

LPG 액상분무의 분열 및 혼합특성

Characterization of Liquid Phase LPG Sprays within Airflow Fields

최재준*, 최동석*, 남창호*, 배충식*
Jaejoon Choi, Dong-Seok Choi, Changho Nam, Choongsik Bae

ABSTRACT

The interaction between airflow and liquid phase LPG (Liquefied Petroleum Gas) sprays was investigated in a steady flow system embodied in a wind tunnel to simulate the variety of flow inside intake port of LPG engines with liquid injection system. The spray developments in flowing fields with the mean velocities of 5.4, 21.5 and 42.4m/s were identified by spray visualization techniques such as Mie scattering and shadowgraph. The microscopic visualization using a telescopic lens system was performed to investigate the shape and size of liquid droplets in the spray. PDA measurement was used to get 1-dimensional velocity and diameter of liquid droplets. The fast co-flows make the spray field be compact and be lead upward to the injection direction. SMD of the spray was smaller at the fast flowing field. Spray width got bigger and SMD of the spray was smaller with higher injection pressure.

주요기술용어 : LPG(액화 석유 가스), LPLI(LPG 액상분사), Mie scattering(Mie 산란), Shadowgraph (음영사진), SMD(Sauter 평균입경)

Nomenclature

A_v : normalized fuel vapor area
SOI : start of injection
 t_i : elapsed time after SOI
 V : velocity

Subscripts

a : air
f : fuel

1. 서론

자동차 엔진 연료로서 액화 석유가스(LPG)는 가솔린과 비교하여 분자구조 상 탄소수가 적기 때문에 CO₂, HC의 저감에 잇점이 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 더욱이 LPG 액상 분사는 기존의 기상 분사기술에 비하여 증발잠열로 인한 체적 효율의 증대로 성능향상에 매우 유리하며 유해 배출물 저감효과도 있는 것으로 알려져 있다.²⁾ 그러나 LPG 엔진 연소에 대한 연구^{3,4)}에 견주어 볼 때 LPG 액상분사에 대한 연구는 아직 미흡한

* 회원, KAIST 기계공학과

실정이다. 특히 공기 유동장 내에서 분무된 LPG 액상연료의 분열 및 혼합특성은 실제 엔진의 포트 분사시의 특성을 예측할 수 있는 기초적인 자료를 제공하는 데 큰 의미가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 LPG 액상 분무의 구조, 분열, 및 혼합 특성을 공기 유동장 내에서 실험적으로 조사하는 것이다. 흡기포트 내부의 여러가지 공기유동 조건을 모사하기 위하여 풍동을 이용한 정상 유동장치에서 실험을 수행하였다. 분무의 방향은 실제 엔진과 동일하게 공기의 유동 방향과 평행하게 설치하였다. Mie산란 및 음영사진(shadowgraph)기법을 사용하여 분무의 거시적 특성을 조사하고, 미시적 사진기법과 PDA 기법을 통하여 액적의 형상과 SMD 및 액적의 속도를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 횡방향 유동을 생성하는 정상 유동장치, 각종 계측시스템으로 구성되어 있다. 풍동의 최대 유속은 45m/s이며, 송풍기의 모터 속도를 제어하여 풍속을 조절하였다. 또한 피토투브를 사용하여 여러가지 유속에서 유동관 내의 속도분포를 조사하였다. 최대 유동률에서 유동관 내의 속도변동은 약 5%이하였다. 유동관의 단면의 크기는 50×50mm이며 투명한 아크릴을 사용하여 광학적 접근이 가능하게 하였으며, 이 직관의 한 변의 길이 50mm로 만들어진 단면적의 넓이는 본 실험에서 사용될 인젝터가 설치될 2L(per cylinder)급의 엔진에서 흡기 포트 단면적의 넓이와 같다. 공기의 유속은 5.4m/s, 21.5m/s와 42.4m/s의 세 가지로 설정하였는데, 이것은 이 인젝터가 설치될 엔진의 흡기관 내에서 저부하, 고부하 중속(약 1600rpm시 스로틀 전개상태), 고부하 고속조건인 유동속도를 모사한 유속이다. Fig. 2는 LPG 액상 분사를 위한 인젝터의 개략도를 나타낸 것이다. 인젝터는 정상 유동장치의 유동관에 대하여 수직으로 설치되어 있다.

