

## 공급 유량 및 당량비 변화에 따른 초소형 가스터빈 연소실 내 수소/공기 연소의 수치해석 연구

권길성\* · 황유현\*\* · 강 호\* · 김대중\*†

\* 서강대학교 기계공학과 \*\* SK 건설

### Numerical Study of Hydrogen/Air Combustion in Combustion Chamber of Ultra Micro Gas Turbine by Change of Flow Rate and Equivalence Ratio

Kilsung Kwon\*, Yu Hyeon Hwang\*\*, Ho Kang\* and Daejoong Kim\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.,

\*\* SK Engineering & Construction Co., Ltd.

(Received February 7, 2012 ; Revised September 13, 2012 ; Accepted September 14, 2012)

**Key Words:** Micro Heat Engine(마이크로 열기관), Ultra Micro Gas Turbine(초소형 가스 터빈), Combustion(연소), Equivalence Ratio(당량비)

**초록:** 본 연구에서는 초소형 가스터빈 연소기에서의 수소/공기 연소에 대한 수치해석을 연소기 입구에서의 공급 유량 및 유체의 수소/공기 혼합비 변화에 대하여 수행하였다. 수치해석은 상용화 프로그램인 STAR-CCM 을 이용하였다. 유체의 공급 유량의 변화는 연소기 내 화염의 위치와 온도, 입구와 출구의 압력비 등에 상당한 영향을 주었다. 유체의 공급 유량이 증가할 때, 연소기 내의 화염은 점점 출구 방향으로 위치하였고, 화염의 온도 및 입구와 출구의 압력비는 단조적으로 증가하였다. 유체의 수소/공기 혼합비 변화는 화염의 위치에는 큰 영향을 주지 않았고, 이론공연 상태에서 연소실 내에 가장 높은 화염 온도를 가졌다.

**Abstract:** In this study, we performed a numerical study of hydrogen/air combustion in the combustion chamber of an ultra micro gas turbine. The supply flow rate and equivalence ratio are used as variables, and the commercial computational fluid dynamic program (STAR-CCM) is used for the numerical study of the combustion. The flow rate significantly affects the flame position, flame temperature, and pressure ratio between the inlet and the outlet. The flame position is close to the outlet in the combustion chamber, and the flame temperature and pressure ratio monotonously increases with the supply flow rate. The change in the equivalence ratio does not affect the flame position. The maximum flame temperature occurs under stoichiometric conditions.

- 기호설명 -

$P$  : 압력 [Pa]  
 $Q$  : 연소기 입구에서 공급 유량 [kg/s]  
 $T$  : 온도 [K]  
 $h$  : 비엔탈피 [J/kg]  
 $m$  : 질량유량 [kg/s]  
 $\eta_c$  : 연소기효율 [-]  
 $\phi$  : 당량비 [-]

### 1. 서 론

휴대폰, 태블릿(tablet), 노트북 등의 다양한 모바일(mobile) 기기들은 최근 소형화 및 다기능화 되고 있으며, 이로 인해 소비되는 에너지량이 증가하고 있다. 위와 같은 모바일 기기들의 에너지 공급원으로는 현재 일차 및 이차 전지(battery)가 사용되고 있으나 전지의 기술은 모바일 기기들이 요구하는 에너지량을 따라가지 못하고 있으며, 이로 인해 모바일 기기들을 위한 새로운 출력원이 요구되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

모바일 기기들을 위한 새로운 출력원으로서 마

† Corresponding Author, [daejoong@sogang.ac.kr](mailto:daejoong@sogang.ac.kr)

이크로 연료전지(micro fuel cells), 역전기투석장치(reverse electro dialysis), 초소형 가스터빈(ultra micro gas turbine) 등의 다양한 기술들이 연구되고 있다.<sup>(3-8)</sup> 이중 초소형 가스터빈은 높은 출력 밀도와 연료의 충전만으로 연속적인 작동을 할 수 있다는 점등으로 인하여 주목을 받고 있다.<sup>(9)</sup> 초소형 가스터빈의 연구 역사 및 최근 연구 동향은 Mitsos 와 Barton 에서 확인할 수 있다.<sup>(10)</sup>

