# 와동에 의해 교란된 대향류 비예혼합화염의 반응물 전달기구

오창보† · 이창언*

# Reactants Transport Mechanism in Counterflow Nonpremixed Flame Perturbed by a Vortex

Chang Bo Oh and Chang Eon Lee

**Key Words :** Flame-vortex Interaction(화염-와동 상호작용), Counterflow Flame(대향류화염), Nonpremixed Flame(비예혼합화염), Vortex(와동)

**Abstract**

A two-dimensional direct numerical simulation is performed to investigate the flame structure of $CH_4/N_2$-Air counterflow nonpremixed flame interacting with a single vortex. The detailed transport properties and a modified 16-step augmented reduced mechanism based on Miller and Bowman's detailed chemistry are adopted in this calculation. The results show that an initially flat stagnation plane, where an axial velocity is zero, is deformed into a complex-shaped plane, and an initial stagnation point is moved far away from vortex head when the counterflow field is perturbed by the vortex. It is noted that the movement of stagnation point can alter the mechanism of reactants (fuel and oxidizer) fluxes into the flame surface, and then can alter the flame structure.

## 1. 서 론

난류를 다양한 크기와 강도를 갖는 와동들에 의해 특징지어지는 것으로 본다면, 이러한 와동과 화염과의 상호작용은 난류 연소과정을 이해하기 위한 하나의 모델로 간주될 수 있다. 이렇게 난류화염을 와동과 상호작용하는 화염으로 간단히 모델링하여 화염구조를 이해하고자 하는 접근 방법은 기존에 많이 수행되었던 1 차원 해석과는 달리 다차원 유동효과와 곡률효과 그리고 비정상효과 등을 동시에 고려할 수 있으며, 소염과 재점화와 관련된 일련의 현상을 고찰할 수 있는 장점을 가지고 있다.

화염-와동 상호작용에 대한 기존의 수치계산 연구를 보면, 대부분이 신장되지 않은 화염과 와동의 상호작용에 대한 고찰이 많다. 이는 계산에서 잘 정의된 신장된 화염을 얻는데 계산시간이 너무 오래 소요되기 때문이다. 그러나, 비신장 화염과 와동 상호작용에 대한 해석이 이미 유동효과를 받고 있는 화염과 와동이 복합적으로 작용하는 실제 난류화염의 국소구조를 이해하는 데 적합한지에 대해서는 검토해 볼 여지가 있으며, 좀 더 현실적인 신장된 화염과 와동의 상호작용에 대해서도 구체적으로 고찰해 볼 필요가 있다.

현재까지 진행된 신장된 화염과 와동의 상호작용에 대해 수치계산 연구들 중에는 $H_2/N_2$ 대향류 비예혼합화염과 와동과의 상호작용 해석을 수행한 것이 있다.(1~3) 이들 연구에서는 와동에 의한 화염의 곡률과 $H_2$ 의 선택확산(Preferential diffusion)에 기인한 환형(Annular) 소염 등의 다양한 현상을 고찰하였다. 또한, $CH_4$ 화염에 대한 예로는, Katta 등(4)이 제트화염에서 주기적으로 생성되는 와동에 의한 화염의 국소 소염현상을 관찰하여, 정상상태 화염의 소염과는 반응경로가 달라짐을 지적한 바 있다. 그러나, 지금까지 진행된 연구는 대부분 $H_2$ 화염에 대한 것이 주를 이루고 있으며, $CH_4$ 화염에 대한 수치계산 연구는 아직까지 많은 연구가

† 인하대학교 기계기술공동연구소
E-mail : turboh@hanmail.net
TEL : (032)867-4522 FAX : (032)868-1716
* 인하대학교 기계공학부

진행되지는 못한 상태이다.

한편, 기존 연구들에서 신장된 화염으로 주로 이용되었던 대향류 비예혼합화염의 확산-반응대 (Diffusive-reactive layer)에서는 화학반응과 확산과정이 균형을 이루는, 잘 알려진 전형적인 구조를 보이는 것으로 알려져 있다.(5) 그러나, 이러한 영역이 강한 와동에 의해 교란될 경우 연료와 산화제의 전달방식이나 확산-반응간의 균형이 어떠한 형태로 나타날 지에 대해서는 아직 검토된 바 없으므로 여기에 대해서 고찰해보는 것도 난류화염의 국소구조를 이해하는데 유익할 것으로 판단된다.

