

기체 탄화수소 연료 연소시험에서 연소불안정의 개루프 제어

황동현^a · 안규복^{a,*}

Open-Loop Control of Combustion Instability in Hot-Firing Test Using Gaseous Hydrocarbon Fuel

Donghyun Hwang^a · Kyubok Ahn^{a,*}

^a*School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea*

^{*}*Corresponding author. E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr*

ABSTRACT

A study was conducted to apply open-loop control to the combustion instability in a dump combustor using gaseous hydrocarbon fuels. Control power and frequency were varied by employing a loudspeaker under combustion conditions with similar characteristic chemistry times of the fuels. In the case of open-loop control where the frequency was identical to the combustion instability frequency, the open-loop control power affected the control performance. Results obtained from conducted open-loop control tests, where the frequency was different from the combustion instability frequency, show that setting the open-loop control frequency similar to the combustion instability frequency is effective.

초 록

기체 탄화수소 연료를 사용하는 덤프 연소기의 연소불안정에 개루프 제어를 적용하는 연구를 수행하였다. 연료들의 특성화확시간이 유사한 연소조건에서 음향 발생기를 이용하여 제어 출력과 주파수를 변화시켰다. 연소불안정 주파수와 동일한 주파수의 개루프 제어에서는 음향 발생기의 출력이 제어 성능에 영향을 주었다. 연소불안정 주파수와 다른 주파수의 개루프 제어결과로부터 개루프 제어 주파수는 연소불안정 주파수와 유사하게 설정하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

Key Words: Open-loop Control(개루프 제어), Dump Combustor(덤프 연소기), Combustion Instability(연소불안정), Characteristic Chemistry Time(특성화확시간)

Nomenclature

f_{ac}	: acoustic forcing frequency
L_c	: combustion chamber length
P_{ac}	: acoustic forcing power
P'	: pressure fluctuation
S_L	: laminar flame speed
u	: inlet mean velocity
W_l	: inlet width
Δx	: laminar flame thickness
τ_{chem}	: characteristic chemistry time
ϕ	: equivalence ratio

1. 서 론

최근 환경문제에 대한 관심이 증대되면서 가스터빈 엔진은 낮은 당량비의 예혼합 조건이나 부분 예혼합 조건에서 주로 운용되고 있다[1-3]. 하지만 이러한 조건에서는 약간의 유동섭동에 도화염이 불안정해지기 때문에 연소유도 진동(combustion driven oscillation), 희박 소염(lean blowout) 그리고 역화(flashback)와 같은 현상이 발생할 수 있다. 연소유도 진동은 고온의 생성물과 저온의 반응물이 와류에 의해 혼합되어 주기적인 열방출(heat release) 패턴을 나타내며, 연소실 수명감소, 구조적 및 열적 손상의 주요한 원인으로 알려져 있다[4-9]. 이러한 연소불안정은 수학적으로 표현된 레일리 기준(Rayleigh's criterion)에 따라 열방출 섭동과 압력섭동의 위상차가 90° 보다 작을 때 발생하게 된다. 특히 본 연구에 사용한 덤프 연소기에서는 큰 스케일의 와류구조에 의해 연소불안정이 유지되는 것으로 알려져 있다[7-12].

연소불안정을 억제하기 위해 다양한 방식의 제어연구가 진행되어 왔다. 먼저 수동제어 방식은 연소기나 분사기의 형상을 변화시키거나 음향 공진기(acoustic resonator), 배플(baffle) 등을 설치하여 압력섭동을 감소시킨다. 실질적으로 가스터빈 엔진이나 로켓 엔진은 이러한 방법으로 개발되어 왔지만, 추가적인 비용, 무게 그리고

좁은 제어범위 등의 단점으로 인해 능동제어 방식에 대한 꾸준한 관심이 있어왔다. 능동제어 방식은 연소불안정의 압력섭동이나 열방출 섭동에 반대 위상의 섭동을 공급하기 위해, 음향 발생기(loud speaker)나 2차 연료(혹은 불활성 가스) 분사를 사용한다. 음향 발생기를 이용하는 방법은 넓은 주파수 대역 및 파워를 간편하게 제어할 수 있기 때문에 폭넓게 연구되어 왔다[13].

