

〈논 문〉

표면연소기의 저주파 연소진동음의 특성

Characteristics of Low-Frequency Combustion-driven Oscillation in a Surface Burner

한 희 갑* · 이 근 희** · 권 영 필***

Hee-Gab Han, Geun-Hee Lee and Young-Pil Kwon

(2000년 7월 28일 접수 ; 2000년 10월 16일 심사완료)

Key Words: Combustion-Driven Oscillation(연소진동음), Combustion Mode(연소모드), Surface Burner(표면연소기), Flame Instability(화염불안정)

ABSTRACT

The objective of this study is to examine the onset condition and the frequency characteristics of the low-frequency combustion oscillation in a surface burner. For this purpose, extensive parametric studies have been performed experimentally and the effects of size of each section, the equivalence ratio, and the entrance velocity on oscillatory behavior explored. The experimental results were discussed in comparison with the other combustors associated with the low-frequency combustion oscillation. The combustion mode is driven at high combustion rate by the lift of unstable flame near the lower limit of the combustible equivalence ratio. The oscillation frequency is dependent not on the burner geometry but on the equivalence ratio and the combustion load. Low-frequency combustion mode was formed to be divided into two different modes, named C1 and C2 respectively. Two modes occurred individually, simultaneously or transitionally according to the equivalence ratio and combustion load. The characteristics of low-frequency oscillation is different from each other depending on the type of combustors. The surface burner has also its own characteristics of low-frequency oscillation.

1. 서 론

연소진동음은 제한된 공간내에서 연소가 일어날 때 피드백 기구를 통해 불연속 주파수 특성을 나타내는 연소음을 말하는데, 특정 주파수에서 매우 높은 음압을 나타내기 때문에 심각한 소음원이 될 뿐만 아니라 연소특성이나 연소기의 안전에 영향을 미칠 수 있으므로 다양한 연소장치에 대하여 오랫동안 연구의 대상이 되어 왔다.

연소진동음은 열공급과 압력변화의 위상관계로 해석될 수 있는 열음향 현상의 하나로서 Rayleigh⁽¹⁾ 이후 많은 연구자들에 의해 열음향 현상의 발생조건에 관한 정량적인 모델이 확립되었으며⁽²⁻⁴⁾, 특히 고속 연소장치의 경우는 연소 불안정에 의한 저주파 진동음의 발생기구에 관한 연구가 주로 있었다.⁽⁶⁻¹²⁾

연소진동은 연소조건에 따라 정상 연소와 비정상 연소에 의한 것으로 분류할 수 있다. 정상 연소에 의한 연소진동음은 대체로 연소반응을 무시하고 열원에서의 열전달 응답을 고려한 열음향 진동으로 그 주파수 특성을 해석할 수 있는 것으로 밝혀졌다.⁽⁵⁾ 그러나 비정상 연소에 의한 연소진동은 연소불안정이나 맥동연소와 관련하여 연소기의 종류에 따라 다양한 특성을 보이는데, 이에 관한 대표적인 연구사례는 다

* 정희원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

** 경기공업대학 기계공학부

*** 정희원, 숭실대학교 기계공학과

음과 같다.

추진장치와 관련한 연구에 있어서 Yu 등⁽⁶⁾은 연소실이 배기노즐로 막힌 램제트의 모델연소기인 덤프 연소기의 경우, 와류가 노즐에 충돌할 때 최대 열발생이 일어나며 와류가 노즐에서 충돌면까지 대류되는 시간이 저주파 진동의 주파수를 좌우한다는 결론을 내렸다. 즉, 와류의 대류와 음장이 연성된 대류-음향모드에 의해 진동음이 발생한다는 것이다. 또, Langhorne⁽⁷⁾, Bloxidge 등⁽⁸⁾은 V형 보염기를 갖는 후연소기 모델을 대상으로 실험과 이론을 통해 연구한 결과 맥동적인 열방출과 비정상 유동 사이에 두가지 형태의 연성이 존재하며, 주된 발생 주파수는 덕트 전체에 걸쳐 비정상 압력과 열방출의 상호작용에 의해 결정된다고 하였다. 한편 Heitor 등⁽⁹⁾은 축대칭 배플을 갖는 예혼합 연소기에 있어서 배플과 연소기의 단면적비로 정의된 차단비가 연소 불안정에 미치는 영향을 조사하였다. 이 경우 불안정 주파수는 배플 상류단의 음향모드에 의해 결정되며, 발생조건은 차단비에 따른 배플 하류단에서의 유동장과 연소 특성의 변화에 의한 것으로 결론지었다.

