

## 2유체 분무의 연소특성에 관한 실험 및 수치 해석적 연구

김 동일\* · 오 상헌\*\*

### Experimental and Numerical Study on Characteristics of Air-assisted Spray and Spray Flames

Kim Dong Il , Oh Sang Huen

**Key Words:** Spray Combustion, PDA, Numerical Model, SMD, Number Density

#### Abstract

Air-assisted atomizer flames are investigated numerically to study spray structures in nonburning and burning conditions based on experimental data. A PDA is used to measure droplet size, velocity, and number density for both nonburning and burning spray. Computations utilize time-averaged gas-phase equations and  $k-\epsilon$  turbulence model for simplicity. The major features of the liquid-phase model are that a SSF approach is used to represent the effect of gas-phase turbulence on droplet trajectories and vaporization, an infinite-diffusion model is employed to represent the transient liquid-phase process.

Computation and experiment results show that the droplet acceleration and evaporation proceed quickly in near the atomizer, characterizing high number densities and a strong convective effect. The primary combustion zone, however, is dominated by the gas phase reaction and exhibits a sheath combustion

---

\* 부산대학교 기계기술연구소

\*\* 부산대학교 기계공학부

## 기호설명

$C_D$	: drag coefficient	$p$	: pressure
$C_1, C_2, C$	: coefficients in turbulent model	$Re$	: drop Reynolds number
$D_p$	: drop diameter	$r$	: radial coordinate
$D_{32}$	: Sauter mean diameter	$Sp_\varphi$	: source term due to interactions between gas and drops
$G_k$	: turbulence energy production term	$S_\varphi$	: source term
$a$	: gravity	$s$	: standard deviation
$k$	: turbulent kinetic energy	$U, u, u'$	: instantaneous, mean and fluctuating axial velocity components
$L_e$	: eddy size	$V, v, v'$	: instantaneous, mean and fluctuating radial velocity components
$N$	: normal(Gaussian) distribution	$H$	: heat of vaporization
$n$	: number of drops represented by a computational drop	$L$	: enthalpy of vaporization
$P$	: present grid point	$f$	: mixture fraction
$\alpha$	: spatial constant	$g$	: fluctuation of mixture fraction
$\beta$	: mass fraction of mixture		
$Y$	: spatial distribution of mass fraction		
	<b>Subscript</b>		<b>Superscript</b>
$i$	: ith direction	$k$	: kth computational drop
$eff$	: effect	$x$	: x directional components
$I, J$	: index to identify a grid node	$y$	: y directional components
$p$	: dispersed phase	$m$	: mixture mass
		$ox$	: oxidizer
		$fu$	: fuel

## 1. 서 론

현재 이용되고 있는 내연 기관, 추진 기관, 로켓 엔진, 산업용 노에 이르기까지 가장 널리 사용되고 있는 연료는 석유계 액체 연료이다. 또한 액체 연료의 대부분은 원유로부터 추출되며 동력이나 에너지를 얻기 위하여 연소 과정을 거친다.

일반적으로 분무 연소 과정을 단계적으로 나누어 보면 첫째, 연소 실내에 분사되는 액체 연료의 표면적을 크게 하여 열과 질량전달률을 증가시켜서 연소를 촉진시키기 위한 미립화 과정, 둘째 미립화된 연료 액적들이 증발, 기체화되어 기체화된 연료와 주위의

산소가 혼합하여 가연성 혼합기를 형성하는 과정, 마지막으로 가연한계에 도달한 혼합기의 착화 연소 및 화학반응으로 인한 공해 물질의 생성 과정들로 구분되어진다. 따라서 분무 연소 과정은 대단히 복잡하기 때문에 연소 유동을 정확하게 실험적으로나 이론적으로 해석하기는 어려운 실정이다. 그러나 최근의 이론 및 광학 계측 장비의 발달은 분무연소의 정량적인 해석을 위한 분무 모델 개발에 기여를 하고 있다.

Williams등<sup>(1)</sup>은 액적의 직경, 속도, 시간 및 공간당 액적 수로 정의되는 통계적 분포 함수에 대한 보존 방정식을 통하여 분무를 모델화 하였다.

Chiu와 Liu<sup>(4)</sup>는 집단연소 모델을 제시하였고, Faeth<sup>(3)</sup>는 분무 연소를 해석하는 방법을 3가지로 구분하고 각각의 장단점을 비교하였다. 3가지 모델은 LHF(Locally Homogeneous Flow) 모델,

액적 운동에서 난류 변동의 효과를 무시한 DSF(Deterministic Separated Flow) 모델, 그리고 난류 변동의 효과를 고려한 SSF(Stochastic Separated Flow) 모델이다.

