

폐회로 시스템에서 고압 디젤엔진의 연소특성에 관한 연구

김 인 교* · 박 신 배*

A Study on Combustion Characteristics of the High Pressure Diesel Engine in Closed Cycle System

I-G Kim* · S-B Park*

Key words : Closed Cycle System(CCS:폐회로 시스템), High Pressure Diesel Engine(고압디젤 엔진), System Operating Pressure(시스템 운전압력), Intake Pressure(흡기압력), 열발생률(Heat Release Rate), Closed Cycle Diesel Engine (CCD:폐회로 디젤엔진)

Abstract

The closed cycle diesel engine is used in a closed circuit system which has no air breathing. The working fluid as intake mixture are consisted of oxygen, argon and recirculated exhaust gas in order to obtain underwater or underground power sources. In the present study, the high pressure diesel engine which can be operated by the closed cycle system with high intake pressure for increasing the net power rate is designed. It has been carried out to investigate the combustion characteristics of high pressure diesel engine according to the power rate. The maximum cylinder pressure and heat release rate were investigated. Also, major experimental data such as specific fuel consumption rate, oxygen concentrations, fuel conversion efficiency, polytropic exponent, and IMEP were compared with low pressure diesel engine experimental data.

1. 서 론

일반적으로 디젤엔진은 열기관 중에서 가장 높은 열효율과 대출력을 얻을 수 있기 때문에, 연료 경제성이 중요시되는 차량, 선박 등 교통수단의 동력원으로 이용되고 있으며 대기중의 공기를 이용하여 운전된다. 그러나 수중이나 지하 같은 공기의 공급이 불가능한 환경에서 동력원을 얻기 위해서

는 특별한 시스템이 요구된다. 폐회로 시스템¹⁾은 디젤엔진에서 나오는 배기에 산소와 아르곤 등을 첨가하여 대기중의 공기 조성과 유사한 인공적인 혼합기를 만들어 작동유체로 사용하는 시스템으로 외부에서 공기의 공급이 없이 폐회로 사이클 운전이 가능하기 때문에 주로 수중에서 동력원을 얻는데 사용되고 있다.

Asada 등²⁾은 리사이클 및 폐회로 사이클 디젤

* 국방과학연구소

엔진을 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. Shen⁵⁾은 높은 고지대에서 디젤엔진의 연소에 관한 연구를 수행하였다. 고지대에서는 대기압이 낮기 때문에 공기의 밀도가 낮아 흡입공기량이 줄어든다. 해발 2000 m 정도의 고지대에서 디젤엔진의 출력은 일반평지보다 24% 정도가 낮고, 연료소비율은 5% 정도 증가할 뿐만 아니라 디젤엔진으로 들어가는 공기과잉률이 낮아 엔진의 열부하가 매우 높게 되고, 배기중의 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 배기의 냉각, 재순환가스와 산소와 혼합, 연소에 의해 발생하는 이산화탄소의 효과적인 흡수 제거 등이다. 특히, 이산화탄소의 효과적인 제거를 위해서는 시스템 운전압력을 높게 하며 이는 엔진흡기 압력의 고압화를 의미한다.

본 연구에서는 특별히 개발된 MTU8V183 SE92 고압디젤엔진을 사용하여 폐회로 운전이 가능한 폐회로 시스템을 구성하고 데이터 계측장비로서 ACAP 시스템을 설치하였으며, 엔진성능에 영향을 주는 폐회로 엔진출력, 실린더내 연소압력, 비연료소모율 및 산소농도, 엔진효율 및 비열비, 지시평균유효압력 및 실린더내 최대압력 등의 여러 가지 실험 데이터를 획득하여 연소특성을 분석하였으며 기존의 저압디젤엔진의 실험데이터와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

폐회로 시스템은 Fig. 1에서 본 바와 같이 디젤엔진, 배기냉각기, 흡수기, 해수처리장치, 가스혼합기, 제어계측장치 등으로 구성되어 있으며 엔진 연소에 필요한 혼합기 조성을 위한 산소와 아르곤 공급장치가 별도로 설치되어 있다. 디젤엔진에서 배출되는 배기는 약 350~400°C 정도의 고온이기 때문에, 이 고온 배기가 바로 흡수기로 들어가면 폴리에틸렌으로 이루어진 내부회전체가 손상되므로 배기냉각기를 설치하여 약 80°C 이하로 제한한다. 흡수기는 해수처리장치를 통하여 공급된 해수에 의하여 배기 중 CO₂ 가스 일부를 해수에 용해

