

## 20W급 휴대용 연료전지 시스템 설계

지 영석<sup>1)</sup>, 고 정식<sup>2)</sup>, 차 석원<sup>3)</sup>

### System Design for 20W Portable Fuel Cell

Young-Seok Jee, Jeong-Sik Ko, Suk-Won Cha

**Key words** : Fuel Cell(연료전지), SOFC(고체 산화물 연료전지), Portable Fuel Cell(휴대용 연료전지), Single Chamber, Dual Chamber, Hydrocarbon(탄화수소)

**Abstract** : Recently by the development of the electronic engineering technology various mobile devices are developed. But their operation time need to be extended although capacity of the batteries are limited. We focused our attention to the portable SOFC system. Because SOFC has the high efficiency and a lot of strongness in comparison with other kinds of fuel cells, In addition they can be built as a self/non-reformable system and single/dual chamber system. So We evaluated some types of SOFC theoretically, and compared the results from the fuel and performance efficiency point of view.

#### Nomenclature

$P_{\text{heat}}$  : Dissipating heat, mW  
 $P_{\text{blower}}$  : Blower consuming power, mW  
 $P_{\text{Max}}$  : Blower consuming power at the max flow rate, mW  
 $V_{\text{ideal}}$  : Ideal voltage, V  
 $V_{\text{oper}}$  : Operation voltage, V  
 $j_{\text{oper}}$  : Operation current density, mA/cm<sup>2</sup>  
 $A_{\text{stack}}$  : Stack area, cm<sup>2</sup>  
 $n$  : Number of electron involved in an electrochem. rxn, none  
 $F$  : Faraday constant, C  
 $\Delta g$  : Gibbs free energy change in an electrochem. rxn, kJ/mol  
 $C_j$  : Heat capacity, kJ/kg-K  
 $N_j$  : Mole flow rate, mol/s  
 $\text{LPM}_j$  : Volume flow rate,  $\ell$ /min  
 $\text{LPM}_{\text{Max}}$  : Max volume flow rate for a blower,  $\ell$ /min  
 $M_j$  : Molar mass, g/mol  
 $Q_{\text{req}}$  : Heat for preheating, mW  
 $Q_{\text{POX}}$  : Heat from a POX reaction, mW  
 $Q_{\text{electrochem}}$  : Heat from an electrochem. rxn, mW  
 $\text{LHV}$  : Lower heating value, cal/mol  
 $\lambda_j$  : Stoichiometric number, none  
 $\eta_{\text{heat}}$  : Efficiency of a heat exchanger  
 $\eta_{\text{elec}}$  : Efficiency of a DC-DC converter  
 $fr$  : ratio of oxygen / hydrocarbon, none

#### 1. 서론

전자공학과 반도체 기술의 발전은 휴대용 전자기기의 비약적인 진화와 함께 유비쿼터스 기술을 가능케 하는 밑거름이 되었다. 허나 이들의 기능이 점차 다양화되고 작동 시간을 연장시키기 원하는 요구를 수용하기에 현재 사용되고 있는 2차전지의 기술적 한계로 인해 여러 가지 Direct Energy Conversion System이 고안되었다. 이 중 연료전지에 대한 연구가 이루어지며 각기 장단점을 가진 다양한 종류의 연료전지가 나타나게 되었는데 특히 SOFC의 경우 높은 출력밀도와 함께, 현재 가장 상용화에 근접한 PEMFC에서의 최대 난점인 물 관리 문제로부터 자유로울 수 있다는 장점을 가졌고, 또한 현재 휴대용 전원으로 활발히 연구되고 있는 DMFC의 Fuel Crossover와 Anode측 Activation Loss등으로 인해, SOFC에 대한 학계와 기업의 시선이 날로 집중되고 있다.

