

# 중심 공기류를 이용한 환상 액막 미립화에 관한 연구 - 기/액 분사 유속에 따른 입경 변화 고찰

최철진\* · 이상용\*

## Atomization of Annular Liquid Sheet with Core Air Flow - SMD Variation with Gas/Liquid Injection Velocity

Chul Jin Choi and Sang Yong Lee

**Key Words :** Annular Liquid Sheet (환상 액막), Liquid Sheet Thickness (액막 두께), Momentum Flux Ratio (운동량비)

### Abstract

The atomization characteristics of an annular liquid (water) sheet of small radius with a core gas (air) flow were studied. Different sizes of annular gaps (0.2, 0.4 and 0.8 mm) were tested to find the effect of liquid sheet thickness on SMD. The inner diameter of the gas port for the core gas flow was 4 mm. Cross-section averaged SMD was measured for various liquid and gas velocities. Regions of the SMD decrease with the increase of the liquid velocity always existed regardless of the liquid sheet thickness. This attributes to the transition of the flow patterns of spray and also to the aerodynamic interaction between the atomizing gas and the ripples on the liquid sheet surface.

### 기호설명

$d_i$	중심 공기류의 직경, mm
$D_i, D_o$	환상 액막의 내경과 외경, mm
$M$	기·액 운동량비( $=\rho_L U_L^2 / \rho_A U_A^2$ )
$SMD$	단면 평균 입경, $D_{32}$ , $\mu\text{m}$
$U_L, U_A, U_R$	액체, 기체, 기/액 상대속도, m/s
$\delta$	액막의 두께, mm
$\rho_A, \rho_L$	기체와 액체의 밀도, $\text{kg/m}^3$

### 1. 서 론

2-유체 분무장치에서 액체(연료)는 주로 액주(liquid column) 혹은 액막(liquid sheet)의 형태로 분사된다. 기체와의 접촉면적을 증가시켜 미립화 효율을 증진시키기 위하여 평면 액막(plane liquid sheet) 혹은 환상 액막(annular liquid sheet)의 형태로 분사하는 방식이 많이 사용되고 있다. 환상 액막

을 분사하는 대표적인 미립화기는 액막 형성 형태(prefilming) 미립화기이다<sup>[1,2]</sup>. 그리고 Y-jet 미립화기<sup>[3]</sup>, 내부 혼합형 미립화기<sup>[4]</sup>, 기체주입(effervescent) 노즐<sup>[5]</sup> 등에서의 분무 현상을 살펴보면, 유체가 분사되기 직전의 노즐 출구 부분에서 액체가 노즐의 내벽면 주위로 환상의 액막을 이루고 그 가운데 부분에 기체나 수증기가 존재하여 분사되는 형식을 가지는 경우가 많다. 즉, 이들 미립화기에서 분무의 공통적인 현상은 분무기의 출구 부분에서 환상의 액막이 형성되고 그 중심(core) 부분에 기체가 존재하는 유동 형태를 지닌다는 것이다.

액막 형성 형태(prefilming)의 환상 액막의 미립화 현상에서 액막 두께가 평균 입경에 미치는 영향에 대한 결과들은 대부분이 2-차원적인 평면 액막을 이용한 실험에서 얻어진 것들이거나, 액막의 내경이 약 2 ~ 10 cm 의 환상 액막을 분사하는 미립화기를 이용하여 도출된 것들이다<sup>[6,7,8,9]</sup>.

Crapper와 Dombrowski 등은<sup>[10]</sup> 선형 안정성 이론을 이용하여 환상 액막의 파동 성장률(wave growth rate)의 특성을 제시하였다. 그들의 결과에

