

## Performance of Solid Oxide Fuel Cell with Gradient-structured Thin-film Cathode Composed of Pulsed-laser-deposited Lanthanum Strontium Manganite-Yttria-stabilized Zirconia Composite

Doo-Hwan Myung<sup>\*\*\*</sup>, Jongill Hong<sup>\*\*</sup>, Jaeyeon Hwang<sup>\*\*\*\*</sup>, Jong-Ho Lee<sup>\*</sup>, Hae-Weon Lee<sup>\*</sup>, Byung-Kook Kim<sup>\*</sup>,  
Sung-Gurl Cho<sup>\*\*\*\*</sup>, and Ji-Won Son<sup>\*†</sup>

<sup>\*</sup>High-Temperature Energy Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>\*\*\*\*</sup>Department of Semiconductors, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

(Received September 18, 2011; Revised September 27, 2011; Accepted September 28, 2011)

### PLD 공정으로 제조된 LSM-YSZ 나노복합체층이 포함된 경사구조 박막 공기극을 적용한 SOFC의 성능 분석

명두환<sup>\*\*\*</sup> · 홍종일<sup>\*\*</sup> · 황재연<sup>\*\*\*\*</sup> · 이종호<sup>\*</sup> · 이해원<sup>\*</sup> · 김병국<sup>\*</sup> · 조성걸<sup>\*\*\*\*</sup> · 손지원<sup>\*†</sup>

<sup>\*</sup>한국과학기술연구원 고온에너지재료연구센터

<sup>\*\*</sup>연세대학교 신소재공학과

<sup>\*\*\*</sup>고려대학교 신소재공학과

<sup>\*\*\*\*</sup>경상대학교 반도체공학과

(2011년 9월 18일 접수 ; 2011년 9월 27일 수정 ; 2011년 9월 28일 채택)

#### ABSTRACT

The effect of the application of lanthanum strontium manganite and yttria-stabilized zirconia (LSM-YSZ) nano-composite fabricated by pulsed laser deposition (PLD) as a cathode of solid oxide fuel cell (SOFC) is studied. A gradient-structure thin-film cathode composed of 1 micron-thick LSM-YSZ deposited at an ambient pressure ( $P_{amb}$ ) of 200 mTorr; 2 micron-thick LSM-YSZ deposited at a  $P_{amb}$  of 300 mTorr; and 2 micron-thick lanthanum strontium cobaltite (LSC) current collecting layer was fabricated on an anode-supported SOFC with an ~8 micron-thick YSZ electrolyte. In comparison with a 1 micron-thick nano-structure single-phase LSM cathode fabricated by PLD, it was obviously effective to increase triple phase boundaries (TPB) over the whole thickness of the cathode layer by employing the composite and increasing the physical thickness of the cathode. Both polarization and ohmic resistances of the cell were significantly reduced and the power output of the cell was improved by a factor of 1.6.

**Key words:** Solid oxide fuel cell, LSM-YSZ nano-composite, Gradient-structured thin-film cathode, Pulsed laser deposition

#### 1. 서 론

Lanthanum strontium manganite(LSM) 페로브스카이트는 yttria-stabilized zirconia(YSZ) 전해질과 열팽창 계수 차이와 화학적 반응성이 적으며 고온에서 전기전도도가 높아 고온(~800°C)에서 작동하는 발전용 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)에서 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 공기극 물질이다.<sup>1-4)</sup> 하지만, SOFC의 고온 작동은 신뢰성과 장기안정성, 경제성에 악영향을 주어 SOFC 상용

화에 큰 걸림돌이 되고 있고<sup>1,5)</sup> SOFC 작동에 있어 공기극에서의 분극저항이 저항 손실의 상당부분을 차지하므로,<sup>6)</sup> SOFC 작동온도를 저하시키기 위한 노력의 일환으로 LSM을 대체할 고성능 공기극 소재를 사용하여 이를 감소시키기 위한 노력이 진행되어 왔다.<sup>5,7)</sup> 그러나 일례로 lanthanum strontium cobaltite(LSC)와 같은 코발트를 함유한 고성능 공기극 소재는 지르코니아계 전해질과 열팽창 계수차가 크고 화학적 반응을 일으키기 때문에 공정조건과 장기안정성 등에 제약이 따르며,<sup>7,8)</sup> 이런 측면에서 LSM과 같은 안정적인 공기극 소재를 SOFC의 저온작동 영역에서 활용할 수 있다면 바람직한 결과를 기대할 수 있다.

