

研究論文

회전연료노즐의 오리피스직경에 따른 분사특성연구

이매훈* · 장성호* · 이동훈** · 최성만***†

A Study of Spray Characteristics of the Rotating Fuel Nozzle with Orifice Diameters

Maehoon Lee* · Seongho Jang* · Donghun Lee** · Seongman Choi***†

ABSTRACT

An experimental study was performed to understand spray characteristics of the V type rotating fuel nozzle with orifice diameters by using high speed rotational system. The experimental apparatus consist of a high speed rotational system, fuel injection system and acrylic case. The droplet size and velocity were measured by PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) and spray was visualized by using Nd-Yag laser-based flash photography. From the test results, droplet size is reduced with increasing orifice diameter up to the critical value. When increasing orifice diameter over than this critical value, droplet size is not decreased with increasing the orifice diameter. This is due to the irregular distribution of the liquid sheet around the inner surface of injection orifice.

초 록

고속회전 시험장치를 이용하여 V 형태의 회전식 연료 노즐의 오리피스 직경에 따른 분사특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 시험장치는 고속 회전장치, 연료공급장치, 아크릴 케이스로 구성하였다. 분무 오리피스의 직경과 회전속도를 변화시켜가며 분무실험을 수행하였다. 분무입자의 크기 및 속도 측정은 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템을 사용하였고, Nd-Yag Laser를 이용하여 분무특성을 가시화하였다. 실험결과, 분무오리피스의 직경이 커질수록 분무입자의 크기가 작아졌으며, 분무입자 크기가 가장 작은 값을 보이는 분무오리피스의 한계 직경이 존재하였다. 오리피스의 직경이 이 한계직경 보다 클 경우 분무입자의 크기는 더 이상 감소하지 않았다. 이것은 분무 오리피스의 직경이 한계직경보다 커질 경우 오리피스 내의 액막이 균일하게 분포하지 않기 때문으로 판단된다.

Key Words: Rotating Fuel Nozzle(회전식연료노즐), Orifice(오리피스), SMD(평균입자크기), Spray Characteristics(분무특성)

접수일 2010. 5. 31, 수정완료일 2010. 8. 11, 게재확정일 2010. 8. 16

* 학생회원, 전북대학교 항공우주공학과

** 정회원, 삼성테크윈 파워시스템연구소

*** 종신회원, 전북대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: csman@jbnu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회(2010. 5. 27-28, 대한항공 중앙교육원) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

가스터빈 연소기의 연료분사 방법에는 압력분무식, air-blast(공기충돌형)와 회전연료분무시스

템 등이 사용되어지고 있다. 기존의 압력분무식과 air-blast 연료분사방식은 가스터빈 엔진에서 요구하는 분무특성을 잘 만족시켜 보편적으로 사용되어지고 있다. 하지만 매우 정밀하고 복잡한 부품들로 구성되어 제작이 어렵고 비용과 시간이 많이 소요된다. 또한, 연료를 공급할 보조장치들이 필요하기 때문에 소형 가스터빈 엔진에 적용하는데 어려움이 있다. 반면 본 연구에 적용된 회전 연료노즐 분사시스템은 엔진 회전축 원심력을 이용하여 연료가 분사되므로 고압 연료펌프시스템이 필요가 없으며, 다른 연료노즐에 비해 부품수가 적고, 구조가 간단하여 소형 가스터빈 엔진에 적용하는데 용이하다[1]. 이러한 이유로 회전 연료분사 시스템은 Noster, Morishita 및 Dahm 등에 의하여 연구되어졌으며, 회전속도가 빠를수록 분모입자의 크기가 작아지는 경향식을 도출하였다[2, 3]. 따라서 회전연료분무시스템은 낮은 회전수에서 분무특성이 취약한 특성을 가지고 있다.

