

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.6.067>

H₂/CH₄/CO 연료조성 변화에 따른 모형 가스터빈 연소기 불안정 특성에 대한 실험적 연구

윤지수^a · 이민철^{a,b} · 주성필^a · 김정진^a · 윤영빈^{a,*}

Experimental Study on Combustion Instability Characteristics of Model Gas Turbine Combustor at Various H₂/CH₄/CO Composition

Jisu Yoon^a · Min-Chul Lee^{a,b} · Seongpil Joo^a · Jeongjin Kim^a · Youngbin Yoon^{a,*}

^a School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

^b Korea Electric Power Corporation, Korea

*Corresponding author. E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

ABSTRACT

IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) system is candidates which can solve the environmental problems including global warming, since it can be easily combined with CCS(Carbon Capture System). In this research, combustion instability characteristics were studied at various fuel which are composed of H₂/CH₄/CO mixture. Mode analysis for instabilities observed experimentally was conducted and the linearly increasing tendency of frequency was observed as the hydrogen content in fuel increases.

초 록

IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)의 경우 CCS(Carbon Capture System) 시스템과의 결합을 통하여 지구온난화와 같은 환경문제를 해결할 수 있는 발전 방식의 하나로 여겨진다. 따라서 합성가스 연소특성에 대한 연구가 중요하며 본 연구에서는 H₂/CH₄/CO로 구성된 합성가스 조성을 바꾸어 가스터빈 연소불안정 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험과정에서 발생한 연소불안정에 대한 모드 분석을 수행하였고 연료 중 수소 비율 증가에 따른 주파수 천이 현상 또한 확인하였다.

Key Words: IGCC(석탄가스화 복합발전), Syngas(합성가스), Combustion Instability(연소불안정), Gas Turbine(가스터빈), Fuel Composition(연료조성)

Received 1 June 2013 / Revised 7 November 2013 / Accepted 15 November 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 30-31, 부산 해운대 한화리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

화석연료의 고갈과 엄격해지는 배기배출물 규제에 대처하기 위하여 신재생에너지에 대한 관심과 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 기존 연료의 청정화를 통한 에너지원의 다원화 노력 또한 함께 이루어지고 있다. 특히 발전 부문의 경우 근래 원자력 발전소의 노후화로 인한 잦은 기동 중단으로 전력 비수기에도 충분한 전력 예비율을 확보하지 못하고 있는 실정으로 기저부하를 담당할 수 있는 안정적인 전력공급원이 필수적인 상황이다. 또한 CO₂ 배출에 관한 규제가 국제 협약으로 점차적으로 강화되고 있는 실정으로 기존의 화석연료인 석탄을 사용하면서도 CCS기술과의 연계가 용이한 IGCC 플랜트에 대한 관심이 높아지고 있다.

IGCC 플랜트는 고온 고압의 조건에서 석탄을 합성가스로 변환하는 가스화 과정과 만들어진 합성가스를 이용하여 복합 발전을 수행하는 복합사이클 과정으로 나누어지며 발전 플랜트 초기 운용과정에서 발생하는 대부분의 문제는 복합발전 과정에서, 특히 연소기 관련부분에서 대부분 발생하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 안정적인 합성가스 연소기술 개발이 필수적이며 많은 연구가 이루어지고 있다.

합성가스 복합발전 시스템은 가스화기에 공급되는 석탄의 종류에 따른 연료 조성변화가 발생하게 된다. 이런 환경에서 안정적으로 구동할 수 있는 가스터빈 연소기 개발이 중요하며 합성가스 뿐만 아니라 SNG, Biomass, Land fill gas 등과 같은 다양한 대체연료를 활용할 수 있는, 연료 유연성이 높은 연소기에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 산업체 및 학계에서 다양한 연료 조성에 대한 연소특성 연구가 이루어지고 있으며 GE, Alstom, HHI 등의 같은 가스터빈 제작사들의 경우 다양한 연료에서 구동 가능한 가스터빈을 개발하기 위해 실제 스케일의 연소기에서 높은 수소 비율 연료에 대한 연소시험을 수행하고 있다[2-4]. GIT, Lawrence Berkely, Princeton 등의 연구 그룹에서는 H₂/CH₄/CO 비율 변화에 따른 화염속도와 같은 기초연구, 합성가스 연소기 배기배출물 특성 등의 응용연구를 수행하고 있으며, 풍부한 석탄자원으로 인하

여 IGCC 시스템에 관심이 높은 중국의 경우 중국과학원에서 합성가스에 대한 실 스케일 연소 시험을 통하여 배기배출물 및 연소 동특성에 대한 연구를 수행하고 있다[5-8].

