

〈논 문〉 SAE NO. 953712

内燃機關에 있어서 熱發生率의 算出方法에 관한 研究

A Study on the Computation Method of Simple Heat Release Rate in Internal Combustion Engine

탁 영 조,* 하 총 료**
Y. J. Tak, J. Y. Ha

ABSTRACT

This study aims to compare the heat release calculated using the ensemble average of pressure data with the heat release calculated using the least squares method for pressure data. This paper propose a heat release computation method that can analyze the most correct, straight and simple method to analyse combustion phenomenon.

In conclusion, we found that the least squares method of third-order was the best computational method for heat release calculation.

주요기술용어 : Heat Release Rate(열발생률), Ensemble Average(앙상블평균), Smoothing(평탄화), The Least Squares Method(최소자승법)

1. 서 론

최근 들어 급격한 자동차의 증가로 인해 유해 배출가스에 의한 대기오염문제는 심각하며, 특히 디젤기관으로부터 배출되는 연소가스중의 NOx 와 미립자상의 배출물이 대기를 오염시키는 주요인 중의 하나다. 이와 같은 환경오염의 문제의 근원적인 해결책으로서는 연소실내에서의 연소 개선이 필요하고 이를위해서는 P-θ 선도를 이용한 정확한 연소해석이 요구된다. 따라서, 지금까지 일반 연구자가 수행해온 방법^{1, 2, 3, 4, 5)}과는

달리 연구자의 주관에 개입되지 않아도 해석이 가능할 정도의 충분한 양과 정도를 얻을 수 있는 측정장치와 연소해석 기술이 필요하다.

내연기관의 연소에 관한 정보는 압력 측정장치에 의해서 얻은 P-θ 선도에서 연소 최고 압력, 착화와 연소끝시기, 착화 지연, 압력 상승률, 압력 변화과정, 노크의 발생 유무, 열발생률등을 알 수 있다. 이 중에서 열발생률은 기관 출력 특성 및 배출 가스 특성에 관한 중요한 정보를 제공한다.

본 연구에서는 주어진 구동 조건에서 얻어진 P-θ 선도, 즉 압력데이터를 기존의 방법인 앙

* 정회원, 동아대학원
** 정회원, 동아대학교

상블 평균(20회)한 결과로써 구한 열발생률과 최소자승법에 있어서도 2, 3, 4차(次)의 경우와, 3차에서 3, 5, 7점으로 변화시킨 경우의 각 결과를 비교하여, 연소현상을 가장 현실에 가깝고 간단하게 해석할 수 있는 열발생률 계산법을 제안하는데 그 목적이 있다.

2. 연소해석을 위한 기초식

2.1 앙상블 평균

N번 채취한 각 사이클의 압력경과선도에서 크랭크각 θ 인 때의 평균 압력 $P(\theta)$ 를 앙상블 평균법(ensemble average technique)⁸⁾을 이용하여 다음 식으로 구하였다.

$$P(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(\theta) \quad (1)$$

2.2 열발생률

연소과정 중의 미소각도 $d\theta$ 에 대한 실린더내 연소가스의 유효 열발생률은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서,

P : 실린더내 가스압력[kgf/cm²]

V : 실린더내 가스체적[cm³]

κ : 비열비

A : 일의 열당량(1/42.68)[cal/kgf · cm]

본 연구에서는 비열비 $\kappa=1.3$ 으로 일정하다고 가정하였다.⁹⁾

2.3 최소자승법을 이용한 평탄화

각각의 분점(자료점) 즉, $x_i(i=0, 1, \dots, n)$ 에서 어떤 함수 $f(x)$ 에 대해서 근사함수 $p(x)$ 를 가정하면 함수 $f(x_i)$ 와 근사함수 $p(x_i)$ 는 각각의 분점 x_i 에서

$$\delta_i = f(X_i) - p(X_i); i=0, 1, \dots, n$$

의 차이를 갖게 된다. 그러므로 최소자승법이란 이 차이의 제곱의 합 즉,

$$E = \sum_{i=0}^n \delta_i^2 = \sum_{i=0}^n \{f(X_i) - p(X_i)\}^2 \quad (3)$$

이 최소가 되게 하는 근사함수 $p(x)$ 를 찾는 방법을 말한다. 또 본 연구에서 최소자승법의 근사함수 형으로서는 각각 2차, 3차, 4차 대수 방정식을 사용했다. 그리고 각각의 차수와 점수에 따른 근사함수 $p(x)$ 를 구하고 이 근사함수 $p(x)$ 를 사용해 함수 $f(x)$ 를 구하였다. 마지막으로 구한 함수 $f(x)$ 를 사용해 압력 데이터의 평탄화 작업을 행하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험기관 및 압력측정장치

실험장치는 실험기관, 기관 동력계, 연소 해석 장치 및 연소기간 측정장치 등으로 구성되며 Fig.1은 실험장치의 개요도이다.

