

분위기 조건 변화에 따른 저압 직접분사식 LPG의 점화성 및 연소특성 연구

A Study on Ignition Probability and Combustion Characteristics of Low Pressure Direct Injection LPG according to a Function of Ambient Condition

정성식* · 황성일**† · 염정국* · 전병열***

Sung-Sik Chung*, Seong-Il Hwang**†, Jeong-Kuk Yeom* and Byong-Yeul Jeon***

(Received 2 January 2016, Revision received 30 March 2016, Accepted 1 April 2016)

Abstract: Under part load condition of spark-ignition engine, pumping loss had great effect on engine efficiency. To reduce pumping loss, the study designed spark-ignited engines to make direct spray of gasoline to combustion chamber. In spark-ignited direct-injection engines, ignition probability is important for successful combustion and flame propagation characteristics are also different from pre-mixed combustion. This study designed a visualization testing device to study ignition probability of spark-ignited direct-injection LPG fuel and combustion flame characteristics. This visualization device consists of combustion chamber, fuel supply system, air supply system, electronic control system and data acquisition system. Ambient pressure, ambient temperature and ambient air flow velocity are important parameters on ignition probability of LPG-air mixture and flame propagation characteristics, and the study also found that sprayed LPG fuel can be directly ignited by spark-plug under proper ambient conditions. To all successful cases of ignition, the study recorded flame propagation image in digital method through ICCD camera and its flame propagation characteristics were analyzed.

Key Words : LPG-DI(Liquefied Petroleum Gas-Direct Injection), Ignition Probability, Spark-Ignited Direct-Injection Engines, Visualization System, Flame Propagation Characteristics

1. 서 론

최근 몇 년 동안 직분식(DI, Direct Injection) 가솔린 엔진은 자동차의 스파크 점화(SI) 엔진의 연

비 향상을 위해 발전해 왔다. DI 엔진은 성층급기로 작동하는데, 이는 높은 사이클 변동 없이도 열 효율 향상을 달성할 수 있는 초회박 연소의 실현이 가능하다.^{1,2)} 펌핑손실의 저감과 출력향상을 위

**† 황성일(교신저자) : 기아자동차 부산서비스센터

E-mail : hsi@kia.co.kr, Tel : 010-4558-1494

*정성식, 염정국 : 동아대학교 기계공학과

***전병열 : 현대자동차 서부산서비스센터

**† Seong-Il Hwang(corresponding author) : KIA Motor's Pusan Service Center.

E-mail : hsi@kia.co.kr, Tel : 010-4558-1494

*Sung-Sik Chung, Jeong-Kuk Yeom : Department of Mechanical Engineering, DongA University.

***Byong-Yeul Jeon : Hyundai Motor's Service Center.

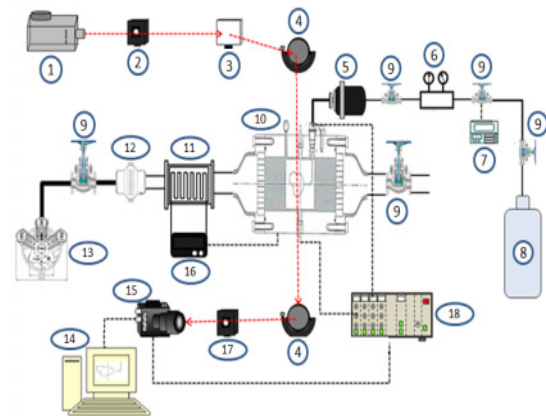
한 가스연료 직분식 엔진 개발에 필요한 기초 연소특성에 관한 정보의 확보는 글로벌 자동차업체들이 연비를 개선하고 CO₂ 배출량을 줄이는 친환경 엔진 개발에 많은 노력을 기울이는 점을 감안하면, 본 연구 또한 그러한 목적에 부합되는 일환이라는 측면에서 의미가 큰 것으로 사료된다.³⁾ 본 연구의 대상인 스파크점화 직분식(SIDI) LPG 엔진은 SI 엔진에 DI 기술을 채택한 엔진의 한 종류이며, 연료는 LPG를 사용하였다. LPG 성층급기 방식 SIDI LPG 엔진의 최적설계를 위해서는 LPG-공기 혼합과정 및 그 결과로 일어나는 연소과정의 본질적 기초연소특성을 조사할 필요가 있다.^{4,5)} 이를 위하여 엔진의 연소실을 모사한 모델 연소기를 제작하고 스파크플러그 및 인젝터 등을 설치하여 기초연소데이터를 얻는 실험적인 연구를 수행하였다.⁶⁾ 본 연구는 텀블 유동이 LPG 연료의 연소에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 연료분사에 분위기 공기를 전면에서 공급하였다. 실험변수로는 분위기 공기유속, 분사압력, 분위기 온도, 분위기 압력 등을 조절 하였으며, 이들이 LPG-공기 혼합기의 점화성 및 연소과정에 미치는 화염전파 특성을 계측, 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 연소실 내의 분무와 화염을 가시화하기 위하여 사용된 실험장치의 개략도이며, Fig. 2는 가시화 실험을 위해 특별히 고안된 연소실 사진이다. Fig. 3은 연소실 단면도로 연소실 내부의 가스운동을 보여준다. 연소실의 외형은 직육면체로 길이는 300 mm이며, 너비와 높이는 모두 180 mm이다. 실린더의 직경은 100 mm이다. 성층급기를 유도하기 위해 L-형 Nozzle을 GDI 인젝터에 부착하여 Nozzle 출구는 연소실 중앙까지 연장시켰다. L-형 Nozzle의 외경은 3 mm, 내경은 1 mm이며, Nozzle 출구에서부터 스파크방전 위치까지의 거리는 20 mm이다. 연료 이송라인은 스테인레스 재질인 원형파이프를 사용하였고, 외경 6 mm, 내경 4 mm인 파이프를 길게 연장하여 연료의 이송시 발생하는 맥동을 감소시켰다. 급기시

스템의 공기유속 측정은 SERIES 8000 MP/NH, ELDRIDGE PRODUCTS INC를 사용하였고, 공기유속 범위는 0 m/s에서 2 m/s까지로 조절이 가능하다.

