

PDPA와 고속카메라에 의한 액상부탄 간헐분무 특성 연구

김종현† · 윤준규* · 임종한**

(원고접수일 : 2003년 10월 24일, 심사완료일 : 2004년 1월 7일)

The Characteristics of a Transient Liquefied Butane Spray using PDPA and High Speed Camera

Jong-Hyun Kim† · Jun-Kyu Yoon* · Jong-Han Lim**

Abstract : The characteristics of liquefied butane spray are expected to be different from conventional diesel fuel spray, because a flash boiling spray is expected when the surround pressure is below the saturated vapor pressure of the butane(0.23MPa at 298K). The axial velocities, radial velocities, and size distributions in butane sprays were measured with PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system. Sprays were macroscopically observed by using the high speed camera in case that the surround pressure is 0.37MPa and 0.15MPa, respectively. Compared with the conventional spray, the reversed results were investigated when the surround pressure is below the saturated vapor pressure of the butane.

Key words : Liquefied butane spray(액상부탄분무), Flash boiling spray(감압비등분무), Velocity distribution(속도분포), SMD(Sauter mean diameter), High speed camera(고속카메라)

1. 서 론

내연기관에는 가솔린엔진에서 사용되는 낮은 압력의 연료분사로부터 디젤엔진용 고압 연료분사가 적용되고 있으며, 분무실 압력은 대기압 이하부터 수십 기압까지 광범위한 조건에서 작동하는 분사계가 채용되고 있다.

액체가 가압되어 분사될 때에 분사되는 분무액적의 속도 및 크기분포는 분무를 특징짓는 요소로

서 공학분야 뿐만 아니라 자연과학, 환경과학, 의학분야에서도 제반현상들을 이해하고 해석하기 위한 중요한 영역을 차지하고 있다. 특히 액상의 연료를 연소시켜 동력을 얻는 내연기관이나 가스터빈 등에서는 연소실 내의 분무특성이 혼합기 생성과 점화특성 등의 연소효율에 영향을 미칠 뿐만 아니라 연소생성물에도 상당한 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

공해문제와 환경에 관심이 높아지면서 연소장치

† 책임저자(경원전문대학 자동차과 겸임교수), E-mail : realtek@freechal.com, T : 031)750-8843

* 경원전문대학 자동차과(jkyoon@kwc.ac.kr)

** 경원전문대학 자동차과(kkjong@kwc.ac.kr)

에서 배기가스를 저감시킴과 동시에 에너지의 효율향상을 통한 에너지자원에 대한 효율적인 사용이 법률로 규제되고 있다.

액상가스연료는 기존의 가솔린이나 디젤연료에 비해 적은 수의 탄소원자수를 포함하고 있어서, 연소생성물에서 탄소를 포함한 부산물이 적게 배출된다. 또한, 심각한 대기오염 성분인 유황물과 질소분, 그리고 금속을 부식시키는 알카리금속 함유물을 포함하고 있지 않다. 따라서 이산화탄소 억제와 배기가스 감소 및 정화에 대한 필요성에 부응하여 가스연료 사용이 효과적이며 가스 연료의 이용기술 확대가 요구되고 있어서 가스터빈과 디젤엔진에 LPG(Liquefied Petroleum Gas)나 CNG(Compressed Natural Gas) 등의 가스연료를 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾

A. K. Aigal⁽²⁾은 메탄올 분사에 대한 연구에서, 메탄올의 발열량이 일반적인 연료(가솔린, 디젤)의 발열량 보다 작으므로 연소 사이클 중에 연료전송을 증가시켜야 함을 나타내었다. 또한, 연료의 압축성, 음속, 점성, 표면장력, 밀도 등의 물성치가 다르므로 메탄올의 분사 및 무화특성은 디젤연료의 특성과는 다른 결과가 나타남을 밝혔다. 그러므로 분사시스템을 해석하기 위해서 분사시스템 요소에 적용되는 연속방정식, 운동방정식에서 수정·변경되는 사항들을 기술하였다. Jouke et al.⁽³⁾은 가스연료를 사용하는 엔진에 대한 배기물질과 효율의 특징을 부분적으로 디젤연료를 사용하는 시스템과 비교하였다. 최적화를 통한 연소와 유동현상에 대한 수학적 모델링을 실제 엔진테스트와 병행하여 연구하여, 천연가스는 일반적으로 문제가 되고 있는 배기가스인 일산화탄소, 탄화수소, 질소화합물, 입자상물질 외에도 이산화탄소를 디젤이나 가솔린 엔진에 비해 26%나 줄일 수 있음을 밝혔다. 藤本 元⁽⁴⁾은 이중연료 방식의 LPG-디젤기관 실용화에 필요한 연구로서 액상부탄을 자동차용 전자제어식 분사밸브(EFI)에 적용하여 대기압 이하의 일정체적의 용기 내에 간헐적으로 분사하여 분무거동을 관찰하고 해석하였다.

