

제트 유동장에서의 마일드 연소 및 오염물질 배출특성에 관한 전산해석 연구

김유정* · 송금미* · 오창보**

Computational Study of the MILD Combustion and Pollutant Emission Characteristics in Jet Flow Field

Yu Jeong Kim, Keum Mi Song and Chang Bo Oh

ABSTRACT

The MILD combustion and pollutant emission characteristics were investigated computationally. The temperature of supplying air-stream and mixing rate (Ω) of exhaust gas in the air-stream were adjusted to investigate the effects of those parameters on the MILD combustion in jet flow field. The emission indices for NO (EINO) and CO (EICO) were introduced to quantify the amount of those species emitted from the combustion. The high-temperature region disappeared gradually as the mixing rate increased for fixed air-stream temperature. The EINO increased as the air-stream temperature became higher for fixed mixing rate, and the EINO decreased dramatically with increasing the mixing rate for each air-stream temperature condition. The EICO also decreased with increasing the mixing rate and it was nearly independent of air-stream temperature except for near $\Omega = 0.7$. It was found that the CO supplied in the air-stream can be destroyed in the MILD combustion over the certain mixing rate.

Key Words : Mild combustion, Jet, Computational study, Emission Index, NOx, CO

1. 서론

마일드(MILD; Moderate or Intense Low oxygen Dilution) 연소는 공기류에 연소생성물을 재순환시켜 산소농도를 낮추면서 배기가스와의 열교환을 통해 공기류의 온도를 높임으로써 열효율이 높고, 안정적인 연소를 유지시키는 연소방식이다[1]. 이 연소방식은 연소효율이 높기 때문에 연료 사용량을 줄일 수 있게 되어 온실가스(CO₂)를 적게 배출하며 비교적 높지 않으면서도 균일화 온도장을 형성하기 때문에 NOx 배출량도 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

이러한 장점들로 인해 근래에 들어오면서 마일드 연소에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 최근까지도 마일드 연소특성을 파악하기 위하여 다양한 실험 및 전산해석 연구가 많이 진행되고 있는데, 이러한 연구들 중에는 실용적 측면에서 이미 마일드 연소기를 산업현장에 적용한 연구의 예도 있으며, 이 연소방식에 대해 좀 더 현상적인 접근을 수행한 연구들도

다수 있다.

최적화된 마일드 연소기를 개발하기 위해서는 실험과 다양한 전산해석을 병행한 기초연구도 필수적이다. 이러한 기초연구에서는 마일드 연소에 미치는 다양한 인자들의 영향을 검토한 연구가 많다[2,3]. 마일드 연소에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나가 공기류의 온도와 공기류 중의 배기가스 혼합비율이다. 연소기 형태가 복잡해지게 되면 이러한 인자들을 독립적으로 변화시켜 그에 따른 영향을 검토하기가 매우 어렵게 된다. 제트는 기존에 기초적인 연소특성 검토를 위해 매우 다양하게 많이 사용되어 온 유동장이며, 실용 연소기의 연소특성을 들여다보기 좋은 특징을 가지고 있어 실용 연소기를 개발하기에 앞서 마일드 기초 연소특성을 검토하기에 적합한 유동장으로 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 비교적 간단한 제트 유동장에서의 마일드 연소특성을 전산해석을 통해 검토하고자 한다. 우선 마일드 연소에 미치는 중요한 인자 중 하나인 공기류 온도와 공기류 중의 배기가스 혼합비를 변화시키면서 마일드 연소특성과 CO, NOx와 같은 오염물질 배출특성을 검토하고자 한다.

* 부경대학교 안전공학과

† 연락저자, cboh@pknu.ac.kr

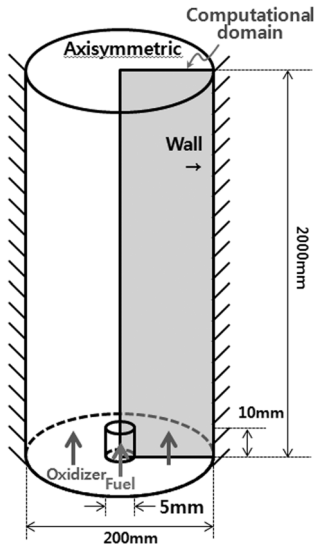


Fig. 1. Axisymmetric confined coflow jet geometry for MILD combustion.

