

## 액상부탄 분사시스템의 수치시뮬레이션 및 분무특성 예측 Simulation of Fuel Injection System and Model of Spray Behavior in Liquefied Butane

김 종 현\*, 구 자 예\*\*  
J. H. 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 saturation vapor pressure of the butane(0.23MPa at 25°C). An accumulator type pintle injector and its fuel delivery system has been simulated in order to give injection pressure, needle lift and rate of fuel injected. The governing equation were solved by finite difference method. The injection duration was controlled by solenoid valve. Spray behaviors such as a transient spray tip penetration, spray angle and SMD were calculated based on the empirical correlations in case that the back pressure is both above the vapor pressure of the butane and below that of butane. When the back pressure is below the vapor pressure of the fuel, conventional correlation is modified to represent the effect of flash boiling.

주요기술용어 :

Liquefied butane spray(액상부탄분무), Flash boiling(감압비등), Accumulator type pintle injector(축압식 핀틀인젝터), Spray behavior(분무거동).

기호설명(nomenclature):

A : 유로면적  
C : 댐핑계수  
d : 액적직경  
K : 스프링상수  
L : 변위  
M : 질량  
P : 압력  
Re : 레이놀즈수  
S : 면적  
t : 시간  
T : 분무선단 도달거리  
U : 속도

V : 체적

$\beta$  : 체적탄성율

$\rho$  : 밀도

$\mu$  : 점성계수

$\sigma$  : 표면장력

하첨자 (subscripts)

AC : 축압실

N : 니들

NOZ : 노즐실

SOL : 솔레노이드실

SPILL: 스펠실

LA : 축압부 파이프

LS : 솔레노이드부 파이프

l : 액체연료

g : 분무실 주위가스

\* 경희대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국항공대학교 항공기계공학과

## 1. 서론

최근 들어 연소시스템에서 환경오염과 에너지 효율의 향상에 대한 관심이 증대되고 있다. 부탄, 프로판과 이들의 혼합물인 LPG와 같은 "청정연료"를 사용하는 것은 배출물질을 줄이는 효율적인 방법이다<sup>(1)</sup>. 내연기관에 부탄을 사용하여 얻는 잇점은, 현재 사용중인 일반적인 연료에 비해 적은 수의 탄소원자량 때문에 매 연을 적게 배출한다는 것이다. 그러나 부탄연료를 오토사이클에 적용할 경우, 에너지 효율은 노킹으로 인하여 균질한 희박연소 오토사이클에 비하여 압축비에 의해 제한을 받는다. 왜냐하면 압축행정 중에 연료와 공기가 같이 흡입되기 때문이다. 그렇지만 직접분사는 높은 압축비를 얻을 수 있어서 디젤엔진과 같은 열효율을 낼 수 있으며, 이것은 트럭이나 버스와 같은 대형차에 적용할 때에 더욱 효율적이다. 부탄연료 엔진시스템에 직접분사를 적용하기 위해, 연료 분사압은 디젤엔진(>50MPa)과 같이 높을 필요는 없지만, 일반적인 스파크점화엔진(약 0.5MPa)에서 사용되는 압력보다는 높아야만 한다. 원추분무에는, 액적직경이 커서 증발이 느린 액적기동 영역이 없으므로 핀틀형 인젝터를 선택하였다<sup>(2-5)</sup>.

연료분사 시스템은 분사시간, 분사량, 분사율 제어를 통해서 부탄연진 연소과정에 영향을 미친다. 대부분의 디젤 연료분사시스템은 일반적인 직렬(in-line)형 연료분사시스템이나 분배(rotary)형 연료분사시스템을 사용하고 있다<sup>(6-8)</sup>. 이에 비하여 축압식 분사시스템에서는 캠(cam)형 분사시스템의 제한을 극복할 수 있어서, 엔진의 속도에 영향을 받지 않고 필요한 압력과 고효율의 분사특성을 얻기 위한 새로운 개념이다. 본 연구에서는 부탄 분사에 대한 축압식(accumulator type) 분사시스템을 유한차분법(finite difference method)으로 시뮬레이션 하였으며, 분사기간 동안 시간에 따라 분사압력이 변하는 간헐 예상부탄의 분무특성, 즉, 분무선단 도달거리, 분무각, SMD에 대한 계산을 수행하였다.

분무선단 도달거리는 앞의 시뮬레이션에서

구한 노즐부의 간헐 분사압력과 니들변위를 사용하여 분사기간 중에 분사되는 연료요소의 궤적을 추적하는 방식으로 계산하였고, 분무각과 SMD도 계산으로 구한 분사압력을 사용하여 관계식에서 구하였다.

분무특성은 연소실에서 공기의 이용 및 연료-공기의 혼합율에 영향을 크게 미치므로 많은 연구가 진행되어, 다양한 이론적, 실험적 관계식들이 제시되어 왔다. 이들 관계식들은 주로 분사압력, 노즐부의 기하학적 형상 및 분사되는 액체와 주위 기체의 물성치, 즉 밀도, 점성계수, 표면장력 등을 주요변수로 사용하였다. 이러한 연구는 Yutaro Wakuri와 Masaru Fujii<sup>(9)</sup> 등이 체계적으로 잘 정리하였다.

