

## Effect of the LDC Buffer Layer in LSGM-based Anode-supported SOFCs

Eun Hwa Song<sup>\*,\*\*</sup>, Tai-Joo Chung<sup>\*\*</sup>, Hae-Ryoung Kim<sup>\*†</sup>, Ji-Won Son<sup>\*</sup>,  
Byung Kook Kim<sup>\*</sup>, Jong-Ho Lee<sup>\*</sup>, and Hae-Weon Lee<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Materials Science & Technology Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>\*\*</sup>School of Materials Science & Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received November 7, 2007; Accepted November 56, 2007)

### LSGM계 음극지지형 고체산화물 연료전지에 적용된 LDC 완충층의 효과

송은화<sup>\*,\*\*</sup> · 정태주<sup>\*\*</sup> · 김혜령<sup>\*†</sup> · 손지원<sup>\*</sup> · 김병국<sup>\*</sup> · 이종호<sup>\*</sup> · 이해원<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>한국과학기술연구원 재료기술연구본부

<sup>\*\*</sup>안동대학교 신소재공학부

(2007년 11월 7일 접수; 2007년 11월 26일 승인)

#### ABSTRACT

LSGM( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ) is the very promising electrolyte material for lower-temperature operation of SOFCs, especially when realized in anode-supported cells. But it is notorious for reacting with other cell components and resulting in the highly resistive reaction phases detrimental to cell performance. LDC( $\text{La}_{0.4}\text{Ce}_{0.6}\text{O}_{1.8}$ ), which is known to keep the interfacial stability between LSGM electrolyte and anode, was adopted in the anode-supported cell, and its effect on the interfacial reactivity and electrochemical performance of the cell was investigated. No severe interfacial reaction and corresponding resistive secondary phase was found in the cell with LDC buffer layer, and this is due to its ability to sustain the La chemical potential in LSGM. The cell exhibited the open circuit voltage of 0.64 V, the maximum power density of 223 mW/cm<sup>2</sup>, and the ohmic resistance of 0.17  $\Omega\text{cm}^2$  at 700°C. These values were much improved compared with those from the cell without any buffer layer, which implies that formation of the resistive reaction phases in LSGM and then deterioration of the cell performance is resulted mainly from the La diffusion from LSGM electrolyte to anode.

**Key words :** SOFC, LSGM electrolyte, Buffer layer, Interfacial reaction, Cell performance

#### 1. 서 론

고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell; SOFC)는 다른 형태의 연료전지보다 상대적으로 에너지 변환효율이 높고 출력특성이 우수할 뿐만 아니라 수요자의 요구에 따라 다양한 크기와 출력으로 시스템을 제작할 수 있어, 매우 유용한 대체에너지원으로 각광받고 있다. 최근에는 작동온도를 낮춰 전지의 신뢰성과 경제성을 높이고자 중저온용(500~800°C) SOFC에 대한 개발이 활발히 진행되고 있으며,<sup>6-7)</sup> 그중 전해질에 대한 연구는 작동온도 저온화를 위한 선결조건이다.<sup>1-3)</sup>

고체산화물 전해질로 사용되기 위한 조건<sup>1,4)</sup>으로는 첫째, 한 종류의 이온만이 움직이는 전도체이며, 전자에 대하여는 절연체여야 한다. 즉, 넓은 온도 및 산소분압 영역( $10^{-18} \leq P_{\text{O}_2}/\text{atm} \leq 1$ )에서 이온나름수(ionic transference number)가 1이 되어야 한다. 둘째, 이온전도도가 충분히

커서 오믹저항에 의한 전압손실을 최소화할 수 있어야 한다. 셋째, 고온에서 장기간에 걸쳐 상안정성을 갖추어야 한다. 넷째, 다른 단전지 구성요소들과 반응성이 없어야 하고 다섯째, 열팽창계수도 비슷하여 열응력에 의한 결합 생성을 방지할 수 있어야 한다. 마지막으로 치밀한(dense) 미세조직을 형성해 산소와 연료의 혼합이 일어나지 않도록 해야 한다.