스월은 분사기간 중에 연료제트와 공기 간의 혼합에 지대한 영향을 미친다. 분사가 종료된 후에 붕괴과정을 통하여 난류 운동에 근본적으로 기여한다.⁷⁾ Fig. 4(a), (b)는 스파크플러그의 전극을 포함하는 국소부에 스월에 상당하는 유동을 90° 방향에 준 경우, 유동패턴을 모사한 것이다. Fig. 4(c)는 연료분사에 대하여 분위기 공기를 전면에서 공급하는 경우이며, 이들은 텀블 유동이 가스의 연소에 미치는 영향을 알기 위한 것이다. 가시화 실험에서 분사된 연료 반대편으로 기름을 추가하여 연료와 공기의 혼합과 연소과정에 대한 영향을 보여준다.



1	Schlieren photography	10	Pressure sauge
2	Pin hole	11	Air heater
3	Surface Mirror	12	Air flow meter
4	Schlieren Mirror	13	Air compressor
5	Surge tank	14	Computer
6	High pressure regulator	15	High speed camera
7	Solenoid Valve Control	16	Heater controller
8	LPG fuel tank	17	Knife edge
9	Valve	18	Electric Control Unit

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig. 2 Photo of the combustion chamber

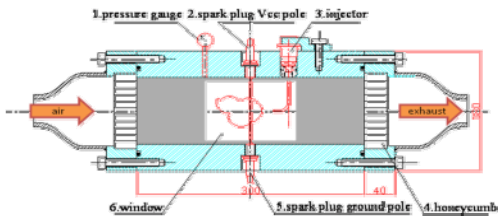
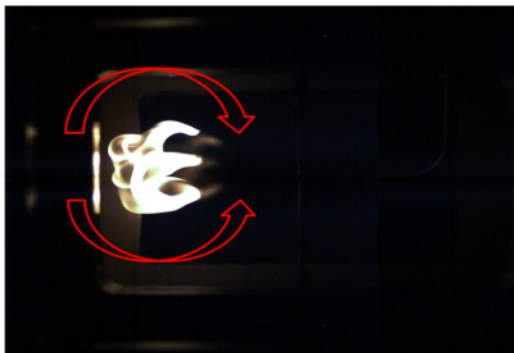
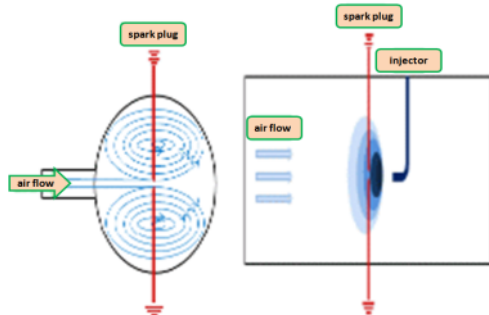


Fig. 3 Sectional view of the combustion chamber



(a) Tumble flow



(b) Central supply (c) Counter flow chamber

Fig. 4 The flow pattern of the ambient air that is provided on the front side of the sprayed fuel

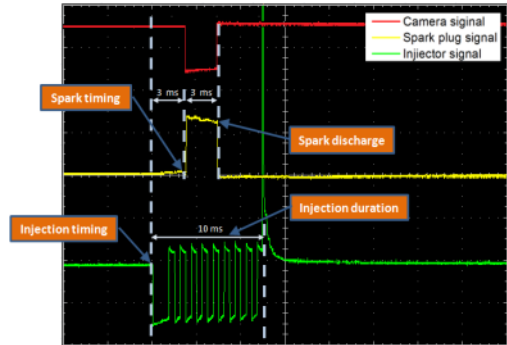


Fig. 5 Electronic control signals

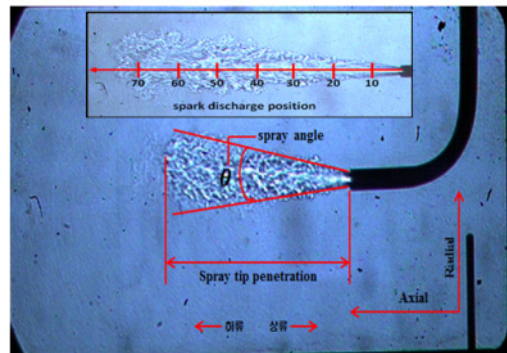


Fig. 6 Definitions of LPG spray tip penetration and spray angle

Table 1 Experimental conditions

Item	Conditions	Unit
Spark plug position	20, 25 mm from the L-shaped nozzle exit	-
Injection pressure	0.5, 0.6, 0.7, 0.9	MPa
Ambient pressure	0.12~0.25	MPa
Ambient temperature	320, 370, 420	K
Spark plug gap	1.0	mm
Spark timing	1~6	ms
Spark duration	3	ms
Injection duration	6, 10	ms
L-shaped nozzle inner diameter	1	mm

3. 결과 및 논의

3.1 LPG-공기 혼합기의 점화성

본 연구에서는 분위기 공기의 유동장에서의 DI LPG의 점화성을 고찰하였다. 본 연구에서 성공적인 점화는 “화염핵이 스파크의 결과로 형성된 후 청색 및 황백색의 화염이 발생하며, 이후의 안정된 화염으로 전파되는 것”으로 정의하였다.

3.1.1 분위기 온도에 따른 점화성

Fig. 7, 8, 9는 다양한 조건 하에서의 LPG-공기 혼합기의 점화성을 보여준다. 연료압력 0.6 MPa, 역류공기유속 0.25 m/s, 분사기간 10 ms, 분위기온도는 각각 320K, 370K, 420K로 설정하였고, 분위기 압력은 0.12~0.24 MPa 범위에서 0.02 MPa로 상승시켰다. 동일 실험조건에서 각 20회씩 반복 촬영하여 80% 이상의 점화 성공시의 데이터를 그래프에 나타내었다.

