

〈논 문〉 SAE NO. 953728

정적연소기내 유동형태가 화염전파에 미치는 영향 연구

An Experimental Study of the Effect of Flow on Flame Propagation
in a Constant-Volume Combustion Chamber

정 동 수,* 오 승 목,* 서 승 우,* 장 영 준**
D. S. Jeong, S. M. Oh, S. W. Suh, Y. J. Chang

ABSTRACT

The aim of this study is to gain a better understanding of the effect of a flow motion on the flame development by means of an optically-accessible constant-volume combustion chamber and the visualization technique of a combustion flame. At first, the characteristics of a flame propagation are investigated in the combustion field of the two kinds of flow conditions such as a quiescent and a flowing condition, and methane-air mixture is used as fuel.

Then the same investigation is performed in two flow configurations : bulk flow motion type and turbulence generating type. In this study, the combustion phenomena are analyzed by measuring the combustion pressure, flame propagation speed, mean velocity, turbulent intensity, and mass fraction burned.

주요기술용어 : Constant-Volume Combustion Chamber(정적연소기), Turbulent Intensity(난류강도), Flame Propagation Speed(화염전파속도), Mass Fraction Burned(질량 연소분율), Flame Visualization(화염가시화)

1. 서 론

엔진연구에 있어서 연소현상의 해석은 성능향상 및 배기가스 개선의 기본적인 자료를 제공하며 특히 회박운전의 경우, 연소현상의 안정화를 위하여 이에 대한 연구는 필수적이다. 회박연소는 화염속도가 낮고 초기화염생성이 어렵기 때문에 이를 실제엔진에 적용시 불안정한 운전조건을 극복하기 위해서는 혼합기의 유동형태변화에 따

른 연소메카니즘의 분석이 요구된다.

엔진연소에 영향을 미치는 유체유동의 중요한 인자는 난류와 스월의 두 가지로 볼 수 있는데 난류가 미시적인 관점에서의 연소촉진 효과가 있다면 스월은 혼합기의 주유동에 관계되므로 화염의 발달 형태를 결정하게 된다. 엔진실린더 내부 연소현상은 매우 복잡하고 측정의 어려움 때문에 일반적으로 연소실을 단순화시켜 실험변수를 줄인 유동형 정적연소기를 제작하여 연소에

* 정회원, 한국기계연구원 동력시스템연구부

** 정회원, 부산대학교 정밀기계과

영향을 미치는 인자에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. Checkel과 Ting¹⁾은 난류에디크기를 조절하여 정적연소기에서 난류길이크기와 화염전파속도에 관한 연구를 수행하였고, Hanson과 Thomas²⁾는 원통형 연소실을 회전시켜 스윙유동에 의한 화염전파를 연구하였다. 한편 초기 점화에너지 변화에 따른 화염커널 형성에 관한 연구도 많이 수행되고 있다.^{3, 4)} Iijima와 Takeno⁵⁾는 정적연소기에서 메탄혼합기의 분위기 온도 및 압력변화에 따른 화염전파속도에 관한 연구를 수행하였다. 정적연소기에서 배기가스 생성메카니즘에 관한 연구는 연소과정중 화염에서 발생하는 발광에 미션(emission)을 측정하여 연소중간 생성물중 라디칼(radical) 농도분포를 계측하는 에미션 스펙트럼(emission spectrum)해석방법이 주로 수행되고 있다.⁶⁾

연소해석기술은 화염가시화에 의해 2차원적인 방법을 이용한 측정기술을 요구한다. 주로 고속 카메라를 이용하여 셀리렌, 새도우 그래피, 홀로그래픽 화상을 취득하며 근래에는 디지털기술의 발달로 CCD(charge-coupled device) 카메라로 2차원 영상을 얻기도 한다.

본 연구에서는 연소화염의 가시화기술을 이용하여 스윙형태의 유동이 화염발달에 미치는 영향에 관한 연구를 목적으로 공기/메탄 혼합기를 이용하여 유동장과 무유동장으로 구분하여 연소장내 화염전파 특성을 실험하였다. 또한 유동장내에서도 일방향스윙 주유동형과 난류발생형으로 정의한 두가지 혼합기 유입형태에 따라 내부 유동조건에 차이가 오는 연소현상을 당량비 및 점화시기의 변화에 따른 연소압력을 측정하고 유동장내에서의 화염발달에 관한 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험장치

2.1 유동형 정적연소기

Fig.1은 본 연구에서 사용된 직경 54mm, 폭 40mm로 체적 63cc를 갖는 유동형 정적연소기이다. 여기에는 한 쌍의 평행한 두께 20mm의 FS창(fused silica windows)을 설치하였고, 연소기 좌우

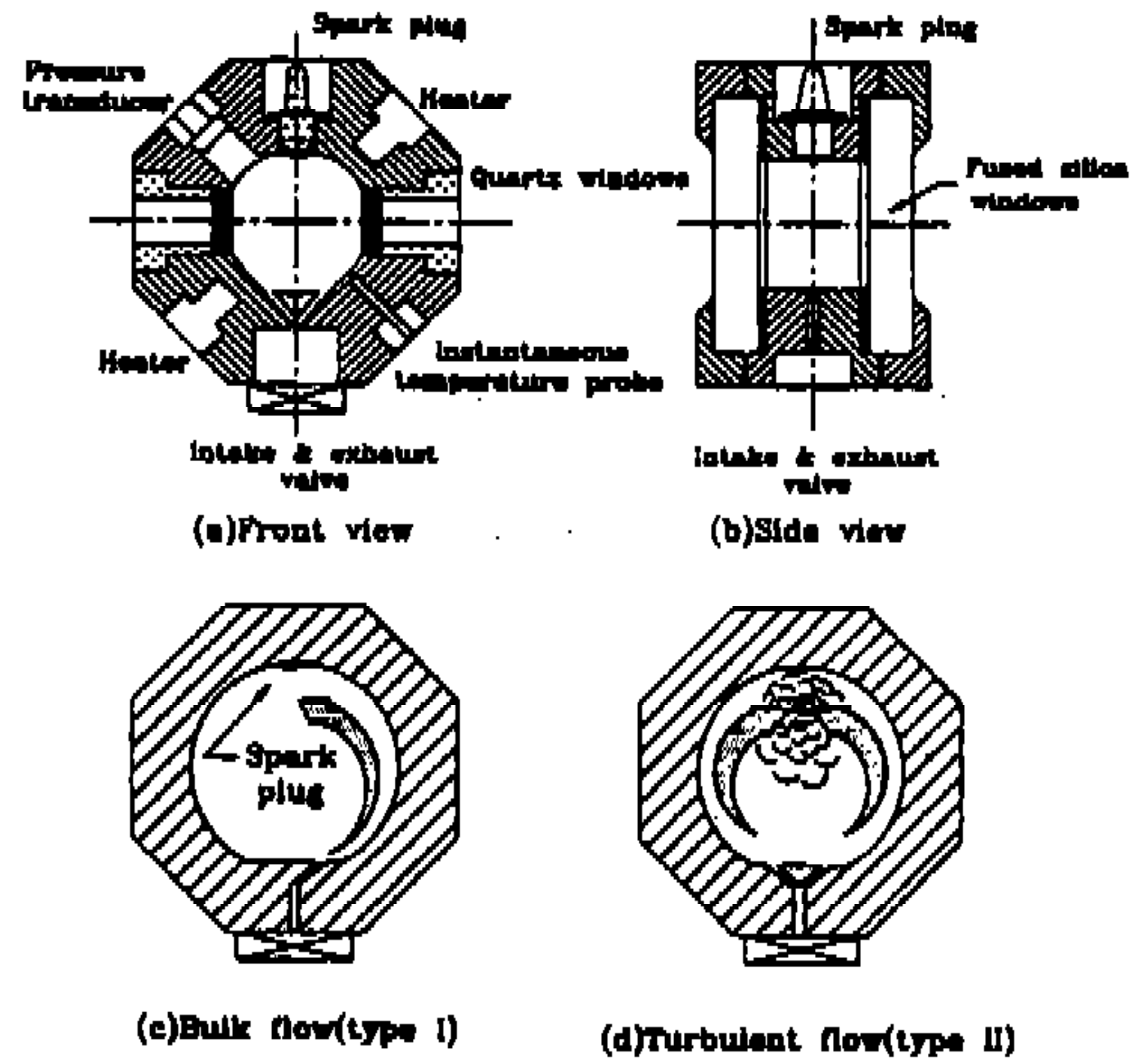


Fig.1 Schematic of constant-volume combustion chamber and flow configurations.

에는 레이저 쉬트(laser sheet)용 석영창을 만들어 레이저를 이용한 연소장가시화를 통해 연소해석기술에 관한 연구를 가능하게 하였다. 흡기포트 부분은 연소실벽에 접선방향으로 설치하여 유입시 혼합기의 스윙유동을 유도하였다.

연소기의 두 면에는 카트리지 히터를 설치하여 관측창에 수분이 응결되는 것을 방지하였다. 연소실 벽면 온도측정을 위하여 연소실 안쪽 벽면 가까이 열전대를 삽입하였고 압력측정을 위해 압전형 압력변환기(AVL QC31)를 설치하였다.

2.2 연소기내 유동속도 측정장치

점화플러그 간극에서 속도측정을 위하여 점화플러그를 제거하고 그 위치에 열선유속계프루브(hot wire anemometer probe)를 장치하기 위하여 어댑터를 설치하여 장착후에 열선유속계프루브의 센서부분이 점화플러그 간극에 위치하게 하였다. 열선유속계프루브는 가스 프루브 보정장치(TSI Model 1125)로서 속도, 온도, 및 압력에 대하여 보정하였다. 열선유속계는 CTA(constant temperature anemometer) 형식의 TSI IFA 100을 사용하였다.

2.3 연소화염 화상취득장치

본 연구에서 화상취득을 위하여 Fig.2와 같은

장치를 구성하였다. 화상은 마이크로 렌즈를 통해 영상증폭장치(Hamamatsu C4723)를 거치면서 증폭되어 CCD카메라에 도달한다. 화상증폭장치는 100ns 게이트 및 10⁴배의 증폭이 가능하다. CCD 카메라에 도달한 화상은 영상처리장치의 메모리에 저장된 후, 개인용 컴퓨터로 옮겨진다. 화상처리장치는 stand-alone 형태로 640×485×8 bit의 해상도를 가지며 실시간(real-time)처리가 가능하다.

3. 실험방법

연소실험에 앞서 유동장 측정을 위하여 열선 유속계프루브를 점화플러그 위치에 장치하여 점화플러그 간극위치에서 주유동 방향의 순간속도 상대난류강도는 대수적으로 감소하고 있으며 따라서 혼합기의 유동은 밸브가 닫힌 후 급속하게 줄어들음을 알 수 있다. 특히 평균속도 값은 1.6s가 지난 이후에는 거의 영에 근접하므로 그 시점에서는 난류변동만 존재하고 있다. 이러한 유동형태는 엔진의 실린더 내부 유동과 흡사한 형태로 볼 수 있다.

Fig4는 각 점화시기대별 시간 경과에 따른 화염 전파과정을 보여주는 그림이다. 각 시간대별 연소사진을 한 프레임씩 반복 실험을 거쳐 취득하였고 연소상태를 검증하기 위해 압력선도와 일치 여부를 각 실험마다 검증하였는데 최고압력, 초

기압력, 그리고 최고압력까지 걸리는 시간을 비교하였다. 본 실험에서는 직접사진법으로 화상을 취득하였기 때문에 3차원 화상이어서 화염면의 굴곡 현상은 잘 보이지 않는다.

연소초기에서는 모두 점화플러그 간극사이에서 화염이 형성되고 있다. $t_i=0.5s$ 의 경우 시간이 지날수록 유동장의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 화염은 연소실의 벽면을 따라 진행되는 것이 아니라 스윙유동의 중심을 향하며 이것이 전체 연소과정을 가속시키리라 생각된다. 이와같은 현상은 스윙유동이 지배적인 조건에서 실험한 Hanson과 Thomas²⁾의 실험에서도 관찰된 바 있다. 이로부터 실제 엔진에서의 연소과정을 단순화시켜 예측할 수 있고 특히 본 연구의 유동방향과 점화플러그의 위치를 볼 때 4밸브엔진의 구조적 조건과 유사하므로 이에 대한 묘사가 가능하다. 화염은 30ms 정도에서 연소실 전체로 확대된다.

