

고체산화물 연료전지용 공기극재료로서의 LSM-YSZ 전극 연구

이유기 · 김정열 · 이영기 · 박동구* · 조범래** · 박종완*** · Steven J. Visco****

위덕대학교 반도체공학과

*수원대학교 전자재료공학과

**계명대학교 재료공학과

***한양대학교 금속공학과

****Lawrence Berkeley National Laboratory

Investigations of LSM-YSZ as Air Electrode Materials for Solid Oxide Fuel Cells

You-Kee Lee, Jung-Yeul Kim, Young-Ki Lee, Dong-Koo Park*, Bum-Rae Cho**,

Jong-Wan Park*** and Steven J. Visco****

Dept. of Semiconductor Engineering, Uiduk University, Kyongju 780-713

**Dept. of Electronic Materials Engineering, Suwon University, Suwon 445-743*

***Dept. of Materials Engineering, Keimyung University, Taegu 704-701*

****Dept. of Metallurgical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791*

*****Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA*

(1999년 4월 9일 받음, 1999년 9월 16일 최종수정본 받음)

초 록 50/50 vol% LSM-YSZ의 복합공기극(LSM = $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, $0 \leq x \leq 0.5$)이 콜로이드 증착법에 의해 준비되며 주사전자현미경과 임피던스 분석기에 의해 연구되어졌다. 재현성있는 임피던스 스펙트럼들이 LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ로 구성된 향상된 셀을 사용함으로써 얻어졌다.

이러한 셀들의 임피던스 스펙트럼들은 작동온도에 강하게 영향을 받았으며, 가장 안정된 조건은 900°C에서 도달되어졌다. 900°C에서 공기//공기 셀에 대해 측정된 전형적인 임피던스 스펙트럼들은 2개의 불완전한 호(depressed arc)로 구성되었다.

LSM 전극에 대한 YSZ의 첨가는 LSM-YSZ 공기극의 저항 감소를 가져왔으며, 전해질 표면의 불순물의 영향을 제거하기 위한 연마는 공기극 저항을 더욱 감소시켰다. 또한 촉매층(Ni 혹은 Sr)을 가진 LSM-YSZ 전극은 촉매층이 없는 경우에 비해 공기극 저항의 감소를 가져왔다. LSM-YSZ 공기극 저항은 전극조성, 전해질의 형태, 인가 전류에 의해 영향을 받았다.

Abstract Composite air electrodes of 50/50 vol% LSM-YSZ where LSM = $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) were prepared by colloidal deposition technique. The electrodes were then examined by scanning electron microscopy (SEM) and studied by ac impedance spectroscopy in order to improve the performance of a solid oxide fuel cell (SOFC). Reproducible impedance spectra were confirmed by using the improved cell, consisting of LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ.

These spectra were a strong function of operating temperature and the stable conditions for the cells were typically reached at 900°C. The typical spectra measured for an air//air cell at 900°C were composed of two arcs.

Addition of YSZ to the LSM electrode led to a pronounced decrease in cathodic resistivity of LSM-YSZ composite electrodes. Polishing the electrolyte surface to eliminate the influences of surface impurities could further reduce cathode resistivity. The cathodic resistivity of the LSM-YSZ electrodes with catalytic interlayer (Ni or Sr) was much smaller than that of LSM-YSZ electrodes without catalytic interlayer. In addition, the cathodic resistivity of the LSM-YSZ electrodes was a strong function of composition of electrode materials, the electrolyte geometry, and applied current.

1. 서 론

최신의 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell; SOFC)는 주로 지르코니아(yttria stabilized zirconia; YSZ) 전해질을 사용하며 전해질의 낮은 이온전도도에 기인하여 주로 고온에서 작동되어진다. 이러한 고온작동은 비세라믹(nonceramic) 전극 및 연결재료(interconnect or separator)의 사용을 제한하므로 셀재료 선택의 폭을 좁게 하고, 구성재료 사이의 열응력 및 상호확산에 의한 셀수명

및 신뢰성에 나쁜 영향을 주며, 값비싼 구성재료의 사용으로 인한 셀제조 비용의 증가 및 고온밀봉(sealing)의 어려움으로 인한 장기안정성의 문제를 야기시킨다. 따라서 저온작동이 가능한 연료전지의 개발이 최근의 SOFC 개발의 주요한 관심사 중의 하나이다. 이러한 저온형 연료전지의 개발은 크게 전해질의 박막화와 지르코니아 전해질을 대체할 만큼 우수한 이온전도도를 가진 전해질 개발로 나누어진다. 이러한 두 범주내에서 개발된 SOFC는 저온에서 사용가능한 작은 전해질 저항을 소유하게 된다. 그러나 전체 셀성능

을 좌우하는 요소중 하나인 전극저항은 여전히 문제로 남게 되며 따라서 우수한 셀성능을 가진 연료전지의 제작을 위해 전극저항의 감소 또한 불가피하다. 현재 우리의 연구는 박막형 SOFC의 개발로 설정되어 있으며 우리의 연구 결과 연료극(fuel electrode or anode; NiO-YSZ)은 넓은 온도 구간에서 우수한 전극성능을 보여준 반면 공기극(air electrode or cathode)은 저온영역에서 셀성능을 제한하는 요소임이 밝혀졌다.¹⁾ 따라서 우수한 성능을 가진 저온형 연료전지 개발을 위한 공기극의 전극성능 향상 연구가 현재 우리의 당면한 연구 관심사이다.

