산소부화된 $H_2/O_2/N_2$ 예혼합 화염에서 첨가제가 NO_X 생성에 미치는 영향 연구

이 기 용*† · 권 영 석**

The Study of Effects of Additives on the NO_X Formation in $H_2/O_2/N_2$ Premixed Flames with Oxygen Enrichments

Ki Yong Lee and Young Suk Kwon

ABSTRACT

Numerical simulations are performed at atmospheric pressure in order to understand the effect of additives on flame speed and the NOx formation in freely propagating $H_2/O_2/N_2$ flames with oxygen enrichments. A chemical kinetic mechanism is developed, which involves 26 gas-phase species and 99 reactions. Under several equivalence ratios and oxygen enrichments, flame speeds are calculated and compared with those obtained from the experiments, the results of which is in good agreement. As hydrogen chloride as additive is added into $H_2/O_2/N_2$ flames with low oxygen enrichments, its chemical effect causes the decrease of flame speed, radical concentration, and the NO production rate. It is found that the chemical effect of additive has much more influence on the reduction of EINO than its physical effect. However, in flames with very high flame temperature the physical effect rather than the chemical effect becomes more important on the reduction of EINO.

Key Words : Flame Speed(화염속도), Oxygen Enrichment(산소부화), EINO(NO 배출지수), Chemical Effect(화학적 효과), Physical Effect(물리적 효과)

기 호 설 명

Ω : 산소부화율	W_i : 화학종i의 분자량
S_P, S_C : 화염속도에서 물리적, 화학적 영향	$\dot{\omega}_i$: 화학종i의 생성율
EI_i : 화학종i의 배출지수	EI_P, EI_C : EINO에서 물리적, 화학적 영향

1. 서 론

산업체에서는 산화제로서 주로 공기만을 이용한 연소기술을 통해 화석 연료로부터 열에너지를 생산해 왔지만 현재 공기에 포함된 산소 함량 비율(약 21%)보다도 더 높은 산소 함량 비율(최대 100%)을 갖는 산화제를 통해 화석 연료를 연소시키는 산소부화연소(Oxygen Enhanced Combustion, OEC) 기술이 고효율 연소기술로서 크게 주목을 받고 있다. 이 기술은 기존의 연료/공기 연소 기술보다도 더 높은 화염 온도, 이용할 수 있는 에너지의 증대, 낮은 점화 온도와 에너지 요구, 배출가스 양의 감소, 연소효율의 증대, 화염의 안정성 강화 등의 장점을 갖고 있다[1]. 한 예로 공업용 가열로에 이 기술을 적용할 경우 산소부화율 1%당 연료절감이 1-3% 가능하기 때문에 열효율을 크게 향상시킬 수 있다[2]. 그러나 단점[1]은

* 안동대학교 기계공학부
† 연락저자, kylee@andong.ac.kr
** 안동대학교 대학원 기계공학과

질소산화물(NO_x)의 증가, 배기가스 양의 감소로 인한 대류 열전달의 감소, 연소로 내의 온도 불균일, 산소 사용에 따른 운전비용 상승 등이 있다. 특히 질소산화물의 생성은 화염온도, 산소농도, 사용연료, 당량비 등에 따라 달라지나 일반적으로 연료/공기 연소시 생성되는 양보다 약5배까지 증가한다[3]. 따라서 질소산화물의 과다발생은 이러한 기술을 산업 현장에 적용하는데 제약 중 하나이기 때문에 질소산화물을 저감시킬 수 있는 새로운 방안을 도출할 필요가 있다.

