

표면연소기의 연소진동음에 관한 연구

한 희 갑* · 권 영 필**
(1998년 4월 8일 접수)

A Study on Combustion-Driven Oscillations in a Surface Burner

Heekab Han and Youngpil Kwon

Key Words: Combustion-Driven Oscillation(연소진동음), Acoustic Mode(음향모드), Combustion Mode(연소모드), Resonant Frequency(공명주파수), Flame Instability(화염불안정)

Abstract

Combustion-driven oscillations in a surface burner have been investigated to clarify their characteristics. A model combustor is made and the oscillation frequencies are measured for various dimensions of the combustor. It is found that there are two modes of oscillations; one is the 'acoustic mode' at high frequencies, associated with the acoustic mode of the combustion system and the other is the 'combustion mode' at low frequencies around 100 Hz, associated with the instability of the flame. Acoustic mode is excited when the surface burner is placed where the phase of particle velocity leads that of acoustic pressure by 90° , for all the combustion conditions. Combustion mode is driven at high combustion rate by the lift of unstable flame near the lower limit of the combustible equivalence ratio. Combustion mode is greatly influenced by the inlet temperature of the premixed gas. When the inlet temperature is very high, the combustion mode does not occur.

1. 서론

표면연소기는 다공체를 사용한 예혼합 연소기로서 다공체에서 연소반응이 일어나므로 화염이 짧아지고, 열방출이 주로 복사에 의하여 이루어지므로 연소실이 작으면서 연소부하를 높일 수 있으며 NOx 발생이 적기 때문에 최근에 많은 관심을 끌고 있다. 그러나, 연소시에 특정주파수의 이상연소음이 발생하기 쉽기 때문에 문제가 되고 있다. 연소장치의 연소과정에서 발생하는 소음은 크게 연소굉음(combustion roar)과 연소진동음(combustion-driven oscillations)으로 나눌 수 있다(1). 연소굉음은 난류 에디들이 무수한 단극자 음원을 만들기 때문에 광대역의 주파수 특성을

갖는 난류 연소음이다. 반면에 연소진동음은 제한된 공간내에서 연소가 일어날 때 피드백 기구를 통해 불연속 주파수 특성을 나타내는 연소음을 말한다. 연소진동음은 특정 주파수에서 매우 높은 음압을 나타내기 때문에 심각한 소음원이 될 뿐만 아니라 연소특성이나 연소기의 안전문제에 영향을 미칠 수 있으므로 그 원인이나 대책에 관한 연구가 요구된다.

대부분의 연소진동음은 음압과 맥동적인 열공급의 상호작용에 의해 발생하는 열음향(thermo-acoustics) 현상의 하나이다. 열음향 진동의 발생 조건에 대해서 Rayleigh는 "유체의 밀도가 밀할 때 가열되거나 소할 때 냉각이 되면 진동이 발생한다(2)."고 하였으며 이를 "Rayleigh 조건"이라고 한다. 일반적으로 압력변화가 밀도변화와 동일 위상을 나타내므로 열음향 진동의 발생기구는 열공급과 압력변화의 위상관계의 해석으로 설명될 수 있으며 Rayleigh 이후 많은 연구자들(3-5)에 의하여 열음향 현상의 발생조건에 관한 정량적인 모델이 확립되었다. 기주내에 하니콤포에 의한 예

* 숭실대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 숭실대학교 기계공학과

혼합연소가 이루어지는 경우에는 연소반응을 무시하고 열전달 응답을 고려한 음향진동 이론으로 그 주파수 특성을 잘 해석할 수 있는 것으로 밝혀졌다⁽⁶⁾.

한편, 고속연소의 연소진동에 관한 연구는 주로 추진장치의 연소불안정 현상^(7~13)이나 맥동연소기⁽¹⁴⁾와 관련하여 활발하게 이루어져 왔다. 특히, 램제트의 불안정연소^(8~10)과 제트엔진의 후연소기의 연소불안정에 의한 저주파 진동음에 관해서 체계적인 연구가 있었다^(11,12). V형 보엽기나 급확대부 등을 통하여 화염을 안정시키는 경우, 불안정현상의 원인 규명을 위하여 맥동적인 유동현상에 주된 관심을 두고 가시화를 통하여 와류의 거동을 관찰하였다^(8~13). 와류가 하류로 대류되면서 성장하여 연소반응을 일으키고 연소열에 의한 압력파가 새로운 와류의 생성을 야기시켜 피드백 사이클을 이루는 것으로 파악되었다. 특히 Yu 등⁽¹⁰⁾은 연소실이 배기노즐로 막힌 램제트의 모델연소기인 덤프(dump)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 의하여 진동음이 발생한다는 것이다.

