

# 액주형 동축노즐 분무의 무화특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Atomizing Characteristics of Liquid Column Type Coaxial Sprays

노 병 준\*, 강 신 재\*\*, 오 제 하\*\*\*  
B. J. Rho, S. J. Kang, J. H. Oh

### ABSTRACT

The main purpose of this study is to investigate the atomizing characteristics of a two phase spray by using a liquid column type coaxial nozzle. The experiments have been carried out to analyze the atomization behavior, the droplet size distributions, and the statistical properties of droplet size distributions.

Immersion sampling method and the image processing technique were adapted for the measurements of particles, and the distributions of the droplet sizes were statistically analyzed. In the experiments, the mass ratio defined as  $Mr = M_s/M_l$  has been changed from 1.0 to 3.4 and the measurements have been performed along the axis of the spray. As a result of this experimental study, the distributions of droplet size were satisfied with the Log-Normal distributions and arithmetic mean diameter and deviation of mass ratio. Droplet volume-surface mean diameter was denoted by a exponential function of mass-ratio and the exponent was denoted by linear relation according to the central axis from the nozzle. Dispersions, skewness factors and flatness factors had comparatively constant values regardless of mass ratio and location.

	기 호 설 명	
$A, B$	: 상수	$\bar{D}_g$ : 액적의 기하학적 평균직경 ( $\mu\text{m}$ )
$a, b$	: 상수	$\bar{D}_{am}(= \bar{D}_{10})$ : 산술평균직경 ( $\mu\text{m}$ )
$D$	: 액적의 직경 ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{D}_{sm}(= \bar{D}_{21})$ : 표면적평균직경 ( $\mu\text{m}$ )
$\bar{D}$	: 액적의 평균직경 ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{D}_{vm}(= \bar{D}_{31})$ : 체적평균직경 ( $\mu\text{m}$ )
$Deq$	: 노즐의 공기분사면적과 동일한 면적을 갖는 원의 직경 (mm)	$\bar{D}_{vs}(= \bar{D}_{32})$ : 체적-표면적평균직경, Sauter 평균직경 ( $\mu\text{m}$ )
		$Dy$ : 영상처리에서 액적의 종축직경 ( $\mu\text{m}$ )

\* 전북대학교 정밀기계공학과, 정회원  
 \*\* 전북대학교 우주항공공학과, 정회원  
 \*\*\* 전북대학교 대학원 정밀기계공학과, 정회원

$D_x$	: 영상처리에서 액적의 횡축직경 ( $\mu\text{m}$ )
$D_{max}$	: 액적들의 최대액적직경 ( $\mu\text{m}$ )
$D_{min}$	: 액적들의 최소액적직경 ( $\mu\text{m}$ )
$D'_{vs}$	: $D - \bar{D}_{vs}$ ( $\mu\text{m}$ )
$F_{vs}$	: 체적-표면적평균직경에 대한 편평도
$f(D)$	: 액적직경 $D$ 에서의 액적의 빈도수함수
$j, k$	: 정수
$M_a$	: 노즐에 공급되는 공기의 질량 유량 ( $\text{kg}/\text{sec}$ )
$M_l$	: 노즐에 공급되는 액체의 질량 유량 ( $\text{kg}/\text{sec}$ )
$Mr (=M_a/M_l)$	: 노즐에 공급되는 액체에 대한 공기의 질량비
$m$	: 정수
$N$	: 측정된 액적의 총수
$S_g$	: 액적의 기하학적 평균직경 ( $\mu\text{m}$ )
$S_{vs}$	: 체적-표면적평균직경에 대한 비대칭도
$V_{rel}$	: 노즐선단에서의 액체와 공기의 상대속도 ( $\text{m}/\text{sec}$ )
$X$	: 분무 중심축을 따르는 노즐로부터의 거리 ( $\text{mm}$ )
$\alpha, \beta$	: 상수
$\rho_a$	: 공기의 밀도 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma_{vs}$	: 체적-표면적 평균직경에 대한 분산 ( $\mu\text{m}$ )

## 1. 서 론

운송의 편리함, 저장의 용이성, 액상에서의 유용성 등을 갖고 있는 액체연료를 연소실 내에 분무시켜 이것을 연소시킴으로써 얻어지는 에너지는 현재 이용되는 에너지의 상당 부분을 차지하고 있다.

Faeth<sup>1)</sup>에 의하면 액체연료를 무화시키는 노즐은 압력식 분무노즐과 2상노즐로 크게 분류할 수 있다. 그 가운데 압력식 분무노즐은 액체만을 노즐에 통과시켜 급격한 압력강

하의 효과에 의하여 무화시키는 것이며, 2상노즐의 분무는 노즐을 통과하는 고속의 기체에 액체를 더하여 무화시키는 것이다.

2상노즐의 장점은 무화된 평균 액적 직경이 작고 균일하다는 것이다. 이 때문에 특성이 넓은 범위의 점도에 대하여 사용할 수 있다. 또한 이 노즐은 막힐 가능성이 비교적 낮다. 또한 2상노즐은 액체 분사를 위한 높은 압력의 압축기가 필요없다는 것도 압력식 노즐에 대한 잇점이기도 하다. 그러나 2상노즐은 압축공기가 필요하다는 것과 비교적 낮은 노즐 효율을 갖는다는 단점이 있다. 이와 같은 단점에도 불구하고 장점의 단점에 대한 상대적 우수성 때문에 압력식 노즐에서 잘 무화되지 않는 고점성의 접착제, 젤라틴, 플라스틱, 페인트 등의 무화나, 점성이 낮은 유체의 아주 우수한 미립화가 요구되는 산업에 널리 응용되고 있다.

2상동축노즐의 분사에 관한 연구에서는 주로 노즐의 구조 및 공급 유량에 따라 분산거리(breakup length), 속도(velocity), 분무각(spray angle), 관통도(penetration), 분무액적의 평균직경(drop size), 액적의 크기분포(size distribution) 등의 측정이 거의 실물 실험을 통하여 이루어지고 있다.