Fig5는 점화후 동일한 시간이 경과한 후 점화시기의 차이에 따른 화염전파면적을 표시한 것이다. 전체적으로 유동조건이 유리한 $t_i=0.5s$ 일 때가 가장 큰 화염면적을 갖는다. 화염면적은 그림의 대수적으로 감소하는 유동장속도에서 예측할 수 있듯이 $t_i=0.5s$ 의 경우가 다른 세 경우보다 거의 두배 이상의 평균속도 및 상대난류강도를 나타낸다. 즉 이것은 $t_i=0.5s$ 에서 연소기간이 짧다는 것을 의미하는 것으로 다른 점화시기에

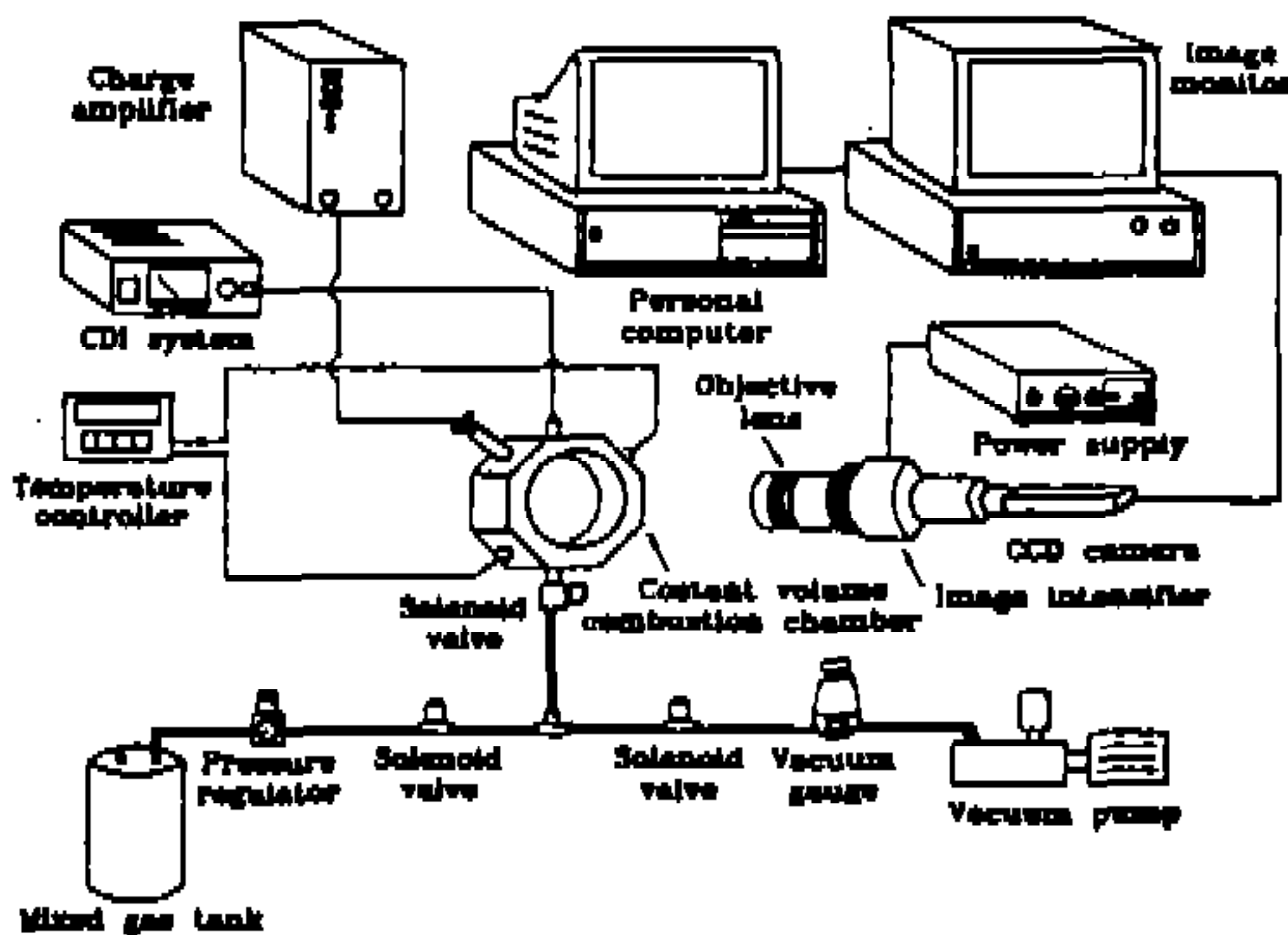


Fig.2 Apparatus for visualization of flame propagation.

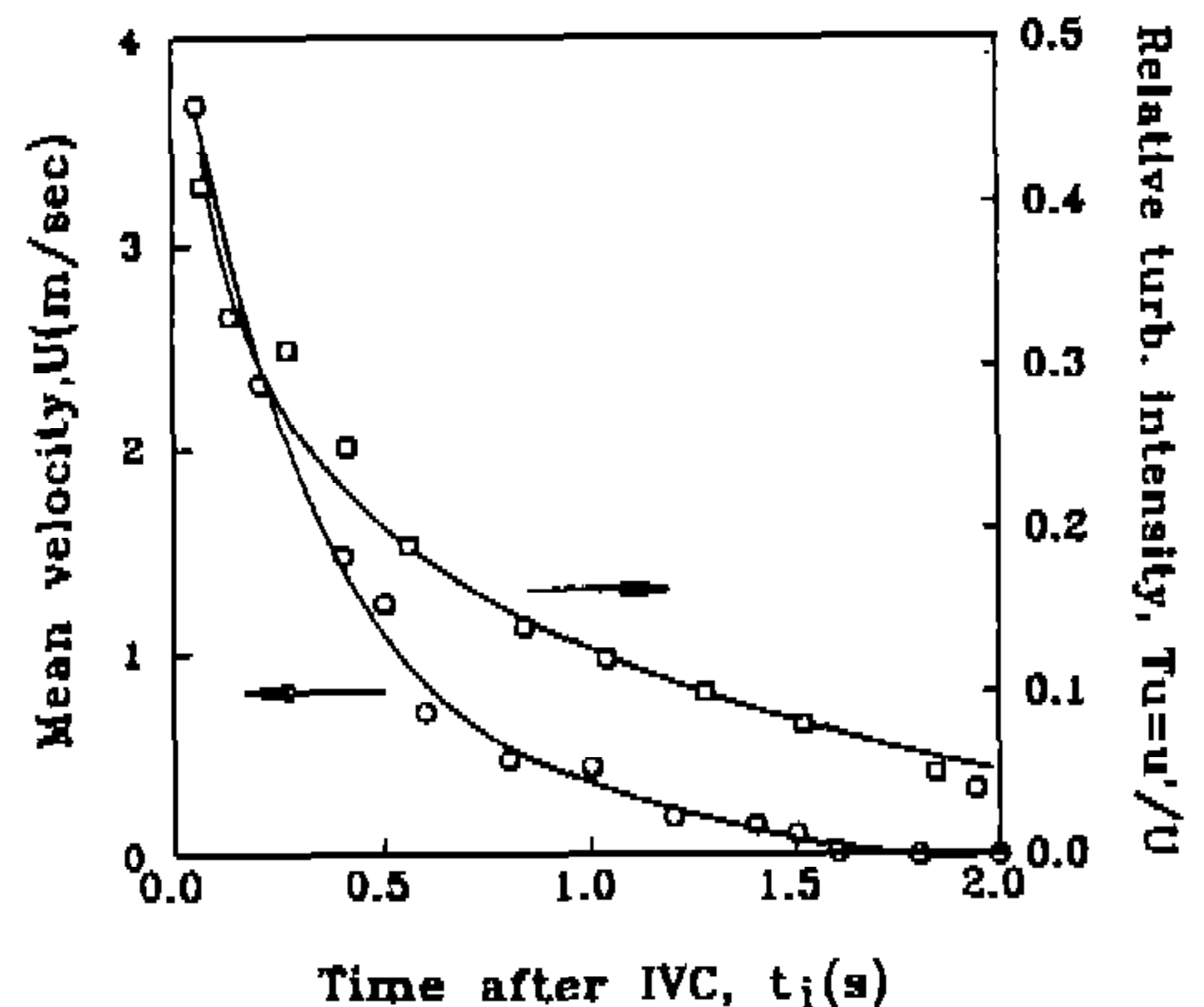
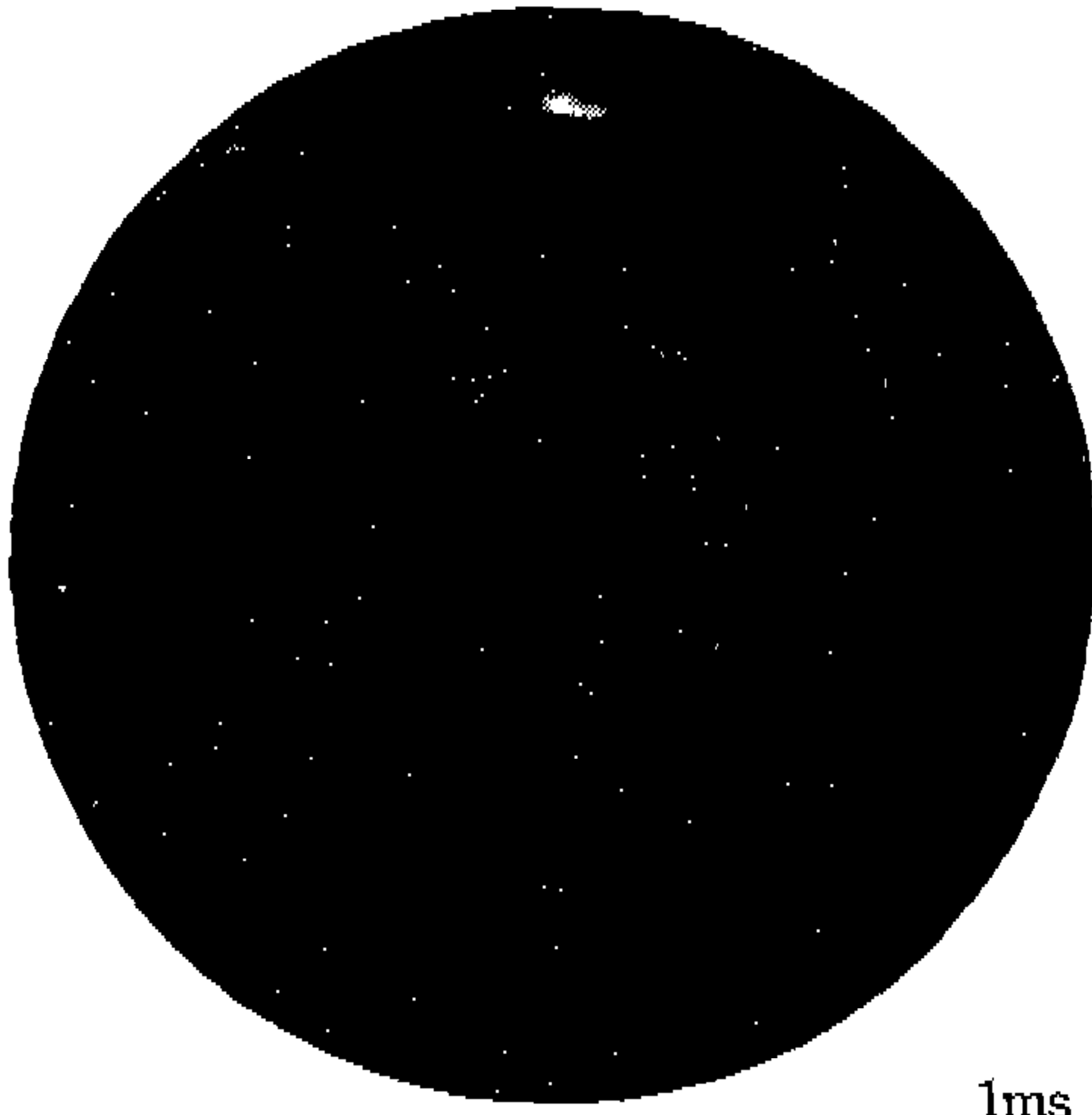
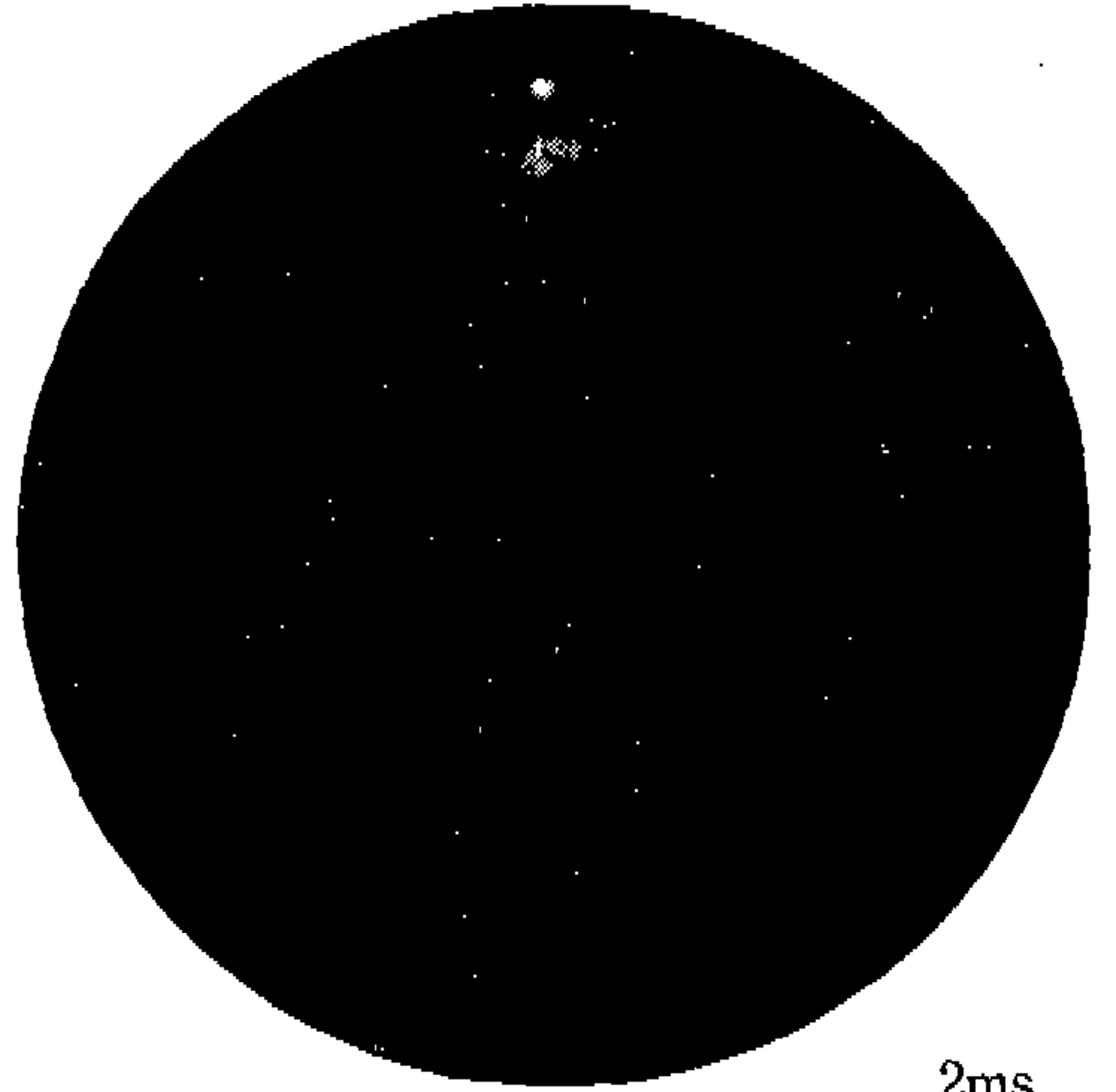


