

[표지]

## [제10회 KAI 항공우주논문상 요약본]

(응용기술, 항공우주/기계, 추진/연소 공학 부문)

- 국문제목 : 친환경(저 NOx) 가스터빈 연소기의 연소동특성에 대한 실험적 연구
- 영문제목 : **An Experimental Study on Combustion Dynamic Characteristics in a Low NOx Gas Turbine Combustor**
- 주저자 : 김민기 (Min-Ki Kim, 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정)
- 공동저자 : 윤지수 (Jisu Yoon, 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정)
- 지도교수 : 윤영빈 (Youngbin Yoon, 서울대학교 기계항공공학부, 교수)

### 초 록

본 연구는 친환경 저 NOx 가스터빈 연소기의 최적설계 인자 도출에 대한 연구로써 항공용 및 발전용 가스터빈에서 사용되는 예혼합 연소기에서의 연소동특성에 대한 실험적 결과를 제시한다. 가스터빈 연소기의 설계 인자인 연료-공기 혼합기 속도, 당량비, 연료 노즐 전의 공간(plenum) 및 연소실의 길이 등의 변화에 따른 화염안정화 지도를 작성하였고, PIV(Particle Image Velocimetry), OH\* 자발광, He-Ne 레이저 광흡수 기법 등을 이용하여 화염의 구조를 분석하였으며, 자체 개발한 다채널 동압측정 시스템을 이용하여 전체 연소기에서 구간별 동압을 실시간으로 측정하여 연소실에서 발생하는 불안정 특성의 원인을 파악하였다. 열방출의 섭동과 11개의 동압센서에서 측정되는 모드와 위상차 분석을 통하여 연소불안정의 원인을 정확히 파악할 수 있었고, 연료-공기 혼합기의 내제적 불안정에 의해 발생하는 화염의 vortex 불안정과 연료-공기의 혼합부(plenum)의 길이가 연소불안정에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였고, 이를 통해서 친환경 가스터빈 연소기 제작을 위한 설계 인자를 명확히 확인하였다.

## 1. 서론

가스터빈은 항공용에서 산업부문의 발전용에 이르기까지 다양한 용도로 활용되고 있다. 초기에는 가스터빈의 안정적인 운용을 위하여 확산화염으로 구동하여 기계적인 안정성을 도모하였다. 하지만 1980년대 전후로 NO<sub>x</sub>와 같은 배기배출물이 문제시 되고, 환경오염의 규제가 강화됨에 따라 희박 예혼합 연소(Lean Premixed Combustion)의 개념이 중요시 되었고, 이로 인하여 NO<sub>x</sub>의 발생을 급격히 감소시킬 수 있었지만, 화염이 외부의 교란에 대하여 매우 민감하게 반응하여 불안정해지는 단점이 발생하게 되었다. 또한 항공용 가스터빈 연소기에서의 저 NO<sub>x</sub> 연소 기술로 RQL(Rich burn Quick mix and Lean burn)연소기가 있으며 이러한 희박 예혼합 연소기의 경우 낮은 당량비 조건에서 화염의 Ignition delay time이 길어짐에 따라 연소불안정 현상이 쉽게 발생하게 된다. 연소불안정 현상에 대하여 전 세계의 많은 연구자들이 연소기의 기하학적 형상 및 연료 또는 공기 공급부에 가진, 수치해석적인 연구를 이용하여 화염의 전달함수, 각종 가시화 기법을 이용하여 화염의 구조적 특징에 대한 연구를 진행하고 있다. 하지만 저속 조건에 따른 혼합기 자체에 대한 불안정 연구와 특히 연소실이 아닌 연료-공기 혼합기가 유입되어 오는 공간(plenum)이 연소불안정 특성에 미치는 영향을 실험적으로 확인한 연구는 없었다.

