

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.5.351

# 고압하에서 수소 확산화염의 소멸에 미치는 복사 열손실 효과에 관한 수치적 연구

오 태 균\* · 손 채 훈†

(2007년 12월 4일 접수, 2008년 3월 11일 심사완료)

## A Numerical Study on Effect of Radiative Heat Loss on Extinction of Hydrogen Diffusion Flames at High Pressure

Tae Kyun Oh and Chae Hoon Sohn

**Key Words:** Radiative Heat Loss(복사 열손실), Extinction(소멸), Gas-Phase Radiation(기체상 복사)

### Abstract

Extinction characteristics of hydrogen-air diffusion flames at various pressures are investigated numerically by adopting counterflow flame configuration as a model flamelet. Especially, effect of radiative heat loss on flame extinction is emphasized. Only gas-phase radiation is considered here and it is assumed that H<sub>2</sub>O is the only radiating species. Radiation term depends on flame thickness, temperature, H<sub>2</sub>O concentration, and pressure. From the calculated flame structures at various pressures, flame thickness decreases with pressure, but its gradient decreases at high pressure. Flame temperature and mole fraction of H<sub>2</sub>O increase slightly with pressure. Accordingly, as pressure increases, radiative heat loss becomes dominant. When radiative heat loss is considered, radiation-induced extinction is observed at low strain rate in addition to transport-induced extinction. As pressure increases, flammable region, where flame is sustained, shifts to the high-temperature region and then, shrunk to the point on the coordinate plane of flame temperature and strain rate. The present numerical results show that radiative heat loss can reduce the operating range of a combustor significantly.

### 1. 서 론

고속 추진시스템의 연소기에서는 연료-공기의 혼합과 화학반응을 위한 체류시간(residence time)이 짧아 점화가 어려우며, 강한 난류 유동장의 형성으로 인해 소멸(extinction)이 발생하기 쉬운 연소 환경이 조성된다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 연소기 설계시 여러 가지 방안을 고려해 볼 수 있는데, 그 중 한 가지 방법이 수소를 연

료로 채택하는 것이다.<sup>(1,2)</sup> 이는, 수소 화염의 경우 안정적으로 존재할 수 있는 영역이 넓기 때문이다. 또한, 수소의 연료로서의 특성을 고려해 볼 때, 수소 연료는 고속 추진 시스템에서뿐 아니라 배기 가스 규제에 대처할 미래의 청정 대체 연료 중의 하나로서도 주목받고 있다.

이러한 관점에서, 연소기내에서 형성될 수 있는 수소/공기 확산화염의 특성에 대한 많은 이론적/수치해석적인 연구가 수행되었다.<sup>(3-6)</sup> 이론적인 연구에서는, 주로 축소(reduced) 화학반응 메커니즘을 채택하고 수학적 도구로 접합점근법(matched asymptotic method)을 이용하여 화염 구조와 소멸 특성을 파악하였다. 상세화학반응 메커니즘을 채용한 수치해석적인 연구를 통해서서는 정량적인 화염 특성 데이터가 제시되었다. 해석

† 책임저자, 회원, 세종대학교 기계항공우주공학부  
E-mail : chsohn@sejong.ac.kr

TEL : (02)3408-3788 FAX : (02)3408-4333

\* 회원, 동양공업전문대학 기계과

의 단순화와 명확성을 도모하기 위해 이론적/수치해석적 연구에서는 대향류(counterflow) 화염이나 액적(droplet) 화염과 같은 층류 화염소 모델(laminar flamelet model)을 채택하였다. 다른 탄화수소계 연료와 비교하여, 수소 화염의 점화/소멸 조건이 크게 상이하기 때문에, 상대적으로 수소 화염에 대한 실험적인 연구는 제한적이었다. 같은 이유로, 수소 연료의 경우에 순수한 수소를 연료로 사용하기보다는 질소로 수소를 희석시켜 사용하는 방안이 자주 채택된다.

고속 추진 시스템은 종종 고압에서 작동하며, 추력의 증대를 위해 연소실 작동 압력을 높여서 운전해야 하는 경우도 있다. 이처럼 고압에서 작동하는 연소기를 설계하기 위해서는, 작동 압력이 화염의 구조와 소멸에 미치는 영향을 파악해야 한다. Papas 등<sup>(3)</sup>은 수소의 희석 정도와 압력의 함수로서의 소멸 스트레인율(strain rate)을 실험적으로 연구하였다. 또한, 이후에 수행된 수치해석적 연구<sup>(6)</sup>에서는 좀 더 포괄적으로 수소 화염의 소멸, 음향 응답, 질소 산화물 형성에 미치는 압력의 효과가 연구되었다. 이러한 연구를 통해, 압력이 증가할수록, 그리고 동일 압력하에서는 수소의 희석정도가 클수록 화염의 두께가 얇아짐을 알았고, 압력 범위에 따라 우세한 화학반응 단계(step)가 다르며, 압력에 따른 소멸 스트레인율이 비단조적(nonmonotonic)으로 변화함이 보고되었다. 비단조적인 소멸 스트레인율 변화를 토대로 압력 범위를 영역 I, II, III로 구분하여 각 영역에서의 화염 구조와 우세한 화학반응 단계, 음향 응답 특성, 질소산화물 배출 특성을 심층적으로 분석하였다. 소멸 조건의 관점에서 주요 결과를 요약하면, 영역 I, III 구간에서는 압력에 따라 소멸 스트레인율이 증가하고 연쇄 분지 반응(chain branching reaction)들이 우세하며, 영역 II에서는 이와 반대로 압력에 따라 소멸 스트레인율이 감소하고 재결합 반응(recombination reaction)이 우세하다는 것이다.