부탄연료를 오토사이클에 적용할 경우, 에너지 효율은 노킹으로 인하여, 균질한 희박연소 오토사이클에 비하여 압축비에 의해 제한을 받는다. 그

렇지만 직접분사는 높은 압축비를 얻을 수 있어서 디젤엔진과 같은 열효율을 낼 수 있으므로, 대형 디젤엔진에 적용할 때 더욱 효율적이다.

액상부탄을 디젤기관에 적용할 경우의 문제점은 경유에 비해 낮은 비등점이다. 온도 20℃에서 노말 부탄은 2bar 정도의 압력에서 액화한다. 이와 같이, 부탄은 상온에서 비교적 쉽게 액화하는 성질이 있어서, 가압에 의해 용기 내에서 쉽게 액체상태로 유지가 가능하므로 비교적 내압이 낮은 용기에서도 액체상태로 저장할 수 있는 이점이 있지만, 외기 온도가 낮으면 부탄 자신의 기화열 공급이 미흡하여 충분한 가스 공급이 어렵다. 따라서 액상부탄을 상온·상압 및 가압상태의 분무실로 분사할 경우에 부탄의 증기압보다 낮은 감압비등현상과 액상부탄의 미립화특성 등을 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 액상부탄 분사장치에 의하여 발생하는 액상부탄 분무에 대해 위상도플러 입자분석기(PDPA)를 사용하여 액적입자의 속도 및 크기를 시간적, 공간적으로 측정하여 분무의 미시적 특성을 규명하고, 액상부탄 분무에 대한 고속사진 촬영을 통하여 분무의 거시적 특성과 분무실 압력에 따른 비등현상을 관찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연료분사계

핀틀형 액상부탄 분사에 사용한 연료분사시스템은 축압인젝터(accumulator type injector), 연료공급장치, 전자제어장치의 세 부분으로 구성되어 있다.

Fig. 1은 액상부탄 분무에 사용한 전자인젝터에 대한 개략도로서, 솔레노이드밸브, 축압실, 니들선단으로 구성되어 있다. 솔레노이드밸브는 인젝터와 전자제어기 사이에서 정보를 교환하며 작동한다.

Fig. 2는 연료공급시스템의 개략도이다. 솔레노이드 밸브가 힘을 받아 작동하면 연료는 연료공급장치에 의해 축압실 내로 충전된다. 솔레노이드 밸브에 전류가 차단되어 유로가 개방되면, 니들밸브(needle valve) 양 끝단에 압력 불균형이 발생하여, 니들이 상승하고 노즐 끝단이 열려서 축압실 내에 저장된 연료가 분사된다.

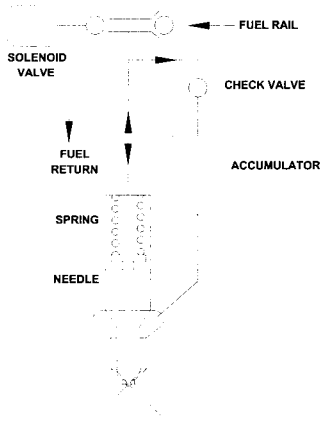


Fig. 1 Schematic of accumulator type injector

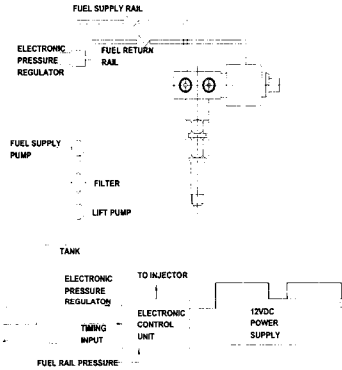


Fig. 2 Schematic of fuel supply system

2.2 PDPA 실험장치

분무액적의 속도와 크기를 측정하기 위한 실험 장치는 연료분사시스템, 분무실, PDPA로 구성되어 있다.

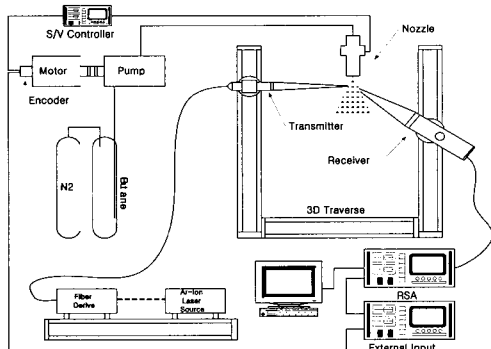


Fig. 3 Arrangement of spray measurement system

Fig. 3은 액상부탄의 분무특성을 관찰하기 위해 사용한 실험장치 및 PDPA의 개략도이다.

