

고체산화물 연료전지 연료극 및 전해질 미세구조 최적화

노종혁 · 명재하[†]

인천대학교 신소재공학과
 22012 인천광역시 연수구 아카데미로 119
 (2019년 2월 28일 접수, 2019년 4월 9일 수정본 접수, 2019년 4월 10일 채택)

Optimization of anode and electrolyte microstructure for Solid Oxide Fuel Cells

Jong Hyeok Noh and Jae-ha Myung[†]

Department of materials science and engineering, Incheon National University,
 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea
 (Received 28 February 2019; Received in revised form 9 April 2019; accepted 10 April 2019)

요 약

고체산화물 연료전지의 성능과 안정성은 전극의 기공률, 기공 분포와 전해질의 치밀도, 두께에 따라 결정 된다. 연료극의 기공률과 기공 분포는 활성면적과 연료 흐름에 영향을 주고, 전해질의 치밀한 미세구조와 두께는 단위전지의 Ohmic 저항에 영향을 준다. 하지만 이를 위해 값 비싼 공정 장비를 이용하거나 여러 단계의 제작 공정이 추가 될 경우 단위전지 제작비가 증가하므로 상업화를 목표로 하는 연구에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 위와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 상용 소재 기반의 NiO-YSZ 연료극을 선정 후 간단한 혼합 방법 및 일축가압 성형법과 담금코팅(dip coating) 공정을 사용하여 저비용 고효율의 세라믹 공정 기반의 고성능 단위전지를 제작하였다. 연료극의 기공률은 기공형성제로서 사용되는 카본 블랙(CB, carbon black)의 첨가량(10~20 wt%)과 최종 소결온도(1350~1450 °C)를 변경하며 제어하였고, YSZ 전해질의 두께와 미세구조는 담금코팅 슬러리의 고상 분말량(YSZ, 1~5 vol%)을 제어하여 치밀한 박막의 전해질을 구현하고자 하였다. 그 결과 Ni-YSZ 연료극에서 최적의 값으로 잘 알려진 40%의 기공률은 카본 블랙을 15 wt% 첨가하고 최종 소결온도를 1350 °C로 설정함으로써 얻을 수 있었다. 담금코팅을 통한 YSZ 두께는 2~28 μm 까지 제어가 가능하였고, 3 vol%의 고상분말량에서 치밀한 전해질 미세구조가 형성되었다. 최종적으로 40%의 기공률을 갖는 Ni-YSZ 연료극, 20 μm 두께의 치밀한 YSZ 전해질, LSM-YSZ 공기극으로 구성된 단위전지는 800 °C에서 1.426 Wcm⁻²의 우수한 성능을 얻을 수 있었다.

Abstract – The performance and stability of solid oxide fuel cells (SOFCs) depend on the microstructure of the electrode and electrolyte. In anode, porosity and pore distribution affect the active site and fuel gas transfer. In an electrolyte, density and thickness determine the ohmic resistance. To optimizing these conditions, using costly method cannot be a suitable research plan for aiming at commercialization. To solve these drawbacks, we made high performance unit cells with low cost and highly efficient ceramic processes. We selected the NiO-YSZ cermet that is a commercial anode material and used facile methods like die pressing and dip coating process. The porosity of anode was controlled by the amount of carbon black (CB) pore former from 10 wt% to 20 wt% and final sintering temperature from 1350 °C to 1450 °C. To achieve a dense thin film electrolyte, the thickness and microstructure of electrolyte were controlled by changing the YSZ loading (vol%) of the slurry from 1 vol% to 5 vol. From results, we achieved the 40% porosity that is well known as an optimum value in Ni-YSZ anode, by adding 15wt% of CB and sintering at 1350 °C. YSZ electrolyte thickness was controllable from 2 μm to 28 μm and dense microstructure is formed at 3vol% of YSZ loading via dip coating process. Finally, a unit cell composed of Ni-YSZ anode with 40% porosity, YSZ electrolyte with a 22 μm thickness and LSM-YSZ cathode had a maximum power density of 1.426 Wcm⁻² at 800 °C.

Key words: Porosity, Microstructure, Dip coating, Electrolyte thickness

[†] To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mjaeha@inu.ac.kr

*이 논문은 연세대학교 설용건 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

연료전지는 직접적인 연소반응 없이 전기화학적 반응을 통해 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 발전 장치이다. 다양한 형태의 연료전지 중 고체산화물 연료전지(SOFCs, Solid Oxide Fuel Cells)는 두 전극과 전해질이 모두 내열성이 강한 세라믹으로 이루어져 있어 다른 연료전지에 비해 넓은 온도범위(600~1000 °C)에서 작동할 수 있으며 고온의 작동온도에 의해 외부 개질기 없이 탄화수소 계열의 연료를 직접 사용할 수 있다[1]. 또한 고체산화물 연료전지는 전기적 효율이 50~60% 정도로 연료전지 중 가장 높은 효율을 가지고 있고, 폐열을 이용한 열병합 발전시 최대 90%에 달하는 효율을 낼 수 있다는 장점을 가지고 있어 차세대 에너지 발전 기술로써 개발 가치가 높다[2].

