

〈논 문〉 SAE NO. 953773

부실식 정적연소실내 층상혼합기의 연소특성(Ⅱ)

Combustion Characteristics of Stratified Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber with Sub-chamber(Ⅱ)

김 봉 석,* 권 철 홍,* 류 정 인**
B. S. Kim, C. H. Kwon, J. I. Ryu

ABSTRACT

The present study was investigated combustion characteristics of methane-air mixtures at stratified charge in a constant volume combustion chamber. The main results obtained from this study can be summarized as follows. In case of $\phi_s=1.0$, total burning times greatly affected rather than initial time of pressure increase and maximum combustion pressure. In case of $\phi_t=1.0$, initial time of pressure increase and total burning times were affected considerably in comparison with the case of $\phi_s=1.0$. Also, even the very lean mixture which total equivalence ratio is $\phi_t=0.69$ ($\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$), by changing configuration of the critical passage-hole and using a stratified mixture, it is possible to decrease substantially the initial time of pressure increase, total burning times and NOx concentration without deteriorating combustion characteristics such as maximum combustion pressure, rate of heat release etc. in comparison with the use of single chamber(in case of $\phi=1.0$) only. Specifically, our trends were revealed remarkably in the case of Type D which is reduced a flame contact area of sub-chamber side of the passage-hole.

주요기술용어 : Combustion Characteristics(연소특성), Stratified Charge(층상급기), Sub-chamber(부실), Critical Passage-hole(임계연락공), Lean Mixture(희박혼합기)

1. 서 론

최근 인구의 증가와 문명의 발달로 가속화된 석유계 연료의 고갈과 이에 따른 대기오염, 지구

온난화, 오존층파괴 등과 같은 지구환경문제에 대응하기 위해 석유대체 에너지원에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 경우, '80년대에 접어들면서부터 급속한 경제성장과 소득수준의 향상에 따라 석유소비가 급격히 증가하게 되었으며, 자가용 승용차의 대중화에 따른 자동차의 급속한 증가로 도심지역의 대기오염에서

* 정회원, 한국에너지기술연구소 수송기술연구팀

** 정회원, 충남대학교 공과대학 기계공학과

자동차 배기가스가 차지하는 비중이 날로 증가하는 추세에 있어 저공해 대체연료의 개발은 필요 불가결하다. 특히, 지난 '90년과 '92년 미국에서 개정된 대기정화법(CAAA)과 에너지정책법(EPA)은 자동차 배기가스에 대한 규제강화는 물론 연비규제도 한층 강화되었으며, 이와 유사한 규제안이 캐나다, EU 등을 중심으로 검토되고 있다. 현재까지 선진각국의 자동차 제조업체에서 개발중에 있는 연구결과에 의하면, 배기가스규제와 연비규제를 동시에 만족시켜줄 수 있는 대체연료로는 전기, 메타놀, 에타놀, 수소, 압축 천연가스(CNG) 등이, 연소기술로는 회박연소가 가장 유용한 것으로 알려지고 있다.^{1)~5)} 그러나, 회박연소를 행할 경우에는 초기점화의 불안정성과 연소속도의 저하 등으로 엔진출력이 저하함은 물론 운전성의 문제가 야기되는 등 아직도 실용화를 위한 몇몇 해결과제가 상존하고 있다.⁶⁾

이에 전보⁷⁾에서는 메탄이 주성분인 천연가스를 총상급기(stratified charge)방식으로 회박연소시키기 위해 원통형의 부실식 정적연소실을 이용, 유동이 정지된 상태에서 주·부실내에 공급되는 메탄-공기 예혼합기의 당량비와 연락공의 직경변화에 따른 연소특성에 대해 고찰하였다. 그 결과, 주·부실내 공급당량비가 이론혼합기에 가까울수록 압력상승개시시기와 전 연소시간은 단축되고, 최고연소압력도 증가하였으며, 주실내 혼합기의 착화는 부실내 혼합기가 이론혼합기 부근일때 양호하고 주실내 공급당량비보다는 부실내 공급당량비가 압력상승개시시기와 전 연소시간에 더 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한, 총상혼합기를 공급함으로써 단실내 메탄-공기 예혼합기의 가연한계 이하인 회박혼합기 영역에서도 연소가 가능했으며, 주실내 혼합기의 회박 가연한계는 연락공 직경에 의해 변하지만 $(\phi_m)_c = 0.46$ 이하로 나타났다. 한편, 연소압력 및 연소시간에 경계가 되는 임계직경의 경우 주실내 혼합기가 $\phi_m = 0.55$ 이하로 되면 초분산연소 형태가 아닌 회박혼합기 특유의 연소특성이 나타났다.

따라서, 본보에서는 전보의 결과를 토대로 주·부실내에 공급되는 메탄-공기 예혼합기의 당량

비와 임계직경을 갖는 연락공의 형상을 변화시켰을 때의 연소압력, 연소시간, 열발생을, 이온신호, 화염발광량신호, 화염전파과정 및 화염온도 등과 같은 연소특성과 NOx 농도에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig.1은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실(주실 : 내경 80mm, 폭 40mm, 부실 : 직경 30mm, 폭 40mm), 점화장치, 혼합기 제조장치, 압력 측정장치, 이온 및 화염발광량신호 측정장치, 쉐리렌사진 촬영장치, 온도측정장치, NOx 측정장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다.

이들에 대한 사항은 전보⁷⁾에 상세하게 기술하였기 때문에 생략하고 여기서는 쉐리렌사진 촬영장치, 온도측정장치 그리고 NOx 측정장치에 대해서만 간략하게 설명하기로 한다.

연소실내의 화염전파과정은 Xenon pulse type의 Light source(Cordin사 Model 359, maximum energy : 1,100mJ), Schlieren concave mirror(초점거리 1.5m, 유효직경 250mm)등으로 구성된 광학시스템으로 가시화 하였고, 쉐리렌사진 촬영에는 드럼형의 16mm 고속도카메라(Cordin사 Model 350F, maximum framing rate : 35,000FPS)와 ASA 100의 Kodak제 Tri Plus-X film을 사용하였다.

연소실내의 화염온도는 세션직경(Engelhard사)이 $75\mu\text{m}$ 인 백금과 백금-13% 로듐(Pt/Pt-13% Rh) 합금선을 사용하여 제작한 R형의 열전대 프로브(Fig.2의 (a) 참조)로 Fig.2의 (b) 위치에서 측정하였다. 열전대의 온도변화에 따른 전압신호는 DC 증폭기(Analog Design사 Model ADL-8731T)를 통해 게인 200배의 크기로 증폭시켜 압력신호, 이온 및 화염발광량신호와 같이 Interface board(NI사 model AT-MIO-16L, maximum sampling rate : 100kHz)를 거쳐 컴퓨터 디스크에 저장, 절대온도로 환산하였다.

