

## 비정상 소화 과정에서의 화염 온도 및 OH 라디칼의 변화

이은도\* · 이기호\*\* · 오광철\* · 신현동†

(2004년 6월 15일 접수, 2004년 9월 24일 심사완료)

### Changes of the Flame Temperature and OH Radical in the Unsteady Extinction Process

Uen Do Lee, Ki Ho Lee, Kwang Chul Oh and Hyun Dong Shin

**Key Words :** Rayleigh Scattering Method(Rayleigh 산란 측정법), OH LIF Method (OH 레이저 유도 형광법), Unsteady Extinction Process(비정상 소화)

#### Abstract

A flame extinction phenomenon is a typical unsteady process in combustion. Flame extinction is characterized by various physical phenomena, such as convection, diffusion, and the production of heat and mass. Flame extinction can be achieved by either increasing the strain rate or curvature, by diluting an inert gas or inhibitor, or by increasing the thermal or radiant energy loss. Though the extinction is an inherently transient process, steady and quasi-steady approaches have been used as useful tools for understanding the flame extinction phenomenon. Recently, unsteady characteristics of flames have been studied by many researchers, and various attempts have been made to understand unsteady flame behavior, by using various extinction processes. Representative parameters for describing flame, such as flame temperature, important species related to reactions, and chemi-luminescence of the flame have been used as criterions of flame extinction. In these works, verification of each parameter and establishing the proper criterions of the extinction has been very important. In this study, a time-dependent flame temperature and an OH radical concentration were measured using optical methods, and the instantaneous change of the flame luminosity was also measured using a high-speed ICCD (HICCD) camera. We compare the unsteady extinction points obtained by three different methods, and we discuss transient characteristics of maximum flame temperature and OH radical distribution near the extinction limit.

#### 기호설명

$a$  : 변형률  
 $V$  : 축 방향 노즐 출구 유속  
 $\rho$  : 유체의 밀도  
 $\lambda$  레이저 파장

$R$  : Rayleigh 산란 신호  
 $\sigma_{Ri}$  : Rayleigh scattering cross section  
 $x_i$  :  $i$  번째 화학종의 몰분률  
 $u$  : 반경방향 유속

#### 1. 서론

화염 소화(flame extinction)는 점화(ignition)와 함께 화염의 유무를 결정하는 현상으로 연소에서 나타나는 가장 대표적인 비정상(unsteady) 현상의 하나이다. 화염 소화는 반응물 내 희석제의 종류 및 양, 화염 근처 유속에 따른 변형률(strain rate)의 크기, 전도, 대류, 복사 등에 의한 화염으로부터의 열 에너지의 손실 등에 의해 영향을 받는다.<sup>(1,2)</sup>

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 현대자동차 연구소

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail: hdshin@kaist.ac.kr

TEL: (042)869-8821 FAX: (042)869-8200

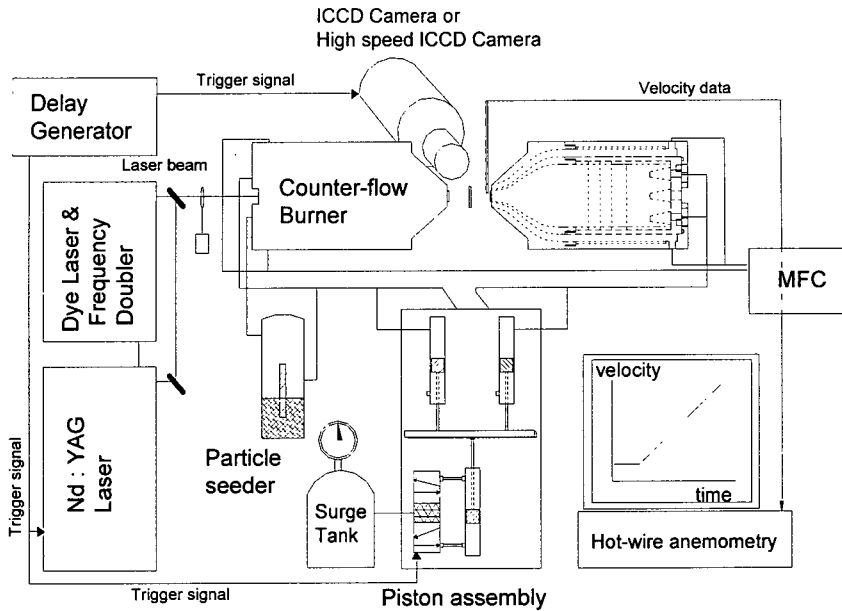


Fig. 1 Schematic of experimental setup

이와 같이 화염 소화는 그 자체로도 매우 다양한 물리현상이 나타나는 흥미로운 문제이지만, 난류 연소, 부상 화염의 선단, 화염의 안정화 조건 등 화염 소화가 나타나는 비정상 연소장을 모델링 하는데 있어 필수적인 요소의 하나이다. 화염 소화는 본질적으로 비정상 현상이지만 비정상적인 소화를 측정하고 기준을 규정하는데 내포된 어려움 때문에 정상(steady) 및 준 정상상태 (quasi-steady)를 이용한 접근 방법이 널리 쓰여 왔다. 그동안 이러한 정상 및 준 정상 상태를 가정한 접근을 통해 다양한 조건에서의 소화 특성 및 소화 조건이 보고되어 왔으며 이러한 결과는 난류 연소 모델링에 활용되어 왔다.<sup>(3-10)</sup>

최근 화염의 비정상 특성에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있으며 특히 소화점 근처의 화염을 대상으로 하여 화염의 비정상 거동을 이해하고자 하는 노력들이 있어왔다.<sup>(11-18,20)</sup> 정상 상태의 경우 실험 장치 및 조건에 따라 다소 차이가 있지만 명확한 소화점이 존재하며 이때의 각 물리량을 소화점의 물리량으로 정의 할 수 있지만 비정상 화염에서는 각 물리량의 거동에 차이가 있을 수 있으며 이 경우 어떤 물리량을 이용할 때 가장 명확히 소화 현상을 정의할 수 있고 또 각 물리량 간의 관계는 어떠한지를 아는 것은 매우 중요한 문제이다. 그렇다면 화염의 소화를 판단할 수 있는 기준은 어떤 것이 있을까? 일반적으로 정상 상태 및 비 정상 상태 모두에서 화염의 자발광, 화염의 온도, 반응에 큰

영향을 미치는 화학종의 분포 등의 물리량 (physical property)이 소화 여부를 판단하는 기준으로 쓰여져 왔으며 이들은 모두 연소 반응과 관련된 인자(parameter)들로 서로 밀접한 관계를 가진다.

