

# 1kW 평판형 SOFC 스택제작 및 성능평가

조남웅\*, 황순철, 한상무, 김영우, 김승구, 전재호, 김도형, 전중환

## Fabrication and Performance Test in Stacks up to 1kW Planar Solid Oxide Fuel Cell

Namung Cho\*, Sooncheol Hwang, Sangmoo Han, Yeongwoo Kim, Seunggoo Kim, Jaeho Jun, Dohyeong Kim, Joonghwan Jun

**Abstract** Stacks of solid oxide fuel cell with 1kW max power performance were designed on planar type employing anode-supported cells and metallic interconnects. The stacks composed of 3-cells, 8-cells, and 16-cells were fabricated and tested in serials by using anode-supported cells purchased from Indec, and sealants/interconnects prepared at RIST. In the performance test of the final 16-cells stack, OCV was recorded to be 16.7V. The peak power and the power density showed 1kW, 0.77W/cm<sup>2</sup> at 820°C, respectively. In addition, the long-term degradation rate of the power exhibited 2.25 % during 500h at 750°C

**Key words** Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), metallic interconnects(금속 연결재), planar type stack(평판형 스택)

\* 포항산업과학연구원(RIST) 연료전지프로젝트  
 ■ E-mail : namung@rist.re.kr ■ Tel : (054)279-6496 ■ Fax : (054)279-6919

### 1. 서론

평판형 고체산화물 연료전지(planar SOFC)는 튜브형(tubular SOFC)에 비해 출력밀도 특성은 우수하지만, 장기 출력 안정성은 아직 부족한 것으로 알려져 있다.<sup>(1-3)</sup>

평판형 SOFC의 종류는 지지체의 형태에 따라 크게는 연료극 측 음극 지지형(anode supported type)과 전해질 지지형(electrolyte supported type)으로 구분할 수 있으며,<sup>(4,5)</sup> 보다 세분화하여 구분하면 양극 지지형(cathode supported type), 연결재 지지형(interconnect supported type), 다공성 기판 지지형(porous substrate supported type)을 포함하여 모두 5가지의 형태로 구분할 수 있다.<sup>(6)</sup>

전해질 지지형은 전지를 제조할 때 고밀도의 전해질 기판 양

쪽에 다공성의 음극과 양극 물질을 코팅하고 소결하므로, 음극 지지형에 비해 PEN (Positive-Electrolyte-Negative)의 휨(warping)이 작아, 대형전지 제작에 유리하다. 전지작동 시에도 강건한 전해질 층이 음극의 환원분위기와 양극의 산화분위기를 장시간 안정적으로 분리하므로 전지의 장기 열화 특성도 비교적 우수하다. 그러나 이 경우에는, 전해질이 두꺼워서 전지 내부저항이 크고, 고출력을 얻으려면 음극 지지형 경우보다 고온에서 작동시켜야 하는 문제점을 안고 있다. 일반적으로 전해질 지지형 전지의 전해질의 두께는 80~200 $\mu$ m이며, 작동온도는 850~1000°C 이다. 이러한 작동온도에서는 금속 연결재를 사용하기 어려우며 란탄 크로마이트(lanthanum chromite) 계열의 세라믹 재료의 연결재가 안정적이다. 그러나 연결재는 그 특성상 복잡 형상을 가지기 때문에 세라믹을 사용할 경우에는 금속 재질 연결재에 비해 제작이 어려운 것은 물론이고, 많

Table 1. Status of the planar SOFCs developed in the entire world

Institution/Company	Cell type	Operation temp. / °C	Power density / Wcm <sup>2</sup>	Max power/ kW
Haldor Topsoe/Risoe	AS	750	1.5	1.25
DLR	MS	800	0.2	-
FZJ	AS	750	0.6	13
Webasto/Indec	ES	850	0.44	0.85
Sulzer Hexis	ES	900	0.180	1.0
Delphi/PNNL	AS	750	0.6	1.3
GE	AS	800	0.5	5.6
VPS	AS	750	0.32	2.3
MMC/KEPCo	ES	780	0.214	2.97
NGK	AS	750	1.6	-
Toho Gas	ES	800	0.152	1.03

Cell type : AS : anode-supported, MS : metal-supported, ES-electrolyte-supported

은 비용과 긴 공정시간이 요구된다.

음극 지지형 경우에는, 다공성의 음극 기판을 먼저 제조한 다음, 그 위에 고밀도의 전해질막을 코팅하고 소결한 후, 그 위에 얇은 다공성의 양극층을 형성시키는 과정을 거친다. 이러한 과정을 통해 단전지(cell)를 대형화하면 제조 단계에서 심하게 휘어지는 경향이 있다. 전지 작동중에도 약한 전해질막으로 인하여 장기적으로 안정하지 못하다는 단점을 가지고 있다.<sup>(8)</sup> 그러나 이런 단점에도 불구하고 음극 지지형은 전기 저항이 큰 전해질이 얇기 때문에 전지 내부저항이 작아, 저온에서도 고출력의 작동이 가능하다.