Poinsot 등[13]과 Lang 등[14]은 각각 층류 예혼합 연소기와 난류 확산화염 연소기에서 음향 발생기의 위치에 따른 연소불안정 제어실험을 수행하였다. Schadow 등[15]은 덤프 연소기의 연소불안정에 음향 발생기를 이용한 개루프(open-loop)와 폐루프(closed-loop) 제어를 시도하였다. 개루프 제어는 와류구조의 일관성을 파괴시키기 위해 적용되었으며, 주기적인 열방출 섭동의 크기가 감소된 것을 확인하였다. 또한 위상지연(phase-delay) 폐루프 제어는 위상지연각에 따라 제어결과가 달라지며, 위상지연각 $250 \sim 330^\circ$ 에서 효과적인 제어성능을 나타내었다. Gulati 등[16]은 저 유량조건에서 당량비에 상관없이 제어가 성공적으로 작동함을 보고하였다. 이 외에도 최근까지 음향 발생기를 이용한 연소불안정 제어연구는 시간지연, 위상지연 그리고 비례제어 방법 등을 적용하거나, 2차 연료 분사와 동시에 적용하는 방법 등 다방면으로 활발하게 진행되고 있다[17-19].

하지만 많은 연구에도 불구하고, 연구자마다 대부분 하나의 연료에서 제어실험이 수행되었다. 따라서 음향가진이 동일하더라도 사용 연료에 따른 제어결과와 차이를 알 수 없었다. 만약 음향가진의 제어효과가 연료와 상관없이 없다면, 특정 연료의 제어결과로 다른 연료의 제어성능까지 예측할 수 있을 것이다. 이는 연소불안정 능동제어를 실제 엔진에 적용하는데 있어 큰 도움이 될 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 개루프 제어된 음향 발생기를 이용하여 다양한 기체 탄화수소 연료의 연소불안정 제어결과를 확인하였다. 또한 능동제어 결과를 예측하는데 있어 특성 화학시간(characteristic chemical time)의 사용 가능성을 살펴보았다.

Table 1. Experimental conditions.

Fuel type	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
u (m/s)	20		
ϕ	0.70	0.85	0.85
τ_{chem} [ms]	0.739	0.732	0.776
f_{ac} [Hz]	200/300		
P_{ac} [W]	6.3, 25.0, 56.2		
Reynolds number	31804		
Strouhal number	0.250/0.375		
Damköhler number	6.77/4.51	6.83/4.55	6.44/4.30

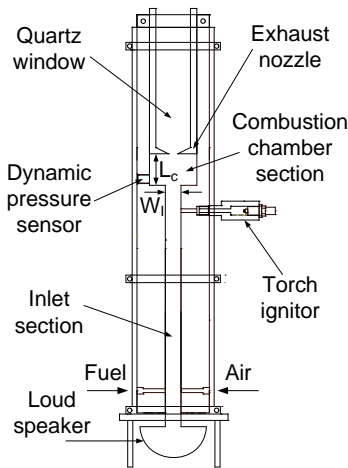


Fig. 1 Schematic of present model combustor.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 모델 연소기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 입구 영역의 단면은 25×25 mm이며, 길이는 360 mm이다. 연소실 영역의 단면은 25×75 mm이며, 길이(Lc)는 노즐의 위치를 조절하여 변경이 가능하지만 본 연구에서는 75 mm로 고정하였다. 연소 현상을 관찰하기 위해 연소기 앞/뒷면에 두께 25 mm의 석영 가시화창을 배치하였다. 메탄과 산소를 이용한 토치 점화기는 연소실 덤프 평면으로부터 40 mm 전단에 설치하였다. 연료와 공기는 연소기 하단 35 mm 위치에서 대칭으로 주입되었고, 이들의

유량제어는 질식 오리피스와 레귤레이터를 사용하였다.

