

〈論 文〉

다공성 물질에 의한 예혼합기의 맥동연소에 관한 연구

권영필* · 이동훈** · 현길학**

(1990년 2월 28일 접수)

A Study on the Pulsating Combustion of Premixed Gas in a Tube with a Honeycomb

Young Pil Kwon, Dong Hoon Lee and Gil Hak Hyun

Key Words: 맥동연소(Pulsating Combustion), 예혼합연소(Premixed Combustion), 하니콤(Honeycomb), 열음향 진동(Thermoacoustic Oscillation), NO_x 농도(NO_x Concentration)

Abstract

This study is on the pulsating combustion of premixed gas in a Rijke type combustor made of a honeycomb flame holder in a tube. Modelling for the onset condition of the oscillation is made by the ratio of the acoustic power generation based on the analysis of heat transfer to the power loss due to the thermoviscous dissipation and radiation. Experiment is performed for the characteristics of acoustic, thermal and combustion. It is shown that the theoretical modelling for the oscillation may be used as a limit condition. And the combustion analysis for the acoustic power generation is needed for better prediction of the onset condition. Experimental result shows that, by pulsation, the flame length is shortened and the flame temperature is decreased with increase in the heat transfer coefficient. The NO_x concentration in the exhaust gas is significantly reduced by pulsation and the concentration of unburned hydrocarbon shows a little increase.

기 호 설 명

- L : 관의 길이
- Lh : 관의 입구에서 하니콤의 윗면까지의 거리
- m : 공기비(air ratio), 실제 공기 공급량/이론 공기량
- $P(x)$: 진동음의 음압(acoustic pressure)의 복소진폭의 단면평균치
- Qf : 연료 공급률
- R : 식 (9)로 정의된 동력비(power ratio)
- $r_o(x)$: 관 또는 하니콤의 반지름
- $T_o - T_5$: 각 위치(0, 1, 2, 3, 4, 5)에서 관 중심의 온도

- $T(x)$: 관 길이 방향의 단면 평균 온도
- T_{max} : 하니콤 표면의 평균온도
- $U(x)$: 진동음의 단면평균 입자속도(particle velocity)의 복소진폭
- W_g : 음향동력의 생성
- W_l : 음향동력의 손실
- x : 관의 길이 방향의 좌표계

1. 서 론

연소기에서 가끔 발생하는 연소진동(combustion-driven oscillation)은 연소 및 열전달과 소리의 귀환(feedback)작용으로 일어나는 높은 진폭의

*정회원, 숭실대학교 공과대학 기계공학과

**숭실대학교 대학원

순음성의 진동음이다. 일반적으로 연소진동은 강한 불쾌감을 주고 연소기의 피로파괴의 원인이 될 수 있으므로 억제되어야 할 현상으로 다루어지고 있다. 그러나 진동에 의한 기류의 맥동은 연소를 맥동적으로 되게 하므로 맥동연소기로 활용될 수 있다^(1,2). 맥동연소기는 일반연소기에 비하여 연소율과 열전달률이 높으므로 최근 많은 관심을 끌고 있다.

본 연구는 Fig. 1과 같이 관내부에 다공성 물질인 하니콤(honeycomb)을 화염대로하여 예혼합기를 연소시킬 때 발생하는 기류진동을 이용한 맥동연소기에 관한 것이다. 이때 발생하는 기류의 열음향적(thermoacoustic) 진동은 Rijke⁽³⁾진동이나 Sondhauss⁽⁴⁾진동의 혼합형이라고 할 수 있다. 열음향진동은 열공급과 음압의 주기적인 변화의 상호작용에 의하여 열로부터 음향으로의 에너지변환 현상으로서 에너지 생성률이 소멸률보다 클때 발생한다⁽⁵⁻⁷⁾. 이때 발생하는 진동은 진폭이 매우 높기 때문에 열전달과 연소특성에 현저한 변화를 일으킬 수 있다. 이러한 맥동연소기는 연속적인 기류의 흐름에 맥동성분이 중첩된 것으로서 불연속적인 폭발식 연소식인 일반맥동연소기와는 구분하여 Rijke형 맥동연소기라고도 한다⁽¹⁾. 저자들은 최근 Rijke형 맥동연소기를 이용하여 석탄을 연소시킬 때, 열전달률이 향상되고 연소현상이 바뀌면서 연소속도가 현저히 증대되며 적은 과잉공기로서 완전연소가 되는 것을 보고한 바 있다⁽²⁾. 본 연구는 다공성 매질을 이용하여 예혼합기체를 맥동연소시킬 때의 진동 특성, 열적특성 및 연소특성에 관한 것이다. 먼저, 맥동의 모우드형상 및 발생조건을 열전달과 음향이론을 바탕으로하여 예측하고 실험을 통하여 검토하

였다. 또한 맥동에 의한 화염형상의 변화를 가시화하여 관측하고, 온도분포 및 배기가스의 조성등을 측정하여 맥동 연소와 비맥동 연소를 비교 고찰하였다.