LSM 공기극의 저온 작동성능을 향상시키기 위한 하나의

<sup>†</sup>Corresponding author : Ji-Won Son

E-mail : jwson@kist.re.kr

Tel : +82-2-958-5530 Fax : +82-2-958-5529

방법은 미세구조를 나노화하여 표면적을 증가시켜 전극반응을 일으키는 부분인 전해질-전극-반응기체가 만나는 3상계면(triple phase boundary, TPB)을 증가시키는 것이다.<sup>1,9,10)</sup> 저자들은 앞선 연구에서 펄스레이저 증착법(pulsed laser deposition, PLD)를 이용하여 저온에서 LSM 공기극을 형성하여 미세구조를 나노화한 결과를 발표하였다.<sup>1)</sup> 하지만 이 경우 1 마이크로 두께의 나노다공성 LSM 단일물질 공기극으로는 분말공정으로 형성한 LSM계 복합체 공기극(e.g. LSM-YSZ)에 비해 매우 낮은 성능결과를 보였다.<sup>1)</sup> 이는 혼합전도성을 거의 지니지 않은 LSM의 경우 단일물질로 공기극을 형성할 때, LSM과 전해질이 만나는 계면에 TPB가 국한되므로 미세구조가 나노화되어도 성능향상에 기여하는 정도가 제한적이기 때문이다. 따라서 나노화를 통해 LSM 공기극의 TPB를 효과적으로 증가시키기 위해서는 LSM과 전해질의 나노복합체로 공기극을 형성하여 TPB를 공기극의 전체 두께로 확장시켜야 한다. 이러한 관계를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 이와 함께, 복합체 공기극의 물리적 두께를 증가시켜 TPB의 추가적인 증가를 도모할 수 있다.

따라서 본 연구에서는, PLD를 이용하여 LSM-YSZ 나노복합체로 경사구조 공기극을 형성한 SOFC 단전지를 평가함으로써 나노복합체화의 효과를 확인하고자 하였다. 선행 연구에서 확인된 LSM 단일물질 공기극을 적용한 SOFC와<sup>1)</sup> 셀 성능 및 전기화학적 물성의 비교를 통해 복합체화와 공기극 박막의 두께 증가가 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

8 마이크로 두께의 YSZ 전해질이 형성된 2 cm × 2 cm

크기의 연료극 지지체 상에, 200 nm의 GDC를 증착하여 공기극을 형성하기 위한 반전지를 제조하였다. 연료극 지지형 YSZ 반전지 및 GDC 층의 형성방법은 선행연구에 상세하게 기술되어 있다.<sup>1)</sup> LSM-YSZ 나노복합체 박막을 형성하기 위해서 LSM-YSZ 복합체 타겟을 제조하여 PLD로 박막을 증착하였다. LSM((La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)<sub>0.95</sub>MnO<sub>3-δ</sub>, Seimi Chemical Co.)과 YSZ(8 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZrO<sub>2</sub>, TZ-8Y, Tosoh Corp.) 분말을 1:1 질량비(LSM : YSZ = 48 : 52 vol%)로 혼합하여 일축가압 성형 후, 1200°C에서 3시간 소결하여 복합체 타겟을 제조하였다. 나노복합체 공기극 박막을 제조하기 위해서 KrF 엑시머 레이저(λ=248 nm, COMPEX Pro 201F, Coherent)를 복합체 타겟에 집속-조사하여 박막을 증착했으며, 타겟 표면에서 레이저 에너지는 약 2.5 J cm<sup>-2</sup>, 타겟과 기판 사이의 거리는 5 cm로 유지되었다. 서로 고용성이 없는 두 물질을 섞어 타겟으로 제조하여 PLD를 이용해 박막을 증착하는 경우, 두 물질이 등방성의 나노입자로 균일하게 혼합된 나노복합체 박막이 얻어진다는 것은 이미 저자들이 선행 연구에서 NiO-YSZ와<sup>11,12)</sup> LSC-gadolinia-doped ceria(LSC-GDC)의<sup>13)</sup> 경우에 보고한 바 있다.

