

Characterization of the LSGM-Based Electrolyte-Supported SOFCs

Eun Hwa Song,^{***} Kwang-Nyeon Kim,^{*} Tai-Joo Chung,^{**} Ji-Won Son,^{*} Joosun Kim,^{*}
Hae-Weon Lee,^{*} Byung-Kook Kim,^{*} and Jong-Ho Lee^{*†}

^{*}Materials Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

^{**}Department of Ceramics Engineering, Andong National University, Kyungbuk 760-749, Korea

(Received January 26, 2006; Accepted May 3, 2006)

LSGM계 전해질 지지형 고체산화물 연료전지의 특성평가

송은화^{***} · 김광년^{*} · 정태주^{**} · 손지원^{*} · 김주선^{*} · 이해원^{*} · 김병국^{*} · 이종호^{*†}

^{*}한국과학기술연구원 재료연구부

^{**}안동대학교 재료공학과

(2006년 1월 26일 접수; 2006년 5월 3일 승인)

ABSTRACT

LSGM($(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})(\text{Ga}_y\text{Mg}_{1-y})\text{O}_3$) electrolyte is known to show very serious interfacial reaction with other unit cell components, especially with an anode. Such an interfacial reaction induced the phase instability of constituent component and deterioration of the unit cell performance, which become the most challenging issues in LSGM-based SOFCs. In this study, we fabricated LSGM($\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.83}\text{Mg}_{0.17}\text{O}_x$) electrolyte supported-type cell in order to avoid such interfacial problem by lowering the heat-treatment temperature of the electrode fabrication. According to the microstructural and phase analysis, there was no serious interfacial reaction at both electrolyte/anode and electrolyte/cathode interfaces. Moreover, from the electrochemical characterization of the unit cell performance, there was no distinct deterioration of the open cell voltage as well as an internal cell resistance. These results demonstrate the most critical point to be concerned in LSGM-based SOFC is either to find a proper electrode material which will not give any interfacial reaction with LSGM electrolyte or to properly adjust the processing variables for unit cell fabrication, to reduce the interfacial reaction.

Key words : SOFC, LSGM, Electrolyte, Tape casting, Interfacial reaction

1. 서 론

고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell : SOFC)는 현재 사용중인 화석연료의 연소반응을 이용한 발전장치에 비해 공해물질의 배출이 거의 없는 무공해 발전장치이며 전기화학 반응에 의해 연료의 화학에너지를 직접 전기 에너지로 변화시키는 고효율의 발전장치이다.^{1,2)} 이로 인해 SOFC 시스템은 미래의 수소에너지 인프라를 고려할 때 가장 적합한 친환경 발전시스템으로 인식되어 지난 20년간 많은 연구개발 투자가 이루어지고 있다.^{2,3)} 일반적으로 이러한 SOFC는 작동온도에 따라 고온형(800°C 이상)과 중저온형(500~800°C)으로 나눌 수 있는데, 최근 들어 고온형은 고온 가스밀봉의 어려움과 고온작동으로 인한 재료의 열화문제 그리고 고가의 제작 및 유지비용으로 인해 상용화에 어려움이 생기면서 보다 작동온도를

낮춰 전지의 수명과 신뢰성을 높이기 위한 중저온형 SOFC에 대한 연구가 더 활발히 진행되고 있다.^{2,4)}

현재 SOFC의 고체전해질로 널리 적용되고 있는 재료는 fluorite 구조의 지르코니아(ZrO_2)계 산화물과 세리아(CeO_2)계 산화물을 들 수 있다. 하지만, ZrO_2 계 산화물은 전해질로 사용되기에 충분한 전기전도도(약 0.1 S/cm)를 가지는 온도가 1000°C 부근으로 높기 때문에 고온형 SOFC 용으로 제한되며 이로 인해 다른 구성 요소들에 대한 선택의 폭이 좁고 장시간 운전시 수명이 저하되는 문제점을 나타낸다. 세리아계 전해질의 경우엔 지르코니아계 전해질보다는 높은 이온 전도도를 가지나 환원성 분위기에 서 쉽게 환원된다는 치명적인 약점으로 인해 전해질로 사용 가능한 영역이 크게 제한 받고 있다. 이러한 이유로 인해 최근에는 높은 이온 전도도와 넓은 전해질 영역을 가지는 페로브스카이트(perovskite)구조의 LaGaO_3 계 산화물이 중저온형 SOFC의 전해질 재료로 많은 주목을 받고 있다.^{1,5,6)}

특히 Sr과 Mg가 각각 La와 Ga를 치환한 형태인 LSGM($(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})(\text{Ga}_y\text{Mg}_{1-y})\text{O}_3$)은 보고된 페로브스카이트계 고체