2. 수치 해석

2.1. 연소장 모델링

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 비교적 단순한 제트 마일드 연소장을 대상으로 전산해석을 수행하였다. 전산해석에는 ANSYS사에서 개발한 Fluent 13.0[5]을 이용하였다. 연소가 이루어지는 제트 연소장은 원통형 벽면으로 한정된 공간으로서, 전산해석을 위해서는 축대칭 좌표계를 이용하여 전체적으로 20만개 정도의 2차원 격자계를 구성하였다.

전산해석 영역 선정을 위해 연소장의 원통형 벽면 내경은 200 mm로 하였으며, 화염형상을 충분히 관찰하기 위하여 높이는 2.0 m로 하여 충분히 하류까지 해석하였다. 연료노즐은 내경이 5 mm이며, 10 mm가 해석영역 내부로 돌출되도록 하였다. 연료노즐 주위의 동축류 영역에서는 배기가스가 혼합된 고온의 공기가 공급되도록 하였다.

2.2. 경계조건

본 연구에서는 공기류의 온도 및 배기가스 혼합비에 따른 마일드 연소특성 및 오염물질 배출특성을 검토하기 위하여 연료와 공기류의 산소를 이용하여 정의된 총괄 당량비는 0.7로 고정하였다. 연료로는 도시가스의 주성분인 CH₄를 사용하였다. 연소생성물은 완전혼합 반응기(Perfectly-Stirred Reactor; PSR)에서 CH₄이 당량비 1.0조건으로 정상상태로 연소될 때의 연소생성물 조성 중 주요 성분인 CO₂, CO, H₂O 및 N₂인 것으로 가정하여 공기류에 혼합하였다. 연소생성물 농도의 계산에는 PSR에 대한 계산이 가능한

Table 1. Composition of the main species in air-stream with the variation of dilution rate and air-stream temperature

Species	Mixing rate (Ω)			
	0.0	0.3	0.5	0.7
O ₂	0.21	0.147	0.105	0.063
N ₂	0.79	0.766	0.750	0.734
CO	0.00	0.003	0.005	0.007
CO ₂	0.00	0.027	0.045	0.063
H ₂ O	0.00	0.057	0.095	0.133

Table 2. Velocity (m/s) of air stream with the variation of dilution rate and air-stream temperature

T _{air}	Mixing rate (Ω)			
	0.0	0.3	0.5	0.7
900 K	0.305	0.435	-	-
1,100 K	0.375	0.530	0.740	1.220
1,300 K	0.445	0.630	0.870	1.450

UPSR 코드[6]를 이용하였다. Table 1은 UPSR에서 얻어진 4개의 화학종이 공기에 혼합되는 비율(혼합비; Ω)을 변화시킬 경우 얻어진 각 화학종의 몰분율을 나타내고 있다. 여기서 혼합비 Ω 는 아래의 식과 같이 정의된다.

$$\Omega = \frac{\text{혼합된 배기가스 성분 체적}}{\text{전체 혼합가스(공기류+배기가스) 체적}} \quad (1)$$

연료의 유속은 12 m/s으로 고정하였으며 이는 Re 수 3,400에 해당된다. 연료의 온도는 300 K로 일정하게 하였으며, 공기류의 온도는 Table 2와 같이 900 K에서 1,300 K까지 변화시켰다. 배기가스 혼합비는 0.0부터 0.7까지 변화시키면서 그 영향을 고찰하였으며 각 공기의 온도와 혼합비 조건에 대한 공기류의 유속은 Table 2에서 보는 바와 같다. 참고로 공기류의 온도가 900 K인 경우 Ω 가 0.5와 0.7 조건에서는 안정된 화염이 형성되지 않았다.

본 연구에서는 제트 연소기 벽면 온도에 따른 영향을 고찰하는 것이 목적이 아니기 때문에 온도는 기존의 마일드 연소기 실험결과들을 참조하여 그 결과들과 유사한 범위에 있도록 900 K로 고정하였다. 벽면에서 유속에 대해서는 점착(No-slip)조건을 부여하였다. 제트 연소장의 하류 출구는 출구 경계조건으로 처리하였다.