Konnov et al. 등은 정상 상태의 대향 제트 에혼합 화염에서 소화를 보다 명확히 규정하는 물리량을 찾기 위해 다양한 경계 조건에서 변형을 증가에 따른 화염 온도와 OH 라디칼(radical)의 농도 변화를 비교하고 OH 라디칼의 분포가 화염의 특성을 보다 잘 대변한다고 주장한 바 있다.<sup>(22)</sup> 비정상 화염의 경우 Korusoy et al.은 화염 소화의 기준으로 화염의 자발광을 이용 하였으며 Katta et al.은 정상 상태 소화 온도를 기준으로 비정상 소화를 판단하였고 Lee et al. 등은 전개 제트 화염의 비정상 소화 과정에서 화염의 온도 변화를 열전대를 이용하여 측정된 바 있다.<sup>(15,16,21)</sup> Brown et al., Thevenin et al. 및 Santoro et al.들은 OH Radical 의 농도를 측정하여 소화의 기준으로 삼았다.<sup>(17-19)</sup> 이와 같이 비정상 화염의 소화에 대해 많은 연구가 있어왔지만 소화점 근처에서의 각 물리량의 거동에 대해 자세히 살펴본 연구는 드문 것이 사실이다.<sup>(12)</sup> 따라서 본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 화염 온도, OH 라디칼의 농도 화염의 자발광의 변화를 측정하고 소화점 근처에서 각 물리량의 거동 특성을 살펴봄으로써 화염의 비정상 소화를 보다 면밀히 관찰해 보고자 한다.

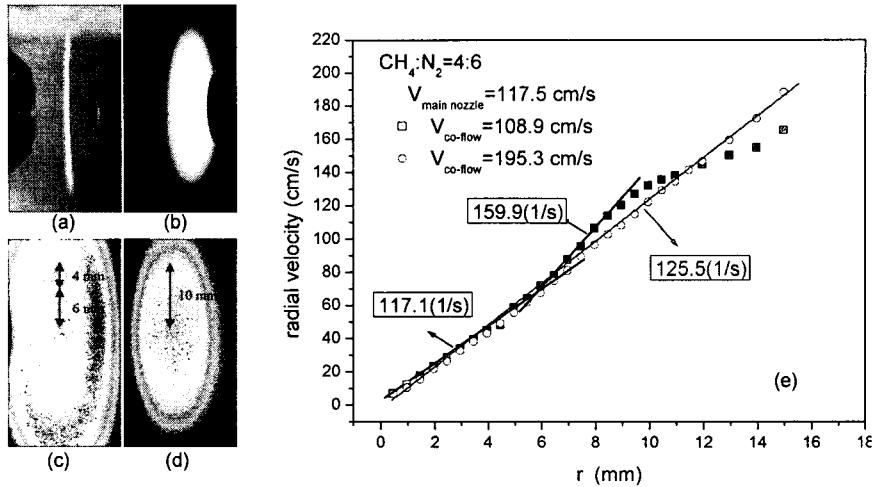


Fig. 2 (a) Flame image [90 degree], (b) Flame image [45 degree], (c) CH chemi-luminescence image [ $V_{\text{main nozzle}}=117.5$  cm/s,  $V_{\text{co-flow}}=108$  cm/s], (d) CH chemi-luminescence image [ $V_{\text{main nozzle}}=117.5$  cm/s,  $V_{\text{co-flow}}=195.3$  cm/s] (e) Radial velocity distribution near the flame [measured by LDV]

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장치

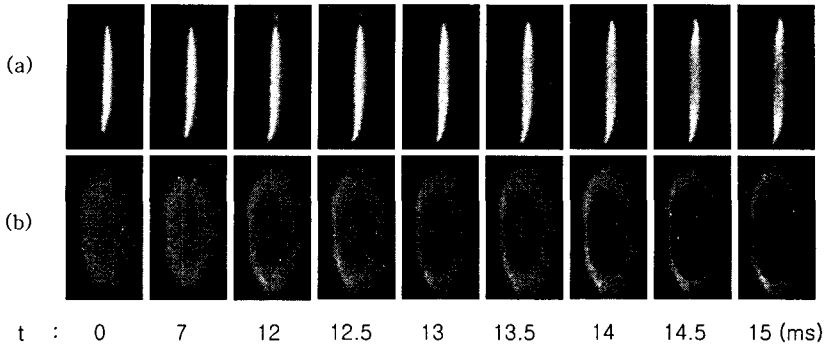
Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치이다. 실험 장치는 연소기와 피스톤 부, 레이저 및 동기 시스템으로 이루어진 측정 부등 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 연소기는 대향 제트 버너(opposing jet counter-flow burner)로 노즐 출구의 유속을 균일하게 하기 위해 18.7의 수축비를 가지는 수축(contraction) 노즐을 사용하였으며 미세한 메쉬와 다공물질을 이용하여 유속 변동 시 연소기 내 유동을 균일하게 하였다. MFC를 통해 조절된 유량은 2L 부피를 가지는 혼합 챔버(mixing chamber)와 오리피스(orifice)를 지나 버너로 공급된다. 연료 측의 혼합 챔버는 메탄과 질소를 혼합 시키기 위해 사용되었으며, 산화제 측에도 물리적으로 같은 유로(flow path) 조건을 주기 위해 같은 크기의 챔버를 설치하였다. 각 챔버 출구에는 1mm 직경의 오리피스를 달아 피스톤에 의해 발생하는 압력 변동이 상류의 유량 제어 부에 영향을 미치지 못하도록 하였다. 실험의 초기 조건이 되는 정상 상태의 화염을 얻기 위해 질소로 희석된 순수 메탄을 연료로, 건조된 공기를 산화제로 사용하였고 주 노즐로 공급되는 연료 및 산화제와 같은 유속의 질소를 주위류 노즐로 공급하여 보다 안정화된 화염을 얻었다.