연소가 종료된 후 MOx 농도를 분석하기 위해

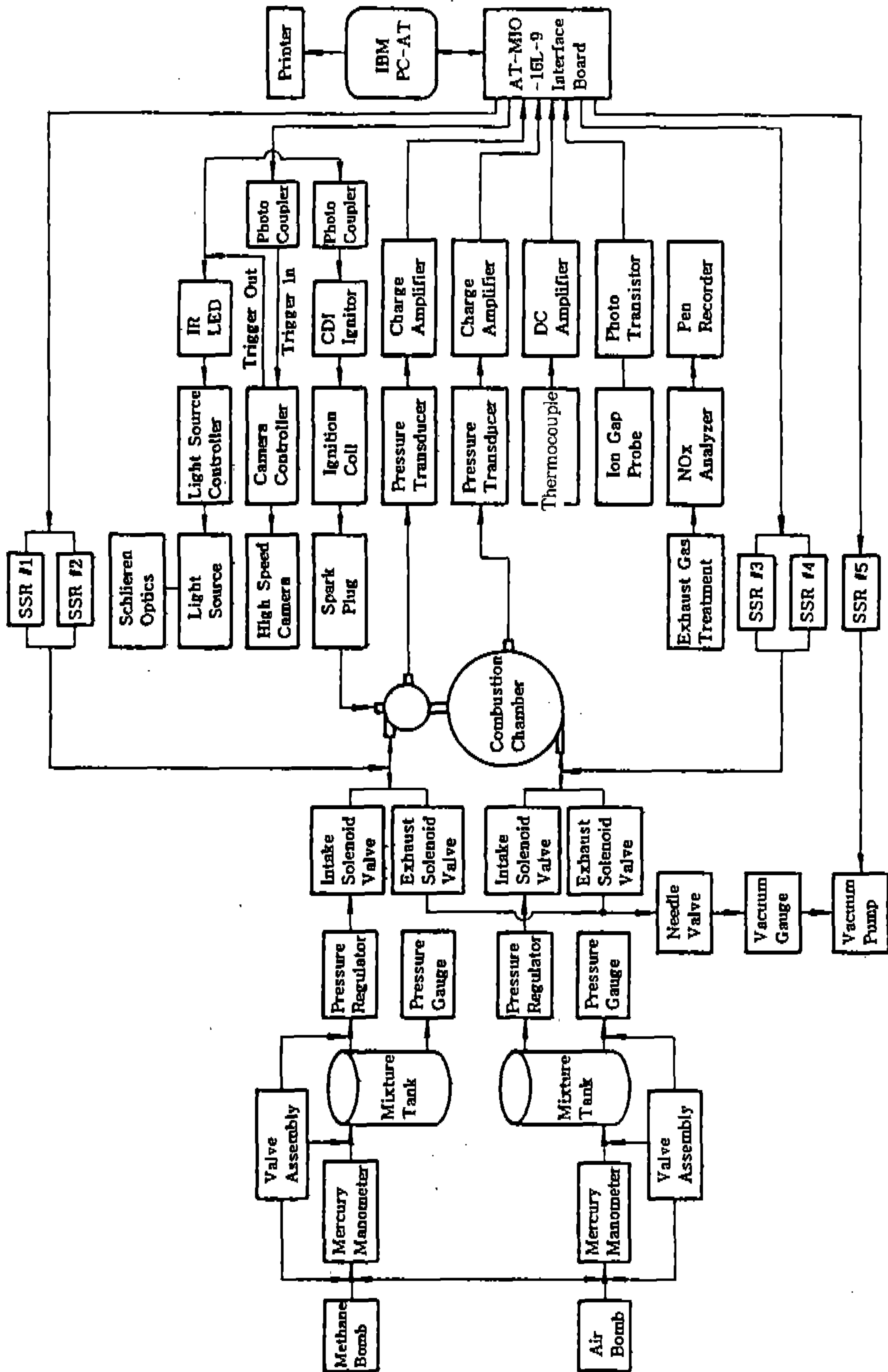
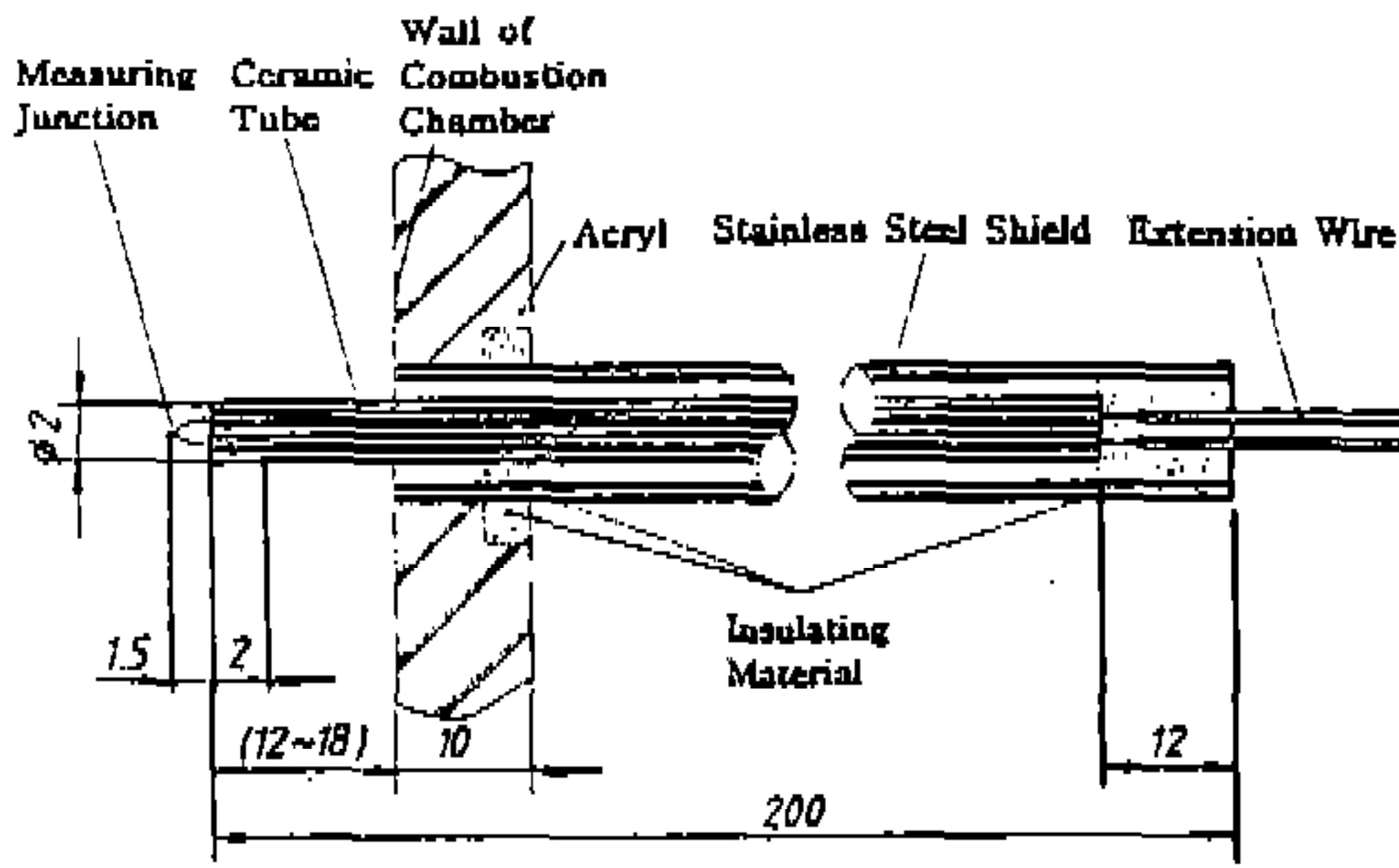
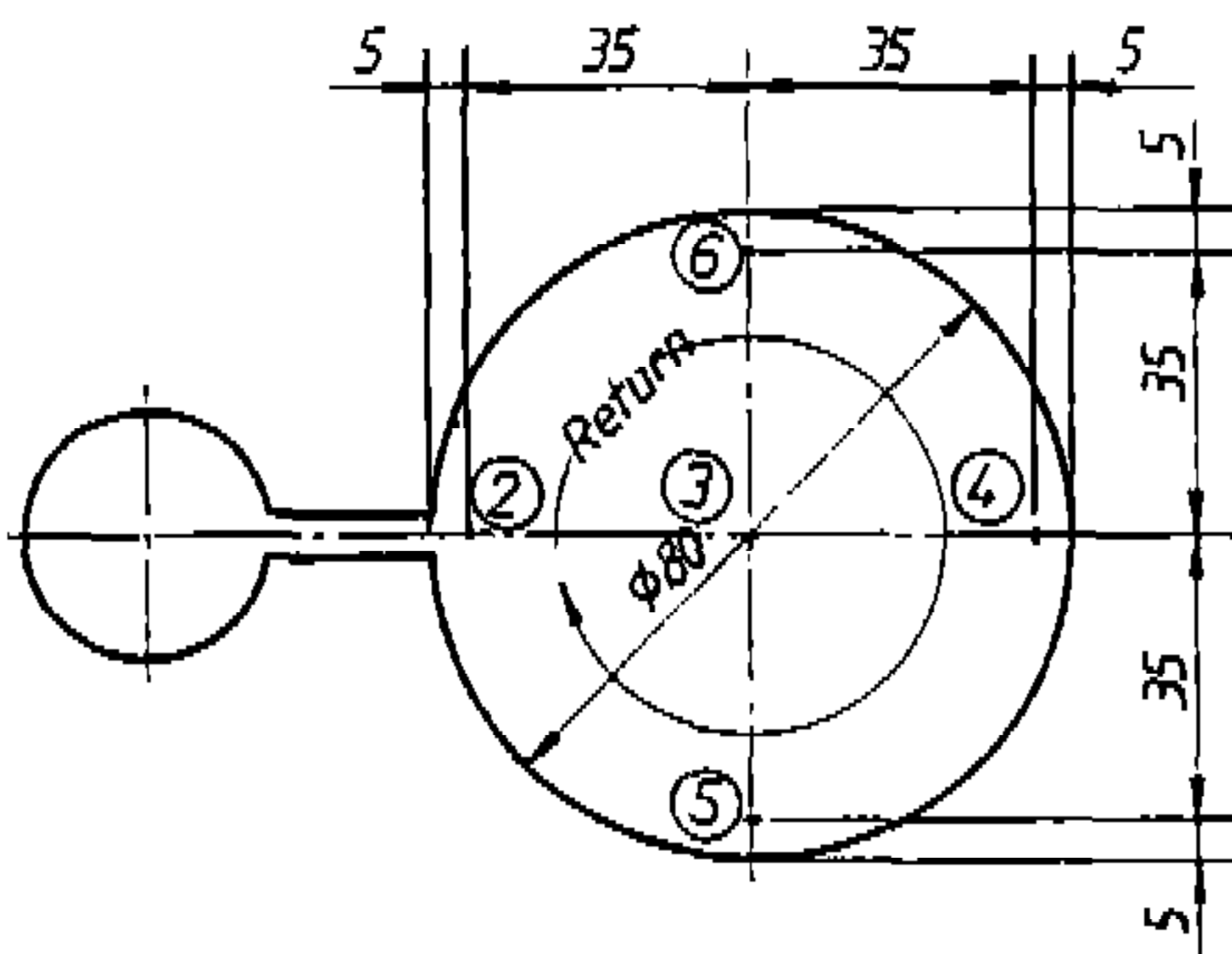


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Thermocouple probe (Type R)



(b) Measuring positions

Fig.2 Details of the thermocouple probe and measuring positions

Table 1 Matrix of equivalence ratio

ϕ_t	ϕ_s	ϕ_m	ϕ_t	ϕ_s	ϕ_m
1.0	0.9	1.01	0.7	0.9	0.67
	1.0	1.00		1.0	0.66
	1.1	0.98		1.1	0.64
	1.2	0.97		1.2	0.63
	1.3	0.96		1.3	0.62
0.9	0.9	0.90	0.6	0.9	0.56
	1.0	0.88		1.0	0.54
	1.1	0.87		1.1	0.53
	1.2	0.86		1.2	0.52
	1.3	0.84		1.3	0.51
0.8	0.9	0.78	0.5	0.9	0.44
	1.0	0.77		1.0	0.43
	1.1	0.76		1.1	0.42
	1.2	0.74		1.2	0.40
	1.3	0.73		1.3	0.39

시료병(내용적 3000cc), 아르곤 가스병, 진공펌프 등으로 구성된 연소가스 희석장치를 제작하였으며, NOx 농도분석은 화학발광반응법에 의한 NOx 분석기(Thermo Electron사, model 10AR, flow rate : 2scfh)를 이용하였다.

2.2 실험방법

실험방법 및 순서는 다음과 같다. 먼저 연소실내를 진공상태로 만든 후, 주실측의 연락공 하단을 총상급기용 로드로 막은 상태에서 혼합기 제조장치에 의해 만들어진 예혼합기를 주·부실내로 압력조정기를 통하여 1.5kg/cm(실온)의 초기 압 상태로 각각 충전한다. 3분 후, 연소실내 혼합기의 유동이 정지되고 총상급기용 로드를 주실 하단의 어댑터안으로 이동시키고 나면, 컴퓨터로부터 발생된 트리거신호에 의해 고속도카메라의 셔터가 열리게 되며, 이 Shutter open signal에 의해 CDI와 Light source가 동작하여 연소실내 혼합기의 점화와 쉐리렌사진 촬영이 행해진다. 쉐리렌 사진 촬영을 하지 않을 경우에는 컴퓨터의 트리거신호를 동기신호로 사용하였다.

Table 1은 연소실내에 공급되는 혼합기의 당량비를 나타낸 것으로, 주·부실내 혼합기의 총공급당량비와 부실내 혼합기의 공급당량비는 각각 $\phi_t=0.5\sim 1.0$, $\phi_s=0.9\sim 1.3$ 으로 하였다.

Table 2는 실험에 사용된 5종의 연락공 형상 및 치수를 나타낸 것으로, 연락공 직경은 연소압력 및 연소시간에 경계가 되는 임계직경($d=5.5$ mm)을 그리고 연락공 형상은 주·부실내에 균일 혼합기를 공급하여 실험한 결과 연소촉진효과가 양호하게 나타난 타입⁹⁾을 택하였으며, 편의상 본 연구에서는 주·부실측의 연락공 형상에 따라 A, B, C, D 및 E 타입으로 구분하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 먼저 주·부실내 혼합기의 공급당량비와 연락공 형상변화가 압력상승개시시기와 전 연소시간, 최고연소압력 등의 연소특성에 미치는 영향을 고찰한 후, 희박혼합기 특유의 연소특성이 나타나는 희박가연한계 근방의 혼합기

Table 2 Configuration and dimension of passage-holes

Type	A	B	C
Configuration and dimension			
	$d = 5.5\text{mm}$	$d = 5.5\text{mm}$ $\alpha = 10^\circ$	$d = 5.5\text{mm}$ $l = 10\text{mm}$
Type	D	E	주) B, C, D 및 E 타입 연락공의 외형치수는 A 타입 연락공의 외형치수와 동일함.
Configuration and dimension			
	$d = 5.5\text{mm}$ $l = 10\text{mm}$	$d = 5.5\text{mm}$ $l = 10\text{mm}, \alpha = 10^\circ$	

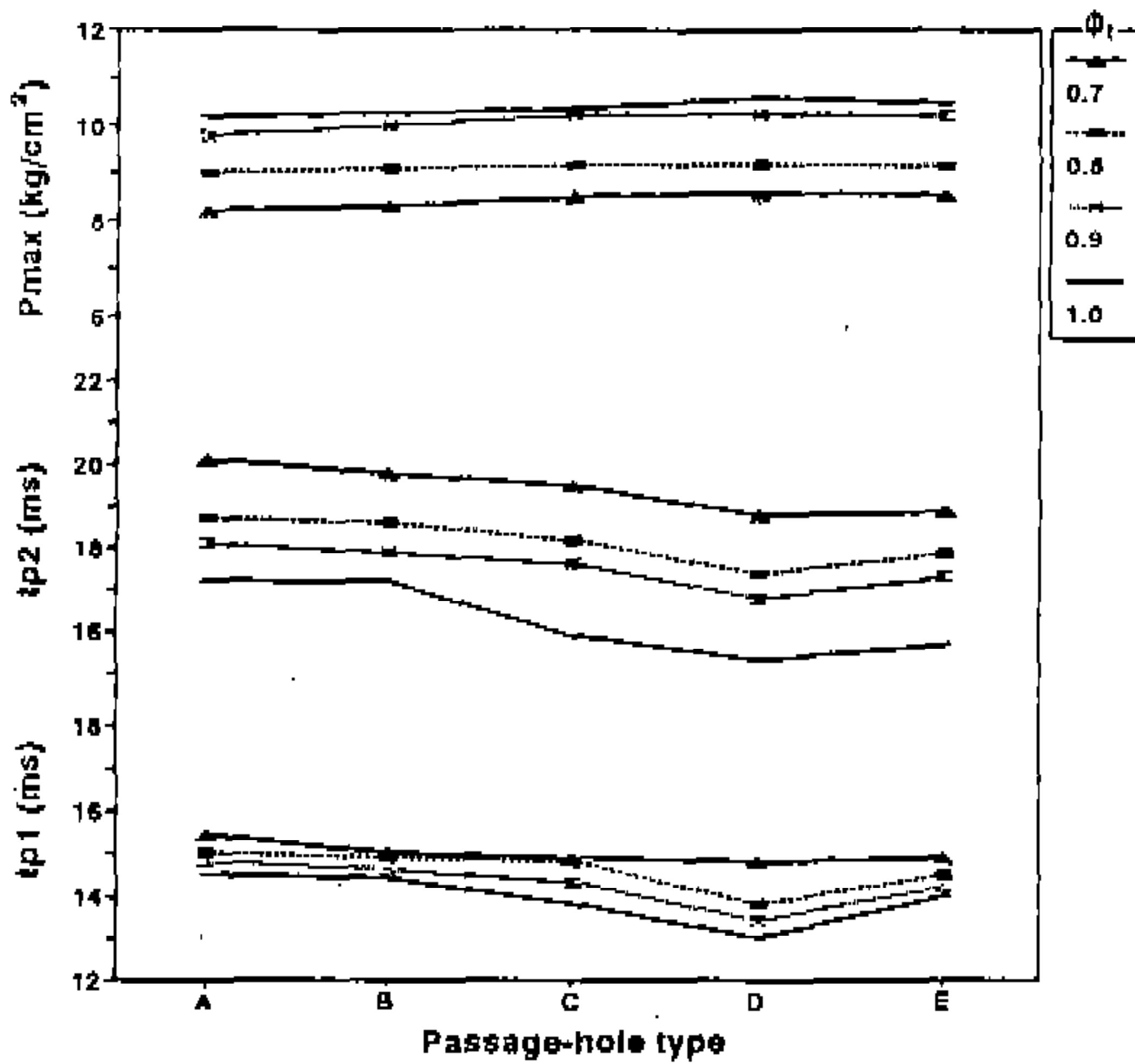


Fig.3 Combustion characteristics of stratified charge ($\phi_s = 1.0, \phi_t = 0.7 \sim 1.0$)

