

H₂/HCl/Air 예혼합 화염의 질소산화물 생성에서 염화수소의 영향

권영석* · 이기용**

The Effect of Hydrogen Chloride on the NO_x Production in H₂/HCl/Air Premixed Flame

Young Suk Kwon* and Ki Yong Lee**

ABSTRACT

Numerical simulations of freely propagating flames burning H₂/HCl/Air mixtures were performed at atmospheric pressure in order to understand the effect of hydrogen chloride on flame structures. The chemical and physical effects of hydrogen chloride on flame structures were observed. A chemical kinetic mechanism was developed, which involved 26 gas-phase species and 198 forward elementary reactions. Under several equivalence ratios the flame speeds were calculated and compared with those obtained from the experiments, the results of which were in good agreement. As hydrogen chloride as additive was added into H₂/Air flame, the flame speed, radical concentration and NO production rate were decreased. The chemical effect of hydrogen chloride caused the reduction of radical concentration, and then the decrease of the net rate of NO production. It was found that the influence in the reduction of EI_{NO} with the addition of hydrogen chloride was attributed more due to the chemical effect than the physical effect.

Key Words : Hydrogen Chloride, Freely propagating flame, Chemical kinetic mechanism, Equivalence ratio, Chemical effect, Additive, Inhibitor

기 호 설 명

E _P	physical effect on emission index	W _i	molecular weight of specie i
E _C	chemical effect on emission index	m _i	mass of specie i
S _P	physical effect on flame speed	·	production rate of specie i
S _C	chemical effect on flame speed	ω _i	

1. 서 론

최근 연소 장치의 설계에서 중요한 요소 중 하나는 공해물질 배출의 제어이고, 생성되는 공해물질은 미연 탄화수소, 질소산화물, 일산화탄소, 황산화물, 매연 등이 있다[1]. 이 중에서 질소산화물(NO_x)은 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂),

및 N₂O를 포함하고 있고, 산성비, 스모그, 오존층 파괴의 원인이 된다[1].

지난 60 여년 동안 연소로부터 질소산화물 형성 과정을 규명하고자 하는 연구들이 진행되어 왔고, 현재 질소산화물 중 중요한 화학종인 NO의 생성에 대하여 5가지 경로반응이 알려져 있다 [2, 3]. 이러한 생성 원인에 근거하여 연소 장치로부터 질소산화물 생성을 제어하기 위한 기술들이 발전하여 왔다. 질소산화물을 저감하는 기술 체계로서는 화염 내에서 질소산화물을 저감시키려는 전처리 제어 기술과 일단 발생된 질소산화

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

† 연락저자, kylee@andong.ac.kr

물을 각종 물리적 및 화학적 방법에 의해 제거하려는 후처리 제어 기술로 나누어진다. 전처리 제어 기술로는 저과잉 공기, 다단 연소, 재연소(reburning), 배기 가스 재순환, 물 분사, 산화제의 고속분사 등의 방법이 있다[1, 4]. 이러한 방법들은 주로 물리적 변화(희석제를 이용하여 화염온도의 저감, 산소 농도의 저하, 혼합가스 농도의 변화, 유동장 변화 등)를 통해 질소산화물을 저감시키는데 있어서 어느 정도 한계를 갖고 있다. 후처리 제어 기술로는 SNCR(selective non-catalytic reduction), SCR (selective catalytic reduction) 등이 실용화되어 질소산화물 저감에 기여하고 있다[5]. 고온을 수반하는 연소 과정에서 질소산화물은 주로 열적 NO 반응 메커니즘을 통해 생성된다[6]. 이 메커니즘은 확장 Zeldovich 메커니즘(extended Zeldovich mechanism)으로 설명이 가능하고, NO 생성률은 온도와 활성기(radical) 농도에 평강히 민감하다. 활성기(O, H 및 OH)들은 H₂-O₂ 반응 과정을 통해 생성되며, 이 활성기들의 생성에 가장 중요한 반응식은 H + O₂ = OH + O[7]로 알려져 있다.

