

근사적 열발생율에 의한 예연소실식 디젤기관의 연소해석

왕 우 경

여수수산대학

(1993년 2월 8일 접수)

Combustion Analysis in a Pre-combustion Chamber Diesel Engine by Approximate Heat Release Rate

Woo-Kyung WANG

Yosu National Fisheries University

(Received February 8, 1993)

In this study, the combustion characteristics in a pre-combustion chamber diesel engine was investigated with experimental conditions of marine engine load. The heat release analysis used was a single-zone single-chamber thermodynamic analysis based on pre-combustion chamber pressure-time data. Based on the results of this investigation, the following conclusions were reached :

- 1) Increasing the load, peak pressure was increased and position of P_{max} was retarded in crank angle degrees.
- 2) Ignition delay time was almost constant without relating to the load and the heat values to form a combustibile mixture were decreased apparently with increasing the load.
- 3) In premixed-combustion mode, the pattern of heat release rate was resembled without relating to the load and premixed-combustion time was shortened with increasing the load.
- 4) Increasing the load, mass of premixed-burned fuel was increased slightly, but was invariable beyond a certain fuel-air ratio.
- 5) Increasing the load, premixed-burned fraction was decreased.

서 론

디젤기관은 높은 열효율과 컴팩트한 구조
적 이점으로 인하여 차량, 선박 및 산업기계

용으로 널리 이용되고 있으나 배출가스의 공
해문제와 폭발적 연소로 인한 소음문제 및
열효율 등에서 개선의 여지를 많이 갖고 있
다. 이러한 공해 및 소음문제의 개선과 열효

율을 향상시키기 위해서는 운전되고 있는 기관의 연소상태를 명확하게 해석할 필요가 있다.

특히 예연소실식 디젤기관은 연소실이 주실과 부실로 분리되어 짧고 좁은 연락공으로 연결되고 있으며, 이들 양실에서 연소가 진행되므로 그 연소과정은 아주 복잡하다.

이런 관점에서, 예연소실식 디젤기관의 연소과정을 상세히 규명하는 연구가 진행되어 왔으며 이들 연구의 대부분은 실린더내의 크랭크각에 대한 압력데이터를 입력으로 한 근사적인 열발생 분석법¹⁾을 이용하고 있다. 그리고 이 연구결과들은 기관의 연소특성에 관한 정량적인 정보를 제공하고 있다. 그 중 Anisits²⁾, Watson³⁾ 및 Kamel⁴⁾ 등은 각각의 연소실에 대한 열발생율을 계산하기 위해 예연소실과 주연소실의 압력데이터를 이용하였다. 그러나 이들 양실간의 압력차는 근소하기 때문에 2개의 압력변환기를 조화시키는데 어려움이 있고, 요구되는 측정정밀도가 압력변환기의 능력을 초과할 때도 있다. 이러한

문제점 때문에 Terada^{5),6)}는 연락공에 설치한 이온검출장치와 주연소실의 압력데이터로 양실의 열발생율을 계산했으며, Alkidas⁷⁾ 등은 주연소실만의 압력데이터를 이용하여 예연소실과 주연소실의 구분이 없는 전체 열발생율로서 연소과정을 해석하였다. 그러나 연료의 분사 및 연소 시작은 예연소실에서 이루어지고 초기 연소단계에서는 예연소실내에 존재하는 연료의 화학적에너지에 의해 발생하는 압력이 주연소실보다 높게 되므로 초기 열발생율은 예연소실의 압력에 민감하다.

따라서, 본 연구에서는 예연소실만의 크랭크각에 대한 압력데이터를 이용하여 single-zone, single-chamber의 열역학적 해석으로 계산된 열발생율에 의해 예연소실식 디젤기관의 연소특성 즉 착화지연, 연소기간 및 연소형태를 부하변동에 따라 연구 검토하였다.

