

초소형 연소기내 화염전파의 수치모사

최권형^{*} · 권세진[†] · 이대훈^{**}

(2002년 5월 13일 접수, 2003년 3월 19일 심사완료)

Numerical Simulation of Flame Propagation in a Micro Combustor

Kwon Hyoung Choi, Sejin Kwon and Dae Hoon Lee

Key Words : Micro Combustor(마이크로 연소기), Closed Vessel Combustor(정적연소실), Heat Loss(열손실), Flame Propagation(화염전파), Premixed Flame(예혼합화염), PISO(피조스킴)

Abstract

A numerical simulation of flame propagation in a micro combustor was carried out. Combustor has a sub-millimeter depth cylindrical internal volume and axisymmetric one-dimensional was used to simplify the geometry. Semi-empirical heat transfer model was used to account for the heat loss to the walls during the flame propagation. A detailed chemical kinetics model of H₂/Air with 10 species and 16 reaction steps was used to calculate the combustion. An operator-splitting PISO scheme that is non-iterative, time-dependent, and implicit was used to solve the system of transport equations. The computation was validated for adiabatic flame propagation and showed good agreement with existing results of adiabatic flame propagation. A full simulation including the heat loss model was carried out and results were compared with measurements made at corresponding test conditions. The heat loss that adds its significance at smaller value of combustor height obviously affected the flame propagation speed as final temperature of the burnt gas inside the combustor. Also, the distribution of gas properties such as temperature and species concentration showed wide variation inside the combustor, which affected the evaluation of total work available of the gases.

기호설명

e : 내부에너지, $J/kg \cdot m^3$
 E : 활성화 에너지, J/mol
 F : 플럭스 벡터
 h_i : i 화학종의 엔탈피, $J/kg \cdot m^3$
 h_f : 생성엔탈피, $J/kg \cdot m^3$
 h : 열전달계수, $W/m^2 \cdot K$
 H : 연소기 높이, m

k : 열전도도, $W/m \cdot K$
 M_i : i 화학종의 물질량, $kg/kmol$
 p : 압력, pa
 P : 연소기내 평균압력
 P_0 : 연소기내 초기압력
 Pe : 피클릿 수
 q : 열유속벡터, W/m^2
 q_{loss} : 열손실량, W/m^3
 r : 공간좌표, m
 R : 기체상수, $kJ/kg \cdot K$
 R_0 : 연소기 반경, m
 R_u : 일반기체상수, $J/mol \cdot K$
 t : 시간, s
 $t_{p,max}$: 최대압력시의 시간, s
 T : 온도, K
 T_0 : 연소기 초기온도

* 현대자동차

** 회원, KAIST 정보전자연구소

† 책임저자, 회원 KAIST 기계공학과 항공우주공학 전공
 E-mail : melody@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3721, FAX : (042)869-3710

u	: 속도, m/s
V_i	: i 화학종의 확산속도, m/s
Y_i	: i 화학종의 질량분율
α	: 좌표 변수
γ	: 비열비
η	: 입자농도/기체농도
κ	: 표면적대 부피비, m^{-1}
ν	: 표준당량비계수
π	: 부차원화 된 압력
ρ	: 밀도, kg/m^3
ρ_0	: 초기밀도, kg/m^3

1. 서론

MEMS 요소기술의 발달에 따라 독립이동형 마이크로 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 MEMS 기술이 기존 Macro Scale 장치의 요소를 소형화 하는 데서 한 걸음 더 나아가, 모든 Subsystem 을 MEMS 로 구현하여 새로운 응용분야를 개척하려는 시도와 밀접한 관계가 있다. 이러한 마이크로 시스템의 예로는 MAV(Micro Air Vehicle), 초소형 인공위성 (Nano Sat) 등을 들 수 있다. 이들은 기존의 MEMS 장치와 달리 마이크로 동력원으로부터 독립되어야 하며, 이를 위하여, 개별적인 탑재가 가능한 초소형 내연기관 엔진(Micro Internal Combustion Engine)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 초소형 내연 기관의 경우 높은 에너지 밀도를 갖는 탄화수소계 연료를 사용함으로써 작은 스케일에서 높은 출력을 얻을 수 있다. 현재 진행중인 초소형 내연 기관에 대한 연구는 Lee et al.⁽¹⁾의 왕복동 엔진과 Mehra et al.⁽²⁾의 가스 터빈엔진 그리고 Fu et al.⁽³⁾의 회전형 엔진(Rotary engine) 등이 있다. 초소형 내연기관의 구현을 위해서는 여러 가지 선행되어야 할 기술적인 과제가 있다. 그 중의 하나가 초소형 연소실에서의 연소 현상에 대한 해석 및 설계 기술을 확보하는 것이다. 초소형 내연 기관 엔진의 경우 연소실의 크기가 크게 작아짐으로써 연소 특성이 달라지고 열효율은 떨어진다. 표면적대 부피비의 증가로 연소실 벽면으로의 열 손실에 의한 효과가 매우 커지고 따라서 열 효율은 감소한다. 일반적인 크기의 연소실에서보다 낮은 온도 낮은 압력에서 연소가 일어나므로 화염의 전파속도도 감소한다. 연소실의 크기가 소멸거리(Quenching Distance)에 육박하므로 안정적인 연소가 이루어질지도 미지수다. 그러나 초소형

