

고온연료의 점화 및 화염 소화특성에 미치는 복사효과

김유정 · 오창보[†] · 최병일* · 한용식*

부경대학교 안전공학과, *한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실

Radiation Effects on the Ignition and Flame Extinction of High-temperature Fuel

Yu Jeong Kim · Chang Bo Oh[†] · Byung Il Choi* · Yong Shik Han*

Pukyong National University, Department of Safety Engineering

*Korea Institute of Machinery and Materials, Department of Energy Plant Safety Technology

(Received October 10, 2013; Revised December 6, 2013; Accepted December 6, 2013)

요 약

대향류 비예혼합 연료-공기 유동장에서 고온연료의 점화특성과 형성된 화염의 소화특성에 미치는 복사효과에 대해 수치계산을 통해 검토하였다. 화학반응의 계산을 위해 GRI-v3.0의 상세화학반응기구를 사용하였으며, 단열계산과 광학적으로 얇은 복사모델을 적용하여 계산을 수행하였다. 대향류 유동장의 점화와 소화점을 정확히 찾기 위하여 화염제어 연속계산법을 적용하였다. 결과를 통해 스트레인을 변화에 대해 최고 온도보다는 최고 H 라디칼 농도가 점화와 소화거동을 이해하는데 더 적합하다는 것을 확인하였다. 최고 H 라디칼 농도변화 거동을 통해 기존에 알려진 S-곡선, C-곡선 및 O-곡선 등을 확인하였다. 복사열손실 분율(f_r)과 공간에 대해 적분된 열발생률(IHRR)을 통해 f_r 이 가장 큰 점에서 복사효과에 의한 소화가 발생하였으며, 화염신장 소화점에서는 IHRR이 가장 높지만 화염에서의 전도에 의한 열손실로 인해 소화가 되는 것을 확인하였다. 복사는 화염신장 소화점에는 거의 영향이 없지만 복사 소화점과 점화점에는 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 또한 연료의 온도가 높아질수록 복사에 의한 소화점의 스트레인과 화염신장에 의한 스트레인을 사이의 영역이 넓어지게 되어 화염 안정성이 향상되고 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The radiation effects on the auto-ignition and extinction characteristics of a non-premixed fuel-air counterflow field were numerically investigated. A detailed reaction mechanism of GRI-v3.0 was used for the calculation of chemical reactions and the optically-thin radiation model was adopted in the simulations. The flame-controlling continuation method was also used in the simulation to predict the auto-ignition point and extinction limits precisely. As a result, it was found that the maximum H radical concentration, $(Y_H)_{max}$, rather than the maximum temperature was suitable to understand the ignition and extinction behaviors. S-, C- and O-curves, which were well known from the previous theory, were identified by investigating the $(Y_H)_{max}$. The radiative heat loss fraction (f_r) and spatially-integrated heat release rate (IHRR) were introduced to grasp each extinction mechanism. It was also found that the f_r was the highest at the radiative extinction limit. At the flame stretch extinction limit, the flame was extinguished due to the conductive heat loss which attributed to the high strain rate although the heat release rate was the highest. The radiation affected on the radiative extinction limit and auto-ignition point considerably, however the effect on the flame stretch extinction limit was negligible. A stable flame regime defined by the region between each extinction limit became wide with increasing the fuel temperature.

Keywords : Ignition, Extinction, Radiation effects, Counterflow flame, Flame-controlling continuation method (FCCM)

1. 서 론

밀폐된 구획실 내부에서 화재가 발생하여 시간이 경과 되면 연소에 필요한 공기의 양이 줄어들게 되어 환기부족 상태의 화재(Under-ventilated fire)가 되며, 이 때 연료는

충분히 산화되지 못하고 고온 배기가스와 혼합되어 고온, 과농(Rich)인 혼합상태를 유지하게 된다. 이후 개구부를 통해 공기가 유입되고 점화조건이 만족된다면 화염이 형성되어 개구부쪽으로 폭발적으로 전파해가는 백드래프트(Backdraft)⁽¹⁾가 형성되게 된다. 백드래프트는 소방관이나

[†]Corresponding Author, E-Mail: cboh@pknu.ac.kr
TEL: +82-51-629-6472, FAX: +82-51-629-6463

거주자에게 치명적인 화재현상 중 하나이다. 최근들어 백드래프트에 관한 연구⁽²⁻⁴⁾가 일부 연구그룹을 중심으로 비교적 활발히 진행되고 있지만 아직까지 이들 연구로는 백드래프트 현상을 완전히 이해할 수 있을 정도의 만족할만한 수준에 도달해 있지 못한 상태이다.

