

〈논 문〉 SAE NO. 953797

자동차용 가솔린 기관의 정상연소 및 이상연소에 관한 연구 (정지장 및 선회 유동장에서의 노킹현상)

A Study on the Normal Combustion and Abnormal Combustion in Automotive S.I.Engine (Knocking Phenomena in Quiscent or Swirl Flow Field)

이 경 우,* 藤 本 元,** 박 경 석***
K. W. Lee, H. Fujimoto, K. S. Park

ABSTRACT

In this study, a rapid compression and expansion machine(RCEM) equipped with a swirl generator was designed and developed, in order to clarify normal and abnormal combustion(knocking phenomena). This RCEM is intended to simulate combustion process in actual automotive S.I.engines, having a high reproducibility in the compression stroke. Flame propagation and autoignition processes associated with normal and abnormal combustion were captured by the high speed schlieren photography. And swirl intensity, equivalence ratio and ignition position were varied to investigate the effect of turbulence, concentration in the unburnt gas region and flame propagation length. The knock intensity, knock mass fraction and knock mass fraction after autoignition were calculated by use of history of measured cylinder pressure.

주요기술용어 : S.I.Engine(가솔린 기관), Schlieren Photography(슈리렌 촬영), Swirl(와류), Normal Combustion(정상연소), Abnormal Combustion(이상연소), Knocking Phenomena(노킹현상), RCEM(급속압축팽창 장치)

1. 서 론

최근, 자동차용 가솔린 기관에 있어서, 열효율의 향상, 연료소비율의 저감 수단으로서 고압축비화가 요구 되어지고 있지만, 이러한 것들을 방

해하고 있는 최대의 장애로는 기관의 압축비의 상승과 더불어 발생하는 이상연소(abnormal combustion), 즉, 노킹현상을 들 수 있으며, 이 현상에 관한 연구는 계측기술 및 계산수단의 급속한 진보를 배경으로 종래부터 수 많이 연구되어지고 있다^{1)~15)}.

지금까지의 연구에 의해서 노킹현상(knocking phenomena)의 윤곽은 거의 정립되어 있다고 할 수 있지만, 말단가스중의 전염반응(pre-reac-

* 동지사대 대학원

** 동지사대 공대

*** 정회원, 경희대 공대

tion)으로부터 자착화(autoignition)에 이르는 과정의 상세한 연구는 화학반응을 시점으로해서 아직까지 불명확한 점이 많다. 또한, 자착화에 따르는 충격파의 발생 및 실린더내 가스의 압력 진동에 대한 상세한 기구, 더우기 연소실내의 열 전달에 미치는 영향에 대해서도 정량적인 해석은 물론 실험적으로도 충분하게 연구되어 있지는 못하다. 따라서, 균일 예혼합기의 가솔린 기관에서는 노킹현상의 정확한 파악을 위한 상세한 계측과 그것을 기초로한 유효한 모델링의 개발에 의해 노킹발생의 예측 및 제어에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 보다 실제의 기관에 가깝게 정상연소 및 이상연소를 재현하기 위하여 비교적 단순한 와류유동(swirl flow)을 연소실내에 발생시킬 수 있는 와류 생성 장치(swirl generator)를 급속 압축 팽창 장치(이하 RCEM)의 연소실 상부에 장착하여 실험을 행하였다. 이 RCEM을 이용하여 유동장에 있어서의 기관의 정상연소 및 이상연소, 특히, 저속 노크(low speed knock)를 기초적으로 해명하는 것을 목적으로 하였다.

또한 연소실내의 유동상황 정상전파화염 및 노킹현상은 각각 비연소의 경우와 연소의 경우를 고속 슈리렌 촬영법(high speed schlieren photography method)을 이용하여 관찰하였다. 그리고, 고속 슈리렌 촬영만으로는 불명확한 자착화 화염의 거동에 대해서는 연소실 전 영역에 걸쳐서 적색 발광을 직접 촬영함으로써, 그 거동을 규명하였다. 더우기, 측정된 실린더내의 압력으로부터는 노크강도 및 노크 질량연소율을 산출하고, 이것에 대한 유동장의 영향을 기초적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 이용한 RCEM의 개략을 Fig.1에 도시하고, RCEM의 구동조건을 Table 1에 표시하였다. 본 실험장치는 단면적이 다른 구동용 피스톤 ①과 연소용 피스톤 ②, 두개의 피스톤으로 구성되어 있고, 압축공기를 구동원으로하며, 1회의 압축팽창 행정을 재현성 높게 실현가능하

다. 연소실은 디스크형(disk type)이며, 연소실 측면에 점화 플러그를 장착하고, 점화플러그의 반대 위치에는 압력센서를 장착하였다. 또한, 연소실 헤드 부분에 장착한 석영유리 ③에 의해 연소실내의 가시화가 가능하며, 연소용 피스톤에는 평면거울 ④(flate mirror)를 장착하여 슈리렌 촬영(촬영속도 14,000fps)도 가능하다.

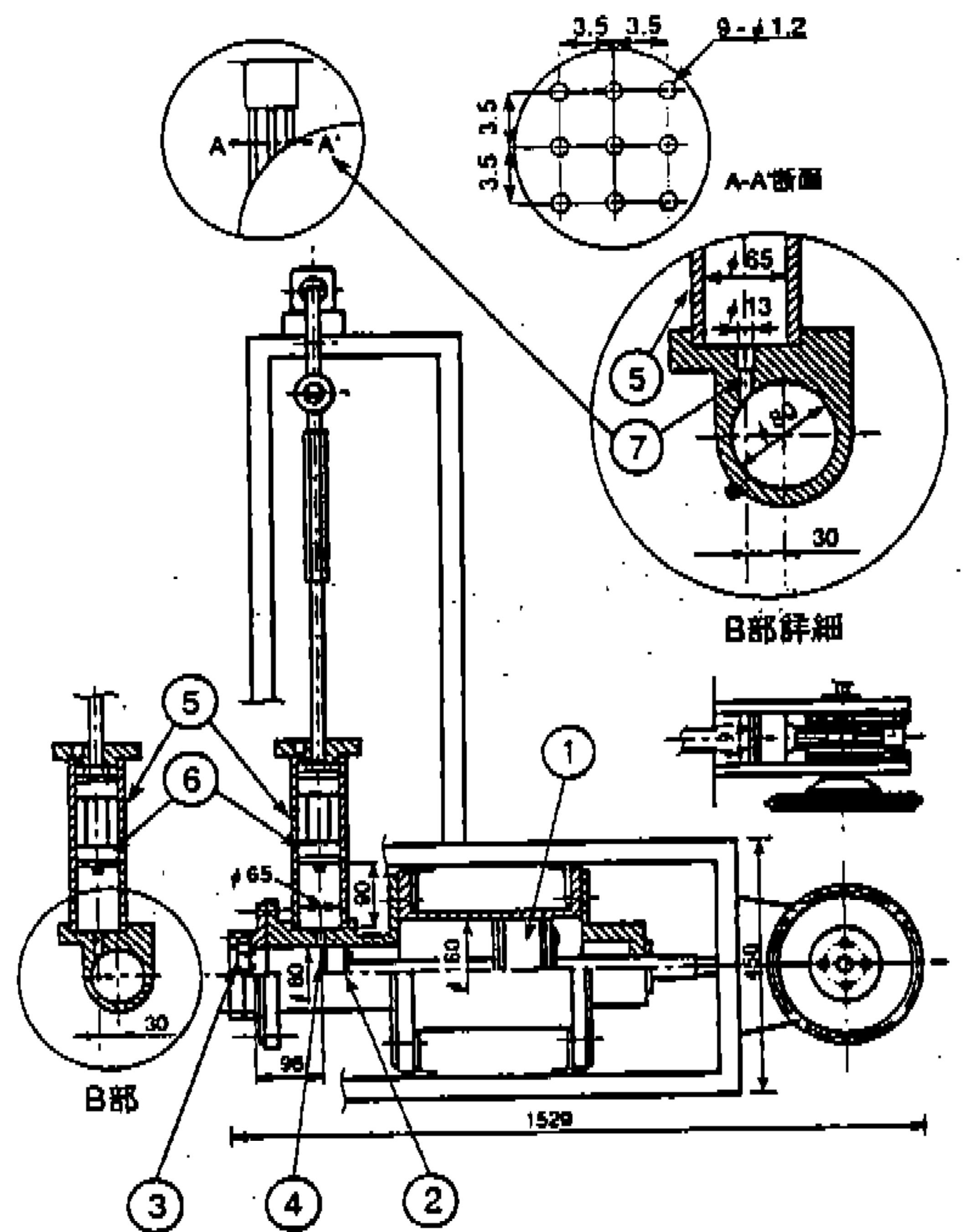


Fig.1 Structure of Rapid Compression and Expansion Machine

Table 1 Driving Conditions of RCEM

Combustion Chamber Shape	Disk Type
Bore × Stroke [mm]	80 × 98
Mean Piston Speed [m/s]	2.5
Equivalent Engine Speed [r.p.m.]	765
Wall Temperature of Combustion Chamber (T _w) [K]	323
Mixture Temperature (T ₀) [K]	323
Initial Pressure (P ₀) [MPa]	0.1
Compression Ratio	7.5

와류 생성장치 ⑤는 본체와 같이 공기압에 의해서 구동되며, 와류용 피스톤 ⑥의 작동에 의해 와류가 발생된다. 본체와의 작동 시간차에 의해서, 연소실내의 유동, 즉, 와류의 강약이 결정된다. 와류 생성장치의 분공부분 ⑦의 장착위치는 본체의 연소용 피스톤($\phi=80\text{mm}$)이 하사점에 있을때의 정점면의 위치와 거의 동일하며, 연소실 중심으로부터 30mm 치우치게 장착하였다.

Fig.1의 단면 A-A'에 표시한 바와 같이, 분공부분은 3.5mm 간격으로 $\phi 1.2\text{mm}$ 의 분공이 9개로 구성 되어있다. 연료로는 n-펜탄(normal pentane)을 사용하였으며, 화염면 전방의 미연 가스 온도는 단열변화를 가정하여 산출하였다.

본 연구에서는 와류강도, 당량비, 점화시기 및 점화위치를 실험변수로 하였으며, 본 연구의 실험조건을 Table 2에 표시하였다. 이러한 조건하에서 고속 슈리렌 촬영 및 시간경과에 따른 연소실내의 압력을 측정하고, 화염전파거리, 열발생률, 질량연소율, 도시평균유효압력, 노크강도 및 노크 질량연소율 등의 정량적인 결과를 얻었다. 특히, 고속 슈리렌 촬영은 연소실 벽면점화와 연소실 벽면으로부터 20mm 점화의 두가지 조건에서 실시하였다. 연소실 벽면에 점화위치를 설정한 경우에는 흡기압력 $p_0=0.1\text{MPa}$, 당량비 $\phi=1.0$ 의 일정 조건하에서 점화시기를 변화시켜 노킹이 발생하지 않는 경우, 노크 한계 부근, 와류가 강한 경우(와류강도 A) 및 와류가 약한 경우(와류강도 B)의 4가지 패턴에 대하여 실험을 실시하였다. 또한, 점화위치를 연소실 벽면으로부터 20mm에 설정한 경우에는 와류강도 A, 와류강도 B의 두 패턴에 관해서 실험을 실시하였다.

3. 노크의 정량화

3.1 노크 강도

본 연구에서는, 측정된 실린더내의 압력-시간 데이터를 FFT(fast fourier transform)방법에 의해 스펙트럼(spectrum) 해석하고, 노크강도의 정량화를 행하였다⁸⁾. 즉, 측정된 노크강도의 압력-시간 데이터를 FFT 방법에 의해 Fourier 변환함으로써, 스펙트럼 분포가 얻어진다.

Fig.2는 얻어진 스펙트럼 분포를 나타내며, 종축이 Fourier 성분의 크기를 나타낸다. Fig.2에 의해 본 실험장치(연소실 직경; $\phi=80\text{mm}$)에서의 노크진동에 의한 주파수는 7kHz, 11.5kHz 부근에 존재함을 알았다.

