

## 단순 와류 분무 노즐에서 분사되는 중공 원추형 액막의 분무각

### Spray Angle of Hollow Cone Liquid Sheet Discharged from Simplex Swirl Spray Nozzle

고광웅\*, 이상용\*

K. U. Koh, S. Y. Lee

#### Abstract

This paper investigates the spray angle and the outline shape of the liquid sheet discharged from a simplex swirl nozzle. A theoretical model was proposed and the corresponding experimental data were presented for comparison. Axial and tangential velocities and thickness of the liquid sheet at the nozzle exit were also predicted. The liquid sheet thickness at nozzle exit, as well as the discharge coefficient, turned out to be a sole function of the swirl Reynolds number. However, the axial and tangential velocities at nozzle exit and the spray angle could not be expressed only with the swirl Reynolds number. The predicted outline shape and spray angle of the liquid sheet agreed reasonably with the measured data.

**주요기술용어(Key Words):** Simplex Swirl Spray Nozzle(단순 와류 분무 노즐), Spray Angle(분무각), Gas Core(기체 코어), Film Thickness(액막), Swirl Reynolds Number(선회 레이놀즈 수).

#### 1. 서론

와류 분무 노즐은 형상이 비교적 단순하지만 낮은 분사 압력에서도 미립화 성능이 좋다. 미립화 성능이 좋은 만큼 그 응용범위<sup>(1)</sup>도 농약 살포 등 농업 분야부터 세척, 로켓 엔진 연소 장치까지 매우 넓다. 따라서 오랫동안 다양한 분야의 연구자들의 관심의 대상이 되어왔다.

와류 분무 노즐에서는 분사 액체가 Fig. 1과 같이 접선 방향의 유로를 통해 와류실(swirl chamber) 내로 공급된다. 액체는 와류실 내에서 회전하게 되고 원심력에 의해 원주 형태의 기체 코어(gas core)를 형성시킨다. 분무기 출구를 통해 분사된 액체는 접선 방향과 축방향의 속도 성분을 모두 갖는 속이 빈 원뿔형태의

액막(liquid sheet)을 형성한다. 액막이 하류로 갈수록 액막의 두께는 점차 얇아지고 불안정해진다. 불안정해진 액막은 액주(ligament)로 분열된 후 최종적으로 다시 액적들로 분열된다.

그러나 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 노즐 구조가 단순함에도 불구하고 노즐 내부에 노즐 내/외부에서의 유동 형태(flow pattern)가 복잡하여 최근까지도 유출 계수, 분무각과 액막의 궤적(형상), 분열길이, 입경 등 분무 특성과 분열 기구에 관한 연구들이 수행되고 있다.

본 연구에서는 간단한 수학적인 액막의 동적 모델을 이용하여 와류 분무 노즐에서 분사되는 액막의 분무각과 액막의 궤적을 살펴보았다. 이와 더불어 노즐 출구에서의 액막 조건(액막 속도, 액막 두께 등)을 결정하는 방법을 제시하였다. 그리고 실험으로 측정된 분무각과 모델

\* 한국과학기술원 기계공학과

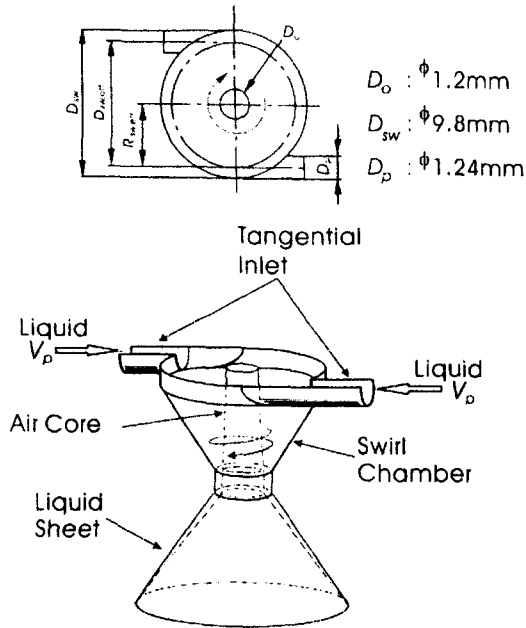


Fig. 1 Illumination of flow pattern in swirl atomizer

로부터 예측된 분무각을 비교하였다.

