

Introduction of a Buffering Layer for the Interfacial Stability of LSGM-Based SOFCs

Kwang-Nyeon Kim,^{*,**} Jooho Moon,^{**} Ji-Won Son,^{*} Joosun Kim,^{*} Hae-Weon Lee,^{*}
Jong-Ho Lee,^{*} and Byung-Kook Kim^{*†}

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

^{**}School of Advanced Materials Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received August 8, 2005; Accepted August 23, 2005)

LSGM계 고체산화물 연료전지의 계면안정성을 위한 완충층의 도입

김광년^{*,**} · 문주호^{**} · 손지원^{*} · 김주선^{*} · 이해원^{*} · 이종호^{*} · 김병국^{*†}

^{*}한국과학기술연구원 재료연구부

^{**}연세대학교 세라믹공학과

(2005년 8월 8일 접수; 2005년 8월 23일 승인)

ABSTRACT

In order to find a proper buffering material which can prohibit an unwanted interfacial reaction between anode and electrolyte of LSGM-based SOFC, we examined a gadolinium doped ceria and scandium doped zirconia as a candidate. For this examination, we investigated the microstructural and phase stability of the interface under different buffering layer conditions. According to the investigation, ceria based material induced a serious La diffusion out of the LSGM electrolyte resulted in the formation of very resistive LaSrGa₃O₇ phase at the interface. On the other hand zirconia based material was directly reacted with LSGM electrolyte and thus produced very resistive reaction products such as La₂Zr₂O₇, Sr₂ZrO₄, LaSrGaO₄ and LaSrGa₃O₇. From this study we found that an improper buffering material induced the higher internal cell resistance rather than an interfacial stability.

Key words : SOFC, LSGM, GDC, ScSZ, Buffering layer, Interfacial reaction

1. 서 론

현재 지구 상 대부분의 에너지원은 석유나 석탄 등의 화석연료에 의한 것이나 화석연료의 연소에 따른 환경오염문제와 가체량의 한계에 따른 화석연료의 고갈 문제로 인해 최근 들어선 이를 대비하기 위한 새로운 대체에너지 개발이 활발히 진행되고 있다. 그 중 최근 들어 주목 받고 있는 연료전지 시스템은 환경친화적이며 미래의 수소에너지 인프라를 고려할 때 가장 적합한 발전시스템으로 인식되어 지난 20여 년간 많은 연구개발 투자가 이루어지고 있다. 현재 개발되고 있는 연료전지는 작동온도나 사용물질에 따라 다양한 형태가 제안되어 있는데 특히 제 3세대 연료전지라고 불리는 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell: 고체산화물 연료전지)는 발전 효율이 가장 높고 연료 개질기 없이도 다양한 연료의 사용이 가능하며 전해질을 보충할 필요가 없는 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 다양한 장점으로 인해 현재 SOFC는 여러 연료전지 방식

중에서도 가장 현실적인 대안으로 많은 선진국들에서 활발한 연구가 이루어지고 있다.^{1,2)}

현재까지 SOFC는 지르코니아계 전해질을 이용하여 800 - 1000°C 구간에서 작동하는 고온형이 주를 이루어 왔다. 그러나 작동온도가 높을수록 재료선택의 폭이 좁아지고 제작비용이 증가하게 되며 SOFC 구성요소 간의 물리적, 화학적 변화가 일어날 확률이 높아져 전지수명이 줄어든다는 문제가 지적되고 있다. 이로 인해 최근 들어선 이 같은 고온작동에 따른 문제점을 해결할 수 있는 대체 방안으로 중저온형 SOFC의 개발이 추진되고 있다.³⁾ 그러나 중저온형 SOFC는 전해질에서의 전도나 전해질/전극 계면에서의 전하 전달과정 상 저항이 커지며 양극/전해질, 음극/전해질 계면에서의 전극분극으로 인해 내부 전압강하가 커짐으로써 출력밀도가 낮아진다는 문제점을 가지게 된다. 또한 작동온도가 낮아짐으로써 관련 물질들의 이동이 전반적으로 원활치 않아 작동 중 여러 문제점이 발생하게 된다. 이런 문제점을 해결하기 위해 현재 많은 연구들에선 낮은 온도에서도 높은 활성을 가져 분극저항을 낮출 수 있는 전극의 개발과 낮은 온도에서도 높은 이온 전도도를 가지는 전해질의 개발에 노력하고 있으며 특히 550 - 700°C 구간에서 작동 가능한 고체전해질의 개발

[†]Corresponding author : Byung-Kook Kim

E-mail : bkim@kist.re.kr

Tel : +82-2-958 5542 Fax : +82-2-958 5489

에 많은 연구가 집중되고 있다.⁴⁾

현재 550 – 700°C 구간에서 작동 가능한 중저온형 전해질 재료로는 크게 세리아(CeO_2)와 같은 fluorite의 구조의 전해질과 LaGaO_3 계와 같이 페롭스카이트(perovskite)의 구조를 갖는 전해질로 나눌 수 있다.⁵⁾ 그 중에서도 LaGaO_3 계 산화물인 LSGM($\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$)은 높은 이온 전도도와 넓은 전해질 영역을 가지고 있어 최근 들어 저온형 SOFC의 전해질재료로 가장 주목 받고 있다.⁶⁾ 그러나 이러한 장점에도 불구하고 전해질 소재인 LSGM이 음극의 주성분인 NiO를 포함한 주변 전지성분들과 극심한 반응성을 보임에 따라 화학적인 상안정성은 물론 전기적 물성 측면에서 많은 문제점이 지적되고 있다.⁷⁻¹⁰⁾ 또한 LSGM과 NiO가 반응하여 나타나는 LaNiO_3 및 La_2NiO_4 상의 경우 자체적으로도 매우 불안정함은 물론 LSGM의 페롭스카이트(perovskite) 구조를 불안정하게 만들어 단전지 수명에 악영향을 미친다고 지적되고 있다.¹¹⁾

