

정체점 유동장에서 수소-액체산소 화염의 음향파 응답 특성

박성우* · 정석호** · 김홍집†
 (2002년 7월 20일 접수, 2003년 1월 11일 심사완료)

Acoustic Response of Hydrogen/Liquid Oxygen Flame in Stagnation-Point Flow

Sung Woo Park, Suk Ho Chung and Hong Jip Kim

Key Words: Acoustic Instability(음향파 불안정성), Hydrogen/Liquid Oxygen Flame(수소-액체산소 화염), Rayleigh Criterion(Rayleigh 기준), Extinction(소멸), Nonlinear Response(비선형 응답)

Abstract

Steady-state structure and acoustic pressure responses of $\text{GH}_2\text{-LOx}$ diffusion flames in stagnation-point flow configuration have been studied numerically with a detailed chemistry to investigate the acoustic instabilities. The Rayleigh criterion is adopted to judge the instability of the $\text{GH}_2\text{-LOx}$ flames from amplification and attenuation responses at various acoustic pressure oscillation conditions for near-equilibrium to near-extinction regimes. Steady state flame structure showed that the chain branching zone is embedded in surrounding two recombination zones. The acoustic responses of $\text{GH}_2\text{-LOx}$ flame showed that the responses in near-extinction regime always have amplification effect regardless of realistic acoustic frequency. That is, $\text{GH}_2\text{-LOx}$ flame near-extinction is much sensitive to pressure perturbation because of the strong effect of a finite-chemistry.

기호설명			
a	스트레인율	\bar{R}	기체 상수
c_p	정압 비열	T	온도
H	규준화된 비선형 증폭지수(Eq. (9))	t	시간
h_j	j -화학종의 엔탈피	v	축방향 속도
h_l	LOx의 잠열	U_j	j -화학종의 확산속도
M_j	j -화학종의 분자량	V	상사함수(= ρv)
n_s	고려하는 화학종의 개수	x, y	공간좌표축
p_s	정체점 압력	Y_j	j -화학종의 질량분율
		w_j	j -화학종의 생성률
		ϕ	위상각(phase angle)
		λ	혼합물의 열전도도
		μ	혼합물의 점성계수
		ρ	밀도
		τ	주기
		ω	각진주파수

† 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 추진기관연구부

E-mail : khongjip@kari.re.kr

TEL : (042)860-2814 FAX : (042)860-2602

* 대우일렉트로닉스 냉기연구소 품질기획그룹

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

- ()_a 가진에 의한 변동량
- ()_m 정상상태
- ()_∞ 외기 조건

1. 서론

로켓엔진 개발에 있어 음향파 불안정성(acoustic instability)은 로켓 내부에서 진동하는 광범위한 주파수의 음향파(acoustic wave)가 연소시 발생하는 열방출율과 상호 작용하여 그 진폭이 증가하는 현상으로, 심한 경우 분사 장치를 손상시킬 뿐만 아니라 로켓의 파괴를 일으킨다.^(1,2) 연소불안정성을 발생시키는 인자들 중, 연소실 내의 분사, 부화, 증발 및 혼합 과정 중에서 발생하는 운동량 및 물질전달 현상도 주요한 요인이 될 수 있으나, 연소과정 중 발생하는 열방출율의 섭동이 가장 중요한 증폭 요소로 인식되고 있다.^(1,2) 최근 발사체 규모가 커짐에 따라 추력의 향상을 위해 로켓 연소실내의 작동 압력이 높아지는 추세이다. 이에 의해 음향파 불안정의 발생 가능성이 증대됨에 따라, 연소불안정성에 대한 구체적인 해석이 요구된다.

일반적으로 로켓 내의 연소상황은 직접 수치모사에 의한 해석이 사실상 불가능한 다상(multi-phase) 난류 유동으로, 이를 단순화된 소화염들의 집합체로 간주하는 층류 소화염 모델(laminar flamelet model)이 제시되어 압력 진동 모드에 대한 소화염들의 응답 특성에 관한 연구가 수행되어 왔다.^(3,4) 이들은 일단계 비가역 화학반응을 가정한 선형 안정성 해석(linear stability analysis)을 통해 증폭 메커니즘의 물리적 이해를 증진시켰으나, 작은 진폭의 섭동에 대해서만 해석이 가능하고, 상세 화학반응 메커니즘의 영향이나 물성치의 온도 및 농도에 대한 의존성이 고려되지 않았다. 특히, 수소/산소 화염에서는, 상대적으로 두꺼운 재결합반응 지역(recombination zone)이 연쇄반응 지역(chain branching zone)을 둘러싸고 있어 선형 해석에서 가정한 일단계 화학반응은 그 적용에 제약이 되고있다.