Zanelli<sup>2)</sup>는 연소과정의 분무액적의 크기 및 속도분포에 의한 영향과 저속 및 고속 조건에서 분산거리를 조사하였는데, 특히 고속 조건에서 사진기법(photographic method)을 이용하여 제트의 분산특성을 연구하였다. Ohtani<sup>3)</sup>는 연료와 공기를 충돌시켜 버너노즐의 고효율화를 위한 새로운 구조의 저공기압 버너노즐을 개발하였다. Ohnishi<sup>4)</sup> 등은 두개의 동축노즐을 임의의 각도로 충돌시켜 액침법(liquid immersion sampling method)을 사용하여 액적경을 측정한 결과 단일 동축노즐보다 특성이 우수하다는 것과 노즐의 외부에서 공기가 분사되는 형(air-outer type)이 내부에서 공기가 분사되는 형(air-inner type)보다 무화성능이 우수하다는 것을 보고하였다. Jackson<sup>5)</sup> 등은 액체급속을

사용한 2상동축노즐의 냉각성능에 관한 연구에서 액적의 크기를 측정하고, 이것이 냉각성능에 미치는 영향에 관하여 논하였다.

본 연구에서는 분류의 중심부에서 액체를 분사시키고 그 주위에서는 환상 제트 형태의 노즐로써 공기를 분사시키는 동축노즐을 제작하여 공기와 액체의 질량비 변화에 따라 형성되는 분무액적의 크기를 액침법(immersion sampling method)을 이용한 영상처리기법(image processing technique)에 의하여 측정하였다. 분무액적의 크기에 관한 분석은 통계학적 해석방법을 도입하여 평균액적경(mean droplet diameter), 크기분포함수, 크기분포의 분산 등을 도출하여 분석하였다.

따라서 2상동축노즐의 공기대 액체의 질량비 변화에 따른 분무특성을 통계학적 방법과 영상처리기법을 이용하여 분석함으로써 2상동축노즐의 분무구조 및 특성을 구명하고, 공기대 액체의 질량비에 따라 액적 크기의 분포특성을 파악함으로써 2상분무가 적용되는 각종 산업용 기기의 구조설계 및 효율개선을 위한 기초 자료로 삼고자 한다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 크기분포

일반적인 액적의 분포에 대한 통계학적 정의는 다음과 같다.

$$f(D, \bar{x}, \bar{v}, t) dD d\bar{x} d\bar{v} \quad (1)$$

이것은 시간  $t$ 에서 속도  $\bar{v}$ 에 대한  $d\bar{v}$ 의 영역, 위치  $\bar{x}$ 에 대한  $d\bar{x}$ 의 영역, 직경  $D$ 에 대한  $dD$ 의 영역에서 속도  $\bar{v}$ , 직경  $D$ , 위치  $\bar{x}$ 를 갖는 액적의 확률을 나타낸다. 여기서  $d\bar{x}$ 와  $d\bar{v}$ 는 각각 물리공간과 속도공간의 3차원 요소이다.

만일 분포가 특정된 시간이 아닌 정상상태 고정위치에서 누적되어 얻어진 것이라면  $\bar{x}$ ,  $\bar{v}$ ,  $t$ 의 항은 소거되어 주어진 조건에 대한 액적의 크기분포를 나타내는 분포함수  $f(D)$ 로

특성지을 수 있게 된다. 여기서 액적크기분포함수  $f(D)$ 는 직경  $D$ 를 나타내는 단위 구간의 액적의 확률을 나타내며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{D_{min}}^{D_{max}} f(D)dD = 1 \quad (2)$$

### 2.2 크기분포함수

액적의 크기분포에 대한 수학적 관계식들은 많은 연구자들에 의하여 제시되고 있으나 어떠한 크기분포에나 적용이 가능한 표현식은 없었으며 어느 한 분포에 대해서도 여러 형태의 분포식이 제시되고 있다. 일반적으로 중요하게 여겨지는 분포함수들이 있는데, 이론식으로 정규분포(Normal distribution, Gaussian)와 대수-정규분포(Log-Normal distribution), 그리고 경험적 분포함수로서의 Nukiyama-Tanasawa 분포<sup>6)</sup>와 Rosin-Rammler 분포<sup>7)</sup>들이 그것이다. 이들 분포함수 가운데 대수-정규분포는 다음과 같이 표현된다.

$$f(D) = \frac{1}{DS_g \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{\ln D - \ln \bar{D}_g}{-2S_g}\right)^2 \quad (3)$$

여기서  $\bar{D}_g$ 와  $S_g$ 는 각각 기하학적 평균직경(geometric mean diameter)과 기하학적 표준편차(geometric standard deviation)이다.

### 2.3 액적의 평균직경

액적의 평균직경은 전체 액적의 크기분포를 대표할 수 있는 가장 적절한 하나의 값으로 표현된다. 크기분포를 완전히 대표하기에 충분한 값은 없기 때문에 보다 전체적인 크기의 특성을 정의하기 위해서는 많은 변수가 사용되어야 한다. 평균직경에 대한 정의에 이용되는 변수에는 많은 형태가 있는데 이들 가운데 어느것을 선택하느냐 하는 것은 분무에서의 길이(length), 면적(area), 체적(volume), 형상(shape)등에 따라 결정된다. 또한 관련

된 특성은 액적에 대한 자료를 어떻게 이용하느냐에 따라 변하게 된다.

가장 많이 인용되고 있는 분포함수  $f(D)$ 의 항으로 나타나는 평균직경  $\bar{D}_{jk}$ 의 일반적인 표현은 다음과 같다.

$$(\bar{D}_{jk})^{jk} \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^k f(D) dD = \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^j f(D) dD \quad (4)$$

여기서  $j$ 와  $k$ 는 정수이다. 이때,  $j=0, k=1$ 의 경우는 산술적 평균직경 (arithmetic mean diameter,  $\bar{D}_{am}$ )으로서 이 평균직경은 액적의 크기분포가 그 값에 비하여 매우 크기가 작은 값을 나타내지 않을 때 중요성을 갖으며, 표면적 평균직경 (surface mean diameter,  $\bar{D}_{sm}$ )은  $j=1, k=2$ , 체적 평균직경 (volume mean diameter,  $\bar{D}_{vm}$ )은  $j=1, k=3$  그리고 연소, 물질전달, 효율에 관한 연구에서 주로 이용되는 체적-표면적 평균직경 (volume-surface mean diameter, Sauter Mean Diameter, SMD,  $\bar{D}_{vs}$ )은  $j=3, k=2$ 로서 정의된다.

