

<論 文>

액체연료의 분사연소시 분사조건이 화염과  
액적군의 성질에 미치는 영향

김 호 영\*

(1984년 1월 23일 접수)

The Effects of Spray Parameters on the Flame and Spray  
Characteristics for Liquid Fuel Spray Flame

Ho Young Kim

Abstract

In order to examine the effect of initial spray condition on the spray combustion mode and flame characteristics, theoretical analysis was carried out to predict combustion mode and flame structure for various initial distribution of droplets in spray. A system of conservation equations of spray flame in two dimensional axisymmetric for two phase flow was solved by a discrete element method for *n*-Butylbenzen ( $C_{10}H_{14}$ ).

As a results of present study, there are two principal group combustion modes that may occur independently for various initial group combustion numbers in a spray burner. These group combustion modes are termed as an external and internal group combustion mode. The critical group combustion number between the internal and external group combustion mode and the flame characteristics of those flame are also predicted. These results may be used as a basic data in the designing of new combustors as well as proper operating conditions for spray burners.

기 호 설 명

$a$  : 액적의 반경

$B$  : 질량전달수

$b$  : 상수 (증발만 일어날 때 :  $b=0$ , 연소가 일어날 때 :  $b=1$ )

$C_p$  : 기체의 정압비열

$G$  : 두번째 종류의 점단연소수

$K$  : Damkohler 수

$L_b$  : 액체연료의 증발잠열

$N$  : 수밀도(drops/cc)

$n$  : 무차원화한 수밀도

$q_0$  : 연소열

$r$  : 무차원화된 반경방향 좌표

$Re$  : 레이놀즈수

$R_0$  : 초기상태의 액적군의 반경

$r_f$  : 무차원화된 화염의 위치

$T$  : 무차원 기체온도

$T_b$  : 액체연료의 무차원 비등온도

$u^i$  :  $i$ 상에 대한 무차원 축방향속도

$v^i$  :  $i$ 상에 대한 무차원 반경방향속도

$w^i$  :  $i$ 상에 대한 속도 벡터

$W_i$  :  $i$ 성분의 분자량

$x$  : 무차원 축방향 좌표

그리스 문자

$\alpha^i$  :  $i$ 성분의 질량에 대한 Shavab-Zeldovich 변수

\* 정희원, 고려대학교 기계공학과

- $\lambda$  : 기체의 열전도계수  
 $\mu$  : 기체의 점성계수  
 $\nu$  : 기체의 동점성계수  
 $\nu_i$  :  $i$  성분에 대한 Stoichiometric 계수  
 $\zeta$  : 무차원화한 액적의 반경  
 $\rho^i$  :  $i$  상에 대한 밀도

#### 첨 자

- $O$  : 산소  
 $F$  : 연료  
 $o$  : 초기상태  
 $p$  : 액체상  
 $g$  : 기체상

## 1. 서 론

현재 액체연료를 사용하는 대부분의 연소기들은 연료를 노즐을 통하여 분사시켜 작은 크기의 액체들로 구성되는 액적군(spray cloud)을 형성시켜, 증발된 연료가 착화되어 연소하는 분사연소(spray combustion) 방법을 채택하고 있다. 연료를 절약하고 출력을 증대시키기 위하여, 이들 연소기에 대하여는 운전조건의 확립 및 성능향상과 새로운 연소기의 개발에 주력하고 있으며, 이 목적을 달성시키기 위하여 분사연소시 화염의 성질 및 연소상태를 규명하려는 데 초점을 맞추고 있다.

현재까지의 액적분사연소에 관한 연구들<sup>(1-15)</sup>의 결과로는 연소상태 및 화염의 성질은 액적과 액적, 액적과 주위 기체간의 집합상관작용(Collective interaction)에 크게 영향을 받는다고 보고되었다. Chiu et al.<sup>(1-3)</sup>은 이 집합상관작용을 집단연소(group combustion)라는 단어로 표현하여 왔으며, 지금까지도 이용하는 고전적인 이론인 액적군내의 액적들은 각각의 개별적인 화염을 액적주위에 형성하며 연소한다는 개념에, 실제 연소상태는 상반된다는 것을 증명하였다. 즉 실제 연소기내의 액적들의 상태는 하나의 균을 이루어 유동하며 연소하므로, 액적군(spray cloud) 중심부에는 공기가 침투하지 못하고, 증발되어 기체화된 연료만이 존재하며, 이곳은 산소의 결핍으로 인하여 착화연소되지 못한다. 이 기체화된 연료는 외부로의 대류와 확산으로 인하여 주위 공기중 산소와 혼합, 커다란 외피화염(envelope flame)을 형성하며 기체확산화염(gaseous diffusion flame)과 비슷하게 연소한다는 것을 이론적으로 증명하였다. 또한 이 현상들은 Chigier et al.<sup>(13-15)</sup>와 Onuma와 Ogasawara<sup>(6,9)</sup> 등에 의하여 실험적으로 관찰되었다. 이 집단연소현상을 간략히 보면 다음과 같