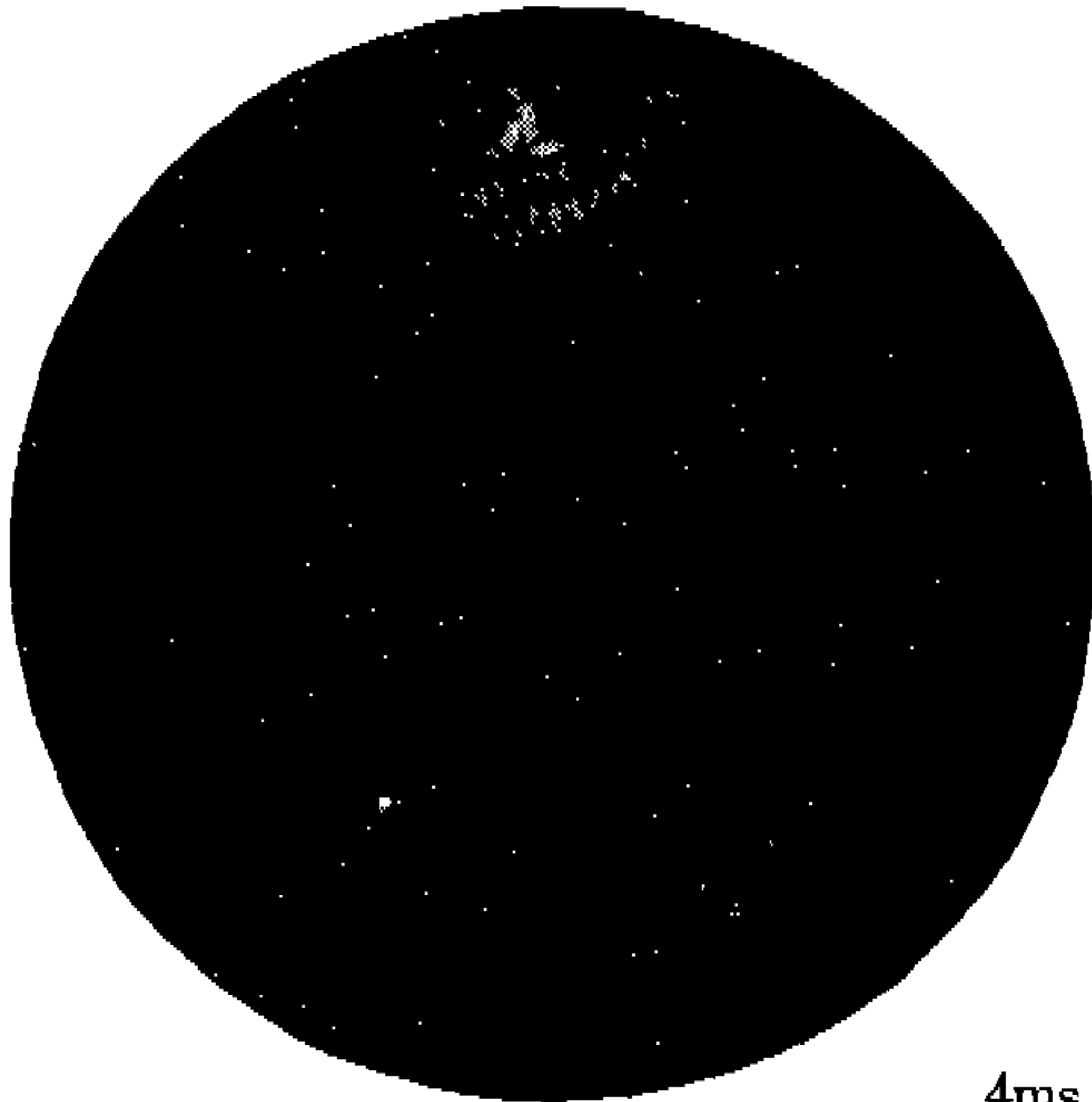
Fig.3 Flow characteristics of bulk flow as a function of ignition time after inlet valve closed at spark plug gap $t_i=0.5s$.



