

에지화염의 자기 진동

박 정* · 윤성환** · 정용호* · 이원준* · 권오봉

Self-excitation of Edge Flame

Jeong Park*, Sung Hwan Youn**, Yong Ho Chung*, Won June Lee*, Oh Boong Kwon*

ABSTRACT

Self-excitations of edge flame were studied in laminar lifted free- and coflow-jet as well as counterflow flames diluted with nitrogen and helium. The self-excitations, originated from variation of edge flame speed and found in the above-mentioned configurations, are discussed. A newly found self-excitation and flame blowout, caused by the conductive heat loss from premixed wings to trailing diffusion flame are described and characterized in laminar lifted jet flames. Some trials to distinguish Lewis-number-induced self-excitation from buoyancy-driven one with $O(1.0 \text{ Hz})$ are introduced, and then the differences are discussed. In counterflow configuration, important role of the outermost edge flame in flame extinction is also suggested and discussed.

Key Words : Buoyancy, Extinction, Heat loss, Lewis number, Self-excitation

에지화염은 확산화염과 예혼합화염의 중간 형태로 화염 선단부가 과농 및 희박 예혼합화염과 확산화염 꼬리로 구성되어 삼중점에서 모이지기 때문에 에지화염 전파는 당량 혼합비의 궤적을 따르게 된다. 따라서 에지화염 속도와 국부 유동속도가 균형을 이루는 위치에서 부상 높이가 결정되는 안정화 기구를 갖게 된다.¹⁻³ 열손실, 루이스수, 부력, 에지화염 선단에서의 연료농도구배, 화염스트레치 등이 변하는 경우 에지 화염은 새로운 안정화 위치를 요구하게 되므로 화염은 자기 진동을 할 수도 있으며, 현재까지 화염 자기 진동은 열손실^{4,5}, 부력에 의한 화염 선단부 부분예혼합기의 열축적^{6,7}, 루이스수에 의한 진동⁸⁻¹⁰, flame flicker^{11,12}에 의한 진동이 알려져 있다.

본 연구에서는 현재까지 알려진 위의 진동들에 대해 그간 연구를 근간으로 각각의 진동들에 대해 수행된 특성화 작업과 진동 기구들을 소개하고, 각 진동들의 상호작용에 의해 나타나는 진동들을 구분하려는 노력들을 소개하고자 한다. 특히 루이스수에 의한 진동과 열단 열축적에 의한 부력에 의한 진동은 $O(1.0 \text{ Hz})$ 로 같은 크기를 갖기 때문에 실험적으로 구분하여 차이점을 이해하기 매우 힘들며 기존 연구자들에 의해 수치해석 및 이론적 접근⁸⁻¹⁰에 의해서만 거동 특성

을 파악하고 있어 실험적 검증이 필요한 상황이며 그간 이러한 실험적 노력을 본 연구에서 소개하고자 한다. 대향류화염의 최외각 화염선단 역시 에지화염을 갖고 있음에도 불구하고 화염 소화에 있어서 에지화염 거동이 화염 소화에 미치는 영향이 간과되어 왔다.^{13,14,15} 본 연구에서는 이러한 최외각 에지 화염의 화염 소화에 있어서 중요한 역할을 또한 논의하고자 한다.

Fig. 1은 자유제트 프로판 부상화염을 질소로 희석한 경우의 화염 안정화 선도이다. 영역 I은 안정된 부상화염, 영역 II는 예혼합화염부로부터 꼬리확산화염으로의 열손실에 의한 자기진동으로 0.1 Hz 이하의 주파수를 가지며, 영역 III은 열손실에 의한 자기진동과 $O(10.0 \text{ Hz})$ 의 flame flicker에 의한 자기진동, 영역 IV에서는 화염 선단 열축적에 의한 부력에 의한 진동으로 $O(1.0 \text{ Hz})$ 를 갖는다.

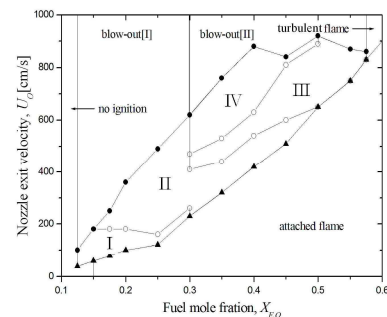


Fig. 1 Flame stability map with a function of fuel mole fraction and nozzle exit velocity with $D=1.0 \text{ mm}$.