연소실에서의 연소 현상에 대한 실험 및 이론적인 연구는 매우 부족한 실정이다. Mehra et al.⁽²⁾ 그리고 Fu et al.⁽³⁾의 연구에서는 베이링, 터빈 등 초소형 내연기관 엔진의 요소 및 이들 요소의 가공 등에 중점을 두었을 뿐 전체 시스템의 성능을 결정하는 연소 및 열역학적인 문제를 간과하였다. 반면에 Lee et al.은 초소형 연소실에서의 연소 특성에 초점을 맞추고 연구를 수행 하였다.

Lee et al.⁽⁴⁾은 연소실의 체적 변화가 가능한 초소형 연소기를 제작하고 초소형 연소실에서의 연소 현상에 대한 체계적인 측정을 시도하였다. 연소실은 실린더 형태를 가지고 연소실 아래 만들어진 나사선을 통해 연소실 높이를 조절할 수 있도록 제작하여 연소실의 체적 변화를 얻을 수 있게 하였고 연소실의 높이(0.61mm~3mm)와 초기 압력(1.68atm~3.72atm)에 따른 연소에 의한 압력 변화를 측정하였다. 초소형 내연 기관을 제작하기 위해 필요한 연소실 크기 변화에 따른 벽면으로의 전도에 의한 열 손실량과 연소 에너지와의 관계, 연소실의 크기와 압력 변화에 따른 화염 전파 속도 등의 화염 특성 변화에 대해 연구가 미흡하기 때문이다. 이와 같은 연구를 수행하기 위해서는 추가적인 정보, 즉 온도 및 연소 속도 등이 필요하다. 그러나 실험적 제약에 의해 압력을 제외한 물리량들은 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이론 및 계산적 접근을 통해 실험 결과 비교 분석함으로써 표면적대 부피비가 증가에 따른 열 손실 효과가 연소 특성 및 연소 효율에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

정적 연소 환경을 모사하기 위한 계산적 접근 방법에는 층류연소속도를 이용한 모델링 방법과 수치 해석적 방법으로 나눌 수 있다.

정적 연소 현상을 모사하기 위한 방법이라기 보다는 층류연소속도 자체를 구하기 위한 방법으로 연소실 전체에 대하여 압력 구배가 없다는 가정, 일차원 화염 전파 가정(평면 혹은 구형화염) 및 등엔트로피 혹은 화학 평형 가정 등을 통하여 간단한 모델링으로 층류연소속도와 화염의 이동 속도와와의 관계식 또는 압력과의 관계식을 얻을 수 있다. Bradley and Mitcheson⁽⁵⁾은 구형 정적 연소실에서 구형 화염 전파를 기술할 수 있는 수학적 모델을 개발하였고 Takeno and Iijima⁽⁶⁾는 이 모델을 발전시켜 측정된 압력으로 부터 층류 연소 속도를 바로 구할 수 있는 관계식을 도출하였다. 그러나 이러한 모델들은 외부로의 열 손실이 없을 때를 가정한 수학적 모델(Analytic model)이기 때문에 본 문제에

적용하기 어렵다.

정적 연소기 내에서의 현상을 해석하기 위한 수치 해석적 방법 또한 다양하게 연구되어 왔다. 정적 연소실에서의 연소 연소는 낮은 마하수 유동(Low Mach Number Flow) 하에서 이루어진다. 연소에 의한 발생한 열은 국부적으로 온도를 높이고 여기서 생성된 압력은 음향파(Acoustic Wave)를 통해 전파된다. 낮은 마하수 유동(Low Mach Number Flow)에 있어서 계산의 시간 증가분은 음향파의 시간 스케일 보다 작아야 한다. 이러한 이유로 인하여 많은 계산 시간이 소요되고 또한 수치적 오차의 증가로 불안정성이 증가한다. 화학 반응이 일어남에 따라 국부적으로 상승한 압력이 밀폐되지 않은 연소실의 경우 생성된 압력이 외부로 빠져 나가는 데 반해 밀폐된 연소기의 경우 그렇지 못하고 연소실 내부의 압력 증가로 나타나기 때문에 밀폐된 정적 연소실에 대해서 수치 해석적 방법을 사용할 경우 계산에 의한 에러에 매우 민감해 불안정성이 커진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 방법이 제시되었다.