분사압력은 분사기간 중에 수시로 변하고, 이러한 특성은 분무의 형성과 발달 과정에 상당한 영향을 주고 있지만 경험식에서 대부분의 경우 비정상 분사압력을 사용하지 않았고, Renner와 Maly<sup>(10)</sup>, 그리고 Xu, Nishida와 Hiroyasu<sup>(11)</sup> 등이 비정상 분사압력으로 디젤 분무거동을 예측하였다.

본 연구에서는 수치해석으로 구한 분사압력을 사용하여 분무특성을 나타내는 관계식을 예상부탄 분무에 적용하였고 분무실 압력이 연료 증기압 보다 낮을 때는 경험식을 수정하였다.

## 2. 연료분사장치

핀틀형 부탄 분사에 사용한 연료분사시스템은 축압인젝터, 연료공급장치, 전자제어장치의 세 부분으로 구성되었다. Fig. 1은 솔레노이드 밸브, 축압실, 니들선단을 나타내고 있으며 부탄 분무에 대한 전자인젝터의 개략도이다. 솔레노이드밸브는 인젝터와 전자제어기 사이에서 정보를 교환하며 작동한다. Fig. 2는 연료공급시스템의 개략도이다. 솔레노이드가 힘을 받아 작동하면 축압기 내의 연료의 질량은 연료공급장치에 의해 충전된다. 솔레노이드가 힘을 잃게 되면, 니들밸브 양 끝단에 압력 불균형이 발생하여, 니들이 상승하고, 노즐 끝단이 열려서 축압기 내에 저장된 연료가 분사된다. 축압기 내의 압력이 니들에 작용하는 스프링력에

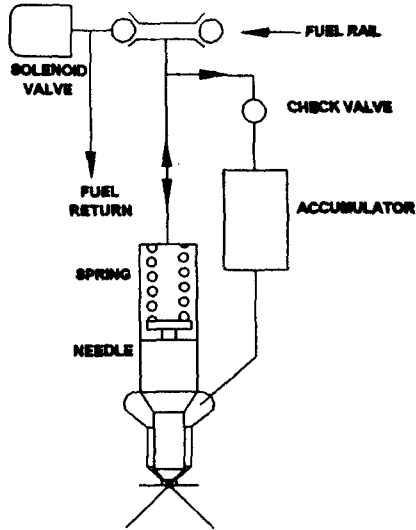


Fig. 1 Schematic of accumulator type injector

의한 개변압까지 떨어질 때 분사가 종료된다. 분사기간은 총 노즐유동면적과 최고압에서 니들 개변압까지의 압력강하에 의해 결정된다. 유압시스템은 인젝터에 연료를 공급하는 유로와 리턴유로로 구성된다. 전자제어 되는 압력 조절기는 연료 분기판에 설치되어 있는데, 안전밸브(safety relief valve)와 리턴유로 체크 밸브(check valve)로 구성되어 있다. 분사되는 양은 레일압력 조절기에 의해 제어된다. 연료공급장치는 인젝터 시스템이 작동하는데 필요한 적절한 연료압력을 공급한다. 연료공급장치는 전기 모터에 의해 작동되는 유압펌프, 전자 압력 조절기, 그리고 충전펌프로 구성되어 있다. 연료공급장치로부터 축압실과 솔레노이드실로 연료가 유입된다.

### 3. 해석모델

축압식 분사시스템의 수치시뮬레이션을 위해서 전체 인젝션시스템을 노즐, 파이프의 2부분으로 나누었다. 축압실은 고압공급시스템 파이프와 노즐부를 연결하는 것으로 생각할 수 있으며, 축압실 입구는 고압공급 시스템 파이프, 그리고 축압실 출구는 노즐부에서 고려하였다.

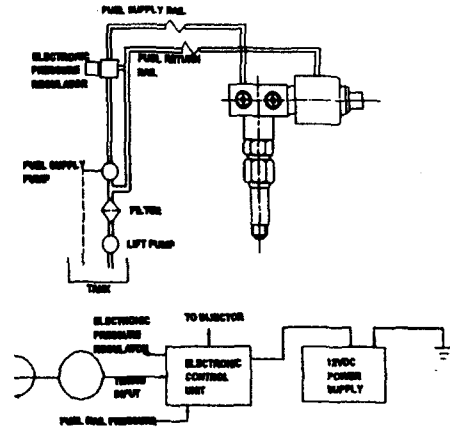


Fig. 2 Schematic of fuel supply system

#### 3.1 축압실 연속방정식

축압실의 압축성량과 노즐실로 나간 유량의 합은 고압공급시스템의 파이프에서 축압실로 들어온 양과 같다.

$$U_{LA} S_{LA} = \frac{V_{AC} dP_{AC}}{\beta_{AC} dt} + C_{AC} A_{AC} \sqrt{2(P_{AC} - P_{NOZ})/\rho} \quad (1)$$

#### 3.2 솔레노이드실 연속방정식

솔레노이드실 압축성량과 스프링실로 나간 유량의 합은 고압공급시스템의 파이프에서 솔레노이드실로 들어온 양과 같다.

$$U_{LS} S_{LS} = \frac{V_{SOL} dP_{SOL}}{\beta_{SOL} dt} + C_{SPILL} A_{SPILL} \sqrt{2(P_{SOL} - P_{SPILL})/\rho} \quad (2)$$

