

레이저 굴절법을 이용한 LPG와 가솔린 연료의 화염전파 특성에 관한 연구

이기형* · 이창식* · 강건용** · 강 우***

(2000년 4월 18일 접수)

A study on the Flame Propagation Characteristics for LPG and Gasoline fuels by Using Laser Deflection Method

Kihyung Lee, Changsik Lee, Kernyong Kang and Woo Kang

Key Words: Combustion Duration(연소기간), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소기), Laser Deflection Method(레이저굴절법), High Speed Camera Method(고속카메라법), Flame Propagation Speed(화염전파속도), Mass Flow Controller(질량유량계)

Abstract

For the purpose of obtaining fundamental data which is needed to develop combustion system of LPG engine, we made constant volume chamber and analyzed flame propagation characteristics under different initial temperature, initial pressure and equivalence ratio which affect combustion of LPG. We investigated flame propagation speed of each fuel using laser deflection method and compared with the results of image processing of flame. As a result, the maximum flame propagation speed was found at equivalence ratio 1.0, and 1.1 for LPG and gasoline, respectively. In the lean region, we can see that flame propagation speed of LPG surpasses that of gasoline. On the contrary, flame propagation speed of gasoline surpasses LPG in the rich region. As initial temperature and initial pressure were higher, flame propagation speed was faster. And, as equivalence ratio was larger and initial temperature was higher, combustion duration was shorter and maximum combustion pressure was higher.

1. 서론

최근 자동차의 배기가스에 의한 환경 오염이 사회적인 문제로 부각됨에 따라 대체연료 엔진 개발에 박차를 가하고 있으며, 그 중에서도 연

료의 공급이 용이하고, 옥탄가와 발열량이 높고 고압축비로 운전이 가능할 뿐만 아니라 HC배출이 적은 LPG가 대체 연료로서 가장 보편화 되고 있는 실정이다. 이러한 LPG 엔진은 LPG 전용 엔진이 아니라 기존의 디젤 또는 가솔린 엔진의 개조에 의하여 개발되고 있으므로 LPG연료 자체의 연소특성과 LPG연료의 공급 시스템 및 LPG엔진의 연소실 형상등에 관한 최적화 기술이 반드시 필요하다. 또한 LPG엔진의 연소 안정화를 통한 성능 향상을 도모하기 위해서는, 연소기간의 단축과 사이클간의 변동을 억제할 필요가 있으므로 화염의 전파속도에 대한 계측이 요구되고 있으며, 이미 D. S-K. Ting,⁽¹⁾ C. Arcoumanis⁽²⁾ 등은 고속카메라를 이용해 연소과정 및 초기 화염 생성과정등을 가시화하여 연소속도를 산출한 예가 있다.

* 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : hylee@email.hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-5251 FAX : (031)406-5550
E-mail : cslee@email.hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0427 FAX : (02)2281-5286
** 회원, 한국기계연구원
E-mail : kykang@mailgw.kimm.re.kr
TEL : (042)868-7316 FAX : (042)868-7305
*** 회원, 자동차부품연구원
E-mail : wkang@ns.katech.re.kr
TEL : (041)559-3072 FAX : (041)559-3069

그러나 이러한 연구들은 고가 장비인 고속카메라를 이용하여 화염의 전파특성을 관측한 결과들이므로 실험에 많은 비용과 시간을 요구할 뿐만 아니라 정량적인 화염 전파속도를 구하기 위하여는 화상처리방법을 도입해야 되는 불편함이 따르는 연구이다. 따라서 간편하면서도 정량적인 화염 전파속도측정이 가능한 계속 기술에 대한 요구가 증대되고 있다.

본 연구에서는 상용 LPG엔진의 연소 시스템 개발에 필요한 기초적인 자료를 제공하고, 기존의 엔진을 LPG용으로 개조시 필요한 정보를 제공할 목적으로, 실제엔진의 점화시기에 해당하는 실린더 내의 압력과 온도 및 당량비를 모사할 수 있는 정적연소기를 제작하여, 자동차용 LPG가스의 주성분인 프로판과 현재 자동차용 연료로 널리 사용되고 있는 가솔린의 초기 조건에 따른 화염 전파특성을 파악하였다. 또한 가격이 저렴하고 실험이 용이한 레이저 굴절법을 이용하여 LPG와 가솔린의 화염 전파속도를 정량적으로 산출하였으며, 이 결과와 고속카메라로 촬영된 두 연료의 화염 전파사진의 이미지 처리를 이용한 화염전파속도를 비교하여 LPG와 가솔린의 화염 전파특성을 분석함과 동시에, 레이저 굴절법의 신뢰성을 검증하였다.

