

메탄-불소계 화합물의 예혼합화염 구조에서 산소 부화의 효과

이 기 용*

* 안동대학교 기계공학과

Effects of Oxygen Enrichment on the Structure of Premixed Methane/Fluorinated Compound Flames

Ki Yong Lee**

* Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received May 4, 2011 ; Revised May 30, 2011 ; Accepted May 30, 2011)

Key Words: Oxygen-Enrichment(산소부화), Trifluoromethane(트리플루오르메탄), Inhibitor(억제제), Premixed Flame(예혼합화염), Flame Speed(화염속도), Reaction Path(반응경로), Radical(레이디칼)

초록: 산소부화 조건의 CH₄/O₂/N₂ 화염에서 트리플루오르메탄의 영향을 조사하기 위해 1기압에서 자유롭게 전파하는 예혼합 화염에 대한 수치해석을 수행하였다. 트리플루오르메탄은 화염속도 감소에 기여하며, 감소의 크기는 화학적 효과보다 물리적 효과에 의해 더 크다. 트리플루오르메탄은 산소부화된 CH₄/O₂/N₂ 화염에서 더 많이 첨가되고 소비될 수 있다. 트리플루오르메탄은 주로 CF₃→CF₂→CF→CF:O→CO를 통해 분해되고, 산소부화 화염에서 CHF₃+M→CF₂+HF+M이 중요한 역할을 한다. 억제제가 산소부화 화염에 첨가함에 따라 활성기 최대 농도의 위치는 상대적으로 낮은 온도로 이동하고, OH의 순생성률은 H의 순생성률보다 높다.

Abstract: We performed numerical simulations of freely propagating premixed flames at atmospheric pressure to investigate the influence of trifluoromethane on CH₄/O₂/N₂ flames under oxygen enrichment. Trifluoromethane significantly contributed toward a reduction in flame speed, the magnitude of which was larger in terms of the physical effect than the chemical effect. More trifluoromethane could be added and consumed on oxygen-enriched CH₄/O₂/N₂ flames. CHF₃ was decomposed primarily via CF₃→CF₂→CF→CF:O→CO and CHF₃+M→CF₂+HF+M played an important role in oxygen-enhanced flames. When an inhibitor was added to oxygen-enriched flames, the position of the maximum concentration of active radicals was shifted to a relatively low temperature range, and the net rate of OH became higher than that of H.

1. 서 론

염화불화탄소(chlorofluorocarbons, CFCs)는 CFCs에 포함된 염소가 성층권의 오존층을 파괴하는 역할을 하는 것으로 알려져 있어 사용이 금지되어 있다. 따라서 염소 대신 불소 또는 수소를 포함한 대체 물질이 개발되어 왔고, 사용 중에 있다. 불연성인 CFCs중 염소가 수소로 대체된 수소불화탄소(hydrofluorocarbons, HFCs)는 연소 가능한 물질로 변환된다. HFCs는 CFCs 보다 불안정하여 성층권의 오존층 파괴효과는 크지 않으나, 이산화탄소나 다른 지구 온난화 물질보다 대기 중에 오

랫동안 머무르기 때문에 높은 지구온난화 지수(global warming potential, GWPs)를 갖는다.⁽¹⁾

Halon 1301(CF₃Br), CFCs계 냉매 등의 대체물질로 불화탄화수소(fluorinated hydrocarbons)에 대한 실험 및 반응 메카니즘 개발에 대한 연구가 미국표준연구소(NIST)에서 많이 수행되어 왔다.⁽²⁾ Linteris과 Truett⁽³⁾는 메탄 예혼합화염에 fluoromethanes 을 첨가한 경우 화염속도 측정 및 수치해석을 수행하였고, 화염속도 및 활성기 농도 감소를 통해 메탄 화염에서 fluoromethanes의 억제제 역할을 살펴보았다. 또한 수치해석에서 사용한 화학 반응 메카니즘이 좀 더 정확성을 갖출 필요성을 제시했다. Grosshandler 등⁽⁴⁾은 대항류 화염 실험을 통해 냉매로 사용되는 HFCs에 대한 희박 한계 조건을 측정하였고, 수치

