

# LPG 분무 연소 특성 Combustion Behavior of LPG

박권하 · 소병두 · 오승우 · 김성윤

K. H. Park, B. D. So, S. W. Oh and S. Y. Kim

## 1. 서 언

가솔린과 디젤을 연료로 사용하는 대부분의 동력원은 강화되고 있는 배기 규제와 함께 환경 친화적인 기술의 개발이 요구되고 있다. 이러한 이유로 대체연료를 사용하는 엔진기술의 개발이 필요하며 많은 연구들이 진행되고 있다.

LPG는 70여년 동안 차량의 연료로서 사용되고 있고, 현재 사용하고 있는 기관을 크게 개조하지 않고도 공해 배출물을 저감할 수 있는 대체연료 기술로서 받아들여지고 있다.

처음 도입되었던 기화기 시스템은 효율의 증가를 위한 전자시스템을 도입하여 연료공급을 제어하게 되었고 근래에 들어서는 더욱 정교한 제어를 위하여 가스분사시스템이 적용되고 있다. 하지만 가스를 공급하는 시스템으로는 연비의 향상, 배기의 저감 및 고부하 영역에서의 출력저하를 개선하는 데에 한계가 있다. 따라서 LPG를 액체로 분사하여 연소실에 공급하는 시스템이 제안되고 있는데, 흡기포트에 분사하는 형식과 연소실내에 직접 분사하는 형식으로 구별된다.

포트분사식 LPG MPI시스템은 상용화되어 보급이 확대되고 있다.

실린더 내에 LPG를 액체로 직접 분사하는 시스템은 지구온난화와 관련하여 특히 강조되고 있는 이산화탄소 배출의 감소를 위한 미래기술로서 제시되고 있다. LPG 분사의 특성은 디젤과 가솔린의 분사특성과 크게 구별되는데, 낮은 압력의 분위기에서 급속히 증발하는 특성을 가지고 있기 때문이다.

Brown과 York<sup>1)</sup>는 분사LPG의 미립화에서 급속 증발(flushing)을 관찰하였고 Kitamura 등<sup>2)</sup>과 Widgen과 Straub<sup>3)</sup>는 분사노즐에서의 비등현상을 발표하였으며 Smith등<sup>4)</sup>은 주위공기 압력과 온도에

따른 특성을 Fusimoto 등<sup>5)</sup>은 미립화 특성을 분석하였다.

엔진효율에 대해서는 Smith 등<sup>4)</sup>은 8%향상을, Hollemans 등<sup>6)</sup>은 4%향상을, Sun등<sup>7)</sup>은 4%저감, Fanick등<sup>8)</sup>은 5%저감을 발표하고 있어 연료질량당 열효율은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 하지만 대부분 LPG의 가격이 가솔린과 비교하여 매우 저렴하기 때문에 연료비용측면에서는 매우 경제적인을 알 수 있다.

실린더 내에 LPG를 직접 분사하는 연구는 가솔린 직접분사식과 같은 형식의 액체 LPG 직접분사식에 관한 연구와 디젤분사와 같은 형식의 연구로 구분되며 미래의 기술로서 제시되고 있다<sup>9-11)</sup>.

본 해설에서는 LPG를 직접분사식 내연기관에 적용하기 위한 기초자료 확보를 위하여 분무 특성 및 고온분위기에서 분무연소특성을 파악하고 이를 분석 고찰한 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 조건

Fig. 1은 분무확산연소를 가시화하기 위한 시험장치도이다. 분무연소를 연속적으로 가시화하기 위한 장치를 추가한다. 분무와 연소를 동시에 가시화하기 위하여 연소실 후면에 1KW 연속발광 텅스텐 광원을 설치하고 가시화창에 반투명 용지를 부착하여 분사된 분무의 음영과 화염의 자발광을 동시에 658 x 496 SR1000C 고속카메라를 사용하여 3000f/s로 가시화한다.

Fig. 2는 연소실 형상을 나타낸다. 분사노즐에서 105mm떨어진 곳에 충돌판을 두고 있으며 충돌판 주위에 원형의 가열코일을 장치한다.

시험조건은 0.22mm 단공노즐을 사용하며 분사 압력과 주위공기압력은 고압의 하스켈펌프를 사용하여 압축한다. 연소를 위하여 분위기 온도를 500K로 하여 충돌후 연료가 동일한 조건으로 연소할수 있도록 789K의 코일을 충돌면 외곽으로 위치시킨다 (Table 1).