고체 산화물 연료전지의 성능은 단위전지의 Ohmic 저항과 전극의 분극저항에 따라 주로 영향을 받는다. 일반적으로 Ohmic 저항은 전해질 저항이 가장 큰 비중을 차지하고 분극저항은 전극, 전해질과 기공으로 이루어지는 삼상계면(TPB, Triple Phase Boundary)의 밀도, 기공크기 및 기공률 등 전극의 미세구조에 따라 그 값이 결정된다[3-4]. 전해질의 경우 전해질 소재의 이온전도도가 높고 두께가 얇을수록 Ohmic 저항이 감소하지만 얇은 전해질은 pin-hole이 생성되기 쉽고, 이는 가스와 공기의 직접 혼합(cross-over)을 유발시킴으로 단위전지의 성능저하 및 열화현상의 주요 원인이 된다. 따라서, 전해질은 일반적으로 5~20 μm 의 얇고 치밀한(dense) 미세구조를 가져야 하며 연료극의 경우 높은 TPB의 밀도에 의한 낮은 분극저항을 위해 40% 내외의 적절한 기공분포와 높은 기공률을 가지도록 해야한다[4-6].

상용적으로 사용되는 SOFC 연료극인 Ni-YSZ 서멧(cermet, Ni과 YSZ, Yttria stabilized zirconia)은 합성방법이 간단하고 귀금속 촉매에 비하여 값이 저렴하며 NiO와 YSZ의 조성비와 분말의 입도크기, 기공형성체의 크기, 기공형성체의 양, 소결온도 등으로 간단하게 미세구조의 제어가 가능하다는 이점을 가진다[7-8]. 또한 높은 전기화학적 촉매능 및 전기전도성을 가지는 Ni 촉매와 높은 산소이온 전도성, 기계적 강도, 고온 안정성 그리고 화학적 안정성을 가지는 YSZ로 인해 고체산화물 연료전지에 연료극 물질로서 주로 사용되고 있다[2,9].

얇고 치밀한 전해질 미세구조를 형성하는 방법으로는 주로 스프레이 코팅(spray coating), 테이프캐스팅(tape casting), 스퍼터링(sputtering), 담금코팅(dip coating) 등이 사용되고 있다[9-12]. 이 중 담금코팅(dip coating)법은 다른 방법들에 비해 공정이 간단하고 비용이 저렴하며 슬러리의 조건이나 당기는 속도를 조절하여 간단하게 전해질의 두께를 제어할 수 있어 전해질 코팅에 주로 사용된다[13].

이를 바탕으로, 본 연구에서는 Ni-YSZ 연료극 물질의 기공형성체로 사용되는 Carbon Black(CB)의 첨가량과 최종 소결온도의 변화를 통해 최적의 기공률 및 미세구조를 갖는 연료극과, 담금코팅 슬러리의 조성을 변화시켜 제작한 치밀한 박막의 YSZ 전해질로 구성된 단위전지를 제작하여 I-V 성능과 EIS 분석을 진행하였다.

2. 실험 방법

2-1. 연료극 지지체 제작

NiO-YSZ 연료극 지지체는 각각의 분말과 첨가제를 습식 혼합한 뒤 일축가압법을 이용하여 제작하였다. NiO 분말 (Kojundo Chemical

Laboratory CO.LTD, Particle size: 0.7125 μm)과 YSZ 분말(Tosoh: TZ8Y 8 mol%, Particle size: 0.04 μm)은 60:40 wt% 비율로 혼합하고, 기공 형성체로 사용되는 Carbon black (CB)의 양은 환원 후 전체 Ni-YSZ 질량의 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%를 첨가하였다. 혼합된 분말은 IPA를 용매로 사용하여 24시간 습식 1차 Ball-milling 후 유기결합제인 바인더(Butvar B-76)를 0.2 wt%만큼 첨가하여 24시간 2차 Ball-milling하였다. 슬러리는 70~80 °C의 Hot plate에서 교반하며 건조시킨 후 200 μm 표준망체와 sieving machine를 사용하여 분말을 체가름한 뒤 지름 1inch 몰드에 넣어 일축 가압하여 펠렛 형태로 제작하였다. 만들어진 펠렛은 1100 °C에서 3시간동안 가소결하여 연료극 지지체로 사용하였고, 연료극 지지체는 최종 소결온도에 따른 수축률 및 기공률 변화를 관찰하기 위해 각각 1350, 1400, 1450 °C로 3시간동안 소결 후 900 °C에서 수소분위기로 12시간동안 환원하였다.

