

모형 가스터빈 연소기의 기초 연소특성에 대한 실험적 연구

이장수* · 김민기* · 박성순* · 윤영빈**

An Experimental Study of Combustion Characteristics in a Model Gas Turbine Combustor

Jangsu Lee* · Min-Ki Kim* · Sungsoon Park* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

The mainly objectives of this study was a combustion dynamics and instability characteristics in a model gas turbine dump combustor which is the scale down of GE 7FA+e DLN 2.6 gas turbine combustor. Model gas turbine injector has 2-stage swirl vane and it's reduced 1/3 size of the original one. The shape of plenum and combustor were designed for similar acoustic characteristics. Inlet air was preheated to 200 ~ 400 °C. The flow velocity at mixing nozzle was 30 to 75 m/s and equivalent ratio was 0.4 to 1.2. The combustor length was varied for different acoustic characteristics to 375 ~ 700 mm. As the result, this research have been show the combustion instability was observed at lower equivalence ratios ($\Phi < 0.5\sim 0.6$) and higher equivalent ratios ($\Phi > 1.1\sim 1.2$).

초 록

본 연구는 GE 7FA+e DLN 2.6 가스터빈 연소기를 축소 제작한 모형 가스터빈 연소기의 연소 동특성 및 연소불안정 현상을 알아보고 위해 진행되었다. 모형 연소기에 사용된 연료노즐은 1/3 크기로 상사하여 제작되었으며, 실제 연료노즐과 동일한 2단 스월러(swirl vane)를 가지고 있다. Plenum과 연소기의 형상은 실 가스터빈과 유사한 음향학적 특성을 가질수 있도록 설계되었다. 실험은 공기 온도 200 ~ 400 °C, 대기압, 노즐출구 속도 30 ~ 75 m/s, 당량비 0.4 ~ 1.2, 연소실 길이 375 ~ 700 mm,에서 이루어졌으며, 그 결과 소염영역 근처의 저 당량비 영역과 당량비 1.1 이상인 연료 과농 상태에서 연소 불안정 현상이 관찰 되었다.

Key Words: Gas turbine(가스터빈), Combustion instability(연소 불안정), Dump combustor(덤프형 연소기), NOX(질소산화물), 2-stage swirl vane(2단 스월러), Plenum(플레넘)

1. 서 론

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

가스터빈은 고효율, 저공해 기관으로 항공부문에서 산업부문에 이르기까지 다양한 용도로 활

용되고 있다. 20세기 초, 가스터빈 개발초기에는 기관의 작동유무와 기계적인 완성, 출력이 중요시 되어 연소의 형태도 확산화염이 사용되었다. 하지만 1970년대를 거치며 에너지 절약의 중요성이 강조되고, 연소시 발생하는 그을음(soot)을 줄이기 위해 예혼합화염의 형태로 변화되었다. 1980년대 전후로 NO_x에 의한 배기배출물이 문제시 되면서 기존에 이론공연비 근처에서의 연소시 문제가 발생함에 따라 이후 희박혼합연소(lean premixed flame)의 개념이 중요시 되었다. 희박가연 한계 근처에서의 연소는 연소실 온도가 낮아짐에 따라 NO_x의 발생을 급격히 감소시킬 수 있었지만, 이로 인해 화염이 불안정해지는 단점이 발생하게 되었다.[1, 2, 3]

GE 7FA+e DLN 2.6 가스터빈은 General Electric co.가 개발한 180 MW 급 중형 가스터빈으로 서인천복합 화력발전소에서 운용하고 있으며, base mode(50~180 MW)에서 약 9ppm 정도의 NO_x를 배출하는 배기배출 특성을 가지고 있다. 가스터빈 초기 기동시에는 6개의 연료노즐 중 일부 노즐에서만 연료를 분사하면서 단계적으로 base mode까지 출력을 높여가게 된다. 이때 특정 출력 모드에서 NO_x의 수준이 높아지거나(65 ppm 이상), 연소실에서의 압력섭동이 커지게 된다(최대 0.7 psi).[4]

