

# Effect of competition between superconductivity and ferromagnetism in $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ bilayers

Jun-Yung Oh<sup>a</sup>, Dong-Seok Yang<sup>b</sup>, and Byeongwon Kang<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Physics, Research Institute for Nanoscale Science and Technology, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

<sup>b</sup> Department of Physics Education, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 22 March 2022; revised or reviewed 9 May 2022; accepted 10 May 2022)

## Abstract

We studied the effect of substrate-induced strain state on the superconducting transition in  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (GdBCO)/ $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) bilayers deposited on a  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) substrate. The strain state of LSMO is controlled by increasing the thickness from 20 nm to 80 nm. Analyses on the extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) measurements reveal difference in the direction of  $\text{MnO}_6$  octahedral distortion depending on the LSMO thickness, which leads to a difference in anisotropy of magnetization of LSMO layer. The superconducting transitions of our system are strongly correlated with the magnetic anisotropy accompanied by the  $\text{MnO}_6$  octahedron distortion in a specific direction. This result suggests the possibility of improving the superconducting transition in the GdBCO/LSMO bilayer system by controlling the degree of competition between superconductivity and ferromagnetism via adjusting strain state in the LSMO layer.

**Keywords:** GdBCO, LSMO, superconducting transition, magnetic anisotropy, local structure

## 1. 서 론

페로브스카이트 산화물을 기반으로 하는 나노 미터 두께의 이중 구조 제조와 이중 구조의 특성화 연구는 강한 전자 상관 관계를 가진 재료들의 특성을 연결하는 중간 고리의 역할로 현재까지 다양한 연구가 진행되어 오고 있다 [1-3]. 전자 스핀들이 서로 같은 방향으로 정렬하려고 하는 강자성체와는 달리 초전도체의 쿠퍼 쌍은 전자 스핀들이 서로 반대방향으로 결합하기 때문에 초전도체와 강자성체가 접하고 있는 이중 구조의 경계면에서는 서로 경쟁하는 질서도 변수 (order parameter)가 유도된다 [4-6]. 이러한 경쟁은 초전도체와 강자성체를 포함한 이중 구조에서 특별한 현상을 일으킬 수 있기 때문에 물리적으로 흥미로운 연구 주제이며, 이것을 이해하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다 [4-8]. 주요 연구의 대부분은 높은 임계온도 ( $T_c$ )로 인해 응용 가능성이 큰 구리-산화물계 고온 초전도체인  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (REBCO, RE: rare-earth element)을 기반으로 한 초전도체/강자성체 이중 구조에 특성에 집중되고 있다.

강자성체와 REBCO를 기반으로 한 이중층 구조에서는 초전도체의 쿠퍼 쌍을 이루는 전자들이 강자성 층으로 침투하거나 강자성체로부터 스핀 편극된 전자가 초전도체로 침투하여 쿠퍼 쌍을 깨뜨려 초전도 상전이 특성을 변화시킬 수 있다고 보고되고 있다 [9-11]. 이러한 효과는 강자성체의 자기상과 입자 배향 그리고 초전도체 혹은 기판과의 구조적 호환성에 크게 의존적이기 때문에 REBCO/강자성체 이중구조 제작에 있어서 적합한 강자성체의 선택은 매우 중요하다.

페로브스카이트 구조를 가진 반금속성 강자성체 중 하나인  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO)는 REBCO 고온 초전도체와 유사한 격자 상수를 가지고 있어서 켄썬기 (epitaxy) 호환성이 좋기 때문에 초전도체/강자성체 이중 구조 제작에 있어

유망한 물질로 주목받고 있다 [12, 13]. 특히,  $\text{MnO}_6$  팔면체를 포함하고 있는 LSMO는 기판이나 상부층과의 격자 상수 차이로 인해 유도되는 변형(strain)에 의해 팔면체의 왜곡이 생기고 자기 구조의 불안정성을 촉진시켜 다양한 형태의 자기 상 출현을 야기시킨다. 이러한 시스템에서의 상 분리는 초전도성과 경쟁하거나 공존할 수 있는 나노 스케일의 길이 변화에서 발생한다. 따라서 REBCO/LSMO 시스템에서의 초전도 특성을 이해하기 위해서는 국부적 격자 왜곡의 특성 분석 및 정량화에 대한 연구가 필요하다.

