

와동의 변화를 고려한 화염-와동 상호 작용 모사

강지훈* · 권세진**

A Simulation of Flame-Vortex Interaction considering the Alteration of Vortex by Flame

Ji Hoon Kang, Se Jin Kwon

Key Words : volume expansion, G-equation, vortex transport equation, flame-vortex interaction

Abstract

A numerical simulation was conducted to analyze the interaction of flame and vortices. The characteristic scales of flame and vortices were limited in the thin laminar flamelet regime. Within this regime, flame is assumed as discontinuity surface and its motion in flow field was described by G-equation instead of full governing equations. Additional approximations include distribution of line volume sources on flame surface to simulate effect of volume expansion. Contrast to previous calculations, current study employed vortex transport equation to evaluate attenuation and smearing of vortices. Two extreme conditions of frozen vortex and frozen flame were considered to validate the current method. Comparison with direct numerical simulation resulted in satisfactory quantitative agreement with higher computational efficiency which warrants the usefulness of the present model in more complex situation.

기호설명
 Da : Damkohler 수
 R : elongation
 S_L : 층류 화염 전파 속도

u_θ : 와동 회전 속도
 σ : 와동 중심 크기
 ω_z : 와도(vorticity)

1. 서론

* 한국과학기술원 기계공학과
항공우주공학 전공 대학원
** 한국과학기술원 기계공학과
항공우주공학 전공

난류 예혼합 화염에서는 연소 영역과 미연 영역의 접촉면을 증가 시키는 난류 혼합과 화염면의 왜곡으로 인해 층

류 화염에 비해 열전달과 radical species의 확산이 증가한다. 이는 화염 전파 속도의 증가를 의미하며 결과적으로 mass consumption rates에 큰 영향을 미치게 되므로 연소실 설계에 고려해야 할 중요한 현상이다. 그러나 난류 예혼합 화염은 난류 유동장에 관한 해석이 어려울 뿐만 아니라 복잡한 화학 반응을 고려해야 하는 화염의 특성으로 인해 그 해석이 매우 어렵다는 특징을 가지고 있다.

난류 연소에서 중요한 두 현상인 난류 유동에 의한 혼합과 chemical kinetics 중에서 어느 현상이 지배적인가에 따라 크게 세가지 연소 영역으로 구분하는데, 본 연구는 대부분의 SI 엔진 내부에서의 연소 및 기타 산업적으로 널리 응용되고 있는 탄화수소의 연소가 포함되는 층류 화염편 영역(laminar flamelet regime)에서의 화염-와동 상호 작용의 모사를 시도하였다. 이 영역에서 화염의 두께는 난류의 최소 길이 단위인 Kolmogorov 스케일보다 작아서 chemical kinetics 보다는 난류 유동에 의한 화염의 면적 및 연소 지속 시간의 변화가 지배적인 현상이다.

이러한 조건하에서 난류의 기본 단위인 에디를 표현한 와동과 화염의 상호 작용에 관한 연구들이 진행되어 왔는데 여러 실험을 통해 몇 가지 중요한 과정들이 밝혀졌다. 화염에서의 열팽창은 전체 유동장을 변화 시키고 와동의 운동 및 강도, 모양 등에 영향을 미친다. 와동은 화염을 굴곡 시킴으로 인해 화염면을 증가 시키거나 화염에 강한 인장(strain)을 유발시켜 냉각(quenching) 현상을 일으키기도 한다[1]. 한편 화염과 와동이 만나면서 연소 영역을 향해 새로운 와도(vorticity)가 발생하여 화염

의 굴곡 정도를 완화 시킨다[2].

층류 화염편 영역에서 화염과 와동의 상호 작용을 수치적으로 모사하는 방법으로는 크게 두 가지 유형이 있다. 첫째는, 연속 방정식, 운동 방정식, 에너지 보존 방정식, 화학종 보존 방정식을 모두 계산하는 직접수치모사법(Direct Numerical Simulation)을 사용하는 것으로써 비용 부담이 크고 높은 레이놀즈 수의 유동과 계산 가능한 속도 섭동이 제한되어 있다는 단점이 있다. 이에 비해 Kerstein et al.[3]에 의해 개발된 G-equation을 사용하는 계산에서는 화염을 연소 가스와 미연 가스를 구분 지으며 호이겐스 원리(Huygens' principle)를 만족시키며 전파되는 불연속면으로 정의하기 때문에 화학 반응에 관한 복잡한 방정식을 계산하지 않아도 되는 장점이 있는 반면 화학 반응으로 인한 열팽창의 효과를 인위적으로 고려해 주어야 한다.