본 연구는 이러한 배경하에 진행되고 있는 단일 와동과 신장된 $CH_4$ 화염의 상호작용에 대한 일련의 수치계산 연구 중 하나이다. 우선, 여기서는 기존의 신장되지 않은 화염을 이용한 연구에서 고찰할 수 없었던, 와동에 의해 교란된 신장된 비예혼화염의 연료와 산화제의 전달기구에 대해서 정상상태 화염과의 비교를 통해 검토해 보고자 한다.

## 2. 수치계산 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서 다루는 유동장은 매우 낮은 유속범위에 해당되므로 지배방정식은 낮은 마하수 근사법(Low-Mach number approximation)(6)을 적용한 식 (1)~(5)로 표현된다. 여기서, 각각의 식은 순차적으로 연속, 운동량, 화학종, 에너지 및 상태방정식을 의미한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u}) = -\nabla p_1 + (\rho - \rho_0)\boldsymbol{g} + \nabla \cdot \mu \left[ (\nabla \boldsymbol{u}) + (\nabla \boldsymbol{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \boldsymbol{u})\boldsymbol{I} \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{im} \nabla Y_i) + W_i \dot{\omega}_i, \quad (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{3}$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^{N} W_i h_i^0 \dot{\omega}_i + \rho \sum_{i=1}^{N} \left( c_{pi} D_{im} \nabla Y_i \cdot \nabla T \right) \tag{4}$$

$$p_0 = \rho R_0 T \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{Y_i}{W_i} \right) \tag{5}$$

여기서, $p_0$ 와 $p_1$ 은 각각 열역학적 압력(Thermodynamic pressure)와 동적 압력(Dynamic pressure)을 의미한다.

본 계산에서는 Soret 과 Dufour 효과 및 복사 열전달은 무시하였으며, 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II(7) 및 TRANFIT Package (8)를 이용하여 계산하였다.

### 2.2 수치해법

방정식의 차분에는 엇갈림 격자계를 이용하였다. 대류항에 대해서 QUICK 법(9), 확산항에 대해서는 2 차 정확도의 중앙 차분법을 이용하였다. 열발생에 의한 급격한 밀도변동이 수반되는 반응 유동장에 대해 안정된 해를 얻기 위해서 Najm 등이 제시한, 전체적으로 2 차 정확도를 갖는 예측-교정자법(Predictor-Corrector method)(10)을 일부 수정하여 시간 적분을 수행하였다. 이 방법에 대해서 자세히 언급하면, 화학종과 에너지방정식은 예측자 단계에서는 2 차 정확도의 Adams-Bashforth 법을 이용하였으며, 교정자 단계에서는 2 차 정확도의 Quasi-Crank-Nicolson 법을 이용하였다. 또한, 운동량방정식은 예측자와 교정자 단계 모두에서 2 차 정확도의 Adams-Bashforth 법을 이용하였다. 속도와 압력의 교정은 밀도변동을 고려하도록 HSMAC 법(Highly Simplified Marker And Cell)(11)을 수정하여 사용하였다. 계산에 사용된 수치 알고리듬에 대한 좀 더 자세한 내용은 참고문헌 (12)에 자세한 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

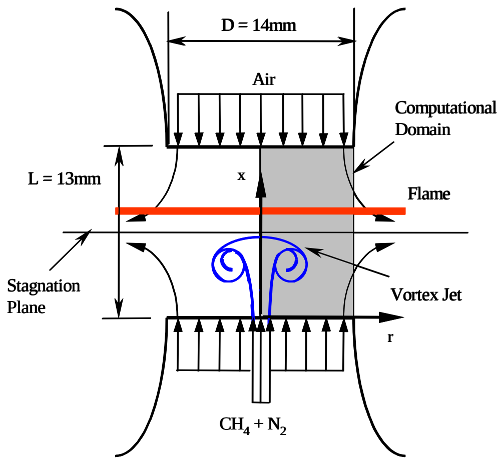


**Fig. 1** Schematic of computational geometry and numerical layout for the interaction of counterflow nonpremixed flame and a single vortex.

