

〈技術論文〉

Y-JET 2-유체 분무노즐 내부유동의 모델링

인왕기* · 이상용** · 송시홍*

(1992년 10월 10일 접수)

Modeling of Nozzle Flow Inside a Y-JET Twin-Fluid Atomizer

Wang Kee In, Sang Yong Lee and Si Hong Song

Key Words : Y-Jet Twin-Fluid Atomizer(Y-Jet 2-유체 분무노즐), Spray(분무), Drop Entrainment(액적의 이탈/유입), Annular-Mist Flow Model(환상-분무류 모델), Choking(초우킹)

Abstract

A simplified one-dimensional analysis has been performed to predict the local pressure distributions in Y-Jet twin-fluid atomizers. Fluid compressibility was considered both in the gas (air) and two-phase (mixing) ports. The annular-mist flow model was adopted to analyze the flow in the mixing port. A series of experiments also has been performed; the results show that the air flow rate increases and the liquid flow rate decreases with the increase of the air injection pressure and/or with the decrease of the liquid injection pressure. From the measured injection pressures and flow rates, the appropriate constants for the correlations of the pressure loss coefficients and the rate of drop entrainment were decided. The local pressures inside the nozzle by prediction reasonably agree with those by the experiments.

기 호 설 명

- | | |
|--|-------------------------------|
| B : 면적, m^2 | T : 절대온도, K |
| C_B : 막힘효과를 나타내는 압력손실 계수 | u : 속도, m/s |
| c_p : 비열비, J/kg · K | v : 비체적, m^3/kg |
| D : 직경, m | W : 질량유량, kg/s |
| e : 액적이탈/유입률(rate of drop entrainment) | x : 건도 |
| f : 관 마찰계수 | z : 좌표, m |
| \bar{f} : 기체 공급관 평균 마찰계수 | α : 기공률(void fraction) |
| G : 질량유속, $kg/m^2 \cdot s$ | γ : 비열비 |
| K_e : 전체유효 압력손실계수 | μ : 점도, $N \cdot s/m^2$ |
| L : 관의 길이, m | ρ : 밀도, kg/m^3 |
| Ma : 마하(Mach)수 | τ : 전단응력, N/m^2 |
| p : 압력, Pa | 하첨자 |
| R : 기체상수, J/kg · K | c : 관 중심부(core) |
| | f : 액체, 액체관 |
| | fF : 액체막 |

*한국과학기술원 기계공학과

**정희원, 한국과학기술원 기계공학과

- g : 기체, 기체관
- i : 기체/액체 경계면
- m : 2상유동(혼합)관
- s : 엔트로피
- 0, 1, 2, 3 : 좌표위치

1. 서 론

Y-Jet 노즐은 산업용 보일러나 연소로 등에 많이 사용되고 있는 내부혼합형 2유체 분무노즐이다. 이러한 분사개념은 액체연료 추진장치 등에도 응용될 수 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 이 노즐내에서는 액체(연료)와 기체(공기 또는 증기)가 각각 액체관 및 기체관을 통해 공급되어 Y자 모양의 혼합지점에서 혼합되어 2유체 유동을 형성한다. Mullinger와 Chigier⁽¹⁾는 이렇게 형성된 2상 유동이 환상-분무류 형태일 것이라고 예측하였다. 2상 유체가 노즐로부터 분사되면 일단 환상형태의 액체막이 형성되었다가 이 막이 깨지면서 작은 액적으로 미립화된다. 대부분의 경우에는 공기 (또는 증기)는 단지 미립화 촉진을 위해 사용되며 2차 공기(연소시에는 산화제)는 다른 방법으로 노즐 바깥으로부터 공급된다. 그러나 어떤 특정한 형태의 연소장치에서는 산화제가 기체관을 통해 직접 공급되기도 한다.

분무노즐 연구의 주 목적은 분사조건, 즉, 분사압력 및 작동유체의 물리적 성질, 그리고 노즐형태가 주어졌을 때 유량 및 액적크기의 분포를 예측하는데 있다. Mullinger와 Chigier⁽¹⁾는 실험결과를 통해 Y-Jet 분무노즐의 성능에 대한 광범위한 연구를 수행하여 분무노즐의 설계를 위한 기본적인 방법을 제시하였다. 또한 일련의 연구가 Graziadio 등,⁽²⁾ De Michele 등,^(3,4) 및 Andreussi 등⁽⁵⁾의 ENEL-CRTN 그룹에 의해 수행되었다. 그들은 2상유동 구간에서의 유동특성을 검토하여 분사압력과 기체/액체 유량과의 관계를 예측하였다. 이러한 해석은 1차원 압축성 유동을 가정하여 이루어졌다. 이 때 액체의 존재는 마찰계수를 수정하므로써 고려되었다. 그들은 또한 액적의 공간적 분포상태를 연구하여 노즐내부 유동형태와의 연관성을 규명하기 위한 시도를 했다. 그러나 그들의 결과는 혼합지점에서의 압력을 미리 알 수가 없기 때문에 유량을 예측하는데 직접적으로 적용하기가 곤란하다.

