

〈논 문〉 SAE NO. 953766

# 가솔린 기관의 혼합기 형성 촉진이 연소 특성에 미치는 영향

## Effect of Enhanced Mixture Formation on the Combustion Characteristics in Gasoline Engine

이 창 식,\* 서 영 호,\*\* 김 민 수\*\*  
C. S. Lee, Y. H. Seo, M. S. Kim

### ABSTRACT

In this paper, the fuel atomization effect of a spark-ignition engine on the lean burn characteristics is studied. The fuel atomization is enhanced by heating the inside of the intake manifold with electric heater. Several operating parameters including cyclic variation are expressed against the air-fuel ratio from the experimental results. The fuel atomization gives much influence on the combustion stability. As the intake manifold is heated, the combustion duration decreased and the value of COV in the lean region as well as in the theoretical equivalence ratio became smaller than of not-heated.

주요기술용어 : Fuel Atomization(연료 무화), Coefficient of Variation(변동 계수), Air-Fuel Ratio (공기연료비), Lean Limit(회박 한계)

### 1. 서 론

기화기식 또는 일점 분사식 가솔린 기관에 있어서 흡기관 내로 분사된 연료의 일부분이 흡기관 벽면에 부착되는 것은 실린더 내의 혼합기 형성에 상당한 영향을 미치게 된다. 액체 상태의 연료는 기관의 흡입 과정 중에 무화되면서 공기와 섞여 혼합기를 형성하여 연소실 내로 유입되는데 이러한 혼합기의 형성 과정은 실린더 내의

연소 현상을 결정하는 중요한 인자가 되고 있다. 연료의 흡기관 부착 현상은 기관의 과도 운전시는 물론 정상 운전시에도 각 실린더로의 혼합기 분배의 불균일 및 연료 유량의 시간적인 변동으로 기관 출력의 저하, 연료 소비율의 증대 및 유해 배출물의 증대 등의 원인이 된다.

Matthes<sup>1)</sup> 등은 흡입관 부근에서의 연료의 상태가 기관의 성능에 미치는 영향을 연구한 결과 미세한 입자의 연료를 사용한 경우에 회박 한계가 확장됨을 규명하였다. 또한 Kiichiro<sup>2)</sup> 등은 고온의 벽면에 연료가 충돌할 경우에 벽면의 온도와 연료의 무화와의 관계에서 벽면의 온도가

\* 정회원, 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대 대학원 기계공학과

높으면 연료의 무화 촉진에 상당한 도움이 됨을 밝혔다. 이들 결과로부터 본 연구에서는 흡입 매니폴드의 밀면을 가열하여 혼합기 중에 포함된 액체 연료의 무화를 촉진시키고, 이것이 회박 영역에서의 기관의 연소에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구의 실험에 사용한 기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

기관으로 흡입되는 혼합기 중의 액체 연료 및 액막류의 증발을 촉진시키기 위하여 문헌 [3]의 연구 결과를 참고로 하여 기화기 하부의, 흡기 매니폴드 내면에 전기로 가열하는 20mm×100mm 크기의 평판 모양의 가열기를 2개 부착하였으며, 가열기와 매니폴드 사이에 열전달이 생기는 것을 방지하기 위하여 가열기의 밀면에 석면으로 단열하였다. 가열기는 150W의 용량을 가지며 외부에서 공급되는 전력의 양을 변화시켜 가열기의 온도를 변화시켰고, 온도는 가열기 밀면에 부착한 열전대로부터 측정하였다.

공연비는 분사 방식을 적용하는 기관에서는 인젝터를 구동시키는 신호를 변화시켜서 조절할 수

있지만, 본 실험에서는 벤투리를 통과하는 공기 유량을 제어할 수 있도록 바이패스 통로를 설치하여 공연비를 제어하는 방식을 취하였다. 기화기에서 분무되는 연료의 양은 기화기를 통과하는 공기의 양에 비례하므로 실린더로 유입되는 공기의 일부를 기화기를 거치지 않고 흡기관의 부압에 의하여 직접 흡기 매니폴드로 유입되게 바이패스 통로를 만들었으며, 이 통로에 크고 작은 2개의 밸브를 설치하여 바이패스되는 공기의 양을 미세 조정함으로써 공연비를 조절하였다.

기관의 흡기 매니폴드에 가열기와 바이패스 통로를 장치한 실험 기관 및 실험 장치의 개략도는 Fig.1과 같다. 실험 장치는 실험 기관, 동력계, 연료 소비율 측정 장치, 고압 압력 변환기, A/D 변환기, 크랭크각 검출기, PC 등으로 구성되어 있다.

기관의 회전 속도, 축 토크는 와전류식(eddy current type) 전기 동력계를 사용하여 측정하였으며 스톱을 개도의 조절은 동력계와 일체로 구성되어 있는 스톱을 액츄에이터를 사용하여 조정하였다. 연료 소비율(SFC)의 측정은 중량식 측정 장치를 사용하였다.

고압 압력 변환기는 압전 효과를 이용한 압력 트랜스듀서(Kistler, 6501A)를 사용하였으며 점화 플러그 일체형 어댑터(Kistler, 6517A)를 사

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	Water-cooled carburetor type gasoline engine
Displacement Volume(cc)	1468
Bore×Stroke(mm)	75.5×82.0
Number of Cylinder	4
Firing order	1-3-4-2
Compression Ratio	8.38
Intake valve open	BTDC 18.5°
close	ABCD 51.5°
Exhaust valve open	BTDC 51.5°
close	ABCD 18.5°

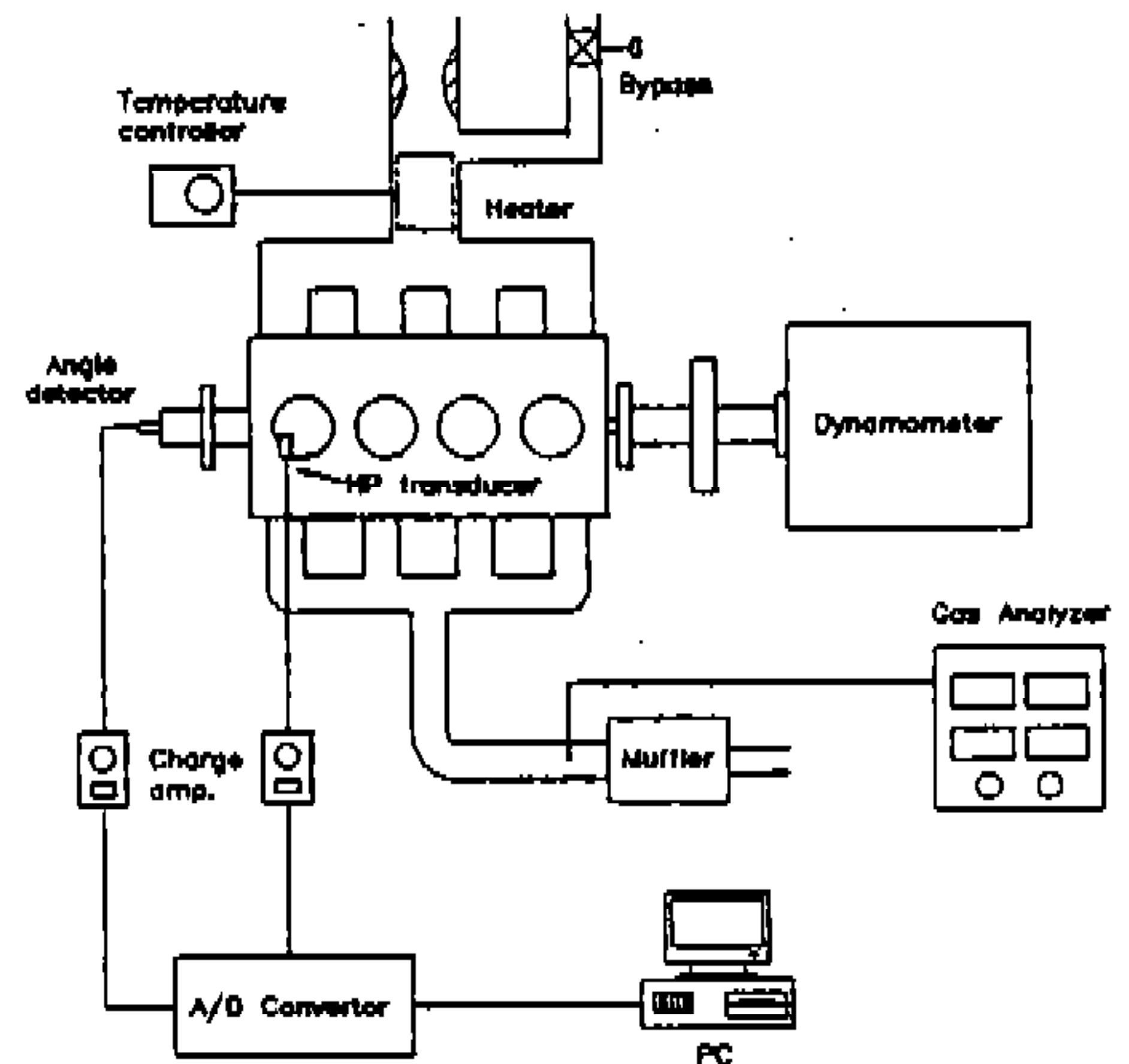


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

용하였다. 센서의 신호는 데이터의 필터링 기능이 내장된 신호증폭기(Kistler, 5011)을 거쳐서 A/D 변환기(Keithley, DAS58, 1Msamples/sec)을 사용하여 입력되도록 하였다.

