

⁵⁷Fe 이온이 CuO에 미치는 효과에 관한 Mössbauer 분광 연구

박재윤*

인천대학교 신소재공학과, 인천광역시 남구 도화동 177, 402-749

김광주

건국대학교 물리학과, 서울 광진구 화양동 1, 143-701

(2009년 4월 27일 받음, 2009년 5월 28일 최종수정본 받음, 2009년 5월 29일 게재확정)

sol-gel 방법을 이용하여 제작된 $^{57}\text{Fe}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ ($x = 0.0, 0.02$) 분말 시료들에 대한 결정구조 및 초미세 자기적 특성을 X-선 회절 (XRD)과 Mössbauer 분광법을 이용하여 조사하였다. XRD 측정 결과 단사(monoclinic) 구조의 CuO 단일상 만이 나타났고, 열처리 온도 상승에 따라 격자상수 값들은 소폭 증가하였다. 또한, 열처리 온도 증가에 따라 Fe^{3+} 스핀들의 정렬과 관련되는 산소 vacancy 농도가 증가하며, 이에 따라 상온에서의 강자성 상의 세기가 증가되었다. Jahn-Teller 효과에 의하여 왜곡된 팔면체 자리에 위치하는 ^{57}Fe 이온에 대하여 CuO의 Néel 온도보다 매우 낮은 17 K에서 사중극자 상호작용과 초미세 자기장 상호작용이 동시에 작용하는 조건을 적용하여 분석한 결과, 초미세 자기장 방향은 전기장 기울기 텐서의 세 주축에 대하여 $\theta = 65^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 이고, 비대칭인자 $\eta = 0.6$ 으로 나타났다. 그리고 Jahn-Teller 효과에 의한 왜곡으로 비교적 큰 사중극자 분열 $\Delta E_Q = -3.67 \text{ mm/s}$ 값이 나타났으며, 이성질체 이동 값은 Fe^{3+} 에 대한 값인 0.32 mm/s 로 얻어졌다. 500°C 에서 열처리를 통하여 얻어진 $^{57}\text{Fe}_{0.02}\text{Cu}_{0.98}\text{O}$ 시료에 대하여 17 K에서 취한 H_{hf} 값은 426.94 kOe 로 비교적 작은 값으로 얻어졌는데, 이것은 H_{hf} 에 관계되는 세가지 항 H_L , H_d , H_c 사이의 온도 의존성 차이에 기인하는 것으로 해석된다.

주제어 : CuO, Mössbauer spectroscopy, 단사구조, 초미세 자기장, 사중극자 분열

I. 서 론

최근에 강자성 반도체는 스핀 트랜지스터, 편광 다이오드, 비휘발성 정보 저장 소자 등과 같은 반도체 및 광전자 소자들에서 스핀 주입을 통하여 저 자기장에서 동작 조절이 가능할 수 있음을 보여 큰 주목을 받고 있다[1-3]. 이에 따라 II-VI, III-V, IV족 반도체에 $3d$ 전이금속을 첨가하여 전하와 스핀의 자유도를 증가시키는 트랜지스터 디바이스의 성능을 높이기 위한 스핀트로닉스 연구가 활발하게 이루어지고 있다[4-8]. 이와 같은 연구의 대상으로서 상온에서 강자성은 없지만 전이금속 치환 시 강자성을 나타내는 ZnO, TiO_2 등의 희박자성 반도체(diluted magnetic semiconductor; DMS) 들이 학계에 보고되고 있다[9, 10]. 한편 CuO에서도 유사한 결과들이 보고되고 있는데[11], 관측되는 강자성의 원인은 시료제조법, 결정 결함이나 전이금속의 화학적 상태에 따라 변화하는 것으로 해석되고 있다[9, 10].

CuO는 비정상적인 자기적 거동을 보이는 것으로 알려지고 있는데, 고온에서 자기 감수율의 온도 의존성이 Curie-Weiss 법칙을 따르지 않으며, 이것은 교환 상호작용 경로의 이차원 배열에 기인한 것으로 설명되고 있다[12, 13]. CuO에서는 Néel 온도(T_N) 230 K 부근에서 상자성에서 반강자성으로의

