

## 석탄가스 난류선회유동 예혼합부상화염의 안정성 해석

\*강 성모<sup>1)</sup>, \*이 정원<sup>1)</sup>, \*\*김 용모<sup>1)</sup>

### Numerical Study on the Stabilization of Turbulent Swirling Lifted Premixed Syngas Flames

\*Sungmo Kang, \*Jeongwon Lee, \*\*Yongmo Kim

**Key Words** : Syngas, Turbulent premixed flame, Low-swirl burner, Flame liftoff, Flashback, Level-set, Flamelet model

**Abstract** : This study has numerically modeled the combustion processes of the turbulent swirling premixed lifted syngas flames in the low-swirl burner (LSB). In these turbulent swirling premixed flames, the four tangentially-injected air jets induce the turbulent swirling flow which plays the crucial role of stabilizing the turbulent lifted flames. In the present approach, the turbulence-chemistry interaction is represented by the level-set based flamelet model. Numerical results indicate clearly that the present level-set based flamelet approach has realistically simulated the structure and stabilization mechanism of the turbulent swirling premixed lifted flames in the low-swirl burner. Computations are made for the wide range of the syngas chemical composition and the dilution level at two pressure conditions (1.0, 5.0 bar). Numerical results indicate that the lifted height in the LSB is increased by decreasing the H<sub>2</sub> percentage and increasing the dilution level at the given equivalence ratio. It is also found that the flashback is occurred for the hydrogen composition higher than 80% at the equivalence ratio, 0.8. However, at the syngas composition range in the IGCC system, the stable lean-premixed lifted flames are formed at the low-swirl burner.

## 1. 서 론

천연가스나 석유와 같은 연료들은 기존의 발전에 많이 사용되어 왔다. 하지만 이러한 연료들은 높은 가격 때문에 석탄이나 바이오 매스 등과 같은 연료들의 가스화 전처리를 통한 합성가스(Syngas) 생성에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 석탄가스화 과정에 의해 생성되는 합성가스는 다양한 조성을 가지며 EU나 미국, 중국 등의 나라에서 관심있게 연구를 진행 중에 있으며 발전용 가스터빈에 연료로서 응용하는 많은 연구가 계속되고 있다<sup>(1)</sup>. 이에 따라 최근에 합성가스에 대한 고온, 고압 상태에서의 화학반응기구<sup>(2,3)</sup>에 대한 연구결과가 많이 나와 있고, EU의 HEGSA (High Efficiency Gas-turbine Syngas Application) 프로젝트에 의해 가스터빈에 적용하기 위한 연구<sup>(4)</sup>가 진행 중이다. 이러한 기존의 연구들은 수소농도가 상대적으로 높은 Syngas의 화염안정성을 유지하기 위하여 비예혼합 연소모드로 작동하는 연소기를 사용하고 있기 때문에 NO 배출량을 저감하는데 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 Syngas 희박예혼합 화염의 구조와 안정성을 검토하기 위해 저 스윙버너 (low-swirl burner, LSB)에서의 선회유동을 가지는 난류 Syngas 예혼합 부상화염 특성을 수치적으로 해석하였다. 기본적으로 선회유동을 가지는 난류 예혼합 부상화염의 난류와 화학반응의 상호작용, 화염 안정화 메커니즘, 그리고 화염과 와동의 상호작용 등은 기초 이론 및 실제적인 응용에 있어서 매우 중요한 물리적 과정이다. 이러한 난류부상 예혼합 화염은 상대적으로 약한 스윙에 의해 화염을 안정화시키는 LSB에 의해 형성된다<sup>(7)</sup>. LSB는 초기에는 난류 예혼합 화염의 기초 연구와 난류화

염 속도의 계측 및 난류화염 영역 이론의 평가에 사용되어 왔다<sup>(7-11)</sup>. 또한 최근에는 예혼합 저공해 버너 및 희박예혼합 가스터빈 연소기의 화염구조 및 화염 안정화 메커니즘을 이해하는데 유익한 정보를 제공하고 기초 설계자료와 수치모델의 검증자료로서 유용하게 활용되고 있다<sup>(12-14)</sup>.

