

## LPG 연료의 직접 분사를 위한 핀틀타입 인젝터의 비정상 분무 특성에 관한 수치해석

### A Computation study on Characteristics of Transient Injection of Pintle-type Injector for Direct Injection of LPG

최성훈\*, 황상순\*\*  
S.H.Choi, S.S.Hwang

#### Abstract

The use of LPG as clean fuel for Diesel engine is very attractive way to reduce soot and NOx emission. In this study, a numerical study has been done to know the transient behavior of LPG fuel in chamber pressures which is held at a pressure above (0.37MPa) and below (0.15MPa) the fuel vapor pressure. Results show that the vortex formed within the start of injection at the leading edge of the spray cone and was most apparent for 0.15MPa chamber pressure case. The high speed photographs and model results showed a narrower cone angle during the quasi-steady spray period at the 0.37MPa chamber pressure compared to the 0.15MPa case. And it can be shown that more realistic vaporization process is necessary to predict the spray length well.

#### 1. 서론

현재 국내에서는 낮은 연료비 및 청정연료로서의 측면에서 부탄이나 프로판 그리고 이들의 혼합기체(LNG)를 사용하는 택시 및 승합차의 대수가 230,000대를 육박하고 있다. 이는 주로 2ℓ~3ℓ급방의 소형 LPG엔진으로 운행되고 있으며 가스 충전소도 680여개 설치되어 있다. 인근 일본에서도 약 30만대의 LPG엔진 택시가 운행되고 있으며 전체 운행의 약 12%에 이르고 있다.

현재까지 중 대형차에 사용되어온 디젤엔진의 경우 날로 강화되어 가고 있는 NOx 및 Soot 규제치를 만족하기 위해서는 현재기술로 매우 어려운 상황으로 되어가고 있다. 그래서 대중 소형 승합차를 중심으로 국내에서도 점차 LPG연료를 이용하는 차량이 증가하는 추세가 있다.

그러나 전체 국내 자동차의 3.6%를 차지하는 대형 경유차의 경우 오염배출량이 전체의 42%를 차지 하

여<sup>(1)</sup> 대형 경유차에 쓰이는 디젤엔진의 저공해화가 바로 국내 환경오염 방지의 중요한 전제가 되고 있다.

이와 같은 디젤엔진의 저공해화의 여러 기술방향들 중의 하나로 본 논문에서 다뤄려고 하는 고효율 실린더 내 직접분사 LPG 엔진개발을 들 수 있다.

현재 택시나 소형승합차에 사용되는 청정연료 엔진으로서 LPG엔진의 경우 가솔린엔진을 개조하여 사용하는 것으로 카브레타 방식과 유사한 형태로 균일 혼합비(homogeneous)상태 및 희박 혼합비 가솔린엔진 개념이 도입되어 노킹에 의한 압축비 제한을 받게 된다.

그러나 대형 디젤엔진에 적용하려는 LPG직접 분사 방식은 보다 높은 압축비 상태에서 연소될 수 있고 스토폴링이 없이 디젤과 같은 높은 열효율을 기대할 수 있다.

\* ATES 연구원

\*\* 정희원, 인천대학교 기계공학과

이러한 직접 분사방식의 적용을 위한 기초 연구 단계로 LPG연료 분사 특성이해를 위한 실험적 연구가 수행되어 왔다.

Goto<sup>(23)</sup> 등은 단공 노즐 및 핀노즐, 인젝터를 사용하여 부탄, 프로판 및 오토연료 (80%Butane+20%)의 분사 특성치를 연구하여 핀노즐이 보다 더 균일한 무화 및 파손 기화 특성을 나타냄을 보여 주었다.

Shakal<sup>(4)</sup> 등은 핀노즐을 사용한 실험에서 부탄가스의 증기압 근방의 조건에서 실험을 통해 분무길이 및 분사특성을 측정하였다.

본 연구에서는 이러한 LPG연료의 분사특성에 대한 실험결과를 바탕으로 주로 경유 등의 디젤연료분사에 사용되어온 수치해석 모델을 적용하여 LPG연료에도 분무모델 적용가능성 및 분무형태의 수치모사가능성을 알아보도록 한다.

이와 같은LPG 연료분사의 적절한 수치모사방법은 LPG적용 사용 엔진 내부 시스템개발에 주요한 자료를 제공할 수 있으리라 생각된다.