#### 3.3 노즐실 연속방정식

연소실로 나간 유량과 노즐실의 압축성효과 그리고 니들밸브 움직임으로 인한 체적변화율의 합은 축압실로부터 들어온 유량의 합과 같다.

$$\begin{aligned} C_{AC} A_{AC} \sqrt{2(P_{AC} - P_{NOZ})/\rho} \\ = C_{NOZ} A_{NOZ} \sqrt{2(P_{NOZ} - P_{CYL})/\rho} \quad (3) \\ + \frac{V_{NOZ} dP_{NOZ}}{\beta_{NOZ} dt} + S_N \frac{dL_N}{dt} \end{aligned}$$

3.4 니들밸브 운동방정식

니들밸브의 운동방정식은 2차 미분방정식의 형태로 되며 관성력, 댐핑력, 그리고 스프링력의 합은 주어진 니들밸브 양단에 미치는 힘과 같다.

$$M_N \frac{d^2 L_N}{dt^2} + C_N \frac{dL_N}{dt} + K_N(L_N + L_{NSSET}) = S_N \times P_{NOZ} - S_{SOL} \times P_{SOL} \quad (4)$$

4. 분무특성

부탄은 상온(298K)에서 포화증기압이 0.23MPa 정도로서, 가솔린이나 경유에 비하여 낮은 포화증기압을 갖는다. 따라서 부탄이 포화증기압보다 낮은 주위기체로 분사되는 경우는 감압비에 의한 효과를 고려하여 계산하여야 한다.

4.1 분무선단 도달거리

4.1.1 해석모델

분무선단 도달거리에 사용된 모델은 Renner와 Maly<sup>(10)</sup>가 제안한 관계식을 역상부탄 분무에 적용하였다.

이 모델은 임의의 작동조건-분사연료와 주위기체의 물성치, 고압파이프에서의 압력변화 과정, 니들밸브 변위, 주위기체의 압력 등에 대해 일정한 상수들의 조합으로 분무의 선단거리를 나타낼 수 있다.

분무실 압력이 연료증기압 보다 높아서 감압비등이 없는 경우의 분무선단 도달거리는 다음과 같다.

$$T = K \cdot A_1^{a_1} \cdot A_2^{a_2} \cdot A_3^{a_3} \cdot A_4^{a_4} \cdot (t)^{a_5} \quad (5)$$

무차원화 된 계수  $A_1$ 은 레이놀즈 수로 규정되며 노즐홀을 통한 유동을 나타낸다.

$$A_1 = \frac{\Delta P \cdot \rho_1 \cdot d_{eff}^2}{\mu_1^2} = Re^2 \quad (6)$$

여기서  $\Delta P$ 는 노즐홀을 통한 압력강하를 나타내고,  $\rho_1$ 과  $\mu_1$ 은 각각 분무액체의 밀도와 점성계수를 나타낸다.  $d_{eff}$ 는 노즐홀의 유효지름을 나타낸다.

$A_2$ 는 Ohnesorge ( $Oh = \frac{\mu_1}{\sqrt{\rho_1 \cdot \sigma_1 \cdot d}}$ ) 수

로 규정되며 액체연료가 액적으로 분열되는 저항을 나타낸다.

$$A_2 = \frac{\rho_1 \cdot \sigma_1 \cdot d}{\mu_1^2} = \frac{1}{Oh^2} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_1$ 은 액체의 표면장력을 나타낸다.

$A_3$ 는 액체와 기체의 밀도비를 나타낸다.

$$A_3 = \frac{\rho_1}{\rho_g} \quad (8)$$

$A_4$ 는 분무가 분열되는 동안 액체와 기체의 점성비를 나타낸다.

$$A_4 = \frac{\mu_1}{\mu_g} \quad (9)$$

사용된 상수값들은 다음과 같다.

$$K = 0.065, \quad a_1 = 0.3, \quad a_2 = -0.008, \\ a_3 = 0.2, \quad a_4 = 0.6, \quad a_5 = 0.4$$

또한, 분무실 압력이 연료증기압 보다 낮아서 분무의 감압비등현상을 고려해야 하는 경우의 분무선단 도달거리를 계산하기 위하여 다음과 같이 감압비에 대한 항을 첨가하였다.

$$A_5 = \frac{P_v}{P_g} \quad (10)$$

여기서  $P_v$ 는 부탄의 포화증기압을 나타내고  $P_g$ 는 주위기체의 압력을 나타낸다. 따라서 감압비등인 경우의 분무선단 도달거리를 나타내는 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$S = K \cdot A_1^{a_1} \cdot A_2^{a_2} \cdot A_3^{a_3} \cdot A_4^{a_4} \cdot A_5^{a_5} \cdot (t)^{a_5} \quad (11)$$

여기서  $a_5$ 는 -1.5를 사용하였다.

윗 식들에 사용된 변수들은 분사압력, 액체 연료와 주위 기체의 온도 및 압력, 니들밸브 변위, 액체의 조성등에 의해 변하는 값들이다.

식에 사용된  $\Delta P$  값은 앞의 시뮬레이션 결과에서 구한 노즐실의 압력을 사용하였으며, 핀홀노즐에서 유효 홀지름  $d_{eff}$ 은 니들 변위에 따른 노즐내부의 유동단면적을 동등한 기하학적 면적을 갖는 원형 단면적으로 취급하였다.

