 m/s	8.1 m/s
9	Displacement volume	15,851 cm ³	15,721 cm ³
10	Maximum power	300/1800 kW/rpm	360/1800 kW/rpm
11	Injection timing	16° BTDC	14° BTDC
12	Fuel injection pressure	200 bar	200 bar
13	Ignition order	1-5-7-2-6-3-4-8	1-5-7-2-6-3-4-8

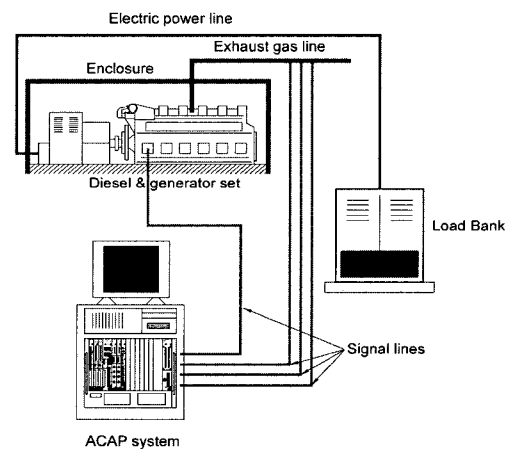


Fig. 2 ACAP system and experimental apparatus set up

폐회로 시스템의 디젤엔진의 흡기로 들어가는 혼합기 조성은 공기 대신 CO₂, O₂, H₂O, N₂, Ar 등으로 구성되어 있으며, 가스혼합기에 들어가는 O₂, Ar 유량은 각각 O₂ 및 Ar 공급라인에 유량계를 설치하여 계측하였으며, 흡수기의 가스 라인 입·출구에 CO₂센서를 설치하여 CO₂ 가스량을 측정하였다. 또한 엔진 흡·배기 라인에 온도, 압력 및 유량센서 등을 장착하여 데이터를 계측하였다.

3. 실험결과 및 운전특성 고찰

고압디젤엔진을 이용하여 폐회로 사이클 운전이 가능한 폐회로 시스템을 구성하고 고출력을 얻기 위해 흡기압력을 최대 5bar까지 증가하여도 시스템이 안정적으로 운전할 수 있도록 하였다. 시스템 운전에 영향을 주는 중요한 인자들을 조사하기 전에 먼저 대기 중의 공기를 이용한 개회로 운전에서 기본적인 실험을 수행하여 관련 실험데이터를 충분히 분석한 후 여러 가지 폐회로 특성실험을 수행하였다.

Fig. 3은 개회로 운전일 때 출력 80kW에서 고압 디젤엔진과 저압 디젤엔진의 연소압력을 비교한 것이다. 그림에서 본 바와 같이 P-θ 및 P-V 선도에서 대기상태의 개회로 운전에서 두 엔진의 연소가 확연히 다름을 알 수 있다. 즉 동일 흡기압력(대기압)일 때 저압 디젤엔진이 고압 디젤엔진보다 전체적으로 실린더내의 연소압력이 높다. 이것은 두 엔진의 압축비 차이 때문이며 저압 디젤엔진의 압축비는 약 14.25 이고, 고압 디젤엔진의 압축비는 약 12.857로서 약 1.4 정도의 차이가 있다. 또한 이 그림에서 높은 압축비는 착화지연기간을 감소하고 최고 연소압력이 높게 나타냄을 알 수 있다. P-V 선도에서 저압 디젤엔진의 흡·배기압력이 고압 디젤엔진보다 큰 차이를 나타내고 있는데 이것은 저압 디젤엔진이 과급기가 있는 디젤엔진으로 설계하였기 때문에 흡·배기 밸브의 밸브 타이밍을 과급기에 맞게 조절하여 설계하였으나 본 실험

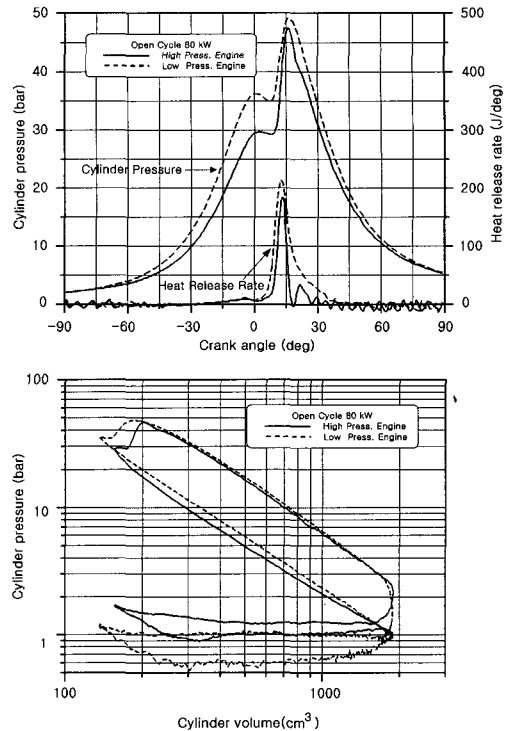


Fig. 3 The comparisons' of cylinder pressure profiles between high and low pressures diesel engine for open cycle operation at 80 kW