현재 공기극에는 산소 환원반응에 대한 높은 촉매 반응성, 높은 전자전도도, 전해질과의 열적, 기계적, 화학적 안정성 등 전극으로서의 우수한 성능특성을 소유한 La_{1-x}Sr_xMnO₃(LSM)이 주로 사용되나 저온영역에서 사용하기 위해서는 여전히 전극저항이 높은 편이다. 최근 이러한 전통적인 LSM의 전극성능과 관련한 전기화학적 성능이 LSM-YSZ 복합전극(composite electrode)에서 삼상계(triple phase boundary; TPB (전해질/전극/산소)) 영역의 증가에 기인하여 향상되어짐이 밝혀졌다.²⁻⁶⁾ 그러나 여러 가지 실험조건에 따라 전극반응에 대한 많은 논쟁의 소지가 남아있고, 따라서 이에 대한 지속적인 연구가 요구되어지고 있다.

따라서 본 연구는 저온형 연료전지의 성능향상을 위한 LSM-YSZ 전극에 대한 제반 공정변수들의 영향과 전기화학적 평가를 통한 LSM-YSZ 전극의 최적 조건을 확립하는데 목적을 두었다.

2. 실험방법

전해질로는 8 mol% YSZ와 결합제를 97 : 3의 비율로 혼합하여 일축가압성형한 후 1450 °C, 4시간 소결한 펠렛을 사용하였으며 이때 제조된 펠렛은 알루미늄판에 의한 시편 표면의 오염방지와 전극의 소결공정단계의 감소를 위해 곡시편(curved pellet)으로 제조되었다.

공기극으로는 glycine과 nitrate의 비가 0.5인 glycine-nitrate를 combustion process⁷⁾에 의해 합성하고 이때 얻어진 LSM을 1200 °C, 4시간 하소한 후, 이 분말과 같은 조건에서 하소된 YSZ 분말을 50/50 vol%로 혼합하여 불밀링한 LSM-YSZ 분말을 사용하였다. 이 분말을 이소프로필 알콜내에서 분산시켜 콜로이드 용액을 제조하여 YSZ 전해질의 1cm×1cm masked area상에 증착시킨후 1100 °C, 4시간동안 소결시켜 작동전극(working electrode)을 형성하였다. 이러한 과정을 통해 LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ 셀이 준비되어졌고, 전해질의 한면에 백금 페이스트를 950 °C, 30분간 소결하여 백금 기준전극(reference electrode)을 증착하였다. 또한 전류집전자(current collector)로는 백금 메쉬(Pt mesh)가 백금 페이스트에 의해 전극에 부착되어졌다. 작동전극과 상대전극(counter electrode)의 두께는 SEM에 의해 각각 10 μm로 측정되어졌다. 한편 전해질과 전극사이의 촉매층(Ni or Sr)은 Ni-nitrate과 Sr-nitrate 농액을 전해질의 표면에 바른 후 건

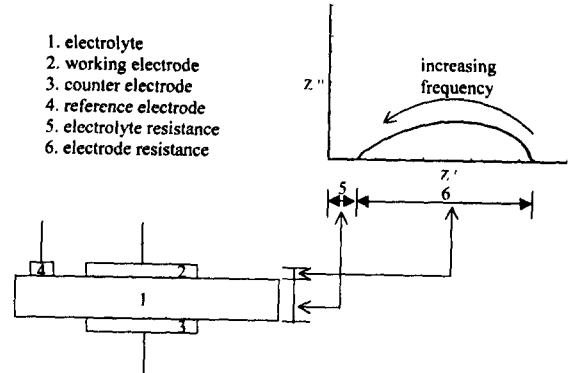


Fig. 1. Measurements configuration used for impedance spectroscopy on LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ cells, together with a schematic impedance diagram.

조시켜 형성하였다.

LSM-YSZ 공기극의 임피던스는 SI (Solartron Impedancemeter) 1260 Impedance/Gain-Phase Analyzer와 Potentiostat/Galvanostat를 이용하여 주로 900 °C, 공기중에서 측정하였다(frequency range: 0.1 Hz-100 kHz, applied AC amplitude: 10 mV). Fig. 1은 개략적인 임피던스 도형과 더불어 임피던스 분석기에 이용된 LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ 셀의 측정 형태를 나타내었다. High frequency intercept가 전해질과 측정도선의 저항에 의해 0으로 접근하지 않음을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 700-900 °C의 작동온도범위에서 온도상승시와 하강시 측정된 La_{0.85}Sr_{0.15}MnO₃-YSZ (LSM15-YSZ)/YSZ 계면의 임피던스 스펙트럼들의 온도의존성을 보여준다. 그림에서 1과 2는 24시간 이내에 각각 온도상승 및 하강시에 측정된 임피던스 스펙트럼을 나타내고, 3과 4는 1차 측정 후 최소 24시간 이후에 각각 온도상승 및 하강시에 측정된 임피던스 스펙트럼이다. LSM15-YSZ의 임피던스는 작동온도가 증가함에 따라 감소하는 강한 온도의존성을 보여준다. 또한 임피던스 스펙트럼들은 작동온도 범위내에서 900 °C를 제외하고는 작동온도 및 작동시간에 따라 온도상승시 및 하강시에 스펙트럼의 불일치를 보여주고 있으며, 이는 LSM-YSZ 전극내의 산소공공의 형성 또는 산소 비화학량론(nonstoichiometry)에 의한 것으로 해석되어지고 있다.⁸⁻¹¹⁾ 따라서 LSM-YSZ/YSZ 셀의 안정조건은 900 °C에서 도달되어지고, 작동온도 900 °C 이하에서는 48시간 이내에 도달하지 못함을 알 수 있다. 그리고 임피던스 스펙트럼들은 고주파수 영역에서 백금 도선과 측정장치에 의해 발생된 전형적인 유도효과(induction effect)를 보여주고 있다.