† Corresponding Author, kylee@andong.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

해석을 통해 계산한 결과와 비교 검토하였다. 측정된 결과는 사용된 버너 직경에 민감하게 변화함을 보여주었고, 추후 좀 더 엄밀한 검토가 필요함을 제시하였다. Linteris 등⁽⁵⁾은 당량비 1 근처인 조건에서 형성된 메탄 예혼합 화염에 최대 6%까지 불화 억제제를 첨가한 경우 화염속도를 측정하였고, 그 결과를 수치해석과 비교 검토하였다. 매연을 발생시키는 수소불화탄소와 매연을 발생시키지 않는 수소불화탄소에 따라 수소불화탄소의 분해 경로는 달라짐을 보여주었다. L'esperance 등⁽⁶⁾은 저압 조건에서 형성된 메탄 예혼합화염에 소량의 HFCs를 첨가한 경우 화염온도와 중요한 화학종 농도를 측정하였다. 이러한 결과는 기존에 있던 HFCs의 반응 메커니즘을 개선하는데 적용하였고, 계산된 화염속도는 비교적 잘 예측하고 있다. Shebeko 등⁽⁷⁾은 밀폐된 용기에서 수소 또는 메탄/공기/불화탄화수소 혼합기의 연소에 대한 실험을 수행하였다. 이를 통해 가연한계, 최대 폭발 압력, 최대 압력 증가율 등이 결정되었고, 이러한 효과는 불화탄화수소의 화학반응과 관련이 있음을 보여주었다. Takizawa 등⁽⁸⁾은 구 용기 방법과 셀리렌 화염 이미지를 통해 HFCs의 화염속도를 측정하였고, 최대 화염속도는 수소와 불소의 몰비와 관련 있음을 나타냈다. Linteris⁽⁹⁾는 Mache-Hebra 노즐 버너를 이용하여 R152-공기 화염의 평균 화염속도를 측정하였고, 수치해석 및 다른 연구자들의 결과와 비교하였다. 화염속도 비교 결과 약 20%의 차이가 나타났고, 그러한 이유로 화염 스트레치, preferential diffusion 등이 영향을 미친다고 하였다. Azatyan 등⁽¹⁰⁾은 압력용기 실험을 통해 다양한 산소부화 조건에서 형성된 수소화염에 HFC 첨가에 따른 가연한계를 측정하였다. CHF₃ 억제제 경우, 산소부화가 20.6%에서 25%로 증가함에 따라 CHF₃의 첨가 농도가 1.2배까지 증가하였다.

HFCs는 온실가스로 지정되어 있어 규제되는 물질이기 때문에 필요시 다양한 방법에 의해 제거되고 있다. 그 중 고온 열분해는 직접 연소를 통해 고온 조건에서 열적으로 분해하는 방법으로 생성물인 불화수소(HF)를 통해 불소원자를 99%이상 회수할 수 있다. 소각시 발생하는 유해한 대기오염물질을 제어하기 위해 산소부화식 소각시스템이 개발 및 적용되고 있고, 보통 산소부화율이 25~50%의 조건에서 이루어지고 있다. 산소부화율이 높을수록 폐기물의 파괴-제거 효율은 증대된다.

본 연구는 불소화합물 중 높은 불소원자를 갖는 CHF₃을 첨가제로 선택하여 산소부화 조건을 갖는 메탄 예혼합 화염에서 CHF₃의 영향에 대하여 연구하였다. 수치해석을 통해 산소부화 화염에서 첨가제가 화염속도, 화염구조, 활성기 농도 등에 미치는 영향을 조사하였다.

