

## 음극지지형 단전지를 사용한 소형 SOFC 스택의 제조 및 출력특성

정화영 · 김우식 · 최선희 · 김주선 · 이해원 · 고행진\* · 이기춘\* · 이종호<sup>†</sup>

한국과학기술연구원 나노재료연구센터  
\*연료전지개발팀 현대-기아 연구개발본부  
(2004년 8월 5일 접수; 2004년 9월 6일 승인)

## Fabrication of Small SOFC Stack Based on Anode-Supported Unit Cells and Its Power Generating Characteristics

Hwa Young Jung, Woo Sik Kim, Sun Hee Choi, Joosun Kim, Hae-Weon Lee,  
Haengjin Ko,\* Ki Chun Lee,\* and Jong-Ho Lee<sup>†</sup>

NMRC, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

\*Fuel Cell Vehicle Team, R&D Division for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation, Kyunggi-Do 445-850, Korea

(Received August 5, 2004; Accepted September 6, 2004)

### 초 록

액상응결 공정법과 일축가압성형법으로 제조된 기판위에 전해질과 양극층을 스크린 인쇄법으로 구성한 후 열처리함으로써 최종크기가  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 인 SOFC 단전지를 제조하였다. 본 연구에서는 이들 단전지와 인코넬 합금으로 제조된 접속자 그리고 가스켓형의 밀봉재를 이용하여 스택을 구성하였다. 본 연구에 사용된 스택은 연료가스와 산화가스가 교차되는 형태의 가스채널을 가지며 가스매니폴드가 내부에 구성되어 있는 형태로 설계되었다. 제작된 3단 스택의 성능을 평가해 본 결과 15 W 정도의 최고출력을 나타내었는데 이는 단전지 출력성능으로부터 예측된 최고출력치의 50% 정도에 해당되는 출력이었다. 본 연구에서는 이러한 스택성능에 영향을 주는 조정인자들과 스택디자인 인자들에 대한 분석을 수행하였다.

### ABSTRACT

In this research,  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  unit cells were fabricated via liquid condensation process and uni-axial pressing followed by the screen printing of electrolyte and cathode layer. The SOFC stack was assembled with unit cells, gasket-type sealant and metal interconnect. The stack was designed to have a single column with internal-manifold and cross-flow type gas-channels. The SOFC stack produced 15 W, which is 50% of the maximum power being expected from the maximum power density of the unit cell. Controlling factors for the proper operation of the SOFC stack and other designing factors of stack manifold and gas channels were discussed.

**Key words :** Anode-supported unit cell, SOFC stack, Sealing gasket, Metal interconnect

### 1. 서 론

연료전지(Fuel Cell)를 이용한 발전은 청정에너지원인 수소를 연료로 이용하기 때문에 화석연료가 연소될 때 나오는 오염물질을 근본적으로 줄일 수 있는 차세대 발전 방식이다. 특히 연료전지 발전은 전기화학반응으로만 전력을 생산하기 때문에 효율이 높고 소음이 없어 소형 전 원장기에서부터 대형발전장치까지 다양한 용량으로 제작이 가능하다.<sup>1)</sup> 특히 세라믹소재를 이용한 SOFC는 인산형, 용융탄산염형, 고분자형 등 여러 연료전지 유형 중에서 에너지 효율이 가장 높고 고가의 외부 개질장치 없

이도 LPG, LNG 등의 탄화가스를 직접 연료로 사용할 수 있어 기존의 연료전지들을 대체할 차세대 연료전지로 주목받고 있다. 일반적으로 SOFC는 단전지의 형태에 따라 평판형과 원통형으로 구분되는데 최근 들어 단위면적당 출력 밀도가 높고 대량생산이 용이한 평판형에 대한 연구가 더 활발하게 진행되고 있다. 평판형 고체산화물 연료전지는 지지체의 종류에 따라 전해질 지지형(Electrolyte-supported)과 전극 지지형(Electrode-supported)으로 나뉜다.<sup>2,3)</sup> 작동온도가  $1000^\circ\text{C}$  부근의 고온인 전해질 지지형 SOFC는 고온작동에 따른 밀봉재의 안정성과 고온용 접속자 소재 개발의 어려움으로 인해 상용화에 어려움이 있으며 이로 인해 최근에는  $800^\circ\text{C}$  이하에서도 작동 가능한 전극 지지형에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 전극 지지형 SOFC는 특별한 재료가 아닌 기존의 전극과 전해질 물질을 그대로 이용하면서도 작동온도를 낮출 수 있어 연

