

산소부화 조건인 CH₄/CH₃Cl/O₂/N₂ 예혼합 화염에서 CH₃Cl의 영향

신성수[†]·이기용^{*}

The Influence of CH₃Cl on CH₄/CH₃Cl/O₂/N₂ Premixed Flames under the Oxygen Enrichment

Sung Su Shin[†] and Ki Yong Lee^{*}

Key Words: Oxygen Enrichment(산소부화), Premixed Flame(예혼합 화염), Flame Speed(화염속도), Equivalence Ratio(당량비), CH₃Cl(메틸클로라이드)

Abstract

A comprehensive experimental and numerical study has been conducted to understand the influence of CH₃Cl addition on CH₄/O₂/N₂ premixed flames under the oxygen enrichment. The laminar flame speeds of CH₄/CH₃Cl/O₂/N₂ premixed flames at room temperature and atmospheric pressure are experimentally measured using Bunsen nozzle flame technique, varying the amount of CH₃Cl in the fuel, the equivalence ratio of the unburned mixture, and the level of the oxygen enrichment. The flame speeds predicted by a detailed chemical kinetic mechanism employed are found to be in excellent agreement with those deduced from experiments. As CH₃Cl addition is increased temperature at the postflame is not almost varied but the heat release rate and EI_{NO} are decreased. The function of CH₃Cl as inhibitor on hydrocarbon flames becomes weakened as the level of the oxygen enrichment is increased from 0.21 to 0.5.

1. 서론

산업 폐기물 중 유기 화합물은 소각을 통해 처리할 때 가장 안전하면서 여러 가지 이점이 있다. 연소 과정에서 유기 화합물은 이산화탄소와 수증기로 전환되고, 이 때 생성되는 유독가스는 세정과정을 통해 흡수시킴으로 대기 중에 방출하는 것을 억제할 수 있다. 또한 부수적으로 에너지를 얻을 수 있다[1].

유기 화합물 중 염화 탄화수소 화합물(chlorinated hydrocarbons, CHCs)은 공업용 물질로써 다양한 분야(냉매, 스프레이 가스, PVC 등)에서 많이 사용되고 있다. 이들의 연소 현상에 대

하여 많은 연구가 진행되어 왔고, 이들이 탄화수소 연소를 방해하는 억제제 역할에 대한 규명이 이루어져 왔다[2, 3]. 또한 지난 수십 년 간 염화 탄화수소 화합물의 화학 반응에 대한 연구 결과, 단순한 구조로 된 염화 탄화수소 화합물에 대하여 이들의 산화 및 열해리에 관한 상세한 화학반응 메커니즘이 개발되어 왔다[4-6].

염화 탄화수소 화합물 중 가장 단순한 구조를 갖는 메틸클로라이드(Methyl Chloride, CH₃Cl)는 Cl/H 비가 낮아 자체적으로 연소가 가능하다. 그러나 좀 더 안정적인 화염을 얻고, 탄화수소 화염에서 CH₃Cl의 역할을 조사하기 위해 주로 메탄/공기 화염에 소량 첨가된 화염에 대한 연구가 주를 이루고 있다. Valeiras 등[7]은 메탄/염화 탄화수소 화합물/공기 분젠 화염을 형성하여 직접 화염 이미지에 근거한 화염속도를 측정하였다. Karra 등[4]은 CH₃Cl 연소에 대한 상세한 화학반응 메커니즘을 제안하였고, 수치해석 결과는 과농 조건의 CH₃Cl/CH₄/O₂/Ar 평면 예혼합 화염으

