

혼합전도체 LSCF(La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃) 양극의 기공률에 따른 음극지지형 단전지의 출력특성 평가

윤중철*** · 김우식** · 김형철** · 이종호**† · 김주선** · 이해원** · 김병호*

*고려대학교 재료공학과

**한국과학기술연구원 나노재료연구센터

(2004년 12월 31일 접수; 2005년 2월 17일 승인)

Effect of Cathode Porosity of Mixed Conducting La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃ on the Power Generating Characteristics of Anode Supported SOFCs

Joong-Cheul Yun,*** Woo Sik Kim,** Hyoungchul Kim,** Jong-Ho Lee,**†
Joosun Kim,** Hae-Weon Lee,** and Byong-Ho Kim*

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Nano-Materials Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

(Received December 31, 2004; Accepted February 17, 2005)

초 록

단전지의 성능을 혼합전도체인 LSCF 양극의 미세구조, 특히 전극반응에 필요한 표면적의 양과 연관되는 양극의 기공률의 변화에 따라 평가하였다. 기공률이 서로 다른 양극을 제조하기 위해 미세한 양극분말과 조대한 양극분말의 혼합비를 달리하여 양극을 제조한 결과 양극의 기공률을 각각 14, 23, 27, 39%로 얻을 수 있었다. 양극 기공률이 서로 다른 4종류의 단전지에 대한 직류 전류차단법과 교류임피던스법을 이용한 전기화학적 평가 결과 전극에서의 분극은 양극의 기공률이 증가할수록 감소하는 결과를 얻었다. 이러한 분극특성은 양극의 기공률이 증가하며 전극반응에 필요한 활성면적이 증가했기 때문으로 추론되며 이러한 이유로 단전지의 성능 또한 양극의 기공률이 증가하면서 향상되는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

We analyzed the unit cell performance against the cathode porosity, which is supposed to be closely related with active sites for the cathode reaction. In order to fabricate the unit cells with different porosity in the cathode layer we changed the mixing ratio of fine and coarse LSCF cathode powders. The final porosity of each cathode layer was 14, 23, 27, 39% respectively. According to the electrochemical analysis of unit cell performance via DC current interruption and AC impedance method, the electrochemical polarization resistance was diminished as the cathode porosity increased. The decrease of polarization resistance was attributed due to the increase of active reaction sites and the enhancement of overall unit cell performance could be explained in the same line.

Key words : SOFC, Mixed conducting cathode, LSCF, Unit cell performance, Polarization

1. 서 론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell : SOFC)의 성능은 단전지를 구성하는 구성성분인 전해질, 음극(연료극), 양극(공기극)의 개별특성 및 그 조합에 의해 결정된다. 따라서 각 구성성분들의 특성이 최적화되지 못하면 높은 단전지 성능을 구현할 수 없다. 초창기 고체산화물을 이용한 연료전지의 형태는 주로 고체전해질을 지지체로 사용했던 전해질 지지형이었다. 초창기 전해질 지지형

SOFC에서의 최대 성능손실요인은 단전지성분 중 가장 큰 비저항을 가진 전해질에서의 저항손실이었다. 이로 인해 전해질 지지형 단전지는 전해질에서의 저항손실을 최소화 하기 위해 900 - 1000°C 정도의 고온에서 사용하였다. 그러나 이러한 고온작동 조건은 재료의 열화는 물론 제조단가를 상승시키는 요인으로 작용해 SOFC 상용화에 있어 최대 걸림돌이 되었다. 따라서 최근에는 전해질의 두께를 감소시킴으로써 전해질에서의 손실을 최소화할 수 있는 전극지지형, 그 중에서도 음극을 지지체로 사용한 음극지지형 단전지가 주 개발대상이 되었다.^{1,2)}

한편 전해질 두께가 수백 μm 이었던 전해질 지지형에 비해 음극지지형 단전지는 전해질 두께를 10 μm 이내로 줄임으로써 전해질에서의 성능손실을 크게 줄일 수 있었

†Corresponding author : Jong-Ho Lee

E-mail : jongho@kist.re.kr

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

다. 이로 인해 음극지지형 단전지는 800°C 이하의 온도에서도 작동이 가능하였으며 최근 들어선 700°C 이하로까지 작동 온도영역을 넓혀가고 있다. 지금까지 전해질에서의 저항손실이 줄어든 음극지지형 단전지에서의 최대손실 요인은 양극에서의 분극 손실로 알려져 있다. 이로 인해 현재 음극지지형 단전지의 성능향상을 위한 최대이슈는 양극특성을 최적화하는 데 있으며 특히 작동온도를 700°C 이하로 낮추려는 저온형 SOFC 개발에 있어서는 양극에서의 분극 손실을 최소화하기 위한 새로운 소재의 개발 및 전극구조 최적화에 많은 연구가 집중되고 있다.^{3,4)}

