

가진된 덤프 연소기 내에서의 비예혼합 화염 거동

박정규* · 신현동*

Behavior of Non-premixed Flame Front in an Acoustically-Driven Dump Combustor

Jung Kyu, Park and Hyun Dong, Shin

Key Words: Dump Combustor, CH Chemiluminescence, Acoustic Oscillation, Rayleigh Criterion, Flame Front Behavior, Ignition Process

Abstract

Dump combustor is a combustor having a dump plane to make coherent structures. A non-premixed flame dump combustor of simple geometry was constructed. We conducted basic experiments such as frequency response on the combustor to confirm the characteristics of the phenomena as a typical dump combustion and unsteady combustion. Furthermore we visualized the flame front behavior by CH chemiluminescence and high speed motion analysis. In spite of the lack of another data such as velocity, species concentration and temperature, the results showed not only the periodic motion of flame front but the ignition process of vortex ring flame. Also we could check out Rayleigh criterion by combining the visualization data with the pressure data.

1. 서론

덤프 연소기란 유체역학적인 거대구조(coherent structure, i.e. vortex)를 발생시킬 수 있는 급확대면, bluff body, cavity 등의 덤프면(dump plane)을 가지고 있어서, 이 거대구조에 의해 착화, 성장, 소화 등의 연소현상이 주기적으로 반복되는 연

소기를 말한다. 이는 열발생이 주기적으로 변화한다는 것을 의미하며, 이것이 계의 음장의 위상과 일치하게 되면 때로는 계를 물리적으로 파손시킬 수 있을 정도로 커다란 음압을 발생시키게 된다. 이렇게 발생된 과도한 음압은 또한 연소장에 다시 영향을 미치게 되어 불안정성을 증폭시킨다. 이를 수치적으로 나타낸 것이 Rayleigh criterion이다.[1]

* 한국과학기술원 기계공학과

$$\int_0^T P(t)Q(t)dt > 0 \quad (1)$$

여기서

T : the period

$P'(t)$: the instantaneous pressure

fluctuation

$Q'(t)$: the instantaneous heat release rate.

이를 물리적으로 보면 음파의 밀소 주기와 열이 (상대적으로) 적게 많이 발생하는 주기가 일치한다면 마치 피스톤처럼 음파를 증폭한다는 것을 의미한다. 반대로 압력변동성분과 열발생주기가 서로 반대의 위상을 가지게 되어 위의 적분값이 음의 값을 갖는다면 음파는 억제된다는 것을 알 수 있다.

덤프 연소기 더 나아가 맥동 연소기에 대한 연구는 상당히 오래 전부터 시작되었는데, 크게 보자면 적극적으로 이 현상을 이용해 보고자 하는 관점과 이 현상이 야기하는 연소불안정을 제어하고자 하는 관점이 있다.

적극적 관점의 연구는 주로 맥동연소기 연구자들에 의해 주도되었는데, 연소가 주기적으로 일어나게 되면 열전달, 물질전달, 연소강도 등이 통상연소기의 것보다 훨씬 크다는 점을 이용하려는 것이다.[2, 3] 최근 들어서는 덤프 연소기가 가지는 긴 체제시간, 고른 화염 온도 등의 특징을 이용하여, 저 NO_x 연소기나 유해물질 소각로에 적극 활용하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다.[4, 5, 6]

소극적 관점의 연구는 주로 터빈 연소기 연구자들에 의해 진행되었다. 전술한 바와 같이 연소기 내에서 열발생이나 압력변동이 과도하게 변화하게 되면 물리적으로 계가 파괴되는 일까지 벌어지는데 이를 적절히 제어하고자 많은 연구가 진행되었다. 이런 연구는 유동장의 거대

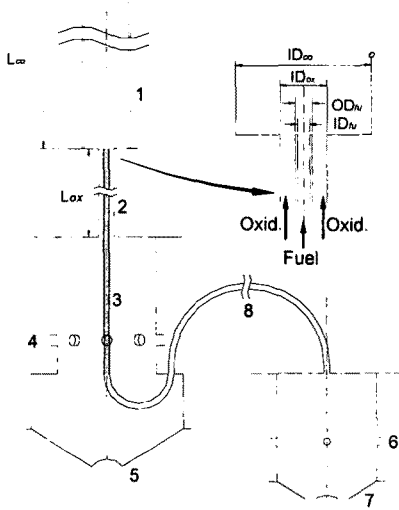
구조가 연소현상에 미치는 영향을 조사하고, 이 거대구조의 제어를 통한 연소현상을 제어하기 위한 여러 가지 기법들, 즉 가진, 기하학적 구조 변경, 공명 주파수 회피, 여러 가지 제어이론의 적용 등과 같은 방법들이 많이 시도되었다.[7, 8, 9]

