

슬링거 연소기의 연소특성

이강엽* · 이동훈* · 최성만* · 박정배** · 박영일*** · 김형모*** · 한영민***

Combustion Characteristics of the Slinger Combustor

Kang-Yeop Lee* · Dong-Hun Lee* · Seong-Man Choi* · Jeong-Bae Park**
Young-Il Park*** · Hyung-Mo Kim*** · Yeong-Min Han***

ABSTRACT

The study was performed to understand combustion characteristics of the slinger combustor. Liquid fuel is discharged radially outwards through injection holes drilled in the high speed rotating shaft. The spray test was performed to verify atomizing characteristics with variation of fuel nozzle rotational speed by using PDPA system. SMD was measured at different RPM and values are $70\mu\text{m}$ at 5,000RPM rpm, $60\mu\text{m}$ at 10,000RPM and $40\mu\text{m}$ at 20,000RPM. In the results, we found out that SMD is grown smaller with increasing rotational speed. In KARI combustion test facility, Ignition and combustion tests were performed by using combustor test rig. In the test results, ignition and combustion efficiency were improved according to increasing rotational speed. The measured radial temperature distribution at the combustor exit shows stable and fairly good distribution.

초 록

슬링거 연소기의 연소특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 연료는 고속으로 회전하는 축의 연료노즐을 통하여 연소기내로 분사된다. 회전분무시스템의 분무특성을 파악하기 위하여 PDPA를 이용하여 연료노즐의 회전속도 변화에 따른 분무입자의 크기를 측정하였다. 연구결과 SMD는 회전수가 5,000RPM일 때 약 $70\mu\text{m}$, 10,000RPM일 때 $60\mu\text{m}$, 20,000RPM일 때 $40\mu\text{m}$ 이었으며 SMD의 크기가 연료노즐의 회전수가 증가할수록 작아짐을 알 수 있었다. 연소기 시험리그를 제작하여 한국항공우주연구원의 연소시험설비에서 점화 및 연소시험을 수행하였다. 시험결과 점화성능 및 연소효율은 연료노즐 회전수에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있었으며, 연소기출구온도는 매우 균일한 온도분포를 나타내었다.

Key Words: Slinger combustor(슬링거 연소기), Rotating fuel injection system(회전분무장치)

1. 서 론

소형 가스터빈 엔진의 경우 슬링거 연소기를 적용하는 경우가 있으며 이러한 시스템을 이용하는 가장 중요한 이유는 연료분사 시스템이 극히 간단하고 연료분사가 엔진의 회전력에 의하여 작

† 2003년 10월 20일 접수 ~ 2003년 12월 2일 심사완료

* 정회원, 삼성테크윈 파워시스템연구소

** 정회원, 국방과학연구소

*** 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: swirl.lee@samsung.com

동되므로 연료시스템의 부하가 압력분무식에 비해 매우 작아질 수 있다는 것이다. 슬링거 연소기의 연료분사 방식은 회전축을 따라 연료가 주입되고 회전하는 중공원판에 설치된 인젝터 노즐을 통하여 원심력을 받아 분무되는 것으로 이를 "Rotary Atomizer" 또는 "Slinger system"이라 불리우고 있다. 슬링거 분사시스템의 최대 장점은 저가이면서 구조가 단순하다는 점이다. 분무의 무화성능은 회전체의 속도에만 지배받는 것으로 연구되어졌다.1),2),3) Norster1)는 회전분무장치에 의한 SMD를 식(1)과 같이 나타내었다.

$$SMD = \frac{0.0426}{\text{drum rotational speed, m/s}} \quad (1)$$

일반적으로 최대 속도에서 약 34MPa 정도의 인젝터 압력을 얻을 수가 있고 주로 최대속도(20,000rpm 이상)의 10%부터 만족스러운 미립화를 기대할 수 있다. 또한, 연료 점성의 영향을 적게 받기 때문에 다양한 연료를 소화할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 슬링거 연소기의 분무특성을 이해하고, 연료분사방식이 연소기 성능과 어떤 상관관계가 있는지를 알기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 연료분무특성을 알기 위하여 연료노즐 분무시험을 PDPA를 이용하여 측정하였고, 또한 연소기의 성능특성을 연구하기 위하여 Full scale 연소기를 제작하여 한국항공우주연구원의 연소시험설비를 이용하여 각종 시험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 분무시험

연료노즐의 분무특성을 알기 위하여 Fig. 1 과 같이 분무 시험 장치를 구성하였다. 시험장치는 고속 전기 모터, 회전축, 연료노즐이 직렬로 연결되며 분무가 외부로 튀지 않게 하는 케이스로 구성된다. 사용액체는 물을 이용하였다.