Fig. 3은 유도효과를 제거한 후 등가회로를 통해 900 °C, 공기중에서 측정된 임피던스 스펙트럼의 deconvolution을 보여준다. 얻어진 복소임피던스 스펙트럼의 deconvolution은 Zplot과 Zview 전기화학 임피던스 소프트웨어

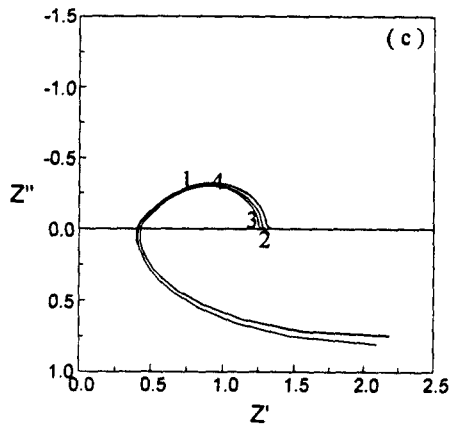
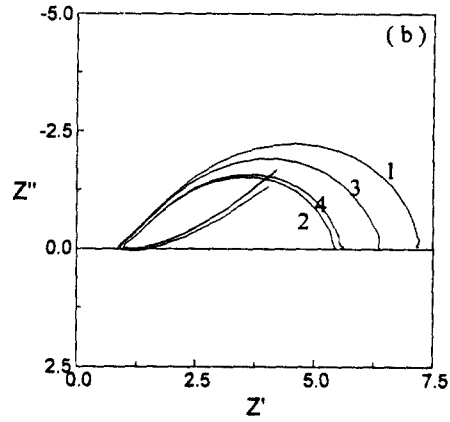
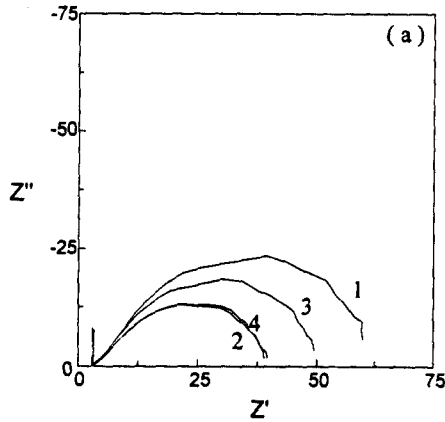


Fig. 2. Evolution of the impedance spectra for a LSM15-YSZ cathode on YSZ measured at (a) 700°C, (b) 800°C and (c) 900°C in air. In each figure, the 1 and 2 represent measured plots under increasing and decreasing of temperature, respectively, within 1 day, and 3 and 4 without 1 day after first measurement.

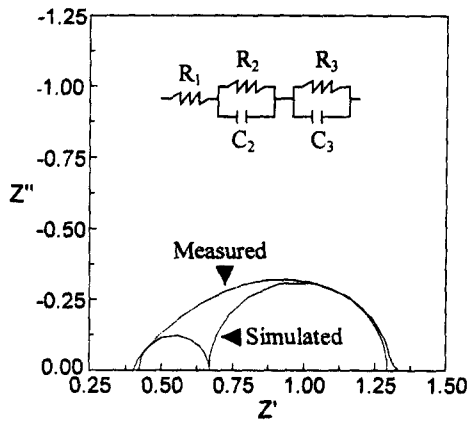


Fig. 3. Deconvolution of the impedance spectrum of LSM15-YSZ cathode measured at 900°C in air with the equivalent circuit after subtraction of the inductance (R_1 : YSZ electrolyte resistance, R_2 : charge transfer resistance, R_3 : mass transfer resistance, C_2 , C_3 : distributed capacitances).

(Scribner Associates Inc.)에 의해 실행되어졌고 이때 적절한 등가회로 모델의 변수가 결정되어졌다. 관찰된 LSM-YSZ 전극의 임피던스 스펙트럼은 두반원(semicircle) 즉, 고주파영역의 전하이동과정(charge transfer process)에 기인한 반원과 저주파영역의 산화물 이온의 물질이동과정(mass transfer process or diffusion process)에

기인한 반원의 부분적 중복(overlap)을 보여주었다.¹²⁻¹⁵⁾ 또한 스펙트럼은 고주파영역의 호(arc)가 저주파영역의 호보다도 훨씬 적음을 보여주었으며, 고주파영역의 끝에서 Warburg impedance를 지시하는 45°의 기울기를 보여주었다. 따라서 이 스펙트럼으로부터 물질이동과정(저주파영역의 호)이 LSM-YSZ 전극에서 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 4는 800°C, 공기중에서 상이한 YSZ 표면상에 증착된 LSM15-YSZ와 LSM15 전극으로부터 측정된 임피던스 스펙트럼을 보여준다. 연마된 YSZ 표면(sanded YSZ surface; 표면거칠기 0.5 μm)상에 증착된 LSM15-YSZ와 LSM15 전극의 임피던스가 연마되지 않은 YSZ 표면(as-sintered YSZ surface) 상에 증착된 두 전극의 임피던스에 비해 작았다. 이것은 유효 삼상경계면(triple-phase boundary (TPB); 전극/전해질/가스 계면)과 전해질 표면의 불순물과 관련되어진다.^{16,17)} 일반적으로 소결된 YSZ 표면은 매끈하고, 광택이 있으며 실리카(silica)나 알루미늄(alumina)와 같은 표면 불순물을 포함한다. 그러므로 연마나 에칭과 같은 전해질 표면처리는 표면 불순물의 제거뿐만 아니라 잉여의 TPB의 생성을 돕는다. 게다가 YSZ 전해질내에서 불순물 특히, 실리카의 제거는 YSZ 전해질의 이온전도도뿐만 아니라 전극 저항에도 영향을 미칠 수 있다.¹⁷⁾ 또한 전해질의 표면처리는 후속공정동안 전극재료의 접착력(adhesion)의 증가를 도와준다.