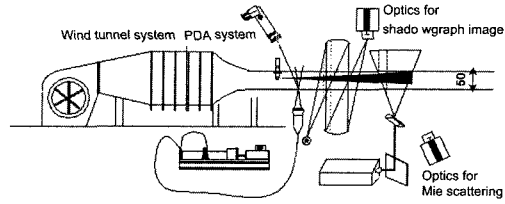


Fig. 1 Experimental setup for liquid phase LPG spray

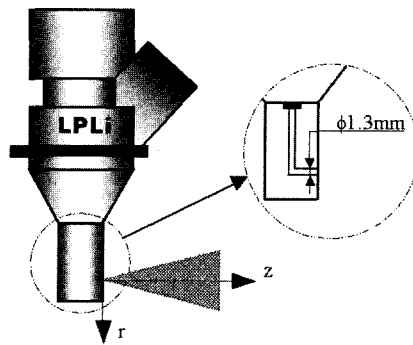


Fig. 2 Injector configuration

분무의 방향은 어댑터를 설치하여 공기 유동방향과 평행하게 되도록 하였다. 이것은 실제 LPG 엔진의 흡기포트 유동조건을 모사하기 위한 것이다. 분사압력은 10기압, 15기압, 20기압의 3가지를 선택하였으며 고압의 질소와 어큐뮬레이터를 사용하여 분사압력을 설정하였다, 분사기간은 분사압력 15기압일 때 5ms 동안 분사된 양인 39mg을 기준으로 각각의 분사 압력에 대하여 동일한 양을 분사하였다. 각각의 분사압력과 분사기간의 관계는 표 1과 같다. 분사량 39mg은 실엔진에서 사용하는 희박연소의 한계치보다 적은 양이지만, 분무의 발달 특성을 파악하기에 적당한 분사시간에 해당되는 분사량이어서 본 실험에 적용되었다.

공기유동과 분무유동간의 상호작용을 거시

Table 1 Relation of injection pressure and injection duration for 39mg injection

| Injection pressure | Injection duration |
|--------------------|--------------------|
| 1MPa | 7.51ms |
| 1.5MPa | 5ms |
| 2MPa | 4.58ms |

적으로 관찰하기 위하여 Mie산란기법과 음영사진기법이 사용되었다. 광원은 1.2W의 수냉식 Ar-ion레이저가 사용되었다. Mie 산란 실험에서는 초점거리 6.5mm와 1m의 원통형 렌즈를 사용하여 평면광을 만들고 분무중심 단면의 액상연료를 가시화하였다. 음영사진 실험에서는 직경 200mm, 초점거리 2m인 오목거울 2개를 사용하여 평행광을 만들고 ICCD카메라로 1 μ s의 노출 시간동안 촬영하였다. 또한 확대비 6.8의 렌즈를 사용하여 미시적인 화상을 취득하였고, 분무액적의 크기와 유동방향의 속도를 구하기 위하여 PDA(Phase Doppler Anemometry) 장치(TSI社)를 사용하였다. 표 2는 PDA 측정을 위한 각종 광학 부품 사양을 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무 액상의 거동

Fig. 3과 4는 Mie 산란 이미징법으로 LPG 분무를 촬영한 그림이다. Mie 산란 이미징법은 액상의 연료만 촬영할 수 있기 때문에 기상을 배제한 이미지를 얻을 수 있다. 이 실험에서는 레이저를 이용하여 평면광을 만들어서 촬영하였다.

주위유동 속도가 5.4m/s일 때에는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 연료가 분사된 뒤에 중력의 영향을 받아서 분무 모양이 아래쪽으로 처지는 것을 알 수 있다. 그러나, 주위유동의 속도가 빨라짐에 따라서 Fig. 3의 (b)와 (c)처럼 분무장은 중력의 영향보다는 유동의 영향을 더 많이 받아서 분무의 중력방향으로의 아래쪽이 접혀 올라가는 현상이 생기게 된다. 이것은 실험장치의 경계조건인 사각직관 50mm의 영향(경계조건)

과 그것의 중앙까지 돌출해 나온 인젝터 끝단의 영향으로 인하여 인젝터 아랫쪽의 유동이 교란되어 난류 경계층과 와도를 일으키면서 윗부분으로 말려 올라가기 때문에 생기는 현상이고 실제 엔진에서도 같은 현상이 생길 것이라고 예측할 수 있다. 주위유동의 속도가 빠를 때에 관측되는 분무면적이 더 넓은데, 이것은 주위유동의 난류강도 강화로 물질전달과 혼합성능이 높아져서 분무장을 효과적으로 분산시켜주기 때문이다.

