

Polycarbonate 멤브레인 필터 기반 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ 나노와이어가 적용된 중온형 고체산화물 연료전지 제작

한강¹⁾ · 고영균¹⁾ · 황규진¹⁾ · 신현호^{2)*} · 신성수^{1)*}

¹⁾국립금오공과대학교 기계시스템공학부

²⁾현대건설 수소에너지연구센터

(투고 2024년 8월 2일, 수정 2024년 8월 13일, 게재확정 2024년 8월 13일)

Fabrication of intermediate-temperature solid oxide fuel cells with $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ nanowires based on polycarbonate membrane filter

Kang Han¹⁾, Young Gyun Goh¹⁾, Gyu Jin Hwang¹⁾, Hyun Ho Shin^{2)*}, Sung Soo Shin^{1)*}

¹⁾*School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology*

²⁾*Hydrogen Energy Research Team, Hyundai Engineering & Construction*

(Received August 2 2024; Revised August 13 2024; Accepted August 13 2024)

Abstract

Enhancing the oxygen surface exchange reaction by increasing the specific surface area of the electrode is a promising structural approach to lowering the operating temperature of solid oxide fuel cells (SOFCs). Nanowire structures, due to their high specific surface area and lower tortuosity of ion and electron conduction pathways, play a vital role in enhancing SOFC electrode performance. In this study, we synthesized $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ (LSC) nanowires using a polycarbonate membrane filter as a nanotemplate and applied them to the cathode for intermediate-temperature SOFC fabrication. The fabricated cell exhibited a 10% increase in peak power density at 650°C, achieving 0.506 W·cm⁻², compared to cell using only commercial LSC powder. Furthermore, distribution of relaxation times analysis revealed a 15% reduction in area-specific polarization resistance in the mid-frequency range. These findings demonstrated that the electrode with LSC nanowires fabricated through electrospray deposition can significantly improve electrochemical performance of intermediate-temperature SOFC.

Keywords : Fuel cell, Solid oxide fuel cell, Electrospray, Polycarbonate membrane filter

* Corresponding author.

Tel : +82-54-478-7395, E-mail : hhshin80@gmail.com,
sshin@kumoh.ac.kr

1. 서론

최근 지구온난화 현상의 심화에 따라 해수면 상승과 함께 전 세계가 이상기후를 겪고 있다. 이런 지구온난화 현상은 대기 중의 탄소에 의해 가속화되기에 2015년 파리협정을 시작으로 대기에 방출되는 탄소 양을 줄이기 위한 전 세계적인 노력이 지속되고 있다(Dolman et al., 2016). 인류에 필수적인 에너지 산업에서도 이산화탄소와 함께 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx)을 배출하는 화석연료 기반 전력 생산 시스템의 대안으로 수소와 산소의 전기화학 반응으로 전력을 생산할 수 있는 친환경 에너지 변환 시스템인 연료전지가 주목받고 있다(Minh, 1993).

화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 연료전지는 물 이외의 부산물을 생성하지 않기에 환경친화적인 에너지 변환 시스템이다. 연료전지의 구동 과정은 공기극에서의 환원반응과 전해질에서의 이온의 전도, 연료극에서의 산화반응으로 이루어져 있다. 연료전지의 종류는 구성요소의 소재 및 전하 운반체에 따라 나뉘어지며, 그 중 고체산화물 연료전지는 세라믹으로 이루어져 있고 산소 이온을 전하 운반체로 사용한다. 고체산화물 연료전지는 귀금속 촉매의 사용이 필요 없다는 점, 이론 효율이 카르노 사이클 대비 약 2배 높다는 점, 탄화수소 및 암모니아 등 연료 이용의 자유도가 높다는 점 등의 장점을 갖고 있다(Ormerod, 2003; Kim et al., 2017). 하지만, 세라믹 소재의 촉매 특성 및 이온 전도 특성의 향상을 위해 700 °C 이상의 높은 작동 온도를 필요로 한다. 이러한 높은 작동 온도는 소자의 기계적 및 화학적 열화를 촉진시키고 시스템 구동 시간을 증가시키며 시스템 유지 비용을 증가시키는 등의 문제를 야기하며, 이는 곧 고체산화물 연료전지 상용화에 걸림돌이 되어 왔다. 따라서, 최근에는 고체산화물 연료전지의 작동 온도를 낮추는 중온형(intermediate-temperature) 및 저온형(low-temperature) 고체산화물 연료전지 연구가 진행중이다(Wachsman and Lee, 2011).