를 택하여 이를 중심으로 연락공 형상변화에 따른 연소특성을 분석하기로 한다. 한편, 본 실험은 어느정도의 편차를 수반하기 때문에 동일조건에서 10회 이상 실험을 행하고 그 평균치를 측정하였으며, 실험결과를 고찰함에 있어 사용된 열발생을 계산과 연소압력 특성시간은 참고문헌 [8]에 상세히 기술하였기 때문에 생략하기로 한다.

3.1 주·부실내 공급당량비와 연락공 형상변화에 따른 영향

Fig.3은 부실내 혼합기의 공급당량비를 $\phi_s = 1.0$ 으로 고정하고 입계직경을 갖는 주·부실측 연락공 형상과 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비를 $\phi_t = 0.7 \sim 1.0$ 으로 변화시켰을 때의 주실내 압력상승개시시간(t_{p1}), 전 연소시간(t_{p2}), 최고연소

압력(P_{max})을 각각 비교하여 나타낸 것이다.

먼저 압력상승개시시간 t_{p1} 은 연락공 형상에 관계없이 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비 ϕ_t 가 희박혼합기측에서부터 이론혼합기인 $\phi_t=1.0$ 에 가까울 수록 단축되었으며, 특히 부실측 연락공형상이 원통형인 D타입의 경우에 가장 단축되었다. 일례로 D타입의 t_{p1} 은 $\phi_t=0.7$ 에서 14.8ms이지만 $\phi_t=1.0$ 에서 13.0ms로 1.8ms 정도 단축되었고, 동일한 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비 $\phi_t=1.0$ 에서 A타입의 t_{p1} 은 14.5ms이지만 D타입의 t_{p1} 은 13.0ms로 1.5ms정도 단축되었다. 그러나 전체적으로 볼때 각각의 연락공 형상과 ϕ_t 의 변화에 따른 t_{p1} 은 13.0~15.4ms의 범위로 그리 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

전 연소시간 t_{p2} 또한 t_{p1} 과 같은 경향을 나타내지만, ϕ_t 와 연락공 형상변화에 따른 t_{p2} 의 단축은 t_{p1} 의 단축에 비해 더 크게 나타나고 있다. 일례로 D타입의 t_{p2} 는 $\phi_t=0.7$ 에서 18.8ms인 반면 $\phi_t=1.0$ 에서 15.3ms로 3.5ms정도 단축되었으며, 동일한 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비 $\phi_t=1.0$ 에서 A타입의 t_{p2} 는 17.2ms 이지만 D타입의 t_{p2} 는 15.3ms로 1.9ms정도 단축되었다. 따라서 부실내 혼합기의 공급당량비 ϕ_s 가 일정할 때 연락공 형상과 ϕ_t 의 변화는 t_{p1} 보다 t_{p2} 에 더 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 부실내 동일 혼합기 즉, $\phi_s=1.0$ 인 조건하에서 형성된 화염전면은 연락공 형상에 따라 주실내 혼합기의 착화시기에만 약간 영향을 미칠 뿐, 결국 주·부실내 혼합기의 혼합에 따른 당량비 변화에 의해 화염전파속도가 변화하여 전 연소시간에 더 크게 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

한편, 연락공 형상과 ϕ_t 변화에 따른 주실내 최고연소압력 P_{max} 는 연락공 형상에 관계없이 $\phi_t=1.0$ 에서 가장 높으나 ϕ_t 가 희박혼합기 측으로 갈 수록 점차 감소하고 있으며, 동일 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비에서는 D타입의 경우가 다른 타입에 비해 다소 높으나 절대값으로 비교할 때 큰 차이는 없다.

Fig.4는 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비를 $\phi_t=1.0$ 으로 고정하고 임계직경을 갖는 주·부실측 연락공 형상과 부실내 혼합기의 공급당량비를

$\phi_s=0.9\sim 1.3$ 으로 변화시켰을 때의 t_{p1} , t_{p2} 및 P_{max} 를 각각 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 보는바와 같이 ϕ_s 의 변화는 t_{p1} 에 크게 영향을 미치고 있으며, 특히 $\phi_s=1.0$ 부근에서 t_{p1} 은 가장 짧고 연락공 형상변화에 따른 t_{p1} 의 단축효과가 크게 나타나고 있는 반면, 과농혼합기인 $\phi_s=1.3$ 부근에서 t_{p1} 은 가장 길며 연락공 형상변화에 따른 t_{p1} 의 단축효과도 크지 않다. 일례로 D 타입의 t_{p1} 은 $\phi_s=1.3$ 에서 18.8ms이지만 $\phi_s=1.0$ 에서 13.0ms로 5.8ms정도 단축되고 있으며, 동일한 부실내 혼합기의 공급당량비 $\phi_s=1.3$ 에서는 A타입의 t_{p1} 은 19.0ms이고 D타입의 t_{p1} 은 18.8ms로 0.2ms정도 단축되고 있다. 이는 주실내 혼합기의 착화시기가 부실내 혼합기의 화염전파속도에 따라 크게 영향을 받기 때문으로 화염전파속도가 가장 빠른 $\phi_s=1.0$ 인 조건에서는 주실내 착화가 일찍 일어난 반면, 화염전파속도가 가장 느린 $\phi_s=1.3$ 인 조건에서는 주실내 착화가 늦게 일어나기 때문이다.

또, 상술한 t_{p1} 에서와 같이 t_{p2} 는 화염전파속도가 가장 빠른 $\phi_s=1.0$ 에서 가장 짧은 반면 화염전파속도가 느린 $\phi_s=1.3$ 에서 가장 길다. 동일 ϕ_s 조건하에서 t_{p2} 는 D타입의 경우가 가장 짧게 나타나고 있으며, 특히 $\phi_s=1.0$ 인 경우에 연락공

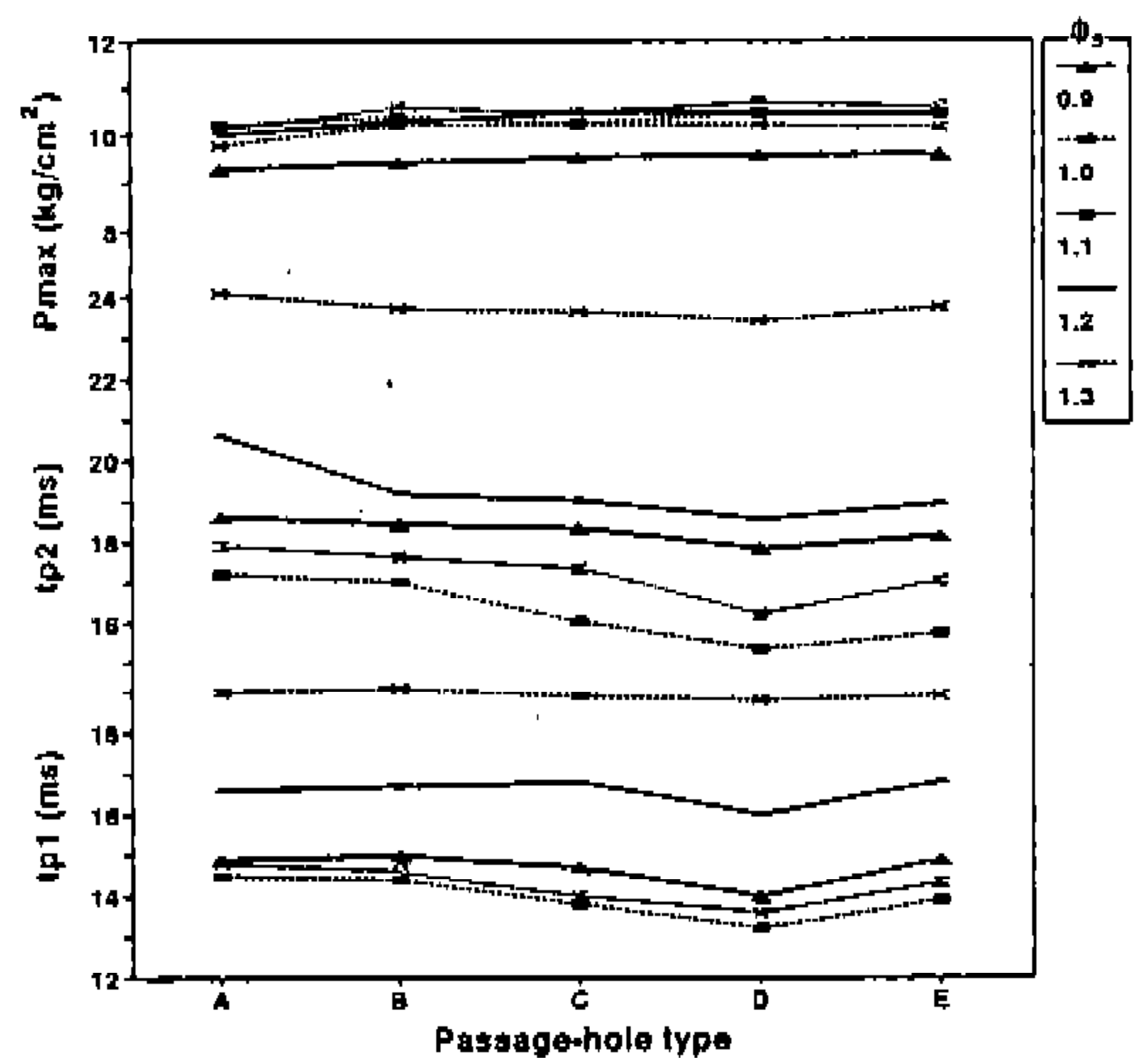


Fig.4 Combustion characteristics of stratified charge($\phi_t=1.0$, $\phi_s=0.9\sim 1.3$)

형상변화에 따른 t_{p2} 의 단축효과가 큰 반면 과농 혼합기측으로 갈 수록 연락공 형상변화에 따른 단축효과는 그리 크지 않다. 일례로 D타입의 t_{p2} 는 $\phi_s=1.3$ 에서 23.4ms이지만 $\phi_s=1.0$ 에서 15.3ms로 8.1ms정도 단축되고 있으며, 동일한 부실내 혼합기의 공급당량비 $\phi_s=1.3$ 에서 A타입의 t_{p2} 는 24.1ms이고 D타입의 t_{p2} 는 23.4ms로 0.7ms정도 단축되고 있다. 이는 상술한 바와 같이 부실내 혼합기의 화염전파속도와 연락공 형상변화에 기인하기 때문이다. 따라서, 연락공 형상이 동일한 조건에서는 주실내 혼합기의 공급당량비보다는 부실내 혼합기의 공급당량비가 전 연소시간에 더 크게 영향을 미친다고 생각할 수 있으며, 이와 같은 결과는 飯沼⁹⁾, 五味¹⁰⁾ 등의 연구결과와 대체로 일치하고 있다.