즉 낮은 작동온도에서 동등 이상의 출력을 얻을 수 있다. 이에 따라 금속분리판 사용이 가능해진다는 커다란 장점 때문에 다른 형태의 전지보다 보다 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(7-9)</sup> 대부분의 음극 지지형 단전지는 500~1000 $\mu$ m 두께의 음극, 5~20 $\mu$ m의 전해질, 30~100 $\mu$ m의 양극으로 구성된다. 그리고 전해질 지지형 경우보다 낮은 650~850 $^{\circ}$ C의 작동온도에서도 그와 유사한 수준의 전기적 출력을 나타낸다.

음극지지형, 전해질 지지형, 금속지지형의 3가지 평판형 SOFC 스택 및 시스템의 선진 개발현황을 Table 1에 정리하였다. 그렇지만 현재는 SWPC(Siemens Westinghouse Power Corporation)와 MHI(Mitsubishi Heavy Industries) / J-power사의 튜브형과 같은 150kW 이상의 대형 발전시스템까지 개발된 것이 없으며, 시험 작동시간도 튜브형에 비하면 짧다고 할 수 있다. Table 1에서도 확인할 수 있는 바와 같이 평판형 중에서도 음극지지형을 개발하는 기관이 비교적 많은 편이다. 유럽 특히, 독일의 경우 금속지지형을 많이 연구하는 경향이 있

으며, DLR Stuttgart의 BMW도 이에 포함되고, 영국의 Seres Power도 금속지지형을 개발하는 것으로 알려져 있다.

현재 개발된 평판형 가운데에서는 독일의 FZJ(Forschungszentrum Julich), 미국의 GE 개발품이 13kW와 5.6kW의 비교적 큰 최대출력을 나타내고 있으며, 보다 진보된 기술을 보유하고 있는 것으로 추측된다. 개발된 단전지의 면적만을 보면, 전해질 지지형 경우에는 Shokubai/Tonen사의 개발품이 850cm<sup>2</sup>로 가장 넓고, 음극지지형의 경우에는 FZJ의 550 cm<sup>2</sup>가 가장 넓다. 그리고 본 연구와 유사하게 금속 연결재를 사용하는 음극지지 평판형 SOFC를 연구개발하는 기관 및 업체로는 FZJ, Delphi / Battelle(PNNL), GE, VPS(Global Thermoelectric), Tokyo Gas, LLNL(Laurence Livermore National Lab.) 등을 들 수 있다.<sup>(10-20)</sup>

본 연구에서는 평판형 음극 지지형 단전지와 금속 연결재를 사용하여, 운전온도 800 $\pm$ 50 $^{\circ}$ C에서 최대출력 1kW가 가능한 스택을 제작하고 운전하는 것을 연구목표로 설정하였다. 본 연구에서는 최종 목표 달성을 위하여 각각 1매, 3매, 8매, 16매 단전지를 적층한 스택을 제작하였으며, 최대출력과 장기 출력감쇠율을 측정하여 성능을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 스택설계

우선 각 구성요소에 사용할 재료를 설정하고, 그에 대하여

형상설계를 실시하였다. 평판형 스택 제작을 위하여 구성요소로서 단전지, 밀봉재, 집전체, 그리고 연결재로서 bipolar plate, 상판 end plate, 하판 end plate를 사용하는 것으로 설계하였다.

단전지 경우에는 금속연결재를 사용하기 위해서  $800\pm 50^{\circ}\text{C}$ 에서 작동이 가능한 평판 음극지지형으로 설정하였다. 그리고 연화점이 약  $670^{\circ}\text{C}$ 이고 유리가 주원료인 밀봉재를 사용하도록 스택을 설계하였다. 집전체는 페이스트(paste)와 메쉬(mesh)를 복합적으로 사용하였으며, 페이스트 경우에는 금속과 세라믹을 모두 고려하였다. 연결재에는 상용 STS 430과, SOFC 용으로 Hitachi 금속에서 개발된 ZMG 232L 및, Inconel 600 등을 사용하는 것으로 설계하였다.

단전지는 시판되는  $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 0.6\text{ mm(t)}$ 의 크기 정사각형 제품으로 설정되었으며, 그에 따라 밀봉재는 단전지 외주부를 2cm 정도 둘러싸는 정사각형 구조에 가스 입출구 매니폴드(manifold)가 절취되는 구조로 형상을 설계하였다. 집전체는 메쉬 경우, 전기전도성과 적층시의 물리적 압력을 고려하여 그 메쉬의 크기를 결정하고, 페이스트 경우에는 고온특성을 고려하여 재질을 선택하였다. 연결재인 bipolar plate와 end plate에 대해서는 내부 매니폴드 형태와 Cross flow 형태를 기본으로 설정한 후에, 개별 구성요소의 조립과 가스밀봉이 용이하고 완벽하게 이루어질 수 있도록 설계하였다.

## 2.2 스택제작

스택의 구성요소로서 사용된 단전지는 Indec사의 ASC2이다. 밀봉재는 자체적으로 밀봉유리 판재를 제조하고 기계적으로 가공하여 사용하였다. 연결재도 Bulk 금속을 기계 가공하여 제작하였으며, 부식방지를 위하여 용사법이나 슬러리 코팅법으로 표면에 금속 또는 세라믹재료를 코팅하였다.

