

# 바이오가스 적용 캐비티 매트릭스 연소기 CFD 수치연산

전영남<sup>†</sup> · 안 준

조선대학교 환경공학과

## CFD Numerical Calculation for a Cavity Matrix Combustor Applying Biogas

YOUNG NAM CHUN<sup>†</sup>, JUNE AN

Dept. of Environmental Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :

[ynchun@chosun.ac.kr](mailto:ynchun@chosun.ac.kr)

Received 1 September, 2022  
Revised 28 September, 2022  
Accepted 18 October, 2022

**Abstract** >> With the advancement of industry, the use of various sustainable energy sources and solutions to problems affecting the environment are being actively requested. From this point of view, it is intended to directly burn unused biogas to use it as energy and to solve environmental problems such as greenhouse gases. In this study, a new type of cavity matrix combustor capable of low-emission complete combustion without complex facilities such as separation or purification of biogas produced in small and medium-sized facilities was proposed, and CFD numerical calculation was performed to understand the performance characteristics of this combustor. The cavity matrix combustor consists of a burner with a rectangular porous microwave receptor at the center inside a 3D cavity that maintains a rectangular parallelepiped shape composed of a porous plate that can store heat in the combustor chamber. As a result of numerical calculation, the biogas supplied to the inlet of the combustor is converted to CO and H<sub>2</sub>, which are intermediate products, on the surface of the 3D matrix porous burner. And then the optimal combustion process was achieved through complete combustion into CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O due to increased combustibility by receiving heat energy from the microwave heating receptor.

**Key words** : CFD(전산유체역학), ESCRS(확장형 연소모델), Biogas(바이오가스), Microwave heating(마이크로웨이브 가열), Cavity matrix burner(캐비티 매트릭스 버너)

## 1. 서론

산업이 고도화되면서 다양한 지속가능한 에너지의 활용과 환경에 영향을 주는 문제에 대한 해결이

적극적으로 요구되어 지고 있다. 이러한 관점에서 기존의 화석연료의 사용은 유한한 에너지 자원의 한계와 온실가스 등 환경 문제를 가지고 있다<sup>1)</sup>.

바이오가스는 이러한 문제를 완화시키는 대체 에

너지원으로서 활용이 가능한 지속적이고 재생가능한 특성을 가지고 있다. 바이오가스는 혐기소화조에서 미생물에 의해 생성되며 이때 공급원로는 낙농업 거름, 도시 폐수, 유기 슬러지, 음식물 쓰레기, 에너지 작물 등이 있다. 이와 같이 생산된 바이오가스가 연소로, 가스터빈, 주방 스토브 등의 연소설비에서 이용되어 진다면 기존의 화석연료 에너지 소비의 일부를 대체할 수 있다<sup>2)</sup>.

바이오가스는 저발열량가스(low calorific calue gas, LCVG)로 가연성분인 메탄(CH<sub>4</sub>)과 비가연성분인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 그리고 미량의 가스인 질소(N<sub>2</sub>), 황화수소(H<sub>2</sub>S), 일산화탄소(CO), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 수소(H<sub>2</sub>), 수증기(H<sub>2</sub>O), 실록산 등을 함유하고 있다<sup>3)</sup>.

기존의 버너 연소는 공기중에 개방된 버너표면에서 화염이 안정화되는 자유화염(free flame)의 특성을 가진다. 이러한 자유화염버너(free flame burner, FFB)는 대류열전달에 의한 배기손실이 많은 형태로 낮은 에너지 효율과 다량의 미연소 공해물질이 배출된다<sup>4)</sup>. 만일, 이러한 배기손실열을 재순환하거나 유입되는 혼합가스 예열에 이용된다면 연소화염의 온도가 단열화염 온도보다 높은 초과 엔탈피연소(excess enthalpy combustion) 또는 초단열연소(super adiabatic combustion)를 이룰수있다.