노크성분 이외의 저주파수 성분을 제거하기 위해, 노크발생의 유무에 의해 컷-오프(cut-off) 주파수를 결정하였으며, 본 연구에서는 5.8kHz를 컷-오프 주파수로 하였다. 또한, 컷-오프 주파수 이상의 고주파 성분을, 역 Fourier 변환하

Table 2 Experimental Conditions

Ignition Position	Distance between Wall of Combustion Chamber and Ignition Position	
	0[mm]	20[mm]
Ignition Timing	15[deg.CA BTDC]~60[deg.CA BTDC]	10[deg.CA BTDC]~35[deg.CA BTDC]
Equivalence Ratio	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2	1.0
Swirl Intensity (Swirl Ratio at TDC)	A : 3.12 B : 1.96	A : 3.12 B : 1.96

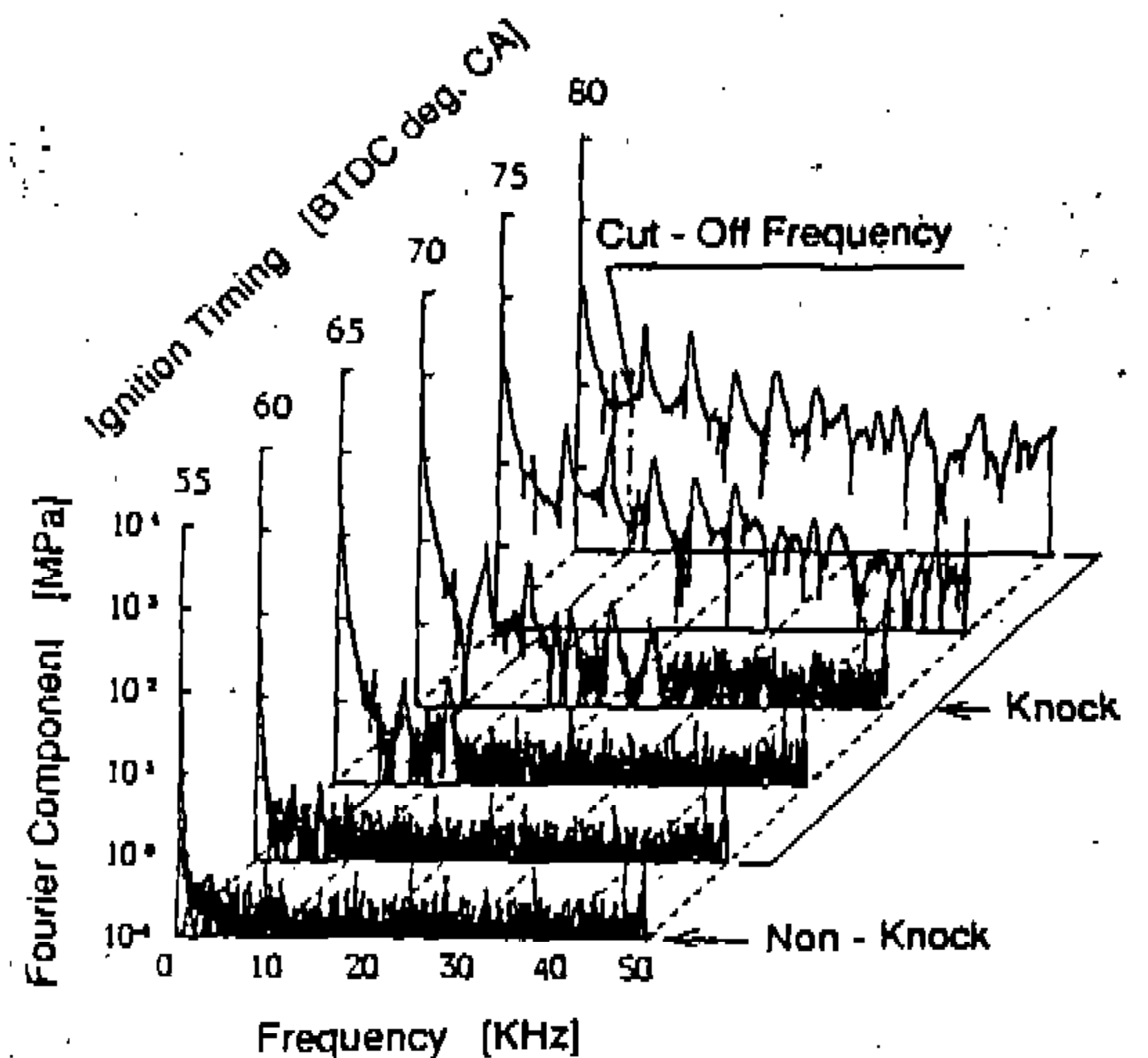
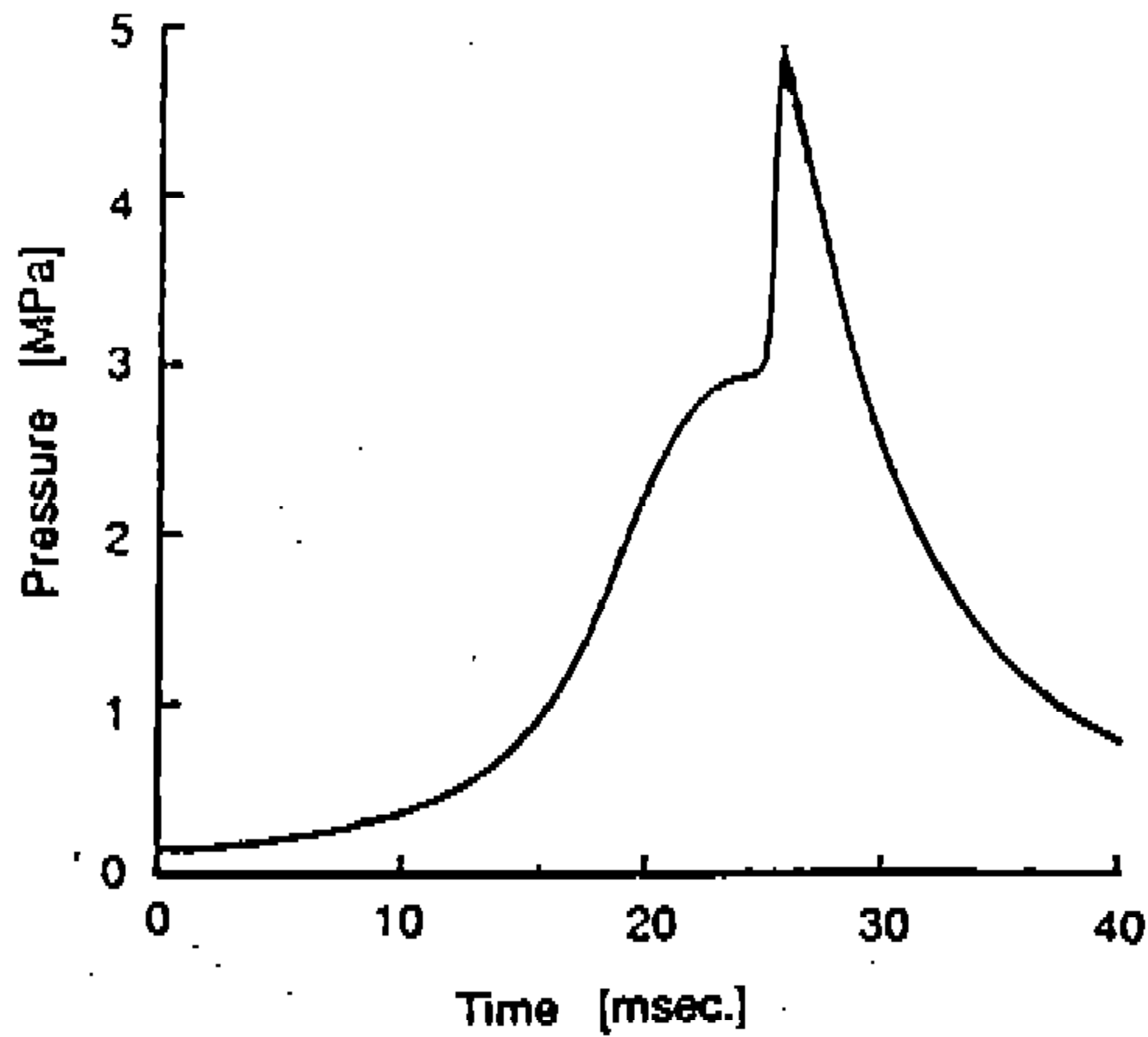
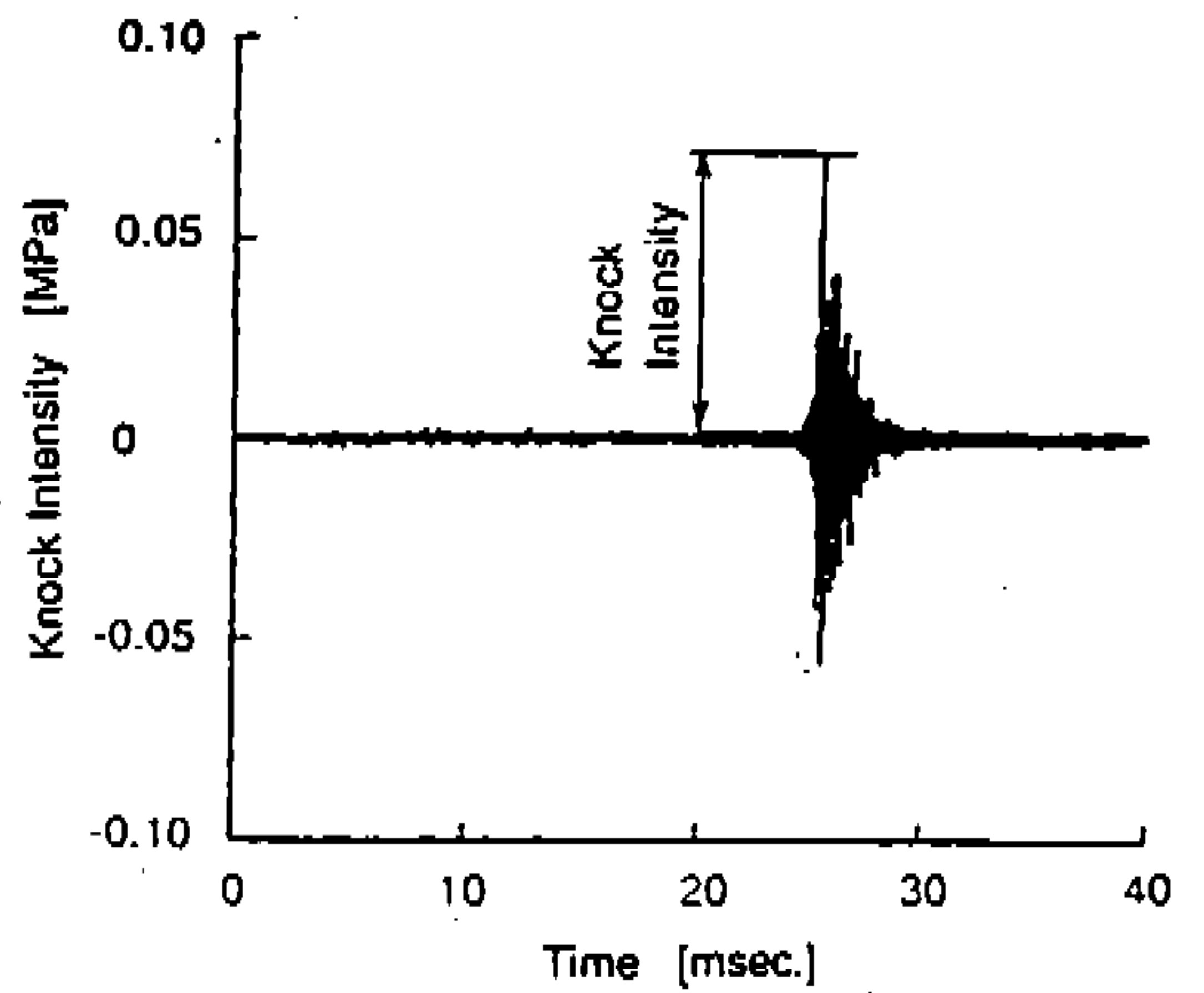