2-2. 단위전지 제작

단위전지는 15 wt%의 CB가 첨가된 NiO-YSZ 연료극 지지체에 담금 코팅방법을 사용하여 전해질을 입혔다. 담금코팅에 사용되는 YSZ 슬러리는 에탄올, 톨루엔 용매, YSZ 분말, 분산제를 넣어 24시간 1차 Ball-milling하였고, 그 후 가소제(DBP, Dibutyl phthalate)와 바인더(PVB)를 첨가하여 24시간 2차 Ball-milling 하였다. 담금코팅 조건은 슬러리 내부에서 20초간 유지하고, 상승속도는 30 mm/min으로 설정하였다. 또한 본 실험에서는 전해질의 두께를 제어하기 위하여 용매와 YSZ 분말의 비율을 1~5 vol%로 변화시켜 사용하였으며 최종적으로 YSZ 전해질이 코팅된 NiO-YSZ 연료극 지지체는 1350 °C에서 3시간 동안 소결하였다. 그 후 연료극 지지체는 두께가 800 μm 가 되도록 한쪽면만 폴리싱 한 뒤 LSM-YSZ 공기극 물질을 약 8~10 μm 정도 두께로 스크린프린팅 하여 공기극을 형성시키고 1200 °C에서 3시간 소결하여 연료전지 단위전지를 제작하였다.

2-3. 미세구조 및 성능 분석

기공형성체의 양과 최종 소결온도 변화에 따라 만들어진 NiO-YSZ 연료극 지지체의 기공률을 분석하기 위하여 각 샘플은 미국표준공업기준인 ASTM-C373을 따라 아르키메데스법을 사용하여 기공률을 측정하였고, 이 때 사용한 계산 방법은 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{기공률(\%)} = [(W_3 - W_1) / (W_3 - W_2)] \times 100 \quad (1)$$

W_1 : 건조질량(g), W_2 : 수중질량(g), W_3 : 포화질량(g)

연료극, 전해질 및 공기극 물질의 미세구조는 열 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, Field emission scanning electron microscope (JEOL/JSM_7800F))을 사용하여 분석하였다. 최종적으로 만들어진 SOFC 단위전지는 전기화학적 평가분석장비(VMP-300, Bio-logics)를 사용하여 전기화학적 임피던스 분석(EIS, Electrochemical impedance spectroscopy)과 단위전지 성능 분석을 진행하였다. 이 때 단위전지의 임피던스와 성능 측정 온도는 700~900 °C이며, 연료 조건은 연료극에 H_2 -3% H_2O , 공기극에는 공기를 주입하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. NiO-YSZ 연료극 지지체 미세구조 특성 분석

