

난류 예혼합 연소기에서의 흡입 유동 섭동에 대한 화염의 동적 거동

김대식**

Flame Dynamic Response to Inlet Flow Perturbation in a Turbulent Premixed Combustor

Daesik Kim

ABSTRACT

This paper describes the forced flame response in a turbulent premixed gas turbine combustor. The fuel was premixed with the air upstream of a choked inlet to avoid equivalence ratio fluctuations. To impose the inlet flow velocity, a siren type modulation device was developed using an AC motor, rotating and static plates. Measurements were 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 test results showed that flame length as well as geometry was strongly dependent upon modulation frequency in addition to operating conditions such as inlet velocity. Convection delay time between the velocity perturbation and heat release fluctuations was calculated using phase information of the transfer function, which agreed well with the results of flame length measurements. Also, basic characteristics of the flame nonlinear response shown in the current test conditions were introduced.

Key Words : Combustion instability, Flame transfer function, Lean premixed combustor, Nonlinear flame response

기 호 설 명

Alphabets

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

Greeks

ϕ Equivalence ratio

Subscripts

mean Temporal mean

1. 서론

최근 지속적인 배출 가스 규제의 강화와 더 높은 효율을 보장하는 가스터빈에 대한 개발 요구로 인하여 산업용 및 항공용 가스 터빈에서는 희박 예혼합 연소기의 채택이 갈수록 증가하는 추세에 있다. 이러한 연소기에서는 혼합기를 미리 예혼합하여 연소함으로써, 기존 종래의 연소기에서 발견되었던 국부 농후한 연소 구간이 사라지게 되어 NOx를 대폭 저감함과 동시에 희박 공연비 운전 영역을 사용함으로써, 연비도 향상시키는 장점이 있는 것으로 여겨져 왔다.

그러나, 희박 예혼합 연소기에서는 시스템 고유의

압력파와 당량비 또는 흡기의 유량 변화에 의하여 발생하는 열발생율의 변동이 서로 위상이 일치(in phase) 하였을 경우 상호 커플링으로 인한 연소 불안정(combustion instability) 현상이 크게 문제로 대두되고 있다. 이러한 불안정 현상은 시스템의 압력 변동 및 진동의 증가를 야기시키고 결국 시스템 또는 일부 부품에 치명적인 손상을 일으킨다.

따라서, 지난 십여년간 이러한 연소 불안정 현상에 대한 원인을 규명하고 제어 인자를 찾으려는 노력이 전 세계적으로 이루어져 왔다. 지금까지의 연구 결과들로부터 발견된 주요 불안정 연소의 인자 중의 하나는 연소기 음파의 교란(acoustic wave perturbation) 또는 유동 와류 (flow vortex)에 의한 화염면의 왜곡(distortion)에 따른 열발생율의 변동이다[1,2].

또다른 불안정 연소의 원인 중 하나는 연소기에서 발생하는 압력파가 연료 노즐 또는 연소기의 상

* 강원도립대학 자동차과

† 연락처, dskim@gw.ac.kr

부로 전달되어 형성되는 당량비(equivalence ratio) 또는 혼합기 질량 유량/속도(mass flow rate/velocity)의 섭동이다. 이러한 혼합기 속도 또는 당량비의 변동은 연소기 내부로 다시 전달되어 화염면에 도달시 열발생율의 변화로 이어지고, 다시 압력파와 커플링되어 연소기 내부의 압력 흔들림 및 진동의 증가로 결부되게 된다.

따라서, 주어진 노즐과 연소기에서 이러한 당량비 또는 혼합기 속도의 섭동이 존재할 때, 화염의 반응 메커니즘을 규명하는 것은 연소 불안정 현상을 이해하고, 이의 제어 인자를 설계할 때 반드시 필요한 부분으로 여겨진다[1,2]. 이를 위하여 최근 많은 가스 터빈 연소기 관련 연구자들이 수행하고 있는 분야가 화염 전달 함수(flame transfer function)를 구하는 것이다[1-4]. 화염 전달 함수는 실제 가스 터빈에서 발생될 수 있는 혼합기 속도 또는 당량비의 변동값을 임의적으로 모사하여 입력한 후, 이러한 입력값에 대한 화염의 결과(즉, 열발생율의 변동)를 측정하는 것으로써, 완전 예혼합 화염의 경우라면(당량비가 일정하게 유지된다면), 다음의 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$FTF(f) = \frac{Q' / Q_{mean}}{V' / V_{mean}} \quad (1)$$

관련 연구들으로써, 초기 여러 연구 그룹에 의하여 간단한 연소기 또는 버너(Burner) 등을 통하여 실험 및 해석적인 접근 방법에 의하여 이루어져 왔었다 [1-3]. 최근 Kim et al.[4] 등은 실제 가스 터빈 연소기에서의 화염 전달 함수를 구하는 연구로 확장하여 진행하여 왔다.