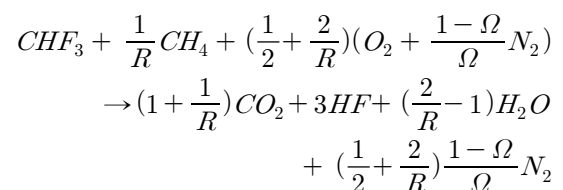
2. 수치해석 방법

기존에 개발된 수치해석 코드인 CHEMKIN Premix-code⁽¹¹⁾를 사용하여 자유롭게 전파하는 CH₄/O₂/N₂ 예혼합 화염에 CHF₃를 소량 첨가한 화염에 대한 수치해석을 수행하였다. 사용한 상세한 화학반응 메커니즘은 크게 2개로 구분되는데, 하나는 메탄 연소에 대한 것이고 다른 하나는 NIST에서 HFCs 연소를 위해 개발한 반응 메커니즘이다.^(3,9) 사용한 반응 메커니즘들은 C₁과 C₂를 포함한 화학종으로 구성되어 있고, 불활성 기체로 Ar과 N₂를 포함한 83개 화학종과 1509개의 정반응 기초반응식으로 이루어졌다.

주어진 계산구간 안에서 격자수는 약 130-180개 정도를 사용하여 급격히 변하는 온도 및 화학종 농도 구간을 잘 나타낼 수 있었다. 초기조건으로 가스 온도는 298K, 압력은 1기압, 당량비는 1을 갖는 화염에 대하여 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 논의

메탄 화염에 HFCs를 첨가할 경우 반응물에서 F/H 비(반응물 중 불소원자와 수소원자의 몰비)에 따라 총괄 반응식은 달라진다.⁽⁴⁾ 즉 반응물에서 낮은 F/H 비를 갖는 경우, 생성물에 존재하는 불소화합물로서 HF만을 고려하는 반면 높은 F/H비를 갖는 경우, 생성물에 2개의 불소화합물(CO₂ 및 CF₄)을 추가해야 한다. 본 연구에서는 메탄을 주 연료로 하고, CHF₃를 첨가제로 사용하고 있어 F/H 비가 1보다 작기 때문에 생성물에서 불소화합물은 HF만 고려한다. 따라서 낮은 F/H비인 경우, 당량비 1인 총괄 반응식은 다음과 같이 표현된다.



여기서 R은 각각 CHF₃/CH₄의 몰비, Ω는 산소부화율이다. 산소부화율은 $\frac{X_{O_2}}{X_{O_2} + X_{N_2}}$ 로 정의하였고, X_{O₂}와 X_{N₂}는 각각 산소와 질소의 몰수이다.

3.1 화염속도의 결과 비교

산소부화율 0.21 조건에서 제시한 화학반응 메카니즘을 사용하여 자유롭게 전파하는 CH₄/O₂/N₂ 예혼합화염에 CHF₃ 첨가에 따른 화염속도 결과를 Figs. 1~3에 나타냈다. 화염속도를 F/H의 몰비에 근거하여 나타냈고, Saso 등^[12]과 Linteris 및 Truett^[3]의 실험결과를 Figs. 1~3에 포함시켰다. Saso 등^[12]은 대항류 예혼합 화염에서 신장율(strain rate)에 대한 화염속도 결과에 선형(linear) 및 비선형(nonlinear) 외삽법(extrapolation)을 적용하여 화염속도를 얻었다. Linteris 및 Truett^[3]는 Mache-Hebra nozzle 버너를 사용하여 셀리렌 화염 이미지를 획득하였고, 화염의 총 면적 방법을 통해 화염속도를 얻었다.