분사압력이 다를 때, 단위시간당 분출되는 연료의 양이 다르기 때문에 사진은 전혀 다른 양상을 보인다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 분사압력 20bar일 때(Fig. 4(c))의 Mie 산란 강도가 같은 시간대의 Fig. 4(a)에서보다 훨씬 강함을 볼 수 있는데, 이것은 (c) 조건에서의 분사압력이 높아서 단위시간당 분사되는 연료의 양이 (a)의 경우보다 많기 때문이다. 또한 분사압력이 높을수록 초기의 모멘텀이 강하여 주위유동에 횡방향으로 확산되기 용이하기 때문에 분무폭이 분사압력이 낮을때보다 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 5는 액상 연료의 시간에 따른 분무도달

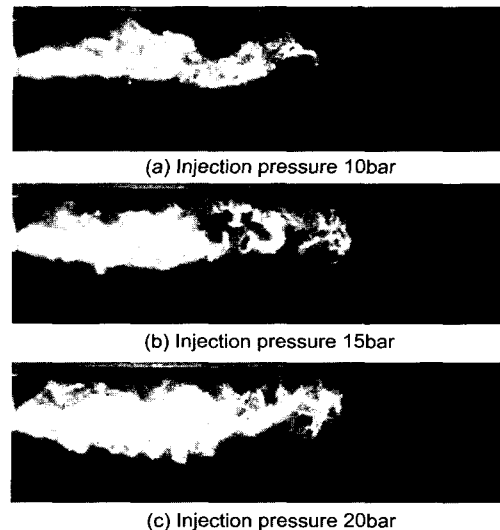


Fig. 3 Spray pattern with different flow velocity at 4.4ms after SOI with injection pressure 15bar

Table 2 PDA system setup parameters

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Laser wavelength | 514.5nm |
| Transmitter focal length | 362.6mm |
| Beam spacing at transmitter | 50mm |
| Receiving lens focal length | 300mm |
| Scattering angle | 30 |
| Vol. diameter | 90.5 μ m |
| Vol. length | 1.31mm |

거리를 그래프로 나타낸 것이다. 주위유동 속도가 바뀔 때에 Fig. 5(a)에서 보면 주위유동속도 5.4m/s일 때만 21.5m/s와 42.4m/s때와 다른 것으로 생각할 수 있다. 분사후 1.6ms까지는 세 경우의 분무도달거리가 거의 비슷하게 진행되다가 1.4ms때에 이르러 주위유동 5.4m/s의 분무속도가 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 분사 시작부터 1.4ms때까지의 분무속도는 35.7m/s인데 반하여 분무후 1.4ms 이후의 평균속도는 19.5 m/s인 것을 알 수 있다. 그래프에서는 표기되지 않았지만 주위유동이 21.5m/s와 42.4m/s의 분무도달거리는 3.5ms 근방에서 차이가 나기 시작하는 것으로 밝혀졌다. 이것은 처음에는 액상의 연료가 자체적으로 후방의 분무 압력에 의하여 모멘텀을 가지고 출발하다가 자신의 모멘텀을 잃고 주위 유동의 모멘텀을 쫓아가는 과정을 표현하는 것이라고 할 수 있다. Fig. 5의 (b), (c)는 분사 압력에 따른 분무도달거리를 보여주는데, 분사 압력의 영향은 미미한 것으로 판명되었다.