한편, 연락공 형상과 ϕ_s 의 변화에 따른 P_{max} 는 $\phi_s=1.0\sim 1.1$ 에서 가장 높고 ϕ_s 가 희박혼합기 또는 과농혼합기($\phi_s=0.9$ 나 1.3) 측으로 갈 수록 점차 감소하고 있으며, 동일 ϕ_s 에서 D타입의 경우가 다른 타입에 비해 다소 높게 나타나고 있으나 대체로 연락공 형상에 관계없이 비슷한 값을 보이고 있다.

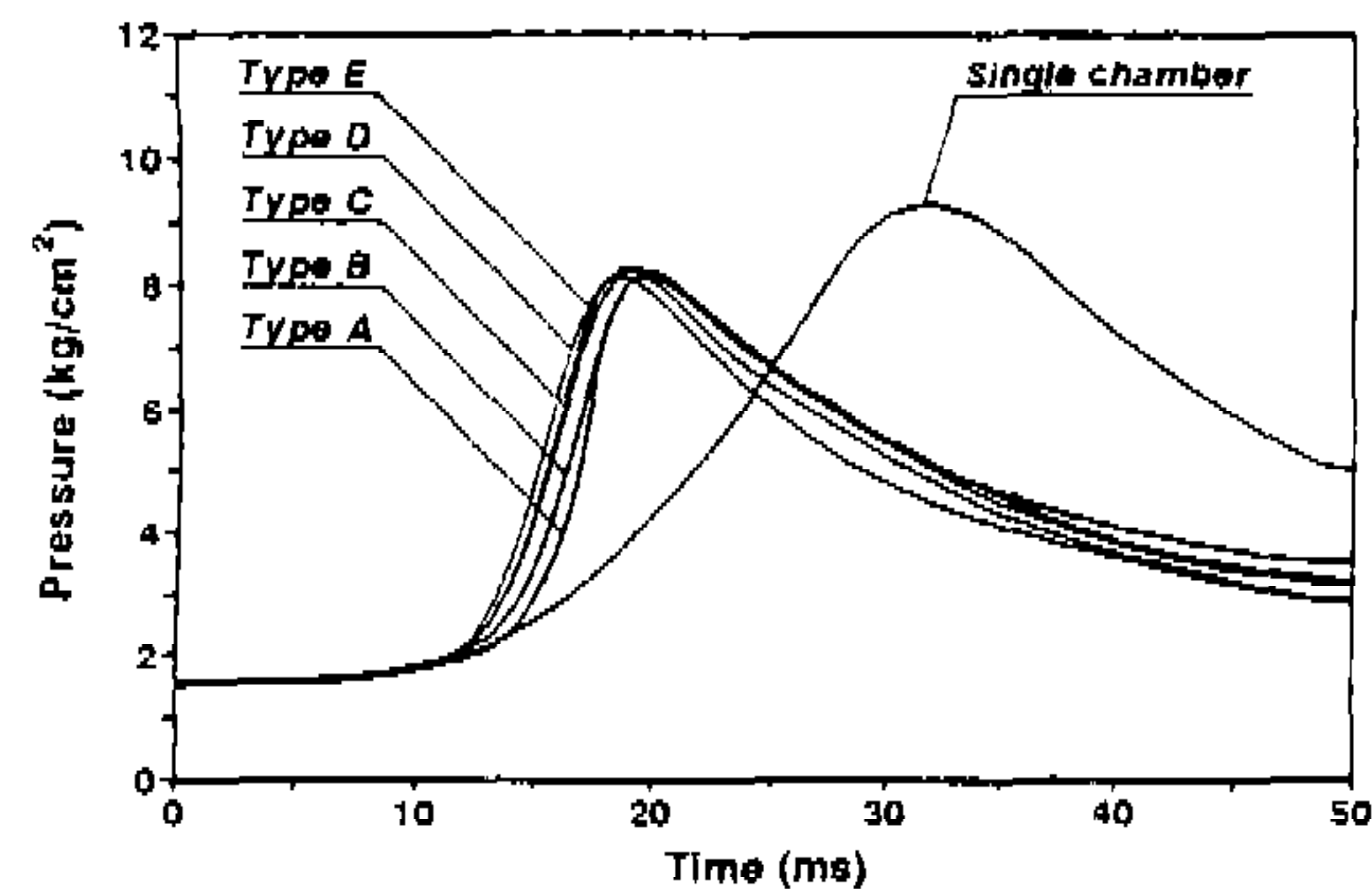
이상 Fig.3과 Fig.4로부터 알 수 있듯이, 부실내 공급당량비를 $\phi_s=1.0$ 으로 고정하고 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비 ϕ_t 와 연락공 형상을 변화시켰을 때 t_{p1} , P_{max} 보다 t_{p2} 가 약간 더 크게 영향을 받고 있으며, 또한 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비를 $\phi_t=1.0$ 으로 고정하고 ϕ_s 와 연락공 형상을 변화시켰을 때의 t_{p1} , t_{p2} 는 ϕ_s 를 고정한 경우에 비해 더 크게 영향을 받고 있다.

3.2 희박혼합기의 연소특성

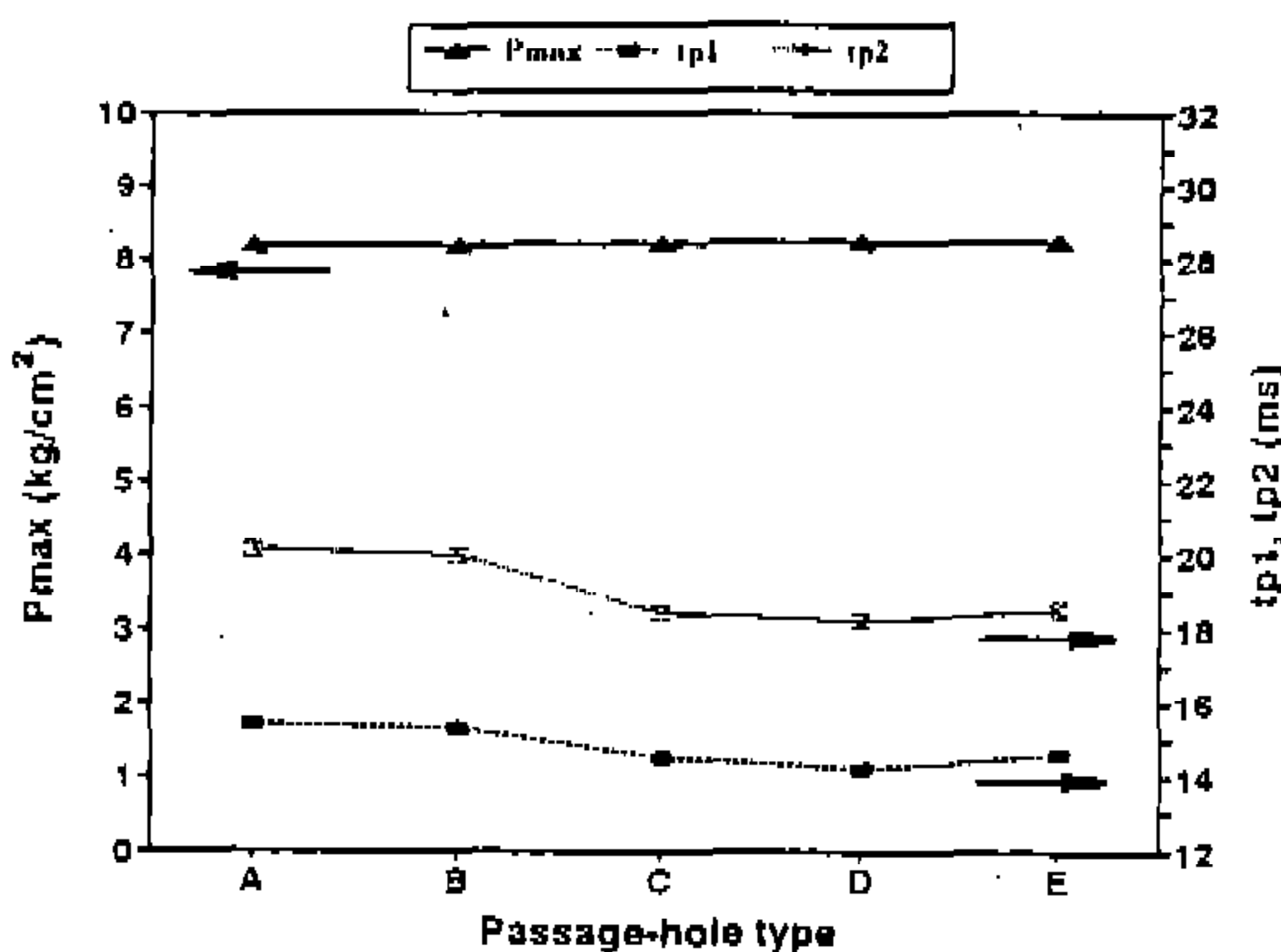
3.2.1 연소압력 및 연소시간

Fig.5는 희박혼합기 연소시의 연소특성을 파악하기 위해 희박가연한계 근방의 혼합기⁷⁾인 $\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$ ($\phi_t=0.69$ 에 해당) 조건하에서 임계직경의 주·부실측 연락공 형상변화에 따른 연소특성을 나타낸 것으로, (a)는 주실내의 압력선도를 (b)는 t_{p1} , t_{p2} 및 P_{max} 를 각각 비교한 것이다.

그림 (a)로부터 보는바와 같이 연락공 형상에 따른 압력선도의 형태는 거의 비슷하게 나타나고 있으며, 부실측 연락공 형상이 원통형인 D타입의 경우가 다른 타입에 비해 최고연소압력이 다소 높고 전 연소시간도 약간 단축되고 있다. 또 D타입의 경우를 단실식 연소실(single chamber type)의 $\phi=1.0$ (중심점화)인 경우¹¹⁾와 비교해 보면 희박혼합기의 연소로 인해 D타입의 최고연소압력은 단실식 연소실의 그것에 비해 12%정도 감소된 반면, 부실식 연소실의 사용으로 인해 압력상승 개시시간과 전 연소시간은 12%와 42%정도 각각 단축되고 있다. 따라서 단실식 연소실에 부실식 총상급기 연소방식을 적용하여 임계직경을 갖는 연락공의 형상변화에 의한 희박연소를 행함으로써 최고연소압력의 큰 저하 없이 전 연소시간을 대폭적으로 단축시킬 수 있음을 알



(a) Pressure-time traces



(b) t_{p1} , t_{p2} , P_{max}

Fig.5 Combustion characteristics of stratified charge($\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$)

수 있다.

한편 t_{p1} , t_{p2} 및 P_{max} 를 나타낸 그림 (b)로부터 볼 수 있듯이, 연락공 형상변화에 따른 P_{max} 는 큰 차이가 없으나 t_{p1} , t_{p2} 는 연락공 형상에 따라 약간씩 차이가 있다. 즉, 부실측 연락공의 화염전면 접촉면적을 감소시켜준 D, E 및 C타입의 경우가 A와 B타입의 경우에 비해 t_{p1} , t_{p2} 가 단축되고 있다. 일례로 D타입의 t_{p1} , t_{p2} 는 각각 14.2ms, 18.2ms인 반면, A타입의 t_{p1} , t_{p2} 는 각각 15.4ms, 20.1ms로 나타나고 있다.

3.2.2 열발생율

Fig.6은 상기 Fig.5의 경우에 있어서 연락공 형상변화에 따른 주·부실내의 열발생율(dQ/dt) 선도를 나타낸 것으로 어느 경우에 있어서나 임계직경의 영향으로 인해 주·부실내의 열발생은 급격히 일어나고 있는 반면, 연락공 타입에 따라

열발생율의 최대값이 나타나는 시기는 약간씩 차이가 있으며, 그중 D타입의 경우가 열발생율의 최대값이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 비록 동일한 임계직경을 갖는 연락공이라 할지라도 부실측 연락공의 화염전면 접촉면적의 감소에 따라 분류의 연락공 통과시 벽면 냉각손실이 더 감소되기 때문이다.

한편, D타입의 최대열발생율의 절대값 및 그 시기를 단일식 연소실의 $\phi=1.0$ (중심점화)인 경우¹¹⁾의 그것과 비교해 보면 D타입은 $(dQ_m/dt)_{max}=0.14kJ/ms$ ($t=15.6ms$ 에서), 단일식 연소실은 $(dQ_m/dt)_{max}=0.04kJ/ms$ ($t=28.4ms$ 에서)로 나타나고 있어, D타입의 총 공급당량비가 $\phi_t=0.69$ 인 점을 감안할때 부실식 총상급기 연소방식이 열발생율 측면에서도 훨씬 더 유리함을 알 수 있다.