상전이가 발생되나 완전한 정도는 아니고, 213 K에서 다시 일직선상의 반강자성 배열이 일어나는 2차 전이가 발생된다. 한편, 극저온에서의 자기 감수율은 상자성 성분의 존재와 온도 변화에 대하여 상수값이 유지되려는 경향 등 독특한 자기적 특성을 나타낸다[14, 15]. 이와 같은 저온 특성에 관한 충분한 해석은 아직 보고되고 있지 않은데, 교환상호작용 경로의 손상, 약한 반강자성에 의한 스핀 canting, 자기모멘트 쿼드 성분 quenching의 불완전함, 또는 격자 내에 Cu^{3+} 이온의 존재 원인과 같은 다양한 주장이 제기되고 있다[15-17]. CuO는 전기적으로는 p -형 전도성을 보이며, 그 결정구조는 단사(monoclinic)구조로서 Jahn-Teller 효과로 인하여 왜곡된 팔면체의 중앙에 Cu^{2+} 이온이, 모서리에는 O^{2-} 이온이 위치하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 sol-gel 방법을 이용하여 Cu가 ^{57}Fe 로 치환된 $^{57}\text{Fe}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ ($x = 0, 0.02$) 분말을 제조하여 그 결정 구조를 확인하고, 열처리 온도 변화에 따르는 자기적 특성 변화를 조사하였다. 특히 T_N 이하의 저온에서 반강자성 특성을 나타내는 CuO에 ^{57}Fe 이온 첨가에 의하여 변화된 자기적 특성을 Mössbauer 분광법을 이용하여 조사하였다.

II. 실험 방법

sol-gel 방법으로 2-methoxyethanol에 monoethanolamine을

*Tel: (032) 770-8271, E-mail: pjy@incheon.ac.kr

촉매제로 사용하여 copper-acetate monohydrate[(CH₃COO)₂Cu · H₂O]를 90 °C에서 2시간 동안 용해하여 전구(precursor) 용액을 제조하였다. 여기서 전구용액은 1.5 mol/l로 준비하여 2-methoxyethanol과 copper-acetate monohydrate의 몰 비율과 같이 되도록 하였다. 불순물 첨가를 위하여 전구용액에 질산(HNO₃)에서 녹인 ⁵⁷Fe를 혼합하였고, 그 첨가량은 제조된 전구용액에서 Cu 원자와 불순물 원자수의 합에 대한 불순물 원자수 비의 백분율(at%)로 나타내었다. 준비된 분말은 공기 중에서 건조기로 80 °C에서 24시간 동안 전구용액을 건조시킨 후, 다시 공기 중에서 24시간 동안 500~1000 °C 범위에서 열처리하였다.

시료들의 결정구조는 Cu K_α 선을 이용한 X-선 회절(X-ray Diffraction; XRD) 장치를 이용하여 θ-2θ 모드로 상온(295 K)에서 측정되었으며, 초미세 자기구조를 알아보기 위하여 Mössbauer spectroscopy(MS) 측정이 수행되었다. MS 측정은 Z80이 CPU로 내장된 UEC-Z07 microcomputer를 multichannel scaler로 사용하는 등기속도형 Mössbauer 분광계를 이용하여 공명흡수선을 취하였다. ⁵⁷Co의 감마선원은 Rh matrix에 확산시킨 50 mCi 크기의 것을 사용하였고, Mössbauer 공명흡수체의 두께를 균일하게 하기 위하여 시료에 boron nitride 분말을 섞어 boron nitride 판으로 압착시켜 균일한 온도분포를 갖게 하였다. 한편 분광계의 분해능을 높이기 위하여 속도 구동 모드를 정현파 모드로 하여 선형 전동기를 구동하였다.

III. 이 론

반강자성 CuO에서의 Fe는 Jahn-Teller 효과의 의하여 왜곡된 팔면체 자리를 차지하게 되므로, T_N 이하에서 ⁵⁷Fe 원자핵에 대한 Hamiltonian \mathcal{H} 은 사중극자 상호작용과 초미세 자기장에 의한 상호작용이 동시에 작용하는 조건으로 아래와 같이 나타내어질 수 있다[18].

$$\mathcal{H} = -g\mu_N \mathbf{I} \cdot \mathbf{H} + [e^2 q Q / 4I(2I - 1)] [3I_{z'}^2 - I(I + 1) + \eta(I_{x'}^2 - I_{y'}^2)] \quad (1)$$

여기서, x', y', z'은 전기장 기울기 텐서의 세 주축을 나타내고, 다음과 같은 조건이 만족되도록 선택되었다.

$$|V_{zz'}| \geq |V_{yy'}| \geq |V_{xx'}| \quad (2)$$

그리고, \mathbf{H} 는 원자핵에서의 초미세 자기장을 의미하고, 전기장 기울기 텐서의 z' 성분은 $eq = V_{zz'}$, 비대칭인자 $\eta = (V_{yy'} - V_{xx'}) / V_{zz'}$ 로 각각 정의된다. 한편, g는 ⁵⁷Fe 원자핵에 대한 g-인자 이고, μ_N 은 nuclear magneton, Q는 원자핵 사중극 모멘트, I는 원자핵의 spin operator이다. 초미세 자기장의 방향