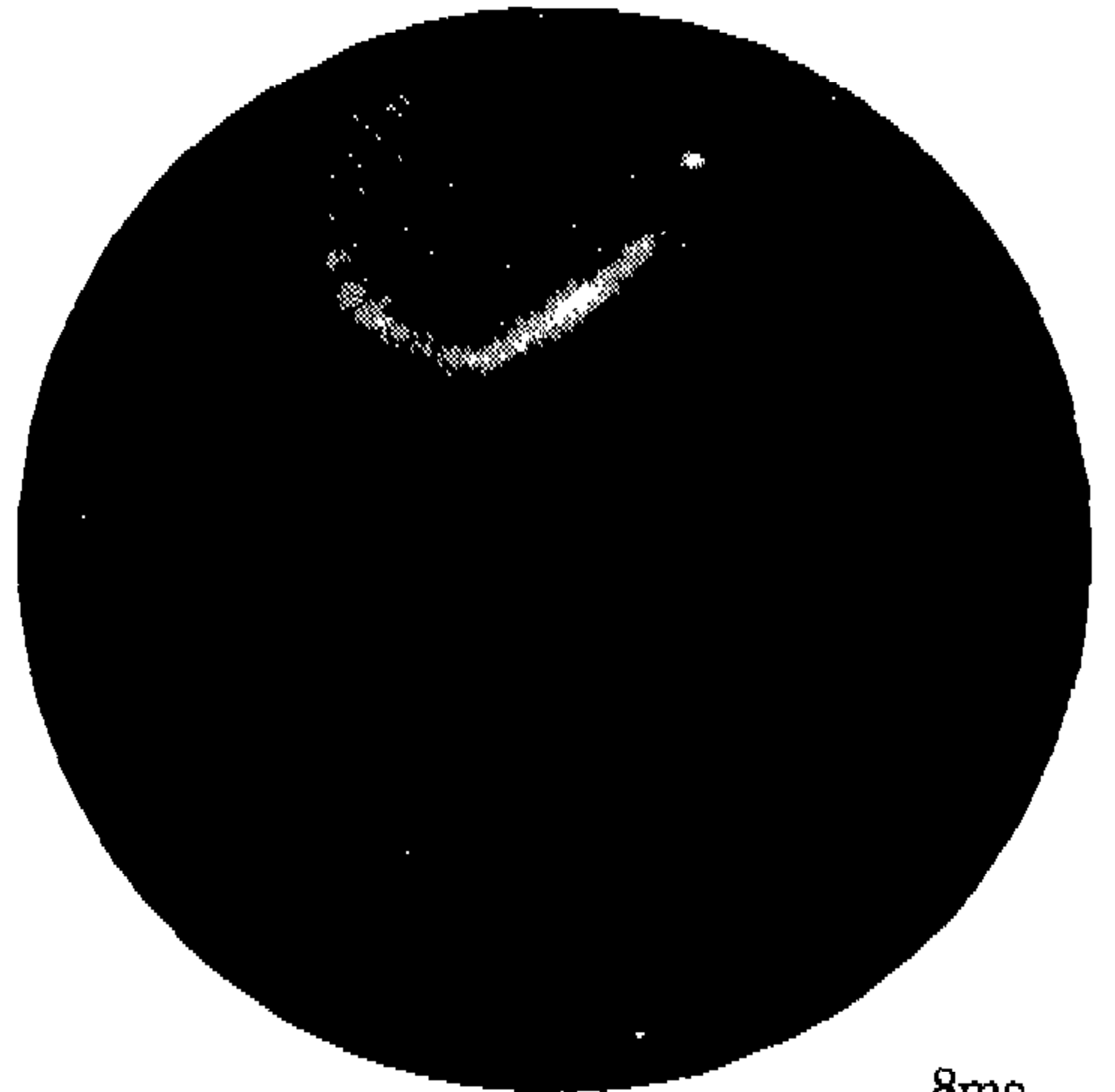
1ms



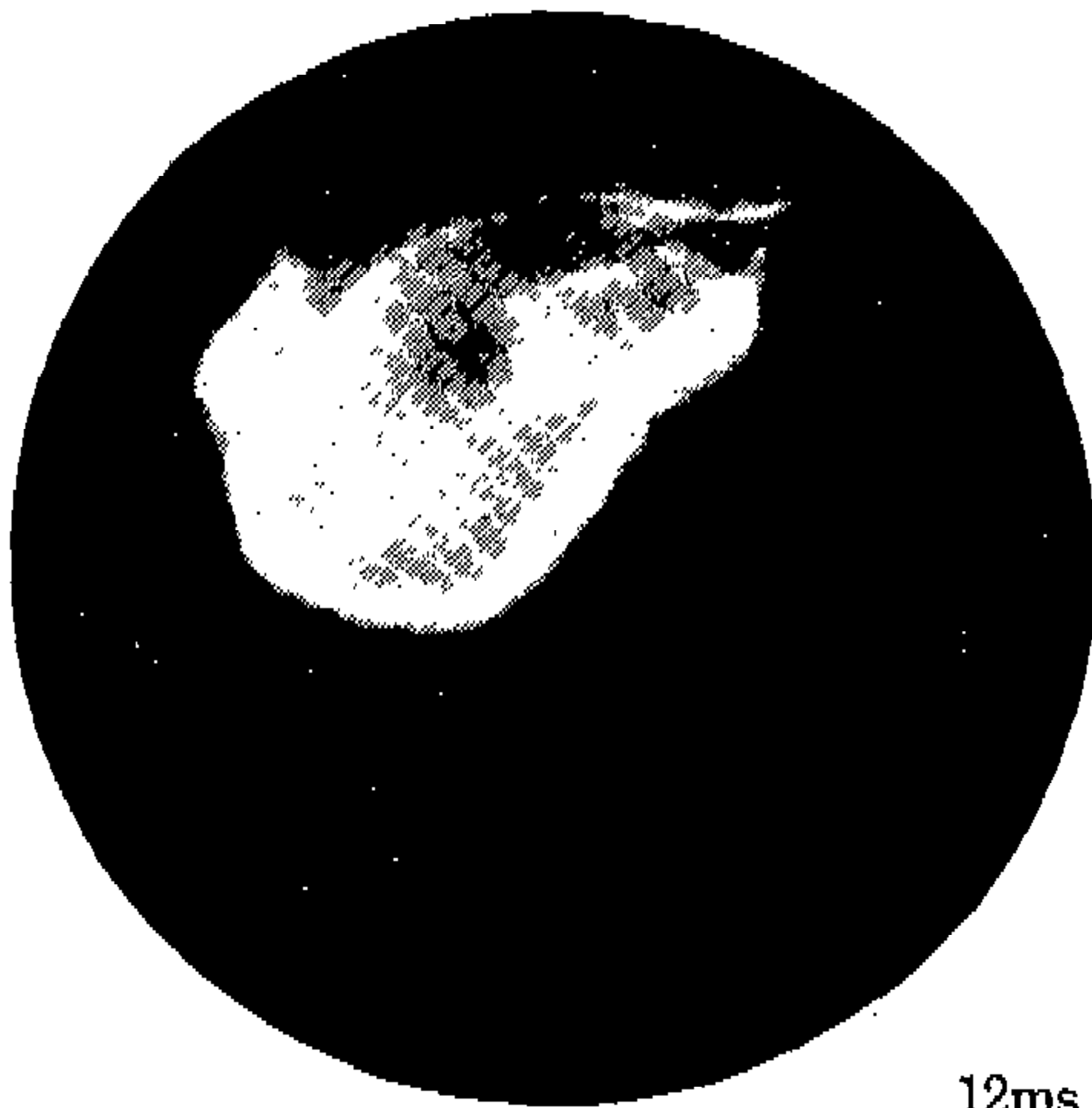
2ms



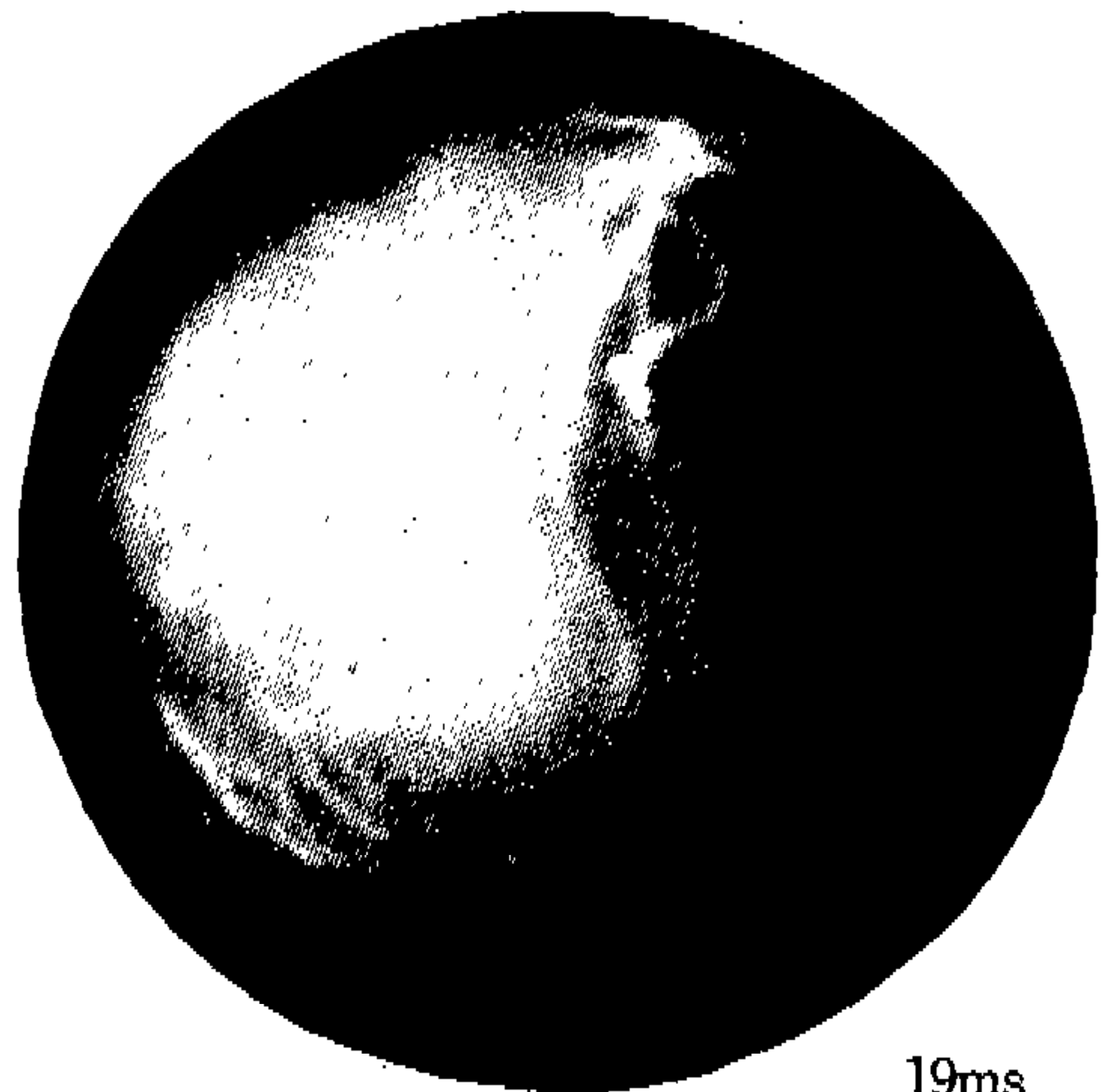
4ms



8ms



12ms



19ms

(a) $t_i = 0.5\text{sec}$

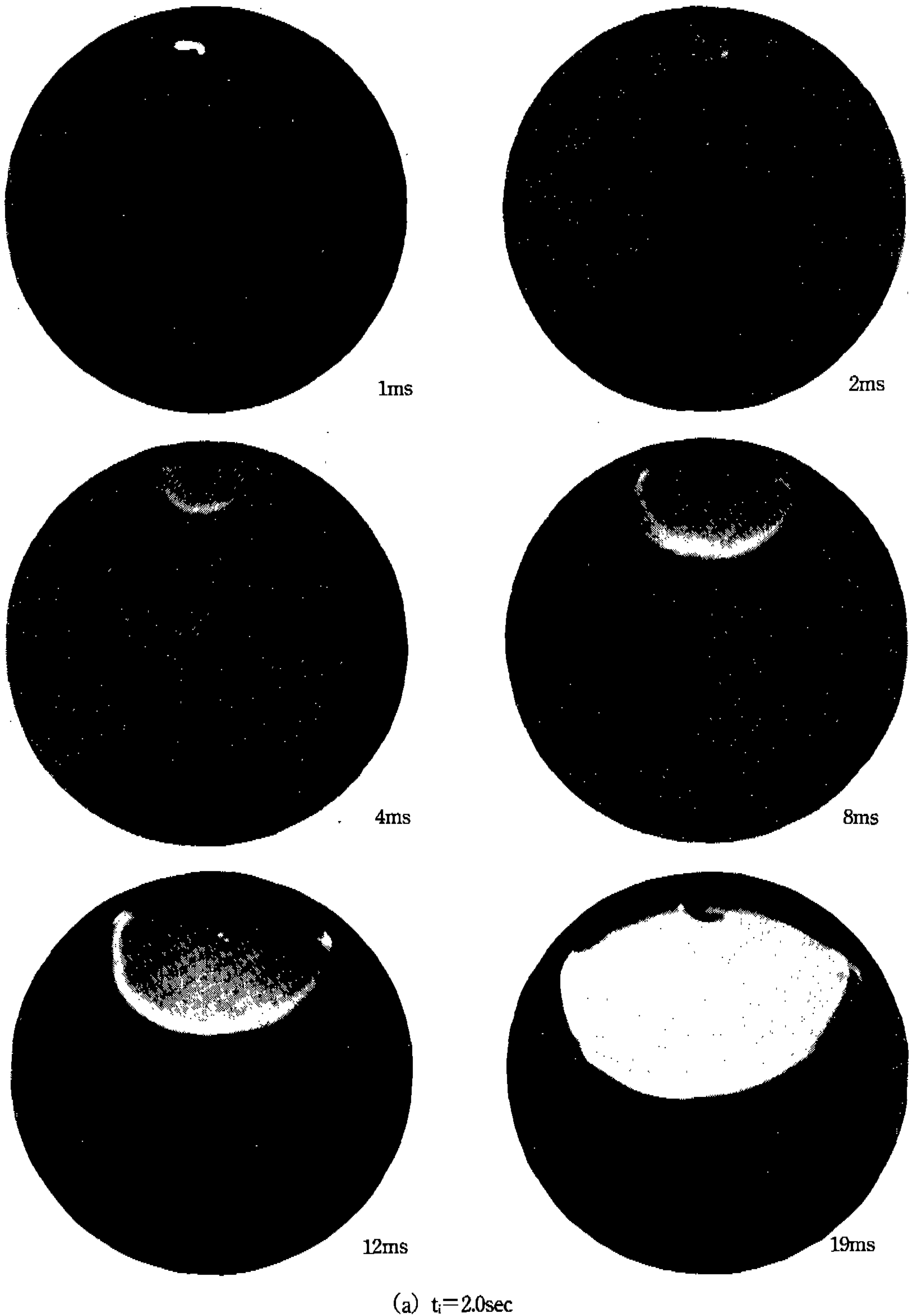


Fig.4 Photograph of flame propagation at different spark ignition timings after valve closed.

대한 상대적 급속연소효과를 보여주는 것이다. 그러므로 이것으로부터 평균화염전파속도를 구하기 위하여 화염의 크기를 나타내는 길이를 화염면적을 원주율(π)로 나누어 제곱근한 값으로 정의하면 이것을 시간으로 나눈 값은 평균화염전파속도(U_f)로 볼 수 있다. Fig.6에서 평균화염전파속도를 난류강도의 변화에 따라 도시하여 보았다. 화염속도는 난류강도에 비례하여 증가하는 기존의 연구결과와 비교할 때, 어느 정도 선형적으로 일치함을 알 수 있다.

Fig.7은 점화시기가 $t_i=0.5s$ 일 때 당량비변화에 따른 질량연소분율(mass fraction burned)을 나타낸 그림이다. 질량연소분율은 순간압력을 측정을 측정하여 평균속도 및 상대난류강도를 구하였으며 연소실험과 같은 유동조건에서 연소는 시키지 않은 채로 측정하였다.