본 연구에서는 GE7EA 1/3 축소형 연소기에서 H₂/CH₄/CO 연료조성의 합성가스 연소 시험을 수행하였다. 연료 성분 중 CH₄의 경우 실제 IGCC 플랜트에서 가스터빈 초기 기동 시 점화 및 저부하 영역까지 운전을 담당하게 된다. 즉 연료 변환 과정이 합성가스 가스터빈 운용과정에서 필수적이며 H₂/CH₄/CO 연료 조성 변화에 따른 화염의 불안정 특성에 대한 연구를 수행하였다.

실험과정에서 공기공급유량을 0.02 kg/s로 고정하였으며 연료의 입열량이 일정한 조건에서 합성가스 조성을 바꾸어가며 일정한 길이의 연소기에서 연소시험을 수행하였다. 40 kW와 50 kW 두 가지 입열량에 대한 연소시험을 수행하였으며 부하 증가에 따른 연소불안정 영역 변화를 확인하였다. 추가적으로 연소불안정 조건에 대한 모드분석을 수행하였으며 전체 불안정 조건에 대하여 불안정 주파수, 온도 변화의 상관관계를 확인하였고, 연료 중 수소비율증가에 따른 연소불안정 주파수 천이현상을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1 모형 가스터빈 연소기

합성가스 연소특성에 대한 연구를 수행하기 위하여 모형가스터빈 연소기를 제작하였다. GE7EA 연소기를 1/3 스케일로 축소하여 제작하였으며, 연료 노즐의 경우 실제 연소기의 연료노즐의 복잡한 파트를 간략화 하였고 부분 확산화염 방식으로 연소기를 제작하였다. 특히 연료는 직경 1.7 mm 14개의 홀을 통해서 공급되며 연료 공기의 혼합 길이는 3 mm이다. 음향학적 특성을 확인하기 위하여 연소실 전단에는 오피리스를 설치하여 음향학적 경계조건을 설정하였다. 또한 연소실 후단에 이동가능하며 연소기 단면적의 88%를 막는 플러그노즐을 장착하여, 연소

실 길이를 1110 mm ~ 1410 mm까지 변경이 가능하도록 구성하였다. 화염가시화를 위하여 130 × 143.7 × 200 mm의 석영유리관을 설치하였으며 석영 유리관 후단에는 이중관 구조의 water cooling 파트를 설치하여 국소적 과열로 인한 석영유리관 파손 및 열 손상을 방지하고자 하였다. 또한 연소현상 계측을 위하여 PCB사의 102A05 동압센서 11개를 설치하였고, 4개의 K-type 열전대를 설치하여 화염안정화지도 및 연소특성 분석을 수행하였다. 센서위치 및 연소기 구성에 대한 상세정보는 오른쪽의 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

2.2 합성가스 공급 설비

합성가스 연소특성 연구를 위하여 가스 혼합 및 공급 설비를 구축하였다. H₂, CO, CH₄, CO₂, N₂, C₃H₈ 6가지 가스를 공급할 수 있도록 구성하였으며, 상기 가스 중 N₂와 CO₂의 경우 향후 희석제에 따른 연소특성 변화에 대한 연구에 활용될 예정이다. 본 실험에서는 H₂, CH₄, CO 3가지 가스를 사용하여 연소시험을 수행하였으며, 각각의 유량의 경우 MFC를 이용하여 제어하며, RS-232통신이 가능한 제어 모듈을 장착하여 자동유량 제어가 가능하도록 구성하였다.

