

얇은 층류 화염편 영역에서 화염과 와동의 상호 작용

강지훈* · 권세진**

Simulation of Flame-Vortex Interaction in Thin Laminar Flamelet Regime

Ji-hoon Kang, Se-jin Kwon

Key Words : G-equation, Flame-vortex interaction, Volume expansion

Abstract

A method is developed to include the effect of volume expansion in the description of the flame dynamics using G-equation. Line volume-source is used to represent the effect of the exothermic process of combustion with source strength assigned by the density difference between the burned and the unburned region. The present model provides good agreement with the experimental results by using realistic volume expansion ratio which was not reached in the previous researches. Including volume expansion, the flow predicts the same behavior of measured velocity field qualitatively. The flame propagation in varying flow field due to volume expansion provides a promising way to represent the wrinkled turbulent premixed flames in a numerically efficient manner.

1. 서론

난류 화염은 층류 화염보다 연소 속도가 훨씬 커서 연소실 설계에 중요한 요소이지만 유동과 화염의 복잡한 상호작용으로 인하여 해석하는데 많은 어려움이 있다. 난류 뿐만 아니라 다른 다

양한 유동장에서 형성되는 화염의 구조와 형태를 알기 위해서는 질량, 운동량, 에너지 및 화학종의 보존을 지배하는 비정상 3차원 연립 편미분 방정식을 풀어야 하나 대류항과 화학 반응항의 높은 비선형성 때문에 해를 구하기 어렵다[1].

본 연구는 연소 현상이 난류 예혼합 화염의 영역 중에서 층류 화염편 영역(laminar flamelet regime)에 속할 때 난류 유동과 화염의 상호 작용을 다루고자

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학과

한다. 대부분의 SI(Spark-Ignition) 엔진 내부의 연소 현상이 층류 화염면 영역에 속하는데 이 영역에서는 난류 유동에 의한 혼합보다 화학 반응이 훨씬 빠르게 일어나서 이 때의 화염면은 반응물과 생성물을 구분하며 에디(eddy)에 의해 굴곡되어지는 얇은 면으로 볼 수 있다. 이러한 영역에서 화염면의 변화를 묘사하는 G-equation 이 Kerstein et al.[2]에 의해 제안되었으며, Aldredge[3]는 G-equation 을 사용하여 주기적 전단류(periodic shear flow)에서 스트레치 효과를 고려한 정상 상태 예혼합 화염의 특성을 연구하였고, Zhu and Ronney[4]는 Taylor Couette 유동에서의 화염 전파를 묘사하여 무차원 난류 강도와 평균 화염 전파 속도 사이의 관계에 대해 액체 화염의 전파 실험과 일치하는 결과를 구했다.

그러나 이들 연구에서는 유동이 화염에 미치는 영향만을 고려하고 화염대의 거동이 유동장에 미치는 영향은 무시하였다. 실제의 연소 현상에서는 유동이 화염의 성질에 영향을 줄 뿐만 아니라 화염에서의 화학 반응으로 인한 열팽창을 통해 유동 또한 화염의 영향을 받는다. Choi[5]는 복소 함수를 이용하여 Ghoniem et al.[6]이 제안한 체적 생성과 Pindra et al.[7]이 제안한 와도 생성을 도입함으로써 파이렉스관 내부의 정상 상태 예혼합 화염과 시간에 따라 변하는 유동의 상호 작용을 묘사하였다. Chung[9,10,11]은 화염을 추적하여 선체적 생성항(line volume source)을 배치하는 방법을 사용하여 난류 유동의 기본 단위인 에디를 묘사한 와동의 특성(이동 속도, 강도 등)에 따른 화염의 변화를 묘사하였지만 코드상의 문제로 인해 반응물과 생성물의 밀도비가 실험값인

5 이상에 못미치는 2.5에 그쳤다.

본 연구의 목적은 화염에 의한 유동장의 속도 성분 재편에 중요한 값인 생성물 대 반응물의 밀도비를 Mueller & Driscoll[8]의 프로판/공기 혼합물 실험에서와 같은 5.7까지 끌어올려 계산을 수행하고 실험 결과와 비교하는 것이다.

