

공기보조식(air-assisted) 플래쉬분무의 분무 각 확대 특성 연구

Analysis of spray cone angle of air assisted flash atomization

류태우*, 김세원*, 방병열*

Tae U Yu, Sae Won Kim, Byong Ryeol Bang

Abstract

When the water jets heated up to the saturation temperature at a high line pressure are sprayed into a reduced (atmospheric) pressure through an air-assisted nozzle, the jets experience sudden exposure into a reduced pressure, get superheated and produce steam bubbles while atomization processes of jets are taking place. This process is called flash atomization. In this study the flash atomization of superheated water jets assisted by air has been studied. Sprays with flash atomization have been photographed at various water and air flow rates and water superheats. It has been found that the spray angle with flash atomization increases with water superheat and water flow rate but decreases with air flow rate, The degree of change of spray angle has been analyzed and correlated as a function of superheat, air and water flow rates.

주요기술용어(Key Words) : Flash Atomization (플래쉬 분무), Air-assisted (공기보조식), Spray Cone Angle (분무각), Superheat (과열), Saturation Temperature (포화온도)

1. 서론

플래쉬분무란 액체를 이송압력의 포화증기 온도 까지 가열하고 노즐을 통해 저압의 분무실에 분무하므로 과열되어있는(superheated) 액체가 가지고 있는 에너지를 순간적으로 방출하면서 분무상태를 추가적으로 개선하는 것을 말한다. 이러한 추가적인 분무상태 개선은 분무체적 팽창, 분무 각 증가, 미립화 향상, 등의 효과로 나타난다. 플래쉬분무가 가능한 액체는 단일화학성분을 갖는 액체를 말한다. 물, 경유, 액화산소, 액화탄화수소연료, 알코올, 등이 있다.

과열(superheated) 된 액체 젯트의 플래쉬 현상에 대한 실험적 및 이론적 연구는 1950년대 부터 시작 되었다[1,2]. Suzuki 등 [3]은 실험을 통해 과열 된 물 젯트에서 발생하는 기포의 발생 형태에 대한 분석을 하였다. Lienhard 와 Day [4]는 과열된 젯트의 분열(breakup)길이를 측정하여 Re수와 관련지었다. Kitamura 등 [5]은 과열된 물 젯트에서 액체 성분이 완전히 플래쉬 되어 증기가 되는 과열온도 차를 실험을 통해 정의하였다. Kessler 등 [6]은 한개 또는 2개의 탄화수소 액체연료 혼합물의 플래쉬 분무에 대한 실험 연구를 수행하였다. Zeigerson -Katz 와 Sher [7], Gemci 등 [8]은 액체와 분무 공기/가스에 의해 생성되는 분무의 플래쉬 현상을 발표하였다.

* 한국생산기술연구원

본 연구에서는 과열된 액체(물)가 공기보조식(air-assisted) 노즐을 통해 분무 될 때 생성되는 플래쉬분무 현상을 분무 각 변화 측면에서 실험을 하고 해석을 수행하고자한다.

2. 실험방법 및 장치

플래쉬분무를 구현하기위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 펌프는 물을 이송하여 노즐을 통해 분무실에 분무 한다. 이송되는 물은 펌프에 의해 노즐까지 고압으로 이송되면서 가열장치에 의해 가열된다. 가열온도는 이송라인의 압력을 측정하여 이 압력에서 물의 포화증기온도 까지를 상한으로 한다.