현재까지 SOFC의 양극재료로 가장 널리 채택되어 왔던 소재는 La, Sr, Mn으로 이루어진 perovskite 구조의 $(La_{1-x}Sr_x)MnO_3$ 이었다. 그러나 전자전도성이 우세하다고 알려진 LSM은 산소환원계수가 매우 낮아 양극에서의 산소환원반응이 2차원 평면의 삼상계면(LSM/전해질/기공)으로만 제한돼 양극에서의 분극이 크다는 단점이 지적되어 왔다. 특히 작동온도가 내려갈수록 산소환원 반응에 대한 분극이 커져 800°C 이하의 중저온형 SOFC에는 적용하는데 무리가 있었다. 이를 해결하기 위해 최근에는 전자전도체인 LSM에 이온전도성을 가진 YSZ(Yttria Stabilized Zirconia)를 혼합함으로써 양극에서의 산소환원반응에 필요한 삼상계면을 전극내부로까지 확장한 복합체 양극이 많이 적용되고 있다. 실제 복합체 양극을 사용하는 경우 산소환원반응에 대한 분극저항을 크게 낮출 수 있어 LSM 전극에 YSZ가 50 wt% 첨가되었을 때 분극저항이 $0.77 \Omega cm^2$ 에서 $0.16 \Omega cm^2$ 로 1/5 정도로 감소한다고 보고된 바 있다.⁵⁻⁷⁾

하지만 LSM-YSZ와 같은 복합체 양극도 700°C 이하의 저온에서는 분극저항이 커져 최근 저온용 SOFC에는 LSC($La_{0.8}Sr_{0.2}CoO_3$), SSC($Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_3$), LSCF($La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$)와 같은 혼합 전도체물질들이 연구되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 이온전도성과 전자전도성을 함께 가지는 혼합전도체 산화물은 전극에서의 산소환원 반응이 삼상계면으로만 제한되지 않고 양극표면 전체에서 가능해 양극에서의 분극손실을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상되고 있다.

본 연구에서 양극물질로 채택한 LSCF도 전자전도체인 perovskite 구조의 $LaCoO_3$ 에 Sr, Fe이 첨가되어 이온전도성이 부가된 혼합전도체 소재로서 전극반응이 양극표면 전체에서 이루어질 것으로 예상되고 있다. 본 연구에서는 이러한 혼합전도체 양극의 특성을 고려하여 전극반응에 필요한 활성면적이 양극의 미세구조에 따라 달라지는 경우 전체 성능에 어떤 영향을 줄 것인지 관찰하기 위해 혼합전도체 양극의 미세구조를 달리한 단전지를 제작하고 그 양극구조에 따른 분극 특성 및 출력밀도를 비교 분석하였다.

2. 문헌 연구

고체산화물 연료전지(SOFC)는 산소 분압차에 의해서

작동되는 일종의 전기화학전지이다. SOFC는 전해질 양단에 걸린 산소의 화학 포텐셜(chemical potential) 차이로 인해 공기극(cathode)에서 산화가스의 환원반응이 일어나고 이때 생성된 산소이온이 전해질을 통해 이동하면서 연료극(anode)에서 연료의 산화반응을 유발한다. SOFC는 이러한 두 전극에서의 전기화학반응시 생성된 전자가 외부 회로를 통해 전달되면서 전기에너지를 발생시키게 된다.

이러한 원리에 의해 작동되는 SOFC는 전해질 양단에 걸린 산소분압차에 의해 식 (1)의 Nernst 식에 따른 이론적인 기전력(electromotive force: V_{emf})을 나타내게 된다.¹¹⁾

$$V_{emf} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2, cathode}}{P_{O_2, anode}} \quad (1)$$

여기서 R 은 기체상수, T 는 절대온도, F 는 Faraday 상수, P_{O_2} 는 산소분압을 나타내며 이러한 이론 기전력은 SOFC에서 얻을 수 있는 최대 전위차를 의미한다. 그러나 이러한 최대 기전력은 연료전지가 개회로 상태일 때만 유지되며 연료전지의 작동 중에는 여러 비가역적인 요소들에 의해 그 전위값이 낮아지게 된다. SOFC의 작동 중에 발생하는 이러한 비가역적인 요소는 ① 전해질에서의 이온 흐름이나 전극에서의 전자 흐름을 방해하는 요소인 ohmic 저항성분에 의한 분극(Ohmic polarization: η_{ohm}), ② 전극 표면에서의 전기화학반응 속도가 충분히 빠르지 않기 때문에 발생하는 활성화분극(activation polarization: η_{act}) 그리고 ③ 전극에서의 전기화학반응에 참여하는 반응물이나 전극반응 후 생성된 생성물의 이동이 원활치 못해 발생하는 농도분극(concentration polarization: η_{conc}) 등 크게 세 가지로 나뉘어 진다.^{12,13)}

한편 전지에서의 저항분극(η_{ohm})은 전지 구성 성분들의 ohmic 저항성분에 의해 나타나는 것으로 식 (2)와 같다.

$$\eta_{ohm} = ir \quad (2)$$

여기서 i 는 전지에 흐르는 전류, r 은 전지의 ohmic 저항이다.

