

# 초소형 열광전변환 장치용 열재순환 초소형 이미터 내 연소특성에 관한 연구

이경호<sup>†</sup>·권오채<sup>\*</sup>

## Combustion Characteristics in a Heat-recirculating Microemitter for a Micro Thermophotovoltaic System

Kyoung Ho Lee and Oh Chae Kwon

**Key Words:** Micro thermophotovoltaic system(초소형 열광전변환 장치), Microemitter(초소형 이미터), Microcombustion(마이크로연소)

### Abstract

A new microemitter (microcombustor) configuration for a micro thermophotovoltaic system in which thermal energy is directly converted into electrical energy through thermal radiation was investigated experimentally and computationally. The microemitter as a thermal heat source was designed for a few watt power-generating micro thermophotovoltaic system. In order to satisfy the primary requirements for designing the microemitter, i.e., stable burning in the small confinement and maximum heat transfer through the emitting walls but uniform distribution of temperature along the walls, the present microemitter is cylindrical with an annular-type shield for heat recirculation to apply for the excessive enthalpy concept. Results show that the heat recirculation substantially improves the performance of the microemitter: the observed and predicted thermal radiation from the microemitter walls indicated that heat generated in the microemitter is uniformly emitted.

### 기호설명

- $d_s$  : 쉴드(shield) 내경 (mm)
- $d_w$  : 초소형 이미터 내경 (mm)
- $l$  : 초소형 이미터의 중심부 길이 (mm)
- $r$  : 반경방향 좌표축
- $T$  : 온도 (K)
- $t_g$  : 초소형 이미터와 쉴드 간극
- $t_w$  : 초소형 이미터 벽두께 (mm)
- $V$  : 초소형 이미터 입구 유속 (m/s)
- $X_f$  : 연료 몰분율
- $x$  : 축방향 좌표축
- $\phi$  : 당량비
- $\gamma$  :  $(d_s/2)/t_g$

### 1. 서론

최근 휴대용 상용 전자제품의 사용 증가와 이동형 군용장비의 개발에 관심이 높아지면서 2차 전지에 대한 수요도 급증하는 추세이나 현재 사용되고 있는 리튬-이온 배터리는 낮은 에너지밀도, 긴 충전시간, 짧은 충전수명, 환경문제 발생 등의 한계가 있어서 이를 대체할 수 있는 초소형 동력발생 장치(Power MEMS)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 하나가 높은 에너지밀도를 갖는 탄화수소계 연료(리튬-이온 전지의 약 100배 이상)의 연소를 이용한 초소형 동력발생 장치이다.<sup>(1)</sup> 1990년대 초부터 MEMS 기술을 기반으로 개발된 MIT의 초소형 가스터빈과 UC Berkeley의 초소형 로터리엔진 등 열기관을 초소형화 하기위한 많은 연구가 수행되어왔다.<sup>(1)</sup> 그러나 동적장치가 포함되어있는 초소형 열기관은 가

---

<sup>†</sup> 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학  
E-mail : devote1004@naver.com  
TEL : (031)290-7917 FAX : (031)290-5889  
<sup>\*</sup> 회원, 성균관대학교 기계공학부

공, 조립 및 기밀(sealing) 등의 기술적 한계로 과도한 마찰 및 심각한 열 손실이 발생하는 것으로 보고된다. Ahn 등<sup>(2)</sup>은 동적장치가 포함되지 않는 대향류 Swiss-roll 버너를 이용한 초소형 열전장치를 제안하였고 열손실을 최소화하기 위해 열재순환 연소방식을 적용하였다. Federici 등<sup>(3)</sup>은 초소형 연소기 내 안정적 연소의 보장을 위해 촉매연소 방식의 초소형 열전장치를 개발하였다. 초소형 화염의 소염문제를 해결하기 위한 방안으로 제시된 촉매연소 방식은 연소기 내 촉매 피독으로 인한 성능저하 문제를 근본적으로 갖는다. Pan 등<sup>(4)</sup>은 열복사에너지를 전기에너지로 직접 변환할 수 있는 단순한 구조의 동적 장치가 없는 초소형 열광전변환 장치를 위한 초소형 연소기에 관한 연구를 수행하였다. 후향계단을 갖는 수소-공기 예혼합의 원통형 초소형 연소기의 다양한 파라미터 연구를 실험과 수치해석을 통해 수행하였으나 소형 연소장치에서의 수소의 이용은 탄화수소계연료에 비해 소염이 덜 된다는 장점을 갖지만 연료 저장이 매우 어렵다는 점에서 실제 응용이 어려울 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 촉매연소 방식을 적용하지 않은 초소형 열광전변환 장치를 위한 프로판-공기 예혼합을 사용하는 초소형 이미터 설계에 관한 연구를 수행하고자 하며 다음과 같은 세부 목적을 갖는다. 1) 수 watt급 초소형 열광전변환 장치용 열재순환 초소형 이미터의 기본형상 설계와 다양한 설계 파라미터를 결정하고, 2) 초소형 이미터의 형상에 따른 연소 특성 및 열전달 특성을 연구하며, 3) 이러한 연구로부터 초소형 이미터의 최적화된 기초 설계데이터를 제공하고 CFD 시뮬레이션을 통한 초소형 화염구조를 분석하고자 한다.

