

연료극 지지체식 평판형 고체산화물 연료전지 특성 연구

김종희^{*,**} · 송락현^{*†}

*한국에너지기술연구원 수소연료전지연구부

**연세대학교 세라믹공학과

(2004년 4월 26일 접수 : 2004년 5월 6일 채택)

Characteristics of Anode-supported Flat Tubular Solid Oxide Fuel Cell

Jong-Hee Kim^{*,**} and Rak-Hyun Song^{*†}

*Hydrogen Fuel Cells Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received April 26, 2004; Accepted May 6, 2004)

초 록

연료극 지지체 평판형 고체산화물 연료전지(SOFC)의 셀 전력밀도를 증가시키기 위하여 압출법에 의하여 제조하고 그 특성을 연구하였다. 연료극 지지체로써 Ni/YSZ(8mol% yttria stabilized zirconia) cermet는 기공율 50.6%, 0.23 μm 의 기공크기를 나타내었다. 지지체에서의 Ni의 분포는 균일하였으며 전자전도 경로로써의 Ni의 연결성은 양호하였다. 지지체에 YSZ 전해질과 복합 공기극층인 LSM((La_{0.85}Sr_{0.15})_{0.9}MnO₃)/YSZ 복합층, LSM, LSCF(La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃)층이 슬러리 디핑법에 의하여 코팅 및 소결된 연료극 지지체식 평판형 고체산화물 연료전지 단위전지의 성능은 800°C에서 300 mW/cm² (0.6 V, 500 mA/cm²)의 성능을 나타내었다. 임피던스 분석에 의하여 평판형 셀의 전기화학적 분극저항을 평가하고 연료측의 기습에 따라 분극저항이 감소되어 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 슬러리 디핑법으로 LSM이 코팅된 SUS430 금속연결재를 Ar+10% H₂에서 소결하였으며, 750°C에서 면저항의 측정할 결과, 초기에는 148 m Ω cm²를 나타내었으며, 450시간 경과 후에 43 m Ω cm²의 낮은 면저항을 유지하였다. 반면에 동일한 조건으로 LSM이 코팅된 Fecralloy는 높은 면저항을 나타내었다.

Abstract: Anode-supported flat tubular solid oxide fuel cell (SOFC) was investigated to increase the cell power density. The anode-supported flat tube was fabricated by extrusion process. The porosity and pore size of Ni/YSZ (8 mol% yttria-stabilized zirconia) cermet anode were 50.6% and 0.23 μm , respectively. The Ni particles in the anode were distributed uniformly and connected well to each other particles in the cermet anode. YSZ electrolyte layer and multilayered cathode composed of LSM((La_{0.85}Sr_{0.15})_{0.9}MnO₃)/YSZ composite, LSM, and LSCF(La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃) were coated onto the anode substrate by slurry dip coating, subsequently. The anode-supported flat tubular cell showed a performance of 300 mW/cm² (0.6 V, 500 mA/cm²) at 800°C. The electrochemical characteristics of the flat tubular cell were examined by ac impedance method and the humidified fuel enhanced the cell performance. Areal specific resistance of the LSM-coated SUS430 by slurry dipping process as metallic interconnect was 148 m Ω cm² at 750°C and then decreased to 43 m Ω cm² after 450 hr. On the other hand, the LSM-coated Fecralloy by slurry dipping process showed a high area specific resistance.

Key words : Flat tubular SOFC, Anode-supported, Electrolyte, Metallic interconnect, Extrusion, Slurry dipping process

1. 서 론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 연료 기체의 화학에너지를 전기화학 반응에 의해 직접 전기에너지로 변환시키는 에너지 변환장치로 무공해, 고효율의 최첨단 발전장치이다. 고체산화물 연료전지의 특성은 다른 연료전지에 비하여 효율이 높고 공해가 적으며, 연료 개질기가 필요 없고 복합발전

이 가능하다는 것이다.¹⁾ 지금까지 개발되고 있는 고체산화물 연료전지의 형태는 원통형, 평판형, 일체형의 3종류가 개발되어지고 있으며, 이 가운데 원통형과 평판형이 주로 많이 연구 개발되어지고 있다. 이중 원통형 구조는 전력밀도가 평판형 구조에 비해 다소 떨어지나 반응기체의 밀봉이 쉽고, 기계적 강도가 높으며, 열응력에 대한 저항성이 높아 스택 제작이 비교적 용이하며 장기 운전이 가능하다는 장점이 있으며, 평판형 구조의 경우는 전류의 흐름이 구성요소의 면에 수직방향으로 흐르므로 전력밀도가 높은 장점이 있으나 기체의 밀봉이 어렵고, 기계적 강