Table 1 Specifications of test diesel engine for closed cycle system

NO	Descriptions	High Pressure Engine	Low Pressure Engine
1	Model	MTU 8V 183 SE92	MTU 8V 183 TE52
2	General Specifications	4-Stroke Diesel	4-Stroke Diesel
3	Number of cylinders	8	8
4	Bor	128.0mm	128.0mm
5	Stroke	142.0mm	142.0mm
6	Connecting Rod Length	257.0 mm	257.0 mm
7	Compression Ratio	12.86	14.25
8	Mean Piston Speed	8.1m/s	8.1 m/s
9	Total Volume	15,851 Cm ³	15,721 Cm ³
10	Maximum Power	300/1800 kW/rpm	300/1800 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

하여 흡수하고 나머지는 재순환되고 가스혼합기에서 산소와 아르곤이 첨가되어 인공적으로 조성된 혼합기가 공기대신 디젤엔진에 공급된다. 이와 같은 과정은 제어계측장치를 통하여 반복함으로써 폐회로 사이클 운전이 가능하게 된다.

본 연구에서 폐회로 시스템의 구성에 사용한 디젤엔진은 독일 MTU사의 MTU8V183 SE92이며 주요 제원 및 특성은 Table 1에 주어져 있다.

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 ± 10 V의 전압으로 증폭하여 데이터 취득장치로 보낸다. 크랭크 각도는 회전축에 엔코더를 장착하여 측정하였으며, AVL364 모델을 사용하였다. 흡기압력 변화에 따른 고압화된 디젤엔진의 연소특성을 분석하기 위하여 미국 DSP Technology사의 ACAP(Advanced Combustion Analysis Program) System 장비를 설치하였다. 이 장비는 크랭크각도에 대한 연소압력, 열발생률, 평균유효압력, 연료소비율 등 여러 가지 데이터를 실시간으로 획득하여 이들 데이터를 디지털 신호처리, 일시저장, 엔진성능 파라미터의 계산, 컴퓨터로의 전송, 모니터상의 디스플레이 등 모든 기능을 한꺼번에 수행할 수 있으며, Fig. 1은 실험장비

의 구성도이다.

폐회로 시스템의 디젤엔진 흡기로 들어가는 혼합기 조성은 공기 대신 CO_2 , O_2 , H_2O , N_2 , Ar 등으로 구성되어 있으며, 가스혼합기에 들어가는 O_2 , Ar 유량은 각각 O_2 및 Ar 공급라인에 유량계를 설치하여 계측하였으며, 흡수기의 가스라인 입출구에 CO_2 센서를 설치하여 CO_2 가스량을 측정하였다. 또한 엔진 흡배기 라인에 온도, 압력, 유량센서 등을 장착하여 계측하였다.

2.2 실험방법

앞에서 언급한 바와 같이 구성된 폐회로 시스템과 계측장비를 이용하여 고압디젤엔진의 연소특성을 파악하기 위하여 개회로 운전과 폐회로 운전일 때 출력변환실험 등을 수행하였다. 폐회로 운전은 대기의 공기를 사용하지 않고 재순환배기와 산소 및 아르곤이 첨가된 혼합기를 사용하여 완전히 폐사이클로 운전한다. 따라서 각 사이클별 운전특성을 비교하는 것이 중요하기 때문에, 동일출력에서 개회로 및 폐회로 운전일 때 각각 성능실험을 수행하여 실린더내의 연소특성을 비교하였다. 출력변환실험은 폐회로 운전일 때 단계별로 출력을 증가시켜 출력시험을 하였으며 일정한 출력 80, 160, 240 kW에 도달하면 안정된 정상운전상태라 간주하여 각각 데이터를 획득하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

고압 디젤엔진의 연소특성을 분석하기 위하여 시스템 운전압력이 높게 유지된 폐회로 사이클 운전이 가능한 실험장치를 구성하고, 엔진성능에 영향을 주는 인자들을 조사하기 위하여 먼저 대기 중의 공기를 이용하여 정상적으로 운전한 개회로 실험을 하였으며, 관련 실험데이터를 충분히 분석한 후 여러 가지 폐회로 특성실험 즉, 연속운전, 출력변환, 흡기압력변환 등의 실험을 하였다.

