

## 수소/공기 대향류 확산화염의 비선형 음향파 응답특성에 관한 연구

김홍집\*, 정석호\*\*, 손채훈†

(2003년 2월 13일 접수, 2003년 5월 21일 심사완료)

### Nonlinear Acoustic-Pressure Responses of H<sub>2</sub>/Air Counterflow Diffusion Flames

Hong Jip Kim, Suk Ho Chung, and Chae Hoon Sohn

**Key Words:** Acoustic-Pressure Responses(음향파 응답), Hydrogen/Air Diffusion Flame(수소/공기 확산화염), Nonlinear Response(비선형 응답)

#### Abstract

Steady-state structure and acoustic-pressure responses of H<sub>2</sub>/Air counterflow diffusion flames are studied numerically with a detailed chemistry in view of acoustic instability. The Rayleigh criterion is adopted to judge acoustic amplification or attenuation from flame responses. Steady-state flame structures are first investigated and flame responses to various acoustic-pressure oscillations are numerically calculated in near-equilibrium and near-extinction regimes. The acoustic responses of H<sub>2</sub>/Air flame show that the responses in near-extinction regime always contribute to acoustic amplification regardless of acoustic-oscillation frequency. Flames near extinction condition are sensitive to pressure perturbation and thereby peculiar nonlinear responses occur, which could be a possible mechanism in generating the threshold phenomena observed in combustion chamber of propulsion systems.

---

#### 기호설명

---

<i>A</i>	: 진폭
<i>a</i>	: 스트레인율
<i>c<sub>p</sub></i>	: 정압 비열
<i>H</i>	: 규준화된 무차원 증폭지수, Eq. (10)
<i>h<sub>j</sub></i>	: <i>j</i> -화학종의 엔탈피
<i>M<sub>j</sub></i>	: <i>j</i> -화학종의 분자량
<i>n<sub>s</sub></i>	: 고려하는 화학종의 개수
<i>P<sub>s</sub></i>	: 정체점 압력

$\bar{R}$	: 기체 상수
<i>T</i>	: 온도
<i>t</i>	: 시간
<i>U<sub>j</sub></i>	: <i>j</i> -화학종의 확산속도
<i>V</i>	: 상사함수( $= \rho v$ )
<i>v</i>	: 축방향 속도
<i>x, y</i>	: 공간좌표축
<i>Y<sub>j</sub></i>	: <i>j</i> -화학종의 질량분율
<i>w<sub>j</sub></i>	: <i>j</i> -화학종의 생성률
$\phi$	: 위상각(phase angle)
$\lambda$	: 혼합물의 열전도도
$\mu$	: 혼합물의 점성계수
$\rho$	: 밀도
$\tau$	: 주기
$\omega$	: 가진주파수, Hz

---

\* 회원, 한국항공우주연구원 엔진그룹

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

† 책임저자, 회원, 조선대학교 항공우주공학과

E-mail : chsohn@chosun.ac.kr

TEL & FAX : (062)230-7123

---

- $(\cdot)_a$  : 가진에 의한 변동량
- $(\cdot)_m$  : 정상상태값 (평균값)
- $(\cdot)_{-\infty}$  : 연료측 외기 조건
- $(\cdot)_\infty$  : 산화제측 외기 조건

## 1. 서 론

화염 스트레치(stretch)나 속도, 압력으로 표현할 수 있는 외부 교란에 대한 소화염(flamelet)의 과도적인 응답 특성에 관한 연구는 난류화염을 이해하는 데 있어 매우 중요하다. 이러한 연구는 연소 불안정과 밀접한 관계가 있으며, 특히 압력 변동에 따른 화염의 응답특성은 다양한 연소기에서 발생하는 음향 불안정성(acoustic instability)과 연관이 있다. 음향 불안정성은, 연소실 내부에서 진동하는 광범위한 주파수의 음향파가 연소시 발생하는 열방출률과 상호작용하여 그 진폭이 증가하는 현상이다.<sup>(1,2)</sup>

