

세차제트노즐 연소기의 유동특성

이혜영* · 허환일**

Fluidic Characteristics of Precessing Jet Nozzle Combustor

Hyeyoung Lee* · Hwanil Huh**

ABSTRACT

Many processing companies are facing environmental regulations such as decreasing NOx emissions when they try to increase thermal efficiencies of combustor. We study a potential new method that may achieve both increase of thermal efficiency and decrease of NOx emissions. This new concept of burner, the precessing jet burner, is known to significantly reduce pollutants such as NOx emissions and simultaneously increase radial heat transfer. This precessing jet nozzle may increase the combustion efficiency of gas turbine engine. A basic research on characteristics of precessing jet nozzle has been conducted using FLUENT and laser visualization technique. Velocities at the nozzle cross-section are compared with the published experimental results. Precessing jet nozzle with centerbody results in better precessing phenomena.

초 록

많은 산업체들은 현재 연소기의 열효율을 증가시키기 위해 노력하고 있으며, 증가되는 NOx 발생으로 환경적인 규제에 직면하고 있다. 우리는 이렇게 열효율 증가와 NOx 발생 감소를 동시에 해결할 수 있도록 새로운 방법을 연구하였다. 이 새로운 개념은 확실히 NOx와 같은 오염물질을 절감시키며, 동시에 반경방향 열전달을 증가시키는 것으로 알려져 있고 이를 세차제트 연소기라고 부른다. 이러한 세차제트 노즐의 특징은 가스터빈의 연소효율의 증가로 이어질 수 있을 것이다. 기본적인 세차제트 노즐에 대한 특성파악을 위해 FLUENT를 이용한 수치해석, 레이저를 이용한 가시화 시험을 진행하였고, 노즐 단면에서의 속도분포를 다른 논문의 실험결과와 비교하였다. Centerbody가 있는 경우 세차현상이 잘 일어났고 노즐 출구에서의 확산각이 증가함을 확인하였다.

Key Words: Precessing Jet(세차 제트), Reattachment(재부착), Swirl flow(스월유동), NOx(질소산화물)

† 2007년 6월 28일 접수 ~ 2007년 8월 15일 심사완료

* 정회원, (주)씨앤스페이스 연구소

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

1. 서 론

제트엔진을 포함한 연소기 내에서 화염의 연소특성은 연료와 산화제의 혼합 방법과 혼합비

에 의해 결정되며, 화염은 노즐에 의해 생성된 혼합영역의 영향을 받는다.[1] 따라서 연소기의 형상과 시스템은 최상의 열효율과 연료 소비를 위해 에너지 전달을 최대화 할 수 있도록 설계해야 한다.[2] 연소기의 이런 설계 요구를 충족시키기 위해 연소기 노즐에서의 혼합을 강화시키기 위한 연구를 이끌어내게 되었고, 그 중 하나가 세차제트에 관한 연구이다. 세차제트 연소 기술은 열전달의 증가에 따른 경제적인 이익뿐만 아니라 오염물질의 감소까지 이룸으로써 새로운 대안이 될 수 있을 것으로 생각되며, 더 나아가 세차제트 연소기술이 철강, 시멘트, 석유화학 산업뿐만 아니라 가스터빈 엔진 등에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

세차제트(Fluidic Precession Jet, FPJ) 노즐은 호주 Adelaide 대학 기계공학과 R.E. Luxton 교수와 Dr. G.J. Nathan(1988) 교수에 의해 개발되었다[3]. FPJ 노즐은 독특한 혼합 특성을 통해 일반적인 축 대칭 제트 화염과는 매우 다른 짧고 둥근 모양의 화염으로 노랑고 매우 밝은 것으로 알려져 있다. FPJ의 초기 연구는 유동가시화와 연소시험, 압력센서와 열선(hot wire) 풍속계를 이용한 실험이었으며 이런 실험을 통해 세차(precession)의 주파수를 찾거나 챔버 안에서 발생하는 세차제트 모드를 안정화하는 연구를 하였다[3-7]. 위의 선행연구들을 통해 세차제트 연소기는 세차현상을 발생시켜 새로운 연료와 공기의 혼합 방식을 제공함으로써 연소 과정에 매우 긍정적인 효과를 제공해 주며, 다른 연소 기술과 비교할 때 오염물질을 감소(NO_x 방출 30-50% 감소, CO 감소 등)시켜 주고 동시에 복사 열전달을 증가시켜 주는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 오염물질을 감소시키고 에너지 절약에도 효과가 있는 세차제트 노즐의 유동 특성 파악을 위해 레이저를 이용한 가시화 실험을 진행하였고, 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용한 수치해석을 통해 세차제트의 전반적인 유동 특성에 대해 파악하였다.

