

디젤엔진을 이용한 폐회로 시스템의 성능해석에 관한 연구

박 신 배* · 이 효 근*

A Study on Performance Analysis of The Closed Cycle System Using the Diesel Engine

S. B. Park · H. K. Lee

Key words : Closed Cycle System(CCS:폐회로 시스템), Open Cycle(개회로), Semi-closed Cycle(반개회로), Closed Cycle(폐회로), Ignition Delay(점화지연), 열발생율(Heat Release Rate), Closed Cycle Diesel(CCD:폐회로 디젤엔진)

Abstract

The closed cycle diesel system is operated in closed circuit system where there is non air breathing with working fluid consisted of the combination of oxygen, argon and recycled exhaust gas for obtaining underwater or underground power sources. This study has been carried out to analysis the performance of closed cycle system by means of investigation on the combustion characteristics of diesel engine MTU8V183TE52 operating in open, semi-closed, and closed cycle modes. The combustion in closed cycle mode starts a little bit earlier than in open cycle mode. The oxygen concentration and fuel consumption at 240kW closed cycle running are 21~24% by volume and 77~79 kg/h, respectively. The maximum cylinder pressure and ignition delay time are investigated 110bar and 8.9degree. Also, The combustion simulation program has been studied to predict whether or not combustion. The results from numerical prediction for the basic, cylinder averaged quantities such as the cylinder pressure and the heat release showed excellent with the experimental data.

1. 서 론

일반 상용 디젤엔진은 가솔린 엔진에 비하여 열 효율이 높고 대출력을 얻을 수 있기 때문에 선박의

추진동력원으로 사용되고 있으며 대기층의 공기를 이용하여 운전된다. 그러나 공기의 공급이 없는 수중이나 지하 같은 곳에서 추진동력원을 얻기 위해서는 특별한 시스템이 요구된다. 폐회로 시스템¹⁾은

* 정회원, 국방과학연구소(원고접수일 : 2000년 3월)

디젤엔진에서 나오는 배기가스에 산소와 아르곤 등을 첨가하여 대기중의 공기 조성과 유사한 인공적인 혼합기를 만들어 작동유체로 사용하여 외부에서 공기의 공급이 없이 폐회로 사이클 운전이 가능하기 때문에 주로 수중에서 추진동력을 얻는데 사용되고 있다.

Asada²⁾ 등은 리사이클 및 폐회로 사이클 디젤엔진을 사용하여 공기가 희박한 지하의 발전기, 수중에서 작동하는 잠수정의 동력원 등에 적용하기 위한 여러 가지 기술적인 문제점을 연구하였다. Uchida³⁾ 등은 단기통 4 행정사이클 직접분사식 디젤엔진을 사용하여 연료소비율의 증가 없이 배기오염물질의 저감을 위해 EGR과 흡기과급을 병행하여 연구를 수행하였으며, Mitchell⁴⁾ 등은 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 2000m 정도의 고지대에서 디젤엔진의 출력은 일반평지보다 24% 정도가 낮고, 연료소비율은 5% 정도 증가하며, 뿐만 아니라 디젤엔진으로 들어가는 공기과잉률이 낮아 엔진의 열부하가 매우 높게 되고, 배기가스중의 Soot가 증가한다는 사실을 언급하였다.

본 연구에서는 MTU8V183TE52 디젤엔진을 사용하여 운전이 가능한 폐회로 시스템을 구성하고 데이터 측정장비로서 ACAP 시스템을 설치하였으며, 시스템 성능에 관련된 영향을 주는 폐회로 엔진출력, 산소농도, 연료소모량, 연소실최대압력 및 점화지연 등의 데이터를 실험적으로 획득하여 분석하였다. 또한 폐회로 운전에서 흡기조성의 영향을 예측할 수 있는 전산수치해석 프로그램을 통하여 연소실압력과 열발생률을 비교하였다.