백드래프트 현상에 대한 연구가 충분히 만족할만한 단계에 이르지 못하는 이유로는 실험적으로는 실험 수행의 위험성이 존재하고 재현 조건선정의 어려움과 구획실 내부에서 순간적으로 발생하는 백드래프트의 관한 정량적인 정보를 취득하는 것에 대한 어려움 등을 들 수 있으며, 수치계산의 경우에는 백드래프트의 복잡한 연소 및 화염전파를 충분히 고려할 수 있는 적합한 연소모델의 개발과 이를 실제 수치계산에 적용하는 것이 쉽지 않은 점 등을 들 수 있다. 또한 현재까지 많이 수행되고 있는 화재의 정상규명과 같은 거시적인 접근법으로는 백드래프트와 관련된 물리-화학적 현상까지 정확하게 이해하는데 한계가 있는 점도 그 이유 중의 하나이다. 따라서, 백드래프트의 현상적 이해나 연소모델의 개발을 위해서는 백드래프트의 개시조건, 전과과정, 화염구조 등에 대해 연소공학 이론들을 접목한 현상론적인 해석도 병행할 필요가 있다.

백드래프트는 구획실 내부에서 화재가 환기부족상태를 거친 후 고온 분위기의 미연 연료성분들이 유입된 공기와 혼합되면서 점화조건이 만족될 경우 개시된다. 백드래프트의 개시 또는 점화조건에 대해서는 연료의 농도, 공기의 농도 등을 이용하여 정량화하려는 시도들이 이루어지고 있지만 아직까지는 일관된 결론은 얻어지지 못한 상태이다. 또한, 연소공학적인 관점에서 보면 점화현상은 소화현상과 매우 밀접하게 연관되기 때문에 소화조건에 대한 충분한 검토도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 연소공학적으로 연료의 자기점화(Auto-Ignition: AI) 특성과 화염의 소화특성을 검토하는데 그 정확도가 충분히 검증된 화염제어 연속계산법(Flame-Controlling Continuation Method: FCCM)⁽⁵⁾을 이용한 수치계산을 통해 고온연료의 점화특성에 대한 기초연구를 수행하고자 한다. FCCM을 이용하여 백드래프트의 개시와 연관된 점화특성에 관한 초기 연구임을 감안하여 비교적 단순한 고온의 순수한 메탄(CH₄) 가스연료와 공기와의 혼합 시의 점화조건에 대한 연구에 중점을 두었으며, 추후 연소생성물이 혼합된 연료성분의 점화특성에 대한 기초자료를 제공하고자 한다. 또한 점화조건은 복사효과에 매우 민감하기 때문에 점화에 미치는 복사효과를 중심으로 검토하였고, 추가적으로 점화되어 형성된 화염의 소화현상은 화재관점이나 연소공학 측면에서도 중요한 특성이기 때문에 복사효과가 이들 소화한계에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다.

2. 수치계산 방법 및 조건

본 연구에서는 고온연료의 자기점화 및 화염 소화특성

을 검토하기 위하여 대항류 유동장을 대상으로 수치계산을 수행하였다. 대항류 유동장은 화염을 특징지을 수 있는 중요한 인자인 스트레인율(Strain rate)을 쉽게 조정할 수 있어, 풀화재(Pool fire)와 같은 낮은 스트레인율이 지배적인 화재부터 제트화재(Jet fire)와 같이 높은 스트레인율이 지배적인 화재의 국소구조를 쉽게 모사할 수 있는 장점이 있다. 연료의 점화 및 화염의 소화특성은 스트레인율에 매우 민감하기 때문에 스트레인율을 쉽게 조정할 수 있는 대항류 유동장에서의 점화와 소화특성을 검토하는 것은 연소공학적으로 널리 사용되는 방법이며 매우 많은 실험과 수치계산을 통해 충분히 타당성이 검증된 바 있다.