## 2. 수치해석적 방법 및 분무 모델

본 연구에서는 디젤 연료 분무 과정에 널리 쓰이고 있는 KIVA 3V<sup>(6)</sup>프로그램에 있는 연료 데이터를 인용하여 KIVA-II 프로그램을 근간으로 수치해석을 수행하였다. 프로그램 중 본 연구에서 가장 중요한 submodel로서의 액적의 항력 및 분열모델은 다음과 같다.

### 액적분열모델

O'Rourke 와 Amsden<sup>(7)</sup>에 의해 제안된 TAB (Taylor Analogy Break up) 모델은 Fig1. - a) 에서와 같이 변형 변수 y(distortion parameter  $y=2x/r$ )가 1이 될 때 분열이 일어난다고 가정하였고 스프링, 질량 유사관계식에 의해 다음식을 근간으로 모델링 하였다.

$$\ddot{y} = \frac{2\rho_g U^2}{2\rho_L r^3} - \frac{8\sigma}{2\rho_L r^3 y} - \frac{5\mu_L}{\rho_L r^2} \dot{y}$$

본 연구에서는 이러한 기존 TAB모델의 변형된 형태로서 DDB(dynamic drop breakup)<sup>(8)</sup> 모델을 적용하였다.

이 모델은 Fig1. - b) 에서와 같이 반쪽 액적의 질량 중심의 운동항에 의한 에너지 보존식을 근간으로 하고 있다. 이 모델에서는 액적은 단순한 신장 운동

에 의해 원형 액적이 장축의 길이가 b인 타원체 액적으로 변화된다고 생각하였고 이에 따른 반쪽 액적의 내부 에너지는 다음과 같은 운동에너지와 위치 에너지를 구성되어 있고

$$\frac{dE}{dt} = \frac{2}{3} \pi r^3 \rho_L \frac{dy'}{dt} \frac{d^2y'}{dt^2} + \frac{9\pi^2 \sigma}{8} y' [1 - 2(\frac{Cy'}{y})] \frac{dy'}{dt}$$

압력 및 점성소산에 의해 행해진 일률은 다음과 같이 표현될 수 있다고 가정하였다.

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{\pi}{4} r^2 \rho_g U^2 \frac{dy'}{dt} + \frac{8}{3} \pi r^3 \mu_L (\frac{1}{y'} \frac{dy'}{dt})^2$$

이러한 에너지율과 일률이 서로 보존된다고 가정하여  $y_1 = y'/r$ 과  $t_1 = tU/r$ 의 항으로 변환하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있으며,

$$\frac{d^2y_1}{dt_1^2} = \frac{3}{8K} - \frac{27\pi^2}{8KWe} y_1 [1 - 2(cy_1)^{-6}] - \frac{4}{K} \frac{N}{Re} \frac{1}{y_1^2} \frac{dy_1}{dt_1}$$

여기서  $K = \rho_L / \rho_g$ ,  $Re = \rho_g U r / \mu_g$  그리고  $N = \mu_L / \mu_g$

$a/r = We/12\pi$  일 때 액적의 분열이 진행된다고 가정하였다. 이 모델은 타 분열모델에 비해 연료분무 과정을 보다 적절히 예측하는 것으로 알려져 있다.

### 액적의 항력모델

액적의 항력모델은 TAB모델에서의 변형변수(y)를 도입한 액적의 변형을 고려하여 다음과 같이 가정하였다.

$$C_p = C_{p, sphere} (1 + 2.632y)$$

여기서

$$C_{p, sphere} = \frac{24}{Red} (1 + \frac{1}{6} Red^{2/3}) \quad Red \leq 1000$$

$$C_{p, sphere} = 0.424 \quad Red > 1000$$

그 외 분무 과정 해석방법에 대한 상세한 설명은 참고문헌<sup>(9)</sup>을 참조하기 바란다.

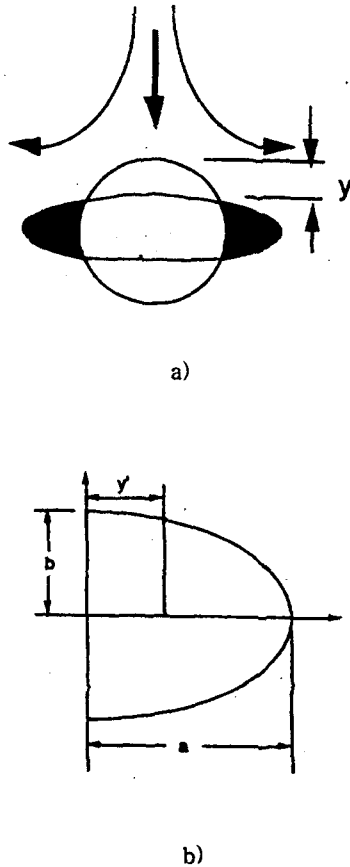


Fig.1 Drop drag model(a) and DDB model(b)

3. 수치해석 결과

본 수치계산 연구의 비교데이터로 사용될 분사실험 조건 및 결과를 살펴보면 다음과 같다. 실험에 사용된 분사기는 Common rail accumulator형 BMK사의 CR-G2이며 분사기간은 초기분사압력에 의해 지배를 받게 된다. 전체 실험 개략도는 Fig.2에 잘 나타나 있다.

