

고체산화물 연료전지용 460FC계 금속분리판에서 무전해 코발트 코팅 두께의 영향

오승주, 한동헌, 배진우*

한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학과 미래융합공학전공

Effect of Electroless Co Coating Thickness on 460FC-based Metallic Interconnects for Solid Oxide Fuel Cell

Seung-Ju Oh, Dong-Heon Han, Jin Woo Bae*

Future Convergence Engineering, School of Energy Materials and Chemical Engineering,
Korea University of Technology and Education

요약 460계 Fe-Cr 합금은 저렴하고 연속공정에 적합하여 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)의 금속분리판의 주요 소재로 사용되고 있다. 그러나 고온산화 조건에서 Cr의 확산 및 휘발과 Cr_2O_3 의 성장으로 인해 생성되는 가스는 SOFC의 에너지 효율을 감소시킨다. 이를 개선하기 위해 Co를 표면 위에 코팅하고 고온산화시켜 산화층(Co_3O_4)을 형성시키는 연구가 진행되었다. Co_3O_4 는 전기전도도가 우수하고, 고온산화 분위기에서 Cr의 분산과 Cr 산화물의 형성을 억제할 수 있기 때문에 금속분리판의 고온산화특성을 개선시킬 수 있다. 그러나 Co 산화층(Co_3O_4)의 경우도 코팅 두께가 두꺼워지면 생성되는 산화막의 두께도 두꺼워져 금속분리판의 전기적 특성이 감소하게 되므로 외부 산소의 침입을 최대한 억제하면서 높은 전기적 특성을 보이도록 Co 코팅 두께를 최적화해야 한다. 본 연구에서는 Co 코팅층을 무전해 도금방식으로 두께별로 460FC에 코팅하였고, 이를 750 °C에서 산화시켰다. Co 코팅 두께에 따른 460FC의 고온산화특성을 Normal scanning electron microscopy/Energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction, Area specific resistance 측정을 통해 비교분석하였다. 그 결과, Co 코팅 두께가 2 μm 일 때 Co_3O_4 가 치밀하게 형성되어 Cr이 표면으로 확산되는 것을 충분히 방지할 수 있었으며 Cr 산화물의 성장을 효과적으로 억제하여 가장 낮은 ASR 값을 나타냄을 알 수 있었다.

Abstract Fe-Cr steel alloys based on 460FC are economical ferritic stainless steel, suitable for conventional continuous casting, and used as metallic interconnects for solid oxide fuel cells (SOFCs). However, the diffusion and volatility of Cr and the growth of Cr oxide from the Fe-Cr alloy during oxidation at high temperature seriously reduce the power efficiency of SOFCs. Generally, a Co oxide layer not only has good electrical conductivity but also improves the oxidation property of metallic interconnects at high temperature by inhibiting Cr diffusion and retarding the growth of Cr oxide during oxidation at high temperature. However, as the thickness of the Co coating layer increases, the electrical properties of the metallic interconnects suffer. Therefore, the thickness of the Co coating layer should be optimized to minimize the intrusion of external oxygen and to keep the electrical properties stable. In this study, protective Co layers were deposited on a 460FC Fe-Cr alloy by electroless plating and then oxidized at 750°C. The oxidation characteristics of the Co-coated 460FC Fe-Cr alloy were analyzed and compared based on the thickness of the Co coating layer by normal scanning electron microscopy/energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction, and area specific resistance. We confirmed that the Co_3O_4 layer was densely formed when the thickness of the protective Co layer was 2 μm , which prevented Cr diffusion and the growth of Cr oxide at high temperature, resulting in a low ASR value (15.3419 $m\Omega \cdot cm^2$).