2. 지배 방정식

2.1 G-equation

층류 화염편 영역에서의 화염 전파를 모사하기 위한 방정식은 수학적으로 Hamilton-Jacobi 형태가 되는데, 이러한 방정식의 해를 구할 때 불연속성이 발생하는 것으로 알려졌다[4]. 그러나 Crandall and Rion[5]에 의해 이러한 형태의 불연속성이 있는 방정식 해의 존재성(existence)과 유일성(uniqueness)이 입증되었고 그 결과 G-equation이 개발되었다.

Wu and Driscoll[6]은 G-equation과 같은 원리인 Chorin[7]의 SLIC(Simple Line

Interface Calculation) 알고리즘을 사용하여 와동에 의한 화염의 모양 변화를 모사하였고, 여러 가지 유동에서의 화염 전파에 관한 연구들이 수행되었다[6,8,9]. 그러나 이들 연구에서는 화염에서의 열 팽창 효과를 고려하지 않았을 뿐만 아니라 고정된 와동 모델을 사용함으로써 화염에 의해 와동의 모양, 강도, 운동 방향 등이 변하는 것을 볼 수 없었다. Choi[10]와 Chung and Kwon[11,12]은 Ghoniem et al.[13]이 제시한 체적 생성항을 도입하여 유동에 미치는 화염의 역할을 고려하기 시작하였다.

G-equation은 식 (1)과 같고, 식 (2)와 식 (3)은 체적 팽창 효과를 고려하여 공간에 대해서 2차, 시간에 대해서 1차의 정확도를 갖는 외재적 해법인 Zhu and Ronney[9]의 방법을 응용하기 위해 식 (1)을 두 식으로 나눈 것이다.

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla G = S_L |\nabla G| \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \nabla \cdot (G\bar{v}) = 0 \quad (\text{Eq. 2})$$

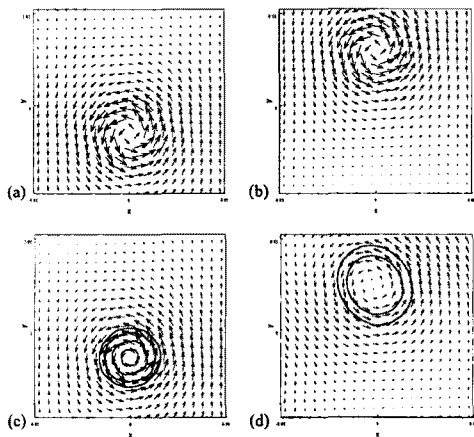


Fig. 1. The vortex contour and velocity distribution during the vortex moves toward using frozen vortex (a,b) and solvin vortex transport equation(c,d).

$$\frac{\partial G}{\partial t} = S_L |\nabla G| + G(\nabla \cdot \bar{v}) \quad (\text{Eq. 3})$$

2.2 Vortex Transport Equation

와동의 운동을 고려하기 위해서 vortex transport equation을 계산하였다. 본 연구의 조건인 2차원의 층류 화염 편 영역에서 화염 생성 와도(FGV)를 고려하지 않은 vortex transport equation은 식 (4)와 같고, 이 식의 우변을 좌변으로 이항하여 정리한 식 (5)는 수학적으로 식 (2)와 같은 형태의 방정식이 된다.

$$\frac{D\omega_z}{Dt} = -\omega_z(\nabla \cdot \bar{v}) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\omega_z \bar{v}) = 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

3. 계산 방법

G-equation을 이용하여 와동에 의한 화염의 변화를 모사하였던 기존의 연구들[6,11,12]에서는 고정된 와동 모델을 사용하여 화염에 의한 와동의 변화(감

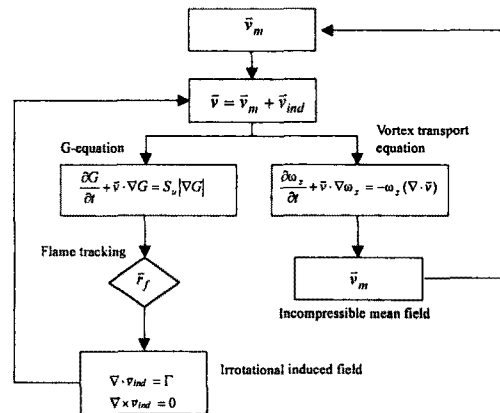


Fig. 2. Flow Chart : implementation of active flame propagation and vortex motion

쇠, 팽창, 가속)를 고려하지 못했다. 화염에 의한 현상과 와동에 의한 현상을 모두 고려하기 위해서 G-equation 과 vortex transport equation 을 동시에 계산 하였으며 계산 순서는 Fig. (2)와 같다.

