

액상부탄 간헐분무의 액적 크기 및 속도 측정과 최적 확률분포 연구

Measurements of Droplet Sizes and Velocities with Optimum Probability Density Function in a Transient Liquefied Butane Spray

김 중 현*, 김 재 옥**, 구 자 예***
J. H. Kim*, J. W. Kim**, J. Y. Koo***

ABSTRACT

The characteristics of liquefied butane spray are expected to be different from conventional diesel fuel spray, because a kind of flash boiling spray is expected when the back pressure is below the saturated vapor pressure of the butane(0.23MPa at 298K). The ambient pressure was held at a pressure above(0.37MPa) and below(0.15MPa) the fuel vapor pressure. The axial velocities, radial velocities, and size distributions in butane sprays were measured with PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system. The PDPA measurement showed a smaller SMD at the 0.15MPa chamber pressure, compared to the 0.37MPa case. Log-hyperbolic density function for the droplets size distribution can be fitted to the experimental results of a liquefied butane spray.

주요기술용어 : liquefied butane spray(액상부탄분무), flash boiling spray(감압비등분무), velocity distribution(속도분포), SMD(Sauter mean diameter), Log-hyperbolic density function(로그-쌍곡선 확률밀도함수)

1. 서론

액체가 가압되어 분사될 때에 분사되는 분무 액적의 속도 및 크기분포는 분무를 특징 짓는 요소로서, 액상의 연료를 연소시켜 동력을 얻는 내연기관이나 가스터빈 등에 있어서는 연소실 내의 분무특성이 혼합기 생성과 점화특성 등의 연소효율에 영향을 미칠 뿐만 아니라 연소생성물에도 상당한 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

요즘, 지구환경 보호에 관심이 높아지면서 연소장치에서 배기가스를 저감시킴과 동시에

에너지의 효율 향상을 통한 에너지자원의 효율적인 이용이 요구되고 있다.

액상가스연료는 기존의 가솔린이나 디젤연료보다 적은 수의 탄소 원자 수를 포함하고 있기 때문에, 연소생성물에서 탄소를 포함한 유해 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 LPG나 CNG 등의 가스연료를 이용하려는 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

Jouke 등⁽²⁾은 가스연료를 사용하는 엔진에서 배기 물질과 효율을 디젤연료를 사용하는 시스

* 한국항공대학교 인턴연구원

** 두원공과대학 동력기계과

*** 한국항공대학교 항공기계공학과

템과 비교하였다. 천연가스는 문제가 되고 있는 배기가스인 일산화탄소, 탄화수소, 질소화합물, 입자상물질 외에도 이산화탄소를 디젤이나 가솔린 엔진에 비해 26%나 줄일 수 있음을 밝혔다. Shinichi Goto⁽³⁾는 디젤엔진에서 수트(soot)를 줄이고 높은 열효율을 얻기 위해 LP 가스, 특히 부탄을 연료로 사용하여 노킹을 방지하고 높은 충전효율을 얻기 위한 방법으로서 분무형태로 흡입밸브 방향으로 부탄가스를 분사하는 실험을 하였다. 永井 伸樹⁽⁴⁾는 자동차용 가솔린 연료분사밸브인 EGI를 이용해 부탄을 상온·상압 하에 분사하여 미립화 과정과 증발 과정을 고속카메라와 칼라CCD 카메라를 이용한 영상해석법을 이용해 관찰하였다.

부탄은 가압에 의해 용기 내에서 쉽게 액체 상태로 유지가 가능하므로 비교적 내압이 낮은 용기에서도 액체상태로 저장할 수 있는 이점이 있지만, 액상가스연료를 디젤기관에 적용할 경우의 문제점은 경유에 비해 낮은 비등점이다. 따라서 부탄을 상온·상압 및 가압상태의 분무실로 분사할 경우에 감압 비등에 의한 미립화 특성을 규명할 필요가 있다. 현재 액상가스연료의 이용은 주로 가스 상태로 사용되고 있으며 액상으로 보일러나 가스터빈, 내연기관 연료로 이용될 수 있는 가능성과 연구는 초기 단계에 있다.

본 연구는 액상부탄 분사장치에 의하여 발생되는 액상부탄 분무에 대해 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하여 액적 입자의 속도 및 크기를 시간적, 공간적으로 측정하여 분무의 특성을 규명한다. 또한 PDPA로부터 얻은 액적크기 데이터의 공간적 분포상황을 수학적 확률밀도함수로 표현함으로써 액상부탄 분무에 대한 액적크기의 분포특성을 매개변수의 조합으로 특징지을 수 있도록 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

분무액적의 속도와 크기를 측정하기 위한 실험장치는 연료분사시스템과 분무실 및 PDPA로 구성되어 있다. 액상 부탄분사에 사용한 연

료분사시스템은 축압인젝터(accumulator type injector), 연료공급장치, 전자제어장치의 세 부분으로 구성되어 있다.

Fig. 1은 부탄분무에 사용된 축압식 인젝터의 개략도를 나타낸 것으로, 전자인젝터는 솔레노이드밸브, 축압실, 니들 등으로 구성되어 있다.