연소 반응 모델에 관한 연구로서 Spalding등<sup>(7)</sup>은 3가지의 모델을 비교, 검토하였는데 화학 평형 모델과 연료와 공기가 공간상으로는 같이 존재하나 각각 다른 시간대에 존재한다는 가정 하에 무한대 일 단계 반응을 하는 모델, 그리고 두 모델과는 달리 Arrhenius 형태의 반응률과 2-방정식 난류 모델에서 구한 난류 운동에너지와 소산률을 이용한 에디-브레이크 모델에서 구한 반응률을 서로 비교하여 최소치를 반응률의 척도로 삼는 모델<sup>(8)-(9)</sup>로 나누었다. 이들 연소모델은 적용이 한정적이고 확산 화염의 해석에 편중되어 있어서 Magnussen<sup>(10)</sup>은 이를 보완하여 예혼합화염과 분무 화염의 해석에도 적용 가능한 와-소산(eddy-break) 연소 모델을 제안하였다.

과도 액상 과정에 대한 연구는 Faeth<sup>(3)</sup>등에 의해 이루어졌고 Faeth는 얇은-액막 모델, 무한-확산 모델, 유한-확산 모델의 3가지 모델로 나누었다. 이에 더불어 Aggarwal과 Chitre<sup>(11)</sup>는 과도 액상 과정과 기체상 난류가 액적에 미치는 영향까지 고려한 1차원 분무 연소 모델을 제안하였다. 이들이 해석한 분무 연소 모델은 계산의 초기 조건을 분무의 증발 실험에서 도입했고, 계산에 국한되었기 때문에 실제 연소과정의 모델링과는 상당한 거리가 있다. Shuen<sup>(13)</sup>등은 개별 액적 화염을 무시하고 반응이 기류상에만 존재하는 난류 확산 화염을 분무 화염에 적용시켜 분무 모델링의 복잡성을 단순화 하였다.

그러나 연소가 가지고 있는 복잡한 제 특성, 즉 액적의 체적이 상대적으로 작고, 액적 충돌로 인한 분열과 유착, 그리고 과농 분무 영역내에서 액체의 분사, 미립화, 그리고 액적간 상호작용의 과정에 대한 불확실한 정보 등으로 정확도가 결여되어 있다. 회박분무라 할지라도 개발된 모델은 난류-액적, 난류-화학성분, 그리고 2상의 상호교환 작용에 대해 고려할 점이 아직도 많다.

본 논문의 목적은 분무 화염의 세세한 구조를 예측하기 위한 모델을 개발하는데 있다. 실험에서 얻은 액적의 크기, 수밀도, 그리고 속도 등의 정보를 이용하여 기초모델의 예측능력을 향상시키고, 비연소시 분무와 연소시 분무의 특징을 비교하여 실제 분무 화염의 구조에 어느 정도 정성적으로 부합하는지를 검증하였다.

본 논문에서는 기류상의 난류가 액적 분산과 증발에 미치는 영향을 고려했고, 과도 액상 과정에 무한 확산모델을 사용했다. 예전 연구에서는, 과도 액상과정 뿐만 아니라 기류상의 난류가 액적분산과 증발에 미치는 영향을 고려하지 않았거나, 불충분한 초기조건을 사용하였다. 본 논문은 연소시 액적의 속도, 크기, 그리고 수밀도 등의 정보와 화염의 온도, 속도 등의 상관관계를 고려하여 사용된 연소 모델의 약점을 보완하였다. 분무 실험의 어려움과 경제성을 고려해 불매 실험 결과와 정성적으로 접근하는 분무 연소 모델의 개발은 중요하다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1. 이론적 방법

#### 2.1.1 기류상 방정식

기류상에 대한 방정식은 광범위하게 사용되는  $k-\epsilon$  난류모델에 근거하고 있다. 선화가 없는 정상 축대칭 난류분류가 고려되었는데 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \varphi) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r}) \\ &\quad + S_{\varphi} + S_{p\varphi} \end{aligned} \quad (1)$$

기류상 방정식에 있는 변수  $\varphi$ 는 속도, 압력,  $k$ ,  $\epsilon$ , 에너지, 질량분율( $f$ ), 그리고 질량분율의 변동량( $g$ ) 등을 나타내고, 질량과 운동량의 생성항  $S_{p\varphi}$ 는 계산 격자(computational cell)  $j$ 를 통과하는 각 액적군  $i$ 의 질량과 운동량의 정미변화율을 계산함으로써 구했다<sup>(2)</sup>. 기류상에 대한 액적의 효과는 운동량을 생성할 뿐만 아니라 난류 구조에도 영향을 미친다. 그런데 액적의 존재로 인한 난류 변조 기법은 지금까지의 대부분의 이론적 연구에 적용되지 않았다. 본 연구에서는 과농 분무 영역을 검증하기 위해 이 기법을 도입하였다.

$$S_{pk} = \overline{US_{pu}} + \overline{VS_{pv}} - u \overline{S_{pu}} - v \overline{S_{pv}} \quad (2)$$

$$S_{p\varepsilon} = -C_3 \rho \frac{\varepsilon}{k} (\overline{u'S_{pu}} + \overline{v'S_{pv}}) \quad (3)$$

여기서  $C_3 = 1.5$

### 2.1.2 연소모델

연소 모델은 액적이 연료 증기원으로 작용하고 화학적 시간이 증발과 난류 혼합 시간보다 훨씬 짧다고 가정하였다.