Keywords : Area Specific Resistance, Co-coated 460FC, Cr-based Oxide, Metallic Interconnects, Solid Oxide Fuel Cell

본 논문은 한국연구재단의 BK21 FOUR 사업과 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 국가혁신클러스터사업(P0015272), 한국기술교육대학교 공용장비센터의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

*Corresponding Author : Jin Woo Bae(Korea University of Technology and Education)

email: jwbae@koreatech.ac.kr

Received November 22, 2022

Revised December 19, 2022

Accepted January 6, 2023

Published January 31, 2023

1. 서론

전세계적으로 환경문제를 해결하기 위해 친환경 에너지에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있으며, 여러 친환경 에너지 중 하나인 연료전지는 효율이 좋고 친환경적으로 에너지를 생산할 수 있어 이에 대한 개발이 활발히 이루어지고 있다[1,2]. 고체산화물형 연료전지(SOFC, solid oxide fuel cell)는 산소 이온전도성이 있는 고체산화물을 전해질로 사용하여 500-1000 °C의 고온에서 운전되는 연료전지로서 고효율 발전과 열병합발전이 가능하다[3]. 분리판은 SOFC를 구성하는 여러 부품 중 핵심 구성품으로 다양한 기능을 수행해야 한다. 분리판은 산소와 수소가 물리적으로 혼합되는 것을 차단하면서 anode와 cathode에 기체를 전달하는 역할을 한다. 또한, 분리판은 고온의 압력에서 쉘을 지지할 수 있어야 하며 전극반응으로 생성·소모되는 전자가 통과할 수 있는 전도체 특성을 나타내야 한다. 따라서, 분리판은 이러한 기능을 수행하기 위해서 SOFC 구동 시에 높은 내식성, 열적 안정성, 전기전도성 등의 특성을 만족시켜야 한다[4].

이러한 특성을 만족시키는 분리판 중 금속분리판은 기존 세라믹 분리판과 비교하여 우수한 가공성, 경제성, 열전도성, 전기전도성을 가지고 있다. 일반적인 금속분리판으로 주로 사용되는 소재는 대부분 스테인리스강이다. 특히 Fe-Cr 합금인 460FC는 가공성과 경제성이 좋을 뿐만 아니라 고온면저항이 낮다고 보고되었다[4]. 그러나 고온산화 분위기의 연료전지 반응에서 Cr의 경우에 휘발성의 Cr을 형성하고, 생성된 Cr 기체가 표면 위로 확산하게 되어 anode 전극 표면에서 Cr_2O_3 를 형성하게 된다. Cr_2O_3 를 장기간 방치하게 되면 CrO_3 기체가 생성되고, 더욱이 연료전지 반응의 부산물인 수증기(H_2O)와 Cr_2O_3 이 반응하게 되면 $CrO_2(OH)_2$ 기체가 생성되어 Cr의 휘발을 촉진하게 된다. 이렇게 생성된 기체는 양극에 증착되면서 표면적을 감소시키기 때문에 SOFC의 출력 성능을 떨어뜨린다[5-7]. 따라서 Cr의 휘발을 효과적으로 방지하는 연구가 요구된다.

Cr의 휘발을 억제하고 전기전도성을 향상시키기 위해서 금속분리판 위에 코팅하는 표면처리에 대한 연구들이 진행되었다. 코팅방법으로는 Spray pyrolysis, Physical vapor deposition(PVD), Chemical vapor deposition(CVD), 전기 도금, 무전해 도금이 있다[8-11]. 이 중 무전해 도금은 직류 전원을 사용하지 않고 용액에 포함되어 있는 환원제의 산화반응으로 유리되는 전자에 의해 금속이온을 환원하여 금속피막을 석출하는 방법이다. 이

러한 무전해 도금방법은 복잡한 형상의 성형물에도 균일하고 얇게 직접 도금이 가능하여 세밀하고 복잡한 유로를 포함하는 금속분리판 표면을 코팅하기에 적합한 방법이다[4,12].

