

# 휴대전원용 마이크로 SOFC

김주선, 김궁호, 이종호, 문주호\*, 이해원  
 한국과학기술연구원 나노재료연구센터, \*연세대학교, 신소재공학부  
 {joosun, ghokim, jongho, hwlee}@kist.re.kr, jmoon@yonsei.ac.kr

## 1. 마이크로 연료전지

마이크로 연료전지에 대하여 논의하기 앞서 기존의 전기화학변환 장치 중에서 연료전지가 차지하고 있는 영역에 대한 검토가 우선되어야 한다. 일반적으로 전기화학변환 장치가 고 전력이나 고 에너지를 따지기 위한 방법으로 Ragone plot를 사용한다. Fig.1. 에 보인바와 같이 연료전지는 이차전지나 슈퍼 커패시터에 비해 고에너지 특성을 가진다. 이론적인 면에서 비교할 때 전지는 연료전지보다 비에너지(Wh/g)와 에너지밀도(Wh/l)가 월등히 낮다. 그러나 현재의 기술수준에선 연료전지의 경우 화학 에너지의 전부를 변환시킬 수가 없어서 전지가 가지는 50%의 변환효율에 비해 상대적으로 낮은 25% 정도의 변환효율을 나타낸다. 그러나 이러한 변환효율의 차이는 향후 연료전지가 70% 이상의 효율을 달성할 것으로 기대되고 있어 상황이 많이 달라질 것으로 예상된다. 이와 같이 전기화학변환 장치에서 실제와 이론의 차이가 나는 원인은 여러 가지가 있지만 다행인 점은 연료전지나 전지는 Carnot 사이클에 제한을 받지 않아 기술적인 진보를

통해 효율을 얼마든지 향상시킬 수 있다는 점이다.

마이크로 연료전지는 현재 시장에서 확고한 위치를 차지하고 있는 이차전지가 활용되는 분야, 혹은 보다 고성능이 요구되는 새로운 분야를 대상으로 한다. 연료전지의 가장 전망 있는 시장은 이차전지의 시장과 같아서 개발 목표 또한 여러 분야에서 전지를 대체하려는데 집중되고 있다. 초기의 연료전지는 제미니와 아폴로 우주계획에 사용되었으며, 연료전지의 높은 에너지 변환 효율과 환경친화적인 특징으로 기존의 내연기관이나 연소에 의한 중대형 발전 시스템을 대체하려는데 주목적이 있었으나, 현재는 휴대전화나 노트북, 가정 전원용 전지 등 소형 전원장치용으로도 활발히 개발되는 추세이다. 이러한 용도의 변화는 현재 상태에서 연료전지가 경제성, 성능, 내구성, 수명 등에서 기존의 내연기관이나 가스터빈의 발전 속도를 추월하는데 시간이 더 필요함을 인식하였기 때문이다.

그러나 소형 전원으로서 연료전지를 활용하려는 시도 또한 실용화를 위해서는 여러 해결해야 할 문제가 있다. 엄밀히 말해 현재의 마이크로 연료전지 기술은 운전시간이 약 3000시간 정도로 이차 전지에 비해 길기는 하지만 10배에는 못 미치는 수준이며 경제성 측면에서도 이차 전지에 비해 크게 유리하지 않아 이차전지와 비교하여 강한 경쟁상대로 인식되지 못하고 있다. 이는 고분자 전해질을 활용하는 연료전지들의 전극에는 다량의 귀금속 촉매가 활용되기 때문이며, 장치의 소형화 및 연료의 다양성 부여를 위해서는 더욱 더 많은 량의 귀금속 촉매를 필요로 하기 때문이다. 실제로 기존의 수소를 사용하는 소형 PEMFC의 경우에 비해 액상의 메탄올을 사용하는 DMFC는 10배 이상의 백금을 필요로 하며 이에 따라 이차전지와의 가격 우위 경쟁에서 절대적인 열세에 놓여있다.

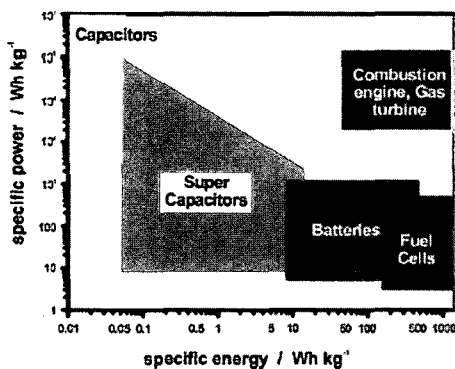


Fig. 1. Simplified Ragone plot of the energy storage domains for the various electrochemical energy conversion systems.