피스톤 부는 안정화된 화염에 유속변동을 주기 위해 설치되었으며 연료와 산화제를 저장했다가 분출하는 두 개의 상단 피스톤과 이들을 구동하기 위한 하단의 공압 피스톤으로 구성되어 있다.

상단 피스톤의 출구는 유량 제어 부에서 버너로 이어지는 유로와 T 형태로 연결되어 있어 하단 피스톤이 아래로 내려오는 동안 각 유로의 유체를 상단 피스톤에 저장했다가 하단 피스톤이 위쪽으로 올라가는 동안 버너로 연료와 공기를 공급하며 양단에 동일한 크기의 유속 변동을 일으키게 된다. 균일한 압력으로 피스톤을 구동하기 위해 서지 탱크를 사용하였으며 솔레노이드(solenoid) 밸브를 이용하여 피스톤을 제어한다. 피스톤의 이동은 안정화된 화염에 유속 변동을 가하여 소화에 이르게 하며 산화제 노즐 출구에서 열선 유속계(hot-wire anemometry, Dantec CTA 56C17)를 사용하여 유속 변동을 측정할 결과 시간에 따라 선형적으로 증가하는 형태의 유속 변동이 나타남을 확인할 수 있었다.

### 2.2 광학 측정

시간에 따라 변화하는 화염 온도와 OH 라디칼의 농도를 측정하기 위하여 Rayleigh 산란 기법과 OH LIF 방법이 사용되었다. Rayleigh 산란 기법은 Nd:YAG 레이저(Continuum, 500mJ, 532nm)를 광원으로 사용하고 band pass filter(532nm, FWHM 10nm)를 장착한 ICCD(Princeton Inc. 512x512)로 신호를 측정하였다. OH LIF는 Nd:YAG 레이저와 더블어 dye 레이저 및 파장 분할기(frequency doubler)를 이용하여 283.01nm로 동조된 레이저(~6mJ)를 광원으로 사용하였고,  $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi^+(v'=1, v''=0)$  전이 Q,6 라인의 OH 라디칼의 신호를 UG-11과 WG-305 필터를 장착한 ICCD 카메라를 이용하여 측정하였다. 화염의 자발광을 통한 소화점은 High speed ICCD 카메라(HICCD, Phantom



**Fig. 3** Behaviors of flame during the unsteady extinction process (a) flame images at 90 degree view (b) flame images at 45 degree view [pictured by HICCD camera, CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>= 5:5 a<sub>initial</sub>=266.1 (1/s)]

v7.0)를 사용하여 측정하였다. 레이저, ICCD 카메라 및 HICCD 카메라는 신호 지연 발생기 (pulse delay generator, BNC 555-4C)에 의해 piston 과 동기되어 작동하며 피스톤의 움직임을 기준으로 하여 일정기간의 지연시간을 줌으로써 시간에 따른 화염의 특성을 관찰할 수 있었다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 화염 소화

##### 3.1.1 정상 상태 화염의 특성

Fig. 2 는 버너에 안정화된 정상 상태(steady state)의 대향류 화염의 직접사진, CH 라디칼 이미지, 그리고 화염대 근처 반경방향 유속 분포를 도시한 그림이다. Fig. 2(a)는 화염 자발광을 직각 방향에서, Fig. 2(b)는 45 도 각도에서 직접 촬영한 사진으로 화염이 1 차원 형태로 안정화 되어있는 모습을 확인할 수 있다. Fig. 2(c)는 주위류의 속도가 주유동의 속도와 비슷한 경우 화염의 CH 라디칼의 분포를 band pass filter(431nm, FWHM 10nm)를 장착한 ICCD 를 사용하여 45 도 각도로 촬영한 그림이다. CH 라디칼의 분포는 정성적으로 반응률과 비례하는 관계에 있으므로 강도가 약한 환형의 부분은 반응률이 매우 약한 부분으로 국부적인 소멸이 일어났다고 생각할 수 있다. 그림에서 CH 라디칼의 분포가 반경방향으로 변화하고 있는데 축 근처에서 ( $r < 6\text{mm}$ ) 균일한 강도를 가지다가  $6\text{mm} < r < 10\text{mm}$  에서 환형의 소멸 지역이 나타남을 알 수 있다. 최

외곽의 화염은 대향 제트 유동장의 제어 범위를 벗어난 영역으로 관심의 대상이 아니다. 주위류의 유속이 주유동에 비해 큰 경우인 Fig. 2(d)의 경우 축에서부터  $r = 10\text{mm}$  까지 비교적 균일한 화염이 존재하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(e)는 화염대에서 산화제 쪽으로 2mm 떨어진 위치에서 주위류의 유속에 따른 반경방향 유속을 LDV 를 이용하여 측정한 결과이다. Fig. 2(c)에 해당하는  $V_{\text{co-flow}} = 108\text{ cm/s}$  에서는 반경방향으로 유속구배 ( $du/dx$ )의 변화가 있으며 중심 축에서  $r = 6\text{mm}$  근방까지는  $du/dx = 117.1(1/s)$ 의 유속구배를  $6 < r < 10$  에서는  $du/dx = 159.9(1/s)$ 의 유속구배를 가지고  $r > 10$  에서는 유속구배가 다시 감소하고 있으며  $V_{\text{co-flow}} = 195.3\text{ cm/s}$  에서는  $r = 10\text{mm}$  범위에서 균일한 유속구배를 가짐을 알 수 있다. 이는 앞서 Fig. 2(c), 2(d)에서 살펴본 CH 라디칼의 공간 분포의 특성과 일치하는 결과로  $6 < r < 10$  의 구간에서 국부적인 소멸 영역이 나타나는 것은 그 지역의 유속 구배가 상대적으로 크기 때문임을 알 수 있다. 이렇게 대향 제트 형태 유동장에서 정체점 근처의 반경방향 유속 구배의 변화가 존재하는 것은 Rolon et al., Korusoy et al.등이 비 반응 유동장에서 보고한 내용과 같은 결과로 대향 제트 형태 유동장의 일반적 특징으로 사료 되며 환형의 국부적인 소멸 영역의 존재는 화염대 근처의 유속 구배 즉 변형률에 의한 영향으로 볼 수 있다.<sup>(20,21)</sup>