**Table 1** Fuel and air-side nozzle inlet boundary conditions for steady counterflow flame

| | Component (Mole Fraction) | Velocity (m/sec) | Temperature (K) |
|---|---|---|---|
| Fuel | $X_{CH_4}$ = 0.23<br>$X_{N_2}$ = 0.77 | 0.255 | 298 |
| Air | $X_{O_2}$ = 0.23<br>$X_{N_2}$ = 0.77 | 0.255 | 298 |

### 2.3 계산조건 및 경계조건

본 연구에서는 계산결과의 검증에 유리하도록 Sung 등의 실험조건[13]과 동일한 정상상태의 화염을 먼저 생성시킨 후, 연료 및 공기측에서 고속의 제트를 분출하여 와동을 생성시켰다.

계산영역은 Fig. 1 에서 보는 것처럼 노즐 사이의 간격($L$)을 13mm, 각 노즐의 직경($D$)을 14mm 로 하여 연료 및 공기노즐 사이에 $CH_4/N_2$-공기 대향류화염을 형성시켰다. 다루고 있는 화염이 축대칭이므로 계산영역은 $x \times r$=13mm$\times$7mm 로 하였다.

연료 및 공기 노즐출구의 경계조건은 Table 1 에서 보는 바와 같으며, 정상상태 화염을 계산할 경우에는 연료류와 공기류 모두 균일한 유속을 갖도록 하였다. 또한, 중심축에는 대칭조건을 부여하였으며, 반경방향의 출구에서는 노즐 바로 안쪽과 바깥에서의 물리량의 변화가 같도록 경계조건을 처리하였다.

격자계는 $N_x \times N_r$ =260$\times$70 개의 비균일 격자계를 이용하였다. 축방향으로는 0.05mm 의 균일한 격자를 이용하였으며, 반경방향으로는 소염이 발생하는 중심축 근처에서 0.05mm 의 격자를 가지며, 반경방향으로 점차 크기가 확장되도록 하였다.

본 연구에서 다루는 화염-와동 상호작용에 대한 해석에서는 와동에 의한 화염의 소염이 관찰되므로 소염점을 적절히 예측할 수 있는 Miller 와 Bowman 의 상세반응기구(MB-Full)를 바탕으로 축소된 ARM(Augmented reduced mechanism)[14]을 이용하였다. MB-ARM 은 20 개의 화학종을 포함한 16 단계의 반응식으로 이루어져 있으며, 비정상 교란 조건하에서도 상세반응기구의 결과를 매우 잘 추종하여, 소염과 비정상 효과가 동반되는 화염-와동 상호작용의 해석에 적용하는 것이 매우 적합하다는 것을 확인하였다. 이 반응기구에 대한 자세한 내용은 참고문헌 (15)을 참조하기 바란다.

시간 전진간격은 계산에 사용된 ARM 이 상세반응기구와 마찬가지로 경직(Stiff)되어 있으므로 착화시에는 $\Delta t$ =0.1 μsec 로 하였으며, 이후에는

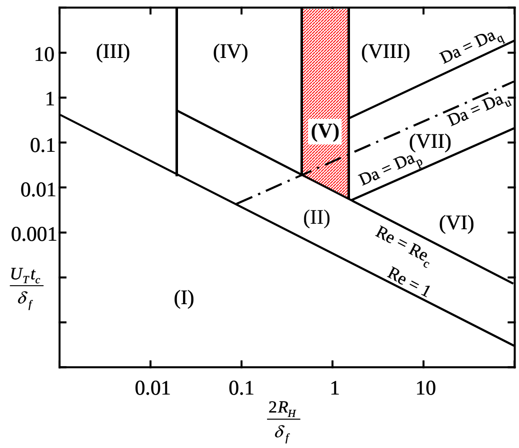


**Fig. 2** Spectral diagram for the nonpremixed flame-vortex interaction (log-log scale)[16].

$\Delta t$ =0.2 μsec 일정하게 하였다. 정상상태 화염을 얻기 위한 계산시간은 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터의 SMP Cluster 의 단일 CPU 에서 600 CPU 시간이 소요되었으며, 와동 생성시에는 각 방향 조건에 대해 60 CPU 시간이 소요되었다.