[†] 안동대학교 대학원 기계공학과

E-mail : 90tan@anuis.andong.ac.kr

TEL : (054)820-5769 FAX : (054)820-5167

^{*} 안동대학교 기계공학부

로부터 측정된 농도 결과와 비교함으로써 만족할 만한 결과를 얻었다. 반응 메카니즘 분석을 통해 CH_3Cl 이 화염에서 매연(soot)을 촉진시키는 메카니즘에 대한 이해를 얻었고, 메탄과 CH_3Cl 의 반응 경로를 입증하였다. Chelliah 등 [5]은 대향류 예혼합 화염 방법을 이용하여 화염속도를 측정하였고, 그 결과는 제안한 상세한 화학반응 메카니즘을 사용한 수치해석의 화염속도와 비교한 결과 약간의 차이를 보여주었다. 그러한 CH_3Cl 의 억제 효과, 매연 형성 경향, 소량의 CH_3Cl 첨가가 억제 효과를 증대시킬 수 있는 가능성 등을 보여주었다. Lee 등 [6]은 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{Air}$ 예혼합 화염에 대한 상세한 화학반응 메카니즘을 개발하였고 이를 근거로 수치해석 적으로 CH_3Cl 첨가량 변화에 대한 화염구조 및 민감도 분석을 조사하였다. 또한 상세한 화학반응 메카니즘을 분석하여 좀 더 화학종 수와 기초 반응식을 줄인 반응 메카니즘(Short Mechanism)을 제안하였다.

높은 Cl/H 비를 갖는 염화 탄화수소 화합물은 산화제로 공기를 사용할 경우 연소시키기 어려운 문제점을 갖고 있다. 또한 낮은 Cl/H 비를 갖는 염화 탄화수소 화합물도 산화제로 공기를 사용할 경우 2차 오염 물질을 발생시킬 가능성이 높다 [8]. 산소부화연소는 염화 탄화수소 화합물/공기 연소가 갖고 있는 문제점을 해결하기 위한 방안 중 하나이다. 산소부화연소를 통해 염화 탄화수소 화합물의 파괴-제거 효율(Destruction-and-Removal Efficiency, DRE) 증대, 더 높은 에너지 활용, 더 낮은 2차 오염 물질 배출, 더 빠른 연소 반응 등을 가져올 수 있다[9].

본 연구는 첨가제로서 CH_3Cl 이 산소 부화된 메탄 예혼합 화염의 화염구조에 미치는 영향을 조사하기 위해 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 예혼합 화염에 대한 상세한 화학반응 메카니즘을 개발하였다. 이를 위해 실험을 통해 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 예혼합 화염에 대한 화염속도를 측정하였다. 층류 화염속도는 메탄, CH_3Cl , 산소 및 질소 등의 혼합물에 대한 중요한 물리 화학적 성질이고, 총괄 연소율은 이것은 제공근에 비례한다[10]. 따라서 화염속도 자료는 이론적 또는 실제적으로 예혼합 화염의 연구에 있어서 매우 중요한 인자이다. 이 자료는 개발한 상세한 화학반응 메카니즘을 입증하고, 계산한 화염속도와 비교하는데 사용하였다.

CH_3Cl 은 고온에서 메탄보다 먼저 분해되어

CH_3Cl 에 포함된 염소원자가 탈락되고, 이 염소원자는 탄화수소 화염 내에 존재하는 수소원자와 반응함으로써 탄화수소 연소에서 중요한 연쇄분지반응인 $\text{H}+\text{O}_2$ 의 반응을 억제시킨다[2]. 이러한 반응 과정은 화염 내에서 중요한 활성기인 O , OH , 및 H 의 농도 감소를 가져온다. 산소부화연소에서 질소산화물은 주로 열적 NO 반응 메카니즘을 통해 생성된다[11]. 이 메카니즘은 확장 Zeldovich 메카니즘(extended Zeldovich mechanism)으로 설명되고, 질소산화물 생성률은 온도와 활성기(radical) 농도에 굉장히 민감하다. CH_3Cl 첨가에 따른 메탄 화염 내에서 활성기 농도 감소는 열적 질소산화물 저감을 야기시키므로 CH_3Cl 첨가가 질소산화물 생성에 미치는 영향에 대한 조사를 하였다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험장치의 구성

