

덤프 연소기에서의 연소불안정과 능동제어에 대한 연구

안규복* · Kenneth Yu** · 윤영빈***

Combustion Instability and Active Control in a Dump Combustor

Kyubok Ahn* · Kenneth Yu** · Youngbin Yoon***

ABSTRACT

The mixed acoustic-convective mode combustion instability and the possibility of combustion control using a loudspeaker to these instabilities were studied. By changing inlet velocity, combustor length and equivalence ratio, the dynamic pressure signals and the flame structures were simultaneously taken. The results showed that as the combustor length increased and the inlet velocity decreased, the instability frequency decreased and the maximum power spectral densities of the dynamic pressures generally decreased. The instability frequency could be affected by an equivalence ratio over the operating conditions. From the data of close-loop control, as the loudspeaker may work out-of-phase with the natural instability, the optimum time-delay controller was confirmed to be able to reduce the vortex shedding from the mixed acoustic-convective mode combustion instability.

초 록

혼합 acoustic-convective 모드 연소불안정과 스피커를 이용한 능동제어의 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 유입속도, 연소실 길이, 당량비를 변화시켜 가면서 동압과 화염구조를 동시 측정하였다. 유입속도와 연소실 길이는 덤프 연소기에서의 와류 생존시간에 영향을 주기 때문에, 연소실 길이가 길어질수록 그리고 유입속도가 작아질수록 연소불안정의 주파수는 작아지고, 동압에서 얻어진 최대 전력스펙트럼밀도 또한 전반적으로 작아지는 경향을 보였다. 당량비에 따라 불안정의 강도와 주파수 특성도 변했는데, 당량비의 증가에 따라 불안정 주파수와 연소불안정 강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 폐루프 방식의 제어를 통하여 스피커를 이용한 능동제어는 이러한 혼합 acoustic-convective 모드 연소불안정으로 발생하는 와류의 발전을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Dump Combustor(덤프연소기), Combustion Instability(연소불안정), Combustion Control (연소제어)

* 한국항공우주연구원 연소기그룹

** University of Maryland at College Park

*** 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: kbahn@kari.re.kr

덤프 연소기에서의 연소불안정을 유발하는 큰 구조의 와류 발생에 대해 그동안 많은 연구가 수행되어왔다[1-4]. 특히, Yu 등[4]은 모델 램젯 연소기에서의 저주파 연소불안정을 연구하였다. 그들의 결과에 따르면 연소실 유입구는 음파 공진기의 역할을 수행하지만 연소불안정의 주파수는 특정값에 고정되지 않고, 주기적인 와류의 생성에 따른 화염면의 운동에 연관된다는 사실을 밝혀내었다. 따라서 연소불안정 주파수는 연소실에서의 와류운동과 유입구에서의 음파의 반응시간에 영향을 받는다는 것이다.

많은 연구에도 불구하고, 노즐을 갖는 폐쇄 구조의 덤프 연소기에 대한 실험적 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유입속도, 연소실 길이 그리고 당량비를 변수로 설정하여, 이에 따라 연소불안정이 어떠한 영향을 받는지 살펴 보았고, 스피커를 이용한 이러한 연소불안정의 능동제어 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1은 본 연구에 사용된 예혼합 연소기의 개략도이다. 실험장치는 덤프 연소기, 토치 점화기, 압력 센서, 공기/연료 공급 시스템 그리고 약간의 전기장비들로 구성되어 있다. 덤프 연소기는 연소실험을 위하여 스피커의 조인트를 제외한 부분은 스테인리스강으로 제작되었으며, 화염 측정을 위하여 앞, 뒷면은 1인치 두께의 석영 유리로 가시화창을 두었다. 예혼합 연소 실험을 위하여 혼합챔버 하단부에 공기와 연료의 노즐을 대칭적으로 설치하였으며, 유량제어를 위하여 choking orifice를 이용하였다. 흡입구의 가로, 세로, 높이 길이는 1 x 1 x 15 인치이며, 연소실은 1 x 3 x 10.75 인치 크기의 모델로 제작되었다. 또한 연소실에 들어오는 반응물의 안정화를 위하여 흡입구 끝단에 honeycomb을 설치하였으며, 압력변화를 측정하기 위하여 유입구 벽면에 압력게이지를 설치하였다. 연료로는 C_2H_4 를 사

용하였으며, 산화제로는 공기를 사용하였다. 주 연료의 점화를 위해서 토치 점화기를 사용하였는데 이를 위해 수소와 산소가 2차 연료와 산화제로 사용되었다. 연소불안정을 제어하기 위한 음파 가진기로써 스피커를 유입구 끝단에 설치하였다.