3.2.3 이온 및 화염발광량 신호

Fig.7은 연락공 형상변화에 따른 주실내 연소상태를 파악하기 위해 이온신호를 나타낸 것이다. $\phi_t=0.69$ 인 희박혼합기 연소조건하에서도 임계연락공 사용으로 인해 주실내의 연소는 초분산

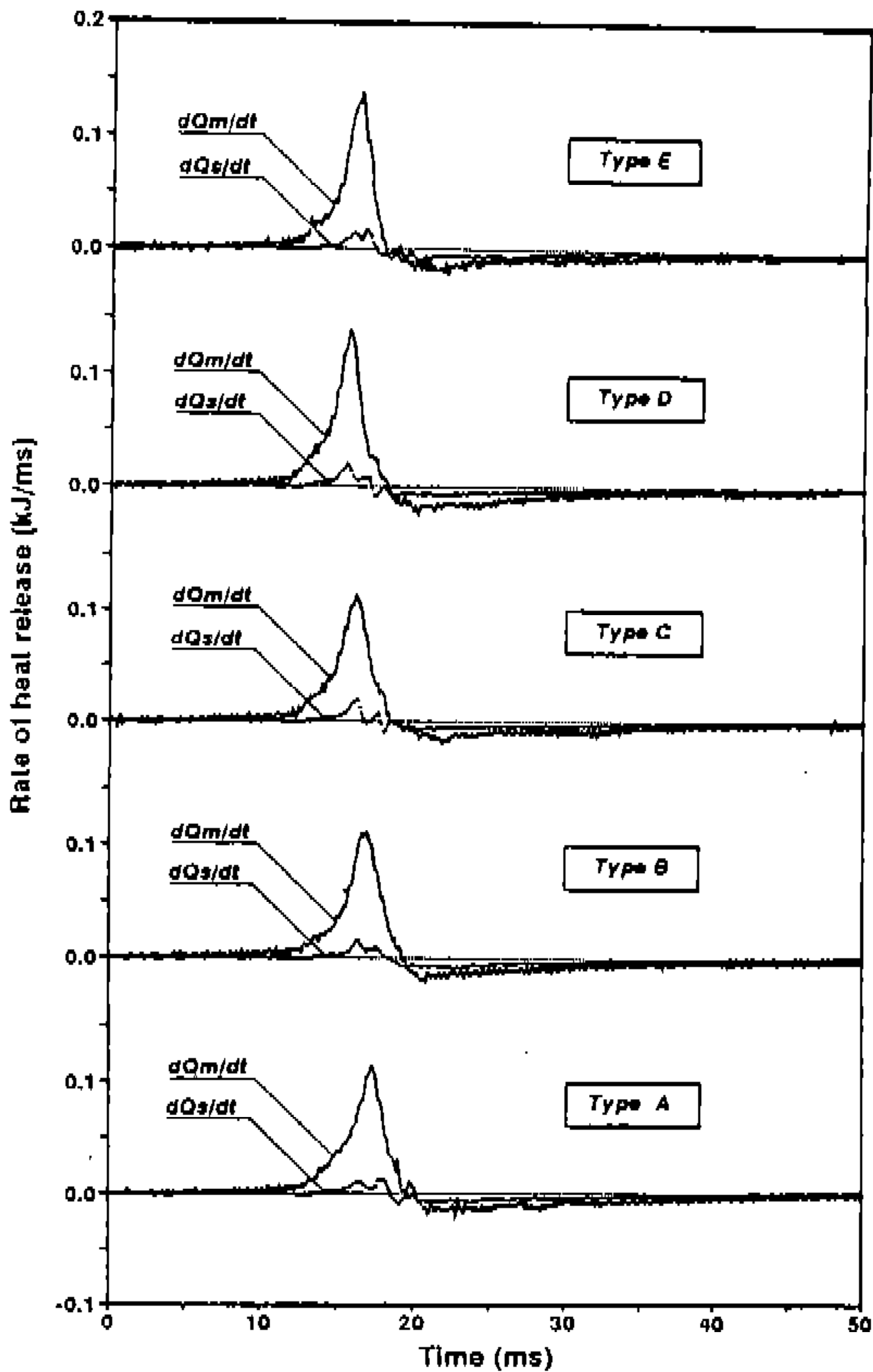


Fig.6 Rate of heat release of stratified charge($\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$)

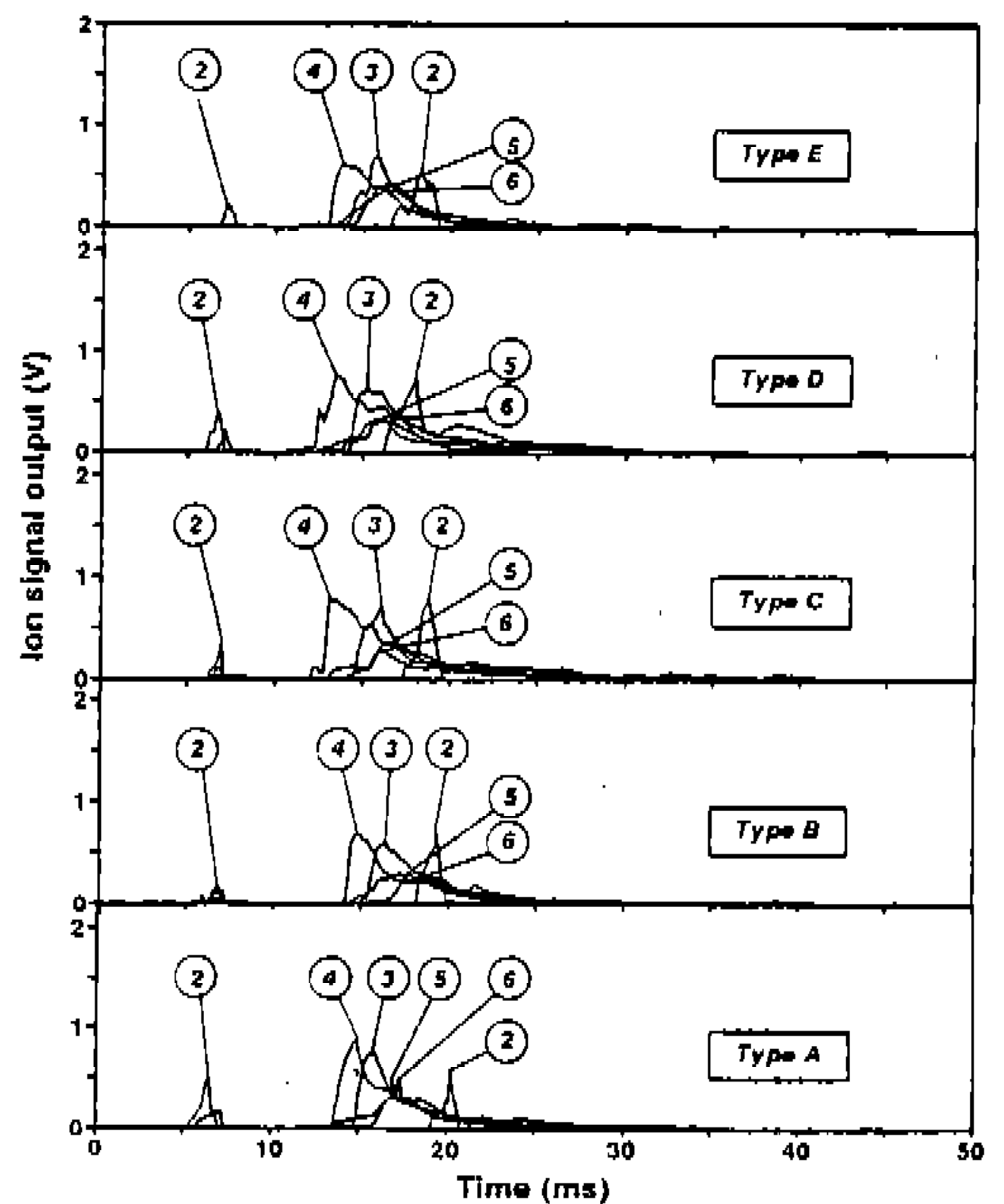


Fig.7 Ion signal output of stratified charge ($\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$)

반응대와 같은 연소형태(Photo.1 참조)로 진행 되기 때문에 연락공 분출구 바로 뒤에 설치된 ②번 위치의 이온신호는 분류의 분출 직후 6.5~8.2ms에서 아주 낮은 파형을 보인 후 지연시간을 거쳐 주실내 혼합기의 착화와 동시에 주실 후미 벽면근방에서 ④ → ③ → ⑤·⑥ → ② 순서로 급격히 최대 이온신호가 나타나고 있으며, 연락공 타입에 따라 그 시기는 약간씩 차이를 보이고 있다. 이는 비록 ②번 위치의 이온프로브가 연락공 분출구 바로 뒤에 설치되어 있다 해도 저온의 기·미연합기(후술할 화염온도 참조)가 주실내로 분출되기 때문에 아주 낮은 파형을 보이나, 지연시간을 거친 후 주실내 혼합기가 주실 후미 벽면근방에서 착화하게 되면 급격연소로 인해 상대적으로 높은 파형을 보이기 때문이다. 또, 연락공 타입에 따라 각 위치에서 이온신호가 발생하는 시기가 약간씩 차이를 보이는 것은 A, C 및 D타입의 연락공 중심축이 ②, ③, ④번 위치의 Ion gap probe와 동일 축선상에 위치한 반면, B와 E타입의 연락공 중심축은 ②, ③, ④번 위치의 Ion gap probe와 10° 각도

로 치우쳐져 설치되어 있기 때문이다.

Fig.8은 상기의 Ion gap probe 대향면 위치에 설치한 Photo transistor의 신호를 나타낸 것으로 이온신호에서와 같이 주실내 혼합기가 착화한 이후에 화염발광량신호가 발생되고 있으며, 각 측정위치에서의 화염발광량신호는 주실내 미연 혼합기가 희박한 조건이기 때문에 주실중심부에 설치된 ③번 위치의 신호만을 제외하고는 작고 완만한 형태로 나타나고 있다. 또한, 화염발광량신호가 발생하는 시기는 상기의 이온신호와 달리 분류의 분출 직후 아무런 변화가 없이 지연되다가 주실내 혼합기의 착화와 동시에 주실 후미 벽면근방에서 ④ → ③ → ⑤·⑥ → ② 순서로 나타나고 있다.

3.2.4 화염전파과정

Photo.1은 Fig.5의 경우에 있어서 연락공 형상변화에 따른 화염전파과정을 나타낸 것으로 사진 숫자위의 *표시는 분류가 주실내로 분출된 초기시간을, **는 압력상승개시시간을, ***는 연소종료시간을 각각 의미한다.

사진에 의하면 점화 직후 부실내 화염은 연락공 타입에 관계없이 약 3.0ms까지 매끈한 화염전면을 갖는 구면형의 종류화염전파를 하고 있다. 그러나, 분류화염이 연락공을 지난 후 주실내에서는 연락공의 형상에 따라 서로 상이한 화염전파형태를 보이고 있다. 즉, 연락공 통과후의 분류화염은 A, C 및 D타입의 경우는 주·부실 중심축 방향으로 진행되고 있고 B타입과 E타입의 경우는 주·부실 중심축에 대해 10° 각도로 치우쳐져 진행되고 있다.