4. 결과 및 고찰

복잡한 화염과 와동의 상호 작용에서 중요한 현상인 화염에서의 열팽창으로 인한 와동의 구조 변화와 와동에 의한 화염의 변화를 관찰하기 위해서 DNS 로 수행한 Rutland and Ferziger[14]의 방법을 참고하였다. Damkohler 수를 정의하여 두 가지 극조건에 대해 계산을 수행하였다.

$$Da = \frac{\tau_{vortex}}{\tau_{chem}} \quad (\text{Eq. 6})$$

4.1 The Frozen Flame

Damkohler 수가 큰 경우에는 화염의 전파 속도가 와동의 회전 속도에 비해 훨씬 커서 와동은 화염에서의 열팽창의 영향을 받는 반면, 화염은 와동의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 화염은 와동이 통과하는 동안에도 평면을 유지하고, 와동은 화염에 수직한 방향으로 늘어나면서 강도가 줄어든다(Fig. 3). 이러한 변화는 Mueller and Driscoll[2]의 실험에서도 관찰된 현상으로, Rutland and Ferziger[14]는 와동의 변화 정도를 각 방향의 2 차 모멘트 비(R)로 계산하였다.

$$R = \frac{m_{02}}{m_{20}} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$m_{i,j} = \int (x - \bar{x})^i (y - \bar{y})^j \tilde{\omega}_z dS \quad (\text{Eq. 8})$$

식 (8)에서 $\tilde{\omega}_z$ 는 와도(vorticity)를 밀도로 나눈 값이고, \bar{x} 와 \bar{y} 는 $\tilde{\omega}_z$ 와 이를 공간 적분한 $\bar{\omega}_z$ 를 이용하여 가중 평균한 x, y 공간 좌표를 의미한다.

$$\bar{\omega}_z = \int \tilde{\omega}_z dS \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\bar{x} = \int x \frac{\tilde{\omega}_z}{\bar{\omega}_z} dS \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\bar{y} = \int y \frac{\tilde{\omega}_z}{\bar{\omega}_z} dS \quad (\text{Eq. 11})$$

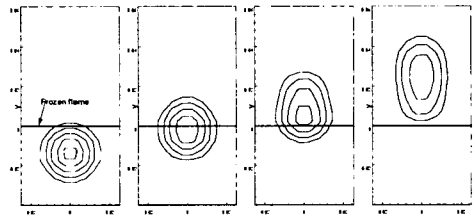


Fig. 3. Vortex moving through a frozen flame at $y=0$.

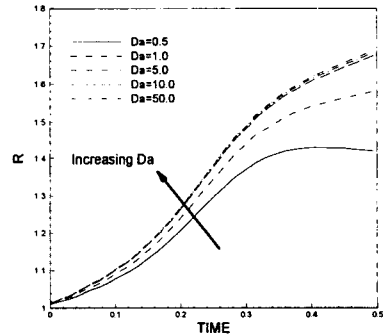


Fig. 4. Damkohler number effect on R.

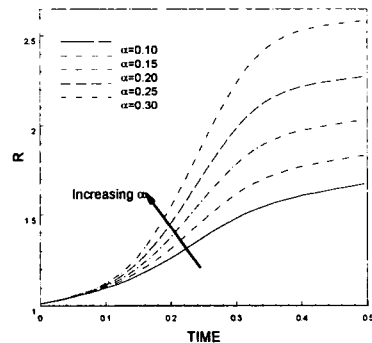


Fig. 5. Heat release effect on R.

계산 결과 DNS로 수행한 기존의 연구와 같은 경향으로 R 값이 Da 와 α 에 따라 증가하는 것을 관찰하였다. y 방향으로의 2차 모멘트 변화는 화염에서의 열팽창에 의해 결정되고, Da 수가 클수록 와동이 화염을 통과하면서 겪는 x 방향으로의 2차 모멘트 변화가 작아지기 때문에 Fig. 4, Fig. 5 와 같은 결과가 나타난다.