이러한 조건으로부터 현재 고체전해질로 널리 적용되고 있는 재료는 지르코니아( $\text{ZrO}_2$ )나 세리아( $\text{CeO}_2$ )와 같은 형석(fluorite) 구조의 산화물계와  $\text{LaGaO}_3$ 와 같은 페로브스카이트(perovskite) 구조의 산화물계로 분류된다. 지르코니아계 산화물로는 이온전도도가 높고 화학적/기계적 안정성이 우수한 YSZ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilized  $\text{ZrO}_2$ )가 대표적인데, YSZ는 1000°C 부근에서는 이온전도도가 0.1 S/cm로 높은 값을 가지지만 800°C에서는 0.04 S/cm로 급격하게 낮아지는 특성이 있어 중저온용으로는 적절치 않다.<sup>5)</sup> 세리아계 산화물은 800°C 이하에서 지르코니아계보다는 높은 이온전도도를 가지나, 환원분위기에서 전자전도도가 커진다는 치명적인 약점이 있어 전해질로 사용될 수 있는 영역이

<sup>†</sup>Corresponding author : Hae-Ryoung Kim

E-mail : hrkim@kist.re.kr

Tel : +82-2-958-6674 Fax : +82-2-958-5529

협소하다.<sup>9)</sup> 반면 페로브스카이트 구조의 LaGaO<sub>3</sub>계 (La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Mg<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub>; LSGM) 산화물은 800°C 이하에서 높은 이온전도도와 더불어 넓은 산소분압 범위에 걸친 전해질 영역을 가지므로, 매우 유망한 중저온용 전해질로써 많은 연구가 이루어져 왔다.<sup>10)</sup> 하지만 LSGM 전해질은 다른 구성요소들과의 화학적 적합성이 떨어진다는 문제가 있다.<sup>11-15)</sup> 세리아계나 지르코니아계와의 반응에 의해 생성되는 LaSrGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>, LaSrGaO<sub>4</sub>, La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Sr<sub>2</sub>ZrO<sub>4</sub> 등은 모두 절연물질로 전기전도도가 매우 낮아 단전지의 성능을 크게 감소시키는 것으로 보고된 바 있다.<sup>11,14,15)</sup> 음극 재료인 NiO와의 반응물 LaNiO<sub>3</sub>도 LSGM의 페로브스카이트 구조를 불안정하게 만들며 단전지 수명에 악영향을 미치는 것으로 보고되었다.<sup>8)</sup> 작동온도의 저온화를 위해서는 단전지의 구조 역시 전해질지지형보다 음극지지형이 유리하나, 음극지지형의 경우 전해질/음극 간 계면의 공정온도가 더 높으므로 이러한 반응성은 더욱 치명적이다. 본 연구에서는 LSGM계 음극지지형 단전지에서 전해질/음극 간 계면반응을 억제하는 방안으로서 완충층의 삽입을 고려하였고, 완충층 재료로써 음극복합체 구성성분인 CeO<sub>2</sub>에 La이 고용된 LDC(La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub>)를 사용하였다. 이 LDC 완충층이 LSGM 전해질과 음극 간 계면반응성에 미치는 영향을 바탕으로, 단전지의 성능특성 개선효과에 대해 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

LSGM 전해질과 음극 간 완충층 재료인 LDC(La<sub>0.4</sub>Ce<sub>0.6</sub>O<sub>1.8</sub>) 분말은 고상반응법(solid state reaction)으로 제조하였다. 출발원료로는 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(순도 99.99%, by Strem Chemicals, USA)와 CeO<sub>2</sub>(순도 99.99%, by Strem Chemicals, USA) 분말을 사용하였다. La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>과 CeO<sub>2</sub>의 혼합비율을 40:60 vol%로 정확히 측정하고 지르코니아 불과 함께 24시간 ball-milling한 후, 혼합한 원료를 충분히 건조하고 분쇄, 체질하여 균일한 분말을 얻었으며, 1350°C에서 5시간 하소하였다. 이렇게 제조한 분말에 대한 열중량/시차열분석기(thermogravimetry/differential thermal analysis; TG/DTA, STA409PC by Netzsch, Germany) 측정결과와 참고문헌<sup>14,16)</sup> 내용을 바탕으로 하소 및 소결 조건을 정하였다. 또한 X-선 회절분석기(X-ray diffraction; XRD, D/max2000 by Rigaku, Japan)를 이용하여 하소분말의 상분석을 수행하였으며, 이때 측정조건은 40 kV, 30 mA, 4°/min scanning speed였다.