2. 맥동발생의 이론 모델

본 연소기에서 발생하는 기류의 맥동은 열공급과 음장의 귀환작용에 의한 열음향적(thermoacoustic)인 것이므로 음압(acoustic pressure)과 같은 위상성분의 맥동열공급량을 계산하면 음향동력을 구할 수 있다⁽⁸⁾. 맥동적인 열공급은 하니콤과 유체사이의 맥동적인 대류 열전달과 맥동적인 연소열 발생에 의한 것의 합으로 볼 수 있으나 음장에 대한 연소열 발생의 응답은 매우 복잡한 문제이며 아직 이렇다할 연구결과가 없다^(9,10). 따라서 본 연구에서는 연소효과를 무시하고 하니콤 내부에서 맥동 열전달에 의하여 생성되는 음향동력을 계산하여 맥동의 발생여부를 예측하려고 한다. 축방향으로 온도구배가 있는 모세관에서의 음장해석은 Rott에 의하여 성공적으로 이루어진 바 있다. Rott는 유체의 점성과 열전달을 고려하여 음압과 입자속도에 관한 1차원 삼미분 방정식을 유도하고 수치적으로 풀어서 저온장치에서 발생하는 열음향적 진동의 발생조건을 예측할 수 있었으며 실험과 잘 일치됨이 입증되었다⁽¹¹⁻¹³⁾. 이 모델은 관벽과 유체사이의 열전달이 고려된 것이기 때문에 음압과 입자속도에 관한 방정식을 풀면 열전달효과에 의한 음향동력의 생성량을 계산할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 하니콤의 모세관 내에서 발생하는 음향동력의 생성에 Rott의 모델을 적용할 수 있으며, 단면평균 음압 및 입자속도(particle velocity)의 복소진폭, P 와 U 에 관하여 표현하면 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

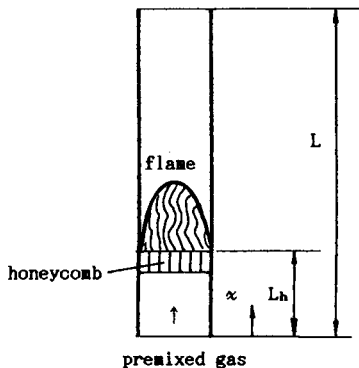


Fig. 1 Rijke type pulse combustor for premixed gas

$$P = - \frac{1 d\Psi}{H dx} \tag{1}$$

$$\Psi = \frac{H dP}{k^2 dx} \tag{2}$$

식에서

$$\Psi = - \frac{1}{\omega} E \gamma P_m U$$

$$k = \frac{\omega}{C} \left(\frac{1 + (\gamma - 1) f_2}{1 - f_1} \right)^{1/2}$$

$$H = (1 + (\gamma - 1) f_2) E$$

$$E = \exp\left(- \int_0^x \frac{(f_2 - f_1) \theta}{(1 - \sigma)(1 - f_1)} dx \right)$$

$$\theta = \left(\frac{dT}{dx} \right) / T$$

$$f_1 = 2J_1(Z) / Z \quad J_0(Z)$$

$$f_2 = f_1(\sigma Z)$$

$$Z = i r_o (\omega / \nu)^{1/2}$$

여기서 i 는 허수기호이며 J_0, J_1 은 0 및 1차의 Bessel 함수를 나타내며, C 는 음속(sonic velocity), ω 는 각진동수, γ 는 비열비, σ 는 Prandtl 수, ν 동점성계수, P_m 는 평균압력을 나타낸다. 또한, 식에서 r_o 는 관의 반지름으로서 하니콧부분에서는 모세관의 반지름, 그외에서는 연소관의 반지름을 뜻한다.

경계조건은 관의 개구부에서 음압은 최소, 입자속도는 최대로 되는 것으로부터 구할 수 있으며 좀더 정확한 계산을 위하여 관의 양끝에서 방사 임피던스(radiation impedance)를 고려한 유효관의 길이⁽⁴⁾

$$L_{eff} = 8 r_o / (3\pi) \quad (\text{flanged})$$

$$L_{eff} = 0.6 r_o \quad (\text{unflanged})$$

를 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{d|P|}{dx} = 0 \quad \text{at} \quad x = -80 r_o / (3\pi), \quad (3)$$

$$x = L + 0.6 r_o$$

방정식 (1), (2)와 경계조건 (3)에서 고유진동수와 모우드 형상을 구하기 위해서는 온도분포 $T(x)$ 가 주어져야 한다. 온도분포는 연료, 공기의 공급률 및 냉각조건에 따라 다를 수 있으나 Fig. 2와 같이 하니콧표면에서 최대온도 1300K까지 도달한 후 완