엔진 내에서 발생하는 비선형 문제에 대한 해석의 복잡성 및 적용범위의 한계를 극복하기 위하여 상세 화학반응을 고려한 수치해석이 필요하며, 이를 통해 압력파의 증폭/감쇠 메커니즘에 대

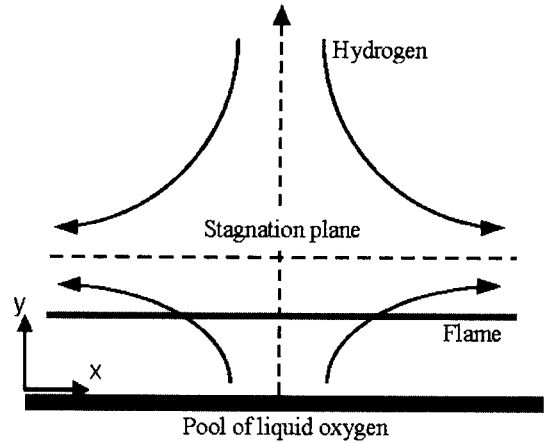


Fig. 1 Schematic diagram of diffusion flame in stagnation-point flow

한 이해를 증진시킬 필요가 있다. 이를 위한 시도로써 각각 상변화(phase change)를 고려한 수소/산소 액적 확산화염⁽⁵⁾과 스트레치를 받는 수소/산소 대향류 확산화염⁽⁶⁾이 소화염으로 도입되어 압력 변동에 따른 음향파 불안정성이 연구되었다. 실제적인 상황에서는 상변화와 스트레치 모두 화염의 특성을 결정짓는 중요한 인자가 될 수 있으며, 이에 본 연구에서는 액체산소(LOx)의 상변화와 수소의 대류 현상으로 인한 스트레치를 동시에 고려하기 위하여 층류 소화염으로서 정체점 유동장에서의 확산화염을 채택하였다. 또한 비선형성의 효과를 고려하기 위하여 상세 화학반응 메커니즘을 도입한 수치해석을 통해 정상상태의 화염의 구조를 해석하고, 압력과 섭동에 대한 화염의 응답특성을 규명함으로써 외부 교란에 의한 화염에서의 음향파 불안정성 메커니즘을 밝히고자 한다.

2. 지배방정식과 경계조건

GH₂-LOx 화염에서 유동장의 특성과 상변화를 고려하여, Fig. 1과 같이 액체산소 pool에 수소가 수직으로 분사되는 정체점 유동장을 해석하였다. Figure 1과 같은 y = 0에서 액체산소가 증발하고 y = L에서 수소가 분사되는 축대칭 정체점 유동장에서는 GH₂-LOx의 유동장 특성길이 내에서 압력은 공간적으로 균일하다고 간주할 수 있으며,

시스템 내의 유동속도는 음속에 비해 매우 작아 점성 소산은 무시될 수 있다. 액체산소는 포화상태로 가정하였으며 수치계산에 고려된 기체상은 이상기체로 취급하였다. 이상의 근사 및 가정을 사용하면 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + 2\rho a + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial a}{\partial t} + \rho a^2 + V \frac{\partial a}{\partial y} - \rho_\infty a_\infty^2 = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial a}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial Y_j}{\partial t} + V \frac{\partial Y_j}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_j U_j) = w_j M_j \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + c_p V \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{dp_s(t)}{dt} - \left(\sum_{j=1}^n \rho Y_j U_j c_{p,j} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{j=1}^n w_j M_j h_j = 0 \quad (4)$$

$$p_s = \rho \bar{R} T \sum_{j=1}^n (Y_j / M_j) \quad (5)$$

액체산소의 표면은 주어진 압력에 대한 포화 온도⁽⁷⁾로 유지되며, 화학반응시 발생한 열이 액체산소 쪽으로 전도되어 기화된다. 화학종들에 대해서는 대류-확산 균형식(diffusive-convective balance)을 이용하면, 경계조건은 다음과 같다.