## 2. 마이크로 SOFC

발전용 및 차량 동력계로서의 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC)에 대한 활발한 연구로 최근까지 성능의 향상과 다양한 재료계의 개발이 이루어져 최근 이를 소형화하여 기존의 휴대용 전원을 대체하려는 연구가 시작되었다. 실제로 마이크로 SOFC에 대한 개념 및 이를 활용한 집적화에 대한 기본적인 생각들은 이미 1990년대 초에 여러 연구자들에 의해 발표된 바 있으나, 최근의 활발한 연구 동향은 실제, 1990년대 후반 일본의 Hibino가 새로운 세라믹 소재를 채용하여 이른바 단일형 마이크로 SOFC의 성능을 획기적으로 향상시킨데 힘입은 바 크다. 이는 마이크로 SOFC가 가지는 여러 장점들에 채용 가능한 소재의 다양성이 더해진데 기인한다고 하겠다. 이는 기존의 PEMFC나 DMFC의 경우와는 대조되는 것으로서 향후 고성능 소재의 개발로 성능의 향상 및 운전온도의 하향화는 물론 저가의 세라믹 소재를 채택하고 단순한 구조를 구현함으로써 가격 경쟁력의 확보도 기대해 볼 수 있는 등의 무한한 잠재력을 가진 것으로 점쳐지고 있다.

## 3. 마이크로 SOFC의 정의

마이크로 SOFC라는 표현은 실제로 마이크론 크기의 연료전지 구조체를 의미하지는 않는다. 보통 휴대용 전원으로 활용 가능한 크기 즉, 휴대폰이나 PDA, 노트북 컴퓨터 등의 전원으로 활용할 수 있는 부피를 의미하는데 엄밀히 따져 열관리 장치, 연료통 및 연료 공급계, 산화제로 쓰이는 공기의 원활한 공급에 필요한 부피 등을 고려한 실제 연료전지 시스템의 크기는 현재의 노트북 컴퓨터에 적용되는 2차 전지의 부피 이하인 것이 바람직하다. 최근에 그 범위를 확대하여 전동 자전거, 전동 휠체어 등의 이륜 구동차의 동력이나 휴대 기계장치의 전원으로 활용하는 다소 큰 출력을 필요로 하는 분야까지 포함하는 경향도 있다. 그러나 본 고에서는 휴대 전자기기의 전원으로 개발하는 최대 수십 W급의 SOFC를 마이크로-SOFC로 규정하고 이보다 용량이 큰 수백 와트급 이상의 전원을 필요로 하는 연료전지를 mini-SOFC

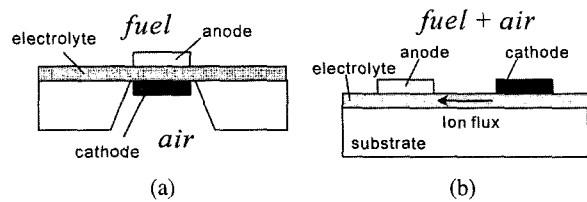


Fig. 2. Sketches of (a) dual-chamber and (b) single-chamber configurations of a micro-SOFC.

로 구별하고자 한다.

마이크로 SOFC는 연료공급의 형태에 따라 크게 단일형(single-chamber type)과 분리형(dual-chamber type)으로 구별할 수 있다. Fig. 2에 단일형과 분리형 SOFC 단전지의 개략적인 구조를 각각 나타내었다. 분리형 연료전지의 경우에는 개념상 발전용이나 자동차 동력용으로 개발되고 있는 기존의 SOFC나 고분자 전해질을 사용하는 PEMFC나 DMFC와 유사하여 전해질을 사이에 두고 음극에는 연료를 양극에는 산화제를 각각 공급함으로써 전해질을 통한 전기화학 변환을 유도하는 것이다. 단일형에 비해 효율은 높으나 기밀성이 유지되는 각각의 기체 공급체계를 갖추어야 하기 때문에 복잡한 구조를 구성해야 하며 이로 인해 소형화 하고자 하는 경우 집적도의 향상에 제약이 있다. 한편, 단일형의 경우 연료와 산화제를 혼합된 형태로 주입하여 양극과 음극의 촉매특성만을 이용하여 각각의 반응을 유도하는 방식이므로 별도의 기체 공급에 필요한 유로를 복잡하게 구성할 필요가 없어 집적화에 유리하다. 그러나 분리형에 비해 성능이 다소 낮으며 연료와 산화제의 혼합비에 따라 성능이 변화한다.