만히 냉각되는 것으로 가정하였다. 온도분포에 따라서 점성계수등의 물성치가 변하므로 식 (1), (2)의 계수들이 x 의 함수가 되어 비선형 방정식이 된다. 따라서 본 연구에서는 x 방향으로 충분히 조밀한 격자(mesh)로 분할한 후 수치적으로 경계조건 (3)을 만족하는 값을 찾을 수 있는 컴퓨터 프로그램을 작성하고 계산하였다. 실험에서 사용한 관의 길이 $L=1.2\text{m}$ 에 하니콧의 위치 $Lh=0.3\text{m}$ 인 경우를 적용한 결과, 모우드형상은 Fig. 3에 도시한 바와 같다. 본 연구에서 사용한 하니콧은 살두께 0.16mm, 폭 1mm의 정사각형 격자이나 전술한 이론의 적용을 위하여 지름 1mm의 원형격자로 가정하였다. 또한 실험에서 관은 길이 5cm의 반침위에 놓여 있기 때문에 계산에서 관길이는 $L=1.25\text{m}$ 로 대입하였다. 진폭의 크기는 관중앙에서 실측한 음압의 크기와 비슷하게 맞추어서 구한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 균일하지 않으므로 모우드형상이 대칭적으로 되지 않음을 알 수 있고 특히, 하니콧내에 온도가 급변하는 부분에서 입자속도의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 하니콧 위의 연소가 일어나는 위치에서 맥동의 진폭은 16m/s에 달하는 것을 알 수 있으며 이는 변위진폭으로 16mm정도에 해당한다. 음장이 구해지면 다음식과 같이 음압과 입자속도의 곱의 시간평균량에 단면적을 곱하여 음향동력(acoustic power) W_g 를 구할 수 있다⁽⁶⁾.

$$W_g = \frac{1}{2} \text{Real}(P^* U) \quad (\text{cross section area}) \quad (4)$$

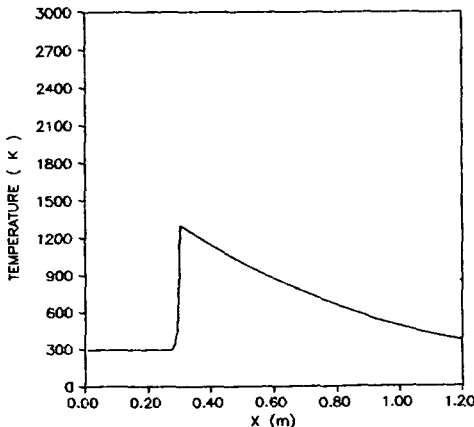


Fig. 2 Assumed temperature distribution along the tube for the numerical simulation

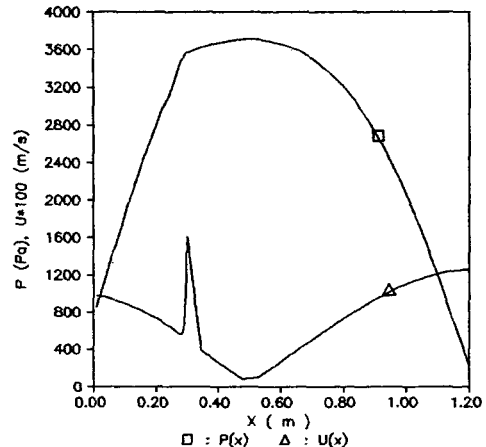


Fig. 3 The first mode shape for $Lh=0.3\text{m}$ and $L=1.2\text{m}$

식에서 P^* 는 음압진폭의 공액(conjugate)이다.

어떤 모우드의 음향맥동이 야기되기 위해서는 그 모우드에 대한 음향동력의 생성률이 소멸률보다 커야한다. 음향동력의 소멸은 관벽에서의 열점성적인 감쇠와 관의 개구부에서 음의 방사나 기류에 따른 손실 때문이다. 모우드 형상이 주어질 때 관벽에서 열점성소산 $W_{i,d}$, 방사손실 $W_{i,r}$ 및 대류손실 $W_{i,c}$ 의 계산은 다음의 이론 모델들을 적용하여 구할 수 있다^(14,15).

