

드럼형 회전연료노즐의 미립화 기구 및 분무특성 연구

이동훈* · 최현경** · 최성만*** · 유경원**** · 허환일*****

The Atomization Mechanism and Spray Characteristics of Drum Type Rotary Atomizer

Donghun Lee* · Hyunkyung Choi** · Seongman Choi*** · Gyungwon You**** · Hwanil Huh*****

ABSTRACT

The atomization phenomena and spray characteristics of drum type rotary atomizer using centrifugal force from high rotational speed of gas turbine engine shaft were studied through rotary atomizer modeling analysis and experimental method. A test rig for rotary atomization that has range of 5,000~40,000 rpm was used to make similarity for high speed rotating shaft. Spray visualization methodology and Phase Doppler Anemometry were also used to investigate the atomization mechanism and spray characteristics. We found that the rotating fuel spray has unique breakup process and we have to make breakup point earlier through increasing rotating speed to improve atomization performance.

초 록

가스터빈엔진에 적용할 수 있는 드럼형 회전연료노즐의 모델링을 통해 원심력이 충분한 연료분사압력을 발생시킴을 보였고, 회전연료분사의 미립화 현상에 대해 실험적으로 연구하였다. 회전연료분사의 미립화기구 및 분무특성을 이해하기 위하여 고속 회전연료노즐 시험리그를 이용하여 5,000 ~ 40,000rpm의 영역에서 분무가시화와 PDA를 이용한 분무액적 측정을 실시하여 회전연료분무의 미립화 특징을 규명하고, 미립화성능 향상을 위해서는 회전속도증가를 통해 액적분열시점을 앞당기는 것이 중요함을 알았다.

Key Words: Rotary Atomizer(회전연료노즐), Atomization(미립화), Spray Visualization(분무가시화)

† 2008년 3월 19일 접수 ~ 2008년 4월 19일 심사완료

* 정희원, 삼성테크윈 파워시스템연구소

** 학생회원, 전북대학교 항공우주공학과 대학원

*** 종신회원, 전북대학교 항공우주공학과

**** 정희원, 국방과학연구소

***** 종신회원, 충남대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

1. 서 론

항공용으로 사용되는 추력 수십~수백 lbf 급의 엔진은 그동안 국내외에서 많은 관심을 가지고

연구와 개발이 이루어져 왔으며, 특히 국내에서 소모성 체계의 추진기관으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 이러한 소형급의 엔진들은 운용목적상 높은 신뢰성을 가져야 하며, 점화 및 운용범위가 넓어야 할뿐만 아니라, 비교적 작은 엔진 크기에 비해 높은 수준의 엔진성능을 보여야 하므로, 엔진에 적용되는 기술 수준이 엔진 크기에 비해 매우 높은 특징을 가지고 있다. 반면, 대부분 소모성의 목적을 가지고 운용되므로 생산성이나 비용 측면을 무시할 수 없는데, 회전연료노즐을 채택한 반경형 연소기(Radial Annular Combustor/Slinger Combustor)는 이에 대한 좋은 해결책이 될 수 있다.

가스터빈엔진에 일반적으로 많이 적용되는 압력분무식이나 공기충돌형 연료노즐의 경우, 하나의 연료노즐 내에 5 ~ 10개에 달하는 정밀부품이 들어가게 되고, 전체 엔진에는 이러한 연료노즐이 다수 장착되므로 총 연료노즐 부품 수는 수십 개 이상이 되며, 따라서 엔진의 유지보수성 및 제작비에 상대적으로 나쁜 영향을 주게 된다.

이에 비해, 연료노즐을 하나의 부품으로 가공하고 연료분사를 위한 에너지 공급원으로써 고속의 회전축을 이용하는 회전연료노즐은 구조가 간단하고 제작이 쉬우며, 비용 및 유지보수 측면에서 매우 우수한 특성을 가지고 있어 주로 소형엔진에 많이 적용되고 있는데, 프랑스 터보메카(Turbomeca)사에 의해 최초로 개발된 후, F107, J402와 같은 소형엔진에 폭넓게 적용되어 왔다. 또한 최근에는 그동안 회전연료노즐의 적용이 어려웠던 헬기용 엔진 및 장수명 엔진, APU(Auxiliary Power Unit, 보조동력장치) 등에도 회전연료노즐의 적용이 확대되는 추세이다. 특히 소형엔진일수록 축회전속도가 빠르며, 낮은 비용이 요구된다는 점에서 회전연료노즐의 적용은 매우 큰 장점을 가지게 된다.