본 연구에서는 저자들의 이전 연구[4]의 연장 선상에 있는 결과물으로써, 상용 예혼합 가스터빈 연소기와 유사한 선회류(Swirl flow)를 갖는 난류 연소기를 Lab-scale로 제작하여, 입구 속도 변동에 대한 화염의 동적 반응(Flame dynamics)을 정량화하고, 아울러 본 실험 장치 및 조건에서 발견된 화염의 비선형 거동(Flame nonlinear response) 결과를 소개하고, 주요 특징을 고찰하고자 한다.

2. 실험 절차 및 방법

2.1. 실험 방법

본 연구의 목적인 화염 전달 함수를 실험적으로 구하기 위한 실험 장치의 개략도가 Fig. 1에서 보여진다. 그림에서와 같이, 본 실험 장치는 산업용 가스 터빈에 적용되는 노즐을 사용하여, 연료와 공기의 혼합이 이루어지는 혼합실(내경 : 125 mm, 길이

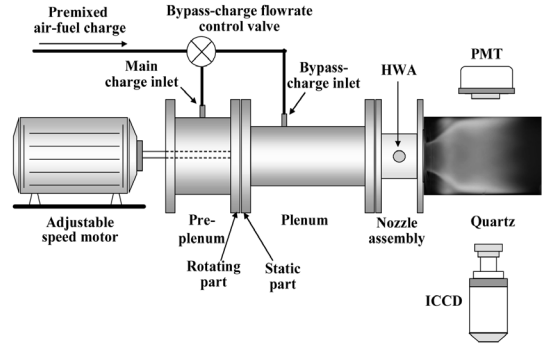


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

500 mm)이 연소기의 상류에 설치되고, 연소기는 화염 구조 및 열발생율의 측정이 가능하도록 하기 위하여 150 mm의 내경과 300 mm의 길이를 갖는 석영 재질의 연소기가 제작되었다. 또한 연료와 공기의 완전한 혼합을 위한 충분한 시간을 보장하기 위하여, 바이패스 밸브 상류의 튜브를 기준으로 20배 이상의 길이를 갖는 예혼합 튜브가 설치된다. 한편 혼합기의 유동 섭동(modulation)을 위하여, 회전 속도 조절이 가능한 AC 모터와 회전판(rotating plate) 및 고정판(static plate)과 중간의 예혼합실로 구성된 유동 섭동 장치가 상류에 설치되었다. 회전판은 축을 통하여 가변 속도 모터와 연결되고, 이 장치를 통하여 400 Hz까지의 섭동 주파수(modulation frequency)를 얻을 수 있다. 또한, 섭동 진폭폭(modulation amplitude)은 예혼합실을 통과하는 유량과 그렇지 않은 유량의 제어를 통하여 제어될 수 있도록 제작되었다.

본 실험에서 사용된 노즐의 구성 및 노즐 내부 속도 위치 등의 개략도가 Fig. 2에서 소개된다. 그림에서와 같이 연료는 노즐 입구에서 연료와 충분히 예혼합되어 공급되고, 또한 노즐 내에서의 압력 변동이 연료 공급에 미치는 영향을 제거하기 위하여 혼합기 공급 위치 이후가 고립될 수 있도록 제작하였다. 또한 그림에서와 같이 스윌러가 내부에 삽입되었고, 속도 측정을 위한 열선 유속계는 덤프 플레인(dump plane)으로부터 상류 60 mm에 설치되었다.

