

論文

덤프 연소기에서의 연소불안정에 대한 실험적 연구

안규복*, Kenneth Yu**, 윤영빈***

Experimental Study on Combustion Instability in a Dump Combustor

Kyubok Ahn*, Kenneth Yu** and Youngbin Yoon***

ABSTRACT

The combustion instability in a model dump combustor with an exhaust nozzle and the possibility of combustion control using a loudspeaker to these instabilities were studied. By changing inlet velocity, combustor length and equivalence ratio, dynamic pressure signals and flame structures were simultaneously taken. Because inlet velocity and combustor length affect the life time of vortex in the dump combustor, the results showed that as the combustor length increased and the inlet velocity decreased, the instability frequency decreased and the maximum power spectral density of the dynamic pressure generally decreased. Also, instability frequency and maximum power spectral density of the dynamic pressure increased with the increment of equivalence ratio. From the data of close-loop control, the optimum time-delay control using a loudspeaker was confirmed to be able to reduce the vortex shedding induced from the mixed acoustic-convective mode combustion instability.

초 록

연소실 출구 노즐을 갖는 모델 덤프 연소기에서의 연소불안정과 스피커를 이용한 능동 제어의 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 예혼합 가스의 유입속도, 연소실 길이, 당량비를 변화시켜가며 동압과 화염구조를 동시에 측정하였다. 유입속도와 연소실 길이는 덤프 연소기에서의 와류 생존시간에 영향을 주기 때문에, 연소실 길이가 길어질수록 그리고 유입속도가 작아질수록 연소불안정의 주파수는 작아지고, 동압에서 얻어진 최대 스펙트럼밀도 또한 전반적으로 작아지는 경향을 보였다. 당량비에 따라 불안정의 강도와 주파수 특성도 변했는데, 당량비의 증가에 따라 불안정 주파수와 연소불안정 강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 페루프 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)

1. 서 론

일반적으로 예혼합 연소기에서의 연소불안정 현상은 큰 스케일의 일관된 구조에 의해 지속된다. 연소반응으로 뜨거워진 생성물은 와류 구조에 의해 새로 유입되는 차가운 반응물과 혼합되

† 2006년 10월 9일 접수 ~ 2006년 11월 2일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기그룹
대전광역시 유성구 어은동 45번지

** University of Maryland at College Park

*** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail : kbahn@kari.re.kr

어 시간적/공간적으로 변화하는 열방출 패턴에 영향을 주게 되고, 열방출의 섭동이 압력의 진동과 같은 위상으로 반응할 때 연소불안정 현상이 발생하게 되는 것이다[1].

덤프 연소기에서 연소불안정을 유발하는 큰 구조의 와류 발생에 대해 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다[1-6]. 특히, Yu 등[6]은 출구 노즐을 갖는 모델 램제트 연소기에서의 저주파 연소불안정을 연구하여, 연소실 유입구가 음파 공진기의 역할을 수행하지만 연소불안정의 주파수는 특정 값에 고정되지 않고 주기적인 와류의 생성에 따른 화염면의 운동에 연관된다는 사실을 밝혀내었다. 따라서 덤프 연소기에서 연소불안정이 발생하는 주파수는 연소실에서의 와류의 생존시간과 유입구에서의 음파의 반응시간에 영향을 받는다는 것이다.

많은 연구에도 불구하고, 노즐을 갖는 폐쇄 구조의 덤프 연소기에 대한 실험적 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 예혼합 가스의 유입속도, 연소실 길이 그리고 당량비를 변수로 이에 따라 연소불안정의 주파수와 강도가 어떠한 영향을 받는지 살펴보았다. 또한 고속솔리덴 기법과 동압 측정을 통하여 이러한 연소불안정에 스피커를 이용한 능동제어의 가능성에 대하여 연구를 수행하였다.

II. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장비는 모델 덤프 연소기, 토치 점화기, 압력 센서, 공기/연료 공급 시스템 그리고 제어/계측을 위한 전기/전자 장비들로 구성되어 있다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 모델 덤프 연소기의 개략도이다. 덤프 연소기의 몸체는 연소실험을 위하여 스테인리스강으로 제작되었으며, 화염 가시화를 위하여 앞, 뒷면은 25.4 mm 두께의 석영 유리를 설치하였다. 예혼합 연소실험을 위하여 연소실 유입구 하단부에 공기와 연료의 노즐을 설치하였으며, 유량제어를 위하여 초킹 오리피스를 이용하였다. 연소실 유입구의 가로, 세로, 높이 길이는 25.4 × 25.4 × 381 mm이며, 연소실은 25.4 × 76.2 × 273 mm 크기의 모델로 제작되었다. 또한 연소실에 들어오는 반응물의 안정화를 위하여 유입구 끝단에 스테인리스강 재질의 honeycomb을 설치하였으며, 압력 변화를 측정하기 위하여 연소실 입구로부터 127 mm 전단 유입구 벽면에 동압센서(Kistler, 211B5, 0~100 psi,

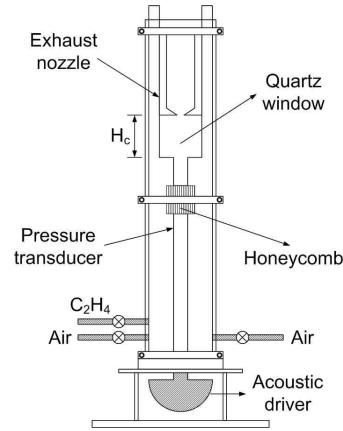


Fig. 1. Schematic of the model dump combustor

0.025~50,000 Hz)를 설치하였다. 덤프 높이는 25.4 mm, 연소실 출구 노즐은 25.4 mm × 12.7 mm의 축소부를 갖도록 스테인리스강으로 제작되었다. Fig. 1에서 보듯, 출구 노즐은 연소실 벽면에 위치를 이동하여 부착될 수 있도록 하여 연소실 길이(H_c)를 변화시키도록 하였다.

연료로는 C_2H_4 를 사용하였으며, 산화제로는 공기를 사용하였다. 주연료의 점화를 위해서 토치 점화기를 사용하였는데 이를 위해 수소와 산소가 2차 연료와 산화제로 사용되었다. 연소불안정을 제어하기 위한 음파 가진기로써 최대 75 W의 출력을 가진 스피커를 유입구 끝단에 설치하였다. 예혼합 가스의 유입속도, 연소실 길이, 당량비에 따른 연소불안정의 변화를 살펴보는 실험에서 스피커는 작동하지 않고 유입구 하단의 기밀 역할만을 수행하였다.

2.2 실험방법 및 조건

연소실에서의 압력 섭동은 동압 센서를 이용하여 측정하였으며, 가진되어 조직화된 큰 와류 구조를 가시화하기 위해 반응물과 생성물의 경계면을 빠르게 가시화할 수 있는 고속솔리덴 기법을 이용하였다. 실험 조건에서 연소불안정의 주파수가 120 Hz 내외인 점을 감안하여 초당 2,000장의 이미지를 얻도록 고속카메라(Photron, Ultima 1024)를 설정하였다.

동압 신호는 증폭된 후 5000 Hz로 NI (National Instrument) 보드에 연결된 IBM 컴퓨터에 의해 기록되고, FFT 방법으로 스펙트럼을 분석하였다. 펄스 제어하는 경우, 동압 신호는 필터링 후 설정된 time-delay를 갖고 스피커에 전달될 수 있도록 다른 NI 보드와 컴퓨터를 사용하였다. 개루프 제어를 하는 경우에는 파동 발생기(Wavetek)

Table 1. Experimental conditions

연소실 길이 [H_c]	유입속도 [u]	당량비(ϕ)
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

를 이용하여 스피커에 신호를 주었으며, 본 실험에서 스피커의 출력은 28.1 W로 고정하여 사용하였다.