음향 불안정성은, 연소실 내에서의 분사, 무화, 난류혼합, 그리고 연소등과 같은 비선형적인 물리·화학적 과정들에 의하여 발생하며, 특히 연소 과정은, 음향 진동을 발생시키고 유지시킬 수 있는 열에너지의 원천이므로 음향 불안정성의 관점에서 주요한 인자 중 하나이다. 이와 관련된 연구로서, 난류 화염을 층류 소화염(laminar flamelet)의 집합체로 모사하여 소화염의 외부 교란에 대한 선형 응답 해석이 이루어졌다.<sup>(3~6)</sup> 이를 통해 음향파 증폭 메커니즘에 대한 물리적 이해가 증진되었으나, 이러한 연구들은 모두 미소 진폭에 대한 화염의 응답특성에 국한되어 있다는 한계가 있다. 실제 연소기에서의 압력 섭동 진폭은 유한한 크기를 가지므로 큰 진폭의 압력 섭동에 대한 화염의 응답은, 음향파 응답 특성의 포괄적인 이해를 위해 유용한 정보이다.

본 연구에서는, 기존의 한계를 극복하기 위해 층류 대향류 화염을 모델로 채택하고, 상세 화학 반응 기구를 고려하여 유한한 크기의 진폭을 갖는 음향파에 대한 화염의 응답 특성을 수치적으로 해석하였다. 이를 통해 외부 교란에 의한 화염의 음향 불안정성 메커니즘을 살펴보고자 하였다.

## 2. 지배방정식과 경계조건

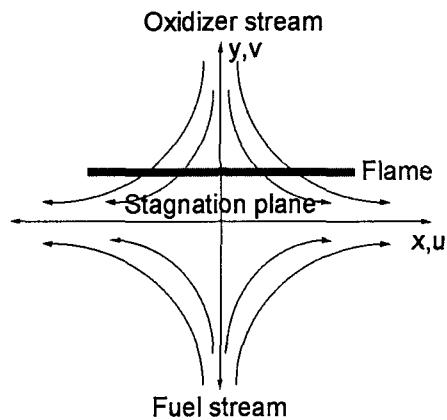


Fig. 1 Schematic diagram of counterflow diffusion flame

본 연구에서 채택한 소화염 모델은 Fig. 1에 나타낸 대향류 확산화염이다. 이를 지배하는 방정식은 본래 2차원 형태이지만, 기존에 알려진 경계층에서의 상사함수를 이용하여 1차원 형태로 근사화시킬 수 있다.<sup>(7)</sup> 또한, 혼합층(mixing layer)의 두께가 상대적으로 얇아 부력의 효과가 미미하므로 자연대류 현상을 무시할 수 있고, Soret 효과와 Dufour 효과를 무시하였다. 혼합층에서의 마하수가 매우 작으므로 점성 소산도 무시될 수 있다. 이러한 가정을 통하여 유도된 지배방정식은 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

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

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

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

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

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

여기서  $V$ 는  $V = \rho v$ 으로 표현되는 축방향 질량유 속이며,  $v$ 와  $y$ 는 각각 축방향 속도와 좌표이다.  $T$ 는 온도,  $\rho$ 는 밀도,  $Y_j$ ,  $M_j$ ,  $w_j$ 와  $h_j$ 는 각각  $j$ -화

학종의 질량분율, 분자량, 반응율과 엔탈피이다.  $c_p$ 는 혼합물의 정압비열,  $a$ 는 스트레인율(strain rate)로서  $a(y, t) = u/x$ 로 표현되며,  $n_s$ 는 고려된 화학종의 개수,  $P_s$ 는 정체점 압력,  $U_j$ 는  $j$ -화학종의 확산속도,  $\bar{R}$ 는 기체상수이다.

일반적으로 연소실의 크기는 화염의 두께에 비해 상당히 크기 때문에, 연소실내에 존재하는 음향파에 의한 압력 교란의 공간적 변화는 무시가능하다. 따라서, 화염에 가해지는 외부 압력 교란은 시간만의 함수로서 다음과 같이 모사된다.