## 2. 실험 및 계산 방법

### 2.1 실험 장치 및 방법

초소형 이미터 내 예혼합 화염의 연소 특성 및 열전달 특성을 관찰하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 초소형 이미터, 유량 공급부, 이미터 벽면의 온도분포를 측정하기 위한 열전대 그리고 열복사가 되는 초소형 이미터 외벽면의 형상을 얻기 위한 디지털 카메라로 구성된다.

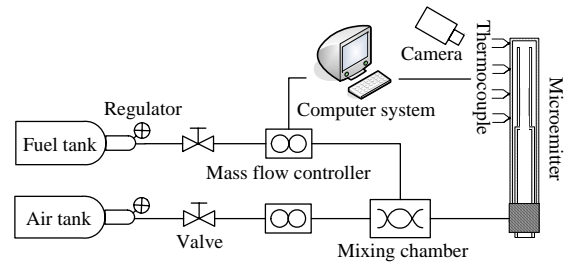


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

연료와 공기는 초소형 이미터 입구의 당량비와 분사속도 조건에 따라 적절한 질량유량계(100-2000 sccm)를 사용하여 초소형 이미터에 공급되었다. 초소형 이미터는 열재순환 연소방식의 적용에 따른 성능향상의 연구를 위해 가공하기 쉬운 스테인리스 스틸(SUS 304)로 제작하였다. 예혼합기가 이미터로 분사되면 이미터 벽면 열손실에 의한 소염을 극복할 수 있도록 배기부에 스파크 점화하여 초소형 화염을 발생시켰다. 이미터가 가열되어 연소가 강화되면 화염은 혼합기 입구부로 전파되어 연소안정화가 이루어진다. 초소형 이미터의 외벽면 온도는 K-type의 열전대를 사용하여 측정하였고 정확도는  $\pm 0.05\%$  갖는다.

적절한 온도 및 균일한 온도분포를 갖는 초소형 이미터의 작동조건을 찾기 위해 당량비  $\phi = 0.9-1.1$ 과 분사속도  $V = 3.3$  m/s범위에서 실험을 수행하였다. 열재순환을 위한 초소형 이미터 내 벽과 쉘드 사이의 간극비(Fig. 2참조)의 다양한 변화와 이미터 외벽두께의 변화에 따른 초소형 이미터의 연소 및 열전달 특성을 관찰하였다.

### 2.2 계산 방법

초소형 이미터의 실험을 통해 얻은 연소 및 열전달 특성의 데이터를 바탕으로 다양한 조건에서 초소형 이미터 내 생성된 화염 구조를 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.2를 사용하여 계산하였다. 지배방정식으로 축대칭 원통좌표계, 2차원 Navier-Stokes 방정식과 연속, 화학종, 에너지 방정식을 사용하여 유한체적법으로 계산하였다.<sup>(5)</sup>

Multi-component diffusion 모델, 열 확산 모델을 적용하였으며 열화학적 물성치는 CHEMKIN 데이터베이스<sup>(6)</sup>를 이용하였다. 또한 최적조건에서 초소형 이미터의 외벽면에서 방출되는 열복사에 의해 가상의 열광전지 셀에서 흡수되는 열복사량을 예측하기 위해 surface-to-surface 복사모델을 적용하였다.<sup>(7)</sup> 프로판-공기의 반응은 7개의 화학종이

포함되어 있는 프로판-산소의 가역 4단계 반응 메커니즘을 사용하여 계산되었다.<sup>(8)</sup> 계산격자는 계산의 정확성과 안정된 수렴성을 확보하기 위해 다양한 격자수와 격자간격 형태를 변화시키면서 수행한 결과 32,000개로 결정하였다. 지배방정식은 전술한 반응 및 복사 모델을 적용한 후 이산화하여 16대의 PC(CPU 3.0GHz/1대)로 이루어진 병렬계산시스템을 이용하여 실험과 동일한 조건에서 계산되었다.