[†]Corresponding author : Jong-Ho Lee

E-mail : jongho@kist.re.kr

Tel : +82-2-958-5532 Fax : +82-2-958-5529

전해질 중 가장 우수한 전해질 특성을 보이고 있어 많은 연구가 진행되고 있다.⁷⁻¹⁴⁾ 그러나 LSGM이 가지는 이러한 전해질 소재로서의 장점에도 불구하고 현재까지는 LSGM 전해질과 주변 전지성분(NiO, 지르코니아, 세리아계 산화물 등)들과의 극심한 반응성으로 인해 그 사용이 제한되고 있으며 특히 반응에 의해 나타나는 계면에서의 2차상으로 인해 전지의 구조적인 안정성은 물론 전기화학적인 물성 측면에서도 많은 문제점이 지적되고 있다.¹⁵⁻²⁰⁾ 앞서 본 연구팀의 선행 연구를 통해서도 LSGM 전해질과 음극의 주성분인 NiO가 반응하여 LaNiO₃ 또는 La₂NiO₄상 등을 형성하여 전해질 자체의 상안정성을 해치고 계면구조를 불안정하게 만들어 단전지 수명에 악영향을 미침을 확인한 바 있으며 마찬가지로 음극의 또 다른 구성성분인 지르코니아계나 세리아계 산화물과도 극심한 반응을 하여 LaSrGa₃O₇, LaSrGaO₄, La₂ZrO₇, Sr₂ZrO₄상과 같은 저항이 매우 큰 계면반응물을 형성해 단전지의 내부저항을 증가시켜 성능을 크게 악화시킬 수 있었다.^{21,22)} 이와 같이 LSGM계 SOFC에서 나타나는 상안정성이나 계면 반응성등의 문제점으로 인해 LSGM 전해질을 활용 시 얻을 수 있는 장점에 대해서는 아직 제대로 평가가 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 이러한 LSGM계 산화물의 중저온형 전해질로서의 실질적인 활용가능성을 확인해 보고자 계면 반응성 문제를 최소화 한 단전지를 제작하고 그 성능을 평가해 보았다. 이를 위해 본 연구에서는 전극의 반응성을 줄이기 위해 단전지 제작온도가 높은 전극 지지형 대신 전해질 지지형 단전지를 구성하고 그 작동성능을 평가해 보았다. 전해질에서의 손실을 줄일 수 있어 중저온형으로 더 적합하다고 알려진 전극지지형의 경우 얇은 전해질층을 치밀하게 구성하기 위해 1500°C 부근의 높은 소결 온도를 필요로 해²³⁾ 전해질과 전극간의 반응을 막을 수 없는 것으로 알려져 있다.^{21,22)} 이에 비해 전해질 지지형의 경우엔 미리 소결된 전해질위에 전극층을 비교적 낮은 온도에서 구성할 수 있으므로 앞서 언급된 계면에서의 반응을 피할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해 본 연구에서는 테이프 캐스팅(Tape-casting)방법으로 얇은 전해질 지지체를 제작하고 계면반응이 일어나지 않는 온도에서 전극을 구성하여 단전지를 제작하였다. 제작된 단전지는 미세구조 관찰, EDS 분석 등을 통하여 계면반응 생성물의 존재 여부를 조사하였고 그 전기화학적 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 전해질 지지형 단전지(Electrolyte-supported unit cell)를 만들기 위해 상용분말인 미국 Rhodia사의 LSGM (La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.83}Mg_{0.17}O_x) 분말을 사용하였다. 먼저 기본적인 분말특성을 조사하기 위하여 주사전자 현미경(Scanning

Electron Microscopy; SEM, XL-30, Philips, Netherlands)과 X-선 회절분석기(X-Ray Diffraction analyzer; XRD, D/max 2000, Rigaku, Japan)를 이용하여 분말의 형태 및 크기 그리고 합성된 상에 대한 분석을 수행하였다. LSGM 소재의 전기 전도도를 측정하기 위해서 일축가압성형법을 이용하여 bar 형태로 시편을 성형하였으며, 1500°C에서 6시간 동안 공기 중 소결한 후 아르키메데스 법을 이용하여 밀도를 측정하였다. 그리고 전류공급기(224 Programable current source KEITHLEY Inc, USA)와 전압측정기(Model 2000 Multimeter, KEITHLEY Inc, USA)를 이용하여 직류 4단자법으로 전기 전도도를 측정하였다.

단전지용 전해질 지지체의 제작을 위해 기존에 많이 사용하는 일축가압성형법이 아닌 두께 제어가 쉽고 보다 얇고 균일한 두께의 sheet를 얻을 수 있는 테이프캐스팅(Tape-casting)법을 이용하여 전해질 테이프를 제작하였다. 이때 제조한 LSGM 테이프는 1460°C에서 6시간 동안 소결한 후, 단위면적당 약 0.13 kg의 하중을 주어 1350°C, 1시간 30분 동안의 flat-firing 과정을 거쳐 약 200 μm 정도의 전해질 기판으로 완성하였다. 소결된 전해질 기판의 미세구조 및 전기적 특성을 조사하기 위해 주사전자 현미경을 이용하여 그 표면과 단면을 분석하였으며 아르키메데스 법을 이용하여 밀도를 측정하였다. 전해질 기판의 전도도는 두께가 얇은 관계로 앞서 벌크를 측정하였을 때와 달리 기판의 양면에서 두 개씩의 전극을 빼내, 전류를 공급하는 전극과 전압을 측정하는 전극을 분리하여 측정하는 교류 준-4단자법(AC quasi-4 probe method)을 이용하였다.