2. 지배 방정식 및 계산 방법

2.1 G-equation

층류 화염면 가정하에서 화염면은 그 값이 0인 스칼라 함수 $G(\vec{r}_f, t)$ 에 의해 결정되며, 경계면의 모양과 운동을 기술하는 G-equation에 의해 화염 전파 현상을 묘사할 수 있다[2].

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla G = S_u |\nabla G|$$

\vec{v} : 화염면에서의 유동 속도

S_u : 국부 화염의 전파 속도

좌변의 두 번째 항은 전체 속도장에 의한 화염의 이동(convection)을, 우변항은 화염의 자가 전파(self-propagation)를 나타낸다.

2.2 열팽창 효과

기존의 많은 연구에서 무시되었던 열팽창 효과를 체적 생성항을 도입함으로써 고려하였다.

하나의 화염면(flame segment)에 의해 공간상의 한 점에 유도되는 속도 성분은 속도 포텐셜을 미분함으로써 구할 수 있다.

$$v_p = \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_p = \frac{S_u (v-1)}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \right)$$

$$v_n = \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_p = \frac{S_u(v-1)}{2\pi} (\theta_2 - \theta_1)$$

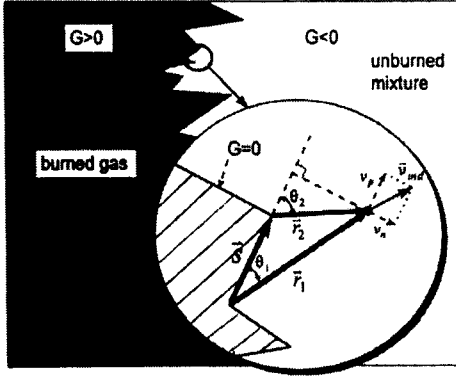


Figure 2.1 Schematics of thin surface where line volume source is assigned to obtain induced velocity.

2.3 수치 해석 방법

층류 화염면 영역에서의 예혼합 화염의 전파를 기술하기 위한 G-equation은 다음과 같다.

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla G = S_u |\nabla G|$$

지배 방정식의 차분화는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였으며, 공간에 대해서 2차, 시간에 대해서 1차의 정확도를 갖는 Zhu & Ronney[4]의 외재적 해법을 참고하였다.

지배 방정식의 우변을 0으로 둔 선형 수송 방정식(linear advection equation)

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla G = 0$$

을 먼저 계산한 후 다음의 식을 이용하여 우변의 비선형 전파항(self-propagation)을 첨가한다.

$$\frac{\partial G}{\partial t} = S_u (G_x^2 + G_y^2)^{1/2}$$

이 식의 우변은 2차의 정확도를 갖는 upwind scheme을 사용하여 차분화하였다.

격자계는 $\Delta x = \Delta y = h$ 인 등간격 엇물림 격자계(staggered grid system)을 사용하였고, 체적 생성항에 의해 유도되는 속도가 벽면 경계에서 벽면을 투과하는 것을 막기 위해서 양 벽면 경계의 대칭되는 위치에 체적 생성항들을 분포시켰다.

계산 순서는 다음과 같다.

- (1) 평균 유동장과 화염에 의해 유도된 유동장을 중첩한다.
- (2) G-equation을 계산하여 각 격자점에서의 G 값을 구한다.
- (3) 화염 추적 알고리즘을 통하여 G=0인 등위곡선이 격자와 만나는 점들의 위치정보를 얻는다.
- (4) 화염면들의 길이에 비례하는 선체적 생성항을 첨가하여 이들에 의해 각 격자점에 유도되는 속도를 구한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 cosine 화염의 전파

속도가 $v=-0.1\text{m/s}$ 로 주어진 평균 유동장에서 cosine 화염의 전파를 관찰하였다. Fig. 3.1을 보면 체적 팽창비가 1.0(no volume expansion), 2.5, 5.7인 세 화염 모두 시간이 지날수록 화염의 모양이 평평해지는 것을 볼 수 있다. 또한 세 화염 중에서 체적 팽창비가 높을수록 그 진행이 빠른 것을 볼 수 있는데, 이것은 화염에 의해 유도된 속도 성분이 화염의 굴곡에 따라 다르기 때문이다.