이전의 연구를 통해, 화학반응의 관점에서 소멸 조건에 미치는 압력의 효과가 규명되었으나, 한 가지 중요한 물리적 현상이 간과되었다. 고압에서는 기체상 복사 열손실의 효과가 크게 나타날 수 있으나, 이전의 연구에서는 복사 열손실을 고려하지 않았다. 복사 열손실의 효과로서 이미 널리 알려져 있는 단순한 사실은, 복사 열손실에

의해 화염의 온도가 감소하지만 화염구조와 관련된 정성적인 특성은 변화하지 않는다는 것이다. 그러나, 이는 높은 스트레인율에 의한 소멸점 근처에서 관찰되는 현상(transport-induced extinction)이며, 스트레인율이 낮아지면 화염이 두꺼워져서 복사 열손실 효과가 점차 증대되어 새로운 소멸점이 나타나게 된다(radiation-induced extinction).<sup>(7,8)</sup> 즉, 후자의 소멸은 화염을 통한 연료/산화제의 누출(leak) 증대로 야기되는 것이 아니라 열손실의 증대로 야기된다는 것이다.

압력이 증대되면 복사 열손실 항의 크기가 증가하는 경향이 있지만, 그와 동시에 화염의 두께가 얇아지므로 복사 효과가 감소되는 상반되는 경향을 갖게 된다. 따라서, 결과적으로 복사 열손실 효과가 소멸 조건에 어떠한 영향을 미치는지를 직관적으로 판단할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 기존의 연구<sup>(6)</sup>에서와 동일한 화염 모델/조건과 방법론을 채택하되 압력 증가에 따라 수소 화염의 소멸에 미치는 복사 열손실 효과에 초점을 맞추어 수치해석을 수행하였다. 본 연구의 목적은 소멸에 미치는 복사 열손실 효과를 규명하고, 이를 통해 압력에 따라 화염이 유지될 수 있는 존재 영역을 제시하고자 함에 있다.

## 2. 지배방정식과 수치해법

실용 연소기에서의 연소 상황은 난류유동으로, 직접 수치 모사에 의한 해석이 매우 어렵다. 따라서 이에 대한 대체 모델로서, 난류 화염을 단순화된 화염소들의 집합체로 간주하는 층류 화염소 모델이 제시되었다. 여러 모델 화염소 중 본 수치 계산에서 채택된 화염 모델은 축대칭 대향류 유동장에 형성된 확산 화염이다. 이는 이전의 연구<sup>(6)</sup>에서 채택된 모델과 동일하며 다만 본 계산에서는 복사 열손실 항이 추가로 고려된다. 자연 대류와 Dufour 효과,<sup>(9)</sup> 점성 소산은 무시하였으며, 수소 분자(H<sub>2</sub>)와 수소 라디칼(H)에 대한 Soret 효과<sup>(9)</sup>를 고려하였다.

축대칭 대향류 유동장에 대해 경계층 근사를 적용하고 유동함수  $f$  을 도입하면 다음과 같은 정상상태(steady state) 일차원 질량, 운동량, 화학종, 에너지 보존 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial V}{\partial y} + 2a_{\infty} \rho f = 0 \quad (1)$$

$$V \frac{\partial f'}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial f'}{\partial y} \right) - a_{\infty} \rho_{\infty} + a_{\infty} \rho f'^2 = 0 \quad (2)$$

$$V \frac{\partial Y_j}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_j U_j) - \omega_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

$$c_p V \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{j=1}^J \rho Y_j U_j c_{p_j} \frac{\partial T}{\partial y} + \sum_{j=1}^J \omega_j h_j - q_r = 0 \quad (4)$$

