

전단 유동에 의한 스월 제트의 미립화 및 분무특성 향상

정재철* · 윤웅섭**

The Advancement of Breakup and Spray Formation by the Swirl Spray Jets in the Low Speed Convective Flow

Jaechul Jeong* · Woong-sup Yoon**

ABSTRACT

Breakup and spray formation of pressure-swirl liquid jets injected into a low-speed convective-flow are experimentally investigated. Effects of the cross-flows on the macroscopic and microscopic spray parameters are optically measured in terms of jet Weber number and liquid-to-gas momentum ratio. The liquid stream undergoes Rayleigh jet breakup at lower jet Weber numbers and a liquid sheet isn't formed because of the weak radial velocity in the swirl jet. At higher jet Weber numbers, the macroscopic spray parameter is a very weak function of the momentum ratio but the effect of the convection on the microscopic spray parameter is significant through the secondary breakup with increasing in the liquid-to-gas momentum ratio. The convective-flow promotes bag/plume breakup and the spray formation, and its effect is more distinct at higher momentum ratio.

초 록

아음속 영역의 대류에 평행하게 압력형 스월 제트를 분사시켜 액막 분열 및 액적 크기와 분포를 실험적으로 측정하였다. 대류로 인한 거시적과 미시적인 분무 특성의 영향을 제트 We_l 수와 기상에 대한 액상의 운동량 비를 사용하여 광학적인 방법으로 측정하였다. 낮은 제트 We_l 수일 때는 제트의 원심력 부족으로 인해 액막을 형성하지 못하고 Rayleigh 제트 분열을 하게 된다. 높은 We_l 수에서는 거시적인 분무 특성은 대류의 영향을 거의 받지 않지만 미시적인 분무 특성은 운동량 비가 높을수록 2차 미립화 과정을 통해 대류의 영향을 많이 받았다. 대류는 제트의 분열을 촉진시키고 스월 제트의 분무 특성을 향상하는 것으로 관찰되었다.

Key Words: SMD(Sauter Mean Diameter), Breakup Length, Swirl Injection, Momentum ratio

1. 서 론

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계공학과

연락처, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

가스 유동이 있는 내부 유동에 액체를 분사하는 분사 방식은 램젯, Selective Catalytic

Reduction(SCR), 가스터빈엔진 등 여러 분야에 걸쳐 쓰인다. 분사기로부터 분사된 제트는 큰 운동량 차이가 있는 가스와의 상호작용에 의해 미립화되고 그 후 기화, 혼합, 연소 혹은 환원반응을 하고, 이 일련의 과정은 기화지배형(vaporization controlled)이 된다. 기화 정도에 영향을 미치는 여러 변수 중 가장 중요한 것은 액적의 크기이며 이 크기는 연소에 주어진 거주시간(residence time)에 제한되게 된다. 따라서 기화시간은 액적크기의 제공에 반비례하므로 일반적으로 기화시간이 짧은, 작은 크기의 액적이 선호된다. 램젯, 스크램젯 같은 공기흡입형 엔진에서는 강한 대류(convection)의 공기를 흡입하는데 이 대류에 의한 운동량을 미립화 촉진에 사용하면 미립화의 향상을 기대할 수 있다. 또한 기상의 운동량 손실은 연소기를 통과하는 공기의 속도를 줄여서 화염안정화에도 기여하게 된다. 따라서 강한 대류에 의하여 교란된 액체제트의 분무특성에 관한 연구들이 이루어져 왔다 [1, 2].