효율적인 초소형 가스터빈의 개발을 위해서는 압축기(compressor)와 터빈(turbine) 사이의 단열, 높은 회전 수를 가지는 로터(rotor), 연소기 내에서의 안정적인 연소, 효율 개선 등이 요구된다. 기존에 초소형 가스터빈은 소형화에 적합한 MEMS(micro electro mechanical system) 기술을 기반으로 하여 연구되었다.<sup>(11-14)</sup> 그러나 제작상의 어려움과 개별적인 구성요소에 대한 작동 시험은 가능하지만, 열차폐 문제 등으로 인하여 가스터빈으로의 자립운전을 구현하는데 어려움을 가졌다.<sup>(11-14)</sup> 이를 개선하기 위한 방법으로 본 연구에서는 제작이 어려운 MEMS 공정을 최소화하고 압축기와 터빈 사이의 단열 효율을 높일 수 있도록 축의 높이를 증가시킨 초소형 가스터빈을 제안하였다. Fig. 1 은 본 연구를 위한 초소형 가스터빈의 구성도이다. 그림과 같이 압축기와 터빈 사이의 거리를 증가하였고, 안정된 연소를 위하여 연소실 공간은 내경이 17 mm, 외경이 23 mm, 높이가 6.4 mm 로 충분히 확

확하였다. 본 논문에서는 제안된 초소형 가스터빈의 초기 연구로서 연소실 입구로 예혼합 되어 들어오는 유체의 공급 유량 및 당량비(equivalence ratio)등의 다양한 변수들의 변화에 의한 연소실 내부의 연소 특성의 수치해석적 연구를 수행하였다.

## 2. 수치해석 방법

초소형 가스터빈 연소기에서의 수소/공기 연소의 해석은 전산유체 해석을 위한 상용화 프로그램인 STAR-CCM+ (Ver 4.02)<sup>(15)</sup>를 사용하였다.

### 2.1 모델 및 격자 생성

본 연구에서는 연소실 내에서의 수소/공기 연소의 효율적인 수치해석을 위한 모델로 원주 방향에 대한 대칭성을 고려하여 연소실을 9° 로 나누어 periodic 경계조건을 적용하여 계산영역을 설정하였다. 유동체적은 STAR-CCM 을 이용하여 fig. 2 와 같이 3D 다면체격자(polyhedral mesh)로 구성하였고, 격자의 독립성 검증을 위하여 연소실 내부의 최소 폭 사이즈인 0.4 mm 를 기준으로 하여 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.25 mm, 0.3 mm 의 격자에 대한 전산해석을 수행하였다. 메쉬의 크기 외에 다른 변수들이 동일한 조건에서 격자 크기를 줄여가며 해석을 수행한 결과, 0.2 mm 이하의 격자에서는 화염온도(flame temperature)의 오차율이 1%이내로 매우 유사한 값을 가졌다. 이로 인해 본 연구에서는 격자 크기를 0.2 mm 로 하여 해석을 수행하였다. 격자 크기가 0.2 mm 일 때 총 격자수는 80,000 개였고, 유체 부분과 고체 부분이 각각 25,000 개와 55,000 개로 구성되었다.