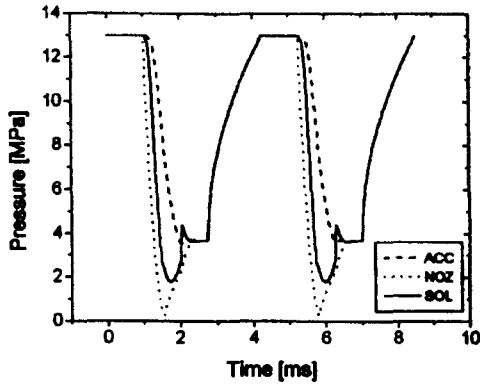


Fig. 3 Pressures in accumulator, nozzle and solenoid chamber at target injection duration of 0.2 msec

4.1.2 해석방법

분사기간 중에 서로 다른 운동량으로 분출되는 예상부탄 요소는 분사되는 압력과 시간이 다르기 때문에 시간과 도달거리를 축으로 하는 그래프에서 서로 다른 궤적을 가지고 진행되어 간다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 분사노즐 내의 분사압력은 분사기간 동안 일정치 않다. 따라서 위의 관계식에 직접 대입하여 전체적인 분무에 대한 분무선단 도달거리를 예측하는 것은 불가능하다. 그러나 전체 분사기간을 아주 작은 분사기간으로 나누면, 각 기간 동안에 분사되는 예상부탄은 특정 분사압력과 분사시간을 갖는 분사로 다를 수가 있다. 앞에서 보여진 Fig. 4는 축압식 분사시스템에 대한 일반적인 분사압력 파형의 예로서 기존의 직렬(in-line)형이나 분배(rotary)형 디젤 분사압력 파형과는 차이가 있다. 직렬형이나 분배형의 분사압력 파형은 분사기간 중반까지 압력이 증가하다 분사 종료시 까지 다시 압력이 감소하는 형태이지만, 본 축압식 분사시스템의 형태는 초기의 분사압이 제일 높고, 분사가 진행될수록 분사압이 떨어지는 형태이다.

이와 같이 시간에 따라 분사압력이 변하는 경우에 대해 다음과 같이 계산을 수행하였다(1).

- (1) 분사기간을 0.01msec로 나누었으며, 분사압력과 시간은 각각의 구간 초기값으로 선택하였다.

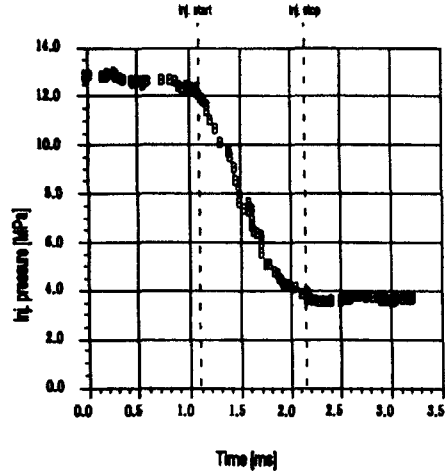


Fig. 4 Measured pressure in accumulator

- (2) 각 예상연료 요소에 대해 주위 기체가 포화 증기압 이상인 경우와 포화증기압 이하인 경우로 나누어서 포화증기압 이하인 경우에는 감압비동의 효과를 고려하는 식을 적용하였다.
- (3) 모든 예상연료 요소에 대한 궤적을 비교하였다(Fig. 6). 각 시간구간에서 노즐에서 가장 멀리 간 궤적의 요소를 분무선단 도달거리로 취한다. 예상연료 요소들 간의 추월은 분무선단에서 일어날 수 있다.
- (4) 각 시간별로 가장 멀리 간 궤적을 구해서 예상부탄의 분무도달 거리를 구하였다.

4.2 분무각

분무각은 Hiroyasu와 Arai<sup>(12)</sup>가 실험에 의해 적용한 관계식을 사용하였으며, 밀도비 및 레이놀즈수에 대한 분무각이 영향을 나타낸다.

$$2 \cdot \theta = \delta \cdot \left( \frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^m \cdot \left( \frac{V_0 \cdot D \cdot \rho_1}{\mu_1} \right)^n \quad (12)$$

여기서  $V_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_1}}$  로 부터 구하고 m 은 0.25, n은 0.5,  $\delta$  값은 0.35를 취하였다.

감압비동에 의한 효과는 감압비  $\frac{P_v}{P_g}$  항을 첨가하여 다음과 같이 나타낸다.

$$2 \cdot \theta = \delta \cdot \left( \frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^m \cdot \left( \frac{V_0 \cdot D \cdot \rho_1}{\mu_1} \right)^n \cdot \left( \frac{P_v}{P_g} \right)^k \quad (13)$$

k는 1.1의 값을 취하였다.

### 4.3 SMD

역상 부탄분무의 SMD에 관한 모델식은 Renner와 Maly<sup>(10)</sup>가 사용한 식을 사용하며, 포화증기압 보다 낮은 주위기체로 분사되는 분무에 대한 감압비동이 동반할 경우에는 감압비를 변수에 추가한다.

