

# 덤프 연소기내의 와류-열방출의 관계에 대한 Damkohler 수의 영향

안규복\* · Kenneth H Yu\*\* · 윤영빈\*

## Effect of Damkohler Number on Vortex-Heat Release Interaction in a Dump Combustor

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

### ABSTRACT

Oscillating heat release associated with periodic vortex-flame interaction was investigated experimentally. Turbulent jet flames were stabilized with recirculating hot products in a dump combustor, and large-scale periodic vortices were imposed into the jet flame by acoustic forcing. Forcing frequencies and operating parameters were adjusted to simulate unstable combustor operation in practical combustors. The objectives were to characterize vortex-heat release interaction that leads to unwanted heat release fluctuations and to identify the proper fuel injection pattern that could be used for actively suppressing such fluctuations. Phase-resolved CH\* chemiluminescence and schlieren images were used as diagnostic tools. The results were compared at corresponding phases of vortex shedding cycle.

### 초 록

주기적인 와류화염과 열방출 진동의 연관성에 대한 실험적인 연구가 수행되었다. 난류제트화염은 덤프 연소기에서 재순환되는 뜨거운 생성물에 의해서 안정화되며, 큰 스케일의 주기적 와류가 음파에 의해서 제트화염에 부가되었다. 실제적인 연소기에서의 불안정 현상을 모사하기 위해 가진주파수와 실험변수들을 조절하였다. 본 연구의 목적은 원치않는 열방출의 진동을 유도시키는 와류-열방출의 연관성을 분석하여, 연소불안정의 능동제어를 위해 사용될 수 있는 알맞은 연료분사 패턴을 조사하는 것이다. 주기적인 패턴을 측정할 수 있는 솔리렌 기법과 CH\* chemiluminescence 기법이 사용되었으며, 실험결과는 와류 생성 사이클의 위상에 따라서 서로 비교되었다.

Key Words: Periodic Vortex (주기적 와류), Heat Release Oscillation (열방출 진동), Active Combustion Control (능동연소제어)

\* 서울대학교 기계항공공학부  
\*\* Department of Aerospace Eng., University of Maryland at College Park  
연락저자, E-mail: kbahn@snu.ac.kr

일반적으로 예혼합 연소기에서의 연소불안정의 발생은 큰 스케일의 일관된 구조에 의해 지속된다. 연소반응으로 뜨거워진 생성물은 와류 구조에 의해 새로 유입되는 반응물과 혼합되어 시간적으로 변화하는 열방출 패턴에 심각한 영향을 주게 될 수 있다. 열방출의 진동이 압력의 진동과 같은 위상으로 반응할때 연소불안정 현상이 발생하게 된다. 이같은 불안정을 능동제어하기 위해 보통 보조연료를 분사하는 방법이 사용되며, 능동제어 방법을 이용하기 위해서는 와류의 발생과 변화에 관련되는 열방출 증감의 위치를 파악하는 것이 필요하게 된다[1].

Yu 등[2]은 V-gutter 화염안정기 실험에서 와류 화염구조에 따른 국부적인 열방출의 진동을 비교하여 예혼합 연소기에서의 국부적인 열방출의 진동이 와류의 앞부분에서는 감소, 와류의 뒷부분에서는 증가의 패턴이 나타남을 보였다. 와류에 의해 유도된 반응물은 와류구조의 앞부분에서의 온도를 낮추게 되며, 고온의 생성물과 혼합된 반응물은 와류구조의 뒷부분에서 연소되어 열방출을 증가시키는 역할을 수행하게 되는 것이다. 하지만 bluff body 후류에서의 이러한 현상은 와류화염의 일반적인 현상이 아닐 수도 있다. 따라서 본 연구의 목적은 가진주파수와 여러 변수들을 조절하여 실제 연소기에서의 불안정 연소를 시뮬레이션하고, 원하지 않는 열방출의 진동을 일으키는 와류와 열방출의 연관성을 파악하여, 연소불안정을 능동제어하는데 사용되어질 알맞은 연료분사 패턴을 파악하도록 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 예혼합 연소기의 개략도이다. 연소실험을 위하여 스피커의 조인트를 제외한 부분은 스테인리스강으로 제작되었으며, 화염 측정을 위하여 앞, 뒷면은 1인치 두께의 석영유리로 가시화창을 두었다. 불안정한 연소현상을 모사하기 위하여 75W 출력의 스피

커를 흡입구의 끝단에 설치하였다. 예혼합 연소 실험을 위하여 혼합챔버 하단부에 공기와 연료의 노즐을 대칭적으로 설치하였으며, 유량제어를 위하여 choking orifice를 이용하였다. 스피커를 가진시키기 위해 주파수 가진기(Wavetek)에서 발생된 싸인파를 앰프(Bogen)에서 증폭하여 사용하였다. 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 흡입구와 연소실 벽면에 압력게이지를 설치하였다.