소형화된 신 개념 전원이 현재 상용화 되어있는 이차 전지의 출력수준을 상회하기 위해서는 최우선 적으로 집적화가 용이하고 경제적으로 제조할 수 있어야 하는데 앞서 밝힌 바와 같이 단일형 SOFC가 이러한 요구조건을 만족하는 최적의 연료전지 시스템으로 판단된다.

## 4. 마이크로 SOFC의 발전

단일형 마이크로 SOFC의 구조는 1965년 W. van Gool에 의해 최초로 제안되었으며 1981년에는 G. A. Louis 등에 의해 특허 출원되었다. 구조는 단일형이라는 점을 제외하면 근본적으로 PEMFC와 유사하며 각 구성 재료

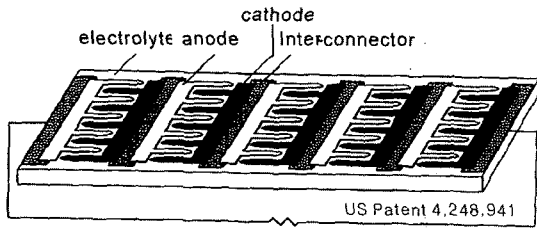


Fig. 3. Schematic design of the first integrated single-chamber micro-SOFC.

를 세라믹 계열로 대체한 것으로 보아도 무방하다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 한평면에 단전지 여러 개를 직렬 연결하여 집적화를 이루었다는 점에 주목해야 한다. 전해질은 보헤마이트 계열을 사용하고 음극과 양극은 각각 Pt-보헤마이트 혼합체와  $\text{SrRuO}_3$ -보헤마이트 혼합체를 사용하였으며 상온에서  $0.8 \mu\text{W}$ 의 출력특성을 보였다. 원료로는 수소를 사용하였으며  $\text{H}_3\text{O}^+$  형태가 전해질 표면을 이동하는 수소이온의 표면 전도현상을 이용하였다. 마이크로 SOFC의 가능성을 확인한 최초의 장치는 C. K. Dyer에 의해 보고되었다. 역시 보헤마이트 전해질에 백금 혹은 니켈을 전극으로 사용한 것으로서 연료와 산화제를 혼합하여 주입한 후 실지로 출력이 나타남을 보였다.

앞에 기술한 바와 같이 마이크로 SOFC에 대한 연구는 오래전부터 있어 왔다. 그러나 실제로는 그 출력이 매우 낮고 백금과 같은 귀금속을 사용한다는 점, 전해질의 이온 전도를 수소이온에 의존한다는 측면에서 진정한 의미의 마이크로 SOFC를 구현해 냈다고는 보기 힘들다. 1990년대에는 발전용 대형 SOFC에 대한 연구가 매우 활발하여 이를 기초로 한 마이크로 SOFC 연구도 매우 활발하였다. 특히 여러 가지 다양한 형태 및 소재를 활용한 신 개념 마이크로 SOFC가 많이 소개되었다. 대부분  $\text{ZrO}_2$  계열의 재료를 전해질로 사용하였으며 Ni계 서멧과 페로프스카이트계 산화물을 각각 음극과 양극으로 사용하여 구성하였다.

2000년 대 초 T. Hibino가 단실형 마이크로 SOFC에 대한 연구의 계기를 마련하였다고 볼 수 있는데 실제 의미 있는 값 수준의 출력특성을 나타냈고 소재 또한 세라믹 재료를 사용하였으며 전해질의 전도기구도 산소이온 전도를 사용하였다. 그는  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  doped  $\text{CeO}_2$ (SDC) 전해질의 양면에 각각 Ni-SDC와  $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ 를 음극과 양극으로 도포한 단전지를 만들고 부탄올+공기 혼합체를

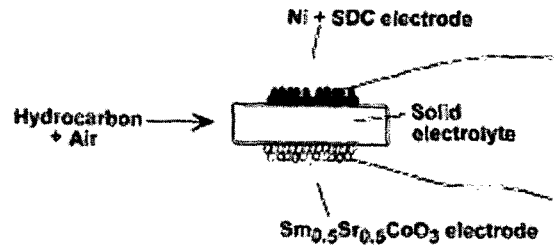


Fig. 4. Schematic representation of single-chamber SOFC flowing in a flowing mixture of hydrocarbon and air.