또 A, C 및 D타입의 경우, 주실내 혼합기가 착화한 이후의 연소방향은 임계연락공의 사용으로 인해 분류화염과 역으로 주실내에 형성된 순환류에 편승하여 새날개 모양으로 연락공쪽으로 향하고, 연소가스가 주실전역에 걸쳐서 분산되어 폭발적으로 반응하는 초분산 반응대(well-dispersed burning zone)와 같은 연소형태를 취하고 있다. B와 E타입의 경우에 있어서도 이와 같은 연소형태를 띠고 있으나, 분출각도 설치로 인해 분류화염의 진행방향은 10° 각도로 치우친 상태로 진행되고 있다. 압력상승개시시기는 부실측

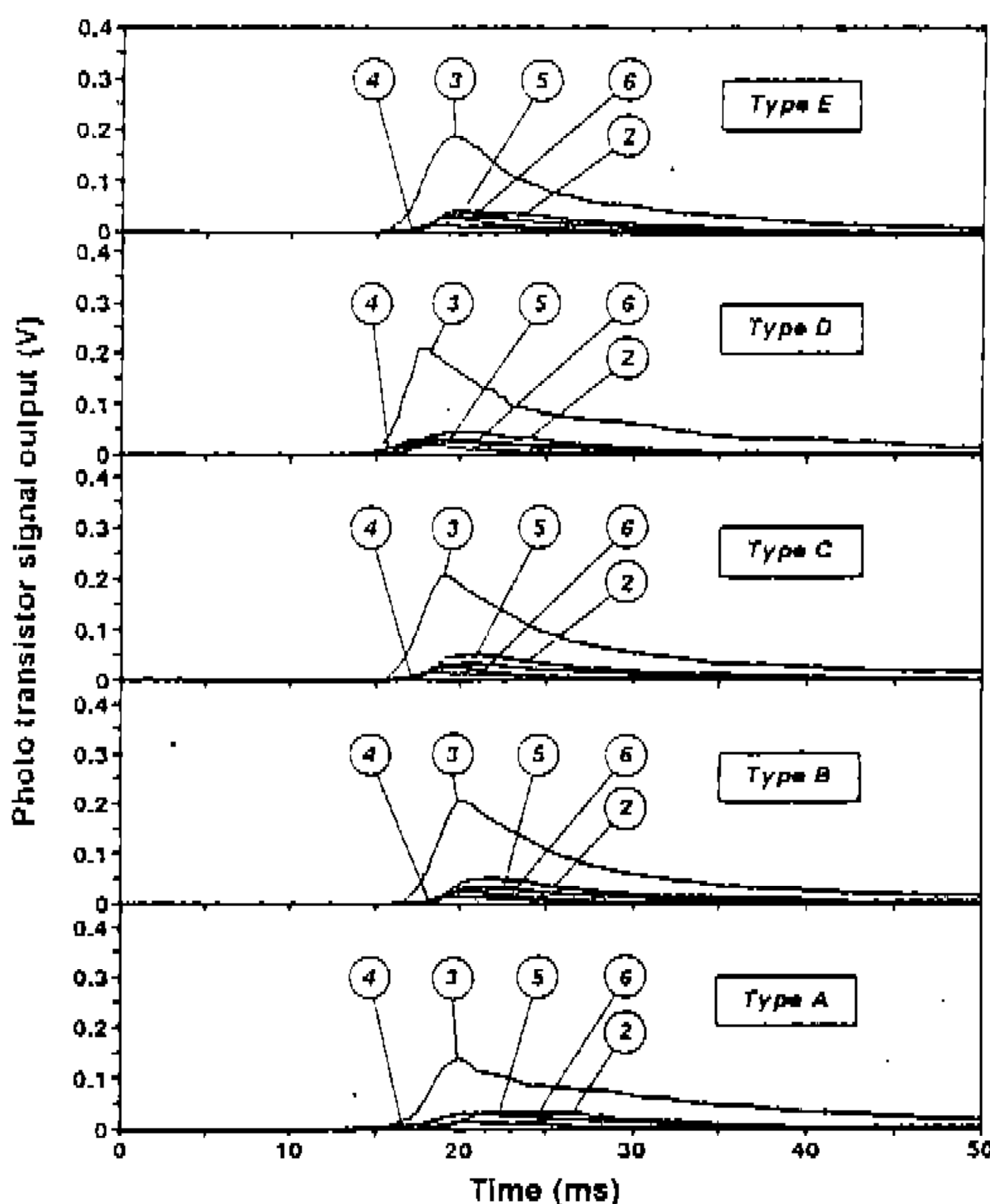


Fig.8 Photo signal output of stratified charge ($\phi_s=1.0, \phi_m=0.65$)

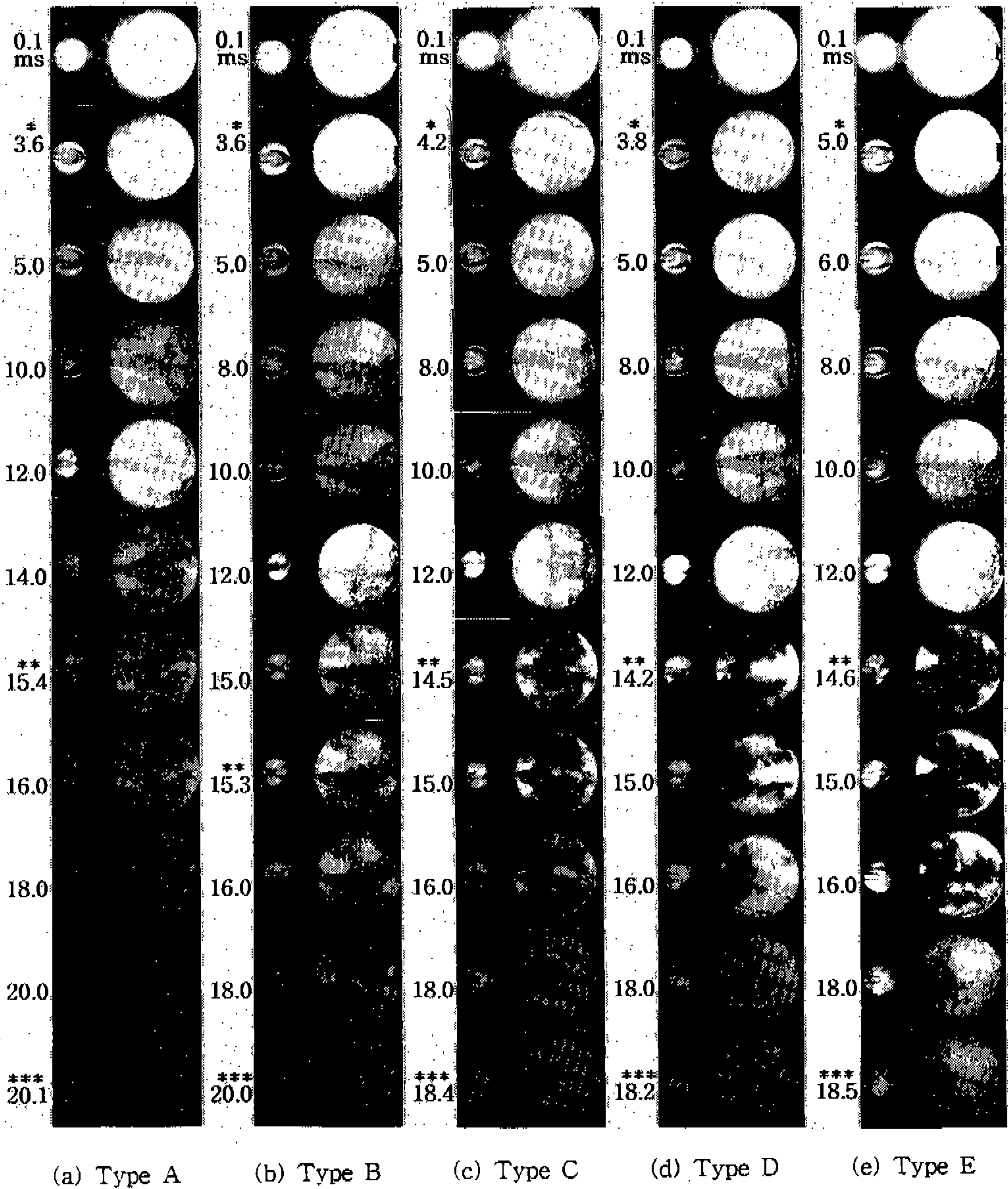


Photo.1 Schlieren photographs of flames propagating at various passage-hole types in the stratified charge ($\phi_s=1.0, \phi_m=0.65$)

연락공의 형상을 원통형과 원뿔형으로 가공한 D와 C타입의 경우가 14.2ms와 14.5ms로 비교적 빠른 반면, 부실측의 연락공 형상을 변경하지 않은 A타입과 10°의 각도를 갖는 B타입의 경우는 15.4ms와 15.3ms로 다소 느리게 나타나고 있다.

한편, 이들 화염전파과정을 Fig.7의 이온신호와 같이 비교하여 고찰해보면 주실내 혼합기의 최초착화를 나타내는 ④번 위치에서의 최대 이온신호값은 연락공 타입에 따라 차이가 있긴 하지만, 그 시기는 13.9~15.0ms 사이에서 발생되고 있어 화염전파과정 사진에 나타낸 압력상승개

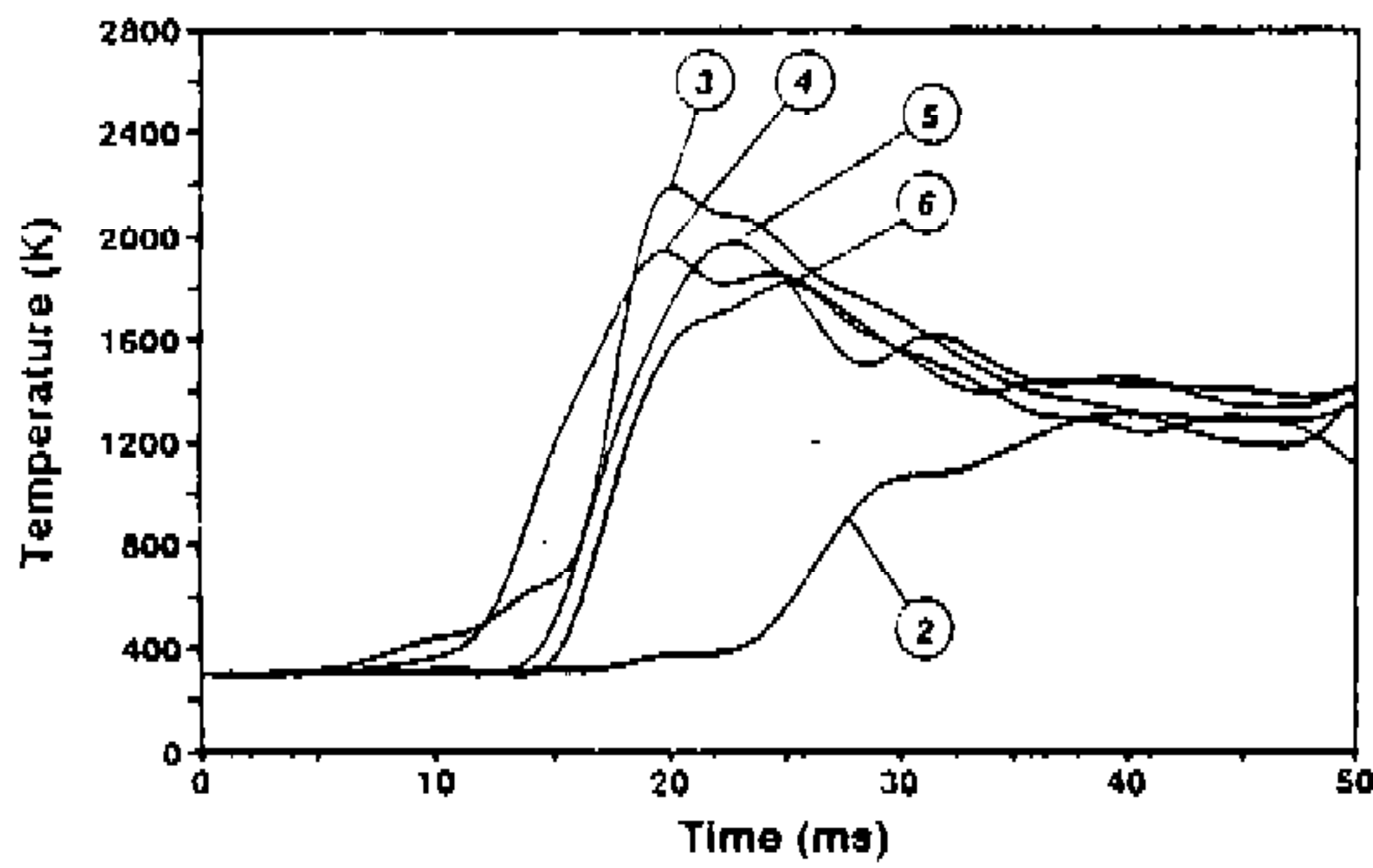
시시기 ($t_{pi}=14.2\sim 15.4ms$)보다 약간 앞서서 발생되고 있음을 알 수 있다.