질소산화물을 저감하는 기술체계로서는 화염 내에서 질소산화물을 저감시키려는 전처리 제어 기술과 일단 발생된 질소산화물을 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 등을 통한 방법 등이 있고[2, 4, 5], 이러한 방법들은 주로 물리적 변화(희석제를 사용하여 화염 온도의 저감, 산소 농도의 저하, 혼합가스 농도의 변화, 유동장 변화 등)를 통해 NO_x를 저감시킨다. 그러나 많은 양의 NO_x를 저감시키는데 있어서 어느 정도 한계를 갖고 있다. 후처리 제어 기술로는 SNCR(selective non-catalytic reduction), SCR (selective catalytic reduction) 등이 실용화되어 NOx 저감에 기여하고 있다 [4, 5].

질소산화물 중 일산화질소(NO)는 화염 내에서 질소산화물의 대부분을 차지하고 있고, 이것의 생성률은 활성기(radical) 농도에 굉장히 민감하다. 따라서 화염 내에서 활성기의 생성을 억제하고 그들의 농도를 저감시킬 수 있다면 일산화질소 생성을 억제시킬 수 있다. 이와 같은 과정은 화염에서 화학적 변화를 가져올 수 있는 첨가제를 첨가함으로서 가능하다. 즉 첨가제는 화염 내에서 물리적 및 화학적 역할을 통해 일산화질소 생성을 저감시킬 수 있다. 물리적 역할은 첨가제가 희석제와 같은 역할을 함으로서 화염온도를 감소시키고, 화학적 역할은 질소산화물 생성에 기여하는 활성기 농도를 저감시킬 수 있다. 위와 같은 역할을 할 수 있는 첨가제로는 화염에서 억제제(inhibitor) 역할을 하는 것으로 알려진 할로겐족 화합물 또는 금속을 포함한 화합물이 적합하다.

본 연구에서는 산소부화된 자유롭게 전파하는 $H_2/O_2/N_2$ 예혼합 화염에 첨가제를 첨가한 화염들에 대하여 수치해석을 수행하였다. 첨가제로서는 화염 내에서 물리적 및 화학적 역할을 할 수 있는 염화수소(HCl)과 물리적 역할만을 할 수 있는 이산화탄소(CO_2)를 선택하였다. 이러한 첨가제가 첨가된 화염과 순수 $H_2/O_2/N_2$ 화염에 대하여 화염 특징 및 질소산화물 생성 결과를 서로 비교함으로서 첨가제가 산소부화된 화염에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 수치해법

앞서 개발된 수치해석 코드인 RUN-1DL[6, 7]을 사용하여 산소부화된 자유롭게 전파하는 $H_2/O_2/N_2$/첨가제(염화수소 또는 이산화탄소) 예혼합 화염에 대한 수치해석을 수행하였다. 사용한 상세한 화학반응 메카니즘은 Marinov 등[8]이 H_2/Air 화염에 대하여 개발한 메카니즘과 NOx/HCl 반응식[9-11]으로 구성되어 있다. 이 메카니즘은 불활성 기체로서 Ar을 포함한 26개의 화학종과 99개의 기초반응식(정방향과 역방향 반응식 포함)을 포함하고 있다. 수치해석 코드에서 입력 데이터인 열역학적 및 전달 물성치는 Ref. 9과 Ref. 11에 있는 자료를 이용하였다.
본 연구에서는 주어진 계산 구간 안에서 온도 및 화학종 농도 분포가 급격히 변하므로 이들의 정확한 분포를 얻기 위해 격자 수를 약 100 - 150 정도 사용하여 결과를 얻었다. 초기조건으로 Ar 농도를 0으로 하고, 혼합기 온도는 300K, 압력은 1기압 조건을 갖는 화염에 대하여 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 논의

당량비 1인 $H_2/O_2/N_2$/HCl(or CO_2) 예혼합 화염에서 Cl/H비가 1보다 작은 경우에는 생성물로서 Cl_2를 고려하지 않아도 되기 때문[12]에 $H_2/O_2/N_2$/HCl(or CO_2)의 총괄 반응식(global reaction)은 다음과 같다.