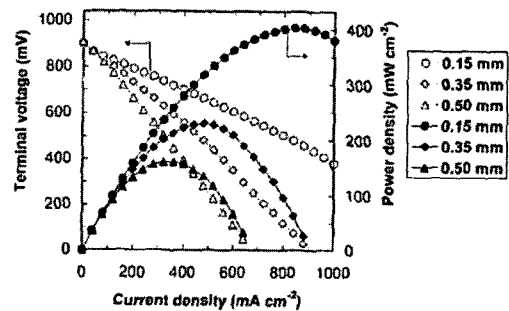
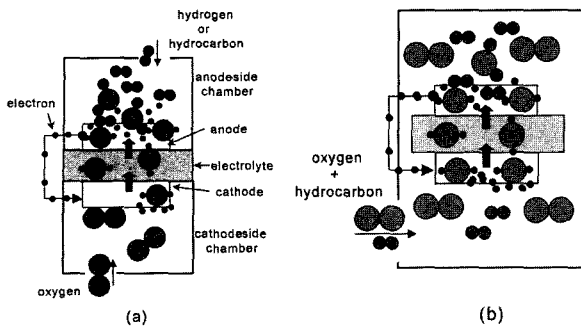


Fig. 5. Discharge properties of single-chamber SOFCs using SDC of different thicknesses in a flowing mixture of ethane and air at 773K.

주입하여  $500^\circ\text{C}$ 에서  $400 \text{ mW/cm}^2$  이상의 출력특성이 나타남을 확인하였다.(Fig. 4 & Fig. 5) 이러한 결과는 기존에 비해 매우 낮은 운전온도와 높은 출력값을 달성한 것으로서 최근의 단실형 마이크로 SOFC 연구를 촉발시킨 계기가 되었다. 이와 같은 결과는 기존의  $\text{ZrO}_2$  계열의 전해질을 사용하던 연구에서 새로운 고성능의 전해질 및 전극 재료를 사용함으로써 다양한 재료를 마이크로 SOFC에 적용하도록 하는 전기를 이루었다는 점도 매우 특이하다.

## 5. 단실형 마이크로 SOFC의 작동 원리

단실형 마이크로 SOFC의 작동원리는 기존의 분리형 SOFC의 작동원리와 비교하여 설명하는 것이 좋다. Fig. 6에 두 가지 형태의 SOFC의 작동원리를 도식적으로 비교하여 나타내었다. 분리형 SOFC (dual- or two-chamber SOFC)는 전해질을 경계로 양극부분과 음극부분에 서로 기밀된 별도의 공간으로 구성되어 있는데 양극쪽에는 산화제인 산소나 공기를, 음극쪽에는 원료인 수소나 탄화수소를 각각 주입한다. 양극쪽에 주입된 산소는 양극의 촉매반응에 의해 산소이온으로 환원되고 산소이온 전도

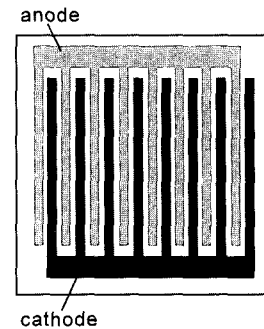


**Fig. 6.** Schematic comparison of the operations of (a) dual-chamber and (b) single-chamber micro-SOFC.

성의 전해질을 통해 음극쪽으로 확산한다. 한편 음극쪽에 주입된 수소는 음극의 촉매반응에 의해 이온화하고 양극으로부터 전해질을 통해 공급된 산소이온과 반응함으로써 전자를 방출하고 물을 생성하게 되는 것이다. 이때 방출된 전자가 외부로 전달되어 전기로서 활용된 후 다시 양극쪽으로 공급되어 연속적인 산소의 환원 반응에 참여하게 된다. 한편, 단일형 SOFC의 경우, 전해질을 경계로 양극과 음극에 별도의 기밀공간을 구성할 필요가 없이 하나의 공간에 위치시키며 연료와 산화제의 공급도 혼합 상태로 한꺼번에 주입한다. 이때 주입된 혼합기체는 양극과 음극에서 각각 앞에서 분리형 SOFC에서의 촉매반응이 선택적으로 일어나게 되고 이중 산소이온은 전해질을 확산하여 이동할 수 있으므로 분리형 SOFC와 같은 반응이 동일하게 일어나며 전기를 생산하게 된다.

