

Fig. 2 Experimental setup

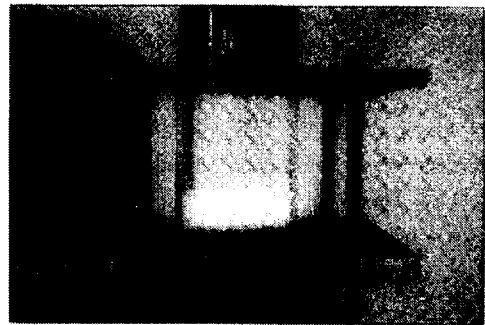
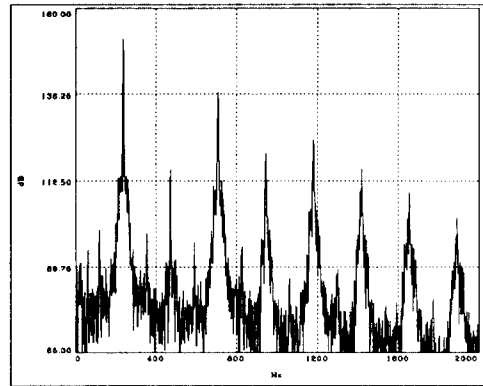
(condenser microphone)을 이용하였으며 여기서 측정된 신호는 전치증폭기(preamp)를 거쳐 B&K 3550 FFT 분석기(analyzer)로 보내져 주파수 대역에서 분석하도록 하였다.

#### 4. 실험 결과 및 검토

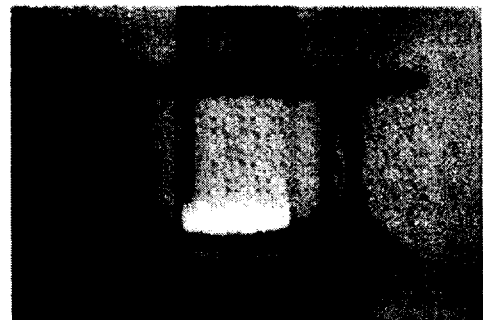
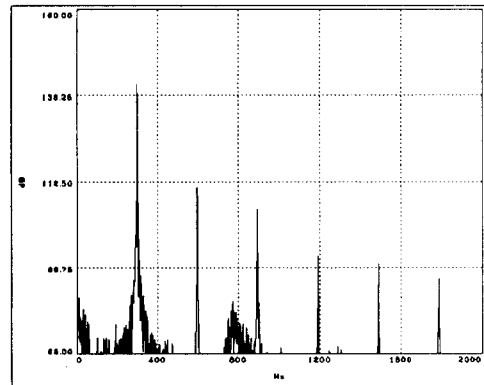
앞서 이론에서 밝힌 바와 같이 Rayleigh의 이론에 의해 불안정성에 있어서 가장 중요한 변수들은 압력 섭동항과 열량 섭동항이다. 따라서 이들의 변동이 열음향학적 불안정과 어떠한 관계를 갖고 이들간에는 어떠한 관계가 있는가에 대한 자료가 필요하다. 실험은 열량 섭동과 관련된 변수인 유량과 혼합비를 변화시켰을 경우에 대하여 음압의 파워 스펙트럼을 측정하는 방법으로 진행되었으며 또한 상반부 냉각의 영향 등을 검토하였다.