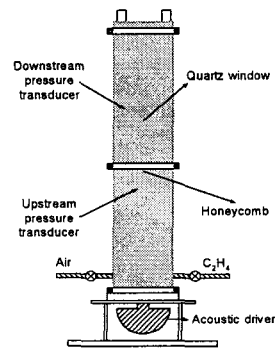


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

### 2.2 실험방법 및 조건

스피커에서 가진된 음파의 신호를 계측하기 위해 압력게이지를 이용하여 동압을 측정하였으며, 가진되어 조직화된 큰 와류구조를 가시화하기 위해 반응물과 생성물의 경계면을 가시화할 수 있는 위상고정 슬리렌 기법을 이용하였다. 그리고 열방출의 분포를 측정하기 위해 CH\* chemiluminescence 기법을 이용하였으며, 열방출의 진동 성분만을 얻어내기 위하여 평균값이 제거된 데이터를 구하였다.

실험결과는 흡입구의 속도 및 크기, 당량비, 음파의 주기에 따라 달라진다. 따라서 이들을 무차원화 할 수 있는  $Re$  (Reynolds No.),  $St$  (Strouhal No.),  $Da$  (Damkohler No.) 등의 변수가 사용되어진다. Table 1은 연구에서 수행된 실험조건을 나타낸다. 본 연구는  $Da$ 에 따른 와

류구조와 열방출 진동간의 연관성에 초점을 두고 수행되었다.

Table 1 Experimental conditions

Inlet velocity ( $U_{inlet}$ )	7.5 m/s	10 m/s	12.5 m/s
Equivalence ratio ( $\phi$ )	0.55, 0.6, 0.65, 0.7	0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8	0.55, 0.6, 0.65, 0.7
Forcing freq. ( $F_s$ )	180 Hz	180, 240 Hz	180, 240, 300 Hz
Reynolds No. ( $Re$ )	$1.3 \times 10^4$	$1.7 \times 10^4$	$2.2 \times 10^4$
Strouhal No. ( $St$ )	0.61	0.46, 0.61	0.37, 0.49, 0.61
Damkohler No. ( $Da$ )	1.5 - 5.6	1.1 - 11.2	0.9 - 5.6

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 음파 가진의 영향

음파 가진에 따른 예혼합 화염의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 음파 가진에 의해 난류제트화염이 큰 스케일의 와류를 갖는 화염으로 변화되고 있으며, 와류에 의해 반응물과 생성물의 혼합이 출구 근처에서 일어나면서 열방출의 위치가 변화됨을 알 수 있다.

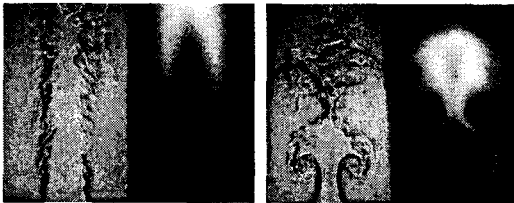


Fig. 2 Representative images of schlieren and CH\* chemiluminescence: (a) unforced and (b) forced conditions

#### 3.2 주기적인 와류 화염의 구조

Fig. 3과 4는 와류의 발생주기를 30° 간격으로 측정하여 위상 평균된 슬리엔 이미지와 CH\* chemiluminescence 이미지이다. 흡입구에서 방출되는 와류구조는 시간에 따라 후류쪽으로 확장되어 전파되고, 뜨거운 생성물이 와류에 의해 상류로 전파되어 새로 유입되는 반응물과 혼합되면서 새로운 열방출이 일어나고 있음을 알 수

있다.

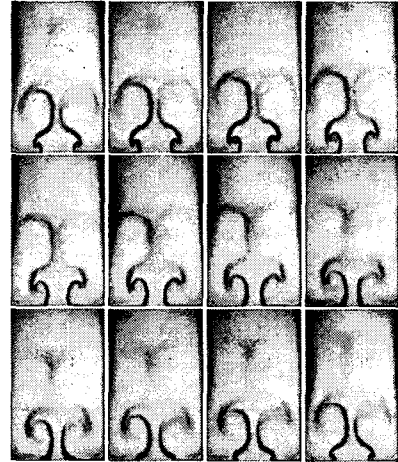


Fig. 3 Schlieren images of one cycle of vortex propagation (30° increment) in case of  $U_{inlet} = 7.5$  m/s,  $\phi = 0.6$  and  $F_s = 180$  Hz