SMD를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{SMD}{d} = \max \left[ \frac{SMD_k}{d}, \frac{SMD_\infty}{d} \right] \quad (14)$$

$$\frac{SMD_k}{d} = 4.12 \cdot \left[ \frac{V_0 \cdot d \cdot \rho_1}{\mu_1} \right]^{0.12} \cdot \left[ \frac{V_0^2 \cdot d \cdot \rho_1}{\sigma_1} \right]^{-0.75} \cdot \left[ \frac{\mu_1}{\mu_g} \right]^{0.54} \cdot \left[ \frac{\rho_1}{\rho_g} \right]^{0.18} \quad (15)$$

$$\frac{SMD_\infty}{d} = 0.023 \cdot \left[ \frac{V_0 \cdot d \cdot \rho_1}{\mu_1} \right]^{0.25} \cdot \left[ \frac{V_0^2 \cdot d \cdot \rho_1}{\sigma_1} \right]^{-0.32} \cdot \left[ \frac{\mu_1}{\mu_g} \right]^{0.37} \cdot \left[ \frac{\rho_1}{\rho_g} \right]^{0.11} \quad (16)$$

감압비동인 경우에는

$$\frac{SMD_k}{d} = 4.12 \cdot \left[ \frac{V_0 \cdot d \cdot \rho_1}{\mu_1} \right]^{0.12} \cdot \left[ \frac{V_0^2 \cdot d \cdot \rho_1}{\sigma_1} \right]^{-0.75} \cdot \left[ \frac{\mu_1}{\mu_g} \right]^{0.54} \cdot \left[ \frac{\rho_1}{\rho_g} \right]^{0.18} \cdot \left[ \frac{P_v}{P_g} \right]^{-1.3} \quad (17)$$

$$\frac{SMD_\infty}{d} = 0.023 \cdot \left[ \frac{V_0 \cdot d \cdot \rho_1}{\mu_1} \right]^{0.25} \cdot \left[ \frac{V_0^2 \cdot d \cdot \rho_1}{\sigma_1} \right]^{-0.32} \cdot \left[ \frac{\mu_1}{\mu_g} \right]^{0.37} \cdot \left[ \frac{\rho_1}{\rho_g} \right]^{0.11} \cdot \left[ \frac{P_v}{P_g} \right]^{-1.3} \quad (18)$$

여기서 SMD<sub>k</sub>와 SMD<sub>∞</sub>로 나누어서 고려하는 것은 분무가 완전히 발달하지 않은 불완전한 영역과 충분히 발달한 완전한 영역을 구분

하는 것으로서, 이 두 영역에서 분무의 역적크기는 분사압과 주위기체의 압력에 따라 다른 경향을 나타내고 있기 때문이다. 따라서 이 두 값 중 큰 값을 취하도록 되어 있다.

### 5. 결과 및 토의

솔레노이드의 상승과 하강시간은 솔레노이드 자체의 특성이며 솔레노이드 밸브의 목표분사시간을 0, 0.1, 0.2 msec로 변화시켰을 경우에 대해서 측압실, 노즐실, 솔레노이드실의 압력을 Fig. 3에 나타내고 있다. 측압실 내의 압력은 약 1.0msec동안 13MPa에서 4MPa까지 떨어진 다. 솔레노이드실과 노즐실 내의 압력은 솔레노이드밸브 상승시간 동안 급격히 떨어지며, 상승시간 후에는 솔레노이드실과 노즐실 내의 압력은 조금씩 증가한다. Fig. 4는 실험에서 구한 측압실의 압력을 나타내고 있으며, 실험결과 는 Fig. 3에서 보여진 계산결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 각 목표 분사시간 동안의 분사율을 나타낸 그림이다. Fig. 6은 각각의 경우, 분사압력이 13MPa일때, 주위기체 압력이 변화될 경우, 각 시간에 분사된 연료요소의 궤적을 나타내고 있다. Fig. 6 (a)는 포화증기압 이상의 주위기체(P<sub>g</sub>=0.37MPa)에 분사되어 감압비동의 영향이 없는 경우를 나타내고, Fig. 6(b)는 포화증기압 이하 (P<sub>g</sub>=0.15MPa)의 주위기체에 분사되어 감압비동의 영향이 있는 경우를 나타낸 것이다. Fig. 7은 감압비동의 효과가 없을 경우, 분무선단 도달거리를 나타낸 것으로 주위 기체의 압력이 증가할수록 연료요소의 궤적은 도달할 수 있는 거리가 줄어드는 경향을 보이고 있다. 분사압력은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 초기의 분사압이 가장 높고 시간에 따라 분사압력이 낮아 지므로 본 측압식 분사시스템에서는 뒤에 분사된 연료요소가 먼저 분사된 연료요소를 추월하는 경우는 거의 일어나지 않고 있다. 감압비동이 일어나는 경우에도 각 연료요소의 궤적은 감압비동이 일어나지 않는 경우와 비슷하며, 주위기체 압력이 낮으면, 감압비동의 효과가 커지므로 분무가 역적에서 증발하는 속도가 빨