음극지지형 단전지(anode-supported unit cell) 제작을 위해서는 먼저 GDC(Gd<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.9</sub>O<sub>1.95</sub>, by Rhodia, USA)와 NiO(by Sumitomo, Japan) 분말을 40:60 vol%의 비율로 혼합한 후, 액상응결법(liquid concentration process; LCP)을 통해 균일한 크기의 NiO-GDC 과립을 제조하였다. 이

를 10 MP의 압력으로 일축가압 성형한 후 1100°C에서 2시간 가소결하여 약 1 mm 두께의 음극 기판을 제작하였다. 이 음극지지체 위에 단전지를 구성 시 전해질과 양극은 상용분말을 사용하였다. LSGM(La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Mg<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub>, by Seimi Chemical, Japan) 전해질과 LSCF(La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub>, by Seimi Chemical, Japan) 양극 및 LDC(La<sub>0.4</sub>Ce<sub>0.6</sub>O<sub>1.8</sub>) 완충층 분말을 Planetary Milling(Pulverisette 5 by Fritsch, Germany)을 사용해 페이스트로 제조하였고, 이를 이용한 스크린인쇄법으로 다층 후막구조의 단전지를 제작하였다. 음극지지체 위에서 순차적으로 LDC 완충층은 1400°C에서 5시간, LSGM 전해질은 1400°C에서 6시간, LSCF 양극은 1100°C에서 2시간 소결하였다.

단전지의 계면반응을 확인하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscopy; SEM, XL-30 by Philips/FEI, Netherlands)의 이차전자(secondary electron; SE) 또는 후방산란전자(back-scattered electron; BSE) 이미지로 단면의 미세구조를 관찰하였고, 각 계면 부근에서의 반응에 따른 조성변화를 알아보기 위해 에너지분산형 분석기(energy dispersive spectroscopy; EDS)로 선/점 정성분석(line/point mapping)을 수행하였다.

단전지의 전기화학적 성능 측정장치의 구조에 대해서는 이미 보고한 바 있다.<sup>21)</sup> 양극과 음극에 대해 각각 Pt mesh와 Ni sponge를 집전체로 사용하였으며 Pt선을 이용해 외부기기와 연결하였다. 연료가스로는 200 sccm의 수소를, 산화가스로는 400 sccm의 공기를 사용하였으며, 이때 연료가스와 산화가스간의 혼합을 막기 위해 자체개발한 가스켓형 밀봉재를 사용하였다. 600~700°C 구간에서 50°C 간격마다 단전지의 직류 전류-전압 곡선 및 교류 임피던스 스펙트럼을 측정함으로써(1260A & 1287A by Solartron Analytical, England) 성능특성을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. LDC 분말의 물성

전해질과 음극 사이의 완충층 재료는 이온전도가 지배적인 이온전도체 혹은 이온/전자 혼합전도체여야 하며, 두 구성요소 간의 계면반응 및 그에 따른 이차상의 생성을 억제할 수 있어야 한다. LDC는 전기전도도가 충분히 높을 뿐만 아니라, La의 비율이 40%일 경우 LSGM 전해질 내 La의 화학적 포텐셜을 유지시켜 전해질에서 음극으로의 La 확산을 억제한다고 보고된 바 있다.<sup>16)</sup> 본 연구에서는 고상반응법을 이용하여 LDC 분말을 직접 합성한 후, 물성평가를 통해 합성조건을 최적화를 도모하였다. Fig. 1은 LDC 분말의 TG/DTA분석결과로, 300~800°C 사이에서 급격한 중량감소가 관찰되었으며, 그 이상의 온도에서의 질량변화 폭은 작게 나타났다. Y축의 무게변화율(%)과 흡/발열 반응의 함수가 100을 넘는 이유는 초기 발열

작용으로 인한 온도의 상승 때문으로 생각된다. 또한 1300°C 이상에서는 반응열의 미세한 변화를 관찰할 수 있었다. 분말평가 결과 및 참고문헌<sup>14,16)</sup> 내용을 바탕으로 LDC 분말의 하소온도를 1350°C로 결정하였다. Fig. 2는 1350°C에서 5시간 동안 하소한 LDC 분말의 X-선 회절분석 결과로, 선택된 1350°C가 입방정(cubic)의 단일상을 형성하는데 적합한 온도임을 알 수 있었다.

