

〈논 문〉 SAE NO. 953743

메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(I)

Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture(I)

김 봉 석*, 권 철 홍*
B. S. Kim, C. H. Kwon

ABSTRACT

This study investigates the combustion characteristics of methane-hydrogen-air premixture in a constant volume combustion chamber. Primary factors of the combustion characteristics of methane-hydrogen-air premixture are the equivalence ratio and hydrogen supplement rate. In the case of $\phi=1.1$, maximum combustion pressure and heat release rate have peaks, and they increase as the initial pressure and hydrogen supplement rate increase. The total burning time is also the shortest at the $\phi=1.1$, it shorten by lowering the initial pressure and by increasing the hydrogen supplement rate. The maximum flame temperature is shown at the $\phi=1.0$, and increasing the initial pressure and hydrogen supplement rate, it increases. The concentration of NO reveals the highest value at the $\phi=0.9$, and it increases by increasing the initial pressure and hydrogen supplement rate. It is also found that the limit of lean inflammability of methane-hydrogen-air premixture is greatly widened by increasing the hydrogen supplement rate.

주요기술용어 : Combustion Characteristics(연소특성), Methane-Hydrogen-Air Premixture(메탄-수소-공기 예혼합기), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소실), Hydrogen Supplement Rate(수소첨가율), Limit of Lean Inflammability(회박가연한계)

1. 서 론

최근의 산성비, 지구온난화현상 및 오존층파괴 등과 같은 환경문제에 가장 큰 오염원의 하나로 간주되고 있는 자동차 배출가스에 대한 규제가

점차 강화되면서 저공해 차량용 대체연료의 개발 연구가 활발히 추진되고 있다. 이중 압축천연가스도 유망한 저공해 차량용 대체연료로 간주되고 있는데 특히 회박연소를 이용한 NGV(natural gas vehicle)차량은 배출가스문제와 연비문제를 동시에 만족시킬 수 있는 하나의 방안으로 많이 연구되고 있다¹⁾. 그러나 회박연소시에는 초기점

* 정희원, 한국에너지기술연구소 수송기술연구팀

화의 불안정성과 연소속도의 저하 등으로 엔진출력이 저하함은 물론 운전성의 문제가 야기되는 등 아직도 실용화를 위한 몇몇 해결과제가 상존하고 있다²⁾.

현재까지 이와같은 희박천연가스 연소상의 문제는 주로 연소실내에 강한 난류나 스웰³⁾ 등을 발생시키거나 보다 강력한 점화장치를 사용⁴⁾하여 해결하고자 시도하고 있으나, 수소가 연료물성 측면에서 천연가스보다 점화에너지가 낮고 연소속도가 빠르며 가연범위가 넓다는 점을 감안해 볼때 천연가스에 수소를 첨가, 사용함으로써 상기 문제점을 해결하는 방안도 고려해 봄직하다고 본다. 특히, 수소는 가솔린, 경유 등 석유계연료의 연소와 달리 입자상물질, SO_x, CO, CO₂, HC 또는 다른 유기배출물들의 방출이 없는 청정연료이기 때문에 이를 메탄에 첨가, 희박운전함으로써 미국의 엄격한 초저공해차량(ULEV : ultra low emission vehicles) 규제치를 충분히 만족할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

이에 본 연구에서는 연소현상을 단순화할 목적으로 제작한 원통형의 정적연소실을 이용하여 혼합기의 유동이 정지된 상태에서 당량비, 수소첨가율 및 초기압력을 변화시켰을 때의 메탄-수소

-공기 예혼합기의 연소특성을 조사한것에 대해 소개하고자 한다.

먼저 본보에서는 연소압력, 연소시간, 열발생을, 화염온도, NO 농도 및 희박가연한계 등에 관련된 메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성에 대해 고찰하고 다음보에서 이온 전류파형, 화염발광량신호, 연소속도, 화염전파속도 및 화염전파과정 등에 대해 고찰하기로 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig.1은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실, 점화장치, 혼합기 제조장치, 압력측정장치, 쉐리렌사진 촬영장치, 온도측정장치, NO 측정장치, 이온신호 측정장치, 화염발광량신호 측정장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다.

황동제의 정적연소실은 Fig.2에서와 같이 내경 80mm, 폭 40mm(체적 201cc)의 원통형이다. 연소실 중앙에는 전극직경이 1mm인 침형의 스테인레스 점화플러그가 설치되었으며, 간극은 1mm로 용량방전점화장치(CDI : capacity discharge

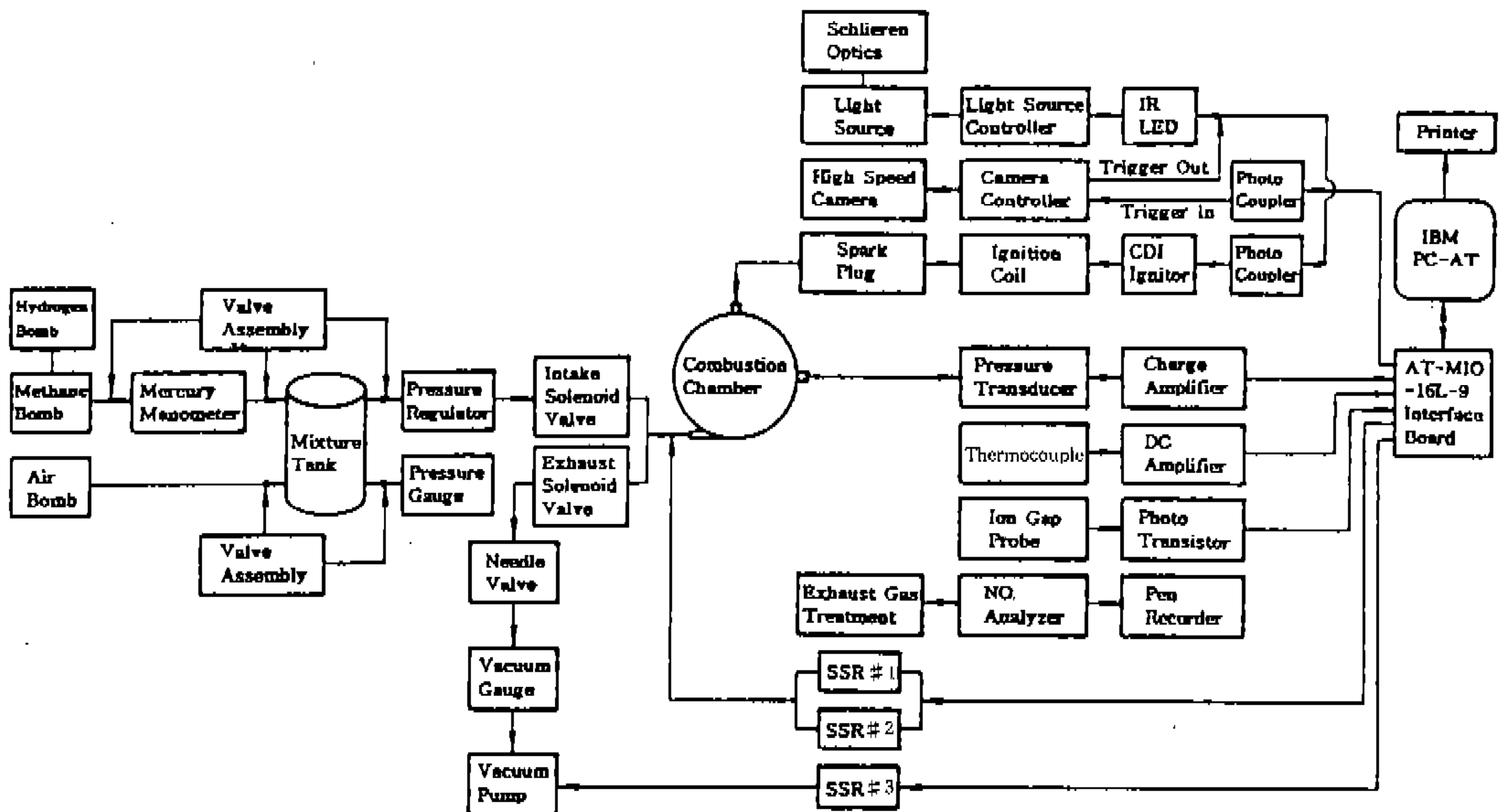


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

igniter)와 자동차용 점화코일에 의해 방전, 점화된다.

연소실하단의 접선부위에는 예혼합기 및 연소가스의 흡·배기를 위해 SSR(solid state relay)과 연결된 솔레노이드 밸브(밸브장착으로 인한 연소실의 체적증가 및 이상연소를 방지하기 위해 니들선단이 연소실벽면에 위치하도록 설계되어 있음)가 부착되어 있다. 이들 SSR은 Interface board(NI사 model AT-MIO-16L, maximum sampling rate : 100kHz)가 내장된 컴퓨터의 제어신호에 의해 온라인으로 작동된다.

연소압력을 측정하기 위해 연소실의 중앙측면에 압전식 압력변환기(Kistler사 model 601A)를 설치하였으며, 압력변환기의 출력은 증폭기(Kistler사 model 5007)를 사용하여 증폭시켰다.

연소실내의 화염온도는 직경 75 μ m인 R형의 열전대 프로브를 연소실 원주벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에서 폭방향으로 20mm 삽입하여 측정하였으며, 열전대의 온도변화에 따른 전압신호는 DC 증폭기(Analog Design사 model ADL-8731T)를 통해 게인 200배의 크기로 증폭하였다.

연소가 종료된 직후 연소가스를 채취하여 불활성기체인 아르곤가스와 혼합한 후 NO 농도를 분석하기 위한 연소가스 희석장치를 제작하였으며, NO 농도분석은 화학발광반응법에 의한 NO

분석기(Thermo Environmental Instruments, Inc.사 model 10AR, flow rate : 2scfh)를 이용하였다.

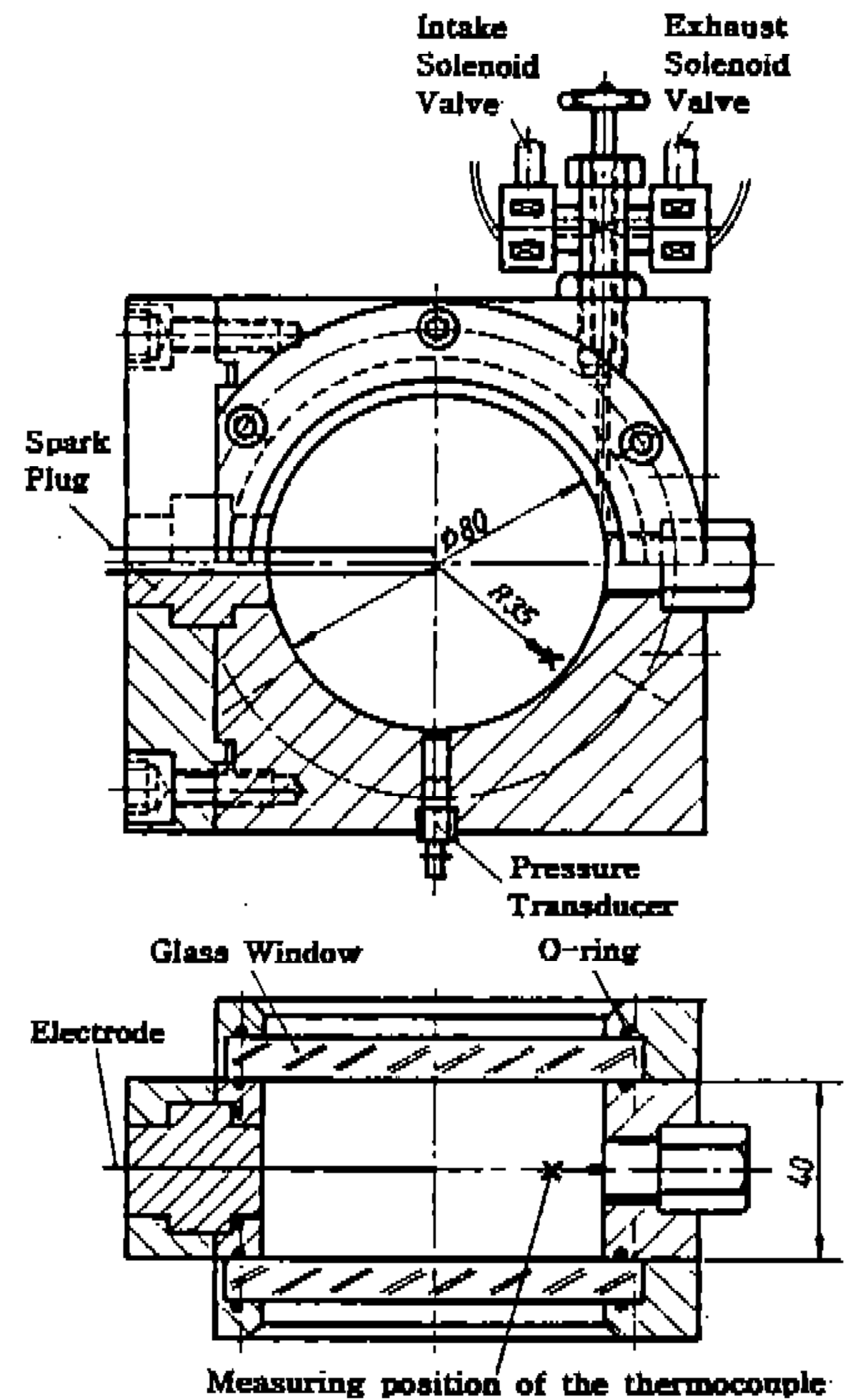


Fig.2 Schematic diagram of combustion chamber

Table 1 Experimental conditions

Combustion chamber volume, V(cc)	201
Fuel/Oxidizer	Methane/Air, Methane-Hydrogen/Air
Equivalence ratio, ϕ	Methane/Air : 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 Methane-Hydrogen/Air : 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3
Hydrogen supplement rate, S_r (Vol% H ₂)	0, 10, 20, 30, 40, 50
Initial pressure, P_i (kg/cm ²)	1.5, 2.0, 2.5
Ignition position	Center
Initial temperature, T_i (K)	Ambient
Ignition energy, E(mJ)	80
Data sampling rate, (ms)	0.1

2.2 실험방법

실험방법 및 순서는 다음과 같다. 혼합기 제조 장치내에서 균일하게 교반되어 만들어진 메탄-공기(또는 메탄-수소-공기) 예혼합기를 미리 진공상태로 소기된 연소실로 실온하에서 초기압력 만큼 충전하고, 이후 3분간에 걸쳐 유동을 정지 시킨 다음, 컴퓨터 트리거신호에 의해 점화시킨다. 이때 연료-공기의 혼합비는 각각의 분압법에 의해 결정하였으며, 메탄(순도 99.99%), 수소(순도 99.99%) 및 탈습공기를 혼합용기내에서 팬으로 충분히 교반, 혼합시켜 필요한 예혼합기를 만들었다. 제조된 예혼합기는 메탄과 수소의 밀도차가 크기 때문에 Gas sampler로 일정량씩 수회 채집하여 가스 크로마토 그래피(Hewlett Packard사 model HP 5891GC, column packing material : molecular sieve MS 5A, detector : TCD)로 분석하였다.