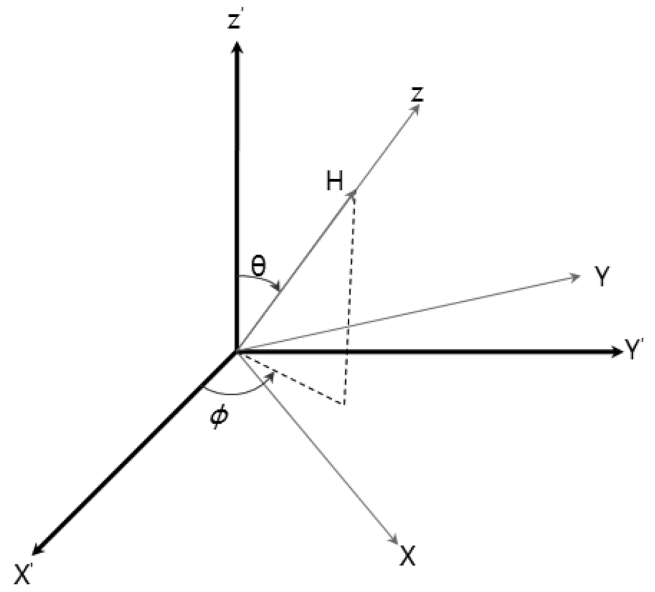


Fig. 1. Direction of \mathbf{H} with respect to the principal axes, x', y', z', of the electric field gradient tensor.

은 전기장 기울기 텐서의 세 주축 x', y', z'에 대한 극각과 방위각이 θ, φ로 정의되고, 새로운 x, y, z는 \mathbf{H} 의 방향이 z축이 되도록 Fig. 1과 같이 가정하였다. ⁵⁷Fe의 첫 번째 들뜬 상태에 대한 Hamiltonian matrix $\langle \frac{3}{2} M_1 | \mathcal{H} | \frac{3}{2} M_1 \rangle$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

	M_1	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{3}{2}$	
M_1		\mathcal{H}_{11}	\mathcal{H}_{21}	\mathcal{H}_{31}	0	
	$\frac{1}{2}$	\mathcal{H}_{21}	\mathcal{H}_{22}	0	\mathcal{H}_{31}	(3)
	$-\frac{1}{2}$	\mathcal{H}_{31}	0	\mathcal{H}_{33}	$-\mathcal{H}_{21}$	
	$-\frac{3}{2}$	0	\mathcal{H}_{31}	$-\mathcal{H}_{21}$	\mathcal{H}_{44}	

여기서,

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{11} &= \frac{3}{2} g_1 \mu_N H + E'_Q, \\ \mathcal{H}_{21} &= \frac{\sqrt{3} e^2 q Q}{12} [-3 \sin \theta \cos \theta + \eta \sin \theta (\cos \theta \cos 2\phi - i \sin 2\phi)], \\ \mathcal{H}_{31} &= \frac{\sqrt{3} e^2 q Q}{24} [3 \sin^2 \theta + \eta (1 + \cos^2 \theta) \cos 2\phi - 2i \eta \cos \theta \sin 2\phi], \\ \mathcal{H}_{22} &= \frac{1}{2} g_1 \mu_N H - E'_Q, \\ \mathcal{H}_{33} &= -\frac{1}{2} g_1 \mu_N H - E'_Q. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathcal{H}_{44} = -\frac{3}{2}g_1\mu_N H + E'_Q,$$

$$E'_Q = \frac{1}{8}e^2qQ(3\cos^2\theta - 1 + \sin^2\theta\cos 2\phi).$$

이고, g_1 은 ^{57}Fe 원자핵에 대한 첫 번째 들뜬상태에서의 g -인자 절대값이다. 식 (3)의 4×4 matrix를 대각선화하면 ^{57}Fe 의 첫 번째 들뜬상태에서의 에너지 고유값을 구할 수 있다. 또한 각 고유값에 대한 고유벡터는 아래와 같이 얻어진다.

$$|\phi_n\rangle = a_{1n}|\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\rangle + a_{2n}|\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\rangle + a_{3n}|\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}\rangle + a_{4n}|\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}\rangle \quad (5)$$

한편, 사중극자 모멘트가 존재하지 않는 ^{57}Fe 원자핵의 바닥

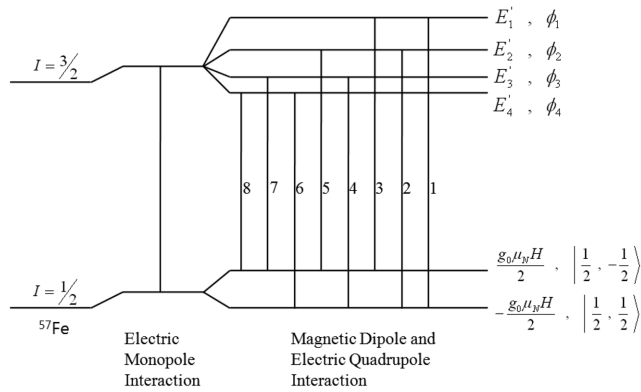


Fig. 2. Energy-level scheme for the first-excited and the ground states of an ^{57}Fe nucleus.