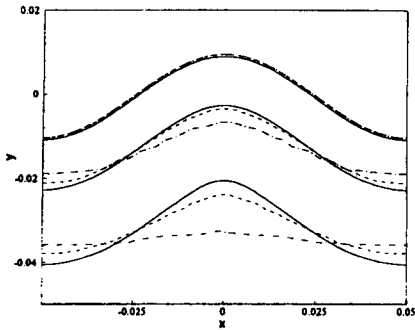


Figure 3.1 Propagation of cosine flame at 0, 60, and 150ms. (solid : $v=1.0$, dashed : $v=2.5$, dashdot : $v=5.7$)

3.2 단일 와동과 화염의 상호 작용

강한 강도의 단일 와동과 화염의 상호 작용을 Fig. 3.2-3에 나타내었다. 체적 팽창비가 클수록 화염의 목이 두꺼운 것을 볼 수 있다. 또한 체적 팽창비에 관계없이 화염의 초기에는 와동이 화염을 굴곡시킴으로 인해 화염의 전체 길이가 세 경우 모두 증가하지만, 체적 팽창비가 작을수록 목의 두께가 빨리가늘어지고 미연가스 덩어리가 연소 생성물 영역으로 떨어져 나가면서 화염의 길이가 급격히 줄어든다. Fig. 3.3을 보면 체적 팽창비가 클수록 최대 화염 면적에 이르는 시간이 지연되면서 최대 화염의 면적이 크게 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

3.3 와쌍(counter-rotating vortex pair)과 화염의 상호 작용

Mueller and Driscoll[8]은 다양한 조건의 와동이 화염을 지날 때 발생하는 현상을 PIV로 측정하여 화염에 의한 와동 강도의 감쇠(attenuation)와 화염에 의해 생성된 와도(Flame Generated Vorticity,

FGV), 그리고 와동에 의한 화염의 굴곡이 와동의 강도에 따라 어떻게 달라지는지 관찰하였다.

본 연구가 수행되는 영역에서는 와동에 의한 화염의 길이 변화가 연소율에 가장 큰 영향을 주는 요인이기 때문에 Chung[9,10,11]은 이 실험 중에서 와동에 의한 화염의 굴곡 현상만을 다루었다.

와동이 중간 강도(intermediate)이고 체

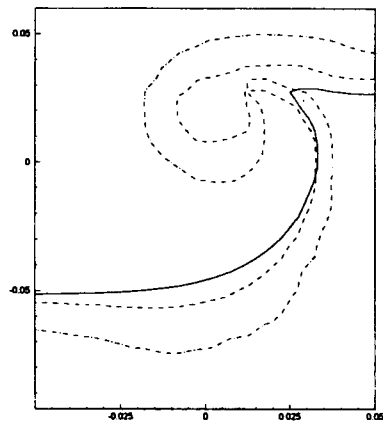


Figure 3.2 Configurations of flames at $t=195ms$. (solid : $v=1.0$, dashed : $v=2.5$, dashdot : $v=5.7$)

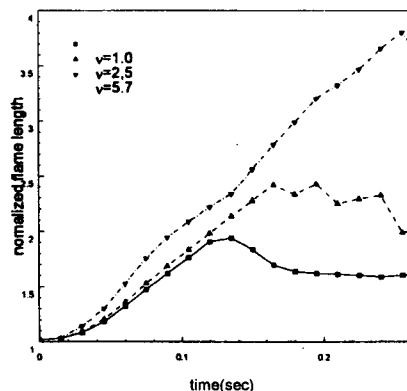


Figure 3.3 Effect of volume expansion on flame length for the case of single vortex-flame interaction.

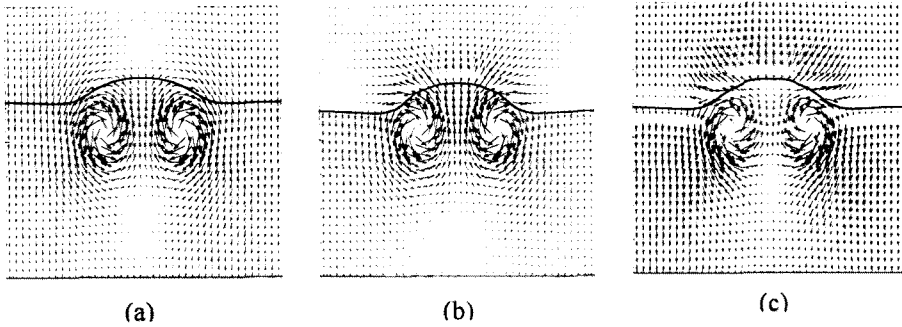


Figure 3.4 Calculated velocity fields for intermediate vortex at 30ms with (a) $v=1.0$, (b) $v=2.5$, and (c) $v=5.7$.

