

자발광 및 레이저 계측기법을 이용한 모형 가스터빈 연소기에서 화염구조 분석

윤지수* · 김민기* · 이민철* · 윤영빈**†

Study of Flame Structure by Chemiluminescence and Laser Diagnostics in Model Gas Turbine Combustor

Jisu Yoon* · Min-Ki Kim* · Min-Chul Lee* · Youngbin Yoon**†

ABSTRACT

To eliminate the onset of combustion instabilities and develop effective approaches for control, flame structure is very important. In this study, we conducted experiments under various operating conditions with a model gas turbine combustor to examine the relation of combustion instability and flame structure by OH chemiluminescence and laser diagnostics of He-Ne laser absorption system. The swirling LNG(CH₄)/air flame was investigated with overall equivalence ratio of 1.2 and dump plane fuel-air mixture velocity 25 ~ 70 m/s. We found that the combustion instability phenomenon occurs at lower mixing velocity and higher mixing velocity conditions. We also concluded that fluid dynamical vortex frequency has major effects on the combustion instability characteristics at lower mixing velocity condition.

초 록

연소불안정 현상을 제거하거나 효과적으로 제어하기 위해서는 화염구조에 대한 이해가 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 OH 자발광 및 He-Ne 레이저 광흡수 계측기법을 이용하여 연소불안정과 화염 구조사이의 상관관계에 대한 실험적 연구를 다양한 실험조건에서 수행하였다. 실험에서는 673K로 가열 되어진 swirl 형태로 공급되는 건조한 공기와 LNG(CH₄) 연료를 사용하였으며 전체 당량비는 1.2 조건에서 속도를 25 ~ 70 m/s까지 바꾸어가며 실험을 수행하였다. 이를 통하여 연소불안정 현상이 낮은 속도조건과 높은 속도조건에서 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 낮은 속도조건에서의 불안정에서는 화염의 와동구조가 연소불안정현상에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다.

Key Words: Combustion instability(연소불안정), Vortex structure(와동구조), Gas turbine combustor(가스터빈 연소기), OH* chemiluminescence(OH 자발광), Laser diagnostics(레이저계측)

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부 및 IAAT

† E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

Tel : (02)880-7396 Fax : (02)872-8032

근래 에너지 문제와 환경오염에 대한 규제가 강화됨에 따라 높은 효율로 연소를 수행하며 낮은 배기배출물을 달성할 수 있는 가스터빈에 대한 연구가 지속되어왔으며 이에 대한 해법으로 희박 예혼합 연소기가 이미 상용화 되어 구동되고 있는 실정이다. 또한 저 NO_x 연소 기술로 RQL(Rich burn Quick mix and Lean burn)연소기가 있으며 이는 높은 당량비로 초기 연소를 수행하며 향후 공기를 추가로 분사하여 후단에는 기존 희박 예혼합 연소기와 같이 낮은 당량비에서 연소가 지속되도록 하는 개념으로 현재 많은 연구가 지속되고 있다.

앞서 예를 든 희박 예혼합 연소기의 경우 낮은 당량비를 통하여 연소실을 온도를 낮추며 이를 통하여 NO_x 발생량을 저감할 수 있다. 하지만 이 과정에서 낮은 당량비의 화염의 경우 화염의 Ignition delay time이 길어짐에 따라 화염의 열 방출과와 연소실 내부의 기하학적 형상에 의한 압력파와의 공진으로 인한 연소불안정 현상이 쉽게 발생하게 된다[1, 2, 3].

연소불안정 현상에 대하여 이해하기 위하여 연소기의 기하학적 형상 및 가진을 이용한 화염의 전달함수에 대한 연구가 많이 진행 되어왔다 [4]. 또한 각종 가시화 기법을 이용하여 화염의 구조적 특징에 대한 연구 또한 많은 그룹에서 진행하고 있는 실정이다[5, 6]. 하지만 이 두가지 이론을 통합하여 연소불안정 상황에서 화염구조에 대한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 유입구 속도조건을 변화시킴에 따라 연소불안정 현상의 발생 및 각 조건에 따른 화염의 구조적 변화에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 모형 가스터빈 연소기

본 연구는 모형 가스터빈 연소기에서 수행되었으며 실제 가스터빈과 유사한 환경에서 실험이 수행될 수 있도록 공기의 경우 공기가열장치를 이용하여 673K까지 가열한 뒤 공급하게 된다. 예혼합 조건을 만족시키기 위하여 스윙 인젝

터가 사용되었으며 연소실 후단에는 길이 조절이 가능한 플러그 노즐을 설치하여 연소실 길이 변화에 따른 연소특성을 확인할 수 있도록 구성하였다. 본 실험의 경우 일정한 길이(1000mm)에서 수행되었다.