따라서 본 연구에서는 레이저 가시화 기법과 연소실 및 연료-공기 혼합부에 자체적으로 개발한 연소특성 측정기법인 다수(11개)의 동압을 측정하여 연소불안정시 나타나는 불안정 모드와 위상차를 분석하여 연소불안정의 원인을 명확히 규명하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 사용된 가스터빈 연소기는 Fig. 1과 같이 희박 예혼합 및 스윙 안정화 화염을 가지는 구조로 되어있고, 일반적으로 항공용 및 발전용으로 사용되는 가스터빈 연소기의 연료노즐 유입구와 덤프면의 지름 비율을 1:3정도로 하는 모형 연소기를 설계, 제작하여 사용하였다. 또한 화염의 섭동 즉, 열방출의 섭동과 유동의 구조적인 특성을 파악하기 위한 방법으로 OH\* 자발광 계측기법과 평면의 순간적인 속도장을 얻을 수 있는 PIV계측기법을 사용하였다. 연소실험에서 발생하는 압력의 섭동을 관찰하기 위하여 다체널 동압 측정 시스템을 구성하여 열방출 섭동측정값과 시간 동기화하여 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1. 화염안정화 지도

모든 실험조건에 따른 아래 Fig. 1의 화염안정화지도 결과를 통하여 모형 가스터빈 연소기의 연소동특성에 영향을 미치는 주요인자는 기존에 연소불안정 연구로 잘 알려진 연소실에서의 당량비, 연소실길이, 연소실 온도, 스윙연료노즐의 각도등이 영향을 미치는 것

을 확인할 수 있었으며, 이와 더불어 연료-공기 혼합기 속도, plenum 길이 등이 또 다른 연소동특성을 가질 수 있음을 확인하였다.

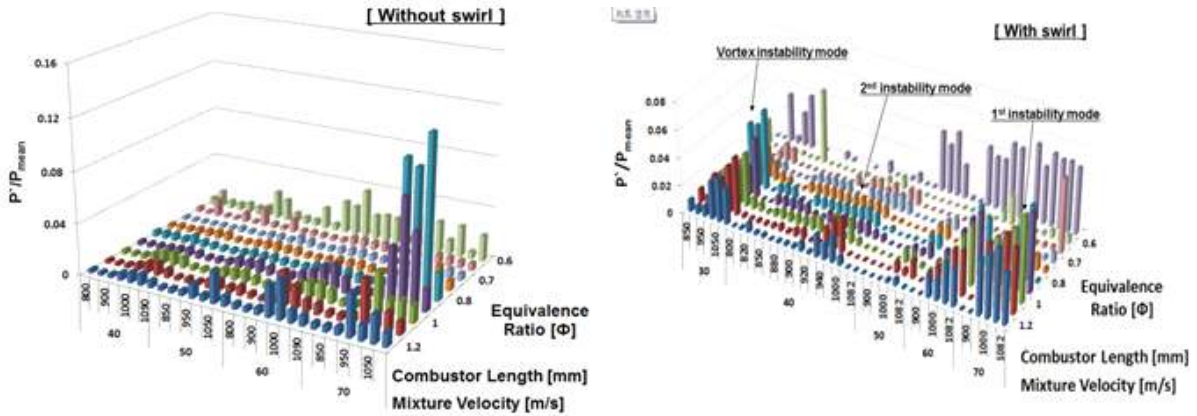


Fig. 1 Stability map for all of the experimental conditions

### 3.2 화염의 가시화 특성

PIV, OH\* 자발광 계측기법 등을 이용하여 연소불안정 현상과 재순환 영역의 형성간의 관계에 대한 연구를 진행하였다. 그 중 화염의 안정화 메커니즘에 지대한 영향을 미치는 재순환 영역의 형성에 중점을 두었다. 스윙 안정화 화염의 구조적 특성을 관찰하고, 이를 thermo acoustic 불안정과 관련하여 연구를 진행하였다는 점에서 의미가 있다고 할 수 있다. 연소불안정이 발생한 경우 화염은 주기적으로 진동하였고 이와 동반하여 재순환