제어 전/후의 압력섭동을 측정하기 위해 연소실 벽면에 동압센서(PCB, 123A21)를 삽입하였다. 압력섭동 신호는 신호조정기(PCB, 482A16)에 의해 100배 증폭되어 NI c-DAQ에 10 kHz로 기록되었다. 연소불안정 제어를 위해 최대 출력 75 W, 8 Ω 를 갖는 음향 발생기를 연소기 입구 하단에 설치하여, 예혼합된 유동에 압력파를 공급하였다. 함수발생기(NI, VirtualBench)에서 생성된 저출력의 사인파는 앰프(Inkel, AX5505)를 통해 증폭되어 음향 발생기에 전압을 공급하였다.

2.2 실험조건

연소불안정 강도가 높은 조건에서 개루프 제어를 적용하기 위해, 제어실험 전 각 연료마다 입구속도와 당량비의 변화에 따른 연소실 내 압력섭동을 먼저 측정하였다. 저장된 압력섭동 데이터는 30 ~ 3,000 Hz 대역 필터(band-pass filter)를 이용하여 노이즈와 DC 성분이 제거된 후, RMS(root mean square)와 PSD(power spectral density) 값의 계산에 사용되었다. 각 연료별 압력섭동의 RMS 값을 Fig. 2에 도시하였다. C₂H₄의 경우 당량비가 0.7 보다 큰 경우 역화가 발생하여 실험을 더 이상 진행하지 않았다. 따라서 C₂H₄는 연소불안정이 가장 강한 조건인 $u = 20$ m/s, $\phi = 0.70$ 에서 개루프 제어실험을 수행하였다.

동일한 유속, 당량비 조건이라 할지라도, 연료의 종류가 다르면 화학적 반응율의 차이로 인해

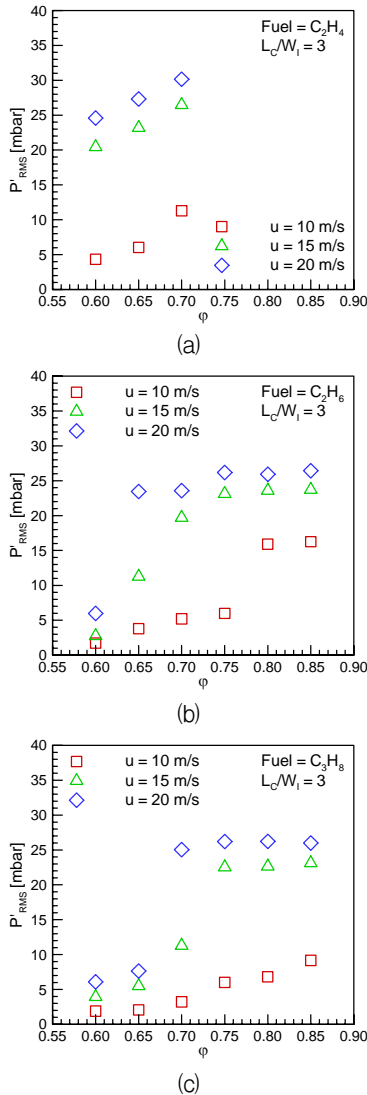


Fig. 2 RMS values of filtered pressure fluctuations: (a) C_2H_4 , (b) C_2H_6 , and (c) C_3H_8 .

화염구조가 상당히 달라질 수 있다[20,21]. 또한 PSD나 불안정 주파수와 같은 연소불안정 특성도 큰 차이가 나타날 수 있다. 하지만 기존 연구에서 특성화확시간이 유사한 조건에서 실험을 한다면, 연소불안정 특성 또한 연료에 관계없이 비슷한 결과를 얻을 수 있었다[22]. 본 연구는 동일한 음향가진 조건에서 연료별 제어성능을 확인하는데 목적이 있으므로, 특성화확시간을 사용하여 연소불안정 특성이 유사한 조건에서 실험을