그러나, 이러한 회전연료노즐의 특징에도 불구하고 고속회전체 실험의 어려움, 회전연료분사의 복잡한 미립화 기구 등의 단점과 더불어 점화성능을 주로 엔진회전속도에 의존할 수밖에 없어 현재까지는 상대적으로 소형급의 엔진에 국한되

어 적용되고 있는 실정이다. 또한 기존의 전통적인 연료노즐을 이용한 연료분사에 비해 연료노즐 오리피스 자체가 연소실 내를 고속으로 회전하기 때문에 분무구조 및 미립화기구가 매우 복잡하고, 분무특성을 정량화하거나 정확히 규명하기가 대단히 어렵다. 특히 고속의 회전축을 모사하기 위한 분무시험장치 구성에 많은 시간과 노력이 필요하며, 분무시험에 일반적으로 적용되는 가시화기법과 분무액적 측정법 또한 측정 조건이 매우 열악해 효율적인 데이터 획득이 쉽지 않다. 미국의 Williams International사, Teledyne사에서 회전연료노즐과 슬링거연소기를 적용한 소형 터보제트엔진을 다수 개발하였고 미국과 유럽을 중심으로 회전연료노즐의 특성에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 전술한 바와 같이 실험적 접근이 어렵고, 이론적, 실험적인 연구결과가 부족해 폭넓게 적용되지는 못하고 있다.

회전연료노즐의 분무현상은 주로 분무가시화를 이용한 연료분무의 구조를 정성적으로 분석하는 방법과 PDA(Phase Doppler Anemometry)나 PIV(Particle Image Velocimetry)와 같은 레이저측정법을 이용해 분무액적의 크기와 속도를 측정하는 방법으로 연구되어져 왔다. Norster는 연료노즐의 회전력(원심력)이 분무액적 크기(Sauter Mean Diameter, μm)에 미치는 영향을 분석하여 디스크의 원주속도 $U(m/s)$ 에 대하여 다음과 같은 실험식을 제시하였다[1].

$$SMD = \frac{3,962}{U} \quad (1)$$

여기서 SMD는 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$SMD = \overline{D_{32}} = \sum_i \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (2)$$

Morishita는 드럼형 회전연료노즐을 이용해 Eq.(3-1)과 같은 오리피스가 없는 평면형 내부구조 및 스윙칩 형태의 분사기구를 가지는 경우와 Eq.(3-2)와 같은 연료분사용 오리피스를 가지는 경우에 대한 오리피스의 직경(d)과 속도(U), 연료유량(Q)에 따른 액적크기 변화를 두 가지 형태의 실험식으로 제시한 바 있다[2].

$$SMD = \frac{2,000}{U^{0.7}} \quad (3-1)$$

$$SMD = 3,300 \frac{Q^{0.2} \cdot d^{0.3}}{U^{0.7}} \quad (3-2)$$

상기와 같이 회전연료노즐의 분무특성을 측정 한 몇몇 선행연구에서는 액적크기 측정을 위해 액침법(Immersion Sampling Method)과 같은 기계적인 포집법을 사용하였는데, 회전연료분사의 전체 구조 및 미립화기구를 설명하기에는 부족한 면이 많았다. 최근 들어 광학기술의 발전에 힘입어 고속회전체 분무에 대한 실험적 접근이 용이해졌는데, Dahm 등은 서로 다른 형태와 크기를 가지는 회전연료노즐 오리피스에서 분사되는 액주 및 액적분열과정을 가시화를 통해 분석하고 수학적으로 액적크기모델을 예측하여 제시하였으며[3], 최, 이 등은 회전연료노즐에서의 분무특성을 가시화와 더불어 레이저 계측법을 이용한 액적크기 측정을 통해 보다 정량적인 미립화 특성을 도출하고자 하였다[4-6]. 나아가 최, 이 등은 회전연료노즐이 적용된 반경형 연소기의 연소시험을 통해 회전연료노즐의 연소특성을 파악하였다[7-8].