이상과 같은 연소진동음에 관한 많은 연구에도 불구하고 표면연소기에 대해서는 아직 발표된 연구가 없었다. 최근, 권영필 등⁽¹⁵⁾에 의하여 다공체가 관의 상단면에 설치된 개방형 표면연소기의 진동음의 발생에 관한 연구가 있었다. 이론모델 및 실험을 통하여 이 경우에 발생하는 진동음은 다공체에서 관으로의 열전달에 의하여 음향모드가 여기되는 것이 입증되었다. 그러나 밀폐형 즉, 내부 연소방식의 표면연소기에서는 연소기의 치수에 영향을 받는 중·고주파의 '음향모드(acoustic mode)'와 치수에 영향을 받지 않고 연소조건에 관계된 저주파의 '연소모드(combustion mode)'가 있는 것이 관찰된 바 있다⁽¹⁶⁾. 그러나 이 두 모드의 특성이 명확히 밝혀지지 못하였다.

따라서 본 연구는 밀폐형 표면연소기의 음향모드와 연소모드의 발생기구 및 발생조건을 구하기 위한 것이다. 연소장치의 치수변화와 부하, 당량비 및 혼합기 온도의 변화에 따른 방사음의 특성 변화를 실험하고 결과를 고찰하여 두 모드의 차이점과 특성을 밝혔다. 또한, 모드해석기법을 통

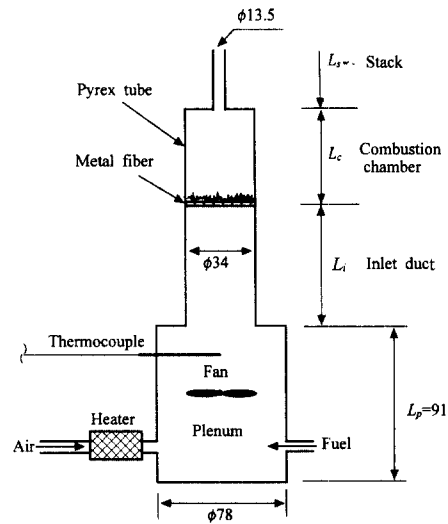


Fig. 1 Schematic diagram of the surface burner.

해 음향모드의 발생기구를 이론적으로 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 연소장치는 예혼합실, 팬, 입구덕트, 다공체, 연소실 및 연도로 구성되어 있다. 예혼합실을 제외한 각 부분은 교체가 가능하며 연소실은 화염의 관찰을 위해 직경 34mm, 두께 2mm의 투명 파이렉스관을 사용하였다. 연료는 상용 프로판 가스를 사용하였으며, 유입 혼합기의 온도조절을 위해 공기측에 예열장치를 두었고, 혼합실내에 열전대를 설치하여 예혼합기의 온도를 측정하였다. 연료와 공기가 충분히 혼합될 수 있도록 혼합실내에 팬을 설치하였다. 화염지지대는 두께 1.7mm, 공극직경 0.6mm, 공극률 5%인 금속성 섬유질 다공체를 사용하였다.

실험은 입구덕트 길이 L_i , 연소실 길이 L_c , 연도 길이 L_s 등의 설계 치수와 연소실로 유입되는 혼합기의 평균속도 U_0 , 당량비 (equivalence ratio) ϕ 및 온도 등의 연소조건을 변화시키면서 수행하였다. 여기서 U_0 는 혼합기의 체적유량을 연소실 단면적으로 나눈 속도이다.

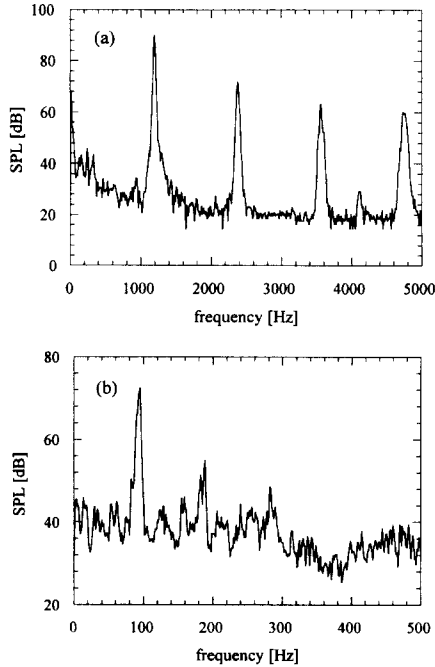


Fig. 2 Typical sound pressure spectrum of combus L_i tion-driven oscillations for $L_p=0.09m, L_c=0.1m, L_s=0.25m$:
 (a) Acoustic mode; $U_o=0.7m/s, \phi=0.88$
 (b) Combustion mode; $U_o=2.5m/s, \phi=0.58$.