스택은 단전지 스택, 3매셀 스택, 8매셀 스택, 16매셀 스택순으로 제작되었는데, 각 스택마다 초기 및 장기 성능시험을 실시하고 그 성능을 확인 한 후에 적층수가 더 높은 스택을 제작하여 운전하고 평가하였다.

## 2.3 성능평가

스택의 전기적 성능평가를 위하여 출력 용량별로 Fig.1과 같이 30~300W용과 300~1500W용 평가시스템을 구축하였다. 두 장치는 모두 스택 최고 온도  $1100^{\circ}\text{C}$  및 각 전기출력 용량에 적합한 가스유량 제어 능력을 가지고 있으며, 스택의 상하 end plate에 일정 압력을 부여할 수 있는 장치가 설치되어 있다. 두 측정장비의 스택장착용 측정로 내부 용적은 각각  $20\times 20\times 20\text{ cm}^3$ 과  $40\times 40\times 80\text{ cm}^3$ 이다.

Fig. 2에 스택의 전기적 성능평가 순서를 대략적으로 나타냈다. 조립된 스택을 측정로 안에 장착하고 일정한 하중을 가하면서, 측정로를 밀봉재 연화점까지 승온하여 일정시간 동안 유

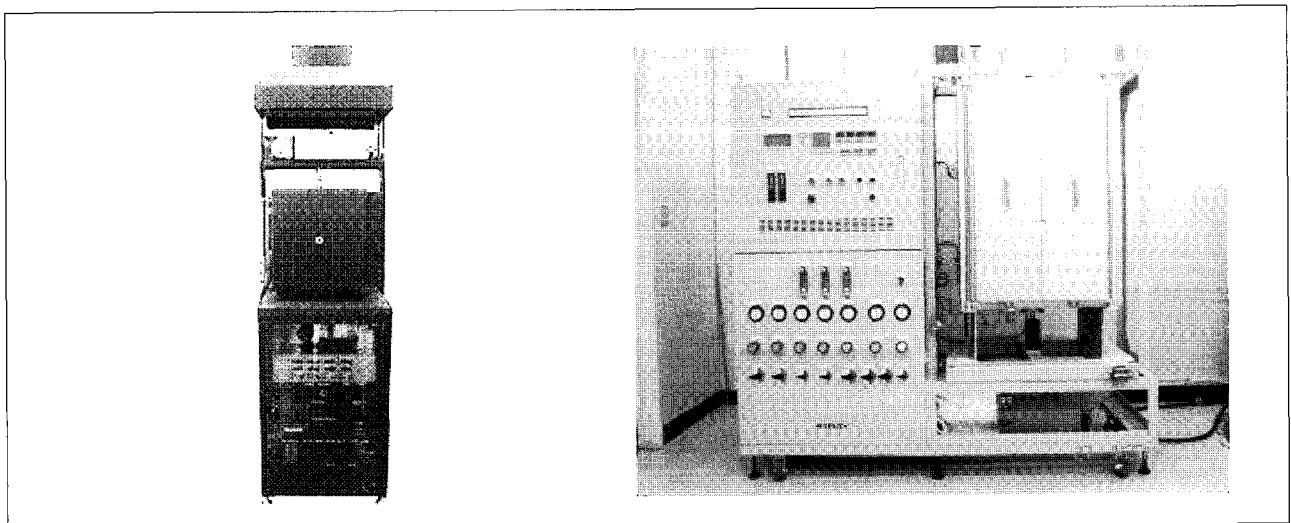


Fig. 1 Equipments for the electrical evaluation for the stacks of 30~300W (left) and 300W~1500W (right).

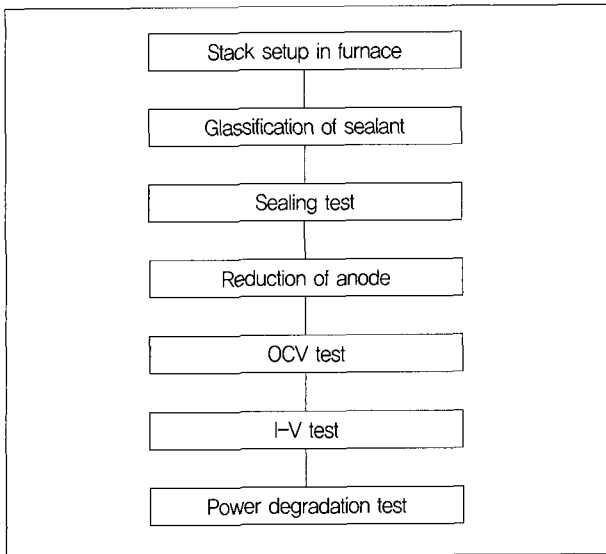


Fig. 2 Procedure of electrical performance test.

지하여 밀봉처리를 실시하였다. 이 과정이 끝나면 스택 입구 쪽에 질소를 투입하면서 출구에서 배출되는 유량을 측정하여 스택내의 전극 간 가스유출상태와 스택 내외부 사이의 가스유출량을 측정하는 밀봉 특성평가를 실시하였다. 가스유출이 검출되지 않으면, 음극, 즉 연료극의 NiO를 환원처리하기 위하여 음극 측에  $N_2 + H_2$  가스를 일정시간 이상 통과시키며 환원 과정을 유지하였다.