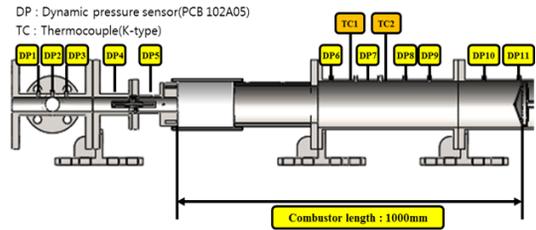


Fig. 1 Schematic of a model combustor

연소실에는 동압계측을 위하여 PCB 102A05 동압센서 11개를 설치하였고 그중 5개를 연소실 전단에 설치하여 상류로 전파되는 연소불안정 특성 또한 확인 하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 일정한 간격으로 동압센서를 배치하여 연소실 내부의 압력 분포를 확인할 수 있도록 하였고 추가적으로 열전대, 정압센서를 설치하여 실시간 연소 특성을 확인하였다.

2.2 스윙 인젝터

연료의 분사와 혼합성능은 배기배출물의 발생과 연소기 효율에 매우 중요한 인자로 이는 인젝터에 의하여 결정된다. 최근에 개발 생산되는 대부분의 가스터빈은 스윙 인젝터를 채택하고 있는 추세이다.

이런 스윙 인젝터를 사용하게 되면 혼합기의 거동에 영향을 미쳐 화염의 안정화에 지대한 공헌을 하는 내부 재순환영역 및 외부 재순환영역을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 내부 재순환영역은 연소된 고온의 가스를 연소기의 중앙부와 노즐쪽으로 이동시켜 혼합기에 열원을 공급하는 역할을 하게 되며 혼합기와 반대방향으로 움직임으로써 전단층을 형성하여 두 유동사이의 전단층으로 난류강도를 증가시키고 이를 통하여 혼합성능의 향상에 기여하게 된다.

본 장치에는 30°의 스윙 베인 각도의 axial

type의 스월 인젝터를 사용하였고 스월 베인은 10개, 연료가 분사되는 hole의 경우 1.2 mm 직경의 10개로 스월 베인 전단에서 유동에 수직한 방향으로 분사되어 예혼합 되도록 설계되어있다. 스월 효과의 정도는 접선방향의 모멘텀과 축방향 모멘텀의 비로 나타나는 S(Swirl Number)로 나타낼 수 있으며 본 실험에 사용된 스월러의 스월넘버는 약 0.42에 해당하게 된다[7].

2.3 OH 자발광 측정 및 화염구조 분석 방법

High speed ICCD 카메라와 OH필터를 이용하여 실험조건에서의 OH 자발광 이미지를 획득하였으며 이렇게 획득된 이미지의 경우 연소진동과 비교하기 위하여 ICCD 카메라의 트리거 신호와 연소 진동 데이터를 실시간으로 획득하였으며 이를 통하여 연소 진동과 자발광 이미지로 대표할 수 있는 열방출과의 섭동을 같은 시간 축에 도시하였다.

획득된 자발광 이미지는 3차원 정보가 누적된 것으로 아벨 역변환을 수행하여 2차원 단면정보의 화염을 획득하였으며 동압정보를 바탕으로 위상 평균된 이미지를 획득 할 수 있었다. 위상 평균된 2차원 이미지에서 화염을 정량적으로 분석하기 위하여 밝기 중심이라는 개념을 도입하였으며 이와 비슷한 개념으로 연소불안정 파트에 적용한 예를 논문 Kim의 논문에서 확인할 수 있다[8].

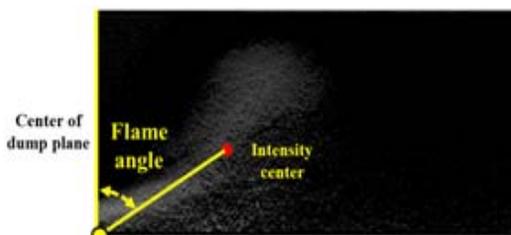


Fig. 2 Definition of Intensity center and flame angle

무게중심을 구하는 것과 같은 방식으로 각 픽셀에서의 밝기를 통하여 밝기 중심을 계산하였고 계산된 밝기중심과 덤프면 중앙이 이루는 각도를 화염각도로 정의하였다. 이렇게 정의된 화

염각도는 유동의 길이방향 속도성분과 반경방향 속도성분의 모멘텀 비를 나타내며 화염의 구조적 특성을 대표할 수 있는 인자로서 본 연구의 분석에 주요 인자로 활용 되었다.