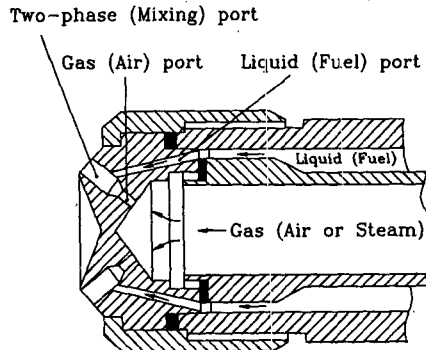


Fig. 1 Y-Jet atomizer

따라서 Lee 등⁽⁶⁾은 기체와 액체구간 및 2상유체 구간에 대해 단순화된 1차원 수력학적 유동모델을 개발하여 여러가지 분사조건에 따른 액체와 기체의 유량을 예측하였고, 아울러 노즐내부의 압력분포도 살펴 보았다. 그러나 이들의 연구에서는 2상 유동관의 액체막에 대한 2상유동 마찰손실배수 모델에서 액체막으로부터 관 중심부로 유입된 액적을 고려하지 않았다. 또한 기체와 액체의 혼합지점에서의 막힘효과(blockage effect)에 의한 압력강하를 무시하였고 2상유동 영역에서의 액적의 이탈/유입(drop entrainment)을 적절히 모델링 하지 못하였다. 이에 본 논문에서는 Lee 등⁽⁶⁾의 모델을 개선하여 계산을 수행하였으며 그 결과를 실험결과 및 Lee 등⁽⁶⁾의 결과와 비교하였다.

2. 해석적 방법

본 논문에서는 1차원 유동을 가정한다. 그리고 액체는 비압축성이나 기체 및 2상유체의 압축성은 고려한다. 상세한 노즐의 형태는 Fig. 2와 같다.

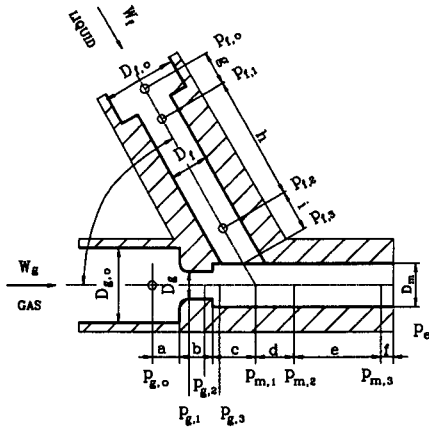
(1) 기체(공기)공급관

유동이 노즐벽면의 축소형태에 따라 거의 변화가 없으므로 축소구간에서는 등 엔트로피 압축성 유동으로 가정할 수 있다. 그러면 기체의 유량은 다음과 같다.

$$W_g = \rho_{g,0} (2C_p T_{g,0})^{1/2} A_g \left[\frac{p_g}{p_{g,0}} \right]^{1/\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_g}{p_{g,0}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]^{1/2} \quad (1)$$

그리고

$$T_g / T_{g,0} = (p_g / p_{g,0})^{(1-\gamma)/\gamma} \quad (2)$$



(unit : mm)

Symbol	Dimen.	Symbol	Dimen.	Symbol	Dimen.
$D_{g,0}$	11.4	a	3.7	f	1.0
D_g	2.2	b	2.8	g	4.0
$D_{f,0}$	11.4	c	1.9	h	10.0
D_f	3.1	d	3.1	i	3.31
D_m	3.5	e	7.0		

Fig. 2 Nozzle configuration for flow analysis

$$\rho_g / \rho_{g,0} = (p_g / p_{g,0})^{1/\gamma} \quad (3)$$

$$Ma = W_g / [\rho_g A_g (\gamma R T_g)^{1/2}] \quad (4)$$

여기서 Ma , R 그리고 γ 는 각각 마하(Mach)수, 기체상수 및 기체의 비열비를 나타낸다. 기체 공급관의 직선구간에서 마찰을 고려한 압축성 유동을 가정하면 압력강하는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{2\gamma Ma^2 \{1 + (\gamma - 1) Ma^2\}}{1 - Ma^2} \frac{\bar{f}}{D_g} p \quad (5)$$

여기서 \bar{f} 는 기체 공급관에서의 평균 벽면마찰계수로써 기체 레이놀즈수의 함수이며 다음과 같이 표시하였다.

$$\bar{f} = c_1 \overline{Re}_g^{-c_2} \quad (6)$$

$$\overline{Re}_g = \frac{W_g D_g}{A_g \mu_g} \quad (7)$$

여기서 c_1 , c_2 는 모델상수이다. 기체공급관의 출구로부터 혼합지점까지의 짧은 구간에서의 압력강하는 Mullinger와 Chigier⁽¹⁾의 논문에서 언급된 막힘효과를 고려하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p_{f,3} - p_{m,1} = C_{B,g} \frac{\rho_f u_{f,3}^2}{2} \quad (8)$$

여기서 $C_{B,g}$ 는 액체유동에 의한 기체유동의 막힘효과를 나타내는 압력강하 계수이다.