<sup>†</sup>Corresponding author : Jong-Ho Lee

E-mail : jongho@kist.re.kr

Tel : +82-2-958-5532 Fax : +82-2-958-5529

료전지의 효율향상과 성능안정에 매우 효과적이라 알려져 있다.<sup>2,5)</sup> 이렇듯 전해질 지지형 보다 상대적으로 낮은 온도인 650~800°C에서 작동이 가능한 전극 지지형 연료전지는 낮은 작동온도로 인해 값싼 금속재를 접촉자로 사용할 수 있게 되어 SOFC 스택의 경제성을 획기적으로 개선할 수가 있다.<sup>2,6-8)</sup>

한편 SOFC는 단전지 1개에서 얻어지는 전압이 약 1.1 V 수준이라 실제 전원장치로 활용하기 위해서는 일정 개수의 단위 셀을 적층하여 사용하여야 한다. 이러한 단전지의 적층형태를 스택이라고 하는데 이러한 SOFC 스택의 구성에는 전기적으로 단전지와 단전지를 연결시켜 주는 접속자와 연료와 산화제가 섞이지 않게 하는 밀봉재가 필요하게 된다. 그러나 이들 밀봉재와 접속자는 SOFC 스택의 가장 핵심부품임에도 불구하고 현재까지 개발방향이 뚜렷이 제시되고 있지 않아 SOFC의 상용화에 가장 큰 장애 요인으로 알려져 있다. 이로 인해 최근 SOFC 연구개발의 초점은 단전지를 포함한 이들 스택 요소부품들의 신뢰성과 경제성을 확보하기 위한 공정개발 및 이들 부품들의 성능을 개선하기 위한 데 맞춰져 있다.<sup>7,8)</sup>

본 연구에서는 이러한 세계적인 연구추세에 따라 상용화가 가능한 수준의 kW급 스택개발에 필요한 선행 연구로서 본 연구실에서 개발된 스택의 핵심부품인 음극지지형 단전지와 가스켓형 밀봉재를 이용해 스택을 제작하고 평가하였다. 스택제작에는 내산화성이 강한 인코넬 금속재를 접촉자로 사용하였으며 연료가스와 산화가스가 교차되는 형태의 가스채널을 가지도록 설계하였다. 제작된 소형스택은 개별 단전지의 특성은 물론 스택의 핵심부품인 밀봉재 및 접속자의 성능을 평가하는데 활용되었고 이들 성능평가로부터 상용화 규모의 대형 SOFC 스택개발에 필요한 스택설계 요소 및 스택의 운전인자들을 파악하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 스택 구성부품 제작

#### 2.1.1. 단전지 제조

Fig. 1은 음극지지체 제조 공정의 흐름도이다. 음극(anode) 지지체형 단전지의 제조방법에 대해서는 이미 선행연구에서 보고한 바 있다.<sup>9)</sup> 음극 재료로는 NiO(미국 J.T Baker 사 Nickle Oxide)와 YSZ(8 mol%, Tohso사 및 Unitec사) 분말을 원료로 사용하였으며 NiO와 YSZ의 중량비가 56 : 44가 되도록 혼합한 후 충분한 시간동안 습식 볼 밀링하였다. 혼합 분말은 액상응결법(Liquid Condensation Process : LCP)으로 과립화하여 금속몰드(8×8 cm<sup>2</sup>)에 채우고 열간 가압하여 기판형상으로 성형하였다. 열간 가압성형은 환원 후 음극의 기공율이 40~45% 수준이 될 수 있도록 압력과 유지시간을 조절하였다.

전해질 코팅을 위해 Tohso사의 TZ-8Y 분말에 페이스트

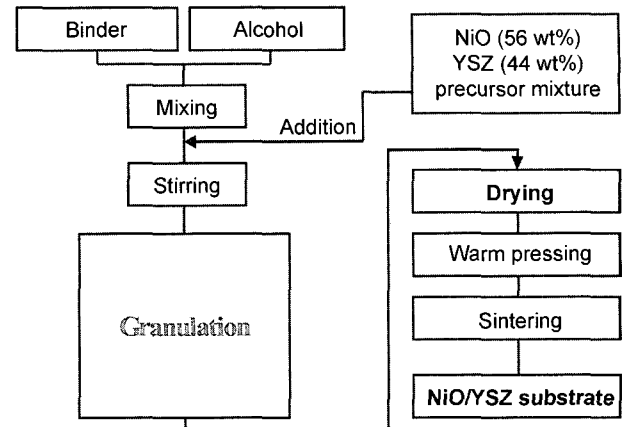


Fig. 1. Fabrication procedure of NiO/YSZ anode substrate.

용 vehicle을 첨가한 후 planetary milling과 3-roll milling을 통해 혼합, 분쇄하여 스크린 인쇄용 페이스트를 제작하였다. 제조된 페이스트는 스크린 인쇄기를 이용해 LCP로 제조한 음극성형기판 위에 3회 인쇄하고, 평탄화(levelling)와 건조과정을 거쳤다. 건조된 기판은 1°C/min의 승온속도로 250°C에서 2시간동안 열처리하여 유기물을 휘발시켰고 1400°C에서 3시간동안 동시소결 하였다.

