

Single Cell Stacked Planar Type SOFC Assembled Using a Ag-Current Collector

Nam-Ung Cho[†], Soon-Cheol Hwang, In-Sung Lee

Fuel Cell Project, Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), Pohang 790-330, Korea

(Received November 12, 2007; Accepted December 12, 2007)

Ag 집전체를 적용한 평판형 SOFC 단전지

조남웅[†] · 황순철 · 이인성

포항산업과학연구원 연료전지연구단

(2007년 11월 12일 접수; 2007년 12월 12일 승인)

ABSTRACT

Current collectors of SOFC play a significant role on the performance of power generation. In this study a single cell stacked SOFC was assembled using Ag-mesh as a cathode current collector, and evaluated its performance. No gas leakages of the single cell stack occurred in the tests of gas detection and OCV measurement. The OCV and initial power of the stack were 1.09 V and 0.45 W/cm², respectively, under the flow rates of air at 2,500 cc/min and H₂ at 1,000 cc/min at the test temperature of 750°C. A degradation rate of 44.0% was measured during the prolonged time of 307 h. The relatively low durability of the tested single cell stack was found to be the evaporation of Ag-mesh at the current collector.

Key words : Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Metallic interconnects, Current collector, Stack performance

1. 서 론

연료전지는 기존의 화석에너지뿐만 아니라 미래의 수소에너지를 사용하여 저공해로서 전기를 효율적으로 생산할 수 있는 발전 시스템이라고 할 수 있다. 고체산화물 연료전지(SOFC)는 다른 연료전지에 비하여 발전효율이 가장 높으며, 고체 전해질을 사용하여 전기화학반응이 안정하게 일어 난다는 것이 특징이다.¹⁻⁴⁾ SOFC는 전지의 형상에 따라 크게 원통형(tubular type)과 평판형(planar type)으로 나눌 수 있다. 최근들어 두 형태의 절충형인 평판형도 개발되고 있으며, MOLB형과 같은 다양한 형태의 전지도 개발되고 있다.⁵⁻¹³⁾ 튜브형 SOFC는 평판형보다 장기성능이 우수하지만, 단위면적당 발전 에너지, 즉 출력 밀도(W/cm²)가 낮은 것이 단점이다. 이와 반대로 평판형은 튜브형에 비하여 출력밀도가 높지만, 장기성능에 있어서 여러 문제가 발생되고 있어 이를 해결하기 위한 연구가 계속적으로 이루어져야만 한다.

중저온의 평판형 SOFC의 장기성능에 영향을 미치는 인자로서 전지 자체의 열화 이외에 금속 연결재, 밀봉재, 집전체의 열화가 보다 심각하게 발생하는 문제가 있다. 금속분리판을 사용하는 중저온 SOFC의 경우 금속 연결재

의 산화부식과 크롬의 증발은 전지성능을 작동기간 중 점점 열화시키는 원인이 된다. 또한 평판형 SOFC의 대부분의 경우에는 밀봉재가 필요하게 되는데 이때 유리원료를 기본으로 하는 재료를 주로 사용하며, 이에 대한 장기 안정성과 열 사이클에 대한 기술개발이 완전히 이루어진 상태가 아니다.

전지에서 발생된 전기를 금속 연결재에 전달하는 집전체는 SOFC 스택의 초기와 장기 성능에 매우 직접적으로 영향을 미친다.^{14,15)} 일반적으로 연료극/연결재 사이는 환원분위기이므로 집전체로는 Ni-mesh, 페이스트(paste)를 사용하여도 특별한 문제가 발생되지 않는다. 현재까지 공기극/연결재 사이의 집전체로는 공기극 재료 또는 이와 유사한 페로브스카이트(Perovskite)계와 MnCr₂O₄, (Mn,Co)₃O 스피넬(Spinel) 세라믹 등과 금속재료로서 Pt, Au, Pd 등이 사용될 수 있다. 세라믹 재료만으로 기계적인 안정성이 확보되지 못하여 공기극 집전층에 금속재료를 사용하는 경우 상기의 귀금속을 사용하는 것은 실용화 측면에서 경제성을 확보하기 어렵기 때문에, 보다 저비용이면서 고성능인 재료에 대한 연구개발이 이루어지고 있다.¹⁶⁻¹⁹⁾ 집전체에 요구되는 특성을 단지 성능면에서 고려하면 전지작동중에 전지저항이 낮아야 하며, 고전류 부하와 고온의 작동조건하에서 연결재, 공기극, 연료극과 같은 타 구성요소와 화학적으로 안정하여야 하고, 열팽창계수와 강도를 포함한 기계적 안정성도 유지되어야 한다.