여기서  $y$ 는 축방향 좌표계,  $u, v$ 는 각각 반경/축 방향 속도, 유동 함수  $f$ 의  $y$ 에 대한 상미분  $f = u/u_{\infty}$ ,  $\rho$ 는 밀도, 축방향 질량 유속  $V = \rho v$ ,  $a$ 는 스트레인율,  $\mu$ 는 점도,  $-\infty$ 는 연료 경계측,  $\infty$ 는 산화제 경계측,  $Y_j$ 는  $j$ -화학종의 질량 분율,  $\omega_j$ 는 화학 반응을,  $J$ 는 고려된 화학종의 개수,  $T$ 는 온도,  $c_p$ 는 정압 비열,  $\lambda$ 는 열전도도,  $h_j$ 는 엔탈피,  $q_r$ 는 단위체적당 복사 열손실률을 나타낸다. 축방향 확산 속도  $U_j$ 의 계산을 위해서 Fick의 법칙과 확산 속도 보정 방법을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 상태 방정식으로는 이상 기체 상태 방정식을 사용하였다. 축대칭 대향류 유동장에서 산화제 경계측 스트레인율은  $a_{\infty} = -(1/2) (dv_{\infty}/dy)$ 로 계산된다. 편의상  $a_{\infty}$ 를  $a$ 로 나타내기로 한다.

본 연구에서 채택한 화염 조건에 대해서 기체상 매질의 두께는, 압력과 스트레인율에 따라 다르지만 약 0.05~0.1의 범위에 있는 것으로 예측되었다.<sup>(7,11)</sup> 따라서, 복사 열손실을 계산하기 위해서 기체상 매질의 광학적 두께가 충분히 얇다는 가정하에서 유도된 다음의 복사 열손실식을 고려한다.

$$q_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_b^4) \quad (5)$$

여기서  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며,  $K_p$ 는 Plank 평균 흡수 상수, 하첨자  $b$ 는 경계(boundary)를 나타낸다. 수소 화염에서 복사에 관여하는 화학종은  $H_2O$  뿐이다.  $K_p$ 를  $H_2O$  화학종의 부분압과 Plank 평균 흡수 상수로 나타내면 다음과 같다.

$$K_p = P_{H_2O} K_{H_2O} \quad (6)$$

이 식에서  $K_p$  계산을 위해 필요한  $H_2O$  화학종의 Plank 평균 흡수 상수 값으로는, Tien<sup>(12)</sup>이 제시한 자료를 다음과 같은 온도에 대한 5차의 다항식으로 곡선 맞춤하여 사용하였다.<sup>(7)</sup>

$$K_{H_2O} = \sum_{j=0}^5 A_j T^j \quad (7)$$

계수  $A_j$ 의 값은 참고문헌(7)에 제시되어 있다. 수소/공기 화학반응을 모사하기 위해 19 단계의 상세화학반응 메커니즘<sup>(13)</sup>을 사용하였다. 여기서는  $H_2, O_2, H_2O, H, O, OH, HO_2, H_2O_2$ 와  $N_2$ 의 9개의 화학종이 고려되었다. three-body 반응들의 고압에서의 반응을 상수 저하 효과(pressure fall-off effect)를 고려하기 위해  $H + O_2 + M \leftrightarrow HO_2 + M$  반응 단계와  $OH + OH + M \leftrightarrow H_2O_2 + M$  반응 단계의 반응률 상수는 Lindemann 형식으로 구하였다.<sup>(14)</sup>

지배방정식에 포함된 화학반응항과 열역학적 물성치 및 전달 물성치의 평가를 위하여 각각 CHEMKIN-II<sup>(14)</sup>와 TRANSPORT PACKAGE<sup>(10)</sup>를 사용하였다.

지배방정식 (1)-(4)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y \rightarrow -\infty ; & \quad f = \sqrt{\rho_{\infty}/\rho} \\ & \quad Y_j = Y_{j-\infty}, j = 1, 2, \dots, J \\ & \quad T = T_{-\infty} \\ y \rightarrow \infty ; & \quad f = 1 \\ & \quad Y_j = Y_{j\infty}, j = 1, 2, \dots, J \\ & \quad T = T_{\infty} \\ y = 0 ; & \quad V = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

기존의 수치해석 방법에서는 스트레인율을 부여하고, 주어진 스트레인율에 맞는 해를 구하게 된다. 그러나, 이런 방법을 사용하면 스트레인율에 따라 화염의 위치가 두께가 변화하게 되므로 이를 감안하여 계산 영역의 구간과 크기를 변화시켜 주어야 수렴된 해를 얻을 수 있다. 이러한 작업은 상당히 불편하고 번거로울 뿐만 아니라, 해의 수렴성을 저하시키는 요인이 되기도 한다.