$$P_s(t)/P_{s,m} = 1 + A \sin(2\pi\omega t) \quad (6)$$

여기서 하첨자  $m$ 은 평균값 (즉, 정상상태에서의 값),  $\omega$ 는 가진주파수를 나타낸다. 위 식으로 표현되는 압축/팽창 과정은 등엔트로피 과정으로서, 이에 따라 연료와 산화제 경계에서의 자유유동의 온도인  $T_F$ 와  $T_O$ 는 시간에 따라 변하게 되며, 정체점에서의 압력인  $P_s(t)$ 의 함수로 표현된다. 위의 지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$y \rightarrow -\infty; \quad a = a_\infty \sqrt{\frac{\rho_\infty}{\rho_{-\infty}}} \\ Y_j = Y_{j,-\infty}, \quad j = 1, \dots, n_s \quad (7)$$

$$\rho_{FC} c_{pF} \frac{dT_F}{dt} = \frac{dP_s(t)}{dt}$$

$$y \rightarrow \infty; \quad a = a_\infty$$

$$Y_j = Y_{j,\infty}, \quad j = 1, \dots, n_s \quad (8)$$

$$\rho_{OC} c_{pO} \frac{dT_O}{dt} = \frac{dP_s(t)}{dt}$$

$$y = 0; \quad V = 0 \quad (9)$$

지배방정식은 유한 체적법(FVM)을 사용하여 이산화하였다. 이산화된 연립방정식의 풀이를 위해, Smooke<sup>(7)</sup>에 의해 개발된 알고리즘을 바탕으로 수정된 Newton iteration방법을 적용하였다. 열역학적 물성치와 화학반응항은 CHEMKIN-II<sup>(9)</sup>를, 전달물성치는 TRANSPORT PACKAGE<sup>(10)</sup>를 사용하여 계산하였다. 또한, 8개의 화학종과 19단계의 기본반응을 포함하는 상세 화학반응 메커니즘<sup>(11)</sup>을 사용하였다.

수치해석은 두 단계로 수행되었다. 먼저, 주어진 유동 조건에서 과도항(transient term)이 없는 정상상태 해를 구하였다. 다음으로 식 (6)의 입력 가진에 따른 과도적인 화염해를 시간의 함수로 구하였다. 시간 적분시 Crank-Nicolson 방법을 채택하였고, 가진 주파수에 따라 시간 증분을 조정하여 수치적 안정과 충분한 정확도를 유지하도록 하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 정상상태 화염 구조

본 연구에서 연료로서 수소를, 산화제로서는 공기(21% 산소/79% 질소)를 채택하였으며, 경계온도는  $T_F=300K$ ,  $T_O=300K$ 로 설정하였다.

일반적으로 분사기 오리피스의 크기와 분사속도에 따라서 화염은, 다양한 연소 조건에서 형성된다. 대향류 화염의 경우, 스트레인율에 따라 평형(equilibrium) 조건과 소염(extinction) 조건 근처 영역에 이르는 다양한 영역에서 연소된다. 음향섭동에 의한 화염의 응답을 살펴보기에 앞서 정상상태 화염의 특징을 살펴보는 것이 유용하다.

총체적인 정상상태 화염의 특징을, 산화제 경계에서의 스트레인율( $a_\infty$ )과 압력의 함수로 Figs. 2와 3에 나타내었다. 이후로  $a_\infty$ 를 편의상  $a$ 로 표기하겠다. 화염구조 계산시, 소염점에 해당하는 전환점(turning point)에서는, 스트레인율과 압력에

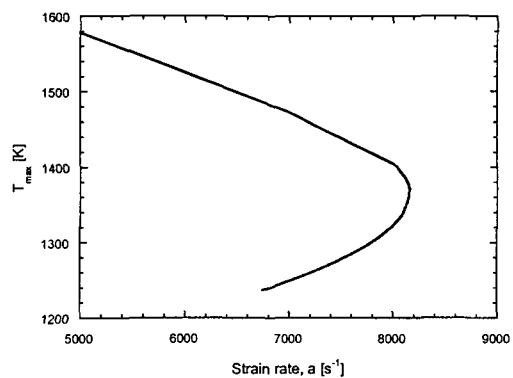


Fig. 2 Variations of maximum temperature as a function of strain rate at mean pressure  $P_{s,m} = 1$  atm

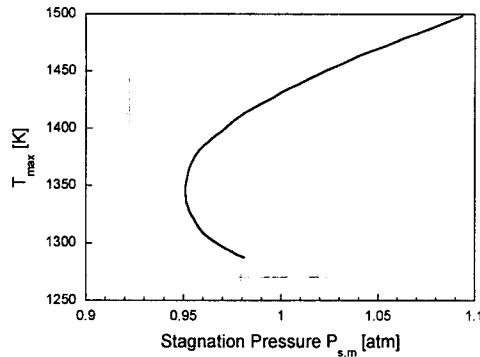


Fig. 3 Variations of maximum temperature as a function of mean pressure at  $a_m = 7000 \text{ s}^{-1}$