2. 세차 제트

2.1 세차제트 노즐 안에서의 유동 형태

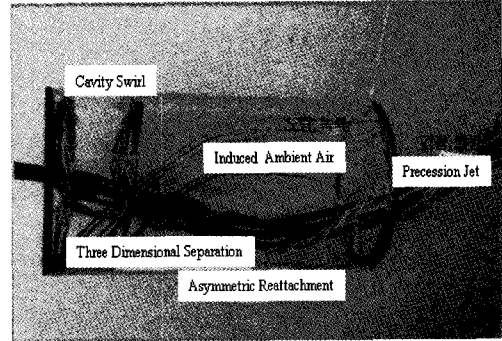


Fig. 1 Flow in Precession Jet Nozzle[4]

Figure 1은 노즐 안에서 발생하는 유동의 형태를 칼라 선을 이용하여 표현한 것이다. 검정과 빨간색은 노즐의 상류 오리피스를 통해 들어오는 공기의 순간적인 유적선을 나타내고, 노랑과 녹색은 노즐 출구 면을 통해 공동 안으로 유입되는 공기의 순간적인 유적선을 나타낸다. 상류 오리피스로부터 분출된 제트는 공동 안으로 배출되며 노즐 안의 압력 섭동으로 인해 제트가 노즐 축에서 비껴나가 공동의 안쪽 면에 비대칭적으로 붙게 된다. 재 부착점에서 제트의 대부분은 하류방향을 유지하지만 일부는 상류방향으로 움직인다(reattachment reversed foot). 이렇게 유입된 공기와 reversed foot은 공동의 뒤쪽에서 흐름이 막히면서 스윙 유동을 만들어낸다.

3. 세차제트 노즐 특성 실험

3.1 세차제트 노즐의 형상

실험을 진행한 세차제트 노즐의 형상은 Fig. 2와 같다. 노즐의 형상은 호주 유체학회에서 발표한 Adelaide 대학의 실험 논문[3]에서 인용하였고 인용한 논문의 실험 결과와 비교하였다. 유체의 흐름을 결정짓는 중요한 파라미터는 입구 오리피스와 챔버의 직경비, 즉 팽창비($D/d=5.07$)와

챔버의 길이 대 직경비($L/D=2.7$), centerbody의 위치와 크기이다. Centerbody는 3개의 작은 지지대에 의해 고정되었고 출구는 45° 각도로 제작하였다.

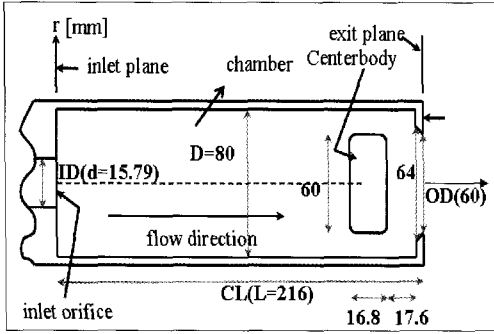


Fig. 2 Configuration of Precessing Jet Nozzle

3.2 실험장치

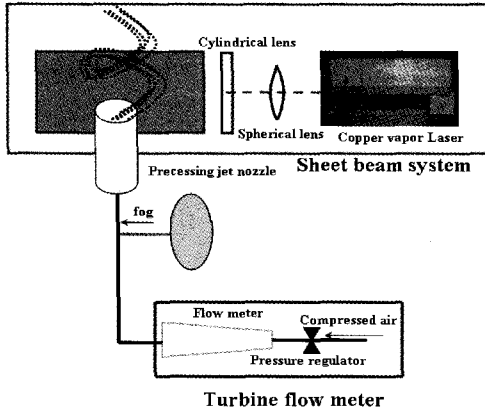


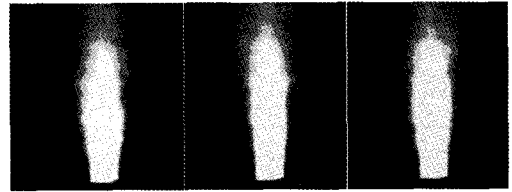
Fig. 3 Experimental Apparatus

Figure 3은 세차제트 노즐의 특성 실험을 위한 실험장치도이다. 압축기와 레귤레이터를 지난 유동은 안개를 만나 최종적으로 세차제트 노즐을 통과하여 출구 면을 빠져나가며, 유동속도 조절을 위해 Flow meter를 사용하였다. 전체적인 유동가시화는 구리증기 레이저를 이용하였으며, 이 실험을 통해 세차제트에 대한 경향성을 파악할 수 있었다.