(2) 액체(연료)공급관

비압축성 액체유동의 압력강하는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p_{f,0} - p_{f,3} = K_e \frac{\rho_f}{2} u_{f,3}^2 + \frac{\rho_f}{2} u_{f,3}^2 \quad (9)$$

여기서 K_e 는 관 마찰과 함께 급격한 유로축소에 의한 압력강하를 포함하는 전체유효 압력손실계수로 역시 일반적으로 레이놀즈수의 함수이므로 다음과 같이 표시하였다.

$$K_e = c_3 \overline{Re}_f^{-c_4} \quad (10)$$

$$\overline{Re}_f = \frac{W_f D_f}{A_f \mu_f} \quad (11)$$

여기서 c_3 , c_4 는 모델상수이다. 액체관 출구로부터 혼합지점까지의 압력강하도 기체공급관의 경우와 같이 기체유동에 의한 액체유동의 막힘현상을 고려해 주기 위하여 다음과 같이 놓는다.

$$p_{f,3} - p_{m,1} = C_{B,f} \frac{\rho_{g,3} u_{g,3}^2}{2} \quad (12)$$

여기서 $C_{B,f}$ 는 기체유동에 의한 액체유동의 막힘효과를 나타내는 압력강하 계수이다.

(3) 2상유동(혼합)관

2상유동 구간에서는 환상-분무류 형태가 나타난다고 알려져 있으므로 환상-분무류 모델을 적용한다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 벽면을 따라서 액체막이 흐르고 관의 중심부에서는 기체와 액적이 혼합되어 액적류의 상태로 흐르게 된다. 관의 중심부 액적류 유동에서 마찰 압력강하는

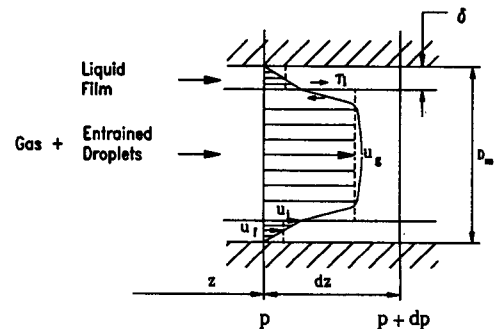


Fig. 3 Annular flow model for two-phase (mixing) port

$$-\left(\frac{dp}{dz}F\right) = \frac{4\tau_i}{D_m - 2\delta} \quad (13)$$

과 같으며 가상적인 액적류만의 유동에 대해서는 마찰 압력강하 기울기를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\left(\frac{dp}{dz}F\right)_c = \frac{4\tau_c}{D_m} \quad (14)$$

여기서 기호 F 는 마찰에 의한 압력강하를 나타낸다. 그리고 τ_i 는 액적류와 액막 경계면에서의 전단 응력을, τ_c 는 관내부에 액적류만이 흐를 때 벽면에서의 전단응력을 나타내는데 이들은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_c (u_c - u_i)^2 \quad (15)$$

$$\tau_c = \frac{1}{2} f_c \rho_c \alpha_c^2 u_c^2 \quad (16)$$

여기서 u_i 는 기체와 액체 경계면의 속도이다. 얇은 액막인 경우 속도분포는 선형적으로 변한다고 가정할 수 있다. 그러면 경계면속도 u_i 는 액체막 평균속도의 2배가 된다. 즉,

$$u_i = 2u_{fF} \quad (17)$$

이다. 액적을 포함하고 있는 관 중심부의 액적류는 균질유동이라고 가정하고,

$$\rho_f \gg \rho_g \quad (18)$$

이므로 평균밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_c} &= \frac{1-x_c}{\rho_f} + \frac{x_c}{\rho_g} \\ &\cong \frac{x_c}{\rho_g} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 x_c 는 다음과 같이 정의된 관 중심부 액적류의 건도(quality)이다.

$$x_c = \frac{W_g}{W_g + eW_f} \quad (20)$$

기호 e 는 액적의 이탈/유입률(rate of drop entrainment)을 나타낸다. 기체(공기)유동방향에 경사지게 공급되는 액체는 혼합지점에서 일부가 2상유동관 벽면을 따라 흐르고, 나머지는 기체유동에 유입되어 2상유동관에서는 환상-분무류를 형성하게 된다. 이 경우는 Collier(1981)에 의해 소개되어 있는 기체 주류내로 액체를 관 중심부에서 분사하는 경우(center jet injection)와 다공성 벽면을 통해서

액체를 주입하는 경우(porous wall injection) 중 그 어느쪽도 아닌 두가지의 혼합형태이다. 따라서 혼합관내에서의 액적의 이탈/유입률은 기체와 액체의 상대적인 질량유속에 따라 변하고 또한 유동방향(z)에 따라 변화가 있다고 하여 다음과 같이 가정하였다.

$$e = \left(\frac{G_f - G_{g,m}}{G_f}\right)^{c_5} \exp\left\{-\left(\frac{G_{g,m}}{G_f}\right)^{c_6} \frac{z_m}{L_m}\right\} \quad (21)$$

여기서

$$G_{g,m} = \frac{W_g}{A_m} \quad (22)$$

$$G_f = \frac{W_f}{A_f} \quad (23)$$

이고, c_5, c_6 는 모델상수이며 z_m 은 혼합지점으로부터 노즐출구 방향으로 임의의 위치를 나타내는 좌표이다. 액막두께와 기공률(void fraction)간의 관계는

$$D_m \gg \delta \quad (24)$$

이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_c \cong \left(1 - \frac{4\delta}{D_m}\right) \quad (25)$$