한편, 코팅 산화물의 전기전도도 및 두께는 연료전지의 성능에 중요한 영향을 미친다[13]. 고온 산화 시에 Co로부터 생성되는 Co_3O_4 는 35.5 S/cm의 높은 전기전도도를 가지고 있어, Co는 금속분리판 코팅 물질의 대표적인 후보가 될 수 있다[5]. 그러나 코팅 두께에 따라서 생성되는 산화물의 두께가 달라지고, 이는 금속분리판의 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 코팅 두께 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 460FC에 Co를 두께별로 무전해 도금시켜 고온산화 시의 특성을 분석 비교하고 성능을 평가하여 최적의 Co 코팅 두께를 찾고자 하였다. 코팅층의 형상과 성분원소를 분석하기 위해서 Scanning electron microscopy(SEM)와 Energy dispersive spectroscopy(EDS) 이미지를 촬영하였다. 또한, 산화물의 결정구조를 분석하기 위해서 X-ray diffraction(XRD)을 측정하였으며, 코팅 두께별 산화 전후의 표면 원소를 분석하기 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy(XPS) 측정을 실시하였다. 750 °C 고온의 산화 분위기에서 고온면저항을 분석하기 위해서 Area specific resistance(ASR)를 측정하였다.

2. 실험

2.1 샘플 제조

본 연구에서 사용된 Fe-Cr 합금은 POSCO사의 460FC를 사용하였으며 샘플의 두께는 약 2.0 mm이며, 이를 직경이 20 mm인 원형으로 가공하였다.

460FC는 전처리 없이 사용하였고, Co-460FC는 460FC에 Co를 두께별로 1 μ m, 2 μ m, 5 μ m 무전해 도금시켜 사용하였다. Co-460FC의 제조는 먼저 460FC 표면에 형성되어 있는 불순물을 세척과 에칭으로 제거하고, 도금밀착성을 개선하기 위하여 Nickel-strike 처리를 하였다. 이후 Co 도금을 실시하였다. $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ 15 g/L와 환원제로는 $(CH_3)_2NHBH_3$ 26 g/L, 착화제는 유기산 킬레이트인 $C_4H_4Na_2O_6 \cdot 2H_2O$ 115 g/L, pH 완충제는 NH_4OH 30 g/L를 사용하였으며, 90 °C 조건에서 무전해 도금시켜 Co가 도금된 Co-460FC를 제조하였다.

2.2 샘플 분석

고온산화 전후의 샘플의 형상 및 성분원소를 분석하기 위해서 샘플을 마운팅 시편으로 제작한 후 Normal-SEM 장비(JEOL Ltd, JSM-6010LA)를 이용하여 3000배의 배율로 단면을 촬영하고, EDS 원소매핑을 통해서 성분원소를 확인하였다. 고온산화된 샘플에서 산화물의 결정구조를 분석하기 위해서 XRD장비(Panalytical B.V, EMPYREAN)를 이용하여 45 kV, 20 mA 조건에서 scan 속도를 5°/min으로 하여 20~80° 범위에서 2θ 값을 측정하였다. 고온산화 전후의 샘플 표면의 성분 원소 분석을 위해서 XPS장비(Thermo Fisher Scientific, K-Alpha+)를 이용하여 측정하였다. 산화시간에 따른 샘플의 고온면저항을 분석하기 위해서 750 °C에서 상단은 Air, 하단은 H₂ 분위기로 조성하였으며, 12시간동안 샘플의 상단 표면을 고온산화시켜 산화층을 먼저 유도하고 산화시간에 따른 고온면저항을 측정할 수 있는 Pt mesh를 산화층에 접촉시켜 500시간동안 Source meter(Keithley, 2400)로 4단자 측정법을 이용하여 전압과 전류를 측정하고 옴의 법칙을 이용하여 ASR를 계산하였다. 이때 상단에 30 N의 하중을 주어서 고온산화된 샘플과 Pt mesh간의 접촉저항을 감소시키고자 하였다.