3.3 노즐 출구에서의 유동 가시화

세차제트(precessing jet) 노즐의 유동특성을 파악하기 위해 축류유동(Axial jet flow) 실험결과

[8]와 비교하였다.



(a) Axial jet flow[8]



(b) Precessing jet flow

Fig. 4 Axial Jet Flow vs Precessing Jet Flow[8]

세차제트 유동(precessing jet flow)의 경우는 노즐 출구 영역에서 불규칙적으로 선회하며 축류유동(axial jet flow)처럼 노즐 중심축을 따라 흐름이 집중되지 않고 노즐 출구에서 커다란 확산 각을 가지고 출구를 빠져나간다. 이는 세차제트가 연소기에 응용될 때 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜서 화염이 노즐 중심부에 집중되지 않고 화염의 분포가 고르게 형성되어 온도 분포가 고르게 형성될 것이며 이는 나아가 NO_x 의 형성을 줄여줄 것으로 판단된다.

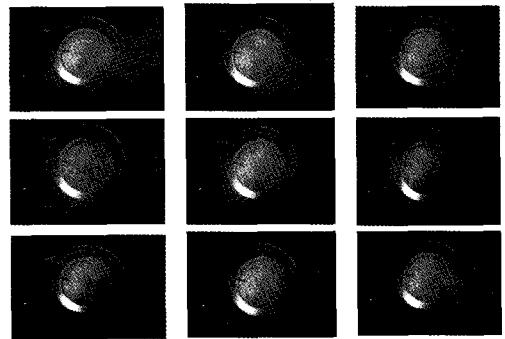


Fig. 5 Precessing Jet in Nozzle Exit [1 sec duration]

노즐 출구에서의 유동가시화에 레이저를 이용하였으며, 특정시간 동안의 동영상 분석(약 1초)을 통한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 위의 결과를 보면 챔버 밖에서의 유동에서 세차가 일어나

고 있는 것을 확인할 수 있으며, 세차현상은 어떤 특정한 회전방향을 가지고 있지 않으며 정체(intermittency)후 그 방향을 유지하기도 하고 반대방향으로 회전하기도 하였다. Fig. 5의 위 3개의 사진은 세차가 정체되어 있는 것으로 보이며 아래 6개의 사진은 세차가 시계방향으로 진행중에 있는 것으로 보인다. 정체가 있을 후 세차의 방향은 바뀌지 않았다.

3.4 공동 벽면(cavity wall)에서의 정압(static pressure)

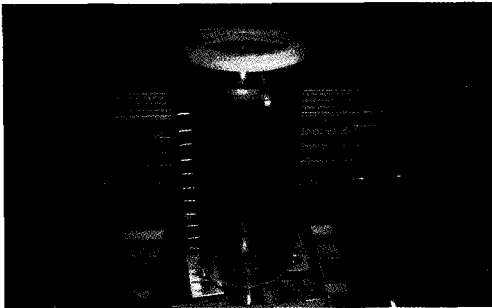


Fig. 6 Static Pressure Measurement on The Cavity Wall

노즐 내부 벽면에서의 정압특성 파악은 세차제트 노즐 유동의 움직임을 결정짓는데 중요하다. 다중 압력 측정기(pressure scanning system, NetScanner Model 9016-16channel)를 통하여 세차제트 노즐의 공동 벽면에서의 정압을 측정하였으며 노즐 벽면에서의 정압을 측정하기 위해 공동의 입구부분에서 출구까지 1.5 cm 간격(12개)으로 압력 홀을 뚫어 놓았다.

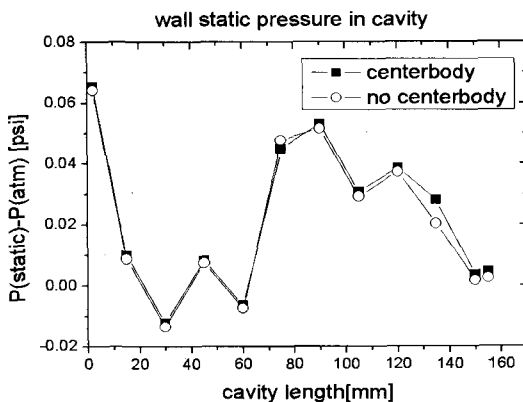


Fig. 7 Wall Static Pressure Distribution

Figure 7은 공동 내부에 centerbody가 있을 때와 없을 때의 벽면에서 정압특성을 보여주고 있는 그래프이다. 결과를 보면 정압이 90 mm 근처에서 가장 높다는 것을 알 수 있는데 이는 이 부분에서 재 부착(reattachment)이 일어났다는 것을 의미한다. 또한 노즐 출구 방향으로 갈수록 정압이 급격하게 감소하는 것으로 보아 동압이 증가하면서 노즐 내부 유동이 노즐 출구 방향으로 진행하고 있는 것을 알 수 있다.

