

흡기 중 스팀함량이 버너화염에 미치는 영향

이영춘¹ · 박권하[†]

(Received March 23, 2018 ; Revised May 10, 2018 ; Accepted May 23, 2018)

Effect of intake steam fraction on burner flame

Young-Chun Lee¹ · Kweon-Ha Park[†]

요약: 환경오염에 대한 관심과 규제가 강화됨에 따라 연소기에 의한 대기오염을 줄이고 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 버너에서 스팀함량이 화염에 미치는 영향을 분석하기 위해 흡기 중에 스팀 함유량을 변화시켜 연소가 진행되는 동안 연소 온도 및 생성물을 분석하였다. 과잉 공기비 1.3에서 스팀 함량 0~20% vol.%의 조건으로 연소계산을 수행하였으며, 계산결과 스팀함량이 증가할수록 화염온도가 감소하였으며 질소산화물 발생에 큰 영향을 미치는 1,800K 이상의 영역이 급격히 줄어들었다. 특히 일산화질소 생성은 스팀 2.5%일 때 38% 감소, 스팀 5% 일 때 61% 이상의 감소율을 보였으며 스팀 20%에서는 거의 발생되지 않았다.

주제어: 스팀함량, 버너화염, 유동계산, 일산화탄소, 일산화질소, 이산화탄소

Abstract: With increasing interest and strengthened on environmental pollution, researches are actively carried out to reduce air pollution in burners and to utilize energy efficiently. In this study, to analyze the effect of steam content on the burner flame, combustion temperature and products were analyzed during the combustion by varying the steam fraction in the intake air. The combustion calculation was performed with a steam content of 0% to 20% at an excess air ratio of 1.3. Numerical results show that as the steam content increases, the flame temperature decreases and the area above 1,800K, which significantly affects the generation of nitrogen oxides, sharply decreases. In particular, nitrogen monoxide production decreased by 38% at 2.5 vol.% of steam, 61% at 5 vol.% of steam, and there was almost no change at 20 vol.% of steam.

Keywords: Steam fraction, Burner flame, CFD, CO, NO, CO₂

1. 서론

연소를 통해 얻어지는 에너지는 우리의 일상생활의 다양한 분야에 활용되고 있다. 가정에서의 난방과 취사를 위한 열 에너지나 운송수단의 동력원, 산업용으로 사용되는 에너지원도 화석연료를 연소하여 사용하고 있다. 그러나 화석연료의 연소에 의해 생성되는 미연 탄화수소, 질소산화물, 일산화탄소, 황산화물, 매연 등의 공해물질은 우리의 건강과 환경을 위협하고 있으며 이러한 대기오염물질은 대부분 법적 기준에 의해 배출이 통제 된다. 최근 미세먼지에 의한 광화학스모그 현상으로 인해 가시거리가 짧아지고 호흡기나 눈을 자극하는 날이 증가하고 있다. 이는 질소산화물과 휘발성 유기화합물이 햇빛에 의한 화학반응에 의해 오존을 생성하고, 이 오존의 일부는 대기 중 또 다른 오염물질과의 2차 반응에 의해 미세입자를 만들게 되므로 질소산화물의 저감이 미세먼지를 줄이는데 중요한

요소가 된다.

이와 같이 환경오염에 대한 관심과 규제에 따라 가스터빈, 버너 등의 연소기에 대기오염을 줄이고 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 천연가스를 사용하는 버너는 배기가스 발생량이 다른 화석연료를 사용하는 버너에 비해 적으며 출력당 가장 적은 이산화탄소를 배출한다. 그러나, 상대적으로 낮은 화염온도와 이혼혼합비 부근에서의 높은 온도 영역의 형성으로 인해 다량의 질소산화물이 발생할 수 있으며 이는 산성비, 광화학 스모그의 원인이 된다[1].