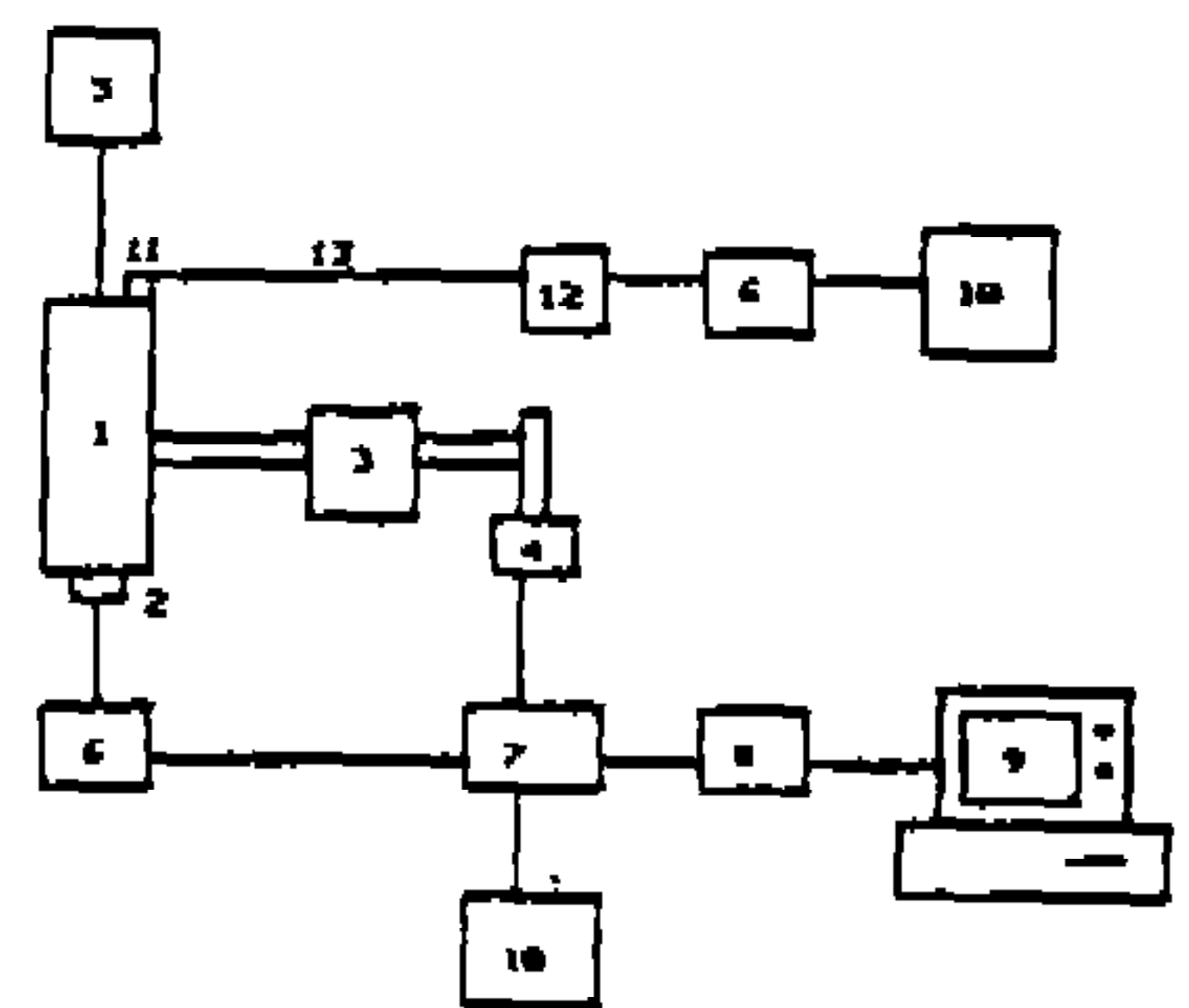


Fig.1 The schematic diagram of experimental apparatus

- ① Test engine
- ② Pressure transducer
- ③ Dynamometer
- ④ Crank angle detector and TDC pulse detector
- ⑤ Surging tank
- ⑥ Amplifier
- ⑦ Analog switch
- ⑧ A/D converter
- ⑨ Computer
- ⑩ Oscilloscope
- ⑪ Quartz glass adaptor
- ⑫ Photo TR
- ⑬ Quartz Fiber

본 연구에서 사용한 기관은 직접분사식 4cycle 단기통 디젤기관으로 배기량은 631cc, 압축비는 19, 분사시기는 BTDC 19도이다.

실린더내에서의 압력 측정은 실린더 헤드부에 설치된 Electric Resistance Wire Strain Gage식 압력 변환기(Rated Capacity : 100kg/cm² MP-100 k-18, Minebea co.)로 부터 감지된 압력의 전기적 신호를 Amplifire, A/D 변환기의 순으로 이송시키고, 인코더의 크랭크각 1도마다의 Pulse를 External clock으로 사용하여 압력 데이터를 채취하고, 각 압력데이터의 위치 확인을 위하여 동일 인코더 상에서 발생하는 TDC 신호를 Analog switch(14066B)소자를 사용하여 압력 데이터상에 겹쳐서 표시했다. A/D 변환기는 입력전압범위가 ±5V, Conversion Time 30μs, 분해능 12bit의 기능을 가진다. 채취한 압력데이터는 20회 앙상블 평균한 입력값 1cycle분과 최소자승법으로 평탄화한 압력값 1cycle분을 각각의 크랭크각도에 대하여 구하고 이를 연소해석에 사용했다.

기관의 운전조건은 흡기온도 293K, 냉각수 출구온도 343K, 기관회전수 1000rpm, 1800rpm일때, 부하는 0.1kgf, 2.4kgf, 4.6kgf, 6.8kgf으로 가변하면서 실험을 행했다.

3.2 연소기간 측정장치

연소실 벽면에 설치한 석영 프로브를 통해 나온 연소광을 광 케이블을 이용해서 Photo Transistor로 유도하여 광신호를 전기적신호로 바꾸고, 이 신호를 Amplifire를 거쳐 Oscilloscope에서 연소기간의 실측을 행했다. 연소기간의 실측값은 각각의 조건에서 50회 산출평균하여 얻었고 실측값의 표준편차를 구해서 다양하게 얻은 연소기간의 신뢰성을 평가하는 기준으로 삼았다.

4. 연구결과 및 고찰

압력계측장치의 정도상의 문제로 발생하는 비정상적인 압력변동을 배제하기 위하여 앙상블 평균을 이용하는 열발생률 계산법과 열발생률의 객관적 분석을 위해 최소자승법에 의한 평탄화 작업을 행하는 열발생률 계산법을 다음과 같은

과정으로 비교, 검토하였다.

4.1 연소 해석용 압력값의 결정

본 연구에서 사용한 연소실 내의 압력측정장치를 사용하여 얻은 압력, 크랭크각 선도를 Fig.2에 보인다. 본 P-θ 선도는 주어진 기관 구동조건에서 얻은 임의의 사이클의 1회분 중 압축, 팽창 행정의 결과를 나타낸다. 지금까지의 연구결과에 의하면 그림에서 보이는 바와 같이 크랭크각 경과에 따른 압력값의 변동은 그것으로 압력변화율(dP/dθ)이나 열발생률(dQ/dθ)을 구했을 때, 그 값들의 변화특성의 분석 즉, 연소해석에 주관이 개입되는 경우가 많음을 알 수 있다.

이러한 이유로 李등은¹⁾ 동일 운전조건에서의 P-θ값을 20회 정도 평균한 결과로써 dP/dθ, dQ/dθ를 구하여 연구자의 주관을 약간은 개입시켜 연소실 내에서의 혼합기의 연소특성을 짐작할 수 있는 연소해석이 가능함을 보고한 바 있다. 그러나 李등이 구한 dP/dθ, dQ/dθ 또한 연구자의 주관이 약간 개입돼야 할 정도의 흔들림은 배제가 불가능한 것으로 보고하고 있다. 만일 앙상블 평균회수를 100회 이상 증가시키면 어느 정도의 결과 개선을 기대할 수 있으나, TDC를 기준으로 한 평균회수가 증가 할수록 압력의 변동분은 줄어지나 주어진 운전조건에서의 연소 특성을 나타내는 압력의 변화 부분마저 없어짐을 피할 수 없게 된다. 이것은 연소해석의 본래 목적에 위배되는 현상으로 피해야만 한다.

