

액체 추진 로켓 내의 액적 화염의 구조 및 음향 압력파에 대한 응답 특성에 관한 수치적 연구 (A Numerical Study on Structure and Acoustic Pressure Response of Droplet Flames in Liquid-Propellant Rocket Engines)

김 홍집, 손 채훈(서울대 대학원), 정 석호(서울대 기계공학과), 김 중수(University of California)

1. 서론

로켓에서 발생하는 음향과 불안정성 (acoustic instability) 은, 연소 과정 중에 발생하는 열방출이 로켓 내부에서 진동하는 음향파 (acoustic wave) 와 상호 작용하여 압력파의 진폭을 증폭시키는 현상이며, 심한 경우 분사 장치의 손상뿐만 아니라 로켓의 파괴를 가져오기도 한다. 액체 추진 로켓 연소실내의 여러 음향파 불안정성 요인중, 열방출율의 섭동 (perturbation) 이 음향파의 불안정성에 영향을 미치는 가장 중요한 증폭 인자로서 인식되고 있다 [1, 2]. 추진 기관으로 이용되는 액체 로켓 엔진, 고체 추진 모터 및 dump combustor, afterburner 등에서 발생하는 연소 불안정으로 인한 피해 사례가 보고되어 온 이후, 연소 불안정성 (combustion instability) 에 대한 연구는 로켓 모터 및 항공기용 엔진의 개발에 있어 중요한 문제의 하나로 인식되어 왔다. 더우기 로켓 발사 비용의 절감을 위하여 연소실 내의 작동 압력이 높아짐에 따라 음향파 불안정의 발생 경향이 증대되고 있으며, 또한 액체 로켓 엔진에서 음향파 불안정성을 피하기 위해 수반되는 추력 감소는 많은 경제적 손실을 가져오고 있다. 최근에 액체 추진제에서 많이 사용되는 연료/산화제 조합은 액체 산소와 수소이며 따라서 LOX-H₂ 로켓에서 액적 화염의 압력 변동에 따른 응답 특성에 관한 연구는, 추진 로켓의 안정성 및 경제성 향상과 관련된 중요한 연구 분야의 하나이다.

일반적으로 로켓내에서 나타나는 유동은 다상 (multi-phase) 난류 반응 유동으로, 직접 수치 모사에 의한 해석은 사실상 불가능하다. 따라서 이에 대한 모델링으로서 다상 난류 연소 상황을 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]. 이러한 연구들은 일단계의 비가역 반응 (one-step irreversible reaction) 을 가정한 선형 안정성 해석 (linear stability analysis) 을 통해 증폭 메커니즘의 물리적 이해를 증진시켰으나 작은 진폭에 대해서만 해석이 가능하고 상세한 화학 반응 메커니즘 (detailed kinetic mechanism) 의 영향이나 물성치의 온도 및 농도에 대한 의존성을 고려하지 못하는 등, 그 적용 범위에 많은 제약이 따른다. 특히 산소액적/수소 화염에서는, 평형 조건 근처를 제외하고는 대류-확산 지역의 두께에 비견될 정도로 두꺼운 재결합 지역 (recombination zone) 이 연쇄 반응 지역 (branching reaction zone) 을 둘러싸고 있다. 따라서 이론 해석에서 사용된 얇은 반응 지역에서의 준정상 상태 가정 (QS approximation) 은 유효하지 않게 된다. 이러한 여러가지 효과를 고려하고, 비선형 문제에 대한 해석의 복잡성 및 적용 범위의 한계를 극복하기 위해서는 상세 화학 반응을 고려한 수치 해석이 필

요하며, 압력파의 증폭/감쇠 메커니즘에 대한 이해를 증진시킬 수 있다.

본 연구에서는 구형 단일 액적 화염을 모델로 채택하여 상세한 화학 반응을 고려한 수치해석을 통하여, 넓은 범위의 연소 조건하에서 형성된 정상상태 액적화염의 구조를 해석하고, 압력파 진동에 대한 응답을 규명함으로써 안정/불안정성을 판별하고 연소 불안정성 메커니즘을 밝히고자 한다.