실험 장치는 유량 공급 장치, 버너, 및 셀리렌 장치로 구성되어 있고, 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 4종류의 고압 실린더 가스(메탄, CH_3Cl , 산소, 및 질소의 순도는 각각 99.95%, 99.9%, 99.995%, 및 99.999%)는 각각 레귤레이터, On/Off 밸브, 및 질량유량계(Mass Flow Controller, Tylan FC280FA)를 통과한 후 튜브 내에서 혼합되면서 버너로 공급되었다. 각 가스들의 유량은 질량유량계에 의해 정밀하게 제어하였고, 질량유량계는 Drycal DC-Lite(Bios International, DCL-H)을 사용하여 Calibration 하였다. 산소부화화염은 높은 화염속

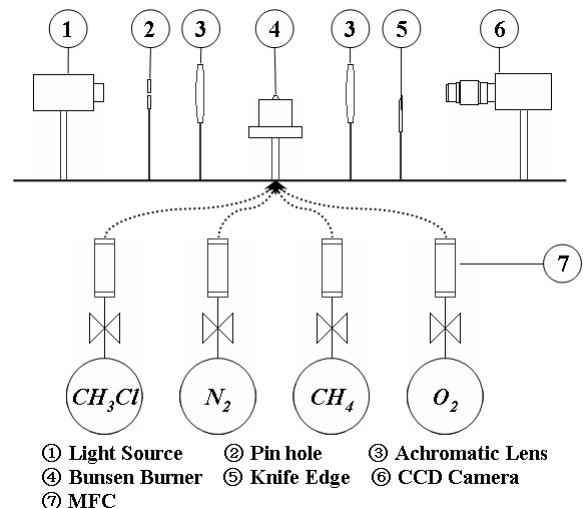


Fig. 1 Schematic of diagram of experiment setup.

도를 갖고 있어 많은 혼합기 유량이 버너에 공급되므로 버너 내에서 부드러운 유동을 얻기 위해 버너 출구를 노즐 형태로 하였다. 버너 출구의 노즐 수축부 형상은 Morel의 제안에 가급적 근접하게 제작을 하였다. 버너 노즐 출구 내경은 12 mm, 버너 총 길이는 약 72 Cm이고, 재질은 스테인레스이다. 노즐 버너에 형성된 산소부화 화염면을 가시화하기 위해 렌즈를 사용한 셀리렌 장치를 이용하였다. 사용한 광원은 제논광(Xenon Lamp)이고, 광원은 핀홀(직경 200um)와 2개의 achromatic 렌즈(76mm 직경, 초점 거리 500mm)를 통과한 후 나이프 에지(knife edge)에 초점이 형성된다. 카메라 렌즈와 디지털 카메라(Roper Scientific, Photometrics CoolSNAP fx)를 통해 나이프 에지 뒤에 형성된 셀리렌 이미지를 찍고, 그것은 이미지 분석을 위해 컴퓨터에 저장되었다. 저장된 이미지는 이미지 해석 프로그램 또는 MatLab 프로그램을 통해 화염면 형상을 얻고 화염 원추각을 측정하여 화염속도를 얻었다.

2.2 수치해법

자유롭게 전파하는 $CH_4/CH_3Cl/O_2/N_2$ 예혼합 화염에 대한 수치해석을 수행하기 위해 RUN-1DL[12]를 사용하였다. 이 코드는 입력 데이터로 화학반응 메카니즘, 메카니즘에 있는 화학종의 열역학적 물성치 및 전달 물성치가 필요하다. 이러한 물성치는 GRI-3.0 메카니즘[13], Leylegian 등[14], Lee 등[6]에서 사용한 것을 이용하였다. 주어진 계산 구간 안에서 온도와 화학종 농도가 급격히 변하므로 이들의 정확한 분포를 얻기 위해 약 180~240개 정도의 격자수를 사용하여 결과를 얻었다. 초기조건으로 Ar 농도를 0으로 하고, 초기가스 온도는 300K, 압력은 1기압을 갖는 화염에 대하여 수치해석을 수행하였다.