### 3. 결과 및 고찰

동적 장치가 없고 구성이 단순하며 제작이 용이하다는 장점으로 인해 기존의 배터리를 대체할 수 있는 잠재력을 지닌 초소형 열광전변환 장치 중 열복사에너지를 방출하는 초소형 이미터는 핵심요소이며, 성능효율을 높이기 위해서는 고온-균일한 온도분포를 가져야 한다. 따라서 안정연소와 균일 온도분포를 보장할 수 있는 열재순환 원통형 초소형 이미터에 관한 연구를 수행하였다.

#### 3.1 초소형 이미터 구조

Fig. 2는 예비 설계된 열재순환 초소형 이미터의 구조와 주요 치수를 보여준다. 초소형 이미터 내 환형 쉴드를 설치하여 열재순환 연소방식을 적용하였다. 초소형 이미터의 배기부에서 점화되어 생성된 초소형 화염의 열전달에 의해 이미터의 연소강화가 이루어지며 화염은 쉴드와 이미터 사이의 혼합기 입구까지 전파되어 안정화된다. 고온 배기가스에 의해 예혼합기가 예열되어 이미터 벽면은 균일 온도분포를 가지며 열손실도 감소된다.

초소형 이미터의 열재순환 효과를 알아보기 위해  $\phi = 1.0$ ,  $V = 2.4$  m/s 조건에서 열재순환 연소방식을 적용하지 않은 원통형 초소형 이미터 (Fig. 3)의 외벽면 온도를 측정하였고 Fig. 4는 실험 결과와 열복사가 발생하는 초소형 이미터의 벽면의 사진이다. 혼합기의 입구 분사속도는 이미터 내 안정적인 화염이 보장되는 최고 분사속도로 결정되었다. 초소형 이미터의 축방향의 위치를 가상 열광전지 셀을 설치 할 길이( $l$ )로 무차원화하여( $x/l = 0-1$ )로 나타내었는데 최고온도로부터 325 K의 온도강하가 발생하여 온도구배는 15 K/mm를 가지며 불균일한 복사가 관찰된다.

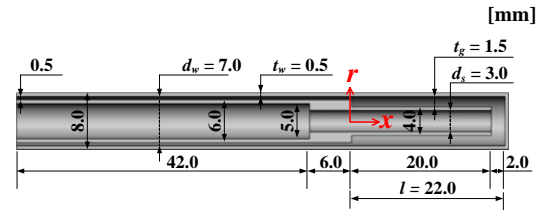


Fig. 2 Configuration of a heat-recirculating microemitter.

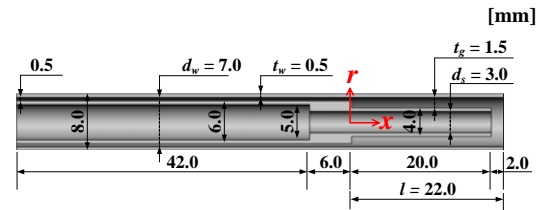


Fig. 3 Configuration of a microemitter without heat-recirculation.

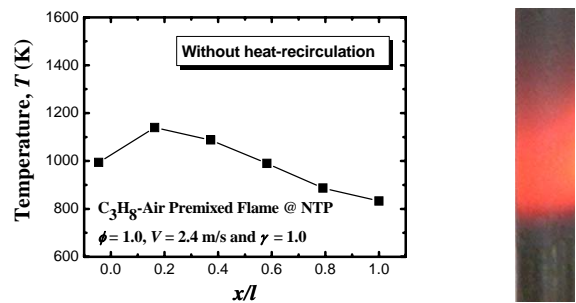


Fig. 4 Measured temperature distribution along the outer wall surface of the microemitter without heat-recirculation ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm and  $t_w = 0.5$  mm) and a radiating image for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 1.0$  and  $V = 2.4$  m/s at NTP.