따라서, 이러한 단점을 해소하기 위해  $y$  방향 좌표축을 스트레인이율이 포함된 인자로 무차원화하고 다른 변수들도 적절한 기준값으로 무차원화하여, 최종적으로 무차원화된 지배방정식을 구성하여 해를 구하였다. 이를 통해 화염 위치와 두께가 스트레인이율에 거의 의존하지 않는 결과를 얻을 수 있다. 무차원화된 변수들과 지배방정식들은 참고문헌<sup>(15)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

복사 열손실의 존재 유무에 따라 한 개 또는 두 개의 정상상태 소염점이 존재하는데,<sup>(7,8,16,17)</sup> 기존의 수치해법으로는 소염점 근처에서 수렴된 해를 얻는 것이 불가능하다. 따라서, 정확하고 안정적인 소염점을 구하기 위해서 역수치해법(inverse numerical method)을 이용하였다. 이를 통해 정상상태 화염구조의 윗가지(upper branch)와 중간가지(middle branch)의 경계가 되는 전환점(turning point)을 정확히 구하였다. 대항류 화염에서 정확한 소염점을 구하기 위한 역수치해법은 참고문헌<sup>(15,18)</sup>에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

### 3. 결과 및 논의

수치계산은 0.1기압부터 50기압의 압력 범위에서 질소로 희석된 수소/공기 확산화염에 대해 수행되었다. 연료측은 12 % 수소와 88 % 질소로 구성되었고, 산화제측은 21% 산소와 79 %의 질소로 구성된다. 연료와 산화제측 경계온도,  $T_b$ 는 300 K으로 설정되었다.

#### 3.1 복사 열손실이 없는 경우의 화염 구조와 소염 특성

먼저, 복사 열손실을 고려하지 않고, 여러 압력에서의 화염 구조를 구하여 비교하였다. 이를 통해 압력에 따른 복사 열손실 효과의 정도를 예측해 보고자 한다. 이를 위해 본 연구에서 화염 구조 중 가장 주목해야 할 항목은 압력에 따른 화염 두께 변화이다.

Figure 1에는 스트레인이율,  $a$ 를  $15 \text{ s}^{-1}$ 로 고정시키고 압력을 1~5 기압까지 변화시켜가며 구한 온도 분포를 나타내었다. 온도 분포를 통해서 압력이 증가할수록, 최고 온도값은 약간 증가하며 화염의 두께는 얇아짐을 예측할 수 있고, 이로 인해 열손실 영역(heat-loss zone)의 두께가 얇아질

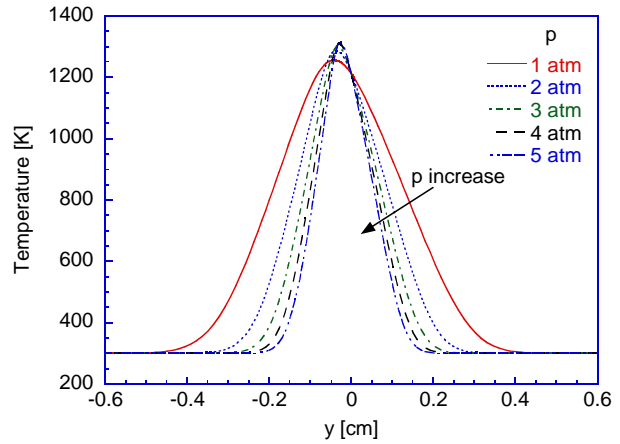


Fig. 1 Temperature profiles at various pressures with fixed strain rate of  $15 \text{ s}^{-1}$  without radiative heat loss

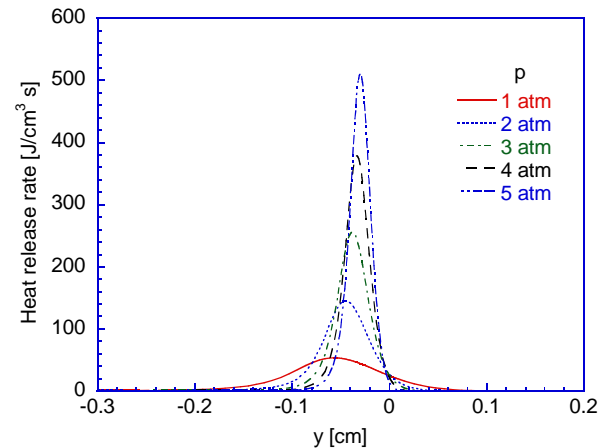


Fig. 2 Heat-release-rate profiles at various pressures with fixed strain rate of  $15 \text{ s}^{-1}$  without radiative heat loss

