

예혼합 연소기에서의 화염 전달 함수 측정

김대식* · 김기태* · 전승배* · 이종근** · Domenic Santavicca**

Flame Transfer Function Measurement in a Premixed Combustor

Daesik Kim, Kitae Kim, Seungbae Chen, Jong Guen Lee and Domenic Santavicca

ABSTRACT

An experimental study of the flame response in a turbulent premixed combustor has been conducted with room temperature, atmospheric pressure inlet conditions using premixed natural gas. The fuel is premixed with the air upstream of a choked inlet to avoid equivalence ratio fluctuations. Therefore the observed flame response is only the result of the imposed velocity fluctuations, which are produced using a variable speed siren. Measurements are made of the velocity fluctuation in the nozzle using hot wire anemometry and of the heat release fluctuation in the combustor using chemiluminescence emission. The results are analyzed to determine the phase and gain of the flame transfer function as a function of the modulation frequency. Of particular interest is the effect of flame structure on the flame response predictions and measurements. The results show that both the gain and the phase of flame transfer function are closely associated with the flame length and structure, which is dependent upon the upstream flow perturbation as well as equivalence ratio in the current study.

Key Words : Combustion dynamics, Flame transfer function, Lean premixed combustor, Inlet velocity modulation.

기 호 설 명

Alphabets

f	Modulation frequency
H	Flame transfer function
Q	Heat release rate
V	Mixture velocity in the nozzle

Greeks

ϕ	Equivalence ratio
--------	-------------------

Subscripts

mean	Temperal mean
rms	Root mean square

1. 서 론

가스 터빈 연소에 관한 최근 연구 동향은 연료 소비율을 줄이면서 NOx 배출물의 저감을 이루기 위하여 희박 예혼합 연소의 적용으로 집중되고 있다. 기존의 연소기는 연료를 주연소 영역에 직접 분사하는 방식이기 때문에 국부적으로 이론

공연비 영역의 농후한 운전 조건에서 연소 온도의 상승에 따른 높은 NOx 생성이 불가피하다. 그러나, 희박 예혼합 연소의 개념은 연료와 공기를 완전히 혼합하여 얻은 균일한 혼합기를 주연소 영역에 공급하고, 당량비를 희박 가연 한계에 가깝게 유지하는 것이다. 이에 따라 저온의 균일한 연소 온도를 유지할 수 있어서 상당한 NOx의 발생을 줄일 수 있다. 이러한 연소 특징들로부터 희박 예혼합 연소기는 항공기 및 산업용 가스 터빈의 배출 가스 규제에 대응하기 위한 획기적인 기술로서 인식되고 있다.

그러나, 희박 예혼합 연소기에서는 열발생물의

* 삼성테크윈, 파워시스템연구소

** Pennsylvania State University

† 연락처, daesik1.kim@samsung.com

변화와 압력과의 상호 작용에 의한 불안정 연소 (Combustion instability) 현상이 큰 문제점으로 대두되고 있다. 연소 불안정과 관련된 연소기 내에서의 다양한 현상을 이해하고, 원인을 분석하고, 발생 구간을 예측하기 위한 노력이 전세계적으로 지난 수십년간 이루어져 왔음에도 불구하고, 여전히 연소 불안정 현상에 대한 많은 의문점들이 희박 예혼합 연소기의 개발을 지연시키는 주된 원인으로 남아 있다[1, 2].

이를 위하여, 연소 불안정이 발생하는 주파수 및 위상 정보를 보다 정확하고, 효과적으로 예측할 수 있는 이론적인 모델 개발에 많은 노력이 경주되고 있으며, 이를 위해 반드시 선결되어야 할 필수 조건은 유동 변동 (flow fluctuation)에 따른 화염의 동적 반응 (flame dynamics)에 대한 명확한 이해이다. 이의 정량화를 위하여 가장 보편적으로 시도되고 있는 방법이 화염 전달 함수 (Flame transfer function)를 구하는 것이다 [3-5].