이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 들어 LSGM 전해질과 음극재료 사이에 계면반응성을 억제하기 위한 완충층을 삽입하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 전해질과 전극계면의 반응성을 억제하기 위한 완충층용 소재가 가져야 할 특성으로는 상안정성 및 높은 이온전도도, 비슷한 열팽창계수 등을 들 수 있는데 현재까지는 주로 세리아계와 지르코니아계 전해질 소재 등이 적용되어 왔다. 그러나 지금까지의 연구들에 적용되어온 완충층 소재들은 당초 기대하였던 계면반응성을 억제하기 위한 효과면에서 그렇게 큰 성과를 보여주지 못하는 것으로 나타났는데,¹²⁻¹⁵⁾ 본 연구에서는 현재까지 완충층 소재로 가장 널리 활용되어 왔던 이온전도성 산화물인 세리아계 및 지르코니아계의 완충층을 삽입하여 그 반응성 정도를 관찰하고 이들 완충층 소재들의 적용상의 한계 및 관련된 문제점들에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

완충층과 LSGM 전해질층간의 계면반응성을 알아보기 위해 GDC($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$, Rhodia, USA) 또는 10 mol-ScSZ (SEIME, Japan) 분말을 각각 10 v%, 20 v%, 30 v% 칭량한 후 LSGM($\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$, SEIME, Japan) 분말과 함께 ball milling으로 36시간 동안 혼합하였다. 혼합분말은 일축가압법으로 디스크 형태의 성형체 형태로 만든 후 1400°C 상압조건에서 6시간 동안 열처리하고 그 반응성을 관찰하였다. 반응결과 생성된 상은 X-선 회절분석기(Mac. Science, AXPHE, Japan)를 이용하여 40 Kv, 30 mA, 4°/min의 조건으로 분석하였으며 주사전자 현미경(FEI, XL30)으로 그 미세구조 변화를 관찰하였다. 한편 완충층과 전해질간의 반응에 의해 복합체의 전기적 물성이 어떻게 달라질 것인지를 관찰하기 위해 반응이 끝난 복

합체시편을 막대형태로 가공한 후, 직류 4 단자법을 이용하여 600~1000°C까지 공기분위기하에서 전기전도도를 측정하였다. 전기전도도 측정시 바깥 전극으로의 전류공급은 Current Source (Keithley 224, USA)를 이용하였으며 내부전극에서의 전압강하는 Multimeter(Keithley 2000, USA)를 이용하였다.

한편 LSGM 전해질을 이용한 실제 단전지에서 나타나는 음극-완충층-전해질간 계면에서의 반응성을 관찰하기 위해 음극으로 많이 사용되는 NiO-GDC 복합체를 사용하여 음극지지형 단전지를 제작하고 그 계면을 관찰하였다. 먼저 음극으로 사용되는 NiO-GDC 기판을 제조하기 위해 GDC($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$, Rhodia, USA)와 NiO(Sumitomo, Japan)의 혼합분말을 10 Mpa로 일축 가압 성형하여 두께 1 mm의 음극성형체를 제조하였다. 제조된 음극 성형체 위에는 planetary milling(Fritsch, Plenerisette 5)을 통해 제조한 스크린 인쇄용 페이스트를 이용해 완충층 및 전해질층을 형성하였다. GDC 완충층을 사용한 단전지의 경우 완충층은 1350°C에서 2시간 동안 소결하였으며 소결된 완충층 위에 인쇄한 LSGM 전해질은 1450°C에서 6시간 동안 소결하였다. ScSZ 완충층을 사용한 단전지의 경우는 완충층을 1400°C 4시간, 전해질을 1450°C 6시간 동안 소결하여 단전지를 완성하였다. 이러한 공정을 거쳐 제작된 단전지 계면에서의 반응성은 주사전자 현미경(FEI, XL30)을 이용하여 15 Kev 가속전압 조건에서 관찰하였으며 계면에 생성된 각 반응물들에 대한 정량분석을 하기 위해 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy; FEI, XL30)를 사용하여 spot 또는 plane mapping을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. LSGM과 GDC 완충층 사이의 반응성

LSGM과 GDC사이의 계면반응성을 관찰하기 위해 제작

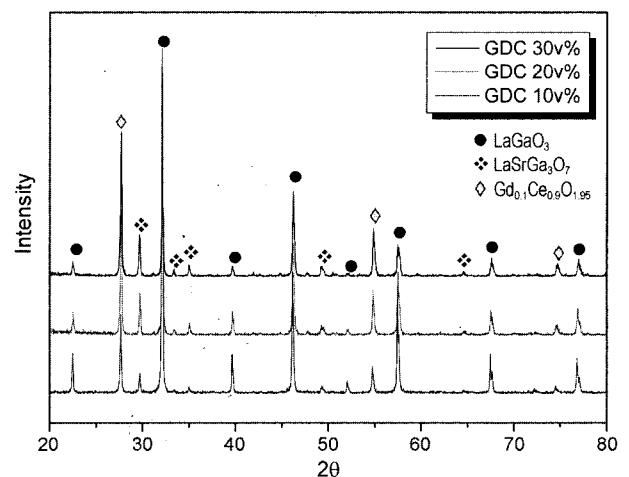


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of LSGM+GDC composites.

