Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 4, pp. 491-496, 2017
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2017.20.4.491

Research Paper 소재 · 나노 · 공정 부문

이중 페로브스카이트 촉매 $PrBaMn_2O_{5+\delta}$의 고온전기분해조(Solid Oxide Electrolysis Cell) 연료극 촉매로 적용 가능성에 대한 연구

권영진[1),2)] · 김동연[1)] · 배중면[*,1)]

[1)] 한국과학기술원 기계공학과
[2)] 육군사관학교 기계공학과

Study on Possibility of $PrBaMn_2O_{5+\delta}$ as Fuel Electrode Material of Solid Oxide Electrolysis Cell

Youngjin Kwon[1),2)] · Dongyeon Kim[1)] · Joongmyeon Bae[*,1)]

[1)] *Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Republic of Korea*
[2)] *Department of Mechanical Engineering, Korea Military Academy, Republic of Korea*

(Received 20 October 2016 / Revised 2 March 2017 / Accepted 16 June 2017)

ABSTRACT

The hydrogen(H_2) is promising energy carrier of renewable energy in the microgrid system such as small village and military base due to its high energy density, pure emission and convenient transportation. H_2 can be generated by photocatalytic water splitting, gasification of biomass and water electrolysis driven by solar cell or wind turbine. Solid oxide electrolysis cells(SOECs) are the most efficient way to mass production due to high operating temperature improving the electrode kinetics and reducing the electrolyte resistance.

The SOECs are consist of nickel-yttria stabilized zirconia(NiO-YSZ) fuel electrode / YSZ electrolyte / lanthanum strontium manganite-YSZ(LSM-YSZ) air electrode due to similarity to Solid Oxide Fuel Cells(SOFCs). The Ni-YSZ most widely used fuel electrode shows several problems at SOEC mode such as degradation of the fuel electrode because of Ni particle's redox reaction and agglomeration. Therefore Ni-YSZ need to be replaced to an alternative fuel electrode material.

In this study, We studied on the Double perovskite $PrBrMnO_{5+\delta}$(PBMO) due to its high electric conductivity, catalytic activity and electrochemical stability. PBMO was impregnated into the scaffold electrolyte $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.85}Mg_{0.15}O_{3-\delta}$(LSGM) to be synthesized at low temperature for avoiding secondary phase generated when it exposed to high temperature. The Half cell test was conducted at SOECs and SOFCs modes.

Key Words : Solid Oxide Electrolysis Cell(고온전기분해조), Fuel Electrode Catalyst(연료극 촉매), Hydrogen Generation (수소생산), Double Perovskite(이중 페로브스카이트)

[*] Corresponding author, E-mail: Jmbae@kaist.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서 론

화석연료의 고갈에 따라 안정적인 에너지원으로서 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 신재생에너지를 이용하여 지역단위로 전력을 생산·공급하는 마이크로그리드 시스템에 대해 연구가 진행되고 있고 일부 군 및 민간에서 도입하여 시험 중에 있다[1,2]. 신재생에너지는 에너지가 생산되는 시점과 에너지가 소비되는 시점이 다르다는 특징 때문에, 생산된 에너지를 저장하고 필요시 공급해주는 에너지저장장치(Energy Storage System)가 필수적이다. 수소(H_2)는 에너지 밀도가 높고 수송과 저장이 간편하다는 특징 때문에 에너지저장장치의 매개체로서 각광받고 있다. 수소를 생산하는 방법 중 고온전기분해조(Solid Oxide Electrolysis Cells)를 이용하는 방법은 작동온도가 높아 촉매활성도가 높고, 전해질의 저항이 감소해 수소 생산 효율이 높을 뿐 아니라, 전기에너지 소비량이 적고, 물을 전기분해하기 때문에 청정에너지원을 이용할 수 있다는 장점이 있다[2-4].

