

# 고주파 유도결합 열플라즈마를 이용한 IT-SOFC용 LSCF 나노분말 합성 및 전기전도도 특성 평가

이호상<sup>1</sup> · 정상민<sup>2</sup> · 양시영<sup>1</sup> · 서준호<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 유연인쇄전자전문대학원, <sup>2</sup>전북대학교 양자시스템공학과

## Radio-Frequency Thermal Plasma Synthesis of LSCF Nano-Powders for Cathode Applications in IT-SOFC

HOSANG LEE<sup>1</sup>, SANG-MIN CHUNG<sup>2</sup>, SHI-YOUNG YANG<sup>1</sup>, JUN-HO SEO<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Flexible & Printable Electronics, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea

<sup>2</sup>Department of Quantum System Engineering, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
jhseo@jbnu.ac.kr

Received 6 February, 2021  
Revised 5 April, 2021  
Accepted 12 April, 2021

**Abstract >>** This work investigates the characteristics of LSCF nano-powders prepared by RF thermal plasma method and the electrical conductivity of their sintered body. XRD graphs and FE-SEM images of the as-synthesized powders showed that single phase LSCF nano-particles were synthesized with the averaged sizes of  $\leq 300$  nm. TEM mapping images and ICP-MS data revealed that metal atoms, La, Sr, Co, Fe, were incorporated into a single particle with small difference of  $<3$  wt% in global composition. In addition, the as-synthesized powders were pressed in the shape of disk and sintered at  $1,100^\circ\text{C}$  for 3 hours. For the sintered body, electrical conductivities were measured for temperatures between  $20^\circ\text{C}$  to  $750^\circ\text{C}$  by using Van der Pauw method, showing high electrical conductivity of  $\geq 300$  S/cm at  $750^\circ\text{C}$ .

**Key words :** RF thermal plasma(고주파 유도결합 열플라즈마), LSCF-6428 (LSCF-6428), Electrical conductivity(전기전도도), IT-SOFC(중저온 고체산화물연료전지), Nano-powder(나노분말)

### 1. 서론

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF)는 ABO<sub>3</sub> 형태의 페로스카이트 구조를 갖는  $\text{LaCoO}_3$ 의 La 또는 Co 자리에 Sr 또는 Fe을 치환한 것으로, 치환되는 Sr과 Fe의 양

을 조절함으로써, 미세 구조를 변화시키고, 이를 통해 전기전도도와 열팽창계수를 제어할 수 있다는 특징이 있다<sup>1-4)</sup>. 예를 들어, Fe 함량은 높을수록 열팽창계수가 작아지는 반면, Sr 함량은 20-40% 사이에서 LSCF의 전기전도도를 극대화시킬 수 있다<sup>1)</sup>. 조성

따른 이와 같은 재료 특성을 바탕으로, 800°C 이하에서 우수한 전기전도도와 기계적 성질을 보여주는  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ 가 중, 저온형 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)의 공기극 재료로서 최근 활발하게 연구가 진행 중이다<sup>1-3)</sup>.

LSCF 산화물의 대표적 제조법으로 고상법, 액상법 및 화염법 등을 들 수 있다<sup>5-10)</sup>. 고상법의 경우, LSCF 단일 상을 가진 페로브스카이트계 산화물을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 셀 재료로 유용성이 있는 분말 상태로 만들기 위해서는 별도의 분쇄과정을 거쳐야하는데, 이 과정에서 불순물이 혼입될 수 있고, 무엇보다 1  $\mu\text{m}$  이하 영역에서 급격히 떨어지는 분쇄 효율로 인해 나노 크기의 산화물을 합성하기에는 부적합하다<sup>5,6)</sup>. 반면, 액상법의 경우 LSCF 단일 상 외 2차 상(secondary phase)들이 나타나기 쉽고, 분말 간 응집이 심할 뿐만 아니라 결정성을 높이기 위해서는 별도의 하소과정 등을 거쳐야 하는 단점이 있다<sup>7,8)</sup>. 이외, 연소법과 같은 방법이 도입되고 있으나, 고온 연소 시 발생하는 유독성 가스 및 환경유해 물질 배출 문제 등을 해결할 필요가 있다<sup>9,10)</sup>.

고주파 유도결합 열플라즈마를 이용한 나노분말 제조 기술은 초고온 열플라즈마를 사용하여 수 수십  $\mu\text{m}$  크기의 금속, 세라믹 등 고용점 원료분말 또는 액상 및 기상원료 등을 순간적으로 용융, 기화 또는 분해시키고 이들 용융, 기화 또는 분해된 입자 종들을 급랭시키는 과정에서 1마이크로미터 크기 이하의 나노분말을 대량으로 합성하는 방법이다<sup>11-17)</sup>. 액상법, 고상법 등과 같은 재료의 분말합성방법에 비해, 환경 부담이 적을 뿐만 아니라, 제조된 분말의 분산 특성이 좋고, 결정성, 순도 및 밀도가 높아 최근 multi layer ceramic capacitor (MLCC)용 전극재<sup>11)</sup>, 유전체 및 소결조제<sup>12,13)</sup> 뿐만 아니라, 촉매<sup>14)</sup>, 기타 기능성 나노분말<sup>15,16)</sup> 등 다양한 형태, 다양한 목적의 나노복합분말 생산에 활용되고 있다.