2.3 고속사진촬영 실험장치

Fig. 4는 고속사진 촬영장치의 개략도를 나타낸다. Model 350 Cordin high speed camera, Model 447A camera controller, Model 659 light source controller, Xenon flash lamp light source를 이용한 웨도우그래프 방법이 사용되었다. 고속카메라에는 35mm 필름을 사용하며 16mm frame이 두 줄로 찍히는 구조로 되어 있다. 1회 촬영시 얻을 수 있는 최대 프레임수는 224 프레임이고, 회전하는 드럼에 의해 필름이 균일한 속도로 회전하기 때문에 모든 프레임이 동일한 시간간격으로 촬영된다. 웨도우그래프 방법에 사용된 렌즈는 직경 90mm, focal length 600mm의 볼록렌즈이다. 점광원 효과를 나타내기 위한 편홀(pin hole)의 직경은 1mm이고 설치의 편리함을 위해 light source 앞에 부착된 판에서 2차원 이송이 가능하도록 제작되었다. 사진촬영 속도는 9090frame/sec로 조정되었다.

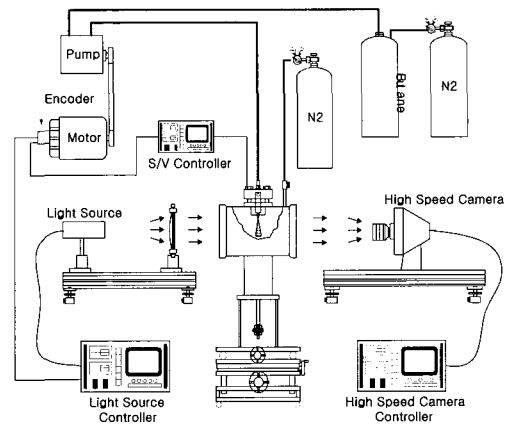


Fig. 4 Schematic of photography system

2.4 분무액적 측정위치

분무 측정점의 위치는 인젝터 부근 영역에서 분무의 하류영역까지, 분무축 방향(z)으로 10mm에서 60mm까지 10mm 단위로 측정을 수행하였고,

각 축방향 중심축 위치에서 반경방향(r)으로 측정을 하였다. 검사체적은 PDPA의 투과부축에 수직인 방향으로 이동하였다. 분무의 축방향 속도는 분무가 진행되는 방향을 양(+)으로 정하였고, 반경방향 속도는 분무 중심축에서 분무외부로의 방향을 음(-)으로 설정하였다. Tabel 1은 n-부탄의 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 n-Butane Properties

Composition	Properties at 298K
Density (kg/m ³)	581
Vapor pressure (MPa)	0.23
Kinematic viscosity (m ² /s)	2.93×10^{-7}
Dynamic Viscosity (N · s/m ²)	0.17×10^{-3}
Surface tension (N/m)	1.17×10^{-2}

3. 결과 및 고찰

3.1 부탄분무 특성

PDPA로부터 얻은 데이터 중에서 분무실 주위 기체 압력이 연료증기압 보다 높은 0.37MPa인 경우와 연료증기압 보다 낮은 0.15MPa인 경우에 대한 분무 중심축에서의 측정 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 인젝터 부근에서 축방향 속도는 주위기체 압력이 0.37MPa 보다 0.15MPa에서 큰 값을 나타내고 있으며 반경방향의 속도도 주위기체 압력이 0.15MPa인 경우가 더 크게 나타나고 있다. 또한, 주위기체 압력이 연료의 증기압 보다 낮은 0.15MPa에서 반경방향의 속도가 큰 양과 음의 값이 존재하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 주위기체 압력이 낮은 경우에 반경방향의 속도가 더 큰 값을 나타내는 것은 그 경우에 분무가 더 큰 분무각을 나타내고 있으며, 이는 일반적인 분무의 특성과는 상반되는 현상을 보이고 있

다. 또한 분무 액적이 존재하는 시간도 주위기체 압력이 0.15MPa일 때가 짧게 나타나고 있으며, 분무 액적의 크기도 주위기체 압력이 0.37MPa의 경우 보다 절반정도로 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 액상부탄이 분사하면서 감압비등에 의해 증발하여 분무가 확산되는 현상이 수반되기 때문이다. 두 경우 모두 분무가 하류로 진행할수록 분사된 분무가 감속되면서 인젝터 부근 보다 상당히 긴 시간동안 분무액적이 존재함을 알 수 있다. 또한, 분무의 하류에서도 부탄의 포화증기압 보다 낮은 주위기체 압력에서 여전히 작은 액적지름과 큰 반경방향의 속도를 나타내고 있다. 분무하류에서는 큰 분무액적이 높은 속도를 낼 수 있음을 알 수 있는데, 커다란 분무액적이 큰 운동에너지를 가지고 있으므로 주위기체의 저항을 극복할 수 있기 때문이다.