일반적으로 대항류 유동장에서의 화염특성 고찰을 위한 수치계산에는 정상상태 수치계산 코드인 OPPDIF⁽⁶⁾가 많이 이용되어 왔다. 그러나 이 코드는 물리적으로 비정상상태(Unsteady)인 점화현상을 고찰할 수 없는 단점이 있으며, 소화한계를 예측하는 데에도 정확도 측면에서 최선의 방법은 아닌 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 대항류 연소장의 점화특성과 형성된 화염의 소화특성을 검토하는데 매우 적합한 것으로 알려진, Nishioka 등이 개발한 화염제어 연속계산법(FCCM)⁽⁵⁾을 적용한 수치계산 코드를 이용하였다. 이 코드는 정상상태 대항류화염에 대한 수치계산에 많이 사용되는 OPPDIF 코드와 수치해석적으로 매우 유사한 구조를 가지고 있다. 계산에 이용된 지배방정식은 정상상태의 연속방정식, 반경방향 운동량보존식, 화학종보존식, 에너지보존식과 상태방정식이다. 지배방정식과 경계조건 및 구체적인 계산방법에 대해서는 참고문헌^(5,6)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

수치계산은 수정된 Newton법⁽⁶⁾을 이용하여 초기의 화염 구조에 대한 가정값을 OPPDIF 코드로 얻은 후 FCCM 계산의 초기치로 설정하여 연속계산을 수행하게 된다. 복사효과는 점화특성과 낮은 스트레인율에서의 소화한계에 큰 영향을 미치지 때문에 본 연구에서는 복사효과를 무시한 단열계산(Adiabatic calculation: ADIA)와 화염이 광학적으로 얇다는 가정 하에 만들어진 복사모델, Optically-thin Model (OTM)⁽⁷⁾을 적용한 수치계산을 수행하였다.

연료로는 화학반응구조가 비교적 단순하면서도 가장 기본적인 탄화수소연료인 CH₄를 사용하였다. CH₄ 연료는 실제 구획화재의 연료와는 차이가 있지만 화염에 대한 고찰에서 기본적으로 사용되는 연료이며, 본 연구가 고온연료의 점화 및 화염 소화특성을 검토하기 위한 초기 연구임을 고려하여 선정되었다. 연료의 연소과정을 모사할 수 있는 화학반응기구로는 53개의 화학종과 325개의 소반응(Elementary reactions)으로 구성된 GRI-v3.0⁽⁸⁾을 이용하였다.

대항류 유동장 형성을 위한 연료와 공기노즐간의 간격(L)은 연료와 공기측의 경계조건 영향을 최소화하도록 통상의 대항류 유동장에 대한 계산(1.5 cm~2.5 cm)보다는 충분히 넓은 6.0 cm로 고정하였다.

공기노즐에서는 O₂와 N₂가 부피비로 각각 21% 및 79%

비율로 혼합된 통상의 공기가 공급되도록 하였다. 고온연료의 점화특성과 화염 소화특성을 검토하기 위하여 연료의 온도(T_F)는 300 K, 700 K, 1100 K 및 1300 K의 3가지 온도조건으로 하였으며, 공기는 300 K의 상온으로 유지시켰다. 이때 분위기 압력은 구획화재를 모사하기 위하여 대기압조건을 부여하였다. 수치계산에서 열역학적 물성치와 전달 물성치는 CHEMKIN-II⁽⁹⁾와 TRANFIT Package⁽¹⁰⁾로 각각 계산하였다.

화염의 구조를 결정하는 중요한 변수인 스트레인은 식(1)과 같이 정의되는 총괄 스트레인을(Global strain rate: a_g)⁽¹¹⁾을 사용하였다.

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + \frac{V_f \sqrt{\rho_f}}{V_a \sqrt{\rho_a}} \right) \quad (1)$$

여기서, V_f 와 V_a 는 각각 연료류와 공기류의 속도이며, ρ_f 와 ρ_a 는 각각 연료류와 공기류의 밀도이다.

복사효과를 정량적으로 해석하기 위하여 아래 식(2)와 같이 정의되는 복사열손실 분율(Radiative heat loss fraction: f_r)⁽¹²⁾을 도입하였다.

$$f_r = \int_0^L \dot{q}_r dx / \int_0^L \dot{q}_c dx \quad (2)$$

여기서, \dot{q}_r 은 OTM으로 계산되는 복사열손실량으로서 아래 식(3)으로부터 구해지며, \dot{q}_c 는 화학반응에 의한 체적 열발생률을 의미한다. 또한 식(2)의 분자항은 공간($0 \leq x \leq L$)에 대해 적분된 복사열손실률(Radiative Heat Loss Rate: RHLR), 분모항은 동일한 공간에 대해 적분된 열발생률(Spatially Integrated Heat Release Rate: IHRR)을 의미한다.

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

$$K_p = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} + P_{CH_4} K_{CH_4} \quad (4)$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, T 는 국소화염온도, T_∞ 는 주위온도, K_p 는 Plank 평균 흡수계수, P_i 는 i 화학종

의 분압 그리고 K_i 는 i 화학종의 Plank 평균 흡수계수를 의미한다.