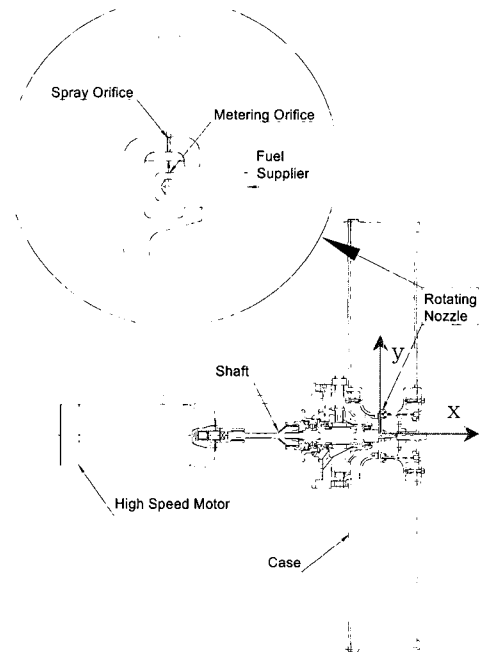


Fig. 1 분무시험장치

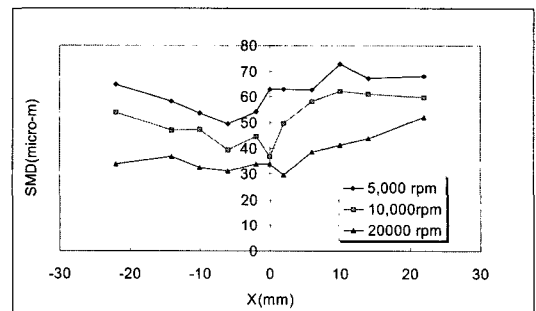


Fig. 2 회전수에 따른 분무입자크기(Y=80mm)

연료노즐 끝단으로부터 80mm 위치(y)에서의 회전수에 대한 측정결과가 Fig. 2에 제시되어 있다. 연소에 적합한 입자의 크기는 대략 60 μm 이하로 알려져 있으며, 회전수 10,000 rpm 이상부터 분무입자의 크기가 60 μm 이하를 가짐을 알 수 있다.

2.2 성능시험 장치 및 방법

2.2.1 성능시험 장치

시험은 한국항공우주연구원의 연소시험설비에서 수행되었다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 연소기 시험리그의 개략도를 보여주고 있다. 리그의 내부에 고속모터를 내장하고 있으며 공기는 고속모터 외곽을 지나 연소기로 들어간다. 연료분무 시스템은 속도가변이 가능한 고속 전기모터와 이와 직렬로 연결된 연료노즐, 그리고 연소기로 구성되며, 연료는 연료파이프를 통해 연소기내로 공급되어, 파이프 끝단의 미터링 오리피스에 의하여 연료유량이 제어된다. 미터링 오리피스를 통과한 연료는 연료노즐 내부표면에 얇은 연료층을 형성하게 되며 고속으로 회전하는 연료노즐의 원심력에 의해 연소기 내부로 분사하게 한다. 그 후, 공기와 혼합되어 연소실내에 연소가 일어나게 되며 연소된 가스는 온도측정센서를 통과한 후 대기로 배출된다.

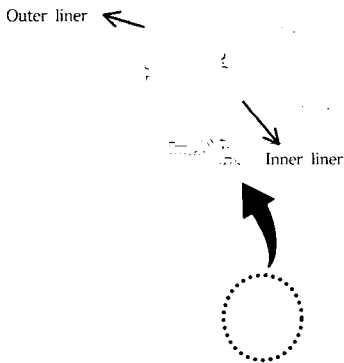


Fig. 3 연소성능 시험리그 개략도

Figure 4는 연소기 출구온도분포를 측정하기 위한 측정 장치로서 소형 전기 모터에 의하여 구동이 되며 2분에 1회전하게 되어 있다. 총 12개의 열전대, 전압력 측정, 배기가스 분석포트로 구성되어 있다.