개회로 운전일 때 고압 디젤엔진의 발전기 출력을 2080 kW까지 20 kW씩 증가하여 최대 80 kW까지 도달하였을 때 실린더 압력을 측정하여 비교한 것이 Fig. 2에 주어져 있다. 그림에서 본 바와 같이 개회로 운전에서 고압 디젤엔진의 실린더내

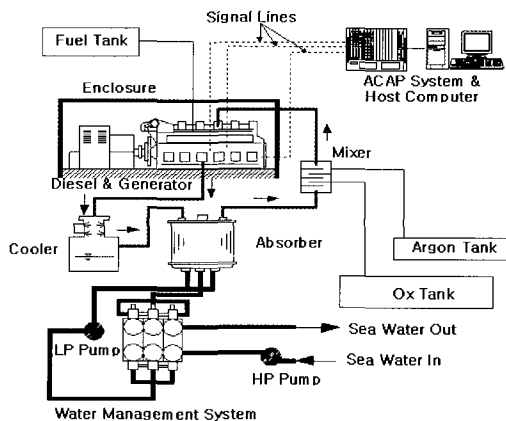


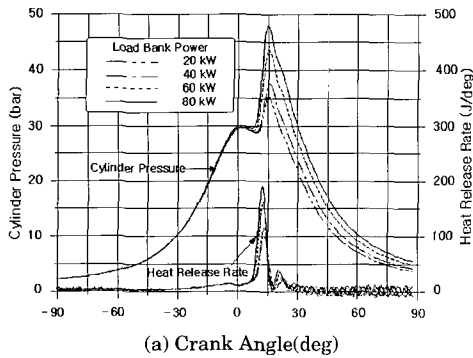
Fig. 1 Schematic diagram for closed cycle diesel system and experimental apparatus with ACAP System

의 압력이 상사점을 지난 직후 감소한 다음 다시 상승하는 이유는 과급을 하지 않는 디젤엔진의 일반적인 현상으로써 실린더내의 연소가 상사점 근처에서 일어나지 않고 피스톤이 상사점을 지나 내려가는 도중에 연소가 일어나기 때문이다. 압력의 감소는 상사점에서 피스톤이 내려감에 따라 체적의 증가로 인한 것이다. 고압 디젤엔진에서도 동일한 현상을 보여주고 있으며 연소가 상사점을 지나 크랭크 각도가 10° 에서 일어나고 있음을 열발생률 곡선을 통하여 알 수 있다. p-θ선도나 p-V선도에서 출력이 상승에 따라 착화지연기간이 조금씩 짧아지는 경향을 보이고 있다. 또 실린더 연소 최고압력이 급격하게 상승하고 팽창과정에서 확산연소기간 및 후기연소기간이 길어지는 경향을 보이고 있다.

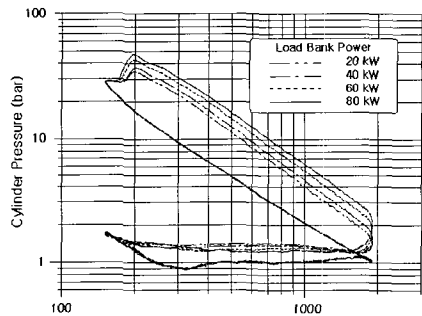
Fig. 3은 고압 디젤엔진을 개회로 및 폐회로 운전일 때의 실린더 압력분포를 비교한 것이다. 그림

에서 본바와 같이 개회로 및 폐회로 운전일 때 실린더내의 압력변화는 상당한 차이가 있다. 특히 최고 폭발압력은 34 bar 정도의 차이가 있으며 이것은 폐회로 상태로 운전할 때는 실린더내의 각종 부속품이 보다 견고한 것으로 설계되어야 한다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 폐회로 운전일 때 출력 증가에 따른 p-θ 및 p-V선도를 나타낸 것이다. 시스템 압력이 일정 값에 도달한 후 출력을 상승시켜도 압축과정의 압력은 더 이상 상승하지 않음을 알 수 있다. 출력 160 kW의 중간 출력단계에서는 출력을 상승시킬수록 최고 연소압력이 상승하였으나, 240 kW의 일정 출력이상에서는 최고 연소압력이 거의 일정함을 알 수 있다. 그러나 출력 200 kW 이상에서 최고 연소압력은 거의 일정하여도 팽창과정의 압력이 출력이 높을수록 약간씩 증가함을 p-V선도에서 볼 수 있다. 이것은 출력이 증가할수록 평균 유효압력(Mean Effective Pressure)이 증대됨을