## 2. 액막 동적 모델과 초기 조건

### 2.1 액막 동적 모델

본 연구에서 사용한 액막 동적 모델로는 와류 분무 노즐로부터 분사된 액막을 워터벨(water bell)이 형성되기 전 분열이 일어난 것이라 생각하여 Taylor<sup>(2)</sup>가 제시하고 Lee와 Tankin<sup>(3,4)</sup>에 의해서 수정된 모델을 사용하였다. 이 모델은 비교적 간단하면서도 실험 결과를 비교적 잘 예측함을 기존 연구들은 보고하고 있다. 이들은 액막의 마찰 저항을 무시하였다. 그리고 액막의 내 액체의 점도를 무시하여 액체의 속도는 액막의 단면에서 균일하며 유선을 따라 일정하다고 가정하였다. 표면 장력은 온도만의 함수라고 가정하였다.

액막의 연속 방정식과 각운동량 보존 관계식은 다음과 같다.

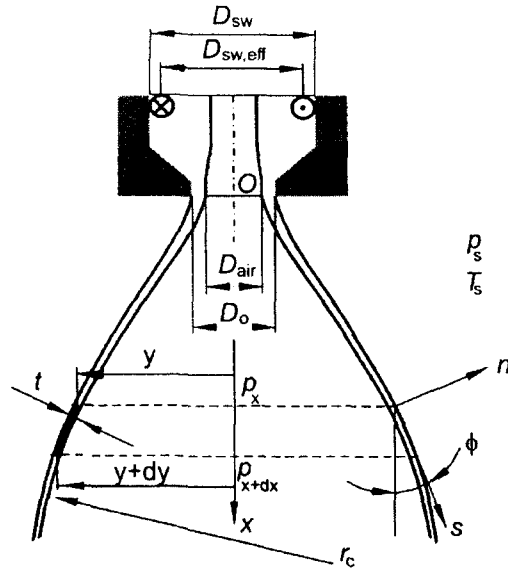


Fig. 2 Schematic diagram of the forces action on a liquid sheet segment

$$Q = (2\pi y)t \cdot u \quad (1)$$

$$v y = \text{constant} \quad (2)$$

여기서  $Q$ 는 유량이고,  $u$ 는 유선을 따라흐르는 액체의 속도,  $t$ 는 액막 두께,  $v$ 는 접선방향 속도이다. 그리고  $y$ 는 분무중심에서 액막 중심까지의 반경방향의 거리이다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 액막에 작용하는 힘들은 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{2\sigma}{r_c} + \frac{2\sigma}{y} \cos \phi + \Delta p - \frac{\rho v^2 t}{y} \cos \phi = \frac{\rho u^2 t}{r_c} \quad (3)$$

좌변 세 번째 항인  $\Delta p$ 는 속이 빈 원뿔형 액막의 내부와 외부의 압력차이다. 액막에서 상변화가 있으면  $\Delta p$ 가 발생한다. 본 연구는 주위 기체가 공기로 액막에서의 상변화가 없는 조건이므로 원뿔형 액막 내부와 외부의 압력차가 없다. 따라서  $\Delta p=0$ 으로 하였다.

2.2 초기 조건(노즐 출구 조건)

와류 분무 노즐의 출구에서의 액막 두께 및 축방향, 접선 방향의 속도 등 액막 조건은 액막의 궤적 및 분무각을 예측할 때 초기조건으로써 필요하다. 그 뿐만 아니라 예측된 액막의 궤적과 분무각의 예측에 크게 영향을 미친다. 그러나 노즐 출구에서의 액막 조건은 오래된 연구 주제이나 아직까지 완전한 해석은 이루어지지 않았다.