Fig. 7은 분위기 온도가 320K일 때, 점화확률이 높은 구간은 점화시기 1~7 ms, 분위기 압력 0.12~0.20 MPa이었다. Fig. 8은 분위기온도가 370K일 때, 점화확률이 높은 구간은 점화시기 1~6 ms, 분위기 압력 0.12~0.22 MPa이었다. Fig. 9는 분위기 온도가 420K일 때, 점화확률이 높은 구간은 점화시기 1~6 ms, 분위기 압력 0.14~0.22 MPa이었다.

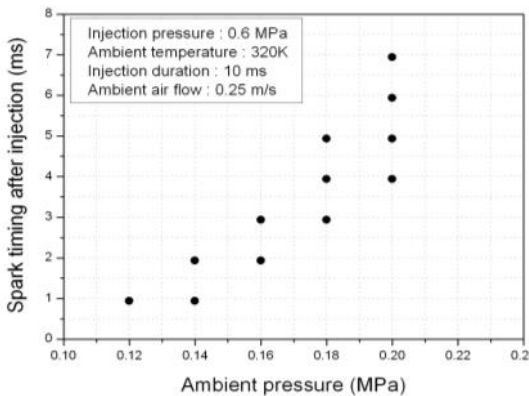


Fig. 7 Ignition probability of LPG-air mixture at 320K ambient temperature

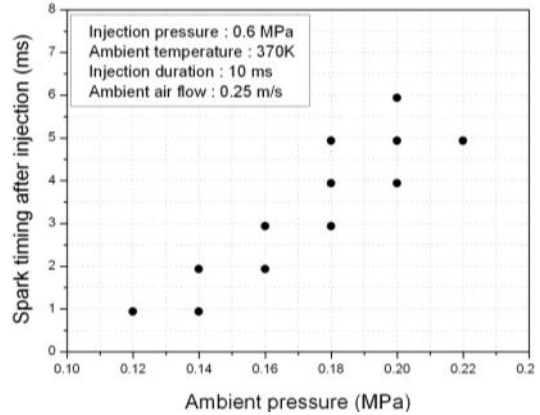


Fig. 8 Ignition probability of LPG-air mixture at 370K ambient temperature

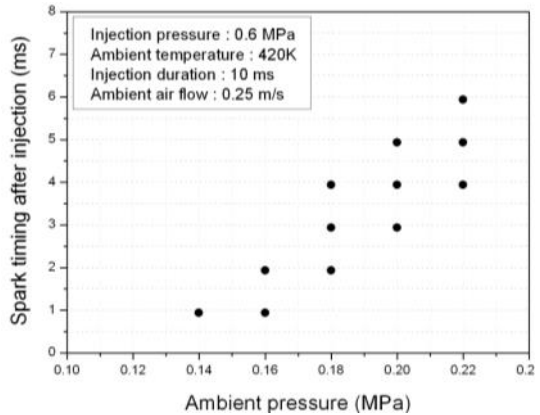


Fig. 9 Ignition probability of LPG-air mixture at 420K ambient temperature

실험결과 점화 시의 순간 속도(instantaneous velocity) 값이 점화의 성공을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 것으로 판단되며, 높은 분위기 압력은 분사된 연료의 관통속도를 지연시키고 분위기 압력이 낮을 때는 분무제트 속도가 높아 점화성이 저하되었다. 또한 적절한 점화시기도 점화성에 중요한 요인으로 작용하였다. 만일 점화시기가 빠르다면 혼합기가 적절한 시점에 스파크방전 위치까지 도달할 수 없으므로 혼합기는 점화될 수 없고, 반면 만일 점화시기가 너무 늦다면 혼합기는 스파크방전 위치를 지나칠 것이며 이때에도 역시 점화는 불가능해진다. 고온의 분위기에서 점화성이 높게

나타났다. 이는 고온의 분위기가 점화 이전에 LPG-공기 혼합기를 가열하면, 연료와 공기의 유동속도가 빨라져 혼합 속도를 높이므로 높은 점화성을 이끌어낸 것이다.

3.1.2 분사 압력에 따른 점화성

Fig. 10은 분사기류(축) 방향을 따라 분사압력이 점화성과 화염 핵의 형성 위치에 미치는 영향을 나타내었다. 본 연구에서 분사기류(축) 방향(SDPa, Spark Discharge Position in Axial Direction)이란 “축 방향에서의 스파크방전 위치”로 정의한다. 실험조건은 분사압력 각각 0.6 MPa 및 0.7 MPa, 분위기온도 320K, 분위기 압력 0.15 MPa, 분사기간 10 ms, 점화시기 2 ms, 연소실 내부 공기유속 0 m/s로 설정하였다.

실험에서 실패를 제외하고 취득한 400회의 영상을 축 방향을 따라 점화에 성공한 화염 핵의 위치를 확률로 나타내었다. 분사압력이 0.6 MPa보다는 0.7 MPa일 때, 점화확률이 높았다. 분사압력이 0.6 MPa일 때에는 분사기류(SDPa) 방향으로 약 9 mm 부근에서 점화확률이 가장 높았고, 분사압력이 0.7 MPa일 때에는 분사기류 방향으로 약 9 mm와 17 mm에서 점화확률이 높았다. 9 mm 지점에서는 분사압력 0.6 MPa와 0.7 MPa의 점화확률이 모두 높았다. 분사 기류방향(SDPa) 20 mm 이후부터는 전반적으로 점화확률이 낮았으며, 분사압력 0.6 MPa와 0.7 MPa의 점화성 패턴은 유사하였다.

