

〈논 문〉 SAE NO. 96370089

정적 연소실내의 메탄-공기 혼합기의 연소 특성에 관한 연구

A Study on the Combustion Characteristics of Methane-air Mixture in Constant Volume Combustion Chamber

이 창 식,* 김 동 수,** 오 군 섭***
C. S. Lee, D. S. Kim, K. S. Oh

ABSTRACT

This study describes the combustion characteristics of methane-air mixture with various equivalence ratio and initial conditions of mixture in constant volume combustion chamber. Combustion characteristics of methane-air mixture such as combustion pressure, combustion temperature, and heat release were investigated by the measurement of combustion pressure and temperature in the combustion chamber. The results show that maximum combustion pressure, gas temperature and rate of heat release have peaks at equivalence ratio of 1.1. Combustion duration is also the shortest at the equivalence ratio of 1.1 and it is shortened as initial mixture temperature increases.

주요기술용어 : Constant volume combustion chamber(정적 연소실), Methane-air mixtures(메탄-공기 혼합기), Combustion characteristics(연소 특성), Equivalence ratio(당량비), Rate of heat release(열발생율)

1. 서 론

기관 연소실 내의 연소 특성의 향상과 배출물 중의 유해 가스 저감에 관한 연구는 기관의 성능 개선 및 환경 오염 물질의 배출 저감에 매우 중요한 연구 과제가 되고 있다.

특히 기관 연소실 내의 연소 현상은 연소실 내의 연소 특성 인자, 초기 조건, 연소실 구조, 기관의 운전 조건 등 여러 가지 인자의 영향을 받게 된다. 그러므로 기관 연소실 내의 연소 특성을 규명하고 연소 성능 개선 인자를 밝히는 것은 시급히 해결하여야 할 과제이다. 또한 실린더 내부의 연소 현상은 연소 상태가 매우 복잡하므로 연소 특성을 정확히 측정하여 연소 성능을 밝히는 것이 어려우므로 연소실을 단순화하고 실험 변수를 적게 하여 연소 현상 및 연소 과정을 연

* 정회원, 한양대학교 기계공학과

** 대우자동차(주) 기술연구소

*** 한국 기계 연구원 열유체 시스템 연구부

구하는 것이 효과적인 방법이다.

최근에는 연소 성능의 개선과 아울러 희박 연소 및 저공해 엔진에 관한 연구가 더욱 활발히 이루어지고 있으므로 연소 현상 및 연소 과정을 이해하고 그 지배 인자의 특성을 파악하는 것은 더욱 중요한 연구 과제로 대두되고 있다. 이러한 관점에서 정적 연소기 내에 혼합기의 연소 특성을 규명하는 것은 복잡한 실린더 내의 연소에 영향을 미치는 인자를 용이하게 도출해 낼 수 있는 특징이 있어서 많은 연구가 이루어지고 있다.

배출 가스에 의한 대기 오염을 방지하고 배출 가스 정화 및 연비 성능을 향상시키기 위하여 적용되고 있는 천연 가스 자동차 개발을 위해서는 연료의 연소 및 연소실 내의 연소 거동을 물리적으로 이해하고 이를 해석하여 연소 성능 향상을 위한 설계 자료 등을 확립하기 위해서도 연소실 내의 연소 특성에 관한 연구가 체계적으로 이루어져야 한다.

정적 연소실 내의 연소 특성에 관한 연구는 여러 연구자에 의하여 연구되어 왔다. Checkel과 Ting¹⁾은 정적 연소기에서 난류의 크기를 조절하여 화염 전파 속도에 미치는 영향을 연구하였고, Hanson과 Thomas²⁾는 스윙 유동이 연소에 미치는 영향과 화염 전파에 대한 영향을 구하였다. 또한 점화 에너지와 화염핵 형성에 관한 연구^{3), 4)}, 메탄 혼합기 분위기 변화에 따른 화염 전파 속도에 관한 연구⁵⁾ 등이 이루어져 왔다. 그러나 연소

실 내의 연소 기구, 배출물 특성, 연소 유동 등의 여러 가지 미해명 부분에 대한 더욱 많은 연구가 필요한 것으로 지적되고 있다.