다<sup>(16,17)</sup>. 액적군 내부에서 증발된 연료는 연료의 확산강도에 따라 액적군 외부 또는 내부 어느위치에 외피화염을 형성 연소한다. 이 연소상태를 단일액적 연소(single droplet combustion) 현상과 구별하기 위하여 집단연소상태라 하며, 액적군내의 액적들의 분포상태가 조밀하여 기체화된 연료의 확산강도가 클 때 외피화염이 액적군 외부에 형성되는 연소상태를 외부집단연소(external group combustion)라 하고, 확산강도가 약할 때 즉 액적들의 분포가 희박할 때 외피화염은 액적군 내부의 어떤 위치에서 형성되며, 외피화염 내부의 액적들은 증발만 하고 외부의 액적들은 단일액적 연소상태로 연소하는 형태를 내부집단연소(internal group combustion)라 한다.

Chiu et al.<sup>(1,3)</sup>은 정지된 구(sphere)의 형태를 가진 액적군이 연소할 때의 상태를 이론적으로 해석한 결과, 위에 언급한 집단연소 현상이 일어남을 입증 하였으며, 또한 분사액적연소에 대한 이론적인 연구들<sup>(2,4,10-12)</sup>과 실험적인 연구들<sup>(4-7,13-15)</sup>의 결과들도 발표되었다. 이들의<sup>(2,4,10)</sup> 해석은 먼저 연소상태를 가정한 후 그 틀에 맞는 연소현상 및 화염의 성질들을 해석하였으므로 연소상태를 예측하지 못하고 있다. Kim과 Chiu<sup>(11,12)</sup>는 연소상태를 가정하지 않고 액적들의 분포상태에 따라 연소상태 및 화염의 성질을 예측하는 방법을 제시하여 현상을 해석하였다.

본 연구는 Kim과 Chiu<sup>(11,12)</sup>가 사용한 연속체 관점에서 유도된 액체-기체상의 2상유동모델(Two Phase Flow: TPF)<sup>(21,22)</sup>을 이용하여 초기 집단연소수(group combustion number)<sup>(1-3,11,12)</sup>의 크기, 즉 액적들의 초기 분포상태에 따른 연소상태를 예측 분류한다. 또한 이때 예측된 대표적인 연소상태에서 형성되는 화염의 성질을 비교 검토한다.

## 2. 이론해석

### 2.1. 지배방정식

액체연료를 노즐을 통하여 분사시켜 미립화된 액적들의 상태로 연소시키는 유동은 기체-액체의 2상유동으로 구성된다. 본 연구에서는 Fig. 1에서 보여주는 바와같이 2차원 축대칭 원통좌표에서 분사제트의 형태를 택하였다. 화염은 확산화염(diffusion flame)으로 산소는 액적군 외부의 공기로 부터 공급되며, 연료는 액적들이 증발하여 공급된다.

이론적인 해석을 보다 간편하게 하기 위하여, 기체는 준정상상태(quasi-steady)이며, 액적의 온도는 연료

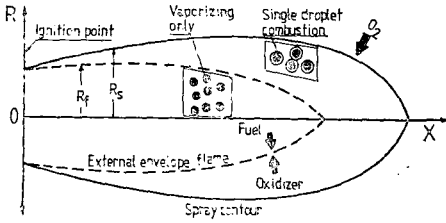


Fig. 1 Schematics of spray combustion flame

의 비등온도 이고, 기체성분들의 확산계수는 같으며 Lewis 수는 1로 가정하였다. 또한 분사되어 유동하는 액적들은 서로 충돌하여 결합 또는 분리되지 않고, 연소시 화학반응의 속도는 연료의 확산속도에 비하여 무한히 빠르다고 가정하였다. 이 가정들은 유동과 화염의 성질에 크게 영향을 주지 않는 일반적인 가정들이다<sup>(19,20)</sup>.

원통좌표에서 기체상과 액체상에 대한 보존방정식들은 2상유동에 대하여 각각의 질량의 증감을 고려한 보존방정식<sup>(21,22)</sup>들을 사용하였으며, 무차원화한 방정식들은 다음과 같다.

연속방정식

○기체상에 대하여

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\theta u^g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho\theta v^g) = Gfn\zeta \quad (1)$$

○액체상에 대하여

$$\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon u^l) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\epsilon v^l) = -Gfn\zeta \quad (2)$$

이때  $\epsilon$ 은 단위체적의 기체-액적 혼합기내의 액적들이 차지하는 체적이며,  $\theta$ 는 기체가 차지하는 체적이다. 또한 단위체적의 혼합기 내의 액적들의 총 연소율(burning rate) 또는 증발율(vaporization rate)은 각각의 액적들에 대한 합을 사용했으며, 준정상 상태에서 대류의 영향을 고려한 단일액적에 대한 증발 또는 연소율은<sup>(23,24)</sup> 다음 식을 이용하였다.

$$\dot{m} = \left( \frac{4\pi a\lambda}{C_p} \right) \ln(1+B)(1+0.276Re_p^{1/2}Pr^{1/3})$$

$$Re_p = \frac{2\rho^* a |v^* - v^g|}{\mu}$$

$B$ 는 질량전달수(mass transfer number)로써 증발할 때와 연소가 일어날 때 각각 그에 대응하는 값을 갖는다.  $f$ 와  $G$ 는 비연소율함수(specific burning rate function)와 집단연소수이며, 다음 식들로 표시된다.