신뢰성 검증 결과 본 연구에서 채택한 레이저 굴절법은 화염 전파속도측정시 고속 카메라법과의 오차가 5% 이내로 확인되었다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 레이저 굴절법의 원리

이 방식은 세 개의 레이저빔을 연소실 내부로 투과하여 각 빔을 지나는 화염의 통과시각을 기록하므로써 두 빔 사이의 화염 전파속도를 측정하는 방식으로서 기존의 고속사진법을 대체할 수 있는 경제적인 방법이다.^(3,4) 그러나 이 방법은 빔을 통과하는 모든 밀도변화를 감지하므로 불규칙한 화염에 대해서는 측정오차를 유발할 수 있으나, 정적 연소기내의 화염전파는 층류화염(laminar flame)의 형태를 나타내고 있음을 확인한 바 있으므로⁽⁵⁾ 본 연구에서는 문제없이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 구축한 실험방법을 나타낸 Fig. 1에서와 같이 He-Ne 레이저 빔 (632.5nm, 50mW,

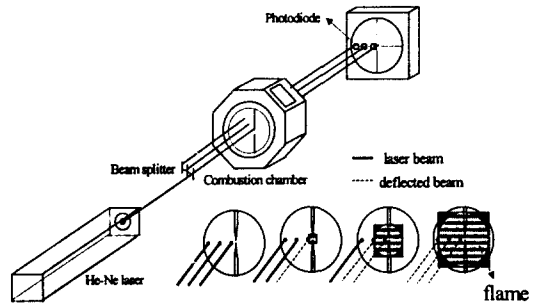


Fig. 1 Schematic diagram of flame propagation speed detection system

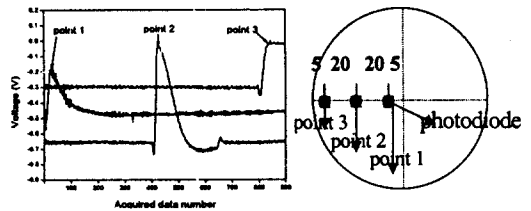


Fig. 2 Position and signal of photodiode

NEC사 제품)을 전반사 미러와 반반사 미러 2개로 구성된 광 분리기(beam splitter)에 의하여 3개의 빔으로 나눈 뒤, 연소실에 설치한 광학창을 통해 수평으로 유입시켰고, 레이저 빔 이송장치를 이용하여 빔이 원하는 수광부에 정확하게 조사되도록 조절하였으며, 점화플러그로부터 반경 방향에 대하여 5mm지점부터, 20mm간격으로 세 점을 측정위치로 선정하여 빔을 투과시켰다.

화염으로 인한 밀도 구배에 의해 레이저 빔이 굴절될때의 신호를 감지할 수 있도록 정적 연소기 반대편에 일정 간격으로 3개의 광소자를 설치하였다. 광소자는 반도체의 PN접합에 광이 부딪치면 전위차가 생기는 광 기전력 효과를 이용한 광검출기의 일종으로서 다시 말하면 광 에너지를 전기 에너지로 변환하는 센서 역할을 한다.

Fig. 2는 연소실을 통과하는 포토다이오드의 위치와 포토다이오드에서 감지한 광신호의 예를 보여주고 있다. 화염 통과시 감지기의 전압이 급상승함을 알 수 있다.