버너에서 질소산화물을 줄이기 위한 방법으로 [2]에서는 과잉공기연소법으로 질소산화물 30%, 일산화탄소 1% 감소, 배기가스 재순환으로 질소산화물 30~50% 저감, 다단 공기 연소 또는 다단 연료 연소법으로 질소산화물을 40~60% 줄일 수 있음을 밝혔다. [3]에서는 메탄 연소기

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9460-8399>): Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: khpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367

¹ Department of Automotive Engineering, Busan Campus of Korea Polytechnic, E-mail: youngs2@kopo.ac.kr Tel: 051-330-7742

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 다단 연소를 실시하여 90%이상 질소산화물이 저감되었고, [4]에서는 메탄 연소기에 재연소를 실시하여 40~50%의 질소산화물과 일산화탄소, HC가 저감되는 방법을 소개하였다. [5]에서는 암모니아 환원제를 사용하여 질소산화물을 30%이상 줄일 수 있음을 밝혔으며, [6]에서는 EV 버너의 NO_x 저감과 화염안정화를 위해 버너 내부로 분사되는 연료 유량을 조절해 NO_x 배출량을 20~30% 감소할 수 있음을 밝혔다. [7]에서는 질소산화물과 분진의 배출을 동시에 저감하기 위해 하이브리드형 물 혼합 에멀전 연료의 버너 특성 실험에서 동일 연소실온도에서 질소산화물 40~50%, 에멀전 16.7%에서 일산화탄소와 스모크가 90%이상 줄어드는 기술을 소개하였으며, 그 외에도 질소산화물저감 방법에 대한 연구가 진행되었다[8].

이처럼 질소산화물 등의 공해물질을 줄이기 위해 다양한 방법을 연구하고 있지만 스팀이 연소에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 버너에서 스팀 함량이 화염에 미치는 영향을 분석하기 위해 흡기 중에 스팀을 0% ~ 20%까지 함유하여 연소온도, CO, CO₂, NO 발생량에 대해 수치해석 방법을 통해 분석하였다.

2. 수학적 모델 및 계산조건

2.1 수학적 모델

본 연구의 유동계산에 적용된 질량, 모멘텀, 에너지 보존에 대한 전달 방정식은 다음과 같다.

연속방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

여기서 응력텐서 τ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U \quad (3)$$

에너지 방정식은

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \quad (4)$$

난류계산은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} = \frac{a_1 k}{\max(a_1, (\frac{\partial u}{\partial y}) F_2)} \quad (5)$$

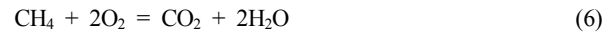
$$F_2 = \tanh(\arg_2^2)$$

$$\arg_2 = \max(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega})$$

여기서 U는 속도벡터, S_M은 운동량 생성항, τ는 응력 텐서, T는 온도, δ은 단위행렬, ρ는 밀도, h는 비정상엔탈피, λ는 열전도도, S_E은 에너지 생성항, k는 단위 질량당 난류 운동 에너지, ω는 각 속도를 나타낸다.

2.2 화학반응

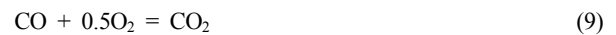
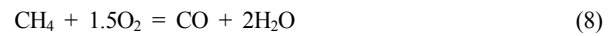
연료는 메탄(CH₄)으로 가정하였으며, 메탄의 1단계 화학반응을 식 (6)에 나타내었으며 화학반응률은 식 (7)에 의해 계산된다.



$$\dot{\omega}_i = A T^n \text{Exp}\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [A]^a [B]^b \quad (7)$$

A	n	E _a /R[K]	[A]	[B]	a	b
1.86×10 ¹⁴	0	24154	CH ₄	O ₂	1	1

메탄 2단계 화학반응을 식 (8), 식 (9)에 나타내었으며 화학 반응률은 식 (7)에 의해 계산되며[9], 여기서 $\dot{\omega}_i$ 는 반응률, A는 빈도 지수, T는 온도, n은 온도지수, E_a는 활성화 에너지, a는 연료 반응지수, b는 산화제 반응지수를 나타낸다.



