



• 특집 • NetZero 2050 핵심 에너지 시스템을 위한 녹색 생산 기술
(Green Manufacturing for Energy Systems in the era of NetZero 2050)

저온형 고체산화물 연료전지를 위한 이트리아 지르코니아 공동 스퍼터링 환원극 기능층 제작

Fabrication of Yttria and Zirconia Co-sputtering Cathode Functional Layer for Low Temperature Solid Oxide Fuel Cells

이태현¹, 오승봉¹, 정다빈², 홍순욱^{1,#}

Taehyeon Lee¹, Seungbong Oh¹, Davin Jeong², and Soonwook Hong^{1,#}

¹ 전남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chonnam University)

² 전남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chonnam University)

Corresponding Author / E-mail: Shong@jnu.ac.kr, TEL: +82-62-530-1686

ORCID: 0000-0003-1063-2995

KEYWORDS: Solid oxide fuel cell (고체산화물 연료전지), Co-sputtering (공동 스퍼터링), Cathode functional layer (CFL), Yttria stabilized zirconia (이트리아 안정화 지르코니아), Thin-film fabrication process (박막제작공정), Grain control (결정립 제어)

A yttria-stabilized zirconia (YSZ) cathode functional layer (CFL) was fabricated using a co-sputtering process to improve the oxygen reduction reaction (ORR) in solid oxide fuel cells (SOFCs). To optimize the yttria molar percentage and achieve a nano-granular structure with enhanced grain boundary density, the DC sputtering power for the metallic yttrium target was varied at 10, 30, and 50 W. Structural and compositional analyses were performed using scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), atomic force microscopy (AFM), and X-ray diffraction (XRD). The results indicated that a DC power of 30 W resulted in a well-developed grain structure with high grain boundary density and an yttria composition close to the optimal molar percentage of 8-10 mol %. Under these optimized conditions, the SOFC with the co-sputtered YSZ CFL achieved a maximum power output of 9.22 mW/cm² at 450°C, representing approximately a 43% enhancement compared to the reference cell. This highlights the significant potential of co-sputtering for future low-temperature SOFC applications.

Manuscript received: August 27, 2025 / Revised: September 29, 2025 / Accepted: October 19, 2025

NOMENCLATURE

SOFC	= Solid Oxide Fuel Cell
CFL	= Cathode Functional Layer
YSZ	= Yttria-stabilized Zirconia
ORR	= Oxygen Reduction Reaction
Polarization Curve	= Performance Curve of Fuel Cell
EIS	= Electrochemical Impedance Spectroscopy
SEM	= Scanning Electron Microscope

XPS	= X-ray Photoelectron Spectroscopy
AFM	= Atomic Force Microscopy
XRD	= X-ray Diffraction

1. 서론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 수소와 산소의 전기화학적 반응을 통해 전기를 생산하는 고효율 친환경

