

## Effect of Excess Cation Doping on Electrical Resistivity and Low-Field Magnetoresistance of Sol-Gel Synthesized Perovskite $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$

Hyo-Ri Jung, Jae-Hee Heo, and Young-Min Kang\*

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received 28 May 2025, Received in final form 16 June 2025, Accepted 16 June 2025)

In this study, perovskite manganites of base composition  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  and cation-excess compositions  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  ( $x = 0.3, 1.0$ ;  $y = 0.1, 0.2$ ;  $z = 0.1, 0.2$ ) were synthesized using the sol-gel method, in which the content of one of the cations—La, Sr, or Mn—was increased. The effects of these compositional variations on the crystal structure, microstructure, electrical, and magnetoresistance properties of the samples were investigated. X-ray diffraction analysis revealed the formation of various secondary phases due to the excess addition of Mn, La, and Sr, along with subtle compositional changes in the dominant perovskite crystal structure. Despite the porous microstructure, electrical resistivity measurements showed a decrease in resistivity for certain compositions, which is attributed to changes in grain boundary characteristics. Under a 5 kOe magnetic field at room temperature, the magnetoresistance (MR) of the stoichiometric  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  was 2.66%, whereas the La-rich samples ( $y = 0.1, 0.2$ ) exhibited enhanced MR values of 3.0% and 3.3%, respectively. This improvement is considered to result from the formation of secondary phases and changes in the grain boundary properties of LSMO, which enhance spin-dependent scattering. The enhancement of magnetoresistance through compositional control suggests potential applicability in various sensor devices, such as self-magnetic sensors, motor rotation detectors, and environmental magnetic field sensors.

**Keywords** : magnetoresistance, La-Sr-Mn oxide, perovskite, sol-gel

### 졸-겔법으로 합성한 페로브스카이트 $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$ 에서 양이온 과잉 첨가가 전기비저항 및 저자기장 자기저항 특성에 미치는 영향

정효리 · 허재희 · 강영민\*

한국교통대학교 반도체신소재공학과, 충주시 대학로 50, 27469

(2025년 5월 28일 받음, 2025년 6월 16일 최종수정본 받음, 2025년 6월 16일 게재확정)

본 연구에서는 졸-겔(sol-gel) 방법으로 페로브스카이트 망간산화물  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 와 양이온 La, Sr 및 Mn 중 하나의 함량을 초과시킨 조성  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  ( $x = 0.3, 1.0$ ;  $y = 0.1, 0.2$ ;  $z = 0.1, 0.2$ )을 합성하여 이들 시료들의 결정 구조, 미세 구조, 전기적 및 자기저항 특성에 미치는 영향을 조사하였다. X선 회절 분석 결과, Mn, La, Sr의 초과 첨가에 따라 다양한 이차상이 형성되었으며, 주상인 페로브스카이트 결정 구조에서 미세한 조성 변화가 관찰되었다. 전기비저항 측정에서는 다공성 미세 구조에도 불구하고 일부 조성에서 오히려 저항이 감소하는 결과를 보였으며, 이는 결정립계 특성의 변화에 기인한 것으로 해석된다. 상온 5 kOe 자기장 조건에서의 자기저항(MR) 특성은 기본 조성인  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 에서 MR = 2.66%가 얻어진 데 비해, La를 과잉 첨가한 시료들( $y = 0.1, 0.2$ )은 각각 MR = 3.0%, 3.3%로 자기저항 특성의 향상을 보였다. 이는 과첨가된 La에 의해 2차상이 형성되고, LSMO 결정립계 특성이 스핀 의존 산란을 강화시키는 방향으로 변화되었기 때문으로 판단된다. 이러한 조성 제어를 통한 자기저항 특성의 향상은 자자기 센서, 모터 회전 감지 센서, 환경 자기장 검출용 센서 등 다양한 응용 분야에서의 활용 가능성을 시사한다.

