

표면 연소기의 연소진동음의 발생조건

Onset condition of the combustion-driven sound in a surface burner

권 영 필*, 이 주 원**, 이 동 훈***
Y. P. Kwon, J. W. Lee, D. H. Lee

Key words : Combustion-driven oscillation(연소진동), Surface burner(표면연소기), Premixed combustion(예혼합 연소), Thermoacoustics(열음향)

Abstract

A strong combustion-driven sound from a surface burner made of a perforated metal fiber plate for premixed gas was investigated to clarify the physical mechanism of its generation. A simple model was developed for the acoustic power generation in terms of the heat transfer response function and the acoustic impedance of the burner. The acoustic impedance of the perforated metal fiber placed on the open exit was measured and the heat release response of the burner to the oscillating flow associated with the acoustic disturbance was expressed in terms of a response function. It was found that the power is generated by the heat release in response to the downstream particle velocity, in contrast to the upstream velocity in the case of the Rijke oscillation driven by a heater placed in the lower half of a column with upstream flow. The measured frequencies of the oscillation were in agreement with the estimated resonance frequencies and their excitation was varied with the combustion conditions. For the same fuel rate, the excited frequency increases with the air ratio if it is low but decreases with the ratio if not so low. Such frequency characteristics were explained by assuming a heat release response function with a time constant and it was shown that the excited frequency decreases as the time constant increases.

1. 서 론

연료의 연소열을 복사 가열 형태로 사용하는 표면 연소기는 종래의 대류열을 이용하는 연소기에

비해서 열효율이 좋고 연소특성이 우수하면서 소형화할 수 있다는 점에서 관심을 끌고 있으나 연소시 발생하는 소음이 문제가 되고 있다. 일반적인 연소 소음은 광대역 주파수 특성을 갖는데 반하여 표면 연소기는 매우 높은 음압의 특정주파수의 순음(pure tone)을 발생하기 쉽다. 이러한 이상연소음은 연소 진동(combustion-driven oscillation)⁽¹⁾에 의한 것으로서 고통스런 소음의 원인이 될 뿐만 아

* 정회원, 숭실대 기계공학과

** 숭실대 대학원

*** 서울산업대 기계공학과

나라 연소특성이나 연소기의 안전문제에 영향을 미칠 수 있기 때문에 그 원인이나 대책에 관한 연구가 필요하다.

연소 진동음은 연소실 내부에 형성되는 음향 모드와 맥동적인 열공급이 되먹임(feedback)작용을 일으켜 발생하는 열음향(thermoacoustic) 현상으로서 대표적인 예로는 Rijke 진동이 있다. Rijke 진동은 상층 기류가 있는 기주(air column)의 중앙 하부에 가열체를 놓았을 때 기주의 공명 주파수에서 발생하는 기주진동현상이다.

이러한 열음향 진동의 발생조건에 대해서 Rayleigh는 “유체의 밀도가 밀할 때 가열되거나 소할 때 냉각이 되면 진동이 발생한다.”⁽²⁾고 하였다. 이를 Rayleigh조건이라고 하며 Chu⁽³⁾와 Putnam⁽⁴⁾, Kwon과 Lee⁽⁵⁾ 등에 의하여 정량화되었다.

열음향력의 생성은 가열체의 형상과 위치, 기류의 속도 그리고 주파수와 유체의 물성치에 따라서 변하게 되며 일반적으로 열전달은 속도에 대한 응답이므로 언제나 속도보다 열전달의 위상이 늦게 된다. 따라서, 음압에 비하여 입자 속도의 위상이 $\pi/2$ 빠른 곳에 가열면이 위치하게 되면 열전달과 음압은 동위상성분을 갖게되므로 이러한 조건을 만족하는 음향모드가 여기될 수 있음이 밝혀졌다⁽⁶⁾. 권영필 등⁽⁷⁾은 하니콧형 연소대를 기주내에 설치한 예혼합연소기에서 발생하는 연소 진동에 관하여 연구한 바 있다. 하니콧의 위치를 이동시킬 때 전술한 바의 위상조건이 맞는 모우드의 주파수가 발생하였다. 따라서, 연소대의 위치가 위로 갈수록 높은 주파수의 소리가 발생하였다. 그러나, 연소대가 개구부에 가까이 가면 진동수가 증가하면서 열음향력의 생성이 약해지기 때문에 진동음은 발생하지 않았다.