Fig.2 Distributions of Cylinder Pressure Spectrum by FFT Method

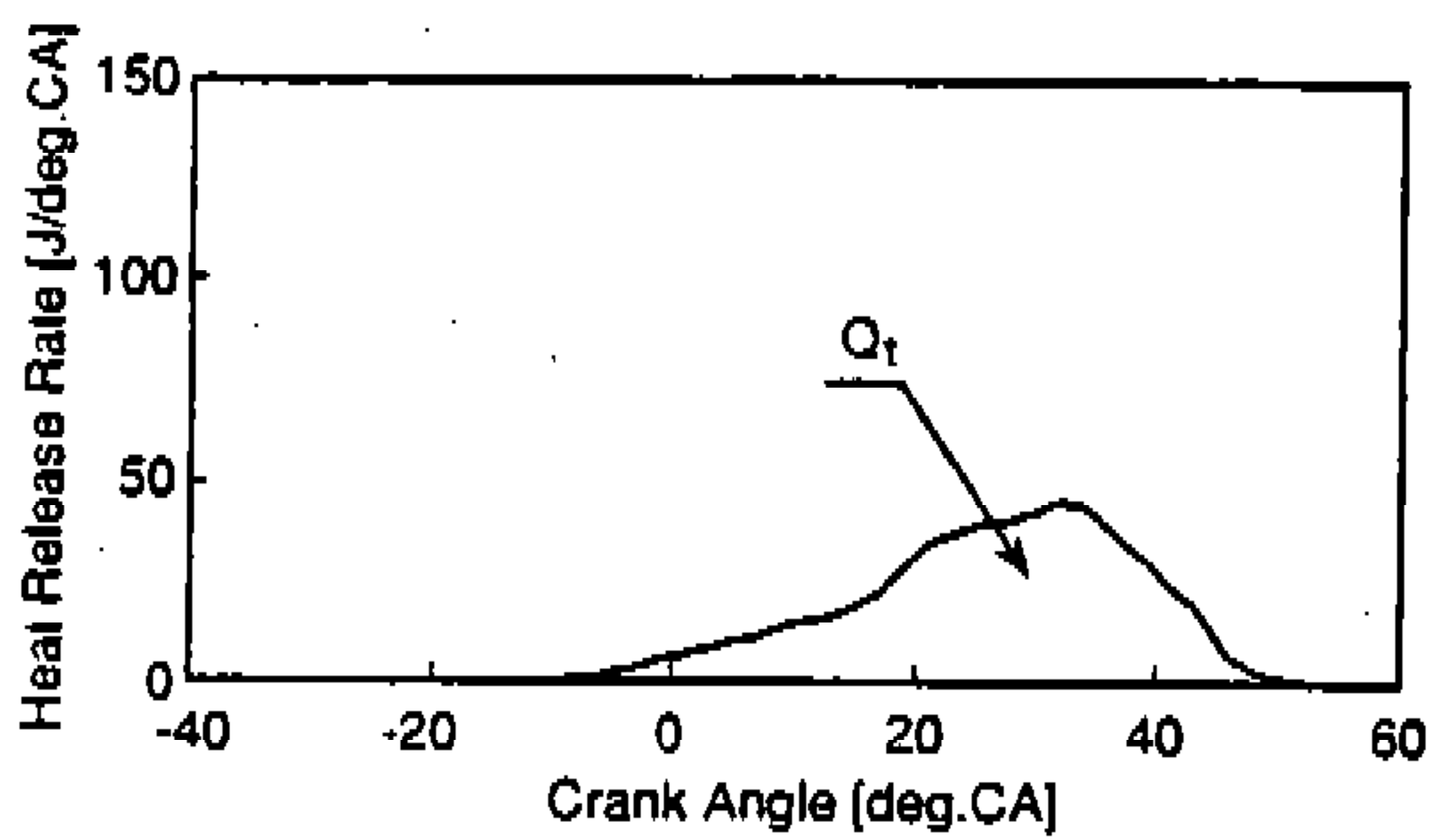


(a) Temporal Pressure Data

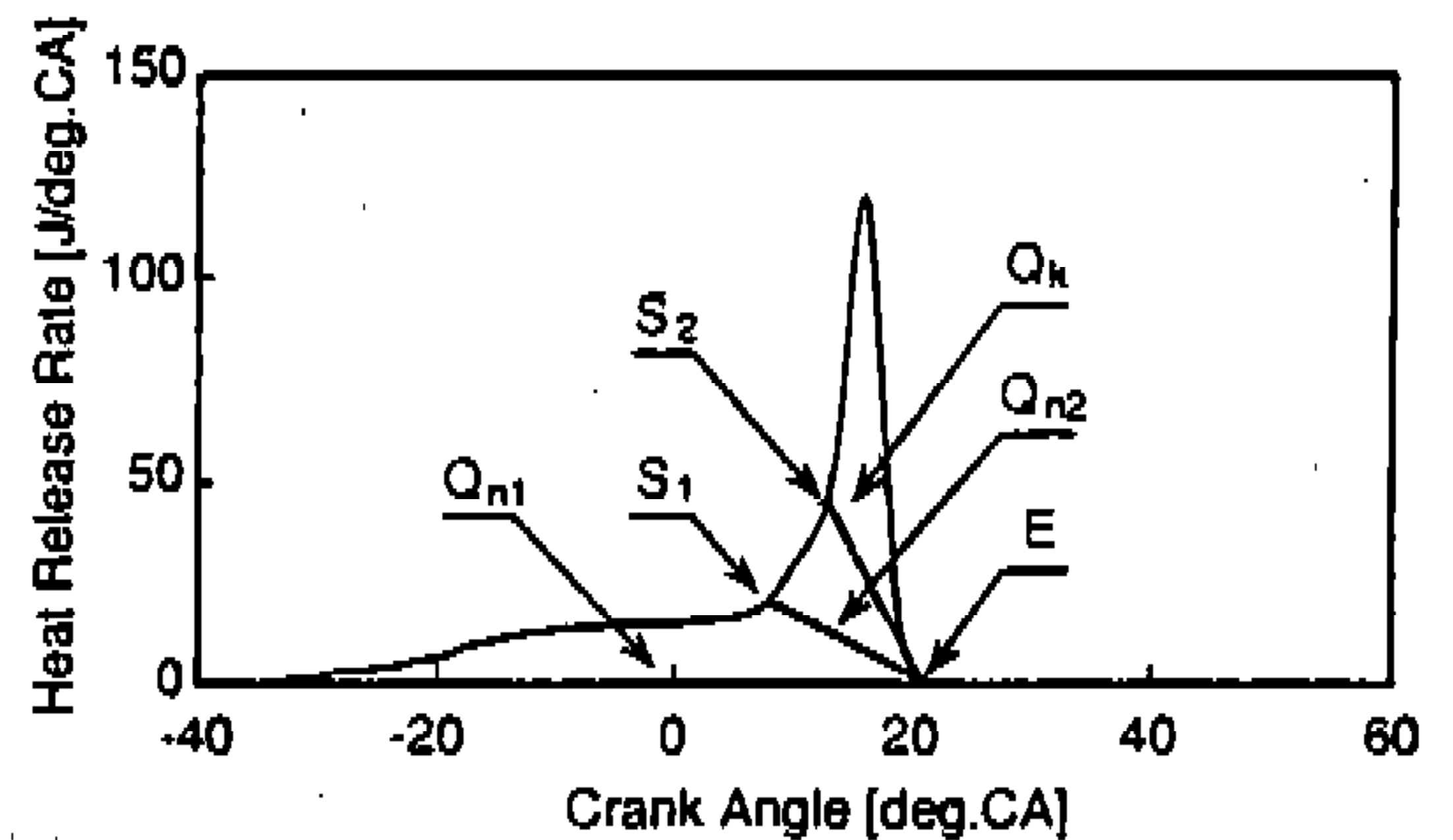


(b) Knock Amplitude

Fig.3 Difinition of Knock Intensity



(a) Non-knock Case



(b) Knock Case

Fig.4 Heat Release Rate in Without Knock and With Knocking

여 얻어진 파형의 최대진폭을 노크강도로 정의하였다. 즉, Fig.3의 압력-시간데이터 (a)의 처리에 의해, 노크진폭 (b)가 얻어지고, 그 최대진폭을 노크강도로 하였다. 본 연구에서는 최대진폭, 즉, 노크강도 3×10^{-3} MPa 이상을 노크에 의한 진동이라고 판단하였다.

3.2 노크 질량연소율의 산출방법

연소실내의 전 예혼합기의 연소는, 정상전파화염(normal flame propagation)에 의한 연소와 자착화(autoignition)에 의한 연소로 구분된다. 후자의 연소에 있어서, 혼합기 비율을 추정하는 것에는 실린더내의 압력의 측정치를 이용하는 방

법이 실용적이다. 따라서, 노크에 의한 질량연소율을 산출하기 위하여, 이하의 방법을 이용하였다.

즉, 측정된 실린더내의 압력 데이터를 이용하여, 열발생률 $dQ_i/d\theta$ [J/°CA], 열발생량 Q [J]를 산출하였다.

$$\frac{dQ_i}{d\theta} = \frac{1}{k-1} \cdot V_i \cdot \frac{dP_i}{d\theta} + \frac{k}{k-1} \cdot P_i \cdot \frac{dV_i}{d\theta} \quad (1)$$

$$Q = \int \frac{dQ_i}{d\theta} \cdot d\theta \quad (2)$$

여기서, k : 비열비, P_i : 실린더내의 압력 [Pa], V_i : 실린더내의 용적[mm³] 이다. 식 (1)을 이용하여 산출한 열발생률 및 질량연소율의 개략을 Fig.4에 나타내었다. 연소실내에 유동을 발생시킨 경우에는, 정상전파화염의 연소상황이 점화 직후와 자착화 직전에 다른 경향을 나타낸다. 따라서, 전자를 정상전파화염 1, 후자를 정상전파화염 2라고 정의하였다. Fig.4(a)는 노크가 발생하지 않는 경우의 열발생률의 추이이고, (b)는 노크가 발생하는 경우, 즉, 정상전파화염 1과 2의 열발생률의 추이이다. 노크가 발생하는 경우의 열발생률은 비교적 높은 피크치가 존재하며, (a)에서는 발생하지 않는 자착화에 의한 급격한 열발생이 (b)에서는 보여진다. (b)에 있어서, S1은 정상전파화염 2개의 개시점이며, S2는 자착화의 개시점이다. 이 S1S2E에 둘러싸인 영역을 정상전파화염 2에 의한 열발생 Q_{n2} 로 하고, 직선 S2E를 경계로 정상전파화염에 의한 열발생($Q_{n1}+Q_{n2}$) 및 자착화에 의한 열발생 Q_k 를 추정하였다. 노크가 발생하는 경우는 연소실 벽면으로의 열손실 증대, 충격파에 의한 온도 경계층의 파괴로 열전달률이 대폭 증가하거나, 연소실내의 압력 불균형에 의한 진동에너지 손실이 증대하는 등의 영향이 있다. 따라서, 자착화에 의한 열발생량 Q_k 를 식 (1), (2)를 이용해서 정확하게 산출할 수 없으므로, Fig.4(a)에서의 총열발생량을 총열발생량 Q_t 로 하였다.

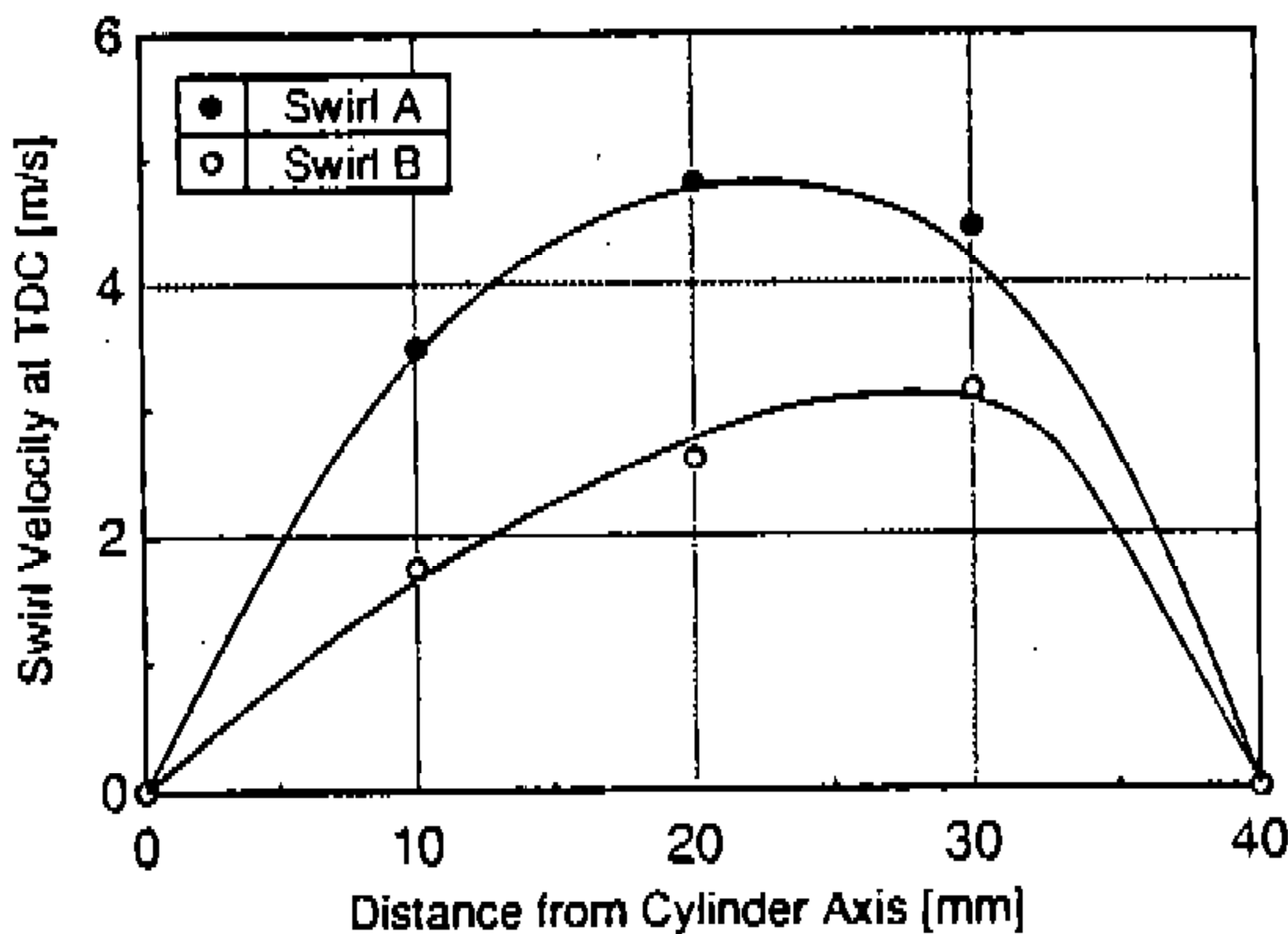


Fig.5 Distribution of Swirl Velocity at TDC

이와같은 방법에 의하여 산출한 것을 이용하여, 정상전파화염 2에 의한 질량연소율(Mfn)은 다음 식으로 산출하였다.

$$Mfn = \frac{Q_{n2}}{Q_t} \times 100[\%] \quad (3)$$

또한, 노크 질량연소율 Mf는 다음 식으로 산출하였다.

$$Mf = \frac{Q_k}{Q_t} \times 100[\%] \quad (4)$$

자착화 개시점 S2 이후의 노크 질량연소율 Mf*는 S2점 전의 화염전파에 의한 열발생량 Q_{f1} 을 Fig.4(b)에서 구하여, 다음 식으로 산출하였다.

$$Mf^* = \frac{Q_k}{Q_t - Q_{f1}} \times 100 = \frac{Q_t - Q_f}{Q_t - Q_{f1}} \times 100[\%] \quad (5)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 연소실내의 유동

RCEM의 구동 운전 경우에 촬영한 고속 슈리렌 사진에 의해, 연소실내의 상사점 부근에서의 와류속도 분포를 Fig.5에 나타내었다. RCEM과 와류 생성장치(배압 : 0.45MPa)와의 작동시간차를 500msec, 700msec로 설정하였다. 이 경우, 상사점에 있어서의 와류비는 각각 3.12, 1.96이며, 각각 와류강도 A, B로 정의하였다.

