

# 고체연료로켓에서 에지화염의 맥동 불안정성

김강태\* · 박준성\* · 박정\* · 김정수\* · 길상인\*\* · 조한창\*\*\*

## Oscillatory Instabilities of Edge Flames in Solid Rocket Combustion

Kangtae Kim\* · Junsung Park\* · Jeong Park\* · Jeongssoo Kim\* · Sangin Keel\*\* · Hanchang Cho\*\*\*

### ABSTRACT

Systematic experiments in CH<sub>4</sub>/Air counterflow diffusion flames diluted with He have been undertaken to study the oscillatory instability in which lateral heat loss could be remarkable at low global strain rate. The oscillatory instability arises for Lewis numbers greater than unity and occurs near extinction condition. The dynamic behaviors of extinction in this configuration can be classified into three modes; growing, harmonic and decaying oscillation mode near extinction. As the global strain rate decreases, the amplitude of the oscillation becomes larger. This is caused by the increase of lateral heat loss which can be confirmed by the reduction of lateral flame size. Oscillatory edge flame instabilities at low global strain rate are shown to be closely associated with not only Lewis number but also heat loss (radiation and lateral heat loss).

### 초 록

CH<sub>4</sub>-He/Air 대향류 확산화염의 저 화염 신장율에서 진동 불안정성에 관하여 실험적으로 연구하였다. 저 화염 신장율에서 진동 불안정은 Le가 1보다 클 때 소화한계 부근에서 발행하고 측면방향 열손실이 중요한 역할을 한다. 화염이 진동할 때 화염의 형태는 전진하거나 후퇴하는 edge flame이고 진동의 동적거동은 성장, 조화 그리고 감쇠 진동 모드 세 가지로 나타났다. 전체 화염 신장율이 감소하면 진동의 진폭은 커지게 되는데 이는 화염의 크기가 감소하게 되어 측면 열손실이 증가하였기 때문이다. 저 화염 신장율에서 edge flame의 진동 불안정성은 Le 뿐만 아니라 복사와 측면 열손실도 밀접한 관계가 있다.

Key Words: Edge Flame(에지화염), Global Strain Rate(전체화염신장율), Lateral Heat Loss(측면열손실), Lewis Number(루이스수), Oscillatory Instability(진동불안정성)

### 1. 서 론

에지화염은 소화 한계 부근에서 Lewis Number(이하 Le)와 부피에 따른 열 손실, 과도한 복사 열 손실에 따라 화염 진동이 발생하게 된다.[1] 이때 Le의 변화에 따라 나타나는 화염 불안정성을 물질-열 확산 불안정성(Diffusive

\* 순천대학교 기계우주항공공학부  
\*\* 한국기계연구원 청정환경기계연구센터  
\*\*\* 포항산업과학연구원 에너지연구실  
연락처, E-mail: jeongpark@sunchon.ac.kr

Thermal Instability)라고 한다. Le가 1보다 작게 되면 셀 불안정성(Cellular instability)이 나타날 수 있고 1보다 크게 되면 맥동 불안정성(Pulsating instability)이 발생 할 수 있다.[2] 맥동 불안정성에 의한 화염 진동은Cheatham 과 Mtalond에 의해 액적 확산화염에서 열손실이 없을 경우에는 매우 큰 Le 일 때 화염 진동이 나타났고 열손실이 있는 경우에는 Le가 1이더라도 화염 진동이 나타났다.[3]

한편, Park등은 저 신장을 대향류확산화염에 관한 실험과 이차원 수치해석을 통하여 복사 열손실 이외에 반경 방향으로의 측면 열손실이 화염 소화에 중요한 역할을 하고, 저 신장을 화염에서 화염 소화를 위한 임계 희석제 물분을 근처에서 화염 크기는 버너 직경보다 작다는 것을 보인 바 있다.[4]

본 연구에서는 메탄/공기 대향류 확산 화염에 연료 측Le > 1이 되도록 헬륨을 메탄 측에 희석시키면서 화염 소화 거동과 일차원 및 이차원 화염 진동을 규명하기 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 방법

Figure 1에서 대향류 버너의 내경은 56mm이다. 연료와 산화제의 노즐 사이의 거리는 20mm였다. 연료는 CH<sub>4</sub>에 헬륨을 희석하여 사용하였고 산화제로는 공기를 사용하였다. 화염 소화 실험은 전체 화염 신장을 일정하게 유지한 상태에서 연료의 유동을 감소시키고 동시에 희석제의 유동을 증가시키면서 화염 소화 한계를 취득하였고 동일한 방법으로 화염 소화 한계 근처에서 실험이 수행된다.