완성된 전해질 지지체 위에 음극층을 구성하기 위해 GDC (Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95}, Rhodia, USA)와 NiO(Sumitomo, Japan)분말을 40 : 60 vol%의 비율로 혼합하였다. 혼합분말은 planetary milling(Fritsch, Plenerisette 5)을 이용하여 스크린 인쇄용 페이스트로 제조하였고 이를 전해질 지지체위에 스크린 인쇄법을 이용하여 인쇄하고 1300°C에서 2시간 소결하여 음극층을 구성하였다. 양극층으로는 상용분말인 LSCF (La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-x}, Nextech, USA)를 이용하였으며 앞서와 같은 방법으로 인쇄용 페이스트를 제조하고 스크린 인쇄한 후 1100°C 2시간 동안 소결함으로써 양극층을 구성하였다.

완성된 단전지의 전해질과 각 전극계면(LSGM/NiO-GDC와 LSGM/LSCF)에서의 반응성을 알아보기 위해 주사전자 현미경을 통한 미세구조 분석과 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy; FEI, XL30) 분석을 수행하였으며 직류 전류-전압 분석 및 교류 임피던스 분석을 통해 단전지의 전기 화학적인 특성을 평가하였다. 단전지의 성능측정에는 양극과 음극의 전류 분포를 균일하게 하기 위해 Pt mesh와 Ni form을 각각 전류 집전체로 사용하였으며 Pt 선을 이용해 외부기기와 연결하였다. 단전지 평가시 연료가스로는 수소(H₂)를 산화가스로는 공기를 사용하였으며 이때

연료가스와 산화가스간의 혼합을 막기 위해 가스켓형 밀봉체를 사용하였다. 성능 측정시 가스의 공급은 자동유량조절기(Mass Flow Controller : Smart Track, Sierra, USA)를 이용하였으며 500~700°C 구간에서 100°C 간격으로 단전지의 직류 전류-전압 특성 및 교류 임피던스를 측정하였다. 교류 임피던스 측정 시 사용한 장비는 FRA(Frequency Response Analyzer, Solartron1260, Solartron, UK)와 Electrochemical Interface(Solartron1287, Solartron, UK)였으며 0.1 Hz~1 MHz 범위에서, 50 mA 진폭을 가하여 측정하였고 얻어진 임피던스 스펙트럼으로부터 단전지의 ohmic 저항성분과 전극에서의 분극 저항성분을 분리하였다.

3. 결과 및 고찰

LSGM 상용 분말과 1500°C에서 6시간 동안 소결한 벌크소결체의 표면 미세구조를 Figs. 1과 2에 각각 나타내었다. Fig. 1에서 보듯이 LSGM 원료 분말의 크기는 약 1~1.5 μm 정도였으며 분말들이 다소 응집된 상태로 존재하였다. 한편 Fig. 2에 나와있는 미세구조 사진에서 보면 벌크소결체는 1500°C에서 충분히 치밀화되어 아르키메데스

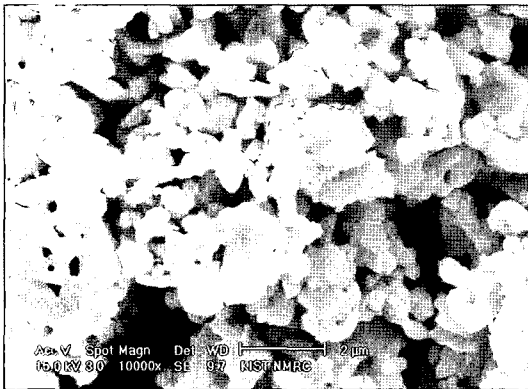


Fig. 1. SEM micrograph of LSGM raw powder.

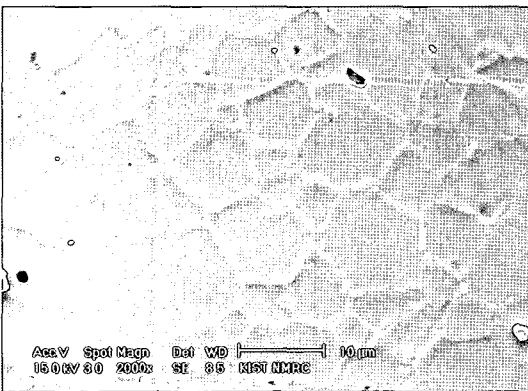


Fig. 2. SEM micrograph of LSGM bulk, sintered at 1500°C for 6 h.