은(Ag)을 집전체로 적용하는 경우 SOFC 작동온도에서

[†]Corresponding author : Nam-Ung Cho
E-mail : namung@rist.re.kr
Tel : +82-54-279-6496 Fax : +82-54-279-6919

전기저항이 상기 금속 중 가장 낮아서 집전체로서 우수한 전기적 특성을 나타낼 수 있다.²⁰⁻²²⁾ 그러나 타 금속과 비교하여 용점이 낮아 상대적으로 낮은 온도에서 증발하는 특성을 갖는 것이 문제점으로 지적되어 왔다.²³⁾ 최근 중저온 SOFC 개발이 활발히 진행되면서 작동온도가 낮아질 수 있는 가능성이 높아지고 있으며, 이에 따른 은(Ag)의 사용 가능성을 평가해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 공기극/연결재 사이의 집전층에 있어서 기존의 금속을 대체한 Ag를 사용하여, 보다 경제적으로 저렴한 스택을 구성하려는 목적의 일환으로 실험을 실시하였다. 따라서 공기극 집전체로 Ag-mesh를 사용하여 단전지 스택을 제작하여, 단전지 스택의 성능에 어떠한 변화를 가져오는지를 평가하였으며, 전지 작동 후 Ag-mesh가 어떠한 영향을 미쳤는지를 공기극 및 Ag-mesh의 미세구조 관찰과 분석을 통하여 조사하였다.

2. 실험 방법

단전지 스택제작에 있어서 가스의 흐름은 cross-flow가 되도록 하여 하부 end-plate(interconnect: 연결재)에서 가스가 출입하는 형식으로 상하 end-plate를 설계하였다. 단전지는 InDEC사에서 시판되고 있는 연료극 지지형(anode supported type)인 ASC4 단전지를 사용하였다. 단전지의 크기는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이지만 전해질 상부의 공기극 면적이 $9 \times 9 \text{ cm}^2$ 로서 실제 반응면적은 81 cm^2 이다. 그 외 구성요소인 밀봉재, end-plate, 집전체는 자체적으로 설계하여 제작하였다. 연결재의 소재는 stainless steel 430(STS 430)을 사용하였으며, 밀봉재는 유기바인더 성분을 함유한 glass slurry를 판재로 제조하고 기계적 가공을 통하여 형상을 제작하였다. 연료극 집전체로는 Ni-mesh를 사용하였으며, 공기극에는 Ag-mesh를 사용하였다.

단전지 스택을 평가하기 위한 측정장비 구축은 스택의 온도를 유지하고 조절하는 전기로와 제어부, 가스의 유량을 제어하는 가스조절부, 전기적 평가를 위한 전기부하와 출력측정 부분으로 구성하여 측정 장비를 제작하였다.

단전지 스택의 단기 및 장기성능은 단전지 스택을 로 내에 장착하고 상부에서 가압할 수 있는 장치에서 평가되었다. 장착된 단전지 스택은 밀봉재에 함유된 유리의 연화점(softening point) 이상으로 승온하므로써 연료와 공기가스의 내부 혼합을 막고, 스택 외부로 가스가 유출되지 않도록 하는 가스밀봉을 실시하였다. 가스의 유출과 섞임이 없는지를 검증하기 위하여 전지작동온도 보다 높은 800°C 에서 각각의 가스 입구에 질소(N_2)가스를 흘리어 출구에서의 유량을 측정하는 가스밀봉 시험을 실시하였다.

단전지 스택의 밀봉이 완성되면 연료극에 800°C 에서 수소가스를 흘리어 연료극을 환원하면서, 단전지의 무부하

전압(Open Circuit Voltage: OCV)을 측정하였다. 초기성능은 단전지의 I-V 곡선(Current density voltage curve)을, 장기성능은 시간경과에 따라 출력의 감쇠율로 판단하였다.

전지작동 시간경과에 따라서 단전지 스택의 임피던스(Impedance)를 측정하여 cole-cole plot를 얻었다. 장기성능 평가후 해체된 단전지, 특히 공기극 표면에 집전체 Ag-mesh와 Ag 성분이 어떠한 형태로 존재하는지를 SEM과 EPMA로 관측하였다. 본 연구에서는 공기극 표면의 미세구조 변화가 Cole-Cole plot에서의 저항증가와 단전지 스택의 장기성능 저하에 어떠한 영향을 주는지 규명하려 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 구성요소 및 단전지 스택제작

단전지 스택제작은 구입된 ASC4 단전지, 자체제작 밀봉재, 연결재, 집전체를 사용하여 제작되었다. ASC4 단전지의 총두께는 $585 \mu\text{m}$ 이었으며, YSZ 전해질이 약 $5 \mu\text{m}$, 공기극과의 반응을 막는 Y_2O_3 -doped CeO_2 (YDC)가 $5 \mu\text{m}$, 공기극으로써 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ (LSCF)가 $50 \mu\text{m}$, 연료극으로서 NiO/YSZ가 $525 \mu\text{m}$ 로 구성되어 있었다. 밀봉재는 BaO-SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-ZrO₂조성계의 유리를 제조하고, 유기바인더와 배합하여 얇은 판재로 제작 후 기계적 가공을 통하여 형상을 완성하였다. 분리판은 구성요소 적층과 가스밀봉이 잘 이루어지도록 간단한 형식으로 설계되었다. 가스밀봉에 있어서는 밀봉재 유리질이 녹아서 단전지 외곽을 밀봉하여 공기극과 연료극 가스를 분리하고, 동시에 메니폴더로부터 스택 외부로 가스가 유출되지 못하도록 제작하였다. 단전지 스택은 Inconel 600 판재로 제작된 장착 스탠드에 부도체의 알루미늄이나 소결판재와 운모판 사이에 적층하여 측정되었으며, 이때 상부에서 0.76 kgf/cm^2 의 기계적 압력을 부가하였다.