고체산화물 연료전지의 작동 온도를 낮추면서 전기화학 성능을 유지하기 위해서는 전극 반응의 속도 결정 단계인 산소환원반응 특성의 향상이 필수적이다. 그 중에서도 해당 반응이 일어나는 영역인 two-phase

boundary 밀도를 증대시키는 연구는 대표적인 구조적 접근법으로 알려져 있다(Zhang et al., 2022; Ding et al., 2014). 특히, 촉매 비표면적 증대를 통해 산소 표면 교환 반응을 활성화하고자 나노와이어 전극을 공기극에 도입하는 연구가 주목받고 있다(Ahn et al., 2017; Kim et al., 2023). 일반적으로, 나노와이어 구조는 전기방사(electrospinning) 공정으로 제작되기에 소재와 공정간의 호환성이 우수하고, 공정 변수가 확립되어야만 안정적인 나노와이어 구조의 형성이 가능했다. 이에, 본 연구에서는 나노템플릿을 활용하여 나노와이어 구조 전극을 제작하는 새로운 접근법을 보고하고자 한다.

나노와이어 구조 공기극 설계를 위해 사용된 공정은 에어로졸 기반 전기분사 증착(electrospray deposition) 공정이다. 전기분사 증착 공정은 상온, 상압 조건에서 진행되며 대면적 증착 및 연속 증착이 용이하기 때문에 에너지 소자 제작에 다방면으로 활용되어 왔다(Jaworek, 2007). 가는 노즐 팁 끝에 인가한 고전압과 접지된 기판을 통해 전기장을 형성하고 일정한 유속으로 슬러리 혹은 전구체 용액을 노즐로 흘려보내면, 노즐 팁에서 전기력, 중력, 표면장력 등이 힘의 평형을 이루며 대전된 미세 액적들이 cone-jet 형상으로 분사되는 원리이다(Rietveld et al., 2006; Jaworek and Sobczyk, 2008). 이 공정은 소재 이용의 제한이 없고, 박막 제작이 가능하며 증착 구조의 미세구조 변경이 용이하다는 장점이 있다(Kim et al., 2017; Shin et al., 2019). 따라서, 전기분사 증착 공정은 치밀한 전해질 구조와 다공성 공기극 구조 등 미세구조 제어 기술이 필요한 고체산화물 연료전지 제작에도 폭넓게 사용되어 왔다(Li et al, 2022; Shin et al., 2021).

본 연구에서는 나노템플릿을 이용한 나노와이어 전극 제작 공정과 전기분사 증착 공정을 결합하여 중온형 고체산화물 연료전지의 성능 향상을 보고하고자 한다. 나노와이어 전극이 첨가된 공기극 슬러리와 상용 전극 분말만 사용된 공기극 슬러리를 전기분사 증착 공정을 통해 동일한 기판 위에 제작함으로써 나노와이어 전극이 셀 성능에 미치는 전기화학 특성을 분석하고자 한다. 또한, 발전된 임피던스 해석 기법을 이용하여 공기극의 미세구조 변화가 전기화학 임피던스 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 실험방법

$\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ (LSC) 나노와이어 제작을 위해 LSC 전구체 용액을 Pechini법으로 제작하였다. 먼저, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Alfa Aesar), $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich)를 탈이온수에 화학양론비에 따른 몰비율에 맞게 투입한다. 용액을 교반시키며 시트르산과 에틸렌글리콜을 차례로 첨가하였으며, 이 때 양이온:시트르산:에틸렌글리콜 몰비율은 1:3:1로 하였다. 지속적인 교반을 통해 투명해진 전구체 용액은 피펫을 이용하여 polycarbonate 멤브레인 필터 (pore size: 200 nm, Sigma-Aldrich) 위에 떨어뜨렸다. 필터의 기공 안쪽으로 전구체 용액이 스며들게 하기 위하여 전구체 용액이 도포된 polycarbonate 멤브레인 필터를 진공 챔버에 넣고 30분 동안 진공 펌프를 가동시켰다. 이후, 탈이온수를 이용하여 필터 표면의 잔여 전구체 용액을 세척하였다. 세척된 필터를 알루미늄 도가니에 넣고 80 °C에서 8시간 동안 겔화를 거친 뒤에 800 °C에서 1시간 동안 소결을 진행하여 나노와이어 구조의 LSC를 합성하였다.

