

# 고압 분무 연소장에서 연료 분무의 자발화 및 연소 과정 해석

## Numerical Modeling for Auto-ignition and Combustion Process of Fuel Sprays in High-Pressure Environment

유 용 옥\*, 강 성 모\*, 김 용 모\*\*  
Y. W. Yu, S. M. Kang and Y. M. Kim

### ABSTRACT

The present study is mainly motivated to investigate the vaporization, auto-ignition and combustion processes in the high-pressure engine conditions. The high-pressure vaporization model is developed to realistically simulate the spray dynamics and vaporization characteristics in high-pressure and high-temperature environment. The interaction between chemistry and turbulence is treated by employing the Representative Interactive Flamelet (RIF) Model. The detailed chemistry of 114 elementary steps and 44 chemical species is adopted for the n-heptane/air reaction. In order to account for the spatial inhomogeneity of the scalar dissipation rate, the multiple RIFs are introduced. Numerical results indicate that the RIF approach together with the high-pressure vaporization model successfully predicts the ignition delay time and location as well as the essential features of a spray ignition and combustion processes.

주요기술용어 : RIF(Representative Interactive Flamelet), Auto-ignition(자발화), detailed chemistry(상세화학반응), fuel spray(연료분무)

#### Nomenclature

$c_p$  : Specific heat at constant pressure  
[cal/g K]  
 $D_z$  : Mass diffusion coefficient [cm<sup>2</sup>/s]  
 $h$  : Enthalpy [cal/g]  
 $\dot{m}_i$  : Chemical production rate of species  $i$   
[g/s]  
 $t$  : Time [s]  
 $T$  : Temperature [K]  
 $u_j$  : Velocity component in cartesian  
coordinates [cm/s]  
 $x_j$  : Cartesian coordinate component [cm]  
 $Y_i$  : Mass fraction of the  $i^{\text{th}}$  species  
 $Z$  : Mixture fraction

$Z'^2$  : Variance of the mixture fraction  
 $\rho$  : Mass density [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\chi$  : Scalar dissipation rate [1/s]

#### Superscripts

$\bar{\phi}$  : Reynolds averaged value  
 $\overline{\phi}$  : Favre averaged value

#### 1. 서론

디젤엔진, 가스터빈엔진 그리고 로켓엔진에 있어서 액체연료의 분무연소특성은 액적의 미립화, 액적과 유동장의 상호작용, 액적의 운동과 증발과정 및 연료증기의 자발화 등에 의해 지대한 영향을 받게 된다. 최근들어 액체연료를 사용하는 고성능 엔진에서의 연소실 압력이 점점 높아져 연료의 임계압력에 가깝거나 또는 넘어서 운전되고 있기 때문에, 저압상태

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

의 증발과정에 비해 현저하게 다른 증발특성을 가지는 고압상태에서의 연료액적의 증발과정을 잘 모사할 수 있는 증발모델의 개발은 고압상태에서 분무 연소과정, 연소 불안정현상 그리고 공해가스 배출특성의 예측을 위한 선결과제이다. 하지만, 고압증발특성에 중요한 영향을 미치는 물리적 현상인 실제기체의 거동, 온도 및 압력에 따른 물성치 및 증발잠열의 변화 그리고 기체의 용해도를 고려한 역상과 기상간의 상평형 등을 정확히 모사하는 데는 많은 어려움이 있다.

또한 고온, 고압하에서의 연료의 자발화 예측도 분무연소특성에 매우 중요한 영향을 미치나 지금까지는 보통 shell ignition model을 사용해서 해석하였다. 하지만 이 모델도 문제의 조건에 따라 계수를 조정해야 한다는 단점을 가지고 있다. Pitsch 등<sup>(1)</sup>은 유동장과 화염장을 분리해서 계산하는 Representative Interactive Flamelet (RIF) 모델을 처음으로 제안하였다. 이 모델은 계수조정이 필요없을 뿐만아니라 상세화학반응을 적용할 수 있다.

본 연구는 고압환경에서 분무 유동과 증발, 연료 분무의 자발화 및 연소를 수치적으로 분석하기 위해서 액적의 가열, 액적 내부의 유동, 강제대류, Stefan flow, 실제기체 효과, 주위공기의 용해 등 고압에서 일어나는 효과들을 모두 고려한 고압증발모델을 이용하였다. 또한 RIF 모델을 이용하여 유동장과 화염장을 분리해서 계산하였고 스칼라 소산율의 공간적 비균일성을 고려하기 위하여 multiple RIF 모델<sup>(2)</sup>을 이용하였다. 여기에 사용한 연료는 n-heptane으로, 자발화를 예측할 수 있는 저온에서의 탄소고리의 굵김, 고온에서의 연료의 산화 등을 고려한 44 화학종, 114 화학반응<sup>(3)</sup>을 이용하였다.

## 2. 분무연소장 해석 모델

### 2.1 고압 증발 모델

기체장의 해석을 위해 Abramzon과 Sirignano<sup>(4)</sup>가 제안한 막이론(film theory)을 이용하여 계산하였다.

내부유동이 없는 경우 액적의 질량과 내부 온도분포는 다음의 지배방정식으로 서술된다<sup>(5)</sup>.

질량 보존 방정식 :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_L \right) = - \dot{m}_F \quad (1)$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_L \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left( \frac{2}{r} + \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (2)$$

액적표면과 주위유동사이에 상대속도가 존재할 경우 전단력의 영향으로 액적내부에 순환이 발생한다. 이러한 내부순환은 액적내부에서의 열 및 질량전달을 증진시키는 역할을 하게 된다. 이는 곧 액적내부에서의 열전도도 및 질량확산계수가 그만큼 증가되었다고 말할 수 있는데 이에 근거한 것이 이른바 '유효전도도(effective conductivity)모델'<sup>(6)</sup>이다. 이 모델은 액적내부의 유동을 직접 계산하는 대신, 액적내부의 순환으로 인해 증진된 열 및 질량전달을 표현할 수 있는 '유효값'의 확산계수를 사용하여 확산방정식만을 해석하는 방법이다.