4. 세차제트 노즐 특성 해석

4.1 격자생성

세차제트 노즐은 상류 오리피스로부터 유동이 시작하고 이 영역에서 복잡한 유동현상을 보이므로 입구 부분에 격자를 조밀하게 생성하였다. 반경방향으로 격자를 방사 형태로 생성하였으며, 길이 방향으로는 입구부분의 격자가 출구까지 일정한 간격으로 격자들이 쌓여있는 형태로 생성하였다.

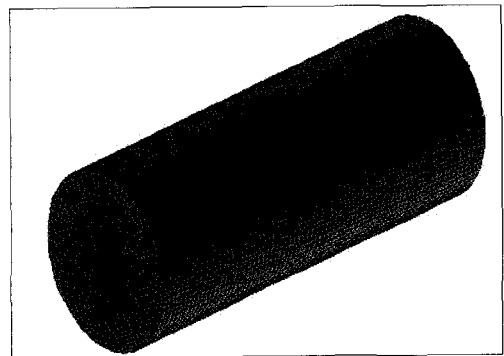


Fig. 8 Grid Generation of Precessing Jet Nozzle

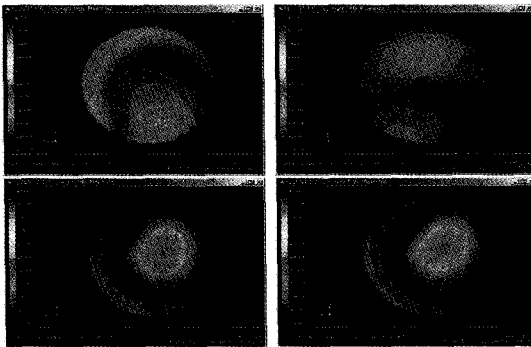
4.2 계산에 사용된 조건 및 모델

세차제트는 공동의 상류부분에서 스웰모션이 만들어지고 공동 안에서 비대칭적으로 벽면에 귀착이 되며, 주기적으로 현상이 나타나므로 완전한 3차원 유동이다. 그래서 노즐의 형상이 2D 축대칭이긴 하지만 3차원 계산을 수행하였고 공

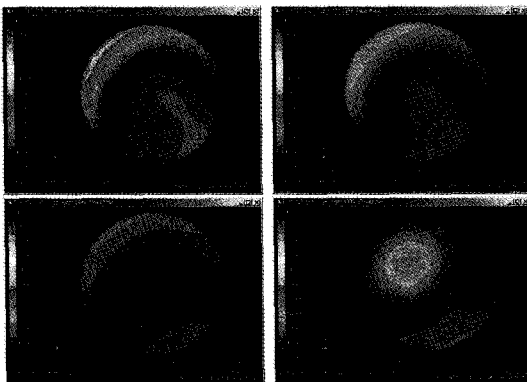
동 내부의 유동이 주기적으로 변화하므로 비정상상태로 계산하였다. 난류 모델로는 일반적으로 많이 사용하고 있는 k-ε 모델을 사용하였다. 본 논문에서 비교, 참고한 논문의 레이놀즈수는 43,000 이었으며, 이를 역산하여 공동입구에서의 속도는 40.3 m/s 로 결정하였다. 작동 유체는 공기이며 마하수가 0.3을 넘지 않으므로 압축성을 고려하지 않았다($\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$).

세차 현상이 일어날 수 있는 조건으로 접선방향의 속도와 축방향의 속도를 동시에 대입하여 정상상태로 계산을 수행하였다. 정상상태의 수렴 결과는 실제 정확한 계산 즉 비정상상태 계산을 위한 초기 조건으로 사용하였으며, 시간에 따른 노즐 내부 유동 특성에 대한 계산을 수행하였다.