연료극 하부 기판 제작을 위해 연료극 소재인 NiO (Sumitomo), 8 mol% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (Yttria Stabilized Zirconia, YSZ; Tosoh) 분말을 polymethylmethacrylate (PMMA; Sunjin Chemical) 기공 형성자, KD-1 (Sigma Aldrich) 분산제와 함께 ethyl alcohol 과 toluene 혼합 용매에 넣고 볼 밀링을 진행하였다. 볼 밀링에는 지름 5 mm 와 10 mm ZrO_2 볼을 사용하였다. 이 때, 각각 가스제와 바인더 역할을 하는 dibutyl phthalate 와 polyvinyl butyral (PVB) 을 첨가하여 슬러리의 점성과 연성을 증가시킨다. 이후, 균일하게 분산된 슬러리를 테이프 캐스팅 장비 (tape casting machine; Hansung Tech.) 에 투입하여 얇은 연료극 지지층 (anode supporting layer, ASL) 시트를 제작한다. 연료극 기능층 (anode functional layer, AFL) 시트는 앞선 ASL 시트 제작 방법과 같지만 PMMA 분말은 투입하지 않는다. 제작된 ASL, AFL 시트는 열 압착기 (hydraulic press machine; Hansung Tech.) 를 이용하여 60°C, 5 MPa 로 라미네이션을 진행하여 0.8 mm 두께의 연료극 기판을 제작하였다.

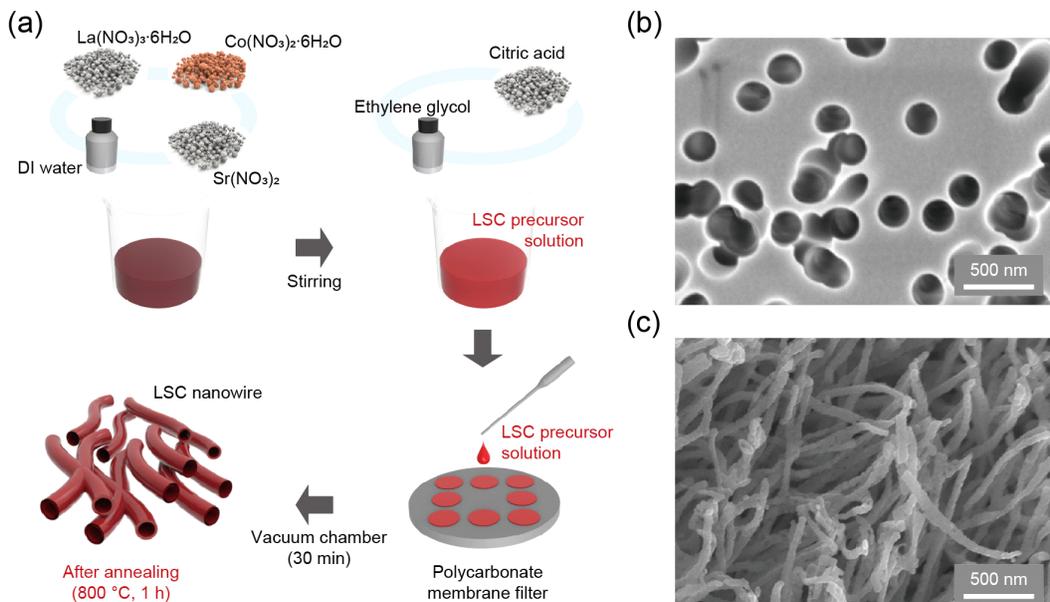


Figure 1. (a) Schematics of the fabrication process of LSC nanowire from polycarbonate membrane filter. SEM images of (b) the top surface of polycarbonate membrane filter and (c) the as-sintered LSC nanowire.

준비된 연료극 기판 위에 스크린 프린팅 공정을 이용하여 YSZ 전해질 층을 증착하고 1350°C 3 시간 동안 공소결을 진행하였다. 소결된 기판 위에 차례로 Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ} (CGO) 버퍼 층과 LSC 공기극 층을 전기분사 증착 장비 (Electrospray machine; NanoNC)를 사용하여 제작하였고 버퍼 층은 1250 °C 2시간, 공기극 층은 950 °C 1시간 동안 열처리를 진행하여 셀을 완성하였다. 이 때, 상용 LSC 분말 (Kceracell) 과 합성한 나노와이어 구조 LSC 분말을 혼합하여 사용하였다.

