

평관형 고체 산화물 연료전지의 연료극 지지체 NiO/YSZ의 환원 및 재산화 거동 특성

송락현[†], 이길용^{*}, 신동열^{*}

*한국에너지기술연구원 수소·연료전지연구부 신연료전지연구센터

Redox Behaviors of NiO/YSZ Anode Tube in Anode-Supported Flat Tubular Solid Oxide Fuel Cells

Rak-Hyun Song[†], Gil-Yong Lee^{*}, Dong-Ryul Shin^{*}

*Advanced Fuel Cell Research Center, Hydrogen and Fuel Cells Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT

The redox behaviors of anode-supported flat tube for solid oxide fuel cell has been studied. The mass change of the extruded NiO/YSZ anode flat tube during redox cycling was examined by thermogravimetric analysis(TGA). The result of TGA was shown a rapidly mass change in the range of 455 - 670 °C and the reoxidation of the NiO/YSZ anode was almost completed at 750 °C. The starting temperature of reoxidation and the maximum temperature of oxidation rate decreased with increasing the reoxidation cycle, which is attributed to the increased porosity caused by volume change. Bending strengths of the NiO/YSZ anode after redox cycling were 96 - 80 MPa and the bending strength decreased slightly with increasing the redox cycle. On the other hand, the bending strength of the NiO/YSZ anode with electrolyte showed 130 MPa after first redox cycling but decreased rapidly with increasing the redox cycle. From the results of the bending test and the microstructure observation, we conclude that the crack initiation of the electrolyte-coated NiO/YSZ anode was induced easily at interface of electrolyte/anode tube and propagated cross the electrolyte.

주요기술용어 : Reoxidation(재산화), Reduction(환원), Anode-supported flat tube(연료극 지지체 평관형), TGA(열분석), mechanical strength(기계 강도), Solid Oxide Fuel Cell(고체 산화물 연료전지)

1. 서론

고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell : SOFC)는 화학에너지를 전기화학반응에 의해

직접에너지로 변화시키는 에너지 변환장치이다. 최근 SOFC의 실용화와 신뢰성 확보를 위하여 SOFC의 작동온도를 1000 °C에서 800 - 600 °C로 낮추려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 작동온도를 낮추게 되면 SOFC의 구성품인 전극, 전해질, 연결재 및 매니폴드 등의 구

[†]Corresponding author : rhsong@kier.re.kr

평판형 고체 산화물 연료전지의 연료극 지지체 NiO/YSZ의 환원 및 재산화 거동 특성

성 재료를 다양하게 선택할 수 있으며, 또한 셀의 열충격 저항성, 구성품들 간의 계면 반응성, 전지의 성능 안정성과 신뢰성 등을 확보할 수 있는 장점이 있다^{1,2)}.

SOFC는 셀의 기하학적인 형태에 따라 원통형과 평판형구조로 나누어진다. 평판형 고체산화물 연료전지는 원통형에 비하여 스택 자체의 전력밀도가 높은 장점이 있다. 그러나 가스 밀봉문제와 재료들 간의 열팽형계수 차이에 의한 열적 쇼크 등의 문제로 그 크기가 제한을 받기 때문에 대용량 연료전지에 필수적인 대면적 연료전지의 제조가 어렵다는 문제가 있다. 이에 비해 원통형은 스택을 구성하는 단위전지들의 밀봉이 용이하고, 열응력에 대한 저항성이 강한 동시에 스택의 기계적 강도가 높아 대면적 제조가 가능한 기술이다. 하지만 평판형에 비하여 단위 면적당 전력 밀도가 낮고 고가의 제조 공정이 필요한 문제가 있다.

