

Microstructure and Electrical Properties of Single Cells Based on a Ni-YSZ Cermet Anode for IT-SOFCs

Jae-Keun Park, Su-Yong Yang, Taehee Lee, Je-Myung Oh, Young-Sung Yoo,[†] and Jin-Woo Park*

Strategic Technology Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

*Daesung Industrial Co., Ltd., Seoul 110-300, Korea

(Received August 19, 2006; Accepted September 30, 2006)

중·저온형 SOFC를 위한 Ni-YSZ 연료극 지지체형 단전지 미세구조와 전기적 특성

박재근 · 양수용 · 이태희 · 오제명 · 유영성[†] · 박진우*

한국전력공사 전력연구원 전략기술연구소

*대성산업(주) 연구개발실

(2006년 8월 19일 접수; 2006년 9월 30일 승인)

ABSTRACT

One of the main issues of Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) is to reduce the operating temperature to 750°C or less. It has advantages of improving the life of component parts and the long-term stability of a system, so the production cost could be decreased. In order to achieve that, the ohmic and polarization loss of a single cell should be minimized first. This paper presents to fabricate anode-supported single cells with controlling microstructure as a function of particle size and volume of graphite and NiO-YSZ weight ratio. By means of optimizing the manufacturing condition through microstructure analysis and performance evaluation, the single cell which had NiO-YSZ=6:4, graphite volume of 24% and graphite size of 75 μm as the anode composition showed a distinguished power density of 510 mW/cm² at 650°C and 810 mW/cm² at 700°C, respectively.

Key words : IT-SOFCs, Ni-YSZ cermet, TPB, Internal resistance, Electrical properties

1. 서 론

현재 고체산화물 연료전지(SOFCs) 개발 주안점 중 하나는 운전온도(750°C 이하)를 낮추는 것이며, 이것은 향후 제품의 상용화시기를 앞당길 수 있으며 제품의 응용분야도 다양화할 수 있다.¹⁻³⁾ 특히 중·저온운전은 제품개발 시 극복해야 할 부분인 구성물질 성능감소와 SOFC시스템의 장기성능 뿐만 아니라 대량생산 시 제조가격과 같은 여러 문제들을 개선할 수 있다. 하지만 이러한 중·저온 운전은 전해질과 전극간의 전기화학적 반응성을 감소시켜, 단전지 내부저항과 전극의 분극저항을 개선해야 하는 문제점을 동시에 가지고 있다.^{4,5)} 일반적으로 내부저항은 주로 전해질 저항이 큰 비중을 차지하고 있으며, 전극의 분극저항은 삼상계면(Triple Phase Boundary, TPB)의 밀도와 직접적으로 관련 있다. 최근에는 전해질의 두께를 약 5~20 μm로 최소화하거나 YSZ보다 높은 이온전도도를

가지는 대체 전해질 물질을 이용하여 내부저항을 줄이고, 중·저온운전에서의 성능을 최대화할 수 있는 전극지지체형 단전지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 연료극 지지체형 단전지의 경우 제조 비용면에서 유리하면서 연료극의 전기화학적 반응점인 TPB 밀도 조절이 가능하여 미세구조를 최적화할 수 있다.^{6,7)} 전극, 전해질과 기공으로 이루어지는 TPB는 주로 원료물질과 전극제조 시 형성되는 미세구조에 의해서 결정되므로, 연료극 구성물질의 조성비, 입자비율과 기공형성제의 종류와 함량 조절을 통해 충분히 개선이 가능하다.