에서는 저압 디젤엔진의 과급기를 제거하였기 때문에 이러한 현상을 보일 수 있다. 그러나 고압 디젤엔진은 흡·배기 압력의 차가 상대적으로 저압 디젤엔진보다 작은 것은 흡·배기 밸브의 밸브 타이밍이 과급기가 없는 상태로 설계하였기 때문이다. 따라서 개회로 운전에서 고압 디젤엔진의 연소압력이 낮은 만큼 폐회로 운전할 때 시스템 운전압력을 높일 수 있으며 폐회로 시스템에서 연소압력의 상승 없이 출력을 높일 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 폐회로 시스템에서 고압 디젤엔진을 이용하여 초기 폐회로 운전 즉 과도상태 운전일 때 출력별로 실린더내 연소압력을 나타낸 것이다. 이것은 시스템 운전압력이 정상적으로 운전되기 전의 과도상태에서 단계적으로 출력을 증가하여 고압 디젤엔진의 연소압력을 P-θ 및 P-V 선도로 나타낸 것이다. 과도상태 운전에서 출력

이 증가할수록 연소압력이 급격히 증가하는 경향을 보이는데 이것은 흡입압력이 점차적으로 증가하면서 연소압력을 급격히 상승시키는 것으로 판단된다. 개회로 운전상태에서 고압디젤엔진을 시동하여 일정시간이 지난 후 폐회로 운전모드로 전환하면 흡입압력은 대기압에서 바로 원하는 운전압력으로 전환되지 않고 서서히 출력증가와 더불어 흡입압력이 증가한다. 특히 이 시험에서는 시스템 안전성을 고려하여 시스템 운전압력을 천천히 상승시켰다. P- θ 및 P-V 선도에서 압축과정의 압력이 출력증가와 더불어 증가하는 것을 보면 흡입압력이 상승함을 알 수 있다. 여기서 과도상태 폐회로 운전시 고압디젤엔진의 특이한 연소특성을 관찰할 수 있었는데 확산연소기간 및 후기연소기간 동안 약간의 연소압력 불균일이 일어난 모습을 볼 수 있었다. 그것은 열발생율 선도에서 P- θ 선도의 불

균일한 구배가 증폭되어 나타나고 있다. 이러한 현상은 흡입압력을 증가시킬수록 크게 나타났다. 고출력에서는 시스템 압력이 일정 값에 도달한 후 출력을 상승시켜도 압축과정의 압력은 더 이상 상승하지 않았다.

Fig. 5는 폐회로 운전상태에서 시스템 운전압력을 안정하게 유지하고 있을 때 출력변화를 보여주고 있다. 이것은 시스템 성능시험에서 고압디젤엔진을 이용한 폐회로 시스템의 안전성을 보여주고 있으며 폐회로 시스템의 운전압력이 일정하게 유지된 상태에서 엔진출력을 변화시켜가면서 240분 동안 저출력에서 고출력까지 운전한 것을 의미한다. 시스템 압력은 초기 약 10분 동안 1bar에서 3bar로 상승하였으며 압력 상승동안의 출력변화를 자세히 보여준 것이 그림 Detail A이다. 시스템 성능시험 전기간에 시스템 압력의 편차는 5%이내였고 시험도중에 출력을 250kW 이상 올리기 위해 압력을 3.6bar로