3.2 분무 증기상의 거동

Fig. 6과 7은 음영사진 기법으로 LPG 연료분사에서 액상의 연료와 기상의 연료를 동시에 촬

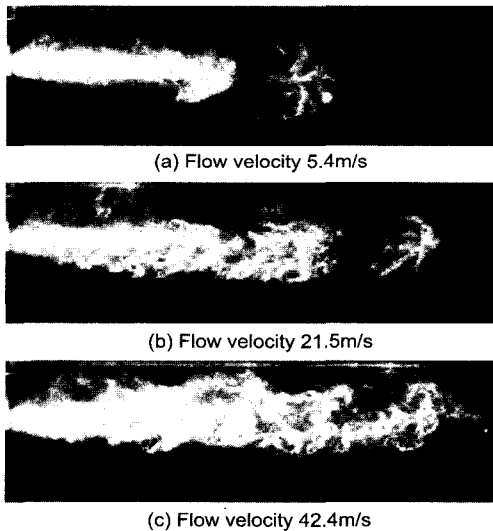
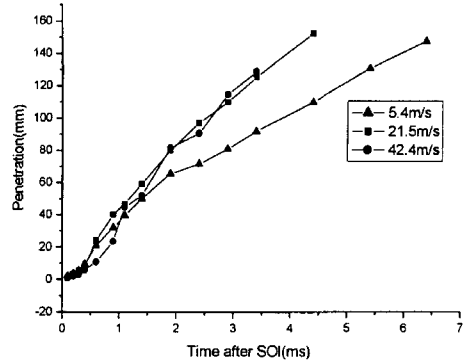
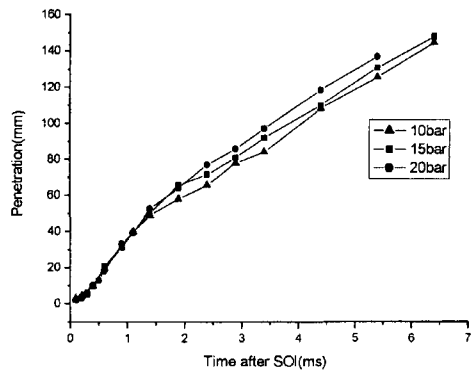


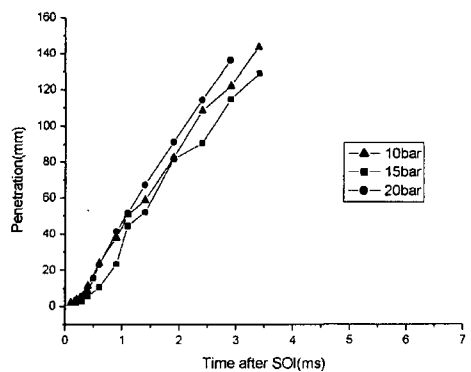
Fig. 4 Spray pattern with different injection pressure at 2.4ms after SOI with flow velocity of 42.4m/s



(a) Various flow velocity, injection pressure : 15bar



(b) Various injection pressure, flow velocity : 5.4m/s



(c) Various injection pressure, flow velocity : 42.4m/s

Fig. 5 Liquid penetration from LPG injector

영한 사진이다. 액상의 연료가 나오기 전에 기상의 연료가 먼저 나오기 때문에 액상의 연료가 나오는 시점을 SOI(Start of Injection)로 잡아서 음영사진에서는 마이너스 시간대에서 분무가

이루어지는 것을 관찰할 수 있었다. 주위유동속도가 다를 때 Mie 산란 이미지에서 확인되었던 중력 반대방향의 유동의 움직임이 Fig. 6을 살펴보면 비교하여 확인될 수 있다. 주위유동의 속도가 빠를 때 분사기 끝에서 생기는 와류 때문에 분사기 전체가 기체의 연료로 싸여지는 것을 관찰할 수 있다. 이 현상은 주위유동의 속

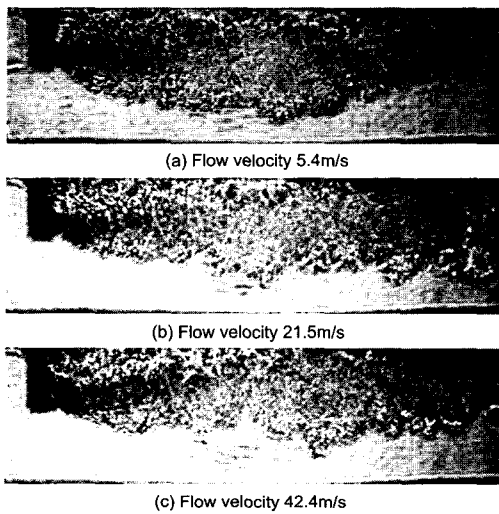


Fig. 6 Spray pattern with different flow velocity at 4.4ms after SOI with injection pressure 10bar