덤프 연소기 내에서 발생하는 연소현상은 전형적인 비정상 연소현상이다. 짧게는 수 ms에서 길게는 수 십 ms 동안의 한 주기 동안 착화, 성장, 소화의 여러 연소현상들이 연속적으로 일어난다. 또한 대부분의 경우 강한 난류영역에서 연소가 일어난다. 이는 연구에 있어서 많은 흥미를 유발시킨다. 즉 난류화염의 혼합기구, 착화기구, 소화기구, 화염전파 속도, 주기적인 유동변화에 따른 화염구조의 변화 등 많은 흥미로운 연구과제를 끄집어 낼 수 있다. 하지만 전술한 바와 같이 현상자체가 비정상 상태에서 발생하며, 유체역학적, 화학적, 음향학적 요소들이 상호연관 되어 있기 때문에 이 요소들이 분리된 명확한 결과들을 도출하기가 어려우며, 현상이 일어나는 공간이 폐쇄되어 있기 때문에 기존에 개발된 여러 연소진단법들을 적용시키기가 상당히 어렵다.

본 연구는 기본적 형태의 덤프 연소기를 제작하고 운전한계 조사, 주파수 특성 파악 등의 기초적 연구를 수행한 후 연소기 내부의 비예혼합 화염 선단(non-premixed flame front)의 비정상 거동(transient behavior)을 관찰하였다. 이는 향후의 덤프 연소기의 특성파악 및 모델링과 관련한 물리적 이해와 검증에 위한 데이터로 쓰일 수 있을 것이다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 연소기는 급확대 덤프면을 가진 원통형 파이프 형태의 연소기를 택하였으며, 연료와 산화제는 연소기의 하단면에 동축으로 위치한 노즐을 통해 공급된다.



1. combustor wall(quartz or steel)
2. oxidizer nozzle
3. fuel nozzle
4. oxidizer inlet port(s)
5. excitation speaker for oxidizer
6. fuel inlet port(s)
7. excitation speaker for fuel
8. flexible fuel pipe

Fig. 1 Experiment Apparatus

2.1 연소기 벽면

연소기의 벽면은 가시화 등의 실험에는 투명한 quartz관을, 온도 등을 측정할 때는 steel관을 선택할 수 있도록 하였다. quartz관에는 압력을 측정하기 위해 압력도출관이 설치되어 있으며 steel관에는 프루브를 삽입할 수 있도록 M8 나사구멍이 축방향을 따라 5 cm 혹은 10 cm

간격으로 뚫려 있다. steel관의 나사구멍은 평소에는 M8 볼트로 막혀 있다. 연소기 내부의 음장조건을 변화하기 위해 quartz관과 steel관은 각각 안쪽 지름 IDco 50 mm, 길이 Lco 0.8, 1.0 m로 두 개씩 총 4개를 제작하였다.

2.2 연료 및 산화제 공급장치

연료와 산화제는 on/off valve, pressure regulator, needle valve, orifice 유량계를 거쳐 실험장치로 공급된다. orifice 유량계는 유량에 따라 버블미터 또는 축소노즐과 피토투브를 이용하여 검정하였다. 연소로에서 생성되는 압력파가 유량에 미치는 변화를 최소화하기 위하여 유량계와 실험장치 사이에는 orifice와 surge tank가 설치되었다.

산화제로는 공기를, 연료는 상용 propane을 사용하였다.

유량계를 거친 연료와 산화제는 가진을 위해 스피커가 설치된 chamber로 유입된다. 연료 chamber에 설치된 스피커는 최대 출력 100 W, 산화제 chamber에 설치된 스피커는 최대출력 200 W이며, 각각 오디오용 앰프로 구동된다. 각각의 앰프로 입력되는 신호는 함수발생기(function generator)와 위상변조기(phase shifter)를 거친다.