### 3.2. LDC 완충층이 단전지의 계면안정성에 미치는 효과

LDC 완충층이 계면반응에 미치는 영향을 비교하고자, Fig. 3에 완충층이 없이 제작된 단전지의 미세구조 및 EDS 분석결과를 나타내었다. 완충층 없이 제작된 단전지의 경우, 전해질과 음극 사이의 계면에 연속적인 완충층이 생성되었다(Fig. 3(a)). Fig. 3(b)의 EDS선 정성분석 결과, 전해질의 La이 음극쪽으로, 음극의 Ni이 전해질쪽으로 이동함을 관찰하였고, 이러한 확산현상이 계면반응층의 형성을 유발한 것으로 여겨진다. Fig. 3(c)의 EDS 점 정성분석을 통해, 계면반응층 중 전해질쪽에 가까운 회색 층(A)은 La, Sr, Ga, O로 구성된 LaSrGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>, 음극쪽에 가까운 검은색 층(B)은 Ni, O로 구성된 NiO임을 확인할 수 있었다. Ni과 LSGM 전해질의 반응 결과 LaNiO<sub>3</sub>상이 만들어졌을 가능성도 크지만, 미세구조 분석을 통해 이상의 존재 유무를 구별할 수 없었다.

Fig. 4는 LDC 완충층을 사용하여 제작한 단전지의 미세구조 및 EDS 분석결과이다. 전해질/음극 계면에 앞서와는 달리 불연속적인 이질상이 존재함을 볼 수 있었고(Fig. 4(a)), 이는 Ni, O로 이루어진 상으로 확인되었다. LDC 완충층 삽입에 따른 구성원소 확산거동 및 계면반응성의 변화를 관찰하고자, 단전지의 단면에서 EDS 선/점 정성분석을 수행하였다(Fig. 4(b-c)). 이 경우에는 LDC 완충층 내 La의 화학적 포텐셜에 의해 계면 부근 전해질의 La 고용량이 유지되었으며, 그 결과 LSGM/LDC계면에서의 La 확산이 억제됨에 따라 La, Sr, Ga, O로 이루어진 높은 저항을 가진 반응층은 생성되지 않았다. LDC/음극 계면에서는 LDC 완충층의 La 일부가 음극쪽으로 확산했지만, LDC의 상안정성에는 영향이 없었기에 역시 별다른 계면반응층이 발견되지 않았다. 그러나 여전히 전해질 내부에서 Ni이 관찰되었으므로, LDC 완충층을 삽입하더라도 음극에서 전해질로의 Ni 확산을 막을 수 없을 것을 확인하였다.

즉, 전해질/음극 간 계면반응성은 구성원소들의 확산거동에 좌우되며, 특히 전해질에서 La이 빠져나가면 저항값이 큰 La-Sr-Ga-O 반응층이 형성되어 단전지의 성능에 악영향을 미치게 된다. La이 고용된 LDC 완충층을 삽입하면 이러한 반응이 억제되어 계면안정성이 향상되는 것을 확인할 수 있었고, 따라서 단전지의 저항감소에 의한 성능향상이 얻어질 것으로 예상된다. 그러나 음극에서 전해

질로의 Ni 이동은 LDC 완충층을 적용하더라도 여전히 미해결 과제이다.

### 3.3. LDC 완충층이 단전지의 전기화학적 성능에 미치는 효과

단전지의 전기화학적 성능은 직류 전류-전압 곡선으로부터 개회회전압(open circuit voltage; OCV)과 최대출력밀도(maximum power density)를, 교류 임피던스 스펙트럼으로부터 오믹저항과 분극저항을 측정함으로써 평가하게 된다.