실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

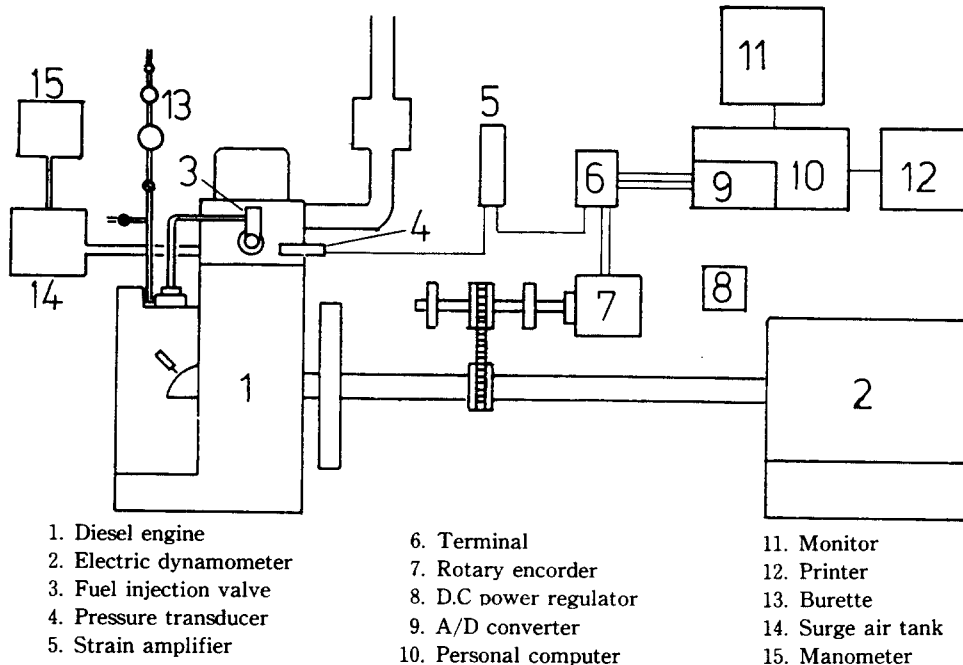


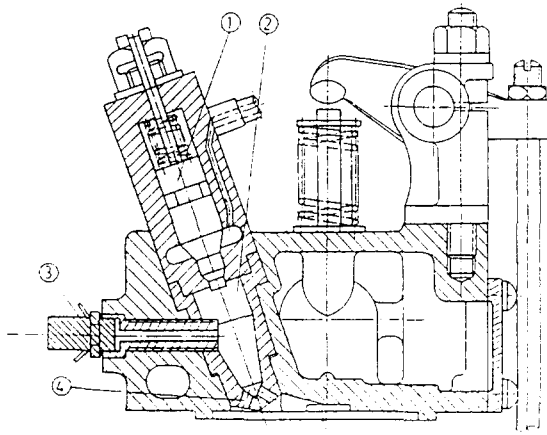
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

주요부분은 실험대상기관, 전기동력계, 데이터 수집장치, 연료소비량 및 흡입공기량 측정장치로 구성되어 있다.

본 실험에 이용된 기관은 소형 선박용 예연소실식 4행정 디젤기관으로 Table 1에 기관의 제원을 나타내었다. Fig. 2는 실험용 기관의 예연소실 형상과 압력변환기의 설치 위치를 나타내었다.

Table 1. Engine specifications

Model	Jam-10
Number of cylinder	1
Combustion chamber	Pre-combustion chamber
Bore × Stroke	96×105 mm
Rated output	5.8PS/1500 rpm
Compression ratio	18:1



1. Fuel injection value 3. Pressure transducer
2. Pre-combustion chamber 4. Connecting passage

Fig. 2. Configuration of pre-combustion chamber.

실린더내 변동압력은 예연소실에 설치된 스트레인 게이지식 압력변환기(PE-200KS)에서 전기적 신호로 바뀌어 증폭기에서 증폭된 후 A/D 변환기(A/D conversion time: 5 μs, 12 bit resolution)에서 디지털신호로 변환되어 컴퓨터에 저장된다. 데이터 수집은, 각각의 운전조건에서 크랭크각 1°CA 마다 즉 1 사이클에 720개의 압력데이터를 20회 연속하

여 수집하였다. 이들 압력데이터로 부터 평균압력을 계산하였으므로 각각의 크랭크각에 대한 표준편차를 포함하고 있다.