본 연구에서 예혼합 연소기에서의 화염 전달 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$H(f) = \frac{Q_{rms}/Q_{mean}}{V_{rms}/V_{mean}} \quad (1)$$

이와 같은 화염 전달 함수는 실험 및 계산 등을 통하여 다양한 방법으로 얻어지고 있으며, 연소 모델링의 기초 자료로 활용되고 있으며 주어진 연소기에서 화염의 동적 반응을 이해하는데 반드시 이해되어야 하는 선결 조건으로 여겨지고 있다. 그러나, 지금까지 얻어진 화염 전달 함수는 장치 구성 및 해석 등의 어려움으로 인하여 대부분 수치 해석적인 접근으로 의존하여 왔고, 일부 연구자들에 의하여 실험에 의한 방법이 시도되고 있으나, 분젠 버너 (Bunsen Burner)와 같이 매우 단순한 연소기에서 소개되어 왔었다[4, 5].

본 연구에서는 실제 예혼합 가스터빈에서의 연소기와 유사한 선회류 (Swirl flow)를 갖는 난류 연소기에서 입구 속도 변동에 대한 화염의 동적 반응이 실험적으로 규명된다. 또한, 다양한 조건에서 화염의 구조가 계측되어 화염의 형상과 동적 반응 특성간의 상호 관계에 대한 정량적, 정성적인 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험 절차 및 방법

2.1 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에서 화염 전달 함수를 실험적으로 구하기 위하여 사용한 실험 장치의 개략

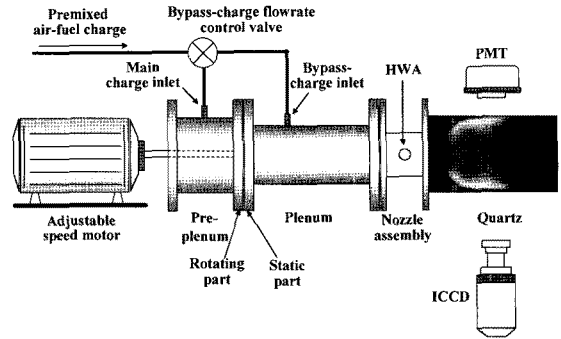


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

도이다. 그림에서와 같이, 화염 구조 및 열발생을 계측이 가능하도록 하기 위하여 150mm의 내경과 300mm의 길이를 갖는 석영 재질의 연소기가 제작되었고, 연료와 공기의 혼합을 위하여 125mm의 내경과 500mm 길이의 혼합실이 연소기 상류에 설치되었고, 또한 흡기의 유동 변조 (modulation)를 위하여 유동 변조 장치가 혼합실 상류에 제작되었다. 연료와 공기의 완전한 혼합을 위한 충분한 시간을 갖도록 하기 위하여 바이패스 밸브 상류의 튜브를 기준으로 하여 20배 이상의 길이를 갖는 예혼합 튜브가 설치된다.

Fig. 2는 본 실험에서 입구 유동 속도의 변조 (modulation)를 위해 제작된 유동 변조 장치의 구성을 보여준다. 그림에서와 같이 유동 변조 장치는 속도 조절이 가능한 AC 모터와 더불어 회전판 (rotating plate), 고정 플레이트 (static plate)와 중간의 예혼합실로 구성된다. 회전판은 축을 통하여 가변 속도 모터와 연결되고, 이 장치를 통하여 400Hz까지의 변조 주파수 (modulation frequency)를 얻을 수 있다. 또한, 변조 진폭폭 (modulation amplitude)은 예혼합실