에너지 변환 기술이다. 수소, 합성가스, 바이오가스 등 다양한 기체가 연료로써 활용이 가능하며, 높은 에너지 변환 효율을 통해 전력 생산 과정에서 발생하는 손실을 최소화하고 자원 효율을 극대화할 수 있다[1-3]. 특히, 고온에서 작동하는 특징으로 인해, 연료의 전처리 없이도 다양한 탄화수소 연료를 활용할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 열 병합 발전 시스템과 결합할 경우 기존 발전 기술보다 월등히 높은 총 효율을 달성할 수 있다. 이러한 SOFC의 특징들은 미래 에너지 기술로써 높은 잠재력을 지니고 있다고 평가받고 있다. 그러나 SOFC는 800-1,000°C의 고온에서 작동되기 때문에 전해질과 전극 소재의 열화, 기체의 기밀 문제 등 다양한 기술적 한계로 인해 상용화가 지연되고 있다[4,5]. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 300-500°C 범위에서 구동 가능한 저온형 SOFC 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 저온 구동 시 산소 이온의 전도도가 감소하여 성능 저하가 발생하는 현상이 지적되어 왔으며, 이를 극복하기 위해 전해질과 전극의 두께를 줄여 옴 손실(Ohmic Loss)을 최소화하는 박막 제작 공정이 널리 연구되고 있다[6-8]. 그럼에도 불구하고, 얇은 전해질과 전극을 이용한 저온형 SOFC에서도 전극-전해질 계면에서의 산소 환원 반응(Oxygen Reduction Reaction, ORR)에서 상당한 활성화 손실이 존재하며, 이는 계면 반응에 요구되는 높은 활성화 에너지 장벽에 기인하는 것으로 알려져 있다. 이를 개선하기 위해, 표면 반응성이 우수한 물질의 결정립계를 미세하게 제어하여 전해질-환원극 계면에 기능성 중간층(Interlayer)을 삽입하는 연구가 진행되고 있다[9-12]. 이는 계면에서의 ORR 활성화 손실을 완화하고 반응 속도를 높이는 것을 목표로 한다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 표면 반응 속도가 빠른 기능층의 물리적 제어가 저온형 SOFC 성능 향상에 중요한 전략이 될 수 있음을 시사한다. 따라서 본 연구에서는 SOFC의 전해질로 널리 사용되는 이트리아 안정화 지르코니아(Yttria-stabilized Zirconia, YSZ)를 환원극/전해질 계면에 박막제작공정(Thin-film Fabrication Process)을 적용하여 YSZ 환원극 기능층(Cathode Functional Layer, CFL)으로 제작하였다. 이후, YSZ CFL의 화학적 조성과 결정립 구조 제어가 SOFC 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 실험은 Yttrium과 Zirconium 금속 타겟을 이용하여 공동 스퍼터링(Co-sputtering) 공정을 수행하였으며, 제작 과정에서 Yttrium 타겟에 가해지는 DC Power를 조절하여 Yttria 조성비를 변환시키고, 이에 따른 결정립계 밀도와 결정립 성장 거동을 제어함으로써, 미세구조 변화가 SOFC 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 YSZ CFL 제작 방법

300 nm 두께의 YSZ CFL을 제작하기 위해 8 mol% 이트리아 안정화 지르코니아(YSZ) 기판(1 cm × 1 cm × 200 μm, MTI Corporation)을 전해질 지지체로 사용하였다. 그리고 Yttrium과

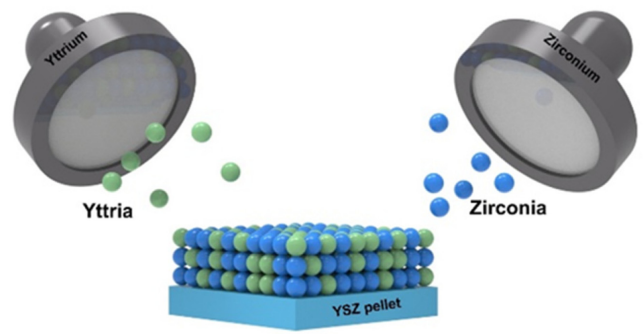


Fig. 1 Schematic of YSZ CFLs fabricated by co-sputtering technique with yttrium and zirconium targets

Zirconium 금속 타겟(MTI Korea)을 이용하여 산소와 아르곤 혼합 기체 분위기에서 공동 스퍼터링을 수행하였으며, 공정은 상온에서 0.93 Pa의 압력 하에 진행되었다. 아르곤은 40 sccm, 산소는 반응성 스퍼터링을 위해 5 sccm의 유량으로 주입되었다. Yttrium 타겟에는 10, 30, 50 W의 DC 전력이, Zirconium 타겟에는 고정된 100 W의 RF 전력이 각각 인가되었으며, 그 결과 YSZ 전해질 지지체의 환원극 표면 위에 YSZ CFL이 증착되었다. 이후 산화극과 YSZ CFL이 증착된 환원극에는 백금(Pt) 전극을 10 Pa의 공정 압력과 40 sccm의 아르곤 분위기에서 증착하였다. 그리고 제작된 YSZ CFL의 형태학적 특성과 화학적 조성을 확인하기 위해 단결정 실리콘(100) 웨이퍼(1 cm × 1 cm × 500 μm)를 사용하였다.