따라서 단일형 SOFC의 경우에는 연료+산화제 혼합기체를 사용하게 되므로 자발적인 연소반응이 일어나지 않도록 적절한 혼합비를 유지해야 할 필요가 있으며 분리형에 비해 연료의 상대적인 주입량이 적어 효율의 저하가 발생하게 된다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 상대적으로 구조가 매우 간단하며, 더구나 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 전극을 동일 평면상에 구성(on-plane type)하는 것도 가능하여 반도체 제조에 사용되는 박막 공정을 채용할 수도 있어 집적화가 가능하다는 장점이 있다. Fig. 7에 보인 구조는 음극과 양극을 동일평면상에 구성하여 집적화 하는 가장 단순한 구조를 나타낸 것으로서 이러한 구조를 여러층으로 서로 적층하면 효율적인 집적화가 가능하다.

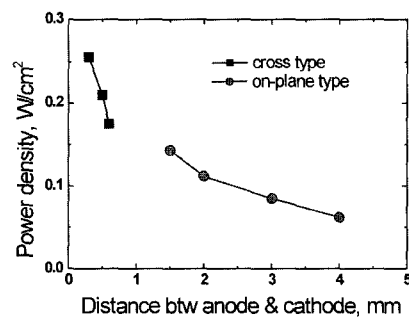
단일형 마이크로 SOFC는 앞에서 소개한 바와 같이



**Fig. 7.** Design of integrated on-plane single-chamber micro-SOFC (comb-crossing type).

(Fig. 6(b)) 전극이 전해질의 상하면에 각각 존재하는 cross형과 Fig. 7과 같이 전극이 동일평면에 위치하는 on-plane형이 있으며 각각의 전극간 거리에 따른 출력특성 형태별로 분류하여 표시하면 Fig. 8과 같다. Cross형이 on-plane형에 비하여 출력특성이 우수한 것으로 판단할 수도 있으나 실제로는 on-plane형을 제조할 때 공정상의 한계로 전극간 거리를 보다 좁게 제어하기 어려웠기 때문으로 보아야 하며 따라서 박막공정 혹은 소프트-리소그래피 공정을 도입하여 전극간 거리를 좁히는 경우 우수한 출력특성을 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 물론 전극간 거리를 좁히는 데에는 각 형태별로 한계가 있을 것으로 생각되는데 이는 전해질이 개방전압을 유지할 수 있을 정도로 충분한 절연강도를 유지해야 할 필요가 있기 때문이다.

Table 1에 단일형 마이크로 SOFC와 분리형 마이크로 SOFC의 대표적인 특징을 비교하여 나타내었다. 여기서 주목해야 할 부분은 단일형에서는 혼합기체를 사용하고 탄화수소의 크래킹 반응이 개입하는 음극특성으로 인해 근본적으로 개질기가 필요 없다는 점이다. 물론 이러한



**Fig. 8.** Correlation between the power density and gap distance of cathode and anode of two different type of single chamber micro-SOFC.

Table 1. Characteristics of Dual-and Single-Chamber SOFC

특성분류	분리형 마이크로 SOFC	단실형 마이크로 SOFC
구성요소	단전자, 밀봉재, 연결자, 가스밀봉, 내산화 연결자	단전자(스택), 연결자, 전도성 연결자
가스공급	양극 산화제, 음극 연료 (분리공급)	연료+산화제 (혼합공급)
탄화수소 연료사용	개질기 필요, 탄소증착 문제 발생	개질기 불필요
전해질 재료	0.2~10 <sup>-17</sup> 산소분압영역에서 안정한 이온전도체 필요: ZrO <sub>2</sub> 사용	0.1~0.15 atm 산소분압에서 안정한 이온전도체 필요: CeO <sub>2</sub> , Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 사용 가능
스택의 설계 및 공정	복잡, 고가	간단, 저가