### 2.4 와동 생성조건

본 연구에서 목적으로 하는 화염-와동 상호작용의 결과를 통해 난류화염과 관련된 기본 연소현상을 이해하고자 하는 접근 방법은 몇 가지 중요한 선행작업을 필요로 한다. 그러한 작업 중의 한가지는 난류연소 현상을 특징적인 영역(Regime)으로 적절히 구분하고, 화염-와동 상호작용의 과정을 이 난류연소 영역과 연관시키는 작업이다. 만약, 이와 같은 연결 고리가 없을 경우, 화염-와동 상호작용에 대한 해석은 단순히 특정 현상에 대한 해석에만 머무를 수 있으며, 난류화염의 특징을 고찰하는데 직접적인 연관성을 찾기 어렵게 될 가능성이 있게 된다.

이와 같은 연결작업은 일반적으로 난류화염의 특징적인 영역을 대표적인 매개변수들을 이용하여 구분한 스펙트럼 선도(Spectral diagram)상에서의 비교를 통해 이루어진다. 본 연구에서는 Fig. 2 에 도시되어 있는 Thévenin 등의 스펙트럼 선도[16]를 이용하고자 한다. 이 선도에서 각 연소영역 구분기준과 특징을 살펴보기 위해 우선, 와동의 외부반경, 초기의 화염두께, 와동의 전파속도 및 화염의 특성 화학반응시간을 각각 $R_H$, $\delta_f$, $U_T$ 그리고 $t_c$ 라고 정의한다. 이러한 변수들을 이용하면 비예혼합화염과 와동의 특성 길이비는 $2R_H/\delta_f$ 그리고, 속도비는 $U_T t_c/\delta_f$ 가 된다. 이를 이용하여 연소특성을 구분하면 Fig. 2 의 영역 (I) ~ (VIII)로 구

별되며, 각 영역의 경계 및 연소특성은 참고문헌 (16)에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략 한다.

본 연구에서는 와동 생성을 위해 연료측과 공기측 노즐 내부에 있는 2mm 내경의 와동제트 노즐에서 시간 및 공간분포에서 최대 5m/s 의 Top-hat 형태 유속을 갖는 제트를 분출시켜 와동을 형성시켰다. 와동 생성전의 정상상태의 화염의 두께는 $\delta_f \simeq 1/|\nabla Z|_{st} \simeq 5.54$ mm 이며, 연료측 와동의 외부 반경 $R_H$ 는 1.9~2.1mm, 공기측 와동은 $R_H$ =2.0~2.3mm 에 해당되므로 와동과 화염두께를 기준으로 Fig. 2 의 비예혼합화염에 대한 Spectral diagram 에 맞추어 본다면, 본 연구의 연료 및 공기측 와동의 경우 $2R_H/\delta_f$ 의 값은 각각 0.69~0.77 과 0.71~0.82 가 된다. 따라서 두 경우 모두 0.5< $2R_H/\delta_f$ <2.0 의 기준으로 분류되는 영역 (V)에 해당된다. 이 영역에서는 와동의 전파속도($U_T$)와 특성 화학반응시간($t_c$)에 따라 소염과 비정상효과가 나타날 수 있다. 또한, 이 구간에서는 와동의 크기가 화염두께와 비슷한 오더를 가지므로 여전히 곡률효과가 중요시 된다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 3 에는 대향류화염의 유동장과 화염의 기하학적 형상과의 관계를 검토하기 위해서 유선과 화염온도 분포를 동시에 도시하였다. 그림에서 굵은 흰색 점선은 화염면, 굵은 가로 실선은 축방향 속도가 0 인 정체면을 의미하며, 검정색 원형 부호는 정체점을 의미한다. 그림에 표시된 유선은 유동의 흐름방향을 한 눈에 잘 보여주고 있다. 이 유선을 이용하면 전체적으로 화염에 공급되는 연료와 산화제의 전달기구(Transport mechanism)을 쉽게 이해할 수 있다.