3. 결과

3.1 두께별 산화층 형상 분석

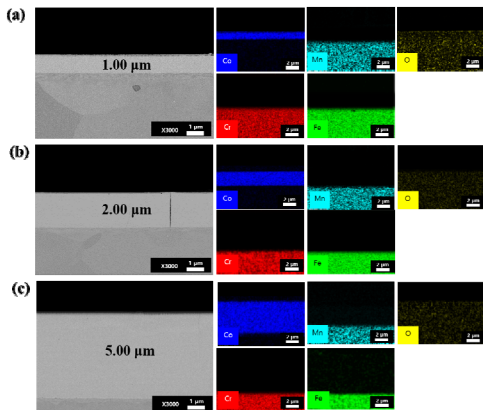


Fig. 1. Cross-section SEM images and EDS mapping observation of (a) Co-460FC-1 μm, (b) Co-460FC-2 μm, and (c) Co-460FC-5 μm before oxidation

고온산화 전후 Co 코팅의 코팅 두께에 따른 Co-460FC의 단면 형상과 성분원소를 SEM과 EDS 매핑분석을 통해 확인하였고, 산화 전의 샘플, 산화 후의 샘플을 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, Co-460FC 단면의 아래층에는 Cr, Fe, Mn 성분이 고루 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Fig. 1(a), (b), (c)에서 Co가 각각 1 μm, 2 μm, 5 μm의 두께로 460FC의 표면 위를 균일하게 이루고 있는 것을 확인하였다. 또한, O 성분은 매우 적은 함량으로 고르게 분포되어 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2는 750 °C에서 고온산화 후 Co 코팅 두께에 따른 Co-460FC의 형상변화와 성분원소의 분포 변화를 나타낸다. SEM 사진을 통해서 모든 샘플이 고온산화 되어 산화물 코팅층의 두께가 1 μm, 2 μm, 5 μm에서 1.12 μm, 2.64 μm, 6.10 μm로 증가된 것을 확인하였다. EDS 매핑분석을 통해서 모든 샘플의 Co 층에 산소가 다량 분포된 것으로 보아 Co의 산화물인 Co₃O₄가 생성되었을 것으로 판단하였다. 또한, Co-460FC-2 μm, Co-460FC-5 μm의 경우 Cr이 Co 코팅층으로 확산되지 않고 내부에 그대로 존재하는 것을 확인하였다. 적절한 두께의 Co 코팅층이 산화되어 Co₃O₄이 치밀하게 생성되어서 Cr의 분산과 Cr₂O₃의 성장을 효과적으로 억제하였을 것으로 판단되었다. 반면 Co-460FC-1 μm의 경우 Cr이 Co 코팅층 표면으로 확산된 것을 확인하였고, 1.12 μm 두께의 Co₃O₄의 코팅층이 외부 산소의 침입을 효과적으로 막지 못한 것으로 판단하였다.

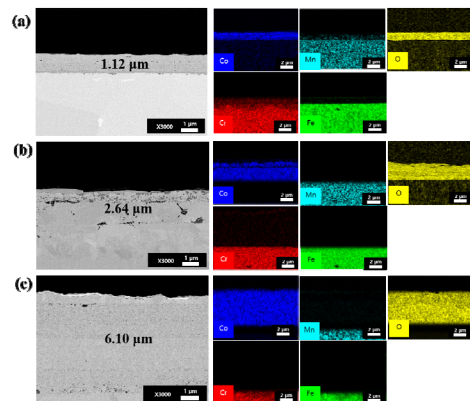


Fig. 2. Cross-section SEM images and EDS mapping observation of (a) Co-460FC-1 μm, (b) Co-460FC-2 μm, and (c) Co-460FC-5 μm after oxidation

