

〈論 文〉

정적연소기를 사용한 메탄올의 연소특성에 관한 연구

이태원* · 이중순* · 탁영조* · 정성식** · 하종률**

(1993년 6월 24일 접수)

Fundamental Study on Combustion Characteristics of Methanol Fuel in a Constant Volume Chamber

Tea-Won Lee, Jung-Sun Lee, Young-Jo Tak, Sung-Sik Chung and Jong-Yul Ha

Key Words : Methanol Flame(메탄올 화염), Equivalence Ratio(당량비), Effective Thermal Efficiency(유효 열량률), Ignitability(발화성), Constant Volume Chamber(정적연소기), Flame Propagation Speed(화염 전 파 속도), High Speed Schlieren Photography(고속 슬리렌사진)

Abstract

It is very important to clarify the ignition and flame propagation processes of methanol fuel in the Spark-ignition engine. High speed Schlieren photography and pressure trace analyses were used to study on combustion characteristics of methanol fuel in a constant volume chamber. Methanol-air mixtures equivalence ratios from lean limit to 1.4 were ignited at initial pressure(0.1, 0.3, 0.5 MPa), temperature(313, 343, 373 K) and ignition energy(40,180 mJ). As the result of this study, we verified the characteristics such as ignition delay, effective thermal efficiency, flame propagation velocity, lean limit, ignitability and combustion duration. Obatined results are as follows. (1) The time to 10% reach of maximum pressure was 40~50% of the total combustion duration for this experimental condition hardly affected by equivalence ratio. (2) The Effective thermal efficiency, as calculated from maximum pressure was the highest when the mixture was slightly lean(ϕ 0.8~0.9) and maximum pressure was the highest when the the mixture was slightly rich(ϕ 1.2~1.2).

1. 서 론

최근 석유계 연료의 유한성에 따른 대체에너지 개발의 측면과 기관으로부터의 유해 배출물로 인한 환경오염이 사회적 문제점으로 대두되고 있어, 저공해 대체연료의 개발에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.^(1,2)

이 가운데 메탄올은 지구상에 풍부하게 보존되어

있는 천연가스, 석탄 및 식물 등으로부터 제조할 수 있기 때문에 장기적인 공급이 가능하며, 가솔린에 비해 메탄올의 고옥탄가로 인해서 출력증대가 가능하고, 가연범위가 넓어 회박연소를 이용한 NOx의 저감이 가능하며, 열효율을 증대시킬 수 있어 고출력, 저공해 및 저연비 기관의 가능성을 가지고 있으며, 엔진에 대해서도 기존의 내연기관 기술의 연장선에 있으므로 비교적 쉽게 대응이 가능하며, 내연기관용 대체연료로서 주목을 받고 있다.^(3,4,5)

그러나, 근래 메탄올연료 자동차의 개발이 진행

*정회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 동아대학교 기계공학과

되고 있으나 대체연료로서 메탄올연료를 사용하기 위해서는 아직도 연소특성에 대한 정보가 충분하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 메탄올연료의 연소특성을 밝히기 위하여 정적연소기를 사용하여 혼합기의 초기온도, 초기압력 그리고 CDI 점화장치에서의 점화에너지를 변화시킬 경우, 메탄올-공기의 당량비에 따른 가연한계, 압력상승기간, 연소최고압력, 화염전파속도, 연소기간, 유효열량률 등의 산출과 화염의 고속사진분석을 통한 연소해석을 하여 정지분위기 속에서 초기조건이 메탄올 연소에 미치는 영향을 밝힘으로써, 메탄올의 연소기구에 대한 기초정보를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소실 및 주변장치

실험에 사용된 연소실은 직경 70 mm, 폭 34 mm 인 체적 134 cc의 정적연소실이며, 가시화를 위해 양측면에 두께 20 mm의 경화유리를 설치할 수 있도록 하였다. 연소실 벽면에 의한 냉각손실로부터 화염성장애 미치는 영향을 줄이고, 사진촬영을 통한 해석을 용이하게 하기 위하여 점화는 연소실 중앙에서 이루어지도록 하였고, 점화플러그는 직경이 1 mm인 피아노선을 사용하여 양단을 침단가공 하였으며, 두 전극의 간극은 1 mm로 하였다. 또한, 연소기의 외측에는 혼합이 쉽게 되도록 하기 위하여 접선방향으로 흡·배기용 밸브를 설치하였고, 압력변환기 연료주입용 어댑터, 그리고 연소실 내의 공기온도 측정을 위해 열전대를 설치하였다. 그리고 연소실의 초기온도를 설정온도로 가열하기 위하여 50 W 판히터를 3곳에 설치하였다.