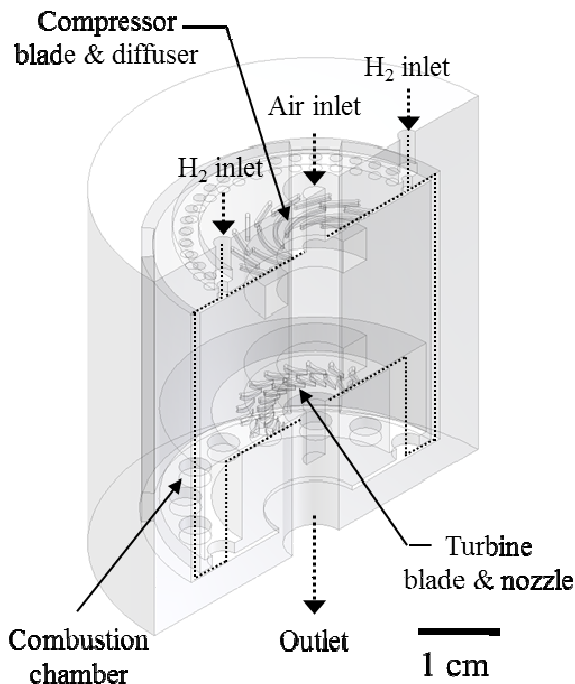


Fig. 1 Schematic of the ultra micro gas turbine

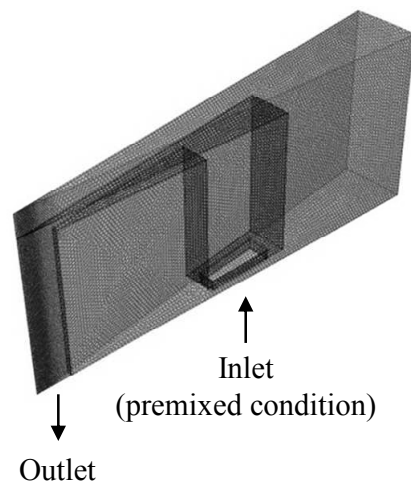


Fig. 2 Grids of the combustion chamber

**Table 1** Gas phase reaction mechanism for hydrogen/air combustion

Number	Reactions
1	$H_2 + O_2 \rightarrow OH$
2	$H_2 + OH \rightarrow H_2O + H$
3	$H + O_2 \rightarrow OH + O$
4	$O + H_2 \rightarrow OH + H$
5	$H + O_2 + M_1 \rightarrow HO_2 + M_1$
6	$H + 2O_2 \rightarrow HO_2 + O_2$
7	$H + O_2 + N_2 \rightarrow HO_2 + N_2$
8	$OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$
9	$H + HO_2 \rightarrow 2OH$
10	$O + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$
11	$2OH \rightarrow O + H_2O$
12	$H_2 + M_2 \rightarrow 2H + M_2$
13	$O_2 + M \rightarrow 2O + M$
14	$H + OH + M_3 \rightarrow H_2O + M_3$
15	$H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2$
16	$2 HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$
17	$H_2O_2 + M \rightarrow 2OH + M$
18	$H_2O_2 + H \rightarrow HO_2 + H_2$
19	$H_2O_2 + OH \rightarrow H_2O + HO_2$

## 2.2 지배 방정식 및 해석 조건

본 연소 모델은 열 전달, 물질 전달, 화학 반응을 포함하였고, 각각의 해는 STAR-CCM 을 이용하여 아래와 같은 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 그리고 수송 방정식을 통해 계산되었다.

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_{i=1}^N h_i J_{ij} \right) + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + S_h + S_{rad} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j Y_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial J_{ij}}{\partial x_j} + R_i \quad (4)$$

수소/공기 연소의 해석은 정상 상태(steady state)에서 연소가 발생하는 유체 부분과 열전달이 일어나는 고체 부분의 경계면에서 열저항이 없는 상태로 동시에 해석되었다. 고체는 스테인리스 스틸(stainless steel)로 설정하였고, 고체 표면은 단열(adiabatic) 상태로 설정하였다. 입구조건은 연료와

공기의 예혼합 상태로 설정하였고, 대기압 상태에서 질량 유량 및 당량비의 변화를 주었다. 본 연구에서의 질량 유량은 0.025 g/s, 0.05 g/s, 0.1 g/s, 0.15 g/s, 0.2 g/s 로 설정하였고, 이 때의 레이놀즈 수는 5, 11, 21, 32, 43 의 값을 가졌다. 이를 통해 유체의 유동 영역은 층류(laminar)로 설정하였다. 출구 조건은 압력 출구로 설정하여 유체의 이동이 원활하도록 하였다.

