

상호작용하는 대향류 메탄 및 수소 예혼합화염에서 당량비 조건에 따른 상호작용 모드 변화

박지웅* · 오창보**

Interaction Mode Change According to the Equivalence Ratios in the Interacting Methane and Hydrogen Counterflow Premixed Flames

Ji-Woong Park*, Chang Bo Oh**

ABSTRACT

The interaction between methane and hydrogen premixed flames with the different equivalence ratio and global strain rate was investigated numerically in one-dimensional counterflow field. The OPPDIF code and GRI-v3.0 were used to simulate the interacting flames. Overall trends in the maximum heat release rates of CH₄- and H₂-side flame were examined with the variation of a_g . The interaction mode of the flames were classified according to the equivalence ratios and Lewis numbers of each flame and global strain rate.

Key Words : Flame-flame Interaction, Interaction mode, Lewis number, Strain rate,

상호작용하는 화염에 관한 연구는 오래전부터 많은 연구자들에 의해 관심을 받아 왔다[1-8]. 이러한 연구들 중에는 비교적 간단한 1차원 대향류 연소장에서 형성되는 두 개의 화염간의 상호작용을 검토한 예가 많다. 대향류 연소장에서 두 화염간의 상호작용은 각 화염의 연료성분, 당량비조건 그리고 스트레인을 변화에 따른 화염거동에 대한 고찰을 통해 검토가 많이 이루어 졌으며 상호작용하는 화염은 단일화염과는 상이한 화염 거동을 보인다고 알려져 있다.

Sobrab 등[1]은 메탄과 부탄연료에서 기인한 두 개의 대향류 예혼합화염에 대해 가연한계 및 하류 상호작용모드에 대하여 검토 한 바 있다. Sato 등[2]은 대향류 유동장에서 형성되는 두 개의 대칭화염에 대해서 Le 수의 변화 및 속도구배에 따른 화염의 소화특성에 대하여 검토하여 Le 수의 차이가 상호작용에 중요한 인자로 작용함이 밝혔다. Law와 Sung[3]은 대향류 유동장에서 동일한 당량비조건을 갖은 대칭화염에 대해서 Le 수 변화와 스트레인을 변화가 화염에 미치는 영향을 검토한 바 있다. 이 연구에서는 $Le < 1$ 인 조건에서는 스트레인을 증가할수록 최고 열

발생률(Maximum Heat Release Rate; MHRR)이 증가하며, 반대로 $Le > 1$ 인 조건에 대해서는 스트레인을 증가에 따라서 MHRR값은 감소함을 확인하였다.

메탄과 수소화염간의 상호작용을 검토한 연구로서, Oh와 Lee[7]는 대향류 연소장에서 각각 이론혼합비 조건을 갖는 메탄 및 수소 예혼합화염간의 상호작용에 대해서 검토를 수행하였다. 이 연구에서는 메탄화염의 가연한계가 확장되어 높은 스트레인을에서도 소멸되지 않으며, 비교적 높은 수준의 열발생률을 보이는 것을 확인하였고, 총괄 스트레인을에 대한 국소 스트레인을의 추종성을 검토하였다. Ha 등[4]은 메탄과 질소로 희석된 수소 예혼합화염간의 상호작용에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서는 각 연료류의 조성에 따른 소멸한계와 화염구조를 검토하였다. 또한 본 연구그룹은 기존연구[8]를 통해 상호작용하는 메탄 및 수소 부분예혼합화염의 거시적인 화염 응답거동을 검토한 바 있다. 이 연구에서는 수소측 당량비 조건이 과농해질 경우 충분히 산화되지 못한 H₂ 성분이 정체면을 넘어가 메탄측 화염의 열발생율에 주요한 화학종인 H₂O의 생성을 촉진시켜 메탄측 열발생율을 증가시키는 것을 확인하였다. 반대로, 메탄측 당량비 조건을 증가시키게 될 경우는 메탄화염면이 정체면을 넘어 수소측에 위치하여 음의 전파속도(Negative flame speed)를 가지게 됨을 확인하였다. 선행 연구에서 볼 수 있듯이 메탄과 수소 예혼합화염

* 부경대학교 안전공학과

† 연락처, E-mail : cboh@pknu.ac.kr

Tel : (051)629-6472, Fax : (051)629-6463

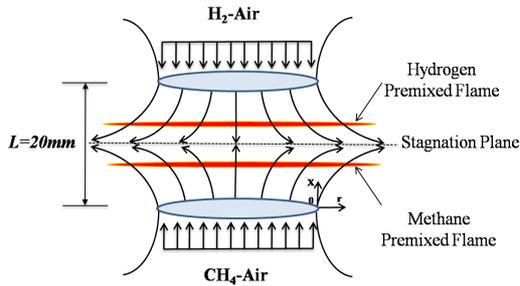


Fig. 1 Schematic diagram of interacting counterflowing premixed methane and hydrogen flames.