본고에서는 액상 분무기술을 이용한 고주파 열플라즈마법<sup>17-19)</sup>을 적용하여 intermediate temperature-solid oxide fuel cell (IT-SOFC)용 LSCF 재료를 합성하고, 합성된 분말의 전기적 특성을 평가하였다. 이

를 위해, La, Sr, Co 및 Fe을 함유한 질산염 원료분말들을 순수와 에탄올에 용해한 다음, 액상 전구체 형태로 고출력 고주파 열플라즈마 시스템에 주입하여 LSCF 나노분말을 합성하였으며, 합성된 분말의 미세구조 및 결정 특성 등을 분석하였다. 또한, 합성된 나노분말들을 펠릿화하여 소결시킨 다음, 소결체의 전기전도도를 200°C부터 시작하여 750°C까지 Van der Pauw법을 이용하여 측정하고 그 결과를 분석하여 플라즈마법으로 합성된 LSCF 나노분말의 실용화 가능성을 살펴보았다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치의 구성 및 액상 전구체의 제조

Fig. 1은 고주파 유도결합 플라즈마 토치, 3-4 MHz의 발전 주파수를 가진 자력식 고주파 전원(TruHeat HF7100, Trumpf, Ditzingen, Germany), 반응기, 필터부와 진공펌프 등으로 주요하게 구성된 나노분말 합성 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 고주파 유도 결합 플라즈마 토치는, 내경 100 mm의 실리콘나이트라이드 관을, 감은 수 4회의 유도코일이 내장된 원통형 코일 지지체 내부에 동축으로 배

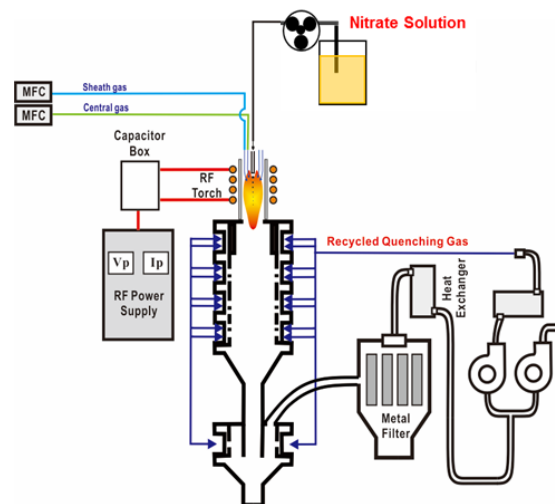


Fig. 1. A schematic of RF thermal plasma synthesis system

치하고, 토치 노즐 및 토치 상부 부품을 이용하여 상호 결합시킨 형태로서, Fig. 2와 같이 설계 제작하여 반응기 상부에 설치하였다. 또한, 실리콘나이트라이드 관과 유도코일 뭉치 사이에 고속의 냉각수를 흐르게 함으로써, Fig. 1의 자력식 고주파 전원으로부터 최대 150 kVA의 고주파 전력이 입력되었을 때에도 안정적인 플라즈마 불꽃을 제공할 수 있도록 설계되었다.

Fig. 2에서 도시된 고주파 유도결합 플라즈마 토치에 대해, 토치 중심부로 주입되는 중심 기체(central gas)와 실리콘나이트라이드 관 내벽을 따라 흐르는 쉬스 기체(sheath gas)를 공급하고 유도코일에 고주파 전력을 인가해 줌으로써, 고주파 유도결합 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 중심 기체로 알곤(argon)을, 쉬스기체로 알곤(argon)과 산소(oxygen) 혼합기체를 사용하였으며 각각의 유량은 Table 1에 다른 실험 조건들과 함께 나타내었다.

Fig. 2는 고주파 유도결합 플라즈마 토치의 단면과 LSCF 합성을 위한 액상 전구체의 주입방법도 함께 보여주고 있다. 먼저, 액상 전구체는 Fig. 1에서 보인 바와 같이, 액체 이송용 정량 펌프를 이용하여, 토치 상부의 수냉식 주입 탐침(injection probe)으로 이송된다. 수냉식 주입 탐침은 Fig. 2에서 확인할 수

있듯이, 3개의 스테인레스 스틸관이 동축으로 배치된 형태를 가지고 있다. 이 중 바깥쪽 2개의 관은 냉각수 흐름을 위해 구성된 냉각관이며, 액상 전구체는 가장 안쪽에 위치한 나머지 1개의 주입관을 통해 토치의 중심축을 따라 플라즈마로 투입된다. 동시에, 주입관 외면과 수냉관 내면 사이 공간을 통해 액적 형성을 위한 운반기체(carrier gas)가 공급된다. 주입관 끝단은 외면에 직경 1 mm 구멍 4개가 대칭으로 뚫린 채 막혀 있어(Fig. 2), 액상 전구체들도 이 구멍을 통해 주입관 외면과 수냉관 내면 사이 공간으로 빠져나오게 된다. 그 결과, 액상 전구체들은 빠져나오는 대로, 운반기체에 의해 잘게 잘리게 되고, 액적 형태로 플라즈마 중심축을 따라 분사된다.