\* 한국과학기술원 기계공학과

따르면, 환상 액막의 내경이 어떤 값(약 1 cm)보다 큰 경우에는 평면 액막의 비대칭 파동 성장률(anti-symmetric)이 환상 액막에서의 성장률과 같다. 따라서 액막의 내경이 충분히 큰 경우에는 환상 액막의 두께 변화의 영향을 2차원적인 평면 액막을 이용한 실험으로 충분히 모사할 수 있으며 평균 입경에 대한 액막 두께의 상관식들을 사용하는데 무리가 없다. 그러나 Y-jet, 내부 혼합형 미립화기 등과 같이 노즐 출구의 직경이 수 mm의 크기를 가지는 경우와 같이 액막의 내경이 약 1cm 이하가 되면 평면 액막과 환상 액막의 비대칭 파동 성장률이 달라지게 된다. 환상 액막의 직경이 작을수록 즉, 곡률(curvature)이 커질수록 불안정한 파동의 성장률과 액막의 불안정성이 급격히 커지게 된다.

그리고, 대칭적인 교란(symmetric disturbance)의 성장률이 변화하는 경향을 살펴보면<sup>[11]</sup>, 환상 액막의 외경에 대한 내경의 비가 1에 가까울수록(액막이 얇을수록) 평면 액막의 특성을 가지며; 0에 가까울수록 원형 액주(round liquid column)의 특성을 가지게 된다. 따라서 평면 액막의 특성만을 고려한 결과나 직경이 큰 환상 액막을 분사하는 경우의 결과들을 그대로 이용하여서는 내부 혼합형 미립화기 등과 같이 환상 액막의 직경이 작고 환상 액막의 내/외경비가 1보다 작아지는 경우의 미립화 현상을 적절하게 평가할 수 없음을 알 수 있다. 따라서, 환상 액막의 직경이 작은 경우의 미립화 현상에서는 평면 액막의 미립화 특성과 더불어 원형 액주의 미립화 특성을 동시에 고려하여야 한다.

환상 액막의 직경이 작을 경우 미립화시의 평균 입경에 대한 액막 두께의 영향과 원형 액주의 미립화 특성을 포함할 수 있도록 환상 액막의 직경에 대한 액막 두께의 영향도 추가로 고려되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 액막의 두께와 직경을 정확히 정의할 수 있는 미립화기를 이용한 실험이 필요하다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 환상 액막의 미립화 특성을 살펴보기 위해 사용한 실험장치는 그림 1과 같다. 이때 액체(물)는 펌프에서 가압된 후 필터를 거쳐 압력 변동을 방지하기 위해 설치된 완충기(accumulator)로 공급된다. 물은 완충기에서 유량계