Table I. Energies and relative intensities for ^{57}Fe Mössbauer spectra under combined magnetic hyperfine and electric quadrupole interactions.

Number	Energy	Relative intensity
1	$E'_1 + \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$3 a_{11} ^2 + 2 a_{21} ^2 + a_{31} ^2$
2	$E'_2 + \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$3 a_{12} ^2 + 2 a_{22} ^2 + a_{32} ^2$
3	$E'_1 - \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$ a_{21} ^2 + 2 a_{31} ^2 + 3 a_{41} ^2$
4	$E'_3 + \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$3 a_{13} ^2 + 2 a_{23} ^2 + a_{33} ^2$
5	$E'_2 - \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$ a_{22} ^2 + 2 a_{32} ^2 + 3 a_{42} ^2$
6	$E'_4 + \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$3 a_{14} ^2 + 2 a_{24} ^2 + a_{34} ^2$
7	$E'_3 - \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$ a_{23} ^2 + 2 a_{33} ^2 + 3 a_{43} ^2$
8	$E'_4 - \frac{1}{2}g_0\mu_N H$	$ a_{24} ^2 + 2 a_{34} ^2 + 3 a_{44} ^2$

상태에 대한 에너지 고유값과 고유벡터는 각각 다음과 같다.

$$-\frac{1}{2}g_0\mu_N H|\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\rangle,$$

$$\frac{1}{2}g_0\mu_N H|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle, \quad (6)$$

여기서 g_0 는 ^{57}Fe 원자핵에 대한 바닥상태에서의 g -인자값이다. ^{57}Fe 원자핵에 대한 첫 번째 들뜬상태와 바닥상태 사이의 감마선 전이는 순수한 M1 형이므로, 이 조건을 고려한 첫 번째 들뜬상태에서 축퇴되지 않은 네 개 에너지 준위와 바닥상태의 두 에너지 준위 사이의 전이확률을 계산하면 Fig. 2 와 같이 얻어질 수 있으며, Table I은 분말 시료에 대한 결과를 보여준다[19].

IV. 결과 및 논의

Fig. 3은 상온에서 측정된 $^{57}\text{Fe}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ ($x = 0, 0.02$) 시료들의 XRD 결과를 나타내는데, 모든 시료가 단사구조를 보이며 Cu_2O 같은 다른 상은 존재하지 않음을 볼 수 있다.

시료들의 격자상수는 Bragg 방정식과 결정면간 거리 d 에

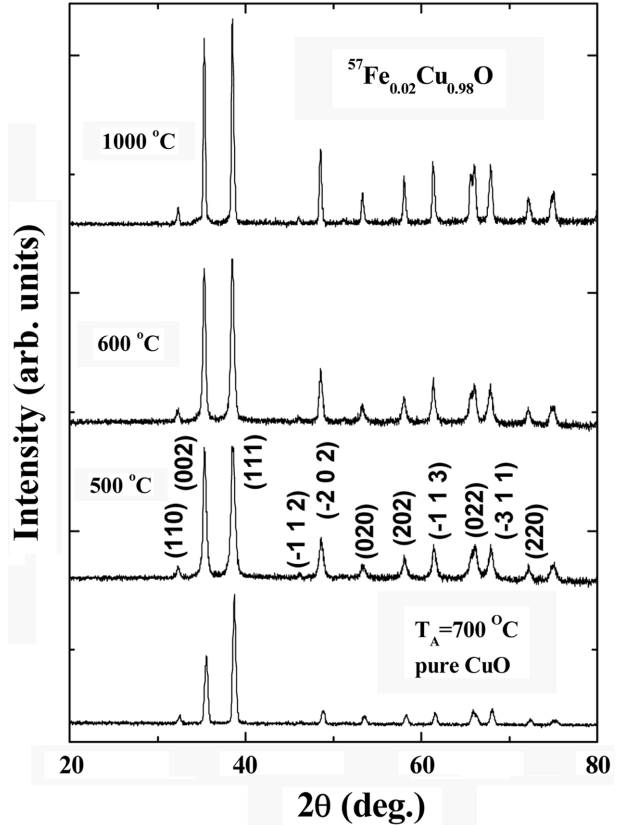


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of $^{57}\text{Fe}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ ($x = 0, 0.02$) powders for varying annealing temperature.