4.2 The Frozen Vortex

Damkohler 수가 작은 경우에는 와동의 회전 속도가 화염의 전파 속도보다 커서 와동에 의한 화염의 굴곡 현상이 지배적이다. Table 1의 조건으로 여러 가지 와동 강도($u_{\theta, \max}$)와 와동 중심 크기(σ)에 대해서 계산을 수행한 결과 시간에 따른 화염 길이의 변화가 실험 결

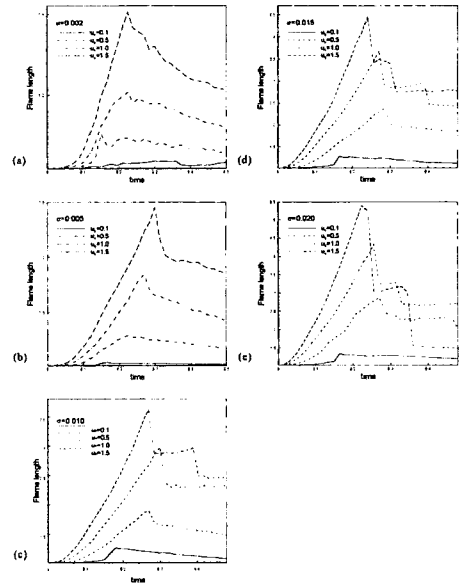


Fig. 6. Effect of vortex strength on the flame length.

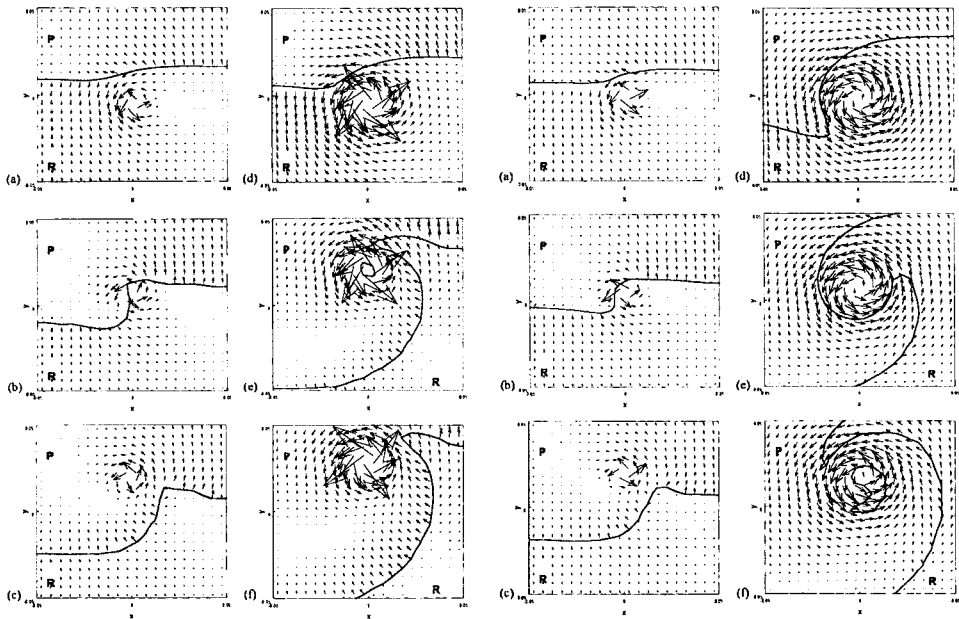


Fig. 7. Interaction between flame and a frozen vortex for (a-c) $u_{\theta, \max} = 0.5, \sigma = 0.005$ and (d-f) $u_{\theta, \max} = 1.5, \sigma = 0.005$.

Fig. 8. Interaction between flame and a frozen vortex for (a-c) $u_{\theta, \max} = 1.0, \sigma = 0.020$ and (d-f) $u_{\theta, \max} = 1.0, \sigma = 0.002$.

Vortex core size, σ (m)	Maximum tangential velocity, $u_{\theta, \max}$ (m/s)	
	0.002(1), 0.005(2), 0.010(3), 0.020(4)	0.1(a), 0.5(b), 1.0(c), 1.5(d)

Table 1. Computational parameters for the frozen vortex cases

과[2,15]나 DNS로 수행한 결과[14]와 같은 경향을 보이고 있음을 확인하였다. Fig. 6에서 일부는 화염의 길이가 최대에 도달한 직후에 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 상대적으로 강한 와동에 의해 미연 가스의 덩어리가 연소 영역으로 떨어져 나갈 때(pocket formation) 나타나는 현상으로 현재 본 연구에서 사용하는 화염추적 알고리즘이 단일 곡선(simply

connected)을 이루는 화염의 위치 정보만 찾아서 화염의 길이를 계산하기 때문에 생기는 현상이다.