단일 분사공 등, 분사제트 축에 대한 동심형 또는 평면형 대칭성이 존재하는 분무에서는 미립화를 위한 운동량의 교환 혹은 상호작용 역시 대칭축 또는 대칭면을 기준으로 발생하므로 방향성에 관한 고려가 필요 없다. 기상 대류의 수직 간섭에 의한 미립화의 촉진도 일반적인 거시적 분무특성인 침투높이, 분열길이, 공간분포 등과 미시적 특성인 액적평균직경, 속도분포 등으로 표현된다. 그러나 그 발생과정은 대칭성이 존재하는 분사기에 대하여 방향성이 중요한 변수로 추가되며 형상적 비단순성과 그에 따른 2차 유동의 영향이 중요한 역할을 하게 되므로 매우 복잡한 것이 된다. 따라서 강한 기상 대류에 의한 액체 제트의 분열 미립화 과정은 좀 더 구체적이고 광범위한 이해가 요구되어 이에 관한 연구들이 있어왔으나, 동축형과 같은 좀 더 복잡한 미립화 메커니즘을 사용하는 분무에 관한 연구는 상대적으로 훨씬 적다. 더불어 실제와 근접한 액체 제트의 미립화 모델의 정립을 위해서도 액체 제트의 미립화에 대한 실험적인 연구가 필요하다. [3, 4]

Wu[3, 4]는 아음속영역의 횡단류에서 단공노즐로부터 분사된 액체 제트의 분열과정과 액주의 궤적 그리고 액주의 분열 길이에 대해서 실험적으로 연구하였다.

Sallam[5]은 정지 대기상태에서 단공 노즐로부터 분사된 난류 제트에 대한 분열과정을 연구하였다. 횡단류에서 수직으로 분사된 액체 제트의 분열과정에서는 높은 웨버수에서의 bag 혹은 shear 모드와 유사함을 실험적으로 증명하였다. 액주는 큰 스케일의 난류에 의해서 반경방향으로 변형이 발생하여 bag / shear 분열과정을 통해 분열되어진다고 밝혔다.

Dai[6]는 한 쪽이 대기에 노출된 사각 충격파관을 사용, 강한 대류 유동을 생성하고 이를 구형 액적에 구속시켜 액적의 시간에 따르는 2차 분열 과정을 연구하였다.

최근 횡단류 내에 단공노즐로부터 분사된 액체 제트의 분열과정에 대한 연구 결과[4, 5, 6]가 많이 있었고 주로 근접 촬영한 분열 이미지를 통해 이루어 졌다. 하지만 선행 연구들의 대부분은 대류에 액체 제트를 덕트나 파이프의 벽면 위에서 여러 각도를 가지고 분사시킨 후 결과를 관찰하였다. 또한 스윙 노즐로부터 분사된 액체 제트의 분열과정은 액막 분열과정으로 현상이 복잡하고 해석이 난해하여 정확한 분열 메커니즘이 규명되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 대류와 평행한 상태에서 스윙 노즐로부터 액체 제트를 분사시킨 후 분무의 미립화와 액적의 분포도, 그리고 분무 특성들이 향상되는 지를 알아보고자 하였다.

이를 위해서 CCD 카메라와 이미지 분석 프로그램 등을 이용하여 실험 및 분석을 하였고 액적들의 공간분포와 크기 변화를 보았다. 제트와 공기의 운동량 비에 따른 분열길이, SMD의 공간분포, 그리고 SMD의 크기를 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Figure 1는 대류에 수평 분사하는 액체 제트의

미립화를 측정하기 위해서 구성된 실험장치의 개략도이다. 액상 제트는 가압장치에 의해서 대류 방향과 평행하게 설치된 노즐로부터 분사되었다.

