

가솔린 연료의 기화율 변화에 따른 연소 특성에 관한 기초 연구

A study on the combustion characteristics
according to evaporation rate of gasoline

이 기 형, 이 창 식*, 신 광 수**, 조 행 목***
K. H. Lee, C. S. Lee, K. S. Shin, H. M. Cho.

ABSTRACT

The present study systematically investigates the effect of evaporation rate on the combustion characteristics and the flame stabilization in a gasoline engine. A constant volume combustion chamber was used to elucidate a basic combustion characteristics and the premixer was installed to control temperature and equivalence ratio. And the maximum pressure, combustion duration and flame propagation according to the evaporation rate were measured to determine the optimal temperature range for evaporating a gasoline fuel.

These experimental results indicate that the combustion characteristics such as combustion chamber pressure and combustion duration were deteriorated by decreasing surrounding temperature of fuel injected. It was also found that the overall gasification process for gasoline fuel was strongly influenced by a combustion chamber temperature rather than a premixer temperature.

주요기술용어: evaporation rate(기화율), combustion stability(연소안정성), constant volume combustion chamber(정적 연소실), premixer(예혼합실), schlieren system(슐리렌 장치)

1. 서 론

최근 보급이 확대되고 있는 MPI(multi-point injection)방식의 연료 공급 시스템의 경우 기체 연료와는 달리 인젝터로부터 액상상태의 연료가 흡기포트내로 분사되므로 연소실내에서 연료가 완전 연소되기 위하여는 가솔린 연료의 기화율이 연소에 미치는 영향은 중요하다고 할 수 있다.

특히, 엔진이 냉간 상태로 운전할 경우 ECU에서는 운전 조건에 맞추어 농후한 혼합기가 공급되도록 설계되어 있으나 벽류의 생성으로

인하여 충분히 기화되지 못한 액상 연료가 증가되고 있는 실정이다. 따라서 가솔린 엔진에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 분사된 연료의 기화율 촉진시켜 각 실린더로의 혼합기의 분배를 고르게 하고 연소 효율을 향상시켜 양호한 운전 성능을 얻기 위하여 흡기 가열 장치(port heater)를 채용하는 엔진이 등장하고 있다.

그러나 지나친 기화율의 촉진은 저온 상태에서 아이싱현상을 유발하거나 엔진의 난기 운전 시 베이퍼록(vapor lock)을 발생시켜 운전의 불안정성을 야기시키는 문제점도 내포하고 있다.⁽¹⁾⁻⁽²⁾ 이와 같이 가솔린 연료의 기화율은

* 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 기계공학과 대학원

***상지전문대학 자동차 공학과

운전의 안정성 및 냉간시 시동성에 중요한 인자로 작용되어지므로 기화율의 변화에 따른 가솔린 연료의 연소 특성을 파악하는 것은 가솔린 엔진의 연소 안정화를 위하여 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 이러한 연소에 영향을 미치는 연료의 특성을 파악한 연구는 많이 수행되고 있으나^{(3)~(9)}, 지금까지는 주로 가스 연료의 연소 특성에 관한 연구가 주류를 이루고 있으며, 현재 자동차용 연료로 널리 사용되고 있는 가솔린 연료에 대한 연구 결과 보고는 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 가솔린 연료의 연소 특성을 규명하기 위하여 연소실을 단순화시켜 실험 변수의 영향을 명백하게 나타나도록 정적 연소실에 의한 기초 연소 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 연소에 영향을 미치는 여러 인자들 중 가솔린 연료의 온도에 따른 기화 특성과 이러한 기화 특성에 의한 연소 압력 및 화염 전파 특성을 파악하여 연소 안정화에 적절한 가열 온도에 대한 기초 데이터를 확보하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

가솔린 연료의 당량비와 기화 온도에 따른 연소 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서 제작한 실험 장치의 계통도는 Fig. 1과 같다.