따라서, 표면연소기와 같이 관의 상단부에 열원이 있는 경우에 발생하는 연소진동음은 관의 내부에 열원이 놓인 경우인 Rijke 진동과 같은 방법으로는 이해하기 어려운 경우라고 할 수 있으며 아직 이러한 경우에 발생하는 열음향현상에 관해서는 연구된 바가 없다.

본 연구에서는 기주의 상단면에 금속성 소재의 다공판 연소대를 설치한 예혼합연소기의 연소시 발생하는 진동음의 발생기구를 규명하기 위하여 음

압, 입자속도 및 열전달 사이의 위상관계를 고찰하고 입자속도에 대한 열전달의 응답함수를 정의하여 진동음의 발생조건을 제시하였다. 또한, 연소조건에 따른 진동음의 주파수특성을 실험으로 구하고 열전달응답함수를 추정하여 실험결과를 해석하여 보았다.

2. 연소진동음의 발생조건

가열체의 크기가 음장의 파장에 비하여 충분히 작은 경우에는 가열체 주변의 음압 P 는 균일하다고 볼 수 있고 압력진폭 P , 각진동수를 ω 라 할 때 음압은 $Pe^{i\omega t}$ 로 나타낼 수 있다. 가열체로부터 주위 유체로의 열전달량을 Q 라 하면 가열에 의한 일정 질량의 주위 유체가 갖는 체적 V 의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{R}{c_p P_0} \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

식에서 R 은 기체상수, c_p 는 기체의 정압비열, P_0 는 평균압력이다.

따라서 가열에 의하여 생성되는 음향파워 W_s 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_s &= \langle P \frac{dV}{dt} \rangle \\ &= \frac{R}{2c_p P_0} \operatorname{Re}[\hat{P}^* \hat{Q}] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\hat{}$ 은 복소진폭을, $\langle \rangle$ 은 시간평균을 의미하고 $*$ 는 공액복소수, Re 는 복소수의 실수부분을 나타낸다. 위의 관계식이 Rayleigh 조건의 간략한 표현이라고 할 수 있다. 즉, 음압과 같은 위상의 열공급이 있으면 음향파워의 생성이 가능해진다.

그리고 맥동적인 열전달은 맥동유동인 입자속도에 대한 응답이므로 무차원 전달함수 \hat{E} ⁽⁸⁾를 다음과 같이 정의하는 것이 편리하다.

$$\hat{E} = \hat{Q} / (\hat{U} Q_0 / \sqrt{\omega \alpha}) \quad (3)$$

식에서 Q_0 는 정상상태 열전달량, α 는 열확산계수를 나타낸다. 응답함수를 식 (2)에 대입하면 생성되

는 음향력 W_r 는 다음과 같다.

$$W_r = \frac{R}{2c_r P_o} \frac{Q_o}{\sqrt{\omega \alpha}} \operatorname{Re}[\widehat{P}^* \widehat{E}U] \quad (4)$$

또한, 열원의 위치에서 음압과 입자속도의 비를 밀도 ρ_o 와 음속 c 의 곱인 특성임피던스 $\rho_o c$ 로 나눈 무차원 임피던스 ζ 를 이용하면 식 (4)는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$W_r = \frac{R}{2c_r P_o} \frac{Q_o}{\sqrt{\omega \alpha}} \operatorname{Re}[\widehat{E}\zeta^*] |\widehat{U}|^2 \quad (5)$$

식 (5)는 입사음에 대한 가열체로부터의 생성 음향력을 나타내는데, 이것이 음향력의 손실보다 큰 경우에 진동은 발생하게 된다.