전체 화염 신장의 정의는 다음과 같다.[5]

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left( 1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_a}}{\sqrt{\rho_f}} \right)$$

$$\text{Where } V_r = \frac{V_f}{V_a}$$

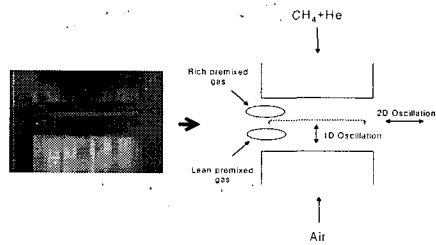


Fig. 1 Photo and schematic diagram of the counterflow flame configuration

여기서 L은 두 노즐 사이의 거리이고, V와 ρ는 반응물유동속도와 밀도를 나타내며, 하첨자 a와 f는 산화제와 연료를 나타낸다.

화염의 동적 거동은 영상 증폭장치가 탑재된 고속카메라를 이용하여 Framing rate 60Hz, 셔터 속도 1/60sec, 1024frame으로 실시간 촬영되고 분석되었다. 또한 1차원 Oppdif[6] 코드를 사용하여 수치해석 데이터를 획득하여 실험과 비교 분석하였다.

기존의 연구들에서 소화 한계 부근에서 화염 진동에 의한 불안정성이 나타난다고 수치해석적으로 밝혀졌고 이는 Lewis Number, 복사 열손실, 체적 열손실이 주요한 영향인은 잘 알려져 있다.[1~3] 이러한 사실들을 근간으로 하여 소화 한계 부근에서 나타나는 화염 진동의 동적 거동과 형상을 측정 하였다.

## 3. 실험 결과 및 논의

Figure 2 전체 화염 신장에 따른 임계 헬륨 물분율의 소화 한계를 도시화한 것으로써, 실험으로 측정된 소화 한계 곡선과 1D Oppdif code를 통하여 수치해석으로 얻어진 소화 한계 곡선을 비교하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 수치해석으로부터 얻어진 화염소화에서 임계 He 물분율의 최대값은 화염 신장이 9s<sup>-1</sup>에서 나타난다. 9s<sup>-1</sup>이하에서 화염소화는 화염복사열손실에 기인하고 9s<sup>-1</sup>이상에서는 화염 신장에 의한 화염 소화 현상으로 인식된다. 반면, 실험에서 얻

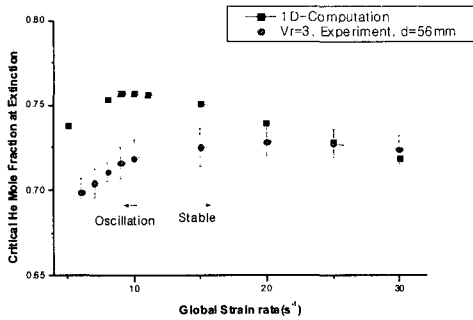


Fig. 2 Measured and computed critical nitrogen mole fraction in the fuel stream for extinction

어진 화염 소화 임계 헬륨 물분율의 최대는 화염 신장율이  $20s^{-1}$ 에서 나타난다. 화염 신장율이  $20s^{-1}$ 이하에서 실험과 수치해석 결과가 크게 차이를 나타내는 것은 Park등의 연구에서 지적한 바와 같이 복사 열손실 이외에도 추가적으로 측면으로 열손실 효과가 기인하는 것으로 판단된다.[4] 그러나, 화염 신장율이 증가하여  $30s^{-1}$ 가 되면 수치해석과 실험과의 차이는 현격히 줄어든다는 것을 알 수 있다. 따라서, 현재 실험 결과와 Park등의 기존 연구들과 비교로부터 화염 신장율이  $20s^{-1}$ 을 중심으로 화염모드는 상이하게 달라짐을 확인할 수 있었고 제시하지 않았지만 화염의 반경 방향으로의 화염 진동 현상이 저 화염 신장율의 소화 한계 부근에서 나타났다.[4] 진동이 발생하는 조건은 전체 화염 신장율이  $13s^{-1}$ 이하에서 화염 소화 한계 부근이었다.

Figure 3-(a)는 각각의 전체 화염 신장율의 화염 소화 조건에서 시간의 변화에 따른 화염 반경 방향 위치와 소화 되는 거동을 나타낸다. 화염의 크기를 살펴보면 전체 화염 신장율이 높아질수록 화염이 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 화염 측면 방향의 크기의 변화가 전체 화염 신장율이 달라짐에 따라 여러 형태로 나타난다. 즉, 전체 화염 신장율  $6\sim 7s^{-1}$ 에서는 진동 진폭의 변화가 상대적으로 크고  $0.66Hz\sim 0.1Hz$ 의 주기를 가지며, 화염의 소화 거동은 진폭이 증가하다가 소화되었다. 전체 화염 신장율  $9\sim 10s^{-1}$ 에서는 진동 진폭의 변화가 상대적으로 작고 주기는 명확하게 관찰되지 않거나  $0.66Hz$ 에서 점점 빨라지

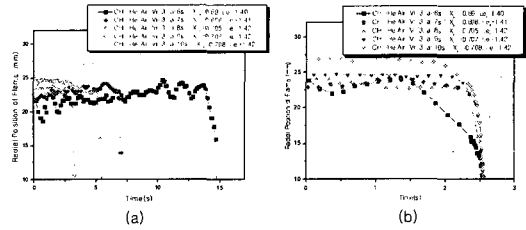


Fig. 3 (a) Temporal variation of radial flame position at various conditions and (b) Temporal variation of radial flame position at various conditions just prior to flame extinction.