기관의 출력은 전기동력계로 측정하였고, 기관회전수는 디지털 타코미터를 이용하여 정밀 측정하였다. 흡입공기량은 Air surge tank에 부착된 경사 마노미터로 측정하였으며, 연료소비량은 뷰렛에 들어 있는 35cc의 연료가 소모되는데 걸리는 시간을 측정하여 계산하였다.

운전조건은, 본 실험기관의 연속 최대 출력 조건(1500 rpm, 5.8 ps)을 4/4 부하로 하고, 박용부하 특성식⁸⁾에 의해 각 부하에서의 회전수를 구한 다음, 각각의 부하에 맞게 토크를 결정하였다. Table 2는 실험조건을 나타내며, 실험시에 냉각수 출구온도는 62±2 °C로 유지하였다. 또 피스톤 상사점(TDC)과 로터리 엔코더(TRD-S360-RE)의 “Z”펄스(TDC감지용)를 일치시키기 위하여 기관을 모터링 상태로 운전하여 최고 압축압력이 “Z”펄스 상에 나타나도록 하여 데이터 수집의 시작점으로 하였다.

Table 2. Experimental conditions

Load	1/4	2/4	3/4	4/4	12/10
R.P.M	939	1202	1363	1500	1603
Torque(ft-lbs)	8	12.5	16.5	20	22.5
Output(PS)	1.45	2.9	4.35	5.8	6.96

결과 및 고찰

1. 연소압력 및 온도

Fig. 3 및 Fig. 4는 부하변화에 따른 압력-크랭크각 선도(P-θ)와 최고압력(P_{max})과 크랭크각 위치관계를 각각 나타낸다. 그림에 의하면, 부하가 증가할수록 최고압력이 높아지고 압력-크랭크각 선도의 폭도 넓어지며 최고압력의 크랭크각 위치가 후진되나 과부하에서는 최고압력과 그 위치가 거의 변

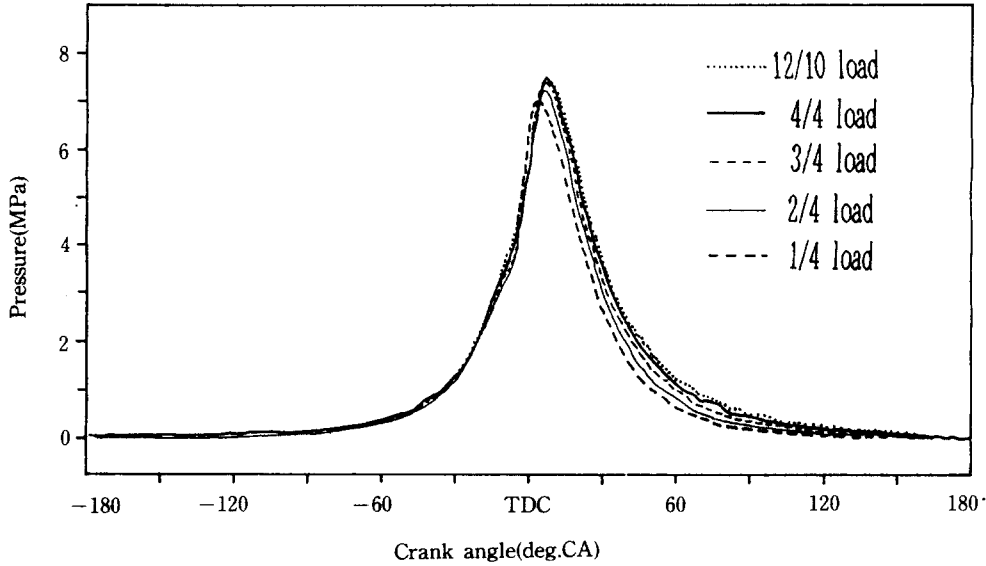


Fig. 3. Pressure- crank angle diagram with load.