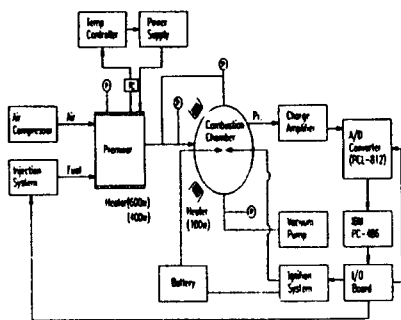


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험 장치는 정적 연소실, 예혼합실, 단발 점화 장치, 온도 조절 장치, 온도 측정 장치, 압력 측정 장치, 데이터 획득 및 처리 장치, 동기 제어 장치, 연료 공급 장치, 슈리렌 사진 촬영 장치 등으로 구성되어 있다.

2.1.1 정적 연소실

실험에 사용된 정적 연소실은 직경이 100mm, 폭이 40mm로서 체적이 314cc이며 재질은 알루미늄으로 제작하였고, 이러한 정적 연소실의 형태는 Fig.2와 같다. 연소실의 양면에는 화염 가시화를 위하여 두께 30mm, 직경 125mm의 석영 유리를 설치하였고 연소실 벽면과 유리면 사이에는 기밀 유지를 위하여 직경 115mm, 두께 3mm의 O-링을 설치하였다. 그리고 연소실의 상단과 상측단 및 하단에 위치한 흡입구와 배출구에는 각각 고압용 밸브(최대 : 150kgf/cm²)를 설치하였다. 연소실 벽면에 의한 냉각 손실이 화염 성장에 미치는 영향을 줄이고, 사진 촬영을 통한 화염 전파 특성 연구에 적합하도록 전파 플러그 전극의 위치는 연소실 중앙에 장착하였으며 양 전극 중심간의 간격은 1.5mm로 고정하였다. 연소실내의 압력측정은 압전형 압력 변환기를 사용하였으며 온도 측정은 직경이 75 μ m의 R형 열전대를 연소실 벽면으로부터 3mm정도 돌출시켜 장착하였다. 연소실벽면에는 100W 판히터 2개를 부착하여 온도 조절 장치에 의하여 온도 조절이 가능하게 하였으며, 연소실내의 초기 공기의 온도는 K형 열전대를 사용하여 측정하였고 벽면 온도의 영향을 최소화하기 위하여 벽면으로부터 15mm 돌출시켜 설치하였다.

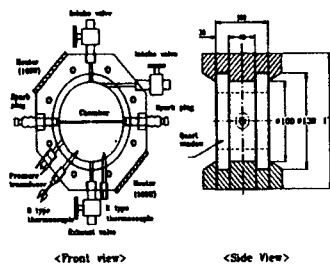


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

2.1.2 예혼합실

연료와 공기의 공급질량에 기초하여 당량비를 조절하기 위하여 Fig. 3과 같은 구조를 가진 예혼합실을 제작하였다. 재질은 열전도성이 우수한 동을 사용하였고, 예혼합실 양 측면에 400W 및 600W 용량의 판히터를 부착하여 벽면의 예열온도차에 기인된 유동의 발생으로 혼합의 분배가 균일하도록 하였다. 예혼합실의 용량은 연소실 용량과 실험 조건을 고려하여 2650cc로 결정하였으며 인젝터가 예혼합실 벽면으로부터의 열전도로 오동작되는 것을 방지하기 위하여 인젝터 어댑터 부분과 밸브부분에 열전도율이 낮은 테프론 봉을 연결하여 고온의 열을 차단하였다. 그리고 예혼합실 내부의 온도는 K형 열전대를 벽면으로부터 20mm 돌출시켜 측정하였다.

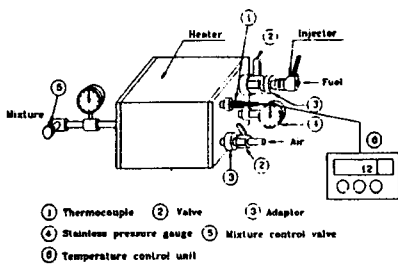


Fig. 3 Schematic diagram of premixer

2.1.3 점화장치

본 실험에 사용된 점화 회로도를 Fig. 4에 나타내었다. 점화 방법은 CDI (capacitor discharge ignition) 방식이며 실제 기관에서 크랭크축의 회전각도에 의해 결정되는 dwell 타임 (dwell time)을 본 실험에서는 파워 트랜지스터로 입력되는 신호를 5KΩ의 가변 저항을 이용하여 조정이 가능하도록 하였다.