연소진동음이 발생할 때 연소기로부터 0.5m 떨어진 위치에서 소음계와 FFT를 이용하여 진동음의 음압을 측정하고 그 주파수를 분석하였다.

2.2 음압 스펙트럼과 모드

실험결과, 연소조건에 따라 서로 다른 특성을 갖는 두 종류의 연소진동음이 관찰되었으며, Fig. 2의 (a), (b)는 그 대표적인 음압 스펙트럼이다.

먼저, Fig. 2(a)는 대체로 수백~수천 Hz에 이르는 중·고주파 대역에서 발생하는 연소진동음으로서 연소장치의 치수에 따라서 주파수가 변화하며 넓은 부하변화에 걸쳐 거의 모든 연소조건에서 발생한다. 이 때 화염은 다공체에 부착하여 존재하고 짧고 뚜렷한 청음을 형성한다. 이러한 연소진동음은 연소장치의 고유 음향모드가 여기된 것으로서 ‘음향 모드’로 분류하였다.

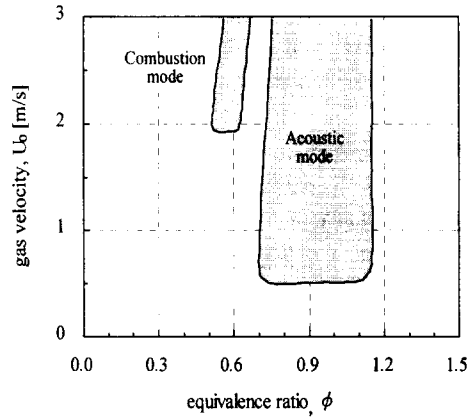


Fig. 3 Unstable ranges for combustion-driven oscillations.

한편 Fig. 2(b)는 100Hz 내외의 저주파 연소음의 스펙트럼으로서 당량비가 낮고 고부하 연소시에 일어나며 화염은 화염지지대상에서 부상하여 불안정 연소를 한다. 이러한 저주파 연소음은 기존의 덤프연소기에서의 대류-음향모드나 기주의 열음향모드와는 달리 연소특성에 크게 관련되어 있기 때문에 본 연구에서는 이를 ‘연소모드’로 분류하였다.

2.3 모드별 진동음의 발생범위

Fig. 3은 당량비 ϕ 와 혼합기의 평균속도 U_o , 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 $\phi=0.7\sim 1.2$ 에 이르는 넓은 범위에 걸쳐서 발생하며, 부하 범위도 상당히 넓음을 알 수 있다. 반면에 연소모드는 저부하에서는 발생하지 않으며, 비교적 고부하이면서 당량비 $\phi=0.5\sim 0.6$ 의 가연한계 근처의 매우 희박한 연소조건에서만 발생한다. 또한 부하가 높아질수록 연소모드가 발생하는 당량비 범위도 점차 높아지는 경향을 보인다. 이와 같이 연소모드는 기존의 덤프연소기의 대류-음향모드와 유사하게 100Hz 내외의 저주파 진동음으로서 대체로 $\phi < 0.7$ 의 희박한 연소조건에서 발생한다.

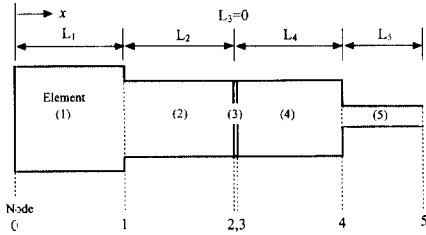


Fig. 4 One-dimensional acoustic model for the surface burner.

3. 음향모드

3.1 모드해석

본 연구에서 이용된 연소기의 고유음향모드를 구하기 위하여 연소기를 Fig. 4와 같이 관지름이 다른 덕트계로 모델링하고 각각의 요소에 대하여 평면파 이론⁽¹⁷⁾을 적용하였다.