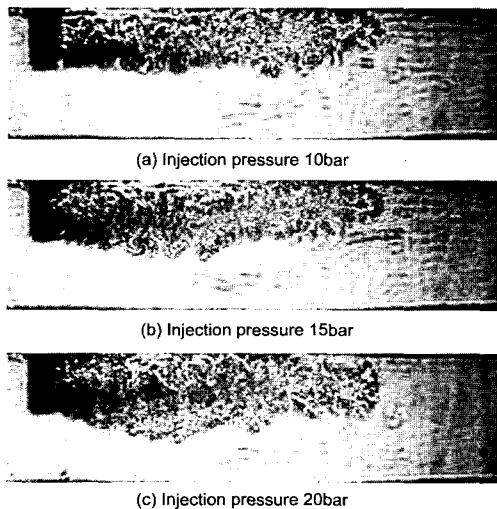


Fig. 7 Spray pattern with different injection pressure at 2.4ms after SOI with flow velocity of 42.4m/s

도가 빠르면 빠를수록 더 두드러지게 나타난다. Fig. 5에서 액체 분무도달거리가 주위유동의 속도에는 상관성이 있지만 분사압력과는 상관성이 없다는 것을 확인했었다. 음영사진 기법으로 촬영한 그림에서 보아도 Fig. 7에서 보는 바와 같이 기상과 액상의 연료가 동시에 보임에도 불구하고 다른 분사압력에서 같은 시간에 거의 동일한 분무도달거리를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 인젝터 팁을 포함한 인젝터 후면에서 심한 밀도구배로 인해 분무의 경계가 상류로 확장되어 인젝터 팁의 영상이 흐려지는 양상을 볼 수 있다. 이것은 재순환 영역이 형성되어 분무 액적이 유동장 상류쪽으로 후퇴하여 음영사진 기법으로 그 부분에서까지 밀도의 구배가 관측되는 것을 의미하며, 공기 유동속도가 빨라질수록 이 영역으로 분무영역이 확대되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 공기 유동속도에 따른 증기상의 공간 분포변화를 분사 후 경과된 시간에 따라 나타낸 것이다. 증기상의 공간분포를 나타내는 지표로 증기상 면적(A_v)의 정의를 Fig. 8에서 보는 바와 같이 하였다. 즉 음영사진 화상의 분무면적에서 Mie산란 화상의 분무면적을 제거하여 구하였다. 또한 증기상의 면적은 두가지 공기 유동속도에 대하여 최대 면적으로 나누어 정규화하였다. 공기 유동 속도가 5.4m/s인 경우, 분사 후 4ms이후에 증기상의 공간분포가 급격히 증가되고 있음을 알 수 있다. 이것은 액상은 분사 중

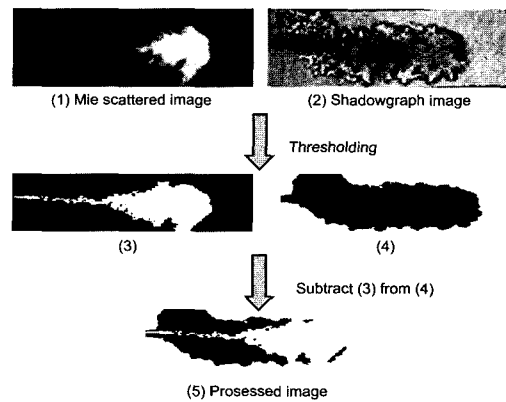


Fig. 8 Image processing for fuel vapor area

료 후에 일정영역에 묻쳐져 있는 반면에 음영사진을 통한 분무경계는 가시영역 전반에 걸쳐 넓게 퍼져 있기 때문이다. 한편 공기 유동속도가 42.4 m/s인 경우, 전체적으로 완만한 증가를 보이고 있다. 이것은 빠른 공기 유동속도로 인하여 액상 및 증기상이 하류로 빨리 확산되기 때문이다.