2.2 연료 공급 장치

아래의 Fig. 3은 본 실험에서 구성한 연료 공급 장치의 개략도이다. 연료통에서 배출된 LPG는 유량조정장치(MFC)를 거쳐 예혼합실로

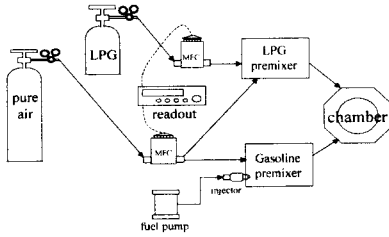


Fig. 3 Schematic diagram of fuel supply system

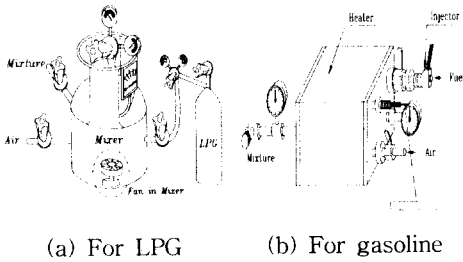


Fig. 4 Configuration of fuel premixer

유입된 후, 연소실에 설치한 압력게이지에 의하여 초기압력 조건을 변화시켜가며 연소시켰다. 반면 가솔린의 경우는 PC에서 제어하는 인젝터의 분사량을 기준으로 당량비를 조절하여 예혼합실을 거쳐 연소실로 유입한 후, CDI 방식으로 단발 점화시켜 압력 및 화염 전파속도를 측정하였다.

2.3 당량비 조절 장치 및 사용방법

본 실험에서는 당량비를 정밀하게 측정하기 위해서 질량유량계 (Mass Flow Controller, MKS 사 제품)를 사용하였다. 질량 흐름측정은 질량유량계 내부의 감지관에 대칭적으로 부착되어 있는 가열장치 사이의 열전달률의 차이를 이용하게 되는데, 이 감지관이 가스가 질량흐름으로 바뀌는 질량운동을 감지하여 이 질량흐름에 비례한 0~5V에 해당하는 신호를 제공하는 원리이다. 이와 같은 원리를 당량비 제어에 사용하기 위해 공기용 MFC와 프로판용 MFC의 설정값과 실제로 흐르는 가스량을 bubble flowmeter를 사용하여 확인과 보정작업을 수행한 후 공기의 질량을 계산하였다. 검증작업 결과 설정값과 유량은 선형적으로 비례함을 확인하였다.

이 공기의 질량을 기준으로 프로판의 질량을

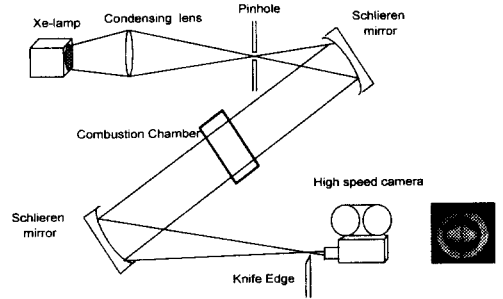


Fig. 5 Optical system of schlieren

계산하였으며, 프로판의 질량 흐름시간을 제어하므로써 당량비에 부합되는 프로판의 유입량을 결정하였다. 반면, 가솔린의 경우에는 예혼합실에 연료 분사장치를 설치하여 공기량에 따른 분사량을 Ohaus의 전자저울(TP200S)을 사용하여 분사회수에 따라 분사량을 보정하여 이 결과를 기준으로 각당량비에 해당하는 분사회수를 결정하여 실험하였다.

또한 본 연구에서는 Fig.4 (a) 와 Fig.4 (b)와 같이 LPG의 예혼합장치와 가솔린의 예혼합장치를 각각 제작하여 연료와 공기의 혼합상태를 개선하였다. LPG 예혼합장치의 경우, 하단부에 팬(fan)을 설치하여 혼합기의 혼합을 촉진시켰다. 또한 동으로 제작한 가솔린의 예혼합장치에는 400W와 600W의 판히터 2개를 부착하여 가솔린의 빠른기화와 온도차에 의한 유동을 이용하여 혼합기의 균일성을 도모하였으며 K형 열전대를 설치하여 예혼합실의 온도를 제어하였다.

2.4 화염전파 가시화 기술

본 연구에서는 레이저 굴절법을 이용한 화염 전파 속도의 신뢰성 검증을 위하여 화염 전파속도를 가시화할 수 있는 Fig. 5와 같은 슐리엔(Schlieren) 시스템을 적용하였다. 이 경우 최대 속도 10,000fps인 회전프리즈식 고속카메라NAC(E-10)의 촬영속도를 3000fps로 고정하였으며 카메라의 정격속도 도달시간을 고려하여 점화장치와 동기시켜 촬영하였다. 광원은 300mW의 크세논 램프를 사용하였고, 이 광원은 양단의 슐리엔 렌즈(직경300mm) 사이에 위치한 연소실에 집광된 후 knife edge에 상이 맺히도록 하였다. 이때 굴절되지 않은 광선은 렌즈 혹은 거울로 집속하여 knife edge로 차단함으로써 굴절된 광선만을

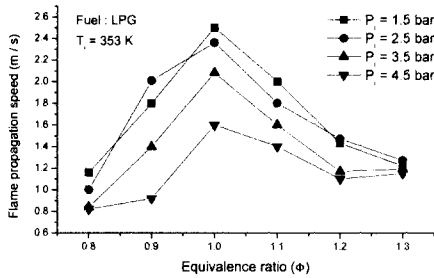
촬영하였다.