2.3 연료 및 산화제 노즐

각각의 chamber에서 나온 연료와 산화제는 연소로의 중심축과 동심원상으로 위치한 노즐을 통해 연소로로 유입된다. 안쪽 노즐에는 연료가, 바깥 노즐에는 산화제가 유입된다. 각 노즐의 첫수는 다음과 같다.

산화제 노즐

IDox = 17.20 mm, Lox = 30 cm

연료 노즐

IDfu = 4.50 mm, ODFu = 6.40 mm

3. 운전조건에 따른 주파수 특성 파악

전술한 바와 같이 덤프 연소기는 연소장(combustion field)과 음장(acoustic field)이 상호연관되어 있기 때문에 음장의 계측, 즉 압력변동성분의 계측은 무엇보다도 중요하다.

실험에 쓰인 덤프 연소기에서의 고유진동수는 대략 수백 Hz 정도로 예상되는바, 이를 정확히 측정하기 위해서는 마이크로폰이나 piezo 압력계와 같은 고속에서 동작하는 센서가 필요하다. 또한 화염이 존재하는 연소장의 압력을 직접 측정하기는 불가능하므로 압력도출관을 연소로 벽에 설치하고 센서를 냉각, 보호하여야 한다. 이 실험에서는 piezo type의 센서(PCB사의 106B모델)를 사용하였고, 수냉자켓으로 센서를 보호하였다.

3.1 압력 도출관의 설계

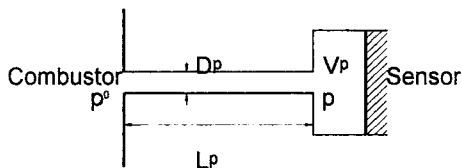
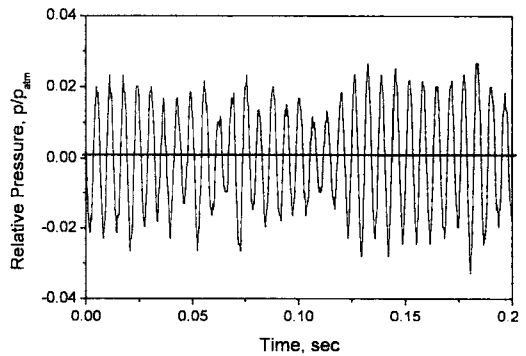


Fig. 2 Helmholtz resonator

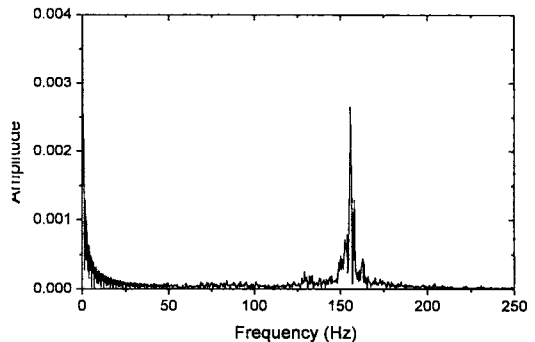
음파가 압력도출관을 거치게 되면 크기와 위상이 달라지게 되는데, 이를 최소화 해야만 한다. 이를 위해 압력도

출관을 Fig. 2와 같은 Helmholtz resonator로 모델링하여 최적화된 설계변수를 도출하였다.[15]

최종적으로 Connector Length, Lp 50.0 mm, Connector Diameter, Dp 3.0 mm, Resonator Volume, Vp 392.7 mm³로 설계하였다. 이 경우 압력도출관 내부의 매질을 2000 K의 공기로 가정하였을 경우 250 Hz 신호의 최대 위상차는 0.43 degree, 압력의 세기비 오차는 1.0 %로 측정된 신호가 원래의 신호를 별다른 왜곡없이 잘 추종한다고 볼 수 있었다.