3.3 미시적 분무특성

Fig. 10은 미시적 사진을 공기 유동속도와 촬영위치에 따라 나타낸 것이다. 그림은 분사 후 3ms에서 촬영한 화상을 예시한 것이다. 분무축 방향(z)으로 10mm와, 반경방향(r)으로 12mm인

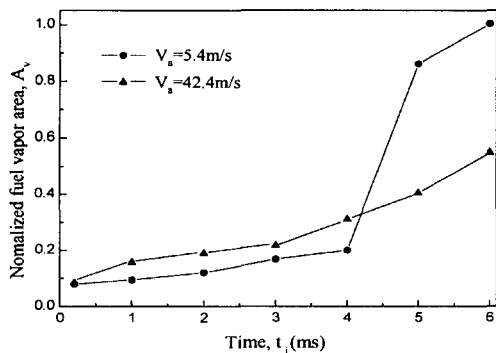


Fig. 9 Temporal change in fuel vapor area with different airflows

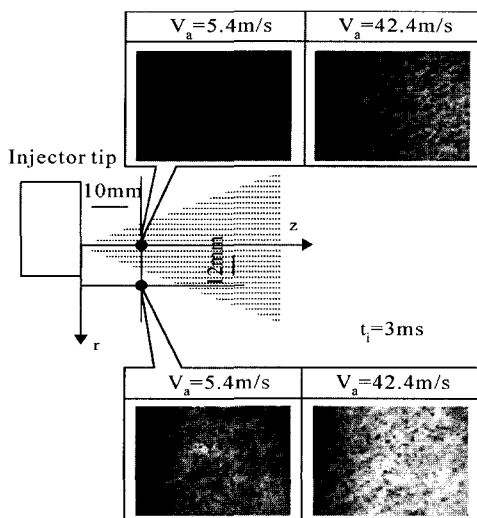


Fig. 10 Microscopic images of LPLi spray

두 지점에서 촬영하였다. 이미 선행연구⁵⁾에서 노즐 출구부근에서의 미시적 촬영을 통하여 연료 액적의 형상이 구형임을 확인한 바 있다. 분무축과 분무외곽을 비교해 볼 때, 분무축에서 수밀도가 높으며 상대적으로 큰 액적이 분포하고 있음을 볼 수 있다. 공기의 유동속도의 영향은 화상으로 볼 때 큰 변화는 없었다.

Fig. 11과 12는 PDA 장비로 측정된 SMD 분포도이다. Fig. 11은 분사압력을 15기압으로 고정시켜 놓았을 때에 분사 4.4ms 후의 순간에 인젝터 끝단에서 150mm까지의 연료 분포를 주위 유동의 속도가 바뀌에 따른 경향을 비교한 그림이다. 주위유동의 속도가 5.4m/s일 때에는 분무장이 주위 유동의 영향을 거의 받지 않고 중력의 영향을 받아 아랫부분에서 큰 SMD를 가진 영역이 많이 발견된다. 주위유동의 속도가 21.5m/s일 때에는 분무장이 유동과 함께 하류로 흘러가고 있는 현상이 보이며, 주위유동의 속도가 42.4m/s일 때에는 빠른 기화현상 때문에 연료가 거의 기화되고 인젝터 윗부분에만 액적이 조금 남아 있는 것을 그림에서 확인할 수 있다. 인젝터의 출구 부분에서의 연료의 밀도가 아주 높아서

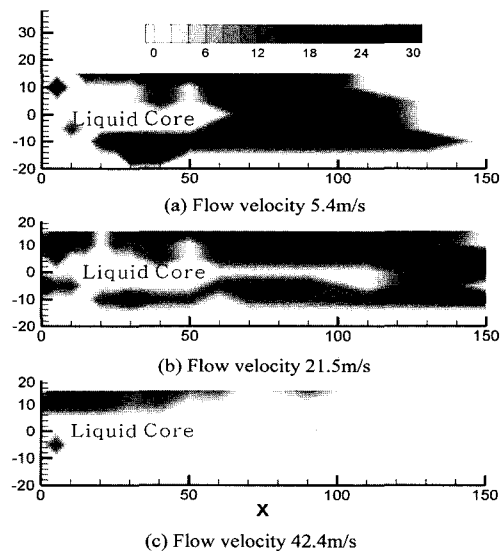


Fig. 11 SMD distribution with different flow velocity at 4.4ms after SOI with injection pressure 15bar