3.2. Sealing 시험

스택제작에 있어서 가스밀봉은 출력 성능에 직접적으로 큰 영향을 미치므로 중요하다. 공기와 연료가스가 스택내부에서 외부로 유출되더라도 공기극과 연료극에 분리되어 공급된다면, 전지의 OCV에는 직접적 영향을 주지 못하며, 단지 스택의 연료이용률 등에 영향을 미친다. 하지만 스택 내부에서 공기극과 연료극이 밀봉재에 의하여 완전히 분리되지 못하고 각각의 가스가 섞이는 경우 단전지 자체의 OCV 뿐만 아니라 장기출력을 열화시키는 심각한 문제가 발생된다.

본 연구에서는 스택의 밀봉특성을 판별하기 위하여 연료와 공기가스 입구에서 질소를 사용하여 먼저 독립적으로 가스를 흘리어 출구에서 가스유량을 검출함과 더불어 양쪽 모두에 가스를 흘리어 공기와 연료가스의 섞임이 있

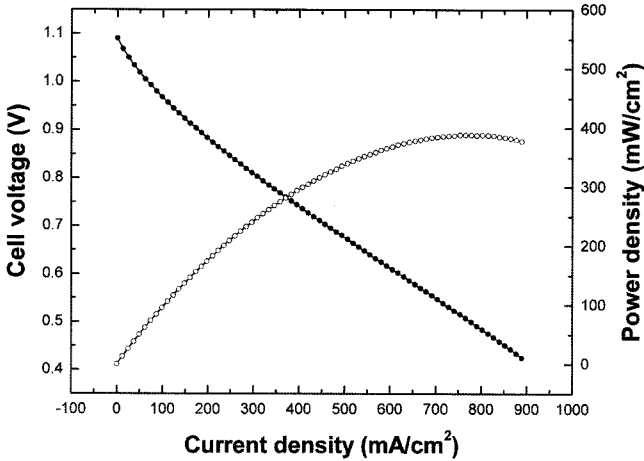


Fig. 1. I-V curves obtained from the single cell stack tested initially with an air flow of 2,500 cc/min and H₂ flow of 1,000 cc/min.

는지를 판별하였다. 가스입구에서 독립적 혹은 복합적으로 가스를 흘릴 경우 출구에서 동일한 가스 유량을 나타냄을 확인하였으며, 이는 단전지 스택내부에서 가스의 섞임이 없을 뿐만 아니라 외부로도 유출이 없음을 의미한다. 따라서 본 연구의 단전지 스택은 가스밀봉에 문제가 없는 것으로 판단할 수 있었다.

3.3. 단전지 스택의 전기적 성능평가

단전지 스택의 초기성능으로서 OCV값과 I-V 곡선을 구하였다. OCV값은 750°C에서 1.09 V이었으며, 이러한 값으로부터 단전지 스택의 밀봉특성에는 큰 문제가 없는 것으로 보인다. Fig. 1은 750°C에서, H₂ 1,000 cc/min, Air 2,500 cc/min의 유량조건하에서 I-V값을 나타내고 있다. 최대출력은 778 mA/cm²의 부하에서 389 mW/cm²이었으며, 0.7 V에서 321 mW/cm²를 나타내었다.

Fig. 2는 부하를 400 mA/cm²로 일정하게 유지하면서 단

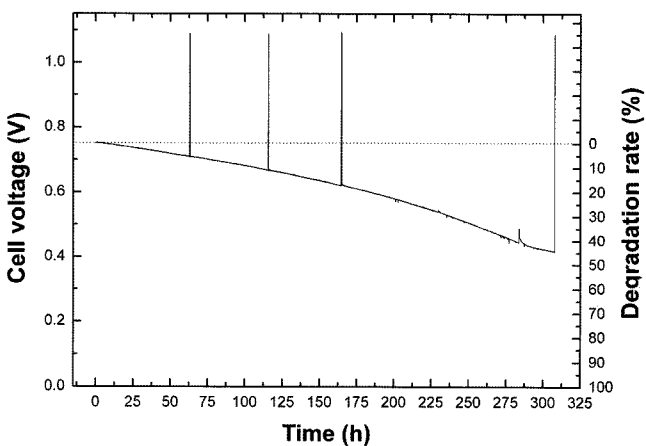


Fig. 2. Power durability of the single cell stack prolonged for 307 h.

