

## EB-PVD법에 의해 제조된 YSZ 전해질의 전기적 특성

신태호<sup>†</sup> · 유지행\* · 이시우\* · 한인섭\* · 우상국\* · 현상훈

연세대학교 세라믹공학과

\*한국에너지기술연구원 에너지재료연구센터

(2004년 10월 15일 접수; 2004년 12월 22일 승인)

### Electrical Properties of YSZ Electrolyte Film Prepared by Electron Beam PVD

Tae Ho Shin,<sup>†</sup> Ji Haeng Yu,\* Shiwoo Lee,\* In Sub Han,\* Sang Kuk Woo,\* and Sang-Hoon Hyun

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*Energy Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received October 15, 2004; Accepted December 22, 2004)

#### 초 록

나노 코팅 기술로써 빠른 증착 속도와 미세구조 제어가 용이하여 항공기 엔진 부품 열차폐 코팅으로 널리 이용되는 Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD) 세라믹 코팅 기술을 연료전지 전해질 제조에 적용하였다. EB-PVD 법을 이용하여 NiO-YSZ 기판에 YSZ 전해질을 약 10  $\mu\text{m}$ 의 두께로 짧은 시간에 코팅하였으며 증착온도에 따라 나노 구조의 표면을 가진 YSZ 막을 얻을 수 있었다. 연료전지 전해질로서의 특성을 평가하기 위하여, 같은 조건의 코팅으로  $\text{Al}_2\text{O}_3$  기판에 전해질을 동일한 조건으로 코팅하여 전해질의 전기적 특성을 평가하였다. 또한 양극물질로서  $\text{LaSrCoO}_3$  분말을 일반적인 스크린 프린팅 기법으로 코팅하여 EB-PVD의 코팅을 이용한 고체산화물 연료전지 제조 가능성에 대하여 논의하였다.

#### ABSTRACT

Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD) is a typical technology for thermal barrier coating with Yttria Stabilized Zirconia (YSZ) on aero gas turbine engine. In this study EB-PVD method was used to fabricate dense YSZ film on NiO-YSZ as an electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC). Dense YSZ films of  $\sim 10 \mu\text{m}$  thickness showed nano surface structure depending on deposition temperature. Electrical conductivities of YSZ film and electric power density of the single cell were evaluated after screen-printing  $\text{LaSrCoO}_3$  as a cathode.

**Key words :** Solid electrolyte, YSZ film, EB-PVD, Electrical conductivity, SOFC

#### 1. 서 론

전자빔 증착법(EB-PVD: Electron Beam Physical Vapor Deposition)이란 수 keV이상의 높은 에너지로 전자빔 총(electron beam gun)을 통해 전자를 가속시켜 타겟물질에 집중시켜 가열함으로써 증착입자를 만들어 기판에 증착시키는 방법이다.<sup>1)</sup> 필라멘트를 이용하는 저항가열 증착법이나 스퍼터링에 비해 원료를 짧은 시간 내에 높은 온도로 가열할 수 있어 산화물과 같은 고용점 세라믹 소재의 박막이나 후막을 형성하는데 주로 이용되는 방법이다.

항공기 및 발전용 가스 터빈의 회전날에 안정화 지르코니아(YSZ: Yttria Stabilized Zirconia)를 코팅하는 기술은 EB-PVD를 이용한 세라믹 코팅기술의 대표적인 활용 예

이다.<sup>2)</sup> EB-PVD에 의해 증착된 막은 독특한 주상구조를 형성하며 주상의 입자 사이에 나노 기공 혹은 나노 틈새가 존재하여 탁월한 열차폐 효과를 얻을 수 있다. EB-PVD 공정의 특징은 비교적 높은 증착속도, 모재와의 강한 결합력, 독특한 주상구조 형성 등이 있으며 증착 공정으로 증착 입자를 제어함으로써 나노 구조의 코팅도 가능하다.