Table. 1에는 일반적으로 통용되는 평균직경과 이의 응용분야에 대하여 요약되어 있다.

Table 1 Popular mean diameters and their fields of application<sup>8)</sup>

k	j	Name	Field of Application
0	1	Linear	Comparison, evaporation
0	2	Surface	Absorption
0	3	Volume	Hydrology
1	2	Surface diameter	Absorption
1	3	Volume diameter	Evaporation, molecular diffusion
2	3	Sauter	Combusion, transfer
3	4	De Brouckere	Combusion, equilibrium

2상분무에 대하여 지금까지 많은 연구가 수행되었고 지금도 수행되어지고 있으나 실제 2상노즐의 설계에 필요한 자료는, 연구가 수행되어진 그 노즐의 연구 부분에 국한되어지는 것이 대부분이었다. 이는 압력식 분무에 관한 연구에서도 해당된다. 그 가운데 비교적 단순한 형태의 2상노즐을 넓은 범위의 실험 조건에 의하여 연구한 이들이 Nukiyama와 Tanasawa인데 이들의 연구<sup>8)</sup>에서 2상노즐로부터 얻어진 액적의 평균직경을 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\bar{D}_{vs} = \frac{A}{(V_{rel}^2 \rho_a)^2} + BMr^\beta \quad (5)$$

여기서  $V_{rel}$ 은 노즐 선단에서의 액체와 공기의 상대속도,  $Mr$ 은 공기와 액체의 질량비,  $\beta$ 는 노즐의 형상에 따른 함수이고,  $A, B, \beta$ 는 노즐의 형상과 액체의 특성에 따른 상수이다.

### 3. 실험장치 및 측정방법

#### 3.1 2상동축노즐

본 연구에서 사용한 2상동축노즐의 형상은 Fig. 1과 같이 노즐선단부를 45° 확산형으로

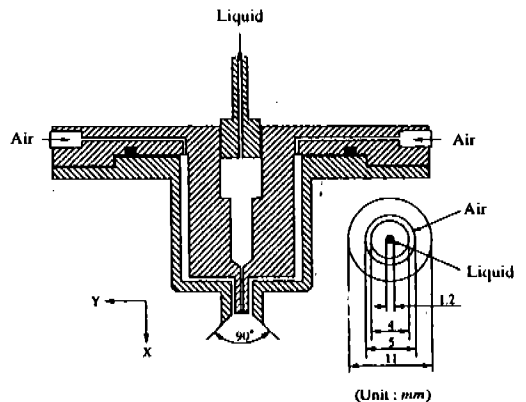


Fig. 1 Schematic diagram of two-phase co-axial nozzles

하고 2상동축노즐의 대표적인 형상인 액주형 (liquid column type)으로 설계 제작하였다. Jackson<sup>6)</sup> 등의 연구에 의하면 노즐 선단에 45°의 경사각을 부여할 경우 직각의 동축노즐보다 무화의 확산 현상이 우수한 것으로 판명되어 이를 택하였다. 또한 공기가 액체의 외부에서 확산형으로 분출되는 공기 외부공급형 동축노즐로 설계하였다. 이는 일반적인 2상동축노즐에서 가장 많이 택하는 형식으로서 분무영역 전체에 대하여 비교적 고른 액적분포를 보이며 측정부의 선택이 용이한 특성을 가지고 있다.

여기서 노즐의 설계형상에 대한 선택은 일반적으로 적용가능한 노즐의 연구가 부족하여 이에 대한 기초적 자료를 삼고자 비교적 단순한 형태로 택하였다.

### 3. 2 분사장치

Fig.2는 노즐분사장치의 계통도로서 크게 액체 공급부와 기체 공급부로 나뉘어진다. 액체 공급부로부터 노즐에 액체를 공급하기 위해서는 액체탱크에 압력을 작용시켜야 한다. 이때 압력원으로서 고압가스와 충전된 압력탱크를 사용하여 액체가 노즐에 안정적으로 공급되도록 하였다.

기체 공급부에서는 공기압축기로부터 공급되는 압축공기가 노즐에 일정하게 공급되도록 하기 위하여 압축기로부터의 압축공기가 가늘고 긴 관을 통과하도록 하여 맥동현상이 완화되도록 하였고, 다시 압력 완충용 공기탱크를 통과시켜 맥동현상을 가능하면 최소화시켰다. 그리고 공급되는 공기의 유량을 조절하기 위하여 조절용 공기 유량계를 사용하였다. 또한 압축기로부터 발생되어 압축공기에 포함된 수분이나 유분을 제거하기 위하여 공기정화장치(air filter)를 공기 유량계 이전에 설치하였다.

### 3. 3 액적포집장치

액적포집장치는 분무내의 위치에 따른 입경 분포(droplet size distribution)의 변화를 측

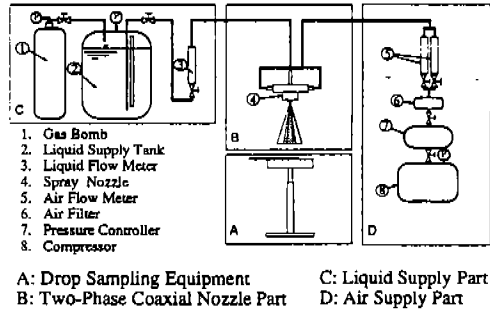


Fig.2 Schematic diagram of experimental measurement system and experimental apparatus

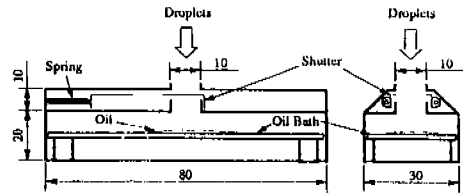


Fig.3 Schematic diagram of the droplet sampling equipment

정하기 위하여 액적을 포집하는 장치로서 Fig.3과 같이 설계 제작하였다.

### 3. 4 액적측정기기

크기분포의 측정에 대하여 많은 방법들이 제시되고 있는데 현미경적 해석(microscopic analysis)이 주로 이용되고 있으며 그 외에 최근에는 레이저의 도플러 위상 차를 이용한 PDPA, 또는 영상처리기법(image processing technique)에 의한 방법이 이용되기도 한다.

