

공기류측에 수증기가 첨가된 대향류 메탄 부분에혼합화염의 화염구조 및 소화한계에 미치는 복사효과

박지웅* · 오창보*† · 김옥중**

Radiation Effects on the Flame Structure and Extinction Limit of Counterflow Partially Premixed Methane Flames Diluted with Water Vapor in the Air Stream

Ji-Woong Park*, Chang Bo Oh*†, Ook Joong Kim**

ABSTRACT

Radiation effects on the partially premixed methane flames diluted with water vapor in the air stream were numerically investigated. OPPDIF code and GRI-v3.0 were used in the numerical simulation. Adiabatic condition was compared with two different radiation models, optically-thin and WSGGM models. It was found that the radiation effect on the flame structure for the equivalence ratio (Φ) of 2.5 was less than $\Phi=1.5$. Extinction limit was not affected significantly, however, local flame structure was markedly influenced by the radiation models as increasing the water vapor concentration.

Key Words : Radiation, Extinction limit, Flame structure, Partially premixed flame, Water vapor

물을 이용한 소화시스템은 다른 소화시스템에 비해 환경오염측면에서 굉장히 우수할 뿐만 아니라, 높은 열용량과 증발잠열로 인한 물리/화학적 소화효과로 많은 관심을 받아 왔다. 이처럼 물을 이용한 소화 메커니즘은 크게 열제거 효과와 산소치환효과, 복사열 차단효과등의 주요한 효과와 화학적 효과, 연료/공기 희석효과등 부차적 효과로 설명될 수 있다.

물을 이용한 소화현상에 대한 연구는 대부분 실용개발 측면에서 워터미스트의 액적거동과 거시적인 화염의 소화현상에 대해 많이 이루어 졌다. 그리고 기초연구 측면에서 수행된 Chelliah[1-2]의 연구에서는 물의 증발잠열 효과를 고찰하기 위한 Water Droplet Model을 개발하여 분무액적의 크기에 따른 화염소화현상에 대한 검토가 이루어 졌다. 하지만, 이러한 연구는 액적모델의 개발과 액적직경의 변화에 대한 소화효과에 주로 초점이 맞추어져 첨가되는 수증기량이 체적비율로 약 3%로 매우 낮게 공급되었다. Pitts[3]는 수치계산을 통하여 상온 조건에서 수증기 첨가에 따른 대향류 비예혼합화염에서의 소화농도를 검토하였다. 이러한 연구에서는 상온에서 첨가된

물이 과포화(Supersaturated) 상태로 존재한다는 다소 한정적인 가정을 도입하여 소화농도를 계산하였다는 한계를 가지고 있다. 일반적으로 화재는 비예혼합화염으로 분류되지만 화재 초기단계에 증발 혹은 분해된 가연성기체가 공기와 일부 혼합된 조건에서 부분에혼합화염으로 존재할 가능성이 있다[4]. 이와 같은 배경 하에, 본 연구에서는 메탄부분예혼합화염을 대상으로 복사에 지배적인 화학종인 수증기 첨가량에 따른 복사효과에 대한 연구를 수행하고자 한다.

대향류 메탄 부분에혼합화염에서 공기류측의 수증기 첨가량에 따른 복사효과를 수치해석적으로 규명하기 위하여 기하학적으로 간단한 대향류 연소장에서 형성되는 화염을 대상으로 하였다. 수치계산에는 대향류 연소장 계산에 많이 이용되는 OPPDIF code가 사용되었으며, 열역학적 물성치는 Chemkin-II, 전달물성치는 Transport package가 사용되었다. 상세 화학반응기구는 부분에혼합화염에 대해서 많이 검증되고 이용되고 있는 GRI-v3.0[5]을 이용하였다. 전체기압은 1 atm 으로 공급되었고 연료측(CH₄/Air)은 상온으로, 공기류측(Air/H₂O)은 공급되는 수증기가 충분히 기상(Vapor phase)로 존재할 수 있도록 450 K 으로 높여 공급되었다. 보다 정확한 소화농도를 얻기 위하여, 소염한계 근처에서 첨가되는 H₂O의 몰분율은 1.0×10⁻⁴ 간격으로 변화되었

* 부경대학교 안전공학과
** 한국기계연구원 극한기계부품연구부
† 연락처, cbob@pknu.ac.kr
TEL : (051)629-6472 FAX : (051)629-6463

다. 본 연구에서 사용되는 총괄 신장율(Global Strain Rate, a_g)[6]은 식(1)과 같이 정의 되고, 실제 화재상황을 충분히 잘 해상하는 총괄 신장율인 $a_g=50 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 계산이 수행되었다.

$$a_g = \frac{2(-V_O)}{L} \left(1 + \frac{V_F}{(-V_O)} \frac{\sqrt{\rho_F}}{\sqrt{\rho_O}} \right) \quad (1)$$

여기서 V 는 혼합기의 유속, ρ 는 혼합기의 밀도, 아래첨자 F 와 O 는 연료 및 공기류를 의미하며, L 은 노즐 간의 거리를 나타내며 전체조건에서 1.8 cm로 고정되었다.