액적의 속도, SMD등을 관찰하기 위해서 PDPA (Particle Doppler Phase Anemometer)를 그리고 연료분사 이미지를 잡기 위해 Copper vapor 레이저를 사용하였다<sup>(4)</sup>. 수치계산에 사용된 LPG연료 성질은 표1에 나타나 있다.

수치계산 입력 데이터로 사용될 측정된 분사 연료압력의 시간 변화량과 판롤형 안팎터는 Fig3에 나타나 있다. 초기압력은 12.6MPa로서 보다 나은 분무특성 때문에 통상의 디젤연진에서의 50MPa보다 낮고 가

솔린연진보다는 높은 압력을 유지하였다. 수치계산에서의 주위공기조건은 실험조건<sup>(4)</sup>에서와 같이 LPG 연료의 증기압 0.2MPa 보다도 작은 0.15MPa의 경우와 증기압보다 높은 0.37MPa의 경우에 대하여 증기압 전후에 따른 분무특성을 알아보도록 하였다.

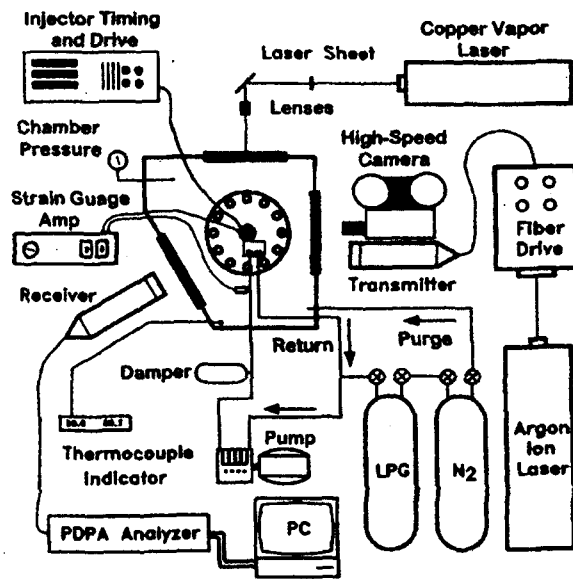


Fig.2 LPG Spray measurement system

Table. Fuel Properties

성분	>80% n-Butane ,balance iso-butane
밀도	0.581 g/cm <sup>3</sup>
증기압	0.2MPa at 15°C
표면장력	5.9dyne/cm at 350° K
점성계수	3.1×10 <sup>-7</sup> m/s

본 연구에서는 판롤형 분무기이기 때문에 일반적인 형태는 Fig4 에서와 같이 노즐부근에서는 길이  $l$  과, 두께  $t$  의 cone형태의 액막으로 되어 있다.

여기서 액막의 속도  $V$ 는 압력차이에 의해 효과를 고려해 보면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V = Kv \left[ \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_L} \right]^{0.5}$$

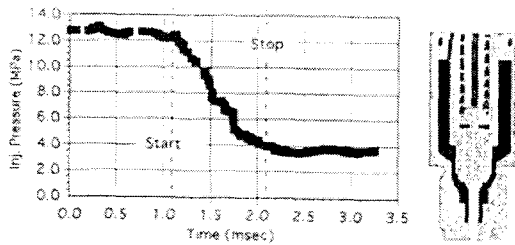


Fig.3 Fuel injector pressure history and injector schematic

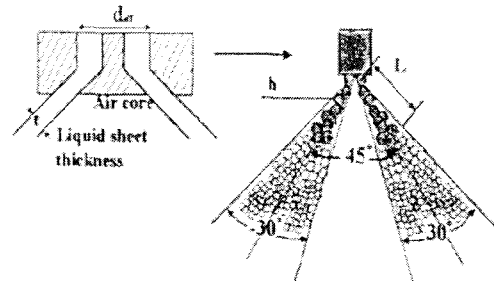


Fig.4 Conical liquid sheet formed in pintle type injection

여기서  $P_1$ 은 분무기내의 연료압  $P_2$ 는 공기압,  $\rho_L$ 은 연료밀도,  $K_v$ 는 속도계수이다  
 여기서 본 연구에서의 분무형태는 hollow cone 형태이므로 Lefebvre<sup>(10)</sup>는 오리피스의 면적  $d_{eff}$ 에 대한 air core 면적비를 다음과 같이 정하고

$$X = \left(1 - \frac{2h}{d_{eff}}\right)^2$$

여기서  $d_{eff}$  : 오리피스 면적에 대한 핀돌지대 투영면적을 제한 값

윗식의  $K_v$ 값을 다음과 같이 설정하였다.