Carbon black의 양과 최종 소결 온도를 변수로 하여 제작된 NiO-

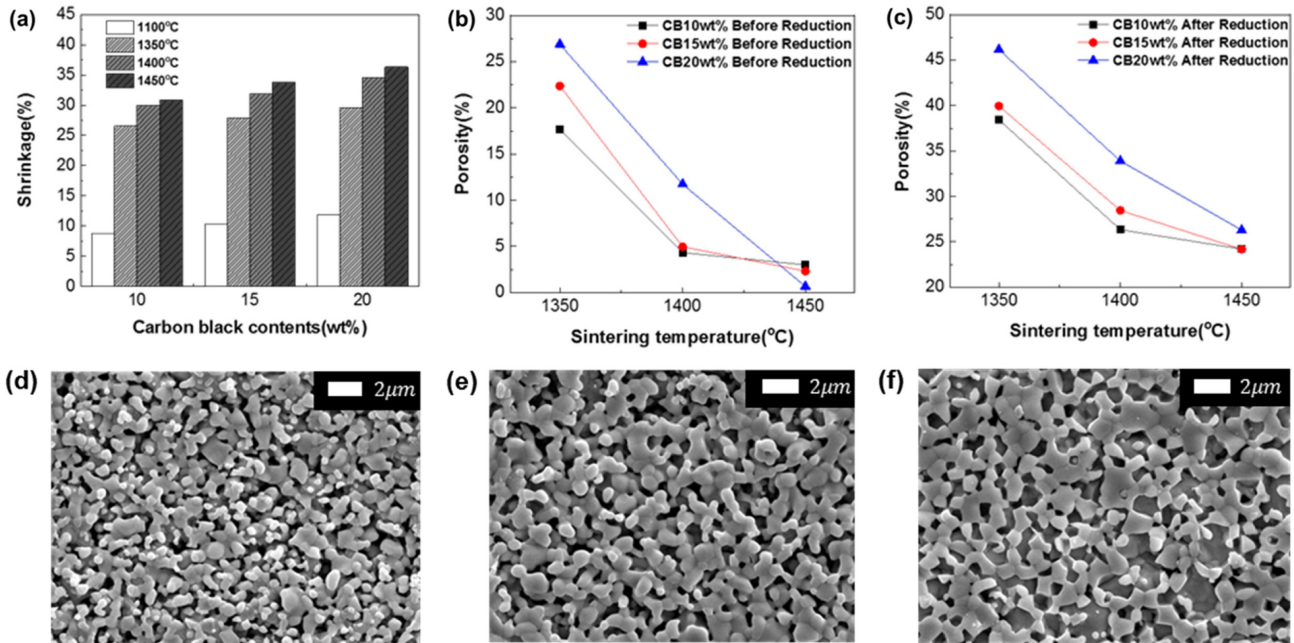


Fig. 1. Shrinkage and porosity changes of NiO-YSZ anode supported cells depending on carbon black contents and sintering temperature : (a) shrinkage change before reduction, porosity changes (b) before and (c) after reduction. Microstructure SEM images of reduced Ni-YSZ with 15 wt% CB by diverse sintering temperatures (d) 1350 °C (e) 1400 °C, (f) 1450 °C.

YSZ 서멧의 지름 수축률은 다음 식 (2)를 이용하여 계산하였으며, 그 결과 NiO-YSZ 펠렛은 소결온도 및 CB의 첨가량이 증가할수록 수축률이 증가하는 것을 확인하였다.

$$\text{수축률}(\%) = \Delta D / D_0 \times 100(\%), \Delta D = D - D_0 \quad (2)$$

D = 펠렛의 지름(mm), D_0 = 몰드 지름(25.4 mm)

1100 °C의 경우 NiO와 YSZ의 소결이 거의 이루어지지 않아 10% 이내의 수축률을 보였으나, 1350 °C 이상의 온도에서는 25~35% 범위의 소결 수축 현상이 일어남을 확인할 수 있었다(Fig. 1(a)). 또한 아르키메데스법을 사용하여 측정한 NiO-YSZ 펠렛의 환원전과 환원 후의 기공률은 같은 온도에서 CB의 첨가량이 많을수록 기공률이 높아지는 경향성을 가지나 1450 °C 이상의 소결온도에서 측정된 연료극의 기공률은 파소결 현상에 의해 환원 전 5%미만, 환원 후 30% 미만으로 적정 기공률 이하의 값을 보이며 급격히 감소하였다(Fig. 1(b), 1(c)). 이는 NiO-YSZ 파소결 이하의 온도에서는 CB의 첨가량이 증가할수록 형성된 내부 기공이 많아지지만, 파소결 이상의 온도에서는 NiO-YSZ의 소결성이 높아져 기공이 유지되지 못하고 수축이 빠르게 진행되면서 결정의 조대화가 이루어지기 때문으로 해석될 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 1(d)-1(f)와 같이 소결온도가 1350 °C 부터 점차 증가하여 1450 °C가 되었을 때, 환원된 Ni-YSZ 내부의 기공이 대부분 수축하여 폐기공이 형성되고 입계가 성장한 것을 촬영한 SEM 사진을 통해서도 확인할 수 있다.

일반적으로 고체 산화물 연료전지에서 Ni-YSZ 서멧 연료극의 기공률이 40%일 때 낮은 분극저항과 높은 분극이 낮은 값을 가져 단위전지가 높은 출력밀도를 나타내는 것으로 잘 알려져 있다[5]. 위 실험 결과 Ni-YSZ 연료극 지지체는 CB의 양을 15 wt%로 첨가하고, 소결온도를 1350 °C로 제어했을 때, 최종적으로 기공률이 40%를 가지는 최적의 미세구조를 얻는 것을 확인 할 수 있었다.

3-2. YSZ 전해질 미세구조 분석

앞서 확인한 최적의 연료극 지지체 위로 담금코팅한 YSZ 전해질의 미세구조와 두께는 담금코팅 슬러리의 YSZ 고상분말량(vol%)에 따라 변화하였고, 이 때 사용한 YSZ 슬러리의 조건은 다음 Table 1과 같다.

YSZ 고상 분말량(vol%)에 따라 코팅된 전해질의 두께를 NiO-YSZ의 단면 SEM 사진을 통하여 확인한 결과, YSZ 고상분말량이 3 vol%까지 증가함에 따라 코팅된 YSZ의 두께가 선형적으로 증가하며 그 이후 5 vol%까지 증가율이 크게 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 2). 위 결과 담금코팅 방법을 통한 YSZ 전해질의 두께는 약 2~30 μm 정도까지 제어할 수 있으며, 이는 단순히 YSZ 고상 분말량(vol%)의 변경만으로 얻을 수 있는 결과이므로 매우 간단하고 효과적인 방법임을 확인하였다. 일반적으로 셀 작동시 전해질 내부저항을 최소화하기 위해서 필요한 5~20 μm의 전해질의 두께는 슬러리의 YSZ 고상분말량을 약 1.5~3 vol% 정도로 하여 담금코팅 함으

Table 1. YSZ electrolyte slurries with different YSZ loading (vol%)

