

압축 착화 기관의 연소 변동 특성에 관한 연구

(연소 특성과 연소 특성치 변동을 중심으로)

A Study on the Characteristics of Combustion Variations in Compression Ignition Engine

이 창 식*
Chang Sik Lee

ABSTRACT

This paper deals with the theoretical prediction and cyclic variation of combustion characteristics in a four stroke, single-cylinder, diesel engine. Theoretical calculations employed a simple empirical model of analysis of energy equation for the thermodynamic system of engine cylinder. The cyclic variation of combustion characteristics is investigated, in term of frequency distribution and standard deviation of peak characteristics, as obtained by combustion analyzer system. The results of theoretical prediction are shown to be in close agreement with the experimental data.

The effect of fuel injection timing, engine speed, cooling water temperature, and the compression ratio on the cyclic variations of combustion characteristics were discussed.

기 호 설 명

BDC : 하사점	Q : 열량
BTC : 상사점 전	R : 가스 정수
CA : 크랭크각	S : 표준 편차
Comp. : 계산치	T : 온도
Exp. : 실험치	t_c : 냉각수 온도
F. D. : 빈도	TDC : 상사점
h : 엔탈피	u : 내부 에너지
h_f : 연료의 엔탈피	V : 체적
m : 질량	\bar{V} : 속도
m_i : 흡입 질량	그리스 문자
m_o : 배기 질량	Δ : 계산 간격
P : 압력	κ : 비열비

* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

λ : 당량비
 φ : 크랭크각
 φ_i : 분사 시기

1. 서 론

디젤 기관의 연소에 관한 연구는 주로 기관 배기중의 미연탄화수소, 일산화탄소, 질소 산화물, 매연 등의 유해 가스의 배출 저감과 출력 성능의 향상이란 두 가지 관점에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 기관의 연소 성능을 지배하는 실린더 내의 열발생에 관한 연구는 디젤 기관의 연료 분사율과 실린더 내의 압력을 계측하여 열발생을 구한 Lustgarten⁽¹⁾의 연구를 비롯하여 Boy⁽²⁾, Mohlenkamp⁽³⁾, Prescher⁽⁴⁾, Whitehouse⁽⁵⁾ 등의 연구가 있다. 특히, 기관 실린더 내의 연소 변동 특성에 관한 연구도 최근 많은 데이터를 동시에 처리할 수 있는 컴퓨터를 응용한 통계 해석 장치의 개발로 보다 신뢰도가 높은 다양한 통계 처리를 할 수 있게 되었다. 기관의 연소 변동에 관한 연구는 호리⁽⁶⁾의 예연소실식 디젤 기관의 연소 압력 변동에 대한 연구를 비롯하여 야마다⁽⁷⁾의 에타놀 혼합 중유 연소에 의한 연소 변동에 관한 연구 등이 있다. 그러나 디젤 기관은 공기만을 흡입하여 압축한 다음 연료를 분사 연소시키는 열기관이므로 연료의 성질, 연료의 분사 조건, 기관의 제원과 운전 조건 등에 따라 연소 성능은 크게 변화한다. 그러므로 기관 실린더 내의 연소 성능을 향상시키고, 연소 특성에 영향을 미치는 인자와 연소 특성치의 사이클 변동 특성을 밝히는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 실린더 내의 가스에 대하여 에너지식을 적용하여 가스의 압력, 압력 상승율 및 열발생율 등의 연소 특성을 이론적으로 구하고, 이론 계산치와 실험치를 비교하였다. 또한 기관의 연소 특성치의 사이클 마다의 변동 특성을 연소 특성치의 출현 빈도 특성을 중심으로 다루고, 연소 특성치 변동에 영향을 미치는 인자를 통계 해석을 통하여 고찰하였다.