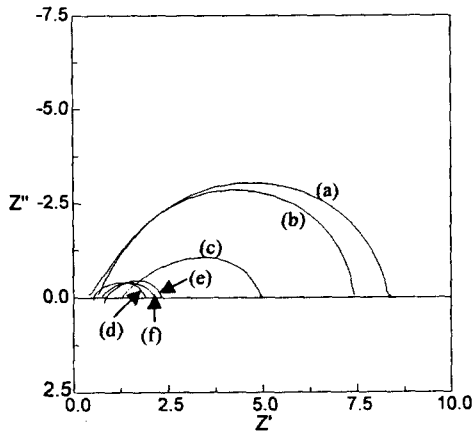


Fig. 4. Impedance spectra for the LSM15/YSZ and LSM15-YSZ/YSZ electrodes with different YSZ electrolyte surfaces at 800°C in air; (a) LSM15 with as-sintered YSZ surface, (b) LSM15 with sanded YSZ surface, (c) LSM15-YSZ with as-sintered YSZ surface, (d) LSM15-YSZ with sanded YSZ surface, (e) LSM15-YSZ with Ni-nitrate interlayer and (f) LSM15-YSZ with Sr-nitrate interlayer.

또한 Fig. 4에서 LSM15-YSZ의 임피던스값은 LSM15보다도 더 작다. 이것은 LSM 전극에 YSZ 첨가와 함께 산소이온 이동단계가 가속화되어질 수 있도록 TPB 길이의 공간적 증가가 이루어졌기 때문이다.^{6,18)} 그리고 Fig. 4는 연마된 YSZ 표면상에 증착된 LSM15-YSZ 전극의 임피던스가 동일 YSZ 표면상에 증착된 LSM15의 임피던스보다

더 적음을 보여준다. 이것은 연마된 YSZ 표면상에 증착된 LSM15-YSZ 전극의 임피던스가 위에서 언급된 것처럼 TPB 길이의 공간적 증가와 전해질 표면의 불순물 제거의 두 효과에 기인하여 급격하게 감소한 것으로 생각된다.

Fig. 4는 또한 촉매층(Ni or Sr)을 가진 LSM15-YSZ 전극의 임피던스가 촉매층을 가지지 않은 LSM15-YSZ 전극에 비해 임피던스가 훨씬 더 적음을 보여준다. 보통 촉매층의 효과는 전극/가스 혹은 전해질/가스 표면의 계면 산소 교환의 속도 증가, TPB 활동도의 증가 및 이들 요소들의 결합과 관련되어진다.

Fig 5는 900°C, 공기중에서 측정된 다양한 공기극의 조성을 가진 LSM-YSZ의 전형적인 임피던스 스펙트럼을 보여준다. 이 그림에서 공기극의 임피던스는 강한 전극조성의존성을 보여준다. 그러나 그 임피던스 스펙트럼은 LSM-YSZ내의 Sr함량 증가에 따른 어떤 경향을 보여 주지는 않았다. 또한 공기극의 반쪽셀(cathodic side half-cell)과 연료극의 반쪽셀(anodic side half-cell)의 스펙트럼들은 제조된 전해질의 형태 즉, 곡시편(curved pellet)에 기인하여 다른 임피던스 경향을 보여줌을 알 수 있다. 즉, Fig. 6은 900°C, 공기중에서 상이한 형태를 가진 YSZ 전해질상에 증착된 LSM15-YSZ 전극의 임피던스 스펙트럼을 보여준다. 편평한 YSZ 전해질상에 증착된 LSM15-YSZ 전극의 임피던스가 오목 및 볼록한 YSZ 전해질상에 증착된 LSM15-YSZ 전극의 임피던스보다 적음을 보여주며, 이 결과로부터 공기극의 임피던스가 전해질의 형태에도 상당