A	n	E _a /R[K]	[A]	[B]	a	b
4.56×10 ¹¹	0	20087	CH ₄	O ₂	0.2	1.3
3.13×10 ¹²	0	24417	CO	O ₂	1.5	0.25

Thermal NO의 생성은 유동장 내의 온도조건에 큰 영향을 받는 Zeldovich mechanism에 의해 결정된다[10].



Thermal NO의 생성은 연소 온도가 높을 때, 연소 영역에서 산소 농도가 높을 때, 고온영역에서 연소 가스의 체류시간이 길 때 많이 발생한다고 알려져 있다.

NO의 생성량은 NO 발생으로 인한 열 발생을 무시 할 수 있고 유동 결과에 영향이 없다는 가정 하에 후처리를 통하여 계산이 가능하다. thermal NO의 생성률은 식 (13)을 통해 계산된다[10].

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{f,1}k_{f,2}[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{f,1}[NO]}{k_{f,2}[O_2] + k_{f,3}[OH]}\right)} \quad (13)$$

Thermal NO의 반응 속도상수는 다음과 같다[11].

$$k_{f,1} = 1.8 \times 10^{11} \exp[-38,370/T(K)] \quad [m^3/kmol-s]$$

$$k_{r,1} = 3.8 \times 10^{10} \exp[-425/T(K)] \quad [m^3/kmol-s]$$

$$k_{f,2} = 1.8 \times 10^7 T \exp[-4680/T(K)] \quad [m^3/kmol-s]$$

$$k_{r,2} = 3.8 \times 10^6 T \exp[-20,820/T(K)] \quad [m^3/kmol-s]$$

$$k_{f,3} = 7.1 \times 10^{10} \exp[-450/T(K)] \quad [m^3/kmol-s]$$

$$k_{r,3} = 1.7 \times 10^{11} \exp[-24,560/T(K)] \quad [m^3/kmol-s]$$

Prompt NO의 생성 메커니즘은 탄화수소 연료의 화학반응과 밀접하게 연결되어 있다. Prompt NO의 일반적인 메커니즘을 살펴보면, 탄화수소 활성기(CH)가 분자 상태의 질소와 반응하여 CN이나 HCN를 생성시키고, HCN이 다른 화학종의 연쇄반응에 첨가되어 NO를 생성시킨다.



prompt NO 생성율은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{pr} [O_2] [N_2][FUEL] e^{-E_a/RT} \quad (18)$$

$$\left(k_{pr} = 1.21 \times 10^7 \left(\frac{RT}{p}\right)^{a+1}\right)$$

여기서 E_a 는 251,151J/mol이며 a 는 산소 반응 차수를 나타낸다.

2.3 계산조건 및 격자

스팀함량이 버너화염에 미치는 영향을 고찰하기 위해 예혼합연료와 공기를 버너 중심부에 공급하고 공기 중으로 방출되게 하였다. 계산격자의 생성은 NX와 ICEM을 사용하였으며 격자 수는 141,771로 Figure 1과 같다. Table 1은 계산조건을 나타내며 사용연료는 메탄, 과잉공기비는 1.3, 스팀함량은 0~20%까지 7단계로 하여 Ansys CFX를 이용하여 해석하였다.

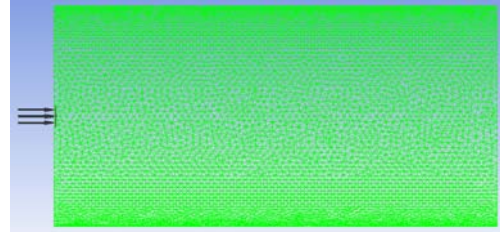


Figure 1: Grids of calculation domain

Table 1: Calculation conditions

Items	Conditions
Inlet mixture temp	25°C
Fuel	CH ₄
Excess air ratio	1.3
Steam fraction (%)	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20%
Outer boundary	Opening

연소가스 조성은 Table 2와 같이 메탄의 이론혼합비 비율로 적용하였다.