SOFCs 연료극의 원료성분은 니켈(nickel)과 이트리아 안정화 지르코니아(yttria stabilized zirconia)로 이루어지는 것이 일반적이며 YSZ는 장기운전 시 발생하는 Ni의 입성장을 억제하고, 산소이온이 움직일 수 있는 경로(path)를 제공함으로써 TPB 영역을 확장하는 역할을 한다.⁸⁾ 연료극은 TPB에서의 전기화학적 반응이 활발히 일어날 수 있도록 최적의 미세구조와 연료가 원활하게 공급되고 생성된 물의 제거가 쉽도록 적절한 기공률을 확보하는 것이 중요하다고 할 수 있으며, 어떤 조건에서도 이들의 안정성이 확보되어야 한다.⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 연료극 지

[†]Corresponding author : Young-Sung Yoo
E-mail : yungsung@kepri.re.kr
Tel : +82-42-865-7555 Fax : +82-42-865-7569

지체형 단전지 제조 시 내부저항과 연료극의 분극저항을 최소화하여 성능을 개선하고자 기공형성제인 graphite 입자 크기 및 첨가량과 NiO-YSZ의 무게 비를 조절하여 단전지를 제조하였고, 각 시편에 대해 미세구조와 전기적 특성평가를 통해 최적화된 제조조건을 수립하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 원료분말로 NiO(Alfa사, 99.9%)와 8 mol% YSZ(Tosho사, TZ-8YS)를 사용하여 연료극 지지체형 단전지를 제조하였으며, 그 제조과정을 Fig. 1에 나타내었다. 연료극 제조를 위하여 NiO 분말은 미리 유성밀(Planetary mill)에서 2시간 불밀 한 다음 oven에서 건조시켰으며, 8YSZ 분말은 1400°C에서 하소한 후 사용하였다. 이러한 NiO와 YSZ의 조성비를 NiO:YSZ=6:4, 5.5:4.5, 5:5, 4.5:5.5로 다양화하여 각각을 24시간 동안 습식 불밀 하였으며, 이때 기공형성을 위한 graphite, 유기 binder와 ethyl alcohol을 혼합물에 첨가한 후 오븐에서 건조시켰다. 이때 첨가한 graphite의 경우 평균 입자크기가 44, 75, 150 μm 인 상용분말을 사용하였으며, 첨가량을 18, 24, 30 vol%로 변화시켰다. 제조된 분말로 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 단전지를 제조하기 위해 크기가 $130 \times 130 \text{ mm}^2$ 이며 두께가 2 mm인 사각 금형으로 일축 성형하였으며, 약 1400°C에서 열처리하여 예비 소결체를 얻을 수 있었다. 이러한 연료극 지지체형 단전지 위에 두께가 약 30 μm 인 YSZ를 슬러리 코팅 방법으로 형성시킨 후 열처리하였으며, 이러한 단계를 통하여 두께가 약 1.6 mm이며 크기가 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 인 단전지를 제조할 수 있었다. 마지막 단계로 cathode 물질인 $(\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})(\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})\text{O}_3$ 에 Sm-doped ceria를 혼합하여 YSZ 전해질 위에 코팅하여 단전지를 완성하였다. 이렇게 제조된 단전지를 평가 장치에 장착 후 연료극에 질소 50 cc/min, 공기극에 공기 100 cc/min를 흘려주며 650°C까지 승온하였으며, 운전온도에 도달 후 연료극에 수소가스를 50 cc/min를 30분 정도 흘려주면서 환원시킨 후, 수소가스 100 cc/min, 공기 250 cc/min로 양을 늘려 약 1시간 30분 동안 안정화시켰다. 그 후에 전자부하(electric loader)를 통하여 단전지에 전류를 흘리고,

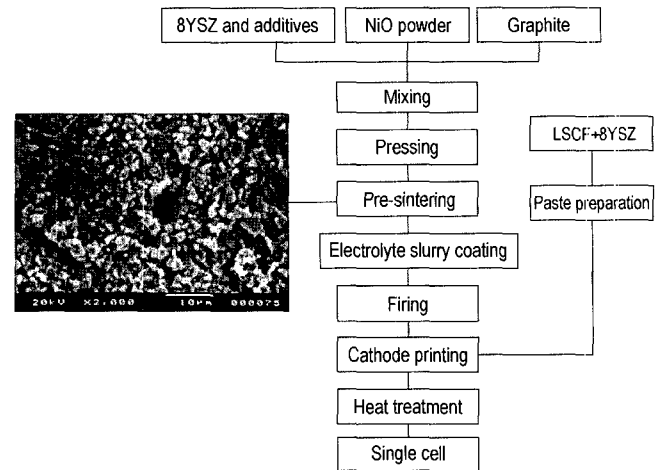


Fig. 1. Schematic diagram of the single cell preparation process.