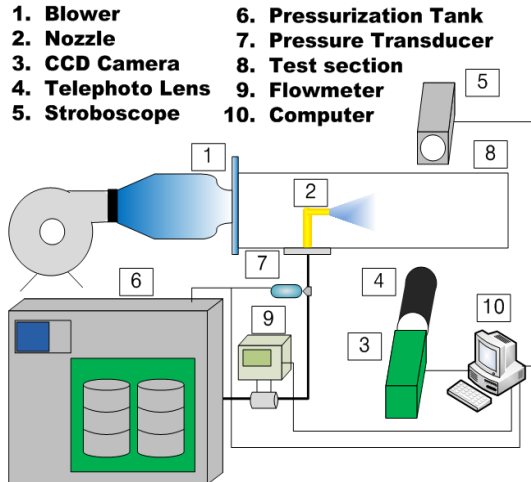


Fig. 1 Schematic of the spray test facilities

유동장 내의 속도 분포가 균일하게 하기 위해 풍동 내에 하니콧을 장착시켰다. 유속을 측정하기 위해 풍동 끝단을 25구역으로 나누고 풍속계(Fluke사)를 이용하여 속도를 측정하였다. 각 구역의 속도는 하니콧 설치 영향으로 거의 균일하였다. 회전 주파수별 유속은 Table 1과 같다.

Table 1. The Flow Velocity Matrix for the Frequency of the Blower

Hz	10	20	30	40	50	60
m/s	6.16	12.14	18.30	24.15	29.76	35.09

실험에 사용된 스웰 노즐은 일반 상용노즐로 Hago사 제품이다. 스웰 노즐은 중공 원추형 노즐이고 분무각은 70 도, 노즐 출구 직경은 0.75 mm이다. 노즐의 분사압력은 0 ~ 93.17 psi이고 유량은 0 ~ 4.15 g/s이다.

촬영에 사용한 CCD 카메라는 Lavision사의 Flowmaster였로 1280 × 1024의 해상도, 노출시간은 1000 μ s, 그리고 8Hz의 속도로 촬영했다. 카메라를 제어하는 소프트웨어인 Davis(Lavision

사)와 PTU(Programmable Timing Unit) board에 의해 CCD 카메라와 Stroboscope가 동기화시켜 이미지를 획득 및 분석하였다. 확대렌즈는 QM 100(Lavision사)으로 초점거리 15 cm일 때 해상도가 1.1 마이크론이다. 이 렌즈를 이용하여 액적들의 더 정밀한 촬영이 가능하였다.

가압장치에서 원하는 압력을 설정하여 작동시킨 후 유로에 설치되어 있는 유량계(Badger meter사)를 통해 유량을 측정하였다. 또한 노즐에 최대한 가까운 지점에 스트레인 게이지 방식 압력 센서(Sensys사)를 설치해 가압장치에서 설정한 압력이 노즐 끝단에서 동일한 압력을 유지하는 지 확인하고 가압장치로 연결시켜 압력부족분을 피드백하여 실시간으로 압력을 재설정 후 가압하였다. 그리고 유량계와 압력 센서를 컴퓨터로 연결하고 Labview 소프트웨어를 이용하여 수치를 육안으로 확인하고 저장했다.

측정부(150 × 150 × 1000 mm)는 분무과정을 가시화할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였으며 실험부의 500mm지점에 노즐을 ‘ㄱ’자 모양으로 설치하였다. 노즐 분사 후 촬영 단면과 카메라 촬영 이미지가 최대한 수직을 유지하게 했다. 풍동과 아크릴 덕트를 연결하고 그것을 카메라가 올려져 있는 정반과 평행하게 위치시켰다. 노즐도 덕트와 평행하게 유지시키기 위해 노즐에 그어 놓은 선과 덕트에 그어 놓은 기준선을 일치시켰다.

2.2 실험방법

대류에 의한 스웰 제트의 분무특성을 분석하기 위해 정지 대기상태에서의 실험을 선행한 후 대류상태에서의 실험을 실시하였다.

먼저 정지 대기상태에서의 실험은 CCD 카메라로 전체적인 분사를 촬영하여 분열길이와 분사각을 측정하였다. 그 후 확대렌즈를 장착하고 액막 분열지점의 이후인 노즐 출구에서부터 하류 15 mm 지점에서 4 mm의 간격으로 9 × 9 격자를 나누어 촬영했다. 스웰 제트의 웨버 수를 변화시키며 액적 크기 및 액적의 공간분포를 측정하였다.

