

# 스월 난류연소기의 흡입공기온도, 스월세기에 따른 연소불안정 발생 메커니즘에 대한 연구

김종찬\* · 성홍계\*\* · 유혁\*\*\*

## A study on flame bifurcation due to inlet mixture temperature and swirl strength in a swirl turbulent combustor

Jong-chan Kim\* · Hong-Gye Sung\*\* · Hyeok Ryu\*\*\*

### ABSTRACT

Large Eddy Simulation has been conducted to investigate both stable and unstable flame structures in a swirl turbulent combustor. While a flame is stabilized with periodic dynamic structure at 600K, a slight increase in the flame temperature of inlet mixture, 660K, lead to bifurcation of flame at swirl angle 45 degrees. It was observed that both swirl number and mixture temperature affect a flame bifurcation and the former is a major parameter. One major mechanism contributing to the unstable flame is that the local flame speed overshadows the local flow velocity near the wall of the combustor.

### 초 록

스월 난류연소기에서의 혼합기 유입온도와 스월세기에 따른 연소불안정 발생 메커니즘 알아보기 위하여 Large Eddy Simulation을 수행하였다. 스월각 45도 경우 연료공기 혼합기의 온도를 600K에서 660K으로 증가시켰을 경우 화염분기(Bifurcation)현상이 관찰되었고, 스월 강도가 변할 경우 온도와 관계없이 화염분기가 일어나거나 그렇지 않음을 확인하였다. 벽면근처의 혼합가스 유동속도와 화염속도 간의 상관관계는 화염분기현상의 발생에 주요한 인자임을 확인하였다.

Key Words: Swirl Combustion, Turbulent Combustion, Stable Flame, Unstable Flame, Large Eddy Simulation

### 1. 서 론

가스터빈은 외란에 강건한 화염을 형성하기 위해 일반적으로 확산화염형태(Diffusion flame style)의 연소기를 사용한다. 확산연소기는 연소가 화학양론조건 (Stoichiometric condition)에 근접하여 일어나므로 안정된 화염을 유지하고, 연

료와 공기가 연소기 내에서 혼합되므로 화염의 역류(Flash back)를 예방할 수 있다. 그러나 환경 오염 문제로 인해 NOx의 규제가 엄격해짐에 따라 확산연소기 대신 희박 예혼합 연소기 (Lean PreMixed(LPM) combustor)로 대체되어 가고 있다. LPM 연소기는 반응영역 상부에서 연료와 공기를 화학양론 조건에 비하여 희박하게 혼합하여 연소온도를 낮춰 Thermal NOx의 발생을 많이 줄일 수 있다.

그러나 LPM 연소기의 화염은 매우 불안정하

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail: [hgsung@kau.ac.kr](mailto:hgsung@kau.ac.kr)

\*\* 항공우주연구원 항공사업단 엔진팀

여 연소 환경에 따라 민감하게 안정 및 불안정 화염이 발생된다. 연소실 내 유동에 비선형 특성이 존재하는 영역이 발생되면 화염 분기현상이 관찰됨을 볼 수 있다[1]. 이러한 화염 분기를 통해 불안정 화염이 발생하므로 분기현상의 이해는 연소의 능동, 수동제어에 중요한 역할을 한다. 몇몇 선행 연구자들에 의해 화염의 분기가 연구되어 왔으며, 연소기내로 유입되는 연소가스의 온도에 따라 안정, 불안정 화염이 발생하고, 압력진동이 변화하는 것으로 알려져 있다[1,2].

본 논문에서는 LPM 스윙 난류 연소기에서 연소가스의 유입온도와 스윙 강도에 따른 화염의 분기 현상을 수치적으로 모사하여 보았다.

## 2. 이론 수식 및 수치해법

본 연구에는 Favre average 된 질량, 운동량, 에너지, 화학종 지배방정식이 사용되었으며, 이는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\tau_{ij} - \tau_{ij}^{sgs})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial ((\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \tilde{u}_j \tau_{ij} + k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} - H_i^{sgs} + \sigma_i^{sgs} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_{k,j} \tilde{Y}_k - \Phi_{k,j}^{sgs} - \Theta_{k,j}^{sgs}) + \bar{w}_k \quad (4)$$

여기서 상첨자 'sgs'는 subgrid scale 난류 모델이 요구되는 subgrid closure term을 의미한다. 난류 sgs항은 압축성 Smagolinsky 모델을 이용하였다. 지배방정식과 경계조건은 유한 체적 기법을 이용하여 계산되었다. 공간에 대해서는 2차 중앙차분법을 이용하였고, 시간에 대해서는 4차 Runge-Kutta 법을 이용하였다. LES의 방대한 계산량을 위해 Multi-block MPI(Message Passing Interface) 병렬기법을 이용하였다.