다공성 복사버너(porous radiant burner, PRB)는 다공체(porous media) 내에서 연소가 진행되어 높은 전도와 복사 열전달이 연소영역에서 다공체 내부 주위로 전달되어 고온이 유지된다. 이로 인해 유입영역으로의 열재순환이 가능하게되어 이 영역으로 공급되는 혼합기체가 예열되어 연소영역에서 초단열연소가 이루어져 고온의 안정된 화염이 형성된다<sup>5)</sup>. PRB의 경우 이러한 특성으로 인해 저발열량 바이오가스의 연소가 기존의 FFB에서 연소가 어려운 경우도 안정된 연소가 가능하여 이에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>6,7)</sup>. 그러나 이러한 대부분의 연구는 평면 다공체 복사버너로 다공체 내의 연소영역에서 발생된 복사열은 혼합가스가 유입되어 가열되는 예열영역으로 뿐만 아니라 배기구 쪽으로도 전달되어 방출되는 문제를 가지고 있다.

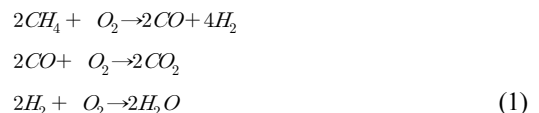
따라서 본 연구에서는 이러한 배기 열손실을 최소화하기 위해 다공체 판으로 구성된 직육면체의 형상을 유지하는 3D 캐비티 구조에 직사각형 다공성 마이크로웨이브 수용체(microwave receptor)가 중심에 위치한 구조로 되어있는 새로운 형태의 캐비티 매트릭스 연소기(cavity matrix combustor, CMC)를 제안하였다. 그리고 제안된 연소기의 연소 성능 특성을 파악하기 위해 연소모델이 포함된 CFD 수치계산을 수행하여 연소기의 성능특성을 파악하여 CMC 바이오가스 연소 가능성을 입증하였다.

## 2. 수치해석 모델 및 방법

### 2.1 수치해석 모델

#### 2.1.1 연소모델

연소모델은 확산화염과 부분예혼합 화염 모두 적용가능한 유한반응모델(finite-rate chemistry model)인 extended simple chemically-reacting system (ESCRS)을 사용하였다. 바이오가스 중 가연 연료(CH<sub>4</sub>)와 중간생성물(CO, H<sub>2</sub>)의 연소반응은 식(1)과 같이 2단계 3가지 반응(two-step three reaction)으로 이루어진다.



각각의 반응율( $\omega_i$ )은 Magnussen과 Hjertager<sup>8)</sup>가 제안한 반응모델을 이용하였으며 다음 식 (2)와 같다.

$$\omega_i = \text{minimum of } \left| \rho A \frac{\epsilon}{k}, \rho A \frac{m_{ox} \epsilon}{s k}, \rho A \frac{m_{pr} \epsilon}{1+s k} \right| \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 시간평균 밀도,  $s$ 는 연료의 단위 질량당 화학양론적인 산화제의 요구량,  $m_i$ 는 각각 CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>의 질량분율,  $m_{ox}$ 는 산화제의 질량분율,  $m_{pr}$ 은 생성물의 질량분율,  $A$ 와  $A'$ 은 Lockwood<sup>9)</sup>등이 제시한 경험상수로 4.0이다.

화학종의 비열, 밀도, 온도는 Kee 등<sup>10)</sup>의 열역학

데이터를 이용하여 계산하였다.

Table 1은 ESCRS 연소모델을 사용하여 일반지배방정식<sup>11)</sup>을 계산할 경우 각각 변수들을 나타내었다. 평형 난류연소모델에서  $\Gamma_\phi$ 와  $S_\phi$ 는 각각  $\phi$ 에 대한 확산계수와 생성항이며 Schmidt수이다.

### 2.1.2 난류모델

연소기 내의 난류유동 수치모사를 위하여  $k-\epsilon$  모델<sup>11)</sup>을 사용하였고, 난류운동에너지  $k$ 와 난류운동에너지 소산율  $\epsilon$ 의 각각의 지배방정식 (8), (9)에 의해 계산된다.

난류 전단력은 Boussinesq 가정에 의하여 에디 또는 난류점성계수  $\mu_t$ 와 평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 Prandtl-Kolmogorov<sup>12)</sup> 관계식으로부터 산출된다.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

난류점성계수  $\mu_t$ 는 난류운동에너지  $k$ 와 난류운동에너지 소산율  $\epsilon$ 의 지배방정식으로부터 구한  $k$ 와  $\epsilon$ 의 해로 구해질 수 있다.