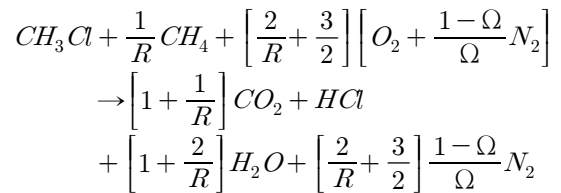
2.3 상세한 화학반응 메카니즘

산소부화연소에 적용할 수 있는 $CH_4/CH_3Cl/O_2/N_2$ 화염에 대한 상세한 화학반응 메카니즘을 개발하였고, 자유롭게 전파하는 예혼합 화염에 이 메카니즘을 적용하였다. 본 메카니즘은 연료로서 메탄과 CH_3Cl 의 연소에 관계되는 메카니즘을 각각 결합한 형태로 되어 있다. 산소부화된 메탄 연소 반응 메카니즘은 Lee[15]가 이미 개발한 것을 사용하였고, CH_3Cl 연소에 사용한 기초 반응

식은 주로 Miller[16]의 반응 메카니즘을 기초로 하여 필요한 기초 반응식들을 첨가[17, 18]하였다. 이 상세한 반응 메카니즘은 불활성 기체로 아르곤(Ar)을 포함한 89개 화학종으로 구성되어 있고, 1017개의 정방향 기초반응식을 포함하고 있다.

3. 결과 및 논의

당량비 1인 $CH_4/CH_3Cl/O_2/N_2$ 예혼합 화염의 총괄 반응식(global reaction)[7]은 다음과 같다.



여기서 R은 CH_3Cl/CH_4 의 몰 비, Ω 는 산소부화율이다. 산소부화율은 $\frac{X_{O_2}}{X_{O_2} + X_{N_2}}$ 로 정의하였고,

X_{O_2} 와 X_{N_2} 는 각각 산소와 질소의 몰 값이다. R 값이 0인 경우는 메탄 화염이고, R 값이 무한대인 경우는 CH_3Cl 화염이고, R 값이 0과 무한대 사이에 있는 경우는 연료로서 메탄과 CH_3Cl 을 혼합한 화염이다. 산소부화율 0.21은 산화제로 공기, 산소부화율 1은 산화제로 순수 산소만을 사용한 것을 나타낸다.

당량비 1에서 CH_3Cl 의 완전 연소를 위해 요구되는 산소량은 탄소가 CO_2 , 염소원자가 HCl, 수소가 H_2O 로 변환되는 순서로 요구되는 산소량의 합으로 정의하였다. 혼합물의 당량비(ϕ)는 (실제 연료/산소비)/(당량비 1에서 연료/산소비)로 정의하였고, 그것은 다음과 같다[7].

$$\phi = [2/R + 3/2] / [\text{실제 사용된 산소 몰 수}]$$

3.1 화염속도의 결과 비교

산소부화율을 0.3과 0.35로 고정하고 당량비를 0.8~1.3까지 변화시키면서 $CH_4/CH_3Cl/O_2/N_2$ 예혼합 화염에 대한 화염속도를 측정된 결과와 수치해석 결과를 Figs. 2와 3에 각각 나타냈다. 또한 CH_3Cl/CH_4 몰 비(= R 값)를 0(순수 메탄 화염)부터 1.0(메탄과 CH_3Cl 이 같은 몰을 갖는 화염)까지 변화시킨 화염에 대한 화염속도 결과도 같이 나타냈다. 언급한 당량비 범위 내에서 CH_3Cl 이 첨가된 화염의 화염속도는 수치해석 결과가 실험 결과보다 약간 낮게 예측하고 있지만 두 결과는 전반적으로 매우 잘 일치하고 있다.

