

# GE 7FA+e DLN-2.6 연소기를 모사한 모형 가스터빈 연소기의 연소불안정 특성에 대한 실험적 연구

김민기\* · 이장수\* · 박성순\* · 윤영빈\*\*

## An Experimental Investigation of Combustion Characteristics in a Model Combustor by Reproduction of GE 7FA+e DLN-2.6 Gas Turbine

Min-Ki Kim\* · Jangsu Lee\* · Seongsoon Park\* · Youngbin Yoon\*\*

### ABSTRACT

The mainly objectives of this study was a combustion dynamics and instability characteristics in a model dump type combustor which is scale down of GE 7FA+e DLN 2.6 gas turbine combustor with running at Seo-Inchon combined cycle power plant. 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. As the result, this research have been shows the peak frequency of model combustor was changed quarter-wave mode to Helmholtz resonator mode in plenum and longitudinal mode in dump combustor at unstable flame conditions caused by the different of combustor temperature and fuel-air mixture distributions.

### 초 록

본 연구의 목적은 실제로 서인천 발전본부에서 운용하고 있는 GE 7FA+e DLN 2.6 가스터빈 연소기의 연소특성과 배기배출물에 대한 제어 연구를 소개하고 모형 가스터빈 연소기의 연소동특성 및 연소불안정 현상을 확인하고자 한다. 모형 연료노즐은 실제의 1/3 크기로 상사하여 제작되었고, 실제 노즐과 동일한 각도의 2단 스윌러(swirl vane)를 가지고 있다. Plenum과 연소기의 형상은 실 가스터빈과 유사한 음향학적 특성을 가질 수 있도록 설계되었고 실험은 공기온도, 노즐출구 속도, 당량비, 연소실 길이를 변수로 이루어졌으며, 그 결과 연소실의 연소불안정 mode는 각각의 실험 변수에 따라서 연소실의 공진주파수의 영향, 연소온도와 공기-연료 혼합기 분포에 의해서 mode가 전이되는 현상을 확인하였다.

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

\* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부  
연락처, E-mail: kmk34@snu.ac.kr

## 1. 서 론

가스터빈 엔진은 고효율, 저공해 기관으로 산업용 발전기와 여러 항공기 엔진에 활용되고 있다. 20세기 초에는 오로지 가스터빈의 작동유무와 기계적인 완성 및 출력만이 중요시 되어 연소의 형태도 비교적 화염이 안정한 확산화염이 사용되었다. 하지만 1970년대 이후에는 에너지 절약과 환경문제로 인해 연소과정에서 발생하는 그을음(soot)을 줄이기 위한 예혼합화염의 형태로 변화되었다. 1980년대 전후에는 질소산화물(NOx)에 의한 배기배출물이 문제시 되면서, 기존에 이론공연비 근처에서의 연소에서는 화염 온도에 따른 배기배출물의 문제가 발생함에 따라 이후 희박혼합연소(lean premixed flame)의 개념이 중요시 되었다. 희박가연 한계 근처에서의 연소는 연소실 온도가 낮아짐에 따라 NOx의 발생을 급격히 감소시킬 수 있었지만, 이로 인해 화염이 불안정해지는 단점이 발생하게 되었다.[1] GE 7FA+e DLN 2.6 가스터빈은 General Electric co.가 개발한 180 MW 급 중형 가스터빈으로 현재 서인천발전본부에서 운용하고 있으며, base mode(50~180 MW)에서 약 9ppm 정도의 NOx를 배출하는 특성을 가지고 있다. 가스터빈 초기 기동시에는 화염의 안정화를 위하여 6개의 연료노즐 중 일부 노즐에서만 연료를 분사하면서 단계적으로 base mode까지 출력을 높여가게 된다. 이때 특정 출력 모드에서 NOx의 수준이 높아지거나(65 ppm 이상), 연소실에서의 압력섭동이 커지게 된다(최대 0.7 psi).[2] 본 연구에서는 실제 가스터빈 연소기에서의 동압 및 배기배출물 제어상수 파악을 통하여 실 연소기에서 제어된 실험결과와 모형 덤프 연소기의 연소특성 및 배기배출물 특성에 관하여 알아보고 실 가스터빈 연소기에서 적용할 수 있는 동압 및 배기배출물의 제어인자에 대하여 확인하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 GE 7FA+e DLN-2.6 연소기 연소상태량 측정방법

실연소기 동압측정 장치는 연소기와의 연결프로브(long tube type), 압력신호수집 및 처리부, 사용자 컴퓨터로 구성되었다. 연결프로브(infinite tube or pig tail)는 압력센서가 고온의 연소기에 직접 닿는 것을 피하고 측정 프로브가 지나는 동압의 특정 주파수 흡수를 막는 역할을 한다. 그러므로 연결프로브의 길이가 길면 길수록 반사파에 의한 간섭이 적어져 좋은 신호특성을 가지게 되는 것으로 알려져 있다 [4].