단전지의 양극은 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Aldrich Chemicals, 99%), SrCO<sub>3</sub>(High Purity Chemicals, 99.9%), MnO<sub>2</sub>(Aldrich Chemicals, 99%)를 출발물질로 하여 Modified-GNP 방법으로 합성한 (La,Sr)MnO<sub>3</sub>을 이용하였다. 먼저 전해질 층 바로 위에는 전극반응의 유효면적을 향상시키기 위해 YSZ(일본 Tosho) 상용분말에 LSM을 60 wt% : 40 wt%로 첨가한 복합체 양극을 구성하였고 그 위에 순수한 LSM 양극층을 구성하였다. 다층 양극의 구성은 LSM-YSZ복합체와 LSM 페이스트를 각각 제조한 후 스크린 인쇄기를 이용해 LSM-YSZ/LSM 순서로 코팅하고 1200°C에서 소결하여 완성하였다.

#### 2.1.2. 밀봉재 및 접속자

스택에 사용된 접속자는 고온에서의 내산화성이 뛰어나다고 알려진 인코넬 601판재와 인코넬 600튜브를 사용하여 제조하였다. 스택 평가용 홀더에는 하판 및 상판에 인코넬 튜브가 연결되어 있는데 이 인코넬 튜브는 연료가스 및 산화가스를 공급하는 가스관인 동시에 스택에서 전류를 빼내거나 또는 기전력을 측정하는 단자로 사용되었다.

스택의 적층에는 기존연구들에 많이 사용되는 페이스트형 밀봉재 대신 내구성이 좋은 가스켓형 밀봉재를 사용하였다. 성형시 압력을 조절하여 스택조립에 적당한 두께를 가지도록 조절된 판상의 밀봉재는 스택의 내부 매니폴드 디자인에 맞게 절단 가공하여 사용하였다. 제작된 가스켓형 밀봉재는 상판과 하판사이에 위치해 연료가스와 산화가스가 서로 섞이지 않게 격리하는 역할과 동시에 상판과 하판을 절연하는 역할을 하도록 설계되었다.

## 2.2. 스택의 제작 및 평가

본 연구에서는 향후 상용화가 가능한 수준의 kW급 스택개발에 필요한 선행 연구로서 단전지를 3장 적층한 소형 스택을 제작하고 이로부터 각 스택 구성요소들의 성능을 평가하였다. 소형스택제작에 사용한 단전지와 밀봉재는 자체기술로 제작된 제품을 사용하였으며 접속자의 경우에는 아직 적절한 접속자소재가 개발되어 있지 않아 상용 인코넬 금속재를 가공하여 사용하였다. 일반적으로 적절한 접속자 소재가 사용되지 않은 경우 단전지와 접속자 사이의 접촉저항 및 분극저항으로 인해 단전지 또는 스택의 자체성능이 제대로 분석되지 못하는 경우가 많다. 이에 본 연구에서는 전극과 접속자간 계면분극의 영향을 최소화하기 위해 단전지와 금속 접속자 사이에 전류를 포집하는 역할을 해주는 집전체로 산화분위기가 유지되는 양극 쪽은 백금망울, 환원분위기가 유지되는 음극 쪽은 니켈망을 사용하였다.

양쪽 전극에 집전체를 부착시킨 단전지를 접속자 하판의 단전지 틀에 고정하고 밀봉재를 가스 매니폴드에 맞춰 설치한 후 상판을 덮는 식으로 조립하였다. 스택의 열처리는 800°C까지 분당 5°C 이하로 천천히 승온하여 밀봉재가 충분히 연화되도록 조치한 후 음극에 수소를 흘려 음극의 환원을 시작하였다. 스택의 출력특성은 환원을 시작한 후 개회로 전압(Open Circuit Voltage : OCV)이 시간에 따라 더 이상 크게 변하지 않고 안정된 것을 확인한 다음 측정하였다. 출력특성 측정에는 100 W급 연료전지 평가 시스템(Scribner, SAT 890 - 100 W)을 이용하였고 스택의 개회로 전압 및 운전 중의 출력 전압은 전압계(Keithley 196)를 사용하여 측정하였다. 연료가스는 100% 수소를 수증기 포화조를 통과시켜 사용하였고 산화가스로는 공기와 산소를 사용하였다. 스택으로 공급되는 연료 및 산화 가스는 자동유량조절기(MFC Sierra, USA)로 조절하였으며 연료가스 공급량은 이용률이 약 67~48% 되는 기준으로 수소 500 - 700 sccm, 공기 1500 sccm 또는 산소 315 sccm (이용률 53%) 정도를 공급하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 스택의 구조 및 특성