2. 지배 방정식과 경계 조건

일반적으로 연소 현상은 물질, 운동량 및 에너지 전달과 같은 전달 현상과 복잡한 화학 반응이 연관되어 있으며, 기하학적인 조건과 유동 상황등에 의해 대부분 다차원적인 성격을 가지므로 이를 모사하기 위해서는 질량, 운동량, 에너지, 화학종에 대한 보존 방정식 및 상태 방정식 등을 다차원적으로 연립하여 해석하여야 한다. 특히 액적 연소의 경우에는 상변화를 수반하기 때문에 이 현상까지 포함하여 해석하기는 매우 어렵다. 따라서 대류 현상을 무시하여 1차원으로 간주하고 액적 표면에서부터 외기에 이르는 기체상만을 해석하였다. 또 연구 범위를 아임계 영역에 국한시키며, 이에 따라 액적 반경 변화의 특성 시간이 특성 확산 시간보다 액체와 기체의 밀도비인 $O(\rho_l / \rho_g)$ 만큼 크므로 연소시의 액적 반경 변화율을 무시할 수 있다 [5]. 로켓 엔진 내에서는 잠열 및 임계 온도, 임계 압력의 차이로 수소가 먼저 증발되어 산소액적 주위를 둘러싸게 된다. 이러한 상황 하에서 형성된 액적 화염에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

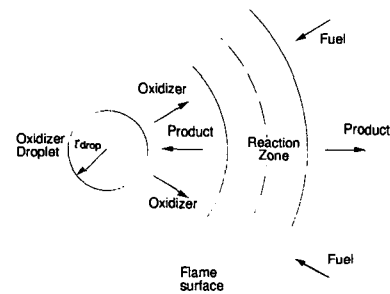


Figure 1. Schematic Diagram of droplet diffusion-flame structure.

액체 산소 입자의 크기는 연소실내에서 전파하는 음향파의 파장보다 매우 작으므로, 액적 연소의 특성 길이 내에서 압력은 공간적으로 균일하다고 간주할 수 있다. 또, 시스템내의 유동 속도는 음속에 비해 매우 작으므로 점성 소산 효과는 무시할 수 있으며, 액적 표면은 항상 포화 상태로 액적 내부 가열현상 (droplet heating) 은 무시하였다. 추가로 다른 액적과의 상호 작용을 무시하며,

고려한 기체상은 이상 기체로 취급하였다. 이상의 근사 및 가정을 사용하면 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial m}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식 :

$$p = p(t) = p_m \pm p_a \sin \omega t \quad (2)$$

에너지 방정식 :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(mh)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho \sum_{j=1}^n h_j Y_j V_j \right) - \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

화학종 방정식 :

$$\frac{\partial(\rho Y_j)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(m Y_j)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho Y_j V_j) = \dot{\omega}_j M_j \quad (4)$$

상태 방정식 :

$$p = \frac{\rho R T}{M} \quad (5)$$

여기서 $m = \rho r^2$, p_m 은 연소실내의 평균 압력, p_a 와 ω 은 각각 압력요동의 진폭과 주파수이다. 액체 산소 액적 표면에서의 온도는 주어진 압력에 따라 항상 일정한 포화 온도를 가진다. 그리고 화학 반응시 발생한 열이 액적쪽으로 전도되고 이것이 잠열로 쓰여 액체 산소는 기화된다. 화학종들에 대해서는 대류-확산 균형식 (diffusive-convective balance) 을 이용하면 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r = r_{drop} ; \lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} &= mL \\ T &= T_{B,O} \\ m Y_j + \rho r^2 Y_j V_j &= 0 \quad (j \neq O) \\ m Y_O + \rho r^2 Y_O V_O &= m \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $T_{B,O}$ 는 산소 액적의 포화 온도를 나타내며 하첨자 O 는 산화제를 뜻한다. 외기의 상태에 대한 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r \rightarrow \infty ; \\ \begin{cases} T = T_\infty ; \text{steady} \\ \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} ; \text{pressure oscillation} \\ Y_F = Y_{F,\infty} = 1 \\ Y_j = 0 \quad (j \neq F) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