복사에 지배적인 화학종 중의 하나인 H_2O 의 첨가에 따른 대항류 메탄부분예혼합화염의 화염구조 및 소화한계에 미치는 복사효과를 고려하기 위해서 두 개의 복사모델과 단일조건에서의 예측 성능이 평가되었다. 먼저, 복사에 의한 열손실이 고려되지 않은 단일조건(ADIA)과 간략화된 모델로서 화염 및 부근의 가스가 광학적으로 매우 얇아 복사에너지를 흡수하지 않고 단순 열손실만을 고려하는 가정이 적용된 Optically thin model (OTM)[7] 그리고 화염대에서의 복사에 의한 열손실 뿐만 아니라 재흡수 까지 고려할 수 되는 Weighted sum of gray gases model (WSGGM)[8]이 비교·검토 되었다. 이에 대한 자세한 수치계산 방법이나 지배방정식은 참고문헌을 참고하기 바란다.

본 연구에 앞서, 고려하는 화학반응기구의 적합성을 평가하기 위하여 기존의 실험연구[9]와의 비교검토를 수행하였다. Fig. 1(a)-(b)는 수증기가 첨가되지 않은 메탄부분예혼합화염에 서로 다른 복사모델을 적용하여 계산된 두 당량비(Φ) 조건에서의 화염구조를 정체면(Stagnation plane)을 기준으로 상대 도시한 것이다. 전체적으로 $\Phi=1.5$ 조건에서는 이중 화염구조(Double flames)가 관찰되고 화염폭이 상대적으로 넓게 분포되고 있으며 $\Phi=2.5$ 조건에서는 결합된 화염구조(Merged flames)를 보이며, 상대적으로 화염폭이 좁게 예측되었다. 두 조건 모두에서 복사효과를 고려하지 않은 ADIA 조건에서는 실험값에 비해 화염최고온도와 화염폭을 과대예측 하고 있으며, 복사효과를 고려한 OTM, WSGGM은 비교적 실험결과를 잘 추종하였다. 본 논문에는 도시하지 않았지만 질량기준으로 5%의 수증기가 첨가 된 조건에서는 복사효과에 기인하여 첨가하지 않은 조건보다 최고 화염온도는 낮고 화염폭은 좁게 예측 되었다. 그리고 이러한 조건에서 실험과 수치계산결과에서 약간의 차이가 발생하게 되는데 이러한 결과는 기존의 실험에서는 공기류측 노즐 입구에 분사기로 수증기를 첨가함

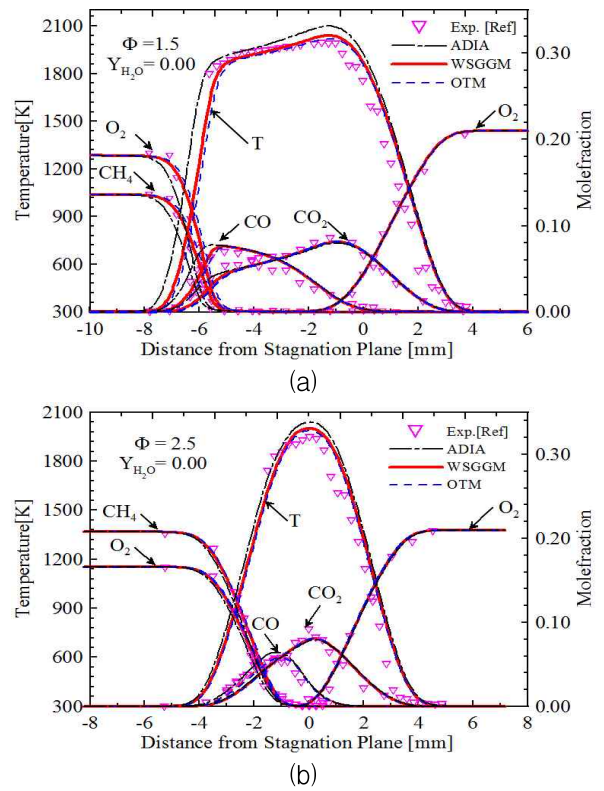


Fig. 1 Comparison of the computational results calculated by GRI-v3.0 mechanism and experimental result (Li and Williams [9]) at the fixed dilution ratio, $Y_{\text{H}_2\text{O}}=0.00$, with the different equivalence ratios (Φ); (a) $\Phi=1.5$, and (b) $\Phi=2.5$.