스택 운전 초기에 OCV(open circuit voltage)를 측정하고, 가스유량과 온도조건을 변화시키며 초기 최대출력을 측정하였다. 그리고 400mA의 전류부하를 가한 상태에서 750, 800°C 온도에서 500시간 이내로 스택의 출력감쇠율을 측정하여 장기 성능평가를 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 구성요소 준비 및 제작

##### 3.1.1 단전지

본 연구에서 사용된 Indec사의 ASC2 단전지는 음극에 YSZ + NiO 복합체, 전해질에 YSZ, Bloking layer에 YDC(Yttria doped Ceria)를, 양극은 LSCF ( $La_{1-x}Sr_xCo_yFe_{1-y}O_3$ )로 구성되어 있다. 전지의 전체 크기는 10cm×10cm×0.6mm(t)이지만 반응면적은 9cm×9cm = 81cm<sup>2</sup>인 전지이다. 전해질의 두

께는 약 5μm으로서 전해질지형의 80~200μm에 비하여 매우 얇다. 음극의 미세구조를 보면, 연료가스가 전지반응을 일으키게 되는 전해질 근처 부분과, 연결재로부터 연료가스가 유입되는 부분의 미세구조가 그 기능에 따라 다르다. 양극 역시 전기 전도성과 전지반응성을 고려하여 YDC/LSCF 2개의 층을 구성한 것으로 추정된다.

##### 3.1.2 밀봉재

밀봉재는 단전지 상하, 즉 음극과 양극사이의 가스유출과 스택 외부로의 가스유출을 막는 매우 중요한 역할을 한다. 밀봉재용 유리의 조성은 BaO-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 계이며, 이 유리의 연화점은 670°C 정도이다. 밀봉재는 분쇄된 유리에 유기 결합제와 용매를 첨가하여 잘 혼합한 후, 이 슬러리를 몰드에 부어 일정한 두께의 판상으로 제조하였다. 제조된 판상의 밀봉재는 매니폴드 부분을 기계적으로 가공하여 완성하였다. 밀봉재 두께는 단위전지 및 스택에서 밀봉재의 수축율과 가스 누설율을 측정하여 결정하였으며, 단위전지 및 스택 실험에서 가스 누출이 전혀 일어나지 않는 밀봉재를 제조하였다

##### 3.1.3 연결재

직렬로 연결되어 전지에서 발생된 전기를 수집하는 연결재에서는 전지가 작동하는 고온에서도 전기전도성이 지속적으로 유지되어야 한다. 또한 단전지, 밀봉재 등과 같은 구성요소와 유사한 고온 열팽창 계수를 가져야 스택자체의 형상 및 가스밀봉성과 집전특성을 유지할 수 있다. 여기에 적합한 상용 소재로는 페라이트계 스테인레스강(STS)이 알려져 있으며, 새로운 합금 개발제품으로는 ThyssenKrupp의 Crofer APU 22와 Hitachi 금속의 ZMG 232L등이 대표적이다.<sup>(21-23)</sup>

본 연구에서 사용된 연결재는 동일한 재질의 bipolar plate, 상부 end plate, 하부 end plate 3종으로 구성되었다. 단전지의 반응 면적이 9×9cm<sup>2</sup>임을 고려하고, 가급적 스택 전체의 단면적이 최소화될 수 있도록 그 형상을 설계하였다. 공기 및 연료(수소)가스가 하부 end plate에서 유입하여 다시 하부로 배출되며, 단전지 상하에서 서로 cross flow가 되도록 가스 흐름 구조를 설계하였다. 그리고 매니폴드 부위의 유량분포가 균일해질 수 있도록 배관되었다. 연결재 표면에는 사용 전에 금속 혹은 양극재료를 코팅하였다. 전류부하를 위하여 상하부 end plate에 연결재 재질의 리드바(lead bar)를 장착하였다.

Table 2. Features on stacks fabricated at RIST

	Interconnect		Pre-heater of gases
	Material	Manifold shape	
16-cell stack	ZMG 232 L	Asymmetrical Array	Setup
8-cell stack	Inconel 600	Asymmetrical Array	Setup
3-cell stack	STS 430	Symmetrical Array	None
Single cell stack	STS 430	Symmetrical Array	None

### 3.2 스택제작

평판형 스택제작은 단전지를 포함한 구성요소를 여러 장 적층한 형태로 이루어 지므로 어떤 하나의 층만이라도 문제가 있는 경우 전체 스택에 심각한 영향을 미치며, 스택의 수명을 결정하게 된다.

본 연구에서는 최종 1kW 최대출력 스택을 제작하기 위하여 단계적으로 단전지, 3매 셀, 8매 셀, 16매 셀로 구성된 스택을 제작하였다. 단계별로 각 평가장치의 이상유무, 스택의 가스밀봉특성과 전기적 성능특성, 그리고 그에 사용된 구성요소의 내구성을 평가하고 만족스러운 결과를 얻은 후에 다음 단계의 더 큰 스택을 제작하는 방식으로 전체 연구를 진행하였다.

단계별로 제작된 스택의 특징을 Table 2에 나타내었다. 모든 스택에 전술한 Indec ASC2 단전지가 사용되었으며, 밀봉재 또한 전술한 RIST자체 제작품이 사용되었다.