본 장치에 의하여 발생하는 유동은 2 사이클 유니플로우(uniflow) 기관의 밸브가 닫힌후의 경우에 가까우며, 4사이클 기관의 경우와는 다르다. 즉, 상사점 부근의 유동은, 피스톤이 상사점 근방에 이르기까지는 작다고 사료된다.

4.2 고속 슈리렌 촬영(벽면점화)

Fig.6, Fig.7에 벽면점화 경우에 있어서, 발생하는 정상연소 및 노크현상을 고속 슈리렌 촬영

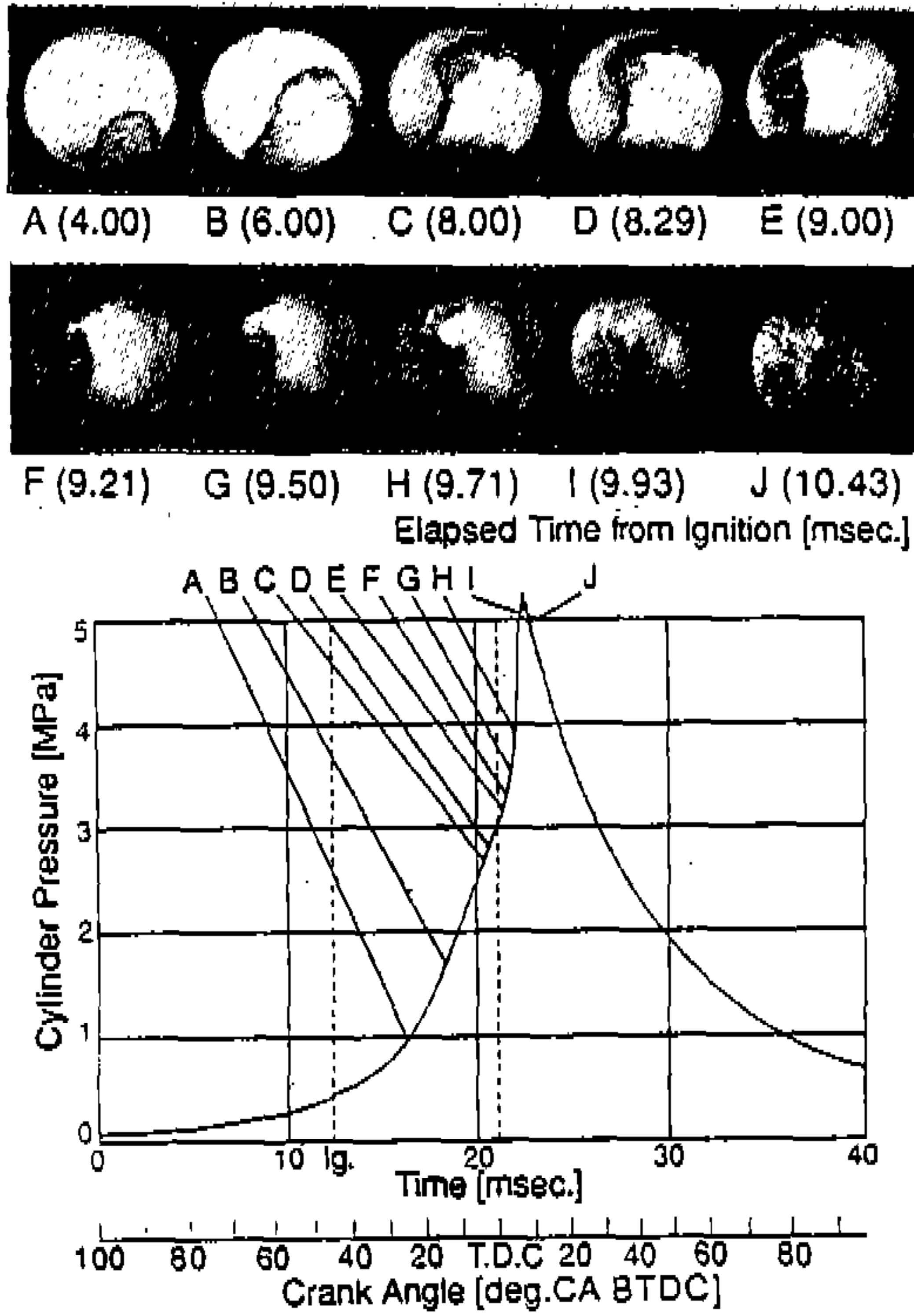


Fig.6 History of Cylinder Pressure and Schlieren Photographs in knock Case (Swirl A, $\phi=1.0$, $\theta_{ig}=45$ [deg.CA BTDC], Ignition at Wall, $K_i=6.5 \times 10^{-2}$ [MPa])

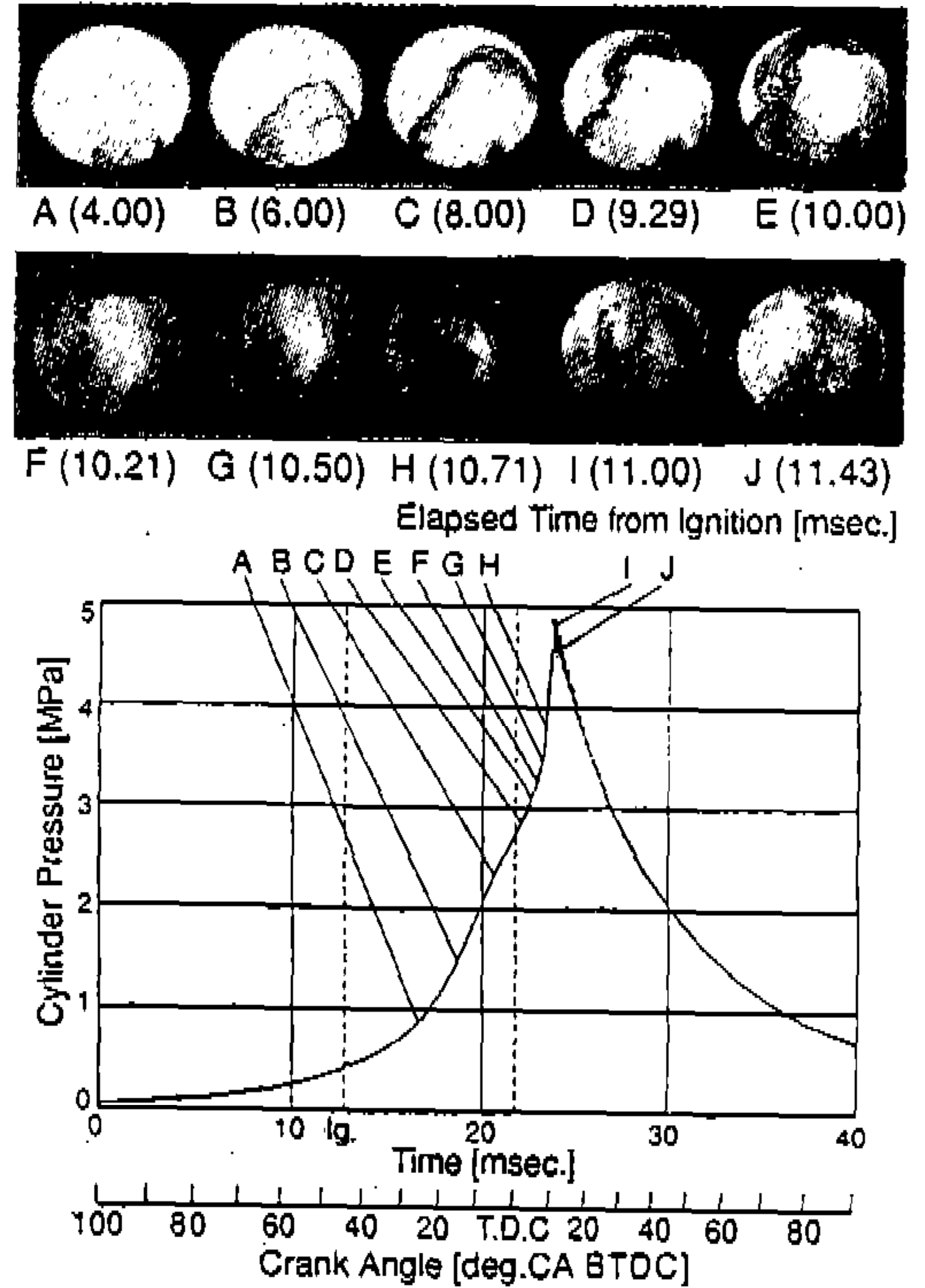


Fig.7 History of Cylinder Pressure and Schlieren Photographs in knock Case (Swirl B, $\phi=1.0$, $\theta_{ig}=45$ [deg.CA BTDC], Ignition at Wall, $K_i=6.5 \times 10^{-2}$ [MPa])

한 결과와 압력의 시간 경과를 나타내었다. 이때의 점화시기는 45deg.CA BTDC이다.

와류 A의 경우(노크강도 : $K_i=6.5 \times 10^{-2}$ MPa), 점화 후에 실린더내의 압력은 완만하게 상승하며, 점화 후 약 9.50msec. (사진G)에서 미연가스 전 영역이 자착화에 이르게 되어, 압력이 급격하게 상승한다. 그 후에 압력 진동을 동반하는 노킹이 발생하고, 연소가 종료함을 보이고 있다. 점화 후 약 5.00msec. 부근까지 정상전파화염은 연소실 내 유동의 영향으로, 그 정방향의 전파속도는 빠르지만, 역방향에서는 느리게 나타나고 있다(사진 A~C). 점화 후 약 8.29msec.부터 유동의 정방향측의 화염면 근방 일부분으로부터, 전파속도가 빠른 화염이 나타나고 있다(사진 D~F). 이 화염은 이 이전의 정상전파화염 보다

도 전파속도가 빠르며, 미연가스의 대부분이 이 연소에 의해서 소비된다(사진 D~H). 그 후 9.50msec. (사진 G)에서 극히 적게 남아있던 미연가스 전 영역이 자착화에 이르게 되고, 연소가 종료하게 된다. 여기서, 본 연구에서는 점화 직후의 정상전파화염을 정상전파화염 1, 화염면 근방의 일부분으로부터 발생하는 전파속도가 빠른 화염을 정상전파화염 2라고 정의하였다.

와류 B의 경우(노크강도 : $K_i=1.5 \times 10^{-1}$ MPa), 와류 A의 경우 보다도 노크강도가 강하다. 실린더내의 압력의 시간 경과와 와류 A의 경우와는 다르지만, 그 정성적인 경향은 거의 동일하다. 화염의 전파상황은 연소실내의 유동이 Fig.7과 비교해서 약하기 때문에 유동의 정방향, 역방향에서의 화염전파의 차이는 약간 작다. 점화 후

약 9.36msec. (사진 D)에 있어서, 화염면 근방 일부분으로부터 전파속도가 빠른 화염이 시작되면서, 화염이 전파함을 보이고 있다. 그 후 10.50msec. (사진 G)에서 잔류 미연가스가 자착화에 이르게 되고, 연소가 종료한다. 고속 슈리렌 사진으로부터 확인한 결과, 화염면 근방에서 발생하는 화염은 정상전파염 1의 전파속도보다 거의 2~2.5배의 속도로 성장함을 알 수 있었다. 이러한 원인의 규명은 현시적에서 불분명 하지만, 실린더 축 부근에 그 중심이 있는 강제와동 (rigid body swirl)에 가까운 와류의 존재에 의해, 와류 주변부로부터 압력이 낮은 와류의 중심을 향해서 화염성장이 가속되어지고 있다고 사료된다.