$$W_{i,d} = \int \frac{(\omega\nu)^{1/2}}{2\sqrt{2}} \rho \left[|U|^2 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{\sigma}} \left| \frac{P}{\rho C} \right|^2 \right] dA \quad (5)$$

$$W_{i,r} = \Sigma \pi r_0^4 \left[\frac{\omega}{C} \right]^2 U^2 / 8\rho C \quad (6)$$

$$W_{i,c} = \frac{G}{8} (1.33 |U_{(0)}|^2 + 4 |U_L|^2) \quad (7)$$

식에서 G 는 관을 통과하는 기류의 시간평균 질량 유동률이다. 이론적인 열점성소산은 거칠기가 전혀 없고 음향적으로 단단한(rigid) 이상적인 면을 조건으로 하며 기체내부에서 감소효과는 무시되기 때문에 실측치보다 작게 계산된다. 대류손실은 유속의 마하(Mach)수가 낮을 때는 무시될 수 있으므로 대류손실을 무시하고 열점성 및 방사손실을 각각 계산하여 그 합을 다음과 같이 정의하면

$$W_i = W_{i,d} + W_{i,r} \quad (8)$$

음향동력의 생성과 소멸의 비로서 다음과 같이 동력비(power ratio) R 를 정의할 수 있다.

$$R = \frac{W_g}{W_i} \quad (9)$$

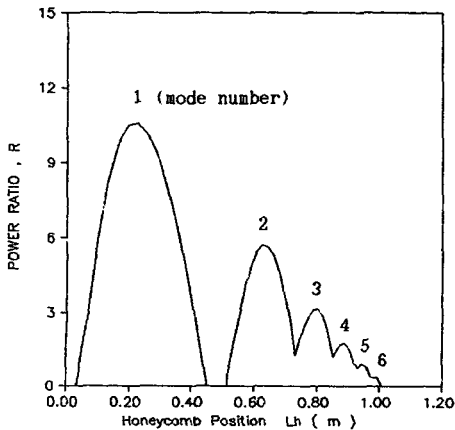


Fig. 4 Variation of the power ratio with the honeycomb position for $T_{max}=1300K$ and $L=1.2m$

어떤 모우드의 음장에 대하여 음향동력의 생성률이 소멸률보다 클 때 그 모우드의 진폭이 증가하게 되므로 이론상 위에 정의된 동력비가 1보다 클 경우에 맥동이 발생한다. 하니콤의 위치를 이동시킬 때 계산된 동력비를 도시하면 Fig. 4와 같다. 그림에서 맥동이 잘 일어나는 하니콤의 위치를 알 수 있으며 기본모우드의 경우에 관의 1/4위치 근처에서 동력비가 가장 크다. 이와 같이 1/4위치에서 기주 진동이 잘 발생하는 것을 Rijke열음향 진동의 가장 큰 특성으로 여겨왔다⁽³⁾. 고차 모우드에서는 위쪽으로 갈수록 동력비가 증가하나 그 크기는 점차 감소하여 5차 모우드에서 약 0.9이므로 열전달 효과만으로 5차 이상의 모우드는 나타나기 어렵다고 할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 Fig. 5에 도시된 바와 같다. 지름 34mm, 두께 2mm, 길이 1200mm의 파이렉스관(pyrex tube)의 내부에 길이 50mm의 400mesh cordierite 하니콤을 장착하고 경계조건을 만족시킬 수 있도록 충분히 큰 체적의 용기위에 세웠다. 공기는 관입구에서관에 점선방향으로 공급하여 선회류가 되게 하였으며 연료는 상용 프로판(propane)으로서 분배기를 통하여 관의 입구에서 공급하여 연료와 공기가 잘 혼합되도록 하였다. 관 중앙에는 압력변환기(BDN, 376A SN303)를 부착하고 증폭기와 FFT를 연결하여 음압을 측정하고