이 논문에서 우리는  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (GdBCO) 초전도체와  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) 강자성체의 이중 층 에피택시 박막에서 국부 구조의 변화에 따른 강자성 특성과 그에 따른 초전도 특성의 메커니즘에 대해 연구하였다. LSMO층의 두께를 20 nm에서 80 nm까지 증가시켜 기판으로부터 유도되는 에피택시 변형을 제어하였으며, 상응하는 미세 국부 구조는 EXAFS (Extended x-ray absorption fine structure) 스펙트럼을 측정하여 분석하였다.

## 2. 실험

GdBCO/LSMO 이중층 시료는 펄스 레이저 증착법(Pulse laser deposition, PLD)을 이용하여 켄썬기 방식으로  $\text{LaAlO}_3(001)$  단결정 기판 위에 제작되었다. 각 층의 공정은 고정된  $2 \text{ J/cm}^2$ 의 레이저 에너지 밀도와 8 Hz의 펄스 주파수로 다음과 같은 최적화된 조건에서 수행되었다. LSMO층의 경우 300 mTorr의 산소 압력 하에서 기판 온도를  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지하며 증착 한 후  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도와 500 Torr의 산소 압력 하에서 1시간 동안 후열처리를 진행하였다. GdBCO층의 경우  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 기판 온도와 300 mTorr의 산소 압력 하에서 증착하고 후열처리 조건은 LSMO 층과 동일하게 진행하였다. 모든 시료의 GdBCO 두께는 400 nm로

\* Corresponding author: [bwkang@chungbuk.ac.kr](mailto:bwkang@chungbuk.ac.kr)

유지하였고 LSMO의 두께는 20, 40, 50, 그리고 80 nm로 변화시켰다. 제작된 시료는 LSMO의 두께에 따라 Pure, L20, L40, L50 과 L80으로 명명하였다.

제작된 시료의 미세 국부 구조 분석을 위한 EXAFS 실험은 포항 가속기 연구소의 8C nano 빔라인에서 진행되었으며, Mn K-edge (6539 eV)의 측정 에너지 영역에서 반딧빛 방식 (fluorescence mode)으로 측정되었다. 이때, EXAFS 측정간 가속기 전자의 가속 에너지와 저장링의 빔 전류는 각각 3.0 GeV 와 120~200 mA 로 유지되었다. 측정된 EXAFS 스펙트럼은 EXAFS 표준 절차에 따라 추출되고 IFEFFIT 소프트웨어 프로그램의 ATHENA 및 ARTEMIS 코드를 이용하여 분석하였다 (Newville, 2001) [14, 15].

제작된 시료의 자화는 VSM (Lake Shore-7307)을 이용하여 150 K 의 온도에서 0 ~  $\pm 800$  mT 범위의 자기장이 인가된 상태에서 측정하였다. GdBCO 의 초전도 전이온도 ( $\sim 90$  K)보다 훨씬 높은 150 K 의 온도는 GdBCO 의 기여가 제거된 LSMO 의 독립적인 자화를 측정하기 위해 선택되었다. 온도에 따른 자화는 MPMS (Quantum design)를 사용하여 박막 표면에 평행한 7 mT 의 자기장 하에서 측정되었다.

### 3. 결과 및 토의

그림 1은 두께가 다양한 LSMO 하부 층 위에 증착 된 400 nm 두께의 GdBCO의 규격화된 자화 곡선의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 규격화된 M-T 곡선에서 반자성 (diamagnetism) 혹은 마이스너 효과 (Meissner effect) 특성이 시작되는 온도를 각 시료의 임계 온도  $T_c$ 로 결정하였고 반자성 신호에서 최대  $dM/dT$  까지의 온도범위를  $\Delta T_c$  로 정의하였다. 시료들의  $T_c$ 는 LSMO 층을 가지고 있지 않은 Pure 샘플과 비교하였을 때 LSMO의 특정 두께에서 향상되었으며 또한 LSMO 두께에 대한 의존성이 단조롭지 않음을 알 수 있다.