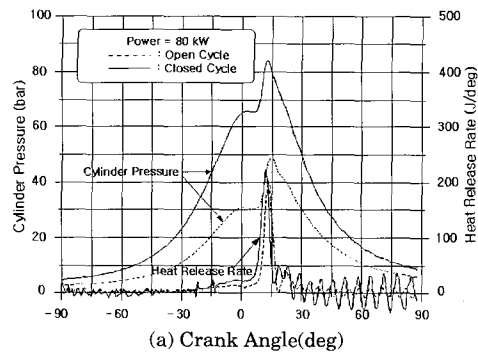


(a) Crank Angle(deg)

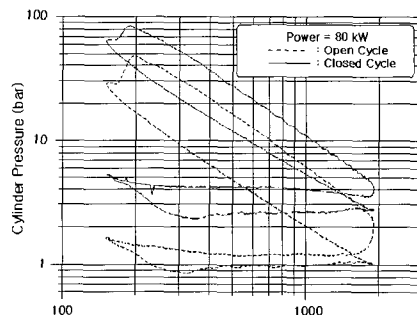


(b) Cylinder Volum(cm³)

Fig. 2 The comparison of the cylinder pressure curves for open cycle operation at powers 20, 40, 60 and 80 kW



(a) Crank Angle(deg)



(b) Cylinder Volum(cm³)

Fig. 3 The cylinder pressure curves for open and closed cycle operations at power 80 kW

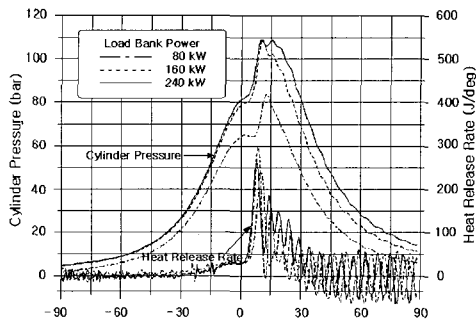
의미하고 연료의 소비량이 늘어남을 의미한다.

Fig. 5는 폐회로 운전일 때 고압 디젤엔진과 저압 디젤엔진의 연소특성을 보여준 것이다. 이것은 출력 240kW에서 측정된 실린더내의 연소압력으로 고압 디젤엔진과 저압 디젤엔진의 p- θ 및 p-V 선도를 비교한 것이다. 그림에서 본 바와 같이 저압 디젤엔진의 연소압력이 고압 디젤엔진보다 높아지고 착화가 빨리 일어나고 있음을 알 수 있다. 이것은 압축비의 영향이 시스템압력보다 크게 작용하고 있기 때문이다. 다시 말해서 저압 디젤엔진이 낮은 흡기압력에서도 압축과정중의 압력이 전반적으로 고압 디젤엔진보다 높다는 것은 압축비가 크다는 것을 의미한다.

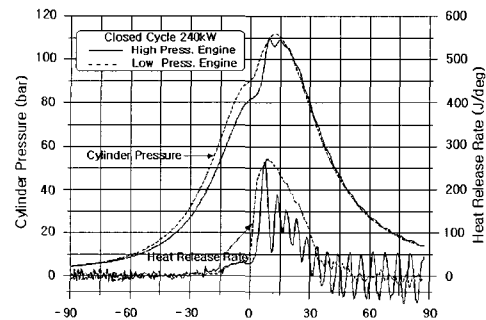
Fig. 6은 폐회로 운전일 때 고압 및 저압 디젤엔진의 출력별로 비연료소비율과 산소농도분포를 비교한 것이다. 출력이 증가할수록 비연료소비율

은 감소하였으며 비연료소비율은 저압 디젤엔진이 고압 디젤엔진보다 약간 높게 나타났다. 배기압력이 증가하면 연소과정 중에 피스톤이 배기를 밖으로 보내는 일량이 많아짐을 의미하며 그만큼 손실이 일어난다. 그림(b)는 폐회로 운전일 때 산소농도를 출력별로 나타내고 있으며 엔진혼합기로 사용되는 산소의 농도는 체적비로 약 2124% 사이에서 증가하였다.