Sample	Solvent volume (mL)	YSZ loading (vol%)	Dispersant (wt%)	Binder (wt%)
YSZ 1	106.88	1	10 wt% of powder	10 wt% of powder
YSZ 2		2		
YSZ 3		3		
YSZ 4		4		
YSZ 5		5		

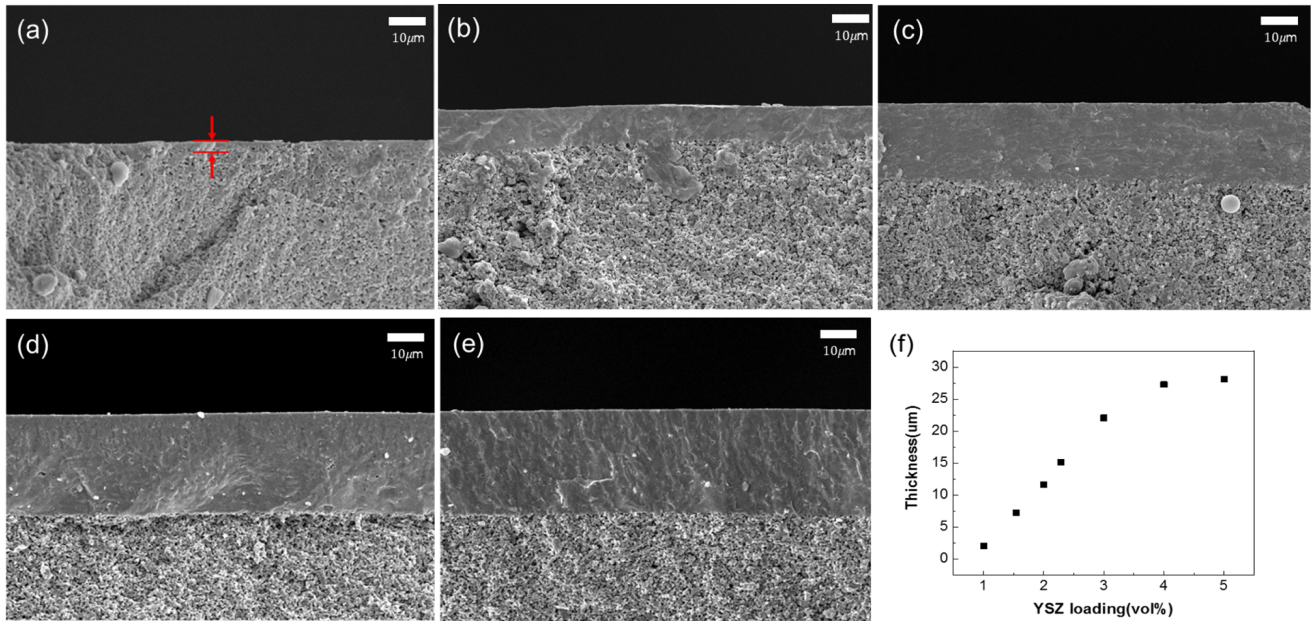


Fig. 2. Electrolyte thickness changes depending on amount of YSZ loading (vol%): SEM images (a) YSZ 1, (b) YSZ 2, (c) YSZ 3, (d) YSZ 4, (e) YSZ 5 and (f) thickness change graph.

로써 얻을 수 있었다.

전해질 내부에 생성된 결함은 연료극과 공기극 사이에 연료 가스와 공기가 직접 혼합되는 현상(cross-over)을 유발하여 연료전지의 성능을 크게 감소시키므로 치밀한 전해질층을 형성시키는 것은 중요하다 [14]. 본 실험에서 코팅된 전해질의 표면 SEM사진을 관찰한 결과 YSZ 고상 분말량이 3 vol%일 경우 코팅된 전해질이 치밀하고 균일한 반면 고상 분말량이 2 vol% 이하로 적거나 4 vol% 이상으로 클 경우에는 전해질에 내부결함(Pin-hole, crack)이 발견되었다(Fig. 3). 특히 슬러리의 YSZ 고상분말량이 2 vol% 이하일 경우 전해질 코팅이 불균일하고 pin-hole이 주로 생성되었으며, YSZ 고상분말량이

4 vol% 이상일 경우 전해질 코팅에 crack이 주로 생성되었다(Fig. 3). 이러한 결함이 발생한 이유는 용액 속에 존재하는 바인더와 가소제의 응집 현상 때문으로 생각해 볼 수 있는데, 이 결과로 슬러리 내부에 응집되어 있던 바인더가 코팅된 후 전해질 소결 과정에서 제거되고 그 주위의 전해질 입자가 수축하며 결함을 생성시킨 것으로 판단된다[15]. 이를 해결하기 위해서는 슬러리 내에 첨가된 바인더를 고르게 분산시키고 안정성을 증가시키거나, 연료극층 위로 기능층(AFL: Anode Functional Layer)을 추가하여 균질성을 증가시킨 후 전해질 코팅을 진행해야 한다. 최근 연구에 따르면 15 μm 정도의 두께를 가지는 AFL이 입혀진 연료극은 기존 연료극보다 표면이 균일하며 결