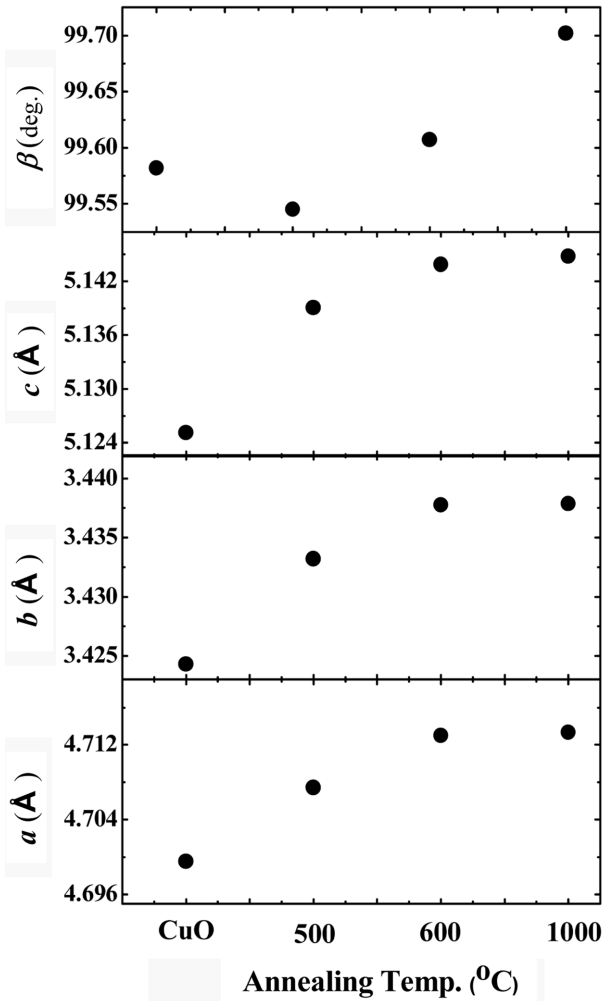


Fig. 4. Lattice parameters of $^{57}\text{Fe}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ ($x = 0, 0.02$) powders.

관한 식

$$\frac{1}{d^2} = \left[\frac{h^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl\cos\beta}{ac} \right] \frac{1}{\sin^2\beta} + \frac{k^2}{b^2} \quad (7)$$

을 이용하여 최소제곱법으로 맞추어 구하여 Fig. 4에 표시하였다. Fig. 4는 열처리 온도 변화에 따른 $^{57}\text{Fe}_{0.02}\text{Cu}_{0.98}\text{O}$ 분말의 격자상수 값의 변화를 보여준다. 500 °C에서 열처리한 시료의 β 값을 제외하고 대체로 열처리 온도의 상승에 따라 격자상수 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 공기 중에서의 열처리 온도 증가에 따라 단위세포의 크기가 전반적으로 증가함을 의미한다. Cu^{2+} 이온의 크기는 0.85 Å이고 high-spin Fe^{3+} 이온의 크기는 0.785 Å 이므로, 단위세포 부피의 증가는 Fe의 Cu 치환에 의한 효과가 아니며, Fe 이온 주입은 열처리 온도 상승에 따라 vacancy 농도의 증가를 촉진하여 부피를 증가시키는 것으로 해석될 수 있다.