또한 전극에서의 활성화분극과 농도분극은 연료전지의 음극 및 양극에서 모두 일어날 수 있으므로 아래와 같이 각 전극별로 활성화분극과 농도분극의 합으로 나타낸다.

$$\eta_{cathode} = \eta_{act}(cathode) + \eta_{conc}(cathode) \quad (3)$$

$$\eta_{anode} = \eta_{act}(anode) + \eta_{conc}(anode) \quad (4)$$

따라서 실제로 연료전지에서 얻을 수 있는 기전력은 식 (5)와 같이 단전지 구성성분들의 ohmic 저항에 의한 손실과 각 전극에서의 분극손실을 차감한 기전력으로 나타난다. 이러한 연료전지 작동중의 기전력 변화를 Fig. 1에 나타내었다.

$$V = V_{emf} - ir - \eta_{cathode} - \eta_{anode} \quad (5)$$

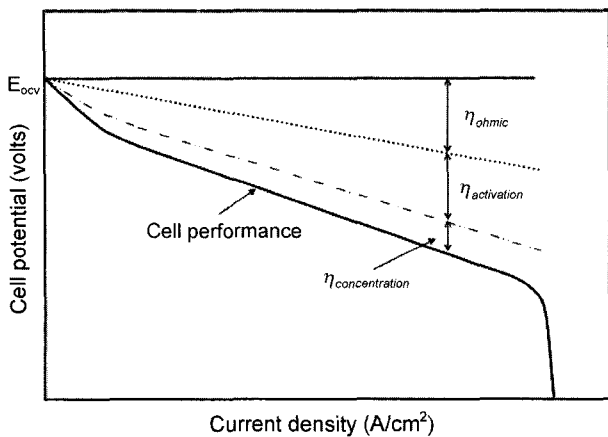


Fig. 1. Typical current-voltage characteristics for an operation of unit-cells.

그림에서 보듯이 연료전지 작동 중 발생하는 기전력은 이론적인 기전력에서 전극이나 전지에서 분극저항에 의한 전위손실을 뺀 것이 되므로 이러한 저항분극, 전극분극을 줄여야만 높은 출력을 낼 수 있게 된다.

3. 실험 방법

단전지를 제조하기 위해 먼저 GDC(Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95}, Rhodia, average size = 0.16 μm, surface area = 12.3 m²/g)와 NiO (J.T Baker, average size = 0.8 μm, surface area = 2.87 m²/g)를 혼합하여 일축 가압 성형법으로 지름 35 mm의 음극 성형체를 제조하였다. 제조된 음극 성형체 위에는 GDC 분말에 용매, 분산제, 바인더와 가스체를 섞어 Planetary Milling(Fritsch, plenerisette 5)을 이용하여 제조된 페이스트를 이용하여 스크린 인쇄법으로 전해질 층을 형성한 후 1300°C에서 두 시간 동안 소결하여 치밀한 전해질 막을 형성하였다.

양극 재료는 혼합전도성을 가진다고 알려진 LSCF를 사용하였으며¹⁴⁾ 양극 기공률의 변화에 따른 단전지의 성능을 평가하고자 크기가 다른 두 가지 LSCF 분말의 혼합비를 달리하여 양극 페이스트를 제조하였다. 양극 페이스트 제조시 사용한 분말은 Rhodia사의 LSCF(average size = 10.5 μm, surface area = 8 m²/g)와 Nextech사의 LSCF(average size = 0.2 μm, surface area = 16 m²/g)였으며 조대한 Rhodia사 분말의 비율을 0, 25, 50, 75% 무게 비율로 혼합하여 4가지 조성의 양극 페이스트를 준비하였다.