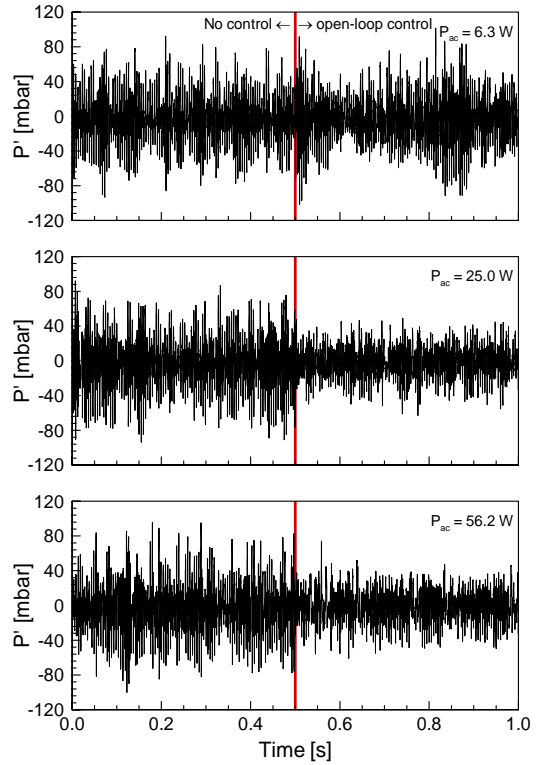


Fig. 3 Time histories of the filtered dynamic pressure data from hot-firing tests using C_2H_4 fuel.

를 수행하였다.

특성화확시간은 아래와 같이 정의되었다[23].

$$\tau_{chem} = \frac{S_L}{\Delta x} \quad (1)$$

여기서 층류화염속도(S_L)와 화염두께(Δx)는 Götgens 등[24]이 제시한 경험식을 통해 계산하였다. 따라서 C_2H_6 와 C_3H_8 또한 C_2H_4 의 조건과 유사한 특성화확시간을 갖는 조건에서 실험을 수행하기 위해 당량비를 0.85까지 증가시켰다. Fig. 2에서와 같이 C_2H_6 와 C_3H_8 의 경우 $u = 20$ m/s, $\phi = 0.85$ 에서 연소불안정의 강도가 가장 크게 나타났다. 이때 각 연료의 특성화확시간은 Table 1에서와 같이 0.73 ~ 0.78 ms로 유사한 값을 갖는다. 사용 연료별 개루프 제어실험에서의 유속, 당량비, 음향 발생기의 주파수와 출력의 크기, 그리고 그에 해당하는 무차원 수를 Table