### 2.2 모형 가스터빈 연소기 소개

모형 가스터빈 연소기 구성은 연료/공기 조절 장치, 공기 압축기, 40KW급 공기 가열장치 3개, 공기가열장치 control panel, 연소기 지지대, 화염 가시화와 유동장의 흐름에 영향을 줄이기 위한 원형연소기(model dump combustor), 소음기, 배기관, 모형 연료노즐, 가시화 연소기, Plenum 등으로 구성되어 있다(Fig. 1).

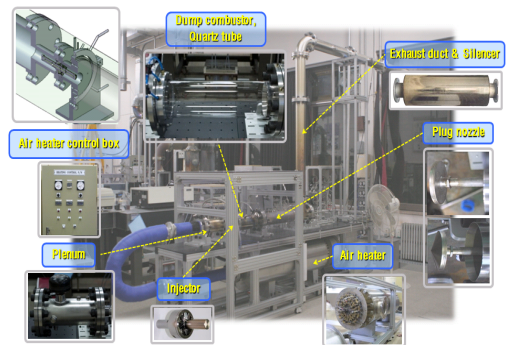


Fig. 1. Model gas turbine dump shape combustor

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.

### 2.3 모형 가스터빈 연소기 실험방법

모형 가스터빈 연소기의 실험조건은 아래 표 1과 같다. 안정된 화염의 조건을 유지하기 위하여 과농연소 상태인 당량비 1.2에 맞춘 후 당량비가 변화되는 조건에 따라 발생할 수 있는

hysteresis 현상을 방지하기 위해 서서히 연료의 유량과 공기유량을 각각 순차적으로 변화시켜 당량비를 실험조건에 따라 0.1~0.01 정도로 낮추어 가며 소멸될 때까지 실험을 수행하였다.

parameter	value
Fuel type	99.9% methane or LNG
Inlet air temperature	373 ~ 673 K
Mixture velocity	30, 45, 60, 75 m/s
Equivalence ratio	Blowout limit ~ 1.2
Combustor length	375 ~ 1000 mm

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 GE 7FA+e DLN-2.6 연소기 연소특성 결과

실연소기의 출력을 고정시킨 상태에서 가스터빈 제어시스템 MARK-VI에 내장된 초기 값을 기준으로 제어상수를 +5, 0, -5씩 증감하며 취득한 연소상태량과 동압 및 NOx 값을 이용하여 실시하였다. GE 연소기의 연소상태량 측정결과 각 노즐에서의 연료량 변화는 모드 3에서 PM 1, 모드 6B에서 PM 3, 모드 6AQ에서 PM 2, 3가 주도함을 알 수 있다. 따라서 배기배출물이 문제시 되는 모드 3에서 PM 1 노즐로 들어가는 연료량(제어상수)을 조절하였다. 그 결과 20 MW에서 제어상수를 5만큼 줄인 경우 참고 값에 비해 NOx가 5 ppm 정도 줄어들었고 반대로 제어상수를 5만큼 늘인 경우 3 ppm 정도 늘어났다 (Fig. 2 (a)). Fig. 2 (b)는 동압주파수 스펙트럼이다. 저출력인 Mode 3과 정격출력인 모드 6AQ에서 동압특성은 양호했다. 그러나 모드 6B (40~45 MW)에서 동압이 다른 모드에 비해 두드러지게 나타났으며 특성주파수는 120~140 Hz 부근이었고 35 MW일 때 동압 변동량의 크기는 0.4 psi 이었다. 모드 6B는 노즐 PM 3에서의 연료량이 급격히 변하는 구간이므로 측정된 특성주파수는 PM 3에서의 연료(LNG)량 증가와 관련이 있을 것으로 판단되어 제어를 통해 동압

level을 52%가량 감소시켰다.