제조된 양극 페이스트는 소결된 전해질 위에 지름 1 cm의 원형 스크린을 사용하여 코팅하였으며 1150°C에서 2 시간 동안 소결을 하여 기공률이 다른 4종류의 단전지를 완성하였다. 이때 제조된 양극의 두께는 기공률에 상관없이 35 μm 정도로 균일하게 제조하여 양극두께에 따른 특성차이를 배제하였다. 전체적인 단전지 제조공정의 공정

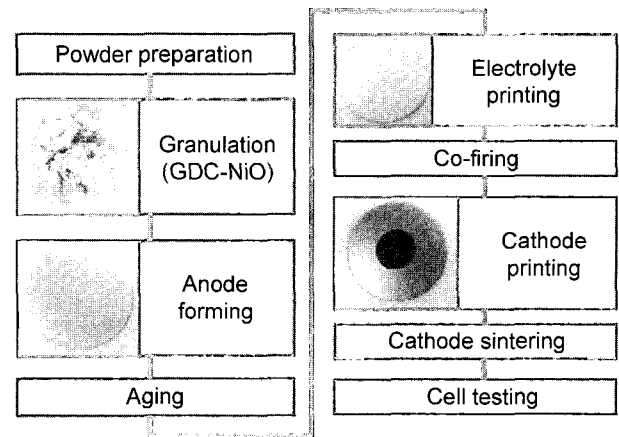


Fig. 2. Flow diagram of unit cell fabrication.

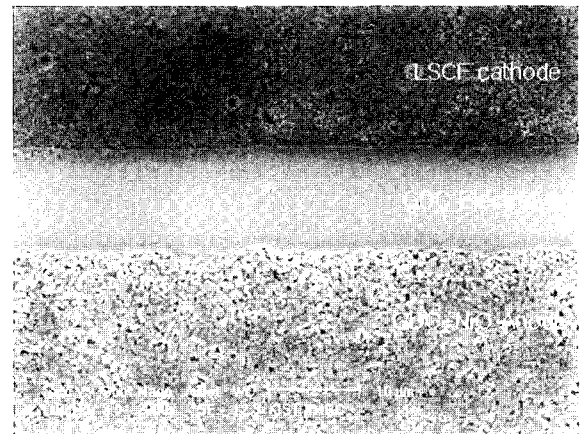


Fig. 3. Cross-sectional view of GDC based unit cell with LSCF cathode.

흐름도를 Fig. 2에 정리하였으며 완성된 단전지의 미세구조를 Fig. 3에 나타내었다.

단전지 성능 평가시 음극에는 수소를 양극에는 공기를 자동유량조절기(MGF-5S, PSPlasma사, Korea)를 통해 공급 하였으며 양극에는 공기를 200 sccm, 음극에는 수소 100 sccm를 공급하였다. 단전지의 성능과 분극저항 측정 은 직류전류-전압법으로 평가하였으며 직류 전류차단법(DC current interruption method)과 교류 임피던스법(AC impedance method)으로 단전지에서의 저항손실과 전극에서의 분극손실을 분석하였다. 교류 임피던스법으로 측정 시 음극에는 counter 전극과 counter 전극에 대한 reference 전극을 양극에는 working 전극과 working 전극에 대한 reference 전극을 연결하는 4단자법을 적용하였고 Solartron 1260 Frequency Response Analyzer와 Solartron 1278 Electrochemical Interface를 이용하여 측정하였다. 직류 전류차단법을 적용시 직류전류는 Source meter(model 2430, Keithley사, USA)를 이용하여 공급하였으며 전류차단시의 전압감쇠신호는 Digital oscilloscope(Waverunner, LeCroy사,

USA)를 사용하여 측정하였다. 직류전류-전압법으로 단전지의 출력성능을 평가시에는 Source meter(model 2430, Keithley사, USA)를 사용하여 인가된 직류전류에 대한 전압을 측정하였다.¹⁵⁾

4. 결과 및 고찰

혼합 전도체인 LSCF 양극의 비표면적을 변화시키기 위해서, 본 연구에서는 조대분말과 미세분말을 혼합하여 양극 페이스트를 제조하였다. 양극의 기공률은 상용 이미지 분석프로그램인 Image Pro Plus(Media cybernetics사, USA)를 이용하여 화상 분석법을 통해 분석하였다. 또한 2차원 이미지에서 기공상의 둘레 길이는 3차원 양극구조에서의 비표면적에 비례한다는 점에 착안해 화상분석법으로 이들 기공둘레를 측정함으로써 전극반응자리로 작용하는 다공성 양극의 상대적인 비표면적의 차이를 유추해 내었다. 이러한 화상분석법은 선행연구결과에 따른 것으로 오차범위 5% 이내에서 분석할 수 있었다.¹⁶⁾ Table 1에는 이 같은 화상분석법을 통해 측정된 조성에 따른 양극의 기공률과 기공의 둘레길이(perimeter) 값을 조성별로 정리해 놓았다. Table 1의 결과에서 보면 본 연구에서 제작한 양극의 경우 미세한 분말과 조대한 분말이 각각 50%씩 섞인 조성에서 가장 큰 기공률을 나타내었으며 기공의 둘레길이 또한 최대값을 나타내었다.