실험 변수로써 유입속도, 연소실 길이, 당량비를 변화시켰다. Table 1과 같이 유입속도는 12.5 m/s에서 20.0 m/s, 연소실 길이는 50.8 mm에서 127.0 mm, 당량비는 0.6에서 0.7까지 변화시켜가며, 고속술리렌 이미지와 동압 신호를 측정하였다.

III. 실험결과 및 분석

3.1 연소불안정 가시화

고속카메라와 술리렌 기법을 이용하여 한번의 연소불안정 사이클 동안에 일어나는 순간 화염 구조를 포착하여, 압력 센서로부터 얻어진 동압 신호와 비교한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 술리렌 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. 고속술리렌 사진과 동압 결과로부터 큰 구조의 와류가 노즐에 충돌하는 시점과 압력이 최고점에 이르는 시점이 t_8 으로 거의 일치하는 경향을 확인할 수 있었다. Fig. 2에서 이미지당 시간 간격은 1 ms이다.

3.2 유입속도와 연소실 길이에 따른 연소불안정 변화

예혼합 가스의 연소실 유입속도와 연소실 길이를 바꾸어가며 동압 신호를 측정하여 연소불안정의 주파수와 스펙트럼밀도의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 예혼합 가스의 당량비는 0.65로 고정하여 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 연

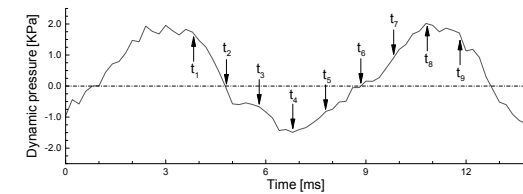
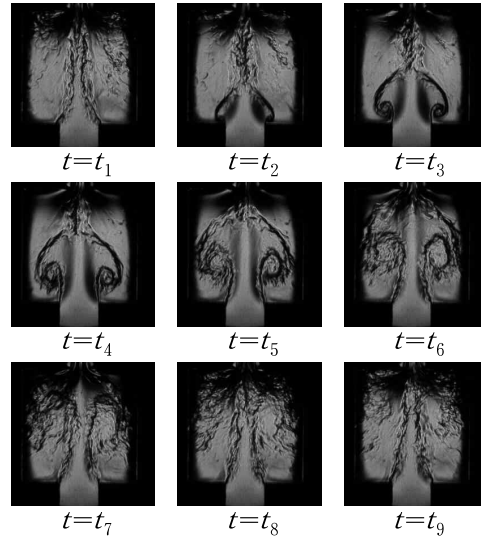


Fig. 2. Sequence of vortex shedding and its pressure signal during an unstable mode operation for the case where $u = 15.0$ m/s, $\phi = 0.65$ and $H_c = 76.2$ mm

소실 길이가 증가할수록 그리고 유입속도가 작아질수록 최대 스펙트럼밀도는 감소하는 경향을 나타내었다.

Yu 등[6]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 0.97의 기울기를 가지며, 3.2 ms의 y 절편을 갖는 다음과 같은 식을 유도할 수 있었다.

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

연소실 유입구 길이(381 mm)만으로 계산된 음파의 반응시간은 2.24 ms로 측정값 보다 작다. 하지만 스피커가 유입구 하단에 부착되어 있어 스피커 내부 길이를 고려한다면 식(1)의 y 절편 값은 압력파가 유입구와 스피커 내부를 왕복하는 시간으로 판단된다. 따라서 Yu 등[6]이 제시했듯이, 덤프 연소기에서 연소불안정 주기는 H_c/u 의 전달시간과 유입구를 왕복하는 음파시간으로부터 결정될 수 있음을 확인할 수 있었다.