간의 상호작용 연구는 최근에 많이 진행되고 있지만 아직까지 양쪽 화염의 다양한 당량비조건에 대해서는 충분히 고려하지 못한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 대향류 연소장에서 형성되는 메탄과 수소 예혼합화염을 대상으로 각 화염의 당량비 조건을 다양하게 변화시키면서 보이게 되는 화염의 거동과 상호작용 모드를 고찰하였다.

본 연구에서는 두 화염간의 상호작용을 검토하기 위하여 Fig. 1에서 보이는 대향류 유동장에서 형성되는 두 개의 예혼합화염간의 상호작용을 검토하였다. 1차원 화염에 대한 수치계산을 위해 O PPDIF 코드[9]를 이용하였다. 연료로는 대표적인 탄화수소계 연료인 메탄과 최근 청정에너지로서 많은 관심을 받고 있는 수소연료를 사용 하였다.

화학반응 메커니즘으로는 수소와 메탄의 연소 반응을 고려할 수 있는 GRI-v3.0[10]을 이용하였다. 이 반응기구는 53개의 화학종과 325개의 화학반응으로 구성되어 있다.

화염면 신장과 두 화염간의 상호작용 정도를 나타내기 위한 파라메타로서 다음과 같이 정의되는 총괄 스트레인을(Global strain rate; a_g)[11]을 이용하였다.

$$a_g = \frac{2V_U}{L} \left(1 + \frac{V_L \sqrt{\rho_L}}{V_U \sqrt{\rho_U}} \right) = \frac{2V_r V_L}{L} \left(1 + \frac{1}{V_r} \frac{\sqrt{\rho_L}}{\sqrt{\rho_U}} \right) \quad (1)$$

여기서 V 는 혼합기의 유속, ρ 는 혼합기의 밀도, L 은 노즐사이의 간격을 의미하며, 아래첨자 U 와 L 은 각각 수소혼합기 및 메탄혼합기를 나타낸다. 또한 V_r 은 두개의 혼합기 유속간의 비로써 V_U/V_L 와 같이 정의된다.

Table 1 Properties of mixtures

Case	ϕ	Lewis Number ($Le = \alpha/D$)			
		CH ₄ mixture		H ₂ mixture	
		D _{CH₄}	D _{O₂}	D _{H₂}	D _{O₂}
Lean Condition (L)	0.5	0.973	1.102	0.357	1.474
	0.7	0.966	1.103	0.377	1.584
Stoichiometric Condition (S)	1.0	0.956	1.105	0.399	1.728
Rich Condition (R)	1.3	0.947	1.107	0.414	1.825
	1.5	0.941	1.108	0.421	1.884
	2.0	0.928	1.111	0.430	2.001
	4.0	0.883	1.119	0.424	2.229

두 노즐의 간격은 2cm로 고정하였으며, 양측 노즐으로 공급되는 혼합기의 온도는 300K으로 일정하게 하였다.

복사효과를 포함하여 검토했던 예비연구를 통해서 본 연구에서 고려하고 있는 스트레인을 영역에서는 복사효과가 영향이 거의 없기 때문에 여기서는 복사효과는 고려하지 않았다.

Table 1은 본 연구에서 고려하고 있는 양측 연료의 다양한 당량비(ϕ) 조건에서의 Le 수를 나타내고 있다. Le 수를 결정할 때는 연료-공기 혼합조성에서 부족한 화학종(Deficient species)의 물질확산도[12]를 이용하여 계산하였다. 메탄과 수소연료의 경우는 일반적으로 당량비 조건이 1보다 작게 되면 Le 수 또한 1보다 작게 되고, 반대로 당량비조건이 1보다 큰 과농조건에서는 Le 수가 1보다 크게 된다. 또한, 당량비가 1인 조건에서는 부족한 화학종을 연료로 보느냐 산소로 보느냐에 따라서 2가지 값으로 표현될 수 있다.

서로 다른 당량비조건을 가지며 상호작용하는 메탄 및 수소 예혼합화염을 검토하기 위해서 우선 메탄 및 수소측 화염의 최대 열발생률을 검토하였다. 양측의 당량비조건이 각각 희박, 이론혼합비, 과농인 3경우를 모두 고려하여 검토하였다.

Fig. 2는 메탄측 MHRR의 경향을 총괄 스트레인의 변화에 대해서 도시화 한 것이다. 양측 당량비조건을 나타내기 위해 영문 대문자 L, S 및 R을 사용하였는데, 여기서 L은 희박조건, S는 이론혼합비조건, R은 과농조건을 의미하며 그 뒤에 오는 숫자는 당량비값을 나타낸다. 또한 Var은 당량비조건을 다양하게 변화시킨 것을 의미한다.