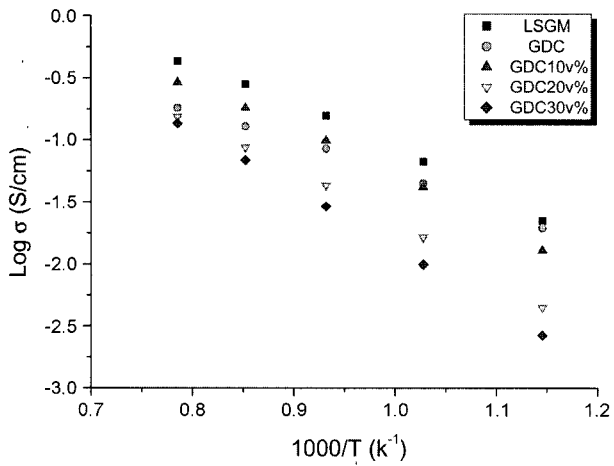


Fig. 2. Temperature dependences of the electrical conductivity of LSGM+GDC composites (in air atmosphere).

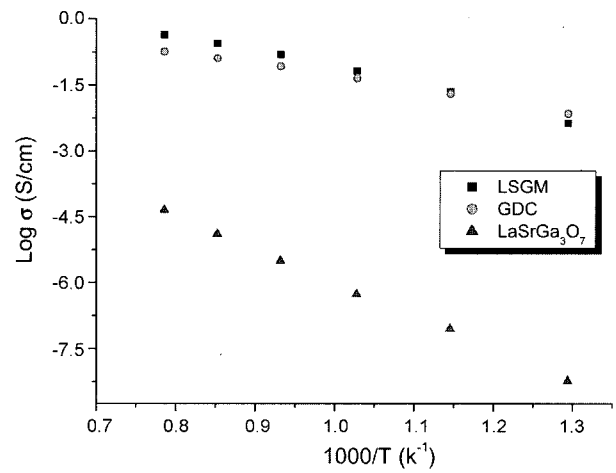


Fig. 3. Temperature dependences of the electrical conductivity of LSGM, GDC, LaSrGa₃O₇ (in air atmosphere).