2.2 YSZ CFL 물성·미세구조 분석

YSZ CFL이 증착된 SOFC는 Scanning Electron Microscope (SEM)을 이용하여 단면 두께를 측정하고 표면의 특성을 관찰하였다. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)를 통해 Yttria와 Zirconia의 조성비를 분석하였으며, Atomic Force Microscope (AFM)을 사용하여 표면 조도와 미세구조를 분석하였다. 또한 X-ray Diffraction (XRD) 분석을 통해 결정상을 규명하고, Williamson and Hall Relationship을 이용하여 결정립 크기를 산출하였다.

2.3 SOFC 전기화학적 성능 평가

YSZ CFL이 증착된 SOFC 성능평가를 위해 본 연구실에서 자체 제작한 전기화학평가 시스템을 이용하여 수행하였다. SOFC 성능 테스트는 450°C에서 진행하였으며, Probe 시스템을 통해 전기적 특성을 측정하였다. 산화극에서는 수소 20 sccm의 유량을 공급하였고, 환원극은 공기를 공급받을 수 있도록 대기에 노출하였다. 이를 통해 SOFC의 전류-전압-전력 그래프(I-V-P Curve)의 특성을 취득하였으며, 저항 특성 분석을 위해 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) 기법을 사용하였다. EIS 측정은 1 MHz에서부터 1 Hz까지 수행하였고, Electrochemical Analyzer (Interface 1010E, Gamry Instrument)를 사용하였다.

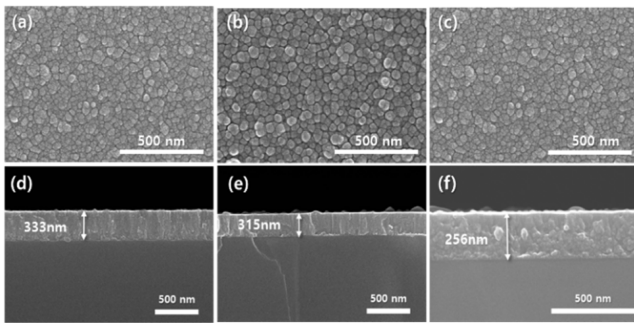


Fig. 2 (a)-(c) Surface and (d)-(f) corresponding cross-sectional SEM images of YSZ CFLs deposited under different DC power conditions: (a),(d) Y10Zr100; (b),(e) Y30Zr100; (c),(f) Y50Zr100

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조 및 표면 분석

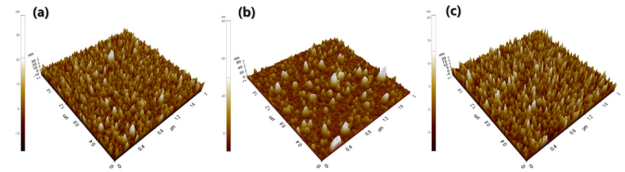
Fig. 2는 SEM을 통해 관찰한 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 YSZ CFL의 표면 미세구조(Surface Morphology)를 보여준다. 모든 증착 조건(DC 10, 30, 50 W)에서 박막이 균열 없이 조밀하게 형성되었으며, 뚜렷한 결정립과 결정립계가 전반적으로 균일하게 발달한 것을 관찰할 수 있었다. 증착된 기능층의 두께는 333, 315, 256 nm로 측정되었으며, 이는 평균적으로 약 300 nm의 두께에 해당한다. 약간의 두께 차이가 있음에도 불구하고 모든 조건에서 조밀하고 균일한 막이 형성되었으며, 이러한 YSZ CFL의 표면 특성을 통해, 공동 스퍼터링으로 ORR 활성화에 유리한 결정립계가 효과적으로 형성되었음을 확인하였다.