$$y=0; \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \rho_o v_o h_l$$

$$\rho_o \left\{ \frac{da_o}{dt} + a_o^2 \right\} = \rho_L \left\{ \frac{da_L}{dt} + a_L^2 \right\} \quad (6)$$

$$\rho_o v_o Y_j + \rho_o Y_j U_j = \rho_o v_o \delta(j - LOx)$$

$$T = T_{B,LOx}$$

$$y=L; \rho v = \rho_L v_L$$

$$\rho_o \left\{ \frac{da_o}{dt} + a_o^2 \right\} = \rho_L \left\{ \frac{da_L}{dt} + a_L^2 \right\} \quad (7)$$

$$Y_j = Y_{j,L}$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{dp_s(t)}{dt} \quad (8)$$

지배방정식은 Smooke⁽⁸⁾에 의해 개발된 알고리즘을 바탕으로 각 독립변수들의 보존성을 엄격히 만족시킬 수 있도록 유한 체적법(FVM)을 사용하여 차분화하였다. 시간항은 암시법(implicit method)을 사용하였으며 이산화된 연립방정식의 풀이를 위해 수정된 Newton iteration 방법을 적용하였다. 열역학적 물성치와 화학반응항은 CHEMKIN-II⁽⁹⁾를, 전달물성치는 TRANSPORT PACKAGE⁽¹⁰⁾를 사용하여 계산하였다.

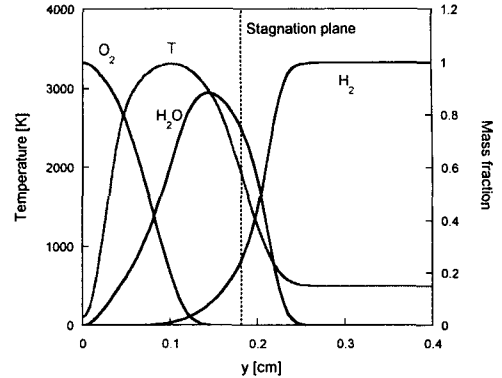


Fig. 2 Distribution of temperature and major species for steady-state flame($p_m = 0.5$ MPa, $a = 10^3 \text{ s}^{-1}$)

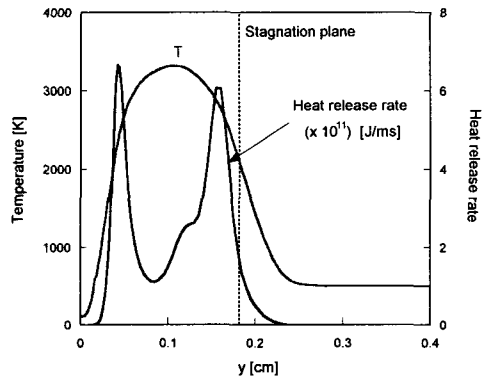


Fig. 3 Distribution of temperature and heat release rate for steady-state flame($p_m = 0.5$ MPa, $a = 10^3 \text{ s}^{-1}$)

또한 8개의 화학종과 19단계의 기본반응을 포함한 상세 화학반응 메커니즘⁽¹¹⁾을 고려하였다.

3. 정상상태의 화염구조

로켓 엔진 내의 액체산소와 수소의 확산화염은 평형에서부터 소멸에 이르기까지 다양한 조건의 압력변동 하에 연소된다. 본 연구에서는 압력변동에 따른 화염의 거동을 해석하기 위하여 정상상태의 화염의 구조에 대한 연구를 선행하였다. 실제 엔진에서와 유사한 조건인 $p_m = 0.5$ MPa, $T_{B,LOx} = 108.81$ K, $T_o = 500$ K, $a = 10^3 \text{ s}^{-1}$ 로 하였을 때 온도와 주 화학종인 H_2 , O_2 와 H_2O 의 질

량 분율의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 화염면을 통한 연료와 산화제의 누출(leakage)이 거의 없는 상태로 화염은 평형에 가까운(near equilibrium) 상태이다. 또한 H₂와 O₂가 거의 소모되는 $y \sim 0.12$ cm에서 온도와 H₂O의 최대점이 각각 존재한다.