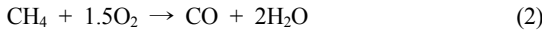
2.3. 연소모델

마일드 연소장에 대한 전산해석을 위해 유동모델

로는 Dally 등[7]이 제트 마일드 연소장 해석에 적합하다고 제안한 수정된 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 이 모델에서는 모델상수 $C_{1\epsilon}$ 의 값이 1.6이 되도록 수정되어 있다. 연소모델로는 EDC(Eddy Dissipation Concept) 모델을 사용하였는데 이는 Arrhenius 형태의 화학반응률을 고려할 수 있다. 최근에는 EDC 모델을 마일드 연소기의 전산해석에 적용하여 합리적인 결과를 얻은 예들이 다수 있다. 따라서 동일한 연소모델을 제트 마일드 연소장에 적용한다면 충분히 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다[8-9].

복사모델로는 DO(Discrete Ordinates)모델을 이용하였으며 반응혼합기의 복사특성을 고려하기 위하여 WSGGM(Weighted Sum of Gray Gases Model)을 사용하였다.

화학반응기구로는 다음과 같은 3단계의 총괄 화학반응식[10]을 고려하였다.



각 반응식에 대한 반응률은 아래 식 (5)~(7)과 같이 고려하였다.

$$k_1 = 5.01 \times 10^{11} e^{-2E+8/RT} [\text{CH}_4]^{0.7} [\text{O}_2]^{0.8} \quad (5)$$

$$k_2 = 2.24 \times 10^{12} e^{-1.7E+8/RT} [\text{CO}] [\text{H}_2\text{O}]^{0.5} [\text{O}_2]^{0.25} \quad (6)$$

$$k_3 = 5.00 \times 10^8 e^{-1.7E+8/RT} [\text{CO}_2] \quad (7)$$

마일드 연소장에서 발생하는 NOx를 고려하기 위하여 Thermal NO와 Prompt NO 그리고 저온에서 중요하다 알려진 N_2O 경우 NO를 고려하였다.

2.4. 오염물질 배출지수

일반적으로 다양한 조건의 화염에서 생성되는 화학종의 양은 농도분포만으로는 정확하게 그 양이 많고 적음을 판단하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 화염에서 배출되는 화학종들의 생성량을 정량적으로 비교하기 위하여 화학종 배출지수(Emission Index; EI)를 도입하였다. 여기서는 기존 문헌에서 제시한 배출지수[11]를 본 연구에 맞게 변형하여 아래 식 (8)와 같이 정의하였다. 본 연구에서 배출량에 관심을 가지고 EI 계산에 사용한 화학종은 CO, NO 등 2개이다.

$$EI_i = \frac{\text{생성된 화학종 } i \text{의 질량}}{\text{소모된 연료의 질량}} \\ = \frac{(\dot{m}_{tot} \times Y_i)_{outlet} - (\dot{m}_{air} \times Y_i)_{inlet}}{(\dot{m}_{CH_4})_{inlet} - (\dot{m}_{tot} \times Y_{CH_4})_{outlet}} \quad (8)$$

여기서 \dot{m}_{CH_4} 는 연료의 질량유량, \dot{m}_{air} 는 공기류(연소생성물 포함)의 질량유량을 의미한다. 또한 \dot{m}_{tot} 은 원형관에서 배출되는 총 질량유량으로서 입구에서 공급되는 $\dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{air}$ 로부터 계산된다. Y_i 는 고려되는 화학종의 질량분율이다. 하첨자 inlet과 outlet은 입구와 출구위치를 의미한다.

출구위치에서의 구하고자 하는 화학종의 질량유량은 간 격자점에서의 밀도와 속도 그리고 각 격자의 출구면적을 이용하여 계산하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도 및 화학종 농도분포