본 연구에서는 기존의 회전연료노즐 적용 엔진보다 더욱 작아진 초소형 터보제트엔진에서의 회전연료노즐의 적용 가능성을 검증하고, 가시화와 PDA를 이용한 액적크기 측정을 동시에 적용하여 회전속도 등의 변화에 따른 회전연료노즐의 미립화 특성을 파악하고자 하였다. 이를 통해 회전연료노즐의 분무특성이 기존 연료노즐의 분무특성과는 상이할 뿐만 아니라, 여러 분무기구가 복합적으로 결합된 현상임을 밝히고, 이를 이해하기 위한 회전연료분사의 각 단계별 미립화 기구를 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 회전연료노즐 및 실험장치

시험대상 회전연료노즐의 제원을 Fig. 1에 보였다. 회전연료노즐은 직경 40 mm에 1.5 mm

직경의 오리피스가 60° 등간격으로 6개가 배치되어 있으며, 이 중 오리피스 4개는 연료노즐의 좌측(연소기 전방 방향), 오리피스 2개는 연료노즐의 우측(연소기 후방 방향)에 위치한다. 이 2열의 오리피스들은 연료노즐의 분무중심축을 기준으로 V자 형태로 배치되어 있는데, 이런 배치구조는 연소기 내부에 연료를 공간적으로 균일하게 분포시키기 위해 슬링거 연소기에 일반적으로 사용되는 배치방식이다.

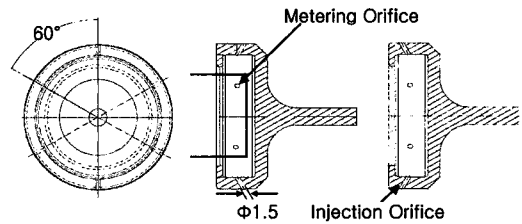


Fig. 1 Rotary Atomizer

회전연료노즐에 연료를 공급하기 위하여 Fig. 1의 가운데 그림과 같이 연료공급관이 회전연료노즐 내부까지 들어가 있으며, 직경 0.5~1 mm의 미터링 오리피스 4개로 연료유량을 조절하였다. 회전연료노즐의 분무특성을 측정하기 위한 장치로 Fig. 2와 같은 회전연료노즐 구동장치를 제작하였다.

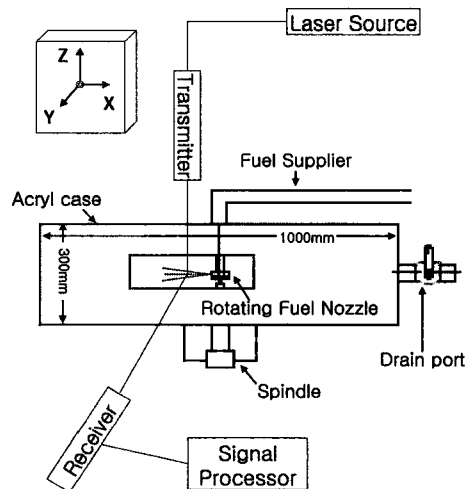


Fig. 2 Rotary Atomizer Test Apparatus

분무액적크기 등을 측정하기 위하여 1-D PDA(Phase Doppler Anemometer, DANTEC)를 이용하였으며, 분무가시화를 위해 Nd:YAG 레이저(120 mJ, NEWWAVE)를 광원으로 이용한 직접사진법을 적용하였는데, 펄스광원인 Nd:YAG 레이저의 조사광에 수직한 평면에 디지털카메라를 위치시키고, 카메라 노출을 1/8000 sec로 유지한 상태에서 순간적인 분무 이미지를 획득하는 방식을 사용하였다.

회전연료노즐 구동장치는 최대 100,000 rpm까지 구동가능하나, 실험조건 및 안정성 등을 고려하여 최대 40,000 rpm까지 측정하였다.

2.2 실험조건

회전축의 반경방향으로 비산되는 회전연료분사의 특성을 감안하여, 실제 연료대신 상온의 물을 사용하여 실험을 수행하였다. 회전연료노즐의 작동 및 분무는 상온, 상압 조건에서 이루어졌으며, 0~40,000 rpm 사이에서 5,000 rpm 단위로 측정되었다. 주로 점화 및 초기 작동조건에서의 회전연료분사 특성을 파악하기 위하여 연료를 15 kg/hr로 공급하였는데, 이는 최대 연료량의 약 17%에 해당하는 연료량이다.

Table. 1에 본 연구에 사용한 연료유량과 회전수 조건을 나타내었다.

Table 1. Test Condition

Parameter	Test Condition
Fuel Flow Rate(kg/hr)	15, 30, 45, 60, 75, 90
Rotating Speed(rpm)	5,000 ~ 40,000 (5,000 rpm step)

3. 회전연료노즐의 작동 특성

3.1 회전연료노즐의 원심력

회전연료노즐의 분무특성을 실험적으로 고찰하기 위해 회전연료노즐의 작동특성을 이해하기 위하여 회전연료노즐의 원심력과 이에 대응

되는 연료공급압력의 상관관계에 대해 모델링하고 그 특성을 파악하였다. 회전연료노즐은 높은 회전수에서 발생하는 원심력을 이용하여 연료노즐 내부 챔버의 연료를 가압하고 이를 오리피스를 통해 분사시키는 구조로 이때 발생하는 원심력은 통상적인 압력식 연료노즐의 연료공급압력에 대응된다고 볼 수 있다.