이 때의 온도와 열방출율의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 열방출율은 두 곳의 국소 최대값을 갖는다. LOX쪽($y \sim 0.042$ cm)에서는 $H + O_2 + M = HO_2 + M$ 와 $HO_2 + OH + M = H_2O + O_2$ 의 반응이, GH₂쪽($y \sim 0.16$ cm)에서는 $H + H + M = H_2 + M$ 와 $H + OH + M = H_2O + M$ 반응이 우세하다. 이 두 반응들은 화염지역에서 생성된 라디칼들이 안정된 화학종으로 재결합하는 발열반응으로, 이러한 반응들에 의해 화염의 양쪽에서 열방출율이 집중된다. 이런 재결합반응 지역들 사이에는 라디칼이 생성, 전파되는 연쇄반응 지역이 존재한다.

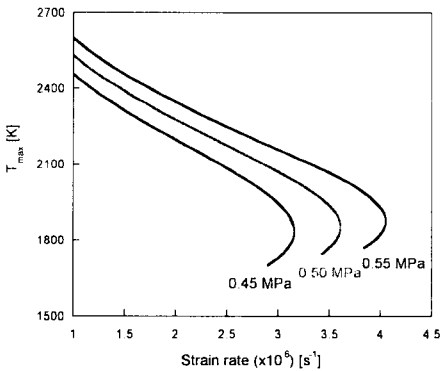


Fig. 4 Variations of maximum temperature with strain rates for various mean pressures

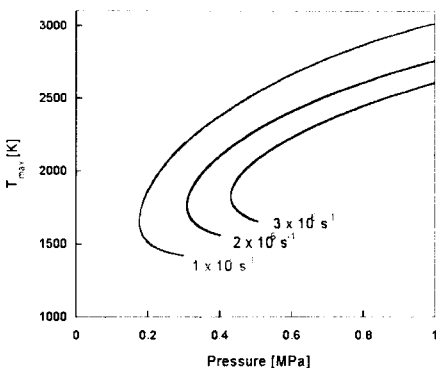


Fig. 5 Variations of maximum temperature with mean pressure for various strain rate

스트레치가 증가하거나 압력이 감소하면, 화염은 액체산소 표면으로 근접하게 되며 화학반응의 감소로 인해 화염의 최대 온도 또한 감소하게 된다. 이러한 특성을 Figs. 4와 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 압력과 스트레치의 변화에 따른 최대 온도의 변화는 소염 현상을 나타내는 전형적인 S곡선의 형태를 보인다. Fig. 4에서 $a = 3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 의 경우, 소염은 $p_m = 0.45 \text{ MPa}$ 보다 약간 작을 때 발생한다. 또한 Fig. 5로부터 $a = 3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 의 화염은 $p_m = 0.43 \text{ MPa}$ 에서 소염된다. 이 두 결과는 Figs. 4와 5가 정량적으로 일치함을 확인시켜준다. 그림에서 알 수 있듯이 압력이 감소하거나 스트레치가 증가하여 임계점을 넘어서면 소염이 일어나게 되며, 특히 소염 근처의 전환점(turning point)에서는 압력과 스트레치의 변화에 따른 최대 온도의 변화가 단조성을 유지하지 못하는 특이점(singularity)이 존재하여, 기존의 해석 방법으로는 매우 불안정하다. 따라서 middle branch의 계산은 공간상의 임의의 한 점의 온도를 지정하여 역으로 스트레치와 압력을 계산하는 방식을 채택하였다.^(5,6)

4. 압력변동에 따른 응답특성

음향과 가진에 따른 화염의 응답을 살펴보기 위해, 정상상태 화염 중 평형과 소염 근처의 화염인 $a = 3 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 와 $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 일 때의 화염을 고찰하였다. 일반적으로 치명적인 음향과 불안정성을 일으키는 진동수는 $O(10^3)$ Hz로 알려져 있으므로,^(1,2) 이 범위의 주파수에서 가진 음향파는 sine 함수로 가정하여, 다양한 주파수와 진폭에 대한 화염의 응답특성을 살펴보았다. 음향 연소 불안정성 해석에 사용되는 압력파의 진폭의 증폭/감쇠의 판정은 Rayleigh 기준을 적용하였는데,⁽¹²⁾ 이는 압력파의 변동과 연소에 의한 열방출율의 변동이 평균적으로 동상(in phase)이면 압력의 증가에 따라 열방출율이 증가하여 압력이 증폭되고, 이상(out of phase)이면 감쇠한다는 기준이다.