식(17)를 이용하면 식(15)는

$$\begin{aligned} \tau_i &= \frac{1}{2} f_i \rho_c (u_c - 2u_{fF})^2 \\ &= \frac{1}{2} f_i \rho_c u_c^2 \left(1 - 2\frac{u_{fF}}{u_c}\right)^2 \end{aligned} \quad (26)$$

과 같이 된다. 다음의 관계식

$$\begin{aligned} \frac{u_{fF}}{u_c} &= \frac{(1-e)W_f}{W_g + eW_f} \frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{\alpha_c}{1-\alpha_c} \\ &\cong \frac{(1-e)W_f}{W_g} \frac{\rho_g}{\rho_f} \frac{\alpha_c}{1-\alpha_c} \end{aligned} \quad (27)$$

과 함께 식(13), (14), (16), (25), (26)을 이용하면 2상유동 마찰손실배수는 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \phi_c^2 &= \left(\frac{dp}{dz}F\right) / \left(\frac{dp}{dz}F\right)_c \\ &= \frac{\tau_i}{\tau_c} \frac{D_m}{D_m - 2\delta} \\ &= \frac{f_i}{f_c} \frac{1}{\alpha_c^{5/2}} \left\{1 - 2\frac{(1-e)W_f}{W_g} \frac{\rho_g}{\rho_f} \frac{\alpha_c}{1-\alpha_c}\right\}^2 \end{aligned} \quad (28)$$

Wallis⁽⁸⁾의 경계면 거칠기에 의한 경계면 마찰계수는 다음식과 같다.

$$f_i = f_c \left(1 + 300 \frac{\delta}{D_m}\right)$$

$$\cong f_c\{1+75(1-\alpha_c)\} \quad (29)$$

또한 환상류에 대한 ϕ_{fF}^2 과 α_c 의 관계는 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\phi_{fF}^2 = \frac{1}{(1-\alpha_c)^2} \quad (30)$$

여기서

$$\phi_{fF}^2 = \left(\frac{dp}{dz}F\right) / \left(\frac{dp}{dz}F\right)_{fF} \quad (31)$$

그리고

$$-\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{fF} = \frac{2f_{fF}G_{fF,m}^2}{D_m\rho_f} \quad (32)$$

$$G_{fF,m} = (1-e)W_f/A_m \quad (33)$$

이다. 본 논문에서는 아래와 같은 Blasius식을 이용하여 식(16)과 식(32)의 액막 및 액적류의 마찰 계수 f_{fF} 와 f_c 를 추정하였다. 즉,

$$f_{fF} = 0.079Re_{fF}^{-1/4} \quad (34)$$

$$f_c = 0.079Re_c^{-1/4} \quad (35)$$

여기서

$$Re_{fF} = (1-e)W_fD_m/A_m\mu_f \quad (36)$$

$$Re_c = (W_g + eW_f)D_m/A_m\mu_c \quad (37)$$

이며, 액적류의 평균점도는 McAdams의 관계식⁽⁹⁾를 적용하여

$$\frac{1}{\mu_c} = \frac{1-x_c}{\mu_f} + \frac{x_c}{\mu_g} \quad (38)$$

와 같이 구한다.

따라서 액적의 이탈/유입률이 적절하게 결정되면, 액막두께 (또는 기공률)를 구할 수 있다. 액막두께가 결정되면 2상유동관에서의 전체 압력강하는 다음 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dz} &= -\left(\frac{dp}{dz}F\right) + G_c\frac{du_c}{dz} \\ &= -\left(\frac{dp}{dz}F\right) + G_c\frac{d}{dz}(G_cv_c) \\ &= -\left(\frac{dp}{dz}F\right) + G_c^2\frac{dv_c}{dz} + G_cv_c\frac{dG_c}{dz} \end{aligned} \quad (39)$$

여기서 G_c 는 관 중심부 유체의 질량유속으로서

$$G_c = \frac{W_g + eW_f}{A_m\alpha_c} \quad (40)$$

과 같이 표현되고 식(39)의 우변 첫 항은 식(13)에 이미 주어진대로 마찰에 의한 압력강하 구배를 나타낸다. 식(39)의 우변 두번째항과 세번째항은 관 중심부 유체의 압축성에 의한 가속에 따른 압력강

하를 나타낸다. 여기서

$$\begin{aligned} \frac{dv_c}{dz} &= \frac{d}{dz}\{x_cv_g + (1-x_c)v_f\} \\ &= \frac{dp}{dz}\left\{x_c\left(\frac{\partial v_g}{\partial p}\right)_s + (1-x_c)\left(\frac{\partial v_f}{\partial p}\right)_s\right\} \\ &\quad + (v_g - v_f)\frac{dx_c}{dz} \end{aligned} \quad (41)$$

이며 액체는 비압축성이고 $v_g \gg v_f$ 이므로 식(41)은

$$\frac{dv_c}{dz} = x_c\left(\frac{\partial v_g}{\partial p}\right)_s\frac{dp}{dz} + v_g\frac{dx_c}{dz} \quad (42)$$

