

리트벨트 해석법을 이용한 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 고온 초전도체의 구조분석

논문
8-6-14

The Structure Analysis of $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ High Tc Superconductor based on Rietveld Method

채기병*, 소대화*
(Kee-Byung Chae, Dae-Wha Sho)

Abstract

For the execution of RIETAN program adopting Rietveld Analysis Method, the sample superconductor is made according to the solid state synthesis method at 920 °C for 24hrs, and was examined for the optimization of parameters needed to analyze Rietveld method with the input of the measured pattern data after measuring the pattern resulted from the X-ray diffraction.

It was proven that the lattice constant of the superconductor which was consisted of Pmmm orthorhombic crystal structure in the analyzed space group correspond to the presented theoretical lattice constant $a=3.8887(8) \text{ \AA}$, $b=3.8238(4) \text{ \AA}$, $c=11.7079 \text{ \AA}$.

Therefore, it was examined and confirmed that the R factor, which was compensated after analyzing the structure of superconductor resulted from this experimented data with the computer simulation, was refined to $R_{wp}=8.83[\%]$, $R_p=6.47[\%]$, $R_1=10.08[\%]$, $R_F=7.19[\%]$, $R_E=3.76[\%]$. On the basis of these experimental data, the significant parameter such as the scale factor(S) and the zero point shift(Z) and FWHM value(U,V,W) were optimized as follows; $S=2.0827E-3$, $Z=0.2146$, $U=4.2761E-2$, $V=1.7983E-2$, and $W=2.6768E-2$.

Key Words(중요 용어) : RIETAN(RIETveld ANalysis), Scale factor(척도인자), Zero point shift(영점이동), FWHM(반치폭), Space group(공간군), Orthorhombic(사방정)

1. 서론

미세결정구조의 연구는 1913년 Bragg가 분말 X-선 회절 분석법을 이용한 이래, 재료개발의 기반이 되는 해석기술로 발전되고 있다. 초미립자 분말 분석법으로서 X선 및 중성자 회절무늬를 이용하는 프로파일 해석법이 1969년 Rietveld에 의하여 발표되었으며, 리트벨트 해석법(Rietveld analysis method)으로 알려져 있다.¹⁾ 이 해석법은 결정분말의 전체 회절 패턴을 숫자화 하여, 그 자료 하나 하나를 측정점으로 분석하고, 관찰된 강도와 계산

에 의한 강도의 최근접치를 결정구조의 정보로 취하여 모델 파라미터인 구조변수, 회절음영 및 회절곡형의 변수 등을 이론적인 회절패턴과 측정된 패턴이 일치될 수 있도록 최적화, 정밀화하는 방법이다.²⁾

리트벨트 해석을 위한 프로그램은 Rietveld법이 처음 발표된 이후 1987년의 Izumi의 연구 보고서³⁾에 의하면, 초전도체의 구조해석에 리트벨트법을 이용함으로써 크게 주목을 받았으며, 이후 미지의 결정구조해석에도 적용 가능성 여부에 대한 관심이 모아지고 있다.⁴⁾

또한, 초전도 재료를 신소재로서 응용하기 위한 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며, 초전도 전이 온도, 전류밀도, 기계적 가공성 및 화학적 안정성 등은 초전도체가 갖추어야 할 중요한 물성으로서

* 명지대학교 전자공학과
접수일자 : 1995년 9월 1일
심사완료 : 1995년 10월 25일

이에 대한 연구가⁵⁾ 주목되고있다. 특히, 높은 전이 온도와 큰 전류밀도는 공학적으로 유용한 초전도체의 필요조건으로서 초전도체의 성분 및 구조와 크게 관련되며, 따라서 초전도체의 구조해석에 필요한 정밀분석 방법에 대한 연구결과들이 보고되어 있다.⁶⁾ 본 연구에서는 YBCO 초전도체의 구조분석 자료를 최적화 하기 위하여, 고체상태로 제작한 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 고온 초전도체의 X선 회절분석에 의한 패턴 데이터를 RIETAN 프로그램에 적용하는 해석방법을 이용하였다. 그리고 최적의 구조해석에 필요한 파라미터를 구하고 동시에 초전도 특성 및 결정구조를 정밀화할 수 있는 R 인자에 대한 연구를 통하여, 그 최적의 초전도체 제조조건을 모델화 하기 위한 기초분석 자료를 제시하였다.