2.4 실험조건 설정

실험을 수행한 모형 가스터빈 연소기의 화염 안정화 지도를 당량비, 연소실 길이, 유입구 혼합기의 속도조건을 바꾸어가면서 획득해 보았으며 Fig. 3와 같은 결과를 얻을 수 있었다. Y축의 경우 연소실 압력을 기준으로 한 압력섭동의 비를 나타내며 일반적인 가스터빈에서처럼 연소 진동이 연소실 압력의 3% 이상 되는 지점부터 연소 불안정 현상이라 정의 하였다. 상기와 같은 정의를 통하여 연소실험 결과를 분석해 본 결과 당량비의 변화에 따라 화염이 안정한 구간과 불안정한 구간이 발생하며 높은 당량비 구간에서 불안정 현상이 발생하며 낮은 당량비 영역에서의 화염 소멸 직전의 화염에서 연소불안정이 일어나는 연소기의 특성을 확인할 수 있었다.

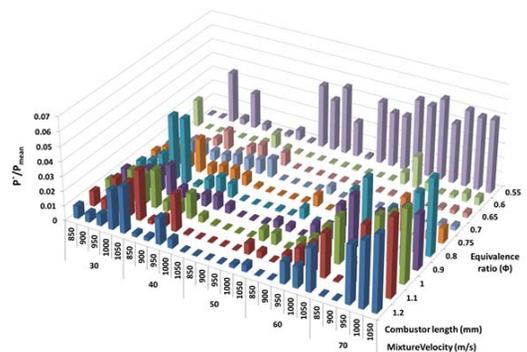


Fig. 3 Stability map

유입구의 혼합기 속도조건을 통하여 분석해본 결과 낮은 속도조건에서 연소불안정이 발생하였으며 중간 영역에서는 연소불안정 현상이 사라지고 높은 속도조건에서 다시 화염이 불안정해지는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 높은 속도 조건에서의 연소불안정 특성은 연소기의 불안정 모드와 관계하고 있으며 혼합기의 속도가 40

m/s의 불안정의 크기가 1/2정도의 낮은 크기의 연소불안정 특성은 또 다른 논문에서 소개할 예정이다[9]. 본 연구에서는 일정한 당량비 조건에서 연소실 유입구 속도조건 즉 출력을 변화시켜 가면서 화염의 불안정 특성을 확인하였으며 이를 자발광 및 레이저 계측을 통하여 정량적으로 분석해 보았다. 실험 조건의 경우 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental condition

Parameters	Values
Fuel	Natural gas (89.4% CH ₄)
Combustor Length (mm)	1000
Inlet Temperature (K)	673
Equivalence Ratio	1.2
Fuel-Air Mixture Velocity (m/s)	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70

3. 결과 및 검토

3.1 주파수 천이

유입구의 연료-공기 혼합기 속도조건을 30 m/s에서 70 m/s까지 변화시켜 가면서 실험을 수행하였으며 이 과정에서 계측된 동압정보를 바탕으로 연소불안정 현상에 대하여 분석해 보았다. 연소불안정 동압의 경우 덤프면에서 가장 가까운 6번째 동압센서를 통하여 분석하였으며 연소실 온도는 후단에 장착된 두 개의 열전대의 평균값으로 구하였다.

연소실 온도와 동압정보의 FFT결과를 바탕으로 각 속도조건에 대하여 도시하여 Fig. 4를 얻을 수 있었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 30 ~ 35 m/s 조건에서 연소불안정 현상이 발생하였고, 55 ~ 70 m/s 구간에서 또 다른 특성의 연소불안정 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 연소불안정 현상의 경우 음속에 대한 함수로 연소기 온도조건에 선형적으로 비례하며 높은 속도조건 불안정에서 그 경향이 잘

맞는 것을 확인할 수 있다. 하지만 낮은 속도조건인 불안정의 경우 연소실 온도가 낮음에도 불구하고 연소불안정 주파수가 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이런 두 가지 영역에서의 연소불안정의 차이점을 확인하는 것을 목표로 화염구조 분석 및 동압의 모드와 페이즈 분석을 수행하였다.

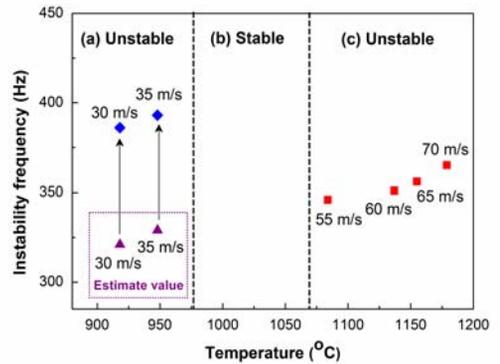


Fig. 4 Combustion instability frequency shifting results at various mixture velocity conditions