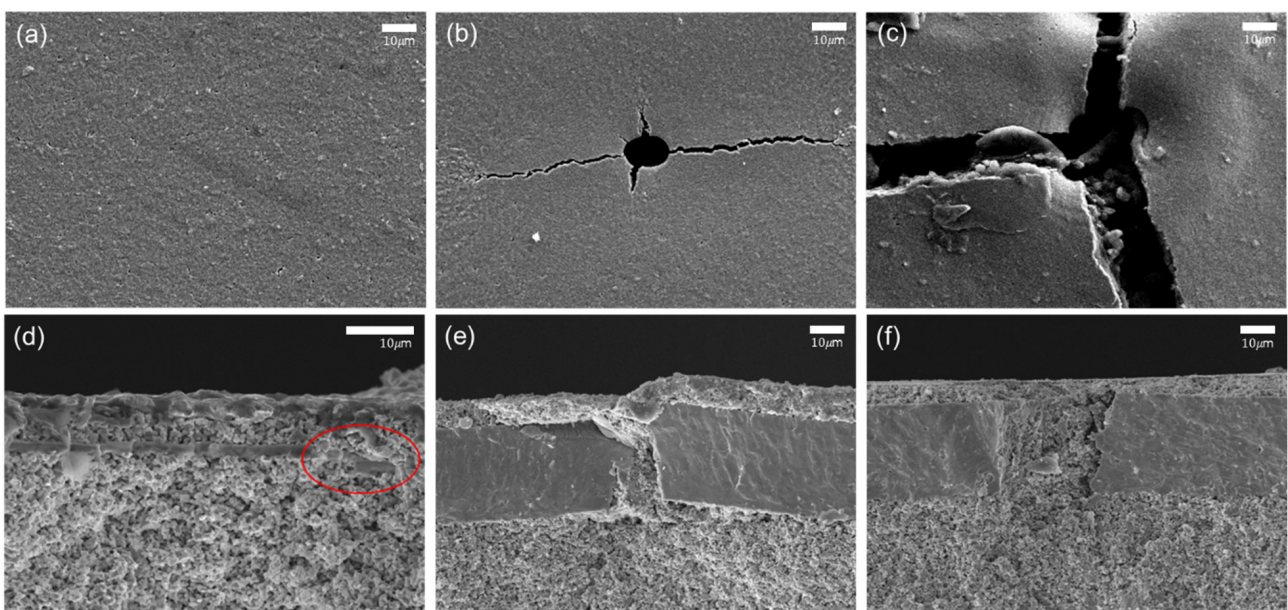


Fig. 3. SEM images of electrolyte surface (a) YSZ 3-no defect (b) YSZ 2-pin hole (c) YSZ 5-crack and cross section defect (d) YSZ 1, (e) YSZ 4, (f) YSZ 5.