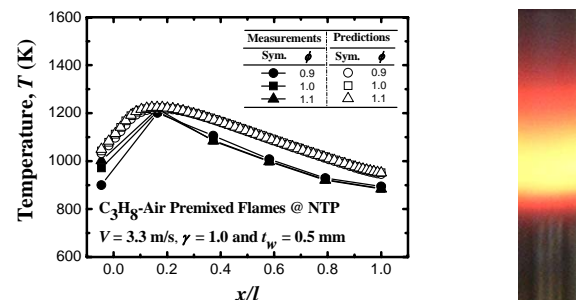
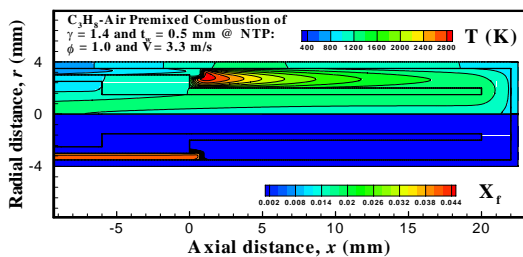
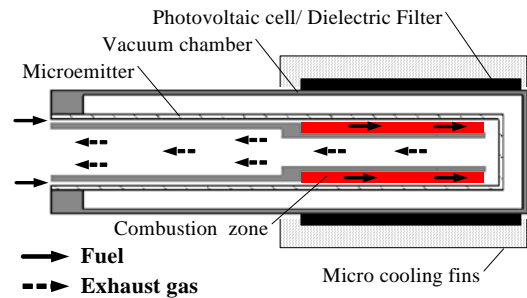


Fig. 5 Measured and predicted temperature distribution along the outer wall surface of the heat-recirculating microemitter ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm,  $\gamma = 1.0$  and  $t_w = 0.5$  mm) and a radiating image for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 0.9, 1.0$  and  $1.1$  and  $V = 3.3$  m/s at NTP. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman *et al.*<sup>(10)</sup>

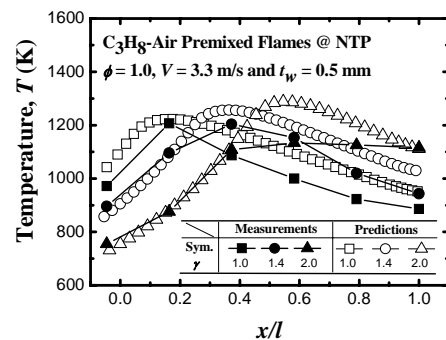
Fig. 5는 열재순환 초소형 이미터(Fig.2)에 대해  $\phi = 0.9-1.1$ ,  $V = 3.3$  m/s의 조건에서 측정 및 예측된 이미터 외벽면의 온도와 열복사되는 이미터를 보여준다. 혼합기의 분사속도는 다양한 예비 실험을 통해 이미터 내 적절한 위치에 화염이 생성되는 조건으로 결정되었다. 예측온도는 실험결과와 비교하여 상대적으로 높게 나타났으며, 이러한 온도차는 대기 중으로 발생하는 열손실 등과 같은 경계조건의 부정확성에 의한 영향으로 판단된다. 반면 초소형 이미터의 무차원 위치에 대한 측정온도와 예측온도는 서로 유사한 경향을 보여주고 있다. 따라서 초소형 이미터의 설계에 있어 실험과 함께 수치해석을 통한 결과를 이용하는 것이 유효함을 알 수 있다. 각각의 당량비에 대한 측정 및 예측온도 차는 거의 없어 이후 초소형 이미터의 실험 및 예측은  $\phi = 1.0$ 인 조건에 대해 수행하였다. 초소형 이미터의 외벽면의 온도구배는 11 K/mm로 열재순환이 적용되지 않은 경우(Fig. 4참조)에 비해 감소하였지만 열복사되는 이미터 외벽면의 사진은 해당조건이 최적 조건은 아님을 보여준다. 열재순환 방식이 적용된 초소형 이미터(Fig.2) 내 예측된 온도분포와 연료분포(몰분율,  $X_f$ )의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 예측된 연료분포는 연료가 혼합기 입구의 상부에서 거의 소모됨을 보여준다. 초소형 이미터 내 공급된 혼합기가 충분한 체류시간을 가지면 상대적으로 상류에서 국소연소가 진행되고 불균일한 복사가 발생한다. Fig. 7은 열재순환 초소형 이미터, 유전필터, 열광전지 셀, 냉각 핀의 단순 구성요소로 이루어진 초소형 열광전변환 장치의 개념도를 보여준다.