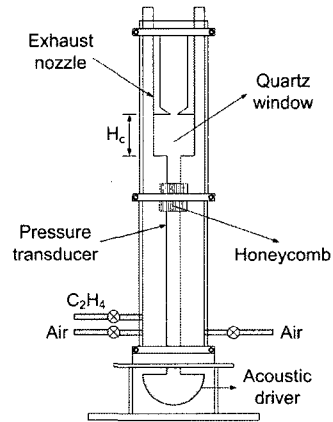


Fig. 1 Schematic of the Model Dump Combustor

2.2 실험방법 및 조건

연소실에서의 압력신호를 측정하기 위해 압력 게이지를 이용하여 동압을 측정하였으며, 가진되어 조직화된 큰 와류구조를 가시화하기 위해 반응물과 생성물의 경계면을 빠르게 가시화할 수 있는 고속 슐리렌 기법을 이용하였다. 동압센서는 연소실 입구로부터 127 mm 전단 벽면에 설치하였다. 덤프 높이는 25.4 mm, 연소실 출구 노즐은 12.7 mm x 25.4 mm의 축소부를 갖도록 하였다. 노즐은 스테인리스강으로 제작되어 연소실 벽면에 부착될 수 있도록 하였다.

실험변수로서 유입속도, 연소실 길이, 당량비를 변화시켰는데 Table 1과 같이 유입속도는 12.5 m/s에서 20.0 m/s, 연소실 길이는 50.8 mm에서 127.0 mm, 당량비는 0.6에서 0.7까지로 변화시켰다.

5000 Hz로 측정된 동압신호는 증폭된 후, National Instrument 보드에 연결된 PC에 의해 기록되고, FFT 방법으로 스펙트럼 분석하였다.

또한 동압신호는 필터링 후 설정된 time-delay를 갖고 스피커에 전달될 수 있도록 다른 National Instrument 보드를 사용하였다.

Table 1. Experimental Conditions

연소실 길이 [H_c]	유입속도 [u]	당량비
50.8 mm	12.5, 15.0, 17.5, 20.0 m/s	0.6, 0.65, 0.7
76.2 mm	12.5, 15.0, 17.5, 20.0 m/s	0.6, 0.65, 0.7
101.6 mm	12.5, 15.0, 17.5, 20.0 m/s	0.65
127.0 mm	12.5, 15.0, 17.5, 20.0 m/s	0.65

3. 실험결과 및 분석

3.1 연소불안정 가시화

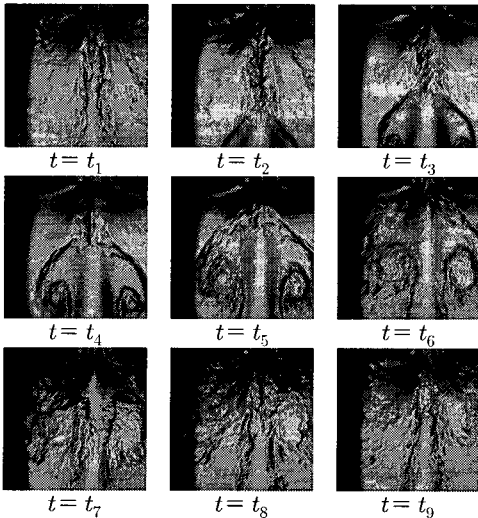


Fig. 2 Sequence of Vortex Shedding and Its Pressure Signal during an Unstable Mode Operation for the Case Where $u = 15.0$ m/s, $\phi = 0.65$ and $H_c = 76.2$ mm

고속카메라(Photron, Ultima 1024)와 솔리렌

기법을 이용하여 한번의 연소불안정 사이클 동안에 일어나는 순간 화염 구조를 포착하여, 압력 센서로부터 얻어진 동압신호와 비교한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 솔리렌 기법은 차가운 반응물과 뜨거운 생성물 사이의 영역을 나타내며, Fig. 2로부터 큰 구조의 와류가 주기적으로 생성, 확장, 노즐에 충돌된 후 깨어지고 반응물이 급격히 연소된다는 것을 알 수 있다. 고속 솔리렌 사진과 동압결과로부터 큰 구조의 와류가 노즐에 충돌하는 시점과 압력의 최대점이 일치하는 경향을 확인할 수 있었다.