$\text{LaAlO}_3$  기판과 LSMO 와의 격자상수 불일치는 -2.3% 로 비교적 큰 편인데 기판으로부터 유도되는 변형의 정도는 LSMO 층의 두께에 따라서 현저히 달라질 것으로 예상된다. 그림 1 에서 나타난 GdBCO 초전도체의  $T_c$  의 증가 혹은 감소는 LSMO 의 두께 변화로 인해 기판으로부터 유도되는

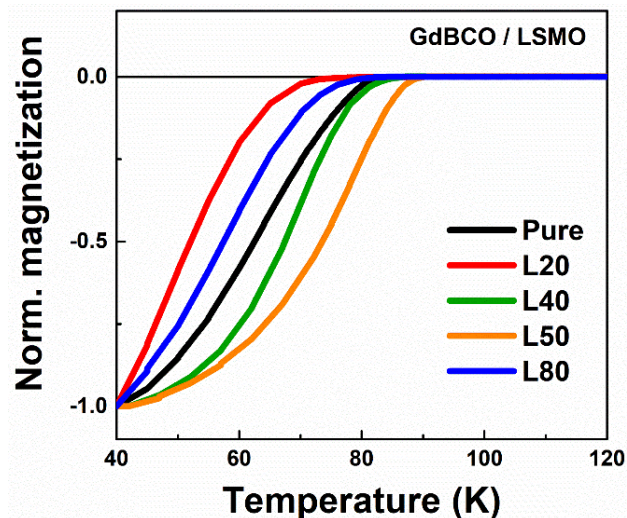


Fig. 1. Temperature dependences of normalized magnetization curves at ZFC for LSMO-buffered GdBCO samples.

서로 다른 변형 상태에 의한 것으로 보인다. 우리의 이전 연구에서 하부 층의 변형이 상부 층인 GdBCO 내부의  $\text{CuO}_2$  평면에 압력을 가하여 왜곡시킴을 확인하였고  $\text{CuO}_2$  평면에 최적의 구조가 유도될 때 가장 높은  $T_c$ 값이 나타나는 것을 확인하였다 [16]. 따라서 GdBCO/LSMO/LAO 시스템의 경우 LSMO의 두께가 40~50 nm인 지점에서 GdBCO층에 가장 최적의 구조가 유도되어 높은  $T_c$ 를 나타내는 것으로 이해할 수 있다. 흥미롭게도, Pure 시료를 기준으로 GdBCO/LSMO/LAO 시스템의  $T_c$ 의 증가/감소는  $\pm 5$  K 범위에서 나타나지만  $\Delta T_c$ 의 증가/감소는  $\pm 15$  K의 훨씬 큰 영역에서 나타난다. 이러한 사실은 GdBCO의 구조적인 변화 이외에도 불안정한 초전도 전이를 야기시키는 추가적 요인이 있음을 시사한다.

Soltan과 Lin 등은 기존 초전도체/강자성체 이중 층 구조에서 나타나는 초전도 상전이 특성이 자기 이방 적 특성으로 인해 발생하며, 이러한 특성이 초전도층의 캐리어 수송을 지배하여 불안정한 초전도 전이를 야기시킬 수 있다고 보고하였다 [13, 17]. 하지만 자기 이방 적 특성으로 인한 초전도 특성에 대한 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 이와 관련된 명확한 메커니즘은 여전히 불분명한 실정이다. 일반적으로 자기 이방성은 Mn 3d 궤도의 전자 점유율과 밀접한 관계가 있는  $\text{MnO}_6$  팔면체의 구조적 왜곡에 크게 의존한다. 따라서, 우리 시스템과 같은 커쌍기 박막시료의 경우 자기 이방성은 기판에 의해 유도되는 구조적 변형 효과에 민감하게 의존할 것이다.