본 연구에서는 난류연소 모델 중 수치효율성, 예측 정확도 및 적용성 등을 고려하여 난류 예혼합 화염장의 난류와 화학반응 상호작용은 level-set 기반의 화염면 모델을 이용하여 모델하였다. 수치계산은 두 가지의 연소실 압력조건 (1, 5 bar)에서 넓은 영역의 Syngas 화학조성과 희석제 첨가율에 대하여 수행하였다. 수치계산결과로부터 Syngas 화학조성과 희석제 첨가율이 저스윙버너에서의 Syngas 희박예혼합 화염의 안정성과 화염구조에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

## 2. 물리 및 수치모델

### 2.1 지배방정식

Favre 평균된  $\phi$ -수송방정식을 다음처럼 Cartesian 텐서 형태로 표기한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j}\right) + S_\phi \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 속도벡터, 엔탈피, 난류운동에너지와 소산율, 혼합분율의 평균과 변동을 포함한다.  $\Gamma_\phi$ 와  $S_\phi$ 는

1) 한양대학교 기계공학부

E-mail : ymkim@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0428 Fax : (02)-2297-0339

확산계수와 생성항을 각각 나타내며 참고문헌에 나타난다<sup>(15)</sup>.

## 2.2 Level-set $G$ 기반 화염면 모델

난류 부분예혼합 화염에서는 예혼합 및 비예혼합 연소에 대한 공식을 사용해야 한다. 이를 위해 비예혼합 연소의 화염면 모델이 예혼합 연소의 화염면 모델과 결합된다. 난류 유동장내의 연료와 산화제의 혼합은 질량분율의 평균과 변동에 대한 수송방정식에 의해 설명된다. 예혼합 연소를 설명하기 위해  $G$ -방정식<sup>(5)</sup>을 사용하는 level-set 접근법이 도입된다. 여기서 등스칼라 면 (iso-scalar surface)  $G(x,t)=G_0$ 는 순간 화염면의 위치를 정의함으로써 유동장을 기연가스 영역 ( $G > G_0$ )과 미연 혼합기 영역 ( $G < G_0$ )으로 나눈다.  $G$ 는 비연소 스칼라이므로 counter-gradient diffusion과 관련된 복잡성을 피한다. 난류 화염면의 평균 위치에 대한 방정식은 다음처럼 나타낸다<sup>(6)</sup>.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{G})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{v}\tilde{G}) = (\bar{\rho}s_T)|\nabla\tilde{G}| - \bar{\rho}D_t\tilde{\kappa}|\nabla\tilde{G}| \quad (2)$$

$$\tilde{\kappa} = \nabla \cdot \tilde{n} = \nabla \cdot \left( -\frac{\nabla\tilde{G}}{|\nabla\tilde{G}|} \right) \quad (3)$$

여기서  $\tilde{\kappa}$ 는 화염면의 곡률,  $\tilde{n}$ 은 화염면에 수직한 단위벡터,  $D_t$ 는 난류 확산률 (turbulent diffusivity) 이다. 난류 확산률은 integral length scale  $l$  과 난류속도 (velocity fluctuation)  $v'$ 로부터 결정될 수 있다.

$$D_t = a_4 l v', \quad l = a_1 v'^3 / \tilde{\epsilon}, \quad v' = (\tilde{\kappa} / a_2)^{1/2} \quad (4)$$

여기서  $a_1=0.37$ ,  $a_2=1.5$ ,  $a_4=0.78$ 이다. 스칼라  $G$ 의 변동에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{G}^2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{G}^2) = \nabla_{||} \cdot (\bar{\rho}D_t\nabla_{||}\tilde{G}^2) + 2\bar{\rho}D_t(\nabla\tilde{G})^2 - c_s\bar{\rho}\frac{\tilde{\epsilon}}{\tilde{\kappa}}\tilde{G}^2 \quad (5)$$

여기서  $\nabla_{||}$ 는 평균 화염면에 접선한 방향으로만 미분하는 것을 의미하고 모델 상수는  $c_s=2.0$ 이다.

Eq. (2)에 있는 난류화염속도  $s_T$ 를 모델하기 위해서 다음의 가정을 따른다. 연료와 산화제는 국부적으로 예혼합되어서, 부분 예혼합 화염은 성층화된 국부 예혼합 환경을 통해 전파한다. 난류 예혼합 연소에 대해 난류화염 속도  $s_T$ 는 다음처럼 결정될 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$\frac{s_T - s_L}{v'} = -\frac{a_4 b_3^2}{2b_1} Da + \left[ \left( \frac{a_4 b_3^2}{2b_1} Da \right)^2 + a_4 b_3^2 Da \right]^{1/2} \quad (6)$$

여기서  $s_L$ 은 평면 화염의 층류화염속도, Damköhler 수는  $Da = s_L l / (v' l_F)$ ,  $l_F$ 는 층류화염 두께이다. 모델 상수들은  $b_1=2.0$ 과  $b_3=1.0$ 이다.