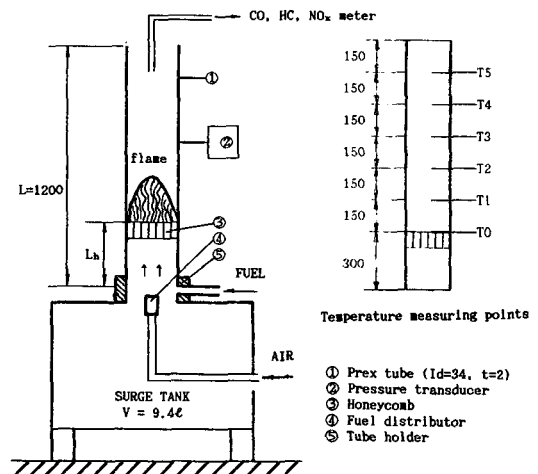


Fig. 5 Schematic of experimental apparatus

분석하였다. 먼저 공기를 공급하고 연료를 공급하여 관의 출구로부터 불을 붙여서 하니콤위에 불이 안정이 되면 공기와 연료의 공급률을 일정하게 맞춘다. 공기 및 연료의 유량은 검정된 로우터미터(rotameter)로 계측하고 진동이 발생하는 경우에는 FFT를 통하여 음압의 주파수와 진폭을 측정한다. 화염의 구조를 비교하기 위하여 직접 사진촬영을 하였다. 또한 배기가스중의 CO, HC 및 NO_x 농도를 측정하기 위하여 적외선 배기분석기(RI-503)와 NO_x분석기를 사용하였으며 채취용 삽입관을 기주의 상부에서 300mm까지 삽입하였다. 같은 연료와 공기유량에서 맥동연소를 비맥동의 정상연소와 비교하기 위하여 하니콤 아래에 스펀지를 넣어서 진동에너지를 흡수하여 비맥동 연소가 되게 하고 화염의 촬영과 배기가스 분석을 하였다. 또한 온도측정은 열전대(T₀는 R type, T₁-T₅는 K type)를 사용하였으며 열전대의 고정을 위하여 파이렉스관 대신에 황동관을 사용하고 Fig. 5에 도시한 바와 같이 관중앙에 열전대를 고정하고 시간에 따른 온도를 다중기록계(multi recorder)에 동시에 기록하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1 진동특성

실험 연소기에서 연료와 공기량을 일정하게 하고 하니콤의 위치를 이동하면서 맥동발생의 여부와 발생할 때 그 주파수를 측정하였다. 맥동이 발생하면 그 어느 위치에서든 분명한 정현파의 순음(pure tone)을 나타냈으며 기본 모우드의 음압진폭은 관중앙에서 약 3000Pa로서 연료 및 공기의 공급률에 따라 다소의 변화가 있었다. 위치별로 발생한 주파수를 연소의 영향을 무시하고 열전달만 고려하여 이론예측치와 비교하여 도시하면 Fig. 6과 같다. 이론과 실험이 잘 일치하나 동력비가 1보다 작은 5차 모우드까지 맥동이 발생한 것을 알 수 있다. 그림에서 이론예측은 하니콤의 표면온도를 1300K로 가정하여 계산한 것이다. 이 온도를 1500K로 가정하면 5차 모우드에서 동력비의 최대치는 1.3정도로 증가하여 5차 모우드의 진동도 가능하다고 할 수 있다. 후술 하겠지만 실제 하니콤의 표면온도는 맥동이 발생하기 전에는 1500K가 넘다가 발생한 후에는 1300K이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 표면온도가 1500K이상으로 높을 때는 열전달

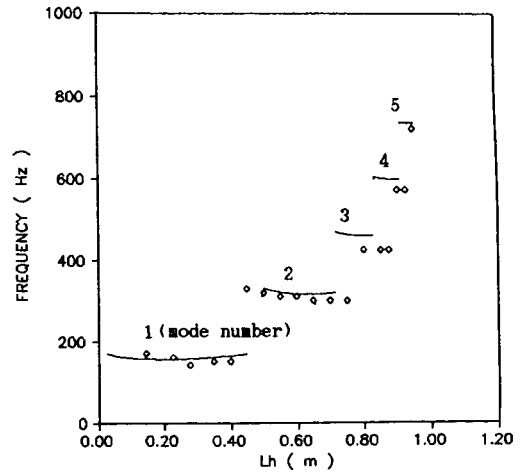


Fig. 6 Variation of the oscillating frequency with the honeycomb position for T_{max}=1300K and L=1.2m (— : theory, ◇ : experiment)

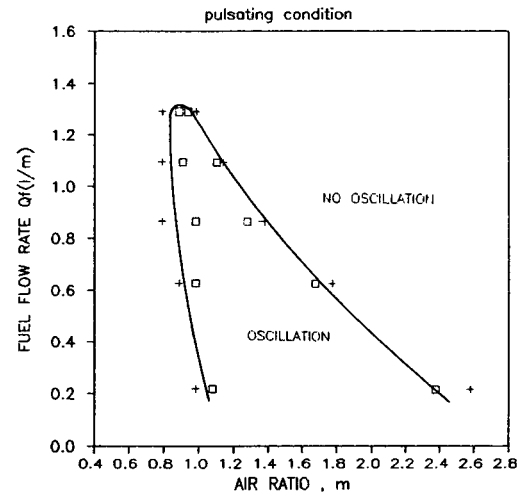


Fig. 7 Experimental result for the oscillating range

에 의한 음향동력에 의하여 5차 모우드의 진동이 야기된다고 할 수 있다. 그러나, 진동이 일단 발생되고 나면 표면온도가 1300K 이하로 떨어지는데도 진동이 계속 유지되는 것은 비선형 효과와 더불어 연소열 발생의 맥동성분배에 의한 음향동력의 생성이 부가되기 때문으로 본다. 그러므로 연소와 음장사이의 상호작용을 무시하고 구한 이론모델의 동력비는 실제값의 하한치에 가깝다고 할 수 있으며 보다 정확한 예측을 위해서는 소리에 대한 연소응답의 해석이 필요하다고 본다.