GdBCO/LSMO/LAO 시스템에서 LSMO의 두께에 따른  $\text{MnO}_6$  팔면체 왜곡을 정량적으로 측정하기 위해 Mn K-edge (6539 eV)에서 측정된 EXAFS 데이터를 체계적으로 분석하였다. 일반적으로 구조적 불 균일성에 의해 나타나는  $\text{MnO}_6$  팔면체의 왜곡은 Mn-O 결합의 국부적 변위에 크게 의존한다. 따라서  $\text{MnO}_6$  팔면체의 왜곡의 정량적인 측정을 위해 Mn-O 결합의 고립된 기여(1.7~2.2 Å 범위)를 이용하여 EXAFS 스펙트럼에서 추출하였고, 이를 EXAFS regularization technique을 사용하여 Mn-O 쌍 분포 함수 (PDF, pair distribution function)의 형태로 나타냈다. 계산된 Mn-O 쌍 분포 함수는  $\text{MnO}_6$  팔면체 배위수에 해당하는 Mn-O 결합의 상대 비율을 고려하여 4개의 평면 내 방향 Mn-O 쌍과 2개의 평면 외 방향 Mn-O쌍에 대해 각각 4 와 2로 정규화 되었다. 이러한 정규화 된 분포는 가우시안 피팅을 통하여 우세한 기여와 그렇지 않은 기여로 구분 지을 수 있는데, 각각 평면 내 방향과 평면 외 방향의 Mn-O 결합에 대한 정보를 제공한다.

그림 2(a)는 L50 샘플에 대한 가우시안 피팅 결과로 정규화된 평면 내/평면 외 Mn-O쌍에 대한 결합 길이의 정보를 제공한다. 그림 2(b)는 그림 (a)에서와 동일한 방식을 사용하여 얻어진 명확하게 분리된 평면내 방향과 평면 외 방향의 Mn-O결합의 결과를 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이 L40과 L50 샘플의 경우 짧은 결합의 기여도가 더 우세하며, 이는 평면 내 방향으로의 수축과 함께 평면 외 방향으로의 인장 된 형태로  $\text{MnO}_6$  팔면체가 왜곡되었음을 의미한다. 반대로 LSMO의 두께가 40~50 nm를 기준으로 더 얇거나 두꺼워진 경우인 L20과 L80 샘플의 경우 긴 결합의 기여도가 우세해지는데, 이는  $\text{MnO}_6$  팔면체의 평면 내 방향으로의 왜곡을 의미한다. 흥미롭게도 LSMO의 두께가 20 nm로부터 점차 증가함에 따라 우세한 기여를 나타내는 평면 내 Mn-O 길이가 수축하고 다시 두께가 80 nm로 증가함에 따라 Mn-O 길이가 인장 되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 LSMO와 LAO기판 사이의 격자상수의 불일치에 기인하며 두께에 따라 각 시료들이 독립적인 압축

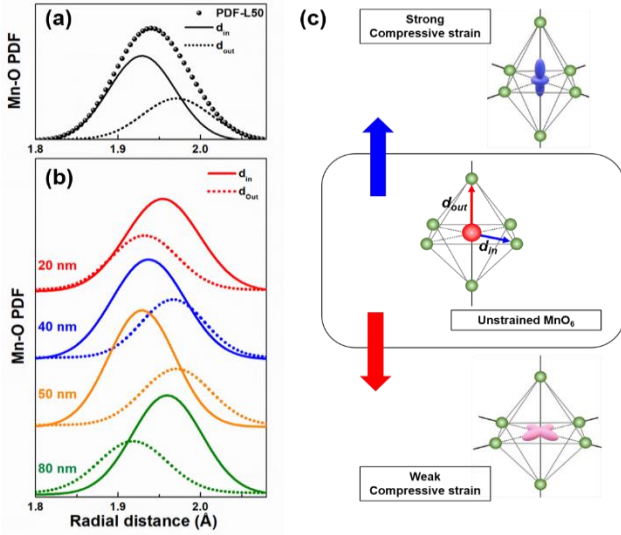


Fig. 2(a) Mn-O pair distribution function (PDF) for L50 samples, and the solid and dotted lines are Gaussian fitting results of the pair distribution function of  $d_{in}$  and  $d_{out}$  in MnO<sub>6</sub> octahedron. (b) Gaussian fitting results of all the samples. (c) Schematics of the local atomic displacement of Mn-O bond in unstrained and strained MnO<sub>6</sub> octahedron depending upon the degree of strain.