식 (5)로부터 가열에 의해서 음향파위가 생성되면 $\widehat{E}\zeta^*$ 의 실수값이 양이 되어야한다. 일반적으로 열전달은 유속보다 위상이 늦기 때문에 응답함수는 음의 허수값에 가깝다. 이 경우 임피던스의 허수, 즉 리액턴스도 음수가 될 때 양의 음향력이 생성되는 것을 알 수 있으며, Rijke 진동의 경우 이러한 조건을 만족하는 곳에 열원이 위치할 때 발생한다. 즉, 양단이 열린 기주의 경우 기본진동은 열원의 위치가 기주의 중앙 하반부에 위치할 때 발생하게 된다.

그런데, 개구면에서의 임피던스는 방사임피던스로서 실수와 허수 모두 양의 값을 갖는다. 따라서 Rijke 관의 경우와는 위상이 반대 위치인 것을 알 수 있다. 따라서, 속도에 대한 열전달응답도 반대로 되어야 한다. 실제 다공판을 통하여 화염대로 상승하는 예혼합가스의 유속이 빠를수록 연소대의 아래쪽의 관내부로 전달되는 열량은 감소한다. 즉, 유속이 빠를수록 가열량은 감소하고 유속이 느릴 때는 증가한다. 따라서 음장에 의한 맥동적인 입자 속도에 의한 열전달의 응답은 역방향속도에 관하여 위상지연을 갖는 형태로 나타내게 될 것이다. 이 지연성분은 음압과 위상이 같으므로 음향력의 생성에 기여할 수 있게 된다. 연소에 의한 총체적인 열 방출은 상방향 기류에 대하여 다소의 위상지연을 갖는 형태로 나타날 것으로 보인다. 그 이유는 연소대가 관의 내부에 있는 경우와 본질적으로 열전

달이 다르게 될 이유는 없기 때문이다. 그러나, 음향력의 생성에 기여하기 위하여서는, 즉 음장과 열전달의 되먹임(feedback) 순환을 유지하는 것은 정재파 음장이 형성되는 공간인 관내부로 들어오는 열량일 것으로 보인다.

진동이 발생하기 위해서는 열전달로 생성되는 음향력이 개구부에서의 방사 및 관벽에서의 소산에 의한 소멸량보다 커야 하며 개구부 방사손실이 지배적이라고 할 때 소멸음향력 W_i 은 방사임피던스의 실수부분인 저항을 사용하여 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$W_i = \frac{\rho_o c S}{2} \operatorname{Re}(\zeta) |\widehat{U}|^2 \quad (6)$$

식에서 S 는 관의 단면적이다.

편의상 무차원 임피던스는 실수부와 허수부를 다음과 같이 분리하여 나타낼 수 있다.

$$\zeta = r + jx \quad (7)$$

저항은 오직 파워의 소멸에만 기여하므로 식 (5)에서 $\operatorname{Re}(\zeta)$ 는 배제되어야 한다. 따라서, 식 (5)와 식 (6)은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_r = \frac{\rho_o c R Q_o}{2c_r P_o \sqrt{\omega \alpha}} x \operatorname{Im}(\widehat{E}) |\widehat{U}|^2 \quad (8)$$

$$W_i = \frac{\rho_o c S}{2} r |\widehat{U}|^2 \quad (9)$$

따라서 진동의 발생조건 $W_r > W_i$ 으로부터 다음 조건식을 얻을 수 있다.

$$\operatorname{Im}(E) > \frac{Sc_r P_o \sqrt{\omega \alpha}}{R Q_o} r \quad (10)$$