원통형 구조의 문제를 해결하기 위한 방안으로 종래의 공기극 원통형 대신에 연료극 지지체 원통형이 개발되었다³⁻⁵⁾. 연료극 지지체 원통형은 작동온도가 낮고, 저가의 습식법에 의한 셀 제조가 가능하다는 이점이 있으며, 형상을 마이크로 튜브형(micro tube), 평판형(flat tube) 등으로 다양화시켜, 기존의 평판형과 비교될 수 있을 정도의 높은 전력밀도를 나타낼 수 있다. 또한, 연료극 지지체 구조(anode support struture)는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다^{1-3,6,7)}. (i) 제조공정 과정에서 전해질과 반응이 없어야 한다. 특히 전해질과 전극을 공소결시 고온(1300 - 1500 °C)에서 전극과 전해질 계면의 반응이 적어야 한다. (ii) 전극 지지체 구조의 강도가 높아야 한다. 셀의 강도는 전극 지지체가 좌우하므로 셀의 제조 및 스택 조립시에 취급이 용이할 정도의 충분한 강도가 요구된다. 또한, 작동온도에서 열적 기계적응력을 견딜 수 있어야 한다. (iii) 전극 지지체는 대개 500 - 2000 μm 의 두께를 가지기 때문에 전극/전해질층/가스의 3상 계면으로 연료

가스가 원활히 공급될 수 있도록 충분한 가스 투과도 가져야 한다. (iv) 높은 소결 적합성을 가져야 한다. 즉 전극지지체와 전해질 공소결시 굽힘이나 휨이 없도록 수축률이 잘 일치하여야 하며, 높은 생산성을 가져야 한다. (v) 높은 전기전도성과 낮은 음저항을 가져야 한다. (vi) 미세구조와 표면 및 수축률 등이 좋아야 한다. (vii) 재료의 단가가 낮아야 한다.

특히, 본 연구에 사용된 평판형 연료극 지지체식(Flat-Tubular anode support type) 고체산화물 연료전지는 평판형 및 원통형 고체산화물 연료전지가 가지고 있는 제반 문제점들을 해결하기 위하여 창안된 것이다. 그러므로 평판형 구조와 원통형 구조를 함께 갖도록 함으로써 원통형의 장점을 가지면서도 저전력 밀도의 문제점이 해결할 수 있고, 고체 산화물 연료전지 스택을 효과적으로 제작할 수 있도록 설계되었다⁸⁾.

연료극 지지체 셀은 정상적인 운전에는 연료극의 NiO는 금속 Ni로 환원된 상태로 존재하게 되며, 가스 공급의 중단 또는 가스 기밀부의 손상 등으로 운전 정지 및 비상시 산화성 분위기에 노출될 때 NiO로 재산화가 발생하게 된다. 이 때 연료극 지지체의 재산화에 따른 미세조직 변화로 셀의 강도 변화가 예상되고 있으나, 이와 같은 재산화 거동이 발생할 경우 일어날 수 있는 연료극 지지체의 특성 변화에 대한 명확한 분석이 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 압출 성형 공정으로 제조된 연료극 지지체 평판형 고체 산화물 연료전지의 환원 및 재산화 사이클에 따른 NiO/YSZ의 TGA 분석, 미세구조 및 기계적 강도 변화를 조사하고 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 평판형 연료극지지체는 NiO-YSZ 다공성 지지체관을 압출법으로 제조하였으며, NiO(Junsei Chem. Co.)와 8 mol%

이트리아 안정화 지르코니아(8 mol% yttria-stabilized Zirconia, 8YSZ, Tosoh Co.)를 이용하여 40 vol.% Ni/8YSZ가 되도록 정량하여 연료극 분말을 제조하였다.

다공성을 얻기 위해 기공형성제로 활성탄(YP17, 일본 Kuray Chem. Co.)을 1 wt.% 첨가하였으며, 압출성형을 위해 연료극 분말에 유기바인더와 가소제, 윤활제를 첨가하여 반죽(kneading)하였다. 그리고 일정 점도 및 균일성형을 위해 증류수를 첨가하여 페이스트를 제조하였다. 제조된 압출용 페이스트(paste)는 48시간정도 숙성(aging)하였다. 압출된 평판형 성형체는 120 °C에서 24시간 건조한 후, 건조된 지지체는 1300 °C에서 가소결하였다. 전해질은 별도로 제조된 8YSZ 슬러리에 반복 코팅 및 탈지(debinding)과정을 거쳐 약 20 μm의 두께로 슬러리 딥 코팅(dip-coating)하고 1400 °C에서 공소결하였다.