한편, 공동 스퍼터링 공정에서 설정한 세 가지 DC Power (10, 30, 50 W) 조건에 따른 YSZ CFL의 표면 조도는 Fig. 3의 AFM 분석을 통해 확인하였다.

분석 결과, Y10Zr100, Y30Zr100, Y50Zr100 샘플에서 각각 RMS (Root Mean Square Roughness) 값은 5.396, 6.863, 3.317 nm로 확인되었다. DC Power 변화에 따라 표면 거칠기 값에는 일부 차이가 존재하였으나, 이전 실험 결과에 비추어 볼 때, 수 나노미터(nm) 수준의 미미한 차이는 SOFC의 전기화학적 성능에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 따라서 DC Power 조건 변화에 따른 표면 조도의 차이는 YSZ CFL의 전기화학적 거동에 크게 작용하지 않는 것으로 판단하였다.

3.2 조성 및 결정성 분석

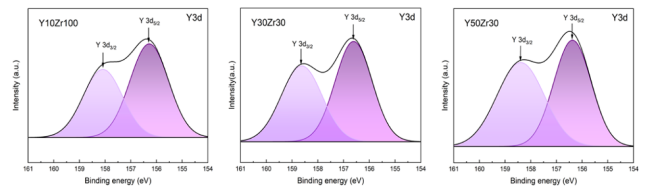
Table 1은 XPS를 통해 YSZ CFL 내 Yttrium, Zirconium, Oxygen의 원자 함량(Atomic Percentage)을 나타낸 것이다. Yttrium에 가해지는 DC Power가 10, 30, 50 W로 인가되었을 때 각 Yttrium의 조성은 1.57, 5.97, 9.59 at%를 보였으며, 이를 Ytria의 몰 농도로 환산하면 2.39, 9.52, 15.91 mol%에 해당한다. 또한 Yttrium 함량이 증가함에 따라 Zirconium의 상대적 비율은 점차 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 Yttrium 함량 증가에



(a) Y10Zr100 (b) Y30Zr100 (c) Y50Zr100
Fig. 3 Surface topography of YSZ CFLs analyzed by AFM

Table 1 Atomic composition of YSZ-CFLs deposited at different DC power

Atomic ratio [at%]	Y10Zr100	Y30Zr100	Y50Zr100
Y 3d	1.57	5.97	9.59
Zr 3d	32.59	30.18	26.62
O 1s	65.84	63.85	63.79



(a) Y10Zr100 (b) Y30Zr100 (c) Y50Zr100
Fig. 4 XPS spectra of Y 3d in YSZ CFLs deposited at different DC power

따른 치환 효과에 기인한 것으로 판단된다. 반면 Oxygen의 함량은 세 조건 간 큰 변화를 보이지 않아 DC Power 변화에 상대적으로 영향을 덜 받는 것으로 확인되었다.

이 중 Ytria의 최적 조성 범위로 알려진 8-10 mol%에 부합하는 값은 Yttrium 타겟에 30 W를 인가한 Y30Zr100 샘플에서 확인되었다. 반면, Y10Zr100, Y50Zr100 샘플은 각각 최적 범위보다 낮거나 높은 조성을 보여주었다. Fig. 4는 공동 스퍼터링 공정으로 증착된 YSZ CFL에서 Yttrium 원소의 결합에너지가 선행 보고된 문헌에서의 값과 일치함을 보여준다[13]. 또한 DC power 조건 변화에 따라 Y 3d 피크의 형상과 분포에 큰 차이가 없다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 증착 시 인가되는 전력이 Ytria의 화학적 결합 상태 변화에 영향을 주지 않음을 시사한다.