2. 디젤 기관의 연소 및 연소 변동 특성

2.1 기관 실린더 내의 연소 특성

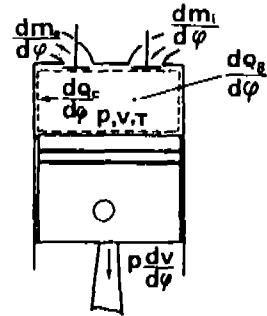


Fig.1 Thermodynamic system of engine cylinder

Fig.1 과 같은 기관은 열역학적 계에서 실린더 내의 가스에 대하여 에너지식을 적용하면

$$\frac{dQ}{d\phi} = m \frac{du}{d\phi} + u \frac{dm}{d\phi} + P \frac{dV}{d\phi} + \frac{dm_o}{d\phi} (h_o + \frac{\bar{V}_o^2}{2}) - \frac{dm_i}{d\phi} (h_i + \frac{\bar{V}_i^2}{2}) \dots \dots \dots (1)$$

가 된다.

또한 열발생을 $\frac{dQ}{d\phi}$ 는

$$\frac{dQ}{d\phi} = \frac{dQ_B}{d\phi} - \frac{dQ_c}{d\phi} - h_f \frac{dm_f}{d\phi} \dots \dots \dots (2)$$

가 된다. 여기서 $dQ_B/d\phi$ 는 연소율, $dQ_c/d\phi$ 는 냉각 방열율이고 $h_{fo}(dm_f/d\phi)$ 는 연료의 엔탈피 변화율이다.

식 (1)에서 내부 에너지 u 를 온도 T 와 당량비 λ 의 함수로 생각하고, 식 (2)에서 $h_{fo}(dm_f/d\phi)$ 를 무시하여 정리하면 다음 관계가 성립한다.

$$\frac{dT}{d\phi} = \left[\frac{dQ_B}{d\phi} - \frac{dQ_c}{d\phi} - \frac{mRT}{V} \frac{dV}{d\phi} - u \frac{dm}{d\phi} - m \left(\frac{\partial u}{\partial \lambda} \right)_T \frac{d\lambda}{d\phi} + \frac{dm_i}{d\phi} (h_i + \frac{V_i^2}{2}) - \frac{dm_o}{d\phi} (h_o + \frac{V_o^2}{2}) \right] / m \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\lambda \dots \dots (3)$$

식 (3)에서 실린더 내의 연소율, 냉각 방열율, 가스의 질량 변화율, 당량비 변화율 등을 구하여 정리하면 기관 실린더 내의 가스 상태

를 구할 수 있다.

2.2 연소 특성의 계산 방법 및 연소 변동

실린더 내의 연소 특성은 초기 조건 T_0, P_0 를 이용하여 에너지 식 (3)을 수치 적분하여 가스 압력을 구하고 이로부터 연소 특성치를 계산한다. 이 경우 에너지식은 Runge-Kutta 법⁽⁸⁾을 이용하여 적분하였다.

한편 실험의 경우 실린더 내의 압력 상승을 $dP_\phi/d\phi$ 및 열발생을 $dQ_\phi/d\phi$ 는 다음 식을 이용하였다.

$$\frac{dP_\phi}{d\phi} = \frac{1}{12J}(P_{\phi-2} - 8P_{\phi-1} + 8P_{\phi+1} - P_{\phi+2}) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dQ_\phi}{d\phi} = \frac{\kappa}{\kappa-1} P_\phi \frac{dV_\phi}{d\phi} + \frac{1}{\kappa-1} P_\phi \frac{dP_\phi}{d\phi} \dots\dots (5)$$

실린더 내의 연소 변동은 연소 특성치의 사이클마다의 변동을 중심으로 다루었으며, 주로 연소 특성치의 발생 시기의 빈도 분포와 그 통계 처리에 주안을 두어 다루기로 한다.

3. 실험 장치 및 방법

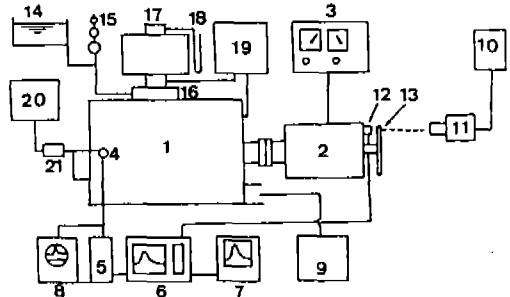
3.1 실험 기관

본 연구에 사용한 실험 기관은 수냉 4행정 사이클 소형 직접 분사식 디젤 기관으로서 실린더 지름 110mm, 행정 150 mm인 박용 시험용 단 실린더 기관이며 압축비는 17.4이며, 출력은 10 PS/1200 rpm이다.