연료액적의 증발현상은 고온, 고압상태에서 일어나므로 이상기체방정식을 단순히 적용하는 것은 불가능하다. 실제 기체의 거동을 고려할 수 있는 상태방정식으로는 Peng - Robinson 상태방정식을 사용하였다<sup>(7)</sup>.

### 2.2 연소모델

난류의 시간 및 길이 척도가 화학반응의 그것에 비해서 크다고 가정하면 난류장 해석과 화학반응 해석을 분리할 수 있다. 이때 화학반응이 일어나는 얇은 층을 여러 대향류 확산 화염들의 조합으로 생각할 수 있고, 이를 층류화염면(flamelet)이라 한다. 이렇게 생각함으로써 화학반응에 대해서는 새로운 독립변수, 혼합분율 Z에 의해 1차원 문제로 변환시킬 수 있다. 층류화염면 방정식은 다음과 같이 나타난다.<sup>(8)</sup>

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} - \frac{\rho x}{2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} - \dot{m}_i = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\rho x}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - \frac{\rho x}{2} \frac{1}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial Z} \frac{\partial T}{\partial Z} \\ & + \frac{\rho x}{2} \frac{\partial T}{\partial Z} \sum_{k=1}^N \left( 1 - \frac{c_{pk}}{c_p} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial Z} \\ & + \frac{1}{c_p} \left( \sum_{k=1}^N h_k \dot{m}_k - \frac{\partial \dot{q}}{\partial t} + \dot{q}_{rad} \dots \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

난류연소를 제대로 다루기 위해서 일반적으로 평균 혼합분을  $\bar{Z}$  와 혼합분율의 분산  $\overline{Z'^2}$ 에 대한 방정식을 풀어야한다. 여기서,  $\bar{\phi}$  는  $\phi$ 의 favre 평균을 의미한다.

이전에는 준정상상태라는 가정하에 위 식들을 이용하였다. 하지만 스칼라 소산율은 급격하게 변하는 유동장에 대해서 층류화염면이 제대로 반응하지 못하므로, 비정상상태에 대해서 설명할 수 있는 새로운 층류화염면 모델이 제안되었다. 각각의 층류화염면은 자신의 영역에서 통계적으로 평균된, 스칼라 소산율에 대응하는, 변수에 의해 CFD code와 상호작용을 하게된다. 이를 Representative Interactive Flamelet (RIF) 모델이라 한다.

본 연구에서 기상과 액상의 상호작용을 모사하기 위하여 KIVA II code<sup>(9)</sup>를 층류화염면 모델과 상호작용할 수 있도록 수정하여 사용하였고, 화학반응에 대해서는 아래와 같이 나타난 평균 혼합분을  $\bar{Z}$  와 혼합분율의 분산  $\overline{Z'^2}$ 에 대한 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho Z}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho u_j Z}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{\sigma_Z} \frac{\partial \bar{Z}}{\partial x_j} \right] + \rho s \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho Z'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho u_j Z'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{\sigma_{Z^2}} \frac{\partial \overline{Z'^2}}{\partial x_j} \right] + \frac{2\mu}{\sigma_{Z^2}} \left[ \frac{\partial \bar{Z}}{\partial x_j} \right]^2 - \bar{\rho \chi} \quad (6)$$

### 3. 결과 및 고찰

Koss et al.<sup>(10)</sup>가 온도가 800K인 공기로 채워져있는 고압연소실에 300K의 n-heptane 액체연료 6mg을 직경이 0.2mm인 노즐을 이용하여 1.4ms 동안 분사하여 실험한 것을 수치해석하였다. 유효전도도 모델에 대해서는 수치효율성을 유지하기 위해서 액체 내부에 10개의 격자를 사용하였다.

본 연구에서는 고온, 고압에서 분무의 유동, 증발, 자발화 및 연소 과정을 알아보기 위해서 저압모델, 고압 무한전도도 모델, 고압 유효전도도 모델의 세가지의 증발 모델을 이용하여 비교하였다. 먼저 연소가 일어나기 전에 대해서 세가지 증발모델의 증발 특성

을 알아보았다. Fig. 1은 연소실 내부에 남아있는 액적의 총질량을 시간에 따라 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 고압 모델 간에는 그리 큰 차이가 보이지 않으나, 저압 증발 모델은 상당히 크게 예측한다. 이는 실제 기체의 영향, 액체 물성치의 변화 그리고

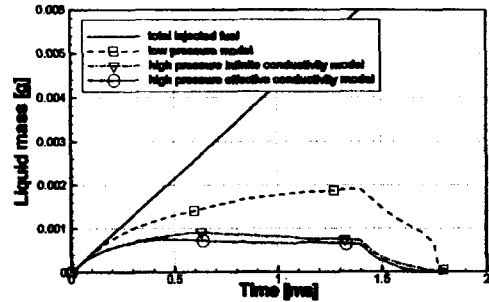


Fig.1 Transient liquid mass of total injected fuel and remained fuel in chamber

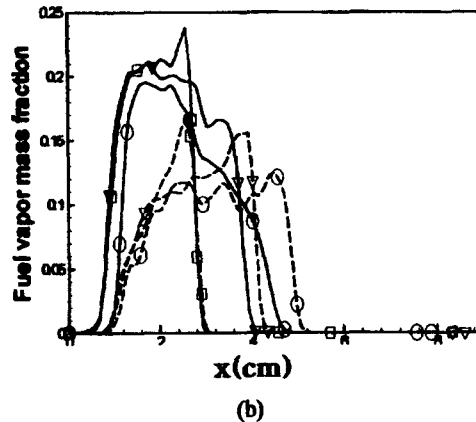
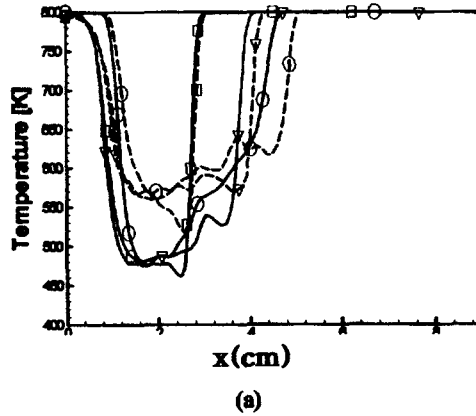