3. 실험결과 및 고찰

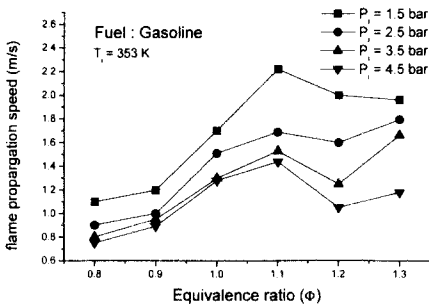
3.1 가솔린과 LPG연료의 화염전파 특성 비교

앞절의 Fig.1에서 나타낸 바와 같은 레이저 굴절법을 이용하여 정적 연소기 내에서의 LPG와 가솔린의 화염전파속도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우 초기 온도는 353K로 일정하게 유지하였으며, 정적 연소기내의 압력은 1.5bar에서 1bar씩 증가 시켜가며 실험을 수행하였다.

이 실험 결과로부터 정적 연소실내의 화염 전파속도는 공급되는 연료의 양, 즉 당량비 변화와 초기 압력에 따라서 현저한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. LPG와 가솔린 연료 모두 초기 압력이 낮을수록 화염 전파속도가 빠르게 나타났으며, LPG의 경우 이론 공연비부근, 즉 당량비 1.0영역에서 최대 화염 전파속도가 나타난 반면 가솔린은 이론 공연비보다 약간 농후한 당량비 1.1에서 화염 전파속도가 최대로 나타났다. 또한



(a) LPG



(b) Gasoline

Fig. 6 Characteristics of flame propagation speed

혼합기농도가 농후한 영역에서는 LPG의 경우 화염 전파속도가 급격하게 저하되고 있으나, 가솔린의 경우는 감소폭이 매우 적으며, 일부 영역에서는 화염 전파속도가 오히려 증가되는 현상도 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 LPG엔진은 희박운전에 비교적 유리한 소질을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 이론 공연비 부근에서도 LPG의 경우가 화염 전파속도면에서 유리한 점으로 보아 각각의 연료를 이론공연비에서 연소시켰을 경우, LPG가 가솔린보다 빠른 연소 속도때문에 knock가 발생될 확률이 적어지므로 실제 엔진의 설계시 고압축비화가 가능해져서 엔진의 효율이 향상될 것으로 예상된다.

Fig. 7은 당량비의 변화에 따른 최고 연소 압력과 연소시간을 비교한 결과로서, 당량비가 증가할수록 두 연료의 최고 연소압력은 증가하고 있으나, 연소시간은 짧아지는 현상을 나타내고 있으며, 최고 연소압력은 같은 조건에서 희박한 영역에서는 그 차이가 크지 않은 반면 농후한 영역으로 갈수록 그 차이가 점차 확대되는 경향을 알 수 있다. 여기서 P_{max} 는 최고연소압력을 나타낸다.

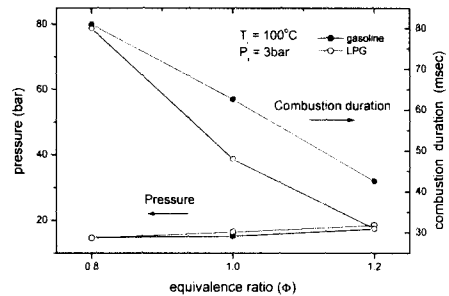


Fig. 7 Effect of equivalence ratio on combustion duration and P_{max}

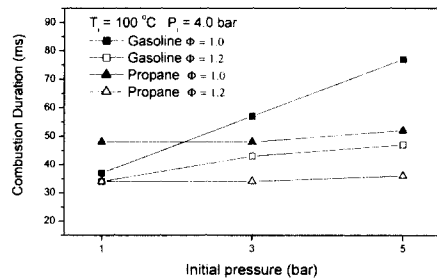


Fig. 8 Effect of initial pressure on combustion duration

Fig. 8은 초기 압력변화에 대한 두 연료의 연소 시간을 비교한 결과로서, 초기압력이 증가할수록 연소시간이 길어지는 경향을 보여주고 있으며, 이때 연소시간 증가폭은 LPG보다 가솔린이 더 크게 나타났다. 이와 같은 연소시간 증가현상은 Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이 초기압력이 높아질수록 화염 전파속도가 저하되기 때문으로 판단된다.