$$HCl(or\,CO_2)+\frac{1}{R}\,H_2+\frac{1}{2R}\,[O_2+\frac{1-\Omega}{\Omega}\,N_2]$$
$$\rightarrow[H_2O, HCl(or\,CO_2), N_2, etc.]$$

여기서 R은 HCl/H_2의 몰 비이다. R값이 0인 경우는 H_2 화염이고, R값이 무한대인 경우는 연료로서 첨가제인 HCl만 존재하고, R값이 0과 무한대 사이에 있는 경우는 연료로서 수소와 첨가제로서 HCl을 혼합한 화염이다. 산소부화율은 $\Omega=\frac{X_{O_2}}{X_{N_2}+X_{O_2}}$로 정의하였고, X_{O_2}와 X_{N_2}는 각각 산소와 질소의 몰분률이다. 산소부화율이 0.21과 1은 산화제로서 각각 공기와 순수 산소를 사용한 화염의 경우를 나타낸다.

소량의 첨가제를 사용하여도 첨가제는 화염 내에서 화학적 역할을 잘 수행할 수 있기에 초기에 첨가제와 연료인 수소의 농도비가 10% (R = 0.1) 이내의 조건을 갖는 3가지 화염(R = 0.01, 0.05,

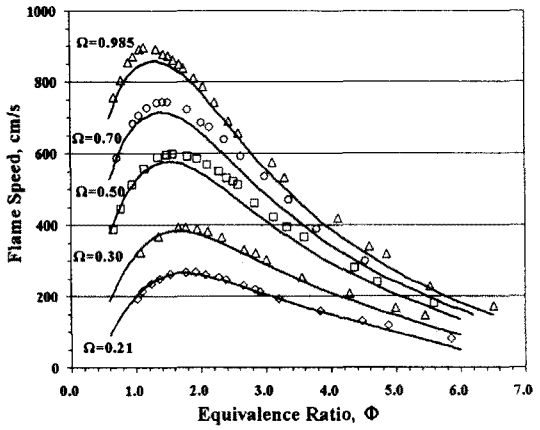

Fig. 1 The comparison of flame speeds with several O_2 enrichment levels, present with respect to equivalence ratio. Line: our calculation ; Symbol: Ref. 13

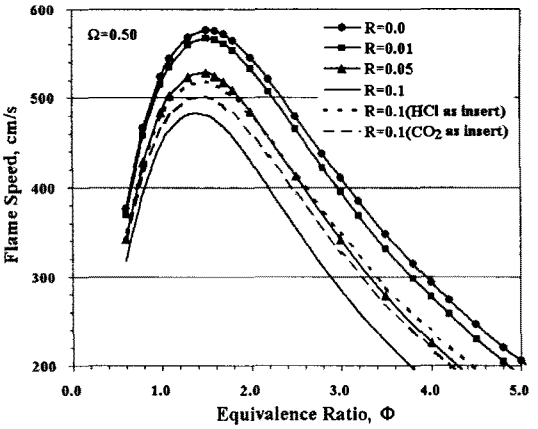

Fig. 2 Fame speeds for several flames with 50% O_2 enrichment level.

및 0.1)에 대하여 수치해석을 수행하였다. 또한 물리적 역할만을 고려한 첨가제로서 HCl(반응 메카니즘에서 HCl 반응을 제외시킴)과 CO_2를 $H_2/O_2/N_2$ 화염에 첨가한 화염에 대하여 수치해석을 수행하였고, 그 결과들을 첨가제가 없는 $H_2/O_2/N_2$ 화염의 결과와 비교하였다.