## 3. 수치해석 결과

저 스윙 버너는 노즐과 접선방향 공기젯으로 구성된다. 노즐에 접선방향으로 유입되는 여러 개의 공기젯은 스윙을 발생하고 버너 출구에서 유동 divergence를 유도하며, 화염장의 난류강도와 난류화염속도를 증가시킨다. 난류 부상화염은 미연 혼합기의 유체입자속도가 화염전파속도와 평형을 이루는 위치에서 안정화된다. 입구 난류는 grid와 천공판 (perforated/punching

plate)에 의해 생성된다.

Syngas 화학반응기구는 넓은 압력영역에서 정확도를 가지는 Ranzi<sup>(3)</sup>등에 의해 제안된 모델을 사용하였다. 수치계산은 등온 유동으로 시작한 뒤 노즐 하류 50 mm에서 반경 30 mm의 화염원으로 혼합기를 점화한다. 점화 후 화염면이 정상상태에 도달할 때까지 수치계산을 진행한다.

본 연구는 석탄가스 난류 예혼합 선회화염의 화염 안정성에 미치는 연료조성과 압력의 영향을 알아보기 위해 Table 1의 조건에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치격자와 입구유동조건은 메탄 난류 예혼합 선회화염에 선행연구<sup>(16)</sup>와 동일하며 기준 당량비는 0.6으로 선정하였다. 예혼합 CH<sub>4</sub> 화염 ( $\phi=0.63$ ,  $\rho_0=1.153 \text{ kg/m}^3$ ,  $s_L=13.9 \text{ cm/s}$ )과 비교하면 혼합기 밀도의 감소로 인해 전반적으로 선회 수가 증가하고 층류화염속도도 비교적 크다는 것을 볼 수 있다.

Table 1. Summary of calculations ( $\phi=0.6$ ,  $T_0=300 \text{ K}$ )

Syngas CO/H <sub>2</sub> (%)	Zst	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )		D (cm <sup>2</sup> /s)		$s_L$ (cm/s)		$T_a$ (K)	S
		1bar	5bar	1bar	5bar	1bar	5bar		
20/80	0.095	0.995	4.975	0.559	0.112	60.83	28.89	1,810	1.72
50/50	0.179	1.059	5.294	0.536	0.106	43.30	24.16	1,857	1.54
80/20	0.250	1.121	5.613	0.478	0.097	29.97	18.28	1,922	1.38
35/35/30%-H <sub>2</sub> O	0.248	1.033	5.164	0.542	0.110	28.43	14.31	1,710	1.61
25/25/50%-H <sub>2</sub> O	0.324	1.004	5.020	0.562	0.112	16.31	5.84	1,557	1.69
35/35/30%-CO <sub>2</sub>	0.330	1.117	5.584	0.494	0.099	25.87	11.80	1,681	1.40
25/25/50%-CO <sub>2</sub>	0.462	1.181	5.905	0.382	0.093	13.47	5.17	1,501	1.26

Fig. 1은 1 bar와 5 bar에서 연료조성에 대해 계산된 층류화염속도를 나타내고 Fig. 2는 CO/H<sub>2</sub> (50/50%) 화염의 화염면 라이브러리를 나타낸다. 압력이 증가했을 때 층류화염속도는 50% 이하로 감소하지만 층류확산계수 ( $D=\mu\text{Pr}/\rho_0$ )는 예혼합기의 밀도에 비례하여 감소하기 때문에 화염두께 ( $l_F=D/s_L$ )는 얇아짐을 볼 수 있다.

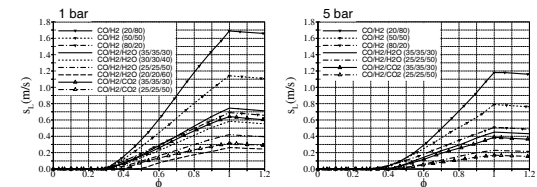


Fig. 1 Laminar burning velocity as a function of equivalence ratio at  $p_0=1/5 \text{ bar}$ ,  $T_0=300 \text{ K}$ .