3.2 초기온도와 압력 변화에 대한 LPG연료의 화염 전파 특성 파악

실제 엔진의 연소실내 온도와 압력은 운전조건(부하, 회전수등)에 따라서 변화되기 때문에 점화시기를 최적화하기 위해서는 점화시기에 해당하는 압축행정 말기 부근의 연소실내 온도와 압력에 대한 LPG연료의 연소특성을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 실험에서는 점화직전의 정적연소기의 온도 변화에 대한 화염 전파속도와 연소압력을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 동일한 초기 압력(4.5bar)에 대하여 모든 당량비 영역에서 초기온도가 높은 경우가 화염 전파속도가 빠른 경향을 보여주고 있으며, 이러한 현상은 연소온도가 높아질수록 연료의 연소 반응속도가 증가한다는 Arrhenius법칙과 잘 일치하고 있다. 또한, Dugger와 Heimel^(6,7)의 실험에서도 나타내었듯이 프로판-공기, 메탄-공기의 혼합가스의 연소속도는 온도에 비례한다는 사실과도 잘 일치되고 있다.

3.3 당량비 변화에 따른 LPG연료의 화염전파 특성 파악

연소특성에 영향을 미치는 인자중의 하나인 당량비 변화에 따른 연소 최고압력과 연소시간의 비교결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

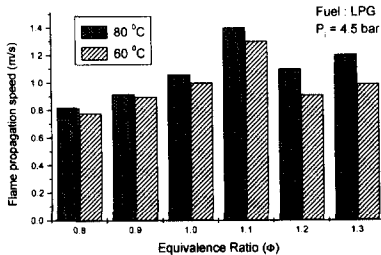


Fig. 9 Effect of initial temp. on flame propagation speed

이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 최적한 연소 상태인 이론 공연비 영역에서 연소 압력이 최고 값을 나타내고 있으며, 최고압력의 발생시기도 가장 빨리 생성됨을 알 수 있다. 또한 혼합비가 농후한 영역($\phi=1.2$)이 희박한 영역($\phi=0.8$)보다는 최고 압력이 증가되고 있으며, 발생시기도 빨라지고 있다. 당량비 변화에 따른 연소시간을 비교해 보면 당량비가 1.1인 영역까지는 당량비가 증가할수록 연소시간이 단축되고 있으며, 저감폭은 초기 압력이 낮은 경우가 더욱 현저하게 나타나고 있다.