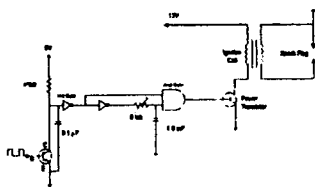


Fig. 4. Circuit diagram of ignition system

2.1.4 가시화 장치

화염 전파의 가시화를 위하여 Fig 5와 같은 슐리렌 사진 촬영 장치를 이용하였다.

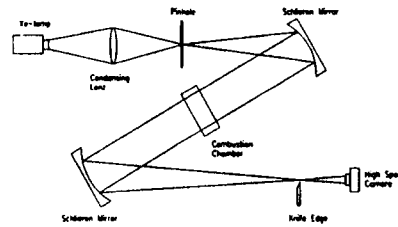


Fig 5. Optical system of schlieren

화염 가시화 방법에는 여러방식들이 적용되고 있지만 비점속식이므로 유체의 흐름에 영향을 미치지 않는 광학적 가시화 방법인 슐리렌 방법을 적용하였다. 슐리렌은 굴절률의 구배를 측정하는 방법으로서, 평행 광선을 유동장 혹은 연소장에 통과시키고 굴절되지 않은 광선 렌즈 혹은 거울로 접속하여 Knife edge로 차단하므로써 굴절된 광선만을 스크린 혹은 필름에 투영하는 방법이며 구성과 사용이 비교적 용이하고 감응도도 뛰어나며 어느 정도의 정량적 분석도 가능하다.

광원은 최대 300mW의 크세논램프(VIX 4)를 사용하였고, 이 광원은 pin hole을 거쳐서 양단의 슐리렌 렌즈(concave mirror, 직경 300mm) 중앙에 위치한 연소실에 집광된 후 Knife edge에서 상이 맺힌다. 이와 같은 상은 회전 프리즘식 고속 카메라 (NAC, E-10, 최대속도: 10,000fps)와 16mm 필름(ASA250, Kodak7297)을 사용하여 2,000fps 속도로 촬영하였다.

2.2 실험 방법

당량비는 연료와 공기의 질량비이므로 공기는 이상 기체라고 가정하고 공기의 질량을 구하였으며 연료는 인젝터의 통전시간에 따른 분사량으로 조절하였다. 가솔린 연료의 당량비와 예혼합기의 온도 변화에 따른 기화 특성을 파악하기 위하여 Table 1과 같이 실험 변수를 정

하였다. 이 경우 Shell⁽⁹⁾의 연구에 의하여 작성된 가솔린 연료의 증발 특성 곡선에서 80%이상의 기화율 보이는 온도(160℃)에서 5%이하의 기화특성을 나타내는 온도(40℃까지의 범위)를 실험온도 변수로 정하였다.

Table 1 Experimental conditions of gasoline - air mixture

parameter	condition
equivalence ratio	0.8 ~ 1.3
initial pressure(bar)	1, 2, 3
combustion chamber temperature(℃)	80, 40
premixer temperature(℃)	160, 80, 60, 40
spark plug gap(mm)	1.5

또한 연소실온도를 일정하게 유지하기 위하여 100W 용량의 판히터 2개를 정적 연소실의 우측에 설치하였으며 이때 정적 연소실의 온도는 정적 연소실의 내면으로부터 3mm 정도 위치한 곳에 열전대($\phi=75\mu\text{m}$, R-Type)를 삽입시켜 측정하였고, 이때 열전대로부터의 전압신호를 증폭기에서 50회 증폭시킨후 A/D컨버터에서 1ms당 1개씩 받도록 프로그래밍 하였다.

전압신호를 온도로 변환시키기 위하여 표준 R-Type 기전력표를 참조하였으며 입력된 정압신호 내사법에 의하여 참조된 온도로부터 계산하였고 자동온도 조절 장치를 설치하여 온도를 일정하게 유지시켰다.