**주제어** : 자기저항, La-Sr-Mn산화물, 페로브스카이트, 졸-겔법

### I. 서 론

$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO)는 페로스카이트 결정 구조를 갖는 페리자성 세라믹스로, 망간 산화물계 소재 중 가장 높은 큐리 온도( $T_C$ )를 가지며[1] 전기 전도성과 스핀 분극(spín polarization)에 기인한 거대자기저항(colossal magnetoresistance, CMR)[2,3], 그리고 우수한 자기 열 효과(magnetocaloric effect)[4,5] 등 다양한 물리적 특성을 보이는 소재이다.

LSMO는 이러한 흥미로운 특성으로 인해 자기 센서 및 메모리 소자[6-8], 고체산화물 연료전지용 전극 및 촉매 재료 [9-11] 등 다양한 분야에서 응용 가능성이 제시되고 있다. LSMO는  $\text{Mn}^{3+}$  및  $\text{Mn}^{4+}$  이온 사이의 전자 hopping이 산소 이온을 매개로 하여 발생함에 따라 비교적 높은 전기 전도성을 나타내며, 이는 이중 교환(double exchange) 메커니즘에 기반한 강자성 거동과도 깊은 관련이 있다. 특히 박막 및 나노구조 형태의 LSMO에 대한 최근 연구에서는 산소 공공(oxygen vacancies), 격자 결함, 결정립계(grain boundaries), 응력(strain), 박막 성장 조건 등 다양한 구조적 요인이  $\text{Mn}^{3+}$ - $\text{Mn}^{4+}$ 의 원자가 상태 및 스핀 정렬에 영향을 미쳐 전기적 및 자기적 특성을 조절할 수 있음이 보고되었다[12-15].

이러한 망간 산화물계의 주요 연구 주제 중 하나로, 저자기장 자기저항(low-field magnetoresistance, LFMR) 특성이 주목받고 있다[7,16,17]. LFMR은 수백 mT 이하의 낮은 자기장에서 높은 저항 변화율을 나타내는 현상으로, 실온 또는 그 부근에서의 동작을 목표로 하는 자기 센서, 자화 메모리, 비휘발성 기억장치 등 실용 소자 개발에 있어 매우 중요한 특성으로 간주된다. 특히, 다결정 박막이나 나노입자 형태의 시료에서는 결정립계(grain boundaries)에서의 스핀 의존 산란이 LFMR 효과의 기원으로 알려져 있으며, 계면 상태의 제어를 통해 그 특성을 향상시킬 수 있음이 여러 선행 연구를 통해 제시되었다[16,17]. 이에 따라 LSMO에서의 LFMR 특성 향상을 위해서는 도핑 조성이나 열처리 조건에 따른 구조적·조성적 변화와 그에 따른 물성 변화에 대한 정밀한 이해가 요구된다. 본 연구에서는 이러한 맥락에서 LSMO의 양이온 조성을 의도적으로 과잉 변화시켜 일부 2차상을 형성하고, 이로 인한 재료의 구조, 전기전도 및 LFMR 특성 변화를 조사하고자 하였다.

### II. 실험 방법

페로스카이트 구조의 망간산화물  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO)를 기본 조성으로 하여, 양이온인 Mn, Sr, La 중 하나의 함량을 화학식상에서 각각 x, y, z만큼 초과한 조성  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$ 을 설계하고 졸-겔(sol-gel)법으로 합성하였다. 출발 원료로는

$\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99.995%, Acros Organics),  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (99+%, Acros Organics),  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (98%, Alfa Aesar) 분말을 사용하였으며, 양이온 조성비에 따라 칭량하여 비커에 넣었다. 이 혼합 분말에 시트르산 citric acid( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ , Acros Organics)을 1:1의 무게비로 혼합한 뒤, 최소한의 증류수를 가하여 고상 분말이 완전히 용해되도록 하였다. 이후 암모니아수( $\text{NH}_4\text{OH}$ , Alfa Aesar)를 첨가하여 pH가 7이 되도록 조절하였다. 혼합 용액은 hot plate 위에서 100°C로 가열하면서 마그네틱 바를 사용해 회전 교반하였고, 용액이 완전히 증발하여 연소가 일어날 때까지 유지하였다. 연소된 젤 상태의 분말은 건조로에서 180°C로 20시간 동안 열처리하여 완전히 건조시켰다. 이후 해당 분말을 알루미늄 도가니에 담아 전기로에 넣고 공기 중 900°C에서 4시간 동안 하소하였다. 하소가 완료된 분말은 한번 더 hand grinding 후, 직사각형(6.25 mm × 17.5 mm, 두께 약 1 mm) 형태의 펠렛(pellet)으로 성형하고, 이를 공기 중 1,100°C에서 2시간 동안 소결하였다.