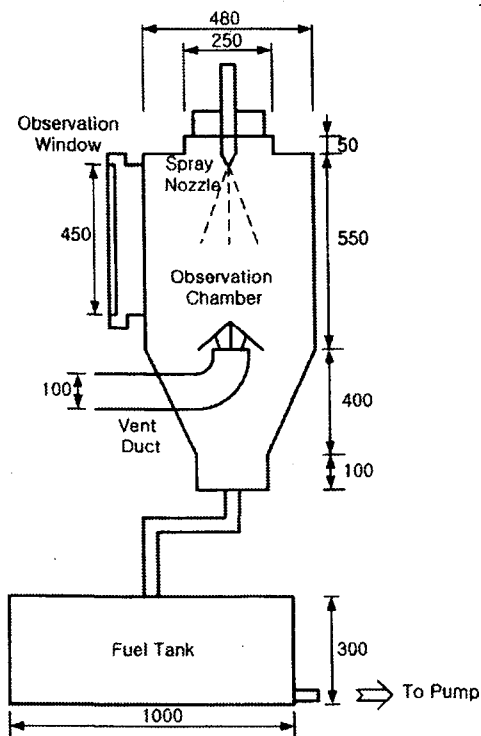


Fig.1 Experimental apparatus

3. 플래쉬분무의 실험

플래쉬분무 실험을 위해 Fig. 1의 실험장치를 이용하였다. 일단 실험 대상액체로 물을 사용하였다. 사용된 노즐은 구멍 하나인 공기

보조식(air assisted) 노즐이다. Fig. 2는 물 온도가 15 °C 와 160°C 두 가지 경우에 대한 분무 사진이다. 여기서, 공기유량과 물유량의 질량비를 공액비(AFR)로 정의하여, 물 유량이 1.4kg/min 일 때 AFR이 0.1과 0.3에 대한 분무상태를 실험하였다. 물 온도가 15 °C인 경우, 공기 비가 0.3일 때가 0.1일때 보다 분무 각이 크다. 이것은 같은 물 유량에서 공액비가 클수록 공기유량이 커지고 따라서 공기가 보다 압축된 상태로 노즐로 투입되고 노즐 후 팽창되므로 분무 각이 커지게 된다. 그러나 물을 160°C로 가열하였을 경우에는 이미 설명한 바와 같이 분무 시 갑작스러운 압력강하와 이로 인한 스팀발생으로 인하여 물의 체적이 팽창하므로 분무 각이 증가 하나 공액비가 커질 경우(AFR 0.3 일 경우) 이러한 분무 각 증가 정도가 줄어들게 된다. 이것은 공액비가 0.3일 경우 가열로 인한 부피팽창 효과에 비해 노즐 분무 중심 축 방향 모멘텀이 커 분사 각 확대 정도가 줄어든다.

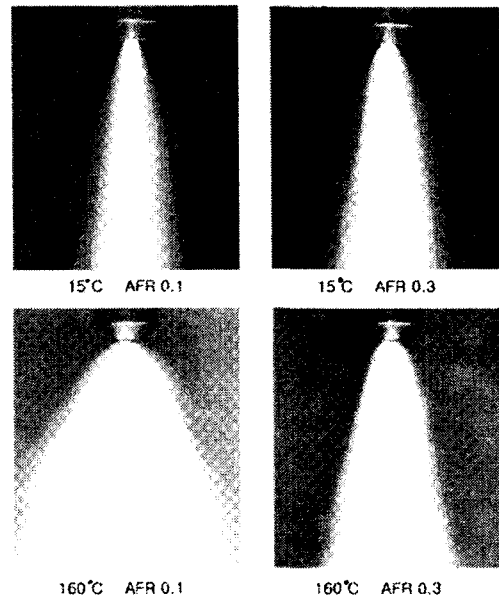


Fig. 2 Photograph of water sprays at temperatures of 15°C and 160°C (water flow rate : 1.4kg/min, AFR : Air flow rate/Water flow rate)

4. 플래쉬분무의 체적팽창

이와 같이 물을 고압에서 포화증기온도 까
지 가열 (이송라인 압력의 포화증기온도 미만
까지) 하고 대기압으로 분사하면 이 분무는
갑작스러운 체적팽창이 일어나게 된다. 이러
한 체적팽창과정에서 고압의 포화증기온도로
가열된 물이 포화증기압력 이하로 갑작스러운
압력 강하할 때 물의 일부가 증기로 증발한
다. 또한 나머지 물은 낮아진 압력에 상응하
는 포화증기온도로 낮아지며 여분의 엔탈피는
물의 일부가 증발하는데 필요한 열로 사용된
다.

예를 들면 고압에서 물을 200°C(포화증기압
=1550kPa 또는 15atm)로 가열하면 물의 엔탈
피는 약 0.853MJ/kg 이다. 대기압에서 물의
증발온도는 100°C 이며 이때 물의 엔탈피는
0.43MJ/kg 이므로 200°C로 가열된 물의 엔탈
피와의 차이는 0.423MJ/kg 가 된다. 따라서
고압에서 200°C로 가열된 물을 대기압으로 분
무 할 때 물은 초과 엔탈피 0.423MJ/kg을 방
출하면서 100°C로 냉각되고 방출된 에너지는
물의 일부를 급격하게 증발시키며 물의 체적
을 팽창하게 한다. 실제로 이때 방출되는 엔
탈피 0.423 MJ/kg는 물의 일부를 증발시키
는데 사용되어질 수 있다. 만약 물로부터 방출
되는 엔탈피 전부는 물 자신을 증발시키는 에
너지로 사용 되어진다면 100°C 물의 기화열은
2.26 MJ/kg 이므로 200°C 물 20% 만큼 증발
되어 스팀이 될 수 있다. 이 경우 급격한 팽
창에 의해 체적변화는 약 300배 이상이 된다.