연소대의 하부면을 기준한 음압과 입자속도의 비를 $\rho_o c$ 로 무차원화한 값인 임피던스를 측정된 결과는 Fig.1과 같다. 측정은 관의 한 쪽 끝에 연소대를 설치하고 반대쪽에 설치한 스피커에 백색잡음을 가한 후 관의 두 점 사이의 음압의 전달함수를 이용하는 방법을 사용했다. 진술한 바와 같이 실수부와 허수부 모두 양의 값을 나타내고 있다. Sullivan⁽⁸⁾에 의하면 공극률(porosity)이 σ 인 다공판의

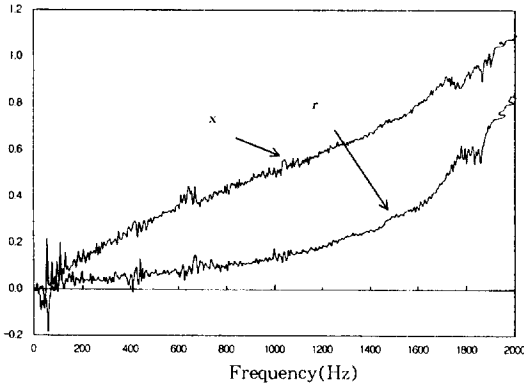


Fig.1 Measured impedance of the perforated metal-fiber plate at the open end of a tube

임피던스는 다음과 같다.

$$\zeta = (6.0 \times 10^{-3} + j4.8 \times 10^{-5}f) / \sigma \quad (11)$$

사용된 연소대는 개구율이 11%이므로 허수부인 리액턴스는 본 실험값과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.1에서 실수값인 저항 r은 주파수의 제곱에 비례하는 방사저항의 특성을 잘 나타내고 있다. 즉, 다공판인 연소대의 바닥면에서의 압력과 속도의 비의 실수는 방사저항이 지배적이며 허수는 다공판의 임피던스가 지배적인 작용을 한다고 할 수 있다. 실험값으로부터 r과 x는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = 0.8(f/2000)^2 \quad (12)$$

$$x = f/2000 \quad (13)$$

r과 x를 식 (10)에 대입하면 다음식으로 진동발생조건을 나타낼 수 있다.

$$\frac{RQ_0}{4 \times 10^{-4} Sc_p \rho_0 \sqrt{2\pi a}} \frac{Im(E)}{f^{3/2}} > 1 \quad (14)$$

3. 연소 진동음의 주파수 특성

3.1 실험방법

연소진동음의 주파수특성을 구하기 위하여 먼저

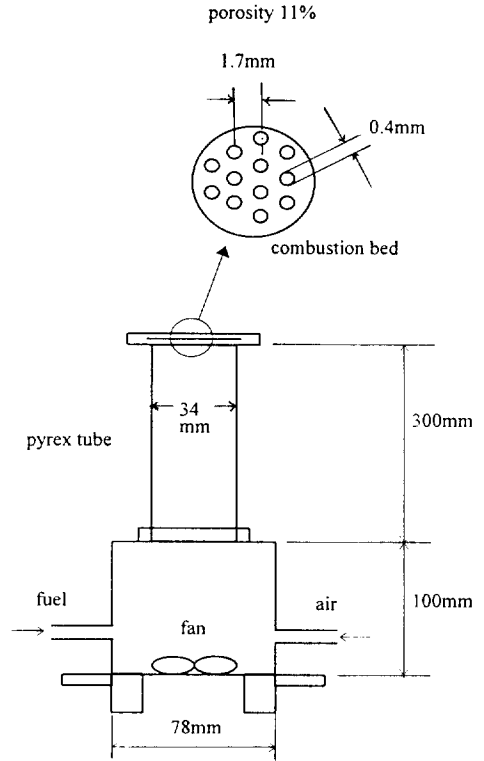


Fig.2 Schematic of the surface burner for the experiment

Fig.2와 같은 연소장치를 사용하여 실험을 수행하였다. 연소기는 지름 34mm, 두께 2mm, 길이 300mm의 파이렉스관(pyrex tube)의 상단에 개구율 11%, 기공지름 0.4mm 두께 0.7mm의 금속섬유 소재의 연소대를 설치하고 관 밑부분은 지름 78mm, 높이 100mm의 예혼합실로 구성되어 있다. 예혼합실 벽면으로부터 연료로 사용된 상용 프로판 가스와 공기를 공급하고 충분한 혼합을 위하여 소형 팬을 설치하였다.