[†]E-mail: rhsong@kier.re.kr

도나 열응력에 대한 저항성이 낮은 단점을 갖고 있다.¹⁻⁴⁾ 본 연구에서는 원통형 구조와 평판형 구조의 상호 장점을 활용하고 단점을 보완한 연료극 지지체식 평판형 고체산화물 연료전지(Anode-supported flat tubular solid oxide fuel cell)를 설계 제조하였으며, 제조된 평판형 연료극 지지체의 특성을 분석하고, 단위전지의 성능 평가와 구성요소 특성을 연구하였다. 또한 연료극 지지체식 평판형 스택구성을 위한 금속 바이폴라판에 대한 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 평판형 연료극 지지체 제조 및 특성평가

본 연구에 사용된 평판형 연료극 지지체는 NiO-YSZ 다공성 지지체관을 압출법에 의하여 제조하였으며 NiO (Junsei Chemical Co.)와 8 mol% 이트리아 안정화 지르코니아(Yttria-stabilized Zirconia, 8YSZ, Tosoh Co.)를 이용하여 연료극 분말을 40 vol.% Ni-YSZ가 되도록 정량하여 연료극 분말을 제조하였다. 다공성을 부여하기 위한 기공형성제로 활성탄(YP17, Kuray Chemical co.), 그리고 압출성형을 위한 유기바인더 및 가소제, 윤활제를 첨가하고 혼련하여(kneading) 압출용 페이스트(paste)를 제조하였으며, 페이스트의 점도와 균일성형을 위하여 일정량의 증류수를 혼합하여 시효한 후 압출하였으며, 지지체 제조에 관한 자세한 내용은 기보고된 문헌상에 자세히 언급되어 있다.^{5,6)} 압출된 성형체는 120°C에서 24시간 건조한 후, 건조된 지지체는 1300°C에서 가소결하였다. 이 연료극 지지체상에 코팅되어지는 전해질 및 공기극 슬러리는 polyvinyl butyral, Di-n-butylate, Triton-X, Fish oil 등의 유기물 첨가제와 Toluene, 2-propanol의 유기용매를 혼합하여 제조하였다. 전해질은 8 mol% YSZ 슬러리에 반복 코팅 및 탈지(debinding) 과정을 거쳐 약 20 μm의 두께로 슬러리 덩 코팅(dip-coating)하고 1400°C에서 공소결하였다. 공기극 물질로써는 (La_{0.85}Sr_{0.15})_{0.9}MnO₃(LSM), La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃(LSCF)의 페로브스카이트(perovskite) 분말을 고상반응법에 의하여 합성한 후, 40 wt.% YSZ와 LSM의 복합체, LSM, LSCF 슬러리를 각각 제조하여 반복 코팅하고 1200°C에서 소결하여 단전지를 완성하였다. 연료극 지지체의 특성은 Mercury porosimeter (Autopore IV 9500 V1.00, Micromeritics)로 기공률 및 기공의 크기를 측정하였으며, SEM 및 조성분석을 이용하여 전자전도의 경로로써 영향을 미치는 Ni의 분포 및 연결성을 확인하였다. 단전지의 성능특성은 Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 전류단자는 Au 선을 이용하고, 전압단자는 Pt 선을 이용하여, dc electric load와 power supply를 이용하여 단전지에 흐르는 전류밀도를 변화시키면서 전압의 변화를 측정하였다. 연료극측의 접촉은 Ni-felt를, 공기극측의 접촉은 Pt mesh를 이용하여 전류집전을 하였다. 임피던스 측정은 Solatron 1260 Frequency Response Analyzer

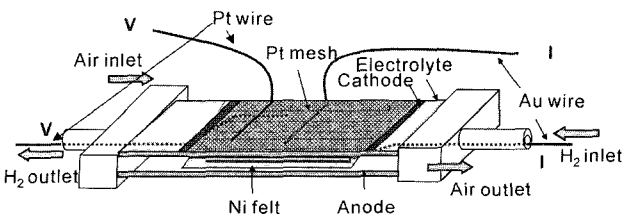


Fig. 1. Schematic diagram for single cell performance test.

및 1287 Electrochemical Interface를 이용하여 주파수 10⁻¹-10⁵ Hz 범위에서 작동전극(working electrode)과 상대전극(counter electrode)에 10 mV의 교류전압을 인가하여, 개회로 전압 상태에서 측정하였다.