LSCF 양극의 기공률이 단전지 출력에 어떤 영향을 주

는지 알아보려고 기공률이 다른 4종류의 단전지에 대하여 출력 밀도를 측정하고 이를 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 14%의 기공률을 나타낸 LSCF0 조성의 단전지는 650°C에서 약 0.2 W/cm²의 출력을 나타내었으나 기공률이 39%로 증가한 LSCF50 단전지는 650°C에서 0.43 W/cm²의 출력을 나타내었다. 즉, 양극에서의 기공률이 증가할수록 단전지의 출력밀도가 증가되었으며 이는 음극과 전해질의 조건이 동일한 조건에서 나타난 성능의 차이라 양극의 기공률이 증가할수록 양극에서의 분극저항이 감소되어 성능이 향상된 것이라 생각할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 양극구조의 차이에 따른 단전지에서의 분극성분을 분석하기 위해 전류차단법으로 먼저 ohmic 저항에 의한 분극성분을 분리하였다. 일반적으로 전극반응에 의한 분극은 ohmic 저항에 의한 분극에 비해 반응시간이 현저히 느리기 때문에 순간적인 전류차단시 일정한 시간을 두고 전위가 이완되게 된다. 따라서 전류차단법을 통해 ohmic 저항성분을 분리하기 위해선 수 ms 시간 내에 벌어지는 전압변화를 정확히 잡아낼 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 수 ms 동안의 전압변화를 측정할 수 있는 digital oscilloscope를 사용하여 초기 전압 변화치를 구해 내었다.

Fig. 5는 이 같은 전류차단법시 나타나는 전형적인 전압이완 현상을 나타낸 그림으로서 그림의 결과에서 보면 전류차단 순간 순간적인 전압변화 후에 서서히 전압이 이완되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 수 ms내의 시간 안에

Table 1. Cathode Composition and Its Related Microstructural Property (Sintered at 1150°C for 2 h)

Sample	LSCF0	LSCF25	LSCF50	LSCF75
Coarse powder (wt%)	0	25	50	75
Fine powder (wt%)	100	75	50	25
Porosity (%)	14.0 ± 0.7	23 ± 1	39 ± 2	27 ± 1
Perimeter (mm)	2.43 ± 0.05	2.89 ± 0.06	3.6 ± 0.1	2.96 ± 0.09

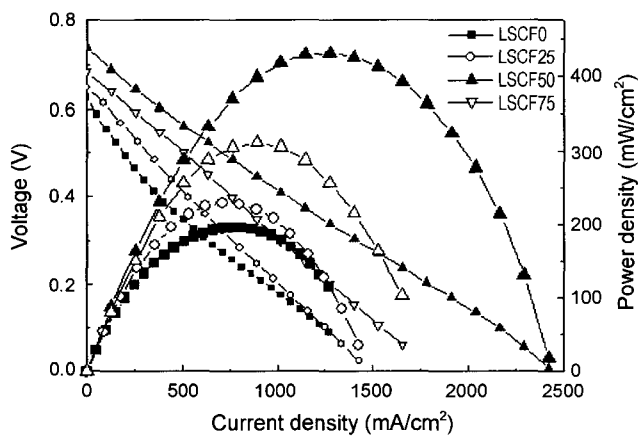


Fig. 4. Power generating characteristics of the unit cells with different cathode porosity at 650°C in air as an oxidant.

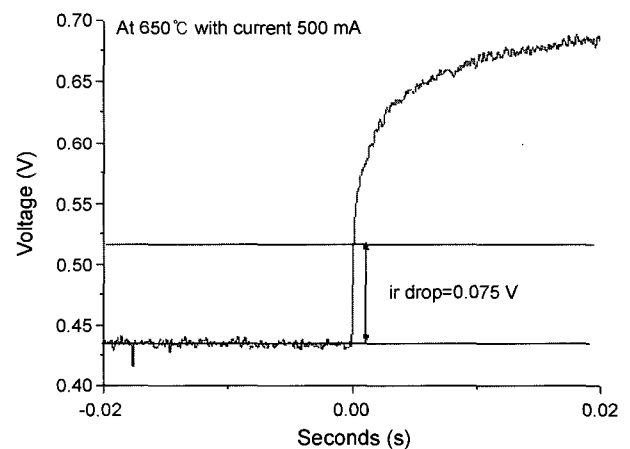


Fig. 5. Typical voltage relaxation curve during the DC current interruption experiment.

순간적으로 생기는 전압변화의 폭이 결국 단전지의 ohmic 저항성분에 의한 분극에 해당되므로 결과적으로 이러한 전압변화치와 가해준 전류 값으로부터 단전지 구성성분들에 의한 ohmic 저항의 크기를 구해낼 수 있다.