적 팽창비가 각각 1.0, 2.5, 5.7 일 때 화염의 모양과 유동장의 속도 분포를 보면 Fig. 3.4 와 같다.

(a) 와동에 의해 화염이 굴곡되어지는 현상을 관찰할 수 있으나, 화염을 지나면서 밀도의 변화로 인한 유동장의 재편 현상을 다루지 않았다. 실제 실험에서는 화염으로 인해 유도된 속도장의 영향으로 화염면을 기준으로 연직 속도 성분이 불연속을 이루고 있으나 화염으로 인한 체적 팽창을 고려하지 않으면 이러한 불연속성을 볼 수 없다.

(b) Chung[9,10,11]은 코드상의 문제로 인해 체적 팽창비가 2.5 에 그쳤는데, 이 경우에는 화염면을 기준으로 생기는 연직 속도 성분의 불연속성을 볼 수는 있으나 실험에서 볼 수 있는 것과 달리 그 성분이 매우 작음을 볼 수 있고, 정지점(stagnation point)의 개수, 위치를 볼 때 아직 실험 결과와 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

(c) 속도 성분의 분포, 특히 화염면 주위의 속도 분포와 정지점의 개수, 위치가 실험 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 3.5-6 은 각각 약한 강도(weak), 중

간 강도(intermediate) 와동에 의해 유도된 속도장에서 화염이 어떻게 전파하는가를 G-equation 을 이용하여 모사한 결과와 실험 결과를 함께 배열한 것이다. 각 와동의 크기, 강도, 이동 속도 등은 Mueller and Driscoll[10]의 실험 조건과 같고, CFL 조건을 만족시키는 범위 안에서 일정한 시간 간격으로 계산했기 때문에 시간에 있어서는 약간씩 차이가 있다.

3.3.1 중간 강도(intermediate)의 와동과 화염의 상호 작용

와동이 화염을 완전히 지나가기 전인 A-D 에서는 실험 결과와 계산 결과가 잘 일치한다. A 에서는 화염면에서의 체적 팽창으로 인해 두 개의 정지점이 생겼고 그 위치도 실험과 계산이 거의 일치하지만 체적 팽창을 고려하지 않는 경우에는 이러한 특성을 모사할 수 없다. 또한 $v=2.5$ 에서 수행된 기존의 계산으로는 화염의 모양이 약간 다를 뿐만 아니라 화염에 의해 유도된 속도가 실제 현상보다 작아서 정지점의 위치와 개수를 정확하게 예측할 수 없다.

$v=5.7$ 을 사용한 본 연구의 결과를 보면, D 와 E 에서의 약간의 위치 오차를 제외하면 거의 정확하게 정지점의 위치와 개수를 예측하고 있다. C 와 D