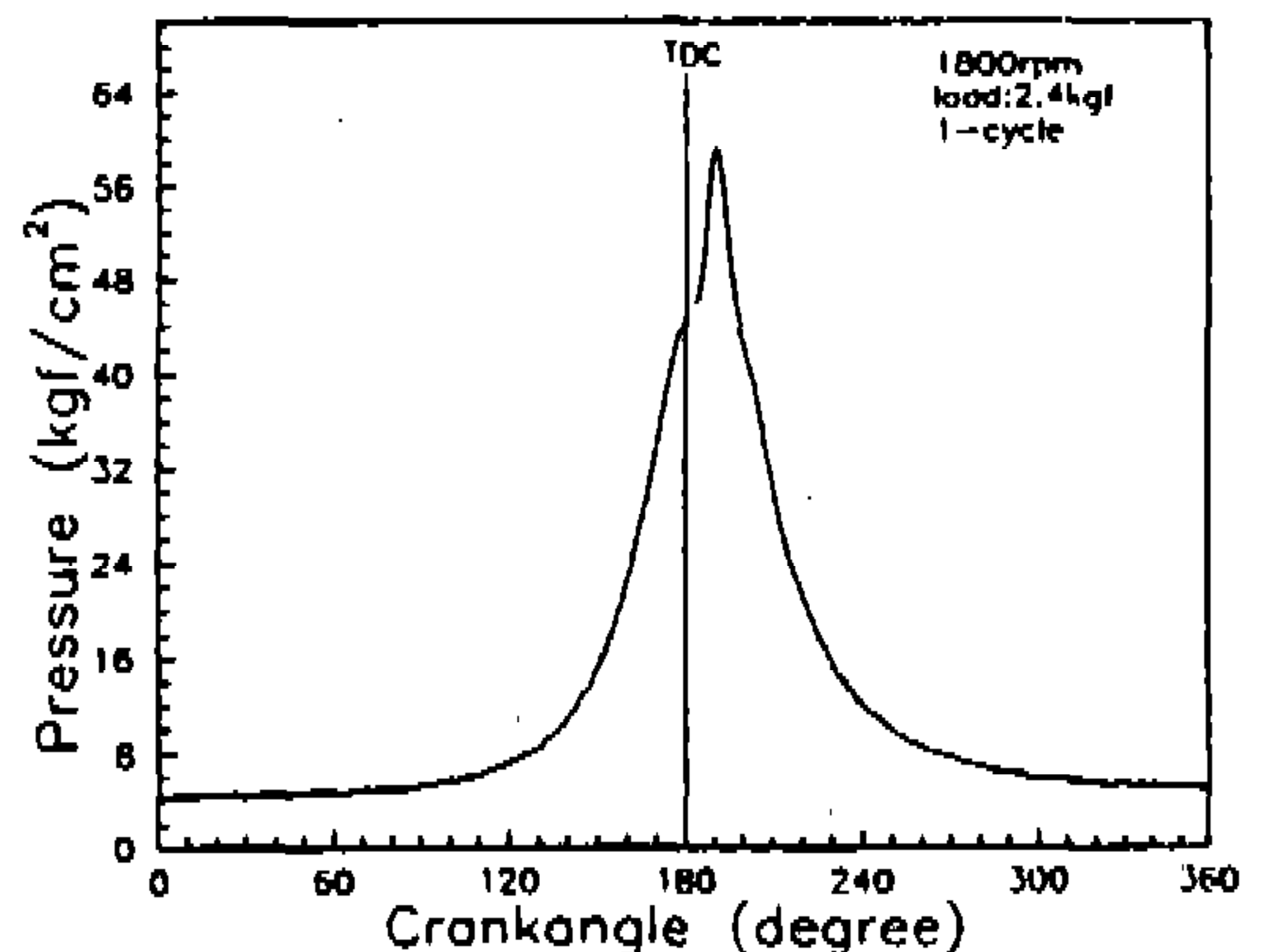


Fig.2 The diagram of pressure vs. crankangle

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 최소자승법을 이용한 평탄화과정으로 연구자의 주관이 개입되지 않고 연소해석을 가능케 하는 방법을 제시하였다.

Fig.3에 보이는 P- θ 선도는 주어진 기관 운전조건에서 측정된 압력값을 최소자승법의 3차 7점으로 평탄화한 결과이다. 본 연구에서 연소 해석에 필요한 압력구간은 연소 시작부터 연소 끝부분까지로 평탄화를 행한 구간도 전술의 사정을 고려하여 압축행정과 팽창행정 구간의 일부분만을 행했다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 연소해석의 각종 정보가 되는 부분의 압력 특성이 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉, 연소개시(착화)점을 알 수 있는 TDC부근의 압력 급상승 부분이 Fig.2의 임의 압력 1회분에서의 결과와 거의 동일한 형태임을 알 수 있고, P_{max} 위치와 발생시기, 연소 끝부분의 압력변화등도 변화가 없는 것을 확인 할 수 있다.

4.2 앙상블 평균 결과와 평탄화한 결과와의 비교

20회분의 P- θ 선도의 앙상블 평균값으로 구한 $dP/d\theta$ 를 Fig.4에 보인다. $dP/d\theta$ 는 피스톤의 각 위치에서의 압력변화율을 확인하기 위한 것으로 Fig.5에 보이는 평탄화한 압력으로 구한 $dP/d\theta$ 결과와 비교할 때 평탄화를 행한 $dP/d\theta$ 의 경우는 연소가 계속되는 구간에서의 압력변화가 연구자의 주관이 전혀 개입되지 않고도 해석 가능함을