이러한 방법으로 양극 기공률이 서로 다른 4종류의 단전지로부터 구해진 ohmic 저항성분에 의한 분극저항을 Fig. 6에 서로 비교하여 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 서로 다른 양극구조임에도 불구하고 단전지의 ohmic 저항크기는 0.15 Ω 정도로 오차범위(최대 5%)내에서 일정한 값을 나타내고 있는데, 이는 Table 1에 나타난 양극의 미세구조나 기공률의 변화에도 불구하고 양극에서의 ohmic 저항크기는 크게 다르지 않음을 의미한다. 따라서 Fig. 4에 나타난 양극 기공률에 따른 출력밀도의 변화는 주로 전극반응에서의 분극성분에 의한 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서는 전극반응에서의 분극성분을 측정

하기 위해 교류임피던스법을 이용하였다. Fig. 7의 결과는 양극구조가 서로 다른 4개의 단전지로부터 측정된 임피던스 스펙트럼의 결과로 양극조건에 따라 서로 다른 경향을 보여주고 있다. 그림의 결과에서 보면 측정된 임피던스 스펙트럼은 모두 실수축의 한 지점에서 시작하여 몇 개의 반원이 겹쳐져 있는 형태로 나타나고 있는데 실수축의 원점에서 스펙트럼이 시작되는 실수 축의 접점은 capacitance 성분을 가지지 않은 순수 ohmic 저항성분의 크기에 해당하며 스펙트럼의 시작점과 끝점 사이의 간격이 전극에서의 분극 성분크기에 해당한다. 이와 같이 교류임피던스법으로 측정된 양극의 기공률에 따른 전극반응에 의한 분극을 Fig. 8에 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 기공률이 40% 정도인 LSCF50인 경우 전극에서의 분극저항이 0.2 ohm 정도로 가장 낮게 나온 반면 기공률이 가장 낮은 LSCF0인 경우는 전극에서의 분극이 0.95 ohm으로 LSCF50에 비해 4배이상 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 처

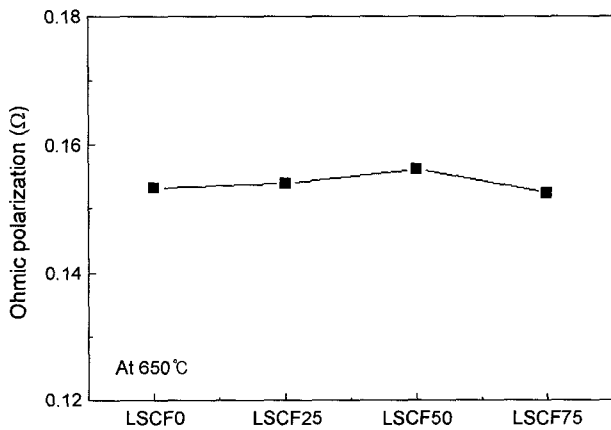


Fig. 6. Ohmic polarization resistance of the unit cells with different cathode porosity.

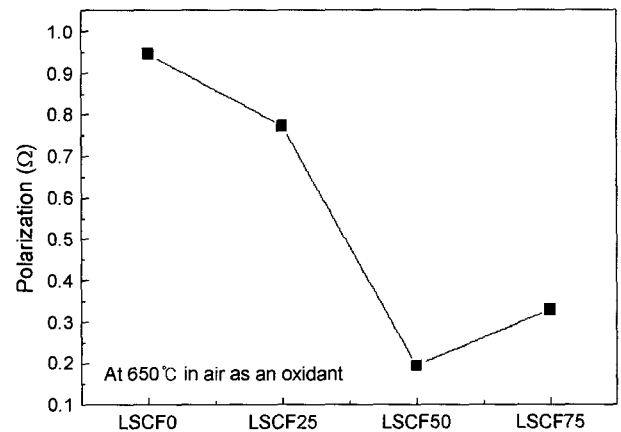


Fig. 8. Electrode polarization resistance of unit cells with respect to the different cathode porosity.

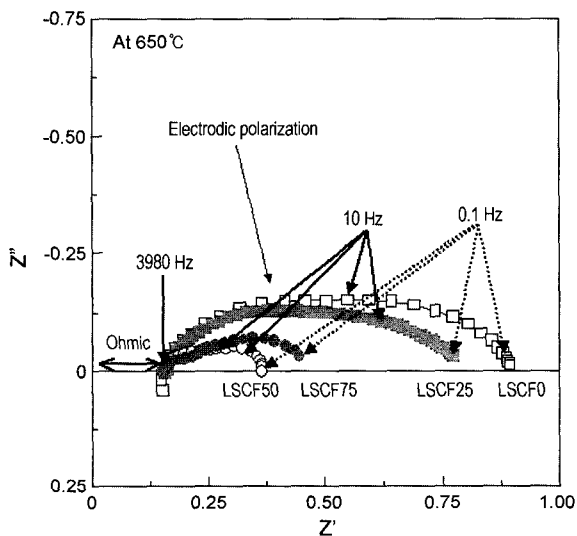


Fig. 7. Comparison of the impedance spectrum of unit cells measured via AC-impedance spectroscopy at 650°C in air.