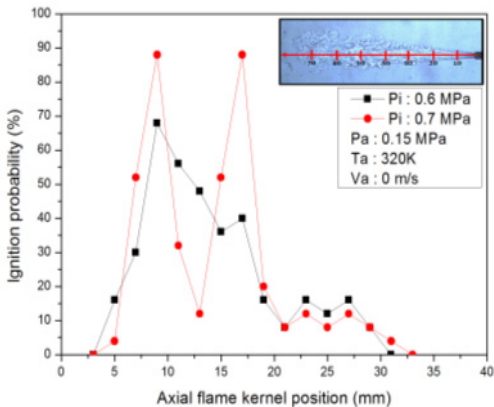


Fig. 10 Ignition probability under injection pressure conditions

실험결과 분사압력은 LPG 분무속도에 상당한 영향을 미친다는 점이 확인되었다. 높은 분사압력은 분무속도의 증가로 이어지는데, 이는 화염 핵의 소멸에 영향을 끼쳐 L-형 Nozzle의 출구 주변 스파크 위치에서의 점화성을 상당부분 감소시켰다.

3.1.3 분사기류 반경방향에 따른 점화성

Fig. 11은 축의 10 mm 지점에서 반경방향에 따른 점화성을 보여준다. 본 연구에서 분사 반경 방향(SDP_r, Spark Discharge Position in Radial Direction)이란 “반경방향에서의 스파크방전 위치”로 정의한다. 실험조건은 Fig. 10과 동일하며 분사 축방향의 10 mm 지점을 0 mm 위치로 규정 후, 점화에 성공한 400회의 화염 핵의 위치를 그래프로 나타내었다.

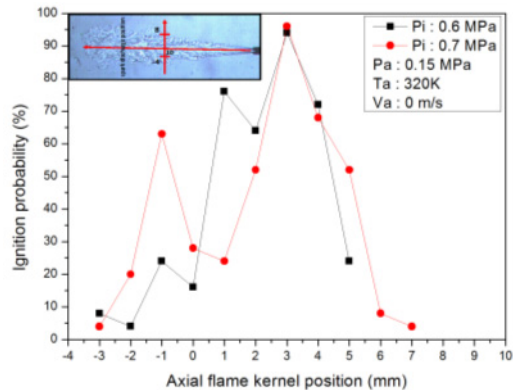


Fig. 11 Ignition probability along the radial direction

점화가능성의 종단면은 분무 중심선(SDPa)을 기준으로 대칭을 이룰 것이라 예측하였으나, 본 실험의 분위기 조건 하에서 최고치는 분무 중심선으로부터 상층으로 3 mm 떨어진 곳에 나타났다. 분무 중심선상과 하층의 구간에서는 오히려 점화성이 약간 하락하였으며, 화염 핵에서부터 화염의 발달과정이 축 방향을 기준으로 상승하였다.

3.2 화염전파 과정

역류 공기 유속이 있을 때의 격렬한 연소대의 이미지를 기초로 화염면 위치나 화염전파 속도와 같은 화염전파 특성을 관찰하였다. 본 연구에서

화염면 위치는 “연소화염의 전면부의 위치”로 정의한다. 난류의 증가는 강한 교란을 일으키는 연소실을 사용하면 화염속도가 빨라지고 또한 엔드 가스의 열발산도 좋으며 노크가 경감된다.⁸⁾

화염전과 특성의 변동은 화염면 위치의 비교를 통해 관찰하였다. 연소화염 전과 이미지는 동일 분위기 조건 하에서 5회에 걸쳐 ICCD 카메라를 통해 기록하였으며 그 값을 데이터화 하였다.

Fig. 12, 13, 14의 실험조건은 분사압력 0.6 MPa, 분사기간 10 ms, 분위기 온도 320K, 분위기 압력은 0.18 MPa, SDPa 20 mm, 분사방향에 대하여 역류공기 속도는 0.25 m/s이며, 점화시기는 3 ms로 설정하였다.

Fig. 12를 보면 초기 화염발달 단계와 화염전과 단계에서는 화염면 위치가 대부분 동일하다. 이때 화염면 위치의 변동은 불꽃 방전 후 약 22 ms가 지난 시점에 일어나며, 화염면 위치는 점화플러그 중심전극과 가장 멀리 떨어져 있다. 화염면 변동의 최대 변화량은 약 10 mm이다. 한편 화염소멸 단계에서는 화염면 위치의 변동이 보다 크며, 그 변화량은 약 20 mm를 보여준다. 이 변동과 유사한 현상이 또한 다른 분위기 온도와 분위기 압력 조건 하에서도 관찰될 수 있다. 따라서 화염전과 특성의 변동, 즉 사이클 변화는 주로 화염소멸 단계에 주로 나타난다고 할 수 있다.

Fig. 13은 성공적인 점화 후 나타나는 다양한 순간의 평균 화염면 위치를 보여주며, 이는 Fig. 12의 실험에서 도출된 평균 화염면 위치이다. 스파크 방전위치와 가장멀리 떨어진 화염면의 위치는 76 mm 지점이며, 역류공기 유속의 영향으로 75 mm 지점 이후의 화염면의 위치는 거의 일정하게 나타났다.

Fig. 14는 성공적인 점화 후 나타나는 다양한 순간의 평균 화염전과속도를 보여주며, 이는 Fig. 12의 실험에서 도출된 평균 화염전과 속도이다. 최대 화염전과 속도는 점화 후 10 ms일 때 8 m/s로 가장 빨랐으며, 이후 시간이 지날수록 화염전과 속도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 화염의 거동은 연소실 내의 유동에 절대적으로 의존하며, 따라서 화염의 거동이 활발할수록 연소실내의 유

동도 활발하기 때문에 공기이용률 증가에 기인하였다.