외부로 인출된 Pt선을 이용하여 출력되는 전압을 측정할 수 있었다. 또한 단전지의 전기적 특성 측정 후, 연료극 지지체의 미세구조를 광학현미경(OLYMPUS AX70)을 통해 관찰하였다. 이때 이미지 분석 프로그램(OLYSIA)를 이용하여 각 상(Ni, YSZ, 기공)을 color value 범위에 따라 구분했으며, 각각의 threshold 값은 이미지를 통하여 조절되었다. 이렇게 구분된 상들로부터 미세구조 및 각 상들의 연결도와 분포의 균일화 정도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 연료극 지지체형 SOFC 단전지 경우 연료극에서 수소(연료)의 공급과 동시에 운전 시 부산물로 생성되는 물(스팀)의 배출이 원활히 일어나야 한다. 이러한 통로의 역할을 하는 기공의 크기, 분포 및 연결도는 연료극의 농도분극과 밀접한 관련이 있을 뿐 아니라 TPB 형성에도 영향을 주며, 나아가 전극 및 전지의 전기적 성능과도 연관된다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 이러한 영향을 알아보기 위해 먼저 연료극 제조 시 기공형성제로 graphite의 평균 입자크기와 첨가량을 변화시켜가며 형성된 미세구조를 관

Table 1. Porosities and Diameters of the Pores by Image Analysis

	NiO-YSZ ratio	Graphite volume (%)	Graphite size (μm)	Porosity (%)	Diameter (μm)
Graphite size	5:5	24	44	24.8	3.9
	5:5	24	75	25.8	4.1
	5:5	24	150	36.1	5.2
Graphite volume	5:5	18	75	22.4	3.7
	5:5	24	75	25.8	4.1
	5:5	30	75	40.7	6.2

찰하고, 단전지의 전기적 특성과의 연관성을 살펴보고자 하였다. Table 1에서와 같이 평균 입자크기 44, 75, 150 μm 의 graphite 분체를 24 vol%로 첨가하고, 평균 입자크기 75 μm 의 graphite를 18, 24, 30 vol%로 첨가량을 변화시켜 연료극을 각각 제조하였는데, 이때 연료극 조성비는 NiO:YSZ=5:5로 고정하였다. 측정결과 첨가한 graphite의 평균입자가 커질수록 형성된 기공률은 24.8, 25.8과 36.1%, 기공크기는 3.9, 4.1과 5.2 μm 로 증가함을 알 수 있다. 평균 입자크기 44, 75 μm 의 graphite를 첨가한 각 단전지의 경우 기공률 측정 결과 큰 차이가 없었으며 Fig. 2(a)와 (b)의 미세구조를 통해서도 이를 알 수 있다. 하지만 평균 입자크기 150 μm 인 graphite를 첨가한 경우 비교적 높은 약 36%의 기공률과 5.2 μm 의 평균 기공크기를 나타내며 Fig. 2(c)에서와 같이 각 상들의 크기가 조대해지며 불균일성도 증가함을 보였다.