Table 2: Composition of gases

Steam Fraction (%)	CH ₄	H ₂ O	O ₂
0%	0.0748	0	0.1944
2.5%	0.0748	0.0232	0.1895
5%	0.0748	0.0463	0.1847
7.5%	0.0748	0.0694	0.1798
10%	0.0748	0.0925	0.1749
15%	0.0748	0.1388	0.1652
20%	0.0748	0.1850	0.1555

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 유동해석

Figure 2는 스팀함량이 0 ~ 20%일 때의 유동속도를 나타낸다. 스팀이 없을 경우 최대속도는 45.5m/s이고, 스팀 2.5% 일 때 최대속도는 44.6m/s, 스팀 20% 일 때 최대속도는 38.6m/s로 유동최대속도는 스팀량이 증가할수록 감소하는데 이는 스팀함량이 증가할수록 연소속도가 감소하기 때문이다.

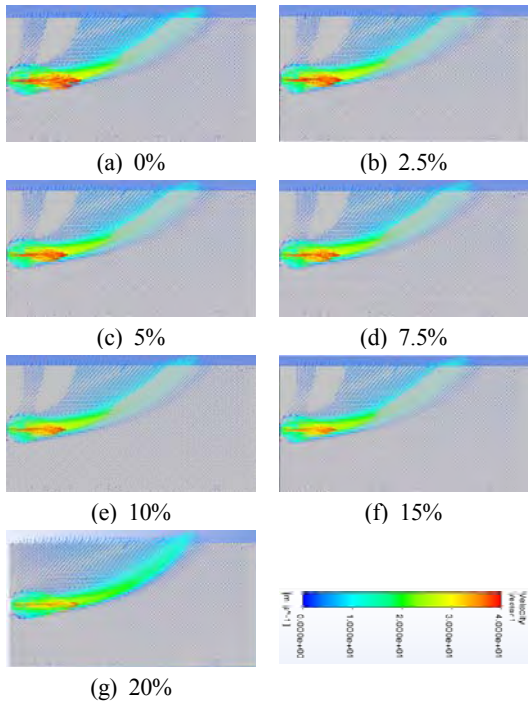


Figure 2: Vector Distribution of Velocities

Figure 3은 스팀함량에 따른 온도분포를 나타낸다. 스팀 없이 공기만을 연소시켰을 경우 최대온도는 2,110K에 도달했으며, 스팀 2.5%일 때 2,061K, 스팀 5%일 때 2,016K, 스팀 7.5%일 때 1,975K, 스팀 10%일 때 1,934K, 스팀 15%일 때 1,862K, 스팀 20%일 때 최대온도는 1,795K를 나타냈다. 특히 질소산화물의 생성은 열적 반응기구의 경우 1,800K 이상에서 의미가 있는데[12] 스팀함량이 증가할수록 1,800K 이상 영역이 급격히 감소됨을 알 수 있다.