실험 방법은 먼저 연료를 공급하여 연소대에 불을 붙인 후 연료량과 당량비(equivalence ratio)의 역수인 실제공기대 이론공기의 비인 공기비 m을 변화시키면서 연소 진동음이 발생할 때 연소기로부터 약 30cm 떨어진 위치에서 소음계와 FFT를 이용하여 진동음의 음압과 주파수 분석을 행하였다. 연소시 연료의 공급량은 진동이 발생하기 시작하는 0.6 l/min부터 3.5 l/min까지 조절하면서 실험하였다.

또한, 연소 진동시 관 내부에 형성되는 음향 모우드의 형상을 보기 위하여 삽입관(probe)을 사용하여 관 내부의 중앙부에서 10mm마다 음압을 측정하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

진동음이 발생할 때의 음압스펙트럼과 음향 모우드의 형상의 일례를 나타내면 Fig.3 및 Fig.4와 같다. Fig.3은 연료 공급률 1.63l/min, 공기비 $m=1.4$ 조건에 대해서 연소 진동시 발생하는 음압의 주파수 스펙트럼을 도시한 것으로 가장 높은 음압 레벨을 갖는 기본음과 그 위로 배음, 3배음, 4배음 등 정수배의 형태로 주파수 분포를 이루었는데, 이와같이 다른 주파수 성분이 동시에 나타나지 않고 한 주파수와 그 고조파만 나타나는 것이 하나의 특성이라고 할 수 있다. Fig.4는 주파수 1,500Hz인 경우로 관내부의 음압 변화를 측정된 결과이다. 음압분포는 분명한 정재파(standing wave)임을 알 수 있으며 연소대 근처에서 진폭이 다소 낮아지는 것은 공기온도의 상승에 의하여 $\rho_c c$ 가 감소하기 때문이다.

Fig.5는 공기비와 연소대의 단위면적당 연료의 체적속도인 연료공급률 $Q_f(m^3/m^2sec)$ 의 변화에 따른 진동음 발생영역을 측정된 결과를 도시한 것이다. 연료공급률이 낮은 경우에는 공기비가 매우 높을 때 진동이 발생하기 시작하며 연료공급률이 높아지면 낮은 공기비에서부터 발생이 시작되어 불

이 꺼질 때까지 계속된다. 연료공급률이 낮으면 공급열량이 감소하므로 식 (14)에서 진동발생이 그만큼 어렵게 되는 것을 알 수 있다. 공기비가 높을 때 진동음이 발생하는 것은 응답함수의 허수값 $Im(E)$ 가 유속에 영향을 크게 받고 유속이 빠를수록 불이 연소대에서부터 높이 뜨므로 관내부의 열전달 지연시간이 길어져서 응답함수의 허수, 즉 음압과 위상이 같은 90도 지연성분이 커지는 것으로 추정된다.