3. 수치 해법

지배 방정식은 $2+n_s$ 에 해당하는 편미분 방정식과 하나의 대수 방정식으로 구성되어 있으며 경계 조건을 이용하여 풀 수가 있다. 여기서 다루는 방정식계는 동결 유동장과는 다른 몇가지 특성을 가지고 있으며 이를 효율적으로 풀기 위하여 적절한

방법이 필요하다. 지배 방정식들로 표현되는 각 독립 변수들의 보존성을 엄격히 만족시킬 수 있도록 유한 체적법 (finite volume method) 을 사용하여 차분화하였으며 시간항에 대한 처리에 있어서는 Crank - Nicolson 법과 암시법 (implicit method) 을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다. 이산화된 비선형 연립 방정식을 푸는 방법으로 Newton 방법을 적용하였다.

지배 방정식에 포함되어 있는 열역학적 물성치와 화학 반응항을 계산하기 위하여 CHEMKIN-II [6] 를 사용하였으며, 전달 물성치의 계산에는 TRANSPORT PACKAGE [7] 를 이용하였다. 본 연구에서 고려한 화학 반응 메카니즘 및 반응열에 대한 계수는 Table 1 에 나타내었다. 여기서 i -반응 단계에서의 반응열 상수 k_i 는 다음과 같은 Arrhenius 형태의 식으로 표시된다.

$$k_i = A_i T^{b_i} \exp(-E_i / RT) \quad (8)$$

4. 정상 상태의 화염 구조

액체 산소 - 수소로켓내에서 분사되는 액적은 무화 과정 (atomization) 을 거쳐 $O(1 \mu m - 1 mm)$ 정도의 다양한 크기의 직경을 갖는데 그 크기에 따라 평형 조건 근처에서부터 소염 조건 근처에 이르기까지 다양한 화염 강도 범위에서 연소되며, 또 여러 가지 주파수와 진폭을 갖는 음향파로 인해 다양한 모드의 압력 변동하에서 연소된다. 본 연구에서는 압력 변동에 따른 화염의 거동을 해석하기 위하여 먼저 여러 크기의 액적에 대한 정상 상태 화염의 구조를 해석하였다.

로켓 엔진내에서의 산소 액적의 상태를 $p_m = 2.8MPa$, $p_a = 0.0MPa$, $T_{B,O} = 140.11K$, $L = 124.6kJ/kg$, $T_\infty = 500K$ 로 설정하였다. 액적의 크기를 $r_{drop} = 1mm$ 로 하였을 때의 온도와 주 화학종인 H_2 , O_2 와 H_2O 의 질량 분율의 분포를 Fig. 2 에 도시하였다. 이로부터 반응물들인 H_2 와 O_2 의 화염면을 통한 누출 (leakage) 이 거의 없는 것을 알 수 있는데 이는 화염이 평형에 가까운 (near equilibrium) 상태임을 의미한다. H_2 와 O_2 가 거의 소모되는 $r/r_{drop} \approx 3.8$ 인 지역에서 온도의 최대점

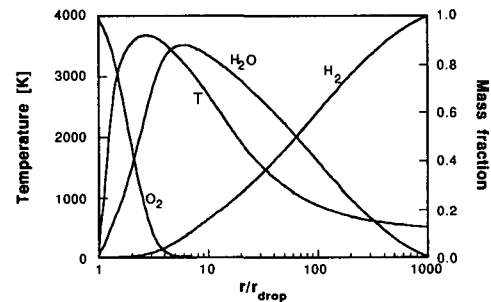
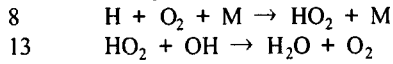


Figure 2. Distribution of major species and temperature for steady-state droplet flame ($p=2.8MPa, r_{drop}=1mm$).