2.2. 금속 바이폴라판 제조 및 특성평가

단전지와 단전지를 전기적으로 연결하고 가스공급 경로 역할을 하며, 스택 구성의 핵심 요소 가운데 하나인 바이폴라판은 작동 분위기 조건에서 안정하고, 높은 전자전도도를 가지며, 열팽창율이 단전지 구성요소와 비슷한 재료이어야 한다.¹⁾ 제조단가 및 기계적 성질 및 가공성 측면에서 우수한 금속 바이폴라판을 본 연구의 평판형 스택에 적용하기 위하여 SUS430 합금에 LSM((La_{0.85}Sr_{0.15})_{0.9}MnO₃)을 슬러리 코팅하고, 1200°C에서 Ar과 10% H₂ 혼합분위기에서 소결하여 dc-2단자법을 이용하여 전기전도도 특성 평가를 수행하였으며, 계면층 특성을 SEM, XRD를 이용하여, 코팅층의 미세조직 및 상 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연료극 지지체 평판형 단전지 제조 및 특성

Fig. 2는 압출법에 의하여 제조된 연료극 지지체를 보여주는 것으로 압출 건조 후, 1300°C에서 가소결된 지지체 형상과((a), (b)) 전해질과 공기극이 코팅후 소결된 평판 단전지(c)의 형상을 보여주고 있다. 압출법에 의하여 제조된 NiO/YSZ의 연료극 지지체는 연료극의 전자전도 이동경로를 짧게 하기 위하여 연결마디가 형성되어 있는 구조를 갖고 있기 때문에 압출 공정중 각 부위별 분말 충진을 고르게 하고, 첨가제와 수분의 함량조절에 의한 예비성형체의 균일성형과 휨방지가 중요하였다. 연료극 지지체의 예비건조 공정은 전자파 건조공정을 이용하여 연료극 분말과 유기물 첨가제의 각 기공 사이에 존재하는 용매가 비교적 빠르게 평판 내부까지 균일하게 건조되도록 유도하고, 다시 120°C의 온도로 유지하여 예비 성형체에서 발생하는 휨 현상을 최소화할 수 있었다. 1300°C 가소결 후 전해질층을 코팅하고 1400°C에서 공소결하여 제작된 연료극 지지체의 연료극 두께는 약 1.9 mm이었다. 연료극은 연료가스의 가스 확산층의 역할을 위하여 연속적인 기공분포와 연료극의 전기화학적인 분극저항을 감소하는 것이 중요하다. 본 연구의 연료극 지지체의 기공 크기, 기공분포, Ni의 분포와 연결성, 상대적 분율 등을 조사하여 Fig. 3과 Fig. 4의 결과에 나타내었다.

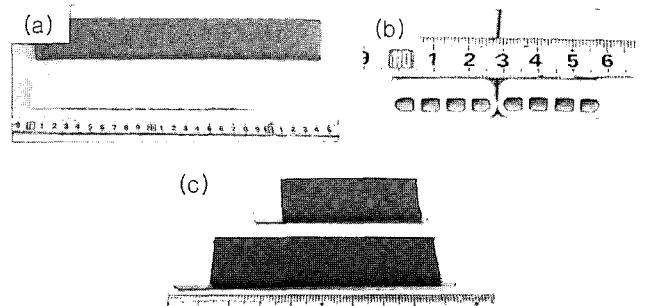


Fig. 2. Photos of anode-supported flat tubular cells. (a) as-extruded(top) and presintered(bottom), (b) transverse section of flat tube, (c) flat tubular cell with electrolyte and cathode coating layers.

Fig 3에서 알 수 있듯이 750°C에서 수소 환원 후 전자전도의 역할을 수행하는 Ni의 연결성과 기공은 기보고⁷⁾된 원통형 구조의 지지체와 유사한 양호한 분포상태를 나타내었다. 연료극 지지체의 기공율과 기공의 크기는 Fig. 4의 결과에 나타내었듯이 1300°C에서 가스결시 기공율은 50.2%이었으며, 1400°C 공소결 후의 기공율은 42.1%로 감소하였다가 수소분위기에서 환

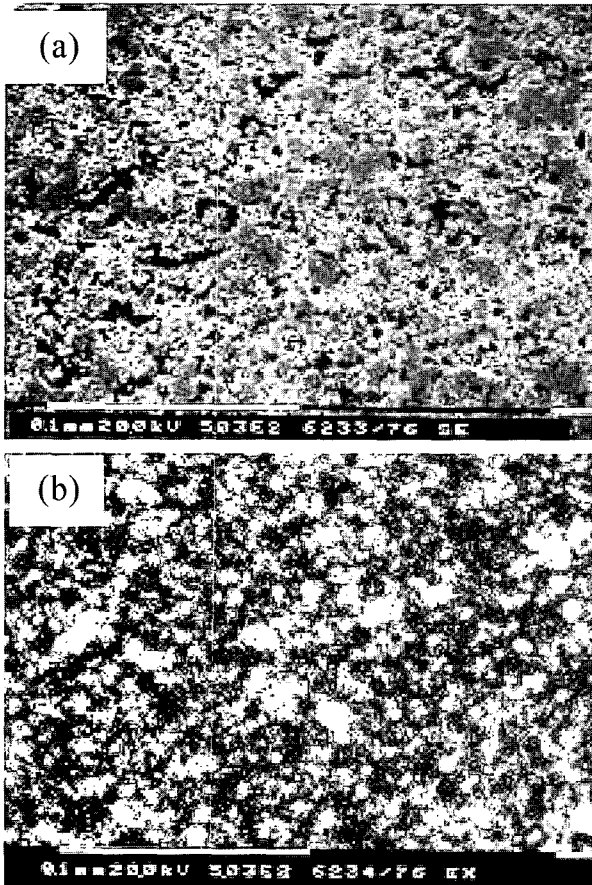


Fig. 3. Microstructure (a) and Ni distribution (b) of Ni/YSZ anode supporter.