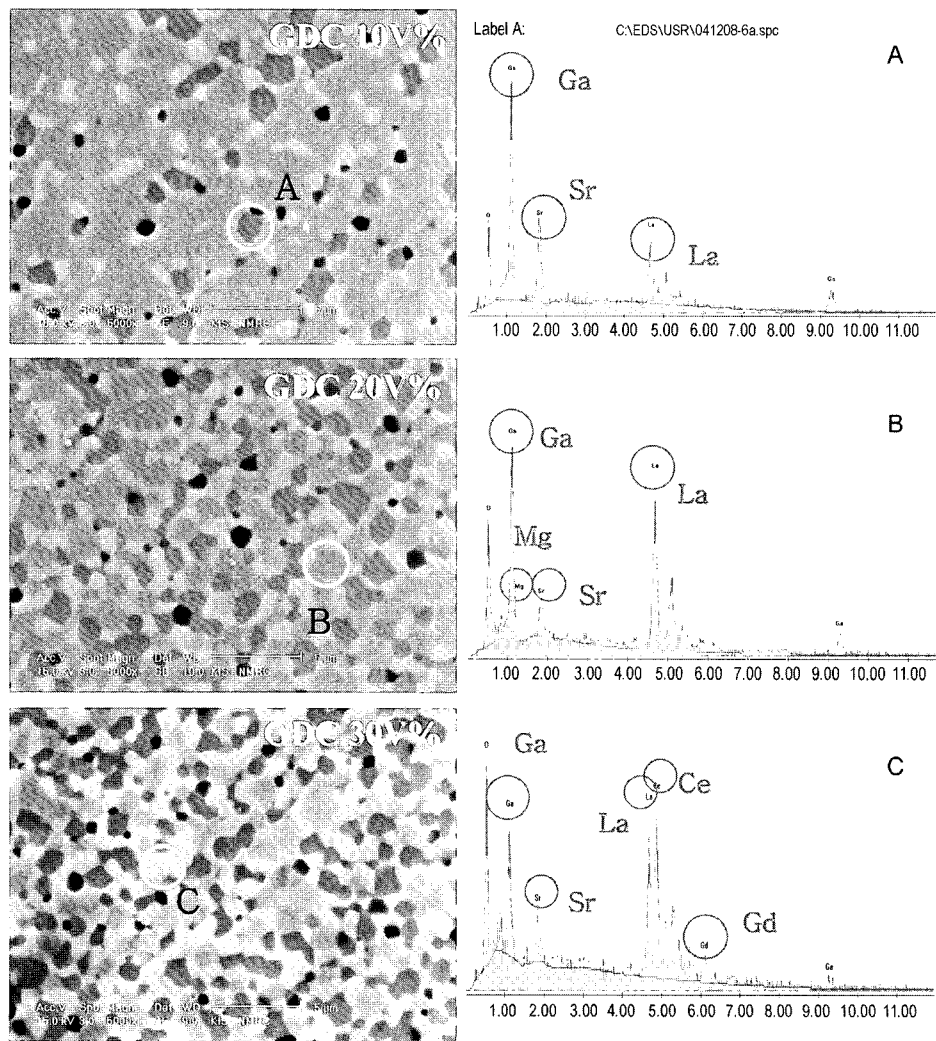


Fig. 4. Cross sectional view of LSGM+GDC composite and the result of EDS analysis on site A, B, and C.

한 LSGM과 GDC 복합체의 X-선 회절 분석결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 혼합분말의 소결 후에는 2차상이 나타났으며 GDC의 양이 늘어날수록 2차상이 늘어남을 알 수 있다. 상분석 결과 LSGM과 GDC의 반응에 의해 생기는 반응물은 $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ 상으로 관찰되었다. 한편 LSGM과 GDC(10, 20, 30 v%)가 혼합된 복합체의 전기전도도를 DC 4 단자법을 사용하여 600°C 부터 1000°C 까지 공기 분위기에서 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 측정결과 공기 분위기에서는 GDC의 첨가량이 많아질수록 전도도가 감소하는걸 볼 수 있는데 이는 Fig. 3의 결과에서 보듯이 LSGM과 GDC에 비해 반응상인 $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ 의 전도도값이 매우 낮기에 GDC의 첨가량이 많을수록 $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ 상이 많이 생성되면서 복합체의 전도도가 낮아졌기 때문이다.

Fig. 4는 LSGM에 GDC가 10, 20, 30 v% 첨가된 시편의 단면을 연마한 후, 각각 SEM을 통해 살펴본 미세구조 사진 및 각 명암 별 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. 분석결과를 보면 GDC 첨가량이 많아질수록 짙은 회색의 상분율이 늘어나는 것을 볼 수 있는데 EDS 분석결과 짙은 회색의 상은 $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ (A)이었으며 옅은 회색은 LSGM

(B), 밝은 흰색은 GDC(C)상으로 나타났다.

한편 Fig. 5은 GDC-NiO/GDC/LSGM 단전지의 미세구조 및 EDS 분석결과이다. 앞선 보고를 통해 전해질과 음극 사이에 완충층 없이 단전지를 구성했을 때, 계면 전체에 검은색의 반응층이 생성됨을 보고한 바 있다.¹⁶⁾ 하지만 Fig. 5의 결과에서 보면 앞서와 달리 검은색의 반응층은 계면 전체적으로는 나타나지 않고 불연속적으로 존재하였다. 대신 GDC 완충층을 사용하는 경우 계면 전체적으로 회색의 반응층이 존재하였다. 이들 반응층에 대한 EDS 분석을 수행한 결과 검은색상(A)은 NiO상으로 나타났으며, 회색층(B)의 경우는 앞서 Fig. 1에서 확인하였듯이 La, Sr, Ga, O로 이루어진 $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ 상임을 알 수 있었다. 한편 해당 계면에 대한 EDS선 정량분석(A)결과 계면을 경계로 전해질인 LSGM으로부터는 La가 GDC 완충층까지 확산되고, LSGM쪽으로 Ni가 이동하였음을 확인할 수 있는데 이로부터 계면에서의 회색 반응층은 전해질인 LSGM 상의 La가 GDC 층으로 확산되어 나가면서 LSGM의 고용량의 변화로 인해 LSGM이 분해되며 La 결핍상인 $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ 상이 생성됐음을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 보면 음극과 전해질간의 계면 반응성을 줄