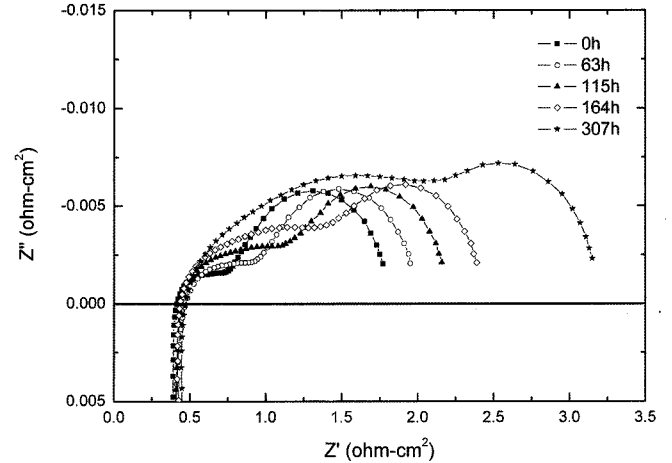


Fig. 3. Impedance variation of single cell stack measured during the operation time.

전지 스택의 전압변화를 측정된 단전지 스택의 장기성능 평가결과를 나타내고 있다. 초기 0.75 V (300 mW/cm²)에서 307시간 후에는 0.42 V (168 mW/cm²)로 매우 급감하여 출력이 44% 감소하였다. 이와 같은 큰 변화는 가스밀봉의 붕괴, 연결재(end plate)의 부식, 집전체 변화, 전지 자체의 열화 등의 많은 원인에 의한 것으로 추정할 수 있다. 가스 밀봉특성은 장기성능 평가 후 입,출구의 가스유량 측정에서 문제가 없었다. 단전지 스택 제작에 사용된 InDEC ASC4 단전지의 제품사양에 의하면 단전지만의 출력저하율은 0.2%/1000 h 정도로 매우 낮아서 단전지 성능 자체가 단전지 스택의 출력저하율에 커다란 영향을 준 것 같지는 않다. 또한 단전지 스택에 사용된 연결재인 STS 430의 부식은 충분히 일어날 가능성이 있지만, 이것보다는 같은 단전지 스택 시스템에서 집전체의 종류를 달리 한 기존 측정결과에 비교하여 Ag 집전체로 대체할 경우 훨씬 출력 감쇠율이 심한 것은 Ag 집전체의 영향이 일차적으로 큰 것으로 판단된다.

전지출력 감쇠율을 보다 면밀히 분석하기 위하여 시간 경과에 따른 단전지 스택의 Impedance 값을 Fig. 3과 같이 측정하였다. 일반적으로 SOFC 단전지 스택의 경우 cole-cole plot에서 좌측 반원의 좌측 실수부 시작점을 단전지 스택의 IR(ohmic)저항으로, 여기에 좌측 반원의 끝 지점 혹은 우측 반원의 시작지점을 IR저항과 분극(charge transfer)저항의 합에 의한 저항으로, 우측반원의 끝 지점을 IR저항, 분극저항, 물질전달(mass transfer)저항의 합에 의한 저항으로 분해하여 분석할 수 있다.²⁴⁾ 본 실험에서 측정된 결과를 살펴보면 먼저 IR저항에 있어서 처음과 307시간 후 각각 0.413 Ω·cm²과 0.468 Ω·cm²으로 거의 미미한 변화를 보이며, 우측반원의 반경도 커다란 변화가 없는 반면, 좌측원의 반경은 이와 달리 시간경과에 따라서 점점 커지는 경향을 나타내었다. 이는 본 연구의 단전지 스택의 경우 가스공급과 단전지 스택의 전체 IR저항

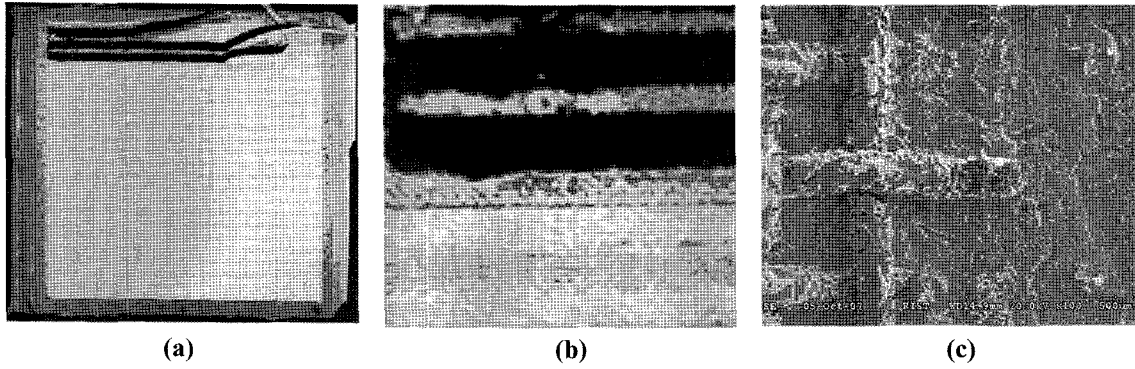


Fig. 4. Cell aspect and microstructures of single cell tested. (a) whole Ag-mesh on cathode, (b) magnification of local area, and (c) microstructure of Ag-mesh.