3. 대항류 유동장에서의 점화 및 화염 소화거동 이론

화염의 점화와 소화특성에 관해서는 매우 오래전부터 관심을 가져왔으며, 관련이론도 잘 정립되어 있는 편이다. 그러나, 복사효과가 이들 특성에 미치는 영향에 대해서는 근래 Tien 등⁽⁷⁾이 이론적으로 복사에 의한 낮은 스트레인율에서의 소화점에 대한 연구를 진행한 후에야 비로서 일부 연구그룹에 의해서 연구가 진행되고 있다. 좀 더 최근에는 Frate 등⁽¹³⁾이 고온 CO 연료와 고온공기 대항류 유동장에서의 점화와 형성된 화염의 소화특성에 대해서 검토한 것이 큰 관심을 모은 바 있다. 이 연구에서는 Figure 1과 같이 스트레인율, 연료-공기의 온도, 복사효과에 따라 스트레인율에 대한 최고 화염온도의 거동은 Figure 1(a)에서 S-곡선(A-B-C-D점을 이은 선), C-곡선(B'-C-D점을 이은 선), O-곡선(C'-D'점을 이은 선) 및 Figure 1(b)에서 Ω -곡선(A-B-C-D'점을 이은 선)의 형태를 보인다고 보고된 바 있다.

S-곡선의 물리적 거동은 주어진 반응물(연료 또는 공기)의 온도에서 스트레인율을 낮추다보면 (B)점에서 자기점화가 되어 주어진 스트레인율에 해당되는 윗가지(Upper Branch: UB)로 도약하면서 화염이 형성되고, 일단 형성된 화염(UB)에서 스트레인율을 높이게 되면 점차 화염온도가 낮아지다가 (C)점에서 소화가 되어 같은 스트레인율을 갖는 낮은 가지(Lower Branch: LB)로 온도가 떨어지게 되어 화염은 A-B-C-D의 S-곡선상에서 거동하게 된다.

C-곡선상에서는 일단 주위의 영향으로 점화된 화염(UB)에 스트레인율이 높아지면 (C)점에서 소화가 되는 점(화염 신장 소화점)은 S-곡선 거동과 동일하지만 주어진 반응물의 온도조건에서는 아무리 스트레인율을 낮추어도 자기점화가 되지 않는 물리적 특성을 보인다. S-곡선은 복사효과를 무시한 경우로서 낮은 스트레인율에서도 복사에 의한

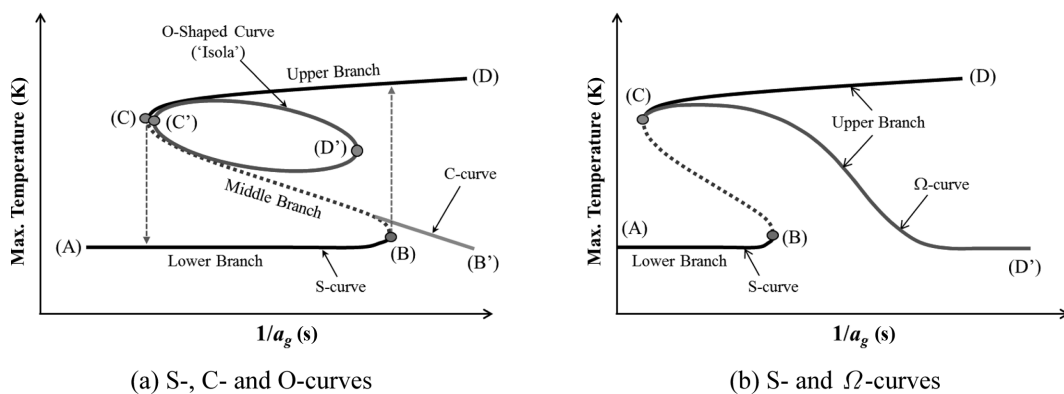


Figure 1. Responses of the maximum temperature to the inverse global strain rate⁽¹³⁾.