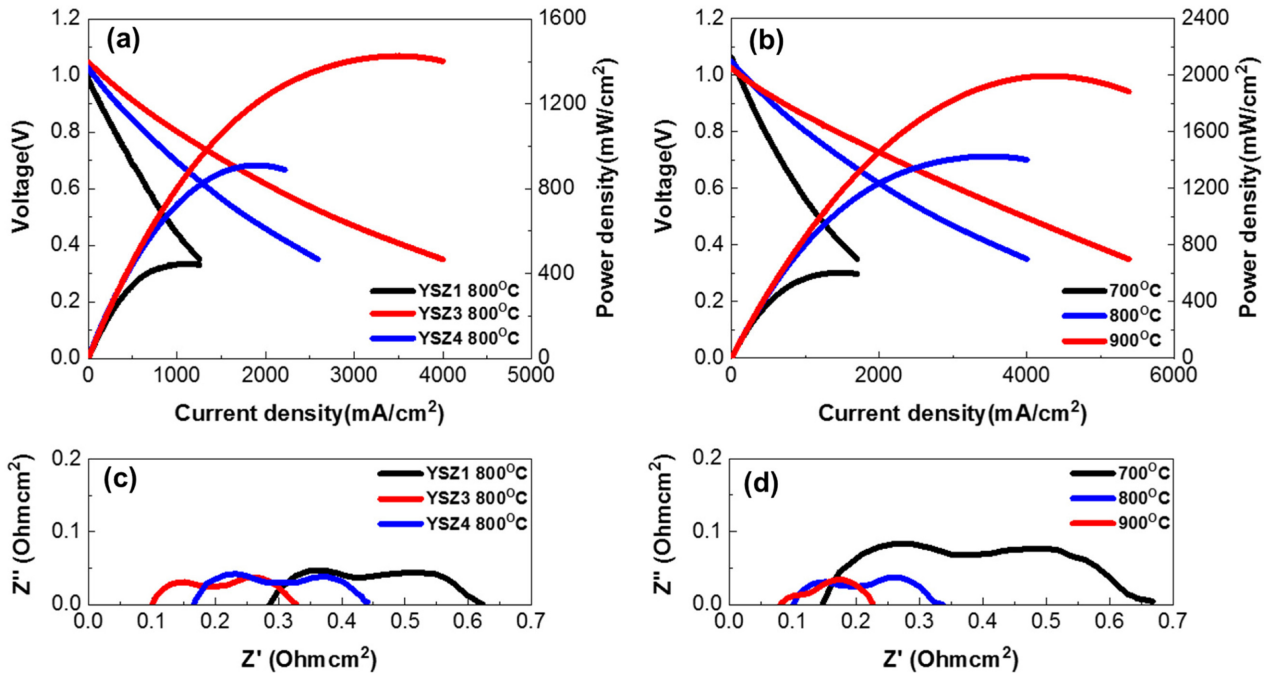


Fig. 4. (a, c) I-V curves and EIS spectra of unit cells coated with YSZ 1, YSZ 3, YSZ 4 electrolyte, and (b, d) I-V curves and EIS spectra of unit cell coated with YSZ 3 electrolyte at 700 to 900 °C.

함이 적어 더 좋은 성능을 가지면서, 담금코팅 과정에서 전해질 코팅이 보다 고르게 된다고 알려져 있으므로 이를 적용하여 전해질을 안정화시키고 성능을 개선하는 추가적 실험이 필요하다[16].

3-3. 단위전지 성능 분석

단위전지의 성능 및 임피던스 값을 800 °C에서 측정한 결과 약 22 μm 의 두께를 가지는 YSZ3을 코팅한 경우 가장 낮은 전해질 저항 및 전극 저항값을 나타내며 최고 성능이 1.426 W/cm²으로 가장 높은 값을 보였다. 또한 약 2 μm 의 얇은 전해질을 코팅한 YSZ1과 약 27 μm 의 두꺼운 전해질을 코팅한 YSZ4의 경우, 저항값이 YSZ3을 코팅한 경우보다 증가하여 최고성능이 각각 0.432 W/cm², 0.925 W/cm²로 감소한 것을 확인하였다(Fig. 4(a), 4(c)). YSZ4가 코팅된 경우 보이는 단위전지의 성능저하와 저항값의 증가는 Fig. 3(e)에서 확인할 수 있듯이 약 30 μm 의 두꺼운 전해질이 단위전지의 ohmic 저항을 증가시켰고, 두꺼운 YSZ층의 불균질한 수축에 의해 생성된 결함에 의해 연료와 공기의 직접혼합(cross over)이 발생되어 O.C.V (open circuits voltage)를 감소시킨 것 때문임을 확인할 수 있었다. YSZ1 전해질이 코팅된 단위전지는 약 2 μm 의 얇은 전해질막 임에도 불구하고 가장 낮은 성능과 가장 높은 저항값을 나타내었는데, 이는 얇은 전해질에 생긴 결함에 의해 발생된 불균일한 전극-전해질간 계면, 연료-공기 직접 혼합 및 두 극간의 직접 단락이 주요원인이 된 것으로 판단된다(Fig. 3(d)). 이는 단위전지의 전극 전도도 및 활성면적을 감소시켜 활성화 손실 및 ohmic 저항을 복합적으로 증가시켰고, 그 결과 단위전지의 성능과 O.C.V가 크게 낮아진 것을 확인하였다(Fig. 4(a), 4(c)). 반면 본 연구에서 사용된 NiO-YSZ 지지체와 YSZ3 슬러리로 제작된 단위전지는 가장 낮은 Ohmic 저항값과 분극 저항값을 보였으며, 전해질 층도 균일하고 결함이 없는 것을 확인할 수 있었다. 이 단위전지의 성능은 900 °C에서 약 2 W/cm², 중저온인 700 °C에서도 0.56 W/cm²을 보여, 상용물질을 이용하고 슬러리 및 지지체 기공률

제어를 통해 우수한 성능의 단위전지를 개발할 수 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 4(b), 4(d)). 향후 전해질의 두께를 5 μm 이하로 얇고 고르게 형성 시키고, AFL층을 추가할 경우 성능은 보다 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