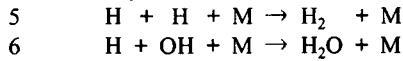
은 액적쪽에, H_2O 의 최대점은 외기쪽에 존재하는 것을 알 수 있다. 액적 표면에서부터 기화된 산소는 반응 지역에 이르러 외기로부터 확산되어 온 수소와 반응하여 H_2O 가 생성된다. H_2O 가 생성되는 주요 반응은 Table 1 에 나타낸 기본반응 중 세번째 반응으로 그 최대점이 수소쪽에 위치하게

된다. 이 때의 온도 분포와 단위 시간, 단위 체적 당의 열방출율(heat release rate)과 여기에 반경 방향의 면적을 곱한 단위시간당 단위길이당의 열방출율의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 액적 화염은 기하학적으로 구형의 형상을 가지고 있으므로 단위 체적당의 열방출율보다는 단위 길이당 열방출율이 더 물리적인 의미를 가진다. 이 그림에서부터 열방출율의 최대값이 두 곳에 존재하는 것을 알 수 있는데 각 지역에서 아래의 반응들이 주를 이루기 때문이다.

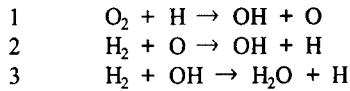
액적(산화제) 쪽 ($r/r_{drop} = 1.343$);



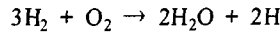
외기(연료) 쪽 ($r/r_{drop} = 3.294$);



이 반응들은 발열 반응으로 화염면에서 생긴 라디칼들이 안정된 화학종으로 바뀌는 반응이다. 이 반응들에 의해 화염의 양쪽에서 두 개의 최대점을 가진다. 이러한 재결합 반응 지역(recombination zone)들 사이에는 아래와 같은 chain branching 및 chain propagation 반응들이 우세한 연쇄 반응 지역(branching reaction zone)이 존재한다.



이 반응들을 종합하면



로 나타낼 수 있는데 이는 수소 화염의 2-단계 축소 메카니즘[8]에서 나타나는 연료의 산화 및 chain branching 반응으로 이 반응이 연쇄 반응 지역의 화학 반응을 대표한다고 볼 수 있다.

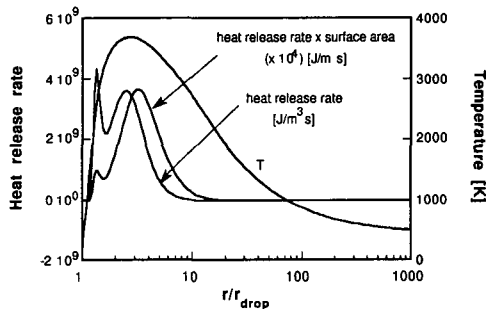


Figure 3. Distribution of temperature and heat release rate for steady-state droplet flame($p=2.8\text{MPa}, r_{drop}=1\text{mm}$).

Figure 3로부터, 액적쪽으로는 외기쪽에 비해 상대적으로 온도의 구배가 매우 급하여 열손실이 매우 크므로 액적쪽에 형성된 열방출율의 국소 최대점이 온도에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. H, O 라디칼들의 최대점들이 각각 연료와 산화제쪽에 존재하고 이 두 화학종의 확산 정도의 차이에 의해 O 라디칼의 최대점근처에서 OH 라디칼의 최대점이 존재한다. H_2O_2 는 HO_2 에 비해 상대적으로 분자량이 크기 때문에 잘 확산되지 못하고, 또 반응에 필요한 H 라디칼이 많은 화염면 근

처에서 최대값이 존재한다. 반면에 HO_2 는 상대적으로 분자량이 작아 확산성이 좋으므로 H_2O_2 보다 화염으로부터 먼 곳에 최대값이 존재하게 된다.

액적 크기를 변화시킬 때 공간에 따른 온도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 액적의 크기가 감소함

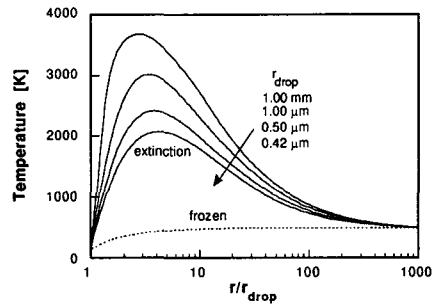


Figure 4. Comparison of temperature profiles for various droplet sizes.