또한, 중심축 상에서 질량유속(Mass flux)에 기여하는 축방향 대류와 확산의 영향을 도시한 Fig. 4 를 이용하면 대류와 확산이 화염면으로의 연료와 산화제 공급에 어떠한 역할을 하는지 쉽게 알 수 있다. 축방향 대류 및 확산에 의한 질량유속은 각각 식 (6)과 식 (7)에 의해서 정의된다. 대류에 의한 질량유속은 축방향 유속($u$)을 이용하여 정의하였기 때문에 중심축의 (+) 축방향으로 질량전달이 있을 경우 (+)값을 가진다. 그리고, 확산에 의한 질량전달은 (+) 축방향으로 농도의 구배가 감소할 경우 (+)값을 가지므로 대류에 의한 경우와 마찬가지로 (+) 축방향으로 질량전달이 진행될 때 (+)값을 갖게 된다. 참고로, 반경방향 대류 및 확산은 중심축 상의 화학종 전달에는 아무런 기여를 하지 않기 때문에 Fig. 4 에는 도시하지 않았다.

$$C_x = \rho u Y_i \quad (i = CH_4, O_2) \tag{6}$$

$$D_x = -\rho D_{im} \frac{dY_i}{dx} \quad (i = CH_4, O_2) \tag{7}$$

Fig. 3 의 2 차원 그림과 Fig. 4 의 중심축 상의 각 전달기구(대류 및 확산)의 역할을 비교해보면, 이론혼합비의 위치로 정의되는 화염면(x=6.67mm)이 정체면(x=5.87mm)을 기준으로 공기측에 위치하기 때문에 연료는 화염면에 확산에 의해서만 공급되

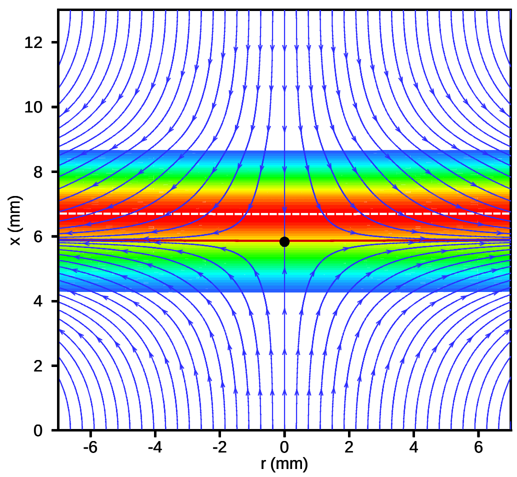


**Fig. 3** Parameters related with flow field; velocity vectors, stream lines with temperature distribution for steady flame (no vortex, symbol : stagnation point).

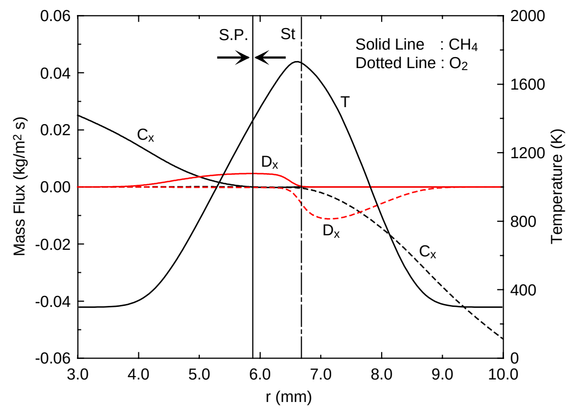


**Fig. 4** Mass flux budget and temperature profile at the centerline for steady flame (vertical solid line : stagnation point, vertical dashed-dotted line : stoichiometric location, bold arrow : flow direction).

며, 산화제는 대류 및 확산에 의해서 공급된다. 그러나, 화염 온도가 상승하기 시작하는 화염대 즉, 확산대에서는 축방향 유속과 산화제의 농도가 낮기 때문에 대류에 의해 화염면에 공급되는 양은 많지 않다. 따라서, 정상상태 화염에서는 잘 알려진 바와 같이 연료 및 산화제의 확산에 의한 화염면으로의 유입이 화염을 유지하는 기본 기구 (Mechanism)임을 알 수 있다. 그 외의 특징으로는 연료와 공기노즐에서의 분출속도가 같고 각 유체에서의 $CH_4$ 및 $O_2$ 의 질량분율도 같지만, 산화제인 $O_2$ 의 분자량이 크기 때문에 산화제의 질량유속이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 연료는 확산에 의해서 화염면을 통과하는 양이 없는데 반해서 산화제는 확산에 의해서 화염면을 통과하는 양이 있음을 보여주고 있어서 화염면을 통과하여 존재하는 $O_2$ 는 확산과정에 의한 것임을 알 수 있다.