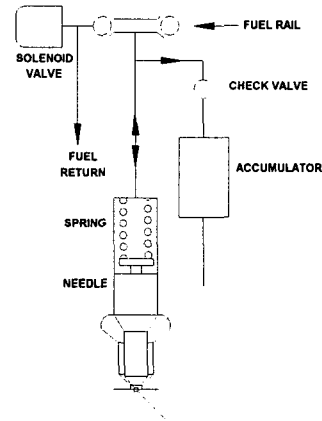


Fig. 1 Schematic of accumulator type injector

솔레노이드 밸브가 작동하면 연료는 연료공급장치에 의해 축압실 내로 충전된다. 솔레노이드 밸브에 전류가 차단되어 유로가 개방되면, 니들밸브 양 끝단에 압력 불균형이 발생하여, 니들이 상승하고 노즐 끝단이 열려서 축압실 내에 저장된 연료가 분사된다. 분사시간은 총 노즐유동면적과 최고압에서 니들 개변압까지의 압력강하에 의해 결정된다. 분사되는 양은 레일압력 조절기에 의해 제어된다.

Fig. 2는 실험에 사용된 핀틀형 인젝터(CR-62, BKM Inc.)를 나타낸 그림이다.

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

인코더에서 나오는 외부 타이밍 소스(12bit timing signal)로 인젝터를 트리거하고 동시에 RSA에 연결되어 있는 외부입력단자에 인코더신호가 유입되어 RSA를 동기시킨다. 레이저 소스는 아르곤-이온(Ar-Ion)레이저가 사용되었으며 최대출력은 750mW이다. 사용된 연료는 Table 1에 표시된 물성치를 갖는 액상부탄으로서 분무실 주위압력은 증기압 보다 낮은 0.15MPa과 증기압 보다 높은 0.37MPa을 선정하였다.

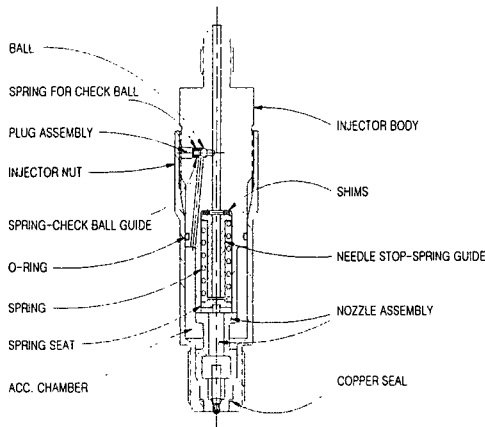


Fig. 2 Details of injector

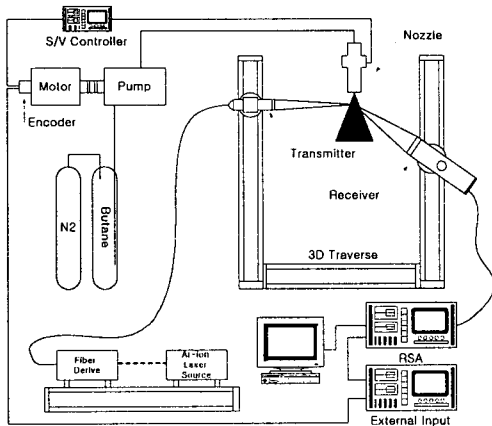


Fig. 3 Arrangement of spray measurement system

2.2 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 투과부

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

축에 수직인 방향으로 이동하였다. 분무의 축방향 속도는 분무가 진행되는 방향을 양(+)으로 정하였고, 반경방향 속도는 분무 중심축에서 분무외부의 방향을 음(-)으로 설정하였다.

3 확률밀도분포 및 확률밀도함수

인젝터에서 생성되는 분무는 액적속도와 크기가 균일하지 않으며 작동조건, 측정위치에 따라 다양한 액적속도와 크기를 갖는 분포를 이룬다. 액적의 속도, 크기분포는 분무와 주위 기체와의 질량, 운동량 및 에너지교환 등의 기본해석을 수행하기 위해 필요하다. 분무 내에서 액적의 크기 분포는 액적 표본검출법이나 가시화기법에 의해서 연구되어 왔다.⁽⁵⁾ 특히 이들 기법에 기초한 평균 액적의 크기측정은 어떤 일정 종류의 확률밀도함수를 크기 측정 이전에 가정하기 때문에 적절한 수학적 함수를 사용하지 않으면 그 결과가 달라질 수도 있다. 그러나 위상도플러 입자분석기를 이용한 액적 속도 및 크기의 동시 측정에는 사전에 어떠한 확률밀도함수도 사용하지 않고 분무 내에서의 국부적인 측정점에서 액적의 속도와 크기를 측정할 수 있으며, 측정데이터로부터 확률밀도분포를 구하고 이에 대한 최적 확률밀도함수를 도출해 낼 수가 있다.

3.1 확률밀도분포

위상도플러 입자측정 실험에서 구한 미처리 데이터(raw data)로부터 액적의 속도 및 크기에 대한 확률밀도분포를 추출할 수 있다. 액적 크기와 속도범위를 어떤 일정수(N)의 저장통(bin)으로 나누고, 각 저장통에 속하는 크기와 속도의 액적의 개수를 미처리데이터로부터 읽어들이는 것이다. N_i를 X_i구간의 각 저장통 속에 있는 측정데이터의 개수라고 하면, 각 저장통 속의 확률 P_i는 다음과 같다.

$$P_{X_i} \left(X_i - \frac{\Delta X_i}{2} \leq X_i \leq X_i + \frac{\Delta X_i}{2} \right) = \frac{N_i}{N_T} \quad (1)$$

여기서 ΔX_i는 각 저장통의 크기를 나타낸다.