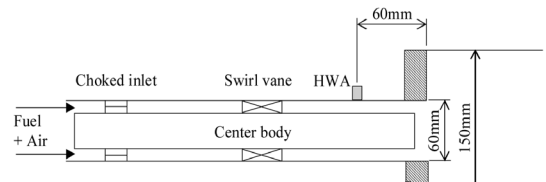


Fig. 2. Schematic drawing of combustor and nozzle assembly.

Table 1. Operating conditions

Mean velocity (V_{mean})	25, 30, 35 m/s
Equivalence ratio (ϕ)	0.65, 0.7, 0.75
Inlet temperature	20°C
Modulation frequency (f)	75 - 320 Hz
Modulation amplitude (V'/V_{mean})	up to 23%
Mixture	Premixed

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* 라디칼의 자발광이 PMT(Hamamatsu model 928A)를 사용하여 전체 화염으로부터 측정되고, 이를 위하여 430 ± 5 nm의 필터가 사용되었다. 열선 유속계와 PMT의 디지털 데이터 취득 장치를 통하여 16,384 Hz의 샘플링 속도로 저장되며, 각 실험 조건에서 16,384개의 데이터를 취득하였다.

또한 화염으로부터의 CH* 자발광 측정을 위하여 ICCD 카메라(Princeton Instruments model 576G)가 동일 필터를 장착하여 사용된다. 모든 조건에서 동일 세팅으로 40개의 이미지가 촬영되며 측정된 이미지의 평균값이 본 논문의 결과로서 사용된다. 얻어진 원시 이미지로부터 2차원 단면에서의 화염 구조로 재구성하기 위하여 Abel Deconvolution이 사용되었다[5]. 또한 연료로는 메탄 96% 함유의 천연가스가 사용되었다.

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

3. 결과 및 검토

3.1. 화염 전달 함수 측정 결과

Fig. 3은 당량비 0.7에서 각 3가지 입구 속도($V_{\text{mean}} = 25, 30, \text{ and } 35$ m/s)의 경우에 대한 유동 섭동 한 사이클 동안의 화염의 평균 CH* 이미지의 구조를 보여준다. 주파수는 75 Hz부터 280 Hz까지 총 6가지의 주파수에서 이미지가 취득되었고, 각 조건에서 속도 진폭(V'/V_{mean})은 7%로 고정되었다. 또한 참고 결과로써, 각 입구 속도에서의 안정된 화염(stable flame)의 이미지가 표 맨 상단에 보여진다. 한 사이클 동안의 평균 화염 이미지 취득을 위하여, ICCD 카메라의 셔터 노출 시간은 섭동 주기와 동일한 시간으로 세팅되었고, 한 조건에서 이러한 방식으로 얻어진 40개 이미지의 평균값을 통한 이미지가 본 결과에서 사용되었다. 또한 후처리를 거친 이미지는 확대칭으로 여겨질 수 있으므로, 연소기의 상단(upper-half)만의 화염 이미지만이 소개되었다[5].

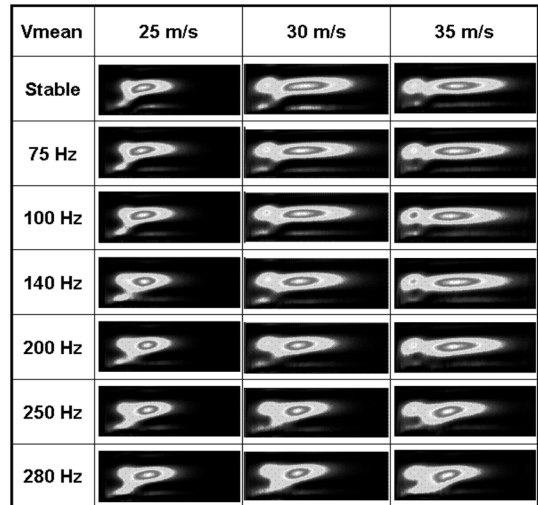


Fig. 3. Effects of modulation frequency and mean velocity on the flame structure($\phi=0.7$, $V'/V_{\text{mean}}=7\%$).