3.1 화염속도의 결과 비교

다른 당량비를 갖는 자유롭게 전파하는 $H_2/O_2/N_2$/HCl(or CO_2) 예혼합 화염에 대하여 언급한 화학반응 메카니즘을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 당량비를 0.6부터 6.5까지, 산소부화율을 0.21부터 0.985까지 변화시키면서 화염속도를 계산하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타냈다. Ref. 13으로부터 1기압, 상온 조건에서 $H_2/O_2/N_2$ 분젠(Bunsen) 버너 화염으로부터 측정한 화염속도를 또한 Fig. 1에 기호로 표시했다. 예상한 것처럼 계산한 당량비 범위 내에서 산소부화율의 증가는 화염속도를 증가시킨다. 산소부화율 증가는 최대 화염속도가 발생하는 당량비 근처에서 화염속도에 크게 영향을 미치지만, 이 당량비 보다 큰 당량비를 갖는 화염일수록 화염속도에는 그 영향이 점점 작아진다. 산소부화율 0.21인 화염에서 최대 화염속도는 당량비 1.7 근처에서 발생하지만 산소부화율 0.985인 화염에서 이 값은 좀 더 낮은 당량비인 1.3로 이동한다.

계산한 당량비 범위 내에서 산소부화율이 낮은 화염에 대하여 계산한 화염속도는 Ref. 13에 있는 실험결과와 매우 잘 일치한다. 산소부화율이 증가하여도 최대 화염속도를 갖는 당량비를 정점으로 전 또는 후로 벗어난 당량비를 갖는 화염에 대하여 계산한 화염속도도 실험 결과와 비교적 잘 일치한다. 그러나 최대 화염속도 부근에서 계산한 화염속도는 실험 결과보다 낮게 예상하고 있고, 높은 산소부화율을 갖는 화염에서 그 차이는 크게 나타난다. 이러한 차이의 가능성으로 실험에서는 Bunsen 버너 화염 기술로 화염속도를 측정할 경우 화염의 스트레치 효과[14], 화염의 표면적 계산[13] 등에 따른 오차가 발생할 수 있고, 수치해석에서는 높은 온도 조건 따른 사용한 기초 반응식에 존재하는 계수들의 부정확성 등이 있을 수 있다. 그러나 이러한 차이는 최대 6% 내에서 존재하므로 언급한 산소부화율과 당량비 범위 내에서 계산한 화염속도는 실험 결과와 비교적 잘 일치한다.

산소부화율 0.5로 고정하고 당량비 변화에 따른 6가지 종류의 화염들에 대한 화염속도를 계산하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 예상한 것처럼 첨가제의 첨가는 희박 및 과농 영역에서 화염속도의 감소를 가져오고, 특히 과농 영역에서 그 영향은 증대한다. 염화수소(HCl)을 첨가한 경우 당량비 1.5 근처에서 최대 화염속도를 갖고, R값이 0.01, 0.05, 및 0.1로 증가함에 따라 화염속도는 각각 566 cm/s, 528 cm/s, 및 481 cm/s로 감소한다.

화염 내에서 첨가제의 물리적 역할을 조사하기 위해 첨가제로 HCl(화염에서 화학반응 제외)과 CO_2를 고려했고, 이 화학종들을 화학 반응 메카니즘에서 불활성(inert) 화학종으로 간주하여 수치해석을 수행하였다. 불활성 첨가제인 HCl과 CO_2를 같은 양 첨가한 화염의 화염속도를 비교하면, 계산한 당량비 범위 내에서 CO_2 첨가가 HCl 첨가보다 화염속도의 더 큰 감소를 가져온다. 이것은 두 첨가제의 비열 차에 기인한다. 산소부화율 50% 화염에 첨가한 첨가제 HCl인 경우 첨가제의 화학적 영향이 물리적 영향보다 화

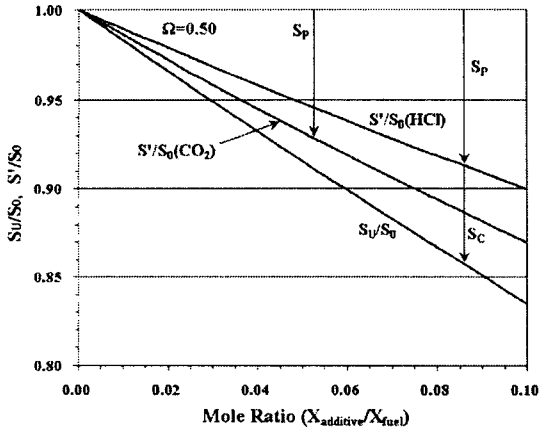

Fig. 3 The physical and chemical components of additive influence on flame speeds for flames with 50% O_2 enrichment level at Φ=1.5.