N_T는 총 데이터 수로서 다음과 같다.

$$N_T = \sum_{i=1}^{N_T} N_i \quad (2)$$

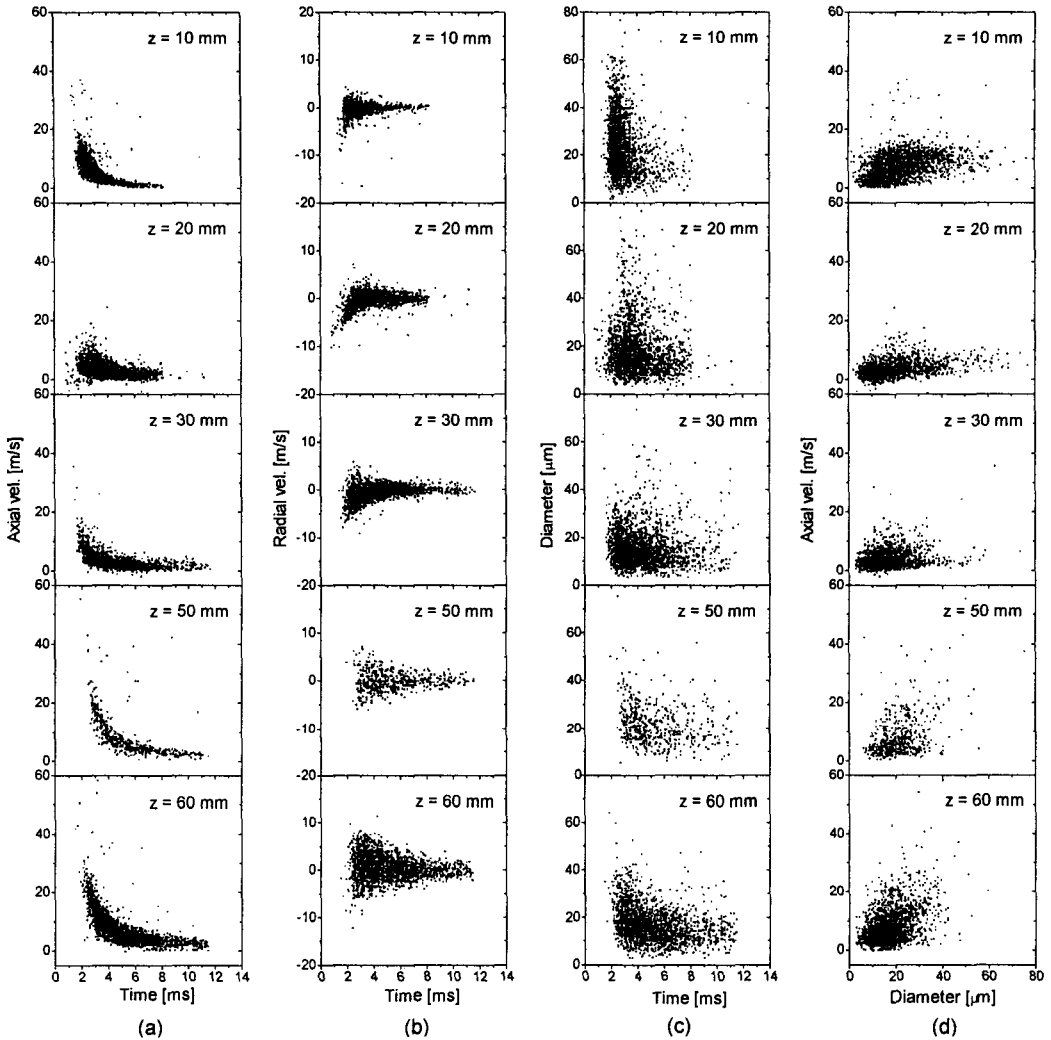


Fig. 4 Droplet velocities, sizes, and its correlations along spray axis in the chamber pressure of 0.37MPa

확률밀도는 저장통의 크기(ΔX_i)에 대해 일반화하기 위해 다음과 같이 표현된다.

$$f_x = \frac{P_{X_i} \left(X_i - \frac{\Delta X_i}{2} \leq X_i \leq X_i + \frac{\Delta X_i}{2} \right)}{\Delta X_i} = \frac{N_i}{N_T \Delta X_i} \quad (3)$$

3.2 확률밀도함수

분무입자 상태와 분무입자의 시간적, 공간적 특성을 이론적으로 쉽게 표현할 수 있는 일반적인 법칙을 수립하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 연료분무는 분사되어 발달하는 과정 중에 위치와 시간에 따라 액적 자체가 2차 분열

및 응집이 일어나므로 보다 정확하게 실험데이터를 표현할 수 있는 확률밀도함수가 필요하다. 이에 적합한 함수가 쌍곡선 분포임을 Durst⁽⁶⁾ 등이 주장하였고, 이에 따른 매개변수 결정법은 참고문헌 [7]에서 사용한 방법을 따른다.