임의의 n 번째 직관 요소에 평면파가 존재할 때 우측단에서의 음압과 체적속도의 복소진폭을 각각 P_n, V_n , 좌측단에서의 복소진폭을 각각 P_{n-1}, V_{n-1} 이라 할 때 이들 진폭사이의 관계를 다음과 같은 전달행렬 $[TR_n]$ 을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} P_n \\ V_n \end{Bmatrix} = [TR_n] \begin{Bmatrix} P_{n-1} \\ V_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

길이 L_n , 단면적 S 인 직관의 경우에 전달행렬은 다음과 같다.

$$[TR_n] = \begin{bmatrix} \cos k_n L_n & -jY_n \sin k_n L_n \\ -(j/Y_n) \sin k_n L_n & \cos k_n L_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 j 는 $(-1)^{1/2}$ 로서 허수, k 는 파수로서 음속 c 에 대한 각주파수 ω 의 비로 정의된다. 또 Y 는 임피던스로서 $\rho c/S$ 이다. 밀도 ρ 와 음속 c 는 매질의 온도에 의존하므로 근사적으로 각 요소의 평균온도 T_m 을 가정하여 다음 식으로 구하였다.

$$c = \sqrt{\gamma RT_m}, \quad \rho = \frac{P_m}{RT_m} \quad (3)$$

여기서 P_m 은 대기압, γ 와 R 은 각각 표준상태의 공기에 대한 비열비와 기체상수를 뜻한다.

또한, 화염지지대로서 사용된 다공체를 음향임피던스 Z_p 의 직렬요소로 처리하면 전달행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[TR_p] = \begin{bmatrix} 1 & -Z_p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

다공체의 임피던스는 Rao에 의해 제시된 다음 모델⁽¹⁷⁾을 사용하였는데, 임피던스의 실수부는 고유모드에 관여하지 않으므로, 계산시에는 허수부만을 취하였다.

$$Z_p = \left\{ \frac{7.34 \times 10^{-3}}{\sigma} + j \frac{2.23 \times 10^{-5} (1 + 51t_h)(1 + 204d_h)f}{\sigma} \right\} Y \quad (5)$$

여기서 t_h 는 다공체의 두께[m], d_h 는 공극의 지름[m] 그리고 σ 는 공극률로서 다공체의 전표면적에 대한 개구부의 면적비로 정의된다.

단면적이 변하는 점에서 음압과 체적속도가 연속인 조건을 이용하면 Fig. 4의 모델에 대한 최종적인 전달행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} P_5 \\ V_5 \end{Bmatrix} = [TR_5][TR_4] \begin{bmatrix} 1 & -Z_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times [TR_2][TR_1] \begin{Bmatrix} P_0 \\ V_0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 경계조건으로 지점 0을 고정단 ($P_0=1, V_0=0$), 지점 5를 자유단 ($P_5=0$)으로 놓으면, 식 (6)으로부터 양단의 경계조건을 만족하는 모드 주파수를 구할 수 있다. 주파수가 구해지면 좌측단의 경계값으로부터 시스템의 고유음향모드를 구할 수 있다. 즉, 요소내(국소좌표, ξ)의 음압과 체적속도의 복소진폭 $P_n(\xi), V_n(\xi)$ 을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} P_n(\xi) \\ V_n(\xi) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_n \xi & -jY_n \sin k_n \xi \\ -(j/Y_n) \sin k_n \xi & \cos k_n \xi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{n-1} \\ v_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

방사단을 갖는 요소(여기서는 5번 요소)의 길이는 방사에 대한 임피던스를 고려한 유효길이를 사용하여야 한다.

Fig. 5는 $L_c=0.07m, L_s=0.02m$ 인 경우 기본모드에서 셋째모드까지의 고유음향모드를 도시한 것이다. Fig. 5(a)는 압력진폭으로서 단면이 변하

는 부분에서 꺾이고 다공체에서 큰 변화를 일으

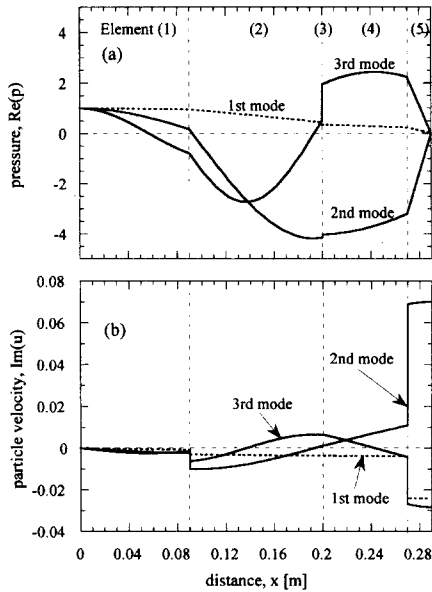


Fig. 5 Mode shapes for the one-dimensional acoustic model: (a) Pressure, (b) Particle velocity.

키는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 체적속도 V 를 단면적 S 로 나눈 평균입자속도 $U = V/S$ 의 변화를 도시한 것이다.