Seth et al.⁽⁷⁾은 압력 구배가 없다는 가정을 통해 운동량 방정식을 생략하여 수치 해를 구하였다. McMurtry et al.⁽⁸⁾은 정압비열이 일정하다는 가정을 이용하고 지배 방정식을 무차원화 시킨 후 낮은 마하수 가정(Low Mach Number Approximation)을 통해 압력을 열 역학적 부분(Thermodynamic Part; Independent to spatial coordinate)과 동역학적 부분(Dynamic Part; Driving force inducing velocity)으로 나눈다. 곧 음향파에 의한 고주파의 압력 전파 부분을 화염 전파에서 배제시켰다. Issa et al.은 준 내재적 스킴(Implicit Scheme)인 PISO(Pressure-Implicit Splitting of Operators)를 통해 밀폐된 연소기의 화염 전파를 모사하였다. 낮은 마하수 유동의 경우 특별한 가정 없이 풀다면 문제 자체가 갖고 있는 불안정성을 배제하기 위하여 시간 증가분이 계산 영역의 공간 차분크기에 제약 받는 외재적(Explicit) 스킴보다는 계산의 시간 증가분에 관계없이 안정적인 내재적 스킴을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 내재적 스킴의 경우 계산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. PISO의 경우 내재적 차분화 방법이면서도 예측-보정 단계(Predictor and Corrector Step)의 Splitting 과정을 통해 계산하기 때문에 수렴 과정을 거치는 SIMPLE 계열의 알고리즘보다 빠르게 계산할 수 있다. 본 연구에서는 이에 따른 계산의 안정성 문제와 계산 시간의 효율성을 고려하여 PISO를 이용하여 수치 해를 구하였다.

2. 이론 모델

2.1 연소 및 화염 전파 모델

본 연구에서는 정적 연소실에서 표면적 대 부피비가 커짐에 따라 일어나는 열손실의 증가와 이에 따른 연소 특성의 변화를 알아 보기 위하여 다음과 같이 문제를 정형화 하였다. 정적 연소실에서 화염은 일차원으로 전파한다. 이때 기존의 일차원 화염 전파 문제에서 다루지 않는 화염면과 수직인 방향으로의 열손실 효과를 고려한다. 따라서 연소실 벽면으로의 열 손실은 반응 영역(Reaction zone), 연소 가스 영역(Burned gas region), 미연 가스 영역의 전 영역에 걸쳐 일어난다. 이러한 열 손실의 영향은 에너지 보존 방정식에 생성항으로 열손실항을 추가함으로써 고려한다. Fig. 1는 비교 검증하고자 하는 Lee et al.⁽⁴⁾의 실린더 형의 초소형 연소기(Cylindrical Sub-millimeter Depth Combustor)이다. 연소기는 일차원 반응유동장(One-dimensional Axisymmetric Chemically Reacting Flow)으로 가정한다. 원통형이므로 축대칭 가정이 가능하고 지름에 대한 높이는 비는 0.081~0.4에 불과하므로 연소실의 높이 방향의 화염전파가 미치는 영향은 미미하므로 r 방향만의 구배가 존재하는 것으로 가정할 수 있다. 본 연구에서 열 손실이 있는 일차원 반응 유동장을 해석하기 위해 사용한 가정은 다음과 같다.

- (1) 이상기체 상태 방정식이 성립한다.
- (2) 비점성 유동으로 가정한다.
- (3) Dufour-Soret 효과(농도차에 의한 열전달과 온도차에 의한 물질 전달)는 무시한다.
- (4) 외력의 영향은 없다.
- (5) 복사 열전달은 없다.

2.1.1 지배 방정식 및 경계 조건

비정상 비점성 유동장과 비정상 화학종 보존 방정식은 다음과 같다. 이때 α 는 좌표계에 관한

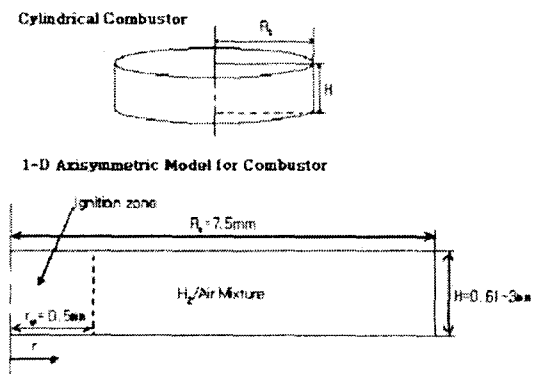


Fig. 1 Schematic of computational domain

파라미터로 $\alpha = 0$ 이면 직각 좌표계(Cartesian Coordinate), $\alpha = 1$ 이면 원통형 좌표계(Cylindrical Coordinate), $\alpha = 2$ 이면 구형 좌표계(Spherical Coordinate)이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u \cdot u) &= -\frac{\partial p}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u \cdot e) &= -\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}[r^\alpha q] - \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha up) + \dot{q}_{\text{in}} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u \cdot Y_i) &= -\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}[r^\alpha (\rho Y_i)] + \dot{m}_i \end{aligned} \quad (1)$$