$$f = \ln \left[ 1 + \frac{C_p T_0 (T - T_b)}{L_h} + bq_0 \alpha^0 \right]$$

$$G = \frac{4\pi\lambda a NR_0}{\rho^* C_p U_0} (1 + 0.276Re_p^{1/2}Sc^{1/3})$$

2상유동에서는 액적들과 주위의 기체간에 공기역학

적인 항력과 증발에 따른 질량의 증감으로 운동량의 전달이 일어난다. 또한 분사시 노즐의 형태에 따라 초기 분사각이 정하여지므로 반경방향의 운동량 전달을 무시할 수 없으므로, 본 해석에서는 액체상에 대한 반경방향 운동방정식을 사용하였다.

운동방정식

○기체상에 대하여

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho\theta u^g u^g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho\theta u^g v^g) \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r\theta}{Re_0} \frac{\partial u^g}{\partial r} \right) - S_a + S_m \end{aligned} \quad (3)$$

○액체상에 대하여

$x$ -방향

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon u^l u^l) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\epsilon v^l u^l) \\ = -S_m \frac{\rho_0}{\rho^*} + S_a \end{aligned} \quad (4)$$

$r$ -방향

$$\begin{aligned} u^* \frac{\partial v^*}{\partial x} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial r} = \left( \frac{9Re_0^2 \rho_0}{2Re_0 a_0^2 \zeta^2 \rho^*} \right) \\ \left( 1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right) (v^* - v^g) \end{aligned} \quad (5)$$

$$Re_0 = \frac{U_0 R_0}{\nu}$$

여기에서  $S_a$ 와  $S_m$ 은 공기역학적인 항력항과 증발에 의한 운동량 전달을 고려한 항으로 다음 식으로 표시된다.

$$S_a = \left( \frac{6\pi R_0^2 a_0 N_0 n \zeta}{Re_0} \right) \left( 1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right) (u^* - u^g)$$

$$S_m = Gfn\zeta u^*$$

연소 유동장내에서는 액적들과 주위의 높은 온도를 갖는 기체간에 전도, 대류, 복사는 물론 증발 및 연소로 인하여 복합적인 열전달이 일어난다. 이 현상들을 생성소멸항에 고려한 에너지 보존방정식은 다음과 같다. |

에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho\theta u^g T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho\theta v^g T) \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r\theta}{Re_p Pr} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + S_e \end{aligned} \quad (6)$$

생성소멸항  $S_e$ 는

$$\begin{aligned} S_e = \left( \frac{Gfn\zeta}{C_p T_0} \right) \left[ \frac{bq_0}{W_r \nu^*} \right. \\ \left. - L_h \left\{ 1 + \frac{1}{(1+0.276Re_p^{1/2}Pr^{1/3})} \right\} \right] \end{aligned}$$

본 해석에서는 기체성분으로 연료와 산소가 화학반응, 연소한다는 1단계 화학반응으로 가정하여, 산소와 연료성분만을 고려하였다. Shavab-Zeldovich 변수를 사용한 성분보존방정식(species conservation equa-

tion)은 다음과 같다.

성분보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho\theta u^* \alpha^i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho\theta v^* \alpha^i) \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r\rho\theta}{Re_0 S_c} \frac{\partial \alpha^i}{\partial r} \right) - S_i \end{aligned} \quad (7)$$

생성소멸항  $S_i$ 와 첨자  $i$ 는

$$S_i = \frac{Gf n_i^*}{W_{F\nu F}} \text{이고 } i=0 \text{는 산소, } i=F \text{는 연료이다.}$$

액적군은 하류방향으로 유동함에 따라 분포상태, 즉 수밀도(number density) 및 액적의 크기가 변한다. 이들에 대한 방정식들은 다음과 같다.

액적군 수밀도 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(u^* n) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r v^* n) = 0 \quad (8)$$

액적반경변화 방정식

$$u^* \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v^* \frac{\partial \zeta}{\partial r} = - \frac{Kf}{\zeta} \quad (9)$$

$K$ 는 Damkohler 수로 해석될 수 있으며, 액적의 존재시간(residence time)과 액적의 증발특성시간(characteristic vaporization time)의 비로써 다음과 같이 표현된다.

$$K = \left( \frac{\lambda R_0}{C_p a_0^3 \rho^* U_0} \right) (1 + 0.276 Re_0^{1/2} Pr^{1/3})$$

또한 기체의 밀도변화를 고려하기 위하여 다음과 같은 이상혼합기체(ideal gas mixture)의 상태방정식<sup>(23)</sup>을 사용하였다.

상태방정식

$$\rho = \frac{p}{RT_0 T \rho_0} \left[ \frac{W_p}{\alpha^F \nu_F (W_F - W_p) + \alpha^0 \nu_0 (W_p - W_0)} \right] \quad (10)$$

여기에 첨자  $p$ 는 생성물을 나타낸다.