2.2.2 시험 방법 및 조건

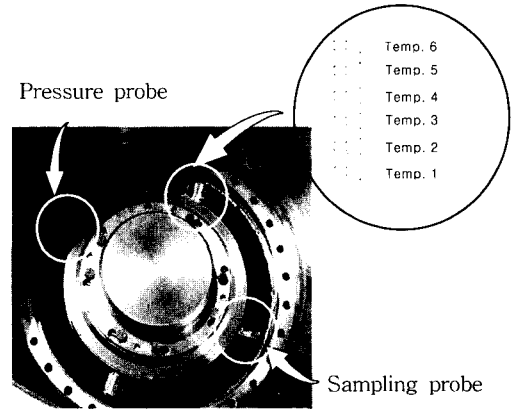


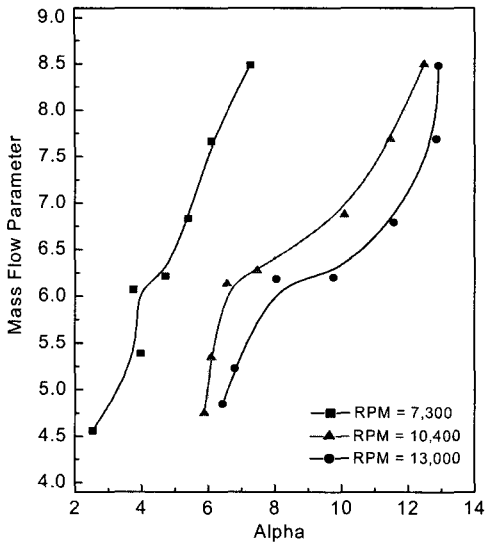
Fig. 4 연소기출구 온도 및 압력 측정장치

연료는 Kerosene계열의 Jet A-1를 사용하였다. 연소시험은 크게 점화시험과 성능측정 시험으로 구분되며, 점화시험에서는 점화한계 및 화염안정성, 회전수 가-감속에 따른 화염안정성을 연구하였다. 점화시험조건은 상온 대기압 조건하에서 공기유량 및 연료유량을 조정하여 시험을 수행하며 연료노즐의 회전수는 7,300, 10,400, 13,000 rpm으로 수행하였다. 성능시험은 공기온도 450K, 공기압력 3.5bar, 공기유량 1.5kg/s에서 수행하였으며, 연료노즐의 회전수는 15,000 ~ 35,000 rpm으로 변화시키며 수행하였다.

2.3 성능 시험결과 및 검토

2.3.1 점화 및 가속시험

점화방식은 2개의 토치를 사용하였으며 점화기 소염 후 약30초간 화염이 유지되면 점화로 판정하였다. Fig. 5는 점화영역을 도시한 그림으로서 회전속도의 상승과 함께 점화영역은 확장되고 있다. 특히 10,400rpm 이상에서는 점화영역이 회전수의 증가에 따라 크게 변화되지 않는다. 이것은 분무시험에서 10,000rpm 이상의 경우 분무입자의 크기가 60 μ m 이하로 측정되었으며, 분무입자의 크기가 어느 정도 이하의 크기를 가질 경우 연소특성은 크게 변화되지 않음을 의미한다.



$$\text{Mass Flow Parameter} = W\sqrt{T}/P$$

W: Air Flowrate [kg/s]
 T : Inlet Temperature [kg/s]
 P : Inlet Pressure [MPa]

$$\text{Alpha}(\alpha) = \text{Excess air ratio}, \frac{(A/F)_{\text{real}}}{(A/F)_{\text{stoich.}}}$$

Fig. 5 회전수에 따른 점화영역

Figure 6은 연료유량 및 공기유량을 고정하고 연료노즐의회전수를 증가시키며 연소기 출구온도의 변화를 관찰한 결과이다. 온도는 연소기 출구의 hollow vane에 높이에 따라 5개의 열전대를 장착하였다. 출구의 가스온도는 14,000~16,000 rpm사이에서 급격한 온도변화가 발생하고 계속 상승하다가 약 27,000rpm부터 더 이상 상승하지 않고 일정값을 유지한다. 이것은 연료노즐 회전수에 따라 연소효율이 급격하게 변화됨을 의미하며, 슬링거 연소기의 가장 큰 특성이라 볼 수 있다. 15,000 rpm부근에서 온도가 급격히 상승하는데 이것은 모터구동부의 고유 진동수와 연관된 현상으로 Chamber의 고유주파수와와 상호 진동에 의한 불안정구간이라고 판단된다. 이것은 감속 시에도 동일하게 발생한다.

