

벽면으로 둘러싸인 제트 유동장에서의 마일드연소 및 오염물질 배출특성에 관한 전산해석 연구

송금미* · 오창보**

Computational Study of the Mild Combustion and Pollutant Emission Characteristics in Wall-confined Jet

Keum Mi Song*, Chang Bo Oh**

ABSTRACT

The characteristics of mild combustion and pollutant emission were investigated computationally with supplied air stream temperature and dilution rate in jet flame. The air was diluted with main combustion products. As dilution rate increased at fixed air temperature, the temperature distribution of burner inside was uniformed and the maximum mole fraction of CO and NO was decreased. In addition, emission indices for NO, CO, and CO₂ were compared with air temperature and dilution rate.

Key Words : Mild combustion, Pollutant, Computational Fluid Dynamics, Emission Index

마일드 연소(Mild combustion)는 공기류에 연소생성물을 희석시켜 산소농도를 낮추면서 배기가스와의 열교환을 통해 공기류의 온도를 높임으로써 안정된 연소를 유지시키는 연소기법으로 잘 알려져 있다[1]. 이 연소법은 연소효율을 높임으로써 온실가스(CO₂)의 저감과 동시에 NO_x, CO 등의 오염물질 배출을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 마일드연소에 대한 연구는 실용적 측면에서 몇가지 형태의 연소기는 실제로 개발되어 사용되고 있으며, 이 연소법에 대한 좀 더 현상적인 접근을 위해서 비교적 간단한 형태의 연소장을 대상으로한 연구도 최근 많은 연구가 진행되고 있다[2,3]. 그러한 간단한 연소장 형태 중 하나가 바로 제트 연소장이며, 제트 연소장 혹은 이와 유사한 연소장에서의 마일드 연소특성을 검토하기 위한 연구도 근래에 많이 진행되고 있다[4].

마일드 연소기 설계에 필요한 인자로는 연소기 내부 유동, 혼합, 연소기 벽면온도, 열제생기 성능과 연관되는 유입되는 공기온도, 연소생성물 희석률 등 많은 것들이 있다. 본 연구에서는 실제 마일드 연소기 설계에 필요한 기본 정보를 제공하기 위하여 비교적 단순한 제트 연소장을 대상으로 유입되는 공기의 온도와 연소생성물

희석률에 따른 연소특성과 오염물질 생성특성을 전산해석을 통해 검토하고자 한다.

본 연구에서는 Fig. 1에 보이는 제트 연소장을 대상으로 CO₂, CO, H₂O 및 N₂와 같은 주요 연소생성물 성분이 포함된 고온 공기류에 의한 마일드연소와 오염물질 배출특성을 검토하였다. 전산해석을 위해 ANSYS사에서 개발한 Fluent 13.0[5]을 이용하였다.

연소가 이루어질 제트 연소장은 지름 120mm, 높이 1.2m의 원통형 벽면으로 한정된 공간이며 전산해석을 위해 전체적으로 106만개 정도의 격자를 이용하여 3차원 격자계를 구성하였다. 연료노즐은 내경이 5mm이며, 연료노즐 외부의 내경

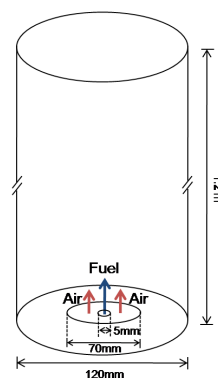


Fig. 1 Axisymmetric confined coflow jet geometry for mild combustion.

* 부경대학교 안전공학과

† 연락처자, cboh@pknu.ac.kr

TEL : (051)629-6472 FAX : (051)629-6463

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

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

70mm 영역에서 고온공기가 공급된다. 이때 연료와 주위 공기류의 유속은 각각 6m/s와 3m/s로 고정하였다.

마일드 연소를 구현하기 위한 연료는 도시가스의 주요성분인 CH₄를 사용하였다. 연소생성물의 주요성분은 CH₄연료를 당량비 1.0조건으로 완전혼합 반응기(Perfectly-stirred reactor; PSR)에서 정상상태로 연소될 때의 연소생성물 조성 중 주요 성분인 CO₂, CO, H₂O 및 N₂만을 연소생성물로 간주하여 혼합하였다. 연소생성물 농도의 계산에는 완전혼합반응에 대한 계산이 가능한 UPSR 코드[6]를 이용하였다. Table 1은 UPSR에서 얻어진 4개 화학종이 공기에 혼합되는 비율(혼합비; Ω)을 변화시킬 경우 얻어진 각 화학종의 몰분율을 나타내고 있다. 여기서 혼합비 Ω 는 다음식과 같이 정의된다.

