

고체로켓연소에서 에지화염 불안정성에 대한 실험적 연구

황동진* · 박 정*** · 김정수* · 김성초* · 김태권**

Experimental Study on Edge Flame Instabilities in Solid Rocket Combustion

Dongjin Hwang* · Jeong Park*** · Jeongsoo Kim* · Sungcho Kim* · Taekwon Kim**

ABSTRACT

Experiments in low strain rate methane-air counterflow diffusion flames diluted with CO₂ have been conducted to investigate the flame extinction behavior and edge flame oscillation. The critical mole fraction at flame extinction is examined in terms of velocity ratio and global strain rate. Onset conditions of the edge flame oscillation and the relevant modes are also provided with global strain rate. It is observed that flame length is intimately relevant to lateral heat loss, and this affects flame extinction and edge flame oscillation considerably. Edge flame oscillations are categorized into three: a growing-, a decaying-, and a harmonic-oscillation mode.

초 록

이산화탄소를 첨가한 저 신장률 메탄-공기 대향류 확산화염에서 화염소화 거동과 에지화염 진동을 조사하기 위해 실험을 수행하였다. 화염소화 조건에서의 임계 몰분율을 속도비와 전체화염 신장률에 따라 분석하였다. 또한 에지화염 진동의 시작조건과 관련된 모드들을 전체화염 신장률에 따라 조사하였다. 화염길이는 측면방향 열손실과 밀접한 연관이 있으며, 측면방향 열손실은 화염소화와 에지화염 진동에 중대한 영향을 미친다. 에지화염의 진동 모드는 성장, 감쇠, 조화 세 가지로 분류된다.

Key Words: Edge Flame(에지화염), Flame Oscillation(화염진동), Lateral Heat Loss(측면방향열손실), Growing Mode(성장모드), Lewis Number(Lewis수), Flame Instability(화염불안정성)

1. 서 론

Lewis 수로 대표되는 열확산과 질량확산의 불

균형은 화염 불안정성(flame instability)의 원인 중 하나로 잘 알려져 왔다. 여기서 Lewis 수는 열확산에 대한 질량확산의 비로 정의 된다. 일차원 예혼합 화염(premixed flame)에서 Lewis 수가 1 보다 작을 경우 셀 불안정성(cellular instability)이 발생하고¹⁾, 반면에 1 보다 큰 경우 진동 불안정성(oscillatory instability)이 발생할 수 있다²⁾. 또한 열손실(heat loss)이 존재할 경우

* 순천대학교 기계우주항공공학부
** 계명대학교 기계자동차공학부
*** 순천대학교 기계우주항공공학부
연락처, E-mail: jeongpark@sunchon.ac.kr

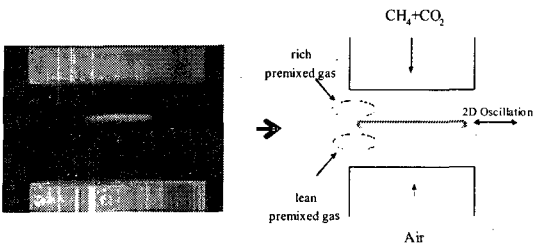


Fig. 1 Representative direct photo and schematic diagram of low strain rate counterflow diffusion flame configuration.

화염의 진동 현상은 더욱 증진된다는 것은 잘 알려진 사실이다³⁾. 화염 진동(flame oscillation) 현상은 일차원 확산 화염(diffusion flame)에서도 발생되며 Kirkby와 Schmitz의 일차원 평면 화염에 대한 수치 해석적 연구가 그 시발점이었다⁴⁾. 진동 불안정성은 화염 소화조건 부근에서 큰 Lewis 수와 열손실에 기인하며⁵⁾, 상당한 체적 열손실(volumetric heat loss)이 진동 불안정성을 일으킬 수 있는 임계 Lewis 수를 감소시킨다는 사실 또한 보고되었다⁶⁾.