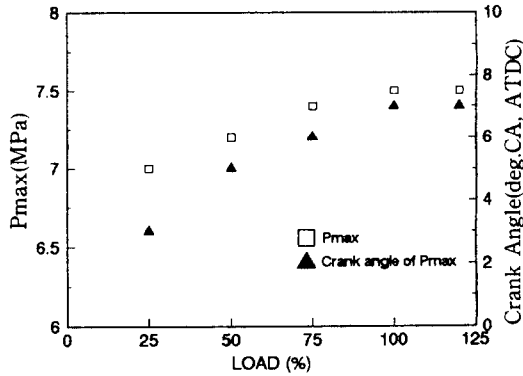


Fig. 4. The relationship between P_{max} and crank angle of P_{max} with load.

화하지 않음을 알 수 있다. 이는 최고압력에 영향을 미치는 착화 지연기간과 그 기간 중에 형성되는 가연 혼합기량에 관계하는 것으로 과부하에서는 착화 지연기간 및 가연 혼합기량이 거의 일정하기 때문이라 사료된다.

Fig. 5는 연소실내의 평균온도-크랭크각 선도($T-\theta$)를 부하별로 나타낸 것이다. 그림에서 나타나는 바와같이, 부하가 증가함에 따라 계산된 평균 가스온도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 부하 증가에 따라 사이클당

분사량이 많아지므로 연소되는 연료량이 증가하기 때문이다. 그리고 압축행정의 말기 즉 분사 시작점 부근까지의 평균 가스온도가 부하증가에 따라 다소 높아지는 것은 기관회전수 증가로 인해 압축압력이 상승하기 때문이다. 여기서 계산된 연소실내 평균 가스온도는 공간적으로 균일한 연소를 한다는 가정 하에서 공간 평균온도를 나타낸 것이다.

2. 열발생율

열발생율 선도에 의한 연소해석은 연소과정중에 일어나는 열발생율(heat release rate)을 검토함으로써 착화 지연기간, 최대 열발생율, 연소기간을 규명할 수 있다. 여기서 착화 지연기간(ignition delay period)이란 연소실내에서 분사된 연료가 증발함으로써 열발생율의 기울기가 음(-)으로 되어 열발생율이 점차 감소하기 직전의 위치(분사시작점)에서 가연 혼합기가 착화하여 열을 발생함으로써 열발생율이 최초로 양(+)이 되는 위치(착화점)까지를 말하고, 연소기간이란 연료가 착화하여 최대 열발생율을 나타낸 후

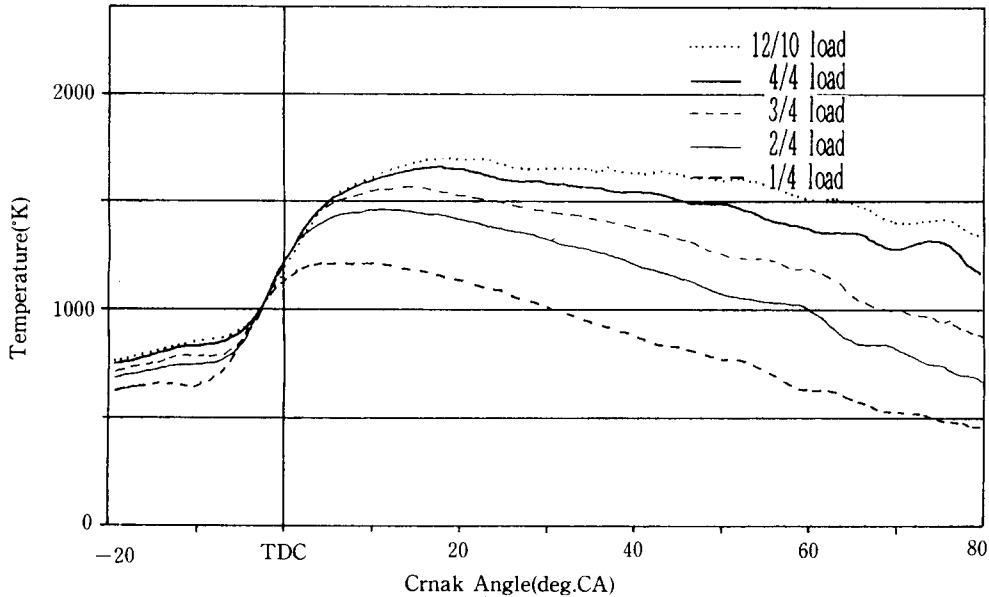


Fig. 5. Temperature- crank angle diagram with load .