연소장 내부에 유동의 변화를 주기 위해 Fig.1의 c), d)에서와 같이 정적연소기의 한쪽접선포트에서만 혼합기가 유입되는 경우를 type I, 양 포트에서 동시에 유입되는 경우를 type II라 정의하였으며 type I과 type II의 혼합기 흡입후 연소기 내부압력은 32기압으로 동일하게 하였다.

접선포트에 의해 유입된 혼합기는 밸브가 닫힌 후 부터 유동감쇄가 시작되므로 점화시기를 밸브가 닫힌 시점부터 $t_i=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 초의 4단계로 조절하였다. 이러한 4종류의 점화시기는 각기 다른 유동조건에 해당하므로 유동장이 연

소과정에 미치는 영향에 관한 연구가 가능하다.

메탄과 공기의 당량비(ϕ)는 1.0, 0.9, 0.8의 세 경우에 대하여 실험하였고 압력용기에 분압을 기초로 하여 결정되며 내부의 팬에 의해 혼합기는 충분한 예혼합이 이루어지게 하였다. 예혼합탱크에서 뽑아낸 혼합기는 초기압력을 조정할 수 있는 압력조정기(pressure regulator)와 고압용 솔레노이드 밸브를 갖춘 라인을 거쳐 접선포트(tangential port)를 통해 정적연소기내로 유입된다. 흡입밸브는 실험의 순간적인 제어를 위해 솔레노이드 밸브를 사용하였고, 배기시 같은 밸브를 통해 일정한 조건의 혼합비가 유지될 수 있도록 진공펌프에 의해 잔류가스를 완전히 제거하였다. 흡입압력은 $2kgf/cm^2$ 로 압력조정기에 의해 일정하게 유지되며, 흡입솔레노이드 밸브를 통해 0.5초간 혼합기를 급속 유입시켜 연소실 내부의 유동조건을 맞추었다. 연소용 점화플러그는 일반승용차용을 사용하였고, 점화플러그의 방향에 따라 화염전파속도에 영향을 미치므로 가장 효과적으로 알려진 방향 즉 접지전극의 끝이 주유동 방향에 마주보도록 설치하였다.⁷⁾ 점화는 CDI(capacitance discharge ignition) 형태로 172.5 mJ(280V, 4.4mF)의 에너지를 공급하였다. 점멸식 온도조절기에 의해 연소기내부 벽면 온도는 $50^\circ C$ 로 일정하게 유지하였다. 연소화상의 획득은 각 시간대의 화상이 실험조건이 동일한 여러 실험에서 얻어지기 때문에 압력데이터를 검토하여

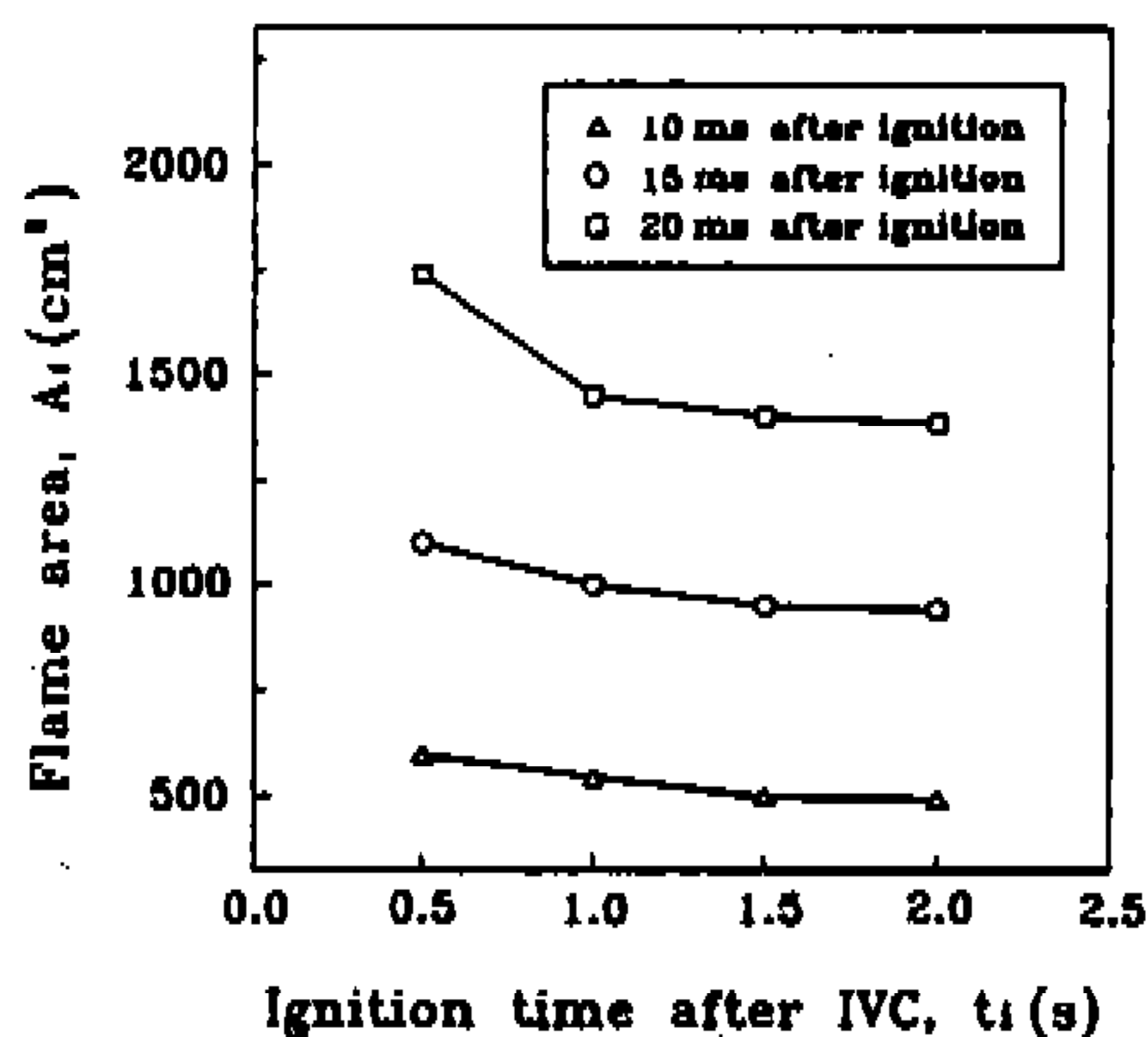


Fig.5 Comparison of flame area at 10, 15, 20 ms after ignition.