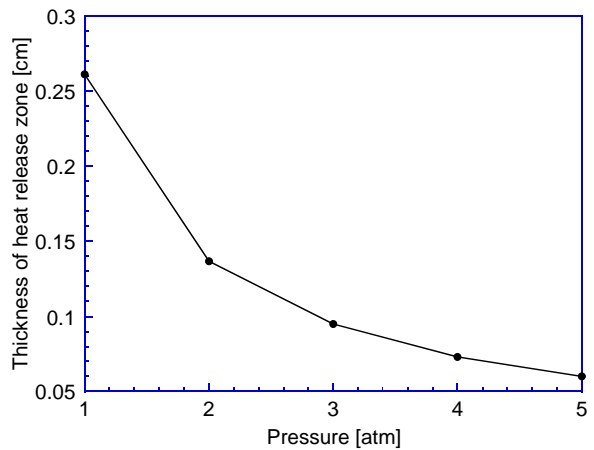
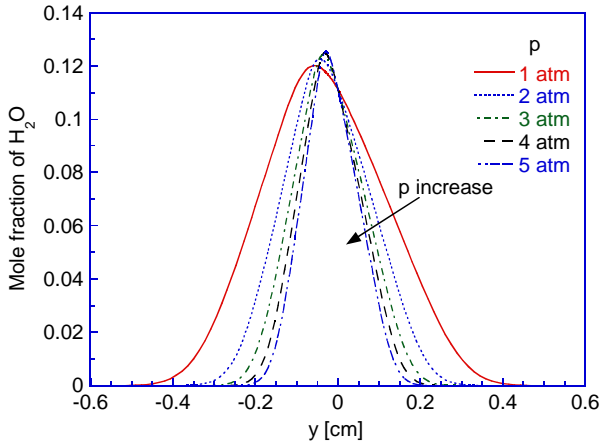


Fig. 3 Thickness of heat release or loss zone as a function of pressure with fixed strain rate of  $15 \text{ s}^{-1}$  without radiative heat loss

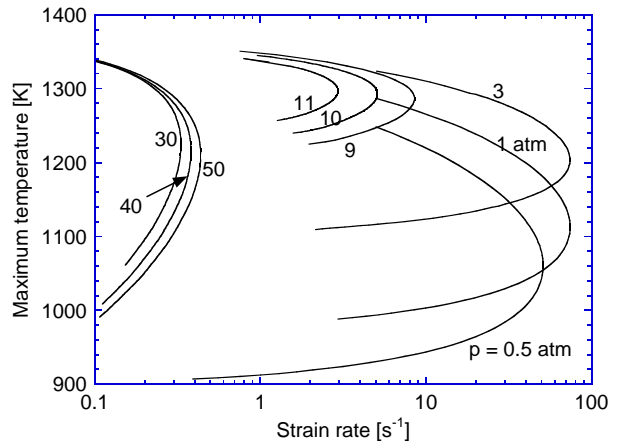


**Fig. 4** Mole fraction profiles of  $H_2O$  at various pressures with fixed strain rate of  $15 \text{ s}^{-1}$  without radiative heat loss

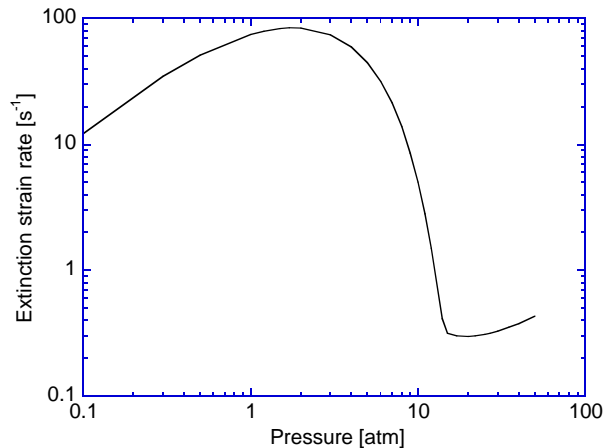
것임을 예상할 수 있다. 계산 결과를 토대로, 여러 압력에서의 열방출률을 구하여 Fig. 2에 나타내었다. 압력 증가에 따라 열이 방출되는 영역이 좁아지고, 열방출률의 최고값은 증가하였다. Fig. 2에 나타낸 결과를 토대로 압력에 따른 열방출 영역의 두께를 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 열방출 영역의 두께는 곧 열손실 영역의 두께를 의미한다. 따라서, 압력의 증가에 따라 열손실 영역은 지속적으로 얇아지지만 압력 증가에 따른 두께 감소폭은 둔화됨을 알 수 있다.

복사 열손실에 관여하는 기체상 화학종이  $H_2O$  이므로, 열손실률 크기 평가를 위해  $X_{H_2O}$ 의 분포를 살펴보는 것이 또한 중요하다. Fig. 4에 동일한 조건에서 구한  $H_2O$ 의 몰분율,  $X_{H_2O}$ 를 나타내었다. 이 그림으로부터 압력에 따른  $X_{H_2O}$  분포의 변화는 온도 분포 변화와 동일한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다.