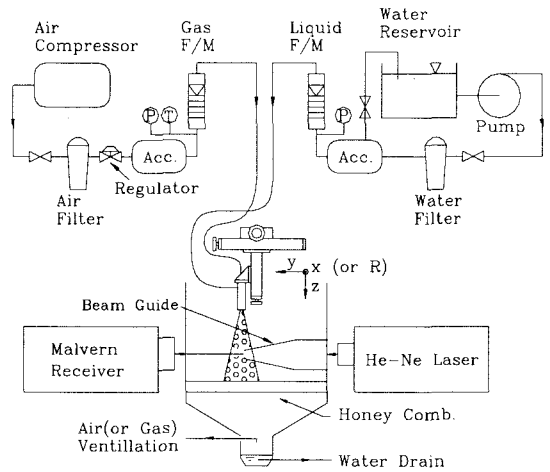


Fig. 1 Experimental setup for the drop size measurement

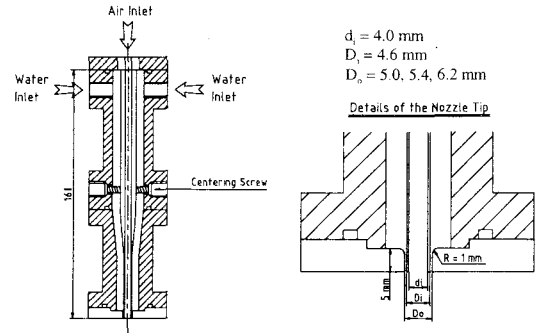


Fig. 2 Nozzle for experiments

(Flow Cell, FLT15A)를 거쳐 미립화기의 액체 공급관으로 공급된다. 액체를 미립화기의 양쪽 방향에서 수직하게 공급하여 액체가 한쪽으로 편향되지 않게 하였다. 그리고 미립화용 기체는 (5.0 ~ 6.3)×10<sup>5</sup> Pa의 압력으로 건물에서 공급되는 공기를 사용하였으며, 공기는 정압기(regulator)에 의해 실험압력으로 조절된 후 완충기 및 유량계(Omega, FL-105)를 거쳐 기체 공급관으로 공급된다. 이때 공기의 온도와 압력 그리고 출구 유속을 측정하여 유량을 보정하였다. 이렇게 공급된 물과 공기는 미립화기에서 실험용 챔버(0.5×0.5×1 m<sup>3</sup>)로 분사되어 분무를 형성하게 된다. 분사된 물은 챔버 하부에 설치되어 있는 배출구(drain)를 통하여 배출되고, 공기는 공기 배출구에 설치된 송풍기(blower)에 의해 외기로 방출된다.

### 2.2 환상 액막형 2-유체 미립화기

그림 2는 본 연구에서 사용한 환상 액막 미립

화기의 형상이다. 미립화용 기체는 노즐의 중심부에 설치된 기체 공급관을 통하여 분사되고, 액체는 노즐의 상단부 측면 방향의 두 곳으로 유입되어 스테인레스 망(screen)을 통한 뒤, 중심부 기체 공급관을 환상으로 감싸고 있는 액체 공급관으로부터 분사된다. 기체 공급관의 중심을 잡기 위하여 4 방향에서 멈춤 나사로 위치를 고정하였다. 또한 기체 공급관의 길이는 액체가 미립화 되는 경우의 공기 유량 조건이 난류 영역인 점을 고려하여 공기류가 완전히 발달되도록(fully developed) 결정하였다. 액막의 두께,  $\delta$ 는 0.2, 0.4, 0.8 mm의 세 가지 경우를 실험하였고, 공기 공급관의 출구 직경은 4 mm로 일정하다. 액체 공급부 끝부분에 설치된 오리피스(orifice)를 교체함으로써 액막의 두께를 변화시킬 수 있도록 하였다.

### 2.3 평균 입경 측정 방법

입경 측정용 기기는 광산란(laser diffraction) 원리를 이용한 Malvern Particle Sizer(Model 2640LC)이다. 본 연구의 실험 영역에서는 액체의 유량이 많기 때문에 분무의 수밀도(number density)가 크다. 따라서 평균 입경(SMD)의 측정을 위하여 Malvern으로 분무영역의 전 단면을 관통하여 측정하면 다중산란(multiple scattering)이 발생하는 실험 영역이 생긴다. 그러므로 본 연구에서는 다중산란 현상을 피하기 위하여 분무 단면상의 절반 부분으로부터 산란이 일어나지 않도록 빔가이드를 사용하였다. 레이저빔이 분무영역을 지나며 산란을 일으키는 부분인 측정 체적(measuring volume)이 분무영역의 절반만을 통과하도록 정렬한 뒤 측정하였다.(그림 1) 또 분사축 방향으로  $z = 200$  mm 하류 지점 단면에서, 일정 간격으로( $\Delta x = 10$  mm) 분무영역을 이동(sweep)하면서 측정하여 단면상의 평균 입경(cross-section averaged SMD)을 구하였다.

### 2.4 실험 조건

본 연구에서는 먼저 기체와 액체의 유량과 액막의 두께( $\delta$ )를 변수로 하여 입경을 측정하였다. 미립화 공기는 1.73 ~ 5.49 g/s, 분사 액체로 사용된 물은 21.6 ~ 113 g/s의 유량 범위에 대하여 실험하였으며, 각각의 유속은 공기: 111 ~ 282.7 m/s, 물: 3.4 ~ 18.6 m/s의 범위이다.

## 3. 결과 및 토의

공기류를 이용한 환상 액막 미립화 현상에서 주요 변수는 기체와 액체의 유속 및 유량, 환상 액막의 두께 및 직경 그리고 기/액체의 밀도, 표면

장력, 그리고 액체의 점도 등이다. 본 실험에서는 환상 액막의 미립화시에 액막 두께에 따른 평균 입경의 변화 경향을 기/액체 유속을 변화시켜 가며 살펴보았다.