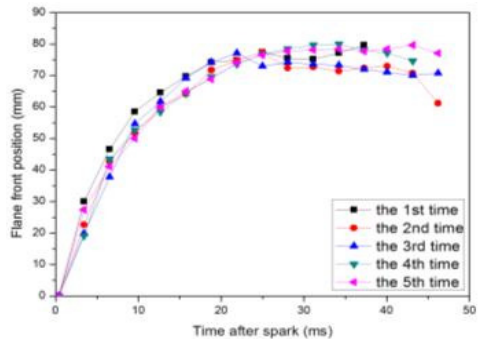


Fig. 12 Variation of flame propagation distance under the same condition

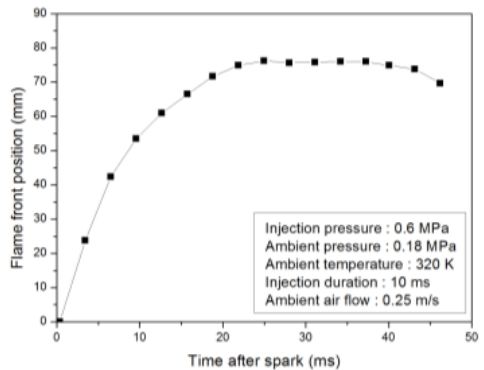


Fig. 13 Average flame front position after spark discharge

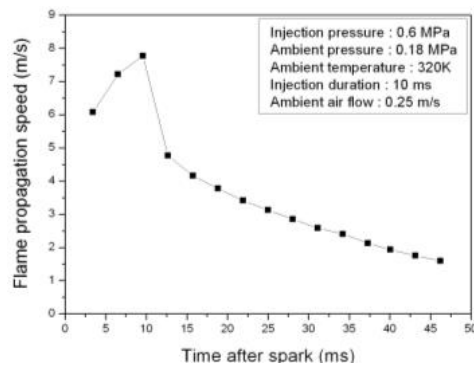


Fig. 14 Average flame propagation speed after spark discharge

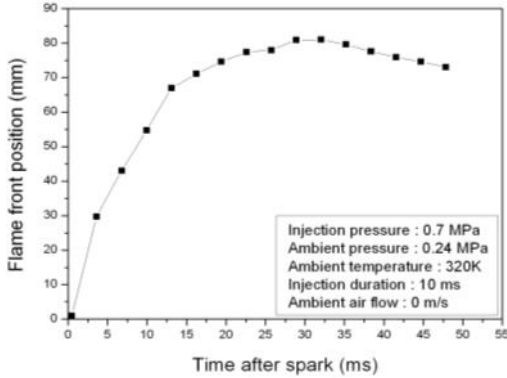


Fig. 15 Flame front position increased with time

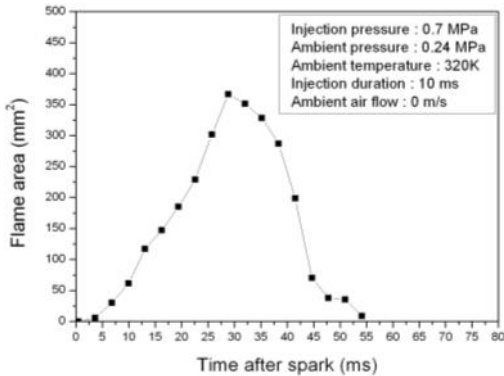


Fig. 16 Flame area increased with time

Fig. 15와 Fig. 16은 역류 공기 유속이 없을 때, 화염면 위치와 화염 면적이 시간에 따라 증가한 결과를 나타내었다. 실험조건은 분사압력 0.7 MPa, 분사기간 10 ms, 분위기 온도 320K, 분위기 압력 0.24 MPa, SDPa 20 mm, 분사방향에 대하여 역류공기 속도는 0 m/s이며, 점화시기는 3 ms로 설정하였다.

Fig. 15에서 스파크방전 위치와 가장멀리 떨어진 화염면의 위치는 81 mm 지점이며, 역류공기 유속의 영향이 없어 화염면의 위치는 Fig. 13의 결과 보다 더 멀리 나타났다. Fig 16의 분사된 연료의 축방향에 따른 화염면적이 가장 발달한 구간은 점화 후 29 ms였으며, 화염이 소멸되는 과정에 따라 화염면적은 급격히 감소하였다. 화염면적은 부피 유량에 비례하고 이론 연료 질량분율에 반비례함을 알 수 있다. 이런 경향은 예측한 바와

같이 적은 공기로 완전 연소를 하는 연료일수록 화염면적이 작아진다는 것을 의미한다.

난류 화염일 때 연소화염의 기하학적 특징을 정확히 측정하기란 난해한 부분이다. 화염발달과 그에 따른 화염전파는 매 실험 시 마다 변동하며, 본 연구에서 연소화염의 모든 기하학적 특징은 동일조건에서 20회에 걸쳐 측정된 데이터의 평균값을 적용하였다.

3.3 화염전파 특성

3.3.1 분위기 온도의 영향

고온 분위기의 연소에서 공기는 LPG-공기 혼합기의 연소속도에 영향을 미칠 것이라는 점에서 중요성을 갖는다고 가정되었으며, 공기의 특성변화는 LPG-공기 혼합기의 연소속도에 영향을 미칠 것이라는 점이 예상되었다. 이는 LPG 연료 시스템의 성능을 평가하는 데에도 중요한 자료로 사용될 것이다.

Fig. 17은 분위기 온도가 화염면 위치에 미치는 영향을 나타내며, Fig. 18은 분위기 온도가 화염전파 속도에 미치는 영향을 보여준다. 실험조건은 분사압력 0.9 MPa, 분사기간 10 ms, 분위기 압력은 0.24 MPa, SDPa 20 mm, 역류공기 속도 0.25 m/s이며, 점화시기는 분사 후 3 ms로 설정하고, 분위기 온도를 320K, 370K, 420K로 변경하며 실험하였다.

