한국소음진동공학회 1997년도 춘계학술대회논문집, pp. 621 ~ 626.

관형 연소기의 열음향학적 특성에 관한 연구

°조 상 연*, 이 수 갑**

Characteristics of Thermoacoustic Oscillation in Ducted Flame Burner

Sangyeon Cho and Soogab Lee

ABSTRACT

Combustion instability is a common phenomenon in a ducted flame burner and is known as accompanying low frequency oscillation. This is due to the interaction between unsteady heat release rate and sound pressure field, that is, thermoacoustic feedback. In Rayleigh criterion, combustion instability is triggered when the heat addition is in phase with acoustic oscillation. A Rijke type burner with a pre-mixed flame is built for investigating the effect of Reynolds number and equivalence ratio on thermoacoustic oscillation. In addition, the effect of wall temperature is presented. The results suggest that the frequency of max. oscillation is dependent on Reynolds number and equivalence ratio whereas its magnitude is not a strong function of these two parameters. On the other hand, the wall temperature distribution has much strong effects on the oscillation, even creates different mode of acoustic resonance.

1. 서 론

교통 수단의 발달과 연소 기술의 발전으로 제트엔진이나 로켓 모터 등과 같은 고성능 추진기관의 중요성이 점점 커져 가고 있다. 이러한 기관들과 공업용, 산업용 로(爐; furnace)등은 일반적으로 관형 연소기(ducted flame burner)의 형태를 띠고 있다. 이러한 형태의 연소기에서 빈번하게 발생되는 연소 불안정은 저주파의 진동(oscillation)과 소음을 동반하며 그 스펙트럼은 일반적인 난류 연소 소음과는 달리 불연속적인 주파수 특성을 갖는 특징이 있다. 위와 같은 진동과 소음이 발생되는 원인은 불안정한 열방출율과 음장간의 상호작용에 의한 것으로 이를 열음향학적 되먹임(thermoacoustic feedback)현상이라 부른다. 즉 연소에 의한 에너지 증가와 압력섭동(pressure fluctuation)의 위상이 같아졌을 경우 열에너지와 음에너지가 서로 상대편에 에너지를 전달하게 되어 폭발적으로 진폭이 커지는 현상을 뜻하며 이러한 현상을 설명하여 주는 이론으로 Rayleigh Criterion이 있다. 이 이론은 열이 공기의 최대 압축점에서 가해지거나 공기의 최소 희박점에서 감해졌을 경우 진동이 발생한다는 것으로 정의되며 열 음향학적 진동이나 맥동 연소기(pulse combustor)등에서 기본이 되는 이론이다. [1]

이와 같이 연소 불안정에 의한 소음 및 진동이 발생하였을 때, 그 정도가 심할 경우는 계의 파손을 가져오거나 매우 강한 소음을 발생시키는 등 심각한 문제를 야기하게 된다. 따라서 불안정성의 생성에 대한 이해는 연소기의 설계 뿐만 아니라 소음 제어의 차원에 있어서도 매우 중요하다 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 연소 불안정을 모사하기 위한 관형의 연소기를 제작하여 그 음향학적인 특성을 살펴보았다. 이와 아울러 혼합비나 Reynolds 수와 같은 물리량에 따른 변화를 살펴보았으며

* 서울대학교 대학원 항공우주공학과

** 서울대학교 공과대학 항공우주공학과

냉각을 하였을 경우의 차이에 대하여서도 고찰하였다.

2. 이 론

Rayleigh는 그의 논문에서 가열에 의한 진동(oscillation)현상에 대한 이론을 수립하였다.