Fig. 1은 실험장치의 구성도이다. 실험장치는 연소기(11), 공기공급장치, 점화장치(16,17,18), 압력측정장치(21,13,14,15) 및 가시화장치로 구분된다.

연소실 내의 압력은 저항선변형계식 압력변환기(PE-100KW, Kyowa)로 측정하며, 증폭기를 거쳐 A/D변환기(샘플링속도 4KHz)를 통하여 컴퓨터에 입력되고, 점화시작 시간을 명확히 하기 위하여 점화신호와 압력 채취 프로그램의 진행신호를 컴퓨터 입력판에서 입력되는 동시신호로 사용하였다. 점화장치는 CDI식이며, 축전기에 충전되는 충전에너지는 전압변환기로 충전전압을 변화시켜 40 mJ과 180 mJ로 점화에너지를 조절하였다. 공기공급장치에서는 압축기로부터의 가압된 공기를 예열탱크 및

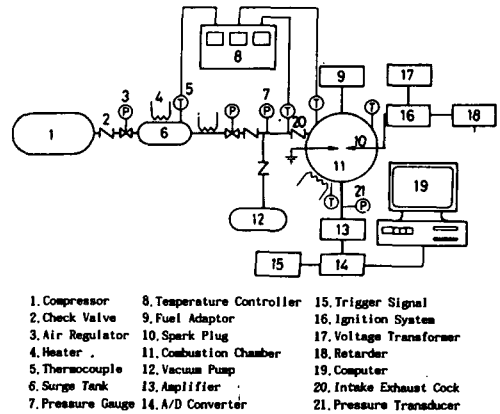


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

공기공급 통로에서 판히터와 코일히터를 사용하여 가열했으며 온도제어는 열전대로써 감지하여 온도 제어기(8)에서 설정된 온도로 제어하였고, 연소실의 초기압력은 두개의 압력조절밸브로써 조절했다. 연소현상의 가시화에는 회전드럼식 고속카메라(CORDIN 350)를 사용하여 약 7000 FPS(35 mm 필름사용)의 속도로 슬리덴 사진촬영을 행했다.

2.2 실험방법

연소기 내의 혼합기 형성은 진공펌프로 연소실 내의 압력을 부압으로 만든 후, 연료주입구를 통하여 마이크로리터 주사기(용량 10, 50, 100 μ l, 최소단위 0.2, 1.0 μ l)로써 설정 연료량을 공급한 후, 설정된 압력과 온도로 조정된 공기를 공급하여 연료 공기를 균질하게 혼합시킨 후 연소실험을 행했다.

대기온도하에서 연소실에 주입되는 메탄올의 양을 당량비에 따른체적(V_m)으로 표시하면 다음과 같다.

$$V_m = \frac{12.26\phi \cdot (P_i - P_{H_2O}) V_c}{100(\rho_{ma} \cdot R_m \cdot T_i)}$$

여기에서,

P_i : 연소실 내 초기압력(MPa)

T_i : 연소실 내 초기온도(K)

V_c : 연소실 체적(m^3)

ρ_{ma} : 대기온도에서의 메탄올의 밀도(Kg/m^3)

ϕ : 당량비

메탄올, 공기 혼합기의 압력, 온도 및 점화에너지의 초기조건은 Table 1과 같고 당량비는 각 초

Table 1 Initial condition of methanol-air mixture

Parameter	Condition
Initial pressure	0.1, 0.2, 0.3, 0.5 MPa
Initial temperature	313, 343, 373 K
Ignition energy	40 mJ, 180 mJ
Equivalence ratio	Lean limit~1.4

기조건의 회박가연한계까지 변화시켰다.