## 2.3 화학반응

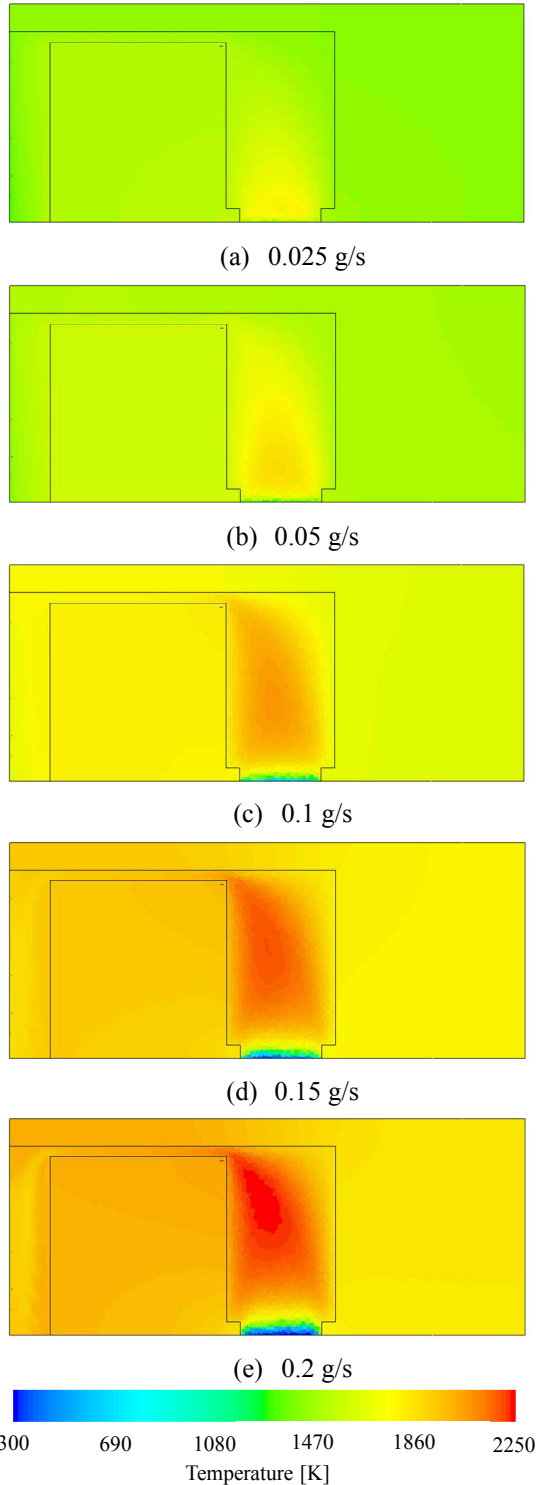
수소와 공기의 반응은 균질 반응(homogeneous reactor)모델을 사용하였다. Table 1 은 수소와 공기 연소를 위한 반응 메커니즘이다. 연소를 위한 반응물질 및 생성물질은 총 9 개의 분자들로 구성되었고, 총 19 개의 가역 반응으로 이뤄졌다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 공급되는 유량의 변화에 따른 연소해석

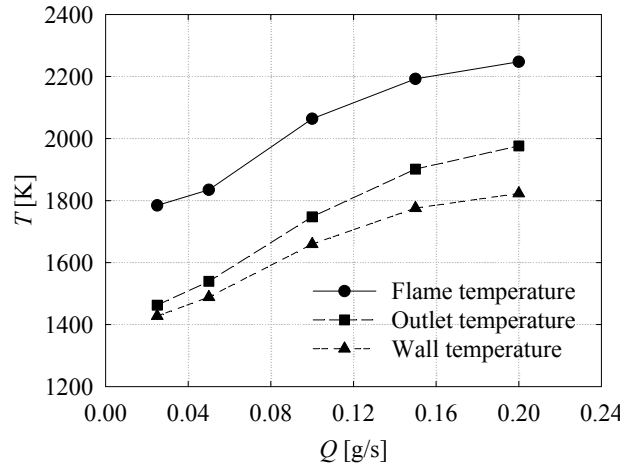
연소실에 공급되는 유량은 안정적인 연소를 위한 매우 중요한 요소이다. 만약, 공급 유량이 너무 적으면, 화염은 낮은 열발생률과 상대적으로 높은 열 손실 때문에 소화(quenching)될 수 있고, 유량이 너무 크다면, 연소실 내에서의 불충분한 연소 시간(residence time)에 의하여 화염이 사라질 수 있다. Fig. 3 은 연소기의 입구로 공급되는 유량의 변화에 의한 온도분포를 연소실 단면에 대하여 가시화한 결과이다. 공급되는 유체의 유량은 0.025 g/s 에서 0.2 g/s 까지 변화시켰고, 연소실 내부에서의 화염의 위치와 온도에 상당한 영향을 주는 것을 확인하였다. 공급되는 유체의 유량이 증가할 때, 화염의 위치는 연소기의 출구와 더 가까워졌고, 화염온도는 증가하였다. 고체의 온도분포는 낮은 유량에서는 연소실 외부와 연소실과 출구 사이에서 차이가 거의 없었다. 그러나 유량이 증가하면 연소실 외부의 온도보다 출구와 연소실 사이의 온도가 더 높아지는 경향을 보였다. 이는 출구 방향으로 유체의 유동에 의하여 화염이 출구 쪽에 더 가깝게 위치하기 때문에 연소실과 출구 사이의 고체에 더 높은 온도로 열전달이 일어난 것으로 예상하였다.