에너지 보존 방정식의 열전달 벡터(Heat Flux Vector) q 와 열 손실항 \dot{q}_{in} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q &= -k \frac{\partial T}{\partial r} + \rho \sum_{i=1}^N h_i y_i V_i \\ \dot{q}_{\text{in}} &= -h \kappa_r (T - T_w) \end{aligned} \quad (2)$$

확산 속도는 Fick's Law 를 따른다.

$$y_i V_i = -D_m \frac{\partial Y_i}{\partial r} \quad (3)$$

압력과 온도는 엔탈피 및 내부 에너지의 정의와 이상기체 상태 방정식으로부터 구한다.

$$\begin{aligned} e &= \sum_{i=1}^N Y_i h_i - \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} u^2 \\ h_i &= h_i^* + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \\ p &= \rho (R_u \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{M_i}) T \end{aligned} \quad (4)$$

문제를 해석하기 위한 $r=0$ 과 $r=R$ 일 때의 경계 조건은 다음과 같다.

$$r=0 \text{ 에서 } \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0 \\ u = 0 \\ \frac{\partial e}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad r=R \text{ 에서 } \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0 \\ u = 0 \\ \frac{\partial e}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2.1.2 열역학 모델 및 화학반응 모델

각 화학종들의 물성치를 구하고 질량

분율로부터 혼합기체의 물성치를 구하는 모든 과정은 Kee et al.⁽⁹⁾의 CHEMKIN 부프로그램을 이용한다. CHEMKIN 은 정적/정압 비열, 열 전도 계수 및 확산 계수 그리고 화학 반응을 등 반응 유동장을 해석하기 위해 필요한 모든 열역학적 물리량들을 제공해 준다. Lee et al.⁽⁴⁾의 실험결과와 비교검증을 위하여 계산은 수소/공기 예혼합 기체에 대해 수행하였으며, 화학 반응 모델로는 10 화학종에 대한 16 단계 기본 반응 모델을 사용하였다.

2.1.3 열손실 모델

실제의 벽면으로의 열 손실은 연소실 내부의 유동과 연소실 내부 벽면과의 대류, 연소실 내부 벽면에서 외부 벽면으로의 전도를 거쳐 일어난다. 그러나 이러한 모든 복잡한 계산을 고려한다 하더라도 계산에 사용할 정확한 열 전달 계수를 알 수 없기 때문에 높은 정확도를 기대할 수 없다. 열 전달 계수를 구하기 위해 Nusselt 수에 관한 실험식을 이용하지만 본 문제와는 다른 일반적인 정상유동에서 얻는 결과라 적용하기 힘들다. 또한 열 전달은 지배 방정식의 경계 조건으로 나타나므로 유동을 2차원 혹은 3차원으로 풀어야 하므로, 열 손실이 큰 연소실에서의 문제에 있어서 많은 계산 시간이 요구되면서도 높은 정확도를 기대하기 힘들기 때문에 열손실 효과를 Kodah et al.⁽¹⁰⁾의 모델링을 통해 고려하기로 하였다. 벽면으로의 열 손실 효과는 위의 식 (1)의 에너지 보존 방정식의 열 손실항으로 나타난다. 실험 결과로부터 직접 모델링할 것이기 때문에 열 전달 메커니즘은 식 (2)와 같이 간단한 대류 형태로 가정하였다.

3. 수치해석 방법

3.1 차분화

FVM(Finite Volume Method)를 이용하여 지배 방정식을 차분화 하였다. Upwind 혹은 Hybrid Upwind/Central 차분화 방법을 통해 대류항-확산항을 차분화 하였다. 화학종 보존 방정식에 대해서는 Hybrid Upwind/Central 차분화 방법을 사용하였고 운동량 보존 방정식과 에너지 보존 방정식은 Upwind Scheme 을 이용하여 차분화하였다. 운동량 보존 방정식은 비 점성 유동을 가정하였고 에너지 보존 방정식은 열전달 벡터(Heat Flux Vector)에 의한 열 전달 항이 정압 비열이 일정하다고 가정할 때 확산항에 해당되지만 이러한 별도의 가정을 도입하지

않았으므로 일차원 General Transport 방정식으로 표현했을 때 확산항에 해당되는 항은 없기 때문이다. PISO 를 이용하여 유동장을 풀게 될 때 연속 방정식과 운동량 보존 방정식으로부터 압력 방정식을 유도하게 되므로, Staggered Grid 를 사용하였다. 시간에 대해서는 내재적 오일러 스킴(Euler Implicit Scheme)을 사용하였다. 이러한 방법으로 지배 방정식을 차분화시킨 후 PISO 를 이용해 수치 해를 구하였다. 먼저 지배 방정식을 다음의 일반적인 형태로 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{1}{r''} \frac{\partial}{\partial r} [r''(\rho u \cdot \phi - \Gamma_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r})] = S_\phi \quad (6)$$