맥동연소기를 대상으로 한 연구에 있어서 Barr 등⁽¹⁰⁾은 시스템의 음향, 유동, 연소반응과 관련된 특성시간이 복합적으로 연성되어 맥동주파수를 결정짓는다고 하였으며, 이를 이론적으로 예측할 수 있는 모델을 제시한 바 있다. 또, 길상인 등⁽¹¹⁾은 맥동연소기의 작동주파수는 단순히 음향해석에 의해 온도만의 함수로 예측될 수 없으며, 연소기의 형상에 따른 체적효율과 연소부하와 관련된 착화 지연 시간이 고려되어야 한다고 하였다. 최근 Ishino 등⁽¹²⁾은 온도, 감쇠 및 반사를 고려한 음향해석을 통해 비연소, 비유동조건에서의 음향모드를 구하였으나 실제 연소조건에서 작동주파수와 비교 고찰은 이루어지지 못하였다.

이상과 같은 연구에서 비정상 연소로 인한 연소진동에 있어서 발생 당량비 범위는 시스템에 따라 각각 다르게 나타나지만 진동음의 발생주파수는 대체로 100 Hz 내외의 저주파이고, 이는 어떤 형태론든 시스템 고유음향모드와의 피드백에 기인하고 있으며, 연소반응도 무시할 수 없는 인자임을 알 수 있었다. 그러나 피드백에 관여하고 있는 인자들은 연소기의 종류와 형상에 따라 각각 차이점을 보였다.

최근 한희갑 등^(13,14)은 내부 연소방식의 표면연소기를 대상으로 연소진동음의 발생기구를 연구하였는데, 이 경우에는 연소기의 치수에 영향을 받는 중고주파의 음향모드와 치수에 영향을 받지 않고 연소조건에 관계된 저주파의 연소모드가 있는 것이 관찰된 바 있다. 음향모드의 경우는 모드해석기법을 통해 그 발생기구가 설명되었으나, 연소모드의 특성은 명확히 밝혀지지 못하였다.

따라서 본 연구의 목적은 표면연소기의 저주파 연소진동에 대하여 연소기 각부의 치수와 연소 조건 등을 변수로 진동음

의 주파수 특성을 실험하고 다른 연소장치들의 저주파 연소진동현상과 비교 고찰함으로써 표면연소기에 있어서 저주파 연소진동음의 발생기구와 발생조건에 관한 특성을 파악하기 위한 것이다.

2. 실험

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 연소장치는 예혼합실, 팬, 입구덕트, 다공체, 연소실 및 연도로 구성되어 있다. 예혼합실을 제외한 각 부분은 교체가 가능하며 연소실은 직경 34 mm, 두께 2 mm의 스테인레스관을 사용하였으며, 화염의 관찰을 위해서는 같은 치수의 투명 파이렉스관을 사용하였다. 연료는 상용 프로판 가스를 사용하였으며, 유입 혼합기의 온도 및 습도 조절을 위해 공기측에 예열장치와 실리카겔 챔버를 두었고, 혼합실내에 온/습도계를 설치하여 예혼합기의 온/습도를 측정하였다. 화염지시대는 두께 1.7 mm, 공극 직경 0.6 mm, 공극률 10%인 금속성 섬유질 다공체이다.

실험은 입구덕트 길이 L_1 , 연소실 길이 L_c , 연도 길이 L_s , 연도 직경 D_s , 연소면 직경 D_f 등의 설계 치수와 연소실로 유입되는 혼합기의 평균속도 U_0 , 당량비 ϕ , 온도 및 습도 등의 연소조건을 변화시키면서 수행하였다. 여기서 U_0 는 혼합기의 체적유량을 연소대의 면적으로 나눈 속도이다. 또 설계인자로서 연소면의 형상에 따른 영향을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 Model 1과 2를 선정하고, Model 1을 기준형상으로 하였다.