액적의 크기를 측정하는 방법은 광학적인 측

정 방법 중 영상 처리방법을 사용하였다.[7] 영상 처리(image processing)를 이용한 측정 방법은 분무 지역에서 CCD 카메라에 순간적으로 포착된 액적들의 영상 신호를 디지털 영상으로 바꾼 후 적당한 영상 처리 기법(image processing technique)과 형상 인식 알고리즘(pattern recognition algorithm)을 상용하여 분무 액적의 수와 입경을 자동적으로 측정하는 방법이다. 이 방법은 분무지역에서 직접 영상을 얻기 때문에 초점에 맞추어진 액적들만을 선별해 내기 위한 영상 처리에 상대적으로 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 한 영상에 포함된 분무 액적들 가운데 초점이 맞추어진 액적 수가 많지 않아서 통계적인 양을 얻기 위해서는 많은 영상을 처리해야 한다. 따라서 각 포인트 당 200장씩 촬영하고 영상처리 기법을 사용하여 분석하였다. 이미지 촬영하고 있는 시간동안 노즐의 분사압력과 유량을 일정하게 유지하기 위하여 실험 장치에서 설명한 것처럼 압력센서와 유량계를 이용하였다.

대류상태에서의 실험은 대류가 스월 제트의 미립화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 스월 제트 웨버 수를 일정하게 유지한 상태에서 대류의 속도를 변화하며 실험한 후 스월 제트의 웨버 수를 변화시키며 실험하였다. 근접촬영을 통해 스월 제트의 분열과정을 분석하였고 액체 제트와 공기 운동량 비에 따른 액적의 크기 및 액적의 공간분포를 측정하였다. 액적 크기를 측정하는 방법은 정지대기 상태에서의 그것과 동일하게 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

대류상태에서의 분무특성을 분석하기 위해서는 정지대기상태에서의 스월 분무의 특성을 이해할 필요가 있다.

스월 분무는 단공노즐의 액주 분열과 달리 액막 분열을 통해서 미립화한다. 스월 분사요소의 스월 챔버내로 액체가 접선방향으로 유입되므로 높은 회전속도에 의해 중심라인에서 공기코어를 형성하고 회전하는 유체는 노즐 오리피스

출구에서 분사되어 원심력에 의해 중공 원추형의 액막을 형성한다. 액막은 노즐 출구로부터 멀어질수록 두께가 얇아져서 불안정해지고 그 후 액사(ligament)나 액적으로 분열한다.[7]

스월 분무에 관한 연구는 분사압력, 유입포트의 수나 면적, 길이-반경비 등의 변화에 따른 분무각이나 분열길이, 액막의 두께, 액적크기, 공간분포 등에 대해서 이루어졌다.[7, 8, 9, 10] 본 실험에서는 대류에 의한 스월 분무의 특성, 그 중에서도 기화성능 변화를 알아보기 위해서 분사압력에 따른 SMD (D32 : Sauter mean diameter) 및 SMD의 공간분포를 측정하였다. SMD는 액적들의 총 체적을 총 표면적으로 나눈 평균치로써 열 및 물질 전달과 관련하여 많이 쓰이고 있다. 즉 액체 제트의 미립화가 좋을수록 SMD는 작아지고 이는 동일한 체적에 대하여 표면적의 증가를 의미하므로 동일한 상태량 구배에서 비례적으로 전달유속의 상승을 가져오게 되므로 이는 기화 지배형의 연소효율을 나타내는 적절한 추정직경이 된다.

따라서 우선 정지대기 상태에서 스월 분무의 SMD 측정 및 분포도를 먼저 측정한 후 대류상태에서의 실험을 하였다. 본 실험에서는 분사압력이나 분사속도 대신에 미립화 특성을 나타내는 무차원수인 웨버 수(Weber Number : $We_l = \rho_l d u_l^2 / \sigma_l$)를 사용하였다. ρ_l 는 액체의 밀도, d 는 특성길이, u_l 는 유체의 속도, 그리고 σ_l 는 액체의 표면장력이다. 일반적으로 미립화는 액체의 표면을 결합시키는 표면장력이 외부나 내부의 요인에 의해서 깨어질 때 발생하며 이 둘의 관계, 즉 표면장력에 의한 힘과 관성력의 비가 We_l 수이다. 따라서 We_l 수는 액체 제트의 미립화를 평가하는 기준으로 많이 쓰이고 있다.