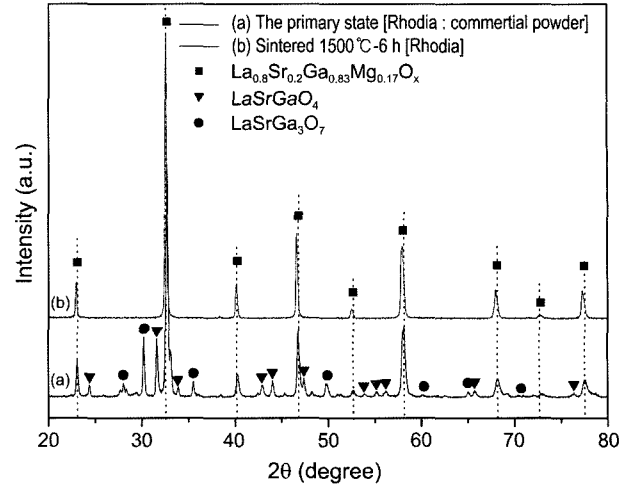


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of (a) LSGM raw powder and (b) LSGM bulk sintered at 1500°C for 6 h.

법으로 밀도를 측정한 결과 96% 이상의 소결 밀도를 가졌으며 입성장이 상당부분 일어나 평균 결정립 크기가 약 7.5 μm로 분포함을 알 수 있었다.

한편 Fig. 3은 LSGM 원료 분말과 이를 소결한 후의 상변화를 관찰하기 위해 X-선 회절 분석한 결과이다. 분석 결과를 보면 본 연구에 사용한 LSGM 상용분말의 경우 $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.83}Mg_{0.17}O_x$ 상 이외에도 $LaSrGa_3O_7$ 과 $LaSrGaO_4$ 등의 이차상이 존재하였으며 이러한 $LaSrGaO_4$ 와 $LaSrGa_3O_7$ 등의 이차상은 소결 과정을 거치면서 사라지는 것을 알 수 있었다. 이는 LSGM의 경우 일반적으로 합성단계에서 단일상으로 형성되기 어려우며 일정 온도 이상에서 열처리한 경우 LSGM 단일상으로 안정화된다는 보고⁹⁾와 일치하는 결과이다.

Fig. 4에는 테이프 캐스팅법으로 제조한 LSGM 테이프를 1460°C에서 6시간 소결하고 추가로 1350°C, 1시간 30분 동안의 flat-firing을 한 후의 소결체 미세구조를 나타내

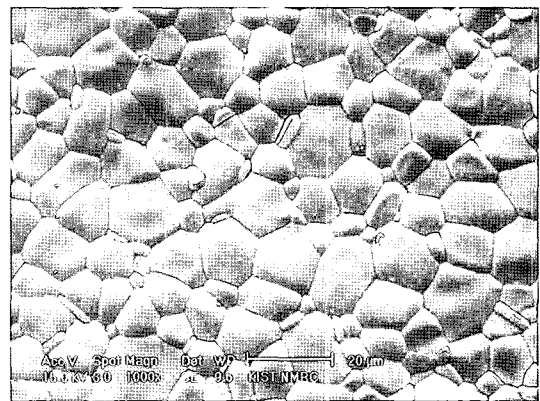


Fig. 4. Surface image LSGM tape, sintered at 1460°C for 6 h.

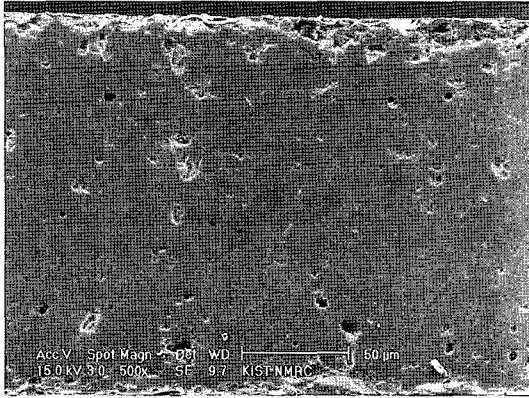


Fig. 5. Cross-sectional view of LSGM tape, sintered at 1460°C for 6 h.

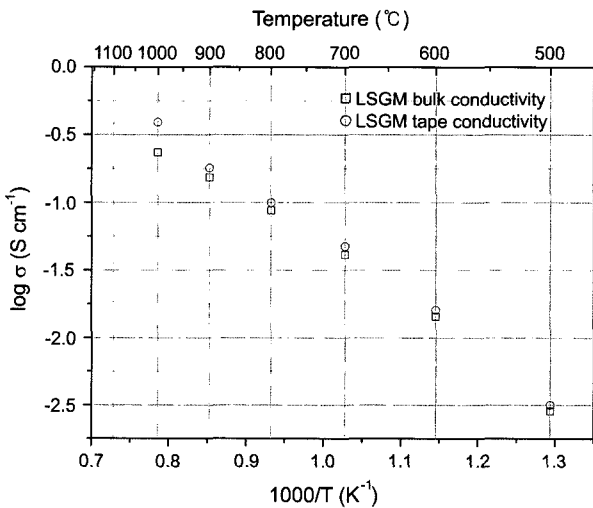


Fig. 6. Arrhenius plot of the electrical conductivity of LSGM tape (AC quasi-4 probe method) and LSGM bulk (DC 4-probe method).