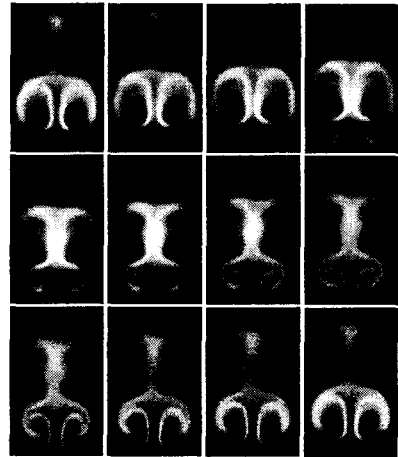


Fig. 4 CH\* chemiluminescence images corresponding to the case in Fig. 3

#### 3.3 Damkohler 수에 따른 와류구조와 열방출

Damkohler 수에 따른 와류구조와 열방출 진동의 연관성을 살펴보기 위해 시간적으로 평균화된 CH\* 이미지를 위상평균 이미지에서 제거하여 Fig. 5, 6에서와 같이 슬리엔 결과와 비교하였다. Fig. 6에서 평균값과 같은 경우 gray, +영역인 경우 white 그리고 -영역인 경우 dark

영역으로 가시화 되었다.

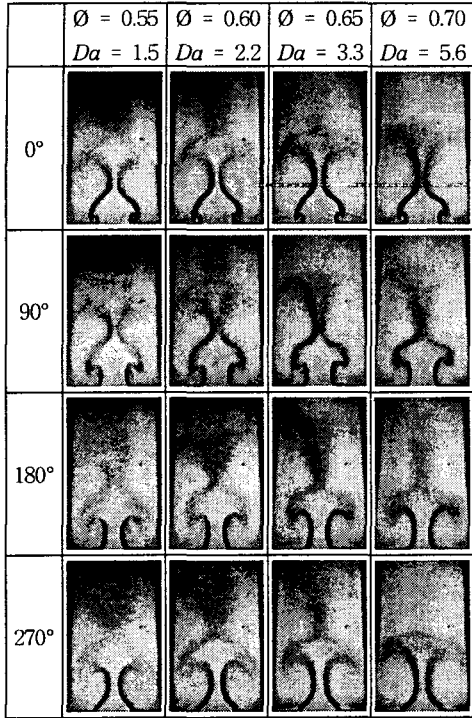


Fig. 5 Phase-lock-averaged schlieren images in case of  $U_{inlet} = 10$  m/s and  $F_s = 180$  Hz

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 Damkohler 수에 따른 와류구조의 변화는 측정영역 내에서 크게 변화되지 않지만 열방출의 분포는 상당한 변화가 나타나고 있다.  $Da$ 가 1 보다 큰 경우 와류구조와 열방출의 증가 부분이 서로 일치하는 위치에 존재하지만,  $Da$ 가 1 근처인 경우 열방출의 증가 부분이 와류구조와 상반된 위치에서 존재하고 있다. 즉,  $Da$ 가 1 보다 큰 경우에서 열방출의 증감 부분이  $Da$ 가 1 근처인 경우에서와 반대로 나타나게 되는 것이다. 다른 실험조건에서도 같은 결과를 나타낸다. 따라서 능동연소제어를 위한 보조연료분사 방식은  $Da$ 에 따라서 달라져야 한다.

#### 4. 결론

$Re$ ,  $St$  변수와는 달리  $Da$ 는 열방출의 진동에 상당한 영향을 미치게 된다.  $Da$ 에 의해서 와류구조는 변화되지 않지만 열방출 증감의 위치가 달라지므로  $Da$ 에 따라서 보조연료분사를 이용하는 능동제어방식은 변화되어야 한다.

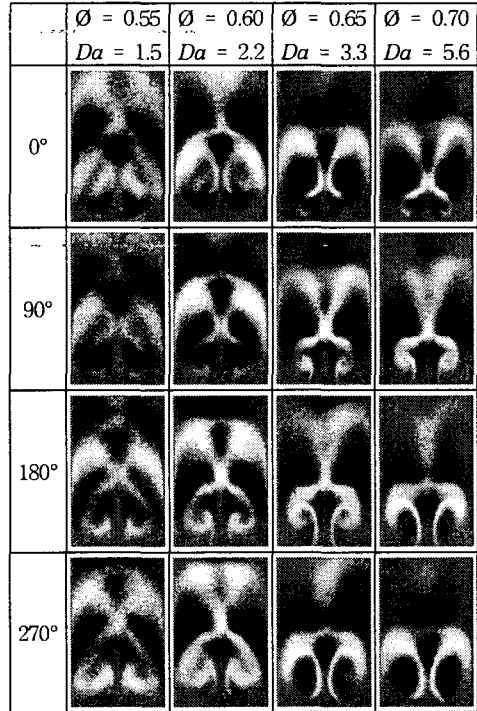


Fig. 6 Oscillation component of  $CH^*$  chemiluminescence corresponding to Fig. 5

#### 참고문헌

1. B. Pang, S. Cipolla and K. Yu, "Oscillatory Heat Release Associated with Periodic Vortices in Dump Combustor," AIAA 2003-0115
2. K. H. Yu, and K. C. Schadow, "Role of Large Coherent Structures in Turbulent Compressible Mixing, " Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14, pp. 75-84, 1997