위의 가시화된 결과를 좀 더 정량적으로 표현하기 위하여 화염온도, 출구에서의 평균온도, 벽면에서의 평균온도, 그리고 입구와 출구에서의 압력비를 공급 유량의 변화에 따라 나타내었다. Fig. 4 는 공급되는 유량 변화에 대한 온도 및 압력비이다. 공급되는 유량이 증가할 때, 화염온도, 출구에서의

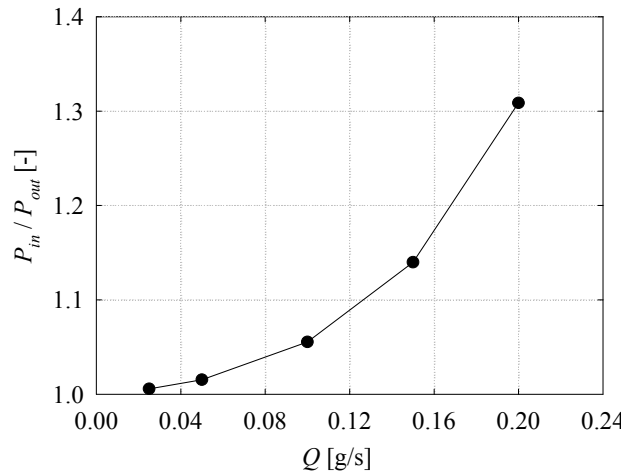


**Fig. 3** Temperature distribution on the cross section of the combustion chamber with the different supply flow rate

평균온도, 벽면에서의 평균온도, 그리고 압력비 모두 단조적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 화염온도는 공급 유량이 증가할수록 수소/공기 연소의 단열 화염온도(2400 K)에 가까워졌고, 온도 증



(a)



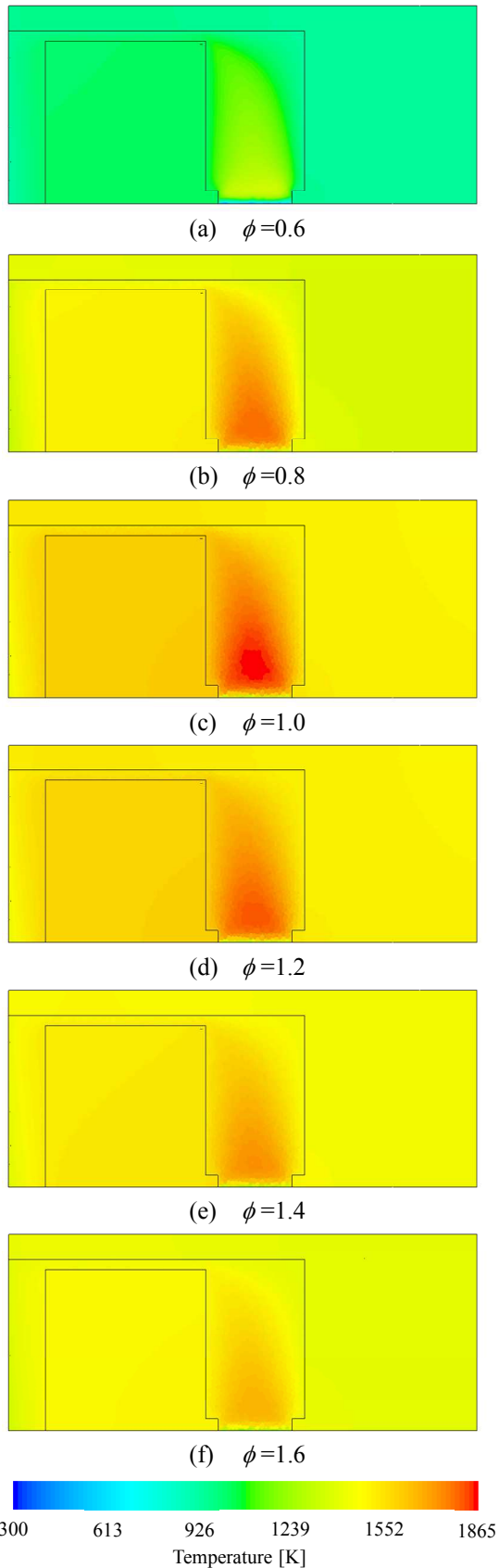
(b)