4.3 화염성장거리

Fig.6, Fig.7에 나타낸 슈리렌 사진으로부터, 정상전파화염 1, 2의 화염성장 거리(L)를 측정하였다. Fig.8에서 보이는 바와 같이, 정상전파화염 1에 대해서는 점화 플러그로부터 화염면 (A~E)까지의 거리 (OA~OE)를 측정하고, 그 평균치를 정상전파화염 1의 성장거리로 하였다. 또한, 정상전파화염 2에 대해서도 화염면 (F~J)까지의 거리 (OF~O'J)를 측정하고, 그 평

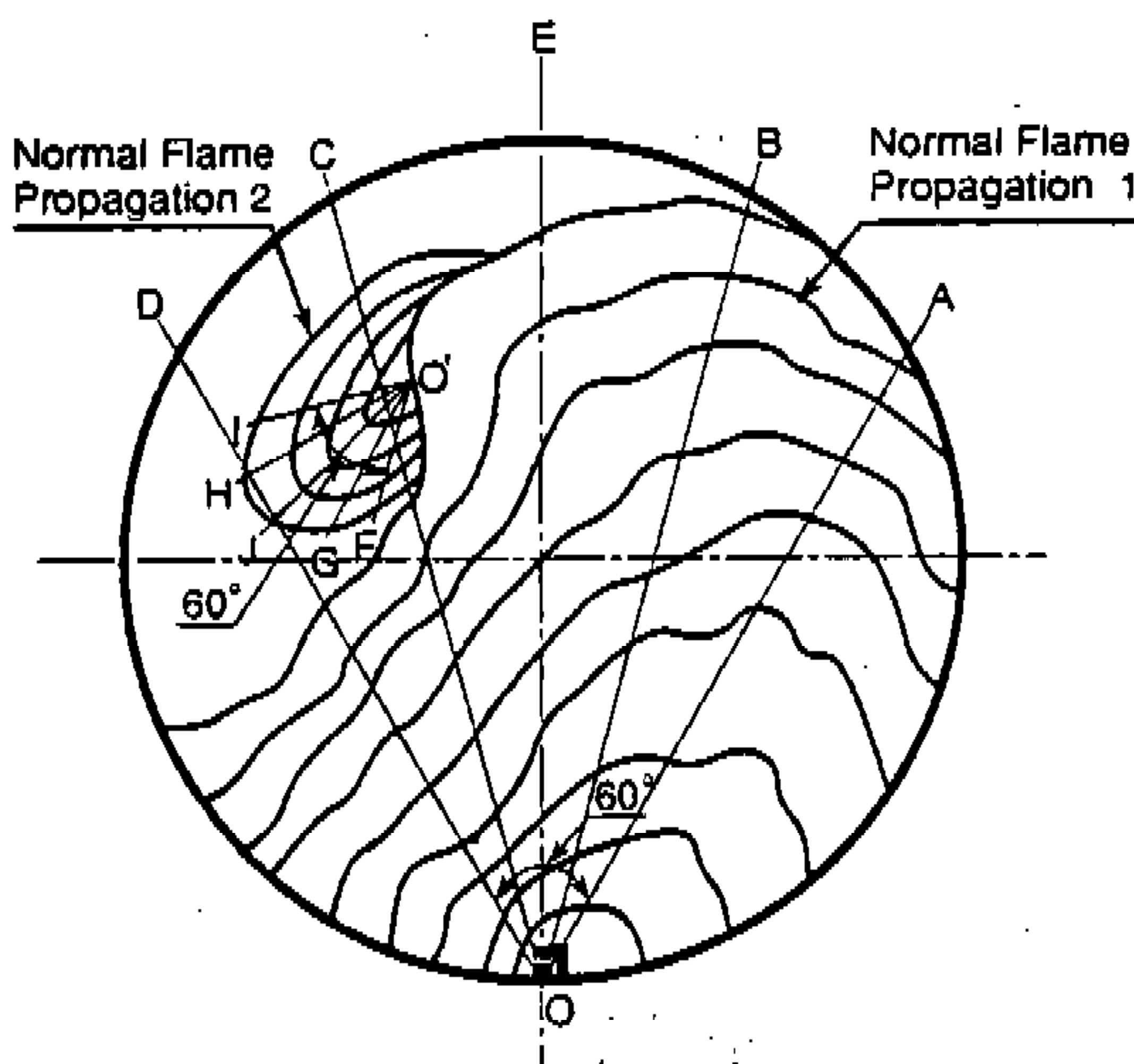


Fig.8 Measurement of Flame Glowing Distance

균치를 정상전파화염 2의 성장거리로 정의하였다. Fig.9는 Fig.8에서 측정한 와류 A, B의 경우에 있어서의 L의 시간경과를 나타내며, L은 시간경과에 거의 비례해서 증가함을 알 수 있다. 정상전파화염 2의 경사면이 정상전파화염 1의 경우와 비교해서 큼을 알 수 있는데, 이러한 원인은 연소실내의 와류가 강제와동에 근접하게 됨으로 인해서, 그 영향을 받게되기 때문이라고 사료된다. 즉, 이 경우의 정상전파화염 1, 2의 전파속도는 각각 약 6.9m/sec. 16.3m/sec이다. 와류 B의 경우에도 와류 A의 경우와 동일한 경향을 나타내며, 그 전파속도는 각각 6.3m/sec, 16.3m/sec이다. 정상전파화염 2는 정상전파화염

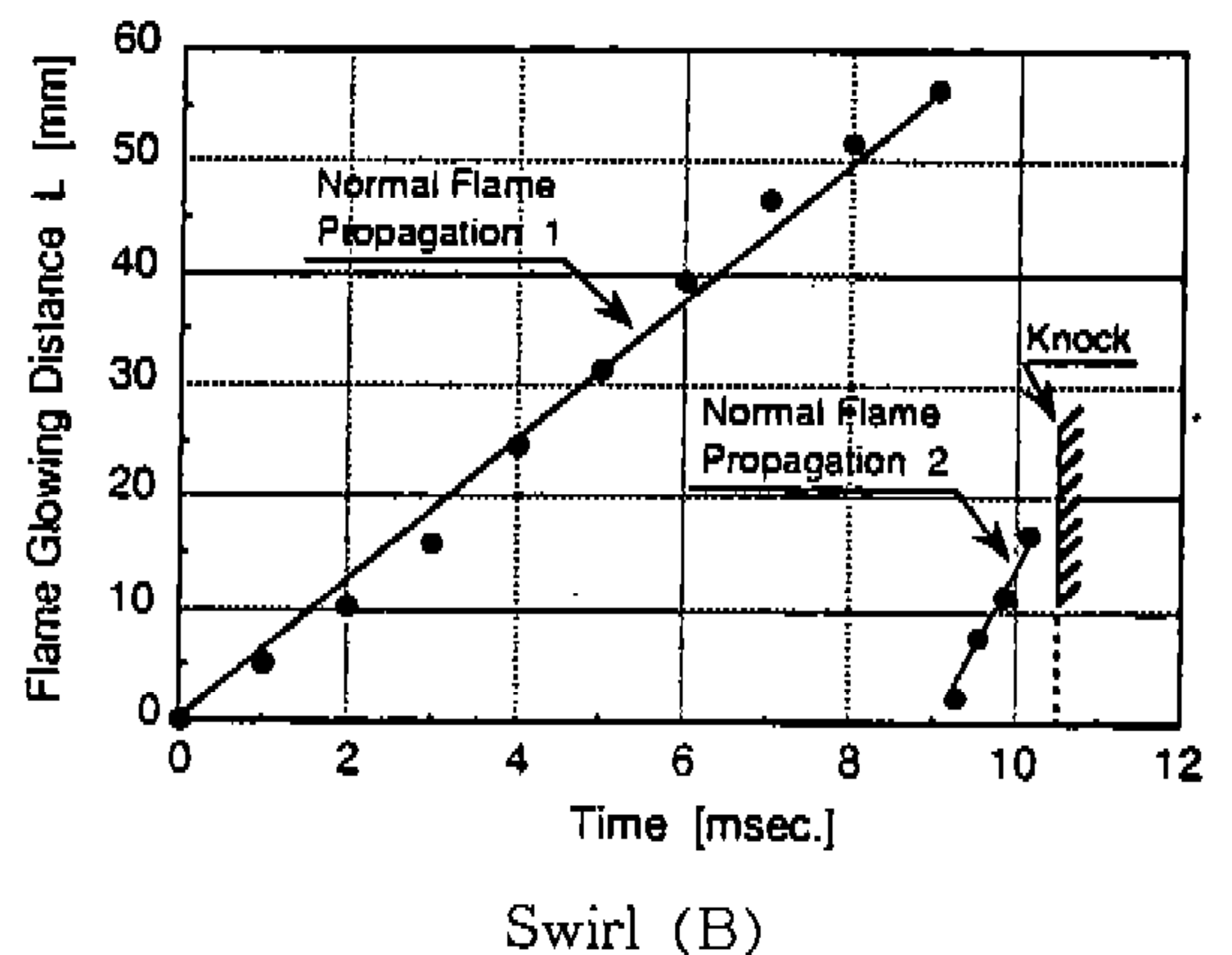
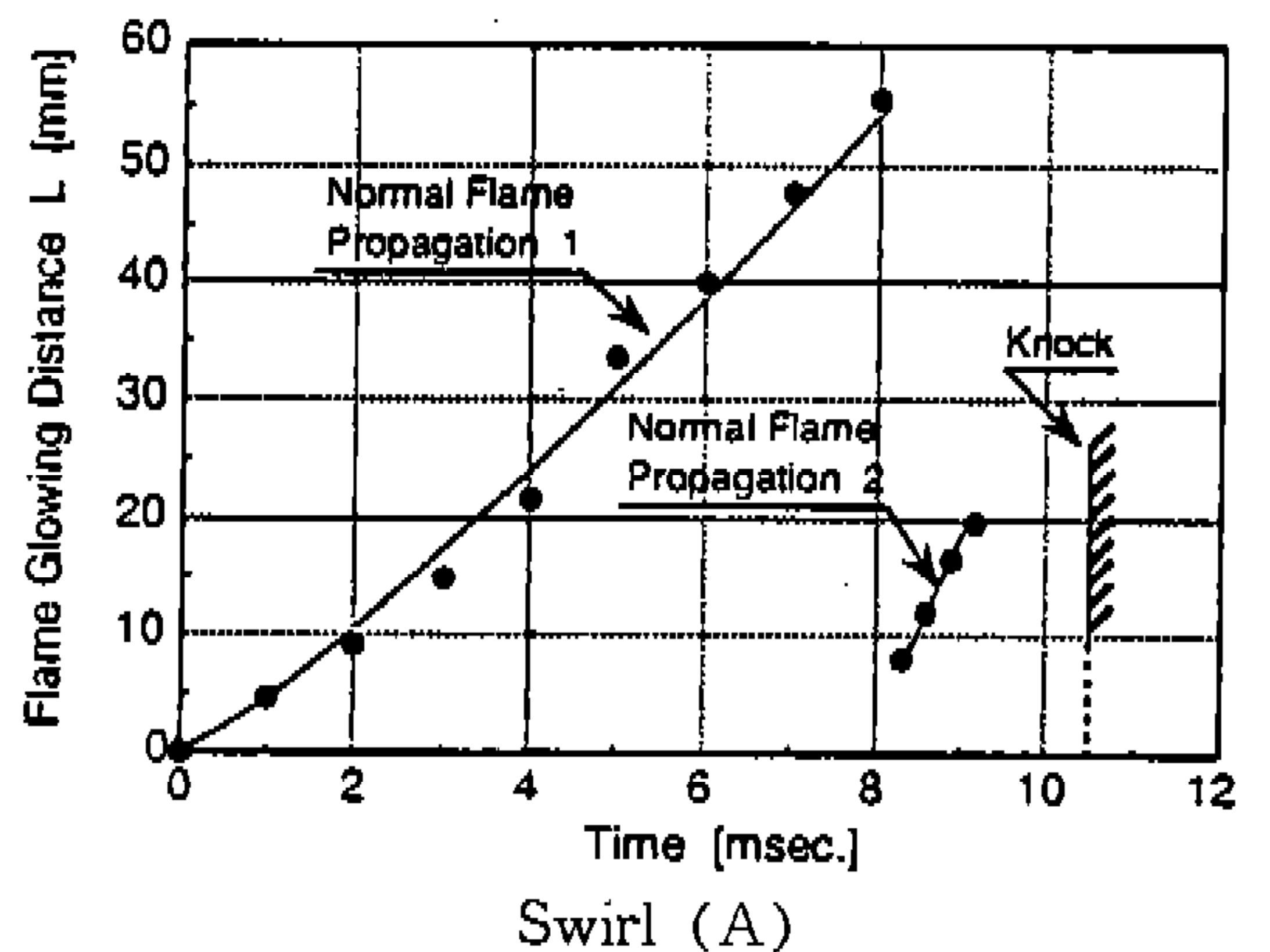


Fig.9 Relation between Time and Flame Glowing Distance ($\epsilon=7.5, P_0=0.1[\text{MPa}], \phi=1.0, \theta_{ig}=45[\text{deg.CA BTDC}], \text{Ignition at Wall}$)

1의 약 2~2.5배의 전파속도로 진행함을 알 수 있었다.

그러나, 와류 A, B에 있어서의 이러한 2개의 화염의 전파속도는 거의 동일한 사실로부터, 벽면점화일 경우에는, 본 실험 조건하에서, 와류강도 차이의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다. 벽면으로부터 20mm의 위치에서 점화한 경우에는 정상전파화염 2가 나타나지 않았다. 이 원인은 연소실내의 유동이 빠른 영역에 점화위치를 설정한 것과 점화 플러그로부터 그 반대편의 벽면까지의 거리가 짧기 때문이라고 사료된다. 이 경우의 화염전파 속도는 각각 16.7m/sec, 16.2m/sec로써, 와류강도 영향이 다소 있음을 알 수 있었다. 그러나, 이때의 화염 전파속도는 벽면 점화 경우의 정상전파화염 2에 상당하며, 이러한 증대는 와류강도 보다도 점화위치에 의한 영향이라고 사료된다.