이 이론은 여러 가지 형태로 표현이 가능하지만 대표적인 내용은 연소기 내부 음장에 열이 그 cycle중 고온 위상을 갖는 순간에 가해졌을 경우 음향학적 교란에 에너지가 주입되게 되며 반대로 저온 위상에서 열이 가해지면 에너지를 잃게 된다는 것이다. 음파에 있어서의 압축은 단열과정이므로 이는 압력과 온도의 섭동(fluctuation)이 서로 같은 위상을 갖고 있으며 압력 섭동이 양의 값을 가질 때 가열이 이루어지면 음파의 진폭이 증가하게 되나 압력 섭동이 음의 값인 경우는 반대의 효과를 가져오게 된다는 것을 뜻한다.[2]

이를 1차원 덕트 가정아래 관의 단일 사이클에 대한 에너지 식으로 나타낼 경우는 다음과 같다.

$$\Delta E_{cycle} = \frac{(\gamma-1)}{\gamma P_o} \int_{cycle} \delta P \cdot \delta q dt \qquad \text{(식 1)[3]}$$

(식 1)은 국부적인 열에너지의 증가나 감소가 특정 압력 섭동(pressure fluctuation)의 증폭을 이루기 위해서는 그 압력 섭동과 서로 양의 값으로 상관되어 있어야 한다는 것을 뜻한다. [3]

이후로도 이에 대한 많은 연구가 이루어졌으며 이를 piston상사를 이용하여 정성적으로 설명하기도 한다. 급격한 온도의 증가가 벽면에 일어났을 때 벽면 근처의 유체층은 팽창하게 된다. 이때 마치 piston과 같이 팽창하는 유체층은 주위에 힘을 전달하게 되며 만약 압력파가 이 층의 경계면에 도달하게 되면 이 압력파는 밀려나게 되어 더 큰 진폭으로 반사되게 된다. 진동계에 있어서 이것은 압력 진동이 열 진동과 같은 위상을 가질 때 증폭됨을 의미한다. 이때 증폭이 이루어지기 위해서는 위상이 정확히 일치할 필요는 없으나 ±90° 내에 있어야 한다.[4]

이러한 Rayleigh의 이론을 잘 설명해 주는 장치가 Rijke 관이다.[5] Rijke관은 양쪽이 트인 관내에 미소(compact)한 열원을 갖는 간단한 형태를 가지고 있다. 이 때문에 관의 양쪽 입구에서 압력 node 점을 갖는 정상파 형태의 음장이 생성되며 관의 하부에 열원이 위치할 경우 열원에 의한 열대류현상과 에너지 증가에 의한 열 음향학적 되먹임 현상에 의해 마치 오르간 파이프가 소리를 내듯이 공명음을 낸다. 이와 유사한 형태를 띄고 있는 연소기들을 통칭하여 Rijke 형 연소기라고 부르기도 한다.[6]

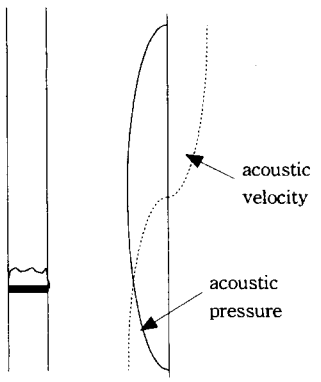

Fig. 1 Rijke thermoacoustic oscillation[6]

이때 공명음을 얻기 위해서는 관내에 유동이 존재해야 하고 벽면으로 나가는 에너지 손실보다 큰 양의 에너지가 공급되어야 하며 열원은 관의 하반부에 위치해야한다. [7]

진동의 유지를 위해서는 속도와 압력의 섭동이 모두 이루어져야 하므로 열원이 속도나 압력의 node점에 위치해선 안되며 열원이 관의 상부에 위치할 경우는 오히려 감쇄가 이루어지게 된다. 특히 그림과 같이 관의 하부로부터 L/4지점에 위치할 경우 음향속도와 음압의 곱이 최대가 되어 가장 활발한 진동(oscillation)이 발생하게 된다.