3. 실험결과

3.1 연소압력의 시간경과

연소실 내에서의 연소압력의 시간경과를 측정 한 결과의 한 예를 기호의 정의와 함께 Fig. 2에 보인다. 연소의 초기조건으로는 점화에너지는 40 mJ, 초기압력과 초기온도는 각각 0.3 MPa, 343 K이며, 당량비 1.0으로 설정한 경우의 결과를 보인다. 그림에서 A점이 점화시기, B점이 압력상승 시작 위치, 그리고 C점은 최고압력 도달시기로서 본 연구에서는 연소가 종료되는 시점으로 판단한다. A 점에서 C점까지를 연소기간 τ_{pmax} 로 표시하고, B 점에서 C점까지를 압력상승시간 τ_{PR} 로 정의한다. 또, 연소압력이 최고 연소압력의 10%까지 상승하는데 소요되는 시간을 τ_{10} , 90%까지 상승시간을 τ_{90} 으로 각각 정의한다.

3.2 가연한계

메탄올·공기 혼합기의 주어진 초기조건에서 특히, 회박혼합비 부근의 가연한계를 밝히기 위하여 초기온도, 초기압력과 점화에너지 등이 착화성에 미치는 영향에 관하여 여러 조건에서 연소실험을 행하였다. 점화 Energy를 40 mJ, 180 mJ, 초기온도를 373 K로 한 경우의 착화 실험결과에서 착화성과 당량비와의 관계를 초기압력의 영향에 대하여 Fig. 3에 도시한다. 연소실험 시도회수는 동일조건에서 최소 5회 이상 실시하였다.

점화에너지의 영향은 40 mJ에서 180 mJ로 증가함에 따라 1~5%의 가연범위가 증가했으며, 초기압력의 영향은 0.1 MPa에서 0.5 MPa로 증가함에 따라 15~20% 정도의 가연한계 범위의 증가를 보였고, 그림에는 표시되어 있지 않으나 초기온도를 증가시켰을 때에도 1~5%의 가연한계 범위의 증가를

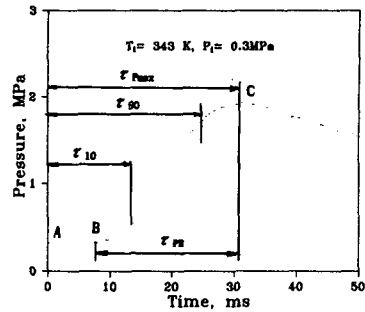


Fig. 2 Typical pressure signal and definition of symbols

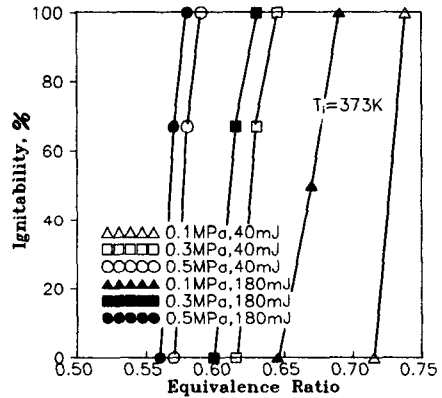


Fig. 3 Ignitability of methanol-air mixture(373 K)

보였다. 이들 결과로부터 가연한계는 초기압력, 초기온도와 점화에너지의 증가와 함께 그 범위가 넓어지고, 특히 초기압력이 가연한계에 미치는 영향이 가장 큰 것을 알 수 있었다.

3.3 당량비와 연소기간

초기온도와 초기압력을 변화시킨 경우의 당량비에 따른 연소기간의 변화를 연소실 압력을 측정하여 구한 결과로써 Fig. 4, 5에 도시한다.