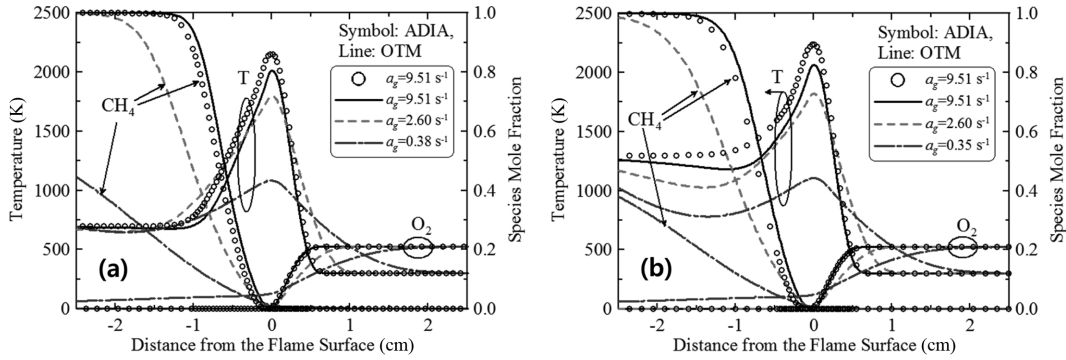


Figure 4. Flame structure with and without radiation heat loss for low strain rates; (a) $T_F = 700\text{ K}$ and $T_F = 1300\text{ K}$.

는 발생하지 않고 화염신장에 의한 소화점(A)만 존재하는 C-곡선 형태를 보이고 있으며 연료의 온도가 1300 K으로 높은 경우에는 화염신장에 의한 소화점(A)와 자기점화점(C)가 존재하는 S-곡선의 형태를 보이고 있다. 복사효과가 존재하는 OTM의 경우에는 $T_F = 1300\text{ K}$ 의 고온이더라도 복사열손실로 인해 자기점화는 되지 않고 있으며 화염신장에 의한 소화점(A)와 복사열손실에 의한 소화점(B)만 존재하는 O-곡선의 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 이들 결과를 통해서 고온연료의 점화와 소화특성을 고찰하기 위해서는 최고 화염온도보다는 H 라디칼의 최고 농도값이 더 적합하며 복사열손실을 고려하는 것은 점화와 형성된 화염의 소화특성을 예측하는 데 매우 중요하다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 4는 연료의 온도가 $T_F = 700\text{ K}$ 과 $T_F = 1300\text{ K}$ 인 조건에 대해 낮은 스트레인을 조건에서의 ADIA와 OTM으로 계산한 화염구조를 보여주고 있다. 그림에서 기호로 표시한 화염구조는 단일계산(ADIA) 결과이며, 선으로 표시한 것들은 OTM 결과이다. x좌표는 화염면을 0으로 정의한 좌표로서 (-)좌표는 연료측, (+)좌표는 공기측을 의미한다. $T_F = 700\text{ K}$ 조건을 보면, $a_g = 9.51\text{ s}^{-1}$ 에 대해 복사를 고려한 OTM에서는 예상할 수 있는 바와 같이 화염온도는 낮아지게 되고 화염폭도 좁아지게 된다. 또한 연료측에서의 온도저감이 공기측보다 더 크게 나타나는데 이것은 본 연구에서 고려한 복사모델인 OTM에서 복사에 관여하는 화학종들은 식(4)에서 보는 바와 같이 연료성분(CH_4)과 연료의 산화과정에서 나타나는 화학종들(CO , CO_2 및 H_2O)이기 때문이다. OTM 결과에서 화염폭이 좁아졌기 때문에 연료의 농도도 화염폭에 상응하여 화염면(최고 화염온도 지점)에 더 가까워지게 된다. 이러한 경향은 $T_F = 1300\text{ K}$ 조건에서도 동일한 것을 알 수 있다.

소화특성을 고찰해 보면, $T_F = 700\text{ K}$ 에서 스트레인을 좀 더 낮추게 되면 화염온도는 급격히 줄어들게 되어 복사에 의한 소화가 발생하게 된다. 다만 $T_F = 1300\text{ K}$ 조건에 대해서 복사효과를 고려하면서 스트레인을 낮추게 되면 화염면의 온도도 급격히 낮아지는 점은 $T_F = 700\text{ K}$ 조건과 동일하지만 연료측의 온도가 유입되는 연료온도보다 낮아

졌다가 화염대 근처에서 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 스트레인이 낮을수록 더욱 크게 나타나고 있는데 그 이유는 유입온도가 1300 K으로 높기 때문에 유입되면서 복사에 의한 열손실 영향을 받기 때문에 온도가 줄어들게 되지만 화염대 근처에서 화학반응에 의해 온도가 상승하기 때문이다. 스트레인이 낮아지게 되면 복사효과가 증가하게 되어 화염면에서의 온도는 낮아지는 점은 예상할 수 있지만 화염대 근처의 연료류의 온도도 더불어 낮아지는 점은 특이한 현상으로 생각된다.