3.2 두께별 산화층 결정구조 분석

고온 산화된 Co 코팅 두께별 산화물의 결정구조를 확인하기 위하여 XRD 분석을 진행하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. XRD 데이터에서 Co-460FC-1 μ m, Co-460FC-2 μ m, Co-460FC-5 μ m의 샘플 모두 (220), (311), (222), (400), (511), (440) 피크가 관찰되었다. 이는 Co₃O₄의 spinel 결정 구조의 피크로 보인다(JCPDS No.42-1467). 더욱이 $\sim 36.85^\circ(2\theta)$ 에서 발견되는 (311)면의 피크 강도(intensity)가 뚜렷하고, (311)면의 집합조직계수(texture coefficient, TC)가 최대값을 가지므로 (311)면으로 우선 방향(preferred orientation) 성장함을 시사한다[14-16]. 이를 통해서 Co-460FC-1 μ m, Co-460FC-2 μ m, Co-460FC-5 μ m의 샘플이 고온 산화되어 좋은 결정성을 가진 Co₃O₄이 생성된 것으로 판단된다. 한편, (311) 회절 피크 값을 이용하여 Co₃O₄의 결정입자의 평균 결정크기를 다음 아래의 Debye-Scherrer 공식을 이용하여 계산하였다.

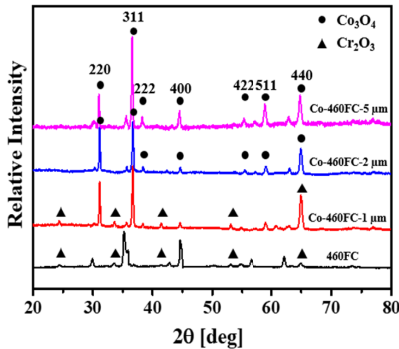


Fig. 3. XRD pattern of 460FC, Co-460FC-1 μ m, Co-460FC-2 μ m, Co-460FC-5 μ m after high temperature oxidation

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

D는 결정의 크기, λ 는 Cu 타겟으로부터 나오는 X-ray 파장(0.15406 nm), β 는 X-ray 회절 피크 반가폭(FWHM, full width at half maximum), θ 는 회절각을 나타낸다. 이를 통해 계산한 결과 평균 결정 크기는 37.17 nm인 것으로 확인하였다.

이렇게 성장된 Co₃O₄ 결정은 치밀한 미세구조를 형성하고, 외부 산소 유입을 최소한으로 억제하여 Cr₂O₃의 성장을 억제하는 역할을 한다. 따라서 Co-460FC-2 μ m, Co-460FC-5 μ m 샘플의 XRD 데이터에서 Cr₂O₃에 대한 피크가 확인되지 않은 것으로 보아 충분한 두께

로 성장된 Co₃O₄가 효과적으로 외부의 산소의 유입을 억제한 것을 판단할 수 있었다. 반면, Co-460FC-1 μ m 샘플은 Cr₂O₃의 피크가 확인되었고, 이전 EDS 결과와 일치하였다[17]. 이러한 결과를 통해서 1.12 μ m 두께의 Co₃O₄의 코팅층이 외부 산소의 침입을 효과적으로 막지 못해 Cr₂O₃가 생성된 것으로 판단하였다.

3.3 두께별 산화층 표면성분 분석

고온산화 전후의 샘플의 표면성분을 확인하기 위하여 Co 코팅 두께별 Co-460FC에 대해서 XPS wide scan 분석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 Co-460FC-2 μ m 샘플에서 고온산화 전후에 모두 Co와 O 피크만 검출되는 것을 확인하였다. 고온산화가 진행되었어도 Cr, Fe 등의 다른 원소가 검출되지 않은 것으로 보아 충분한 두께의 Co 코팅으로 인하여 Co₃O₄ 이외의 어떤 산화물도 표면에 생성되지 않는 것으로 판단하였다. 반면, Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, Co-460FC-1 μ m 샘플에서는 Co와 O 피크뿐만 아니라 Cr 피크도 확인되었다. 이러한 결과는 EDS와 XRD 결과에서 언급한 것처럼 1.12 μ m 두께의 Co₃O₄이 효과적으로 외부 산소를 차단하지 못하고 Cr₂O₃이 성장하여 표면에 관찰된 것으로 판단되었다.

