

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.5.054>

부분 예혼합 가스터빈 연소기에서의 비연소 전달함수 계측으로부터의 화염전달함수 특성 파악

주성필^a · 김성현^a · 윤지수^a · 여재익^a · 윤영빈^{a,b,*}

A Study of the Flame Transfer Function Characteristics using Cold-flow Transfer Function in a Partially Premixed Model Gas Turbine Combustor

Seongpil Joo^a · Seongheon Kim^a · Jisu Yoon^a · Jai-ick Yoh^a · Youngbin Yoon^{a,b,*}^aDepartment of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea^bInstitute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Korea*Corresponding author. E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

ABSTRACT

In order to identify the characteristics of the flame transfer function gain, cold-flow transfer function was introduced, which is the part of the combustion instability research. Nitrogen and carbon dioxide was used to obtain the cold-flow transfer function and input/output variables was measured by hot wire anemometry. Density and fluid flow rate affect the cold-flow transfer function gain and peak frequency. In addition, acoustic resonance frequency affects the peak frequency of gain in the fuel feeding line.

초 록

연소불안정 연구의 일환인 화염전달함수에서 나타나는 gain의 특성을 파악하기 위하여 비연소상태에서의 전달함수를 도입하여 화염전달함수에서의 특성과 비연소전달함수의 특성에 대한 원인을 파악하고자 하였다. 비연소 전달함수를 획득하기 위하여 질소와 이산화탄소를 활용하였으며, 입력값과 출력값을 계측하기 위하여 열선풍속계를 이용하였다. 비연소 전달함수에서의 gain과 주파수의 peak는 비활성기체의 밀도와 유량에 대하여 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한 연료공급라인에서의 음향학적 공진주파수가 peak 주파수에 영향을 주는 것을 확인하였다.

Key Words: Flame Transfer Function(화염 전달함수), Cold-flow Transfer Function(비연소 전달함수), Gas Turbine Combustor(가스터빈 연소기), Combustion Instability(연소불안정)

Received 7 March 2017 / Revised 7 June 2017 / Accepted 13 June 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

ICAO : International Civil Aviation Organization

ACEP : Committee on Aviation Environmental
Protection

CTF : Cold-flow transfer function

FTF : Flame transfer function

S_N : Swirl number

HWA : Hot wire anemometry

u' : Velocity fluctuation

\bar{u} : Mean velocity

\bar{q} : Mean heat release rate

q' : Heat release rate fluctuation

n : Gain

τ : Phase

1. 서 론

세계 에너지 기구(IEA)에서는 점차 고갈되어 가는 화석연료와 대기환경의 엄격한 규제에 인하여 대체연료의 개발 및 기존 발전장치에 대한 효율증대가 새로운 에너지 시대에 대한 근본적인 대책이라고 시사하였다[1]. 이를 위하여 해상 풍력, 태양열에너지 등 대체에너지에 대한 수요가 급속도로 커졌으며, 대형 가스터빈 제작사에서는 새로운 형태의 가스터빈 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. GE에서는 다양한 연료에서 활용 가능한 가스터빈의 개발에 앞장서고 있으며, 지멘스의 경우 RDS (Remote Diagnostic Service)라는 자체 데이터를 분석할 수 있는 시스템을 마련하여 자체적으로 시스템 최적화에 몰두하고 있다[2].

대기환경 측면에서는 국제민간항공기구(ICAO)의 환경규제위원회(CAEP)에서 NO_x 등의 주요 대기오염 물질에 대한 규제(CAEP/2, CAEP/6 등)를 매년 새롭게 제정하고 적극적으로 적용하고 있다. 최근에는 중소형급 민간항공기 엔진에 대하여 CAEP/8 규제를 시행하였다[3]. 즉, 대기환경 규제를 만족하기 위해서는 연소시스템에 대한 전반적인 기술이 반드시 수반되어야함을 역설하고 있다. 항공용 가스터빈 엔진의 경우 무게 및 공간에 대한 제약이 많아 대기환경 오염

물질에 대한 촉매장치 등의 추가 장치를 설치하기 매우 어려운 실정이다. 즉, 대기오염 물질에 대한 저감을 위해서는 제한된 코어엔진 내에서의 친환경 연소기술이 반드시 필요하다.