크랭크 신호는 크랭크각과 TDC를 검출할 수 있는 광파이버식 크랭크각 검출기(Ono Sokki, CP-620)와 신호 증폭기(Ono Sokki, CA-500A)를 사용하여 압력 신호와 동기되도록 하였다.

## 2.2 실험 방법

실험은 기관을 충분히 예열시킨 후 냉각 수온을  $80 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지한 상태에서 운전하였으며, 기관의 연소 상태에 대한 점화 시기의 영향을 없애기 위해 점화 시기는 BTDC  $35^\circ$ 로 일정하게 유지하였다<sup>4)</sup>. 본 연구에서는 기관의 부분 부하 운전 조건에 대한 회박 영역의 연소 상태를 파악하는 것이 기본 목적이므로, 기관의 회전 속도 및 축 토크를 각각 2,000rpm, 35Nm로 일정하게 유지한 상태에서 공연비 만을 이룬 공연비인 14.7부터 약 20까지 변화시키면서, 매니폴드 하부를  $150^\circ\text{C}$ 로 가열하여 혼합기 중의 연료의 증발을 촉진시킨 경우와 가열하지 않은 경우에 대해서 실험하였다. 각 조건에서의 실린더 압력은 A/D 변환기를 거쳐 PC에 저장함과 동시에 열발생율, 연소율 등의 제 인자들의 영향과 연소특성을 계산하도록 하였다.

본 실험의 내용은 작동 유체(공기와 연료)의 유동 방향에 직접적으로 가열판을 부착한 것이 아니라 스로틀 보디에서 매니폴드로 유입되는 수직 곡관의 하단에 가열판을 부착함으로써 빠른 유동의 공기 및 그 속에 부유하는 매우 작은 입경의 연료 액적에는 별로 영향을 주지 않지만 스로틀 밸브 주위에서 충분히 무화하지 못한 큰 입경의 액적 또는 벽류에 의하여 응집되어 있는 연료액막의 양을 가열에 의하여 극소화시키는 것이 주 목적으로 하기 때문에 작동유체의 온도상승에 의한 체적효율의 변화는 무시할 수 있도록 하였다.

우선 실제 실험에서 공연비 조절의 정확도를 확인을 위하여 임의의 기관 실험 조건을 설정한

후 일정 시간동안 운전시키면서 총류 공기 유량계 및 연료계로부터 측정된 공연비와 배기 가스 분석기의 산소 농도로부터 산출되는 공연비를 비교하여 보았으며, 정상 운전 상태에서는 상호 일치함을 볼 수 있었다. 이 결과를 토대로 하여 공연비는 배기 가스 조성으로부터 구하는 방식의 공연비 측정기를 사용하여 측정하였다.

각 실험 조건에 대하여 180사이클의 연속적인 압력을 기록하여 사이클 변동을 조사하였으며, 압력 등의 대표값은 크랭크 각도  $0.5^\circ$ 마다 저장하여 이를  $1^\circ$  간격으로 180사이클의 평균값을 구하였다.

## 3. 실험 결과의 해석

### 3.1 압력 상승율 및 열발생율

압력 센서와 A/D 변환기, PC 등을 이용하여 실린더 내의 압력을 구하고 그로부터 압력 상승율, 열발생율, 연소율 등을 계산하였다.

실린더 내의 압력 상승율( $dP/d\theta$ , R.O.P.R)은 측정된 압력값으로부터 다음 식으로 표현된다. 임의의 크랭크각  $i$ 에서의 값은  $i$ 전후에서의 압력값으로부터 구해진다.

$$\left(\frac{dP}{d\theta}\right)_i = \frac{1}{12} [P(\theta_{i-2}) - 8P(\theta_{i-1}) + 8P(\theta_{i+1}) - P(\theta_{i+2})]$$

기관 실린더에 열역학 제 1법칙과 이상 기체의 상태 방정식을 적용하면 열발생율( $dQ/d\theta$ )은 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{k-1} \left[ kP \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right]$$

### 3.2 변동 계수

측정된 실린더 압력으로부터 구할 수 있는 사이클 변화에 관련된 가장 중요한 인자중의 하나가 변동 계수(coefficient of variation, COV)이다. 변동 계수는 변량의 표준편차와 평균값의 비

의 백분율로 표시된다. 즉,  $N$ 개의 변량  $x_i$ 가 있을 때 그 표본의 평균  $\bar{x}$ 와 표준편차  $\sigma_x$ 는