3.2 음향모드의 발생조건

음향모드에 관한 열전달 응답은 열대류 응답과 연소반응의 응답을 합한 것이라고 할 수 있으며 이를 정량적으로 해석하기 위한 모델은 아직 개발되지 못했으므로 여기서는 무차원 전달함수를 이용한 열응답의 정성적인 해석을 통하여 위에서 계산된 음향모드가 여기될 수 있는지 예측하고자 한다. 열원에서 음향모드의 입자속도에 대한 열공급의 복소진폭비를 무차원화한 열전달 응답함수는 다음식으로 정의 될 수 있다.^(5,6)

$$E = Q / (UQ_o / \sqrt{\omega\alpha}) \tag{8}$$

식에서 Q 는 전달열량의 복소진폭, U 는 열원에서 음장의 입자속도의 복소진폭, α 는 열확산계수를 나타낸다. 일반적으로 열전달에서 열공급은 유속보다 위상이 항상 늦다고 할 수 있으므로 응답함수는 음수의 허수값을 갖는다. 위의 응답함수를 이용하면 음향파위의 생성량 W_g 는 다음

Table 1 Calculated and measured frequencies for acoustic modes.

L_5 [m]	L_4 [m]	Calculated [Hz]	Measured [Hz]	Sign of $Im(P^*U)$	T_m [K]
0.02	0.05	183 (1st)	—	—	950
		903 (2nd)	900~925	—	
		1588 (3rd)	1563~1588	+	
0.02	0.07	178	—	—	900
		824	775~850	—	
		1479	1412~1488	+	
0.02	0.1	173	—	—	900
		740	625~650	—	
		1375	1240~1270	+	
0.02	0.18	158	—	—	880
		582	540~560	+	
		1220	—	—	
0.25	0.05	90	—	—	1050
		583	575~588	+	
		1167	—	—	
0.25	0.07	90	—	—	1050
		539	535~550	+	
		1158	—	—	
0.25	0.1	86	—	—	1050
		488	485~490	+	
		1144	—	—	
0.25	0.18	81	—	—	1050
		405	420~435	+	
		1096	—	—	

식과 같다.

$$W_g = \frac{RQ_o}{2c_p P_m \sqrt{\omega\alpha}} Re(EP^*U) \tag{9}$$

여기서 P^* 는 열원에서 복소음압진폭의 공액값이다.

식 (9)에서 정재파를 나타내는 음압과 입자속도의 곱은 순허수가 되므로 음향파위에 기여하는 것은 응답함수의 허수값이 된다. 그런데 응답함수의 허수는 음의 값이므로 P^*U 가 양의 허수값을 가질 때 음향파위의 생성이 가능하다. 즉, 음향모드가 여기되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$Im(P^*U) > 0 \tag{10}$$

이는 입자속도가 음압보다 위상이 90° 앞서는 위치에 열원인 연소대가 위치할 경우를 나타낸다. 양단이 개방된 기주의 경우 이러한 위상조건은 기주의 중앙 하반부에 있는 경우에 해당하며 Rijke 진동이 기주의 1/4위치에서 가장 잘 일어난다는 것과 관련된 것이다.^(5,6)

Table 1은 서로 다른 연소실의 치수에 대하여 계산한 모드 주파수와 실험으로 측정된 주파수를 정리한 것이다. 표에서 온도 T_m 은 모드계산에 사용된 연소실의 온도이며 다공체의 온도는 연소

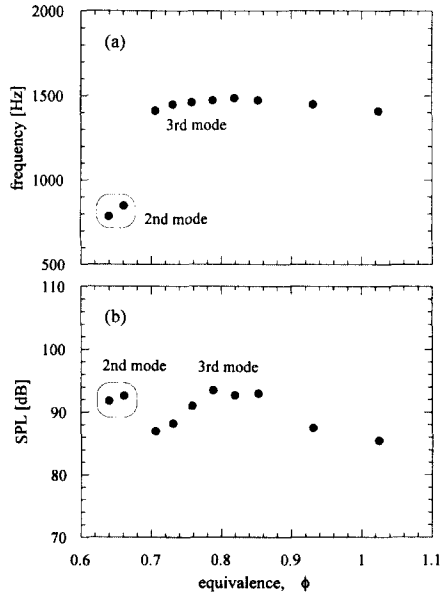


Fig. 6 Variation of the frequency and the sound pressure level for acoustic mode as a function of equivalence ratio: (a) Frequency (b) pressure.