시료의 결정 구조 분석은 소결체를 분말화하여 Cu K $\alpha$ 선( $\lambda = 0.154056$  nm)을 사용하는 X-선 회절 분석기(XRD, D2 Phaser, Bruker)로 수행하였다. 미세 구조 분석은 소결체의 표면면을 전계 방사형 주사 전자 현미경(FE-SEM, JSM-7610F, JEOL)으로 관찰하였고, backscattered electron (BSE) 모드로 이미지를 촬영하였다. 전기적 특성 측정을 위해 직사각형 소결체 시료에 연속된 4개의 Ag 전극을 형성시킨 후, 4-point probe 방법으로 저항 및 자기저항을 측정하였다. 자기저항 측정 시에는  $-5 \text{ kOe} \leq H \leq 5 \text{ kOe}$  범위의 자기장을 인가하면서 저항 변화를 관찰하였다.

### III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 sol-gel 법으로 합성한 후 소결체로 제조한 7개

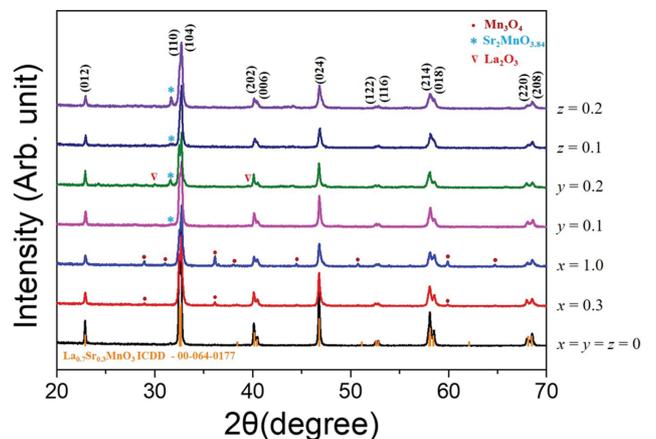
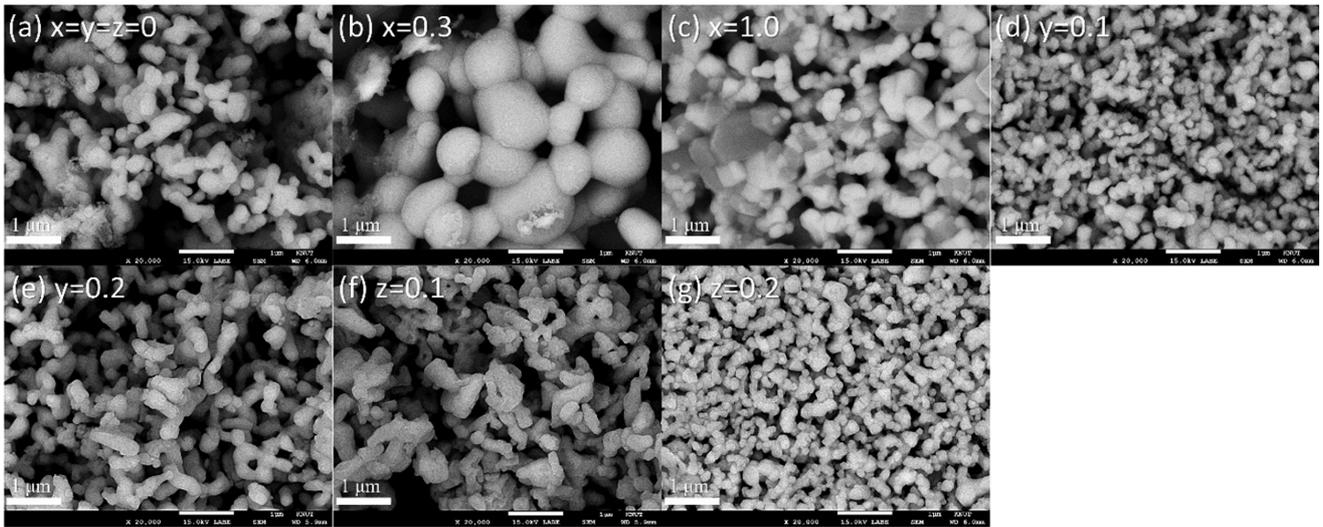


Fig. 1. (Color online) XRD patterns of  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  samples sintered at 1,100°C.