YSZ는 높은 기계적 강도와 내식성을 가져 구조용 세라믹스로서 많은 장점을 가질 뿐만 아니라, 차세대 동력원으로서 고체산화물 연료전지의 전해질 소재로서 많은 연구가 이루어진 매우 중요한 물질이다. YSZ는 높은 산소 이온전도도와 더불어 높은 기계적 안정성, 환원분위기에서의 화학적 안정성을 보여 여타의 전해질 소재에 비해 고온에서 사용할 때 매우 우수한 특성을 보인다. 그러나, 연료전지의 작동온도는 800-1000°C로서 매우 높아서 연결재와 밀봉재의 선택이 어렵고, 고온에서 장시간 운전 시 성능이 저하되는 문제점이 있어서 상용화의 걸림돌이 되

<sup>†</sup>Corresponding author : Tae Ho Shin

E-mail : nixman95@yonsei.ac.kr

Tel : +82-42-860-3414 Fax : +82-42-860-3133

고 있다. 연료전지의 작동온도를 낮추기 위해서는 전해질의 두께를 최소한으로 줄여서 산소이온의 전도가 빠르게 일어나도록 하는 것이 중요하다. 고체산화물 연료전지의 전해질 박막 제조에 있어서 dip-coating, 플라즈마 열 분무 코팅, 화학기상 증착법, 전기화학적 증착법, MOCVD, 스퍼터링 등을 이용하여 YSZ 전해질의 박막화에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다.<sup>3-5)</sup>

저온에서 작동 가능한 박막이나 후막의 전해질을 제조하기 위해서, 지지체(전극)와의 우수한 접착강도와 낮은 기공률, 우수한 이온전도도를 갖는 것이 필수적이다. 고체산화물 연료전지는 음극과 전해질 그리고 양극의 세라믹 복합체로써 고온에서의 장시간 작동에 따른 내구성을 향상하기 위하여 전해질 및 양극 코팅 기술이 개선되어야 하며, 제조 단계에 있어서 재현성 있는 코팅기술을 확보하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 코팅층간의 결합력이 우수하며 코팅 조건의 재현성이 우수한 EB-PVD법을 이용하여 YSZ를 증착하고 전해질로서의 전기적 특성을 평가하였다. EB-PVD 공정법은 YSZ의 소결온도보다 낮은 증착온도에서 비교적 치밀한 막을 형성시키며 독특한 주상의 나노 구조와 표면 나노 구조를 형성하여 전해질로서의 특성이 기대된다. 또한, EB-PVD법은 빠른 증착공정의 특징과 코팅의 대면적화가 가능하여 연료전지 전해질 코팅에 있어서 비용절감과 전해질 제조에 있어서 공정의 안정화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 음극지지체 제조

고체산화물 연료전지(SOFC)의 음극재료는 Ni-YSZ 복합체를 이용하는 것이 일반적이다. 금속과 세라믹의 혼합은 비교적 어렵기 때문에, NiO와 YSZ 분말을 혼합 성형하여 소결한 후, 연료전지의 운전과정에서 연료(주로 수소)에 의해 Ni로 환원시킴으로써 음극을 제조한다. YSZ 전해질 코팅에 사용될 기판은 기존의 연구를 통해 얻어진 전기전도와 기계적 특성이 우수한 조건을 이용하여 증착조건에 맞는 형태로 제작하였다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 음극지지체형 SOFC를 제조하기 위해 NiO 분말(Junsei Chemical Co., Japan)을 8 mol%의 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 안정화한 ZrO<sub>2</sub> 분말(TZ-8YS, Tosoh, Japan)의 분과분율이 40 : 60이 되도록 칭량하고, 기공전구체로서 카본블랙(L30, LG carbon, Korea)을 40 vol%가 되도록 첨가하였다. 균일한 혼합을 위해 출발분말을 지르코니아 불을 이용하여 메탄올과 함께 48시간동안 습식 불밀을 하였다. 혼합된 분말을 건조시킨 후, 체가름 하여 원료분말을 제조하였다. 음극지지체형 SOFC에서 음극의 역할은 기계적 강도와 더불어 전극으로서의 높은 전자전도도 및 연료가스(H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO 등)에 대한 높은 촉매활성, 연료가스의

흐름을 위한 높은 기공률 등이 요구된다. 이를 위해서는 각 원료분말의 혼합비와 소결온도를 조절하는 것이 필요하다.<sup>6)</sup> 주어진 분말을 실린더형 몰드를 이용하여 가압성형(400 kgf/cm<sup>2</sup>)한 후, 1400°C에서 3시간동안 소결하여 디스크를 제조하였다. 준비된 소결체의 평면을 연마하여 EB-PVD용 기판으로 사용하였다. 소결체의 밀도는 약 80%로 측정되었다.

EB-PVD로 증착된 YSZ 막의 전해질로서의 전기적 특성을 측정하기 위해, 절연성 기판으로서 치밀한 알루미늄(4×25×1 mm<sup>3</sup>)를 절단하여 준비하였다.

