

열-음향에 의한 난류희박 예혼합연소의 불안정성에 관한 실험적 연구

홍정구[†]·이민철^{*}·신현동^{**}

An experimental study on the instability of lean premixed turbulent combustion induced by thermo-acoustics

Jung Goo Hong, Min Chul Lee and Hyun Dong Shin

Key Words: combustion instability(연소불안정성), lean premixed combustion(희박예혼합연소), thermo-acoustic(열-음향), time scale(시간스케일)

Abstract

The combustion instability acts as a serious obstacle for the lean premixed combustion of gas turbine and even causes the fatal damage to the combustor and whole system. In this experiment, the pressure fluctuation is highly related to the stabilizing position of flame and fuel injection location. The fuel injection location is connected with the convection time of the fresh mixture, which is important time scale to refresh the mixtures near the flame stabilization location. The flame is extremely unstable when the alternative stabilization occurs and bulk mode frequency (~10Hz) of pressure fluctuation is observed in this condition. It was found that the convection time scale of the fresh reactant coincided with the time scale of the bulk mode fluctuation. Hence this phenomenon results from the local equivalence ratio change caused by the pressure fluctuation induced by thermo-acoustic effects.

1. 서 론

최근 국내외 대부분의 가스터빈에서는 난류 희박 예혼합 연소 방법을 사용하고 있다. 예혼합 화염은 확산화염에 비해 국부적인 온도의 상승을 줄임으로써 NO_x 배출량을 줄이고, 희박연소를 통해 연료소비량을 줄일 수 있기 때문이다. 그러나 이러한 예혼합 화염은 여러 가지 불안정성의 문제를 가지고 있는데 각 부분별로 구분하여 보면, 시스템 전반적인 불안정성과 연소실 내에서

불안정성 그리고 화염자체에서 발생하는 불안정성 문제로 구분할 수 있다. 이 중 연소실 내에서 일어나는 불안정성의 문제는 연소실 내의 음향학적 압력분포와 연소반응에 의한 열발생이 결합되어 나타나며, 그 결과 가스터빈과 같은 실제 연소기에서는 큰 압력변동과 열변동으로 인한 피로 파괴를 유발시키기도 한다. 이러한 압력 변동 및 열발생의 변동은 주로 연소에 기인한 진동(combustion-driven oscillations)으로 잘 알려져 있고, 현재까지 행해진 연구들은 크게 두 가지로 불안정성의 원인을 설명하고 있다[1]. 첫 번째는 연소실 내에서 덤프면(dump plane) 혹은 둔체(bluff body)와 같은 연소실의 형상 특성에 의해 형성된 와동이 그 와동을 타고 형성되는 화염과 간섭(flame-vortex interaction)하여 불안정한 연소가 일어난다고 설명한다. 즉 와동과 화염은 시간적 공간적으로 밀접한 관계를 맺고 있으며, 와동의

[†] 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : jghong70@kaist.ac.kr

TEL : (042) 869-3057 FAX : (042) 869-8820

^{*} 한국과학기술원 기계공학과

^{**} 한국과학기술원 기계공학과 교수

주기와 크기에 지배를 받으며 연소한다. 또한 와동에 기인한 불안정한 연소는 그 와동을 이차 분류(secondary air) 등을 통하여 깨뜨림으로써(vortex break) 안정성을 회복할 수 있다고 주장하고 있다 [2]. 두 번째로는 주기적 연소에 의한 열발생율의 변화에 따른 압력변동이 상류로 전파되고, 이에 기인한 연료혼합 위치에서의 당량비 변화, 그리고 이 당량비의 변화가 다시 하류의 열발생율의 변화를 일으켜서 연속적으로 순환되는 형태로 연소시스템을 불안정하게 한다고 설명하고 있다 (feed system coupling)[3]. 그러나 이제까지 대부분의 연구들은 그 불안정성의 일부분만을 설명할 수 있을 뿐이고, 특정조건에서만 한정되어, 명확한 불안정성의 발생기구를 설명하기에는 부족하였다. 이에 본 연구는 이러한 회박 예혼합 연소시 발생하는 연소기 내의 압력변동의 주기성에 관해 알아보고, 공간적 시간적 관점에서 이러한 불안정성의 발생 및 증가, 지속, 감소기구를 관찰하여, 이러한 현상에 관한 원인을 명확히 밝히고, 제어할 수 있는 방법을 모색하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소기와 실험장치