소결된 평판형 연료극지지체는 온도에 따른 Ni/YSZ의 재산화에 따른 거동을 측정하기 위해, 3 × 3 mm크기로 다이아몬드 절삭기를 사용하여 시편을 제조한 후 시편 표면을 연마한 후 초음파 세척하였다. 제조된 시편을 환원성 분위기인 혼합가스(Ar 96 % + H₂ 4 %)를 사용하여 750 °C에서 5시간 동안 환원시켰다. TGA (Netsch, STA 409PC)를 이용하여 질량변화를 측정하였으며 이때 공기 유량은 20 ml/min, 승온속도는 2 °C/min로 상온에서 900 °C까지 측정하였다. 동일 시편으로 4회 산화/환원을 반복하여 측정하였다. 또한, 소결된 평판형 지지체를 약 4 × 1.7 × 36 mm 크기로 시편을 제조한 후 강도측정에 영향을 미치지 않도록 SiC연마지를 이용하여 각진 모서리 부분을 제거하고 초음파 세척하였다. 제조된 시편을 각 환원/산화 분위기에서 승온속도는 2 °C/min로 상승한 후, 750 °C에서 5시간 동안 환원/산화를 각각 1 - 4회 반복하여 시편을 제조하였다. 전해질이 코팅된 평판형 지지체도 동일한 방법으로 시편을 제조하였다.

각각의 제조된 시편의 기계적 강도는 3점 굴곡시험법(3-point bending strength)으로 측정하였으며, 시편을 하부 간격(span)이 1인치인 3점 굴곡강도 지그에 올려놓은 후 1 mm/min의 속도로 하중을 가하여 강도를 계산하였다. 전해질 코팅 후 공소결시킨 평판형 연료극지지체의 재산화시 균열 발생을 관찰하고 미세구조 특성을 알아보기 위해 XRD(Rigaku, Rint-2000)와 SEM(HITACHI, S-4700)을 이용하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

NiO/YSZ연료극 지지체의 재산화 사이클에 따른 질량변화를 TGA를 사용하여 관찰하였다. Fig. 1은 NiO/YSZ의 압출시편을 혼합가스(Ar 96 % + H₂ 4 %)를 이용하여 750 °C에서 5시간 환원시킨 후, 상온에서 900 °C까지 승온시켰으며 동일한 시편을 사용하여 재산화 과정을 반복하였다.

처음 재산화된 시편의 경우 350 °C 부근에서 Ni/YSZ시편의 산화반응이 시작되며, 475 - 670 °C 구간에서 11.9 %의 급격한 질량증가를 보였으며 전체적으로 13.3 %의 질량 증가를 나

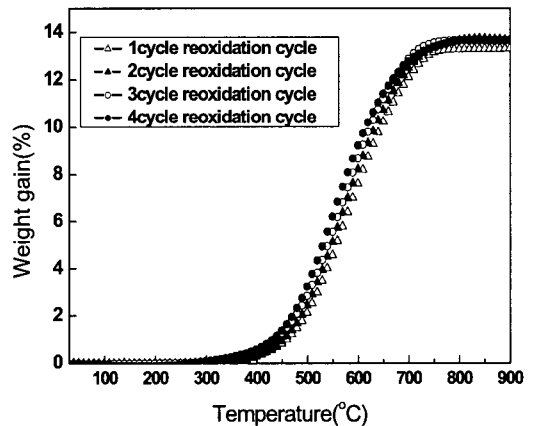


Fig. 1 TGA curves of NiO/YSZ sample during reoxidation at a constant temperature rate of 2 °C/min

평판형 고체 산화물 연료전지의 연료극 지지체 NiO/YSZ의 환원 및 재산화 거동 특성

타났다. 750 °C 이후 질량증가의 변화는 일어나지 않고 일정한 값을 나타내는 것으로 보아 Ni/YSZ가 NiO/YSZ로 완전히 산화되었음을 관찰할 수 있다. 2회 재산화시 470 - 660 °C 구간에서 12.0 %의 질량증가를 보인 후 전체적으로 13.6 %의 질량증가를 나타냈다. 3회 재산화시 460 - 665 °C 구간에서 12.5 %의 급속한 질량증가를 보인 후 전체적으로 13.6 %의 질량증가를 나타냈다. 4회 재산화시 455 - 650 °C 구간에서 12.0 %의 빠른 질량증가를 보였으며, 전체적으로 13.7 %의 질량증가를 나타냈다.