본 연구에서는 정적 연소실 내의 연소 특성을 규명하기 위하여 정적 연소실을 제작하고, 메탄-공기 혼합기를 공급하여 혼합기의 연소 과정을 연소실 내의 분위기, 혼합기의 온도, 압력, 점화 에너지 등의 연소 조건이 변화하였을 경우에 대하여 비교 검토하였다. 또한, 슬리렌 시스템과 고속 촬영 광학 시스템을 이용하여 가시화하고 연소 특성을 구하여 연료-공기의 당량비, 초기 조건 등의 영향을 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치는 정적 연소실, 점화 장치, 메탄-공기 혼합 장치, 압력 측정 장치, 온도 측정 장치, 데이터 수집 및 해석 장치, 슬리렌 사진 촬영 장치 등으로 구성하였으며, Fig.1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 계통도를 나타낸 것이다. 또한 Fig.2는 실험에서 사용한 정적 연소실을 나타낸 것으로서 그 주요 제원은 Table 1과 같다.

연소실의 크기는 지름 100mm, 깊이 40mm이며 연소실 용적은 314cc이고 그 재질은 두랄루민이며 가시화를 위하여 양쪽면에 석영 유리를

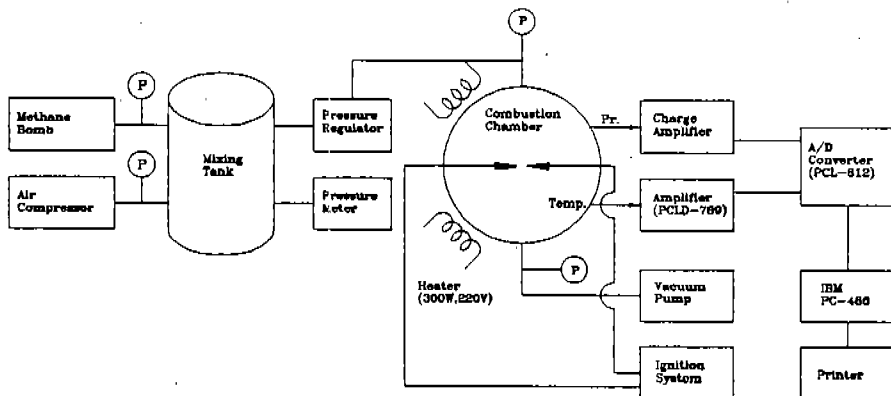


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

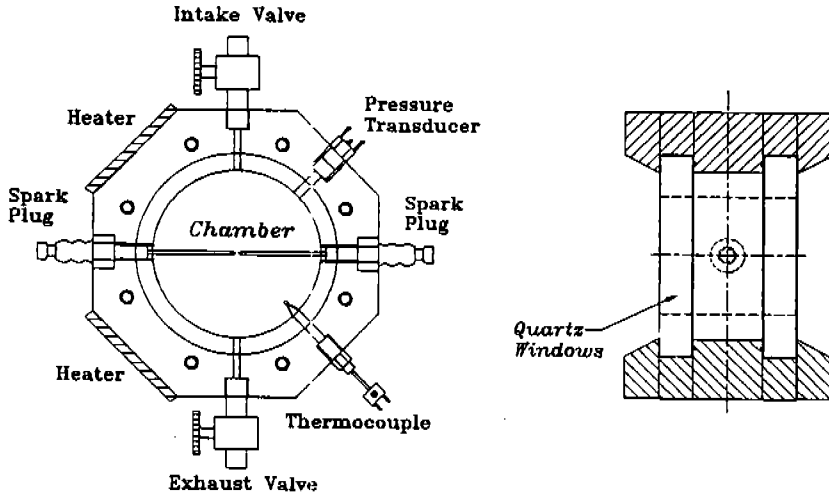


Fig.2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

Table 1 Specifications of constant volume combustion chamber

Diameter	100mm
Depth	40mm
Volume of chamber	314cm ³
Ignition system	CDI system
Pressure transducer	Piezoelectric type(Kistler 601A type)
Thermocouple	R-type

2.2 실험방법

정적 연소실 내로 공급된 혼합기의 초기 압력은 1.5bar에서 3.5bar까지 0.5bar 간격으로 변화시켰고 초기 온도는 308K, 333K, 353K의 3가지로 변화시켰으며, 혼합기의 당량비는 0.7에서 1.2까지 0.1간격으로 변화시켜 실험하였다.