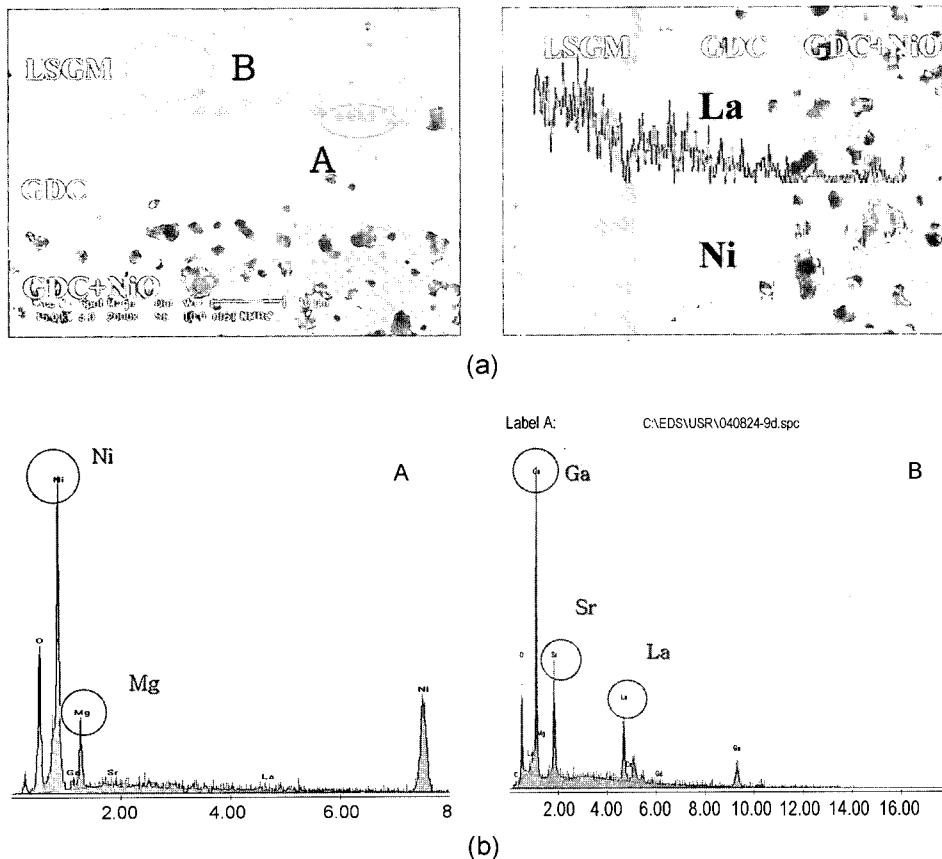


Fig. 5. (a) Cross sectional view of LSGM/GDC/GDC-NiO and its EDS line profiling for La and Ni, (b) EDS analyzing results on site A and B of reaction layer.

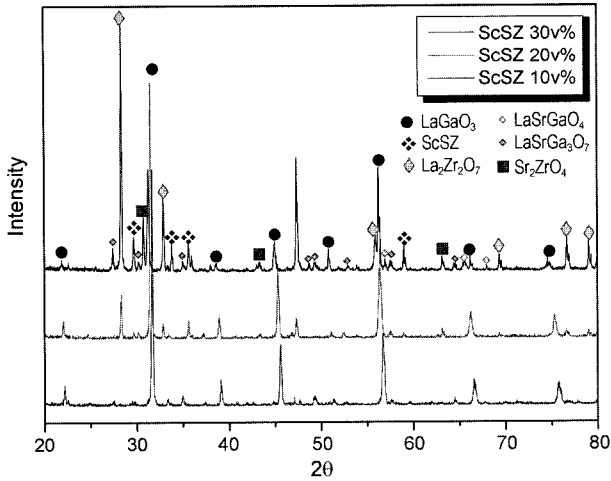


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of LSGM+ScSZ composite.

이기 위해 적용한 GDC 완충층의 경우 음극으로부터의 Ni의 확산을 막지 못하는 물론 전해질로부터의 La 확산을 유발해 전해질의 안정성을 떨어뜨리고 저항성이 큰 계면반응물을 형성시킴을 알 수 있었다.

3.2. LSGM과 ScSZ 완충층 사이의 반응성

세리아계열의 GDC를 완충층으로 사용하는 경우에도 LaSrGa₃O₇ 등의 계면반응물이 생성되는 것을 막을 수 없었다. 이에 본 연구에서는 세리아계열의 완충층 대신에 지르코니아계열의 ScSZ 완충층을 사용하여 LSGM과의 반응성을 살펴보았다. Fig. 6에는 LSGM과 ScSZ 간의 반응성을 알아보기 위해 ScSZ의 양을 달리하며 복합체를 만들고 이에 대한 X선 회절분석을 한 결과를 나타내었다. Fig. 6의 X선 회절 분석결과를 보면 ScSZ의 첨가량이 늘어날수록 앞서 GDC의 경우와 마찬가지로 2차상이 많이 생성되는 것으로 나타났으며, 생성되는 이차상의 종류는 앞서 GDC의 경우와 달리 훨씬 다양하게 관찰되었다. 상분석 결과 나타난 2차상으로는 La₂Zr₂O₇, Sr₂ZrO₄, LaSrGaO₄ 및 LaSrGa₃O₇상 등이 관찰되었는데 그 중에서도 La₂Zr₂O₇상이 가장 주요한 반응물로 나타났다. 반응결과 생성된 La₂Zr₂O₇와 Sr₂ZrO₄ 등은 Table 1에 보듯이 매우 낮은 전

Table 1. Electrical Conductivities of Each Reaction Compounds at 1000°C, which has been Produced from the Chemical Reaction between LSGM and a Zirconia Based Buffering Material

Second phase	$\sigma_{1000^\circ\text{C}}$ (S/cm)
La ₂ Zr ₂ O ₇	2.4×10^{-5} S/cm ¹⁷⁾
Sr ₂ ZrO ₄	4.5×10^{-5} S/cm ⁶⁾
LaSrGa ₃ O ₇	4.4×10^{-5} S/cm
LaSrGaO ₄	4.0×10^{-5} S/cm ¹¹⁾