혼합비(equivalence ratio)의 정의는 연료와 공기의 질량비(Fuel-Oxidant ratio)를 F/O 라고 하였을 때, 실제 F/O와 이론 혼합비에서의 F/O간의 비율을 뜻한다.<sup>(8)</sup>

Fig. 3은 본 실험장치를 통해 얻어진 파워 스펙트럼들이다. (a)는 불안정이 활발히 진행될 경우 얻어지는 결과이다. 작계는 대략 210 Hz에서 크기는 280 Hz 까지의 기본 주파수(fundamental frequency)를 갖고 있으며 그 값도 155~160 dB (ref 2.0e-5 Pa)에 이를 정도로 매우 크다. 아울러 그 하모닉(harmonic)성분들의 값들이나 광대역(broad band) 성분 값도 상당히 크기 때문에 매우 강력한 진동과 소음이 발생되며 약 3~6cm정도로 화염이 상하로



(a)



(b)

Fig. 3 (a) 1st resonance (b) 2nd resonance

진동하는 모습을 육안으로 확인할 수 있다. 또한 기본 주파수(fundamental frequency) 바로 다음 나오는 두 번째 하모닉의 값이 세 번째 하모닉 성분의 값보다 작게 나오는 스펙트럼 특성을 보인다. 초기 발생 온도는 유량이나 혼합비에 따라 다르게 나타나지만 혼합비가 커질수록 시작되는 온도가 낮다. 대략 압력 측정점의 온도가 870℃ 근방에서 활발히 발생되며 이전까지는 급격하던 온도 증가 속도는 이때부터 비교적 느려진다. 온도의 증가와 함께 기본 주파수도 서서히 증가한다. 한편 공급되는 유량이 늘어날 경우, 관의 하부에서 미처 연소되지 못한 혼합기는 관의 개구부(open end)에서 재연소 된다. 이때 (a)와 같은 스펙트럼이 나타날 때는 화염의 형상이 왕관 형상과 같은 난류 연소 화염 형태를 띄고 있다.

온도가 계속 증가하면 어느 순간 위의 (b)와 같은 형상의 스펙트럼이 발생된다. 이때 기본 주파수의 값은 점프가 발생하여 앞서의 경우보다 더 높은 300~320Hz 정도로 변화하며 그 크기도 앞의 경우에 비해 작은 145dB이하의 값을 갖는다. 스펙트럼의 형상은 거의 순음(pure tone)에 가깝다고 볼 수 있을 정도로 날카로운 첨점(peak)들을 보이고 광대역 성분 값도 작아서 진동은 느껴지지 않으나 앞서보다 고음의 소음을 낸다. 광학창으로 본 화염의 두께는 대략 1cm정도이며 육안으로 식별하기 어려울 정도로 진동한다. 이 경우 온도 증가는 매우 느리게 일어나고 동시에 기본 주파수는 시간이 지날수록 점차 작아진다. 또한 앞서 (a)의 경우처럼 유량이 많고 과농한 경우 혼합기의 재연소로 인한 화염이 발생하지만 그 형태는 층류 확산 화염의 형상을 띄고 있다.

편의상 (a)와 같은 형태의 진동을 1차 공진이라고 하고 (b)와 같은 형태를 2차 공진이라고 부르기로 한다. 이러한 명칭을 붙이는 것은 1차 공진이 먼저 발생할 뿐만 아니라, 더욱 강하고 주된 진동(oscillation)현상이기 때문이다.

Fig. 3의 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 공진 현상이 발생할 경우 기본 주파수에 해당되는 첨점의 크기가 그 다음 크기의 첨점보다 10dB이상 차이가 나며 대부분의 에너지가 이곳에 모여있게 되어 이때의 값이 지배적이 된다. 따라서 유량의 변화에 따른 각 경우의 기본 주파수와 그때의 크기를 혼합비에 대하여 나타내어 유량과 혼합비의 영향을 비교하여 보았다.