점화후 연소특성을 파악하기 위한 신호들은 인터페이스 보드를 거쳐 컴퓨터 디스크에 저장되며, 압력변환기와 열전대로부터 출력된 전압신호들은 절대압력과 절대온도로 각각 환산하였다.

Table 1은 전체적인 실험조건을 나타낸 것으로 실험변수는 당량비, 수소첨가율 및 초기압력이며, 각각의 당량비에 있어서 메탄에 대한 수소첨가율 S_r 은 다음식 (1)로 정의하였다.

$$S_r = \frac{H_2}{CH_4 + H_2} (Vol\%) \quad (1)$$

한편, 본 실험은 어느정도의 편차를 수반하기 때문에 동일조건에서 10회 이상 실험을 행하고 그 평균치를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소압력 및 연소시간

Fig.3은 연소의 초기조건이 수소첨가율 $S_r=0\%$ H_2 , 초기압력 $P_i=1.5kg/cm^2$ 인 경우에 있어서 연소압력을 시간경과에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 A점이 점화시기, B점이 압력상승 개시

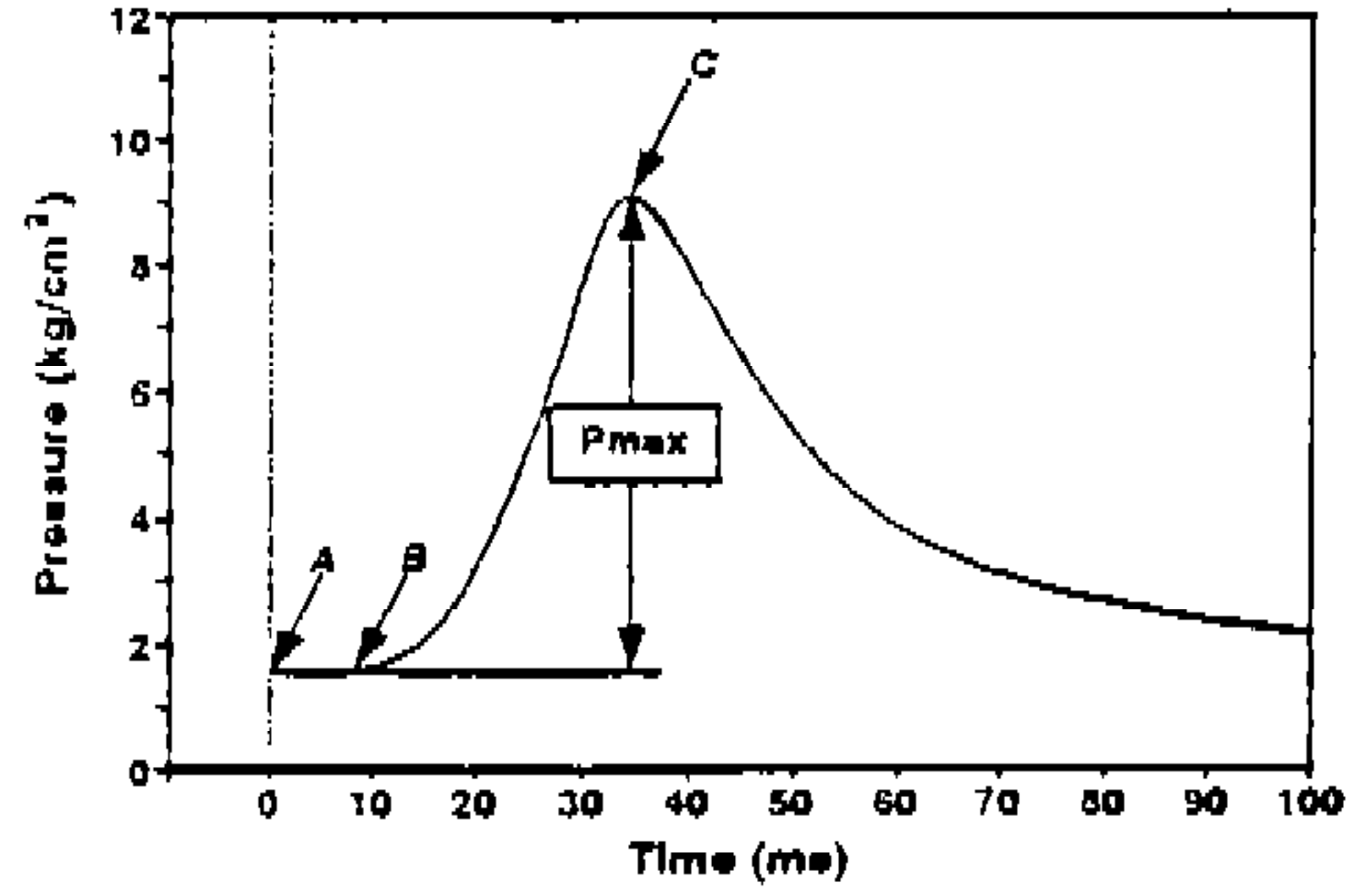
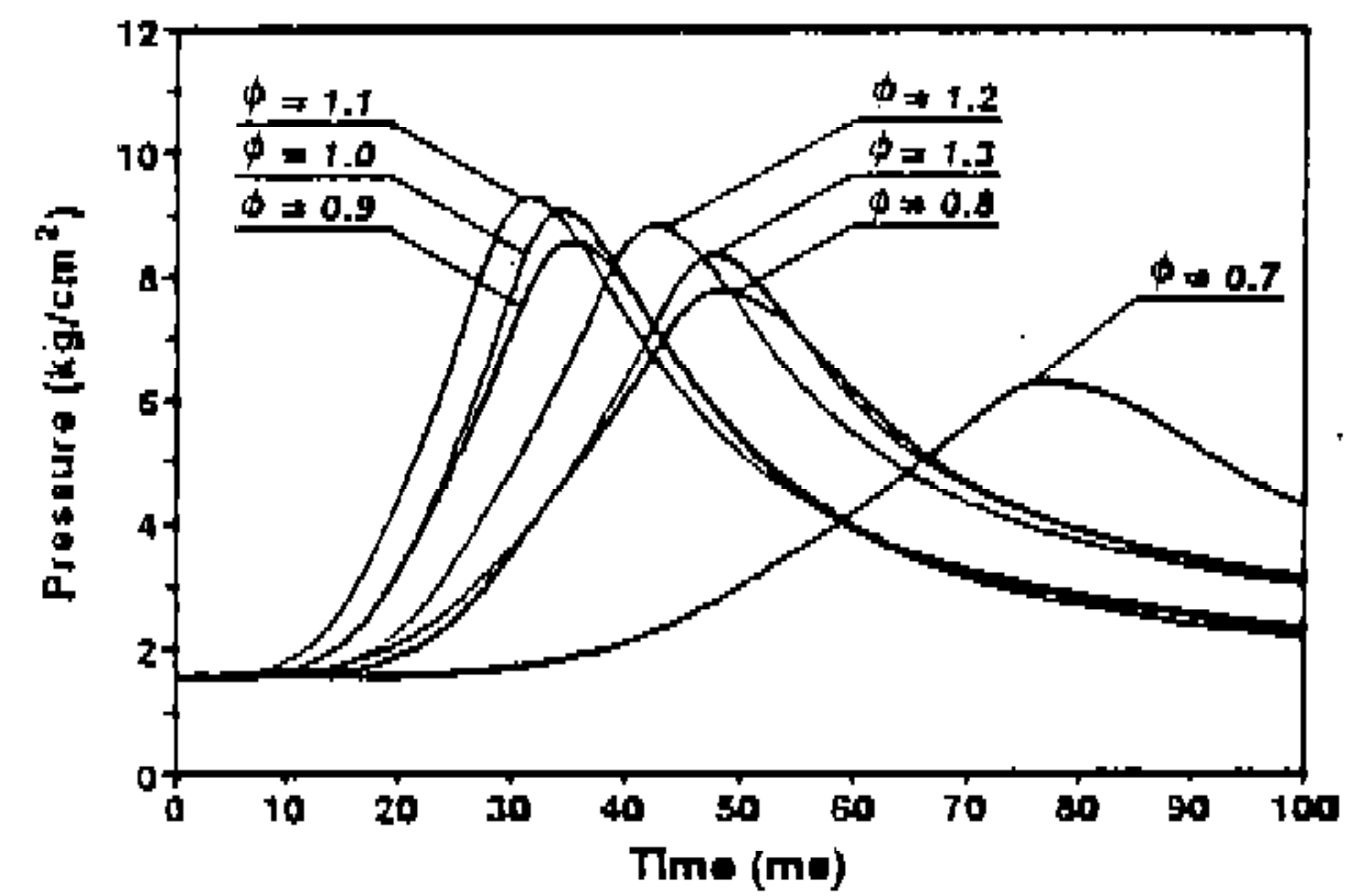
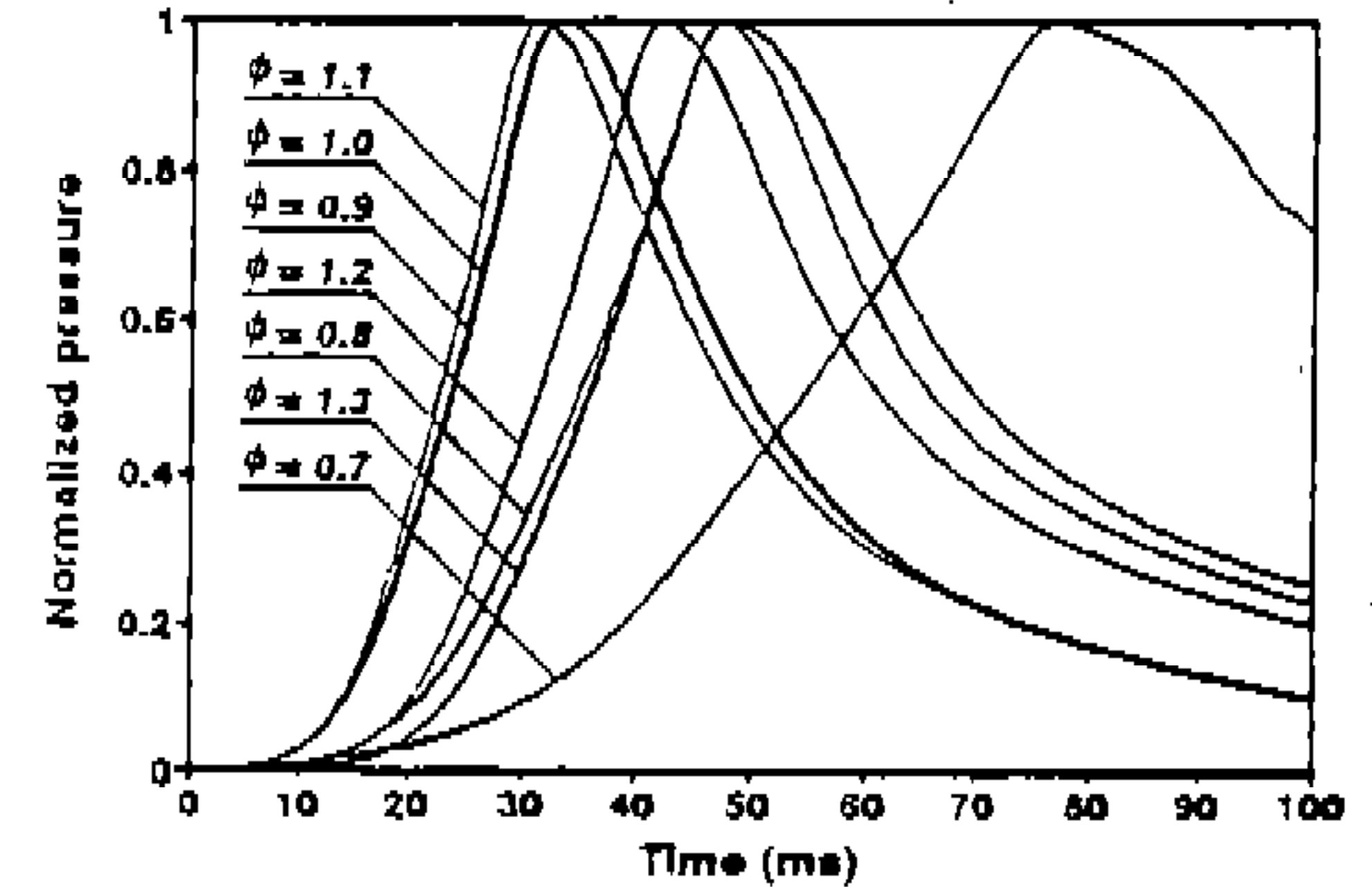