* 부경대학교 기계공학과
 ** Hokkaido Univ., Div. of Aerospace Engineering
 † 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr
 TEL : (051)629-6140 FAX : (051)-629-6126

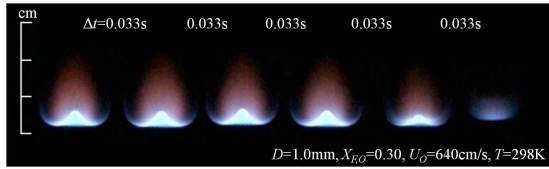


Fig. 2 Flame blowout caused by significant heat loss.

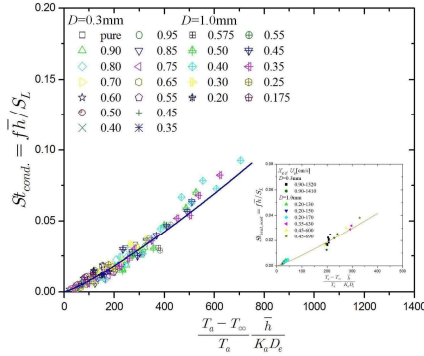


Fig. 3 Characterization of heat-loss-induced self-excitation with a functional dependency of Strouhal number on related physical parameters.

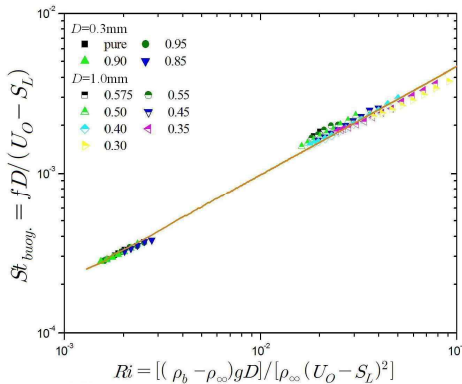


Fig. 4 Characterization of buoyancy-induced self-excitation with a functional dependency of Strouhal number on Richardson number.

한편 Blowout[I]은 기존에 관찰된 화염날림(Fig. 2a)을 의미하며 Blowout[II]는 부상 높이는 거의 변화없이 꼬리 확산화염이 움츠러들면서 화염 소화가 나타나는 경우(Fig. 2b)를 나타낸다. 열손실에 의한 자기진동과 화염날림은 항온항습 조건에서 온도를 낮춤에 따라 진동주파수는 증가하고 진폭도 증가하며 화염 날림이 촉진됨을 확인하였다. 열손실에 의한 자기진동은 스트라우할수에 대해 열손실인자, 무차원 부상높이, 칼로비치수, 무차원 노즐직경에 의해 잘 묘사됨을 Fig. 3으로부터 알 수 있다. 또한 flame flicker에 의한 부력이 유발이 유발하는 자기 진동 역시 Fig. 4에 보이는 바와 같이 스트라우할수와 리차드슨수에 의해 잘 묘사됨을 알 수 있다. 한편 영역 IV에서

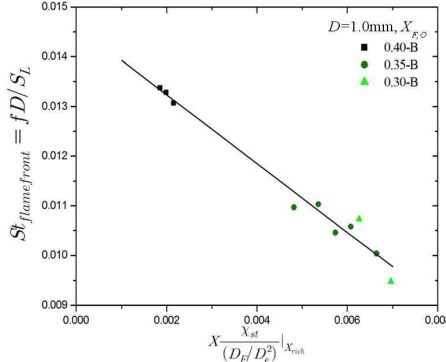
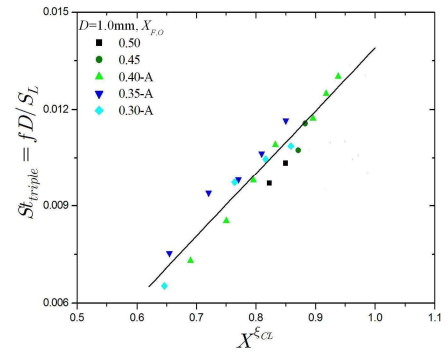


Fig. 5 Characterization of buoyancy-driven self-excitation; (a) triple flame propagation and (b) flame front propagation.