경사구조 LSM-YSZ 공기극의 형성을 위해서 1 마이크로 두께의 LSM-YSZ 층은 증착압력 200 mTorr에서, 그 상부의 2 마이크로 두께의 LSM-YSZ 층은 증착압력 300 mTorr에서 형성하였다. 이는 증착압력이 높아질수록 박막의 다공성의 정도가 높아지는 원리를 이용하여 전해질과 공기극의 계면으로부터 공기극의 상부로 갈수록 기공률이 높아지는 경사구조를 구현하기 위함이다. 이때 증착온도는 700°C였다. 복합체 공기극의 상부에 2 마이크로 두께의 LSC 층을 집전층으로 형성하였고, LSC 층은 상온에서 100 mTorr의 증착압력에서 증착하여 650°C에서 1시간 후열처리하여 형성

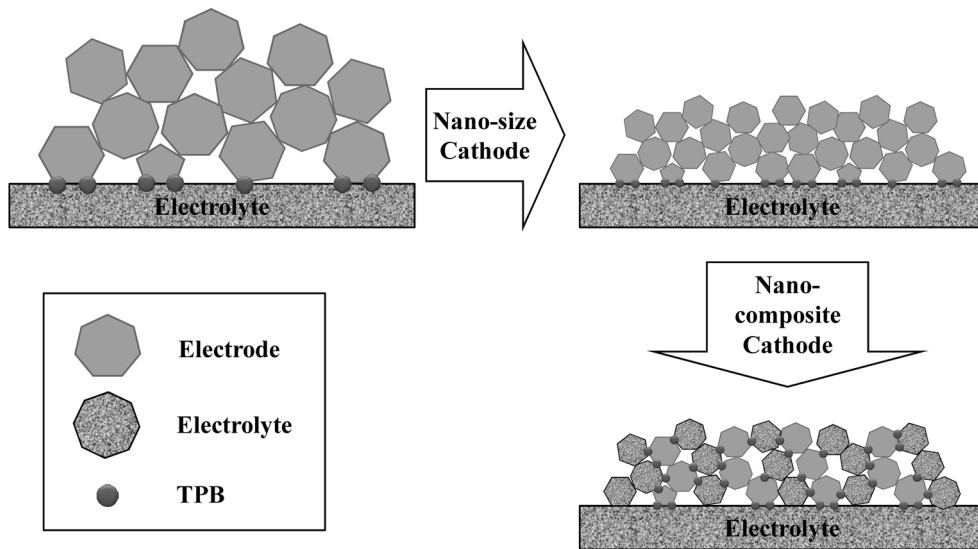


Fig. 1. Schematic of the increment of TPB by employing nano-size and nano-composite cathode.

하였다. 본 연구에 사용된 모든 PLD 증착에서 산소를 공정기체로 사용하였다. 제작한 SOFC 단전지의 단면구조를 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다. 단전지의 출력특성과 임피던스 특성은 솔라트론 임피던스 분석기(SI1260 + SI1287, Solartron)를 이용하여 분석하였다. 측정셋업 및 조건은 LSM 단일물질 공기극 SOFC의 경우와 동일하였다.<sup>1)</sup> 공기극의 상, 미세구조 등 물성은 X선 회절분석(XRD, PW3830, PANalytical) 및 주사전자현미경(SEM, XL-30 FEG, FEI)을 통해 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3에 제작한 단전지의 XRD 결과를 보였다. Fig. 2에 보인 다층구조의 XRD이므로 공기극 이외의 다른 층의 회절 피크도 나타나지만, YSZ와 LSM의 회절 피크가 확연히 분리되어 나타난 것을 확인할 수 있었다. 집전체인 LSC의 경우는 LSM과 피크 위치가 유사하여 겹쳐져 나타난 것으로 보인다. XRD 결과로부터 LSM과 YSZ가 혼합되어 있는 복합체층을 얻어낸 것을 확인할 수 있었으며, 이는 앞서 언급한 것과 같이 서로 고용성이 없는 두 물질을 섞어 타