물의 포화엔탈피는 Steam Table[9]에서 얻
을 수 있으며, 이를 온도 373K와 500K 사이
에서 다음과 같이 온도의 선형함수로 나타낼
수 있다.

$$h = 4.32 \times 10^3 T_s - 1.193 \times 10^6 \text{ (J/kg)} \quad (1)$$

$$(373K < T_s < 500K)$$

여기서 T_s 는 포화 물 온도(K) 이다. 따라서
373K에서 물의 엔탈피에서 온도가 올라가

로 변화하는 엔탈피 변화는 식 (2)와 같이 표
현할 수 있다. 이 값은 물 가열에 따라 스팀
생산에 제공되는 엔탈피 값이다.

$$\Delta h = h - h_f$$

$$= 4.32 \times 10^3 T_s - 1.612 \times 10^6 \text{ (J/kg)} \quad (2)$$

$$(373K < T_s < 500K)$$

여기서 $h_f : 0.419 \times 10^6 \text{ J/kg}$
(대기압 373K에서 물의 엔탈피)

비체적 및 엔탈피와 포화증기의 질량분율은
식(3)과 같이 나타나므로 식(2)의 엔탈피 차에
의해 포화증기의 질량분율(x)를 계산 할 수
있다.(식(4))

$$v = v_f + x(v_g - v_f)$$

$$h = h_f + x(h_g - h_f) \quad (3)$$

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} = \frac{\Delta h}{h_{fg}} \quad (4)$$

플래쉬분무에 의한 물의 체적변화는 식
(3,4)에 의해 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{v - v_f}{v_f} = \left(\frac{v_g}{v_f} - 1 \right) \frac{\Delta h}{h_{fg}}$$

$$= (3.2 T_s - 1.194 \times 10^3) \frac{1}{1.043} \quad (5)$$

여기서 $h_{fg} : 2.255 \times 10^6 \text{ J/kg}$
(대기압 373K에서 물의 증발에너지)

$v_g : 1.672 \text{ m}^3/\text{kg}$
(스팀의 비체적, 대기압 373K)

$v_f : 1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$
(물의 비체적, 대기압 373K)

증발된 증기의 질량비는 식(4)로부터 다음
과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta h}{h_{fg}} = 1.916 \times 10^{-3} T_s - 0.715 \quad (6)$$

이러한 관계식들은 온도에 대해 선형관계가
있다. Fig. 3은 물의 플래쉬 분무에 의해 발생

되는 스팀의 질량 비 $\frac{\Delta m}{m}$ 와 이에 따른 분무의 체적변화 $\frac{\Delta V}{V}$ 를 나타낸다.

이러한 플래쉬분무 현상은 물과 같이 어떤 압력에 하나의 비등온도가 존재하고 압력이 증가할수록 비등온도가 증가하는 액체에 똑같이 적용될 수 있다. 이러한 액체를 여기서는 단일성분액체라 하고 물과 같은 방식의 체적팽창 해석이 가능하며 단지 물보다 다른 온도와 압력에 따라 변하는 단일성분액체의 엔탈피 변화, 증발에너지, 비체적을 고려하면 된다. 즉, 단일성분액체의 플래쉬분무에 의한 체적변화는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 한편 이러한 단일성분액체가 자신보다 비등점이 높은 다른 액체나 고체와 혼합되어 있을 경우 비체적은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_0 = \gamma v_f + (1 - \gamma) \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

여기서 v_f : 단일성분액체의 비체적
 ρ : 단일성분액체 이외의 밀도
 γ : 혼합물 중 단일성분액체의 질량비

플래쉬분무에 의한 체적변화는 단일성분액체의 증발에 의한 체적 팽창만 고려한다면, 이때 비체적은 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$v = \gamma [v_f + x(v_g - v_f)] + (1 - \gamma) \frac{1}{\rho} \quad (8)$$

여기서 v_g : 단일성분액체 증기의 비체적
 $x = \frac{\Delta h}{h_{fg}}$: 단일성분액체 포화증기의 질량분율
 h_{fg} : 단일성분액체의 증발에너지