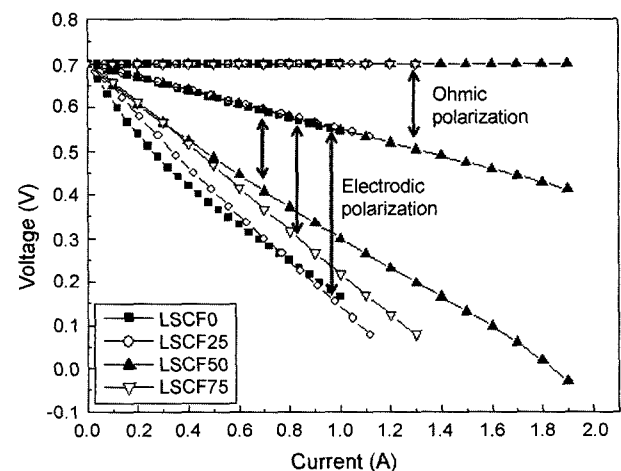


Fig. 9. Separation of ohmic and electrode polarization from the normalized current-voltage characteristics.

Table 2. Power Density of Unit Cells with Different Cathode Porosity(Unit : mW/cm²)

Sample	P(max)	P(i=0.2 A/cm ²)	P(i=0.4 A/cm ²)	P(i=0.6 A/cm ²)
LSCF0	258	137	214	253
LSCF25	270	149	235	268
LSCF50	384	166	267	340
LSCF75	326	156	264	317

음 예상했듯이 양극의 기공률이 증가하며 전극반응에 필요한 활성면적이 증대됨으로써 양극에서의 산소 환원반응에 필요한 분극저항이 감소되었음을 의미한다.

한편 양극조건에 따른 분극저항과 이에 따른 단전지의 성능차를 같은 기준에서 비교해보기 위해 개회로 전압을 0.7 V로 균일하게 보정한 상태에서의 전압-전류 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 모든 단전지에서 저항분극에 의한 손실은 같게 나타나는 반면 전극반응에 의한 분극손실은 기공률이 증가할수록 감소하는 경향을 확인 할 수 있다. 이를 좀더 정량적으로 나타내기 위해 개회로 전압을 보정한 상태에서의 출력밀도를 Table 2와 Fig. 10에 정리하였다. Fig. 10의 결과는 앞서 Fig. 4에서와 달리 개회로 전압의 차이로 인한 출력성능 차를 배제하고 전극반응에 의한 분극손실 차만을 반영한 결과로서 본 연구의 초기 의도인 양극구조의 효과를 비교해 보는데 더 효과적인 그림이다.

그림의 결과에서 보면 본 연구에서 제작한 단전지의 경우 양극의 기공률이 증가하면 단전지의 성능이 뚜렷이 향상되는 것을 알 수 있는데 이는 양극 기공률의 증가가 양극반응에 대한 활성면적의 증가로 이어져 양극반응에 대한 분극손실을 줄이게 되고 결과적으로 이러한 양극에서의 분극특성이 단전지 성능을 향상시키기 때문이라 생각된다. 이상의 연구결과로부터 본 연구에서는 혼합전도성 양극을 사용하여 단전지를 구성하는 경우 양극반응에 필

요한 전극의 활성점을 최대한 확보하기 위해 양극의 조성은 물론 양극의 미세구조를 적절히 조정해야 함을 알 수 있었으며 특히 양극의 기공률을 변화시켜 전극의 활성점을 늘리는 것도 단전지 성능을 향상시키는데 매우 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

