Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 43, No. 3, pp. 162~168, 2006.

Electrical Properties of the Lanthanum Ferrite-Based Cathode Materials for Low-Temperature SOFCs

Ju Hyun Kang, Jung Woon Choi, Han Byel Shim, and Kwang Soo Yoo†
Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea
(Received November 28, 2005; Accepted March 7, 2006)

저온 작동형 SOFC Lanthanum Ferrite계 공기극 소재의 전기적 특성

강주현 · 최정운 · 심한별 · 유광수†
서울시립대학교 신소재공학과
(2005년 11월 28일 접수; 2006년 3월 7일 승인)

ABSTRACT

The perovskites with nominal compositions $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}M_xO_3$ (M=Co, Mn, Ni, x=0.1-0.3) were fabricated by a solid-state reaction method as cathode materials of low-temperature operating Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs). X-ray diffraction analysis and microstructure observation for the sintered samples were performed. The ac complex impedance were measured in the temperature range 600-900°C in air and fitted with a Solatron ZView program. The electrical conductivity and polarization resistance of $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}M_xO_3$ (M=Co, Mn, Ni, x=0.1-0.3) were characterized systematically. The porosities of the sintered samples were in the range of 25% to 38%. The polarization resistance of $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}M_{0.3}O_3$ was 0.291 Ωcm^2 at 700°C.

Key words : ***SOFC, Perovskite, LSF, Polarization resistance, Impedance***

1. 서 론

고체산화물연료전지(이하 SOFC)는 연료기체가 소유하고 있는 화학에너지를 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지로 변환시키는 에너지 변환장치이다. 또한 환경 친화적이고 고 효율성을 갖는 새로운 대체에너지로써 최근 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야이다.[1] SOFC는 기본적으로 공기극, 전해질, 연료극으로 단순하게 이루어 졌기 때문에 소형발전에서 대형발전장치까지 다양한 용량으로 제작이 가능하다는 장점이 있다.

초창기 전해질 지지형 SOFC에서의 최대 성능손실요인은 단전지성분 중 가장 큰 비저항을 가진 전해질에서의 저항손실이었다. 이로 인해 전해질 지지형 단전지는 전해질에서의 저항손실을 최소화하기 위해 900-1000°C 정도의 고온에서 사용하였다. 그러나 고온작동 조건은 단전지 구성성분간의 화학적 반응은 물론 열팽창계수의 차이로 인해 오는 신뢰성 및 성능 저하 등의 문제를 일으킨다. 따라서 최근에는 전해질의 두께를 감소시킴으로써 전해질에서의 성능 손실을 최소화할 수 있는 전극지지형, 그 중에서도 음극(연료극, anode)을 지지체로 사용한 음극지지형 단전지가 주 개발대상이 되었다.[2,3]

한편 전해질 두께가 수백 μm이었던 전해질 지지형에 비해 음극지지형 단전지는 전해질 두께를 10 μm 이내로 줄임으로써 전해질에서의 성능손실을 크게 줄일 수 있었다. 이로 인해 음극지지형 단전지는 800°C 이하의 온도에서도 작동이 가능하였으며 최근 들어선 700°C 이하로까지 작동 온도영역을 넓혀가고 있다. 음극지지형 단전지의 경우 최대손실 요인은 양극(공기극, cathode)에서의 분극손실로 알려져 있다. 따라서 음극지지형 단전지의 성능향상을 위해 양극특성의 최적화가 따라야 하며 이를 토대로 음극지지형 단전지의 작동온도를 700°C 이하로 낮추는 연구가 병행되어야 한다. 특히 700°C 이하의 작동온도에서 충분한 전기적 특성을 갖는 새로운 소재의 개발과 분극 손실을 최소화 할 수 있는 전극구조의 최적화에 많은 연구가 집중되고 있는 실정이다.[4]

현재까지 많은 연구가 이루어진 SOFC의 공기극 재료로는 $La_{1-x}Sr_xMnO_3$(이하, LSM), Lanthanum ferrite계, Lanthanide cobaltite계 등이 있다. 이중 LSM은 산화분위기에서 안정하면서 전해질인 YSZ의 열팽창율과 비슷한 장점을 가지고 있다. 또한 작동온도가 1000°C에서 높은 전기전도도 값을 갖는 것으로 알려져 있다. Sr의 함량이 약 50 mol% 될 때까지 치환양이 증가할수록 전기전도도 역시 직선적으로 증가한다. 하지만 LSM의 경우에 이온전도도는 발현되지 않기 때문에 저온형 SOFC의 공기극으