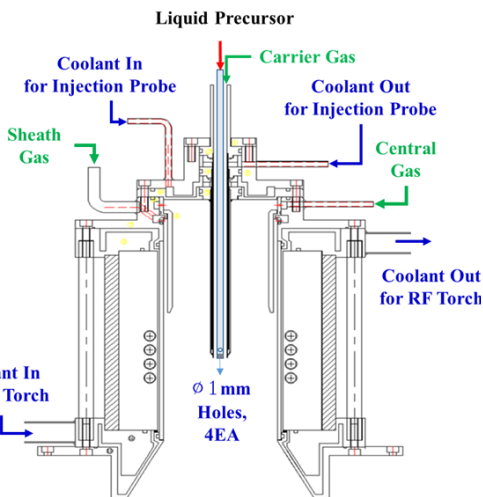
실험에 사용된 액상 전구체는, La, Sr, Co 및 Fe을 함유한 대표적 질산염인,  $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ,  $Sr(NO_3)_2$ ,  $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  및  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 를 La, Sr, Co 및 Fe 원자에 대한 몰 비가  $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$ 의 화학당량을 맞출 수 있도록 정량한 다음 순수에 용해시키고, 이 수용액에 에탄올을 추가하여 제조하였다. 여기서, 에탄올의 추가는 1.5 몰 농도의 질산염 수용액을 원활하게 투입하기 위한 점도 조절과 플라즈마 내에서 연소에 의한 추가적인 열량을 제공할 목적으로 수행되었다.

## 2.2 분말 특성 평가 및 소결체의 전기전도도 측정

플라즈마 합성 실험 후 생성물들은 Fig. 1의 필터 부에서 포집되었으며, FE-SEM (S4800, Hitachi Ltd,

**Table 1.** Experimental conditions for synthesis of LSCF nano powders by using RF thermal plasmas

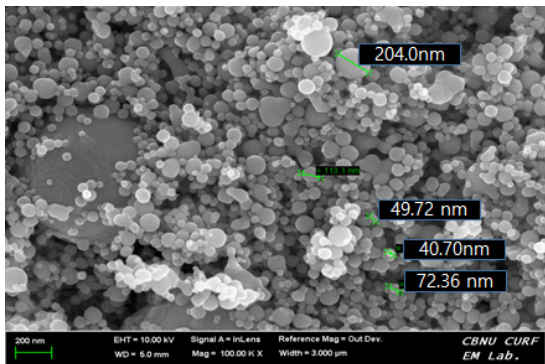
Operation parameters	Values
Plasma forming gases	
· Central gas (lpm)	50 (Ar)
· Sheath gas (lpm)	150 (Ar) + 30 (O <sub>2</sub> )
· Carrier gas (lpm)	10 (Ar)
Reactor pressure (kPa)	44-54
Plate power (kVA)	~60
Feeding rate of precursor [mL/min]	40



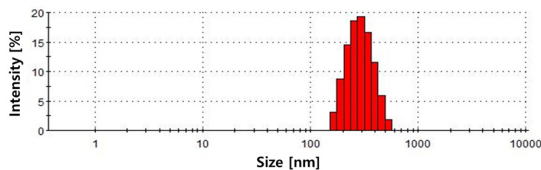
**Fig. 2.** A cross-sectional view of RF thermal plasma torch

Tokyo, Japan), Particle Size Analyzer (Zetasizer Nano ZS90, Malvern Instruments, Malvern, UK), XRD (D8Advance, Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany) TEM mapping (JEM-ARM-200F, JEOL Ltd., Tokyo, Japan), ICP-MS (7500A ICP-MS, Agilent Technology, Santa Clara, CA, USA) 등을 이용하여 물성 분석을 수행하였다.

또한, 합성된 LSCF 나노분말을 소결하여 지름 12 mm, 두께 1 mm인 디스크 형태의 소결체를 만들고 온도 변화에 따른 전기전도도 변화를 추적하였다. 이를 위해, 합성된 LSCF 나노분말을 스텐레스 스틸 mold에 채운 다음, 10 ton/cm<sup>2</sup>의 압력을 약 5분간 가하여, 펠렛을 성형하고, 성형된 펠렛을 1,100°C에서 3시간 동안 소결하여 소결체를 얻었다. 이후, 소결체 귀통이 4곳에 은으로 제조된 도선을 연결한 후, 1,000°C 이상 가열 가능한 원통형 수평로 중심부에 설치한 다음, 공기 분위기에서 20°C부터 750°C까지 온도를 변화시켜가며, Van der Pauw 법을 이용하여 전기전도도를 측정하였다.