실과 대기온도의 평균온도로 하였고, 연도는 연소실 온도의 0.8배로 가정하였다. 계산값은 기본 모드부터 세번째 모드까지의 주파수를 나타내며 이들 주파수는 연소실이나 연도의 길이에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 실측한 주파수는 연소조건에 따라서 10~30Hz 사이의 편차를 나타냈으며 이는 주로 연소온도의 변화와 관련된 것으로 생각된다.

Table 1에서 음향모드는 고유모드 중 식 (10)을 만족하는 주파수만 여기되는 것을 알 수 있다. $Im(P^*U)$ 의 부호가 음인데도 진동이 발생하는 경우는 진동이 매우 불안정하였으며 연소대가 절점에 가까운 경우로서 약간의 경계조건 변화에 의하여 $Im(P^*U)$ 의 부호가 바뀌는 경우였다. 따라서 음향모드가 발생하는 조건에 관한 예측이 실험결과와 일치한다고 할 수 있다. 즉, 음향모드는 연소장치의 음향모드 중 열원의 위치에서 음압과 입자속도의 위상관계가 식 (10)을 만족하는 경우에 발생된다. Table 1에서 기본 모드인 저주파진동은 모두 여기조건을 만족하지 못함으로써

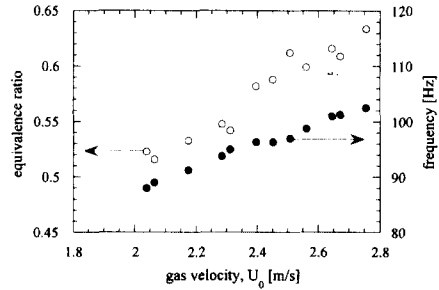


Fig. 7 Variation of the frequency and the equivalence ratio for combustion mode as a function of gas velocity.

발생하지 않는 것을 알 수 있다.

3.3 당량비의 영향

한편 같은 모드라도 당량비가 변함에 따라 발생 주파수 및 음압의 변화를 나타내는데, 이러한 경향의 일례를 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 연료공급량이 1.5 l/min으로 일정할 때 혼합기의 당량비에 따라 $\phi \approx 0.8$ 을 기준으로 주파수가 증가 혹은 감소의 경향을 보이는 것은 당량비에 따른 연소 온도의 변화가 음속에 영향을 주기 때문이다. 즉 당량비 $\phi \approx 0.8$ 근처에서 연소온도가 가장 높기 때문에 음속도 가장 빠르게 되어 최대의 주파수를 나타내고 희박 혹은 농후한 조건으로 갈수록 음속이 감소하므로 주파수가 점점 떨어진다 고 볼 수 있다. 마찬가지로 당량비에 따른 음압도 $\phi \approx 0.8$ 에서 가장 높은 값을 나타낸다.

4. 연소모드

4.1 연소조건에의 영향

Fig. 7은 유입혼합기의 평균속도 U_0 , 즉, 연소 부하에 따라 연소모드의 진동음이 발생하는 당량비와 주파수를 도시한 것이다. 그림에서 연소모드는 희박한계점 근처에서 일어나는데 부하가 증가할수록 희박한계는 당량비가 높은 쪽으로 이동하므로 연소모드가 발생하는 당량비는 높아진다. 부하 증가에 따라 주파수가 증가하는 원인은 다음의 두 가지로 추정된다. 첫째는 부하 증가에 따라 연소실 내부 온도가 증가하므로 음속이 증

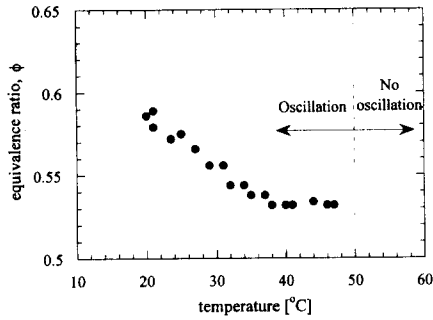


Fig. 8 Effect of the inlet gas temperature on combustion mode.

가하기 때문이다. 그러나 주과수 모델을 세우기 위해서는 더욱 심도 있는 연구가 필요하다. 둘째는 맥동연소기나 램제트 연소기에서 처럼 유입속도나 당량비의 증가가 맥동주과수를 증가시키는 것과 같은 맥락에서 연소모드의 진동주기가 희박 혼합기의 연소속도와 관련이 있기 때문이다.