Fig.2 Fuel vapor mass fraction and Temperature profiles along centerline; — high-pressure effective conductivity model, - - low-pressure model, □ 0.5ms, ▽ 1.0ms, ○ 1.5ms

증발잠열의 계산을 무시함으로써 얻어진 상대적으로 적은 증발율에 기인한다. Fig. 2는 고압 유효전도도 모델과 저압증발모델에 대해서 연소실 축에서의 온도 및 연료 증기의 질량분율 분포를 분포를 0.5ms, 1.0ms, 1.5ms에 대해서 나타내었다. 고압모델의 경우 상류 영역(1cm < x < 3cm)에서 주된 증발이 일어남을 알 수 있다. 따라서 액적 증발에 의한 냉각효과에 의해 가장 낮은 온도 영역이 같은 영역에 위치하고, 계속적인 증발과 분무에 의해 유발된 유동에 의해 하류 방향으로 퍼져나가는 것이 보인다. 하지만 이에 반해서 저압 모델은 큰 열적 관성과 고압 증발 특성을 고려하지 못함으로 인해 상대적으로 증발량을 낮게 예측한다. 즉, 상대적으로 낮은 질량분율 분포 및 높은 온도 분포를 보이고 있고, 액적의 증발이 느림으로 인해 침투거리도 더 큼을 알 수 있다. Fig. 3은 1.5ms이 지난 후의 액적 개체과 온도 및 연료 증기의 분포를 나타낸다. 위에 나타난 것이 고압 유효전도도 모델이고, 아래 것이 저압 모델로 연료 증기 질량분율의 최대값은 각각 0.196, 0.124이고, 온도의 최저값은 480.7K, 566.7K이다. 저압 증발 모델을 사용한 결과가 상대적으로 많은 액적이 남아 있음을 알 수 있고, 위치도 더 하류에 위치함을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 대로 상대적으로 낮은 증발량에 기인한다. 결과적으로 분무 끝이 보다 하류 영역에 존재하므로 연료증기도 상대적으로 하류 영역에서 생성된다.

이러한 증발 모델간의 차이는 자발화 및 연소 특성에 중요하게 작용하는 스칼라 소산율에 큰 영향을 준다. 스칼라 소산율은 난류에 의한 영향을 반영하는 변수로, 분무 연소장에 있어서 분무의 증발특성에 따라 변한다. Fig. 4는 세 증발모델에 대한 스칼라 소산율의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 초기에 액적이 분사되면서 스칼라 소산율은 급속도로 증가를 하고 곧 최대값에 도달한다. 분무의 분사속도가 크기 때문에 액적의 파열과 액적의 분열, 기상과 액상간의 대류 열전달 및 기체상의 난류를 증진시키게 되고 또한 액적도 많이 증발하게 된다. 특히, 액적의 분열이 빨리 일어남으로 인한 증발 특성시간의 감소와 액상과 기상 간의 대류열전달의 증가로 인해, 증발량은 크게 증가한다. 결과적으로 이러한 높은 분사속도는 난류의 증진, 많은 증발량, 혼합분율의 커다란 구배 등 비평형 효과의 증가로 인해 스칼라 소산율을

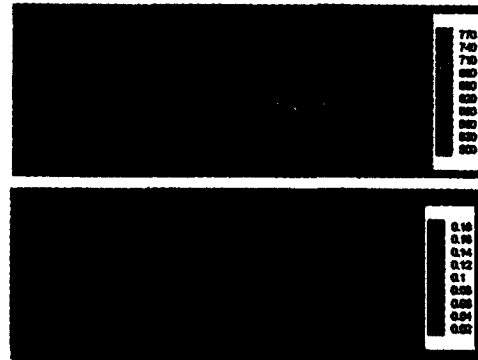


Fig. 3 Temperature field, fuel vapor mass fraction field and droplet distribution 1.5ms after the onset of injection; upper part : high-pressure effective conductivity model, lower part : low-pressure model

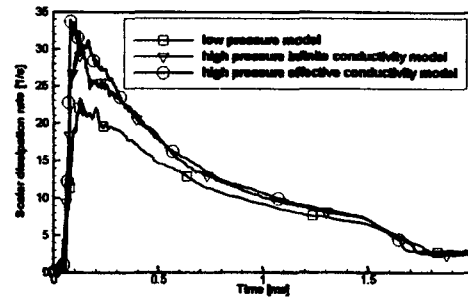


Fig.4 Evolution of the scalar dissipation rates calculated with different vaporization

때우 크게 증가시킨다. 이 초기 시기가 지난 후, 난류 소산 및 증발된 연료 증기가 주위로 퍼져나감으로 인해서 스칼라 소산율은 천천히 떨어진다. Fig. 4에 보인 바와 같이 고압 유효전도도 모델이 가장 높은 스칼라 소산율을 예측하고 있고, 고압 무한전도도 모델, 저압 모델이 약간씩 작은 값을 예측하고 있는데 이러한 경향은 세 증발모델에 의해서 예측된 분무 증발특성을 반영하고 있다. 저압 모델의 경우 스칼라 소산율을 낮게 예측하고 있지만 두 고압 모델의 경우는 거의 비슷하게 예측하고 있다. 특히, 0.35ms 이후는 거의 같은 값을 나타내고 있다. 자발화가 일어날 즈음에도 고압 모델은 같은 값을 나타냄에 비해서, 저압 모델은 늦게까지 남아있던 액적의 계속적인 증발로 인해서 그보다 약간 높은 값을 보이고 있다.