**Table I.** Sample compositions, secondary phases identified by XRD analysis, resistivity ( $\rho$ ), and magnetoresistance (MR) values of the samples.

Composition	x, y, z	Second phases	$\rho$ [ $\Omega$ ·cm]	MR (%) @ H = 5kOe
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	$x = y = z = 0$	none	17.7	2.66
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$	$x = 0.3$	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	8.58	2.64
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$	$x = 1.0$	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	5.35	2.51
$\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	$y = 0.1$	$\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$	22.8	2.99
$\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	$y = 0.2$	$\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84} + \text{La}_2\text{O}_3$	12.8	3.33
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_x\text{O}_3$	$z = 0.1$	$\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$	5.14	2.63
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_x\text{O}_3$	$z = 0.2$	$\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$	24.1	2.01



**Fig. 2.** (a-g) SEM micrographs (BSE mode) of  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  samples sintered at 1,100°C.

조성 시료에 대한 XRD 패턴을 보여준다. 각 시료는 명목상의 조성식  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$ 에서 La, Sr, Mn 중 하나의 양을 각각 x, y, z만큼 증가시켜 배합하였다. 화학량론적 조성인  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  ( $x = y = z = 0$ ) 시료는 공간군 R-3c에 속하는 단상의 능면체(rhombohedral) 페롭스카이트 구조를 나타낸다. 그림 하단에는 International Centre for Diffraction Data(ICDD-00-064-0177)와 본 시료의 XRD 패턴이 잘 일치함을 보여주고 있다. Mn 함량이 증가된  $x = 0.3$  및  $x = 1.0$  시료에서는 2차 상으로  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ 가 확인되었다. La 함량이 증가된  $y = 0.1$  시료는 거의 단상으로 보이나, La(Sr) site 원소 rich Mn 산화물인  $\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$ 와 유사한 상이 미량 존재하는 것으로 판단된다. 이는  $\text{ABO}_3$  페롭스카이트 구조에서 A-site에 La가 과잉 존재함에 따라 Sr이 밀려나  $\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$  상을 형성했거나, 해당 상의 Sr 자리에 일부 La가 치환되었을 가능성도 있다.  $y = 0.2$ 로 La의 함량이 증가된 시료에서는 이 상의 회절 피크가 명확히 관찰되며, 미량의  $\text{La}_2\text{O}_3$  상도 함께 존재하는 것으로 확인되었다. Sr 함량이 증가된  $z = 0.1$  및  $0.2$  시료에서도 Sr-rich Mn 산화물인  $\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$  상이 나타났다. Table I에는 본 연구에서 제조한

각 시료의 조성별 2차 상, 전기 전도도, 자기저항 값이 정리되어 있다.

Fig. 2(a-g)는 Table I에 제시된 7개 조성 시료들의 미세구조를 보여준다. 2차상의 분포를 확인하기 위해 SEM의 BSE(backscattered electrons) 모드로 획득한 이미지를 제시하였다. 모든 시료는 다공성(porous) 미세구조를 보인다. Fig. 2(a)의 LSMO 시료는 결정립들이 둥근 형태를 이루고 있으며, 평균 결정립 크기는 약 300 nm로 확인된다. Mn이  $x = 0.3$ 만큼 추가된 시료에서는 결정립이 약 1  $\mu\text{m}$  내외로 성장한 것이 확인된다. XRD 패턴에서는  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ 가 2차 상으로 확인되었지만, BSE 이미지에서는 명확한 명암 차이를 가지는 2차 상을 식별하기 어려웠다. 반면, Fig. 2(c)의 Mn이  $x = 1.0$ 로 추가된 시료에서는 밝은 명암의 LSMO 상과 어두운 명암으로 나타나는  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  상이 BSE 이미지에서 뚜렷이 구별된다. 정방정계(tetragonal) 구조의  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  상은 각진 형태의 결정립으로, 수백 nm에서 1  $\mu\text{m}$  정도의 크기로 분포하고 있다. Fig. 2(d)의 La가  $y = 0.1$ 만큼 초과된 시료에서는 Fig. 2(a)의 LSMO 시료보다 결정립 크기가 뚜렷하게 작아졌으며, BSE 이미지에서도 2차 상이 구별되지 않는다. La의 초과량이  $y =$