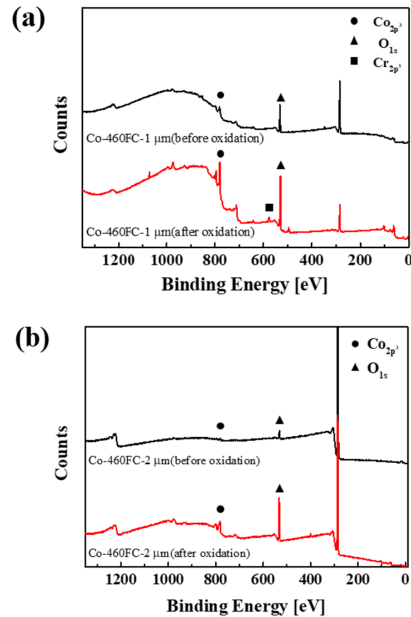


Fig. 4. Typical XPS wide scan spectrum of (a) Co-460FC-1 μ m and (b) Co-460FC-2 μ m before and after oxidation at high temperature

3.4 두께별 산화층 고온면저항 분석

Fig. 5는 Co 코팅 두께별 Co-460FC 샘플을 750 ℃의 고온산화 분위기에서 1000시간동안 산화시킨 후 측정된 Area specific resistance(ASR) 값을 나타낸 그래프이다. Co 코팅 두께가 5 μm에서 2 μm로 감소할수록 ASR 값이 25.56 mΩ·cm²에서 15.34 mΩ·cm²로 감소하였다. 그러나 Co 코팅 두께가 1 μm인 샘플은 ASR 값이 50.75 mΩ·cm²로 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 ASR 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$ASR = 2\rho_o l_o = 2 \frac{\sqrt{K_p t}}{\sigma_0} T \exp\left(\frac{-0.5E_{ox} + E_{co}}{kT}\right) \quad (2)$$

여기서 ρ는 표면에 형성된 산화물의 비저항이며, l은 산화물의 두께를 의미한다. K값은 산화물 성장의 비례상수 값이고, t는 산화시간, σ는 전기전도도, T는 온도, E는 활성화 에너지를 나타낸다. 위 식에서 알 수 있듯이 ASR 값은 산화물의 두께 및 산화물의 비저항 혹은 전기전도도에 의하여 결정된다. 따라서 Co₃O₄의 두께가 얇을수록 낮은 ASR 값을 가질 것이라 판단된다. 그러나 EDS, XRD, 및 XPS 결과에서 알 수 있듯이 1 μm의 Co 코팅 층은 Co₃O₄를 비교적 치밀하게 형성하지 못하여 Cr의 확산과 고온면저항을 증가시키는 Cr₂O₃이 생성되어 면저항 값이 증가된 것으로 판단되었다[18]. 결과적으로 2 μm 두께의 Co 코팅이 효과적으로 산소를 차단하여 Cr의 확산과 Cr₂O₃의 생성을 억제하여 전기적 안정성을 보이고, 낮은 면저항 값을 갖는 것으로 사료된다. 이러한 결과들을 통해서 Co-460FC는 무전해 도금법으로 최적화된 두께로 Co를 코팅하게 되면 향후 SOFC용 금속분리판 소재로써 사용되어 연료전지의 안정성 및 성능을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

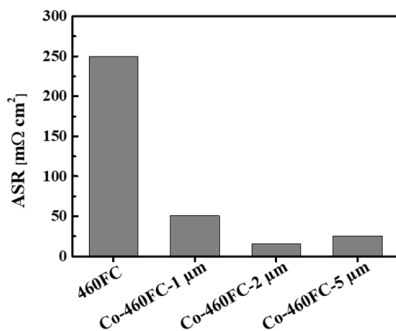


Fig. 5. ASR values of different Co coating thickness on 460FC substrate during 1,000hr