2. 리트벨트 해석 이론

리트벨트 해석법은 분말 X선 회절도형의 각 회절각 2θ 에 대한 관측 강도와 예상되는 결정구조로부터 계산한 강도가 잘 일치하도록 격자상수, 결정구조 파라미터, 피크와 백그라운드의 형상관계 등에 들어있는 파라미터를 최소 자승법으로 동시에 결정한다. 측정값과 계산 값의 척도를 알 수 있는 R인자(R-factor)로써 R_{wp} (weighted pattern R-factor), R_p (pattern R-factor), R_I (intergrated intensity R-factor), R_F (structure R-factor) 등이 있으며, 일반적으로 구조에 대한 정산이 만족하게 이루어진 경우 R인자는 감소하게 된다. 이 결과의 오차는 예상표준 편차(estimated standard deviation, ESD)로 표시되며, 또 리트벨트 정밀화 계산의 결과는 다음과 같은 잔류 값에 의하여 통계적으로 평가된다.

$$R_{wp} = \left[\frac{\sum_i W_i (y_{i.o} - y_{i.c})^2}{\sum_i W_i y_{i.o}^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{\sum_i |y_{i.o} - y_{i.c}|}{\sum_i y_{i.o}} \quad (2)$$

$$R_I = \frac{\sum_i |I_{Ko} - I_{Kc}|}{\sum_i I_{Ko}} \quad (3)$$

$$R_F = \frac{\sum_i |[I_{Ko}]^{1/2} - [I_{Kc}]^{1/2}|}{\sum_i [I_{Ko}]^{1/2}} \quad (4)$$

$$G(g.o.f) = \frac{\sum_i W_i (y_{i.o} - y_{i.c})^2}{(N - P + C)} = \frac{R_{wp}}{R_E} \quad (5)$$

$$R_E = \left[\frac{N - P}{\sum_i W_i y_{i.o}^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

여기서

- N : 회절패턴의 측정점 수,
- P : 정산 되어야할 변수의 수,
- C : 정산시 규제조건 수,
- R_E : 기대 치(R-expected).

예를 들어, 적합성 g.o.f (goodness of fit)는 선정된 구조 모델의 적합 여부를 나타내는 척도로써 단위 1에 가까울수록 우수하다. 일반적으로 구조정산이 만족하게 이루어진 경우 R 인자가 단일물질에서는 1이하, 혼합물에서는 10이하가 되면 비교적 정확한 정밀화 인자로 취급된다. 리트벨트 해석법에서 파장을 고정하고 2θ 를 변화시키면 관찰한 통상의 분말 회절무늬 관찰법이 사용되기 때문에 이용이 쉽게 되어 매우 유용하게 진보된 결정구조 분석을 할 수 있다.

따라서, 분말 회절연구는 리트벨트법을 이용하여 이상 산란 현상 해석, 에너지 분산법, 분말상신 소재의 결정구조해석 연구등 새로운 영역을 개척하는 방향으로 진행될 수 있다.

3. 실험

1) Y-Ba-Cu-O 초전도체의 제작
산화물 초전도체의 제조방법에는 일반적으로 고상합성법(solid state reaction), 공침법(coprecipitation) 및 졸겔법(sol-gel) 등의 방법이 있는데, 본 연구에서는 고상합성법을 이용하여 123상인 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 의 초전도체를 제작하였다.⁷⁾ YBCO 초전도체의 출발물질로는 Y_2O_3 (99.99%), $BaCO_3$ (99.9%) 및 CuO (99.9%)의 분말을 1:2:3의 몰비로 정확히 칭량한후 알루미늄 불 밀을 이용하여 12시간 혼합하였다. 혼합한 시료는 충분히 자연건조한 후 $850^\circ C$ 에서 하소(calcination)하였다. 그후 다시 분쇄, 혼합하여 $1[t/cm^2]$ 의 압력으로 성형하였다. 시편의 크기는 직경 50.8mm, 두께 50mm정도로 제작하였으며, 성형된 시편은 다시 알루미늄 보트에 넣어 전기로에서 $920^\circ C$ 로 24시간 소결한후 로냉(furnace cooling)하였다.⁸⁾ 냉각과정에서 $750^\circ C$ 에서 12시간, $400^\circ C$ 에서 4시간 열처리를 하였으며, 이때의 상승 및 냉각속도는 모두 $1^\circ C/min$ 로 하였다. 제작된 시편은 4점접 방식을 이용하여 전기저

항을 측정하고, X-Y기록장치에서 온도와 전위차를 구하였으며, X선 회절분석 및 주사전자현미경으로 관찰하였다.