Fig. 4에서는 초기온도를 343 K, 점화에너지 40 mJ에서 초기압력을 변화시킨 경우의 당량비에 따른 연소기간을 보인다. 연소기간은 점화시작부터 최고압력발생시 까지의 기간으로 구했으며 당량비에 따른 연소기간은 당량비 1.1~1.2범위에서 가장 짧고, 혼합비가 농후하거나 회박할수록 길어지는 경향을 보이며, 회박가연한계 근처에서는 급격히 길어진다. 특히, 초기압력이 0.1 MPa에서 0.5 MPa로 증가함에 따라 당량비 1.0~1.2인 구간에서는

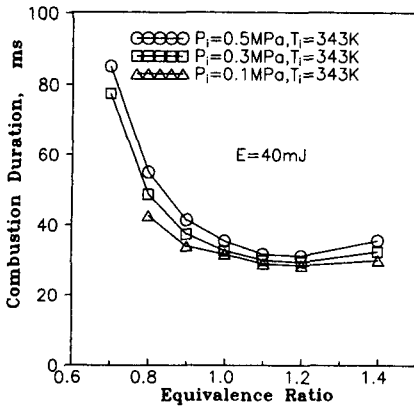


Fig. 4 Effect of equivalence ratio on combustion duration τ_{pmax}

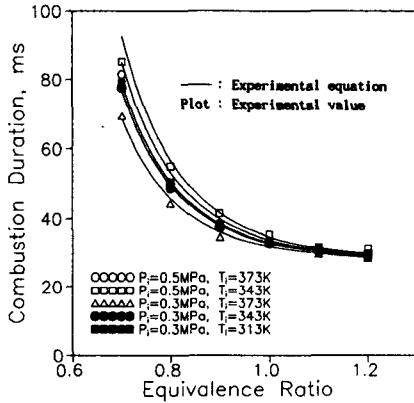


Fig. 5 Effect of equivalence ratio on combustion duration τ_{pmax}

8% 정도의 연소기간의 증가에 비하여, 당량비 0.7~0.9인 구간에서는 연소기간이 22% 정도 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 5에서는 점화에너지 40 mJ, 초기압력 0.3, 0.5 MPa에서의 초기온도를 313, 343, 373 K로 각각 변화시킨 경우의 당량비에 따른 연소기간과 실험식에 의해 계산된 결과치를 함께 보인다. 초기온도가 낮아질수록 연소기간은 5~10% 정도 길어지며, 실험치와 실험식에 의해 계산된 결과치와는 최소 95% 이상의 정도를 보인다. 각 초기온도조건과 초기압력조건에서 보면, 연소기간은 초기조건중 당량비의 영향을 가장 많이 받으며, 다음으로 압력, 온도 순으로 길어진다.

정지분위기인 경우 연소기간에 영향을 주는 요인으로는 당량비, 초기압력, 초기온도이며, 본 연구

의 결과를 이용하면 메탄올의 연소기간은 다음과 같은 실험식으로 표시 할 수 있다.

$$\tau_{pmax} = 26.80 + [(48.4205 - 0.11265 T_i) \cdot P_i + 3.2] \phi^{-5.910}$$

여기에서,

- τ_{pmax} : 연소기간 (ms)
- T_i : 혼합기의 초기온도 (K)
- P_i : 혼합기의 초기압력 (MPa)
- ϕ : 당량비

3.4 압력발생지연 및 압력상승기간

본 연구의 실험조건 범위에서 고전압 발생시각을 점화시작 시간으로 판단하는 경우 압력발생지연은 전 연소기간의 20% 이상의 범위를 보였는데 이는 착화지연, 화염전파지연, 압력변환기의 응답성(정격출력 $0.5 \mu V/V / (1527 \times 10^{-6})$, 고유진동수 25~45 KHz) 등에 의한 이유로 생각된다. 이러한 압력변환기로부터의 정보와 고속 화염사진으로부터의 정보를 비교분석할 때, 압력변환기에 감지되는 압력의 출현은 연소실 중앙부에서 점화하는 경우 연소실체적의 12% 이상 성장했을 때부터임을 확인하였다. 이러한 결과로 부터 점화후 압력변환기에서 의형상 압력이 감지되는 시각으로부터 연소끝으로 판단되는 P_{max} 발생시각까지의 시간 비율을 판단함으로써 전 연소기간중 압력상승에 소요되는 시간비율을 각 초기조건에 따라 밝혔다.