본 연구에서는 상용의 백등유(Kerosene)를 연료로 사용했다. 실제 연소 반응은 수많은 연쇄반응이 일어나고, 중간 생성물이 존재하여 매우 복잡하지만, 연료와 산소가 무한 일단계반응으로 순간적으로 연소한다고 가정하였다.



무차원 혼합분률  $f$ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$f = (\beta_m - \beta_{m,ox}) / (\beta_{m,fu} - \beta_{m,ox})$$

여기서,  $\beta$ 는 복합질량분률로서 아래와 같이 정의한다.

$$\beta = Y_{ox} - i \cdot Y_{fu}$$

$\beta_{m,ox}$ ,  $\beta_{m,fu}$ 는 각각 산소, 연료의 유입 구에서의  $\beta$  값이고  $Y_{ox}$ ,  $Y_{fu}$ 는 각각 산소와 연료의 질량분률이고,  $i$ 는 이론 산소/연료비(질량)이다. 연소장에서 위 혼합분률  $f$ 는 격렬하게 변동한다. 변동하는 난류 연소장에서 질량분율과 온도를 구하기 위해 확률 밀도 함수(PDF)의 개념을 사용한다. 각 함수( $\varphi(f)$ )를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\overline{\varphi} = \int_0^1 \varphi(f) p(f) df \quad (4)$$

$$p(f) = \alpha \delta(f_-) + (1 - \alpha) \delta(f_+) \quad (5)$$

여기서  $\alpha$ 를 0.5로 두면 다음과 같이 기술

할 수 있다.

$$\bar{f} = (f_- + f_+) / 2$$

$$g = (\bar{f} - f_-)^2 = (f_+ - \bar{f})^2$$

$$f_- = \bar{f} - g^{\frac{1}{2}}, f_+ = \bar{f} + g^{\frac{1}{2}}$$

여기서  $f$ 와  $g$ 는 지배 방정식(1)을 통해 구할 수 있고, 연소장의 각 위치에서  $f_-$ ,  $f_+$ 를 얻는다. 그래서 식(5)에서 구한 확률 밀도 함수를 이용하여 식(4)를 통해 산소와 연료의 질량분률과 온도를 구할 수 있다. 본 연구에서 사용한 연소모델은 기체 확산화학 및 분무연소의 계산에 많이 사용되는 연소모델(즉, clipped Gaussian PDF 모델 등)에 비해 단순하다. 그러나 이 모델은 계산시간이 대단히 절약되어 경제성이 좋고 계산효율도 full PDF 모델에 비해 나쁘지 않다.

### 2.1.3 액체상 방정식

SSF 방법과 결합된 라그랑지안 해석은 난류 연소장 속에서 각각의 액적군이 운동할 때 그들의 물성치를 계산하기 위하여 도입했다. 실제적으로 이 전통적인 라그랑지안 해석은 복잡한 분무 연소장에 잘 부합되지 않는다. 이러한 분무 해석 모델의 약점 때문에 액적의 크기, 수 밀도, 그리고 속도와 같은 초기 자료의 정확성이 요구된다. 라그랑지안 방정식을 사용할 때의 주요한 가정은 직접적인 액적간 상호작용의 무시, 준정적 상태의 기체상, 복사효과와 항력 법칙, 반경험적인 관계로 도출되는 강제대류의 영향의 무시와 액적표면에서의 상 평형 등이다. 각각 액적군의 궤적을 따라 각각

의 액적군  $k$ 에 대한 위치, 속도, 그리고 크기의 변화를 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d x_{pi}^k}{dt} = U_{pi}^k \quad (6)$$

$$m^k \frac{d U_{pi}^k}{dt} = -\frac{\pi}{8} (D_p^k)^2 \rho C_D \times |U_{pi}^k - U_i| (U_{pi}^k - U_i) + a \quad (7)$$

여기서  $U_i = u_i + u_i'$

$$\frac{d D_p^k}{dt} = -2 \dot{m}^k \rho_p \quad (8)$$

액적표면에서의 연료증기의 질량분율은 상 평형 관계를 이용해서 구한다.

액적은 와의 수명(lifetime)  $\tau_e$ 와 와내의  $i$ 번째 계산액적의 잔류시간  $\tau_i'$ 중 최소의 시간에 대해 난류연소장의 와와 상호작용한다고 가정하였다.

SSF 모델은 기체상의 난류가 액적의 가열과 증발뿐만 아니라 액적의 궤적에 어떠한 영향을 미치는지를 기술키 위해 도입했다. Monte Carlo 방식은 난류와의 임의적인 분포와 만날때 각 액적의 샘플의 궤적을 계산키위해 사용했다. 연속상에서 적용하는  $k-\epsilon$  난류모델에 일관되게, 분산상에 의한 변동속도  $u'$ 은 가우스 분포함수에 의해 임의의 선택한다. 분산상의 순간 속도 성분은 식(6)의 비선형 상미분방정식을 축차적으로 적분함으로써 결정한다.