$$K_v = C \left(\frac{1-X}{1+X}\right)^{0.5} \frac{1}{\cos \theta}$$

여기서 C는 실험과의 비교를 통해 1.1로 두었다.  
 이와같은 식을 기본으로 Clarie and Domborwski<sup>(11)</sup>는 다음과 같은

$$\text{분열길이: } L = B \left[ \frac{\rho_L a \ln(\eta/\eta_0) h \cos \theta}{\rho_a u^2} \right]^{0.5}$$

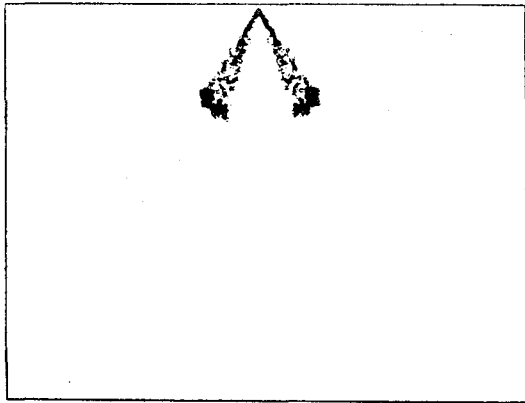
를 실험치와 비교하여 제안하였고 여기서  $\ln(\eta/\eta_0)$ 는 실험치로 결정된 봉상 12의 값으로 두고 계산하였다.

본 연구에서 사용된 부탄가스에 대한 물리적 성질 및 조건을 역막길이를 나타낸 윗식에 대입한 결과  $L=10^{-3}cm$  order로서 분사순간 높은 압력에 의해 분무순간 분열되는 atomization mode로 되는 것을 알 수 있어 본 계산에서는 분사초기조건에서 초기직경을  $1.65\mu m$ 를 두고 계산을 수행하였다. 그리고 분사폭은  $30^\circ, 20^\circ, 15^\circ$ 로 각각 계산하였으나 실험적으로는 분사중앙부분인 air core부분에 역적의 존재를 확인할 수 있어 수치계산에서  $30^\circ$ 를 사용하였다.  
 이와 같은 실험결과에 의한 2차원 축대칭 계산결과가 Fig.5에 나타나있다.

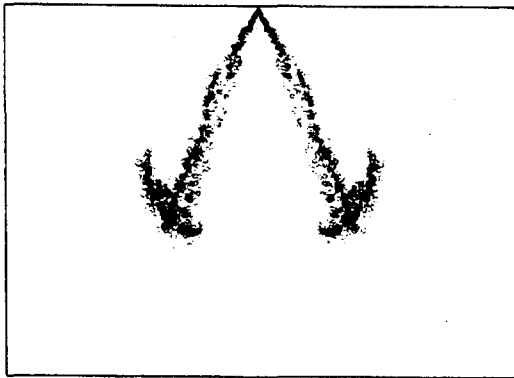
대기압 0.15MPa의 조건으로서 분사시작  $200\mu sec$ 후를 살펴보면 포화증기압보다 낮은 조건하에서 분사순간 기화하고 약  $500\mu sec$ 후에 분무팁 부근에서는 hollow cone형태 분무에서 종종 나타나는 와류형태의 분무형상을 보여주고 있다. 이런 와류형태는 분사시간이 진행됨에 따라 점차적으로 그 크기가 커져나감을 알 수 있다. 이는 액체상태의 액적들이 기화되어 기체상태로 변화됨에 따라 모멘텀의 손실에 따른 현상으로 여겨진다.

실제실험에서는 hollow cone형태의 분무기라 하더라도 중앙부분에 많은 역적의 속도가 존재하기 때문에 2차원 축대칭 계산으로서는 실험에서 측정된 Fig.6와 같은 역적의 분포 특성을 표현하기 힘들기 때문에 Fig.7에서는 주위기압 0.15MPa에서 3차원 180° 계산각도범위에서 수치계산을 수행하였다.