4. 결과 및 고찰

4.1 부탄분무 특성

PDPA로부터 얻은 데이터 중에서 분무실 주위 기체 압력이 연료중기압 보다 높은 0.37MPa인 경우와 연료중기압 보다 낮은 0.15MPa인 경우에

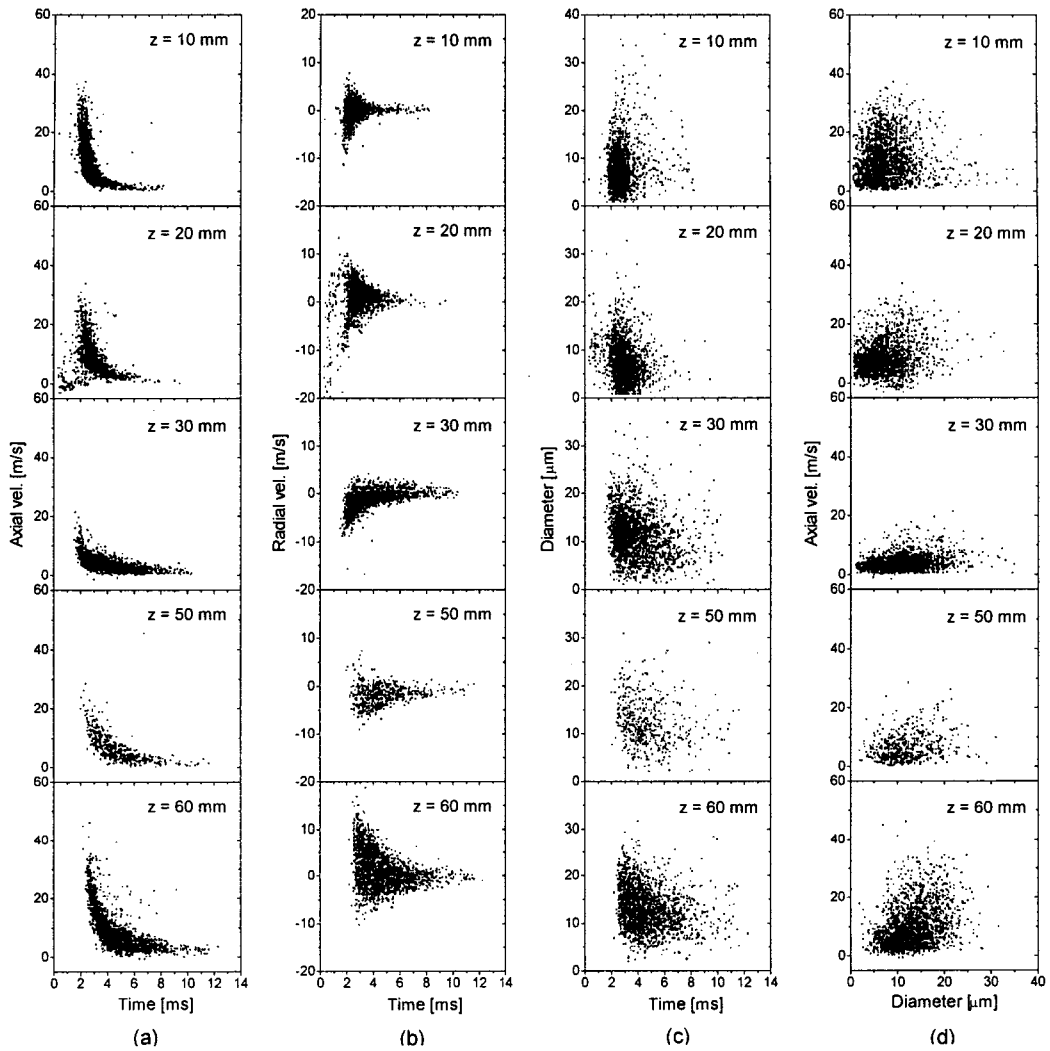


Fig. 5 Droplet velocities, sizes, and its correlations along spray axis in the chamber pressure of 0.15MPa

대한 분무 중심축에서의 측정 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5에서 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 나타내

고 있으며, 이는 일반적인 분무의 특성과는 상반되는 현상을 보이고 있다. 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 분무가 감속되면서 인젝터 부근 보다 상당히 긴 시간동안 분무액적이 존재함을 알 수 있다. 또한, 분무의 하류에서도 부탄의 포화증기압