충류화염편의 관점에서 볼 때, 매우 높은 스칼라 소산율은 열과 라디칼의 확산에 의해 줄어드는 정도

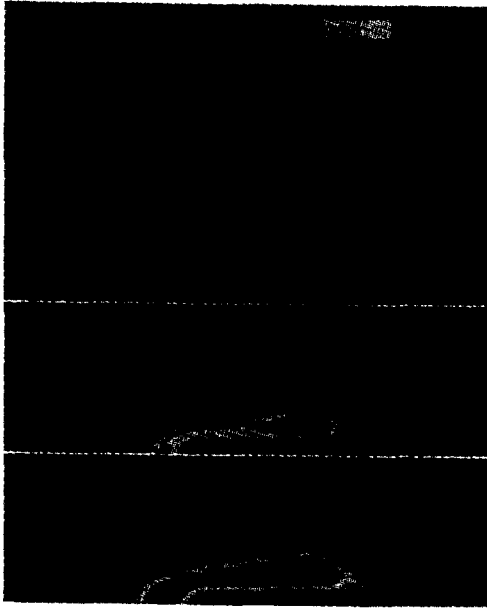


Fig.5(a) The instantaneous temperature distribution and droplet trajectory of low-pressure vaporization model

가 화학반응에 의한 열 생성과 라디칼 생성에 비해 크므로 화염은 꺼지게 된다. 스칼라 소산율이 감소함에 따라 체류시간이 길어지게 되고 화학반응이 충분히 일어나게 된다. 충분히 낮은 스칼라 소산율의 경우 화학반응에 의해 열과 라디칼이 생성되지만 확산에 의한 손실이 거의 없으므로 계속 축적되어 결국 자발화가 일어난다. 즉, 스칼라 소산율이 어느 정도 값보다 낮을 때에만 자발화가 일어나게 되는 것이다.

새가지 증발 모델에 대해서 시간에 따른 온도장 및 액적의 분포를 Fig. 5에 각각 나타내었다. 분무 제트의 하류 부근에서 자발화가 일어나고 화염이 상류 방향과 하류 방향으로 전파됨을 보이고 있다. 여기서 굵은 선은 당량비가 1인 곳을 나타내고 있다. 새가지 증발 모델은 각기 다른 연료 과농 영역 분포를 보이고 있다. 저압 증발 모델은 상대적으로 늦은 증발에 의해 넓게 과농 영역을 예측하고 있다. 고압 무한전도도 모델은 유한전도도 모델에 비해 과농 영역을 작게 예측하고 있다. 이것은 무한전도도 모델이 열적 관성을 크게 예측함으로써 나타나는 결과이다. 고압 유한전도도 모델에 의해 예측된 자발화 지연시간 (1.63ms)이 실험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 저압 모델과 고압 무한전도도 모델에 의해 예측된 자



Fig.5(b) The instantaneous temperature distribution and droplet trajectory of high-pressure infinite conductivity vaporization model

발화 지연시간은 각각 1.75ms과 1.77ms이다. 두 고압 모델의 경우, 비록 자발화가 일어날 즈음의 스칼라 소산율이 거의 같음에도 불구하고 초기의 발달과정이 다르므로 인해서 혼합분율 분포 및 화염면의 구조, 자발화 및 연소 과정이 매우 다르게 나타난다는 것을 알려주고 있다.

#### 4. 결 론

1. 본 연구에서 사용한 RIF 모델과 고압 증발 모델을 이용한 분무 연소 모델은 고압 상태에서의 자발화 및 연소 과정을 잘 예측하고 있다.
2. 새가지 증발 모델은 각기 다른 연료 과농 영역 분포를 보이고 있다. 저압 증발 모델은 상대적으로 늦은 증발에 의해 넓게 과농 영역을 예측하고 있다. 고압 무한전도도 모델은 유한전도도 모델에 비해 과농 영역을 작게 예측하고 있다.
3. 추후의 연구에서는 NOx, soot을 포함하고, 다성분의 액적 연료에 대한 자발화와 연소 과정 및 디젤엔진 내에서의 배기가스 형성에 대해 알아보고자 한다.

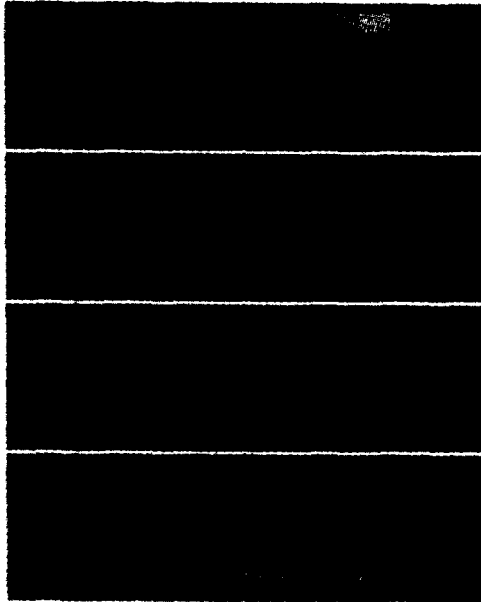


Fig.5(c) The instantaneous temperature distribution and droplet trajectory of high-pressure effective conductivity vaporization model

#### 참 고 문 헌

1. Pitsch, H., Barths, H. and Peters, N., "Three-Dimensional Modeling of NOx and Soot Formation in DI-Diesel Engines Using Detailed Chemistry Based on the Interactive Flamelet Approach", SAE paper 962057, 1996.
2. Barths, H., Hasse, C., Bikas, G., and Peters, N., Simulation of Combustion in DI Diesel Engines using and Eulerian Particle Flamelet Model, Twenty-Eighth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 2000.
3. Pitsch, H., Private communication.
4. Abramzon, B. and Sirignano, W.A., "Approximate Theory of a Single Droplet Vaporization in a Convective Field: Effects of Variable Properties, Stefan Flow and Transient Liquid Heating", Proceedings of Second ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol.1, pp.11-18, 1987.
5. 유용욱, 김용모, "고압유동장에서의 액적증발 특성 해석", 대한기계학회논문집 B권 제22 권 제8호, pp1121-1131, 1998
6. Abramzon, B. and Sirignano, W.A., Droplet vaporization Model for Spray Combustion Calculations, AIAA-88-0636, 1988.
7. 유용욱, 김용모, "고압상태의 증발 특성 해석 결과에 미치는 상태방정식의 영향", 한국역체미립화학회지 Vol.2, No.3, pp32-43, 1997
8. Peters, N., "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 10, pp.319-339, 1984.
9. Amsden, A.A., O'Rourke, P.J. and Butler, T. D., "KIVA II: A Computer Program for hemically Reactive Flows with Sparys", Los Alamos National Labs, LA-11560-MS, 1989.
10. Koss, H.J., Bruggemann, D., Wiartalla, A., Backer, H. and Breuer, A., "Inverstigation of the Influence of Turbulence and Type of Fuel on the Evaporation and Mixture Formation in Fuel Sprays", IDEA Final Report, 1993.