이러한 회전연료분무 시스템을 가스터빈 엔진에 적용하기 위해서는 엔진이 시동되는 낮은 회전수에서도 점화 및 연소가 가능하도록 연료분사가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 낮은 회전수에서도 최적의 분사특성을 가질 수 있는 회전연료노즐을 연구하고자 한다. 실험에 이용된 설계변수로는 회전연료노즐의 분무오리피스 직경이며, 분무오리피스 직경을 5가지로 변화시켜가며 그 특성을 비교 분석하며 최적의 분무특성을 가지는 오리피스 직경을 도출하고, 오리피스 직경에 따른 분무특성을 분석하고 이해하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1은 회전연료노즐의 실험장치에 대한 개요도를 보여준다. 실험장치는 가압식 물탱크, 회전연료노즐, 연료공급노즐, 고속회전이 가능한 Spindle, 아크릴케이스 및 PDPA시스템으로 구성하였다. PDPA시스템은 Ar-Ion Laser, Transmitter, Receiver, Signal Processor와 3-D

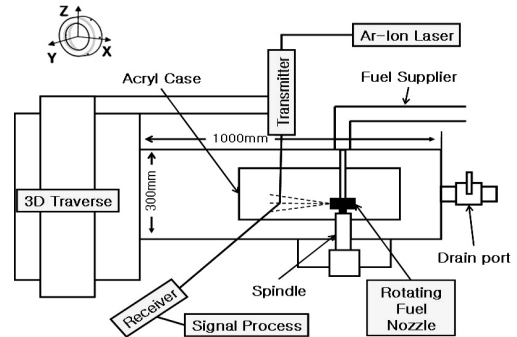


Fig. 1 Schematic diagram of Spray Test Rig with PDPA System

Traverse로 구성된다. 작동유체는 물을 사용했다. 회전연료노즐은 Spindle축과 직접 연결하여 구동하도록 하였고, 가압식 물탱크와 연료공급노즐을 연결하여 일정한 압력으로 일정한 양의 연료를 공급하도록 하였다. 또한, 연료공급노즐의 Metering Orifice와 회전연료노즐의 Injection Orifice 중심이 일치하도록 설치하였다. 아크릴 케이스는 광원이 간섭되지 않도록 설계, 설치하였고 측정 중 분사된 물은 드레인 포트를 통하여 배출되도록 구성하였다.

2.2 실험방법

분무실험은 실제 엔진의 작동조건과 비슷한 조건에서 이루어 졌으며, 분무 오리피스 직경의 크기가 각각 1.5, 2.2, 2.6, 3.0, 3.4 mm인 회전연료노즐을 이용하여 회전수 10,000, 15,000, 20,000, 25,000, 30,000, 35,000, 40,000 rpm에서 유량 15 kg/h에 대하여 수행되어졌다. 실험에 사용된 회전연료노즐은 모두 분무 오리피스의 개수가 12개이고, 직경의 크기에 따라 Table 1에 각각의 경우에 Case1, Case2, Case3, Case4, Case5로 표시하였다. 회전연료노즐의 형상과 단면적은 Fig. 2에서 보여지고 있으며 V 자형 배치를 가지고 있다. A와 B단면의 위치에 따라 분무 오리피스의 개수가 다르다. (a)에서 보여지는 것처럼 A 단면에 해당된 분무오리피스의 개수는 8개이고, B 단면에 해당된 분무오리피스의 개수는 4개이다.

Table 1. Test Matrix for Rotating Fuel Nozzle

Type	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Orifice Diameter (mm)	1.5	2.2	2.6	3.0	3.4
Orifice Total Area (mm ²)	21.20	45.59	63.68	84.78	108.9

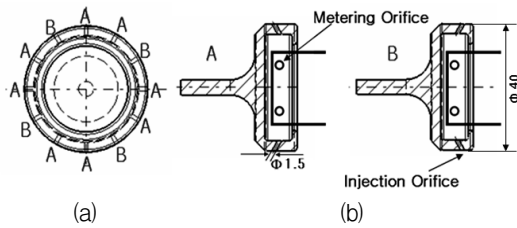


Fig. 2 Rotating Fuel Nozzle

Figure 3은 1-D PDPA를 이용한 입자의 크기 및 속도 측정 시 측정위치를 나타낸 것이다. 측정위치는 xy평면 223개이며, 각 측정 위치에서 20초 동안 10,000개의 데이터를 샘플링하였다. PDPA의 추천값은 10초 동안 5,000개의 데이터를 샘플링하도록 되어있으나 충분한 데이터 샘플링을 위하여 최대 측정시간이 20초가 되거나, 또는 최대 10,000개의 데이터를 샘플링하도록 설정하였다.