대향류 확산 화염 형상에서 예지 화염의 거동과 화염 불안정성에 대한 몇 가지 연구들이 보고되었지만⁷⁻⁹⁾, 이들 연구들은 대부분 고 신장률 영역에서의 연구 결과임을 주목하여야 한다. 최근 Park 등은 실험과 2차원 DNS를 통해 저 신장률 대향류 확산 화염에서 화염 소화 거동은 복사 열손실뿐만 아니라 측면 방향 열손실(lateral heat loss)과도 밀접한 관계가 있음을 입증하였고, 저 화염 신장률에서 화염길이는 측면 방향 열손실의 척도가 될 수 있음을 보고하였다¹⁰⁾. Fig. 1에서 보는 바와 같이 화염 바깥쪽 예지 부분에 형성되는 농도장은 부분 예혼합 화염구조를 갖는다. 결과적으로 저 신장률 영역의 화염 소화 조건에서 다양한 형태의 진동 불안정성이 관찰될 것으로 기대된다. 본 연구는 저 화염 신장률에서 예지 화염 진동 불안정성의 시작조건과 진동 불안정 모드에 대해 조사 분석하는 데 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

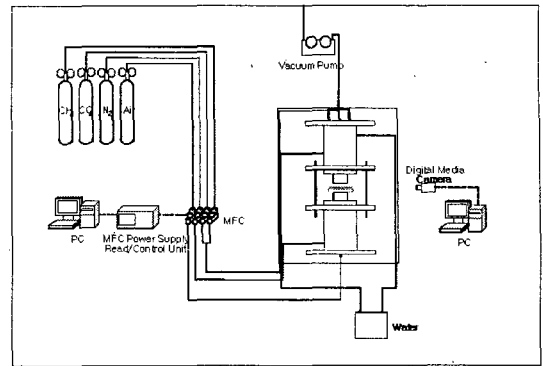


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow system.

Figure 2는 실험에 사용된 대향류 버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 대향류 내경은 26mm, 버너 노즐 간 간격은 15mm로 유지하였다. 부력에 의한 노즐의 과열 방지와 온도 경계 조건 유지를 위해 위 버너에 물 순환 펌프를 이용한 냉각 장치를 설치하였다. 버너 덕트 내부에는 미세한 메시 스크린을 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동 속도를 갖도록 하였다. 외부 화염 교란을 막고 후류에 의한 외측 화염을 제거하기 위해 질소를 장막 유동(curtain flow)으로 사용하였다.

연료는 메탄을 사용하였으며, 이산화탄소를 연료 측에 첨가하였다. 첨가제(diluent)로써 이산화탄소를 사용한 이유는 연료 측 Lewis 수를 1보다 작게 하기 위해서이고, 저 신장률 영역에서의 예지 화염 불안정성이 잘 관찰될 것으로 기대되었기 때문이다. 실험은 전체 화염 신장률을 일정하게 유지하면서 이산화탄소의 공급유량을 증가시키면서 실행하였다. 전체 화염 신장률은 다음과 같이 정의된다¹¹⁾.

$$a = \frac{2 V_a}{L} \left[1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}} \right], \quad V_r = \frac{V_f}{V_a} \quad (1)$$

여기서 V_r 은 연료와 산화제 측 버너 덕트 출구에서의 속도비를 의미한다. 화염의 동적 거동은 SONY사의 디지털 미디어 카메라를 이용하여 획득하였다. 이산화탄소 첨가에 따른 연료 측

Lewis 수 범위는 0.8096에서 0.8217이었고, 산화제 측 Lewis 수는 1.0643이었다.

3. 실험 결과 및 토의

Figure 3은 다양한 전체 화염 신장률과 속도비에 따른 임계 이산화탄소 물분율을 나타낸 것으로서, 실험과 수치해석 결과를 비교한 것이다. 수치해석에는 Oppdif 코드를 사용하였다^{12,13)}.