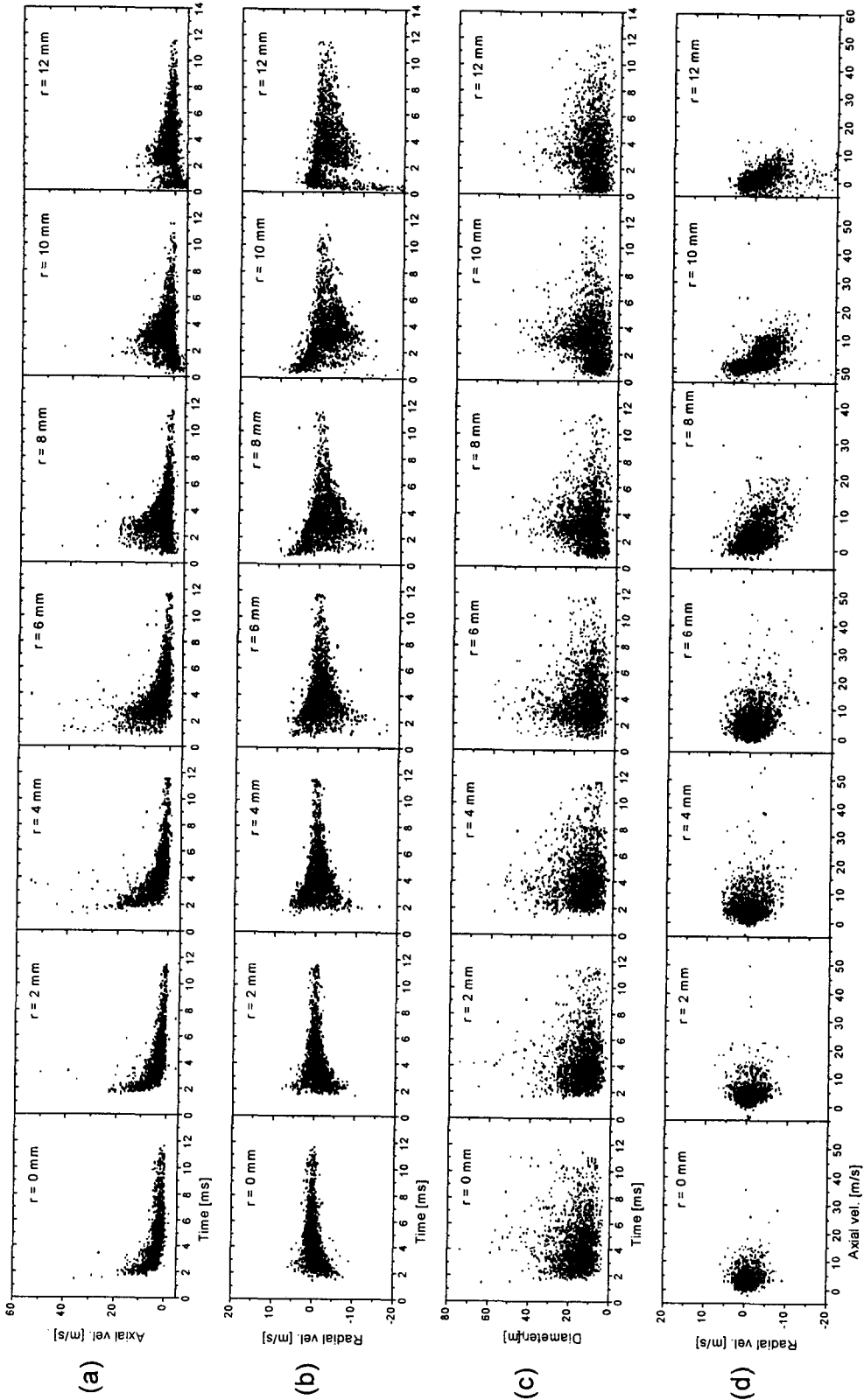


Fig. 6 Droplet velocities, sizes, and its correlations in the radial direction at 30mm from nozzle exit in chamber pressure of 0.37MPa