었다. 그림의 결과에서 보면 소결 온도가 벌크 소결체보다 낮았음에도 불구하고 소결체의 평균 결정립 크기가 10 μm 정도로 앞서 1500°C에서 6시간 동안 소결한 벌크 소결체 (약 7.5 μm) 보다 입성장이 더 일어났음을 알 수 있다. 이는 테이프의 소결시 적절한 온도선택으로 입성장과 치밀화가 최적화되었기 때문으로 보인다. 한편 소결 후 LSGM 테이프의 두께는 Fig. 5에서 보듯이 약 170 μm 정도였으며 아르키메데스 법으로 밀도를 측정된 결과 98% 이상의 소결 밀도를 가지는 치밀한 전해질 지지체로 확인되었다.

한편 Fig. 6에는 제조된 LSGM 테이프의 전기 전도도를 확인하기 위해 교류 준-4 단자법으로 전기전도도를 측정 후 앞서 측정하였던 LSGM 벌크의 전도도와 함께 비교해 놓았다. 그림의 결과에서 보면 LSGM 테이프의 전기 전도도는 전도도 측정시 교류 준-4 단자법을 이용한 관계로 절대값에 있어서는 벌크 전도도와 약간 차이가 나

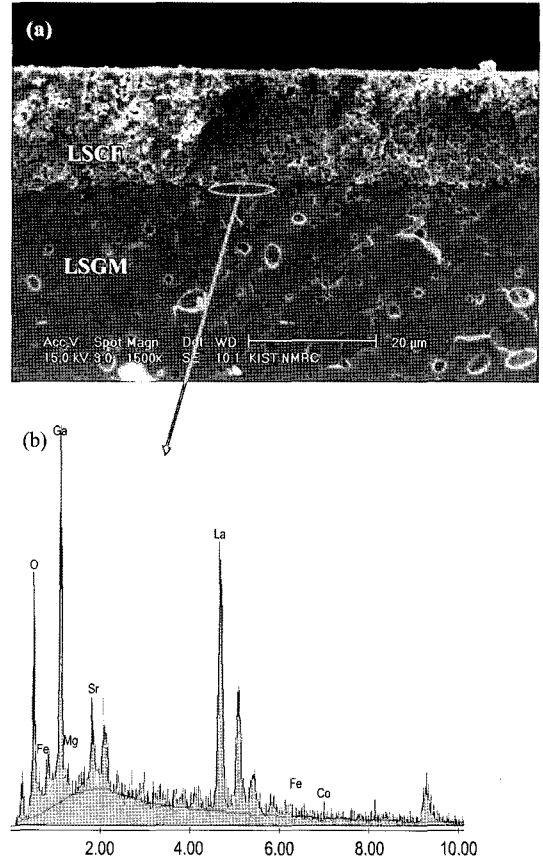


Fig. 7. Cross sectional view (a) and EDS analyzing result (b) for the cathode/electrolyte interface of LSGM supported cell.

타나나 오차범위 내에서 전반적으로 잘 일치하였다. 이상의 결과는 테이프 캐스팅 방법으로 제조된 전해질 지지체에 미세 균열이나 조대 기공 등이 존재하지 않음을 의미하며 따라서 본 연구에서 단전지를 구성하기 위한 전해질지지체로 사용하는데 무리가 없음을 말해준다.

전해질과 전극간의 계면 반응성을 알아보기 위해 전해질과 양 전극간의 계면에 대한 미세구조 및 상분석을 수행하였다. Figs. 7과 8에는 전해질과 양극 그리고 전해질과 음극간의 계면을 관찰한 미세구조 사진과 EDS 분석 결과를 나타내었다. 그림의 미세구조 사진에서 보면 LSGM 전해질은 매우 치밀한 구조를 가지고 있는 반면 양극과 음극은 다공성 층임을 알 수 있다. 본 연구에 사용한 LSCF 양극과 NiO-GDC 음극은 매우 균일한 기공분포를 가지고 있으며 두께는 두 전극 모두 약 20 μm 정도였다. 한편 Figs. 7과 8에서 보면 LSGM/LSCF, LSGM/NiO-GDC 계면에는 SEM상으로 관찰하기에 특별히 심각한 결함이 없이 잘 결합되어 있으며 이들 계면 사이에 앞서 언급된 계면 반응층의 흔적은 관찰되지 않았다. 실제 양 계면에 대한 Figs. 7과 8의 EDS 분석결과를 보면 두 계면 모두 전극지지형 단전지 연구²²⁾에서 발견되었던 것과 같은 특별