이때 Γ_ϕ 는 확산 계수, S_ϕ 는 생성항을 의미한다. ϕ 가 1 이면 연속 방정식, u 이면 운동량 보존 방정식, e 이면 에너지 보존 방정식 Y 이면 화학종 보존 방정식이 된다. 시간에 따라 내재적 차분화 하고 r'' 를 양변에 곱한 후 제어 체적에 대해 적분하면 Patankar⁽¹¹⁾로부터 다음의 식을 얻는다. 윗첨자 " 는 n 번째 Time Step 에서 n+1 번째 Time Step 의 값을 구하기 위한 계산을 수행할 때 n 번째 Time Step 의 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} a_e \phi_e &= a_e \phi_e + a_w \phi_w + b \\ a_e &= a_e + a_w + a_p^0 \\ a_e &= r_e'' \{D_e A(|Pe_e|) + \{[-F_e, 0]\}\} \\ a_w &= r_w'' \{D_w A(|Pe_w|) + \{[F_w, 0]\}\} \\ a_p^0 &= \rho_p^0 \frac{r_e^{n+1} - r_w^{n+1}}{(\alpha + 1)\Delta t} \\ b &= S_{\phi,p} \frac{r_e^{n+1} - r_w^{n+1}}{\alpha + 1} + a_p^0 \phi_p^0 \end{aligned} \quad (7)$$

이때 F 는 Flux 로서 $F=\rho u$ 이고 D 는 Diffusion Conductance 로서 $D=\Gamma_\phi/\Delta r$ 이다. Peclet 수는 $Pe=F/D=\rho u \Delta r/\Gamma_\phi$ 로 정의된 값이다. Operator $[[A, B]]$ 는 $\text{MAX}(A, B)$ 즉 두 값 중 큰 값을 취하는 연산이다. $A(|Pe|)$ 는 각 스킴에 의해 결정되는 함수이다. $A(|Pe|)$ 는 Upwind Scheme 일 때 1, Hybrid Upwind/Central Scheme 일 때 $[[0.1 - 0.5|Pe|]]$ 이다.

3.2 스플리팅 (Splitting)

(1) 차분화된 압력 방정식을 유도하는 과정에서 보여 주듯이 PISO에서는 압력과 속도의 강한 비선형

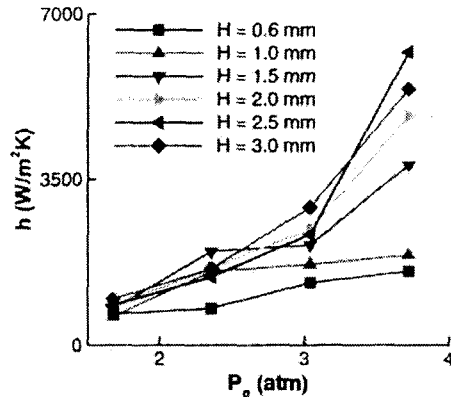


Fig. 2 Pressure dependency of heat loss model

결합을 다루기 위해서 연속 방정식과 운동량 방정식 그리고 이상기체 상태 방정식을 결합시켜 차분화된 방정식을 유도한다. 지배 방정식들은 밀도를 통해서도 강한 비선형 결합을 이루고 있는데 화학 반응에 의해 연소 에너지가 크게 발생할 때는 밀도 변화가 크므로 화학 반응 유동장의 해석에서 이러한 영향을 고려해야 한다. Issa⁽¹²⁾는 이러한 비선형성을 고려하여 예측 및 보정 단계(Predictor-Corrector Step)의 Splitting 을 수행하였다. 다음은 개략적인 Splitting 과정이다.

(2) 단위 시간 증가분 동안에도 연소에 의해 온도와 화학종 질량 분율이 빠르게 변화하므로 예측 단계에서 에너지 보존 방정식과 화학종 보존 방정식을 운동량 방정식과 함께 내재적인 형태로 계산한다.

(3) 보정 단계를 계산할 때는 밀도가 크게 변화하는 점을 고려하여 차분화된 지배 방정식들의 계수 값들을 바로 전 단계의 중간 값들을 이용하여 구한다. 이때 각 물리량, 특히 화학종 질량 분율을 보존 시키기 위해 연속 방정식과 운동량 보존 방정 그리고 이상기체 상태 방정식으로부터 유도한 압력 방정식을 풀이한 다음 중간 값들을 갱신한다.

운동량 방정식의 보정 단계를 계산한 후 에너지 보존 방정식과 화학종 보존 방정식의 계산한다. Issa et al.^(13,14)에 의해 이러한 계산 수행 과정이 전체적인 계산의 정확도를 높이는 것으로 확인되었다.