3.2 유입속도와 연소실 길이에 따른 연소불안정 변화

예혼합 가스의 연소실 유입속도와 연소실 길이를 바꾸어가며 동압신호를 측정하여 연소불안정의 주파수와 최대 전력스펙트럼밀도의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 예혼합 가스의 당량비는 0.65로 고정을 하여 실험을 수행하였다. 유입속도와 연소실 길이는 덤프 연소실에서의 와류가 생성되어 노즐에 충돌되어 연소되는 생존시간에 영향을 줄 수 있기 때문에, 연소실 길이가 증가할수록 그리고 유입속도가 작아질수록 연소불안정의 주파수는 감소하는 결과를 나타내었다. 또한 전반적으로 연소실 길이가 증가할수록 그리고 유입속도가 작아질수록 최대 전력스펙트럼밀도는 감소하는 경향을 나타내었다.

Yu 등[4]의 결과에 따라, 연소불안정 주파수의 역수가 되는 불안정 주기를 연소실 길이와 유입속도로 정의된 H_c/u 로 정규화하여 Fig. 4에 나타내었다. 데이터로부터 1차 선형계수를 구해본 결과 0.9652의 기울기를 가지며, 3.182 ms의 y 절편을 갖는 다음과 같은 식을 유도할 수 있었다.

$$\tau_{period} = 0.9652 \times \frac{H_c}{u} + 3.182 \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 y 절편값인 3.182 ms 시간은 압력파가 유입구와 스피커를 왕복하는 시간으로 여겨지며, Yu 등이 제시했듯이, 덤프 연소기에서 연소불안정 주기는 H_c/u 의 전달시간과 유입구를 왕복하

는 음파시간으로부터 결정될 수 있음을 알 수 있었다.

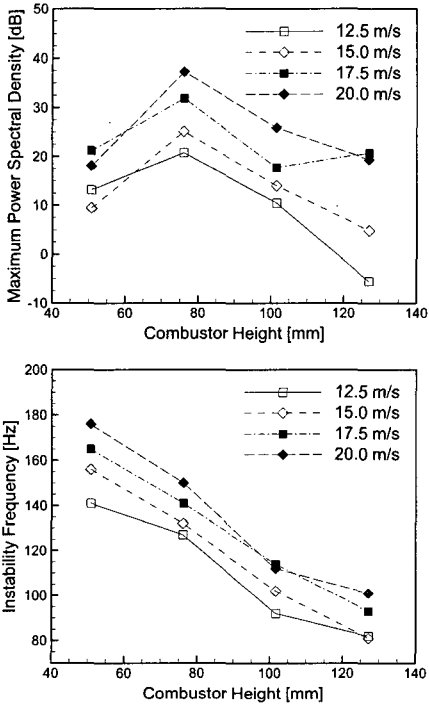


Fig. 3 Summary of Instability Frequencies and Maximum Power Spectral Densities as Functions of Inlet Velocity and Combustor Height

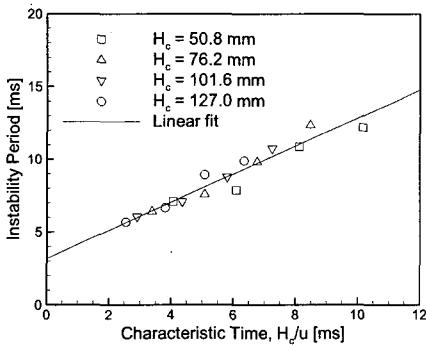


Fig. 4 Measured Period of Oscillation as a Function of the Characteristics Flow Residence Time H_c/u

3.3 당량비에 따른 연소불안정 변화

앞에서 살펴보았듯, 짧은 유입구 길이와 연소실 노즐을 갖는 덤프 연소기의 연소불안정 주기는 음파의 왕복시간과 와류의 생존시간이라는 특성시간들로부터 얻어질 수 있음을 확인했다. 이번에는 당량비에 따라 연소불안정의 특성이 어떻게 달라지는 대한 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

당량비가 증가함에 따라 불안정 주파수와 최대 전력스펙트럼밀도는 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 연소실에서의 연소능력이 증대되면서 연소압이 강해지며, 온도가 높아짐에 따라 음파의 왕복시간이 감소하게 됨으로써 불안정 주파수는 작아진다고 추측할 수 있다.