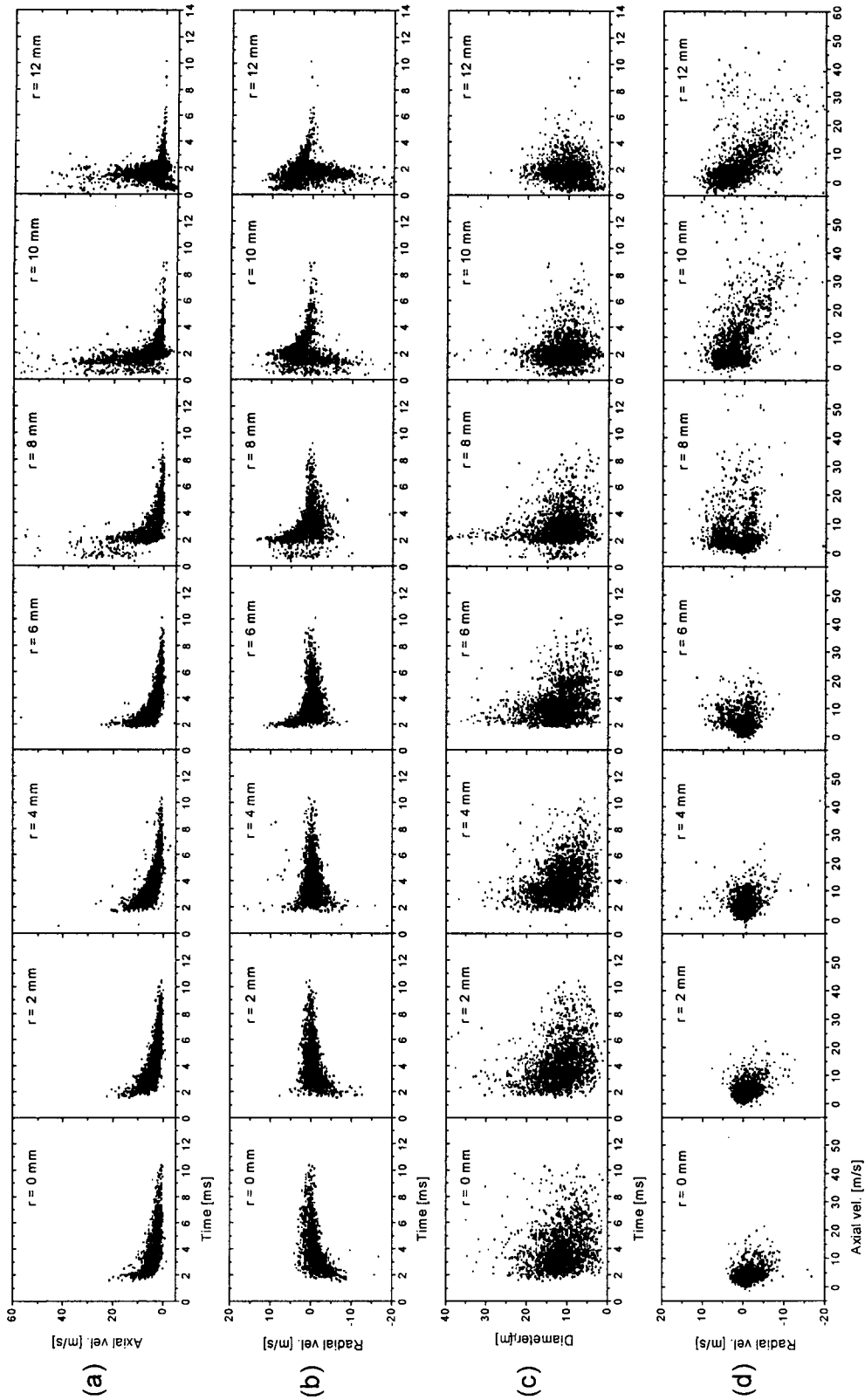


Fig. 7 Droplet velocities, sizes, and its correlations in the radial direction at 30mm from nozzle exit in chamber pressure of 0.15MPa

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.

Fig. 6과 Fig. 7은 주위기체 압력이 0.37MPa와 0.15MPa일 경우에 대해 분무선단에서부터 30mm의 위치에서($z=30\text{mm}$) 반경방향의 변화에 따른 PDP 측정결과를 나타낸 그림이다.

Fig. 6의 주위기체 압력이 0.37MPa일 경우에 축방향 속도는 중심으로부터 6mm인 경우에 가장 크게 나타나고 있으며, 8mm인 경우에서부터는 음의 축방향 속도값이 나타나기 시작하고 있다. 이와 같은 음의 축방향 속도성분은 분무외부에서의 와류로 인한 영향으로 판단된다. 반경이 10mm 이상에서는 축방향의 속도값이 상당히 줄어 있음을 알 수 있는데, 이는 분무의 주분사영역을 벗어나기 시작하면서 나타나는 현상으로 판단된다. 분무액적의 크기도 축방향과 반경방향의 속도가 클 때 큰 값을 나타내고 있으며, 분무외곽에서는 큰 액적의 수가 줄어들음을 알 수 있다.

Fig. 7의 주위기체 압력이 0.15MPa일 경우도 축방향의 속도는 분무 내부보다 분무외각으로 갈수록 큰 값을 나타내고 있으며, 주위기체 압력이 0.37MPa의 경우보다 분무중심에서 더 멀리 떨어진 위치에서 큰 속도값이 발생되고 있다. 이러한 현상은 앞서 언급한 바와 같이 주위기체 압력이 0.15MPa일 때가 0.37MPa일 경우 보다 분무폭이 크기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 분무가 존재하는 시간은 감압비동에 의해 분무가 외곽에 있을수록 짧아짐을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 축방향의 속도가 큰 액적이 큰 반경방향의 속도를 가지고 있음을 알 수 있으며, 이는 분무외곽에서 분무의 확산에 기인하는 현상으로 보인다.

4.2 액적속도와 크기에 대한 평균분석

Fig. 8에 액적의 속도에 대한 전체평균(All)과 분사초기(Interval A), 분사중기(Interval B), 분사말기(Interval C)에 대한 평균값을 PDP