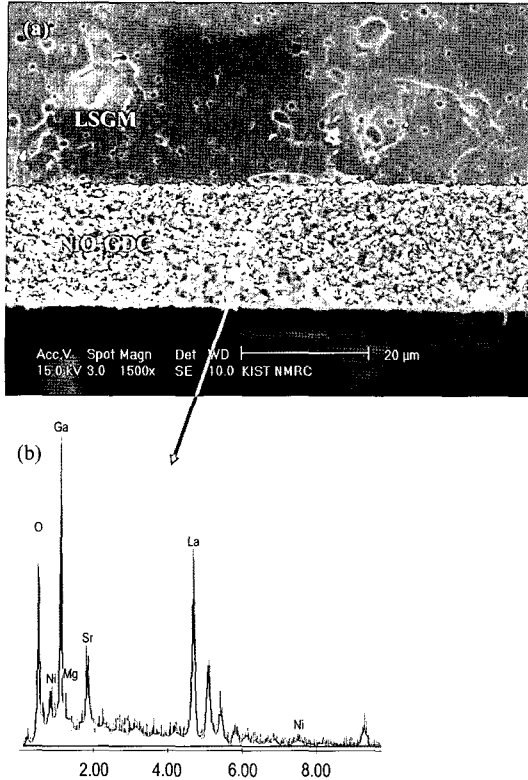


Fig. 8. Cross sectional view (a) and EDS analyzing results (b) for the electrolyte/anode interface of LSGM supported cell.

한 이차상은 생성되지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 전해질 지지형의 경우 전극 지지형에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 전극을 소결 하였기 때문에 전해질과 전극 사이에 계면 반응이 일어나지 않은 것으로 보인다. 이와 같이 본 연구에서 제작한 전해질 지지형 단전지의 경우 전해질과 전극에서의 반응층이 존재하지 않는 상태를 확인 할 수 있었다.

계면 반응층이 억제된 단전지에서의 전기 화학적 특성을 알아보기 위해 직류 전압-전류 분석법과 교류 임피던스법을 이용해 단전지의 분극 특성 및 ohmic 저항 특성을 500~700°C 온도 범위에서 100°C 간격으로 측정하였다. 전압-전류 특성을 나타낸 Fig. 9의 결과에서 보면 단전지의 열린회로 기전력은 500~700°C 구간에서 이론치와 대체로 유사한 값을 보였다. 이러한 결과는 앞선 연구^{21,22)}에서 계면반응이 일어나는 경우 전해질층을 관통하여 형성되는 전자 전도성 상으로 인해 열린회로 기전력이 감소된다는 결과에 비추어 볼 때 본 전해질 지지형 단전지에서는 LSGM 전해질과 음극간의 반응이 심각하지 않음을 나타내 주는 결과이다. 한편 Table 1에 나타낸 단전지 출력특성으로부터 단전지의 유효면적을 고려하여 환산한 면저항 (Area Specific Resistance : ASR) 값을 보면 각 측정온도에서 1.0 Ωcm²(700°C), 1.96 Ωcm²(600°C), 5.65 Ωcm²(500°C) 값을

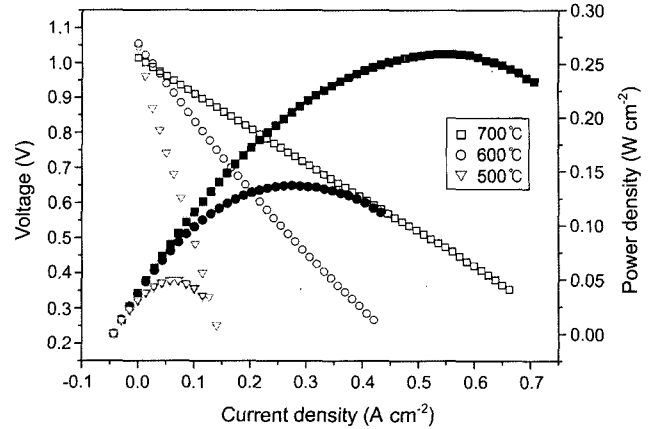


Fig. 9. Typical current-voltage and power generating characteristics of LSGM electrolyte-supported cell at different temperatures (500~700°C).

Table 1. Cell and Ohmic ASR Measured via AC Impedance Spectroscopy and Cell ASR Estimated from DC I-V Characteristics

Temperature (°C)	Cell ASR (Ωcm ²) at 0.7 V (from DC)	Cell ASR (Ωcm ²) at OCV (from AC)	Ohmic ASR, R _s (Ωcm ²) at OCV (from AC)
500	5.65	5.34	2.52
600	1.96	1.97	0.9
700	1.0	1.03	0.74

가지는데 이러한 ASR 값은 전해질과 전극간의 계면반응이 존재하는 경우 나타나는 ASR 값이 700°C에서 10~1200 Ωcm² 정도²²⁾였던 점을 감안해 볼 때 훨씬 낮은 값을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 전해질과 전극간의 계면반응을 억제하는 경우 비록 전해질 자체에 의한 내부저항이 큰 전해질 지지형이더라도 전극지지형에 비해 훨씬 좋은 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, 실제 Fig. 9에 나타낸 단전지의 최대 출력 밀도(Maximum Powder Density)는 700°C의 경우 0.260 W/cm², 600°C에서는 0.137 W/cm², 500°C에서는 0.049 W/cm²로 계면 반응층에 의해 낮은 성능을 보였던 전극지지형 단전지에서의 결과²²⁾들에 비해 높은 값을 보였다. 또한 앞서 보고되었던 같은 유형의 전해질 지지형 단전지에서의 결과들^{4,24-26)}과 비교해서도 조성이나 전해질 두께에 따른 차이를 감안하면 대체적으로 비슷한 성능수준을 나타내었다.