Fig. 8은 연료공급량이 2.9 l/min일 때 혼합기의 온도가 연소모드의 발생에 미치는 영향을 도시한 것이다. 혼합기의 온도가 높아질수록 연소모드의 주과수 변화는 거의 나타나지 않았으며 발생이 점차 희박한 영역으로 이동하다가 당량비 $\phi \approx 0.53$ 에서 일정하게 유지된다. 이는 혼합기의 온도가 높을수록 자연한계가 점차 희박한 영역으로 넓어지다가 당량비 0.53 정도에 이르면 혼합기의 온도와 관계없이 자연한계가 더 이상 낮아지지 않기 때문이다. 한편, 혼합기 온도가 50°C 이상이 되면 연소모드가 억제되는 데 이는 연소모드의 발생이 혼합기의 온도와 당량비 즉, 연소속도와 관련된 연소특성에 강하게 의존하고 있음을 나타내는 결과이다. 따라서 연소모드의 발생기구를 다음과 같이 추정하여 보았다. 부하가 높고 당량비가 낮은 경우 연소속도가 유속보다 늦게 되므로 혼합기는 화염지지대에서 미처 착화되지 못한 채 연소실로 유입되고 연소실내에서 잔류화염에 의하여 혼합기는 거의 일시에 폭발적인 연소를 하므로 급격하게 연소실의 압력이 상승한다. 곧이어 유입구로 전파된 화염은 화염지지대나 역화방지장치의 소멸작용으로 더 이상 전파되지 못하고 꺼지게 된다. 또한 연도를 통한 가스의 배출과 함께 연소실 압력이 내려가면서 새로운 가스가 유입되지만 화염지지대의 온도는 충분

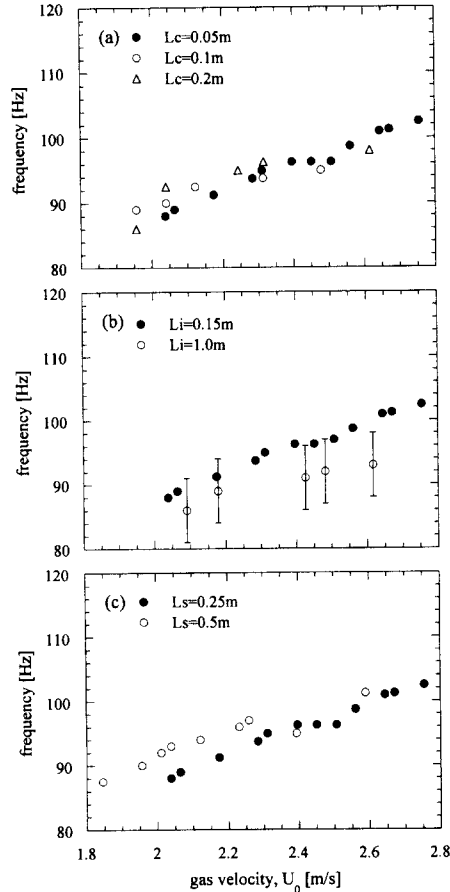


Fig. 9 Effect of the burner dimensions on combustion mode: (a) Effect of the combustor length, (b) Effect of the inlet duct, (c) Effect of the stack length.

히 낮기 때문에 더 이상 착화점으로써 역할을 하지 못하고 앞의 과정을 반복함으로써 하나의 사이클을 이루게 된다. 따라서 예열온도가 50°C 이상이거나 당량비가 희박한계보다 높으면 연소속도가 유속보다 빠르게 되며, 부하가 매우 낮으면 유속이 연소속도보다 늦게 되기 때문에 연소모드가 여기되지 않는다고 할 수 있다. 다만 자발적인 착화 연소가 연소실내의 잔류화염에 의한 것인지⁽¹⁴⁾, 고온연소생성물에 의한 것인지는 아직 불분명하다.

4.2 설계인자의 영향

Fig. 9(a)는 연소실의 길이 L_c 의 변화에 따른 연소모드의 주파수 변화를 도시한 것으로 주파수가 연소실의 길이에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 입구덕트의 길이 L_i 가 각각 0.15m와 1m일 때 연소부하에 따른 연소모드의 주파수변화를 도시한 것이다. 그림에서 입구덕트의 길이가 발생 주파수에 다소 영향을 미치는 것으로 보이나 상당한 길이변화임을 감안할 때 주파수 변화는 매우 작다고 할 수 있다. 그러나 입구길이가 길어질수록 진동음의 발생이 억제되고, 주파수의 변동이 심해지는 것을 볼 때, 입구길이가 연소모드의 발생에 전혀 기여하지 않는다고는 볼 수 없으며, 다만 뚜렷한 주파수의 변화를 가져올 정도의 상관관계는 없는 것으로 보인다. Fig. 9(c)는 연도길이 L_s 가 각각 0.25, 0.5m 일 때 저주파 진동음의 주파수 변화를 도시한 것이다. 그림에서 주파수는 배기관 길이와 거의 무관한 것을 알 수 있다. 다만 연도가 너무 짧거나 너무 긴 경우에는 오히려 진동음의 발생이 억제되는 것으로 나타나 연도는 그 발생에 영향을 미치는 것으로 보인다.