연료는 순도 99.995%의 메탄(CH₄)을 사용하였으며 메탄-공기의 혼합비는 각각의 분압으로부터 다음 식으로 계산하였다.

메탄의 분압은 다이아프램식 압력 게이지(0~2000mbar)로 측정하였고, 공기의 분압은 압력 게이지(0~10kgf/cm²)로 측정하여 혼합비를 구하였다.

연소실에서 발생한 압력은 압력 변환기를 지나서 증폭기에서 증폭되어 A/D변환기를 통하여 1msec 간격으로 컴퓨터에 입력하도록 하였다. 또한, 연소 온도는 열전대의 신호를 증폭기에서 50배 증폭되어 압력 측정과 같은 A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 입력하여 분석하였다.

점화 장치는 CDI(Capacitive Discharge Ignition) 시스템을 사용하였으며 점화 에너지는 파워 트랜지스터로 들어가는 신호의 드웰 타임(dwell

설치하였다. 점화 플러그는 연소실 중앙에서 점화가 이루어지도록 하였으며, 점화 장치는 CDI 시스템으로 구성하고 점화 에너지를 변화시킬 수 있도록 하였다. 연소실의 압력 측정은 압전형 압력 변환기를 사용하였고 온도 측정에는 지름 75 μm의 R-형 열전대를 사용하였다. 한편 연소실 바깥 둘레에는 150W의 판 가열기를 부착하여 혼합기 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

화염 전파의 가시화를 위해서는 지름 300mm인 슐리덴 시스템과 회전 프리즘식 고속 카메라(NAC, 10,00fps)를 사용하여 촬영하고 화염 전파 과정 및 연소 상태를 관찰하고 비교하였다.

time)을 변화시켜서 초기 혼합기 온도 308K, 초기 혼합기 압력 1.1bar에서 10회씩 반복하여 평균 최소 점화 에너지를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 메탄-공기 혼합기의 연소 압력

본 실험에서 압력 데이터는 1ms당 1개씩 컴퓨터에 저장되며 연소가 시작되어 가스 압력이

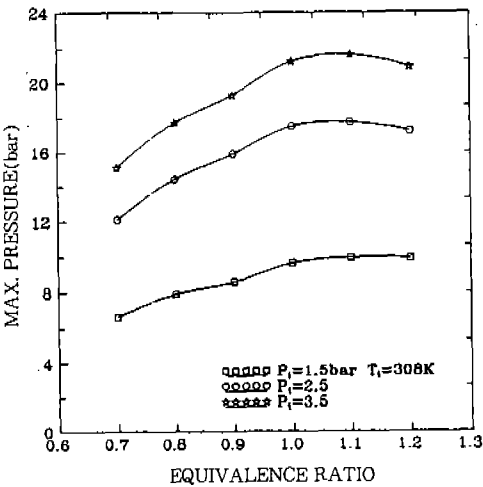


Fig.3 Effect of initial pressure on maximum combustion pressure

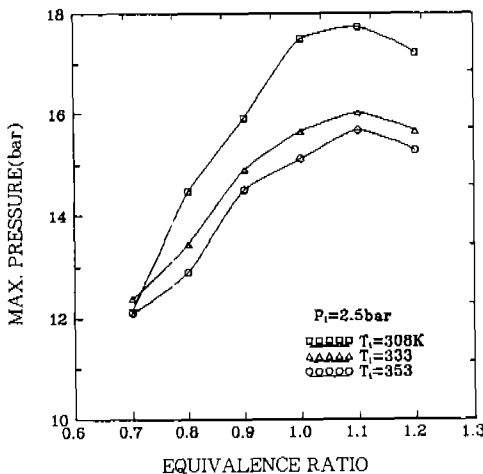


Fig.4 Effect of initial temperature on the maximum combustion pressure

최고에 도달하는 점을 연소 종료점으로 판단하였다.