Fig.6은 연료공급률과 공기비에 따라 연소진동이 발생할 때 진동음의 주파수 변화를 도시한 것이다. 공기비가 증가함에 따라, 즉 유속이 증가함에

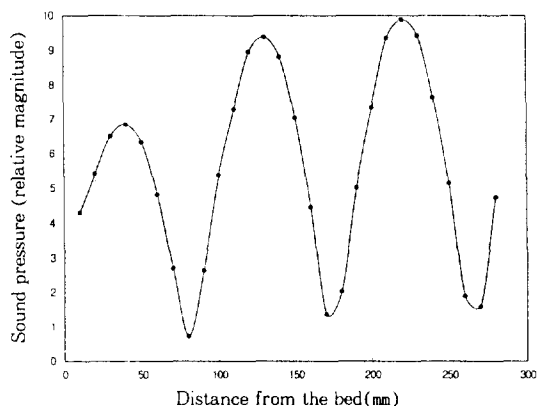


Fig.4 The acoustic pressure amplitude in the tube at 1500Hz

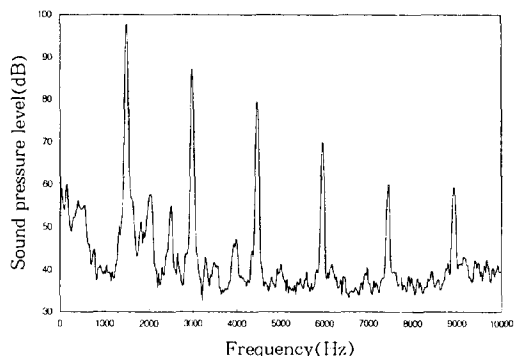


Fig.3 Pressure spectrum at fuel rate 1.63l/min and air ratio 1.4

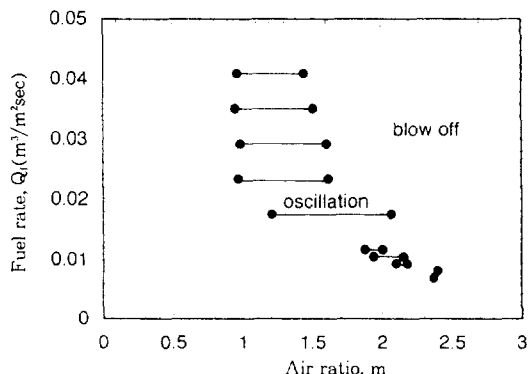


Fig.5 Range for the generation of combustion-driven oscillation

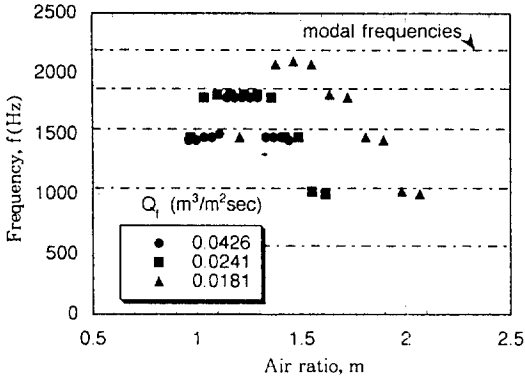


Fig.6 Frequencies of the combustion-driven sound as a function of air ratio for various fuel rates

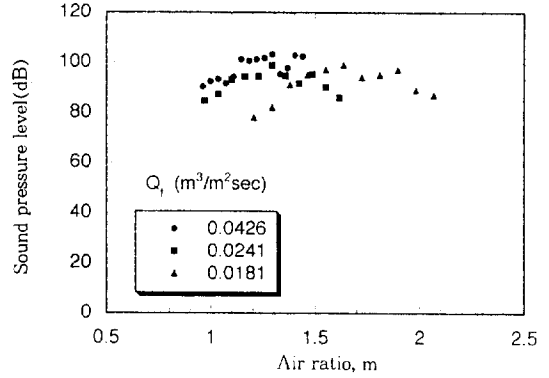


Fig.7 Sound pressure level of the combustion driven oscillation

따라 여기되는 공명 주파수는 증가하다가 다시 어느 유속 범위에서 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림에서 연료공급률이 높을수록 연소 가능한 공기비의 범위는 좁아지나 공기비에 따른 주파수 변화의 경향은 비슷하다. 따라서 주파수가 가장 높아지는 공기비는 연소율이 높을수록 낮아지고 공기비 변화에 따른 주파수변화가 더 빨리 일어나는 것을 알 수 있다.