또한 연소실내의 압력 측정은 압전형 압력변환기(Kistler, 6051)로 측정하여 증폭기(charge amplifier)로 증폭시킨 후 A/D 변환기(sampling rate : 200kHz)를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 해석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 당량비 변화에 따른 연소 특성

가솔린 연료의 당량비 변화에 따른 연소 특성을 파악하기 위하여 충분히 기화된 상태라고

할 수 있는 온도인 예혼합실의 온도를 433K로 조정하고 연소실의 온도를 353K로 일정하게 유지시킨 후 3가지 공급압력에 대하여 실험을 수행하여 최대 연소 압력의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 실험의 신뢰성을 위하여 9번의 실험 데이터를 평균하여 당량비에 따른 최대 압력의 변화를 나타내었다.

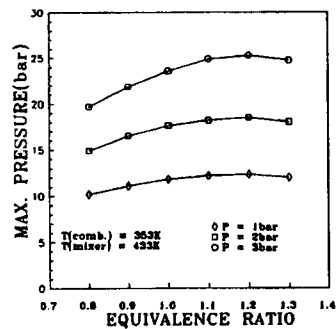


Fig. 6 Effect of initial pressure on maximum combustion pressure

동일 당량비에서 최고 연소 압력은 혼합기의 압력이 증가함에 따라 증가하는 현상을 보이며 그 기울기가 초기 압력이 높아 질수록 증가하고 있음을 보여 주고 있다. 또한 최대 연소 압력은 당량비 1.1 ~ 1.2 사이에 존재하므로 이는 이론상의 최대 출력 당량비인 1.131 ~ 1.176의 범위와 잘 부합되어진다. 이러한 결과에 의하여 본 실험에서 사용한 당량비 조절 방법이 타당함을 입증하였다.

Fig. 7에는 동일한 온도 조건인 연소실의 온도가 353K 이고 예혼합실의 온도가 433K인 경우의 각 당량비에 대한 압력 선도의 시간 변화를 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있듯이 연소실내로 공급되는 혼합기의 초기압이 높아질수록 각각의 당량비에서 압력 선도는 증가하고 있으며 당량비가 높아질수록 점화 지연 기간은 짧아지고 있으며 최고 압력 상승율이 급격해지고 있는 경향을 보이고 있다. 그러나 그 압력의 하강폭이 이상적인 정적 연소 과정의 압력선도에 비해 급격히 감소하는 현상을 보이고 있는데 이는 정적 연소실의 재질이 알루미늄으로 제작되어

있으므로 열전달에 의한 에너지의 감소 현상에 기인되는 것으로 생각되어진다.

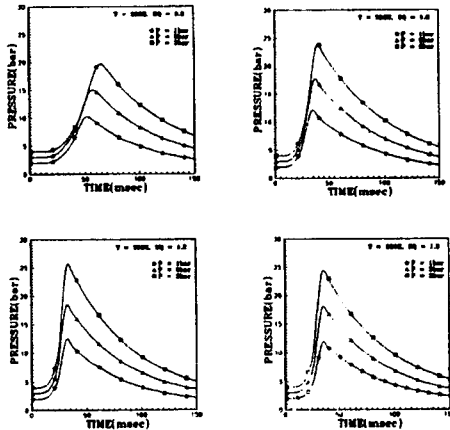


Fig. 7 Combustion pressure with initial mixture pressure

Fig. 8에는 각 당량비에서의 최고 압력까지 도달되는 소요 시간을 나타내었다. 최대 압력까지의 도달 시간은 출력 당량비에서 가장 짧게 나타나고 있으며 최박한 당량비 영역으로 이동할수록 세 경우의 공급 압력 모두 연소 지연율이 현저하게 증가됨을 알 수 있다.

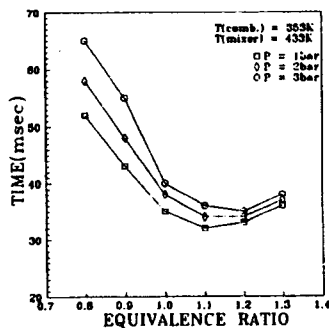


Fig. 8 Effect of equivalence ratio on time which takes to the maximum pressure

3.2 분무 주위 온도 변화에 따른 연소 특성

분사된 연료의 주위 온도에 따른 기화율 변화가 연소에 미치는 영향을 파악하기 위하여

예혼합실의 온도를 네가지 경우로 변화시켰을 때의 당량비 1.0에서의 압력 선도 변화를 측정하여 그 결과를 공급 압력별로 Fig. 9에 나타내었다.