단전지와 구성요소가 적층된 단전지 스택의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 단전지와 3매셀 스택의 연결재 재질로서 STS 430을 사용하였다. 이 스택들은 작동 시의 공기와 연료가스 유량이 작기 때문에 별도의 가스예열장치 없이, 전기로 안에 설치된 가스공급 파이프가 고온으로 유지되면서 자연스럽게 가

스온도가 상승되도록 하였다.

Fig. 4는 단전지 3장을 적층한 3매셀 스택의 사진이다. 스택 내부 bipolar와 end plate의 가스공급 매니폴드는 공기/연료의 입출부 4곳에 대하여 모두 동일한 형상과 대칭성을 가지도록 제작되었다.

Fig. 5는 8매셀 스택의 사진이다. 8매셀 스택에서는 연결재의 재질을 Inconel 600으로 변경하였다. 8매셀 스택과 16매셀 스택은 가스유량이 비교적 크기 때문에 스택 측면에 예열기를 설치하였다. 평가장치 내부에도 스택에 유입되는 가스를 예열하는 장치가 포함되어 있지만, 최종적으로 스택에 유입되는 연료 가스 및 공기가 일정한 온도를 가지도록 하기 위해, 전기로 안에 가스배관으로 연결된 예열기를 부착한 것이다. 또한 가스가 매니폴더로 균등하게 유입되도록 매니폴드 입구 바로 앞에 배관장치를 부착하였다. 8매셀 스택과 16매셀 스택에 사용된 bipolar와 end plate의 매니폴드에는 공기/연료의 입/출부 4곳 크기가 각각 다른 비대칭 설계가 적용되었다. 8매셀 스택과 16매 셀 스택은 단전지-스택이나 3매셀 스택에 비해 가스유량이 크기 때문에, 입구와 출구의 압력차를 고려하여 설계함으로써 가스흐름이 원활하게 이루어지도록 했다.

최종적으로 제작된 16셀 스택의 사진을 Fig. 6에 나타내었

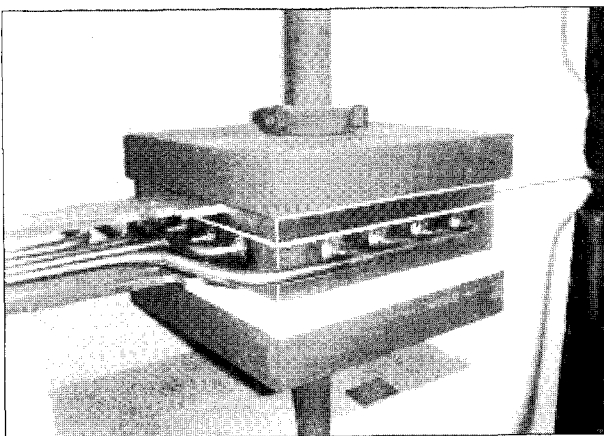


Fig. 3 Picture of single cell stack.

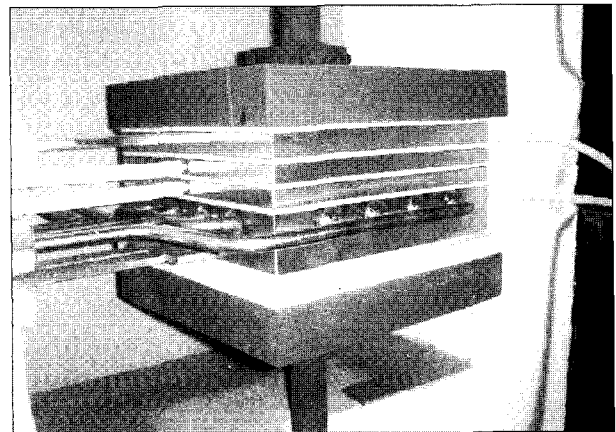


Fig. 4 Picture of 3-cell stack.

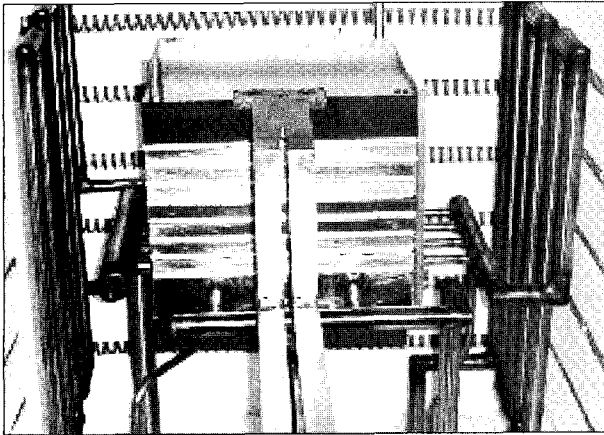


Fig. 5 Picture of 8-cell stack.

다. 이 스택에 사용된 연결재의 재질은 Hitachi 금속에서 개발한 ZMG 232L이다. 적층수가 늘어 스택이 높아진 것 외에는 모든 면에서 8매 셀 스택과 동일하다. 배관을 제외한 스택만의 크기는 15cm(가로)×15cm(세로)×18cm(높이)이다. 또한 스택 내의 가스온도를 측정하기 위하여 스택 내부 및 배관 내부에 열전대를 장착하였다.