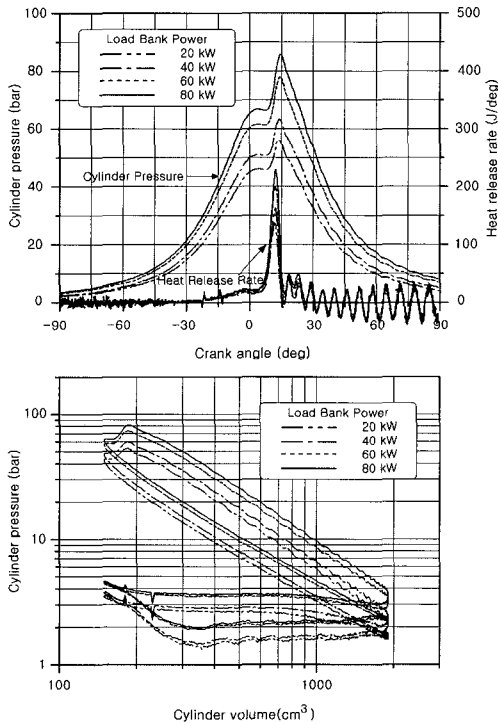


Fig. 4 The cylinder pressure curves of high pressure diesel engine for transition operation of closed cycle system

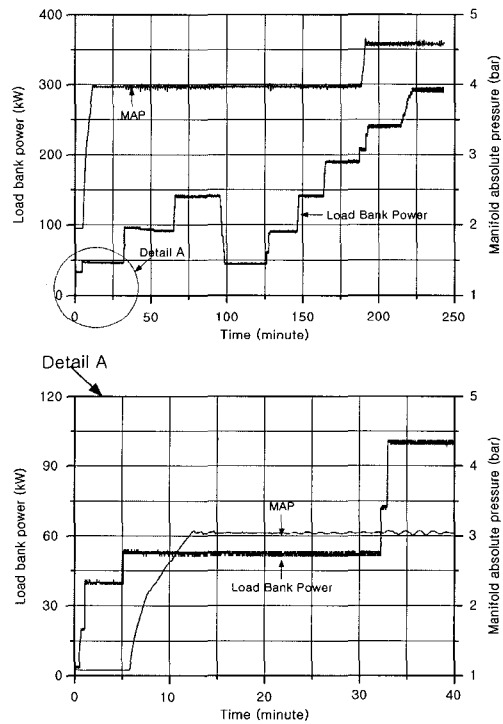


Fig. 5 Load bank power and intake pressure distributions for closed cycle operation

하여 고출력 운전에서 시스템의 안전성을 유지하였다.

Fig. 6은 폐회로 운전에서 출력이 각각 100, 200 및 300kW 일 때 출력 증가에 따른 P-θ 와 P-V선도를 나타낸 것이다. 실린더내의 연료분사는 출력에 상관없이 상사점 근처에서 시작됨을 알 수 있다. 시스템 운전압력이 3bar일 때 200kW의 출력에서 연소압력은 110bar 근처에 있고 확산연소기간 및 후기연소기간이 조금씩 길어지는 것을 보여준다. 그리고 착화지연기간은 출력에 상관없이 불규칙한 특성을 보이는데 이것은 압력을 측정하는 매순간 이산화탄소 농도 및 비열비 제어를 위한 아르곤의 농도가 조금씩 변하기 때문이다. 또한 최대출력을 얻기 위해 시스템 압력을 3.6bar에서 출력이 증가함에 따라 최고 연소압력은 거의 일정하고 확산연소기간 및 후기연소기간이 길어진다. 이것은 평균유효압력이 상승하고 연료공급의 증가로 출력이 향상되기 때문이다.

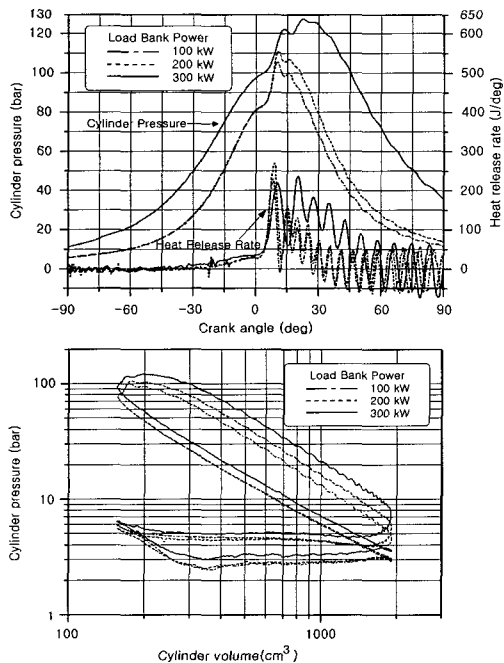


Fig. 6 The comparisons of the cylinder pressure curves at power 100kW, 200kW and 300kW for closed cycle operation

Fig. 7은 동일출력에서 시스템 압력에 따른 고압디젤엔진의 연소특성을 비교한 것이다. 이것은 동일 출력에서 시스템 압력이 다를 경우에 대한 연소압력 측정 결과이다. 그림에서 본 바와 같이 연소압력 상승에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 바로 시스템 운전압력이다. 시스템 운전압력 차이가 0.5bar일 때 출력 260kW에서 최고 연소압력의 차이는 약 20bar 정도 차이를 보이고 있다. 더불어 열발생을 곡선을 보면 열발생율의 진폭이 시스템 압력이 높을수록 커짐을 알 수 있다. 이러한 사실을 통해 폐회로 시스템에서 운전압력의 상승은 시스템전체의 효율 향상에 도움이 되지만 디젤엔진에 있어서 전체적인 연소압력의 급격한 상승이 나타난다.