Figs. 1과 2에 나타난 화염속도는 일정한 X_{CH₄}/X_{O₂} 비를 갖는 CH₄-Air 예혼합 화염에 CHF₃를 반응물 기준 최대 4%(X_{CH₄}/X_{O₂}=0.45 화염) 또는 8%(X_{CH₄}/X_{O₂}=0.5 화염)까지 첨가한 조건에서 얻어진 것이다. 수치해석 결과는 CHF₃이 첨가되지 않은 화염에 대한 화염속도 결과^[13]와 비교적 잘 일치한다. Figs. 1과 2를 보면, F/H비가 증가함에 따라 화염속도는 감소하고, 그 감소율은 당량비 1인 화염에서 좀 더 큰 값을 갖는다. CHF₃와 CH₄의 몰비가 0.5로 일정한 조건에서 당량비를 0.7에서 1.4까지 변화시켜 계산한 화염속도를 Fig. 3에 나타냈다. 계산 결과

를 살펴보면, 희박조건 및 과농조건에서 비선형 결과와 비교적 잘 일치한다.

실제적으로 예혼합 화염에서 화염속도는 매우 중요한 인자이다. CH₄/CHF₃/O₂/N₂ 예혼합 화염에 대한 이러한 인자는 본 연구에서 제안한 상세한 화학반응 메카니즘을 통해 잘 예측되고 있다.

산소부화율이 0.21과 0.5인 경우, 당량비가 1인 CH₄/CHF₃/O₂/N₂ 화염의 화염속도에서 CHF₃ 첨가에 따른 물리적 및 화학적 영향을 조사하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 물리적 영향(S_p)와 화학적 영향(S_c)는 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$S_p = \frac{S_o - S'}{S_o} \tag{1}$$

$$S_c = \frac{S' - S_u}{S_o} \tag{2}$$

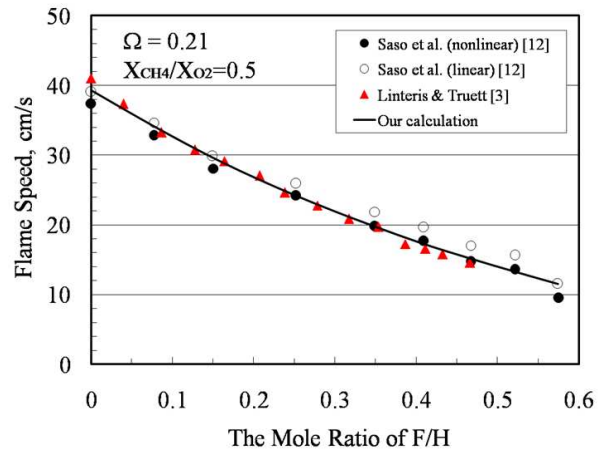


Fig. 2 Variation of flame speeds as a function of the mole ratio of F/H at X_{CH₄}/X_{O₂}=0.5

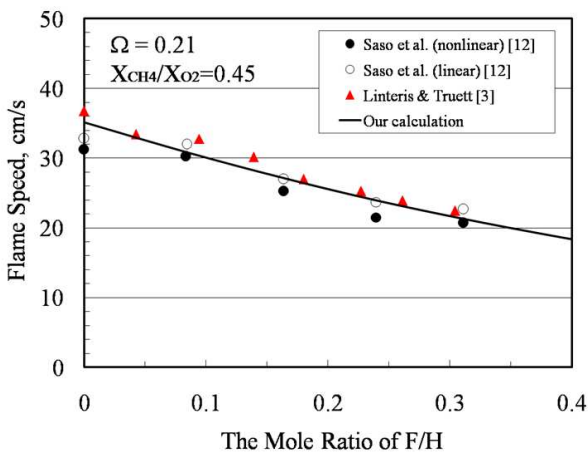


Fig. 1 Variation of flame speeds as a function of the mole ratio of F/H at X_{CH₄}/X_{O₂}=0.45