변형 상태 하에 있다는 것을 나타낸다. 특히, L40과 L50의 경우 평면 내 방향 Mn-O 결합이 상대적으로 수축됨을 알 수 있는데, 이는 LAO기판으로부터 유도되는 압축 변형(compressive strain)의 효과가 LSMO의 두께가 50 nm일 때 최대로 작용하고 있음을 나타낸다. 또한 80 nm로 두께가 증가함에 따라 다시 평면 내 방향 Mn-O 결합이 늘어나는 것을 통해 LSMO의 두께가 50 nm를 초과하게 되면 압축 변형이 완화되는 효과가 나타나는 것임을 알 수 있다. 결과적으로 우리 시료들은 LSMO의 두께에 따라 MnO<sub>6</sub> 팔면체는 두 가지 부류로 나뉘어 지는데, 그림 2(c)의 개략도로 나타난 것처럼 강한 압축 변형 상태에 있는 경우(L40과 L50)와 약한 압축 변형 상태에 있는 경우(L20과 L80)이다.

MnO<sub>6</sub> 팔면체의 왜곡은 Mn<sup>3+</sup> 이온의 분할로 인해 강한 전자-포논 결합을 유발시킨다. 이는 강자성으로 결합된 Mn<sup>3+</sup>과 Mn<sup>4+</sup> 사이의 이중 교환에 영향을 미치며 전자 궤도의 정렬을 발생시킨다. 특히, L40과 L50의 경우와 같이 MnO<sub>6</sub> 팔면체가 면내 방향으로 수축된 경우는 면내 방향으로의 강자성 상호작용의 증가와 함께  $3d_{3z^2-r^2}$  궤도의 안정화를 동반하고, 반대의 경우인 L20과 L80의 경우는 면외 방향으로의 강자성 상호작용의 증가와  $3d_{x^2-y^2}$  궤도의 안정화를 동반한다. 두께에 따른 서로 다른 방향으로의 강자성 상호작용은 자기 이방성에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

자기 이방성에 대한 변형 상태의 영향을 연구하기 위해 모든 시료의 자기이력곡선을 서로 다른 결정학적 축을 따라 측정하였고, 비교를 위하여 규격화된 자화의 형태로 그림 3에 표시되었다. 그림3에서 볼 수 있듯이 L20과 L80 시료들의 경우 자기이력곡선은 평면내 및 평면 외 방향을 따라 유사한 모양을 나타낸다. 이 경우는 LAO기판으로부터 유도되는 압축 변형의 정도가 약한 상태를 특징으로 하는데, 이 상태에서는 MnO<sub>6</sub> 팔면체의 왜곡이 적고 동시에  $3d_{x^2-y^2}$  궤도 점유를 선호하게 되어 평면내 이중 교환 상호작용이 강화되어 평면내 방향으로 쉬운 자기 축(magnetic easy axis)이

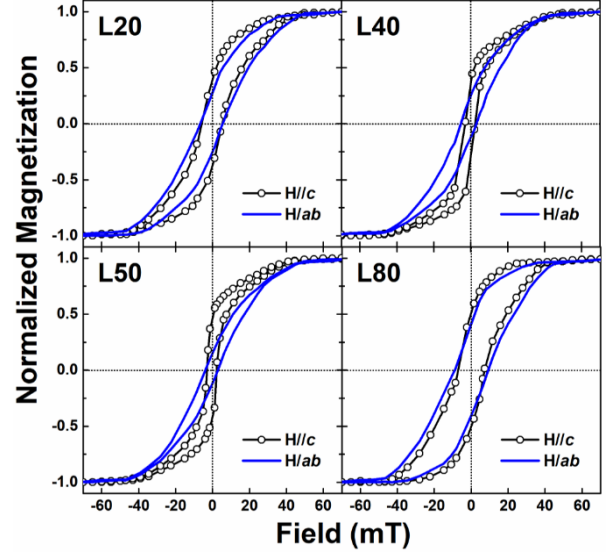


Fig. 3. Field dependences of magnetization measured at 150 K for GdBCO/LSMO/LAO samples with the magnetic field perpendicular (open circles) and parallel (solid line) to the film surface.