그러므로 플래쉬분무에 의한 체적변화는 식(8)과 식(7)의 차에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{v - v_0}{v_0} = \frac{(v_g - v_f) \cdot \frac{\Delta h}{h_{fg}} \cdot \gamma}{v_f \cdot \gamma + (1 - \gamma)/\rho} \quad (9)$$

역시 단일성분액체가 물일 경우 상기 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{(3.2 T_s - 1.194 \times 10^3)}{1.043 + \frac{1 - \gamma}{\gamma} \frac{1}{1.3}} \quad (10)$$

여기서 ρ : 1.3×10^3 kg/m³
 (단일성분액체 이외의 밀도, 가정)

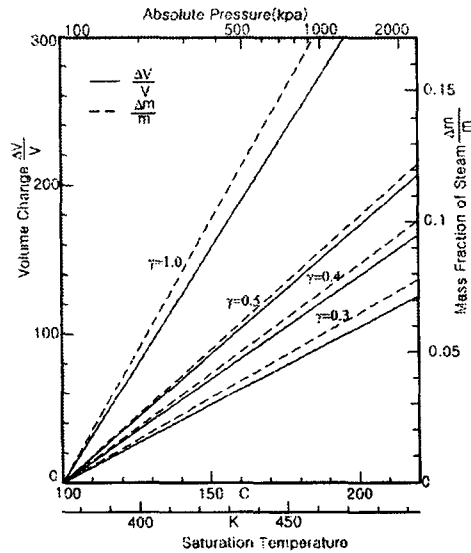


Fig. 3 Volume change of flash atomization of water mixed sprays (γ : fraction of water)

만약 혼합물에 물이 30% 혼합되어 있다면, 200°C로 가열된 혼합물이 순간적인 증발현상으로 생산되는 스팀량은 혼합물 kg 당 0.06kg 발생된다. 이 경우 체적 변화는 약 100배가 된다. Fig. 3에는 물의 혼합비율이 0.5, 0.4, 0.3에 대한 체적효율을 나타내었다. 한편 200°C로 가열된 혼합물의 경우 플래쉬분무 과정에서 물을 제외한 물질에 저장된 열이 물로 전달된다면 이것은 추가적인 플래쉬분무에 에너지가 될 것이며 더 나아가 스팀 발생율을 증가시키고 결국 추가적인 체적 증가를 가져다 줄 것이다.

5. 플래쉬분무의 분무 각 증대

Fig. 2에서 보는 것과 같이 플래쉬분무 동안의 급격한 체적변화는 분무 각을 증가시킨다. 이러한 분무 각 증가가 어떤 변수에 의해 결정되는지 해석하였다.

분무와 관련하여 2개의 분무 속도 성분을 정의할 수 있다. 그 하나는 축 방향 분무속도 V_a , 다른 하나는 원주방향으로 진행되는 분무속도 V_r 이다. 속도 성분 정의는 Fig. 4에 설명되어 있다. 플래쉬분무를 적용하는 분무의 경우에는 과열된(superheated) 액체의 추가적인 동력학적에너지 때문에 추가적인 원주방향 속도 V_f 가 정의될 수 있다. Fig. 4에서 보는바와 같이 플래쉬분무 없는 분무의 반각 α_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sin \alpha_0 = \frac{V_r}{V_a} \quad (11)$$

Fig. 4에서 플래쉬분무의 경우 반각 α 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sin \alpha = \frac{V_r + V_f}{V_a} \quad (12)$$

만약에 플래쉬분무 시 얻어지는 에너지($\Delta\psi$) 모두가 원주방향 동력학적 에너지로 전부 변환된다면 추가되는 속도성분의 최고 값 $V_{f,max}$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\psi = \frac{V_{f,max}^2}{2} \quad (13)$$

여기서 포화증기온도 이상 과열된 액체로부터 얻어지는 에너지($\Delta\psi$)는 등압과정에서 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\psi = \Delta h - T_{sat}\Delta S \quad (14)$$