비점성 유동으로 노즐 내부 유동을 가정하면 출구에서의 접선 방향 속도는 각운동량 보존 관계식에 의해 쉽게 구할 수 있다. 그러나 실제 유동에서는 와류분무 노즐 내부에서의 마찰에 의해 출구에서의 각운동량은 노즐 입구에서의 각운동량 보다 작다. 본 연구에서는 노즐 출구에서 접선 방향의 속도를 구하기 위하여 노즐 내부에서의 각운동량 플럭스의 손실을  $Re_{sw}$ 의 함수로 보고한 Horvay와 Leuckel<sup>(5)</sup>의 결과를 사용하였다.

$$\frac{\dot{M}_o}{\dot{M}_{in}} = 1 - \exp(a(2 Re_{sw})^b)$$

$$a = -0.1777 G^{-2.413}$$

$$b = 0.2439 G^{0.425}$$

여기서  $\dot{M}_{in}$ 은 와류실 유입구 부근(에서의) 각운동량 플럭스이고,  $\dot{M}_o$ 는 노즐 출구에서의 운동량 플럭스이다.  $Re_{sw}$ 와  $G$ 는 선회 레이놀즈 수(swirl Reynolds number)와 형상 상수(Geometric constant)<sup>(6)</sup>로 아래와 같이 정의된다.(Fig. 1)

$$Re_{sw} = \frac{u_p \cdot R_{sw,eff}}{\nu} \quad (5)$$

$u_p$ 는 와류실 유입구의 속도이며,  $R_{sw,eff}$ 는 와류실 중심부에서 와류실 유입구의 중심선까지의 거리이다.(Fig. 1)

$$G = \frac{R_{sw,eff} R_o}{i R_p^2}$$

$$= \frac{\pi R_o^2}{Q} \cdot \frac{Q}{i \pi R_p^2} \cdot \frac{R_{sw,eff}}{R_o} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{u_{o,area}} \cdot \frac{v_p \cdot R_{sw,eff}}{R_o}$$

$$= \frac{v_o}{u_{o,area}}$$

형상 상수  $G$ 는 Giffen과 Muraszew<sup>(7)</sup>가 제시한 노즐 상수  $K$ 의 역수와 유사하다.

$$K = \frac{A_p}{\sqrt{A_{sw} A_o}} = \frac{i R_p^2}{R_{sw} R_o} \quad (7)$$

여기서  $A_p$ 는 와류실 유입구들의 총 단면적,  $A_{sw}$ 는 와류실 단면적 그리고  $A_o$ 는 노즐 출구의 단면적이다.  $i$ 는 와류실 유입구의 개수이다.

노즐 상수에는 와류실의 크기( $D_{sw}$ )를 주요 변수로 사용한 반면 형상 계수에서는 유효 와류실 직경( $D_{sw,eff}$ )을 주요 변수로 사용하였다. 일반적으로는 노즐 상수를 대표적인 변수로 사용하지만 본 연구에서는 유효 와류실 직경을 사용함으로써 노즐 내부의 와류 강도를 좀 더 정확히 예측하는 형상 계수를 주로 사용하였다.

그리고 Horvay와 Leuckel<sup>(5)</sup>는 와류실 상류에서의 각운동량 플럭스 ( $\dot{M}_{in}$ )는 와류실 유입구에 형성된 경계층에 의해 유입구의 실질적인 단면적이 감소하여 이론으로부터 얻은 각운동량 ( $\dot{M}_p$ )의 1.3배( $f=1.3$ )가 됨을 보고하였다. 형성된 경계층의 두께는 와류실 유입구의 형상(단면적, 길이)에 따라 달라진다. 따라서 와류실 유입구의 형상이 다른 본 연구에서는 Horvay와 Leuckel<sup>(5)</sup>의 연구 결과를 수정 없이 사용하기 힘들다. 본 연구에서는 이를 1.25로 수정하여 사용하였다.  $f=1.25$ 의 경우 실험값과 예측값이 가장 잘 일치했다.

$$\dot{M}_{in} = f \dot{M}_p \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f &= 1.3 : \text{Horvay와 Leuckel}^{(5)} \\ f &= 1.25 : \text{presentstudy} \end{aligned}$$