##### 3.1.2 비정상 화염 소화의 특성

Fig. 3 은 비정상 소화 과정을 겪고 있는 화염의 시간에 따른 변화를 고속카메라를 이용하여 촬영한 결과이다.  $t = 1\text{ms}$  에서 노즐 출구의 유속이

변화하기 시작하며  $t=7\text{ms}$  이후에서 화염대 중앙에서부터 화염 강도의 변화가 관찰되기 시작한다. 시간이 지남에 따라 화염의 강도는 점점 더 약화되어 소화점이 발생하기 시작하며 이 소화 영역은 화염대 중심 쪽으로 점점 진행되고 최종적으로 중심 화염의 소화가 일어난다. 본 연구에서는 중심 화염의 소화를 화염의 최종 소화 점으로 잡았으며 Fig. 3의 경우  $t=15\text{ms}$  에서 화염의 최종 소화가 일어난다. 화염의 자발광을 통한 소화점은 위와 같은 방법으로 반복 측정하여 구하였으며 실험결과 1ms 이내의 높은 재현성을 보임을 확인할 수 있었다.

3.2 Rayleigh 산란신호를 이용한 화염 온도 측정

Fig. 4 는 시간에 따른 Rayleigh 산란 신호의 변화를 보여준다. Rayleigh 산란 신호는 측정 위치의 분자 밀도와 각 분자의 Rayleigh 산란 단면적(scattering cross section)에 의해 신호의 세기가 결정된다. 먼저 화염이 없는 경우 Rayleigh 산란 신호를 살펴보면 정체점을 기준으로 왼쪽의 공기부분과 오른쪽의 연료 부분의 Rayleigh 산란 신호의 차이를 살펴볼 수 있다. 이는 연료 측 메탄의 Rayleigh 산란 단면적이 매우 크기 때문에 같은 레이저 강도에서 더 큰 신호가 검출되기 때문이다. 화염이 있는 경우 화염주변의 Rayleigh 신호 강도가 매우 약하게 나타나게 되는데 이는 화염에 의한 온도 상승으로 인해 단위 부피당 분자의 개수가 감소하기 때문이다. 시간에 따른 Rayleigh 신호의 변화를 살펴보면 화염대 근처 고온부의 너비(thermal thickness)의 변화를 명확히 관찰 할 수 있다. 본 연구에서는 Rayleigh 신호 분석을 위해  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  의 주요 화학종을 고려하였으며 상온 공기( $T=298\text{ K}$ )와 화염대 사이의 신호세기 비를 이용하여 화염 최고 온도를 측정하였다. 각 화학종의 Rayleigh 산란 단면적은  $R_{\text{ref}}^{(23)}$ 의 값을 사용하였고 최고 온도 지점에서 각 화학종의 물분률은 수치해석<sup>(29,30)</sup>을 통해 얻은 결과를 사용하였다. Table 1 에 각 화학종의 Rayleigh 산란 단면적과 수치해석 결과 화염이 최고 온도를 가지는 지점에서의 각 화학종을 고려한 산란 단면적(Mixture Averaged Rayleigh Scattering Cross Section)을 정리하였다. Table 1 을 보면  $\lambda = 532\text{nm}$  를 기준으로 초기 조건 ( $a_{\text{initial}}=226.8\text{ (1/s)}$ ,  $\sum x_i \sigma_{Ri} \times 10^{28} (\text{cm}^2) = 6.33858$ )에서 소화 조건 ( $a_{\text{steady, extinction}}=179.4\text{ (1/s)}$ ,  $\sum x_i \sigma_{Ri} \times 10^{28} (\text{cm}^2) = 6.31211$ )에 이르기까지 0.42% 이내에서 변화하고 이는 1800K 를 기준으로 온도 예측에 있어 최대 8K 정도의 오차를 유발하지만 이는 실험 오차에

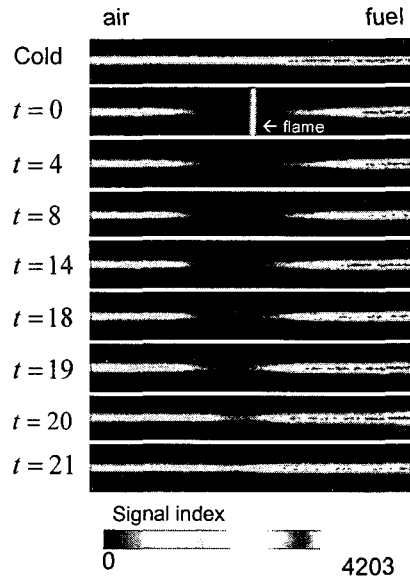


Fig. 4 Rayleigh scattering signal image without the flame and Rayleigh scattering signal images during the unsteady extinction process[ $\text{CH}_4:\text{N}_2=5:5$   $a_{\text{initial}}=226.8\text{ (1/s)}$ ]

포함되는 값이다. Rayleigh 산란 신호에서 화염의 온도를 구하는 식은 (1)과 같다.