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

이 되고, 이로부터 변동 계수는

$$COV = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\%$$

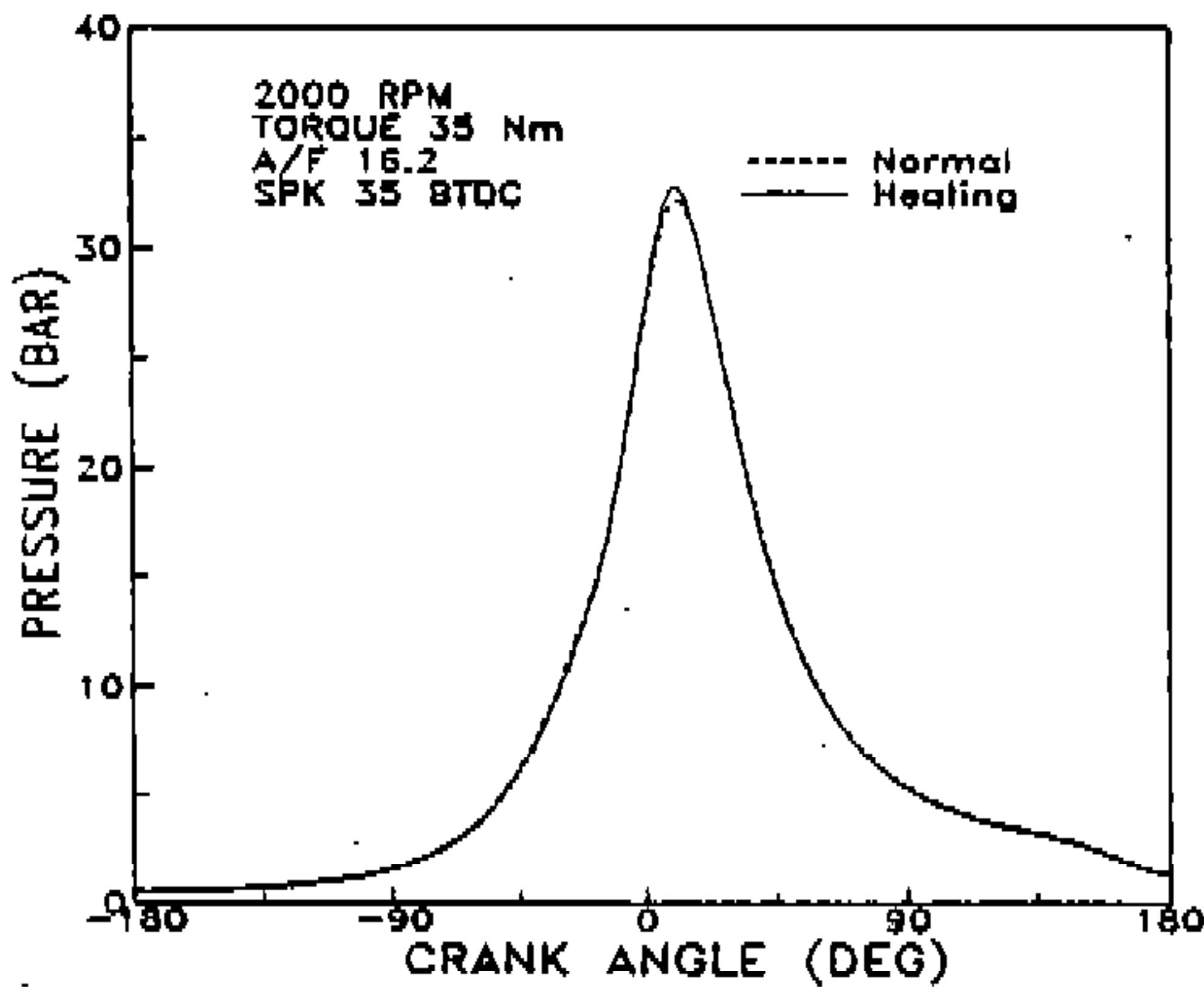


Fig.2(a) Effect of heating device on the cylinder pressure at A/F 16.2

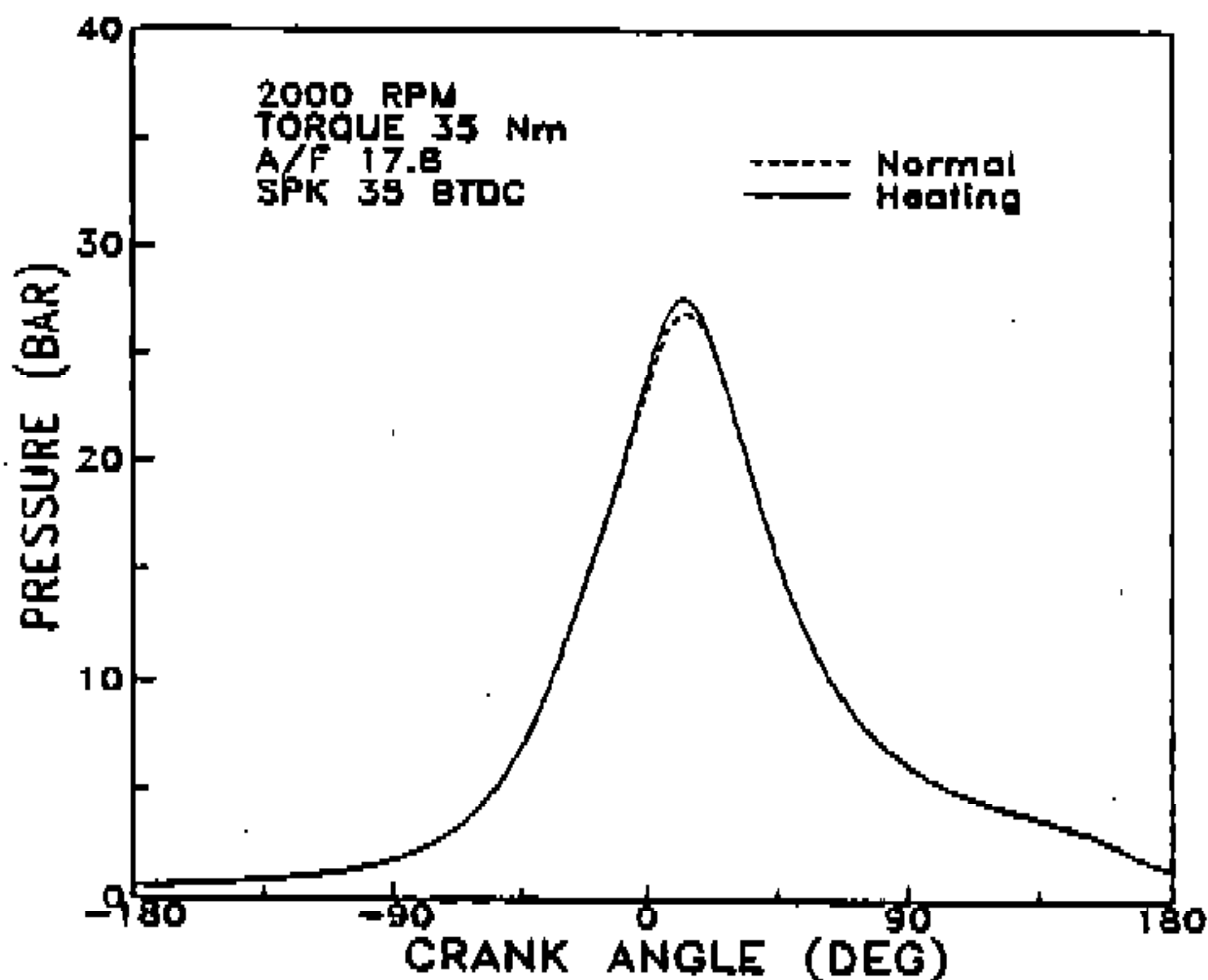


Fig.2(b) Effect of heating device on the cylinder pressure at A/F 17.8

로 정의된다.

여기서 변량  $x$ 는 평균유효압력( $P_{me}$ ), 최고압력( $P_{max}$ ), 최고압력이 나타나는 크랭크각( $\theta(P_{max})$ ), 압력상승율의 최대값( $(dP/d\theta)_{max}$ ), 또는 그 때의 크랭크각( $\theta(dP/d\theta)_{max}$ ) 등을 적용한다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig.2는 혼합기의 무화를 촉진시킨 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 기관의 실린더 압력을 나타낸 것이다. 연료의 무화를 촉진시킨 경우는 무화 축진을 하지 않는 일반적인 경우보다 실린더 최고 압력이 약간 높거나 거의 같은 경향을 나타낸다. 그러나 최고 압력이 발생하는 각도 이외의 영역에서는 두 경우의 실린더의 압력이 일치함을 보여 무화를 촉진시키는 것이 전체적인 실린더 내의 압력에는 그다지 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig.3은 공연비의 변화에 대한 실린더 내의 압력을 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 실린더 내의 최고 압력은 공연비(A/F)가 증가함에 따라 저하하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 공연비가 증가할수록 흡입된 혼합기 중에 들어가는 연료의 양이 적어지므로 연소실 내의 가스 압력은 저하하는 것으로 볼 수 있다. 이와 같이 실린더 내 최고 압력의 저하와 더불어 최고 압력이 나타나는 크랭크 각도도 공연비가

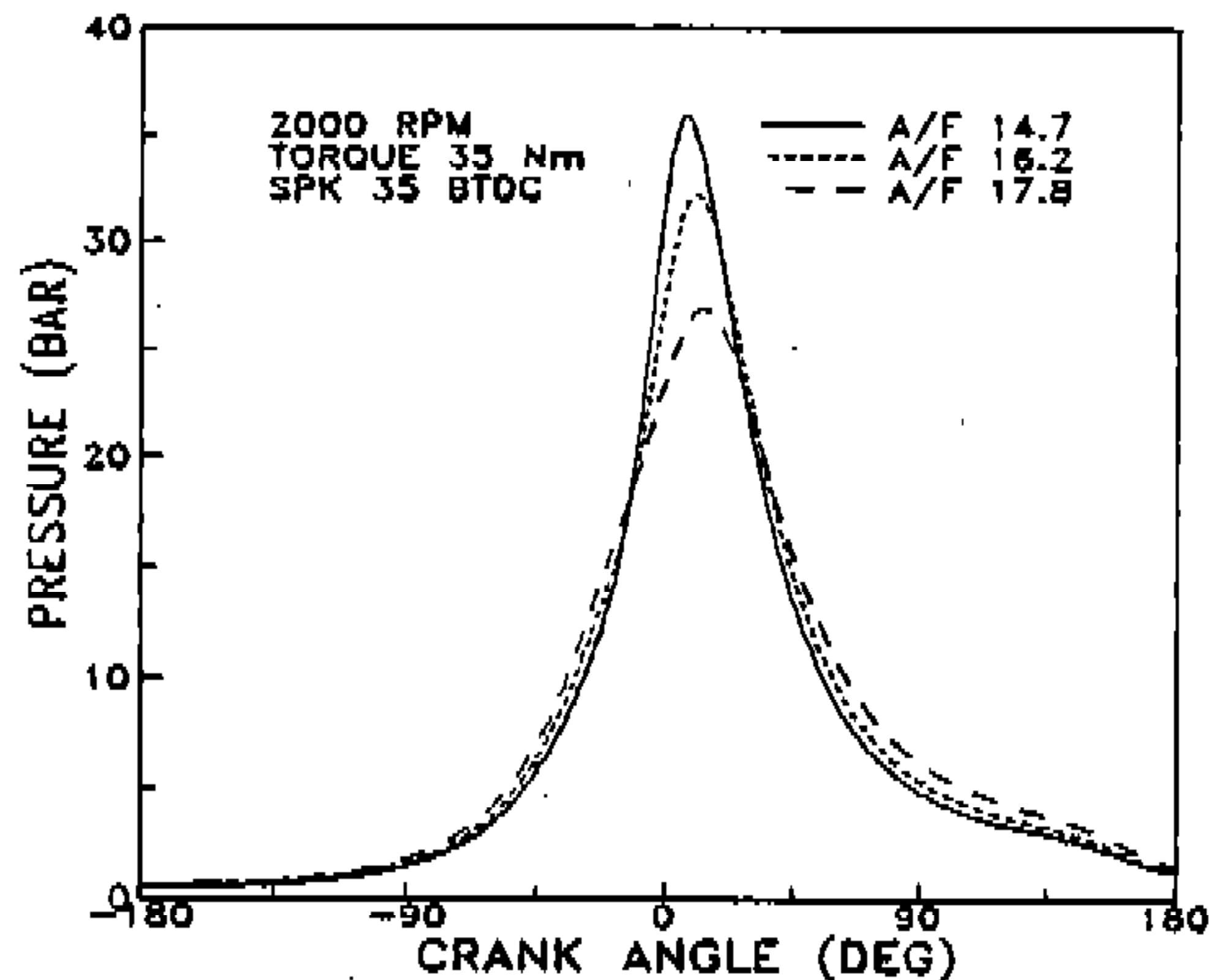


Fig.3 Effect of air-fuel ratio on the cylinder

증가할수록 지연되는 경향을 나타내었다. 이것은 혼합기가 희박해질수록 화염의 전파속도가 느려져 급격 연소가 이루어지지 않기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.4는 기관의 압력 상승율(R.O.P.R)의 최대값을 공연비의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 이 선도에 나타난 것과 같이 압력 상승율은 혼합기가 희박할수록 그 최고값이 낮아지는 경향을 보였지만 연료의 증발을 촉진시킨 경우에는 그 최고값이 보통의 경우보다 어느 정도 상승한 경향을 나타내었다.

Fig.5는 연료의 무화를 촉진시킨 경우와 일반적인 경우에 있어서의 열발생율(R.O.H.R)의 변

화를 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 무화를 촉진시킨 경우가 그렇지 않은 경우보다 열발생이 더 빠르게 시작하여 더 빠르게 끝나는 경향을 나타내었다. 즉, 전체적으로 연소가 빨라짐을 알 수 있다.