Figure 4에서 관찰한 $T_F = 1300\text{ K}$ 조건에서 스트레인이 낮아지면서 화염면(최고 화염온도 위치)을 기준으로 연료측에서도 온도가 저감되는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상을 이해하기 위하여 Figure 5에는 복사에 영향을 주는 화학종 중에서 대표적으로 H_2O 의 농도를 화염온도와 같이 도시하였다. 그림에 도시하지는 않았지만 연료를 제외한 복사에 영향을 주는 다른 화학종들(CO 및 CO_2)의 분포경향도 H_2O 와 거의 동일함을 확인하였다. 앞서서도 설명한 바와 같이 동일한 스트레인을 조건에서는 복사를 고려하면 화염온도가 낮아지고 발생하는 주요 화학종인 H_2O 농도도 낮아지게 된다. 또한 스트레인을 낮추게 되

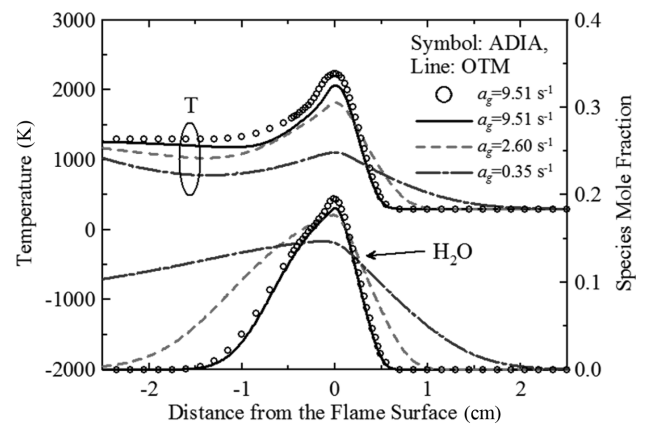


Figure 5. Flame temperature and H_2O concentration with and without radiation heat loss for low strain rates and $T_F = 1300\text{ K}$.

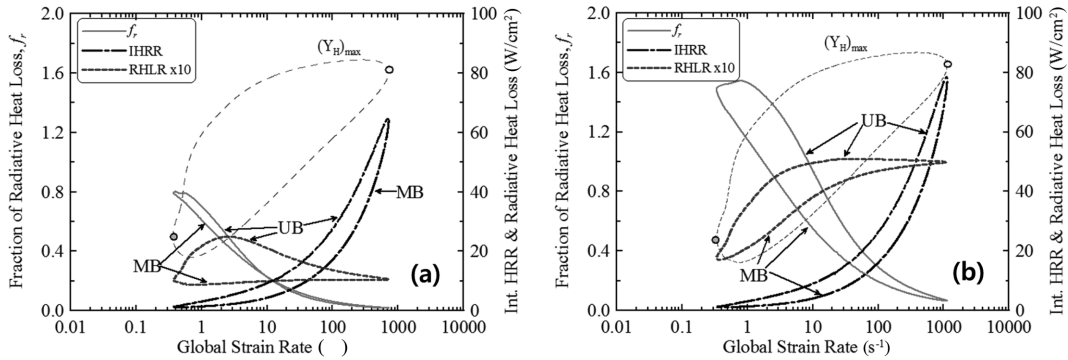


Figure 6. Responses of radiative heat loss fraction (f_r), integrated radiative heat loss rate (RHLR) and integrated heat release rate (IHRR); (a) $T_F = 700$ K and $T_F = 1300$ K.

면 원래는 화염대 폭이 넓어지고 화염온도가 증가하게 되는데 복사효과를 고려하였기 때문에 복사열손실은 T^4 에 비례하여 더욱 증가하게 되어 결과적으로 화염온도는 낮아지게 된다. 이때 화염온도는 낮아졌지만 화염폭은 여전히 넓은 상태를 유지하기 때문에 연소과정에서 생성된 화학종들도 넓게 분포하게 된다. 연료층에 분포하는 연료성분을 포함하여 복사에 영향을 주는 화학종들인 H_2O , CO , CO_2 는 연료층에서 복사열손실을 커지게 하여 온도를 감소시키게 된다. 스트레인율이 낮아지면서 복사에 관여하는 화학종들은 공기층으로도 넓게 분포하지만 공기층의 온도는 상온이기 때문에 공기층의 복사열손실은 없게 되고 결국 연료층에서만 큰 폭으로 온도가 저감되는 것으로 나타나게 된다. 연료층에서도 화염면에서 멀어질수록 온도가 다시 올라가는 것은 수치계산에서는 연료의 경계온도를 1300 K으로 고정하였기 때문이다.