Fig. 2는 공기류의 온도를 900 K부터 1,300 K으로 각각 공급했을 때 혼합비에 따른 온도의 공간분포와 고온의 공기류의 확산화염과 비교를 위하여 통상 CH_4 화염과 같이 공기류 온도를 300 K으로 공급했을 때 $\Omega=0.0$ 에서 온도의 공간분포를 보여주고 있다. 공기류의 온도를 900 K으로 공급했을 때 $\Omega=0.5$ 부터는 화염이 소멸되었기 때문에 도시하지 않았다. 공기류의 공급 온도와는 상관없이 $\Omega=0.0$ 에서는 연소생성물이 전혀 포함되지 않으면서 공기류의 온도가 높게 공급이 되기 때문에 통상의 CH_4 확산화염보다 화염 최고온도는 높게 나타나고 있다. 낮은 혼합비에서는 연소장 하류측에서는 온도가 균일하게 나타나지만 상류영역에서는 고온의 연소영역이 존재하고 있으며, Ω 가 증가함에 따라 화염 최고온도는 점차 낮아지게 되고 온도는 연소장 전체에 걸쳐 균일하게 나타나게 되는 것을 알 수 있다. 또한, $\Omega=0.7$ 에서는 공기류의 공급온도가 고온임에도 불구하고 고온 화염대 영역이 거의 보이지 않으며 공기류 온도를 1,100 K로 공급했을 경우에는 화염이 부상되었지만 더 높은 온도로 공급했을 때는 화염이 부상하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3은 각 공기류 온도조건에 대해서 혼합비를 변화시킬 경우의 최고 화염온도를 보여주고 있다. 공기류 온도가 900 K일 경우에는 혼합비를 충분히 높일 수 없기 때문에 화염 최고온도를 기준으로 했을 때는 Cavaliere와 Joannon 등의 정의한 마일드 연소기준[1]을 만족시킬 수 없는 것을 알 수 있다. 공기류 온도가 1,100 K과 1,300 K의 경우에는 각각 $\Omega=0.4$ 와 $\Omega=0.33$ 이상에서는 전체 연소장에서 마일드 연

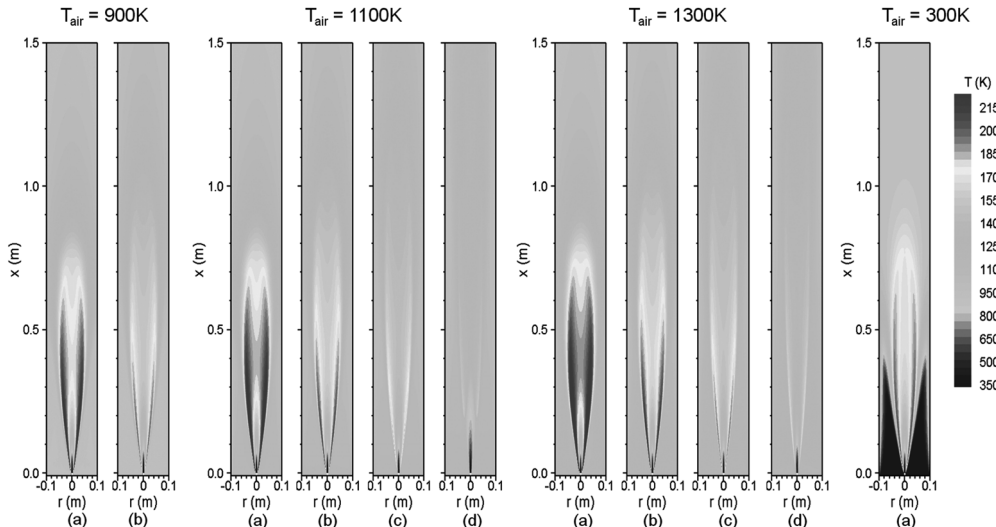


Fig. 2. Temperature distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for air-stream temperature. (a) $\Omega = 0.0$; (b) $\Omega = 0.3$; (c) $\Omega = 0.5$; (d) $\Omega = 0.7$.

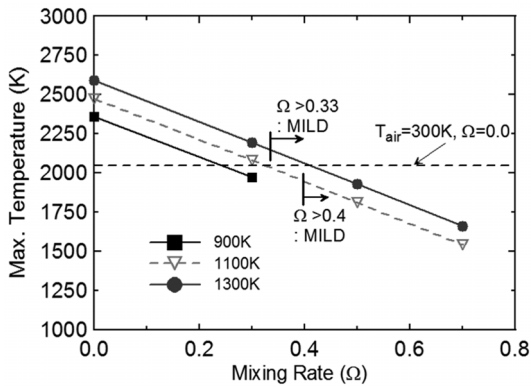


Fig. 3. Variation of maximum temperature with inlet air-stream temperature and dilution rate.