3. 실험 장치

열 음향학적 진동현상을 모사하기 위한 실험장치를 아래의 그림과 같이 설계, 제작하였다. 기본적인 형태는 앞서 언급한 Rijke 열 음향학적 진동을 이용한 버너로 관의 하부에 프로판을 이용한

예혼합 화염(premixed flame)을 관 단면 전체에 걸쳐 발생시키게 된다. 연료와 산화제의 완전한 예혼합과 안정적인 공기의 공급을 위하여 연소기 아래부분에 부피 약 60 ℓ의 decoupler를 설치하였으며 straighter로 가는 stainless pipe를 연결하여 사용하였다. 관의 길이는 1m로 상부와 하부는 stainless관을 사용하였고 화염이 위치한 부위에 석영(quartz)관을 연결하여 화염의 진동형태를 관찰할 수 있도록 하였다. 특히 관의 상반부에는 수랭식의 냉각기(cooling jacket)를 설치 상반부 냉각의 영향을 확인할 수 있도록 하였다.

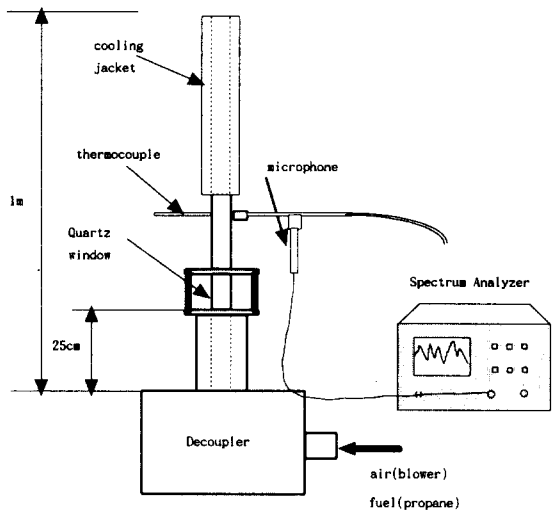

Fig. 2 Experimental setup

측정은 기본주파수(fundamental frequency)에서 압력 진폭이 가장 크게 나타나는 압력 anti-node점에 압력센서를 설치하여 음압을 측정하고 그 옆쪽에 열전대를 설치하여 이때의 온도를 측정하도록 하였다. 압력 센서로는 B&K 4134 condenser microphone을 이용하였으며 여기서 측정된 신호는 전치증폭기(preamp)를 거쳐 FFT analyzer로 보내져 주파수 대역에서 분석하도록 하였다.

4. 실험 결과 및 검토

실험은 우선 관의 냉각 없이 유량과 혼합비를 변화시키며 각 경우, 음압의 파워 스펙트럼을 측정하는 방법으로 진행되었으며 냉각을 수행한 경우와 하지 않은 경우의 차이에 대한 실험과 벽면온도의 영향 등을 검토하였다.