접수일: 2002년 12월 21일

박권하(책임저자) : 한국해양대학교 기계공학과

E-mail : khpark@mail.hhu.ac.kr Tel. 051-410-4367

소병두, 오승우, 김성윤 : 한국해양대학교 기계공학과

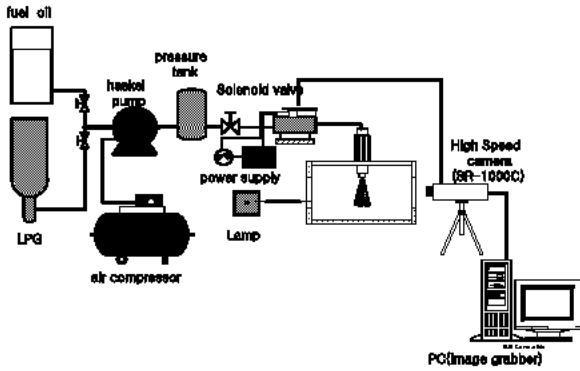


Fig. 1 Experimental setup

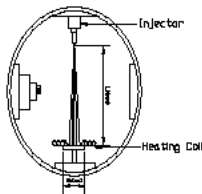


Fig. 2 Combustion Chamber Design

Table 1 Test cases

Fuel	noz. hole dia. (mm)	Nozzle type	Rail pressure (MPa)	Liquid temperature (K)	Surround pressure (MPa)	Surround temperature (K)	Li (mm)	Rh (mm)
LPG	0.22	Automatic close (Single hole)	10,15, 25,50, 100,150	280	0.1,0.4 0.7,1.0	500	105	95
Diesel	0.22							
Gasoline	0.22							

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3, 4는 분사압력 10Mpa, 분위기 온도 500K에서 분위기 압력이 0.1, 0.4Mpa인 경우의 분무사진이며, Fig. 5는 분위기 압력이 0.1, 0.4, 0.7, 1.0Mpa 일때의 분무순단 진행거리를 나타낸다.

분위기 압력이 0.1Mpa일때 초기 분무 거동을 보면 노즐을 나온 LPG가 연소실 내부로 진행하지 못하고 사라지는 현상을 나타낸다.

분사 후 1.0ms 이후부터 분무의 진행이 급속히

빨라진다. 한편 분위기 압력이 0.4Mpa 인 경우에는 분사초기부터 분무의 진행이 빠르며 연소실 하단의 충돌면에 도착한다. 이러한 현상은 일반적인 석유연료 및 디젤유나 가솔린의 분사특성과는 상이한 것으로 Fig. 5에서도 명확히 나타낸다.

이러한 독특한 특성은 LPG의 급속증발특성에 기인한 것이다. Fig. 6은 압력 엔탈피 곡선에서 LPG 연료의 증발 과정을 나타낸 그래프이다. 분사전 LPG의 상태는 280K, 10Mpa (S<sub>1</sub>)의 액체상태이다.

노즐을 통하여 분사가 되면 등엔탈피 팽창을 하게 됨으로 동일한 엔탈피 상태에서 분위기 압력까지 LPG압력이 낮아지게 된다.

분위기 압력이 0.1Mpa, 즉 대기압 상태인 경우는 280K LPG의 포화압력 0.27Mpa 보다 낮은 값이기 때문에 노즐을 나오는 순간 액체 LPG는 액기 혼합상태(83.6% 액체+16.4% 기체)인 R<sub>1-1</sub>상태에 이르게 되고 고온의 주위공기에서 열을 흡수하면서 급속히 증발하고 최종적으로는 500K, 0.1Mpa의 주위 조건(S<sub>2-1</sub>)과 같게 된다.

주위공기 압력이 높아지면(S<sub>2-2</sub>, S<sub>2-3</sub>, S<sub>2-4</sub>) 분사된 액체 LPG에 미치는 압력이 주위공기 압력까지는 급격히 낮아지지만, 이 압력이 포화압력 보다 높은 상태에 있기 때문에 아직 액체 상태(R<sub>1-2</sub>, R<sub>1-3</sub>, R<sub>1-4</sub>)이다. 고온의 주위 상태에서 열을 받아들여 포화액점(R<sub>2-2</sub>, R<sub>2-3</sub>, R<sub>2-4</sub>)에 이르면 포화증기점(R<sub>3-1</sub>, R<sub>3-2</sub>, R<sub>3-3</sub>)을 거쳐 증발하여 최종상태(S<sub>2-2</sub>, S<sub>2-3</sub>, S<sub>2-4</sub>)에 이르게 되는데 가열과 함께 포화압력도 상승하기 때문에 가열된 액체LPG의 포화압력이 분위기압력보다 높아지게 되면 이때부터는 앞의 경우와 같은 전체급속증발이 이루어진다. 하지만 분위기 압력이 초기 온도에서의 포화증기압보다 높기 때문에 늦은 증발현상을 나타낸다.