### 3.3 스택평가

#### 3.3.1 스택별 성능비교

운전평가를 할 때에는 Fig. 3와 Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 스택이 놓일 수 있도록 설치된 Inconel plate 위에 전기적 절연체를 삽입하고 그 위에 스택을 장착한 다음, 일축 가압기를 이용하여 스택을 고정하였다.

네 가지 스택에 대해 800 ~ 820 °C 범위 안에서 밀봉특성, OCV, 최대출력 등을 측정하여 초기 성능평가를 실시하였다. 모든 스택이 스택 입구와 출구에서 동일한 가스유량을 나타내었고, OCV 역시 밀봉이 유지되었을 때 예상되는 1.04 V 이상의 값을 보였기 때문에, 가스밀봉은 완벽하게 이루어진 것으로 보인다.

Table 3에 본 연구에서 제작된 단전지-, 3매-, 8매-, 16매-

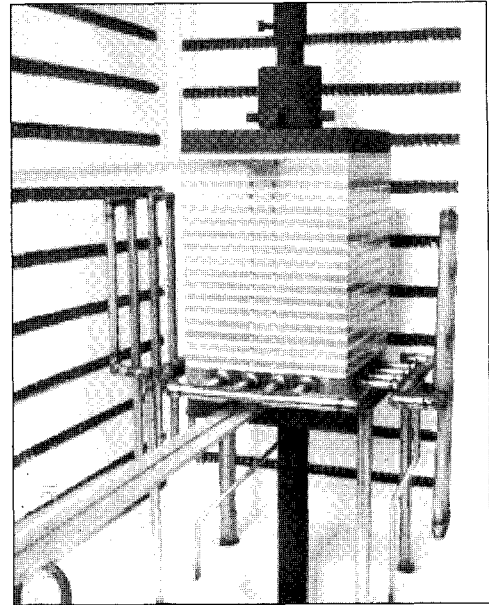


Fig. 6 Picture of 16-cell stack.

셀 스택의 전기적 성능평가 결과를 비교해서 나타내었다.

각 스택의 적층 수가 1, 3, 8, 16으로 증가함에 따라 OCV는 1.08, 3.13, 8.36, 16.7 V로 증가하였다. 이를 단전지 1매의 평균값으로 나타내면 1.04~1.08V가 된다. 최대출력은 48, 149, 364, 1,000W로 증가하였다.

출력밀도는 0.56 ~ 0.77 W/cm<sup>2</sup>인 것으로 나타났다. 장기출력은 73~1063시간까지 측정하였으나, 도중에 측정조건을 변화시키며 실험한 부분이 있기 때문에, Table 3에는 동일조건에서의 최장시간 측정값만을 나타내었다.

#### 3.3.2 최종 16셀 스택의 성능평가

##### 1) 초기 성능평가

16셀 스택의 I-V특성을 측정하여 초기성능을 평가하였다. Fig. 7은 측정온도 820°C에서 연료와 공기가스유량이 각각 24와 60 L/min일 때의 출력값을 보여주고 있다. 측정기의 한계 때문에 999.99W까지만 측정되었으나, 출력 그래프의 형태로 부터 추정할 수 있는 바와 같이 본 연구를 통해 개발된 16셀 스

Table 3 Results of performance test on the stacks fabricated at RIST

	Operation Temp. / °C	OCV / V	Max. Power / W	Power density / Wcm <sup>2</sup>	Degradation rate / %
16-cell stack	820	16.7	1000	0.77	2.25/500h at 750°C
8-cell stack	800	8.36	364	0.56	20.7/73h at 800°C
3-cell stack	800	3.13	149	0.62	19.1/500h at 800°C
Single cell stack	800	1.08	48	0.60	15.0/500h at 800°C

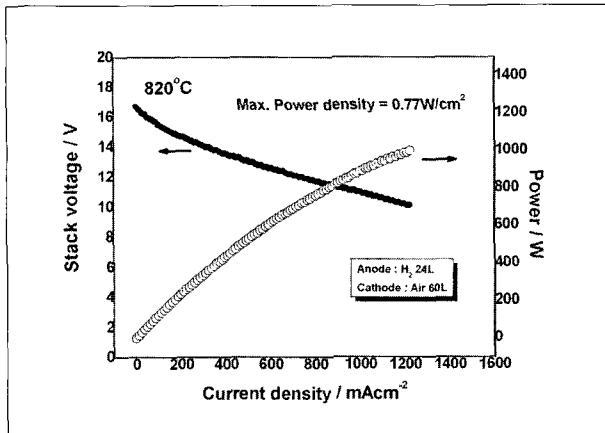


Fig. 7 Initial I-V curve of the 16-cell stack

택은 1000W, 즉 1kW 이상의 출력을 나타낼 수 있었을 것으로 보인다. 16개의 각 셀은 출력 특성이 조금씩 달랐다. 각 전지 중에서 가장 낮게 나타난 출력의 값은 53.3W, 가장 높은 값은 66.8W이며, 평균값은 62.5 W였다.