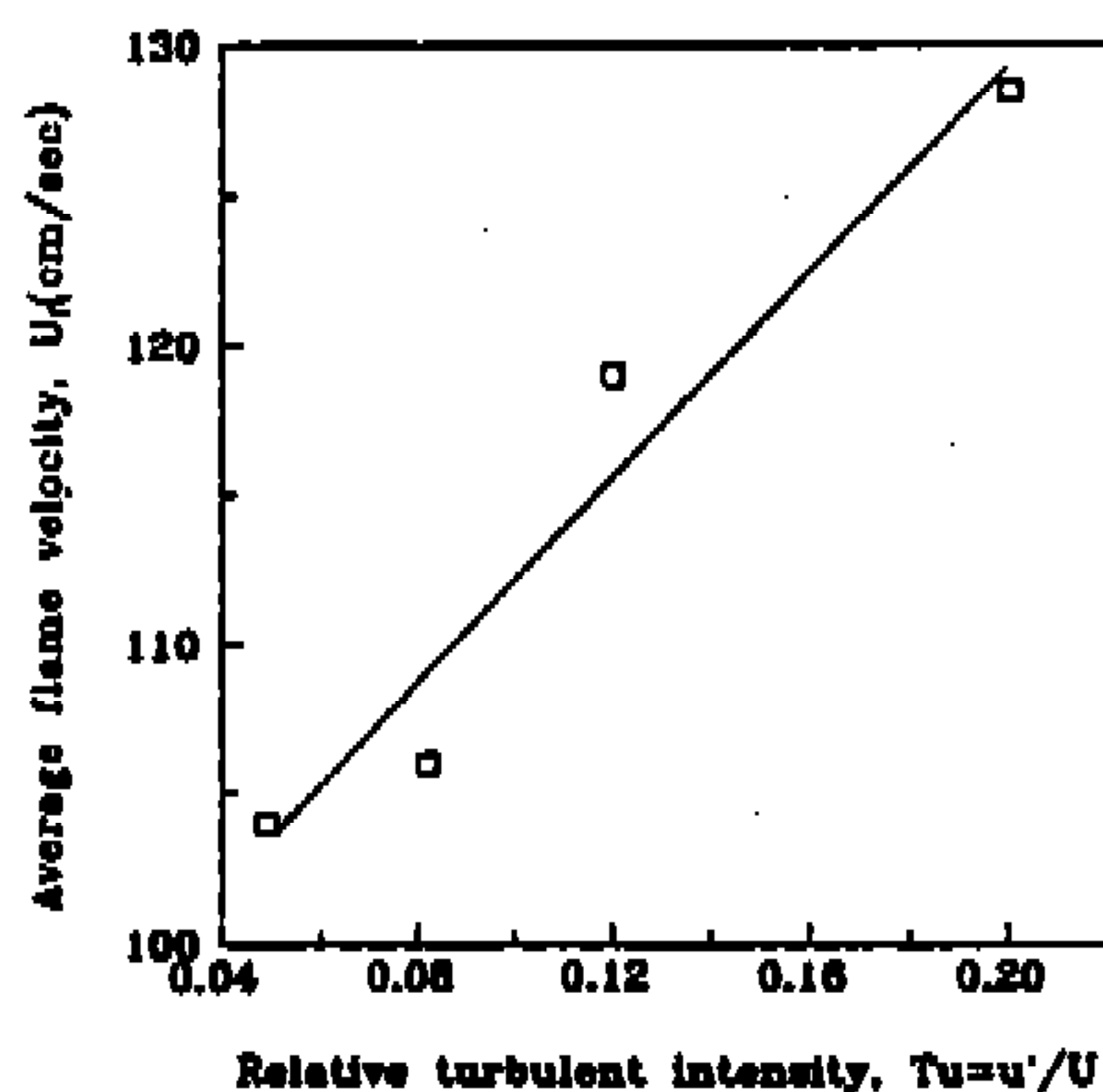


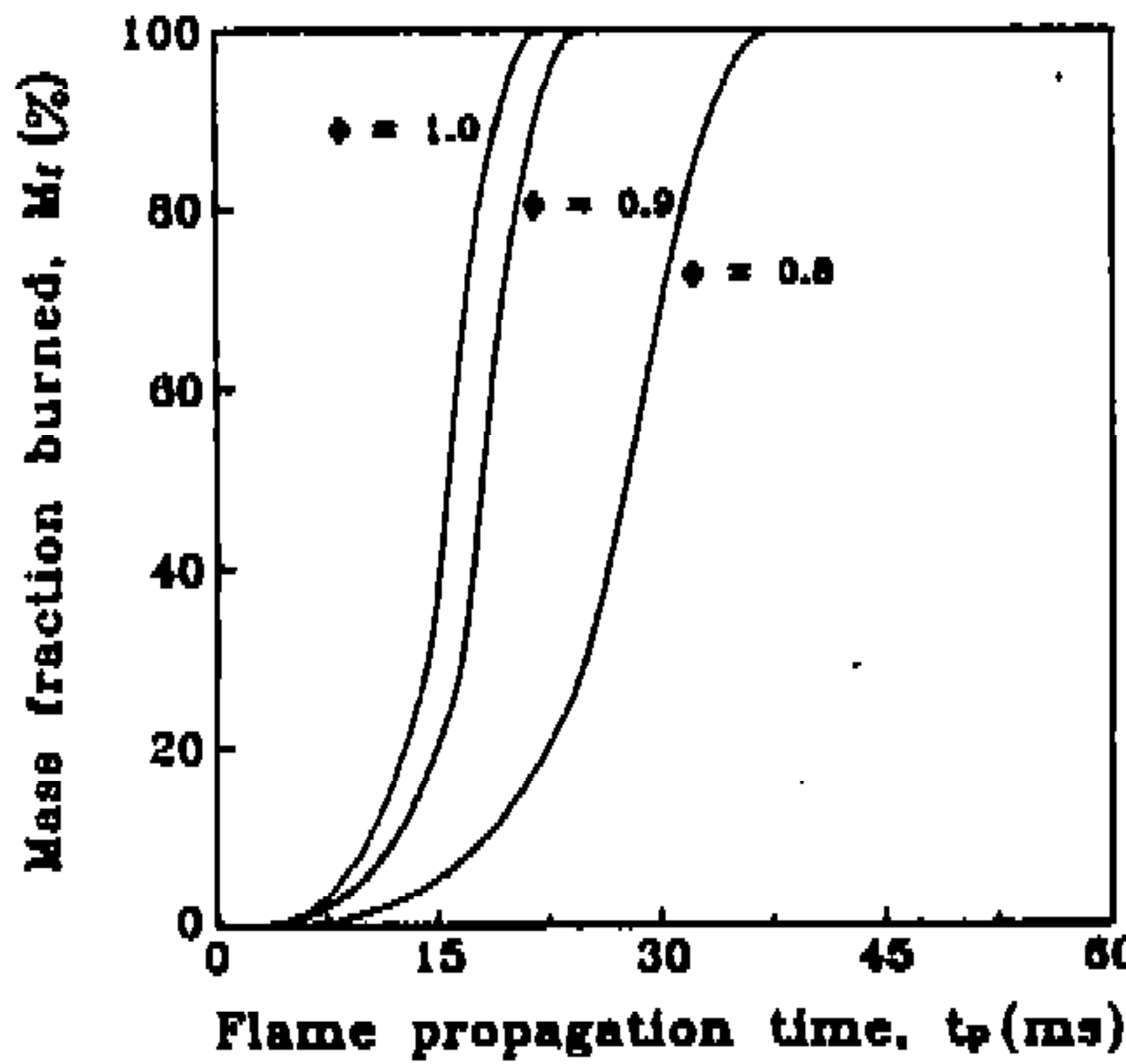
Fig.6 Flame propagation velocity(U_f) with turbulent intensity(Tu).

기준에 적합한 화상만 취득하였다.

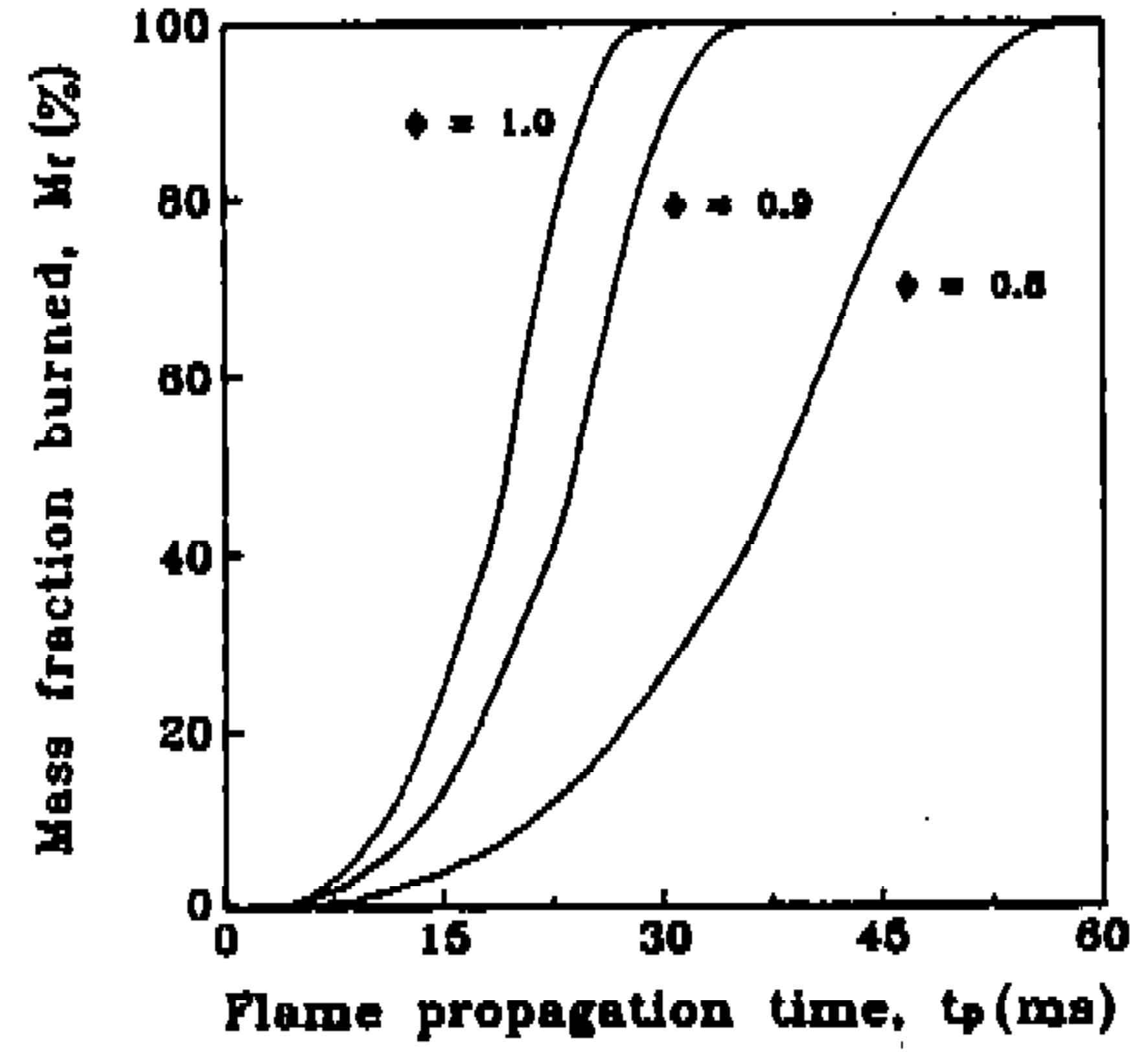
4. 실험결과 및 고찰

접선 방향으로 공급되는 메탄/공기 혼합기의 유동특성은 흡입솔레노이드가 닫히는 순간부터 열선유속계에 의해 측정되었는데 Fig.3은 열선유속계를 이용하여 점화플러그 간극 위치에서 흡입 초기의 평균속도와 상대난류강도 값을 나타낸 그림이다. 상대난류강도, Tu 는 난류변동의 rms값, u' 을 평균속도, U 로 나눈 값이다. 평균속도 및 정하여 Lewis와 Elbe⁸⁾의 식을 이용하여 구하였다.

$\phi=1.0, 0.9$ 에 비해 $\phi=0.8$ 은 상당히 큰 연소시간 지연을 보여주고 있으며 시간이 지날수록 그 차이는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. Fig.8은 type I에서 당량비와 점화시기에 따른 질량연소분율을 시간에 대하여 미분하여 얻은 질량연소율 (mass burning rate)곡선으로 (a)에서 $\phi=0.8$ 인 경우 연소초기에 오랫동안 불안정한 연소율을 보여준다. 이것은 희박연소에서 연소의 불안정성을 의미한다고 볼 수 있다. (b)의 $\phi=1.0$ 인 경우 점화시기별 질량연소율곡선에서는 연소기내의 유동속도가 급격한 감쇄를 보이기 때문에 점화시기가 늦어질수록 전체연소기간이 길어짐을 알

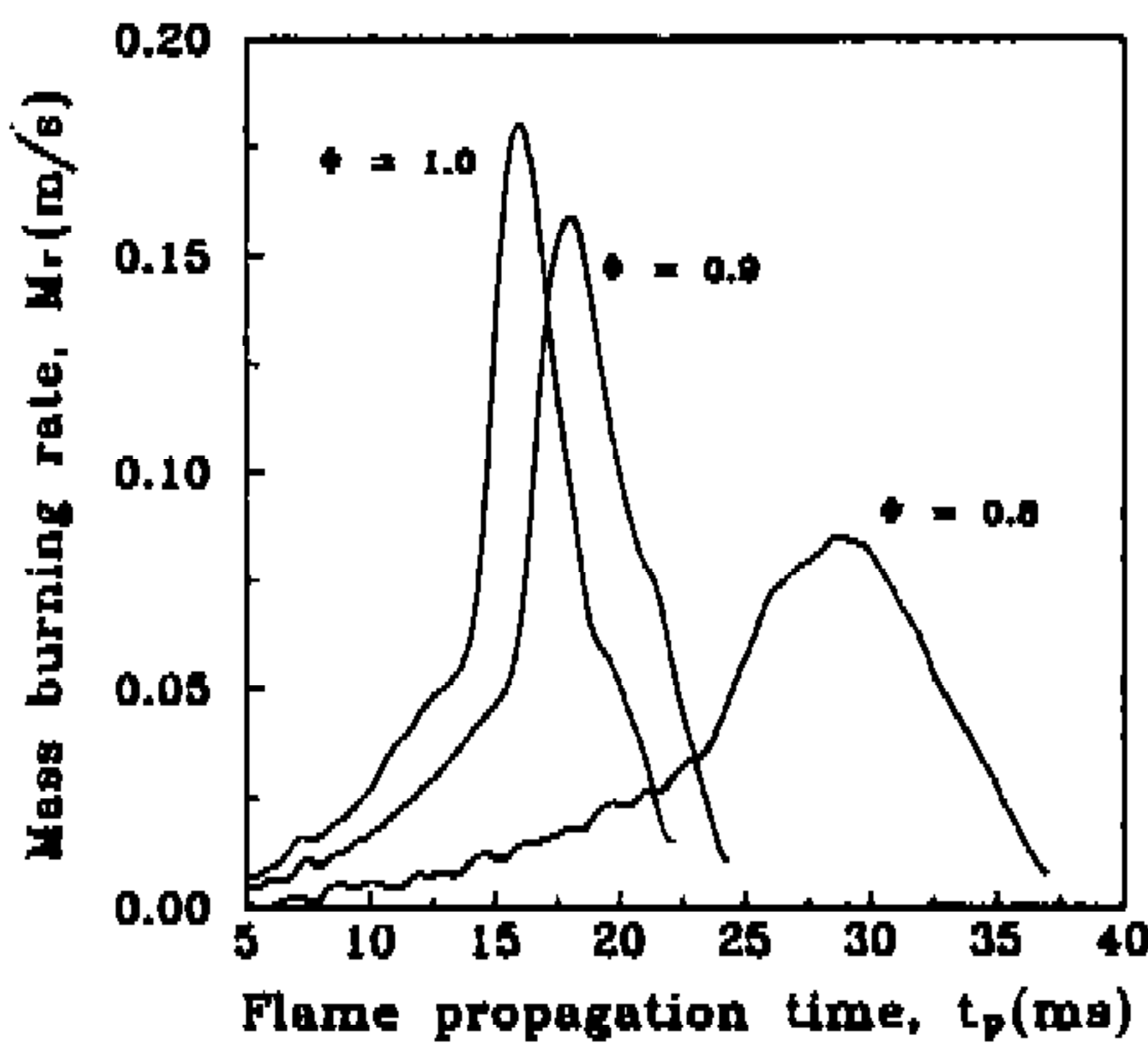


(a) Bulk flow (type I)