Figure 6에는 $T_F = 700$ K과 $T_F = 1300$ K인 조건에 대해 복사열손실을 고려했을 경우 나오는 O-곡선($(Y_H)_{max}$)의 경향을 분석하기 위하여 복사열손실 분율 f_r 과 복사열손실률인 RHLR, 공간에 대해 적분된 열발생률 IHRR의 변화거동을 같이 도시하였다. 각 폐곡선에서 아래의 선은 MB를 의미하는데 이 선의 해들은 물리적인 의미를 부여하기 힘든 가상의 해이기 때문에 상부의 선인 UB에 한정하여 설명하겠다. 우선 $T_F = 700$ K의 UB에 대한 결과를 보면, IHRR은 스트레인율이 증가할수록 점차 증가하게 되어 화염신장에 의한 소화점에서 최대가 되는 것을 알 수 있다. 기존에 알려진 바에 의하면, 화염신장에 의한 소화점에서는 열발생량은 충분히 많지만 스트레인율이 높기 때문에 화염대 폭이 좁아지게 되어 화염면에 수직방향으로의 전도열손실도 급격히 증가하게 되어 화염강도가 약화되고 결국 소화되게 된다. RHLR은 스트레인율이 높아지게 되면 화염 온도도 낮아지고 화염대 폭이 좁아지기 때문에 점차 줄어들게 되지만 스트레인율이 낮아지게 되면 점차 높아지다가 특정 스트레인율보다 낮은 조건에서는 다시 낮아지는 것을 알 수 있다. 그렇지만 열발생률에 대한 복사열손실률로 정의되는 f_r 값은 스트레인율이 낮아질수록 단순히 증가하게

되고 복사에 의한 소화점 근처에서 최대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 낮은 스트레인율 소화점의 소화 메커니즘은 열발생률 대비 복사열손실이 최대가 되기 때문이라는 것을 명확히 알 수 있다. 이러한 경향은 $T_F = 1300$ K의 결과에서도 동일하게 나타나고 있다. 다만, 이 조건에서는 복사 소화점에서 f_r 값이 최대보다 미소하게 작은 점은 고온이 될수록 노즐사이의 거리 6 cm가 충분하지 않기 때문에 미소하게 연료층 경계에 영향을 주기 때문이다. 그렇지만 전체적으로 낮은 스트레인율 소화점 근처에서는 복사열손실에 의해서 소화가 된다는 점에는 큰 변화가 없다.

Figure 7에는 연료의 온도를 변화시켰을 때 두 개의 소화점(복사 소화점과 화염신장 소화점) 사이에서 안정되게 화염을 형성할 수 있는 안정된 화염영역(Stable Flame Regime: SFR)을 도시하였다. 그림에서 SFR의 상부경계는 주어진 온도에 대한 화염신장 소화점을 의미하며, 하부경계는 복사 소화점을 의미한다. 화염신장 소화점은 ADIA(점선)와 OTM(실선) 결과가 거의 동일하게 나타나고 있어 복사효과에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그렇지만 앞에서 설명한 바와 같이 복사 소화점은 복사효과를 고려한 OTM 계산에서만 얻어질 수 있다. 그림의 결과는

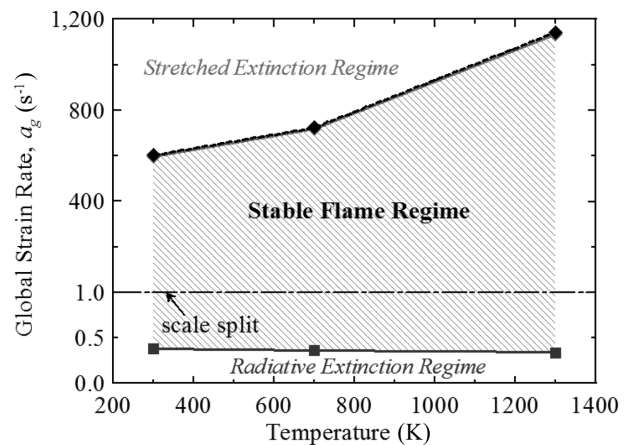


Figure 7. Stability diagram for the counterflow nonpremixed high-temperature fuel flames.