첨가제를 사용하여 화염 내에서 활성기들의 생성을 억제하여, 그들의 농도를 저감시켜 질소산화물의 생성을 억제시킬 수 있다. 즉 첨가제를 화염에 첨가할 경우 화염 내에서 첨가제의 물리적 및 화학적 효과를 통해 열적 NO 생성을 저감시킬 수 있다. 물리적 역할은 첨가제가 희석제와 같은 역할을 함으로서 화염온도를 감소시키고, 화학적 역할은 열적 NO 생성에 기여하는 활성기 농도를 저감시키는 것이다. 위와 같은 역할을 할 수 있는 첨가제로는 화염에서 억제제(inhibitor) 역할을 하는 할로겐족 화합물 또는 금속을 포함한 화합물이 적합하다. 예로서 할로겐족 원소는 반응 영역에서 수소원자(H)를 제거함으로써 활성기 생성에 중요한 연쇄분기반응(chain branching reaction)인 H + O₂ = OH + O의 반응률을 감소시킨다[8, 9]. 특히 낮은 온도에서 수소원자는 산소(O₂)와 반응하기 보다 할로겐족 원소를 포함한 화학종(HX 또는 X₂, X는 할로겐 원소)과 반응하며, 그것은 낮은 활성화 에너지(activation energy)에 기인한다.

본 연구에서는 첨가제를 첨가한 자유롭게 전파하는 H₂/Air 예혼합 화염에 대하여 수치해석을 수행하였다. H₂/Air 화염은 탄화수소 화염보다 비교적 화학 반응 메커니즘이 간단하여 반응 메커니즘을 해석하기가 용이하다. 첨가제로서는 화염 내에서 물리적 및 화학적 역할을 할 수 있는 HCl을 선택하였다. 이러한 첨가제가 첨가된 화염과 순수 H₂/Air 화염의 화염 구조 및 질소산화물 생성 결과를 비교함으로써 첨가제가 그들에 미치

는 영향을 조사하였다.

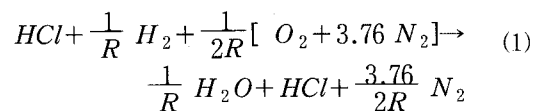
2. 수치해법

앞서 개발된 수치해석 코드인 RUN-1DL[10, 11]을 사용하여 자유롭게 전파하는 H₂/HCl/Air 예혼합 화염에 대한 수치해석을 수행하였다. 사용한 상세한 화학반응 메커니즘은 기존에 개발된 H₂/Air 화염 반응 메커니즘[12]과 NO_x/HCl 반응식[13-15]으로 구성되어 있다. 이 메커니즘은 불활성 기체로서 Ar을 포함한 26개의 화학종과 198개의 정반응 기초반응식을 포함하고 있다. 수치해석 코드에서 입력 데이터인 열역학적 및 전달 물성치는 Ref. 13과 Ref. 15에 있는 자료를 사용하였다. 상세한 화학반응 메커니즘은 Ref. 16에서 찾을 수 있다.

주어진 계산 구간 안에서 온도 및 화학종 농도 분포가 급격히 변하므로 이들의 정확한 분포를 얻기 위해 약 100~150 정도의 격자 수를 갖고 결과를 얻었다. 초기조건으로 Ar 농도를 0으로 하고, 혼합기 온도는 300K, 압력은 1기압 조건을 갖는 화염에 대하여 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 논의

H₂/HCl/Air 예혼합 화염에서 Cl/H비가 1보다 작은 경우에는 생성물로서 Cl₂를 고려하지 않아도 되기 때문[17]에 당량비 1인 H₂/HCl/Air의 총괄 반응식(global reaction)은 다음과 같다.



여기서 R은 HCl/H₂의 몰 비이다. R값이 0인 경우는 H₂/Air 화염이고, R값이 0과 어떤 실수 사이에 있는 경우는 연료로서 수소와 첨가제로서 HCl을 혼합한 화염이다.

첨가제는 화염 내에 소량 첨가되어도 주로 화학적 반응에 의해 활성기 농도를 낮출 수 있다. 따라서 첨가제인 HCl 농도와 연료인 수소 농도의 비가 10% (R = 0.1)이내의 조건을 갖는 3가지 화염(R = 0.01, 0.05, 및 0.1)에 대하여 첨가제의 물리적 및 화학적 효과를 조사하였다. 첨가제의 물리적 및 화학적 효과를 찾기 위해 염화수소를 가상의 불활성 화학종으로 고려하여 수치해석을 수행하였다. 즉 가상의 첨가제는 화학반응을 수행하는 첨가제와 같은 열역학 및 전달 물성치를 갖고 있지만 화학반응에는 참여하지 않는다. 염화수소