이 실험에서는 예혼합실에서 연소실로 공급되어진 혼합기가 연소실의 온도(353K)에 의해 재기화되는 효과를 최소화하기 위해 분사후 10초 정도 후 점화시켜 데이터를 획득하였다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 예혼합실의 온도가 감소함에 따라 압력선도가 낮아지고 있으며 특히, 313K 정도까지 감소시켰을 때 현저하게 압력이 낮아지고 있음을 보여주고 있다. 즉 당량비가 적절히 조절되어진다면 연소는 일어나지만 연소 압력은 기화율과 공급되어진 압력에 비례하여 증가되어지는 경향을 보이고 있으며 본 실험의 온도 범위에서는 기화율이 급격히 나빠지는 온도가 313K임을 알 수가 있다.

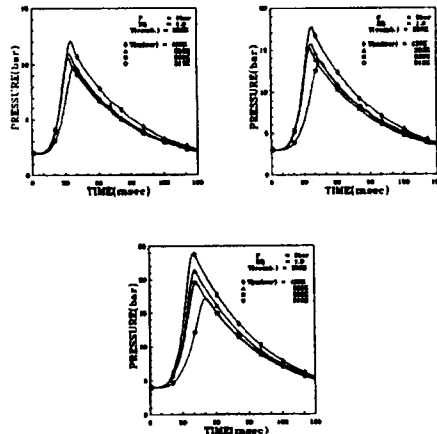
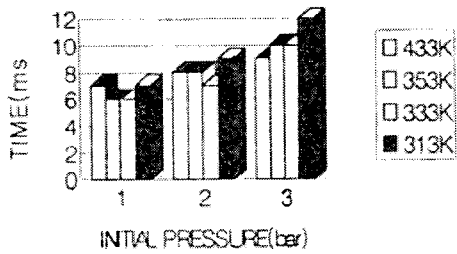


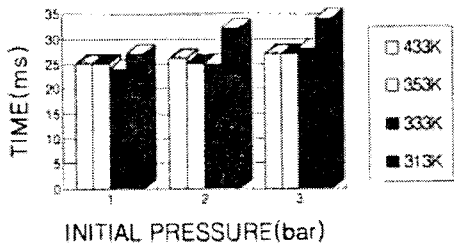
Fig. 9 Combustion pressure with pre-mixer temperature

기화율이 연소 속도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연소실 온도가 353K일 경우의 예혼합실 온도 변화에 따른 초기 연소기간(0~10%)과 주 연소기간(10~90%)을 Fig. 10에 나타내었다. 예혼합실의 온도가 333K이상일 경우 연소 기간에 있어서 그다지 큰 차이를 보이지 않으나, 주위 온도가 313K인 경우 연소 기간이 다른 온도에 비하여 급격히 악화되고 있다. 이러한 결과는 예혼합실의 온도가 313K인 경우

기화율의 악화로 인한 연소 속도의 저하가 현저하게 나타나기 때문에 여겨진다. 또한 연소 기간의 지연 정도는 공급 압력이 높아질수록 더욱 현저하게 나타나고 있다.



(a)Flame-Development Period



(b)Rapid-Burning Period

Fig. 10 Effect of pre-mixer temperature on mass burnt ratio

3.3 연소실내의 온도 변화에 따른 연소 특성

연소실내의 온도가 기화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연소실내의 온도를 353K와 313K일 경우에 대하여 낮추어 연소 실험을 수행하였다.

연소실내로 공급되어지는 혼합기의 압력이 일정할 경우에 대한 당량비의 변화에 따른 최고압에 도달하는 시간을 측정하여 Fig. 11에 그 결과를 나타내었다.