**Fig. 6** Predicted distributions of temperature and mole fraction of fuel in the heat-recirculating microemitter ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm,  $\gamma = 1.0$  and  $t_w = 0.5$  mm) for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 1.0$  and  $V = 3.3$  m/s at NTP. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman *et al.*<sup>(10)</sup>



**Fig. 7** A conceptual design of a micro TPV power system.

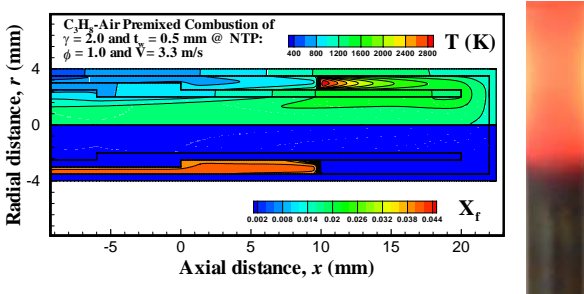


**Fig. 8** Effects of on temperature distribution along the outer wall surface of the heat-recirculating microemitter ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm and  $t_w = 0.5$  mm) for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 1.0$  and  $V = 3.3$  m/s at NTP:  $\gamma = 1.0, 1.4$  and  $2.0$ . Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman *et al.*<sup>(10)</sup>

### 3.2 초소형 이미터의 형상 변화

셴드 내경 대 초소형 이미터 내벽면과 셴드 사이의 간극의 비로 정의되는 형상비( $\gamma$ )의 변화를 통해 열재순환 효과가 최대를 갖는 조건을 고찰하였다. 또한 초소형 이미터 벽두께의 변화에 따른 연소특성과 열전달 특성을 연구하였다.

Fig. 8은  $\phi = 1.0$ ,  $V = 3.3$  m/s의 조건에서 형상비( $\gamma = 1.0, 1.4, 2.0$ )에 따른 실험 및 계산 결과이다. 무차원화한 길이에 대한  $\gamma = 1.0, 1.4, 2.0$ 의 각각의 경우 온도구배는 11, 10, 3 K/mm로 측정되었다. 형상비  $\gamma = 2.0$ 을 갖는 이미터 내 예측된 온도분포 및 연료분포를 복사되는 이미터의 사진과 함께 Fig. 9에 나타내었다. 다양한 형상에 대한 이미터의 예측 및 실험 결과와 같이  $\gamma$  증가할수록 가상의 열광전지 셀을 적용할 이미터의 벽면 위치에서의 온도 균일성이 향상됨을 확인하였다. 즉,  $\gamma$ 가 증가하게 되면 간극 사이의 부피가 줄어 유속이 증가되고 혼합기의 체류시간

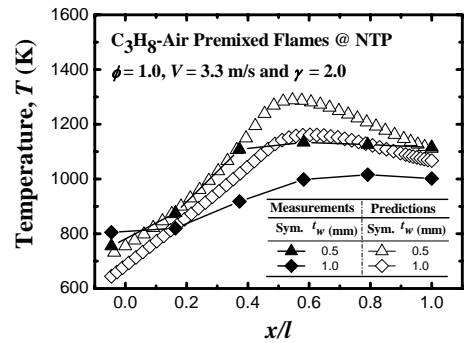


**Fig. 9** Effects of  $t_w$  on distributions of temperature and mole fraction of fuel in the heat-recirculating microemitter ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm and  $t_w = 0.5$  mm) and a radiating image for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 1.0$  and  $V = 3.3$  m/s at NTP:  $\gamma = 2.0$ . Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman *et al.*<sup>(10)</sup>

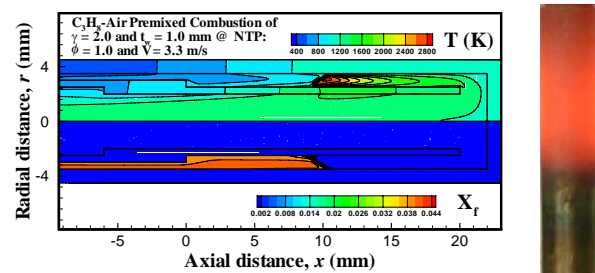
도 짧아져서 상대적으로 하류 부분에서 쉘드 끝 부분에 고온의 연소가스가 체류하게 되어 많은 열복사가 이루어지게 되는 것이다. 따라서 불균일한 복사가 상당히 개선된 것이다. 실험 결과와 예측 결과 간의 정량적인 차이는 관찰되나 정성적인 경향은 서로 유사하다.