그림에서 보이는 바와 같이, 입구 평균 속도가 커질수록, 화염의 평균 길이는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 동일 입구 속도에서 주파수의 증가와 함께, 화염 상의 CH* 자발광의 강도가 최대치를 보여주는 곳의 위치가 점점 덤프면(dump plane)으로 가까워지고 있는 것을 알 수 있다. 이는 저자들의 이전 결과[4]와 동일한 경향으로, 본 결과들로부터, 화염 변조시, 화염의 전체 길이뿐 아니라 전체 화염면의 구조는 당량비와 입구 속도 등의 혼합기 공급 조건과 더불어 변조 조건에 따라서도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

각 운전 조건에서 화염 길이에 대한 정량적인 평가를 위하여 이미지 처리 기법을 통하여 각 화염 이미지의 무게 중심(center of mass, COM)이 구해진다. 본 연구에서는 구하여진 COM과 덤프면 사이의 거리를 화염의 특성 길이로 정의하였고, 그 결과가 Fig.

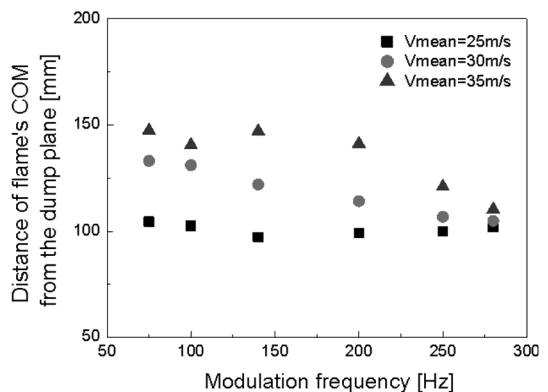


Fig. 4. Flame length as a function of modulation frequency($\phi=0.7$, $V'/V_{\text{mean}}=7\%$).

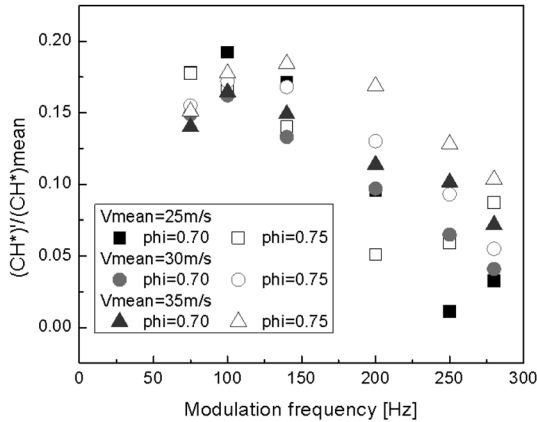


Fig. 5. Normalized CH* intensity fluctuation as a function of modulation frequency and mean velocity ($\phi=0.7, 0.75, V'/V_{mean}=7\%$).

4에서 소개되었다. Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건들에서 계산된 화염의 길이를 주파수와 입구 속도의 함수로서 나타내었다. 그림에서 보여지듯이, 짧은 화염을 갖는 낮은 속도($V_{mean}=25$ m/s)에서는 주파수가 화염 길이에 미치는 영향은 상대적으로 미비하였다. 그러나, 상대적으로 긴 화염을 갖는 높은 혼합기 입구 속도 조건($V_{mean}=30, 35$ m/s)에서는 주파수의 증가와 더불어 화염의 길이가 크게 감소하고 있음을 보여준다.

Fig. 5는 주파수 변화에 따른 화염 전달 함수의 측정 결과를 보여준다. 그림에서는 CH* 자발광의 변동 진폭을 그 평균값으로 나눈값으로서, 본 그래프에서의 결과들은 속도 진폭을 일정하게 유지($V'/V_{mean}=7\%$)한 상태에서 얻어졌으므로 본 결과들은 곧, 화염 전파 함수의 이득값(gain)으로 여겨질 수 있다.

$$Gain_{FTF} = \frac{|(CH^*)' / (CH^*)_{mean}|}{|V' / V_{mean}|} \quad (2)$$

그림에서 보여지듯이, 본 실험 조건에서는 초기 100 Hz에서 이득값이 최고치를 보이다가 주파수가 증가함에 따라 점점 이득값이 거의 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이전 해석적 기법을 통한 화염 전달 함수를 구한 결과[2]들과 동일한 경향으로, 일반적으로 화염은 저역 통과 필터(low pass filter)와 같은 역할을 하는 것으로 보여진다. 그러나, 화염이 상대적으로 짧은 낮은 속도($V_{mean}=25$ m/s)의 경우에는 이득값이 선형적으로 감소하다가 어느 주파수에서 최저치를 기록한 후, 다시 주파수의 증가와 더불어 이득값도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6에서는 화염 전달 함수 측정으로부터 얻을 수 있는 또다른 주요 정보인 V'과 (CH*)' 사이의 위