주위압력이 0.1Mpa 일때는 연소화염을 관찰하지 못했다. 이는 분무 LPG의 급속증발에 의하여 초기 분무의 대부분이 연소실 상부에서 증발되며 후기의 빠른 분무는 충돌후 사방으로 넓게 퍼짐으로서 가열코일 부근에서 당량비가 연소한계에 도달하지 못한 것으로 생각된다.

주위압력이 0.4Mpa인 경우 Fig. 7과 같이 충돌면 좌측 가열코일부에서 연소가 시작되어 그 부근을 중심으로 미소한 연소가 진행된 후 충분한 화염을 형성하지 못하고 소멸된다.

Fig. 8은 0.7Mpa 일때의 화염으로 저속으로 충돌한 연료가 충돌면 부근에 충분히 분포함으로써 활발한 화염을 나타낸다. 이 경향은 1.0Mpa 더욱 분명하다.

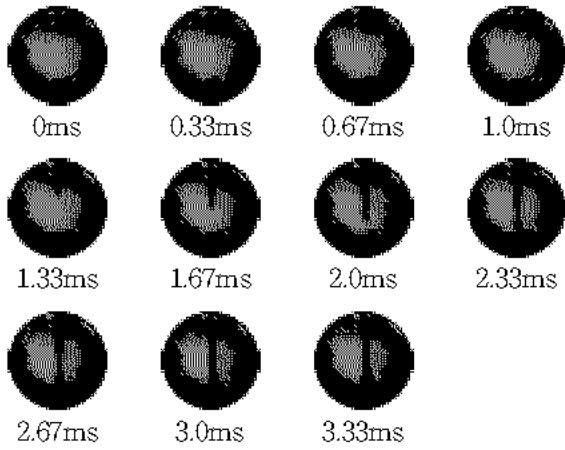


Fig. 3 LPG Spray development (Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.1MPa)

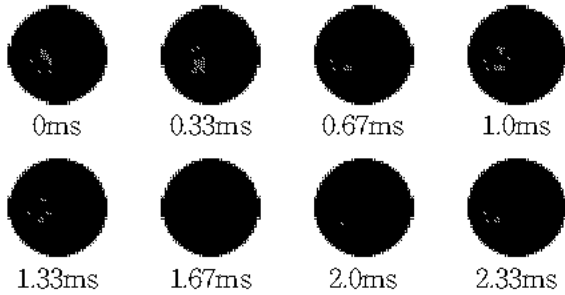


Fig. 4 LPG Spray development (Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.4MPa)

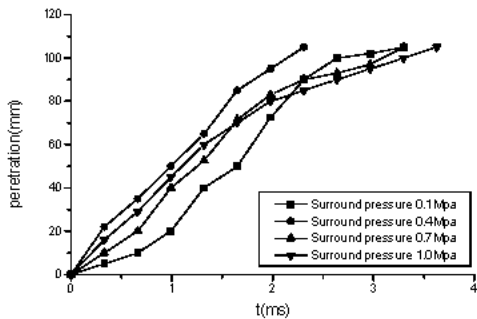


Fig. 5 Spray tip penetration at rail pressure of 10MPa

### 3.1 가솔린 분무 및 연소특성

분사압력 10MPa에서 분위기 압력이 0.1, 1.0MPa 일때의 분무사진을 Figs. 9, 10에서 보여준다. 분위기 압력이 0.1MPa, 즉 대기압의 경우는 분무진행에 따라 주위공기의 저항이 매우 작기 때문에 분사된 가솔린 연료가 빠른 속도로 진행하여 충돌면에 도달하는 것을 보여준다. 분위기 압력이 증가하면서 공기저항이 증가하고 분무의 진행도 둔화됨