따라서 유효점성계수(effective turbulent viscosity)는 식 (4)와 같이 층류점성계수( $\mu$ )와 난류점성계수( $\mu_t$ )의 합으로 주어진다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

여기서 유효 점성계수  $\mu_{eff}$ 가 구해지면 물질 또는 에너지 전달식의 확산계수는 난류에서 Schmidt수 또는 Prandtl수인  $\sigma$ 를 이용하여 물질 및 에너지의 전달 계수를 각각 구할 수 있다.

### 2.1.3 국부체류시간

바이오가스 연소를 하는 데 캐비티매트릭스 연소기내에서의 국부체류시간(local residence time)은 중요하다. 이것은 계산영역 내의 임의의 점에서 계산이 필요한데 주입된 유체가 그 점에 도달하여 얻어진

시간이다. 국부체류시간은 일반 지배방정식 (12)의 종속변수  $\phi$ 를 체류시간  $t$ 로 하고, 생성항  $S_\phi$ 는 식 (5)와 같이하여 계산한다.

$$S_\phi = \Delta t \sum_j \dot{m}_{ij} = \frac{\rho Vol}{\sum_j m_{ij}} \sum_j \dot{m}_{ij} = \rho Vol \quad (5)$$

여기서,  $Vol$ 은 셀의 체적,  $\dot{m}_{ij}$ 는  $j$ 면을 통하여 셀에 유입되는 질량 유량,  $\sum$  는 모든 면에서 합을 의미한다.

## 2.2 지배방정식

연소기 내 3차원 난류유동의 해석을 위해 정상류 유체라 가정하였으며, 종속변수들을 계산하기 위해 지배방정식을 벡터 텐서(vector tensor)형태로 나타내면 다음 식들과 같다.

▷ 연속방정식

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

▷ Navier-Stokes 운동 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (7)$$

**Table 1.** Expression of  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  for enthalpy and species mass fraction

$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
$m_{CH_4}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CH_4}}$	$\omega_{CH_4}$
$m_{CO}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CO}}$	$\omega_{CO}$
$m_{H_2}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{H_2}}$	$\omega_{H_2}$
$h$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$(m_{CH_4}H_{CH_4} + m_{CO}H_{CO} + m_{H_2}H_{H_2})$

- ▷ 난류모델 지배방정식  
- 난류 운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho \epsilon \quad (8)$$

- 난류에너지 소산율 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

$$G_k = \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

- ▷ 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} + S_h \quad (10)$$

- ▷ 화학종 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_i) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_i} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_j} + \omega_i \quad (11)$$

### 2.3 수치해석방법

각각의 지배방정식은 다음 식 (12)와 같이 2차 편미분 지배방정식으로 일반화 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (12)$$

위 식에서  $\phi$ 는 일반적인 종속변수로서 속도성분 ( $u, v, w$ ), 압력( $p$ ), 엔탈피( $h$ ), 화학종의 질량분율 ( $m_{CH_4}, m_{O_2}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{CO}, m_{H_2}$ ) 및 난류 에너지( $k, \epsilon$ ), 온도( $T$ ), 체류시간( $t$ )이다.

일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사 체적에 기초한 유한차분법<sup>13)</sup>(control vol-

ume based finite difference method)과 대류항의 선형화를 위해 power law scheme을 이용하여 이산화방정식(discretization equation)을 유도하였다.

본 논문에서 사용한 수치해석은 Patanker<sup>14)</sup> 방법을 사용하였으며 차분화된 운동방정식으로 셀 압decoupling을 없애기 위하여 엇갈린 격자망(staggered grid arrangement)을 사용하였다.

각 검사체적에 대한 이산화 방정식은 line-by-line tridiagonal matrix algorithm (TDMA)에 의해 해를 구하였으며, Navier-Stokes 운동방정식에서 나타나는 압력과 속도의 연계는 빠른 수렴을 위하여 semi implicit methods for pressure linked equation (SIMPLE) 알고리즘에서 변형된 SIMPLEST 알고리즘(semi implicit method for pressure-linked equations shortened)<sup>15)</sup>을 사용하였다.