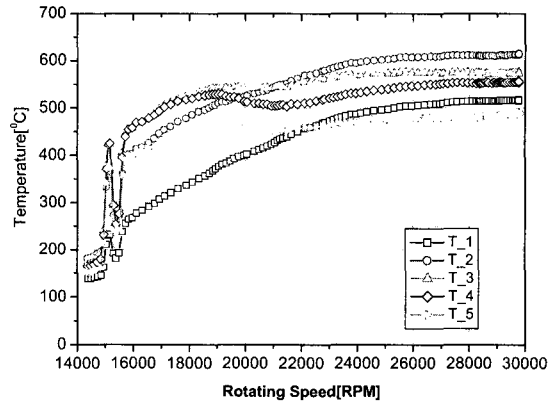


Fig. 6 연료노즐 회전수에 따른 연소기 출구온도의 변화

2.32 연소 성능시험

2.32.1 연소기 출구온도분포

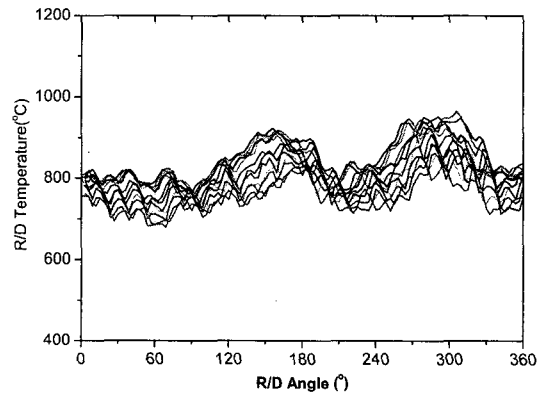
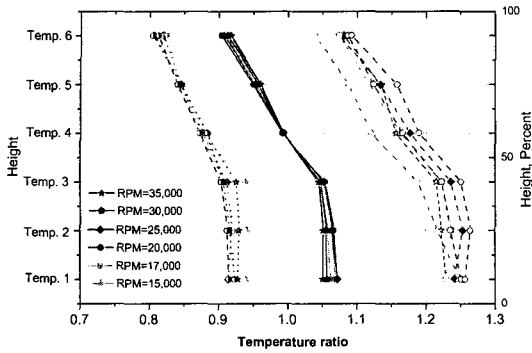


Fig. 7 연소기 출구 온도측정 결과

연료노즐 회전수 35,000 rpm 에서의 원주방향(360°)에 대한 온도분포를 나타낸 그림은 Fig. 7 이다. 압력 분무식 연료노즐 연소기의 경우, 연료노즐의 개수와 위치에 따라 최대온도가 관측되고 그 분포가 결정되지만 본 연소기는 환형의 균일한 분무특성으로 인해 약 200℃이하의 온도편차로서 균일한 분포를 보이고 있다.



$$\text{Temperature ratio} = \frac{T_{\text{meas.}} - T_{\text{inlet}}}{T_{\text{mean}} - T_{\text{inlet}}}$$

Fig. 8 연소기 출구 온도분포

Figure 8은 반경방향의 온도분포와 평균값과의 비를 연소기 출구높이에 따라 표현한 그래프이다. 모든 회전수에서 유사한 곡선을 가지고 있어 연소 유동장이 매우 안정되어 있음을 알 수 있다.

2.3.2.2 연소기 벽면 온도분포

연소기의 열적 냉각특성을 파악하기 위하여 연소기 라이너(Liner)에 열전대를 장착하여 온도를 측정하였다. 열전대는 라이너의 주공기공과 냉각 슬롯의 위치별로 2개씩 장착하였다. 결과는 Fig. 9로서 시간에 따른 연소기 라이너의 온도를 보여 주고 있다.

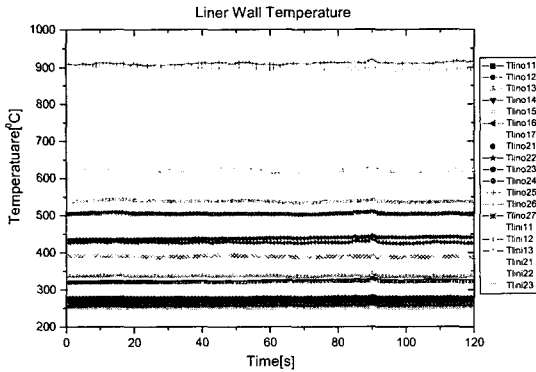


Fig. 9 연소기 벽면 온도

측정결과에서 작동시간에 따라 벽면온도는 일정

한 값을 유지하고 있어 화염이 매우 안정된 상태로 작동하고 있음을 알게 해준다. 연소기의 내부 벽면의 유로 변곡점부위에서 900℃의 최대온도를 보이고 있어 추가적인 냉각이 요구된다.