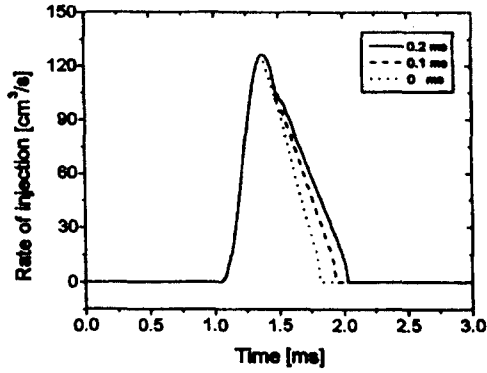


Fig. 5 Rate of injection at various target injection time

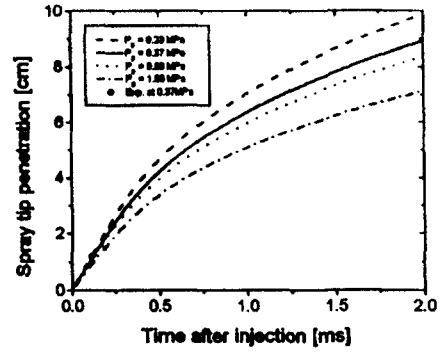


Fig. 7 Transient spray tip penetrations (back pressure is above the vapor pressure of the butane)

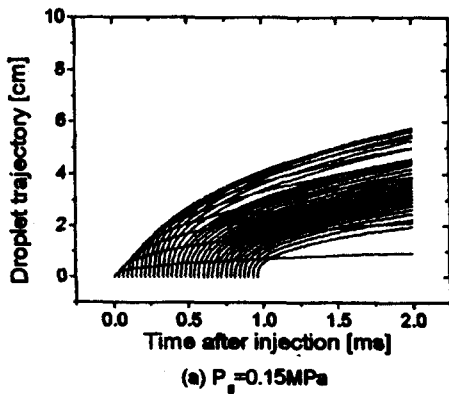
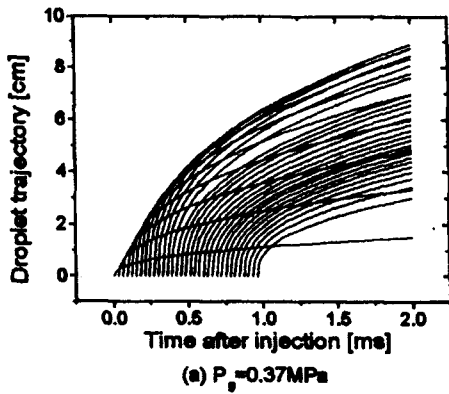


Fig. 6 Trajectories of fuel elements at different ambient pressure

라져서, 분무선단 도달거리는 짧아진다고 생각된다. 본 축압식 분사시스템에서 분무의 도달거리는 주로 초기의 분사조건에 영향을 받으므로, 초기의 조건이 분무특성에 큰 영향을 준다

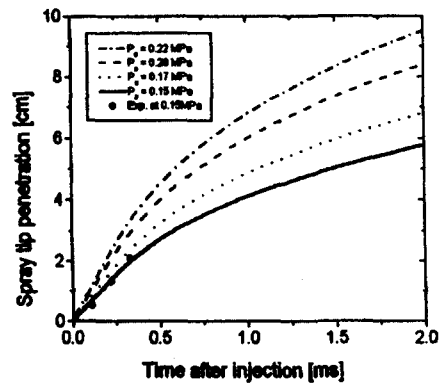


Fig. 8 Transient spray tip penetrations (back pressure is below the vapor pressure of the butane)

고 생각된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 9의 사진에서 측정된 분무선단 도달거리를 추가하였으며, 경험계산식과 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 9는 주위기체 압력이 각각 0.37MPa와 0.15MPa일 경우에 대해 분무를 촬영한 사진이다. 분사시작 경과시간이 각각의 그림 아래 표기되어 있다. 주위기체 압력이 0.37MPa인 경우에는, 처음 두 사진 t=0.11ms, 0.22ms로부터 분무선단 도달거리가 12.1mm, 22.4mm가 구해진다. 주위기체 압력이 0.15MPa인 경우에, 처음 세 사진 t=0.11ms, 0.22ms, 0.33ms에서 분무선단 도달거리가 5.5mm, 13.4mm, 21.2mm가 얻어진다. 분무의 각 부분을 제외하고는 분무의 농도가 진행서 액적 및 내부모양이 구별되지

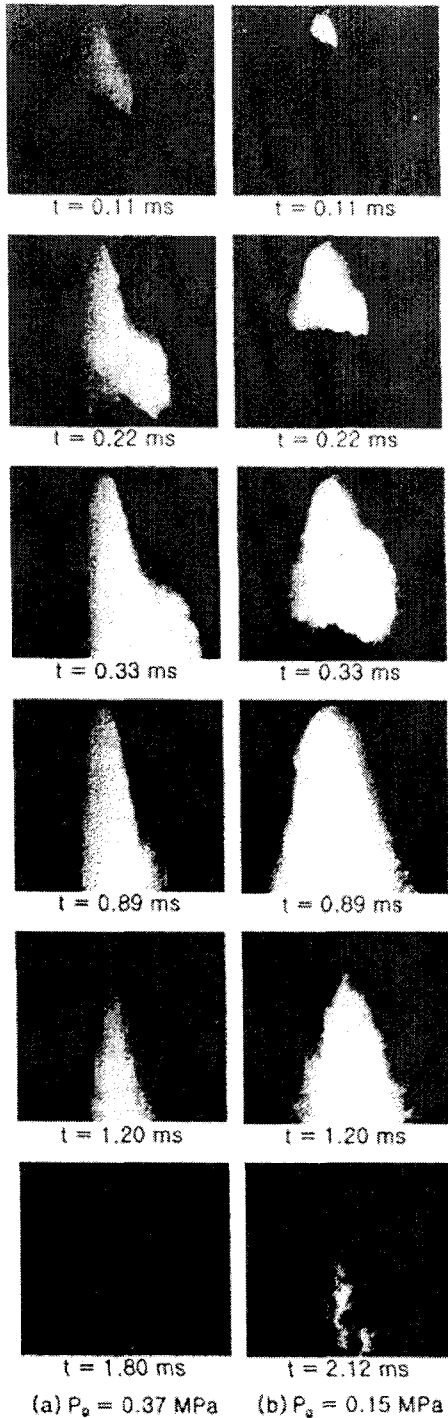


Fig. 9 High Speed photographs of butane spray (The elapsed time after injection start is shown below each figure)