SOFC는 YSZ, SDZ, SDC, GDC, LSGM등의 ceramic을 전해막으로 사용하는 연료전지로서 이들은 산소 이온의 통로 구실을 한다.<sup>1)</sup> 대표적인 고온 연

- 
- 1) 서울대학교, 기계공학과  
E-mail : koobe@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)880-1696
  - 2) 서울대학교, 기계공학과  
E-mail : fixedtype@naver.com  
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)880-1696
  - 3) 서울대학교, 기계공학과  
E-mail : swcha@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-1700 Fax : (02)880-1696

료전지인 SOFC는 일반적인 Fuel Gas인 개질된 수소를 이용한 전력생산 외에, 탄화수소로 Direct Internal Reforming(DIR)을 통해 반응에 필요한 수소와 일산화탄소를 얻어 전력을 얻는 시스템 구성이 가능하다.<sup>2)</sup> 최근 연구 자료에 따르면 공기와 탄화수소의 혼합물을 같은 Chamber 안에서 선택적인 반응을 하도록 유도하는 Single Chamber SOFC(SCFC)가 새로운 SOFC의 Type으로 주목받고 있으며 이의 저온화연구도 진행 중이다.<sup>3)</sup>

따라서 본 연구에서는 휴대용 전원으로써 기능을 하는 20W SOFC 시스템에 대한 이론적 고찰을 통해 실제에의 적용과 가능성을 타진해 본다.

## 2. 시스템 산정 및 계산

휴대용 기기의 구동을 목적으로 하는 소용량 연료전지 시스템은 그 형상과 구성 요소 각각이 작고 간단해야만 하기 때문에 많은 BOP 구성품을 포함시킬 수 없고, 위에 열거한 여러 가지 SOFC 시스템의 종류 또한 적용시키기 쉽지 않다.

또한 통상적으로 시스템 설계의 과정이 최적 성능을 발휘하는 Stack이 산정된 후에, 여기에 맞추어 BOP산정 및 시스템을 구성하게 되는 수순을 따르는 것이 대부분이므로, 본 연구 또한 객관적인 비교를 위해 시스템과 연료의 종류에 관계없이 특정온도 하에서 일정 출력밀도를 내는 Stack을 가정하고 여러 가지 변수를 두어 설계 변수에 따른 결과를 예상해보고자 했다.

제한된 상황에서 기본적으로 필요한 BOP 구성 요소로는 Stack에 공기를 불어넣기 위한 Blower, 작동온도까지 Feed Gas 온도를 예열시키기 위한 열교환기와 Burner, Stack에서 나오는 저전압-고전류를 사용하기에 적당한 전압과 전류로 변환해주는 DC-DC converter가 제안되었다. 또한 통상적인 SOFC의 Type인 Tubular Cell대신 출력밀도가 높아 소형화에 유리한 Planar Cell을 적용하여 사용하기로 했으며, 논문 등의 자료조사<sup>3)4)5)6)7)8)</sup>를 통해 얻은 데이터로 연료전지의 성능과 휴대용 기기에 적용하기 위한 타협점인 500℃, 400mW/cm<sup>2</sup>를 계산에 필요한 작동온도와 Stack 성능으로 하여 20W Net Power를 출력으로 하는 시스템을 산정하였다. 또한 연료와 공기 혹은 혼합가스의 재순환을 고려하지 않은 Passive 방식에 대한 계산을 수행하였다.

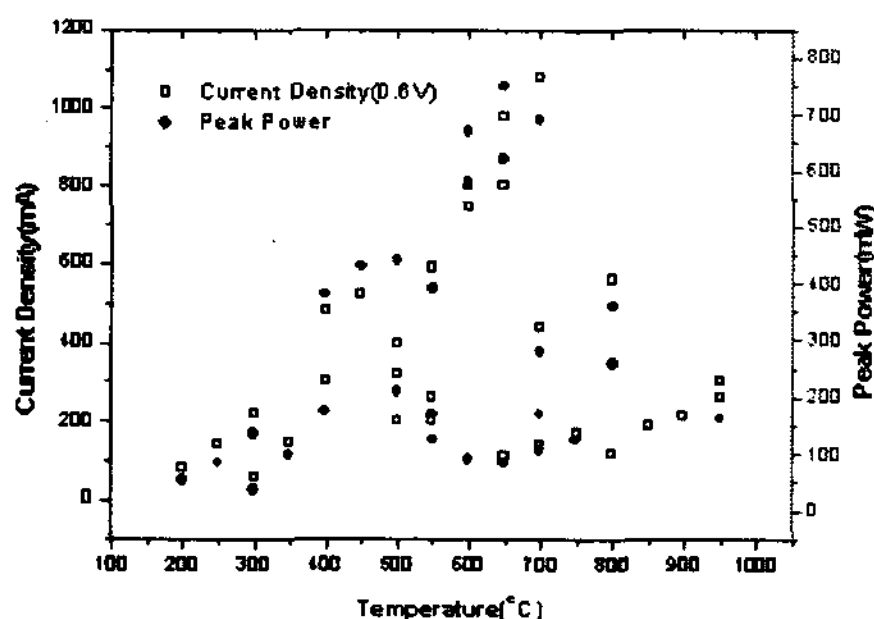


Fig. 1 작동 온도에 따른 SCFC 성능 분포

### 2.1 Single Chamber POX Type

최초 Type으로 휴대용 전원이라는 목적에 부합하도록 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 탄화수소인 부탄을 Fuel Gas로 하고 추가적인 개질 장치가 필요 없는 SCFC 시스템을 고려하였다.