고온전기분해조는 일반적으로 고체산화물연료전지(Solid Oxide Fuel Cells)와 같은 구조인 연료극 NiO-YSZ(Nickel-Yttria Stabilized Zirconia) / 전해질YSZ(Yttria Stabilized Zirconia) / 공기극 $La_{1-x}Sr_xMnO_3$-YSZ(Lanthanum Strontium Manganite-YSZ)으로 이루어진다. 니켈은 높은 촉매활성도와 전기전도도 그리고 값싼 가격으로 인하여 고체산화물 연료전지에서 가장 많이 사용하는 연료극 촉매이나 이는 고온전기분해조 모드에서는 수분으로 인하여 전극 산화환원 및 조대화 현상이 심해져 내구성이 낮아진다는 단점이 발생한다[5-7]. 그래서 고온전기분해조의 내구성을 확보하기 위해서는 Ni-YSZ을 대체할 전극 촉매가 필요하다.

본 연구에서는 촉매 안정성, 전기전도도 및 촉매활성도가 높은 전극물질로 알려진 이중페로브스카이트 구조 촉매인 $PrBrMn_2O_{5+\delta}$(PBMO)을 고온전기분해조 연료극에 적용하는 연구를 진행했다. 고온에서 전해질과 2차상을 만드는 문제를 피하기 위하여, 고온에서 열처리를 통해 형성한 전해질 $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.85}$ $Mg_{0.15}O_{3-\delta}$(LSGM) 스케폴드 구조체에 전극물질을 함침하여 저온에서 열처리하는 방식을 적용했다. 반전지 테스트를 통해서 고온전기분해조 및 고체산화물연료전지 방식에서 촉매활성도를 측정하고 분석했다.

2. 실험방법

본 연구는 이중 페로브스카이트 촉매 PBMO를 전해질 LSGM 스케폴드 구조체와 2차상을 형성하는지 여부를 확인하기 위한 정합성 테스트를 진행했다. 그리고 제작한 PBMO가 연료극으로 적용하기 위한 촉매의 전기전도도 및 촉매활성도를 측정했다.

2.1 PBMO제작 및 정합성 테스트

PBMO는 LSGM 스케폴드 구조에 함침하기 위해서는 탈이온수(Deionized Water)에 $Pr(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$(Sigma-Aldrich), $Ba(NO_3)_2$(Sigma-Aldrich), $Mn(NO_3)_2{\cdot}xH_2O$(Sigma-Aldrich)를 화학양론 비에 맞게 용해하고 킬레이트제(Chelating agent)인 Glycine(Sigma-Aldrich)을 양이온 수에 3배만큼 첨가하여 만든 용액을 이용한다. 예를 들어, 60 ml의 탈 이온수에 Pr, Ba, Mn이 0.5:0.5:1 비율로 0.5 mol/L 농도로 들어가게 만든다고 한다면, 분자량 326.9191 g/mol인 $Pr(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$를 4.904 g이 되게 된다. 같은 조건에서 $Ba(NO_3)_2$ 3.920 g, $Mn(NO_3)_2{\cdot}xH_2O$ 5.370 g, 글리신 6.756 g 사용했다. 이는 글리신 질산염 프로세스(Glycine Nitrate Process)와 동일한 용액을 사용한다. 그래서 글리신 질산염 프로세스를 통해 제작한 PBMO를 공기 중에 950 ℃에서 4시간동안 열처리하고, 수소 10 % 질소 90 %의 환원분위기의 800 ℃에서 4시간 동안 열처리를 진행했다. 상합성 여부를 확인하기 위하여 X-선 회절법(X-ray diffraction)을 통하여 검증했다. 그리고 전해질인 $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.85}$ $Mg_{0.15}O_{3-\delta}$(Fuel cell materials)과 PBMO를 1:1중량비로 에탄올에서 24시간동안 볼밀(Ball-mill)을 했다. 이 후 120 ℃에서 열처리 후 나온 파우더를 100 μm로 시브(Seive)한 후 900 ℃, 950 ℃, 1000 ℃에서 열처리를 진행했다. LSGM과 PBMO의 2차상 형성여부를 확인하기 위하여 X-선 회절법을 사용하여 정합성 테스트를 진행했다.