†Corresponding author : Kwang Soo Yoo
E-mail : ksyoo@uos.ac.kr
Tel : +82-2-2210-2514 Fax : +82-2-2215-5863

로는 적절하지 못하다는 단점이 있다. 따라서 이온전도체인 YSZ와 함께 사용하여 LSM-YSZ 복합 공기극 소재에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있으나 복합 공기극 소재 또한 작동온도가 낮아짐에 따라 분극손실이 커지는 현상이 발견되었으며 이를 해결하기 위한 연구가 필요한 시점이다.[5-8)]

Lanthanide cobaltite계 공기극 소재는 SOFC의 작동온도를 500-700°C로 낮추기 위해 연구된 소재로써 다른 연료전지 공기극에 비해 우수한 혼합전기전도도를 갖는 재료로 알려져 있다. 하지만 이 소재는 YSZ의 전해질과의 상호반응이 일어나기 때문에 전지의 성능이 떨어지는 경향이 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 전해질과 공기극 사이에 $Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9}$(CGO) burffer layer를 만들어 줌으로써 상호반응의 문제들을 해결하는 연구가 이루어지고 있는 실정이다.[9)]

Lanthanum ferrite계는 $La_{1-x}Sr_xFeO_3$(이하, LSF)을 기본물질로 중온용 SOFC의 공기극 재료로 연구가 이루어졌다. 기존의 연구는 ABO_3 perovskite 구조의 B-자리에 Co를 사용하면서 이종원자가인 Fe을 치환하는 연구는 이루어진 반면, B-자리에 Fe을 주원소로 사용한 연구는 거의 보고된바 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Lanthanum ferrite계인 $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}M_xO_3$을 기본 물질로 M-자리에 Co, Mn, Ni를 각각 10-30 mol% 치환하여 중·저온형 SOFC의 공기극을 제조하였다. 제조된 시편에 대하여 기본 물성을 측정하고 조성 및 작동온도에 따라 impedance analyzer를 이용하여 전기전도도와 분극저항 등 전기적 특성을 체계적으로 비교분석하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 La_2O_3, SrO, Fe_2O_3, CoO, NiO, MnO를 출발원료로 사용하여 $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}M_xO_3$(x=0.1-0.3)의 공기극 재료를 합성하였다. 제조방법은 전형적인 세라믹 고상반응법으로 제조하였다. Fig. 1은 중·저온용 SOFC 공기극소재의 제조방법이다. Fig. 1과 같이 조성에 따라 칭량한 후 알루미나 볼과 함께 48시간 동안 혼합하였다. 혼합한 분말은 1000°C에서 4시간 동안 하소하여 각각의 혼합물을 합성하였다. 하소된 재료를 유발로 분쇄한 후 vehicle (56 wt% α-terpineol, 27 wt% 2-butoxyethoxy, 11.5 wt% polyvinyl butyral-co-vinyl alcohol-co-vinyl acetate, 16.5 wt% polyethylene glycol)과 함께 질량비로 공기극 파우더:vehicle =74:26의 비율로 혼합하여 페이스트(paste)화 하였다. 제

Table 1. Compositions of Lanthanum Ferrite Cathode Materials and their Porosities Obtained by Image Analysis

Classification	Composition	Porosity (%)
LSF	$La_{0.8}Sr_{0.2}FeO_3$	35
LSFC01	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.9}Co_{0.1}O_3$	29
LSFC02	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.8}Co_{0.2}O_3$	26
LSFC03	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}Co_{0.3}O_3$	30
LSFM01	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.9}Mn_{0.1}O_3$	31
LSFM02	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.8}Mn_{0.2}O_3$	33
LSFM03	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$	38
LSFN01	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.9}Ni_{0.1}O_3$	28
LSFN02	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.8}Ni_{0.2}O_3$	23
LSFN03	$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}Ni_{0.3}O_3$	25