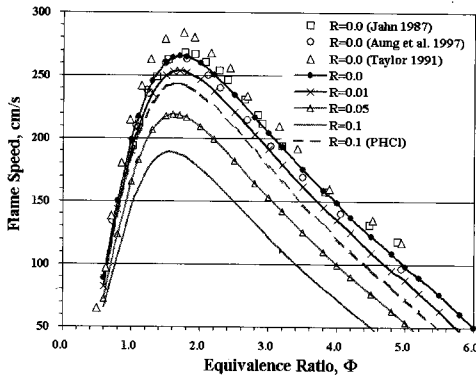


Fig. 1 A comparison of flame speeds for the different flames with respect to equivalence ratio

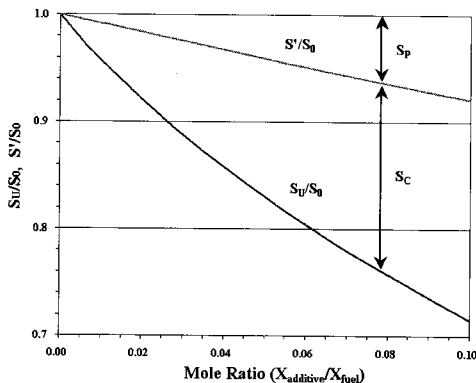


Fig. 2 The physical and chemical components of HCl influence on flame speed

에 대한 가상 첨가제로 PHCl을 도입하여 계산하였다. 언급한 화염에 대한 계산 결과는 H_2/Air 화염의 결과와 비교하였다.

3.1 화염 속도

자유롭게 전파하는 $H_2/HCl/Air$ 에혼합 화염에 대하여 언급한 화학반응 메커니즘을 통해 당량비 변화에 따른 5가지 종류의 화염들에 대한 화염속도를 계산하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타냈다. 또한 최근의 다른 연구자들[18-20]이 H_2/Air 화염의 화염속도에 대하여 측정된 실험 결과를 그림에 기호로 표시했다. H_2/Air 화염에 대하여 계산한 화염속도는 실험 결과와 비교적 잘 일치한다. 예상했던 것처럼 H_2/Air 화염에 HCl의 첨가(물리적 및 화학적 역할 포함)는 희박 및 과농 영역에서 화염속도의 감소를 가져오고, 그 영향

은 과농 영역에서 더 크게 나타난다. 당량비가 약 1.6 근처에서 최대 화염속도를 갖고, 그 값은 264 cm/s이다. R값이 0.01, 0.05, 및 0.1로 증가함에 따라 화염속도는 각각 253 cm/s, 219 cm/s, 및 189 cm/s로 감소하고, 이것은 첨가량(또는 R 값)에 따라 화염속도가 선형적으로 감소하지 않음을 보여준다. 즉 소량의 첨가물이 첨가될 때 화염속도는 크게 감소하지만, 계속해서 그 양을 증가시키더라도 화염속도는 완만하게 감소한다. 이것이 할로겐 화합물이 수소 또는 탄화수소 화염에 첨가되었을 때 나타나는 특징이다.

가상 첨가제의 첨가는 반응물의 희석과 첨가제의 비열 효과를 가져온다. 희석 효과는 단일 화염온도 감소를 야기시키고, 이것은 반응을 저감에 영향을 미쳐 화염속도를 감소시킨다. 같은 양의 가상 첨가제가 화염에 첨가된 경우 첨가제의 비열이 크면 클수록 그 크기에 비례하여 화염속도 저감이 나타난다. Fig. 1에서 보는 것처럼 가상의 염화수소(PHCl) 첨가는 언급한 효과를 통해 화염속도를 저감시키지만 화학적 효과를 동반했을 때 보다 화염속도 저감에서 그 영향은 적다.