2.2 PBMO 전기전도도 측정

$La(NO_3){\cdot}_6H_2O$(Sigma-Aldrich), $Sr(NO_3)_2$(Sigma-Aldrich), $Cr(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$(Sigma-Aldrich), $Ru(NO)(NO_3)_x(OH)_y$(Sigma-Aldrich), $Mn(NO_3)_2{\cdot}xH_2O$(Sigma-Aldrich) 및 $[CH_3CH(O-)CO_2NH_4]_2Ti(OH)_2$(Sigma-Aldrich)를 화학양론 비에 맞게 글리신과 함께 탈이온수에 용해하여, 글리신 질산염 프로세스를 통해 페로브스카이트 구조 촉매인 $La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.5}Mn_{0.5}$(LSCM), $La_{0.8}Sr_{0.2}Cr_{0.95}Ru_{0.05}$(LSCR), $La_{0.4}Sr_{0.6}Ti_{0.4}Mn_{0.6}$(LSTM)을 제작했다. 제작한 LSCM,

LSCR, LSTM 그리고 PBMO 파우더 2 g을 2 ton의 압력으로 직육면체 형태로 성형한 후, 1000 ℃에서 열처리하여 제작했다.

전기 전도도는 Solatron(SI 1287) 장비를 이용해 양단에 전류를 흘려주고 중간에 전압차를 측정하여 저항과 전도도를 구하는 4-prove 방법을 사용했다. 전류범위는 0.05 A부터 1 A까지로 하고 각 온도별로 800 ℃부터 600 ℃까지 50 ℃ 단위로 전압을 측정했다. 이후 전압과 전류를 이용하여 저항(R)을 구한 후 다음 식을 이용하여 전기전도도(σ)를 계산했다.

$$\sigma = L/R \times A \quad (1)$$

σ : 전기전도도(S/cm)
L : 시편 길이(cm)
R : 저항(Ω)
A : 단면적(cm^2)

2.3 PBMO 반전지 제작 및 테스트

LSGM 전해질 파우더와 Triton X-100(Sigma-Aldrich)을 용매인 Methyl ethyl keton(J. T. Baker)와 에탄올에 첨가하여 16시간 볼밀했다. 그리고 Poly ethylen glycol (Sigma-Aldrich), Dibutyl phtalate(Junsei), Butvar(Sigma-Aldrich)를 넣은 후 4시간을 더 볼밀한 후 지르코니아 볼을 빼고 24시간동안 탈기(Deairing)를 실시했다. 완성된 슬러리를 케스팅하여 24시간 건조 후 1450 ℃에서 소결하여 기판을 제작했다. 그리고 LSGM 파우더에 α-Terpineol(Alfa Aesar), Hypermer KD-1(Uniqema)을 용매인 에탄올에 넣어 24시간 볼밀했다. 이 후 용액을 75 ℃의 교반기에서 용매를 기화시키면서 페이스트를 제작했다. 그리고 LSGM 기판에 LSGM 페이스트를 스크린 프린팅하고 1250 ℃에서 열처리를 통해 스케폴드 전극 구조체를 만들고 반대편에는 Pt 페이스트로 Counter/Reference 전극을 스크린 프린팅하여 반전지를 제작했다. PBMO 0.5 mol 솔루션을 글리신 질산염 프로세스와 동일한 방식으로 제작하여 스케폴드 구조에 함침을 진행했다.