Fig. 6은 초기압력을 0.5 MPa, 초기온도를 313, 343 K로 변화시켰을 때의 당량비에 따른 압력상승기간 τ_{PR} 에 대해서 나타낸다. 압력상승기간은 당량비의 영향을 거의 받지 않고 일정한 값을 보이며, 온도가 증가하면 그 값은 감소하는 경향을 보이고 압력상승기간은 전 연소기간의 60~80% 범위인 것을 알 수 있다. 이것은 온도가 증가하면 전 연소기간에서 압력상승기간의 소요시간이 단축됨을 의미하며, 이러한 경향은 초기압력이 변해도 동일한 결과를 나타낸다.

Fig. 7은 초기압력 0.5 MPa, 초기온도 343, 373 K로 변화시켰을 때의 τ_{10} , τ_{90} , τ_{pmax} 를 당량비에 따라 도시한다. τ_{10} 까지의 도달기간이 차지하는 비율은 희박혼합비 쪽에서 약간 상승하는 경향이 있지만 거의 40~50%의 범위를 보인다. 이는 τ_{10} 이 전 연소기간 중 차지하는 비율은 당량비, 초기온도에 무관하게 거의 일정한 비율을 나타내며, 초기압력

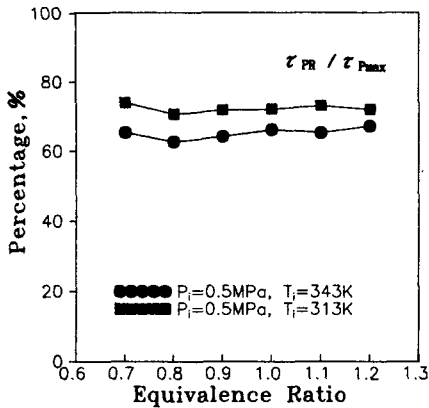


Fig. 6 Effect of equivalence ratio on τ_{pr}/τ_{pmax}

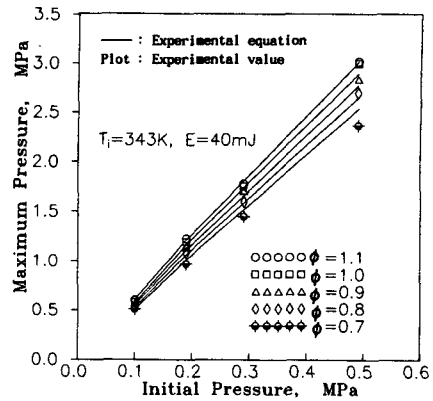


Fig. 8 Relation between maximum pressure and initial pressure

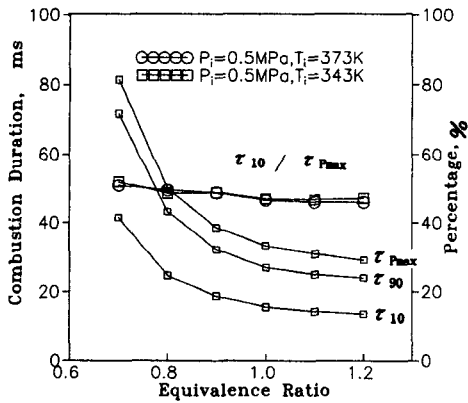


Fig. 7 Effect of equivalence ratio on combustion duration and τ_{10}/τ_{pmax}

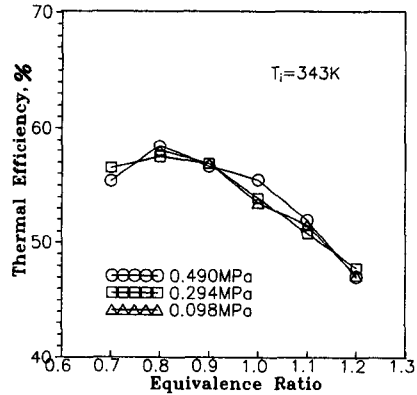


Fig. 9 Effect of equivalence ratio on thermal efficiency

의 영향도 받지 않음을 알 수 있다.