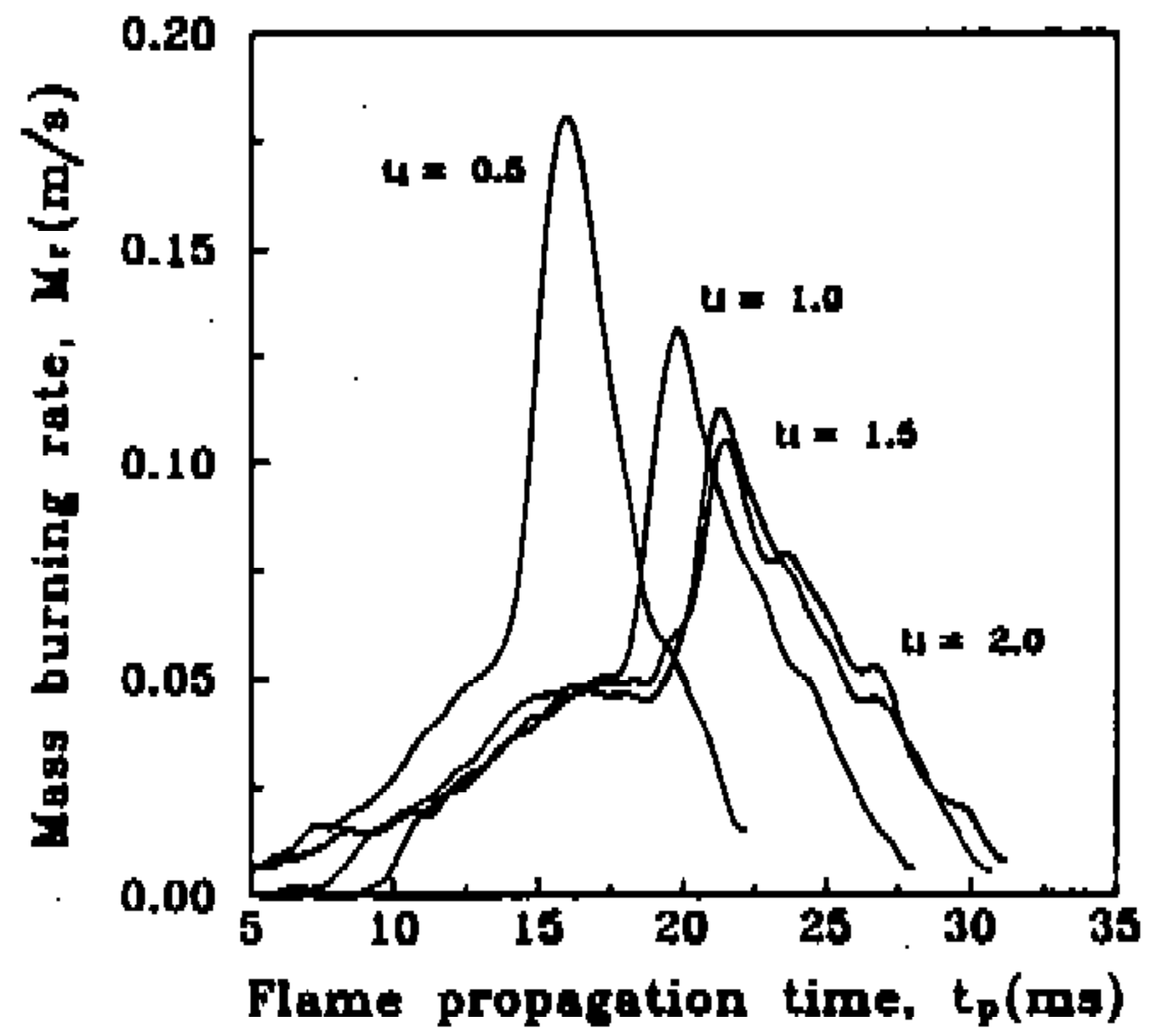


(b) Turbulent flow (type II)

Fig.7 Comparison of mass fraction burned for bulk and turbulent flow when $t_i=0.5$ sec.



(a) Ignition time, $t_i=0.5$ sec.



(b) Equivalence ratio, $\phi=1.0$.

Fig.8 Mass burning rate according to ignition time(t_i) and equivalence ratio(ϕ) for bulk flow (type I).

수 있다.

Fig.9는 $\phi=1.0$ 의 조건에서 type I 과 type II 의 질량연소분율을 비교한 그림이다. $t_i=0.5s$ 일 때 연소종료까지 type I 이 type II보다 높은 값을 가진다. 그러나 $t_i=1.0s$ 인 경우 연소초기에는 type II가 근소한 차이로 type I 보다 크나 15ms 근방에서 type I 이 급격히 증가하기 시작하여 연소중반 이후에는 상당한 차이로 높은 질량연소분율을 보이고 있다. $t_i=1.5, 2.0s$ 일 때는 type II가 높은 값을 보이다가 연소말기에 역전되는 형태를 나타내고 있다.

Fig.10은 type I 과 type II에서 10% 및 90% 연소시간(t_{10}, t_{90})을 비교한 그림이다. Type I 에서 $\phi=0.9$ 이고 $t_i=0.5s$ 인 경우 $\phi=1.0$ 이고 $t_i=1.5, 2.0s$ 인 경우보다 짧은 연소시간을 보여주고 있다. Type II의 경우 점화시기에 대한 의존성이 type I 보다 작으며 실험조건내에서는 당량비가 클수록 점화시기에 관계없이 연소시간이 절대적으로 짧음을 알 수 있다. 또한 전체적으로 볼 때 $\phi=0.8$ 인 경우가 점화시기에 대한 의존성이 비교적 크게 나타나고 있다. $t_i=1.5, 2.0s$ 일때 type I, II를 비교해보면 type II가 10% 연소시간(t_{10})은 상대적으로 높게 나타나는데 비해 90% 연소시간(t_{90})은 약간 작게 나타나고 있다. 이것은 type I 이 한 방향으로 주유동이 강한 유동형태임에 비해 type II는 양방향으로 유입된 혼합기가 점화플러그 근처에서 부딪혀서 소실됨에 따라 유동장중에 주유동보다는 난류성분이 지배적인 유동형태이므로 $t_i=1.5, 2.0s$ 일때 type I 의 경우 10% 연소시간(t_{10})까지는 연소가 지연되나 후반으로 갈수록 주유동의 영향으로 연소율이 증가하게 된다. Type II는 이와 반대로 10% 연소시간(t_{10})까지는 난류성분이 강하여 연소에 유리하나 후반으로 가면서 주유동에 의한 화염전파효과가 type I 에 비해 상대적으로 작기 때문에 연소에 불리하게 작용한 것으로 생각된다. 따라서 연소율을 높이기 위해서는 초기점화위치에 난류성분이 크면서 주유동이 오래 지속될 수 있는 유동형태가 화염전파에 유리함을 알 수 있다.

Fig.11은 $\phi=1.0$ 에서 $t_i=1.5s$ 일때 5ms와 10ms에서의 화염사진을 비교한 것이다. 비교적 유동이 존재하는 연소초기에 이 조건에서 type II의 화

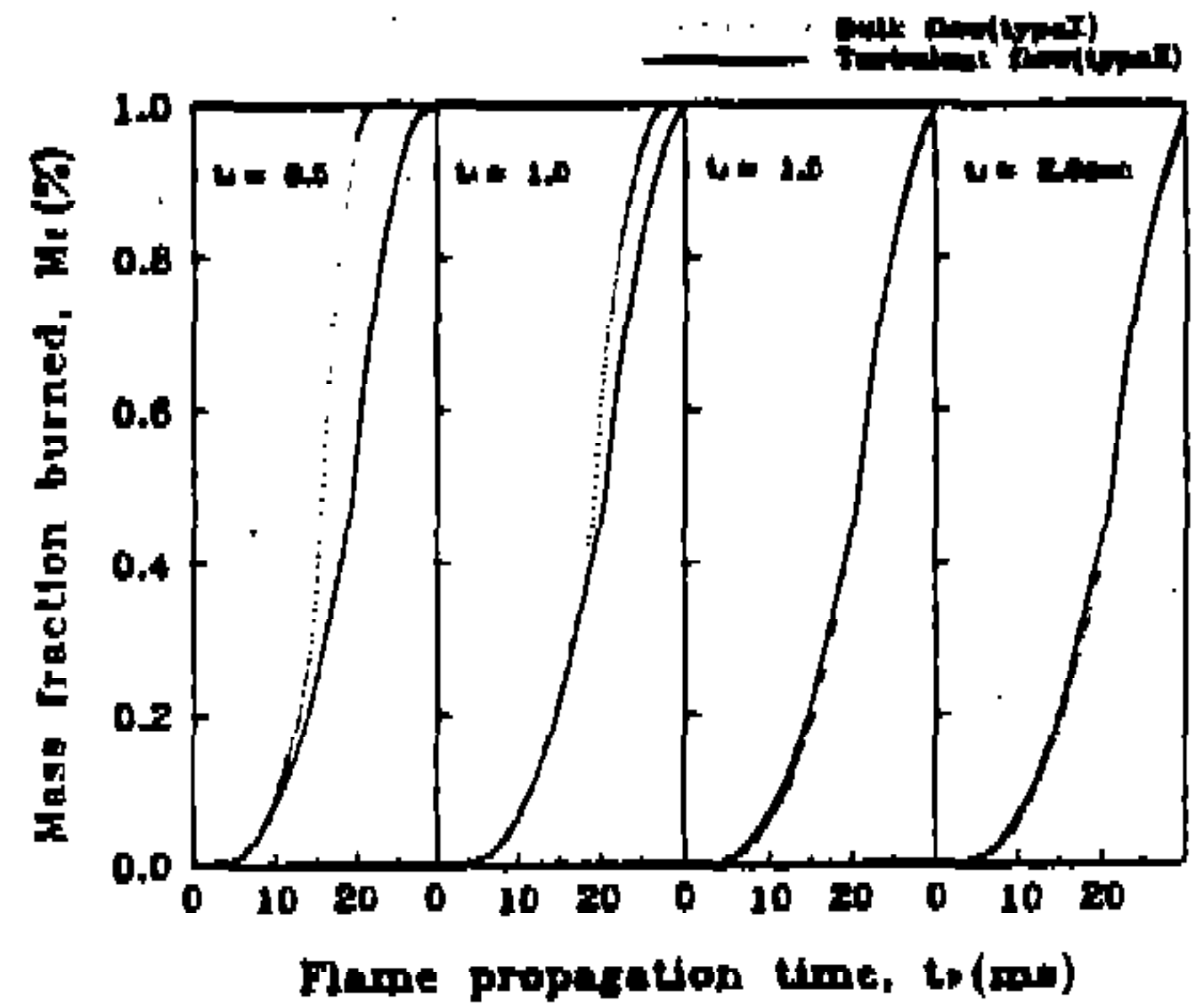


Fig.9 Comparison of mass fraction burned as a function of flame propagation time and ignition time after inlet valve closed for bulk flow(type I), and turbulent flow (type II) at $\phi=1.0$.