전기분사 증착 공정에서는 ethyl alcohol을 용매로 사용하였으며, 버퍼 층 증착의 경우 용매 대비 2 wt% 비율의 CGO 분말을 2 wt% PVB 바인더와 함께 투입하였다. 버퍼 용액의 전기분사 증착 조건은 110 °C 기판온도, 7.0 kV 인가 전압, 5 cm 노즐 팁-기판 거리, 0.2 ml·h⁻¹ 유량이었다. 반면, 공기극 증착의 경우 용매 대비 10 wt% 비율의 LSC 분말을 10 wt% polyvinylpyrrolidone (PVP) 바인더와 함께 투입하였으며, 공기극 용액의 전기분사 증착 조건은 110 °C 기판온도, 6.4 kV 인가 전압, 4 cm 노즐 팁-기판 거리, 0.2 ml·h⁻¹ 유량이었다.

제작한 셀의 전기화학 성능 측정을 위해 연료극에는 3% H₂O를 포함하고 있는 H₂ 를, 공기극에는 air 를 200 mL·min⁻¹ 유량으로 흘려주었다. 셀의 전류-전압-전력 곡선과 전기화학 임피던스 결과는 전기화학 분석기(IviumStat; Ivium Technologies)로 측정하였

다. 교류 임피던스 분석은 1 × 10⁶에서 1 × 10⁻¹ Hz 까지 측정하였으며, 각 저항 성분의 정량 분석을 위해 distribution of relaxation times (DRT) 분석을 진행하였다. DRT 분석의 경우 FTKREG 소프트웨어를 통해 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환 및 역변환 과정을 거쳐 solution norm 과 misfit norm 의 값이 최소가 되는 L-Curve 코너의 값을 최적화된 정규화 파라미터로 사용하여 계산하였다(Weese, 1992; Shin et al., 2021). 셀 및 나노와이어의 미세구조는 주사전자현미경 (scanning electron microscopy, SEM; MAIA 3 LM; TESCAN) 으로 분석하였으며, 합성된 나노와이어의 격자구조 및 비표면적은 X선 회절 분석기 (X-ray diffractometer, XRD; Smartlab; Rigaku) 와 비표면적 기공률 측정장치 (BET surface area analyzer; BELSORP-max; MicrotracBEL) 로 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

나노와이어 구조 LSC 제작 과정은 그림 1(a)에 나타내었다. 탈이온수에 금속질산염과 시트르산, 에틸렌글리콜을 차례로 첨가하여 LSC 전구체 용액을 제작하였다. LSC 전구체 용액을 polycarbonate 멤브레인 필터 위에 도포하고 30분 동안 진공 챔버에 넣어 필터 안쪽 빈 공간을 LSC 전구체 용액으로 채워준다. 그림 1(b)는 사용한 polycarbonate 멤브레인 필터의 표면 SEM 결과이며, 200 nm 직경의 구멍들이 존재한다.

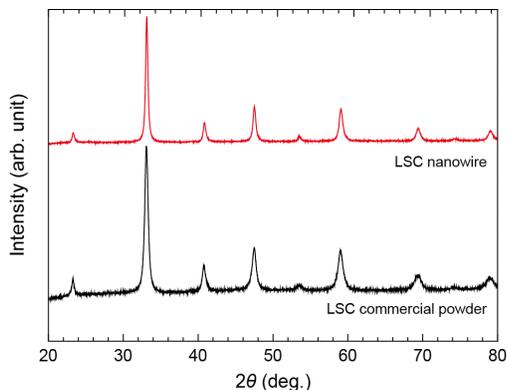


Figure 2. XRD results of LSC commercial powder and LSC nanowire after 800 °C, 1 h.

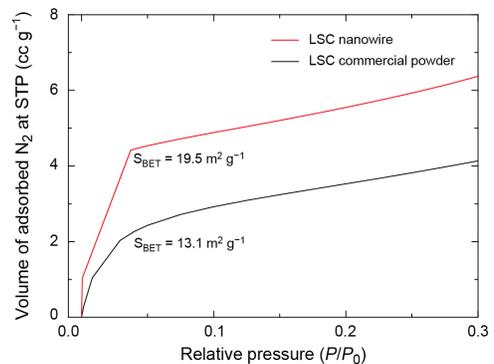


Figure 3. BET results of LSC commercial powder and LSC nanowire after 800 °C, 1 h.