3.2 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 2는 실험 장치의 구성 계통도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 기관 성능 시험 장치와 실린더 내의 압력 및 크랭크각 검출부로 구성된 연소 해석 장치로 구성하였다.

기관의 압력 변화는 압력 변환기로부터의 신호와 크랭크각 검출기로부터의 펄스를 입력 처리하는 지압계 장치와 그래픽 프린터에 의하여 기록하였다. 크랭크각의 검출은 광트랜지스터와 투광기를 사용하였으며, 기관의 동력 흡수는 와전류식 전기 동력계를 사용하였다.



1. Test engine
2. Dynamometer
3. Dynamometer controller
4. Pressure transducer
5. Amplifier
6. Combustion analyzer
7. Printer
8. Oscilloscope
9. Exhaust gas analyzer
10. Power supply
11. Optical projector
12. Photo-transducer
13. Slit plate
14. Fuel tank
15. Fuel burette
16. Injection pump
17. Nozzle of surge tank
18. U-manometer
19. Multi-channel digital thermometer
20. Cooling water tank
21. Flow meter

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

실험은 기관의 연료 분사 시기 및 냉각수 온도를 변화시켰을 경우 실린더 내의 연소 특성치와 연소 특성치의 사이클 변동을 지압 선도의 데이터를 연소 해석 장치로 통계 처리하여 연소 특성치의 발생 시기의 빈도 분포, 평균치, 표준 편차, 최고 압력 주위의 빈도 분포 등을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

앞에서 다룬 해석 방법을 이용하여 연소 특성치를 예측하고, 이들 계산 결과를 실험 결과와 비교 검토하고, 기관 실린더 내의 최고

압력, 압력 상승율, 열발생을 등의 변화와 사이클마다의 변동을 구하기로 한다.

4.1 실린더 내의 연소 특성

Fig. 3과 Fig. 4는 실린더 내의 가스에 에너지식을 적용하여 계산한 압력과 실험으로부터 구한 실린더 압력을 비교한 것이다. 이들 선도는 압축비 17.4, 연료 분사 시기가 상사점 전 22°와 상사점 전 5°일 경우의 계산 결과를 실선으로, 실험치를 o표로 표시하였다. 이들 선도에서 보는 바와 같이 이론 계산 결과와 실험 결과는 약간의 차이는 있으나 대

체로 일치하는 결과를 가져 왔다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 연료의 분사 시기가 상사점 전 5°로 늦추어 준 경우에는 연료가 충분히 연소하지 못하고 팽창 행정으로 옮겨져 피스톤의 하향 행정의 영향을 받는 관계로 실험과 예측치에는 Fig. 3의 경우보다 차이가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 실린더 내 가스의 압력으로부터 구한 압력 상승율 $dP/d\psi$ 를 크랭크각에 대하여 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 가스의 압력 상승율은 착화 지연 직후에 발생하는 연료의 연소에 의하여 급격히 상승하였