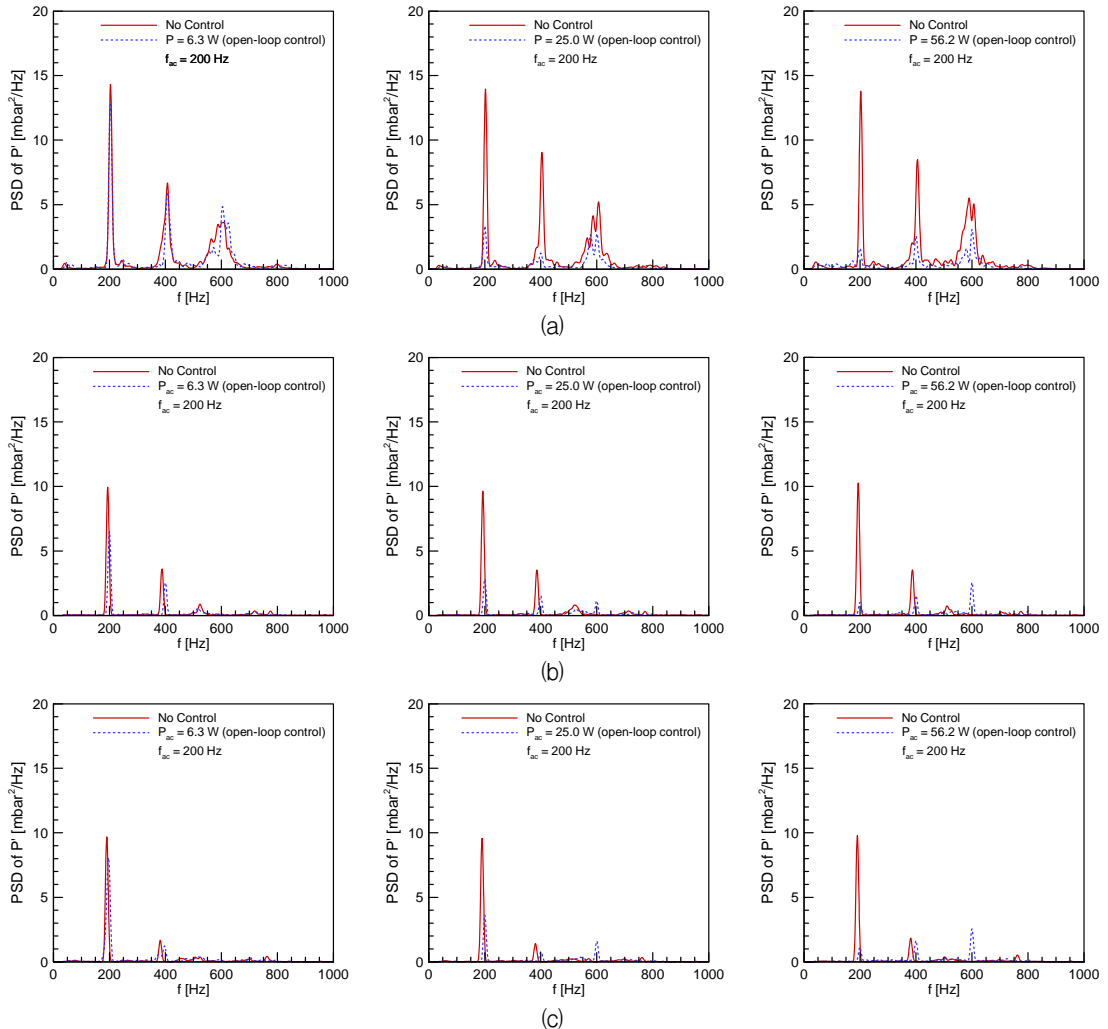


Fig. 4 PSD data of pressure fluctuations by 200 Hz open-loop control(from top to bottom: C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8).

1에 정리하였다.

3. 실험결과

3.1 음향가진 출력 변화에 따른 개루프 제어성능

Fig. 3은 C_2H_4 를 이용한 연소실험에서 필터 처리된 압력섭동의 결과를 나타낸다. 초기 0.5초는 음향 발생기를 작동하기 전의 연소불안정 상태를 나타내며, 0.5 ~ 1.0초는 200 Hz 개루프 제어 시의 결과를 보여준다. 음향출력에 따라 제어결과들의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 6.3 W

의 출력으로 개루프 제어를 수행한 경우 압력섭동의 크기가 제어 전과 거의 동일한 수준을 유지하였다. 하지만 25.0 W, 56.2 W의 음향가진을 공급하였을 경우 압력섭동의 크기가 제어 전에 비해 줄어든 것을 확인할 수 있다.

200 Hz 개루프 제어실험의 결과를 더욱 직관적으로 분석하기 위해, 필터된 압력섭동을 FFT하여 PSD로 변환한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 유사한 특성화확시간을 갖는 조건이었기 때문에, 제어 전 연소불안정의 주파수와 PSD는 연료에

Table 2. Summary of experimental results by 200 Hz open-loop control.

Fuel	PSD of P' near 200 Hz [mbar^2/Hz]		RMS of P' [mbar]	
	No control	200 Hz, 6.3 W	No control	200 Hz, 6.3 W
C_2H_4	14.3	12.7	30	26.2
C_2H_6	9.9	6.5	26	15.2
C_3H_8	9.7	8.0	26	14.4
	No control	200 Hz, 25.0 W	No control	200 Hz, 25.0 W
C_2H_4	13.9	3.1	30	16.6
C_2H_6	9.6	2.8	26	15.5
C_3H_8	9.6	3.6	26	13.9
	No control	200 Hz, 56.2 W	No control	200 Hz, 56.2 W
C_2H_4	13.8	1.5	30	17.4
C_2H_6	10.0	1.0	26	15.7
C_3H_8	9.8	1.0	26	14.2