와 같이 된다. 식(42)를 식(39)에 대입하면, 식(39)는

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dz} &= -\left(\frac{dp}{dz}F\right) + G_c^2x_c\left(\frac{\partial v_g}{\partial p}\right)_s\frac{dp}{dz} \\ &\quad + G_c^2v_g\frac{dx_c}{dz} + G_cv_c\frac{dG_c}{dz} \end{aligned} \quad (43)$$

이 된다. 그런데 식(43)의 우변 네번째항은 $v_g \gg v_f$ 라는 가정하에 세번째항과 상쇄되므로 식(43)은 결과적으로

$$-\frac{dp}{dz} = -\left(\frac{dp}{dz}F\right) + G_c^2x_c\left(\frac{\partial v_g}{\partial p}\right)_s\frac{dp}{dz} \quad (44)$$

이 된다. 기체는 이상기체로 가정하면

$$\left(\frac{\partial v_g}{\partial p}\right)_s = -\frac{v_g}{\gamma p} \quad (45)$$

이므로 식(44)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{-\left(\frac{dp}{dz}F\right)}{1 - G_c^2x_c\frac{v_g}{\gamma p}} \quad (46)$$

3. 실험

분사압력과 유량($(p_{g,0}, p_{f,0}) - (W_g, W_f)$)과의 관계 및 노즐내부 압력을 비교, 평가하기 위해 일련의 실험을 수행하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 4와 같다.

공기공급관은 공기공급원에 연결되어 있으나 높은 분사압력 조건에서는 중간에 공기 정화장치가 되어있는 가압 공기용기가 사용되었다. 정화된 물은 펌프나 가압기에 의해 공급되었다. 보정된 유량계(rotameter)를 사용하여 공기와 물의 체적유량을 측정하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 액체

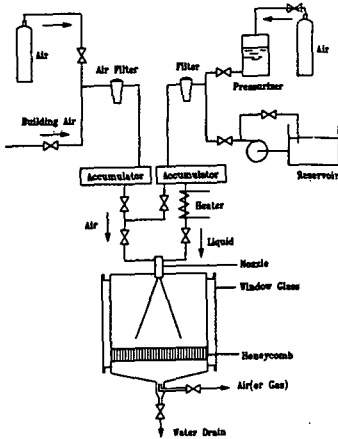


Fig. 4 Experimental set-up

공급관에서 2부분의 압력($p_{f,1}$, $p_{f,2}$)이 측정되었고 3군데의 압력($p_{m,1}$, $p_{m,2}$, $p_{m,3}$)이 2상유동관에서 측정되었다. 공기와 물의 공급압력(Fig. 2에서 $p_{g,0}$, $p_{f,0}$)도 측정하였다. 실험에 사용된 노즐내부의 규격은 Fig. 2에 나타나 있다.

실험은 부록에 나타난 바와 같이 두가지 경우로 나누어 수행되었다. 첫번째는 공기와 물의 분사압력을 각각 약 200~600 kPa 범위내에서 여러가지로 변화시켜 18개의 실험결과(Table 1)를 얻었고, 두번째는 공기 분사압력을 약 400 kPa, 500 kPa과 600 kPa로 고정시키고 물 분사압력을 변화시켜 각각 13개(Table 2), 10개(Table 3) 및 9개(Table 4) 등 50개 분사조건에 대한 실험결과를 얻었다.

Table 1 Experimental data set #1

No.	Mass flow rate (kg/min)		Pressure ($\times 10^2$ kPa)						
	W_g	W_f	$p_{g,0}$	$p_{f,0}$	$p_{f,1}$	$p_{f,2}$	$p_{m,1}$	$p_{m,2}$	$p_{m,3}$
1	0.112	3.273	3.33	3.28	2.94	2.98	2.88	2.33	1.34
2	0.130	3.077	3.61	3.38	3.06	3.09	2.98	2.43	1.39
3	0.200	2.641	4.73	3.79	3.59	3.64	3.43	2.83	1.74
4	0.204	2.562	5.03	3.89	3.74	3.77	3.58	3.01	1.84
5	0.182	2.611	4.73	3.84	3.64	3.64	3.26	2.85	1.74
6	0.270	2.333	5.98	4.15	4.00	4.01	3.78	3.28	2.04
7	0.230	2.259	5.53	4.05	3.87	3.90	3.68	3.23	1.94
8	0.284	2.278	6.20	4.20	4.04	4.05	3.83	3.39	2.09
9	0.102	4.102	3.85	3.89	3.42	3.46	3.43	2.68	1.44
10	0.180	3.362	5.08	4.46	4.14	4.15	3.93	3.23	1.84
11	0.195	3.273	5.33	4.51	4.24	4.25	4.03	3.38	1.94
12	0.260	2.844	6.18	4.66	4.49	4.51	4.23	3.58	2.14
13	0.256	2.241	5.58	3.79	3.74	3.70	3.53	3.03	1.94
14	0.234	1.762	4.88	3.07	3.04	3.04	2.83	2.58	1.74
15	0.266	1.169	5.55	3.13	3.04	3.04	2.88	2.68	1.84
16	0.283	1.762	5.95	3.38	3.34	3.34	3.15	2.93	1.99
17	0.266	1.373	5.51	2.92	2.94	2.88	2.73	2.81	1.84
18	0.266	1.225	5.53	2.87	2.79	2.83	2.63	2.53	1.79