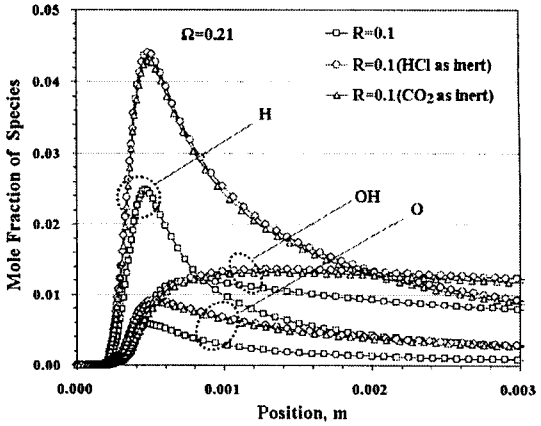

Fig. 4 The concentration profile of radicals for the Φ=1.0 flame with 21% O_2 enrichment level adding HCl or CO_2 as additive.

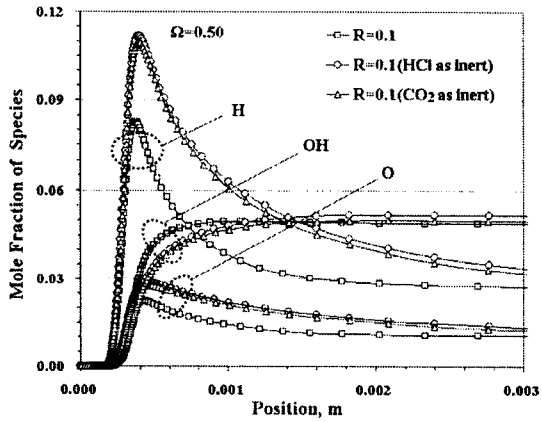

Fig. 5 The concentration profile of radicals for the Φ=1.0 flame with 50% O_2 enrichment level adding HCl or CO_2 as additive.

염속도 감소에 더 큰 영향을 미친다.

당량비 1.5, 산소부화율 0.5인 $H_2/O_2/N_2$ 화염의 화염속도에서 첨가제의 물리적 및 화학적 영향을 조사하여 Fig. 3에 나타냈다. 화염속도에 있어서 물리적 영향(Sp)과 화학적 영향(Sc)을 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$S_p = \frac{S_0 - S'}{S_0} \ , \ S_c = \frac{S_0 - (S' - S_u)}{S_0}$$

여기서 S에 아래첨자 0는 첨가제가 없는 $H_2/O_2/N_2$ 화염의 경우, 위 첨자 '은 첨가제가 화염에서 불활성 화학종(물리적 역할)로 간주된 경우, 아래첨자 u는 첨가제가 화염에서 물리적 및 화학적 역할을 한 경우를 나타낸다. 불활성 화학종 첨가인 경우 화염속도에 미치는 물리적 영향은 첨가량에 따라 선형적으로 증가하고, CO_2 첨가가 HCl 첨가보다 화염속도에 물리적 영향이 더 크다. 산소부화율 0.21인 화염에서 HCl 첨가량에 따라 화염속도에 대한 화학적 영향은 선형적으로 비례하여 증가하지 않지만[15], Fig. 3에서 보는 것처럼 산소부화율 0.5인 화염에서 HCl 첨가량에 따라 화학적 영향은 거의 선형적으로 비례한다. 첨가제 HCl인 경우 산소부화율이 증가할수록 화염속도에 미치는 전체 영향(물리적 및 화학적 영향) 중에서 화학적 영향은 점점 감소하는 반면 물리적 영향은 점점 증대한다.