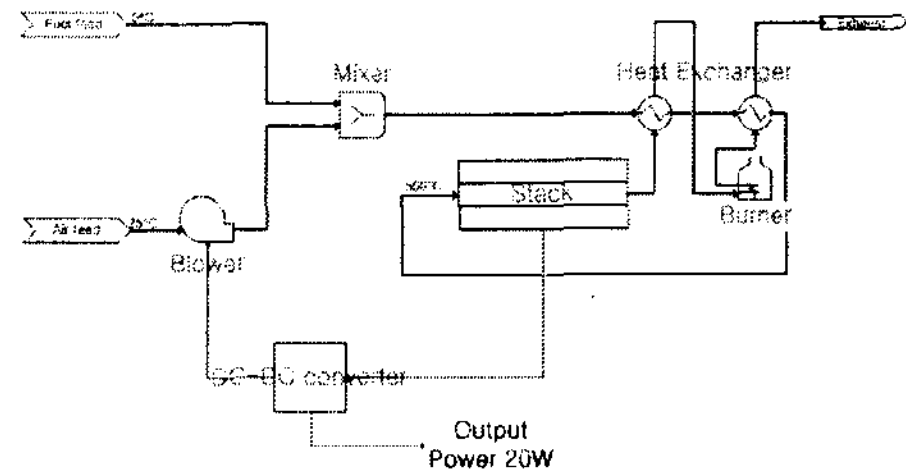


Fig. 2 Single Chamber POX Type 개략도

부탄 용기에 연결된 밸브를 통해 나온 Fuel Gas는 Blower를 거친 공기와 혼합되어 첫 번째 열교환기를 거친다. 이 때 열원은 발열 반응인 POX에 의한 열과 Stack 내의 Electrochemical 반응의 엔탈피를 환산한 Voltage 값과 작동 Voltage 차에 의한 열로써<sup>1)</sup> Stack을 빠져나가는 미 반응 기체와 반응 후 기체를 매개로 전달된다. 식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$P_{heat} = [V_{ideal} - V_{oper}] \times j_{oper} \times A_{stack} \quad (1)$$

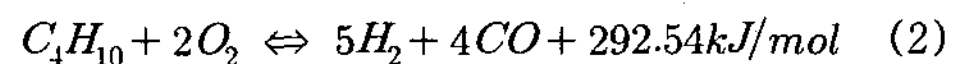
$$V_{ideal} = \frac{\Delta g}{nF}$$

혼합 기체는 두 번째 열교환기를 거치며 작동온도인 500℃까지 예열되는데 이때는 부탄의 일부를 태우면서 발생하는 저위 발열량을 이용한다.

Stack에서 생성된 전력은 일정한 효율을 가지는 DC-DC Converter를 통해 전압과 전류를 변환한 후, Air 유량에 따라 변화하는 Blower 소모 전력을 제외한 20W를 Net Power로 얻을 수 있다.

이 시스템의 설계에서 한 가지 주의할 점은 POX 반응이 Fuel Rich 상태에서 이루어지기 때문에 Fuel과 산소의 과급률을 결정하는데 일정한 구속조건이 따라야만 한다.

부탄가스의 POX 반응은 식(2)와 같으며 발열반응임을 확인할 수 있다,



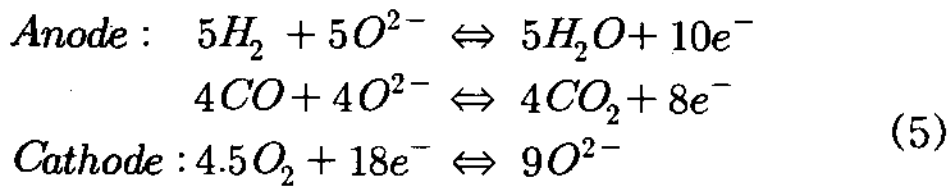
Feed Gas를 기화 온도와 상온으로부터 작동온도까지 예열시키는 과정에서, Electrochemical 반응의 손실열과 POX반응에 의한 열 외에 얼마큼이 더 필요한지를 계산하여 부탄의 저위 발열량으로써 반응하지 않고 남은 부탄의 몇 %가 Burner로 연소되어야 하는지 그 값을 도출해낸다. 일련의 과정에서 열 교환 효율을 항상 감안하여야 함은 물론이다.