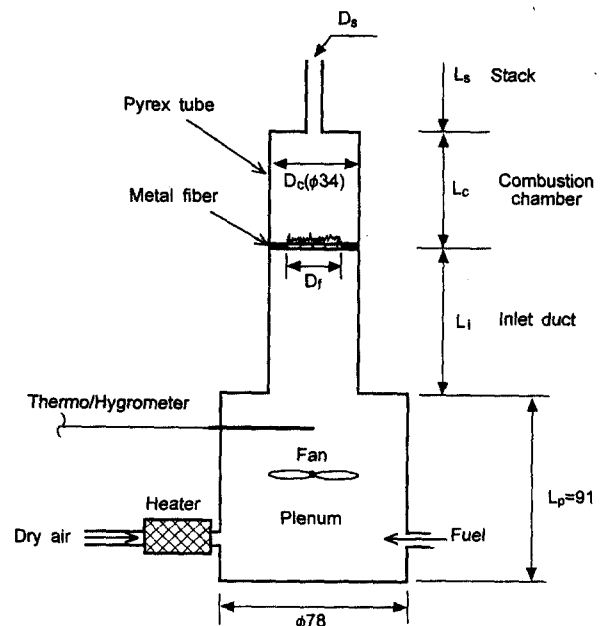


Fig. 1 Schematic of the surface burner

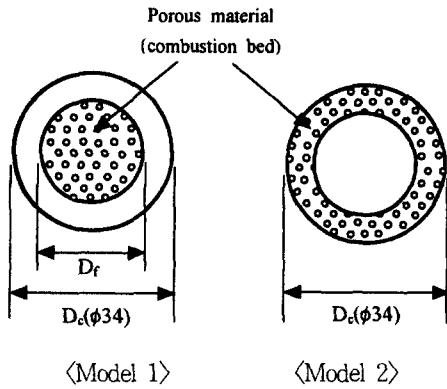


Fig. 2 Combustion beds for experiment

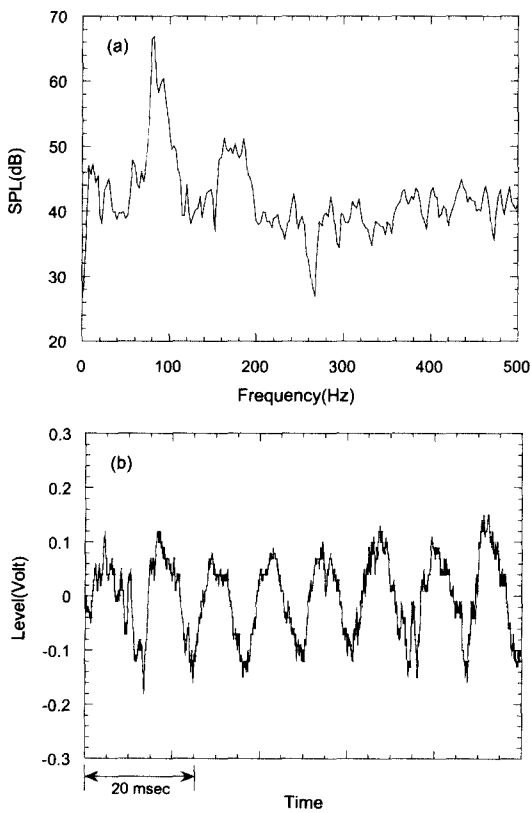


Fig. 3 A typical frequency spectrum and time data of the combustion mode

연소가 시작되고 연소진동음이 발생할 때 연소기로부터 0.5 m 떨어진 위치에서 마이크로폰과 FFT를 이용하여 진동음의 음압을 측정하고 주파수 분석을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 음압 스펙트럼과 발생범위