Fig. 2 (a)는 메탄측이 희박(L0.7)이고 수소측은 희박(L0.7), 이론혼합비(S) 및 과농(R1.3)인 경우에 대한 메탄측 MHRR 경향을 보여주고 있다. 전체적으로 메탄측 MHRR은 총괄 스트레인을 증가에 따라서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 고정된 스트레인율에서는 메탄측 MHR R은 수소측 당량비조건이 희박에서 과농으로 변

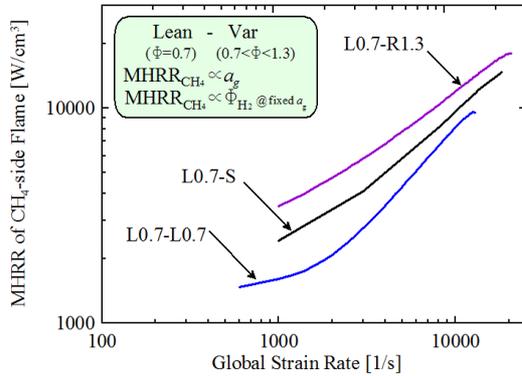
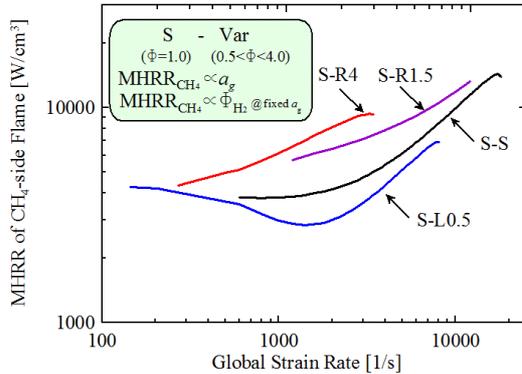
(a) MHR of the CH₄-side flame at Lean-Var(b) MHR of the CH₄-side flame at S-Var

Fig. 2 Maximum heat-release rates evaluated at the methane flame sides at different equivalence ratios as functions of the global strain rate.

화합에 따라 점차 증가한다.

Fig. 2 (b)는 메탄측은 이론혼합비로 공급되고 수소측은 희박(L0.5), 이론혼합비(S), 과농조건(R1.5)으로 경우에 대한 메탄측 MHRR 변화를 보여주고 있다. S-L0.5의 낮은 스트레인을 제외하면 메탄측이 희박인 Fig. 2 (a)와 유사하게 전체적으로 총괄 스트레인의 증가에 따라 메탄측 MHRR은 증가하는 경향을 보인다. 또한, 고정된 스트레인율에서는 수소측 당량비가 점차 과농으로 공급될수록 메탄측 MHRR도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 기존 연구 결과[8]를 통해 보고된 바와 같이 수소혼합기를 과농으로 공급하게 되면 H₂가 충분히 산화되지 못하고 정체면을 넘어 메탄측으로 넘어오게 된다. 이 과정을 통해 메탄측 화염의 열발생에 중요한 H₂O의 생성을 촉진시키게 되어 결과적으로 메탄측 열발생을 증가시키기 때문이다.

Fig. 2 (b)의 S-L0.5 조건은 낮은 스트레인율 영역에서는 메탄측 MHRR이 점차 낮아진 이후에 $a_g \approx 1500$ [1/s] 이후 다시 증가하는 경향이 나타나게 되는데, 이러한 경향을 통해 메탄측 화염

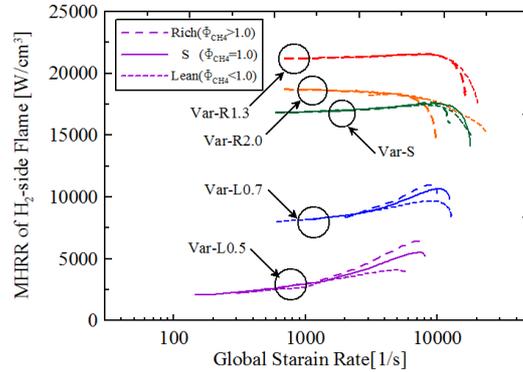


Fig. 3 Maximum heat-release rates evaluated at the hydrogen flame sides at different equivalence ratios as functions of the global strain rate.