Figure 6에 평형 조건 근처에서 저주파수와 고주파수 압력의 변동에 따른 화염의 응답 특성을 위상각 ϕ 의 함수로 도시하였다. 압력이 증가할 때에는 액체산소의 참여가 감소하기 때문에 액체산소 표면에서의 증발율이 증가하게 된다. 이 때 저주파 가진이 있는 경우, 압력파의 특성시간

(ω^{-1})이 유동 특성시간(a^{-1})에 비하여 길기 때문에 증발량의 증가 영향이 상대적으로 멀리 전파되어 화학반응을 증대시키므로 화염의 온도는 상승하게 된다. 그러나, 고주파 가진의 경우에는 그 특성시간이 저주파의 경우보다 매우 짧아 액체산소와 반응지역 사이에 위치한 대류-확산 지역에서의 비정상성(unsteadiness)이 증대된다. 따라서 이러한 유동장의 지연은 압력 증가에 의한 화학반응의 강도 증가 효과보다 우세하게 된다. 그러므로, 고주파로 가진할수록 화염 반응의 위상차가 증가되어, 화학반응 강도가 감소하는 영역인 압력과 감쇠 영역이 나타나게 된다.

소염근처의 화염에 대하여 음향파를 가진한 경우의 응답 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 소염 조건에 접근할수록 화학반응의 강도가 감소하며 화염지역 또한 액체산소로 근접하게 된다. 소염근

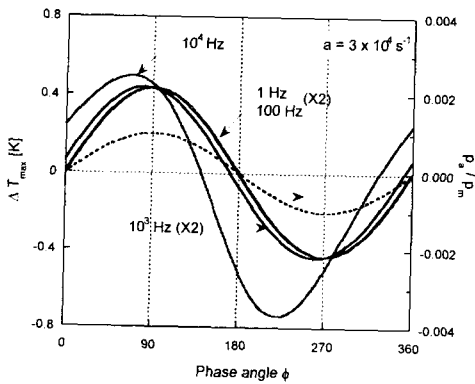


Fig. 6 Response of maximum temperature fluctuation of near-equilibrium regime

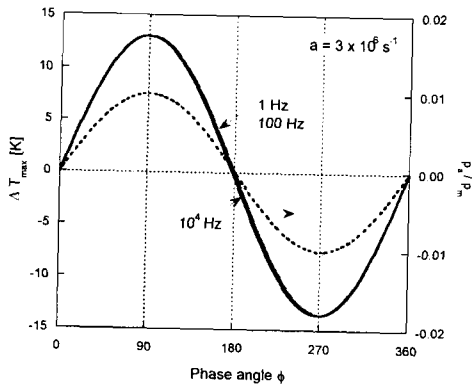


Fig. 7 Response of maximum temperature fluctuation of near-extinction regime

처 화염의 경우에는 평형근처의 화염과 달리, 대류-확산 지역에서의 유동 지연의 효과보다 압력 변동에 의한 유한 화학반응의 효과가 더 지배적이므로 주파수에 관계없이 압력 증가에 따른 화염면에서의 열방출 증폭 효과가 나타난다.

또한, 액체산소의 증발량 측면에서 살펴보면 고주파수로 가진된 경우 산소의 증발량의 변동은 평형근처 조건과 소염근처 조건 모두 큰 위상차를 보인다. 그러나 평형 조건의 경우엔 이 차이가 결국 화염의 반응에 영향을 미치게 되지만 소염 근처 조건의 경우에는 증발량의 변동이 미미하기 때문에 상대적으로 거의 균일한 증발량을 보이게 되므로 화염의 응답은 압력변동에 의존하게 된다.