1차 공진의 크기는 아래 Fig. 4와 같이 혼합비가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며 유량이 증가하면 그 크기가 전체적으로 커진다. 즉, 불안정을 쉽

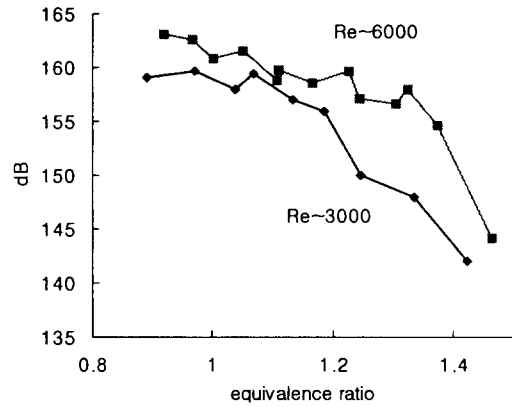


Fig. 4 Max. peak values of 1st resonance

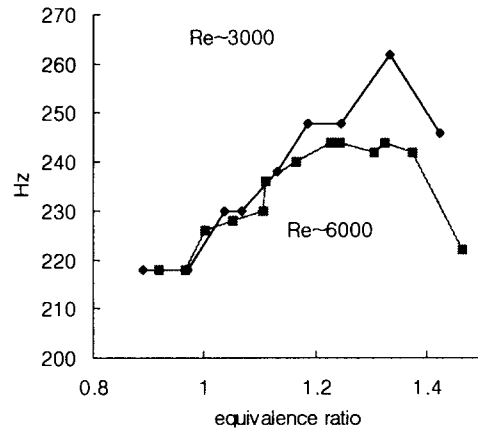
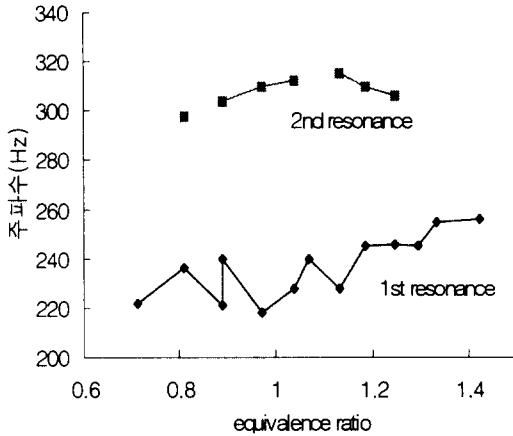


Fig. 5 Fundamental frequencies of 1st resonance

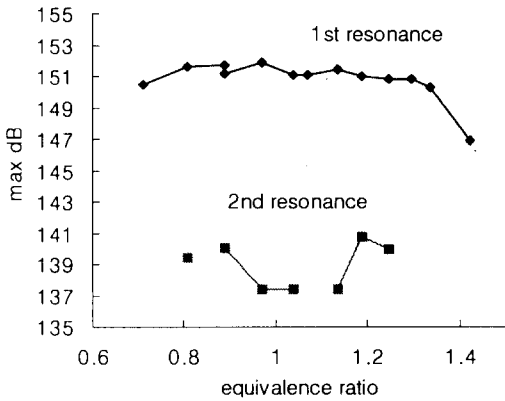
게 관찰할 수 있는 영역인 혼합비 0.9이상 1.2이하의 경우, 혼합비가 낮을수록 불안정성이 강하게 나타난다. 또한 혼합비의 변화에 대하여 유량이 많을 경우 공급되는 전체 열량의 증가로 인해 섭동(fluctuation)이 크게 됨을 관찰할 수 있었다.

유량에 따른 경향은 기본 주파수 값의 경우에도 해당된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 유량이 증가하면서 혼합비에 따른 기본 주파수의 변화가 완만해짐을 관측할 수 있다. 기본 주파수는 대체적으로 혼합비에 따라 증가하지만 혼합비가 비교적 큰 영역에서는 다시 감소하는 경향을 보이기도 한다.