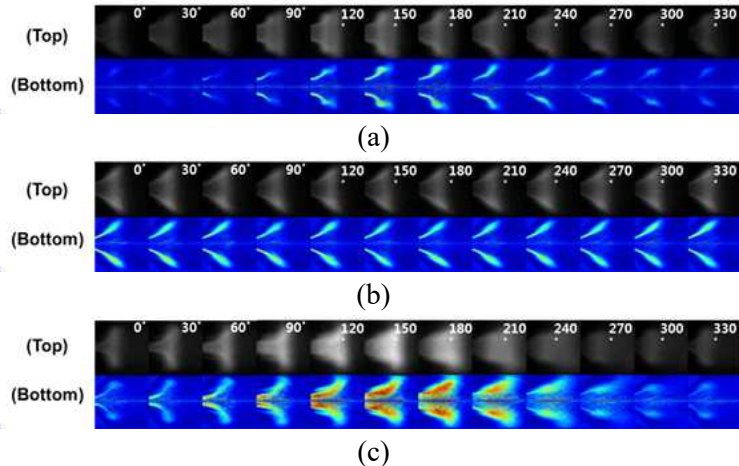
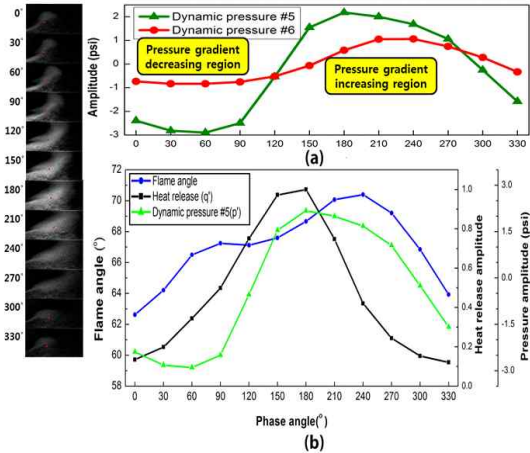


Fig. 2 OH\* chemiluminescence(top) and Abel-inverted images(bottom) at  $L_{comb.} = 1000$  mm,  $\Phi = 1.2$  conditions: (a) unstable,  $v_{mix} = 30$  m/s, 370 ~ 390 Hz, (b) stable,  $v_{mix} = 50$  m/s, (c) unstable,  $v_{mix} = 70$  m/s, 340 ~ 360 Hz.

영역의 섭동이 관찰되었다. 이때의 재순환 영역의 섭동 주파수는 연소불안정 주파수와 동일하였다. 이를 통해서 연소불안정 하에서 재순환 영역의 섭동이 발생하며, 이러한 재순환 영역의 섭동은 재순환 영역내의 질량유량의 섭동, 열방출율의 섭동을 일으켜 결국 연소불안정을 발생, 강화하는 역할을 하게 됨을 알 수 있었다.

### 3.3 저 혼합기 속도 구간의 연소불안정 특성

연료-공기 혼합기 속도조건을 변수로 연소실험을 수행하였으며, 낮은 속도조건과 높은 속도조건에서 연소불안정이 발생함을 확인할 수 있었다. 이런 연소불안정현상은 서로 다른 특성을 나타내는 것을 FFT 및 연소실 온도 분석을 통하여 확인하였고, 원인을 파악하기 위하여 연소불안정 상태에서의 화염구조 분석을 통하여 확인 하였다. 화염 각도의 변화



의 경우 열방출파가 압력섭동을 야기하고 이렇게 야기된 압력섭동이 화염 각도를 바꾸는 것을 확인할 수 있었으며 화염의 길이방향 섭동의 경우 연소실내부에 존재하는 압력구배에 영향을 받는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다. 낮은 속도조건에서의 화염에서 연소불안정 주파수가 예측한 값보다 훨씬 높게 나타나는 현상에 대한 원인 분석을 위하여 모드, 위상 분석을 수행하였으며 낮은 속도조건에서의 화염의 경우 Rayleigh' criteria를 만족시키지 못하는 조건임에도 불구하고 연소불안정 현상이 일어나는 것을 확인하였다. 이에 추가적인 분석으로 Strouhal number 및 레이저를 이용한 cold, hot 섭동 계측을 수행하였고, 그 결과 낮은 속도조건에서의 경우 화염 끝단의 와동구조(Vortex shedding)가 생기기 쉬우며 실제 레이저를 이용한 계측 결과도 낮은 속도조건에서의 경우 연소 전 유동장에서 이미 섭동이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.4 연료-공기 혼합부(plenum)에 의한 연소불안정 특성

연료-공기 혼합부의 길이에 따른 연소불안정 특성에서 서로 다른 mode의 강한 연소불안정 주파수가 관찰되었는데, 두 주파수 대역 모두 연소실에 위치한 동압센서에 의해 측정된 진폭과 위상을 통해 연소실의 길이에 의해 발생하는 음향모드(Longitudinal mode, n=1, 2)와 관계가 있는 것으로 확인하였다. 연소불안정시 나타날 수 있는 음향모드의 밴드인 1L 및 2L mode 중에서 실제로 연소불안정이 나타나는 특정 대역의 주파수가 존재하기 때문에 연소실내의 음향 주파수를 결정하게 되는 연소실의 온도(또는 당량비), 연소실 길이가 연소불안정 현상에 중요한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 실험에서 관찰된 1L mode의 연소불안정 현상은 연소실의 길이방향 모드와 관련이 있으며, 이러한 연소불안정 현상은 열방출 섭동과 동기화되어 화염응답특성에 의해 발생하는 것으로 기존