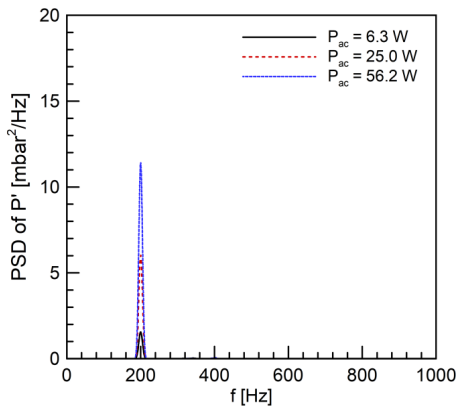


Fig. 5 PSD data of pressure fluctuations from the loudspeaker.

상관없이 거의 차이를 보이지 않았다. Fig. 4(a)는 Fig. 3과 동일한 실험조건의 결과이다. 출력이 6.3 W인 경우 Fig. 3과 마찬가지로 기존 종방향 모드 연소불안정 주파수인 200 Hz의 PSD가 크게 낮아지지 않았다. 하지만 25.0 W의 경우 최대 14 mbar^2/Hz 의 PSD가 3 mbar^2/Hz 정도로 감소되었으며, 56.2 W의 경우 제어 이후 200 Hz 대역의 PSD는 1.5 mbar^2/Hz 로 가장 좋은 제어성능을 보여주었다.

C_2H_6 와 C_3H_8 연료들의 개루프 제어결과 또한 C_2H_4 의 결과와 거의 유사한 것을 Table 2를 통해 확인할 수 있다. 출력이 25.0 W의 경우 제어

이후 최대 PSD는 C_2H_4 와 거의 일치하는 대략 3 mbar^2/Hz 를 보여주었으며, 56.2 W의 경우에도 200 Hz 대역의 PSD는 1 mbar^2/Hz 를 나타내었다. 이러한 결과로부터 특성화시간이 동일한 조건에서 측정된 연소불안정 특성과 연소불안정 제어결과는 유사한 경향성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

음향 발생기 출력에 따른 제어성능의 변화를 분석하기 위해, 비연소/비유동 조건에서 음향 발생기 출력을 변화시켜가며 음파섭동을 측정하였으며 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 출력이 6.3 W인 경우 음파섭동의 PSD는 1.5 mbar^2/Hz 로, 연소불안정의 PSD가 대략 10.0 mbar^2/Hz 이므로 음향 발생기의 출력이 연소불안정을 제어하기에는 현저히 낮았던 것으로 판단된다. 음향발생기 출력이 25.0 W, 56.2 W인 경우 음파섭동의 PSD는 6 mbar^2/Hz , 11.5 mbar^2/Hz 로, 연소불안정 PSD의 절반 이상이었다. 따라서 음향 발생기를 이용한 연소불안정 제어는 음향출력이 연소불안정 강도 대비 일정 수준 이상 커야 한다는 것을 알 수 있다.