다음에는 하니콧의 위치를 $Lh=0.3m$ 로 고정하고 공기와 연료량을 변화시키면서 맥동의 발생유무를 실험한 결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 연료공급률이 크거나, 공기비가 너무 높거나 낮을 때 맥동의 발생이 어려운 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 하니콧 표면의 최고온도가 변하기 때문으로 사료된다. 같은 연료량에서 공기비가 낮아서 과농연소가 되거나 공기비가 높아서 희박연소가 되면 연소온도는 당연히 내려간다. 또한 같은 공기비에서 연료 공급률이 증가 할수록 화염이 하니콧 표면에서 멀어지므로 표면의 온도는 내려가게 될 것을 예측할 수 있으며 이것은 온도 측정으로 확인할 수 있었다.

4.2 열적특성

진동특성이나 배기가스 배출특성과는 달리 열적으로는 완전한 정상상태 도달이 어려운 것을 알았

다. 그 까닭은 연소장치의 열용량이 크기 때문이고 또한 하니콧내에서 화염대가 서서히 미연층으로 내려가기 때문이다. 하니콧 상부 15cm부터 위치별 관중양의 점화후의 온도변화를 측정된 결과를 도시하면 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있는 것은 점화후에 연소가스 온도가 상승하다가 맥동이 발생하면 온도가 현저히 내려간다는 것이다. 그러나 관벽의 온도는 맥동의 경우가 비맥동의 경우보다 다소 높으나 큰 차이는 없었다. 이러한 현상은 비맥동연소일 때 화염이 길게 뻗치면서 관중양의 온도가 관벽쪽보다 현저히 높으나 맥동이 일어나면 화염이 짧아지면서 중양과 벽의 온도 차이가 현저하게 줄어들기 때문이다. 맥동의 경우에 관벽의 가열속도가 다소 높아지고 배기가스 온도 T_5 가 현저히 낮게 되는 것은 맥동에 의하여 연소가스로부터 관벽으로의 열전달률이 크게 증가 되었기 때문이다. 그리고 하니콧 윗면에서 측정한 온도 T_0 의 최고치를

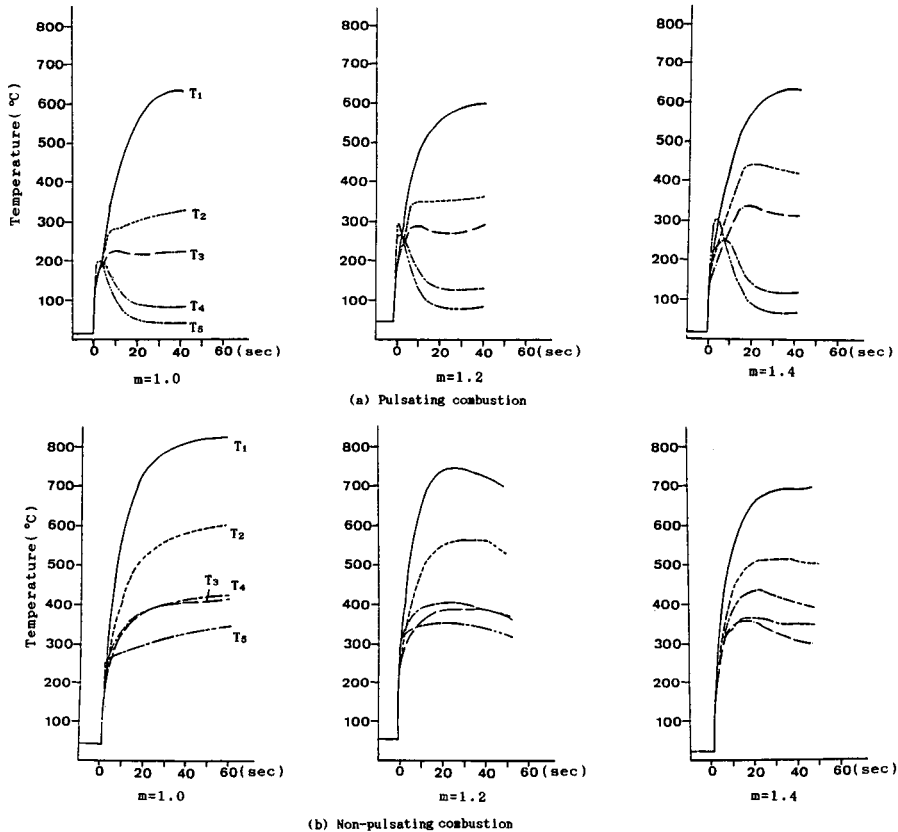


Fig. 8 Temperature variation with time for the fuel rate $Q_f=0.65l/min$

Table 1 The maximum temperature T_o ($^{\circ}$ C) on the honeycomb surface

| Fuel/Air ratio(m) | | 1.0 | 1.2 | 1.4 |
|-------------------|--------------|------|------|--------------|
| 1.1l/min | Nonpulsation | 1460 | 1533 | 1395 |
| | Pulsation | 1100 | 990 | Nonpulsation |
| 0.65l/min | Nonpulsation | 1300 | 1500 | 1450 |
| | Pulsation | 1040 | 830 | 740 |