(a)



(b)

**Fig. 3.** (a) FE-SEM image and (b) particle size distribution of the as-synthesized nano-powders

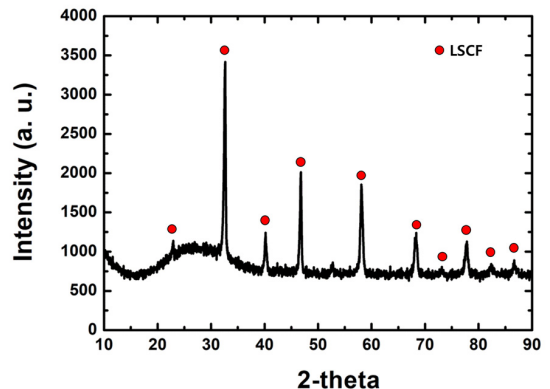
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 합성된 분말의 특성 분석

Fig. 3은 Fig. 1의 필터부에서 수거한 생성물의 FE-SEM 사진과 입도분포 그래프를 각각 나타내고 있다. 이 그림들로부터, 합성된 생성물은 D50 크기가 300 nm 이하인 구상 나노분말임을 알 수 있다. 일반적으로, 3,000 K 이상의 고온 플라즈마에 액상 혼합 원료를 액적 형태로 주입할 경우, 액적에서 용매들이 순간적으로 기화되어 빠져나가게 된다<sup>18,19</sup>. 용매의 증발로 인해 석출된 용질들은 서로 뭉쳐서 플라즈마 내부를 비행하며 지속적으로 가열되는데, 이 과정에서 구성 물질 간 원자 수준에서의 재조합 및 고상 반응 등을 기대할 수 있다.

Fig. 4는 합성된 분말에 대한 XRD 그래프로서, 앞에서 언급한, 비행 중인 액적을 플라즈마 처리한 결과물들이 LSCF 단일 상 구조의 나노분말로 재조합되었음을 보여주고 있다. 특히, 300 nm 이하의 나노분말임에도 별도의 2차 상 없이 결정성 높은 LSCF 단일 상으로 합성된 점은 종래의 액상법들과 비교하여 고주파 유도결합 플라즈마의 고유한 장점이 될 수 있다.

Fig. 5은 플라즈마 합성된 LSCF 분말에 대한 TEM mapping 사진을 보여주고 있다. 이 사진으로부터, 무엇보다, La, Sr, Co 및 Fe 원자들이 합성된 개별 입자



**Fig. 4.** XRD graph of the as-synthesized nano-powders

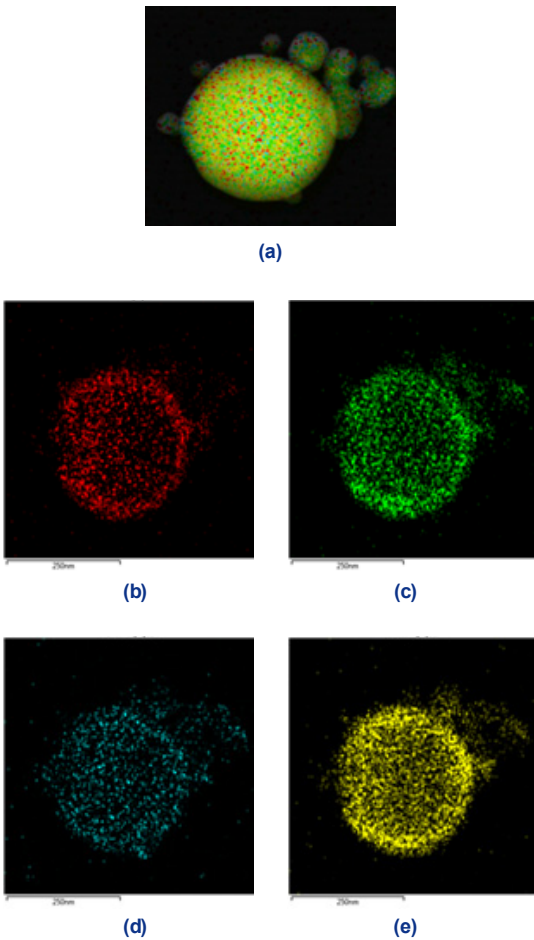
내에서 골고루 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 TEM-mapping 이미지 결과는 XRD (Fig. 4) 데이터와 함께 액상 전구체의 고주파 열플라즈마 처리에 의해 LSCF 단일 상을 갖는 고결정 나노분말을 합성할 수 있음을 보여준다.