Figure 3의 y(-)영역은 Fig. 2의 A 단면에 해당하며, y(+) 영역은 B단면에 해당한다.

3. 실험결과 및 검토

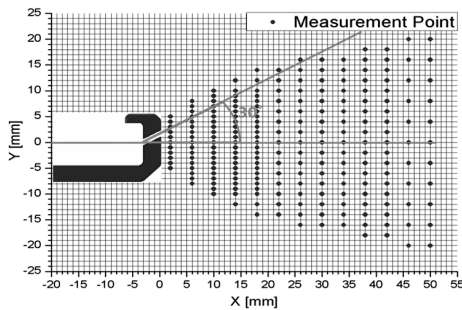


Fig. 3 PDPA Measurement Point

Figure 4는 X=26 mm인 위치에서 오리피스의 직경이 Case1, Case2, Case3, Case4, Case5인 경우에 대해 회전속도를 증가시키면서 입자의 최대속도가 나타나는 위치에서의 SMD를 측정할 결과이다. 시험장치 구성상 부유입자를 측정할 가능성이 있어 이를 배제하기 위해 최대속도를 가지는 입자의 크기를 기준으로 하였다.

Figure 4의 결과로부터 회전속도가 증가함에 따라 분무입자의 크기(SMD)는 점차 작아짐을 알 수 있으며, 분무오리피스의 직경이 클수록 SMD값이 작아짐을 알 수 있다. 회전수 10,000 rpm에서 30,000 rpm의 경우에는 오리피스 직경이 Case1에서 Case3으로 증가할 경우 SMD의 크기는 점차 작아짐을 볼 수 있다. 그러나 분무 오리피스의 직경이 Case3에서 Case4, Case5로 증가한 경우 분무입자의 크기는 감소되지 않고 오히려 증가됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 회전속도가 낮은 경우에는 분무입자의 크기가 최소가 되는 최적의 분무오리피스 크기가 존재함을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 5의 분무가시화 결과를 통해 그 이유를 알 수 있다.

Figure 5는 Canon EOS 5-D 카메라와 Nd:Yag Laser를 이용하여 Case1, Case3, Case5의 회전연료노즐에 대한 분무 가시화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 (a), (b), (c)는 회전연료노즐의 회전속도가 15,000, 2,5000, 3,5000 rpm에서의 가시화 결과이다. 회전속도 15,000 rpm의 경우,