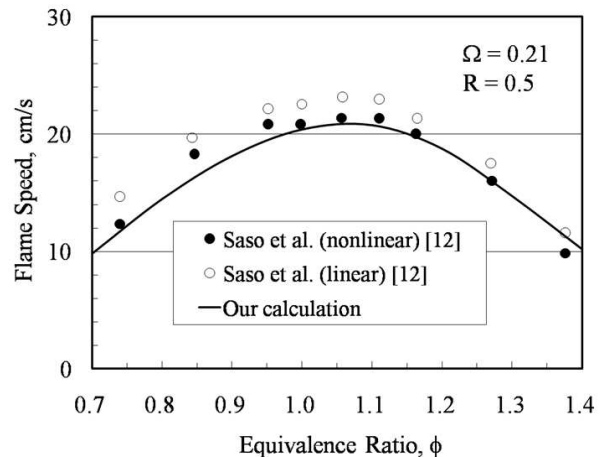


Fig. 3 Variation of flame speeds as a function of equivalence ratio

여기서 S 는 계산한 화염속도이고, S_0 에 있는 아래 첨자 0 는 첨가제가 없는 경우, 아래첨자 u 는 첨가제가 화염에서 화학반응을 한 경우, 위 첨자 $'$ 은 첨가제가 화염에서 불활성 가스(물리적 역할)로 간주한 경우를 의미한다.

산소부화율 증가는 CH_4/CHF_3 예혼합 화염의 화염속도를 증가시키는 반면 CHF_3 첨가에 따른 전체적 화염속도 감소율은 산소부화율 0.21보다 0.5에서 더 작다. 이것은 높은 산소부화율을 갖는 메탄 화염에서 CHF_3 의 억제제 역할이 약화되기 때문이다.⁽¹⁴⁾ 물리적 및 화학적 영향을 살펴보면, CHF_3 첨가에 따른 화염속도는 산소부화율 0.21 및 0.5인 화염 모두에서 화학적 영향보다 물리적 영향을 더 받아 감소하며, CHF_3/CH_4 몰비가 증가할수록 화학적 영향은 감소하는 대신 물리적 영향이 증가한다.

일반적으로 할로젠 화합물의 화학적 억제 효과는 화염 내의 수소원자를 좀 덜 활성적인 화학종으로 변환시키는 반응과 억제제의 재생산 반응을 통해 할로젠 원소가 촉매의 역할을 함으로 가능하다.⁽¹⁴⁾ 불소는 언급한 2가지 반응 중 재생산 반응의 역할을 거의 못한다. 이것은 생성된 HF가 매우 높은 결합에너지를 갖고 있어 거의 불활성 기체로서의 역할을 하기 때문이고, 따라서 화염 내에서 거의 물리적 역할만을 한다.

억제제 첨가량이 증가할수록 열손실이 증가⁽¹⁴⁾ 하기 때문에 산소부화율이 낮은 조건에서 메탄 화염에 CHF_3 의 첨가량은 제한될 수밖에 없지만, 좀 더 많이 CHF_3 의 첨가량을 늘리는 조건에서 화염을 형성시키기 위해서는 산소부화율의 증가가 요구된다.

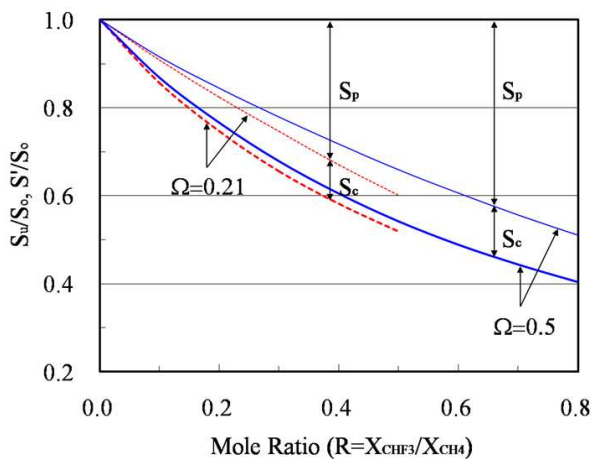


Fig. 4 The physical and chemical components of additive influence on flame speed

Fristrom 및 Sawyer⁽¹⁵⁾은 산화제로서 공기 또는 산소를 사용하는 화염에서 억제제가 화염속도에 미치는 변화를 나타내기 위해 무차원 지수 (dimensionless index)인 억제지수(inhibition index, I)를 제시하였고, 다음과 같다.