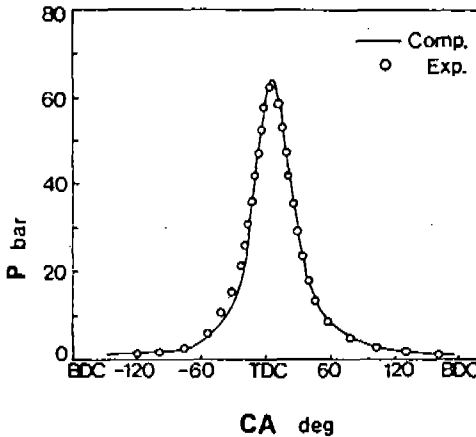


Fig. 3 Comparison of predicted and experimental cylinder pressure

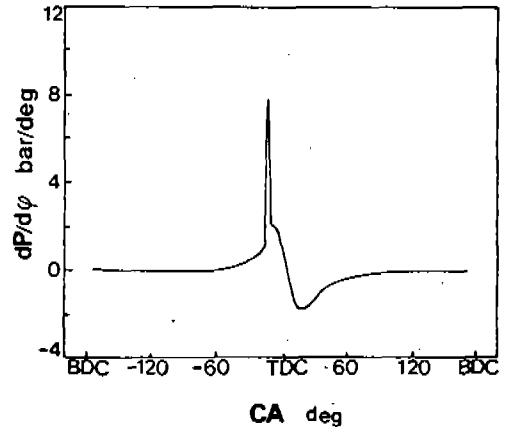


Fig. 5 Rate of pressure rise-crank angle diagram

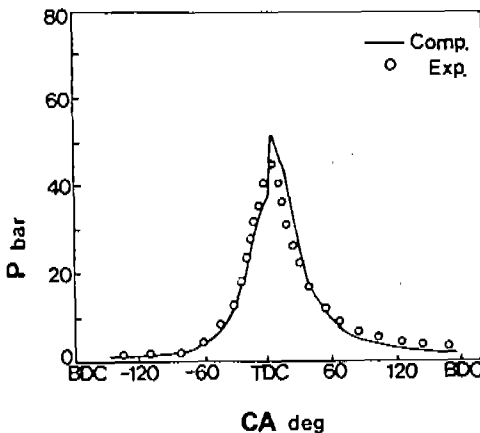


Fig. 4 Comparison of predicted and experimental cylinder pressure

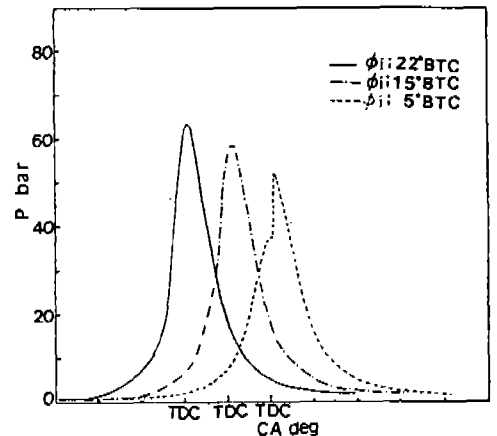


Fig. 6 Effect of fuel injection timing on the cylinder pressure

다가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 착화 지연 기간 중에 분사 축적된 연료가 급격히 연소함에 따른 것으로 생각된다. 이러한 경향은 문헌⁽⁹⁾의 분사시기 변화에 따른 결과와 같은 경향을 보이고 있다.

Fig. 6은 연료의 분사 시기를 상사점 전 5°, 15°, 22°의 3종으로 변화시켰을 경우 실린더 내의 압력을 비교한 것이다. 이 선도에서 나타낸 바와 같이 실린더 내의 압력은 연료의 분사 시기가 상사점쪽으로 지연됨에 따라 저하하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 분사 시기를 늦추어 준 경우 착화 지연 기간 중에 분사 축적된 연료의 양이 적고 또 상사점 후 곧 팽창 행정이 되므로 이러한 영향을 받아서 압력은 그다지 상승되지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 연료의 분사 시기를 바꾸었을 경우 압력 상승율의 계산 결과를 비교한 것이다. 가스의 압력 상승율은 분사 시기의 지연과 더불어 감소하는 경향을 나타내었다.

한편 Fig. 8은 실린더 내의 열발생을 $dQ/d\phi$ 의 계산 결과와 실험 결과를 도시한 것이고, Fig. 9는 분사 시기 변화에 따른 연소량을 분사 시기의 변화에 대하여 비교한 것이다. 앞에서 지적한 바와 같이 열발생율과 연소량 Q 는 분사 시기가 상사점쪽으로 지연됨에 따라 작아지는 것으로 나타났다.

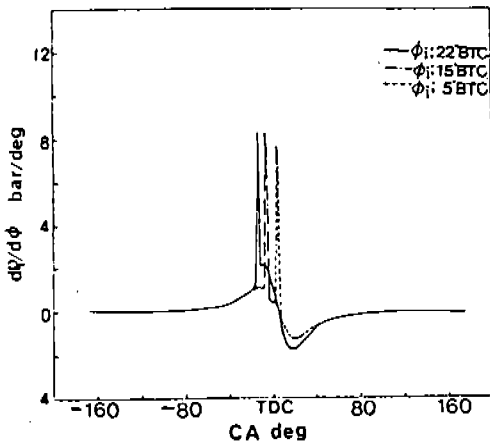


Fig. 7 Effect of fuel injection timing on the rate of pressure rise

4.2 연소 특성치의 사이클 변동

연소 특성치의 사이클 마다의 변동은 실린더 내의 연소 특성치를 연소 해석 시스템으로부터 계속하고, 이들 값의 500사이클의 자료를 통계 처리하여 최고 압력의 표준 편차를 구하여 이들을 여러 가지 조건에 대하여 비교 검토하였다.