$$\begin{aligned} & C_{C_4H_{10}} \times N_{C_4H_{10}} \times M_{C_4H_{10}} \times (T_{oper} - T_{initial}) \\ & + C_{O_2} \times N_{O_2} \times M_{O_2} \times (T_{oper} - T^0) \\ & + C_{N_2} \times N_{N_2} \times M_{N_2} \times (T_{oper} - T^0) \\ & = Q_{req} \times \eta_{heat} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 C는 해당 화학종의 비열이며 N은 주입 몰수, M은 분자량,  $\eta_{heat}$ 는 열 교환 효율을 나타내며 필요한 열량  $Q_{req}$ 를 구해내도록 한다.

$$\frac{burn \%}{100} = \frac{Q_{req} - (Q_{POX} + Q_{electrochem})}{LHV_{C_4H_{10}} \times 4.2 \times (N_{C_4H_{10}} - \frac{jA}{nF})} \quad (4)$$

POX반응으로 생성된 Fuel Gas와 Cathode를 통해 들어온 산소의 Half Cell 반응을 살펴보면 아래의 식과 같이 된다.<sup>3)</sup>



위의 식을 보면 주입한 부탄 1몰 당 반응하는 산소는 6.5몰이고 이 때 이동하는 전자는 총 18개이다. 이로부터 소모되는 부탄의 소모량은 Faraday 법칙으로써 구할 수 있으며 산정한 과급률을 곱해주면 Stack에 주입하는 부탄 몰수를 알 수 있다.

$$\lambda_{C_4H_{10}} \times \frac{jA}{nF} = N_{C_4H_{10}} \quad (6)$$

Stack에 주입하는 산소 몰수는 반응하는 부탄과 산소의 비율을 고려하여 아래와 같이 계산한 후 공기 중 질소와 산소의 비율을 감안하여 Air 유량을 계산한다.

$$\lambda_{O_2} \times \frac{jA}{nF} \times 6.5 = N_{O_2} \quad (7)$$

허나 위에서 언급한 Fuel Rich 조건을 만족시키기 위해서 부탄과 Air의 과급률은 아래와 같은 관계를 갖고 있어야만 하며 fr값은 산소와 부탄의 비를 의미한다.

$$\frac{\lambda_{C_4H_{10}}}{\lambda_{O_2}} = \frac{6.5}{fr} \quad (8)$$

stack에서 생산되는 전력은 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} 20W &= V_{oper} \times j_{oper} \times A_{stack} \times \eta_{elec} - P_{blower} \\ P_{blower} &= \frac{LPM_{Air}}{LPM_{Max}} \times P_{Max} \end{aligned} \quad (9)$$

BOP system 중 유일하게 전력을 소모하는 Blower의 소비전력은 Air 유량의 함수이고 이렇게 도출된 기생전력을 Net Power 계산에 쓰다보면 전류량이 바뀌어 Air 유량이 바뀌는 오류가 생기게 된다. 때문에 여러 번의 Feed Back 연산으로 이 오류를 제거해 나가면서 Net Power인 20W에 근접시켜야한다.

마지막으로 시중의 부탄가스 제원으로부터 사용되는 부탄 유량에 따른 동작 시간을 계산했다.

## 2.2 Dual Chamber POX Type

실제 SCFC를 채택한 휴대용 전원 공급시스템을 구현함에 있어서 화학종에 대한 Selectivity가 계산상에서보다 떨어지거나 예상치 못한 난점이 나타날 수 있다. 이에 대비하여 POX반응이 일어나는 DIR 시스템을 구현하되 Dual Chamber의 구조를 갖는 Type을 산정하여 계산해보았다.