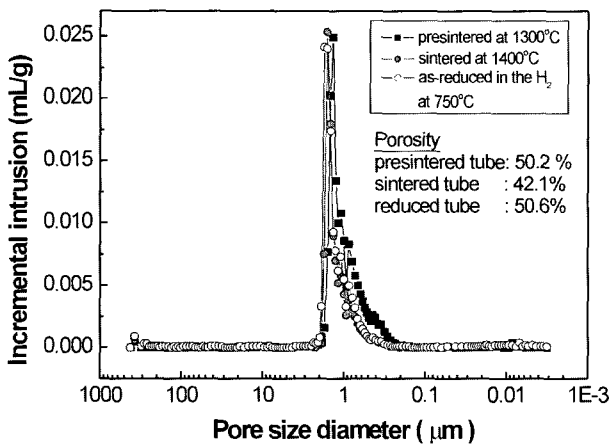


Fig. 4. Pore size distribution of anode supported flat tube at various sintering conditions.

원된 지지체관은 Ni가 Ni로 환원됨에 따라 50.6%로 8.5% 증가하였고 평균 기공의 크기도 0.21 μm에서 0.23 μm로 증가하였다. 이러한 기공 분포는 고체산화물 연료전지의 연료극으로 사용하기에는 충분한 조건이다.

Fig. 5는 슬러리 디핑 코팅된 전해질층과 공기극층의 단면 미세구조를 나타낸 결과이다. YSZ 전해질층은 약 20 μm의 치밀한 층을 형성하였으며, 미세조직 상으로 일부 폐기공이 전해질층내에 관찰되어지지만 기체투과율이 거의 없고, 성능곡선상의 개회로 전압이 이론치와 일치하는 것으로 보아(Fig. 7 참조) 치밀한 전해질층을 나타냄을 알 수 있다. 공기극 층으로는 전해질과의 계면층에 40 wt.% YSZ과 LSM의 혼합층과 LSM, 전자전도와 이온전도성이 우수한 LSCF층의 복합층의 다층으로 형성되어짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 전극 유효면적 24.5 cm²을 갖는 단전지를 온도에 따라 3% H₂O가 기습된 H₂와 공기조건에서 측정한 성능곡선을 나타낸 것이다. 작동온도가 증가할수록 전지내부저항 및 분극저항의 감소로 전지성능은 향상되는 것을 알 수 있으며, 800°C의 작동온도에서 300 mW/cm² (0.6 V, 500 mA/cm²)의 전지성능을 나타내었다.

본 연구의 연료극 지지체 평판형 전지의 전기화학적인 특성을 평가하기 위하여 작동온도 750°C, 850°C에서 연료극과 공기극에 공급되는 가스의 조건을 달리하면서 성능곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 공급되는 연료에 수증기가 포함되어 있을 경우 다음과 같은 Nernst 식에 의하여 기전력(Electromotive force)을 나타낼 수 있다.

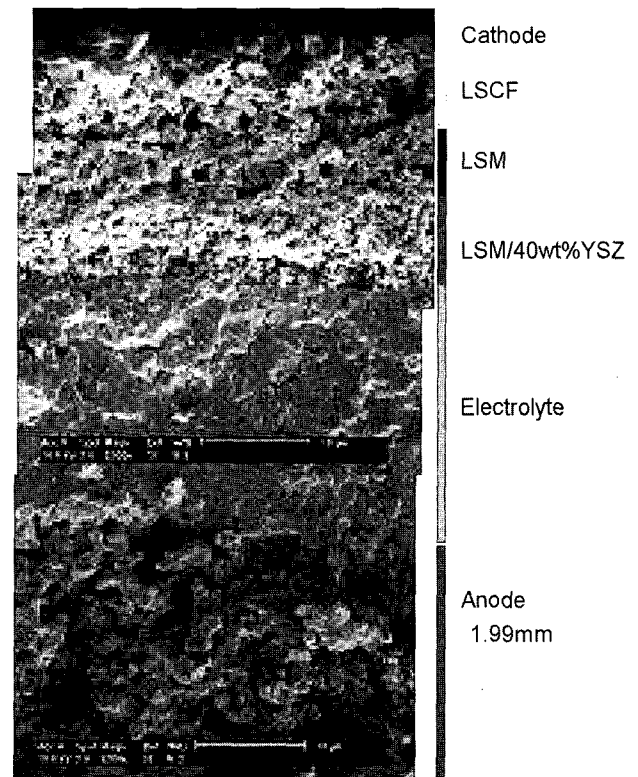


Fig. 5. Cross sectional view of anode, electrolyte, and cathode layer of the anode-supported flat tube cell.