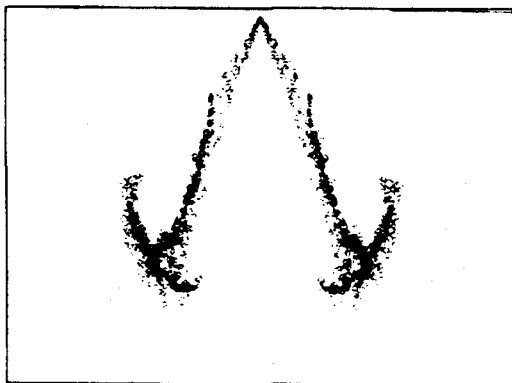
좌측은 3차원 수치계산 결과이고 우측은 직접사진 촬영에 의한 부탄 분무의 시간변화 모습을 비교한 그림이다.



(a)  $t = 200 \mu \text{sec}$



(b)  $t = 500 \mu \text{sec}$



(c)  $t = 600 \mu \text{sec}$

Fig.5 Spray pattern simulated by axisymmetric calculation

시간이 0.11msec후에서 시작하여 0.89msec까지의 분무형태로서 실험사진에서의 분무팁에서의 와류형성을 보여주고 있는데 수치계산에서 이를 잘 나타내어 주고 있음을 보여준다.

Fig.8은 0.37MPa에서의 수치계산된 분무형태와 실험사진과 비교한 데이터이다.

0.15MPa에 비해 같은 분사시간에서 분무길이 상 대적으로 길어지고 그리고 준 정상상태인 0.89 msec 근방에서 분무각도가 0.37MPa이 좀 더 작아지는 실험결과를 잘 재현하고 있다.

그러나 수치계산에서의 분무길이에 있어서는 실제분무형태의 비대칭성등에 의해 실제 분무길이 보다 작은 값을 가지고 있어 증발률 모델등에 대한 분석이 보다 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

Fig.9은 0.15MPa과 0.37MPa에서의 수치계산된 연료 증기 분포를 보여주는 것으로 포화증기압보다 낮은 0.15MPa 경우 증발잠열에 의해 초기온도강하로 그 이후 분사된 부탄연료의 많은 부분이 액체상태로 남아 있음을 알 수 있고 0.37MPa의 경우는 보다 점진적인 기화조건으로 주 분사구간은 좁은 상태이지만 보다 많은 증기농도분포 특성을 보여주고 있다.

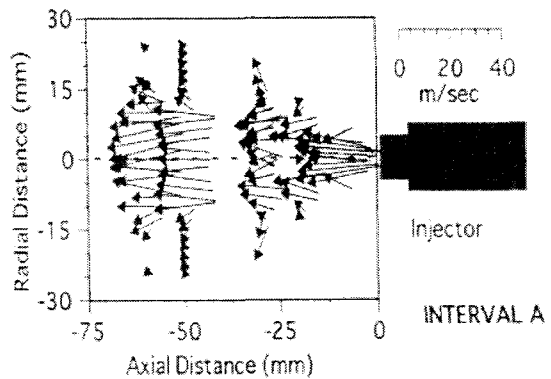


Fig.6 Measured particle velocity at 0.5MPa chamber pressure

실험에서는 분무가장자리부터 중심까지 약  $10 \mu - 30 \mu$ 의 SMD 분포특성을 보였고 PDPA에 의한 평균 Validation rate는 약 80%정도 였으며 수치결과도 유사한 SMD분포특성을 보여준다.