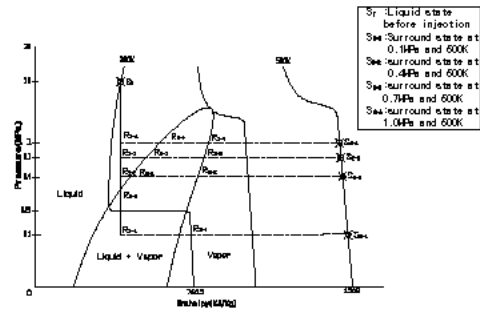


Fig. 6 LPG vaporizing routes in Pressure Enthalpy diagram for LPG use

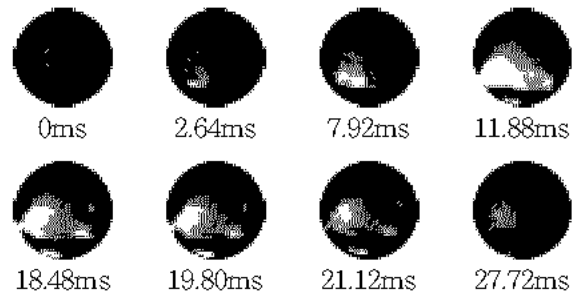


Fig. 7 LPG flame development and termination (Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.4MPa)

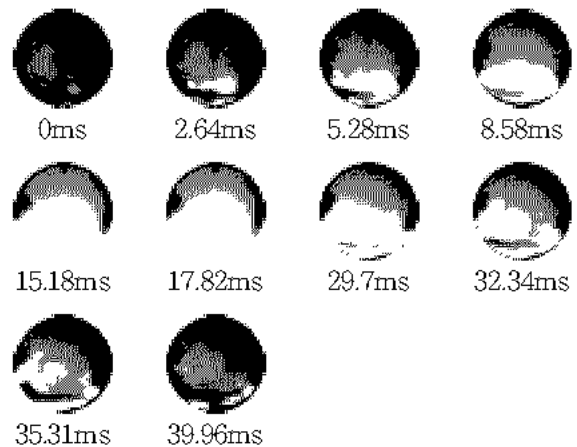


Fig. 8 LPG flame development and termination (Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.7MPa)

을 보여주며 동시에 분무밀도가 증가하여 선명한 분무축을 보여준다. Fig. 9는 이러한 현상을 잘 보여준다.

Fig. 12과 13은 분위기 압이 0.1Mpa, 0.7Mpa일 때의 화염을 보여준다. 대기압인 0.1Mpa에서 분사된 경우에는 분사된 연료가 빠르게 증발함과 동시

에 고속으로 진행하여 충돌면에 충돌하고 불규칙하게 튀어나가 연소실전체에 분포함으로써 연소가 시작된 직후 산발적인 화염집단을 보여준다.

분위기압이 증가하여 0.7MPa가 되면 연소가 주로 충돌면 근처에서만 이루어짐을 보여주는데 이는 분무진행동안 연료증발이 줄어들면서 많은 연료가 충돌면 주위에 분포함을 말한다. 또한 고압에 의한 산소농도 증가 역시 밝은 자발광을 나타내며 활발한 연소가 진행될 수 있게 하는 것으로 생각된다.

연소의 종료과정에서는 분위기압력이 낮은 경우 연소실전체에서 연소가 완료됨을 나타내는 반면, 압력이 증가하면서 연료가 충돌면 부위에 집중되어 당량비의 불균형을 갖는 농후한 혼합기를 형성함으로써 산소부족에 의한 미연가스의 발생이 증가되며 종료후 가시화창에 soot의 흔적을 나타낸다.

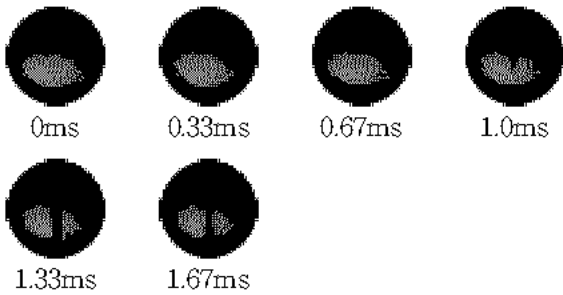


Fig. 9 Gasoline Spray development(Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.1MPa)