이전 선행 연구<sup>4,5,9)</sup>에서 유리만을 이용한 페이스트형 밀봉재를 적용해 본 결과 페이스트형 밀봉재는 다층스택에서와 같이 내부 가스매니폴드의 구성 등으로 밀봉부위가 늘어나는 경우 효과적인 밀봉재 구성이 어려운 것으로 나타났다. 실제 본 연구에서도 다층스택에 페이스트형 유리밀봉재를 적용해 본 결과 불균일하게 도포된 밀봉재로 인해 스택이 기울어지거나 또는 운전 중 밀봉층에 압력이 전달되는 경우 쉽게 파손되는 현상이 발견 되었다. 또한 페이스트 형태의 유리밀봉재는 접속자 안쪽으로 쉽게 흘러

러 들어가 가스관 또는 가스채널을 막아 버리거나 흘러들 어간 유리질에 의해 다른 구성성분들과 반응해 버리는 문제점이 관찰되었다. 이러한 문제들로 인해 스택 구성시 페이스트형 밀봉재를 적용하는 것은 적절치 않은 것으로 판단되어 본 연구에서는 다층 스택평가에 보다 적합한 가스켓형 밀봉재를 이용하여 스택평가를 하였다.

평가 결과 가스켓형 밀봉재를 적용하는 경우 유리 밀봉재만을 사용하는 경우 보다 스택구성 시 조립이 훨씬 용이하였으며 가스켓 자체만으로도 접속자간의 절연이 가능해 유리밀봉재를 적용할 때와 달리 추가 절연층을 넣을 필요가 없었다. 또한 가스켓형 밀봉재는 밀봉특성 자체도 유리밀봉재에 비해 떨어지지 않았으며 특히 열사이클 성능 면에서 유리밀봉재에 비해 월등한 특성을 가지고 있었다. 또한 본 연구에 사용한 가스켓형 밀봉재는 스택평가 후 단전지 및 접속자와의 분리가 쉬워 추후 대형 스택 운전 시 일부 단전지에 문제가 생겨 교체를 하게 되는 경우에도 교체작업이 수월함을 알 수 있었다. 본 연구에 적용한 가스켓형 밀봉재의 밀봉특성 및 작동성능 평가 결과에 대해선 추후 별도의 논문을 통해 보고할 예정이다.

Fig. 2에 가스켓형 밀봉재를 포함하여 평가용 스택을 구성하는데 사용한 금속 접속자 및 단전지를 나타내었다. 그림에서 보듯이 스택제작에는 5×5 단전지 3장과 밀봉 가스켓 3장이 사용되었으며 상판과 하판을 포함한 4장의 금속 접속자가 사용되었다. 본 연구에서 사용한 스택은 가스켓 형태의 밀봉재를 적용하기에 페이스트형 밀봉재를 사용하는 경우와 달리 별도의 절연판 없이 제작할 수 있도록 설계되었다. 스택평가는 평가용 스택전체를 전기로 안에 넣고 운전하는 방식을 채택하였으며 전기로에는 운전 시 밀봉효과를 증대시키기 위해 외부적으로 스프링 로딩을 하여 스택에 압력을 가해줄 수 있는 장치를 설치하였다.

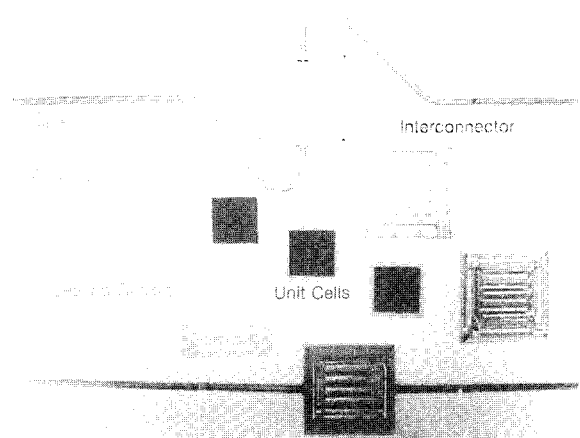


Fig. 2. Configuration of various stack components; cells, sealing gaskets and interconnects for the construction of 3-cell stack.

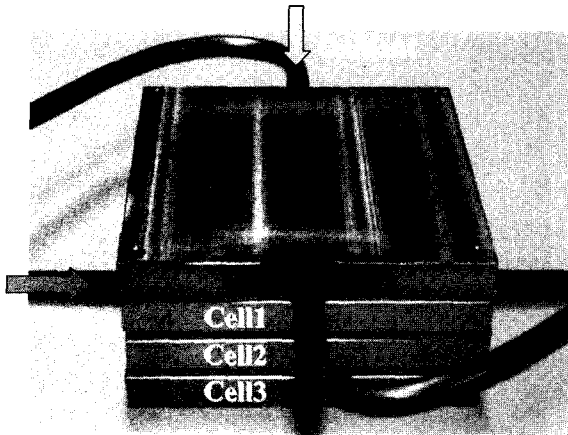


Fig. 3. Assembled scheme of 3-cell stack based on  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  unit cell.