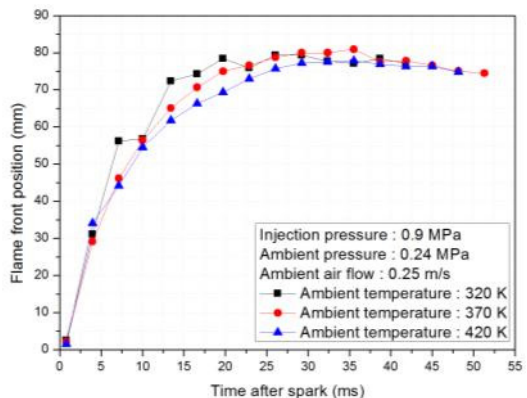


Fig. 17 Effect of ambient temperature on the flame front position

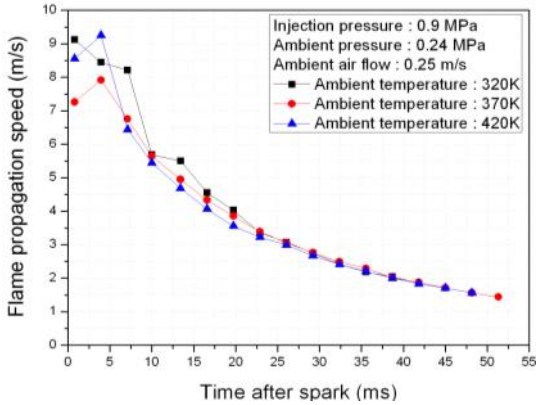


Fig. 18 Effect of ambient temperature on the flame propagation speed

실험결과 분위기 온도가 높을수록 화염면 위치가 일부 감소하였다. 화염발달 단계인 점화 후 4 ms까지는 화염면의 위치가 대부분 동일하였고, 이후 화염전파 단계인 40 ms까지는 분위기 온도가 낮을 때 화염면의 위치가 스파크방전 위치와 멀리 떨어져있다. 본 실험조건에서 화염면 위치에 영향이 큰 분위기 온도는 320K에서 370K로 나타났다. 분위기 온도의 차이 때문에 가장 먼 화염면 위치에 도달하는 데 소요되는 시간이 평균적으로 약 35 ms이다. 분위기 온도가 420K일 때 초기 화염 발달 단계에서는 화염전파 속도가 상대적으로 빠르지만 화염전파 단계에서는 화염전파 속도가 상대적으로 감소하였다. 화염전파속도의 곡선이 안정적인 구배를 이루는 분위기 온도는 370K로 나타났다.

3.3.2 분위기 압력의 영향

분위기 압력과 온도가 높게 되면 반응속도는 증가하지만, 연소실 내에서는 교란이 화염전파에 큰 역할을 하기 때문에 급기 온도가 높아지면 공기 점도가 크게 되어 교란의 감쇠가 증가되고 화염속도는 약간이지만 감소한다.⁸⁾ 이는 예혼합기의 형성과 LPG-공기 혼합기의 확산 및 이후의 연소 속도에까지 중요한 영향을 미치게 된다.

Fig. 19는 분위기 압력의 증가에 따라 화염면 위치의 감소를 나타내고 있으며, 분위기 압력에

따른 화염면 위치의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 실험조건은 분사압력 0.9 MPa, 분사기간 10 ms, 분위기 온도 370K, SDPa 20 mm, 역류공기 속도 0.25 m/s, 점화시기 3 ms로 설정하였다.

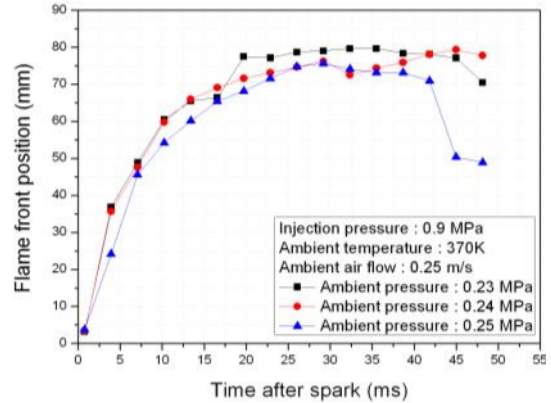


Fig. 19 Effect of ambient pressure on the flame front position

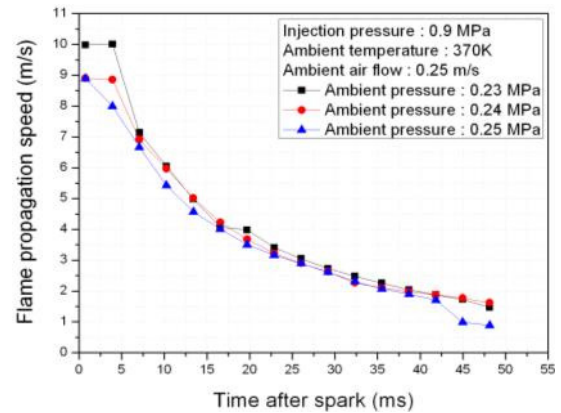


Fig. 20 Effect of ambient pressure on the flame propagation speed

분위기 압력 0.23 MPa, 0.24 MPa, 0.25 MPa일 때, 가장 빠른 화염면의 위치는 각각 79 mm, 79 mm, 75 mm였다. 그리고 가장 빠른 화염면 위치에 도달하는데 소요되는 시간은 각각 32 ms, 44.5 ms, 29 ms였다. 전체적인 화염면의 위치가 스파크 방전 위치에서 가장 멀리 떨어진 분위기 압력은 0.23 MPa이며, 분위기 압력 0.25 MPa일 때 분위

기 압력과 역류공기의 유속이 분무관통능력을 상세시켜 연소 말기인 스파크 방전 후 42 ms 지점부터는 화염면의 위치가 급격히 감소되었다.

Fig. 20은 화염전파속도를 나타내었다. 초기 화염발달 단계에서 분위기 압력 0.23 MPa과 0.24 MPa에서 화염전파속도가 0.25 MPa에서 보다 더 빠르게 나타났다. 이는 분위기 압력이 적절할 때 LPG-공기의 혼합이 잘 이루어져 화염전파에 유리하게 작용한 결과이다.

분위기 압력은 화염면의 위치와 화염전파 속도에 영향을 미친다. 분위기압력이 높을수록 화염면의 위치가 스파크 방전위치와 가까워졌고, 화염전파 속도 또한 상대적으로 감소하였다.