위의 두 그래프를 살펴보면, 혼합비 값이 작을 경우 압력의 섭동이 더 강하게 나타나며 이는 열량의 섭동이 혼합비가 작을수록 강하게 나타난다는 것을 보여주는 결과로 사료된다. 또한 유량이 많아지면



(a)



(b)

Fig. 6 Difference between 1st and 2nd resonance (Re=3000) (a) Fundamental frequency (b) Maximum peak dB (ref  $2 \times 10^{-5}$  Pa)

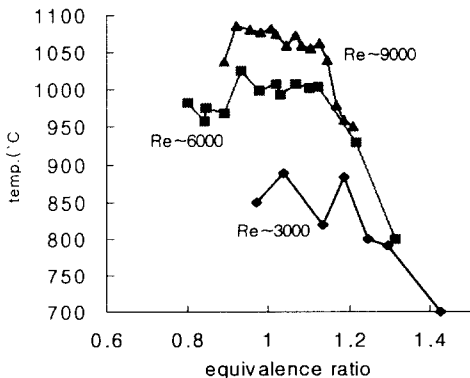


Fig. 7 Starting points of 2nd resonance

진동(oscillation)이 혼합비에 대하여 안정적이 되는 것을 알 수 있다.

2차 공진 현상은 1차 공진 현상에 비해 약하고 부수적인 결과로 보인다. 2차 공진이 생기는 이유는 관 상부의 온도 증가에 의한 열음향 진동의 감쇠(damping)작용 때문으로 생각되며 이에 대한 것은 뒤에 냉각의 영향을 살펴볼 때 다시 언급할 것이다.

2차 공진과 1차 공진의 크기는 위의 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 혼합비가 작은 경우, 상당한 차이를 보이며 혼합비가 증가하면서 점차 그 차이가 줄어든다. 유량이 증가하면 2차 공진의 분포가 전체적으로 상승하며 따라서 혼합비가 클 경우 1차와 2차 공진 간의 구분이 어려워지게 된다. 이와 같이 2차 공진이 시작되어 기본 주파수의 불연속이 발생하는 온도는 유량에 따라 다르지만 아래 Fig. 7와 같이 전체적인 형태는 유사하며 정상 연소 영역(혼합비 0.9 ~ 1.2)에서 혼합비에 따라 완만하게 줄어든다. 또한 대체적으로 유량이 증가하면서 같이 증가하는 경향을 보인다.

이를 통해 공진의 형태가 바뀌는 현상이 과농하거나 희박 연소의 경우 더 쉽게 나타난다는 것을 알 수 있으며, 안정 연소 영역이거나 유량이 많을 경우는 잘 일어나지 않는다는 사실을 알 수 있다.

관의 기본 주파수(fundamental frequency)나 그 하모닉 성분의 값을 기본적인 1차원 관 음향학(1-dimensional duct acoustics)에 기초하여 가정하는 것이 여러 연구들에서의 일반적인 경향이다. 이 경우 기본 주파수는 음속  $c$ 와 관 길이  $L$ 의 함수로 관의 형상이 일정할 경우 결국  $\sqrt{T}$ 의 함수가 된다. 즉 기본 주파수는 관내 온도에 따라 온도의 제곱근 곡선을 따라서 변화한다고 가정한다. 또한 이때 관 전체의 온도 분포는 일정하다고 가정하게 된다. 그렇지만 본 실험과 같이 관내의 압력과 온도가 높고 온도차가 심하게 나타나는 경우는 위와 같은 가정은 성립할 수 없으며 시스템은 매우 심한 비선형성을 띄게 된다. 이러한 비선형성은 기본 주파수의 변화를 나타낸 Fig. 8을 통해서도 확인할 수 있다. 온도에 따른 기본 주파수의 변화를 나타내었을 때 공급된 유량이 Re=6000 정도로 낮을 경우 980°C에서 기본 주파수에 점프가 생기고 이보다 유량이 많을 경우, 기본 주파수 값은 불연속에 이르기 전까지는 변화가 거의 일어나지 않는다.

따라서 관형의 연소기가 가진 비선형적 특성과 화학 반응에 의한 복잡한 현상을 설명할 수 있는 이론적 접근과 계산이 병행하여 이루어져야 하며 현재 이에 대한 연구가 진행중이다.