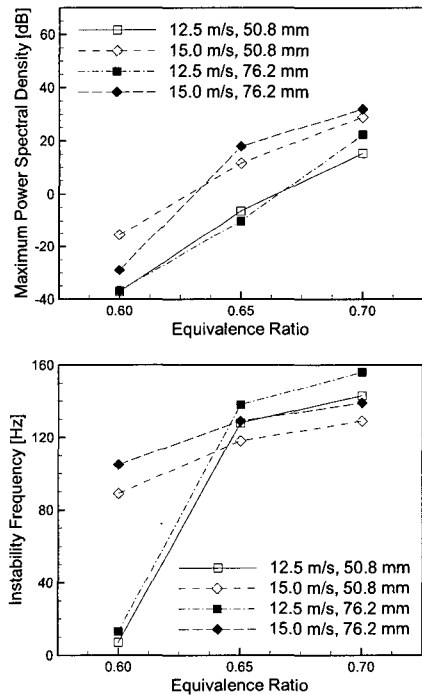


Fig. 5 Summary of Instabilities and Maximum Power Spectral Densities as a Function of Equivalence Ratio

3.4 연소불안정의 능동제어

짧은 유입구와 연소실 노즐을 갖는 덤프 연소

기에서의 연소불안정을 능동제어하기 위해 개루프 방식과 폐루프 방식의 제어기법을 사용하였고, 폐루프 방식의 가장 간단한 방식의 하나인 time-delay 제어 기법을 적용한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 동압센서로부터 측정된 신호를 Butterworth bandpass filter로 필터링한 후 time-delay를 추가하여 스피커에 신호를 줌으로써 연소불안정과 스피커의 위상을 변화시켜 주었다. 1.2 ms의 time-delay를 주었을 경우 연소불안정과 스피커의 가진이 in-phase 되면서 전력 스펙트럼에서의 최대점이 증가하였으나 4.2 ms의 time-delay를 주었을 경우에는 out-of-phase 되면서 최대점이 상당히 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 고속 슬리텐 기법에서 얻어진 결과로부터 4.2 ms의 time-delay 경우 와류의 발전이 저지된다는 사실로부터도 확인할 수 있었다.

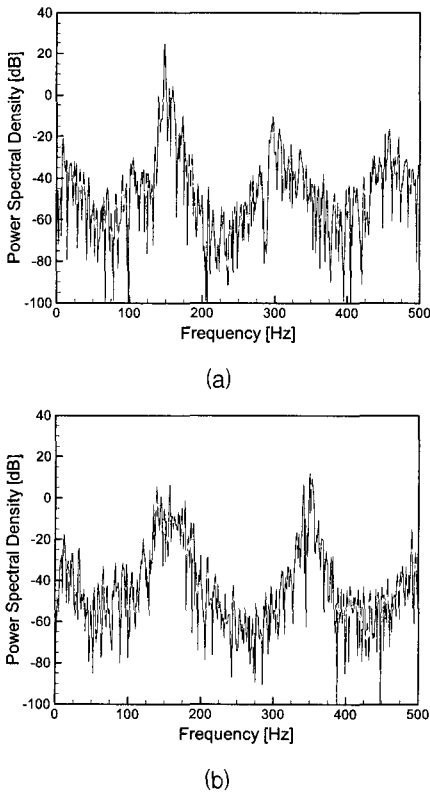


Fig. 6 Spectral Analysis of the Pressure Signals with the Time-delay Controller for the Case

Where $u = 15.0$ m/s and $H_c = 50.8$ mm: (a) Time-delay of 1.2 ms and (b) Time-delay of 4.2 ms

4. 결 론

혼합 acoustic-convective 모드 연소불안정과 스피커를 이용한 능동제어의 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 예혼합 가스의 유입속도, 연소실 길이의 변화는 와류의 생존시간(convective time)에 영향을 주고, 당량비의 변화는 음파의 왕복시간(acoustic time)에 영향을 줌으로써 덤프 연소기에서의 연소불안정의 주기와 강도에 영향을 줄 수 있음을 확인하였으며, 스피커를 이용한 폐루프 방식의 능동제어 결과로부터 최적화된 time-delay 제어방식으로 이러한 연소불안정의 발생, 즉 와류의 발생을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Byrne, R. W., "Longitudinal Pressure Oscillations in Ramjet Combustors," AIAA Paper 83-2018, 1983
2. 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, 1991, pp.161-166
3. Poinot, T. J., Trounev, D. P., Veynante, S. M., Candel, S. M. and Esposito, E. J., "Vortex-driven Acoustically Coupled Combustion Instabilities," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 177, 1987, pp.265-292
4. Yu, K. H., Trounev, A. and Daily, J. W., "Low-Frequency Pressure Oscillations in a Model Ramjet Combustor," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 232, 1991, pp.47-72