Fig. 5는 XRD를 이용한 YSZ CFL의 결정구조 및 상 분석 결과를 보여준다. 이 분석은 박막 내 분자들의 상(Phase)과 격자구조의 발달 정도를 규명하고 결정성의 성장 여부를 검증하기 위해 수행되었다. 그 결과, (111), (200), (220) 등 YSZ 특유의 회절 피크가 확인되었으며, DC Power 크기와 무관하게 모든 시편에서 높은 결정성이 나타났다.

$$\Delta(2\theta)\cos\theta = \frac{\lambda}{D} + 2\varepsilon\sin\theta$$

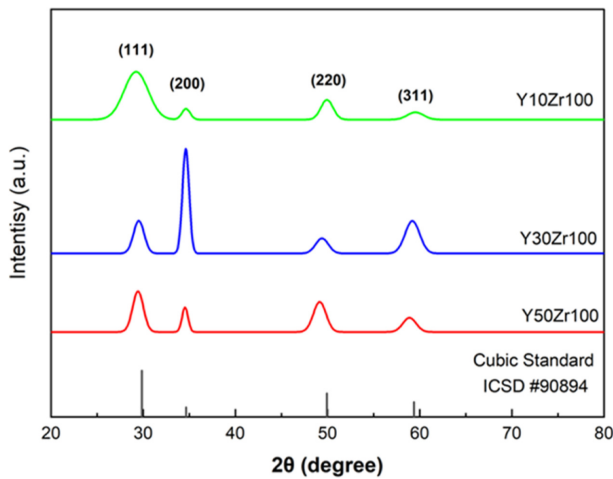


Fig. 5 XRD analysis of YSZ CFLs under different DC power conditions

또한 Williamson and Hall Relationship을 적용하여 결정립 크기를 산출하였다. $\Delta(2\theta)$ 는 FWHM이고, λ 는 방사선의 파장, D 는 결정립의 크기, 그리고 ε 는 미세 변형률을 의미한다. 이를 사용하여 Y10Zr100, Y30Zr100, Y50Zr100 샘플에서 각각 11.37, 14.48, 15.36 nm의 결정립 크기를 산출하였다. 일반적으로 DC Power가 낮을수록 기판에 도달하는 입자의 운동에너지가 감소하여 핵생성이 빠르게 일어나지만 성장 시간이 충분하지 않아 결정립 크기가 작게 형성되는 경향을 보인다. 이는 단위 면적당 결정립계 밀도를 증가시키며, 이러한 미세구조적 특징이 ORR을 촉진하는데 기여할 수 있음이 문헌에 보고된 바 있다[9-12]. 이에 본 연구에서도 높은 결정립계 밀도를 확보함으로써 산소 환원 반응의 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단하였다.

3.3 전기화학적 특성 평가

Fig. 6(a)는 공동 스퍼터링 공정을 이용한 서로 다른 DC power를 통해 YSZ CFL이 증착된 SOFC의 전류-전압-전력 그래프(I-V-P Curve)를 보여준다. 450°C의 작동온도에서 YSZ CFL이 증착되지 않은 Pt Reference SOFC의 경우 약 6.45 mW/cm²의 출력 밀도가 측정되었으며, Y30Zr100 샘플은 약 9.22 mW/cm²의 성능을 달성하였다. 이러한 성능 향상은 앞서 분석한 바와 같이 최적의 Yttria 도핑 농도와 동시에 높은 결정립계 밀도에 의해 ORR의 반응 속도가 촉진되었음을 시사한다고 볼 수 있다. 반면 Y10Zr100, Y50Zr100 샘플은 각각 6.87, 6.18 mW/cm²의 성능이 측정됐는데, Yttria 도핑 비율이 최적 범위에서 벗어남에 따라 전반적으로 SOFC 성능이 저하되는 경향을 보였다. 그러나 Y10Zr100이 Y50Zr100보다 더 우수한 성능을 보이는 이유는, 상대적으로 높은 결정립계 밀도가 산소 환원 반응 활성화를 유도했기 때문으로 추측된다.