이상의 압력 증가에 따른 화염 구조 변화 경향으로부터, 압력이 증가함에 따른 화염두께의 감소와  $X_{H_2O}$ 의 분포 영역의 감소는 복사 열손실 효과의 감소를 초래할 것으로 예측할 수 있다. 그렇지만, 그 효과는 압력에 따라 선형적으로 증가하지 않고, 점차 증가율이 둔화하게 됨을 알 수 있다. 복사 열손실과 관련된 식 (5)-(7)을 보면, 같은 온도와  $X_{H_2O}$ 에 대해서는 복사 강도가 압력에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 압력이 증가한 만큼 복사강도가 증가하게 된다. 그런데, 열손실 영역의 두께는 압력 증가 폭만큼 감소하지 않으므로 종합적으로 압력 증가에 따라 열손실 효과는



**Fig. 5** Maximum flame temperatures as a function of strain rate at various pressures without radiative heat loss



**Fig. 6** Variation of extinction strain rate as a function of pressure without radiative heat loss

더욱 우세하게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

복사 열손실을 고려하지 않은 경우, 압력에 따른 소염점을 구하기 위해, 소염점 근처에서의 정상상태 화염구조의 윗가지와 중간가지를 구하였다. 대표적으로 낮은 압력 영역, 중간 영역, 높은 압력 영역을 대표하는 압력값들에 대한 계산 결과를 스트레인율( $a$ )에 따른 최고 화염 온도( $T_{max}$ )로 표시하여 Fig. 5에 나타내었다. 스트레인율이 증가할수록 반응지역에서 연료/산화제의 화학반응이 종결되지 못한 채로 화염을 통해 누출되는 연료/산화제 양이 증가하므로, 특정 스트레인율의 값에 도달하면 소염된다. 이러한 소염은 확산-반응간의 경쟁으로 유발되는 소염(transport-induced extinction)이라 부르며, Fig. 5에 보인 각 곡선들의

전환점(turning point)이 이러한 소염점에 해당한다. 이 소염점에서의 스트레인을  $a_{HE}$ 라 표시하겠다. 이러한 곡선들로부터 압력에 따른  $a_{HE}$ 를 추출하여 Fig. 6에 나타내었다. 이전의 연구결과<sup>(6)</sup>에서 자세히 설명하였듯이, 압력 증가에 따라 소염 스트레인을,  $a_{HE}$ 가 증가하다가 감소한 후, 다시 증가함을 확인할 수 있다. 다만, 10기압 이상의 고압에서의 소염 스트레인은 이전의 연구에서 계산된 값들에 비해 약간 감소하였는데, 이는 고압에서의 반응을 상수 저하 효과(pressure fall-off effect)에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2 복사 열손실 고려시 소염 특성

복사 열손실을 고려하게 되면, 열손실에 의해 화염온도가 통상 감소하게 된다. 복사 열손실의 효과는 화염의 두께가 점점 두꺼워 질수록 증가하게 된다. 대향류 화염에서는 스트레인이 감소할수록 화염이 두꺼워지고, 화염 온도가 증가한다. 따라서, 스트레인이 감소할수록 복사 열손실 효과가 증가하게 되어 어느 한도 이하로 스트레인이 감소하게 되면, 화염 온도가 감소하기 시작하여 또다른 소염 조건이 형성된다.<sup>(16,17)</sup>

본 연구에서 채택한 화염에 대해서 정상상태 해석을 수행한 결과를, 여러 압력에 대해 스트레인에 따른 최고 화염 온도로 표시하여 Fig. 7에 나타내었다. 예측대로  $a-T_{max}$  곡선은 닫힌 폐곡선의 모양을 보이며, 높은 스트레인율에서의 소염점과 낮은 스트레인율에서의 소염점을 관찰할 수 있다. 후자의 소염점에서의 스트레인을  $a_{LE}$ 라 표시하겠다. 따라서, 화염이 안정적으로 존재하는 구간은  $a_{LE}$ 와  $a_{HE}$  사이의 스트레인율 범위가 된다. 0.5기압으로부터 점차 압력이 증가함에 따라 폐곡선이 점차 고온 영역으로 이동하고,  $a_{LE}$ 와 더불어  $a_{HE}$ 도 증가하였다. 그런데, 압력이 더욱 증가함에 따라 폐곡선이 위축되어 최고 온도와  $a_{HE}$ 가 감소하였다. 이로 인해, 안정적으로 화염이 존재하는 영역이 상당히 축소됨을 알 수 있다. 7.26 기압 이상의 압력에서는 수치적으로 수렴된 해를 얻을 수가 없었다. 이는, 화염이 아주 좁은 영역(Fig. 7에 나타낸 평면상에서 거의 한 점에 해당)에서만 안정적으로 존재하기 때문으로 판단된다.