Fig.6은 공연비의 변화에 대한 열발생율의 변화를 나타낸 것이다. 열발생율은 혼합비가 증가하여 희박 혼합기로 될수록 최고 압력 상승율이 저하함과 아울러 열발생 시기도 지연되는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향의 주된 원인은 희박한 혼합기일수록 연소 속도가 느려져서 열발생이 상사점 이후에도 계속되기 때문인 것으로 생각된다. 즉 이론 공연비 부근에서는 연소실 체적의

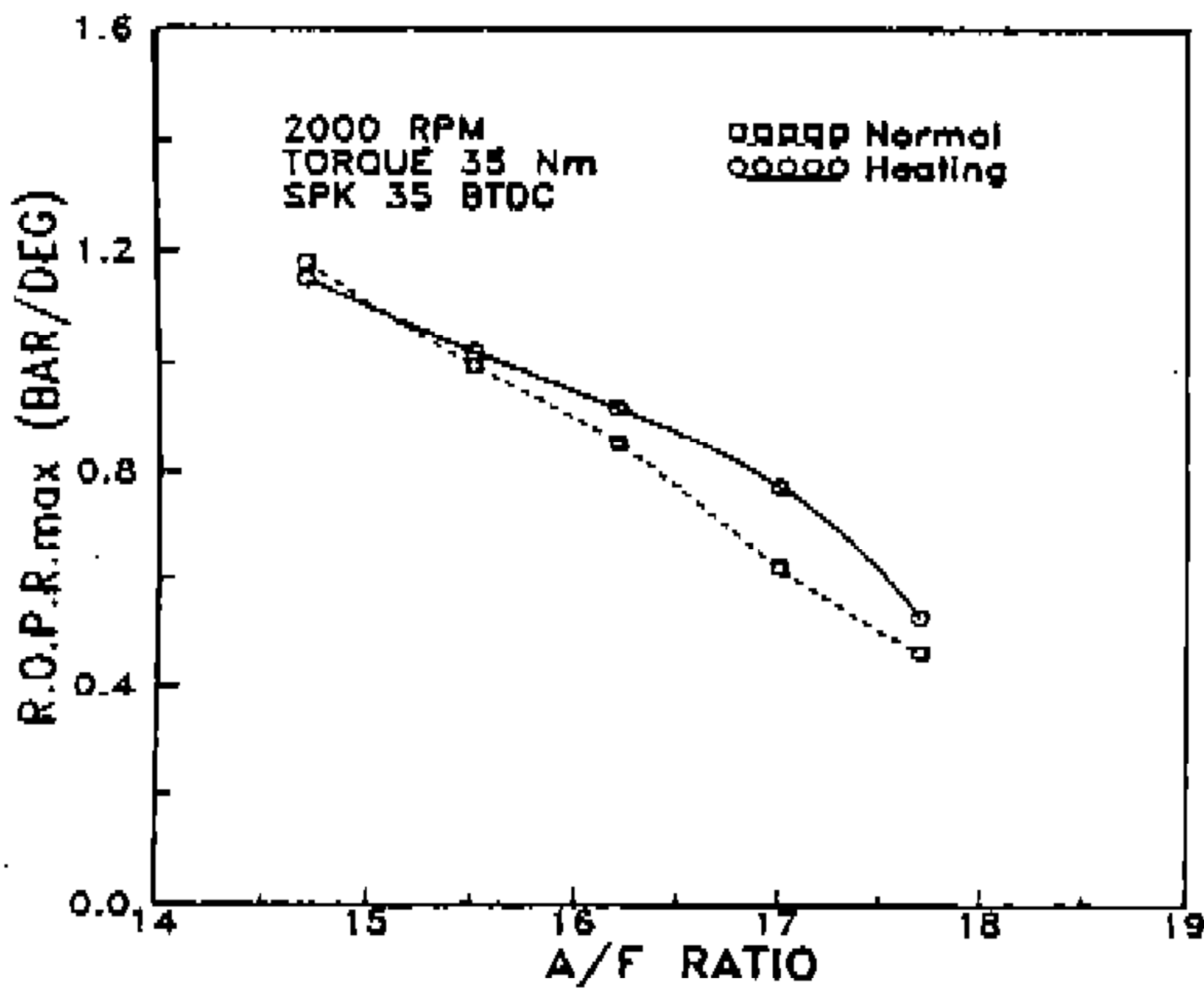


Fig.4 Effect of heating device on the maximum rate of pressure rise

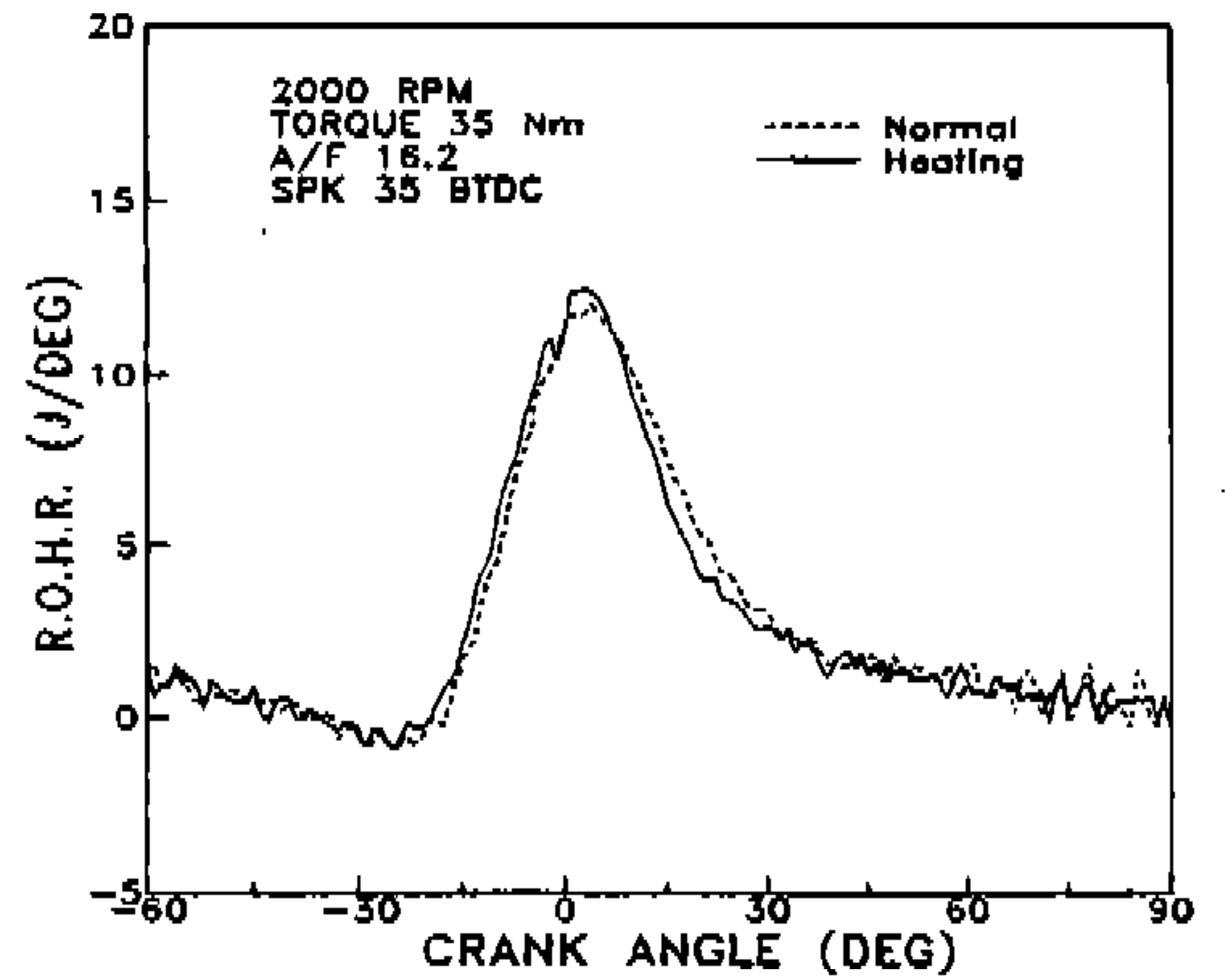


Fig.5(a) Effect of heating device on the rate of heat release at A/F 16.2

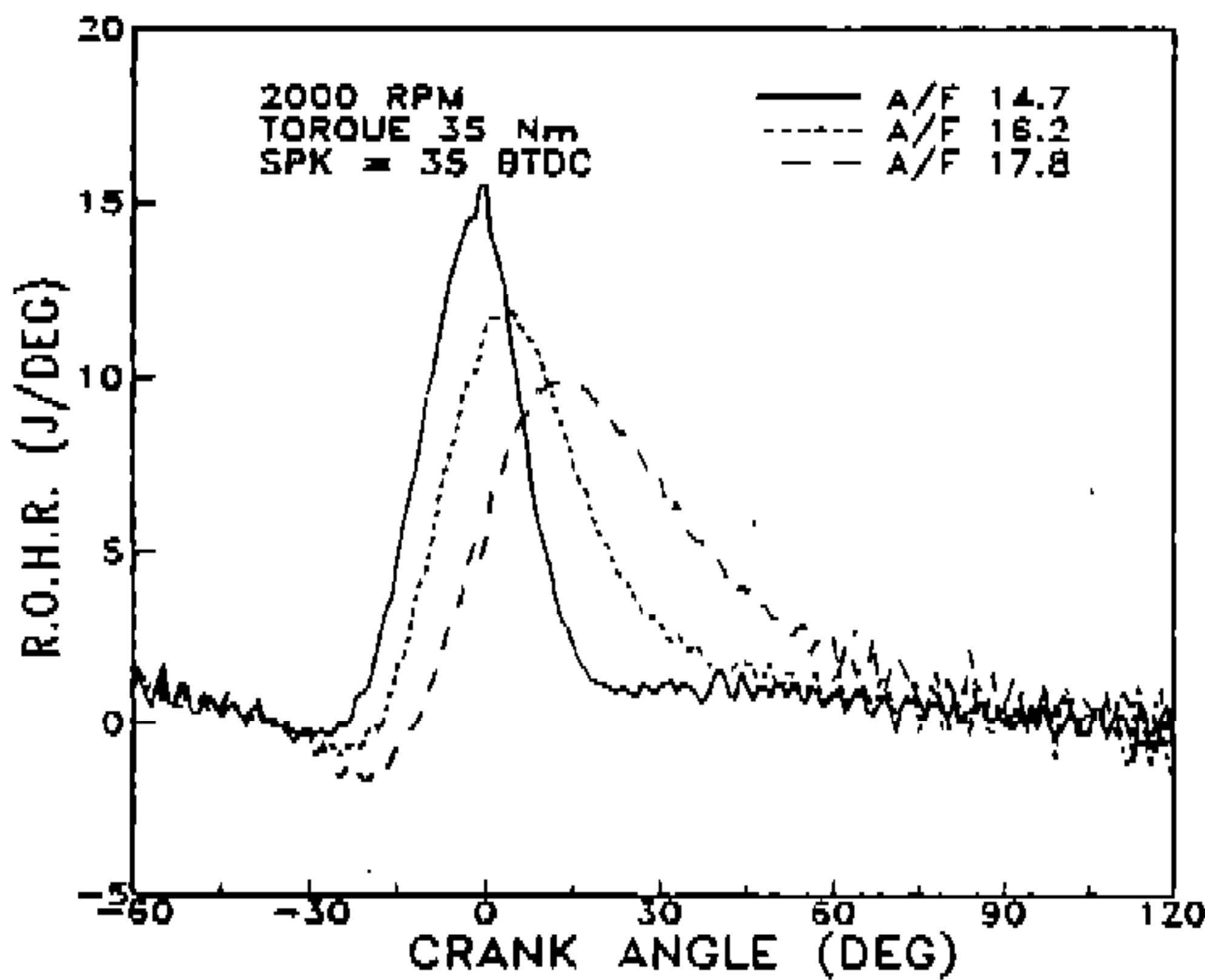


Fig.6 Effect of air-fuel ratio on the rate of heat release

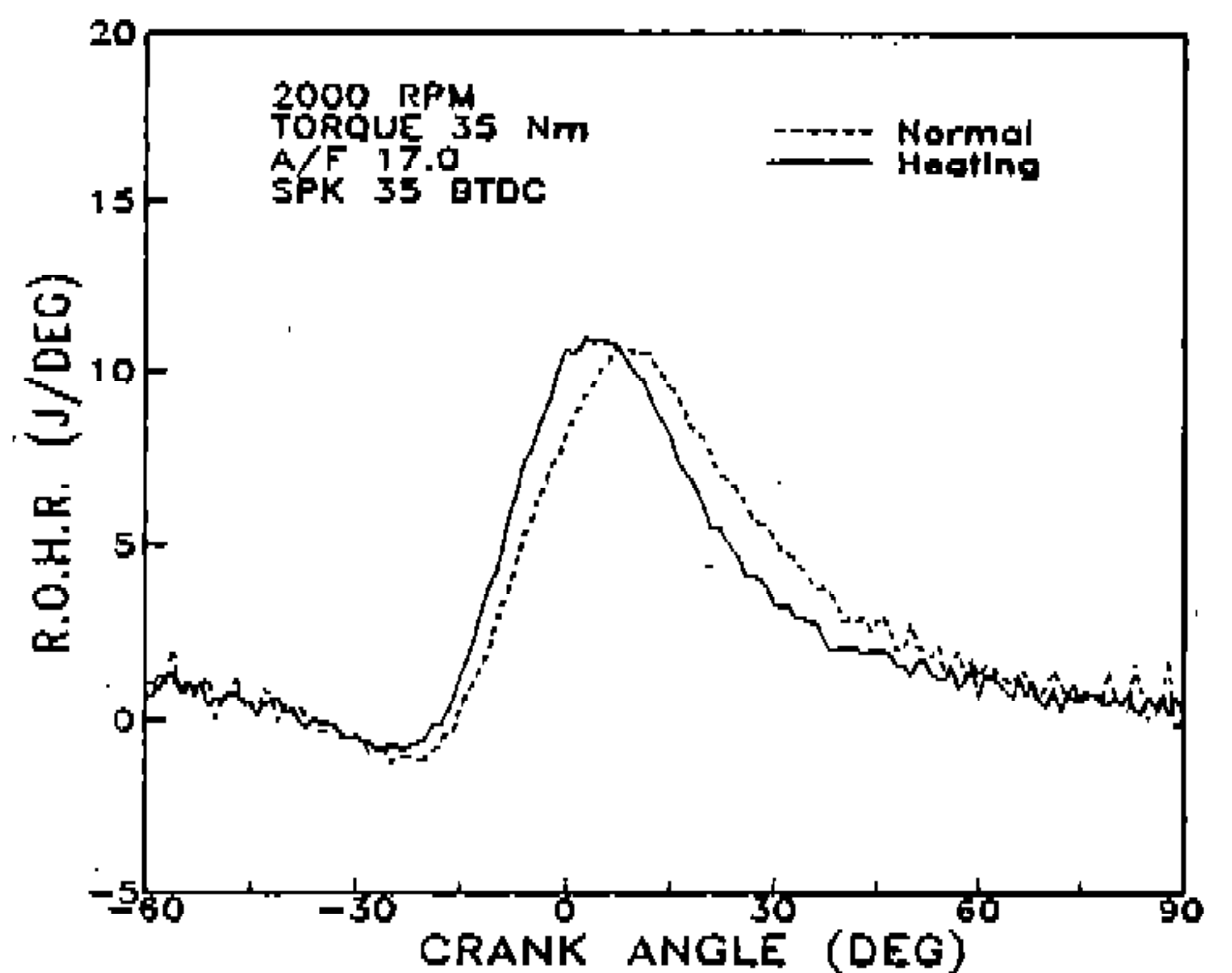


Fig.5(b) Effect of heating device on the rate of heat release at A/F 17.0