### 2.2. EB-PVD에 의한 YSZ 코팅

YSZ 코팅을 위한 타겟으로서 8 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가된 ZrO<sub>2</sub>분말(TZ-8YS, Tosoh, Japan)을 약 100 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 일축가압 성형하여, 충분히 건조(chamber 내의 진공도를 높이기 위해서)한 후 구리 도가니 위에 장착하였다. Chamber 내의 진공을 10<sup>-4</sup> Torr로 유지하면서 약 3.8 kW로 전자빔을 발생시켜 타겟을 약 3시간동안 예비 가열한 후, 타겟이 용융되기 시작할 때 셔터를 열고 산소기체를 약 2.5 cc/min의 유량으로 흘려주어 충분히 산화된 YSZ가 기판 위에 증착되도록 하였다. 기판은 앞서 서술한 바와 같이 NiO-YSZ 디스크와 막대모양의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 동시에 장착하여 같은 조건에서 SOFC 단전지 테스트 셀과 전기전도도 측정 시편을 만들고자 하였다.

여타의 박막제조기술과 마찬가지로 EB-PVD를 이용한 나노코팅기술에 있어서, 기판의 온도는 막의 특성을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 서론에서 밝힌 바와 같이 EB-PVD는 매우 빠른 증착속도가 특징인데, 기판의 온도는 기상에서 고상으로의 상전이 과정에서 핵생성 및 결정 성장 속도를 결정하여 코팅층의 미세구조를 결정하는 중요한 요인이 될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 기판의 온도를 각각 600, 700, 800°C로 변화시켜 증착된 코팅막의 미세구조를 조절하고자 하였다. YSZ 전해질을 증착하기 위하여, 기타의 실험 조건은 Table 1에 정리하였다.

### 2.3. YSZ의 상 및 전기적 특성 분석

순수한 지르코니아는 온도에 따라 단사정, 정방정(1000°C

**Table 1.** The Condition of Deposition by Electron Beam

Target source material	8 YSZ (8 mole% yttria stabilized zirconia)
Gas flow	O <sub>2</sub> gas : 5 cc/min
Substrate	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Substrate temperature	800°C
Deposition time	25 min
Generating power of EB	3.5 kW

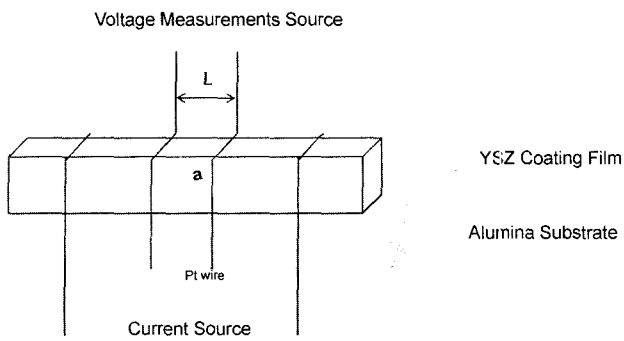
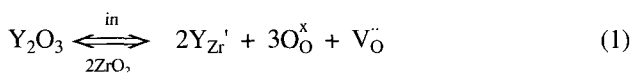


Fig. 1. The measuring device for electrical properties of the YSZ film on alumina by using 4-probe D.C method.

이상), 입방정(2750°C 이상)의 구조를 갖는데, CaO 혹은 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 첨가량에 따라 1000°C 이하의 온도에서도 정방정이나 입방정의 구조로 안정화시킨다. 구조용 재료로서는 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가량이 비교적 적은 부분안정화 지르코니아를 사용하지만, 연료전지나 산소센서와 같은 전해질로서 높은 이온전도도를 갖기 위해서는 8 mol% 이상의 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가된 입방정 구조의 안정화 지르코니아가 이용된다. 본 연구에서는 증착된 막의 상을 분석하기 위하여 X-선 회절법을 이용하였다. 코팅층의 표면 및 단면의 미세구조를 전계 방출형 주사 전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM) 및 원자현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)을 이용하여 분석하였다.

지르코니아 막의 전기전도도를 측정하기 위하여 알루미늄 기판위에 증착된 시편을 Fig. 1과 같이 백금 전극을 도포한 후, 산소분위기에서 800°C로 열처리 하였다. 그 후 백금 전선을 감아 직류 4단자법을 이용하여 전기전도도를 측정하였다. 직류 4단자법에 의한 전기저항 측정은 -50~+50 μA의 전류를 인가한 후 내부의 두 전극사이에서 전압을 측정하여 계산하였다.