재산화 사이클 수에 따라 전체적으로 13.3 - 13.7 %의 일정 질량증가량을 보임으로써 Ni/YSZ의 산화반응량은 거의 일정함을 알 수 있다. 재산화 사이클 수가 증가할수록 초기 질량증가가 시작되는 온도가 300 °C 부근으로 낮아지며 급속한 질량증가가 끝나는 온도도 초기 670 °C에서 650 °C로 이동하였음을 관찰할 수 있다.

이와 같은 결과로 부터 급속한 질량변화가 발생하는 온도구간의 변화는 재산화 과정에서 Ni/YSZ가 NiO/YSZ로 되면서 부피팽창이 발생하여, 재산화 사이클 수가 증가할수록 산화반응이

더욱 용이한 방향으로 NiO/YSZ의 기공도가 증가하기⁹⁾ 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 2는 TGA 결과를 이용하여 질량변화곡선을 미분(DTG)하여 얻은 최대 산화율인 온도(T_m)를 나타낸 것이다. T_m 값이 처음 재산화시 578 °C에서 4회 재산화시 544 °C로 점점 낮아짐을 관찰할 수 있다. Fig. 3은 NiO/YSZ시편의 재산화 사이클에 따른 굴곡강도 값을 나타낸 것이다. 1400 °C 소결 후 NiO/YSZ시편은 약 96 MPa의 굴곡강도를 나타냈으며, 재산화 사이클 수가 증가함에 따라 굴곡강도는 약간씩 감소하였다. NiO/YSZ 시편의 기공은 조대기공(coarse pore)과 미세기공(fine pore)으로 이루어지며, 환원/재산화 과정이 반복됨에 따라 NiO는 스펀지와 같은 형태로 더 많은 미세기공을 형성하게 된다.

이 과정에서 조대기공에 노출된 NiO와 YSZ의 연결도가 감소하게 되며, 이로 인해 재산화 사이클 수가 증가할수록 미세기공이 많아지고 따라서 균열 발생이 증가하게 되어 연료극지지체의 강도가 감소하게 된다. 반면에 전해질이 코팅된 연료극지지체 시편의 경우 초기의 강도가 약 130 MPa로 상대적으로 NiO/YSZ시편보다 더 높은 파괴강도를 나타냈으며, 이는 치밀

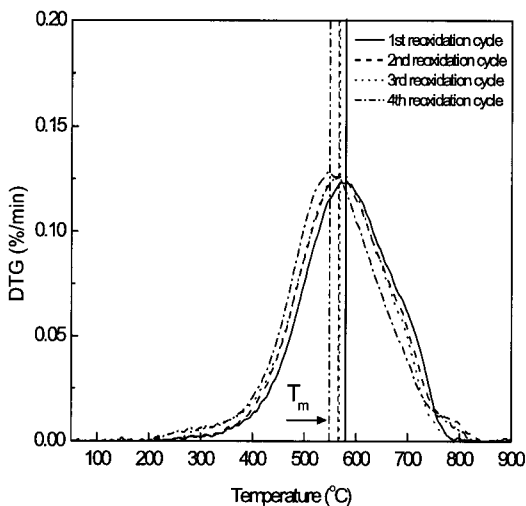


Fig. 2 Derivatives of reoxidation TGA curves obtained at a constant temperature rate