#### 2.1.4 과도 액상 과정

이 모델은 근본적으로 액체의 열적 관성력이 고려되고, 온도는 액적 내부에서는 일정하나 시간적으로 변화한다고 가정했

다. 액적 증발시 액적 내부의 열 확산은 전체의 액적 가열에 비해 거의 무시해도 되기 때문에 액적 내부의 온도변화를 고려치 않았다<sup>(11)</sup>. 액적에 대한 에너지 평형을 이용할때, 액체 온도의 순간적인 변화는 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{6 \dot{m}' (H-L)}{c_{pl} \rho_p D_p} \quad (9)$$

#### 2.1.5 수치해석 절차

본 연구에서 기류상의 지배방정식을 풀기위해 유한체적법(FVM)을 이용하여 이산화하고, Hybrid scheme을 대류항에 적용한다. 계산은 SIMPLE 방식에 의거하여 수행하고, 엇갈림 격자제를 사용했다.

그리고 분사되는 액적의 거동을 더욱 세밀하게 계산하기 위해서 축 중심부근에서는 격자의 간격을 좁게하고 축에서 멀어질 수록 그 간격이 넓어지는 축방향과 반경방향으로  $51 \times 51$ 개의 비균등간격 격자를 사용하였다.

#### 2.1.6 액적의 초기조건

계산에 필요한 초기 조건은 다음과 같다.

$D_{32}$	45 $\mu\text{m}$
최대 입경	100 $\mu\text{m}$
최대 분사각	25 °
초기분사 속도	40 m/s

액적의 궤적과 속도를 계산키 위해 10~100  $\mu\text{m}$ 까지 다른 직경을 가진 10개의 액적군을 사용했고, 액적군은 600개의 계산 액적으로 구성되어 있다. 액적군의 액적분포와 수밀도 분포는 Nukiya-

ma-Tanazawa 분포함수를 적용하였다. 액적의 초기 조건은 실험의  $Z = 2\text{mm}$  단면의 조건을 사용했다.

2.2.7 기류상의 경계조건

연속상의 분출속도 분포와 나머지 변수( $k, \epsilon, \rho$  등)는 TEACH 코드의 식을 수정하여 사용하였고, 노즐 벽면에서는 벽법칙을 적용했다. 중심축상에서는 각 변수의 반경방향 구배를 0으로 두었다.

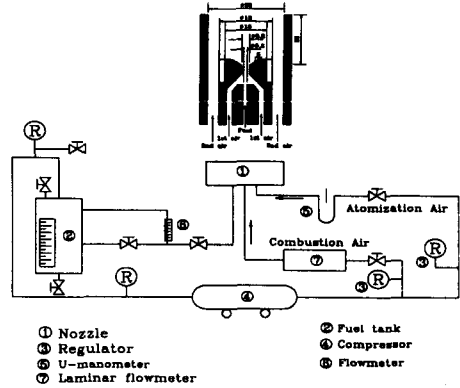


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2. 실험적 방법

2.2.1 실험장치

본 논문에 사용된 노즐과 실험장치의 개략도는 Fig.1에 나타난 것과 같으며 노즐은 air-assist 형으로서 연료의 분출 직경은 0.2mm이며 연료와 공기는 노즐 내부에서 혼합 - 미립화되는 2유체 노즐의 내부 혼합형으로 연료와 공기의 최종 분출 직경은  $\phi 3.2\text{mm}$ 이다. 본실험에 사용될 노즐은 부산대학교에서 개발한 것으로 화염의 안정성이 아주 뛰어나다. 또한 실험에 사용될 실험장치는 Fig.1의 개략도와 같이 공기 공급계와 연료 공급계로 크게 구분된다. 실험조건은 다음의 표와 같다.

Fuel flow rate (cc/min)	Atomization flow rate(l/min)	Combustion air rate(l/min)	Nonburning /burning
17.8	26.5	30	Nonburning
17.8	26.5	30	Burning

2.2.2 실험방법

액적의 크기 및 속도 등의 동시측정은 위상 도플러 입자 분석기(PDA)를 이용하여 수행했다. 이 방법은 액적에 의하여 산란된 도플러 신호의 위상차와 주기를 이용한 것으로서 현재 분무연소 연구에 활발히 사용되고 있다. Fig.2는 본 논문에 사용한 PDA 시스템의 개략도로서 최대 출력이 5W의 아르곤-이온 레이저, 전달부, 이송계, 수광부, 도플러 신호 처리계, 개인용 컴퓨터 등으로 구성되었다. 위상/도플러 방법은 액적의 크기가 위상차에 비례하는 것을 이용하여 위상차로부터 액적의 크기를 구하며 입자의 크기와 속도의 동시 측정이 가능하다.