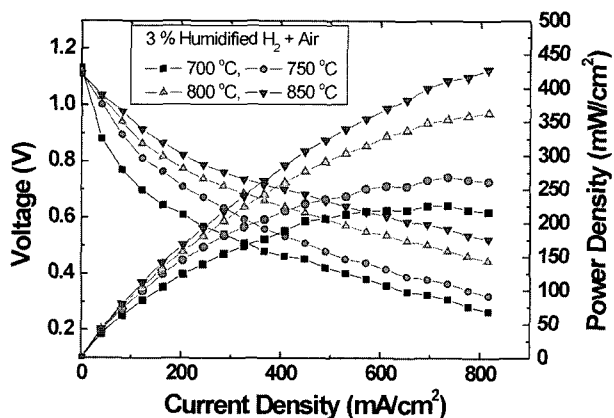


Fig. 6. Performance of the anode-supported flat tubular cell at various temperatures.

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right]$$

Fig. 7의 결과에서 알 수 있듯이 순수 수소가스를 연료로, 공기극 측에는 공기를 사용하였을 경우의 개회로 전압(OCV, open circuit voltage)은 1.25 V 이었으며, 순수 수소에 3% H₂O를 가

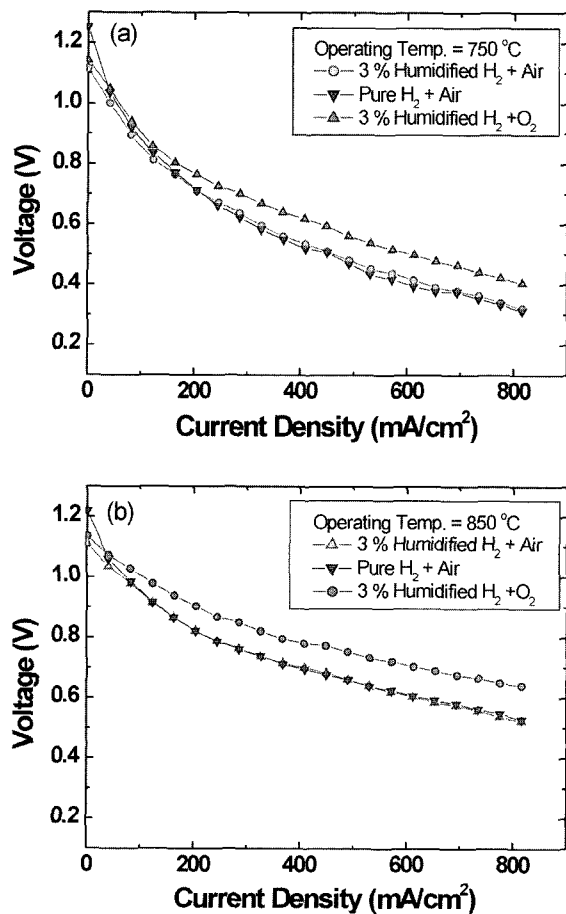


Fig. 7. I-V characteristics of single cell with variations of fuel. (a) 750°C, (b) 850°C.

습하였을 경우의 개회로 전압은 1.11 V로 이론치와 일치하는 값을 보였다. 또한 3% H₂O 기습된 H₂ 연료와 순수 O₂를 사용하였을 경우 이론치인 1.146 V의 값과 유사한 1.142 V의 개회로 전압을 나타내고 있다. 이것은 본 연구에서 제작된 평판형 전지가 매우 치밀하게 형성되어 있음을 의미한다.

Fig. 7의 750°C의 작동온도에서 기습된 연료를 사용하는 경우는 낮은 전류밀도 영역에서는 순수 수소를 연료로 사용하였을 때 보다 낮은 성능을 나타내지만 전류밀도가 증가할수록 미량의 성능 증가를 관찰할 수 있다. 수소 산화에 대한 보고는 명확히 규명되고 있지 않지만, 적당량의 기습은 YSZ 전해질 표면에 수증기의 흡착으로 인한 전극반응 영역을 확대하여 전극반응 속도를 증가시키기 때문인 것으로 알려져 있다.^{8,11)} 이러한 기습 효과는 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 순수 산소를 공기극측에 주입하였을 경우의 성능 증가 현상은 산소 분압의 증가에 의한 공기극측 분극저항의 감소에 의한 것으로 임피던스 분석결과에서도 이를 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 평판형 전지의 전기화학적 특성을 규명하기 위하여 측정된 임피던스 결과이다. 복소 평면상에서 임피던스 곡선은 작동온도 750°C에서는 3개의 반원을, 850°C의 작동온도에서는 2개의 반원을 나타내었다. 임피던스 곡선으로부터 고주파 영역에서 실수부와 교차점인 R₀와 고주파부터 주파수가 감소함에 따라 나타나는 각 주파수 범위에서의 반원 크기인 R₁, R₂,