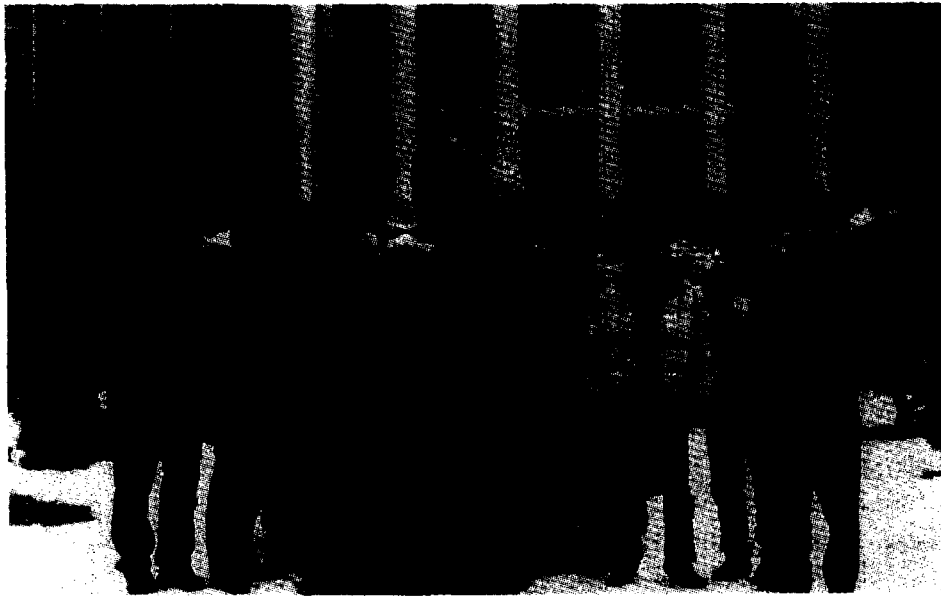
## 한양대학교 열공학 연구실

김대식\*

### 1. 연구실 개요

본 연구실은 열역학, 내연기관 및 연소, 액체의 미립화 및 분무 시스템, 자동차 공학등과 관련된 학문의 연구와 이와 관련된 산업기술 개발 등에 관련된 실험과 연구를 수행하는 연구실이다. 이 연구실은 1960년대 초에 설립되어 작고하신 서정일 교수님께서 연구실의 토대를 이루어 주셨고 그 후 조진호 교수님께서 운영하시다가 1995년에 정년을 맞이하셨다.

현재는 1978년에 본 대학에 부임하신 이창식 교수님께서 열역학, 연소, 연소기관, 액체의 미립화 분야의 연구를 확장하시면서 오늘날의 연구실로 발전하였다. 따라서 현재의 연구실 구성원으로는 이창식 교수님의 지도하에 현재까지 박사 9명, 석사 60명을 배출하였고, 현재는 박사과정 5명, 석사과정에 7명이 각각의 연구활동에 전념하고 있다.



◆ 한양대학교 사자탑 앞에서(2001.1.19. 왼쪽으로부터 박성욱(석3), Jin Daxiang 연구원, 유선호(석1), 이창식교수님, 김대식(박4, 필자), 허성근(석4), 김명윤(석3), 김형준(석1), 전학식선생님)

\* 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정

본 연구실의 졸업생들은 국내외의 각 분야에서 학자, 중견 전문가로서 지도적인 역할을 하고 있으며, 특히 대학 및 자동차 관련 산업체에서 우리나라의 산업발전에 중추적인 역할을 담당하고 있고, 재학생들은 선배들의 연구업적에 뒤지지 않도록 젊은 패기와 열정을 가지고 자신의 맡은 연구분야에 최선을 다하고 있다.

본 연구실의 특징은 연소 및 연소기관, 에너지 변환 시스템의 열에너지 이용 극대화, 연비 저감 및 환경 문제에 대응하기 위한 연료의 미립화 및 고성능 저공해 연소기관 연구에 목표를 두고 이 분야의 선도적인 학문연구 및 실험을 통하여 훌륭한 전문가를 육성하고 있다.

실험실에서 보유하고 있는 주요 장비로는 엔진 동력계, 위상 도플러 입자 분석기, 단기통

가시화 엔진, 엔진 배기 가스 분석기, 엔진 연소 해석 시스템, 레이저 측정장비, 연소 및 내연기관, 각종 광학 장비 및 슐리렌 장치, 연료미립화 측정장치 등 열공학 분야 연구에 필요한 각종 실험 기기 등을 갖추고 있다.

본 연구실의 홈페이지 <http://coens.hanyang.ac.kr>를 통해 관련분야에 종사하는 여러분, 그리고 선배님들과 후배님들과의 정보교류가 활발히 이루어지기를 기대한다.