Fig. 5~6 에는 연료측 와동이 전개되는 2.8ms 의 순간에 Fig. 3~4 의 결과와 동일한 물리량들은 도시한 것이다. Fig. 6 에서 연료인 $CH_4$ 의 축방향 대류에 의한 질량유속은 x=5.35mm 에서 최대 0.75kg/m$^2$s 가 되지만 화염면 근처에서 다른 전달과정과 비교하기 위해 편의상 0.08kg/m$^2$s 까지만 도시하였다. 이 결과들은 앞에서 확인한 정상상태의 화염 및 유동장과는 많이 다른 형상을 보여주고 있다. 우선, 축방향 속도가 0 인 정체면의 형상은 와동에 의해 교란을 받아 평면 형상이 아님을 알 수 있다. 특이한 점으로는 와동에 의해 중심축상의 정체점이 화염면을 기준으로 훨씬 공기측으

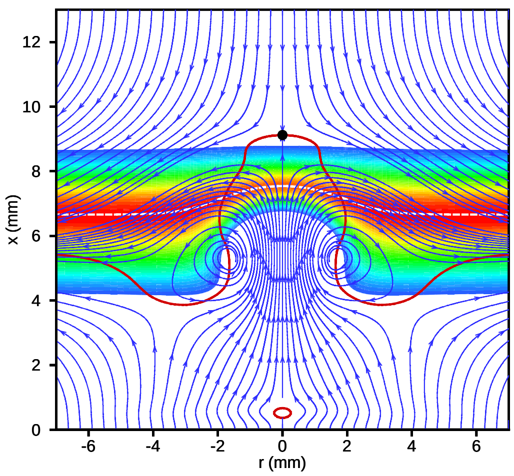


**Fig. 5** Parameters related with flow field; velocity vectors, stream lines with temperature distribution for the case of fuel-side vortex at 2.8ms (vjet =5m/s, symbol : stagnation point).

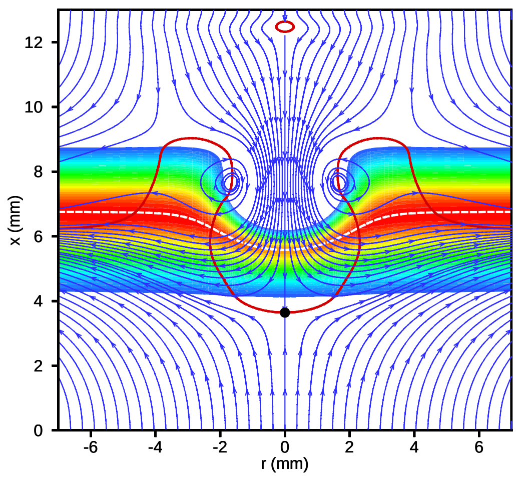


**Fig. 7** Parameters related with flow field; velocity vectors, stream lines with temperature distribution for the case of air-side vortex at 2.8ms (vjet =5m/s, symbol : stagnation point).

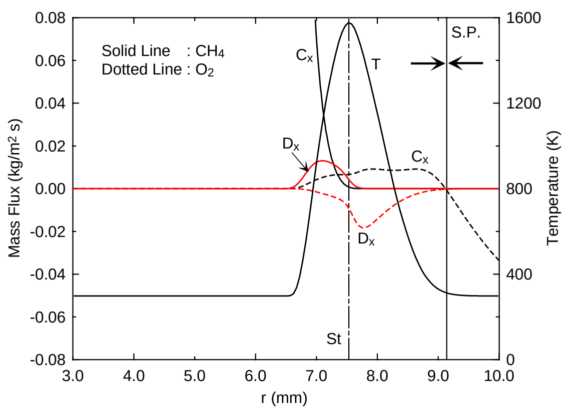


**Fig. 6** Mass flux budget and temperature profile at the centerline for the case of fuel-side vortex at 2.8ms (vertical solid line : stagnation point, vertical dashed -dotted line : stoichiometric location, bold arrow : flow direction).