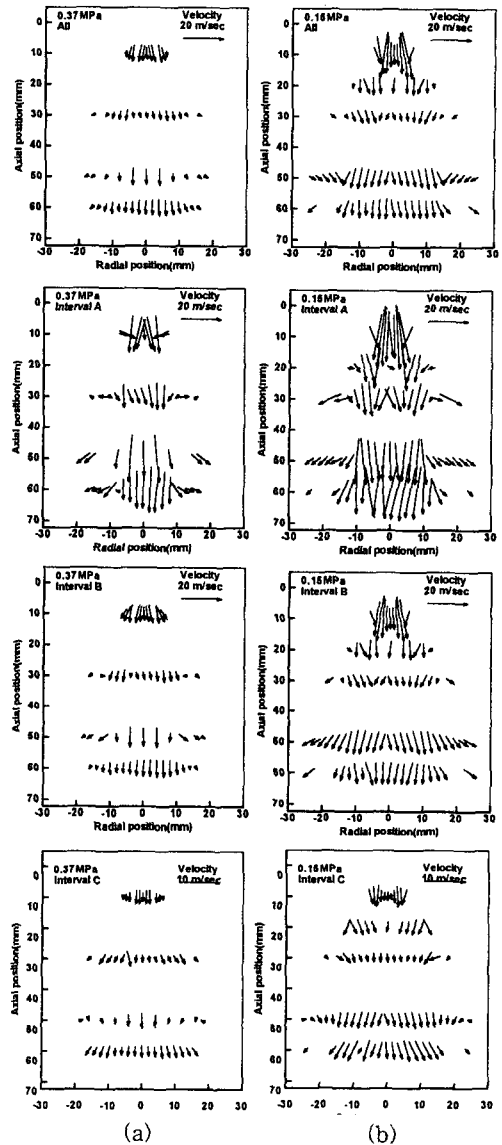


Fig. 8 Average droplet velocities for total and interval A, B, C at
(a) 0.37MPa chamber pressure
(b) 0.15MPa chamber pressure

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. 8에서도 알 수 있는 바와 같이 주위기체 압력이 0.15MPa인 경우가 더 큰 분무각을 형성하고 분사말기에 주위기체

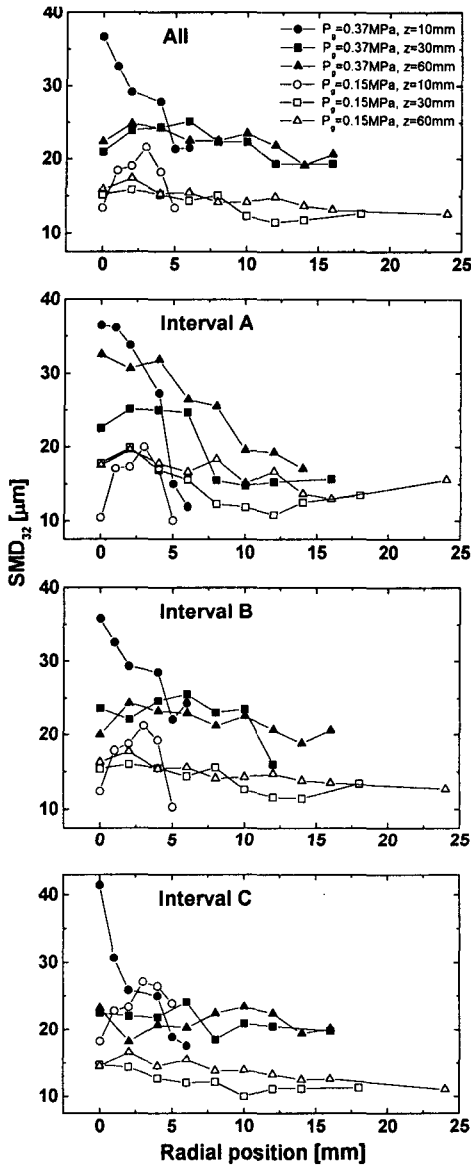


Fig. 9 Average SMD for total and interval A, B, C at 0.37MPa chamber pressure and 0.15MPa chamber pressure

의 유입이 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 분사 시간구분과 동일하게 분사시간 전체와 분사초기, 분사중기, 분사말기에 대해 분무역적의 SMD분포를 나타내고 있다. Fig. 8에 나타난 속도의 값과 비례하여 SMD의 값이 변함을 알 수 있다. 즉, 분무의 속도가 높은 분사 영역에서 큰 SMD값을 나타내고 있다. 주위기체 압력이 0.37MPa인 경우에

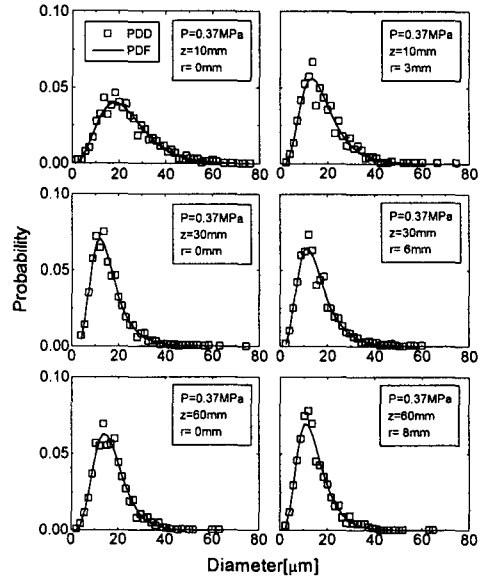


Fig. 10 PDD and PDF for the droplet diameter at the chamber pressure of 0.37MPa

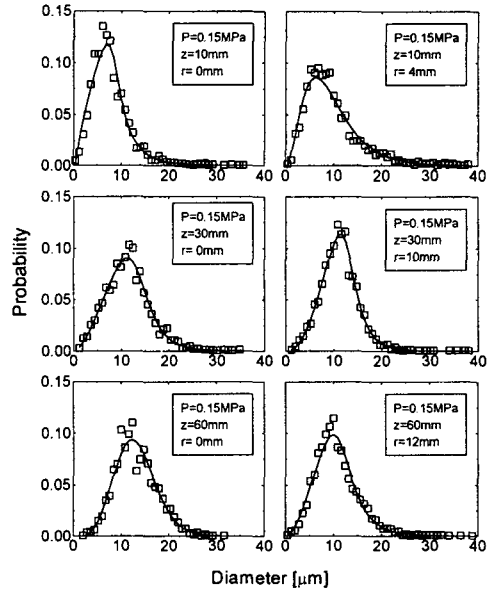


Fig. 11 PDD and PDF for the droplet diameter at the chamber pressure of 0.15MPa

는 분무의 중심축에서 가장 큰 SMD값을 나타내고 있으며, 분무가 하류로 진행하면서 그 크기가 줄어드는 현상을 나타내고 있으나, 주위기체 압력이 0.15MPa일 경우에는 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.