500 Sccm의 기체를(H_2O 54 %, H_2 23 %, N_2 23 %) 밀봉된 쿼츠에 공급하고 온도범위 600 ℃부터 800 ℃까지 50 ℃ 단위로 Potentiostat / Galvanistat(Solatron, SI1287)를 측정하고, 수소 100 % 환경에서의 전기화학 임피던스 분석(Electrochemical Impedance Spectroscopy)을 진행했다. 여기서 구한 면적비저항을 2번의 아레니우스 식(Arrhenius equation)을 이용하여 활성화 에너지를 구했다. 또한, 3번식을 이용하여 아레니우스 도표(Arrhenius plot)를 통해 다른 연료극 전극 물질과 활성화 에너지를 비교했다.

$$ASR = \mathring{A}exp(-Ea/RT) \quad (2)$$

$$Log(ASR) = -(Ea/R)\times(1000/T) + log(\mathring{A}) \quad (3)$$

ASR : 면적비저항(Ω·cm^2)
$\mathring{A}$: 사전지수상수
Ea : 활성화 에너지(eV)
R : 보편 기체상수(8.314 J/mol·K)
T : 절대 온도(kelvin)

3. 실험결과

3.1 PBMO 제작 및 LSGM과 정합성 테스트

PBMO는 950 ℃에서 1차 열처리 후 육방구조를 형성하고, 800 ℃에서 환원을 거치면서 산소이온이 빠져나가 층상의 큐빅구조로 바뀌게 된다. 이는 분자의 구조를 분석해 주는 X-선 회절법으로 확인이 가능하다.

Fig. 1은 PBMO의 1, 2차 열처리 후 파우더를 X-선 회절법으로 분석한 결과이다. 여기서 육방구조인 PBMO의 경우 아래 그래프에 'H'로 표시를 했고, 큐빅구조의 경우 'C'로 표시를 했다. 이를 바탕으로 2차 열처리 결과를 보면, 일부 육방구조의 $Pr_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$가 남아 있지만 전체적으로 큐빅구조의 $PrBaMn_2O_{5+\delta}$가 잘 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 열처리 온도에 따른 2차상 형성여부의 경우는 Fig. 2에서 붉은색 동그라미 친 것을 보면 육방구조의 PBMO도, LSGM도 아닌 상이 형성된 것을 확인할 수 있다. PBMO열처리 온도인 950 ℃까진 LSGM과 PBMO가 2차상을 형성하지 않고 있다가, 1,000 ℃부터 2차상이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 전해질로 LSGM과 전극촉매로 PBMO를 사용했던 연구는 대부분 이 문제 때문에 중간에 완충층[8]을 사용했으나, 본연구에서는 스케폴드 구조체를 2차상이 형성되는 고온에서 열처리 하고, 함침을 한 촉매를 2차상이 형성되지 않는 저온에서 상합성이 가능할 것으로 판단된다. 이는 완충층이 없어져 저항을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 촉매를 함침하여 삼상계면(Three phase boundary)을 늘려 성능을 향상 시킬 수 있다[9].