가스실에서 공급된 가스는 static mixer를 이용하여 균일하게 혼합되어 연소기로 공급되며, 안전을 위하여 가연성 가스공급라인에는 역화방지기를 설치하였다. 특히 가스 누설의 위험이 있는 가스 혼합기, 가스실, 연소기에는 가스감지기를 설치하여 안전한 환경에서 실험을 수행할 수 있도록 하였다.

2.3 실험조건

일반적인 가스터빈의 연소실의 경우 공기압축 과정에서 단일압축으로 인하여 공기온도가 상승하게 되며 그 온도는 일반적으로 700K정도로 공급된다[9]. 본 연구에서는 축소형 연소기의 한계 및 H₂연료를 사용하는 위험성을 고려하여 연소기로 공급되는 공기를 473.15 K로 가열하여 연소시험을 수행 하였다. 연소실길이의 경우 1410 mm 조건에서 연소시험을 수행하였으며 공기공

Table 1. Test condition.

| Parameters | Values |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Fuel | H ₂ , CH ₄ , CO |
| Combustor Length [mm] | 1410 |
| Heat Input [kW] | 40, 50 |
| Air Mass Flow Rate [kg/s] | 0.02 |
| Inlet Air Temperature [K] | 473.15(±20) |

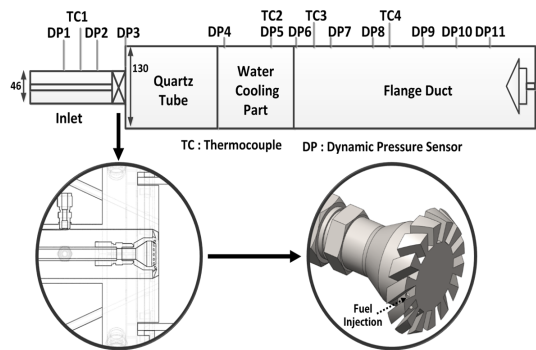


Fig. 1 Schematic of model combustor.

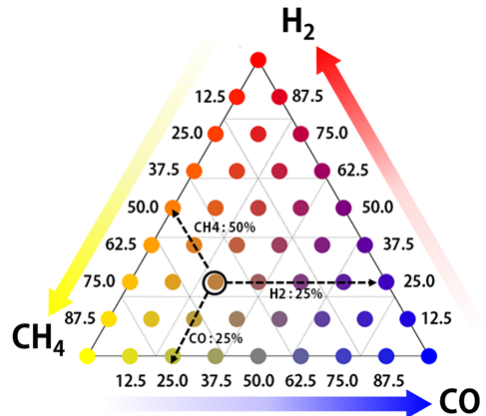


Fig. 2 Ternary diagram of fuel composition test.

급 유량 또한 0.02 kg/s로 고정하였고 40 kW와 50 kW 두 가지 입열량 조건에 대하여 H₂/CH₄/CO 세 가지 연료의 조성을 일정한 입열량 조건을 만족할 수 있도록 바꾸어 가며 연소시험을 수행하였다.

연료조성의 경우 Fig. 2에서 나타나 있는 것과 같이 각 입열량에 대하여 45가지 조건에 대하여 실험을 수행하였으며 연료 조성의 경우 12.5% 씩 바꾸어 가며 실험 하였다. 아래 그림에서 표시된 실험 조건의 경우 H₂ 25%, CH₄ 50%, CO 25% 연료 조성을 나타내며 나머지 실험조건 또한 같은 방법으로 확인 할 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 부하 변화에 따른 연소 불안정 현상