점은 반대로 수소연료를 사용하는 것보다는 효율이 낮다는 단점도 있으나, 역시 구조 및 장치를 단순하게 구성할 수 있는 이점을 제공한다. 또한 분리형에서의 전해질이 경험하는 음극표면과 양극표면의 극심한 산소분압차이를 단실형의 경우에는 고려할 필요가 없어 실제로 지금까지 산소분압에 대한 안정성 문제로 그 활용이 어려웠던 CeO<sub>2</sub>계나 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계와 같은 고이온 전도성 소재를 전해질로 사용할 수 있다는 장점 또한 있다. 이는 SOFC의 구동온도를 획기적으로 낮출 수 있다는 매우 중요한 결론에 도달할 수 있는데, 실제로 Fig. 9에 나타낸 것처럼 단실형 마이크로 SOFC를 SDC 전해질을 사용하여 구성하는 경우 500°C에서 측정된 출력이 YSZ 전해질을 사용한 셀을 950°C에서 측정된 출력에 비하여 높은 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

### 6. 마이크로 SOFC 연구의 당면 과제

앞에서 서술한 바와 같이 휴대형 전원으로서의 단실형 마이크로 SOFC의 활용가능성은 매우 높다. 그럼에도 불구하고 기존의 PEMFC와 DMFC와 같은 고분자전해질을 활용하는 마이크로 연료전지에 비해서는 기술개발 기간이 매우 짧아 실제 상용화가 가능할지 판단하기에는 이른 감이 없지 않다. SOFC가 가지는 여러 장점이 고온 특성을 활용하는데서 기인하는 것이라 실제 SOFC를 소형화하여 휴대용 전원으로 활용하기 위해서는 열관리 기술의 확보가 매우 중요하기 때문이다. 이는 보다 다학제적인 연구가 필요한 것으로 판단되며 장기적인 계획 또한 반드시 수립되어야 한다. 또한 마이크로 SOFC 스택 자체의 경우

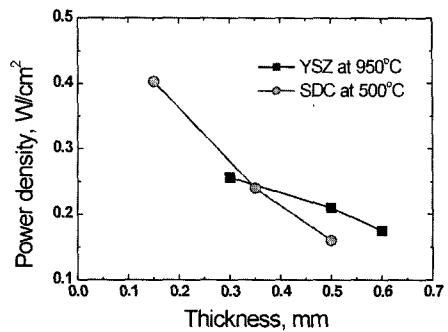


Fig. 9. Variation in power density as a function of gap thickness between anode and cathode. The sample fabricated with YSZ-electrolyte was operated at 950 °C and the other one with SDC-electrolyte was operated at 500°C.

에도 아직까지 집적화에 성공한 연구결과는 없으며, 향후 수 년 내에 심도 있는 연구가 진행되어야 하는 분야이다. 재료 선정의 경우에도 이온공학 및 촉매공학 연구자의 보다 체계적이고 협력적인 연구를 선행함으로써 단실형 마이크로 SOFC의 운전과 관련된 여러 기구의 구체적인 이해를 통한 획기적인 연구 진척이 절실히 필요하다 하겠다.

### 7. 맺음말

마이크로 SOFC는 지속적으로 확대되고 있는 장시간 고출력 특성을 요구하는 휴대전자 기기의 대폭적인 시장 확대에 따라 그 관심이 증가하고 있다. 세라믹 재료를 활용하는 연료전지 중에서는 단실형 마이크로 SOFC가 이러한 요구에 부응하는 가장 적합한 SOFC 형태로 판단된다. 그러나 기존의 휴대기기용 전원으로 이차전지가 확고한 시장을 점유하고 있고 또한 고분자 전해질을 기반으로 한 여러 연료전지 또한 개발속도가 매우 빠르다는 점을 인식할 필요가 있다. 따라서 마이크로 SOFC에 대한 연구는 가능한 단시간에 전폭적인 연구가 필요한 분야라고 보아야 하며 이러한 기대에 부응하기 위해 많은 관련 연구자의 관심과 노력을 바라는 바이다.

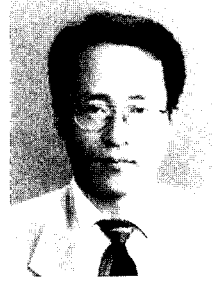
### 참고문헌

1. W. van Gool, "The Possible Use of Surface Migration in Fuel Cells and Heterogeneous Catalysis", *Philips Research Reports*, **20**, 81-93 (1965).