4.3 속도분포(Velocity profile)_108 mm 단면



(a) Without Centerbody



(b) With Centerbody

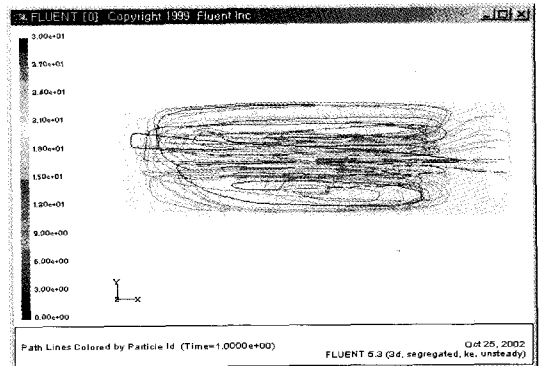
Fig. 9 Velocity Profile According to The Time Variation

Figure 9(a), (b)는 비정상상태에서 centerbody가

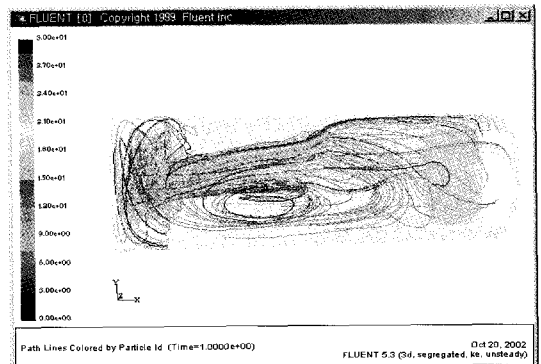
없을 때와 있을 때 각각 노즐 단면에서의 속도분포를 나타낸 그림이다. 특정 공동 입구 부분에서는 스월이 일어나고, 뒷부분에서는 centerbody의 영향을 받기 때문에 전체유동 특성 분석을 위해 공동 중앙(x=108 mm)의 단면을 잘라서 0.25초 간격으로 확인 해보았다. 전체 계산은 2초 동안 해석하였으며, 위 그림은 1초 동안의 결과를 나타내고 있다. 이후에는 큰 변화를 보이지 않았으며, 결과를 보면 108 mm 단면에서의 속도분포만으로는 노즐에서의 유동특성에서 스월 특성을 정확하게 파악하기가 힘들다는 것을 알 수 있다.

4.4 Path line

세차제트 노즐의 단면에서의 속도분포만으로 centerbody의 유무에 따른 세차현상에 대한 특성을 정확하게 파악할 수 없었다. 하지만 추가로 노즐 전체에서의 유적선 분석을 통해서는 정확한 현상을 분석할 수 있었다.



(a) Without Centerbody



(b) With Centerbody

Fig. 10 Path Lines

Figure 10(a), (b)는 centerbody가 있을 때와 없을 때의 유적선(path line)에 대한 결과이다. Fig. 10(a) 결과를 보면 centerbody가 없을 때는 공동 앞부분에서 스웰 모션이 일어나지 않는 것을 알 수 있으며, 공동 전체를 보았을 때 약간의 세차 현상이 발생한 것처럼 보이지만 강한 세차현상이 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 10(b)를 보면 centerbody가 있을 때는 공동 앞부분에서 스웰모션이 확실하게 일어나고 있고 출구 쪽에서도 주요 유선이 출구 전체를 차지하지 못하고 한쪽으로 치우쳐 대기 증으로 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 또한 길이방향의 정압측정 결과에서 확인되었듯이 공동 길이의 1/2 지점에서 주요 유선이 재 부착(reattachment)되는 것을 확인할 수 있다.

45 길이 방향의 속도 분포(참고 문헌과의 비교)

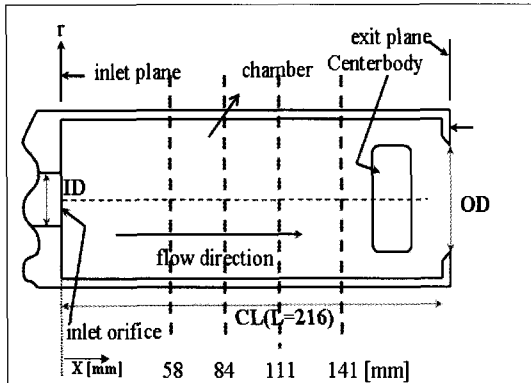
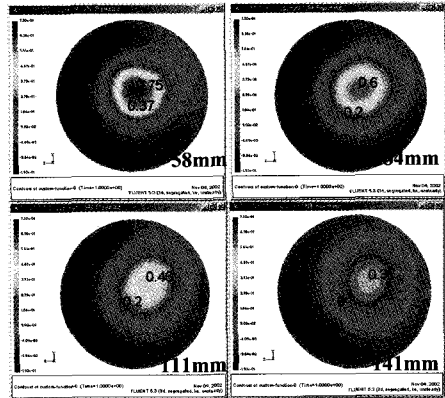


Fig. 11 Longitudinal Velocity Measurement Position[3]

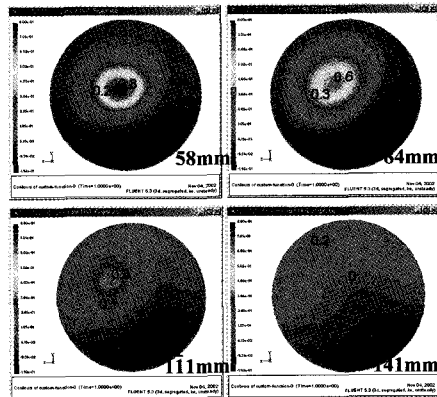
Figure 11은 세차제트 노즐의 길이방향에 따른 속도분포를 계산하기 위한 개략도이다[3]. 참고문헌으로 사용된 논문에서는 공동을 크게 네 부분으로 잘라 그 부분에서의 속도분포를 LDA(Laser Doppler Anemometry)를 이용하여 측정하였다[3-6].