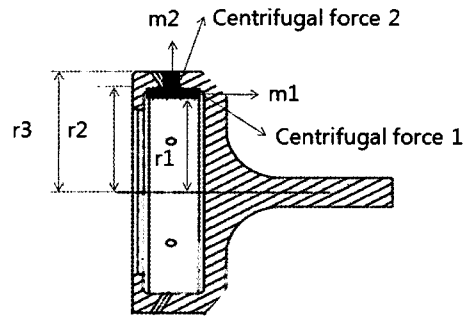


Fig. 3 Definition for Centrifugal Force Analysis of Rotating Nozzle

Figure 3에 회전연료노즐의 원심력 해석에 필요한 정의를 보였다. 회전연료노즐 중 단순원판형(Simple Disk)이나 종형(Bell) 회전연료노즐의 경우, 연료가 축적되는 내부 챔버가 없이 바로 분사가 되나, 드럼형 연료노즐에서는 Fig. 3과 같은 내부 챔버를 거친 후 연료가 분사된다. 따라서 회전연료노즐의 내부 연료가 받는 원심력은 크게 회전연료노즐 내부 챔버에 적층된 연료의 원심력과 오리피스내부의 연료가 받는 원심력으로 나눌 수 있다. 이를 원심력의 정의인 (질량×원주속도/회전체반경)을 도입하고, 회전체반경에 대한 적분을 도입하면 회전연료노즐 내부의 연료가 받는 원심력은 다음과 같이 표현할 수 있는데,

$$\begin{aligned}
 C.F_{total} &= C.F_{inner\ chamb.} + C.F_{disch. orifice} \\
 &= \int_1^2 \frac{\delta m_1 V_p^2}{r} dr + \int_2^3 \frac{\delta m_2 V_p^2}{r} dr \\
 &..... (4-1)
 \end{aligned}$$

where, C.F : Centrifugal Force

V_p : Peripheral Velocity

r : Radius of Centrifugal Force

δm : Infinitesimal Fuel Mass Element

기존의 회전연료노즐 실험결과에서 고속의 상태에서는 내부 챔버에 축적되는 연료의 양이 매우 작아 무시할 수 있고, 회전속도에 비해 연료량이 크지 않은 소형엔진에서는 회전연료노즐 내부에서 원심력을 받는 연료의 질량 또한 매우 작다고 가정할 수 있으므로, 연료노즐의 해당 설계점 질량유량이 받는 원심력이 압력식 연료노즐의 분사압력과 상용한다고 볼 수 있다. 또한 회전연료노즐의 직경에 따른 미소 연료질량의 원심력 차이도 거의 없다고 가정하고 압력식 노즐과 마찬가지로 오리피스 입구의 챔버 표면에 작용하는 원심력이 분사압력과 동일하다고 가정할 때, 원심력은 다음과 같이 단순화하여 표현할 수 있다.

$$\text{Centrifugal Force} = \frac{\dot{m} V_p^2}{r_2} \quad (4-2)$$

상기의 원심력을 회전속도 변화에 대해 계산하고, 이를 다시 내부 챔버 면적에 작용하는 분사압력으로 대응시켜 Fig. 4와 같은 결과를 도출하였다.

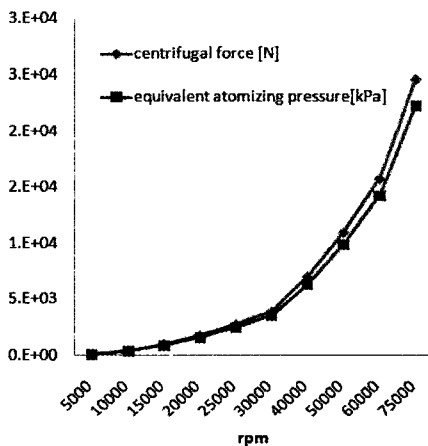


Fig. 4 Centrifugal Force and Equivalent Atomizing Pressure of Rotary Atomizer

해석 결과, 본 드럼형 연료노즐이 75,000 rpm의 고속으로 회전할 때 발생하는 원심력의 크기는 압력식 분무노즐에서 약 220 bar의 분사압력과 동일한 효과를 낼 수 있는 것으로 예측되었다. 이러한 200 bar가 넘는 분사압력은 압력식 연료노즐에서 실제 구현하기 힘든 매우 높은 압력으로 회전연료노즐이 고속으로 회전할 때 발생하는 원심력은 연료미립화에 충분한 압력공급원이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 회전연료노즐의 미립화 성능