3.5 당량비와 연소 최고압력

Fig. 8은 혼합기의 초기온도가 343 K인 경우 연소 최고압력과 초기압력과의 관계를 실험식에 의해 계산된 결과치와 함께 각 당량비 별로 보인다. 동일 당량비에서 연소 최고압력은 초기압력에 비례해서 증가하며, 당량비가 작을수록 압력상승의 기울기는 감소하는 경향을 보이며, 각 초기온도, 초기 압력조건에서는 당량비 1.1부근에서 가장 높은 최고압력을 나타내며, 실험식에 의해 계산된 결과치와의 비교에서 최소 95% 이상의 정도를 보인다.

본 연구의 결과에 의하면 연소 최고압력 P_{max} 는 혼합기의 초기압력 P_i (MPa)과 당량비 그리고 초기온도 T_i (K) 로써 다음과 같은 실험식으로 표현된다.

$$P_{max} = 3.841 P_i \exp[(1.241269 - 0.002358 T_i) \phi]$$

3.6 당량비와 유효열량률

주어진 초기조건에서 연소실에 공급된 열량의 연소실 내 압력상승에 기여하는 정도를 알아 보기 위하여 아래에 제시한 계산방법으로 유효열량률을 확인하였다.

혼합기 초기온도가 343 K, 초기압력이 0.1, 0.3, 0.5 MPa인 압력조건에서 당량비에 따른 유효열량률의 변화를 Fig. 9에 보인다. 유효열량률은 혼합기의 초기압력에 그다지 영향을 받지 않고, 당량비 0.8~0.9부근에서 최대값을 보이며 특히, 가연한계 근방인 당량비 0.7에서 높은 유효열량률을 보이는 데 비하여 이론혼합비와 농후한 쪽에서 유효열량률이 크게 낮아지는 현상을 나타내며, 초기온도가 증

가하면 유효열량률도 증가하는 경향을 보임을 본 연구결과로 부터 알 수 있다.

이러한 경향은, 과농혼합기인 경우가 희박혼합기 보다는 공급열량이 많음에도 불구하고 압력상승의 기여도가 낮은 것은 불안전연소로 인해 공급열량의 유효압력으로의 전환율이 나쁘기 때문이며, 주위 초기온도가 일정한 경우 희박혼합기 조건보다는 과농혼합기의 발열량이 높아 주위와의 온도구배가 증가함으로 인한 냉각손실이 더 크기 때문으로 생각 된다.

유효 열량률 η 는 아래의 식으로 구하였다.

$$Q_1 = V_f \cdot H_i$$

$$Q_2 = C_m \cdot G \cdot (P_{max} \cdot V_c / G \cdot R_m - T_i)$$

$$\eta = (Q_2 / Q_1) \times 100$$

여기에서,

- Q_1 : 연소실에 공급된 열량
- Q_2 : 연소압력으로 부터 환산된 열량률
- H_i : 연료의 저발열량(Kcal)
- C_m : 평균비열

3.7 화염의 가시화

메탄올·공기혼합기의 여러 초기조건에 따른 연소현상을 가시화하기 위하여 화염의 고속 슐리렌사진 촬영을 행하여 그 결과를 분석하였다.

초기압력 0.3 MPa, 초기온도 373 K에서 당량비를 0.7, 0.9로 변화시켰을 때의 고속 슐리렌사진(6742 FPS)을 Fig. 10에 보인다. 당량비 0.9는 동일 초기온도, 초기압력에서 유효열량률이 가장 높은 영역이며, 0.7의 조건은 희박쪽의 가연한계 부근으로 연소기간이 가장 긴 경우이다. 당량비 0.9의 경우엔 화염의 초기 성장시 거의 진원인데 비하여, 0.7의 경우에는 느린 화염전파속도 때문에 점화플러그 전극의 냉각손실에 의하여 초기 성장시 부터 타원의 형상으로 발전하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 다른 초기조건에서 촬영한 화염사진으로 부터도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 이와 같은 현상은 최고의 유효열량률을 나타내는 당량비 0.8의 경우에도 화염의 형상이 전극부근에서 오목해지는 현상을 보이며, 이러한 결과로써 전극으로부터의 냉각손실은 다른 연소에 미치는 열량