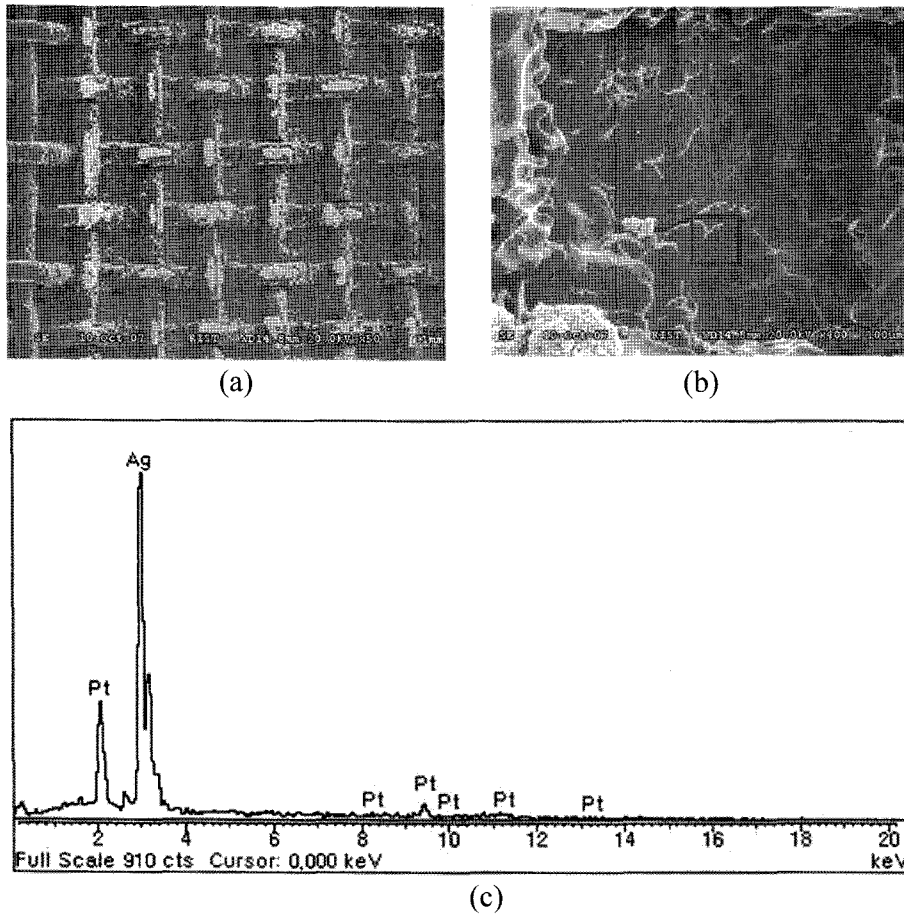


Fig. 5. Microstructures and element analysis of Ag-mesh faced with interconnect. (a) Ag-mesh on cathode, (b) cathode surface in Ag-mesh, and (c) spectrum of component detected.

은 시간경과에 따라 커다란 변화가 없으나, 공기극의 $1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ 반응과 연료극의 $O^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$ 반응에 있어서의 반응저항이 계속해서 심각하게 증가한다는 것을 의미한다. 이는 두 전극의 반응 속도면에서 공기극의 속도가 느리므로 전체 저항에 지배적인 영향을 미친다. 따라서 양극에서 공기중 산소가 산소이온으로 변환되는 화학반응에 계속해서 장애요인 발생하고 있음을 추

정할 수 있다. 따라서 다음 단계로 Ag 집전체가 산소이온의 화학반응을 일으키는 삼상계면(Triple-Phase Boundary: TPB)에 어떠한 영향을 미쳤는지 양극의 미세조직 관찰을 통하여 조사하였다.

3.4. 작동 후 단전지 양극과 집전체의 미세구조

본 연구에서는 특별히 공기극측의 집전체를 기준과 달

리할 경우 출력감쇠율이 심하게 나타나는 것이 발견된 관계로 공기극 집전체 조직을 세밀하게 관찰하였다. Fig. 4는 단전지 스택을 307시간 작동시킨 후 단전지만을 분리하여 공기극 표면을 관찰한 사진이다. Fig. 4 (a)에서 보듯이 연결재와 맞닿는 부분과 연결재의 공기유로에 접한 면은 서로 다른 명암을 나타내며, 이 사진에서 밝은 부분이 맞닿은 부분이다. 유로에 접한 Ag-mesh는 양극으로부터 박리되었으나, 연결재와 접한 Ag-mesh는 자체만 따로 박리되지 않고 공기극과 함께 붙어서 박리되었다. Fig. 4 (b)는 Ag-mesh가 박리된 부분과 남겨놓은 부분을 확대한 사진이다. 이를 보다 확대한 Fig. 4 (c)에서 보듯이 Ag-mesh의 형상은 매우 늘리어 있으며, mesh wire도 부분적

으로 crack과 기공이 발생되어 있음이 발견되었다.