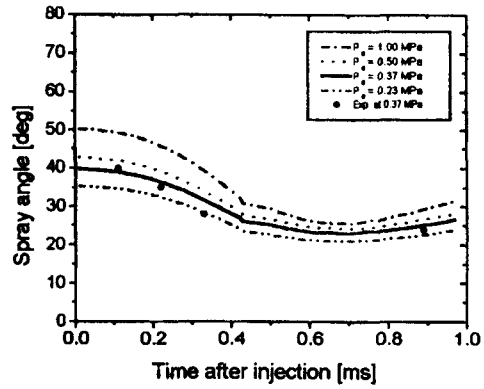


Fig. 10 Transient spray angles (back pressure is above the vapor pressure of the butane)

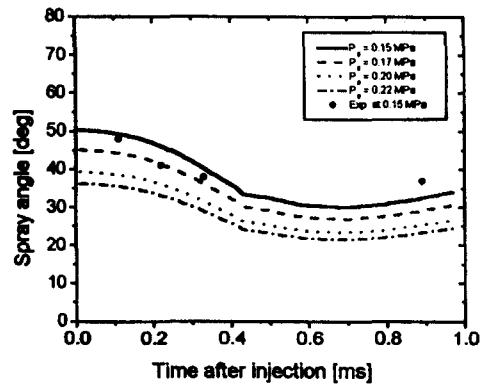


Fig. 11 Transient spray angles (back pressure is below the vapor pressure of the butane)

않고 있으며, 분사시작 후 0.3ms 이내에 분무 원추의 외각부에 커다란 와류가 형성된다. 와류의 바깥 부분은 운동량을 급격히 잃어버리지만, 안쪽 부분은 분무의 실제 구조를 유지하며 새로 분사되는 연료에 의해서 하류방향으로 휨을 띠며 내려간다. 이러한 현상은 0.15MPa의 주위 기체로 분사될 때 더욱 명확하다.

Fig. 10과 Fig. 11은 주위 기체압력이 변할 경우, 분무각의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 10에서와 같이 감압비동의 영향이 없는 경우, 주위 기체의 압력이 높을수록 분사된 연료의 분무는 주위 기체와의 저항이 증가하여 넓은 분무각을 형성하고 있으며, Fig. 11과 같이 감압비동의 영향이 있는 영역에서는 감압비가 높을 수



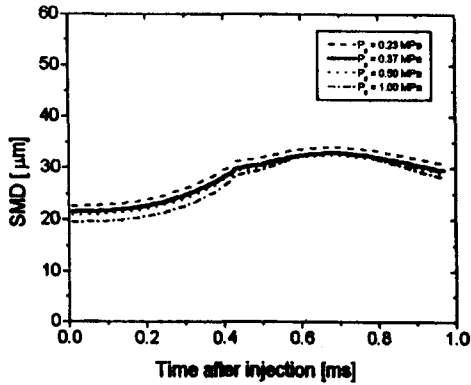


Fig. 12 Transient droplet sizes (back pressure is above the vapor pressure of the butane)

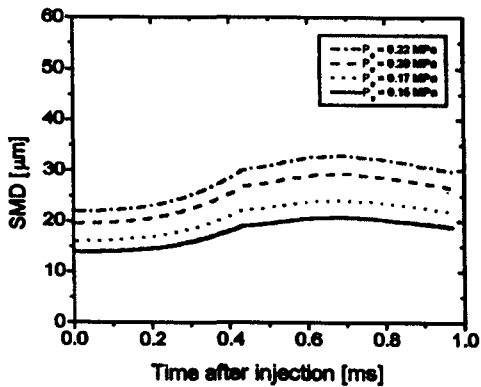
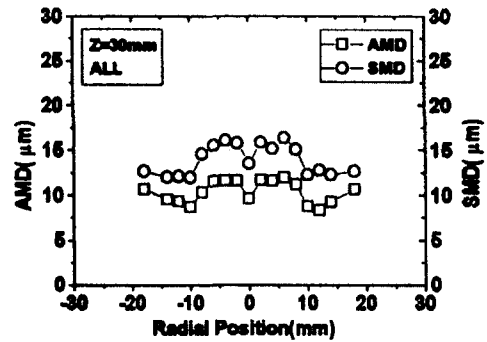


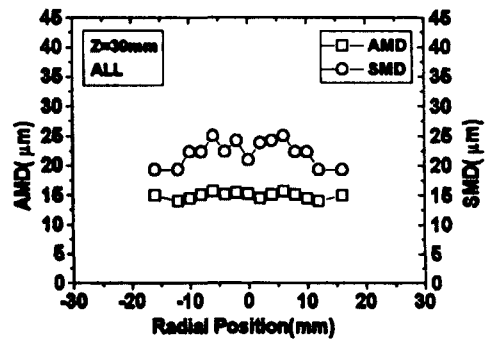
Fig. 13 Transient droplet sizes (back pressure is below the vapor pressure of the butane)