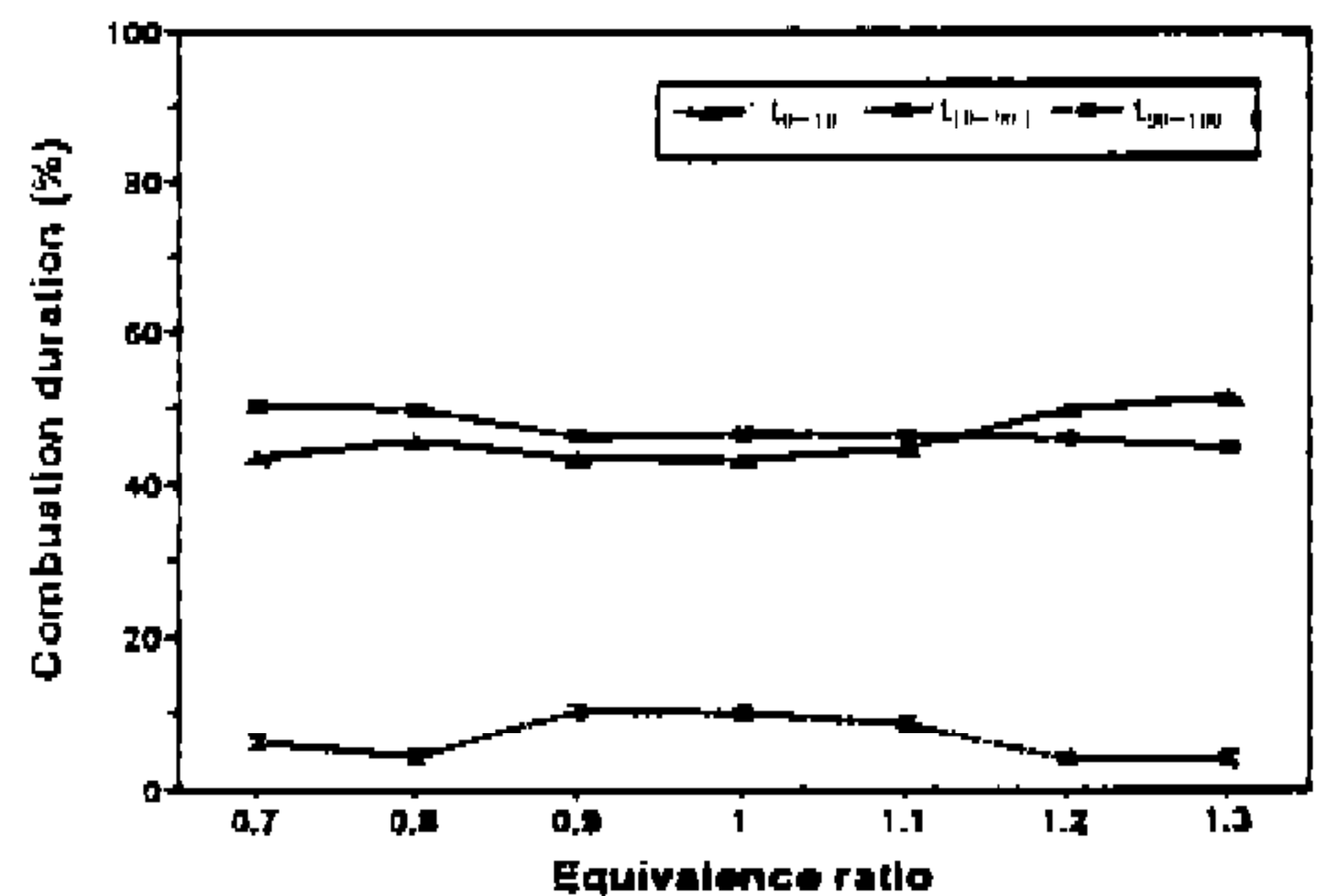
Fig.3 Definition of burning times



(a) Pressure-time traces

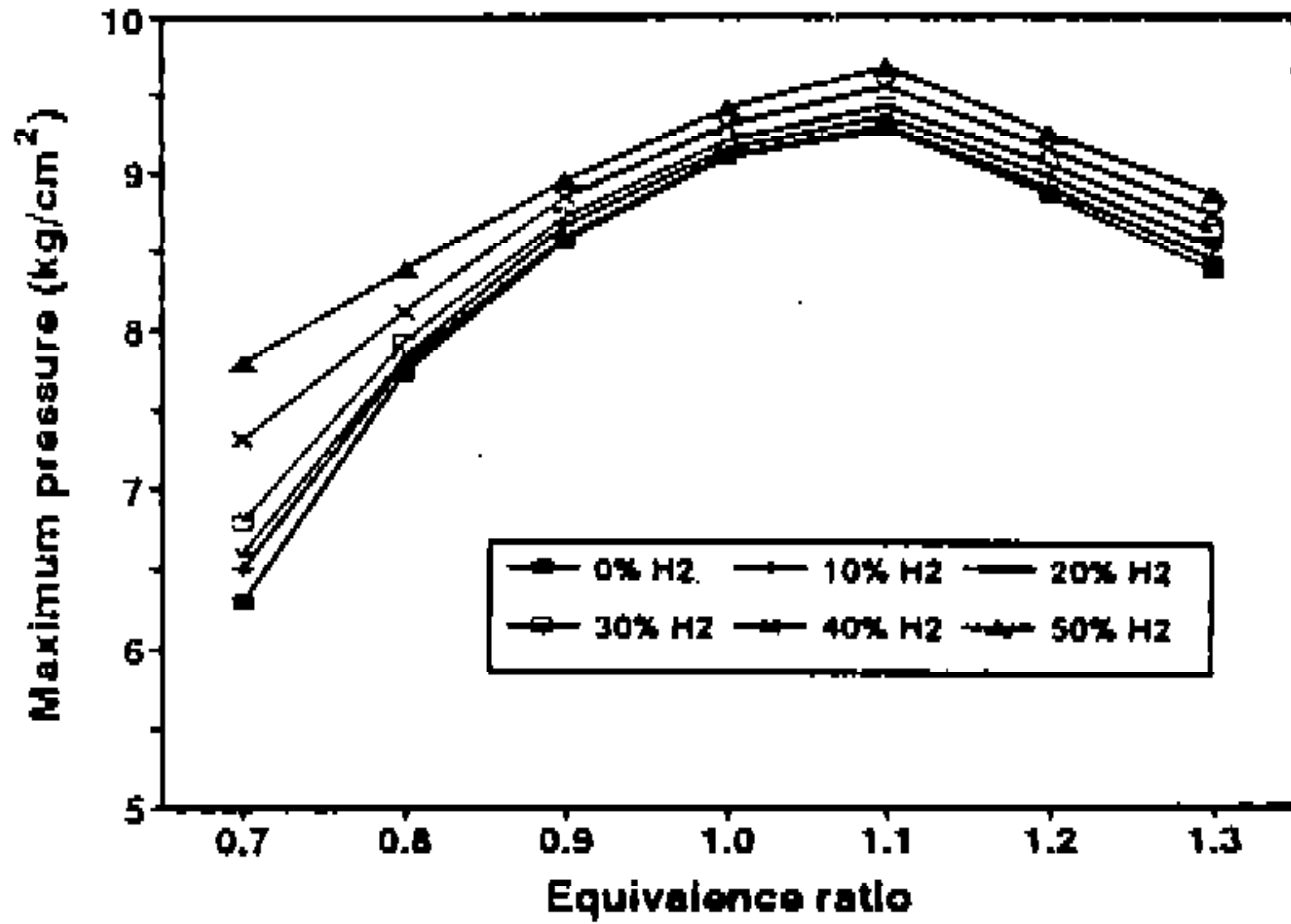


(b) Normalized pressure-time traces

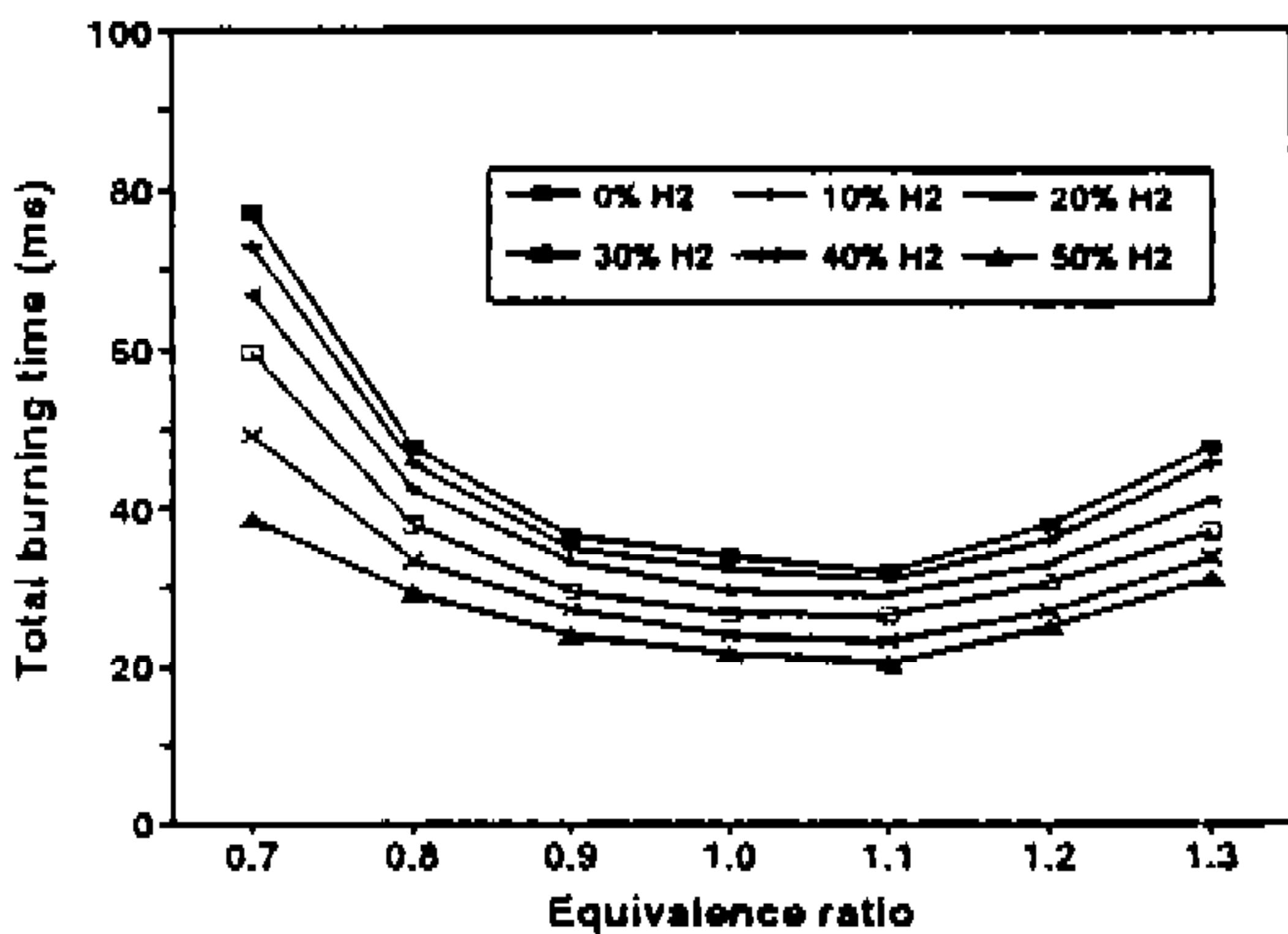


(c) Combustion duration

Fig.4 Effect of equivalence ratio on pressure-time traces and combustion duration ($S_r=0\% H_2$, $P_i=1.5kg/cm^2$)



(a) Maximum pressure



(b) Total burning time

Fig.5 Effect of equivalence ratio and hydrogen supplement rate on maximum pressure and total burning time ($P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)

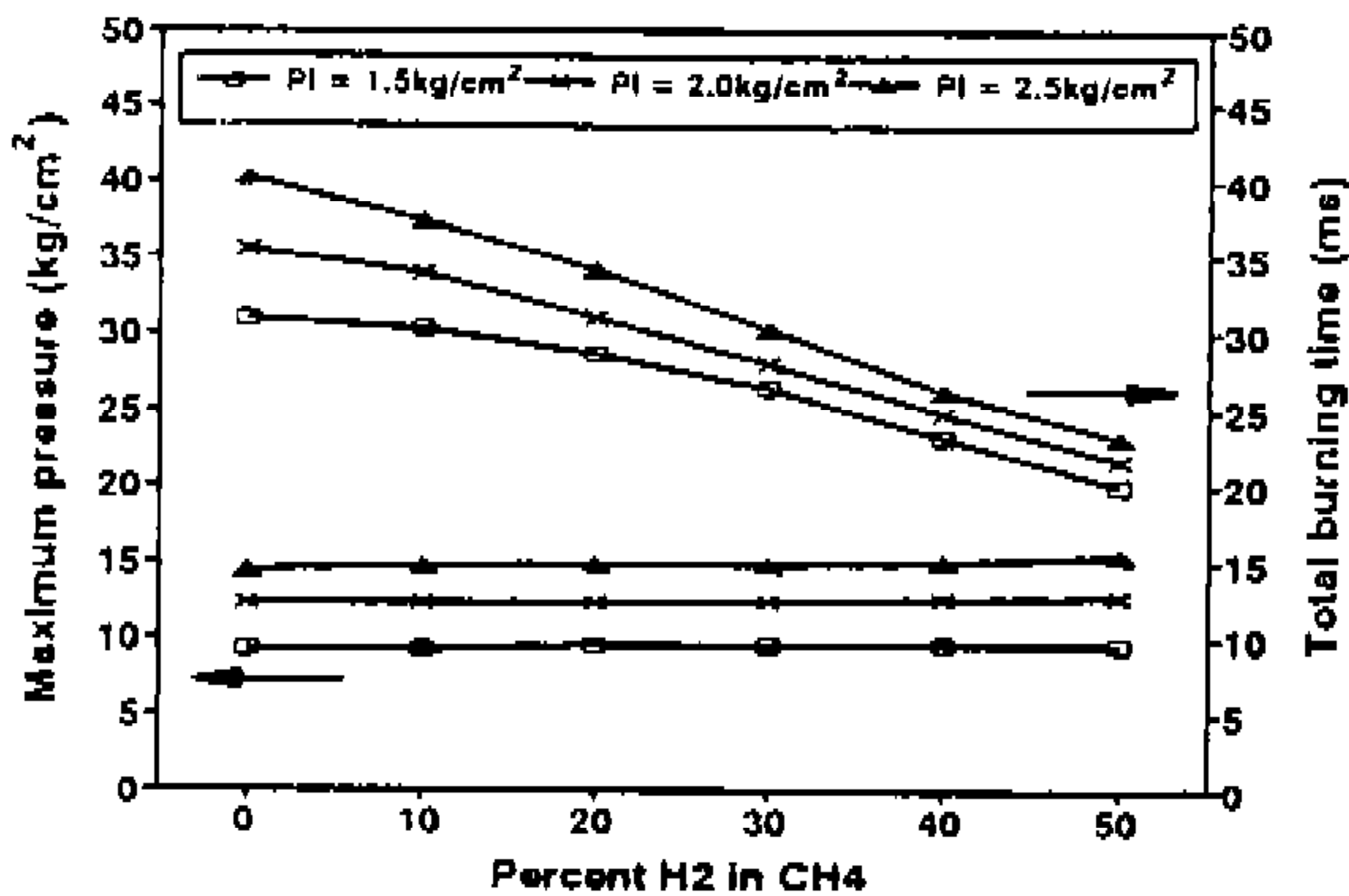


Fig.6 Effect of hydrogen supplement rate and initial pressure on maximum pressure and total burning time ($\phi = 1.1$)

시기, 그리고 C점은 최고연소압력(P_{max}) 도달시기로서 본 연구에서는 C점까지 이르는 시간을 전연소시간(total burning time) t_{max} 로 각각 정의했다.