3.1 대류 간섭되지 않은 스월 분무특성

Figure 2는 스월 제트의 We_l 수를 증가시키며 노즐 출구 하류 15mm지점 단면에서 측정된 스월 분무의 SMD 공간분포이다. Fig. 2의 a는 스월 제트의 We_l 수가 작아서 즉 노즐출구에서 반경방향의 속도성분이 축방향 속도성분에 비해서

작기 때문에 충분히 발달된 증공 원추형의 액막을 형성하지 못하여 원형에 가까운 SMD 분포를 보인다. SMD는 원형의 중심에서 크게 나타난다.

스윙 제트의 We_l 수가 증가하게 되면 Fig. 2의 b, c, d에서처럼 환형의 형태로 나타나고 SMD는 환형부분에서 크게 나타난다. 이는 We_l 수의 증가에 따라서 증공 원추형의 액막이 형성되고 액막부분에서 큰 액적들이 분포하기 때문이다. 또한 We_l 수가 증가함에 따라서 스윙 분무의 분무각이 커지기 때문에 환형의 크기 역시 커짐을 볼 수 있다.

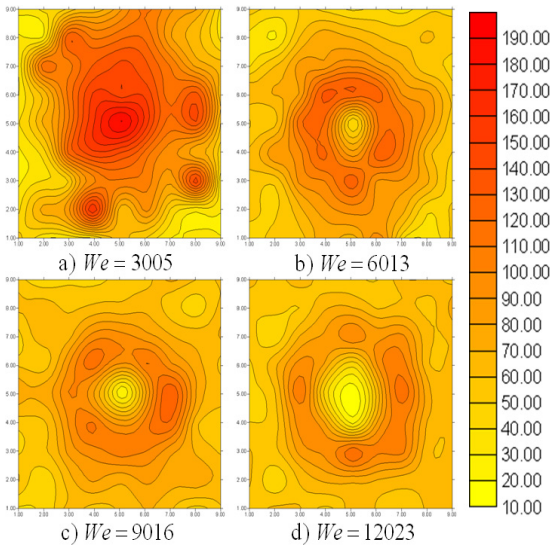


Fig. 2 The Cross-sectional Distributions of SMD without the Gas Flow

Figure 3은 제트의 중심축을 기준으로 한 단면에서의 SMD 변화를 나타낸 것이다. 중심에서 반경반향으로 멀어질수록 SMD는 증가하다가 다시 감소함을 볼 수 있다. 그 이유는 증공 원추형의 액막 분열 때문에 액막이 분열하는 위치에서 SMD가 크게 나타나고 액막의 중심과 외곽에서는 작게 나타나기 때문이다. 또한 스윙 제트의 We_l 수가 증가할수록 증공 원추형 액막이 발달하여 이러한 경향은 뚜렷하게 나타나며 전체적으로 SMD는 작아진다.

3.2 대류 간섭상태에서의 스윙 분무특성

대류에 의한 스윙 분무의 미립화 특성을 분석하기 위하여 SMD 공간분포와 제트의 We_l 수에 따른 분열길이를 측정하였다.