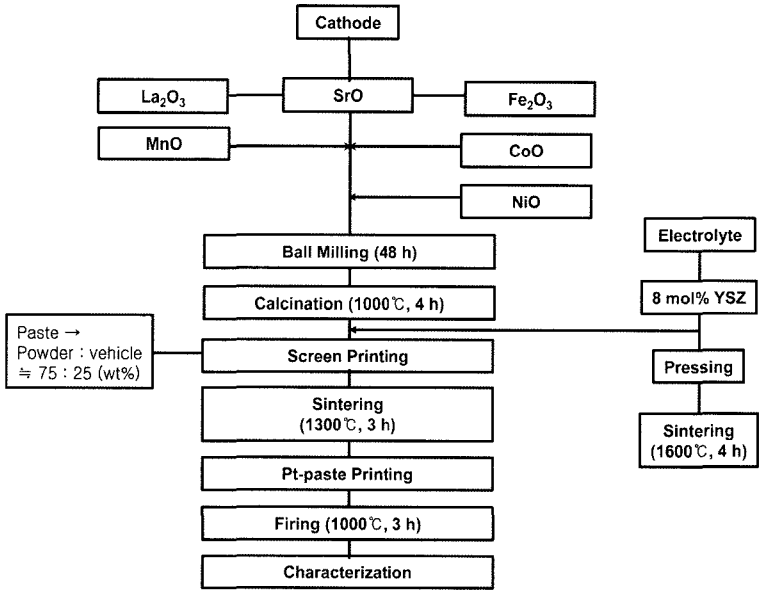

Fig. 1. Schematic diagram of the sample preparation process.

조된 공기극 소재는 Table 1에 나타내었다.

전해질을 제조할 때는 8 mol% YSZ 파우더를 이용하여 일축가압성형을 통해 펠렛(pellet) 모양의 성형체를 제조한 후, 29,000 psi로 CIP(Cold Isostatic Pressing)를 하였다. 이렇게 얻은 성형체는 고온전기로를 사용하여 5°C/min의 승온 속도로 1600°C에서 4시간 동안 소결하였다.

위에서 제조한 공기극 페이스트를 미리 준비된 YSZ 전해질 위에 스크린 프린팅법을 이용하여 후막을 입힌 후 5°C/min의 승온 속도로 350°C에서 1시간 동안 유지하면서 바인더를 날려버린 후 다시 7°C/min 승온 속도로 1300°C에서 3시간 동안 소성하였다.

제조된 성형체를 다시 스크린 프린팅법을 이용하여 양면에 일정한 패턴으로 Pt paste를 입힌 후 공기극 위에 전류 집전체(current collector)로 Pt mesh를 사용하였다. 이를 다시 7°C/min의 승온 속도로 1000°C에서 3시간 동안 소결하여 Pt 전극을 만들었다. X-ray Diffractometer (Rigaku, MiniFlex$^+$)를 이용하여 소결된 시편의 합성 정도와 결정상을 알아보았고, Field Emission Scanning Electron Microscopy(FESEM, Hitachi, S-4300)를 사용하여 미세구조를 관찰하였다. 시편의 전기적 특성을 측정하기 위하여 Computer-Interfaced Impedance Grain-Phase Analyzer (Solatron, Model 1260A)를 사용하여 0.01 Hz에서 10 MHz의 주파수 범위에서 600-800°C의 온도범위에서 100°C 간격으로 승온시키면서 교류 임피던스로 측정하였다. 이때 가해진 전류는 10 mV이었다. 임피던스 측정시, 각 측정 온도에서 충분히 유지시켜 평형상태에 도달한 다음에 측정하였으며 수집된 데이터는 ZView 프로그램을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

ABO_3 perovskite 구조의 산화물은 각각 A-자리와 B-자리에 이종원자가를 치환시킴으로 전자전도도 및 이온전도도를 증가시킬 수 있는 재료이다. 본 실험에서는 A-자리에는 20 mol%의 Sr을 B-자리에는 각각 Co, Mn, Ni을 치환시켜 공기극을 제조하였다. Fig. 2는 합성된 공기극 소재의 XRD 그래프이다. 위 그래프에서 알 수 있듯이 동일한 2θ 각에서 peak가 뜨는 것으로 미루어 보아 제조된 lanthanum ferrite계 공기극 소재는 perovskite 구조의 단일상으로 합성이 된 것으로 사료된다. 전극에서의 제 2상의 존재는 전기전도도에 있어서 장애물로 작용하기 때문에 공기극 전기적 특성에는 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 제조된 공기극 소재의 표면 사진이다. 모든 조성에서 공기극 입자들간의 연결성이 우수한 것을 확인 할 수 있었으며, 소결후 입자의 크기를 비교해 보았을 때 Ni이 치환된 공기극 소재의 입자가 다른 소재에 비해 크기

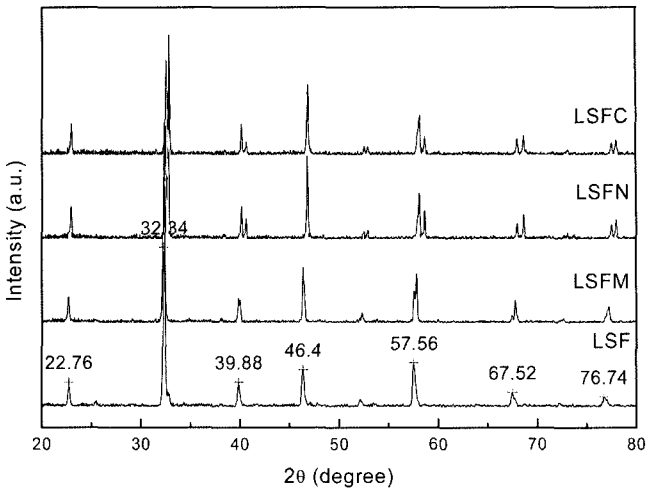

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of lanthanum ferrite cathode materials.