당량비가 1.6인 H_2/Air 화염의 화염속도에서 첨가제의 물리적 및 화학적 영향을 조사하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 물리적 영향(S_p)과 화학적 영향(S_c)은 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$S_p = \frac{S'_0 - S_0}{S_0} \quad (2)$$

$$S_c = \frac{S'_u - S_u}{S_0} \quad (3)$$

여기서 S 에 있는 아래첨자 0는 첨가제가 없는 H_2/Air 화염의 경우, 위 첨자 '은 첨가제가 화염에서 불활성 가스(물리적 역할)로 간주된 경우, 아래첨자 u는 첨가제가 화염에서 물리적 및 화학적 역할을 한 경우의 화염속도이다. 물리적 역할을 하는 첨가제 HCl이 첨가됨에 따라 화염속도에서 물리적 영향은 첨가량에 선형적으로 비례하여 감소하는 반면 화학적 영향은 선형적으로 비례하여 증가하지 않는다. HCl을 첨가한 경우 물리적 및 화학적 효과를 비교하면, HCl의 화학적 효과가 화염속도 감소에 더 큰 효과를 준다. $R=0.01$ 인 경우 화염속도의 감소에 있어서 화학적 영향이 물리적 영향보다 약 4 배 이상, $R=0.1$ 인 경우 약 2.5배의 영향을 준다. 따라서 소량의 첨가제가 화염에 첨가되는 것이 화염속도 감소에 더 큰 영향을 미친다.

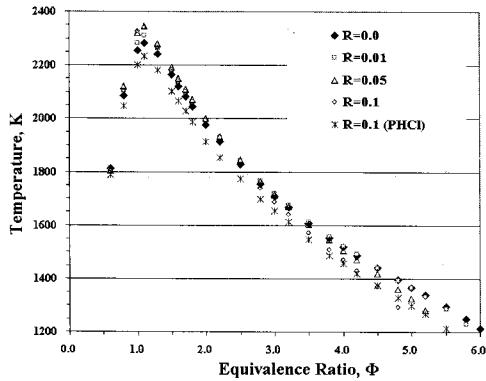


Fig. 3 Temperature for the different flames with respect to equivalence ratio

3.2 화염온도

당량비 변화에 따라 5가지 종류의 화염의 화염 하류에서 계산된 화염온도를 Fig. 3에 나타냈다. 당량비가 1.1 부근에서 형성된 화염의 화염 하류에서 최대 화염온도가 발생하고, 양쪽 방향으로 감소한다. 희박 및 과농 조건에서 H₂/Air 화염과 염화수소가 첨가된 화염(3가지 종류)에서 계산된 화염온도를 비교하면 그 차이는 약 38K 이내이고, 당량비 1.1 근처에서 화염온도 차이는 약 70K 이하이다. H₂/Air 화염에 염화수소의 첨가는 화염 내의 화학반응을 통해 그 차이는 크지 않지만 약간의 화염온도 상승을 가져온다.

반면 화염속도에서 논의한 것처럼 염화수소의 물리적 효과는 화염온도의 감소를 가져오고, 계산한 당량비 내에서 H₂/Air 화염온도와 비교하면 그 차이는 약 70K 이하이다. 따라서 염화수소의 화학적 효과는 물리적 효과와 달리 화염 하류의 온도 감소를 동반하지 않는다.

3.3 활성기 농도 분포

NO_x 반응 메커니즘에서 NO 생성률에 기여하는 중요한 인자 중 하나는 활성기 농도이다. 첨가제가 이러한 활성기 농도에 미치는 영향을 조사하기 위해 당량비 1이고 R=0.1인 2가지 종류의 화염에 대하여 계산한 결과를 Fig.4에 나타냈다. 불활성 물질로의 역할을 고려한 PHCl이 화염에 첨가된 경우, 활성기(H, OH, 및 O) 농도 분포는 H₂/Air 화염의 결과와 닮은 경향을 보여주며, 단지 약간의 활성기 농도 감소를 가져온다.

그러나 화학반응을 고려한 HCl이 사용된 경우 화염 내에서 화학 반응이 존재함으로 활성기 농

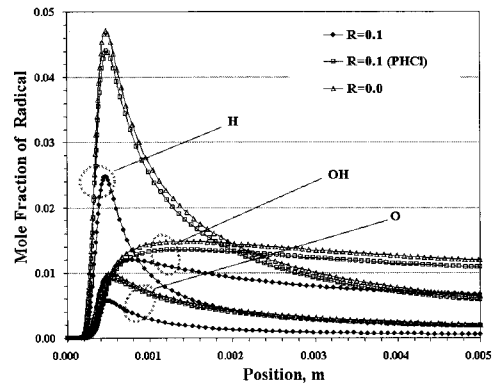


Fig. 4 The concentration profile of radicals for the Φ=1 flame adding HCl and PHCl