4.4 점화위치에 의한 영향

실린더내 압력의 시간 경과로 부터 산출한 열 발생률 및 질량연소율을 Fig.10(벽면에서 점화), Fig.11(벽면으로부터 20mm의 위치에서의

점화)에 나타내었다.

이때의 점화시기는 30deg.CA BTDC 이다. 점화위치에 관계없이 와류강도가 크면, 열발생률의 최대값도 큰 경향을 나타낸다. 즉, 열발생에 미치는 연소실내 유동의 영향이 큼을 알 수 있다. 점화위치 20mm의 경우는 벽면점화와 비교하여서, 유동에 관계없이 열발생률의 최대값은 크고, 열발생기간은 짧다. 전자의 경향은 점화 플러그 위치의 전후에 정상화염이 성장하기 때문이고, 후자의 원인은 미연 영역의 단열압축이 증가했기 때문이라고 사료된다.

4.5 점화시기의 영향

Fig.12에 연소실 벽면점화, 당량비 $\phi=1.0$ 일 정하에서, 점화시기를 (θ_{ig})를 15deg.CA BTDC 까지 변화시킨 경우의 도시평균유효압력(P_i), 노크강도(K_i), 정상전파화염 2에 의한 열 발생률(M_{fn}), 노크 질량연소율(M_f) 및 자착화 후의 노크 질량연소율(M_f^*)을 와류강도 A, B에 대해서 나타내었다. 어떠한 경우의 와류강도에 있어서도, P_i 는 θ_{ig} 를 전각시킴에 따라서 증대하고, 최대값에 달한 후에 감소한다. 이때의 최대

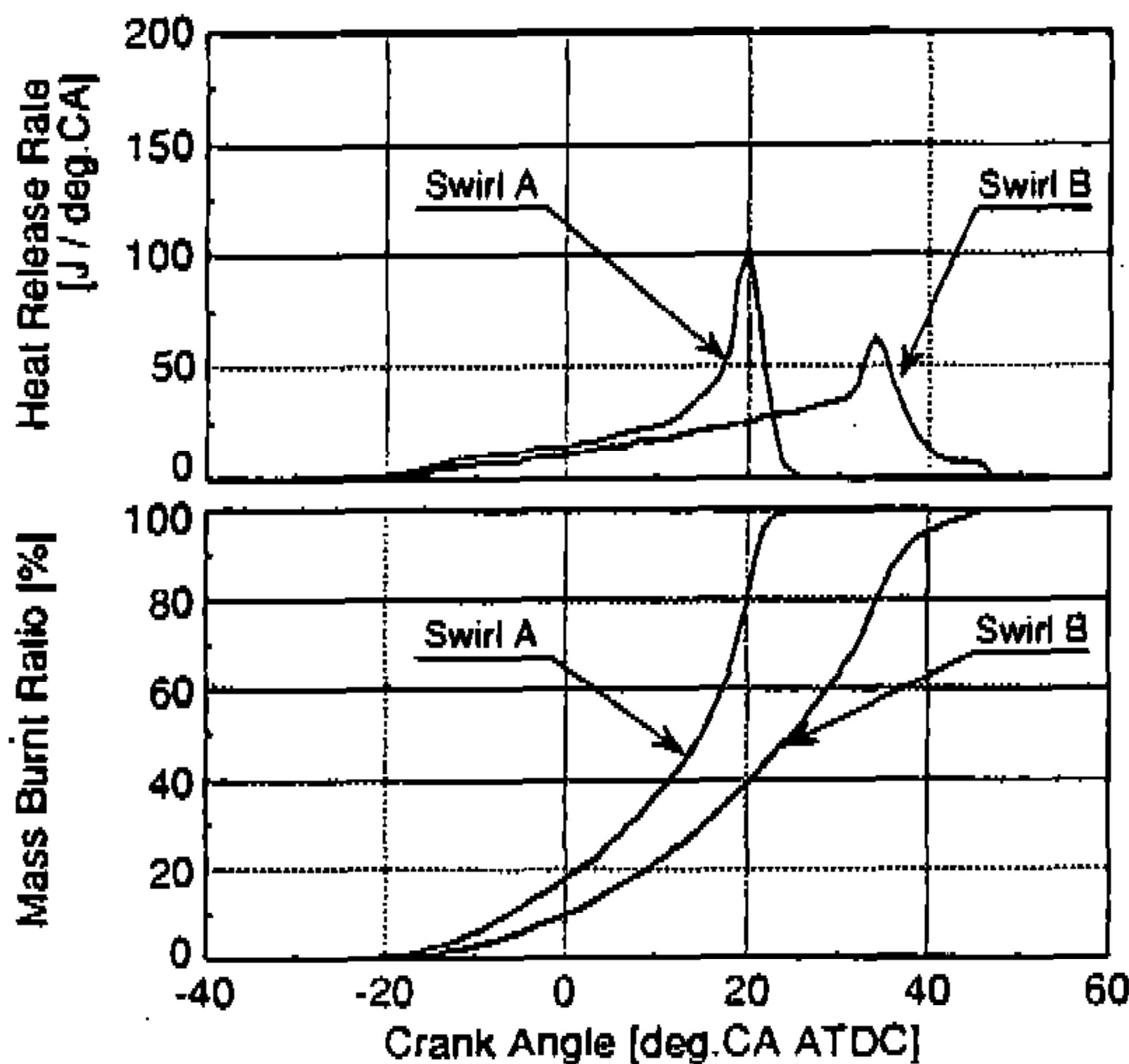


Fig.10 Heat Release Rate and Mass Burnt Ratio as Function of Swirl Intensity ($\epsilon=7.5$, $P_0=0.1$ [MPa], $\phi=1.0$, $\theta_{ig}=30$ [deg.CA BTDC], Ignition at Wall)

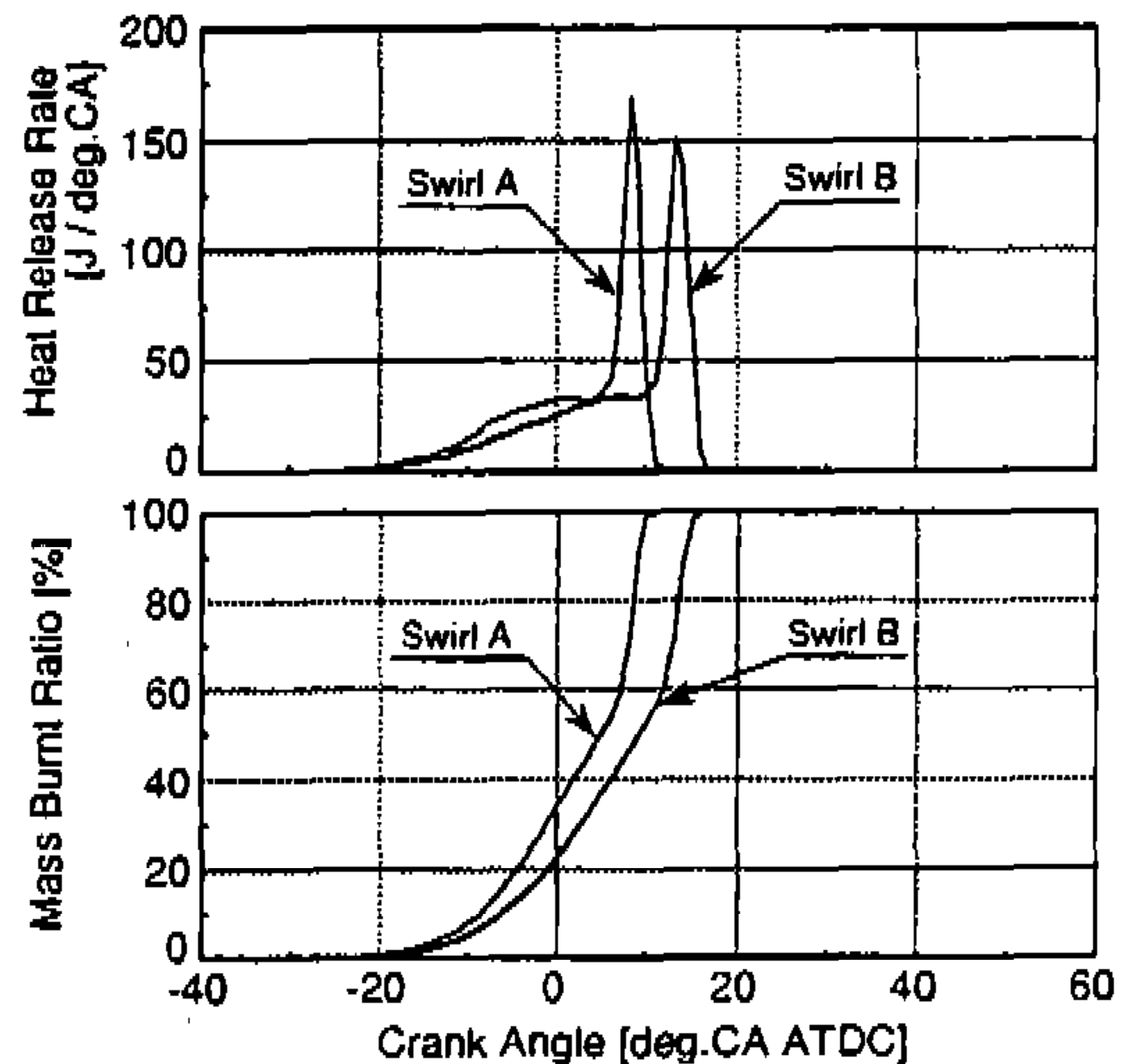


Fig.11 Heat Release Rate and Mass Burnt Ratio as Function of Swirl Intensity ($\epsilon=7.5$, $P_0=0.1$ [MPa], $\phi=1.0$, $\theta_{ig}=30$ [deg.CA BTDC], Ignition Point : 20 [mm]from Wall)

값은 유동이 강한 와류 A가 와류 B 보다도 크다. 이것은 유동에 의해서 연속속도가 증대하고⁷⁾, 상사점 부근의 아주 작은 크랭크 각도에서 연소가 종료하기 때문이라고 사료된다. 또한, 최대값에 도달하는 시기는 와류 A가 와류 B보다 빠르다. K_i 에 대해서도 θ_{ig} 가 변하여도 와류강도의 효과는 없다. 즉, 벽면점화의 경우에는 와류 A, B 정도의 유동 차이가 K_i 의 변화에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

노크한계를 넘으면, M_{fn} 은 노크강도가 증가함에 따라서 점차로 감소하게 된다. 이것은 점화시기를 진작시키면, 정상전과화염 2의 진행이 두드러지지 않는 시기에 자작화가 발생하기 때문이라고 생각된다. 또한, 전술의 이유로부터, M_{fn} 에 대한 와류강도의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 그러나, M_f , M_f^* 는 θ_{ig} 를 진작시킴에 따라 급격하게 증가하지만, 그 후에는 증가 비율이 점

차로 감소하여, 최종적으로 거의 동일시기에 대략 일정값에 이르게 된다.

연소실 벽면으로부터 20mm의 위치에서 점화한 경우의 P_i , K_i , M_f 및 M_f^* 를 Fig.13에 나타내었다. 이때에 정상전과화염 2가 전술에서 설명한 바와 같이 발생하지 않으므로, M_{fn} 은 도시하지 않았다. $\phi=1.0$ 일정하에서, 점화시기를 (θ_{ig}) 와류 A의 경우는 10~30deg.CA BTDC, 와류 B의 경우는 10~35deg.CA BTDC의 범위에서 각각 변화시켰으며, θ_{ig} 에 대한 경향은, 기본적으로 Fig.9와 비슷하다. 그러나, 와류가 있는 경우는 P_i 가 최대가 되는 시기 및 P_i , K_i , M_f 및 M_f^* 가 증가하는 시기는 전술과 동일한 이유로, Fig.9의 경우보다 빠르게 됨을 알 수 있다. 와류가 없는 경우의 노크강도의 증가 비율은, 와류가 있는 경우와 비교해서 큼을 알 수 있다. 이것은 자작화 조건을 달했을때의 잔류 미연가스가 많기