(a) raw pressure signal



(b) FFT of pressure signal

Fig. 3 Typical Pressure Signal, Air : 138.6 l/min, Fuel : 5.3 l/min

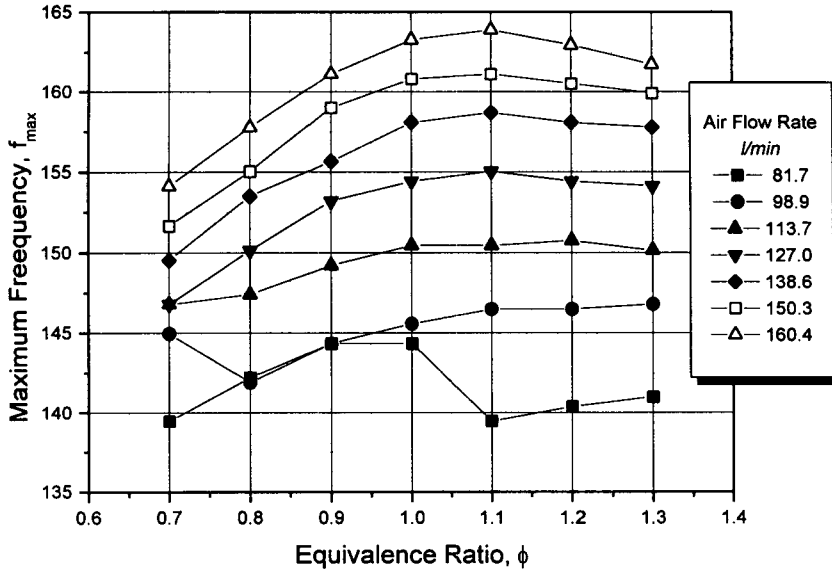


Fig. 4 Resonant frequency with varying air flow rate and equivalence ratio

3.2 압력 측정 결과

이 중 대표적인 경우를 살펴보자.

Fig. 3은 1.0 m 연소로에서 행한 압력 측정 결과 중 가장 전형적인 결과이다. (a)의 결과를 보면 일정한 주기의 신호가 지배적으로 발생하고 있음을 알 수 있으며, 이를 FFT분석한 (b)의 결과는 이를 명확히 보여주고 있다.

Fig. 4는 모든 실험조건에 대하여 FFT 분석을 하여 공진주파수를 공기유량과 당량비의 함수로 나타낸 결과이다. 대체적으로 당량비 1.0~1.1 사이에서 최대값을 나타낸다. 이는 이 조건에서 내부의 온도가 가장 높다는 것을 간접적으로 나타내는 결과이다. 이는 다음과 같이 해석될 수 있다.

이 실험의 연소로와 같은 기하학적 조건에서의 공명 주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[1]

$$F(x) = \frac{N(n)}{k \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{\gamma R_0 T(x)}}} \quad (2)$$

- T(x) = temperature spatial function, K
- L = length of the combustor, m
- N(n) = 2n-1 for a quarter-wave
= n for a half-wave
- n = harmonic order
- k = 2 for a quarter-wave
= 4 for a half-wave
- γ = specific heat ratio
- R0 = perfect gas constant, kJ/kgK

위의 식에서 다른 모든 조건들이 동일하다고 한다면 공명주파수를 결정하는 것은 연소로 내부의 온도이다. 즉 위의 식을 통해 유량이 많고, 당량비가 1.0 근방에서 운전되는 조건에서 온도가 가장 높게 유지되며 따라서 가장 높은 공명주파수를 내는 것을 알 수 있다.

4. CH chemiluminescence 기법을 활용한 비정상 화염 가시화

덤프 연소기 내에서는 음장 뿐만이 아니라 연소로 내부의 화염의 거동 또한 주기적으로 변동하게 된다. 이는 내부의 열발생량 및 압력과 발생과 직접적인 연관성이 있기 때문에 이런 종류의 실험에서는 대단히 중요하다. 본 실험에서는 이를 관찰하기 위해서 고속카메라와 CH chemiluminescence 기법을 활용하여 연소로 내부의 화염을 가시화 하였다.

4.1 CH chemiluminescence

탄화수소계열의 연료가 산소와 연소반응을 일으키게 되면 여러 radical을 생성하는데, 이 반응기들은 고유한 빛을 내게 된다. 이를 관찰하면 화염대의 위치, 화염의 강도 등을 알 수 있다. 이 중에서 OH, CH, C2 radical은 가장 강도가 강한 radical로서 연소연구에 많이 이용된다.