3.2 활성기의 농도 분포

화염 내에서 활성기 농도는 화염속도, NOx 생성 등에 영향을 미치므로 중요한 인자 중 하나이다. 첨가제가 활성기 농도에 미치는 영향을 조사하기 위해 당량비 1, 산소부화율이 0.21과 0.5이고, R=0.1인 3가지 종류의 화염에서 중요한 활성기(radical, OH, O, 및 H)의 농도분포를 Figs. 4와 5에 나타냈다. 산소부화율 0.21인 화염에 첨가된 경우 불활성 화학종으로 고려한 HCl과 CO_2가 활성기(H, OH, 및 O) 농도 분포는 첨가제가 첨가되지 않은 화염의 결과와 같은 경향을 보여주며, 단지 약간의 활성기 농도 감소를 가져온다. 그러나 첨가제로 화학반응을 고려한 HCl이 사용된 경우 화염 내에서 화학 반응으로 인하여 활성기 H와 O의 농도는 매우 크게 감소한다. 특히 수소원자와 산소원자 최대 농도는 각각 약 1.9배와 약 1.7배까지 감소한다. 할로겐 원소인 염소원자는 수소원자를 제거하고, 이것은 $H_2/O_2/N_2$ 화염에서 활성기 생성에 중요한 연쇄분기반응(chain

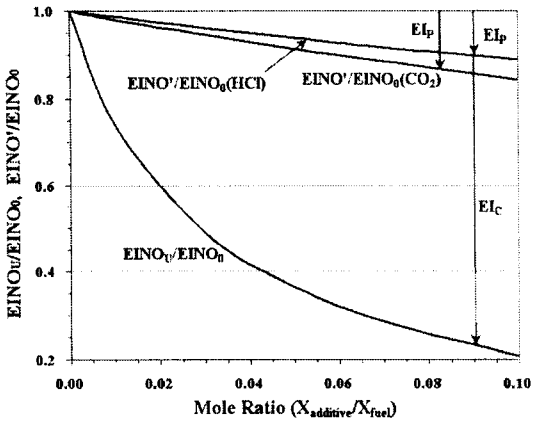

Fig. 6 The physical and chemical components of additive influence on EINO for flames with 21% O_2 enrichment level at Φ=2.5.

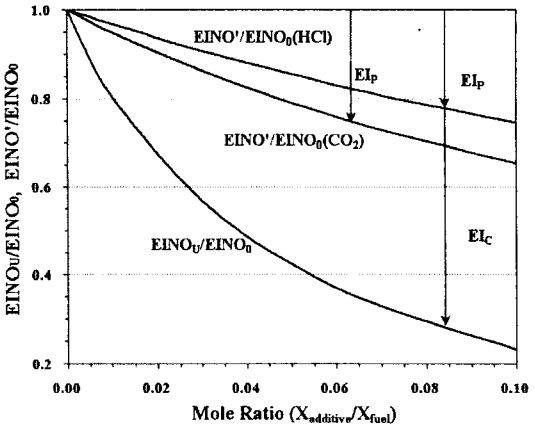

Fig. 7 The physical and chemical components of additive influence on EINO for flames with 50% O_2 enrichment level at Φ=2.5.

branching reaction)인 H + O_2 = OH + O의 반응률을 감소시키기 때문이다[16,17]. 수소와 첨가제 HCl의 결합 에너지(각각 104.18과 103.1 kcal/mole [18])는 매우 작은 차이를 갖고 있어 활성기의 최대 농도 위치를 약간 화염 상류로 이동시킨다.