한편 Fig. 10에는 교류 임피던스법을 이용하여 측정된 단전지의 임피던스 스펙트럼을 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 각 온도 별로 반원이 몇 개 겹쳐져 있는듯한 스펙트럼이 나타나 있는데 이때 실수축과 만나는 반원의 시작점이 단전지 내부의 ohmic 저항성분을 나타내며 실수축에서의 나머지 반원성분이 전극에서의 분극저항에 해

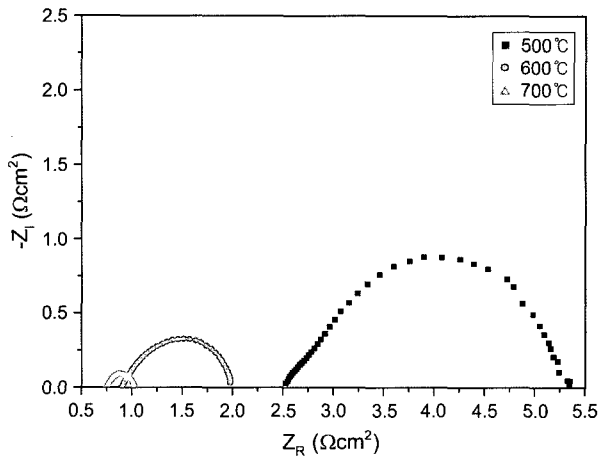


Fig. 10. Typical impedance spectra of LSGM electrolyte-supported cell obtained at OCV condition.

당한다. 이러한 단전지 구성 요소별 저항성분을 단전지의 유효면적을 고려해 면저항(Area Specific Resistance: ASR)으로 환산한 후 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1의 결과에서 보면 교류 임피던스법으로부터 구한 단전지의 ASR 값이 앞서 직류 전압-전류 분석법으로부터 구한 단전지의 ASR 값과 오차범위 내에서 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 직류 전압-전류 분석법과 교류 임피던스법이 신뢰성 있게 적용되었음을 말해준다. 또한 Table 1의 결과에서 보면 교류 임피던스 법으로부터 구한 ohmic 저항성분의 크기는 온도가 낮을수록 커짐을 볼 수 있는데 이는 ohmic 저항성분의 대부분이 전해질에 기인한 것으로 온도가 낮아지면 전해질의 저항이 커지는 현상을 반영한 것이다.

이상의 결과로 볼 때 LSGM계 단전지의 출력성능은 다른 전해질 시스템에서와 달리 전해질 자체의 저항성분이 주요한 내부저항요인이 아니라 전해질과 전극 계면에서의 반응층에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며 LSGM계 SOFC에서는 이러한 계면 반응층의 생성을 억제해 단전지의 내부저항을 줄이는 것이 가장 필수적인 요소임을 알 수 있었다. 이러한 계면 반응층의 형성을 막는 방법에 대한 연구는 현재 진행 중이며 추후 그 결과가 나오는 대로 보고할 예정이다.

4. 결 론

전극형성 시 열처리 온도를 낮출 수 있는 LSGM계 전해질 지지형 단전지를 제조하여 평가해 본 결과 전해질과 전극 사이에 일어나는 심각한 계면 반응을 억제할 수 있었다. 이렇게 계면반응을 억제한 단전지에서는 계면 반응에 의해 전해질 층에 생기는 전자 전도성상의 형성이나 저항성이 큰 2차상의 형성을 억제해 열회로 기전력

의 감소뿐만 아니라 내부저항 증가에 따른 전력 손실을 막을 수 있었다. 이러한 결과는 LSGM계 SOFC에서 보고되고 있는 구성성분간 반응성에 따른 저항손실을 최소화하기 위해 비록 전해질에 의한 저항손실은 크더라도 계면 반응성을 최소화할 수 있는 단전지 구조나 제조방법을 채택하는 것이 효과적일 수 있음을 말해준다.