Single Chamber에서와 같이 두 열원의 열 교환기를 거치며 작동온도까지의 예열이 이루어지며, 차이점은 Cathode에 Air를 불어넣어줌과 동시에 Anode극에서 POX반응이 이루어져야 하므로 Fuel Rich 한 조건을 만들기 위해 부탄의 일정 비율을 갖는 양의 Air를 Anode에도 공급해야 한다는 점이다. 또한 1차 예열은 상대적으로 유량이 큰 Cathode의 Exhaust Gas에 의해, Burner에 의한 2차 예열은 Anode의 Exhaust Gas에 의해 이루어지게 된다.

계산 과정은 앞서 설명한 Single Chamber POX Type에서 다른 수순에 따라 Physical한 구조 변화에 근거하여 진행되었다.

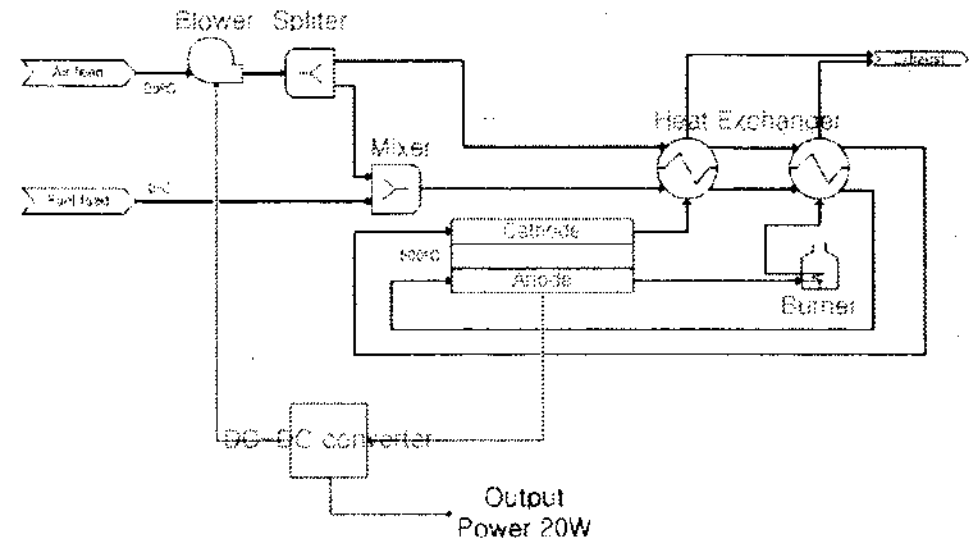


Fig. 3 Dual Chamber POX Type 개략도

## 2.3 Dual Chamber Pure H2 Type

순수한 수소를 Fuel Gas로 하여 작동하는 시스템도 구성해보았다. 물론 개질이 필요한 탄화수소에 비해 Performance가 상대적으로 좋을 것으로 예상이 되었지만 객관적인 비교를 하기위해서 역시 같은 출력 밀도를 갖는 Stack을 산정하였고, Anode 극으로 Air가 들어가지 않는 것 외의 사항은 위의 Dual Chamber POX Type과 동일한 구조를 갖는다.

이 Type 역시 앞서 설명한 Type들과 동일한 수순을 따랐으며, Fuel의 변화에 따른 객관적인 비교를 위해서 작동시간 계산 시에 최초의 가스량을 Electrochemical 반응 관여 전자 수를 고려하여 조정하였다.