이후, 80 °C에서 8시간과 800 °C에서 1시간 동안 열처리를 거쳐 LSC 나노와이어를 생성한다. 이 때, polycarbonate의 열분해 온도는 455 °C 인 관계로 열처리 과정을 거치며 polycarbonate 멤브레인 필터는 분해되어 제거되며 LSC 나노와이어만 남게 된다. 그림 1(c)는 제작된 LSC 나노와이어의 SEM 결과이다. LSC 전구체 용액이 polycarbonate 멤브레인 필터 안쪽까지 균일하게 침투되어 LSC 나노와이어가 형성되었음을 알 수 있다.

제작된 LSC 나노와이어의 상 형성 및 구조 특성을 분석하기 위해 XRD 분석과 BET 분석을 진행하였으며 상용 LSC 분말과 그 결과를 비교하였다. 그림 2는 LSC 나노와이어와 상용 LSC 분말의 XRD 결과를 나

타낸다. 두 분말의 XRD 결과에서는 정확한 화학양론비의 LSC 피크만 나타나고 있으며 추가적인 이차상은 관찰되지 않았다. 따라서, LSC 나노와이어는 800 °C 1시간 소결로도 충분히 합성될 수 있음을 확인하였다. 다음으로, 제작된 LSC 나노와이어의 비표면적 측정을 위해 N_2 가스의 흡착 정도를 통해 결과를 얻는 BET 분석을 진행하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. LSC 나노와이어의 비표면적은 $19.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 를 기록하였고, 이는 상용 LSC 분말의 비표면적인 $13.1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 대비 49% 증가한 결과였다. 고체산화물 연료전지는 전극 표면에서 전기화학 반응이 일어나기 때문에 전극의 비표면적이 커지면 일반적으로 분극 저항이 감소하고 전기화학 성능이 향상된다. 따라서, 우리는 LSC 나노와이어를 고체산화물 연료전지 전극에 적용하여 연료전지 성능을 향상시키고자 했다.

LSC 나노와이어의 전기화학적 특성을 확인하고자 두 개의 다른 셀을 제작하였다. 두 셀은 테이프 캐스팅 공정으로 제작된 연료극 기반, 스크린 공정으로 제작된 YSZ 전해질 층, 전기분사 증착 공정으로 제작된 CGO 버퍼 층과 LSC 공기극 층 구조를 갖고 있으며, 공기극을 제외한 나머지 구조는 두 셀이 동일하다. 공기극 제작을 위한 전기분사 증착 공정은 그림 4(a)에 나타내었으며, 제작된 SOFC의 단면 삽화 및 SEM 결과는 각각 그림 4(b)와 (c)에 나타내었다. SEM 결과에서 보이듯이, 치밀한 구조의 전해질과 다공성 공기극이 균일하게 제작된 것을 알 수 있다. 상용 LSC 분말로만 제작된 셀을 앞으로 'RE cell' (SOFC cell with reference

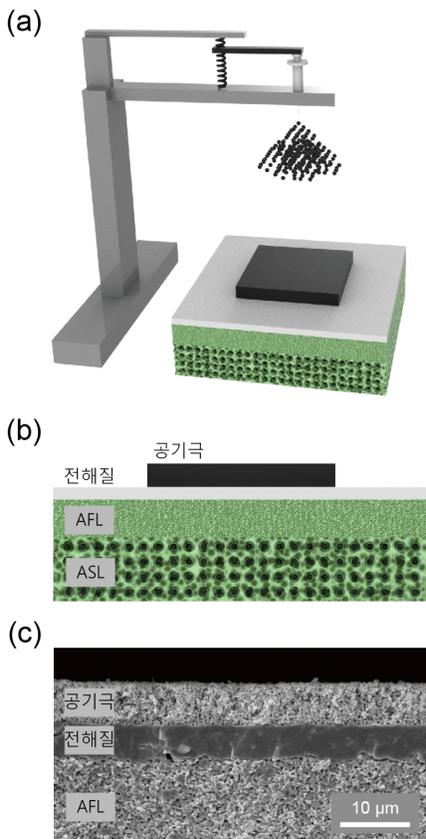


Figure 4. (a) Schematic of electro-spray deposition process. (b) Cross-sectional schematic of SOFC. (c) Cross-sectional SEM image of fabricated SOFC.