5. 결 론

혼합전도체 양극의 구조에 따른 성능 분석을 위해 양극 미세분말과 조대분말을 0, 25, 50, 75%비로 달리하여 양극의 기공률이 각각 14, 23, 27, 39%인 네 종류의 단전지를 제조하였다. 양극의 기공률이 다른 네 종류의 단전지에 대한 분극특성을 관찰한 결과 양극 기공률에 따른 ohmic 저항에 의한 손실은 차이가 없는 반면 양극반응에 대한 분극손실은 기공률에 따라 큰 차이를 나타내었다. 전류차단법과 교류임피던스법으로 분석한 단전지 분극저항에 대한 분석결과 양극의 기공률이 14%에서 39%로 증가하면서 전극반응에 대한 분극저항이 4배 이상 감소하였으며 이러한 전극반응에 대한 분극저항의 감소는 그대로 단전지의 출력성능에 반영되어 단전지의 최대출력이 기공률이 증가하면서 약 1.5배 정도 증가하였다. 본 연구에서는 이러한 결과로부터 혼합전도체 양극물질을 사용하여 단전지를 제작하는 경우 양극의 기공률을 최대화하여 전극의 활성면적을 최대한 확보하는 것이 단전지의 성능을 개선하는데 필수적임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 과학기술부지원으로 수행하는 국가지정연구실 사업과 SOFC 핵심원천 기술개발사업에서 지원 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

1. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cell," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
2. J. Will, A. Mitterdorfer, C. Kleinlogel, D. Perednis, and L. J. Gauckler, "Fabrication of Thin Electrolytes for Second-generation Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, **131** 79-96 (2000).

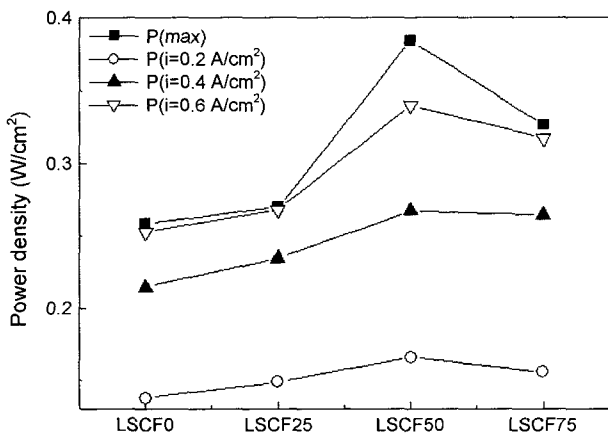


Fig. 10. Comparison of the power density of unit cells with different cathode porosity.

3. J. D. Kim, G. D. Kim, J. W. Moon, Y. I. Park, W. H. 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).
4. H. C. Yu and K. Z. Fung, "Electrode Properties of L_{1-x}Sr_xCuO_{2.5-δ} as New Cathode Materials for Intermediate-Temperature SOFCs," *J. of Power Sources*, **133** 162-68 (2004).
5. B. C. H. Steele, "Survey of Materials Selection for Ceramic Fuel Cells; II. Cathodes and Anodes," *Solid State Ionics*, **86-88** 1233-34 (1996).
6. J. V. Herle, A. J. McEvoy, and K. R. Thampi, "A Study of the La_{1-x}Sr_xMnO₃ Oxygen Cathode," *Electrochimica Acta*, **41** [9] 1447-54 (1996).
7. T. Kenjo and M. Nishiya, "LaMnO₃ Air Cathodes Containing ZrO₂ Electrolyte for High Temperature Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, **57** 295-302 (1992).
8. S. B. Adler, "Mechanism and Kinetics of Oxygen Reduction on Porous L_{1-x}Sr_xCuO_{3.δ} Electrodes," *Solid State Ionics*, **111** 125-34 (1998).
9. C. Xia, W. Rauch, F. Chen, and M. Lia, "Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO Cathodes for Low Temperature SOFCs," *Solid State Ionics*, **149** 11-9 (2002).
10. A. Esquirol, N. P. Brandon, J. A. Kilner, and M. Mogensen, "Electrochemical Characterization of La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃ Cathodes for Intermediate-Temperature SOFCs," *J. Electrochemical Soc.*, **151** A1847-A55 (2004).
11. J. Larminie and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained," pp. 1-59, Plenum Press, New York, 1993.
12. M. C. Williams, "Fuel Cell Handbook," Sixth Edition, 37-52, EG&G Technical Services. Inc., West Virginia, 2002.
13. F. Zhao and A. V. Virkar, "Dependence of Polarization in Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells on various Cell Parameters," *J. Power Sources*, In press, Corrected proof.
14. L. W. Tai, M. M. Nasrallah, H. U. Anderson, D. M. Sparlin, and S. R. Sehlin, "Structure and Electrical Properties of La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO₃. Part 1. The System La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{1-y}Fe_yO₃," *Solid State Ionics*, **76** 259-71 (1995).
15. F. Zhao and A. V. Virkar, "Dependence of Polarization in Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells on various Cell Parameters," *J. Power Sources*, **141** 79-95 (2005).
16. K. R. Lee, S. H. Choi, J. Kim, H. W. Lee, and J. H. Lee, "Viable Image Analyzing Method to Characterize the Microstructure and the Properties of the Ni/YSZ Cermet Anode of SOFC," *J. Power Source*, **140** 226-34 (2005).