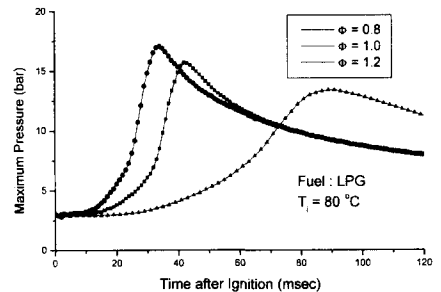


Fig. 10 Combustion pressure with different equivalent ratio

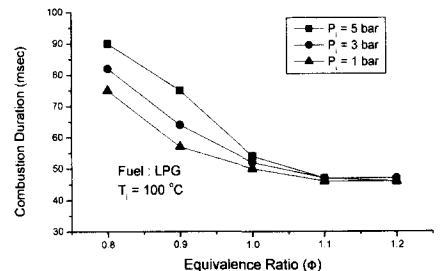


Fig. 11 Combustion duration with different initial pressure

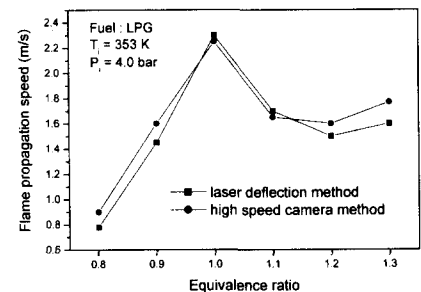
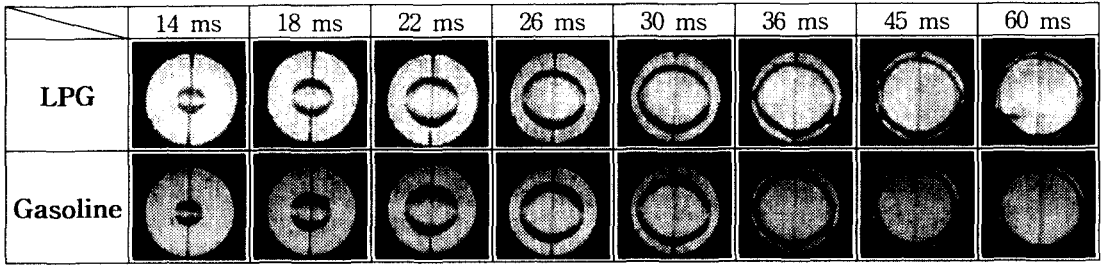
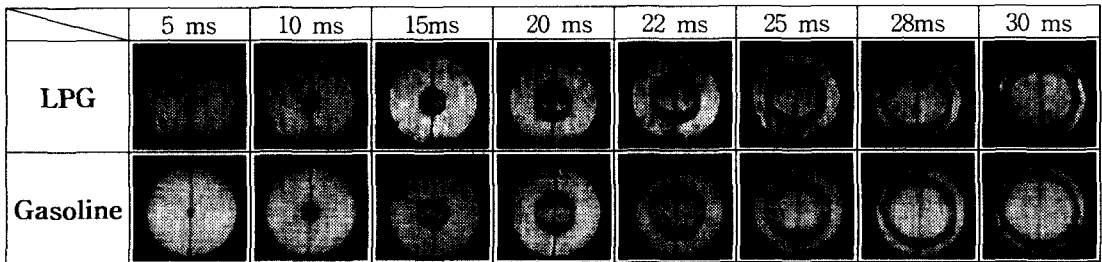
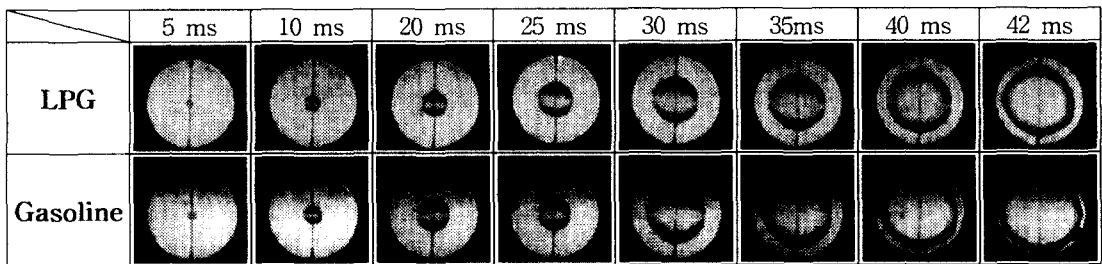


Fig. 12 Comparison of laser deflection method and high speed camera method

(a) $\Phi = 0.8$, $P_i = 4 \text{ bar}$, $T_i = 353\text{K}$ (b) $\Phi = 1.1$, $P_i = 4 \text{ bar}$, $T_i = 353\text{K}$ (c) $\Phi = 1.3$, $P_i = 4 \text{ bar}$, $T_i = 353\text{K}$ **Fig. 13** Schlieren images showing the flame propagation processes of different equivalence ratio

3.4 가솔린과 LPG의 화염전파 가시화

본 실험에서는 레이저 굴절법을 이용한 화염 전파속도와 고속 카메라법을 이용한 화염 전파속도를 비교하기 위하여 유체의 밀도 구배에 따라 선형적으로 변하는 빛의 굴절을 현상을 이용한 슈리렌 시스템(Fig. 5 참조)에 의하여 화염을 고속 카메라로 촬영하였다. 이때 촬영된 각각의 화염 사진들을 이미지 처리한 후 화염의 전파속도를 계산하여 레이저 굴절법과 비교한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

레이저굴절법과 고속카메라에 의해 촬영한 화염의 전파속도를 비교한 결과 5% 이내의 오차범

위로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 고가 장비인 고속 카메라를 이용하지 않더라도 본 연구에서 구축한 레이저 굴절법을 이용한 실험 방법을 사용하면 종류 화염의 전파속도가 측정될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13는 LPG 와 가솔린의 화염 전파과정을 비교한 결과이다. 연소 조건으로는 초기압력과 초기온도를 4 bar, 353K로 유지하였고 당량비를 바꾸어가면서 촬영한 사진들이다.