마지막으로, Table 2에 ICP-MS 분석을 통해 얻은 LSCF 나노분말 내 La, Sr, Co 및 Fe 원자 함량과 액상 전구체 제조 시 사용한 설계조성값을 상호 비교하여 나타내었다. Table 2의 비교 결과로부터, 액상 분무를 이용한 고주파 열플라즈마법으로 합성된 LSCF 분말들은 액상 전구체에 대한 설계값 대비 2.6 wt. % 이내에서 조성 제어도 가능성을 확인할 수 있다. 한

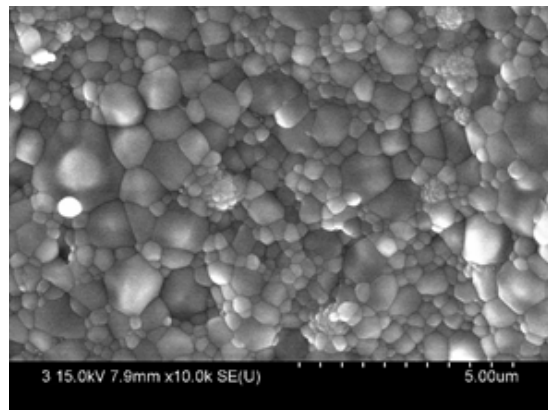
편, Table 2에 표시된 설계 조성과 합성 조성의 차이는 플라즈마를 통한 LSCF 합성 과정에서 La의 손실과 이로 인한 Co의 상대적 화학량량 증가가 발생할 수 있다는 것을 보여준다. 앞에서 언급한 것처럼, 플라즈마 내에서 액상 혼합원료로부터 석출된 용질들

**Table 2.** Comparison of the weight percentages between the designed values and ICP-OES data of the as-synthesised LSCF nano-powder

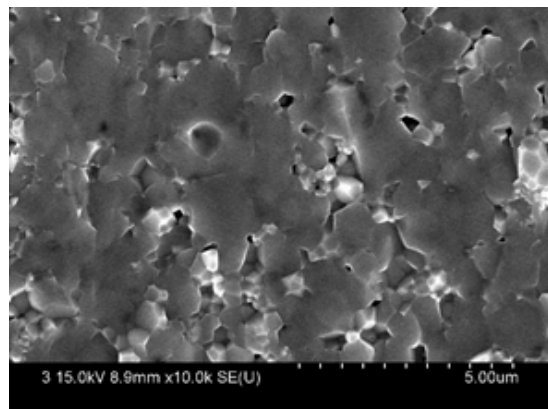
Nitrates	La	Sr	Co	Fe
Designed (A)	47.66	20.04	6.74	25.55
as-synthesized (B)	45.10	21.31	9.48	24.11
Difference (A-B)	2.56	-1.27	-2.74	1.44



**Fig. 5.** TEM image of (a) the as-synthesized particle mapped with the element of (b) La, (c) Sr, (d) Co and (e) Fe



(a)



(b)

**Fig. 6.** FE-SEM images for (a) surface and (b) cross-section of the LSCF body sintered at 1,100°C

은 서로 뭉쳐서 플라즈마 내부를 비행하며 지속적으로 가열됨과 동시에 주위의 산소들과 반응하여 산화되는 과정을 겪는다. 이 과정에서 주변의 산소량이나 플라즈마에 의한 열전달이 충분치 않을 경우, 코발트 산화물에 비해 표준생성 엔탈피가 더 큰<sup>20,21)</sup> 란타넘 산화물의 형성이 상대적으로 덜 이루어질 수 있다. 곧, Table 1의 실험 조건에서 산소 유량과 플라즈마 출력을 더 높여줄 경우, Table 2의 조성 차이는 좀 더 개선될 수 있을 것이라 생각된다.

### 3.2 소결체의 전기전도도 특성

Fig. 6은 합성된 분말을 1,100°C에서 3시간 동안 소성하여 제작된 소결체의 표면 및 단면에 대한 FE-SEM 사진을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 도시된 소결체의 밀도는 5.51 g/cm<sup>3</sup>로 측정되었는데, 이는 LSCF-6428의 이론적 밀도값인 6.36 g/cm<sup>3</sup> 대비 85.8%에 해당하는 값으로, Petric 등<sup>1)</sup>이 1,350°C에서 제작한 LSCF-6428 소결체의 밀도 5.52 g/cm<sup>3</sup>와 비슷한 값이다. 이에 따라, Fig. 6(b)의 단면 사진에서 1 μm 이내의 기공이 일부 보이지만, 전반적으로 나노분말 간 고온 소결에 의한 고밀도 미세구조를 확인할 수 있다.

또한, 소결체의 XRD 데이터를 나타내고 있는 Fig. 7로부터, 플라즈마 합성된 LSCF 분말의 경우, 연소법

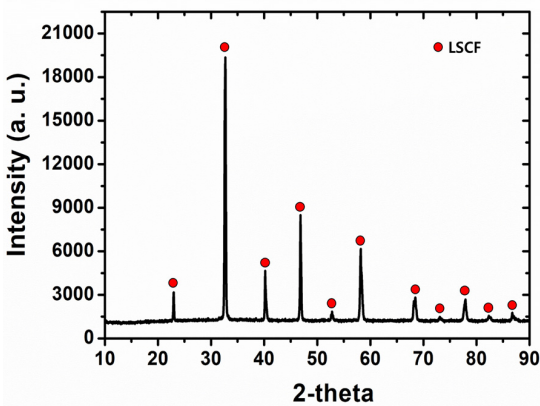


Fig. 7. XRD graph of the LSCF body obtained by sintering of the as-synthesized LSCF powders at 1,100°C

등 다른 제조법으로 합성된 분말과는 달리<sup>9,10,22)</sup>, 별도의 하소과정이 없어도, 고결정 LSCF 단일 상을 갖는 소결체를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Van der Pauw 법으로 측정된 소결체의 전기전도도를 온도 변화에 따라 도시한 것이다. 이 그림에서 소결체의 전기전도도는, 상온에서 온도가 올라감에 따라 증가하다가 550°C에서 최댓값 381.4 S/cm를 기록하고 다시 감소하는 경향을 보인다.