이 중에서 본 실험에서는 CH radical을

이용하였으며 이로 인해 초기 점화 구간 이후 발생하는 sooting flame의 영향을 최소화시킬 수 있었다.

4.2 측정 시스템

본 실험에서는 CH filter (430.6 nm, Bandwidth 1.6 nm), High Speed Motion Analyser(Kodak Ekta Pro system) 및 Intensified CCD Camera를 사용하여 화염의 CH radical의 상대적인 강도를 측정하였다. 이때 motion analyser와 압력측정 시스템을 trigger 회로를 이용하여 동기시켜 압력변동에 따른 화염의 변화를 관찰할 수 있도록 하였다(Fig. 5). 측정된 화상은 VCR과 image grabber를 통해 BMP 파일 형태로 PC에 저장되고, 자체 작성한 프로그램을 이용하여 배경잡음을 제거하고 불필요한 화면을 삭제한 후 CH radical의 강도에 따라 pseudo coloring 하였다. 이 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 이때 CH radical의 강도는 적색이 가장 강하며 황색, 녹색, cyan의 순으로 약해지며 청색은 가장 약하다.

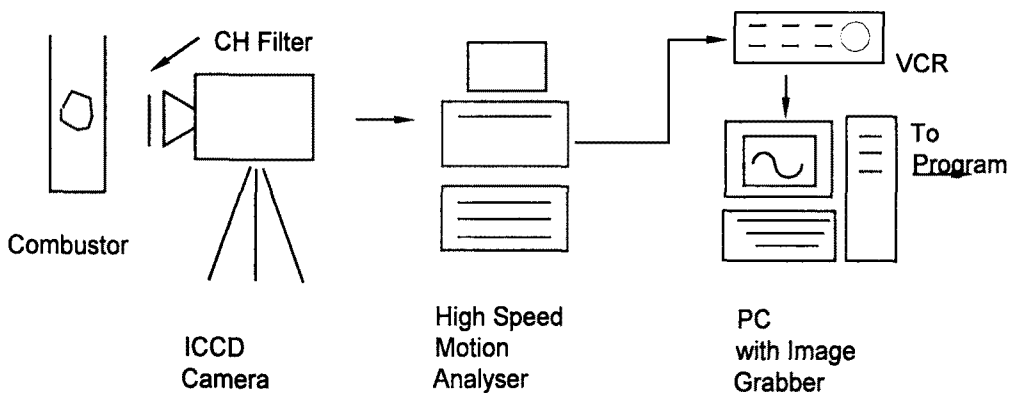


Fig. 5 CH chemiluminescence measuring system

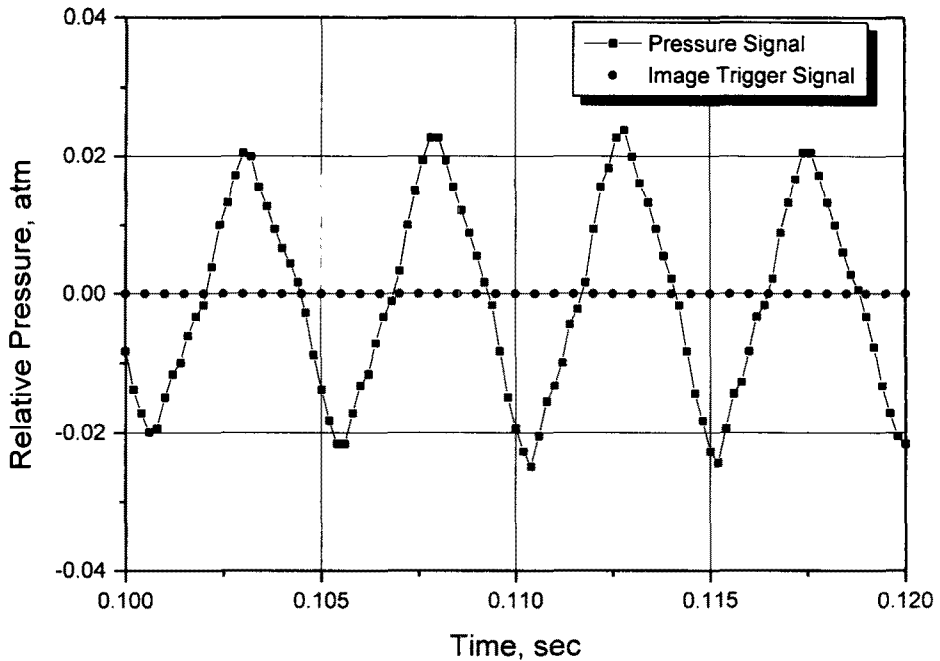


Fig. 6 Pressure signal and image trigger signal (Air : 81.57 l/min, Fuel(propane) : 3.43 l/min, Φ : 1.0 Air was Forced with the Resonant Frequency of Combustor Pressure sensor location : 2.0 cm from the nozzle exit plane)

4.3 측정 결과

가시화 실험은 80 cm 연소로에서 산화제를 공명주파수로 가진시켜 유동조건을 안정화시킨 상태에서 진행되었다. 그중 가장 대표적인 결과를 보도록 하자.

Fig. 6와 Fig. 7의 결과를 보면 $t = 115.0$ ms부터 $t = 120.0$ ms 까지가 대략한 주기임을 알 수 있다. 이를 순서대로 살펴보도록 하자.

1 단계($t = 115.0 \sim 115.5$ ms)

이전 주기에서 발생한 화염덩어리는 소멸해가며 착화된 vortex는 활발히 연소되고 있다.

2 단계($t = 116.0 \sim 117.0$ ms)

커다란 화염덩어리에서 새로이 생성되는 vortex로 작은 화염이 밀려 들어간다.

3 단계($t = 117.5 \sim 118.5$ ms)

새로이 생성되는 vortex에 화염이 생성됨과 동시에 1 단계에서 착화된 화염 덩어리는 떨어져 나가기 시작한다.

4 단계($t = 119.0 \sim 120.0$ ms)

1단계와 3단계에서 생긴 두 화염 덩어리는 완전히 분리되며, 새로이 형성된 화염은 성장하고, 이전에 생성된 화염은 소멸해 간다.

결론적으로 위의 가시화 결과는 덤프 연소기의 특징인 화염의 주기적 변화를 잘 보여준다.