연료의 온도가 높아질수록 SFR이 급격히 넓어지고 있어 화염을 소화시키기 더욱 어렵다는 것을 잘 알 수 있다. 지구상의 화재에서는 부력에 의한 유동효과 때문에 복사 소화점을 얻을 수 있을 정도로 낮은 스트레인율을 만드는 것은 거의 불가능하다. 따라서 소방공학의 실제 관심대상은 지구상의 화재에서 존재할 수 있는 화염신장 소화점이 될 수 있다. Figure 7의 결과를 통해서 고온연료가 분출되는 제트화재를 소화시키는 것은 통상의 화재에 비해 쉽지 않다는 것을 알 수 있으며, 구획실 내부에서 연료와 연소가스가 혼합된 고온 가연성 혼합가스 성분에 기인하는 백드래프트는 폭굉(Detonation)의 성질을 보일 정도로 강하지는 않지만 화염으로서는 매우 강한 화염강도를 가지고 있음을 알 수 있다. 향후 백드래프트가 발생하는 구획실 내부의 상황을 좀 더 현실적으로 고려하기 위하여 연료와 연소가스가 혼합된 고온 혼합가스에 대한 해석을 추가적으로 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온연료의 점화와 형성된 화염의 소화특성에 대해 FCCM과 상세화학반응기구를 적용한 수치계산 연구를 수행하였으며, 스트레인율에 대한 화염응답 거동과 복사열손실 분율을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

스트레인율 변화에 따른 점화특성과 형성된 화염의 소화특성을 검토하기에는 최고 온도보다는 최고 H 라디칼 농도값이 더 적합함을 알 수 있었다. 검토된 1300 K 이하의 고온 CH₄ 연료의 경우 두 가지 소화점, 즉 화염신장에 의한 소화점과 복사열손실에 의한 복사 소화점을 가짐을 확인하였다. 열발생률에 대한 복사열손실률로 정의되는 복사열손실 분율을 통해 복사 소화점에서는 복사열손실량이 최대가 되는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 검토된 연료의 온도조건 내에서는 낮은 스트레인율에서 소화되지 않는 특성을 보이는 Ω-곡선은 관찰되지 않았다. 또한 복사 효과가 CH₄의 연료의 자기점화에도 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 고온연료의 안정된 화염영역 선도를 통해 고온 제트화재의 소화가 매우 어려울 수 있는 점과 백드래프트의 화염강도가 매우 강하다는 점을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A4A01008588). 이에 감사드립니다.

References

1. D. T. Gottuk, M. J. Peatross, J. P. Farley and F. W. Williams, "The Development and Mitigation of Backdraft: A Real-scale Shipboard Study", *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 261-282 (1999).
2. C. M. Fleischmann, P. J. Pagni and R. B. Williamson, "Quantitative Backdraft Experiments", *Fire Safety Science Proceedings of the Fourth International Symposium*, pp. 337-348 (1994).
3. W. G. Weng and W. C. Fan, "Critical Condition of Backdraft in Compartment Fires: A Reduced-scale Experimental Study", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 16, pp. 19-26 (2003).
4. W. G. Weng, W. C. Fan, L. Z. Yang, H. Song, Z. H. Deng, J. Qin, and G. X. Liao, "Experimental Study of Back-draft in a compartment with Openings of Different Geometries", *Combustion and Flame*, Vol. 132, pp. 709-714 (2003).
5. M. Nishioka, C. K. Law and T. Takeno, "A Flame-Controlling Continuation Method for Generating S-Curve Responses with Detailed Chemistry", *Combustion and Flame*, Vol. 104, pp. 328-342 (1996).
6. A. E. Jutz, R. J. Kee, J. F. Grcar and F. M. Rupley, "OPPDIF : A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames", *Sandia Report*, SAND96-8243 (1997).
7. J. S. T'ien, "Diffusion Flame Extinction at Small Stretch Rates: The Mechanism of Radiative Loss", *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 31-34 (1986).
8. C. T. Bowman, R. K. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner, V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach and M. Goldenburg, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ (1999).
9. R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", *Sandia Report*, SAND89-8009B (1989).
10. R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties", *Sandia Report*, SAND86-8246 (1986).
11. H. K. Chelliah, C. K. Law, T. Ueda, M. D. Smooke and F. A. Williams, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp. 503-511 (1990).
12. Y. Ju, H. Guo, K. Maruta and F. Liu, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-air Premixed Flames", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315-334 (1997).
13. F. C. Frate, H. Bedir, C. J. Sung and J. S. T'ien, "On Flammability Limits of Dry CO/O₂ Opposed-jet Diffusion Flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 2047-2054 (2000).