도는 매우 크게 감소한다. 특히 최대값에서 수소 원자와 산소원자 농도는 모두 약1.7배까지 감소한다. 언급한 것처럼 할로겐 원소인 염소원자는 수소원자를 제거함으로써 활성기 생성에 중요한 연쇄분기반응(chain branching reaction)인 H+O₂=OH +O의 반응률을 감소시키며[8,9]. 이것은 활성기 O와 OH의 농도 감소를 가져온다. 수소와 첨가제 HCl의 결합에너지(각각 104.18과 103.1 kcal/mole)[21]는 매우 작은 차이를 갖고 있고, 이것이 활성기의 최대 농도 위치를 약간 화염상류로 이동시킨다.

3.4 NO 생성률 및 NO 배출지수

Figure 5는 당량비 1인 5가지 종류의 화염에서 계산한 NO 순생성률(net production rate) 결과를 보여준다. 첨가제가 활성기 농도에 영향을

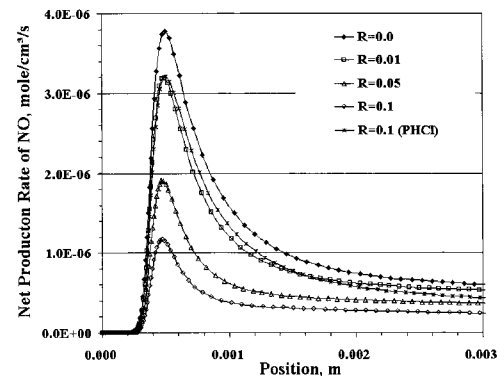


Fig. 5 The net rate of NO production for the Φ=1 flame adding HCl and PHCl

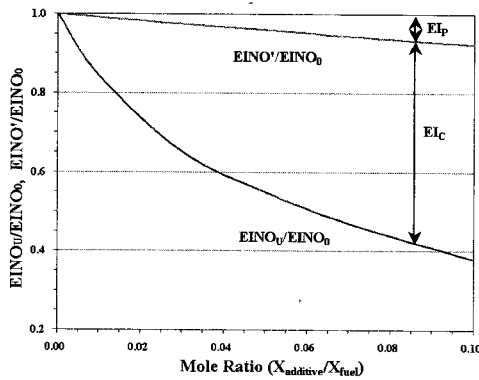


Fig. 6 The physical and chemical components of HCl influence on E_{NO}

미치는 것과 같은 경향이 NO 순생성물에도 나타난다. 즉 첨가제의 물리적 또는 화학적 역할이 NO 순생성물의 감소를 가져오고, 화학적 역할이 물리적 역할보다 NO 순생성물 감소에 더 큰 영향을 미친다. HCl의 첨가량이 증가할수록 NO 순생성물의 폭은 좁아지고, 10% HCl 첨가시 최대 NO 순생성물에서 약 3.3배까지 감소한다. 1% HCl을 첨가한 화염으로부터 계산한 NO 순생성물 분포는 10% PHCl(물리적 역할)을 첨가한 화염으로부터 계산한 결과와 닮은 결과를 보여준다. 이를 통해 염화수소의 소량의 HCl을 사용할 경우 HCl의 NO 순생성물에 대한 영향은 같은 양의 회석제보다 약 10배의 효과가 있음을 알 수 있다.

NO 배출지수(Emission Index, E_{NO})는 연소과정에 의해 소비된 연료 질량에 대한 화학종 NO의 질량 비로 정의하였고, 다음과 같은 식으로 나타냈다.

$$EI_{NO} = \frac{W_{NO} \int_0^L \omega_{NO} dx}{-W_{H_2} \int_0^L \omega_{H_2} dx} \quad (4)$$

여기서 m 은 질량, W_i 는 화학종 i 의 분자량, ω_i 는 화학종 i 의 순생성물, $L(=0.002 \text{ m})$ 은 계산 구간이다. 분모에 (-)가 있는 것은 연료의 순생성물을 적분하면 음의 값을 갖기 때문이다.