Figure 8에서 압력과의 진폭에 따른 화염의 최대 온도 반응을 고찰함으로써 화염의 비선형적인 응답 특성을 살펴보았다. 위상각이 90°일 때보다 270°에서 최대온도의 변동폭이 커지고, 압력과의 진폭이 증가하여 10%가 되면 소염이 발생한다. 소염 근처의 화염의 강도는 유한 화학반응으로 인해 압력에 대해 매우 민감하기 때문에 압력의 과도한 감소는 결국 소염을 야기시키게 된다. 이러한 응답 특성은 화염의 정상상태 특성인 Fig. 5로부터도 유추될 수 있다. 즉, 압력의 섭동량이 주어질 때 평형영역보다는 소염영역으로 천이될수록 그 응답의 크기가 커지게 된다.

전체적인 응답의 비선형성을 정량화하기 위해서, Fig. 8과 같은 조건에서 다음과 같은 표준화된 응답을 도입하였다.

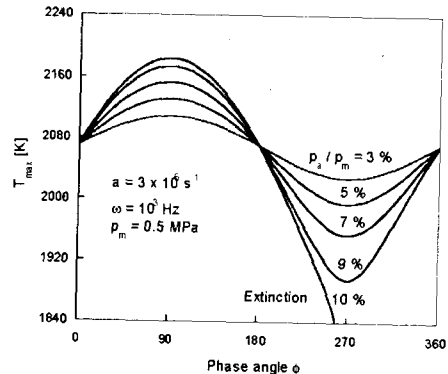


Fig. 8 Variation of maximum temperature response for various pressure perturbations

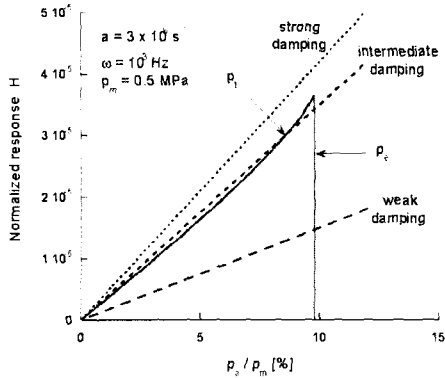


Fig. 9 Nonlinear maximum temperature response with normalized acoustic amplitude

$$H = \int_0^{\tau} [T_a / T_m] \sin(2\pi\omega t) dt \quad (9)$$

Figure 9에서 압력 가진폭이 증가하여 화염이 소염 조건에 가까워질수록 규준화된 화염 응답특성의 비선형성이 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이, 압력파의 진폭이 증가함에 따라 최대 온도의 변동폭이 $\phi = 270^\circ$, 즉 소염영역 근처에서 더 크게 나타나기 때문이다. 즉, 화염이 소염에 근접하는 경우에는 준정상상태(quasi-steady)의 응답특성으로 인하여 화염은 강한 비선형 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 작은 진폭의 가진에 대한 선형 안정성 해석은 그 진폭이 증가함에 따라 유효하지 않음을 정량적으로 보여준다.

연소 시스템에서 교란에 대한 감쇠율(damping rate)은 일반적으로 선형적으로 가정할 수 있다. 이 경우 다음과 같은 세 가지 현상을 설명할 수 있다. 감쇠율이 큰 경우에는 소염을 일으키지 않는 크기의 압력 변동에 대하여 화염은 안정성을 찾지만, 작은 경우에는 화염의 응답은 가진에 의해 계속 증폭되어 소염에 이르게 된다. 중간 크기의 감쇠율이 존재하는 경우에는 특정 크기의 진폭(p_1) 이상에서만 화염이 불안정해지는 것을 알 수 있는데, 이는 화염의 비선형 응답특성이 Clavin 등⁽¹³⁾에 의해 논의된 역치(threshold) 현상을 설명할 수 있는 메커니즘이라는 것을 의미한다.

화염 지역에서의 교란에 의한 복사 열전달 또한 중요한 인자 중 하나이지만, 본 연구에서와 같이 음향파 가진에 의한 화염의 비선형적인 응답 특성을 보이는 소염 영역 근처인 경우에는 복

사열전달에 의한 소염보다는 스트레인 효과에 의한 소염이 훨씬 더 지배적인 것으로 알려져 있으므로⁽¹⁴⁾, 본 연구에서와 같은 결과에 있어서는 정량적으로도 큰 차이가 없을 것으로 여겨진다.