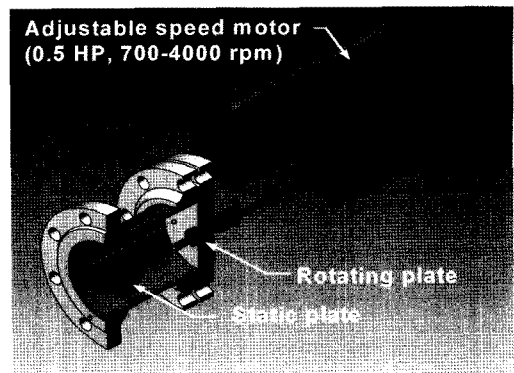


Fig. 2 Schematic diagram of modulation device

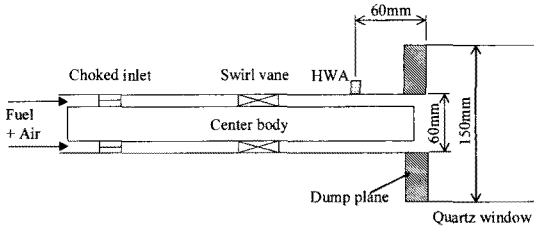


Fig. 3 Schematic drawing of combustor and nozzle assembly

을 통과하는 유량과 그렇지 않는 유량의 제어를 통하여 제어될 수 있도록 제작되었다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용된 노즐 및 속도 측정 위치 등의 개략도를 보여준다. 그림에서와 같이 연료는 노즐 입구에서 연료와 충분히 예혼합되어 공급되고, 또한 노즐 내에서의 압력 변동이 연료 공급에 미치는 영향을 제거하기 위하여 혼합기 공급 위치 이후가 초킹(choking)될 수 있도록 제작하였다. 또한 그림에서와 같이 스윌러가 내부에 삽입되었고, 속도 측정을 위한 열선 유속계는 덤프 플레인(dump plane)으로부터 상류 60mm에 설치되었다.

2.2 실험 방법

혼합기 유동의 속도 측정을 위하여 열선 유속계 (Hot wire anemometry, TSI model 1210)가 사용되고, 열발생의 정량화를 위하여 본 연구에서는 CH*와 OH* 라디칼의 자발광이 PMT (Hamamatsu model 928A)를 사용하여 전체 화염으로부터 측정되고, 이를 위하여 각각 430±5 nm와 307±5 nm의 필터가 사용된다. 또한 일부 관심 영역의 경우, 화염으로부터의 자발광 측정을 위하여 ICCD 카메라 (Princeton Instruments model 576G)가 사용된다. 얻어진 원시 이미지로

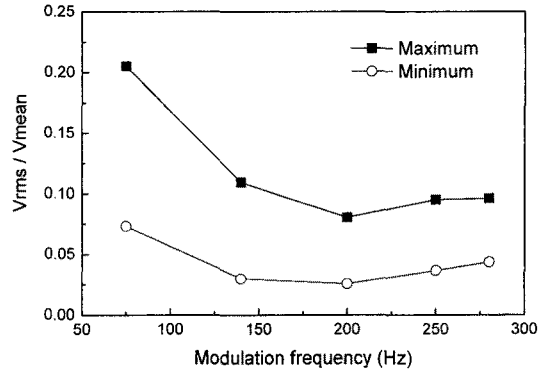


Fig. 4 Maximum and minimum amplitudes of velocity fluctuations at each modulation frequency in the current modulation device

부터 2차원 단면에서의 화염 구조로 재구성하기 위하여 Abel Deconvolution[6]이 사용되었다. 또한 연료로는 메탄 96% 함유의 천연가스가 사용되었다.

Table 1은 본 실험이 이루어진 실험 조건이다. 실험은 대기압 조건에서 수행되었다.

Fig. 4는 본 연구에서 입구 속도 변동을 제어하기 위해 사용된 유동 변조 장치의 각 주파수에서 얻을 수 있는 최대 및 최소 진폭의 특성을 보여준다. 그림에서 보여지듯이, 변조 주파수가 증가할수록 얻을 수 있는 속도파의 진폭은 차츰 감소하다가 200Hz 근처에서 최소값을 이루고, 이 이후로 주파수가 증가할 경우 미소하게 다시 증가하는 것으로 나타났다. 실험이 이루어진 주파수 범위내에서 최대 속도 진동폭은 75Hz 근처에서 22%로 측정되었고, 반면 200Hz 변조 주파수 영역에서의 최대 진폭은 대략 10% 미만인 것으로 나타났다. 본 결과를 토대로 전달 함수 측정을 위한 입구 속도 진폭 변조의 범위는 각 주파수의 최대값과 최소값 사이의 4-6개의 측정 구간에서 이루어진다.

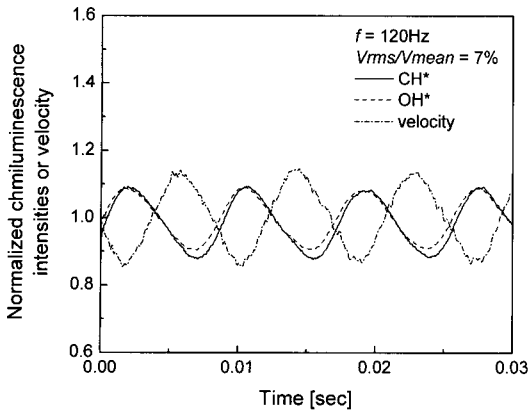
Table 1 Operating conditions

Mean velocity (Vmean)	30 m/s
Equivalence ratio	0.65 - 0.75
Inlet temperature	20°C
Modulation frequency	70 - 300 Hz
Modulation amplitude (Vrms / Vmean)	up to 22%
Mixture	Premixed