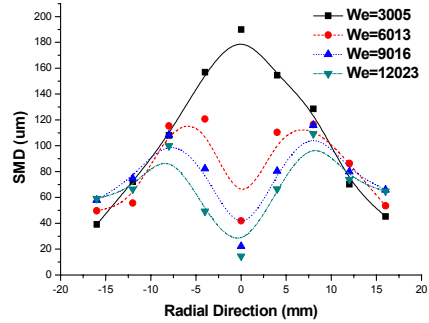


Fig. 3 The SMD Distribution on the Radial Direction for the We_l Number

대류의 영향이 없을 때 스윙 분무는 We_l 수가 증가함에 따라서 처음에는 액주형태 (dribble stage, distorted pencil)에서 증공 원추형의 분무형태(onion stage, tulip stage, fully developed spray)로 발달한다.[7] 평행으로 부는 대류에 의한 분열과정을 해석하기 위해서 스윙 제트의 We_l 수를 2004, 8014, 12023으로 일정하게 유지하고 대류속도를 변화시켜가며 특성의 변화를 알아보았다. 대류에 의한 스윙 분무는 제트와 공기의 운동량 비($q = \rho_l u_l^2 / \rho_g u_g^2$)를 변수로 실험되었다. u_g 는 기체의 속도이다.

3.2.1 분열 길이

분열길이는 스윙 제트의 액막이 액사 (ligament)나 액적으로 분열하는 위치로 정의된다.

Figure 4, 5, 6은 We_l 가 각각 2004, 8014, 12023일 때 운동량 비를 변화시키며 촬영을 하였다. Fig. 4에서 a)와 b)를 비교해보면 대류속도는 증가하지만 액막의 분열은 오히려 길어졌다. 그리고 c), d)에서는 점차 분열길이가 줄어들었다. b)일 때 대류속도가 증가함에도 불과하고 분

열길이가 길어지는 이유는 분무가 완전 발달된 상태가 아니어서 낮은 대류 속도일 때 대류가 분무의 액막의 성장을 도와주기 때문이다. 그리고 c)와 d)에서는 확연하게 분열길이가 짧아지는 것을 볼 수 있다. 주위 대류가 갖고 있는 큰 운동량이 난류 현상에 의해 액막으로 전달되어서 액막의 운동량을 증가시켜 분열 현상을 더 활발히 만들었다.