**Fig. 4** (a) Flame temperature, outlet temperature, and wall temperature and (b) pressure ratio between inlet and outlet under the different hydrogen/air flow rate with the same equivalence ratio of 1.0

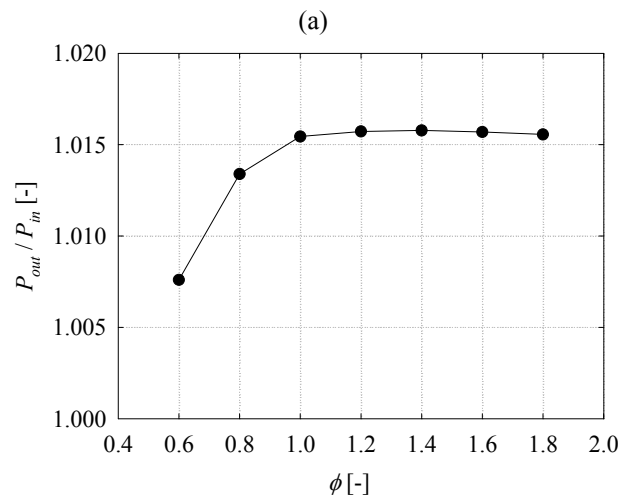
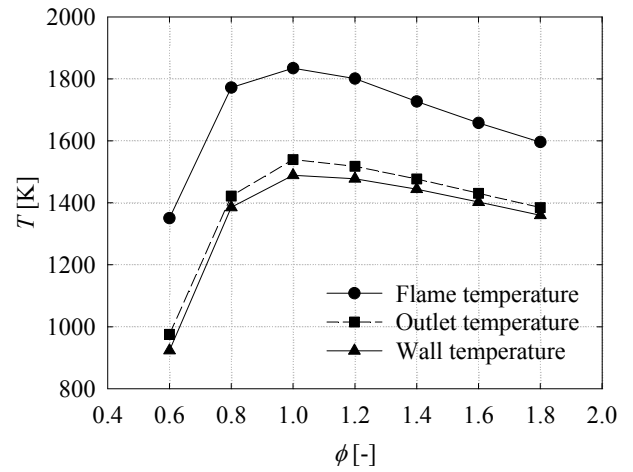
가량은 공급 유량의 증가에 의하여 점점 감소하는 경향을 보였다. 공급 유량의 변화에 의한 연소 화염온도 변화는, 유입되는 수소 연료에 의한 열발생량의 변화에 의한 것으로 예상하였다. 출구에서의 평균온도 증가량은 화염의 위치적인 영향에 의하여 화염온도와 벽면에서의 평균 온도보다 상대적으로 더 높았다. 공급 유량의 증가는 출구에서의 압력 강하 값을 상승시켰고, 이로 인해 입구와 출구에서의 압력비는 단조적으로 증가하는 경향을 보였다

### 3.2 당량비 변화에 따른 연소해석

Fig. 5 는 공급되는 유체의 유량을 0.1 g/s 로 고정된 상태에서 수소와 가스 혼합물의 당량비를 변화시킬 때, 연소실 내부의 단면의 온도분포를 가시화한 결과이다. 수소와 공기의 당량비 변화는



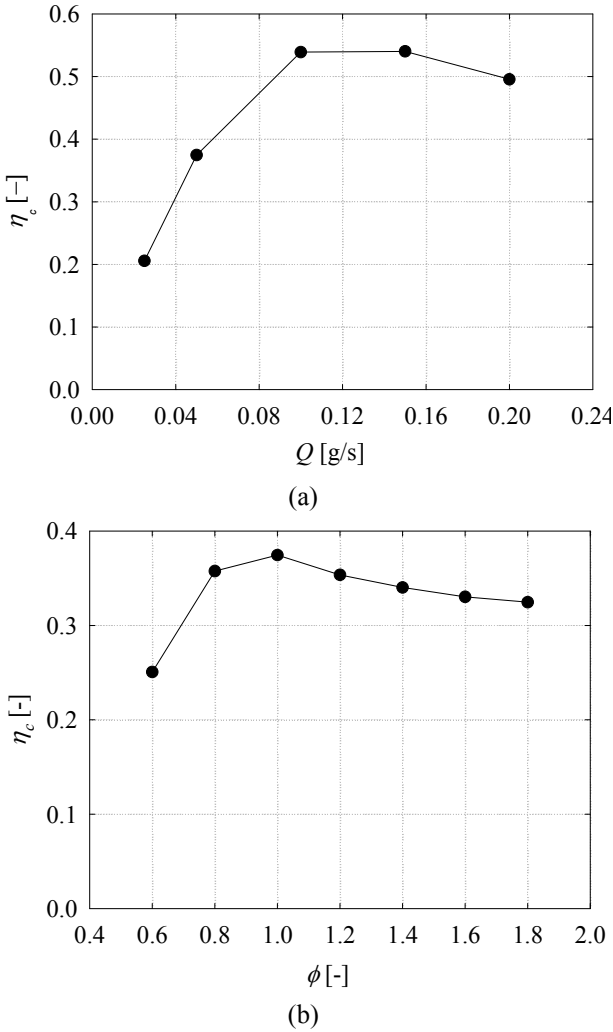
**Fig. 5** Temperature distribution on the cross section of the combustion chamber with the equivalence ratio