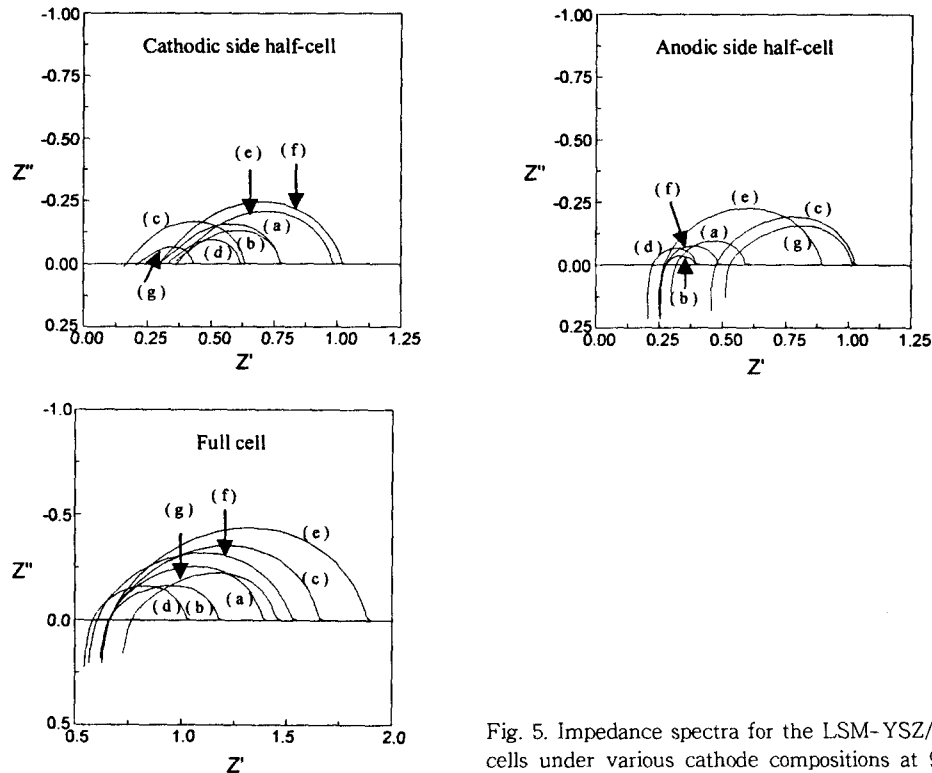


Fig. 5. Impedance spectra for the LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ cells under various cathode compositions at 900°C in air; (a) LaMnO_3 -YSZ, (b) $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$ -YSZ, (c) $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ -YSZ, (d) $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ -YSZ, (e) $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -YSZ, (f) $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ -YSZ and (g) $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ -YSZ.

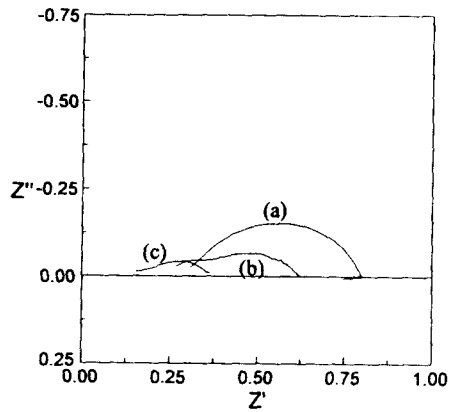


Fig. 6. Impedance spectra of LSM15-YSZ cathodes with different YSZ electrolyte geometry at 900°C in air; (a) electrode deposited on convex YSZ surface, (b) electrode deposited on concave YSZ surface and (c) electrode deposited on flat YSZ surface.

한 영향을 받을 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7의 SEM 사진에서 보여주는 바와 같이 전극/전해질 계면의 접촉 및 TPB 길이에 기인한 농도분극 때문인 것으로 사료된다. 즉, 전극/전해질 계면 및 TPB로의 산소의 직접 침투가 오목 및 볼록한 YSZ 전해질을 가진 셀에서 우수하지 못한 계면 접촉 및 적은 TPB 길이에 기인하여 지연되어졌기 때문이다.¹⁹⁾ 그러므로 편평한 면을 가진 전해질의 사용이 고성능 셀의 제조에 바람직하다.

Fig. 7은 상이한 형태를 가진 YSZ 전해질상에 증착된 LSM15-YSZ 전극의 횡단면 SEM 사진을 보여준다. LSM15-YSZ 전극내의 볼록한 면의 전극/전해질 계면 접촉이 오목 및 편평한 면의 계면 접촉에 비해 비교적 적은 TPB 길이를 가지며 훨씬 우수하지 못함을 알 수 있다. 또한 SEM 사진은 LSM15-YSZ 공기극의 두께가 약 10 μm 이고, LSM-YSZ 전극내의 LSM과 YSZ 입자사이의 구별이 불가능함을 보여주고 있다.