일반적으로, LSCF와 같은 반도체들의 온도에 따른 전기전도도 특성은, p-type small polaron의 온도에 따른 이동도 특성을 반영한 식 (1)을 이용하여 설명할 수 있다<sup>23,24)</sup>.

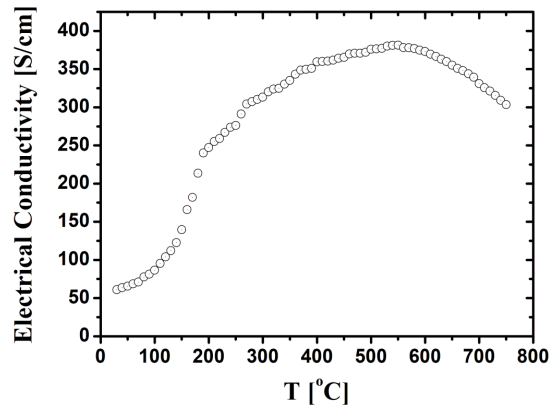


Fig. 8. Electrical conductivity of the LSCF body obtained by sintering of the as-synthesized LSCF powders at 1,100°C

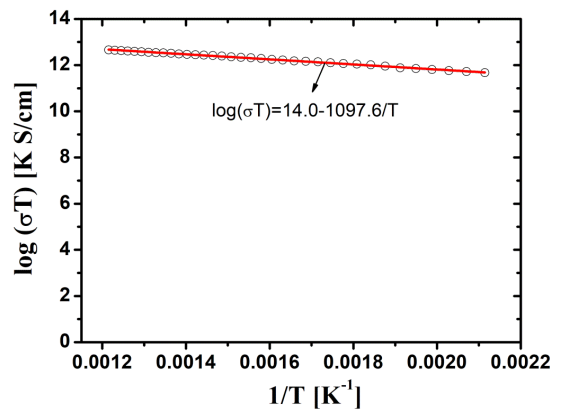


Fig. 9.  $\log(\sigma T)$  vs  $1/T$  graph for the LSCF body obtained by sintering of the as-synthesized LSCF powders at 1,100°C

$$\sigma = \frac{A}{kT} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

위 식에서  $\sigma$ ,  $A$ ,  $T$ ,  $k$  및  $E_a$ 는 각각 재료의 전기전도도, 결정 구조 및 재료 구성과 관련된 상수, 절대 온도, 볼츠만 상수 및 전기전도도의 활성화 에너지를 뜻한다. 식 (1)에서 전기전도도는  $1/T$ 에 대해 비례하는 항과  $1/T$ 의 함수로 표현된 지수항의 곱으로 표현되어 있는데, 여기서  $1/T$ 에 비례하는 항은 온도가 증가함에 따라 전기전도도가 감소한다는 것을, 반면 지수항은 온도에 따라 전기전도도가 증가한다는 것을 가리킨다<sup>23,24</sup>. 곧, 전기전도도는 Fig. 8과 같이 온도가 올라감에 따라 지수항 때문에 증가하다가  $T_{max} = E_a/k$ 에서 최댓값에 이르게 되고, 이후엔  $1/T$ 에 비례하는 항이 전기전도도 값을 지배하기 시작하면서 감소하게 된다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 small polaron이 온도 변화에 따라 활성화되는 모습을 잘 보여주고 있는 200°C에서 550°C까지의 온도 범위에 대해, 소결체의 전기전도도 변화를  $1/T$ 에 대한  $\ln(\sigma T)$  함수로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터, 측정된 전기전도도에 대한  $\ln(\sigma T)$  값은 식 (1)에 의해 예측되는 바와 같이  $1/T$ 에 대해 선형 의존성을 가짐을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 9에서 최소자승법을 써서 fitting한 일차함수의 기울기로부터 활성화 에너지  $E_a$ 를 구해보면 약 0.1 eV 내외임을 알 수 있는데, 이는 Tai 등<sup>24</sup>이 LSCF-6428 조성에 대해 이론적으로 계산한 활성화 에너지 값과 비슷하다.