스택에 사용된 각 접속자들은 내부 분배형식과 교차흐름 방식의 구조를 가지도록 매니폴드가 설계되었으며, 연료가스 및 산화가스가 이를 통하여 각각의 연료극과 공기극에 주입되도록 제작되었다. 연료가스 및 산화 가스는 각각 하판 및 상판에 용접된 인코넬 튜브를 통해 공급되는데 각 층마다 연료가스와 산화가스가 단전지를 사이에 두고 수직으로 교차하여 흐르도록 구성하였다. 이때 사용하는 인코넬 튜브는 가스 공급이외에도 단전지에서 전류를 빼내거나 또는 기전력을 측정하는 단자로도 사용되어 외부 평가시스템으로 연결되었다. 스택의 양극과 음극 쪽 가스 매니폴드는 산화가스를 공기로 사용하는 경우의 유량을 고려하여 양극 매니폴드를 다소 크게 설계하였다. 이와 같은 방식으로 제작한 3단 스택의 최종 구성도를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2. 스택 성능평가

작동온도  $800^\circ\text{C}$ , 수소와 공기를 각각 연료와 산화제로 사용하여 얻은 3단스택의 출력특성과 스택의 단위면적당 출력밀도를 단전지와 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)의 결과에서 보면 3단 스택의 기전력은 약  $3.3 \text{ V}$  였으며 단전지 당 약  $1.1 \text{ V}$ 의 기전력을 나타내었다. 스택의 평균 최고출력밀도는 약  $0.25 \text{ W/cm}^2$  정도였으며 단전지의 유효면적으로 환산시 스택의 전체 출력용량은  $12 \text{ W}$  정도로 나타났다.

한편 스택의 출력성능을 단전지의 출력성능과 비교해 본 Fig. 4(b)의 결과에서 보면 스택의 출력이 단전지가 나타내었던 평균 최고출력밀도  $0.45 \text{ W/cm}^2$  보다는 매우 낮은 것으로 나타났다. 단전지에 비해 스택의 출력밀도가 낮은 원인은 일차적으로 스택구성에 사용된 단전지의 자체성능이 낮은 것으로 볼 수 있다. 그러나 본 연구에 사용된 단전지의 경우 작동성능의 재현성은 선행연구를 통해 충분히 확인된 상태이므로 스택에서의 성능감소는 대

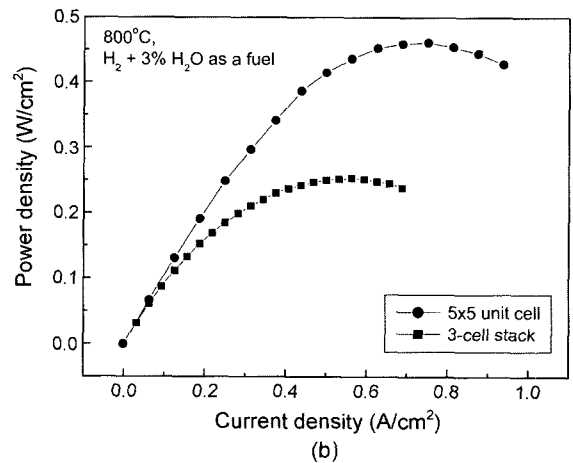
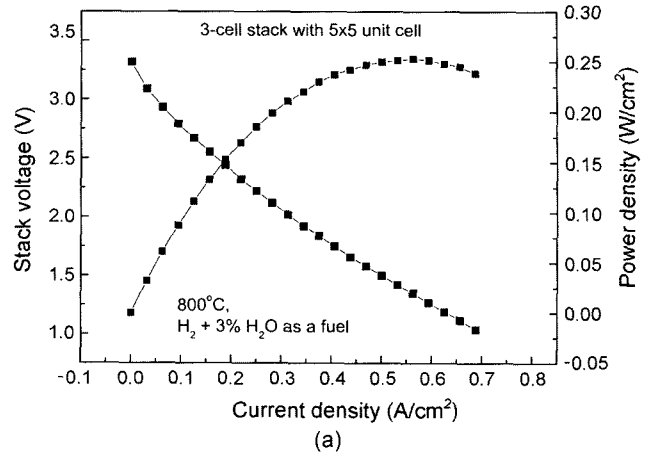


Fig. 4. (a) power generating characteristics of 3-cell stack with  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  unit cell at  $800^\circ\text{C}$  and (b) comparison of output power density between stack and unit cell at  $800^\circ\text{C}$ .

부분 스택 디자인에서의 문제점에 기인한 것으로 보인다. 즉 스택 디자인이나 스택구성이 최적화되지 못해 전극과 접속자간의 접촉저항이 커졌거나 연료공급이나 산화가스 공급이 원활하지 못해 전극에서의 성능손실로 이어진 것으로 보인다.