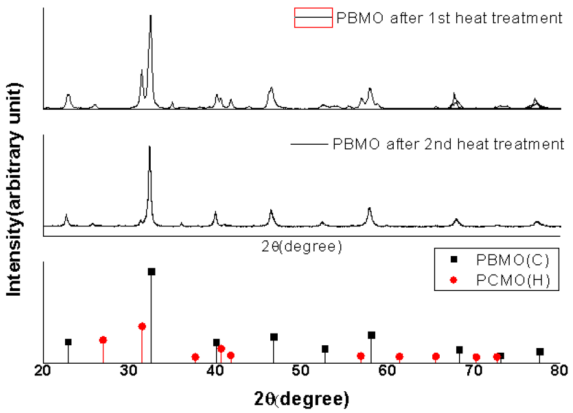

Fig. 1. X-RD data about PBMO synthesis

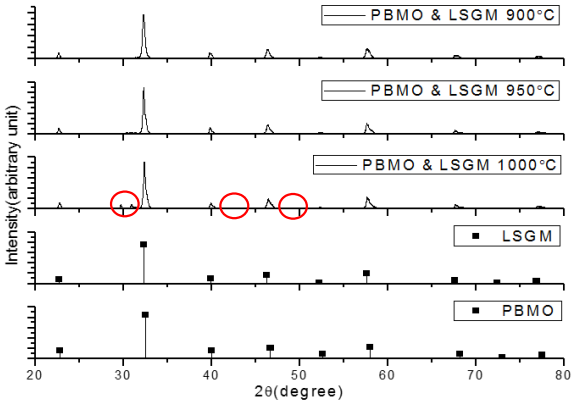

Fig. 2. X-RD data about chemical compatibility of PBMO & LSGM

3.2 산화물 촉매 및 PBMO 전기전도도 측정

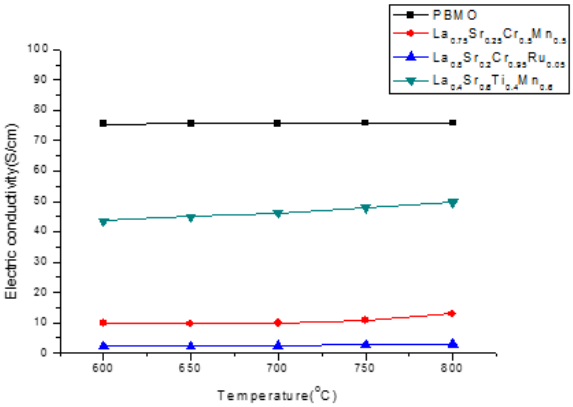

Fig. 3. Electric conductivity of catalysts

전해질은 산소이온을 전도하고 각 전극은 화학반응으로 발생한 전자를 전도하는 기능이 있다[10]. 그래서 연료극 전극 촉매의 전기전도도는 중요하다. Fig. 3은 기존에 연료극으로 사용하던 Perovskite 구조 촉매인 LSCM, LSCR, LSTM과 Double perovskite 촉매인 PBMO의 전기전도도를 환원환경(10 % H_2)에서 600 ℃부터 800 ℃까지 50 ℃ 간격으로 측정한 결과이다[11]. 800 ℃ 기준으로 LSCM은 12.9 S/cm, LSCR은 2.7 S/cm, LSTM은 49.6 S/cm인데 반해 PBMO의 전기전도도는 약 83.3 S/cm로 기존에 사용하던 촉매들에 비해 높은 값을 보여주고 있다. 이는 층상구조를 가진 Double perovskite 구조 촉매의 산소이온이 빠지면서 생긴 정공으로 인하여 전자의 흐름이 원활한 것으로 판단된다.

3.3 PBMO 반전지 측정

반전지는 운전전극 자체의 전극 특성을 파악 할 수 있다는 장점이 있다. 아레니우스 도표는 기울기를 통해 전극의 활성화 에너지를 구할 수 있다. 전극의 활성화 에너지는 전극의 반응 속도와 관계되는 것으로 낮을수록 전극에서의 물질 반응 속도가 높아진다. 이때, 아레니우스 도표를 통한 그래프의 경우 기울기를 통해 그 값이 나타나게 되기 때문에 정확한 값을 표시하기 위해 활성화에너지 값을 Table 1에 정리했다. Fig. 4는 PBMO를 12.4 wt% 함침한 후 수소 100 % 환경에서 EIS 분석을 통해 구한 비저항으로 아레니우스 도표를 표현한 것이다. 동일한 LSGM 전해질과 스케폴드 구조체에 LSCM을 함침한 결과에 대해 발표한 논문과 비교하면 PBMO는 더 적은 양의 함침 함으로도 비저항뿐 아니라 활성화 에너지도 낮음을 알 수 있다[12]. 이는 이중 페로브스카이트 구조인 PBMO가 페로브스카이트 구조 촉매에 비해 구조 내 정공이 형성되어 있어, 산소 이온 및 전자의 흐름 높여주기 때문에 더 낮은 활성화에너지가 나오는 것으로 판단된다[8,13]. Ni-YSZ의 활성화 에너지는 1.16 eV, 15 wt% 함침한 LSCM의 활성화 에너지는 0.84 eV, 12.4 wt% 함침한 PBMO는 0.48 eV로 두 전극에 비해 활성화에너지가 낮음을 확인할 수 있다. 이는 함침한 PBMO가 Ni-YSZ나 함침한 LSCM에 비해서 반응속도가 빨라 높은 성능을 보일것으로 판단된다.