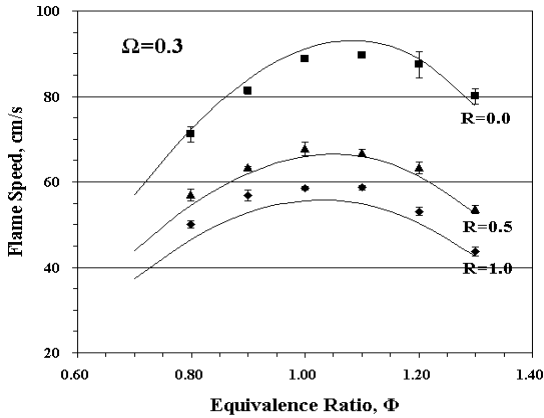


Fig. 2 Flame speeds with respect to equivalence ratio at $\Omega=0.3$.

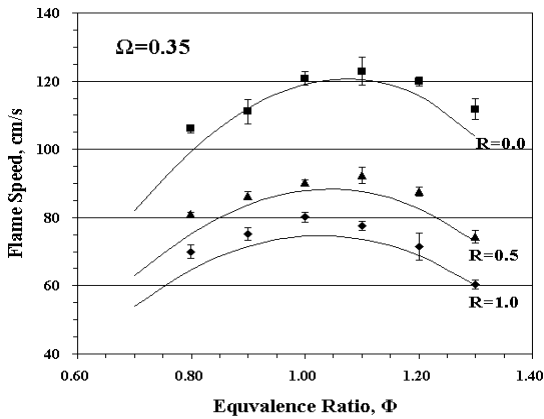


Fig. 3 Flame speeds with respect to equivalence ratio at $\Omega=0.35$.

예상한 것처럼 두 종류의 산소부화율 조건에서 CH_3Cl 의 첨가는 염소 원자의 양을 증가함에 따라 당량비에 관계없이 화염속도는 낮아지고, 소량의 CH_3Cl 첨가가 화염속도 감소에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. CH_3Cl 첨가는 희박 영역보다 과농 영역에서 더 많은 화염속도 감소에 영향을 미치는데 이것은 염화 화합물이 C_2 화학종의 농도를 더 증가시키는 경향이 있기 때문이다.

산소부화율을 0.21, 0.30 및 0.35로 고정하고 R 값을 0부터 1까지 변화시키면서 얻어진 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 화염 내에서 염소 원자량의 증가는 화염속도의 감소를 가져오는데 R 값이 1에 가까울수록 완만함을 보여준다. $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{Air}$ 화염에 대하여 대항류 화염 기술을 이용해서 화염속도를 측정된 Chelliah 등[5]의 결과와 Bunsen 화염 기술을 이용해서 화염속도를 측정된 Valeiras 등[7]의 결과도 Fig. 4에 나타냈다. 산소

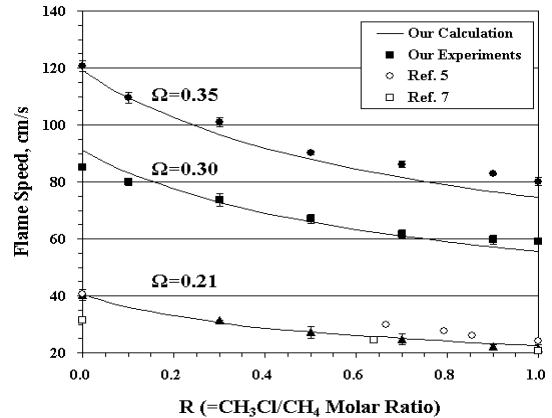


Fig. 4 A comparison of flame speeds with the different O_2 enrichment levels.

부화율 0.21인 화염에서 Chelliah 등[5]이 측정된 화염속도는 본 연구에서 얻어진 수치해석 및 실험 결과보다 2~5 Cm/sec 높게 나타지만 Valeiras 등[7]이 측정된 화염속도는 메탄/공기 조건을 제외하고 본 연구 결과와 매우 잘 일치한다. 본 실험에서 측정된 메탄/공기 화염의 화염속도는 40.6 Cm/sec로 Chelliah 등[5]의 결과와 일치함과 동시에 일반적으로 알려진 40.5 Cm/sec [19]와 매우 잘 일치한다.