열발생율이 점차 감소하다가 0부근에서 같은 크기로 음(-) 양(+)으로 진동하기 직전의 위치(연소끝점)까지의 기간을 말한다. 또 연소기간을 세분화 해 보면, 착화 지연기간중에 형성된 가연 혼합기가 급격히 연소하여 높은 열발생율을 나타내는 예혼합 연소기간 (premixed-combustion period), 착화 지연 기간중에 형성된 가연 혼합기가 예혼합 연소 기간 중에 모두 연소됨으로 인해 연료증기와 공기와의 혼합과정에 의해 열발생율이 지배 되는 확산 연소기간(diffusion-combustion period)으로 구분할 수 있다.

Fig. 6은 열발생율 선도($dQ/d\theta - \theta$)를 부하별로, Fig. 7은 부하에 따른 착화 지연시간 (Ignition delay time) 및 연소시간 (combustion time)을 나타낸 그림이다. 그림에 의하면, 부하가 증가할 수록 착화 지연기간은 크랭크각도상 길어지고 가연 혼합기 형성에 요하는 흡열량은 걸보기로 감소하고 있다. 그러나 부하가 증가함에 따라 기관회전수가 상승하므로 그 기간을 크랭크각도로 비

교할 수 없고, 기관회전수에 대한 크랭크각도를 시간으로 환산하여 비교해 보면 착화 지연시간은 거의 일정했다. 이는 저부하에서는 연소실내의 압축가스 온도, 압력 및 연소실 벽면의 온도가 낮아, 가연 혼합기 형성에 소요되는 흡열량이 주로 압축가스에서 열전달되어 연소실내의 압력강하가 크기 때문이라 사료된다. 그리고 고부하로 될수록 연소실내의 온도, 압력 및 연소실 벽면의 온도가 높아 가연 혼합기 형성에 소요되는 흡열량이 압축가스에 의한 열전달 보다는 분무가 연소실 벽면에 충돌하면서 연소실 벽면에 의한 열전달 영향이 크므로 압축가스의 압력강하가 적고, 가연 혼합기가 부분적으로 착화하여 미약한 열을 발생하기 때문이라 사료된다. 또 부하가 증가함으로써 이 기간중에 분사되는 연료량이 많아지나, 기관회전수가 상승하므로 연소실내의 온도와 swirl이 높아 가연 혼합기 형성을 촉진하기 때문에, 부하에 관계없이 착화 지연시간은 거의 일정하다고 사료된다.