모형 가스터빈 연소기는 실 가스터빈 연소기의 연소특성을 관찰하기 위해 노즐의 회전수, 연료-공기 혼합거리, 노즐과 덤프면의 면적비, 노즐 출구에서의 속도와 당량비, plenum 및 연소기의 음향학적 특성 등을 상사해 제작되었다. 본 연구에서는 제작한 모형 가스터빈 연소기의 설계 확인 및 기본적인 연소특성에 관하여 알아보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모형 가스터빈 연소기

모형 가스터빈 연소기는 크게 공기가열장치, Plenum, 연료노즐, 퀴츠 연소기, 배기단의 플러그형 노즐로 이루어져 있다. 공기가열장치는 40

kW급 전열기 3개로 이루어져 있으며, 공급되는 공기를 400 °C까지 가열 시켜주는 역할을 한다. plenum은 가열된 공기가 노즐을 통해 연소기로 들어가기 전에 공기유동을 안정화 시켜주기 위한 공간으로 본 실험에서는 plenum의 음향학적인 특성이 연소장에 미치는 영향을 알아보기 위해 구성되어 있다. 연료노즐은 1단 스윌러의 팁 부분에서 연료가 분사되는 형태로 설계되었으며 1단 스윌러와 2단 스윌러를 거치면서 공기와 혼합되어 연소실 내부로 들어가게 설계되어 있다. 연소실은 가시화 실험을 위한 원형의 퀴츠 튜브와 기초적인 연소 동특성 실험을 위한 원형 STS tube를 사용할 수 있도록 제작되었다. 이는 연소실의 화염 가시화와 유동장의 흐름에 영향을 줄이기 위해 원형으로 설계되었다. 배기단에 위치한 플러그 노즐은 음향학적 경계를 만들어 연소실의 공명주파수를 변화시켜주는 역할을 하게 되며, 이는 모형 가스터빈 연소기 후단에 위치한 스텝 모터에 의해 연소실의 길이를 375 mm에서 700 mm까지 0.1 mm 단위로 제어할 수 있도록 설계되었다.

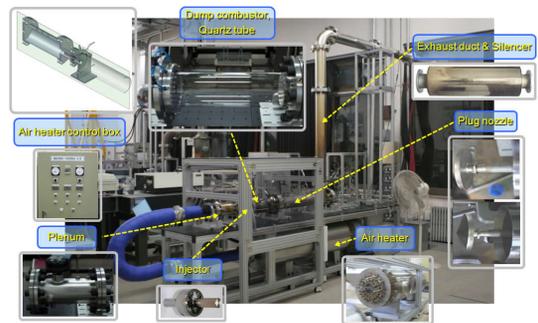


Fig. 1 Model gas turbine combustor

2.2 실험장치

본 연구에서는 모형 가스터빈 연소기에서의 기초 연소 특성 및 배기배출물을 알아보기 위해 다양한 센서와 유량조절을 위한 유량계가 사용되었다. 연소시 발생하는 압력 섭동을 관찰하기 위해 plenum, swirler 전, 후단, 연소실에는 PCB사에서 제작한 102A05 동압센서를 사용하였고, 유량 제어 및 연소실 연소압력을 관찰하기 위해

Valcom사의 정압센서가 사용 되었다. 온도 측정 은 inlet pipe, plenum, swirler, 연소실, 플러그 노즐, exhuast duct 등에서 총 7개의 K-type 열 전대를 이용하여 측정하였다. NOx량의 측정은 HORIBA사에서 제작한 MEXA-720NOx 모델이 사용되었다.

실험장치에 공급되는 연료 유량은 Alicat Scientific사의 M-1500SLPM-D 모델을 이용해 조절하였고, 공기유량의 경우 대한인스트루먼트사의 FK-4 차압계를 이용해 조절하였다.