3.2 액적속도와 크기에 대한 평균분석

Fig. 7에 액적의 속도에 대한 전체평균(All)과 분사초기(Interval A), 분사중기(Interval B), 분사말기(Interval C)에 대한 평균값을 PDPA 데이터로부터 구하여 벡터그림으로 나타내었다. 분사초기는 액상부탄이 실제로 분사되고 있는 시간을 나타내고, 분사중기는 분사가 종료된 후 분무운이 측정점을 통과하는 기간에 해당되며, 분사말기는 유입유동이 일어나는 후반부 기간을 말한다. Fig. 7에서도 알 수 있는 바와 같이 주위기체 압력이 0.15MPa인 경우가 더 큰 분무각을 형성하고 분사말기에 주위기체의 유입이 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 분사 시간구분과 동일하게 분사기간 전체와 분사초기, 분사중기, 분사말기에 대해 분무액적의 SMD분포를 나타내고 있다. Fig. 7에 나타난 속도의 값과 비례하여 SMD의 값이 변함을 알 수 있다. 즉, 분무의 속도가 높은 분사 영역에서 큰 SMD값을 나타내고 있다. 주위기체 압력이 0.37MPa인 경우에는 분무의 중심축에서 가장 큰 SMD값을 나타내고 있으며, 분무가 하류로 진행하면서 그 크기가 줄어드는 현상을 나타내고 있으나, 주위기체 압력이 0.15MPa일 경

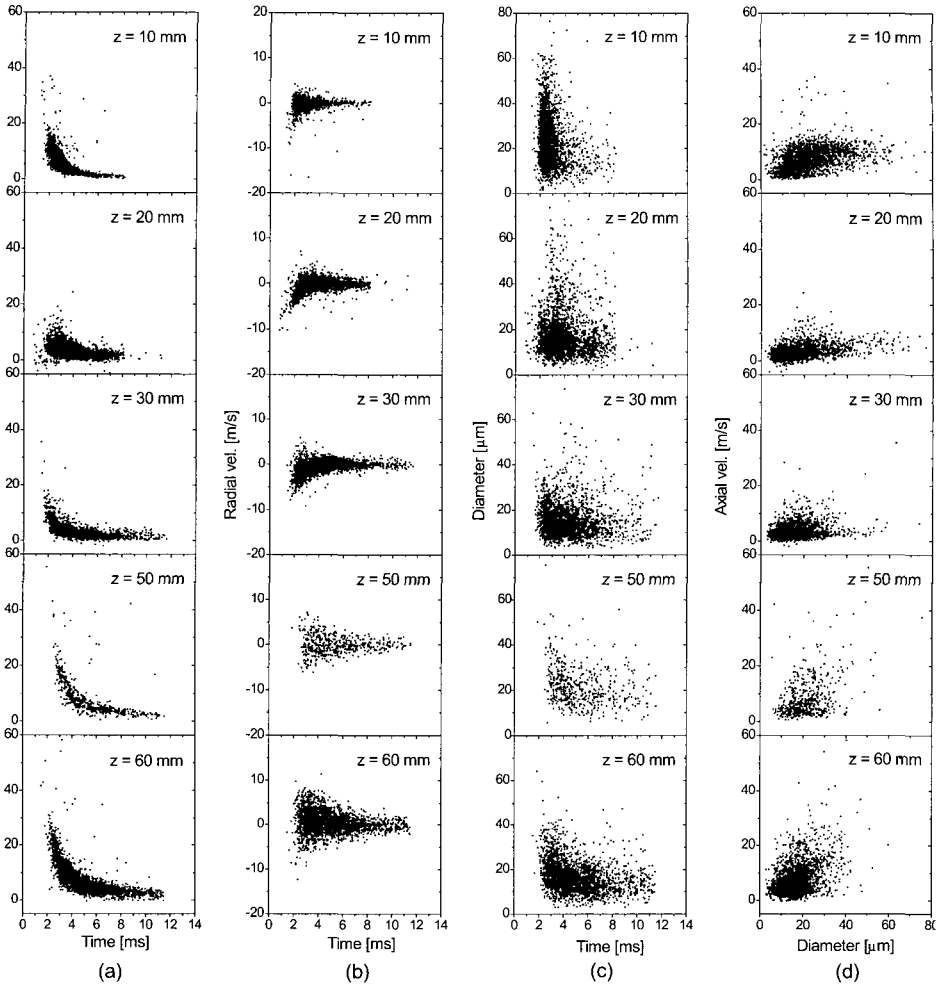


Fig. 5 Droplet velocities, sizes, and its correlations along spray axis in the chamber pressure of 0.37MPa