Fig. 1은 연소기와 실험장치의 개략도이고, 장치는 크게 연소기, 유량조절부, 측정부로 나눌 수 있다. 열-음향 불안정성을 재현성있게 발생시킬 수 있는 실험실 스케일의 연소기를 그림과 같이 제작하였고, 그 형상은 후방확대 덤프연소기(rearward-step dump combustor)로 확대면을 중심으로 아래의 버너 부분과 위쪽으로 석영관(지름: 80 mm, 높이: 700mm, Aspect ratio: 8.75)에 의해 가시화된 연소실 부분으로 나눌 수 있다. Mass Flow Controller(MFC)에 의해 공기, 주연료 그리고 파일롯 화염을 위한 연료가 각각 따로 조절되어 삼중관으로 구성된 버너로 공급되고, 주연료는 주연료 분사구(main fuel injection holes, ϕ 0.7mm \times 8개소)에서 분사되며, 공기와 혼합되는 혼합거리(L_{fuel})를 거친 후, 스윌러(swirler)를 통해 연소실내로 투입된다. 화염의 점화시에만 파일롯 화염을 이용하고, 실제 실험조건에서는 파일롯 노즐로 연료를 공급하지 않았다.

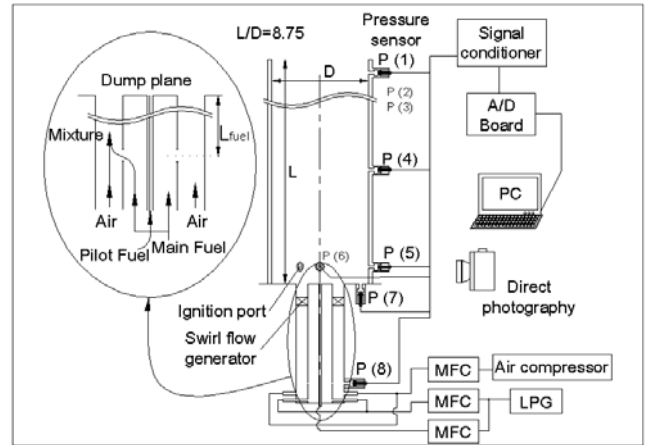


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

2.2 실험방법

연소실 내의 압력은 압력 센서(piezo-electric pressure sensor, PCB Model 106B)를 통해 연소실 벽면, 덤프면과 버너벽면에서 측정하였고, 실험변수로는 당량비(ϕ), 연소실에서의 입구유속 그리고 연료와 산화제가 혼합되기 시작하는 위치(L_{fuel})를 두어 연소실내에서의 음압을 측정함으로써 연소 불안정성 실험을 수행하였다. 실험에서 사용한 스윌러의 형태는 Fig. 2와 같고, 산화제에 연료를 분사시키는 거리(L_{fuel})를 덤프면에서부터 30, 93.75, 157.5, 221.25, 285mm로 바꾸어 혼합정도 및 당량비의 변화에 따른 화염을 관찰할 수 있게 하였다.

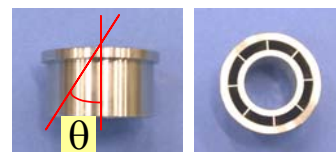


Fig. 2 swirler

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 형태 및 연소실내 압력측정

상용프로판(LPG)/공기의 예혼합기체의 연소실 방향 입구속도를 21 m/s(Reynolds number : 8850)로 고정한 상태에서, Fig. 2에서와 같이 축방향에 대하여 스윌베인(swirl vane)이 기울어진 각도(swirl vane angle, θ)가 45°인 스윌러를 장착한 후, 당량비를 줄여가면서 화염의 형태를 직접사진으

로 찍고, 그 때의 음압(acoustic pressure)을 측정하였다. 이 때의 선회수(swirl number)는 Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L.[4] 이 제한한 식(1)로 구했으며, 본 실험에 대한 선회수는 0.897이다.

$$S_n = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_h / D_n)^3}{1 - (D_h / D_n)^2} \right] \tan \theta \quad (1)$$

여기서, D_h, D_n 와 θ 는 각각 스윌러의 내경과 외경 그리고, 스윌베인의 각도이다.