으로 인해 공급된 액상의 수증기가 기상으로 증발됨에 따른 증발잠열 효과에 의한 판단되며[9], 전체적으로 보았을 때는 본 연구를 수행하는데 있어서 고려된 GRI-3.0 반응기구가 실험의 결과를 충분히 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 2(a)-(b)은 수증기 첨가에 따른 메탄 부분예혼합화염의 거시적인 화염응답특성을 도시하였다. 전체적으로 두 당량비 조건 모두, 수증기 첨가량 증가에 따라서 화염 최고온도와 축방향 공간상에서 적분된 전체 열발생율은 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 잘 알려진 바와 같이 첨가되는 수증기에 의한 물리/화학적 효과에 기인하는 결과로 판단된다. 그리고 $\Phi=1.5$ 조건이 동일한 수증기 첨가량 조건에서는 $\Phi=2.5$ 조건보다는 높은 수준을 유지하고 있다.

복사모델의 예측성능에 있어서, 수증기 첨가량에 따른 ADIA의 예측 결과는 다른 복사모델에 비해서 높은 수준을 유지하고 있다. 반면에, OTM은 가장 낮은 값을 예측하고 있으며, WSGGM은 ADIA와 OTM의 중간수준을 유지하고 있다. 그리고, 낮은 수증기 첨가량에서는 OTM과 WSGGM의 차이가 미소하지만 수증기

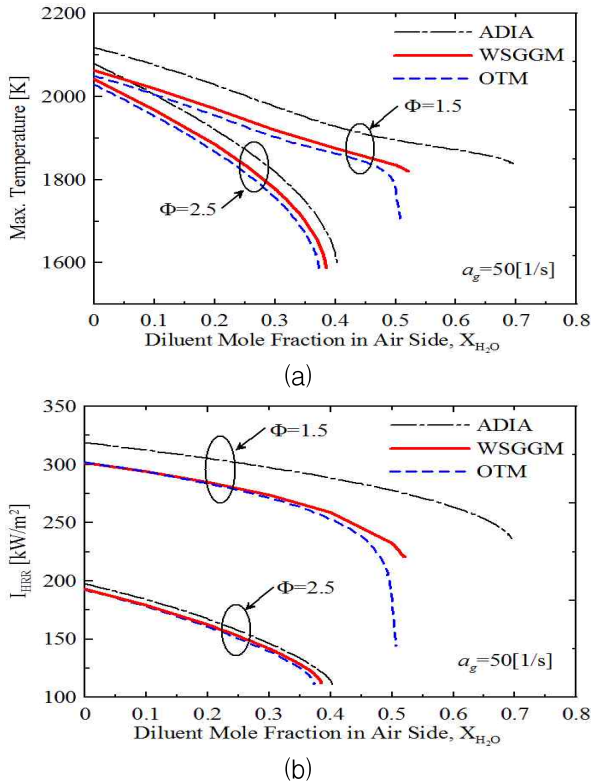


Fig. 2 Global Flame Responses evaluated by different radiation models at the fixed global strain rate, $a_g=50 \text{ s}^{-1}$, according to the dilution of water vapor in the heated oxidizer side as 450 K ; (a) Maximum Temperature, (b) Integrated Heat Release Rate.