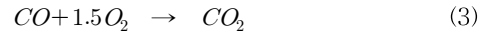
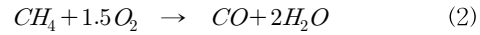
$$\Omega = \frac{\text{혼합된 배기가스 성분 체적}}{\text{전체 혼합가스 체적}} \quad (1)$$

연료의 온도는 300K으로 고정하였고, 공기류의 온도는 900K, 1100K, 1300K으로 변화시켰으며, 공기류 중의 연소생성물 혼합비는 Table 1과 같은 조건으로 변화시키면서 계산을 수행하였다. 또한 벽면의 온도는 기존의 마일드연소기 실험 결과들을 참조하여 마일드연소기 벽면온도와 유사한 범위에 있도록 900K으로 고정시켰으며 유속에 대해서는 벽면조건을 부여하였다. 제트 연소장의 하류출구에서는 출구 경계조건으로 처리하였다.

전산해석을 위해 유동의 해석은 표준 k- ϵ 난류모델을 이용하였다. 복사모델은 DO(Discrete Ordinates) 모델을 이용하였으며 반응혼합기의 복사특성을 고려하기 위해 WSGGM(Weighted Sum of Gray Gases Model)을 사용하였다. 또한 연소반응의 계산을 위하여 최근 연구들에서 마일드 연소특성 검토에 적합하다고 알려진 ED C(Eddy Dissipation Concept) 모델을 사용하였다. 이 모델은 Arrhenius 형태의 화학반응률을 고려할 수 있는데, 본 연구에서는 다음과 같은 3단계의 총괄 화학반응식[7]을 고려하였다.

Table 2 Ignition state of CH₄ fuel with the mixing rate and temperature of mixture.

$T_{air}(K)$	Mixing rate (Ω)			
	0.0	0.3	0.5	0.7
900	○	○	X	X
1100	○	○	○	X
1300	○	○	○	○



각 반응식에 대한 반응률은 참고문헌을 참고하기 바란다. 또한 마일드 연소장에서의 NO 발생량을 고찰하기 위해서 Thermal NO와 Prompt NO의 생성이 고려되도록 하였다.

본 연구에서 검토한 공기류의 온도 및 혼합비는 Table 2에서 보는 바와 같다. 참고로 Table 2에서 ○는 화염이 형성된 경우이고 ×는 안정된 화염이 형성되지 못한 조건이다.

Fig. 2는 공기류의 온도를 1300K으로 공급했을 때 혼합비에 따른 온도분포를 보여주고 있다. $\Omega=0.0$ 에서는 연소생성물은 전혀 포함되지 않으면서 공기류의 온도가 높기 때문에 통상의 CH₄ 확산화염보다 화염 최고온도는 높게 나타나고 있다. 그러나 Ω 가 증가할수록 화염 최고온도는 점차 낮아지게 되고 온도는 연소장 전체에 걸쳐 균일하게 나타나게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에는 연료노즐 출구로부터의 특정 높이 단면에서의 온도분포를 혼합비 변화에 따라 도시하였다. 연소장 상류측에서 하류측으로 갈수록 각 단면의 최고온도는 점차 감소하고 있으며 온도분포는 벽면근처를 제외하면 균일해지고 있다. 또한 혼합비가 가장 큰 $\Omega=0.7$ 조건에서 최고온도도 낮으며 온도도 가장 균일한 것을 알

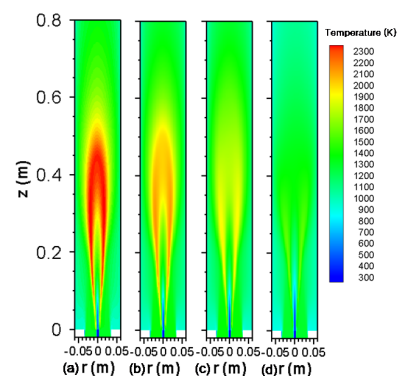


Fig. 2 Temperature distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for $T_{air}=1300K$. (a) $\Omega=0.0$; (b) $\Omega=0.3$; (c) $\Omega=0.5$; (d) $\Omega=0.7$.