3.2 위상 평균된 자발광 이미지 및 Abel 변환

낮은 속도조건 불안정, 안정조건, 높은 속도조건인 불안정 화염을 대표할 수 있도록 30 m/s, 50 m/s 70 m/s의 혼합기 속도조건에서의 화염을 선택하였고, 각 조건에 대하여 OH 자발광 계측을 수행하였다. 계측된 자발광 이미지를 7번째 동압센서를 기준으로 위상 평균된 이미지를 획득하였으며 진동이 최대 위상인 지점을 0도로 정의하였고 30°간격으로 12장의 이미지를 획득하였다. 이렇게 획득된 위상 평균된 이미지에 대하여 Abel 역변환을 수행하여 화염의 구조적 분석을 수행하였다[10, 11].

낮은 혼합기 속도조건인 30 m/s의 불안정 화염의 경우 위상변화에 따라 화염의 밝기가 변화하며 화염 끝단에서의 발림현상이 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 안정조건인 화염의 경우 화염 밝기가 일정하며 화염의 구조적 변화도 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 높은 속도조건인 70 m/s의 불안정 화염의 경우

낮은 속도조건에서의 불안정 화염과 같이 위상변화에 따라 주기적인 밝기 변화를 확인 하였으며 상대적으로 화염의 길이방향 변화가 낮은 속도조건에서의 화염에 비하여 큰것을 확인할 수 있었다.

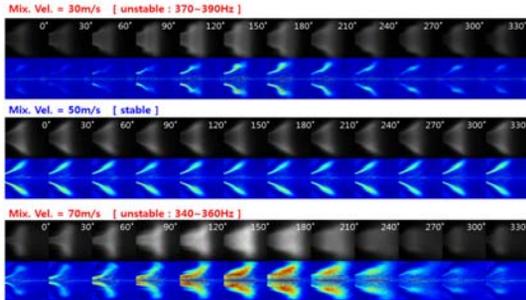


Fig. 5 OH chemiluminescence and Abel inverted images at 30, 50 and 70m/s mixture velocity conditions

3.3 화염구조 분석

앞에서 확인한 위상 평균된 Abel 역변환 이미지를 바탕으로 분석을 진행하였으며 불안정 현상에 따른 화염의 구조적 변화를 크게 두 가지, 화염각도의 변화와 화염의 길이방향 변화를 통하여 분석해 보았다. 연소실 내부의 압력 섭동을 기준으로 하여 연소실 내부에 형성되는 압력구배와 화염구조의 변화에 대하여 고찰해 보았다. 압력구배의 경우 연소실 전단에 위치한 5번 센서와 후단 가장 가까이 위치한 6번 센서의 동압 정보를 이용하였다.

높은 속도조건에서의 불안정화염의 경우 연소실 전단의 정압이 후단에 비하여 높은 값을 갖는 것을 계측을 통하여 확인할 수 있었다. Fig. 6의 (a)와 같이 전단 동압이 증가하는 위상 120 ~ 270 구간에 대하여 고찰해 보면 연소실 전단 압력은 동압만큼 증가하게 되고 후단의 경우에도 증가하지만 그 증가량이 상대적으로 적은 것을 예상할 수 있다. 즉 압력 구배가 상대적으로 커지게 되어 유량이 증가할 것이라 예상되며 이런 현상은 화염의 길이방향 변화 및 밝기가 크게 변하는 것을 통하여 확인할 수 있다. 반대로 연소실 전단 압력이 후단압력에 비하여 감소하는

구간을 확인해 보면 연소실 전단 동압이 후단 동압에 비하여 상대적으로 많이 감소하며 이로 인하여 연소실 내부에 형성되는 압력구배가 상대적으로 감소할 것이라 예상된다. 즉 전체적인 유동이 적어질 것이라 예상되며 이런 현상은 위상 평균된 자발광 이미지를 통하여 확인해 볼 수 있다.

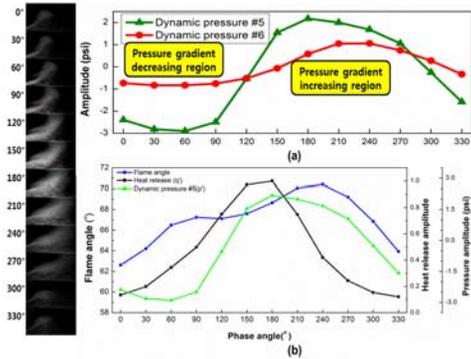


Fig. 6 Heat release, dynamic pressure, and flame angle change results at 70 m/s mixture velocity conditions.