2. 폐회로 시스템

2.1 실험장치

디젤엔진을 이용한 폐회로 시스템은 Fig. 1에서 본 바와 같이 디젤엔진, 배기냉각기, 흡수기, 해수

처리장치, 가스혼합기 및 제어계측장치 등으로 구성되어 있으며 혼합기 조성을 위한 산소와 아르곤 공급장치가 별도로 설치되어 있다. 디젤엔진에서 배출되는 배기가스는 약 350~400°C 정도의 고온이기 때문에, 바로 흡수기로 들어가면 폴리에틸렌으로 이루어진 내부회전체가 손상되므로 배기냉각기를 통하여 약 80°C 이하로 제한한다. 흡수기는 해수처리장치를 통하여 공급된 해수에 의하여 배기가스중 CO₂ 가스 일부를 해수에 용해하여 흡수하고 나머지는 다시 재순환되어 가스혼합기에서 산소와 아르곤이 첨가되어 인공적으로 조성된

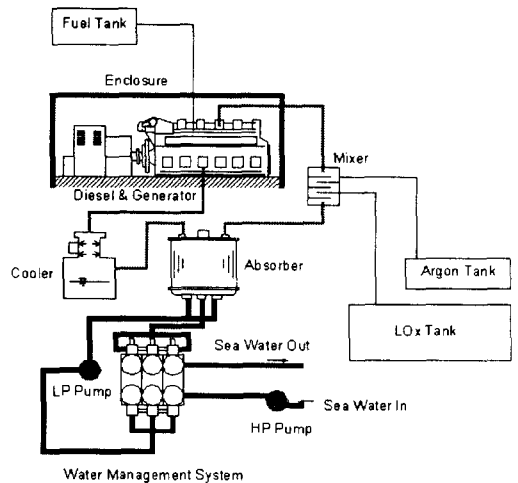


Fig. 1 Schematic diagram for closed cycle diesel system

Table 1 Specifications for test diesel engine

NO	Description	사양 및 제원
1	Model	MTU 8V 183 TE52
2	General Specifications	4-Stroke Diesel
3	Number of cylinders	8
4	Bore	128.0 mm
5	Stroke	142.0 mm
6	Connecting Rod Length	257.0 mm
7	Compression Ratio	14.25
8	Mean Piston Speed	8.1 m/s
9	Displacement Volume	14,618 cm ³
10	Maximum Power	360/1800 kW/rpm
11	Injection Timing	14° BTDC
12	Fuel Injection Pressure	200 Bar
13	Ignition Order	1-5-7-2-6-3-4-8

혼합기가 공기대신 디젤엔진에 공급된다. 이와 같은 과정이 제어계측장치를 통하여 반복함으로써 폐회로 사이클 운전이 가능하게 된다.

본 연구에서 폐회로 시스템의 구성에 사용한 디젤엔진은 독일 MTU사의 MTU8V183TE52이며 주요 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

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 ±10V의 전압으로 증폭하여 데이터 취득장치로 보낸다. 크랭크각도는 회전축에 엔코더를 장착하여 측정하였으며, AVL364 모델을 사용하였다. 폐회로 시스템 성능을 분석하기 위하여 미국 DSP Technology사의 ACAP(Advanced Combustion Analysis Program) System 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 구성도이다.

폐회로 시스템의 디젤엔진 흡기로 들어가는 혼

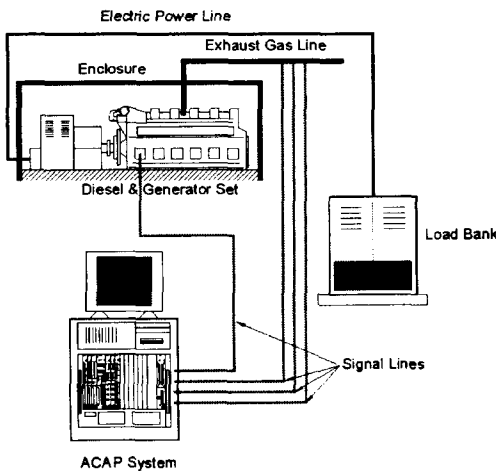


Fig. 2 ACAP system and experimental apparatus set up

합기 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 가스라인 입출구에 CO₂센서를 설치하여 CO₂ 가스량을 측정하였다. 또한 엔진 흡배기 라인에 온도, 압력 및 유량센서 등을 장착하여 계측하였다.

2. 2 전산수치해석

압축 및 팽창과정에서 발생한 실린더내의 압력은 연소특성을 파악하는데 중요한 정보가 된다. 이러한 정보를 통하여 연료의 화학적인 에너지 발생률 즉 열발생률과 연소하는데 필요한 연료의 질량비를 구할 수 있다. 복잡한 디젤연소인 경우 그 연소과정의 메커니즘을 정확히 묘사할 수 있는 유효적절한 3차원모델이 제시된 적이 없고, 특히 흡기 조성이 공기가 아닌 다성분의 작동유체를 사용하는 경우 연소모델은 더 한층 복잡하다.