겟으로 제조하여 PLD를 이용해 박막을 증착하는 경우, 두 물질이 균일하게 혼합된 박막이 얻어진 경우와 일치하는 결과로 볼 수 있다.<sup>11,12,14)</sup> Fig. 4(a)와 (b)에 공기극의 표면과 단면의 미세구조를 각각 보였다. 표면 LSC 집전층의 구조는 기존에 같은 방법으로 제작되었던 LSC 층의 미세구조와 거의 동일하며,<sup>15)</sup> 낮은 온도와 높은 공압에서 증착한 후 후열처리를 통해 얻어진 구조로서 국부적인 소결수축에 의한 균열 형상의 기공이 수직방향으로 확보되었음을 확인할 수 있다. 단면 구조는 LSC-GDC 다층 경사구조와<sup>13)</sup> 유사하게 200 mTorr의 공압에서 증착한 LSM-YSZ 층은 다소 치밀하게, 300 mTorr에서 증착한 LSM-YSZ 층은 보다 더 다공성으로 형성되었음을 확인할 수 있으며, 최상부의 LSC 집전층은 가장 다공성으로 형성되어 의도한 바와 같이 경사구조를 형성한 것을 관찰할 수 있다.

앞서 보고되었던 LSM 단일물질 공기극을 적용한 경우<sup>1)</sup>와 본 연구에 적용된 공기극의 차이점은 크게 i) LSM 단일물질에서 LSM-YSZ 복합체로 변화, 그리고 ii) LSM계 전극층이 1마이크론에서 3마이크론으로 증가한 것으로 정

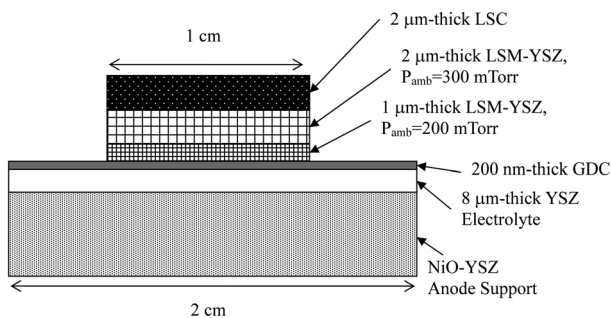


Fig. 2. Schematic of the cross-section of the fabricated unit cell.

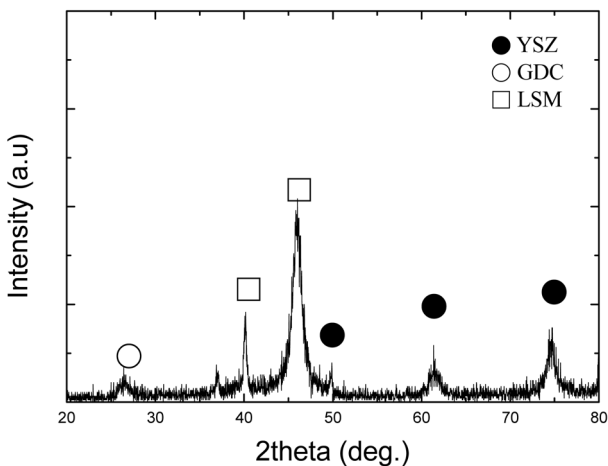


Fig. 3. XRD result of the fabricated unit cell.