Fig. 5는 $^{57}\text{Fe}_{0.02}\text{Cu}_{0.98}\text{O}$ 열처리 온도 변화에 따라 상온(295

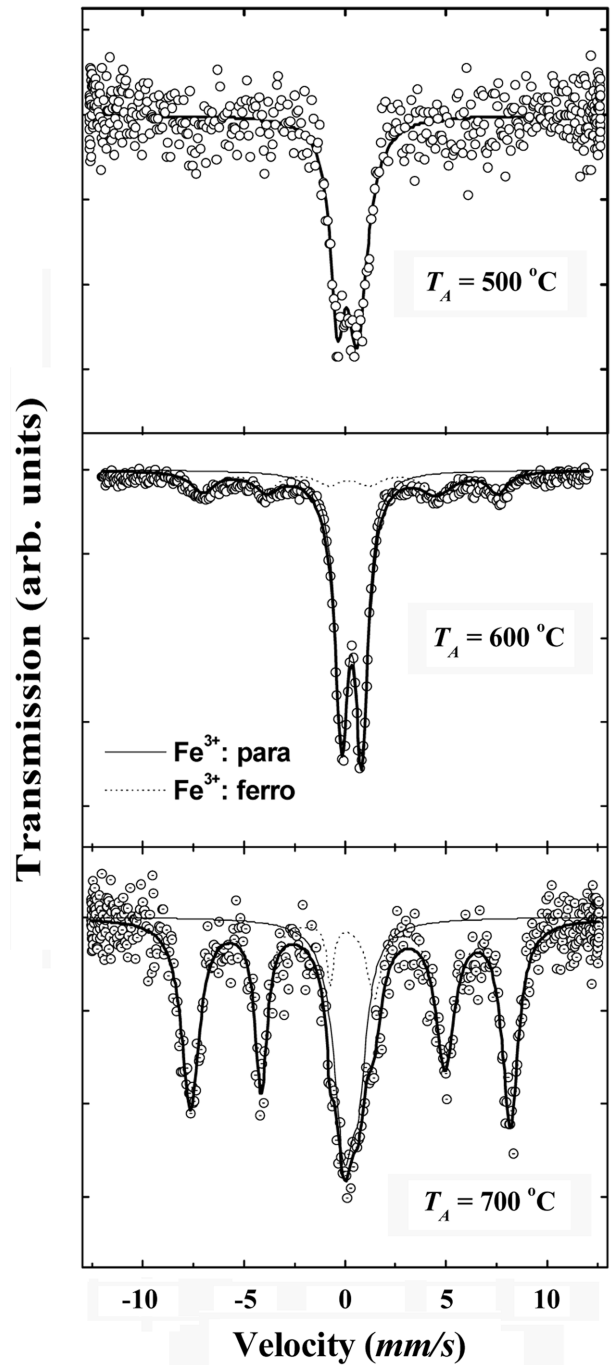


Fig. 5. Mössbauer spectra of $^{57}\text{Fe}_{0.02}\text{Cu}_{0.98}\text{O}$ powders at 295 K for varying annealing temperature.

K)에서 측정된 Mössbauer 공명흡수선을 보여준다. 열처리 온도가 증가함에 따라 6개의 공명흡수선으로 표시되는 강자성상이 증가됨을 볼 수 있다. Coey의 연구 결과에[20] 따르면 이와 같은 강자성 상은 산화물 재료에서 산소 vacancy와 밀접하게 연관되어 있는데, Fe^{3+} 이온들의 스핀 정렬에 산소 vacancy에 국소화 된 전하 운반체가 관계되어 강자성을 나타

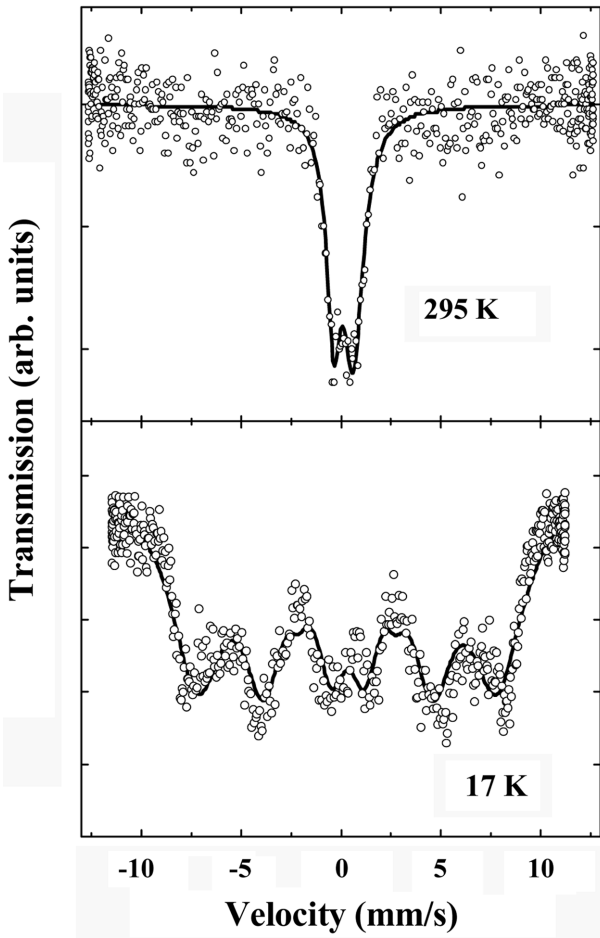


Fig. 6. Mössbauer spectra of ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O powders at 295 and 17 K.

내는 것으로 해석된다. 이것은 XRD 측정 결과에 나타난 단위세포 크기의 증가가 vacancy 양의 증가에 의한 것이라는 해석과 잘 일치한다.

단사구조의 CuO는 T_N 이하에서 반강자성 배열을 하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 상온에서 vacancy와 연계된 강자성 상이 없는 $T_A = 500^\circ\text{C}$ 시료에 대한 Mössbauer 분광 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 T_N 에 비하여 매우 낮은 온도인 17 K에서 취한 ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O 분말 시료($T_A = 500^\circ\text{C}$)의 Mössbauer 분광 측정 결과는 초미세 자기 상호작용뿐만 아니라 전기 이중극자 상호작용이 동시에 관여됨을 보여준다. 그러므로 앞의 이론에서 지적한 바와 같이 Table I에 표시된 공명흡수선의 위치와 세기를 구하기 위하여, 4×4 행렬식(3)을 대각선화 하여 θ, ϕ, η 및 $R = e^2qQ/2g_I\mu_N H$ 를 구하여 8개 공명흡수선에 맞추어야 한다. 이와 같이 8개의 Lorentzian으로 맞추어 구한 공명흡수선의 위치와 세기를 Table II에 표시하였다.