즉, 연소모드의 주파수는 연소장치의 치수에는 별로 영향을 받지 않는다. 이는 연소실이나 흡기관의 길이가 진동음의 주파수 변화와 직접적인 관계를 갖는 덤프연소기의 음향-대류모드⁽¹⁰⁾와는 대조되는 점이다. 표면연소기는 덤프연소기와는 달리 혼합기가 연소실로 유입될 때 급확대부가 없기 때문에 와류를 생성할 수 없으므로 혼합기 제트의 불안정현상과 음향모드가 관련된 대류-음향모드를 야기시키지 않는다고 할 수 있다. 따라서, 표면연소기 진동음의 연소모드는 연소기의 길이에는 거의 무관하고 연소특성에 의해서 결정된다고 할 수 있다.

5. 결론

밀폐형 표면연소기의 연소진동음에 관하여 해석 및 실험을 통한 연구결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 진동모드에는 연소장치의 음향특성에 관련된 중·고주파의 음향모드와 연소의 불안정성에 관련된 저주파의 연소모드가 있다.

(2) 음향모드는 연소대로부터의 열전달 응답에 관련된 것으로서 본 연구의 모드해석기법을 통해 잘 예측될 수 있다.

(3) 연소모드는 음향모드와 관계가 없으며, 희박한계 근처에서 고부하 연소시 화염이 부상하면서 발생한다.

(4) 연소모드는 혼합기의 온도에 크게 영향을 받으며 온도가 높을수록 당량비가 더욱 낮은 조건에서 발생하고 온도가 크게 높으면 연소모드는 억제된다.

참고문헌

- (1) Putnam, A. A., 1982, "Combustion Roar as Observed in Industrial Furnaces," J. Engineering for Power, Vol.104, pp. 867~873.
- (2) Rayleigh, J. W. S., 1945, The Theory of Sound, Vol. 2, Dover.
- (3) Chu, B. T., 1956, "Stability of System Containing a Heat Source the Rayleigh Criterion," National Advisory Committee for Aeronautics, Res. Memo. 56D27.
- (4) Putnam, A. A. and Dennis, W. R., 1953, "A Study of Burner Oscillations of the Organ Type," Trans. ASME 75, pp. 15~28.
- (5) Kwon, Y. P. and Lee B. H., 1985, "Stability of the Rijke Thermoacoustic Oscillation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78(4), pp. 1414~1420.
- (6) 권영필, 이병호, 1987, "기주의 열음향진동에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 11(2), pp. 253~261
- (7) Macquistein, M. A. and Dowling, A. P., 1993, "Low-frequency Combustion Oscillations in a Model Afterburner," Combustion and Flame, Vol. 94, pp. 253~264.
- (8) Poinso, T. J., Trouve, A. C., Veynante, D. P., Candel, S. M., and Esposito, E. J., 1987, "Vortex Driven Acoustically Coupled Combustion Instability," J. Fluid Mech., Vol. 177, pp. 265~292.
- (9) Kailasanath, K., Gardner, J. H., Oran, E. S., and Boris, J. P., 1991, "Numerical Simulations of Unsteady Reactive Flows in a Combustion Chamber," Combustion and Flame, Vol. 86,

- pp. 115~134.
- (10) 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.
- (11) Langhorne, P. J., 1988, "Reheat Buzz: an Acoustically Coupled Combustion Instability. Part 1. Experiment," J. Fluid Mech., Vol. 193, pp. 417~443.
- (12) 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.
- (13) Hertzberg, J. R., Shepherd, I. G. and Talbot, L., 1991, "Vortex Shedding Behind Rod Stabilized Flames," Combustion and Flame, Vol. 86, pp. 1~11.
- (14) 김상인, 신현동, 1991, "헬륨홀쓰형 맥동연소기의 연소 및 작동 특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 제 15권 제 5호, pp.1727~1736.
- (15) 권영필, 이주원, 권영필, 1997, "표면연소기의 연소진동음의 발생조건," 공기조화냉동공학회 논문집 9(2), pp. 221~228.
- (16) 한회갑, 권영필, 1997, "표면연소기의 저주파 연소진동음의 발생조건과 주파수 특성," 대한기계학회 1997년도 추계학술대회 논문집 B pp. 446~450.
- (17) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Duct and Mufflers, John Wiley & Sons, chapter 2~3.