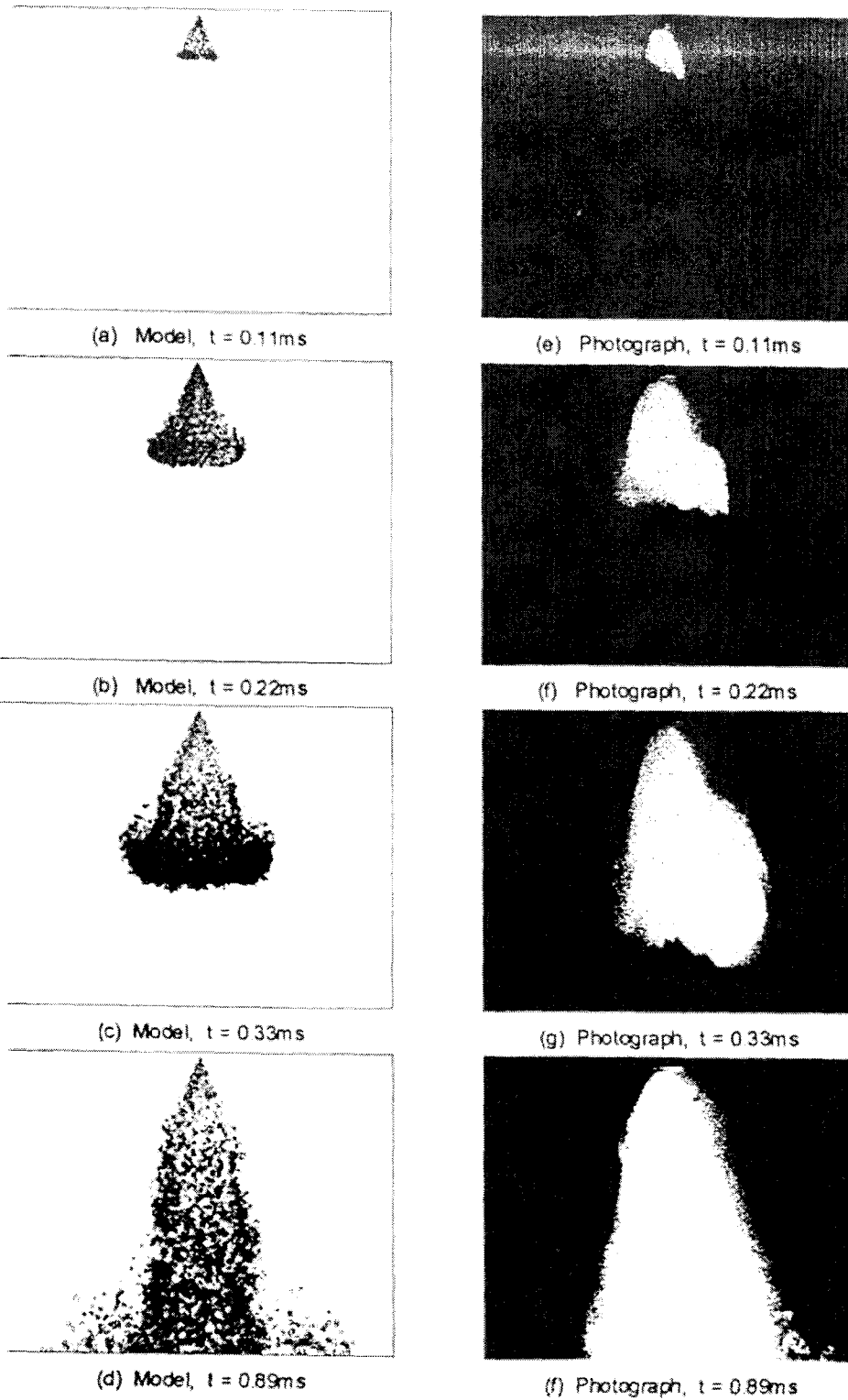


Fig.7 Comparison of high-speed photographs and computed spray parcels at 0.37MPa chamber pressure. The elapsed time after injection start is shown below each figure. Scale: image height = 30mm