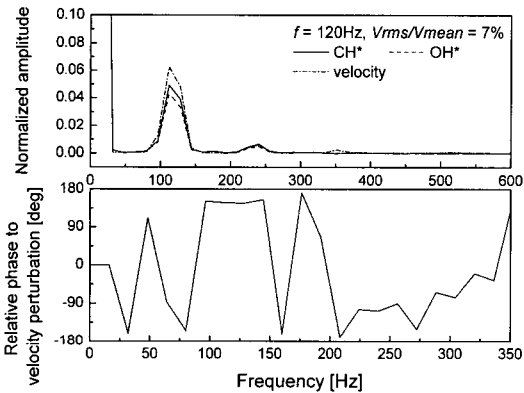
3. 결과 및 검토

3.1 변조 주파수 (Modulation frequency)의 영향

Fig. 5는 흡기 유동 변조를 통하여 얻어진 연소실로부터 측정된 CH* 및 OH*의 변동과 노즐에서 측정된 속도 변화의 관계를 시간 영역에서와 이를 Fast Fourier Transform (FFT)를 통하



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 5 Typical examples showing time traces and frequency spectra of CH*, OH*, and velocity fluctuations under modulation ($\phi = 0.72$)

여 주파수 영역으로 변환된 일반적인 예를 보여 준다. 그림에서 나타나듯이, CH* 및 OH* 사이에 평균값에 있어서의 어느 정도 오차는 보여지나, 속도 파형과 비교하였을 때, 위상차 및 진폭에 있어서는 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 이후 본 연구에서 다루어지는 열발생 변동은 CH*의 강도 변화에 의해 측정된 값으로 언급하고자 한다.

Fig. 6은 열발생 변동 및 주파수 분석을 통한 화염 전달 함수의 계산 결과를 보여준다. 본 결과에서의 실험 조건은 당량비 0.65~0.75, 연료 공기 혼합물의 공급 노즐에서의 평균 속도는 30m/s, 변조 주파수는 75~280Hz이고, 각 조건에서의 변조폭은 일정하게 유지되었을 경우이다. 이 경우, 식 (1)에서 분모의 절대값이 일정하게

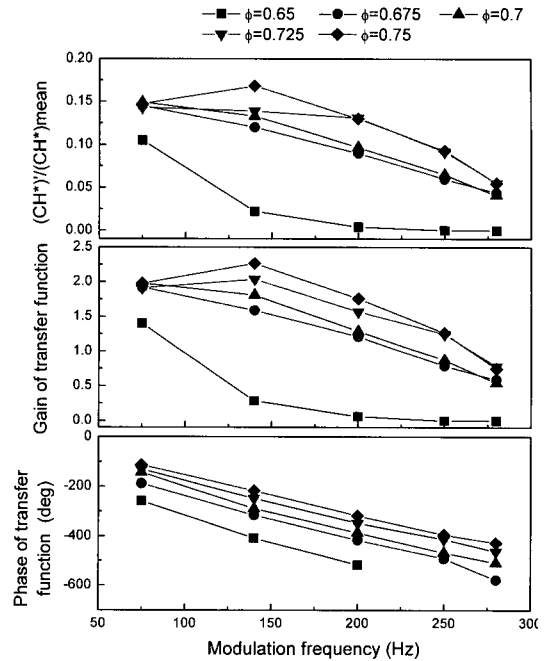


Fig. 6 Effects of modulation frequency and equivalence ratio on CH* fluctuation and flame transfer function at a given modulation amplitude ($V_{rms} / V_{mean} = 7\%$)

유지되므로 $(CH^*)' / (CH^*)_{mean}$ 의 값이 바로 전달 함수의 이득값(gain of transfer function)으로 해석될 수 있다. 그림에서 보여지듯이, 당량비가 증가할수록 이득값은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 동일한 연소기 구조 및 시스템 댐핑 조건에서 주어진 연소기 입구에서의 속도 변동에 대하여 높은 당량비에서 화염이 상대적으로 더욱 민감하게 반응할 수 있음을 나타낸다.

또한, 입구 속도 변동 및 열발생 변동 사이의 위상 차이 절대값은 당량비의 증가와 함께 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 일정한 주파수에서, 당량비 증가에 따라 화염이 짧아질 경우, 입구에서의 속도 변동이 화염에까지 전달되는 시간이 짧아진다는 사실을 잘 반영한다. 따라서, 위의 결과들로부터 화염 구조의 변화는 전달 함수의 이득과 위상차에 크게 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다[3, 7-8].