또한 각각의 시편(셀)에 대한 전기적 성능(최대전력밀도, Pmax)과 내부저항의 크기를 Table 2에 나타냈다. 결과에서 알 수 있듯이 각 시편의 전기적 특성도 graphite 입자크기가 감소할수록 성능이 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 Fig. 2에서처럼 graphite 입자가 작을수록 TPB 밀도가 증가하여 반응저항이 작아져서 성능이 증

가하는 경향을 보이는 것으로 여겨진다. 특히 graphite 입자크기 44 μm 가 첨가된 시편이 650°C에서 470 mW/cm^2 로 비교적 높은 최대 전력 밀도 값을 나타냈으며, 이때 기공의 크기와 분포에서는 기공의 미세화에 따른 저항 증가 성분인 농도분극의 증가가 나타나지 않고 오로지 각 상(Ni, YSZ, 기공)의 미세화 및 분포의 균일성에 따른 연결도의 증가에 따라 TPB 밀도가 증가하면서 높은 성능 값을 나타내는 것으로 여겨진다. 하지만 이중 가장 큰 150 μm 의 평균입자크기를 갖는 graphite를 첨가한 경우에 단전지 출력성능(Pmax=400 mW/cm^2)은 graphite 입자크기 75 μm 을 포함한 시편에 비해 저항이 작음에도 불구하고 낮은 성능 값을 보였다. 이는 Fig. 2(c)에서와 같이 기공의 크기가 조대한 경우에는 미세구조의 불균일성으로 내부저항은 작으나 연료극의 분극저항이 커져 낮은 성능을 갖는 것으로 여겨진다.

한편 graphite 첨가량이 증가함에 따라 연료극의 기공률과 기공의 크기가 비례하는 것을 Table 1의 결과를 통해 알 수 있었다. Fig. 3은 graphite 첨가량을 18, 24, 30 vol%로 변화시킨 경우 관찰된 미세구조를 나타낸 것이며, Table 2에서의 단전지 성능 결과로부터 420 mW/cm^2 (650°C)로 가장 높은 성능을 나타낸 graphite가 24 vol% 함유된 시편이 미

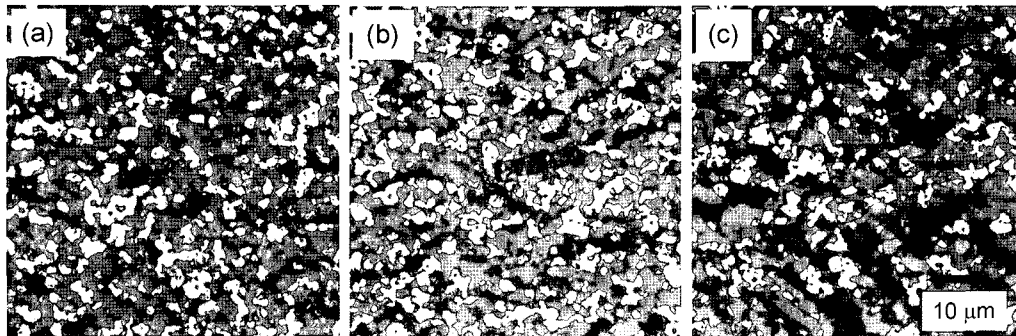


Fig. 2. Microstructures of the anodes as a function of the average particle size of graphite: (a) 44 μm , (b) 75 μm , and (c) 150 μm .

Table 2. Maximum Power Density and IR of the Test Single Cells (650°C)

	NiO-YSZ ratio	Graphite volume (%)	Graphite size (μm)	Pmax (mW/cm^2)	IR (Ωcm^2)
Graphite size	5:5	24	44	470	0.39
	5:5	24	75	420	0.49
	5:5	24	150	400	0.44
Graphite volume	5:5	18	75	380	0.45
	5:5	24	75	420	0.49
	5:5	30	75	260	0.5
NiO-YSZ ratio	6:4	24	75	510	0.34
	5.5:4.5	24	75	450	0.37
	5:5	24	75	420	0.49
	4.5:5.5	24	75	400	0.44