## 3. 계산 조건

실험에서 NG (Natural Gas, 천연가스)를 이용하는 가스터빈 연소기는 하나의 스윙 인젝터, 연소실 그리고 노즐로 이루어져 있다(Fig.1). 스윙

각에 따른 화염분기를 알아보기 위해 본 연구에서 이용된 스윙각은 35도, 45도, 55도이며, 각각 0.54, 0.76, 1.09의 스윙수를 가진다. 입구전온도에 따른 영향은 실험값에 근거하여 600K, 660K를 안정과 불안정 모사조건으로 선택하였다[1].

계산 영역 내 연소기의 기본 치수는 실험장치와 동일하지만, 효율적인 계산을 위하여 종방향으로 1L Mode가 발생된다는 실험 결과를 고려하여 계산 영역을 연소실 길이의 반으로 선택하였다. 계산 영역은 17개의 블록으로 나누어 계산하였다.(Fig.2)

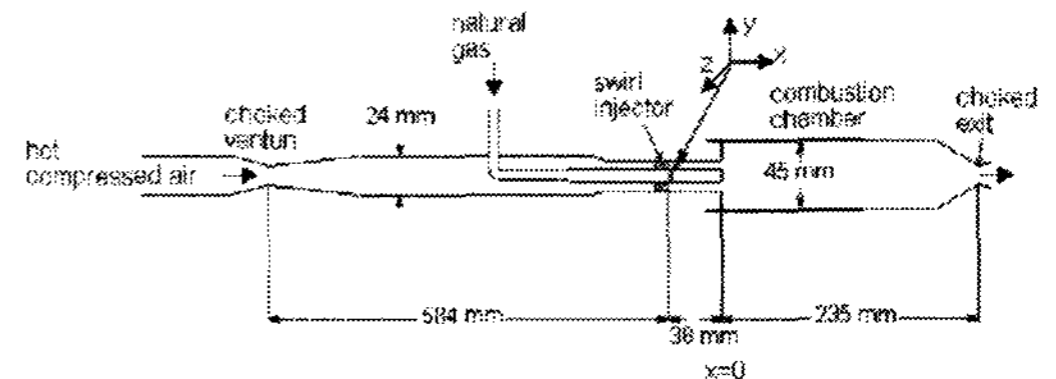


Fig. 1 Schematic of a model gas turbine combustor[1]

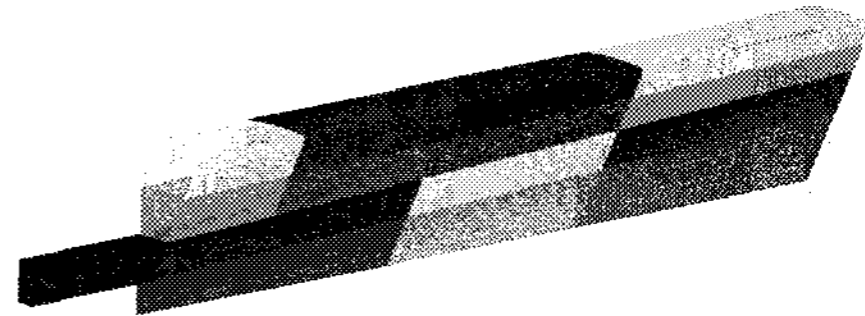


Fig. 2 Schematic of grid system

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 Stable Flame

안정된 화염은 입구에서 공기/연료 혼합기체의 온도가 600K이고 스윙각이 45도 일 때 얻어 낼 수 있다. Fig. 3은 안정 화염에서의 유선과 온도를 나타낸다. 중심 재순환영역은 스윙 유동에 의하여 반경 방향으로 급격히 팽창함에 따라 발생하는 것으로 강한 스윙 유동(S>0.5)에서 나타나는 전형적인 현상이다. 이러한 재순환 영역은 유입되는 혼합기를 고온의 생성가스와 혼합하게 하여 안정된 화염을 유지시키며, 화염길이를 짧게 하는 효과가 있다. 중심 재순환 영역과 모서리 재순환 영역에서 발생하는 크고 작은 와류는 유동 패턴을 동적으로 만들고 화염의 구조를 변화시킨다.