기본적으로 NO_x 등의 대기환경을 저감하기 위해서는 연소장내에서의 온도가 낮은 상태에서 연소가 이루어져야하는데, 이를 위해서는 연료-공기의 상대적인 비율인 희박 연료 연소조건(fuel lean)에서 연소 환경이 이루어져야한다. 또한 연소장 내에서의 균일한 온도분포가 NO_x를 저감하는데 유리하기 때문에 국소적으로 화염의 온도가 높게 형성되는 확산화염의 형태가 아닌 균일한 온도분포를 갖는 예혼합 연소기를 채택하여 활용하고 있다. 하지만 희박 연료 연소조건과 예혼합 연소기는 화염역화 및 연소불안정에 매우 취약한 연소 형태이기 때문에 이를 제어하기 위한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다 [4-6].

연소불안정은 연소장에서의 압력섭동과 동압 섭동의 간섭 때문에 일어나는 현상으로 강한 화염의 떨림과 강한 동압섭동이 발생하여, 연소불안정이 강하게 발생하는 경우 연소기 라이너의 소손으로 직결되는 중요한 문제이다. 그렇기 때문에 이러한 연소불안정이 발생하는 연소환경에 대한 예측 및 연소불안정이 발생하였을 때, 이를 저감하는 연구 또한 많은 연구진들에 의하여 진행되고 있다[7].

화염 전달함수는 가스터빈 연소기라는 블랙박스에 입력값과 출력값에 대한 전달함수로 정의가 되며 입력값은 연료나 공기의 섭동값(u'), 출력값은 화염의 섭동값(q')으로 계측할 수 있다. 화염 전달함수는 복소수 형태로 표현이 되는데 복소수에서의 실수부는 입력값이 출력값에 미치는 증폭값(gain)을 의미하며 허수부는 시간지연(phase)를 의미한다. 이러한 화염 전달함수는 연소불안정을 예측하는 코드의 입력값으로 사용이 되며 연소기의 특성을 파악할 수 있는 계측값으로 활용된다. 관련 연구로는 GE global research의 Preetham 연구진은 화염전달함수에 대하여 수학적으로, 컴퓨터를 이용한 해와 실험적으로 획득한 해가 높은 일치도를 보이는 것을 확인하

였으며[8], CNRS의 Candel 연구팀은 예혼합연소에서 화염전달함수와 화염 묘사함수를 구하였고 이전 연구에서 밝혀낸 LES를 이용한 CFD 해석 결과와 매우 잘 일치하는 연구 결과를 발표하였다[9]. 국내에서는 서울대학교의 Yoon 연구팀에서 수소와 메탄이 섞인 연료조성에서 연소 불안정의 주파수가 수소의 연료조성이 높아질수록 고주파로 전이하는 현상과, 해당 조건에서 화염전달함수를 계측하는 연구를 수행하였다. 하지만 화염전달함수에서 나타나는 특성에 대한 원인을 규명하지 못하는 한계가 있었다[10].

본 연구에서는 부분 예혼합 연소기를 채택하고 있는 가스터빈 연소기에서 화염전달함수에서 나타나는 특성에 대한 원인을 파악하고자 하였다. 이러한 화염전달함수에서 나타나는 특성의 원인이 화염에 직접적인 영향을 받고 있다고 판단하여 노즐의 특성을 간접적으로 확인할 수 있는 비연소 전달함수를 도입하여 화염전달함수에서 나타나는 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 비연소 전달함수를 획득하기 위하여 반응에 참여하지 않는 비활성 기체인 질소와 이산화탄소를 활용하여 비연소 전달함수를 계측 및 계산하였다. 이때 비연소 전달함수의 입력값과 출력값은 가진기에서 발생한 가진을 열선풍속계로 계측하여 계산에 활용하였다.