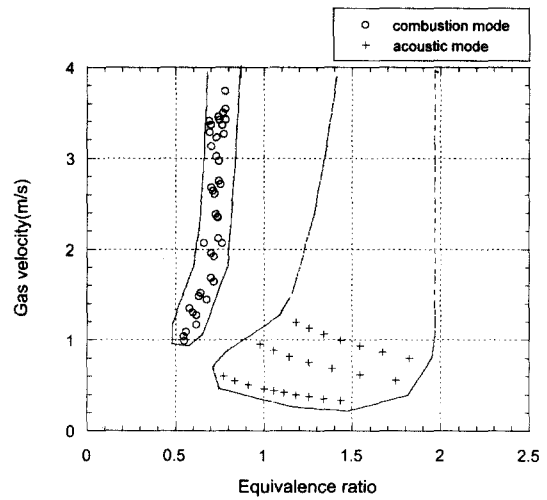


Fig. 4 Onset ranges of combustion-driven oscillations

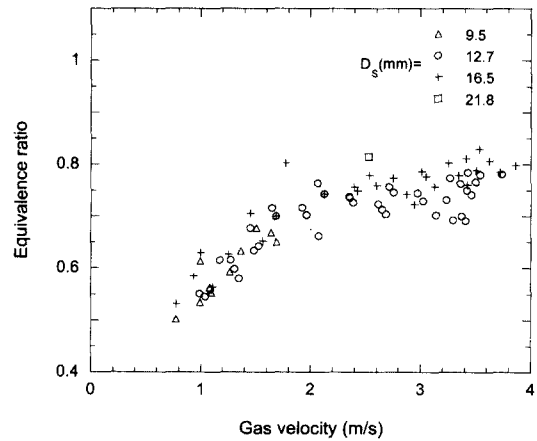
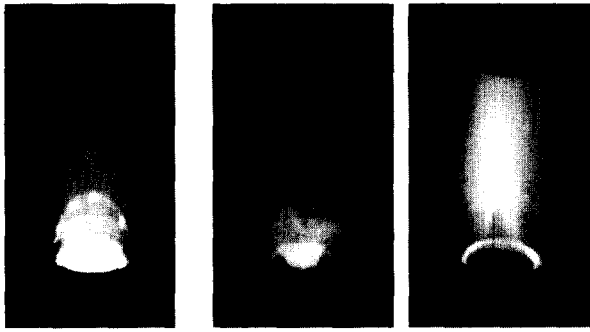


Fig. 5 Onset range of the combustion mode

Fig. 3의 (a), (b)는 연소모드의 대표적인 음압 스펙트럼과 시간영역 데이터이다. 연소모드는 대체로 100 Hz 내외의 저주파 연소음으로서 화염이 화염지지대상에서 부상을 반복하면서 주기적으로 연소를 할 때 발생한다.

Fig. 4는 당량비 ϕ 와 혼합기의 평균속도 U_0 즉, 연소부하에 따른 연소진동음의 발생범위를 도시한 것이다. 그림에서 음향모드와 연소모드는 동시에 나타나지 않고, 연소조건에 따라 각각 독립적으로 발생하며, 두 모드의 발생구간 사이에 진동음이 발생하지 않는 일종의 천이구역이 존재한다. 음향모드는 당량비가 약 $\phi = 0.8 \sim 1.8$ 에 이르는 넓은범위에 걸쳐서 발생하며, 부하가 커질수록 당량비 범위는 다소 좁아진다. 반면에 연소모드는 저부하에서는 발생하지 않으며, 당량비 범위가 좁고 $\phi = 0.5 \sim 0.8$ 인 가연한계 근처의 매우 희박한 연소조건에서만 발생한다. Fig. 5는 연소부하와 당량비



(a) Acoustic mode (b) C1 mode (c) C2 mode
Fig. 6 Flame shapes of combustion-driven oscillations

의 함수로서 연도 직경에 따른 연소모드의 발생범위를 도시한 것으로, 매우 희박한 영역에서부터 발생하여 부하가 증가할수록 당량비 범위가 점차 증가하다가 당량비 0.7~0.8에 이르러 거의 일정하게 유지된다. 연소모드에 있어서 연소부하와 당량비의 관계는 연도 직경뿐만 아니라 다른 설계인자나 연소조건 변화에 대해서도 같은 경향을 보인다. 이와같이 연소모드가 희박한계에서 나타나는 것은 덤프연소기나 후연소기와 공통적인 특성이다.

3.2 화염 형태

Fig. 6은 음향모드와 연소모드가 발생할 때 나타난 연소실 내 화염의 형상을 촬영한 것이다.

음향모드(Fig. 6(a))는 화염이 다공체상에 균일하게 부착되어 연속적으로 정상연소를 할 때 발생한다. 그러나 당량비가 낮아져 혼합기가 점차 희박해지면 화염은 연소면의 가장자리로부터 점차 부상하기 시작하고 연소면으로부터 완전히 부상하기 직전에 이르면 화염은 다공체 상부근처에서 전체가 부착과 부상을 반복하며 미세하게 진동하는 양상을 보인다. Fig. 6(b)는 이 때의 화염형상으로서 본 연구에서는 이것을 연소모드 C1이라 명하였다. 혼합기가 더욱 희박해지거나 유입속도가 증가되면 Fig. 6(c)와 같이 화염은 다공체로부터 완전히 부상하여 연소실내에서만 관찰되는데, 육안으로 규칙적인 진동의 양상을 인식하기는 곤란하였으나 청각과 음압스펙트럼상에는 일정한 저주파 진동이 분명하게 존재하였기 때문에 이를 연소모드 C2로 구분하였다. 여기서 연소모드를 C1, C2 모드로 나눈 이유는 두 모드가 모두 화염의 부상과 더불어 나타나는 현상으로서 연소불안정에 의한 저주파 진동이었으나 화염의 형상과 주파수 특성 등이 구분되었기 때문이다.