Fig.4의 (a)는 $S_r = 0\%$ H_2 , $P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우에 있어서 당량비 변화에 따른 압력선도를, (b)는 이때의 연소압력 P 를 최고압력과 초기압력에 의해 무차원화한 압력 $(P - P_i) / (P_{max} - P_i)$ 을 각각 나타낸 것이다. 메탄만을 연소시킨 경우 연소실내의 압력은 이론혼합기보다 약간 농후한 혼합기인 $\phi = 1.1$ 에서 가장 높고 이보다 농후하거나 희박한 혼합기 측에서는 낮게 나타나고 있으며(Fig.4의 (a)), 전연소시간도 $\phi = 1.1$ 에서 가장 짧고 과농 또는 희박 혼합기 측으로 갈 수록 길어지고 있다(Fig.4의 (b)).

한편, 상기에 있어서 연소기간을 구분하기 위하여 압력선도에서 최고압력의 0~10%, 10~90% 및 90~100%까지의 기간을 각각 초기연소기간(t_{0-10}), 주연소기간(t_{10-90}) 및 후연소기간(t_{90-100})으로 정의하여 Fig.4의 (c)에 나타냈다. 그림으로부터 알 수 있듯이 주연소기간은 희박혼합기 측에서 약간 높게 나타나는 경향이 있지만, 당량비에 관계없이 전연소기간 중에서 초기연소기간과 주연소기간이 차지하는 비율은 40~50%, 후연소기간은 10% 이하의 범위를 차지하고 있다.

Fig.5의 (a)와 (b)는 $P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ 로 고정하고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 연소실내의 최고압력과 전연소시간을 당량비에 따라 나타낸 것이다. 상술한바와 같이 최고압력은 수소첨가율에 관계없이 $\phi = 1.1$ 에서 가장 높고 희박혼합기인 $\phi = 0.7$ 에서 가장 낮게 나타나고 있으며, 전연소시간 또한 수소첨가율에 관계없이 $\phi = 1.1$ 에서 가장 짧고 $\phi = 0.7$ 에 가장 길게 나타나고 있다.

이들을 이론혼합기보다 약간 농후한 혼합기($\phi = 1.1$), 희박한 혼합기($\phi = 0.7$) 및 농후한 혼합기($\phi = 1.3$)인 조건으로 나누어 살펴보면 다음과 같다. 먼저 $\phi = 1.1$ 인 경우에 있어서 연소실내의 최고압력은 수소첨가율이 증가함에 따라 그리 큰 변화가 없으나 전연소시간은 상당히 단축됨을 알 수 있다. 일례로 $S_r = 50\%$ H_2 인 경우 P_{max} 은

$S_r=0\%$ 인 경우에 비해 3.3%밖에 증가되지 않았으나, t_{max} 은 $S_r=50\%$ H_2 인 경우가 $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 비해 36.5% 정도 단축되었다. 그러나, 혼합기가 희박($\phi=0.7$)하거나 농후($\phi=1.3$)한 경우에는 이와같은 경향이 달라진다. $\phi=0.7$ 일 때의 P_{max} 은 수소첨가율이 증가함에 따라 점차 급격히 상승하는 경향을 보여 최대첨가율 $S_r=50\%$ H_2 인 경우의 P_{max} 은 $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 비해 23.8% 정도 증가되었고 t_{max} 은 $S_r=50\%$ H_2 인 경우가 $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 비해 50% 정도 단축되었다. 또한, $\phi=1.3$ 일 때의 최고압력은 $\phi=0.7$ 의 경우보다 큰 증가는 없지만($S_r=50\%$ H_2 인 경우의 P_{max} 은 $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 비해 5.5% 정도 증가), t_{max} 은 $S_r=50\%$ H_2 인 경우가 $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 비해 37.2% 정도 단축되고 있다.

이와같이 메탄에 수소를 첨가함에 따라 최고압력이 높아지고 전연소시간이 짧아지는 것은 메탄에 비해 7배 정도의 연소속도(수소의 최대충류연소속도 : 278cm/s, 메탄의 최대충류연소속도 : 41cm/s)를 갖는 수소가 메탄의 연소촉진제로 작용⁶⁾하기 때문이다. 특히 희박혼합기측에서 수소첨가량 증가에 따라 이런 경향이 뚜렷해지는 것은 수소가 희박혼합기측에서 Lewis number가 1보다 작아 확산·열적효과가 현저하게 크기 때문⁷⁾인 것으로 사료된다. 따라서 수소첨가로 인한 연소시간의 단축은 실제엔진에서 연소를 이상적인 정적과정에 이르게 함으로써 열효율을 더 높여줄 수 있을 것으로 판단된다.

Fig.6은 $\phi=1.1$ 인 경우에 있어서 수소첨가율과 초기압력 변화에 따른 최고압력과 전연소시간을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 연소실내의 초기압력이 높을 수록 최고압력과 전연소시간은 점차 증대되는 경향을 보이고 있는데, 최고압력의 증가는 초기압력이 증대에 따른 당연한 결과이며, 전연소시간의 증대는 밀폐된 용기내를 화염이 충류화염전파를 할 경우 초기압력이 증가할 수록 질량연소율(mass burned rate)이 감소되기 때문이다.⁸⁾

3.2 열발생을

Fig.7은 혼합기의 당량비를 변화시켰을 때의 열발생율선도를 나타낸 것으로, 열발생율(dQ/dt)의 계산은 열역학 제 1 법칙과 연소실내 혼합기를 이상기체라 가정하고 이상기체의 상태식에 의해 구한 식 (2)를 이용하였으며, 연소실 벽면으로의 열손실은 무시하였다.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A}{\kappa-1} \left(V \frac{dP}{dt} \right) \quad (2)$$

여기서 A는 일의 열당량, V는 연소실의 체적(201cm^3), κ 는 비열비(1.3)이다.

그림에서 보는 바와 같이, $S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우의 최대열발생율은 이론혼합기보다 약간 농후한 혼합기인 당량비 1.1에서 나타나고, 이보다 농후하거나 희박한 혼합기 측에서는 낮게 나타나고 있다. 일례로 $\phi=1.1$ 일 때 최대열발생율의 값은 0.04kJ/ms 이나 $\phi=1.3$ 일 때의 최대열발생율의 값은 0.02kJ/ms , $\phi=0.7$ 일 때의 최대열발생율의 값은 0.01kJ/ms 로 큰 차이를 보이고 있다.

Fig.8의 (a), (b) 및 (c)는 초기압력과 당량비를 $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$, $\phi=0.7, 1.1$ 및 1.3으로 고정시키고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 열발생율선도를 나타낸 것으로 세가지 당량비 모두 수소첨가율이 증가됨에 따라 열발생율은 점차 증가하고 있다. 특히, 희박혼합기인 $\phi=0.7$ 인 경우에

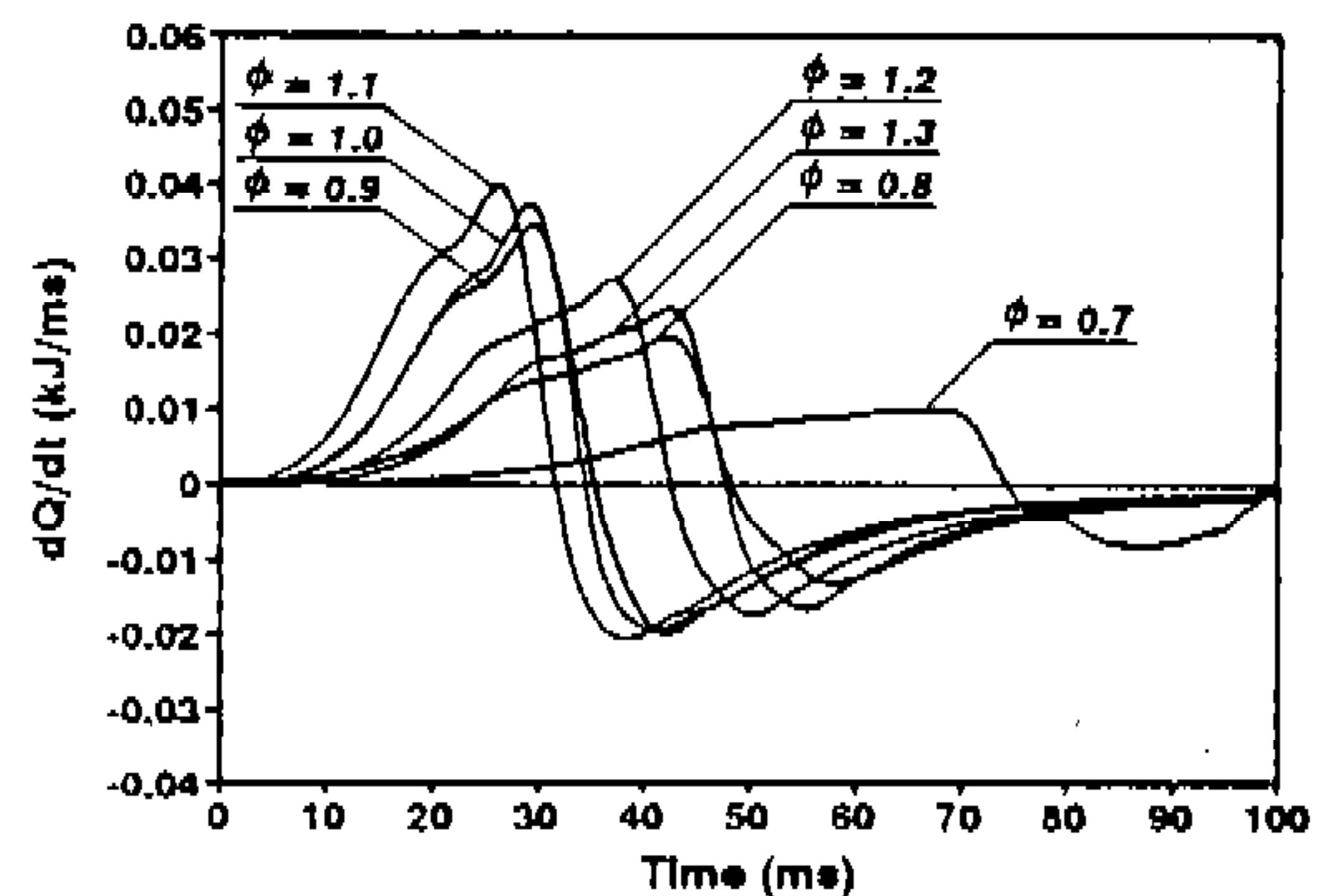


Fig.7 Effect of equivalence ratio on rate of heat release($S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

있어서 순수 메탄($S_r=0\% H_2$)에 비해 수소를 최대로 첨가($S_r=50\% H_2$)한 경우의 최대열발생율의 증가폭은 265% 정도로 $\phi=1.1(73.4\%)$ 과 $\phi=1.3(81.5\%)$ 의 그것에 비해 상당히 크게 나타나고 있다. 이와같이 수소첨가율이 커질 수록 열발생율이 증가하는 것은 상기한바와 같이 메탄-수소-공기 예혼합기에 대한 수소의 빠른 연소속도의 영향으로 인해 $(dP/dt)_{max}$ 이 증가하기 때문이다.

또, Fig.9에서와 같이 당량비와 수소첨가율을 고정시킨 경우($\phi=1.1, S_r=20\% H_2$)에 초기압력을 높일 수록 열발생율은 증대되는 경향을 보이고 있는데, 이와 같이 열발생율이 커지는 것은 초기압력의 증대에 따른 당연한 결과로 볼 수 있다.