와동에 의한 화염의 굴곡 현상에 대한 고전적인 이론(Damkohler[16], Shchelkin[17])에 의하면 부분적인 화염 면적 증가는 속도 성분의 섭동($u_{\theta, \max}/S_L$)만의 함수일 뿐 와동의 크기와는 관계가 없다. 그러나 계산 결과 Robert and Driscoll[15]의 실험에서와 같이 와동의 크기도 화염의 굴곡에 중요한 요소임을 확인하였다(Fig. 7, Fig. 8).

4.3 The Full Simulation

고정된 와동 모델을 사용한 조건 중에서 $\sigma = 0.020$, $u_{\theta, \max} = 1.0$ 과 $\sigma = 0.005$, $u_{\theta, \max} = 0.5$ 에 대해서 G-

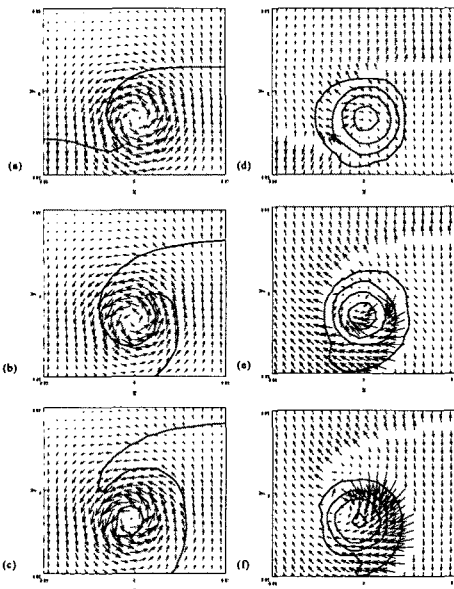


Fig. 9. Flame configuration with total velocity field(a-c) and vortex contour with flame induced velocity field(d-f). $u_{\theta, \max} = 1.0$, $\sigma = 0.020$ (Full simulation).

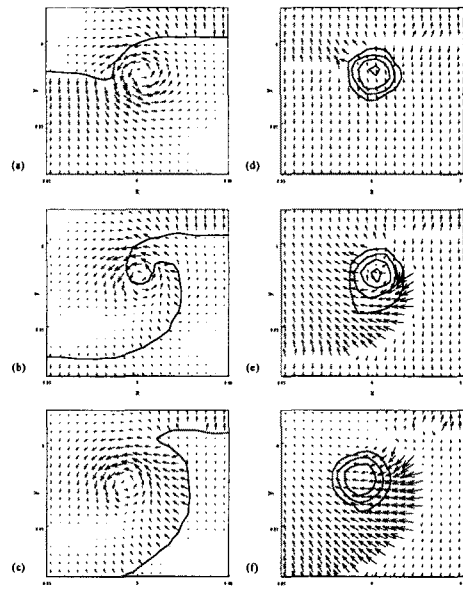


Fig. 10. Flame configuration with total velocity field(a-c) and vortex contour with flame induced velocity field(d-f). $u_{\theta, \max} = 0.5$, $\sigma = 0.005$ (Full simulation).

equation 과 vortex transport equation 을 동시에 계산하는 'full simulation'을 수행하였다(Fig. 9, Fig. 10).

G-equation 을 사용하여 화염과 와동의 상호 작용을 모사한 기존의 연구들[6,11,12]에서 와동은 화염을 지나면서 크기와 강도가 고정된 채 인위적으로 설정한 속도에 의해 일정한 방향으로 이동한다. 그러나 실험 결과[2] 화염 뿐만 아니라 와동도 화염에서의 열팽창에 의해 감쇠, 팽창, 가속 등을 겪는 것을 관찰하였다. 본 연구에서도 이러한 와동의 변화를 관찰할 수 있었다. Fig. 9 와 Fig. 10 에서 화염과 와동의 상호 작용의 진행 과정을 살펴보면, 와동이 화염에 접근하면서 화염이 굴곡되고 굴곡된 화염에서의 열팽창으로 인해 와동의 모양과 이동 방향이 조금씩 바뀐다. 와동이 화염을 통과하기 시작하면 화염에 의한 미연 가스 영역으로의 강한 열팽창의 영향으로 와동이 화염에 수직한 방향으로 늘어나면서 중심 강도는 감소한다(팽창, 감쇠). 와동이 화염을 완전히 통과한 이후에는 굴곡된 화염의 영향으로 와동의 이동 방향이 많이 바뀐다.