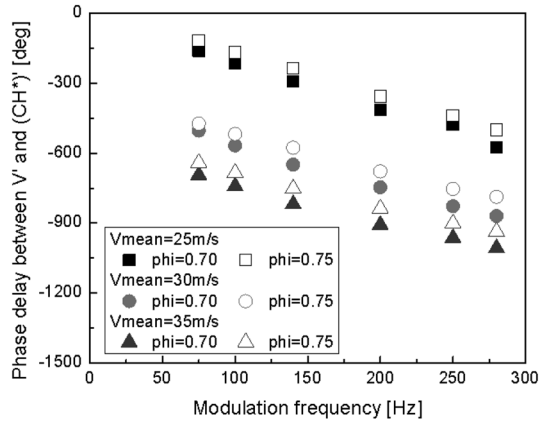


Fig. 6. Phase delay of flame transfer function as a function of modulation frequency and mean velocity ($\phi=0.7, 0.75, V'/V_{mean}=7\%$).

상차에 대한 결과를 보여준다. 각 혼합기 공급 조건에서 모두 주파수의 증가와 함께 위상차의 절대값은 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 위상 결과로부터 얻어진 전달 지연 시간(convection delay time)의 계산 결과이다. 이는 연소기 입구에서의 속도 변동치가 어느 정도의 지연 시간을 가지고 열발생률의 섭동으로 영향을 미치는지에 대한 정량적인 데이터를 제공한다. 그림에서 보여지듯이, 화염 길이가 짧아짐에 따라(혼합기 속도가 감소할수록, 또한 당량비가 증가할수록) 전달 지연 시간이 감소하였으며, 동일 혼합기 공급 조건에서는 25 m/s 입구 조건의 경우를 제외하고는, 주파수가 증가할수록 지연 시간이 짧아지고 있는 경향을 보였다. 이러한 결과는 Fig. 4에서의 화염 길이 변화의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 나타난다.

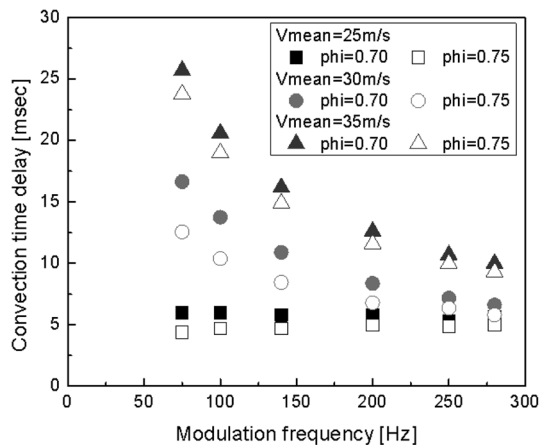


Fig. 7. Convection time delay as a function of modulation frequency and mean velocity ($\phi=0.7, 0.75, V'/V_{mean}=7\%$).

또한, 본 결과에서 구해진 전달 지연 시간은 Time-lag 분석[6]에 적용되어 실제 연소기에서 발생하는 불안정 현상의 예측을 위하여 사용될 수 있다.

3.2. 화염의 비선형 반응 구간

외부 섭동에 대한 화염의 반응은 크게 선형(linear) 구간과 비선형(nonlinear) 구간으로 나뉘게 된다. 이중, 선형 구간의 화염 반응은 연소기에서의 불안정 연소의 초기 증폭 속도(initial growth rate of instability)를 결정한다. 이러한 선형 구간에서의 화염 거동은 선형 시스템 동역학에 의하여 모델링이 가능하며, 이러한 모델링의 결과들로부터, 압력파의 주파수와 모드 등이 해석 가능하고, 또한, 불안정 연소가 발생하는 조건들을 예측이 가능하게끔 한다[2,4,7].