2. 실험 방법 및 조건

2.1 실험장치

본 연구의 선행연구인 화염전달함수를 계측하기 위한 가스터빈 연소기는 Fig. 1과 같다.

화염전달함수에서 연료의 가진을 주기 위하여 Fig. 2과 같은 기계식 가진 장치인 사이렌을 이용하여 연료에 대한 속도 섭동을 주어 화염전달함수에서의 입력값을 사용하였다.

화염전달함수는 입력값이 출력값에 미치는 영향만을 고려한 함수이기 때문에 외란에 대하여 독립적으로 시스템이 구성되어야 한다. 이를 위하여 연소기를 음향학적으로 열어두어 연소시에 발생하는 self-excited 불안정에 대한 효과를 제거

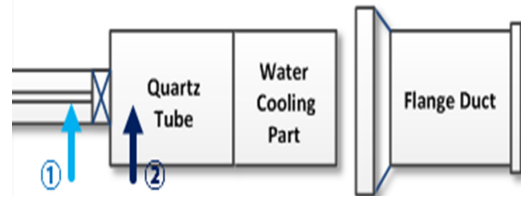


Fig. 1 Flame transfer function measurement system in a model gas turbine combustor.

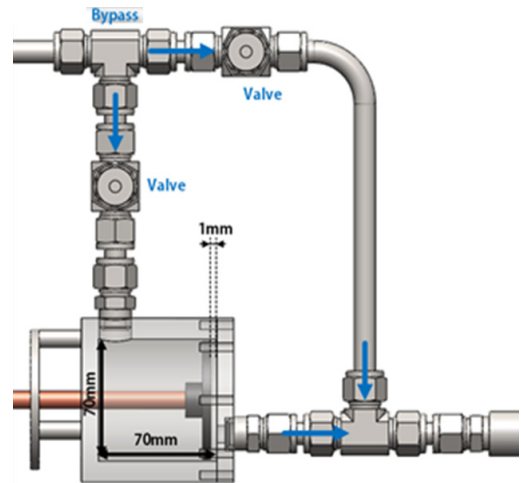


Fig. 2 Fuel modulation system(siren).

하고자 하였다.

비연소 전달함수는 비연소상태에서 노즐에 대한 특성을 파악하는 실험으로 비연소전달함수를 획득하였을 때 연소기 노즐의 특성을 파악할 수 있을 뿐 아니라 화염전달함수에서 나타나는 특성에 대한 원인을 파악할 수 있는 함수이기도 하다. 비연소 전달함수를 획득하기 위하여 입력값은 화염전달함수에서 사용했던 가진기를 사용하였고, 출력값은 연소기 노즐 직후단에서의 공기 속도의 섭동값을 활용하였다. 입력값과 출력값은 모두 HWA (Dantec dynamics 54T42, MiniCTA)기법을 활용하였다. 비연소 전달함수를 위하여 비반응 기체인 질소와 이산화탄소를 활용하였고, 가진은 0 Hz부터 1000 Hz까지 가능하도록 시스템을 구성하였다.

실험에 사용된 노즐은 공기에 대하여 연료가 45도 각도를 갖는 베인에서 횡단유동(jet in cross) 형태로 분사가 되는 형태의 부분 예혼합

노즐이며, 예혼합거리는 약 3 mm의 매우 짧은 예혼합 거리를 갖는다. 하지만 0.8의 매우 강한 선화강도를 갖기 때문에 매우 짧은 예혼합거리를 갖음에도 불구하고 화염이 안정적인 형태로 연소가 된다.