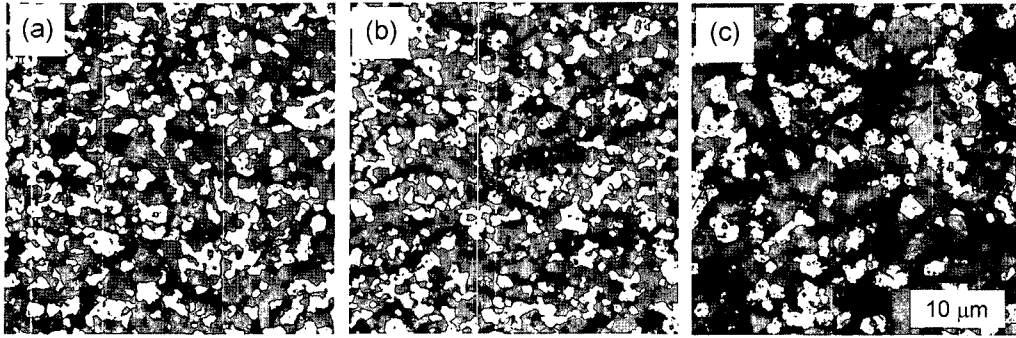


Fig. 3. Microstructures of the anodes as a function of the volume fraction of graphite: (a) 18 vol%, (b) 24 vol%, and (c) 30 vol%.

세구조상 최대의 TPB 밀도가 형성된 것을 알 수 있었다. 단전지의 성능은 운전온도 650°C에서 각각 380 mW/cm² (18 vol%), 420 mW/cm² (24 vol%)와 260 mW/cm² (30 vol%)의 결과로 얻어졌으며, 이때의 내부저항은 0.45, 0.49와 0.5 Ωcm²로 나타났다. 이러한 결과로 미세구조에서 기공률은 약 24~26%, 평균 기공크기는 약 4.0 μm가 가장 적절한 것임을 실험결과를 통해 예상할 수 있었다. 또한 첨가된 graphite 입자크기와 첨가량을 조절하여 연료극의 기공률과 기공크기를 제어할 수 있으며 이러한 연료극의 미세구조 변화로 단전지의 성능을 최적화할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 기공형성제인 graphite의 변화를 통해 나타난 미세구조를 통하여 기공변화에 따른 분극저항과 성능과의 연관성을 판단하기 보다는 기공률과 기공크기에 따른 연결도의 해석 및 TBP와의 상관관계 등이 고

찰되어야 할 것으로 생각된다.

연료극 지지체형 단전지의 경우 전기화학적 반응성은 Ni, YSZ와 기공으로 형성되는 삼상계면(TPB)에 크게 의존하며,³⁾ 단전지 출력 성능 향상을 위해 TPB밀도와 Ni입자의 연결도를 높이는 것은 필수조건이라 할 수 있다. 이러한 미세구조는 연료극의 원료물질과 각 입자크기 및 함량, 소결온도 등과 같은 여러 조건 변화를 통해서 제어가 가능한 것으로 알려져 있어, 이를 통해 연료극의 성능을 충분히 개선시킬 수 있다고 생각된다. 이에 따라 연료극 구성물질인 NiO와 YSZ의 조성비를 변화시켜가며 제조된 연료극의 미세구조 이미지를 관찰했으며 단전지가 갖는 전기적 특성과 연관지어 살펴보았다. 이를 위해 연료극 제조 시 조성비를 NiO:YSZ=6:4(a), 5.5:4.5(b), 5:5(c)와 4.5:5.5(d)로 변화시켰으며, 이때 기공형성제로서 평균 입자크기 75 μm의 graphite를 24 vol%로 동일하게 섞어 혼합하였다. 이러한 조성비 변화에 따른 연료극 미세구조를 Fig. 4에 나타내었으며, NiO 함량이 증가할수록 Ni 입자의 연결도와 각 상의 분포가 균일화됨을 알 수 있었다. 또한 Fig. 4(a)와 (b)의 경우 미세구조 관찰시 큰 차이점이 없었지만, 시편 조성비 NiO:YSZ=5.5:4.5의 단전지가 비교적 낮은 성능을 보였으며 이는 일부분에 나타난 불균일한 미세구조가 영향을 준 것으로 생각된다. 조성비 NiO:YSZ=4.5:5.5인 시편 Fig. 5(d)의 경우 기공의 크기와 모양이 일정치 않았으며, 각 상들의 연결이 균일하게 형성되지 못한 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 미세구조는 Ni이 YSZ에 둘러싸여 전자의 이동이 원활하지 못한 형태로, Table 2에서의 전기적 성능결과에서도 낮은 성능 값을 보여 고성능 연료극을 위한 미세구조로 부적합할 것으로 판단되었다.