3.2 음향가진 주파수 변화에 따른 개루프 제어 성능

Fig. 4의 결과를 바탕으로 제어성능이 가장 우수하다고 판단된 출력 56.2 W에서 가진 주파수

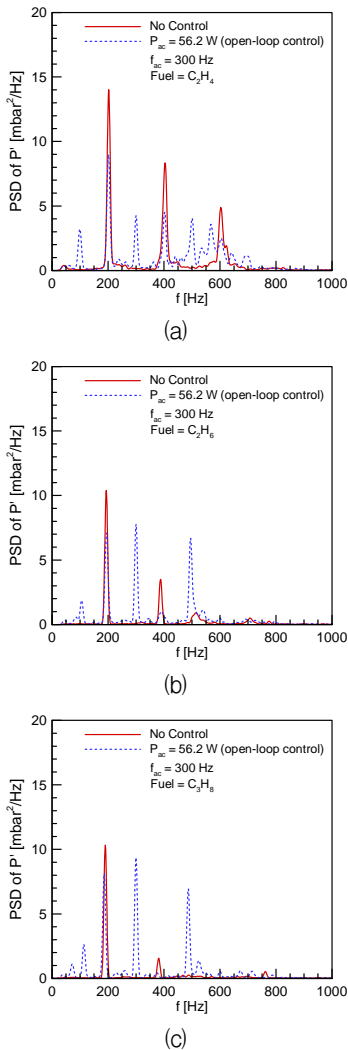


Fig. 6 PSD data of pressure fluctuations by 300 Hz open-loop control(from top to bottom: C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8).

를 300 Hz로 변화시켜 개루프 제어실험을 반복하였다. Fig. 6은 연료별 제어결과를 나타낸다. 충분한 출력에서 실험을 수행했음에도 불구하고 연소불안정 주파수인 200 Hz의 PSD를 크게 감소시키지 못하였다. 또한 음향가진 주파수인 300 Hz에서 뿐 아니라, 동조 주파수가 아닌 500 Hz에서도 상당한 크기의 PSD가 관찰되었다. 이는 300 Hz의 음향섭동과 연소불안정 압력섭동이 Fig. 4와는 다르게 상호작용했기 때문이다. 이러

한 결과로부터 연소불안정 개루프 제어를 위해서는 연소불안정 주파수와 동일한 제어 주파수를 사용하는 것이 효과적인 방법이라고 판단된다.

4. 결 론

기존 기체 탄화수소 연료를 이용하는 모델 덤프 연소기의 연소시험에서 연소불안정 현상이 관측되었으며, 연료의 특성화학시간이 유사하다면 사용된 연료(C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8)들에서 연소불안정 특성 또한 비슷한 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 이러한 연소불안정 개루프 제어특성을 살펴보기 위해, 음향 발생기의 출력과 주파수의 변화에 따른 실험을 수행하였다.

첫째로, 개루프 제어 주파수를 연소불안정 주파수와 유사한 값($f_{ac} = 200$ Hz)으로 선택하여 음향 발생기의 출력을 6.3 W에서 56.2 W까지 변화시켰다. 동일한 음향조건 하에서의 실험결과는 사용된 연료(C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8)에 관계없이 연소불안정 제어성능이 비슷한 결과를 보여주었다. 하지만 연소불안정 강도에 비해 현저히 낮은 음향출력 조건에서는 제어가 이루어지지 않는 모습을 보였다. 음향출력이 연소불안정 강도에 비해 절반 이상일 때 의미 있는 제어결과가 도출되었다.

둘째로, 음향 발생기의 출력을 충분히 높게 유지한 상태($P_{\infty} = 56.2$ W)에서 개루프 제어 주파수를 연소불안정 주파수와 다른 300 Hz로 증가시켜 실험을 반복하였다. 하지만 300 Hz의 음향출력은 기존 연소불안정 주파수(200 Hz) 대역의 압력섭동을 거의 감소시키지 못하였다. 이로부터 음향 발생기를 이용한 개루프 제어조건은 연소불안정의 음향모드를 고려해야 함을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A5A1073861, N