Fig. 3은 덤프면으로부터 연료가 분사되는 거리 즉, L_{fuel} 를 285mm로 고정하고, 당량비(ϕ)를 1에서부터 0.54까지 변화시키며 화염 특성의 변화를 관찰한 화염형태로써 서로 다른 특성이 나타나는 영역에 대해 대표적인 결과를 도시하였다. 여기서 당량비의 감소에 따라 음압의 크기는 줄어들고, 화염의 형태도 확연히 달라짐을 볼 수 있다. 연료가 농후할수록 연소속도가 빨라져서 덤프면 쪽으로 화염이 다가왔고, 당량비를 낮추어갈수록 화염의 길이가 길어지고, 화염대가 덤프면에서 멀어지는 경향을 보였다. Region 1에서는 예혼합 가스가 연소실로 나오자마자 덤프면에서 재순환하여(recirculate) 큰 와동(vortex)을 형성하며, 연소 반응도 이 유동을 따라 강하게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이 영역에서 심한 소음과 진동이 발생하였으며, 덤프면에서 동압력(dynamic pressure)을 측정하였을 때, 크기(Peak to Peak Pressure fluctuation)는 12.6kPa을 넘었고, 이 값의 반(6.3kPa)을 최소가청음압(2×10^{-5} Pa)을 기준으로 SPL(Sound Pressure Level)을 계산하였을 때 170dB로 매우 시끄러운 소음을 내며 연소반응을 일으켰다. Region 2에서는 화염의 형태가 주기적으로 변화하였으며 이에 압력변동도 같은 주기로 변화하였다. Region 3, 4에서는 화염이 안정적으로 연소하였으며, Region 5에서는 화염이 lift off 되어 당량비를 0.54이하로 하였을 때는 날아가서 꺼지는 것(blow off)을 확인하였다. 여기서 압력변동이 큰 Region은 앞서 언급한 연소실 벽면 혹은 연소기 후단에 위치한 터빈의 피로파괴를 유발할 수 있기 때문에 이러한 불안정성의 생성 및 증폭 기구에 대한 자세한 관찰이 요구된다. 이에 본 연구에서는 열음향 불안정성을 보다 자세히 알아보기 위해 실험영역을 압력변동이 큰 Region 1과 2로 잡았고, 이 영역에서 물리적 해석을 수행하였다.

연소-음향 불안정성은 이미 Rayleigh에 의해 잘






	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5
Direct photo					
ϕ	1~0.78	0.78~0.73	0.73~0.67	0.67~0.61	0.61~0.54
Pressure [kPa]	12.6	14.0	1.6	1.4	1.6

Fig. 3 Photographs of flame

알려져 있으며 이 원리는 본 실험의 결과에도 적용될 수 있다. 1877년 Rayleigh는 Rayleigh Index를 식(2)와 같이 열발생율의 변동과 압력변동의 상호작용으로 정의하고, 검사체적까지 범위를 확장했을 때, 이 값이 점성소산(viscous dissipation), 음향에너지 손실(acoustic energy loss) 등과 같은 감쇄요소의 합보다 클 때 음파는 증폭된다고 결론지었다.[5]

$$R.I. = \int_V \int_T P(x,t) Q(x,t) dt dv \geq \int_V \int_T \sum L_i(x,t) dt dv \quad (2)$$

여기서, V : 검사체적

T : 현상이 일어나는 주기

L_i : i번째 감쇄요소(i-th damping process)

본 실험에서도 Region 1, 2의 경우는 위와 같은 Rayleigh criterion을 만족시키기 때문에, 불안정한 연소시스템을 이루고, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Region 1의 조건에서는 연소실 내의 압력변동은 하나의 주파수(200.2 Hz)에 지배를 받는 것을 확인할 수 있다. 본 실험은 아래와 같은 세 가지 가정과 식 (3)을 이용하여 관내 공명주파수를 계산할 수 있다[6].