다가 진동이 나타나지 않으며, 진폭이 감소하다가 화염이 소화 되었다.

화염의 소화 거동의 진폭이 증가하다가 소화되는 경우를 Mode 1이라고 명명하였고, 진폭이 감소하다가 소화되는 경우를 Mode 3라고 명명하였다. 또한 Mode 1과 Mode 3 사이에 천이적인 현상이 나타나는 경우를 Mode 2라고 명명하였다. Mode 2는 전체 화염 신장율  $8s^{-1}$ 에서는 화염의 진폭이 상대적으로 크지는 않고 화염이 소화될 때까지 균일한 진폭의 화염 진동 현상이 계속 나타난다. 주기는  $0.75\sim 0.86Hz$ 로 관찰되었다.

Mode 1경우에서는 Park등의 연구에서와 같이 낮은 전체 화염 신장율에서는 화염 크기가 버너 직경에 비해서 현저히 적다.[4] 그래서 화염 예지로부터 열 손실이 화염 전체에 영향을 미치게 된다. 즉, 열 손실이 커지면 성장 화염 진동 모드(growing flame oscillation mode)를 나타내며 소화가 발생하는 것으로 판단된다. Mode 2경우에는 균일한 진폭의 진동을 보이는 조화 화염 진동 모드(Harmonic flame oscillation mode)를 나타내다 소화된다. 그러나 Mode 3경우에는 전체 화염 신장율이 상대적으로 증가 되어서 화염의 크기가 커지게 된다. 그러므로 화염 반경 방향 열손실은 급격히 감소하여 화염 진동이 약해지는 감쇠 화염 진동 모드(decaying flame oscillation mode)로 나타난다. 따라서 Mode 3에서는 화염 진동 현상이 화염 소화 거동에 큰 영향을 주지 못했다. 이러한 동적 거동은 Fig. 3-(b)에서 보면 더 확연히 알 수 있다. 가장 낮은

전체 화염 신장율에서는 화염 반경이 가장 작고 변화가 매우 크게 나타나만 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염의 반경은 커지며 변화가 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염이 소화되는 시간의 기울기가 점점 커진다. 이는 화염 소화가 발생 할 때 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염이 작아지는 속도가 더욱 빨라져서 소화가 일어나는 속도가 빨라진다는 것을 의미한다.

이상의 결과들로부터 저신장율의 대향류 확산 화염에서 화염 소화와 소화 한계 부근에서의 화염 진동에는 Le, 복사 열손실 이외에도 측면 방향 열 손실이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

### 3. 결 론

대향류 버너에서 C-curve의 소화 한계를 취득하기 위해 헬륨을 희석제로 사용하여 전체 화염 신장율을  $6\sim 30s^{-1}$ 까지 체계적으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 이와 더불어 다차원 열 손실 효과를 배제한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교 분석하였다. 저화염 신장율 화염에서는 화염 소화에 영향을 주는 요인으로 복사 열 손실 효과와 더불어 화염 반경 방향의 열 손실이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.  $Le > 1$ 에 대해 수행된 실험으로부터 화염 소화 한계 부근과 낮은 화염 신장율인 경우 화염 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 화염의 진동 현상은 세 가지의 모드로 구분 할 수 있다. 성장 화염 진동 모드(Glowing flame oscillation mode), 조화 화염 진동 모드(Harmonic flame oscillation mode), 감쇠 화염 진동 모드(decaying flame oscillation mode)를 보이다 화염 소화에 이르게 된다.

본 연구 결과와 기존 연구 결과들을 근거로 저 화염 신장율의 화염 소화 한계 근처에서 화염 진동은 Le, 복사 열손실등의 영향뿐만 아니라 측면 열손실 효과가 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

### 참 고 문 헌

1. Buckmaster, J. D., 2002, "Edge-flames" Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 28, pp. 435~475.
2. Kim, J. S., 1997, "Linear analysis of the diffusional - thermal instability of diffusion flames with Lewis number close to unity" Combust. Theory Modelling, Vol. 1, pp. 13~40.
3. Cheatham, S., and Matalon, M., 1996, "Heat loss and Lewis number effects on the onset of oscillations in diffusion flames" Twenty-sixth Symposium (international) on combustion / The combustion institute pp. 1063~1070.
4. Park, J., Oh, C. B., Kim, K. T., Kim, J. S., and Hamins, A., 2005, "Multi-dimensional effects on Low strain rate flame extinction in methane/air counterflow non-premixed flames" 5<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, , pp. 345~348.
5. Chellian, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D., and Williams, F. A., 1990, "An experimental and theoretical investigation of the dilution, pressure and flow-field effects on the extinction condition of methane-air-nitrogen diffusion flames. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> international Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 503.
6. Lutz, A.E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF : A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames" sandia Report SAND 96-8243