실제적으로 화염 전파의 중요한 요소인 화염속도는 층류 예혼합 화염에서 매우 중요한 인자이다. 수치해석을 위해 사용한 상세한 화학반응 메카니즘은 산소부화된 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 화염의 화염속도를 잘 예측하고 있어 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 화염의 화염 구조 해석에 대한 적용이 가능하다.

3.2 화염온도 및 열 방출률

산소부화율 0.21과 0.5로 고정하고 당량비 1인 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 예혼합 화염에 대하여 R 값을 0, 0.5, 및 1로 변화시키면서 계산한 화염온도 분포와 열 방출률 분포를 Figs. 5와 6에 각각 나타냈다. Fig. 5에서 보는 것처럼 메탄 화염에 CH_3Cl 을 첨가하여도 산소부화율에 상관없이 화염 하류에서 화염온도는 감소하지 않고 메탄 화염보다 약간 높은 온도를 갖는다. 산소부화율이 낮은 조건을 갖는 메탄 화염에서 CH_3Cl 의 첨가량이 증가할수록 화염온도 상승은 완만해지는 반면 산소부화율이 증가할수록 화염온도는 높아지면서 화염 내에 화염온도 변화에 CH_3Cl 첨가는 별 영향을 미치지 못한다.

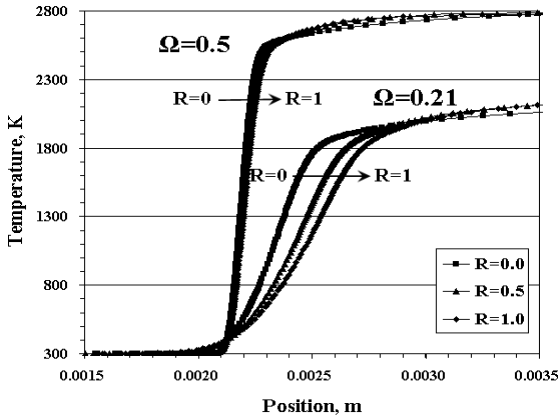


Fig. 5 Spatial temperature profiles for a $\Phi=1.0$ flame with the different O_2 enrichment levels.

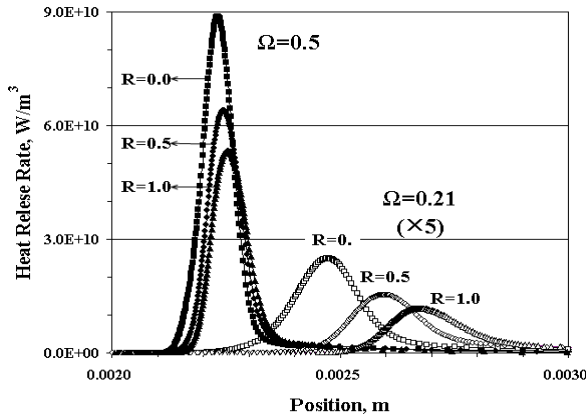


Fig. 6 Heat release profiles for a $\Phi=1.0$ flame with the different O_2 enrichment levels.

Fig. 6에서 괄호에 표시한 수치는 열 방출률 값을 수치값 만큼 곱한 것을 말한다. CH_3Cl 첨가는 화염 내 활성기 농도의 저감을 가져온다. 특히 CO 산화에 필요한 OH 농도 감소에 영향을 미쳐 열 방출에서 중요한 $CO+OH \rightarrow CO_2+H$ 의 반응을 덜 활발하게 한다. Fig. 6에 있는 열 방출률 분포의 면적을 살펴보면 산소부화율 0.21에서 ($R=1$ 에서 면적)/($R=0$ 에서 면적)=0.57이고, 산소부화율 0.5에서 그 비는 0.66이다. 따라서 산소부화율이 높아질수록 CH_3Cl 첨가를 통한 $CO+OH \rightarrow CO_2+H$ 반응식의 억제력은 점점 감소함을 알 수 있다.