따른 최대 온도의 변화가 단조성을 유지하지 못하는 특이성(singularity)이 존재하므로, 공간상의 한 점의 온도를 지정하여 역으로 스트레인율과 압력을 계산하는 역수치해법(inverse numerical method)을 채택하였다.<sup>(6)</sup>

1기압에서 스트레인율의 변화에 따른 최대온도의 변화 양상을 Fig. 2에 도시하였으며, 또한  $a_m = 7000 \text{ s}^{-1}$ 에서 압력에 따른 화염의 최대온도를 Fig. 3에 나타내었다. 이러한 화염의 특성은 비록 정성적이기는 하지만 압력 가진에 의한 화염의 비정상(unsteady) 응답을 설명하는데 유용하게 사용될 수 있다. 대향류 화염의 경우, 주어진 스트레인율에서 압력이 급격히 감소하면 소염될 수 있으며 이러한 특징은 전형적인 S-커브의 윗가지(upper branch)를 보여주는 Fig. 3으로부터 알 수 있다. 여기서 압력에 따른 최대 화염온도의 구배(변화율)는 압력 변동에 따른 화염 응답의 민감도(sensitivity)를 암시한다고 할 수 있는데, 그림에서 볼 수 있듯이, 소염점에 가까운 압력에서는 구배가 커지는 것을 알 수 있다. 이는, 소염 영역 근처의 화염에서 유한 화학반응(finite-rate chemistry)의 효과가 매우 크게 나타남에 기인한다.<sup>(4)</sup> 또한 압력 변동 하에서 화염이 최소의 압력값을 가지는 부분을 지날 때 매우 큰 응답 특성을 보일 것을 예측할 수 있으며, 이에 따라 비선형적인 응답특성이 나타날 수 있음을 암시한다.

### 3.2 음향 응답 특성

음향 불안정성 해석에 사용되는, 압력파 진폭

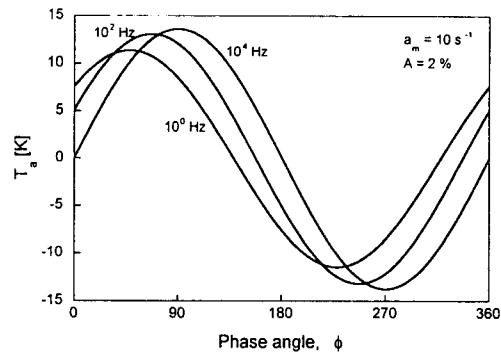
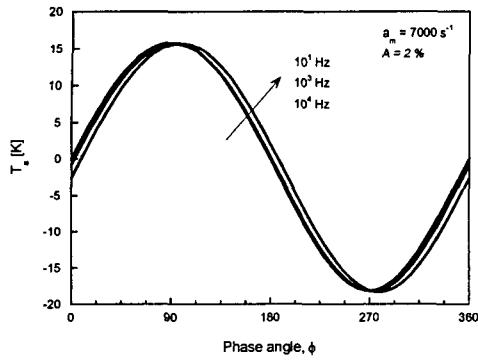


Fig. 4 Responses of maximum temperature fluctuation of near-equilibrium flame to slow, medium and fast pressure oscillations

의 증폭/감쇠 판정 기준으로 Rayleigh 기준을 채택하였다.<sup>(12)</sup> 이는 압력파의 섭동과 열방출률의 섭동이 평균적으로 같은 위상(phase)으로 변동하면 증폭, 다른 위상을 가지면 감쇠된다는 기준이다.

대향류 화염의 경우 앞에서 설명되었듯이 스트레인율의 크기에 따라 평형 영역과 소염 영역의 화염으로 대별할 수 있다. 먼저 평형( $a_m = 10 \text{ s}^{-1}$ )과 소염 영역 근처의 화염( $a_m = 7000 \text{ s}^{-1}$ )에 대하여, 다양한 가진 주파수의 압력 교란에 대한 화염의 응답 특성을 살펴보았다. 음향 응답 계산시 고려되는 주요한 특성시간으로, 특성 유동시간(characteristic flow time)과 특성 화학 반응시간이 있으며, 전자는 스트레인율의 역수인  $a^{-1}$ 에 비례하는 크기를 갖고, 후자는 통상  $O(10^{-5} \sim 10^{-8})$ 의 크기를 갖는다.<sup>(6)</sup>