식 (13)의 리액터를 이용하여 실험관의 공진 주파수를 계산한 결과 560Hz, 1050Hz, 1520Hz, 1870Hz, 2200Hz를 얻을 수 있었다. 이러한 계산값들은 실험에서 나타난 주파수들과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 실험값이 다소 계산값보다 낮은 값을 보이는 것은 연소에 의하여 다공관이 가열되고 예혼합가스의 구멍 통과속도가 상당히 크기때문에 비선형 영향이 나타날 수 있으며 저항의 영향등이 있을 수 있으나 이론계산에는 고려되지 못했기 때문으로 볼 수 있다.

Fig.7은 연소조건에 따라 진동음의 레벨을 측정 한 결과를 나타내고 있다. 주파수특성은 불연속적인 변화를 보이며 방사음의 압력은 연속적인 변화를 보이며 공기비가 낮은 경우에 공기비의 증가와 더불어 음압은 약간씩 증가하다가 거의 일정한 크기의 음압을 나타내는 것을 알 수 있다.

4. 열전달 응답함수

주파수특성의 실험결과에서 연소조건에 따라 가진되는 공진주파수가 다른 것을 알 수 있었다. 이러한 특성은 열원이 관 내부에 위치할 경우에는 관찰하기 어려운 현상이다⁽⁷⁾. 이것은 식 (3)의 열전달 응답함수가 연소조건에 따라서 변하기 때문이라 할 수 있다. 즉, 식 (10)의 진동발생조건을 만족시키는 공명주파수가 여기되는데 전달함수의 주파수 특성은 연소조건에 따라서 다른 것을 암시한다. 임피던스의 무차원 저항 r 과 리액턴스 x 가 연소조건에 영향을 거의 받지 않는다면 연소특성에 따른 열전달 응답함수의 변화가 연소음의 주파수 변화를 좌우한다고 할 수 있다.

음장에 의한 백동 유동의 유속이 다공관에서 아래쪽으로 향할 때 화염근처의 뜨거운 가스가 아래로 움직이면서 아래쪽으로 열을 공급하게 된다. 이때 열전달응답은 백동의 주파수와 화염대로부터의 화염거리에 따라 변할 것으로 생각된다. 주파수가 빠를수록 진폭은 낮아지고 위상지연은 커진다. 따라서, 식 (3)으로 정의된 백동적인 열전달과 입자 속도 사이의 무차원 전달함수를 다음과 같이 가정하여 보았다.

$$E = \frac{-e^{-j\pi(\omega t)/[1 + (\omega t)^2]}}{1 + (\omega t)^{1/2}} \quad (15)$$

식에서 t 는 응답의 지연시간과 관련된 상수로서 일종의 시정수(time constant)라고 할 수 있다. 식이 음(---)으로 시작되는 것은 앞에서 논한 바와 같이 음향파위의 생성과 되먹임 순환에 기여하는 열공급 응답은 역방향속도에 의한 것이기 때문이다. $-E$ 의 위상과 진폭을 도시하면 Fig.8과 같다. 그림에서 주파수와 시정수의 곱이 크면 진폭은 감소하고 위상지연은 증가하는 것을 알 수 있다.

응답함수를 이용하면 식 (14)에 의하여 공기비에 따른 주파수별 진동발생 가능성을 추정할 수 있으며 상대적인 크기인 $Im(E)/f^{3/2}$ 의 계산결과를 시