## 2.2. 경계 및 계면조건

2차원 축대칭 원통좌표의 분사액적연소 유동장에서 경계 및 계면(interface)조건들은 다음과 같다.

제트의 유동축에 대하여는 축대칭으로 부터,

$$\begin{aligned} r=0, \quad x \geq 0 \\ \frac{\partial \beta}{\partial r} = 0, \quad v^* = v^* = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

계면인 외피화염에서,

$$\begin{aligned} r=r_f(x), \quad x \geq 0 \\ \alpha^0 = \alpha^F = 0, \quad \left. \frac{\partial \alpha^0}{\partial r} \right|_+ = \left. \frac{\partial \alpha^F}{\partial r} \right|_- \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서  $+$ 와  $-$ 는 외피화염을 계면으로 하여 외부와 내부쪽을 나타내며, 외피화염의 위치는 축방향에 따

라 변하므로, 조건 (12)를 만족하는 위치를 구해야 하므로, 외피화염의 위치결정은 특성치문제(characteristic value problem)가 된다. 또한 외피화염에서 발생되는 연소열은 주위로 전달되므로 기체의 엔탈피가 변한다. 이 열전달현상은 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} r=r_f, \quad x \geq 0 \\ C_p T_0 \left[ \left. \frac{\partial T}{\partial S} \right|_+ - \left. \frac{\partial T}{\partial S} \right|_- \right] \\ = q_0 \nu_F \left[ \left. \frac{\partial \alpha^F}{\partial S} \right|_+ - \left. \frac{\partial \alpha^F}{\partial S} \right|_- \right] \end{aligned} \quad (13)$$

확화점에서의 속도 및 연료성분의 질량분포는 full cone을 형성하는 액적분사화염의 노즐에서 얻은 다음 실험식들을<sup>(15,17)</sup> 사용하였다.

$$\frac{u^*}{u_m} = \exp(-K_u \xi^{2.0})$$

$$\frac{\alpha^f}{\alpha_f^*} = \exp(-K_f \xi^{1.5})$$

$$\xi = \frac{r}{(x+x_0)}$$

이때  $K_u$ 와  $K_f$ 는 속도 및 연료의 퍼짐계수(spread coefficient)이고,  $x_0$ 는 제트의 가상적인 시작지점부터의 거리를 나타낸다. 본 논문에서는  $K_u=130$ <sup>(15)</sup>와  $K_f=180$ <sup>(17)</sup>을 사용하였다. 액적군 외부에서 충분히 떨어진 지점의 기체에 대한 경계조건은 다음과 같으며, 본 해석에서는 주위의 기체의 유동이 없다고 가정하여  $u_m=0$ 으로 잡았다.

$$\begin{aligned} r \rightarrow \infty, \quad x \geq 0 \\ u^* = u_m^*, \quad T = T_m, \quad \alpha^0 = \alpha_m^0 \end{aligned} \quad (14)$$

## 2.3. 수치해석 방법

위에서 유도한 연립미분방정식들을 경계 및 계면조건과 함께 풀기 위하여, 본 연구에서는 discrete element method<sup>(25)</sup>를 power law scheme 및 upwind scheme과 함께 사용하였으며, 개략적인 계산과정은 Fig. 2에 보여주는 것과 같다. 이때 일반적으로 표시되는 지배방정식의 유한차분식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \beta_{i,j} = \frac{1}{A_p} (A_E \beta_{i+1,j} + A_W \beta_{i-1,j} + A_N \beta_{i,j+1} \\ + A_S \beta_{i,j-1} + B) \end{aligned} \quad (15)$$

여기에  $A_E$ ,  $A_W$ ,  $A_S$ 와  $A_N$ 은 제어체적 동서남북방향 경계에서의 계수이며,  $B$ 는 생성소멸항을 나타낸다. 계산순서는 고정된  $x$ 에 대하여 반경방향의 분포상태 계산을 오차 범위내에 수렴시킨 후 다음 전진된  $x$ 에 대하여 반경방향의 분포상태를 계산하였다.

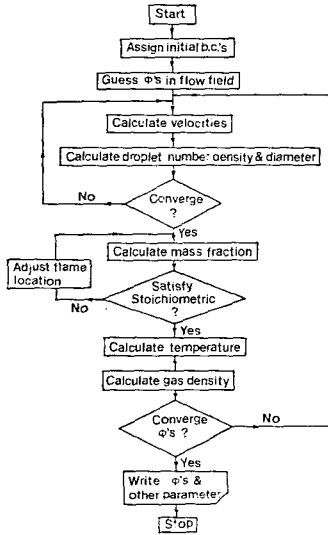


Fig. 2 Flow chart of numerical solution scheme

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치적인 해를 얻기 위하여 연료로 *n*-Butylbenzene( $C_{10}H_{14}$ )을, 산소의 공급원으로 공기를 택하였으며, 이들에 대하여 사용한 성질에 대한 값들은  $q_0=85,000\text{cal/mole}$ ,  $L_i=116.8\text{cal/g}$ ,  $W_F=134.21\text{g/mole}$ ,  $W_0=32.0\text{g/mole}$ ,  $W_p=29.9\text{g/mole}$ ,  $\nu_F=1.0$ ,  $\nu_0=13.5$ ,  $T_b=456^\circ\text{K}$ ,  $Y_\infty=0.222$ ,  $\lambda=0.22\times 10^{-3}\text{cal/cmsec}^\circ\text{K}$ ,  $C_p=0.33\text{cal/g}^\circ\text{K}$ 과  $\mu=0.476\times 10^{-3}\text{g/cmsec}$ 이다.