고체산화물 연료전지의 전해질로서 사용하기 위해서는 높은 이온전도도와 더불어 낮은 전자전도계수(electronic transference number)를 갖는 것이 중요하다. 왜냐하면, 전자전도도에 의한 전류만큼 산소이온의 전도에 의한 발생 전력을 감소시키기 때문이다. YSZ의 이온전도도는 아래 반응식에 의해 고용된 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 의해 생성된 산소결함(oxygen vacancy)에 의해 결정되므로, 산소분압에 관계없이 일정한 전도도를 갖는다.



따라서 본 연구에서는 헬륨 가스와 산소 가스를 혼합하여 산소분압을 조절하면서 전기전도도를 측정하여 전해질로서의 특성을 확인하였다. 측정 온도는 700~1000°C의 범위로 변화시켰다.

### 2.4. 단전지 성능 평가

YSZ 전해질을 EB-PVD법으로 제조한 후, 일반적인 스크린 프린팅 기법을 이용하여 양극물질로서 LaSrCoO<sub>3</sub> 분말을 전해질 표면에 코팅하여 버튼형 단전지를 제조하였다. 양극 물질인 LaSrCoO<sub>3</sub> 분말은 혼합이온전도체로서 기존의 연구 결과에서 산소 이온 전도성이 우수하여 연료전지의 전극물질 및 산소투과 분리막으로 이용이 가능하다고 알려져 있다.<sup>7,8)</sup> 양극 물질의 스크린 프린팅 조건은 Table 2에 정리하였다. 버튼형 단전지는 2.2절에서의 제조 조건 중에서 기판의 온도를 700°C로 하여 전해질을 코팅한 시편을 사용하여 만들었으며, Fig. 2와 같이 단전지를 반응기에 장착하여 성능을 테스트 하였다. 이때 전극에 백금 페이스트를 칠하고 은 링(Ag ring)을 이용하여 가스의 흐름을 차단하였다. 버튼형 단전지는 원형으로 직경은 12 mm이며 이에 따른 전극 면적은 1.13 cm<sup>2</sup>이다. 단전지 전력을 평가할 때 쓰인 가스는 음극에는 4% H<sub>2</sub> 가스와 H<sub>2</sub>O를 혼합하여 흘렸으며, 양극은 공기를 흘려주면서 800°C에서 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. YSZ의 결정구조 및 미세구조

NiO-YSZ 디스크 위에 증착된 YSZ 코팅막에 대하여 X-

Table 2. The Paste of LaSrCoO<sub>3</sub> Powder for Screen Printing on YSZ Film

Solvent	α-Tepineol	85 wt%	
Bonding	Ethyl cellulose	7 wt%	60 wt%
Dispersant	Fish oil	2 wt%	
Plasticizer	PEG+DBP	6 wt%	
Ceramic powder	LaSrCoO <sub>3</sub> powder		40 wt%

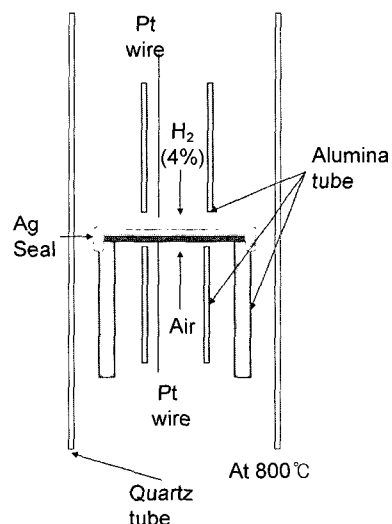


Fig. 2. Schematic of the experimental button cell testing arrangement.

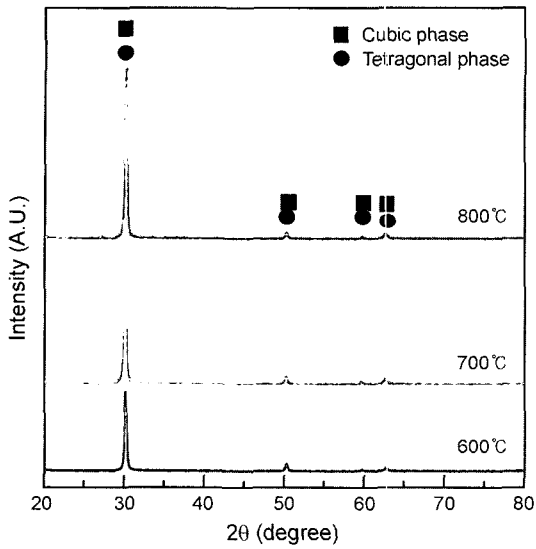


Fig. 3. The XRD patterns of the YSZ films by EB-PVD at substrate temperature of 600, 700, and 800°C.