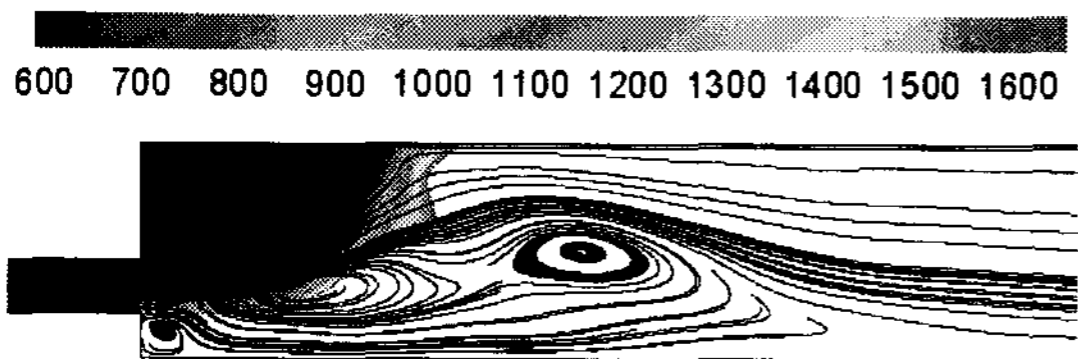


Fig. 3 Temperature contours and streamlines of stable flame

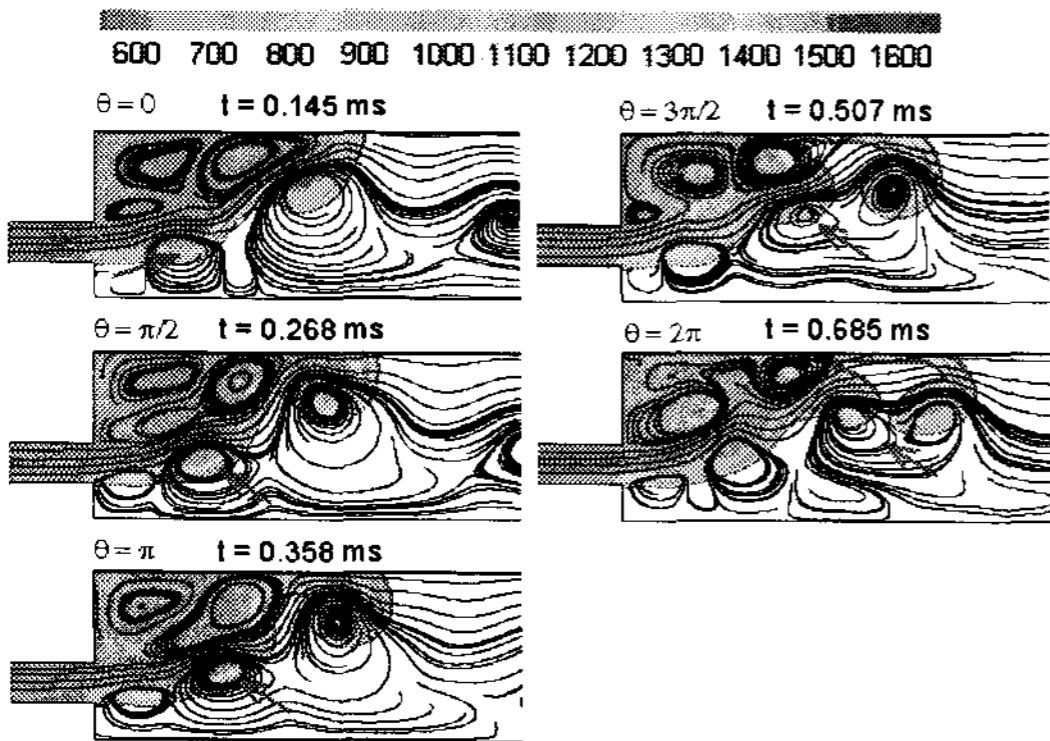
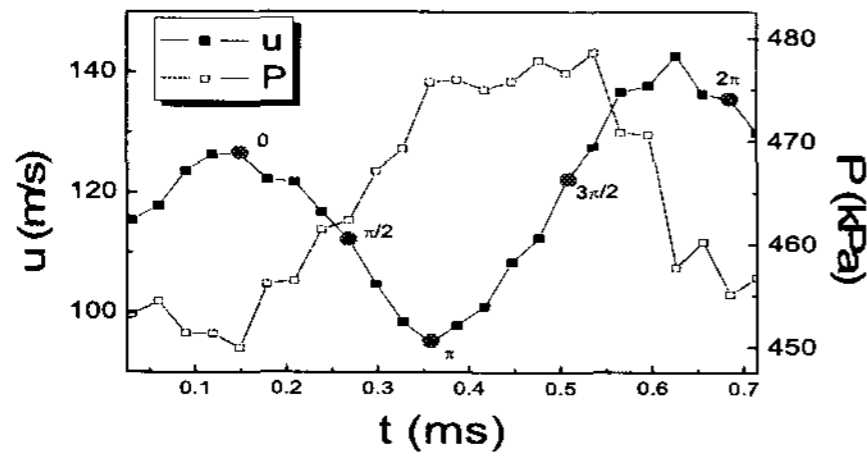