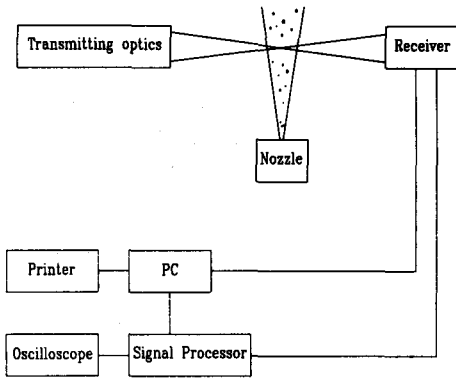


Fig.2 Schematic diagram of the optic system

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 온도분포

Fig.3은 화염의 평균온도분포를 축 방향거리  $Z=20\text{ mm}$ ,  $50\text{ mm}$ ,  $100\text{ mm}$  단면에서 반경방향에 따른 분포를 나타낸 것이며, Fig.5는 중심 축상에서 화염의 축방향에 따른 평균온도의 분포를 계산치와 실험치를 비교한 결과 이다.

Fig.3에서 실험치와 계산치 모두 축 중심으로부터 반경방향으로 일정거리에서 최고 온도를 나타내고 있는데, 전형적인 확산화염의 온도분포와 유사하다. 이러한 결과는 분무 중심부에서는 증발한 연료증기가 과농하여 화염의 형성이 어렵고 중심부의 연료증기는 분무군 외부로 확산하여 분무중심에서 떨어진 위치에서 외부로부터 유입된 공기와 반응하여 활발한 연소반응이 일어나기 때문이다. 각 단면에서 실험치와 계산치 결

과의 경향은 거의 일치하고 있다. 축 중심 부근의 불일치는 액적의 증발이 비교적 실제보다 느리게 일어나기 때문에 온도의 상승에 영향을 미쳐 다소 낮은

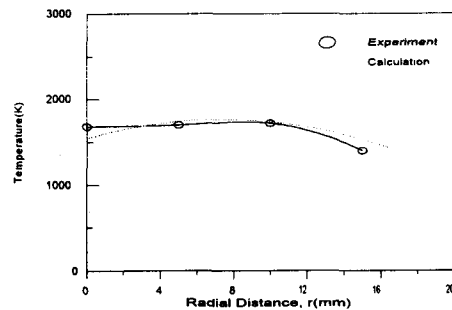
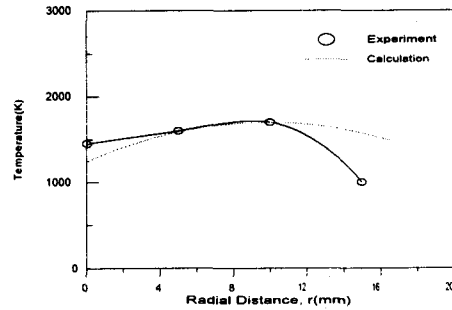
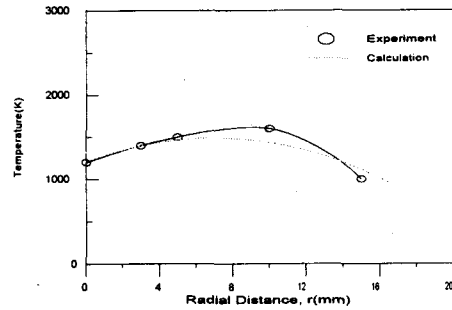


Fig.3 Radial Distributions of Temperature for Spray Flames ( $Z=20,50,100\text{ mm}$ )

온도를 나타내고 있다. 이러한 결과는 실험에서 사용한 노즐이 내부혼합형으로 미립화가 대단히 양호하기 때문에 작은 액적이 빠른 시간에 증발하나, 계산에서



는 다소 큰 액적이 잔존하기 때문에 증발이 실제보다 늦다. 그러나 온도가 최고점에 도달한 후, 즉 반응이 활발해지면 실험결과보다 다소 높은 온도분포를 보인다. 이 과도한 온도상승은 1단계 연소반응으로 가정한 반응모델의 한계, 계산과정에서 복사효과와 발생하는 그을름(soot)의 무시, 그리고 기존의  $k-\epsilon$  난류모델에 의한 난류혼합 효과(turbulent mixing)가 부정확하기 때문이다.

Fig.4는 축 방향을 따르는 온도분포를 나타내는 결과인데 실험에서 미립화 및 증발이 급속히 이루어 지기 때문에 사용한 모델의 계산결과와 비교할 때 상류영역에서 실험결과는 계산결과보다 높게 나타나고 있다.

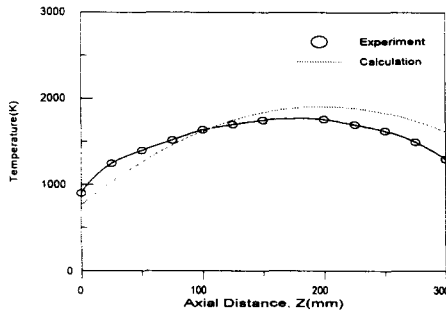


Fig.4 Axial Distributions of Temperature for Spray Flames

실험치는 축 중심부터 서서히 상승하여  $Z=180\sim 200$  mm 부근에서 최고온도 (1750K)를 나타낸다. 그리고 계산치는  $Z=200$  mm 전후에서 최고온도(1840K)에 도달한다.  $Z=50$  mm에서 150 mm까지의 중심영역은 과농한 연료층기가 존재하는 영역이고, 최고온도 부근의 영역( $Z=180\sim 200$  mm)에서 연소반응이 활발히 일어남을 실험과 계산결과가 모두 나타내

고 있다.