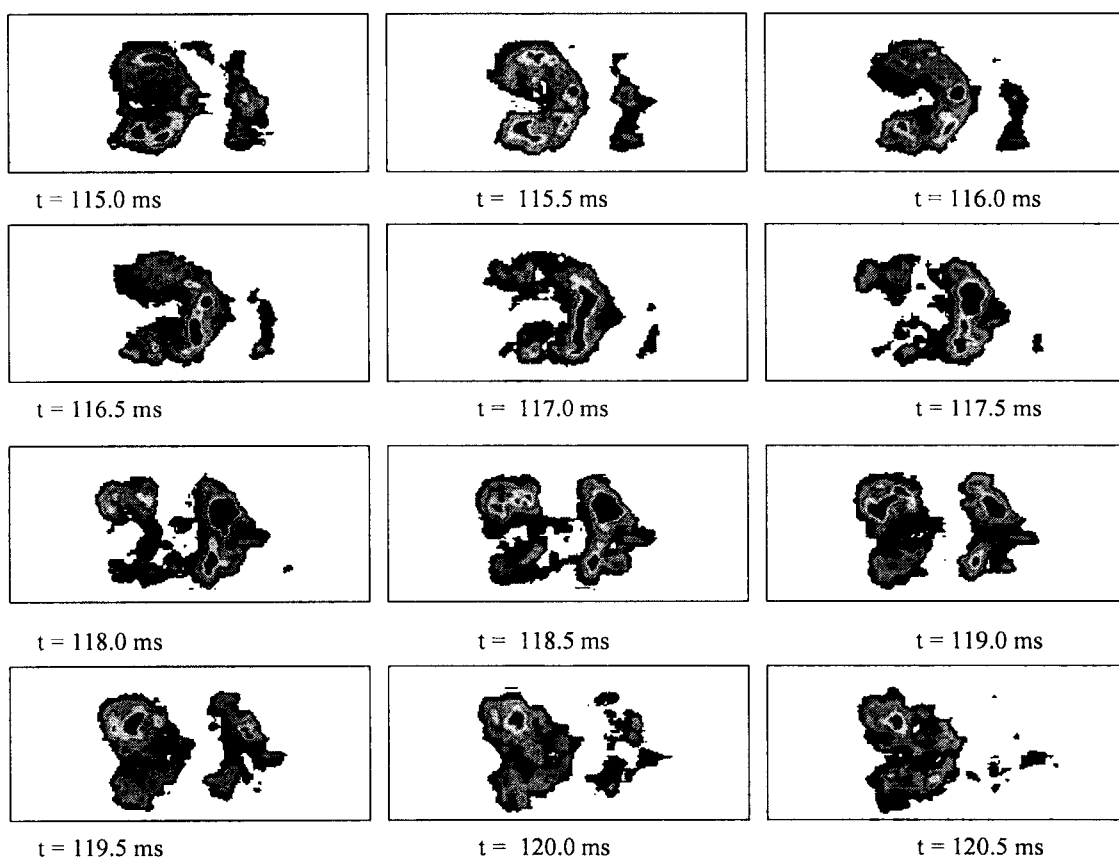
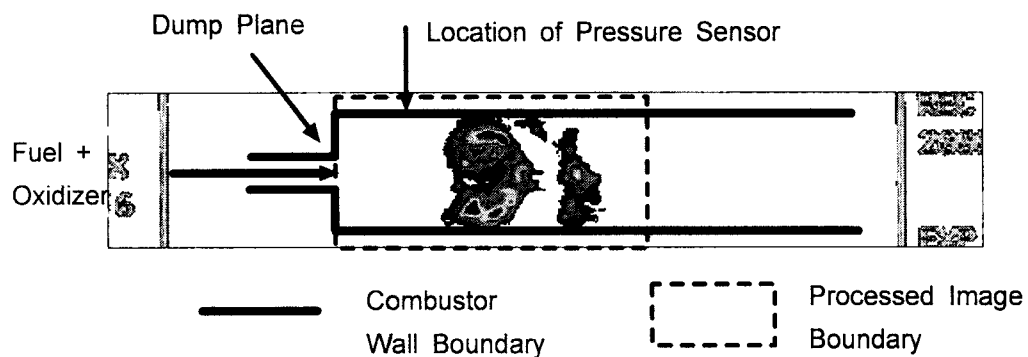


Fig. 7 Transient behavior of CH radical (Air : 81.57 l/min, Fuel : 3.43 l/min, Φ : 1.0
Air was Forced with the Resonant Frequency, Shutter speed : 1/2,000 sec)

vortex 내에서 화염이 착화되는 거동을 살펴보도록 하자. Fig. 7의 결과를 보면 가장 처음에 생성된 vortex에서 화염은 vortex의 가장 바깥 표면이 아닌, 말려 들어간 부분에서 가장 강하게 연소되는 것을 관찰할 수 있다. 실험에 사용된 연소로가 비예혼합 상태로 연료와 산화제를 공급함에도 불구하고 Fig. 7의 결과들은 마치 예혼합상태에서 착화가 되는 것 같은 거동을 보이고 있다. 만일 가장 처음에 생성되는 vortex 부근의 농도장을 알 수 있다면 이는 vortex에서 화염이 착화되는 메카니즘을 실험적으로 밝힐 수 있는 아주 흥미로운 연구가 될 수 있을 것이다.[10]

4.4 화염의 열발생과 압력의 연관성

Fig. 8은 CH radical의 강도가 어느 값 이상인, 즉 화염이 존재한다고 판단되는 지점의 면적과, 화염의 평균 radical 강도를 구한 데이터이다. 비록 Fig. 7에서 얻

어진 화상 데이터가 단면상이 아닌 적분상이지만 화염의 열발생량을 정성적으로 알아볼 수 있을 것이다. 이중 화염의 면적을 나타낸 데이터가 주기성을 비교적 잘 나타낸다고 볼 수 있다. Fig 8의 결과를 Fig. 6의 압력 데이터와 비교해 봤을 때 Rayleigh criterion의 조건인 압력과 열발생의 위상이 180° 가깝게 차이 나는데, 이는 압력 센서가 위치한 곳에서 음파가 억제되고 있음을 보여준다. 같은 연소기 내에서도 Rayleigh criterion은 공간적으로 불균일하게 분포하는 것이 일반적이다.[11]