Fig. 4 Stable flame evolution over one cycle of oscillation: temperature contours and streamlines

화염구조의 변화는 흡입구로 유입되는 공기/연료 혼합물의 유속에 의한 Karman vortex 주기와 연소실내 음향파의 주요 모드와의 상호관계에 의하여 주기적으로 동적구조 (dynamic structure)를 나타낸다. Fig.4는 연소실 상부에서의 한주기 동안의 화염의 전개와 와류의 발생을 나타낸다. 유입구 출구부분의 압력과 속도는 서로 역수관계임을 볼 수 있다. 이 과정에서 새로운 와류가 발생하고 하류로 흘러가며 화염 면에 변형을 준다. 동시에 유속이 증가하여 화염을 하류로 밀어내고, 와류는 화염면으로부터 멀어지면서 스케일이 작아지고 화염은 다시 상부로 나아간다. 이러한 과정은 주기를 가지고 반복적으로 일어난다.

#### 4.2 흡입공기 온도의 영향

불안정한 화염은 45도의 스윙러를 가진 실험에서 600K에서 660K으로 입구온도가 증가할 때 발생한다[1]. 이러한 화염의 천이과정을 관찰하기 위해 앞절의 계산된 결과에 유입온도를 변화시켰다.

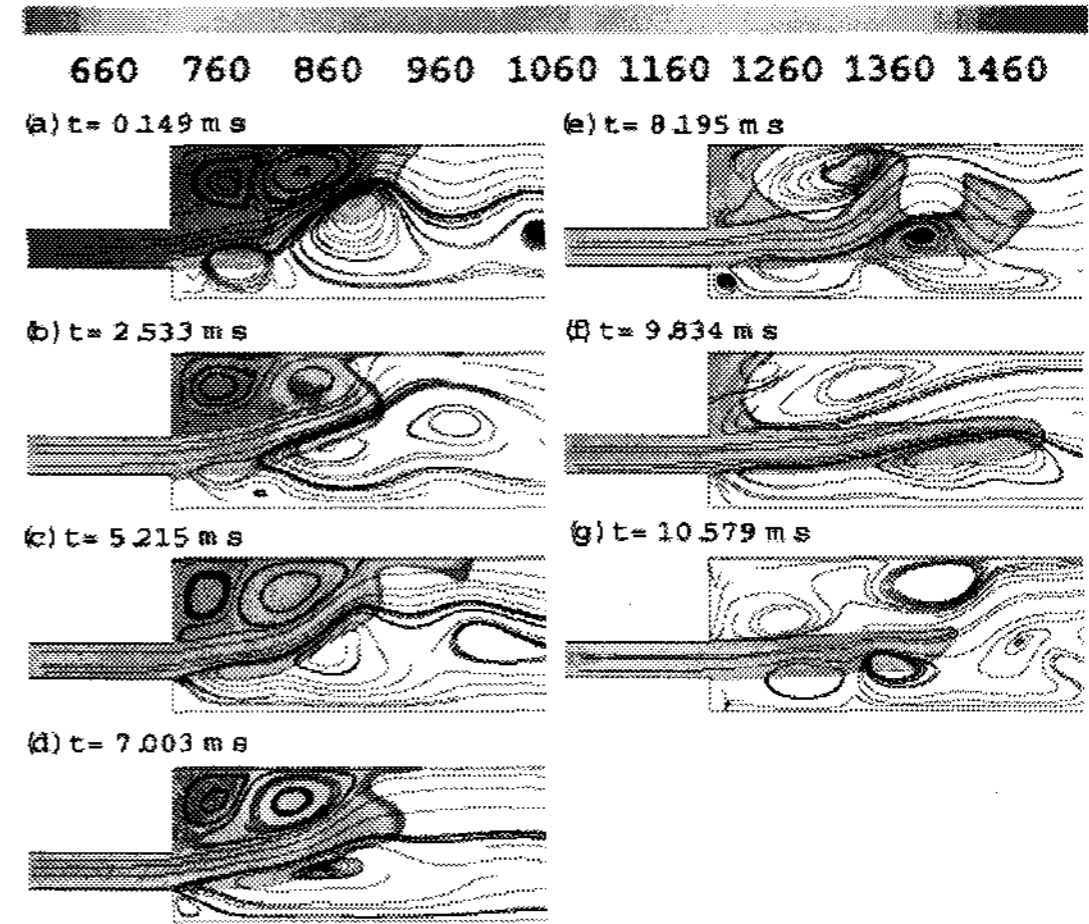


Fig. 5 Transition from stable to unstable flame with increased inlet temperature 600K to 660K