2.2.2.3 배기가스성분 및 연소효율

연소기 배기가스를 측정하였으며 그 성분을 이용하여 연소효율을 계산하였다. 각각의 HC와 CO의 분포는 회전수에 따라 Fig. 10과 같은 결과를 보인다.

Figure 11은 연료노즐 회전수에 대한 연소효율로서 연료노즐의 회전수가 증가할수록 연소상태가 보다 양호하게 진행되는 것을 알 수 있다. 연소 효율은 최대 99.62%로 매우 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며 약 32,000 rpm 부근에서 최대효율을 보이고 있다.

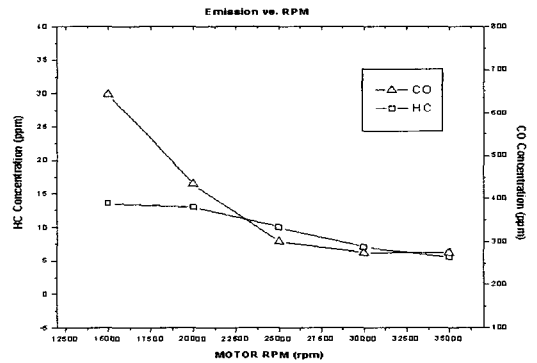


Fig. 10 연료노즐 회전수에 따른 배기가스

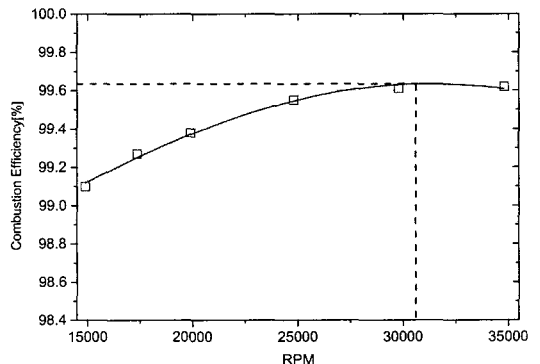


Fig. 11 연료노즐 회전수에 따른 연소효율

3. 결 론

회전분무장치에 의해 구동되는 슬링거 연소기의 연소특성을 연구하였다. 분무시험 및 점화, 가속 및 성능시험을 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

1. 연료노즐의 분무특성은 회전수에 의해 지배적인 영향을 받는다.
2. 슬링거 연소기의 점화특성은 회전수가 증가할수록 양호하며 점화영역은 충분히 넓은 것으로 파악되었다.
3. 연료노즐의 회전수를 증가할수록 연소효율은 증가하며 30,000rpm 이상에서는 더 이상 증가하지 않고 일정값을 유지한다.
4. 슬링거 연소기의 출구온도분포는 매우 균일하며 연소 유동장은 매우 안정되어 있음을 알 수 있었다.
5. 추가적인 연구를 통하여 가스터빈에 충분히 적용 가능한 슬링거 연소기의 기본 모델을 확립할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Arthur H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion," Second edition, Taylor & Francis, 1999, pp.212~213
2. Arthur H. Lefebvre, "Atomization and Spray," Hemisphere Publishing Corporation, 1989 pp.134-135
3. L. Bayvel, Z. Orzechowski, "Liquid Atomization" Taylor & Francis, 1993, pp.110-113, 208-220
4. Maskey and Marsh, "The Annular Combustion Chamber with Centrifugal Fuel Injection," SAE paper 444C, January 1962
5. NREC, "The design and development of Gas Turbine Combustors" volume I, Northern Research and Engineering Corporation, 1980, pp. 6. 32-6. 34
6. 최성만, "Establish Fuel Nozzle Spray Performance Test Data," 삼성테크윈 기술 자료 Doc No. TC0005466, 2002
7. Casimir Rogo and Richard L. Trauth, "Design of High Heat Release Slinger Combustor with Rapid Acceleration Requirement," SAE paper 740167
8. Maskey and Marsh, "The Annular Combustion Chamber with Centrifugal Fuel Injection," SAE paper 444C, January 1962