산소부화율 0.5인 화염에서 불활성 화학종이 첨가된 경우 활성기 농도 분포는 산소부화율 0.21인 화염과 비슷한 경향을 보여준다. 첨가제 HCl의 첨가는 화학반응에 의해 수소원자와 산소원자 최대 농도를 모두 약 1.4배까지 감소시키지만 산소부화율 증가는 이러한 값의 감소율을 저감시킨다. 화염온도가 높아질수록 염소원자의 화염 억제력은 감소하고, 언급한 연쇄분기반응이 활성화되면서 화학종 OH 농도는 증가한다(Fig. 5 참조). 이것은 높은 산소부화율을 갖는 화염에서 화염속도 또는 NOx 생성에 화학적 영향의 감소를 가져올 것으로 사료된다.

3.3 NO의 생성률 및 NO 배출지수

화학종 i의 배출지수(Emission Index, EI_i)는 연소과정에 의해 소비된 연료 질량에 대한 화학종 i의 질량의 비로 정의하였고, 다음과 같은 식으로 나타냈다.

$$EI_i = \frac{m_i}{m_F} = \frac{W_i \int_0^L \dot{\omega}_i \, dx}{-W_F \int_0^L \dot{\omega}_F \, dx}$$

여기서 m은 질량, Wi는 화학종 i의 분자량, $\dot{\omega}_i$는 화학종 i의 순생성률, L은 계산 구간이다. 분모에 (-)가 있는 것은 연료의 순생성률을 적분하면 음의 값을 갖기 때문이다.

당량비 2.5, 산소부화율 0.21과 0.5인 $H_2/O_2/N_2$ 화염의 EINO에서 첨가제의 물리적 및 화학적 영향을 조사하였고, 그 결과를 Figs. 6과 7에 나타냈다. 물리적 영향(EIp)과 화학적 영향(EIc)은 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$EI_p = \frac{EINO_0 - EINO}{EINO_0}$$

$$EI_c = \frac{EINO_0 - (EINO - EINO_u)}{EINO_0}$$

여기서 첨자들은 화염속도에서 사용한 첨자와 같은 의미를 갖는다. 물리적 역할만을 갖는 첨가제 HCl과 CO_2의 첨가는 첨가량 증가에 따라 EINO에서 물리적 영향에 선형적으로 비례하여 증가하고, CO_2 첨가가 HCl 첨가보다 EINO에서 더 큰 영향을 갖는다. 산소부화율이 증가할수록 EINO 감소에 있어서 첨가제의 물리적 역할은 증대한다. HCl의 화학반응을 고려한 경우 HCl 첨가량 증가는 EINO 감소에 선형적으로 비례하지는 않는다. 화염속도에서의 경향과 달리 첨가제의 화학적 영향에 따른 EINO 감소는 물리적 영향에 따른 EINO 감소보다 매우 크다. 이것은 첨가제의 물리적 효과가 첨가제의 비열과 희석 효과에 의해 발생하는 반면 첨가제의 화학적 효과는 중요한 활성기 농도의 감소를 통해 발생하기 때문이다.

산소부화율이 증가할수록 EINO 감소에 있어서 화학적 첨가제의 화학적 효과는 감소하게 되고 물리적 효과가 증대하게 된다. 앞에서 언급한 것처럼 매우 높은 화염온도를 갖는 화염에서는 화학 반응에 의한 염소원자의 활성기 생성 억제

력은 감소하기 때문이고, 조건에 따라 EINO 감소에 첨가제의 물리적 효과가 크게 증대될 것으로 사료된다.

4. 결 론

산소부화된 자유롭게 전파하는 $H_2/O_2/N_2$ 예혼합 화염에 첨가제를 첨가한 화염들에 대하여 수치해석을 수행하였다. 화염 내에서 물리적 및 화학적 역할을 할 수 있는 염화수소(HCl)과 물리적 역할만을 할 수 있는 CO_2를 첨가제로 선택하였고, 이러한 첨가제가 산소부화된 $H_2/O_2/N_2$ 예혼합 화염의 화염속도, 활성기 농도 및 NO 배출지수에 미치는 물리적 및 화학적 영향을 조사하였다.

