

Rijke 열진동력 발생

권영필
(송전대)

이병호
(과학기술원)

Analysis of the Rijke Thermoacoustic Oscillation

Youngpil Kwan
(Soong Jun Univ.)

Byungho Lee
(KAIST)

1. 서론

기록가 있는 근여 실시된 가열망 (grid) 에 의하여 발생되는 기류의 진동은 대표적인 열음향현상으로서 Rijke의 의하여 처음 관측된 이후 Rijke진동으로 알려져 있다. 현상은 Carrier, Kerwin, Melling, 등 많은 연구진들이 의하여 실험적으로나 이론적으로 연구 되어 왔으며 주요한 특성은 잘 알려져 있다. 특히 최근 Katto와 Madarame는 비선형화 heater를 이용하여 실험적으로 연구하여 유용한 정보들을 제시하였으며 Madarame는 heater를 이상적인 평면면원으로 가정하여 음향력 발생을 연속이고 그와 실험결과를 비교한 바가 있다. 그러나 열음향현상은 음압과 열전달과의 상호작용에 의하여 발생하기 때문에 열전달에 대한 완전한 해석이 필요하다. Rijke 진동은 작은 선으로 구성된 망으로 부터 발생하기 때문에 가열선으로 부터 발생되는 음향력에 대한 해석이 바탕이 되어야 할 것이다.

본 연구는 기록중이 수직으로 부터 작은 선으로 부터 소리의 Particle velocity 에 의한 진동열전달의 해석을 통하여 음향력의 발생을 연속하고 Rijke 진동의 발생한계 (Stability limit)를 구한 것이다. 공기류 매질속성 전성유체로 가정하여 Reynolds수가 낮은 2차원 유동이 때마에 Particle velocity와 대응하는 열전달의 진동성분을 수치적으로 계산 하였다. 이것을 열음향발생의 일반적이 모델하여 열음향력의 크기를 구하고 관여의 열전달 요소산이 또한 음향력의 손실을 계산하여 Rijke 진동의 발생이 필요한,

heater 로 부터 공급되어야 할 가열량을 연속 하였다.

이론적선을 입증하기 위하여 Katto 의 실험결과와 비교 하였으며 잘 일치하는 것을 보여주었다.

2. 가열선으로 부터의 열음향력의 발생

가열이 의하여 소리가 발생하기 위한 조건은 Lord Rayleigh 에 의하여 처음으로 설명 되었으며 다른것으로는 Putnam 와 Dennis 의 의하여 증명 되었다. 열음향력의 발생은 Chu 에 의하여 구해졌으며 본 저자들이 발표한 내용과 같은 일반식이 있다.

$$W_g = \frac{\gamma P_0}{\rho_0 c_0} \int_{\Omega} \hat{r}_c \left(\frac{\partial \hat{u}_c}{\partial t} \right) d\Omega \quad (1)$$

즉 가열된 열전으로 부터 발생되는 음향력의 크기는 진폭 \hat{u}_c 인 유압과 진동열전달 (진폭 \hat{r}_c) 의 곱의 시간평균을 열전도면 전체에 대하여 식분하여 구할 수 있다. 여기서 γ 는 비열비 (C_p/C_v), P_0 는 정상상태 압력을 나타낸다. 선으로 부터 유출되는 열전달은 유체의 속도에 의존하는 비열전달이기 때문에 비열전달에 대한 지체 방정식은 풀어야 구할 수 있으며 위 식을 다음과 같이 표현되는 것이 편리하다.

$$W_g = \frac{(\gamma A) |\hat{u}_c \hat{u}_\infty|}{2 \gamma \rho_0 c_0} E \Omega \quad (2)$$

식에서 \hat{u}_∞ 는 heater 근처에서 소리의 Particle velocity의 진폭을 나타내며 Ω 는 때로이 으리이 heater 로 부터 공기류로 전달되는 총 열전달량을 나타낸다. 여기서 E 는 효율 계수로 정의될 수 있으며 같은 가열량에 대하여 열음향력 발생의 상대적인 크기를 나타낸다.

효율 계수 또는 열전달에 대한 해석을 통하여 구할 수 있으며 과전동수 α 와 열 확산 계수 α 로 무차원화된 기류의 속도, $U_{0,0}^* = U_{0,0}/\sqrt{\alpha l}$ 와 heater 의 반지름, $r_w^* = r_w/\sqrt{\alpha l}$ 의 함수임을 알게 되었으며 수치 해석을 통하여 구한 결과는 그림 5와 같다. 그림에서 $U_{0,0}^*$ 와 r_w^* 가 1에 가까울 때 이 때 효율 계수는 최대가 되는 것을 알 수 있다.

3. Stability limit of the Rijke Oscillation

tube 로부터의 유향력의 감쇠는 관벽에서 열 및 점성소산, 기류에 의한 손실 및 복사손실을 둘 수 있으나 일반적으로 열 및 점성소산이 지배적임을 알 수 있다. 기류 heater 를 하나의 선으로 가정하고 열유향력 발생 및 소산을 관계 놓을 때 다음과 같은 진동 발생 한계를 구할 수 있다.

$$Q_0 = \frac{\sqrt{2} \pi^2 a (d_m)^2 r \left(\frac{hE}{kT} + 1 \right) P_0}{E \sin(2\pi h/l)} \quad (3)$$