함침에 대한 연구를 진행한 눈문에서 약 30 wt%에서 활성화에너지와 비저항이 최저가 되면서 가장 높은 성능이 나온다고 알려져 있다[9,12,14]. 이를 통해 보면 PBMO가 함침량의 변화에 따라 성능이 향상될 수 있

고, 이를 통해 Ni-YSZ보다 더 높은 성능을 구현할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단된다.

또한, 연료극의 과전압은 Potentiostat / Galvanostat 모드에서 각각 측정했다. 800 ℃부터 600 ℃까지 H_2O:H_2가 30:70(H_2O 54 %, H_2 23 %, N_2 23 %) 환경에서 정상적인 테팔 도표(Tafel plot)가 나오는 것을 보아 수증기가 주 연료로 사용되는 고온전기분해조의 전극으로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

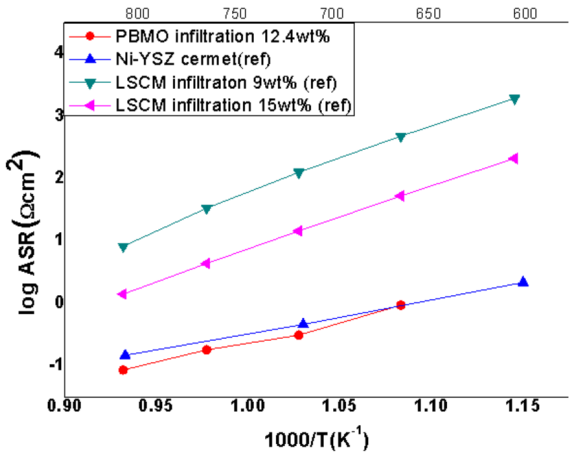

Fig. 4. Arrhenius plot of various catalysts and infiltrated PBMO

Table 1. Activation energy of various catalysts and infiltrated PBMO

Fuel electrode	Temperature range(℃)	Activation energy(eV)	Remark
Ni-YSZ cermet	600 ~ 800	1.16	ref[12]
9 wt% LSCM	600 ~ 800	0.92	ref[12]
15 wt% LSCM	600 ~ 800	0.84	ref[12]
12.4 wt% PBMO	650 ~ 800	0.48	

4. 결 론

미래 에너지 자원인 수소(H_2)를 생산하기에 가장 효율적인 방법은 고온에서 물을 전기분해하는 고온전기분해조이다. 일반적으로 고온전기분해조 연료극에 사용하는 Ni-YSZ는 몇 가지 내구성 문제들이 있다고 알려져 있다. Ni-YSZ를 대체할 연료극 물질로서 최근 연구되고 있는 이중페로브스카이트 촉매 $PrBaMn_2O_{5-\delta}$의 가능성에 대해서 연구했다. 기존의 연구에서 PBMO와 전해질 사이 완충층을 사용하는 것과 달리 본 연구에서는 스케폴드 전해질 구조체에 촉매를 함침하여 합성하는 방법을 사용했다. 그리고 연료극 물질이 필요한 요소인 전기전도도를 다른 페로브스카이트 촉매와 비교 분석하고, EIS 분석을 통해 SOEC 모드에서 작동 유무 확인 및 활성화 에너지를 구했다. 실험 결과 PBMO 합성 온도인 950 ℃에서는 전해질과 2차상을 형성하지 않음을 확인했고, 수증기:물의 비율이 70:30에서 정상적으로 작동함을 확인했다. 그리고 PBMO의 전기전도도는 기존에 연료극으로 사용하던 페로브스카이트 촉매 LSCM, LSCR, LSTM에 비해 약 2배 이상 높은 83.3 S/cm임을 확인했다. 그리고 EIS 분석을 통한 활성화 에너지는 0.48 eV로 기존의 Ni-YSZ에 비해 낮아 촉매 반응속도가 빠르고 성능이 높을 것으로 판단된다. 본 연구에서 PBMO를 LSGM전해질에 함침하는 방법을 이용하여 고성능 고내구성의 고온전기분해조를 제작 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 대한민국 육군, 정부(미래창조과학부)와 한국전력의 한국서부발전의 재원으로 한국 이상화탄소 포집 및 처리연구개발 센터의 지원으로 수행된 기초연구개발사업(No 2014M1A8A1049299)임.