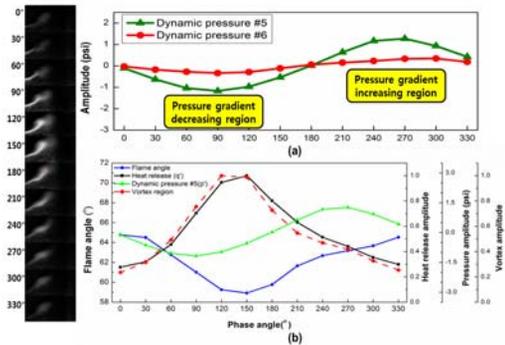


Fig. 7 Heat release, dynamic pressure, and flame angle change results at 30 m/s mixture velocity conditions

낮은 속도조건에서의 불안정 화염의 경우 Fig. 7의 (a)와 같으며 높은 속도조건에서의 화염과는 다른 거동을 확인할 수 있다. 우선 정압을 계측하였을 때 연소실 전단과 후단의 압력차이가 거의 일정하였다. 따라서 상대적으로 연소실 전단 동압이 후단보다 작아지는 구간에서 즉 상대적으로 압력구배가 낮아지는 구간에서 화염이 정체될 것

으로 예상되며 높은 속도조건에서 화염의 밝기가 줄어들었던 것과는 반대로 화염의 밝기가 평균적인 낮은 유량의 화염보다 밝아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 화염 끝단에서 와동구조가 발달하는 것을 확인할 수 있으며 이렇게 발달된 와동구조의 경우 연소실 전단압력이 증가하는 부분에서 유량증가로 인하여 뒤쪽으로 밀려가며 화염이 밝기가 약해지는 것을 확인할 수 있었다. 다시 말해서, 연소실 내부에 형성되는 압력구배를 통하여 화염의 길이방향 변화에 대하여 설명할 수 있으며 특히 낮은 속도조건에서의 화염의 경우 화염 끝단의 와동구조 형성과 같은 높은 속도조건에서의 화염과는 다른 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

화염각도변화를 중심으로도 분석을 진행해 보았다. 각 위상에 대한 화염각도와 자발광의 세기를 통하여 그래프를 도시해 보았으며, Fig. 6의 (b)에서 확인할 수 있듯이 화염각도의 변화와 열방출량의 변화 그리고 연소실에서 가장 가까운 5번째 동압센서의 거동이 적은 위상차를 보이며 순차적으로 진동하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉 이는 일반적인 열 음향학적 연소불안정을 일으키는 조건인 Rayleigh's criteria[12]를 잘 만족시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 데이터의 위상 차이를 통하여 열방출과 관련하여 야기된 섭동이 상류로 전파되어 압력과의 섭동을 야기하고 이런 압력과의 섭동이 화염각도의 변화를 야기하는 것을 확인할 수 있다. Candel의 논문을 통해서 압력섭동이 스윙러의 스윙넘버를 변화시켜 화염의 구조를 변화시킨다고 보고된 바 있다[4].

Figure. 7의 (b)에서 확인할 수 있듯이 낮은 속도조건에서의 불안정 조건에서 같은 분석을 수행해 보면 차이점이 발생하게 된다. 열방출과 압력 섭동 그리고 화염 각도의 변화가 발생하는 순서는 일치하지만 그 위상차이가 90° 이상이거나 거의 90° 에 가까운 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 열음향학적 연소불안정 현상과는 다른 특이한 현상이 계측 되었으며 이는 뒤에 있을 모드 페이즈 분석 파트에서 자세하게 다루어질 예정이다.

3.4 동압의 모드와 위상차 분석

앞에서 언급한 연소불안정 주파수 천이현상에 대한 원인을 분석하기 위하여 모드 페이즈 분석을 수행하여 보았다. 연소실에서 측정된 동압의 1초 평균 데이터를 이용하여 연소실 내부에 형성되는 정상파의 형태에 대하여 확인해 보았다. 이를 통하여 연소실 내부의 연소불안정이 연소실 길이방향의 1st 모드인지 2nd 모드인지 확인할 수 있으며 그 결과는 아래 Fig. 8과 같다.