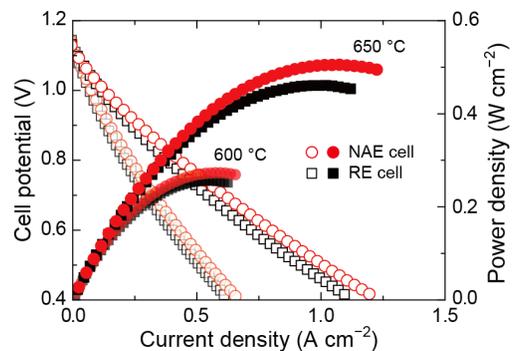


Figure 5. Voltage-current density-power density curves of NAE cell and RE cell at 650 °C and 600 °C.

electrode) 로, 5 wt%의 LSC 나노와이어와 95 wt%의 상용 LSC 분말로 제작된 셀을 'NAE cell' (SOFC cell with nanowire-assisted electrode) 로 서술하겠다. 그림 5는 RE cell 과 NAE cell 의 전압-전류밀도-전력밀도 곡선 결과를 나타내고 있다. 두 셀에 동일한 유량의 air와 H₂ (200 mL·min⁻¹)를 각각 공기극과 연료극에 흘려주었으며, 이외의 측정 조건은 동일하였다. 두 셀 모두 1.1 V 이상의 개방회로 전압을 기록하여 스크린 프린팅으로 제작된 전해질 층이 치밀함을 확인하였다. NAE cell 은 작동 온도 650 °C에서 0.506 W·cm⁻²의 최고전력밀도(peak power density, PPD)를 기록하였고 이는 RE cell (0.461 W·cm⁻²) 대비 약 10% 증가한 결과이다. NAE cell 은 모든 작동 온도에서 RE cell 대비 향상된 PPD를 기록하였다. LSC 나노와이어의 비표면적이 상용 LSC 분말 대비 큰 점과 나노와이어의 구조적 특징인 연결도의 향상이 셀 성능 향상에 영향을 미친 것으로 보인다. 우리는 추가 임피던스 분석을 통해 저항 성분을 정량적으로 분석하고자 하였다.

그림 6(a)는 NAE cell 과 RE cell 의 650 °C, 개방회로전압 조건에서의 전기화학 임피던스 결과를 나타낸다. NAE cell 은 0.290 Ω·cm² 옴릭 면비저항(area-specific ohmic resistance, ASR_{ohm})과 1.030 Ω·cm² 분극 면비저항(area-specific polarization resistance, ASR_{pol})을 기록하였으며, 이는 RE cell 의 결과 (0.290 Ω·cm², 1.135 Ω·cm²) 대비 동일한 ASR_{ohm}과 9% 감소한 ASR_{pol}을 나타낸다. 두 셀의 전해질 두께가 동일하기 때문에 ASR_{ohm}은 동일하게 측정되었으며 공기극의 미세구조 차이가 ASR_{pol}의 감소를 야기한 것으로 볼 수 있다. 특히, LSC 나노와이어 첨가에 의해 향상된 전극의 비표면적과 향상된 이온 및 전자 전도 경로가 두 셀의 전기화학 임피던스 차이를 만들어냈다. 하지만, 그림 6(a)에서 보이는 임피던스 결과를 복소평면에 나타낸 Nyquist plot에서는 저항 성분의 정량적인 분리가 애매하다는 단점이 있기 때문에 우리는 DRT 분석법을 이용하여 주파수 범위에 따른 저항 성분을 정량적으로 분리하고자 하였다. 우리가 사용한 DRT 분석은 'FTIKREG' 소프트웨어를 통해 Kramers-Kronig 관계식으로부터 임피던스 응답의 실