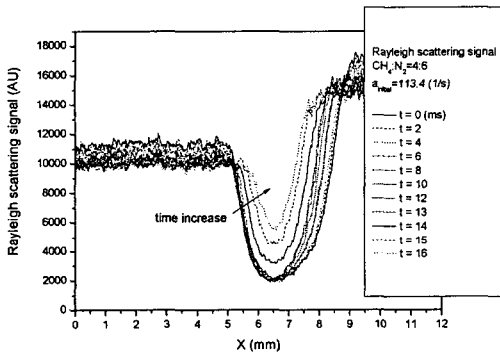
$$\frac{T_{\text{flame}}}{T_{\text{air}}} = \frac{(R_{\text{air, 298K}} - R_{\text{background noise}})}{(R_{\text{flame}} - R_{\text{background noise}})} \cdot \frac{\left( \sum_i^n x_i \sigma_{Ri} \right)_{\text{flame}}}{\left( \sum_i^m x_i \sigma_{Ri} \right)_{\text{air}}} \quad (1)$$

Fig. 5 는 각 시각에서 Rayleigh 산란 신호의 공간 분포를 도시한 그림이다. 왼쪽이 산화제 측, 오른쪽이 연료 측이며 중앙의 화염대 근처에서는 고온에 의해 분자의 밀도가 낮아져 약한 Rayleigh 산란 신호가 측정됨을 관찰 할 수 있다. 위 신호는 각 시간 간격에서 10 회씩 측정된 결과를 평균한 신호의 강도이며 별도의 스무딩(smoothing) 과정을 거치지 않은 신호이다. 각 시각에서 Rayleigh 신호의 최저점이 최고 온도 지점이며 화염의 영향을 벗어난 상온 영역에서 Rayleigh 산란 단면적의 차이 때문에 왼쪽 산화제 측 신호보다 오른쪽 연료 측 신호가 더 큼을 알 수 있다. 그림을 살펴보면 시간이 지남에 따라 화염대 내 고온부의 너비(thermal thickness)가 감소하고 있으며 중앙의 Rayleigh 신호 최저점의 강도가 점점 강해지고 있음을 알 수 있다. 한편 상온 공기 측( $0 < x < 5\text{mm}$ )의 신호를 살펴보면 각 경우에 대해 Rayleigh 신호의 세기가 10% 내외에서 변화하고 있음을 알 수 있다.

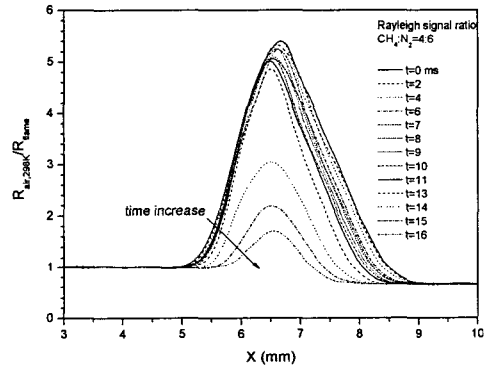
**Table 1** Rayleigh cross-sections of various gases and Rayleigh cross-sections at  $T_{max}$  with various strain rates

Component	Rayleigh scattering cross-section ( $\lambda = 532nm$ ) $\sigma_{Ri} \times 10^{28} (cm^2)$	Strain rate(1/s)	Rayleigh scattering cross-section $\sum x_i \sigma_{Ri} \times 10^{28} (cm^2)$
H <sub>2</sub>	1.335	226.8	6.33858
O <sub>2</sub>	5.083	237.0	6.33432
OH	2.889	261.6	6.33443
H <sub>2</sub> O	4.428	291.2	6.32199
CH <sub>4</sub>	13.42	322.8	6.32197
CO	7.870	358.6	6.30811
CO <sub>2</sub>	13.79	358.8	6.31211
N <sub>2</sub>	6.129		
Air	5.777		

$x_i$  was obtained from numerical simulation  
(Chemkin, GRI 3.0)



**Fig. 5** Spatial distribution of Rayleigh scattering signal with respect to the time[CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>=4:6  $a_{initial}$ =226.8 (1/s)]



**Fig. 6** Rayleigh scattering signal ratio by dividing the Rayleigh signal of the ambient air with that of the flame [CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>=4:6  $a_{initial}$ =226.8 (1/s)]

이는 각각의 측정 시 레이저 출력에 변화가 있음을 의미하며 각 실험 결과에서 온도를 예측할 때 레이저 강도의 변화를 고려해야 함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 각 시각에서 식 (1)을 이용하여 온도를 예측할 때 10회 측정 각각의 신호에서 공기의 Rayleigh 신호와 화염의 Rayleigh 신호를 이용하여 계산한 후 이를 평균하여 사용하였다. Fig. 6은 상온 공기의 Rayleigh 산란 신호와 화염대의 Rayleigh 산란 신호의 비를 나타낸 그림이다. Fig. 5의 신호를 스무딩(smoothing)한 후 주변의 잡음 신호(background noise signal)를 제거하고 상온 공기 측의 Rayleigh 산란 신호의 평균값을 각 위치의 Rayleigh 산란 신호로 나누는 값이다. 위 결과는 화염의 온도와 정성적으로 비례하는 값으로써 각 위치에서 Rayleigh 산란 단면적을 곱해주면 화염의 온도를 구할 수 있다. 이 그림에서도 시간에 따른 화염대의 변화를 유추 할 수 있다.

시간이 지남에 따라 화염대 근처 고온부의 너비(thermal thickness)가 줄어들을 알 수 있으며 화염의 최고 온도도 감소하고 있음을 확인 할 수 있다.

### 3.3 OH LIF 를 이용한 OH radical 측정

OH 라디칼은 연소 반응에 있어 가장 중요한 라디칼의 하나로 그 동안 화염의 특성을 규정하는 대표적인 인자로 사용되어왔다.<sup>(24-28)</sup> 라디칼이 가지는 특성상 연소 반응의 변화를 가장 빠르고 정확히 대표할 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 본 연구에서는 화염 소화 한계에서 OH 라디칼의 거동을 살펴보고 이를 화염의 온도 변화와 비교하고자 하였다. Fig. 7은 시간에 따른 OH LIF 신호의 변화를 나타낸 그림 이다. 유속 변동에 의해 화염이 영향 받아 소화점에 가까이 갈수록 화염내의 OH 농도가 감소하고 있음을 확인할 수

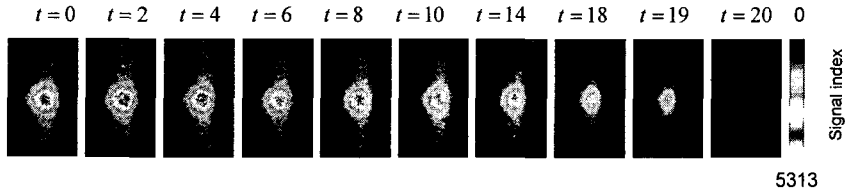


Fig. 7 OH LIF signal images of the unsteady extinction process [CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>= 5:5 a<sub>initial</sub>=226.8 (1/s)]