### 3. 캐비티 매트릭스 연소기의 원리

캐비티 매트릭스 연소기(cavity matrix combustor, CMC)는 연소실 챔버 내에 3D 직육면체의 다공체 매트릭스로 구성된 밀폐형 캐비티 버너가 위치하고 캐비티 내 마이크로웨이브 수용체(microwave receptor, MWR)가 위치한 구조이다(Fig. 1). 연소용 혼합가스는 매트릭스 버너 하부와 측면 다공체를 통과하면서 예열된 후 고온의 연소영역에서 평면화염이 형성되고 이때 발생된 열은 예열부와 캐비티 측으로 이동된다. CMC는 기존의 평면 다공체 복사버너와 달리 다공체의 복사열이 상부 덮개 면에 의해 손실없이 연소기 내부에 축열되는 구조이다.

화염면에서 매트릭스 표면으로 강한 대류와 복사 열교환이 진행되어 연소 생성가스의 온도는 감소되고 매트릭스 내부 표면은 가열되어 유입되는 혼합기체를 예열하여 그 온도가 거의 표면온도와 동일하게 공급된다. 화염으로부터 복사손실이 없기 때문에 이상연소(ideal combustion)로 간주되며 높은 축열(heat recuperation)로 인해 화염면의 온도가 단열화염온도를 초과하는 소위 초단열 모드(superadiabatic mode)가 발생된다. 이러한 특성으로 인해 연소한계 범위의

확대와 저온에서 화염이 안정되어 저농도의 NO<sub>x</sub>와 CO의 달성이 가능하다. 또한, 밀폐형 캐비티 매트릭스 연소기는 연소가스 열의 회복(recuperation)과 복사열손실이 없어 기존 평면 매트릭스 복사버너(PRB)나 자유화염연소버너(FFB)에 비해 상대적으로 연소생성가스의 연소성이 우수하다.

마이크로웨이브 가열은 마이크로파가 직접 마이크로웨이브 수용체 내부로 침투해 물질을 진동시켜 직접 열을 발생시키는 유전체 가열이 진행되어 가열율(heating rate)을 높여 초기 시동특성과 연소 안정성을 높인다. 또한, 마이크로웨이브 수용체는 마이크로웨이브가 조사될 경우 마이크로플라즈마(microplasma)가 발생하는 고온영역(hot spot)의 존재로 인해 수용체의 직접가열로 인해 연소 시 반응률(reaction rate)이 증가되어 연소성 제고와 미연성분의 감소를 달성할 수 있다<sup>16)</sup>.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 캐비티 매트릭스 연소기 특성

Figs. 2-5는 본 연구에서 제안된 캐비티 매트릭스

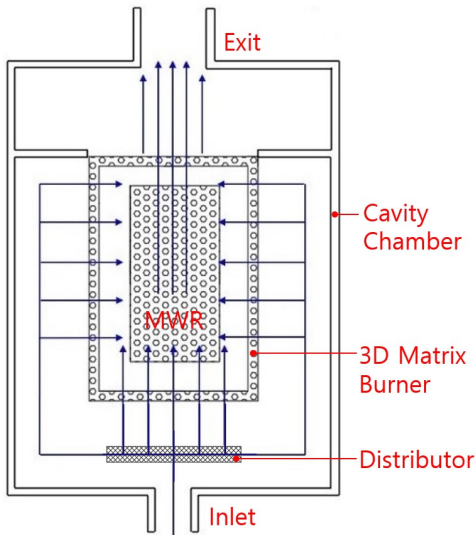


Fig. 1. Cavity matrix combustor with microwave heating to microwave receptor

연소기의 성능특성을 파악하기 위한 기준조건으로 수치계산한 결과이다(참고: 그림 중 단위는 농도는 %이고 온도는 K이다). 이 경우 바이오가스(CH<sub>4</sub> 60%, CO<sub>2</sub> 40%)를 공기비 1.1로 연소가 진행될 경우 연소기 입구의 유입혼합기 유량은 30 L/min으로 하고 마이크로웨이브 수용체 가열은 0.7 KW로 하여 진행되었다.