4. 결론

본 연구에서는 Fe-Cr 합금인 460FC의 구성성분인 Cr의 분산과 Cr₂O₃의 성장을 억제하기 위해 460FC 표면 위에 Co를 코팅하였다. 그리고 Co를 두께별로 코팅하여 샘플을 고온 산화 시킨 후 이들에 대한 특성을 SEM, EDS, XRD, XPS, ASR 분석을 통해 확인하였다. SEM 분석을 통해서 샘플의 코팅 두께가 1 μm, 2 μm, 5 μm에서 고온산화 후 1.12 μm, 2.64 μm, 6.10 μm로 증가된 것을 확인하였다. EDS, XRD, XPS 분석을 통해서 고온산화 후 Co의 산화물인 Co₃O₄가 생성된 것으로 판단하였으며, 2 μm, 5 μm 두께의 경우에 고온산화 시 Co₃O₄가 치밀하게 성장하여 Cr의 분산과 Cr₂O₃의 생성을 억제한 것으로 사료된다. 그러나 1 μm 두께의 경우에 Co₃O₄가 비교적 치밀하게 형성하지 못하여 Cr의 분산과 Cr₂O₃의 생성을 효과적으로 억제하지 못한 것으로 보인다. ASR 측정을 통해서 1 μm, 2 μm, 5 μm 코팅 두께일 때 50.75 mΩ·cm², 15.34 mΩ·cm², 25.56 mΩ·cm²인 것을 확인하였다. 이를 통해 산화물의 두께가 감소할수록 면저항은 감소하지만, 코팅이 얇은 경우에 Cr의 분산 및 Cr₂O₃의 생성을 효과적으로 억제하지 못하여 면저항이 증가된 것으로 판단되었다. 결과적으로 2 μm 두께의 Co-460FC가 가장 낮은 면저항을 가지므로 최적의 두께임을 확인할 수 있었고, 이는 향후 SOFC의 금속분리판 소재로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. H. Lee, J. S. Kim, N. H. Kang, H. H. Jo, and D. H. Nam, "Surface Characteristic of Graphene Coated Stainless Steel for PEMFC Bipolar Plate", *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*, Vol.44, No.5, pp.226-231, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2011.44.5.226>
- [2] A. B. Stambouli, and E. Traversa, "Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.6, No.5, pp.433-455, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00014-X)
- [3] Y. J. Choi, J. S. Ahn, I. S. Lee, H. Y. Bae, J. W. Moon, and J. Y. Lee, "Study on Internal Reforming Characteristic of Planar Type Solid Oxide Fuel Cell Stack", *New & Renewable Energy*, Vol.12, No.4, pp.98-104, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.4.377>
- [4] K. H. Jo, J. H. Kim, K. M. Kim, I. S. Lee, and S. J. Kim,