반면, Fig. 9에서 구한  $E_a$  값으로부터 전기전도도가 최대가 되는 온도  $T_{max}$ 를 구해보면, 약 920°C가 되는데, 이 값은 Fig. 8에서 기록된  $T_{max} = 550^\circ\text{C}$ 에 비해 매우 큰 값이다. 곧, 550°C 이상의 고온에서는, small polaron의 hopping 외에, LSCF 소결체의 전기전도도를 감소시키는 다른 요인이 있다는 것을 의미한다. Tai 등<sup>24</sup>은 고온에서 전기전도도를 감소시키는 주요 요인으로서, LSCF 산화물들 내 산소 방출의 증가에 따른 산소 공공의 증가와 이로 인한 전하 보상 효과를 지목한 바 있다. Fig. 9로부터 구한 활성화 에

너지 및  $T_{max}$ 에 대한 값들이 Tai 등<sup>24</sup>의 결과와 크게 다르지 않으므로, 본 실험에서 사용된 LSCF-6428 소결체 역시 550°C 이상의 고온에서는 산소 손실의 증가를 겪을 것으로 예상되며, 이에 따라 산소이온의 투과도도 크게 증가될 것이라 기대할 수 있다.

## 4. 결론

고주파 유도결합 열플라즈마를 이용하여 La, Sr, Co 및 Fe을 함유한 질산염 용액을 증발시키고, 석출된 용질들을 가열시킴으로써 LSCF 나노분말을 연속적으로 합성하는 공정을 실험하고, 합성된 분말의 분말 특성과 소결체의 전기전도도 특성을 분석하였다.

먼저, 합성된 분말의 경우, 필터에서 수거된 생성물들에 대한 FE-SEM 사진, XRD 데이터 및 TEM-mapping 이미지를 분석한 결과, 300 nm 이하의 LSCF 단일 상을 가진 구상 나노분말로 관찰되었다.

한편, 합성된 LSCF 나노분말을 이용하여 만든 소결체는 550°C에서 최댓값 381.4 S/cm의 전기전도도를 보였으며, 이때의 활성화 에너지는 0.1 eV로 계산되었다. 반면, 550°C 이상이 되면 전기전도도는 650°C에서 355.0 S/cm, 750°C에서는 303.5 S/cm로 지속적으로 감소하는 것을 확인하였다.

이와 같은 결과는 550°C 이하에서는 small polaron conduction 메커니즘을 따라 온도 증가와 함께 전기전도도가 증가하는 반면, 550°C 이상의 고온에서는 산소 공공의 증가 때문에 온도가 올라갈수록 감소하는 전형적인 LSCF-6428 소결체의 전기전도도 특성에 해당하며, 계산된 0.1 eV의 활성화 에너지 역시 LSCF-6428에 대한 다른 문헌자료들과도 잘 일치하는 값에 해당한다.

이상의 실험 결과들로부터 플라즈마법으로 합성된 LSCF 나노분말들 역시 IT-SOFC의 양극 소재로서 활용 가능할 것으로 생각되며, 특히 300 nm 이하의 초미세 분말로서 기능성 잉크와 함께 슬러리 적용성이 우수할 것으로 예상되므로 IT-SOFC용 소재 개발을 위한 새로운 기법으로서 플라즈마법에 대한 관심도 증가할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2016M1A2A2940152). 또한, 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(20191510301420).