3.3 화학종 배출지수

화학종 i 의 배출지수는 연소과정에 의해 소비된 연료의 질량에 대한 화학종 i 의 질량비로 정

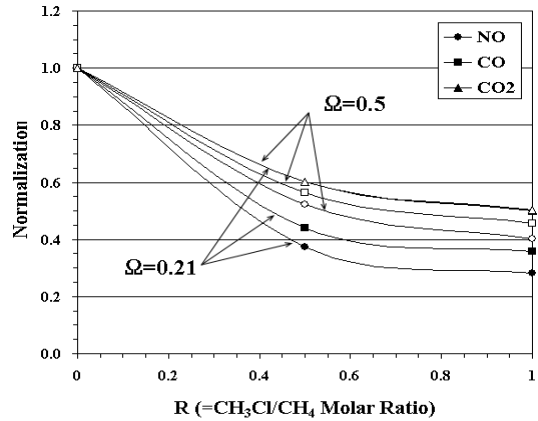


Fig. 7 Normalization profiles of EI_i .

의하였고, 다음과 같은 식으로 나타냈다.

$$EI_i = \frac{m_i}{m_F} = \frac{W_i \int_0^L \dot{\omega}_i dx}{- \left[W_{CH_4} \int_0^L \dot{\omega}_{CH_4} dx + W_{CH_3Cl} \int_0^L \dot{\omega}_{CH_3Cl} dx \right]}$$

여기서 m 은 질량, W_i 는 화학종 i 의 분자량, $\dot{\omega}_i$ 는 화학종 i 의 순생성률, L 은 계산 구간이다. 분모에 (-)가 있는 것은 연료의 순생성률을 적분하면 음의 값을 갖기 때문이다.

당량비 1인 $CH_4/CH_3Cl/O_2/N_2$ 화염의 조건에서 3개의 화학종(NO, CO, 및 CO_2)에 윗 식을 적용하여 각 화학종에 대한 배출지수를 계산하였다. 그 배출지수를 메탄 화염에 대하여 계산된 각각의 화학종에 대한 배출지수로 나눈 결과를 R 값 변화에 따라 Fig. 7에 나타냈다. 산소부화율에 상관없이 CH_3Cl 첨가량의 증가는 3개의 화학종 배출지수를 감소시킨다. 같은 양의 CH_3Cl 이 첨가된 화염에서 CO와 NO 배출지수는 산소부화율 0.5보다 산소부화율 0.21에서 더 크게 감소한다. 반면 CO_2 배출지수는 산소부화율 변화에 영향을 받지 않는다.

열적 NO 생성은 화염온도, 산소원자 및 질소 농도와 관련을 갖으며 특히 화염온도에 매우 영향을 받는다. Fig. 5에서 본 것처럼 메탄 화염에 CH_3Cl 첨가는 매우 미미한 화염온도 변화를 가져오기 때문에 이러한 화염에서 NO 생성은 화학종 농도만의 함수가 된다. 메탄 화염과 비교하면 산소부화 조건과 CH_3Cl 첨가는 각각 질소농도와 산소원자 농도를 저감시켜 NO 배출지수의 감소를

가져온다. 낮은 산소부화율에서 NO 배출지수가 더 낮은 것은 산소부화율이 높을수록 열 방출률에서와 마찬가지로 메탄 화염에서 CH_3Cl 의 억제제 역할이 감소하기 때문이다.