소가 진행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 다른 조건들에서도 연소장 전체는 아니지만 부분적으로는 화염온도가 마일드 연소의 정의에 부합하는 영역은 존재하는 것을 확인하였다.

Fig. 4~5는 각각 공기류의 온도를 1,100 K으로 공급했을 때 혼합비에 따른 CO와 NO의 몰분율분포를 나타내고 있다. 그림은 혼합비에 따라 최고 농도값의 스케일을 수정하여 도시화 하였다. 두 화학종 모두 혼합비가 증가함에 따라 각 화학종의 농도(몰분율)도 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서는 혼합비가 증가함에 따라 CO 농도가 높게 분포하는 영역은 하류로 길게 위치하고 있으며 $\Omega = 0.5$ 부터는 $\Omega = 0.3$ 이하의 조건과는 다르게 공기류에 포함되어 공급되는 CO로 인해 출구 근처까지 유동장 전체에 걸쳐 비교적 균일하게 분포됨을 알 수 있다. 또한, $\Omega =$

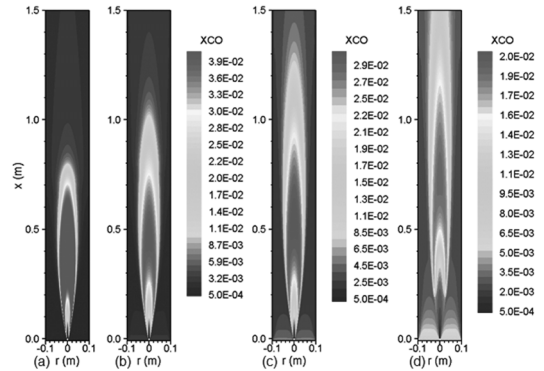


Fig. 4. CO concentration distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for $T_{air} = 1,100$ K. (a) $\Omega = 0.0$; (b) $\Omega = 0.3$; (c) $\Omega = 0.5$; (d) $\Omega = 0.7$.

0.7에서는 다른 조건들에 비해 최고 농도값은 작지만 출구에서 비교적 높은 농도를 유지하면서 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에서 NO 농도분포를 살펴보면 혼합비가 증가됨에 따라 NO의 최고 농도값은 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. $\Omega = 0.0$ 에서 $\Omega = 0.5$ 까지 혼합비를 증가시키면 NO 농도가 높은 영역은 화염끝단(FIame tip)이 달히는 형태와 유사하게 타원형으로 달히는 분포를 보이고 있다. 그러나 $\Omega = 0.7$ 에서는 다른 혼합비와는 달리 부상된 화염의 상류의 좁은 영역에서만 주변보다 비교적 높은 NO 농도를 보이고 하류로 갈수록 매우 낮은 농도를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 이 혼합비에서는 NO는 벽면 근처에서는 거의 분포하지 않는 것도 다른 혼합비와는 다른 점이라고 할 수 있다.

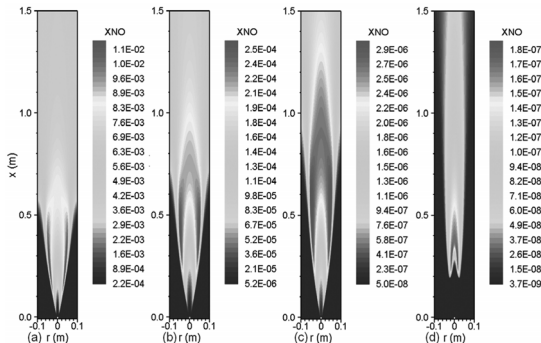


Fig. 5. NO concentration distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for T_{air} = 1,100 K. (a) Ω = 0.0; (b) Ω = 0.3; (c) Ω = 0.5; (d) Ω = 0.7.