위 식에서 α_m 은 공기 의 평균온도에 대한 열확산 계수를 나타낸다. 식으로 +의 효율

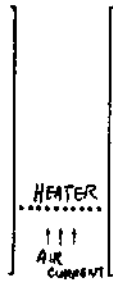


Fig. 1 Rijike Tube

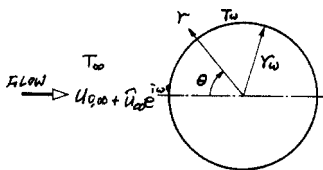


Fig. 2 The coordinate system and the flow situation

계수 E 가 클 수록 노 가열위치 (l_h) 가 관길이 (l) 의 $\frac{1}{2}$ 되는 곳이 가까와 최대 진동의 발생이 필요한 열량이 감소하는 것을 알 수 있다. 위의 이론 해석을 Katto 의 실험 결과와 그림 6에 비교 하였으며 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

1. Rijke tube 에서 유향력의 발생은 효율 계수를 정의함으로서 간단하게 표현될 수 있다.
2. heater 를 하나의 선으로 볼 때 효율 계수는 기류의 무차원 속도 $U_{0,0}^*$ 와 선의 반지름 r_w^* 에 따라 변화하며 수치 계산의 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 효율 계수는 $U_{0,0}^*$ 와 r_w^* 가 1에 가까울 때 최대로 된다.

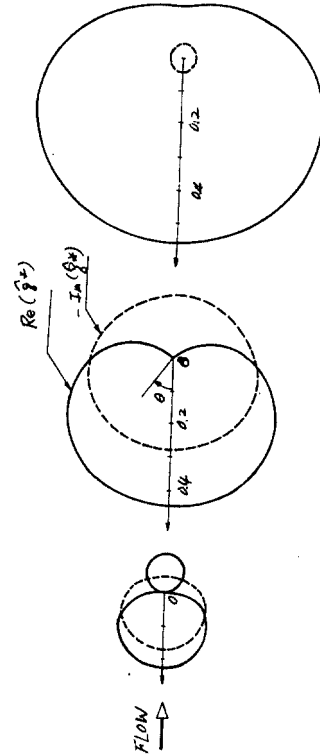


Fig. 3 Real(—) and imaginary(---) parts of the circumferential distribution of the oscillating heat release amplitude when $r_w^* = 0.1$, for $U_{0,0}^* = 1$

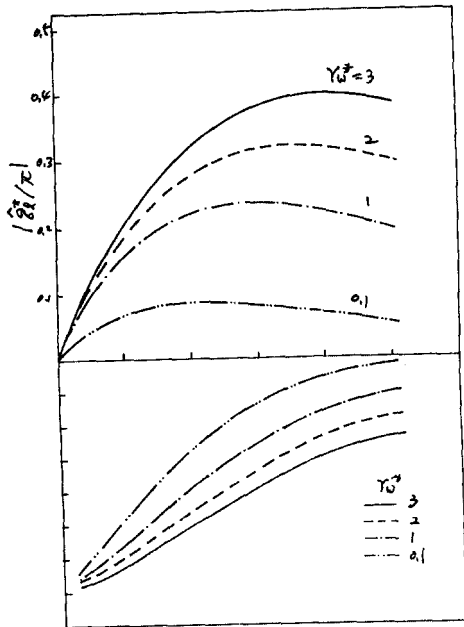


Fig. 4 Amplitude and phase of the oscillating heat release from a wire per unit length for $\gamma_0^* = 1$

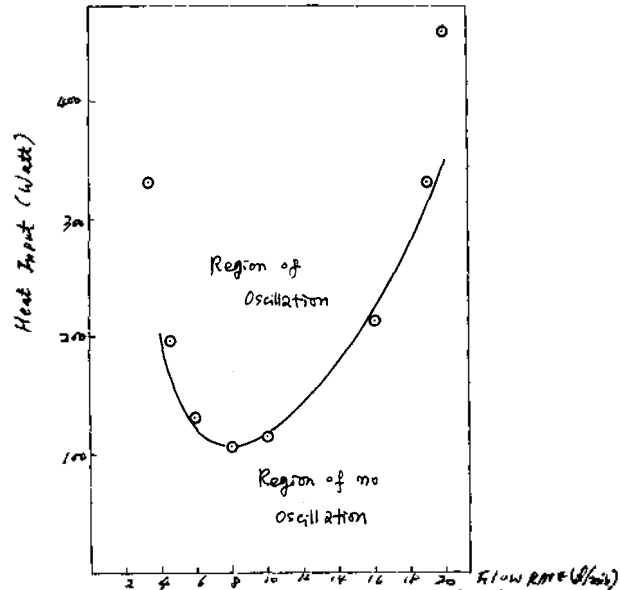


Fig. 6 Comparison of our prediction (—) with the experimental measurements (o) by Katto et al for the stability limit of the Rijke oscillation. The tube length = 4.32m and its diameter 30 mm. A spiral heater of 7 turns is placed at 1/4 from the tube inlet

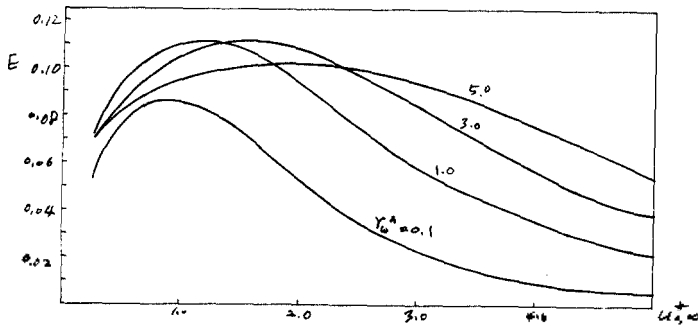


Fig. 5 The efficiency factor E