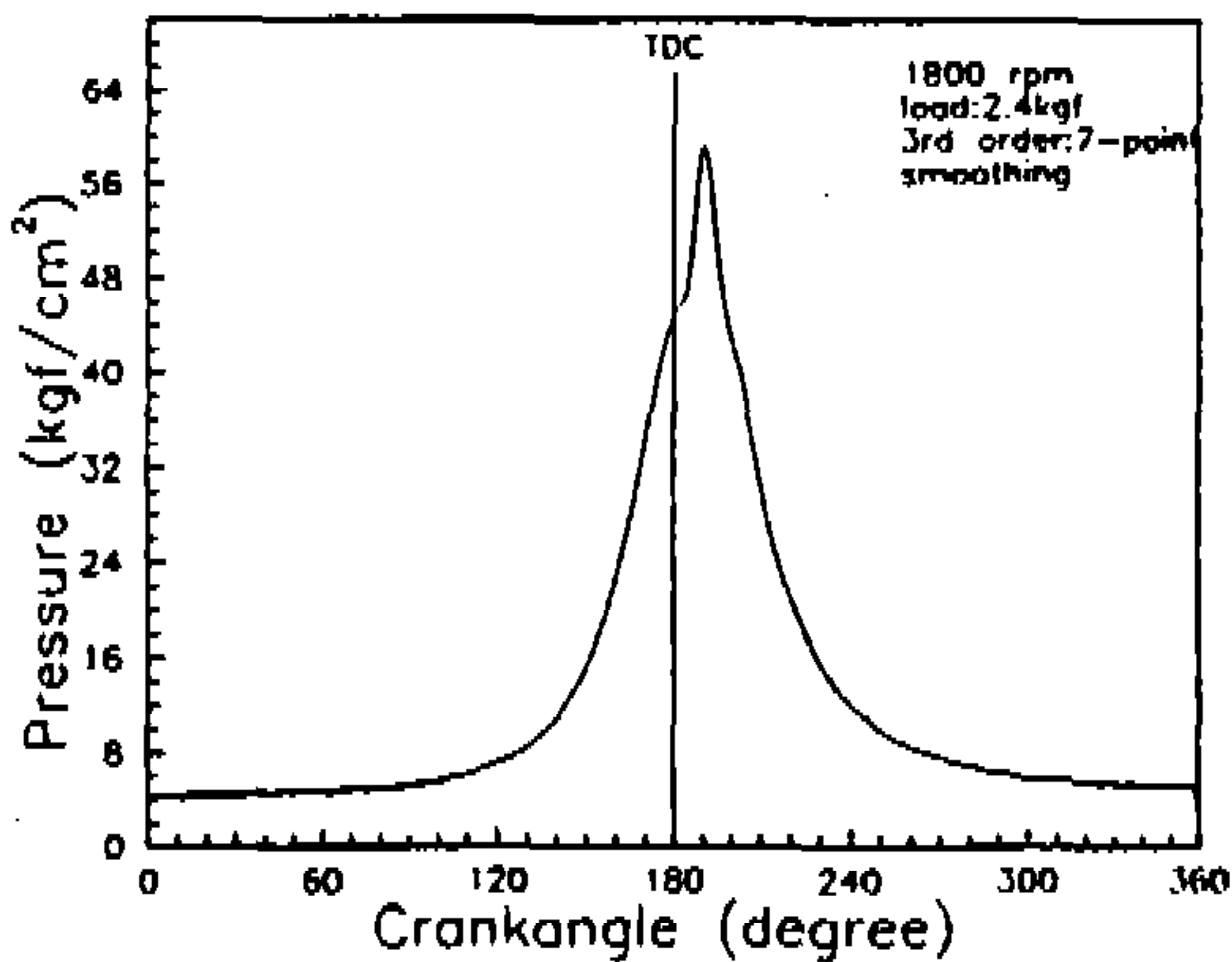


Fig.3 The diagram of pressure vs. crankangle

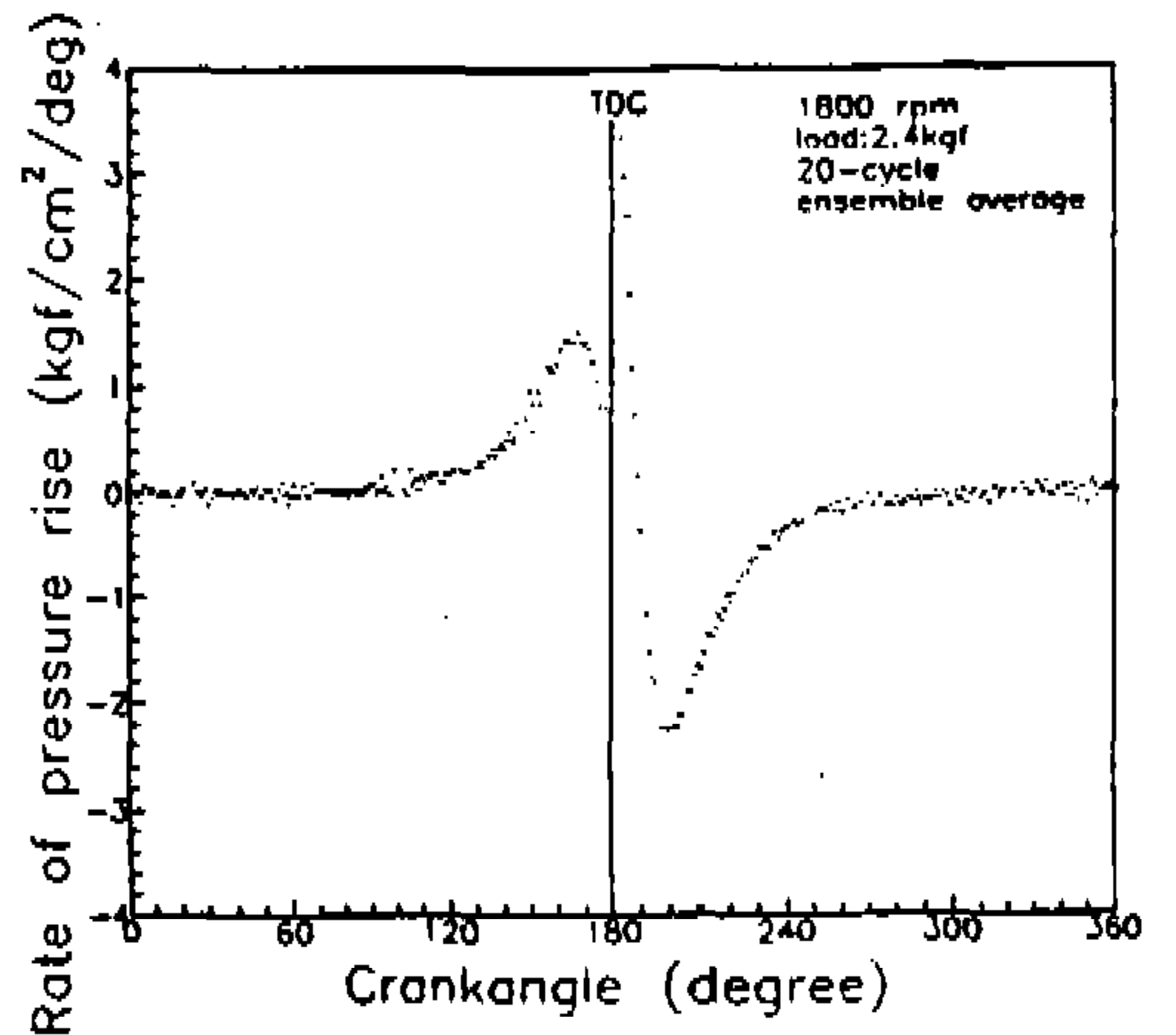


Fig.4 The diagram of pressure rise rate vs. crankangle

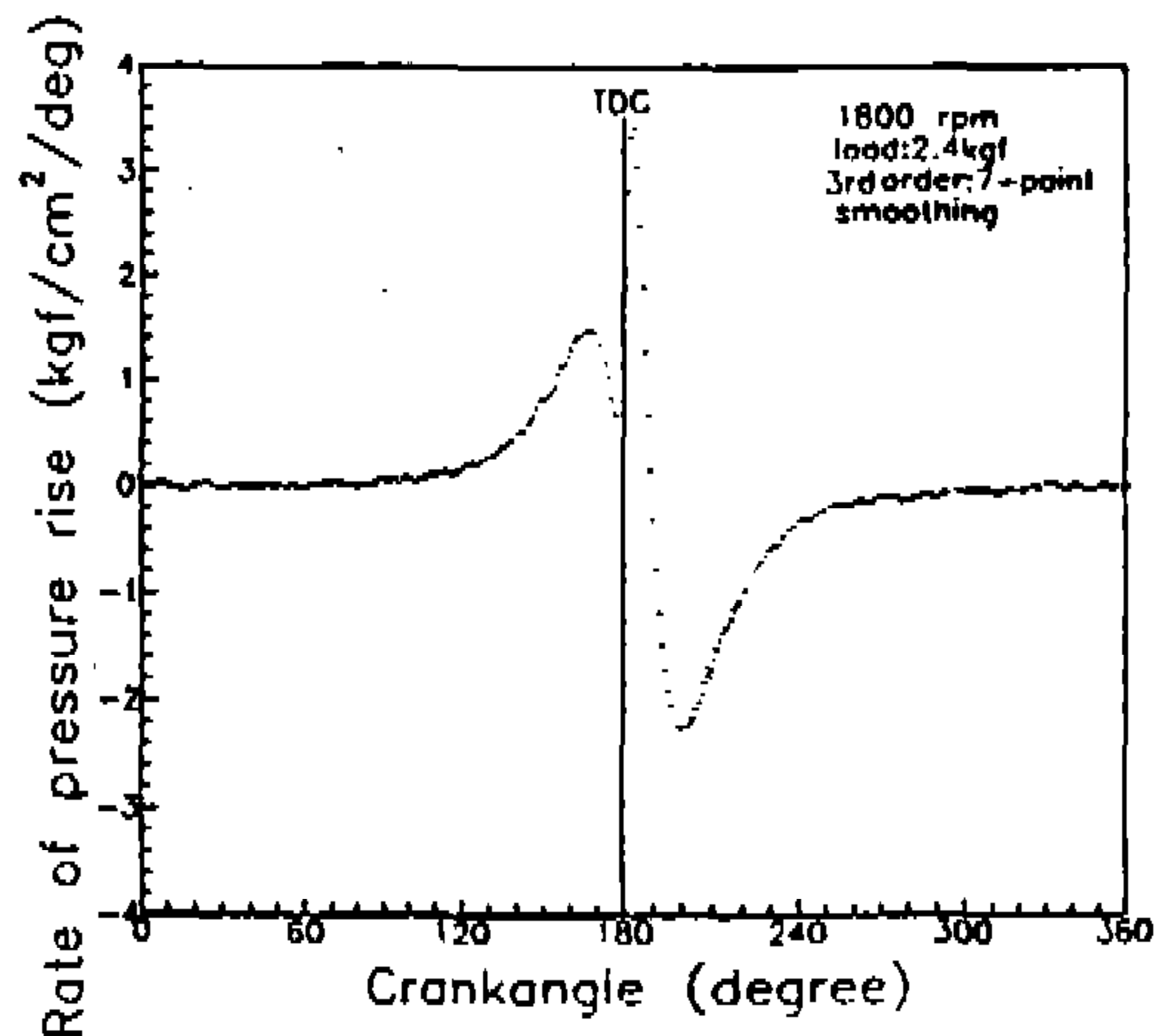


Fig.5 The diagram of pressure rise rate vs. crankangle

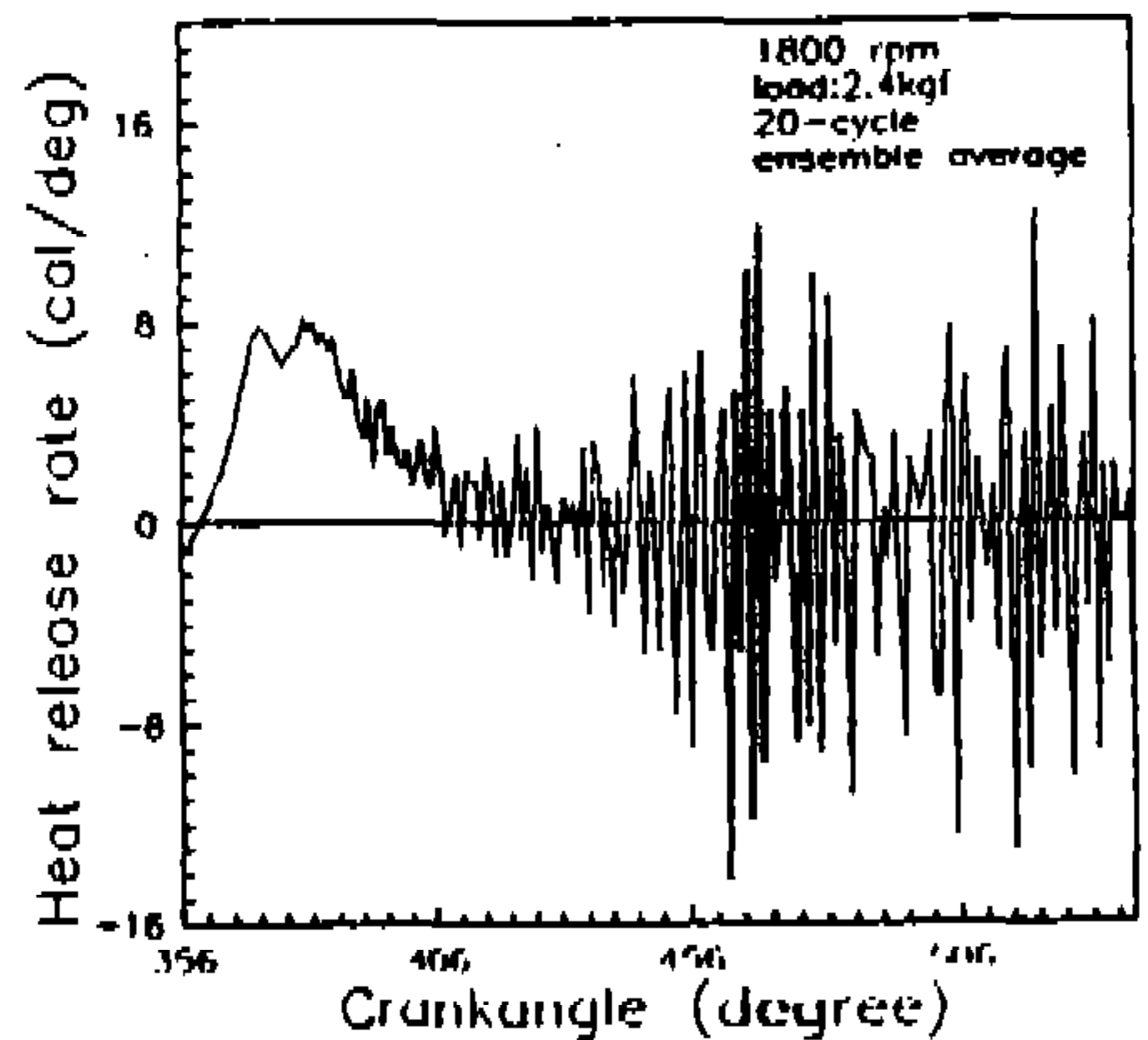


Fig.6 The diagram of heat release rate vs. crankangle

알 수 있다. 본 연구에서 구한 $dP/d\theta$ 선도에서 최초로 발생한 극대점 다음의 극소점을 착화시기로, 그 다음에 발생하는 최대점을 예혼합연소부와 확산연소부의 경계부로, 그 다음에 최대점과 최소점 사이의 $dP/d\theta$ 값이 0이 되는 위치를 P_{max} 의 발생 위치로 판단하였다. $(dP/d\theta)_{max}$ 다음의 극소점을 지나 다시 상승한 후에 기준점에 도달하는 위치를 연소 끝으로 판단한다. 특히, 그림에서 최초의 극소점과 최대점사이의 열발생량을 예혼합연소량으로 계산하였다.