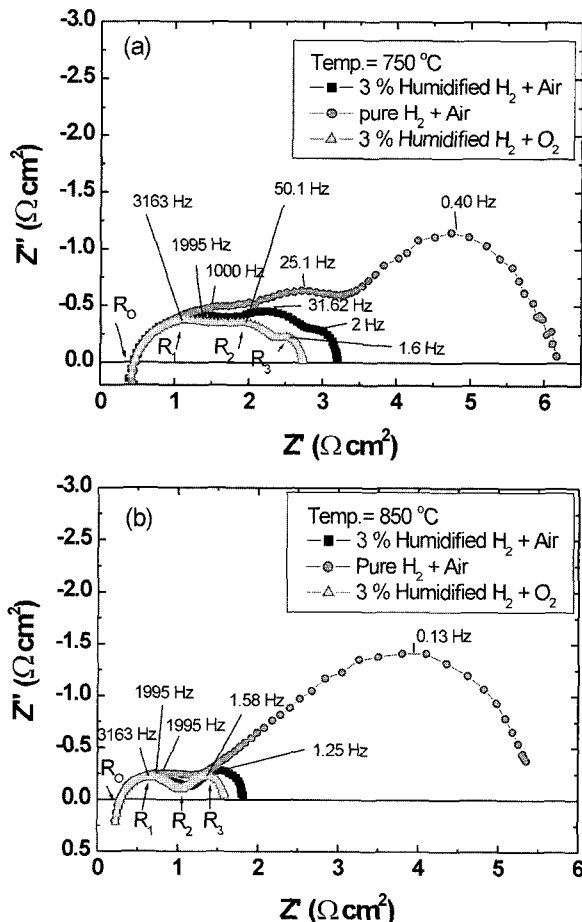


Fig. 8. AC Impedance spectra of anode-supported flat tubular cell at two different temperatures. (a) 750°C, (b) 850°C.

Table 1. Summary of each impedance obtained by ZView impedance analysis software.

Temp.	Condition	R ₁ (Ωcm ²)	R ₂ (Ωcm ²)	R ₃ (Ωcm ²)
750°C	3% Humidified H ₂ + Air	0.90	1.02	0.61
	Pure H ₂ + Air	1.16	1.41	2.49
	3% Humidified H ₂ + O ₂	0.88	0.79	0.47
850°C	3% Humidified H ₂ + Air	0.62	-	0.60
	Pure H ₂ + Air	0.72	-	3.20
	3% Humidified H ₂ + O ₂	0.60	-	0.49

R₃ 저항값을 얻을 수 있다. 이때 등가회로 분석을 통하여 얻은 각각의 저항값은 Table 1에 나타내었다. 전지의 내부 저항을 나타내는 R₀는 작동온도가 증가할수록 감소하였다. 이것은 전지의 전기전도도에 기여하는 전해질의 이온전도도 및 전극기운대 반응에 참여하지 않는 전류집전 및 전극 계면 부근의 임피던스와 관련되는 것으로 생각된다. 연료극에 주입되는 연료의 기압에 따라 전극 활성영역의 증가로 인한 R₁ 값이 감소하였으며, 작동온도의 증가에 의해서도 감소하였다. 이것으로 미루어 보아 R₁ 값은 연료극의 미세구조와 관련된 반응저항 성분임을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7의 전지성능의 결과와 일치한다. 저주파 영역에서의 R₃ 저항값은 공기극 측에 공급되는 산소 분압이 증가할 때와 연료극측 기압이 이루어지는 조건에서 감소하는 것으로 미루어 보아 공기극 및 연료극측 반응기체의 불충분한 확산^{9,10}에 의한 반응저항 성분으로 판단할 수 있다. 즉 단전지에서 측정된 R₃는 확산저항과 관계되며, 이러한 확산저항은 연료극내의 가스 확산뿐만 아니라 공기극에서의 산소 확산과도 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. 이러한 연구결과는 다른 연구자의 연구결과에서도 보고되고 있다.^{10,11} Fig. 8에서 750°C에서는 3개의 반원이 관찰되었지만, 850°C에서는 2개의 반원만 관찰되었다. 주파수 범위에 따라 나타나는 1000 Hz 이상에서의 반원인 R₁, 10-1000 Hz 범위에서 나타나는 R₂, 10 Hz에서의 값인 R₃로부터,^{10,12} 고온에서 사라진 반원은 R₂ 성분인 것으로 판단된다. R₂는 공기극 조건을 일정하게 하고 연료극에 기압을 했을 때와, 연료극 조건을 일정하게 하고 공기극의 산소분압을 증가시켰을 때 감소하였다. 이것으로 미루어 보아 R₂는 연료극 및 산소극 전극계면 반응과 관련되어지는 것으로 생각되나 현재의 연구로 부터는 각각의 기여도를 명확히 구분 짓기는 곤란하며, 향후 반전지 시험 등을 통한 더 세밀한 연구가 요구된다.