Fig. 5는 LDC 완충층을 적용하여 제작한 단전지의 성능측정 결과이다. 700°C의 경우 OCV값은 0.64 V, 최대출력밀도는 223 mW/cm<sup>2</sup>였다. 650°C의 경우 OCV값과 최대출력밀도는 0.65 V와 174 mW/cm<sup>2</sup>, 600°C의 경우 각각 0.66 V와 108 mW/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. Fig. 6은 동일한 단전지의 교류 임피던스 스펙트럼이다. 각 온도별로 반원이 몇 개 겹쳐져 있는 듯한 스펙트럼을 보이는데, 이때 고주파영역의 실수축 절편값이 단전지 전체의 오믹저항을 나타내며, 이 점에서부터 저주파영역의 실수축 절편까지의 길이가 전극에서의 분극저항에 해당한다. 단전지 저항값의 합리적인 크기비교를 위해서는 임피던스 측정값에 단전지의 유효면적(effective area)을 고려하여 얻은 단위면적당 저항값(area specific resistance; ASR)을 사용한다. 700°C에서의 오믹 ASR은 0.17 Ω·cm<sup>2</sup>였고, 650°C와 600°C에서의 오믹 ASR은 각각 0.26 Ω·cm<sup>2</sup>와 0.46 Ω·cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 이러한 결과는 이미 참고문헌<sup>9,16-20)</sup>에 보고된, LDC 완충층이 삽입된 음극지지형 단전지에서의 결과들에 비해 성능 수준이 낮은 편으로, 그 원인에 대해서는 후에 다시 언급하도록 하겠다.

Fig. 7은 700°C에서 LDC 완충층이 삽입된 단전지와 삽입되지 않은 단전지의 성능측정을 비교한 그래프이다. 단전지 성능을 평가할 때 일반적으로는 0.7 V에서의 출력밀도를 비교하지만, 본 연구의 단전지에서는 OCV 손실이 큰 탓에 700°C에서의 최대출력밀도를 비교하였다. 완충층이 없는 단전지의 경우 700°C에서 OCV는 0.42 V였고, 0.40 mW/cm<sup>2</sup>의 매우 낮은 최대출력밀도를 보였다. 이러한 낮은 OCV값과 최대출력밀도는 완충층이 없는 상태에서 LSGM 전해질과 음극이 직접 반응함으로써 저항값이 큰 La-Sr-Ga-O 이차상이 계면에 연속적으로 생성됨에 의한 것으로 판단된다. LDC 완충층이 삽입된 단전지의 경우 700°C에서 OCV는 0.64 V, 최대출력밀도는 223 mW/cm<sup>2</sup>로 측정되었으며, 완충층이 없는 단전지의 최대출력밀도에 비해 약 400배의 높은 값을 보였다. 이는 앞의 3.2.에서 보였듯이, LDC 완충층이 계면 부근 LSGM의 La 고용량을 유지시켜 전해질의 분해를 막고 상안정성에 기여했기 때문인 것으로 고려된다. LDC 완충층이 있는 경우와 없는 경우 모두 음극에서 전해질로의 Ni 이동이 있었기 때문에, Ni 확산에 비해 La 확산에 의한 계면반응층 형성이 단전지의 최대출력밀도에 주된 영향을 미침을 알게 되

었다. 즉 LDC 완충층을 삽입하면 La 확산에 의한 계면반응이 억제되고 이는 곧바로 단전지의 성능 향상으로 이어지게 된다. Fig. 8에서는 LDC 완충층이 있는 단전지와 없는 단전지 각각에 대해 역시 700°C에서 임피던스를 통해 얻은 오믹 ASR을 비교하였다. 완충층이 없는 경우 오믹ASR은  $10.99 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , LDC 완충층이 삽입된 경우  $0.17 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 측정되었다. 두 값의 확연한 차이로부터, La 확산 결과 생성되는 La-Sr-Ga-O 계면반응층에 의한 저항값 증가는 상당 부분 오믹저항에 연관되는 것으로 보인다.