0.2로 증가한 Fig. 2(e)의 시료에서는 결정립 크기가 다시 증가하는 경향을 보이며, 이는 Fig. 2(a)의 LSMO 시료와 유사한 수준이다. XRD 분석에서는 미량의  $\text{La}_2\text{O}_3$  상이 확인되었지만, LSMO 상과는 명확한 명암 차이를 보이지 않는다. Fig. 2(f)와 2(g)는 Sr 함량이 각각  $z = 0.1$  및  $z = 0.2$ 만 큼 초과된 시료의 BSE 이미지이며, Sr 함량이  $z = 0.2$ 로 증가함에 따라 결정립이 더욱 미세해지는 경향을 보인다.

Table I에 제시된 시료들의 비저항 값을 보면, 모두 5~20  $\Omega\cdot\text{cm}$  수준을 보이고 있다. 이는 일반적으로 고상법으로 제조된 다결정 LSMO 벌크 시료의 상온 비저항(약  $5 \times 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$ [16])에 비해  $\sim 10^2$ 배 이상 높은 값이며, 이러한 차이는 본 연구에서 합성한 시료들의 다공성 미세구조에 기인한 것으로 판단된다. 특히, 전기적으로 절연체인  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ 가 다량 함유된  $x = 1.0$  조성 시료의 비저항 값이 화학량론적 조성의 LSMO 시료보다 오히려 약 3배 낮은 것은 매우 흥미로운 결과이다. 이는 LSMO 다결정 벌크 시료의 경우, 전체 저항이

결정립 내부보다는 입계(grain boundary)의 저항에 의해 지배됨을 의미하며, LSMO 결정립계의 특성 변화가 주요한 원인으로 작용했을 가능성이 크다. 2차상이 포함되고 결정립이 미세화되었음에도 불구하고 LSMO와 동등하거나 더 낮은 전기 비저항을 나타낸다는 것은, 결정립계의 비저항이 상당히 감소했음을 시사한다. 화학량론적 조성에서 Mn, La, Sr를 각각  $x, y, z$ 만큼 초과시킨 시료들에서는 2차상이 형성됨과 동시에 결정립계의 화학 조성과 구조적 특성 역시 변화되었을 것으로 예상되며, 이러한 변화가 결정립계의 전기 전도 특성에 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다.

이러한 결정립계 특성의 변화는 자기저항 효과(Magnetoresistance, MR)의 변화로도 나타날 수 있다고 판단하여, 각 시료에 대해 자기장 변화에 따른 저항값을 측정하였다. Fig. 3(a-g)는 인가 자기장을 -5 kOe에서 +5 kOe까지 증가시킨 후 다시 -5 kOe 부근까지 감소시키며 시료의 저항값을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 각 시료의 자기저항