## References

1. A. Petric, P. Huang, and F. Tietz, "Evaluation of La-Sr-Co-Fe-O perovskites for solid oxide fuel cells and gas separation", *Solid State Ionics*, Vol. 135, No. 1-4, 2000, pp. 719-725, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00394-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00394-5).
2. E. V. Tsipis and V. V. Kharton, "Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review", *J. Solid State Electrochem.*, Vol. 12, 2008, pp. 1367-1391, doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-008-0611-6>.
3. C. Sun, R. Hui, and J. Roller, "Cathode materials for solid oxide fuel cells: a review", *J. Solid State Electrochem.*, Vol. 14, 2010, pp. 1125-1144, doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-009-0932-0>.
4. M. Kwak, H. J. Choi, T. W. Kim, D. W. Seo, S. K. Woo, and S. D. Kim, "Redox stability and electrochemical performances of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{1-x}\text{Sc}_x\text{O}_{3-\delta}$  for solid oxide cells interconnector", *Trans Korean Hydrogen and New Energy Soc.*, Vol. 29, No. 3, 2018, pp. 274-279, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.3.274>.
5. R. J. Bell, G. J. Millar, and J. Drennan, "Influence of synthesis route on the catalytic properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ", *Solid State Ionics*, Vol. 131, No. 3-4, 2000, pp. 211-220, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00668-8](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00668-8).
6. Q. Zhang, T. Nakagawa, and F. Saito, "Mechanochemical synthesis of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  by grinding constituent oxides", *J. Alloys Compd.*, Vol. 308, No. 1-2, 2000, pp. 121-125, doi: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00901-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00901-4).
7. M. Ghouse, Y. Al-Yousef, A. Al-Musa, and M. F. Al-Otaibi, "Preparation of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$  nanoceramic cathode powders for solid oxide fuel cell (SOFC) application", *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 35, No. 17, 2010, pp. 9411-9419, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.144>.
8. E. Mostafavi, A. Babaei, and A. Ataie, "Synthesis of nanostructured  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$  perovskite by co-precipitation method", *J. ultrafine grained nanostructured mater.*, Vol. 48, No. 1, 2015, pp. 45-52, doi: <https://doi.org/10.7508/jufgmsm.2015.01.007>.
9. L. da Conceicao, A. M. Silva, N. F. P. Ribeiro, and M. M. V. M. Souza, "Combustion synthesis of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_3$  (LSCF) porous materials for application as cathode in IT-SOFC", *Mater. Res. Bull.*, Vol. 46, No. 2, 2011, pp. 308-314, doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.10.009>.
10. A. P. Jamale, A. Natoli, and L. D. Jadhav, "Synthesis of active electrocatalysts using glycine-nitrate chemistry", *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 148, 2021, pp. 109723, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2020.109723>.
11. Y. M. Kim, K. H. Kim, B. Kim, and H. Choi, "Size and morphology manipulation of nickel nanoparticle in inductively coupled thermal plasma synthesis", *J. Alloys Compd.*, Vol. 658, 2016, pp. 824-831, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.136>.
12. J. H. Seo, D. U. Kim, J. S. Nam, S. H. Hong, S. B. Sohn, and S. M. Song "Radio frequency thermal plasma treatment for size reduction and spheroidization of glass powders used in ceramic electronic devices", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 90, No. 6, 2007, pp. 1717-1722, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01645.x>.
13. S. M. Song, H. S. Kim, K. J. Park, S. B. Sohn, Y. T. Kim, and K. H. Hur, "The effect of uni-nanoadditive manufactured using RF plasma processing on core-shell structure in MLCC", *J. Korean Ceram. Soc.*, Vol. 46, No. 2, 2009, pp. 131-136, doi: <https://doi.org/10.4191/kcers.2009.46.2.131>.
14. M. Y. Lee, J. S. Nam, and J. H. Seo, "Synthesis of Ni-CeO<sub>2</sub> catalyst for the partial oxidation of methane using RF thermal plasma", *Chinese J. Catal.*, Vol. 37, No. 5, 2016, pp. 743-749, doi: [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61071-3](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61071-3).
15. J. H. Seo and B. G. Hong, "Thermal plasma synthesis of nano-sized powders", *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 44, No. 1, 2012, pp. 9-20, doi: <https://doi.org/10.5516/NET.77.2012.002>.
16. T. Ishigaki, "Synthesis of functional oxide nanoparticles through RF thermal plasma processing", *Plasma Chem. Plasma Process.*, Vol. 37, 2017, pp. 783-804, doi: <https://doi.org/10.1007/s11090-017-9788-8>.
17. Y. Shen, V. A. B. Almeida, and F. Gitzhofer, "Preparation of nanocomposite GDC/LSCF cathode material for IT-SOFC by induction plasma spraying", *J. Therm. Spray Technol.*, Vol. 20, 2011, pp. 145-153, doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9583-z>.
18. L. Qian, J. Lin, and M. Yu "Parametric study on suspension behavior in an inductively coupled plasma", *J. Therm. Spray Technol.*, Vol. 22, 2013, pp. 1024-1034, doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9943-6>.
19. P. Fauchais, M. Vardelle, J. F. Coudert, A. Vardelle, C. Delbos, and J. Fazilleau, "Thermal plasma deposition from thick to thincoatings and from micro- to nanostructure", *Pure Appl. Chem.*, Vol. 77, No. 2, 2005, pp. 475-485, doi: <https://doi.org/10.1351/pac200577020475>.
20. M. W. Jr. Chase, "NIST-JANAF thermochemical tables part 1, Al-Co. Journal of Physical and Chemical Reference Data



- Monograph No. 9”, 4th ed, American Chemical Society and the American Institute of Physics for the National Institute of Standards and Technology, USA, 1998, pp. 957.
21. R. J. M. Konings, O. Beneš, A. Kovács, D. Manara, D. Sedmidubský, L. Gorokhov, V. S. Iorish, V. Yungman, E. Shenyavskaya, and E. Osina, “The thermodynamic properties of the f-elements and their compounds. Part 2. The lanthanide and actinide oxides”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 43, No. 1, 2014, 013101, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4825256>.
  22. A. Dutta, J. Mukhopadhyay, and R. N. Basu, “Combustion synthesis and characterization of LSCF-based materials as cathode of intermediate temperature solid oxide fuel cells”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 29, No. 10, 2009, pp. 2003–2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.011>.
  23. L. W. Tai, M. M. Nasrallah, H. U. Anderson, D. M. Sparlin, and S. R. Sehlin “Structure and electrical properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ . Part 1. The system  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ”, *Solid State Ionics*, Vol. 76, No. 3-4, 1995, pp. 259-271, doi: [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(94\)00244-M](https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)00244-M).
  24. L. W. Tai, M. M. Nasrallah, H. U. Anderson, D. M. Sparlin, and S. R. Sehlin, “Structure and electrical properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ . Part 2. The system  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$ ”, *Solid State Ionics*, Vol. 76, No. 3-4, 1995, pp. 273-283, doi: [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(94\)00245-N](https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)00245-N).