Fig.3은 각 초기 혼합기 온도가 308K로 일정하고 초기 혼합기 압력을 1.5, 2.0, 2.5, 3.0bar로 변화시켰을 때 당량비와 최고 연소 압력의 관계를 나타낸 선도이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 연소실 내의 가스 압력의 최고치는 당량비 1.0~1.2 범위에서 높은 값을 보이고 있으며 당량비 1.1에서 최고치를 나타내었다. 또한 초기 조건인 혼합기 압력이 증가할 수록 연소 가스의 최고 압력은 현저하게 높아지며, 증가 기울기도 초압이 낮은 경우에 비하여 커지는 경향을 보였다.

Fig.4는 초기 혼합기 압력이 일정할 때 초기 혼합기 온도를 변화시켰을 경우 당량비 변화에 따른 평균 최고 연소 압력의 변화를 나타낸 것이다. 최고 압력은 혼합기 온도가 상승할수록 최고 압력은 저하하는 경향을 나타내었다. 이는 혼합기의 온도가 높아질 수록 가스의 밀도가 감소하면서 연소실 내부로 유입된 혼합기의 질량이 감소한 것에 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

그러나 당량비 0.7의 경우는 높은 당량비에 비하여 그 질량이 극히 작아서 밀도 감소의 영향을 별로 받지 않은 것으로 생각된다.

Fig.5는 초기 혼합기 압력이 일정할 때 초기

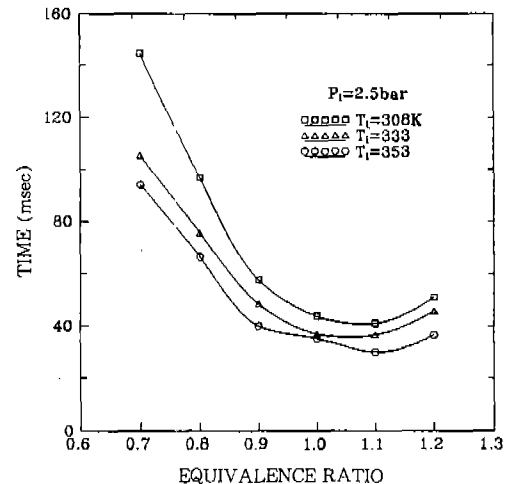


Fig.5 Effect of initial temperature on the combustion duration

혼합기 온도 변화에 따른 연소 압력이 최고에 달하는 시간을 나타낸 것이다. 연소 기간은 점화 시작부터 최고 연소 압력 발생시 까지의 기간으로 구하며 당량비가 1.1에서 가장 짧아지며, 혼합기의 초기 온도가 상승함에 따라서 연소 기간이 짧아짐을 알 수 있다. 특히 공연비가 희박해짐에 따라서 연소 기간이 급격히 길어지고 있음을 알 수 있다.

3.2 메탄-공기 혼합기의 연소 온도

Fig.6은 초기 혼합기 온도와 압력이 각각 308K, 1.5bar일 때 당량비 변화에 따른 연소 온도의 변화를 나타낸 그림이다. 당량비가 0.7에서 1.0으로 농후해짐에 따라서 연소 기간을 짧아지고 최고 연소 온도는 증가하는 경향을 보이며, 당량비가 1.0일 때 최고 연소 온도가 나타나고 있다.

Fig.7는 당량비와 초기 혼합기 압력이 일정할 때 초기 혼합기 온도를 308, 333K의 두 가지로 변화시켰을 경우의 연소 온도의 변화를 나타낸 선도이다. 연소 온도는 초기 혼합기 온도가 높은 경우가 최고 연소 온도는 낮아졌다.

Fig.8은 당량비, 초기 혼합기 온도, 초기 혼합기 압력의 변화에 대한 최고 연소 온도를 도시한 것이다. 당량비가 일정할 경우 초기 혼합기 압력

이 감소함에 따라서 최고 연소 온도가 저하하는 경향을 나타내었다.