References

[1] News, “Stranded and Localised Grids,” Fuel Cell Today, UK, pp. 16-21, 2013.

[2] J. Kang, “3-Dimensional Numerical Analysis of Solid Oxide Electrolysis Cells(SOEC) Steam Electrolysis Operation for Hydrogen Production,” Journal of Fuel Cell Science and Technology, Vol. 12, No. 5, pp. 051006-1 ~ 051006-7, 2015.

[3] P. Kim-Lohsoontorn, “Gadolinium Doped Ceria-Impregnated Nickel-Yttria Stabilised Zirconia Cathode for Solid Oxide Electrolysis Cell,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 16, pp.

9420-9427, 2011.

[4] P. Kim-Lohsoontorn, “Performance of Solid Oxide Elextrolysis Cells based on Composite $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_{3-\delta}$ -Yttria Stabilized Zirconia and $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$ Oxygen Electrodes,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 9, pp. 3958-3966, 2010.

[5] M. S. Khan, “Fundamental Mechanisms Involved in the Degradation of Nickel-Yttria Stabilized Zirconia (Ni-YSZ) Anode During Solid Oxide Fuel Cells Operation : A Review,” Ceramics International, Vol. 42, No. 1, pp. 35-48, 2016.

[6] A. Faes, “A Review of Redox Cycling Solid Oxide Fuel Cells Anode,” Membranes, Vol. 2, No. 3, pp. 585-664, 2012.

[7] M. H. Pihlatie, “Electrical Conductivity of Ni-YSZ Composites : Degradation Due to Ni Particle Growth,” Solid State Ionics, Vol. 189, No. 1, pp. 82-90, 2011.

[8] S. Sengodan, “Layered Oxygen-Deficient Double Perovskite as an Efficient and Stable Anode for Direct Hydrocarbon Solid Oxide Fuel Cells,” Nature Materials, Vol. 14, No. 2, pp. 205-209, 2014.

[9] B. Yoon, “Characteristics of Nano $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$-Infiltrated $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-\delta}$ Scaffold Cathode for Enhanced Oxygen Reduction,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 30, pp. 13399-13407, 2013.

[10] S. Jiang, “A Review of Anode Materials Development in Solid Oxide Fuel Cells,” Journal of Materials Science, Vol. 39, No. 14, pp. 4405-4439, 2004.

[11] C. Sun, “Recent Anode Advances in Solid Oxide Fuel Cells,” Journal of Power Source, Vol. 171, No. 2, pp. 247-260, 2007.

[12] B. Yoon, “Effects of Infiltrated Sr and Mn Doped $LaCrO_3$ on Porous $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-\delta}$ Scaffolds used as Anodes in Solid Oxide Fuel Cells,” Solid State Ionics, Vol. 249-250, pp. 26-33, 2013.

[13] S. Choi, “Highly Efficient and Robust Cathode Materials for Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cells: $PrBa_{0.5}Sr_{0.5}Co_{2-x}Fe_xO_{5+\delta}$,” Nature Scientific Report, No. 2426, pp. 1-6, 2013.

[14] B. Yoon, “Electrochemical Investigation of Composite Nano $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$ Infiltration into a LSGM Scaffold Cathode on a LSGM Electrolyte,” Electrochemical Society Transaction, Vol. 57, No. 1, pp. 1933-1943, 2013.