전술한 바와 같이, 회전연료노즐의 미립화성능은 드럼(디스크)의 회전속도와 드럼(디스크)의 직경이 가장 중요한 요소이다. 선행 연구자인 Norster와 Morishita가 제시한 식(1)과 식(2-1), 식(2-2)를 이용해 본 연구에 사용한 드럼형 회전연료노즐의 미립화성능을 예측한 결과, Fig. 5와 같은 회전속도에 따른 미립화 성능을 도출하였다. 최고속인 75,000 rpm에 도달하면 약 20 ~ 50 μm 의 매우 양호한 액적크기를 얻을 수 있을 것으로 예측되었으나, 엔진의 점화개시 구간인 20,000 ~ 25,000 rpm 에서는 50 ~ 150 μm 정도로 예측 편차가 클 뿐 아니라, 안정적인 점화를 위해서는 미립화 성능의 향상이 뒤따라야 함을 보이고 있다.

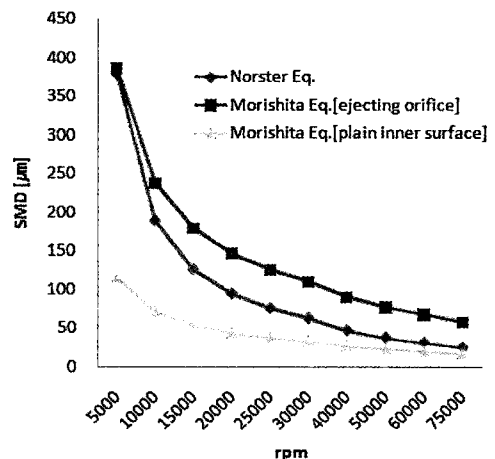


Fig. 5 Estimation of Droplet Size

4. 실험 결과

4.1 회전연료분무의 가시화

회전연료노즐의 분무특성을 정성적으로 파악하기 위하여 분무가시화를 수행하였다. 우선 회전연료노즐의 회전속도 증가에 따른 분무특성을 가시화하기 위하여 회전속도를 5,000 ~ 40,000 rpm까지 5,000 rpm 단위로 증가시켰으며, 엔진의 시차~초기 가속 구간임을 감안하여 점화유량 초기에 해당하는 15kg/hr의 연료를 공급하였다. Fig. 6에 회전수에 따른 가시화결과를 보였다.

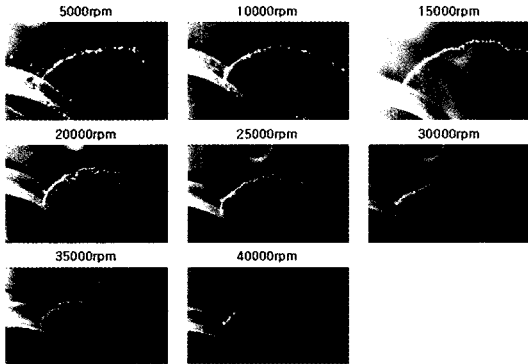


Fig. 6 Visualization for Atomization Development in accordance with Rotating Speed (Fuel Flow Rate : 15 kg/hr)

회전연료노즐의 오리피스에서 분사되는 연료는 Fig. 6과 같이 기본적으로 액주(Liquid Column)의 형태를 가지게 되며, 고속회전체에서 분사되는 연료와 정체상태의 주위공기와 상대속도차로 인한 미립화가 진행됨을 알 수 있다. 이러한 미립화는 램제트엔진에서 흔히 적용되는 고속의 공기유로 내에 수직으로 분사되는 연료 분사의 미립화와 매우 유사한 특성을 가지고 있다. 램제트엔진에서의 수직분사는 연료노즐이 고정된 상태에서 빠른 공기유동의 충돌에너지를 통해 미립화가 촉진되는 반면, 회전연료노즐에서는 정체된 유동 내를 연료노즐이 빠르게 지나가면서 미립화가 촉진되는 구조를 가지고 있다.