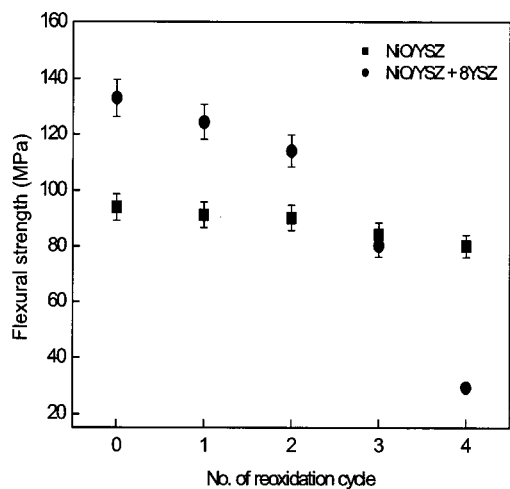


Fig. 3 Bending strengths of NiO/YSZ samples with and without an electrolyte as a function of reoxidation cycle

한 YSZ전해질로 인한 강도증가이다. 그러나 재산화 사이클 수가 증가할수록 강도의 감소가 NiO/YSZ 시편보다 더 크게 나타났으며, 재산화 사이클 수 3회부터 더욱 급격한 강도 감소를 보이다가 4회에서 약 20 MPa를 보여 주었다. 이런 결과는 다음과 같이 설명되어질 수 있다.

환원 및 재산화에 따른 부피수축 및 팽창으로 인하여 NiO/YSZ와 전해질 계면에서 인장응력을 받게 된다. 이 때 계면의 조대기공에서 균열이 발생하게 되며, 재산화 사이클 수가 증가할수록 균열은 전해질 쪽으로 전파하게 되어 치밀한 전해질 층에 급격한 파괴가 발생하게 된다. 본 실험에서는 재산화 사이클이 4회인 경우에 이미 전해질 층에 균열이 발생하였음을 확인할 수 있었다. Sammes등¹⁰⁾은 재산화 과정에서 연료극 지지체의 급격한 강도감소는 NiO의 Ni로 환원에 따른 부피변화에 의한 것이라 보고하였다.

또한, Malzbender 등¹¹⁾에 따르면 재산화 과정동안에 연료극의 미세구조가 변하게 되며, 이로 인해 기공도의 증가와 부피 팽창을 일으켜 전해질에 인장응력 및 변형을 유발시켜 파괴를 일으킨다고 보고하였다. 이러한 연구결과들은 본 연구와 동일한 경향을 나타내는 것으

로 재산화 과정에 따른 강도 감소와 파괴 현상은 NiO의 부피 팽창과 밀접한 관계를 가지고 있음을 의미한다.

Table 1은 문헌^{10,12,13)}에 따른 Ni/YSZ 및 NiO/YSZ시편을 측정방법에 따른 파괴강도를 나타낸 것이다. 본 연구결과의 80 - 96MPa값과 Sammes 등¹⁰⁾이 발표한 80 - 120MPa값은 시편의 조성 및 측정방법에서 좋은 비교대상이며, 측정강도는 Ni 함량뿐 만 아니라 시편의 제조방법에도 의존한다는 것을 보여 준다.

Fig. 4 (a)는 1회 재산화 후 환원에 따른 전해질이 코팅된 평판형 연료극지지체의 사진이다. 지지체의 기하학적 구조로 인하여 전해질 및 연료채널 및 전류 집전부인 립(rib)에서 균열이주로 발생하였음을 관찰할 수 있다. 이는 평판형 지지체의 경우, 재산화에 따른 응력 및 변형의 발생이 전해질뿐만 아니라 연료극지지

Table 1 Bending strength values of Ni/YSZ and NiO/YSZ samples for various test methods

Sample composition and type	Test technique (at room temp.)	Mechanical strength (MPa)	Reference
37 vol% Ni/YSZ (20.7 % porosity)	flexure strength of bar	120	K. Z. Fung et al. ¹²⁾
40 vol% Ni/8YSZ	3-point bend	80 - 120	Sammes et al. ¹⁰⁾
NiO/YSZ (coat-Mix®)	4-point bend	80 - 120	D. Simwonis et al. ¹³⁾
40 vol% NiO/8YSZ	3-point bend	80 - 96	this study