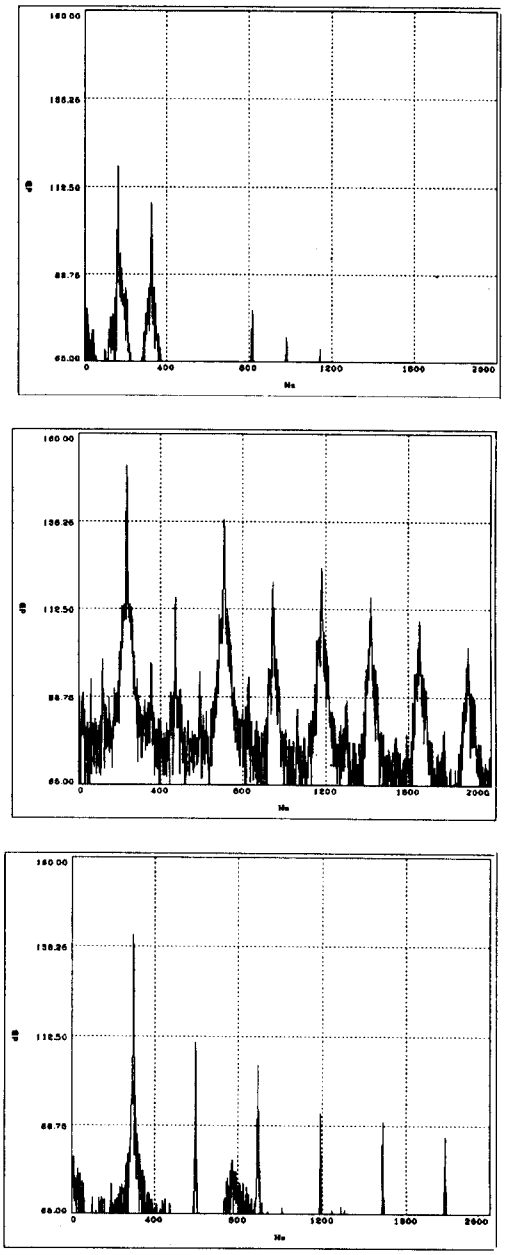

Fig. 3 Power spectra

위의 Fig. 3은 본 실험장치를 통해 얻어진 파워 스펙트럼들로 위와 같은 세 가지 형태를 얻을 수 있었다. 처음의 것은 비교적 unsteady한 상태의 연소시에 나타나는 스펙트럼형상이다. 130 ~140Hz 정도의 비교적 낮은 tone의 주파수대역이 주된 에너지를 가지고 있으며 그 최대값도 그다지 크지 않아 진동이 작다. 화염은 unsteady한 형상이며 온도는 급격히 증가한다. steady한 공진 상태로 넘어가는 천이 과정으로 보이며 혼합비 값이 낮은 경우는 이러한 상태만 계속되기도 한다. 두 번째의 스펙트럼은 불안정이 활발히 진행된 상태를 보여주는 결과이다. 대략 210 ~ 260Hz 정도의 기본 주파수(fundamental frequency)를 갖고 있으며 그 값도 매우 크다. 아울러 그 harmonic성분들의 값들이나 광대역 성분 값도 상당히 크기 때문에 매우 강력한 진동과 소음이 발생되며 약 3cm정도로 화염이 상하로 진동하는 모습을 육안으로 확인할 수 있다. 온도는 대략 870℃ 근방에서 발생되며 이때 온도 증가 속도는 비교적 느린 편이다. 온도가 계속 증가하여 대략 920℃ 이상이 되면 세 번째와 같은 형상의 스펙트럼이 발생된다. 기본 주파수의 값은 앞서의 경우보다 더 높은 300 ~ 320Hz 정도이며 그때의 값도 전의 경우에 비해 작다. 스펙트럼의 형상은 거의 순음(pure tone)에 가깝다고 볼 수 있을 정도로 날카로운 peak들을 보이고 광대역 성분 값도 작아서 진동은 느껴지지 않으나 앞서보다 고음의 소음을 낸다. 화염의 형상은 대략 1cm 정도의 화염이 육안으로 식별하기 어려울 정도로 진동한다. 이 경우 온도 증가는 거의 일어나지 않는다.

편의상 두 번째와 같은 형태의 진동을 1차 공진 모드라 하고 세 번째와 같은 형태를 2차 공진이라고 부르기로 하자.

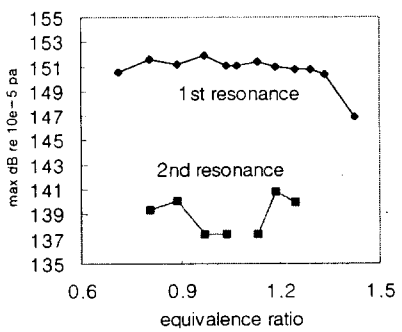

Fig 4. Maximum dB (1st & 2nd Resonance)

두 경우 스펙트럼의 최대값의 차이는 위 그림과 같다. 이와 같이 여러 형태의 공진 모드들은 관의 온도 증가와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 보이며 뒤에 냉각에 의한 영향을 살펴볼 때 이를 다시 언급할 것이다.