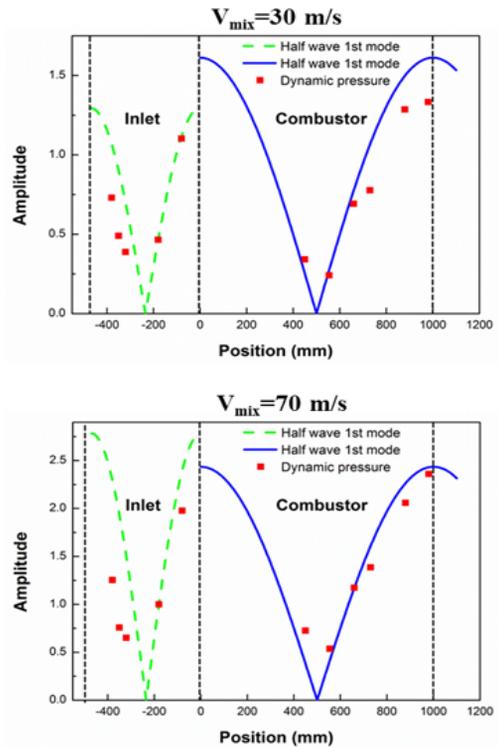


Fig. 8 Mode analysis at different inlet velocity conditions

Figure. 8에서 확인할 수 있듯이 낮은 속도조건과 높은 속도조건에서의 불안정 모드 모두 연소실 내부에는 1D longitudinal 1st 모드가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 즉 연소불안정 주파수 천이의 원인이 연소실 내부에 형성되는 연소불안정 모드 변화가 아니라는 것을 모드 분석을 통하여 확인할 수 있었다.

추가적으로 높은 속도의 불안정 조건과 낮은 속도조건의 불안정 조건에 대하여 계측된 동압 및 열방출과 정보를 이용하여 위상 차이를 확인해 보았다. 열방출과 정보의 경우 Highspeed ICCD 카메라를 통하여 획득된 자발광 정보를 모두 합하여 한 시점의 열방출과 정보를 계산하였고, 이를 같은 시간 축에 동압 정보와 함께 도시하여 위상 정보를 파악해 보았다. 동압 정보의 경우 앞선 길이방향 변화를 분석할 때 활용되었던 연소기에서 가장 가까운 5번, 6번 센서의 값을 사용하였다.

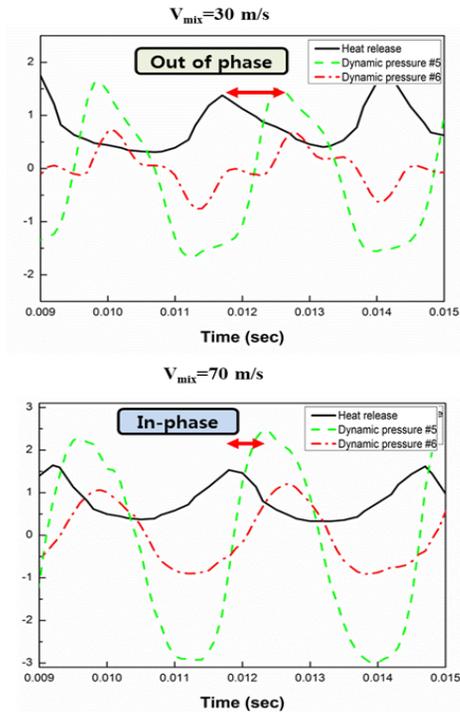


Fig. 9 Dynamic pressure and Heat release analysis at different inlet velocity conditions

Figure 9에서 확인할 수 있듯이 낮은 속도조건의 불안정의 경우 압력섭동과 열 방출과의 위상 차이가 90° 이상으로 열음향학적 불안정의 기준인 Rayleigh's criteria[12]를 만족시키지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 높은 속도조건의 불안정의 경우 열방출과와 압력섭동의 위

상차이가 90° 이내로 Rayleigh's criteria를 잘 만족 시키는 것을 확인할 수 있으며 이는 앞서 화염각도 분석에서 위상 평균된 이미지를 통하여 획득한 결과와 일치한다. 정리하면 낮은 속도조건의 불안정의 경우 열음향학적 조건을 충분히 만족시키지 못함에도 불구하고 상대적으로 강한 연소불안정 현상이 발생하였으며 이에 대한 다른 원인에 대하여 고찰해 보았다.

3.5 Strouhal number 계산

화염의 1초 평균이미지 및 아벨 변환된 이미지를 획득하였고 화염의 밝기 중심을 계산하였다. 이렇게 계산된 화염밝기 중심과 덤프면 중심과의 거리를 바탕으로 Strouhal number를 불안정 현상이 발생하였던 전체 유입구 속도조건에 대하여 계산해 보았다. 그 결과는 아래 Table 2와 같으며 낮은 속도조건의 불안정인 30 ~ 35 m/s 영역에서 Strouhal number가 상대적으로 1.5배정도 크게 계산됨을 확인할 수 있었다.