화염전달함수는 Eq. 1과같은 형태로 구성이 되며, 비연소 전달함수는 Eq. 2와 같이 정의된다.

$$FTF = \frac{(\bar{q}'/\bar{q})_{flame}}{(\bar{u}'/\bar{u})_{fuel}} \quad (1)$$

$$CTF = \frac{(\bar{u}'/\bar{u})_{nozzle}}{(\bar{u}'/\bar{u})_{fuel}} \quad (2)$$

즉, 화염전달함수는 가진기에서의 유동섭동이 화염의 섭동에 미치는 영향을 파악하기 위한 함수이며, 비연소 전달함수는 같은 시스템에서 화염전달함수에 영향을 미치는 공급계통에 대한 특성을 파악할 수 있는 함수이다. 이러한 가진기는 구멍이 난 원판이 회전하며 유로와 일치하는 지점에서는 유동이 흐르며, 일치하지 않는 지점에서는 흐르지 않는 형태로 유동의 속도섭동을 일으키게 된다. 본 연구에서 사용된 가진기는 최소 1 Hz 단위까지 제어가 가능하도록 구성하였다.

2.2 실험조건

비연소전달함수의 실험조건은 선행연구에서 획득한 화염전달함수와 비교를 위하여 화염전달함수 획득을 위하여 선택하였던 공기유량변화, 당량비 변화, 수소비율 변화에 사용된 공급연료 유량을 비활성기체의 유량으로 치환하여 사용하였다[10]. 또한 본 연소기의 노즐은 횡단유동노즐을 사용하였기 때문에 연료공급시스템에 절대적으로 지배받는 형태로 구성이 되어 공기는 공급하지 않고 연료라인에서의 유동섭동만 고려하여 실험을 수행하였다. 비활성기체는 속도에 직접적으로 영향을 미치는 밀도의 조성이 서로 다른 질소와 이산화탄소를 사용하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Test condition.

| Transfer function | | FTF | | | | CTF |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------------|
| | | % | | slpm | | |
| Test condition | | | | | | |
| U _{air} 1100 slpm | | H ₂ | CH ₄ | H ₂ | CH ₄ | N ₂ , CO ₂ |
| | | 25 | 75 | 20 | 61 | 81 |
| | | 50 | 50 | 51 | 51 | 102 |
| | | 75 | 25 | 106 | 35 | 141 |
| φ= 0.55 | U _{air} 963 slpm | 50 | 50 | 45 | 45 | 90 |
| | U _{air} 1238 slpm | 50 | 50 | 58 | 58 | 116 |
| U _{air} 1100 slpm | φ= 0.45 | 50 | 50 | 42 | 42 | 84 |
| | φ= 0.65 | 50 | 50 | 60 | 60 | 120 |

*slpm : Standard liter per minute

*U_{air} : Air flow rate

*φ : Equivalence ratio

3. 실험 결과 및 검토

3.1 화염전달함수 - 비연소전달함수 비교

본 연구는 화염전달함수에서 나타나는 특성에 대한 원인을 파악하고자 비연소 전달함수의 개념을 도입하였다. 이를 위하여 비연소전달함수에서의 유체의 유량은 화염전달함수에서 사용된 연료의 유량과 동일한 조건에서 실험을 수행하였고 그 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 (a) 그래프는 화염전달함수의 gain값이며, (b) 그래프는 비연소전달함수의 gain 그래프이다. 수소연료의 비율에 따른 화염전달함수의 gain 특성을 보여주고 있는데, 수소의 비율이 증가하면서 화염전달함수의 gain이 감소하는 특성을 보여 주고 있다. Yoon 등은 이러한 현상이 수소화염이 갖는 특성에서 기인한 것이라고 기술하였다. 수소화염

은 매우 빠른 화염전파속도로 인하여 매우 짧은 화염이 형성이 되며 외란에 영향을 크게 받지 않는 강인한 화염의 특성을 갖는다. 이러한 수소 화염의 특성이 연료가진에 영향을 크게 받지 않아 이러한 특성을 갖는다고 하였다.