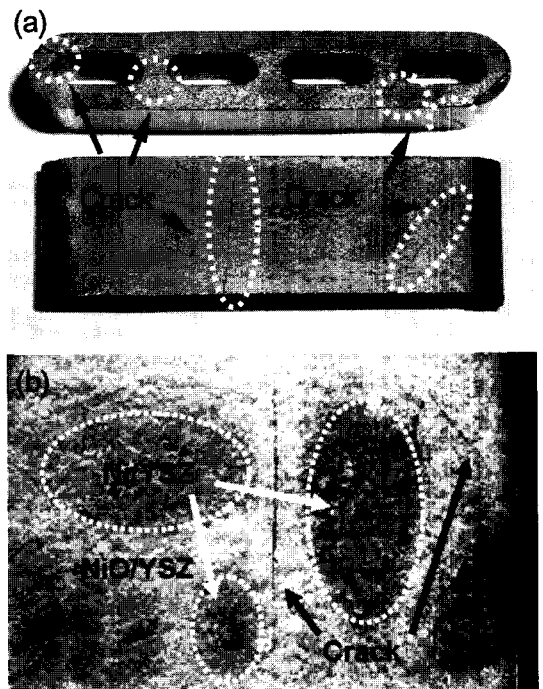


Fig. 4 Images of a (a) reduced anode supported flat tube after reoxidation and (b) an anode surface with an electro-lyte after reoxidation

평판형 고체 산화물 연료전지의 연료극 지지체 NiO/YSZ의 환원 및 재산화 거동 특성

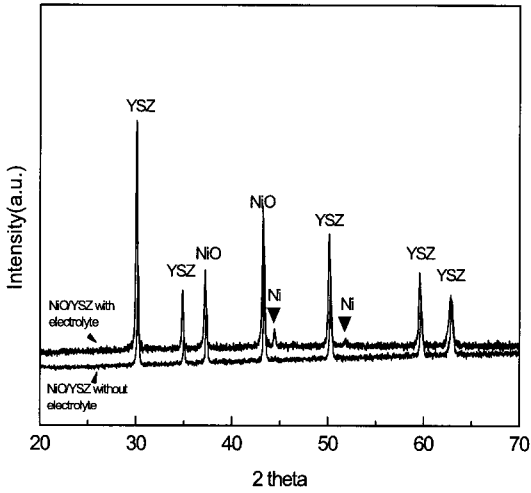


Fig. 5 X-ray patterns of NiO/YSZ samples without and with an electrolyte after reoxidation

체 전체에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Fig. 4 (b)는 전해질 코팅된 평판형 셀을 재산화 사이클을 수행한 후 균열이 발생된 부분을 보여 주고 있으며, 다소 짙은 색을 띠는 부분이 균열주위에 섬처럼 분포해 있음을 알 수 있다. 이 부분을 XRD 분석결과 Fig. 5와 같이 $2\theta = 45^\circ, 52^\circ$ 부근에서 Ni 피크가 관찰됨으로써 산화되지 않는 Ni/YSZ 벌크임을 확인할 수 있다. 재산화 후 이러한 Ni/YSZ 덩어리가 NiO/YSZ 내에 존재함으로써 지지체/전해질 계면에 인장응력의 차이를 더욱 유발시켜 균열의 생성 및 전파를 가속화시킬 것으로 사료된다.

Fig. 6은 재산화 후 전해질이 코팅된 NiO/YSZ 시편의 단면을 나타낸 것으로, 전해질에서 균열이 관찰되었다. Fig. 6 (a)는 균열이 전해질과 연료극 계면에서 시작되었고, Fig. 6 (b)는 연료극에서 전해질로 전파되었음을 관찰할 수 있다. 그리고 세라믹의 균열 전파는 매우 빠르기 때문에 치밀한 전해질 층의 경우 균열이 전파되는 과정을 관찰하기가 매우 어렵다.