여러 압력에 대해  $a_{HE}$ 와  $a_{LE}$ 를 추출하여 Fig. 8에 나타내었다. 복사 열손실이 소염 스트레인에 미치는 효과를 파악하기 위해, Fig. 6에 나타

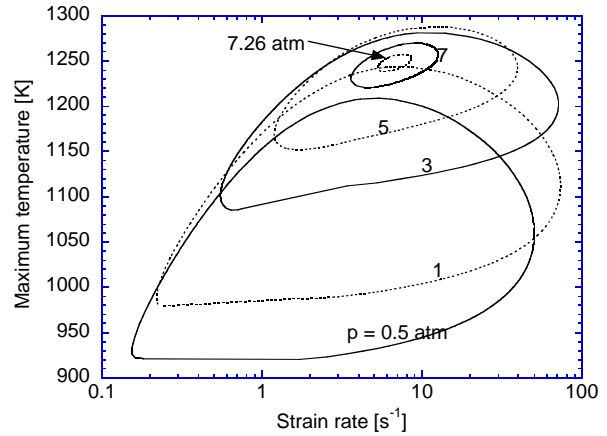


Fig. 7 Maximum flame temperatures as a function of strain rate at various pressures with radiative heat loss

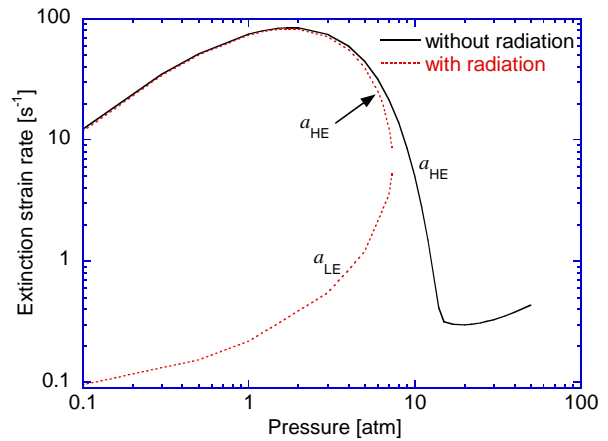


Fig. 8 Variations of extinction strain rates as a function of pressure without/with radiative heat loss

내었던 복사 열손실을 무시하고 구한  $a_{HE}$ 를 함께 도시하였다. 낮은 압력 영역에서는 복사 열손실 유무에 따른  $a_{HE}$ 의 값에 차이가 거의 없다가, 3기압 이상에서는 차이를 감지할 수 있으며 점차 압력에 따라 그 차가 증가함을 알 수 있다. 이는,  $a_{HE}$ 의 값은 확산-반응간의 경쟁에 의한 것이므로 복사 열손실의 효과를 미미하게 받으며, 높은 스트레인율에서 나타나는 소염 조건에 의한 것이므로 화염 두께가 얇아 복사 열손실 효과가 미약하기 때문이다. 따라서, 상당히 고압 영역에 이르러서야 비로소 복사 열손실 효과가 뚜렷하게 나타나는 것이다. 한편,  $a_{LE}$ 의 값은 압력에 따라 증가하면서 점점  $a_{HE}$ 에 접근하게 된다. 본 수치해석에서 수렴된 해를 구할 수 있었던 최고 압력값은 7.26기압이었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 7.26기

압 근처에서는 압력 변화에 따른  $a_{HE}$ 의 변화율(감소율)과  $a_{LE}$ 의 변화율(증가율)이 급격하여 약간의 압력 증가에 의해서도  $a_{HE}$ 와  $a_{LE}$ 가 서로 같아질 것으로 예측된다. 즉, 약 7.26기압 이상의 압력에서는 어느 스트레인을에서도 화염이 존재하지 못하게 됨을 의미한다. 즉, 복사 열손실이 존재할 때에는 화염의 조건에 따라 안정적으로 존재할 수 있는 최고 압력 한계(upper pressure limit)가 존재함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 연구에서 고려하지 않았던 복사 열손실 효과에 초점을 맞추었다. 고압조건에서, 그리고 낮은 스트레인을에서 복사 열손실은 무시할 수 없는 중요한 물리적 현상이다. 따라서, 수치해석을 통해 복사 열손실이 수소 확산화염의 소염 현상에 미치는 효과를 조사하였다. 수소 확산 화염의 생성물로  $H_2O$ 가 발생하며, 이는 복사 열손실에 관여하게 된다. 이전의 연구 결과를 토대로, 압력에 따른 다양한 소염 특성을 명확히 볼 수 있는 화염 조건을 조성하기 위해, 질소로 희석시킨 수소를 연료로 채택하였다.

먼저, 압력 증가에 따른 기본 화염 구조를 분석하여, 압력 증가에 따른 복사 열손실 효과의 정도를 예측하였다. 화염의 두께(즉, 열손실 영역의 두께)가 압력 증가에 따라 감소하지만, 그 감소폭은 압력에 따른 선형적인 변화를 가정했을 때의 감소폭보다 작으며, 특히 압력이 더욱 증가하면 그 감소폭은 크게 줄어들음을 알 수 있었다. 압력이 증가하면, 매질의 부분압이 증가하여 복사 열손실의 크기가 대략 압력 증가에 따라 선형적으로 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 두 가지의 복사 열손실 증가/감소 요인이 서로 경쟁하지만, 종합적으로는 압력에 따라 복사 열손실의 효과가 증가할 것으로 예측되었다.