4. 결 론

산소부화된 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 예혼합 화염을 노즐 버너에 형성시키고, 웰리렌 장치를 사용하여 화염속도를 측정하였다. 실험결과는 수치해석 결과와 비교함으로써 상세한 화학반응 메커니즘을 정립하였고, 이를 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 예혼합 화염의 화염구조를 해석하는데 이용하였다. 산소부화된 메탄 화염에서 화염온도, 열 발생률, 화학종 배출지수에 CH_3Cl 이 미치는 영향을 조사하였다.

1. 주어진 당량비와 R값 범위 내에서 수치해석을 통해 계산한 화염속도는 실험 결과와 매우 잘 일치하였다. 따라서 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 화염에 대하여 개발한 상세한 화학반응 메커니즘은 이러한 화염구조를 해석하는데 적용할 수 있다.

2. 메탄 화염에 CH_3Cl 의 첨가는 화염 하류 온도에 미미한 변화를 주지만 열 방출률에 있어서 그 영향은 크게 작용한다. 이것은 CH_3Cl 이 OH 농도 저감을 야기함으로써 열 방출에서 중요한 $\text{CO}+\text{OH}\rightarrow\text{CO}_2+\text{H}$ 의 반응을 억제시키기 때문이다.

3. 3개 화학종(NO, CO, 및 CO_2)의 배출지수는 메탄 화염 보다 메탄/ CH_3Cl 화염에서 더 많이 감소한다. 산소부화 조건과 CH_3Cl 첨가를 통한 화염 내에서 질소 및 산소원자 농도 감소는 $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ 화염에서 화학종 농도만의 함수가 되는 열적 NO 생성을 저감시킨다. NO 배출지수와 열 발생률을 통해 산소부화율이 높을수록 메탄 화염에서 CH_3Cl 의 억제제 역할은 감소함을 보여 주었다.

후 기

이 연구는 2003년도 안동대학교 학술연구지원 사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) Tanner, R.K., 1979, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 5, p. 245.

- (2) Westbrook, C. K., 1982, 19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 127.
- (3) Wilson, W.E., O'Donovan, J.T., and Fristron, R.M., 1969, 12th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 929.
- (4) Karra, S.B., Gutman, D., and Senkan, S.M., 1988, Combust. Sci. Technol., Vol. 60, p. 45.
- (5) Chelliah, H.K., Yu, G., Hahn, T.O., and Law, C.K., 1992, 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 1083.
- (6) Lee, K.Y., Yang, M.H., and Puri, I.K., 1993, Combust. Flame, Vol. 92, p. 419.
- (7) Valeiras, H., Gupta, A.K., and Senkan, S.M., 1987, Combust. Sci. Tech., Vol. 36, p. 123.
- (8) Karra, S.B. and Senkan, S.M., 1987, Combust. Sci. Tech., Vol. 54, p. 333.
- (9) Baukal, C.E. 1998, Oxygen-Enhanced Combustion, CRC Press.
- (10) Glassman, I., 1996, Combustion, 3rd Ed., Academic Press.
- (11) Sung, C.J. and Law, C.K., 1998, 27th symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 1411.
- (12) Rogg, B., 1991, RUN-1DS: A computer program for the simulation of one-dimensional chemically reacting flows. University of Cambridge.
- (13) http://www.me.berkeley.edu/gri_mech
- (14) Leylegian, J.C., Zhu, D.L., Law, C.K., and Wang, H., 1998, Combust. Flame, Vol. 114, p. 285.
- (15) Lee, K.Y., Nam, T.H., You, H.S., and Choi D.S., 2002, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 26, p. 555.
- (16) Miller, G.P., 1995, Combust. Flame, Vol. 101, p. 101.
- (17) Wu Y.P. and Won Y.S., 2000, Combust. Flame, Vol. 122, pp. 312.
- (18) Chang, W.D. and Senkan, S.M., 1989, Environmental Science and Technology, Vol. 23, p. 442.
- (19) Law, C.K., 1993, "A compilation of experimental data on laminar burning velocities," Peters, N and Rogg, B. (Eds.), Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems, Springer-Verlag.