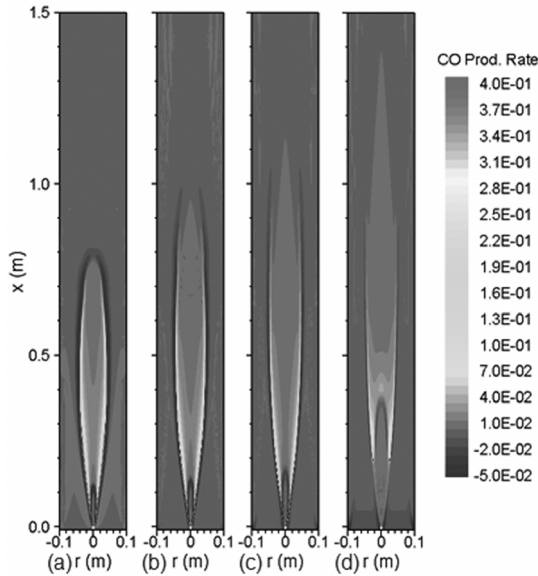


Fig. 6. CO production rate distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for T_{air} = 1,100 K. (a) Ω = 0.0; (b) Ω = 0.3; (c) Ω = 0.5; (d) Ω = 0.7.

Fig. 6은 공기류의 온도를 1,100 K로 공급하였을 때 혼합비에 따른 CO의 생성률(Production rate)을 나타낸 그림이다. CO의 생성률은 연소장의 상류측의 화염면 근처를 따라서 주로 최고값을 나타내고 있기 때문에 CO 생성은 유동장의 상류측 화염면 근처에서 주로 많이 생성됨을 알 수 있다. 혼합비가 증가함에 따라 CO가 가장 많이 생성되는 영역은 크게 변화하지 않으며 Ω = 0.7에서는 화염이 부상됨에 따라 상류측 화염선단(Flame edge)에서 CO가 많이 생성됨을 알 수 있다. 그러나 CO와 NO의 공간분포만을 가지고 이들 화학종의 배출량이 많다 적다를 정량적으로 판단하기 어려우므로 화학종 배출지수를 이용하여 검토할 필요가 있다.

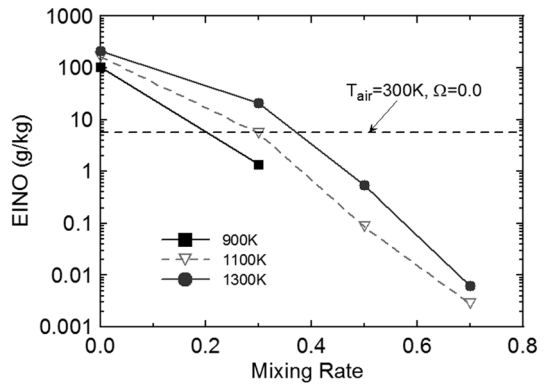


Fig. 7. Variation of emission index for NO with inlet air-stream temperature and dilution rate.

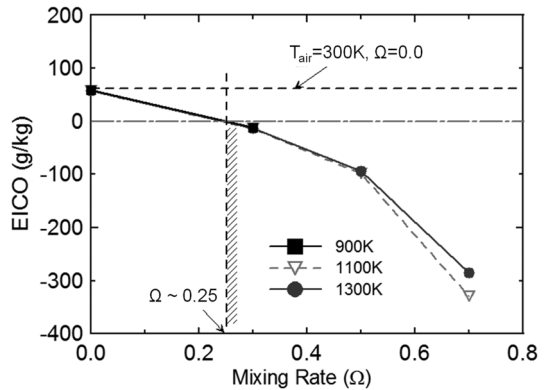


Fig. 8. Variation of emission index for CO with inlet air-stream temperature and dilution rate.

3.2. 오염물질 배출특성

Fig. 7~8은 공급되는 연료 1 kg에 대한 연소기 출구에서 배출되는 NO와 CO의 질량(EINO 및 EICO)을 나타내고 있다. 각 그림에서 점선은 공기류의 온도는 300 K이고 Ω = 0.0인 조건에 대한 NO와 CO의 배출지수를 나타낸 지시선이다. 우선 Fig. 7의 EINO의 값을 보면 공급되는 각 공기류 온도에 대해 혼합비가 증가함에 따라 NO의 배출량은 현저히 감소됨을 알 수 있다. Ω = 0.0에서는 공기류의 온도가 상온인 300 K에 비해 고온인 경우가 더 높은 NO 배출량을 보이게 된다. 이는 통상 공기류를 고온으로 공급하기 때문에 화염의 온도도 더 높게 형성되어 Thermal NO의 생성이 더 많아진 것으로 판단된다.