3.3 메탄-공기 혼합기의 연소율

연소율의 계산은 실험결과 얻어진 압력 데이터로부터 Lewis와 Von Elbe⁹⁾의 식을 이용하여 계산한다.

$$M_{burn}(t) = \frac{P(t) - P_i}{P_{max} - P_i}$$

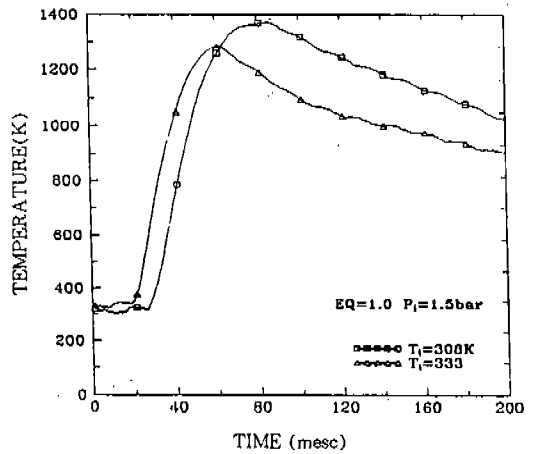


Fig.7 Effect of initial temperature on the combustion temperature

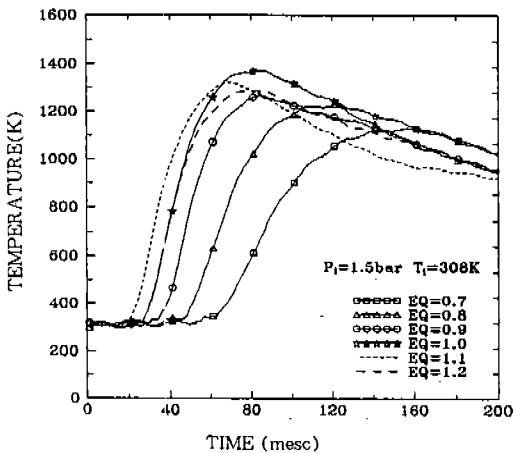


Fig.6 Effect of equivalence ratio on the combustion temperature

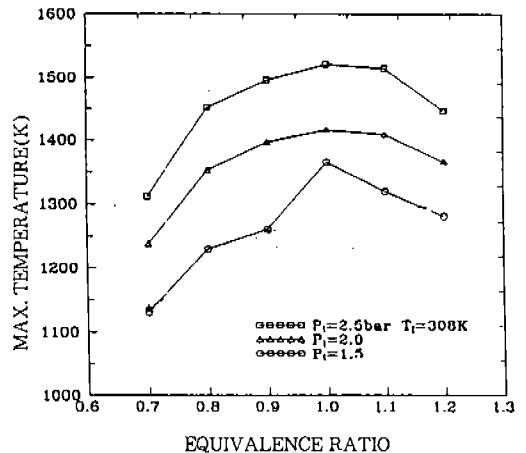


Fig.8 Effect of initial pressure on the maximum combustion temperature

여기서, $P(t)$ 는 연소 압력, P_i 는 초기 혼합기 압력, P_{max} 는 최고 연소 압력을 나타낸다. 즉, 최고 연소 압력에 도달한 때를 혼합기가 100% 연소한 것으로 보고 이에 대한 상대값을 계산한 것이다.

Fig.9는 초기 혼합기 온도가 308K, 초기 혼합기 압력이 2.5bar일 때 당량비가 0.7에서 1.1까지 변화함에 따른 연소율의 변화를 나타낸 것이다. 이 선도에 도시한 바와같이 당량비 0.9~1.1의 범위에서는 연소율의 차이가 매우 작아지며, 당량비가 0.7에서 1.1로 농후해짐에 따라서 연소율은 급격히 좋아짐을 알 수 있다. 한편 당량비가 0.9이하로 희박해짐에 따라서 100% 연소될 때까지의 시간이 40ms이상 길어지게 되며 당량비가 0.9에서 0.8로, 0.8에서 0.7로 희박해질 때의 연소 기간은 약 40ms이상 길어졌다. 따라서 비교적 연소가 안정된 영역은 0.9~1.1 사이이며 이 영역을 벗어날 경우 연소 기간이 급격히 길어짐을 알 수 있다.