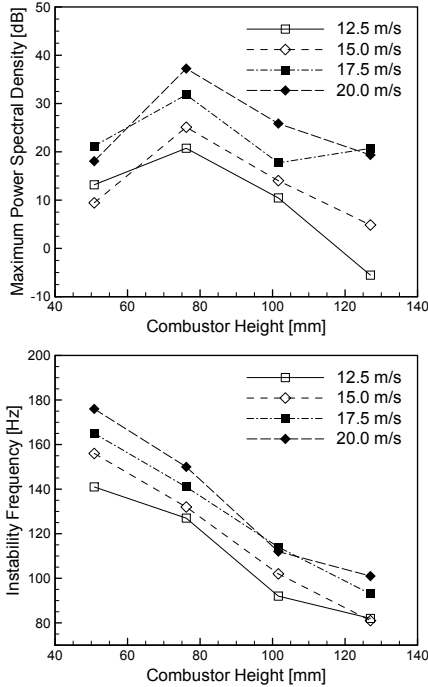


Fig. 3. Summary of instability frequencies and maximum power spectral densities as functions of inlet velocity and combustor height

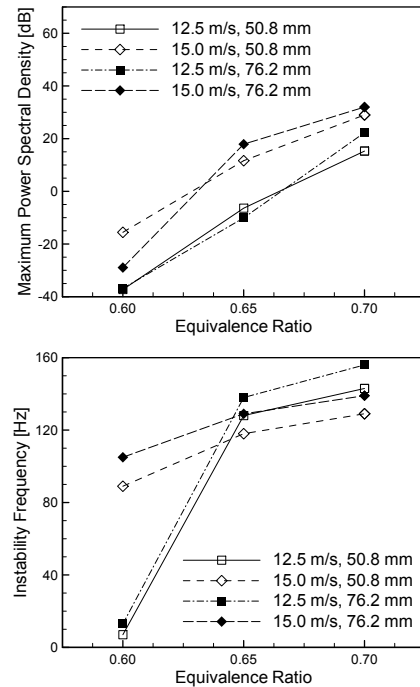


Fig. 5. Summary of instabilities and maximum power spectral densities as a function of equivalence ratio

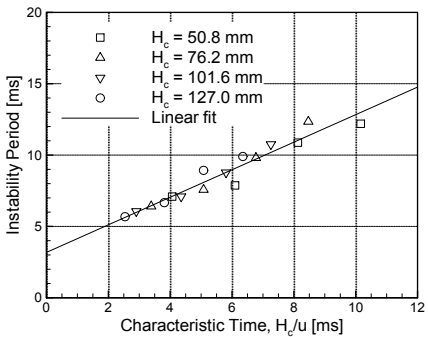


Fig. 4. Measured period of oscillation as a function of the characteristic flow residence time H_c/u

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 확인하였다. 이번에는 당량비에 따라 연소불안정의 특성이 어떻게 달라지는 대한 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

실험은 유입속도 12.5, 15.0 m/s, 연소실 길이 50.8, 76.2 mm인 조건에서 당량비를 0.6, 0.65, 0.7로 증가시키며 수행되었다. 당량비가 커짐에 따라 연소불안정 주파수와 최대 스펙트럼밀도가 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 온도, 연소압, 연소속도, 열방출률의 증가에 따른 결과로 이해될 수 있다. 온도가 높아짐에 따라 유입구에서의 음파의 왕복시간이 감소하게 되고, 연소속도와 열방출률의 증가로 인하여 연소특성이 변화됨으로써 불안정 주파수가 증가한다고 볼 수 있다. 그리고 연소압과 열방출률의 증가로 동압 섭동이 커짐에 따라 최대 스펙트럼밀도 또한 증가한다고 추측할 수 있다.

Fig. 5에서 유입속도 12.5 m/s, 당량비 0.6인 조건에서는 연소불안정 주파수가 일반적인 경향을 따르지 못하고 매우 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 이 조건에서 연소가 연소불안정 영역을 지나 안정적인 영역에 들어와 있기 때문으로 판단된다.