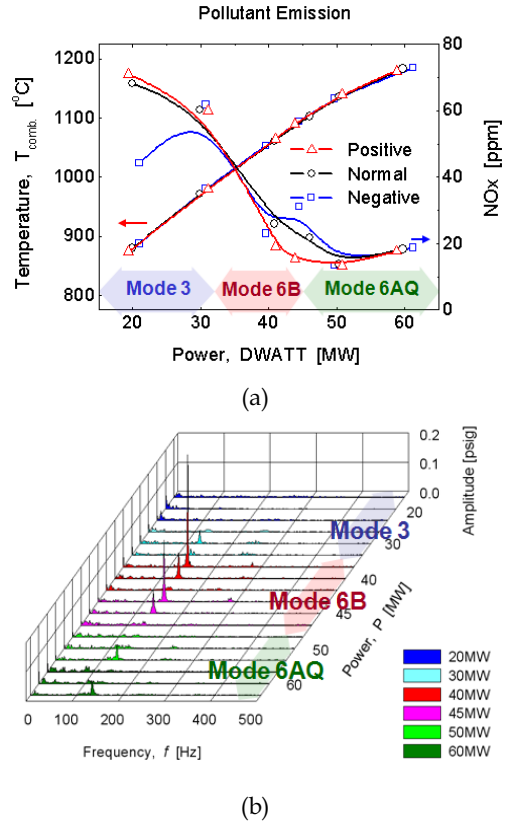


Fig. 2. GE 7FA+e DLN-2.6 combustor tuning data measurement as increasing power from 20 to 60 MW; (a) NOx emission and temperature in a combustor, (b) frequency spectrum of dynamic pressure

#### 3.2 모형 가스터빈 연소기에서 화염안정화지도 작성

Figure 3은 모형 가스터빈 연소기에서 각각의 혼합기 속도, 유입되는 공기온도별 실험을 통하여 동압센서의 연소실 동압측정으로 각각의 당량비 조건에서 화염안정화 지도이다. 노즐 출구 속도가 30 m/s일 때에는 혼합기의 속도 자체가 낮음으로 인한 덤프형 연소기의 vortex가 연소실 형상과의 관계로 인하여 고유 주파수로 진동으로 각각의 당량비와 plenum에서의 입구 공기 온도와 관계없이 전체 영역에서 연소 불안정 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 공기의 온도가 높아지면 비교적 혼합기 영역에서 공

기의 밀도가 낮아지게 되고 이로 인해 연료와 공기가 다른 조건보다 더 잘 섞이게 되는 것으로 확인할 수 있어, 당량비가 낮은 희박 연소시에도 화염이 꺼지지 않고 살아있는 것으로 분석된다.

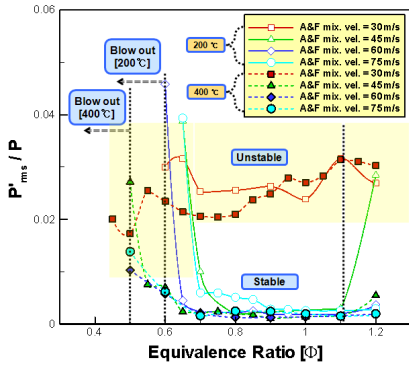


Fig. 3. Stability maps for various nozzle mixture velocity and inlet air temperature conditions of model gas turbine combustor

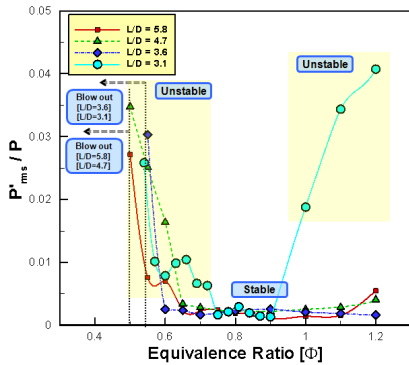


Fig. 4. Stability maps in various combustor length scales at fuel-air mixture velocity 45 m/s

Figure 4는 L/D 즉, 연소실 길이 대 직경 비에 따른 화염 안정화 지도이다. 연소실이 길어지면, 낮은 당량비 영역까지 화염이 존재하는 것을 알 수 있었다. 또한 L/D가 3.1인 경우에서 화염 안정화 구간이 당량비 0.75 ~ 0.9 정도로 다른 실험조건에 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.