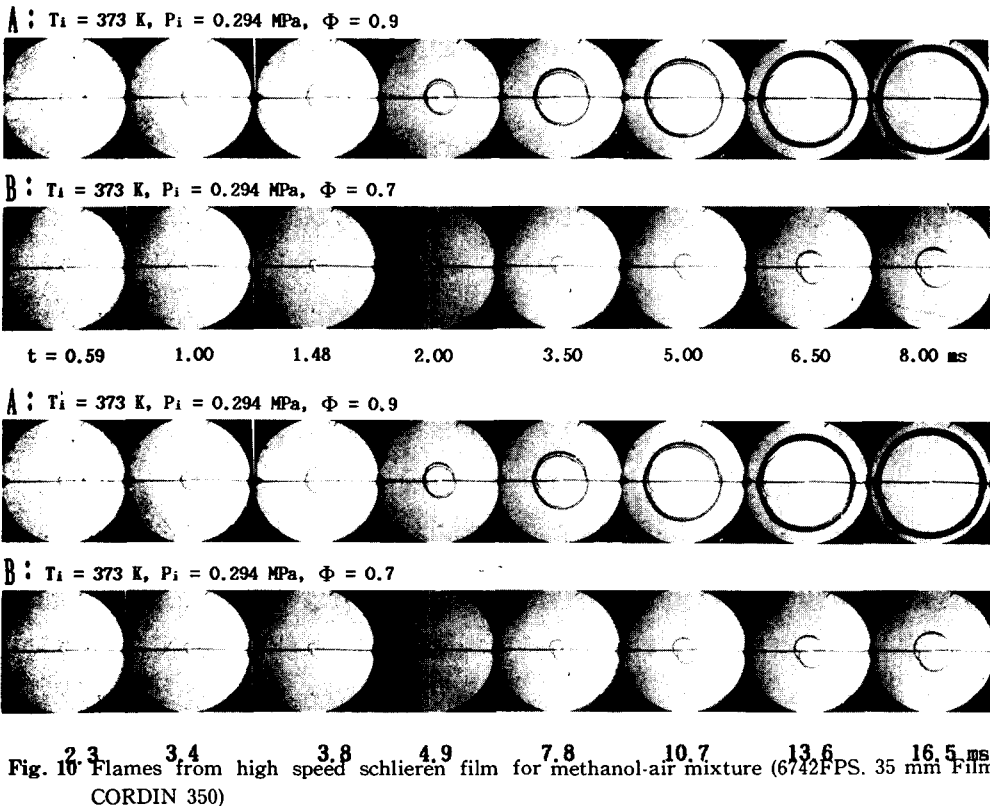


Fig. 10. Flames from high speed schlieren film for methanol-air mixture (6742FPS, 35 mm Film, CORDIN 350)

손실요인에 비하여 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

3.8 화염전파속도

Fig. 11은 초기압력 0.3 MPa, 당량비 0.7에서 초기온도를 313 K, 343 K, 373 K로 변화시킨 경우 화염전파속도의 시간경과를 보인다. 본 실험조건에서 희박한계인 당량비 0.7은 연소초기에 화염전파속도의 최대 피크치를 보인후 일정시간 거의 등속을 보이며, 초기온도가 증가함에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 방전에너지의 영향에 의하여 화염전파속도가 급격히 증가하는 점화초기의 약 2 ms동안을 제외하고 14 ms까지의 평균 화염전파속

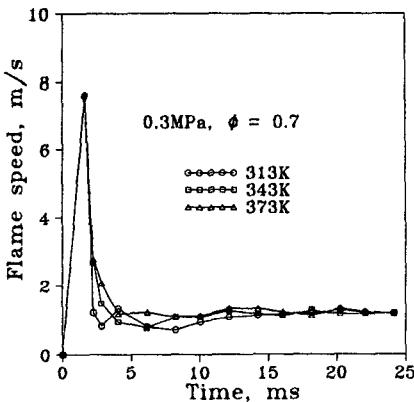


Fig. 11 Effect of initial temperature on flame propagation speed.