Fig.6에는 20회 앙상블 평균에 의한 평균압력값으로 구한 $dQ_E/d\theta$ 를, Fig.7에는 평탄화를 행한 압력값으로 구한 $dQ_S/d\theta$ 선도를 보인다. $dQ_E/d\theta$ 선도의 경우 착화 이후 열발생량의 변동으로 연구자의 주관이 개입되지 않고서는 열량의 변화 과정이나 열량의 적산이 불가능함을 알 수 있다. 또한, 착화시거나 연소 끝의 위치도 명확치 않음을 알 수 있다. 특히 연소 후반의 열발생량의 변동은 연소 후기의 특성 해석을 불가능하게 함을 알 수 있다.

한편, $dQ_S/d\theta$ 선도의 경우에는 착화시기가 확실하고 연소 끝의 위치도 무리없이 구할 수 있음을 알 수 있고, 열발생량의 적산도 크랭크각도의 변화에 따라 표시가 가능하다. 피스톤의 위치와 혼합기 연소특성과의 관계도 열발생률 선도로 부터 쉽게 구할 수 있다.

4.3 평탄화 방법에 따른 열발생률 선도 비교

연소실 내에서 측정된 압력으로 열발생률을 계산하여 그것으로 연소해석을 행하기 때문에 열발생률 계산용 압력값의 선택은 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 압력값을 3차 7점으로 평탄화를 행한 압력값으로 구한 열발생률 선도가 앙상블 평균에 의한 압력값으로 구한 경우보다 더욱 진실에 가까운 연소해석이 가능하다는 결과를 다음에 논하는 과정을 거쳐 얻었다.

2차 7점, 3차 7점과 4차 7점으로 평탄화를 행한 압력값으로 구한 열발생률 선도를 Fig.7-1, Fig.7-2, Fig.7-3에 보인다.