염화수소가 E_{NO} 에 미치는 물리적 및 화학적 영향을 조사하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 물리적 영향(EI_P)과 화학적 영향(EI_C)은 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$EI_P = \frac{EI_{NO_0} - EI_{NO_0}'}{EI_{NO_0}} \quad (5)$$

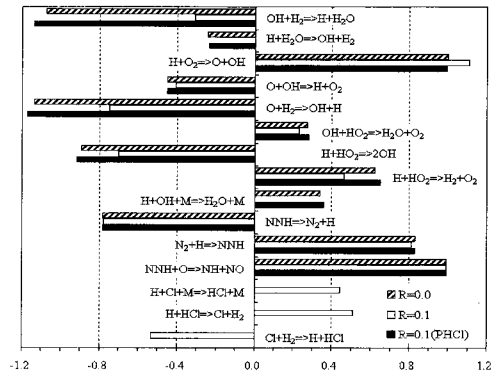


Fig. 7 Sensitivity analysis for NO species in the $\phi=1$ flame

$$EI_C = \frac{EI_{NO_0}' - EI_{NO_0}}{EI_{NO_0}} \quad (6)$$

여기서 첨가제는 화염속도에서 사용한 첨가제와 같은 의미를 갖는다.

염화수소가 H_2 /Air 화염에 첨가된 경우 첨가제가 화염에서 E_{NO} 에 미치는 물리적 및 화학적 영향은 화염속도에 미치는 영향의 경향과 비슷하다. 물리적 역할을 하는 첨가제 PHCl가 첨가됨에 따라 E_{NO} 에서 물리적 영향은 첨가량에 선형적으로 비례하여 감소하는 반면 첨가제의 화학적 영향은 선형적으로 비례하여 감소하지 않는다. 화염속도에서의 경향과 달리 첨가제의 화학적 영향에 따른 E_{NO} 감소는 물리적 영향에 따른 E_{NO} 감소보다 매우 크다. 이것은 첨가제의 물리적 효과가 첨가제의 비열과 회석 효과에 의해 발생하는 반면 첨가제의 화학적 효과는 중요한 활성기 농도의 감소를 통해 발생되기 때문이다. E_{NO} 의 감소에 있어서 $R=0.01$ 인 경우 화학적 영향이 물리적 영향보다 약 19 배 이상, $R=0.1$ 인 경우 약 7배의 영향을 준다.

따라서 소량의 염화수소를 화염에 첨가되는 것이 E_{NO} 감소에 더 큰 영향을 미치고, 이는 소량의 첨가제가 화염 내에서 화학적 효과를 더 크게 작용시키기 때문이다.

3.5 NO 민감도 분석

당량비 1.0인 조건에서 첨가제가 첨가되지 않은 화염($R=0.0$), 첨가제로서 HCl과 PHCl($R=0.1$)가 고려된 화염의 조건에서 화학종 NO에 대한 상대적 민감도 분석(relative sensitivity analysis)을 하였다. 전체 198개의 정반응 기초 반응식 중 120%이상의 민감도 값을 갖는 기초반응식만 Fig. 7에 나타냈다.

반응식 $H+O_2 \rightarrow O+OH$, $N_2+H \rightarrow NNH$, $NNH+O$

→NH+NO는 NO의 생성, 반응식 OH+H₂→H+H₂O, O+H₂→OH+H NNH→N₂+H는 NO의 소비에 있어서 중요한 영향을 미치는 반응식이다. 여기서 N₂+H→NNH와 NNH+O→NH+NO는 NO의 반응경로 중 NNH 메카니즘의 중요한 기초 반응식[3]이다. NNH와 반응하는 산소원자뿐만 아니라 N₂와 반응하여 NNH를 생성하는 수소원자도 NO생성에 크게 관여한다. 염화수소 첨가는 반응식 H+Cl→HCl+M, H+HCl→Cl+H₂, Cl+H₂→H+HCl이 화학종 NO 생성 및 소비에 중요한 영향을 미친다.

4. 결론

자유롭게 전파하는 H₂/Air 예혼합 화염에 첨가제를 첨가한 화염들에 대하여 수치해석을 수행하였다. 첨가제인 염화수소가 H₂/Air 화염 구조 및 질소산화물 생성에 미치는 영향을 조사하였고, 또한 화염 내에서 염화수소의 물리적 및 화학적 효과를 조사하였다.