우에는 분무의 중심보다는 중심에서 벗어난 곳에서 가장 큰 SMD값을 나타내고 있다. 즉, 주위기체 압력이 0.15MPa일 경우에는 분무가 중공분무(hollow cone)의 형태를 이루다가 분무가 하류로 진행할수록 그 특성이 사라지고 있다. 이는 분무의 속도벡터의 그림에서도 나타나고 있는 현상과 일치하는 경향이다.

3.3 고속사진 촬영에 의한 거시적 부탄분무 특성

Fig. 9와 Fig. 10은 분사압이 13MPa이고 분

무실 압력이 각각 0.37MPa 및 0.15MPa인 경우에 대해 액상부탄이 분사되는 현상을 고속촬영한 사진이다. 각 상마다 분사시작 후의 순서가 각 상의 아래에 프레임번호로 표시되어 있다. 고속카메라가 분사되는 분무에 대해 9090frame/s의 속도로 촬영하였으므로 각 상의 시간간격은 0.11ms정도를 나타내고 있다. 전체적으로 분사는 대칭을 이루고 있다.

분무실압력이 낮은 0.15MPa의 경우가 분무실압력이 높은 0.37MPa의 경우보다 큰 분사각을 나타내고 있으며, 분사된 분무의 폭도 넓다. 그러나 분무가 진행하면서 넓게 퍼지는 못하고 분무

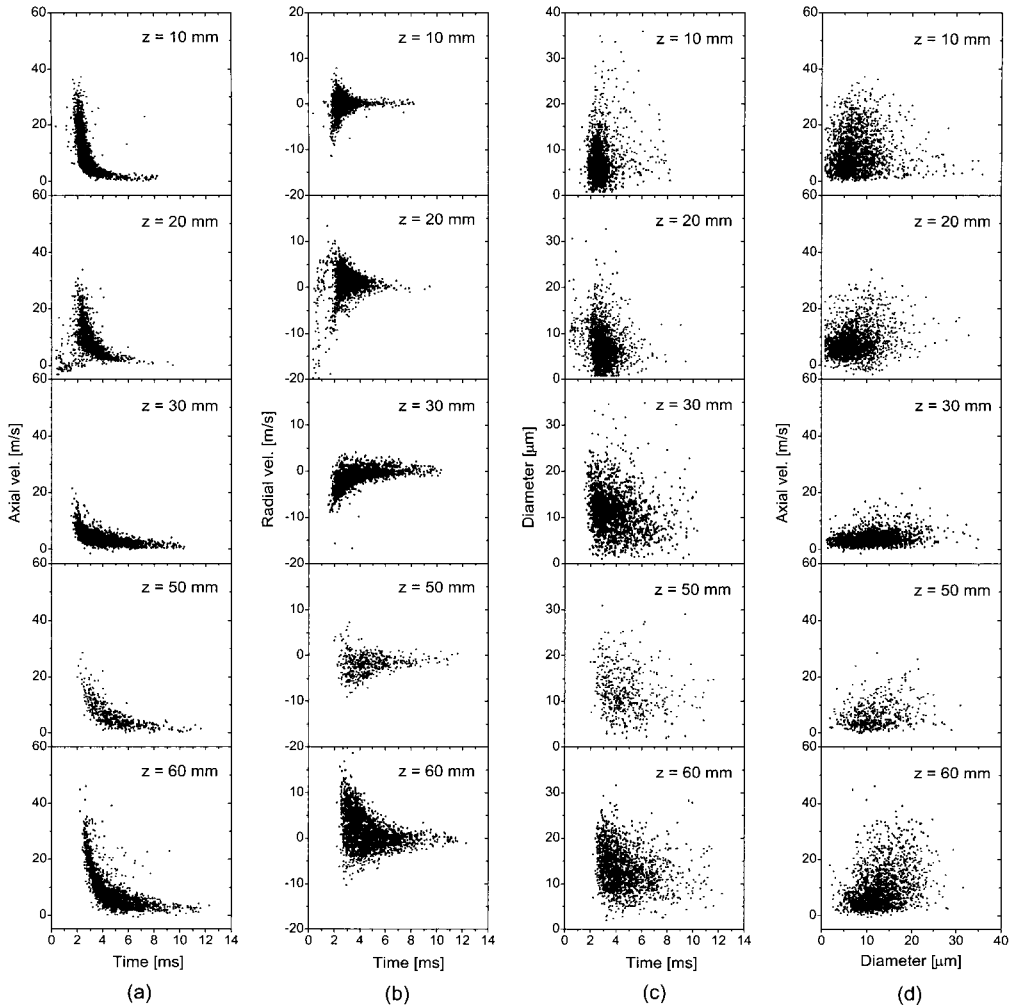
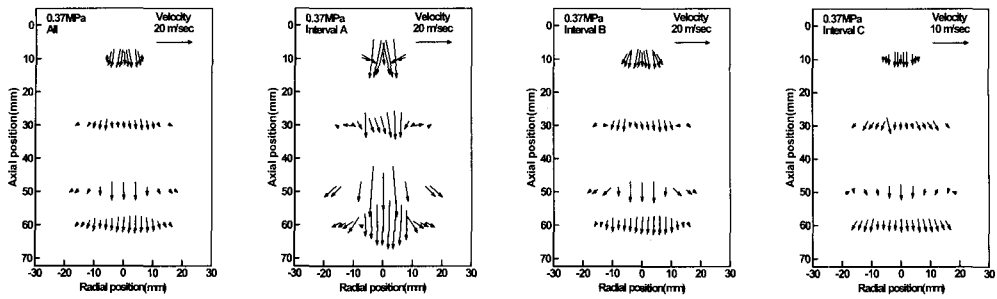