선 회절(XRD) 스펙트럼을 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. 증착온도에 관계없이 단사정(monoclinic) 상에 의한 회절은 관찰되지 않았으며,  $2\theta \sim 30^\circ$  부근에서 가장 큰 회절강도를 보였다. 입방정(cubic)과 정방정(tetragonal) 결정 구조는 모두  $30^\circ$  부근에서 가장 큰 회절 피크를 보이므로 단일상으로 존재한다고 말하기는 어렵다.<sup>9)</sup> 본 연구에서 사용된 원료분말은 8 mol%의  $Y_2O_3$ 가 첨가된 것으로서, 입방정계의 Fluorite 구조를 가지지만, 용융된 타겟으로부터 Y와 Zr의 휘발속도가 일정하지 않다면 사용된 원료물질과 다른 조성의 막을 얻을 가능성이 있다. 이러한 점은 EB-PVD 공정의 대표적인 문제점으로서, 원료물질의 조성이 다양할수록 각 물질의 용점과 증기압이 다르기 때문에 원하는 막의 조성을 얻기 어렵다.

증착온도가 증가함에 따라  $30^\circ$  부근 peak의 상대적인 크기가 증가하는 것으로 보아, 증착온도가 높을수록 (111) 면으로 편향된 성장이 일어나며 보다 결정화된 구조를 갖는 것으로 생각된다. 알루미늄 기판 위에 증착된 YSZ 코

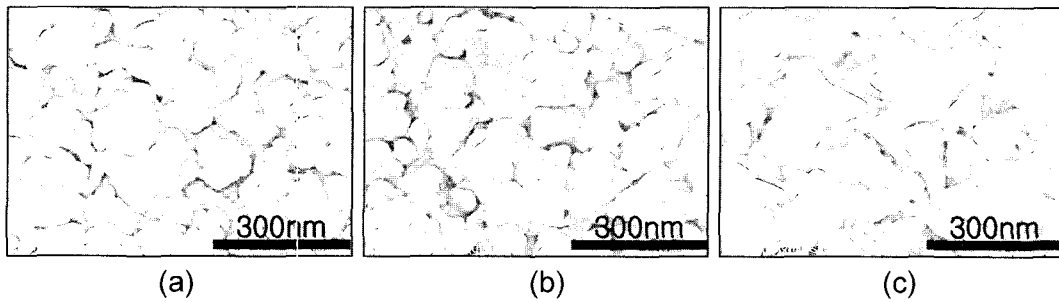


Fig. 4. The FE-SEM surface images of the YSZ films on NiO-YSZ anode substrates as a function of substrate temperature (a) 600, (b) 700, and (c) 800°C.