3.2.5 화염온도 및 NOx 농도

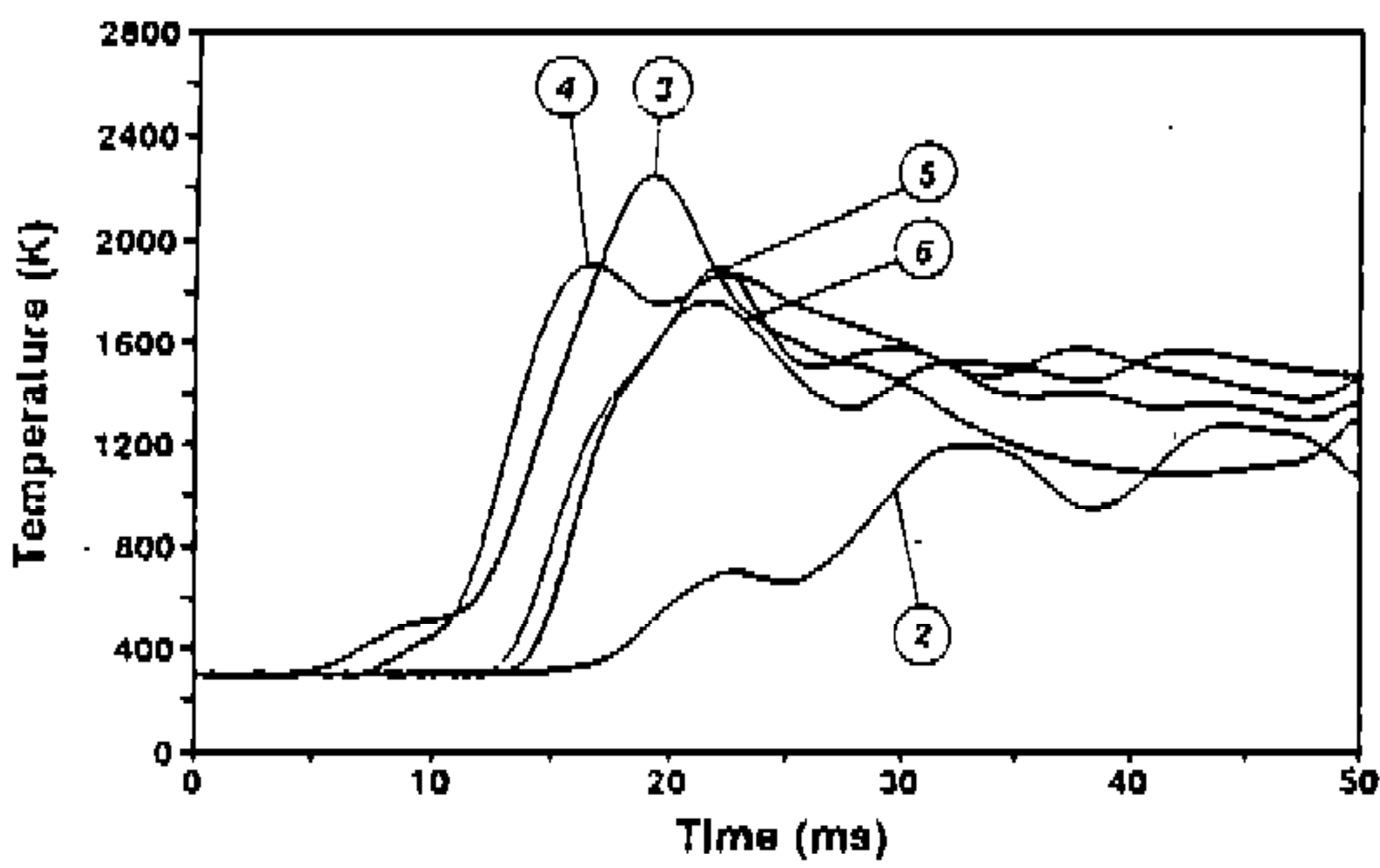
Fig.9는 희박혼합기 연소시의 주실내 온도특성을 파악하기 위해 각 열전대 위치에서 측정된 화염온도를 나타낸 것으로 그림 (a), (b) 및 (c)는 A, C 및 D 타입의 일례이다.

이들 그림으로부터 보는 바와 같이 세가지 타입 모두 연락공 분출구 바로 뒤 ②번 위치에서

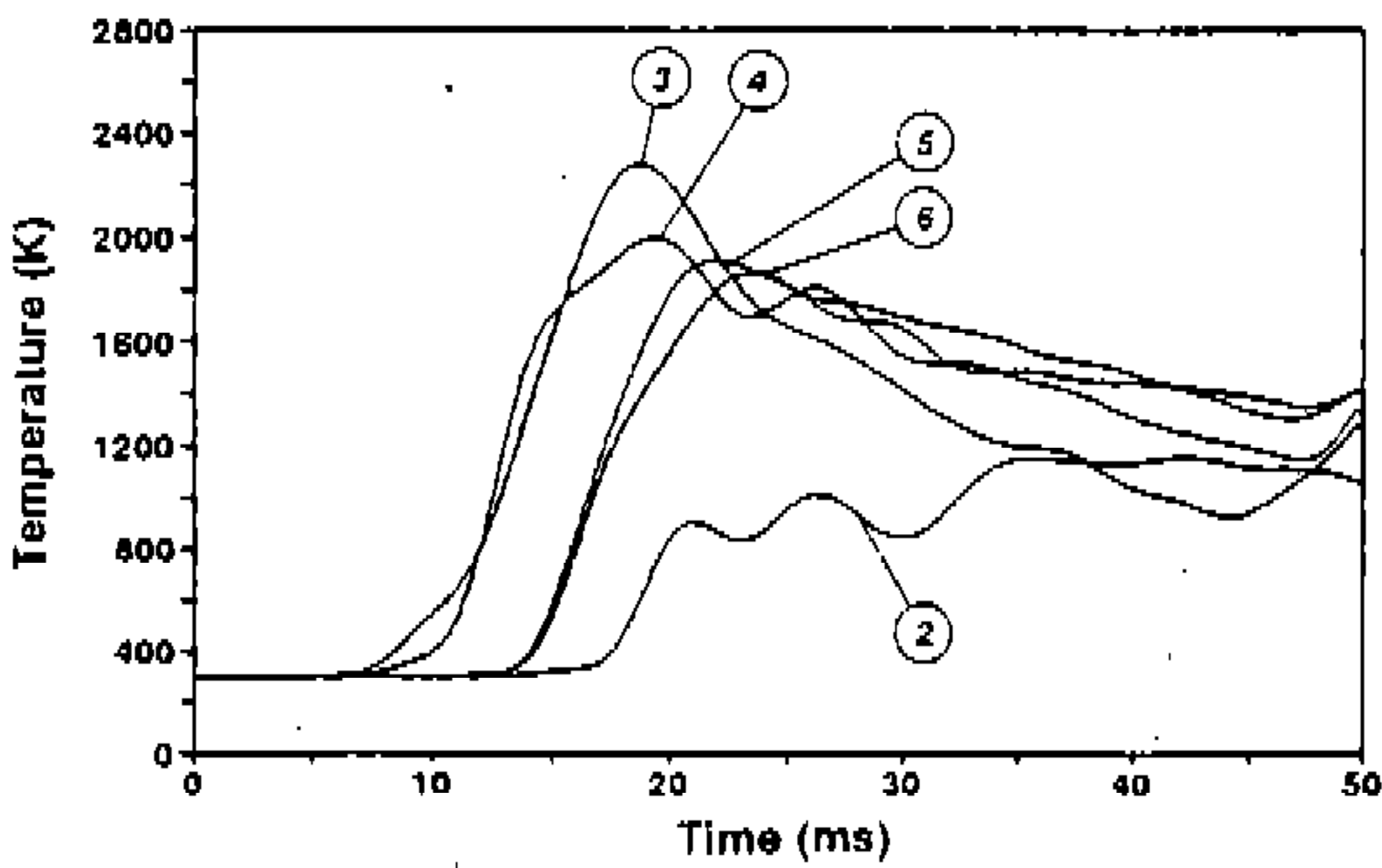
의 온도는 1200K 이하의 저온가스이며, 열전대가 분류화염에 가장 먼저 접촉되었음에도 불구하고 온도상승시기는 다른 위치의 그것에 비해 상당히 지연되고 있다. 이는 부실내에서 점화된 화염이 입계직경을 갖는 연락공을 지나는 동안 연락공 벽면으로의 냉각손실과 주실내 희박한 미연혼합기의 혼합시 야기되는 냉각손실 등으로 인하여 화염온도가 저하되었기 때문에 착화하기까지 약간의 지연시간이 필요하고 또 화염전파과정 사진에서 본 바와 같이 연소후기에는 착화시에 비해 연소가 다소 완만하게 이루어지기 때문으로 사료된다. 한편, 주실후미 벽면근방 ④번 위치와 주실중심부 ③번 위치의 온도는 주실내 혼합기의 착화와 더불어 급격히 상승하고 있으며, ③