3.3.3 주변 역류공기 유속의 영향

다양한 역류공기 유속에 따른 점화성과 화염전파 특성을 고찰하였다. 가스의 운동은 스파크점화 직분식 엔진에서 연료-공기 혼합과 연소과정을 좌우하는 주요 요소 중 하나로 알려져 있다.

Fig. 21을 보면 화염발달 단계에서 화염면의 위치는 다양한 주변 공기유속에 대하여 거의 유사하다. 실험조건은 분사압력 0.9 MPa, 분사기간 10 ms, 분위기 온도 370K, SDPa 20 mm, 분위기 압력 0.24 MPa, 점화시기 3 ms로 설정하고, 역류공기 속도를 각각 0.2 m/s, 0.25 m/s, 0.3 m/s로 변경하였다. 역류공기 속도가 0.3 m/s일 때 화염면 위치가 스파크 방전위치와 가장 멀어지며, 그 화염전파 속도는 화염전파 단계에서 가장 높았다.

초기 화염발달 단계인 스파크방전 후 약 7 ms에서는 화염면의 위치가 주변 역류공기 유속(0.2 m/s, 0.25 m/s)에 대하여 거의 동일하다. 그러나 역류공기 유속이 0.2 m/s 일 때는 화염소멸 단계에서의 화염면의 위치는 35 ms 이후에서 급격히 역류하였다. 이는 역류 공기와 소멸되는 분무제트 사이의 상대적인 속도차에 따른 결과로 판단된다.

본 실험의 조건에서는 역류공기의 유속이 0.3 m/s에서 LPG-공기 혼합기의 예혼합이 잘 이루어져 화염전파에 유리하게 작용했다는 것을 알 수 있다.

Fig. 22의 화염전파 속도는 대부분 구간에서 유사하게 나타났으며, 화염소멸 구간에서 역류공기 유속이 0.2 m/s일 때, 스파크방전 후 35 ms 지점

이후에서 화염전파 속도가 감소하였다. 화염소멸 구간에서의 낮은 화염전파 속도는 역류공기 유속의 영향으로 판단된다.

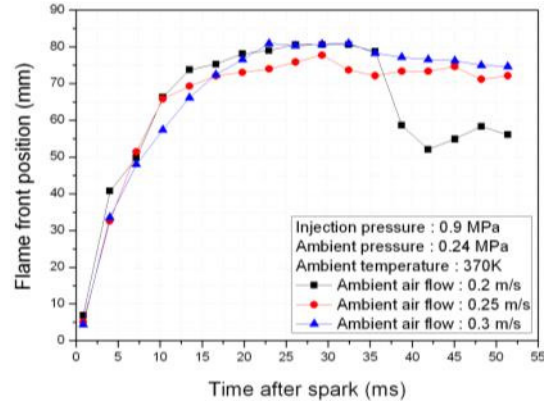


Fig. 21 Effect of ambient counter air flow on the flame front position

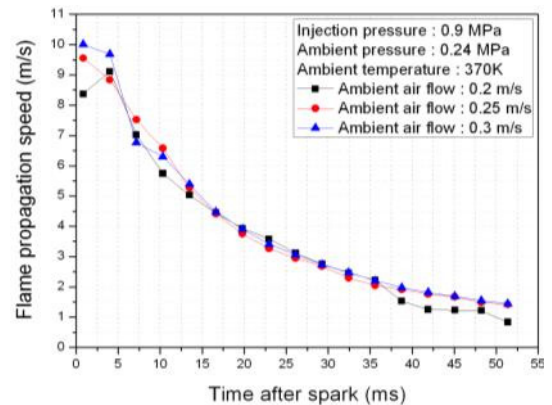


Fig. 22 Effect of ambient counter air flow on the flame propagation speed

Fig. 23과 Fig. 24는 공기유속이 화염면 위치에 미치는 영향을 나타내었다. 역류공기 유속, 분위기 온도, 분위기 압력과 같은 분위기 조건은 연소 화염의 거동과 구조에 크게 영향을 미친다. 실험 조건은 분사압력 0.5 MPa, 분사기간 6 ms, 분위기 온도 370K, SDPa 25 mm, 분위기 압력 0.2 MPa, 점화시기 2 ms, 역류공기 속도는 각각 0 m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s로 변경하였다.

Fig. 23은 역류공기 유속 0.5 m/s, 1.0 m/s에서

화염면 위치의 경향은 거의 유사하였다. 각각의 역류공기 유속 조건에서 스파크방전 위치에서 가장 먼 화염면의 위치에 소요되는 시간은 스파크방전 후 21 ms에서 29 ms 범위였다. 역류공기 유속 0.5 m/s와 1.0 m/s보다 역류공기 유속이 없는 화염면의 위치가 스파크방전 위치에서 가장 멀리 떨어져 있다.

역류공기의 유속이 증가할수록 화염면의 위치는 급격히 스파크방전 위치에서 멀어지지만 최대 도달거리는 스파크방전 위치와 가까웠고, 반대로 역류공기의 유속이 감소할수록 화염면의 위치는 서서히 멀어지지만 최대 도달거리는 스파크방전 위치와 가장 멀어졌다.