Fig.10은 당량비가 0.9로 일정하고 초기 혼합기 압력이 2.5bar로 일정할 경우 초기 혼합기 온도를 308K, 333K, 353K의 세 가지로 변화시켰을 때의 연소율의 변화를 나타낸 것이다. 혼합기의 초기 온도가 높아짐에 따라서 연소반응이 활발해져서 연소 기간은 짧아짐을 알 수 있다. 이

러한 경향은 초기 온도가 높아짐에 따라 혼합기의 반응에 필요한 시간이 단축되며, 연소에 필요한 활성화가 더욱 촉진되기 때문인 것으로 생각된다.

3.4 메탄-공기 혼합기의 열발생율

열발생율을 계산하기 위하여 먼저 압력 상승률 (dP/dt)을 계산해야 하는데 이는 측정된 압력 값으로부터 계산한다.

연소실 내의 혼합기에 대하여 이상 기체 상태 방정식을 적용하고 시간 t 에 대하여 미분하여, 열역학 제 1 법칙 식을 정리하면 열발생율 (dQ/dt)이 계산된다.

Fig.11은 연소실 내의 혼합기의 당량비를 1.7로부터 1.2까지 변화시켰을 경우의 열발생율(R. O.H.R.)을 나타낸 것이고, Fig.12와 Fig.13은 각각 초기 압력 P_i , 초기 혼합기 온도 T_i 를 변화시켰을 경우 연소실 내의 열발생율을 구하여 도시한 것이다. Fig.11은 당량비가 1.1일 때 최고 열발생율이 나타나며 열발생율의 최고치가 나타나는 시간도 가장 짧았다.

Fig.12는 초기 혼합기 압력이 1.5에서 3.5bar까지 변화시켰을 때의 열발생율을 도시한 것으로 초기 혼합기 압력이 3.5bar일 때 최고치를 나타내었다.