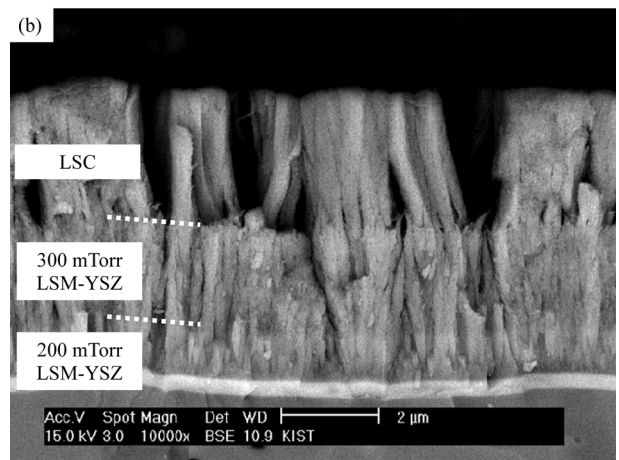
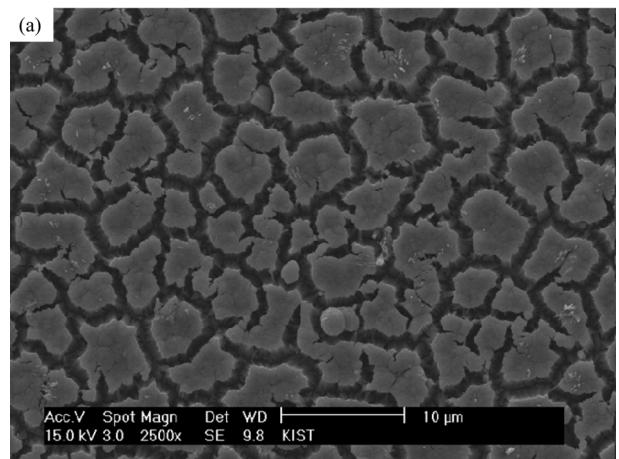
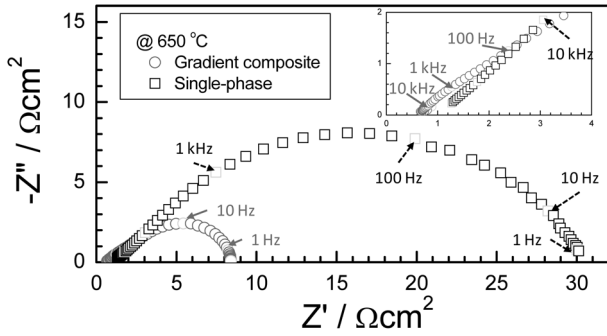


Fig. 4. (a) Surface and (b) cross-sectional microstructure of the LSM-YSZ/LSC gradient-structure thin-film cathode.



**Fig. 5.** Impedance spectra of the cell with gradient-structure composite cathode (○, this study) and that with single-phase LSM cathode (□)¹).

리할 수 있다. 이러한 변화가 전기화학적 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해서 두 종류의 단전지에서 650°C에서 측정된 임피던스를 Fig. 5에 비교하였다. 가장 눈에 띄는 변화는 LSM 단일물질에서 경사구조 복합체 공기극으로 변화하면서 10 Hz 이상의 고주파수 영역의 임피던스 arc가 확연하게 감소한 것이다. 고주파수 영역의 임피던스 arc는 전극의 반응, 즉 산소의 환원과 전극-전해질 사이의 전하의 전달과 관계되어 있는 부분으로,<sup>7,15,16)</sup> 비교대상인 두 경우가 공기극 소재와 전해질 소재가 동일하므로 소재의 변화에 의한 전극활성 증가가 일어난 것은 아니며, 복합체 공기극에서 이 부분의 크기가 줄었다는 것은 전극반응이 일어날 수 있는 지점의 수, 즉 TPB가 증가하여 전극의 반응이 향상되었다는 것을 뜻한다. LSM 단일물질에서 LSM-YSZ로 변화하고, 두께 또한 증가하면서 공기극의 두께방향으로 TPB가 증가한 효과가 분명하게 나타난 것으로 사료된다.