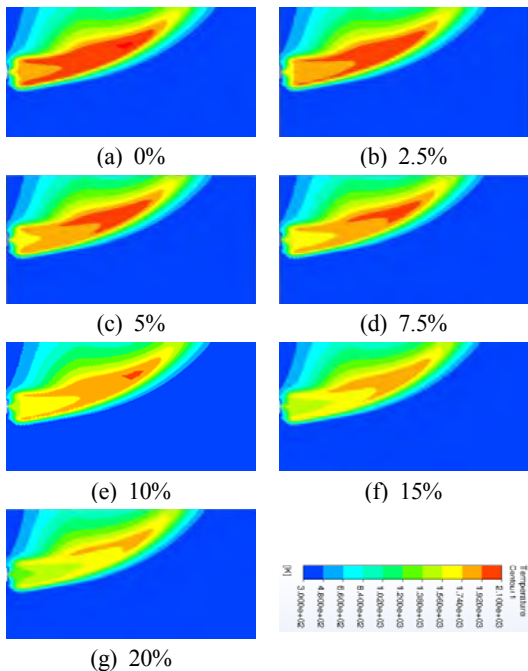


Figure 3: Contour of Temperature

3.2 NO 생성

Figure 4는 스팀함량에 따른 NO 질량분율의 분포를 나타낸다. 스팀 함유 없이 공기만을 연소시켰을 때 평균 NO 질량분율(Volume Average of NO Mass Fraction on Default Domain)은 2.91ppm, 스팀 2.5%를 함유했을 때 1.8ppm으로 38%의 감소율을 보였고, 스팀 5%일 때 1.12ppm으로 61.5%의 감소율을 나타냈다. 스팀 7.5%일 때 0.71ppm, 스팀 10%일 때 0.47ppm, 스팀 15%일 때 0.2ppm, 스팀 20%일 때 0.09ppm으로 97%의 NO 질량분율 감소를 가져왔다. 이는 스팀 함량이 증가하면 연소온도가 감소되어 질소산화물의 질량분율 분포가 감소됨을 보여준다.

NO 최대질량분율(Maximum Value of NO Mass Fraction on Default Domain)은 스팀 함유 없이 공기만을 연소시켰을 때 196ppm, 스팀 2.5%일 때 130ppm으로 33.7%의 감소율을 보였고, 스팀 5%일 때는 86ppm으로 56.1%의 감소율을 나타냈다. 스팀 7.5%일 때 57ppm, 10%일 때 39ppm, 스팀 15%일 때 18ppm, 스팀 20%일 때 9ppm으로 공기만 연소했을 때 보다 95% 이상의 감소율을 보였다. 이와 같이 NO 최대질량분율 또한 스팀함량에 따라 연소온도가 낮아짐으로 이와 비례하여 감소함을 알 수 있다.

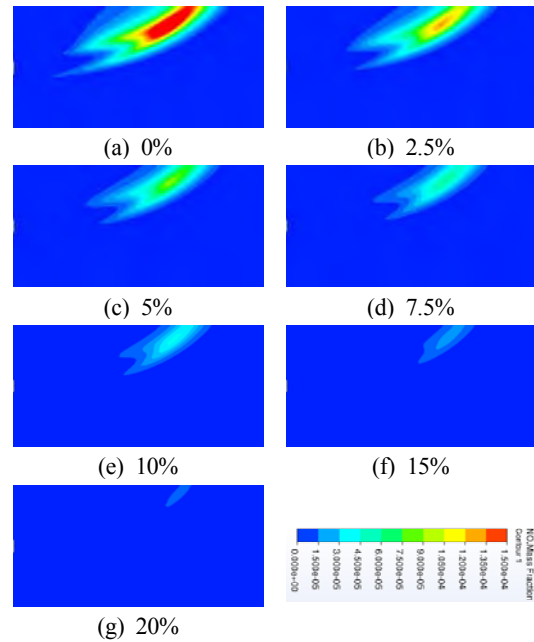


Figure 4: Contour of NO mass fraction

3.3 CO 생성

Figure 5는 스팀함량에 따른 CO 질량분율(Volume Average of CO Mass Fraction on Default Domain)을 나타낸다. 공기만을 연소시켰을 때 평균 CO 질량분율은 280ppm, 스팀 2.5% 함량일 때 287ppm으로 약 2.5% 증가, 스팀 5%일 때 297ppm으로 약 6.1%가 증가하였다. 스팀 7.5%일 때 307ppm으로 9.6% 증가, 스팀 10%일 때 315ppm으로 12.5%

증가, 스팀 15%일 때 329ppm으로 17.5% 증가, 스팀 20%일 때 337ppm으로 20.4% 증가를 나타냈다. 또한 각 조건에서 CO 최대질량분율(Maximum Value of CO Mass Fraction on Default Domain)은 4.63%로 동일하였다. 평균 CO 질량분율은 스팀함량 10%일 때 12.5% 증가, 15%일 때 17.5% 증가, 20%일 때 20.4% 증가됨을 알 수 있다. 이는 스팀첨가로 인해 연소속도가 감소하였고, 산소공급량이 줄어들어 CO 질량분율이 늘어난 결과로 판단된다.