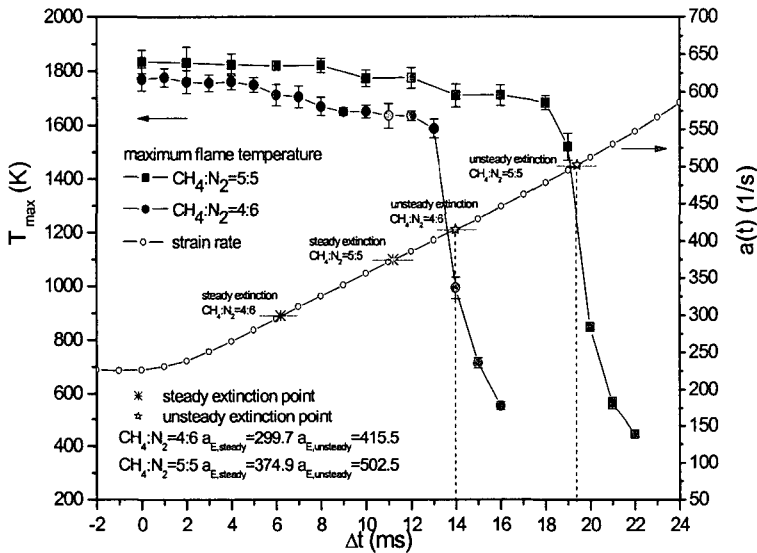


Fig. 8 Behaviors of maximum flame temperature and strain rate history with respect to the time; star marks indicate the unsteady extinction points [ CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>= 4:6 CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>= 5:5 a<sub>initial</sub>=226.8 (1/s)]

있다. 레이저가 통과하는 부피 (probe volume)의 중심 부분에서 강한 OH 신호가 검출되며 레이저 조사 볼륨의 변두리 (probe edge) 부분에서 약한 OH LIF 신호가 검출 됨을 확인할 수 있다. 이 경우도 Rayleigh 산란 신호 측정 시와 마찬가지로 각 경우에 대해 10 회씩 반복 실험하였으며 그 결과를 평균하여 사용하였다.

#### 4. 토 의

##### 4.1 소화점 근처의 화염 온도의 특성

Fig. 8 은 시간에 따라 변화하는 변형률. 각 경우 최고 화염 온도 그리고 화염 자발광을 관찰해 얻은 정상 및 비정상 소화점을 각각 도시한 그림이다. 변형률은 노즐 출구 유속을 측정된 후 아래 식 (2)에 의하여 구하였다.<sup>(7)</sup> 그림을 보면 시간이 지남에 따라 변형률이 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며

$$a = -\frac{2 \cdot V_{oxidant}}{L} \left( 1 + \frac{V_{fuel}}{-V_{oxidant}} \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{oxidant}} \right)^{1/2} \right) \quad (2)$$

일정시간이 지난 후 화염의 소화가 나타남을 알 수 있다. 이때 그림에 표시된 비정상 소화점 (unsteady extinction point)은 고속 카메라로 측정된 화염의 자발광이 사라지는 지점을 반복 측정하여 얻은 평균 시간에서의 변형률이다. 여기서 시간에 따른 화염 최고 온도는 측정된 Rayleigh 신호와 식 (1)을 이용해 얻은 값으로 유속 변동이 시작된 초기에는 화염 온도의 변화가 크지 않다가 일정 시간이 지난 후 화염의 온도가 점점 감소하고 고속 카메라 이미지에서 얻은 소화점 근처에서는 온도가 급격히 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 비정상 소화 과정에서의 S-curve 의 upper branch 라 할 수 있다. 유속 변동 초기에 화염 온도가 거의 일정한 영역은 화염이 미처 유속

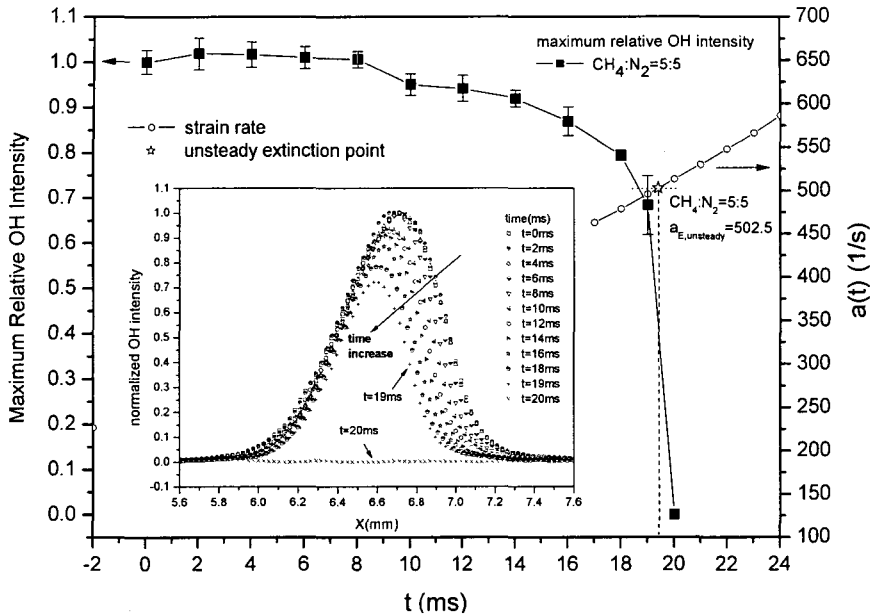


Fig. 9 Change of the maximum relative OH intensity with respect to the time[CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>= 4:6 CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>= 5:5,  $a_{\text{initial}}=226.8$  (1/s)]