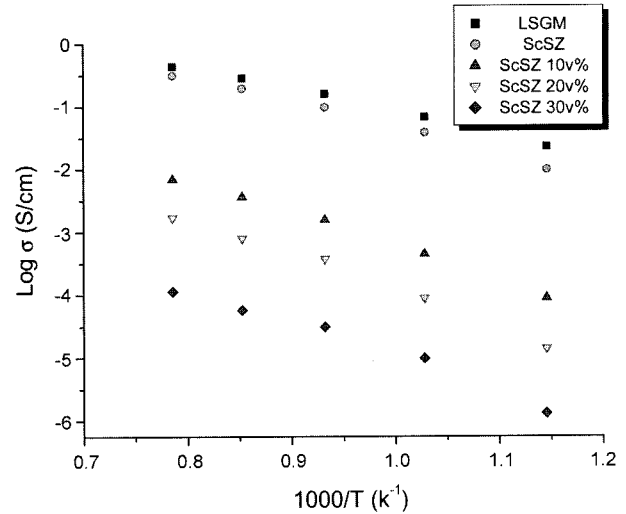


Fig. 7. Temperature dependences of the electrical conductivity of LSGM+ScSZ composites (in air atmosphere).

기전도도를 가지는 것으로 보고되고 있는데 실제 LSGM과 ScSZ 복합체에 대한 전기 전도도를 나타낸 Fig. 7의 결과에서 보면 ScSZ가 많이 첨가될수록 전도도가 낮은 이차상들의 생성이 많아져 전도도값이 크게 감소됨을 알 수 있다.

한편 Fig. 8에는 LSGM에 ScSZ가 10, 20, 30 v% 첨가된 소결체 시편의 단면을 연마한 후 분석한 미세구조 및 EDS 결과를 나타내었다. 분석결과를 보면 ScSZ 첨가량이 많아질수록 회색의 LaSrGa₃O₇(A) 상이 많이 생성됨을 볼 수 있는데 그 양은 앞서 GDC 완충층의 경우에 비해서는 소량이었으며, 검은색 점(B)은 Mg가 다량 검출되었는데 이것은 LaSrGa₃O₇ 상이 생성되면서 Mg가 주인 상이 분리되어 나타난 것으로 판단된다. 반면 이미지상의 콘트라스트 차는 없었으나 LSGM 상으로 보이는 하얀색(C)부분에서 La, Sr, Ga, Mg 이외에 Sc 및 Zr이 다량 검출되었는데 이는 앞서 XRD 분석결과 나타났던 La₂Zr₂O₇상 등의 이차상이 이 부분에 존재함을 의미하는 것으로 LaSrGa₃O₇ 상이 뚜렷한 회색의 명암을 가지고 있는 것과는 다르게 명암차이로 구별할 수는 없는 것으로 나타났다.

실제 지르코니아계의 완충층을 사용한 단전지의 계면 반응성을 관찰한 Fig. 9의 결과를 보면 세리아계열의 완충층을 사용했을 때와는 다르게 전해질과 완충층 계면에 연속적인 반응층은 관찰되지 않았으며, 연속적이진 않지만 ScSZ와의 계면 근처에 회색의 LaSrGa₃O₇상이 발견되었다. 한편 전해질과 완충층 계면에 대한 EDS 분석결과 완충층을 통한 음극내 Ni 성분의 이동현상은 크게 감소한 것으로 나타났으며 계면에 존재하는 검은색 점은 앞서 Fig. 8에서 확인하였듯이 Ni의 양이 적게 관찰되었다. 하지만 전해질과 접한 ScSZ 완충층의 상단부분(A)에서는