본 연구에서는 일부 실험적 데이터를 이용하여 엔진성능 및 연소생성물을 예측하기 위하여 단일 영역모델을 사용하였으며, 디젤엔진의 실린더내 연소실을 준정적평형과정이라 가정하고, 열역학 제1법칙을 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i = \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

여기서 dQ/dt 는 연소에 의한 열발생률과 시스템 경계를 통해 전달되는 열전달량의 합이며 dW/dt 은 시스템이 한 일률, m_i 는 시스템 내로 유입 또는 유출되는 질량유량, h_i 는 m_i 의 엔탈피, 그리고 $U = \sum_{i=1}^n x_i \cdot u_i$ 는 시스템내의 총 내부에너지이다.

본 연구에서 적용하는 직접분사식 폐회로 디젤엔진은 예연소실이 없으므로 단일 개회로 시스템으로 단순화시킬 수 있다. 시스템의 경계로 유입 또는 유출의 유동에는 연료분사에 의해 연료가 유입되어 흡기와 혼합되는 유동과 실린더와 피스톤 사이의 틈새로 혼합물이 흘러들어 가는 유동의 두 가지 유동이 있다. 여기서 틈새로 들어가는 유동을 무시하고, 식(1)를 직접분사식 폐회로 디젤엔진에 적용하기 위하여 시간미분 대신에 크랭크각도로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{\chi-1}{V} \left[-\frac{\chi}{\chi-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{dQ}{d\theta} \right] \quad (2)$$

여기서 χ 는 비열비, Q 는 연소에 의한 열발생률 Q_H 와 실린더 벽면을 통하여 손실되는 열전달량 Q_w 로 나타낸다. 크랭크각도의 함수로서 실린더내의 체적을 나타내면

$$V = V_s \left[\frac{\epsilon}{\epsilon-1} - \frac{1-\cos\theta}{2} + \frac{L}{S} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{2L}{S} \right)^2 - \sin^2\theta \right)} \right] \quad (3)$$

으로 표현된다. 여기서 V_s 는 행정체적, ϵ 은 압축비, S 는 피스톤행정, L 은 컨넥팅로드 길이이다. 기하학적 형상이 주어진 내연기관의 크랭크각도에 따른 실린더체적은 구할 수 있다.

실린더내의 압력을 계산하기 위하여 열발생률에 대한 수학적 모델은 실린더내의 혼합가스가 이상기체로서 흡입, 압축, 폭발 및 팽창과정의 진행정에 대해서 균일하게 혼합된 상태로 분포된다고 가정하는 단일영역모델을 사용하였으며, 연소과정중 혼합가스는 완전히 연소한다고 가정한다. 따라서 단일영역모델에서 계산의 정확도는 열발생률 Q_H 의 정확한 수학적 모델링에 좌우 된다. 본 연구에서 열발생률은 Miyamoto⁶⁾ 등이 제시한 다음과 같은 Double Wiebe의 연소함수를 사용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_H}{d\theta} = & \beta \frac{Q_p}{\theta_p} (M_p + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_p} \right)^{M_p} \exp \left[-\beta \left(\frac{Q_d}{\theta_p} \right)^{M_p + 1} \right] \\ & + \beta \frac{Q_d}{\theta_d} (M_d + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_p} \right)^{M_d} \exp \left[-\beta \left(\frac{Q_d}{\theta_p} \right)^{M_d + 1} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 β 는 실험적으로 주어진 상수이며 Q_p 와 Q_d 는 각각 열발생량, θ_p 와 θ_d 는 각각의 연소기간 그리고 M_p 와 M_d 는 형상계수로서 3.0과 0.9이다. 한편, 실린더 벽면을 통하여 손실되는 열전달량 Q_w 을 계산하기 위하여 Annand⁷⁾ 등의 열전달모델을 사용하였다. Annand 등은 연소실내에서 열전달은 대류열전달과 복사열전달이 동시에 일어난다고 가정하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{dQ_w}{dt} = A \left[ak \frac{Re^b}{D} (T_g - T_w) + c(T_g^4 - T_w^4) \right] \quad (5)$$

여기서 A 는 실린더내의 연소실에 있는 연소혼합가스가 접촉하고 있는 실린더 벽면의 면적이며, T_g 와 T_w 는 각각 연소실내의 혼합가스와 실린더 벽면의 온도이다. 그리고 a, b 및 c 는 상수로서 각각 0.26, 0.75 및 3.88×10^{-8} 이다.