2. G. A. Louis, J. M. Lee, D.L. Maricle, and J. C. Trocchiola, "Solid Electrolyte Electrochemical Cell", *US Patent* 4,248,941 (1981).
3. C. K. Dyer, "A Novel Thin-Film Electrochemical Device for Energy Conversion" *Nature*, **343**, 547-548 (1990).
4. K. Asano, T. Hibino and H. Iwahara, "A Novel Solid Oxide Fuel Cell System Using the Partial Oxidation of Methane", *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 3241-45 (1995).
5. T. Hibino, K. Ushiki, and Y. Kuwabara, "Non-Diaphragm Solid Electrolyte Type Fuel Cell for Co-generation", *Japan patent* 1996-264195 (1996).
6. T. Hibino, K. Ushiki and Y. Kuwahara, "New Concept for Simplifying SOFC System", *Solid State Ionics*, **91**, 69-74 (1996).
7. B. Zhu, G. Meng, B.-E. Mellander, "Non-Conventional Fuel Cell Systems: New Concepts and Development", *J. Power Sources*, **79**, 30-6 (1999).
8. T. Hibino, Y. Kuwabara, and S. Wang, "Effect of electrode and Electrolyte Modification on the Performance of One-Chamber Solid Oxide Fuel Cell", *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 2821-26 (1999).
9. T. Hibino, H. Tsunekawa, S. Tanimoto and M. Sano, "Improvement of a Single-Chamber Solid Oxide Fuel Cell and Evaluation of New Cell Designs", *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 1338-43 (2000).
10. T. Hibino, S. Wang, S. Kakimoto, and M. Sano, "One-

Chamber Solid Oxide Fuel Cell Constructed from a YSZ Electrolyte with a Ni Anode and LSM Cathode", *Solid State Ionics*, **127**, 89-98 (2000).

11. T. Hibino, A. Hashimoto, T. Inoue, J.-I. Tokuno, S.-I. Yoshida and M. Sano, "A Low-Operating-Temperature Solid Oxide Fuel Cell in Hydrocarbon-Air Mixtures", *Science*, **288**, 2031-33 (2000).
12. J. Fleig, H.L. Tuller, and J. Maier, "Electrodes and Electrolytes in Micro-SOFCs: a Discussion of Geometrical Constraints," *Solid State Ionics*, in print (2004).
13. G.A. Tompsett, C. Finnerty, K. Kendall, T. Alston, and N. M. Sammes, "Novel Applications for Micro-SOFCs," *J. Power Sources*, **86** 376-82 (2000).



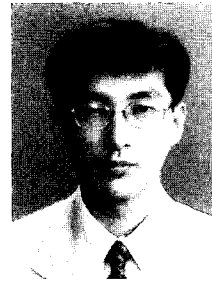
**이 해 원**

- 1980년 서울대학교 요업공학과 졸업
- 1982년 서울대학교 요업공학과 석사
- 1990년 U. Florida 재료공학과 박사
- 1990년 美 Keramont Advanced Materials Corp., R&D Manager
- 1992년 KIST 나노재료연구센터 ~현재 책임연구원



**김 주 선**

- 1990년 연세대학교 요업공학과 졸업
- 1992년 KAIST 재료공학과 석사
- 1998년 KAIST 재료공학과 박사
- 1998년 U. Pennsylvania, 연수연구원
- 1999년 KAIST 제면공학연구센터 연수연구원
- 2000년 KIST 나노재료연구센터 ~현재 선임연구원



**김 공 호**

- 1979년 연세대학교 금속공학과
- 1987년 워싱턴 주립대학교 재료공학과 (석사)
- 1993년 워싱턴 주립대학교 재료공학과 (박사)
- 1979년 국방과학연구소 연구원
- 1984년 KIST 나노재료연구센터 ~현재 책임연구원



**이 종 호**

- 1988년 서울대학교 무기재료공학과 졸업
- 1990년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 1994년 서울대학교 무기재료공학과 박사
- 1994년 서울대학교 RETCAM, Post Doc.
- 1995년 독일 TU-Darmstadt, 전기화학 연구소 연구원
- 1998년 KIST 나노재료연구센터 ~현재 책임연구원



**문 주 호**

- 1990년 연세대학교 요업공학과 졸업
- 1995년 U. Florida 재료공학과 석사
- 1996년 U. Florida 재료공학과 박사
- 1996년 MIT 재료공정센터, Post-Doc.
- 1998년 일본 나고야 공업기술원 초빙 연구원
- 2000년 연세대학교 신소재공학부 부교수 ~현재