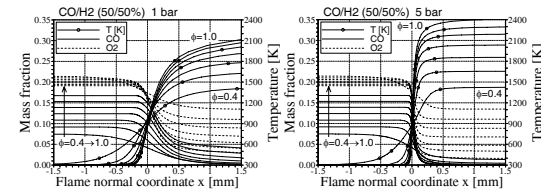


Fig. 2 1-D laminar premixed CO/H<sub>2</sub> (50/50%) flames for different fuel compositions and equivalence ratios at  $p_0=1/5 \text{ bar}$ ,  $T_0=300 \text{ K}$ .

화염안정화에 대한 당량비 영향을 알아보기 위해 기준 당량비 0.6과 당량비 0.8에 대해 추가계산 하였다. Fig. 3은 대기압, 당량비 0.6과 0.8에서 석탄가스 (CO/H<sub>2</sub>) 화염의 다른 연료조성에 대해 축방향 중심단면 ( $z=0$ )에서 예측된 평균 온도장을 비교하였다. 당량비가 0.8로 증가할 때 화염부상높이는 낮아지고 특

히 수소함량이 높은 석탄가스 CO/H<sub>2</sub> (20/80%)인 경우에 역화 (flashback)가 일어나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4와 5는 당량비가 0.6일 때 대기압과 5 bar에서 Syngas 화염의 다른 연료조성에 대해 축방향 중심 단면에서 예측된 평균 속도벡터, scalar G, 온도장을 도시하였다. 모든 경우에 화염안정화가 이루어지는 것으로 나타났고 H<sub>2</sub> 함량이 감소할수록 압력이 증가할수록 화염부상높이는 증가하는 것을 볼 수 있다.

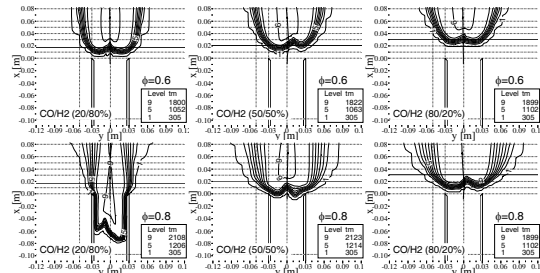


Fig. 3 Mean temperature at  $\phi=0.6/0.8$  and  $p=1$  bar for different fuel composition. Left to right: CO/H<sub>2</sub> (20/80%), CO/H<sub>2</sub> (50/50%), CO/H<sub>2</sub> (80/20%).

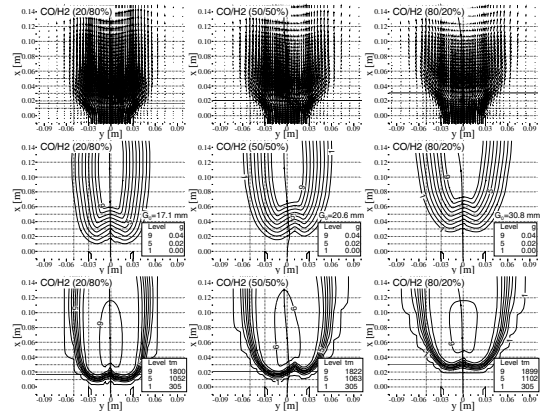


Fig. 4 Mean flame field in terms of velocity vectors, scalar G, and temperature at  $\phi=0.6$  and  $p=1$  bar for different fuel composition. Left to right: CO/H<sub>2</sub> (20/80%), CO/H<sub>2</sub> (50/50%), CO/H<sub>2</sub> (80/20%).

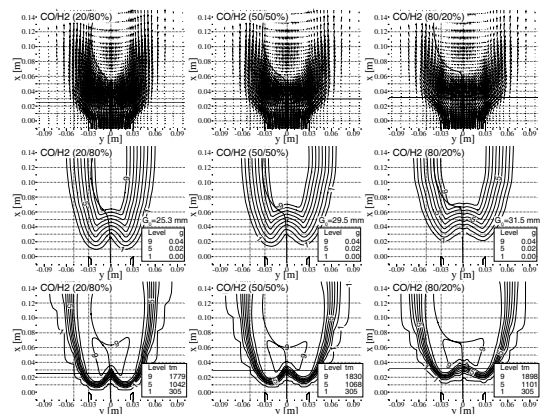


Fig. 5 Mean flame field in terms of velocity vectors, scalar G, and temperature at  $\phi=0.6$  and  $p=5$  bar for different fuel composition. Left to right: CO/H<sub>2</sub> (20/80%), CO/H<sub>2</sub> (50/50%), CO/H<sub>2</sub> (80/20%).