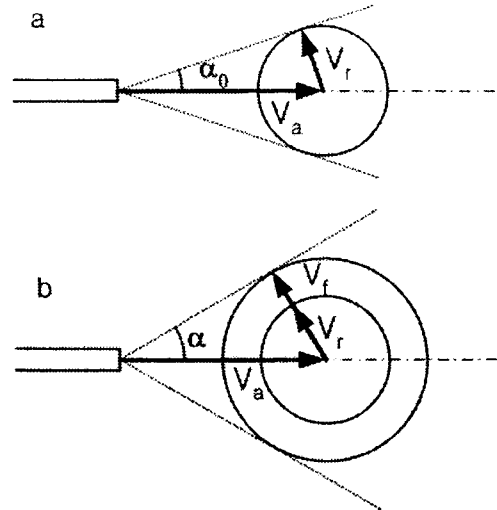


Fig. 4 Spray cone angle
a. without flash atomization
b. with flash atomization

여기서 Δh : 액체의 과열된상태(superheated)와 포화된상태(saturated)의 엔탈피 차이

T_{sat} : 분무실에서의 액체의 포화증기온도

ΔS : 액체의 과열된상태(superheated)와 포화된상태(saturated)의 엔트로피의 차이

비열 C_p 가 거의 일정하다고 가정하면 상기 식은 다음 식으로 표현할 수 있다. (관심은도 범위에서 물의 경우 비열 C_p 거의 일정)

$$\Delta\psi = C_p \left[\Delta T - T_{sat} \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{sat}} \right) \right] \quad (15)$$

여기서 C_p : 일정한 압력에서 액체의 비열

ΔT : 액체의 과열(superheat)

$T = \Delta T + T_{sat}$: 과열된(superheated) 액체의 온도

그러므로 과열된 액체의 유용(available) 에너지 ($\Delta\psi$)는 등압과정에서 다음의 관계로 표현된다.

$$\Delta\Psi = C_p \left[\Delta T - T_{sat} \cdot \ln \left(\frac{\Delta T + T_{sat}}{T_{sat}} \right) \right] \quad (16)$$

이러한 과열된 액체의 유용 에너지는 분무의 동력학적 에너지 또는 분무 중 새로운 표면 에너지의 증가로 활용될 수 있다. Lienhard [10] 의 연구결과 동력학적 에너지에 비해 새로운 표면에너지의 크기는 중요하지 않다고 하였다.

따라서 플래쉬분무에 의해 추가되는 원주방향 최고속도 $V_{f_{max}}$ 는 다음 식으로 표현 될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{f_{max}} &= (2\Delta\Psi)^{0.5} \\ &= (2C_p)^{0.5} \left[\Delta T - T_{sat} \ln \left(\frac{\Delta T + T_{sat}}{T_{sat}} \right) \right]^{0.5} \quad (17) \end{aligned}$$

현실적으로는 과열된 액체의 일부분만이 포화상태로 돌아가고 분무 각도 변화에 기여할 것이다. 따라서 실질적인 속도 증가 V_f 는 플래쉬분무로 얻어지는 최고 추가속도 $V_{f_{max}}$ 에 효율지수 ξ 로 관련된다고 설명할 수 있다. 즉

$$V_f = \xi V_{f_{max}} \quad (18)$$

여기서 효율지수 ξ 는 1보다 작으며 적용되는 분무 노즐, 단일성분물질의 량, 대상액체의 종류 등에 의해 결정되는 상수가 될 것이다.

따라서 플래쉬 분무의 속도 V_f 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_f &= V_a (\sin \alpha - \sin \alpha_0) = \xi V_{f_{max}} \\ &= \xi (2C_p)^{0.5} \left[\Delta T - T_{sat} \ln \frac{\Delta T + T_{sat}}{T_{sat}} \right]^{0.5} \quad (19) \end{aligned}$$

여기서 플래쉬 분무의 반각 α 는 단일성분액체의 과열(superheat) 온도 ΔT , 효율지수 ξ , 분무의 축방향 속도 V_a 로 다음식과 같이 연결시킬 수가 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \sin^{-1} \left[\sin \alpha_0 + \frac{\xi}{V_a} (2C_p)^{0.5} \right. \\ &\quad \left. \left\{ \Delta T - T_{sat} \ln \frac{\Delta T + T_{sat}}{T_{sat}} \right\}^{0.5} \right] \quad (20) \end{aligned}$$

여기서 α : 플래쉬분무에 의한 분무 반각

α_0 : 정상분무의 반각

T_{sat} : 단일성분액체의 포화증기온도

ξ : 효율지수

V_a : 분무의 축 방향 속도

C_p : 등압 비열

상기식으로 부터 분무각 α 를 계산하기위해서는 ξ/V_a 값을 알아야한다. ξ/V_a 값은 실험을 통해 얻을 수 있다. 일단 상기 식을 ξ/V_a 값을 기울기로 하는 식을 만들어 보면

$$\sin \alpha - \sin \alpha_0 = \frac{\xi}{V_a} (2C_p)^{0.5} \cdot$$

$$\left[\Delta T - T_{sat} \ln \frac{\Delta T + T_{sat}}{T_{sat}} \right]^{0.5} \quad (21)$$