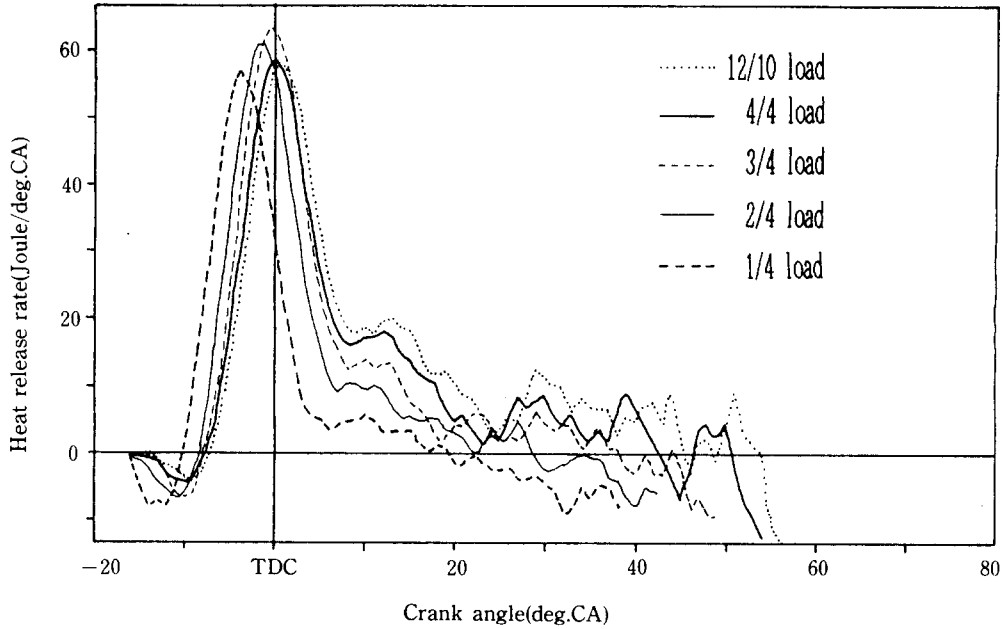


Fig. 6. Heat release rate-crank angle diagram with load .

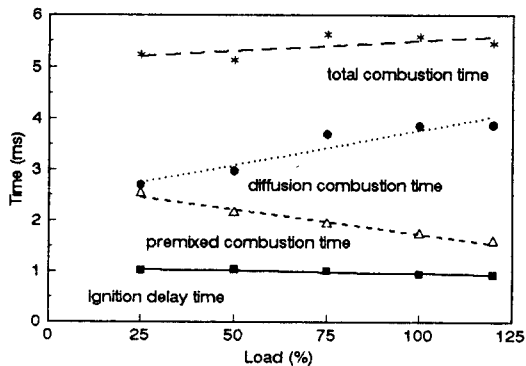


Fig. 7. Variations of ignition delay and combustion time with load .

예혼합 연소기간중의 열발생율 양상은 부하에 관계없이 거의 비슷하나 고부하로 될수록 예혼합 연소기간의 후기에 약간 높은 열발생율을 나타낸다. 그리고 예혼합 연소에 요하는 시간은 부하가 증가함에 따라 짧아진다. 이는 부하가 증가할수록 착화 지연기간 동안 분사되는 연료량이 많아 가연 혼합기량이 다소 증가하지만 연소실내의 온도가 높아 보다 높은 연소율로 연소하기 때문이라 사료

된다.

확산 연소기간중의 열발생율은 부하가 증가함에 따라 약간 높은 열발생율을 나타내고 있지만, 그 모양은 일정치 않고 확산 연소에 요하는 시간은 길어진다는 것을 알 수 있다. 이는 부하가 증가함에 따라 예혼합 연소기간에 미처 연소하지 못한 연료량이 많아지고, 이 기간중에는 연소실 분위기에 따른 연료와 공기 혼합율에 따라 연소과정이 지배되기 때문이라 사료된다. 그리고 이 확산 연소에 요하는 시간에 따라 전체 연소시간이 좌우되고, 부하가 증가함에 따라 연소시간이 길어짐을 알 수 있다.

3. 누적 열발생량

Fig. 8은 누적 열발생량-크랭크각 선도 ($Q-\theta$)를 부하별로, Fig. 9는 부하에 따른 연소비율(Q_b/Q_{LHV})을 나타낸다. 실린더내에 분사된 연료가 연소하여 발생하는 연료의 화학적에너지는 연료가 완전연소하고 열손실이