4. 결과 및 토론

4.1 열손실 모델

Lec et al.⁽⁴⁾은 연소실 높이를 변화시킬 수 있는 초소형 연소기를 제작 실험하였다. 초기 압력은 1.68atm~3.72atm 까지 연소실 높이는 0.6mm~3mm

까지 변화시켜 가면서 시간에 대한 압력의 변화를 측정하였다. Fig. 2는 실험결과로부터 얻은 열 손실 계수들을 초기 압력을 가로축으로 하여 열 손실 계수(또는 열 손실 계수의 기울기)를 그린 그래프이다. 그림에서 보듯이 압력이 증가함에 따라 열 손실 계수 혹은 열 손실 계수의 기울기가 커짐을 알 수 있다. 이는 열 손실량이 압력의 함수임을 보여주고 있다. 초기 압력에 따라 연소실 내의 연료 및 산화제의 양이 달라지기 때문이다. Kodah et al.⁽¹⁰⁾의 경우 일반적인 크기의 연소기의 열 손실량을 모델링 하기 위해 열 손실 계수를 압력의 함수로 보았다. 이러한 압력의 영향은 연소실의 높이가 줄어들어 따라 현저히 감소한다. 연소실의 높이가 0.6mm 에 다다랐을 경우 열손실 계수는 거의 차이가 없다.

4.2 계산 조건

실험조건과 동일한 초기온도 $T_0=278K$ 를 사용하였다. 점화를 위해서 연소실 중심의 고온영역을 설정하고 이 영역 안의 온도를 1500K 으로 주었다. 전 계산 영역의 압력은 P_0 로 일정하므로 점화 영역 안의 밀도는 이상기체 상태 방정식으로부터 구한다. 당량비는 실험에서와 같이 1 로 하였다. 이러한 초기 조건에 대하여 초기 압력이 2.36atm 일 때 열 손실 없이 계산을 수행하였고, 실험과의 비교를 통해 연소실의 높이 변화에 따른 열 손실의 영향을 알아보기 위해 2.36atm 일 때 연소실 높이가 각각 1mm, 2mm, 3mm 일 때의 계산을 수행하였다. 이 때 Grid 수는 76 개를 사용하였다. 연소기의 반지름이 7.5mm 이므로 Δr 는 0.1mm 가 된다. H_2/Air 예혼합 화염의 화염 두께가 1mm, 점화 영역의 크기가 0.5mm 이므로 화염 전파를 모사할 수 있는 충분한 크기다. PISO 는 내제적 스킴이므로 시간 증가분에 관한 제약이 없지만 계산의 안정성을 고려하여 시간 증가분 Δt 를 결정하였다. 화염 전파의 시간 스케일은 3 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 유동 시간 스케일로서 유동에 의한 대류항을 원활히 계산하기 위한 시간 스케일이다. 둘째는 음파 시간 스케일로서 압력 전파를 모사하기 위한 시간 스케일이고 셋째는 화학반응 시간 스케일로서 화학 반응을 모사할 수 있는 시간 스케일이다. 세 시간 스케일을 주어진 계산조건에서 비교해 보면 유동 시간 스케일은 10^{-3} sec 정도의 시간 스케일을, 음파 시간 스케일은 10^{-6} sec 의 시간 스케일을, 화학반응 시간 스케일은 10^{-8} sec 의 스케일을 가진다. 따라서 가장 작은 시간 스케일인 화학반응 시간 스케일을 시간 증가 분으로 사용하였다. 이때 Chemical reaction time scale 은

H_2/Air 예혼합 기체의 화학 반응 자체의 시간 스케일이라기 보다 CHEMKIN 을 이용하여 다단계 화학 반응으로 풀 때 원활히 계산되는 시간 스케일이다. 계산을 통해 Δt 가 10nsec 일 때 4nsec 의 결과와 별 차이가 없음을 확인하였고 따라서 본 연구에서는 $\Delta t = 10nsec$ 를 사용하였다.

4.3 실험 결과와의 비교 및 검증

실험에서 센서를 Fig. 1 의 원통형 연소기의 맨 바깥쪽 부분 즉 $r=R_0$ 에 설치하여 압력을 측정하였다. 따라서 계산을 통해 구한 계산 영역 전체의 압력 중 경계인 $r=R_0$ 를 포함하는 Grid point 의 값을 실험에서 측정된 압력과 비교하였다. 그러나 실제로 정적 연소실 내의 압력 구배는 거의 없으므로 어느 점의 압력과 비교해도 상관 없다. 초기 압력 2.36atm, 높이 2, 3mm 일 때를 모사한 계산 결과가 Fig. 3 에 제시되어 있다. 그림을 통해서 최대 압력 값까지의 변화를 잘 모사하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최대 압력을 지난 후 실험에서는 압력이 급격히 떨어지는데 반해 계산에서는 압력이 계속 증가하고 있다. 이는 실험에서는 소멸(Quenching)이 일어났는데 반해 본 연구의 계산 모델에서는 소멸 현상을 고려하지 못하고 있기