[가정1] 직경이 80mm, 높이가 700mm로 직경에 비해 높이가 길므로 1차원 길이방향의 음향모드에 의해 지배받는다.

[가정2] 연소로의 한쪽은 덤프면에 의해 대부분 막혀있으며 다른 한쪽은 대기 중에 노출되어 있으므로 한쪽이 막혀있고, 다른 한쪽이 열린 시스템(closed-open system)으로 볼 수 있다.

[가정3] 상용프로판/공기 연소에 의한 연소실

내의 가스를 550℃의 공기라고 가정한다. (프로판 연소시 화염온도는 대략 1500℃ 정도이지만 주위로의 열전달과 화염의 대부분이 연소실 하부에만 존재하기 때문에 연소실 내의 평균온도를 550℃로 가정하였다.)

$$F = \frac{nc}{4L} \quad (3)$$

여기서,

$$c = c_o \sqrt{1 + \frac{1}{273} T} \quad : \text{ 대기 중에서의 음속}$$

$c_o = 331.42 \text{ m/s} : 0^\circ\text{C}$ 대기 중에서의 음속

T : 연소실내 섭씨온도

계산에 의한 공명주파수는 $F=205.5\text{Hz}$ 이고, 이는 실험에 의한 공명주파수 $F=200.2\text{Hz}$ 와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Region 1과 달리 Region 2에서는 압력이 주기적으로 커졌다가 줄어들었다 하는 것을 발견할 수 있었다. 여기서 Fig. 5의 그래프를 통해 1초간 압력신호에서 산의 개수를 세어보면, 10번의 주기(10Hz)로 반복하는 것을 알 수 있다. 압력변동의 크기는 Region 1의 경우보다 컸으며, 주파수 영역의 그래프를 볼 때 200Hz를 중심으로 넓게 퍼져서 혼재된 주파수가 지배적이라는 것을 알 수 있다. 또한 압력 신호가 커졌다가 다시 줄어드는 형태가 주기적으로 반복되는 것을 보고, 그 원인을 규명하기 위해 연료 분사위치에 따른 실험을 수행하였다.

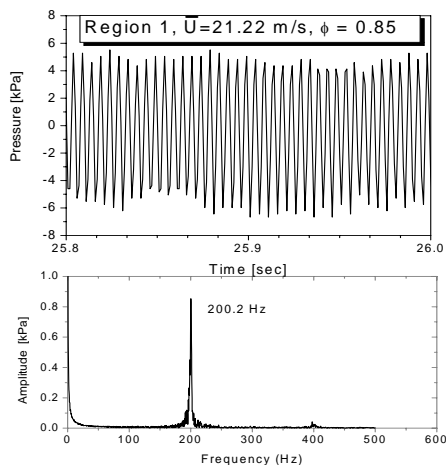


Fig. 4 Pressure fluctuation and FFT (Region 1, $\phi=0.85$, $L_{\text{fuel}}=285\text{mm}$)

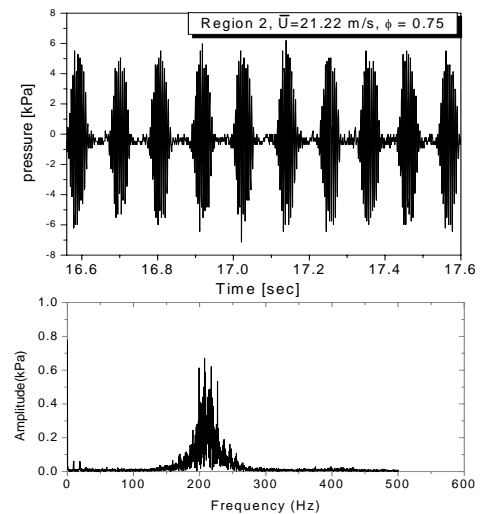


Fig. 5 Pressure fluctuation and FFT (Region 2, $\phi=0.75$, $L_{\text{fuel}}=285\text{mm}$)