액적군의 초기 분포상태에 따른 연소상태 및 화염의 성질을 규명하기 위하여 여러가지 값의 초기 집단연소수, 즉 수밀도 및 액적의 반경을 변화시키면서 수치해석한 결과는 다음과 같다. 이때 착화점( $x=0$ )에서의 화염의 위치는 착화점 상류지역의 증발과정에 좌우되며, 정확한 위치결정은 상류지역에 대한 정확한 해석 후에 가능하므로 해서, 본 해석에서는 착화점의 화염 위치는 액적군경계와 일치한다는 가정을 택하였다.

Fig. 3은 초기 집단연소수가 화염의 길이( $L_f$ ) 및 액적군의 길이( $L_d$ )에 미치는 영향을 도시한 것이다. 화염의 길이는 착화점( $x=0$ )부터 외피화염이 제트의 중심축과 만나는 곳까지의 거리이고, 액적군의 길이는 착화점부터 액적들이 완전히 증발되어 소멸되는 곳까지의 거리로 정의하였다. I의 경우(case I)는 액적

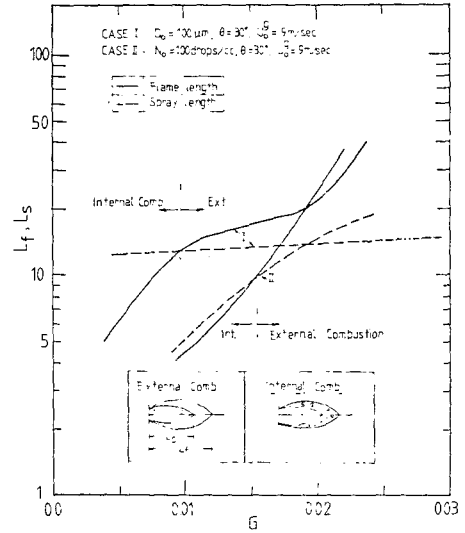


Fig. 3 Dependence of combustion mode (flame length and spray length) on initial group combustion number

의 초기 반경을 고정하고 수밀도를 변화시킨 경우이고, II의 경우(case II)는 수밀도를 고정하고 액적의 반경을 변화시켰을 때의, 초기 집단연소수의 변화에 따른 화염 및 액적군의 길이 변화를 보여준다. 이때 착화점에서의 기체분류속도는  $9\text{m/sec}$ , 기체와 액적간의 상대속도는  $3\text{m/sec}$ 이고 분사각은  $30^\circ$ 이다.

I의 경우, 액적군의 길이는 초기 집단연소수가 증가함에도 불구하고 거의 변화가 없으며, 화염의 길이는 이에 비하여 크게 증가함을 볼 수 있다. 또한 초기 집단연소수가 약  $1.0\times 10^{-2}$ 에서 연소상태는 내부집단연소에서 외부집단연소로 천이된다. 즉 집단연소수가  $1.0\times 10^{-2}$  보다 적은 경우 내부집단연소가 일어나며, 이보다 큰 경우 외부집단연소가 일어난다. 또한 집단연소수의 변화에도 불구하고 액적군의 길이는 크게 변화하지 않는다는 것은, 액적의 존재시간은 액적의 수밀도의 영향보다는 액적의 크기에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 즉 액적의 증발시간은 주위의 연료질량분포상태보다는 액적의 크기에 더욱 영향을 받는다고 해석된다. II의 경우는 집단연소수가 증가함에 따라 화염의 길이 및 액적군의 길이가 증가하고, 초기 집단연소수는 화염의 길이에 더욱 큰 영향을 미침을 보여준다. 또한 내부집단연소에서 외부집단연소로 천이되는 집단연소수의 경계치는 I의 경우보다 큰  $1.6\times 10^{-2}$ 임을 보여준다. 이는 같은 집단연소수일지라도 액적의 크기가 크

고 수밀도가 작은 액적군, 즉 액적과 액적간의 거리가 큰 액적군에서는 내부집단연소가 더욱 큰 집단연소수에서도 일어날 수 있음을 보여준다.

Fig. 4에서 Fig. 8은 연소상태에 따른 화염의 성질을 규명하기 위하여 세개의 서로 다른 연소상태, 즉, 외부집단연소( $L_f > L_s$ ), 외부집단연소와 내부집단연소의 경계상태( $L_f = L_s$ )와 내부집단연소( $L_f < L_s$ )의 화염들에서 온도, 질량, 속도, 수밀도 및 액적반경의 변화를 서로 비교하였다. A의 경우는  $L_f = 19.5R_0$ ,  $L_s = 14R_0$ 인 외부집단연소상태이고, B의 경우는  $L_f = L_s = 9.5R_0$ 인 두 집단연소상태의 경계이고 C의 경우는  $L_f = 5.0R_0$ 와  $L_s = 12.5R_0$ 인 내부집단연소상태이다. 초기 집단연소수는 Fig. 3의 결과와 같이 A, B, C의 순으로 큰 값을 가진다.