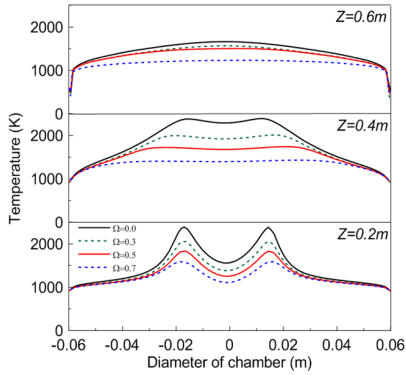


Fig. 3 Response of the temperature distributions in height variation with dilution rate for $T_{air}=1300K$.

수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 공기류의 온도를 1300 K으로 공급했을 때 혼합비에 따른 CO와 NO의 불분율을 나타내고 있다. 두 화학종 모두 혼합비가 증가함에 따라 각 화학종의 농도(물분율)도 감소하는 것을 알 수 있다. $\Omega=0.7$ 에서는 CO와 NO의 최고농도값이 다른 조건에 비해 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러나, $\Omega=0.7$ 의 CO 농도분포 결과를 보면 다른 조건들에 비해 최고농도값은 작지만 출구에서는 비교적 높은 농도를 유지하면서 배출되고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 다양한 조건의 화염에서 생성되는 화학종의 양은 농도분포만으로는 정확하게 많고 적음을 판단하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 화염에서 배출되는 화학종들의 생성량을 정량적으로 비교하기 위하여 화학종 배출지수(Emission Index; EI)를 도입하였다. 여기서는 Takeno와 Nishioka가 제시한 배출지수[8]를 본 연구에 맞게 변형하여 아래 식 (5)와 같이 정의하였다. 본 연구에서 배출량에 관심을 가지고 EI 계산에 사용한 화학종은 NO, CO, CO₂ 등 3개이다.

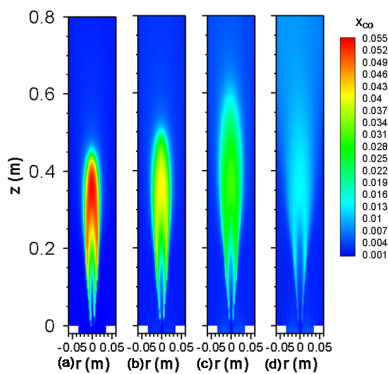


Fig. 4 CO concentration distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for $T_{air}=1300K$. (a) $\Omega=0.0$; (b) $\Omega=0.3$; (c) $\Omega=0.5$; (d) $\Omega=0.7$.

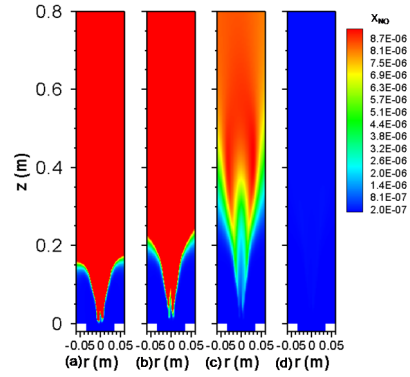


Fig. 5 NO concentration distributions of CH₄ jets when the dilution rate was varied for $T_{air}=1300K$. (a) $\Omega=0.0$; (b) $\Omega=0.3$; (c) $\Omega=0.5$; (d) $\Omega=0.7$.

$$EI_i = \frac{\text{생성된 화학종 } i \text{의 질량}}{\text{소모된 연료의 질량}} = \frac{(\dot{m}_{tot} \times Y_i)_{outlet} - (\dot{m}_{air} \times Y_i)_{inlet}}{(\dot{m}_{CH_4})_{inlet} - (\dot{m}_{tot} \times Y_{CH_4})_{outlet}} \quad (5)$$

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 *inlet*과 *outlet*은 입구와 출구위치를 의미한다. 참고로 식 (5)를 이용하여 EI를 정의하기 위해서는 배출구의 반경방향 농도가 균일하여야 한다. 배출구에서의 각 화학종 농도분포를 확인한 후에 의하면 농도 변동치는 최대 2-3% 정도로서 식 (5)를 이용하여 EI를 계산하여도 무방함을 확인하였다.

Fig. 6~8은 공급되는 연료 1kg에 대해 배출되는 NO, CO 및 CO₂의 질량을 나타내고 있다. 우선 Fig. 6의 EINO의 값을 보면 공급되는 각 공기류 온도에 대해 혼합비가 증가함에 따라 NO의 배출량은 현저히 감소됨을 알 수 있다. 또한 동일한 혼합비에서는 공기류의 온도가 높아질수록 NO 배출량은 많아지지만 공기류 온도가 높아지면 충분히 높은 혼합비까지 화염을 유지시킬 수 있기 때문에 NO 배출량을 줄이는데 더욱 효과적임을 알 수 있다.