Fig. 5는 연결재에 늘리어 양극표면으로부터 쉽게 박리가 되지 않는 집전체와 공기극 표면을 관찰한 사진이다. Fig. 5 (a)에서 보듯이 약간의 좌측면을 제외한 연결재에 늘린 Ag-mesh 부분은 심하게 변형되었으나, 좌측면에 보듯이 공기유로와 접한 Ag-mesh는 거의 손상이 없는 것이 발견되었다. 손상된 Ag-mesh 안쪽의 양극 표면의 조직사진과 성분을 Fig. 5 (b), (c)에 나타내었다. Fig. 5 (c)에서 알 수 있듯이 Ag 성분이 가장 많은 75.7 wt%를 나타내었다. 이는 집전용 Pt-paste 위에 Ag의 증발 혹은 확산에 의하여 Ag가 덮여 있는 것을 보여주고 있다. 이는 연결재에 늘려 있던 Ag-mesh의 손상과도 연계하여 설명될 수

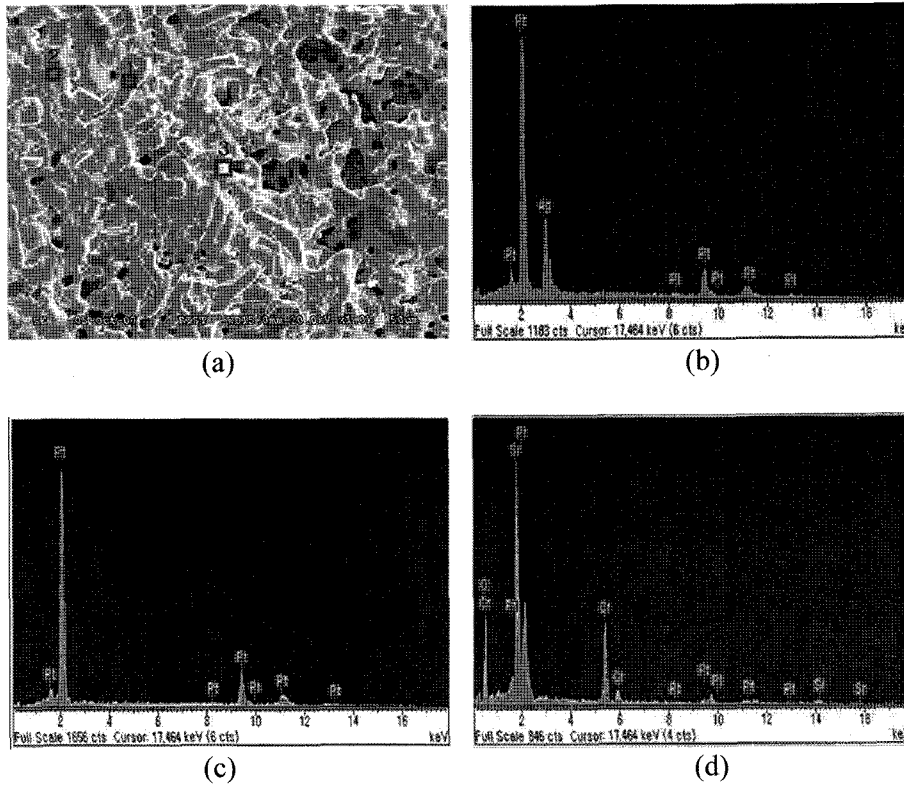


Fig. 6. Microstructure and element analysis of cathode surface not contacted with interconnect. (a) cathode surface, (b) spectrum of component detected at point 1, (c) spectrum of component detected at point 2, and (d) spectrum of component detected at point 3.

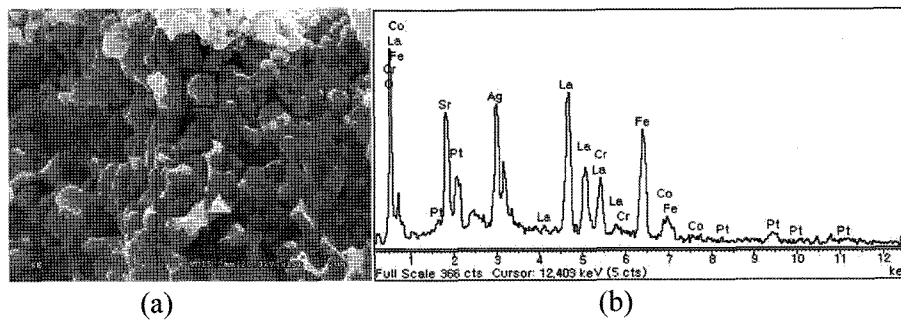


Fig. 7. Microstructure and element analysis of cathode internal faced with Ag-mesh. : (a) microstructure and (b) spectrum of component detected at the point

있다.

Fig. 6는 연결재의 가스유로 측면에 부착된 Ag-mesh를 제거하고 난후, 하부 공기극의 표면을 관찰한 조직사진과 성분분석 결과이다. Fig. 6 (a)의 확대사진에서 보듯이 입자의 형상을 달리한 2종류의 입자와 공기를 공급하는 기공이 나타나 있음을 알 수 있다. 여기에서 보다 크면서 판상인 입자의 성분분석 결과를 Fig. 6 (b), 작고 입계가 연결된 입자를 Fig. 6 (c), 기공 부분을 Fig. 6 (d)에 나타내었다. Fig. 6 (b)에서 보듯이 판상의 커다란 입자는 Ag를 함유한 Pt의 합금입자임이 확인되었으며, Fig. 6 (c)에서와 같이 작은 입자는 순수한 Pt 입자임이 확인되었다. 기공의 안쪽 부분에 있어서는 공기극 재료의 성분과 Pt성분이 함께 검출되었다.