변화가 적은 상사점 부근에서 많은 열발생을 나타내고 있으므로 연소 속도가 급격 연소가 수반되어 최고 압력 및 열발생율의 최고치도 높아지는 것으로 생각된다. 따라서 희박 영역에서는 최고치도 낮을 뿐만 아니라 연소가 일어나는 시기도 늦어진다.

Fig.7은 공연비의 변화에 대한 점화 지연 기간을 나타낸 것이다. 일반적으로 점화 지연 기간은 플러그에서 점화가 된 후 실제로 연소가 시작될 때까지의 기간을 나타낸다<sup>5)</sup>. 본 실험에서는 점화 시기를 일정하게 한 상태이나 혼합기의 공연비가 증가할수록 지연 기간이 길어지는 경향을 나타내었다. 그 이유는 혼합기가 희박한 상태에서는 화

염핵의 생성이 이른 혼합기에 비하여 어렵고 화염의 전파속도가 느려지기 때문이다. 즉, 혼합기가 희박해지면 점화시기를 당겨주어야 한다. 그러나 흡입 매니폴드 내부를 가열하여 연료의 증발을 촉진시킨 경우는 일반적인 경우보다 지연기간이 전체적으로 약간 낮아지는 경향을 보인다.

Fig.8은 일정한 토크와 회전 속도에서 공연비의 변화에 대한 제동 연료 소비율(S.F.C.)을 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 연료 소비율은 혼합기가 희박해짐에 따라 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 매니폴드를 가열하여 무화를 촉진시킨 경우가 가열하지 않은 경우보다 연료 소비율이 전체적으로 약간 낮은