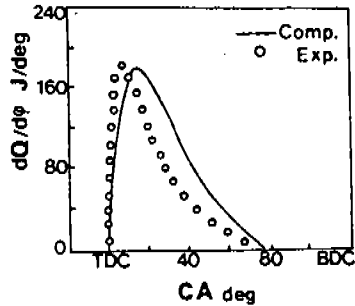


Fig. 8 Comparison of predicted and experimental rate of heat release

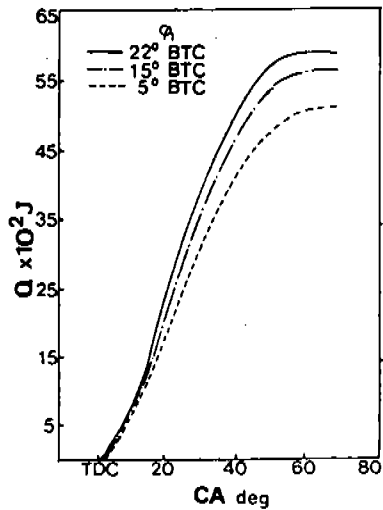


Fig. 9 Effect of fuel injection timing on the heat release

Fig. 10은 기관의 최고 압력 P_{max} 의 출현 빈도를 기관의 회전 속도에 대하여 비교한 것이다. 최고 압력의 출현 빈도는 대체로 상사점 후 5~6°의 크랭크각 범위에 집중 분포되는 경향을 나타내었다. 한편 Fig. 11은 기관의 최고 압력의 평균치 주위의 출현 빈도를 500

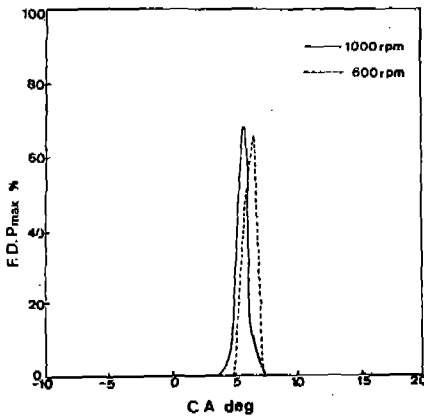


Fig. 10 Effect of engine speed on the frequency of maximum pressure

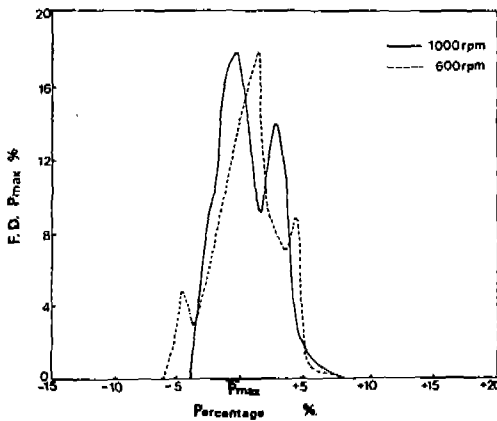


Fig. 11 Effect of engine speed on the frequency of maximum pressure

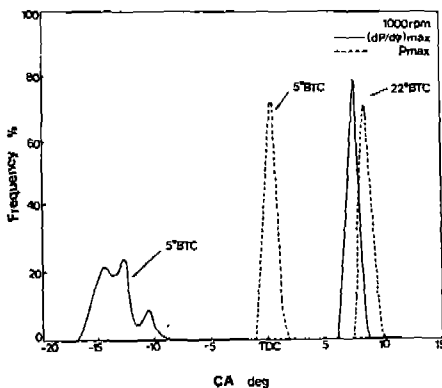


Fig. 12 Effect of fuel injection timing on the combustion characteristics

사이클의 평균치로부터 구한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 최고 압력의 발생 빈도를 보면 600 rpm의 경우가 1000 rpm의 경우보다 조금 더 넓은 범위로 분포되는 것으로 나타나고 있으나 대체로 큰 차이는 없었다.