Fig. 2(a)는 연소기 내부의 가스 속도벡터와 분포를 나타낸 것이다. 바이오가스와 연소용공기가 혼합되어 연소기 하부 입구로 공급되어 분배판(distributor)에서 균일하게 분포되어 다공성 매트릭스를 통과하여 캐비티 내부를 거쳐 출구로 배출되고 일부는 입구측 양 측면 공간에서 재순환되는 패턴을 보였다. Fig. 2(b)는 식 (5)에 의해 계산되어진 연소기 내부의 국부 체류시간을 나타낸 것이다. 연소기 입구측에서는 혼합기가 5.3 m/s로 공급되어 분배판을 거친 후 매트릭스 버너에서 연소가 진행된 후 출구쪽에서 재순환되어 체류시간이 증가된 후 배출되었다. Fig. 2(c)

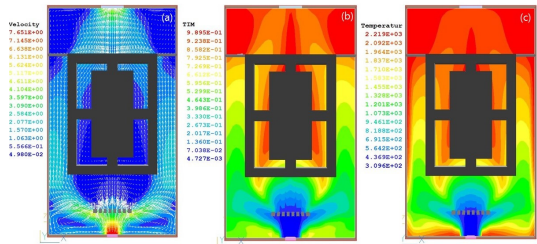


Fig. 2. Contours and vector of (a) velocity, (b) local residence time, and (c) gas temperature

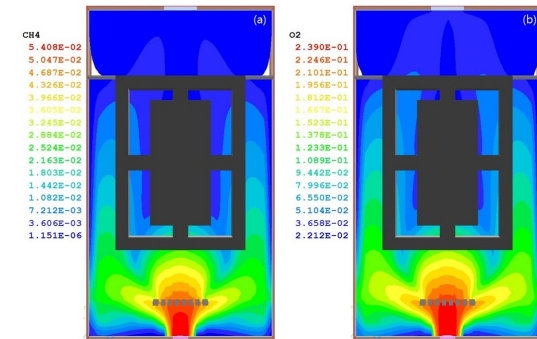


Fig. 3. Contours of (a) methane and (b) oxygen concentrations



는 연소가스의 온도를 나타낸 것으로 버너에서 가연 성가스인 CH<sub>4</sub>이 연소되어 가스온도가 증가되어 연 소기 후류측의 온도가 약 1,700℃의 고온으로 유지 되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3은 바이오가스의 가연성분인 CH<sub>4</sub>와 산화제

인 O<sub>2</sub>의 농도를 나타낸 것이다. 이 두 가스 성분이 혼합되어 연소기 입구로 유입되기 때문에 입구측의 농도가 두 가스 모두 농도가 높았다. 연소기로 유입 된 후 자발화온도 이상으로 유지되는 마이크로웨이 브 가열 축열 매트릭스 버너에서 연소가 진행되어 연 소 중간생성물인 CO, H<sub>2</sub>와 완전연소가스인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O로 전환되어 출구로 갈수록 두 성분의 농도가 감 소되었다.

본 연구에서 적용된 연소모델은 2단계 3가지 반응 (식 [1] 참조)이 적용된 것으로 중간생성물로 CO와 H<sub>2</sub>가 생성되며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 연 소 기 입구로 바이오가스 성분인 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>가 공기와 혼합기의 형태로 유입되므로 입구측의 두 성분 농도 는 크지 않으나 재순환 영역이 형성(Fig. 2[a])되는 입 구 양 측면면에서 가장 높은 부포를 보였다. 그리고 연소가 진행되는 매트릭스 버너 양 측면에서의 농도도 전반적으로 높게 나타났다. 이렇게 형성된 중 간생성물 CO와 H<sub>2</sub>는 연소기 후류에서 완전연소성분 인 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 거의 모두 전환되어 그 농도가 상 당히 낮은 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 완전연소 생성물인 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>의 농도를 나타낸 것이다. 상기에서 언급된 바와 같이 이 두 성 분은 중간생성물인 H<sub>2</sub>와 CO가 공기 중 O<sub>2</sub>와 산화반