에 따라 화염의 온도가 감소하고 화염대거리(r_f/r_{drop})가 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 화학 반응의 물질확산에 대한 상대적 강도를 나타내는 무차원 수인 Damköhler 수는 액적 화염의 경우, 액적 크기의 제곱에 비례한다[4]. 따라서 액적의 크기가 감소하면 Damköhler 수가 감소하여 화염의 강도가 줄어들고 이에 따라 화학 반응율이 감소하므로, 화염면을 통하여 연료 및 산화제의 누출이 증가하게 되며, 특히 온도 구배가 큰 액적쪽에서 H_2 의 누출이 증가하여 액적 표면까지 존재한다. 이러한 양상을 Fig. 5에 나타내었다. 여러 가지 크기의 액적에 대하여 계산된 단위 길이당의 열방출율을 Fig. 6에 나타내었다. 액적의 크기가 감소

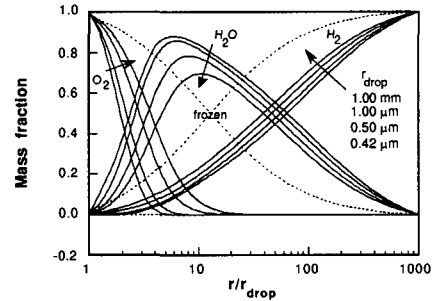


Figure 5. Comparison of major species profiles for various droplet sizes.

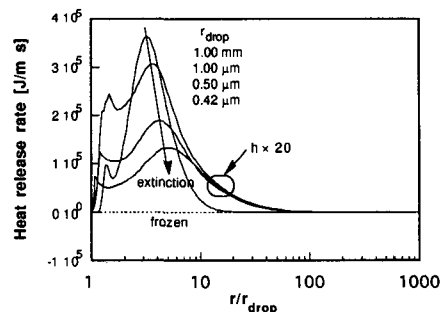


Figure 6. Comparison of heat release rate profiles for various droplet sizes.

함에 따라 열방출율의 두 최대점들이 연쇄 반응 지역으로부터 멀어지면서 열방출 지역도 넓게 분산되어 분포되며 그 최대치 역시 급격히 감소하는

것을 알 수 있다. 액적의 크기가 계속 감소하면 화학 반응율의 감소로 열 방출량이 감소하여 소멸(extinction)에 이르게 된다. 소멸이후에 동결 유동장이 형성되면 화학 반응이 일어나지 못하게 되고 연료와 산화제인 H_2 와 O_2 만이 단순하게 혼합된다. 액적에서의 질량 유량인 증발율의 액적 크기에 따른 분포를 Fig. 7에 나타내었는데 액적 크기의 넓은 범위에서 대체적으로 d^2 -법칙을 따르나 액적의 크기가 작아져 소멸 근처에 이르면 d^2 -법칙의 예측치보다 증발율이 감소한다. 액적 반경의 변화에 따른 최대 온도의 변화를 도시한 Fig. 8은 점화 및 소멸 현상을 보여 주는 S 곡선의 upper branch를 나타내주고 있다

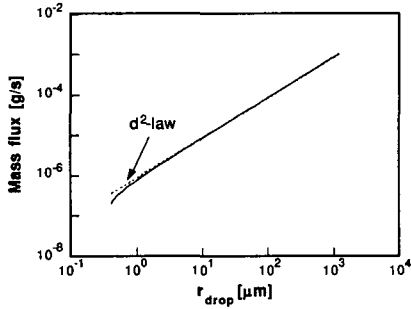


Figure 7. Distribution of mass flux for various droplet sizes.

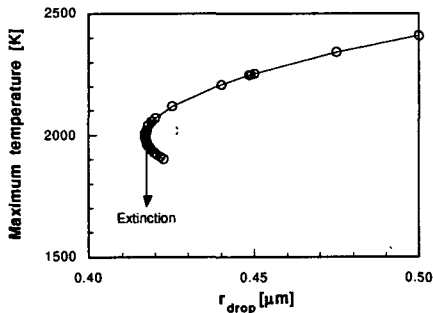


Figure 8. Characteristic S-curve representing extinction condition.