한편 Fig. 12는 연료 분사 시기를 변화시켰을 경우 실린더 내의 최고 압력과 최대 압력 상승율의 빈도 분포를 도시한 것이다. 이 선도에서 알 수 있는 바와 같이 분사 시기의 지연은 최고 압력과 최고 압력 상승율의 발생하는 크랭크각 사이의 범위가 넓어지는 것으로 나타났다. 그러나 분사 시기가 22°BTC의 경우에는 P_{max} 및 $(dP/d\phi)_{max}$ 의 발생 시기는 5°BTC의 경우에 비하여 매우 접근하는 경향을 보였다.

Fig. 13은 기관의 회전 속도 1000 rpm의 경우에 대하여 연료 분사 시기의 변화에 따른 실린더 내의 최고 압력 P_{max} , 압력 상승율의 최대치 $(dP/d\phi)_{max}$ 및 최고 압력의 표준 편차 S 를 도시한 것이다. 기관의 최고 압력은 분사 시기를 상사점 가까이로 늦추어 줌에 따라 현저하게 저하하는 것으로 나타났다. 이것은 앞에서 다른 연소 특성치에서 고찰한 바와 같은 경향으로서 압력 상승율의 경우도 같은 경향을 보였다. 이것을 P_{max} 의 표준 편차를 중심으로 살펴 본 결과 분사 시기가 늦어질수록

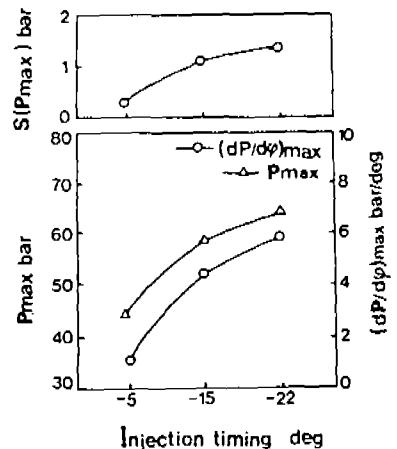


Fig. 13 Effect of injection timing on the combustion characteristics of engine

편차치는 작아지는 것으로 나타났으며, 이것은 연료의 연소에 의한 압력 상승의 변화가 작아짐을 뜻하는 것이 된다.

Fig. 14는 기관의 압축비 변화에 따른 압력 상승율의 빈도를 도기한 것이다. 압축비는 저하는 단순히 최고 압력의 저하만이 아니라 그 압력 상승의 출현 빈도의 발생 범위도 넓게 분포되는 경향을 보였다.

Fig. 15, 16은 냉각수 온도 변화가 압력 상승 및 최고 압력에 미치는 영향의 한 보기를 비교한 것이다. 이들 빈도 분포도에서 보는 바와 같이 실린더 내의 최고 압력 및 최고 압력 상승율은 냉각수 온도가 낮은 경우 그 최대 분포를 발생하는 시기가 늦어지는 것으로 나타났다. 이것은 실린더 내에 분사된 연료와 공기의 혼합 및 증발 상태가 냉각수 온도에 밀접하게 영향을 받기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

디젤 기관 실린더 내의 연소 특성을 구하고, 연소 특성치의 사이클 변동을 연소 특성치의 발생 빈도 분포를 중심으로 다룬 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 기관 실린더 내의 가스에 대한 열역학적 계에 에너지식을 적용하여 구한 연소 특성치는 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다.

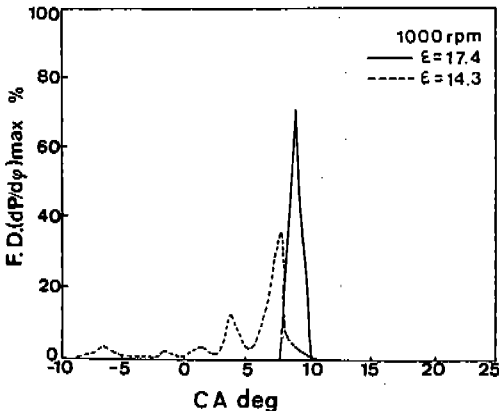


Fig. 14 Effect of compression ratio on the maximum rate of pressure rise

2. 실린더 내의 가스 압력은 분사 시기가 지연됨에 따라 현저하게 저하하며, 연료 분사 시기의 지연은 최고 압력의 발생 시기를 지연시키는 인자로 된다.