RF-2017R1A1A1A05001237, NRF-2018M1A3A3A 02065683)을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Lefebvre, A.W., "Lean Premixed/Prevaporized Combustion," NASA CP-2016, 1977.
2. Foglesong, R.E., Frazier, T.R., Flamand, L.M., Peters, J.E. and Lucht, R.P., "Flame Structure and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Los Angeles, CA, U.S.A., AIAA 1999-2399, 1999.
3. Lieuwen, T.C. and Yang, V., *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling*, Frank, K.L., Reston, U.S.A., Vol. 210, Sep. 2005.
4. Schadow, K.C., Gutmark, E., Wilson, K.J. and Smith, R.A., "Multistep Dump Combustor Design to Reduce Combustion Instabilities," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 6, No. 4, pp. 407-411, 1990.
5. Schadow, K.C., Gutmark, E., Wilson, K.J. and Smith, R.A., "Noncircular Inlet Duct Cross-Section to Reduce Combustion Instabilities," *Combustion Science and Technology*, Vol. 73, pp. 537-553, 1990.
6. Tachibana, S., Zimmer, L., Kurosawa, Y. and Suzuki, K., "Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Combustor by Secondary Fuel Injection Coupling with Chemiluminescence Imaging Technique," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 3225-3233, 2007.
7. Poinso, T.J., Trouve, A.C., Veynante, D.P., Candel, S.M. and Esposito, E.J., "Vortex-Driven Acoustically Coupled Combustion Instabilities," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 177, pp. 265-292, 1987.
8. Culick, F.E.C., "Combustion Instabilities Driven by Thermo-Chemical Acoustic Sources," *ASME, NCA-Vol. 4 (HTD-Vol. 128)*, pp. 33-52, 1989.
9. Yu, K.H., Trouve, A. and Daily, J.W., "Low-Frequency Pressure Oscillations in a Model Ramjet Combustor," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 232, pp. 47-72, 1991.
10. Byrne, R.W., "Longitudinal Pressure Oscillations in Ramjet Combustors," *19th Joint Propulsion Conference*, Seattle, W.A., U.S.A., AIAA 1983-2018, 1983.
11. Gutmark, E., Schadow, K.C., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H., "Interaction Between Fluid-Dynamic and Acoustic Instabilities in Combusting Flows Within Ducts," *Combustion Science and Technology*, Vol. 79, pp. 161-166, 1991.
12. Sterling, J.D. and Zukoski, E.E., "Longitudinal Mode Combustion Instabilities in a Dump Combustor," *25th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 87-0220, 1987.
13. Poinso, T., Bourienne, F., Candel, S. and Esposito, E., "Suppression of Combustion Instabilities by Active Control," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 5, No. 1, pp. 14-20, 1989.
14. Lang, W., Poinso, T. and Candel, S., "Active Control Combustion Instability," *Combustion and Flame*, Vol. 70, pp. 281-289, 1987.
15. Schadow, K.C., Gutmark, E. and Wilson, K.J., "Active Combustion Control in a Coaxial Dump Combustor," *Combustion Science and Technology*, Vol. 81, pp. 285-300, 1992.

16. Gulati, A. and Mani, R., "Active Control of Unsteady Combustion-Induced Oscillations," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 8, No. 5, pp. 1109-1115, 1992.
17. Paschereit, C.O. and Gutmark, E., "Proportional Control of Combustion Instabilities in a Simulated Gas-Turbine Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 6, pp. 1298-1304, 2002.
18. Dowling, A.P. and Morgans, A.S., "Feedback Control of Combustion Oscillations," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 37, pp. 151-182, 2005.
19. Moeck, J.P., Bothien, M.R., Guyot, D. and Paschereit, C.O., "Phase-Shift Control of Combustion Instability Using(Combined) Secondary Fuel Injection and Acoustic Forcing," *Active Flow Control*, Vol. 95, pp. 408-421, 2007.
20. Ahn, K. and Yu, K.H., "Effects of Damkohler Number on Vortex-Flame Interaction," *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp. 686-696, 2012.
21. Hwang, D. and Ahn, K., "A Study on Heat Release Fluctuation Using Various Hydrocarbon Fuels," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 6, pp. 1-10, 2016.
22. Hwang, D., Song, Y. and Ahn, K., "Combustion Instability Characteristics in a Dump Combustor Using Different Hydrocarbon Fuels," *23rd ISABE Conference*, Manchester, England, ISABE 2017-21433, Oct. 2017.
23. Sterling, J.D., "Longitudinal Mode Combustion Instabilities in Air Breathing Engines," Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, C.A., U.S.A., 1987.
24. Gottgens, J., Mauss, F. and Peters, N., "Analytic Approximations of Burning Velocities and Flame Thicknesses of Lean Hydrogen, Methane, Ethylene, Ethane, Acetylene, and Propane Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 24, pp. 129-135, 1992.