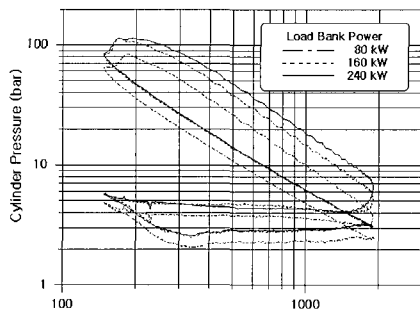
Fig. 7은 출력에 따른 엔진효율(Fuel Conversion Efficiency)과 플리트로피지수를 나타내고 있다. 엔진효율곡선은 앞에서 설명한 비연료소비율과 연계되어 비연료소비율이 최소일 때 엔진효율은 최대가 된다. 본 실험에서 약 240 kW 폐회로 운전 상태에서 엔진효율이 약 36% 정도이다. 플리트로피지수는 폐회로 운전일 때는 1.271.33 사이의 분포를 보이고 있다. 폐회로 운전일 때 대기의 공기보다 폴리



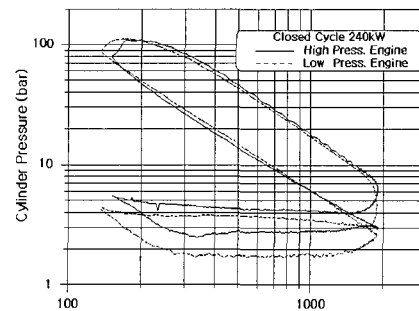
(a) Crank Angle(deg)



(a) Crank Angle(deg)



(b) Cylinder Volum(cm³)



(b) Cylinder Volum(cm³)

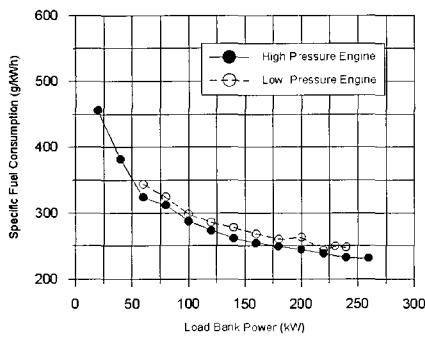
Fig. 4 The cylinder pressure curves for closed cycle operation at power 80, 160 and 240 kW

Fig. 5 The comparisons of cylinder pressure curves between high and low pressures diesel engine for closed cycle operation at power 240 kW

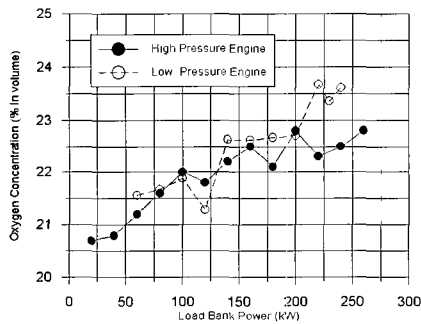
트로피지수가 낮은 이유는 과도한 이산화탄소의 발생으로 이산화탄소의 농도가 높기 때문이며 이는 폴리트로피지수를 제어하기 위해 공급된 아르곤량이 부족한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 지시평균유효압력(Indicated Mean

Effective Pressure : IMEP)과 실린더내의 최고압력 분포를 나타낸 것이다. 대체적으로 고압 디젤엔진의 폐회로 운전에서 높게 나타나고 있다. 이러한 주된 이유는 폐회로 운전에서 고압 디젤엔진이 저압 디젤엔진의 흡기압력보다 높기 때문이라 생각되

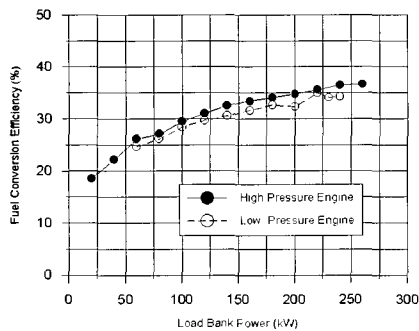


(a) Specific Fuel Consumption Profile

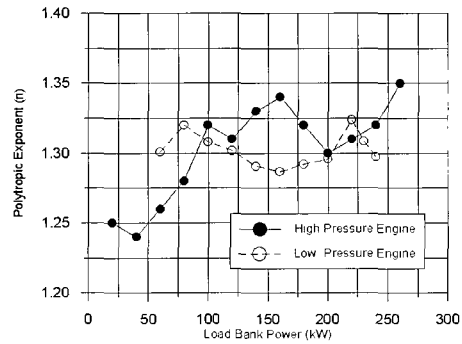


(b) Oxygen Concentration Profile

Fig. 6 Specific fuel consumption and oxygen concentration profiles for closed cycle operation