본 연구에서는 위와 같은 스택성능의 감소원인을 알아보기 위해 스택의 각 층별로 성능을 평가해 보았다. Fig. 5는 같은 운전 조건에서 스택의 각 층별로 기전력을 측정하고 층별 출력밀도를 비교해 본 결과이다. Fig. 5에서 구분한 cell 1, 2, 3는 앞서 Fig. 3에서 보인바와 같이 산화가스 공급관에 가까운 단전지로부터 차례대로 구분한 것이다.

Fig. 5의 결과에서 보면 스택을 구성하는 각 층별 성능차가 심하게 나고 있는데 대체적인 경향성은 연료 공급관에 가까울수록 출력이 낮게 나옴을 볼 수 있다. 이러한 결과는 아래쪽 단전지의 성능이 떨어져서 이기 보다는 스택디자인상의 문제로 인해 산화가스 공급이 원활치 못해 생긴 현상으로 보인다. 이를 확인해 보기 위해 본 연구에서는 산화가스를 공기에서 산소로 교체하고 이에 따른 스

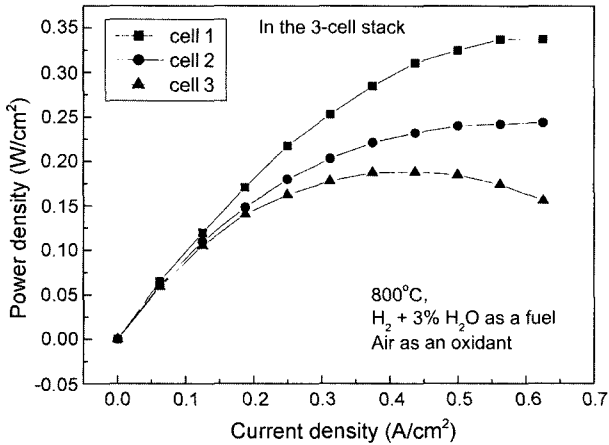


Fig. 5. Power generating characteristics of each cells in stack at 800°C (H<sub>2</sub> as a fuel and air as an oxidant).

택의 출력성능변화를 평가해 보았다. 산화가스를 산소로 바꾸는 경우 같은 가스유량하에서 스택 내 압력을 바꾸지 않고서도 공기에 비해 5배의 산소공급효과를 낼 수 있어 산화가스 공급조건에 의한 성능차이를 확실히 구분할 수 있을 것으로 기대하였다.

Fig. 6은 산화가스를 산소로 바꾼 후 동일한 운전 조건에서 실험한 스택의 성능평가 결과이다. Fig. 6(a)의 결과에서 보면 산화가스를 산소로 바꾸어 산화가스 공급량을 늘려준 경우 산화가스관으로부터 먼 쪽에 위치하였던 층의 성능이 크게 향상된 것을 볼 수 있으며 대체적으로 각 층간의 성능차이가 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. 또한 산화가스의 공급을 개선함으로써 전체적인 스택의 출력도 개선되어 최고출력이 앞선 12 W 보다 크게 개선된 15 W의 출력을 나타내었다.

산화가스를 산소로 하였을 때 나타나는 성능향상의 원인을 좀더 구체적으로 살펴보기 위해 개별 출력특성을 Fig. 6(b)에 함께 비교하여 나타내었다. Fig. 6(b)의 결과에서 보면 산소를 산화가스로 사용한 경우 활성화분극이 주요 성능손실요인으로 작용하는 저전류 영역에서의 성능개선이 눈에 띄게 향상됨을 볼 수 있다. 이는 산화가스가 산소로 바뀌에 따라 유량 자체는 1500 sccm에서 315 sccm로 감소되었지만 스택디자인에서 오는 가스 흐름의 불안정한상태가 안정한 상태(steady state)로 변화되면서 공기극인 양극 표면의 촉매활성이 증대되었기 때문으로 보인다.<sup>10,11)</sup> 또한 산소가스만을 공급하는 경우 공기에 비하여 상대적으로 산소 이온의 표면확산이 증가하는 것도 활성화분극손실의 감소요인으로 작용된 것으로 보인다.<sup>11,12)</sup> 이렇듯 산화가스가 공기에서 산소로 바뀌는 경우 단전지의 ohmic 저항손실 성분은 크게 달라지지 않으면서 활성화분극 손실은 줄어들므로써 스택의 성능이 향상 되는 것으로 생각된다.