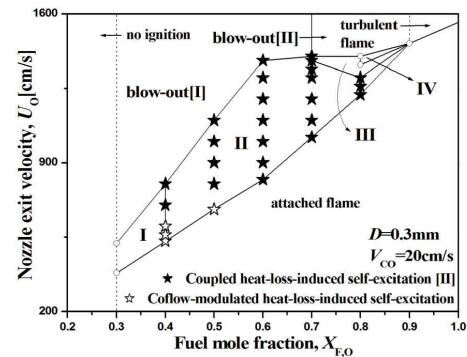


Fig. 6 Flame stability map on the basis of heat-loss-related self-excitations in laminar lifted coflow-jet flames; $V_{CO}=20$ cm/s, $D=0.3$ mm.

나타나는 O(1.0 Hz)의 자기 진동은 수평 분사로부터 선단 열축적 효과를 제거하는 기법을 사용하여 화염 진동이 사라짐을 확인하였고 따라서 선단 열축적에 의한 부력에 의한 진동임을 확인하였고 Fig.5에 나타난 바와 같이 삼지화염 전파와 화염 선단 전파에 대해 각기 잘 묘사됨을 알 수 있다.

동축류 제트 층류 부상화염에서 기존 연구에서 열손실에 의한 자기진동을 관찰한 예가 없어 확장 연구를 수행하였고 Fig. 6에 나타난 바와 같이 열손실에 의한 자기 진동은 동축류 공기류 불어주는 경우 진동주파수가 감소하여 억제되고

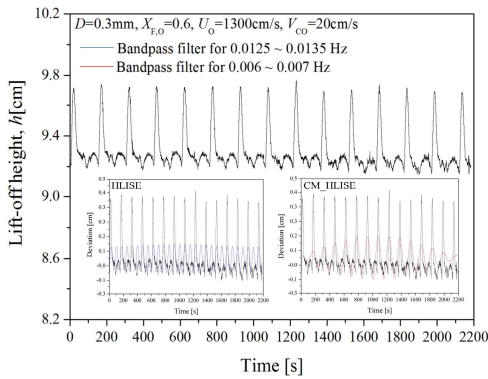


Fig. 7 Temporal lift-off height at $X_{F,O}=0.6$, $U_o=1300$ cm/s for $V_{CO}=20$ cm/s (regime II).

진폭 역시 급격히 줄어들어 0.01 Hz보다도 작은 주파수가 나타나게 된다. 실제로 동축류 공기 속도가 45 cm/s 이상 되며 열손실에 의한 자기 진동은 사라지게 된다. 한편 Fig. 7에 나타난 바와 같이 동축류에 의해 열손실에 의한 자기 진동이 억제되는 임계부상높이가 존재함을 알았다. 따라서 임계부상 높이가 이하에서는 0.001 Hz 크기의 주파수 (CM_HLISE)와 0.01 Hz 크기의 주파수가 공존하게 되며 임계 부상높이 이상에서는 다시 0.01 Hz 크기의 주파수로 복원되는 CF_HLISE가 나타나게 된다.

한편, 전술된 바와 같이 선단열축적에 의한 부력에 의한 진동과 루이스수에 의한 진동은 $O(1.0$ Hz)의 유사한 크기를 가지므로 이를 구분해 내기는 매우 어렵고 열손실에 의한 자기진동이 나타나면 이러한 진동 주파수는 상당히 억제되어 실험적으로 재현하기가 매우 어렵다. 따라서 수평 분사를 통해 선단 열축적에 의한 부력 효과를 제거하고 DC 전기장을 인가하여 화염을 노즐 근처에 부착시켜 열손실에 의한 자기 진동을 억제하는 기법을 사용하여 부력에 의한 진동과 루이스수에 의한 진동을 구분하는 실험을 수행하였다. Fig. 8에 나타내는 바와 같이 부력에 의한 진동과 루이스수에 의한 진동은 phase diagram에 나타나듯이 상이한 모드를 나타내는 것을 알 수 있었다.