### 3.1 평균 입경 (SMD, Sauter Mean Diameter)

먼저 액체 유속( $U_L$ )에 따른 단면 평균 입경(cross-section averaged SMD) 측정 결과를 기체 유속( $U_A$ )과 액막 두께( $\delta$ ) 변화에 따라 그림 3에 도시하였다. 2 유체 노즐에서는 일반적으로 액체 유량이 증가하면 평균 입경이 증가하는 경향을 보이는데, 그림 3의 결과를 보면 액체 유량과 비례하는 액체 유속이 증가함에 따라 대체적으로 평균 입경이 증가하는 경향이 있다. 그러나, 그림 3과 4에 A, B, C, D로 표시된 원 근방의 조건에서는 액체 유속의 증가에 따라 평균 입경이 오히려 감소하는 경향이 있다. 이러한 평균 입경 감소 경향은 Choi 와 Lee<sup>[12]</sup>의 결과에서 보고되고 있는데,

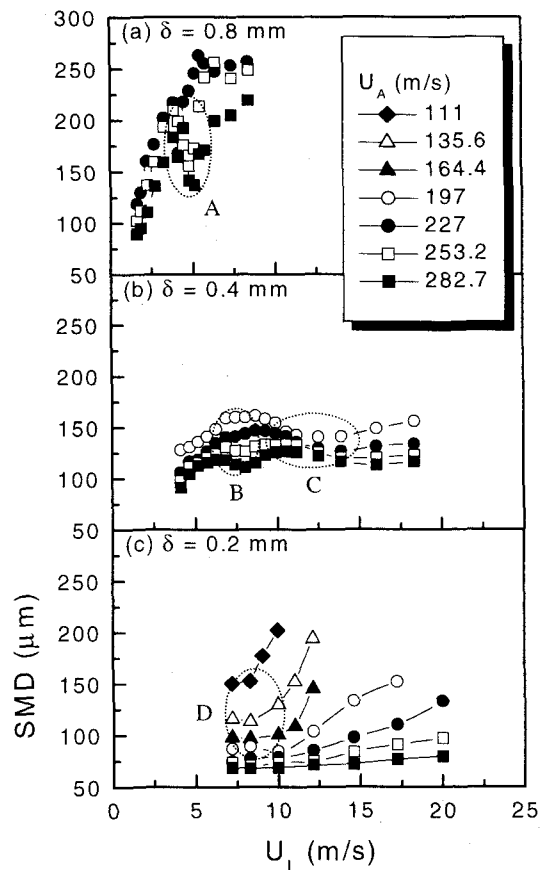


Fig. 3 Influence of  $U_L$  on SMD for different  $U_A$  and  $\delta$

그들은 환상 액막 두께가 0.4 mm 인 경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 기·액 운동량비( $M$ )를 식 (1)과 같이 정의하여 평균 입경의 증/감 경향을 설명하였다.

$$M = \frac{\rho_L U_L^2}{\rho_A U_A^2} \quad (1)$$

기·액 운동량비는 액체의 운동량을 기체의 운동량으로 나눈 값이며, 액체와 기체의 운동에너지 비로도 볼 수 있다. 그들은 운동량비의 범위에 따라 평균 입경의 경향을 설명하였다. 즉,  $M$ 이 증가함에 따라  $M < 1$ 의 범위에서는 평균 입경이 증가하고,  $1 < M < 3 \sim 4$ 의 범위에서는 평균 입경이 감소하며,  $M > 4$ 에서는 다시 증가한다고 하였다. 본 연구에서는 그들의 예측을 기초로 하여, 환상 액막의 두께가 변화할 경우에  $M$ 값에 따른 평균 입경의 변화 경향을 살펴보았다.