과거의 액적측정방법은 분무된 액적을 직접 또는 간접적인 방법에 의하여 사진촬영한 후 이를 확대하여 사람이 직접 손으로 하나 하나 측정하는 것이었다. 따라서 많은 양의 액적을 자료화 하기 위해서는 많은 시간이 요구되고 측정자의 주관적인 오차요인이 많이 포함되어 얻어진 자료의 신뢰도가 낮았다. 그리하여 보다 많은 양의 액적을 객관적으로 측정할 수 있는 방법이 요구되었다. 이의 결과로 개발

된 방법이 레이저를 이용한 방법과 영상처리 기법이다.

본 연구에서는 이들 방법 가운데 영상처리 기법을 이용하여 액적의 크기를 측정하였다. 영상처리기법을 이용한 액적의 크기 측정에는 액적의 사진촬영이 요구된다. 그리고 이 사진 촬영방법에는 직접 분무된 액적을 촬영하는 방법과 액적을 포집하여 포집된 액적을 촬영하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 택하여 액침법(immersion sampling method)을 이용한 사진촬영을 하였다.

Fig. 4는 본 실험에서 사용되어진 영상처리 장치에 대한 계통도이며, 그 구성은 광량을 조절할 수 있는 점광원(point light source), 현미경(Parco ORION), CCD 카메라(SONY model CCD-F 70), A/D 변환기(DATA TRANSLATION, model DT 2853, 512×512×8-bit), 마이크로컴퓨터(80386, 20MHz) 등으로 이루어져 있다.

일반적으로 액침법을 이용한 영상처리기법에서는 현상된 필름을 사용하여 영상화 한다. 이와 같은 방법은 필름의 해상도가 높아야 하고 촬영조건이 비교적 까다로운 단점을 가지고 있으며, 촬영후 영상처리에 적합하지 않은 결과를 얻을 수도 있다. 그러나 본 연구에서는 액침법에 의하여 포집된 액적을 직접 CCD 카메라를 이용하여 영상화함으로써 위와 같은 단점의 발생 가능성을 최소화 하였다.

2진화된 영상의 각 픽셀(pixel)은 0(black)에서 255(white)까지의 gray level 을 갖는

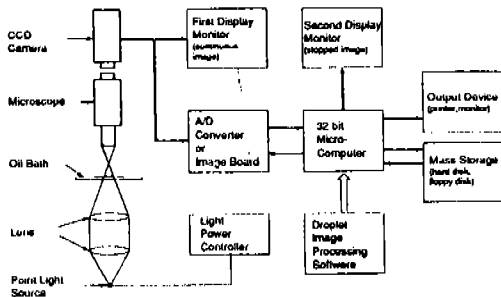


Fig. 4 Block diagram of the image processing equipment

다. 그리고 영상의 최대 크기는 512 × 512 pixels로 이루어진다. 또한 각 픽셀의 공간적 해상도는 현미경의 배율에 따라 결정되는데 본 연구에서는  $6.46 \times 10^{-7} \text{m/pixel}$ 의 해상도를 갖는 배율의 렌즈를 사용하였다.

### 3.5 실험조건

본 연구의 노즐 분사 실험은 주위의 온도가 24℃, 습도가 60%인 조건에서 이루어졌다. 노즐에 공급되는 액체는 물을 사용하였으며 이때 물의 온도는 20℃이었다. 그리고 공급되는 공기의 온도는 주위의 온도와 같다고 생각하였다. 액주형 및 액막형의 노즐에 공급되는 물의 질량유량은 0.03 kg/min으로 일정하게 하면서 공급되는 공기의 질량유량을 변화시키며 액적의 크기분포 및 속도분포를 측정하였다. 이때 공기대 물의 질량비( $M_r = M_a/M_l$ )는 1.0, 1.5, 2.2, 2.8, 3.4인 조건이었다. Table 2는 본 연구의 실험조건에 대하여 요약한 것이다.

Table 2 Spray conditions

Design	External mixing
Liquid	Water
Gas	Air
Liquid Temperature (°C)	20
Gas Temperature (°C)	24
Liquid rate (kg/min)	0.03
Gas rate (l/min)	25.3, 37.9, 55.6, 70.7, 85.9
Mass ratio ( $M_r = M_a/M_l$ )	1.0, 1.5, 2.2, 2.8, 3.4
Liquid annulus area (mm <sup>2</sup> )	1.131
Gas annulus area (mm <sup>2</sup> )	7.069

### 3.6 액적측정방법

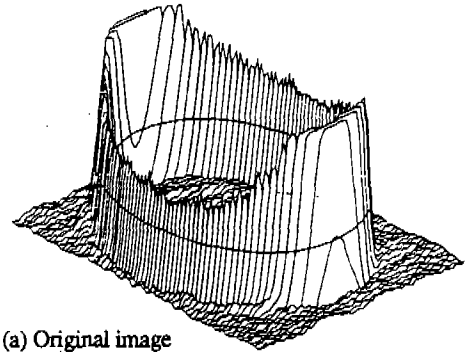
액적의 포집은 분무의 중심부에서 주어진 분무조건에 대하여  $X/Deq = 33.3, 66.7, 100.0, 133.3$ 인 4개의 위치에 대하여 시행하였다. 여기서  $Deq$ 는 노즐의 공기분사면적과 동일한

면적을 갖는 원의 직경을 나타낸다. 그리고 포집된 액적은 현미경을 통한 CCD 카메라에 의하여 영상화 되었다. 이 원시 영상은 다시 8-bit A/D 변환기에 의하여 256 단계의 명암차로 이루어진 디지털 영상이 된다.