Fig.7-1의 2차 7점인 경우에는, 원시열발생률과 다른 연소특성을 나타냈고, Fig.7-3의 4차 7점의

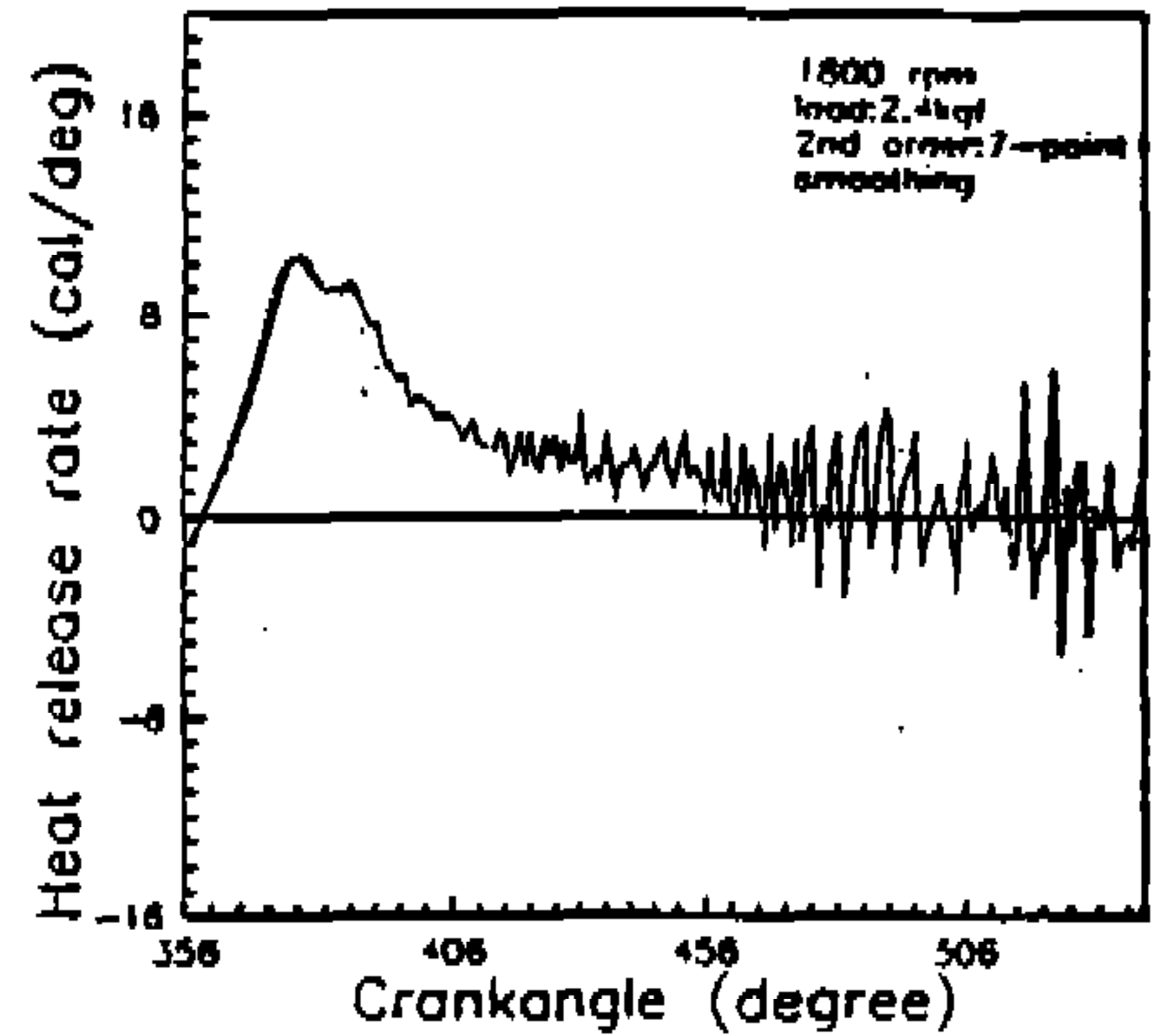


Fig.7-1 The diagram of heat release rate vs. crankangle

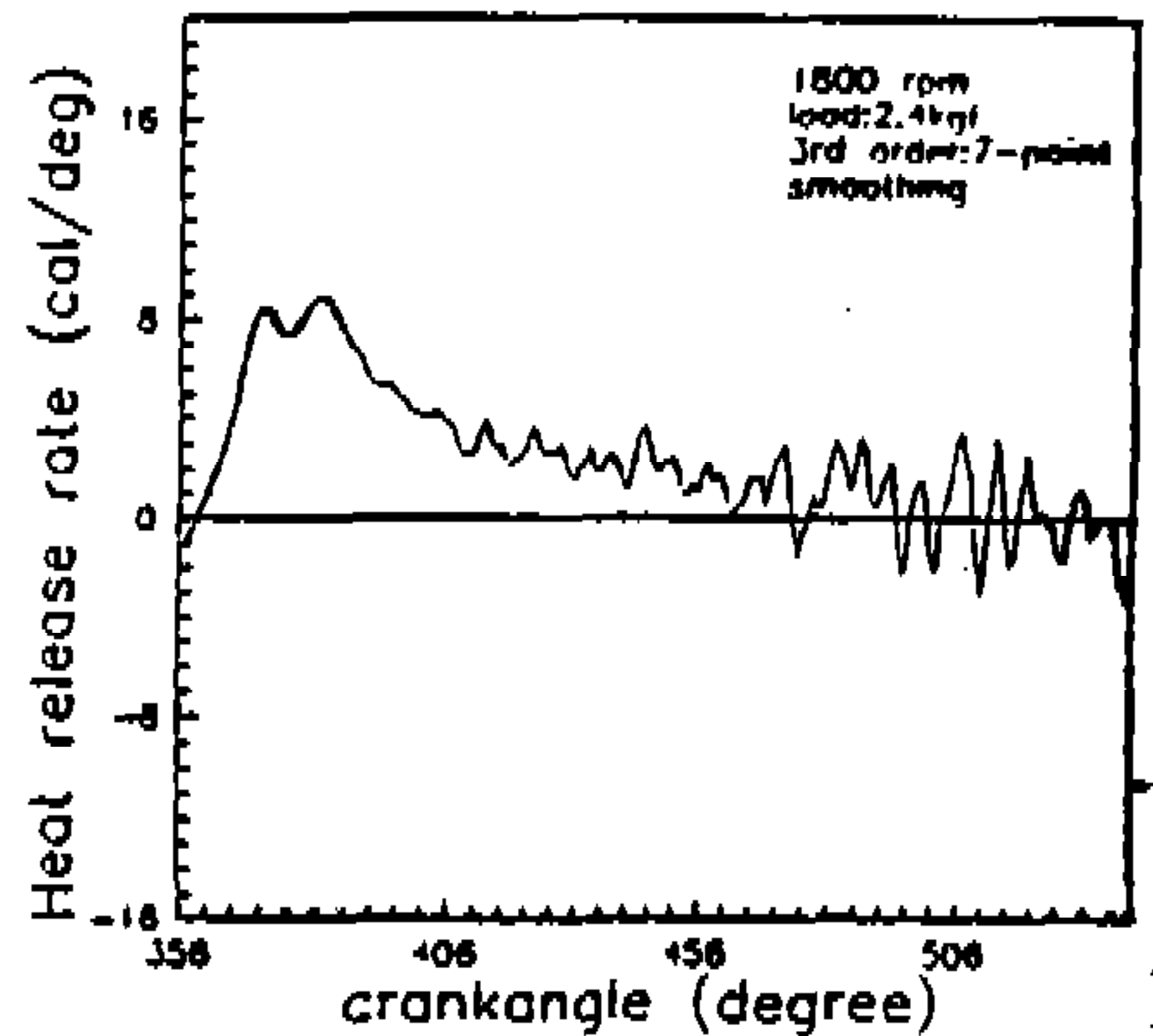


Fig.7-2 The diagram of heat release rate vs. crankangle