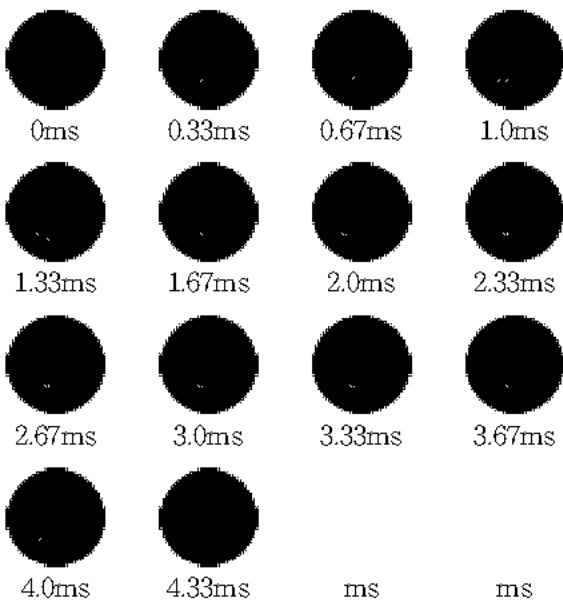


Fig. 10 Gasoline Spray development(Rail pressure 10MPa Surround pressure 1.0MPa)

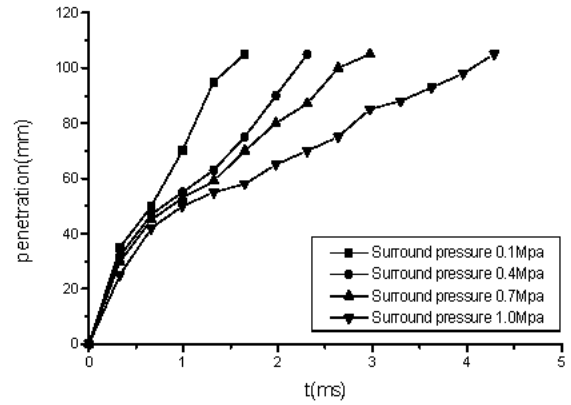


Fig. 11 Spray tip penetration at rail pressure of 10MPa

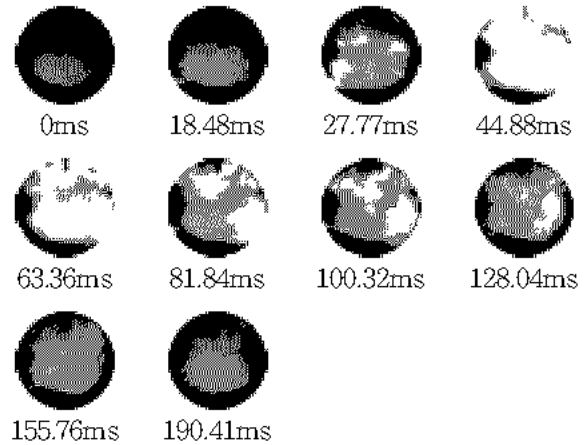


Fig. 12 Gasoline flame development and termination(Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.1MPa)

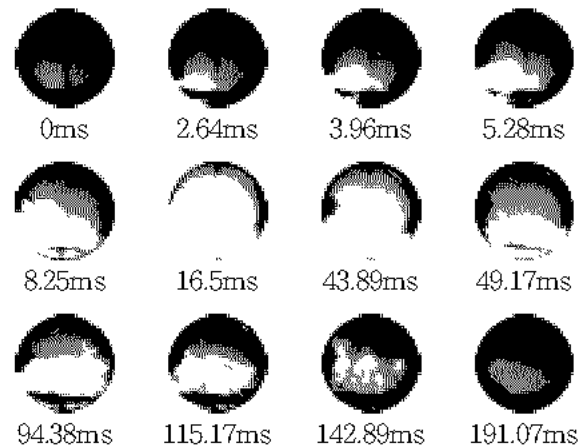


Fig. 13 Gasoline flame development and termination(Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.7MPa)

### 3.2 디젤분무 및 연소특성

분사압력 10MPa인 분무거동을 분위기 압력 0.1, 1.0MPa에서 가시화한 결과를 Figs. 14, 15에 보여준다. 대기압 상태에서 분사한 Fig. 14의 경우 분사연료가 급속하게 연소실 아래의 충돌면에 이르는 것을 볼 수 있다. 하지만 분위기 압력이 증가하면서 분무거동이 느려지고 1.0MPa인 경우에는 분무선단의 버섯모양과 분무의 굴곡을 나타낸다(Fig. 15).

Fig. 16은 주위압력 변화에 따른 분무선단 거리를 보여준다.