가스터빈 연소불안정에 관한 연구들에서도 비슷한 현상을 확인할 수 있는 내용이며, 높은 불안정 주파수로 불안정 모드가 천이되는 연소불안정 현상의 경우에는 연소실의 길이방향 모드와 연료-공기 혼합부의 길이방향 모드의 결합을 통하여 발생하는 mode인 것을 확인할 수 있었다. 혼합부와 연소실 2곳에서 longitudinal mode의  $n=2$ 에 해당하는 음향학적인 주파수의 영역이 서로 비슷하면 해당하는 주파수로 연소불안정 현상이 발생되었고, 또한 연소실의 압력 진동보다도 연료-공기 혼합부에서의 압력진동에 더 큰 영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있었다.

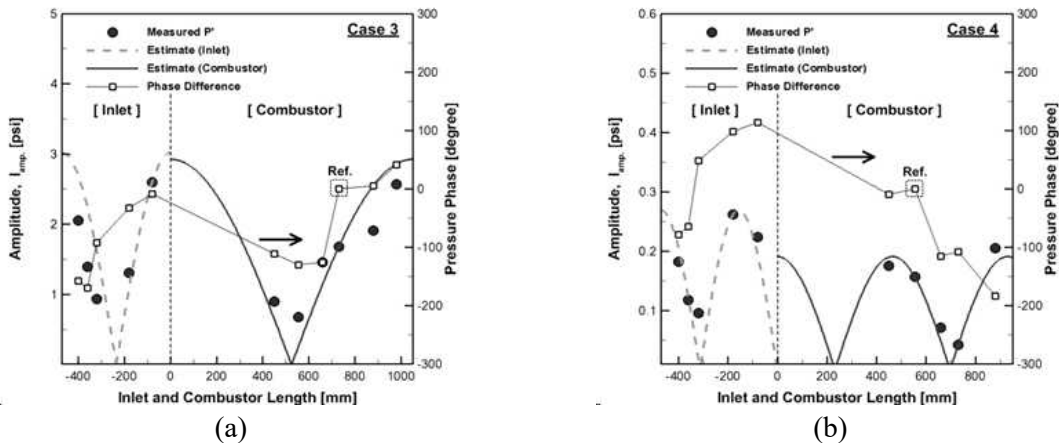


Fig. 4 Dynamic pressure amplitude and phase difference between each sensor at 30° swirl condition and  $L_{inlet} = 470$  mm; (a) 1<sup>st</sup> longitudinal instability mode,  $L_{comb.} = 1050$  mm,  $\Phi = 1.1$ ,  $v_{mix} = 70$  m/s, case 3, (b) 2<sup>nd</sup> longitudinal instability mode,  $L_{comb.} = 930$  mm,  $\Phi = 1.2$ ,  $v_{mix} = 40$  m/s, case 4.

#### 4. 결론

친환경 저 NOx의 배기배출물 특성을 갖는 모형 가스터빈 연소기에서 중요한 설계인자들을 변수로 연소실험을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 연소동특성의 원인과 결과를 명확히 분석한 본 연구결과의 자료를 바탕으로 기존 이론들에 대한 내용을 검증하고, 나아가서 기존에 알려지지 않은 낮은 연료-공기 혼합기 속도조건에서의 유체역학적인 불안정과 연소불안정 특성과의 관계 및 연료-공기 혼합부의 길이를 변경함에 따라 특이한 연소불안정 조건이 발생하는 특성을 확인하였고, 기존 가스터빈 연소기 설계에 있어서의 주요인자들과 더불어 추가적인 연소동특성 인자를 검증하였다. 또한 각 인자들이 화염구조에 미치는 영향을 실험적으로 확인할 수 있었다. 이는 추후 친환경 항공용, 발전용 가스터빈 연소기의 최적설계 및 자력 개발에 있어서 매우 중요한 연구결과로 활용이 가능하리라 생각한다.