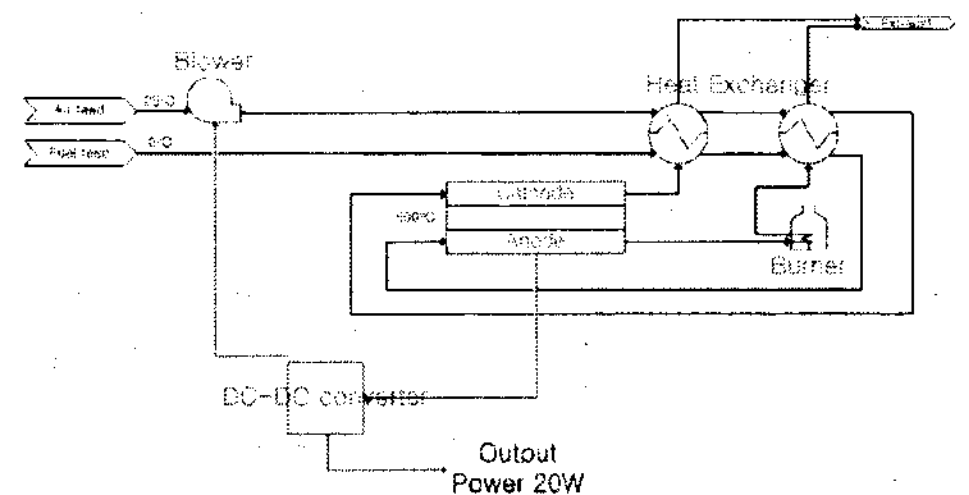


Fig. 4 Dual Chamber Pure H2 Type 개략도

### 3. 결과

위의 세 가지 Type에 따른 결과는, 연료와 공기의 과급률을 어떻게 Setting 하여 Operation 하는가에 달려있다고 보았다. Fuel Gas의 과급률은 연료 이용률에 있어서, 공기의 과급률은 유량의 변화에 따른 Blower의 전력 소모에 직접적인 영향을 미치므로 성능에 있어서 가장 Critical한 요소이기 때문이다. 따라서 시스템의 특성을 고려한 Reasonable한 값을 대입하여 각각을 비교해 보았다. Single Chamber POX Type의 경우, 앞에서 기술했듯이 두 Feed Gas의 과급률에 일정 비율의 구속조건이 걸려있기 때문에 이 비율에 해당하는 모든 Type의 결과 비교와 함께 Dual Chamber에서 적용될 수 있는 적절한 과급률을 대입하여 비교 분석 해본다.

#### 3.1 연료 소비 효율 측면

POX 반응이 일어나기 위한 부탄:산소 비율을 1:2.5로 정하고 위에서 열거한 계산식에 대입시키면 Fuel의 과급률을 3.9, 공기의 과급률을 1.5로 설정하고 계산을 수행한 결과 다음 Table 1과 같은 결과를 얻었다.

	Type	연료 유량	작동 시간	연소율
		LPM	hour	%
Fixed stoichiometric No. (A:3.9 C:1.5)	Single C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.168	9.045	3.003
	Dual C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.231	6.602	24.541
	Dual H <sub>2</sub>	1.343	10.209	6.995

Table 1 Result of Fixed Stoichiometric No.

위에서 나타난 결과를 보면 Single Chamber POX Type이 Dual Chamber POX Type보다 적은 연료 소비와 함께 예열에 필요한 Fuel의 연소 량도 월등히 작음을 알 수 있다.

수소로 동작하는 Type의 경우 유량에 가장 긴 작동시간을 보였고 연소해야 하는 비율도 상대적으로 작은 편이었지만 관여 전자수를 감안한 최초 연료가 공급되는 탱크가 커야하고 개질에 필요한 에너지와 비용 등을 고려해봤을 때 연료 소비 효율이 수치상으로 나타나는 그것 보다 좋지 못함을 예상할 수 있었다.

Dual Chamber POX Type은 상기한대로 Anode와 Cathode에 동시에 Air가 공급되어야 한다는 태생적인 한계 때문에 위의 과급률에 의거하면 Air유량이 커져 Blower에 의한 기생전력이 매우 커지기 때문에 연료소비가 클 수밖에 없다. 허나 독립적으로 과급률을 적당한 값에 적용시켜 보면 Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

	Type	연료 유량	작동 시간	연소율
		LPM	hour	%
Fixed stoichiometric No. (A:3.9 C:1.5)	Single C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.168	9.045	3.003
Non Constrained	Dual	0.070	21.877	5.410

Stoichiometric No. (A:1.5 C:1.5)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>			
	Dual H <sub>2</sub>	0.517	26.543	4.958

Table 2 Result of Non Constrained Stoichiometric No.

두 Dual Chamber Type의 시스템이 작아진 Anode 측의 과급률로 인해 연료소비가 현저히 줄어들었고 연소에 쓰이는 비율도 감소하였다. 또한 이로 인한 작동 시간의 증가로 최초의 취지인 휴대용 전원 공급 장치로서의 가능성도 확인할 수 있었다. 수소를 연료로 하는 경우가 수치상으로 확실히 우위에 있음을 확인하였지만 위에서 설명된 바와 같이 시스템 외적인 부분을 고려해야 함을 다시 한 번 생각할 수 있다.

#### 3.2 출력 효율 측면

위에서 진행한 두 가지 경우에서 계산된 결과를 아래 Table 3,4에 나타내었다.