Table 2. Strouhal number calculation at various inlet mixture velocity conditions

Flame shape	Length (mm)	Velocity (m/s)	Freq (Hz)	Strouhal number.
	50.72	30	370	0.626
	54.64	35	393	0.614
	63.46	55	346	0.399
	66.13	65	356	0.362
	66.53	70	365	0.347

C Kulsheimer의 논문에서 Strouhal number가 증가함에 따라 작은 외란에도 vortex shedding 현상이 발생함을 확인할 수 있다[13]. 이 결과를 본 실험 분석 결과에 적용하여 보면 낮은 속도조건의 높은 Strouhal number는 작은 외부요인

이라 할지라도 Vortex shedding을 야기할 수 있으며 이런 와동 구조가 열 음향학적 불안정 메커니즘과 별개로 혹은 이에 더불어 불안정현상을 일으키거나 불안정 주파수에 영향을 끼치는 인자로 생각된다.

낮은 속도조건에서의 불안정의 경우 Fig. 5에서 확인 할 수 있듯이 화염끝단에서의 와동구조가 명확하게 확인되며 높은 속도조건에서의 불안정의 경우 그 섭동이 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 낮은 속도조건에서의 불안정 화염에서 와동 구조영역을 따로 분리하여 FFT 및 실시간 위상평균 된 섭동을 계산한 결과는 Fig. 7 (b)의 점선으로 확인할 수 있다. 이는 전체 화염을 통한 결과와 거의 일치하는 결과를 확인할 수 있다.

3.6 He-Ne 레이저 광흡수 계측

화염에 영향을 끼치는 와동구조에 대하여 정량적으로 분석을 해보기 위해서 레이저를 이용하여 그 섭동을 계측해 보았다. Fig. 10과 같이 He-Ne 레이저를 덤프면 후단 낮은 속도조건에서의 와동구조가 집중적으로 발달하는 지점(덤프면 중심기준 30 mm X 30 mm 지점)에 장치 PMT를 이용하여 그 밝기를 수광하여 시간에 따른 그 변화를 확인 해 보았다. 실험은 30 m/s, 70 m/s 각각의 조건에서 연소 전, 연소 장으로 나누어 시행되었다. 수광되는 신호세기의 변화는 연소기 내부의 밀도 변화로 인한 것이다.

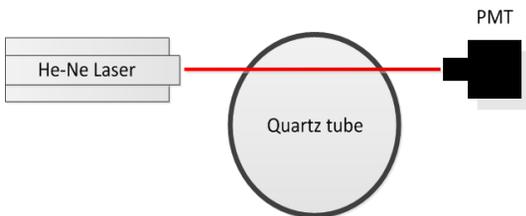


Fig. 10 Schematic diagram of laser diagnostics system

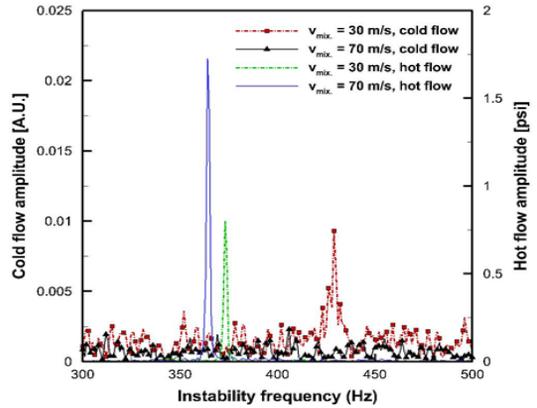


Fig. 11 Frequency analysis of He-Ne laser signal at hot and cold conditions

실험결과는 위 Fig. 11의 그래프와 같으며 우선 연소 전 조건의 두가지 속도조건에서의 레이저 섭동을 확인해본 결과 낮은 속도조건에서의 경우 430Hz 가량의 섭동이 발생하는 것을 확인할 수 있었고 높은 속도조건의 경우에는 신호의 섭동이 주파수대역에 따라 거의 일정하여 특성주파수가 나타나지 않았다.

연소장에서의 실험결과의 경우에는 각각의 섭동치가 실제 동압 및 열방출파를 통하여 계측되었던 연소불안정 주파수와 일정하며, 이를 통하여 화염의 국소적인 부분이 연소불안정 주파수와 일치하게 진동하고 있음을 확인할 수 있었다.

상기 내용으로 미루어 보아 낮은 속도조건에서의 경우 유체역학적으로 와동구조가 생기기 쉬운 조건으로 연소가 발생하지 않더라도 국소적인 와동구조가 형성되며 그 위치의 불안정 주파수가 430hz 가량임을 확인할 수 있었고 이런 유체역학적 특징이 연소상황에서 연소기내부에 형성되는 연소불안정현상에 영향을 끼치게 될 것임을 예상해 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 OH 자발광 및 레이저 계측기법을 이용하여 모형 가스터빈 연소기의 불안정 화염의 구조적 특징에 대한 연구를 수행하였다.

특히 유입구 속도조건을 변인으로 하여 실험을 수행하였으며, 낮은 속도조건과 높은 속도조건에서 연소불안정이 발생함을 확인할 수 있었다.