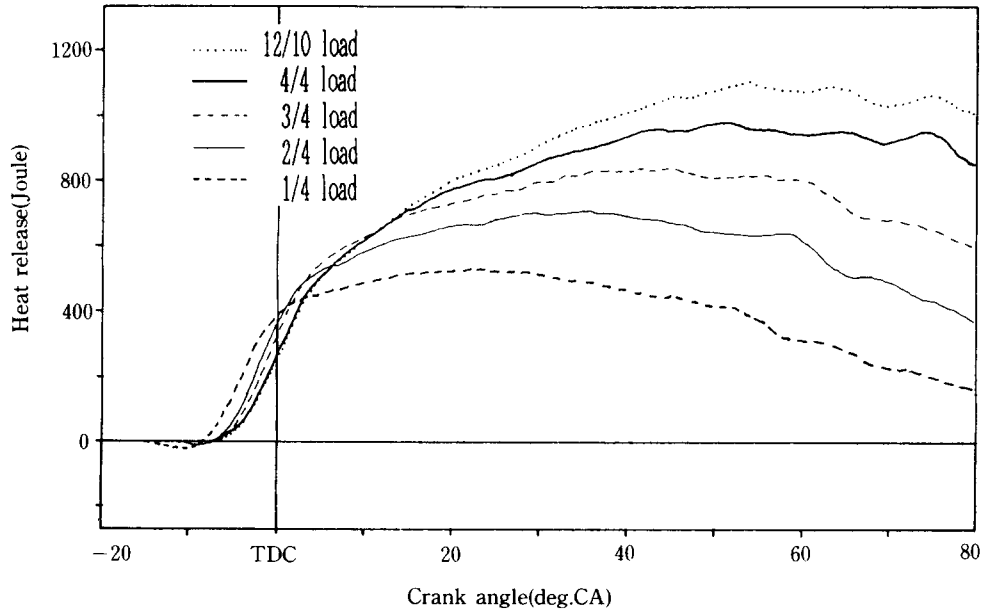


Fig. 8. Cumulative heat release - crank angle diagram with load.

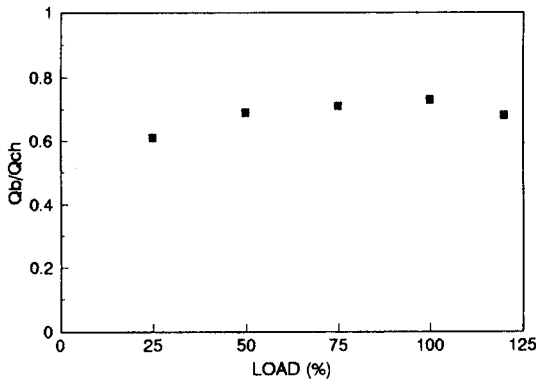


Fig. 9. Ratio of cumulative heat release to fuel energy with load.

없다면 열발생율의 합과 같다. 즉 분사량 (m_f)과 연료의 저위발열량(Q_{LHV})의 곱으로 나타낼 수 있다. 그러나 실제기관에 있어서 연소실내에 분사된 연료가 완전연소되기 어려울 뿐만 아니라 연소실 벽면으로 부터의 열손실, 가스누설에 의한 열손실 등을 포함한다. 그림에 의하면, 저부하에서 고부하로 갈수록 연소비율이 증가하다 과부하가 되면 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 부하가 증

가함에 따라 연공비 (fuel-air ratio)가 상승하나 연소실내의 온도와 swirl이 높아 연소가 촉진된다고 생각할 수 있으며, 과부하에서는 연공혼합기가 농후하여 미처 연소치 못한 연료증기가 배기가스와 함께 배출되기 때문이라 사료된다.

4. 예혼합 연소분율 및 연소량

Fig. 10은 부하에 대한 예혼합 연소분율 (Premixed-Burned Fraction)과 연공비 (Fuel-Air Ratio)의 관계를 나타낸다. 그림에 의하면, 부하가 증가함에 따라 예혼합 연소분율은 감소하고 연공비는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 저부하에서는 분사시간이 짧고 분사량이 적은 반면 흡입 공기량은 상대적으로 많아 연공비가 낮고, 착화 지연기간중에 연료의 대부분이 분사되어 가연혼합기를 형성하여 예혼합 연소기간중에 연소되므로 예혼합 연소분율이 높아진다고 생각된다. 그리고 고부하가 될수록 분사기간이 길고 분사량이 많은 반면 흡입 공기량은 상

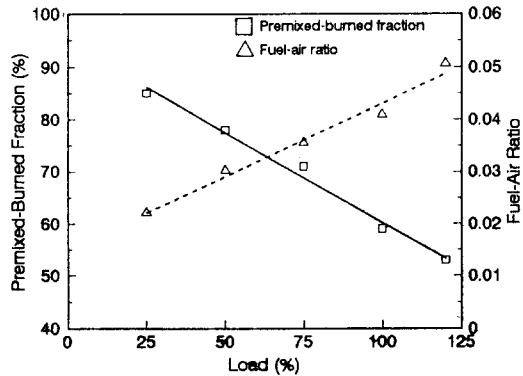


Fig. 10. Variations of the premixed-burned fraction with load.