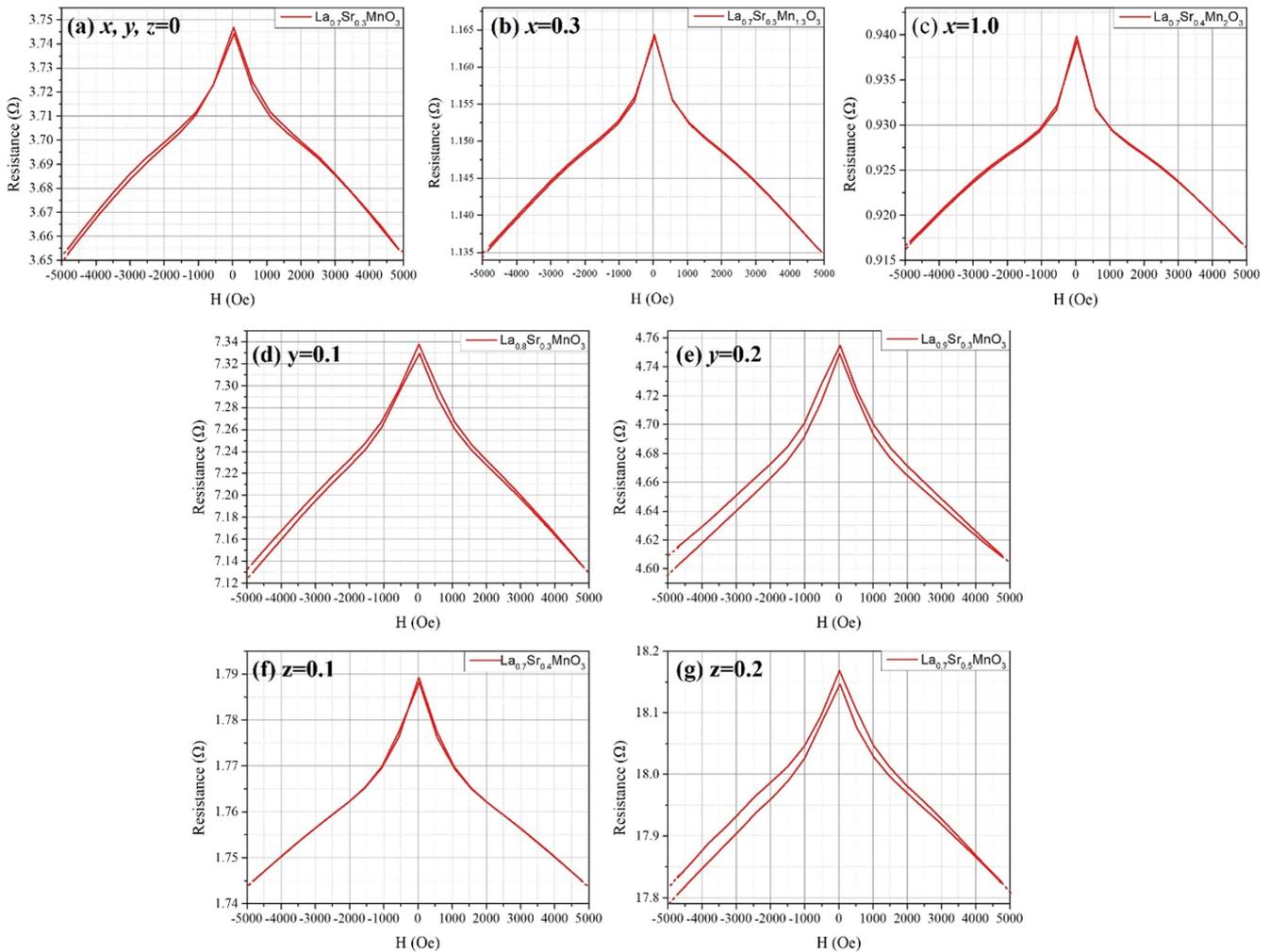


Fig. 3. (Color online) (a-g) R-H curves of the  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  samples.

(MR) 값은 아래 식(1)에 따라 계산하였으며, Table I에 정리하였다.

$$MR(\%) = \frac{R_{(H=0)} - R_{(H=5\text{ kOe})}}{R_{(H=0)}} \times 100\% \quad (1)$$