노즐 출구에서의 액막의 축방향 속도는 출구에서의 액막의 두께와 유량으로부터 얻었다. 비점성 유동에서 출구에서의 액막의 두께는 형상 상수와 기체 코어 크기 사이의 관계로부터 구할 수 있다.<sup>(6), 7)</sup>

$$2S^4 = (1 - S^2)^3 G^2 \quad (9)$$

여기서 S는 노즐 출구에서의 기체 코어 반지름( $R_{gas\ core}$ )과 노즐 출구의 반지름( $R_0$ )의 비이다. 그리고 형상 상수 G는 식 (6)에서 볼 수 있듯이 노즐 출구에서의 접선 방향 속도( $u_0$ )와 기체 코어가 없을 때 축방향 속도의 비( $u_{0,area}$ )를 나타낸다. 따라서 노즐 출구에서의 기체 코어 크기는 출구에서의 접선 방향 속도( $u_0$ )와 기체 코어가 없을 때 축방향 속도( $u_{0,area}$ )의 비로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 점성 유동에서 기체 코어의 크기를 예측하기 위해서 노즐 출구에서의 실제 접선 방향의 속도( $u_{0,viscosity}$ )로 정의한 유동 형상 상수( $G_{flow}$ )를 사용하였다. 전술한 노즐 형상만의 함수인 형상 상수 G와 구분하기 위해 본 연구에서는 이를 유동 형상 상수로 정의하였다.

$$G_{flow} = \frac{u_{0, viscosity}}{u_{0, area}} \quad (10)$$

유동 형상 상수는 유속으로 정의되기 때문에 형상 상수와 달리 유량에 따라 변한다.

Bayvel과 Orzechowski<sup>(6)</sup>는 노즐 출구에서의 압력 분포를 고려하여 식 (9)의 관계를 수정하였다. 본 연구에서는 노즐 출구에서의 액막 두께를 구하기 위해 Bayvel과 Orzechowski<sup>(6)</sup>이 제시한 관계식에 유동 형상 상수를 대입한 식 (11)을 사용하였다. 이와 같이 유동 형상 상수( $G_{flow}$ )를 이용하면 유동 형상 상수가 유량에 따라 변하므로 식 (11)을 이용하여 구한 액막 두께도 유량의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{\sqrt{1 - C_d^2 (G_{flow})^2}}{-S\sqrt{S^2 - C_d^2 (G_{flow})^2} - C_d^2 (G_{flow})^2} \quad (11) \\ &\times \ln \left( \frac{1 + \sqrt{1 - C_d^2 (G_{flow})^2}}{S + \sqrt{S^2 - C_d^2 (G_{flow})^2}} \right) \end{aligned}$$

유출계수( $C_d$ )는 본 연구와 동일한 노즐을 사용한 Koh와 Lee<sup>(8)</sup>와 고흥웅과 이상용<sup>(9)</sup>의 실험 결과를 사용하였다.(Fig. 3)

노즐 출구에서의 액막의 초기 각도 또한 예측된 분무각에 크게 영향을 준다. 연구자들에 따라 노즐 출구에서 액막은 식 (12)와 같이 노즐 출구에서의 접선방향 속도( $u_0$ )와 축방향 속도( $u_o$ )의 비로 정의되는 초기 각도(분무 반각  $\alpha$ )를 갖고 노즐 출구에서 분사된다고 주장한다.

$$\tan(\alpha) = \frac{u_o}{u_0} \quad (12)$$

그러나 노즐 출구에서 액막은 접선 방향 속도를 갖고 있으나 액체의 유동은 노즐 벽에 의해 제한되므로 액막의 초기 각도는 노즐 출구의 형상에 의해 결정된다. 본 연구에서 사용한 노즐의 출구와 분무축이 이루는 각도는  $0^\circ$ 이다. 따라서 본 연구에서는 노즐 출구에서의 액막의 초기 각도를  $0^\circ$ 로 하였다.