최소제곱법으로 8개 공명흡수선을 맞춘 결과 초미세장은 전기장 기울기 텐서의 주축에 대한 극각 $\theta = 65^\circ$ 이고, 방위각

Table II. Relative line positions (energies) and intensities of the eight lines for Mössbauer spectrum of ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O at 17 K.

Number	Energy ($g_I\mu_N H$)	Relative intensity
1	2.5906	2.8260
2	1.4719	1.8663
3	0.8371	0.1740
4	0.2947	1.1391
5	-0.2816	1.1337
6	-0.8502	0.1686
7	-1.4588	1.8609
8	-2.6037	2.8314

Table III. θ, ϕ, η, R , magnetic hyperfine field H_{hf} , quadrupole splitting ΔE_Q , and isomer shift δ at 17 and 295 K for ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O powders ($T_A = 500^\circ\text{C}$).

T (K)	θ ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)	η	R	H_{hf} (kOe)	ΔE_Q (mm/s)	δ (mm/s)
17	65	0	0.6	-1.2	426.94	-3.67	0.32
295						-0.99	0.12

$\phi = 0^\circ$ 이며 비대칭인자 $\eta = 0.6$, 그리고 $R = -1.2$ 이다. 초미세 자기장 $H_{hf} = 426.94$ kOe이고, 전기 이중극자 분열값 $\Delta E_Q = \frac{e^2qQ}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{3}\eta^2} = -3.67$ mm/s를 각각 얻었으며 그 요약한 결과는 Table III에 나타내었다.

한편 17 K에서 이성질체 이동값은 0.32 mm/s로 금속철에 대한 상대값은 Fe 이온의 전하 상태가 +3가로서 Cu^{2+} 를 치환함을 의미한다. 반강자성 CuO에서의 Fe는 T_N 이하에서 Jahn-Teller 효과로 인하여 왜곡된 팔면체 자리를 차지하게 되므로 비교적 큰 -3.67 mm/s의 사중극자 분열값을 갖는 것으로 판단된다. 그리고 초미세 자기장 H_{hf} 값 426.94 kOe는 Table II의 1번선과 8번선 차이와 실험 결과의 양쪽 최외각 공명흡수선의 차이를 다음과 같이 등식하여 구하였다.

$$V_1 - V_8 = (2.5906 + 2.6037)g_I\mu_N H \frac{C}{E_0} \quad (8)$$

Fig. 5의 상온에서 강자성 상을 보이는 ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O 분말 시료($T_A = 700^\circ\text{C}$)의 Mössbauer 분광실험결과에서 H_{hf} 는 495.95 kOe로 나타났다. 하지만 같은 Fe³⁺ 이온으로 17 K에서 취한 ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O 분말 시료($T_A = 500^\circ\text{C}$)의 H_{hf} 값은 일반적인 경우 다르게 426.94 kOe로 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 H_{hf} 에 관계되는 orbital항 H_L 과 dipolar항 H_d 그리고 Fermi 접촉항 H_c 사이의 온도 의존성 차이에 기인되는 것으로 추측된다.

IV. 결 론

sol-gel 방법을 이용하여 Cu를 ⁵⁷Fe로 치환시킨 ⁵⁷Fe_xCu_{1-x}O

분말을 제조하여 그 결정구조 및 초미세 자기적 특성을 조사하였다. 시료들에 대한 XRD 측정 결과 CuO 단일상 만이 나타났고, 후열처리 온도 상승에 따라 격자상수값들은 소량 증가하였다. 이와 같은 결과는 열처리 온도 증가에 따라 산소 vacancy 양이 증가하는 것으로 이해될 수 있으며, Fe³⁺ 스핀들의 정렬에 관계되는 vacancy 양이 증가함에 따라 상온에서의 강자성상이 증가되는 Mössbauer 분광 실험 결과와 일치한다. Jahn-Teller 효과에 의하여 왜곡된 팔면체 자리를 차지하는 ⁵⁷Fe 이온을 T_N 이하에서 사중극자 상호작용과 초미세 자기장 상호작용이 동시에 작용하는 조건을 적용하여 분석한 결과, 초미세 자기장 방향은 전기장 기울기 텐서의 세 주축에 대하여 $\theta = 65^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 이고, 비대칭인자 $\eta = 0.6$, 그리고 $R = -1.2$ 으로 나타났다. 그리고 Jahn-Teller 효과에 의한 왜곡으로 비교적 큰 값의 사중극자 분열 $\Delta E_Q = -3.67$ mm/s 값이 나타났으며, 이성질체 이동값은 Fe³⁺에 대한 값인 0.32 mm/s 으로 얻어졌다. CuO의 T_N에 비하여 매우 낮은 17 K에서 취한 ⁵⁷Fe_{0.02}Cu_{0.98}O 분말 시료(T_A = 500 °C)의 H_{hf} 값이 426.94 kOe로 비교적 작은 값으로 얻어진 것은 H_{hf}에 관계되는 세가지 항 H_L, H_d, H_c 사이의 온도 의존성 차이에 기인하여 발생하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원에 의하여 수행되었음. 이에 감사를 드린다.