수직분사기구에서는 공기유속과 연료분사압력

이 독립적으로 작용하기 때문에 연료분사각도가 조건에 따라 변하는 것이 일반적이나, 회전연료노즐은 원심력으로 발생하는 분사압력과 미립화에 필요한 상대속도차 모두 회전속도의 비례함수이므로, 액주와 연료노즐표면이 이루는 분사각도는 회전수와 무관하게 일정함을 알 수 있다.

5,000 ~ 10,000 rpm의 낮은 회전수에서는 오리피스로부터 분사된 연료가 비교적 완전한 액주형태를 하류까지 유지하고 있는 것이 관찰되었으며, 15,000 ~ 20,000 rpm 구간에서는 액주와의 불안정 현상이 발생하고 회전수가 올라갈수록 더욱 이러한 불안정현상이 두드러짐을 관찰할 수 있다. 일반적으로 높은 밀도를 가지는 연료액주가 낮은 밀도속의 분위기내로 분사될 때, 특히 낮은 Weber수 하에서 연료액주의 표면에 불안정한 파(Instable Wave)가 형성되는데, 이러한 연료 액주의 불안정현상을 지배하는 Rayleigh 불안정성을 조기에 발생시키고, 액주로부터 액적이 분리되는 Break-up Point를 상류쪽으로 이동시키는 것이 천이단계의 회전연료분사에서 중요한 미립화 성능 향상인자가 됨을 알 수 있다. 30,000 rpm 이상에서는 오리피스 출구에서부터 바로 단일 액적으로 미립화되는 단계(Direct Drop Formation)가 관찰되었는데, 이 결과로부터 본 연료노즐 및 연소기의 적정 연소영역은 최소 30,000 rpm 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

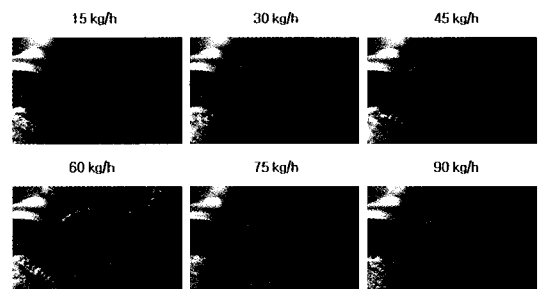


Fig. 7 Visualization for Atomization Development in accordance with Fuel Flow Rate (Rotating Speed : 30,000 rpm)

동일회전수 조건에서 연료유량의 변화에 따른 회전연료노즐의 미립화 특성 변화를 Fig. 7에 보였다. 연료유량이 증가할수록 오리피스 출구에서의 연료액주의 직경이 증가하는 것을 알 수 있으며, 따라서 액주가 분열하여 액적으로 발달하기 시작하는 지점이 후류로 이동하는 것이 관찰되었다. 회전속도 변화에 따른 가시화 결과와 마찬가지로 연료유량의 증가 여부에 관계없이 액주와 연료노즐이 이루는 분사각도는 일정함을 알 수 있다.

15 kg/hr의 저유량 조건에서는 Direct Drop Formation 단계가 시작되는 것을 볼 수 있는 반면, 90 kg/hr과 같은 고유량 조건에서는 연료액주의 직경이 커짐에 따라 다시 액주 분사 단계와 천이 단계로 회귀하는 결과를 보여주고 있다. 따라서 액주의 직경과 연료노즐의 회전속도의 비에 따라 미립화 단계가 달라진다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 램제트와 같은 수직분사기구의 미립화 단계와 유사한 면이 있으나, 수직분사에서는 오리피스의 직경과 액주직경이 동일한 반면, 회전연료노즐에서는 회전력으로 인해 연료액주가 오리피스의 후면으로 치우치면서 Fig. 6과 Fig. 7의 오리피스 출구의 액주형상과 같은 비대칭 형상을 만들기 때문에 액주의 분열 및 미립화 기구가 한층 더 복잡하다. 특히 이렇게 오리피스의 후면으로 연료액주가 편향되면서 반구형의 Half-Bubble 형상을 만들면서 얇은 막을 형성하게 되고 이어 막의 천공현상이 일어나게 되는데, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 회전연료분무의 미립화 특성 측정

전술한 가시화 결과를 바탕으로 회전연료분무의 정확한 특성을 정량화 하기 위한 PDA 측정을 실시하여, 액적크기 및 분포를 파악하였다.