한편 공기극인 양극의 운전조건은 동일하게 유지하면서 연료극인 음극의 연료가스 공급조건만을 변화시키며

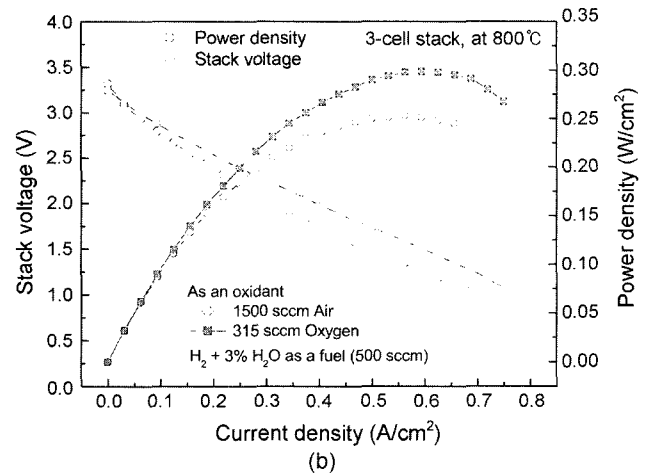
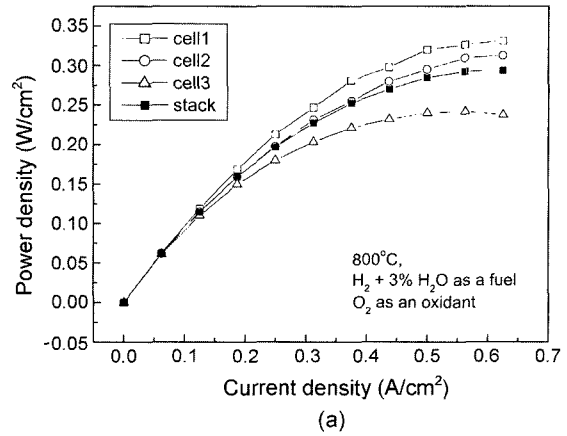


Fig. 6. (a) power generating characteristics of each cells in stack at 800°C (H<sub>2</sub> as a fuel and oxygen as an oxidant) and (b) comparison of power generating characteristics under different oxidant supplying condition.

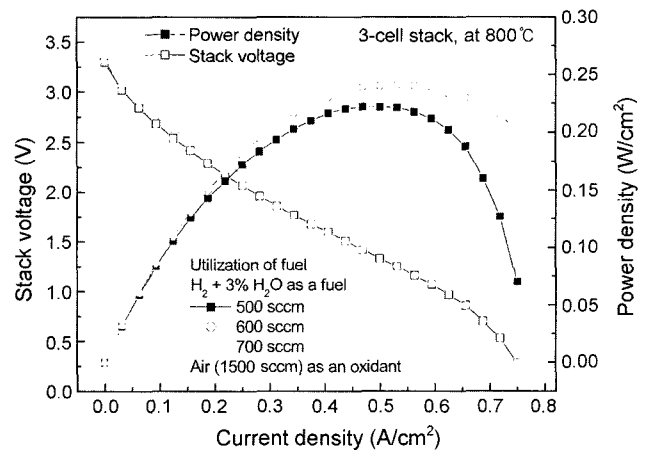


Fig. 7. Comparison of stack performance under different fuel supplying conditions at 800°C.

얻은 출력특성 평가결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 결과에서 보면 연료가스의 유량이 증가함에 따라 ohmic 손실은 산화가스를 변화시켰을 때와 마찬가지로 거의 변

화가 없는 것으로 나타났다. 이는 단전지를 구성하는 전극이나 전해질 소재들의 전도도와 접촉저항 등이 주어진 산소분압조건에서 거의 변하지 않음을 의미한다. 그러나 연료극의 경우 공기극에서와는 달리 연료공급조건이 변하며 활성분극 영역과 농도분극영역이 모두 달라지고 있는데 연료가스 공급량이 커질수록 두 종류의 분극손실이 모두 개선되는 쪽으로 변화됨을 알 수 있었다. 특히 연료가스의 공급량이 작을수록 측정 변수 범위내에서 농도분극에 의한 효과가 뚜렷하게 나타나고 있는데 연료극의 유량이 500 sccm인 경우 농도분극에 의한 효과가  $0.7 \text{ A/cm}^2$  부근에서부터 나타남을 볼 수 있다. 이러한 농도분극에 의한 성능변화가 연료극쪽에서 더 민감하게 나타나는 이유는 본 연구에서 채택한 단전지가 음극지지형 단전지라 연료극인 음극내에서의 가스확산이 전체 성능을 결정짓는 중요한 반응기구로 작용하기 때문이다.