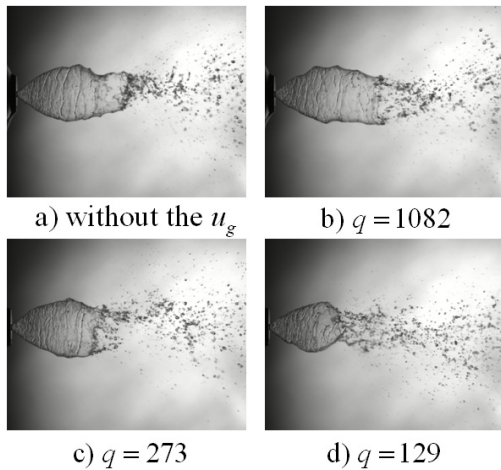


Fig. 4 The Breakup Process at $We_l = 2004$

Figure 5와 Fig. 6에서는 q 와 We_l 수가 증가할수록 분열길이가 짧아짐을 볼 수 있다. 그러나

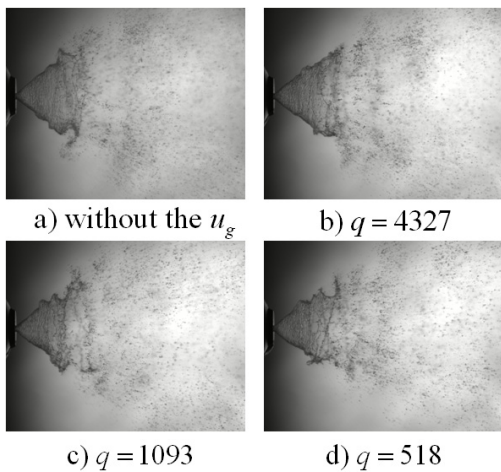


Fig. 5 The Breakup Process at $We_l = 8014$

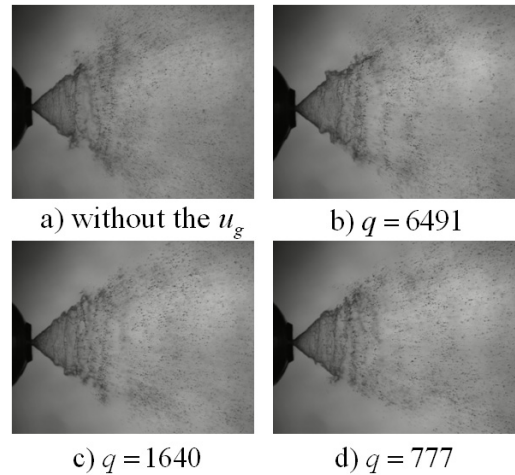


Fig. 6 The Breakup Process at $We_l = 12023$

그 차이가 미세하여 전체적인 사진만으로는 변화를 감지하기가 힘들다. 그 이유는 분무가 충분히 발달되고 액막이 확실히 유지되어 액막의 두께가 얇아지는 끝부분만이 영향을 받았기 때문이다. Fig. 7의 그래프가 보이는 것처럼 제트의 We_l 수가 증가하여 액막이 완전 발달한 후에는 대류속도가 0 ~ 35.09 m/s까지 증가하였을 때 액막의 분열길이는 최대 약 1 mm 정도 감소한다.

Figure 7이 보여주는 것처럼 We_l 수가 커질수록 그리고 대류속도가 커질수록 분열길이가 줄어든다. 결과에서 보이는 것처럼 We_l 수가 2004 일 때는 대류속도가 12.14 m/s일 때까지 분열길이가 증가하였다가 그 이후에 감소한다. 그 이유는 스웰 제트가 노즐에서 분사 되었을 때 접선 방향과 진행 방향의 속도를 갖고 있는데, 액막이 완전 발달되지 않았을 경우 대류가 갖고 있는 진행방향으로의 운동량이 난류 효과로 인해 액막으로 전달되어 스웰 제트의 진행 방향 속도가 증가하게 되어 액막이 성장하기 때문이다. 하지만 대류 속도가 더 커지게 되면 대류의 난류 효과가 Fig. 4의 c)와 d)에서처럼 오히려 액막을 분해시키려는 경향이 커져서 Fig. 7에서 보이는 것처럼 분열길이가 감소한다.

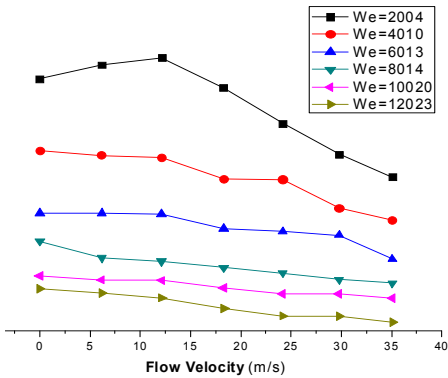


Fig. 7 The Breakup Length Graph along the We_l Number and the Flow Velocity

3.2.2 SMD 공간분포

노즐 출구로부터 하류에서 스월 제트의 We_l 수를 12023으로 일정하게 하고 대류속도를 증가함에 따라서 스월 분무의 SMD 공간분포를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 정지대기 상태에서 충분히 발달한 스월 분무의 SMD 공간분포가 환형의 대칭적인 형태를 보였고 대류 상태에서는 대류속도가 증가함에 따라서 중공 형태는 뚜렷이 나타났지만 정지대기 상태에서만큼 뚜렷한 환형은 이루어지지 않았다.

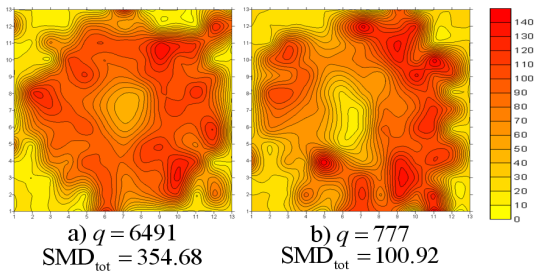


Fig 8. The Cross-sectional Distribution of SMD at $We_l = 12023$

SMD_{tot} 는 측정 단면에 있는 모든 액적들의 SMD값이다. 공간 분포 내에서 SMD는 중심에서 작게 나타나며 대체적으로 외곽에서 크게 나타난다. 이는 스월 분무의 형상과 관련 있다. 중공 원추형의 액막 특성 때문에 공간분포의 중심에

서 SMD는 작게 나타나며 정지대기상태에서와 마찬가지로 대류상태에서도 볼 수 있듯이 액막에서 분열한 액적들은 대체적으로 큰 액적들이 많다. 큰 액적들은 대류에 의해서 관성력을 쉽게 잃지 않기 때문에 외곽에 주로 분포하여 SMD는 공간분포의 외곽에서 크게 나타난다.