Fig. 6 Droplet velocities, sizes, and its correlations along spray axis in the chamber pressure of 0.15MPa

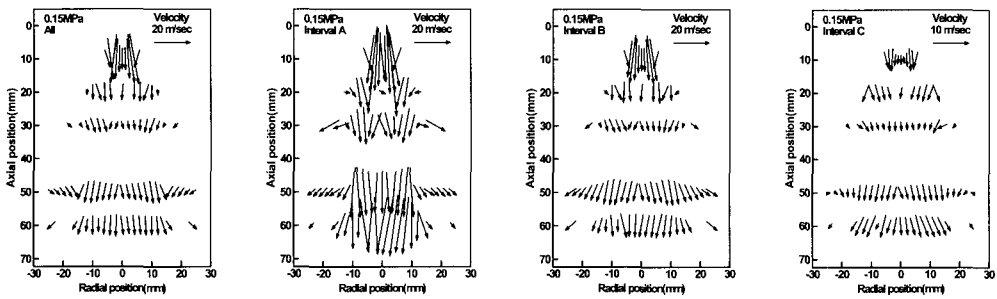
폭이 일정한 종(鐘) 형상의 분무를 나타내고 있다. 이러한 현상은 0.15MPa의 분무실압력에 분사된 액상부탄 분무는 분사 후에 감압비등에 의한 팽창으로 인하여 분사각이 넓어졌기 때문이다.

또한 분사시작 후 0.3ms 이내에 분무의 앞전(leading edge)에 큰 와류가 발생한 것을 분무실압력이 0.37MPa와 0.15MPa인 각각의 경우에 관찰할 수 있다(frame2). 이러한 와류는 즉시 운동량을 상실하며, 이와 같은 현상은 0.15MPa의 분무실압력에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.

분사가 완료된 후(frame 10이후)를 살펴보면 0.37MPa의 분무실압력에서는 분무의 내부로 주위기체가 유입되는 현상이 뚜렷하게 보이는 물고기뼈 구조(fish-bone structure)를 보이고 있으며, 주위에 와류가 발생하여 동그랗게 구멍이 뚫린 것 같은 모양이 나타나고 있다. 0.15MPa의 분무실압력에서도 주위공기가 유입되는 현상은 나타나고 있지만 0.37MPa의 경우와 같이 뚜렷하지는 않다. 또한 분무가 반경방향으로 확산되어 가고 있는 모습이 보이고 있으며 거미줄 구조