식 (6)과 같은 압력 변동에 대한 평형 근처 화염의 응답특성을 계산하여 Fig. 4에 도시하였다. 가진 주파수는  $10^0 \text{ Hz}$ ,  $10^2 \text{ Hz}$ ,  $10^4 \text{ Hz}$ 로 각각 저/중/고 주파수에 해당한다. 여기서 화염온도는 간접적으로 열방출률을 지시하는 인자이다. 기존의 연구 결과<sup>(4)</sup>에 의하면, 압력이 증가함에 따라 유체가 압축되어 밀도가 증가하고, 이에 의해 축방향 속도가 감소한다. 이에 따라 화학 반응지역으로 유입되는 반응물의 질량 유량이 감소하여 압력과 온도(열방출률)의 섭동 사이에 위상차가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 수소는 탄화

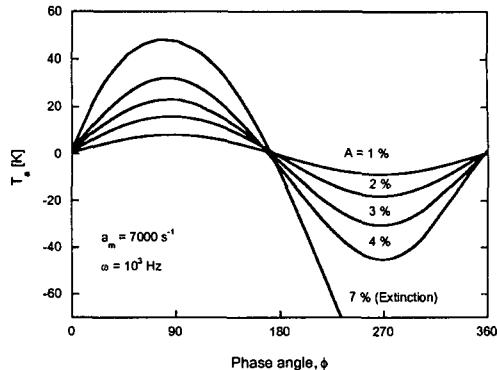


**Fig. 5** Responses of maximum temperature fluctuation of near-extinction flame to slow, medium and fast pressure oscillations

수소계 연료에 비하여 Lewis수가 작으므로 확산도가 뛰어나 이러한 위상차가 적게 발생하게 된다. 한편, 일반적으로 압력이 증가하면 화학 반응이 활발해져 온도가 증가하고 비선형 응답의 누적효과(accumulation effect)<sup>(6)</sup>도 발생할 수 있다. 그러나, 평형 근처의 화염은 이미 화학반응의 관점에서 포화된 상태이므로 그 효과가 작게 나타난다. 이러한 두 가지 상반된 효과에 의해 결과적으로  $10^0$  Hz와  $10^2$  Hz의 음향파 가진의 경우, 온도섭동은 각각  $43^\circ$ 와  $21^\circ$ 의 위상 진전(advance)을 보이고 있다.

주파수가 증가함에 따라, 주로 유동장 응답에 의해 나타나는 위상차 응답 특성 경향이 감소하는 것을 Fig. 4에서 알 수 있다. 고주파 가진시 나타나는 이러한 현상은 기존의 이론 해석과 정성적으로 일치한다.<sup>(4)</sup> 이로부터, 특성 음향시간( $T'$ )이 특성 유동시간( $a'$ )과 비슷하거나 짧게 되면, 유동장 응답에 의한 위상차가 발생하지 않고 주로 화학반응에 의한 열방출이 거의 동상(in-phase)으로 발생하게 되어 Rayleigh 기준에 따라 음향파가 크게 증폭된다고 판정할 수 있다. 따라서 평형 근처의 화염은 고주파 가진에 대해서 음향파를 크게 증폭시킬 것으로 예측된다.

다음으로, 소염 영역 근처의 화염( $a_m = 7000 s^{-1}$ )이 음향 가진에 대하여 보여주는 응답 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 평형 근처의 화염과는 달리, 소염 근처의 화염은 실제적인 주파수 범위에서



**Fig. 6** Variations of maximum temperature fluctuation for various amplitude of pressure oscillation

위상차가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 유동장 응답에 의한 효과보다는, 소염 영역에서 두드러지는 유한 화학반응의 효과 때문이다. 즉 소염 영역 근처의 화염은 압력 변화에 의한 화학반응의 변화 효과가 훨씬 더 지배적이므로 가진에 대해 동일 위상으로 응답하게 된다. 앞에서 언급하였듯이, 특성 화학 반응시간은 본 주파수 범위에서의 특성 음향시간에 비해 상당히 짧기 때문에, 화학반응의 변화는 압력 변화에 즉시 응답할 수 있음에 주목해야 한다. 위와 같은 응답 경향은 기존의 이론 해석과 액적 및 정체점 유동장에서의 해석 결과와 정성적으로 일치한다.<sup>(4,13,14)</sup> 따라서  $10^4$  Hz 범위까지도 화염은 압력 변동에 따라 즉각적으로 반응하는 준정상(quasi-steady) 상태의 응답 특성을 보인다. 따라서 실제적인 저/중/고 주파수 범위에서 모두 음향파 증폭 경향이 나타날 것으로 예측된다.