초소형 이미터의 배기부의 평균온도는  $\gamma = 1.0, 2.0$ 에 대해 각각 723, 900 K으로 측정되었다. 이것은  $\gamma$ 가 감소하면 총열회수 효과가 증가됨을 보여주며 Fig. 6( $\gamma = 1.0$ )과 Fig. 11( $\gamma = 2.0$ )의 예측된 배기가스의 온도로도 확인하였다. 그러나 전술한 바와 같이 낮은  $\gamma$ 에서는 화염이 Fig. 6과 같은 불균일한 복사가 관찰된다. 이런 관점에서 불 때 안정연소를 하는 고온-균일의 복사를 하는 이미터 설계를 위해서는 상류에서 점화되어 쉘드와 이미터 내벽 사이의 간극을 적절히 선택하여 상대적으로 안정연소가 가능하도록 해야 한다.

초소형 이미터의 벽면 두께에 대한 열전달 특성변화를 고찰하기 위해  $\phi = 1, V = 3.3$  m/s,  $\gamma = 2.0$ 인 조건에서  $t_w = 0.5, 1.0$  mm에 대한 측정온도와 예측온도를 Fig. 10에 나타내었다. 무차원 위치에 대한 온도구배는 거의 유사성을 갖지만  $t_w = 1.0$  mm를 갖는 두꺼운 이미터의 벽면 온도는 상대적으로 감소하였다.  $t_w = 1.0$  mm의 초소형 이미터 내 예측된 온도 및 연료 복사되는 이미터의 사진을 Fig. 11에 함께 나타내었다. 벽면 두께 변화에 따른 온도 경향은 거의 유사하지만 상대적으로 열손실이 커진 두꺼운 벽을 갖는 이미터의 사진은 더 낮은 온도로 상대적으로 불균일하게 관측되었다. 따라서 초소형 이미터 내에



**Fig. 10** Effects of  $t_w$  on temperature distribution along the outer wall surface of the heat-recirculating microemitter ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm and  $\gamma = 2.0$ ) for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 1.0$  and  $V = 3.3$  m/s at NTP:  $t_w = 0.5$  and 1.0 mm. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman *et al.*<sup>(10)</sup>



**Fig. 11** Effects of  $t_w$  on distributions of temperature and mole fraction of fuel in the heat-recirculating microemitter ( $d_w = 7.0$  mm,  $l = 22.0$  mm and  $\gamma = 2.0$ ) and a radiating image for a  $C_3H_8$ -air mixture of  $\phi = 1.0$  and  $V = 3.3$  m/s at NTP:  $t_w = 1.0$  mm. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman *et al.*<sup>(10)</sup>

서 안정연소를 위해서는 가공과정과 기계적 강도를 고려하여 가능한 얇은 두께를 갖도록 설계를 해야 한다. Fig. 11의 예측된 연료분포는 상대적으로 더 얇은 벽면을 갖은 초소형 이미터의 결과와 유사하게 나타난다.

### 3.3 초소형 이미터의 최적화 설계

지금까지 초소형 이미터의 성능향상을 위해 다양한 설계 파라미터와 이미터 형상의 변화에 대한 연소특성과 열전달 특성을 살펴보았다. 이론당량비 부근에서의 당량비 변화는 이미터 성능향상에 영향을 주지 않았으며 예혼합기의 분사속도는 수 watt급 발생동력에 맞추어 결정되었다. 초소형 이미터 내에서  $\gamma$ 가 증가할수록 안정화된 균일 연소가 발생되었으며 이미터 벽면 두께가

감소할수록 초소형 이미터는 고온-균일의 온도분포를 보였다. 따라서 주어진 당량비와 온도조건에서 상대적으로 얇은 벽면 두께를 갖고 높은  $\gamma$ 를 가질 경우 최적화에 가깝다고 판단된다.