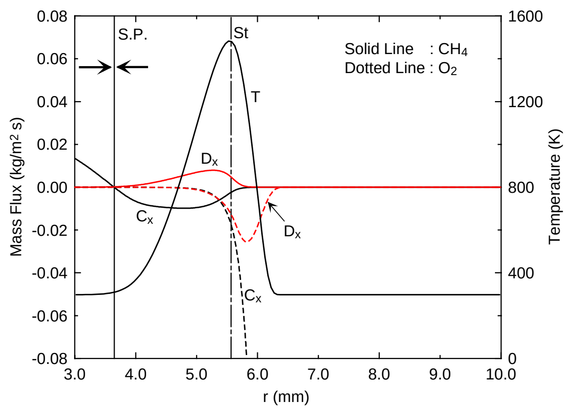


**Fig. 8** Mass flux budget and temperature profile at the centerline for the case of air-side vortex at 2.8ms (vertical solid line : stagnation point, vertical dashed -dotted line : stoichiometric location, bold arrow : flow direction).

로 이동한 것을 알 수 있으며, 그 이동 정도는 와동이 화염에 가까이 접근할수록 더 크게 됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 연료측 와동이 전개될 때 중심축 근처에서는 정상상태의 화염과는 달리 연료가 대류에 의해서도 화염면 근처까지 공급될 수 있음을 알 수 있다. 반면, 산화제는 확산에 의해서는 공기노즐 측에서 화염면으로 공급되며, 대류에 의해서는 화염면을 투과했던 산화제가 확산방향과는 반대의 (+) 축방향으로 전달되어 화염면을 통과하고 있음을 알 수 있다. 산화제가 확산의 반대방향으로 전달되는 것은 연료측 와동에 의해 (+) 방향으로 큰 유속을 갖기 때문이다. 이러한 현상은 Fig. 5 의 유선 및 정체점 위치로부터 잘 관찰되고 있다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 공기측 와동이 전개되는 2.8ms 의 순간에 대한 결과들이다. 여기서도 편의상 $O_2$ 의 축방향 대류에 의한 질량유속은 0.008 $kg/m^2s$ 까지의 값에 한정하여 도시하였다. 이 경우에도 연료측 와동에 의한 경우와 마찬가지로 정체면이 와동에 의해 교란되어 평면이 아닌 복잡한 형태를 갖는다. 그러나, 공기측 와동은 연료측 와동과는 반대로 정체점을 훨씬 연료측으로 이동시키는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 연료가 연료노즐에서 화염면으로의 유입되는 것은 확산만이 기여하는 것을 알 수 있다. 연료측 와동의 경우처럼, 공기측 와동의 경우에도 와동 진행에 의해 와동의 머리 부분에 (-) 축방향의 유속이 증가되므로 대류에 의해서는 이미 유입된 연료성분이 확산과는 반대방향으로 전달됨을 알 수 있다. 반면, 산화제는 대류 및 확산에 의해 화염면으로 공급된다. 그리고, 동일한 시간의 연료측 와동에 의한 경우보다 대류에 의한 화염면으로의 질량 전달이 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한, 화염온도를 볼 때 연료측 와동에 의한 경우보다 소염이 더 많이 진행된 것으로 보이며, 이로 인해 연료 성분도 다량 화염면을 투과하는 것이 관찰된다.

Fig. 3~8 의 결과들은 정상상태의 유동장 구조가 와동에 의해 교란될 경우, 와동이 연료류나 공기류의 어느 쪽에 위치하는지에 따라 화염면으로의 연료와 산화제의 전달 방식에 차이를 보일 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 이렇게 화염면으로의 연료와 산화제의 전달방식이 달라지는 현상은 혼합연료 등에서 선택확산의 영향이 지배적일 경우, 다소 그 영향을 증가 또는 감소시키는데 역할을 할 수도 있을 것으로 추정된다. 또한, 그 효과는 연료와 산화제의 혼합기가 화염면에 공급되는 예혼합화염에서 더욱 두드러질 가능성도 있다. 따라서, 향후 가벼운 화학종을 포함하는 연료로 이루어진 화염을 대상으로 부가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

$CH_4$ 대향류 비예혼합화염과 단일 와동과의 상호작용에 대해 직접수치모사를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