3.2. 금속 연결재 특성

작동온도가 증저온으로 낮아지면 Ferritic steel과 같은 저가의 금속 소재를 연결재로 사용할 수 있다. 그러나 Ferritic steel을 사용할 경우에는 800°C의 사용온도에서 산화에 취약하기 때문에 도전성이 있는 페로브스카이트 산화물의 코팅기술이 필요하다. 본 연구에서는 이들 내산화막 코팅기술을 통한 평판형 전지의 스택에 전류 연결재로서 적용하는 기술을 개발하기 위하여 상용 합금인 SUS430과 Fecralloy에 전도성 LSM 산화물을 코팅하고 그 특성을 평가하였다. 코팅층은 20 μm의 안정한 코팅막을 형성하였으며, 단면과 표면에 대한 관찰 결과로부터 치밀한 산화물층을 형성함을 알 수 있었다.

Fig. 9는 슬러리 디핑법으로 전도성 LSM을 코팅한 Fecralloy와 SUS430합금의 전기저항 변화를 650°C~850°C구간에서 측

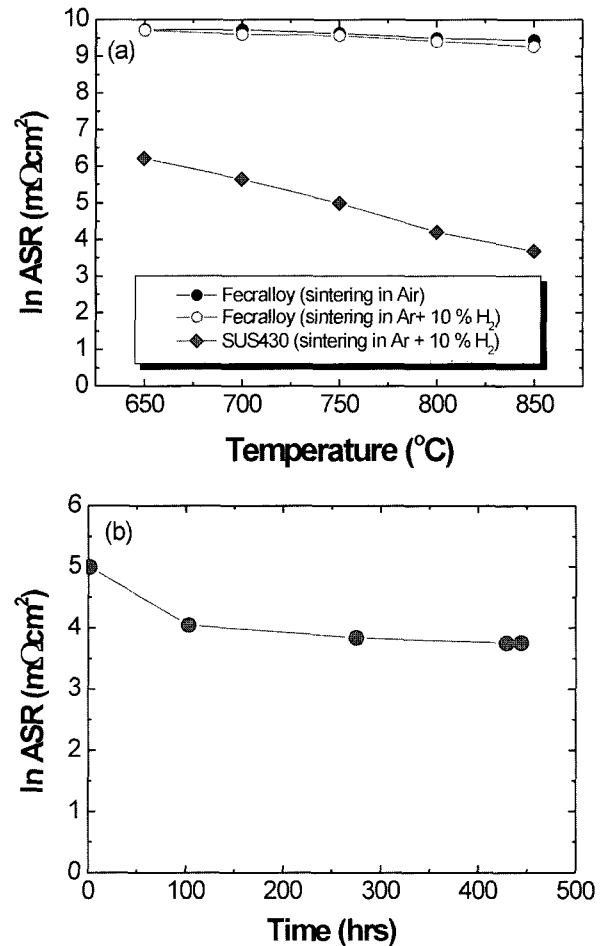


Fig. 9. Areal specific resistance (ASR) of SUS430 and Fecralloy coated with LSM as a function of temperature (a) and the LSM-coated SUS430 at 750°C as a function of holding time (b).

정한 결과와 LSM 코팅된 SUS430합금을 유지시간의 변화에 따라 측정된 전기저항값을 나타낸 결과이다. LSM 코팅후 환원성 분위기에서 소결된 SUS430은 매우 낮은 저항을 나타내었으나, 환원성 또는 산화성 분위기에서 소결된 LSM코팅된 Fecralloy의 경우 14~15 Ωcm²로 매우 높은 저항값을 나타내었다. 산화성 분위기에서 소결된 Fecralloy가 약간 더 높은 저항을 나타내었다. Fecralloy의 이러한 전기저항 특성은 소결시에 LSM과 Fecralloy의 계면에서 형성된 절연성의 알루미늄계 혼합 산화물층의 형성에 기인하는 것으로 판단된다. 이것은 계면에 존재하는 Al 원소의 집중된 분포로부터 확인할 수 있었다.