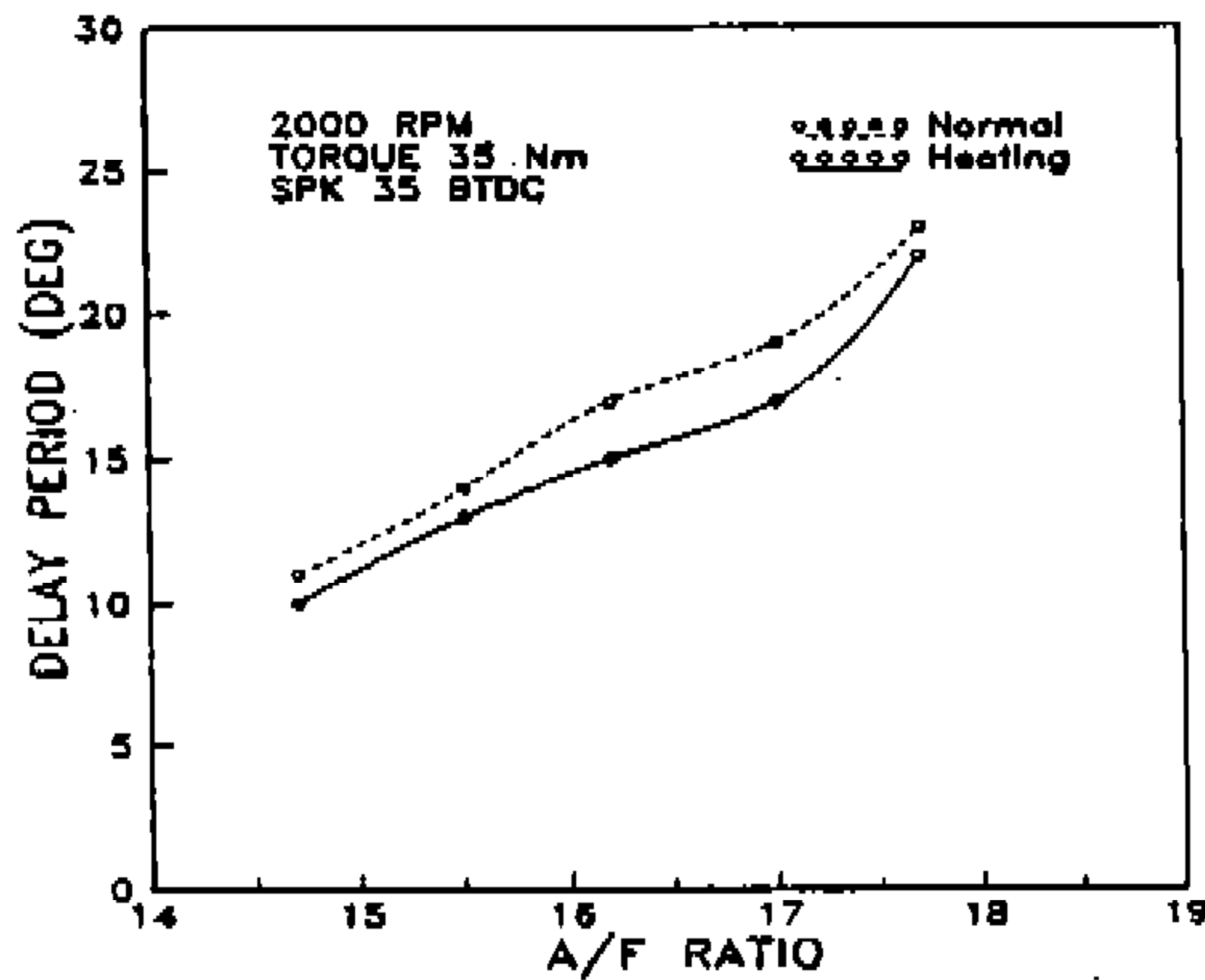


Fig.7 Effect of heating device on the Ignition delay

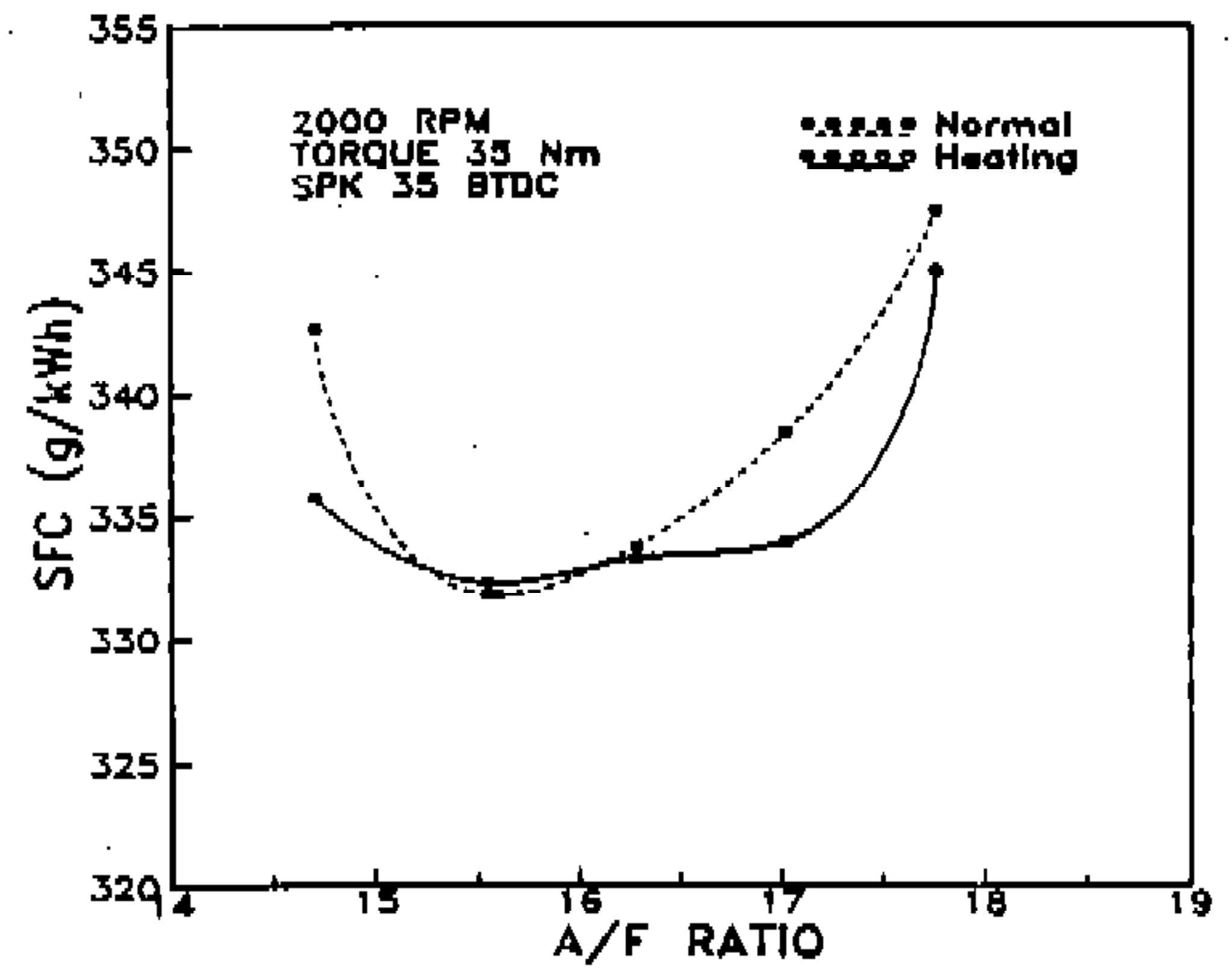


Fig.8 Effect of heating device on the specific fuel consumption rate

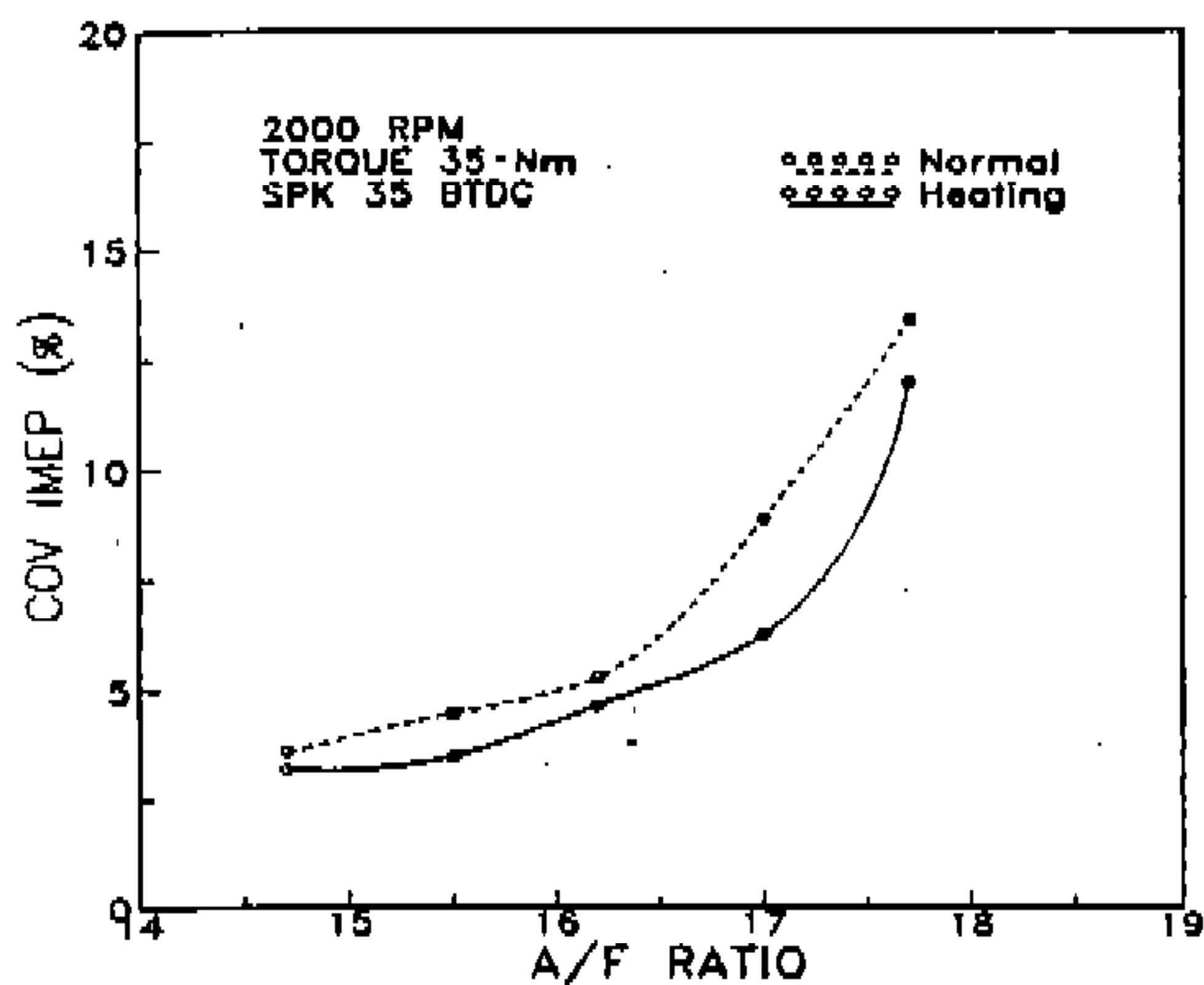


Fig.9 Relation between air-fuel ratio and  $COV_{imep}$

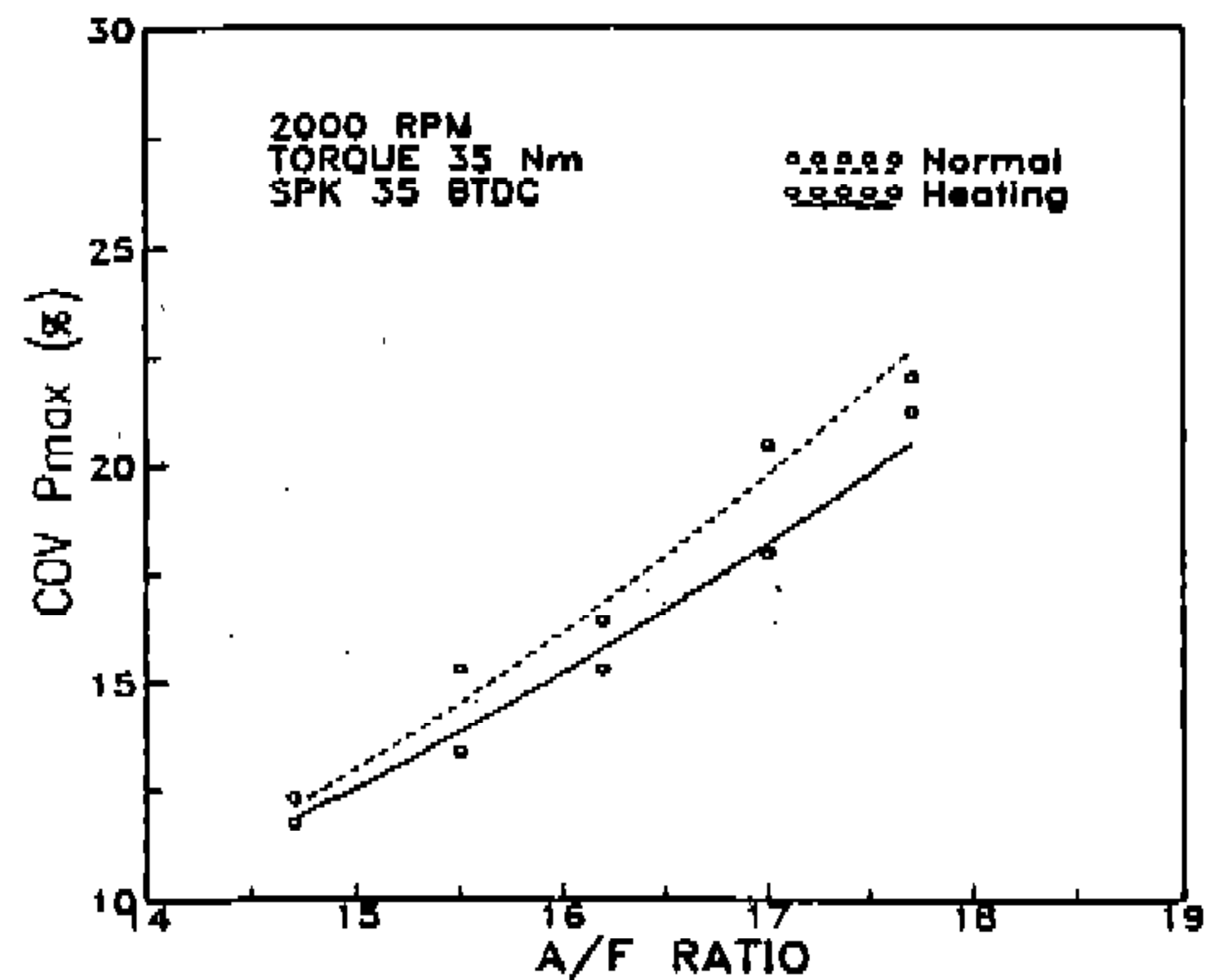


Fig.10 Relation between air-fuel ratio and  $COV_{Pmax}$

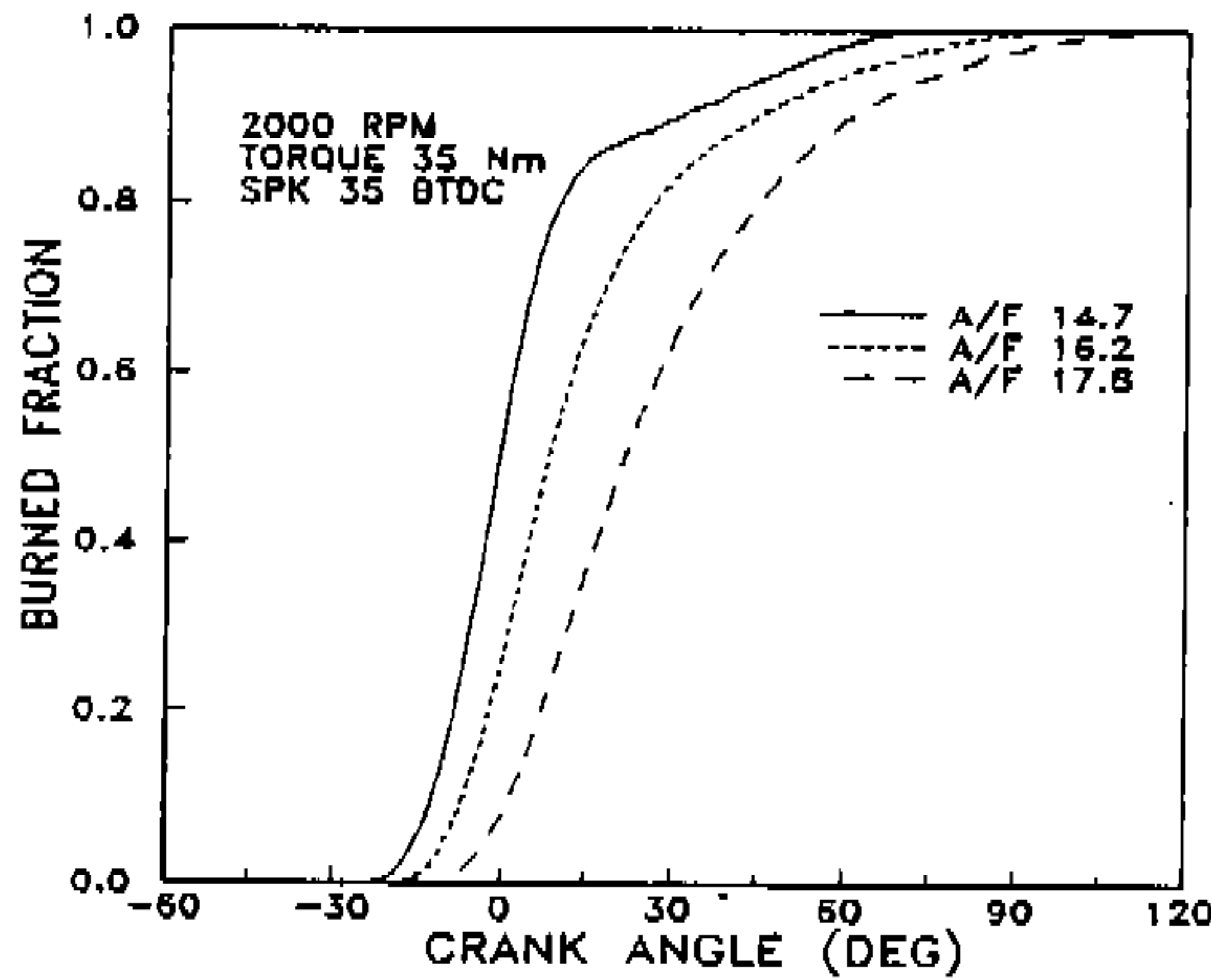


Fig.11 Effect of air-fuel ratio on the burned fraction

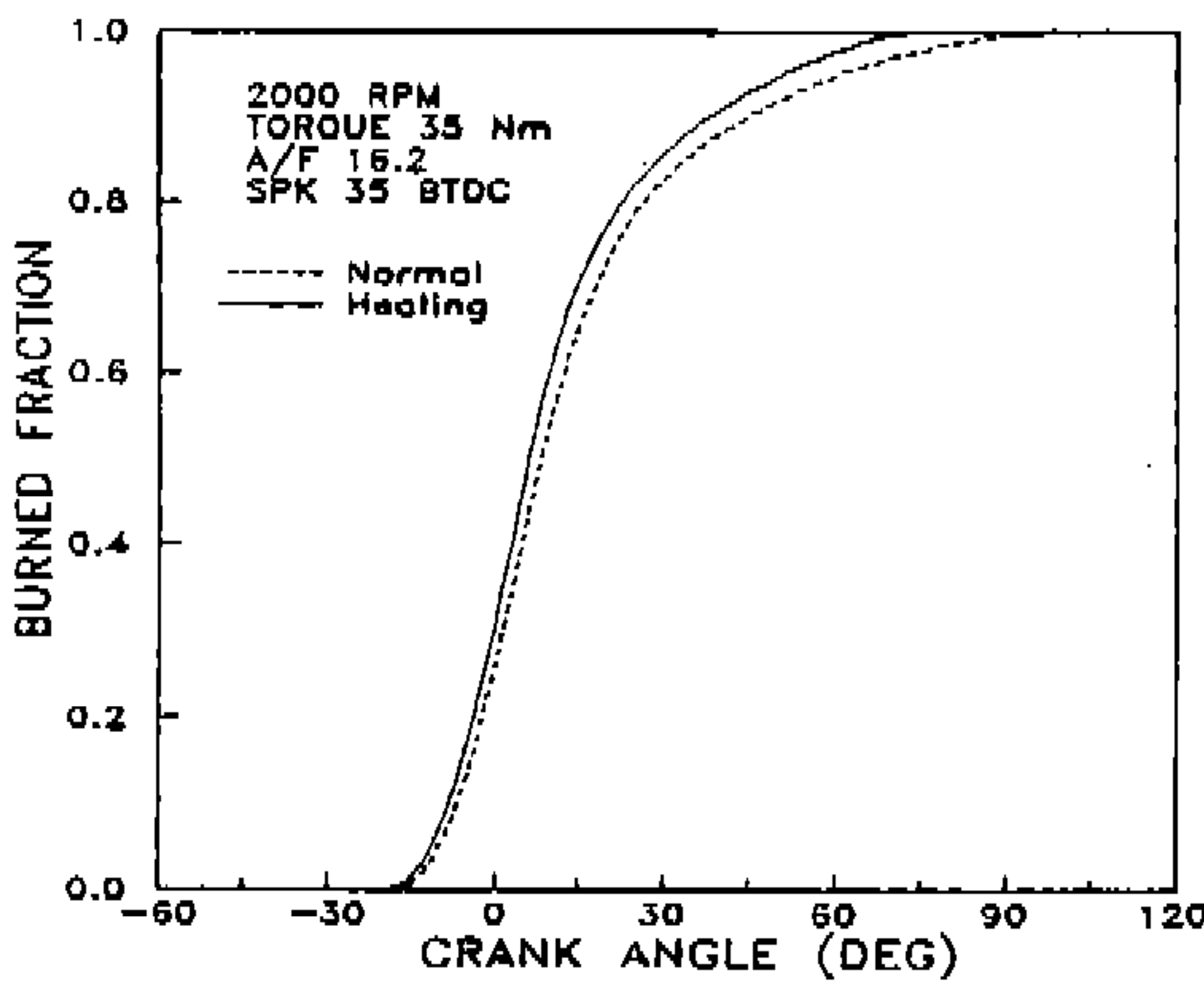


Fig.12(a) Effect of heating device on the Burned fraction at A/F 16.2

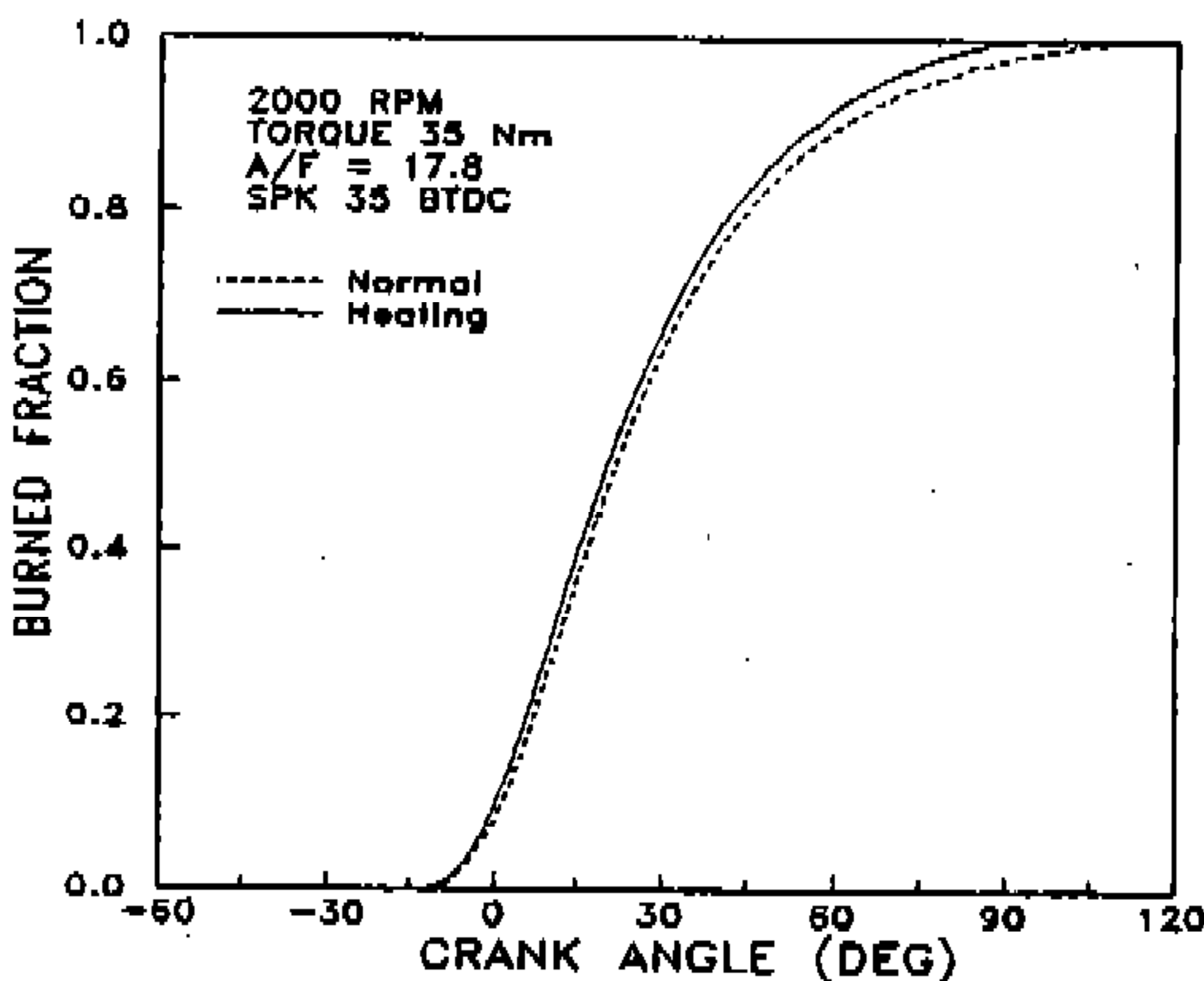


Fig.12(b) Effect of heating device on the Burned fraction at A/F 17.8

경향을 보이는데 이는 연료의 무화가 촉진되어 실화나 소염, 사이클 변동 등이 적어졌기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 연료 소비율이 증가하기 시작하는 시기도 무화를 촉진시킨 경우에는 지연되었다.