## 2) 장기 성능평가

전지의 출력감쇠율은 전지의 열화, 연결재의 산화, 셀과 연결재 사이의 계면에서 나타나는 저항의 변화와 같은 전지 자체의 열화와 전지에 걸리는 부하 정도, 운전온도, 가스유량 등과 같은 작동조건 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 장기성능평가를 위하여 400 mA/cm<sup>2</sup> 부하, 750°C 조건 하에서 출력 감쇠율을 500시간 동안 측정하였다.

Fig. 8은 16셀 스택의 장기 출력감쇠율을 나타내고 있다. 온도를 하향하여 750°C로 안정화한 129시간 이후, 400mA/cm<sup>2</sup> 전류부하하에서 500시간까지의 출력 감쇠율은 2.25%였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 네 종류의 평판 음극 지지형 SOFC 스택을 설계, 제작, 운전하고 평가하였다. 모든 스택은 내부 매니폴드 형식 및 Cross flow 방식으로 설계되었다. Indec ASC2를 단전지로 사용하였으며, 유리질 밀봉재와 금속 연결재는 RIST에서 자체적으로 개발하여 제작하였다. 1매, 3매, 8매, 16매의 단전지와 각종 구성요소를 조립하고 적층하여 각 스택들을 성공적으로 제작하여 운전하였다. 운전 중에는 가스 유출이 전혀 검출되지 않았다. 최종적으로 제작된 16셀 스택의 초기 출력은

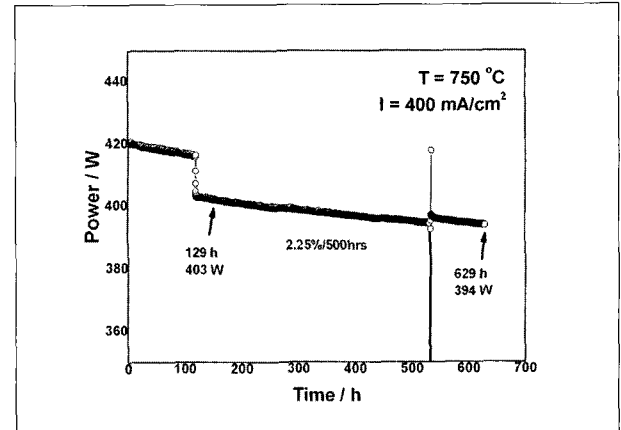


Fig. 8 Long-term power degradation of 16-cell stack

820°C에서 1000W 이상이었으며, 출력밀도는 0.77W/cm<sup>2</sup>이었다. 장기성능에 있어서는 750°C, 500 시간, 400 mA/cm<sup>2</sup> 부하에서 2.25%의 출력감쇠율을 나타내었다.

평판형 SOFC가 상업적인 의미를 가지려면 큰 출력과 안정적인 운전 능력, 그리고 무엇보다 제조비용이 저렴해야 한다는 조건을 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 음극 지지형 단전지와 금속 연결재를 사용하여 스택들을 개발하는 연구를 통하여 1kW 이상의 스택 제조기술을 확보함과 동시에, 상업화에 좀더 접근한 스택 제조가 가능함을 보였다.

## References

- (1) F. Tietz, V.A.C. Haanappel, A. Mai, J. Mertens, and D. Stöver, 2006, "Performance of LSCF cathodes in cell tests", J. of Power Sources, Vol. 156, No. 1, pp.20-22
- (2) S.C. Singhal, 2002, "Solid oxide fuel cells for stationary, mobile, and military applications", Solid State Ionics, Vol. 152-153, pp.405-410
- (3) M.C. Williams, J.P. Strakey and S.C. Singhal, 2004, "U.S. distributed generation fuel cell program", J. of Power Sources, Vol. 131, No.1-2, pp.79-85
- (4) N.Q. Minh, 1993, "Ceramic Fuel Cells", J. Am. Ceram. Soc. Vol. 76, pp.563-588
- (5) N.Q. Minh, 2004, "Solid oxide fuel cell technology-features and applications", Solid State Ionics, Vol. 174, No. 1-4, pp.271-277