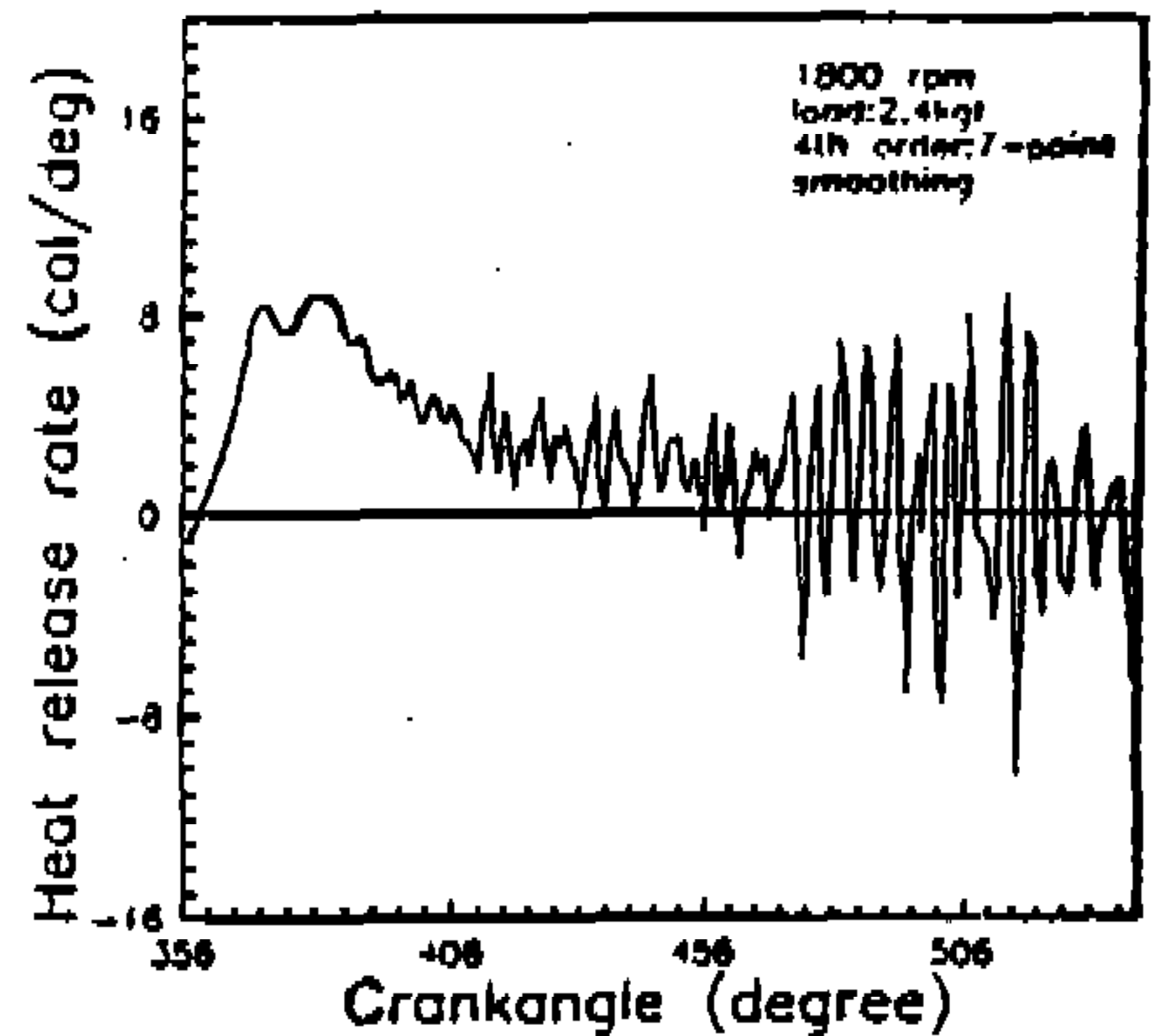


Fig.7-3 The diagram of heat release rate vs. crankangle

경우는 연소특성은 원시열발생률과 유사한 경향을 나타냈으나 지나친 민감성으로 연구자의 주관을 배제하려는 평탄화의 목적에 위배되는 경향이 있다. 이에 비해 Fig.7-2의 3차 7점의 경우는 평탄화 압력이 원시압력값에 가깝고 평탄화한 압력값으로 구한 열발생률선도 또한 연소특성을 잘 나타내면서도 열량값의 변동이 적어 상대적으로 연소해석에 가장 적합한 것으로 판단된다.