일부 시료에서는 측정을  $H = -5,000$  Oe 부근에서 시작했을 때, 자기장을 증가시킨 후 다시  $H = -5,000$  Oe로 되돌아갔을 때 저항값이 약간 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 현상은 측정 과정 중 전류에 의한 시료 온도 상승에 기인하며, 온도 변화에 따라 금속적 거동을 보이는 LSMO의 특성으로 설명할 수 있다. 화학량론적 조성의 LSMO 시료는  $MR = 2.66\%$ 의 값을 나타냈으며, Mn을 초과 첨가한 시료는 유사한 수준의 MR 특성을 보였다. 또한 Sr을  $z = 0.1$ 만큼 초과 첨가한 시료 역시 LSMO와 매우 유사한 MR 값을 나타내었다. 한편, La를  $y = 0.1, 0.2$ 만큼 초과 첨가한 시료는 각각  $MR = 3.0\%, 3.3\%$ 로 단계적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

시료들의 자기저항 특성을 한눈에 확인하기 위해,  $R(H)/R(H = 0)$  대  $H$ 의 곡선을 플롯하여 Fig. 4에 제시하였다. 그 결과,  $y = 0.2$  시료가 가장 우수한 자기저항 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. LSMO에서 저자기장 자기저항(Low Field Magnetoresistance, LFMR)은 주로 결정립계에서 발생하는 스핀-의존 산란(spin-dependent scattering)에 기인하며, LFMR의 향상은 결정립계 특성의 변화와 밀접한 관련이 있다.  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$  상평형도[18]에 따르면, 페로스카이트  $\text{LaMnO}_3$  상은 La:Mn 몰비 1:1에서만 선상상(line phase)으로 존재하는 것이 아니라, Mn/(La + Mn) 비가 0.45~0.53 범위 내에서 고용체(solid solution)로 존재할 수 있는 것으로 보고되어 있다. 따라서  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 에서도 양이온 비 Mn/(La + Sr)가 페로스카이트 구조를 유지하면서 일정 범위 내에

서 변화할 수 있으며, 이는  $x, y, z$ 만큼 초과 첨가된 Mn, La, Sr이 주상인 페로스카이트의 미세 조성에 영향을 주고, 특히 결정립계 근처의 조성 균일성에도 변화를 초래하여 결정립계의 저항 및 특성을 변화시키는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서 주목할 만한 결과는, Mn, La, Sr 중 La를 과량 첨가하여  $\text{La}_2\text{O}_3$  상이 형성될 경우, 가장 뚜렷한 LFMR 향상이 나타났다는 점이다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 졸겔법을 이용하여 화학량론적 조성의  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 와 함께, La, Sr, Mn 양이온 중 하나를  $x, y, z$ 만큼 초과 첨가한  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  조성의 총 7개 시료를 합성하고, 이들의 구조적, 미세구조적 특성 및 전기전도도와 자기저항 특성을 평가하였다. XRD 분석 결과, Mn을 과량 첨가한 시료에서는  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ 가, Sr 또는 La을 과잉 첨가한 시료에서는  $\text{Sr}_2\text{MnO}_{3.84}$  및  $\text{La}_2\text{O}_3$  등의 이차상이 소량 검출되었다. 또한, BSE 이미지를 통해 다공성 구조와 결정립 크기의 변화, 일부 이차상의 분포가 확인되었다. 모든 시료는 상온에서  $5\sim 20 \Omega\cdot\text{cm}$  범위의 비저항을 나타내었으며, 이는 다공성 미세구조와 결정립계의 높은 저항 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 흥미롭게도, 전기적으로 절연체인  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ 가 포함된 시료에서도 전체 비저항이 감소하는 현상이 관찰되었으며, 이는 결정립계 저항의 감소에 의한 결과로 해석된다. 자기저항 특성 측정 결과, 화학량론적 조성의 LSMO 시료는 약 2.66%의 LFMR을 나타냈으며, La을 초과 첨가한 시료의 경우 각각 3.0%, 3.3%로 가장 큰 향상을 보였다. 이러한 향상은 결정립계의 조성과 구조 변화에 따라 스핀-의존 산란 효과가 증가한 결과로 해석된다. 본 연구는 벌크 형태의 LSMO 기반 소재에서도 조성 제어를 통해 자기저항 특성을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 입증하였으며, 이는 저자기장 센서 및 자기저항 기반 소자 등 다양한 응용 분야에 대한 가능성을 제시한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2024학년도 한국교통대학교의 해외파견 연구교수지원금을 받아 수행한 연구임.