Table 2 Experimental data set #2

No.	Mass flow rate (kg/min)		Pressure (x 10 ² kPa)						
	W_g	W_f	$P_{g,0}$	$P_{f,0}$	$P_{f,1}$	$P_{f,2}$	$P_{m,1}$	$P_{m,2}$	$P_{m,3}$
1	0.118	3.055	4.03	3.69	3.33	3.44	3.15	2.63	1.54
2	0.117	3.497	4.03	3.89	3.46	3.54	3.43	2.73	1.56
3	0.084	3.960	4.03	4.08	3.53	3.64	3.59	2.81	1.54
4	0.049	5.171	4.03	4.51	3.63	3.76	3.87	2.88	1.46
5	0.140	2.641	4.03	3.43	3.21	3.24	3.08	2.75	1.54
6	0.168	2.259	4.03	3.21	3.06	3.06	2.93	2.43	1.54
7	0.180	1.917	4.03	2.97	2.93	2.83	2.78	2.38	1.54
8	0.182	1.619	4.03	2.76	2.65	2.65	2.58	2.26	1.49
9	0.204	1.183	4.03	2.08	2.03	2.04	2.01	1.86	1.42
10	0.180	1.489	4.03	2.84	2.73	2.73	2.63	2.24	1.49
11	0.182	1.373	4.03	2.70	2.64	2.63	2.58	2.24	1.49
12	0.189	1.270	4.03	2.64	2.62	2.60	2.49	2.23	1.47
13	0.070	4.438	4.03	4.30	3.63	3.74	3.73	2.93	1.54

Table 3 Experimental data set #3

No.	Mass flow rate (kg/min)		Pressure (x 10 ² kPa)						
	W_g	W_f	$P_{g,0}$	$P_{f,0}$	$P_{f,1}$	$P_{f,2}$	$P_{m,1}$	$P_{m,2}$	$P_{m,3}$
1	0.081	4.926	5.03	5.27	4.45	4.79	4.58	3.72	1.82
2	0.133	4.198	5.03	4.92	4.28	4.39	4.28	3.43	1.84
3	0.161	3.497	5.03	4.51	4.20	4.22	4.03	3.33	1.84
4	0.187	2.844	5.03	4.15	3.98	3.95	3.80	3.13	1.84
5	0.199	2.446	5.03	3.89	3.68	3.69	3.53	2.98	1.84
6	0.213	2.083	5.03	3.50	3.43	3.44	3.27	2.83	1.82
7	0.225	1.762	5.03	3.18	3.08	3.08	3.01	2.63	1.79
8	0.073	5.417	5.03	5.43	4.49	4.66	4.68	3.61	1.79
9	0.053	6.026	5.03	5.63	4.48	4.66	4.83	3.63	1.74
10	0.232	1.270	5.03	2.82	2.73	2.73	2.63	2.43	1.74

Table 4 Experimental data set #4

No.	Mass flow rate (kg/min)		Pressure (x 10 ² kPa)						
	W_g	W_f	$P_{g,0}$	$P_{f,0}$	$P_{f,1}$	$P_{f,2}$	$P_{m,1}$	$P_{m,2}$	$P_{m,3}$
1	0.255	1.762	6.03	3.49	3.43	3.44	3.23	3.03	2.01
2	0.245	2.446	6.03	4.33	4.23	4.25	3.98	3.43	2.09
3	0.211	3.497	6.03	5.17	4.83	4.86	4.63	3.72	2.14
4	0.197	3.960	6.03	5.43	4.93	5.01	4.78	3.82	2.14
5	0.175	4.438	6.03	5.68	5.03	5.18	4.98	3.92	2.14
6	0.148	4.926	6.03	5.92	5.13	5.27	5.13	4.02	2.14
7	0.163	4.681	6.03	5.79	5.13	5.22	5.03	3.99	2.14
8	0.138	5.171	6.03	6.04	5.23	5.37	5.28	4.07	2.09
9	0.224	3.055	6.03	4.87	4.60	4.63	4.38	3.63	2.14

4. 결과 및 고찰

우선 실험자료 (W_g , W_f , $p_{f,0}$, $p_{g,0}$)로부터 식 (6), (8), (10), (12) 및 (21)에 대한 가장 적절한 유동 모델상수값을 다음과 같이 결정하였다.

$$c_1=1.0, c_2=0.25 \quad (47)$$

$$c_3=20.0, c_4=0.4 \quad (48)$$

$$c_5=6.0, c_6=0.3 \quad (49)$$

$$c_{B,g}=0.3, c_{B,f}=0.5 \quad (50)$$

이러한 모델상수값을 사용하여 Y-Jet 분무노즐의 분사조건에 따른 유량 및 노즐내부의 압력분포를 예측하였다.