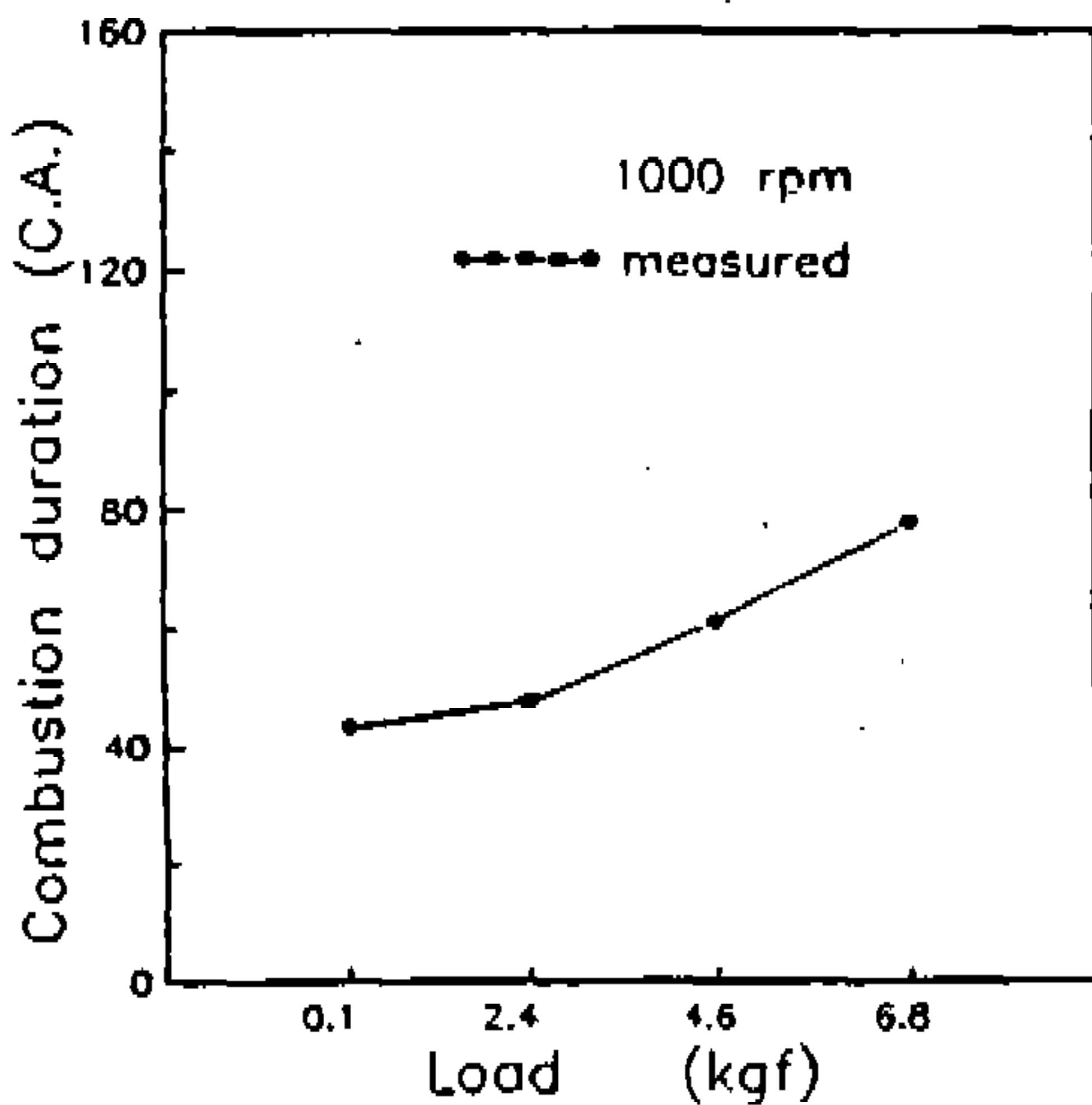


Fig.8 The diagram of combustion duration vs. load

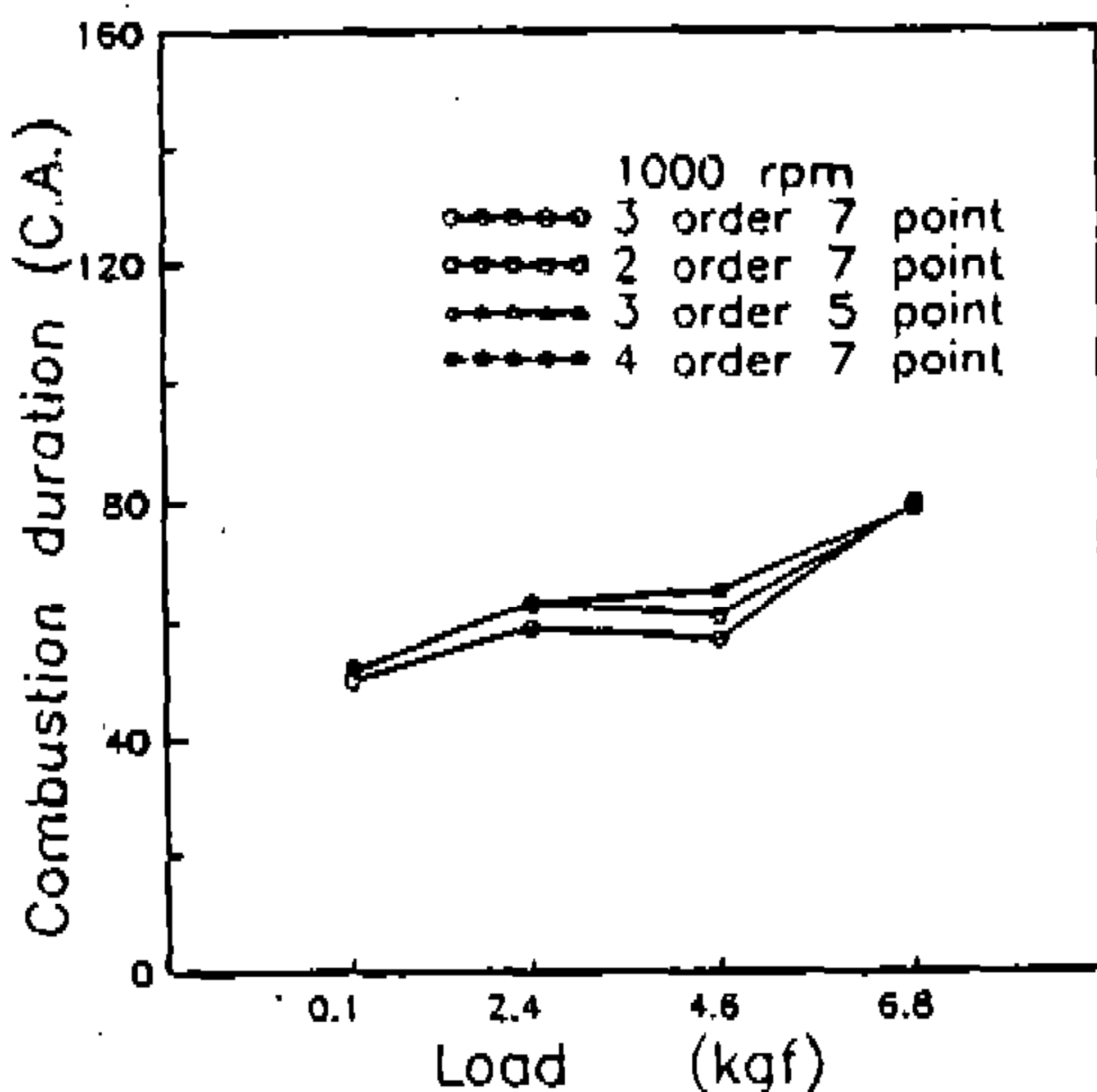


Fig.9 The diagram of combustion duration vs. load

4.4 연소기간 비교

Fig.8은 부하의 변화에 대한 연소기간의 변화를 실측한 그림으로 연소기간은 부하의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 사이클변동에 의한 실측값의 표준편차값은 10도CA정도로 변동폭이 큼을 확인했으며, 기관회전수의 증가에 따라서 크랭크각으로 표시한 연소기간도 길이짐을 확인하였다.

Fig.9에서는 최소자승법의 차수와 점수의 변화에 따른 연소기간의 신뢰성을 확인하기 위해 그 변화를 비교해 놓았다. 그림에서와 같이 연소기간은 어느 차수의 경우나 그 경향을 신뢰할 수 있으며 절대값도 실측값의 표준 편차의 범위에 속함을 알 수 있었다. 특히 3차 7점의 경우는 연소기간과 타 연소해석면에서 다른 차수의 경우보다 상대적으로 우수했다. 따라서 본 연구에서 제시하는 P-θ 선도의 평탄화를 통하여 dQ_v/dθ 선도로 부터 연소기간을 구할 수 있음을 확인했다.

5. 결 론

본 연구에서는 압력의 크랭크각 경과를 압력 발생의 특성을 살리면서도 측정장치상의 정도 부족으로 인한 압력의 비정상적인 변화를 배제하기 위한 앙상블 평균을 이용한 열발생률 계산법과 열발생률의 객관적 분석이 가능할 정도의 최소자승법을 이용한 평탄화 작업을 통한 열발생률 계산법을 연구하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 앙상블 평균보다 최소자승법으로 평탄화과정을 거친 P-θ, dP/dθ 선도와 이로부터 구한 dQ/dθ 선도가 실제현상에 가깝고, 객관적인 연소해석이 가능했다.
- 2) 내연기관에서 연소실내의 압력값으로 열발생률을 구하여 연소해석을 행하는 경우에는 압력값을 평탄화하기 위한 최소자승법의 근사함수의 차수 및 점수는 3차 7점이 비교적 양호함을 알 수 있었다.
- 3) 실측한 연소기간은 12-25% 정도의 사이클변동이 있으며 평탄화한 dQ/dθ로부터 구한 연소기간은 사이클변동 범위에 있음을 확

인하였다.

참 고 문 헌

1. 이상석, 김희년, 김봉근, 하종률, "직분식디젤 기관에서 Cavity형상이 연소특성과 배출미립자에 미치는 영향", 한국자동차공학회지, 제12권 6호, pp.40-47, 1990.
2. 김희년, 김시범, 하종률, "Micro-computer를 이용한 기관 실린더 내의 압력측정 및 연소 해석에 관한 연구", 한국자동차공학회지, 제10권 3호, pp.45-50, 1988.
3. 박기룡, 이상석, 이창현, 하종률, "내연기관 연소실 내의 압력측정에 관한 연구", 대한기계학회 강연논문집(Energy동력공학부문위 초록집), pp.38-42, 1989.
4. Manuel A. Gary L. Borman et al., "A study of diesel cold starting using both cycle analysis and multidimensional calculation." SAE paper 910180.
5. 石田正弘, 松村昇外 4名, "光ファイバ 温度計による ディ젤 燃焼の計測" 日本機械學會 論文集(B) Vol.58, No.555(1992) pp.3482-2488.
6. M.G. Barbara, R.T. Johnson, "Review of Simple Heat Release Computations" SAE paper No. 900445, 1990.
7. Robert H. Perry et al., "Perry's Chemical Engineers' Handbook" 6th Edition, New York, McGraw-Hill, pp.2-66, 1984.
8. 沼倉三郎, "測定値 計算法", 森北出版, pp. 153-155, 1977.
9. 이성렬, "내연기관", 보성각, p.108, 1994.