한편 이미지 분석 프로그램을 이용하여 각 상(Ni, YSZ, 기공)들의 분율(면적) 및 평균 입자크기의 평균값을 구할 수 있었으며, 그 결과를 Table 3에 나타냈다. 첨가된 NiO 함량이 증가할수록 Ni입자가 점점 커지는 것을 알 수 있었으며, 이에 따라 Ni간의 접촉성뿐만 아니라 Ni의 입자크기도 조절될 것으로 생각된다. 또한 Table 3의 결과로

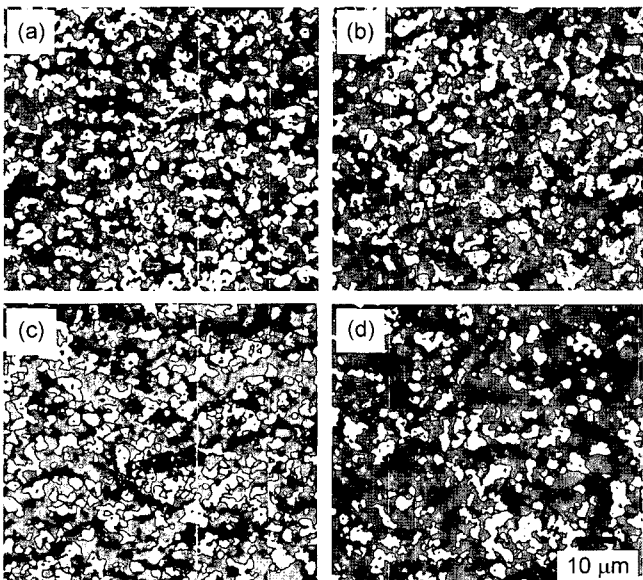


Fig. 4. Microstructures of the anodes as a function of the NiO-YSZ composition ratio: (a) NiO-YSZ = 6:4, (b) NiO-YSZ = 5.5:4.5, (c) NiO-YSZ = 5:5, and (d) NiO-YSZ = 4.5:5.5.

Table 3. Area Fraction and Diameter of Ni, YSZ and Pore

	NiO-YSZ ratio	Ni-YSZ	Fraction (%)/ Diameter (μm) of Ni	Fraction (%)/ Diameter (μm) of YSZ	Fraction (%)/ Diameter (μm) of pore
	6:4	1.13	39.7/5.1	35.2/4.2	23.7/4.1
NiO-YSZ ratio	5.5:4.5	0.94	37.2/4.7	39.6/4.8	23.2/3.9
	5:5	0.72	31.8/4.5	44.0/4.8	25.8/4.1
	4.5:5.5	0.65	27.3/4.3	41.8/5.1	25.7/4.4