이 결과 그림들로부터 고속 슈리렌 사진 방법을 이용하면 점화후 시간 경과에 따른 화염 전파

과정을 가시화 할 수 있음을 확인하였고, 두 연료 사이의 화염전파 과정의 차이도 분석할 수 있었다. 이러한 화염의 사진에서 볼수 있듯이 혼합기의 농도가 희박한 영역($\Phi=0.8$)에서는 점화후 화염이 형성되는 시기 즉, 점화 지연기간이 길게 나타나고 있으며, LPG의 화염 전파속도가 가솔린보다 빠르게 나타나고 있다. 반면 농후한 영역($\Phi=1.1$, $\Phi=1.3$)으로 갈수록 가솔린의 경우가 LPG보다 화염이 빠르게 성장하고 있는 경향을 볼 수 있다.

4. 결 론

정적연소기와 두 연료를 공기와 혼합할 수 있는 연료공급시스템을 제작하여 LPG와 가솔린 연료의 초기조건 변화에 따른 연소특성 실험을 수행하였으며, 레이저굴절법을 이용하여 화염 전파속도를 측정된 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LPG의 화염전파특성 측정을 위한 정적연소기의 설계 및 제작 기술을 확립하였으며, 가스연료의 당량비조절 방법을 확립하였다.

(2) 레이저 굴절법을 이용한 화염 전파속도 측정기술을 개발하여, LPG연료의 화염 전파속도에 적용해 본 결과 모든 당량비 영역에서 최대 5% 이내의 신뢰도를 가지고 있음을 확인하였다.

(3) LPG와 가솔린 연료 모두 주위 압력이 낮을수록 화염 전파속도가 증가되었으며, LPG연료는 이론 당량비 영역 ($\Phi=1.0$)에서 최대 전파속도를 나타내는 반면 가솔린 연료는 당량비 1.1 영역에서 최대 전파속도를 나타내었다.

(4) LPG연료와 가솔린 연료의 화염 전파속도를 비교해 본 결과, 희박 영역과 이론 당량비 영역에서는 LPG의 화염 전파속도가 빠른 반면, 농후한 영역에서는 가솔린의 화염 전파속도가 향상되는 결과를 얻었다.

(5) LPG연료의 경우 초기 온도가 증가할수록 화염 전파속도가 증가되고 있으며, 최대 압력의

발생시기도 빨라짐을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 LP 가스엔진연구사업단의 지원으로 수행된 연구 결과로서, 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ting, D. S-K., Chekel, M. D., Haley, R., and Smy, P. R., "Early Flame Acceleration Measurements in a Turbulent Spark-Ignited Mixture," *SAE Transaction*, Paper No. 940687.
- (2) Arcoumanis, C. and Bae, C-S, "Correlation Between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant Volume Combustion Chamber," *SAE Transaction* Vol. 101, Sec 3, pp. 556~570, Paper No. 920413.
- (3) 片岡克己, 吳 逸文, 深谷信彦, 角田敏一, 1992, 定容燃焼機内均質混合氣 燃焼特性に及ぼす燃焼性狀の影響, 第10回内燃機關合同 シンポジウム 講演論文集 ('92.7)
- (4) 배충식, 1996, "프로판-공기 예혼합기의 화염 전파 과정에 관한 연구," 한국연소학회 논문집, Vol. 1., No. 2., pp. 21 ~ 29.
- (5) Ghoniem, A. H. and Knio, O. M., "Numerical Simulation of Flame Propagation in Constant Volume Chambers," *21th Symposium on Combustion*, pp. 1313~1320.
- (6) Dugger, G. L. and Heimel, S., 1952 "Flame Speeds of Methane-Air, Propane-Air and Ethylene-Air Mixtures at Low Initial Temperature," NACA TN 2624.
- (7) Dugger, G. L., 1951 "Effect of Initial Mixture Temperature on Flame Speed of Methane-Air, Propane-Air and Ethylene-Air Mixtures," NACA TN 2374.