비연소 전달함수는 화염전달함수와 그 경향성이 매우 유사하게 나타났으며, gain 값이 1보다 크지 않은 점은 화염에 의하여 증폭되지 않은 비연소상태에서의 전달함수라는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 비연소 전달함수에서는 화염 전달함수와 유사하게 약 50 Hz 부근에서 peak 이 생기는 것을 확인할 수 있으며, 300 Hz 부근에서도 비슷한 경향성을 확인할 수 있다. 비연소 전달함수에서는 수소가 많은 연료조성에서 마찬가지로 gain이 낮게 나타나는 특성을 확인할 수 있는데 수소비율이 많은 조건이 상대적으로 연료라인에 흐르는 유체의 유량이 많다. 즉 전체적인 유량이 증가할수록 관내의 유속이 빠르기 때문에 가진에 대한 반응이 상대적으로 느리다는 것을 의미한다. 즉 화염전달함수에서 수소의 비율이 높은 연료조성에서 gain이 낮게 나타나는 것은 단순히 수소의 화학적 특성 뿐만이 아니라 관내의 유량과도 직접적으로 연관이 있는 변수임을 간접적으로 확인할 수 있다.

3.2 서로 다른 기체에서의 비연소전달함수 비교

Fig. 4는 질소와 이산화탄소를 활용하여 비연소 전달함수를 계측한 결과이다. 이산화탄소를 활용한 비연소 전달함수에서도 질소를 활용한 비연소 전달함수와 유사한 특성이 나타났다. 마찬가지로 50 Hz와 부근에서 gain에 대한 peak가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이산화탄소를 이용한 비연소 전달함수에서는 300 Hz보다 낮은 약 250 Hz 부근에서 peak이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 질소를 이용한 전달함수에서와 마찬가지로 유량이 증가할수록 gain의 특성이 낮아짐을 확인할 수 있는데 이는 3.1에서 제시한 관내의 유량증가에 따른 유속의 증가로 확인할 수 있다. 이러한 유속의 증가는 질소와 이산화탄소에 대한 물질량의 차이에 따른 기체의 모멘텀에 의한 차이임을 확인할 수 있다. 질

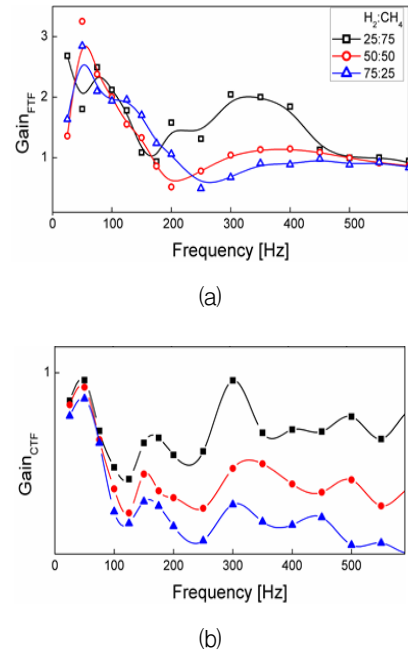


Fig. 3 Comparison between (a) flame transfer function and (b) cold-flow transfer function using N₂ and CO₂.

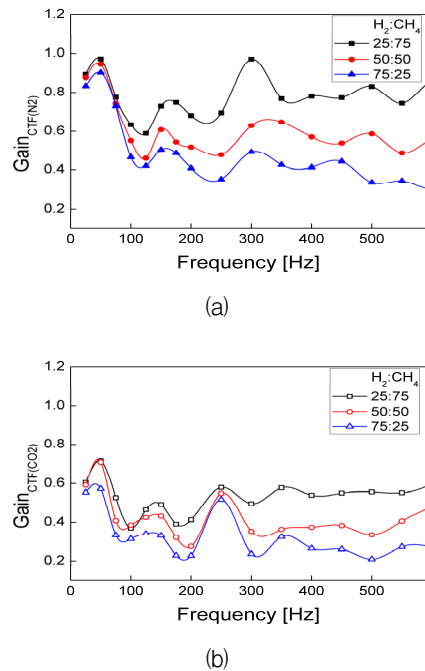


Fig. 4 Cold-flow transfer function using N₂ and CO₂ at the same flow rate.