연료조성변화에 따른 연소 특성을 확인하기 위하여 40 kW와 50 kW 입열량 조건에 대한 연소시험을 수행하였다. 덤프면에 설치된 세번째 동압센서에서 획득한 압력섭동의 RMS값을 바탕으로 45개의 실험 결과를 등고선 지도로 Fig. 3에 도시하여 연료 조성변화에 대한 압력 변화 추이를 확인해 보았다. 그림에서 점선으로 표시된 부분이 연소불안정으로 판단한 영역이며 부하가 증가함에 따라 불안정 세기가 강해지고 연소불안정영역 또한 넓어지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 대부분의 연소불안정은 H₂/CH₄ 비율이 높은 조성의 연료 구간에 발생하는 것을 확인하였으며 그림에서 연료조성 중 CO 비율이 높아짐에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 확인하였다. 상기 연구 결과를 실제 시스템을 고려하여 적용해 보면, IGCC 발전소의 경우 초기 점화의 경우 CH₄를 이용하여 수행하게 되며 H₂/CO의 합성가스로 연료조성을 변화시키게 된다. 실험결과를 적용하게 되면 연료 천이를 고부하 과정에서 수행하게 되는 경우 중간과정에서 연소 불안정이 발생할 위험이 높으며 이를 회피하기 위해서 특정 연료조성으로 연료를 변화시키거나 저부하 영역에서 연료 천이 과정을 수행해야 할 것으로 예측된다.

연소불안정 현상에 대하여 정량적으로 확인해 보기 위하여 40 kW 입열량 조건에 대하여 압력 섭동 및 FFT를 통한 Peak 주파수를 확인하여 Fig. 4 (a)와 같이 정리하여 보았다. 일반적으로 연소불안정의 판단기준은 평균압력의 5% 압력

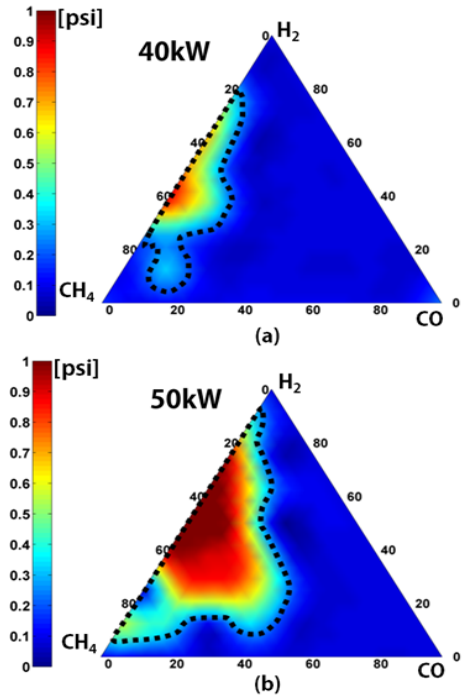


Fig. 3 Ternary stability map of the combustor (a) Heat input : 40kW, (b) Heat input : 50kW.

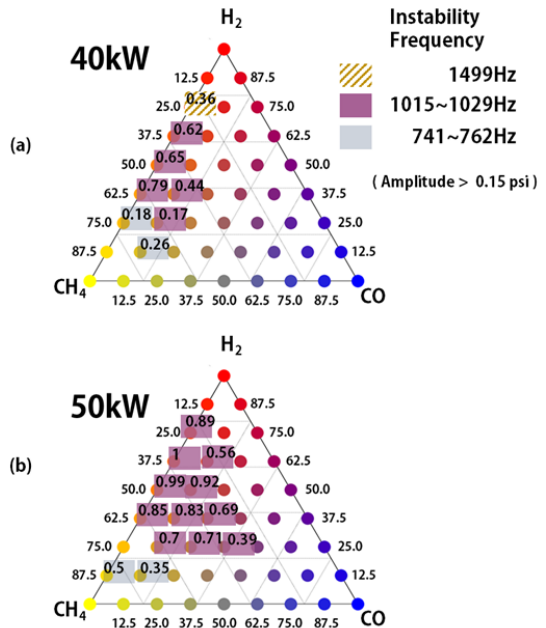


Fig. 4 Frequency classification of ternary stability map (a) Heat input : 40kW, (b) Heat input : 50kW.

섭동이며, 발전용 가스터빈에서는 안전을 고려하여 약 2%내외로 정하고 있다[10]. 본 연구에서는 연소실압력(1atm = 14.7psi)의 1%인 0.15psi 이상의 섭동을 연소불안정으로 정의하였다.

각 조건에 대한 주파수 분석을 수행한 결과 750 Hz, 1000 Hz 및 1500 Hz 세 영역으로 나눌 수 있었다. 연료 조성을 바탕으로 상기 영역을 분류하면, 연료 중 CH₄ 비율이 높은 구간에서 750 Hz 대역의 상대적으로 낮은 주파수가 확인되었으며 점차적으로 H₂ 비율이 높아짐에 따라 연소불안정 주파수가 높아지는 현상을 확인할 수 있었다.