실린더내의 압력을 정확하게 계산하기 위해서는 연소과정의 연소특성을 잘 모델링해야 한다. 특히 연료의 연소특성과 관련하여 연료의 점화지연시간은 폐회로 사이클 해석에 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 연료의 점화지연시간을 예측하기 위하여 다음과 같은 Stringer⁸⁾의 점화지연모델을 적용하였다.

$$\tau_{id} = AP_{max}^{-n} \exp \left[\frac{E_A}{RT_{max}} \right] \quad (6)$$

여기서 P_{max} 와 T_{max} 는 각각 실린더내의 최대압력과 온도를 나타내고 E_A 는 활동에너지이다.

3. 실험결과 및 고찰

폐회로 사이클 운전이 가능한 실험장치를 구성하고 시스템 성능에 영향을 주는 인자들을 분석하기 위하여 먼저 대기 중의 공기를 이용하여 정상적으로 운전한 개회로 실험을 하였으며, 관련 실험데이터를 충분히 분석한 후 여러 가지 폐회로 특성실험 즉 연속운전실험, 출력변환실험 및 연소특성실험 등을 수행하였다.

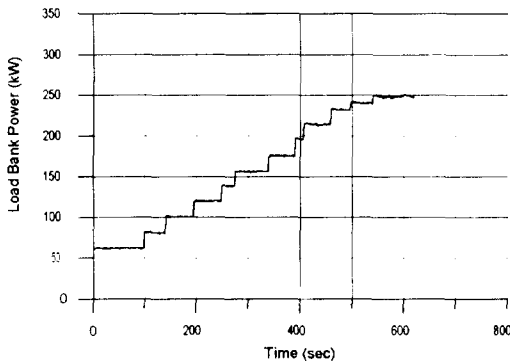
폐회로 시스템의 연속운전실험은 단계적인 출력변화에 따른 폐회로 시스템의 안전성을 조사한 것이다. Fig. 3은 폐회로 사이클 운전에서 디젤엔진의 출력분포를 보여주고 있고 초기상태에서 출력은 단계적으로 증가 시켜가면서 운전하였으며 출력 240kW에서 연속운전을 한 결과 폐회로 시스템이 안정적으로 운전되었다. Fig. 4는 폐회로 시스템에 사용하는 디젤엔진의 운전에 필요한 산소농도와 연료소모량을 측정 한 것이다. 240kW 정상 상태에서 산소농도는 물분율 대비 21~24% 정도이며, 연료소모량은 77~79kg/h이다.

Fig. 5는 출력 120kW에서 각각 개회로, 반개회로 및 폐회로 운전일 때 실린더내의 압력분포를 비교한 것이다. 개회로 운전과 반개회로 운전의 차이

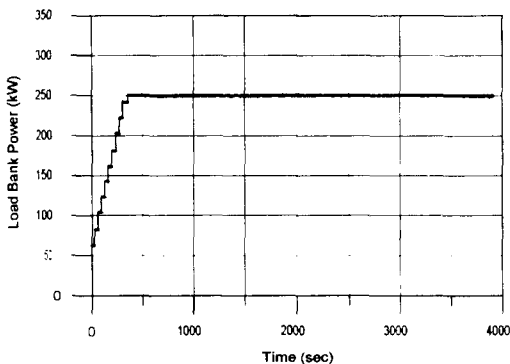
점은 배기가 흡수기를 통과하는지 여부에 따라서 정의되며 배기가 흡수기를 통과하지 않고 대기중으로 배출되면 개회로 운전이고, 흡수기를 통과하여 대기중으로 배출되면 반개회로 운전상태이다. 개회로 운전이나 반개회로 운전일 때 실린더내의 압력 변화는 거의 없으나, 폐회로 운전일 때는 상당히 차이가 있다. 특히 최고폭발압력은 약 28bar 정도의 차이가 있음을 보여주고 있다. 이는 폐회로 상태로 운전할 때 실린더내의 부속품은 보다 견고한 것으로 설계되어야 한다는 것을 의미한다. 실린더내의 연소 시작점은 폐회로 운전일 때가 개회로 또는 반개회로 운전일 때 보다 상사점에 근접해 있으며, 점화지연기간도 줄어들었다. P-V선도를 보면 폐회로 운전일 때 흡기압력과 배기압력은 개회로 및 반개회로 운전할 때 보다 높음을 알 수 있다. 또한 압축과정에서의 비열비는 로그 스케일의