### 3. 분무각의 정의 및 측정

분무각은 노즐 출구에서 분출지점에서의 액체 분무의 분사 각도를 의미하며, 각 연구자들마다 다른 정의를 사용한다. 액막은 표면 장력에 의해 유동 안쪽으로 수축한다. 그리고 분무 중심축을 경계로 좌우 액막의 발달 정도가 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 분무 중심축과 좌측 액막이 이루는 각 중 가장 큰 각과 분무 중심축과 우측 액막이 이루는 각 중 가장 큰 각(Fig. 2의 a)의 합을 분무각으로 정의하

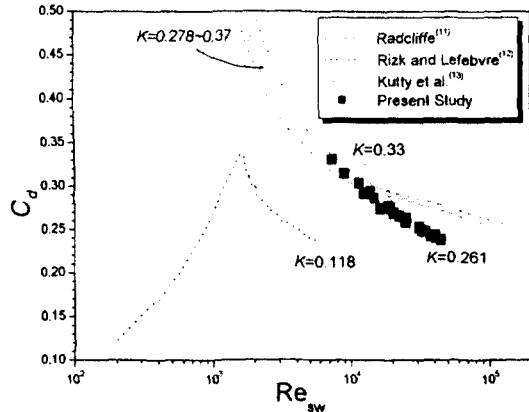
였다.

노출 시간을 1/30로 하여 얻은 분무의 평균 상으로부터 영상 처리 기법을 이용하여 분무각을 측정하였다. 영상처리 기법에서 일반적으로 이용하는 명도(gray level)의 2차 미분항이 0인 지점을 분무의 가장자리로 정의하였다. 광원은 할로겐 램프를 사용하였고 CCD카메라(model No. : IK-537K, Toshiba)를 이용하였다. 광원을 분무 유동 뒷면에, 카메라는 분무 유동 정면에 설치하는 배후 조광법(back-illumination method)을 사용하였다. 각 조건 마다 25장의 사진을 이용하였다.

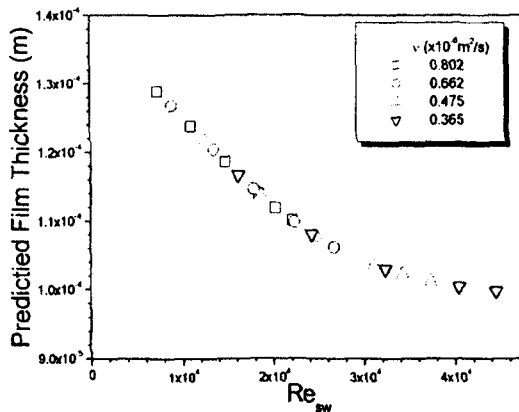
본 연구에서 사용한 와류 분무 노즐은 Koh와 Lee<sup>(7)</sup> 그리고 고평웅과 이상용<sup>(8)</sup>이 사용한 노즐과 동일한 노즐을 사용하였다. 주요한 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 노즐의 노즐 상수  $K$ 는 0.261이다. 시험 유체로는 물을 사용하였다. 분사 압력 범위는 0.04~0.6MPa이고, 유량 범위는  $(3.33\sim 10) \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ 이다. 액체 점도는 액체의 온도를 조절하여 변화시켰다. 동점성 계수의 변화 범위는  $(0.802\sim 0.365) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 이며, 이에 해당하는 절대 점성 계수의 변화 범위는  $(0.799\sim 0.355) \times 10^{-3} \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 이다. 액체 온도를 전기 가열기(heater, 2kW)와 이중관식 열교환기를 이용하여  $(30\sim 80) \pm 1^\circ\text{C}$  범위 내로 조절하였다.

#### 4. 결과 및 토의

Fig. 3 (a)에 볼 수 있듯이 Koh와 Lee<sup>(8)</sup> 그리고 고평웅과 이상용<sup>(9)</sup>은 유출 계수가 본 연구에서는 선회 레이놀즈 수의 함수임을 보고하였다. 이들은 이를 기체 코어의 크기가 선회 레이놀즈 수의 함수이기 때문에 즉 실질적인 유동의 단면적이 선회 레이놀즈 수에 따라 변하기 때문이라 설명했다. 이들이 측정한 유출 계수로부터 예측된 노즐 출구에서의 액막 두께는 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 선회 레이놀즈 수의 함수로 표현된다. 액막 두께는 선회 레이놀즈 수가 커지면 얇아진다. 즉 기체 코어 크