5. 압력 변동에 따른 응답 특성

음향과 가진에 대한 화염의 응답에 대한 해석을 위해 정상 상태의 화염중 $r_{drop} = 1 \text{ mm}$ 와 $0.42 \mu\text{m}$ 일 때를 각각 평형과 소멸 근처의 화염으로 정하였다. 음향-연소 불안정성을 야기시키는 음향파의 진동수는 10^3 Hz 이상으로 알려져 있으므로 기준 주파수로는 $\omega = 10^4 \text{ Hz}$ 를 택하였고, 주파수 효과에 따른 응답 특성을 파악하기 위하여 저주파수로는 $\omega = 1 \text{ Hz}$ 를 택하였다. 가진한 음향파로는 $p = p_m - p_a \sin \omega t$ 의 형태를 택하였다. 음향 연소 불안정성 해석을 위하여 압력파의 진폭이 증폭되는지 감쇠되는지를 조사하며, 압력과 증폭/감쇠의 판정은 Rayleigh 기준(Rayleigh Criterion)을 적용하였다[9]. 즉 압력파의 요동과 연소로 인한 열방출율의 변동이 한 주기동안 평균적으로 동상(in-phase)이면 압력의 증가에 의해 열방출율이 증가하며 이 열방출율의 증가에 따라 압력이 증폭되므로 불안정하며, 이와 같은 이유로 다른 상(out-of-phase)이면 감쇠한다는 기준을 사용하였다.

저주파수와 고주파수에서의 압력 변동에 따른

평형 조건 근처의 화염의 응답 특성을 위상각 ϕ 의 함수로 Fig. 9에 나타내었는데 열방출율 변동은 주기함수의 형태를 띠고 있다. 압력이 증가하면 잠열이 작아지기 때문에 액적 표면에서의 증발율인 $m|_{r=r_{drop}}$ 이 증가하게 된다. 이 때 저주파수의 가진이 있는 경우 압력파의 특성 시간은 매우 길기 때문에 압력 증가에 따른 증발량의 증가가 액적으로부터 먼 곳까지 전파되어 화염면에서의 질량 유량 역시 정상 상태의 m_m 보다 커지게 되어 화염이 외기쪽으로 이동하게 된다. 따라서 화염 강도가 약화되므로 열방출율이 감소하게 된다. 반면에 압력 및 유량의 증가는 화학반응의 증가를 의미하며 이에 따라 열방출율은 증가하게 된다. Figure 9.로부터 전체 열방출율은 압력 증가시 평균적으로 증가함을 알 수 있으며 이는 압력 및 유량의 증가에 의한 열방출율 증가가 화염의 이동에 따른 열방출율 감소효과보다 더 우세함을 의미한다. 고주파수의 압력파를 가진하는 경우, 그 특성 시간이 저주파의 경우보다 짧기 때문에 액적과 반응면 사이에 위치한 대류-확산 지역 및 반응지역에서의 비정상성(unsteadiness)이 증대되고 유동에 대한 응답 지연을 일으키게 된다. 즉, 압력의 증가로 인하여 생긴 증발율의 증가가 대류-확산 지역에서의 응답 지연으로 인하여 오히려 화염 근처에서의 질량 유량 m 을 감소시킴으로써 화염이 액적으로 접근하는 결과를 가져오게 된다. 압력 증가에 따른 화학반응의 증가는 열방출율 증가를 가져오고, 질량 유량의 감소는 화학 반응 강도 및 열방출율 감소를 가져오지만, 후자의 효과가 더 우세하므로 고주파로 갈수록 위상차가 증대되어 압력 파 감쇠 영역이 나타난다.

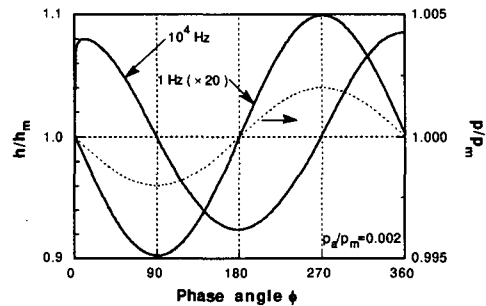


Figure 9. Heat release rate response near equilibrium regime.