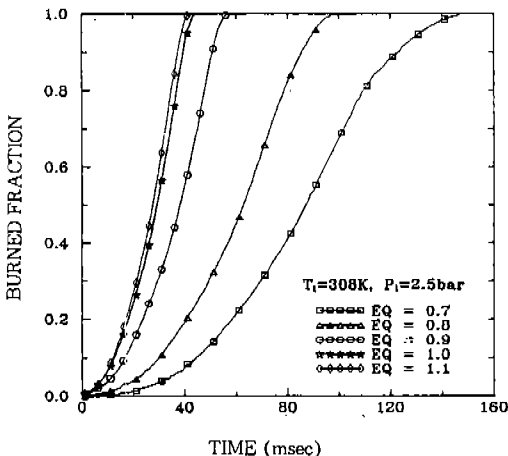


Fig.9 Effect of equivalence ratio on the burned fraction

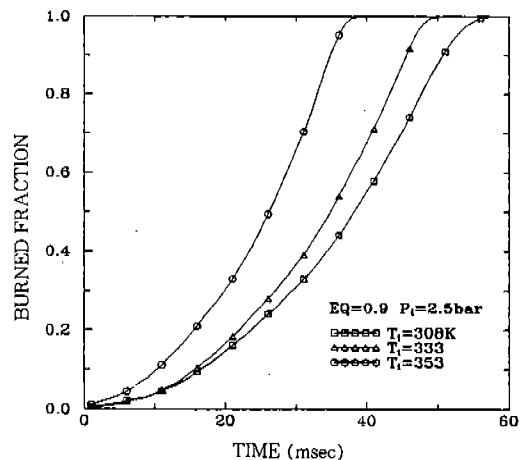


Fig.10 Effect of initial temperature on the burned fraction

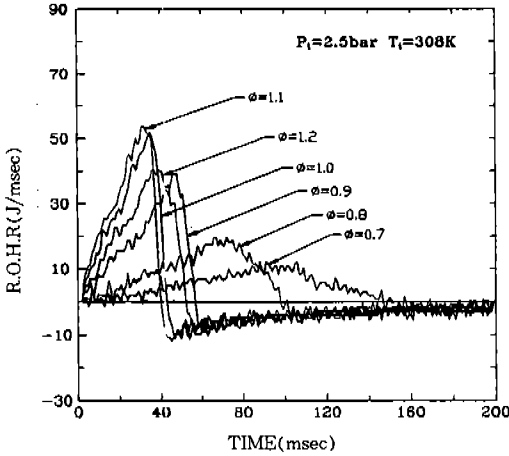


Fig.11 Effect of equivalence ratio on the rate of heat release

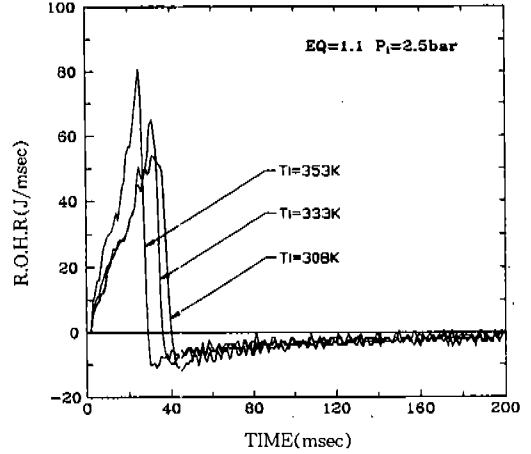


Fig.13 Effect of gas temperature on the rate of heat release

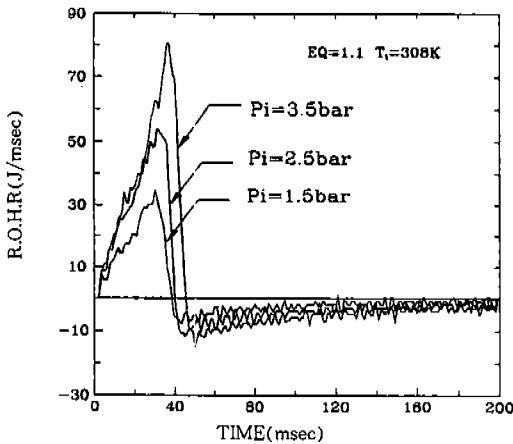


Fig.12 Effect of initial pressure on the rate of heat release

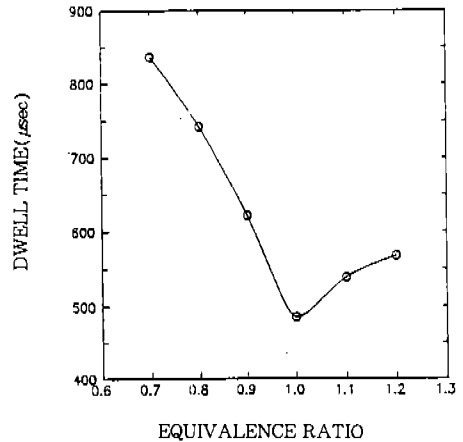


Fig.14 Relation between dwell time and equivalence ratio

Fig.13은 혼합기의 당량비와 초기압력이 일정할 때 초기 혼합기 온도 변화에 따른 열발생율의 변화를 나타낸 것이다. 혼합기의 온도가 높아질수록 열발생율의 최고치는 높아지며 최고치에 도달하는 시간도 짧아지고 있는데 이는 혼합기에 대한 초기 혼합기 온도가 연소 속도를 빠르게 하는 인자로 작용함을 나타내는 것으로 판단된다.

3.5 메탄-공기 혼합기의 최소 점화 에너지

점화 에너지는 파워 트랜지스터로 들어가는 신호의 dwell time에 비례하므로 최소 점화 에너지

는 dwell time을 측정해서 구할 수 있다.

Fig.14는 초기 혼합기 압력 1.1bar, 초기 혼합기 온도 308K에서 최소 점화 에너지가 되는 dwell time을 측정된 결과를 도시한 선도이다.

그림에서 dwell time은 당량비가 1.0~1.2 범위에서 비교적 낮은 값을 나타냈으며 당량비 1.0에서 490 μ sec로 최소값을 나타내었다. 이 결과는 당량비가 1.0일 때 혼합기를 연소시키는 데 필요한 점화 에너지가 가장 적음을 알 수 있고, 또한 온도를 상승시켰으나 비슷한 값을 나타내어 온도는 점화 에너지에 별로 영향을 주지 않는 것