복사 열손실항을 포함한 계산 결과, 압력이 증가함에 따라 복사 열손실 효과가 증대되었으며, 높은 스트레인을 영역에서의 소염 스트레인을 값은 압력에 따라 점차 감소하고, 낮은 스트레인을 영역에서 복사 열손실에 의해 야기되는 소염점의 스트레인을 값은 점차 증가하였다. 결국, 어느 압력 값에서 두 스트레인을 값이 일치하게 되리라는 새로운 사실을 알게 되었다. 이는 복사 열손

실을 고려하지 않았던 기존 연구에서는 관찰되지 않았던 현상이며, 그로 인해 복사 열손실이 존재하는 실제의 화염에서는 화염 조건에 따라 화염이 안정적으로 존재하는 압력의 상한값(upper pressure limit)이 존재함을 알게 되었다.

복사 열손실이 과다하게 존재하는 연소기를 설계하는 경우 화염 존재 영역 지도(map)가 크게 변경/축소될 것이므로 안정적인 연소기 작동 범위가 제한될 수 있다. 그리고, 새로운 연료를 채택한 연소기 설계시, 복사 열손실의 효과를 고려하여 안정적인 화염 존재 영역을 파악하는 작업이 필요하다. 또한, 연소기의 안정적 작동을 위해 각 연료의 화염 조건에 따라 적절한 스트레인과 압력의 조합이 이루어져야 할 것이다. 한편, 화염이 존재 가능한 압력의 상한값을 정량적으로 비교하기 위한 실험적 연구가 병행되어야 할 것이며, 이는 향후의 연구 주제로 고려할 만하다.

#### 후 기

본 연구는 2007년도 동양공업전문대학 학술 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 알려드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Ju, Y. and Niioka, T., 1995, "Ignition Simulation of Methane/Hydrogen Mixtures in a Supersonic Mixing Layer," *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 462~470.
- (2) Ju, Y. and Niioka, T., 1994, "Reduced Kinetic Mechanism of Ignition for Nonpremixed Hydrogen/Air in a Supersonic Mixing Layer," *Combustion and Flame*, Vol. 99, pp. 240~246.
- (3) Papas, P., Glassman, I. and Law, C. K., 1994, "Effects of Pressure and Dilution on the Extinction of Counterflow Nonpremixed Hydrogen-Air Flames," *Twenty-fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1333~1339.
- (4) Balakrishnan, G., Smooke, M. D. and Williams, F. A., 1995, "A Numerical Investigation of Extinction and Ignition Limits in Laminar Nonpremixed Counterflowing Hydrogen-Air Streams for Both Elementary

- and Reduced Chemistry," *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 329~340.
- (5) Lee, S. R. and Chung, S. H., 1994, "On the Structure of Hydrogen Diffusion Flames with Reduced Kinetic Mechanisms," *Combustion Science and Technology*, Vol. 96, pp. 247~277.
- (6) Sohn, C. H. and Chung, S. H., 2000, "Effect of Pressure on the Extinction, Acoustic Pressure Response, and NO Formation in Diluted Hydrogen-Air Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 288~300.
- (7) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K. and Liu, F., 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315~334.
- (8) Sohn, C. H., Kim, J. S., Chung, S. H., and Maruta, K., 2000, "Nonlinear Evolution of Diffusion Flame Oscillations Triggered by Radiative Heat Loss," *Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 95~106.
- (9) Williams, F. A., 1985, *Combustion Theory*, 2nd ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA.
- (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) Molina, A., Schefer, R. W., and Houf, W. G., 2007, "Radiative Fraction and Optical Thickness in Large-Scale Hydrogen-Jet Fires," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 2565~2572.
- (12) Tien, C. L., 1968, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 253~324.
- (13) Maas, U. and Warnatz, J., 1988, "Ignition Processes in Hydrogen-Oxygen Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 74, pp. 53~69.
- (14) 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.
- (15) Sohn, C. H., Chung, S. H., Lee, S. R. and Kim, J. S., 1998, "Structure and Acoustic - Pressure Response of Hydrogen-Oxygen Diffusion Flames at High Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 115, pp. 299~312.
- (16) Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y. and Niioka, T., 1998, "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity," *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 181~187.
- (17) Sohn, C. H. and Chung, S. H., 2001, "A Numerical Study on Radiation-Induced Oscillatory Instability in CH<sub>4</sub>/Air Diffusion Flames," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 25, No. 1, pp. 29~35.
- (18) Sohn, C. H., 1998, *Acoustic-Pressure Response and Pulsating Instability of Diffusion Flames*, Ph. D. Thesis, Seoul National University.