첨가량이 증가하여 소화점에 가까워지게 되면 예측성능의 차이는 급격히 커지게 된다. 이러한 경향은 앞서 밝힌바와 같이 첨가되는 수증기가 복사열손실(Heat loss)에 주요한 화학종일 뿐만 아니라 복사된 열의 재흡수(Reabsorption)에도 주된 영향을 주는 화학종이기 때문에, 수증기 첨가량이 증가됨에 따라서 두 복사모델의 예측성능에 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Table 1에는 두 당량비 조건에서 서로 다른 복사모델을 고려한 조건에서의 소화농도를 나타내었다. 두 당량비 조건 모두 ADIA조건이 수증기 첨가에 의한 소화농도를 가장 높게 예측하고 있으며, WSGGM 그리고 OTM 순으로 높게 예측하고 있다. 그리고 $\Phi=1.5$ 조건의 소화농도가 $\Phi=2.5$ 보다 높게 예측되고 있는데, 이러한 경향은 앞서 Fig. 2에서 살펴 본 것과 같이 전체적인 화염강도가 $\Phi=1.5$ 에서 더 높기 때문으로 판단된다. 수증기가 첨가된 메탄부분예혼합화염에 미치는 복사효과를 좀 더 면밀히 검토하기 위하여 Fig. 3-4 에는 두 당량비 조건에서 공기류측에 수증기가 첨가된 조건에서의 화염구조를 정제면

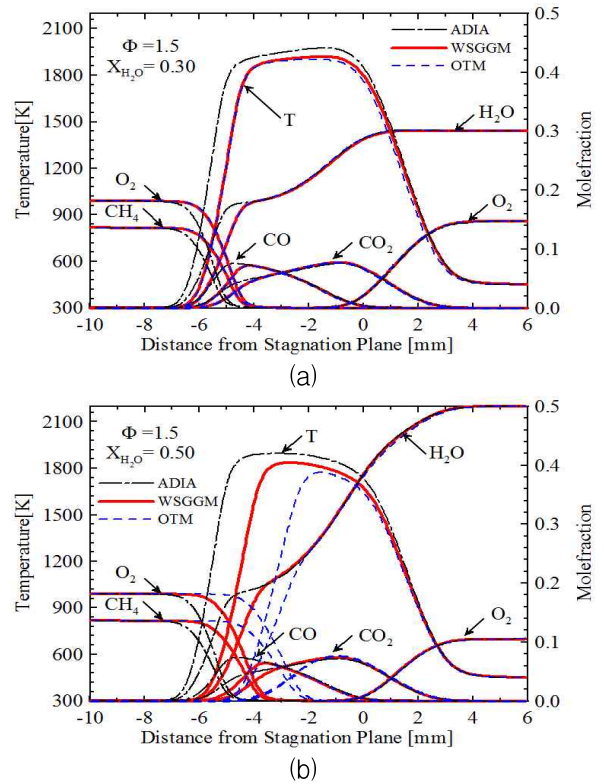


Fig. 3 The effects of radiation on the flame temperature and major species for the $\Phi=1.5$ of methane partially premixed flame diluted with water vapor in the air stream at the fixed global strain rate, $a_g=50 \text{ s}^{-1}$; (a) $X_{H_2O}=0.30$, (b) $X_{H_2O}=0.50$.

을 기준으로 상대 도시하였다. 먼저 Fig. 3(a)를 보면 공기류측에 수증기가 체적비율로 30% 첨가된 $\Phi=1.5$ 조건에서는 ADIA 조건이 두 복사모델 조건에 비해서 화염최고 온도와 화염폭을 과대 예측하는 것을 볼 수 있으며, OTM과 WSGGM은 화염최고온도의 미세한 차이를 제외하고 동일한 결과를 보여주고 있다. 반면에, 수증기가 50% 첨가된 Fig. 3(b)조건에서는 세 조건 모두 화염구조를 상이하게 예측하고 있으며, 복사모델에 따라서 큰 차이가 나타나지 않은 비예혼합화염의 반응영역(NPZ)과는 달리, 예혼합화염의 반응영역(RPZ)에서는 복사모델에 따라서 예혼합화염의

Table 1 Extinguishing concentration of counterflow methane partially premixed flame diluted with water vapor in the air stream.

Radiation Model	Extinguishing concentration of H_2O in the air stream (%)	
	$\Phi=1.5$	$\Phi=2.5$
ADIA	69.98	40.31
WSGGM	51.98	38.50
OTM	51.31	37.46