REFERENCES

1. N. Q. Minh and T. Takahashi, "Science and Technology of Ceramic Fuel Cells"; pp. 92-95, Elsevier Science, Amsterdam, 1996.
2. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cell," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
3. N. Q. Minh, "High-Temperature Fuel Cell. Part II: The Solid Oxide Fuel Cell," *Chemtech.*, **21** 120-26 (1991).
4. T. Fukui, S. Ohara, K. Murata, H. Yoshida, K. Miura, and T. Inagaki, "Performance of Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells with La(Sr)Ga(Mg)O₃ Electrolyte Film," *J. Power Sources*, **106** 142-45 (2002).
5. T. Ishihara, H. Matsuda, and Y. Takita, "Doped LaGaO₃ Perovskite Type Oxide as a New Oxide Ionic Conductor," *J. Am. Chem. Soc.*, **116** 3801-03 (1994).
6. Y. Arachi, H. Sakai, O. Yamamoto, Y. Takeda, and N. Imanishi, "Electrical Conductivity of the ZrO₂·Ln₂O₃ (Ln=lanthanides) System," *Solid State Ionics*, **121** [1-4] 133-39 (1999).
7. K. Huang and J. B. Goodenough, "A Solid Oxide Fuel Cell Based on Sr- and Mg-Doped LaGaO₃ Electrolyte: The Role of a Rare-Earth Oxide Buffer," *J. Alloys and Compounds*, **303-304** 454-64 (2000).
8. P. Maiewski, M. Rozumek, C. A. Tas, and F. Aldinger, "Processing of (La,Sr)(Ga,Mg)O₃ Solid Electrolyte," *J. Electroceramics*, **8** 65-73 (2002).
9. M. J. Lee, S. S. Park, and B. H. Choi, "Variations in the Properties of LSGM System Electrolyte with Sr and Mg Addition and Sintering Conditions(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [4] 352-58 (2002).
10. R. Polini, A. Pamio, and E. Traversa, "Effect of Synthetic Route on Sintering Behavior, Phase Purity and Conductivity of Sr- and Mg-Doped LaGaO₃ Perovskites," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **24** [6] 1365-70 (2004).
11. T. Ishihara, H. Matsuda, M. A. bin Bustam, and Y. Takita, "Oxide Ion Conductivity in Doped Ga Based Perovskite Type Oxide," *Solid State Ionics*, **86-88** 197-201 (1996).
12. J. H. Kim and H. I. Yoo, "Partial Electronic Conductivity and Electrolytic Domain of La_{0.9}Sr_{0.1}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-δ}," *Solid State Ionics*, **140** 105-13 (2001).
13. F. Zheng, R. K. Bordia, and L. R. Pederson, "Phase Constitution in Sr and Mg Doped LaGaO₃ System," *Mater. Res. Bull.*, **39** 141-55 (2004).
14. L. Cong, T. He, Y. Ji, P. Guan, Y. Huang, and W. Su, "Synthesis and Characterization of IT-Electrolyte with Perovskite Structure La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.85}Mg_{0.15}O_{3-δ} by Glycine-Nitrate Combustion Method," *J. Alloys and Compounds*, **348** 325-31

- (2003).
15. X. Zhang, S. Ohara, R. Maric, H. Okawa, T. Fukui, H. Yoshida, T. Inagaki, and K. Miura, "Interface Reactions in the NiO-SDC-LSGM System," *Solid State Ionics*, **133** [3-4] 153-60 (2000).
 16. M. Hrovat, A. Ahmad-Khanlou, Z. Samarzija, and J. Hole, "Interactions between Lanthanum Gallate Based Solid Electrolyte and Ceria," *Mater. Res. Bull.*, **34** 2027-34 (1999).
 17. N. Maffei and G. de Silveira, "Interfacial Layers in Tape Cast Anode-Supported Doped Lanthanum Gallate SOFC Elements," *Solid State Ionics*, **159** 209-16 (2003).
 18. E. Djurado and M. Labeau, "Second Phases in Doped Lanthanum Gallate Perovskites," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **18** 1397-404 (1998).
 19. A. Naoumidis, A. Ahmad-Khanlou, Z. Samarzija, and D. Kolar, "Chemical Interaction and Diffusion on Interface Cathode/Electrolyte of SOFC," *J. Anal. Chem.*, **365** 277-81 (1999).
 20. P. Huang, A. Horky, and A. Petric, "Interfacial Reaction between Nickel Oxide and Lanthanum Gallate During Sintering and Its Effect on Conductivity," *J. Am. Ceram. Soc.*, **82** [9] 2402-06 (1999).
 21. K.-N. Kim, J. Moom, H. Kim, J.-W. Son, J. Kim, H.-W. Lee, J.-H. Lee, and B.-K. Kim, "Interfacial Stability between anode and Electrolyte of LSGM-Based SOFCs(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [7] 509-15 (2005).
 22. K.-N. Kim, J. Moom, H. Kim, J.-W. Son, J. Kim, H.-W. Lee, J.-H. Lee, and B.-K. Kim, "Effect of Interfacial Layer on the Electrochemical Performance of LSGM-Based SOFCs(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [10] 665-71 (2005).
 23. M. J. Lee, J. H. Nam, and B. H. Choi, "Cell Properties for SOFC Using Synthesized Power of Electrolyte LSGM System and Cathode LSM System(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [4] 359-66 (2002).
 24. J. H. Wan, J.-Q. Yan, and J. B. Goodenough, "LSGM-Based Solid Oxide Fuel Cell with 1.4 Ω/cm^2 Power Density and 30 Day Long-Term Stability," *J. Electrochemical Soc.*, **152** [8] A1511-15 (2005).
 25. T. Ishihara, H. Minami, H. Matsuda, and Y. Takita, "Application of the New Oxide Ionic Conductor, LaGaO₃, to the Solid Electrolyte of Fuel Cells," *Solid Oxide Fuel Cells IV, USA*, [2001-16] 344-52 (1995).
 26. W. Gong, S. Gopalan, and U. B. Pal, "Performance of Intermediate Temperature (600~800°C) Solid Oxide Fuel Cell Based on Sr and Mg Doped Lanthanum-Gallate Electrolyte," *J. Power Sources* (in press).