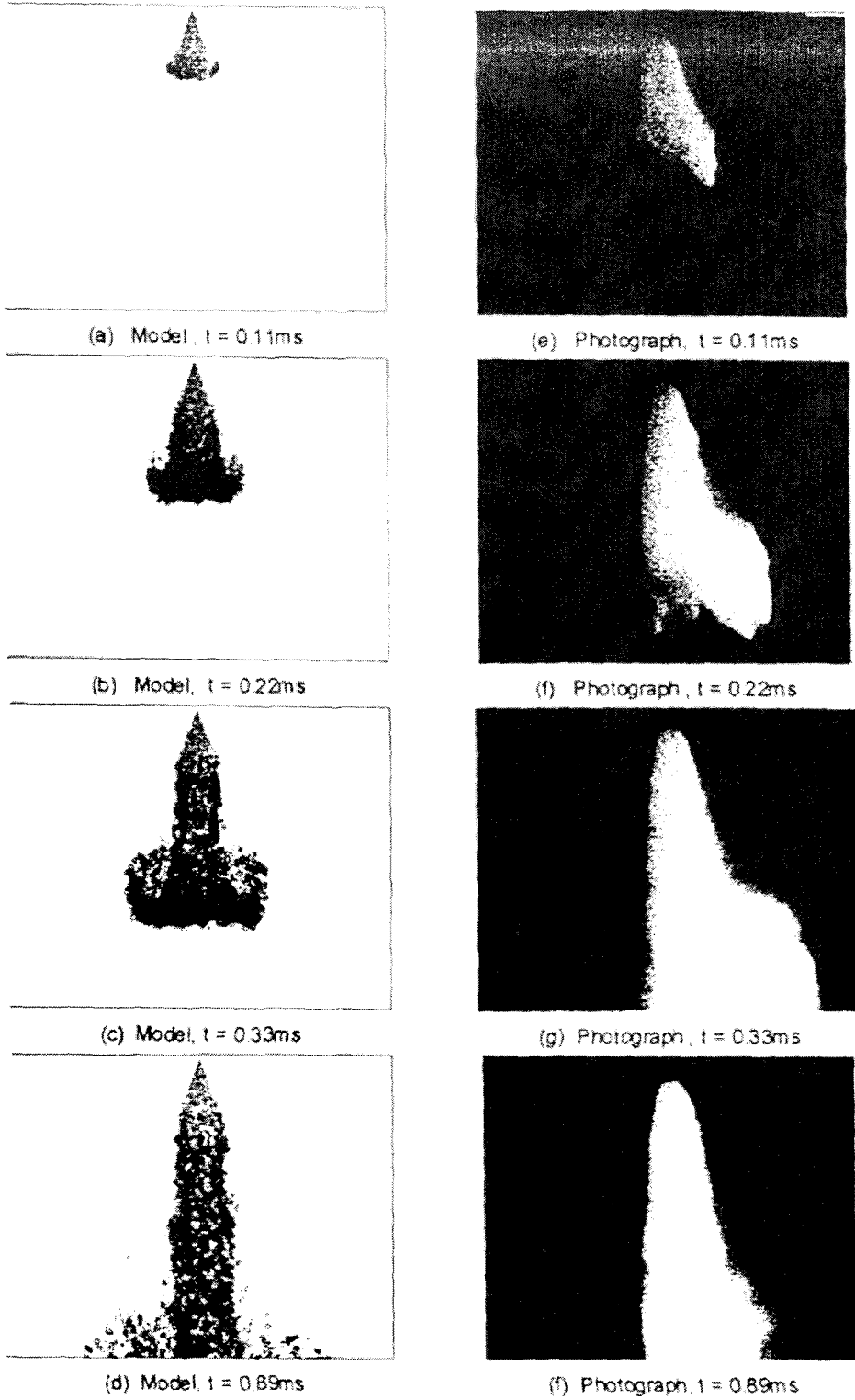
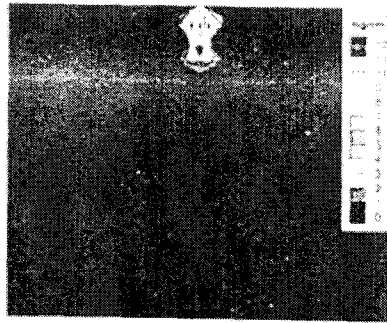
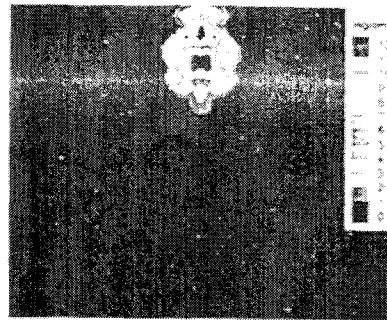


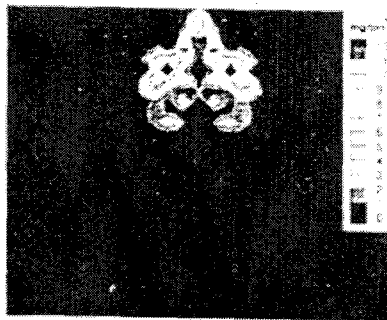
Fig.8 Comparison of high-speed photographs and computed spray parcels at 0.37MPa chamber pressure. The elapsed time after injection start is shown below each figure. Scale: image height = 30mm