Fig. 12(a), (b), (c)는 Fig. 11과 같은 노즐단면에서의 계산된 속도분포와 다른 참고문헌[7]에서의 속도분포 계산결과이다. Fig. 12(c)의 실험결과[7]에서 볼 수 있듯이 노즐단면에서의 속도분포는 크게 두 부분으로 나누어지는데(forward flow, reversed flow) 이를 점선으로 표현하였다. 해석결과 입구로

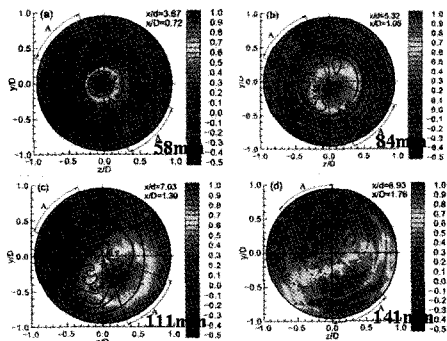
부터 58 mm 위치에 있을 때 입구 유동은 축대칭적으로 흐르고 후류로 내려갈수록 최대속도의 정점이 축에서 조금씩 비켜나가는 것을 알 수 있다. 또한 111 mm, 141 mm 근처에서는 완전히 한 쪽 벽면에 비대칭적으로 귀착하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Calculation (Without Centerbody : 1 sec)



(b) Calculation (With Centerbody : 1sec)



(c) Experiment [7]

Fig. 12 Longitudinal Velocity Distribution

위의 결과들은 초기 1초 동안 노즐 단면에서 축방향의 속도분포로서 비교적 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 12(b), (c)는 centerbody가 있을 때의 속도분포인데 역류흐름(reversed flow)의 속도성분이 비교적 넓게 분포가 되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 centerbody가 있을 때 스윙 효과가 증대되고 연소효율이 증대될 수 있다는 것을 의미한다. 참고문헌의 결과와 본 연구의 결과 비교에서 공동 앞부분에서 속도분포가 약간 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 계산 시 접선방향의 속도와 축방향의 속도성분을 대입하여 얻은 정상상태결과를 비정상상태의 해석 시 초기조건으로 이용했기 때문이다. 즉 참고문헌의 결과보다 본 연구의 결과가 대칭축의 중심에서 약간 벗어나게 계산되었다. 하지만 전체적인 경향은 동일한 것을 확인할 수 있었으며, 후류 쪽으로 갈수록 공동의 한 쪽 면에 비대칭적으로 귀착하는 것을 알 수 있고 속도분포가 크게 정 방향(forward)과 역방향 흐름(reversed flow)으로 나누어지는 것을 확인할 수 있다.

4.6 노즐 출구 유동

노즐 출구 유동은 실제로 연소실의 연소효율에 직접적으로 영향을 준다. 노즐에서 분출된 유동, 즉 연료와 공기(또는 산화제)가 충분히 혼합될 수 있도록 하여야 하며, 열 집중이 적을수록 전체 시스템의 효율은 감소할 수 있다.

Figure 13은 세차제트 노즐출구에서의 유동에 대해 해석한 결과이다. 결과를 보면 노즐 출구 면에서 유동이 중심축을 따라 직선 흐름이 아니라 커다란 확산 각을 가지고 한쪽으로 치우쳐서 분출되고 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과로 세차제트 노즐의 사용으로 연소가 진행되었을 때 노즐 중심 부분에 연료와 공기가 집중되는 것을 막고 연료와 공기의 혼합이 증대될 것으로 예상되며 따라서 화염이 노즐 중심부에 집중되는 것을 막아 온도가 고르게 분포하여 NOx 절감에도 큰 효과가 있을 것으로 기대된다. 즉 가스 터빈 엔진의 인젝터 설계 시 중요시 되는 연료와 산

화제의 혼합에 세차제트 노즐의 사용이 전체적인 효율 증대에 필요하고 유해물질 절감에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