P-V선도에서 압축과정 그래프의 기울기로 나타낸다. 각 회로의 압축과정 그래프의 기울기를 보면 폐회로 운전일 때 개회로나 반개회로보다 작게 나타나고 있다. 이는 폐회로 운전에서 흡입하는 혼합기가 대기의 공기보다 비열비가 작은 상태임을 알 수 있다.

Fig. 6은 폐회로 운전에서 출력이 각각 120, 180 및 240kW 일 때 출력 증가에 따른 P-θ와 P-V 선도를 나타낸 것이다. 실린더내의 연료분사는 출력에 상관없이 상사점 근처에서 시작됨을 알 수 있다. 이는 점화지연기간이 개회로나 반개회로 운전보다 짧다는 것을 보여주고 있다. Fig. 7에서는 폐회로 운전일 때 실린더내 최고압력은 동일 출력의 개회로나 반개회로 운전에서 보다 매우 높게 나타나고 있으며, 출력이 상승할수록 최고압력은 증가하였으며, 출력이 240kW 일때 실린더내의 최대압

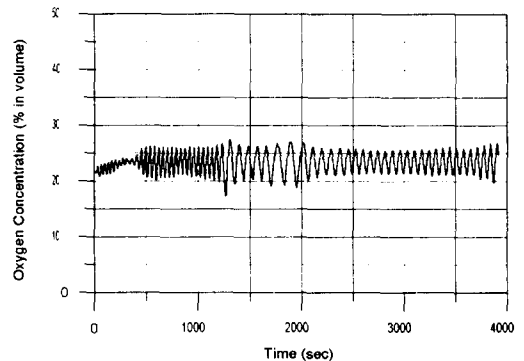


(a) Initial Operation

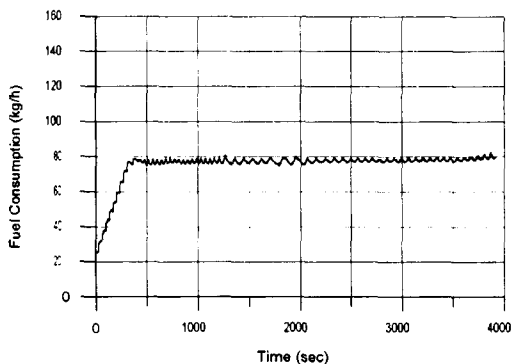


(b) Continuous Operation

Fig. 3 Load bank power transitions of closed cycle diesel engine



(a) The Oxygen Concentration Transient



(b) Fuel Consumption Transient

Fig. 4 The oxygen concentration and fuel consumption transitions at power 250kW

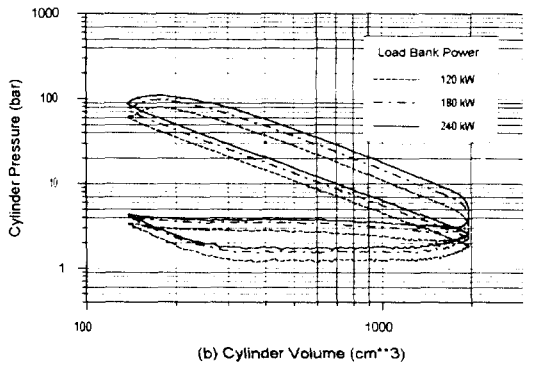
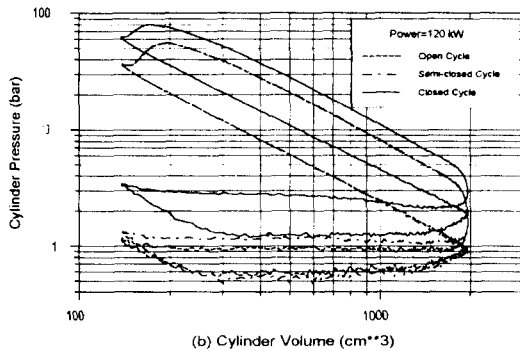