Fig. 8은 1 A/cm²의 전류가 통과한 전후의 LSM-YSZ

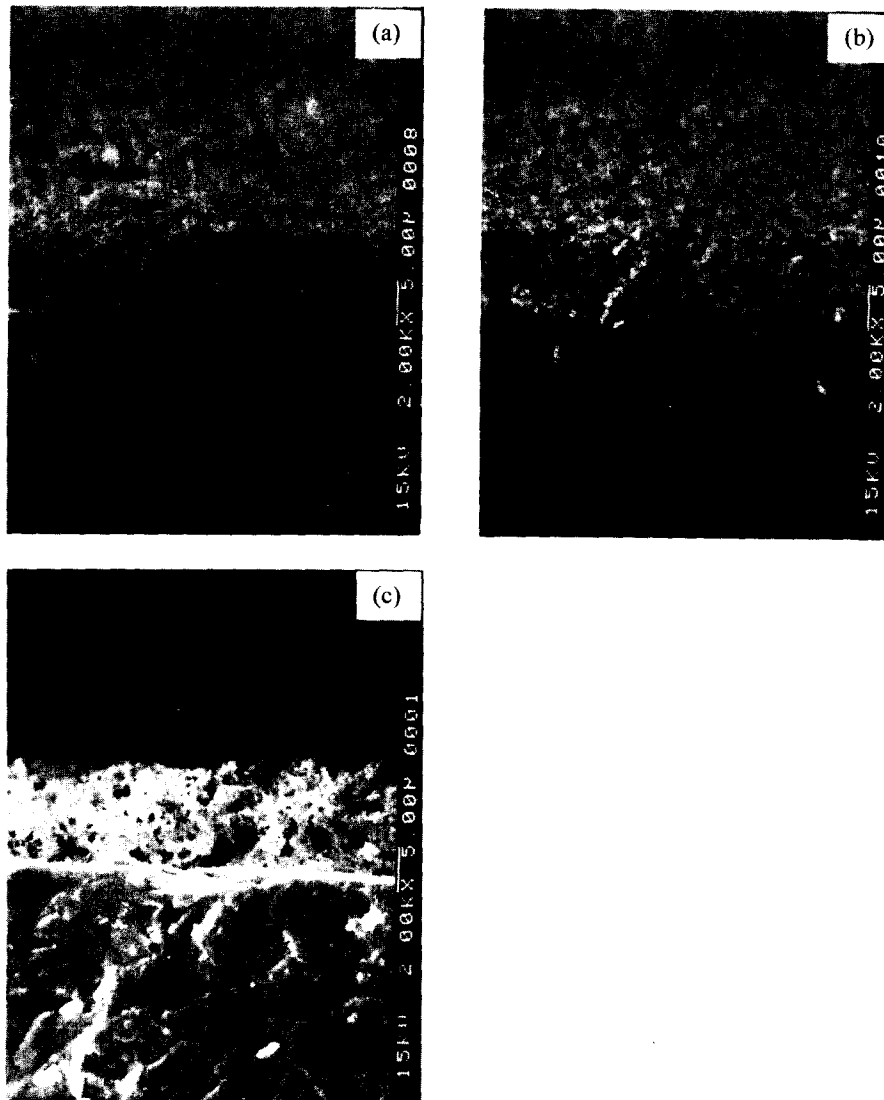


Fig. 7. SEM photographs of a cross-sectional fracture surface of LSM15-YSZ electrodes on (a) convex, (b) concave and (c) flat YSZ plates.

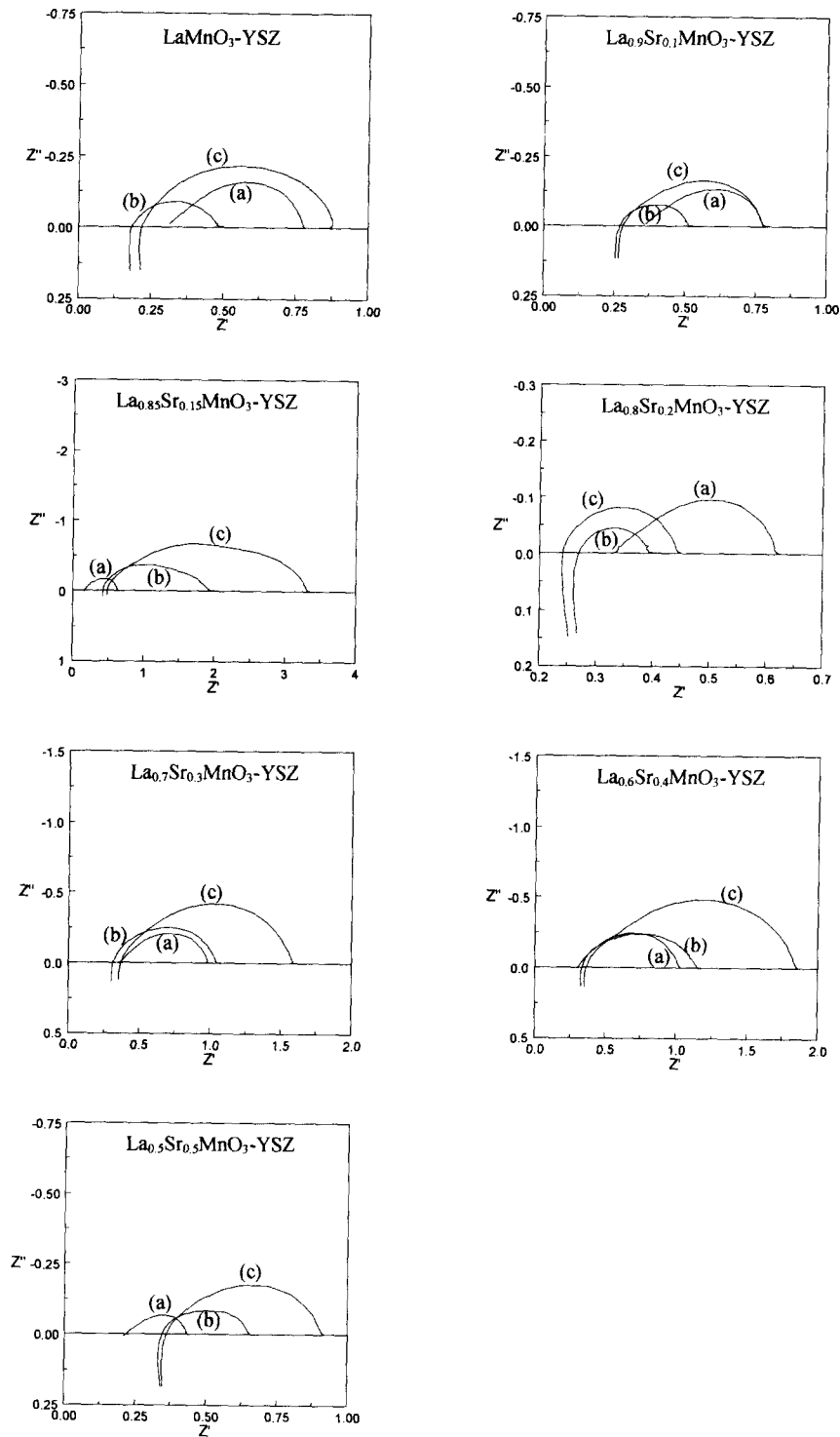


Fig. 8. Impedance spectra of LSM-YSZ cathodes before and after passing a current of 1 A/cm². Measurements were taken at 900°C, (a) before, (b) 4 min after and (c) 24 h after passing a current of 1 A/cm².