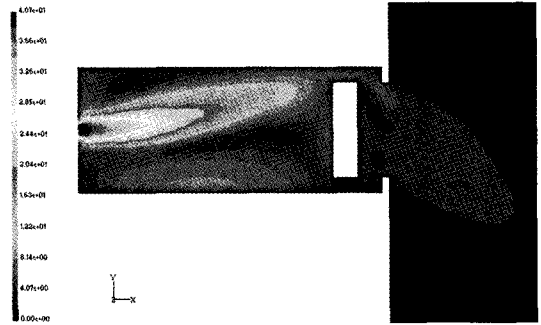


Fig. 13 Precessing Jet Flow (With Centerbody)

4.7 길이방향의 속도 분포(무차원 분포)

세차제트 노즐의 반경에 따른 속도분포는 일반적인 축대칭 노즐의 유동과 다른 경향을 보인다. Fig. 14는 축대칭 노즐과 세차제트 노즐의 공동(cavity) 길이 방향에 따른 속도분포를 측정 한 참고문헌[7] 실험 결과이다. 전체적으로 세차제트 노즐의 경우 제트흐름이 후류 방향으로 갈수록 공동(cavity)의 한 쪽 면으로 유동이 비대칭적으로 귀착하는 것을 확인할 수 있다.

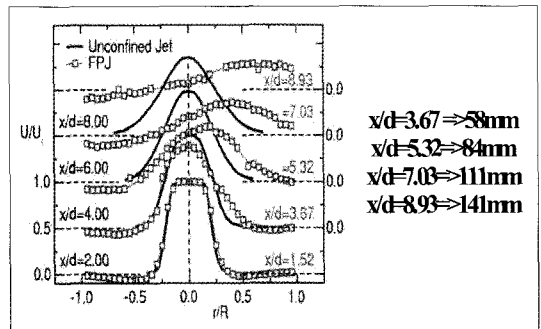
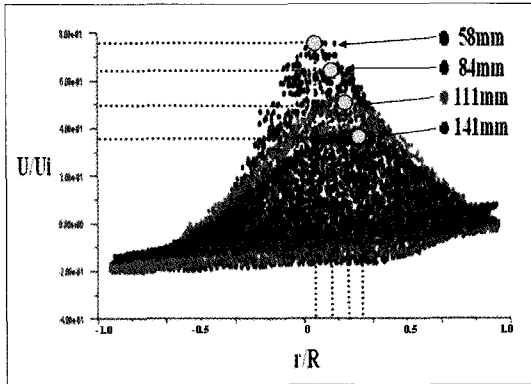


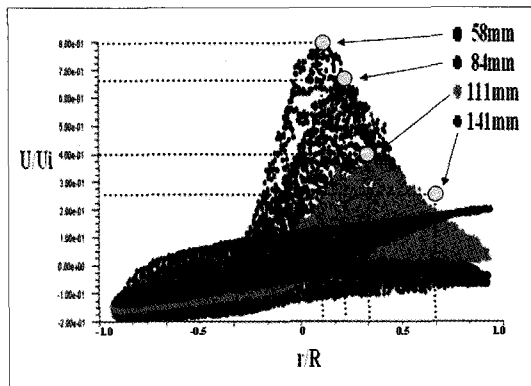
Fig. 14 Precessing Jet Nozzle vs Axisymmetric Nozzle (Radial Direction, r/R) [7]

Figure. 14를 보면 축 대칭 노즐의 경우는 노즐의 중심 부분의 속도가 가장 크게 나오고 후류로 갈수록 중심 부분의 속도가 작아지면서 반경방향으로 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 세차제트 노즐의 경우는 입구에서 가까운 면에서는 축 대칭 노즐의 속도 분포와 유사한

경향을 보이거나 후류로 갈수록 한 쪽 면에 귀착하면서 귀착하는 면에서 속도 분포가 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 다른 쪽 면에서는 무차원화 된 값들이 음의 값을 나타내는데 이는 역방향 흐름(reversed flow)이 있음을 나타낸다.



(a) Calculation (Without Centerbody)



(b) Calculation (With Centerbody)

Fig. 15 Longitudinal Velocity Distribution

Figure 15(a), (b)의 CFD 해석결과에서도 역시 centerbody의 유·무에 상관없이 모두 Fig. 14의 실험결과처럼 유동의 무차원화 된 최고 속도분포가 공동에서 한쪽 면으로 귀착되는 것을 확인할 수가 있다. 또한 흐름은 후류로 갈수록 한쪽 면에 비대칭적으로 벽면에 귀착하고 다른 쪽 면에서는 실험결과처럼 역방향 흐름(reversed flow)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. centerbody가 있을 때 세차현상이 더욱 강하게 나타나는데 이는 centerbody의 형상설계도 매우 중요한 파라

미터임을 의미한다.