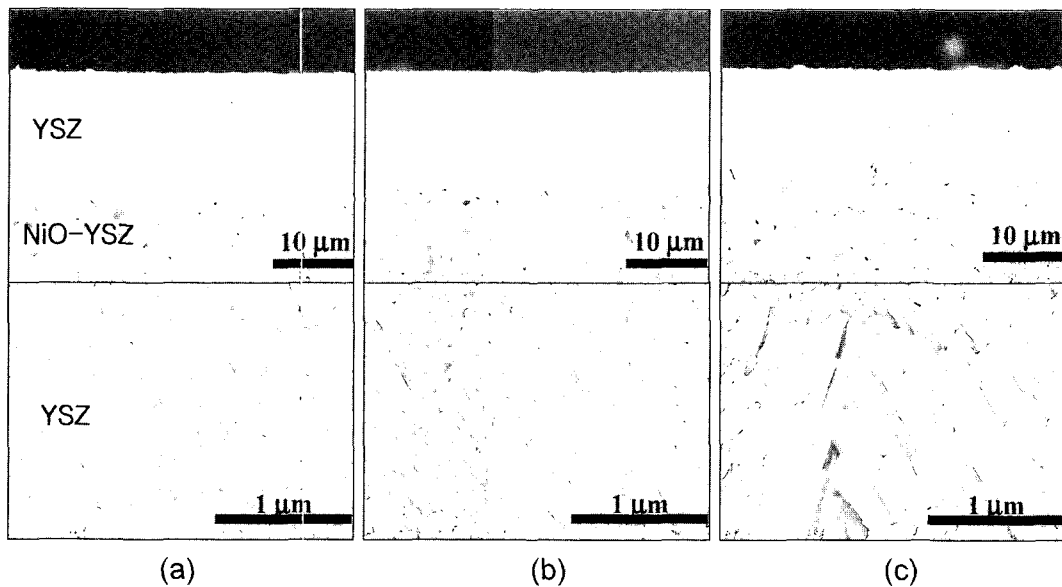


Fig. 5. The FE-SEM cross-sectional images of the YSZ films on NiO-YSZ anode substrates as a functions of substrate temperature (a) 600, (b) 700, and (c) 800°C.

팅막도 거의 같은 회절특성을 보였다. 본 연구에서는 두 개의 시편을 동시에 장착하여 막을 증착하였으므로, 같은 조성과 구조를 갖는 상이 형성되었을 것으로 판단된다.

Figs. 4와 5는 NiO-YSZ 기판 위에 증착된 YSZ 막의 표면 및 단면의 미세구조를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과이다. 20여 분 동안 증착된 막의 두께는 증착온도에 관계없이 11 - 13  $\mu\text{m}$ 로 일정하였다.

Fig. 5에서 나타난 바와 같이, EB-PVD로 증착한 YSZ 코팅막의 표면 미세구조는 매우 흥미로운 결과를 보여주었다. 600°C에서 증착된 막은 직경 ~50 - 100 nm 크기의 구형 입자들로 이루어져 있는 반면에, 800°C에서 증착된 막의 표면 미세구조는 삼각형 모양의 입자형상의 성장이 보다 뚜렷이 나타났다. 이러한 결과는 X-선 회절 패턴으로부터 입방정 혹은 정방정 구조에서의 (111) 결정면에 의한 우선 배향이 일어나는 결과와 일치한다.<sup>10)</sup> 현재까지 YSZ의 결정면에 따른 산소나 연료 기체와의 반응성의 상관관계는 알 수 없으나, 나노 입자로 이루어진 표면 구조는 기체와의 반응성을 향상시키고, 전극과의 반응면적을 넓혀 전극반응에 의한 과전압을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 5에서 관찰된 바, YSZ 코팅막의 표면 사진은 증착 온도가 막의 미세구조에 얼마나 중요한 영향을 미치는 지를 보여준다. 표면 구조와 마찬가지로, 증착 온도가 낮을 때에는 직경 100 nm 이하의 구형입자들이 치밀한 막을 형성하고 있는 반면에 (Fig. 5(a)) 증착온도가 증가할수록 주상의 입자들이 V자의 형태로 성장하여 있음을 알 수 있다(Fig. 5(b), (c)). 이는 증착 온도가 증가할수록, 기체상으로부터 고체상으로 응결되는 과정에서 핵 생성속도보다 입자성장 속도가 커지면서 결정상을 발달 시키기는 것으로 사료된다. 이는 막 형성의 주요인자로 기판의 온도와 증착 입자의 속도(운동에너지)인 것으로 잘 알려져 있으며 본 연구의 실험조건에서 증착 기판의 온도 외에 모든 변수를 고정시켰으므로 기판의 온도의 요인으로 핵형성과 성장의 메커니즘을 고려하여 판단한 것이다. 따라서 증착 기판의 온도가 높을수록 성장이 보다 유리할 것으로 판단된다.

### 3.2. YSZ 코팅막의 전기적 특성

본 연구에서는 기판의 온도가 코팅막의 미세구조 형성에 있어 매우 중요한 요인이 됨을 밝혔다. 3.1절에서 보는 바와 같이 기판의 온도에 따라 미세구조에 차이가 명확히 있으며 이러한 요인이 전기적 특성에 영향을 미칠 것으로 판단되었으며, Fig. 6의 결과 전기전도도의 특성은 기판의 온도가 700, 800°C의 경우가 비교적 좋은 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 기판의 온도가 클수록 입자의 성장이 커져 전기전도도에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 YSZ 코팅막이 전해질로서 사용되기 위해서는 순수한 이온전도도를 가질 필요가 있는데, 전자 전도