보다 구체적인 성능 향상 요인을 확인하기 위하여 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 6(b)에 제시하였다. Pt Reference와 Y30Zr100 샘플은

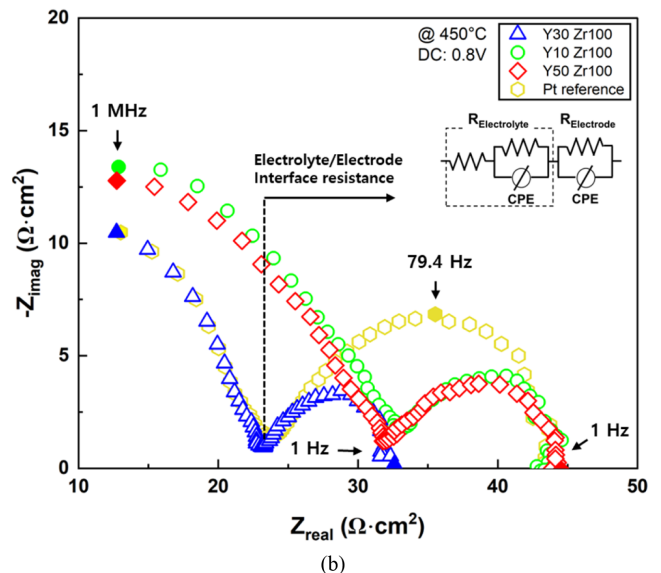
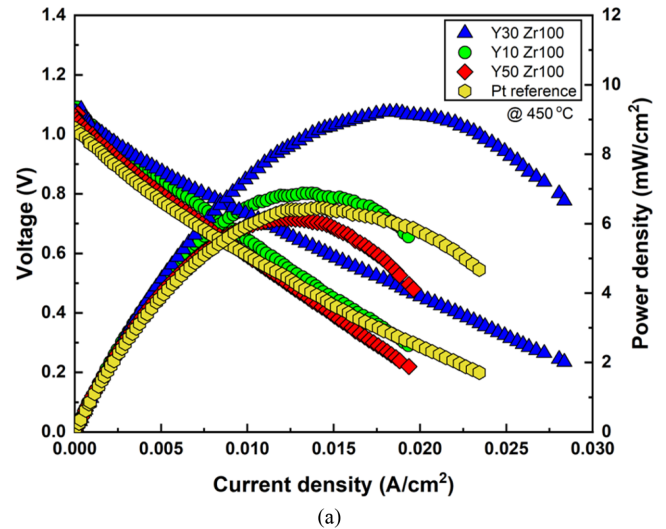


Fig. 6 Electrochemical characterization of SOFCs with YSZ cathode functional layer. (a) Polarization curves of SOFC under different DC power conditions and (b) EIS spectra for of SOFC under different DC power conditions at 450°C

약 23 Ω·cm² 부근에서 Second Semicircle이 시작되는 것을 확인하였다. 반면 Y10Zr100 및 Y50Zr100 샘플에서는 약 32-33 Ω·cm²에서 First Semicircle이 형성되었다. 모든 YSZ CFL의 두께가 약 300 nm로 유사함에도 불구하고 옴 손실이 크게 증가한 것은 두 가지 요인이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 첫째, 비최적(Non-optimal) 도핑 농도에 따른 이온 전도도의 본질적인 저하이다. 상대적으로 낮거나 높은 이트리아(Yttria) 도핑 함량은 산소 공공(Oxygen Vacancy)의 부족 또는 과잉을 초래하여 격자 왜곡을 유발하고, 그 결과 산소 이온의 이동성을 감소시킨다. 이는 YSZ의 이온 전도도가 특정 농도(약 8-10 mol%)에서 최대치를 보인 후 급격히 감소한다는 제일원리 계산 연구 결과와 일치한다[14]. 둘째는 미세구조, 특히 결정립계(Grain Boundary) 밀도 증가의 영향이다. 실제로 Y10, Y30,