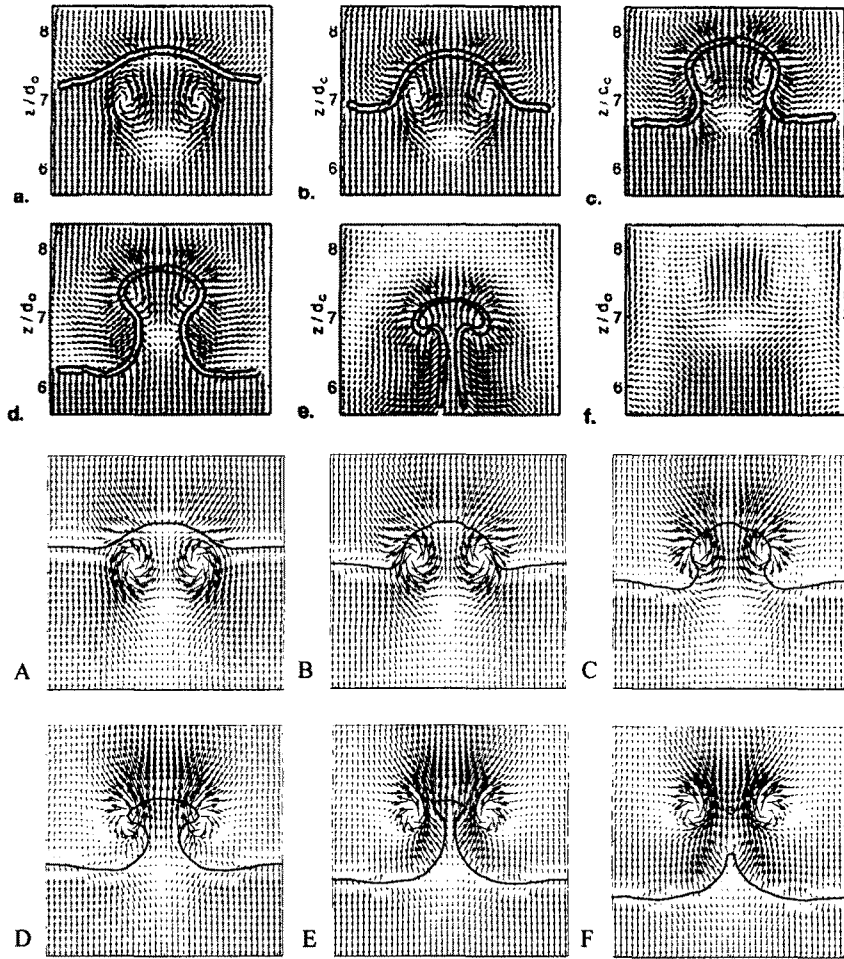


Figure 3.5 Measured(a-f) and calculated(A-F) velocity field for intermediate vortex-flame interaction.

에서는 화염의 잘룩한 부분이 실험 결과보다 약간 더 큰데, 이것은 실제로는 와동이 화염의 영향으로 인해 바깥쪽으로 휘어지며 이동하지만 본 연구에서 사용한 와동 모델은 크기나 위치, 이동 속도의 변화를 고려하지 않았기 때문에 나타난 차이임을 짐작할 수 있다. E와 F는 화염의 모양 자체가 실험 결과와 차이를 보이고 있는데, 이것은 중간 강도의 와동이 화염을 지나간 후에 약 80% 정도의 감쇠가 일어나고 약간의

화염 생성 와도(FGV)가 발생하는 것을 것을 계산에 도입하면 해결할 수 있을 것이다.

이것은 와동의 감쇠 정도와 화염 생성 와도의 크기가 더 큰 약한 강도의 와동에서 실험과 계산의 차이가 더 큰 것을 보아 타당하다.