## 2. 연구 분야 및 연구 실적

본 연구실에서 수행한 연구 내용들은 에너지 변환 시스템의 열역학적 해석, 자동차용 가솔린 기관의 연소 특성, 수퍼차저 설계 및 적용기술, 연료 인젝터의 분무 거동 및 액주 분열 특성 연구, 연료 분무 미립화 및 연소, 디젤 엔진의 연소 인자와 질소산화물 배출 특성, 디젤 엔진의 과급 특성 및 과급 매칭 기술 개발, LPG 연료의 연소, LPG 엔진의 연소 시스템 개발, 저압축-고팽창비 엔진의 과급특성, 스크루 과급기의

성능 연구, 환상 선화 분류의 연소 특성, 가솔린엔진 인젝터의 분무 미립화 특성 평가, 엔진 내부 유동의 최적화 연구, 엔진 내부의 스윙 및 텀블 효과, 유동 가시화 및 레이저 계측과 응용기술 개발 등 엔진 연소와 연료분무 시스템 관련 기술에 관한 해석 및 실험적 연구를 수행하여 이 분야의 학문 발전과 기술개발에 기여하고 있다.

본 연구실에서 현재 수행중인 연구는 자동차용 엔진의 핵심기술이 되고 있는 엔진 연소 성능 향상 및 연료 분무, 분사 특성 개선에 의한 저공해 연소 기술 개발에 중점을 두고 디젤엔진의 배출물 저감에 관한 연구, NOx와 입자상 물질(Particulate Matter, P.M.)의 저감을 위한 청정 연소 기술 개발, 고압 인젝터의 분무 특성 연구, 액체 미립화 특성, 촉매 변환기의 성능해석, 정적 연소기 내의 연소, 연소기관 열역학 제2법칙 해석 등에 관한 연구를 수행하고 있다.

## 3. 연구 내용

본 연구실에서 이루어지고 있는 주요 연구 내용을 요약하여 소개하면 다음과 같다.

### ▶ 액체 미립화 및 연소 기관 인젝터의 연료 분무 특성에 관한 연구

각종 원동기 및 산업설비에 사용되는 연료 인젝터의 분무특성, 특히 액적의 미립화, 분무인젝터 시스템 기술 등에 관한 실험적 연구가 수행되고 있다. 저공해와 저연비를 동시에 만족할 수 있는 차세대 기관의 개발을 위한 설계 기술을 확립하기 위해서는 포트 분사식 또는 직접 분사식 가솔린기관 GDI 인젝터의 분무 거동 및 미립화 특성 등과 같은 분무 구조와 분열기구의 해석 및 연료 미립화를 촉진시킬 수 있는 다양한 미립화 기구들에 대한 연구가 필요하다.

따라서 이러한 관점에서 본 연구에서는



PMAS와 PDPA 시스템을 이용하여 각종 기관용 인젝터와 직접 분사식 가솔린 인젝터에서의 연료의 분열 과정, 분무의 관통도 및 분무각, 분무 액적 평균 입경, 분무 속도 등의 분무 특성을 파악하고, 이들의 상관 관계를 분석함으로써 적절한 인젝터 부착 위치, 연소실 형상, 유해 배출 가스 저감, 흡기 포트 설계 및 인젝터 최적 설계의 기본 자료를 제공하고자 한다.

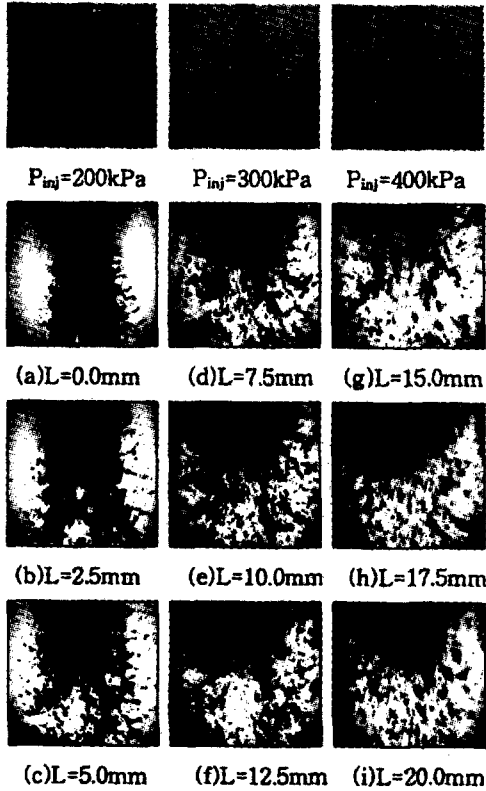
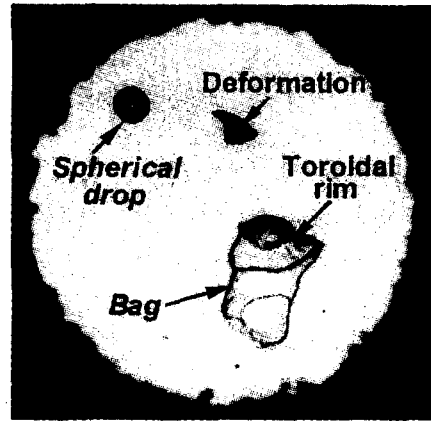


그림 1. 편롤형 인젝터의 연료 분열거동 (6.32(H)mm × 4.71(V)mm)

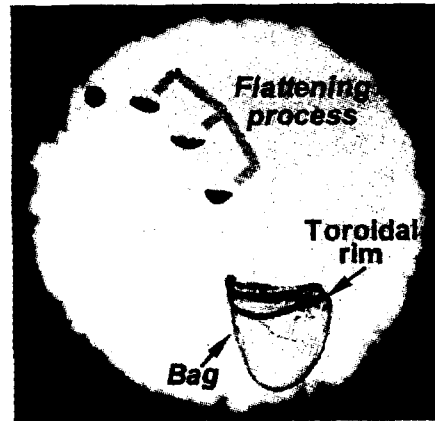
▶ 디젤기관의 고압 인젝터의 분무 특성에 관한 연구

최근 고압 커먼 레일식 디젤기관에 적용되는 고압인젝터의 제어 및 분무특성에 관한 연구를 수행하여 입자상물질 저감 및 연소특성을 개선하는 분무 시스템의 성능 향상에 관한 연구를 수행한다. 특히 초

고압 분사이므로 시스템 설계 및 분무 특성 실험 및 제어 시스템, 분무 미립화 특성을 규명하는 연구이다.