센서 데이터 취득은 National instrument 사의 C-RIO를 이용해 이루어졌으며, LabVIEW 기반의 프로그램을 통해 센서 데이터 처리 및 유량 제어를 수행하였다. 각각 유량계와 차압계를 이용하여 계산한 연료, 공기 유량은 KANOMAX사의 Hot-wire velocimeter인 Model 6332D를 통해 확인하였으며, 계산 값과 연소기 출구에서의 측정 속도 오차는 3% 이내로 확인되었다.

2.3 실험 방법

모형 가스터빈 연소기의 연료로는 99.9% 순도의 메탄 연료가 사용되었다. 실험 조건은 plenum 온도 200 ~ 400 °C, 연소실 길이 375 ~ 700 mm, 당량비 0.4 ~ 1.2까지의 범위를 측정하였다. 목표속도와 당량비 조건을 1.2에 맞춘 후 당량비 조건에 따라 발생할 수 있는 hysteresis 현상을 방지하기 위해 서서히 당량비를 낮추어 가며 소멸 될 때까지 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

Figure 2는 모형 가스터빈 연소기에서의 화염 안정화 지도를 보여준다. 노즐 출구 속도가 30 m/s일 때에는 당량비와 plenum에서의 입구 공기 온도와 관계없이 전체 영역에서 연소 불안정 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 입구 공기 온도가 400 °C일 때에는 당량비 0.45 ~ 0.5 구간에서 소멸이 일어나게 되었으며, 200 °C에서는 당량비 0.6 ~ 0.65 구간에서 소멸이 일어나는 현상이 관찰 되었다. 공기 온도와 관계없이 소멸 전

낮은 당량비에서 약한 연소 불안정 현상이 일어나는 현상이 나타났으며, 당량비 1.1 이상에서도 약한 연소 불안정 현상이 발생하였다. 전체적으로는 연료, 공기 혼합기 속도가 증가하고, 흡입 공기온도가 증가할 수 록 넓은 당량비 영역에서 안정한 모습을 확인할 수 있었다.

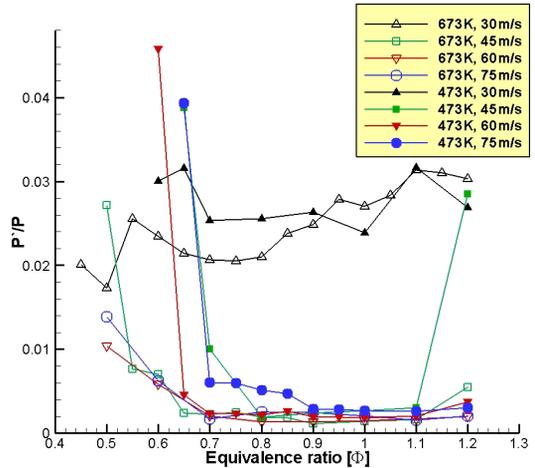


Fig. 2 Stability maps for various nozzle mixture velocity and inlet air temperature conditions

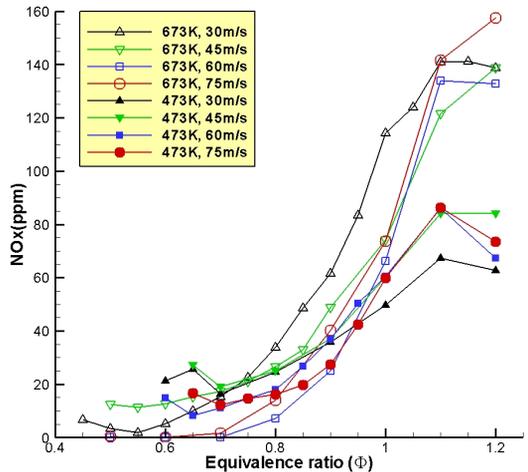


Fig. 3 NOx formation in model gas turbine combustor

NOx 발생량의 경우 전반적으로 당량비가 증가함에 따라 NOx량이 증가하는 모습을 보였으며, 혼합기 속도가 증가함에 따라 NOx량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 혼합기 속도가 증

가함에 따라 공급되는 연료량이 증가하게 되는데 이로 인해 연소실 온도가 높아지기 때문이다. 30m/s의 경우 전 당량비에서의 연소 불안정 현상의 발생으로 인해 다른 혼합기 속도 조건에 비해 전반적으로 많은 NOx가 발생 하는 것을 볼 수 있었고, 소염 전 연소불안정 현상의 발생 시 NOx 량이 증가하는 모습을 볼 수 있었다.