(a) 0.37MPa chamber pressure



(b) 0.15MPa chamber pressure

Fig. 7 Average droplet velocities for total and interval A, B, C

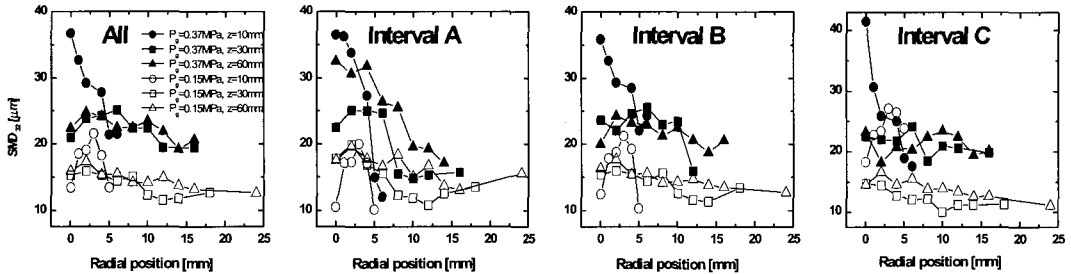


Fig. 8 Average SMD for total and interval A, B, C at 0.37MPa and 0.15MPa chamber pressure

(web-like structure)를 나타내고 있다.

분사가 종료된 후 분무가 증발하는 속도는 분무실압력이 0.15MPa 보다 0.37MPa인 경우가 빠른 것을 볼 수 있는데, 이는 분무실압력이 0.37MPa일 경우가 높은 열용량을 갖고 있기 때문이라고 판단된다.

분사가 거의 종료될 때 (frame 8, 9) 인젝터 선단에서 소량의 부탄이 다시 분사되는 현상이 발생하기도 한다. 분무실 압력이 0.37MPa일 경우가

더욱 뚜렷하게 보이고 있는데, 이와 같은 2차분사 (second injection)가 발생하면 분사 후기에 비교적 저속으로 운동하는 큰 액적들이 상대적으로 냉영역으로 분사되는 현상을 초래한다.

이와 같이 분무실압력이 낮은 경우가 오히려 큰 분사가 및 분무폭, 그리고 작은 분무선단속도를 나타내고 있는데, 이는 일반적인 액상분무와 반대되는 현상으로서, 감압비등을 경계로 하여 분무특성이 반전되었기 때문으로 판단된다.