Fig. 8은 연속운전시험 기간 동안의 산소 농도와 산소농도의 편차를 나타낸 것이다. 그림에서 운전초기에 산소농도의 변화가 심한데 이것은 폐회로가 아닌 개회로 운전모드에서 산소센서의 천이 기간(산소센서가 초기에 안정된 값을

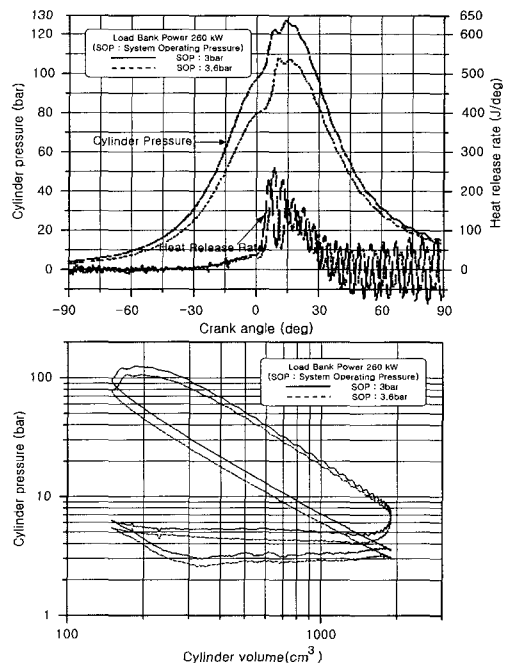


Fig. 7 The comparison of cylinder pressure when system operation pressures are 3 and 3.6 bars at power 260kW

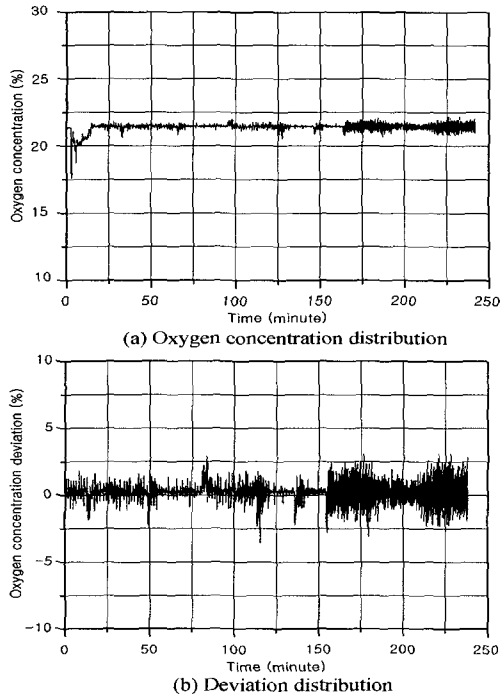


Fig. 8 Oxygen concentration and its deviation distributions for closed cycle system operation

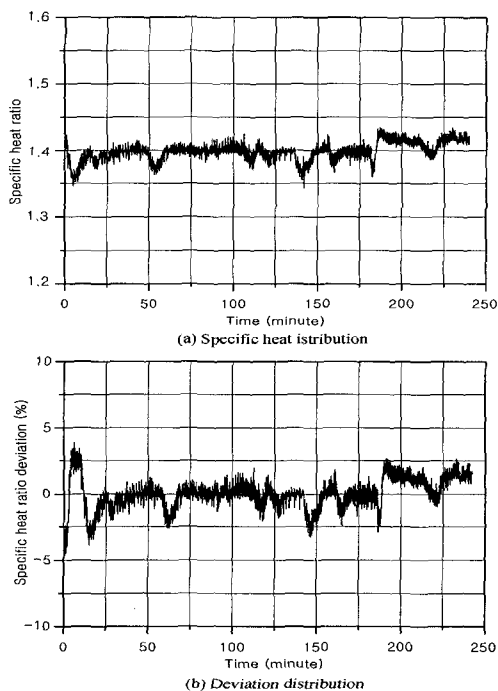


Fig. 9 Specific heat ratio and its deviation distributions for closed cycle system operation

가지기 위한 기간)에 해당하기 때문이다. 산소 농도의 편차는 폐회로 상태로 운전되고 있는 동안 정해진 산소농도 21%에서 운전 전기간 동안 $\pm 5\%$ 이내의 편차를 보이며 운전되었다.