Fig. 17과 Fig. 18은 분위기압이 0.1Ma, 1.0Mpa에서의 화염사진이다. Fig. 15에서 볼 수 있는 것처럼 대기압상태에서는 분사된 연료가 고온저압의 분위기에서 신속하게 증발되고 동시에 고속으로 충돌면에 충돌된 액적들이 연소실 내에 넓게 분포됨으로써 착화점이 명확하지 않으며 연소실 전체에서 거의 동시에 연소가 시작되고 화염이 연소실을 가득 채운다. 하지만 전체적으로 확산화염과 같은 밝은 부분을 갖지 못하고 연소를 마친다.

모든 영역에서 연소가 활발하지 못하고 많은 미연가스를 동반하면서 soot가 전 가시화장을 오염시킨다.

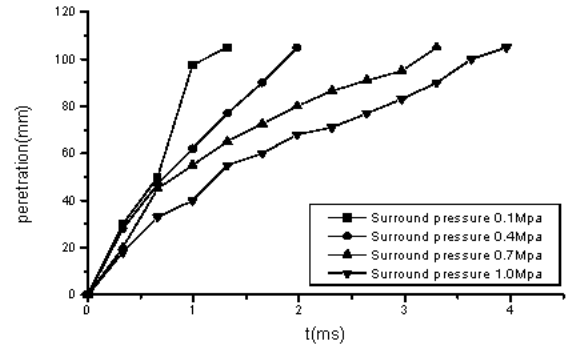


Fig. 16 Spray tip penetration at rail pressure of 10MPa

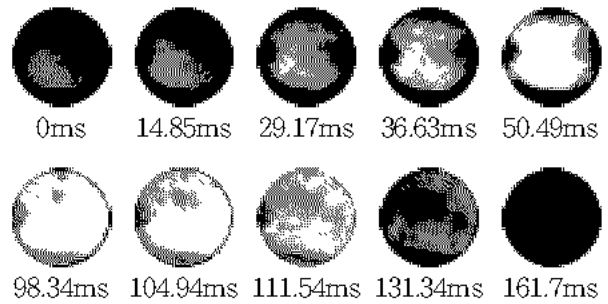


Fig. 17 Diesel flame development and termination (Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.1MPa)

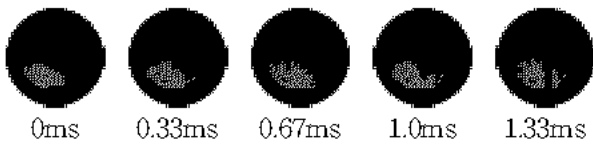


Fig. 14 Diesel Spray development (Rail pressure 10MPa Surround pressure 0.1MPa)

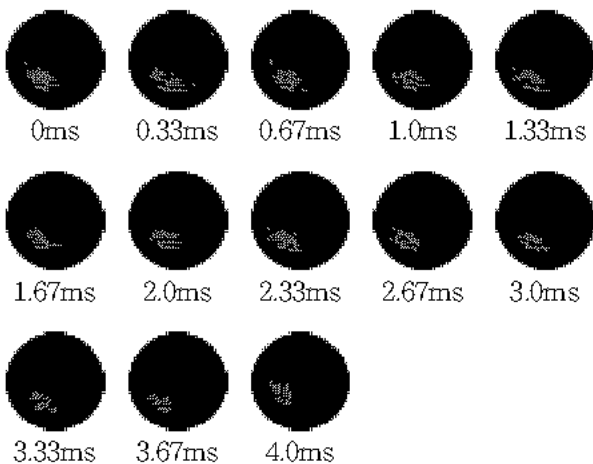


Fig. 15 Diesel Spray development (Rail pressure 10MPa Surround pressure 1.0MPa)

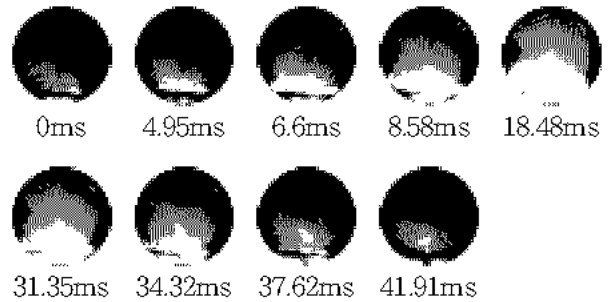


Fig. 18 Diesel flame development and termination (Rail pressure 10MPa Surround pressure 1.0MPa)

분위기 압력이 0.4MPa이 되면 이러한 특성이 줄어들면서 화염이 주로 충돌부위에 집중된다. 하지만 아직 많은 연소들이 연소실 상단에서 진행된다.