요약하면 Table 1과 같다. 표에서 보듯이 비맥동시에 하니콤 상부의 온도는 공기비 1.2근처에서 최대가 되고 공기비가 증가하거나 감소하면 그 온도는 내려간다. 그것은 공기비가 낮아지면 불완전연소가 되기 때문이며 공기비가 높아지면 과잉공기에 의하여 냉각되기 때문이다. 그러나 맥동이 발생하면 공기비 1.0에서 최대로 되는 것은 바로 연소속도의 증가에 의하여 공기비가 1.2보다 낮은 1.0에서 완전연소가 되기 때문으로 사료된다. 또한, 연료량

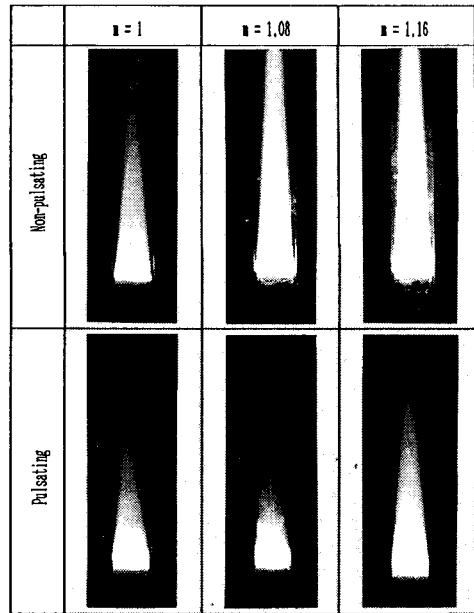


Fig. 9 Photos of the flame shape for comparison of pulsating and non-pulsating combustion for $Q_r=1.1l/min$ (focal ratio : 1.4, exposure time : 4sec)

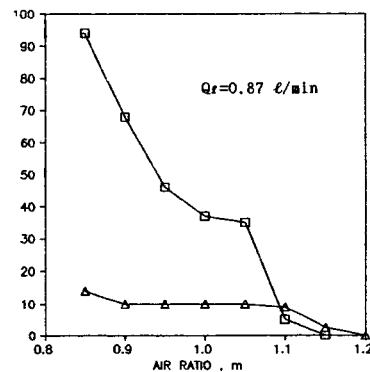
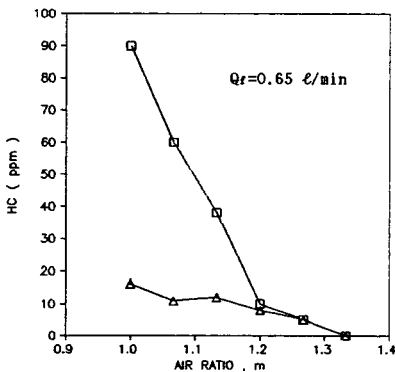


Fig. 10(a) Emission of the unburned hydrocarbon(HC) (□ : pulsating △ : non-pulsating)

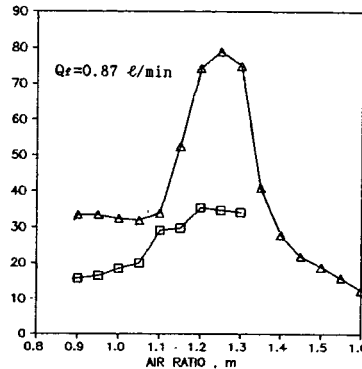
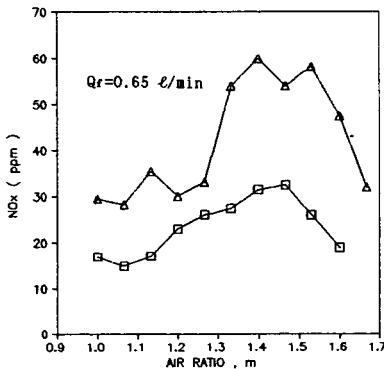


Fig. 10(b) Emission of NO_x (□ : pulsating, △ : non-pulsating)

이 증가하면 같은 공기비에서 유속이 증가하여 연소의 중심이 위로 뜨기 때문에 온도가 감소하는 것으로 사료된다. 또한, Table 1에서 하니콤포면의 최고온도는 비맥동시 최고 1800K에 가까우나 맥동이 발생하면 최저 1000K이하까지 낮아지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 맥동연소에 의하여 하니콤포면의 온도가 현저히 감소하는 것은 연소가스의 냉각속도가 증가되기 때문으로 사료된다. 화염이 큰 진폭으로 맥동하므로 화염구조의 변화와 함께 관벽으로의 냉각속도가 현저하게 빨라지며 이것이 맥동연소기의 큰 장점이라고 할 수 있다.