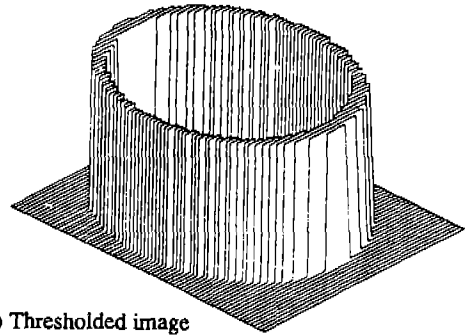
A/D 변환기에 의하여 디지털화 되어진 영상은 적절한 기준값(threshold level)에 의해서 gray level 이 0 또는 255의 두 값만을 갖는 2진 영상(binary image)으로 바뀐다. 이와 같은 과정은 배경과 액적을 구분하기 위한 것으로 여기에 이용된 기준값은 선택에 특별한 주의를 요한다. 이 기준값을 선택에 따라 측정되어지는 액적의 크기가 다소 가감될 수 있기 때문이다. 기준값에 의하여 2진 영상화 되기 전의 액적에 대한 픽셀값의 분포는 Fig. 5a와 같다. 그리고 Fig. 5b는 기준값에 의하여 2진화 되어진 영상에서의 액적에 대한 픽셀값의 분포이다.

이 기준값의 선택은 특히 촛점이 정확하지 않은 경우 액적의 크기에 큰 영향을 주지만 촛점이 정확한 영상에 대해서는 큰 영향을 주지 않는 경향이 있다. 본 연구에서 사용한 영상처리기법에서는 액적의 영상을 직접 CCD 카메라에 의하여 얻기 때문에 비교적 정확한 촛점의 영상을 얻을 수 있어 이 기준값의 선택범위가 넓었으며 120의 gray level을 사용하였다.

일반적인 액적은 구형이므로 각 픽셀들이 구성하는 형태 역시 구형으로 이루어진다. 따라서 픽셀이 원형의 형태를 구성하는가의 판별이 액적의 형상을 인식하는 알고리즘(pattern recognition algorithm)의 관건이 된다. 본 연구에서 사용된 알고리즘은 분포된 픽셀들 가운데 gray level이 0인 8개의 픽셀을 추출하여 그 픽셀들이 원형을 이루는가를 판별하여 액적의 형상을 인식한다. 그리고 인식된 액적의 종방향 직경과 횡방향 직경의 크기가 같아야 하므로 그 오차 한계를  $0.95 < Dy/Dx < 1.05$ 로 하였다. 또한 불필요한 판별시간의 절약을 위하여 판별을 순차화 하였다. 이때 본 영상처리시스템에서 한



(a) Original image



(b) Thresholded image

Fig. 5 Effect of threshold level in filtering operation

장의 영상을 처리하는데 소요된 시간은 80386, 20MHz의 시스템에서 약 40초 이었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 액적의 크기분포

Fig. 6은 노즐에 공급되는 공기대 물의 질량비 변화에 따라 액적의 크기분포를 분무단면  $X/Deq = 33.3, 66.7, 100.0, 133.3$ 에 대하여 도시한 것이다. 이때 빈도수를 나타내는 값은 포집된 액적의 전체 수에 대한 특정 액적 크기구간에서의 포집 빈도수의 비율을 다시 그 액적구간으로 나누어 나타낸 것이다. 이때 액적의 크기구간은  $10 \mu m$ 로 하였다.

질량비가 작은  $Mr = 1.0$ 의 조건에서는 분무단면에 따라 다소 분포특성이 차이를 보이고 있으나 질량비가 커짐에 따라 분무단면에 따른 액적의 크기분포의 특성이 유사하게 나

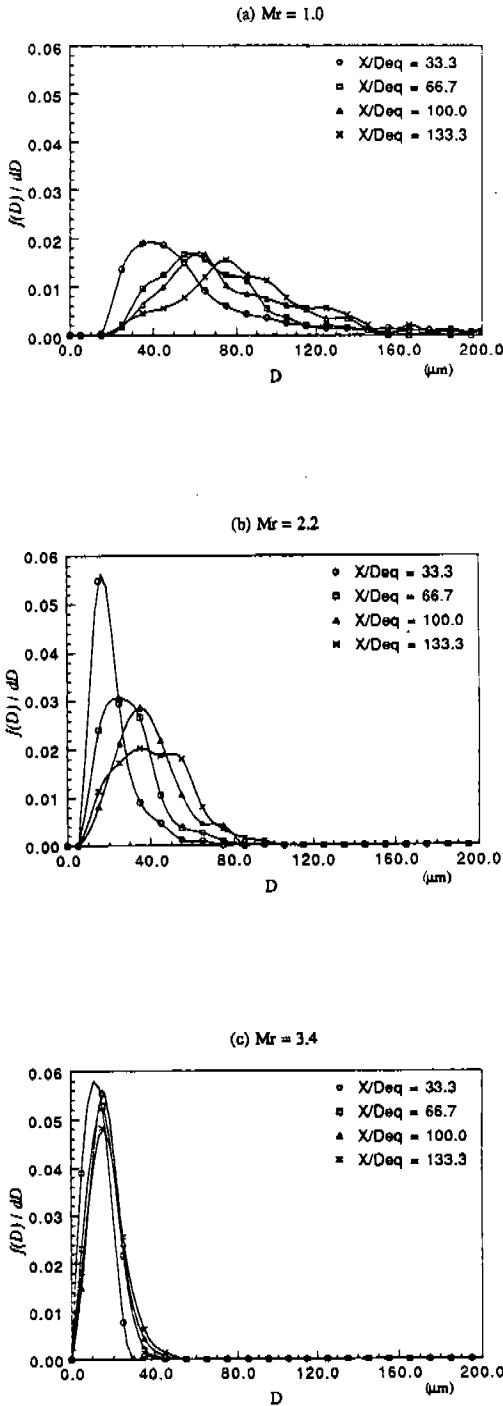


Fig. 6 Droplet size frequency distribution vs.  $X/Deq$

타남을 알 수 있다. 이러한 현상이 일어나는 원인으로서는 질량비가 작은 조건에서의 공기의 속도가 비교적 작기 때문에 분무 하류에서의 무화 정도가 우수하지 못하기 때문에 큰 액적들이 보다 많이 존재하여 분열의 현상이 계속되는 반면 질량비가 큰 조건에서는 노즐 선단에 가까운 분무 상류에서 이미 무화가 거의 이뤄지고 노즐로부터 먼 위치일지라도 액적의 속도가 상대적으로 크기 때문에 액적의 합착현상이 질량비가 작은 경우보다 작게 일어나기 때문으로 생각된다.