Fig.9, 10은 각각 공연비의 변화에 대한 평균 유효 압력 및 연소 최고 압력의 사이클 변동 계수(COV)를 나타낸 것이다. 희박 한계(lean limit)는 혼합기가 희박해져서 기관의 운전 상태가 불안정해지는 때의 공연비를 말하는데 일반적으로는  $COV_{imep}$ 가 5~6% 이상이 되면 희박 한계라고 한다. 이 선도에서 보는 바와 같이 공연비가 증가할수록 변동 계수의 값도 증가한다. 그 이유는 혼합기가 희박해질수록 실화나 소염 등이 증가하기 때문인 것으로 생각한다. 그러나 흡기 매니폴드를 가열한 경우에는 그렇지 않은 경우보다 변동 계수가 전체적으로 낮은 분포를 갖는다. 가열을 하여 혼합기의 증발이 촉진되고 그 결과 연소실 내의 혼합기가 균일하게 되어서 점화하는 순간에 점화 플러그 간극 사이에 가연 혼합기가 있을 확률이 높아지고 화염핵의 형성에 도움이 되기 때문이라고 판단된다. 즉, 연료의 증발의 촉진은 연소의 안정에 상당한 도움이 되는 것으로 볼 수 있다.

Fig.11은 실린더 내의 혼합기의 연소율을 공연비의 변화에 대하여 비교한 것이다. 혼합기가 희박해질수록 연소가 시작되는 시기는 지연되고 연소 기간도 이른 공연비의 경우보다 길어지는 경향을 나타내었다. 그러나 Fig.12에서 보는 바와 같이 연료의 증발을 촉진한 결과 연소 기간이 약간 줄어들었다.

### 5. 결 론

가솔린 기관의 흡기 매니폴드를 가열하여 연료의 증발을 촉진시키고 공연비의 변화에 따른 연소 특성의 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기관의 가열에 의한 증발 및 무화를 촉진시킨 결과 기관의 압력, 압력 상승율, 열 발생을 등의 연소 특성은 향상되는 경향을

나타내었다.

- 2) 변동 계수는 공연비가 희박할수록 증가하는 경향을 나타내었으나 무화를 촉진시킨 결과 안정되는 경향을 보여서 연료의 무화 촉진이 연소의 개선에 도움이 됨을 알 수 있었다.
- 3) 기관의 연료 소비율은 연소의 불안정으로 희박한 영역에서 감소하다가 오히려 증가하였다. 그러나 연료의 무화를 촉진시킨 경우는 연료 소비율이 전체적으로 낮은 경향을 보였으며 다시 증가하기 시작하는 공연비도 확장되었다.