다음으로는 벽면 냉각의 영향을 살펴보았다. 이는

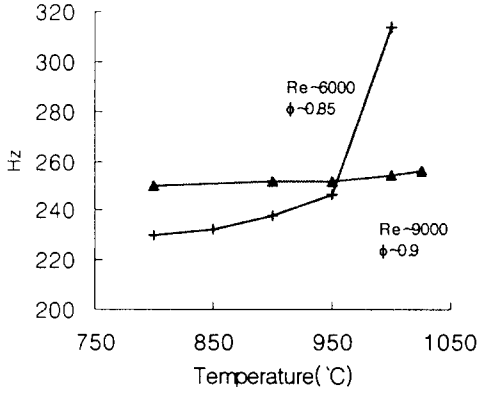
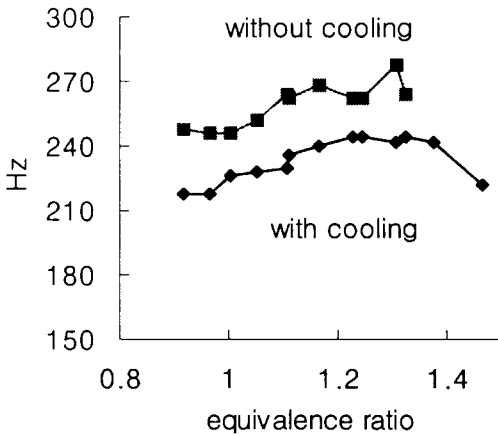
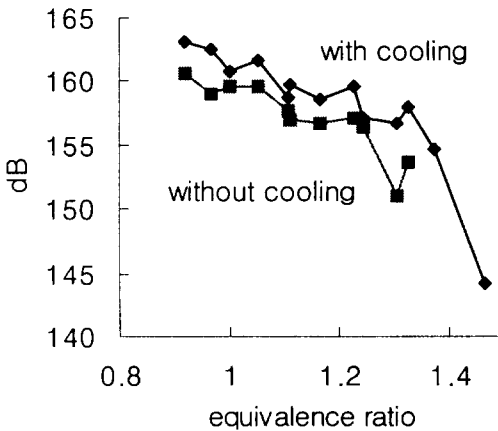


Fig. 8 Fundamental frequency change (along with temperature)  $Re=6000$  &  $9000$



(a)



(b)

Fig. 9 Cooling effect ( $Re=6000$ ) (a) Fundamental frequency (b) Maximum peak dB (ref  $2 \times 10^{-5}$  Pa)

2차 공진 현상과 온도와의 상관관계를 보기 위한 목적을 지니고 있기도 하다.

앞서의 실험과 같은 조건아래 실험을 수행한 결과, 냉각을 실시한 경우 파워 스펙트럼의 형상은 1차 공진과 유사한 형태이지만 더욱 강한 진동이 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며 2차 공진 현상은 나타나지 않았다. 냉각을 한 경우, 기본 주파수는 하지 않은 경우보다 저주파 영역에 위치한다. 이것으로 기본 주파수가 온도와 관련된 함수임을 볼 수 있다. 기본 주파수에 있어서 냉각을 한 경우나 하지 않은 경우, 혼합비가 증가하면서 그 값이 증가하다 감소하는 경향은 서로 유사하며 최대값 곡선에서도 냉각의 유무에 상관없이 혼합비 증가에 따른 경향은 일치하였다.

벽면 냉각의 영향은 유량이 작을수록 더욱 크게 나타나며 유량이 큰 경우에는 그 차이가 줄어든다.