3.3 설계인자의 영향

연소기 설계인자에 따른 연소모드의 주파수 및 발생조건 등의 변화를 조사하기 위하여 선택된 치수는 Table 1과 같

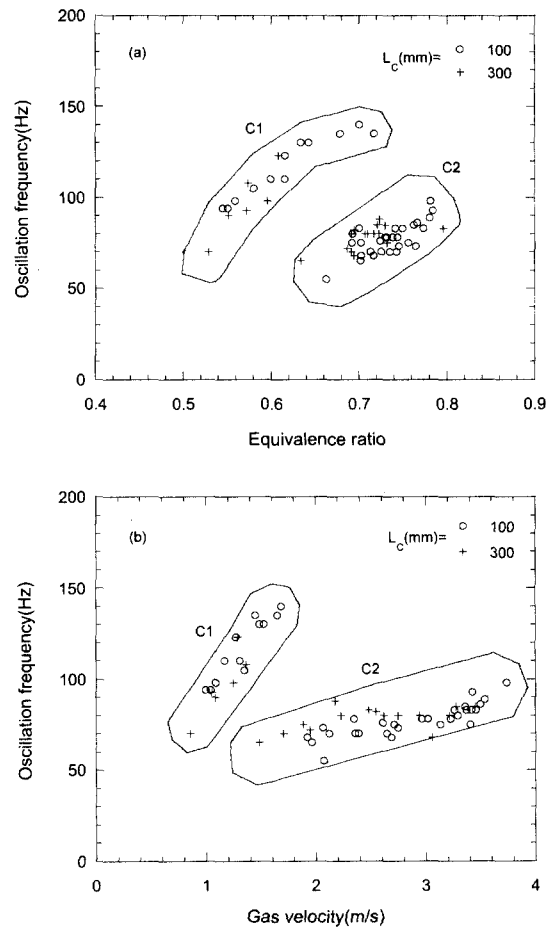


Fig. 7 Effect of the combustion chamber length on the oscillation frequency

Table 1 Design parameters of the surface burner

Unit : mm

$L_i =$	161, 300, 600
$L_c =$	100, 300, 600
$L_s =$	0(no stack), 25, 100, 200, 400
$D_f =$	18, 22, 26, 30, 34
$D_s =$	9.5, 12.7, 16.5, 21.8

다. 표에서 밑줄 친 값은 기준 설계조건으로 다른 설계인자를 변화시킬 때 기준이 되는 값을 뜻한다.

Fig. 7의 (a), (b)는 연소실 길이에 따른 연소모드의 주파수 변화를 당량비와 연소부하의 함수로 도시한 것으로 연소모드는 연소실의 길이와 무관함을 알 수 있다. 또 그림에서 연소모드는 두 개의 주파수 그룹을 형성하는데 비교적 저부