한편 대향류 비에 혼합 화염의 최외각의 화염은 부분예혼합 구조를 갖고 있으므로 예지화염을 갖

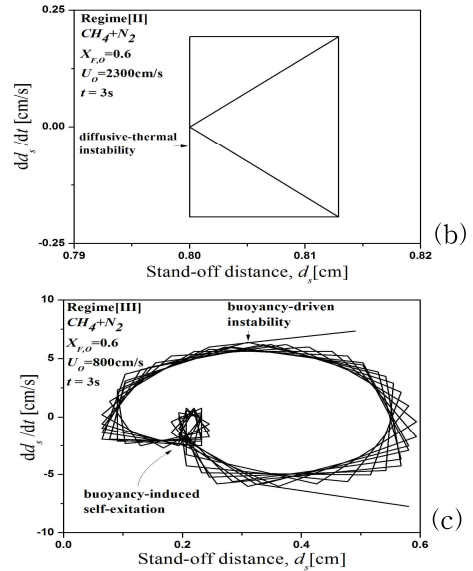
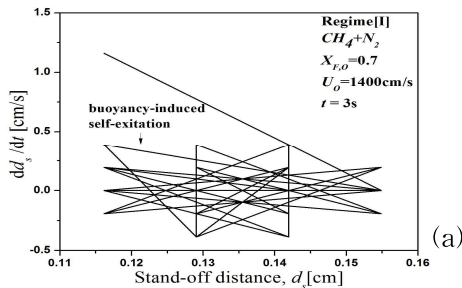


Fig. 8 Phase diagrams of stand-off distance and displacement velocity at various self-excitation modes.

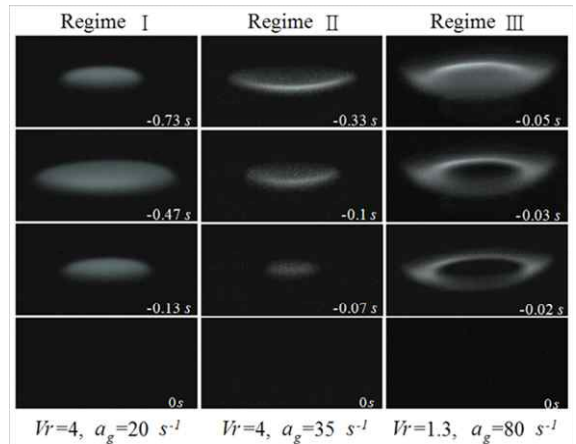


Fig. 9 Distinct flame extinction modes in counterflow nonpremixed flame.

게 된다. 따라서 전술한 바와 같이 열손실, 루이스수, 부력에 의해 예지화염 전파속도는 영향을 받게 되며 따라서 예지화염의 진동 역시 나타날 수 있고 이러한 진동들은 화염소화에도 영향을 미치게 된다. 1997년 Maruta 등¹³은 14mm 노즐을 사용하여 미소중력에서 저신장을 화염소화는 복사 열손실에 기인하고 고신장을 화염소화는 화염 스트레치에 기인함을 발표한 바 있다. 그러나, Tien 연구 그룹에서 수치레이율이 $2 s^{-1}$ 인 경우 화염두께는 2-3 cm가 될 수 있음을 보였고 따라서 대향류화염에서 다차원효과를 배제하고 1차원 화염구조를 갖기 위해서는 적어도 20 cm 이상에서 실험이 수행되어 함을 보였고¹⁴, 스킵트를 이용하여 총길이가 24 cm인 버너를 사용하여 저신장과 고신장을 화염이 모두 화염 구멍을 통해 소화되는 것을 보인 바 있다¹⁵. Park 등¹⁶⁻¹⁸은 1

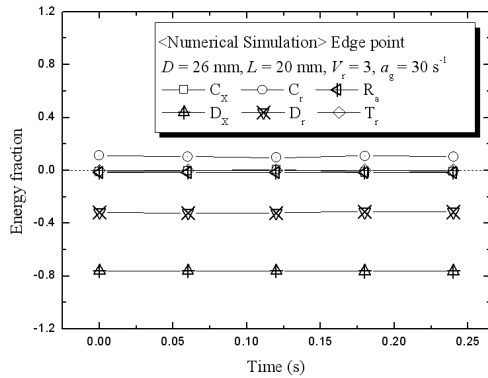


Fig. 10 Comparison of energy fraction for each terms in energy equation.