이와 아울러 기본 주파수의 첨점(peak)들은 더 큰 최대값을 갖는다. 또한 냉각을 수행한 경우 앞서 정의한 2차 공진 현상이 대부분 발생하지 않는다. 이러한 공진 모드의 변화는 관을 통한 열전달로 인한 상부의 온도 상승이 주된 이유로 보인다. 즉, 관 상부의 온도가 증가하면 Rijke 열 음향 진동의 기본 이론에 의하여 상부에 마치 열원이 존재하는 것과 같은 효과를 내게 되고 결국 열 음향 진동을 감소(damping)시키는 쪽으로 작용하게 되는 것이다. 앞서 냉각이 없는 경우 관 벽면의 가열로 관내의 온도가 Fig. 7에 표시한 온도 이상까지 올라가는데 반해 냉각을 한 경우는 이에 미치지 못하게 되어 2차 공진이 발생하지 않는 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

(1) 열 음향 진동을 모사하기 위한 실험 장치인 관형의 연소기를 설계, 제작하였으며 이를 이용한 실험을 수행하였다.

(2) 공진이 발생하였을 때, 온도가 상승하면서 기본 주파수 값이 불연속적으로 변화하는 점이 생긴다. 이때 불안정이 활발한 1차 공진의 경우, 기본 주파수에서의 크기는 불안정을 쉽게 관찰할 수 있는 영역인 혼합비 0.9이상 1.2이하의 경우, 혼합비가 낮을수록 불안정성이 강하게 나타나며 열량 섭동이 크게 나타나는 것으로 사료된다. 혼합비의 변화에 대하여 유량이 많을 경우 덜 민감하게 반응하는데 비해 유량이 적을 경우는 혼합비의 영향을 크게 받는다. 기본 주파수는 대체적으로 혼합비에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이며 유량의 증가에 따라 변화하는 폭이 줄어든다.

## 참고 문헌

- (1) S. M. Candel, 1992, "Combustion Instabilities coupled by Pressure Waves and their Active Control," *24th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1277~1296.
- (2) A. P. Dowling and J. E. Ffowcs Williams, 1983, "Sound and Sources of Sound," Ellis Horwood Limited.
- (3) R. A. Strehlow, 1984 "Combustion Fundamentals," McGraw-Hill.
- (4) R. L. Raun, M. W. Beckstead, J. C. Finlinton and K. P. Brooks, 1993, "A Review of Rijke Tubes, Rijke Burners and Related Devices," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 19, pp. 313~364.
- (5) 권영필, 이동훈, 1989, "Rijke형 연소기에서 석탄의 맥동연소에 관한 연구," *大韓機械學會論文集* 第13卷 第3號, pp. 508~516.
- (6) B. T. Zinn, 1989, "Pulsating Combustion," *Mechanical Engineering*, August, pp 36~41.
- (7) M. A. Heckl, 1985, "Heat Sources in Acoustic Resonator," Ph. D. Thesis, Cambridge University, Cambridge, England.
- (8) K. K. Kuo, 1986, "Principles of Combustion," John Wiley & Sons, Inc.

(3) 연소기 내에 온도의 증가가 일어나면 진동 모드가 변화한다. 이러한 2차의 공진 값이 작게 나타나는 이유는 관의 상반부로의 열전달로 인해 진동 (oscillation)에 감쇠(damping)현상이 발생하기 때문이다. 두 번째 공진이 발생하는 온도는 공급되는 유량에 따라 다르나 유량이 증가하면 같이 증가하는 경향을 보인다. 또한 냉각을 하였을 경우의 실험을 통해 이 두 가지의 공진 형태가 연소기의 온도와 관계가 있음을 보였다.

(4) 관형 연소기의 상반부를 냉각할 경우, 기본 주파수의 크기가 더 커진다. 이는 열전달에 의한 상반부의 가열을 막아서 열에너지와 음장간의 상호작용을 증가시켰기 때문이며 Rijke 열 음향 진동의 기본 이론과도 잘 부합된다. 기본 주파수는 더 낮게 나타나며 이 역시 기본 주파수의 값이 온도와 관련된 함수임을 보여준다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(1995년 목적 기초 95-0200-07-03-3)으로 수행되었으며 이에 동 재단 관계자에게 감사드린다.