50 kW 입열량 조건에 대하여 동일한 분석을 Fig 4 (b)와 같이 수행하였으며 그 결과 40 kW와 다르게 1500 Hz 대역의 불안정이 발생하지 않았으며 CH₄ 비율이 높은 연료 조성에서 750 Hz 대역의 불안정, H₂ 비율이 높아짐에 따라 1000 Hz 대역의 불안정이 발생하는 동일한 경향을 확인할 수 있었다.

3.2 불안정 조건에 대한 주파수 및 모드 분석

연소불안정 주파수에 대한 상세분석을 위하여 불안정 조건에서 각 압력센서 데이터에 대한 FFT 분석 및 RMS 동압 값을 바탕으로 모드 분석을 수행하였다. 40 kW 부하 조건에 대한 분석을 수행하였으며 세가지 연소불안정 영역을 대표할 수 있도록, 각 영역에서 가장 큰 압력섭동을 나타내는 조건을 선택하여 상세 분석을 수행하였다. 선택된 각 조건에 대한 세부 정보는 아래 Table 2에서 확인할 수 있다.

Table 2. Representative conditions for classification of mode analysis.

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|-----------------------------|--|---|---|
| Fuel Composition [%] | H ₂ : 12.5 CH ₄ : 75.0 CO : 12.5 | H ₂ : 50.0 CH ₄ : 50.0 CO : 0.0 | H ₂ : 75.0 CH ₄ : 25.0 CO : 0.0 |
| RMS Pressure Amplitude[psi] | 0.26 | 0.79 | 0.36 |
| Temperature [K] | 1195 | 1178 | 1188 |

연소실 압력섭동 정보는 덤프면에 위치한 세 번째 동압센서의 값을 이용하였으며 온도정보의 경우 연소실에 설치된 TC2 지점의 값을 이용하였다. 각 센서의 위치에 대한 정보는 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

750 Hz 영역의 불안정을 대표할 수 있는 case 1에 대한 분석을 수행하였으며 각 압력센서에 대한 FFT 결과는 아래 Fig. 5와 같다. 1개의 압력센서에서 계측한 동압정보를 바탕으로 FFT 그래프를 획득하였으며 주파수 섭동의 세기를 바탕으로 1st , 2nd Peak 주파수를 그래프에 표시하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 동압정보 계측 위치에 상관없이 모든 지점에서 741 Hz, 1482 Hz 가 1st , 2nd Peak으로 계측되는 것을 확인할 수 있었으며, 압력센서의 계측 위치 변화에 따라 주파수 간의 상대적인 크기 비율이 변하는 것을 확인할 수 있었다.

FFT 계산결과를 바탕으로 모드분석을 위하여 연소실에서 계측된 RMS 압력섭동 값을 각 센서 위치에 도시하여 Fig. 6의 (a) 그래프를 얻었으며

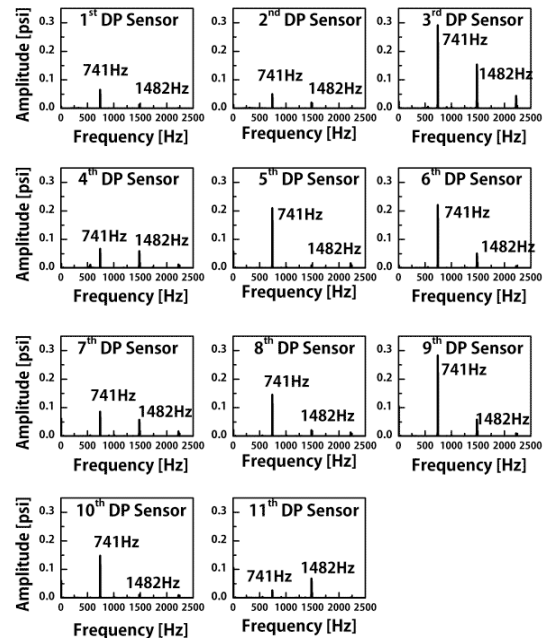


Fig. 5 FFT analysis result of each dynamic sensor at case 1 condition.