본 연구를 통해 최적화된 설계 형상은  $\phi = 1$ ,  $V = 3.3 \text{ m/s}$ 의 조건에서  $d_w = 7.0 \text{ mm}$ ,  $d_s = 4.0 \text{ mm}$ ,  $t_g = 1.0 \text{ mm}$  ( $\gamma = 2.0$ ),  $t_w = 0.5 \text{ mm}$  그리고  $l = 22.0 \text{ mm}$ 를 갖는 열재순환 원통형 초소형 이미터이다. 이러한 최적설계 형상을 갖는 초소형 이미터의 성능평가를 위해 이미터에서 가상 열광전지 셀로 들어가는 열복사량과 동력 발생량을 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 초소형 이미터의 성능효율과 초소형 열광전변환 장치의 발생동력은 각각 39.5%, 3.6 W로 예측되었고 열광전지 셀의 전환효율을 10%로 가정<sup>9)</sup>할 때 초소형 열광전변환 장치의 전체효율은 3.2 %가 된다. 또한 전체효율은 높은 방사율을 갖는 재질( $\epsilon_{SiC} = 0.9$ )로 이미터를 설계하면 더욱 향상 될 것이다.

#### 4. 결 론

수 Watt급 동력발생용 초소형 열광전변환 장치를 위한 초소형 이미터의 최적화 설계를 위해 연소 및 열전달 특성을 연구하였다. 본 연구의 주요 결과요약 및 결론은 다음과 같다.

1) 초소형 이미터 내 안정연소를 위해 열재순환 연소방식을 적용한 원통형 초소형 이미터를 설계하였다. 최적화된 설계 조건에 대해서 열재순환 연소방식의 적용은 초소형 이미터의 성능을 향상시켰다. 즉, 초소형 이미터의 벽면에서 측정 및 예측된 열복사는 고온-균일하게 방출되었다.

2) 초소형 이미터의 성능은 쉘드와 이미터 내 벽 간극이 증가할수록 개선되었으나 총 열회수는 감소하였다. 또한 이미터의 벽면 두께를 감소하면 이미터의 성능은 개선된다.

3) 예측된 초소형 열광전변환 장치의 전체효율과 발생동력은 각각 3.2%와 3.6 W로 예측되었으며 SiC와 같은 높은 방사율을 갖는 재질로 이미터를 설계하면 성능효율은 향상될 것이다.

#### 후 기

본 논문은 에너지관리공단의 2004년도 에너지기술학술진흥사업 지원을 받아 연구되었음(과제

번호: 2004-03-0012-0-000).

#### 참고문헌

- (1) Fernandez-Pello, C., 2002, "Micropower generation using combustion: Issues and approaches," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 883~899.
- (2) Ahn, J., Eastwood, C., Sitzki, L. and Ronney, P. D., 2004, "Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 2463~2472.
- (3) Federici, J. A., Norton, D. G., Bruggemann, T., Voit, K. W., Wetzel, E. D. and Vlachos, D. G., 2006, "Catalytic microcombustors with integrated thermoelectric elements for portable power production," *J. Power Sources*, Vol. 161, pp. 1469~1478.
- (4) Pan, J. F., Huang, J., Li, D. T., Yang, W. M., Tang, W. X. and Xue, H., 2007, "Effects of major parameters on micro-combustion for thermophotovoltaic energy conversion," *App. Thermal Eng.*, Vol. 27, pp. 1089~1095.
- (5) Fluent Inc., 2001, "Fluent 6.2 User's Guide," Fluent Inc., Lebanon, NH, USA.
- (6) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1992, "The CHEMKIN Thermodynamic Data Base," *Report No. SAND87-8215B*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.
- (7) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, "Thermal Radiation Heat Transfer," 4th ed., Hemisphere Publishing Corp., Washington, DC, USA, pp. 722~729.
- (8) Hautman, D. J., Dryer, F. L., Schug, K. P., and Glassman, I., 1981, "A multiple-step overall kinetic mechanism for the oxidation of hydrocarbons," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 25, pp. 219~235.
- (9) Green, M. A., Emery, K., King, D. L., Hisikawa, Y., and Warta, W., 2006, "Solar cell efficiency tables (Version 27)," *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 14, pp. 45~51.