참고문헌

[1] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omlia, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, and K. Ohtani, Nature (London), **408**, 944 (2000).
 [2] R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A.

Waag, and L. W. Molenkamp, Nature (London), **402**, 787 (1999).
 [3] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, and D. D. Awschalom, Nature (London), **402**, 790 (1999).
 [4] T. M. Pekarek, C. L. Fuller, J. Garner, B. C. Crooker, I. Miotkowski, and A. K. Ramdas, J. Appl. Phys., **89**, 7030 (2001).
 [5] H. Saito, W. Zaets, R. Akimoto, K. Ando, Y. Mishima, and M. Tanaka, J. Appl. Phys., **89**, 7392 (2001).
 [6] Y. D. Kim, S. L. Cooper, M. V. Klein, and B. Y. Jonker, Phys. Rev. B, **49**, 1732 (1994).
 [7] K. J. Kim and Y. R. Park, Appl. Phys. Lett., **81**, 1420 (2001).
 [8] Z. Wang, W. Wang, J. Tang, L. D. Tung, L. Spinu, and W. Zhou, Appl. Phys. Lett., **83**, 518 (2003).
 [9] J. H. Park, M. G. Kim, H. M. Jang, and S. Ryu, Appl. Phys. Lett., **84**, 1338 (2004).
 [10] K. Ueda, H. Tabata, and T. Kawai, Appl. Phys. Lett., **79**, 988 (2001).
 [11] S. J. Stewart, R. A. Borzi, G. Punte, and R. C. Mercader, Phys. Rev. B, **57**, 4983 (1998).
 [12] B. X. Yang, T. R. Thurston, J. M. Tranquada, and G. Shirane, Phys. Rev. B, **39**, 4343 (1989).
 [13] J. B. Forsyth, P. J. Brown, and B. M. Wanklyn, J. Phys. C, **21**, 2917 (1988).
 [14] C. B. Azzoni, A. Paleari, and G. B. Parravicini, J. Phys.: Condens. Matter, **4**, 1352 (1992).
 [15] F. Marabelli, G. B. Parravicini, and P. Watcher, Solid State Commun., **86**, 131 (1993).
 [16] N. A. Viglin, S. V. Naumov, and A. A. Samokhvalov, Soviet Phys. Solid State, **38**, 706 (1996).
 [17] U. Köbler and S. T. Chattopadhyay, Z. Phys. B, **82**, 383 (1991).
 [18] M. H. Cohen and F. Rief, Solid State Physics, edited by F. Seitz and D. Turnbull, Academic Press Inc., N.Y. (1957) vol. 5.
 [19] H. N. Ok and J. G. Mullen, Phys. Rev., **168**, 563 (1968).
 [20] J. M. D. Coey, A. P. Douvalis, C. B. Fitzgerald, and M. Venkatesan, Appl. Phys. Lett., **84**, 1332 (2004).

Mössbauer Study on the Variation in Magnetic Properties of CuO Induced by ^{57}Fe Addition

Jae Yun Park*

Department of Materials Science and Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea

Kwang Joo Kim

Department of Physics, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received 27 April 2009, Received in final form 28 May 2009, Accepted 29 May 2009)

$^{57}\text{Fe}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ ($x = 0.0, 0.02$) powders were prepared by sol-gel method and their crystallographic and magnetic hyperfine properties have been studied using X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy (MS). The crystal structure of the samples is found to be monoclinic without any secondary phases and their lattice parameters increase with increasing annealing temperature (T_A), which is attributed to an increase in oxygen-vacancy content. MS measurements at room temperature indicate that Fe^{3+} ions substitute Cu^{2+} sites and ferromagnetic phase grow with increasing T_A . Magnetic hyperfine and quadrupole interactions of $^{57}\text{Fe}_{0.02}\text{Cu}_{0.98}\text{O}$ ($T_A = 500^\circ\text{C}$) in the antiferromagnetic state at 17 K have been studied, yielding the following results: $H_{\text{hf}} = 426.94$ kOe, $\Delta E_Q = -3.67$ mm/s, $I.S. = 0.32$ mm/s, $\theta = 65^\circ$, $\phi = 0^\circ$, and $\eta = 0.6$.

Keywords : CuO, Mössbauer spectroscopy, monoclinic, hyperfine field, quadrupole splitting