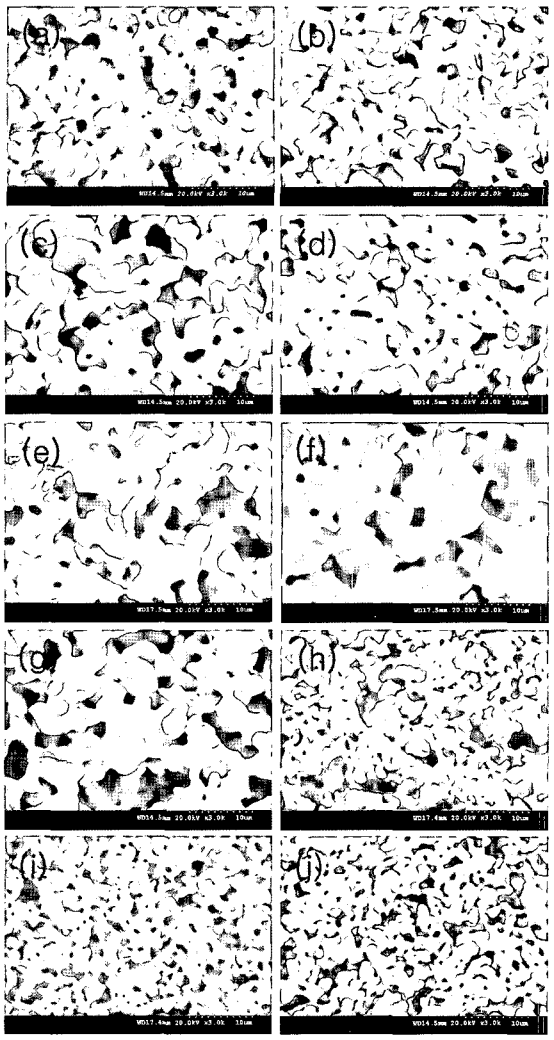

Fig. 3. Scanning electron micrographs of (a) LSF, (b) LSFC01, (c) LSFC02, (d) LSFC03, (e) LSFM01, (f) LSFM02, (g) LSFM03, (h) LSFN01, (i) LSFN02, and (j) LSFN03.

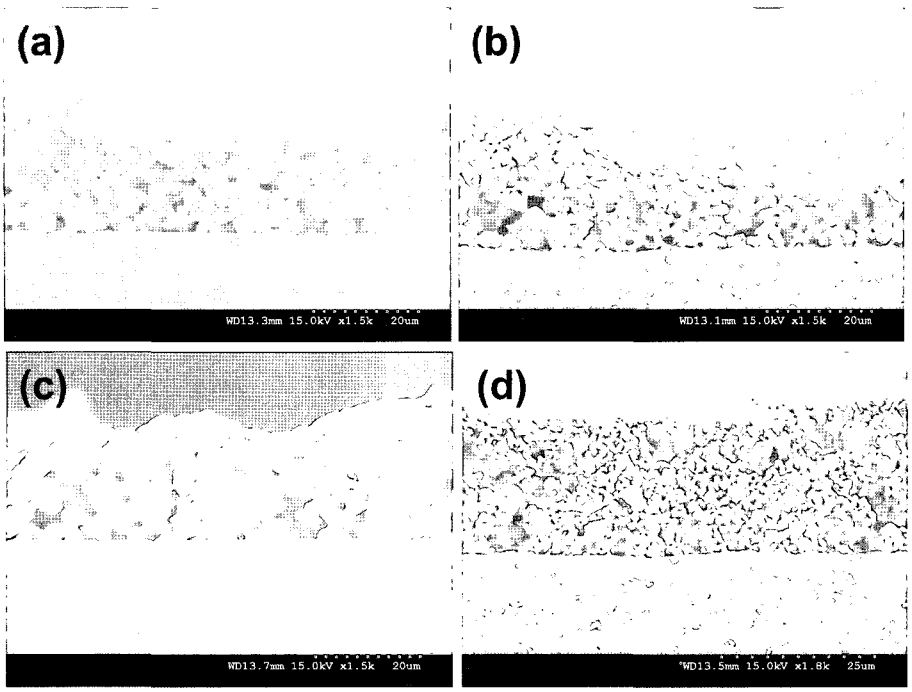

Fig. 4. Cross-sectional micrographs of the cathode materials; (a) LSF, (b) LSFC03, (c) LSFM03, and (d) LSFN03.