그러나 균열의 발생이 연료극 지지체/전해질 계면에서 주로 발생하기 때문에 재산화에 따른

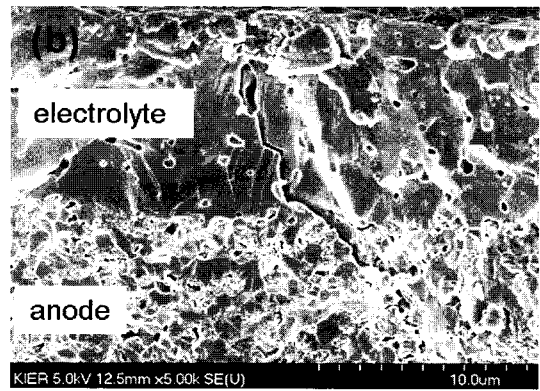
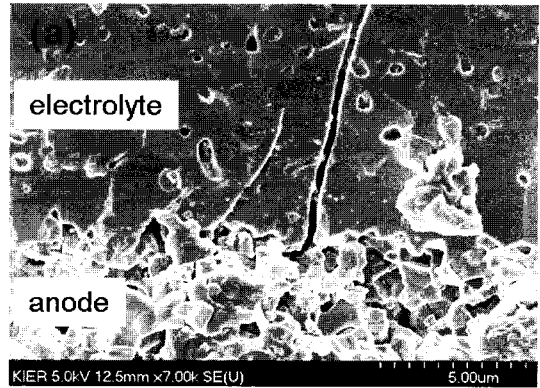


Fig. 6 Cross sections of redox cycled samples showing (a) the cracked electrolyte, (b) the crack propagation across an interface of electrolyte and anode support

연료극과 전해질사이의 조대기공으로 인한 구조적 결함을 억제하고, 연료극과 전해질 계면의 인장응력을 최소화하기 위해 보다 작은 입자크기를 갖는 Ni 산화물을 사용한 기능성 막의 도입이 필요하다. D. Waldbillig 등¹⁴⁾에 따르면 Ni의 함량을 달리하여 기능성 막을 코팅할 경우 재산화에 의한 부피변화를 줄일 수 있으며, 우수한 전기적 특성을 나타낸다고 보고하였다.

4. 결 론

본 연구는 환원/재산화 사이클 수에 따른 평판형 NiO/YSZ 연료극 지지체의 TGA 분석, 기계적 강도, 전해질의 코팅 효과를 조사하여 다

음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) TGA를 이용한 Ni/YSZ시편의 산화특성 실험결과, 처음 재산화시 350 °C 부근에서 산화반응이 시작되었으며, 전체적으로 455 - 670 °C 온도구간에서 급격한 질량증가를 보인 후, 750 °C 부근에서 산화 반응이 대부분 종료됨을 확인할 수 있었다. 전체적으로 13.3 - 13.7 %의 질량증가를 얻었다. 재산화 사이클 수가 증가할수록 급격한 질량증가가 발생하는 온도구간이 낮은 방향으로 이동하였으며, 이와 같은 결과는 재산화 사이클 수가 증가함에 따라 Ni/YSZ가 NiO/YSZ로 부피 팽창하여 기공성이 증가하기 때문이다.
- 2) 환원/재산화 사이클수에 따른 강도측정 결과, 연료극 지지체 NiO/YSZ 시편은 96 - 80 MPa를 보였으며, 재산화 사이클수가 증가함에 따라 강도 감소는 크지 않았다. 반면에 전해질이 코팅된 NiO/YSZ 시편은 초기 130 MPa값을 나타내었으나, 재산화 사이클 수가 증가함에 따라 강도는 급속히 감소하였다. 이것은 전해질과 NiO/YSZ 계면에서 균열의 발생 및 전해질로의 급속한 균열 전파에 기인하는 것으로 생각된다. 전해질이 코팅된 NiO/YSZ의 경우 재산화 후 국부적으로 급속 Ni이 산화되지 않은 부분이 관찰되었으며, 이러한 불균일한 산화 또한 전해질 코팅된 NiO/YSZ의 강도 감소에 기여했을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 연료전지 핵심 원천기술 개발 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) N. Q. Minh and T. Takahashi, "Science and Technology of Ceramic Fuel Cells", Elsevier,

Amsterdam, 1995, pp. 165-191.