LDC 완충층이 삽입된 단전지의 오믹 ASR을 최근에 보고된 5/10/10  $\mu\text{m}$  LDC/LSGM/LDC 다층구조가 적용된 음극지지형 단전지에서의 오믹 ASR<sup>16)</sup>과 비교하여 보았다 (Fig. 9). 참고문헌의 오믹 ASR은 10  $\mu\text{m}$  LSGM으로 구성된 가상의 음극지지형 단전지의 오믹 ASR 계산값<sup>17)</sup>에 비해 3배 정도 큰 값을 보이는데, 이는 LDC/LSGM/LDC 다층구조의 전체두께가 약 25  $\mu\text{m}$ 인 점을 감안할 때 타당한 결과이다. 본 연구의 단전지에서는 LSGM 전해질과 LDC 완충층의 두께가 각각 20  $\mu\text{m}$ 씩이므로, 전체두께의 오믹 ASR이 10  $\mu\text{m}$  LSGM 기준의 오믹 ASR 계산값보다 4배 정도 클 것으로 예상되었으나, 실제로는 약 10배 높은 값을 얻었다. 앞에서 언급했듯이 본 연구의 단전지가 이미 보고된 것들에 비해 성능이 떨어지는 셈이다. 그 원인으로서는 우선 Fig. 10에서 관찰할 수 있는 전해질 내부의 미세균열을 들 수 있는데, 이는 LSGM 전해질과 LSCF 양극 간의 열팽창계수 차이로 인한 내부 열응력(interfacial thermal stress) 때문에 발생하는 것으로,<sup>20)</sup> 양극의 조성 및 미세구조 제어를 통한 열응력 개선방안이 요구된다. 또한 La 확산에 비해 Ni 확산은 저항값이 큰 이차상 생성에 있어서 그다지 결정적인 역할을 하지 않는 것으로 보이지만, OCV 뿐만 아니라 최대전류밀도나 오믹저항 등에도 추가적인 성능저하 요인으로 작용할 수 있으므로 좀더 자세한 연구가 필요하겠다.

이상의 결과로부터, LSGM계 음극지지형 단전지의 출력성능은 전해질과 전극 계면에서의 반응층에 의해 직접적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있었으며, 이 계면에 LDC 완충층을 삽입하면 전해질 내의 La 고용량을 유지시켜 저항값이 큰 계면반응층 생성을 억제함으로써 단전지의 내부저항을 최소화하고 성능저하를 방지할 수 있음을 확인하였다. 한편 단전지 성능의 최적화를 위해서는 양극/전해질 계면의 열응력 개선, 음극에서 전해질로의 Ni 확산 제어 등 추가적인 문제들이 해결되어야 할 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

LSGM 전해질을 사용하여 중저온용 음극지지형 SOFC 단전지를 구성할 때 음극과의 반응으로 인한 단전지 성

능저하를 막기 위해 LDC 완충층을 삽입한 결과, 전해질과 음극 사이의 심각한 계면반응성을 줄일 수 있었다. SEM 및 EDS 분석결과 LSGM쪽에서의 La 확산이 전해질의 상안정성 감소 및 이차상 생성의 주된 요인으로 밝혀졌으며, 그 결과 단전지의 내부저항 증가에 따른 성능저하가 유발되는 것으로 조사되었다. LDC 완충층을 삽입하면 LSGM 전해질 내 La의 화학적 포텐셜을 안정하게 유지함으로써 계면안정성을 확보할 수 있었다. 그러나 단전지 성능의 최적화를 위해서는 양극/전해질 계면의 열응력 개선, 음극에서 전해질로의 Ni 확산 제어 등 추가적인 문제들이 해결되어야 할 것이다.