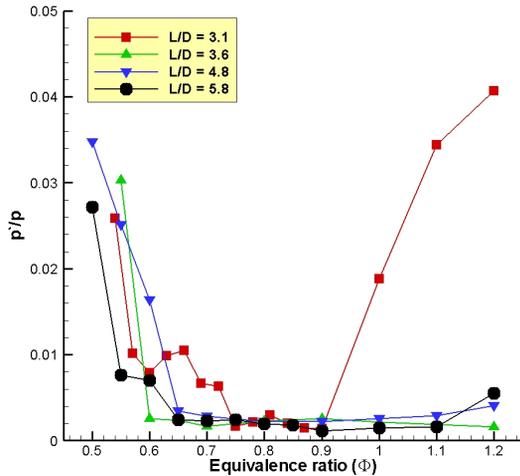


Fig. 4 Stability maps in various combustor length scales at fuel-air mixture velocity 45 m/s

Figure 4는 연소실 길이에 따른 화염 안정화 지도를 보여준다. L/D는 연소실 길이 대 연소실 직경비를 나타내며, 연소실 길이가 길어질 수록 낮은 당량비까지 화염이 존재하는 것을 알 수 있었다. 또한 L/D가 3.1인 경우에서 화염 안정화 구간이 당량비 0.75 ~ 0.9 정도로 다른 실험 조건에 비해 좁게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 Heitor[5], Preston III[6] 등의 연구에서 L/D가 짧은 연소기에서 화염 안정성에 대한 연구 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

모형 가스터빈 연소기의 실험적 연구로 기초 연소특성에 대하여 확인해 본 결과 혼합기 속도에 따른 연소실 동압 특성은 30 m/s를 제외하면, 다른 속도 조건에서는 비슷하게 나타나고 있

다. plenum에서의 공기온도가 높아질수록 소염이 발생하는 당량비가 낮아지는 현상을 볼 수 있었다. NOx량의 경우 같은 온도조건에서 혼합기의 노즐에서의 속도가 증가함에 따라 NOx량이 증가하였다. 또한 plenum에서의 공기온도에 의해 NOx의 발생량이 큰 차이를 보였으며, 연소불안정 현상이 발생시 NOx가 증가하였다. 연소실 길이에 따른 효과는 L/D가 3.1일때 전체적으로 화염이 불안정한 것을 확인할 수 있었는데, 이는 좀더 넓은 L/D 영역에서 관찰할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 서인천 발전본부 중장기 기술과제 "가스터빈(GE7FA DLN-2.6) 연소기의 연소 불안정성 제어기법 개발"의 일환으로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. P. Boyce, Cas turbine engine handbook-3rd edition, GPP press, USA, 2001, p.47
2. M. P. Boyce, Handbook for cogeneration and combined cycle power plant, ASME press, USA, 2001, p.41
3. 오정석, 윤영빈, "가스터빈에서의 연소불안정 현상", 한국추진공학회지, 제 12권, 제 4호, 2008, pp.63~77
4. 오정석, 김민기, 허필원, 이장수, 윤영빈, "GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기 연구 : Part II 모형 덤프 연소기 설계", 한국추진공학회지, 제 12권, 제 5호, 2008, pp.51~59
5. K. C. Schadow et al, "Large-scale coherent structures as drivers of combustion instability", Combustion science and technology, 64, 1999
6. Lon H. Preston III, "Initial fuel distribution and its relation to flame stability in a bluffbody dump combustor", Master thesis, 1997