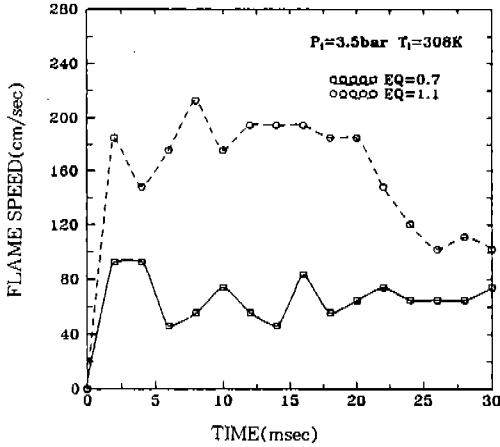


Fig.15 Effect of equivalence ratio on flame propagation speed

으로 생각된다. 특히 당량비가 농후할 때보다 희박해짐에 따라서 dwell time이 큰 폭으로 증가하므로 그만큼 점화 에너지가 많이 필요하게 되는 결과를 보이고 있다.

3.6 화염의 전파 속도

본 연구에서 화염 전파 속도는 연소 과정을 2,000fps 속도로 촬영한 고속 스틸렌 사진으로부터 화염면의 진행 거리를 측정하여 그 속도를 계산하였다.

Fig.15는 초기 혼합기 압력과 온도가 일정할 때 당량비를 0.7과 1.1의 두가지로 변화시킨 경우의 화염 전파 속도를 계산한 것이다. 당량비가 0.7인 경우에는 1.1에 비하여 그 속도가 현저히 낮으며, 특히 당량비 1.1의 경우에는 화염 전파 속도가 0.7의 경우보다 빠른 것으로 나타났다.

4. 결 론

정적 연소기를 이용하여 메탄-공기 혼합기의 당량비, 초기 혼합기 압력 및 초기 혼합기 온도를 변화에 따른 연소 특성을 실험한 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 메탄-공기 혼합기를 정적 연소실 내에서 연소시켰을 경우 연소 압력은 혼합기의 분

위기 압력이 높을 수록, 또한 초기 혼합기 온도가 낮을 수록 높게 나타났다. 특히 당량비가 1.0~1.2일 때 연소 압력이 높았으며 최고 연소 압력이 나타나는 것은 당량비 1.1일 경우이다.

- 2) 메탄-공기 혼합기의 연소 기간은 희박 혼합기일수록 길어지며, 당량비가 1.1부근에서 가장 짧게 나타난다.
- 3) 메탄-공기 혼합기의 연소 온도는 혼합기의 초기 압력이 높아질수록 높아지며, 열 발생율은 초기 압력과 초기 온도가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 갖는다.
- 4) 메탄-공기 혼합기의 연소 점화 에너지는 당량비가 이론 혼합비일 경우에 가장 적게 소요되며, 희박해질수록 점화 에너지는 증가한다.

후 기

이 연구는 한국 과학 재단의 특정 기초 연구 지원에 의하여 이루어진 연구의 일부로서 연구를 지원하여 주신 한국 과학 재단과 관계 제위에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. J. Waldon and R. G. Allen, "Natural Gas for Vehicles(NVG)", SAE Paper 912558, 1991.
2. M. David Chekel and David Sing-Khing Ting, "turbulence Effects on developing Turbulent Flames in a Constant Volume Combustion Chamber", SAE Technical Paper Series, 930867, 1993.
3. R. J. Hanson and A. Thomas, "Flame Development in Swirling Flows in Closed Vessels", Combustion and Flame, Vol. 55, pp. 301~305, 1984.
4. L. E. Gettel and K. C. Tsai, "The Effect of Enhanced Ignition on the Burning Characteristics of Methane-Air Mixtures", Com-

- bustion and Flame, Vol. 69, pp. 650~655, 1987.
5. 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. 150~155, 1987.
 6. T. Iijima, T. Takeno, "Effect of Temperature and Pressure on Burning Velocity", Vol. 65, pp. 1986.
 7. Yukio Mizutani, et al, "Processing of Luminescent Radical Images for Flame Diagnostics", *JSME Int. J. Series II*, Vol. 32, No. 3, pp. 162, 1989.
 8. C. Arcoumanis and C-s. Bae, "Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant-Volume Combustion Chamber", *SAE 930868*, p. 1, 1993.
 9. Lewis, B and von Elbe. G., "Combustion, Flames, and Explosions of Gases," Academic Press, New York, p. 374, 1961.