Fig. 4는 화염 중심축에서 유동방향으로의 온도분포의 변화를 비교한 것으로써 증발만 하는, 액적군의 의

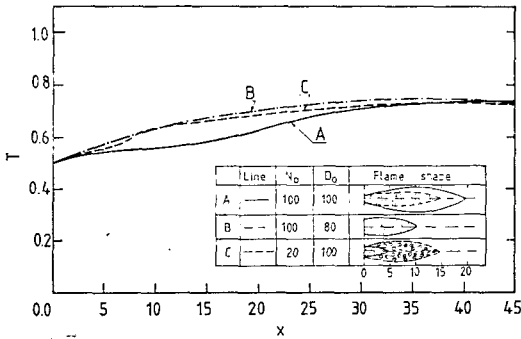


Fig. 4 Axial distribution of temperature along jet axis for various combustion modes

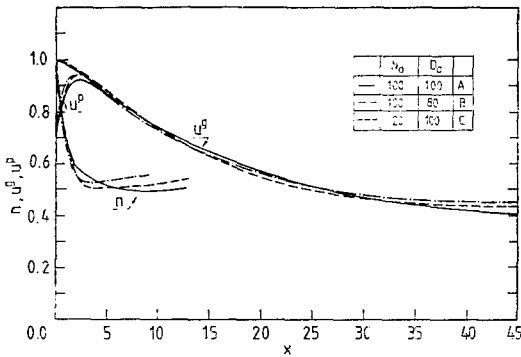


Fig. 5 Axial distribution of velocities and number density along jet axis for various combustion modes

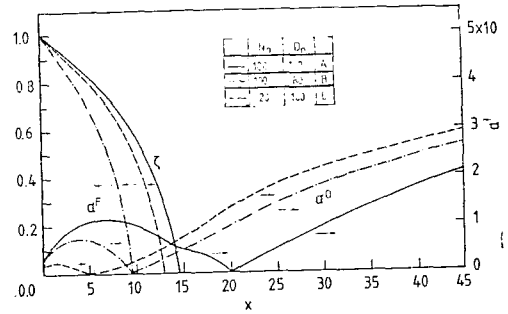


Fig. 6 Axial distributions of fuel, oxidizer concentration and droplet radius along jet axis for various combustion modes

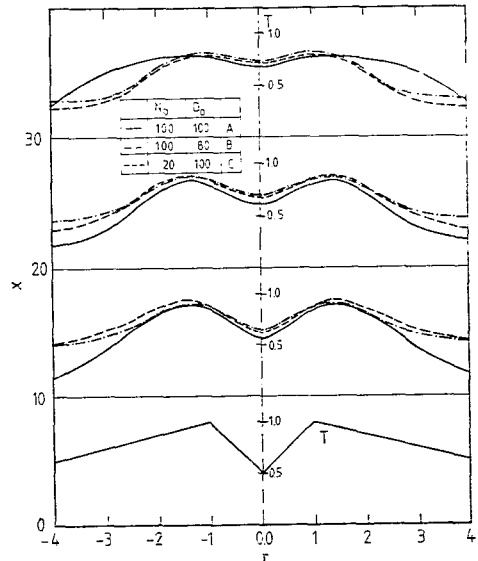


Fig. 7 Radial temperature distribution at several axial locations for various combustion modes

부에 의외화염이 존재하는 A의 경우, 초기의 온도증가는 의외화염의 선단이 착화점에 보다 가까이 있는 B의 경우보다 적으며, C는 이들 중간에 있음을 보여준다. 초기에 낮은 중심선 온도를 갖는 A의 경우는 액적군이 증발할 때 요구되는 증발열이 주위로부터 공급됨으로, 온도의 증가가 적은 것으로 해석되며, C의 경우도 역시 증발만 할 때는 온도의 증가가 적고, 단일액적들이 의외화염 외부에서 연소됨으로 온도증가가 갑자기 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 5는 중심축에서의 기체속도, 액적의 속도 및 액적군내의 수밀도의 변화를 유동축 방향에 따라 도시한 것이다. 기체속도의 감소현상은 균질기체 제트의 속

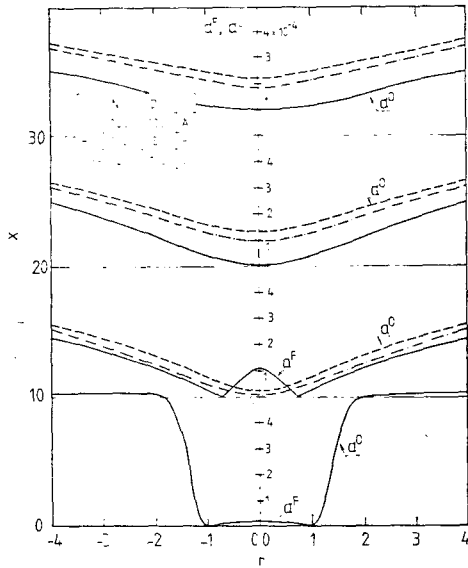


Fig. 8 Radial distributions of fuel and oxidizer concentration at several axial locations for various combustion modes