변동을 인지하지 못한 영역으로 기존의 비정상 화염 연구에서 대류 확산 영역(convective-diffusive layer)의 지체(delay) 현상으로 보고된 영역으로 사료된다. 이 영역에서는 유속 변화에 의해 확산 영역의 경계가 좁아지게 되지만 화염이 존재하는 확산 반응 영역(diffusive-reactive layer)에 까지 확산이 진행되는데 걸리는 시간 때문에 화염이 유속 변동에 반응하지 못하는 영역이다.<sup>(15,19)</sup>

화염의 자발광이 사라지는 지점의 온도는 CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>=4:6의 경우 약 1000K 정도, CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>=5:5인 경우 1250K 정도로 생각된다. 소화점 근처에서는 화염의 온도가 급격히 떨어지며 자발광 역시 급격히 감소하게 되는데 대략 1600K 이하에서는 더 이상 화염의 자발광이 존재하지 않음을 알 수 있다. 그렇다면 화염의 자발광에 대한 정보 없이 화염 온도만을 가지고 화염의 소화를 결정한다면 어느 지점을 화염의 소화점으로 잡을 수 있을까? Fig. 8을 통해 정확한 소화점을 결정하기는 쉽지 않다. 약 1600K로부터 화염 온도의 감소 폭이 커지지만 정확히 화염의 소화가 일어나는 온도는 정의할 수 없다. 이는 여기서 얻은 화염 온도가 어떤 시각의 각 분자의 온도가 그 순간 평형을 이루고 있다는 국소 평형 가정(local equilibrium assumption)을 통해 얻어진 온도이기 때문이다. 이 경우 화염의 온도는 측정하는 공간 내 각 분자의 분포에 좌우되며 측정 공간의 분자가 유속의 크기에 따라 측정 공간을 벗어나기 때문에 온도의 감소율은 측정 영역 유동의 특성 시간(변형률의 역수)에 좌우되게 된다. 실제로 Fig. 8에서

유동의 특성 시간은 수 ms 정도이며 실제로 화염이 존재하는 1600K 근방에서 상온으로 떨어지는데 걸리는 시간은 유동 특성 시간과 비슷한 값을 확인할 수 있다.

#### 4.2 소화점 근처의 OH radical의 특성

Fig. 9는  $t=0$  ms에서 소화에 이르기까지 시간에 따라 변화하는 OH LIF 신호의 상대적인 공간 분포와 최고 신호 강도를  $t=0$  ms에서의 최대 신호 강도로 정규화(normalize)하여 각각 도시한 그림이다. Fig. 6과 비교해 보면 같은 시각에서 OH 라디칼이 존재하는 영역이 고온부의 너비(thermal thickness)에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 한편 시간이 흐름에 따라 유속 증가에 따른 화염의 변화에 의해 OH 라디칼의 최대 농도와 OH 라디칼이 존재하는 영역이 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 소화점 근처인  $t=19$  ms에서 OH 라디칼의 최대 농도가 초기 조건의 70% 정도로 감소하며 이후 급격히 감소하여 소화점을 지난  $t=20$  ms에서는 OH 라디칼이 완전히 소멸하였음을 확인할 수 있다. OH 라디칼이 사라지는 영역인  $t=19$  ms는 앞서 화염의 자발광과 화염 온도를 통해 살펴본 소화지점과 일치하는 영역이다. 이 결과에서 주목할 것은 소화 지점을 기준으로 OH 라디칼이 완전히 사라진다는 점이다. 앞서 온도 측정 결과에서와 같이 유동 특성 시간에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이는 것이 아니라 소화 즉시 OH 라디칼이 완전히 소멸하게 된다. 이는 OH 라디칼의 반응 시간이 빠르고 또



매우 미량이 존재하기 때문이다.

## 5. 결 론

비정상 유속 변동에 의해 소화해 가는 화염의 자발광의 변화를 살펴본 결과 대향 제트(opposing jet) 형태의 화염은 화염 외곽에서 화염 중심 방향으로 화염의 소화가 일어남을 알 수 있었다. 화염대 근처의 유속을 측정된 결과 위 소화 현상은 대향 제트 유동장의 경우 국소 변형률(local strain rate)이 화염 외곽지역이 더 크기 때문으로 밝혀졌다.

Rayleigh 산란 신호를 이용하여 시간에 따른 화염대 근처 온도장의 변화를 살펴볼 수 있었다. 시간이 지남에 따라 thermal thickness의 변화와 화염 최고 온도의 변화를 살펴볼 수 있었으며, 수치해석을 통해 얻은 물성치를 이용하여 화염 최고 온도를 얻어낼 수 있었다. 그 결과 변형률의 변화에 따른 화염 최고 온도의 변화를 나타내는 S curve의 upper branch를 비정상 소화 과정에서 얻어낼 수 있었다.

OH LIF를 이용하여 시간에 따른 화염의 OH 라디칼의 변화를 살펴볼 수 있었다. OH 라디칼은 Rayleigh 산란 신호를 통해 얻은 thermal thickness에 비해 매우 작은 영역에 존재하며 소화점을 넘어서는 순간 온도에 비해 매우 빠르게 소멸함을 관찰할 수 있었다.

소화점 근처에서 소화를 대표할 수 있는 물리량인 화염의 자발광, 화염 최고 온도, OH 라디칼의 변화를 시간에 따라 측정된 결과 세 물리량을 기준으로 얻은 비정상 소화점은 오차범위 안에서 일치하였으며 유동의 특성에 덜 민감하고 화염의 반응 상태를 잘 대표하는 OH 라디칼의 변화가 보다 명확한 소화 기준을 제시함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 과학재단 지정 우수연구 센터인 연소 기술 연구센터(CERC)와 BK21 사업의 지원으로 수행 되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Tsuji, H., 1982, "Counter-Flow Diffusion Flames," *Prog. Energy Combust. Sci.* 8, pp.93~119.
- (2) Williams, F. A., 2000, "Progress in Knowledge of Flamelet and Extinction," *Prog. Energy Combust. Sci.* 26, pp. 657~682.
- (3) Linan, A., 1974, "The Asymptotic Structure of Counter-Flow Diffusion Flames for Large Activation