예측한대로 우변항

$$(2C_p)^{0.5} \left[\Delta T - T_{sat} \ln \frac{\Delta T + T_{sat}}{T_{sat}} \right]^{0.5} \text{ 은 단}$$

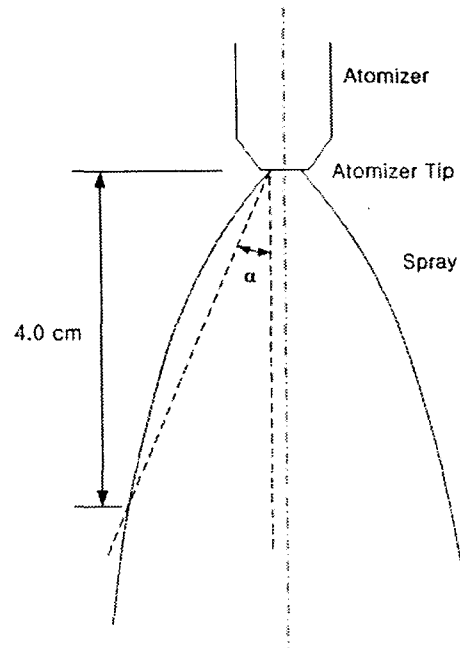


Fig. 5 Definition of spray cone angle

일성분액체의 과열(superheat)온도에 따라 계산되는 값이며 좌변항 $(\sin \alpha - \sin \alpha_0)$ 은 실험을 통해 측정되는 분무 각으로 계산된다. 분무실험에서 확보한 분무 사진에서 노즐 끝과 노즐 끝에서 후류 4cm 위치에서 만나는 분무 외면과 중심 축과 만드는 각을 분무 각으로 정의하여 측정하였다. 측정방식이 Fig. 5에 설명되어 있다

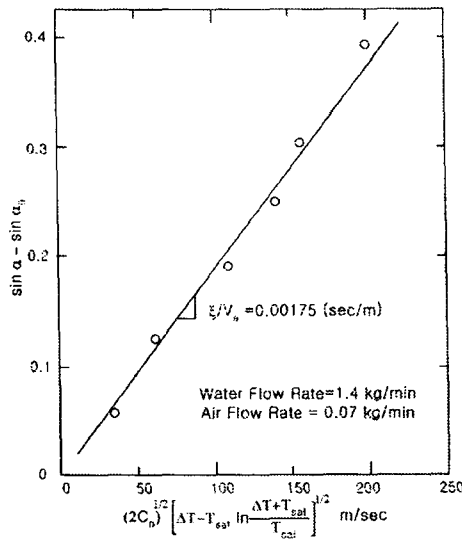


Fig. 6 Relation of $(\sin \alpha - \sin \alpha_0)$ and $(2Cp)^{1/2}[\Delta T - T_{sat} \cdot \ln((\Delta T + T_{sat})/T_{sat})]^{1/2}$

플래쉬분무에 의한 분무각 변화를 측정하기 위하여 분무공기 및 물의 유량이 고정된 상태에서 물을 가열하면서 분무 각 측정실험을 수행하였다. 과열(superheat) 온도의 함수로 분무 각을 측정하였고 우변 및 좌변항을 계산하여 그 결과를 Fig. 6에 표시하였다. 그림에 나타난 결과는 공기유량 m_a 및 물 유량 m_w 이 고정된 상태에서 우변 항은 좌변 항에 따라 거의 선형으로 변한다는 것을 보여주고 있다. 따라서 이 그림에서 기울기는 ξ/V_w 값을 의미한다.

한편 분무의 축방향 속도 V_a 는 분무공기의 질량유량 m_a 과 연료의 질량유량 m_f 에 따라

변한다. 따라서 ξ/V_w 를 m_a 와 m_f 로 연관 지을 수 있다. 따라서 같은 실험을 분무공기유량 m_a 과 물유량 m_f 을 바꾸면서 수행하였다.