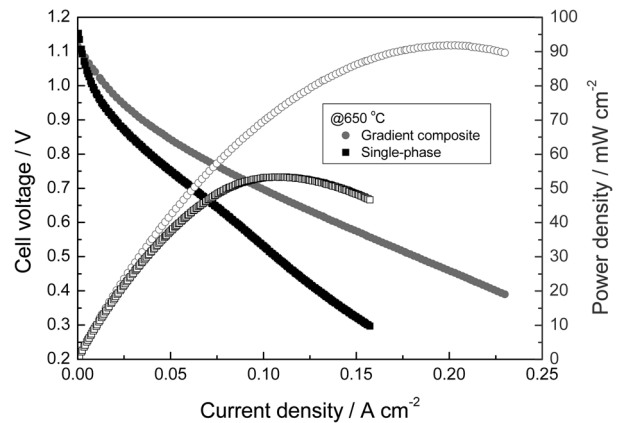
또한, 공기극 두께의 증가는 전극의 분극(polarization resistance)의 개선 뿐 아니라 오믹분극(ohmic resistance)의 개선에도 영향을 미치는 것으로 보인다. Fig. 5의 삽입 그래프에 오믹분극을 확인할 수 있는 고주파 영역 arc와 실수축(x축)이 교차하는 부분을 확대하여 같이 도시하였는데, 오믹 비면적저항(area specific resistance, ASR)이 LSM 단일물질의 경우와 복합체 경사구조 공기극의 경우 각각 약 1.2과 0.7 Ω·cm<sup>2</sup>으로, 오믹분극 역시 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 공기극 두께의 증가에 따라 공기극 면에 수평한 방향의 전기적 전도가 일어날 수 있는 면적(전극의 수직단면 면적)이 증가되므로, 수평 방향의 전기적 저항 손실이 감소되어 나타난 결과로 보여진다. 특히 본 연구에서 사용된 것 같은 수 마이크론 이하의 박막 전극에서는 전극의 두께가 얇아 수평방향의 전도 손실이 클 수 있기 때문에 전극 두께의 변화가 오믹분극에 영향을 미칠 개연성이 크다고 할 수 있겠다. Table 1에 Fig. 5에서 얻어진 두 단전지의 분극저항을 비교하였다. LSM 단일물질 공기극을 사용한 경우에 비해 LSM-YSZ 복합체 경사구조 공기극을 사용한 경우 전

**Table 1.** Comparison of ASR Values of the Cells at 650°C

Cell ID	Ohmic ASR (Ω·cm <sup>2</sup> )	Polarization ASR (Ω·cm <sup>2</sup> )
Cell with gradient-structure composite cathode	0.7	8.4
Cell with LSM single-phase cathode <sup>1)</sup>	1.2	28.9

극분극 저항은 단일물질 공기극 저항의 약 30%, 오믹분극 저항은 약 60%로 감소한 것을 볼 수 있다.

이와 같은 분극저항의 변화는 단전지의 성능에 영향을 미쳤다. Fig. 6에 본 연구에서 얻어진 복합체 경사구조 공기극을 사용한 경우와 단일물질 공기극을 사용한 경우의 650 °C에서의 전류-전압-출력(I-V-P) 곡선을 비교하였다. Table 2에 비교한 바와 같이, 경사구조 복합체 공기극을 사용함으로써 출력성능은 1.6배 이상 증가하였다. I-V 곡선에서, 저전류 밀도 영역(약 0~0.25 Acm<sup>-2</sup>)에서 복합체 공기극을 사용한 경우 전압의 하강이 완화되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 임피던스에 나타난 것과 같이 공기극의 전극활성이 향상되어 활성화 분극이 감소되어 나타난 결과로 해석할 수 있다. 또한 오믹저항이 지배하는 I-V의 직선영역에서도 기울기의 차이가 확연히 드러나, 두께가 증가한 복합체 공기극을



**Fig. 6.** I-V-P curves of the cell with gradient-structure composite cathode (○, this study) and that with single-phase LSM cathode (□)¹).

**Table 2.** Comparison of Performances of the Cells at 650°C

Cell ID	Power density @ 0.7 V (Wcm <sup>-2</sup> )	Maximum power density (Wcm <sup>-2</sup> )
Cell with gradient-structure composite cathode	69	92
Cell with LSM single-phase cathode <sup>1)</sup>	43	53

사용함으로써 획득한 오믹 분극저항의 감소의 영향이 셀 성능에 미친 영향을 확인할 수 있었다.