전극의 임피던스 스펙트럼들을 보여준다. 측정은 900°C에서 24시간동안 1 A/cm²의 전류가 통과하기 전과 통과한 후 4분 및 24시간 후에 각각 이루어졌다. 전류 중단 후 4분 후에 측정된 LSM-YSZ 전극 저항이 전류 통과전과 비교하여 다양한 공기극 조성을 가진 셀 중 LaMnO₃-YSZ, La_{0.9}Sr_{0.1}MnO₃-YSZ, La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃-YSZ 조성을 가진 셀에서 감소를 가져온 반면, 전류 중단 후 24시간 후에 측정된 전

극 저항은 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃-YSZ 조성을 가진 셀만을 제외하고 급격한 증가를 가져왔다. 현재 전류가 통과한 전후의 LSM-YSZ 전극의 이러한 이완 거동 (relaxation behavior)의 차이에 대한 정확한 원인을 알 수는 없다. 단지 조성에 따라 다른 이완거동을 보여주었다는 사실과 현재의 연구에서 전류가 통과한 전후 비교적 적은 전극 저항을 가지는 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃-YSZ 조성이 가장 유망한 전극재료라는 점

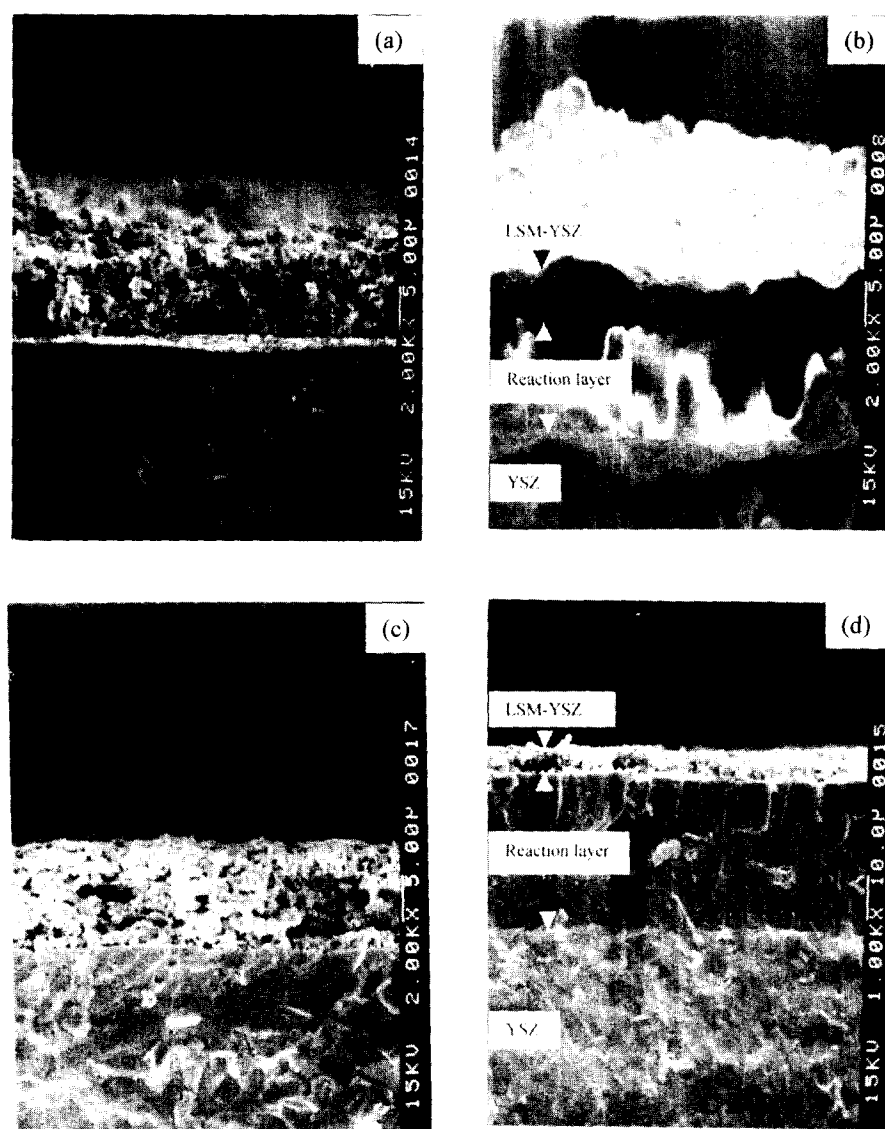


Fig. 9. SEM photographs of a cross-sectional fracture surface of anodic side in LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ cells before and after current passage; (a) LSM15-YSZ side before current passage, (b) LSM15-YSZ side after current passage, (c) LSM20-YSZ side before current passage and (d) LSM20-YSZ side after current passage.

을 강조하고 싶다. 비슷한 현상이 Zukuda와 Yamashita³⁰⁾에 의해 관찰되었으며 그들은 이러한 현상이 전류가 통과한 전후의 전극의 미세구조(microstructure)의 변화에 기인한다고 보고했다.

Fig. 9는 1 A/cm^2 의 전류가 통과한 전후의 LSM-YSZ/YSZ/LSM-YSZ 셀에서 각각 연료극(anode) 면의 $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ -YSZ (LSM15-YSZ)와 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ -YSZ (LSM20-YSZ)의 횡단면 SEM 사진을 보여준다. LSM-YSZ 연료극의 두께내의 차이는 SEM 관찰을 위한 단위셀로부터 백금메쉬의 제거와 함께 LSM-YSZ 연료극의 일부가 분리되어졌기 때문이다. 본 연구에서는 Zukuda와 Yamashita의 관찰과는 달리 전류의 통과에 기인한 단위셀내의 LSM-YSZ 공기극(cathode) 면의 미세구조 변화는 관찰되지 않았다. 그러나 Fig. 8에서 보는 바와 같이 전류 통과 후 연료극 면의 YSZ와 LSM-YSZ 사이의 계면에서 새

로운 상이 형성되어짐을 관찰할 수 있었다. 이 결과는 전류 통과 후 LSM-YSZ 연료극 성분의 일부가 YSZ로 확산되어졌음을 의미한다. 또한 전류 통과 후 LSM15-YSZ/YSZ 연료극 계면의 LSM15-YSZ 전극은 전류 통과전의 LSM15-YSZ/YSZ 연료극 계면의 전극과 비교하여 소결성 증가와 결정립 성장을 가져온 반면에, LSM20-YSZ/YSZ 연료극 계면의 LSM20-YSZ 전극은 전류 통과전후에 미세구조내의 변화를 보여주지 않았다. 현재까지의 결과로부터 연료극내의 미세구조의 변화들이 다양한 LSM-YSZ 공기극 조성에 대한 전류 통과 전후의 임피던스의 변화를 가져온 한 요인이 되지 않았을까 추정하지만, 이러한 변화의 보다 정확한 분석은 차후연구에서 발표되어질 것이다.