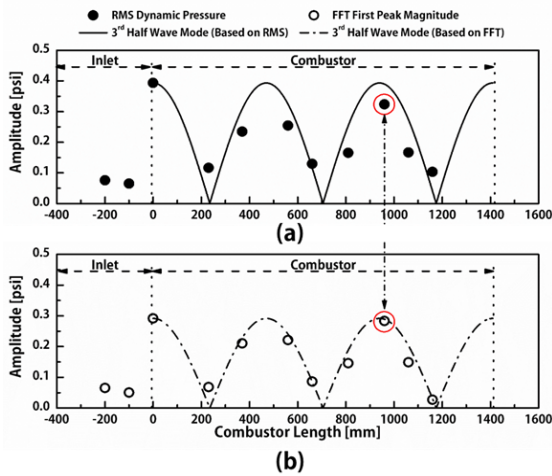


Fig. 6 Mode analysis based on (a)RMS pressure amplitude, (b) FFT first peak magnitude at case1.

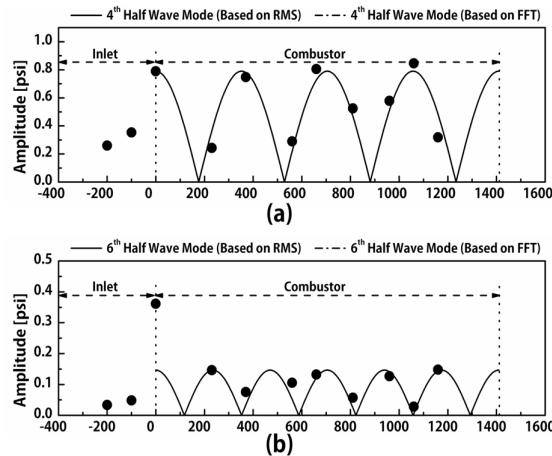


Fig. 7 Mode analysis based on RMS pressure amplitude (a) case 2 (b) case 3.

덤프면에 위치한 세 번째 압력센서 위치의 RMS 압력섭동의 크기를 기준으로 3rd half wave 모드를 연소실 길이에 맞게 도시한 결과 그림 (a)의 실선으로 나타났다. 두 값을 비교한 결과 실제 측정된 연소실 RMS 압력섭동이 이론적으로 예측한 연소실 내부 압력 변화, 즉 실선과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 즉 case 1의 경우 종방향 모드 중 3rd half wave 모드라는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 모드 분석의 정확도를 높이기 위한 방법으로 FFT 결과를 적용해 보았다. 연소불안정 분석과정에서 각 지점에서 측정된 압력섭동의 경우 가장 주요한 불안정 주파수 이외에 정수배 및 다양한 불안정의 섭동이 합쳐진 결과이다. 즉 분석과정에서 목표로 하는 불안정 주파수에 대한 섭동의 경향을 확인하기 위해서는 FFT 결과에서 목표 주파수의 진폭을 활용할 수 있을 것으로 예상하였다. Fig. 5에서 획득한 각 센서위치의 741 Hz의 진폭을 Fig. 6의 (b)의 원으로 도시하였다. 기존에 RMS 압력값을 바탕으로 수행한 분석에서와 같이 덤프면에서의 압력섭동을 기준으로 3rd half wave 모드를 점선으로 도시하였으며 그래프 (a), (b)를 비교해 보면 붉은색 원으로 표시한 부분에서 두드러지게 확인할 수 있듯이, FFT 진폭을 바탕으로 한 모드 분석에서 측정된 데이터 값과 이론적으로 예상한 값이 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 즉 일정한 주파수에 대한 모드를 분석하는 경우에는 압력센서에서 측정된 RMS값이 아니라 각 센서에 대한 FFT를 먼저 수행하고 목표 주파수의 진폭을 통하여 모드 분석을 수행하는 것이 더욱 정확한 결과를 나타낼 것으로 예상된다. Case2와 Case3에 대하여 동일한 분석을 수행하였으며 Case1에서와 같이 종방향 모드의 4th half wave 모드와 6th half wave 모드가 발생하는 것을 Fig. 7을 통하여 확인할 수 있었다.