고체산화물 연료전지의 연료극에서 가장 높은 성능을 나타내는 40%의 기공률을 가진 Ni-YSZ는 Ni:YSZ = 60:40 wt%를 기준으로 기공형성제인 CB의 양을 15 wt%만큼 첨가한 뒤 1350 °C에서 3시간 소결하여 얻을 수 있었다. 또한 40% 기공률을 가지는 NiO-YSZ 연료극 지지체 위로 코팅된 약 2~30 μm 두께의 YSZ 전해질은 슬러리의 YSZ loading (vol%)을 1~5 vol%까지 변경하여 담금코팅 함으로써 얻을 수 있었다. 제작된 단위전지의 미세구조를 관찰하고 성능 및 임피던스 분석을 비교한 결과, 전해질이 매우 얇아 불균일하게 코팅되거나(YSZ1), 전해질에 결함이 많고 두껍게 코팅되었을 때(YSZ4) 저항이 크게 증가하고 단위전지 성능이 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 YSZ 고상 분말량을 3 vol%로 하여 담금코팅 할 경우 약 22 μm 두께의 균질하고 치밀한 전해질 형성시킬 수 있었다. 이 때 단위전지가 가장 낮은 저항값을 가지며, 800 °C에서 성능이 1.426 W/cm²으로 가장 높은 출력 값을 가지는 것을 확인하였다. 향후 단위전지의 성능을 더욱 향상 시키기 위해서는 얇은 전해질 막을 위한 AFL의 도입 및 각 슬러리의 안정성에 대한 추가적 연구가 필요하다.

감 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B5044487).

References

1. Murray, E. P., Tsai, T., and Barnett, S. A., "A Direct-methane Fuel Cell with a Ceria-based Anode," *Nature*, **400**(6745), 649 (1999).
2. Choi, M. H., Choi, J. H., Lee, T. H. and Yoo, Y. S., "Effect of Microstructure on Mechanical and Electrical Properties in Ni-YSZ of Anode Supported SOFC," *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **22**(5), 592-598(2011).
3. Park, J. K., Yang, S. Y., Lee, T. H., Oh, J. M., Yoo, Y. S. and Park, J. W., "Microstructure and Electrical Properties of Single Cells Based on a Ni-YSZ Cermet Anode for IT-SOFCs," *J. Korean Ceram. Soc.*, **43**(12), 823-828(2006).
4. Lee, J. H., Moon, H., Lee, H. W., Kim, J., Kim, J. D. and Yoon, K. H., "Quantitative Analysis of Microstructure and Its Related Electrical Property of SOFC Anode, Ni-YSZ Cermet," *Solid State Ionics*, **148**(1-2), 15-26(2002).
5. Ni, M., Leung, M. K., and Leung, D. Y., "Parametric Study of Solid Oxide Fuel Cell Performance," *Energy Conv. Manag.*, **48**(5), 1525-1535(2007).
6. Anselmi-Tamburini, U., Chiodelli, G., Arimondi, M., Maglia, F., Spinolo, G. and Munir, Z. A., "Electrical Properties of Ni/YSZ Cermets Obtained Through Combustion Synthesis," *Solid State Ionics*, **110**(1-2), 35-43(1998).
7. Prakash, B. S., Kumar, S. S., and Aruna, S. T., "Properties and Development of Ni/YSZ as an Anode Material in Solid Oxide Fuel Cell: a Review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **36**, 149-179(2014).
8. Virkar, A. V., Chen, J., Tanner, C. W. and Kim, J. W., "The Role of Electrode Microstructure on Activation and Concentration Polarizations in Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, **131**(1-2), 189-198(2000).
9. Ding, J., and Liu, J., "An Anode-supported Solid Oxide Fuel Cell with Spray-coated Yttria-stabilized Zirconia (YSZ) Electrolyte Film," *Solid State Ionics*, **179**(21-26), 1246-1249(2008).
10. Moon, H., Kim, S. D., Hyun, S. H. and Kim, H. S., "Development of IT-SOFC Unit Cells with Anode-supported Thin Electrolytes via Tape Casting and co-firing," *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**(6), 1758-1768(2008).
11. Brahim, C., Ringuedé, A., Gourba, E., Cassir, M., Billard, A. and Briois, P., "Electrical Properties of Thin Bilayered YSZ/GDC SOFC Electrolyte Elaborated by Sputtering," *J. Power Sources*, **156**(1), 45-49(2006).
12. Lenormand, P., Caravaca, D., Laberty-Robert, C. and Ansart, F., "Thick Films of YSZ Electrolytes by Dip-coating Process," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **25**(12), 2643-2646(2005).
13. Zhang, Y., Gao, J., Peng, D., Guangyao, M. and Liu, X., "Dip-coating Thin Yttria-stabilized Zirconia Films for Solid Oxide Fuel Cell Applications," *Ceram. Int.*, **30**(6), 1049-1053(2004).
14. Oh, C. H., Song, K. H., Han, J. and Yoon, S. P., "A Study of Ceria on Low-temperature Sintering Using Sintering Aids for Solid Oxide Fuel Cells," *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **25**(3), 280-288(2014).
15. Klemensø, T., Menon, M., and Ramousse, S., "Low Toxicity Binder Systems for Tape Cast $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$ Laminates," *Ceram. Int.*, **36**(2), 773-780(2010).
16. Yoon, D., Lee, J. J., Park, H. G. and Hyun, S. H., "NiO/YSZ-YSZ Nanocomposite Functional Layer for High Performance Solid Oxide Fuel Cell Anodes," *J. Electrochem. Soc.*, **157**(4), B455-B462(2010).