Fig. 7은 Ag-mesh 집전체와 함께 박리된 공기극 단면에서의 형상과 성분분석 결과이다. Ag-mesh 집전체와 직접적으로 접촉이 되지 않은 공기극의 내부에서도 Fig. 7 (b)에서 보듯이 Ag가 13 wt% 존재하는 것이 확연히 밝혀졌다. 이는 Ag-mesh로부터 공기극 내부로 Ag가 침투되었다는 것을 나타낸다.

3.5. 장기성능과 집전체 특성과의 관계

본 연구에서 Ag-mesh를 공기극 집전체로 사용하여 제작된 단전지 스택의 경우 Figs. 4~7과 같이 750°C, 307 h의 작동조건에서 Ag-mesh가 안정하지 못한 것이 확인되었다. 특히 연결재와 접촉하면서 일정압으로 면압을 가한 Ag-mesh의 영역은 보다 심하게 형상을 유지하지 못하고 mesh wire에 작은 hole과 crack을 발생하면서 부분적으로 결손되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

공기극 표면에 집전층으로 코팅된 Pt-paste층 표면에서 Ag 성분은 모두 검출이 되며 연결재 표면에 눌러있는 영역의 공기극 표면에는 많은 양의 Ag가 전지작동시 공기가 유입되어야 할 기공까지도 막고 있는 형상이 관측되었다. 이러한 영역의 단면 성분분석 결과에서 집전Pt-paste뿐만 아니라 안쪽의 공기극 내부에서도 다량의 Ag 성분이 검출되고 있다. 또한 연결재에 눌러지 않은 Ag-mesh와 Pt-paste계면에 있어서는 Ag가 검출되었다.

앞의 관측 결과를 통하여 메쉬의 Ag가 고상확산 혹은 녹아서 형성된 것이 아니라 기상으로 증발하여 집전Pt-paste층과 공기극의 내부까지 석출된 현상으로 판단된다. 이와 같은 현상은 표면의 공기공급 기공을 막을 수 있으며, 공기극 내부에서는 산소가 산소이온으로 변환되는 삼상계면의 면적을 낮추어 전지의 성능을 열화시킬 가능성이 있다.

미세구조 변화와 Impedance 결과를 연관시켜 고찰하면 초기의 단전스택의 IR값이 $0.413 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 307시간 후 $0.468 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 변하는 것은 초기의 Ag-mesh 경우 완전한 형상이었으나 시간경과에 따라 메쉬를 구성하는 Ag wire가 부분적으로 증발, 결손되면서 최종적으로는 IR값

을 높이는 원인중의 하나로서 기여되었다고 판단할 수 있다. 단전지 스택의 장기성능 열화는 Ag가 점점 증발하면서 집전 paste층의 공기유입로를 막고, 더욱 심각하게는 공기극의 내부까지도 침투하여 산소가 이온화 되는 삼상계면 표면에 점점 많이 석출되면서 이에 대한 저항값이 높아진 것이 원인으로 Impedance 결과인 좌측 반원 분극 저항이 증가하는 것과 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 Ag-mesh의 증발에 의한 미세구조 변화가 단전지 스택의 장기적 성능 열화에 매우 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구의 단전지 스택은 연료극 지지형의 단전지와 STS 430 연결재 및 밀봉재를 사용하고, 집전체로 Ag-mesh를 적용하여 제작하였다. 이렇게 제작된 단전지 스택은 800°C에서 가스밀봉시험을 거쳐서, 750°C, H₂ 1,000 cc/min, Air 2,500 cc/min 조건에서 초기 출력과 307 h 동안 장기 출력 변화시험을 실시하였다. 스택내부와 외부로의 가스 유출은 없었으며, 초기 최대출력 밀도는 389 mW/cm^2 , 출력감쇠율은 44%/307 h이었다.

출력감쇠율이 매우 큰 원인을 밝히기 위하여 단전지 스택의 시간경과에 따른 임피던스(Impedance)를 측정하였으며, 307 h 경과 후 단전지 공기극의 미세조직과 성분관찰을 하였다. 결과를 종합하면 Ag-mesh의 증발로 인하여 집전체 표면에 많은 결함을 발생시켰었으며, 이것들은 공기극 표면의 집전paste층 뿐만 아니라 하부의 공기극 내부에서도 발견되었다. 따라서 단전지 스택의 장기성능 열화는 Ag-mesh에서의 Ag 증발이 직접적인 원인인 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. M. Dokiya, "SOFC System and Technology," *Solid State Ionics*, **152-153** 383-92 (2002).
2. O. Yamamoto, "Solid Oxide Fuel Cells: Fundamental Aspects and Prospects," *Electrochim. Acta*, **45** 2423-35 (2000).
3. S. P. S. Badwal and K. Foger, "Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell Review," *Ceram. Int.*, **22** 257-65 (1996).
4. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cells," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** 563-88 (1993).
5. K. Kendall, N. Q. Minh, and S. C. Singhal, "High Temperature and Solid Oxide Fuel Cells: Cell and Stack Designs," pp. 197-228, Elsevier, 2003.
6. H. Y. Jung, S. H. Choi, H. Kim, J. W. Son, J. Kim, H. W. Lee, and J.-H. Lee, "Fabrication and Performance Evaluation of 3-cell SOFC Stack Based on Planar 10 cm × 10 cm Anode-supported Cells," *J. Power Sources*, **159** [1] 478-83 (2006).