한편 주파수의 변화가 전달 함수에 미치는 영향을 살펴 볼 경우, 주파수의 증가에 따라 전달 함수의 이득이 크게 감소하는 것으로 측정되었다. 이는 화염이 저주파수 필터링의 역할을 한다는 기존의 연구 결과[3, 7]들과 일치한다.

반면 주파수의 증가에 따라 위상차 역시 크게 영향을 받으며, 당량비에 상관없이, 주파수 증가

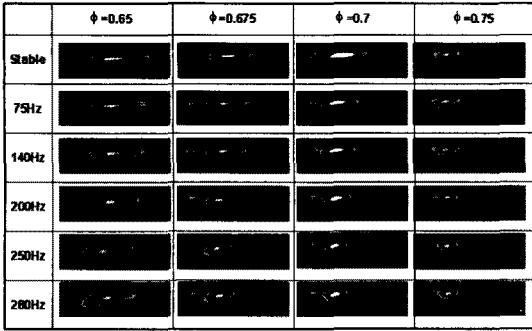


Fig. 7 Effects of modulation frequency and equivalence ratio on the flame structure ($V_{rms} / V_{mean} = 7\%$)

와 함께 위상차의 절대값은 거의 선형적으로 증가한다. 이러한 결과로부터, 상류 유동 속도 변조에 따른 화염의 반응은 당량비와 변조 주파수에 따라 크게 다르게 반응하며, 전달 함수의 측정에 있어서, 화염 구조와의 상관관계의 규명이 매우 중요할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 입구 속도 변조시 화염의 거동을 규명하기 위하여, Fig. 6과 동일한 조건에서 취득된 이미지이다. 이때, 한 사이클 동안의 평균 이미지를 얻기 위하여 ICCD 카메라의 셔터 속도는 변조 주기와 일치하도록 조정하였다. 그림에서 보여지듯이 당량비의 변화에 따라 화염의 구조는 크게 달라지며, 당량비가 증가할수록 한 주기 동안의 평균 화염 길이는 크게 짧아진다. 또한 동일 당량비에서 주파수의 증가에 따라 화염 길이도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 주파수가 증가함에 따라 화염의 길이는 크게 감소하고, 이러한 경향은 당량비 0.65에서와 같이 상대적으로 긴 화염을 갖는 희박한 운전 조건에서 더욱 두드러지는 것으로 나타났다. 현재까지 수행된 연구 결과로부터는 이러한 주파수의 증가에 따른 화염 구조 변화에 대한 명확한 이유를 제시하기는 어려운 관계로, 이를 위하여 향후 더욱 세분화된 추가 연구가 요구된다.

3.2 변조 진폭 (Modulation amplitude)의 영향

화염 전달 함수의 또다른 중요한 특징 중의 하나는 비선형 화염 반응 (Nonlinear flame response) 영역이 존재한다는 점이다. 이러한 화염의 비선형성은 실제 연소기에서 발생하는 연소 불안정 현상을 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공한다[7, 8].

이를 위하여 Fig. 8은 각 주파수에서 흡입 유

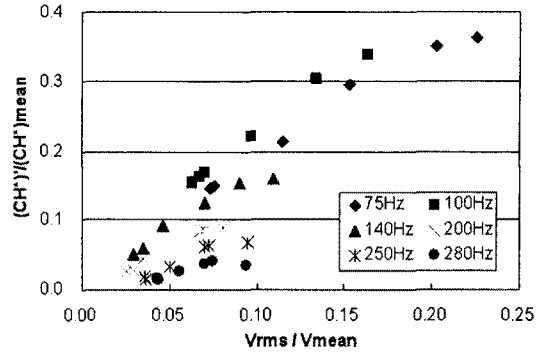


Fig. 8 Effects of modulation amplitude on CH^* fluctuations ($\phi=0.7$)