3.3.2 약한 강도(weak)의 와동과 화염의 상호 작용

화염의 초기 단계에서부터 실험과 계

산 결과의 차이가 발생하고 있다. 이는 와동의 세기가 약해서 와동이 화염

으로써 화염이 왜곡되고 화염에서의 열 팽창으로 인한 유동장 속도 성분들의

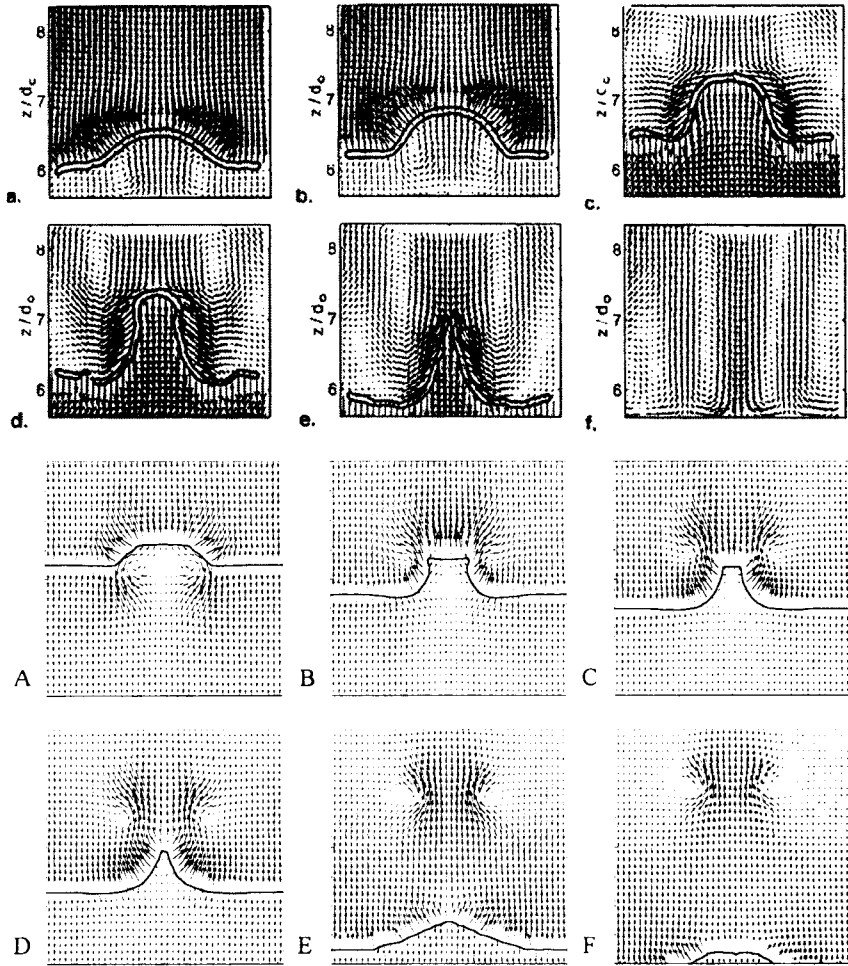


Figure 3.6 Measured(a-f) and calculated(A-F) velocity field for weak vortex-flame interaction.

을 지나면서 와동의 감쇠가 완전히 진행되는 실험 결과를 반영하지 못했기 때문이다.

4. 결론

기존의 연구에서 사용한 체적 팽창비를 비교 대상 실험에서의 값을 사용함

재판 현상을 수치적으로 보일 수 있었다. 그러나 앞으로 화염과 와동의 상호 작용 과정을 정확히 모사하기 위해서 화염으로 인한 와동의 가속과 감쇠 현상, 그리고 화염에서의 와도 생성을 고려할 예정이다.

참고문헌

- (1) Sung, C. J., Yu, K. M., and Law, C. K., "On the Geometry and Burning Intensity of Wrinkled Premixed Flames", AIAA Paper 92_0238, January 1992
- (2) Kerstein, A. R., Ashurst, W. T., and Williams, F. A., "Field Equation for Interface Propagation in an Unsteady Homogeneous Flow Field", Phys. Rev. A37:2728-2731, 1988
- (3) Aldredge, R. C., "The Propagation of Wrinkled Premixed Flames in Spatially Periodic Shear Flow", Combustion and Flame, Vol.90, pp.121-133, 1992
- (4) Zhu, J. and Ronney, P. D., "Simulation of front Propagation at Large Non-dimensional Flow Disturbance Intensities", Combust. Sci. and Tech., Vol.100, pp.183-201. 1994
- (5) 최병일, "주기적으로 변동하는 유동장 내에서의 예혼합 화염의 거동 및 화염-유동 상호작용에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1999
- (6) Ghoniem, A. F., Chorin, A. J., and Oppenheim, A. K., "Numerical Modeling of Turbulent Flow in a Combustion Tunnel", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A-304, pp.303-325, 1982
- (7) Pindra, M. Z. and Talbot, L., "Some Fluid Dynamics Consideration in the Modeling of Flames", Combustion and Flame, Vol.73, pp.111-125, 1988
- (8) Mueller, C. J. and Driscoll, J. F., "Vorticity Generation and Attenuation as Vortices Convect Through a Premixed Flame", Combustion and Flame, Vol.112, pp.342-358, 1998
- (9) 정의현, "체적 팽창이 예혼합 화염 전파에 미치는 효과", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1997
- (10) 정의현, 권세진, "체적 팽창 효과를 고려한 예혼합 화염과 와동의 상호작용에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B 권, 제 22 권 제 12 호, pp.1669-1680, 1998
- (11) Chung, E. H. and Kwon, S. J., "The effect of volume expansion of the propagation of wrinkled laminar premixed flame", Combust. Sci. and Tech., Vol.146, pp.85, 1999