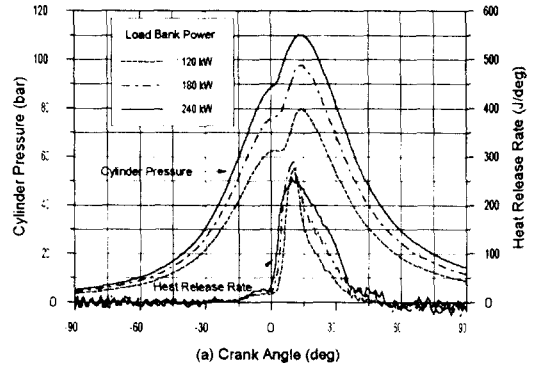
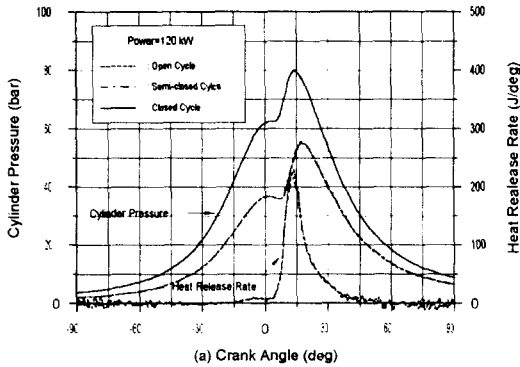


Fig. 5 The comparisons of cylinder pressure curves at power 120kW for open, semi-open and closed cycle operations

Fig. 6 The comparisons of the cylinder pressure curves at power 120kW, 180kW and 240kW for closed cycle operation

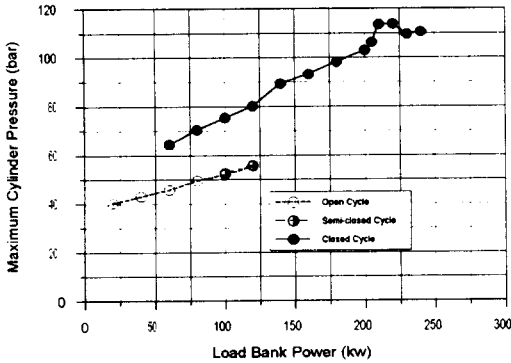
력은 약 110bar이다. 열발생률은 팽창과정에서 개회로 운전이나 반개회로 운전보다 완만히 감소하고 있다. 이는 연료의 분사량이 많고 점화지연기간이 짧아짐에 따라 확산연소부분이 증가하게 되어 연소가 완만하게 이루어지기 때문이라 생각된다.

폐회로 디젤엔진의 실린더내의 압력을 실험적으로 측정한 결과와 전산수치해석에 의한 시뮬레이션의 예측결과를 비교한 것이 Fig. 8에 주어져 있다. 계산결과는 실험장치의 로드뱅크에서 측정 한 부하가 240kW인 경우 흡기압력이 2.52bar 이며 흡기조성이 CO₂ 25%, O₂ 21%, N₂ 35%, H₂O 3% 및 Ar 16% 인 경우를 비교한 것이다. 그림에서 본 바와 같이 실린더내의 최고압력은 약 110bar이며, 시뮬레이션 결과 실험치와 거의 일치함을 보여주고 있다. 이것은 점화지연시간을 예측하는데 사용된 모델이 상당히 적절하다는 것을 나타내고 있다. 연료가 분사되어 연료의 점화가 일어날 때까지