3.3 화염온도

본 연구에서와 같이 연소가 수십 ms 이내에 종료되는 경우, 복사 열손실, 전도 열손실 및 촉매작용 등을 무시한다면 가스중의 세션의 열평형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_w C_w V_w \frac{dT_w}{dt} = h_w A_w (T_r - T_w) \quad (3)$$

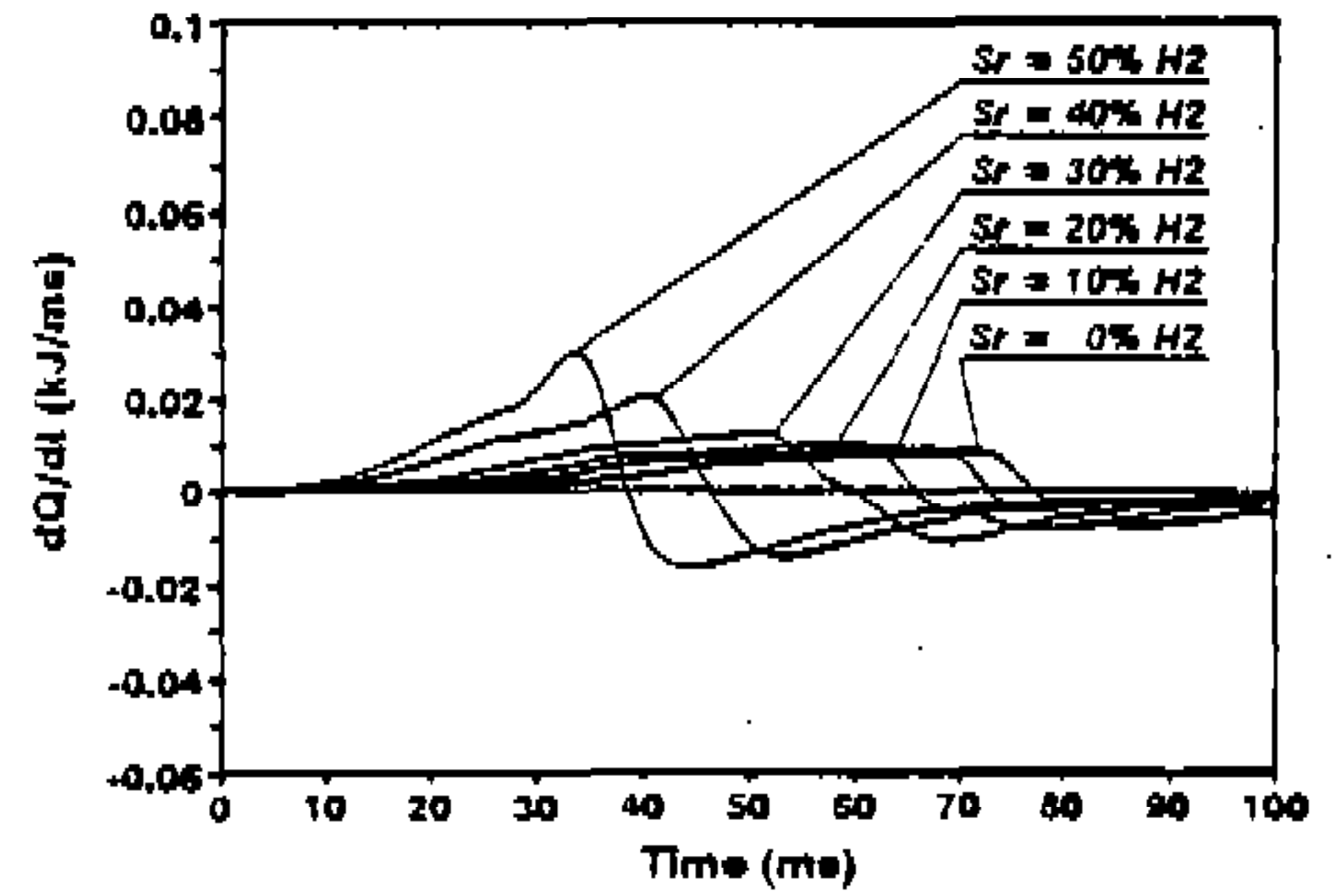
여기서 A_w 는 열전대 세션의 표면적, C_w 는 열전대 세션의 비열, T_g 는 가스의 온도, T_w 는 열전대 세션의 온도, V_w 는 열전대 세션의 체적, h 는 국소 열전달계수, t 는 시간, ρ_w 는 열전대 세션의 밀도이다.

식 (3)을 $h_w A_w$ 로 나누면 다음의 식이 된다.

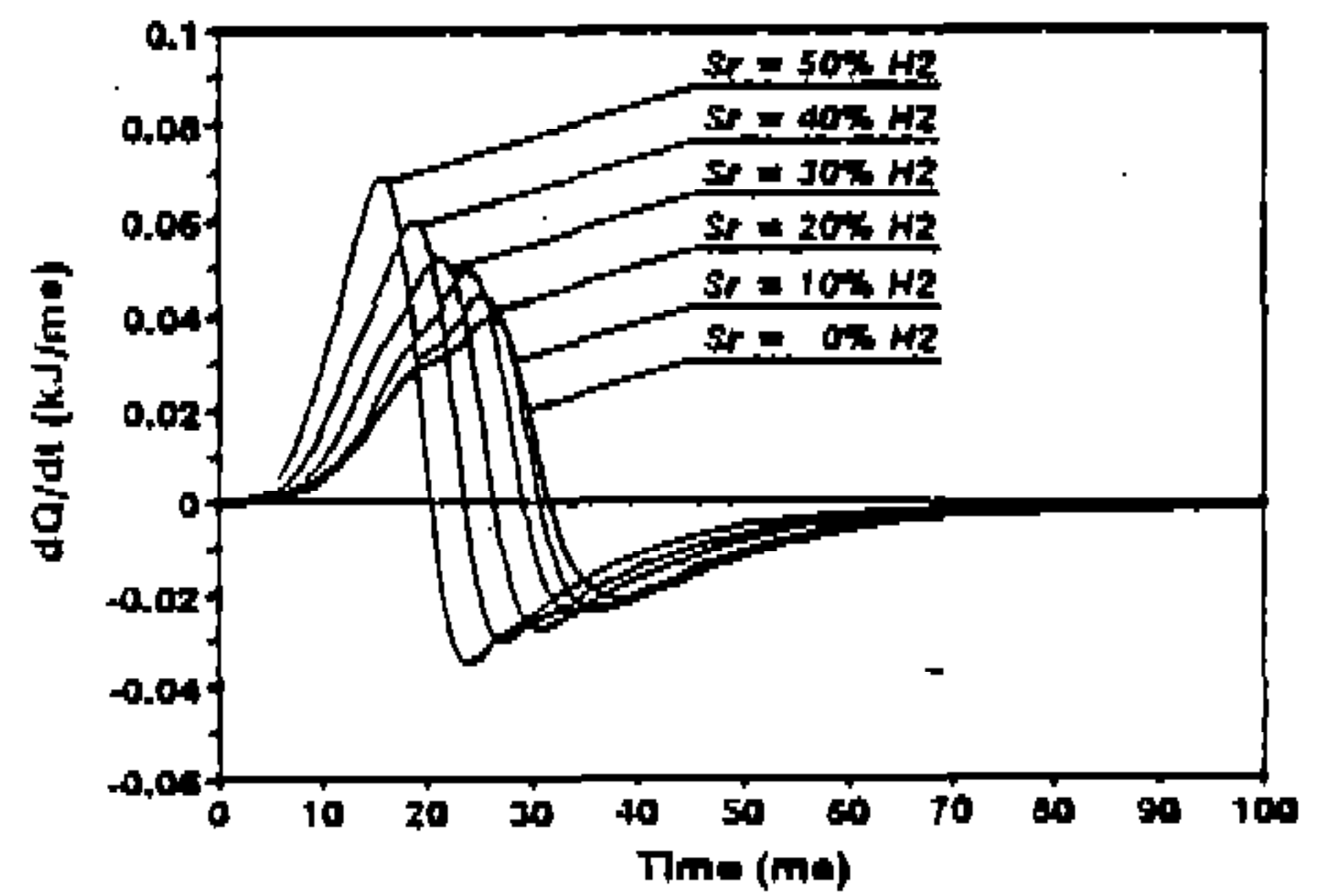
$$T_r = T_w + \tau_c \left(\frac{dT_w}{dt} \right) \quad (4)$$

여기서 τ_c 는 $\tau_c = \frac{\rho_w C_w V_w}{h_w A_w}$ 로 정의되는 시정수(time constant)이다.

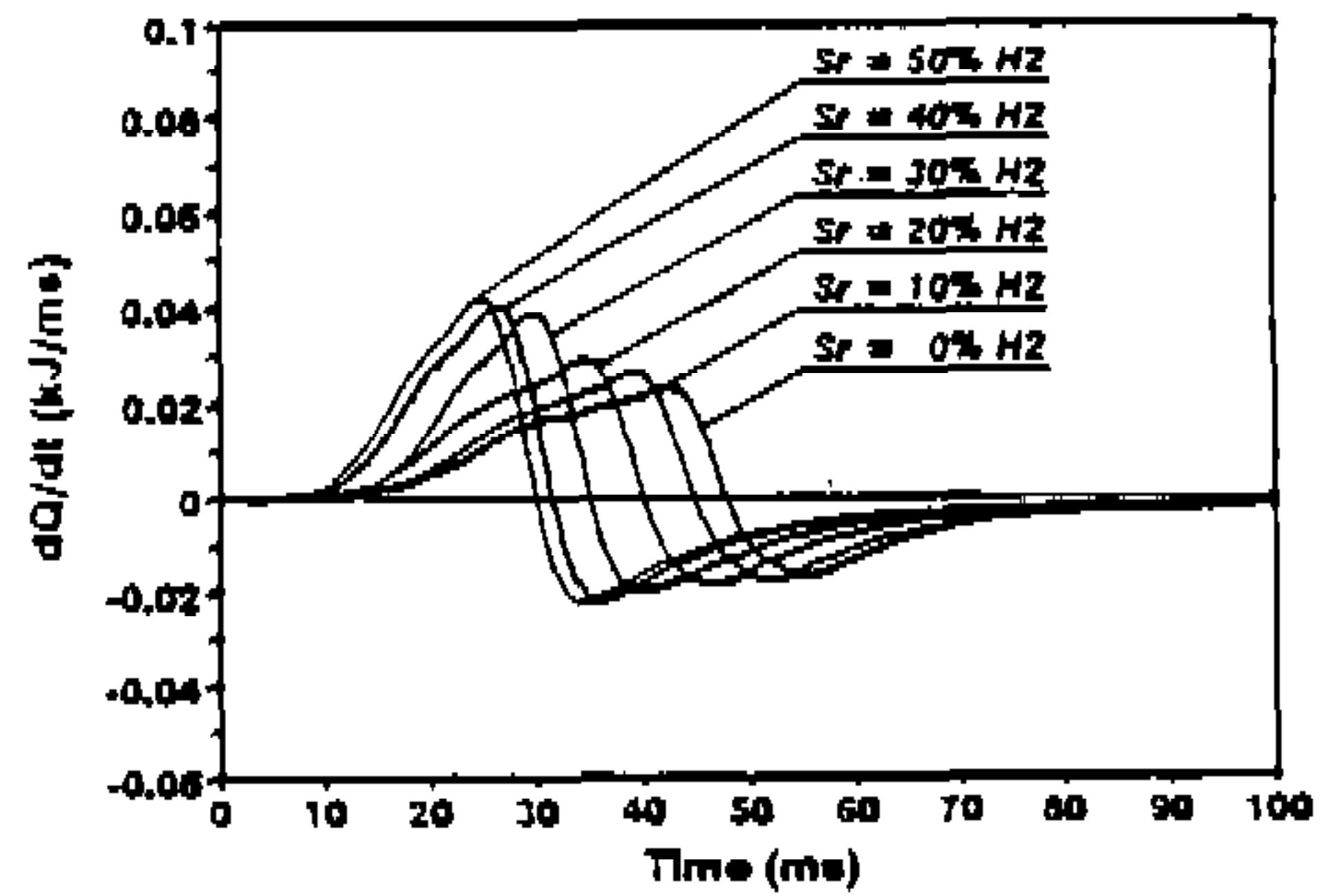
그런데 τ_c 는 열전대의 성분, 세션의 직경, 가스의 조성, 유동상태에 따라 다를 뿐만 아니라 화염내 각 측정점에 있어서도 다르기 때문에 이론



(a) $\phi = 0.7$



(b) $\phi = 1.1$



(c) $\phi = 1.3$

Fig.8 Effect of hydrogen supplement rate on rate of heat release ($P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)

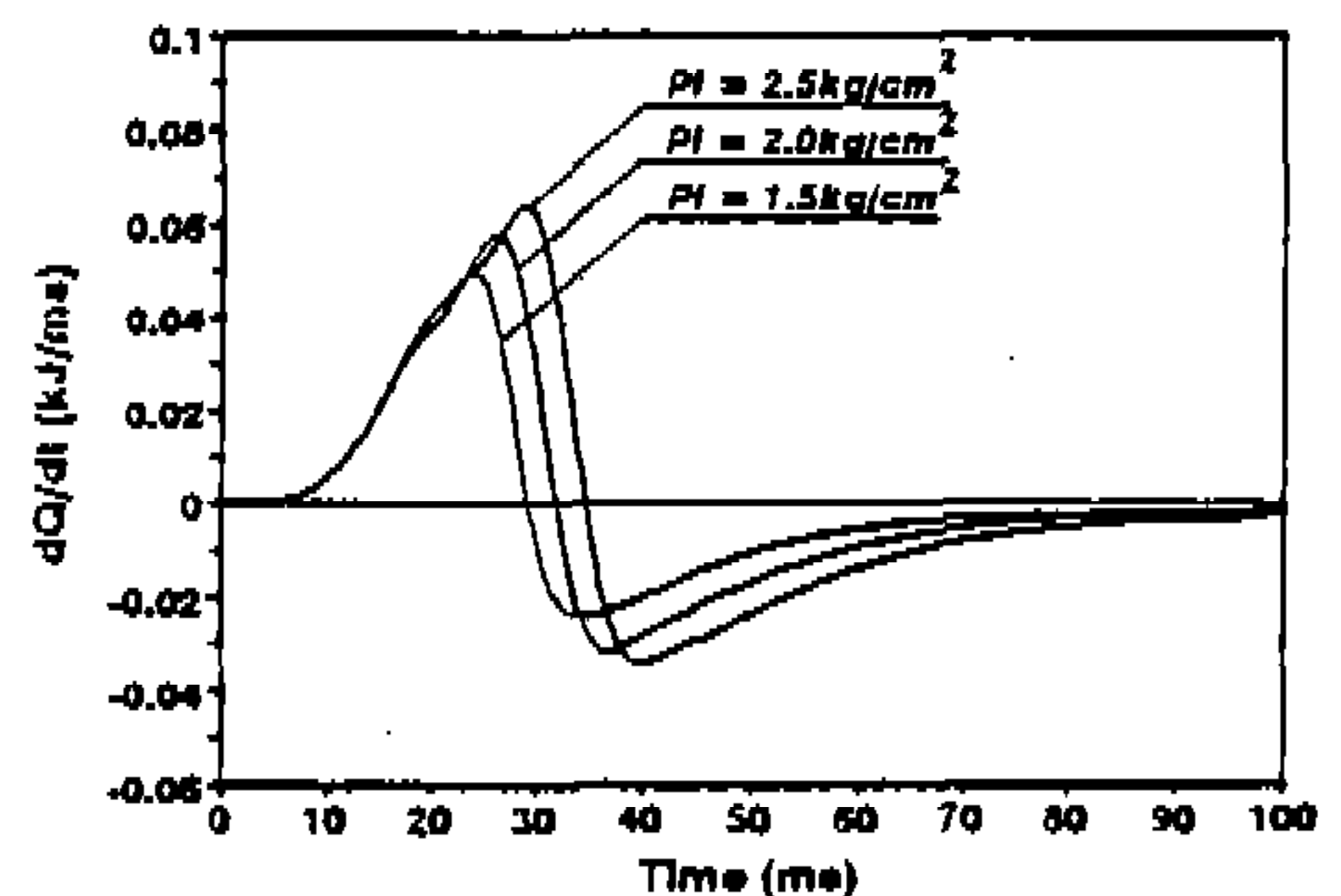


Fig.9 Effect of initial pressure on rate of heat release ($\phi = 1.1, S_r = 20\% H_2$)