한편, 공급되는 유량과 혼합비(equivalence ratio)에 대한 변화를 살펴보기 위한 실험을 수행하였다. 앞서 Fig.3에서 볼 수 있듯이 공진 현상이 발생할 경우 기본 주파수에 해당되는 peak의 크기가 그 다음 크기의 peak보다 10dB이상 차이가 나며 따라서 대부분의 에너지가 이곳에 모여있어 현상을 좌우하게 된다고 볼 수 있다. Reynolds 수 3000영역과 6000영역에서 실험을 수행하였으며 이때 1차 공진시의 기본 주파수 값과 그 크기의 변화는 다음과 같다.

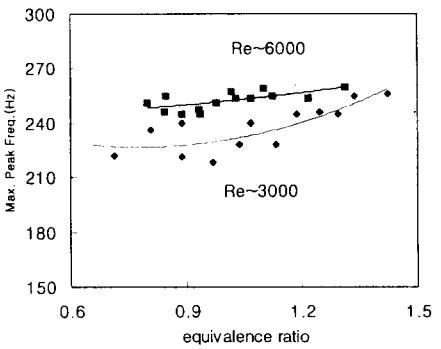

Fig. 5. Fundamental frequency difference
Re≒3000 & 6000

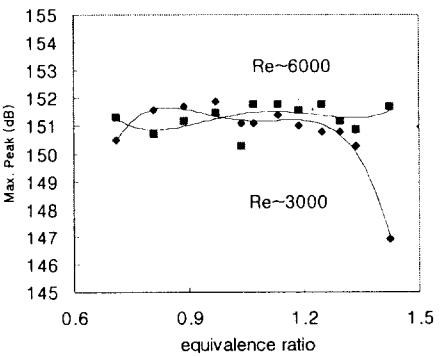

Fig. 6. Maximum peak difference
Re≒3000 & 6000

위의 그림에서 Reynolds수의 변화, 즉 유량의 변화는 기본 주파수의 값을 고주파영역으로 올리는 효과가 있으나 그 크기에는 그리 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다. 혼합비가 증가하면서 기본 주파수의 값이 점차 증가하는 경향을 보이며 혼합비 값이 0.8 ~ 1.2 정도에서는 기본 주파수의 최대값은 거의 비슷한 값을 나타내게된다. 진동(oscillation)형태도 유사하게 나타난다.

다음으로는 벽면 냉각의 영향을 살펴보았다. 이는 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. 또한 온도는 대략 880℃ 근방까지 상승하여 그 값을 유지하며 진동이 매우 강하게 나타날 경우 오히려 온도가 약간 하강하기도 한다. 다음의 그림은 냉각을 한 경우와 하지 않은 경우의 비교이다.

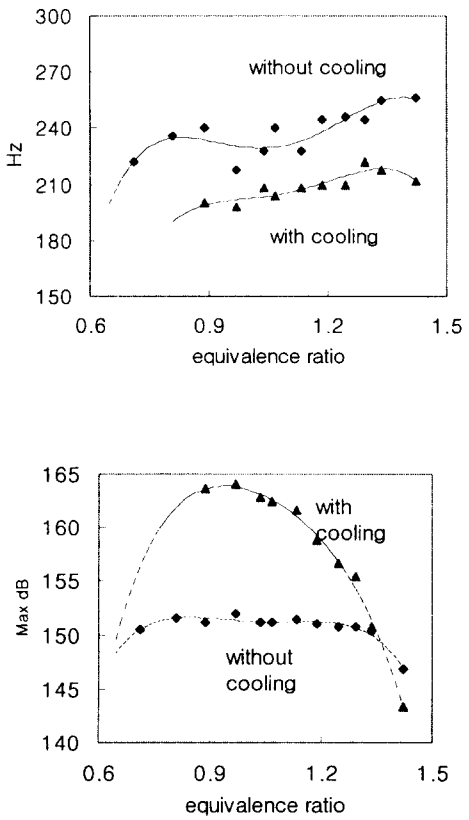

Fig. 7 cooling effect (Re≒3000)