가 작음을 알 수 있었다. 또한 Mn과 Co를 치환한 경우보다 공기극 입자들의 연결성이 떨어지는 것을 알 수 있었다. Ni을 10 mol% 첨가한 경우, 20–30 mol% 첨가한 경우보다 공기극 입자의 연결성이 우수하였으며 이는 전기적 특성에도 영향을 미칠것으로 사료된다. Fig. 4는 전이금속을 각각 30 mol% 치환했을 때, 공기극과 YSZ 전해질과의 파단면사진이다. 위 그림에서 알 수 있듯이 공기극 입자와 YSZ 전해질은 면접촉을 통해 networking 되어 있는 것을 알 수 있다. 만약 공기극 입자가 YSZ 전해질과의 면접촉이 아닌 점접촉으로 networking을 이루고 있다면 TPB(Three Phase Boundary)의 면적이 증가하게 되어 전극에서의 분극저항 손실을 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 추후 실험에서는 소결온도를 달리하여 공기극과 YSZ 전해질과의 계면 상태에 따른 전기적 특성 실험이 필요하다고 생각된다.[11]

Figs. 5-9은 동일하게 유효전극면적(active area)을 갖도록 제조된 공기극 소재의 임피던스 스펙트럼이다. 유효전극면적은 0.6 cm^2으로 고정하였다. 스펙트럼의 시작점과 끝점 사이의 간격이 전극에서의 분극성분에 해당한다. Figs. 5-9에서 알수 있듯이 작동온도가 증가할수록 전극의 분극성분이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 Kim 등[13]이 보고한 열적활성화 반응기구(thermally activated process)를 따름을 알 수 있다. Fig. 5는 LSF의 임피던스 스펙트럼이다. 작동온도가 600°C에서 700°C로 증가함에 따라 분극저항값은 현저하게 떨어지고 있으며 이때, 분극저항값은 600°C에서는 1.897 Ωcm^{2}이며, 700°C에서는 0.467 Ωcm^{2}이

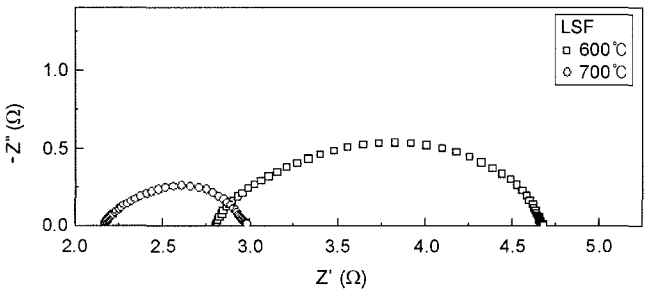

Fig. 5. Impedance spectra of the $La_{0.8}Sr_{0.2}FeO_3$ measured at 600°C and 700°C in the air atmosphere.

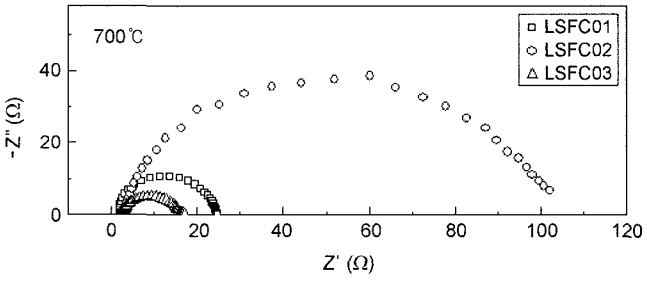

Fig. 6. Impedance spectra of the $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}Co_xO_3$ measured at 700°C in the air atmosphere.

었다. Fig. 6은 B-자리에 Co를 각각 10, 20, 30 mol% 치환한 공기극 소재의 스펙트럼이다. 30 mol%를 치환한 경우가 가장 작은 값의 분극저항값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 조성 이외의 다른 조건이 동일하다고 가정할 때,

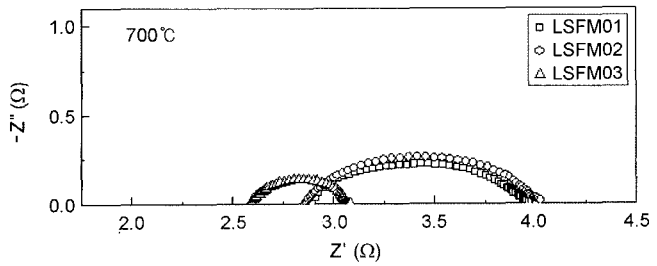

Fig. 7. Impedance spectra of the $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}Mn_xO_3$ measured at 700°C in the air atmosphere.