동 속도 변동의 진폭을 변화시켰을 경우 화염으로부터 열발생율 특성을 CH^* 의 변동을 통하여 정량화하여 도시한 것이다. 그림에서 보이듯이 모든 주파수에서 낮은 진폭 영역에서는 속도 변동폭의 증가와 함께 열발생율의 진폭도 거의 선형적으로 증가한다. 그러나 어느 정도 이상으로 진폭이 증가하였을 경우 열발생율은 더 이상 증가하지 않고 포화되기 시작하고, 이 시점 이후부터는 속도 변동 진폭의 증가에도 불구하고, 일정한 값을 유지하던지 혹은 오히려 감소하기 시작한다. 이러한 현상을 화염의 비선형 반응이라고 한다. 그림에서 보여지듯이 이러한 화염의 비선형 반응이 시작되는 속도 변동 진폭 값은 주파수에 의존함을 알 수 있다. 비선형 반응이 나타나기 시작하는 (즉, 열발생 변동폭이 더 이상 증가하지 않고, 포화되기 시작하는) 속도 변동의 진폭은 변조 주파수가 높아질수록 낮아지는 것으로 발견되었다.

Fig. 9는 변조 주파수와 진폭이 화염 전달 함수

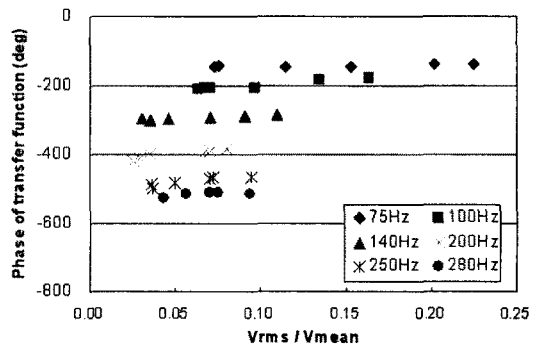


Fig. 9 Effects of modulation amplitude and frequency on phase of flame transfer function ($\phi=0.7$)

수의 위상차에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 각 주파수에서 Fig. 8에서처럼 속도 변동 진폭을 변화시켰으나, 이러한 진폭 변화는 전달 함수의 위상차에는 거의 영향을 미치지 않고, 단지 주파수에만 의존하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 예혼합 연소기에서 발생하는 연소 불안정 현상을 이해하고자, 연소기 입구 속도 진동에 따른 화염의 구조 및 열발생율을 정량적으로 분석하기 위한 화염 전달 함수가 실험적으로 구하여졌다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 변조 주파수가 일정하게 유지되었을 경우, 당량비가 증가할수록 이득값은 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 입구 속도 변동 및 열발생 변동 사이의 위상차는 당량비의 증가에 따라 감소한다.
2. 당량비가 일정할 경우, 화염이 저주파수 필터와 같은 역할을 함에 따라 유동 변조 주파수의 증가에 따라 화염 전달 함수의 이득이 급격히 감소한다.
3. 화염의 구조는 당량비와 더불어 유동의 주파수에도 크게 영향을 받으며, 이러한 화염 구조의 변화는 화염의 동적 특성에도 영향을 미치게 된다.
4. 유동의 변동 진폭을 계속 증가시킬 경우, 화염은 유동에 대하여 비선형적으로 반응하기 시작하며, 이러한 비선형 반응이 나타나는 진폭은 저주파수로 갈수록 감소한다.

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (KRF-2005-214-D00237), 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Krebs, W., Flohr, P., Prade, B., and Hoffmann, S., "Thermoacoustic stability chart for high-intensity gas turbine combustion systems," *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, No. 7, pp. 99-128, 2002.
- [2] Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., "Combustion dynamics and instabilities: elementary coupling and driving mechanisms," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 722-734, 2003.
- [3] Lieuwen, T., "Modeling premixed combustion-acoustic wave interactions: a review," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 765-781, 2003.
- [4] Santosh, H., and Sujith, R. I., "Kinematic coupling effects on heat-release transfer function of a premixed flame," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 21, No. 4, pp. 591-599, 2005.
- [5] Birbaud, A. L., Durox, D., Ducruix, S., and Candel, S., "Dynamics of confined premixed flames submitted to upstream acoustic modulations," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 1257-1265, 2007.
- [6] Dasch, C. J., "One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods," *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, pp. 1146-1152, 1992.
- [7] Balachandran, R., Ayoola, B.O., Kaminski, C.F., Dowling, A.P., and Mastorakos, E., "Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 143, pp. 37-55, 2005.
- [8] Bellows, B. D., Bobba, M. K., Seitzman, J. M., and Lieuwen, T., "Nonlinear flame transfer function characteristics in a swirl-stabilized combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 129, No. 4, pp. 954-961, 2007.