Syngas 예혼합 화염의 화염안정성에 대한 H<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub> 희석의 영향을 알아보기 위해 30%와 50%

H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>를 첨가한 연료조성에 대해 수치해석을 수행하였다. Fig. 6과 7은 대기압과 5 bar에서 다른 연료조성에 대해 축방향 중심 단면에서 예측된 평균 속도벡터, scalar G, 온도장을 도시하였다. H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>의 첨가량이 증가할수록 화염부상높이가 증가하고 고온화염영역이 감소함을 알 수 있으며 이러한 희석효과는 H<sub>2</sub>O첨가 시보다 CO<sub>2</sub> 첨가 시에 상대적으로 크게 나타나고 있다. 또한 대기압과 5 bar에서 전체적인 화염특성은 유사하게 나타났으며 5 bar인 경우가 대기압의 경우에 비하여 약간 높은 위치에서 화염이 안정화되었다.

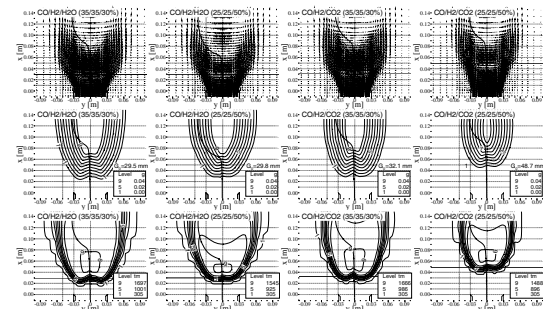


Fig. 6 Mean flame field in terms of velocity vectors, scalar G, and temperature at  $\phi=0.6$  and  $p=1$  bar for different fuel composition. Left to right: 30%-H<sub>2</sub>O, 50%-H<sub>2</sub>O, 30%-CO<sub>2</sub>, 50%-CO<sub>2</sub>.

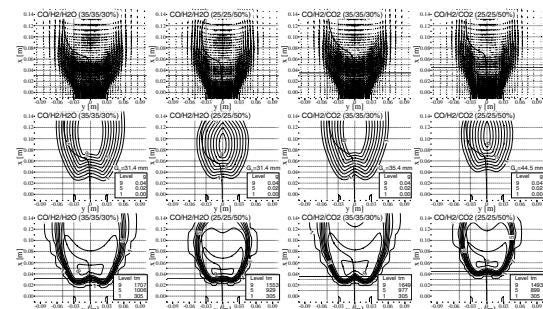


Fig. 7 Mean flame field in terms of velocity vectors, scalar G, and temperature at  $\phi=0.6$  and  $p=5$  bar for different fuel composition. Left to right: 30%-H<sub>2</sub>O, 50%-H<sub>2</sub>O, 30%-CO<sub>2</sub>, 50%-CO<sub>2</sub>.

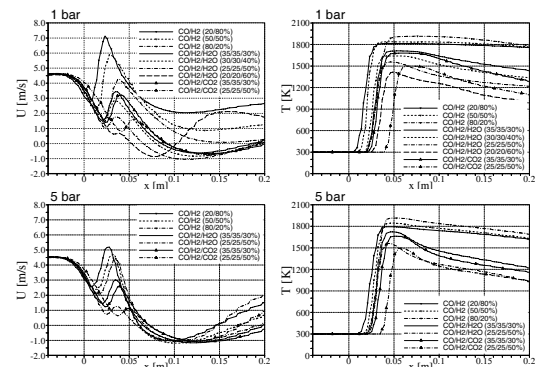


Fig. 8 Centerline profiles of mean axial velocity and temperature for different fuel composition at  $\phi=0.6$  and  $p=1/5$  bar.

Fig. 8은 대기압과 5 bar에서 다른 연료조성에 대해 축 중심을 따라 예측된 평균 축방향 속도와 온도 분포를 도시하였다. H<sub>2</sub> 함량이 감소할수록 H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> 함량이 증가할수록 화염부상높이는 증가하는 것을 볼

수 있다.