동일한 혼합비에서는 공기류의 온도가 높아질수록 NO 배출량은 많아지지만 공기류 온도가 높아지면 충분히 높은 혼합비까지 화염을 유지시킬 수 있기 때문에 높은 혼합비를 유지시킬 수 있다면 NO 배출량을 줄이는 데는 더욱 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 8의 EICO 경향에서는 EINO와 마찬가지로 각

공기류 온도에 대해 혼합비가 증가함에 따라 CO의 배출량은 감소하게 됨을 알 수 있다. 약 $\Omega=0.25$ 이상의 혼합비에서는 EICO의 배출지수가 음의 값을 가지게 되는데 이는 공기류에 혼합된 배기가스 성분 중의 CO가 마일드 연소장에서 일부 소모된다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 대향류화염을 이용한 기존의 기초연구에서도 확인된 바 있어[12] 마일드 연소장의 중요한 특성으로 볼 수 있을 것으로 판단된다. $\Omega=0.0$ 에서 공기류 온도를 변화시킨 조건들은 공기류 온도가 300 K인 조건과 비교해 보았을 때 공기류 온도가 CO 배출지수에는 큰 영향이 없다는 것을 알 수 있었다. 또한 $\Omega=0.5$ 이하의 조건에서는 각 혼합비 조건에서 공기류 온도를 900 K부터 1,300 K까지 변화시키더라도 CO 배출지수에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 제트 유동장에서 공기류의 온도와 공기류 중에 연소생성물의 혼합비를 변화시키면서 마일드 연소특성과 오염물질 배출특성을 고찰하였다.

공기류의 온도가 동일할 때는 혼합비가 증가함에 따라 NO와 CO의 배출은 상당히 감소함을 확인하였다. 특히 EINO의 경우에는 혼합비가 증가될수록 매우 큰 폭으로 감소한다. 그러나, 예상할 수 있는 바와 같이 동일한 혼합비에서 공기류의 온도가 증가함에 따라 EINO는 증가하였다.

EICO의 경우에는 $\Omega=0.5$ 이하의 조건에서는 동일 혼합비에서 공기류의 온도에 무관함을 알 수 있었다. 그러나 $\Omega=0.25$ 이하의 조건에서는 공기류에 공급된 CO가 마일드 연소장에서 분해되어 소멸됨을 확인하였다. 따라서 이러한 CO 소멸 메커니즘을 적절히 이용한다면 마일드 연소를 보다 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20102030200051-13-1-0).

참고문헌

- [1] A. Cavaliere, M. Joannon, "Mild Combustion", *Pr ogr. Energy Combust. Science*, Vol. 30, 2004, pp. 329-366.
- [2] G. G. Szego, B. B. Dally, G. J. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system", *Combustion and Flame*, Vol. 156, 2009, pp. 429-438.
- [3] B. B. Dally, S. H. Shim, R. A. Craig, P. J. Ashman, G. G. Szego, "On the Burning of Sawdust in a MILD Combustion Furnace", *Energy and Fuels*, Vol. 24, 2010, pp. 3462-3470.
- [4] C. Galletti, A. Parente, L. Tognotti, "Numerical and Experimental Investigation of a Mild Combustion Burner", *Combust. Flame*, Vol. 151, 2007, pp. 649-664.
- [5] *Fluent 13.0 User's Guide*. ANSYS, Inc.
- [6] C. B. Oh, E. J. Lee, G. J. Jung, "Unsteady auto-ignition of hydrogen in a perfectly stirred reactor with oscillating residence times", *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, 2011, pp. 4605-4614.
- [7] F. C. Christo, B. B. Dally, "Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow", *Combust. Flame*, Vol. 142, 2005, pp. 117-129.
- [8] B. F. Magnussen, "On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow." *Nineteenth AIAA Meeting*, St. Louis, 1981.
- [9] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", *16th Int. Symp. Combustion*, The combustion institute, 1976.
- [10] F. L. Dryer, I. Glassman, "High-Temperature Oxidation of CO and CH₄", *Proc. Combustion Institute*, Vol. 14, 1973, pp. 987-1003.
- [11] T. Takeno, M. Nishioka, "Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions", *Combustion and Flame*, Vol. 92, 1933, pp. 465-468.
- [12] K. M. Song, C. B. Oh, "Ignition of CH₄ by Counterflowing Hot Air Diluted with Combustion Products", *Mediterranean Combustion Symposium*, Vol. 7, 2011, pp. 69.