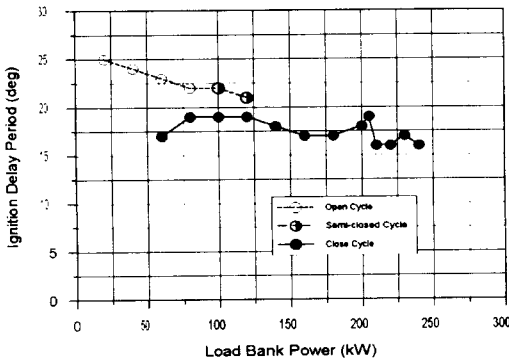
의 점화지연기간은 약 8.9 degree 정도이다. 실린더내의 열발생률을 보면 점화지연기간에서 이론적인 열발생률은 0으로 하였으며 연소과정에서 열발생률은 실험치와 거의 일치함을 보여주고 있다. 본 연구에서 제시한 열발생률과 착화지연의 수학적 모델은 폐회로 디젤엔진의 연소과정을 잘 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 특히 흡기압력이 변할 때 흡기조성을 실험적으로 측정할 수 없는 경우에 수치계산을 통하여 흡기조성을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 MTU8V183TE52 디젤엔진을 사용하여 폐회로 시스템을 구성하였으며, ACAP 시스템장비와 계측장비를 설치하여 폐회로 시스템의 연속운전실험, 출력변환실험 및 운전특성실험



(a) Maximum Cylinder Pressure Curve

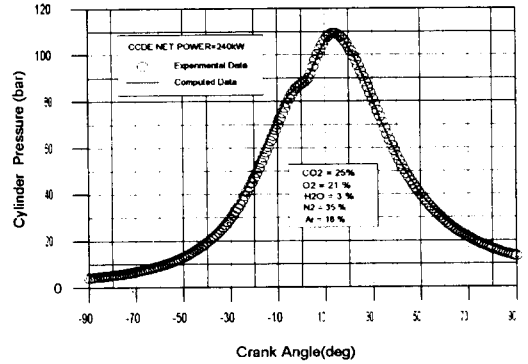


(b) Ignition Delay Period Curve

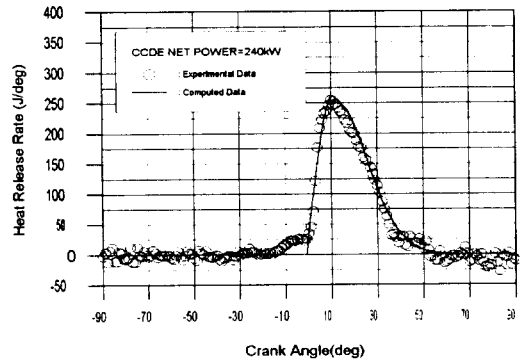
Fig. 7 The maximum pressure and ignition delay period curves at each cycle operation condition

등을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 폐회로 시스템의 연속운전실험은 고출력에서도 시스템이 안정적으로 운전할 수 있음을 확인하였으며, 출력 240kW에서 산소농도는 물분을 대비 21~24% 이고, 연료소모량은 77~79 kg/h이다.
- 2) 폐회로 디젤엔진의 실린더내 압력은 폐회로 운전일 때 개회로 또한 반개회로 운전보다 높게 나타났으며, 최대압력은 28bar 정도의 차이가 있었다. 또 폐회로 운전일 때 혼합기의 비열비가 공기의 비열비보다 다소 낮았다.
- 3) 폐회로 운전에서 점화지연기간이 개회로나 반개회로 운전보다 짧았으며 동일 출력에서 실린더내 연소압력이 높게 측정되었다. 열발생률은 팽창과정에서 개회로 운전이나 반개



(a) Cylinder Pressure Curves



(b) Heat Release Rate Curves

Fig. 8 The comparison of the cylinder pressure curve and the heat release rate between experimental and numerical simulation data

회로 운전보다 완만히 감소하였다.

- 4) 폐회로 디젤엔진의 연소특성을 분석하기 위해 제시한 수학적 모델은 폐회로 사이클 성능을 잘 예측할 수 있으며, 수치해석결과 실린더내의 연소압력과 열발생률은 실험치와 잘 일치하였다.

참고문헌

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", Hitachi Shipbuilding & Engineering Co., LTD, 75th SAE Technical Paper Series No.800964, 1980.

3. Noboru Uchida, Yasuhiro Daisho, Takeshi Saito and Hideaki Sugano, "Combined Effects of EGR and Supercharting on Diesel Combustion and Emmisions", Hito Motor, LTD, Waseda University, 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", Pennsylvania State University, 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 Sawer, "Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wjebe' 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", Procceding Institute Mechanical Engineers, Vol. 184, PT.3J, 1969~1970.

저 자 소 개



박신배 (朴信培)

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



이효근 (李孝根)

1956년 9월 19일생. 1979년 서울대학교 졸업(공학사). 1988년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1994년 한국과학기술원 졸업(공학박사). 현재 국방과학연구소 근무