Fig. 5와 6은 공기 분사압력을 일정하게 유지시키고 물 분사압력을 변화시켜 얻은 공기와 물의 유량변화를 세개의 실험세트(Tables 2, 3과 4)의 결과와 함께 나타내고 있다. 이전의 연구결과(Lee 등⁽⁶⁾)도 비교를 위해 같이 나타내었다. 공기 분사압력이 일정할 때 물 분사압력이 증가함에 따라 물의 유량은 증가하고 공기유량은 감소하고 있음을 알 수 있다. 공기 분사압력이 높아졌을 때는 물의 유량은 감소하나 공기유량은 증가한다. 이러한 경향은 이미 Mullinger와 Chigier⁽¹⁾의 연구에서 보고 되었고 본 연구에서도 확인할 수 있었다. 따라서 액체(연료)와 기체(공기)의 유동은 서로 상관관계가 있음을 알 수 있다. 물의 유량변화는 Lee 등⁽⁶⁾

의 연구결과와 별 차이없이 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 공기유량의 예측결과는 물 분사압력이 공기 분사압력보다 높은 경우 실험결과보다 매우 크게 나타나고 있다. 이는 물 분사압력이 비교적 높은 경우 혼합지점에서 물의 유동에 의해 공기유동이 크게 방해 받는다는 것을 의미하며 (앞서 이를 막힘효과라고 언급하였다), 이에 대한 연구가 좀 더 이루어져야 할 것이다.

분사압력이 $p_{g,0}=620$ kPa, $p_{f,0}=420$ kPa인 경우 (Table 1, No. 8)의 유동방향에 따른 대표적인 압력분포는 Fig. 7과 같다. 측정된 값들과 함께 Lee

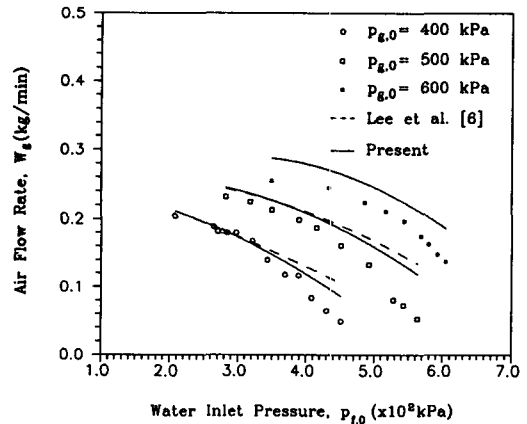


Fig. 5 Variation of air flow rate as a function of water and air supply pressures

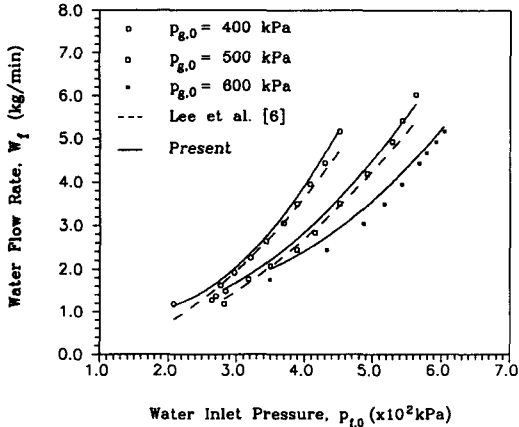


Fig. 6 Variation of water flow rate as a function of water and air supply pressures

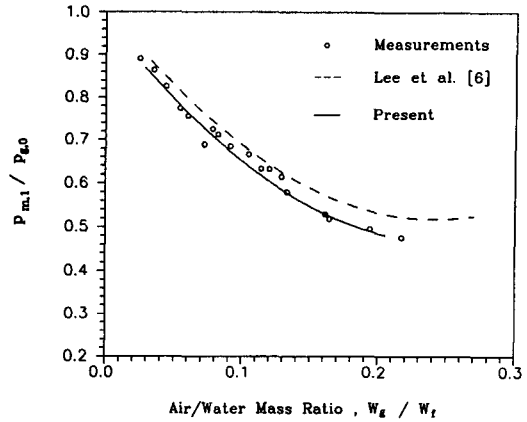


Fig. 8 Relationship between the pressure ratio ($p_{m,1}/p_{g,0}$) and the air/water mass flow rate ratio (W_g/W_f)

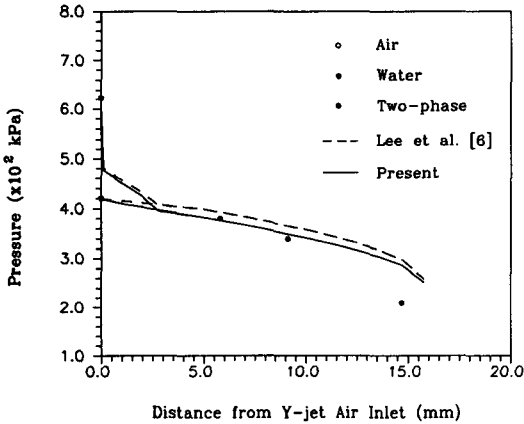


Fig. 7 Pressure distribution along the flow direction inside the nozzle ($p_{g,0}=620$ kPa, $p_{f,0}=420$ kPa)

등⁽⁶⁾의 연구결과도 비교를 위해 같이 도시하였다. 본 모델의 결과는 Lee 등⁽⁶⁾의 연구결과에 비해 혼합지점에서의 압력이 다소 낮게 나타나며, 실험결과에 좀 더 근접하는 것을 알 수 있다. 대부분의 경우에 2상유동관 출구에서 초우킹(choking)이 발생하고 있다. 공기 분사압력이 매우 높을 때는 때때로 혼합지점 바로 앞의 공기공급관 출구에서도 초우킹이 발생한다.