한편, 비선형 구간에서의 화염의 반응은 한계 순환 진폭(limit cycle amplitude)을 결정하는 것으로 알려져 있다. 이러한 한계 순환 진폭의 특성은 복잡한 비선형 방정식들에 의해 정의되어질 수 있다. 그러나, 화염 전달 함수는 해석 및 실험 적 방법에 의하여 시스템의 한계 순환 진폭에 대한 정보를 제공할 수 있다.

Fig. 8은 입구 속도 25 m/s, 당량비 0.75에서의 각 주파수에서의 속도 진폭에 대한 CH* 자발광의 진폭과 화염 전달 함수의 이득값을 보여 준다. 그림에서 나타나듯이, 속도 진폭이 증가함에 따라 초기 CH*의 진폭 또한 선형적으로 증가한다(이 구간에서 이득값은 거의 일정하거나, 소폭 증가한다). 그러나 각 주파수에서 속도 진폭이 계속적으로 증가함에 따라, CH*의 진폭은 더 이상 증가하지 않고, 어느 일정 진폭 근처에서 포화 상태로 이르게 되는 지점에 이르게 된다(이 때, 이득값은 감소하기 시작한다). 흥미로운 점은 이렇게 이득값이 감소하기 시작하는 속도

진폭은 주파수가 낮아짐에 따라 낮은 영역에 발견되고 있다. 이러한, 비선형 구간이 시작되는 지점이 주파수에 의존하는 세부적인 이유에 대해서는 추가적인 고찰이 필요할 것으로 여겨진다.

4. 결론

희박 예혼합 연소기를 이용하여 화염의 동적 특성을 검토하기 위하여 화염 전달 함수가 측정되고, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 화염의 길이 및 구조는 외부 유동의 섭동 주파수에 영향을 받으며, 혼합기 입구 속도가 증가할수록(화염의 길이질수록) 그 영향은 더욱 두드러지게 된다.

2) 화염 전달 함수의 측정으로부터 외부 유동 교란에 대한 열발생율 섭동 진폭을 계산할 수 있을 뿐만 아니라, 교란이 화염까지 전달되는 지연 시간을 계산할 수 있다. 전달 지연 시간은 화염의 길이와 구조에 크게 영향을 받는다.

3) 외부 교란 진폭 증가에 대하여, 화염은 초기에 선형적으로 반응하나, 과도한 속도 진폭에 대하여 비선형 화염 반응이 나타나는 구간이 존재한다. 이러한 비선형 구간은 섭동 주파수가 감소할수록 낮은 진폭에서 발생된다.

후기

본 연구는 저자가 Penn State University에서 재직 시 이루어진 결과물로서, 도움 및 조언을 아끼지 않으신 Prof. Santavicca와 이종근 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Ducruix, S. et al., "Combustion dynamics and instabilities: elementary coupling and driving mechanisms," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 722-734, 2003.
- [2] Lieuwen, T., "Modeling premixed combustion-acoustic wave interactions: a review," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 765-781, 2003.
- [3] Balachandran, R. et al., "Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 143, pp. 37-55, 2005.
- [4] Kim, D. et al., "Effect of flame structure on the

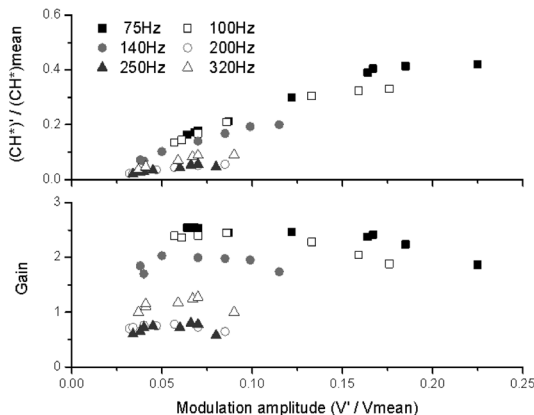


Fig. 8. Normalized CH* fluctuations and gain of transfer function as a function of modulation frequency and amplitude ($\phi=0.75$, $V_{mean}=25$ m/s).

- flame transfer function in a premixed gas turbine combustor,” *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, 2010.
- [5] 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.
- [6] Gonzalez, E. et al., “A study of combustion instabilities driven by flame-vortex interactions,” AIAA paper 2005-4330.
- [7] Bellows, B. D. et al., “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.

접수일 : 2009. 11. 26
심사완료일 : 2009. 12. 09