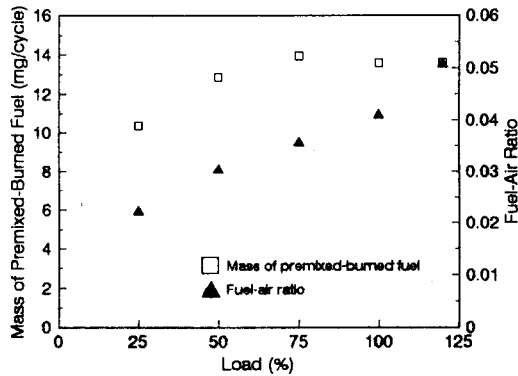


Fig. 11. Variations of mass of premixed-burned fuel with load.

대적으로 적어 연공비가 높고, 착화 지연기간중에 형성되는 가연 혼합기량의 증가가 분사량 증가에 비해 미약하기 때문에 예혼합 연소분율이 감소된다고 사료된다.

Fig. 11은 부하에 대한 예혼합 연소량 (Mass of Premixed-Burned Fuel)과 연공비의 관계를 나타낸다. 그림에서 나타나는 바와같이, 부하가 증가함에 따라 연공비가 증가하고, 예혼합 연소량은 증가하다 고부하에서는 거의 일정하게 됨을 알 수 있다. 이는 부하가 증가함에 따라 연공비가 높아지고 착화 지연기간중에 분사되는 연료량도 많아져서 가연 혼합기량이 다소 증가하지만, 일정

한 연공비 이상에서는 연공비가 증가하여도 착화 지연기간에 형성되는 가연 혼합기량이 일정하게 되기 때문이라 사료된다.

결론

예연소실식 디젤기관에 있어서 박용부하 운전조건에 따른 연소특성을 규명하기 위해 예연소실의 압력데이터를 single-zone, single-chamber의 열역학적 해석에 적용하여 연소 해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 부하가 증가함에 따라 최고압력이 상승하고 그 위치가 크랭크각도상 후진되었다.
- 2) 착화 지연시간은 부하에 관계없이 거의 일정하고, 부하가 증가할수록 가연 혼합기 형성에 소요되는 흡열량은 결보기로 감소하였다.
- 3) 예혼합 연소단계의 열발생 양상은 부하에 관계없이 거의 비슷하고, 예혼합 연소시간은 부하가 증가할수록 짧아졌다.
- 4) 부하가 증가함에 따라 예혼합 연소량은 다소 증가하나 일정 연공비 이상에서는 거의 일정했다.
- 5) 예혼합 연소분율은 부하가 증가함에 따라 감소했다.

참고문헌

- 1) Heywood, J.B.(1988) : Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, 508-517.
- 2) Anisits, F., and Zapf, H.(1971) : Auswertverfahren der Druckverlaufe und Elektronische Berechnung des Verbrennungs-Verlaufs in Dieselmotoren mit Unterteilten Brennraumen. Motortechnische Zeitschrift, Vol.32,

- 447-451.
- 3) Watson, N., and Kamel, M.(1979): Thermodynamic Efficiency Evaluation of Indirect Injection Diesel. SAE Transactions, Vol.88, 158-171.
 - 4) Kamel, M.(1977): Thermodynamic Analysis of Indirect Injection Diesel Engine Operation. Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology, University of London.
 - 5) Terada, K.(1979): Zur Ermittlung der Heizverlaufe in einem Nebenkammer-Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift, Vol.40, 237-243.
 - 6) Terada, K.(1981): Ermittlung der Gastemperaturen in beiden Brennraumen eines Wirbelkammer-Dieselmotors, Motortechnische Zeitschrift. Vol.42, 19-21.
 - 7) Alkidas, A.C.(1987): Heat Release Studies in Divided-Chamber Diesel Engine. ASME Transactions, Vol.109, 193-199.
 - 8) 長尾(1984): 內燃機關. 大光서림, 166.