Table 2에 정리된 세 가지 조건에 대하여 연소실에서 측정된 불안정 주파수의 모드를 예측하였으며, 실제 측정된 온도 및 연소실 길이를 바탕으로 이론적으로 예상되는 불안정 주파수를 계산하여 실제 압력섭동을 통하여 측정한 불안정 주파수와 아래 Table 3과 같이 비교하여 보았다. 측정값을 이용하여 계산된 불안정 주파수의 경우, 실제 압력센서에서 측정된 값에 비하여 낮게 계산되는 것을 확인할 수 있었으며 주파수 차이는 4 Hz~39 Hz 정도 범위였다. 측정된 온도가 연소실 한 지점에 대한 값인 점을 고려하면, 각 조건에 대한 모드를 잘 파악하였으며 불안정 주파수 또한 근사하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 3. Measured and calculated frequency comparing at each case.

| | Case1 | Case2 | Case3 |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Estimated Mode | 3 rd half wave mode | 4 th half wave mode | 6 th half wave mode |
| Calculated Frequency [Hz] | 737 | 976 | 1470 |
| Measured Frequency [Hz] | 741 | 1015 | 1499 |

3.3 연소불안정 주파수 천이 특성

40 kW와 50 kW에서 계측된 연소불안정 조건에서 연소실 온도와 연소불안정 주파수의 상관관계에 대하여 Fig. 8 과 같이 도시하였다. 부하 조건에 따라 40 kW의 경우 연소실 온도가 상대적으로 낮기 때문에 그래프의 왼쪽 아래 부분에 형성되는 것을 확인하였고 50 kW조건에서의 불안정의 경우 오른쪽 위쪽으로 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

연소실 온도가 증가 하게 되면 아래의 Eq. 1 과 같이 음속이 증가하게 되며 이렇게 증가한 음속은 닫힌 관내의 공진 주파수에 대한 Eq. 2 에 적용하면 음속의 증가로 인하여 선형적으로 연소 불안정 주파수 또한 증가하게 된다. 즉 연소실 부하 및 연료조성에 따른 연소실 온도 증가에 따라 연소불안정 주파수가 증가하게 된다.

$$c = \sqrt{\gamma RT} \tag{1}$$

$$frequency = \frac{nc}{2L} \quad (n = 1, 2, 3..) \tag{2}$$

본 연구에서도 동일한 경향을 확인하였으며 특히 연소 중 H₂ 비율을 바탕으로 분석을 수행한 결과 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 H₂ 비율이 증가함에 따라 연소불안정 주파수가 증가하는 경향이 40 kW와 50 kW 전체 입열량 영역에서 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 전체 실험은 동일한 연소실 길이에서 수행되었기 때문에 수소 비율의 증가가 화염의 속도 및 화염구조에 영향

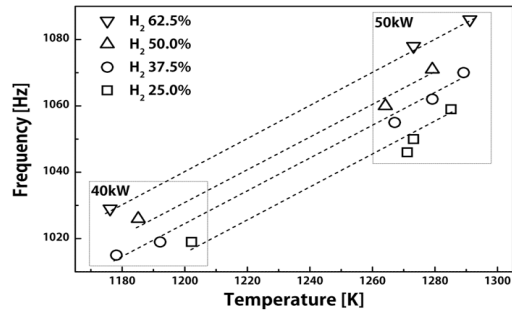


Fig. 8 Combustion instability frequency shifting results at various fuel composition.

을 미치게 되어 연소실 온도와 별개로 연소 불안정 주파수 변화에 영향을 끼치는 것으로 생각 된다. 향후 연구 과정에서 상기 조건에 대한 화염가시화와 같은 추가적인 실험을 통한 정성적인 분석 및 연료조성 변화에 따른 화염속도 비교와 같은 정량적인 분석을 수행할 예정이다.