3. 기관 실린더 내 연소 특성치의 사이클 변동을 사이클 작동 인자들에 대하여 실험한 결과 연료 분사 시기는 연소 특성치의 발생 빈도 분포 및 그 최대치에 영향을 미치는 주된 인자로 작용한다.

4. 기관의 연소 특성치의 빈도 분포에 미치는 압축비의 영향을 비교한 결과 압축비의

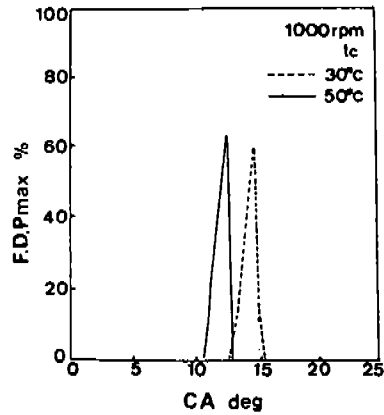


Fig. 15 Effect of cooling water temperature on the frequency of maximum pressure

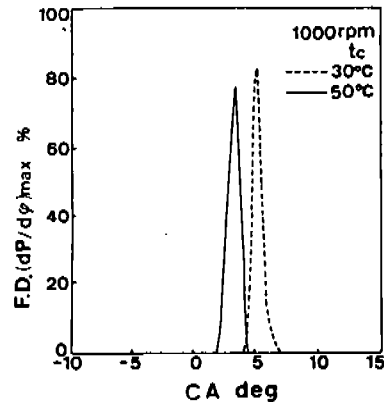


Fig. 16 Effect of cooling water temperature on the frequency of maximum rate of pressure rise

저하는 연소 특성치의 발생 시기의 출현 빈도 분포를 분산시키는 경향을 가져오며, 그 최대 빈도도 저하되는 원인이 된다.

5. 기관의 연소 특성치의 빈도 분포에 미치는 냉각수 온도 저하의 영향은 실린더 내의 최고 압력 및 최고 압력 상승율의 발생 시기를 지연시키는 인자로 작용한다.

후 기

본 연구는 한국 과학 재단의 연구 지원에 의하여 이루어진 것으로서 동 재단의 연구 지원에 대하여 심심한 사의를 표합니다. 그리고 본 연구에 도움을 주신 고오베 대학의 마쯔모토 교수에게 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. G.A. Lustgarten: "Theoretische Betrachtungen zur Auslegung des Dieselkreisprozesses unter Konstanthaltung des Spitzendrucks," MTZ 33-7, p. 275, 1972.
2. P. Boy: "Untersuchung einzelner Einflüsse auf das instationäre Betriebsverhalten mittelschnellaufender Schiffdieselmotoren", MTZ 41-9, p. 343, 1980.
3. H. Möhlenkamp: "Zur Genauigkeit der Brenngesetzrechnung eines Dieselmotors mit nichtunterteiltem Brennraum", MTZ 37-7/8, p. 285, 1976.
4. K. Prescher: "Zwei-Zonen-Rechenmodell für die Verbrennung im Ottomotor unter Berücksichtigung der Gasdissoziation", ATZ 85-2, p. 85, 1983.
5. N.D. Whitehouse and R.J.B. Way: "A Simple Method for the Calculation of Heat Release Rates in Diesel Engines Based on the Fuel Injection Rate", SAE Paper 70134, 1971.
6. 堀・澤・内田: "豫燃燒室式ディーゼル機關の燃燒壓力變動と諸因子", 內燃機關, Vol. 20, No. 256, p. 9, 1981.
7. 山田・三留・近久・宮本・村山: "ディーゼル機關の燃燒變動に関する研究", 日本機械學會論文集(B), 第 51 卷 463 號, p. 00 1985.
8. L.A. Pipe and L.R. Harvill: "Applied Mathematics for Engineers and Physicists", p. 569, McGraw-Hill, 1970.
9. 廣安・角田・新井: "直接噴射式ディーゼル機關の燃燒モデルと性能豫測", 日本機械學會論文集(B), 48 卷 432 號, pp. 1614 ~ 1621, 1982.