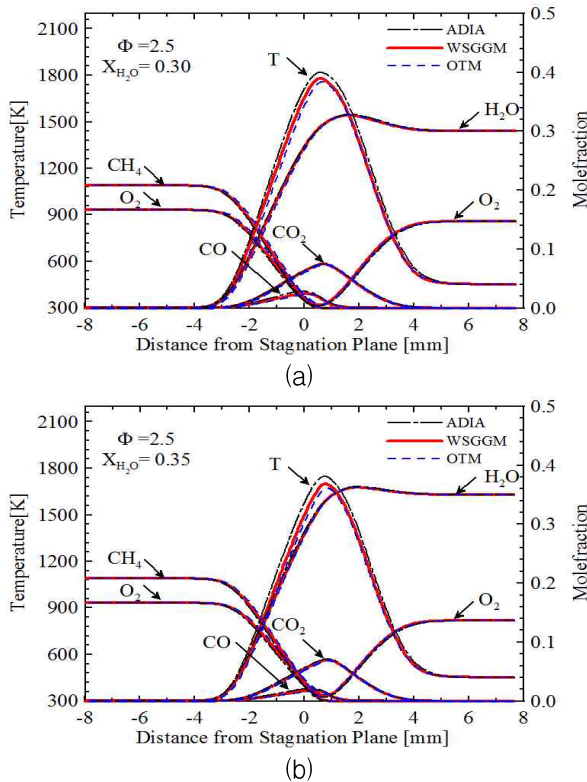


Fig. 4 The effects of radiation on the flame temperature and major species for the $\Phi=2.5$ of methane partially premixed flame diluted with water vapor in the air stream at the fixed global strain rate, $a_g=50 \text{ s}^{-1}$; (a) $X_{\text{H}_2\text{O}}=0.30$, (b) $X_{\text{H}_2\text{O}}=0.35$.

위치가 다르게 예측되고 있음을 알 수 있다.

본 논문에는 도시하지 않았지만, 예혼합화염의 위치가 상이하게 예측되는 이유는 과농한 부분 예혼합화염에서의 복사모델에 따른 화염전파속도의 예측성능의 차이에 기인하여 화염이 안정화되는 위치를 상이하게 예측하기 때문으로 판단된다. 이와는 달리, Fig. 4의 $\Phi=2.5$ 조건에서는 복사모델에 따라서 화염최고 온도와 화염폭이 다소 상이하게 예측되기는 하나 $\Phi=1.5$ 에 비하면 그 효과가 미미한 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 $\Phi=2.5$ 조건이 $\Phi=1.5$ 조건에 비해 동일한 수증기 첨가량 조건에서 화염 최고온도가 더 낮고, 고온영역($T \geq 1500 \text{ K}$)의 너비가 상대적으로 좁기 때문에 수증기 첨가에 따른 복사효과가 미소하게 나타난 것으로 판단된다.

결과적으로 수증기가 첨가된 메탄부분예혼합화염의 소화농도는 OTM과 WSGGM에서 큰 차이를 보이지 않았지만 국소 화염구조예측에 있어서는 첨가량에 따라 복사모델에 따른 예측성능의 차이를 보이는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : 2010-0012480).

참고 문헌

- [1] A.M. Lentati and H.K. Chelliah, "Dynamics of Water Droplets in a Counterflow Field and Their Effect on Flame Extinction", *Combust. Flame*, Vol. 115, 1998, pp. 158-179.
- [2] H.K. Chelliah, "Flame Inhibition/Suppression by Water Mist : Droplet Size/Surface Area, Flame Structure, and Flow Residence Time Effects", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, 2007, pp. 2711-2719.
- [3] W.M. Pitts, J.C. Yang, R.A. Bryant, M. Huber, L.G. Blevins, "Characterization and Identification of Super-Effective Thermal Fire Extinguishing Agents - Final Report, NGP Project 4 C/1/890", *Technical Note 1440*, National Institute of Standards and Technology, 2006.
- [4] S.K. Aggarwal, "Extinction of Laminar Partially Premixed Flames", *Progr. Energy Combust. Sci.*, Vol. 35, 2009, pp. 528-570.
- [5] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner, Jr., V.V. Lissianski, and Z. Qin, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [6] K. Sheshadri and F.A. Williams, "Laminar Flow between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, 1978, pp. 251-253.
- [7] Y. Ju, H. Guo, K. Maruta, and F. Riu, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Nonadiabatic Stretched Methane-air Premixed Flames", *J. Fluid Mech.*, Vol. 342, 1997, pp. 315-334.
- [8] O.J. Kim, J.P. Gore, R. Viskanta, and X.L. Zhu, "Prediction of self-absorption in opposed flow diffusion and partially premixed flames using a weighted sum of gray gases model (WSGGM)-based spectral model", *Numer. Heat Transfer Part A-Appl.*, Vol. 44, 2003, pp. 335-353.
- [9] S.C. Li and F.A. Williams, "NO_x Formation in Two-Stage Methane-Air Flames", *Combust. Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 399-414.