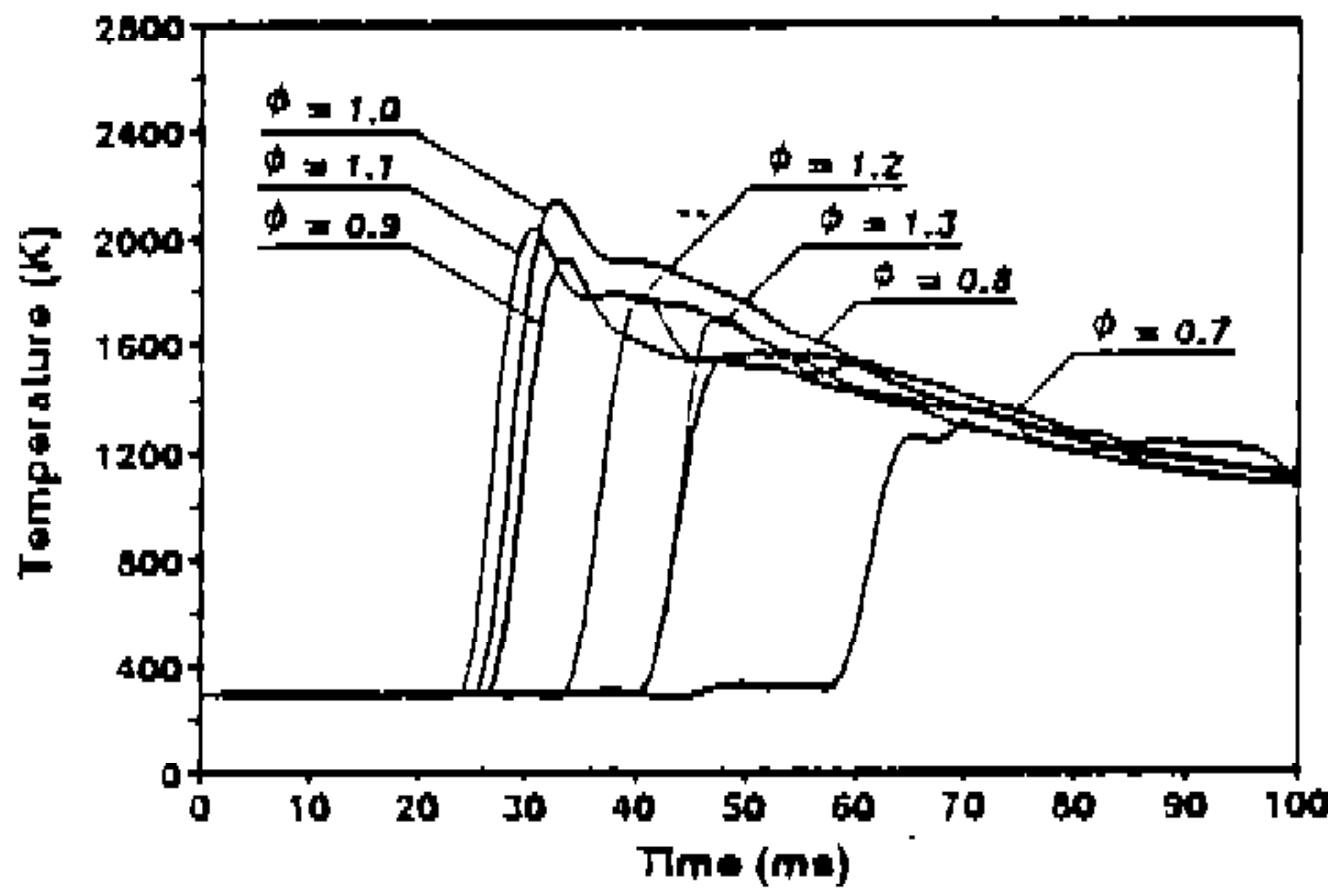
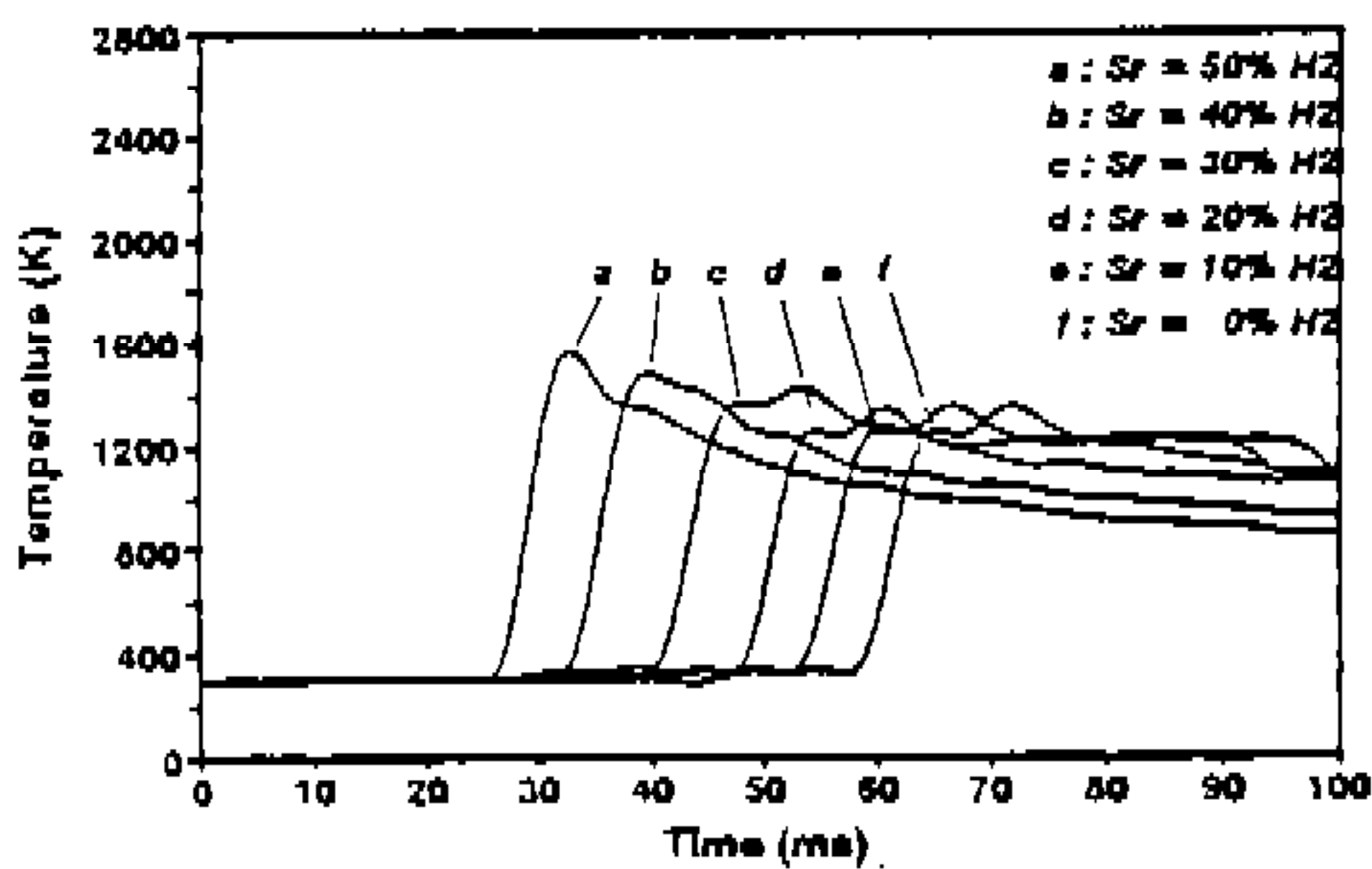
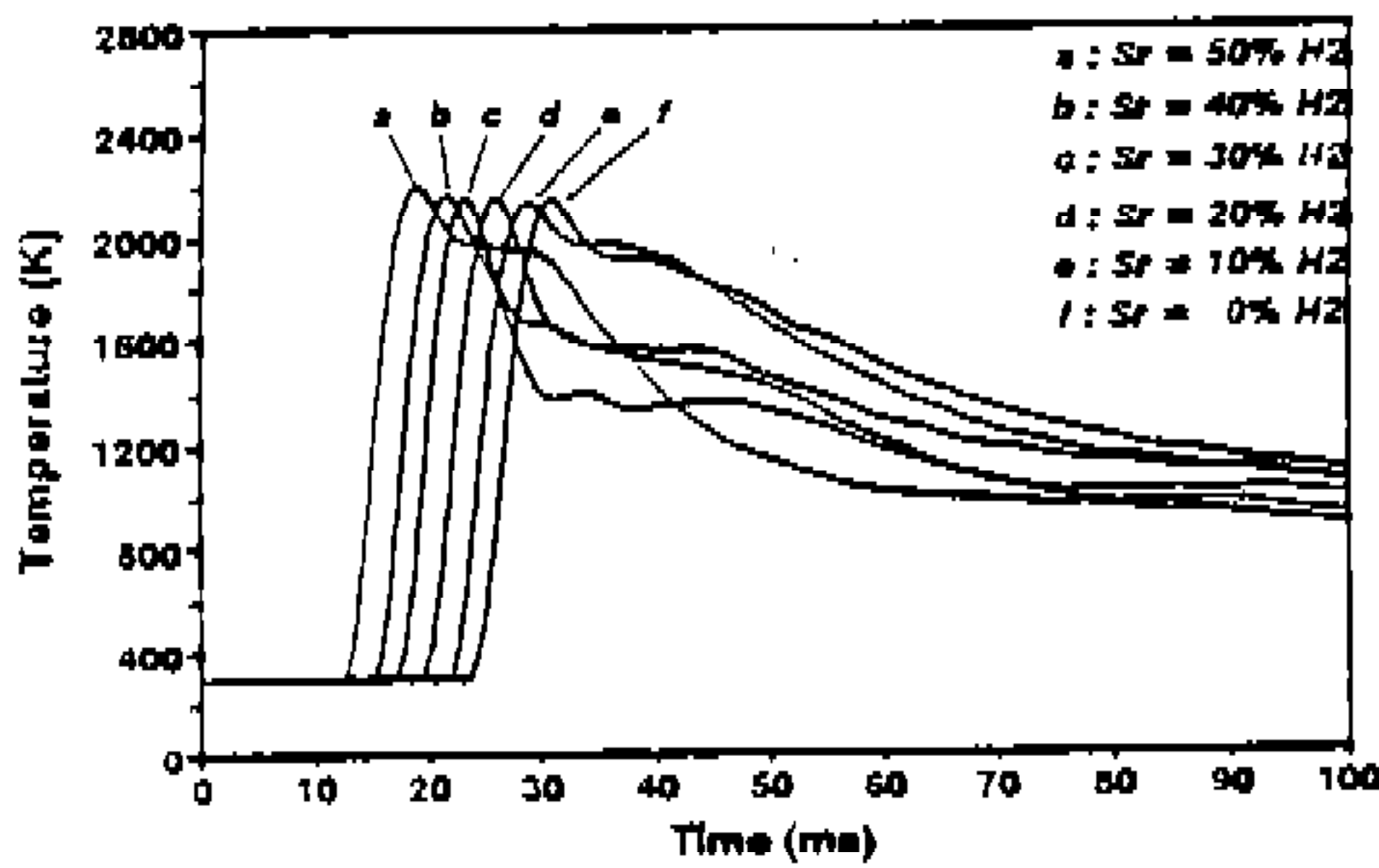