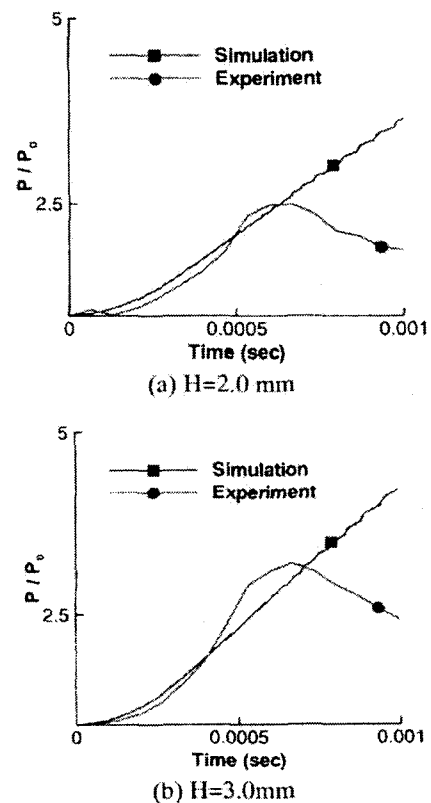
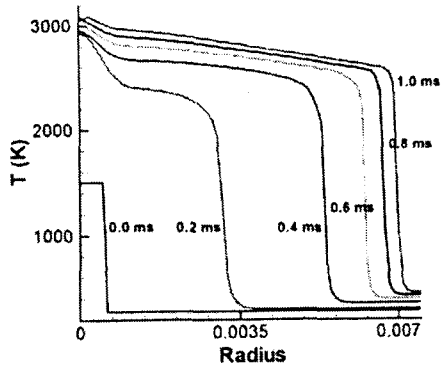
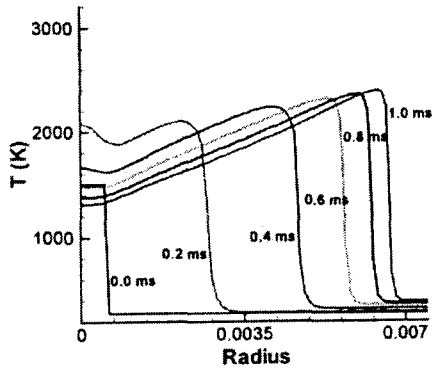


Fig. 3 Comparison of with measurements by Lee et al. at $P_0=2.36atm$



(a) Adiabatic flame propagation



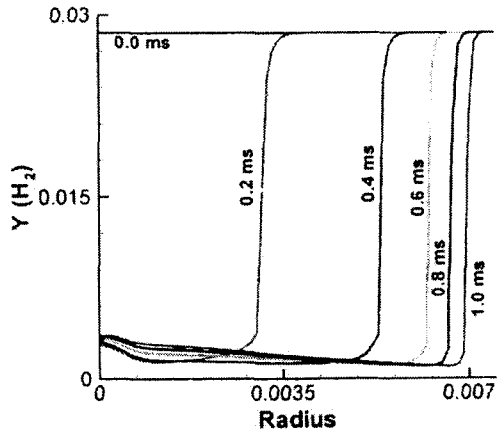
(b) Under heat loss

Fig. 4 Heat loss effect on flame propagation

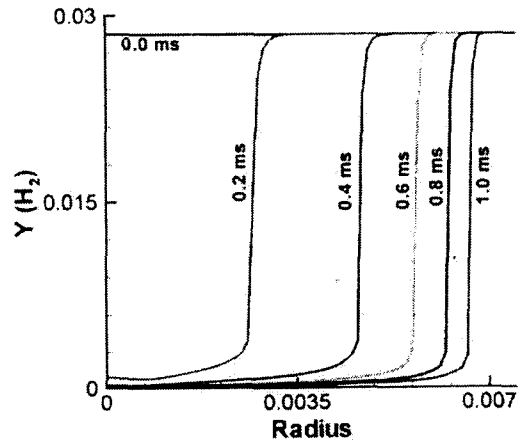
때문이다. 실험에 있어서 화염이 연소기 벽면까지 끝까지 전파되지 못하고 끼치는 소염 현상이 관찰되었다. 소염이 일어나기 전까지 연소실 높이가 2mm, 3mm 일 때 모두 압력 상승을 비교적 정확하게 모사하고 있다.

4.4 열 손실 효과에 의한 화염 전파 특성

Fig. 4는 화염 전파시 열손실의 영향을 보여 준다. 열손실이 있는 환경에서의 온도 분포를 보면 화염면 부근만 고온이 유지된 채 기연가스 영역은 열손실에 의해 온도가 현저히 낮아진 채로 화염이 전파되는 것을 볼 수 있다. 열손실이 없을 경우 연소기 중앙을 중심으로 기연 영역의 온도가 올라가는 것은 압력 일의 영향으로 증가하는 것으로 Takeno 등의 화염 전파 계산에서 동일하게 나타나는 현상이다. 또한 열 손실이 없을 때는 1msec 동안 화염 전파가 일어났는데 비해 열손실이 있을 때는 화염이 벽면에 다다르기 까지 2msec가 걸렸다. 즉 연소 속도가 반으로 떨어진 것이다. Fig. 5에 제시된 수소 질량 분율을 살펴보면, 열손실이 없을 경우 연소 가스 영역에서 수소가 존재하는데 반해 열손실이 있을 경우 기연영역에 수소가 거의 없다. 단열일 경우