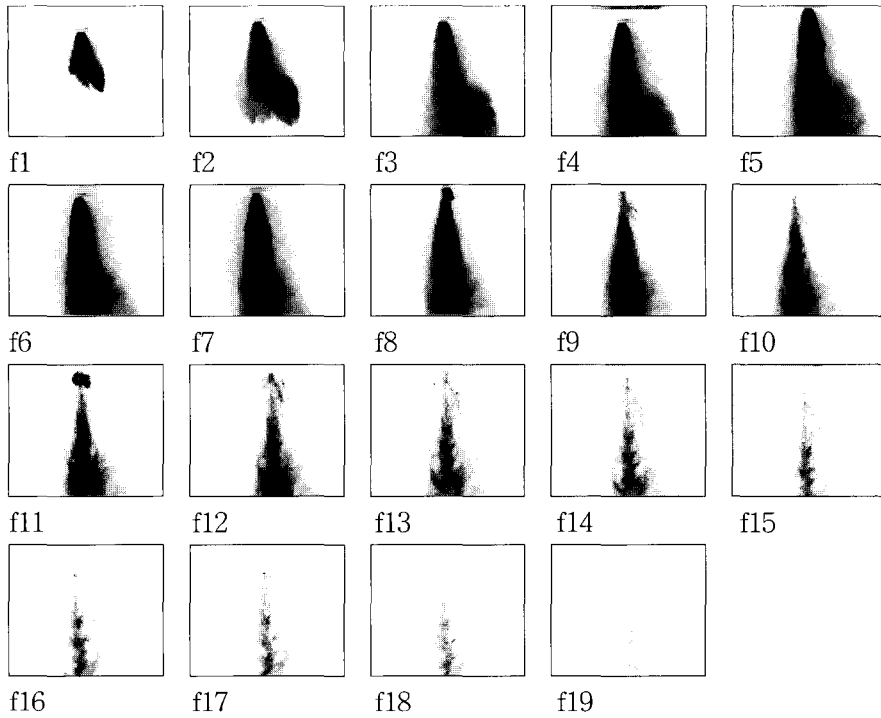


Fig. 9 High speed photographs of butane spray at 0.37MPa chamber pressure

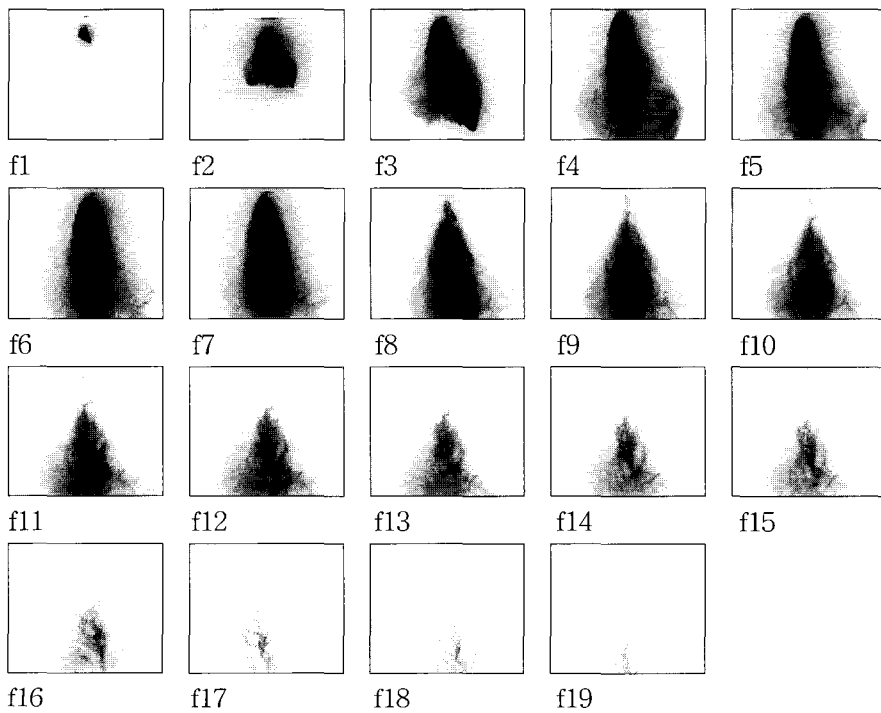


Fig. 10 High speed photographs of butane spray at 0.15MPa chamber pressure

5. 결 론

액체가 분사될 경우 분사되는 주위기체 압력이 높을수록 분무선단도달거리가 줄어들고, 분무각이 증가하며, SMD(Sauter mean diameter)가 줄어드는 것이 일반적인 분무거동의 특징이지만, 본 연구에서와 같이 분사되는 액체의 포화증기압 보다 낮은 주위기체로 액체가 분사되는 경우에는 액체의 포화증기압을 경계로 하여, 포화증기압 이하에서는 분무의 일반적인 특징들이 반전되는 현상이 나타나고 있다.

- (1) 분무실 압력이 액상부탄의 포화증기압 보다 높은 경우가 액상부탄의 포화증기압 보다 낮은 경우에 비해 더 큰 SMD분포를 나타냈다.
- (2) 분무실 압력이 액상부탄의 포화증기압 보다 높은 경우가 액상부탄의 포화증기압 보다 낮은 경우보다 속도감속율은 더 낮게 나타나고 있다.
- (3) 분무실 압력이 포화증기압 보다 낮은 경우가 높은 경우 보다 큰 분무각을 형성한다.

참고문헌

[1] J. V. Weide, J. J. Seppen, A. N. Ling, and H. J. Dekker, "Experience with CNG and LPG Operated Vehicles with Emphasis on US HD Diesel Emission Standard," SAE Paper No. 881657, 1988.

[2] A. K. Aigal, B. P. Pundir, and A. S. Khatchian, "High Pressure Injection and Atomization Characteristics of Methanol", SAE Paper No. 861167, 1986.

[3] Jouke et al. "Experiences With CNG and LPG Operated Heavy Duty Vehicles With Emphasis on US HD Diesel Emission Standards", SAE Paper No. 881657, 1988.

[4] 藤本 元, "EFI方式による液化ブタン噴霧, 壁面衝突噴霧舉動の觀察およびモデル解釋", 低公害LPG ディーゼルエンジン車の開發及び實用化に關する 技術調査報告書, 日本機械學會, 1994.

저 자 소 개



김중현 (金鍾顯)

1968년 2월생, 1990년 경희대학교 기계공학과졸업(공학사), 1992년 경희대학교 대학원(석사), 1999년 2월 경희대학교 대학원(박사), 2003년~현재 경원전문대학 자동차과 겸임교수, 당학회 회원



윤준규 (尹俊圭)

1957년 8월생, 1981년 조선대학교 기계공학과졸업(공학사), 1987년 경희대학교 대학원(석사), 2001년 2월 명지대학교 대학원(박사), 1996년~현재 경원전문대학 자동차과 부교수, 당학회 회원



임종한 (林宗漢)

1957년 8월생, 1981년 조선대학교 정밀기계공학과졸업(공학사), 1985년 경희대학교 대학원(석사), 1992년 8월 경희대학교 대학원(박사), 1995년~현재 경원전문대학 자동차과 부교수