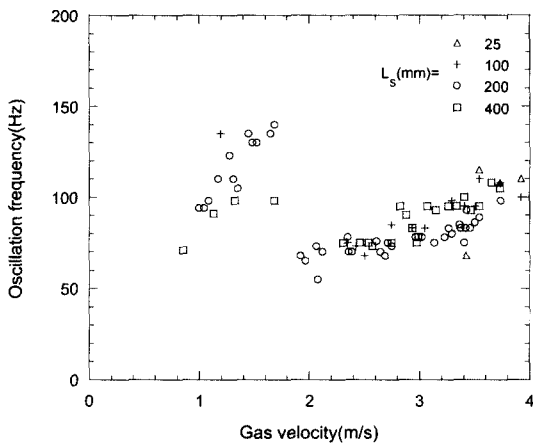


Fig. 8 Effect of the stack length on the oscillation frequency

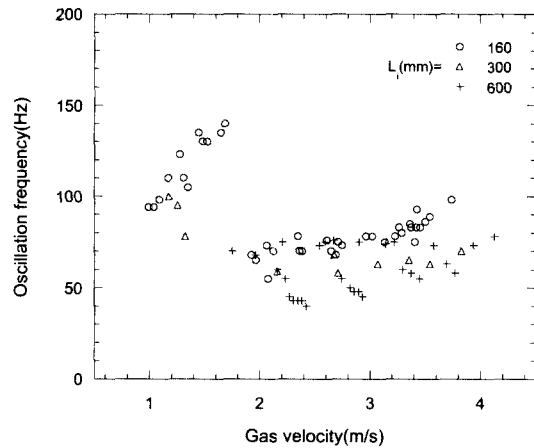


Fig. 10 Effect of the inlet duct length on the oscillation frequency

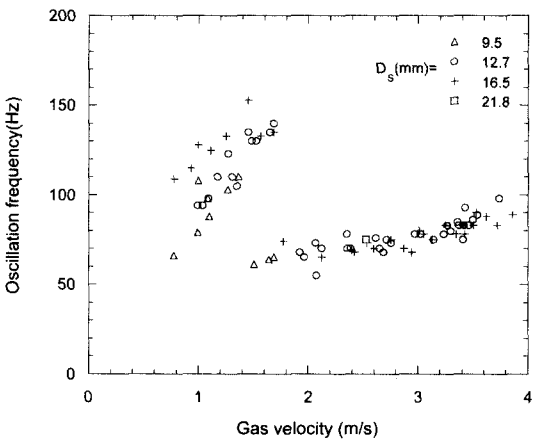


Fig. 9 Effect of the stack diameter on the oscillation frequency

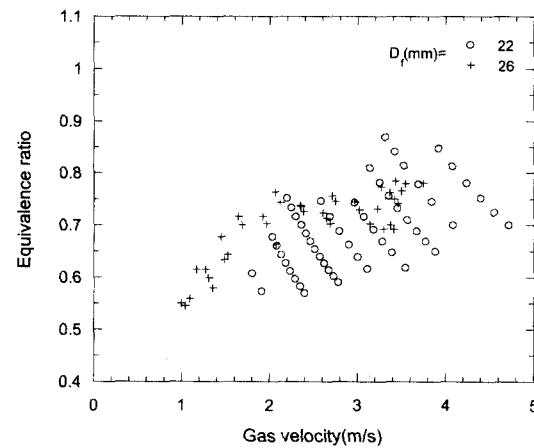


Fig. 11 Effect of the bed diameter on the onset range

하이면서, 당량비가 낮은 영역에서 나타나는 것은 C1모드이며, 고부하이면서 당량비 약 0.7~0.8에서 나타나는 것은 C2모드인 것을 확인하였다.

Fig. 8은 연도길이에 따른 연소모드의 주파수 변화를 연소부하의 함수로 도시한 것이다. 그림에서 연도길이는 연소모드의 주파수에 거의 영향을 미치지 못하지만, 연도가 길수록 발생영역이 넓어지고, 연도가 너무 짧으면 잘 발생하지 못하는 것을 볼 때 연소모드의 발생에는 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 9은 연도 직경에 따른 연소모드의 주파수 변화를 연소부하의 함수로 도시한 것이다. 연도 직경도 연소모드의 주파수와는 무관하나, 직경에 따라 연소모드의 발생범위가 다른 것을 볼 때 연소모드의 발생에는 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그림에서 $D_s=12.7$ mm와 16.5 mm는 연소모드가

전 부하범위에 걸쳐 강하게 나타났으며, $D_s=9.5$ mm인 경우에는 저부하의 C1모드가 주로 나타나고, $D_s=21.8$ mm인 경우에는 고부하에서 C2모드만 약하게 나타났다. 그리고, $D_s < 9.5$ mm 이거나 $D_s > 21.8$ mm 보다 큰 경우에는 연소모드가 나타나지 않았다. 그러나 연도가 없이 연소실이 개방된 경우라도 연소실의 길이가 직경의 15배가 넘는 매우 긴 경우에는 연소모드가 관찰되기도 하였다.

Fig. 10은 입구덕트의 길이가 연소모드의 주파수에 미치는 영향을 당량비와 연소부하의 함수로 도시한 것이다. 그림에서 입구덕트의 길이 또한 연소모드의 주파수에 지배적인 인자가 되지 못한다. 다만 입구덕트의 길이가 길어질수록 저부하의 C1모드 보다 C2모드가 주로 나타나는 것을 볼 때 연소모드의 발생에만 다소 관련이 있는 것으로 판단된다. 입구덕트는 배플이 있는 연소기나 후연소기, 텀프연소기⁽⁶⁻⁹⁾ 등에서 연소진동을 일으키는 중요한 설계인자로서 입구측의 음향