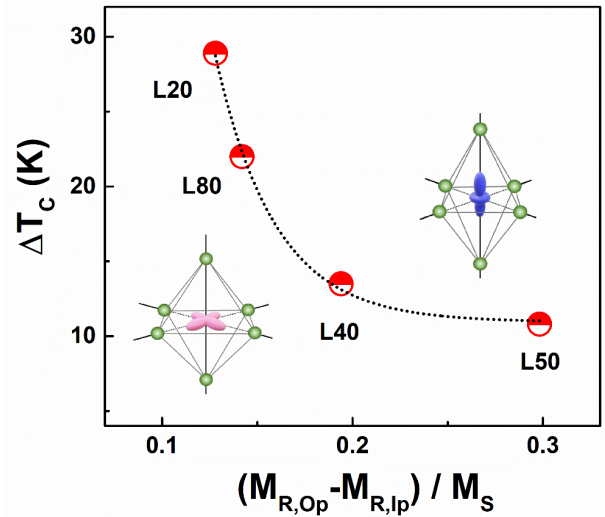


Fig. 4. Superconducting transition width ( $\Delta T_c$ ) of GdBCO/LSMO bilayer samples as a function of the magnetic anisotropy defined as  $(M_{R,Op} - M_{R,Ip}) / M_s$ .

형성된다. 반대로, L40과 L50 시료들의 경우는 LAO 기판으로부터 유도되는 강한 압축 변형에 의해 MnO<sub>6</sub> 팔면체는 평면 외 방향으로 크게 왜곡되어  $3d_{3z^2-r^2}$  궤도의 안정화가 유발되고, 이로 인해 쉬운 자기 축이 c축과 정렬되도록 회전함과 동시에 명확한 자기 이방성이 관찰된다. 이 결과는 우리 시스템에서 LSMO의 두께 변화로 자기 불균일성 정도의 제어가 가능함을 시사한다. 이는 앞서 관찰된 불안정한 초전도 상전이 특성 과도 관련이 있어 보이는데, 특정 상태에서 유도되는 자기 이방적인 성질과 불안정한 초전도 상전이의 관계를 수치화 한다면 우리 시스템에서의 초전도 메커니즘을 명확하게 알 수 있을 것이다.

그림 4는 포화 자기 모멘트 ( $M_s$ )에 의해 규격화된 평면 내 방향과 평면 외 방향 사이의 잔류 자기 모멘트 ( $M_R$ )의 차이로 정량화된 자기 이방성과 초전도 전이와의 관계를 나타낸다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 모든 시료에 대한 자기 이방성의

양수 값은 평면 외 방향으로 쉬운 자기 축을 의미한다. 흥미롭게도 초전도 전이는 자기 이방성이 감소함에 따라 증가하며, 이는 LSMO의 두께에 따라 변화하는 변형 장의 효과에 의해 유도되는  $\text{MnO}_6$  팔면체의 왜곡이 불안정한 초전도 전이에 중요한 역할을 하고 있음을 나타낸다. 즉, LSMO 두께 변경으로 유도되는 변형 정도는 GdBCO/LSMO 이중 층 구조에서 초전도성과 강자성 간의 경쟁 정도를 제어하는 것으로 보인다.  $\text{MnO}_6$  팔면체의 왜곡이 면내 방향으로 발생하는 L20과 L80의 경우,  $3d_{x^2-y^2}$  궤도의 안정화와 함께 평면 외 방향으로의 강자성 상호작용이 증가한다. 이러한 상태에서는 강한 초전도성-강자성 경쟁이 나타나며 결과적으로 이방적인 전하 이동에 의한 불안정한 초전도성의 결과로 넓은 초전도 전이가 나타난다. 반대로 평면 외 방향을 따라  $\text{MnO}_6$  팔면체의 왜곡이 유지되는 L40과 L50의 경우, 평면 내 방향으로의 강자성 상호작용의 증가와 함께 초전도성-강자성 경쟁 효과가 완화되어 상대적으로 안정된 초전도 전이를 나타낸다. 이 결과는 GdBCO/LSMO/LAO 이중 층 시스템에서 특정 두께의 LSMO층이 LAO 기판에 의해 가해지는 압축 변형을 수용함으로써 효과적인 강자성 완충층으로 작용할 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결론

이 연구에서는  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3$  (GdBCO/LSMO/LAO) 이중층에서 LSMO의 두께에 따라 기판으로부터 유도된 변형이 초전도성에 미치는 영향을 조사하였다. LAO기판에 의해 유도되는 변형의 정도는 LSMO의 두께에 따라 변하는 것으로 확인되었고, 그 정도에 따라 서로 다른 방향으로  $\text{MnO}_6$  팔면체 왜곡이 일어나는 것을 확인하였다. 이러한  $\text{MnO}_6$  팔면체 왜곡 방향의 차이는 LSMO 자기 이방성의 변화를 유도하여 초전도 전이에 직접적인 영향을 미치는 초전도성-강자성 경쟁의 정도를 제어하는 것으로 확인되었다. 결과적으로 GdBCO/LSMO 이중 층 구조에서 안정된 초전도 상을 보장하기 위해서는 기판의 변형을 수용하는 LSMO의 적절한 구조적 상태가 유지되어야 하며 이러한 구조적 상태는 LSMO의 두께를 제어함으로써 달성할 수 있다.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (2021R1I1A3044518).