3.4 연소불안정의 능동제어

연소실 노즐을 갖는 덤프 연소기에서의 연소불안정을 능동제어하기 위해 개루프 방식과 time-delay

를 이용한 페루프 방식의 제어기법을 사용하였다. 당량비는 0.65로 동일한 조건에서 수행되었다.

개루프 능동제어 시험의 경우 파동발생기와 스피커를 이용하여 연소 상황과 독립적으로 200 Hz 신호를 28.1 W의 출력으로 유입구 하단에 제공하였다(Fig. 1). 시험결과 개루프 제어방식은 평균적으로 동압 섭동의 강도를 약간 감소시킬 수는 있었지만, 고속슬리렌 측정결과 연소불안정과 스피커에 의한 음파의 위상 관계에 따라 연소불안정이 감소되기도 증폭되기도 하였다[7].

개루프 능동제어 시험 결과와 스피커의 작동 가능한 주파수 범위(125 ~ 8000 Hz)를 고려하여 유입속도 12.5, 15.0 m/s, 연소실 길이 50.8 mm 인 조건에 대하여 페루프 능동제어를 적용하여 보았다.

유입속도 15.0 m/s, 연소실 길이 50.8 mm인 조건에서 페루프 능동제어의 가장 단순한 방식인 time-delay 제어를 적용한 결과를 Fig. 6, 7에 나타내었다. 동압센서로부터 측정된 신호를 Butterworth

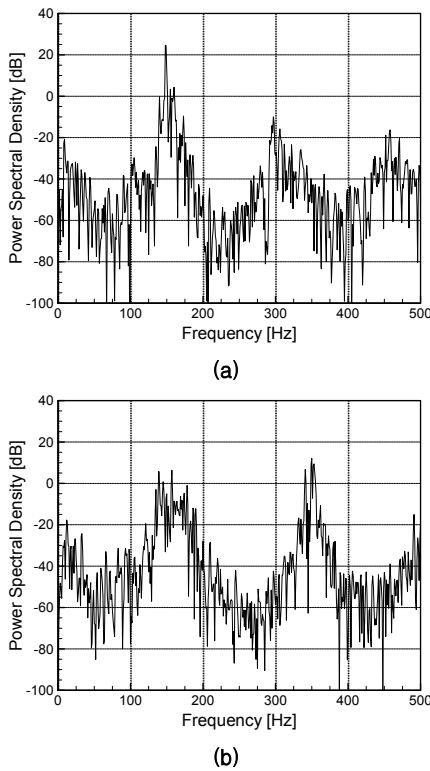


Fig. 6. Spectral analysis of the pressure signals with the time-delay controller for the case where $u=15.0$ m/s and $H_c=50.8$ mm: (a) time-delay of 1.2 ms and (b) time-delay of 4.2 ms