한편 스택의 최대출력밀도는 연료가스가 500 sccm에서 700 sccm으로 상승시 약 15% 상승하였는데 이러한 결과는 단전지만을 평가할 때 얻어진 연료가스 공급량에 따른 성능향상 결과와 유사한 결과였다. 이와 같이 산화제 가스나 연료가스의 공급조건에 의한 성능변화로 볼 때 본 연구에서 사용한 스택의 디자인에는 연료극이나 산화극 쪽 모두 가스채널 설계나 매니폴드 설계가 최적화 되지 않은 것으로 보인다. 따라서 향후 전산모사 기법 등을 통한 스택구조와 성능간의 상관관계 분석을 통해 보다 최적화된 스택을 개발해야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

1. 본 연구에서는 새로이 도입한 역상응결법과 열간가압성형법을 통해 성형공정이나 양산화 공정에 보다 적합한 단전지를 제조할 수 있었다. 또한 기존 연구들에 많이 쓰이는 페이스트형 밀봉재가 가지는 밀봉재 적용상의 어려움과 밀봉효과의 불안정성을 극복하기 위해 보강재를 이용한 가스켓형 밀봉재를 개발하고 이로부터 보다 안정된 밀봉재 적용방법을 확립하였다.

2. 본 연구에서 새로이 개발된 단전지와 밀봉재를 사용하여 3단 소형스택을 제조하고 평가해 본 결과 최고출력 15 W를 얻을 수 있었으며 스택을 구성하는 단전지나 밀봉재가 원활히 작동하고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 스택의 성능을 결정짓는 스택설계 및 운전조건들에 대한 평가를 통해 스택의 운전 및 성능에 영향을 주는 인자들을 탐색하였다. 결과 스택의 성능은 개별 단전지의 성능은 물론 스택디자인에 의해 결정지어지는 접촉저항이나 연료, 산화가스 공급조건에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었고 이로부터 최고의 스택성능을 내기 위해서는 가스 매니폴드 및 스택 유로설계서부터 최적화되어야 함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 과학기술부지원으로 수행하는 국가지정연구실 사업과 현대자동차 수탁과제에서 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cells," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
2. P. K. Srivastava, T. Quach, Y. Y. Duan, R. Donelson, S. P. Jiang, F. T. Ciacchi, and S. P. S. Badwal, "Electrode Supported Solid Oxide Fuel Cells: Electrolyte Films Prepared by DC Magnetron Sputtering," *Solid State Ionics*, **99** 311-19 (1997).
3. W. Bai, K. L. Choy, R. A. Rudkin, and B. C. H. Steele, "The Process, Structure and Performance of Pen Cells for the Intermediate Temperature SOFCs," *Solid State Ionics*, **113-115** 259-63 (1998).
4. J.-H. Lee, G. D. Kim, Y. B. Sohn, H.-W. Lee, S. W. Kim, H. S. Song, and G. H. Kim, "Power Generating Characteristics and Long Term Stability of the Anode Supporting Type SOFC," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37** [9] 847-55 (2000).
5. J.-H. Lee, J. W. Heo, D. S. Lee, J. Kim, G. H. Kim, H. W. Lee, H. S. Song, and J. H. Moon, "The Impact of Anode Microstructure on the Power Generating Characteristics of SOFC," *Solid State Ionics*, **158** 225-32 (2003).
6. D. Simwonis, A. Naoumidis, F. J. Dias, J. Linke, and A. Morpoulou, "Material Characterization in Support of the Development of an Anode Substrate for Solid Oxide Fuel Cells," *J. Mater. Res.*, **12** 1508-18 (1997).
7. W. Z. Zhu and S. C. Deevi, "Opportunity of Metallic Interconnects for Solid Oxide Fuel Cells: A Status on Contact Resistance," *Mater. Res. Bull.*, **38** 957-72 (2003).
8. T.-L. Wen, D. Wang, H. Y. Tu, M. Chen, Z. Lu, Z. Zhang, H. Nie, and W. Huang, "Research on Planar SOFC Stack," *Solid State Ionics*, **152-153** 399-404 (2002).
9. H. Y. Jung, T. W. Roh, J. Kim, H.-W. Lee, H. Ko, K. C. Lee, and J.-H. Lee, "Power Generating Characteristics of Anode-Supported SOFC Fabricated by Uni-Axial Pressing and Screen Printing," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [6] 456-63 (2004).
10. T. Tsai and S. A. Barnett, "Effect of LSM-YSZ Cathode on Thin-Electrolyte Solid Oxide Fuel Cell Performance," *Solid State Ionics*, **93** 207-17 (1997).
11. J. D. Kim, G. D. Kim, J. W. Moon, Y. P. H.-W. Lee, K. Kobayashi, M. Nagai, and C. E. Kim, "Characterization of LSM-YSZ Composite Electrode by AC Impedance Spectroscopy," *Solid State Ionics*, **143** 379-89 (2001).
12. E. P. Murray, T. Tsai, and S. A. Barnett, "Oxygen Transfer Processes in (La,Sr)MnO<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Stabilized ZrO<sub>2</sub> Cathodes: An Impedance Spectroscopy Study," *Solid State Ionics*, **110** 235-43 (1998).