액적의 크기분포에 대한 자료는 연소, 2상 유동 등과 같이 입자의 특성이 요구되는 연구에서 전제조건으로서 반드시 필요한 것이다. 또한 근래에 많이 이루어지고 있는 수치적 해법에서는 더욱 중요한 요소를 차지하고 있어 그 결과의 신뢰도를 좌우하기도 한다. 그러므로 보다 일반화되고 사용이 간편한 액적의 크기분포함수가 요구된다. 그래서 본 연구에서는 실험으로부터 얻어진 액적의 크기분포를 수학적 형태로 나타낼 수 있는가에 대하여 시도하여 보았다.

Fig. 7은 분무단면  $X/Deq = 100.0$ 에서 질량비에 따라 측정된 액적의 크기분포를 이용하여 대수-정규 분포함수로서 도시한 것이다. 이때 크기분포로부터 얻어진 기하학적 평균 직경과 기하학적 표준편차의 분포를 아래의 표에 나타내었다.

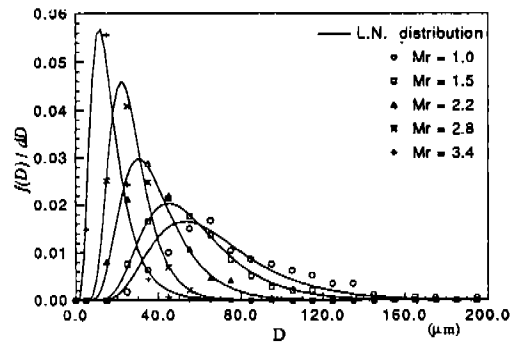


Fig. 7 Log-Normal distribution of the measured droplet size distribution (at  $X/Deq = 100.0$ )



Mr	D <sub>g</sub>	S <sub>g</sub>
1.0	62.86	0.419
1.5	52.90	0.402
2.2	35.99	0.404
2.8	25.37	0.365
3.4	15.08	0.533

위의 표에서 질량비와 액적의 기하학적 평균직경과의 관계를 살펴보면 상관관계가 있음을 추측할 수 있다. 대수-정규분포함수는 기하학적 표준편차에 의존하는 함수이므로 이들 기하학적 평균직경과 기하학적 표준편차의 질량비에 대한 관계를 도출할 수 있으면 액적의 크기분포를 공기와 액체의 질량비의 함수로서 나타낼 수 있으리라는 점에 착안하여 질량비 Mr과 기하학적 평균직경의 대수 ln(D<sub>g</sub>)의 관계를 도시하고 질량비와 기하학적 평균직경과의 선형적 관계식을 최소제곱법을 이용하여 구하였다. 이때 얻어진 관계식은 다음과 같다.

$$\ln(\bar{D}_g) = 4.81 - 0.59 Mr \quad (6)$$

그리고 기하학적 표준편차는 질량비에 따라 변화 양상이 어느 일정치를 기준으로 나타나고 있어 그 평균을 취하였다. 이로부터 얻어진 기하학적 표준편차의 평균치는 0.4246를 얻을 수 있었다.

$$S_g = 0.4246 \quad (7)$$

이와 같은 결과로부터 질량비에 따른 액적의 크기분포를 다음과 같은 대수-정규분포함수로서 나타낼 수 있었다. 그러나 본 연구에서 구한 이 함수는 특정 위치에서 특정 액체 공급유량에 대하여 얻어진 것이므로 보다 많은 검증이 요구된다.

$$f(D) = \frac{1}{DS_g\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(\ln D - (a+bMr))^2}{-2S_g^2}\right)$$

$$S_g = 0.4246, \quad a = 4.81, \quad b = -0.59$$

### 4.2 액적의 평균직경

액적의 평균직경은 액적의 크기분포를 가장 잘 대표할 수 있는 수학적 형태로서 본 연구에서는 산술평균직경, 표면적평균직경, 체적평균직경 그리고 가장 널리 인용되는 체적-표면적평균직경이 질량비와 분무 위치에 따라 어떻게 분포되는가를 알아 보았다.

Fig. 8은 각 분무 단면에 따른 액적의 산술평균직경, 표면적평균직경, 체적평균직경, 체적-표면적평균직경을 각 질량비에 대하여 도시한 것이다.

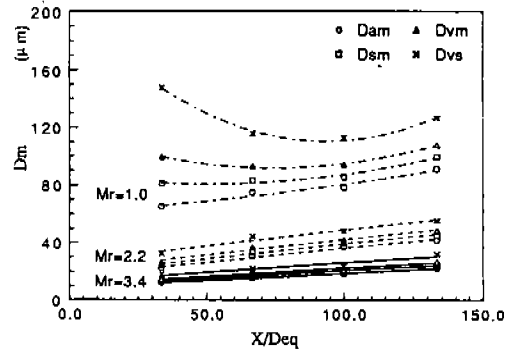


Fig.8 Variations of mean diameters vs. X/Deq

질량비가 작은 경우에는 노즐 선단으로부터 멀어질수록 산술평균직경, 표면적평균직경, 체적평균직경은 계속적으로 증가하는 경향을 보이는 반면 체적-표면적평균직경은 X/Deq = 100까지 감소하다가 그 이후부터는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 질량비가 큰 경우에는 전 분무단면에 대하여 노즐선단으로부터 멀어질수록 액적의 평균직경이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 질량비가 1.0 일 때는 X/Deq = 100에서 최소 체적-표면적평균직경을 얻을 수 있었다. 이러한 현상이 나타나는 것은 질량비가 큰 경우 노즐선단에 가까운 부분에서 이미 무화가 충분히 이루어져 노즐선단으로부터 멀어짐에 따라 액적의 합착이 일어나기 때문이라 생각된다.