### 3.2. 액적의 SMD분포

Fig.5는 축 방향거리  $Z=50$  mm, 100 mm 단면에서 비연소시와 연소시 SMD 분포를 실험 및 계산결과를 비교한 것이다.

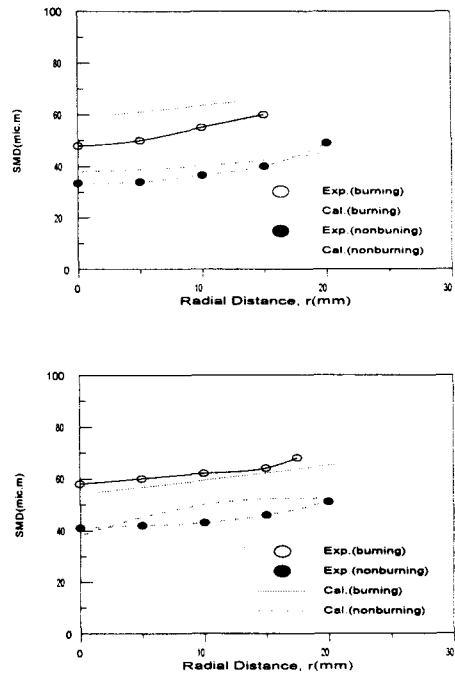


Fig.5 Distributions of SMD for Burning & Nonburning Spray ( $Z=50,100$  mm)

각 단면에서 모두 연소시가 비연소시 보다 SMD 분포가 크다.  $Z=50$  mm 단면에서 연소시 액적의 크기는 비연소시 보다 분무중심에서  $17\mu\text{m}$  정도, 외측에서는  $25\mu\text{m}$  정도 증가하였다.  $Z=100$  mm 단면에서도 유사한 결과를 보인다. 연소시 액적의 크기가 증가하는 것은 화염에 의한 고온으로 액적이 증발할때 체적에 비해 상대적으로 큰 표면적을 가진 직경이 작

은 액적의 빠른 증발로 인해 연소시 액적의 SMD는 증가한다. 또한 분무중심보다 외측에서 비연소시와 연소시 액적의 크기에 상대적으로 큰 차이가 발생하는 것은 화염에 의하여 중심부보다 분무군 외부영역에서 빨리 증발하기 때문이다. 비연소시 계산치와 실험치는 각 단면에서 잘 부합하고 있으나, 연소시 50 mm 단면에서 실험치보다 다소 큰 분포를 나타내고 있다. 이는 온도분포에서 보았듯이 증발율이 다소 느리고 미립화 과정이 정확하게 묘사되지 못했기 때문에 큰 액적이 다소 존재하기 때문이다. 그러나 Z=100 mm 단면에서는 액적의 증발이 거의 완료되었기 때문에 실험결과보다 약간 작으나 정성적으로 잘 일치하고 있다.

### 3.3. 액적의 속도분포

Fig.6은 Z=50 mm, 100 mm 단면에서 연소시와 비연소시의 반경방향에 따른 액적의 축 방향 속도 분포를 실험치와 계산치를 비교 도시하였다.

각 단면 모두 연소시 속도가 비연소시 속도보다 월등히 크게 나타나고 있다. 이는 비연소시에 비해 연소시 액적의 저항력이 감소하고, 고온가스의 체적 팽창 및 액적 수밀도 등이 감소하기 때문에 액적의 속도가 크게 증가한다. 따라서 분무군 외측보다 중심영역에서 속도가 크게 증가한 것은 액적의 증발에 의한 체적의 급격한 증가가 이루어짐을 알 수 있다. 비연소시 계산치는 실험치에 잘 일치하나 실험치보다 반경방향으로의 확산이 작다. 이는 계산에 사용한 액적수가 실제보다 작고 외부에서 유인되는 공

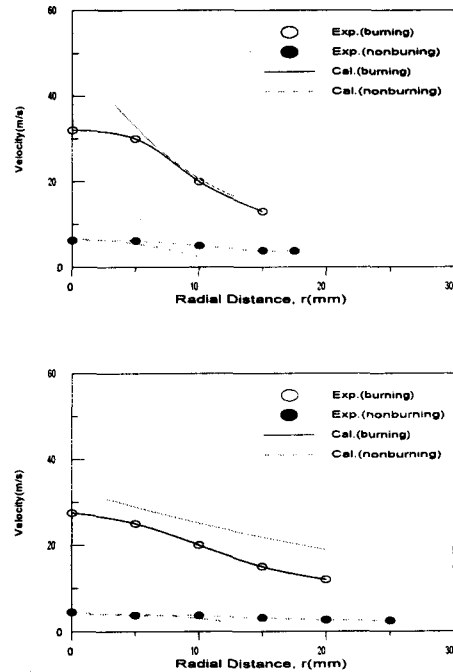


Fig.6 Distributions of Axial Drop Velocity for Burning & Nonburning Spray (Z=50,100 mm)