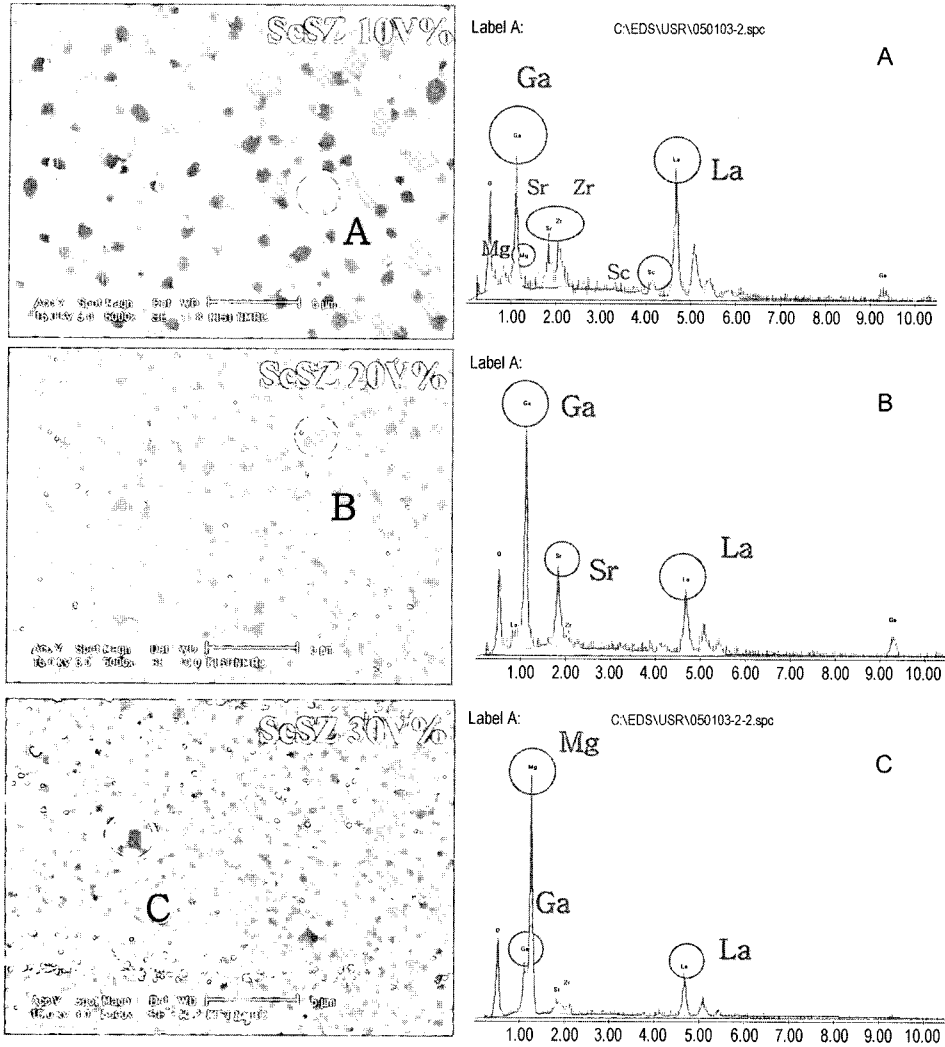


Fig. 8. Cross sectional view of LSGM+ScSZ composite and the result of EDS analysis on site A, B, and C.

La, Zr이 다량 검출되는 반면 하단부분(B)에서는 주로 Sc, Zr만이 검출되었는데 이는 완충층의 상단부분에는 SEM 상으로는 확인할 수 없지만 La와 Zr이 반응하여 만든 $La_2Zr_2O_7$ 상 등의 이차상이 생성되어 있음을 말해준다.

이상의 결과를 볼 때 지르코니아계 완충층을 사용하는 경우 음극으로부터 이동해오는 Ni의 확산을 막는 효과가 있으나, La와 Zr과의 심한 반응성으로 인해 세리아계 완충층을 사용했을 때 보다 La가 완충층으로 더 많이 확산되어 새로운 2차상들이 다량 생성된 것으로 사료된다. 또한 세리아계 완충층을 사용했을 때 나타난 $LaSrGa_3O_7$ 상 보다 지르코니아계열의 완충층을 사용시 나타난 $La_2Zr_2O_7$, Sr_2ZrO_4 , $LaSrGa_3O_7$ 등의 다양한 2차상들은 상안정성을 더욱 악화시키고 결과적으로 단전지의 내부저항을 크게 증가시킬 것으로 예상되어 단전지의 성능 및 안정성에는 더 악영향을 줄 것으로 예상된다. 이러한 계면 이차상들이 단전지 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 현재 진행 중

이며 다음 논문에서 보고할 계획이다.

4. 결 론

LSGM 전해질과 NiO계 음극사이에 세리아계열의 GDC 완충층을 삽입한 결과 LSGM과 NiO의 반응성을 상당량 줄일 수 있었다. 그러나 X-선 회절 분석 및 EDS 분석결과 LSGM에서 La가 GDC 완충층으로 확산되어 나오며 LSGM을 분해시켜 La결핍상인 $LaSrGa_3O_7$ 상을 생성한다는 것을 알 수 있었다. 한편 완충층으로 지르코니아계열의 ScSZ를 사용한 경우에는 완충층의 지르코니아가 전해질 성분들과 반응하여 $La_2Zr_2O_7$, Sr_2ZrO_4 , $LaSrGaO_4$, $LaSrGa_3O_7$ 과 같은 다양한 2차상을 생성하였다. 이렇게 생성된 2차상들은 모두 전기전도도가 매우 낮은 것으로 나타나 단전지의 내부저항손실을 크게 증대시켜 성능저하를 유발함은 물론 불안정한 상안정성으로 인해 단전지의