### 3.2 기·액 운동량비 ( $M$ , Momentum Flux Ratio)

그림 4는 기·액 운동량비와 평균 입경간의 관계를 액막 두께와 기체 유속에 따라 도시한 결과이다.  $\delta = 0.4$  mm의 경우  $M$ 의 증가에 따라 평균 입경이 감소하는 경향이  $1 < M < 3 \sim 4$  구간에서(C 영역) 확연히 나타나고 있다. 그러나  $\delta = 0.2$  mm의 경우에는 평균 입경의 감소 경향이  $U_A$ 가 200 m/s 이하인 경우에만 나타난다.(D 영역) 즉, 액막의 두께가 얇은 경우( $\delta = 0.2$  mm)에 고속의 공기( $U_A > 200$  m/s)로 미립화하면  $M$  증가에 따라 평균 입경이 감소하는 경향이 거의 나타나지 않고 있다.

그리고  $\delta = 0.8$  mm의 경우는 액막의 두께가 상대적으로 두껍기 때문에, 같은 액체 유량을 분사할 경우에 대하여 액체의 노즐 출구유속은 0.8 mm의 경우가 0.4 mm에 비해 약 2.16 배 느리다. 따라서 다른 조건이 일정할 때  $M \propto U_L^2$ 의 관계가 있으므로, 액체 유량 조건이 같을 경우에 대하여 0.8 mm의 경우가 0.4 mm에 비해  $M$ 은 약 4.7 배 작은 값을 가지게 된다. 따라서  $\delta = 0.8$  mm의 경우에는 모든 실험 유량 범위의 결과가  $M < 1$ 에 분포되어 있다. 그러나 Choi와 Lee<sup>[12]</sup>의 설명과는 달리,  $\delta = 0.8$  mm에서는 모든 조건이  $M < 1$ 의 범위에 속함에도 불구하고 평균 입경의 감소 경향이  $M = 0.1 \sim 0.3$  근방의 A 지점에 나타나고 있다.

실험시의 관찰에 따르면 A 지점 전/후의 실험 영역에서 각기 다른 분무 형태가 나타남을 관측할 수 있었다. 즉,  $M$  값을 기준으로 A 지점 이전의 영역에서는 분사된 액막이 중심 공기류에 완전히 혼합되어 하나의 입자군을 형성하는 분무가 나타났

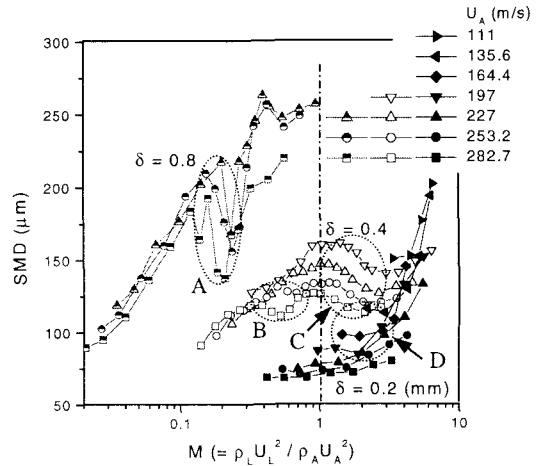


Fig. 4 Influence of  $M$  on SMD for different  $U_A$  and  $\delta$

다. 그러나 A 지점 이후에는, 분무의 중심부는 공기류와 혼합된 작은 입자군이 분포하지만 그 주변부에는 공기류와 충분히 혼합되지 못하는 큰 입자군으로 이루어진 영역이 존재하였다. 그리고 A 지점에서는 전/후의 유동 형태가 교차해서 나타나고 있었다. 이것은 A 지점에서 두 유동 형태간의 천이가 일어나고 있음을 의미하고 있으나, 현재 정확한 원인은 알 수 없는 상태이다.  $\delta = 0.2, 0.4$  mm의 경우에 나타나는 D와 B의 전/후에도 동일한 유동 천이가 발생하고 있었다. 즉, A, B, D의 감소 경향은 유동 형태의 천이에 기인한 것으로 보여진다. 그러나 C의 평균 입경 감소 경향은 A, B, D와는 다른 현상으로 보여지며, Choi와 Lee<sup>[12]</sup>는 C의 감소 경향을 액막의 표면에 발생하는 리플(ripple)들과 공기류 사이의 공기역학적 상호작용(aerodynamic interaction)이 증가하기 때문이라고 하였다.