4.3 연소특성

연료량과 공기비를 변화시키면서 맥동연소를 시켜서 연소특성을 비맥동의 정상연소와 비교 고찰하였다. 먼저 화염의 구조를 사진촬영한 결과는 Fig. 9와 같다. 그림에서 맥동이 있을 때가 맥동이 없을 때보다 화염이 짧아지고 화염의 뿌리 부근의 형상이 다른 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 앞에서 언급한 바와 같이 맥동에 의하여 평균유속보다 더 큰 진폭의 속도변화가 있으므로 유체의 강한 교란에 원인이 있는 듯하다. 다음에 CO, HC 및 NO_x 등의 배기가스 농도를 측정하여 맥동과 비맥동에 관하여 비교분석한바, CO가스는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었으나 HC 및 NO_x의 농도는 현저한 차이가 있다. 미연탄화수소(HC)의 농도를 도시하면 Fig. 10(a)와 같고 맥동이 있을 때의 농도가 없을 때보다 크게 나타나며 이것은 연소온도가 저하하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 10(b)에 NO_x의 농도를 비교 도시하였으며 맥동에 의하여 NO_x의 농도가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 맥동연소의 특성을 잘 나타내는 결과라고 할 수 있으며 연소온도의 저하에 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

5. 결 론

이상과 같이 하니콤포를 이용한 Rijke형 맥동연소기에서 예혼합기의 맥동연소에 관하여 연구한 결과 다음의 결론을 내릴 수 있다.

(1) 연소를 무시하고 열전달만을 고려한 맥동발생조건에 이론모델을 세웠으며 이는 맥동발생의 한 제조조건으로 사용될 수 있다.

(2) 맥동발생은 하니콤포의 위치 및 연료와 공기의

공급률에 따라서 결정된다.

(3) 맥동에 의하여 연소실 온도가 감소되며 관중양과 벽사이의 온도차가 줄어들고 열전달의 증가로 배기온도가 현저히 감소한다.

(4) 맥동에 의하여 화염의 길이는 짧아지고 화염 온도가 내려 감으로 NO_x의 배출이 크게 감소하고 미연탄화수소는 다소 증가한다.

후 기

본 연구는 1989년도 한국과학재단의 기초연구비(과제번호 891-0901-023-1)지원에 의해 수행된 연구로서 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) Zinn, B.T., Miller, N., Carvalho, J.A. and Daniel, B. R., 1982, "Pulsating Combustion of Coal in a Rijke Type Combustor", 19th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.1197~1203.
- (2) 권연필, 이동훈, 1989, "Rijke형 연소기에서 석탄의 맥동연소에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제13권, 제3호, pp.508~516.
- (3) Feldman, Jr., K.T., 1968, "Review of the Literature on Rijke Thermoacoustic Phenomena", J. Sound Vib. 7, No.1, pp.83~89.
- (4) Feldman, Jr., K.T., 1968, "Review of the Literature on Sondhauss Thermoacoustic Phenomena", J. Sound Vib. 7(1), pp.71~82.
- (5) Rayleigh, J.W.S., 1987, Theory of Sound, Dover, Newyork.
- (6) Putnam, A.A. and Dennis, W.R., 1953, "A Study of Burner Oscillations of the Organ Type", Trans. ASME 75, pp.15~28.
- (7) Chu, B.T., 1956, "Stability of Systems Containing a Heat Source the Rayleigh Criterion", National Advisory Committee for Aeronautics, Res. Memo. 56D27.
- (8) Kwon, Y.P., Lee, B.H., 1985, "Stability of the Rijke Thermoacoustic Oscillation", J. Acoust. Soc. Am. 78 (4), pp.1414~1420.
- (9) Schimmer, H., Vortmeyer, D., 1977, "Acoustical Oscillation in a Combustion System with a Flat Flame", Combustion and Flame 28, pp.17~24.
- (10) Goldshmidt, V.W., Leonard, R.G., Riley, J.F., Wolfbrandt, G., Baade, P.K., 1978, "Transfer Function of gas Flames: Methods of Measurement and Representative Data", ASHRAE Tr, Vol. 84, Part 1,

- pp.466~476.
- (11) Rott, N., 1980, Thermoacoustics, Advances in Applied Mechanics, Vol.20, pp.135~175.
- (12) Rott, N., 1973, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part II. Stability limit for Helium", Z. Angew. Math Phys. 24, pp.54~72.
- (13) Yazaki, T., Tominaga, A. and Narahara, Y., 1979, "Stability Limit of Thermally Driven Acoustic Oscillation", Cryogenics.
- (14) Pierce, A.D., 1982, Acoustics, McGraw-Hill, Newyork.
- (15) Ingard, U. and Sigal, V.K., 1975, "Effect of Flow on the Acoustic Resonances of an Open-Ended Duct", J. Acoust. Soc. Am. 58, pp.788~793.