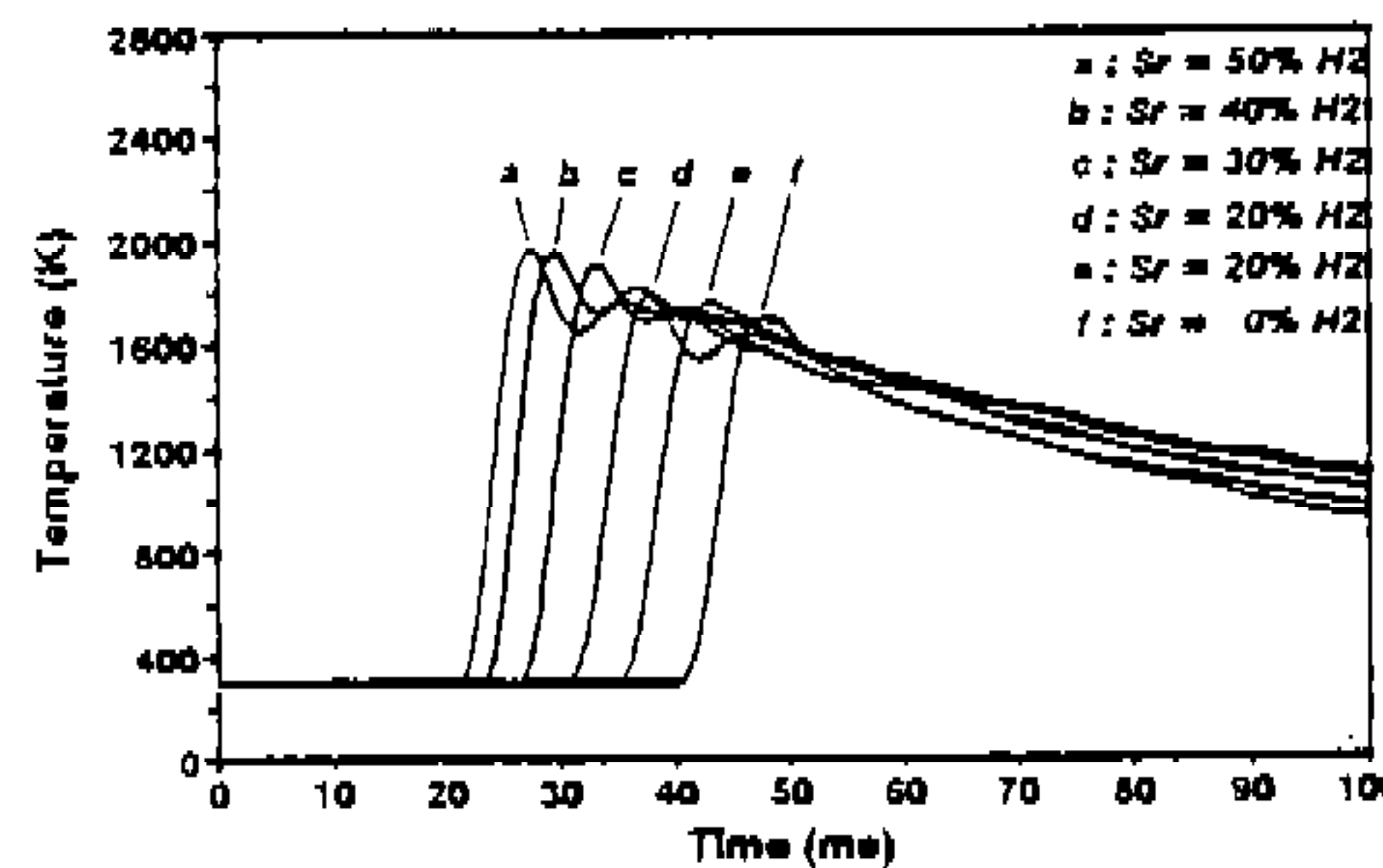
Fig.10 Effect of equivalence ratio on flame temperature-time traces($S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)



(a) $\phi = 0.7$



(b) $\phi = 1.0$



(c) $\phi = 1.3$

Fig.11 Effect of hydrogen supplement rate on flame temperature-time traces($P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

적으로 구하는 것은 곤란하다. 따라서 열전대를 이용한 온도계측에 있어서 τ_c 의 결정은 주로 실험결과나 단열화염온도(adiabatic flame temperature)의 계산결과를 사용하고 있다. 시정수 τ_c 는 본 정적연소실내의 단열화염온도를 수치해석적으로 구한결과와 실험결과를 이용하여 결정하였다. 메탄-공기 예혼합기의 당량비가 1.0일 경우 연소실내의 단열화염온도의 계산결과는 2311K였으며, 이와 같이 하여 구한 시정수는 $\tau_c=54$ 일때 화염온도가 최고 2100K 정도로 열해리 등을 가정할 경우 합리적인 값이라 생각하여 본 연구에서는 $\tau_c=54$ 로 하여 온도보상을 하였다⁹⁾.

Fig.10은 수소첨가율과 초기압력을 $S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 로 고정시키고 혼합기의 당량비를 변화시켰을 때의 화염온도를 나타낸 것이다. 열전대 설정위치의 온도는 Hopkinson효과 때문에 연소실내의 장소에 따라 다르지만, 본 연구에서와 같이 점화플러그가 연소실 중심에 설치된 관계로 연소실 원주벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에서 폭방향으로 20mm 삽입하여 측정된 최고화염온도는 이론혼합기인 $\phi=1.0$ 에서 가장 높고 이보다 농후하거나 희박한 혼합기 측에서는 감소되는 경향을 보이고 있었다.

Fig.11의 (a), (b) 및 (c)는 초기압력과 당량비를 $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$, $\phi=0.7, 1.0$ 및 1.3 으로 고정시키고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 화염온도를 나타낸 것이다. 연소실내의 화염온도는 세 가지 당량비 모두 수소첨가율이 증가됨에 따라 점차 증가하여, 순수 메탄에 비해 수소를 최대로 첨가한 경우의 최대화염온도는 $\phi=0.7$ 인 경우 214.5K($S_r=0\%$ $H_2: 1351.7\text{K}$, $S_r=50\%$ $H_2: 1566.2\text{K}$), $\phi=1.0$ 인 경우 55.6K($S_r=0\%$ $H_2: 2143.8\text{K}$, $S_r=50\%$ $H_2: 2199.4\text{K}$), $\phi=1.3$ 인 경우 268.2K($S_r=0\%$ $H_2: 1694.1\text{K}$, $S_r=50\%$ $H_2: 1962.3\text{K}$)정도 각각 높게 나타나고 있다. 이와 같이 수소첨가율이 증가할 수록 화염온도가 높아지는 것은 메탄-수소-공기 예혼합기의 비열이 수소혼합에 따라 점차 적어지기 때문이며, 또한 공기중에서 수소의 화염온도가 메탄에 비해 322K정도 높기 때문이다¹⁰⁾.

또, Fig.12에서와 같이 당량비와 수소첨가율을 고정시킨 경우($\phi=1.0$, $S_r=20\%$ H₂)에 초기압력을 높이면 화염온도가 증가하며, 최고화염온도가 나타나는 시기도 약간씩 지연되는 경향을 볼 수 있다. 이와 같이 초기압력이 증가함에 따라 화염온도가 높아지는 것은 단위체적(연소실)내의 혼합기량이 증가하기 때문이며, 최고화염온도가 나타나는 시기가 점차 지연되는 것은 상술한 바와 같이 밀폐된 용기내를 화염이 종류전파할 경우 초기압력이 증가할 수록 질량연소율이 감소되기 때문이라고 생각한다⁸⁾.

3.4 NO 농도

탄화수소계열의 연료가 연소될 때 생성되는 유해물질중 질소산화물의 대부분은 NO이며, 그 외 NO₂, N₂O 등 9종류로 이루어져 있다. 일반적으로 당량비가 1.0보다도 작은 희박혼합기 또는 이론훈합기에 가까운 혼합기의 연소시 Thermal NO는 확대 Zeldovich 기구¹¹⁾라 불리는 반응에 의해 잘 예측될 수 있으며, 희박혼합기 연소에 있어서의 NO의 생성율은 N의 농도를 정상상태로 가정한다면 Kinetic theory에 의하여 연소계가 고온으로 지속되는 시간에 강한 의존성을 보인다.

Fig.13은 $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 일때 당량비와 수소첨가율 변화에 따른 NO 농도를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 당량비 변화에 따른 NO 농도는 최고압력과 달리 약간 희박한 혼합기인 $\phi=0.9$ 에서 가장 높으며, 희박한 혼합기이거나 농후한 혼합기 측에서는 대폭적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 또 수소첨가율 변화에 따른 NO 농도는 $\phi=1.2$ 이상의 농후한 혼합기 범위에서는 큰 차이가 없지만, $\phi=0.7\sim 1.1$ 범위에서는 수소첨가율이 증가할 수록 NO 농도의 차이가 커진다. 이러한 이유는 NO 농도가 낮은 당량비 영역에서는 생성속도에 주로 지배되어 화염온도에 민감하게 대응하는 반면, 높은 당량비 영역에서는 주로 분해속도에 의해 결정되어 화염온도에 대해 별로 민감하지 않기 때문¹²⁾인 것으로 사료된다. 또한, 수소첨가율이 증가할 수록 NO 농도가 증가하고 있는 이유로는 상기한 바와 같이 수

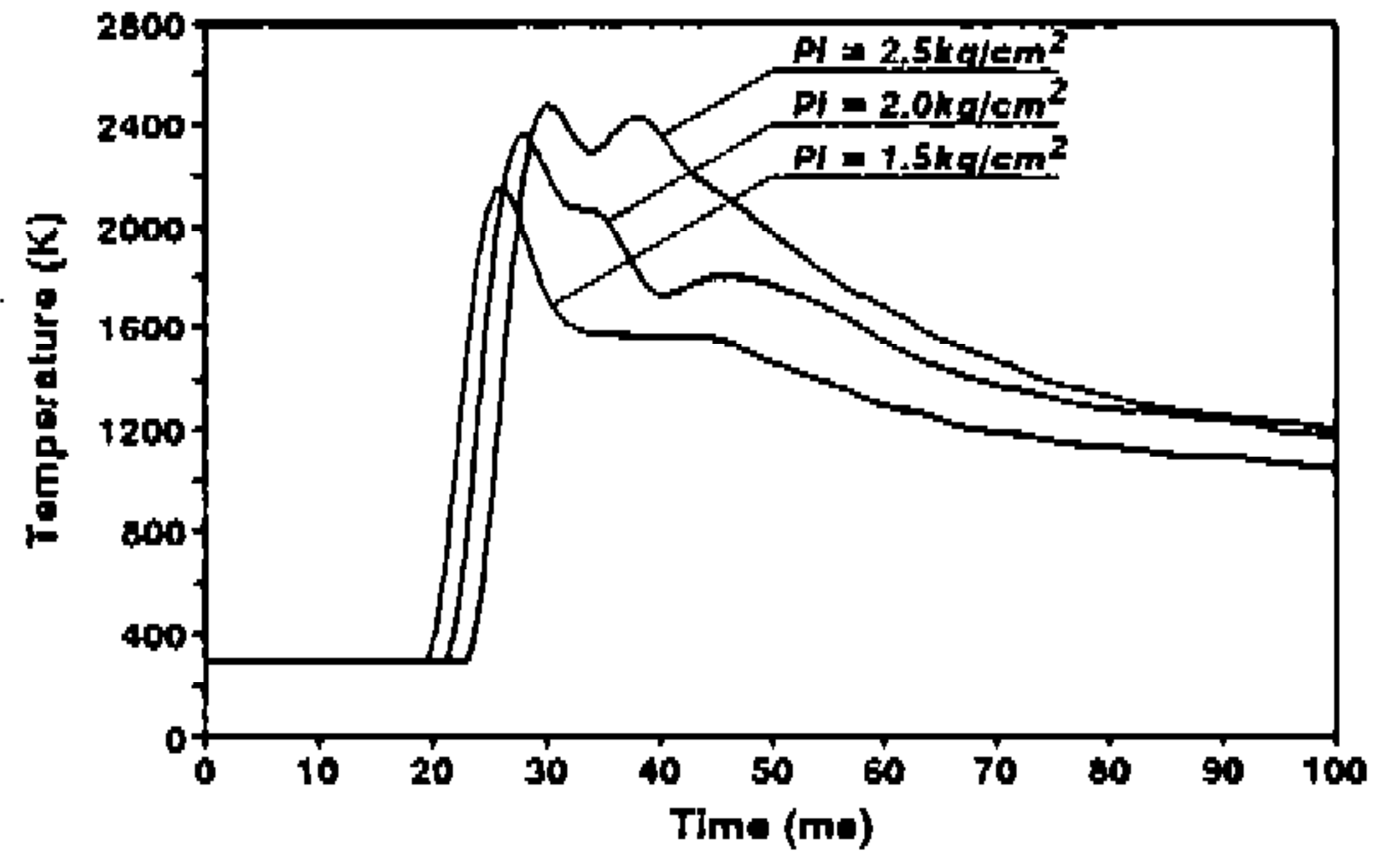


Fig.12 Effect of initial pressure on flame temperature-time traces($\phi=1.0$, $S_r=20\%$ H₂)

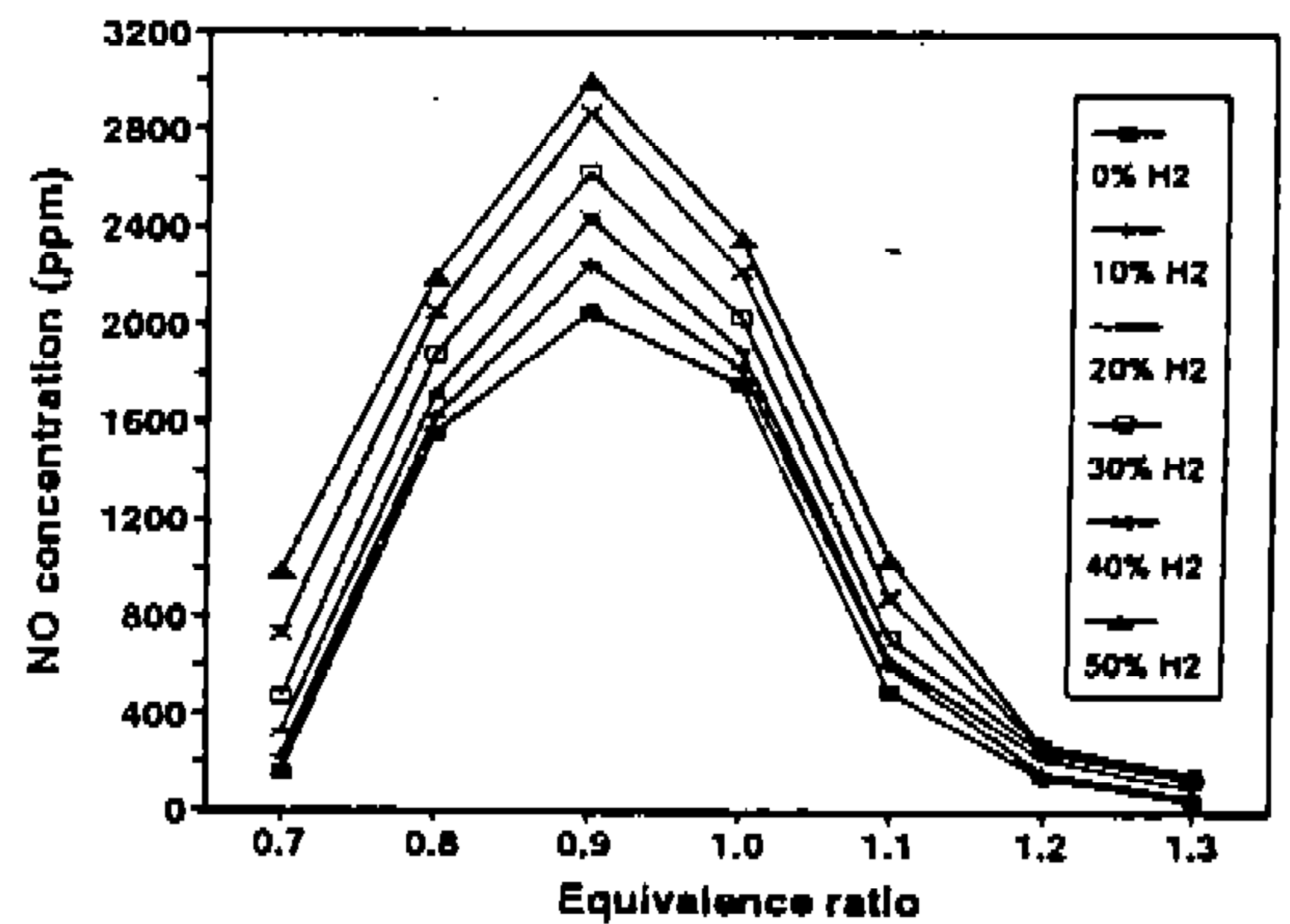


Fig.13 Effect of equivalence ratio and hydrogen supplement rate on NO concentration($P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