4.3 확률밀도분포 및 확률밀도함수에 의한 부탄분무 표현

Fig. 10과 Fig. 11에 주위기체 압력이 0.37MPa과 0.15MPa에 대한 분무중심축과 주분사영역에서의 확률밀도분포(PDD:Probability Density Distribution)와 확률밀도함수(PDF:Probability Density Function)를 나타내었다. 주위기체 압력이 0.37MPa이고 분무축방향 z 가 10mm인 위치의 분무액적의 직경은 분무내부에서 액적직경의 분포가 넓고, 큰 액적직경이 많이 나타나고 있다. 주분사영역에서는 확률밀도의 폭과 큰 액적직경의 수가 줄어들어 있다. 그러나 Fig. 11의 주위기체 압력이 0.15MPa이고 z 가 10mm인 경우에는 분무내부 보다 주분사영역에서 확률밀도곡선이 넓은 분포와 큰 액적직경을 포함하고 있으며, 주분사영역에서 확률밀도분포 곡선의 정점은 액적직경이 큰 쪽으로 이동되어 있다. 또한, 액적직경이 작은 부분은 그 수가 줄어들어 있다. 주위기체 압력이 0.37MPa, 분무축 z 가 30mm인 위치의 분무액적의 직경은 분무내부와 주분사영역에 대해 비슷한 확률밀도분포 곡선을 나타내고 있으나 주분사영역에서 큰 액적의 분포가 조금 더 많게 나타나고 있다. 확률밀도곡선의 폭이 분무축 z 가 10mm일 때 보다 줄어들어 있는 것을 알 수 있다. 즉, 분무가 진행되면서 액적의 분열이 이루어진 것을 알 수 있다. 주위기체 압력이 0.15MPa이고 z 가 30mm인 경우에는 주분사영역 보다 분무내부에 작은 액적입자와 큰 액적입자가 많이 존재하지만 주분사영역에 중간 크기의 액적이 상대적으로 많이 존재함을 알 수 있다. 또한, 분무내부에서 확률밀도의 정점이 z 가 10mm와 비교하여 우측으로 이동되어 있고 큰 액적이 존재하는 확률도 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있는데, 이는 분무내부에서는 분무가 응집되는 현상이 지배적이라고 볼 수 있

다. 주위기체 압력이 0.37MPa, 분무축 z 가 60mm인 위치의 액적직경의 확률밀도분포는 분무축 z 가 30mm일 경우와 비교하여 분무 내부에서는 액적직경이 큰 것들이 조금 증가하고 있다. 이러한 현상도 분무가 진행하면서 액적들이 서로 응집되는 현상으로 보아진다. 주위기체 압력이 0.15MPa일 경우에도 비슷한 모양의 확률밀도 곡선을 나타내고 있으나, 분무내부에서 액적의 직경이 $5\mu\text{m}$ 이하인 액적은 그 수가 급격히 줄어들어 있다.

분무축 z 가 10mm, 30mm, 60mm의 위치에서 분무중심, 주분사영역에 대해 주위기체 압력이 각각 0.37MPa과 0.15MPa일 경우의 액적크기에 대한 확률밀도분포를 로그-쌍곡선(log-hyperbolic) 확률밀도함수를 사용하여 근사시킨 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 함께 나타내었다. 각 경우에서 액적크기에 대한 확률밀도분포가 확률밀도함수로 잘 표현되고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

분사되는 액체의 포화증기압 보다 낮은 주위기체로 분사되는 경우에는 포화증기압을 경계로 하여 분무의 일반적인 특징들이 반전되는 현상을 나타내고 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.
- (4) 액적크기에 대한 로그-쌍곡선 확률밀도함수는 액상부탄의 액적 크기분포를 적절히 표현하고 있다.

참고 문헌

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. 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.
 3. Shinichi Goto, "Dual-Fuel Diesel Engine Using Butane", SAE Paper No. 920690, 1992.
 4. 永井 伸樹, "EGIを用いた液状ブタン燃料の微粒化, 東北大学工学部", 低公害LPGディーゼルエンジン車の開発及び実用化に関する技術調査報告書, 日本機械学会, 1994.
 5. T. Kamimoto, H. Yokota and H. Kobayash, "A New Technique for the Measurement of Sauter Mean Diameter of Droplets in Unsteady Dense Spray," SAE Paper No. 890316, 1989.
 6. F. Durst, "Phase-Dopple Measurements in Liquid Sprays and their Presentation by Log-Hyperbolic Distribution" Conf. on Mechanism of Non-Uniform Combustion, Tokyo, pp.9-14, 1990.
 7. 구자예, "연료분무의 위상도플러 측정과 확률 밀도함수의 도출", 대한기계학회논문집, Vol. 18, No.4, pp. 1039-1049, 1994.