(a) Adiabatic condition



(b) Under heat loss

Fig. 5 Heat loss effect on Y_{H_2}

연소가 일어나 연료인 수소가 사라져야 하지만 고온에서의 역반응인 해리에 의해 수소가 남아있게 된다. 하지만 열 손실이 있을 경우 온도가 낮아지므로 해리가 일어나지 않아 수소의 분포가 관찰된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 초소형 연소실 내에서의 화염 전파를 열 전달을 고려하여 모사하였다.
- (2) 계산 결과는 초소형 연소실내의 수소-공기 예혼합 화염의 전파를 비교적 정확하게 예측하였다.
- (3) 열손실이 있을 때 연소 가스 영역의 밀도가 증가하여 연소 가스 대 미연 가스의 밀도비가 감소한다.

(4) 열 손실을 고려했을 때 냉각이 빠르게 일어나 연소실 중앙부의 온도가 낮아지지만 단열 계산에서는 압력 일의 영향으로 중앙부의 온도가 오히려 상승하였으며 이는 Takeno 등의 화염 전파 계산에서 동일하게 나타나는 현상이다. (5) 연소 반응이 일어나 온도 상승하면서 발생한 체적 팽창에 의해 속도가 유도 되는데 열 손실이 있을 때 연소 가스 영역의 체적이 감소하므로 단열의 경우 보다 연소 가스 영역으로의 속도가 증가하고 상대적으로 미연 가스 영역으로의 속도는 감소한다.

(5) 연소 가스 영역은 열 손실이 없을 때 해리가 일어나는데 비해 열 손실이 있을 때는 온도가 낮아져 해리가 일어나지 않는다.

후 기

본 연구는 과학재단의 우수 연구센터인 연소 기술 ERC의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 채위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, D. H., Park, D. E., Yoon, J. B., Kwon, S. and Yoon, E., 2002, "Fabrication and test of a MEMS combustor at a reciprocating device," *J. Micromech. Microeng.*, 12, pp. 26~34.
- (2) Mehra A., Ayon A. A., Waitz I. A. and Schmidt M. A., 1999, "Microfabrication of High-Temperature Silicon Devices Using Wafer Bonding and Deep Reactive Ion Etching," *IEEE Journal of MEMS*, Vol. 8, No. 2, pp. 152~160.
- (3) Fu K., Knobloch A. J., Cooley B. A., Walter D. C., Fernandez-Pello C., Liepmann D. and Miyaska K., 2001, "Microscale Combustion Research for Applications to MEMS Rotary IC Engine," *Proceedings of ASME 35th National Heat Transfer Conference NHTC2001-20089*.
- (4) Lee, D.H. and Choi, K. H. and Kwon, S., "Measurement and Modeling of Combustion in a Microcombustor," *36th Thermophysics Conference 11-14 June 2001, Anaheim, California*.
- (5) Bradley, D. and Mitcheson, A., 1976, "Mathematical Solutions for Explosions in Spherical Vessels," *Combustion and Flame*, Vol. 26, 201~207.
- (6) Takeno, T. and Iijima T., 1985, "A Theoretical Analysis of Flame Propagation in Closed Vessels," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 28, No. 79.
- (7) Seth, B. and Aggarwal, S. K. and Sirignano, W. A., 1980, "Flame Propagation Through and Air-Fuel Spray Mixture with Transient Droplet Vaporization," *Combustion and Flame*, Vol. 39, pp. 149~168.
- (8) McMurtry, P. A. and Jou, W. H. and Riley, J. J. and Metcalfe, R. W., "Direct Numerical simulations of a Reacting Mixing Layer with Chemical Heat Release," *AIAA Journal* Vol. 24, No. 9, pp. 962~970.
- (9) Kee, R. J. and Miller, J. A. and Jefferson, T. H., 1989, "CHEMKIN: A General-Purpose, Problem-Independent, Transportable, Fortran Chemical Kinetics Code Package," *Sandia National Laboratories Report, SAND80-8003*.
- (10) Kodah, Z. H. and Soliman, H. S. and Qudais, M. A. and Jahmany, Z.A., 2000, "Combustion in spark-ignition engine," *Applied Energy*, Vol. 66, pp. 237~250.
- (11) Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *Hemisphere Publishing Corporation*.
- (12) Issa, R. I., 1985, "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator Splitting," *Journal of Computational physics*, Vol. 62, pp. 40~65.
- (13) Issa, R. I. and Gosman, A. D. and Watkins, A. P., 1986, "The Computation of Compressible and Incompressible Recirculating Flows by a Non-iterative Scheme," *Journal of Computational physics* Vol. 62, 66~82.
- (14) Issa, R. I. and Ahmadi-Befrui, B., Beshay K. R. and Gosman, A. D., 1991, "Solution of the Implicitly Discretised Reacting Flow Equations by Operator Splitting," *Journal of computational physics* Vol. 93, 388~410.