(a) Diesel fuel : We=78 (Nozzle : 100 μm)



(b) Water : We=78 (Nozzle : 75 μm)

그림 2. 액적의 Bag breakup 과정 비교

▶ 고속 액적의 분무 미립화에 관한 연구

액체의 미립화에 기본이 되는 액적의 미립화 거동을 액체의 점성, 분위기 조건, 공

기 속도 등에 대하여 비교 분석하여 액적 분무 과정을 규명하기 위한 기초 연구이다. 고속 기류 중에 액적을 일정 속도로 분사 하였을 때의 액적의 분무 거동을 분석하여 분무 액적의 분열 기구, 미립화 과정을 연구하는 액적 분열 기구에 관한 연구를 수행하고 있다.

이 연구는 액적이 고속 유동장 내에서 일어나는 분열 및 분무 형성 과정을 규명 하는 연구에 주안을 두고 있다.

▶ 가솔린 기관의 실린더 내 가스 유동 특성에 관한 연구

내연 기관의 실린더 내 유동은 연소실의 형상, 피스톤 헤드의 형상, 실린더 내의 공간 형상의 변화에 따라서 변화하며 이러한 실린더 내 가스 유동은 기관 성능 및 화염 전파 속도를 증가시키는 등 연소 과정에 큰 영향을 미치기 때문에 실린더 내의 텀블(tumble) 및 스윙(swirl) 유동은 연소특 성 개선에 매우 중요한 인자가 되고 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 실린더 내의 비정상 유동을 해석하고, 비정상 거시 유동 형태를 가시화하고 정량화를 위하여 흡입 및 압축시의 가스 유동 특성을 분석 한다. 또한 흡입 2밸브 기관의 주 유동 형태인 텀블 유동의 형성 및 소멸 과정을 레이저 시트법을 이용한 유동 가시화 및 입자 추적법을 이용한 거시 유동의 정량화를 시도하고, 흡입 때의 유동 특성을 여러 가지 기관의 작동 조건 및 기관의 변수들에 대하여 가시화 기법을 적용하여 규명한다. 이와 아울러 엔진 유동장 실험결과를 이론 적으로 해석한 결과와 비교하기 위해 유동 장 내의 이론 해석에 관한 전산 프로그램 연구를 병행하고 있다.

▶ SI 엔진의 과급 특성에 관한 연구

과급기를 부착하여 기관의 출력 성능을 개선하고, 비출력의 향상과 연비, 배기특성을 개선하기 위한 연구는 매우 중요한 기술이다.

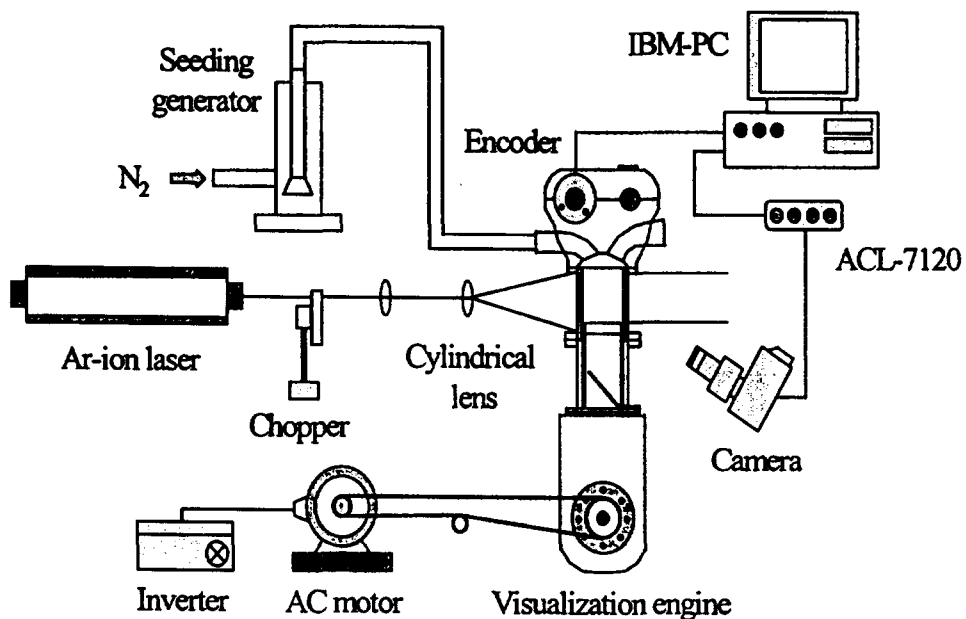


그림 3. 실린더내의 가스 유동 실험장치

1994년부터 시작된 과급에 관한 연구는 지금까지 2엽식, 3엽식(2 lobe, 3 lobe type) 슈퍼차저의 과급기 전용 성능 실험 장치를 설계 제작하고 성능 특성에 관한 연구와 엔진 적용 시험을 수행하였다.

또한 저압축 고폽창비 가솔린 기관의 성능 향상을 도모하기 위하여 3엽 루츠식 슈퍼차저의 과급 성능을 실험하고, 슈퍼차저 단체 성능 특성 및 과급기 적용 기관 성능 특성을 분석하였다. 저압축 고폽창비 기관에 적용할 과급기의 성능 특성을 구하기 위한 단체 성능 실험 기술과 기관 적용 기술을 확립하고, 과급기 온도, 압력, 유량 및 성능 특성 인자의 영향을 실험하여 과급기 관에 장착할 수 있는 과급기 성능 및 기관 적용 특성을 규명하는데 주안을 두고 있다.

▶ 균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 연소 기술 개발

디젤기관의 질소산화물(NOx)은 엔진 연소 온도가 높을수록 생성 농도가 증가하므로 연소

온도를 저하시키면 현저하게 저감되나 연소온도의 저하는 미연탄화수소(HC), 스모크(smoke), 미연 카본 등의 생성농도를 증가시켜 입자상 물질(P.M.) 농도가 증가하게 된다. 이와 같이 NOx와 P.M. 저감은 서로 상충되는 관계가 있으므로 이것을 해결하여 청정 연소를 달성하는 것은 매우 어려운 과제가 되고 있다.