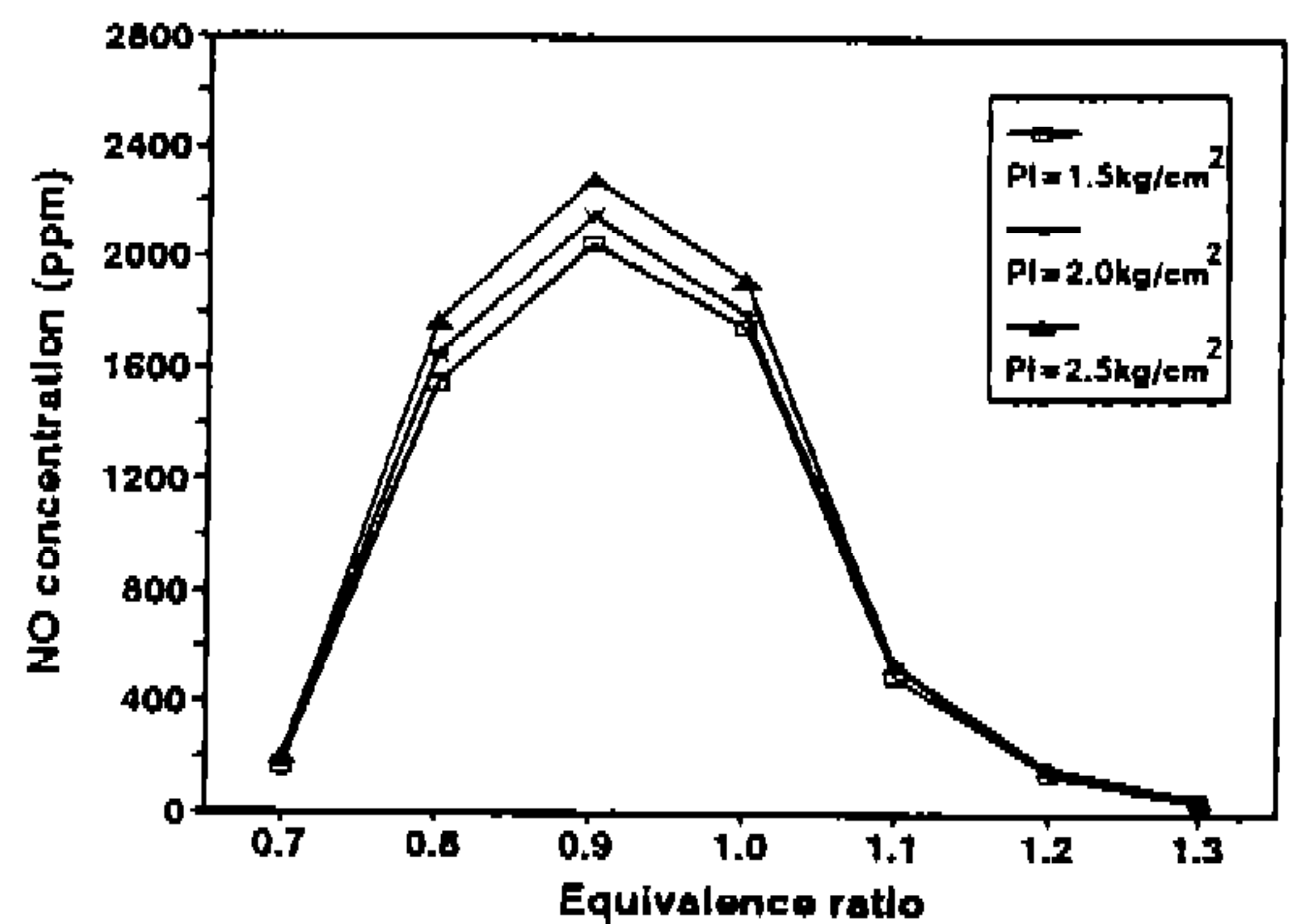


Fig.14 Effect of equivalence ratio and initial pressure on NO concentration($S_r=0\%$ H₂)

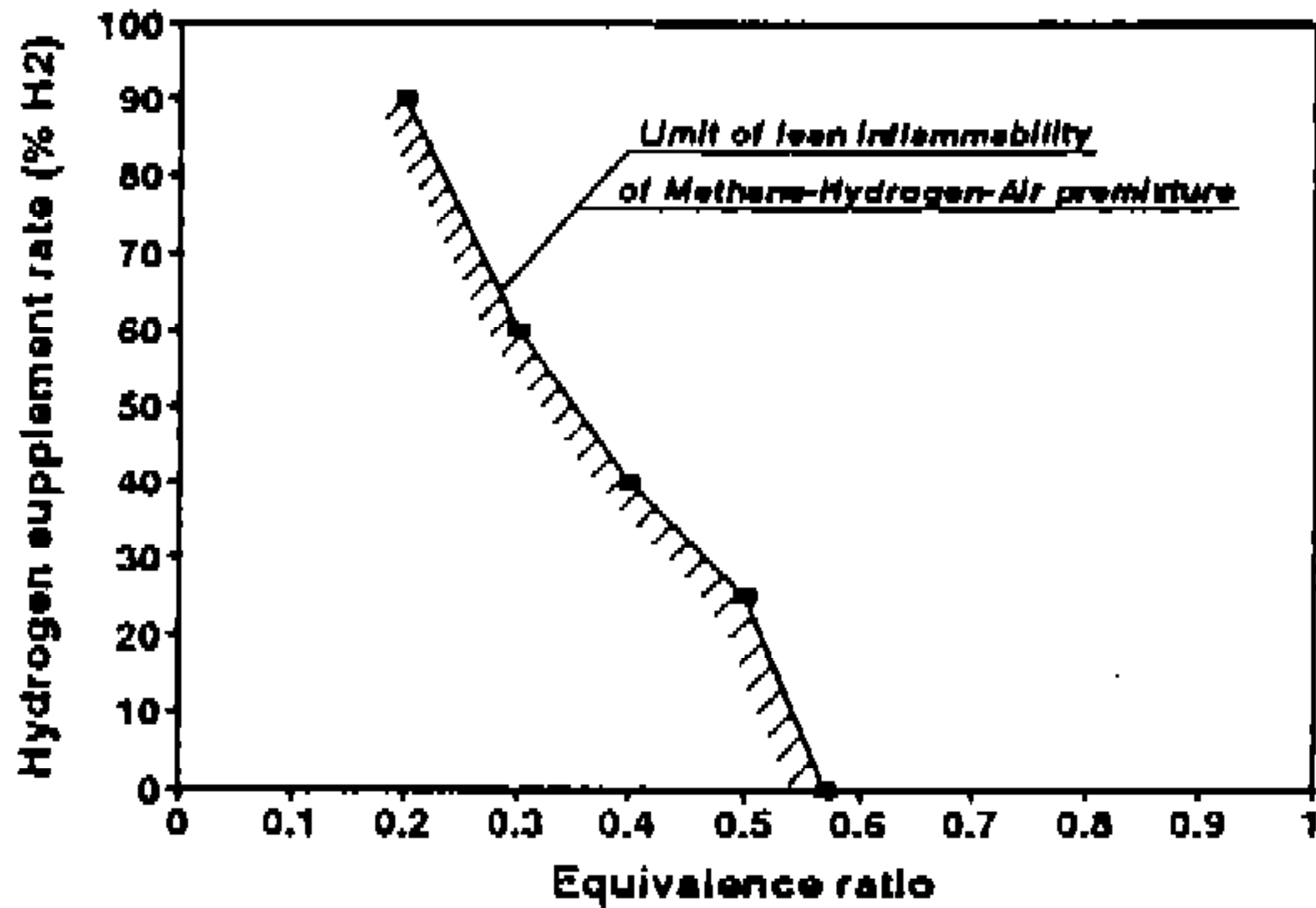


Fig.15 Limit of lean inflammability of methane-hydrogen-air premixture ($P_i=1.5$ kg/cm²)

수소첨가율이 증가할수록 화염온도가 증가되기 때문이다.

Fig.14는 $S_r=0\%$ H₂ 일때 당량비와 초기압력 변화에 따른 NO 농도를 나타낸 것이다. NO 농도는 $\phi=0.8\sim 1.0$ 범위에서 초기압력이 증가할수록 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으나, $\phi=1.0$ 이상의 농후한 혼합기나 $\phi=0.7$ 이하의 희박한 혼합기 측에서는 큰 차이가 없다. 일례로 $\phi=0.9$ 인 경우에 NO 농도는 1.5kg/cm², 2.0kg/cm² 및 2.5kg/cm²에서 2055ppm, 2153ppm 및 2287ppm으로 증가하고 있으나, $\phi=0.7$ 인 경우에는 세가지 초기압력에서 160~204ppm, $\phi=1.3$ 인 경우에는 45.4~59ppm으로 비슷하게 나타나고 있다.

3.5 회박가연한계

Fig.15는 $P_i=1.5$ kg/cm² 일때 당량비와 수소첨가율 변화에 따른 메탄-수소-공기 예혼합기의 회박가연한계 범위를 나타낸 것이다. 본 연구에서의 회박가연한계는 연소실내에 충전된 혼합기에 대해 CDI장치로부터 10회의 단발점화신호를 보냈을때 한번도 점화되지 않은 경우로 정의하였다.

밀폐된 정적연소실내에서 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄-공기 예혼합기의 회박가연한계범위는 $\phi=0.57^9)$ 이지만, 수소첨가율이 증가함에 따라 회박가연한계 범위는 점차 넓어져 $S_r=90\%$ H₂일때 초회박 가연한계인 $\phi=0.2$ 까지 확장

되었다.

4. 결 론

정적연소실내의 혼합기 유동이 정지된 상태에서 당량비, 수소첨가율 및 초기압력 변화에 따른 메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메탄-수소-공기 예혼합기의 최고압력과 열발생율은 $\phi=1.1$ 부근에서 가장 높으며, 수소첨가율과 초기압력이 증가할수록 높아진다. 전연소시간 또한 $\phi=1.1$ 부근에서 가장 짧으며, 초기압력이 낮고 수소첨가율이 증가할수록 단축된다. 한편, 수소첨가에 따른 최고압력과 최대열발생율의 증가 및 전연소시간의 단축은 희박혼합기($\phi=0.7$) 측에서 가장 현저하게 나타났다.
- 2) 메탄-수소-공기 예혼합기의 화염온도는 $\phi=1.0$ 부근에서 가장 높고 수소첨가율과 초기압력이 증가할수록 높아진다.
- 3) 메탄-수소-공기 예혼합기의 NO 농도는 $\phi=0.9$ 부근에서 가장 높고 수소첨가율과 초기압력이 증가할수록 높아진다.
- 4) 수소첨가율이 증가함에 따라 메탄-수소-공기 예혼합기의 회박가연한계 범위는 점차 넓어져, $S_r=90\%$ H₂ 일때 $\phi=0.2$ 까지 연소가 가능하다.

참 고 문 헌

1. Synder WE, Dexter SG, CIMAX Paper, 1989.
2. 中園徹, “稀薄カス機關に關する研究(副室式稀薄燃焼における主室形狀の影響)”, 日本機械學會論文集(B編), 第58卷, 第550號, pp.1943-1948, 1992.
3. 池上 詢 外 4人, “火花點火カス機關の稀薄燃焼”, 日本機械學會論文集(B編), 第59卷, 第562號, pp.2094-2099, 1993.
4. J.A. Harrington, R.C. Shishu, and J.R. Asik, “A Study of Ignition System Ef-

- fects on Power, Emissions, Lean misfire Limit, and EGR Tolerance of a Single Engine-Multiple Spark Versus Conventional Single Spark Ignition", SAE 740188, 1974.
5. 이상준 외 3인, "부실불이 정적연소실의 연소속진효과", 대한기계학회논문집, 제16권, 제 3 호, pp.569-577, 1992.
 6. 森外 14人, 日本機械學會 2P-SC 23 成果報告書, 1975-1-3, 1975.
 7. 大八木 重治, 松井 淳, 吉橋熙夫, "定容容器内お傳ばする火焰面の不安定性", 日本機械學會論文集(B編), 第60卷, 第569號, pp. 300-307, 1994.
 8. B. Lewis and G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, 2nd Edition, New York, Academic Press, 1961.
 9. 권철홍 외 5인, 고효성 흡착제를 이용한 차량용 CNG의 저장 및 연소기술 연구(I), 한국에너지기술연구소 연구보고서 KE-93007G, 1993.
 10. G.A Karim, "Some Considerations of the Safety of Methane(CNG), as an Automotive Fuel Comparison with Gasoline, Propane and Hydrogen Operation", SAE paper 830267, 1983.
 11. J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, McGRAW-HILL Book Company, pp.572, 1989.
 12. 小笠原光信 외 3人, "豫混合定容燃焼器におけるNO發生に関する實驗と解析", 日本自動車研究所 研究速報, No.61, pp.27-32, 1977.