기량을 고려하지않아 감속이 빨리 일어나고 분산도 작다. 비연소시 보다 연소시 계산치가 외측으로 확산한 것은 연소시 가스장의 속도가 상류에서는 빠르지만 하류로 갈수록 팽창이 줄어 속도가 액적보다 작기 때문이다. 연소시 두 단면에서 계산치가 실험치보다 다소 크게 나타났다. 이러한 현상은 분무 중심에서 액적 증발이 실제보다 과소 평가되어 실제보다 큰 액적이 잔존하고, 외각으로 갈수록 반응이 실제보다 활발해져 고온가스의 체적 팽창과 액적 수밀도 등의 감소가 두드러지기 때문이다.

Fig.7은 축 중심에서 축 방향 액적의 속도를 연소시 및 비연소시의 결과를 나

타내었다. 비연소시 노즐부근을 제외하고는 실험치와 계산치가 잘 부합하고 있다.

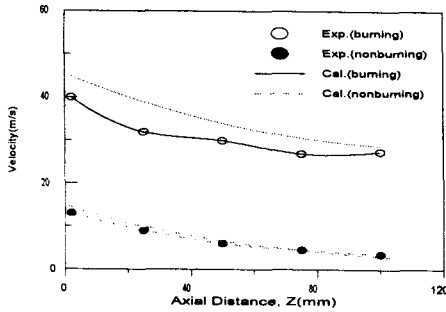


Fig.7 Axial Variations of Drop Velocity for Burning & Nonburning Spray

반경방향으로의 속도분포와 유사하게 연소시에 비해 3~4 배정도의 속도차가 하류까지 유지되고 있다. 연소시 속도분포는 상류에서 계산치가 다소 크다. 이는 축방향으로의 온도분포에서 보았듯이 100mm 단면 근방까지 실제보다 큰 액적이 계산시에 잔존하기 때문이다. 그리고 100mm 단면에 이르면서 두 결과가 비슷해짐을 알 수 있다.

Fig.8은 축 방향 변화에 따른 주위 기체와 액적간의 상대속도 분포의 계산 결과를 보여 주고 있다. 비연소시는 노즐 선단부근을 제외한 대부분의 영역에서 주위 공기의 속도보다 액적의 속도가 빠르기 때문에 하류로 갈수록 상대속도는 점차 줄어든다. 연소시는 노즐 선단의 급격한 연소반응으로 인해 액적의 가속화 영역이 확대된다. 상류지역에서는 액적들의 증발과 연소반응에 의한 혼합기의 급격한 팽창때문에 가스의 속도가 액적에 비해 대단히 빠르고, 하류로 갈수록 혼합기의 팽창이 감소하여 주위 유

동장 보다 잔존 입자의 속도가 빠르다. 그래서 상류지역에서 상대속도는 최고점에서 급격히 감소하고 서서히 하류로 갈수록 증가한다. 상대속도가 증가할수록 유인되는 공기량이 많아지기 때문에 연소반응은 분무의측에서 활발하다.

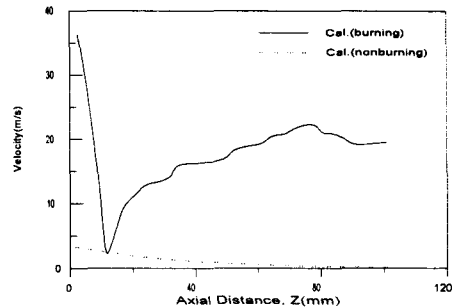


Fig.8 Axial Variations of Relative Velocity for Burning & Nonburning Spray

### 3.4. 액적의 수밀도분포

Fig.9는 Z=50 mm, 100 mm 단면의 비연소 및 연소시 수밀도 분포를 계산치와 실험치를 비교하여 나타낸 것이다.

Z=50 mm 단면에서 비연소시 결과에 비해 연소시 결과는 실험 및 계산에서 모두 급격한 감소를 보이고 있다. 그리고 Z=100 mm 단면의 연소시 수밀도 분포는 거의 증발하여 소멸 하였음을 나타낸다. 비연소시의 경우 하류로 감에 따라 액적의 분산으로 인해 축 중심부분은 수밀도가 감소하고 축 중심에서 떨어진 영역은 증가하는 현상을 보이고 있다. 연소시 액적의 수밀도 분포는 50~100 mm 단면에서 거의 소멸하여 액적 증발은 분무군의 상류지역에서 급격히 이루어짐을 실험치 및 계산치에서 알 수 있다. 그래서 하류로 갈수록 가스확산화염과 유사

한 현상을 나타낸다.