소멸 근처의 화염에 대하여 음향파를 가진한 경우의 응답 특성을 Fig. 10에 나타내었다. 소멸

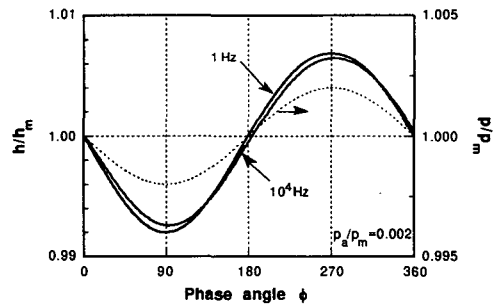


Figure 10. Heat release rate response near extinction regime.

근처에서는 평형 근처보다 계산 영역의 절대적인

크기가 작으므로 질량 유량 m 의 공간적인 의존성이 작고 넓은 화학반응 효과로 저주파수의 경우에는 거의 모든 지역에서 m 이 공간적으로 거의 일정하게 된다. 압력이 증가함에 따라 주파수의 크기에 관계없이 화염면에서의 증발량이 m_m 보다 커지게 되며 이는 유량 및 압력증가에 따른 열방출을 증가효과가 크기 때문이다. 이 경우에는 음향파의 특성 시간(characteristic time)이 시스템의 특성 시간에 비해 상대적으로 길기 때문에, 변동 압력의 어느 순간은 그때의 압력에 해당하는 정상상태의 화염에 근접하게 된다. 이는 가진에 대한 화염의 응답 지연이 거의 없음을 의미하며 따라서 항상 압력파가 증폭된다고 예측할 수 있다.

열을 방출하는 화학 반응의 강도는 압력에 비례하게 되는데, 소염 근처의 화염의 강도는 유한 화학 반응의 효과때문에 압력의 변화에 더욱 민감해진다. 즉 평형 근처에서의 화염 강도는 이미 거의 평형 상태에 도달해 있으므로 압력 변화에 의해 큰 영향을 받지 않는 반면에 소염 근처에서의 화염은 압력의 변화에 매우 민감하게 반응할 수 있게 된다. 압력이 어느 값이상 감소하면 화염이 더 이상 유지되지 못하고 소염된다. 같은 크기의 진폭에 대하여, 저주파수에서 고주파수로 그 크기를 증가시키면서 계산한 결과 어느 주파수 이상에서는 소염이 일어나지 않게 되는데 이는 압력파의 특성시간에서 그 이유를 찾을 수 있다. 즉, 압력파의 특성 시간의 차이로 고주파수에서는 소염을 야기시킬 수 있는 임계 상태를 빨리 벗어날 수 있기 때문이다. 각 주파수에 따라 소염 근처의 화염에 대해 소염을 야기시키는 임계 진폭의 변화를 Fig. 11에 나타내었다.

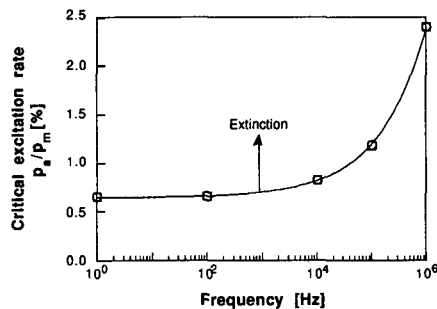


Figure 11. Critical excitation rate with pressure oscillation frequency near extinction regime.

6. 결론

LOX-H₂ 로켓 엔진내에서의 음향-연소 불안정성 연구를 위해 산소 액적 화염을 모델로 하여 정상 상태의 액적 화염의 구조를 해석하고 음향 압력파에 대한 화염의 응답 특성을 해석하였다.

정상 상태의 액적 화염에서는 연쇄 반응 지역 및 이를 둘러싸는 재결합 반응 지역이 존재함을 알았고, 액적쪽의 열방출을 국소 최대점은 기하학적 특성으로 전체 시스템에의 기여도가 미미함을 알았다. 또한 액적 반경이 감소하면 화염의 강도가 감소하여 어느 한계 이상으로 작아지면 소염이 발생하여 동결 유동장을 형성하며 이 때 소염을 나타내주는 S 곡선의 upper branch를 얻었다.