압력이 더욱 증가되면 분무연료의 증발이 감소되고 충돌부위 근처에 연료가 집중됨으로서 밝은 연소화염이 이곳을 중심으로 발달되고 소멸된다.

### 3.3 LPG, 가솔린, 디젤의 분무연소 비교

Fig. 19는 분사압력 10MPa 일 때 분위기 압력이 0.1, 0.4, 0.7, 1.0MPa 인 경우 분무선단이 분사 노즐로부터 105mm 떨어진 충돌면에 도달할 때까지 걸리는 시간을 나타낸다.

가솔린과 디젤연료의 경우에는 분위기 압력이 증가하면서 도달시간이 증가됨을 나타내는데 이는 분위기 압력과 밀도 증가에 의한 유동저항증가의 당연한 결과임을 알 수 있다.

하지만 LPG의 경우에는 분위기 압력이 0.1MPa 인 대기압의 경우에는 도달 시간이 길고 더 높은 압력의 경우 오히려 줄어든다. 이는 LPG 증발 특성에 의하여 설명되는데 분위기 압력이 낮은 0.1Mpa의 경우에는 분사된 LPG 연료가 분사 액체 온도의 포화압보다 낮은 압력 상태로 순간적인 노출이 이루어 지기 때문에 전체 분사액적이 급속히 증발되어 확산됨으로써 분무의 진행이 정상적으로 이루어지지 못하기 때문이다.

분위기압력이 증가되면 이러한 급속 증발현상이 사라지게 되고 분무 거동이 가솔린이나 디젤의 경우와 비슷하게 된다.

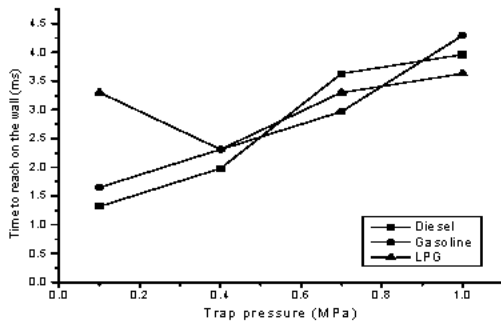


Fig. 19 Comparison of times to reach on the wall for LPG Gasoline and Diesel fuels

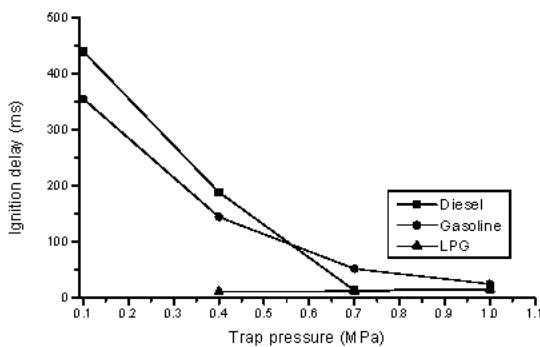


Fig. 20 Comparison of ignition delays for LPG, Gasoline and Diesel fuels

Fig. 20은 분무선단의 충돌면에 도달했을 때부터 연소가 시작될 때까지의 시간인 착화지연시간을 보여준다. 분위기 압력 0.1MPa에서는 LPG 연소가 너무 약해서 자발광에 의한 가시화에 실패하였다. 분위기 압력 0.4MPa인 경우 가솔린과 디젤에 비하여 10배 이상 착화시간이 단축된다. 그러나 분위기 압력이 증가하여 1.0MPa 가 되면 차이가 줄어들는데, 디젤의 경우와 유사한 수준이 된다. 대기압 상태에서의 연소특성을 보면 LPG의 경우 고속카메라로 가시화 할 수 없을 정도의 미약한 연소를 보여주며, 가솔린, 디젤의 경우에도 화염이 집중되지 못하고 연소실 전체에 분포되면서 연소가 활성화되지 못하고 연소 종료 후에 많은 미연가스가 존재한다. 분위기 압력이 0.4MPa 인 경우 연료가 주로 분포하고 있는 충돌면에서 화염이 시작하여 분무축이 있는 곳으로 타고 오르는 연소특성을 보여 주는데, LPG의 경우가 가솔린, 디젤에 비하여 비교적 약한 화염을 나타낸다. 모든 연료의 경우에 대해서 비교적 양호한 연소와 함께 연소 종료 후에도 미연가스나 soot가 거의 없음을 알 수 있다.