수부와 허수부 영역에 대한 데이터를 대입하는 방식으로 수행되었다(Weese, 1992; Shin et al., 2021). 그림 6(b)는 그림 6(a)의 임피던스 결과에 대한 DRT 분석 결과를 나타낸다. 저항 성분들은 주파수의 범위에 따라 분리하였으며 0.1 - 10 Hz 영역은 R_{LF} (low-frequency resistance), 10 - 10³ Hz 영역은 R_{MF} (mid-frequency resistance), 10³ - 10⁵ Hz 영역은 R_{HF} (high-frequency resistance)로 나타내었다. 10 Hz 보다 작은 저주파수 영역은 가스 확산에 의한 농도 손실 저항을 나타내며, 중간 주파수 영역은 산소 흡착/탈착과 분자/이온간 전이에 따른 저항을 나타내고, 고주파수 영역은 전하 전달 저항을 나타낸다(Wang et al., 2024; Taubmann et al., 2023). 650 °C, 개방회로전압 조건에서 NAE cell 은 0.481 Ω·cm²의 R_{LF}, 0.450 Ω·cm²의 R_{MF}, 0.099 Ω·cm²의 R_{HF}를 각각 기록하였으며, RE cell 은 0.500 Ω·cm²의 R_{LF}, 0.530 Ω·cm²의 R_{MF}, 0.105 Ω·cm²의 R_{HF}를 각각 기록하였다. 두 셀의 R_{LF}와 R_{HF}는 비슷하였지만 NAE cell 은 RE cell 대비 15% 감소된 R_{MF}를 기록하였다. LSC 나노와이어에 의한 비표면적 향상이 산소 환원반응이 일어나는 two-phase boundary 영역을 증가시켰고, 산소환원반응이 관여하는 저항성분인 R_{MF}가 감소하여 셀 성능이 향상된 것으로 분석된다. 결국, 소량의 LSC 나노와이어 첨가로 전극의 전기화학

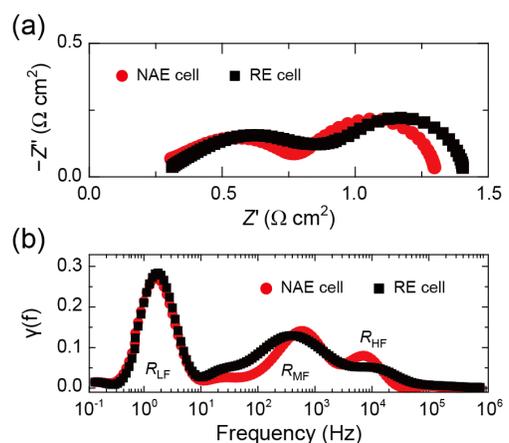


Figure 6. (a) Nyquist plots and (b) the DRT curves obtained from the electrochemical impedance results of NAE cell and RE cell at open-circuit voltage and 650 °C.

특성을 향상시켰으며 고체산화물 연료전지 성능을 증가시켰다.

4. 결론

본 연구에서는 polycarbonate 멤브레인 필터를 나노템플릿으로 활용하여 LSC 나노와이어를 제작하고, 상온·상압 연속공정인 전기분사 증착 공정을 이용하여 LSC 나노와이어가 첨가된 다공성 공기극 층을 제작함으로써 고체산화물 연료전지의 성능을 향상시킬 수 있음을 보고하였다. Pechini법으로 제작된 LSC 전구체 용액을 진공 챔버를 이용하여 polycarbonate 멤브레인 필터의 구멍에 침투시켰으며, 후속 겔화 및 소결 공정으로 LSC 나노와이어를 합성하였고 polycarbonate 나노템플릿을 제거하였다. 상용 LSC 분말로 구성된 전극과 LSC 나노와이어가 첨가된 전극의 전기화학 성능을 비교하고자 셀을 제작하였다. 제작된 NAE cell 은 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 RE cell 대비 10% 증가한 PPD 를 기록하였으며, 개방회로전압 조건에서 9% 감소한 ASR_{pol} 을 기록하였다. 우리가 제작한 LSC 나노와이어가 첨가된 공기극이 셀의 전기화학 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 DRT 분석을 진행하였다. DRT 분석 결과 NAE cell 이 RE cell 대비 15% 감소된 R_{MF} 를 기록하였고, 이는 LSC 나노와이어 첨가에 의한 two-phase boundary 영역 증가에 기인한 것이었다. 나노템플릿 구조를 이용한 나노와이어 제작공정과 에어로졸 기반 상온 상압 연속공정의 결합이 고체산화물 연료전지의 상용화 및 전극 구조 고도화 기술의 가이드 라인이 되기를 기대한다.

감사의 글

이 연구는 국립금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2022년도)

References

Dolman, A. J., Belward, A., Briggs, S., Dowell, M., Eggleston, S., Hill, K., Richter, C., and

Simmons, A. (2016). A post-Paris look at climate observations, *Nature Geoscience*, 9, 646.