도 감소 추세와 비슷하나, 액적들로 인하여 초기단계에서는 급격히 감소함을 보여주며, 액적의 속도는 기계역학적인 항력으로 인하여 초기단계에서 갑자기 증가하여  $x$ 가 약 5.0 근처에서 기체와 같아짐을 볼 수 있다. 이는 초기단계에서만 액적들과 주위 기체간의 운동량전달이 일어나며 하류에서는 서로 평형상태가 됨을 알 수 있다. 또한 집단연소수가 큰 A의 경우가 B와 C의 경우보다 속도평형이 이루어지는 시간이 길다. 이 결과로써 초기 집단연소수가 작은 액적군의 유동에 대하여는 두 상간의 운동량 전달시간이 전체 액적군의 유동시간보다 매우 짧기 때문에 국부균질유동(locally homogeneous flow: LHF) 모델에 의한 해석도 큰 오차없이 가능할 것이다. 액적군의 수밀도는 초기단계에서 액적의 급격한 속도 증가로 인하여 급격히 감소하다가 속도가 평형을 이룬 후 서서히 증가하다 증발을 완료함을 볼 수 있다. 액적의 수밀도가 서서히 증가하는 현상은 제트중심축상의 속도가 감소함으로써 액적들이 감속되어 누적됨으로 해석되며 중심축에서는 반경방향의 속도가 양수 이므로 entrainment의 영향은 없다고 생각된다.

Fig. 6은 A, B, C의 경우들에 대하여 유동축에서의 연료와 산소의 질량분포 및 액적반경의 변화를 축방향에 따라 도시한 것이다. 외부집단연소가 일어나는 A

의 경우를 보면 액적들이 증발하는 구간에서는 연료질량의 변화가 증가하다가 액적의 크기 및 수밀도의 감소로 인하여 어느 정도 감소한 후 액적군의 경계를 지난 후에도 착화되지 않고 서서히 감소한 후 외피화염선단에서 소멸된다. B와 C의 경우도 비슷한 현상이 나타나며, 액적의 반경은 하류방향으로 갈수록 증발에 의하여 크기가 감소하며, 이 현상은  $d^2$ 법칙<sup>(23,24)</sup>과 같은 경향을 갖는다.

Fig. 7과 8은  $x$ 가 0, 10, 20, 30의 하류방향으로 갈 때 각 지점에서의 반경방향의 온도분포와 질량분포를 A, B, C의 경우에 대하여 도시한 것이다.

Fig. 7에서 보면  $x=10$  즉, A의 경우 증발만 일어나고 C는 단일액적연소가 일어나고 B의 경우는 연소가 끝난 지점에서의, 중심온도는 액적의 증발로 인한 열의 소멸로 A가 가장 낮고 화염이 끝난 B의 경우가 대류열전달로 인하여 제일 높으며, 온도가 최대가 되는  $r=1.5$  근방에서 외피화염이 존재함을 보여 준다. 큰 온도구배가 공해물질생성을 촉진한다는 사실을 감안할 때 액적들은 내부집단연소의 상태로 연소시키는 것이 외부집단연소상태보다 바람직하다는 것을 알 수 있다. 또한 하류지점, 즉  $x=30$ 에서의 반경방향 온도분포는 중심에서 대류로 인한 상류지점의 영향으로 A의 경우가 가장 낮고, 반경방향으로 감에 따라 A의 경우가 높아지는 현상은 많은 연료공급량을 갖는 A의 경우의 연소열이 대류열전달됨으로 해석된다. Fig. 8은 반경방향의 질량분포를 도시한 것으로써, 외부쪽으로 감에 따라 연료의 질량은 감소하며, 산소의 질량은 외피화염의 위치에서 부터 증가하여 공기중의 산소질량값에 접근함을 보여준다.

이상의 결과들은 Onuma et al.<sup>(5,6)</sup>, Styles와 Chigier<sup>(14)</sup>, Boyson과 Swithenbank<sup>(15)</sup>, Gupta와 Beer<sup>(18)</sup> 등의 실험결과들과 경향이 일치함을 보여준다. 위 실험들에 대한 화염의 상태 및 액적들의 분포상태에 대한 데이터의 부족으로 정량적인 비교는 가능하지 못했으며, 집단연소현상을 실험을 통하여 증명하기 위하여 보다 체계적인 연구가 요구된다.

#### 4. 결 론

액체연료를 노즐을 통하여 미립화시켜 연소시킬 때 액적군의 초기 분포상태가 연소에 미치는 영향을 이론적으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액적군의 연소상태는 액적군의 초기 분포상태, 즉 초기 집단연소수의 크기에 따라 달라지며, 이 무차

원수가 증가함에 따라 연소상태는 내부집 단연소에서 의 부집 단연소 상태로 천이된다.