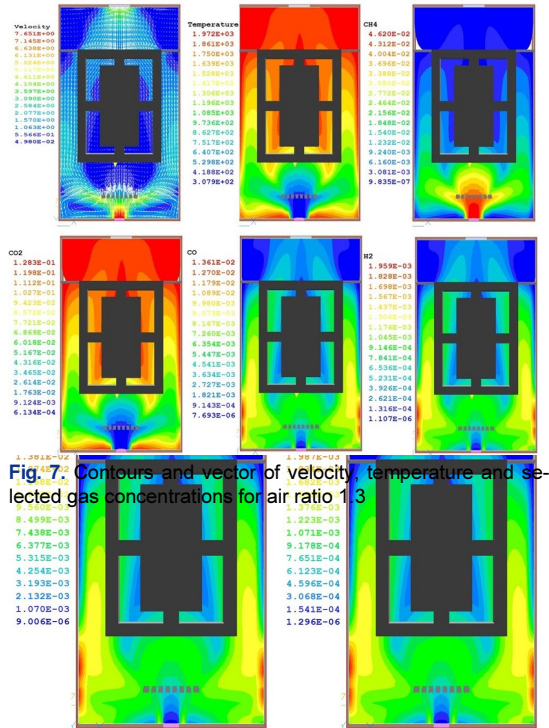


Fig. 4. Contours of (a) carbon dioxide and (b) hydrogenconcentrations

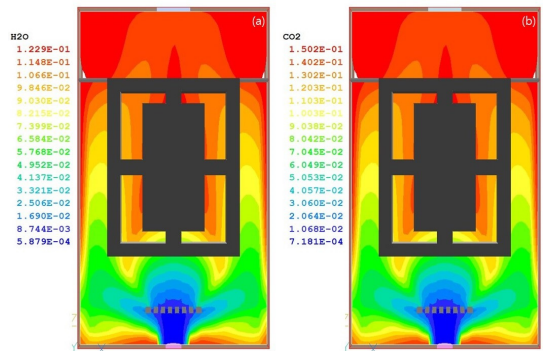


Fig. 5. Contours of (a) water and (b) carbon dioxideconcentrations

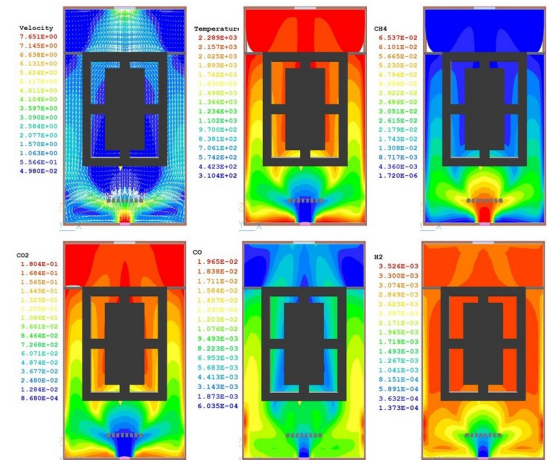


Fig. 6. Contours and vector of velocity, temperature and selected gas concentrations for air ratio 0.9

응에 의해 생성되므로 매트릭스 버너 입구면에서 전환반응이 일어나 매트릭스 버너 캐비티 중심부와 출구부에서 높은 농도를 보였다. 두 가스의 농도는 다르나 생성메커니즘이 동일하여 농도분포가 유사한 패턴을 보였다.

## 4.2 공기비 영향

Figs. 6, 7은 공기비 변화에 대해 연소기 내 가스농도(%)와 온도분포(K)를 나타낸 것이다.

Fig. 6은 공기비가 상기에 언급된 기준조건인 1.1보다 공기량이 부족한 0.9일 때의 속도 유동분포, 연소가스 온도, 가스농도를 나타낸 것이다. 연소기 내 속도벡터와 유동패턴과 가스 온도분포는 기준조건과 유사한 패턴을 보였으며 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나  $\text{CH}_4$ 와  $\text{CO}_2$ 는 상대적으로 공급량이 높고 적은 공기가 공급되어 산화제인 산소부족으로 인해 완전연소가 어려워 일부 미연되어 연소기 내의 농도가 기준조건에 비해 높았다. 중간생성물인  $\text{CO}$ 와  $\text{H}_2$  역시 공기량 부족으로 인해 완전연소가스 성분으로 전