(a) Variation of discharge coefficient with  $Re_{sw}$



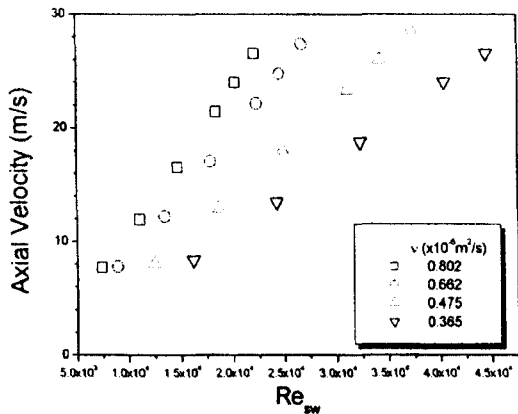
(b) Variation of predicted film thickness  $Re_{sw}$

Fig. 3 Variation of discharge coefficient film thickness with  $Re_{sw}$

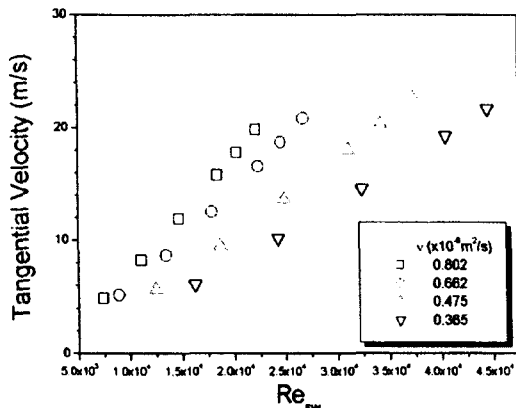
기는 커진다. 그러나 선회 레이놀즈 수가 커지면 액막 두께의 감소 기울기는 작아져 액막 두께는 일정한 값으로 점근해간다.

Fig. 4는 선회 레이놀즈 수에 따른 노즐 출구에서의 축 방향과 접선 방향의 속도 변화를 보여준다. 액체의 점도가 다른 두 분사 조건의 선회 레이놀즈 수가 같으면 노즐 출구에서의 액막 두께가 같고 실질적인 유동 단면적이 동일하다. 그러나 유량이 달라져 축방향의 속도는 서로 다르다.

식 (5)에서 볼 수 있듯이 선회 레이놀즈 수가 같으면 노즐 내부에서 손실되는 각운동량



(a) Axial velocity

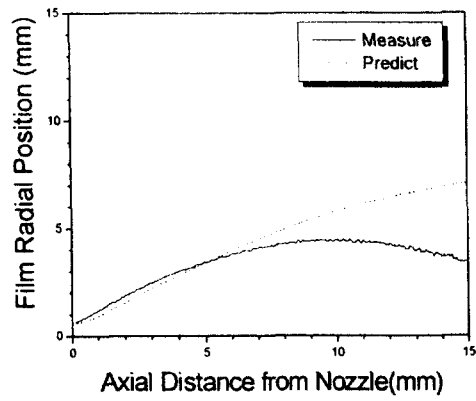


(b) Tangential velocity

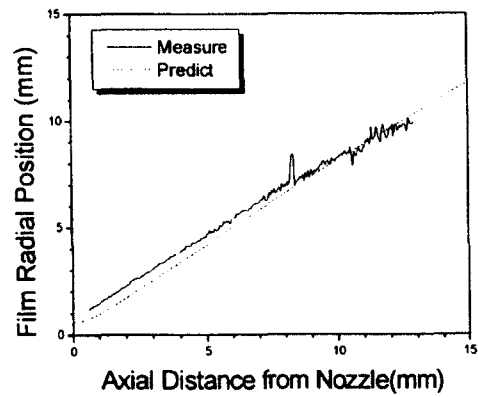
Fig. 4 Variation of predicted velocities with  $Re_{sw}$

플릭스의 비율은 같다. 그러나 유량 차이로 인하여 노즐로 유입되는 각운동량의 크기가 다르므로 노즐 출구에서의 접선 방향의 속도도 차이가 난다. 따라서 노즐 출구에서 축방향 속도와 접선 방향 속도는 선회 레이놀즈 수만의 함수로 표현되지 않는다.