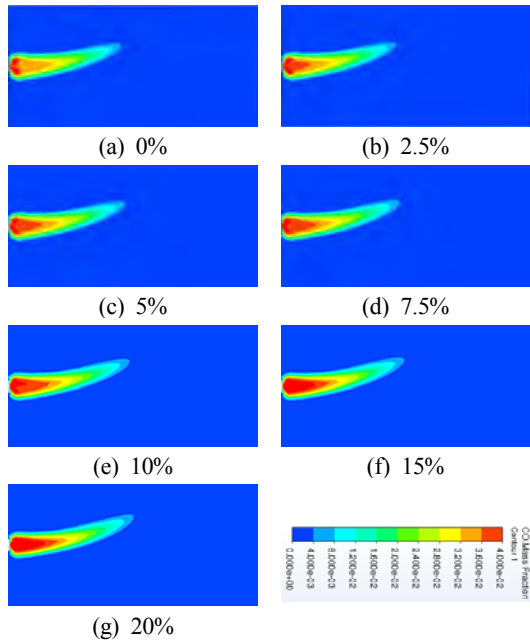


Figure 5: Contour of CO mass fraction

Figure 6은 스팀함량에 따른 CO와 NO의 질량분율 및 연소온도를 나타낸다. 스팀 2.5% 함유량일 때 연소온도의 감소율은 2.3%, NO 질량분율은 38.1% 감소하였다. 특히 온도가 1,800K에 가까울수록 질소산화물의 양은 급격히 감소함을 볼 수 있으며 이는 스팀 함량이 질소산화물 저감에 매우 효과적임을 알 수 있다.

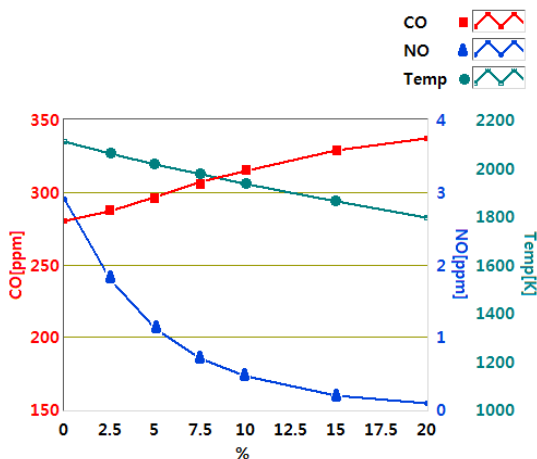


Figure 6: CO, NO and temperature comparison

3.4 CO₂ 생성

Figure 7은 스팀함량에 따른 CO₂ 최대질량분율(Maximum Value of CO₂ Mass Fraction on Default Domain)을 나타낸다. 공기만을 연소시켰을 때 13.7%, 스팀 2.5%함량일 때 13.5%, 스팀 5%일 때 13.3%, 스팀 7.5%일 때 13.1%, 스팀 10%일 때 12.9%로 공기만을 연소시켰을 때 보다 5.8% 감소하였으며, 스팀 15%일 때 12.5%로 8.8% 감소, 스팀 20%일 때 CO₂ 최대질량분율은 12.1%로 공기만을 연소시켰을 때 보다 11.7% 감소하였다. 이는 스팀함량에 따라 일산화탄소의 질량분율이 증가하였고, 산소공급량은 줄어들어 이산화탄소의 생성은 줄어든 것으로 판단된다.