와동에 의해 대향류 유동장이 교란을 받게 되면 정상상태 대향류 유동장 구조와는 많은 차이를 보이게 된다. 연료측 와동이 진행하면, 화염면을 기준으로 연료측에 위치하던 정체점이 공기측으로 이동하며, 정체면은 더 이상 평평한 형태가 아닌 복잡한 형상을 갖게 된다. 또한, 공기측 와동이 진행하면 화염면을 기준으로 연료측에 위치하던 정체점이 연료측으로 더욱 멀리 이동하며, 공기측 와동과 마찬가지로 정체면은 복잡한 형상으로 변형된다. 정상상태 화염에서는 연료는 확산에 의해서만 화염면으로 공급되고 공기는 대류 및 확산에 의해서 화염면으로 공급되지만, 연료측 와동이 화염면에 접근하면 대류 및 확산에 의해 연료가 화염면으로 공급되며 산화제는 확산에 의해 화염면에 공급된다. 그러나, 공기류의 대류에 의해서는 화염면을 투과했던 산화제가 화염면을 통해 다시 공기측 방향으로 전달됨을 알 수 있었다.

반면에 공기측 와동의 경우에는 연료측 와동과는 반대로 산화제는 대류 및 확산에 의한 화염면으로 공급되고 연료는 확산에 의해 화염면으로 공급되지만 화염면을 투과한 연료가 다시 반대 방향으로 전달된다. 따라서, 와동과 간섭하는 화염에서는 정상상태 화염과는 다른 연료와 산화제의 전달방식을 갖고 있으며, 이로 인해 화학반응 경로도 달라질 수 있을 것으로 추정된다.

## 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(Combustion Engineering Research Center)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Takagi, T., Yoshikawa, Y., Yoshida, K., Komiyama, M. and Kinoshita, S., 1996, “Studies on Strained Non-premixed Flames Affected by Flame Curvature and

Preferential Diffusion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 1103-1110.
(2) Lee, J. C., Frouzakis, C. E. and Boulouchos, K., 2000, "Numerical Study of Opposed-jet H2/Air Diffusion Flame-Vortex Interactions", *Combustion Science and Technology*, Vol. 158, pp. 365.
(3) Katta, V. R., Carter, C. D., Fiechtner, G. J., Roquemore, W. M., Gord, J. R. and Rolon, J. C., 1998 b, "Interaction of a Vortex with a Flat Flame Formed Between Opposing Jets of Hydrogen and Air", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 587-594.
(4) Katta, V. R., Hsu, K. Y. and Roquemore, W. M., 1998 a, "Local Extinction in an Unsteady Methane-Air Jet Diffusion Flame", *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 1121-1129.
(5) Linan, A., 1993, "Fundamental Aspects of Combustion", Oxford University Press.
(6) McMurtry, P. A., Jou, W. H., Riley, J. J. and Metcalfe, R. W., 1986, "Direct Numerical Simulations of a Reacting Mixing Layer with Chemical Heat Release", *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 962-970.
(7) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-Ⅱ : A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *Sandia Report*, SAND89-8009B.
(8) Kee, R. J., Dixon-Lewis,G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1986, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *Sandia Report*, SAND 86-8246.
(9) Leonard, B. P., 1979, "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, pp. 59-98.
(10) Najm, H. N., Wyckoff, P. S. and Knio, O. M., 1998, "A Semi-Implicit Numerical Scheme for Reacting Flow. I. Stiff Chemistry", *Journal of Computational Physics*, Vol. 143, pp. 381-402.
(11) Hirt, C. W. and Cook, J. L., 1972, "Calculating Three-Dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain", *Journal of Computational Physics*, Vol. 10, pp. 324-340.
(12) Oh, C. B. and Lee, C. E., 2001, "Numerical Simulation of Unsteady $CH_4$/Air Jet Diffusion Flame," *Transactions of KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1087-1096.
(13) Sung, C. J., Liu, J. B. and Law, C. K., 1995, "Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations," *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 481-492.
(14) Homma, R. and Chen, J.-Y., 2001, "Reduced Mechanism for Prediction of $NO_2$ Formation and Ignition Delay in Methane-Air Combustion," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 123, pp. 303-307.
(15) Oh, C. B., Park, J. and Lee, C. E., 2002, "An Investigation of Unsteady Response of Augmented Reduced Mechanism for Numerical Simulation of $CH_4$-Air Nonpremixed Flames," *Transactions of KSME B*, Vol. 27, No. 2, pp. 243-250.
(16) Thévenin, D., Renard, P. H., Fiechtner, G. J., Gord, J. R. and Rolon, J. C., 2000, "Regimes of Non-premixed Flame-Vortex Interactions", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 2101-2108.