한편 분무의 축방향 속도 V_a 는 분무공기의 질량유량 m_a 와 연료의 질량유량 m_f 에 따라 변하므로 다음과 같이 가정 할 수 있다.

$$V_a \sim c_1 V_a + c_2 V_w \quad (22)$$

$$V_w = \frac{m_f}{\rho_f A_f}, \quad V_a = \frac{m_a}{\rho_a A_a}$$

노즐 면적 A_0 를 기준으로 하는 연료의 평균속도를 $\bar{V}_w = \frac{m_f}{\rho_f A_0}$ 라 가정 하면, 위 식은 다음과 같이 효율지수 ξ 를 포함하는 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w} \sim c_1' + c_2' m_a \quad (23)$$

$$c_1' = c_1$$

$$c_2' = c_2 \frac{A_f}{A_a} \frac{\rho_f}{\rho_a} \frac{1}{m_f}$$

측정된 ξ/V_w 값으로부터 $\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w}$ 을 계산하고

분무공기의 질량유량 m_a 의 함수로 Fig. 7에 표시하였다.

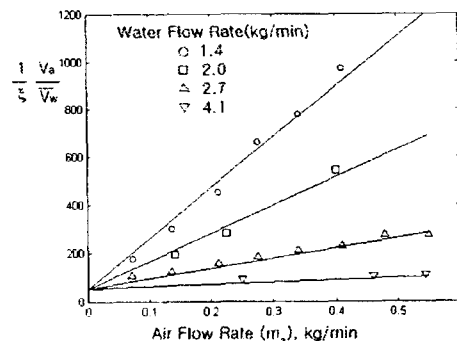


Fig. 7 Variation of $\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w}$ with air and water flow rate

실험 결과는 공기유량이 증가할 수록

$$\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w}$$

값이 선형적으로 증가하였고 그 기울기는 물 유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

그리고 공기유량이 없을 때 ($m_a = 0$) $V_a = \overline{V_w}$

이므로, 이것은 식(23)에서 $\frac{1}{\xi} = c_1'$ 가 되고, ξ

는 상수임을 알 수 있다 ($\xi = 0.0189$,

$\frac{1}{\xi} = 52.9$). 따라서 식 (23)은 다음과 같이 표

현할 수 있다.

$$\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w} = 52.9 + c_2 \frac{A_f}{A_a} \frac{\rho_f}{\rho_a} \frac{m_a}{m_f} \quad (24)$$

한편 기울기 c_2' 중 미지수 $c_2 \frac{A_f}{A_a}$ 를 물의

Reynolds 수 ($\frac{m_f}{\mu_f D_f}$) 의 함수로 나타내면 Fig.

8과 같다.

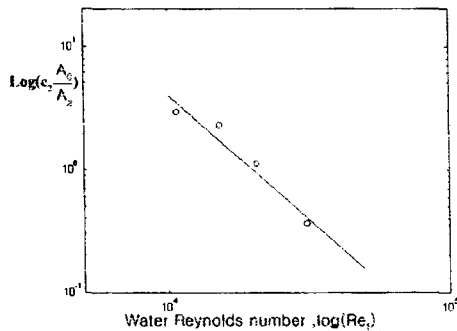


Fig. 8 Variation of $c_2 \frac{A_f}{A_a}$ with water

Reynolds Number

Fig. 8 에서 보면 $c_2 \frac{A_f}{A_a}$ 는 Re_f 수에 따라 반 비례 하는 것을 알 수 있고 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\log c_2 \frac{A_f}{A_a} = -2 \log Re_f + 8.6 \quad (25)$$

또는

$$c_2 \frac{A_f}{A_a} = 3.98 \times 10^8 Re_f^{-2} = 3.98 \times 10^8 \left(\frac{\mu_f D_f}{m_f} \right)^2$$

이러한 결과는 물이 공기와 같이 노즐 통로에서 분열(breakup), 혼합되면서 분출할 때 공기유량에 따른 축방향 속도 V_a 증가율이 Re_f^2 에 반비례 하는 것을 의미한다.

결국 축방향 속도 변수 $\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\xi} \frac{V_a}{V_w} = 52.9 + \frac{3.98 \times 10^8}{Re_f^2} \frac{\rho_f}{\rho_a} \frac{m_a}{m_f} \quad (26)$$

따라서 플래쉬분무 반각 α 는 식(21), (26)에 의해 결정된다. 즉 플래쉬분무의 분무 반각 α 는 대상액체(여기서 물)의 온도, 대상액체(여기서 물)의 superheat ΔT , 대상액체와 분무 공기의 mass 유량으로 결정되는 것을 알 수 있다.