Fig. 9는 액적의 체적-표면적평균직경을 질량비와 위치에 따라 도시한 것이다. 질량비에

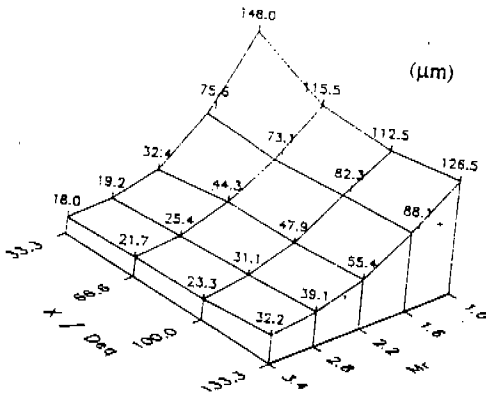


Fig. 9 Distribution of the volume-surface mean diameters

다른 체적-표면적평균직경은 질량비 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 노즐선단으로부터 멀어질수록 체적-표면적평균직경이 증가함을 알 수 있다. 그러나 질량비가 작은 조건에서는 노즐선단으로부터 멀어질수록 감소하다가 다시 증가하는 특성을 보이고 있었다. 즉 본 연구의 실험조건에 대하여 최소평균직경은 질량비가 크고 노즐에 가까운  $Mr=1.0$ ,  $X/Deq=33.3$ 에서 얻을 수 있었으며, 최대 액적경은 질량비가 작고 역시 노즐선단에서 가까운  $Mr=3.4$ ,  $X/Deq=33.3$ 에서 얻을 수 있어 두 경우 모두 노즐에 가까운 곳에서 일어남을 알 수 있었다.

본 연구에서는 일반적으로 많이 인용되고 있는 이 체적-표면적평균직경의 질량비와 위치에 따른 특성을 수학적으로 표현하고자 평균액적경에 대한 Nukiyama의 관계식(Eq. 5)에서 우변의 첫채항이 공기와 액체의 상대속도의 제곱에 역비례하므로 질량비가 큰 경우 본 실험에서와 같이 액체의 유량을 고정하였을 때 이 상대속도가 증가하게 되어 첫채항이

상대적으로 둘째항보다 작은 값을 가지므로 이 첫채항을 생략하여 다음과 같이 액적의 체적-표면적평균직경에 대한 함수를 가정하였다.

$$\bar{D}_{vs} = \alpha \cdot Mr^{\beta} \quad (9)$$

그리고 질량비의 대수( $\log(Mr)$ )와 체적-표면적평균직경의 대수( $\log(\bar{D}_{vs})$ )의 분무단면에 대한 관계식을 최소자승법을 이용하여 구하였다. 이들 관계식들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X/Deq &= 33.3 \\ \log(\bar{D}_{vs}) &= 2.171 - 1.843 \cdot \log(Mr) \quad (10a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X/Deq &= 66.7 \\ \log(\bar{D}_{vs}) &= 2.088 - 1.421 \cdot \log(Mr) \quad (10b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X/Deq &= 100.0 \\ \log(\bar{D}_{vs}) &= 2.096 - 1.319 \cdot \log(Mr) \quad (10c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X/Deq &= 133.3 \\ \log(\bar{D}_{vs}) &= 2.122 - 1.147 \cdot \log(Mr) \quad (10d) \end{aligned}$$

위의 관계식을 살펴보면 절편의 상수는 비교적 변화가 없이 일정한 값을 나타내는 반면 기울기는 위치에 따른 변화를 보이고 있다. 이와 같은 위치에 따른 기울기의 특성이 다소 비약적이기는 하지만 대략 선형적 관계로 나타낼 수 있음을 알 수 있었다. 이때 얻어진 관계식은 다음과 같다.

$$\beta = 1.98 + 6.56 \times 10^{-3} \cdot X/Deq \quad (11)$$

위의 관계식들을 종합하여 다음과 같은 체적-표면적평균직경에 대한 수학적 표현식을 얻을 수 있다.

$$\bar{D}_{vs} = \alpha \cdot Mr^{(a+b \cdot X/Deq)} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \log(2.12) = 0.326, \\ a &= -1.98, \quad b = 6.56 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

### 4.3 액적 크기분포의 통계학적 특성

액적의 크기분포를 나타내는 여러가지 분포 함수들이 제시되어 있으나 보다 일반적이고 범용화된 분포함수가 제시되지 못하고 있다. 그래서 본 연구에서는 액적의 크기분포에서 얻을 수 있는 여러가지 통계학적 특성치들을

이용하여 액적의 크기분포를 나타낼 수 있는 방법이 있지 않는가 하는 점에 착안하여 비교적 널리 알려진 몇몇 통계학적 특성치들을 액적의 크기분포에 대하여 구하여 보았다.

이때 사용된 특성치들의 정의는 다음과 같다.

$$\overline{D'_{vs}^m} = \frac{1}{N} \sum (D - \overline{D}_{vs})^m \quad (13)$$

분산:  $\sigma_{vs} = \sqrt{\overline{D'_{vs}^2}}$  (14)

비대칭도:  $S_{vs} = \frac{\overline{D'_{vs}^3}}{(\overline{D'_{vs}^2})^{3/2}}$  (15)

편평도:  $F_{vs} = \frac{\overline{D'_{vs}^4}}{(\overline{D'_{vs}^2})^2}$  (16)

Fig. 10은 액적의 크기분포에서 체적-표면적평균직경에 대한 분산의 정도를 나타내고 있다. 액적의 체적-표면적평균직경과 유사한 경향을 보이고 있으며 질량비가 커지고 노즐에 가까울수록 액적의 체적-표면적평균직경에 대한 분산이 감소함을 알 수 있다. 역시 질량비가 큰 조건에서는 위치에 따라 변화의 폭이 작은 반면 질량비가 작은 조건에서는 그 변화의 폭이 크게 나타나고 있다. 그리고 분산 역시 평균직경과 유사하게 질량비가 작고 노즐선단에 가까운 부분에서 최대의 분산을 나타내고 있었다.

Fig. 11은 앞에서 나타낸 평균직경에 대한 분산의 크기가 액적의 평균직경에 대하여 어떠한 분포를 이루고 있는가를 나타내고 있다.

본 연구에서는 체적-표면적평균직경에 대하여 도시하였다. 무화가 충분히 이루어지지 않은 노즐선단에 가까운 영역에서의 질량비가 작은 조건을 제외한 조건에서는 체적-표면적평균직경에 대한 분산이 그 체적-표면적평균직경의 약 50%의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 관계를 계속적인 연구를 통하여 충분히 발달된 분무에서 액적의 크기분포함수를 나타내는 변수로 활용할 수 있을 것이라 생각된다.