3.2 압력변동과 시간 스케일 분석

Fig. 6의 결과는 연료가 산화제쪽으로 분사되는 위치를 각각 285, 221.25, 157.5, 93.75, 30mm로 바꾸면서 Region 2에서의 압력신호를 측정해 본 것으로 모두 0.5초 동안의 음압 신호를 나타내었다. 연료분사거리가 덤프면에 가까워질수록 산과 산의 거리가 가까워져서 더 많은 수의 산들이 동일한 시간 동안에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 $L_{\text{fuel}}=30\text{mm}$ 인 위치에서는 이와 같은 경향성에서 다소 벗어남을 볼 수 있었고, 음압신호가 큰 구간과 작은 구간의 구분이 명확하지 않았고, 압력변동의 크기 또한 다른 경우의 절반 수준(2.5kPa)이었다. 이와 관련된 선행 연구자들 가운데 Lieuwen과 Seo는 연소장에서 중요한 시간 스케일을 통해 화염의 불안정성을 설명하고, 또한 연소조건변화에 따른 불안정성을 예측하고자 하였다[7],[8]. 본 실험에서의 Region 2에 대한 불안정성 기구를 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선, 연소실내에서 압력변동과 열발생율의 변동이 Rayleigh Criterion을 만족시켜서 압력변동이 증폭되어 맥동연소를 일으키기 시작하면, 이 압력변동은 음속으로 상하류로 전달된다. 상류쪽으로 전달된 압력파는 연료가 분사되는 위치에서 연료의 유량을 변화시키게 되며 이에 따라 당량비가 시간에 따라 달라지는 결과를 가져온다. 이 당량비의 변동은 하류쪽으로 다시 전달되어 연소장에

까지 영향을 미치며 이에 다시 화염에서 열발생의 변동을 가져오고, 이는 다시 또 연소장에서의 압력변동을 가져오는 것이다. 이와 같은 불안정성 기구에 참여한 지체시간(time lag)들이 압력변동의 증폭을 지연시키는 결과를 초래하게 된다. Fig. 5의 압력변동 신호에서 낮게 유지되는 기간이 이런 지체시간의 합이라고 볼 수 있다. $L_{fuel}=285mm$ 일 경우 각각의 시간스케일을 계산해보면 다음과 같다. 계산상의 지체시간(τ_{cal})에서 반응시간($\tau_{reaction}$)은 약 1msec 정도의 크기이므로 무시하고, 열발생시간(τ_{eq})과 전환시간($\tau_{turnover}$) 또한 무시하고 계산하여 보았다.

$$\tau_{cal} = \tau_{acoustic} + \tau_{convection} + [\tau_{reaction} + \tau_{eq} + \tau_{turnover}] \quad (4)$$

$$\tau_{acoustic} = \frac{L_{fuel} + L_{flame}}{c - U} \quad (5)$$

$$\tau_{convection} = \frac{L_{fuel} + L_{flame}}{U} \quad (6)$$

여기서, c : 음속 (식3 참조)