(a) Type A

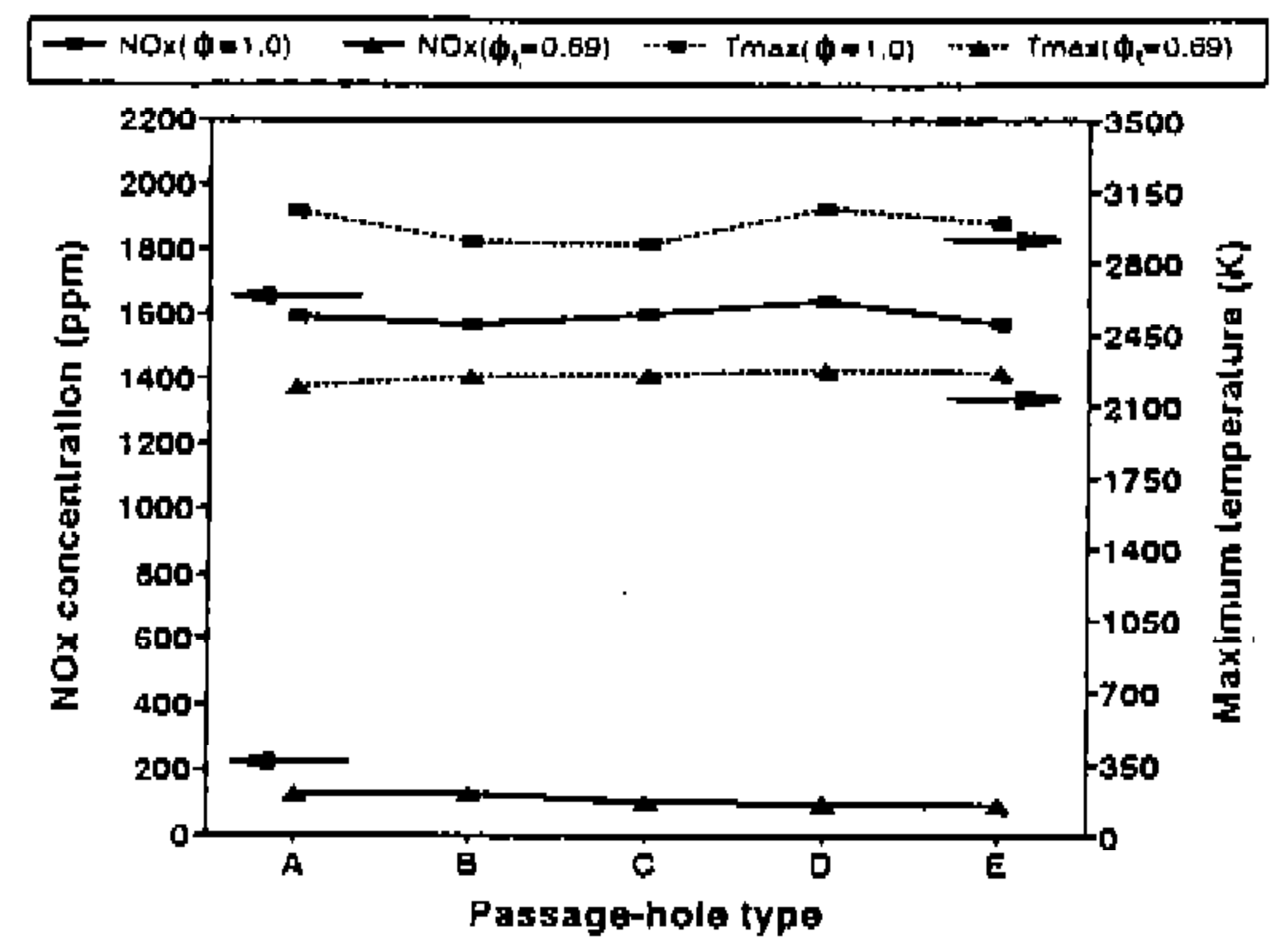


(b) Type C

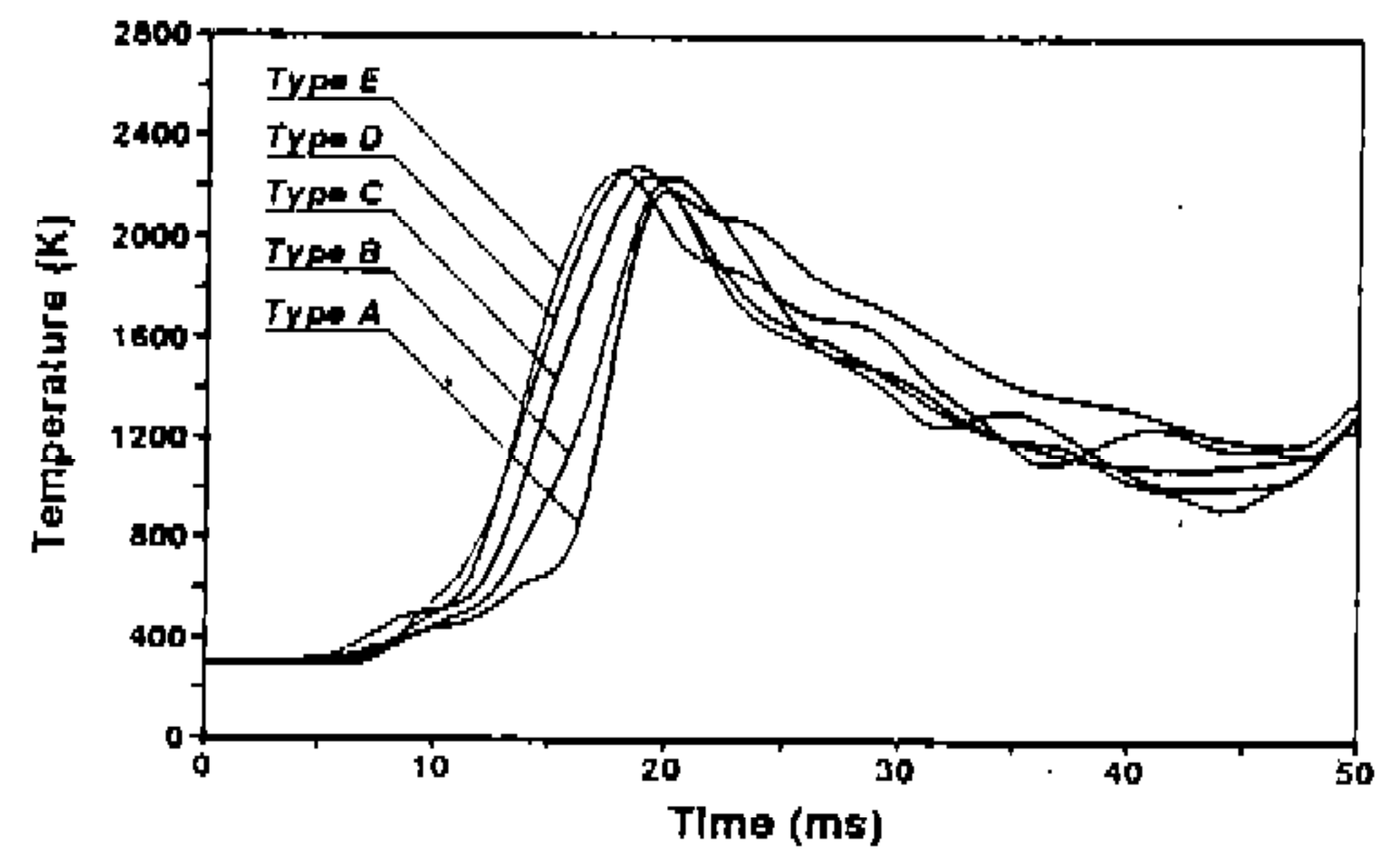


(c) Type D

Fig.9 Temperature-time traces of stratified charge ($\phi_s=1.0, \phi_m=0.65$)



(a) NOx concentration



(b) Temperature-time traces

Fig.10 NOx concentration and temperature-time traces of stratified charge ($\phi_s=1.0, \phi_m=0.65$)

번 위치에서 최고 화염온도가 나타나고 있다. ⑤와 ⑥번 위치에서의 온도는 주실중심부에 설치된 ③과 ④번 위치의 온도보다 약간 낮고 느리게 상승하고 있지만, 주실내 화염전파과정이 거의 대칭형으로 진행되기 때문에 최고화염온도 및 그 발생시기는 대체로 비슷하게 나타나고 있다.

Fig.10의 (a)는 연락공 형상변화에 따른 NOx 농도특성을 나타낸 것으로 참고로 당량비 $\phi=1.0$ 인 균일급기시⁸⁾의 NOx 농도특성과 연소실내 최고화염온도 T_{max} 도 함께 나타냈다. 그림 중의 ▲ 표시는 $\phi_1=0.69$ 인 총상혼합기 연소의 경우를, ■ 표시는 $\phi=1.0$ 인 균일혼합기 연소의 경우를 각각 의미한다.

그림으로부터 알 수 있듯이 총상혼합기 연소시의 최고화염온도는 2200K 정도로 비교적 고온임에도 불구하고 NOx 농도는 A타입의 경우 128.9ppm, D타입의 경우 95.5ppm 정도의 아주 낮은 레벨로 나타나고 있다. 이는 당량비가 1.0보다도 작은 희박혼합기 또는 이론혼합기에 가까운 혼합기의 연소시 Thermal NO는 확대 Zeldovich 기구¹²⁾라 불리는 반응식들에 의해 잘 예측될 수 있듯이, 희박혼합기 연소에 있어서의 NOx의 생성은 연소계가 고온으로 지속되는 시간에 강한 의존성을 보이기 때문이다. 즉, 본 총상급기 연소의 경우에는 연소가스가 고온하에서 지속되는 시간이 연락공 타입에 따라 3.9~4.7ms 정도로 극히 짧기 때문에 이와 같은 경향을 보인것으로 사료된다. 그러나, 최고화염온도가 균일급기시 연소의 경우와 같이 2800K 이상으로 높으면 그림에서와 같이 NOx 농도는 급격히 상승하게 된다.

또한, D타입의 최고화염온도가 2277K 정도로 A타입의 최고화염온도 2190K에 비해 다소 높음에도 불구하고 NOx 농도가 오히려 적게 배출되는 것은 D타입의 정미연소시간(net burning time)이 4.0ms인데 비해 A타입의 정미연소시간은 4.7ms(Fig.5의 (b) 참조)로 다소 길어 연소가스가 그만큼 고온의 연소상태에 놓이기 때문으로 사료된다.

한편, 연락공 타입에 따른 NOx 농도를 총상급기인 경우와 균일급기인 경우⁸⁾에 있어서 비교

해 보면, $\phi_1=0.69$ 인 경우가 $\phi=1.0$ 인 경우에 비해 92%정도 저감되고 있으며, 또 이를 단실식 연소실인 경우¹¹⁾와 비교해 보면 94%정도 저감되고 있어 총상 희박혼합기의 연소방식으로 인해 NOx 농도를 대폭적으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig.10의 (b)는 연소실내 최고화염온도를 나타내는 열전대 ③번(A, C, D타입)과 ④번(B, E 타입)위치에서 측정된 화염온도를 연락공 형상변화에 따라 비교한 것이다. 연소압력에서 언급한 바와 같이 연락공 타입에 따라 최고화염온도 및 그 발생시기는 약간씩 차이가 있으나, 모든 경우에 있어서 임계직경을 갖는 연락공의 사용으로 인해 화염온도가 비교적 급격하게 상승되고 있음을 알 수 있다.

이상 주·부실내 혼합기의 공급당량비가 희박혼합기($\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$)인 경우에 있어서 연락공의 형상변화에 따른 연소특성을 살펴본 결과, 임계직경을 갖는 연락공의 형상을 변화시키고 연소실내에 총상혼합기를 공급함으로써 $\phi=1.0$ 인 단실식 연소실에 비해 연소압력의 큰 감소 없이 전 연소시간의 단축 및 NOx 농도를 대폭적으로 저감시킬 수 있었으며, 특히 부실측 연락공 형상이 원통형인 D타입의 경우는 이와같은 경향이 더욱 현저하였다.

4. 결 론

메탄이 주성분인 천연가스를 총상급기방식으로 희박연소시키기 위해 원통형의 부실식 정적연소실을 이용, 유동이 정지된 상태에서 주·부실내에 공급되는 메탄-공기 예혼합기의 당량비와 연락공의 형상을 변화시켰을 때의 연소특성에 대해 고찰하였다. 그 결과, 부실내 공급당량비를 $\phi_s=1.0$ 으로 고정하고 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비 ϕ_1 와 연락공 형상을 변화시켰을 때 t_{p1} , P_{max} 보다 t_{p2} 가 약간 더 크게 영향을 받으며, 주·부실내 혼합기의 총 공급당량비를 $\phi_1=1.0$ 으로 고정하고 ϕ_s 와 연락공 형상을 변화시켰을 때의 t_{p1} , t_{p2} 는 $\phi_s=1.0$ 으로 고정한 경우에 비해 더 크게 영향을 받고 있었다. 또한, $\phi_s=1.0$, $\phi_m=0.65$

($\phi_r=0.69$)인 희박혼합기 조건하에서도 임계직경을 갖는 연락공의 형상을 변화시키고 연소실내에 층상의 혼합기를 공급함으로써 $\phi=1.0$ 인 단실식 연소실에 비해 연소압력의 큰 감소없이 압력상승개시시간과 전 연소시간의 단축 및 NOx 농도를 대폭적으로 저감시킬 수 있었다. 특히 부실층 연락공의 화염전면 접촉면적을 감소시켜준 D타입의 경우가 이와같은 경향이 더욱 현저함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 吸野眞人, 入江南海雄, “電氣自動車の現狀と將來展望”, 自動車技術, 第45卷, 第8號, pp. 35~41, 1991.
2. T. S. Suga and Y. Hamazaki, “Development of Honda Flexible Fuel Vehicle”, SAE Paper 922276, 1992.
3. C. E. Wyman, “Ethanol: Fundamentals of Production from Renewable Feedstocks and Use of a Transportation Fuel”, Appl. Biochem. & Biotech., 24/25, pp. 735~753, 1990.
4. 浜純, “水素燃料のエンジンへの利用”, 日本機械學會講演會, No.920-48, pp. 44~48, 1992.
5. G. J. Waldon and R. G. Allen, “Natural Gas for Vehicles(NGV)”, SAE Paper 912558, 1991.
6. 中國徹, “稀薄ガ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篇), 第58卷, 第550號, pp. 1943~1948, 1992.
7. 김봉석, 권철홍, 류정인, “부실식 정적연소실내 층상혼합기의 연소특성(I)”, 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제1호, pp. 65~75, 1995.
8. 김봉석, 권철홍, 류정인, “부실식 정적연소실내 연소특성에 관한 연구(II)—임계연락공의 형상변화에 따른 연소촉진효과—”, 대기학회 논문집, 제17권, 제10호, pp. 2611~2623, 1993.
9. 飯沼一男, “噴流を伴う燃焼容器内混合氣中の火焰傳ば”, 第14回 燃焼シンポジウム, pp. 142~144, 1976.
10. 五味 努, 古川純一, 本望行雄, 水村 榮, “層狀燃焼に關する基礎的研究”, 日本自動車研究所研究速報, No.43, pp. 8~13, 1975.
11. 김봉석, 권철홍, “밀폐용기내 메탄-공기 예혼합기의 연소특성(I)”, 한국에너지공학회지, 제3권, 제2호, pp. 193~200, 1994.
12. J. B. Heywood, *Internal Combustion engine Fundamentals*, New York, McGRAW-HILL Book Company, pp. 572, 1989.