Y50 샘플의 결정립 크기는 각각 11.37, 14.48, 15.36 nm로 산출되었는데, Y10 샘플의 경우 상대적으로 작은 결정립 크기를 가지는 것은 단위 부피당 더 많은 결정립계가 형성되었음을 시사한다. 이처럼 이온 전도에 저항으로 작용하는 결정립계의 밀도가 과도하게 증가한 것이 저항 증가에 기여한 것으로 판단된다. 따라서 농도 불일치로 저하된 이온 전도도와 미세구조적으로 과도하게 증가한 결정립계 저항이 복합적으로 작용하여 Y10Zr100 및 Y50Zr100 샘플에서 공통으로 관찰된 옴 저항 증가의 주된 원인으로 판단된다. 일반적으로 SOFC에서, EIS Spectra의 고주파수 영역에 나타나는 시작점은 주로 전해질 자체의 저항(Ohmic Loss)을 반영하며, 저주파수 영역에 나타나는 반원의 지름은 전해질/전극 계면에서 발생하는 활성화 손실을 반영한다. 특히, 산화극보다는 환원극 전해질 계면의 영향이 지배적인 것으로 알려져 있다[10,15]. 측정된 EIS Spectra에서 Y30Zr100 샘플이 가장 작은 Second Semicircle을 나타냈으며, 이어서 Y10Zr100, Y50Zr100, Pt Reference 순으로 작은 Second Semicircle 경향을 보였다. 이러한 결과는 결정립계 밀도가 높은 샘플일수록 계면 저항이 크게 감소하고, 이에 따라 더 높은 전력 밀도를 형성함을 의미한다. 이는 앞서 SEM, XPS 및 XRD 분석을 통해 확인한 바와 같이, DC Power 변화에 따른 YSZ 기능층의 결정립계 밀도, Ytria의 조성 변화 및 결정성 발달과 밀접하게 연관되며, 이러한 구조적, 화학적 특성이 EIS에서 관찰되는 전기화학적 거동을 뒷받침한다. 따라서 최적의 결정립계 밀도와 조성비는 SOFC 성능 향상에 결정적인 요인으로 작용할 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 공동 스퍼터링 공정을 이용해 Yttrium 타겟에 인가되는 DC Power를 변화시켜 YSZ CFL의 Ytria 조성비와 결정립계 밀도 변화를 유도하고, 이러한 요인들이 SOFC 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 연구결과, DC Power 조건에 따라 YSZ CFL의 화학 조성과 미세구조를 효과적으로 제어할 수 있었으며, 특히, 최적의 DC Power 조건에서 Ytria조성비와 결정립계 밀도가 효과적으로 제어되며, 조밀한 결정립 구조가 형성됨을 확인할 수 있었다. 이러한 미세구조적 특성은 이온전도 경로를 원활히 확보하게 하여 ORR의 활성화를 촉진함을 확인하였고 전류-전압-전력 그래프(I-V-P Curve), EIS 분석 결과를 통해, Ytria조성비 최적화와 조밀한 결정립계 구조는 전극-전해질 계면 저항을 효과적으로 감소시켜 ORR의 반응 속도 개선에 기여할 수 있음을 확인하였다. 결과적으로 YSZ CFL이 증착된 SOFC의 전력 밀도가 크게 향상되었으며, 특히 Y30Zr100 샘플에서 Pt Reference보다 43% 향상된 9.22 mW/cm^2 의 출력이 관찰되었다. 반면 최적화되지 않은 DC Power의 조절은 Ytria의 과잉 혹은 결핍을 발생시킨다. 또한 DC Power조절을 통해 결정립계 밀도 변화가 발생할 수 있으며,

결정립계 밀도 저하는 성능의 감소로 이어질 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 YSZ CFL 설계 시 Ytria 도핑 농도의 정밀 제어와 함께 결정립계 밀도 최적화가 필수적인 주요 인자임을 보여준다. 더 나아가 이러한 접근은 저온 구동 SOFC에서 환원극 활성화 손실을 줄여 ORR을 촉진하는 효과적인 전략으로 활용될 수 있으며, 고효율 SOFC 개발을 위한 핵심적인 지침을 제공한다. 따라서 본 연구는 차세대 SOFC의 고성능화와 상용화를 앞당기는 데 있어 중요한 학술적, 실용적인 의미를 가진다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 20018075).