- "Development of a new cost effective Fe-Cr ferritic stainless steel for SOFC interconnect", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.40, No.30, pp.9523-9529, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/i.ijhydene.2015.05.125>
- [5] W. K. Han, J. W. Ju, G. H. Hwang, H. S. Seo, J. C. Shin, J. H. Jun, and S. G. Kang, "Synthesis and characterization of the Co-electrolessly deposited metallic interconnect for solid oxide fuel cell", *Korean Journal of Materials Research*, Vol.20, No.7, pp.356-363, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2010.20.7.356>
- [6] B. B. Ebbinghaus, "Thermodynamics of gas phase chromium species: the chromium oxides, the chromium oxyhydroxides, and volatility calculations in waste incineration processes", *Combustion and Flame*, Vol.93 No.1-2, pp.119-137, 1993.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(93\)90087-J](https://doi.org/10.1016/0010-2180(93)90087-J)
- [7] H. Tu, and U. Stimming, "Advances, aging mechanisms and lifetime in solid-oxide fuel cells", *Journal of power sources*, Vol.127, No.1-2, pp.284-293, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.025>
- [8] T. Brylewski, M. Nanko, T. Maruyama, and K. Przybylski, "Application of Fe-16Cr ferritic alloy to interconnector for a solid oxide fuel cell", *Solid State Ionics*, Vol.143, No.2, pp.131-150, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(01\)00863-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(01)00863-3)
- [9] A. Furusaki, H. Konno, and R. Furuichi, "Perovskite-type lanthanum chromium-based oxide films prepared by ultrasonic spray pyrolysis", *Journal of materials science*, Vol.30, No.11, pp.2829-2834, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00349650>
- [10] W. J. Quadackers, J. Piron-Abellan, V. Shemet, and L. Singheiser, "Metallic interconnectors for solid oxide fuel cells—a review", *Materials at high temperatures*, Vol.20, No.2, pp.115-127, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1179/mht.2003.015>
- [11] S. P. Jiang, J. P. Zhang, and X. G. Zheng, "A comparative investigation of chromium deposition at air electrodes of solid oxide fuel cells", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.22, No.3, pp.361-373, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00280-1)
- [12] W. J. Shong, C. K. Liu, and P. Yang, "Effects of electroless nickel plating on 441 stainless steel as SOFC interconnect", *Materials chemistry and physics*, Vol.134, No.2-3, pp.670-676, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.03.049>
- [13] W. Z. Zhu, and S. C. Deevi, "Opportunity of metallic interconnects for solid oxide fuel cells: a status on contact resistance", *Materials Research Bulletin*, Vol.38, No.6, pp.957-972, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(03\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(03)00076-X)
- [14] N. Matinise, N. Mayedwa, X. G. Fuku, N. Mongwaketsi, and M. Maaza, "Green synthesis of cobalt (II, III) oxide nanoparticles using Moringa Oleifera natural extract as high electrochemical electrode for supercapacitors", *AIP Conference Proceedings*, Vol.1962, No.1, p.040005, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5035543>
- [15] L. J. Cardenas-Flechas, A. M. Raba, M. Rincón-Joya, "Synthesis and evaluation of nickel doped Co₃O₄ produced through hydrothermal technique", *Dyna*, Vol.87, No.213, pp.184-191, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.84410>
- [16] P. Srinivasan, A. J. Kulandaisamy, G. K. Mani, K. J. Babu, K. Tsuchiya, and J. B. B. Rayappan, "Development of an acetone sensor using nanostructured Co₃O₄ thin films for exhaled breath analysis" *RSC advances*, Vol.9, No.52, pp.30226-30239, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RA04230J>
- [17] W. Zhang, B. Hua, N. Duan, J. Pu, B. Chi, and J. Li, "Cu-Fe spinel coating as oxidation barrier for Fe-16Cr metallic interconnect in solid oxide fuel cells", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.159, No.9, pp.388-392, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1149/2.021209jes>
- [18] B. K. Park, R. H. Song, S. B. Lee, T. H. Lim, S. J. Park, C. O. Park, and J. W. Lee, "Ceramic Materials for Interconnects in Solid Oxide Fuel Cells-A Review", *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol.51, No.4, pp.231-242, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.4191/kcers.2014.51.4.231>

오 승 주(Seung-Ju Oh)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 2022년 2월 : 한국 기술교육대학교 에너지신소재화학공학과 미래융합공학전공 석사
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학과 미래융합공학전공 박사과정

〈관심분야〉

차세대 스트레처블 디스플레이소재, 고신축/고유연 에너지 하베스팅소재

한 동 헌(Dong-Heon Han)

[준회원]



- 2020년 8월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학과 미래융합공학전공 석박사통합과정

<관심분야>

수소연료전지 고분자 전해질막

배 진 우(Jin Woo Bae)

[정회원]



- 1998년 3월 ~ 2004년 8월 : 한국 기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2004년 9월 ~ 2012년 2월 : 서울 대학교 화학생물공학부 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2013년 9월 : 삼성 디스플레이 책임연구원
- 2013년 10월 ~ 2016년 2월 : 경희대학교 연구교수
- 2016년 3월 ~ 2019년 8월 : University of California, Berkeley 박사후연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지신소재 화학공학부 조교수

<관심분야>

고분자 센서, 액츄에이터, 연료전지 및 에너지하베스팅