이러한 수치계산결과로부터 수소조성비가 80%이하인 IGCC용 Syngas는 저 스윙버너에서의 회박예혼합 연소 모드에서 충분한 화염안정성을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 level-set 기반의 화염편 모델을 사용하여 저 스윙 버너에 의해 안정화되는 석탄가스 난류 예혼합 부상화염장의 구조와 안정화 메커니즘을 수치 해석 하였다. 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 석탄가스 (CO/H<sub>2</sub>) 예혼합 화염에서 당량비가 0.8로 증가시키면 화염부상높이는 낮아지고 특히 수소함량이 높은 석탄가스인 CO/H<sub>2</sub> (20/80%) 경우에 역화 (flashback)가 일어나게 된다.
- (2) 당량비가 0.6이고 대기압과 5 bar에서 Syngas 예혼합 화염의 경우 모든 연료조성에 대하여 화염안정화가 이루어지는 것으로 나타났으며 H<sub>2</sub> 함량이 감소할수록 압력이 증가할수록 화염부상높이는 증가하였다.
- (3) H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>의 첨가량이 증가할수록 화염부상높이가 증가하고 고온화염영역이 감소함을 알 수 있으며 이러한 회석효과는 H<sub>2</sub>O 첨가 시보다 CO<sub>2</sub> 첨가 시에 상대적으로 크게 나타나고 있다. 또한 대기압과 5 bar에서 전체적인 화염특성은 유사하게 나타났으며 5bar인 경우가 대기압의 경우에 비하여 약간 높은 위치에서 화염이 안정화되었다.
- (4) 수치계산결과로부터 수소조성비가 80% 이하인 IGCC용 Syngas는 저 스윙버너에서의 회박 예혼합 연소 모드에서 충분한 화염안정성을 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 “신재생 에너지 기술개발 사업”의 일환으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] F. Bonzani and P. Gobbo, 2007, GT2007-27114, ASME Turbo Expo 2007, ASME.
- [2] H. Sun, S. I. Yang, G. Jomaas, and C. K. Law, 2007, "High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion," Proc. Comb. Institute, Vol. 31, pp. 439-446.
- [3] A. Frassoldati, T. Faravelli, and E. Ranzi, 2007, "The ignition, combustion and flame structure of carbon monoxide/hydrogen mixtures. Note 1: Detailed kinetic modeling of syngas combustion also in presence of nitrogen compounds," Int. J. Hydrogen Energy.
- [4] FP5 Project NNE5-2001-00644: High Efficient Gas Turbine with Syngas Application (HEGSA), Progress Report, 2004.
- [5] F.A. Williams, 1985, "Turbulent Combustion," in The Mathematics of Combustion (J.D. Buckmaster, ed.), pp. 197-1318.

- [6] N. Peters, 2000, Turbulent Combustion, Cambridge University Press, Cambridge.
- [7] R.K. Cheng, 1995, "Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl," Combust. Flame, Vol. 101, pp. 1-14.
- [8] B. Bedat and R.K. Cheng, 1995, "Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence," Combust. Flame, Vol. 100, pp. 485-494.
- [9] T. Plessing, C. Kortschik, N. Peters, M.S. Mansour, and R.K. Cheng, 2000, "Measurements of the turbulent burning velocity and the structure of premixed flames on a low-swirl burner," Proc. Combust. Inst., Vol. 28, pp. 359-366.
- [10] I.G. Shepherd, R.K. Cheng, T. Plessing, C. Kortschik, and N. Peters, 2002, "Premixed flame front structure in intense turbulence," Proc. Combust. Inst., Vol. 29, pp. 1833-1840.
- [11] C. Kortschik, T. Plessing, and N. Peters, 2004, "Laser optical investigation of turbulent transport of temperature ahead of the preheat zone in a premixed flame," Combust. Flame, Vol. 136, pp. 43-50.
- [12] D.T. Yegian and R.K. Cheng, 1998, "Development of a lean premixed low-swirl burner for low NOx practical applications," Combust. Sci. Tech., Vol. 139, pp. 207-227.
- [13] R.K. Cheng, D.T. Yegian, M.M. Miyasato, G.S. Samuelsen, C.E. Benson, R. Pellizzari, and P. Loftus, 2000, "Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers," Proc. Combust. Inst., Vol. 28, pp. 1305-1313.
- [14] D. Littlejohn, A.J. Majeski, S. Tonse, C. Castaldini, and R.K. Cheng, 2002, "Laboratory investigation of an ultralow NOx premixed combustion concept for industrial boilers," Proc. Combust. Inst., Vol. 29, pp. 1115-1121.
- [15] S. Kang and Y. Kim, 2003, "Parallel unstructured-grid finite-volume method for turbulent nonpremixed flames using the flamelet model," Numer. Heat Transfer B, Vol. 43, pp. 525-547.
- [16] S. Kang, H. Kim, J. Lee, Y. Kim, J. Chung, and D. Ahn, 2008, "Stabilization and combustion processes of turbulent premixed lifted methane-air flames on low-swirl burners," Energy and Fuel, Vol. 22, No. 2, pp. 925-934.