2) RIETAN 프로그램의 구성

리트벨트 분석 프로그램은 FORTRAN-77을 사용하였으며, 1) 결정학자료와 산란인자가 수록되어 있는 자료, 2) 관측된 X-선 회절 패턴 자료와 정밀화조건 및 변수 등이 수록된 자료⁹⁾, 3) 위의 두 자료와 함께 실행할 수 있는 반사의 계산강도 y_{ic} 가 계산되고, 그 결과를 출력할 수 있게 구성되어 있다.¹⁰⁾ 그림1은 리트벨트 해석을 위한 프로그램 RIETAN 시스템의 구성도를 나타낸것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 제작된 시편의 X선 강도와 출발물질의 구성원소 각각에 대한 공간군 및 결정 계에 따른 파라미터를 수치적으로 분석하고, 시뮬레이션된 초기조건을 각 블록에 제공하여 리트벨트 해석을 한다.¹¹⁾ 즉, 격자구조와 관련된 파라미터를 분석하고 원자거리, 원자위치 및 각도 등을 합성한 출력을 얻을 수 있는 RIETAN 프로그램의 전체 구성 도이다.

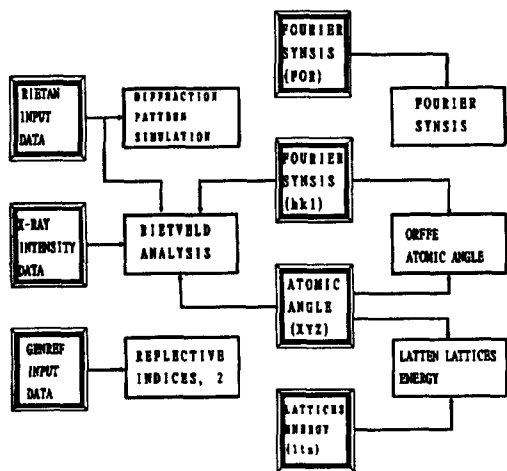


그림 1. RIETAN 시스템의 구성도
Fig. 1. Block diagram of RIETAN system.

X-선 회절무늬를 리트벨트 해석법으로 분석하는 과정은, 먼저 변수의 정밀화 순서에 따라 계산된 회절무늬의 변화를 시뮬레이션 한다. 그 다음 회절피크의 위치에 관계되는 영점이동과 격자정수를 정밀화하고, 높이에 관계되는 척도인자 및 백그라운드인자를 정밀화하여, 회절피크의 위치와 크기를 결정한다. 그리고 회절피크의 모양에 관계되는

파라미터를 정밀화하면 분산피크에 관계되는 파라미터를 감소시킬 수 있다. 또 결정구조에 관계되는 원자의 위치점유율과 열진동인자 등을 정밀화하면 결정의 구성 과 위치에 대한 정보를 포함하는 R인자가 감소되어 정밀화가 완료된다.

결국 리트벨트 해석과정에 의하여 시뮬레이션이 진행되면 격자구조의 그래픽 및 원자간 거리와 각도를 계산할 수 있게 된다. 따라서 그림 2는 RIETAN 프로그램의 과정을 나타낸것이다.

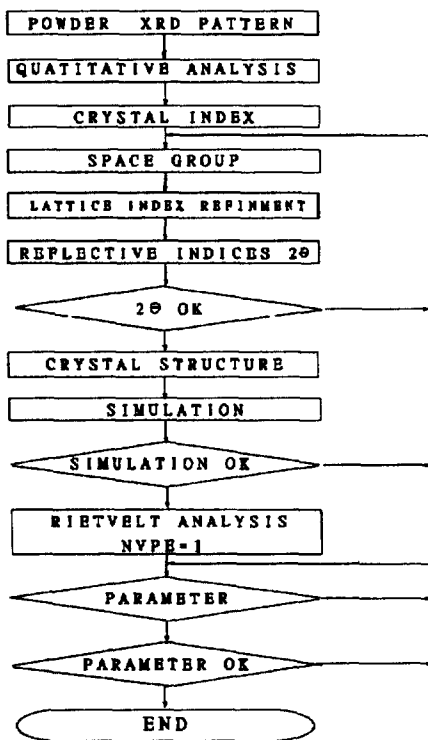


그림 2. 리트벨트 해석과정
Fig. 2. Flow chart of Rietveld analysis.