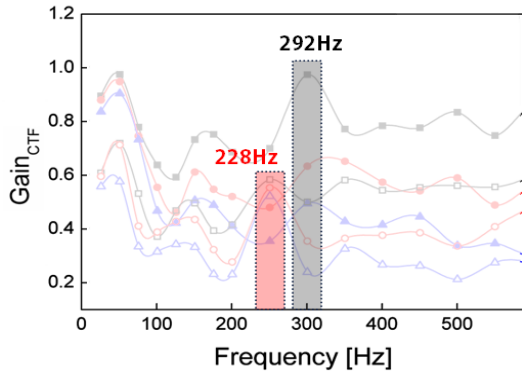


Fig. 5 Peak frequency of gain in cold-flow transfer function using N_2 and CO_2 .

소와 이산화탄소를 이용한 비연소 전달함수 실험에서 같은 유량이지만 이산화탄소를 이용한 비연소 전달함수의 gain이 상대적으로 매우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 위에서 언급한 기체의 모멘텀에 기인한다는 것을 알 수 있다.

3.3 연료공급시스템의 공진주파수

질소와 이산화탄소를 이용한 비연소 전달함수에서 공통적으로 나타나는 현상은 50 Hz와 250 Hz, 300 Hz에서 gain에 대한 peak 특성이 나타난다는 점이다. 이는 연료 공급시스템의 특성에서 찾아볼 수 있다. 50 Hz에서 공통적으로 나타나는 특성은 노즐의 횡단유동(jet in cross)에서 나타나는 특성으로 가정하고 현재 명확한 원인을 규명하기 위한 연구를 진행중이다. 250 Hz와 300 Hz에서 나타나는 gain의 특성은 연료라인 자체에서의 공진주파수에서 기인하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서 명확하게 확인할 수 있는데, 본 연구에서 활용된 가스터빈 연소기에서 음향학적으로 닫힌경계로 가정할 수 있는 가진기 끝단과 노즐 끝단인 덤프면까지의 길이는 0.63 m이며, 상온에서의 질소의 밀도는 1.165 kg/m^3 이다. 이때의 음속은 367 m/s이다. 또한 이산화탄소의 경우 1.842 kg/m^3 이며, 이에 상응하는 음속은 286 m/s이다. 이를 양 끝단이 닫힌 음향경계조건에서의 공진주파수를 구하면 각각 질소의 경우

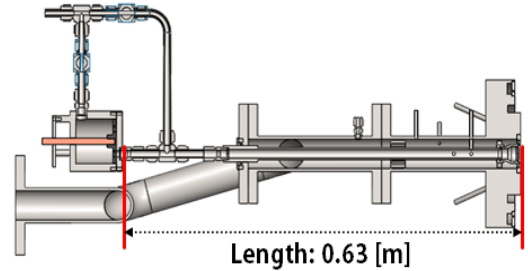


Fig. 6 Closed-closed acoustic boundary condition in a fuel feeding line system.

292 Hz, 이산화탄소의 경우 228 Hz로 계산할 수 있다. 즉, 비연소 전달함수에서의 gain의 peak가 발생하는 주파수는 연료공급 시스템에서의 공진주파수에서 기인하는 것을 확인할 수 있다.

이로부터 연소불안정을 제어하기 위해서는 노즐의 정밀한 설계 뿐만 아니라 연료라인에서부터 발생하는 공진주파수의 설계도 매우 중요한 설계변수임을 본 연구로부터 확인할 수 있다.

4. 결 론

연소불안정 연구의 일환인 화염전달함수에 대한 특성에 대한 원인을 규명하고자 비연소 전달함수의 개념을 도입하여 화염전달함수에서 나타나는 특성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 질소와 이산화탄소를 활용한 비연소 전달함수를 계측하였고, 아래와 같은 결론을 도출해내었다.