4. 결 론

합성가스 연료조성 변화에 따른 연소불안정 특성을 파악하기 위하여 일정한 연소실 길이, 온도 및 공기유량 조건에서 연소시험을 수행하였으며 각 조건에 대한 연소불안정 주파수 분석 및 모드 분석을 수행하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 입열량이 증가함에 따라 연소불안정 영역이 증가하며 연소불안정 세기 또한 강해지는 경향을 확인할 수 있으며 CO 비율이 낮은 연료 조성, 즉 H₂/CH₄비율이 높은 연료 조성에서 연소 불안정 현상이 발생하였다. 본 결과를 바탕으로 할 때에 실제 가스터빈을 다양한 연료조건에서 운용하는 경우 연료 천이과정에서 연소불안정이 발생할 위험이 높으며 이를 해결하기 위한 회피 프로세스가 필요함을 확인할 수 있었다.

2) 40kW 입열량 조건에 대하여 불안정 주파수를 기준으로 세 가지 연소불안정 영역을 분류하였고 각 조건에 대하여 FFT 및 모드분석을 수행하였다. 또한 FFT결과를 바탕으로 불안정 모드

를 예측하였으며 case 1의 경우 3rd half wave mode, case 2의 경우 4th half wave mode 그리고 case 3의 경우 6th half wave mode를 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 즉 기존의 연소불안정 현상이 대부분 길이방향에 대한 1st half wave mode를 만족시키던 것에 비하여 연료 조성의 변화로 인하여 동일한 불안정 음향모드 안에서 높은 차수의 고주파 연소불안정이 발생 하는 현상을 확인할 수 있었다. 추가적으로 모드 분석과정에서 목표 주파수의 주파수 도메인의 진폭을 활용하는 경우 RMS 값을 통한 분석보다 이론적인 예측값과 유사함을 확인하였다.

3) 전체 불안정 조건에 대하여 연소불안정 주파수 및 연소실 온도에 대하여 도시한 결과 연료 중 수소비율이 증가함에 따라 연소불안정 주파수가 증가하는 경향을 발견하였으며, 그 원인에 대하여 추가적인 분석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2011-0016455)과 지식경제부의 재원으로 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업(2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

1. Jones, R. M. and Shilling, N. Z., "IGCC gas turbines for refinery applications", *GE Power Systems*, GER-4219
2. York, W. D., Ziminsky W. S. and Yilmaz, E., "Development and testing of a low NOx hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 135, No. 2, 2013.
3. Mayer, C., Sangl, J., Sattelmayer, T., Lachaux, L. and Bernero, S., "Study on the operational window of a swirl stabilized syngas burner under atmospheric and high pressure conditions," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 134, No. 3, 2012.
4. Dodo, S., Asai, T., Koizumi, H., Takahashi, H., Yoshida, S, Hiroshi Inoue, "Performance of a multiple-injection dry low NOx combustor with hydrogen-rich syngas fuels," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 135, No. 1, 2013.
5. Natarajan, J., Kochar, Y., Lieuwen, T. and Seitzman, J., "Pressure and preheat dependence of laminar flame speeds of H₂/CO/CO₂/O₂/He mixtures," *Proc Combust Inst*, Vol. 32, pp. 1261-1268, 2009.
6. David Littlejohn, Robert K. Cheng, D. R. Noble, T. Lieuwen, "Laboratory investigations of low-swirl injectors operating with syngases," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 132, No. 1, 2010.
7. Burke, M. P., Chaos, M., Dryer, F. L. and Ju Y., "Negative pressure dependence of mass burning rates of H₂/CO/O₂/diluent flames at low flame temperatures," *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 4, pp. 618-631, 2010.
8. Song, Q., Fang, A., Xu, G., Xu, Y. and Huang, W., "Experimental investigation of thermoacoustic oscillations in syngas premixed multi swirler model combustors," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*, No. 2, GT2009-59882, pp. 669-678, 2009.
9. Kehlhofer, R., Rukes, B., Hannemann, F. and Stirnimann, F., "Combined-Cycle Gas Steam Turbine Power Plants," *PennWell*, 2009.
10. Oh, J. and Yoon, Y., "Combustion Instability in Gas Turbine Engines," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 63-77, 2008.