<https://doi.org/10.1038/ngeo2785>

Minh, N. Q. (1993). Ceramic fuel cells, *Journal of American Ceramic Society*, 76, 563-588. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03645.x>

Ormerod, R. M. (2003). Solid oxide fuel cells, *Chemical Society Reviews*, 32, 17-28. <https://doi.org/10.1039/B105764M>

Kim, J. H., Shin, S. S., Noh, H. S., Son, J.-W., Choi, M., and Kim, H. (2017). Tailoring ceramic membrane structures of solid oxide fuel cells via polymer-assisted electrospray deposition, *Journal of Membrane Science*, 544, 234-242.

<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.09.027>

Wachsmann, E. D., and Lee, K. T. (2011). Lowering the temperature of solid oxide fuel cells, *Science*, 334, 935-939.

<https://doi.org/10.1126/science.1204090>

Zhang, Y., Shen, L., Wnag, Y., Du, Z., Zhang, B., Ciucci, F., and Zhao, H. (2022). Enhanced oxygen reduction kinetics of IT-SOFC cathode with $\text{PrBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}/\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{1.9}\text{O}_{2-\delta}$ coherent interface, *Journal of Materials Chemistry A*, 10, 3495-3505.

<https://doi.org/10.1039/D1TA09615J>

Ding, D., Li, X., Lai, S. Y., Gerdes, K., and Liu, M. (2014). Enhancing SOFC cathode performance by surface modification through infiltration, *Energy & Environmental Science*, 7, 552-575.

<https://doi.org/10.1039/C3EE42926A>

Ahn, M., Lee, J., and Lee, W. (2017). Nanofiber-based composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, 353, 176-182.

- <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.151>
- Kim, S. J., Choi, M., Mun, T., Woo, D. Y., and Lee, W. (2023). Infiltrated nanofiber-based nanostructured electrodes for solid oxide fuel cells, *International Journal of Energy Research*, 1, 7410245. <https://doi.org/10.1155/2023/7410245>
- Jaworek, A. (2007). Electrospray droplet sources for thin film deposition, *Journal of Materials Science*, 42, 266-297. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0842-9>
- Rietveld, I. B., Kobayashi, K., Yamada, H., and Matsushige, K. (2006). Electrospray deposition, model, and experiment: toward general control of film morphology, *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(46), 23351-23364. <https://doi.org/10.1021/jp064147+>
- Jaworek, A., and Sobczyk, A. T. (2008). Electrospraying route to nanotechnology: An overview, *Journal of Electrostatics*, 66(3-4), 197-219. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2007.10.001>
- Li, G., Kim, J. H., Son, J.-W., Choi, M., Kim, H., and Shin, S. S. (2022). Crack-free cathode of intermediate-temperature solid oxide fuel cells via electrospray deposition, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19(1), 242-248. <https://doi.org/10.1111/ijac.13853>
- Shin, S. S., Kim, J. H., Li, G., Lee, S. Y., Son, J.-W., Kim, H., and Choi, M. (2019). A highly activated and integrated nanoscale interlayer of cathodes in low-temperature solid oxide fuel cells via precursor-solution electrospray method, *International Journal of Hydrogen Energy* 44(9), 4476-4483. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.143>
- Shin, S. S., Kim, J. H., Jeong, H., Park, M. Y., Yoon, K. J., Son, J.-W., Choi, M., and Kim, H. (2021). Vapor-mediated infiltration of nanocatalysts for low-temperature solid oxide fuel cells using electrosprayed dendrites, *Nano Letters* 21(24), 10186-10192. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02872>
- Weese, J. (1992). A reliable and fast method for the solution of Fredholm integral equations of the first kind based on Tikhonov regularization, *Computer Physics Communications*, 69(1), 99-111. [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(92\)90132-1](https://doi.org/10.1016/0010-4655(92)90132-1)
- Shin, S. S., Kim, J.-S., Choi, S., Ji, H.-I., Yoon, K. J., Lee, J.-H., Chung, K. Y., and Kim, H. (2021). Quantitative determination of lithium depletion during rapid cycling in sulfide-based all-solid-state batteries, *Chemical Communications*, 57, 3453-3456. <https://doi.org/10.1039/D0CC08367D>
- Wang, Y., Lyu, Z., Li, H., Han, M., and Sun, K. (2024). Analysis of polarization characteristics and optimal operating conditions for industrial-sized SOFC based on comparison with button cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 50B, 1308-1323. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.277>
- Taubmann, J., Sun, X., Rizvandi, O. B., and Frandsen, H. L. (2023). Advanced insights into gas conversion and diffusion impedance of solid oxide cells by 2D multi-physics modelling, *Journal of Power Sources*, 588, 233739. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233739>