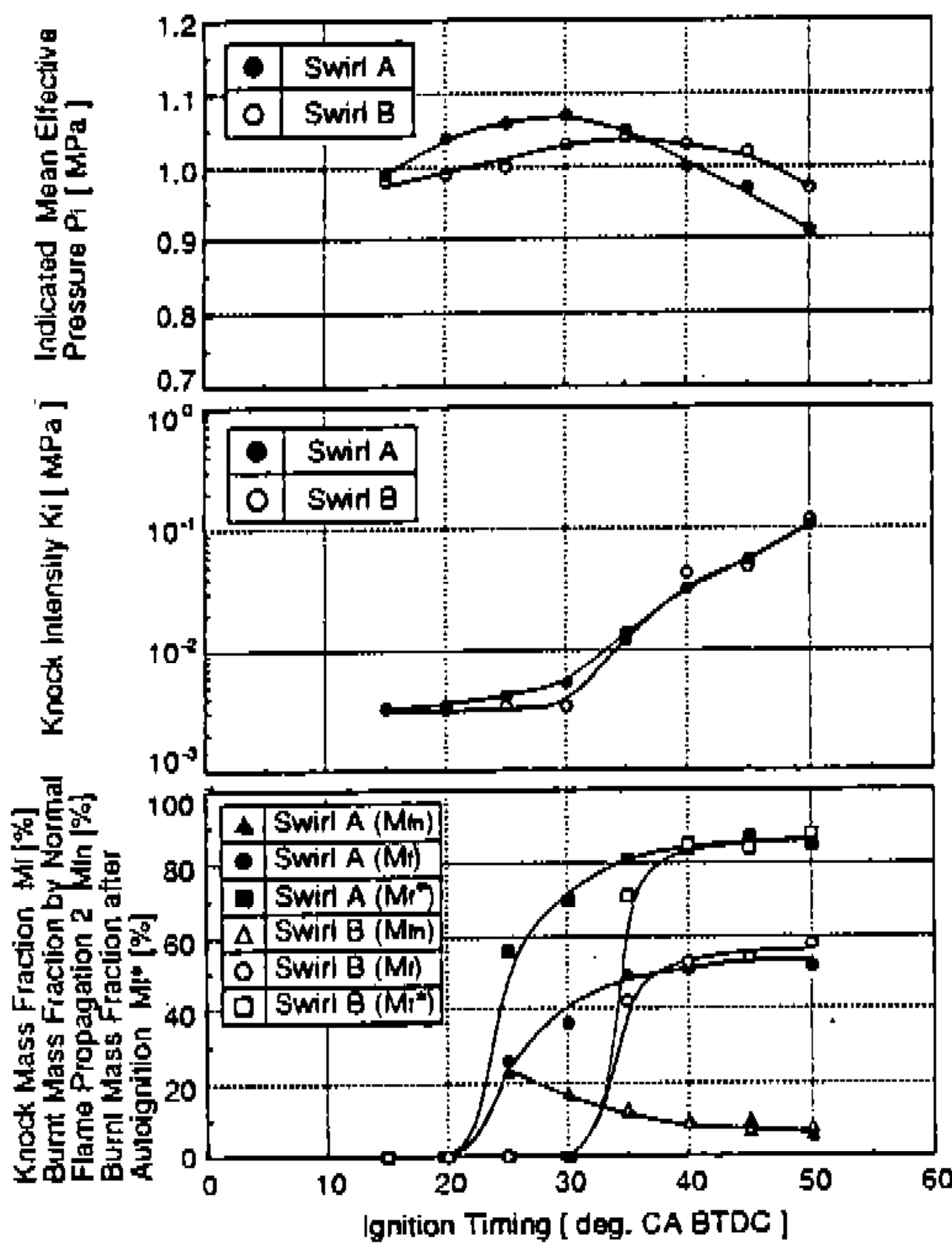


Fig.12 Effect of Ignition Timing on Indicated Mean Effective Pressure, Knock Intensity and Knock Mass Fraction ($\epsilon=7.5$, $P_0=0.1$ [MPa], $\phi=1.0$, Ignition at Wall)

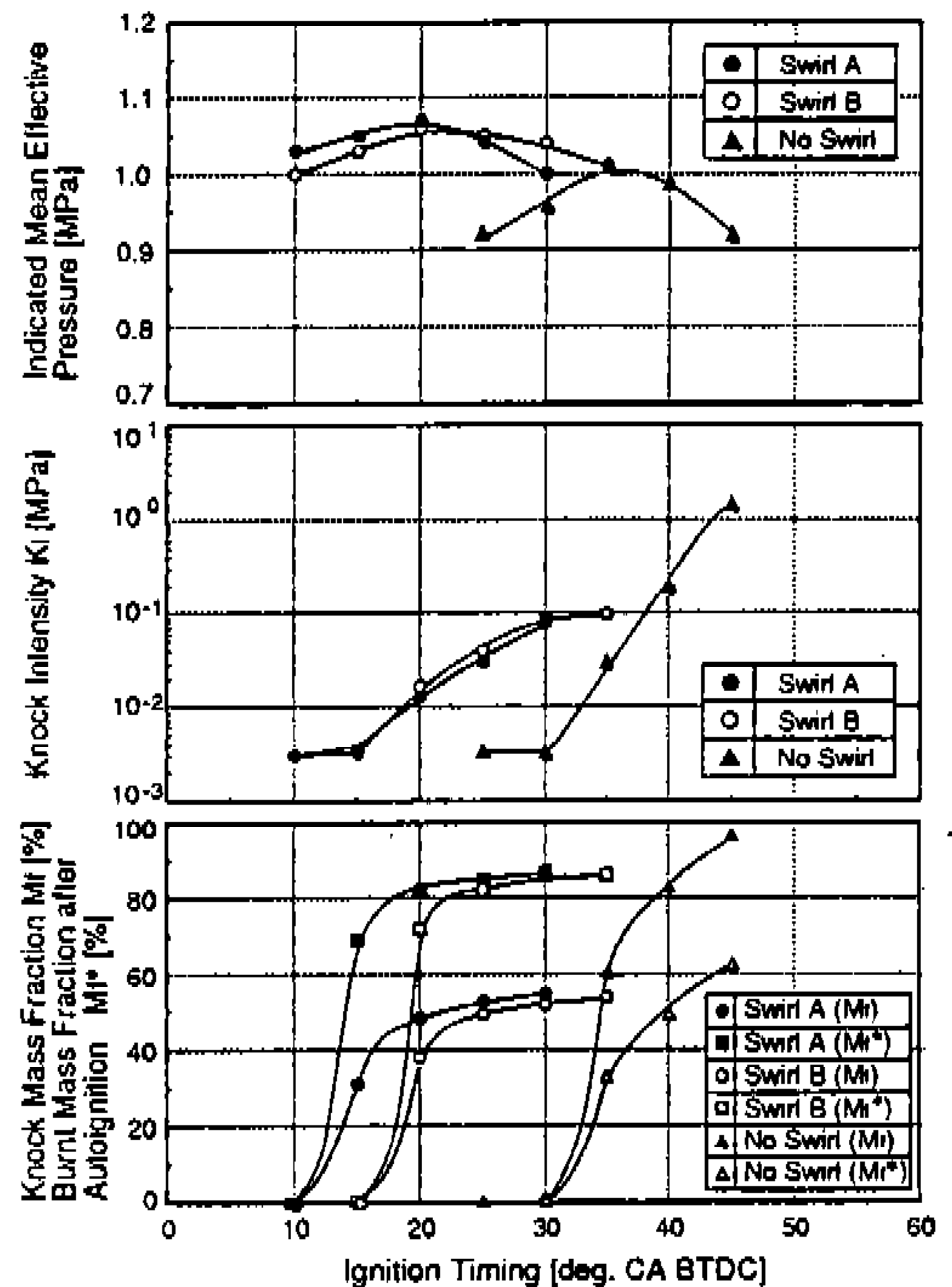


Fig.13 Effect of Ignition Timing on Indicated Mean Effective Pressure, Knock Intensity and Knock Mass Fraction ($\epsilon=7.5$, $P_0=0.1$ [MPa], $\phi=1.0$, Ignition Point : 20[mm] from Wall)

때문이라고 사료된다.

4.6 당량비의 영향

미연가스 중이 혼합기 농도가 미치는 영향을 알아보기 위해서, 와류강도를 변화시킨 경우의 각 당량비에 있어서의 노크한계의 점화시기 및 최적점화시기(MBT)를 Fig.14에 나타내었다. 이 그림에 의하면, 노크한계의 점화시기 및 최적 점화시기는 $\phi=1.0\sim 1.1$ 의 범위에서 최소값을 나타내고 있다. 이것은 연소속도가 이 당량비 부근에서 가장 빠르게 됨으로 인해, 조기에 자착화 조건에 이르기 때문이라고 사료된다. 또한 와류를 발생시킨 경우에는 연소속도가 증가하기 때문에, 노크한계의 점화시기 및 MBT는 와류 A의 경우가 와류 B의 경우보다 작게 됨을 알 수 있다.

4.7 유동장에서의 노크발생 기구의 검토

유동장에서의 노크발생 기구를 검토하기 위해서, 유동이 있는 경우와 유동이 없는 경우의 노크현상의 특성을 조사하였다. 연소실 벽면에서 점화한 경우는 당량비 $\phi=0.8\sim 1.2$, 연소실 벽면으로부터 20mm의 위치에서 점화한 경우에는

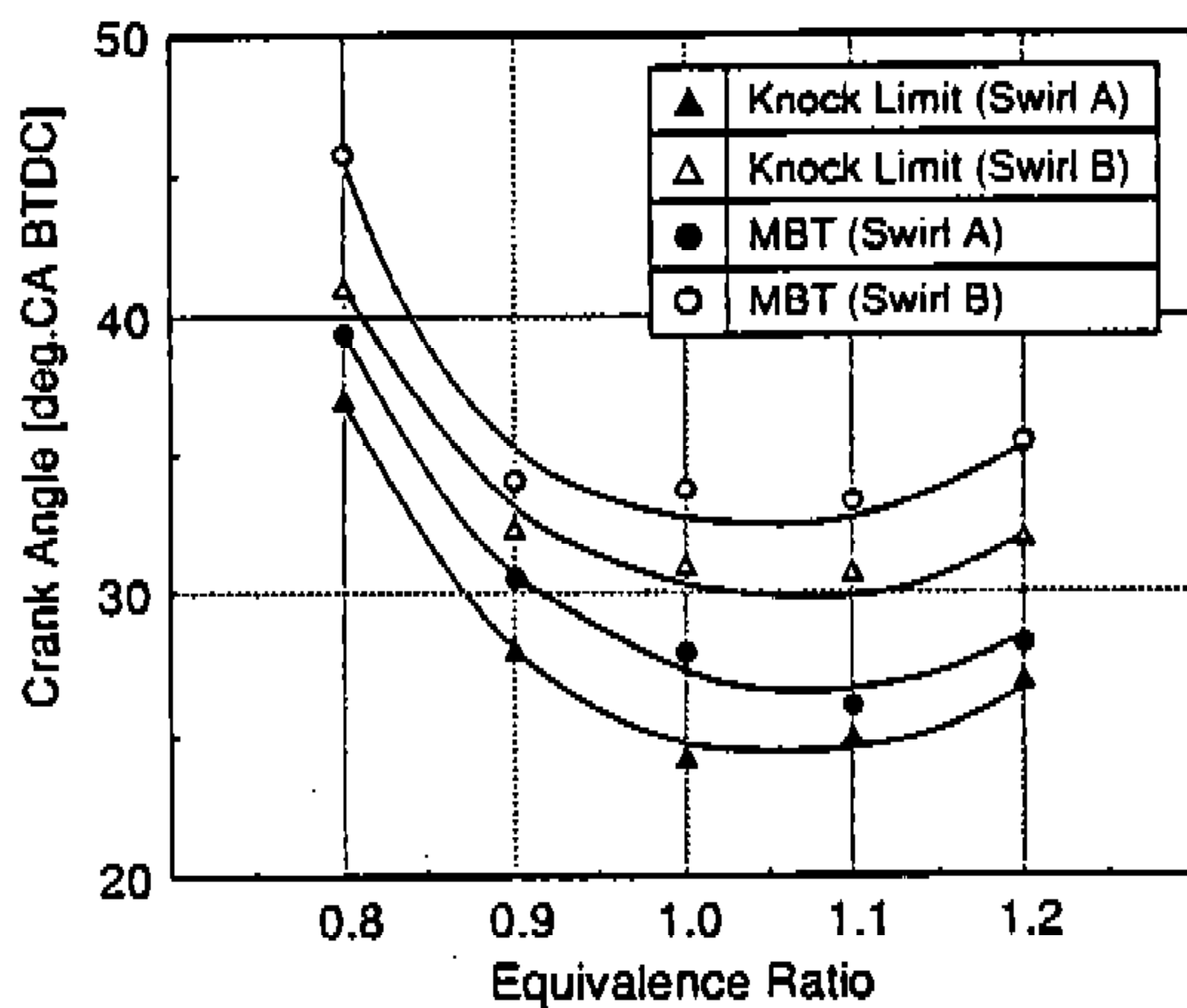


Fig.14 Ignition Timing of Knock Limit and MBT ($\epsilon=7.5$, $P_0=0.1$ [MPa], Ignition at Wall)

$\phi=1.0$ 의 조건하에서, 노크강도(K_i) 및 노크 직전의 연소실내의 미연가스 온도(T_u)와 노크발생 시기의 관계를 Fig.15에 나타내었다. 전체적으로 노크강도는 노크발생 시기가 상사점에 가까워질수록 높아지고 있음을 나타내고 있다. 그리고, 비교적 강한 노크가 발생할 때에는 노크발생