하지만, 동일 제작 방식을 사용했던 혼합전도체인 LSC 계의 경우<sup>13,15)</sup>와 비교했을 때 LSM의 경우 성능향상폭이 크지 않았다. PLD로 제작한 LSC계 공기극의 경우에는 두께가 3 마이크론을 넘어서면서 기존의 분말공정으로 제작된 LSC계 공기극과 거의 유사하거나 더 뛰어난 성능을 나타낸 반면,<sup>13,15)</sup> LSM의 경우에는 복합체화와 두께 증가에도 불구하고 분말 공정으로 제조된 수십 마이크론 두께의 LSM-YSZ 복합체 공기극을 적용한 셀의 성능(650°C에서 0.7 V 출력 밀도 ~280 mWcm<sup>-2</sup>)<sup>17)</sup>에 비해 훨씬 낮은 성능을 보였다. LSM의 경우, 혼합전도성이 거의 없기 때문에 전극의 활성점이 증가하기 위해서는 공기와 LSM, 그리고 전해질의 3상이 동시에 만나는 TPB가 증가하여야 함과 동시에, 이 TPB가 실제로 전극반응에 기여하려면 전극 반응으로 생성된 전하의 전달을 위해서 공기극 내 공기극 물질 간, 그리고 전해질 물질 간의 상호연결도도 공고해야 하는 반면, 혼합전도체인 LSC는 공기와 LSC의 2상이 만나는 2상 계면(2 phase boundary, 2PB)의 증가로도 효과적으로 반응점 밀도를 증가시킬 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, Fig. 4에 보인 PLD를 이용한 공정으로 만들어진 LSM-YSZ 복합체 공기극의 미세구조와 참고문헌 13에서 저자들이 보고한 LSC-GDC 복합체 공기극의 미세구조는 거의 동일하므로, 본 연구결과는 이러한 미세구조가 수 마이크론의 얇은 두께에서 2PB의 증가에는 매우 효과적이거나, TPB의 증가에는 그 효과가 상대적으로 제한되어 있는 것을 보여주는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

PLD를 이용하여 증착한 LSM-YSZ 나노복합체를 포함한 공기극을 연료극 지지형 SOFC에 적용하여 물성과 전기화학적 평가를 진행하였다. 공기극은 200 mTorr에서 증착한 1 마이크론의 LSM-YSZ; 300 mTorr에서 증착한 2 마이크론의 LSM-YSZ; 2 마이크론의 LSC 집전층의 세 부분으로 이루어진, 기공률이 공기극의 상부로 갈 수록 증가하는 경사구조로 제작되었다. LSM 단일물질 공기극과 비교하였을 때, LSM-YSZ로 복합체를 형성함에 따라 TPB를 공기극 두께 전체로 확장시킬 수 있으며, 공기극의 물리적 두께를 증가시켜 추가적으로 TPB의 증가를 얻어낼 수 있을 것으로 기대되었다. 이를 통해 단일물질 공기극에 비해 공기극의 전극 분극을 30% 수준으로 낮출 수 있었으며, 공기극의 두께 증가에 따라 수평방향 전도를 향상시켜 오믹 분극 또한 감소되는 효과를 얻어낼 수 있었다. 하지만 기존의 분말 공정으로 제작된 LSM-YSZ 공기극과 비교했을 때 만족스럽지 않은 성능을 보였는데, 이는 PLD로 증착한 복합체 박막의 미세구조가 수 마이크론의 얇은 두께에서 기존의 공

기극과 비견할 만큼의 효과적인 TPB 증가를 얻어내기에는 한계가 있기 때문으로 사료된다.