LSM이 코팅된 SUS430의 전기저항값이 750°C에서 초기 유지시간에서 0.148 Ωcm²의 저항값을 나타내다가 시간에 따라 0.043~0.057 Ωcm²의 저항값으로 감소 후 일정하게 유지되었다. 대기 중 750°C에서 유지 시간이 지남에 따라서 저항값이 감소하는 현상은 LSM 코팅후 Ar+ 10% H₂의 환원성 분위기에서 소결하는 과정에서 부분 상분리되었던 LSM 상이 산화성 분위기에서 유지 시간이 경과에 따라 이들 상들이 다시 LSM perovskite 상으로 회복되어 나타나는 것임을 측정 시편에 대한 XRD와 EDS의 정성 분석 결과로부터 알 수 있었다. SUS430에 LSM 코팅된 전기저항값의 이러한 안정된 거동은

$\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_3$ 을 코팅하여 800°C 에서 $\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 의 연료극 분위기에서 얻어진 다른 연구결과¹³⁾와 유사한 것이다. 본 연구의 결과로 미루어 보아 LSM 코팅된 SUS430의 경우 전기저항 면에서 금속연결재의 요구조건을 충분히 만족하는 것으로 판단되나, 반면에 Al 원소가 함유된 Fecralloy가 LSM 코팅 후 소결 공정을 거쳐 제조될 경우 전기저항이 너무 높아 고체산화물 연료전지의 스택 제조에 사용하기에는 적합하지 않다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 원통형 구조를 개선하여 연료극 지지체식 평판형 고체산화물 연료전지를 제조할 수 있었다. 연료극 지지체의 기공율은 환원된 상태에서 50.6%, 기공크기 $0.23\ \mu\text{m}$ 를 보였으며, 지지체에서의 Ni의 분포와 연결성은 우수하였다. 슬러리 디핑 공정에 의하여 약 $20\ \mu\text{m}$ 의 YSZ 전해질층과, LSM($(\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15})_{0.9}\text{MnO}_3$)과 YSZ의 복합체, LSM, LSCF($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$)의 복합 공기극층을 코팅하여 구성한 단전지의 성능은 800°C 의 작동온도에서 $300\ \text{mW}/\text{cm}^2$ ($0.6\ \text{V}$, $500\ \text{mA}/\text{cm}^2$)의 전지성능을 나타내었다. 연료극쪽으로 가습된 연료를 공급할 경우 연료에 포함된 수분에 의해 연료극의 반응을 향상되었으며, 이러한 거동은 온도 의존적이다. 스택 제조 구성요소인 금속 연결재로써 전도성 LSM 산화물이 코팅된 SUS430 금속연결재의 전기저항은 매우 낮게 나타났으며, 안정한 값을 보여 주었다. 반면에 Fecralloy의 경우 소결 공정으로 제조된 LSM 코팅은 전기저항이 높아 금속연결재의 요구조건에 부적합한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. N. Q. Minh and Takehiko, Science and Technology of Ceramic Fuel Cell, Elsevier Science, (1995).
2. K. Huang, M. Feng, and J. B. Goodenough, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**, 357-362 (1998).
3. P. Charpentier, P. Fragnaud, D. M. Schleich, and E. Gehain, *Solid State Ionics*, **135**, 373-380 (2000).
4. J. Q. Li and P. Xiao, *J. of European Ceramic Society*, **21**, 659-668 (2001).
5. R. H. Song, E. Y. Kim, D. R. Shin, and H. Yokokawa, Proceedings of the 6th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, Ed., U. Stimming, S. C. Singhal, H. Tagawa, **99-19**, 845-850 (1999).
6. R. H. Song, K. S. Song, Y. E. Ihm, and H. Yokokawa, Proceedings of the 7th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, Ed., H. Yokokawa, and S. C. Singhal, 2001-16, 1073-1079 (2001).
7. 송근숙, 송락현, 임영언, *Korean J. of Mat. Res.*, **12**(9), 691-695 (2002).
8. F. Z. Mohamedi-Boulenouar et al., Proceedings of the Fifth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, Ed., S. C. Singhal, 441 (1997).
9. S. P. Jian and S. P. S. Badwal, *J. Electrochem. Soc.*, **144**, 3777 (1997).
10. 윤성필, 한종희, 남석우, 임태훈, 홍성안, 현상훈, 유영성, *J. of Korean Elechem. Soc.*, **4**, 58-64 (2001).
11. Himeko O., Kimitaka W., and Masayasu A., *J. of Power Source*, **112**, 90-97 (2002).
12. Himeko O., Satoshi N., Kimitaka W., Masayasau A., and Toshiro H. *電子情報通信學會*, **1**, 7-12 (2001)
13. Tomasz B., Makoto N., Toshio M., and Kazimierz P., *Solid State Ionics*, **143**, 131-150 (2001).