환되지 못하고 미연성분으로 남아 그 농도가 높았다. 특히,  $\text{H}_2$ 의 경우 연소기 출구 근처인 후류영역까지 미연되어 잔류하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 공기비가 1.3으로 과잉공기로 공급될 때에 대한 속도벡터, 연소가스 온도, 가스농도를 나타낸 것이다. 속도벡터 유동장과 가스 온도 역시 유동패턴과 온도분포가 기준조건과 유사한 형태로 큰 차이를 보이지 않았다.  $\text{CH}_4$ 와  $\text{CO}_2$ 는 충분한 공기공급으로 인해 연소성이 높아 연소기 내의 농도가 기준조건인 공기비 1.1에 비해 낮았다. 중간생성물인  $\text{CO}$ 와  $\text{H}_2$  역시 공기량이 충분하여 완전연소가스 성분으로 전환되어 그 농도가 상대적으로 낮았다.  $\text{H}_2$ 의 경우는 공기비 0.9에서 연소기 후류에서 공기량 부족으로 인해 완전연소되지 못하고 잔류하던 것과는 달리 대부분  $\text{H}_2\text{O}$ 로 전환된 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 연소기 출구 중심축에서의 연소가스의 농도를 나타낸 것이다. 바이오가스 성분 중 가연성가스인  $\text{CH}_4$ 는 완전연소 시 생성가스인  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 로 전환되기 때문에 연소기 입구부의 낮은 농도에서 점차 증가된 후 거의 일정한 값을 가졌다.  $\text{CO}_2$ 는 연소

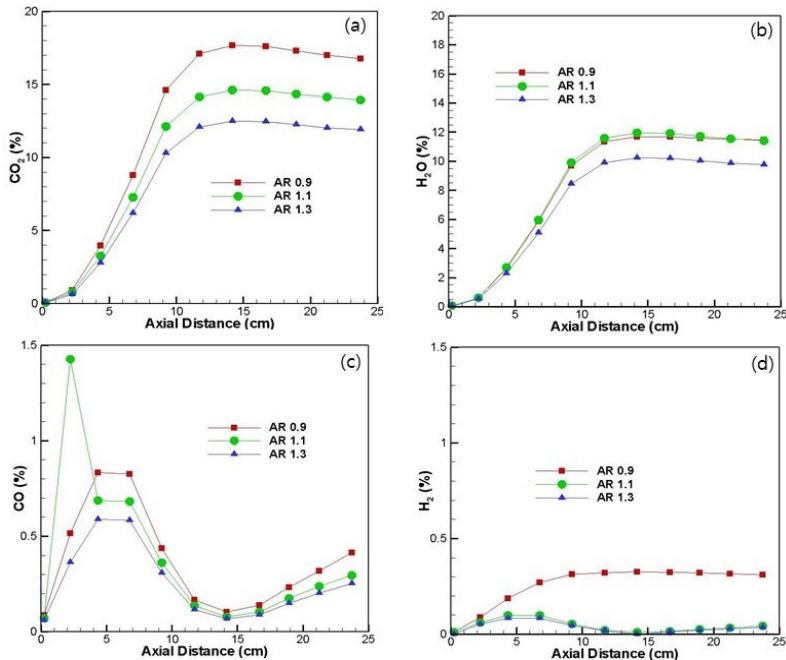


Fig. 8. Comparison of the selected gas concentrations at the center of combustor according to air ratio change

되지 않지만 바이오가스 성분으로 연소기 입구에서도 공급되기 때문에 공기비가 낮을수록 공기에 의한 희석율이 낮아 그 농도가 상대적으로 높은 값을 보였다. 그러나 H<sub>2</sub>O의 경우 가연성분인 CH<sub>4</sub>의 연소시 생성되므로 연소성이 우수한 공기비 1.1에서 최대값을 가졌고 1.3에서 작은 값을 보였다.

중간생성물인 CO와 H<sub>2</sub> 다른 생성 패턴을 보였다. CO의 경우 공기비가 1.1일 때 연소기 입구부 측에서 급격히 증가된 후 점차 감소된 후 CO<sub>2</sub> 열분해로 일부 생성되어 증가되었다. 공기비 0.9와 1.3은 연소기 입구부 측에서 다소 증가된 후 감소된 후 후류에서 역시 다소 증가되었다. H<sub>2</sub>의 경우 공기비 0.9일 때는 연소기 입구부에서 증가되어 공기 부족으로 인해 일정하게 유지되었고, 공기비 1.1과 1.3은 연소기 입구 측에서 다소 증가된 후 과잉공기로 공급되는 조건에서는 감소되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 새로운 형태의 캐비티 매트릭스 연소기를 제안하고 바이오가스 연소기 성능특성을 파악하기 위해 ESCRS 연소모델이 적용된 CFD 수치계산을 수행하였다.