Fig. 8은 혼합지점의 압력비 ($p_{m,1}/p_{g,0}$)와 공기와 물의 유량비 (W_g/W_f)의 관계를 18개의 실험결과와 함께 나타내고 있다. 압력비는 예측과 실험결과가 모두 유량비의 증가에 따라 감소하고 있다. 이는 Mullinger와 Chigier⁽¹¹⁾의 결과와 동일한 경향을 나

타낸다. 그러나 본 논문의 예측결과와는 이질처럼 선형적인 관계가 아닌 Hurley와 Doyle⁽¹⁰⁾이 지적한 바와 같이 비선형적인 관계를 보여주고 있다. 본 논문에서 사용한 Y-Jet 분무노즐은 기존의 연구에서 사용한 것과 상이하므로 혼합지점의 압력비의 직접적인 비교가 어렵다. 본 논문에서 사용한 모델이 Lee 등⁽⁶⁾의 결과에 비해 다소 개선된 결과를 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 수력학적 유동모델을 개발하여 Y-Jet 2유체 분무노즐 내부의 유동특성을 살펴보았다. 단순화된 1차원 해석을 통해 분사압력과 분사유량과의 관계를 예측하였다. 기체 및 2상유동관에서는 유체의 압축성을 고려하였으며 Lee 등⁽⁶⁾의 모델을 개선하여 계산을 수행하였다. 또한 분사유량과 분사압력, 그리고 노즐내부의 압력분포를 실험을 통하여 살펴보았다. 일반적인 유량/압력관계를 살펴보면 공기 분사압력이 증가 또는 액체 분사압력이 감소함에 따라 액체유량은 감소하고 공기유량이 증가함을 알 수 있다. 분사압력 및 유량에 대한 실험결과로부터 관 마찰계수 및 액체의 이탈/유입률을 도출하였다. 본 모델을 통하여 노즐내부의 압력분포를 계산한 결과 본 논문의 모델이 이전의 Lee 등⁽⁶⁾의 모델보다 실험치에 좀더 가깝게 나타나고 있다. 대부분의 경우 2상유동관 출구에서 초우

킹이 예측되었다. 그러나 2상유동관에서의 압력분포는 아직도 노즐출구 가까운 곳에서 실험결과와 차이를 보이고 있다. 이것은 혼합지점 근처에서의 압력강하 (좀 더 정확히는 $C_{B,G}$ 및 $C_{B,J}$ 는 유동의 함수이며 이를 좀 더 적절히 모델링하여야 한다), 2상유동관의 2유체 경계면의 마찰계수 (f_i), 2상유동 형태 및 액적의 이탈/유입률 등을 상세하게 고찰하므로써 규명될 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업 (KOSEF-89-02-03-08, KOSEF-92-51-00-02) 및 국방과학 연구소의 장기기초연구사업 (ADD-90-5-5) 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드린다.

참고문헌

- (1) Mullinger, P. J. and Chigier, N. A., 1974, "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers," Journal of the Institute of Fuel, Vol. 47, pp. 251~261.
- (2) Graziadio, M., Andreussi, P., Tognotti, L. and Zanelli, S., 1987, "Atomization of Coal-Water Fuels by a Pneumatic Internal Mixing Nozzle Part I-Two-Phase Flow Inside the Nozzle," Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, pp. 187~208.
- (3) De Michele, G., Graziadio, M., Novelli, G., Andreussi, P. and Giacomelli, A., 1989, "Scaling Problems of HFO Y-Jet Atomizers," Proc. 4th Members Conference, Int. Flame Res. Found., Noordwijkerhout, The Netherlands.
- (4) De Michele, G., Graziadio, M., Morelli, F. and Novelli, G., 1991, "Characterization of the Spray Structure of a Large Scale H.F.O Atomizer," Proc. of ICLASS-91, Gaithersburg, MD, U. S. A., pp. 779~786.
- (5) Andreussi, P., Tognotti, L., De Michele, G. and Graziadio M., 1992, "Design and Characterization of Twin-Fluid Y-Jet Atomizers," Atomization and Sprays, Vol. 2, pp. 45~59.
- (6) Sang Yong Lee, Byung Suh Park and Wang Kee In, 1992, "Study of Flow Characteristics inside a Y-Jet Twin-Fluid Atomizer," Proc. of the 2nd JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Kitakyushu, Japan.
- (7) Shapiro, A. H., 1953, "Compressible Fluid Flow," Vol. 1, John Wiley & Sons.
- (8) Wallis, G. B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow," McGraw-Hill.
- (9) Collier, J. G., 1981, "Convective Boiling and Condensation," 2nd Ed., McGraw-Hill.
- (10) Hurley, J. F. and Doyle, B. W., 1985, "Design of Two-Phase Atomisers for Use in Combustion Furnaces," Proc. of ICLASS-85, pp. 1A/3/1-1A/3/13.