5. 결론

액체 추진 로켓에서 발생하는 음향파 불안정성을 파악하기 위하여 정체점 유동장에서 상변화불기지는 액체산소와 수소의 확산화염을 모델로 하여, 정상상태에서의 화염의 구조와 압력변동에 따른 화염의 최대 온도 응답특성을 상세 화학반응을 고려한 수치적 해석을 통하여 연구하였다. 음향파의 증폭/감쇠의 판단 기준으로 Rayleigh 기준을 사용하였으며, 평형과 소염 근처의 화염에 대하여 다양한 주파수와 진폭을 가지는 음향파에 대한 응답 특성을 살펴보았다.

정상상태의 화염 구조를 해석한 결과, 정체점 유동장에서 액체산소와 수소의 화염은 연쇄 반응 지역을 둘러싼 재결합 반응이 존재하였으며 스트레인의 증가와 정체 압력의 감소는 소염을 야기시켰다.

음향파 가진이 있는 경우 평형과 소염 근처의 화염의 응답 특성을 살펴보았는데, 평형조건 근처의 화염은 주파수의 증가에 따라 발생하는 응답 위상차에 의해 고주파 음향파가 감쇠하는 영역이 존재하였다. 이와 달리, 소염 조건 근처의 화염은 유한 화학반응의 효과로 인해 실제적인 주파수 범위에서 음향파가 증폭하여 음향파 가진에 매우 민감한 반응을 보였다. 또한 음향파 가진에 따라서 소염근처에서 강한 비선형적 응답특성을 확인하였고, 이를 정량화함으로써 역시 현상을 설명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 연소기술 연구센터(CERC)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Culick, F. E. C., 1983, "Combustion Instabilities in Liquid-Fueled Propulsion Systems - An Overview," AGARD 72B PEP Meeting.

- (2) Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds.), 1972, Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, NASA SP-194.
- (3) Kim, J. S. and Williams, F. A., 1994, "Contribution of strained Diffusion Flames to Acoustic Pressure Response," *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp. 279~299.
- (4) Sohn, C. H., Chung, S. H., Kim, J. S. and Williams, F. A., 1996, "Acoustic response of Droplet Flames to Pressure Oscillations," *AIAA Journal*, Vol. 34, pp. 1847~1854.
- (5) Kim, H. J., Sohn, C. H., Chung, S. H., Kim, J. S., 2001, "Nonlinear Acoustic-Pressure Response of Oxygen Droplet Flames Burning in Gaseous Hydrogen," *KSME International Journal*, Vol. 15, pp. 510~521.
- (6) Kim, H. J., Chung, S. H. and Sohn, C. H. , "Nonlinear Acoustic Responses of H₂/Air Counterflow Diffusion Flames," submitted to *Transactions of KSME*.
- (7) Sychev, V. V., 1987, Thermodynamic Properties of Oxygen, Hemisphere Publishing Corporation.
- (8) Smooke, M. D., 1982, "Solution of Burner Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value methods," *Journal of Computational Physics*, vol. 48, pp. 72~105.
- (9) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009.
- (10) Kee, R. J., Warnatz, J. and Miller, J. A., 1983, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities, and Diffusion Coefficients," Sandia National Laboratories Report, SAND83-8209.
- (11) Maas, U. and Warnatz, J., 1988, "Ignition Processes in Hydrogen-Oxygen Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 74, pp. 53~69.
- (12) Rayleigh, J. W. S., 1945, The Theory of Sound, vol. II, Dover.
- (13) Clavin, P., Kim, J. S. and Williams, F. A., 1994, "Turbulence-Induced Noise Effects on High-Frequency Combustion Instabilities," *Combustion Science and Technology*, Vol. 96, pp. 61~84.
- (14) Guo, H., Ju, Y., Maruta, K., Niioka, T. and Liu, F., 1997, "Radiation Extinction Limit of Counterflow Premixed Lean Methane-Air Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 109, pp. 639~646.