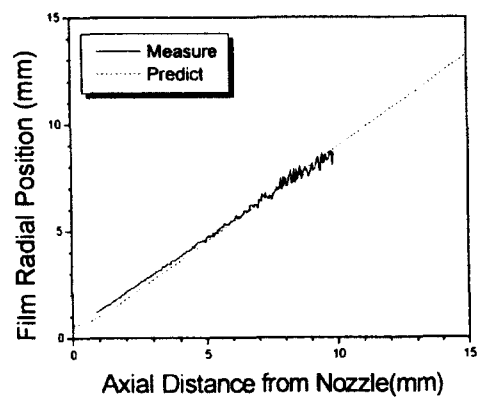
세 가지 다른 유량 조건에서 계산한 액막의 궤적을 Fig. 5는 보여준다. 유량이 증가하면 액막의 궤적 형상이 워터벨 형상에서 원뿔형의 형태로 변하는 것을 계산 값도 잘 예측하고 있다. 본 연구에서 사용한 액막의 동적 모델은 주위 기체와의 상호 작용에 의해 발생하는 파(wave)에 의한 액막의 섭동 등을 고려하지 않았다. 따라서 예측된 액막의 궤적은 실험에 비



(a)  $Q=3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n=0.475 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



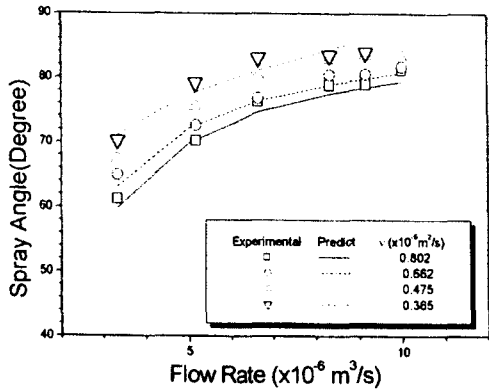
(b)  $Q=6.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n=0.475 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



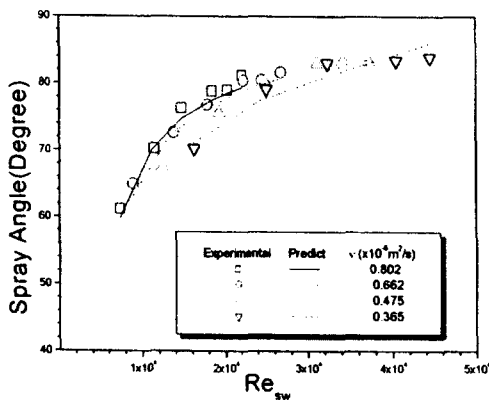
(c)  $Q=1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n=0.475 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Fig. 5 Comparison between experiments and prediction of liquid film trajectory

해 부드러운 곡선으로 보인다. 그리고 주위 기체와의 운동량 교환 등의 상호 작용과 액막 액체의 점도를 무시하였기 때문에 유량이 작은



(a) Spray angle variation with flow rate



(b) Spray angle variation with  $Re_{sw}$

Fig. 6 Comparison between experiments and predictions of spray angle

경우 분무 하류로 갈수록 예측된 액막의 궤적이 실험값과 차이를 보인다. 그러나 대체적으로 액막의 궤적을 잘 예측하고 있다.

Fig. 6에 예측된 분무각과 실험으로 측정된 분무각의 크기를 비교하였다. Fig. 6(a)가 보여주듯이 분무각은 유량이 증가함에 따라 넓어지나, 증가 기울기는 감소하여 유량이 증가함에 따라 일정한 값으로 접근해 간다.

액체의 점도가 일정할 때 유량이 증가하면 유량이 적을 때와 비교하여 노즐 내부에서는 강한 와류 유동이 형성되어 노즐 출구에서의 액막 두께가 얇게 된다. 따라서 접선 속도와 축 방향 속도 모두 증가한다. 그러나 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 유량이 작을수록 유량에 따른

접선 방향 속도의 증가율이 축방향의 속도 증가율보다 상대적으로 커서 분무각은 넓어진다. 그리고 유량이 증가할수록 액막 두께의 변화량이 작아지고 노즐 내부에서의 각운동량의 손실 비도 작아진다. 그러므로 축방향 속도와 접선 방향 속도 모두 유량이 증가함에 따라 증가 기울기의 변화가 점점 줄어들어 두 속도(축 방향과 접선방향 속도)의 비는 일정한 값으로 접근해 간다. 따라서 유량이 증가하면 분무각은 일정한 값으로 접근해 간다.