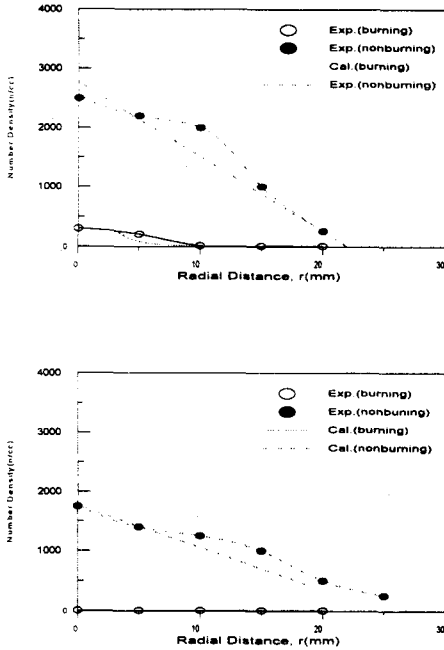


Fig.9 Distributions of Number Density for Burning & Nonburning Spray ( $Z=50,100$  mm)

분무연소의 해석시 액적의 SMD와 수밀도 분포는 실험결과에 의한 초기분포의 정확도에 의해 큰 영향을 받기 때문에 상류지역보다는 하류로 갈수록 실험치와 잘 일치하고 있다. 따라서 두 분포의 계산은 액적이 과농한 영역, 즉 노즐 선단 부근의 2상 혼합영역에서의 보다 정확한 실험 결과를 이용하면 신뢰성을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

백등유를 이용한 2 유체 분사 노즐에 의하여 형성된 분무에 대하여 비연소 및 연소시의 분무특성을 실험과 계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 분무화염에 대한 온도분포를 실험치와 계산치를 비교한 결과 노즐 선단 근처에서 잔존하는 큰 액적때문에 실험치가 약간 크고, 분무외각으로 갈수록 반응이 실제보다 활발한 계산치가 크다.
- ② 연소시 액적의 SMD 분포는 작은 액적들이 상대적으로 빨리 증발함으로서 비연소시 액적의 SMD 보다 증가하였다. 비연소시는 계산치와 실험치가 정성적인 경향이 일치하나, 연소시 실제보다 큰 액적의 존재로 상류쪽에서 계산결과가 크다.
- ③ 연소시 액적의 속도는 비연소시 액적의 속도보다 월등히 크다. 비연소시 속도분포는 두 결과가 잘 일치하나, 액적의 확산을 과소평가하였다. 이에 반해 연소시 결과는 분무중심부의 속도가 큰 액적의 잔존과 외측에서의 과도한 온도 상승으로 인해 계산결과가 실험치 보다 큰 분포를 나타내었다. 또한, 상대속도를 비교한 결과 노즐 선단의 상류지역에서는 가스의 속도가 액적의 속도보다 빠르나 하류로 감에 따라 액적의 속도가 빠르다.

#### 후기

이 연구는 1997년도 학술진흥재단의 도움으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Williams, F.A., "Progress in Spray Combustion Analysis," 8th Symp.(Int.) on Combustion, pp.50~59, 1962.
- (2) Crowe, C.T., Sharma, M. P. and Stock, D. E., "The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flow", J. Fluids Eng., pp.325~383, 1978.
- (3) Faeth, G.M., "Mixing, Transport and Combustion in Sprays", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.13, pp. 293-345, 1987.
- (4) Chiu, H.H., and Liu, T.M., "Group Combustion of Liquid Droplets," Combustion and Science and Technology, Vol.17, pp.127~142, 1977.
- (5) Shearer, A.J., Tamura, H. and Faeth, G.M., "Evaluation of a Locally Homogeneous Flow Model of Spray Evaporation," J. Energy, Vol3, No5, pp.271-278, 1979.
- (6) Solomon, A.S.P., Shuen, J.S., Zhang, Q.F. and Faeth, G.M., "Structure of Nonevaporating Spray, Part II: Drop and Turbulence Properties," AIAA J. Vol.23, No.11, pp.1724~1730, 1985.
- (7) Khalil, E.E., Spalding, D.B. and Witelaw, J.H., "The Calculation of Local Flow Properties in Two-Dimensional Furnaces," Int. J. Heat and Transfer, Vol.18, pp.775~791, 1975.
- (8) Spalding, D.B., "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames," 13th Symp.(Int.) on Combustion, pp.649~657, 1967.
- (9) Spalding, D.B., "Development of Eddy-Breakup Model of Turbulent Combustion," 16th Symp.(Int.) on Combustion, pp.1657, 1976.
- (10) Magunussen, B.F. and Hjertager, B.H., "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," 16th Symp.(Int.) on Combustion, pp.719~728, 1970.
- (11) Aggarwal, S.K., and Chitre, S., "Computations of Turbulent Evaporating Sprays," J. of Propulsion and Power 7(2), pp.213~220, 1991.
- (12) Aggarwal, S.K., and Chitre, S., "On the Structure of Unconfined Turbulent Spray Flames," Combust. Sci. and Tech., Vol.81, pp.97~113, 1992.
- (13) Shuen, J.S., Solomon, A.S.P., and Faeth, G.M., "Drop-Turbulence Interaction in a Diffusion Flame," AIAA. J., Vol.24, No.1, pp.101~108, 1986
- (14) 백민수, 오상현, "2유체 분사노즐을 이용한 분무 및 연소특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제2호, pp.548~558, 1995