소염 영역 근처 화염( $a_m = 7000 s^{-1}$ ,  $P_{s,m} = 1$  atm,  $\omega = 10^3$  Hz)의, 가진 음향파의 진폭에 따른 응답특성을 Fig. 6에 나타내었다. 앞서 기술한 바와 같이 소염 근처의 화염은 유한 화학반응의 효과가 우세하므로 위상차를 보이지 않고 준정상 상태의 응답을 보인다. 이 그림으로부터, 가진 음향파의 압력값이 최대가 되는  $90^\circ$  위상각보다 최소가 되는  $270^\circ$  위상각에서 응답의 변동폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 진폭이 증가함에 따라 더 뚜렷히 나타나며, 이는 소염 근처

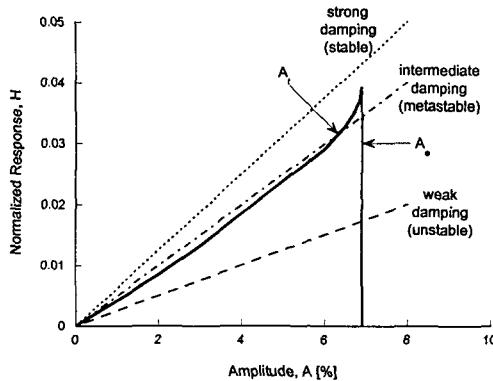


Fig. 7 Variations of normalized maximum temperature response as a function of acoustic-pressure amplitude for  $a_m = 7000 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega = 10^3 \text{ Hz}$ , and  $P_{s,m} = 1 \text{ atm}$

의 화염에 있어 화학반응의 강도가 압력의 변화에 따라 매우 민감하게 변하기 때문이다. 따라서, Fig. 6에서 보듯이, 비선형적인 응답 현상이 나타나게 된다. 진폭이 더 증가하여 특정 임계치( $A = 7\%$ )보다 진폭이 큰 경우, 화염은 압력 가진에 대해 더 이상 응답하지 못하고 소염되었다.

이러한 비선형 응답특성을 정량화하기 위해, 한 사이클에 대한 최대온도의 변동폭을 다음과 같이 규준화하였다.

$$H = \int_0^T [T_a / T_m] \sin(2\pi\omega t) dt \quad (10)$$

Fig. 6에서와 동일한 계산 조건에 대해 규준화된 무차원 진폭 지수,  $H$ 를 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 진폭이 증가함에 따라 증폭 지수가 선형성을 벗어나 비선형적으로 증가하며, 진폭이 임계값( $A_c$ )을 넘어서면 0이 되는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은, Fig. 3에 나타낸 정상상태 화염의 특성으로부터 유추할 수 있다. 즉, 순간적인 압력이 작은 값을 갖는 구간에서 화염 응답의 민감도가 커져 비선형성이 증가하게 된다.

### 3.3 Threshold 현상과의 연관성

Figure 7에 나타낸 결과는, 특정값보다 큰 진폭

의 교란에 대해서만 연소 불안정이 발생한다는 역치(threshold) 현상<sup>(15)</sup>이 나타나는 근본 메커니즘으로 해석될 수 있다. 연소시스템에서 교란에 대한 감쇠율은, 많은 경우에 가진 진폭의 일차함수로 근사화될 수 있으며<sup>(16,17)</sup>, 세가지의 대표적인 경우를 Fig. 7에 점선과 일점쇄선으로 표시하였다. 이 때, 정상상태로서 도달가능한 상태는 증폭곡선(실선)과 감쇠 곡선의 교점에 해당한다. 감쇠율이 큰 경우에는, 외부 가진에 의한 교란이 감쇠되어 안정한  $A = 0$ 인 상태로 수렴하게 된다. 반대로 감쇠율이 작은 경우에는 두 개의 교점이 존재( $A = 0$ ,  $A_c$ )하며, 안정한 점인  $A = A_c$ 에 수렴하게 되어, 화염의 응답은 가진에 의하여 증폭되고 결국 소염된다.