$$I = \left(\frac{\Delta S}{S} \right) \left(\frac{X_{O_2}}{X_{inhibitor}} \right) \quad (3)$$

여기서 ΔS 는 억제제가 첨가되지 않은 화염과 첨가된 화염의 화염속도 차이이고, X_{O_2} 와 $X_{inhibitor}$ 는 각각 반응물에서 산소와 억제제의 몰분율을 나타낸다.

계산한 억제지수 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 화염속도 결과에서 보여주는 것과 마찬가지로 $\Omega=0.21$ 과 $\Omega=0.5$ 화염에서 R값의 증가는 억제지수의 감소를 가져온다. R=0.1에서 $\Omega=0.21$ 화염의 억제지수는 2.94이고 $\Omega=0.5$ 화염의 억제지수는 2.70으로 약8% 차이를 갖지만 R값의 증가는 차이의 감소를 가져온다.

3.2 CHF_3 반응경로 및 화염구조

Fig. 6은 산소부화율이 0.5이고, R값이 0.5인 화염에서 CHF_3 소비에 대한 주요한 반응경로를 보여준다. 그림에 있는 괄호 안의 숫자는 기초반응식의 반응률을 고려하여 화학종 소비 경로가 차지하는 비율을 나타낸다. CHF_3 소비는 다음과 같이 크게 2가지 경로를 통해 이루어진다.

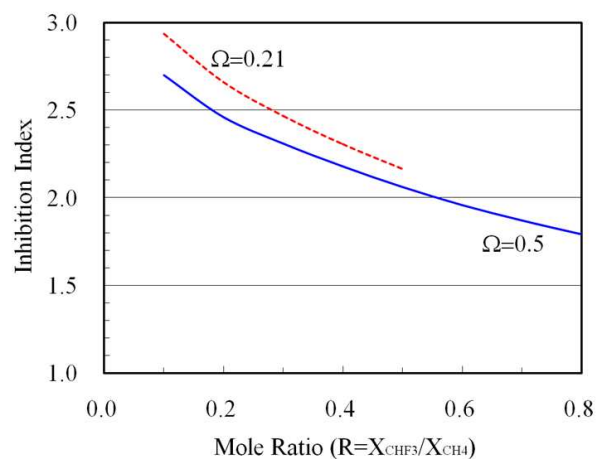
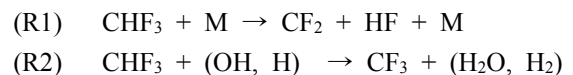


Fig. 5 The inhibition index as a function of the mole ratio of additive to fuel

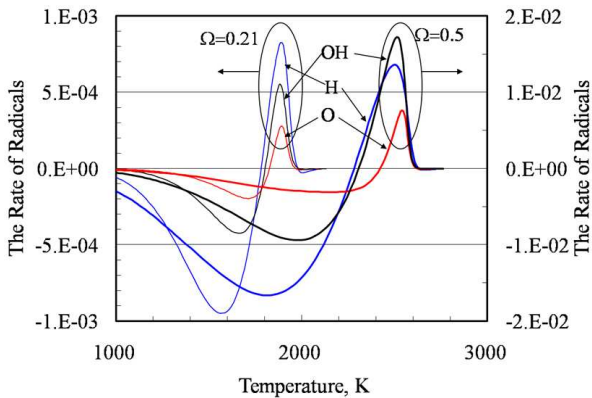


Fig. 9 The rate of radicals for decomposition of CHF_3 at $R=0.5$ in $\Omega=0.5$ and $\Omega=0.21$

다. 산소부화율이 0.21인 경우, 수소원자의 최대 농도는 1900K 근처에 위치하며, CHF_3 의 첨가량이 증가할수록 좀 더 높은 온도로 이동한다.