특 분무각이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 분무각은 초기에 큰 각을 보이다가 차츰 줄어드는 경향을 보이는데, 이는 초기의 분사압이 높기 때문이다. Fig. 10과 Fig. 11에는 Fig. 9에서 측정된 분무각을 추가하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 분사기간 동안 SMD의 변화를 나타내고 있다. 감압비동이 일어나지 않는 경우 주위기체의 압력이 높을수록 SMD는 작아지는데, 이것 역시 주위기체의 압력이 높을수록 분사된 분무역적과 주위기체와의 저항이 증대하여 역적의 분열이 쉽게 일어나기 때문이며, 감압비동이 발생할 경우에는 감압비가 클수록 증발이 빨리 일어나므로 SMD도 작아진다고 볼 수 있다. Fig. 14는 노즐선단으로부터



(a)  $P_g = 0.15$  MPa



(b)  $P_g = 0.37$  MPa

Fig. 14 Measured droplet size at the position of 30mm from nozzle tip

터 분무방향으로 30mm 떨어진 위치에서 PDPA로 분무역적의 직경을 측정된 그림이다. 주위 기체압력이 0.37MPa에서 측정된 SMD값이 18~25 $\mu$ m의 분포를 나타내고 있고, 계산된 값은 22~33 $\mu$ m의 값을 나타내고 있다. 또한 0.15MPa에서는 측정된 SMD값이 12~16 $\mu$ m의 분포를 나타내고 있고, 계산된 값은 14~20 $\mu$ m의 값을 나타내고 있다. 계산된 값은 특정위치가 아닌 전체분무에 대한 값을 나타내고 있으며, SMD의 값은 반경방향의 측정 위치에 따라서 다소 차이는 보이고 있으나 계산된 SMD와 실험에서 측정된 SMD의 크기는 비슷하며, 각 경우 감압비동 분무가 비감압비동 분무 보다 SMD가 작게되고 있다.

## 6. 결론

부탄분사에 대한 축압식 분사시스템 시뮬레이

선을 유한차분법으로 수행하였으며, 계산된 비정상 분사압력을 이용하여 분무거동을 나타내는 분무선단 도달거리, 분무각, SMD를 예측하였다.

- (1) 예상부탄 연료시스템의 수치계산에서 구한 축압실 압력과 실험에서 구한 축압실 압력은 비교적 잘 일치하였으며, 비정상 분사압력을 예측할 수 있었다.
- (2) 분무선단 도달거리는 비등이 일어나지 않는 경우 주위기체 압력이 증가할수록 그 거리가 짧아지며, 비등분무인 경우에는 감압비가 높을수록 분무선단 도달거리가 짧아진다.
- (3) 분무각은 비등이 일어나지 않는 경우 주위기체 압력이 클수록 증가하는 경향을 보이며, 감압비등분무인 경우에는 감압비가 높을수록 분무각이 커진다.
- (4) SMD는 비등이 일어나지 않는 경우 주위기체의 압력이 클수록 줄어들고, 감압비등분무인 경우에는 감압비가 높을수록 SMD가 줄어들고 있다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구 (과제 번호 : 961-1005-042-2) 결과의 일부이며, 연구 지원을 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Sinor Consultants Inc., "The Clean Fuels Report", 1995, pp.100-105.
2. Senda, J., Nishikori, T., Tsukamoto, T., and Fusimoto, H., "Atomization of Spray under Low-Pressure Field from Pintle Gasoline Injector", SAE Paper 920382.
3. Goto, S., Furutani, H., and Delic, R.D., "Dual-Fuel Diesel Engine Using Butane", SAE Paper 920690.
4. Goto, S., Furutani, H., Komori, M., and Yagi, M., "LPG Diesel Engine: Dual Fuel Method", SAE Paper, 9300747.
5. Karim, G.A. Zhaoda, Y., "An Analytical Model for Knock in Dual Fuel Engines of the Compression Ignition Type", SAE Paper 880151.
6. Knight, B., "Fuel Injection Syatem Calculation," Proc. Instn. Mech. Engrs., pp. 25-33, 1960.
7. Wylie, E.B., Bolt, J.A., and El-Erian, M., "Diesel Fuel Injection System Simulation and Experimental Correlation", SAE paper 710569.
8. Matsuoka, S., Yokota, K., Kammimoto, T., and Igoshi, M., "A Study of Fuel Injection Systems in Diesel Engines", SAE paper 760551.
9. Wakuri, Y., Fijii, M., Amitani, T. and Tsuneya, R. "Studies of the Penetration of a Fuel Spray in a Diesel Engine", Bull. JSME, Vol.3, 123, 1960.
10. G. Renner and R. R. Maly, "A Universal Model for Spray Characteristics of Technical Diesel Sprays", International Symposium COMODIA 94, 1994.
11. Min Xu, Keiya Nishida and Hiroyuki Hiroyasu, "A Practical Calculation Method for Injection Pressure and Spray Penetration in Diesel Engine", SAE 920624.
12. Hiroyasu, H. and Arai, M., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engine", Trans. of JSAE, 1980.