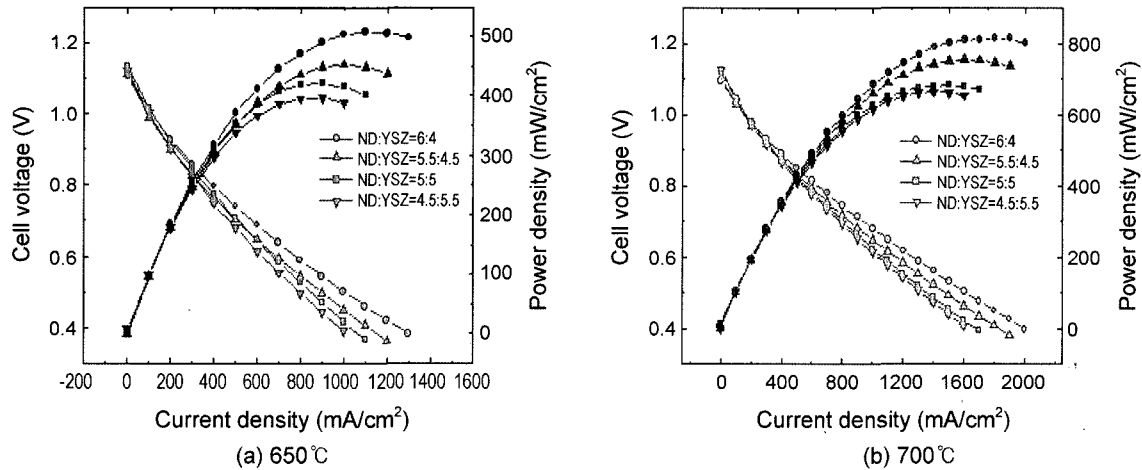


Fig. 5. The I-V and I-P characteristics of the single cells as a function of the NiO-YSZ composition ratio.

부터 NiO-YSZ 조성변화는 실제 기공률 및 기공의 평균 크기에는 크게 영향을 미치는 않은 것으로 생각되며, 연료극의 기공률은 앞선 결과에서도 알 수 있듯이 첨가한 graphite의 입자크기와 함량에만 의존하는 것으로 생각된다. 따라서 NiO-YSZ 조성비는 기공률 외에 Ni과 YSZ의 분포(연결도)에 직접적으로 영향을 미쳐 TPB 밀도와 연관되는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 운전온도 650, 700°C에서 NiO-YSZ 조성비에 따른 단전지 I-V와 I-P 특성을 보여준다. 이러한 단전지의 전기적 특성 결과 조성비 NiO-YSZ=6:4인 단전지의 성능이 650°C에서 Pmax값으로 약 510 mW/cm², 700°C에서는 약 810 mW/cm²로 가장 높게 나타나 NiO함량이 증가할수록 성능이 커지는 것을 알 수 있었으며, 이때의 조성비가 가장 적절한 조건임을 확인할 수 있었다. 한편 내부저항도 0.34 Ωcm²로 가장 낮은 값을 보였으며, 조성비 NiO-YSZ=5:5까지 NiO함량이 감소함에 따라 내부저항이 증가했다. 따라서 연료극 지지체형 단전지의 경우 원료물질 조성비 조절을 통해 전자와 이온의 이동이 원활하도록 하기 위한 Ni과 YSZ의 형성이 균일해야 하며, 특히 미세구조에서 Ni입자의 연결 정도는 전자의 이동에 가장 큰 영향을 미치며 단전지의 성능에 직접적인 관여를 하므로 NiO-YSZ 조성비 정립은 연료극 지지체형 단전지 제

조 시 무엇보다 중요하다고 판단된다.

4. 결 론

중·저온에서 고성능을 가지는 연료극 지지체형 단전지를 제조하기 위해 연료극 기공 및 미세구조 조절을 통해 연료극 분극저항 및 단전지 내부저항을 최소화하고자 하였다. 연료극을 구성하는 기공을 제어하기 위해 기공형성제인 graphite의 입자크기 및 첨가량을 조절하고, 각 상들의 연결도와 분포를 균일화하고자 연료극 구성물질(NiO-YSZ)의 조성비를 변화시켰으며 이에 따른 시편의 미세구조와 전기적 특성을 살펴보았다. 결과적으로 graphite의 평균 입자크기와 첨가량을 변화시킴에 따라 기공의 크기와 기공률을 조절할 수 있었으며, 특히 기공률과 기공의 평균크기는 NiO-YSZ 조성변화에는 영향을 크게 받지 않았고 graphite의 입자크기와 첨가량에만 의존하는 것을 실험으로부터 알 수 있었다. 또한 NiO-YSZ 조성비는 기공률이 아닌 TPB밀도와 직접적으로 연관되는 것으로 생각되었다. 제조된 단전지 중 평균 입자크기 75 μm의 graphite가 24 vol% 함유되고, 연료극조성비 NiO:YSZ=6:4를 갖는 것이 균일한 미세구조, 높은 성능과 낮은 내부저항 값을 나타냈다. 이러한 시편의 연료극은 실험 중 최적의 기공