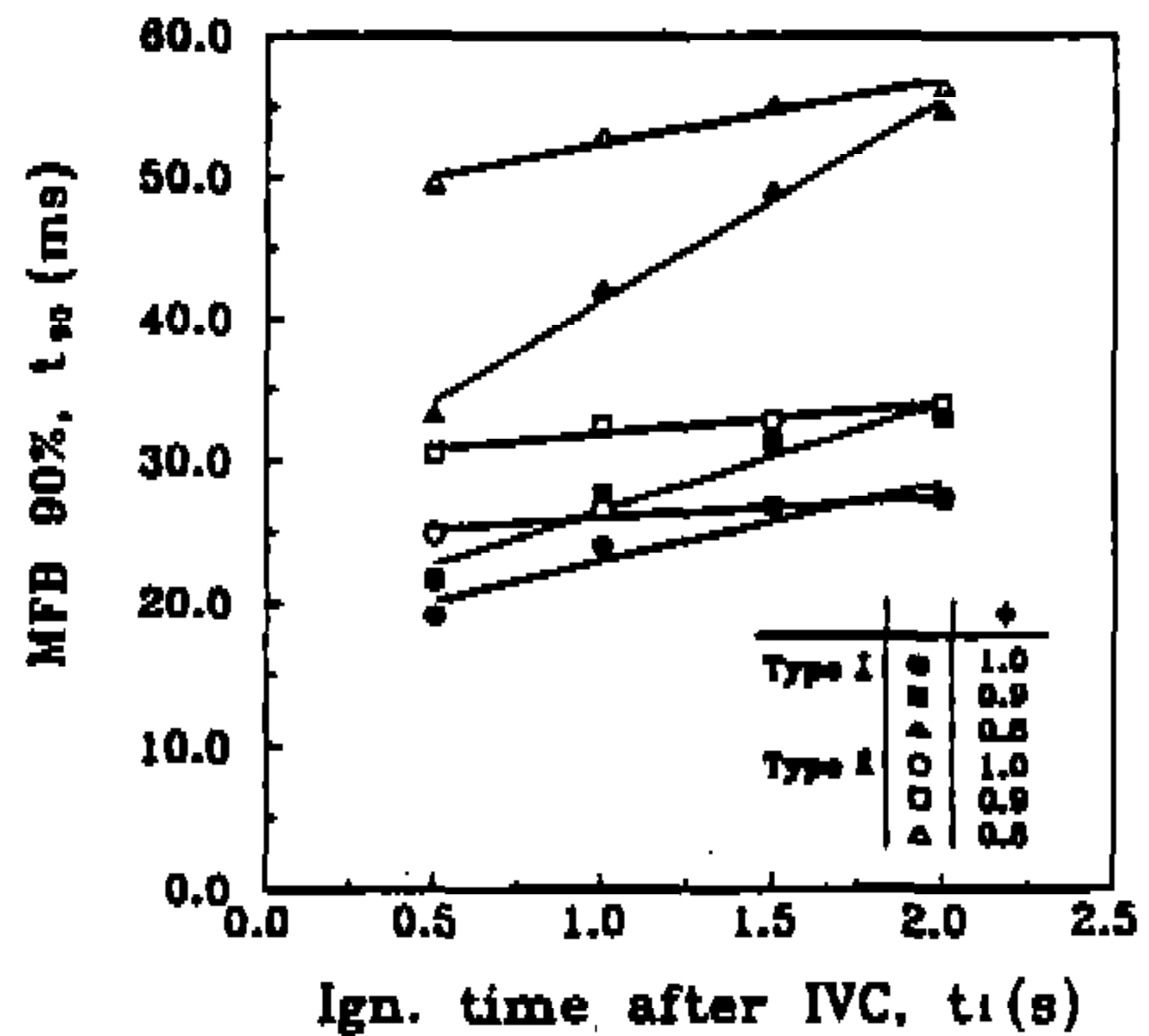
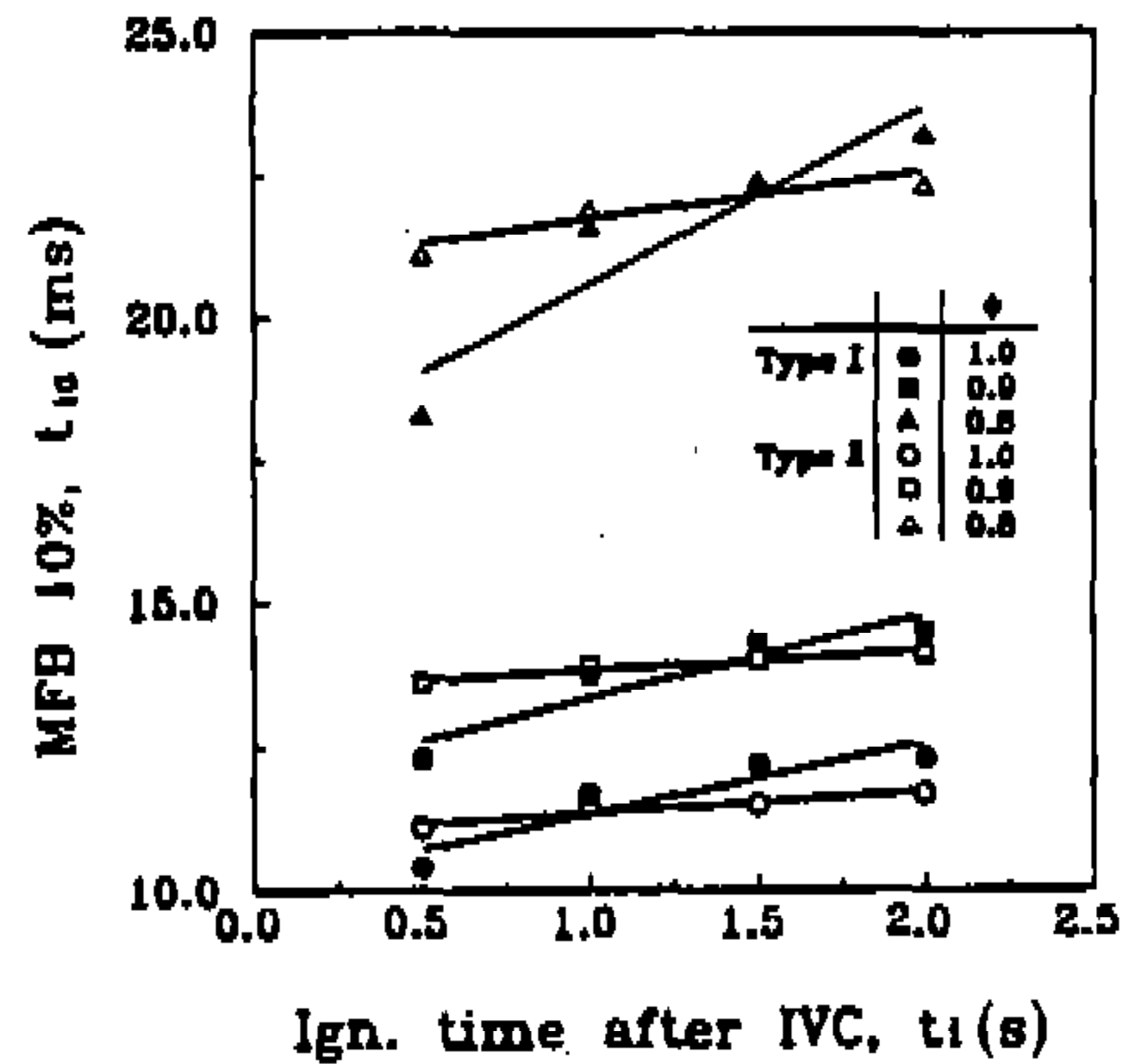


Fig.10 10% and 90% mass fraction burned as a function of equivalence ratio and ignition time after inlet valve closed for bulk flow(type I), and turbulent flow (type II).

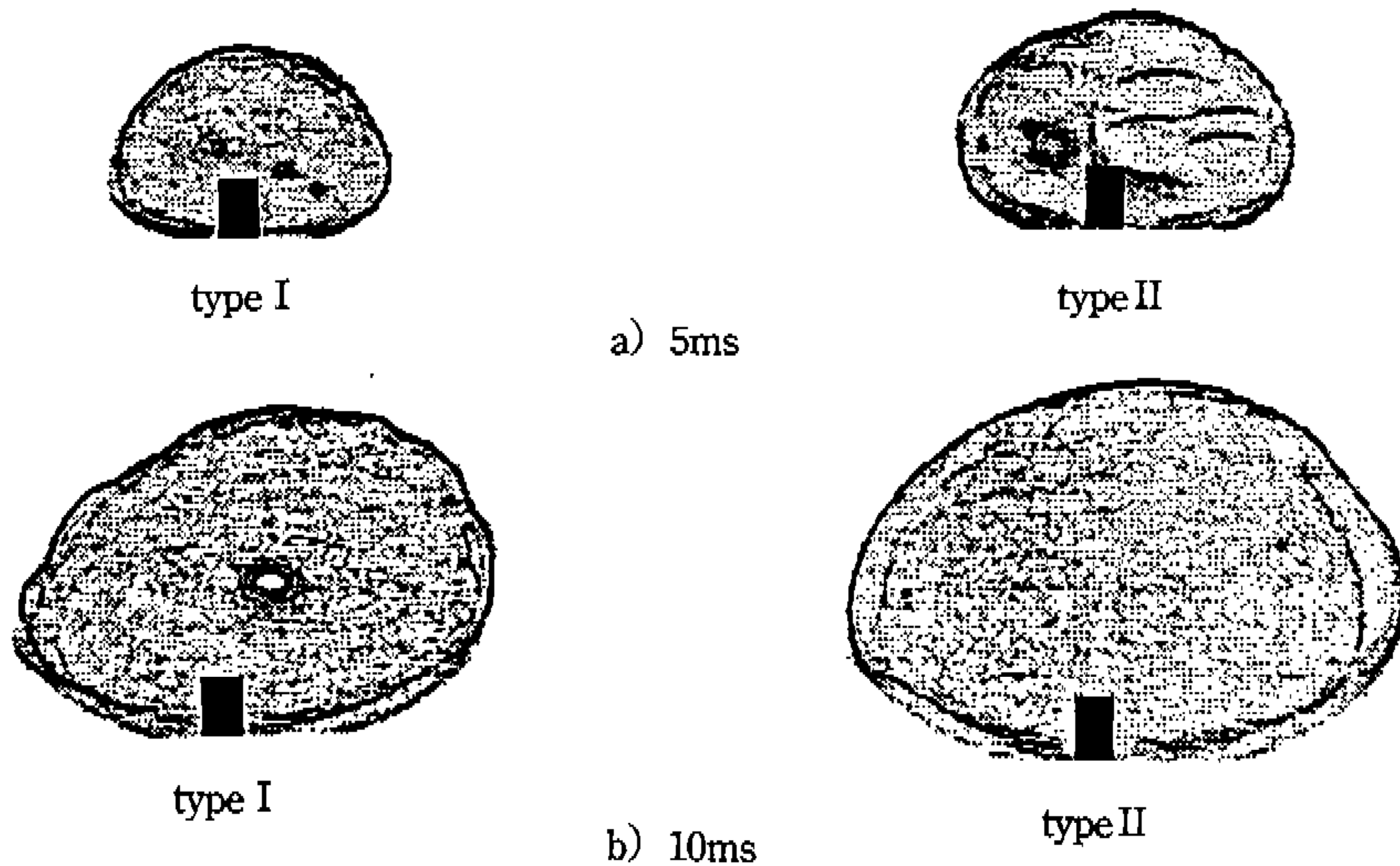


Fig.11 Photographs comparison for early stage of flame propagation between bulk and turbulent flows at $\phi=1.0$ and ignition timing, $t_i=1.5\text{sec}$.

염면적이 type I 보다 약간 크게 나타난 것은 역시 type II가 연소초기 화염전파에 유리함을 알 수 있다.

5. 결 론

정적연소기내 유동과 연소관계 해석을 목적으로 유동형 정적연소기를 제작하여 메탄-공기 혼합기의 연소기내의 유동속도를 열선유속계로써 측정하였으며, 유동형태의 변화에 의해 달라지는 연소기내 화염발달형태를 CCD카메라와 영상증폭장치를 이용한 직접사진법에 의하여 가시화함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연소화염은 스윙유동의 영향으로 한쪽으로 치우쳐지고 스윙유동의 중심을 향하여 발달하면서 유동이 없는 경우에 비해 화염전파가 촉진되고 있다.
- 2) 화염전파속도는 난류강도의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.
- 3) 연소장에서 유동이 강할 경우 주유동형(bulk flow)이 난류 발생형에 비해 연소후기에 화염전파를 촉진시키는 효과가 크다.
- 4) 연소장내의 유동이 약해질수록 난류발생형

이 주유동형에 비해 점화지연시간의 단축 효과와 연소초기 화염전파 촉진효과에서 유리하다. 따라서 연소장내의 연소화염전파 촉진효과는 주유동의 영향이 큰 요인이며 난류의 영향 못지않게 주유동도 화염을 확산함으로써 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. M. David Checkel and David Sing-Khing Ting, "Turbulence Effects on Developing Turbulent Flames in a Constant Volume Combustion Chamber", SAE Technical Paper Series, 930867.
2. R.J. Hanson and A. Thomas, "Flame Development in Swirling Flows in Closed Vessels", Combustion and Flame, Vol.55, pp.255-277, 1984.
3. L.E. Gettel and K.C. Tsai, "The Effect of Enhanced Ignition on the Burning Characteristics of Methane-Air Mixtures", Combustion and Flame, Vol.54, 183-193, 1983.
4. M.T. Lim, R.W. Anderson, and V.S. Arpaci, "Prediction of Spark Kernel Development in

- Constant Volume Combustion", *Combustion and Flame*, Vol.69, pp.303-316, 1987.
5. T.Iijima, T.Takeno, "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity", Vol.65, 1986.
 6. Yukio Mizutani, et al, "Processing of Luminescent Radical Images for Flame Diagnostics", *JSME Int. J. Series II*, Vol.32, No.3, pp.455-463, 1989.
 7. C. Arcoumanis and C-S. Bae, "Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant-Volume Combustion Chamber", SAE paper 930868, 1993.
 8. B.Lewis, G.Von Elbe, "Combustion Flames and Explosions of Gases", Academic Press, New York, p.374, 1961.