반면 Fig. 7의 결과에서 공기류 온도가 1100K 이하에서는 혼합비가 증가될수록 점차 CO 배출량은 줄어드는 것을 알 수 있다. EICO의 배출지수가 음의 값을 갖는 것은 공기류에 혼합되어 공급된 CO조차도 연소장에서 일부 소모된다는 것을 의미하는 것으로서 대항류화염을 이용한

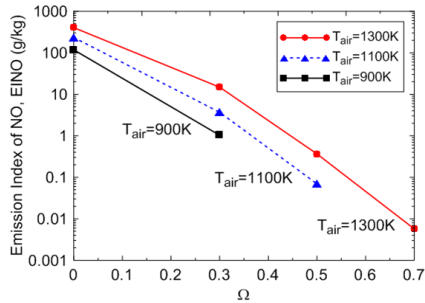


Fig. 6 Variation of emission index for NO with inlet air stream temperature and dilution rate.

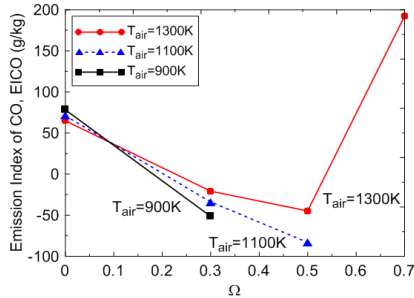


Fig. 7 Variation of emission index for CO with inlet air stream temperature and dilution rate.

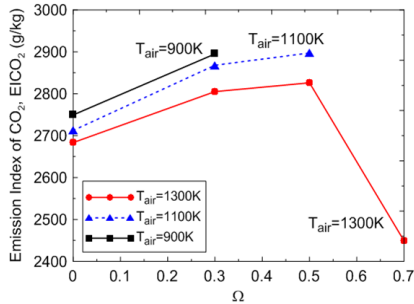


Fig. 8 Variation of emission index for CO₂ with inlet air stream temperature and dilution rate.

기초연구에서도 기존에 확인된 바 있다[9]. 그리고 포함된 공급된 CO공기류 온도가 1300K의 경우에는 혼합비 증가에 따라 CO 배출량은 줄어들다가 $\Omega=0.7$ 에서는 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 8의 CO₂ 배출량을 통해서 잘 알 수 있다. 본 연구에서는 공기류의 유량은 고정된 상태에서 혼합비를 증가시켰기 때문에 혼합비가 증가할수록 산소량은 적어지게 되어 연료를 충분히 산화시키지 못하는 상태에 이르게 된다. $\Omega=0.7$ 조건에서는 공급되는 연료량과 산소량으로 계산한 총괄 당량비가 1.4 정도가 되어 연료를 충분히 연소시킬 수 없는 상태가 됨을 확인할 수 있다. 따라서 공기류 온도가 1300K이고 $\Omega=0.7$ 조건에서 CO 발생

이 급격히 증가하는 것은 공급되는 산소부족에 따른 연료의 불완전 연소(산화)에 기인하는 것을 알 수 있다. 참고로 이 조건을 제외하면 다른 조건에서는 총괄 당량비는 1.0보다 작은 희박조건이 되어 산소의 양은 연료를 산화시키는데 충분한 상태임을 확인하였다. 이러한 결과는 마일드 연소기를 설계할 때 CO나 NO를 줄이기 위해서는 연소생성물과의 혼합을 증진시킬 필요가 있지만 연소생성물을 과도하게 많이 혼합시킬 경우에는 오히려 불완전 연소에 기인한 CO 배출량을 증가시킬 수도 있기 때문에 최적의 연소조건을 찾는 것이 중요함을 암시하고 있다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100100764)

참고 문헌

- [1] A. Cavaliere, M. Joannon, "Mild Combustion", Progress Energy Combustion 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", Combustion and Flame, Vol. 151, 2007, pp. 649-664.
- [5] Fluent 13.0 User's Guide.
- [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. L. Dryer, I. Glassman, "High-Temperature Oxidation of CO and CH₄", Proc. Combustion Institute, Vol. 14, 1973, pp. 987-1003.
- [8] T. Takeno, M. Nishioka, "Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions", Combustion and Flame, Vol. 92, 1993, pp. 465-468.
- [9] 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.