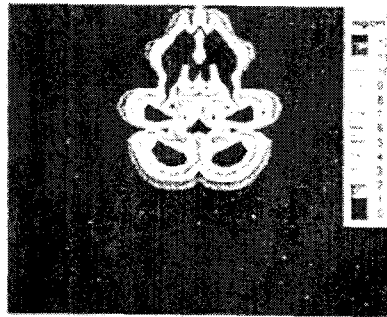
(a) Pamb = 0.15MPa, t = 0.11ms



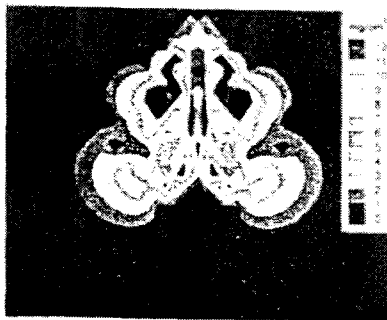
(e) Pamb = 0.37MPa, t = 0.11ms



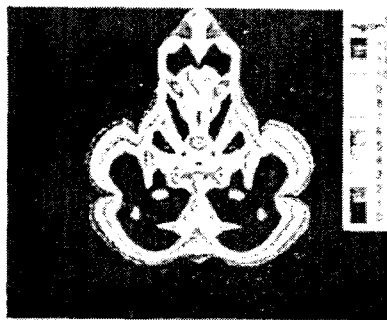
(b) Pamb = 0.15MPa, t = 0.22ms



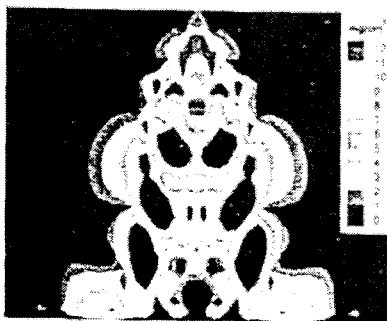
(d) Pamb = 0.37MPa, t = 0.22ms



(c) Pamb = 0.15MPa, t = 0.33ms



(g) Pamb = 0.37MPa, t = 0.33ms



(d) Pamb = 0.15MPa, t = 0.89ms



(f) Pamb = 0.37MPa, t = 0.89ms

**Fig.9** Comparison of computed vapor distribution at 0.15 and 0.37MPa chamber pressure. The elapsed time after injection start is shown below each figure. Scale: plot height = 30mm, vapor concentration

units= mg/cm<sup>3</sup>



Fig 8.에서 초기분무상태에서는 실험적으로 비대칭을 이루나 분무중반부는 대칭성을 유지하기 때문에 수치계산과의 비교에 있어서는 전체적으로 대칭으로 간주하였다

#### 4. 결론

LPG연료 핀틀형 분무기를 사용한 비정상 분사과정을 포화증기압 전후의 조건에서의 수치계산 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) DDB(Dynamic Drop Breakup)로 불리워지는 변형된 액적의 변형에너지 보존을 고려한 변형된 TAB(Taylor Analogy Break up) 모델이 LPG 연료분사 형태를 어느 정도 잘 예측함을 알 수 있었다.
- 2) 실험에서 밝혀진 포화증기압보다 0.2MPa보다 낮은 0.15MPa에서 보다 0.37MPa에서 보다 분무길이 가 길어지고 준정상상태에서 분사각도가 줄어드는 현상을 수치결과가 잘 나타내고 있다.
- 3) 0.37MPa에서 실제 분무길이와의 오차에 대하여서는 기화 과정에 대한 보다 자세한 연구가 수반 되면 실제 엔진 내부연소과정에 본 수치해석 모델이 적절히 적용될 수 있으리라 판단된다.

#### 참고문헌

1. 임명도, "국내의 자동차 배기가스 규제 동향." pp. 35-38,1999
2. S. Goto, H. Furutan and R. D. Delic, "Dual-Fuel Diesel Engine Using Butane, " SAE 920690
3. S. Goto, H. furutani and M. Komori, etc " LPG Diesel Engine; Dual Fuel Method, " SAE 9300747
4. J. S. Shakal, S. S. Hwang and J. Y. Koo, " A Comparison of Measured and Calculated Transient Injection Characteristics of a Pintle - Type Injector for Direct Injection of LPG, " 1998 FISITA F9BP502
5. A.A. Amsden, " KIVA-3V : A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," Los Alamos 1997

6. A.A. Amsden, P.J. O'Rourke and J.D. Butler, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Spray," Los Alamos National Laboratory Report NO, LA 11560-MS, 1989
7. P.J. O'Rourke and A.A. Amsden, " The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup." SAE 872089, 1987
8. E.A. Ibrahim, H.Q. Yang and A.J. Prozekwas, "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," AIAA J. Propulsion Power, vol 9, pp651-654, 19934
9. 최성훈, 황상순, "고온고압상태에서 분할 분사 방법에 의한 배기가스 특성에 관한 수치해석적 연구," SAE 99370078, 1999
10. A.H. Lefebre, Atomization and Sprays, Hemisphere, New York, 1998
11. C.J. Clack and N. Dombrowski, "Aerodynamic Instability and Disintegration of Inviscid Liquid sheets, Proc, Roy, Soc, Lond.A. vol 32, pp427, 1972