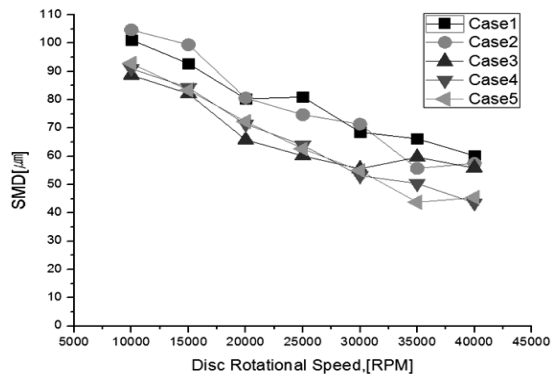


Fig. 4 SMD with Injection Orifice Diameter

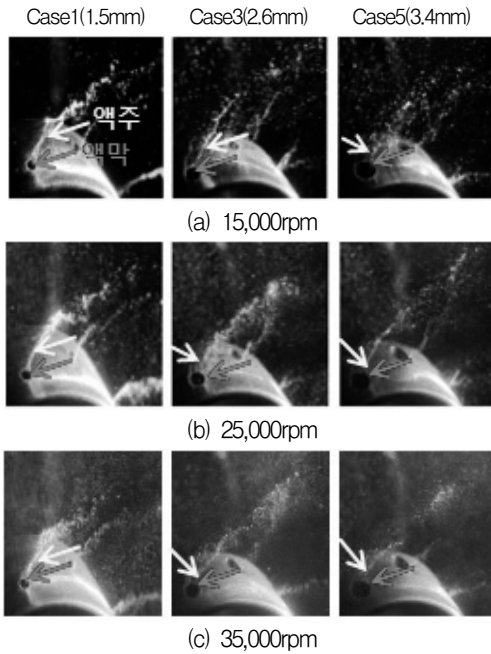


Fig. 5 Spray Visualization with Rotational Speed

Case1에서는 분사액체가 액주의 형태로 오리피스를 빠져나와 분열됨을 볼 수 있으며, Case3의 경우에는 오리피스 주위 전체로 고르게 액막의 형태로 분출되어 분사됨을 볼 수 있다. 그런데 Case5인 경우에는 오리피스 주위의 액막이 균일하게 분포되지 않고 일정부분에 치우쳐 분열되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 25,000 rpm에서도 유사하게 나타난다. 하지만 35,000 rpm에서는 Case3과 Case5의 경우 모두 유사한 분무형태를 보임을 알 수 있다. 따라서 이러한 가시화 결과, 낮은 회전수에서는 적정크기의 오리피스 직경 이상에서는 오리피스 내부에 형성된 액막이 오리피스 원주 주위로 고르게 분포되지 않고 한쪽으로 치우치게 되며 이것이 분무입자의 크기를 증가시키게 되는 원인으로 판단된다.

Figure 6은 회전연료노즐 Case1, Case3, Case5에 대해서 공급유량 15 kg/h와 15,000 rpm의 회전속도 조건에서, 반경방향 (X축) 거리에 따른 분무입자의 속도를 측정된 결과이다. X는 분무 오리피스 출구로부터 반경방향(X축, Radial Distance)으로 2 mm에서 50 mm까지의 거리를

나타내며, Y축은 분무입자의 속도 분포를 나타낸다. 이 결과로부터 동일한 회전속도를 가질 때, 회전연료노즐의 반경 방향 거리에 따른 분무 액적속도(V_L)는 점차 감소함을 알 수 있다.

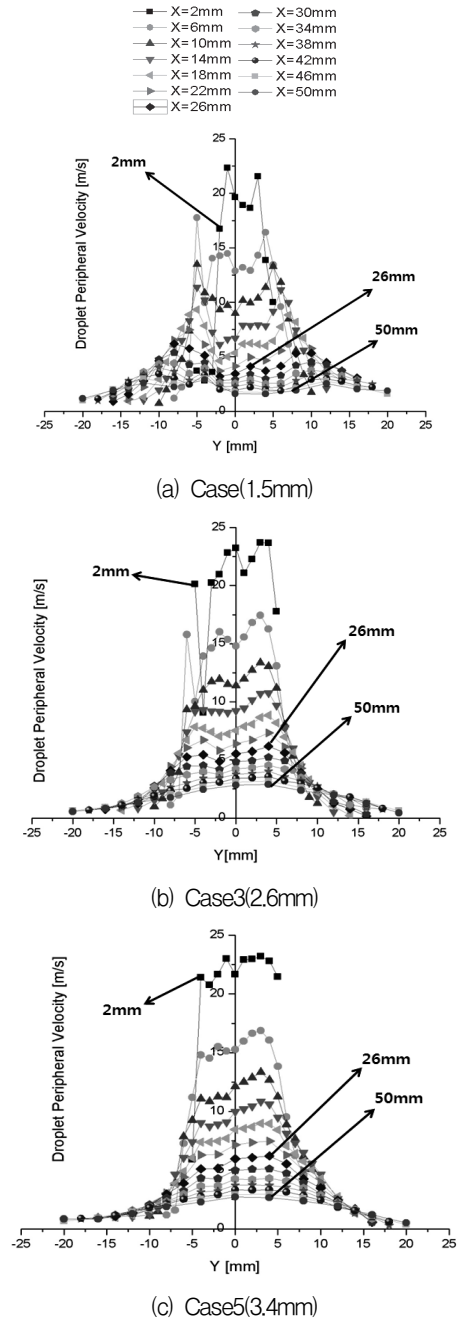
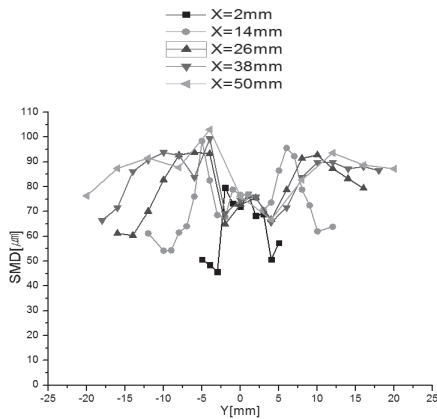
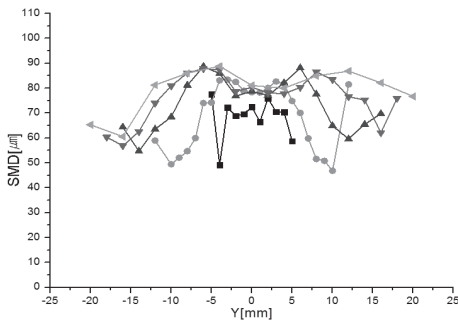