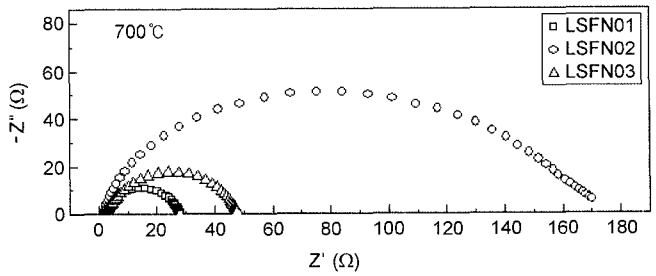

Fig. 8. Impedance spectra of the $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}Ni_xO_3$ measured at 700°C in the air atmosphere.

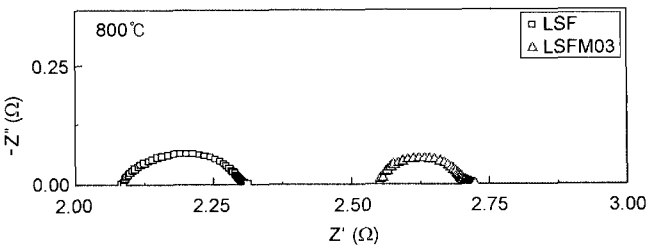

Fig. 9. Impedance spectra of the $La_{0.8}Sr_{0.2}FeO_3$ and $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$ measured at 800°C in the air atmosphere.

치환량에 따라 전기전도의 메카니즘, 즉 더 많은 산소 빈격자나 자유전자의 수를 증가시키기 때문으로 사료된다. 하지만, 모든 조성의 샘플에서 10 mol%와 20 mol%를 치환한 경우에는 전혀 반대의 경향을 보이고 있다. 이는 양극에서 분극저항을 결정짓는 가장 큰 요인 중 하나가 전극의 미세구조인데 Table 1에서 볼 수 있듯이 모든 조성의 샘플에 대해 10 mol%를 치환한 경우가 20 mol%를 치환한 경우에 비해 기공율이 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 10 mol%와 20 mol%의 상반된 결과는 기공율 차이로 인한 영향이 조성에 따른 분극저항에 대한 효과 보다 큰 원인임을 짐작할 수 있다. 이는 모든 조성의 샘플에서 가장 작은 값의 분극저항값을 갖는 샘플에 대해 기공율을 측정한 결과를 통해 확인할 수 있다. Fig. 6에서는 Co를 10 mol%를 치환 경우 작동온도 700°C에서 13.582 Ωcm^2이었으며, 20 mol%를 치환한 경우는 60.144 Ωcm^2, 30 mol%를 치환한 경우는 8.116 Ωcm^2이었다.

Mn을 치환한 경우는 Fig. 7에서 보여준다. Fig. 7에서 측정시 전극의 접촉 문제로 인해 스펙트럼의 시작점이 달라졌다. 스펙트럼의 시작점이 달라지는 원인으로는 공기극과 전해질과의 계면반응 문제, 전지의 Ohmic 저항 성분 등에 따라서 스펙트럼의 시작점은 달라진다. 하지만 본 실험에서는 기준전극을 연료극 쪽에 위치하게 제작하였기 때문에 공기극과 전해질과의 계면반응, 공기극과 전류 집전체와의 계면 반응 및 후면에 부착한 연료극과 전해질과의 계면 반응 등 하프셀 내에서 발생하는 각각의 계면저항 성분을 분석하기가 어렵고, 또한 아직도 많은 학계에서 이에 대한 의견이 분분한 상태이다.[12] 하지만, Figs. 6과 8을 통해 본 실험에서와 같은 하프셀에서의 스펙트럼 측정시, 가장 큰 영향을 미치는 것은 전극의 접촉저항 성분이라는 것을 알 수 있다. Mn의 경우, Co를 치환한 경우와 마찬가지로 같은 경향을 가지고 있었다. Mn을 30 mol% 치환한 경우는 작동온도 700°C에서 0.291 Ωcm^2으로 우수한 분극특성 값을 보였다.