8, 26, 45 mm의 버너 직경을 사용하여 저신장울에 의한 화염 소화는 반경방향으로의 전도열손실이 복사열손실에 비해 훨씬 우세하게 기여함을 실험 및 수치해석을 통해 보였다. 실제로 저신장울의 화염 소화는 에지화염 진동 혹은 움츠러들면서 발생하고 고신장울의 화염소화는 화염구멍을 통해 발생함을 Fig. 9에 잘 나타내고 있다. 또한 Fig. 10의 수치해석에서도 보이는 바와 같이 최외각 에지 근처에서 복사열손실에 비해 반경방향 전도열손실이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 또한 반경방향 대류항은 최외각 에지에서 양의 값을 갖는 것을 또한 알 수 있다. 이러한 상황에서 반경 방향 전도 열손실이 과다하면 에지화염 속도는 감소하여 중심부로 화염이 움츠러들고 반경방향 대류열전달에 의해 다시 에지화염은 화염 전파속도가 증가하여 다시 화염은 확장하게 되는데 이것이 화염 소화 직전까지 자기 진동을 유발한다. 한편 이러한 진동은 루이스수에 의한 진동으로 판단되며 부력이 루이스수에 의한 진동 주파수를 억제하여 $O(0.1 \text{ Hz})$ 의 주파수가 나타난 것으로 판단된다. 이것을 입증하기 위해 부력을 억제하는 기법을 개발하였고 스트레인율은 4.5 s^{-1} 까지 화염의 위치가 속도비 1.0인 경우에도 화염이 버너 사이 중심에 위치하는 것을 확인하였고 flame flicker에 의한 $O(10.0 \text{ Hz})$ 가 나타나지 않는 점으로부터 부력을 제거할 수 있는 개발된 기법이 유용함을 알았고 이것을 이용하여 현재 실험을 진행 중에 있다. 이 경우 진동주파수는 $O(1.0 \text{ Hz})$ 가 됨을 확인하였고 따라서 부력이 루이스수에 의한 진동을 억제함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 일반연구자지원사업의 일환 (2010-0021916)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] S.H. Chung, B.J. Lee, *Combust. Flame* 86 (1991) 62-72.
 [2] B.J. Lee, S.H. Chung, *Combust. Flame* 109 (1997) 163-172.
 [3] S.H. Chung, *Proc. Combust. Inst.* 31 (2007) 877-892.
 [4] S.H. Yoon, J.K. Han, J. Park, J.H. Yun, S.I. Keel, *Combust. Flame* 158 (2011) 1960-1969.
 [5] S.H. Yoon, J. Park, O.B. Kwon, J.H. Yun, S.I. Keel, J.S. Kim, D.S. Bae, *Fuel* 91 (2012) 51-60.
 [6] S.H. Won, S.H. Chung, M.S. Cha, B.J. Lee, *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 2093-2099.
 [7] S.H. Won, J. Kim, M.K. Shin, S.H. Chung, O. Fujita, T. Mori, J.H. Choi, K. Ito., *Proc. Comb. Inst.* 29 (2002) 37-44.
 [8] M. Short, Y. Liu, *Combust. Theory Model.* 8 (2004) 425-447.
 [9] E. Fernández, V. Kurdyumov, A. Liñán, *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 2125-2131.
 [10] V.N. Kurdyumov, M. Matalon, *Proc. Combust. Inst.* 31 (2007) 909-917.
 [11] B.M. Cetegen, K.D. Kasper, *Phys. Fluids* 8 (1996) 2974-2984.
 [12] V.R. Katta, W.M. Roquemore, A. Menon, S.Y. Lee, R.J. Santora, T.A. Litzinger, *Proc. Combust. Inst.* 32 (2009) 1343-1350.
 [13] Maruta K, Yoshida M, Guo H, Ju Y, Niioka T. *Combust. Flame* 1998; 112: 181-187.
 [14] Frate FC, Bedir H, Sung CJ, T'ien JS. *Proc. Combust. Inst.* 2000; 28: 2047-2054.
 [15] Han B, Ibarreta AF, Sung CJ, T'ien JS. *Proc. Combust. Inst.* 2005; 30: 527-535.
 [16] Park JS, Hwang DJ, Park J, Kim JS, Kim SC, Keel SI, Kim TK, Noh DS. *Combust. Flame* 2006; 146: 612-619.
 [17] Oh CB, Hamins A, Bundy M, Park J. *Combust. Theory Modeling*, 2008; 12(2): 283-302.
 [18] Park DG, Yun JH, Park J, Keel SI. *Energy & Fuels* 2009; 23: 4236-4244.