희박한 영역일수록 두 경우의 차이가 현저하게 나타나고 있으며, 연소실 온도가 353K인 경우 연소 속도가 출력 공연비(당량비 1.2) 부근에서 가장 빠른 반면 313K인 경우에는 혼합기가 농후할수록 연소 속도가 빨라지는 현상을 보여주고 있으며 이러한 연소 기간은 메탄 혼합기에 비하여 연소 속도가 전반적으로 빠른

특징을 보여주고 있다⁽⁸⁾. 이와 같은 결과는 연소실의 온도가 증가 될수록 연소 반응이 활발해지고 기화율이 향상되기 때문으로 판단된다. 본 실험의 온도 조건인 경우(433K) 예혼합실내에서는 충분히 기화할 수 있는 온도이므로 연소실내의 온도 상태에 따라서는 기화된 연료가 다시 액화되어 기화율에 상당히 악영향을 미친다는 사실을 뒷받침하고 있다. 따라서 희박 혼합기 영역에서의 연소 상태에는 연소실내의 온도가 매우 중요하다는 사실을 알 수 있다.

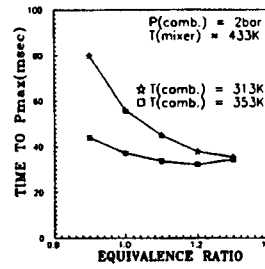


Fig. 11 Effect of initial temperature on maximum combustion pressure

각 당량비 조건에서 연소실내의 온도 변화에 따른 실질적인 연소 기간을 구체적으로 파악하기 위하여 Fig. 12에 혼합기의 초기 압력을 2bar로 일정하게 하고 연소실의 온도를 353K, 313K로 변화 시켰을 경우 연소율을 비교하였다.

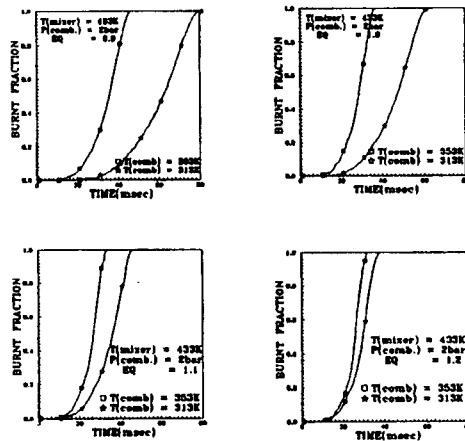


Fig. 12 Effect of initial temperature on burned fraction

당량비가 증가할수록 두 경우 모두 연소 속도가 빨라지고 있으며 연소실 온도 313K의 경우가 당량비의 증가에 따른 연소 속도 증가율이 현저하게 증가되고 있는 현상을 나타내고 있다. 따라서 엔진의 냉간 운전시에는 연소실 내의 온도가 상승되지 못한 상태이므로 연료의 분사량을 농후하게 공급하여야 한다는 사실을 본 실험 결과로부터 알 수가 있다.

3.4 화염 가시화

Fig. 13은 당량비 변화에 따른 화염전파 특성을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 당량비 1.0일 경우 당량비 0.8일 경우의 동일시기에서보다 화염전파가 빠른 속도로 진행되고 있으며 최고 연소 압력은 약 25bar를 나타내고 있다. 그러나 당량비 0.8일 때는 당량비 1.0일 때보다 연소기간이 길어지고 최고 연소 압력도 약 20bar로 나타나 희박 연소 구간에서는 화염진행과정이 다소 느려짐을 보여주고 있다.

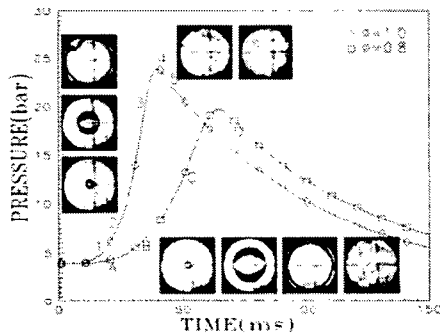


Fig. 13 Comparison of Flame propagation process between $\phi=1$ and $\phi=0.8$

Fig. 14는 예혼합실 온도 변화에 따른 화염 전파 특성을 나타낸 그림이다. 이 그림에서는 당량비와 연소실의 온도 조건을 같게 하고 예혼합실 온도가 433K와 333K인 경우를 비교한 그림이다.

예혼합실의 온도를 상승시켰을 때 화염 진행 속도가 빠르게 나타남을 볼 수 있으나, 예혼합실의 온도가 저하되면 화염핵 형성이 느려 화염 진행속도가 떨어짐을 알 수 있다. 이러한

사실로부터 연료의 기화 상태에 따라 화염의 전파속도가 현저하게 달라진다는 사실을 알 수 있다.