5. 결론

기본적 형태의 덤프 연소기를 설계/제작하고, 이를 운전조건을 달리 하면서 압력측정, 화염 가시화 등의 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

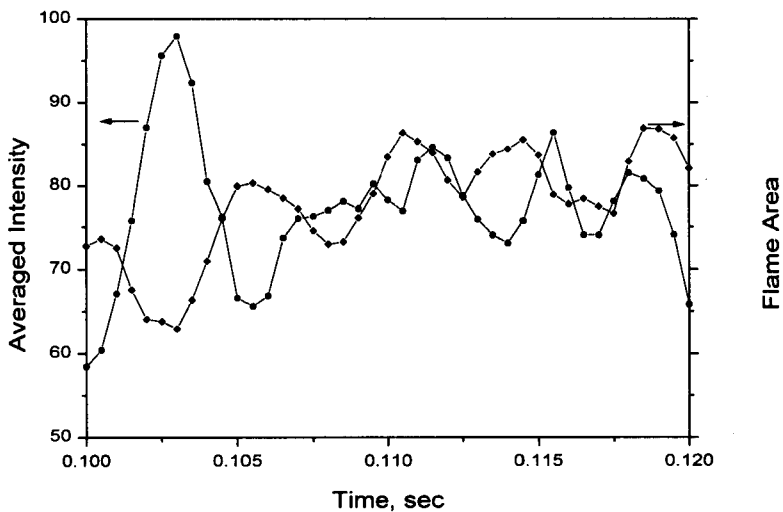


Fig. 8 Flame area and Normalized flame intensity

1. 압력변동 성분 측정 결과 공진 주파수는 유량과 당량비의 함수로 나타낼 수 있으며, 이는 공진주파수에 관한 기존의 연구결과와 잘 부합된다.

2. 화염 가시화 결과 주기에 따라 화염이 착화, 성장, 소멸되는 과정을 잘 보여주고 있으며, 또한 가장 처음에 형성되는 vortex에서의 착화 메커니즘과 관련되어 흥미로운 결과를 도출할 가능성이 보인다.

3. 화염의 전체면적을 시간별로 나타냈을 경우 압력변동의 주기와 일치하고 있음을 알 수 있었으나 측정점에서의 Rayleigh criterion의 값이 양(positive)으로 나타나지는 않았다.

참고문헌

1. E. C. Fernandes and M. V. Heitor, 1996, Unsteady flame and the Rayleigh criterion, in Unsteady Combustion, Kluwer Academic Publishers
2. R. S. Gemmen, J. O. Keller, and V. S. Arpaci, 1993, Heat/mass transfer from a cylinder in the strongly oscillating flow of a pulse combustor tailpipe, Comb. Sci. Tech., vol. 94, 103
3. P. A. Eibeck et. al., 1993, Pulse combustion : Impinging jet heat transfer enhancement, Comb. Sci. Tech., vol. 94, 147
4. G. Pont et. al., 1998, Emissions reduction and pyrolysis gas destruction in an acoustically driven dump

- combustor, Comb. Flame, vol. 113, 249
5. E. J. Gutmark et. al., 1996, Compact waste incinerator based on vortex combustion, Comb. Sci. Tech., vol. 121, 333
6. O. I. Smith et. al., 1990, Incineration of surrogate wastes in a low speed dump combustor, Comb. Sci. Tech., vol. 74, 199
7. K. R. McManus, T. Poinso, and S. M. Candel, 1993, A review of active control of combustion instabilities, Prog. Energy Comb. Sci., vol. 19, 1
8. K. C. Schadow and E. Gutmark, 1992, Combustion instability related to vortex shedding in dump combustors and their passive control, Prog. Energy Comb. Sci., vol. 18, 117
9. K. C. Schadow and E. Gutmark, 1989, Large-scale coherent structures as drivers of combustion instability, Comb. Sci. Tech., vol. 64, 167
10. Y. H. You, D. K. Lee and H. D. Shin, 1998, Visual investigation of a vortex ring interacting with a nonpremixed flame, Comb. Sci. Tech., vol. 139, 365
11. G. Benelli, V. Cossanlter and M. Da Lio, 1993, Advances in numerical simulation of pulsating combustion at ENEL, Comb. Sci. Tech., vol. 94, 317