1. $H_2/O_2/N_2$ 화염에 첨가제 첨가는 화염속도를 감소시키고, 첨가제 염화수소의 화학적 영향이 화염속도 감소에 있어서 물리적 영향보다 매우 크다. 그러나 높은 산소부화율을 갖는 화염일수록 화염속도 감소에서 화학적 영향은 줄어들고 물리적 영향이 증가한다.

2. 화염 내에서 활성기 농도는 첨가제 첨가량에 따라 감소하고, 특히 화학반응을 동반한 첨가제 염화수소의 첨가는 수소원자와 산소원자의 최대 농도를 매우 크게 저감시킨다. 산소부화율이 증가할수록 중요한 연쇄분기반응 H + O_2 = OH + O 이 활성화되면서 염소원자의 활성기 생성 억제력은 감소하며 화학종 OH 농도는 증가한다.

3. EINO 감소에 있어서 첨가제의 물리적 효과는 첨가량에 선형적으로 비례하지만 화학적 효과는 첨가량에 선형적으로 비례하지 않으며, 화학적 효과는 물리적 효과보다 매우 크다. 산소부화율의 증가는 EINO 감소에 있어서 화학적 첨가제의 화학적 효과는 감소하게 되고 물리적 효과가 증대하게 된다.

후 기

본 논문은 2003년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

[1] Baukal, C.E.(Ed.), *Oxygen-enhanced Combustion*, CRC Press, 1998.

[2] 주원길, 한건우, 및 이용국, "*산소부화용 고속분사식 저NO_x 버너 개발*," 제3회 온실가스저감기술개발 종합심포지움, 2001년5월25일, 한국에너지기술연구원,온실가스저감기술사업단, 2001.

[3] 한국동력자원연구소, *고온로의 산소부화 연소기술 개발(II)*, 과학기술처, 1986.

[4] Turns, S.R., 1996, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill.

[5] 한국화학공학회, 1996, *에너지 공학*, 교보문고.

[6] Rogg, B., 1993, "RUN-1DL : The Cambridge Universal Laminar Flamelet Cpmputer Code," in: Reduced Kinetic Mechanism for Applications in Combustion Systems, Appendix C, N. Peters and B. Rogg (Eds.), Springer-Verlag.

[7] Rogg, B., 1994, "RUN-1DL: The Universal Laminar Flame and Flamelet Cpmputer Code," User Manual.

[8] Marinov, N, Westbrook, C.K., and Pitz, W.J., 1996, *"Detailed and global chemical kinetics model for hydrogen,"* In Transport Phernomena in Combustion, Vol. 1, Taylor and Francis.

[9] GRI-Mech Version 3.0 7/30/99, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.

[10]Miller, G.P., 1995, *Combust. Flame*, **101**, p. 101.

[11]Linstrom, P.J., CKMech program, Oso Technologies Inc.

[12]Valeiras, H., Gupta, A.K., and Senkan, S.M., 1987, *Combust. Sci. technol.*, **36**, p. 123.

[13]Lewis, B and Elbe, G., 1987, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic.

[14]Leylegian, J.C., Zhu, D.L., Law, C.K., and Wang, H., 1998, "Experiments and numerical simulation on the laminar flame speeds of dichloromethane and trichloromethane," *Combust. Flame*, Vol. 114, p. 285.

[15]이기용, 권영석, 및 신성수, 2003, "H2/HCl/Air 예혼합 화염에서 NOx 저감을 위한 HCl의 효과," 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, p. 2180.

[16]Karra, S.B., Gutman, D., and Senkan, S.M., 1998, *Combustion Sci. Technol.*, **60**, p.45.

[17]Westbrook C.K., 1983, *Combust. Sci. Technol.*, **34**, p. 201.

[18]Kuo, K.K., 1986, Principles of Combustion, John Wiley & Sons.