7. H. Yoshida, H. Yakabe, K. Ogasawara, and T. Sakurai, "Development of Envelope-type Solid Oxide Fuel Cell Stacks," *J. Power Sources*, **157** [2] 775-81 (2006).
8. S. Bedogni, S. Campanari, P. Iora, L. Montelatici, and P. Silva, "Experimental Analysis and Modeling for A Circular-planar Type IT-SOFC," *J. Power Sources*, **171** [2] 617-25 (2007).
9. J. Staniforth and K. Kendall, "Cannock Landfill Gas Powering A Small Tubular Solid Oxide Fuel Cell: A Case Study," *J. Power Sources*, **86** [1-2] 401-03 (2000).
10. N. Q. Minh, "Solid Oxide Fuel Cell Technology: Features and Applications," *Solid State Ionics*, **174** [1-4] 271-77 (2004).
11. Y. Yang, G. Wang, H. Zhang, and W. Xia, "Computational Analysis of Thermo-fluid and Electrochemical Characteristics of MOLB-type SOFC stacks," *J. Power Sources*, **173** [1] 233-39 (2007).
12. J. J. Hwang, C. K. Chen, and D. Y. Lai, "Detailed Characteristic Comparison between Planar and MOLB-type SOFCs," *J. Power Sources*, **143** [1-2] 75-83 (2005).
13. J. J. Hwang, C. K. Chen, and D. Y. Lai, "Computational Analysis of Species Transport and Electrochemical Characteristics of A MOLB-type SOFC," *J. Power Sources*, **140** [2] 235-42 (2005).
14. D. E. Alman, C. D. Johnson, W. K. Collins, and P. D. Jablonski, "The Effect of Cerium Surface Treated Ferritic Stainless Steel Current Collectors on the Performance of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)," *J. Power Sources*, **168** [2] 351-55 (2007).
15. C. Chervin, R. S. Glass, and S. M. Kauzlarich, "Chemical Degradation of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilized ZrO_2 Composite Cathodes in The Presence of Current Collector Pastes," *Solid State Ionics*, **176** [1-2] 17-23 (2005).
16. D. P. Lim, D. S. Lim, J. S. Oh, and I. W. Lyo, "Influence of Post-treatments on The Contact Resistance of Plasma-sprayed $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ Coating on SOFC Metallic Interconnector," *Surface and Coatings Technology*, **200** [5-6] 1248-51 (2005).
17. E. Konyshcheva, J. Laatsch, E. Wessel, F. Tietz, N. Christiansen, L. Singheiser, and K. Hilpert, "Influence of Different Perovskite Interlayers on The Electrical Conductivity between $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ and Fe/Cr-based Steels," *Solid State Ionics*, **177** [9-10] 923-30 (2006).
18. N. Pryds, B. Toftmann, J. Schou, P. V. Hendriksen, and S. Linderoth, "Electrical and Structural Properties of $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{3\pm\delta}$ Films Produced by Pulsed Laser Deposition," *Applied Surface Science*, **247** [1-4] 466-70 (2005).
19. Z. Yang, G. Xia, X. Li, and J. W. Stevenson, " $(\text{Mn},\text{Co})_3\text{O}_4$ Spinel Coatings on Ferritic Stainless Steels for SOFC Interconnect Applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, **32** [16] 3648-54 (2007).
20. S. P. Simner, M. D. Anderson, L. R. Pederson, and J. W. Stevenson, "Performance Variability of $\text{La}(\text{Sr})\text{FeO}_3$ SOFC Cathode with Pt, Ag, and Au Current collectors," *J. Electrochemical Society*, **152** [9] A1851-59 (2005).
21. S. P. Jiang, J. G. Love, and L. Apateanu, "Effect of Contact between Electrode and Current Collector on The Performance of Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, **160** [1-2] 15-26 (2003).
22. S. P. Simner, M. D. Anderson, J. E. Coleman, and J. W. Stevenson, "Performance of A Novel $\text{La}(\text{Sr})\text{Fe}(\text{Co})\text{O}_3$ -Ag SOFC Cathode," *J. Power Sources*, **161** [1] 115-22 (2006).
23. Z. G. Lu and J. H. Zhu, "Thermal Evaporation of Pure Ag in SOFC-Relevant Environments," *Electrochemical and Solid-State Letters*, **10** [10] B179-82 (2007).
24. Q. A. Huang, R. Hui, B. Wang, and J. Zhang, "A Review of AC Impedance Modeling and Validation in SOFC Diagnosis," *Electrochimica Acta*, **52** [28] 8144-64 (2007).