6. 연소공정에의 응용

본 연구에서는 플래쉬분무에 의한 체적변화 및 분무 각 확대를 실험으로 확인하고 이론적으로 해석하였다. 플래쉬분무에 따른 분무 각 확대는 분무 액적의 축방향 속도를 떨어지게 하고, 추가적인 체적팽창은 분무액적을 추가적으로 미립화 시킬 것이다. 따라서 이러한 결과를 물과 혼합된 연료 또는 다른 비등점을 갖는 연료에 적용할 경우 연료 분무의 플래쉬 효과를 얻을 수 있다. 플래쉬분무는 연소과정 중에 화염의 안정성을 향상시키고 결과적으로 탄소 연소(산화)효율을 증가시킬 수 있다. 본 연구실에서는 이러한 다양한 연료에 플래쉬분무를 적용하는 연구를 수행 중에 있다.

7. 결론

플래쉬분무에 의해 분무체적이 증가가 되는 원리 및 강도를 해석하였다. 또한 이러한 체

적변화에 의해 분무 각 증가를 이론적으로 해석하였고 실험을 통해 확인하였다.

- 1) 단일성분액체를 고압에서 포화증기온도 까지 가열하고 낮은 압력으로 분무할 때 급격한 분무 체적변화가 발생한다. 이 체적변화 정도는 과열된 온도와 방출된 압력에서의 포화증기온도 차이에 따른 엔탈피 변화에 비례한다. 고압에서 200°C로 가열된 물의 경우 대기압으로 분무할 때 약 300배 이상의 체적변화를 겪게 된다. 물이 다른 액체 또는 고체분말과 혼합될 경우 혼합된 물의 양이 줄어들면 이러한 체적변화가 줄어드나 30% 물의 경우 100배 이상의 체적변화를 동반한다.
- 2) 이러한 체적변화는 분무 각 확대로 나타난다. 분무 각을 확대하는 성분은 분무의 원주방향속도에 플래쉬분무에 의한 체적변화가 추가적인 원주방향 속도성분으로 나타난다. 이 추가적인 원주방향 속도의 최대 값은 플래쉬분무 시 체적변화를 유발하는 available 에너지에 결정된다.
- 3) 플래쉬분무의 분무 반각 α 는 대상액체(여기서 물)의 온도, 대상액체(여기서 물)의 superheat ΔT , 대상액체와 분무공기의 질량 유량으로 결정될 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 전력연구원의 전력기반 연구사업 및 환경부 차세대 환경기술개발사업의 지원을 받아 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Forster, H. K. and Zuber, N. "Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Liquid," J. of Applied Physics, V.25, No. 4, April, 1954
- [2] Brown, R. and York, J. L. "Sprays Formed by Flashing Liquid Jets," AIChE.J. Vol. 8, No. 2, pp.149-153, May, 1962
- [3] Suzuki, M., Yamamoto, T., Futaagami,

N. and Maeda, S. "Atomization of Superheated Liquid Jet," ICLAS '78, Tokyo, pp.37-43. Aug. 1978

[4] Lienhard, J. H. and Day, J. B. "The Breakup of Superheated Liquid Jets," J. of Basic Engineering, Transactions of The ASME, pp.515-522, Sept. 1970

[5] Kitamura, Y., Morimitsu, H. and Takahashi, T. "Critical Superheat for Flashing of Superheated Liquids Jets," Ind. Eng. Chem. Fundam., No 25, pp.206-211, 1986

[6] Kessler, C., Sloss, C.A. and McCahan, S. "Flash Atomization in Single and Binary Hydrocarbon Sprays," ILASS America, Sacramento, CA, pp.264-267, May 1998

[7] Zeigerson-Katz, M. and Sher, E. "Spray Formation by Flashing of Binary Mixture: A Parametric Study," Atomization and Sprays, Vol.3, nO.8, PP.255-266, 1998

[8] Gemci, T., Yakut, K., Chigier, N. and Ho, T.C. "Cavitation Enhanced Flash Atomization of Hydrocarbon Liquids," ILASS-Europe 2001, Zurich, Sept. 2001

[9] Joseph H. K., Frederick G. K., Philip G. H. and Joan G. M., "Steam Tables", John Wiley & Sons Inc, 1969

[10] Lienhard, J. H. "An Influence of Superheat Upon the Spray Configuration of Superheated Liquid Jets," J. of Basic Engineering, Transactions of The ASME, pp.685-687, September 1966