- 1) 비연소 전달함수의 결과를 통하여 화염전달함수에서 나타나는 수소 비율에 따른 화염 전달함수의 gain이 낮아지는 현상은 단순히 수소화염이 갖는 특성에 의한 것이 아닌 연료공급라인에서의 유량의 증가로 인한 요인도 작용함을 확인하였다.
- 2) 질소와 이산화탄소의 비연소전달함수 gain의 결과를 통하여 gain이 감소하는 특성은 유량에 증가함에 기인하며 peak 주파수가 감소하는 현상은 기체의 밀도에 기인하는 것을 실험적으로 검증하였다.
- 3) 약 250 Hz와 300 Hz 부근에서 나타나는

gain의 peak 특성은 연료 공급라인에서의 음향학적으로 단힌경계에 의한 공진주파수 임을 연소기 길이, 밀도, 그에 따르는 기체의 음속에 의한 공진주파수임을 실험적으로 밝혀냈다. 하지만 두 기체에서 동일하게 나타났던 50 Hz 에서의 특성은 추후 연구할 과제로 남아있다.

본 연구 화염 전달함수에서 나타나는 특성을 파악하고자 함과 동시에 연소불안정이 발생하는 연소기 노즐의 특성을 파악하는 연구이며, 그에 대한 결과를 비연소 전달함수라는 개념을 도입하여 검증하였다. 본 연구에서의 결과는 연소기 설계에서 연료노즐이 매우 중요한 설계점임과 동시에 유체가 흐르는 관내의 설계도 연소불안정 저감에 매우 중요한 변수가 될 수 있음을 시사하는 연구결과들이다. 하지만 50 Hz에서 나타나는 특성에 대해서는 다양한 실험조건을 토대로 추가적인 분석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 핵심연구지원사업 (No. 2015R1A2A2A010043, NRF-2013R1A5A1073861)과 산업통상자원부의 재원으로 산업기술혁신사업의 지원을 받아 수행한 연구 (No. 10067074) 결과이며 이에 감사드립니다.

References

1. Mangena, S.J., Bunt, J.R. and Waanders, F.B., "Mineralogical behaviour of North Dakota lignite in an oxygen/steam blown moving bed reactor," *Fuel Processing Technology*, Vol. 106, pp. 474-482, 2013.
2. "Siemens Breaks Ground on New Turbine Testing Center," *Renewable Energy Focus*, Vol. 15, No. 2, pp. 8, 2014.
3. Renyu, F. and Man, Z., "Low Emission Commercial Aircraft Engine Combustor Development in China: From Airworthiness Requirements to Combustor Design," *Procedia Engineering*, Vol. 17, pp. 618-626, 2011.
4. Jeong, H.H. and Lee, K.M., "Effect of Swirl Angles and Combustion Characteristics of Low Swirl Model Combustor," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 40-49, 2016.
5. Hong, J.S., Sung, H.G. and Lee, D.H., "LES of combustion instability and its suppression in a cylinder - 3 slot grain solid rocket motor," *Proceeding of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Yeosu, Korea, pp. 54-60, Nov. 2012.
6. Kim, D.S. and Kim, K.T., "Thermoacoustic Analysis Model for Combustion Instability Prediction - Part 1 : Linear Instability Analysis," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 32-40, 2012.
7. Lee, M.C., Joo, S.P., Yoon, J.S. and Yoon, Y.B., "Combustion Performance Test of Syngas Gas in a Model Gas Turbine Combustor - Part 1 : Flame Stability," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 41, No. 8, pp. 632-638, 2013.
8. Preetham, Santosh, H. and Lieuwen, T., "Dynamics of laminar premixed flames forced by harmonic velocity disturbances," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 8, pp. 632-638, 2013.
9. Candel, S., Durox, D., Schuller, T., Bourgouin, J. and Moeck, J.P., "Dynamics of Swirling Flames," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 46, pp. 147-173, 2014.
10. Yoon, J.S., Joo, S.P., Kim, J.J., Lee M.C., Lee, J.G. and Yoon Y.B., "Effects of convection time on the high harmonic combustion instability in a partially premixed combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, No. 3, pp. 3753-3761, 2017.