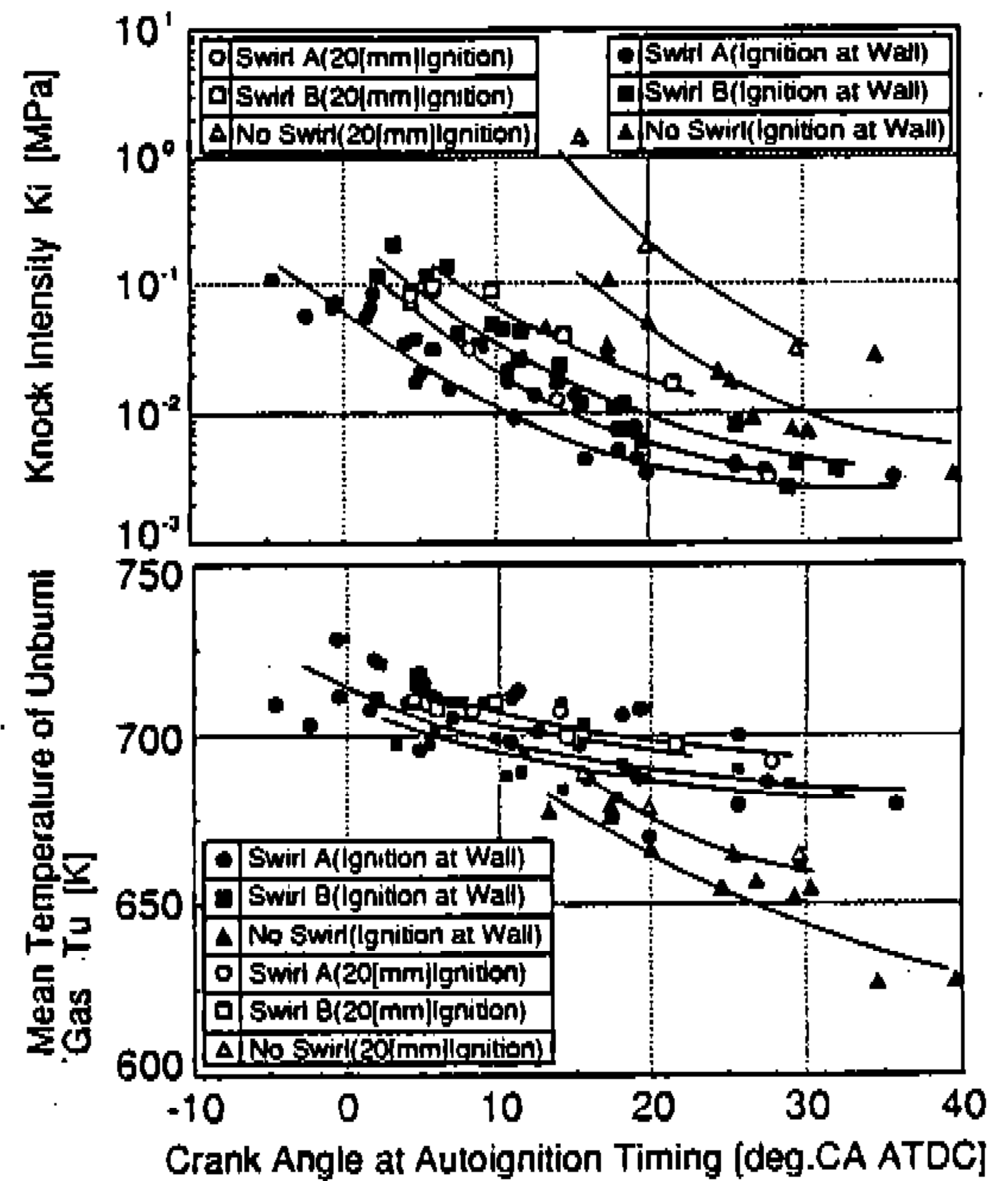


Fig.15 Relation among Knock Intensity, Mean Temperature of Unburnt Gas and Auto-ignition Timing

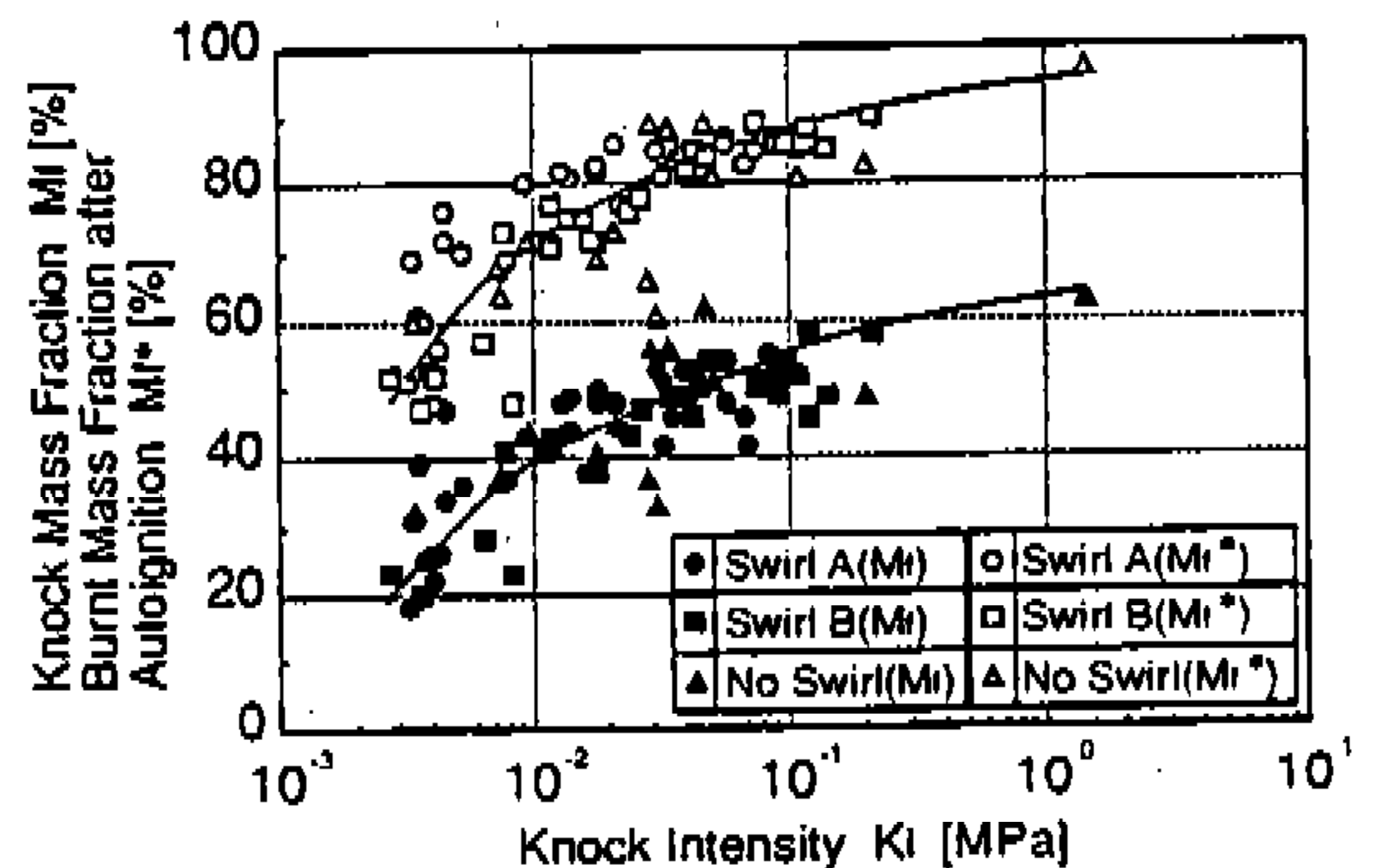


Fig.16 Relation between Knock Mass Fraction and Knock Intensity

시기가 빠르게 되고, 그 시기의 잔류 미연가스가 많기 때문에 Mf 및 Mf^* 도 크게 된다. 또한, 와류강도가 증가하게 되면, 노크강도가 작아지게 되고, 연소실내의 미연가스 온도는 높아지게 된다.

Fig.16에는 본 실험에서 측정된 Ki , Mf 및 Mf^* 의 관계를 와류강도 A , B 및 와류가 없는 경우의 전 데이터를 정리하여 나타내었다. 비교적 Ki 가 작은 경우에는 Mf 및 Mf^* 는 넓은 영역에 분포하지만, Ki 가 클수록 Mf , Mf^* 는 좁은 영역에 집중한다. 이러한 경향은 Ki 가 작을 때에는 실험조건외 변화로 인해, 노크발생 시기가 상사점 근방에 집중하기 때문에, Mf , Mf^* 와 Ki 사이에는 비교적 강한 상관 관계가 있으며, Ki 가 크게 되면 Mf 및 Mf^* 도 커지게 된다. 반면, 이러한 관계에 있어서, 와류강도가 큰 영향을 미치는 것은 아니지만, 이 이유에 대해서는 이후로 검토가 필요하다고 사료된다.

또한, 유동장에서의 노크발생 기구에 관해서, 물리적 및 화학적 요인을 이하에 검토한다. 우선, 물리적 요인으로서 유동에 의한 정상전파 화염의 연소속도의 증대 효과를 들 수 있다. 와류가 강하게 되면, 연소속도가 증대하는 것에 의해, 미연가스가 자착화에 달해서도 정상전파 화염이 진행된다. 이 때문에 와류가 없는 경우와 비교해서, 조기에 고온에서 자착화하여 노크가 발생함에도 불구하고, 노크질량연소율이 작게 되어 노크강도가 작게 된다.

화학적 요인으로는 유동에 의한 착화 지연기간의 증대효과를 들 수 있다. 특히, 미연가스는 어느 온도, 압력에 달하면, 일정한 지연기간을 경과한 후에 자착화에 이르게 된다. 이 지연기간 중에 냉염(cool flame) 및 청염(blue flame)이 발현, 발달하게 되지만, 와류에 의해서 이 냉염 및 청염의 발현, 발달이 억제되고, 착화 지연기간이 길어진다⁵⁾. 따라서, 미연가스의 유동에 의한 착화 지연기간과 연속속도 증대의 상승(相乘) 효과에 의해서, 이 착화 지연기간 중에 미연가스가 소비되어 Mf 및 Mf^* 가 감소한다. 그 결과로 인해서, Ki 가 작아진다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는, 급속압축팽창 장치에 와류 생성장치를 장착하여 기관의 정상연소 및 이상연소, 특히 노크현상에 미치는 와류의 영향에 대하여 고찰하였으며, 본 실험의 범위에서 이하의 결과를 얻었다.

- 1) 와류가 있는 경우에는 정상전파화염 2가 발생하고, 이 화염의 속도는 와류강도에 관계없이 정상전파화염 1의 약 2~2.5배 가깝게 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 노크강도(Ki), 노크 질량연소율(Mf) 및 자착화 후의 노크 질량연소율(Mf^*) 사이에는 와류의 유무에 관계없이 강한 상관 관계가 있다. 즉, 노크강도가 큰 경우에는 노크 질량연소율 및 자착화 후의 노크 질량연소율이 크게 됨을 알 수 있었다.
- 3) 당량비 (ψ)가 1.0~1.1의 범위에서는 가장 빠르게 자착화 조건에 이르게 되어 노크가 발생하게 되고, 와류가 클수록 동일 노크 발생 직전의 연소실내의 미연가스 온도에서 노크강도가 작게 됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구를 수행하는데 있어서, 많은 조언과 협조를 주신 일본 堀場製作所の 塚本 時弘씨, 본 연구실의 대학원생 三宅 周三군에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. H.R. Ricard, "The High Speed Internal Combustion Engine", 1960
2. A.S. Sokolik, "Self-Ignition Flame and Detonation in Gas", Israel Program for Scientific Translation, pp.60-67, 1963
3. C.F. Taylor, "The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice Volume II"(11) The Mit Press, pp.35-85, 1968

4. C.M. Coasts and A. Williams, "Investigate of the Ignition of N-Pentane-Oxygen Mixture", pro.17th Symp.(Int.) on Combust., pp.611-621, 1979.
5. 太田 安彦, 高橋 和, 寺田 耕, 高尾 聲, "ツリンダ内自着火に及ぼす混合氣流動の效果", 第23回 燃焼シンポジウム前別集, pp.85-87, 1995
6. H. Schapertons and W. Lee, "Multi-dimensional Modeling of Knocking Combustion in S.I. Engines", SAE Paper 850502, 1985
7. 兵本 嘉輔, 富田 榮二, 田中 豊, 片山 哲他, "火花點火機關の燃焼に及ぼすスワールの影響", 日本機械學會論文集(B編) 52卷 480互, pp.3059-3067, 1986
8. 高木 靖雄, 尹東, 輝行, 飯島 有, "火花點火機關のサイクルごとの自着火による燃焼率特性とノッキング強度について", 日本機械學會論文集 (B編), 52卷 480互, pp.3068-3074, 1986
9. H. Hu and J. Keck, "Autoignition of Adiabatically Compressed combustion Gas Mixtures", SAE Paper 872100, 1987
10. 水谷 幸夫, 佐伯 孝敏, 中部 主敬 "映像處理による火炎反應領域の可視化(緩報)", 日本機械學會論文集 (B編), 54卷 504互, pp. 2219-2227, 1988
11. 富田 榮二, 浜本 嘉輔, "火花點火機關のツリンダ内亂流豫混合火炎に關する研究", 日本機械學會論文集 (B編), 56卷 523互, pp. 823-829, 1990
12. M. Haghooie, "Effect of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knocking Characteristics of a Single Cylinder Engine", SAE Paper 902134, 1990
13. G. Konig and C.G.W. Sheppard, "End Gas Autoignition and Knock in a Spark Ignition Engine", SAE Paper 902135, 1990
14. U. Spicher, H. Krörger and J. Ganser, "Detection of Knocking Combustion Using Simultaneously High Speed Schlieren Cinematography and Multi Optical Fiber Technique", SAE Paper 912312, 1991
15. Kyung-Woo Lee, T. Tsukamoto, J.Senda, H. Fujimoto, "Analysis of Knocking Mechanism Applying the Chemical Luminescence Method", SAE Paper 951005, 1995