#### Acknowledgments

본 연구는 한국과학기술연구원 기관고유사업과 교육과학기술부 한국연구재단 중견연구자 지원사업(2011-0012230)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. H.-S. Noh, J.-W. Son, H. Lee, H.-R. Kim, J.-H. Lee, and H.-W. Lee, "Thin Film (La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)<sub>0.95</sub>MnO<sub>3.8</sub> Fabricated by Pulsed Laser Deposition and Its Application as Solid Oxide Fuel Cell Cathode for Low Temperature Operation," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **47** [1] 75-81 (2010).
2. F. Tietz, "Thermal Expansion of SOFC Materials," *Ionics*, **5** 129-39 (1999).
3. S. P. Jiang, "Development of Lanthanum Strontium Manganite Perovskite Cathode Materials of Solid Oxide Fuel Cells: A Review," *J. Mater. Sci.*, **43** 6799-833 (2008).
4. E. Koep, C. Jin, M. Haluska, R. Das, R. Narayan, K. Sandhage, R. Snyder, and M. Liu, "Microstructure and Electrochemical Properties of Cathode Materials for SOFC Prepared via Pulsed Laser Deposition," *J. Power Sources*, **161** 250-5 (2006).
5. H. Jung, K. Hong, H. Jung, H. Kim, H. Kim, J. Son, J. Kim, H. Lee, and J. Lee, "SOFCs with Sc-doped Zirconia Electrolyte and Co-containing Perovskite Cathodes," *J. Electrochem. Soc.*, **154** [5] B480-B5 (2007).
6. N. Q. Minh, "Solid Oxide Fuel Cells for Power Generation and Hydrogen Production," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **47** [1] 1-7 (2010).
7. C. Peters, A. Weber, and E. Ivers-Tiffée, "Nanoscaled (La<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>)CoO<sub>3.8</sub> Thin Film Cathodes for SOFC Application at 500°C < T < 700°C," *J. Electrochem. Soc.*, **155** [7] B730-B7 (2008).
8. H.-S. Noh, J.-W. Son, H. Lee, J.-S. Park, H.-W. Lee, and J.-H. Lee, "Direct Applicability of La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>CoO<sub>3.8</sub> Thin Film Cathode to Ytria Stabilized Zirconia Electrolytes at T ≤ 650°C," *Fuel Cells*, **10** [6] 1057-65 (2010).
9. L. Dieterle, D. Bach, R. Schneider, H. Stormer, D. Gerthsen, U. Guntow, E. Ivers-Tiffée, A. Weber, C. Peters, and H. Yokokawa, "Structural and Chemical Properties of Nanocrystalline La<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>CoO<sub>3.8</sub> Layers on Ytria-stabilized Zirconia Analyzed by Transmission Electron Microscopy," *J. Mater. Sci.*, **43** 3135-43 (2008).
10. J.-J. Choi, S.-H. Oh, H.-S. Noh, H.-R. Kim, J.-W. Son, D.-S. Park, J.-H. Choi, J. Ryu, B.-D. Hahn, W.-H. Yoon, and H.-W. Lee, "Low Temperature Fabrication of Nano-structured Porous LSM-YSZ Composite Cathode Film by Aerosol Deposition," *J. Alloys Compounds*, **509** [5] 2627-30 (2011).
11. H.-S. Noh, J.-S. Park, J.-W. Son, H. Lee, J.-H. Lee, and H.-W. Lee, "Physical and Microstructural Properties of NiO- and Ni-YSZ Composite Thin Films Fabricated by Pulsed Laser Deposition at T ≤ 700°C," *J. Am. Ceram. Soc.*, **92** [12]

- 3059-64 (2009).
12. H.-S. Noh, J.-W. Son, H. Lee, H.-I. Ji, J.-H. Lee, and H.-W. Lee, "Suppression of Ni Agglomeration in PLD Fabricated Ni-YSZ Composite for Surface Modification of SOFC Anode," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30** [16] 3415-23 (2010).
  13. D.-H. Myung, J. Hwang, J. Hong, H.-W. Lee, B.-K. Kim, J.-H. Lee, and J.-W. Son, "Pulsed Laser Deposition of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ - $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$  Nano-composite and Its Application to Gradient-structured Thin-film Cathode of SOFC," *J. Electrochem. Soc.*, **158** [8] B1000-06 (2011).
  14. K. Hayashi, O. Yamamoto, Y. Nishigaki, and H. Minoura, "Sputtered  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ -Yttria Stabilized Zirconia Composite Film Electrodes for SOFC," *Solid State Ionics*, **98** [1-2] 49-55 (1997).
  15. H.-S. Noh, H. Lee, H.-I. Ji, H.-W. Lee, J.-H. Lee, and J.-W. Son, "Limitation of Thickness Increment of Lanthanum Strontium Cobaltite Cathode Fabricated by Pulsed Laser Deposition," *J. Electrochem. Soc.*, **158** [1] B1-B4 (2011).
  16. T. Tsai and S. A. Barnett, "Sputter Deposition of Cermet Fuel Electrodes for Solid Oxide Fuel Cells," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **13** [3] 1073-77 (1995).
  17. H.-G. Jung, Y.-K. Sun, H.-Y. Jung, J.-S. Park, H.-R. Kim, G.-H. Kim, H.-W. Lee, and J.-H. Lee, "Investigation of Anode-Supported SOFC with Cobalt-containing Cathode and GDC Interlayer," *Solid State Ionics*, **179** [27-32] 1535-39 (2008).