중간 크기의 감쇠율을 가지는 경우에는, 두 개의 안정점( $A = 0, A_c$ )과 그 사이에 존재하는 하나의 불안정점( $A = A_t$ )이 존재한다. 만약 진폭이  $A_t$ 보다 작을 경우에는 교란이 감쇠되지만,  $A_t$ 보다 클 경우에는 증폭되어  $A_c$ 로 수렴되는 역치(threshold) 현상을 보여준다. 이러한 현상은 단일 액적<sup>(13)</sup>과 liquid pool 형태의 화염<sup>(14)</sup>과 같은 소화염들에서도 얻을 수 있었으며, 소염근처의 화염은 독특한 비선형적인 거동을 보임을 알 수 있다. 실제 추진기관에서 존재하는 화염은 상당히 복잡한 형태이나, 이와 같은 소화염들의 집합체로 근사화시켜 모델링할 수 있으므로, 이러한 접근법에 의한 분석은, 추진기관에서 나타나는 비선형 거동들의 메커니즘을 이해하는데 도움이 될 것이다.

## 4. 결 론

수소/공기 충류 대향류 화염의 정상상태에서의 화염 구조와, 음향파 가진에 따른 비선형 응답특성을 상세 화학반응 기구를 고려하여 수치적으로 연구하였다. 정상상태의 화염에서 압력의 변화에 따른 최대온도의 구배로부터, 소염 근처에서는 매우 민감한 화염 응답이 나타날 것으로 예상할 수 있었다.

다양한 주파수와 진폭을 갖는 음향파 가진을 통하여 평형과 소염 조건 근처에서의 화염의 비선형적인 응답 특성을 고찰하였다. 소염 근처 화염의 경우, 유동장에 의한 응답보다 우세한 유한화학반응의 효과로 인하여, 열방출률이 음향 가

진에 대하여 거의 같은 위상으로 응답하였다. 또한 가진 압력값이 최소점을 지날 때, 화염의 응답이 매우 커짐을 알 수 있었다. 비선형 응답을 정량화하기 위해 증폭 지수를 도입하였으며, 증폭 지수와 연소기에 내재하는 감쇠율의 크기를 서로 비교함으로써, 연소기에서 발생하는 음향 불안정에서의 역치 현상을 설명할 수 있는 메커니즘을 제시하였다.

### 참고문헌

- (1) Culick, F. E. C., 1983, "Combustion Instabilities in Liquid-Fueled Propulsion Systems - An Overview," AGARD 72B PEP Meeting, 6-7 October.
- (2) Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds.), 1972, *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, NASA SP-194.
- (3) Strahle, W. C., 1965, "Periodic Solutions to a Convective Droplet Burning Problem: Stagnation Point," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 10, pp. 1315~1325.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Sohn, C. H., 2002, "Unsteady Analysis of Acoustic Pressure Response in N<sub>2</sub> Diluted H<sub>2</sub> and Air Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 128, pp. 111~120.
- (7) Smooke, M. D., 1982, "Solution of Burner Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods," *Journal of Computational Physics*, Vol. 48, pp. 72~105.
- (8) Liñán, A. and Williams, F. A., 1993, "Ignition in an Unsteady Mixing Layer Subject to Strain and Variable Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 95, pp. 31~46.
- (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) Kim, H. J., Sohn, C. H., Chung, S. H., and Kim, J. S., 2001, "Nonlinear Acoustic-Pressure Response of Oxygen Droplet Flames Burning in Gaseous Hydrogen," *KSME International Journal*, Vol. 15, pp. 510~521.
- (14) Park, S. W., Chung, S. H., and Kim, H. J., 2003, "Acoustic Response of Hydrogen/Liquid Oxygen Flame in Stagnation-Point Flow," accepted in *Transactions of the KSME(B)*.
- (15) 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.
- (16) Culick, F. E. C., 1963, "High-Pressure Oscillations in Liquid Rockets," *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 5, pp. 1097~1104, .
- (17) Margolis, S. B., 1993, "Nonlinear Stability of Combustion-Driven Acoustics Oscillations in Resonance Tubes," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 253, pp. 67~84.