REFERENCES

- Haile, S. M., (2003), Fuel cell materials and components, *Acta Materialia*, 51(19), 5981-6000.
- Stambouli, A. B., Traversa, E., (2002), Fuel cells, an alternative to standard sources of energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(3), 295-304.
- Yamamoto, O., (2000), Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects, *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2423-2435.
- Wachsman, E. D., Lee, K. T., (2011), Lowering the temperature of solid oxide fuel cells, *Science*, 334(6058), 935-939.
- Steele, B. C., Heinzel, A., (2001), Materials for fuel-cell technologies, *Nature*, 414(6861), 345-352.
- Noh, H.-S., Yoon, K. J., Kim, B.-K., Je, H.-J., Lee, H.-W., Lee, J.-H., Son, J.-W., (2014), The potential and challenges of thin-film electrolyte and nanostructured electrode for yttria-stabilized zirconia-base anode-supported solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, 247, 105-111.
- de Souza, S., Visco, S. J., De Jonghe, L. C., (1997), Thin-film solid oxide fuel cell with high performance at low-temperature, *Solid State Ionics*, 98(1-2), 57-61.
- Ji, S., Cho, G. Y., Yu, W., Su, P.-C., Lee, M. H., Cha, S. W., (2015), Plasma-enhanced atomic layer deposition of nanoscale yttria-stabilized zirconia electrolyte for solid oxide fuel cells with porous substrate, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(5), 2998-3002.
- Kim, Y. B., Park, J. S., Gür, T. M., Prinz, F. B., (2011), Oxygen activation over engineered surface grains on YDC/YSZ interlayered composite electrolyte for LT-SOFC, *Journal of Power Sources*, 196(24), 10550-10555.

10. Hong, S., Lim, Y., Yang, H., Bae, J., Kim, Y.-B., (2017), Single-chamber fabrication of high-performance low-temperature solid oxide fuel cells with grain-controlled functional layers, *Journal of Materials Chemistry A*, 5(5), 2029-2036.
11. Bae, J., Hong, S., Koo, B., An, J., Prinz, F. B., Kim, Y.-B., (2014), Influence of the grain size of samaria-doped ceria cathodic interlayer for enhanced surface oxygen kinetics of low-temperature solid oxide fuel cell, *Journal of the European Ceramic Society*, 34(15), 3763-3768.
12. Lee, W., Jung, H. J., Lee, M. H., Kim, Y. B., Park, J. S., Sinclair, R., Prinz, F. B., (2012), Oxygen surface exchange at grain boundaries of oxide ion conductors, *Advanced Functional Materials*, 22(5), 965-971.
13. de Rouffignac, P., Park, J.-S., Gordon, R. G., (2005), Atomic layer deposition of Y₂O₃ thin films from yttrium tris (N, N'-diisopropylacetamidinate) and water, *Chemistry of Materials*, 17(19), 4808-4814.
14. Pornprasertsuk, R., Ramanarayanan, P., Musgrave, C. B., Prinz, F. B., (2005), Predicting ionic conductivity of solid oxide fuel cell electrolyte from first principles, *Journal of Applied Physics*, 98(10),
15. Shim, J. H., J.S., Holme, T. P., Crabb, K., Lee, W., Kim, Y. B., Tian, X., Gur, T. M., Prinz, F. B., (2012), Enhanced oxygen exchange and incorporation at surface grain boundaries on an oxide ion conductor, *Acta Materialia*, 60(1), 1-7.

**Tachyeon Lee**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is Sputtering and ALD for fuel cells.

E-mail: t_lee@jnu.ac.kr

**Seungbong Oh**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is ALD and Rotating disk electrode for fuel cells.

E-mail: sb_oh@jnu.ac.kr

**Davin Jeong**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is ultrasonic spray coating system for water electrolysis and ALD for fuel cells.

E-mail: djeong@jnu.ac.kr

**Soonwook Hong**

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is ALD and Sputtering for renewable energy conversion devices.

E-mail: shong@jnu.ac.kr