률과 기공크기를 가지고 있는 것으로 믿어지며 Ni입자의 연결도와 각 상의 분포가 균일하게 나타났으며, 그 결과 650°C에서 최대전류밀도가 510 mW/cm², 700°C에서 810 mW/cm²로 비교적 높은 성능을 보였다. 하지만 Ni, YSZ와 기공 3상에 대한 크기 및 비율뿐만 아니라 이 상들의 연결도에 대한 정량적인 분석이 수행될 수 있다면 좀더 미세구조와 전기적 성능과의 상관관계를 해석할 수 있을 것으로 여겨진다. 향후 이렇게 개선된 연료극에 다층구조(functional layer)를 도입하여 반응성을 개선하고, 고성능의 단전지 제조에 관한 연구를 진행 할 것이다.

Acknowledgment

본 연구는 산업자원부 연료전지 핵심원천기술 개발사업(2004-00486)과 에너지관리공단 신재생에너지 기술개발사업(2003-N-FC02-P-01)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

REFERENCES

1. K. Choy, W. Bai, S. Charojrochkul, and B. C. H. Steele, "The Development of Intermediate-Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the Next Millennium," *J. Power Sources*, **71** 361-69 (1998).
2. J. P. P. Huijsmans, F. P. F. VanBerkel, and G. M. Christie, "Intermediate Temperature SOFC-a Promise for 21st Century," *J. Power Sources*, **71** 107-10 (1998).
3. T. Fukui, K. Murata, S. Ohara, H. Abe, M. Naito, and K. Nogi, "Morphology Control of Ni-YSZ Cermet Anode for Lower Temperature Operation of SOFCs," *J. Power Source*, **125** 17-21 (2004).
4. Y. J. Leng, S. H. Chan, K. A. Khor, and S. P. Jiang, "Performance Evaluation of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells with Thin Film YSZ Electrolyte," *Int. J. Hydrogen Energy*, **29** 1025-33 (2004).
5. H. Abe, K. Murata, T. Fukui, W.-J. Moon, K. Kaneko, and M. Naito, "Microstructure Control of Ni-YSZ Cermet Anode for Planer Thin-Film Solid Oxide Fuel Cells," *Thin Solid Films*, **496** 49-52 (2006).
6. T. Kawada, N. Sakai, H. Yokokawa, M. Dokiya, M. Mori, and T. Iwata, "Structure and Polarization Characteristics of Solid Oxide Fuel Cell Anodes," *Solid State Ionics*, **40** 402-46 (1990).
7. T. Fukui, S. Ohara, M. Naito, and K. Nogi, "Performance and Stability of SOFC Anode Fabricated from NiO-YSZ Composite Particles," *J. Power Source*, **110** 91-5 (2002).
8. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cell," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
9. H. Koide, Y. Someya, T. Yoshida, and T. Maruyama, "Properties of Ni/YSZ Cermet as Anode for SOFC," *Solid State Ionics*, **132** 253-60 (2000).
10. J. W. Heo, D. S. Lee, J. H. Lee, J. D. Kim, J. S. Kim, H. W. Lee, and J. H. Moon, "Effect of the Pore Structure on the Anodic Property of SOFC(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [4] 86-91 (2002).