Fig. 9는 연속운전시험 기간 동안의 중요 제어 인자인 비열비의 변화와 비열비의 편차를 나타낸 것이다. 비열비는 주 제어기에서 압축과정의 두 지점에서 실린더내 연소압력을 측정하여 계산한 값이다. 비열비 역시 정해진 값 1.4에서 시험 전기간 동안 $\pm 5\%$ 편차를 나타내고 있다. 비열비의 제어는 폐회로 운전모드에서만 가능한 것으로서 개회로 운전모드에서 폐회로 운전모드로 전환되는 초기의 약 10분간은 큰 변화 폭을 나타내고 있지만 곧 안정된 값으로 수렴되었다.

4. 결론

본 연구에서는 MTU8V183SE92 고압디젤엔진을 사용하여 시스템 운전압력을 최대 5 bar까지 높일 수 있도록 폐회로 시스템을 구성하고, ACAP 시스템장비와 계측장비를 설치하여 폐회로 시스템의 운전모드 변환시험, 부하변화시험 및 시스템 성능실험 등을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 개회로 운전에서 저압 디젤엔진이 고압 디젤엔진보다 전체적으로 실린더내의 연소압력이 높으며 이것은 두 엔진의 압축비 차이로서 높은 압축비는 착화지연기간을 감소하고 최고 연소압력이 높게 나타났다.

2) 출력변환시험에서는 200kW 이상의 고출력에서도 시스템이 안정적으로 운전할 수 있음을 확인하였으며, 시스템 운전압력을 3.6 bar까지 증가하여 최대 출력 290kW에서도 운전이 가능하였다.

3) 동일출력에서 실린더내의 연소압력에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 시스템 운전압력이며 260kW 출력에서 0.5bar의 시스템 운전압력 차이는 실린더내의 최대연소압력에서 약 18bar 차이가 있었다.

4) 폐회로 시스템의 성능시험은 시스템 운전 압력이 1bar에서 3bar까지 증가하는데 약 10분 정도 소요되었으며 3bar에서 약 3시간동안 연속 운전하면서 산소농도와 비열비를 분석하였다. 폐회로 상태로 운전되고 있는 동안 정해진 산소 농도 21%에서 운전 전기간 동안 $\pm 5\%$ 이내의 편차를 보였으며 비열비 역시 정해진 값 1.4에서 시험 전기간 동안 $\pm 5\%$ 편차를 나타내고 있다. 비열비의 제어는 폐회로 운전모드에서만 가능한 것으로서 개회로 운전에서 폐회로 운전모드로 전환되는 초기의 약 10분간은 큰 변화 폭을 나타내고 있지만 곧 안정된 값으로 수렴됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) S. Zimmerman, "Submarine Technology for 21st Century," Pasha Publications Inc., pp. 21-28, 1990.
- 2) T. Asada, M. Nagai, "Investigations on Recycle and Closed Cycle Diesel Engine," 75th SAE 800964, 1980.
- 3) N. Uchida, Y. Daisho, T. Saito, H. Sugano, "Combined Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emmisions," SAE 930601, 1993.
- 4) D. L. Mitchell, J. A. Pinson, T. A. Litzinger, "The Effects of Simulated EGR via Intake Air Dilution on Combustion in an Optically Accessible DI Diesel Engine," SAE 932798, 1993.
- 5) S. Lizhong, "Combustion Process of Diesel Engines at Regions with Different Altitude," SAE 950857, 1995.
- 6) N. Miyamoto, T. Chikahisa, T. Murayama, R. Sawyer, "Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wiebe's Functions," SAE 850107, 1985.
- 7) W. J. D. Annand, "Heat Transfer In the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines," Proceedings of the Institute Mechanical Engineers, Vol.177 No.36, 1963.
- 8) F. W. Stringer, A. E. Clarke, J. S. Clarke, "The Spontaneous Ignition of Hydrocarbon Fuels in a Flowing System," Proceeding of the Institute Mechanical Engineers, Vol.184, PT.3J, 1970.
- 9) 박신배, "폐회로 디젤엔진의 연소특성에 관한 고찰," 한국자동차공학회논문집, 제8권 제6호, pp.60-69, 2000.