낮은 속도조건과 높은 속도조건에서의 연소불안정현상이 다른 특성을 나타내는 것을 FFT 및 연소실 온도 분석을 통하여 확인하였고 원인을 파악하기 위하여 추가실험 및 분석을 진행하였다. 연소불안정 화염의 화염구조 분석을 통하여 화염 각도의 변화의 경우 열방출과가 압력섭동을 야기하고 이렇게 야기된 압력섭동이 화염각도를 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, 페이즈 분석을 수행하였으며 낮은 속도조건에서의 화염의 경우 Rayleigh' criteria를 만족시키지 못하는 조건임에도 불구하고 연소불안정 현상이 일어나는 것을 확인하였다. 이에 추가적인 분석으로 Strauhal number 및 레이저를 이용한 cold, hot 섭동 계측을 수행하였고, 그 결과 낮은 속도조건에서의 경우 화염 끝단의 Vortex shedding이 생기기 쉬우며 실제 레이저를 이용한 계측 결과도 낮은 속도조건에서의 경우 연소 전 유동장에서 이미 섭동이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 낮은 속도조건에서의 연소불안정 현상에는 유체역학적인 와동 구조가 영향을 끼친다고 생각되며 이 영향으로 인하여 연소불안정 주파수가 상대적으로 높게 나타나는 것으로 예상된다.

하지만 본 실험의 경우 실제 열방출과가 계측된 지점과 압력이 계측된 지점이 동일하지 않다는 문제점이 있다. 연소실 온도를 바탕으로 거리를 보상하여 계산해본 결과 열방출과와 압력과 섭동의 위상차이가 현재에 비하여 80° ~ 90° 정도로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 가설 검증 및 정밀한 분석을 위해서는 열방출과 계측지점과 동일한 지점에서 압력 계측이 필요하며 추가적으로 PIV등의 레이저 계측 기법을 활용하여 와동구조가 연소불안정현상에 끼치는 영향에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(0498-20110009)과 지식경제부의 재원으로 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업(0420-20110006)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Timothy C. Lieuwen, "Investigation of combustion instability mechanisms in premixed gas turbines", Georgia Institute of Technology, Ph.D thesis, 1999, pp.1-52
2. 김민기, 박성순, 윤지수, 윤영빈, 윤한우, "발전용 GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기의 최적 연소조건 제어 및 프로그램 개발", 한국항공우주학회 추계 학술대회, 2010
3. 김민기, 이장수, 박성순, 이종근, 윤영빈, "모형 가스터빈 연소기에서의 연소 불안정 모드 분석에 관한 실험적 연구", 한국연소학회지, Vol.15, No.1, 2010, pp.12-21
4. P.palies, D.Durox, T.Schuller, S.Candel, "The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames", Combustion and Flame, 2010, pp. 1698-1717.
5. M.Stohr, I.Boxx, C.Carter, W.Meier, "Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor", Proceedings of Combustion Institute, 2011, vol 33, pp. 2953-2960.
6. 박성순, 김민기, 윤지수, 윤영빈, "모형 가스터빈 연소기에서 화염구조와 연소불안정 특성에 대한 실험적 연구" 한국추진공학회지, 15권 4호, 2011, pp.26-34
7. David g. Lilley, "Swirl flows in combustion", AIAA Journal, Vol.15, No. 8, 1977, pp.1063-1078
8. Deasik Kim, Jong Guen Lee, Bryan D.

- Quay, Domenic A. Santavicca, Kwanwoo Kim, Shiva Srinivasan, "Effect of Flame Structure on the Flame Transfer Function in a Premixed Gas Turbine Combustor", *Journal of Engineering of Gas Turbines and Power*, Vol. 132, 2010
9. 김민기, 윤지수, 황정재, 윤영빈, "모형 덤프 연소기에서 혼합기 유입구 길이 변화에 따른 연소불안정 특성에 대한 실험적 연구", 제 37회 한국추진공학회 추계 학술대회, 2011
10. N. Bouvet, C. Chauveau, I. Go'kalp, S.-Y. Lee, R.J. Santoro, "Characterization of Syngas Laminar Flames using the Bunsen Burner Configuration", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, pp.992-1005
11. Dash CJ, "One-Dimensionnal Tomography: a Comparison of Abel, Onion-Peeling and Filtered Back Projection Methods", *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, 1992, pp.1146-1152
12. J.W.S.Rayleigh, "The Theory of Sound-Vol. 2", Nabu Press, New York, 1945, pp.226
13. C Kùlsheimer, H Bùchner, "Combustion Dynamics of Turbulent Swirling Flames", *Combust. Flame*, Vol. 131, No. 2, 2002, pp.70-84