동일한 유량조건에서 점도가 감소하면 점도가 일정할 때 유량이 증가하는 경우와 동일한 이유로 분무각은 넓어진다. 유량이 커지면 점도가 분무각에 미치는 영향은 작아진다.

Fig. 6(b)는 선회 레이놀즈 수에 따른 분무각의 변화를 나타내었다. 분무각은 선회 레이놀즈 수가 커지면 넓어지나 분무각의 증가 기울기는 줄어들어 선회 레이놀즈 수와 상관없이 일정해진다. 선회 레이놀즈 수가 작은 경우에는 선회 레이놀즈 수가 같더라도 점도가 달라지면 전술하였듯이 각 조건의 유량이 달라져 노즐 출구에서의 축방향과 접선 방향의 속도비가 달라진다. 따라서 분무각은 선회 레이놀즈 수만의 함수로 나타낼 수 없다.

Fig. 6은 본 연구에서 사용한 간단한 액막의 동적 모델이 분무각의 변화를 비교적 잘 예측하고 있음을 또한 보여준다.

### 5. 결론

액막 두께는 유출 계수의 경우와 같이 선회 레이놀즈 수만의 함수로 표현된다. 그러나 노즐 출구에서 축방향과 접선 방향의 속도 그리고 분무각은 선회 레이놀즈 수만의 함수로 나타낼 수 없다. 분무각은 유량 또는 선회 레이놀즈 수가 증가함에 따라 넓어지나 증가 기울기는 작아져 일정한 값으로 접근한다. 그리고 본 연구에서 사용한 노즐 출구에서의 액막 조건과 동적 모델은 대체적으로 액막의 궤적과 분무각을 잘 예측한다.

## 후기

본 연구는 한국항공우주 연구원의 소형위성 발사체(KSLV-I) 개발사업(I), 국가지정연구실 사업(MI-9911-00-0009), 두뇌한국(BK)-21 그리고 한국과학기술원 기관고유사업 "산화제 조성변화에 따른 연소 현상 규명 및 D/B 구축," 의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- (1) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996.
- (2) G. I. Taylor, The dynamics of thin sheets of fluid, Proc. R. Soc. London. A. Vol. 253, 289-321, 1959.
- (3) S. Y. Lee and R. S. Tankin, Study of liquid spray(water) in a non-condensable environment(air), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No.3, pp. 351-361, 1984.
- (4) S. Y. Lee and R. S. Tankin, Study of liquid spray(water) in a condensable environment(steam), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No.3, pp. 363-374, 1984.
- (5) M. Horvay and W. Leuckel, Experimental and theoretical investigation of swirl nozzles for pressure-jet Atomization, Ger. Chem. Eng, Vol. 9, pp. 276-283, 1986.
- (6) L. Bayvel and Z. Orzechowski, Liquid Atomization, Taylor & Francis, 1993.
- (7) E. Giffen and A. Muraszew, The Atomization of Liquid Fuels, John Wiley & Sons, Inc., 1953.
- (8) K. U. Koh and S. Y. Lee, A note on flow discharge coefficient of simplex swirl atomizer, Proc. ILASS Americas, 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Madison, WI, pp. 110 - 114, 2002.
- (9) 고광웅, 이상용, 심플렉스 와류 분무기 내 유동의 유출계수, 대한 기계학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 1333-1338, 2002.
- (10) Mao, Chien-Pei, The dynamics of a swirling liquid film, Proc. of 8th ICLASS, pp. 1171-1178, 2000.
- (11) A. Radcliffe, The performance of a type of swirl atomizer, Proc. The Inst. Mech. Eng., Vol. 169, pp. 93-106, 1955.
- (12) N. K. Rizk, and A. H. Lefebvre, Influence of liquid properties on the internal flow characteristics of simplex atomisers, Atomisation and Spray Technology, Vol. 2, pp. 219-233, 1986.
- (13) P. S. Kutty, M. V. Narasimhan and K. Narayanaswamy, Design and prediction of discharge rate, cone angle and aircore diameter of swirl chamber atomisers, Proc. of ICLAS-78, pp. 93-100, 1978.