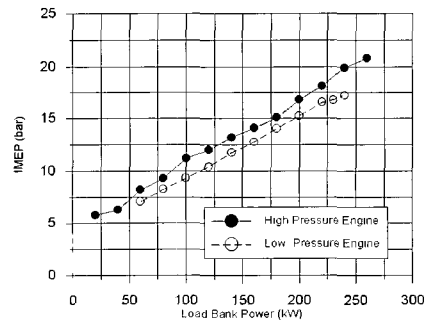


(a) Fuel Conversion Efficiency Profile

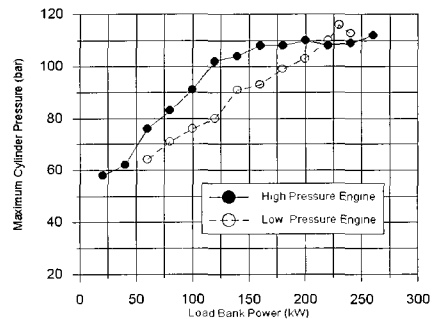


(b) Polytropic Exponent Profile

Fig. 7 Fuel conversion efficiency and polytropic exponent profiles for closed cycle operation



(a) Indicated Mean Effective Pressure Profile



(b) Maximum Cylinder Pressure Profile

Fig. 8 IMEP and maximum cylinder pressure profiles for closed cycle operation

며, 또한 분사된 연료가 점화지연기간이 짧아진 만큼 확산연소기간동안 충분히 연소되어 전체적인 실린더 압력을 높일 수 있기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 MTU8V183SE92 고압 디젤엔진을 이용하여 폐회로 시스템을 구성하였으며, ACAP 시스템 장비와 계측장비를 설치하여 폐회로 시스템에서 고압 디젤엔진의 연소특성을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 폐회로 시스템에서 고압 디젤엔진의 실린더내 연소압력이 상사점을 지난 직후 감소한 다음 다시 상승하였으며 과급을 하지 않는 디젤엔진의 일반적인 연소현상과 동일하였다.

2) 폐회로 디젤엔진의 실린더내 압력은 개회로 운전보다 높게 나타났으며, 최대압력은 34 bar 정도의 차이가 있었다. 따라서 재료선택에 주의를 해야 한다.

4) 비연료소모율은 저압 디젤엔진이 고압 디젤엔진보다 약간 높게 나타났으며, 엔진혼합기로 사용되는 산소의 농도는 체적비로 약 2124% 사이에서 증가하였다.

5) 지시평균유효압력과 실린더내의 최대압력은 고압 디젤엔진이 저압 디젤엔진보다 더 높게 나타났으며 240 kW의 고회력에서는 반대로 저압 디젤엔진의 연소압력이 더 높았다.

참 고 문 헌

- (1) Stan Zimmerman, "Submarine Technology for 21st Century", Pasha Publications Inc., pp. 21-28, 1990.
- (2) Tadataka Asada and Masashi Nagai, "Investigations on Recycle and Closed Cycle Diesel Engine," SAE Technical Paper Series No.800964, 1980.
- (3) Noboru Uchida, Yasuhiro Daisho, Takeshi Saito and Hideaki Sugano, "Combined Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emmisions," SAE Technical Paper Series No.930601, 1993.
- (4) David L. Mitchell, John A Pinson, and Thomas A. Litzinger, "The Effects of Simulated EGR via

Intake Air Dilution on Combustion in an Optically Accessible DI Diesel Engine," SAE Technical Paper Series No.932798, 1993.

- (5) Shen, Lizhong et al, "Combustion Process of Diesel Engines at Regions with Different Altitude," SAE Technical Paper Series No.950857, 1995.
- (6) Noboru Miyamoto, Takemi Chikahisa, Tadashi Murayama and Robert Sawyer, "Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wiebe's Functions," SAE Technical Paper Series No.850107, 1985.
- (7) Annand, W. J. D., "Heat Transfer In the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines," PIME, Vol.177 No.36, 1963.
- (8) Stringer F.W., Clarke A.E. and J.S. Clarke, "The Spontaneous Ignition of Hydrocarbon Fuels in a Flowing System," Proceeding Institute Mechanical Engineers, Vol.184, PT.3J, 1969-1970.
- (9) 박신배, 이효근, "디젤엔진을 이용한 폐회로 시스템의 성능해석에 관한 연구," 한국박용기관학회지, 제 24권 제 4호, pp54-61, 2000.

저 자 소 개



김인교(金仁敎)

1968년 11월 27일생. 1993년 경북대학교 기계공학과 졸업. 1995년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업. 1995년~현재 국방과학연구소 재직.



박신배(朴信培)

1959년 5월 16일생. 1983년 한양대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1985년 동대학원 졸업(공학석사). 1990년 한국과학기술원 졸업(공학박사). 현재 국방과학연구소 근무.