냉각을 한 경우, 기본 주파수는 하지 않은 경우보다 저주파영역에 위치한다. 이와 아울러 기본 주파수의 peak는 훨씬 더 큰 최대값을 갖는다. 기본 주파수에 있어서 냉각을 한 경우나 하지 않은 경우, 혼합비가 증가하면서 그 값이 증가하는 경향은 서로 유사하지만 최대값 곡선에서는 냉각이 있는 경우의 구배가 훨씬 크게 관측되었다. 또한 냉각을 수행한 경우 앞서 정의한 2차 공진 현상은 발생하지 않는다. 이러한 공진 모드의 변화는 관을 통한 열전달로 인한 상부의 온도 상승이 주된 이유로 보인다. 즉, 관 상부의 온도가 증가하면 Rijke 열음향 진동의 기본 이론에 의하여 상부에 마치 열원이 존재하는 것과 같은 효과를 내게 되고 결국 열 음향 진동을 감쇄(damping)시키는 쪽으로 작용하게 되는 것이다. 앞서 냉각이 없는 경우 관 벽면의 가열로 관내의 온도가 900℃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) 본 연소기에서 냉각을 수행하지 않았을 경우, 대략 세 가지 형태의 스펙트럼 형상을 얻을 수 있었고 두 가지의 공진 형태를 관측하였다. 이때 2차의 공진 값이 작게 나타나는 이유는 관의 상반부로의 열전달로 인해 진동(oscillation)에 감쇄(damping)현상이 발생하기 때문이다. 또한 냉각을 하였을 경우의 실험을 통해 이 두 가지의 공진 형태가 연소기의 온도와 관계가 있음을 보였다.

3) 1차 공진의 경우, 기본 주파수에서의 크기는 유량 혹은 Reynolds 수에 대해 별로 영향을 받지 않으며 혼합비의 경우 과농(rich)하거나 희박(lean)한 영역을 제외하면 유사한 값을 보인다. 그러나 이때의 주파수 값은 Reynolds수가 클수록 고주파 영역으로 이동하며 혼합비가 증가하면서 점차 커지는 경향이 있다.

4) 관형 연소기의 상반부를 냉각할 경우, 기본 주파수의 크기가 더 커지며 그 진동도 냉각을 하지 않은 경우에 비해 훨씬 강하게 나타난다. 이는 열전달에 의한 상반부의 가열을 막아서 열에너지

와 음장간의 상호작용을 증가시켰기 때문이며 Rijke 열 음향 진동의 기본 이론과도 잘 부합된다.

6. 후 기

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

7. 참고 문헌

[1] S. M. Candel, "Combustion Instabilities coupled by Pressure Waves and their Active Control," *24th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1277-1296, 1992.

[2] A. P. Dowling and J. E. Ffowcs Williams, "Sound and Sources of Sound," Ellis Horwood Limited, 1983

[3] R. A. Strehlow, "Combustion Fundamentals," McGraw-Hill, 1984

[4] R. L. Raun, M. W. Beckstead, J. C. Finlinson and K. P. Brooks, "A Review of Rijke Tubes, Rijke Burners and Related Devices," *Prog. Energy Combust. Sci.* vol. 19, pp. 313-364, 1993.

[5] 권영필, 이동훈, "Rijke형 연소기에서 석탄의 맥동연소에 관한 연구," 大韓機械學會論文集 第 13 卷 第 3 號, pp. 508 - 516, 1989.

[6] B. T. Zinn, "Pulsating Combustion," Mechanical Engineering, August, pp 36 - 41, 1989.

[7] M. A. Heckl, "Heat Sources in Acoustic Resonator," Ph.D. Thesis, Cambridge University, Cambridge, England, 1985.