Figure 8에 연료유량 15 kg/hr 조건에 대해 회전속도를 달리하면서 연료노즐표면에서 반경 50mm지점에서 측정한 액적크기 분포 결과를 보였다. 회전수가 증가할수록 액적크기 감소가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며, 드럼형 노즐의

중심선을 기점으로 양옆으로 최대액적을 보이는 쌍봉의 형태를 보이고 있는데, 이는 연료노즐 오리피스를 2열로 V자로 배치한 결과에 의한 것이다. 연료액적의 크기는 20,000 rpm 이하에서는 80 ~ 100 μm 정도의 작은 크기를 보이다가 회전수가 40,000 rpm 으로 증가하면, 40 ~ 60 μm 의 양호한 액적크기를 보임을 알 수 있다. 5가지 회전수 조건에 따른 액적크기는 회전수 증가에 따라 비교적 뚜렷한 감소경향을 보이거나 25,000~30,000 rpm은 거의 유사한 특성을 보이고 있는데, 이는 25,000~30,000 rpm 구간이 Liquid Column 단계에서 Direct Drop Formation 단계로 넘어가는 천이영역이기 때문에 속도에 따른 미립화정도가 혼재되어 측정되고 있는 것으로 추측된다.

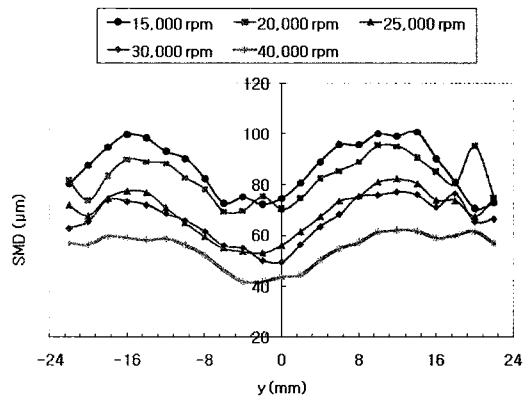


Fig. 8 SMD distribution in accordance with Rotating Speed (Fuel Flow Rate : 15 kg/hr)

상기 결과에서, 분무가시화 결과와 마찬가지로 40,000 rpm 이상에서는 연소에 충분한 액적크기를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 전술한 Norster와 Morishita의 입경 예측 결과와 비교해보면, 영역에 따라 약 20 ~ 30% 정도의 입경감소를 보이고 있어 새로운 보정식이 제시될 필요성이 있으며, 또한 연료의 점도 및 표면장력 특성도 고려해야 할 것으로 판단된다.

Figure 9에 동일조건에 대한 원주방향 속도분포를 보였다. 액적크기 분포와 유사하게 노즐중심선의 양쪽에 최대속도값을 나타내고 있으며,

노즐중심은 5 m/s 이하의 상대적으로 낮은 속도를 보이고 있다. Fig. 9와 Fig. 10의 결과에서 보인 노즐 중심부의 낮은 속도와 작은 액적크기는 이 영역에서 작은 액적들이 정체되어 있다는 것을 의미하며, 노즐 중심부와 속도가 높은 영역 사이에 발생하는 전단영역(Shear Layer)의 존재는 회전연료노즐을 적용한 연소기에서 화염안정화를 위한 영역으로 사용될 수 있음을 의미한다. 이러한 노즐 중심부의 정체영역 및 외곽의 쌍봉 형태는 압력식 선회연료노즐의 분무형태와 매우 유사한 것으로 압력식 선회노즐의 재순환영역과 형태적으로 매우 유사하다고 판단된다. 이 등[9]에 의해 수행된 PDA 측정을 통한 압력식 선회노즐의 분무형태 연구의 결과와 비교해보면, 압력식 선회노즐은 단일 연료노즐에서 위와 같은 재순환영역 및 쌍봉 형태가 구현되는 반면, 회전연료노즐에서는 회전체 전체의 거동에서 이중토로이달(Dual Toroidal) 형태의 액적크기 및 속도 분포를 보인다. 따라서 회전연료노즐은 회전운동을 통해 분무전체의 거동이 압력식 선회노즐의 단일 거동과 유사한 특성을 가진다고 말할 수 있다.

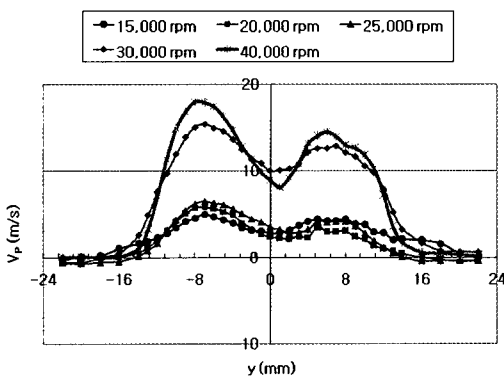


Fig. 9 Peripheral Velocity Distribution in accordance with Rotating Speed (Fuel Flow Rate : 15 kg/hr)

Figure 10에 20,000 rpm, 15 kg/hr 조건에 대해 회전연료노즐의 분무형태를 체적유속(Volume Flux, cc/cm²/sec)으로 표현하였다.