비록 전류 통과 후 LSM20-YSZ 공기극 조성의 경우가 전류 통과전과 비교하여 훨씬 더 작은 임피던스 값을 보여

주었지만, LSM-YSZ/YSZ 연료극 계면의 새로운 반응상의 형성은 장기안정성을 가진 SOFC 시스템 제조에 바람직하지 않다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 비활성 물질을 가진 성분층으로 연료극과 전해질 계면 사이의 전해질 표면을 코팅하거나 백금 혹은 Ni-YSZ 등과 같은 연료극 물질을 대체함으로써 SOFC 성분에 대한 비활성 연료극의 제조 등이 바람직하다.

4. 결 론

SOFC의 제조 및 성능향상을 위해 콜로이드 증착법 (colloidal deposition technique)에 의해 준비된 50/50 vol% LSM-YSZ 공기극 ($\text{LSM} = \text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$))의 전기화학적 특성이 임피던스 측정에 의해 연구되어졌다. 900°C의 공기/공기 셀에 대한 전형적인 임피던스 스펙트럼은 2개의 불완전한 호 (depressed arc)로 이루어졌음을 알 수 있었으며, 공기극의 임피던스에 대한 온도효과는 셀을 900°C에서 측정함으로써 측정시간에 무관한 일관성있는 데이터를 얻을 수 있었다. LSM-YSZ 공기극의 전기화학적 성능은 전기화학적 촉매층 및 YSZ 표면의 연마 등 전해질/전극 계면의 제조술에 의해 크게 향상되어졌다. 또한 LSM-YSZ 공기극의 임피던스 특성은 작동온도, 전해질의 형태, 공기극 조성, 인가전류 등과 같은 실험적 조건에 의해 영향을 받았다. 이상의 연구결과 최적의 공기극의 성능을 얻기 위하여 편평한 YSZ 전해질의 사용, 전해질 표면의 연마 및 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ -YSZ 공기극 조성의 사용 등이 요구됨을 알 수 있었으며, 이들 실험조건의 일부는 공기극의 특성뿐만 아니라 고체산화물 연료전지의 성능 향상에 대단히 큰 영향을 줄 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. S. Souza, S. J. Visco, and L. C. De Jonghe, *Solid State Ionics*, **98**, 57 (1997).
2. M. Juhl, S. Primdahl, C. Manon and M. Mogensen, *J. Power Sources*, **61**, 173 (1996).
3. K. Sasaki, J. - P. Wurth, R. Gschwend, M. Gödickemeier and L. J. Gauckler, *J. Electrochem. Soc.*, **143**(2), 530 (1996).
4. T. Kenjo and M. Nishiya, *Solid State Ionics*, **57**, 295 (1992).
5. B. A. Boukamp, *ibid.*, **20**, 31 (1986).
6. S. Wang, Y. Jiang, Y. Zhang, J. Yan and W. Li, *J. Electrochem. Soc.*, **145**(6), 1932 (1998).
7. L. A. Chick, L. R. Pederson, G. D. Maupin, J. L. Bates, L. E. Thomas, and G. J. Exarhos, *Mat. Lett.*, **10**(1,2), 6 (1990).
8. M. L. T. Østergaard and M. Mogensen, *Electrochem. Acta*, **38**(14), 2105 (1993).
9. H. Y. Lee, W. S. Cho, S. M. Oh, H-D. Wiemhöfer, and W. Göpel, *J. Electrochem. Soc.*, **142**(8), 2659 (1995).
10. Y. Jiang, S. Wang, Y. Zhang, J. Yan, and W. Li, *ibid.*, **145**(2), 373 (1998).
11. A. Hammouche, E. Siebert, A. Hammon, M. Kleitz, and A. Caneiro, *ibid.*, **138**(5), 1212 (1991).
12. A. Hahn and H. Landes, *Proceedings 5th Intern. Symp. SOFC, Archen, Germany, June 1997*, U. Stimming, S. C. Singhal, H. Tagawa, W. Lehnert eds., p.595, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ.
13. Y. Shibuya and H. Nagamoto, *ibid.*, p.510.
14. T. Ioroi, T. Hara, Y. Uchimoto, Z. Ogumi and Z. Takehara, *J. Electrochem. Soc.*, **145**(6), 1999 (1999).
15. E. Siebert, A. Hammouche and M. Kleitz, *Electrochem. Acta*, **40**(11), 1741 (1995).
16. T. Tsai and S.A. Barnett, *J. Electrochem. Soc.*, **145**(5), 1696 (1998).
17. J-M. Bae and B.C.H. Steele, *Solid State Ionics*, **106**, 247 (1998).
18. H. Fukunaga, M. Ihara, K. Sakaki and K. Yamada, *ibid.*, **86-88**, 1179 (1996).
19. T. Kenjo and K. Wada, *ibid.*, **67**, 249 (1994).
20. H. Tsukuda and A. Yamashita, *Proceedings 1st European SOFC Forum, Lucerne, Switzerland, October 1994*, U. Bossel ed., p.715, European SOFC Forum, Baden, Switzerland.