**Fig. 6** (a) Flame, outlet, and wall temperature and (b) pressure ratio under the different equivalence ratio with the same supply flow rate of 0.5 g/s

그림에서 확인할 수 있듯이 화염의 위치에는 큰 영향을 주지 못했다. 그러나 화염의 온도에는 상당한 영향을 주었다. 당량비가 0.4 일 때, 연소실 내부에는 화염이 발생하지 않았고, 이론공연상태에서 최대 화염온도를 가졌다

Fig. 6 은 수소와 공기의 당량비 변화에 따른 화염온도, 출구온도, 벽면에서의 온도 및 입구와 출구에서의 압력비를 정량적으로 표현한 결과이다. 화염온도와, 출구의 평균온도, 그리고 벽면에서의 평균온도 모두 당량비가 연료 희박상태에서 이론공연상태로 변화할 때는 증가하는 경향을 보였고, 이론공연상태에서 연료 과농도 상태로 변화할 때는 감소하는 경향을 보였다. 입구와 출구에서의 압력비의 경우 연료 희박 상태에서 이론공연상태로 변화할 때는 증가하는 경향을 보이지만, 이론공연상태 이후로는 거의 일정한 값을 가졌다.



**Fig. 7** Combustor efficiency under (a) different fuel/air flow rates with the same equivalence ratio of 1.0 and (b) different equivalence ratio with the same supply flow rate of 0.1 g/s

3.3 연소기 효율

Fig. 7 은 연소기 입구에서의 공급 유량 및 당량비 변화에 대한 연소기 효율이다. 연소기의 효율은 열효율(thermal efficiency)과 화학효율(chemical efficiency)의 계산으로부터 얻어진 값으로, 유체의 증가한 엔탈피를 방출 가능한 최대 엔탈피로 나눈 값으로 아래와 같이 표현된다.<sup>(16)</sup>

$$\eta_c = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)h_{out} - \dot{m}_a h_{in}}{\dot{m}_f h_f} \quad (6)$$

위 식에서  $m_a$  와  $m_b$  는 공기와 수소의 공급 유량이다.  $h_{in}$  과  $h_{out}$  은 연소기 입구와 출구에서의 비엔탈피이고,  $h_f$  는 수소의 저발열량(lower heating value)이다. 연소기 효율은 최대 화염온도의 변화와 유

사한 경향을 보였다.