#### Acknowledgment

이 논문은 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. N. Q. Minh and T. Takahashi, "Science and Technology of Ceramic Fuel Cells," pp. 69-116, Elsevier, Amsterdam, 1995.
2. N.Q. Minh, "Ceramic Fuel Cells," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
3. T. Ishihara, N. M. Sammes, and O. Yamamoto, "Electrolytes," pp. 83-118, in <High Temperature Solid Oxide Fuel Cell: Fundamentals, Design and Applications>, Ed. by S.C. Singhal and K. Kendall, Elsevier, New York, 2003.
4. B.C.H. Steele, "Ceramic Ion Conducting Membranes," *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, **1** [5] 684-91 (1996).
5. Y. Arachi, H. Sakai, O. Yamamoto, Y. Takeda, and N. Imanishi, "Electrical Conductivity of the  $\text{ZrO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$  System," *Solid State Ionics*, **121** [1-4] 133-39 (1999).
6. T. Fukui, S. Ohara, K. Murata, H. Yoshida, K. Miura, and T. Inagaki, "Performance of Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells with  $\text{La}(\text{Sr})\text{Ga}(\text{Mg})\text{O}_3$  Electrolyte Film," *J. Power Sources*, **106** [1-2] 142-45 (2002).
7. N.P. Brandon, S. Skinner, and B.C.H. Steele, "Recent Advances in Materials for Fuel Cells," *Annu. Rev. Mater. Res.*, **33** 183-213 (2003).
8. 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] 2402-406 (1999).
9. Z.H. Bi, B.L. Yi, Z.W. Wang, Y.L. Dong, H.J. Wu, Y.C. She, and M.J. Cheng, "A High-performance Anode-supported SOFC with LDC-LSGM Bilayer Electrolytes," *Electrochem. Solid St.*, **7** [5] A105-07 (2004).
10. T. Ishihara, H. Matsuda, and Y. Takita, "Doped  $\text{LaGaO}_3$  Perovskite Type Oxide as a New Oxide Ionic Conductor," *J. Am. Chem. Soc.*, **116** [9] 3801-803 (1994).
11. M. Hrovat, A. Ahmad-Khanlon, Z. Samardzija, and J. Holc,

- “Interactions between Lanthanum Gallate Based Solid Electrolyte and Ceria,” *Mater. Res. Bull.*, **34** [12-13] 2027-034 (1999).
12. N. Maffei and G. de Silveira, “Interfacial Layers in Tape Cast Anode-supported Doped Lanthanum Gallate SOFC Elements,” *Solid State Ionics*, **159** [3-4] 209-16 (2003).
  13. A. Naoumidis, A. Ahmad-Khanlon, Z. Samardzija, and D. Kolar, “Chemical Interaction and Diffusion on Interface Cathode/electrolyte of SOFC,” *Fresenius’ J. Anal. Chem.*, **365** [1-3] 277-81 (1999).
  14. K.Q. Huang, J.H. Wan, and J.B. Goodenough, “Increasing Power Density of LSGM-based Solid Oxide Fuel Cells using New Anode Materials,” *J. Electrochem. Soc.*, **148** [7] A788-94 (2001).
  15. F.W. Poulsen and N. van der Puil, “Phase Relations and Conductivity of Sr-zirconates and La-zirconates,” *Solid State Ionics*, **53-56** 777-83 (1992).
  16. Y.B. Lin and S.A. Barnett, “Co-firing of Anode-supported SOFCs with thin  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  electrolytes,” *Electrochem. Solid St.*, **9** [6] A285-88 (2006).
  17. T. Ishihara, H. Arikawa, T. Akbay, H. Nishiguchi, and Y. Takita, “Nonstoichiometric  $\text{La}_{2-x}\text{GeO}_{5-\delta}$  Monoclinic Oxide as a New Fast Oxide Ion Conductor,” *J. Am. Chem. Soc.*, **123** [2] 203-09 (2001).
  18. J.H. Wan, J.Q. Yan, and J.B. Goodenough, “LSGM-based Solid Oxide Fuel Cell with  $1.4 \text{ W/cm}^2$  Power Density and 30 day Long-term Stability,” *J. Electrochem. Soc.*, **152** [8] A1511-515 (2005).
  19. W.Q. Gong, S. Gopalan, and U.B. Pal, “Materials System for Intermediate-temperature (600-800°C) SOFC Based on Doped Lanthanum-gallate Electrolyte,” *J. Electrochem. Soc.*, **152** [9] A1890-895 (2005).
  20. W.Q. 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*, **160** [1] 305-15 (2006).
  21. K.-N. Kim, J. Moon, H. Kim, J.-W. Son, J. Kim, H.-W. Lee, J.-H. Lee, and B.-K. Kim, “Effect of Interfacial Reaction Layer on the Electrochemical Performance of LSGM-based SOFCs (in Korean),” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [10] 665-71 (2005).