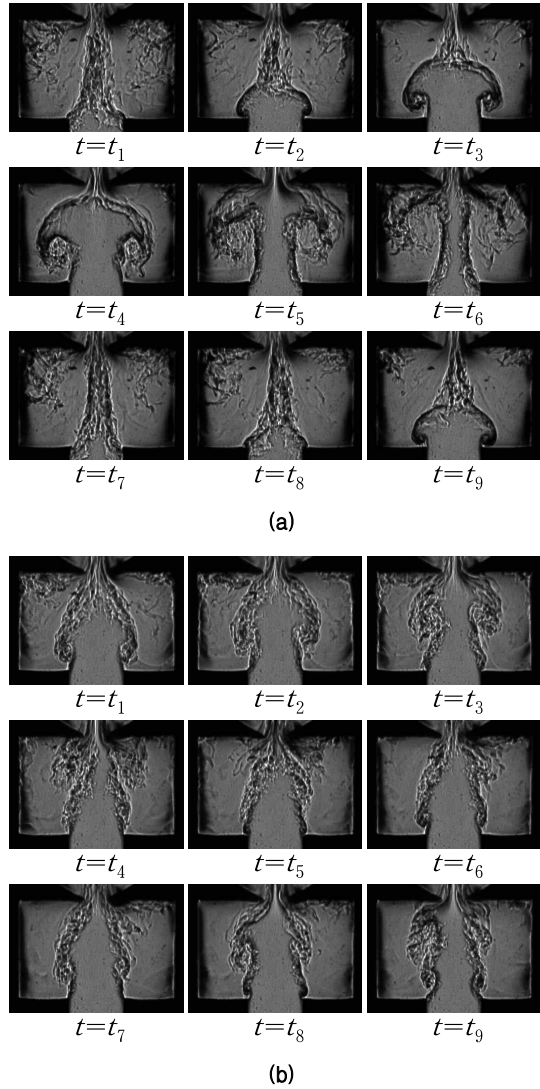


Fig. 7. Sequence of flame shape using the time-delay controller for the case where $u = 15.0$ m/s and $H_c = 50.8$ mm: (a) with 1.2 ms time-delay and (b) with 4.2 ms time-delay

bandpass filter로 필터링한 후 time-delay를 추가하여 스피커에 신호를 줌으로써 연소불안정과 스피커 사이의 위상을 변화시켜 주었다.

시험조건에서 연소불안정 주파수가 150 Hz대인 것을 감안하여 0.6 ms부터 6.6 ms까지 0.6 ms 단위로 time-delay를 증가시켜가며 실험을 하였으며 가장 대표적인 값을 나타내는 1.2 ms, 4.2 ms의 time-delay 제어 결과를 Fig. 6, 7에 나타내었다. Fig. 6으로부터 1.2 ms의 time-delay를 주었을 경우 연소불안정과 스피커의 가진이 in-phase

되면서 스펙트럼밀도에서의 최대값이 상당히(15 dB) 증가하였다. 이에 반해 4.2 ms의 time-delay를 주었을 경우에는 out-of-phase 되면서 연소불안정이 발생하는 150 Hz 주위의 스펙트럼밀도값이 약간 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 고속솔리덴 기법에서 얻어진 결과(Fig. 7)로부터도 확인할 수 있다. 1.2 ms의 time-delay를 주었을 경우 와류가 주기적으로 생성, 확장되어 노즐에 충돌하는 Fig. 2에서와 같은 패턴을 보이지만, 4.2 ms의 time-delay를 주었을 경우 와류가 스피커에서 가진된 음파에 의해 큰 구조로 확장되지 못하고 발전이 저지되고 있다.

시험조건에서 연소불안정 주파수가 150 Hz인 것을 감안하면 1.2 ms와 4.2 ms의 time-delay는 대략적으로 180도의 위상차를 갖는다.

IV. 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 연소기에서 연소불안정의 주기와 강도에 이러한 변수들이 어떠한 영향을 주는지 확인하였다. 또한 스피커를 이용한 펄스 방식의 능동제어 결과로부터 최적화된 time-delay 제어방식으로 이러한 연소불안정의 발생, 즉 와류의 발생을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 안규복, K. H. Yu, 윤영빈, "덤프 연소기내의 와류-열방출의 관계에 대한 Damkohler 수의 영향", 제 23회 한국추진공학회 추계학술발표대회, 2004년 10월 22-23일, 건국대학교.
- 2) Byrne, R. W., "Longitudinal Pressure Oscillations in Ramjet Combustors", AIAA Paper 83-2018, 1983.
- 3) 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.
- 4) Poinso, 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.
- 5) Sterling, J. D. and Zukoski, E. E., "Longitudinal Mode Combustion Instabilities in a Dump Combustor", AIAA Paper 87-0220, 1987.
- 6) 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.
- 7) 안규복, "덤프 연소기에서의 난류유동 혼합과 연소불안정 제어", 공학박사학위 논문, 서울대학교 대학원, 2005.