#### References

- [1] A. Urushibara, Y. Moritomo, T. Arima, A. Asamitsu, G. Kido, and Y. Tokura, Phys. Rev. B **51**, 14103 (1995).
- [2] J. Volger, Physica **20**, 49 (1954).
- [3] M. C. Martin, G. Shirane, Y. Endoh, K. Hirota, Y. Moritomo,

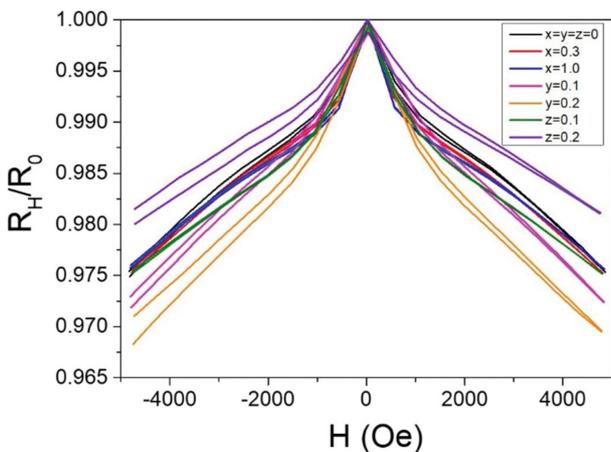


Fig. 4. (Color online) Normalized resistance  $R(H)/R(H = 0)$  as a function of magnetic field ( $H$ ) for  $\text{La}_{0.7+y}\text{Sr}_{0.3+z}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  samples.

- and Y. Tokura, *Phys. Rev. B* **53**, 14285 (1996).
- [4] A. Rostamnejadi, M. Venkatesan, P. Kameli, H. Salamati, and J. M. D. Coey, *J. Magn. Magn. Mater.* **323**, 2214 (2011).
- [5] C. P. Reshmi, S. S. Pillai, K. G. Suresh, and M. R. Varma, *Solid State Sci.* **19**, 130 (2013).
- [6] N. Zurauskiene, V. Stankevici, S. Kersulis, M. Vagner, V. Plausinaitiene, J. Dobilas, R. Vasiliauskas, M. Skapas, M. Koliada, J. Pietosa, and A. Wisniewski, *Sensors* **22**, 4004 (2022).
- [7] C. Zhang, S. Ding, K. Qiao, J. Li, Z. Li, Z. Yin, J. Sun, J. Wang, T. Zhao, F. Hu, and B. Shen, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13**, 28442 (2021).
- [8] A. Thapa, P. C. Pradhan, and B. Sharma, *Advances in Communication, Devices and Networking* **776**, 51 (2022).
- [9] H. Jalili, J. W. Han, Y. Kuru, Z. Cai, and B. Yildiz, *J. Phys. Chem. Lett.* **2**, 801 (2011).
- [10] J. Scholz, M. Risch, K. A. Stoerzinger, G. Wartner, S.-H. Yang, and C. Jooss, *J. Phys. Chem. C* **120**, 27746 (2016).
- [11] M. Risch, *Catalysts* **7**, 154 (2017).
- [12] S. Kumari, N. Mottaghi, C.-Y. Huang, R. Trappen, G. Bhandari, S. Yousefi, G. Cabrera, M. S. Seehra, and M. B. Holcomb, *Sci. Rep.* **10**, 3659 (2020).
- [13] D. Rasic, R. Sachan, J. Prater, and J. Narayan, *Acta Mater.* **163**, 189 (2019).
- [14] K. Navin and R. Kurchania, *Ceram. Int.* **44**, 4973 (2018).
- [15] T. Iwasaki and R. Takeda, *Curr. Appl. Phys.* **25**, 12 (2021).
- [16] Y.-M. Kang, H.-J. Kim, and S.-I. Yoo, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 052510 (2009).
- [17] U. K. Sinha, B. Das, and P. Padhan, *Nanoscale Adv.* **2**, 2792 (2020).
- [18] J. A. M. van Roosmalen, P. Van Vlaanderen, E. H. P. Cordfunke, W. L. IJdo, and D. J. W. IJdo, *J. Solid State Chem.* **114**, 516 (1995).