4. 결 론

초소형 가스터빈의 안정적인 구동을 위하여 연소실 내에서의 안정적인 연소는 매우 중요하다. 적절한 연소실 설계와 공급 유량 및 당량비의 최적화는 충분한 화염의 열발생량과 연소 시간을 부여하여 안정적인 연소를 가능하게 해준다. 본 연구에서는 상용화 전산유체해석 프로그램인 STAR-CCM 를 이용하여 제안된 초소형 가스터빈의 연소실 내부에서의 수소/공기 연소를 공급 유량 및 당량비 변화에 대하여 해석하였다. 연소실은 해석의 용이함을 위하여 본래의 연소실 크기의 1/4 로 축소한 모델을 이용하였고, 화염온도 및 입구와 출구에서의 압력비 그리고 연소기 효율등의 변화를 확인하였다. 연소실 내부로 공급되는 유량이 증가할수록 화염의 위치가 연소실의 출구 부분으로 향하였고, 열발생량의 증가에 의해 화염온도는 단조적으로 증가하는 경향을 보였다. 수소와 공기의 당량비 변화는 화염의 위치에는 큰 영향을 주지 못하였고, 화염온도에는 영향을 주었다. 당량비가 0.4 이하에서는 불충분한 연료의 공급에 의하여 연소가 발생하지 않았고, 공급되는 수소와 공기가 이론공연상태일 때 가장 높은 화염온도를 가졌다. 연소기의 효율은 화염 온도의 변화와 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서의 수치해석 결과는 향후 열손실을 최소화한 조건에서 실제 제작된 초소형 가스터빈의 연소실에서의 연소 실험을 위한 기반 자료로 사용될 것이고, 실험 결과를 현재 수행된 해석 결과와 비교한 연구를 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소 지정 국방 MEMS 특화연구센터의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Dunn-Rankin, D., Leal, E. M. and Walther, D. C., 2005, "Personal Power Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, No. 5~6, pp. 422~465.
- (2) Kang, K., Meng, Y. S., Breger, J., Grey, C. P. and Ceder, G., 2006, "Electrodes with High Power and High Capacity for Rechargeable Lithium Batteries," *Science*, Vol. 311, No. 5763, pp. 977~980.
- (3) Kim, D. K., Duan, C., Chen, Y. F. and Majumdar, A.,

- 2010, "Power Generation from Concentration Gradient by Reverse Electrodialysis in Ion-Selective Nanochannels," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 9, No. 6, pp. 1215~1224.
- (4) Lueke, J. and Moussa, W. A., 2011, "MEMS-Based Power Generation Techniques for Implantable Biosensing Applications," *Sensors*, Vol. 11, No. 2, pp. 1433~1460.
- (5) Walther, D. C. and Ahn, J., 2011, "Advances and Challenges in the Development of Power-Generation Systems at Small Scales," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, No. 5, pp. 583~610.
- (6) Kim, Y. and Logan, B. E., 2011, "Microbial Reverse Electrodialysis Cells for Synergistically Enhanced Power Production," *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, No. 13, pp. 5834~5839.
- (7) Cao, L., Guo, W., Ma, W., Wang, L., Xia, F., Wang, S., Wang, Y., Jiang, L. and Zhu, D., 2011, "Towards Understanding the Nanofluidic Reverse Electrodialysis System: Well Matched Charge Selectivity and Ionic Composition," *Energy & Environmental Science*, Vol. 4, No. 6, pp. 2259~2266.
- (8) Sundarrajan, S., Allakhverdiev, S. I. and Ramakrishna, S., 2012, "Progress and Perspectives in Micro Direct Methanol Fuel Cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, In press.
- (9) Ju, Y. and Maruta, K., "Microscale Combustion: Technology Development and Fundamental Research," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 669~715.
- (10) Mitsos, A. and Barton, P. I., 2009, *Microfabricated Power Generation Devices: Design and Technology*, Wiley-VCH, New Jersey, pp. 81~96.
- (11) Mehra, A., Zhang, X., Ayon, A. A., Waitz, I. A., Schmidt, M. A., Spadaccini, C. M., 2000, "A Six-Wager Combustion System for a Silicon Micro Gas Turbine Engine," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 517~527.
- (12) Epstein A. H., 2003, "Milimeter-Scale, Micro-Electro-Mechanical Systems Gas Turbine Engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 126, No. 2, pp. 205~226.
- (13) Shan, X. C., Wang, Z. F., Jin, Y. F., Wu, M., Hua, J., Wong, C. K. and Maeda, R., 2005, "Studies on a Micro Combustor for Gas Turbine Engines," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 9, pp. S215~S221.
- (14) Iiduka, A., Ishigaki, K., Takikawa, Y., Ohse, T., Saito, K., Uchikoba, F., 2011, "Development of the Electromagnetic Induction Type Micro Air Turbine Generator Using MEMS and Multilayer Ceramic Technology," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 18, 0902035.
- (15) CD-Adapco, 2008, "Star-CCM+ (v 4.02.007) manual.
- (16) Hua, J., Wu, M. and Kumar, K., 2005, "Numerical Simulation of the Combustion of Hydrogen-Air Mixture in Micro-Scaled Chambers Part II: CFD Analysis for a Micro-Combustor," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 13 pp. 3507~3515.