	Type	공기 유량	Blower 소비	Stack 출력
		LPM	mW	mW
Fixed stoichiometric No. (A:3.9 C:1.5)	Single C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6.015	8.37	35.46
	Dual C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	122.083	169.82	237.30
	Dual H <sub>2</sub>	3.689	5.13	31.42

Table 3 Result of Fixed Stoichiometric No.

	Type	공기 유량	Blower 소비	Stack 출력
		LPM	mW	mW
Fixed stoichiometric No. (A:3.9 C:1.5)	Single C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6.015	8.37	35.46
Non Constrained stoichiometric No. (A:1.5 C:1.5)	Dual C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	7.543	10.49	38.12
	Dual H <sub>2</sub>	3.689	5.13	31.42

Table 4 Result of Non Constrained Stoichiometric No.

Anode와 Cathode가 고정된 과급률의 경우, 연료 소비율에서처럼 Dual Chamber POX Type은 Blower 소비전력이 커져 Stack에서 만든 전력의 10%에도 모자라는 출력 효율을 보이고 있다.

독립적인 과급률을 적용시켰을 때는 공기의 유량이 적게 필요한 순으로 출력 효율이 정해져 Dual Chamber Pure H<sub>2</sub> Type이 가장 좋은 성능을 보였다.

### 4. 결론 및 토의

본 연구의 수행은 20W 출력을 갖는 휴대용 연료 전지의 각 Type에 따라 그 실제 시스템의 구축에 앞서 성능 및 요구조건을 계산상으로 예상해보고 선 평가 하는데 목적을 두었다.

Chamber의 분리와 연료의 종류에 따른 세 가지 Type의 Passive 방식의 소용량 SOFC를 비교해본

결과 수소를 사용하는 Dual Chamber의 경우가 출력 효율과 연료 소비효율에 있어 가장 뛰어난 성능을 보였다, 이는 개질이 일어나지 않은 시스템인 연유로 이에 수반되는 산소 공급의 필요성이 존재하지 않기 때문이라고 예상된다.

부가적으로 반응하지 않은 연료와 공기를 재순환 시키는 시스템을 구축한다면, 예열에 필요한 연료 소모와 반응에 필요한 공기 주입을 그만큼 하지 않아도 되는 Self Sustained Type SOFC System이 가능한 만큼<sup>9)</sup> 시스템 효율이 극대화를 꾀할 수 있다는 점에서 이 부분에 대한 최적화가 이루어져야 할 것이라고 생각된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 재료기술연구본부 에너지 재료센터의 마이크로/나노가공기술에 의한 초박막 고체산화물 연료전지 Platform 설계 및 개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] R. O'Hayre, S. W. Cha, W. Colella, F. B. Prinz, 2006, "Fuel Cell Fundamentals", Wiley
- [2] James Larminie, A. Dicks, 2003, "Fuel Cell Systems Explained", Wiley
- [3]. A. Tomita, D. Hirabayashi, T. Hibino, 2005, "Single-Chamber SOFCs with a Ce<sub>0.9</sub>Gd<sub>0.1</sub>O<sub>1.95</sub> Electrolyte Film for Low-Temperature Operation", Electrochemical and Solid -State Letters, Vol.8. A63-A65
- [4] T. W. Napporn, X. Jacques-Bédard, 2004. "Operating Conditions of a Single-Chamber SOFC", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 151. pp. A2088-A2094
- [5] T. Suzuki, P. Jasinski, 2004, "Anode Supported Single Chamber Solid Oxide Fuel Cell in CH<sub>4</sub>-Air Mixture", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 151. pp. A1473-A1476
- [6] X. Jacques-Bédard, T.W. Napporn, 2006, "Performance and Ageing of an Anode-Supported SOFC Operated in Single-Chamber Conditions", Journal of Power Sources, Vol. 153, pp. 108-113.
- [7] Y. Hao, Z. Shao, J. Mederos, 2006, "Recent Advances in Single-Chamber Fuel-Cells: Experiment and modeling", Solid State Ionics, Vol. 177, pp. 2013-2021.
- [8] T. Hibino, 1999, "Single Chamber Solid Oxide Fuel Cell Constructed from an Ytria-Stabilized Zirconia Electrolyte", Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. 2, pp. 317-319.
- [9] Z. Shao & S. M. Haile, 2005, "A Thermally Self-Sustained Micro Solid-Oxide Fuel Cell Stack with High Power Density", Nature, Vol. 435, pp. 795-798.