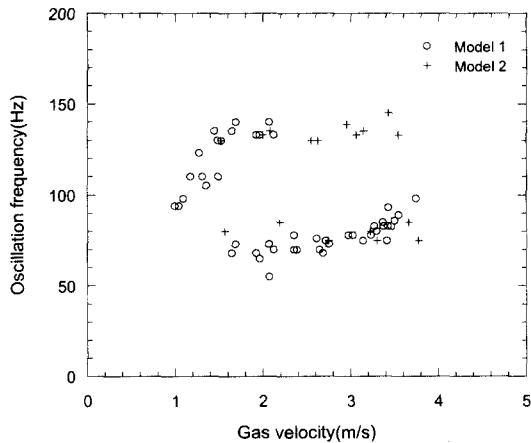


Fig. 12 Effect of the shapes of combustion bed on the oscillation frequency

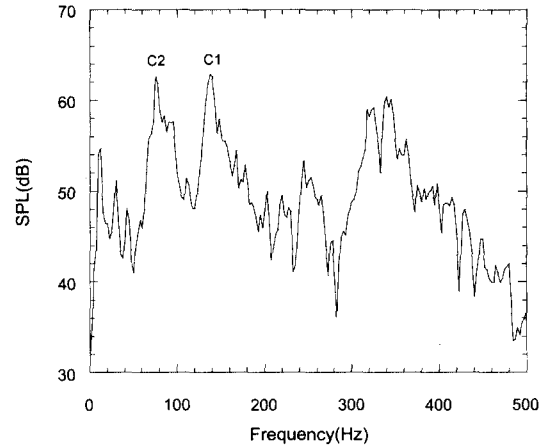


Fig. 13 Frequency spectrum when two combustion modes appear simultaneously

모드가 불안정 주파수와 직접적인 관련이 있다고 보고되었는데, 표면연소기의 경우는 입구덕트 또한 연소모드의 주파수와 거의 무관하다는 것은 매우 특징적이라 할 수 있다.

Fig. 11은 연소면 직경에 따른 연소모드의 발생범위를 연소부하와 당량비의 함수로 도시한 것이다. 연소모드의 맥동적인 특성은 연소실에 대한 연소면의 면적이 작을수록 크게 나타나는데, $D_f=26$ mm보다 22 mm인 경우에 맥동성이 더 강하고 발생 부하 및 당량비 범위도 더 넓게 나타난다. 그러나 $D_f > 26$ mm나 $D_f < 22$ mm인 경우에는 연소모드가 거의 관찰되지 않았다. 이 결과로부터 연소모드의 발생을 위해서는 연소면에 접한 배플에 의한 재순환 영역의 존재가 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 즉, 재순환 영역이 매우 작거나 매우 큰 경우에는 연소모드가 관찰되지 않는다.

Fig. 12는 연소면 형상에 따른 연소모드의 주파수 변화를 연소부하의 함수로 도시한 것이다. Model 2는 Heitor 등의 연소장치와 거의 유사하나 배플 주위로 다공체가 있다는 것이 차이점이다. 실험결과는 Heitor 등의 결과와 달리 발생주파수가 상류측 덕트길이에 무관하였고, 매우 희박한 혼합기에서만 발생하였다. Model 1과 2는 주파수 특성, 발생 당량비 범위, 화염 형상 등이 거의 유사하여 두 모델의 연소모드는 동일한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 화염지시대인 다공체가 본 연소장치의 저주파 연소진동 현상을 다른 연소장치들의 것과 구별짓게 하는 가장 근본적인 인자임을 나타내는 것이라고 할 수 있다.

따라서 표면연소기에 있어서 연소기의 치수와 관련된 설계 인자는 저주파 맥동 주파수를 결정짓는 인자가 아니며, 발생 조건에만 다소 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 다른 연소장치들에서 나타났던 저주파 연소진동 현상⁽⁶⁻¹²⁾이 대부분 연소기의 치수와 관련된 음향모드에 의존하였다는 것과 구별되는 것이다. 그러나 스펙트럼 상에서 보여지듯이 연

소모드의 맥동 특성이 상당히 주기적이기 때문에 그 발생기구에 대하여 어떠한 피드백 기구를 배제시키고 단순히 화염의 불안정현상만으로 설명이 가능한지 아직은 불분명한 상태이다.

3.4 연소조건에의 영향

혼합기의 온도 및 습도가 연소모드에 미치는 영향을 조사하기 위하여 혼합기의 온도를 20°C~60°C, 습도를 0%~20%로 변화시키며 실험하였으나 연소모드의 주파수 및 음압 레벨은 변화되지 않았다. 이는 한희갑 등⁽¹⁴⁾의 연구 결과와 상반되는 것인데, 검토 결과 이전 연구에서 유량 측정계를 공기에 열기 하류단에 설치함으로써 혼합기 온도에 따라 정확한 유량을 측정하지 못한데서 오는 오류였음을 알게 되었다.