- 4) 공연비가 희박해질수록 점화 지연 시간이 길어지나 연료의 증발을 촉진시키면 점화 지연 시간이 짧아져서 희박한 영역에서도 연소 개선의 효과를 얻을 수 있었다.

이 논문은 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것의 일부로서 연구비를 지원하여 주신 관계 제위에게 감사드리는 바입니다.

## 참 고 문 헌

1. William R. Matthes and Ralph N. McGill, "Effects of the Degree of Fuel Atomization on Single-Cylinder Engine Performance", SAE Paper No.760117, 1976
2. Kiichiro Takeuchi and Jiro Senda, "Break-up Behavior of Fuel Jet Impinging upon a Hot Surface", Internal Combustion Engine, Vol.21, No.264, pp.9~18, 1982
3. Yukio Hosho, Yoshishige Oyama, Teruo Yamauchi and Torazo Nishimiya, "Exhaust Emission Reduction with Lean Mixture(1) -Early Fuel Evaporation Device", Internal Combustion Engine, Vol.12, No.145, 1973
4. Seiichi Shiga and Kazumitsu Kobayashi, "Effect of Fuel Atomization at a Fuel Supply System on the Lean Burn Characteristics in a Spark-Ignition Engine", SAE Paper No.910568, 1991
5. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw Hill, pp. 376~390, 1988.