수소/공기 예혼합화염에서도 할로젠 화합물의 첨가는 화염 내에서 활성기 농도를 낮춤과 동시에 활성기 최대 농도가 발생하는 위치를 좀 더 높은 온도로 이동시킨다.⁽¹⁸⁾ 이것은 억제제가 첨가된 화염의 총 활성화 에너지가 증가하는데 기인한다.

산소부화율이 0.5인 경우, 수소원자의 최대농도는 2600K 근처에 위치하며, R값이 0에서 0.8로 증가함에 따라 그 위치는 좀 더 낮은 온도로 이동한다. 높은 산소부화율을 갖는 화염에서는 높은 최대 화염온도를 갖기 때문에 억제제 효과가 상대적으로 감소한다. 억제제 효과는 평균 화염 온도, 총 활성화 에너지, 초기온도 등으로 표현할 수 있으며,⁽¹⁹⁾ 이에 따라 산소부화율이 높은 화염에서는 억제제 첨가에 따른 총 활성화 에너지 증가보다도 높은 최대 화염온도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

산소부화율 0.21과 0.5인 화염에서 $R=0.5$ 인 경우 중요한 활성기들(H, OH, O)의 순 생성률을 Fig. 9에 나타냈다. (+)값은 활성기의 생성, (-)값은 활성기의 소비를 의미한다. 산소부화율의 증가는 연료의 물분율을 증가와 높은 화염온도로 인해 활성기들의 순 생성률이 큰 값을 갖게 한다. CHF_3 를 첨가한 경우, 반응식 R_5 가 OH 생성에 있어서 중요한 역할을 하지만, 산소부화율 증가와 더불어 그 기여도는 감소하는 반면 불소를 불포함 하고 있는 기초반응식들의 역할이 증대한다. 앞선 언급한 것처럼 OH 생성은 반응식 R_3 - R_5 가

크게 기여하며 추가적으로 반응식 $\text{O}+\text{H}_2\rightarrow\text{H}+\text{OH}$ 의 역할이 증대한다.

4. 결론

자유롭게 전과하는 $\text{CH}_4/\text{CHF}_3/\text{O}_2/\text{N}_2$ 예혼합 화염의 상세한 화학반응 메커니즘을 통해 산소부화율이 화염속도, 화염구조, 활성기 농도 등에 미치는 영향을 조사하였다.

산소부화율 0.21 조건에서 계산한 화염속도는 Linteris와 Truett⁽³⁾와 Saso 등⁽¹²⁾이 수행한 실험 결과와 매우 잘 일치하였다. 산소부화율 0.5 화염 조건에서 CHF_3 의 첨가량이 증가할수록 화염속도는 감소하며, 화학적 영향 보다 물리적 영향에 의한 감소가 더 크게 나타난다. 산화제로 공기를 사용하는 것보다 산소부화율을 높이는 경우, 좀 더 많은 CHF_3 첨가를 통해 분해가 가능하다. CHF_3 소비는 $\text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_2 \rightarrow \text{CF} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}$ 의 경로를 통해 이루어지며, 높은 산소부화율에서는 CHF_3 소비 경로 중 제3체와의 반응 경로가 중요하고 또한 CF_2O 의 열분해에 의한 소비가 추가된다. 산소부화율이 0.5인 경우, 억제제 첨가량을 증가함에 따라 최대 활성기 농도 위치가 좀 더 낮은 화염온도로 이동하며, 화염온도 증가가 커다란 영향을 미친다. 활성기 생성 영역에서 H_2O 소비에 따른 높은 활성기 OH 농도를 가져온다.