Table 1, 2는 각 단면에서 최고 속도계산결과를 실험 결과와 수치적으로 비교한 결과이다. Centerbody가 있는 경우 실험결과와 가장 근접한 것으로 나타났다.

Table 1. Maximum Velocity

거리(mm)	결과 실험 [7]	Fluent 해석	
		Without centerbody	With centerbody
58	0.85	0.75	0.80
84	0.60	0.65	0.65
111	0.40	0.50	0.40
141	0.30	0.35	0.25

Table 2. Radial Location for Maximum Velocity

거리(mm)	결과 실험 [7]	Fluent 해석	
		Without centerbody	With centerbody
58	0	0.05	0.10
84	0.25	0.15	0.20
111	0.45	0.20	0.32
141	0.60	0.30	0.65

5. 결 론

많은 산업체들은 열설비, 에너지, 추진, 연소분야 등에서 연소효율을 증가시키기 위해 많은 노력을 하고 있는데 NOx와 같은 유해물질 발생으로 환경적인 규제에 직면하고 있다. 연료 소비 및 공해 배출물을 저감할 수 있는 고효율, 저공해 연소기술 개발이 절실한 상태이며 열효율 증가뿐만 아니라 NOx 발생을 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 열효율 증가와 NOx 발생 감소를 동시에 해결할 수 있도록 새로운 방법을 연구하였다. 세차제트 노즐은 NOx와 같은 오염물질 절감과 동시에 연료와 산화제의 혼합증대로 열효율을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 기본적인 세차제트 노즐에 대한 특성파악을 위해 FLUENT를 이용하였으며, 레이저를 이용하여 가시화 시험

을 진행하였고, 노즐 단면에서의 속도분포를 다른 논문의 실험결과와 비교하였다. 연구결과 유동은 초기에 난류성 유동을 보이다 2초 후 정체현상을 보였으며, 정압측정을 통해 노즐의 길이방향 1/2 지점에서 재 부착되는 것을 확인할 수 있었다. 공동내부의 centerbody의 유무에 따라서 유동 특성이 달랐으며, centerbody가 있는 경우 세차현상이 잘 일어났고, 세차제트 유동은 축 대칭 유동과는 달리 선회하는 흐름이 발생하여 노즐 출구 면에서 커다란 확산 각을 가지고 분출하여 연소과정에서 연료와 공기의 혼합을 증대시킬 것으로 예상된다. 결과적으로 에너지, 추진장치 등의 인젝터 설계 시 세차제트 노즐 개념을 도입한다면 전체 시스템 효율이 크게 증가할 수 있고, 동시에 환경규제에 대한 보안을 할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2004년도 충남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음. 실험 자료에 도움을 준 서정원, 성대현과 논문정리에 도움을 준 정성철에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 류승협, 서정무, 박용국, 이근선, 문수연, 이충원, "난류발생기가 장착된 선회기를 이용한 연소기내의 혼합 및 연소 특성," 한국추진공학회지, 제5권 제4호, 2001, pp.83-93
2. 김형모, 박영일, 박부민, 양수석, "55kW급 마이크로 터빈용 저공해 연소기 개발," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2005, pp. 318-321
3. C. Y. Wong, P. V. Lanspeary, G. J. Nathan, R. M. Kelso and T. O'Doherty, "Phase Averaged Velocity Field Within a Fluidic Precessing Jet Nozzle", 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, 10-14 December 2001
4. Nathan. G. J., "The Enhanced Mixing Burner", PhD Thesis, The Department of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, 1988
5. G. J. Nathan, S. J. Hill and R. E. Luxton, "An Axisymmetric 'Fluidic' Nozzle to Generate Jet Precession", The Journal of Fluid Mechanics, Vol. 370, 1998, pp. 347-380
6. Nathan, G. J., Turns, S. R. and Bandaru, R. V., "The Influence of Jet Precession on NOx Emissions and Radiation from Turbulent Flames", Combust. Sci. and Technol., Vol. 112, 1996, pp.211-230
7. Luxton, R. E., Nathan, G. J. and Luminis Pty. Ltd., "Mixing of Fluids", Australian Patent Office, Patent Application NO. 16235/88, International Patent Application NO. PCT/AU88/00114, 1988
8. 서정원, 축열식 산소부화연소기의 질소산화물 (NOx) 저감 방법에 관한 실험적 연구, 충남대학교 석사학위논문, 2002
9. 이혜영, 에너지절약용 세차제트 노즐의 유동특성에 대한 연구, 충남대학교 석사학위논문, 2002