(2) 액적군 내의 액적의 크기가 수밀도보다 연소상태에 미치는 영향이 크며, 액적군의 유동거리는 액적 크기에 영향을 받으며 수밀도의 영향은 거의 없다.

(3) 같은 초기 집 단연소수를 갖는 액적군일지라도 액적의 반경이 크고 수밀도가 적은 경우가, 액적군의 수밀도가 크고 액적의 반경이 작은 경우보다 내부집 단연소 상태가 일어날 수 있는 범위가 크다.

(4) 액적들과 기체간의 운동량 전달은 초기 단계에서 행하여지므로 초기 집 단연소수가 작은 유동인 경우 국부균질유동모델의 사용도 가능하다.

끝으로 액적군의 연소현상을 보다 체계적으로 규명하기 위하여는 액적의 미립화과정, 착화과정 등에 대한 연구가 첨가되어야 하며, 2상난류유동모델과 복사열 전달에 대한 연구들 또한 요망된다. 아울러 이론적인 해석을 보다 정확히 하고, 뒷받침하기 위하여는 많은 실험적 연구가 체계적으로 수행되어야 하겠다.

## 후 기

본 연구는 1982년도 한국과학재단의 신진연구비 지원으로 수행된 것이며, 이에 대하여 많은 감사의 뜻을 표한다.

## References

- (1) Chiu, H.H. and Liu, T.M., "Group Combustion of Liquid Droplets", Comb. Sci. and tech., 17, 1977
- (2) Chiu, H.H., Ahluwalia, R.K., Koh, B. and Croke, E.J., "Spray Group Combustion", AIAA 16th Aerospace Science Meeting, AIAA paper 78-75, 1978
- (3) Chiu, H.H., Kim, H.Y. and Croke, E.J., "Internal Group Combustion of Liquid Droplets", 19th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1982
- (4) Boyson, F. and Swithenbank, J., "Spray Evaporation in Recirculating Flow", 17th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1978
- (5) Onuma, Y., Ogasawa, M. and Inue T., "Further Experiments on the Structure of a Spray Combustion Flame", 16th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1976
- (6) Onuma, Y. and Ogasawa, M., "Studies on the Structure of a Spray Combustion Flame," 15th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1974
- (7) Twardus, E.M. and Brzustowski, T.A., "An Experimental Study of Flame Spread and Burning on Arrays of Monosize Hydrocarbon Droplets", Comb. Sci. and Tech., Vol. 17, 1978
- (8) Labowsky, M. and Rosner, D.E., "Group Combustion of Droplets in Fuel Cloud I. Quasi-Steady Prediction", Advances in Chemistry Series, 166, 1978
- (9) Sangiovanni, J.J. and Dodge, L.G., "Observation of Flame Structure in the Combustion of Monodispersed Droplet Stream", 17th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1978
- (10) Mao, C-P., Wakamatsu, Y. and Feath, G.M., "A Simplified Model of High Pressure Spray Combustion", 18th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1980
- (11) Kim, H.Y., "The Group Combustion of Liquid Fuel in Laminar Spray Jet", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago, 1982
- (12) Kim, H.Y. and Chiu, H.H., "Group Combustion of Liquid Fuel Sprays," AIAA 21st Aerospace Science Meeting, AIAA-83-0150, 1983
- (13) Chigier, N.A., "Energy Combustion and Environment", McGraw-Hill, 1979
- (14) Styles, A.C. and Chigier, N.A., "Combustion of Air Blast Atomized Spray Flames", 16th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1976
- (15) Chigier, N.A., "The Atomization and Burning of Liquid Fuel Sprays", Prog. Energy Comb. Sci., Vol. 2, 1976
- (16) Kim, H.Y., "Group Combustion Model: Review", J. of KSME, Vol. 23, 4, 1983
- (17) Chigier, N.A., "Group Combustion Models and Laser Diagnostic Methods in Sprays: A Review", Comb. and Flame, Vol. 51, No. 2, 1983
- (18) Gupta, A.K. and Beer, J.M., "Potential Appli-



- cation of *Modulated Swirl Combustor to Clean Combustion of Liquid Fuel*", *Advances in Chemistry Series*, 1966, 1978
- (19) Bellen, J. and Summerfield, M., "The Theoretical Examination of Assumptions Commonly Used for the Gas Phase Surrounding a Burning Droplet," *Comb. and Flame*, Vol. 33, 1978
- (20) Williams, F.A., "On the Assumptions Underlying Droplet Vaporization and Combustion Theory", *J. of Chemical Physics*, 33, 1960
- (21) Smoot, L.D. and Pratt, D.T., "Pulverized-Coal Combustion and Gasfication", Plenum Press, 1979
- (22) Crowe, C.T., "Heat Transfer in Dispersed-Phase Flow", 6th International Heat Transfer Conference, 1978
- (23) Williams, F.A., "Combustion Theory", Addison-Wesley, 1965
- (24) Williams, A., "Combustion of Droplets of Liquid Fuel; A Review", *Comb. and Flame*, Vol. 21, 1973
- (25) Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, 1980