- (6) K. Kendall, N.Q. Minh, S.C. Singhal, in: S.C. Singhal, K. Kendall (Eds.), 2003, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications", Elsevier, Oxford, UK, pp.197-245
- (7) Z. Cai, T.N. Lan, S. Wang and M. Dokiya, 2002, "Supported Zr(Sc)O<sub>2</sub> SOFCs for reduced temperature prepared by slurry coating and co-firing", *Solid State Ionics*, Vol. 152-153, pp.583-590
- (8) B.C.H. Steele, 2000, "Materials for IT-SOFC stacks: 35 years R&D: the inevitability of gradualness?" *Solid State Ionics*, Vol. 134, No. 1-2, pp.3-20
- (9) B. Godfrey, K. Föger, R. Gillespie, R. Bolden and S.P.S. Badwal, 2000, "Planar solid oxide fuel cells: the Australian experience and outlook", *J. of Power Sources*, Vol. 86, No. 1-2, pp.68-73
- (10) W. Bujalski, C.M. Dikwal, and K. Kendall, 2007, "Cycling of three solid oxide fuel cell types", *J. of Power Sources*, In Press, Corrected Proof, Available online 20
- (11) P. Batfalsky, V.A.C. Haanappel, J. Malzbender, N.H. Menzler, V. Shemet, I.C. Vinke and R.W. Steinbrech, 2006, "Chemical interaction between glass-ceramic sealants and interconnect steels in SOFC stacks", *J. of Power Sources*, Vol. 155, No. 2, pp.128-137
- (12) "Jülich claims SOFC performance milestone", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2002, No. 8, pp.8-9
- (13) "GE hits SECA milestone with SOFC prototype", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2006, No. 12, p.9
- (14) N. Minh, A. Anumakonda, B. Chung, R. Doshi, J. Ferrall, G. Lear, K. Montgomery, E. Ong, L. Schipper, and J. Yamanis, 1999, "High-performance, reduced-temperature SOFC technology", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2, No. 6, pp.9-11
- (15) "Versa buys strategic assets of FCE's Canadian SOFC operations", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2004, No. 12, 2004, pp.6-7
- (16) "The emergence of viable solid oxide fuel cell technology", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 3, No. 26, 2000, pp.8-11
- (17) H. Yoshida, H. Yakabe, K. Ogasawara, and T. Sakurai, 2006, "Development of envelope-type solid oxide fuel cell stacks", *J. of Power Sources*, Vol. 157, No. 2, pp.775-781
- (18) K. Matsumoto and K. Kasahara, 1998, "Long-term commitment of Japanese gas utilities to PAFCs and SOFCs", *J. of Power Sources*, Vol. 71, No. 1-2, pp.51-57
- (19) "Tokyo Gas develops low-temperature SOFC", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2003, p-5
- (20) B.W. Chung, C.N. Chervin, J.J. Haslam, A.Q. Pham, and R.S. Glass, 2005, "Development and Characterization of a High Performance Thin-Film Planar SOFC Stack" *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 152, No. 2, pp.A265-A269
- (21) N. Sakai, T. Horita, Y.P. Xiong, K. Yamaji, H. Kishimoto, M.E. Brito, H. Yokokawa, and T. Maruyama, 2005, "Structure and transport property of manganese-chromium-iron oxide as a main compound in oxide scales of alloy interconnects for SOFCs", *Solid State Ionics*, Vol.176, No. 7-8, pp.681-686
- (22) I. Antepara, I. Villarreal, L.M. Rodríguez-Martínez, N. Lecanda, U. Castro, and A. Laresgoiti, 2005, "Evaluation of ferritic steels for use as interconnects and porous metal supports in IT-SOFCs" *J. of Power Sources*, Vol. 151, pp.103-107
- (23) M. Stanislawski, E. Wessel, K. Hilpert, T. Markus, and L. Singheiser, 2007, "Chromium Vaporization from High-Temperature Alloys: I. Chromia-Forming Steels and the Influence of Outer Oxide Layers", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 154, No. 4, pp. A295-A306



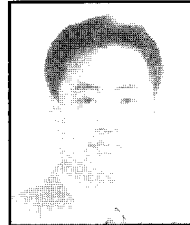
**조남웅**



1985년 한양대학교 무기재료공학과 공학사  
1990년 대관대학 화학과 이학석사  
1993년 대관대학 화학과 무기 및 물리화학 전공 이학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지프로젝트 책임연구원  
(E-mail : namung@rist.re.kr)

**황순철**



1992년 연세대학교 세라믹공학과 공학사  
1994년 연세대학교 세라믹공학과 공학석사  
2005년 포항공과대학교 신소재공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지프로젝트 책임연구원  
(E-mail : hschaha@rist.re.kr)

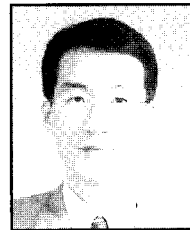
**한상무**



1986년 서울대학교 재료공학과 공학사  
1988년 한국과학기술원 재료공학과 공학석사  
1994년 한국과학기술원 재료공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지프로젝트 선임연구원  
(E-mail : smhan@rist.re.kr)

**김영우**



1985년 부산대학교 무기재료공학과 공학사  
1987년 부산대학교 무기재료공학과 공학석사  
1996년 부산대학교 무기재료공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지프로젝트 책임연구원  
(E-mail : ywkim@rist.re.kr)

**김승구**



1988년 연세대학교 세라믹공학과 공학사  
1990년 연세대학교 세라믹공학과 공학석사  
1998년 연세대학교 세라믹공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지 프로젝트 책임연구원  
(E-mail : seunggoo@rist.re.kr)

**전재호**



1987년 서울대학교 금속공학과 공학사  
1992년 POSTECH 재료·금속공학과 공학석사  
2003년 POSTECH 신소재공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지프로젝트 책임연구원  
(E-mail : jaeho@rist.re.kr)

**김도형**



1983년 서울대학교 무기재료공학과  
1985년 한국과학기술원 재료공학과 석사  
1992년 한국과학기술원 재료공학과 박사

현재 포항산업과학연구원 책임연구원  
(E-mail: dhkim@rist.re.kr)

**전중환**



1983년 서울대학교 금속공학과 공학사  
1985년 서울대학교 금속공학과 공학석사  
1988년 서울대학교 금속공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원 연료전지프로젝트 리더  
(E-mail : junjh@rist.re.kr)