Time	2	8	14	20	26	32	38	44	50
temp.	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
433K									
333K									

Fig 14 Flame propagation process on prechamber temperature

Fig. 15는 연소실 온도 변화에 따른 질량 연소율을 표시한 그림이다. 이 그림에서 연소실 온도가 353K에서 연소속도가 급속하게 이루어지며 화염 진행속도도 빠르게 나타남을 알 수 있다. 연소실 온도가 313K일 때는 353K일 때보다 연소 전파 진행속도가 불안정하며 연소기간이 길어지는 현상을 보여주고 있다.

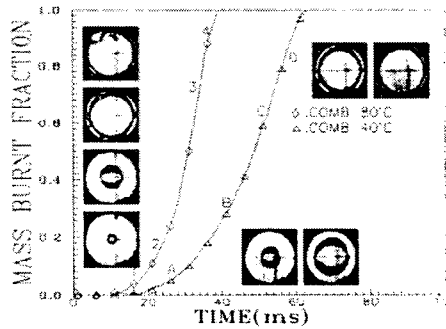


Fig. 15 Flame propagation process with combustion chamber temperature

4. 결 론

정적 연소기를 이용하여 가솔린-공기 혼합기의 당량비, 연소실온도, 예혼합실온도 및 초기 혼합기압력의 변화에 따른 가솔린 연료의 기초적인 연소 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가솔린-공기 혼합기의 연소 압력은 당량비 1.0 ~ 1.2 사이에서 최고를 나타냈으며, 가

솔린 연료의 압력이 높을수록 최고 압력을 나타내었다.

(2) 분사된 연료의 주위 온도가 낮을수록 기화율이 저하되어 연소 압력과 연소 속도가 감소되고 있으며, 특히 313K일 경우 그 감소폭이 현저하게 증가됨을 알 수 있었다.

(3) 분사된 연료가 충분히 기화되었다 하더라도 연소실내의 온도 상태에 따라서 기화율이 급격하게 저하되는 현상을 볼 수 있었다. 이러한 경향은 희박한 영역일수록 현저하게 나타나고 있으므로 냉간 운전시 농후한 연료 공급이 필요함을 알 수 있었다.

(4) 가솔린 연료의 기화에 대해서는 분사된 직후의 주위 온도의 영향도 중요하지만 최종적으로 공급되는 연소실내의 온도의 영향이 지배적임이 판명되었다.

(5) 고속 슬리덴 사진 촬영의 결과 화염전파 특성이 당량비 1.0일 때와 예혼합실온도 433K 및 연소실온도 80℃일 때 양호하게 나타남을 알 수 있었으며, 이는 연소실 온도와 당량비 및 초기 혼합기압력에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 한국 과학 재단의 핵심 연구 과제 (과제번호:961-1005-039-2)연구비에 의해 이루어진 연구 결과의 일부로써, 관계 기관의 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. T.K.Garrett, "Automotive fuels systems", pp. 10~12
2. 趙珍鎭, "內燃機關工學", pp. 926~932
3. G.j.Waldron, and R.G.Allen, "Natural Gas for Vehicles (NGV)", The 6th International Pacific Conference on Automotive Engineering. pp. 913~918
4. D.S.Jeong, J.D.Chung and K.N.Choi, "A Study on Performance Improvement of Natural Gas Engine", The 6th International Pacific Conference on Automotive Engineering, pp. 913~918
5. 片岡, 深谷, 角田, "カスエンジンの燃焼特性に関する基礎的研究", 第 11回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, pp. 117~148
6. 공학철, "Natural Gas Vehicle (CNG/LNG Program)", 미래의 자동차 엔진 배출가스 감소 세미나, pp. 117~148
7. G.A.Karim and LWicrzbbba, "Methane - Carbon Dioxide Mixtures as a fuel", SAE Paper 921557
8. 김 동 수, "정적 연소실내의 연료-공기 혼합기의 연소 특성에 관한 연구", 한양대 석사 학위 논문, 1995
9. T. K. Garrett, "Automotive fuels and fuel system", PENTECH PRESS, pp. 11