$$U = \frac{285}{285 + 80} U_1 + \frac{80}{285 + 80} U_2$$

U : 연료 분사위치에서부터 화염대까지의 평균속도

U_1 : 버너 내에서의 평균속도

U_2 : 덤프면 이후 연소실에서의 평균속도

L_{flame} 은 Fig. 1에서 화염대에서부터 덤프면까지의 거리로써 정의하고, Fig. 3의 직접사진을 통해 구하였다($L_{flame}=80mm$). 식(4)~(6)에 대해 구해보면, $U=8.45m/s$, $\tau_{acoustic}=1.1msec$, $\tau_{convection}=43.2msec$, $\tau_{cal}=44.3msec$ 로 나타나, 계산으로 구한 지체시간의 대부분은 연소실로 들어가기 전에 예혼합된 미연가스의 대류시간($\tau_{convection}$)에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 실험을 통해 얻은 진동시간은 대략 100 msec 정도인데 이 중 음압신호가 낮은 시간은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 약 50msec이다. 따라서, 지체시간 즉, 실험에서의 τ_{exp} 값과 계산상의 τ_{cal} 값은 각각 50msec와 44.3msec로 거의 비슷한 수준임을 알 수 있다. 여기서 실험값보다 계산한 값이 적게 나타난 이유는 수 msec 수준인 반응시간이나 열발생시간 및 연소실 내에서 연소에 의한 속도변화 등을 무시하였기 때문이고, 만일 이러한 시간들을 고려한다면 더 정확한 계산

이 가능할 것이다. 마찬가지로 방법으로 L_{fuel} 의 거리에 따라 지체시간을 Fig. 6의 실험결과에서 실험값을 구할 수 있고, 앞서 제시한 식(4)~(6)을 통해 계산값을 추정할 수 있다. 이러한 과정을 통해 연속적으로 순환되는 형태의 연소시스템 불안정성을 설명할 수 있다. Fig. 7에서 실험과 계산 결과를 비교하였다.

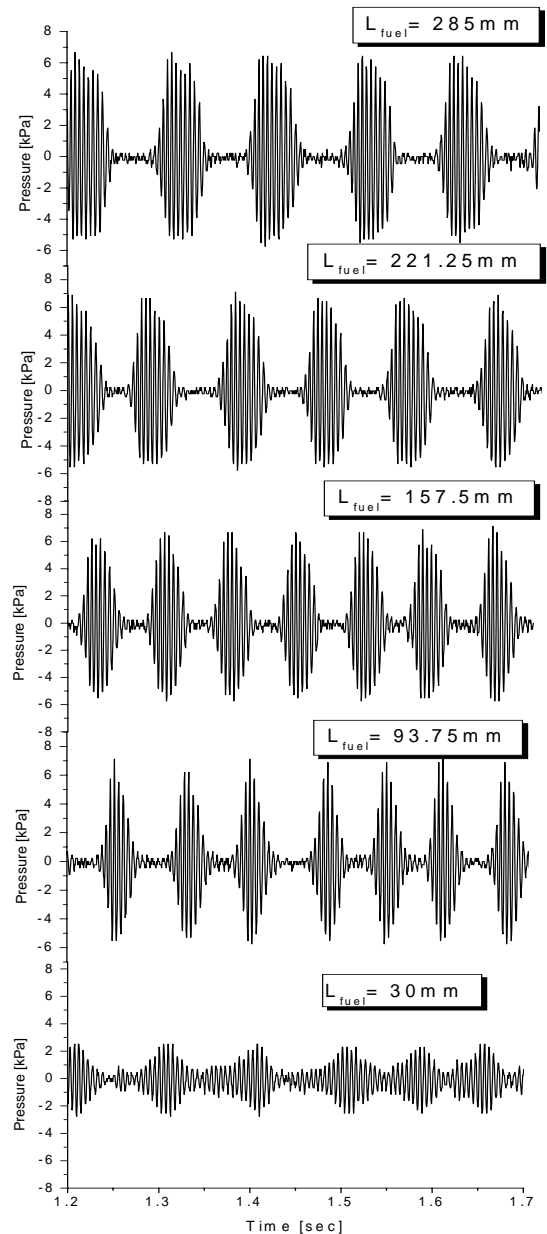


Fig. 6 Pressure fluctuation with fuel injection location

앞서 설명한 바와 같이 미연혼합기가 스윌러를 기준으로 볼 때 스윌러를 지나고 난 후의 L_{fuel} 이

30mm인 경우는 다른 경우와 달리 명확하게 산과 골이 구분되는 Region 2를 찾기가 어려웠고, 압력 신호를 통해 산의 개수를 세는 데도 모호함이 있기 때문에, 경향성에서 벗어난다고 할 수 있다. 또한 $L_{fuel}=30mm$ 일 때를 제외한 실험과 계산에 의한 결과값의 기울기는 거의 일치하므로 L_{fuel} 이라는 변수는 $\tau_{oscillation}$ 즉, 주기를 지배한다고 할 수 있다.