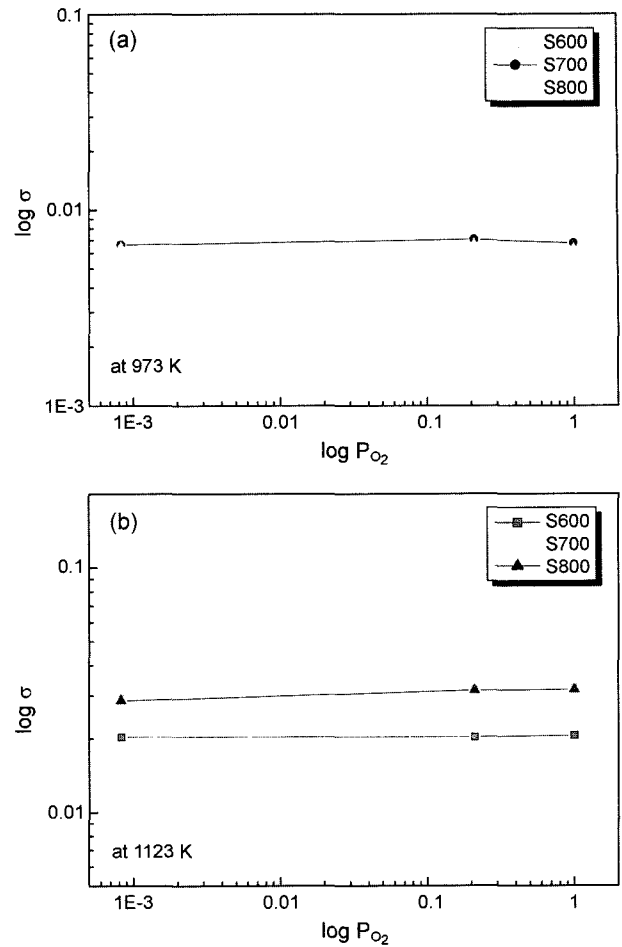


Fig. 6. Electrical conductivity of the YSZ films as a function of partial O<sub>2</sub> pressure at (a) 700 and (b) 950°C.

도를 가질 경우 전해질 내부에서 전자전도도에 의한 전력손실이 나타나기 때문이다. Fig. 6(a), (b)는 950, 700°C의 각각에서 전기전도도를 산소 분압별로 측정된 결과이며 그림에서 보는 바와 같이 전체 전기전도도는 산화분위기에서 산소분압과 관계없이 일정한 값을 나타낸다. 이는 YSZ 코팅막의 전기전도도가 순수한 이온전도도임을 나타낸 예이며 YSZ 코팅막이 연료전지의 전해질막으로 사용 가능함을 증명한 중요한 결과이다.

### 3.3. 단전지 성능 평가

NiO-YSZ 기판 위에 EB-PVD법을 이용하여 YSZ 전해질을 10  $\mu\text{m}$  정도의 두께로 코팅하고 다시 그 위에 LaSrCo<sub>3</sub> 양극 물질을 코팅하여 버튼형 단전지를 완성하였다. 버튼형 단전지의 경우 전극 면적이 1.13 cm<sup>2</sup>으로 매우 작았으며 EB-PVD법으로 제조한 YSZ 전해질막의 미세한 성능을 평가하기에 여러 가지 전극 성능이 최적화가 되지 않아 평가하기 힘들었다. Fig 7에서 보는 바와 같이 단위 면적당 최대 출력은 800°C에서 4.6 mW/cm<sup>2</sup>이었으며 개방

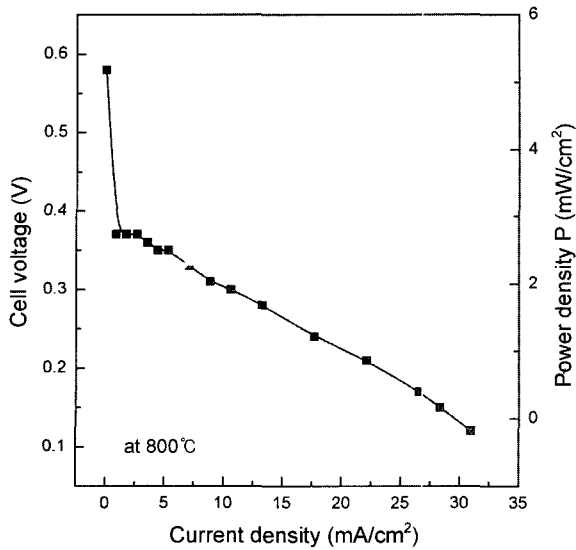


Fig. 7. Performance of the button cell prepared by EB-PVD at substrate temperature of 700°C measured at 800°C under 4%H<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O/air condition.