초기의 화염은 중앙 재순환영역과 모서리 재순환영역사이에 형성되어 안정되어 있다. Fig.5a-5b는 안정된 화염에 660K의 혼합기가 유입될 때 입구부분의 온도가 상승해 감을 볼 수 있다. 이때 고온의 혼합기에 의해 유동속도가 상승하여 화염면이 약간 앞으로 밀려나는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 고온의 혼합기가 화염에 접할 때 화염속도의 증가를 가져온다. 그러나 벽면에서의 유속은 유입부에서 증가된 유속을 따라가지 못하고 화염속도는 증가하여 벽면에서 화염의 역류가 발생한다. 이러한 화염의 역류는 Fig.5d-5g에 걸쳐 보이고 있다.

이러한 화염의 역류는 와류의 영향에 의해 연소기의 상단부로 전파되며, 화염의 구조는 앞절의 안정된 화염과는 달리 혼합기의 양쪽에서 이루어진다. 이는 화염의 길이를 짧게 하여 화염이 위치한 곳에서 공간체적 대비 열 방출량을 크게 증가시켜 연소진동을 증폭하고 연소실 압력을 증가시키게 됨을 확인할 수 있다.

### 4.3 스월각에 따른 영향

스월각에 따른 화염분기의 영향을 알아보기 위하여 45도의 안정된 화염결과를 이용하여 스월각에 따른 천이 과정을 관찰하였다.

Figure. 6은 스월각 45도에서 55도로의 천이과정을 보여준다. 온도는 600K으로 고정되어 있음에도 불구하고 화염분기 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 스월 각도가 커짐으로서 축방향 속도가 감소하고 접선방향의 속도가 증가함에 따라 중앙 재순환 영역과 모서리 재순환 영역의 와류강도가 증가하였기 때문이다. 또한 화염면에 존재하며 안정된 화염을 이루던 와류들이 하나로 통합되어 가면서 벽면근처의 축방향 유동속도를 감소시켜 역화를 일으킴으로서 화염 분기를 일으킨다.