이 받는 상호작용 경향을 두 가지로 구분하여 설명할 수 있다. 먼저 충분히 낮은 스트레인율 영역에서는 두 화염이 충분히 멀리 떨어져 있기 때문에 메탄-공기 혼합기 자체특성의 영향을 많이 받게 된다. Table 1의 Le 수와는 달리 Law와 Sung[3]의 연구에서 알려진 바와 같이 메탄화염은 당량비 1.0에서의 Le 수가 1보다 크다고 본다면 스트레인율 증가에 따라 MHRR이 점차 감소되는 경향은 통상적인 $Le > 1$ 의 조건을 갖는 메탄화염의 특성으로 이해될 수 있다. 이후 점차 스트레인율을 높이게 되면 두 화염면의 간격이 점차 좁아지게 되며 수소측 화염에서 생성되는 미연 H₂ 화학종과 활성 라디칼 등이 메탄측으로 전달되어 메탄측 열발생률에 영향을 주게 되는 수소화염측과의 상호작용 영향을 받게 된다.

Fig. 3은 수소측 MHRR의 경향을 총괄 스트레인율의 변화에 따라 도시한 것이다. 수소측 MHRR의 경향은 수소측 조건이 $\phi \leq 1.3$ 일 경우에는 총괄 스트레인율의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인 후 소염점에 가까워지면서 급격히 감소하게 된다. 그러나 수소측 조건이 $\phi \geq 2.0$ 인 경우에는 메탄측 당량비 조건에 상관없이 총괄 스트레인율의 증가에 따라 수소측 MHRR은 미소하게 감소하는 경향을 보인다. 잘 알려진 바와 같이 $Le < 1$ 의 조건에서는 열발생률이 스트레인율 증가에 따라 증가하게 되고, 반대로 $Le > 1$ 인 조건에서는 열발생률은 스트레인율 증가에 따라 감소하게 된다[13]. 따라서 수소측 MHRR은 수소화염측의 당량비 조건과 그에 따른 Le 수에 대한 기존의 열발생률 경향과 잘 일치하고 있다. 그러나, 수소측 조건이 $\phi < 1.0$ 인 경우에는 스트레인율이 점차 증가함에 따라 메탄측 당량비가 증가하면 수소측 MHRR도 증가하는 경향을 보이고 있다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : 20110004602).

참고 문헌

- [1] S. H. Shorab, Z. Y. Ye, C. K. Law, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speeds", Proc. Combust. Inst. Vol. 20, 1984, pp. 1957 - 1965.
- [2] J. Sato, "Effects of Lewis Number on Extinction Behavior of Premixed Flames in a Stagnation Flow", Proc. Combust. Inst. Vol. 19, 1982, pp. 1541-1548.
- [3] C. K. Law and C. J. Sung, "Structure, Aerodynamics, and Geometry of Premixed Flamelets", Progr. Energy Combust. Sci., Vol. 26, 2000, pp. 459-505.
- [4] J. S. Ha, J. Park, T. M. Vu, O. B. Kwon, T. H. Kim, J. H. Park, J. H. Yun, S. I. Keel, "A Study on Flame Interaction between Methane/Air and Nitrogen-Diluted Hydrogen-Air Premixed Flames", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 35, 2010, pp. 6992-7001.
- [4] S. H. Chung, J. S. Kim, C. K. Law, "Extinction of Interacting Premixed Flames: Theory and Experimental Comparisons", Proc. Combust. Inst., Vol. 21, 1986, pp. 1845 - 1851.
- [5] S. D. Lee and S. H. Chung, "On the Structure and Extinction of Interacting Lean Methane/Air Premixed Flames", Combust. Flame, Vol. 98, 1994, pp. 80 - 92.
- [6] Z. Cheng, J. A. Wehrmeyer, R. W. Pitz, "Lean or Ultra-lean Stretched Planar Methane/Air Flames", Proc. Comb. Inst. Vol. 30, 2005, pp. 285-29.
- [7] C. B. Oh and E. J. Lee, "Numerical Study of Interaction between Hydrogen and Hydrocarbon Flames", J. KOSOS, Vol. 25, 2010, pp. 12 - 8.
- [8] J. -W. Park, C. B. Oh, "Flame Structure and Global Flame Response to the Equivalence Ratios of Interacting Partially Premixed Methane and Hydrogen Flames", Int. J. Hydrogen Energy, 2012, In press.
- [9] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, and F. M. Rupley, OPPDIF: A FORTRAN Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames, Sandia Report, 1997, SAND 96-8243.
- [10] G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldernberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner, Jr., V. Kissianski, and Z. Qin, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [11] K. Sheshadri and F. A. Williams, "Laminar Flow between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number", Int. J. Heat Mass Trans., Vol. 21, 1978, pp. 251-253.
- [12] <http://navier.engr.colostate.edu/>.
- [13] C. K. Law, Combustion Physics, 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge, 2006.