회로 전압(OCV: Open Circuit Voltage)은 0.6 V를 측정할 수 있었다. 전해질막에서의 가스 누설은 없었으며 전극의 저항이 큰 요인으로 작용하여 이론적인 값에 도달하지 못한 것으로 판단된다. 다만, 새로운 코팅방법으로 EB-PVD 법을 이용하여 고체산화물 연료전지의 전해질 및 SOFC 제조의 응용가능성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

기존에 YSZ를 이용한 열차폐 코팅에 응용되어 온 EB-PVD를 이용하여 NiO-YSZ 기판 위에 YSZ 전해질막을 증착하였다. 증착된 막의 미세구조는 기판의 온도에 매우 의존적이며, 600~800°C 범위에서 온도가 증가할수록 주상의 결정상들이 성장함을 관찰하였다. 생성된 코팅막의 결정상은 주로 입방정과 정방정의 혼합체로 이루어졌음을 X-선 회절 스펙트럼으로부터 확인하였다. 이러한 미세구조의 차이는 전기적 특성에 영향을 미쳤으며 산소분압 별 전기전도도의 영향은 없었으므로 순수한 이온전도성을 보임에 따라 연료전지 전해질막으로 사용가능함을 확인할 수 있었다. NiO-YSZ 기판의 온도가 700°C일때 YSZ

전해질막을 증착한 시편을 LaSrCoO<sub>3</sub>의 양극 물질을 코팅하여 단전지를 제조하고 그 평가를 하였는데, 이론적인 값에 미치지 못하였으며 이는 음극과 양극의 전극성능이 최적화 되지 못하여 낮은 수치를 얻은 것으로 판단되었다. 다만, 본연구의 결과에서는 EB-PVD를 이용하여 연료전지 제조에 새로운 응용의 가능성을 확인하였다.

#### REFERENCES

1. B. A. Movchan, "Functionally Graded EB-PVD Coating," *Surf. and Coat. Tech.*, **149** [2-3] 252-62 (2002).
2. B. Saruhan, P. Francois, K. Fritscher, and U. Schulz, "EB-PVD Processing of Pyrochlorestuctured La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Based TBCs," *Surf. and Coat. Tech.*, **182** [2-3] 175-83 (2004).
3. Y. J. Leng, S. H. Chan, K. A. Khor, and S. P. Jiang, "Performance Evaluation of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells with Thin Film YSZ Electrolyte," *Int. J. of Hydrogen Energy*, **29** [10] 1025-33 (2004).
4. C. Wang, W. L. Worrell, S. Park, J. M. Vohs, and R. J. Gorte, "Fabrication and Performance of Thin Film YSZ Solid Oxide Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **148** [8] A864-A68 (2001).
5. S. Y. Chun and N. Mizutani, "The Transport Mechanism of YSZ Thin Films Prepared by MOCVD," *Appl. Surf. Sci.*, **171** [1-2] 82-8 (2001).
6. K. S. Lee, D. W. Seo, J. H. Yu, and S. K. Woo, "A Study on the Improvement of Strength in NiO-YSZ Porous Anode Material for Solid Oxide Fuel Cell," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [3] 241-48 (2003).
7. S. Lee, S. Y. Lee, K. S. Lee, S. K. Woo, and D. K. Kim, "Oxygen Permeation and Mechanical Properties of La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.8</sub>O<sub>3-δ</sub> Membrane with Different Microstructures," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [3-4] 994-1000 (2002).
8. S. Lee, S. Y. Lee, K. S. Lee, K. W. Chung, D. K. Kim, and S. K. Woo, "Oxygen Permeation and Syngas Production of La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>O<sub>3-δ</sub> Oxygen Permeable Membrane," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [6] 594-600 (2003).
9. M. H. Li, X. F. Sun, S. K. Gong, Z. Y. Zhang, H. R. Guan, and Z. Q. Hu, "Phase Transformation and Bond Coat Oxidation Behavior of EB-PVD Thermal Barrier Coating," *Surf. and Coat. Tech.*, **176** [2] 209-14 (2004).
10. K. Wada, N. Yamaguchi, and H. Matsubara, "Crystallographic Texture Evolution in ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Layers Produced by Electron Beam Physical Vapor Deposition," *Surf. and Coat. Tech.*, **184** [1] 55-62 (2004).