반면에 Ni을 치환한 경우, 10 mol% 치환했을 때 FESEM 이미지로 확인하였듯이 20, 30 mol% 치환한 경우보다 공기극 입자의 연결성이 더 우수하였으며 기공율 측정 결과 28%로 20, 30 mol%에 비해 큰 기공율 값을 가지고 있었다. 따라서 작동온도 700°C에서 10 mol%를 치환한 경우, 분극저항값은 15.413 Ωcm^2인 반면, 20, 30 mol%를 치환한 경우는 각각 98.244 Ωcm^2, 27.248 Ωcm^2의 값을 가졌다.

Fig. 9은 800°C의 작동온도에서 우수한 전기적 특성을 보이는 LSF와 LSFM03 시편의 임피던스 스펙트럼이다. LSF의 경우, 800°C에서 0.134 Ωcm^2의 값을 가진 반면 LSFM03은 0.095 Ωcm^2의 값으로 우수한 값을 가졌다. Figs. 3과 4를 토대로 image analyzer를 통해 기공율을 측정한 결과 기공율은 약 25-38%의 값을 가졌으며 전기적 특성이 우수한 재료일수록 기공율 또한 크다는 것을 확인하였다. 즉 공기극에서의 분극저항 값은 기공율에 크게 의존하면서도 공기극 입자와 전해질과의 접촉면적 또한 중요하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 제조된 시편의 Arrhenius plot이다. 이 그래프에서의 직선의 그래프는 각각의 시편의 Activation energy로써 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 치환된 전이금속의 종류에 따라, 치환된 양에 따라 전극의 반응기구는 변하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 LSF, LSFC03, LSFM03, LSFN01의 분극저항 특성을 작동온도에 따라 그래프화 한 것이다. 작동온도가 증가함에 따라 분극저항 특성은 선형적으로 좋아지는 것을 알 수 있다. 초기 작동온도 600°C에서는 전이금속을 치환하지 않은 LSF의 분극저항 특성이 좋았으나 700°C

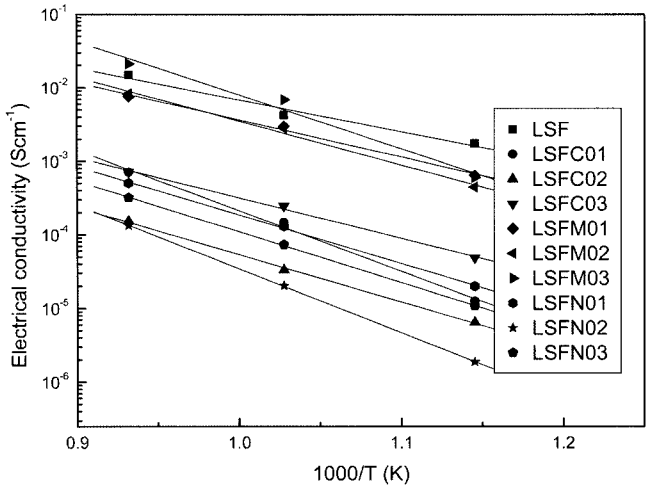

Fig. 10. Arrhenius plots of the electrical conductivity of lanthanum ferrite cathode materials as a function of operating temperature.

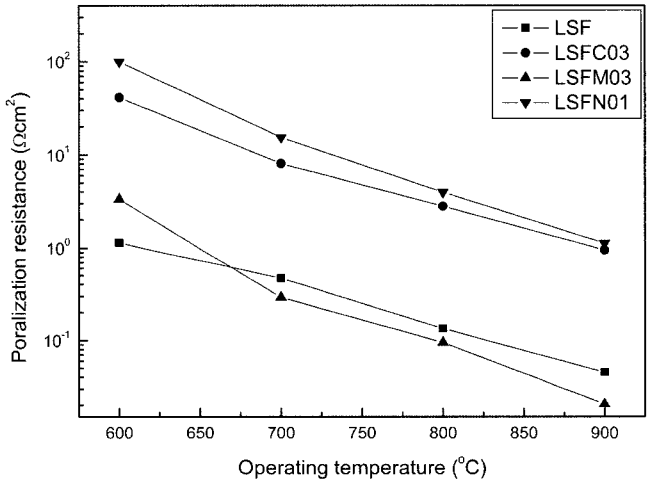

Fig. 11. Polarization resistances of the lanthanum ferrite cathode materials as a function of operating temperature.