#### REFERENCES

- [1] M. M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazeles, "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattice" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 2472, 1988.
- [2] R. B. Gangineni, L. Schultz, C. Thiele, I. Mönch, and K. Dörr, "Reversible strain effect in  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  step edge junctions" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, pp. 122512, 2007.
- [3] Daniel Hsu, J. G. Lin, C. P. Chang, C. H. Chen, W. F. Wu, C. H. Chiang, and W. C. Chan, "Current enhanced magnetic proximity effect in  $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  bilayer" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 162504, 2007.
- [4] A. I. Buzdin, "Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures" *Rev. Mod. Phys.*, vol. 77, pp. 935, 2005.
- [5] M. G. Khusainov and Yu. N. Proshin, "Possibility of periodically reentrant superconductivity in ferromagnet/superconductor layered structures" *Phys. Rev. B*, vol. 56, pp. R14283, 1997.
- [6] M. J. M. de Jong and C. W. J. Beenakker, "Andreev reflection in ferromagnet-superconductor junctions" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, pp. 1657, 1995.
- [7] K. Senapati and R. C. Budhani, "Superconducting and normal-state interlayer exchange coupling in  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3\text{-YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7\text{-La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  epitaxial trilayers" *Phys. Rev. B*, vol. 71, pp. 224507, 2005.
- [8] P. Przysluski, I. Komissarov, W. Paszkowicz, P. Dluzewski, R. Minikayev, and M. Sawicki, "Magnetic properties of  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  superlattices" *Phys. Rev. B*, vol. 69, pp. 134428, 2004.
- [9] V. Peña, Z. Sefrioui, D. Arias, C. Leon, and J. Santamaria, M. Varela, S.J. Pennycook, and J.L. Martinez, "Coupling of superconductors through a half-metallic ferromagnet: Evidence for a long-range proximity effect" *Phys. Rev. B*, vol. 69, pp. 224502, 2004.
- [10] V. Peña, C. Visani, J. Garcia-Barriocanal, D. Arias, Z. Sefrioui, C. Leon, and J. Santamaria, "Spin diffusion versus proximity effect at ferromagnet/superconductor  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  interface" *Phys. Rev. B*, vol. 73, pp. 104513, 2006.
- [11] E. A. Demler, G. B. Arnold, and M. R. Beasley, "Superconducting proximity effects in magnetic metals" *Phys. Rev. B*, vol. 55, pp. 15174, 1997.
- [12] T. Aytug, M. Paranthaman, B. W. Kang, S. Sathyamurthy, A. Goyal, and D. K. Christen, " $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ : A single, conductive-oxide buffer layer for the development of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  coated conductors" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 2205-2207, 2001.
- [13] J. G. Lin, S. L. Cheng, C. R. Chang, and D. Y. Xing, "Superconducting and transport properties of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 / \text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  bilayers" *J. Appl. Phys.*, vol. 98, pp. 023910, 2005.
- [14] B. Ravel, "ATOMS: crystallography for the X-ray absorption spectroscopist," *J. Synchrotron Radiat.*, vol. 8, pp. 314-316, 2001.
- [15] B. Ravel and M. Newville, "ATHENA, ARTEMIS, HEPHAESTUS: data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT," *J. Synchrotron Radiat.*, vol. 12, pp. 537-541, 2005.
- [16] J. Y. Oh, C. Y. Song, Y. J. Ko, D. S. Yang, and B. Kang, "Strain-induced local structural change and its effect on the superconducting properties of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  heterostructure" *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 33, pp. 075002, 2020.
- [17] S. Soltan, J. Albrecht, and H. -U. Habermeier, "Ferromagnetic/superconducting bilayer structure: A model system for spin diffusion length estimation" *Phys. Rev. B*, vol. 70, pp. 144517, 2004.