- Energies," *Acta Astronautica* 1, pp. 1007~1039.
- (4) Ishizuka, S. and Tsuji, H., 1981, "An Experimental Study of Effect of Inert Gases in Extinction of Laminar Diffusion Flames," *Proc. Comb. Inst* 18, pp. 695~703.
- (5) Puri, I. K. and Seshadri, K., 1986, "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air," *Combust. Flame* 65, pp. 137~150.
- (6) Dixon-Lewis, G. and Massaghi, M., 1988, "Structure and Extinction Limits of Counter-Flow Diffusion Flames of Hydrogen-Nitrogen Mixtures in Air," *Proc. Comb. Inst* 22, pp. 1461~1470.
- (7) Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smook, M. D. and Williams, F. A., 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure, and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Proc. Comb. Inst* 23, pp. 503~511.
- (8) Du, J. and Azelbaum, R. L., 1996, "The Effects of Flame Structure on Extinction of CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Diffusion Flames," *Proc. Comb. Inst* 26, pp. 1137~1142.
- (9) Pitts, W. M. and Blevins, L. G., 1999, "An Investigation of Extinguishment by Thermal Agents Using Detailed Chemical Modeling of Opposed-Flow Diffusion Flames," *Halon Options Technical Working Conference*, pp. 145~156.
- (10) Peters, N., 1983, "Local Quenching Due to Flame Stretch and Non-Premixed Turbulent Combustion," *Combust. Sci. and Tech.* 30, pp. 1~17.
- (11) Peters, N., 1984, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.* 10, pp. 319~339.
- (12) Darabiha, N., 1992, "Transient Behavior of Laminar Counterflow Hydrogen-Air Diffusion Flames with Complex Chemistry," *Combust. Sci. and Tech.* 86, pp. 163~181.
- (13) Oh, C. B. and Lee, C. E. 2003, "Extinction in a Counterflow Nonpremixed Flame Interacting with a Vortex," *Trans. of the KSME B*, Vol. 27, No. 10, pp. 1401~1411.
- (14) Oh, C. B. and Lee C. E. 2001, "Numerical Simulation of Unsteady CH<sub>4</sub>/ Air Jet Diffusion Flame," *Trans. of the KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1087~1096.
- (15) Katta, V. R., Meyer, T. R., Brown, M. S., Gord, J. R. and Roquemore, W. M., 2004, "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flames," *Combust. Flame* 137, pp. 198~221.
- (16) Lee, E. J., Oh, K. H. and Shin, H. D., 2000, "Experiments on The Transient Effect of Evolving Jet Diffusion Flames," *Proc. Comb. Inst.* 28, pp. 2079~2084.
- (17) Brown, T. M., Pitz, R. W. and Sung, C. J., 1998, "Oscillatory Stretch Effects on The Structure and Extinction of Counterflow Diffusion Flames," *Proc. Comb. Inst.* 27, pp. 703~710.
- (18) Thevenin, D., Renard, P. H., Rolon, J. C. and Candle, S., 1998, "Extinction Processes During a Non-premixed Flame-Vortex Interaction," *Proc. Comb. Inst.*

- 27, pp. 719~726.
- (19) Santoro, V. S., Kyritsis, D. C., Linan, A. and Gomez, A., 2000, "Vortex-Induced Extinction Behavior in Methanol Gaseous Flames: a Comparison with Quasi-steady Extinction," *Proc. Comb. Inst.* 28, pp. 2109~2116.
- (20) Rolon, J. C., Veynante, D., Martin, J. P. and Dust, F., 1991, "Counter Jet Stagnation Flow," *Experiments in Fluids* 11, pp. 313~324.
- (21) Korusoy, E. and Whitelaw, J. H., 2002, "Extinction and Relight in Opposed Flames," *Experiments in Fluids* 33, pp. 75~89.
- (22) Konnov, A., Idir, M., Delafau, J. L. and Vovelle, C., 1996, "Experimental Study of Extinction of Non-adiabatic Counter-Flow Premixed Flames," *Combust. Flame* 105, pp. 308~320.
- (23) Namer, I. and Schefer, R. W., 1985, "Error Estimates for Rayleigh Scattering Density and Temperature Measurements in Premixed Flames," *Experiments in Fluids* 3, pp. 1~9.
- (24) Seo, J. I., Kim, N. I., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2003, "An Experimental Study on the Effects of Concentration Gradient and Mean Velocity on the Liftoff Characteristics of the Triple Flame," *Trans. of the KSME B*, Vol. 27, No. 8, pp. 1061~1070.
- (25) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2000, "Temperature Field Measurement of Non-Isothermal Jet Flow Using LIF Technique," *Trans. of the KSME B*, Vol. 24, No. 10, pp. 1399~1408.
- (26) Lee, B. J., Gil, Y. S., Han, J. W. and Chung, S. H., 1996, "Hydroxyl Radical Measurements in the Flame Using LIF," *Trans. of the KSME B*, Vol. 20, No. 2, pp. 710~719.
- (27) Jin, S. H., Nam, G. J., Kim, H. S., Chang, N. N., Park, S. H., Kim, U., Park, K. S., Sim, K. H. and Kim, K. S., 1996, "Planar Measurements of OH and O<sub>2</sub> Number Density in Premixed C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/O<sub>2</sub> Flame Using Laser Induced Predissociative Fluorescence," *Trans. of the KSME B*, Vol. 20, No. 12, pp. 4044~4052.
- (28) Jeong, E. H., Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2003, "Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration Field in a Stirred Mixer Using PIV/LIF Technique," *Trans. of the KSME B*, Vol. 27 No. 4 pp. 504~510.
- (29) Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., Coltrin, M. E., Grcar, J. F., Meeks, E., Moffat, H. K., Lutz, A. E., Dixon-Lewis, G., Smooke, M. D., Warnatz, J., Evans, G. H., Larson, R. S., Mitchell, R. E., Petzold, L. R., Reynolds, W. C., Caracotsios, M., Stewart, W. E., Glarborg, P., Wang, C. and Adigun, O., 2000, *CHEMKIN Collection, Release 3.6, Reaction Design, Inc., San Diego, CA.*
- (30) Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Song, Soonho, Gardiner, W. C. Jr., Lissianski, V. V. and Qin, Z., 2000, *GRI-Mech 3.0.*, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).