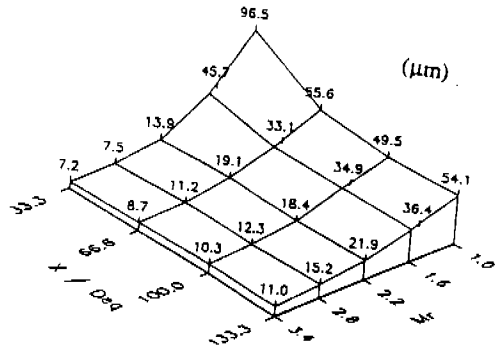


Fig.10 Distribution of the dispersion of volume-surface mean diameters

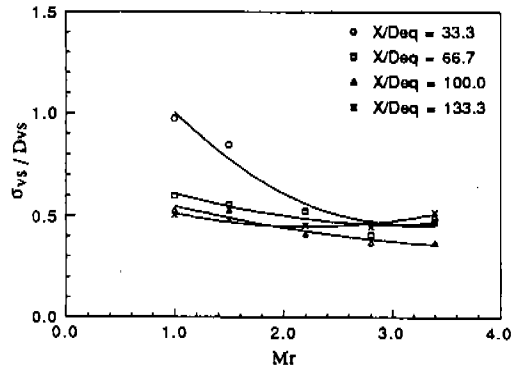


Fig.11 Dispersion intensity of the volume-surface mean diameters

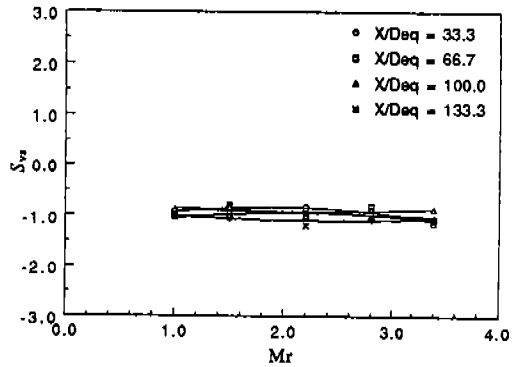


Fig.12 Distribution of skewness factor of the volume-surface mean diameters

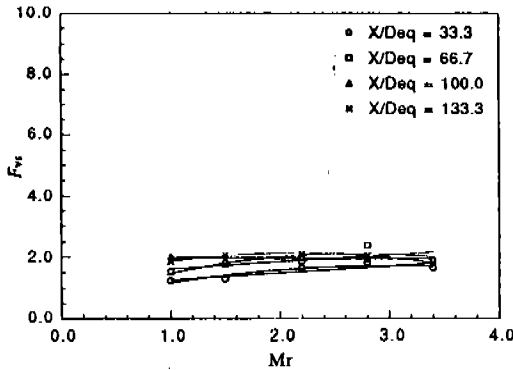


Fig.13 Distribution of flatness factor of the volume-surface mean diameters

Fig.12는 액적 크기분포의 체적-표면적평균 직경에 대한 비대칭도를 나타내는 것으로서 질량비의 변화에 따라 도시하였다.

정규분포를 나타내는 Gauss 분포 ( $S_{vr} = 0$ )의 좌측으로 치우친 음의 값을 나타내며 질량비에 관계없이 -1.0의 값을 나타내고 있다. 또한 분무영역 전체에 대해서도 같은 값을 나타내고 있어 본 연구에서의 실험조건으로부터 얻어진 액적의 크기분포는 조건에 관계없이 일정한 비대칭도 분포값을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig.13은 액적 크기분포의 체적-표면적평균 직경에 대한 편평도를 나타내는 것으로서 질량비의 변화에 따라 도시하였다.

정규분포를 나타내는 Gauss 분포 ( $F_{vr} = 3$ )과 비교하여 작은 값을 나타내고 있으며 전 실험조건에 대하여 비교적 일정한 약 2.0의 편평도를 보이고 있다.

이와 같은 액적 크기분포의 분산, 비대칭도, 편평도의 분포가 질량비와 위치에 따라 그 변화가 크지 않게 나타나는 것은 이들 값이 본 연구에서 사용된 2상동축노즐로부터 얻어지는 액적의 크기분포를 특성화 하는 값이기 때문이라 생각하며 보다 많은 형태의 노즐에 대한 연구를 통하여 이들 통계학적 특성치와 액적 크기분포의 관계를 도출할 수 있을 것이라 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서 액주형 동축노즐을 사용하여 공기와 물의 질량비에 따른 무화특성을 영상처리방법과 통계학적 방법을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 액체의 크기분포는 대수-정규분포함수를 이용하여 나타낼 수 있었으며 이 대수-정규분포함수의 기하학적 평균직경과 표준편차를 질량비의 함수로서 나타낼 수 있었다.

(2) 액적의 체적-표면적평균직경을 질량비의 지수함수로서 나타낼 수 있었고 그 지수는 노즐로부터의 중심축 위치에 따라 선형적으로 나타낼 수 있었다.

(3) 본 연구에서 사용한 액주형 동축노즐로부터 얻어지는 액적의 크기분포에 대한 통계학적 특성치 분산, 비대칭도, 편평도는 질량비와 위치에 비교적 무관한 일정한 값을 나타내었다.

## 참 고 문 헌

1. Faeth, G. M., "Current Status of Droplet and Combustion," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.3, pp.191-224, 1977.
2. Zanelli, S., "Behaviour of a Liquid Jet near the Nozzle," ICLASS-'88, pp.1-4, 1988.
3. Ohtani, S., "Study on Development of Pneumatic Type Liquid Atomizers," ICLASS-'88, pp.15-22, 1988.
4. Ohnishi, N., and Ikeuchi, H., "The Development of Impinging-Jet Atomizing Nozzle of Two-Phase Type," ICLASS-'88, pp.57-63, 1988.
5. Jackson, M.A., Toda, S., and Hori, Y., "Sodium Spray for Liquid Metal Cooling," ICLASS-'88, pp.221-228, 1988.
6. Nukiyama, S., and Tanasawa, Y., "Experiments on the Atomization of Liquids in an Air Stream," Trans. SME Japan, Vol.5, No.18, pp.62-67, 1939.

7. Rosin, P., and Rammler, E., "*The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal*," J. Inst. Fuel, Vol.7, No.31, pp.29-36, 1933.
8. Kuo, K.K., *Principles of Combustion*, John Wiley, 1986.