수치계산은 바이오가스 가연성분인 CH<sub>4</sub>과 산화제인 O<sub>2</sub>는 연소기 입구에서 공급되어 분배판을 통해 균일하게 공급되어 직사각형 매트릭스 다공체 표면에서 중간생성물인 CO, H<sub>2</sub>로 전환된 후 마이크로웨이브 수용체 열을 받으면서 연소성이 증가되어 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 완전연소되어 출구부로 배출되어 LCVG 바이오가스 고효율 직접연소가 가능함을 보였다.

본 캐비티 매트릭스 연소기의 경우 공기가 부족한 공기비가 0.9일 때는 연소기 출구에서 미연성분인 CO, H<sub>2</sub>농도가 가장 높았고, 공기가 과도하게 공급되는 공기비 1.3은 완전연소가스 성분이 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 농도가 최적 공기비인 1.1일에 비해 다소 낮았다. 즉, 바이오가스 최적연소조건은 기준조건인 공기비 1.1, 유입혼합기 유량 30 L/min으로 하고 마이크로웨이브 수용체 파워를 0.7 kw로 하였을 때이다.

이상의 CFD 결과는 향후 중소형 설비에서 발생되는 저발열량 바이오가스 버너설계 및 최적운전조건을 도출에 활용 가능하다.

## 후 기

이 논문은 2022학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었다.

## References

1. G. P. Minde, S. S. Magdum, and V. Kalyanraman, "Biogas as a sustainable alternative for current energy need of India", *Journal of Sustainable Energy & Environment*, Vol. 4, 2013, pp. 121-132. Retrieved from <https://deliverypdf.ssrn.com/delivery.php?ID=845069121118114097094114029092095100034054008081016087100064103026124070076091024106117048061042052044115124021077068080023092112042011052088084093012073115127090093077021054000127064119112117002021091103080080096121104118075086000087108003016112068111&EXT=pdf&INDEX=TRUE>.
2. S. E. Hosseini, M. A. Wahid, and A. A. A. Abuelnuor, "Biogas flameless combustion: a review", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 388, 2013, pp. 273-279, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.388.273>.
3. C. E. Lee and C. H. Hwang, "An experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels", *Fuel*, Vol. 86, No. 5-6, 2007, pp. 649-655, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.033>.
4. H. S. Zhen, C. W. Leung, C. S. Cheung, and Z. H. Huang, "Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using Bunsen burner", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 25, 2014, pp. 13292-13299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.126>.
5. F. J. Weinberg, "Combustion temperatures: the future?", *Nature*, Vol. 233, 1971, pp. 239-241, doi: <https://doi.org/10.1038/233239a0>.
6. J. An and Y. N. Chun, "Development of microwave-matrix reformer for applying SOFC stack", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 534-541, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.534>.
7. S. Devi, N. Sahoo, and P. Muthukumar, "Impact of preheat zone properties on the flammability limits of crude biogas combustion in a two-layer porous radiant burner", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1473, 2020, pp. 1-9, doi:



- <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012033>.
8. B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", Symposium (International) on Combustion, Vol. 16, No. 1, 1977, pp. 719-729, doi: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4).
  9. F. C. Lockwood, A. P. Salooja, and S. A. Syed, "A prediction method for coal-fired furnaces", Combustion and Flame, Vol. 38, 1980, pp. 1-15, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90033-4).
  10. R. J. Kee, J. A. Miller, and T. H. Jefferson, "A general-purpose, problem-independent, transportable, fortran chemical kinetics code package", Sandia Lab., Livermore, 1980. Retrieved from [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:11548068](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:11548068).
  11. B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows", Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., Vol. 3, No. 2, 1974, pp. 269-289, doi: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2).
  12. R. B. Bird, "Transport phenomena", Appl. Mech. Rev., Vol. 55, No. 1, 2002, pp. R1-R4, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1424298>.
  13. B. W. Launder and D. B. Spalding, "Mathematical models of turbulence", Academic Press, USA, 1972.
  14. S. V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1980, doi: <https://doi.org/10.1201/9781482234213>.
  15. D. B. Spalding, "Phoenics training course notes", TR/300, CHAM, 1988. doi: <http://www.cham.co.uk>.
  16. X. Zhang, D. O. Hayward, and D. M. P. Mingos, "Effects of microwave dielectric heating on heterogeneous catalysis", Catalysis Letters, Vol. 88, No. 1, 2003, pp. 33-38, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1023530715368>.