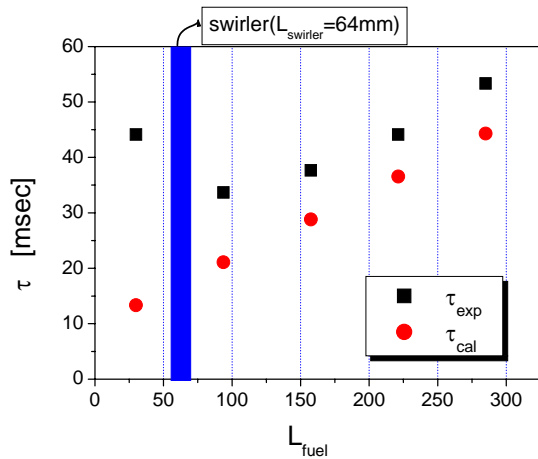


Fig. 7 Time lag with fuel injection location

4. 결론

본 연구는 실험실 스케일의 연소기를 제작하여 상용프로판/공기의 난류회박 예혼합연소를 통해 bulk mode frequency(~10Hz)의 연소진동을 구현하였고, 실험결과 예혼합기의 당량비와 연료분사위치에 따라 화염의 특성을 구분할 수 있었다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 화염의 위치와 형태에 따라 안정성이 많이 달라진다. 주로 화염대가 덤프면에 가까울수록 관내 압력과 연관이 되며 이에 불안정해지고, 화염대가 덤프면에서 멀어지면 안정해지는 경향을 보인다. 이는 관내 압력장과 관련이 되어 있으며 한쪽이 막히고 한쪽이 열린 시스템(closed open system)이기 때문에 막힌 덤프면 쪽에서 압력변동이 크고, 여기서 열발생이 일어날 경우 더 큰 불안정성을 나타내기 때문이다.

(2) 시간차원해석(time scale analysis)을 통해, 상류방향 압력변동의 전파와 이 압력변동으로 인한 연료분사위치(L_{fuel}) 및 화염대에서의 당량비변동

이 본 연구의 열음향 불안정성을 설명하는 중요한 기구임을 알 수 있다.

(3) 실험과 계산에서 구한 지체시간의 대부분은 연소실로 들어가기 전에 예혼합된 미연가스의 대류시간($\tau_{convection}$)에 의해 지배됨을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 BK21의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- (1) J. G. Lee and D. A. Santavicca, "Experimental Diagnostics for the Study of Combustion Instabilities in Lean Premixed Combustors", *Journal of Propulsion and Power* vol.19, No.5, september-october. 2003.
- (2) H. Büchner and H. Bockhorn, "Aerodynamic Suppression of Combustion-driven Pressure Oscillations in Technical Premixed Combustors", *Symposium on energy eng. in the 21st century*, pp.1573~1580, 2000.
- (3) T. Lieuwen, H. Torres, C. Johnson and, B. T. Zinn, "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors", *ASME*, vol. 123, January 2001.
- (4) Mathur, M. L. and Maccallum, N. R. L., "Swirling Air Jets Issuing from Vane Swirlers Part-1 ; Free Jets" *Journal inst. Fuel*, May,39,214, 1967.
- (5) Fernandes E. C. and Heitor M. V., *Unsteady flame and the Rayleigh criterion*, in *Unsteady Combustion*, Kluwer Academic Publishers, 1996
- (6) Putnam A. A. and Dennis W. R., *Organ-pipe oscillations in a flame-filled tube*, *Proc. Comb. Inst.*, vol. 4, 566, 1953.
- (7) T. Lieuwen and B. T. Zinn, "The Role of Equivalence Ratio Oscillations in Driving Combustion Instabilities in Low NOx Gas Turbines", *27th Symposium (international) on combustion*, pp.1809~1816, 1998.
- (8) S. H. Seo, "Combustion Instability Mechanism of Lean Premixed Gas Turbine Combustor", *KSME International Journal*, Vol 17, No 6, pp. 906~913, 2003.