그리고 제트와 공기의 운동량 비 감소, 즉 대류의 속도가 증가할수록 SMD가 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8에 각 운동량 비에 따른 측정된 SMD 수치가 제시되어 있다. 대류의 강한 운동량으로 액막으로부터 액적이 형성된 이후에도 액적들은 주위 기체와의 상호작용 및 액적간의 충돌 등 이러한 2차 미립화 과정이 활발해져서 더 미립화한다.

4. 결 론

강한 대류속도로 평행하게 분사되는 스월 제트의 분무 특성을 실험적으로 연구하였다. 스월 제트의 We_l 수와 대류속도에 따라서 스월 제트의 분열과정을 분석하였으며 SMD의 공간분포를 측정하였다. 실험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 정지대기상태의 SMD 공간분포는 액체 제트의 We_l 수가 작은 영역에서는 구형의 분포를 보이며 제트의 We_l 수가 증가함에 따라서 환형의 분포를 보인다.
- 2) 스월 분무의 반경 방향 SMD는 중심에서 반경방향으로 멀어질수록 커진다. 또한 We_l 가 커질수록 분무각이 증가 하여 가장 큰 SMD는 액막 분열 때문에 중심에서 먼 지점에서 나타난다.
- 3) 스월 분무의 분열 길이는 액체 제트의 We_l 수에 따라서는 변화가 적은 반면에 대류의 속도가 증가함에 따라서 난류의 영향으로 인해 감소하는 경향을 보인다.
- 4) 동일한 We_l 수에서 액체 제트와 공기의 운동량 비가 감소할수록 2차 미립화 과정을 통해 SMD는 작아지는 것으로 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. T.T.Nguyen and A.R.Karagozian, "liquid fuel jet in subsonic crossflow", jet propulsion, vol.8, NO.1, 1992, PP.21-27.
2. George P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements" 6th ed., John Wiley & Sons. inc., 1992, pp. 168-281.
3. Pei-Kuan Wu, Kevin A. Kirkendall, and Raymond P. Fuller and Abdollah S. Nejad, "Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflow", journal of propulsion and power, vol. 14, No. 2, 1998.
4. Pei-Kuan Wu, Kevin A. Kirkendall, and Raymond P. Fuller and Abdollah S. Nejad, "breakup processes of liquid jets in subsonic crossflow", journal of propulsion and power, vol. 13, No. 1, 1997.
5. K.A. Sallam, Z. Dai, G.M. Faeth, "liquid breakup at the surface of turbulent round liquid jets in still gases", international journal of multiphase flow, Vol. 28, 2002, pp427-449.
6. Z. Dai, G. M. Faeth. "Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime", international journal of multiphase flow, vol. 27, 2001, pp217-236
7. Lefebvre, A.W., "Atomization and sprays", Hemisphere publishing corporation, 1989.
8. Rizk, N.K., and Lefebvre, A.H., "Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers", J. Propulsion, Vol.1, No. 3, 1985, pp 193-199
9. Suyari, M., and Lefebvre, A.H., "Film thickness measurement in a simplex swirl atomizer", J. Propulsion, Vol. 2, No. 6, 1986, pp 528-533
10. Dongjun Kim, Poonggyoo Han and Yongbin Yoon, "Effect of flow condition and geometry on flow characteristics of a swirl injector", ILASS americas, 16th annual conference on liquid atomization and spray systems, monterey, ca, may 2003