1. H₂/Air 화염의 화염속도에 염화수소의 화학적 영향이 물리적 영향 보다 매우 크고, 소량이 첨가되었을 때 화염속도 감소에 큰 영향을 미친다.
2. H₂/Air 화염의 결과와 비교하면, 화염 내에서 활성기 농도는 염화수소의 첨가량에 따라 감소하며, 특히 수소원자와 산소원자 농도의 감소율이 크다. 이러한 것은 NO 순생성률의 감소에 기여한다.
3. 염화수소의 첨가는 화염 하류에서 약간의 온도 상승을 가져오지만, 화학 반응에 의한 활성기 농도의 감소로 인해 EI_{NO}는 매우 크게 감소한다. 당량비 1인 화염에서 첨가제의 물리적 효과도 EI_{NO} 감소에 어느 정도 영향을 주지만, R=0.01인 경우 화학적 효과는 물리적 효과 보다 약 19배 이상의 EI_{NO} 감소 효과가 있다.

후 기

본 논문은 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

[1] Turns, S.R., "An Introduction to Combustion," McGraw-Hill, 1996.
 [2] Miller, J.A. and Bowman, C.T., "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 15, 1989, p. 287.

[3] Gardiner, W.C. (Ed.), "Gas-Phase Combustion Chemistry," Springer-Verlag, 2000.
 [4] 주원길, 한건우 및 이용국, "산소부화용 고속 분사식 저NO_x 버너 개발," 제3회 온실가스저감 기술개발 종합심포지움, 2001년5월25일, 한국에너지기술연구원, 온실가스저감기술사업단, 2001.
 [5] 한국화학공학회, "에너지 공학," 교보문고, 1996.
 [6] Sung, C.J. and Law, C.K., "Dominant Chemistry and Physical Factors Affecting NO Formation and Control in Oxy-fuel Burning," 27th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1998, pp.1411.
 [7] Warnatz, J., "Critical Survey of Elementary Reaction Rate Coefficients in the C/H/O System," In *Combustion Chemistry*, Gardiner, W.C. (Ed.), Springer-Verlag, 1984
 [8] Karra, S.B., Gutman, D., and Senkan, S.M., "Chemical Kinetic Modeling of Fuel-rich CH₃Cl/CH₄/O₂/Ar Flames," *Combust. Sci. Tech.*, 60, 1988, pp.45.
 [9] Westbrook C.K., "Inhibition of Hydrocarbon Oxidation in Laminar Flames and Detonation by Halogenated Compounds," 19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1982, pp. 127.
 [10] Rogg, B., "RUN-1DL : The Cambridge Universal Laminar Flamelet Computer Code," In *Reduced Kinetic Mechanism for Applications in Combustion Systems, Appendix C*, Peters, N. and Rogg, B. (Eds.), Springer-Verlag, 1993.
 [11] Rogg, B., "RUN-1DL: The Universal Laminar Flame and Flamelet Computer Code," *User Manual*, 1994.
 [12] Marinov, N, Westbrook, C.K., and Pitz, W.J., "Detailed and Global Chemical Kinetics Model for Hydrogen," In *Transport Phenomena in Combustion, Vol. 1*, Taylor and Francis, 1996.
 [13] GRI-Mech Version 3.0 7/30/99, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
 [14] Miller, G.P., "The Structure of a stoichiometric CCl₄/CH₄/Air Flat Flame," *Combust. Flame*, 101, 1995, pp.101.
 [15] Linstrom, P.J., "CKMech program," *Oso Technologies Inc*.
 [16] 권영석, "산소부화된 H₂/O₂/N₂ 예혼합 화염에서 첨가제가 화염구조에 미치는 영향에 관한 연구", *안동대학교 석사학위 논문*, 2003.

- [17] Valeiras, H., Gupta, A.K., and Senkan, S.M., "Laminar Burning Velocities of Chlorinated Hydrocarbon-Methane-Air Flames," *Combust. Sci. Tech.*, 36, 1987, pp. 123.
- [18] Lewis, B and Elbe, G., "Combustion, Flames and Explosions of Gases," *Academic*, 1987.
- [19] Aung, K.T., Hassan, M.I. and Faeth, G.M., "Flame Stretch Interaction of Laminar Premixed Hydrogen/air Flames at Normal Temperature and Pressure," *Combust. Flame*, 109, 1997, pp.1.
- [20] Taylor, S.C., Ph.D. Thesis, *University of Leeds*, 1991.
- [21] Kuo, K.K., "Principles of Combustion," *John Wiley & Sons*, 1986.