마찬가지로 노즐 중심부에는 연료가 거의 분사되지 않는 반면, 대부분의 연료가 V형 노즐의 방향을 따라 분사되고 있음을 알 수 있다. 체적유속의 비대칭성은 전술한 바와 같이 연소기 내의 유량분포를 위해 오리피스 개수를 비대칭 배치한 결과에서 기인한 것이며, 액적크기와 속도 분포에서 고찰한 바와 같이 노즐 중심부에는 연료가 거의 분포하지 않은 정체영역을 형성하고 있음을 알 수 있다.

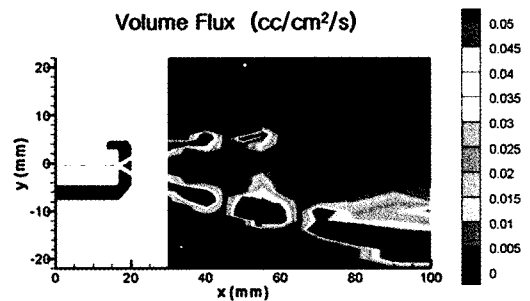


Fig. 10 Volume Flux Distribution at 15 kg/hr, 20,000 rpm

상기의 정체영역으로 인한 회전연료노즐의 미립화 기구 및 분무특성은 추가적인 연구를 통해 규명되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

회전연료노즐의 분무특성을 분무가시화와 PDA 계측법을 이용하여 파악하였다.

1) 회전연료노즐의 분사압력에 대한 모델링 결과, 회전연료노즐이 발생하는 원심력은 가스터빈 엔진 연료미립화에 충분한 압력을 공급해 줄 수 있음을 밝혔다.

2) 분무가시화를 통해 회전연료분사의 미립화 과정을 분석한 결과, 미립화를 촉진시키기 위해서는 천이영역에서 액주의 불안정성을 증가시켜야 함을 보였다.

3) PDA 측정을 통해 회전연료분무의 구조 및 미립화 특성을 밝혔으며, 기존에 제시된 실험 예 측치보다 향상된 미립화 결과를 보였으며, 소형 가스터빈에의 적용이 타당함을 보였다.

참 고 문 헌

1. E. R. Norster, CoA-Memo-51, Cranfield College of Aeronautics, Bedford, England, 1964.
2. T. Morishita, "A Development of the Fuel Atomizing Device Utilizing High Rotational Speed," ASME Paper No. 81-GT-180, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1981.
3. W. J. A. Dahm, P. R. Patel and B. H. Lerg, "Visualization and Fundamental Analysis of Liquid Atomization by Fuel Slings in Small Gas Turbine Engines," 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA Paper No. 2002-3183, 2002.
4. 최성만, 이동훈, 박정배, "Spray Characteristics of the Rotating Fuel Injection System", 한국액체미립화학회지, 제11권, 제2호, 2006, pp.81-88
5. Seong Man Choi, Kang Yeop Lee, Dong Hun Lee and Jeong Bae Park, "Spray characteristics of the rotating fuel injection system by using PDPA and PIV, " Proceeding of 17th International Symposium on Air-breathing Engines, 2005
6. Hyun Kyung Choi, Chea Hong Choi, Seong Man Choi and Dong Hun Lee, "An Experimental Study of the Rotational Fuel Injection System," JSASS-KSAS Joint International Symposium on Aerospace Engineering. 2007. 10
7. Seong Man Choi, Kang Yeop Lee, Dong Hun Lee and Jeong Bae Park, "An Experimental Study of the Slinger Combustor," Proceeding of Asian Congress on Gas turbine, ACGT 2005-039, 2005
8. 이강엽, 이동훈, 최성만, 박정배, 박영일, 김형모, 한영민, "슬링거 연소기의 연소 특성", 한국추진공학회지 제8권 제1호, 2004, pp.38-43
9. 이동훈, 이강엽, 최성만, "쉬라우드 공기 선회 유동 특성 변화에 따른 심플렉스 연료노즐의 분무 특성", 한국액체미립화학회지 제9권 제3호, 2004, pp.35-41