후 기

본 논문은 2010년도 안동대학교 학술연구지원 사업에 의하여 연구되었습니다. HFCs 반응 메커니즘 및 물성치 데이터를 제공한 Dr. Linteris (NIST, USA)에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php
- (2) Burgess, Jr. D.R., Zachariah, M.R., Tsang, W and Westmoreland, P.R., 1996, "Thermochemical and Chemical Kinetic Data for Fluorinated Hydrocarbons," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 21, pp. 453-529.
- (3) Linteris, G.T and Truett, L, 1996, "Inhibition of Premixed Methane-Air Flames by Fluoromethanes," *Combustion and Flame*, Vol. 105, pp. 15-27.
- (4) Grosshandler, W, Donnelly M. and Womeldorf, C., 1998, "Lean Flammability as a Fundamental

- Refrigerant Property," NISTIR 6229.
- (5) Linteris, G.T., Burgess, D.R., Babushok, Jr. V., Zachariah, M., Tasng, W., and Westmoreland, P., 1998, "Inhibition of Premixed Methane-Air Flames by Fluoroethanes and Fluoropropanes," *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp. 164~180.
- (6) L'esperance, D, willians, B.A. and Fleming, J.W., 1999, "Intermediate Species Profiles in Low Pressure Premixed Flames Inhibited by Fluoromethanes," *Combustion and Flame*, Vol. 117, pp. 709~731.
- (7) Shebeko, Y.N., Azatyan, V.V., Bolodian, I.A., Navzenya, V.Y., Kopylov, S.N., Shebeko, D.Y., and Zamishevski, E.D., 2000, "The Influence of Fluorinated Hydrocarbons on the Combustion of Gaseous Mixtures in a Closed Vessel," *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 542~547.
- (8) Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., Kondo, S. and Sekiya, A., 2005, "Burning Velocity Measurement of Fluorinated Compounds by the Spherical-Vessel Method," *Combustion and Flame*, Vol. 141, pp. 298~307.
- (9) Linteris, G., 2006, "Burning Velocity of 1, 1-Difluoroethane (R-152a)," *ASHRAE Transactions*, Vol. 112, pp. 448~458.
- (10) Azatyan, V.V., Shebeko, Yu.N., Shebeko, A.Yu., Navzenya, V.Yu., and Tomilin, A.V., 2007, "An Influence of Oxygen Content in an Oxidizing Atmosphere on Inhibitive Action of Fluorinated Agents on a Hydrogen Flame," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 20, pp. 494~500.
- (11) Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D., and Miller, J.A., 1985, Sandia National Laboratories Report No. SAND 85-8240.
- (12) Saso, Y., Zhu, D.L., Wang, H., Law, C.K., and Saito, N., 1998, "Laminar Burning Velocities of Trifluoromethane-Methane Mixtures: Experiment and Numerical Simulation," *Combustion and Flame*, Vol. 114, pp. 457~468.
- (13) Glassman, I. and Yetter, R.A., 2000, *Combustion*, 4th Ed., Elsevier.
- (14) Babushok, V., Tsang, W., Linteris, G.T., and Reinelt, D., 1998, "Chemical Limits to Flame Inhibition," *Combustion and Flame*, Vol. 115, pp. 551~560.
- (15) Fristrom, R.M. and Sawyer, R.F., 1971, "Flame Inhibition Chemistry," Paper #12 in Proceedings of AGARD Conference, Aircraft Fuels, Lubricants and Fire Safety, Available from NASA Langley Field, VA 23365, Report Distribution and Storage Unit.
- (16) Kuo, K.K., 1986, *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons.
- (17) Fristrom, R.M. and Tiggelen, P.Van, 1978, "An Interpretation of the Inhibition of C-H-O Flames by C-H-X Compounds," *Seventeen Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 773~785.
- (18) Babkin, V.S. and V'yun, A.V., 1971, "On the Mechanism of Laminar Flame Propagation at High Pressures," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 7, pp. 203~206.
- (19) Baratov, A.N., Karagulov, F.A., and Makeev, V.L., 1970, "Investigation of the Region of Inhibition of The Flames of H₂-O₂-N₂ Mixtures by Halogenated Hydrocarbons," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 6, pp. 15~21.