### 3.3 모형 가스터빈 연소기에서 배기배출물 특성

배기배출물은 전반적으로 당량비가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>량이 증가하는 모습을 보였다. 이는 당량비의 증가에 따라 연료의 양도 증가하고 연료의 단위 질량당 연소되는 양이 증가하여 화염의 온도를 높여서 배기배출물의 양이 증가하게 되는 것이다. 또한 혼합기 속도가 증가함에 따라 공급되는 연료량이 증가하게 되기 때문에 연소실 온도가 높아지면서 Thermal NO<sub>x</sub>양의 증가로 높은 수치를 보이고 있다. 혼합기 속도가 30m/s의 경우에는 연소불안정 현상의 발생으로 불안정 연소를 초래하여, 화염의 평균 온도가 비교적 낮지만 상대적으로 많은 NO<sub>x</sub>가 발생 하는 것을 확인할 수 있었다. 흡입공기온도가 높은 경우에는 화염이 안정화되어 혼합기 노즐 근처에 화염이 형성되게 되고 흡입공기온도가 낮은 경우에는 덤프면에서 상대적으로 멀어져서 형성되기 때문에 완전연소를 하지 못하여 연소실의 평균 온도가 낮아지게 되고 배기배출물의 특성도 낮아지게 되는 현상을 확인할 수 있었다.

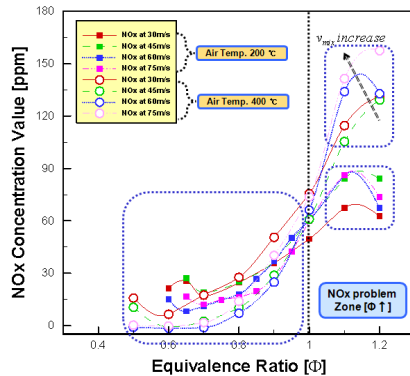


Fig. 5. NO<sub>x</sub> formation in model gas turbine combustor as various inlet air temperature and nozzle mixture velocity conditions

## 4. 결 론

GE 7FA+e DLN-2.6 연소기의 운전모드 최적

화 연구와 이를 기반으로 설계/제작한 모형 가스터빈 연소기에서의 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 기동초기 모드 3의 20 MW에서 NO<sub>x</sub>가 가장 많이 배출되었으며(약 65 ppm) PM 1의 제어상수를 5만큼 줄임으로써 5 ppm 정도 NO<sub>x</sub>가 줄어들었다.
2. GE 7FA+e DLN-2.6 연소기 Mode 6B에서 동압의 크기(0.4 psi)가 가장 컸으며 140 Hz의 특성 주파수를 지녔고 동압은 PM 3의 연료 유량 증가에 따라 52%가량 줄어들었다.
3. 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 있다. plenum에서의 공기온도가 높아질수록 소음이 발생하는 당량비가 낮아지는 현상을 볼 수 있었다.
4. 모형 연소기에서 연소실 길이에 따른 효과는 가장 길이가 짧은 L/D가 3.1일때 전체적으로 화염이 불안정한 것을 확인할 수 있었다.
6. 배기배출물(NO<sub>x</sub>)의 특성의 경우 같은 온도조건에서 혼합기의 노즐에서의 속도가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>량이 증가하였다. 또한 plenum에서의 공기온도에 의해 NO<sub>x</sub>의 발생량이 큰 차이를 보였으며, 연소불안정 현상이 발생시 NO<sub>x</sub>가 증가하였다.

## 후 기

본 연구는 한국서부발전 중장기 기술과제 “가스터빈(GE7FA DLN-2.6) 연소기의 연소불안정성 제어기법 개발”과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. M. P. Boyce, Cas turbine engine handbook-3rd edition, GPP press, USA, 2001, p.47
2. 오정석, 김민기, 허필원, 이장수, 운영빈, “GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기 연구 : Part II 모형 덤프 연소기 설계”, 한국추진 공학회지, 제 12권, 제 5호, 2008, pp.51~59
3. T. Lieuwen, "Investigation of combustion instability mechanisms in premixed gas turbines," Ph.D thesis, Georgia institute of technology, 1999, pp. 42~45
4. D. R. Englund, W. B. Richards, "The infinite line pressure probe," Thirty-ninth International Instrumentation Symposium, Denver, Colorado, 1984
5. V. G. McDonell, G. S. Samuelsen, "Measurement of fuel mixing and transport processes in gas turbine combustion," Meas. Sci. Technol., Vol. 11, 2000, pp. 870~886
6. Lon H. Preston III, "Initial fuel distribution and its relation to flame stability in a bluffbody dump combustor", Master thesis, 1997
7. L. Douglas Smoot, Paul O.hedman, Thomas H. Fletcher. B. Scott Brewster, 1997, "Modeling Lean Premixed Combstion in gas Turbines"
8. Zinn, H. and M. Habermann., Developments and Experiences with Pulsation Measurements for Heavy-Duty Gas Turbines, ASME Paper No. GT2007-27475., 2007