이상의 작동온도 영역에서는 LSFM03의 분극저항 특성이 우수하였다. $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}Mn_xO_3$의 공기극 재료는 전반적으로 다른 조성에 비해 분극특성이 우수하였으며 Mn의 치환량이 늘어남에 따라 전극에서의 분극손실도 선형적으로 줄어들었다. 따라서 중·저온용 SOFC의 공기극 재료에는 Mn을 치환한 $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}Mn_xO_3$계 물질이 가장 적합하다고 사료되며 정확한 메카니즘 규명과 우수한 전극 특성을 갖도록 추후 시험이 필요하다고 생각된다. 또한 현재 연구 목적이 SOFC의 작동온도를 낮추는 데 있기 때문에 600°C의 작동온도에서도 공기극에서의 분극저항 값이 0.3 Ωcm^2 이하 값을 갖도록 하는 연구가 진행되어야 한다고 사료된다.

4. 결 론

$La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{1-x}M_xO_3$를 기본물질로 M-자리에 이종원자가 원소인 Co, Mn, Ni를 10−30 mol%씩 각각 치환하여 10종류의 공기극 시편을 제조하였다. XRD 분석결과, 모든 조성에 perovskite 단일상으로 합성이 되는 것을 확인하였다. 또한 미세구조 분석결과, 기공율은 25−38%의 값을 보였으며 $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$ 시편이 가장 큰 38%의 기공율을 가졌다. 공기극 입자들의 연결성은 Ni을 치환한 경우를 제외한 모든 시편에서 우수하였다. 임피던스 스펙트럼을 통해 공기극 소재의 전기적 특성을 측정한 결과, 600°C의 작동온도에서 $La_{0.8}Sr_{0.2}FeO_3$ 시편의 분극저항이 1.897 Ωcm^2 값으로 가장 낮은 값을 보인 반면 700°C에서는 $La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$ 시편이 0.291 Ωcm^2 값으로 우수한 분극특성 값을 보였다.

Acknowledgments

이 논문은 산업자원부 지원으로 수행하는 SOFC 핵심원천기술개발사업을 통해 수행되었으며, 이에 대해 감사드립니다.

REFERENCES

1. K. S. Yoo, "R&D Trend of Thin-Film SOFCs," *Ceramist*, **3** [5] 29-33 (2000).
2. J. Will, A. Mitterdorfer, C. Kleinloged, D. Perednis, and L. J. Gauckler, "Fabrication of Thin Electrolyte for Second-generation Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, **131** 79-96 (2002).
3. J. D. Kim, G. D. Kim, J. W. Moon, Y. I. Park, W. H. Lee, K. Kobayashi, M. Nagai, and C. E. Kim, "Characterization of LSM-YSZ Composite Electrode by AC Impedance Spectroscopy," *Solid State Ionics*, **143** 379-89 (2001).
4. J. C. Yun, W. S. Kim, H. C. Kim, J. H. Lee, J. S. Kim, H. W. Lee, and B. H. Kim, "Effect of Cathode Porosity of Mixed Conducting $La_{0.6}Sr_{0.2}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$ on the Power Generating Characteristics of Anode Supported SOFCs(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [4] 269-75 (2005).
5. B. C. H. Steels, "Survey of Materials Selection for Ceramic Fuel Cells; II. Cathodes and Anodes," *Solid State Ionics*, **86-88** 1233-34 (1996).
6. J. Fleig, "On the Width of the Electrochemically Active Region in Mixed Conducting Solid Oxide Fuel Cell Cathodes," *J. Power Sources*, **105** 228-38 (2002).
7. J. M. Ralph, A. C. Schoeler, and M. Krimplet, "Materials for Lower Temperature Solid Oxide Fuel Cells," *J. Mater. Sci.*, **36** 1161-72 (2001).
8. M. D. Anderson, J. W. Stevenson, and S. P. Simner, "Reactivity of Lanthanide Ferrite SOFC Cathodes with YSZ Electrolyte," *J. Power Sources*, **129** 188-92 (2004).
9. J. M. Ralph, C. Rossignol, and R. Kumar, "Cathode Mate-

rials for Reduced-Temperature SOFCs," *J. Electrochem. Soc.*, **150** 1518-22 (2003).
10. F. Zhao and A. V. Virker, "Dependence of Polarization in Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells on various Cell Parameters," *J. Power Sources*, **141** 79-95 (2005).
11. A. Esquirol, N. P. Brandon, J. A. Kilner, and M. Mogensen, "Electrochemical Characterization of $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$ Cathodes for Intermediate-Temperature SOFCs," *J. Electrochemical Soc.*, **151** A1847-55 (2004).
12. G. Hsieh, T. O. Mason, E. J. Garboczi, and L. R. Pederson "Experimental Limitations in Impedance Spectroscopy Part 3-Effect of Reference Electrode Geometry/Position," *Solid State Ionics*, **96** 153-72 (1997).