- 2) S. C. Singhal and K. Kendall, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cells" Elsevier, Kidlington, 2003, pp. 173-180.
- 3) R. H. Song, E. Y. Kim, D. R. Shin and H. Yokokawa, "Fabrication and Characteristics of Anode-Supported Tube for Solid Oxide Fuel Cell," Proc. 6th Intern. Sym. Solid Oxide Fuel Cells, The Electrochemical Society, October 17-22, 1999, pp. 845-850.
- 4) 송락현, 신동열, 김용용, Harumi Yokokawa, "연료극 지지체식 원통형 고체산화물 연료 전지 및 그 제조 방법," 한국특허 등록 제 0344936호, 2002년 7월 3일.
- 5) Rak-Hyun Song, Dong-Ryul Shin, EungYoung Kim, Harumi Yokokawa, "Fuel Electrode-Supported Tubular Solid Oxide Fuel Cell and Method of Manufacturing The Same," U.S. Patent 6,436,565 B1, Aug. 20, 2002.
- 6) S. P. Jiang and S. H. Chan, "A review of anode materials development in solid oxide fuel cells", J. Mater. Sci. 39 4405-4439, 2004.
- 7) K. S. Lee, D. W. Seo, J.H. Yu and S. K. Woo, "A Study on the Improvement of Strength in NiO-YSZ Porous Anode Material for Solid Oxide Fuel Cell". J. Kor. Ceram. Soc., vol. 40, No. 3, 2003, pp. 241-248.
- 8) J. H. Kim and R. H Song, "Characteristics of Anode-supported Flat Tubular Solid Oxide Fuel Cell", J. Korean Electrochem. Soc., vol. 7, No. 2, 2004, pp. 94-99.
- 9) J. Malzbender, E. Wessel, R. W. Steinbrech, "Reduction and Re-oxidation of Anodes for Solid Oxide Fuel Cells," Solid State Ionics, vol. 176, 2005, pp. 2201-2203.
- 10) N. M. Sammes and Y. Du, "The Mechanical Properties of Tubular Solid Oxide Fuel Cells", J. Mater. Sci., vol. 38, 2003, pp. 4811-4816.
- 11) J. Malzbender, E. Wessel and R. W.

평관형 고체 산화물 연료전지의 연료극 지지체 NiO/YSZ의
환원 및 재산화 거동 특성

- Steinbrech, "Reduction and re-oxidation of anodes for Solid Oxide Fuel Cells", Solid State Ionics, accepted for publication (2005) Fuel Cells, vol. IX, 2005, pp. 1244-1256.
- 12) K. Z. Fung, J. Chen, C. Tanner and A. A. Virkar, "Low Temperature Solid Oxide Fuel Cells with Dip-Coated YSZ Electrolytes," in proceedings of Fourth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, edited by M.Dokiya, O.Yamamoto, H. Tagawa and S. C. Singhal (The Electrochemical society, Inc. Pennington, NJ), 1995, pp. 1018-1027.
- 13) D. Simwoni, G. Stathis, F. Tietz, R. W. Wteinbrech and A. Naoumidis, "Oxidation and Resulting Mechanical Properties of Ni/8YSZ Anode Substrate for SOFC," in Proceedings of Third European Solid Oxide Fuel Cell Forum, edited by P. Stevens (European Fuel Cell Forum, Oberrohrdorf, Switzerland), 1998, pp. 219-228.
- 14) D. Waldbillig, A. Wood and D. Ivey, "Enhancing the Redox Tolerance of Anode supported Solid Oxide Fuel Cells by Microstructural Modification", in: S. C. Singhal, J. Mizusaki(Eds.), The Electrochemical Society Proceedings Series, Proc. Solid Oxide Fuel Cells, vol. IX, 2005, pp. 1244-1256.