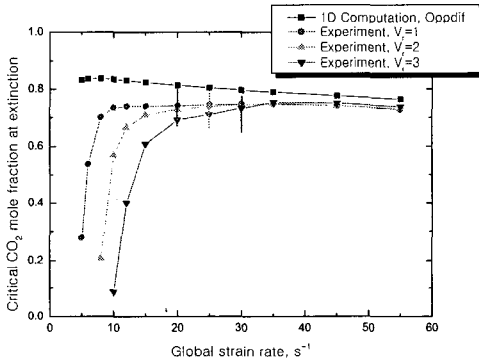


Fig. 3 Measured and computed critical CO₂ mole fractions of the fuel stream at extinction with global strain rate for various velocity ratios.

Figure 3의 수치해석 결과에서 전체 화염 신장률이 8 s⁻¹ 보다 작은 영역에서의 화염 소화 현상은 복사 열손실에 기인하고, 8 s⁻¹ 보다 큰 영역에서의 화염 소화 현상은 화염 신장률 때문이다¹⁴⁾. 고 신장률 영역에서 실험적으로 얻어진 임계 이산화탄소 물분율은 속도비의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 갖지만, 저 신장률 영역에서는 전체 화염 신장률이 감소할수록, 그리고 속도비가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 저 신장률에서 임계 물분율이 차이가 나는 것은 기존 연구에서 보였던 바와 같이 복사 열손실뿐만 아니라 측면 방향 열손실에 기인한다. 그 이유는 측면 방향 열손실의 척도인 반경 방향 화염길이가 속도비가 증가할수록 감소하기 때문이다. 반경방향 화염길이가 갖는 물리적 의미는 다음 식으로 설명할 수 있다.

$$q_r = k \frac{\partial T}{\partial r} \sim \frac{1}{l_f} \quad (2)$$

여기서, l_f 는 반경 방향 화염길이를 의미한다. 식 (2)에서 화염길이가 작아질수록 반경 방향으로의 열전달은 증가하게 된다.

Fig. 3에서 수치 실험은 화염 소화 조건에서 화염 불안정성에 의한 진동 모드가 관찰되는 한계 화염 신장률을 의미한다. 화염 소화 조건에서의 예지화염 불안정성이 나타나는 전체 화염 신장률의 한계는 속도비를 증가시킬수록 고 화염 신장률로 영역이 확대되었다. 그 이유는 속도비를 증가시킬수록 반경 방향 화염길이가 줄어 들고, 측면 방향 열손실이 증가하기 때문이다.

예지화염의 진동 모드는 성장, 조화, 감쇠 진동 모드로 요약할 수 있다. 성장 진동 모드에서, 화염은 주기적으로 진동하며 그 진폭은 화염 소화 직전까지 점차 증가하였고 약 1.0 Hz의 주기를 가졌다. 특히 성장 진동 모드는 각각의 화염 소화 조건에서만 관찰되었다. 조화 진동 모드에서 화염은 진동 진폭의 변화 없이 주기적으로 진동하며, 감쇠 진동 모드에서 화염은 일정기간 주기적으로 진동한 후 화염의 진동 폭은 서서히 줄어들고, 진동의 주기성도 사라지는 경향을 보였다.