연소모드는 연소조건에 따라 100~160 Hz의 C1모드와 50~90 Hz의 C2모드로 구분되는데 이 두 모드는 부하 조건이나 당량비 조건 등에 따라 개별적으로 나타나기도 하고, 천이하기도 하며, 동시에 나타나기도 한다. 비교적 저부하의 희박 혼합조건일수록 C1모드가 나타나고 부하가 높아지면서 C2모드가 나타나는 것으로 보인다. Fig. 13은 두 모드가 동시에 나타난 경우의 주파수 스펙트럼이다. 현재로서는 이 두 연소모드가 유사한 불안정 특성을 갖는다고 추정될 뿐 정확히 구분하여 설명하기 위해서는 좀 더 심도 있는 연구가 필요하다.

4. 결론

표면연소기의 연소진동음은 연소조건에 따라 음향모드와 연소모드가 관찰된 바 있으며, 본 연구에서는 연소모드를 중심으로 실험적으로 조사하고, 기존의 관련 연구결과와 비교 고찰하였다.

연소모드는 희박 혼합조건에서 화염이 부상할 때 발생하는 불안정 모드로서 그 발생주파수는 연소기의 치수와 무관하고 당량비와 연소부하만의 함수이다.

연소모드의 발생은 연소특성에 영향을 미칠 수 있는 연소실 온도, 압력 및 유동 분포와 연소 베드, 배기관 등의 연소기 치수에 의존하는 것으로 판단된다.

연소모드는 C1 및 C2의 두 모드가 존재하며 부하나 당량비 조건에 따라 개별적으로 나타나기도 하고 천이하기도 하며, 동시에 나타나기도 한다.

각종 연소장치에 있어서 저주파 연소진동음의 발생기구는 연소기의 형상이나 연소조건 등의 작은 차이에도 특성을 달리하며, 표면연소기의 경우도 다른 연소장치들과 구분되는 특성을 나타낸다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국과학재단 핵심전문연구사업에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Rayleigh, J. W. S., 1945, The Theory of Sound, Vol. 2, Dover.
- (2) Chu, B. T., 1956, "Stability of System Containing a Heat Source the Rayleigh Criterion," National Advisory Committee for Aeronautics, Res. Memo. 56D27
- (3) Putnam, A. A. and Dennis, W. R., 1953, "A Study of Burner Oscillations of the Organ Type," Trans. ASME 75, pp. 15~28.
- (4) Kwon, Y. P. and Lee B. H., 1985, "Stability of the Rijke Thermoacoustic Oscillation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78(4), pp. 1414~1420.
- (5) 권영필, 이병호, 1987, "기주의 열음향진동에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 11(2), pp. 253~261.
- (6) Yu, K. H., Trouve, A., Daily, J. W., 1991, "Low-frequency Pressure Oscillations in a Model Ramjet Combustor," J. Fluid Mech., Vol. 232, pp. 47~72.
- (7) Langhorne, P.J., 1988, "Reheat Buzz: an Acoustically Coupled Combustion Instability. Part 1. Experiment," J. Fluid Mech., Vol. 193, pp. 417~443.
- (8) Bloxidge, G. J., Dowling, A. P. and Langhorne, P. J., 1988, "Reheat Buzz: an Acoustically Coupled Combustion Instability. Part 2. Theory," J. Fluid Mech., Vol. 193, pp. 445~473.
- (9) Heitor, M. V., Taylor, A. M. K. P., Whitelaw, J. H., 1984, "Influence of Confinement on Combustion Instabilities of Premixed Flames Stabilized on Axisymmetric Baffles," Combustion and Flame, Vol. 57, pp. 109~121.
- (10) Barr, P. K., Keller, J. O., Bramlette, T. T., 1990, "Pulse Combustor Modeling Demonstration of the Importance of Characteristic Times," Combustion and Flame, Vol. 82, pp. 252~269.
- (11) 길상인, 신현동, 1991, "헬름홀쯔형 맥동연소기의 연소 및 작동 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 제 15 권 제 5 호, pp. 1727~1736.
- (12) 石野洋二浪, 外 3人, 1997, "二次元バルブレスパルス燃焼器の音響特性の實驗的および數值的評價: 數値解析手法と非燃焼時の音響特性の試み," 日本機械學會論文集 B 編, 63卷, 614号, pp. 3419~3425.
- (13) 김성근, 한희갑, 권영필, 1998, "표면연소기의 연소진동음에 관한 연구-(1)음향모드," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 498~503.
- (14) 한희갑, 권영필, 1998, "표면연소기의 연소진동음에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제 22 권, 제 11 호, pp. 1582~1590.