정상 상태의 화염에 음향파 가진이 주어지면 상태에 따라 각기 다른 응답 특성을 나타낸다. 평형 조건 근처의 액적 화염에서는 음향파의 주파수가

증가함에 따라 화염 강도가 매우 크기 때문에 압력 변동에 의해 받는 화학 반응의 영향이 작고 유동장에서의 응답 지연이 우세하여 어느 이상 고주파 영역에서는 음향파 감쇠 현상이 예측되었다. 소염 조건 근처에서는 유한 화학 반응(finite-rate chemistry)으로 인한 화학 반응 효과가 매우 크고 응답 지연이 나타나지 않아 항상 증폭되었다. 또한 임계 진폭 이상의 음향파에 대해서는 화염이 유지되지 못하고 소염되었다.

후기

본 연구는 서울대학교 터보 동력 기계 연구 센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Culick, F.E.C. and Yang, V., "Overview of Combustion Instabilities in Liquid Propellant Rocket Engine", *First International Symposium on Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, Pennsylvania State University, 18-20 January (1993).
2. Culick, F.E.C., "Combustion Instabilities in Liquid-Fueled Propulsion Systems - An Overview", AGARD 72B PEP Meeting, 6-7 October (1988).
3. Kim, J.S. and Williams, F.A., "Contribution of Strained Diffusion Flames to Acoustic Pressure Response", *Combustion and Flame*, vol.98, pp.279-299 (1994).
4. 손채훈, 정석호, 김종수, "로켓 엔진 내의 액적 화염의 음향 압력파에 대한 응답에 관한 이론 해석", 한국항공우주학회지(심사중)(1995).
5. Crespo, A. and Liñan, A., "Unsteady Effects in Droplet Evaporation and Combustion", *Combustion Science and Technology*, vol 11, pp.9-18 (1975).
6. Kee, R.J., Rupley, F.M. and Miller, J.A., "CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009 (1989).
7. Kee, R.J., Warnatz, J. and Miller, J.A., "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities, and Diffusion Coefficients," Sandia National Laboratories Report, SAND83-8209 (1983).
8. 이수룡, "수소 확산화염의 축소 메카니즘 및 구조에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문(1992).
9. Rayleigh, J.W.S., *The Theory of Sound*, vol.II, Dover (1945).

Table 1. Kinetic mechanism of H₂/O₂ reaction system
(A_i:mole,cm³,sec; E_i:kJ/mole)

No.	Reaction				A _i	b _i	E _i
1	O ₂	+H	= OH	+O	2.00E+14	0.00	70.30
2	H ₂	+O	= OH	+H	5.06E+04	2.67	26.30
3	H ₂	+OH	= H ₂ O	+H	1.00E+08	1.60	13.80
4	OH	+OH	= H ₂ O	+O	1.50E+09	1.14	0.42
5	H	+H	+M= H ₂	+M	1.80E+18	-1.00	0.00
6	H	+OH	+M= H ₂ O	+M	2.20E+22	-2.00	0.00
7	O	+O	+M= O ₂	+M	2.90E+17	-1.00	0.00
8	H	+O ₂	+M= HO ₂	+M	2.30E+18	-0.80	0.00
9	HO ₂	+H	= OH	+OH	1.50E+14	0.00	4.20
10	HO ₂	+H	= H ₂	+O ₂	2.50E+13	0.00	2.90
11	HO ₂	+H	= H ₂ O	+O	3.00E+13	0.00	7.20
12	HO ₂	+O	= OH	+O ₂	1.80E+13	0.00	-1.70
13	HO ₂	+OH	= H ₂ O	+O ₂	6.00E+13	0.00	0.00
14	HO ₂	+HO ₂	=>H ₂ O ₂	+O ₂	2.50E+11	0.00	-5.20
15	OH	+OH	+M= H ₂ O ₂	+M	3.25E+22	-2.00	0.00
16	H ₂ O ₂	+H	= H ₂	+HO ₂	1.70E+12	0.00	15.70
17	H ₂ O ₂	+H	= H ₂ O	+OH	1.00E+13	0.00	15.00
18	H ₂ O ₂	+O	= OH	+HO ₂	2.80E+13	0.00	26.80
19	H ₂ O ₂	+OH	= H ₂ O	+HO ₂	5.40E+12	0.00	4.20

Third body efficiencies

H₂/1.0/ H₂O/6.5/ O₂/0.35/ N₂/0.4/