시간에 따른 화염의 길이 변화를 살펴보면, 고정된 와동 모델을 사용한 경우와는 달리 와동이 화염과의 상호 작용으로 인해 화염과의 부착 정도가 더 크고, 화염을 통과한 이후에는 강도가 약해지면서 화염에 의해 빨리 밀려나기 때문에 화염이 최대 길이에 도달하는 시간은 빨라진 반면 이 때의 최대 화염 길이는 감소하였다(Fig. 11). 와동에 의한 화염의 굴곡 정도가 작은 경우, frozen vortex 에서는 와동이 화염과의 상호 작용을 위해 충분한시간이 없었지만

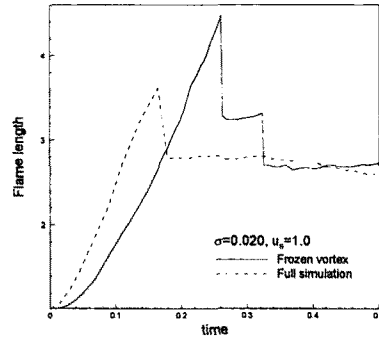


Fig. 11. Difference between the frozen vortex case and the full simulation in the maximum flame length for $Da=0.2$.

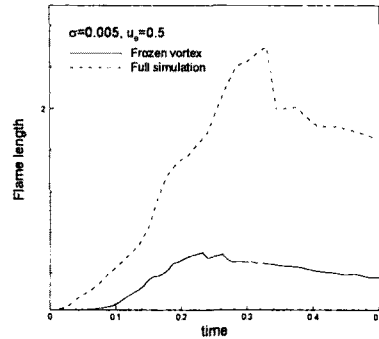


Fig. 12. Difference between the frozen vortex case and the full simulation in the maximum flame length for $Da=0.1$.

full simulation 에서는 와동이 강제로 이송(convection)되지 않기 때문에 화염과 부착되어 굴곡시킴으로써 Fig. 12 와 같은 경향을 보이는 것이다.

5. 결론

층류 화염편 영역의 난류 예혼합 화염을 효과적으로 모사하는 G-equation 에 체적 생성항을 도입함으로써 화염에서의 열팽창 효과를 고려하고, vortex transport equation 을 사용하여 와동의 변

화를 고려함으로써 화염과 와동의 상호 작용을 조사하였다. 고정된 와동 모델을 사용한 경우와 비교해 볼 때, 와동이 강도나 크기, 운동 방향 등에서 화염의 영향을 많이 받고 이러한 와동의 변화로 인해 화염의 굴곡 현상 또한 두드러지게 변하는 것을 확인하였다.

Luftfahrtforsch, p.133 (1939)
 (17) Schelkin, K. I., J. Tech. Phys.(Russian)
 13:520 (1943)

참고문헌

- (1) Poinso, T. J., Veynante, D., and Candel, S. M., J. Fluid Mecch. 228:561-606 (1991)
- (2) Mueller, C., J. and Driscoll, J., F., Combust. And Flame 122:342-358 (1998)
- (3) Kerstein, A. R., Ashurst, Wm. T. and Williams, F. A., Phys. Rev. A 37:2728-2731 (1988)
- (4) Osher, S. and Sethian, J. A., J. Comput. Phys. 79:12-49 (1988)
- (5) Crandall, M. G. Evans, L. C., and Rion, P. L., Trans. Am. Math. Soc. 282:487-502 (1984)
- (6) Wu, M. -S. and Driscoll, J. F., Combust. and Flame 91:310-322 (1992)
- (7) Chorin, A. J., J. Comput. Phys. 35:1-11 (1980)
- (8) Aldredge, R. C., Combust. and Flame 90:121-133 (1992)
- (9) Zhu, J. and Ronney, P. D., Combust. Sci. and Tech. 100:183-201 (1994)
- (10) 최병일, 한국과학기술원 박사학위 논문 (1999)
- (11) 정의현, 권세진, 대한기계학회 (1998)
- (12) Chung, E. H. and Kwon, S. J., Combust. Sci. and Tech. 146:85-103 (1999)
- (13) Ghoniem, A. F., Chorin, A. J., and Oppenheim, A. K., Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 304:303-325 (1982)
- (14) Rutland, C. J. and Ferziger, J. H., Combust. and Flame 84:303-360 (1991)
- (15) Robert, W. L. and Driscoll, J. F., Combust. and Flame 87:245-256 (1991)
- (16) Damkohler, G., Jahrb. Deut.