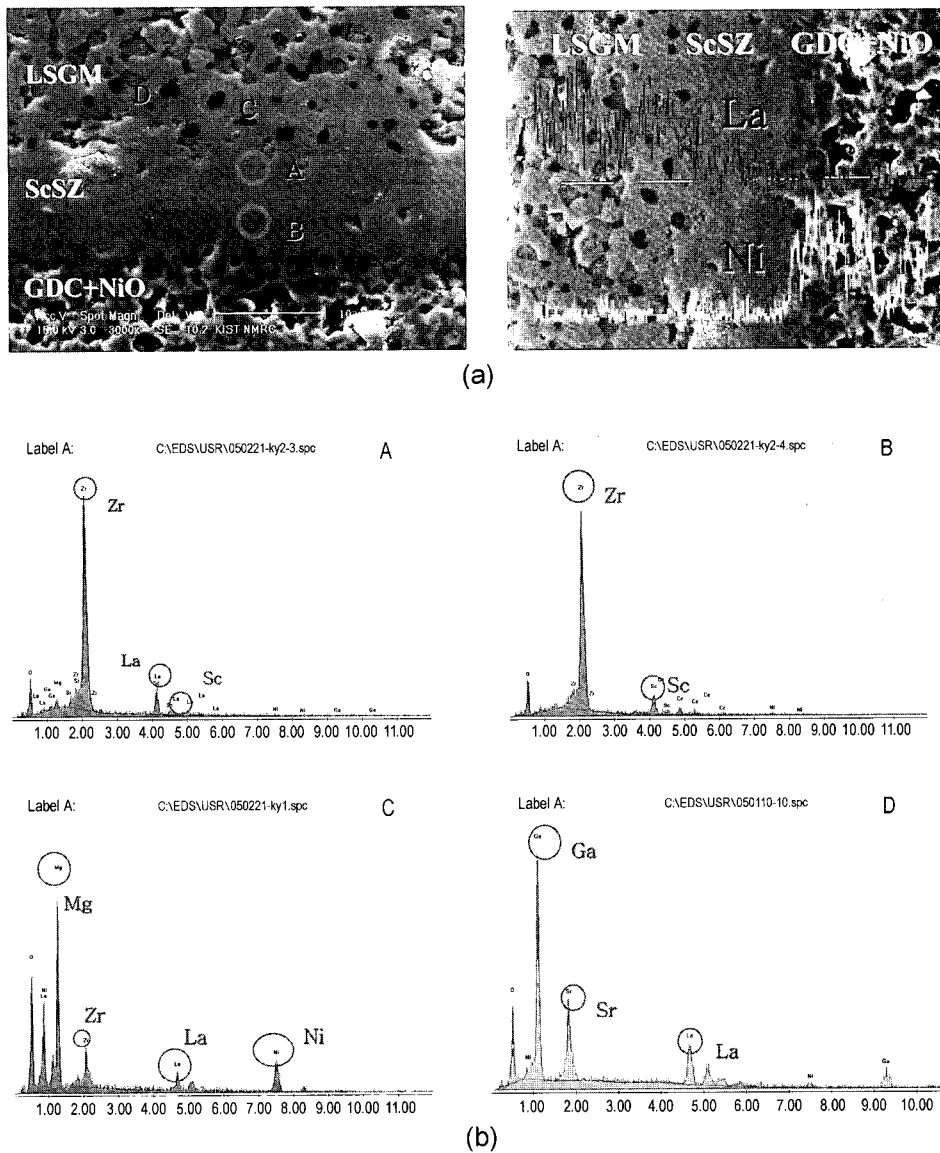


Fig. 9. (a) Cross sectional view of LSGM/ScSZ/GDC-NiO and its EDS line profiling for La and Ni, (b) EDS analyzing results on site A, B, C, and D of reaction layer.

수명을 크게 악화시킬 것으로 예상되었다.

감사의 글

이 논문은 고체산화물 연료전지 핵심원천기술개발 사업과 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. N. Q. Minh, "High-Temperature Fuel Cells. Part II : The Solid Oxide Fuel Cell," *Chemtech.*, **21** 120-26 (1991).
2. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cell," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
3. T. Hibino, "A Low-Operating-Temperature Solid Oxide Fuel Cell in Hydrocarbon-Air Mixture," *Science*, **288** 2031-33 (2000).
4. S. M. Haile, "Fuel Cell Materials and Components," Jon & Wiley Sons, New York, NY, pp. 60-107 (2000).
5. B. C. Steele, "Ceramic Ion Conducting Membranes," *Current Opinion in Solid State & Mater. Sci.*, **1** [5] 684-91 (1996).
6. F. W. Poulsen and N. van der Puil, "Phase Relations and Conductivity of Sr-and La-Zirconates," *Solid State Ionics*, **53-56** 777-83 (1992).
7. M. Hrovat, A. Ahmad-Khanlou, Z. Samardzija, and Janez

- Hole, "Interactions between Lanthanum Gallate Based Solid Electrolyte and Ceria," *Mater. Res. Bull.*, **34** 2027-34 (1999).
8. 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).
 9. A. Naoumidis, A. Ahmad-Khanlou, Z. Samardzija, and D. Kolar, "Chemical Interaction and Diffusion on Interface Cathode/Electrolyte of SOFC," *J. Anal. Chem.*, **365** 277-81 (1999).
 10. K. Huang, J. H. Wan, and J. B. Goodenough, "Increasing Power Density of LSGM-Based Solid Oxide Fuel Cell Using New Anode Materials," *J. Electrochem. Soc.*, **148** [7] 788-94 (2001).
 11. 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).
 12. S. Elangovan, S. Balagopal, D. Larsen, M. Timper, J. Pike, and B. Heck, "Lanthanum Gallate Electrolyte for Intermediate Temperature Operation," *Electrochemical Society Proceedings*, **7** 299-303 (2003).
 13. K. Huang, M. Feng, and J. B. Goodenough, "Electrode Performance Test on Single Ceramic Fuel Cells Using as Electrolyte Sr-and Mg-Doped LaGaO₃," *J. Electrochem. Soc.*, **144** 3620-24 (1997).
 14. K. Huang, R. Tichy, and J. B. Goodenough, "Superior Perovskite Oxide-Ion Conductor; Strontium- and Magnesium-Doped LaGaO₃: III, Performance Tests of Single Ceramic Fuel Cells," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81** [10] 2581-85 (1998).
 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** 153-60 (2000).
 16. K. N. Kim, J. H. Moon, J. W. Son, J. S. 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).
 17. H. Y. Lee, and S. M. Oh, "Origin of Cathodic Degradation and New Phase Formation at the La_{0.9}Sr_{0.1}MnO₃/YSZ Interface," *Solid State Ionics*, **90** 133-40 (1996).