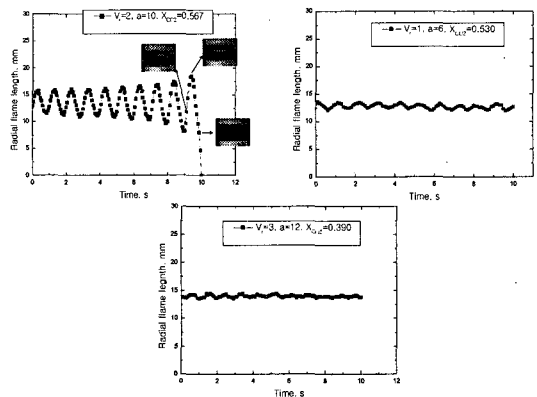


Fig. 4 Representative flame oscillation modes

후 기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 지방대
학혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. G. I. Sivashinsky, *Combust. Sci. Tech.*, 15, 1977, pp.137-146.
2. G. Joulin, and P. Clavin, *Combust. Flame*, 35, 1979, pp.139-153.
3. S. Cheatham, M. Matalon, *Proc. Combust. Inst.* 24, 1996, pp. 1063~1070.
4. L.L. Kirkby, R.A. Schmitz, *Combust Flame*, 10, 1966, pp. 205-220.
5. J.D. Buckmaster, *Prog. Energy Combust. Sci.* 28, 2002, pp. 435-475.
6. C.H. Sohn, S.H. Chung, J.S. Kim, *Combust. Flame*, 117, 1999, pp. 404-412.
7. V.S. Santoro, A. Liñán, A. Gomez, *Proc. Combust. Inst.* 28, 2000, pp. 2039-2046.
8. W.F. Carnell Jr., M.W. Renfro, *Combust. Flame*, 141, 2005, pp. 350-359.
9. C. H. Sohn, J. S. Kim, S. H. Chung, K. Maruta, *Combust. Flame* 123, 2000, pp. 95~106.
10. J. Park, C. B. Oh, K. T. Kim, J. S. Kim, A. Hamins, *Proc. ASPACC.* 5, 2005, pp. 345~348.
11. J. Park, D. J. Hwang, K. H. Lee, J. O. Chung, S. I. Keel, S. B. Lee, *Int. J. of Energy Res.* 28, 2004, pp. 861~885.
12. C.T. Bowman, R.K., Hanson, D.F. Davidson, W.C. Gardiner, V. Lissianski, G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, M. Goldenberg (1999) http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
13. R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, Sandia Report (1989) SAND89-8009B.
14. K. Maruta, M. Yoshida, Y. Ju, T. Niioka, *Proc. Combust. Inst.* 26, 1996, pp. 1283.

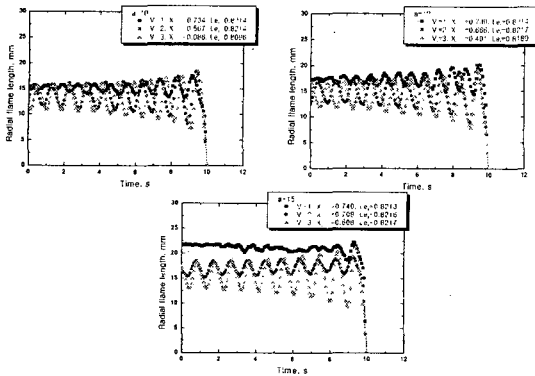


Fig. 5 Temporal variation of the radial flame length at flame extinction with velocity ratios

Fig. 5에 보이는 바와 같이, 화염은 각 소화 조건에서 성장 진동 모드를 나타내고, 속도비를 증가시킬수록 진동의 진폭이 더욱 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 일정한 전체 화염 신장률에서 속도비를 증가시킬수록 반경 방향 화염길이는 감소하고 따라서 에지 화염 진동 폭은 증가하였다. 결과적으로 화염길이는 측면 방향 열손실과 밀접한 관계가 있으며, 측면 방향 열손실은 저 신장률에서 화염 소화와 에지 화염 불안정성에 직접적인 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

저 신장률 $\text{CH}_4/\text{CO}_2\text{-Air}$ 대향류 확산 화염의 불안정성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 반경 방향 화염길이는 측면 방향 열손실과 직접적인 연관이 있으며, 복사 열손실뿐만 아니라 측면 방향 열손실 또한 화염 소화 거동과 에지 화염 불안정성에 중대한 영향을 미친다.

저 신장률 대향류 확산 화염에서 에지 화염 진동 불안정성은 성장, 조화, 감쇠 진동 모드로 요약할 수 있었다. 특히 성장 진동 모드는 개개의 화염 소화 조건에서만 관찰되었다.