분위기 압력이 더욱 증가하면 분무연료의 증발이 둔화되고 충돌후 액적의 분산이 줄어들면서 많은 연료가 충돌면을 중심으로 분포됨으로서 밝은 화염이 이곳에 집중적으로 나타나며 연소 후에도 산소부족 등에 의하여 미연가스가 많이 분포함을 알 수 있다. LPG의 경우는 비교적 청정하고 디젤의 경우가 오염이 가장 심하다.

## 4. 결 언

본 해설에서는 일정 분사압력하에서 분위기 압력을 변화시켰을 때의 연료의 종류에 따른 분무와 연소의 특성을 검토하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

가솔린, 디젤과 달리 LPG 연료는 주위공기압력에 크게 영향을 받으며, 특히 주위공기 압력이 LPG 분사전 액체온도에서의 포화증기압보다 낮은 경우에는, 분사직후에 많은 연료가 증발하여 확산함으로서 분무가 계속적으로 뿜어 나가지 못한다. 하지만 분위기 압이 증가하면 이러한 특성이 급격히 줄어들면서 디젤분무 거동과 유사하게 된다. 연소 역시 이러한 분무특성에 크게 영향을 받으며, 저압에서는 전 연소실에서 극히 미미한 연소가 진행되는 반면 고압 분위기에서는 가솔린, 디젤과 유사한 연소특성을 나타낸다. 그러나 분무 종료후 미

연가스나 soot가 현저하게 작은 것을 알 수 있다.

이러한 LPG 분무연소 특성을 고려할때 직분식 가솔린 기관과 같이 5~10MPa정도의 낮은 분사압력으로 연소실에 LPG를 직접 분사하는 경우에는 분사된 분무 연료가 주위 유동에 매우 민감하기 때문에 연료가 점화플러그 근처에 모일 수 있도록 적절한 내부유동형성을 위한 정교한 설계가 요구된다. 특히 고속 고부하 영역과 같이 분사시기가 빠른 경우(early injection)에는 분위기 압력이 낮기 때문에 전체 급속증발효과에 의한 분무 확산 거동특성을 고려하여야 한다. 디젤과 같은 고속 분사의 경우에도 LPG 연료의 빠른 증발 특성은 퇴적 현상을 줄이고 미연가스나 soot의 발생을 억제하기 때문에 고속 소형엔진에 적용하는 경우에 효과적인 유해배출물저감 및 에너지 효율 향상이 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. R. Brown and J. L. York, "Spray Formed by Flashing Liquid Jet", *AICHE Journal*, vol. 8(2), pp. 149~153, 1962
2. Y. Kitmura, H. Morimitsu and T. Takahashi, "Critical superheat for flashing of superheated liquid jets", *Industrial Engineering Chemical Fundamentals*, vol. 25, pp. 206~211.
3. A. Wildgen and J. Straub, "The boiling mechanism in superheated free jets", *International Journal of Multiphase Flow*, vol.15(2), pp. 193~207, 1989
4. William J. Smith, David J. Timoney, and Dermor P. Lynch, "Emissions and Efficiency Comparison of Gasoline and LPG Fuels in a 1.4Litre Passenger Car Engine", SAE paper 972970, 1997
5. H. Fusimoto, Y. Iwami and J. Senda, "Atomization characteristics of liquefied n Butane spray with flash boiling phenomena", *Pro. of ICLASS '97 Seoul*, 1997
6. Bas Hollemans, LConti, P.de Kok "Propane the "Clean"Fuel of the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles",TNO paper VM9504, 1995
7. Xiaobo Sun, Tom Wiedmann, and Syed Hussain "Fuel Management and Exhaust Emissions of Light and Heavy Duty Trucks Operating on CNG and LPG", SAE paper 971661, 1997
8. E.Robert Fanick and Kevin A.Whitney, Brent K. Bailey "Particulate Characterization Using Five Fuels", SAE paper 961098, 1996
9. 서희준, 오승목, 정용일, 배충식, "연소모사장치를 이용한 LPG 직접분사식 엔진 연소특성 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp. 3~8, 1999
10. 조규백, 정동수, "직접분사식기관 적용을 위한 LPG연료의 실린더내 분무 특성에 관한 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp76~81, 1999
11. 임희성, 박권하, "분사압력변화에 따른 액체 LPG 분무특성 디젤분무와의 비교", '한국연소학회지 제4권 제2호 pp43~50, 1999