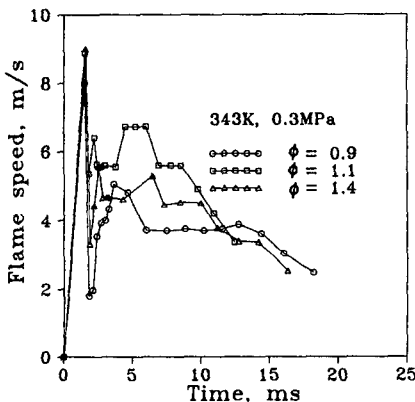


Fig. 12 Effect of equivalence ration on flame propagation speed

도로 비교해 볼때, 313 K에서 0.9 m/s, 343 K에서 1.2 m/s, 373 K에서 1.4 m/s로 각각 증가하였다. 초기압력을 0.2 MPa에서 0.3 MPa로 변화시킨 경우에 평균 화염전파속도로 비교해 보면 0.2 MPa에서 3.1 m/s, 0.3 MPa에서 2.3 m/s로 초기압력이 증가할수록 평균 화염전파속도는 감소하는 경향을 보였다. Fig. 12는 초기온도 343 K, 초기압력 0.3 MPa에서 당량비를 0.9, 1.1, 1.4로 변화시킨 경우 화염전파속도의 시간경과를 보인다. 연소실 내에서 측정된 연소압력으로부터 판단한 연소시간이 가장 짧게 나타난 당량비 1.1의 경우에 화염전파속도는 가장 빠른값을 보인다. Fig. 11의 경우와 동일한 방법으로 구한 평균 화염전파속도로 비교해 볼때, 당량비 0.9에서 3.9m/s, 1.1에서 4.8m/s, 1.4에서 4.1m/s를 보여 이론혼합비 근처인 당량비 0.9보다는 다소 과농한 1.4의 평균 화염전파속도가 빨라 연소압력으로 측정된 결과와 잘 일치하고 있다. 화염전파속도에 미치는 초기조건의 영향은 당량비의 영향이 가장 크고 다음이 압력, 온도의 순으로 나타난다.

4. 결 론

정적연소기를 사용하여 메탄올·공기 혼합기를 연소시키기 위하여 혼합기의 초기압력, 초기온도, 점화 Energy와 당량비를 변화시켜 연소실험을 행하고 그 결과를 분석하여, 다음과 같은 연소특성을 얻었다.

(1) 메탄올·공기혼합기의 연소시간은 혼합기의 초기압력이 낮을수록, 초기온도가 높을수록, 또 당량비가 약간 농후한 조건(1.1~1.2)에서 짧아지는 경향을 보인다.

(2) 혼합기의 초기압력과 초기온도가 증가하거나, 점화에너지가 증가할수록, 희박쪽의 가연한계는 넓어지는 경향을 보이며 특히, 초기압력의 영향이 가장 크게 나타났다.

(3) 연소압력이 최고압력의 10%에 도달하는데 소요되는 시간은 초기조건에 영향을 받지 않고 전체 연소시간의 40~50%의 범위이다.

(4) 초기조건이 동일할 때 당량비 0.8~0.9에서 유효열량은 가장 높은 값을 보이고, 당량비 1.1~1.2에서 최고 연소압력을 나타낸다.

(5) 화염전파속도는 당량비의 영향이 가장 크며, 다음이 압력, 온도의 순으로 나타났다.

후기

본 연구는 1991년도 한국과학재단의 기초연구비 지원 과제번호 911-0966-027-2)에 의한 결과로서 관계당국에 대하여 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Nakajima, 1989, "Ignition Phenomena of Methanol-Iso-Octane Blends on a Hot Surface," 日本機械學會論文集(B編), Vol. 55, No. 514, pp. 1743~1743.
- (2) Kosei ANDOH, 1987, "Studies on Ignition and Flame Propagation Process of Pre-mixed Gas in Constant Volume Combustion Chamber(In case of Alcohol Fuels)," *JSAE Review*, Vol. 9, No.1, pp. 5~13.
- (3) 研究報告書 6卷, 1991, "메탄올 自動車 導入에 관한 調査 研究," (財)日本運輸經濟研究센터.
- (4) 研究報告書, 1990, "메탄올 自動車에 의한 市内 走行試驗," 日本메탄올自動車株式會社.
- (5) Gunnar Kinbom, 1990, "Swedish Policy and R&D of Alternative Motor Fuels," *International Symposium on Methanol-Fuelled Vehicles*, Tokyo, pp. 93~108.