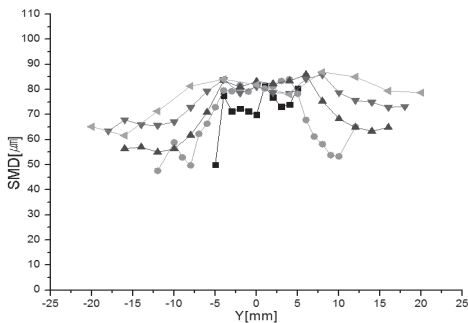
Fig. 6 Droplet Peripheral Velocity with Radial Distance



(a) Case1(1.5mm)



(b) Case3(2.6mm)



(c) Case5(3.4mm)

Fig. 7 SMD Distribution with Radial Distance

Figure 7은 회전연료노즐의 분무오리피스 출구로부터 반경방향 거리에 따른 분무입자의 크기를 알아보기 위해 Case1, Case3, Case5에 대해서 15 kg/h의 공급유량과 15,000 rpm의 회전속도 조건에서 반경방향 거리 2 mm, 14 mm, 26 mm, 38 mm, 40 mm에 따른 분무입자의 크기

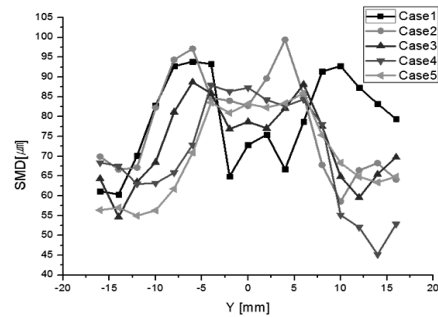


Fig. 8 SMD Distribution with Radial Distance

를 측정 한 결과를 나타낸다. 분무입자의 크기는 Case1의 경우 $\pm 5 \text{ mm}$ ($Y=0$ 기준) 근처에서 가장 큰 값을 보이고 있으며, 중심부에서는 낮은 값을 가지고 있다. 이것은 분무입자가 $\pm 5 \text{ mm}$ ($Y=0$ 기준) 근처에 집중되어 있고 나머지 부분에는 주변무에서 떨어져 나온 작은 부유입자로 구성되어 있음을 보여 준다. Case3은 원점 부근의 입자가 최대치에 비해 다소 작으며, Case5의 경우에는 피크치와 유사한 크기를 보여 $\pm 10 \text{ mm}$ ($Y=0$ 기준) 영역에서는 균일한 크기의 입자가 분포되어 있음을 알 수 있다.

Figure 8은 15,000 rpm의 회전속도에서 $X=26 \text{ mm}$ 인 위치에서 분무입자의 크기 분포를 각 오리피스 크기에 따라 나타낸 것이다. 오리피스 직경 Case1, Case2인 경우 최대값은 원점으로 양쪽에 분포하여 있으며 중심과의 크기 차이는 매우 크다. 오리피스 직경 Case3인 경우 입자의 직경의 최대치는 작아지고 중심부와의 크기 차이도 작아지며, 오리피스 직경 Case4, Case5에서는 이 경향이 보다 뚜렷하게 나타난다. 즉 오리피스 직경이 Case3 이상에서는 입자의 크기는 더 이상 작아지지는 않고 입자의 분포가 더욱 고르게 나타남을 알 수 있다.

Figure 9는 액체가 분무오리피스로부터 균일하게 분포되고 Coriolis 효과가 무시될 정도로 작다는 가정 하에 회전 연료분사노즐의 이론적인 액막의 두께에 대해 정의하고 있다. 여기에서 t 는 액막의 두께(liquid film thickness)를 나타내며, d_0 는 분무오리피스의 직경이다.