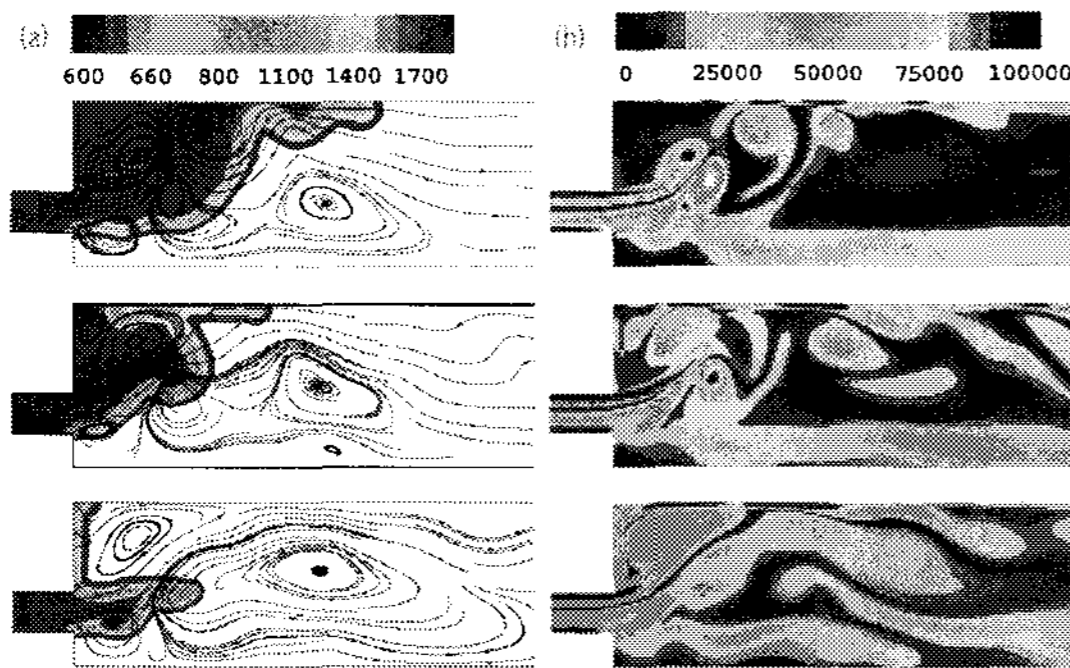


Fig. 6 Transition from 45 deg. to 55 deg.; (a) temperature contour, stream line (b) vorticity magnitude

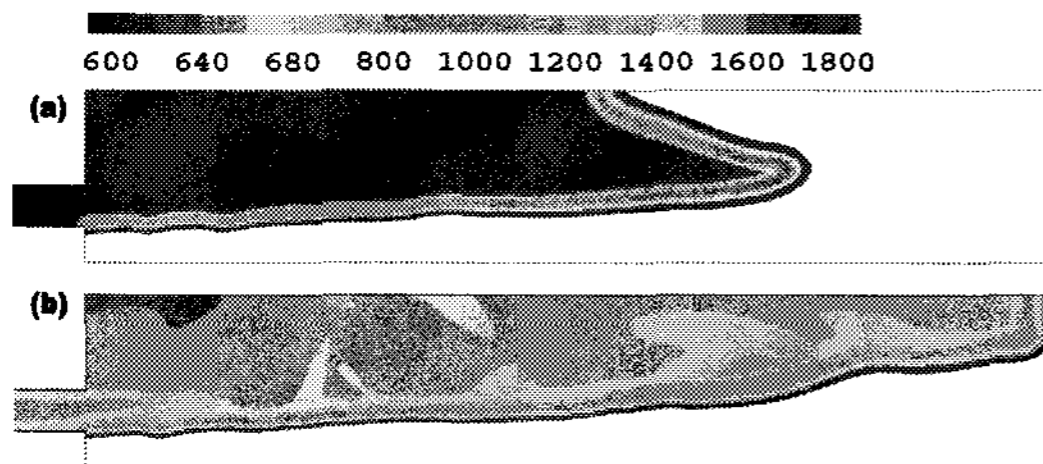


Fig. 7 Stable flame at swirl angle 35 degree  
(a) 600K (b) 660K

Figure. 7은 35도의 스월각을 가지는 경우로 축방향 속도가 증가하여 화염이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이 때 벽면에서 화염이 안쪽으로 타고 들어가는 것을 볼 수 있으나 더 이상 화염의 역류는 일어나지 않고 안정됨을 확인하

였다. 그러나 온도를 증가시킨 경우 화염의 분기는 일어나지 않고 화염의 길이가 더욱 증가하는 것을 확인하였다.

### 5. 결 론

스월 난류 희박 예혼합 연소기의 안정 및 불안정 화염 특성을 MPI 병렬 계산 기법을 이용한 LES 해석을 통하여 모사하였다.

유입되는 공기/연료의 온도가 600 K에서는 안정된 화염이 형성되지만, 주기성을 갖는 화염구조를 나타냈다. 안정된 화염형상에서 유입 온도를 660 K로 증가 시키면 안정된 화염은 불안정 화염으로 천이되는데, 이는 연소실 벽면 근처에서의 유동 속도보다 화염 전파 속도가 큼에 따라 화염이 역류되기 때문이다. 따라서 연소실로 유입되는 혼합기의 온도와 속도에 따라 안정 또는 불안정 화염이 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다.

온도의 변화에 관계없이 스월강도가 약한 경우 화염분기가 일어나지 않고 연소면적이 증가함을 확인하였고, 스월강도가 강한 경우 벽면근처 축방향 유동속도가 감소하며 역화가 발생하여 화염의 분기가 일어남을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구성 품개발사업(KARI주관) 위탁연구결과 중 일부임.

### 참 고 문 헌

1. Broda, J.C., Seo, S., Santoro, R.J., Shirhattikar, G., and Yang, V., "An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector," 27th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1998, pp. 1849-1856.
2. Huang, Y. and Yang, V., "Bifurcation of Flame Structure in a Lean-premixed Swirl-stabilized Combustor: Transition from Stable to Unstable Flame," Combustion and Flame, 2004, Vol 136, pp. 383-389.