본 연구에서는 예혼합 압축착화 엔진을 실현시키기 위하여 필요한 회박 예혼합기의 착화 및 연소의 제어에 관한 기초 지식을 확립하는 것을 목적으로 균일한 예혼합기를 공급할 수 있는 연료 시스템과 성능 측정용 단기통 실험 엔진을 구성하여 예혼합 압축 착화 엔진의 착화 및 연소 특성을 파악하고자 한다. 또한 예혼합기의 당량비, 엔진 회전속도, 흡기온도 등 운전 조건이 착화시기, 착화압력 및 연소 과정에 미치는 영향에 대하여도 분석한다.

예혼합 압축착화 엔진에 적합한 새로운 혼합 연료에 대한 적용성과 연소 특성을 실험하여 배출가스 중의 NOx, P.M. 저감 인자의 규명에 주안을 두어 배출물 정화를 위한 예혼합 압축 착화 연소기술을 확립하는 연구이다.

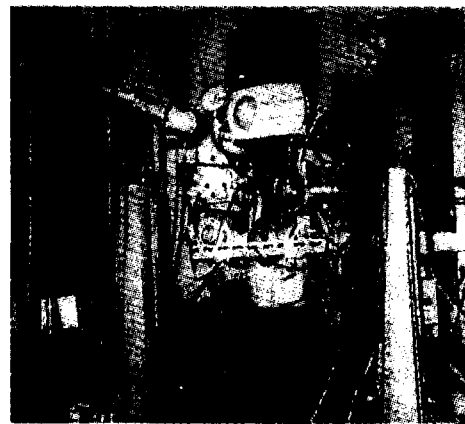


그림 4. 과급 실험 장치

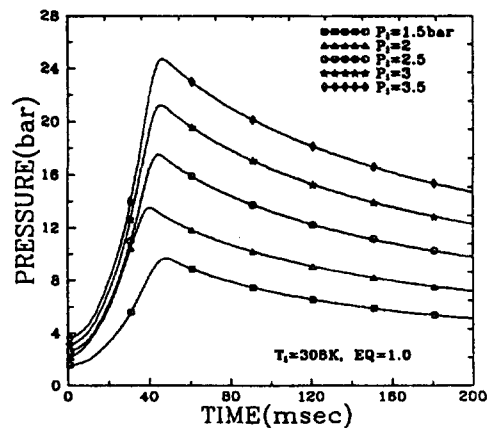


그림 5. 정적연소실 내의 압력변화

▶ 정적 연소실 내의 연소 특성에 관한 연구

정적 연소실내의 연소 및 화염 전파 과정, 연소 압력 및 정적 연소실내의 연소 및 화염 전파 과정, 연소 압력 및 온도, 연소실 내의 가스 유동, 연소율 등의 연소 특성을 연구하여 연소 기구와 연소 개선 등에 관한 연구를 수행하고 있다. 지금까지 기체

연료의 연소 특성과 가솔린 및 메탄을 혼합 연료의 연소 특성 등에 관한 연구가 수행되었다.

#### ▶ 에너지 변환 시스템의 열역학 제2법칙 해석에 관한 연구

각종 원동소에서 사용되는 연소 에너지 및 열에너지의 효율적인 이용과 효율 극대화를 위하여 에너지 시스템을 열역학 제1법칙, 열역학 제2법칙 해석을 통하여 유효에너지 이용 증진을 위한 연구를 수행하고 있다.

지금까지 증기 원동소의 엑서지 해석을 비롯하여 연소 기관의 제2법칙 해석 등에 관한 연구를 수행하여 에너지 변환 장치의 성능 향상에 필요한 열정산 및 열유동 해석에 관한 연구를 진행하고 있다. 이 연구는 연소기관, 연소 시스템, 증기 원동소 사이클 등에 적용하여 유효에너지 이용 증대에 대하여 연구하고 있다.

#### ▶ 순수 물질의 열역학적 물성 해석에 관한 연구

순수물질로서 공업적으로 가장 많이 사용되고 열역학적 물성 연구에 중요한 공업 증기의 상태 변화에 따른 열역학적 물성 해석에 관한 연구를 수행하고 있다. 이 연구는 압축액, 포화액, 포화증기, 과열증기의 각 영역에서 열물성에 영향을 미치는 여러 가지 인자들의 영향을 분석하여 증기의 열역학적 성질을 해석하는 연구이다.

### 4. 향후 연구 활동 및 연구 계획

현재 본 연구실에서는 열에너지 시스템의 열역학적 해석, 직분식 가솔린 엔진의 연료 미립화 특성, 디젤 엔진의 NOx와 P.M. 동시 저감 기술 개발, 디젤 연료 분사 시스템 및 분무 성능 개선에 관한 연구, 매연 저감 및 유해 배출물 저감을 위한 촉매 변환 시스템 연구 등에 연구를 계속적으로

집중해 나갈 예정이다. 또한 엔진 연소 현상의 기초가 되는 정적 연소실내의 연소 특성, 연소 인자의 영향 등에 관한 연구와 엔진 연소를 지배하는 요인이 되고 있는 연료 분무 특성, 연료 분무의 분열 거동 및 미립화 특성, 엔진 내 가스 유동 가시화, 정적 연소실 내의 화염 전파 및 연소 특성에 관한 연구를 계속해 나갈 계획이다. 아울러 가시화 연구를 병행하여 엔진연소 배출물 중의 유해 물질인 NOx, P.M., HC, CO<sub>2</sub>, CO 등의 유해 배출가스 저감에 기여하는 저공해 환경 엔진 기술 개발에 관한 연구를 수행하여 차세대 엔진의 기초가 되는 엔진 연소 및 연료 분사 시스템, 연료 분무 미립화 및 그 응용 기술 연구에 정진할 것이다.