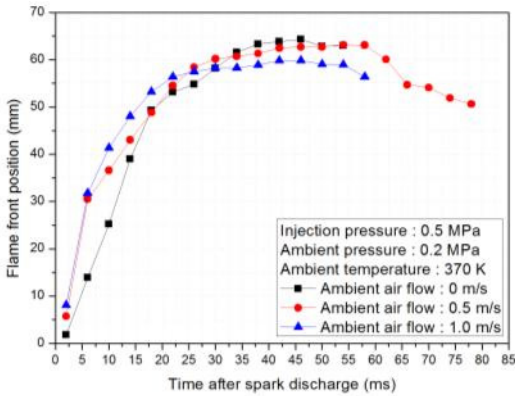


Fig. 23 Effect of counter air flow velocity on the flame front position

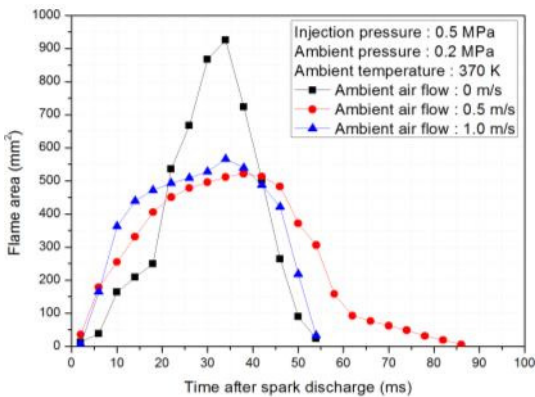


Fig. 24 Effect of counter air flow velocity on the flame area

Fig. 24는 역류공기 유속이 화염면적 전파에 미치는 영향을 보여준다. 역류공기 유속이 증가하면 최대 화염면적은 감소하며, 최대 화염면적에 도달하는데 소요되는 시간도 짧았다. 역류공기의 유속이 없을 때 최대 화염면적은 커졌다.

Fig. 25는 이미지 처리 프로그램(Photoshop CS6)을 이용한 화염면적 산출방법에 대한 개략도이다.

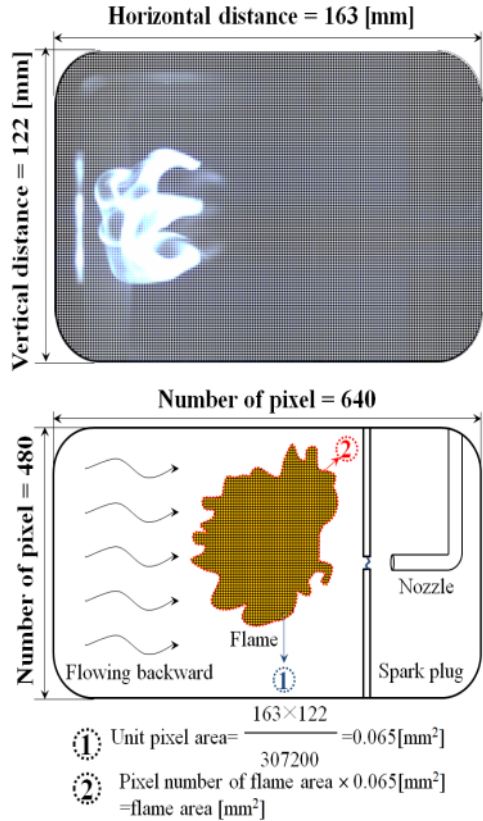


Fig. 25 The flame area calculation

5. 결론

다양한 분위기 조건에 따른 스파크점화분석 LPG의 점화성 및 기초 연소특성에 대한 본 연구의 결과는 아래와 같이 요약된다.

고온의 분위기가 점화 이전에 LPG-공기 혼합기를 가열하면, 연료와 공기의 유동속도가 빨라져 혼합 속도를 높이므로 점화성이 높았으며, 점화성

이 높은 구간은 분위기압력 0.12~0.22 MPa, 점화 시기 1~7 ms 범위였다.

0.7 MPa일 때 점화 확률이 높았으며, 분사압력을 상승 시 분무속도의 증가로 이어지며 이는 화염핵의 소멸에 영향을 끼쳐 L형 Nozzle의 출구 주변 스파크 위치에서의 점화성을 상당부분 감소시켰다.

분사기류 반경방향에 따른 실험에서 분무의 유동이 상승 기류의 영향으로 분무 중심선보다 상층의 구간에서 점화성이 높았다.

역류공기의 유속이 있을 시 화염전과 과정 이후부터는 화염면의 위치와 화염전과 속도가 상대적으로 상승하지 못했다. 이는 낮은 분사압력과 역류공기의 유속의 영향으로 나타났다.

역류공기 유속이 존재할 때 화염의 기하학적 특징은 (1) 초기 화염발달 구간, (2) 화염전과 구간, (3) 화염소멸 구간으로 구별된 주요 3구간의 연소과정이 관찰되었다.

점화플러그 주변 혼합기의 운동과 조성이 초기 화염의 발달을 상당 부분 좌우하였고, 화염전과 단계에서는 난류 화염면이 원형 형태 대신 불규칙한 형태로 나타났다.

역류공기 분위기에서 화염발달과 그에 뒤따르는 화염전과에 기인하는 사이클 변동은 주로 화염소멸 단계에서 나타났다.

후 기

본 연구는 동아대학교 연구기금의 지원을 받았다.

References

1. K. Zeng, Z. H. Huang, B. Liu, L. X. Liu, D. M. Jiang, Y. Ren and J. H. Wang, 2006, "Combustion characteristics of a direct-injection natural gas engine under various fuel injection timings", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 806-813.
2. S. Kono, 1995, "Study of the stratified charge and stable combustion in DI gasoline engines", JSAE Review, Vol. 16, pp. 363-368.
3. S. I. Hwang, 2012, A Study on Combustion Characteristics of CNG Injected into High-Temperature Air, MS thesis, Dong-A University, Pusan, Korea.
4. H. Kamura and K. Takada, 1998, "Development of in-cylinder gasoline direct injection engine", JSAE Review, Vol. 19, pp. 175-180.
5. M. Gäfvert, K. E. Årzén, L. M. Pedersen and Bo Bernhardsson, 2004, "Control of GDI engines using torque feedback exemplified by simulations", Control Engineering Practice, Vol. 12, pp. 165-180.
6. Yu Liu, 2011, A Study on the Spray Development and Combustion Flame Propagation Processes of Spark-ignited Direct Injection CNG, Ph.d thesis, Dong-A University, Pusan, Korea.
7. Gary L. Borman, Kenneth W. Ragland, 2005, "Combustion Engineering", Book's Hill publishing Co, Seoul, pp. 490-493.
8. Y. T. Oh, J. I. Ryu and J. Y. Ha, 2004, "Engineering of the internal combustion engine", Dong Myeong Publishers, KOREA, pp. 490-491.