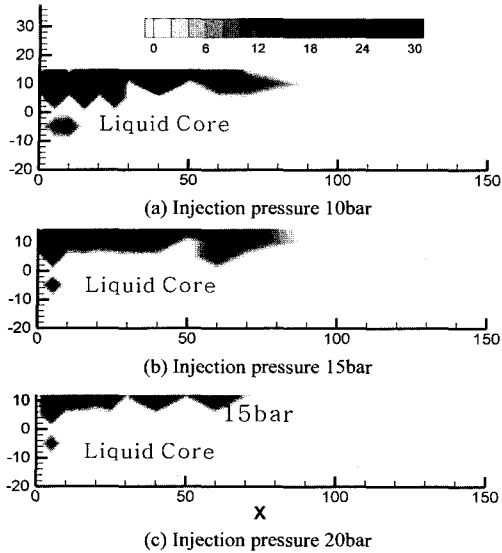


Fig. 12 SMD distribution with different injection pressure at 2.4ms after SOI with flow velocity of 42.4m/s

SMD를 나타낸 Fig. 11에서는 중간이 비어있는 것처럼 보이거나 여기에 연료가 있음을 평면광을 이용한 미 산란 사진(Fig. 3, Fig. 4)에서 확인할 수 있다. Fig. 12는 분사압력에 따른 SMD 분포를 나타내어준다. 이 그림은 주위유동 42.4m/s, 분사 후 2.4ms 때의 순간을 압력을 바꾸어 주면서 측정한 결과이다. 미 산란 사진과 음영사진 기법으로는 확인하지 못하였던 분사압력에 따른 분무장의 변화가 그림의 명암으로 확인할 수 있듯이, 분사압력이 높아짐에 따라서 분무액적의 SMD가 작아지는 것을 알 수 있고, 면적도 좁아지는 것으로 보아 분사압력의 증가가 기화에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 미 산란 사진에서와 음영사진 기법으로 촬영한 사진에서 확인했던 분사압력과 분무폭과의 상관관계는 이 실험에서는 적용되지 않았다. 즉, 분사압력이 높아질수록 큰 액적의 미립화가 잘 일어나서 분무폭이 커지는 것이 아니라 오히려 더 작게 보이기도 하였다.

Fig. 13과 14는 PDA 장치로 측정한 분무방향으로의 속도장을 나타내어준다. Fig. 13은 주위 유동장의 속도의 변화에 따른 속도분포를 나타

내는데, 유동장 속도가 5.4m/s일 때에는 나타나지 않던 음의 속도가 유동장 속도 21.5m/s, 42.4m/s일 때에는 인젝터부근에서 음의 속도, 즉 유동장에 반대되는 속도를 가진 영역이 존재하는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 분사기에서의 와류 유동으로 인한 재순환영역이라고 생각하기보다는 강한 주위 유동장이 돌출되어 있는 분사기에 방해로 받아 재순환영역이 형성되는 것이라고 생각되어진다. 실제 엔진에서도 같은 현상이 생길 것으로 추측되며, 이것은 분사기 자체에 연료 액막을 형성함으로써 엔진 성능에 좋지 않은 영향을 미칠 것이라고 생각된다. Fig. 14는 주위 유동장 속도가 42.4m/s일 때에 분사압력을 바꾸어가면서 측정한 속도장이다. 주위 유동장의 속도가 충분히 빠르기 때문에 인젝터 팁 근처에서는 음의 속도가 역시 관찰되며, 분사압력이 커질수록 미 산란 사진이나 음영사진 기법으로 촬영한 사진에서 확인하였듯이 분무폭이 커지는 것을 속도 그래프에서 인젝터 팁의 아래쪽의 속도가 더 큼을 확인하여 유추할 수 있다.

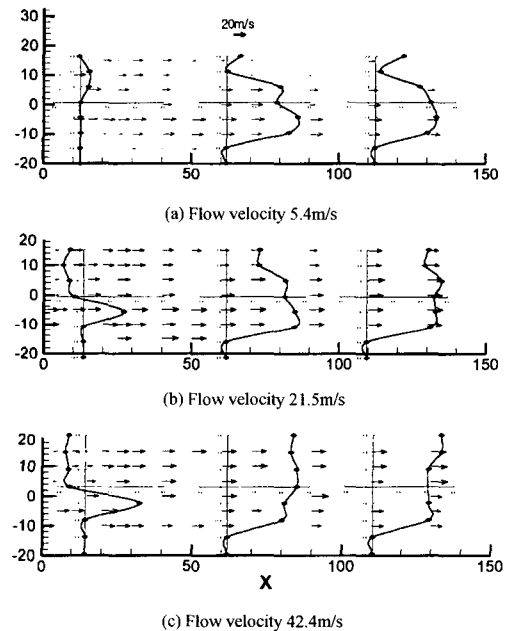


Fig. 13 Velocity distribution with different flow velocity at 4.4ms after SOI with injection pressure 15bar