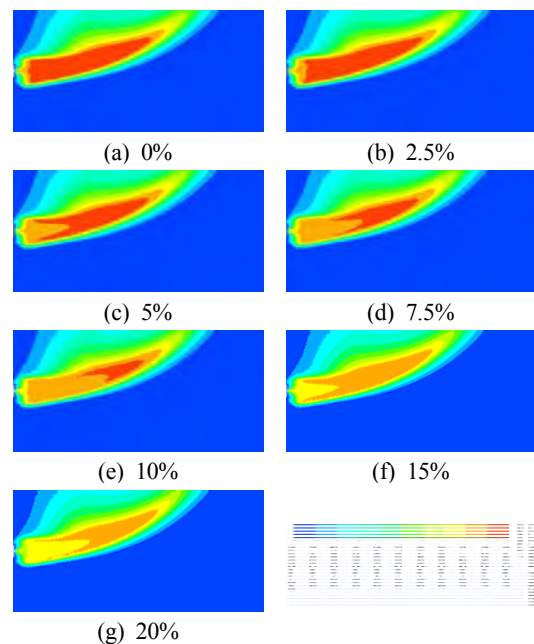


Figure 7: Contour of CO₂ mass fraction

4. 결론

흡기 중 스팀함량이 버너화염에 미치는 영향에 대해 연소온도, CO, NO, CO₂ 생성을 분석한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 스팀 함량이 0 ~ 20%까지 증가할수록 유동 최대속도는 15%까지 감소하였고, 연소온도는 14.9% 낮아졌다.
- (2) 스팀함량이 증가하면서 Thermal NO 생성에 영향을 미치는 1,800K이상의 영역이 급격히 감소함을 보였다.
- (3) NO 질량분율이 가장 큰 폭으로 감소한 case는 스팀 2.5% 함유량일 때 38.1% 감소하였고, 이때 CO 질량분율은 2.5% 증가, CO₂ 질량분율은 1.5% 감소하였다.

References

[1] S. R. Turns, An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, Third Edition, Mc-Graw Hill, pp.

- 4-11, 2012.
- [2] A. Zaidi and S.Kumar, "Combustion control techniques to reduce NO_x emissions from industrial boilers," PULP & CANADA, vol. 96, no. 6, pp. 45-52, 1995.
- [3] S. Hayashi, H. Yamada, K. Shimodaira, and T. Machida, "Nox emissions from Non-Premixed, direct fuel injection methane burners at High-Temperature and elevated pressure conditions," Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute, vol. 27, no. 2, pp. 1833-1839, 1998.
- [4] C. A. Miller, A. D. Touati, J. Becker, and J. O. L. Wendt, "Nox abatement by Fuel-Lean reburning: Laboratory combustor and Pilot-Scale package boiler results," Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute, vol. 27, no. 2, pp. 3189-3195, 1998.
- [5] J. B. Lee and S. D. Kim, "NO_x reduction by hydrazine in a Pilot-Scale reactor," Chemical Engineering Journal, vol. 69, no. 2, pp. 99-104, 1998 (in Korean).
- [6] C. O. Paschereit, B. Schuermans, and D. Buche, "Combustion process optimization using evolutionary algorithm," ASME Turbo Expo, pp. 281-292, 2003.
- [7] C. J. Kim and D. K. Kim "Burner combustion characteristics of hybrid type water mixing emulsion fuel," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 4, pp. 308-315, 2013 (in Korean).
- [8] K. Y. Lee and N. Talukder, "The methods calculating the reduction efficiency of nitrogen oxide for the facilities including the low NO_x burners," KOSCO Symposium, p. 295, 2015 (in Korean).
- [9] W. Polike, K. Dobbeling, T. Sattelmayer, D. G. Nicol, and P. C. Malte, "A NO_x prediction scheme for lean-premixed gas turbine based on detailed chemical kinetics," ASME, vol. 118, no. 4, pp. 775-776, 1996.
- [10] S. R. Turns, An Introduction to Combustion, Mc-Graw Hill, pp. 472-507, 2000.
- [11] ANSYS CFX-Solver Theory Guide V14.0, ANSYS Inc., 2012.
- [12] S. R. Turns, An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, Third Edition, Mc-Graw Hill, pp. 179-186, 2012.