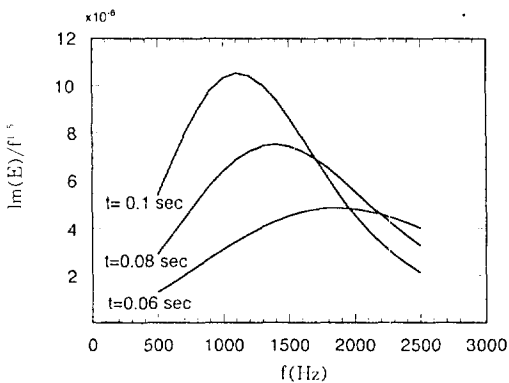


Fig.8 Assumed response function E

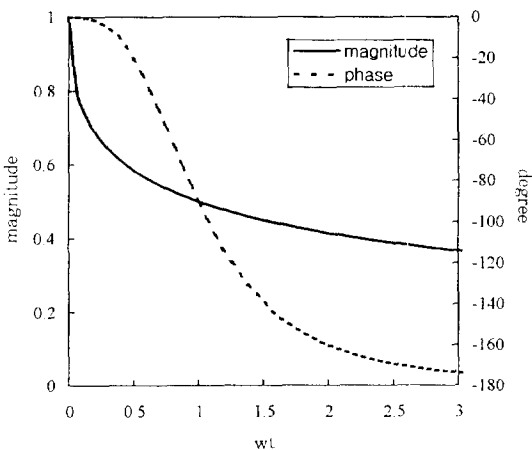


Fig.9 Frequency factor for the ratio of the acoustic power generation to the loss as a function of frequency for some time constants.

정수를 매개변수로하여 도시하면 Fig.9와 같다. 생성된 열음향력이 개구부에서 방사 및 대류손실과 관내부에서의 열점성 소산에 의한 손실음향력보다 크면 그 주파수의 진동은 가능하다고 할 수 있다. 그러나, 실험에 의하여 진동음은 여러 모우드가 동시에 여기되지 않고 오직 하나의 주파수와 그 고조파들만 나타나는 것이 관찰되었다. 따라서, 음향력 생성의 상대적인 크기가 최대가 되는 주파수만 여기된다고 할 수 있다. 그림에서 이 최대음향력을 나타내는 주파수는 시정수에 따라서 다른 것을 알 수 있다. 즉, 시정수가 0.06sec일 때 1800Hz, 0.08sec일 때 1500Hz, 0.1sec일 때 1000Hz의 진동음이 여기되는 것이다. 따라서, 실험결과인 Fig. 6에서 공기비에 따라서 주파수가 다른 것은 시정수가 변하기 때문이라고 할 수 있다. 응답함수가 식 (15)와 같다고 한다면 공기비가 1.2 근처에서 시정수가 가장 작고 공기비가 작아지거나 커지면 시정수는 증가한다는 것을 의미한다.

4. 결 론

이상과 같이 표면 연소기의 연소 진동의 발생조건과 주파수특성에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

기주의 상단에 금속성 소재의 연소대를 설치한 예혼합 표면 연소기에 의하여 발생하는 연소진동음은 연소대 아래 쪽으로 유입되는 열전달과 음압의 상호작용에 의한 열음향현상으로 설명할 수 있다. 발생하는 연소진동음의 주파수는 연소가 없는 상태의 다공판의 리액턴스를 이용하여 계산한 공명주파수와 거의 일치하며 기류의 영향은 무시할 만하다. 여기되는 공명주파수는 공기비에 따라서 약간의 증가를 보이다가 감소하는 특성을 나타내며 연료공급률이 증가할수록 공기비에 따른 변화가 더욱 크게 된다. 이러한 주파수 특성을 열전달 응답함수를 가정하여 설명하였으며 연소조건에 따라서 응답의 지연시간 변화에 의한 것임을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. Putnam, A. A., 1982, "Combustion Roar as

- observed in industrial furnaces”, Jr. Eng. for Power of ASME, 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. Madaramc H., 1981, “Thermally induced oscillations in a pipe”, Bull JSME 24, pp. 1626~1633.
 7. 권영필, 이동훈, 현길학, 1990, “다공성 물질에 의한 예혼합기의 맥동연소에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제14권, 제3호, pp. 676~684.
 8. Sullivan, J. W., 1979, “A Method for modeling perforated tube muffler components. II. Applications”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 66(3), pp. 779~788.