현재까지  $\delta = 0.2, 0.4, 0.8$  mm의 세가지 액막 두께에 대한 실험 결과만으로는 평균 입경에 미치는 액막 두께의 영향의 명확한 해석이 어려우며, 추후로 액막 두께에 대한 추가적인 실험에 의한 평가가 필요하다.

## 4. 결론

본 연구에서는 중심부 공기를 이용한 환상 액막의 미립화 특성을 살펴보기 위하여 액막 두께와 기·액 유속을 변화시켜가며 단면평균입경을 측정하였다. 평균 입경의 감소 경향이 나타나는 원인의 하나는 분무 유동 형태의 천이이며(A, B, D 지점), 다른 하나의 원인은 액막 표면에 발생하는

리플들과 공기류 사이의 공기역학적 상호작용으로 추정되나(C 지점) 현재까지의 실험으로 단정하기 어렵다. 액막 두께 변화의 영향의 추가적인 실험을 통한 해석이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 두뇌한국-21(BK-21)과 연소기술 연구센터(CERC), 그리고 한국과학기술원 기관고유사업 “산화제 조성변화에 따른 연소현상 규명 및 기초 D/B 구축”의 지원을 받아 수행되었다.

## 참고문헌

- (1) 이상용, 1996, 액체의 미립화, 민음사.
- (2) Lefebvre, A. H., 1980, “Airblast Atomization,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 6, pp. 233-261.
- (3) Song, S. and Lee, S., 1996, “Study of Atomization Mechanism of Gas/Liquid Mixture Flowing through Y-jet Atomizers,” *Atomization and Sprays*, Vol. 6, No. 2, pp. 193~209.
- (4) Sakai, T., Zhao, D. Q., Iijima, M. and Saito, M., 1994, “Relation of Spray Structure and Turbulence of Air within Spray Ejected from Internal Mixing Twin Fluid Atomizer of Orifice-Type,” *Proc. ICLASS-94 Rouen, France*, paper XI-3, pp. 914-921.
- (5) Kim, J. Y. and Lee S. Y., 1999, “Formation of Two-phase Flow Pattern within Effervescent Atomizers,” *Proc. ILASS-Asia-99 Yongin, Korea*, pp. 163-168.
- (6) Rizkalla, A. and Lefebvre, A. H., 1975, “The Influence of Air and Liquid Properties on Air Blast Atomization,” *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 97, No. 3, pp. 316-320.
- (7) Rizk, N. K. and Lefebvre, A. H., 1980, “The Influence of Liquid Film Thickness on Airblast Atomization,” *ASME J. Eng. For Power*, Vol. 102, pp. 706-710.
- (8) El-Shanawany, M. S. M. R. and Lefebvre, A. H., 1980, “Airblast Atomization: The Effect of Linear Scale on Mean Drop Size,” *J. Energy*, Vol. 4, pp. 184-189.
- (9) Jasuja, A. K., 1979, “Atomization of Crude and Residual Fuel Oils,” *ASME J. Eng. Power*, Vol. 101, No. 2, pp. 250-258.
- (10) Crapper, G. D., Dombrowski, N. and Pyott, G. A. D., 1975, “Kelvin-Helmholtz Wave Growth on Cylindrical Sheets,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, Part 3, pp. 497-502.
- (11) Lee, J. G. and Chen, L. D., 1991, “Linear Stability Analysis of Gas-Liquid Interface,” *AIAA J.*, Vol. 29, No. 10, pp.1589-1595.
- (12) Choi, C. J. and Lee, S. Y., 2000, “ Experimental Study of the Atomization of Annular Liquid Sheet with Core Air Flow,” *Proc. ILASS-Asia-2000 Tsukuba, Japan*, pp. 147-152.