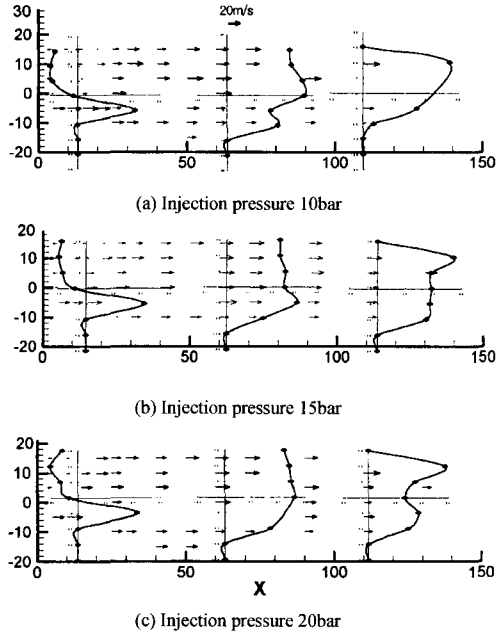


Fig. 14 Velocity distribution with different injection pressure at 2.4ms after SOI with flow velocity of 42.4m/s

4. 결론

공기 유동장의 변화에 따른 LPG 액상 분무의 구조, 분열, 및 혼합 특성을 Mie산란기법과 음영 사진기법, PDA 기법을 사용하여 조사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주위유동의 속도가 빠를 때에 연료는 중력 방향으로 확산하는 것이 아니라 인젝터의 윗쪽 부분으로 치우친다.
- 2) 분사압력이 높아질수록 분무는 자신의 모멘텀을 가지고 높은 주위유동의 속도에도 불구하고 분무폭이 더 커지는 결과를 갖는다. 또한 분사압력이 높아지면 연료의 미립화가 촉진되어 더 작은 SMD값을 갖는다.
- 3) 주위유동이 있을 때에 분무는 초기에 분사압력으로 인하여 진행하다가 자신의 모멘텀을 잃고 주위 유동에 따라가는 경향을 보인다. 시간에 따른 분무도달거리의 변화는 주위유동의 속도와

관계가 있으나, 분사압력과는 상관이 없었다.

4) 주위유동의 속도가 느릴 때에 분무는 중력의 영향을 받아 인젝터 아랫부분에 큰 SMD를 가진 영역이 많이 발견되며, 주위유동의 속도가 빠를 때에는 연료가 위쪽으로 쏠리고 기화가 신속하게 일어나기 때문에 위쪽부분에서 큰 SMD를 가진 영역이 발견된다.

5) 주위유동의 속도가 빠를수록 인젝터 부근에서의 음의 속도가 두드러지게 나타난다. 이것은 분사기가 유동에 교란을 주기 때문인데, 이것은 엔진의 흡기와 엔진의 성층 혼합기 형성에 영향을 미친다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 한국기계연구원 LP가스 사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) A. Gerini, G. Monnier, R. Bonetto, "Ultra Low Emission Vehicle-Using LPG Engine Fuel," SAE 961076, 1996.
- 2) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection," SAE 922363, 1992.
- 3) H. Huang, T. Nakajima, A. Gua, "Spray Dynamics Simulation of Liquefied Butane Injection," SAE 972868, 1997.
- 4) J. S. Shakal, S. T. Hong, S. Goto, J. Y. Koo, "Transient Injection Characteristics of Pintle Type Injector for Direct Injection of LPG," Proceedings of International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-97), pp.164-174, 1997.
- 5) C. Bae, J. Kim, D. Choi, J. Choi, S. Lee, "Spray Characteristics of Liquid Phase LPG Injection for Port Fuel Injection S.I. Engine," Proceedings of ILASS-Asia 2001, pp.161-166, 2001.