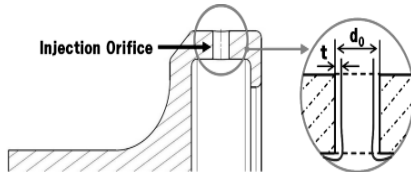


Fig. 9 Schematic of Liquid Film Thickness of Rotating Fuel Nozzle

여기에서, 액막두께(t)는 Dahm[3]으로 부터 유도된 (1)식을 이용하여 구할 수 있다.

$$t = \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_L q}{\rho_L R \Omega^2 d_0}\right)^{1/3} \quad (1)$$

Figure 10은 분무오리피스의 출구로부터 X 축으로 26 mm 위치에서 유량 15 kg/h일 때, 계산된 액막의 두께와 분무입자의 최대속도에서의 SMD관계를 무차원화 하여 나타낸 것으로서, 액체의 유량, 회전속도, 액막의 두께 등의 효과를 경험식으로 나타낼 수 있다. 이때 R^2 은 결정계수를 나타낸다. 액주형태로 분사되는 Case1과 Case2의 경우 (A) 와 같은 직선 형태로 나타남을 알 수 있었고, 액막형태로 분출되는 Case3의 경우에는 (B) 직선으로 나타났다. 액막이 치우치는 Case4와 Case5의 경우에는 (C) 직선 형태로 나타남을 알 수 있다. 즉 오리피스가 V 자형으로 되어 있는 경우, 오리피스의 직경에 따라 낮은 회전수에서는 3가지 형태의 분무 특성을 보이며, 이 관계식을 이용하여 액체의 유량, 회전수에 대한 입자의 최대 직경을 도출 할 수 있을 것으로 기대된다. 이 결과는 Morishita[2]에 의해 제안된 하나의 경험식으로는 다양한 오리피스 크기에 대한 입자의 크기를 예측하는데 한계가 있으며, 세 가지 형태의 세분화된 경험식이 필요함을 의미한다.

4. 결 론

30,000 rpm 이하의 낮은 회전수에서의 V자형 회전연료노즐에서 오리피스 직경에 따른 분사특

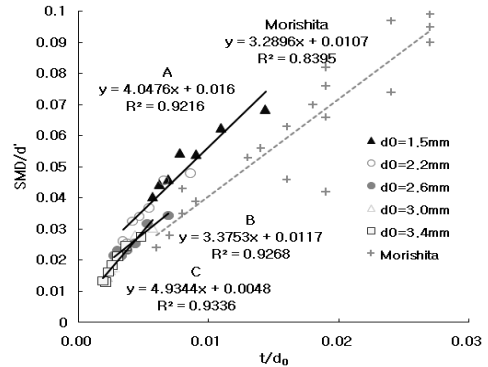


Fig. 10 SMD/d' with t/d0

성은 다음과 같다. 오리피스 직경의 크기가 1.5mm 인 Case1 근방에서는 액체의 분출형태가 액주형태로 분사되나, 오리피스 직경이 2.6mm 인 Case3 에서는 액막 형태로 고르게 분사된다. 이보다 오리피스 직경이 커지게 되면 액막이 고르게 분포되지 않고 오리피스 한쪽 내 측면으로 분출 액체가 치우쳐 분출되게 된다. 분출된 액적 입자의 크기는 오리피스 직경이 2.6mm 까지는 점차 작아지는 경향을 보이나 이보다 오리피스 직경이 클수록 분무 입자의 크기는 감소되지 않고 액적의 크기 분포만 바뀌게 됨을 알 수 있었다. 이러한 분무현상은 액적의 크기와 오리피스 내의 액막 두께와의 무차원화된 경험식으로 표현할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. M Mellor, Design of Modern Turbine Combustors, Academic Press, London, 1990, pp.306-314
2. Morishita, T., A Development of the Fuel Atomizing Device Utilizing High Rotational Speed, ASME PaperNo. 81-GT-180, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY
3. W. J. A. Dahm, P. R. Patel, and B. H. Lerg, "Analysis of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization", Atomization and sprays, Vol. 16, 2006, pp.945-962