3) 리트벨트 분석 파라미터

리트벨트 분석 파라미터는 RIETAN 프로그램에서 정밀화해야 하는 주요 파라미터로서 이들로부터 결정학 자료와 산란인자가 수록되어 있는 자료, 관측된 X-선 회절패턴 자료와 정밀화조건 및 변수 등이 수록된 자료, 그리고 위의 자료와 함께 실행할 수 있는 반사계산강도 등의 결과를 출력하게 된다. 프로그램에서 RIETAN이 실행되면 해석의 완료와 관계없이 *OUTPUT가 생성되며 *HP-GL은 해석이 완료된 후 생성된다. 변수의 정밀화는 일반적으로 영점이동, 척도인자, 격자정수, 백그라운드와 회절패턴의 모양함수, 원자의 위치점유율

및 열진동인자 등의 결정학적 자료 순으로 진행한다.

따라서 RIETAN 시스템을 실행하는 방법은 주 메뉴인 파일의 조작, 반사지수 2θ , 회절패턴 시뮬레이션, 리트벨트 해석, 원자간 거리, 각도계산, Fourier합성 및 D합성 격자에너지의 계산 등으로 구성되어있다.

본 연구에서는 Izumi가 개발한 RIETAN 시스템을 이용하여 컴파일된 프로그램을 응용하였으며, 정밀화를 위한 주요 파라미터로 회절피크의 위치에 관계되는 영점이동 파라미터와 격자정수 파라미터를 정밀화하고, 높이에 관계되는 척도인자 및 백그라운드 인자를 정밀화하여 회절 피크의 위치와 크기를 결정하는 순서로 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 회절 피크의 모양에 관계되는 파라미터를 정밀화하면, 분산된 피크에 관계되는 파라미터를 감소시킬 수 있으며, 결정구조에 관계되는 원자의 위치 점유클과 열진동 인자 등을 정밀화하면 결정의 구성 및 위치에 대한 정보를 포함하는 R인자가 감소되어 정밀화가 완료된다. 결국, 리트벨트 해석에 의해서 시뮬레이션을 하면, 격자구조의 그래픽은 물론 원자간 거리와 각도를 계산할 수 있게 된다.

4. 결과 및 고찰

1) 구조 분석

고온 초전도체의 결정학적 구조는 페롭스카이트 구조로써 공간군 Pmmm에 속하는 사방정 구조이다. 단위격자 ABO_3 가 세개 포개어져 있는 형태로서, A에 해당하는 Ba와 Y 이온이 Ba-Y-Ba-Y-Ba와 같이 배열되어 있어서 c축 길이가 다른 축에 비하여 약 3배 정도가 되는 막대구조의 모양을 하고 있는 페롭스카이트 격자구조에서 격자상수로써 $a=3.8887(3)\text{\AA}$, $b=3.8238(4)\text{\AA}$, $c=11.7077\text{\AA}$ 이며, 정밀화된 침상형 구조임을 알 수 있다. 따라서, 실험에 의한 격자상수는 $a=3.8887(8)\text{\AA}$, $b=3.8238(4)\text{\AA}$, $c=11.7079\text{\AA}$ 으로써, 이 값을 이용하여 다시 시뮬레이션을 수행하였다.

또 초전도체의 미세구조의 변화를 관찰하기 위하여 주사형전자현미경(Oxford Co, LEICA-440)을 이용하여 표면사진을 분석한 결과, 벌크형 시편으로 결정입자의 크기가 크고 결정화가 잘 이루어졌음을 알 수 있으며, 앞에서 언급한 페롭스카이트 입자가 막대 구조를 하고있음을 알 수 있었다. 그리고 사방정 구조의 Pmmm 공간군과 원자위치를 표 1 과 같이 분석하였으며, I-47 공간군을 확인할

표 1. 사방정구조의 원자위치

Table 1. Atomic positions of orthorhombic structure.

atoms	x	y	z	site
Y	1/2	1/2	1/2	1h
Ba	1/2	1/2	0.18	2t
CU1	0	0	0	1a
CU2	0	0	0.35	2q
O1	1/2	0	0	1b
O2	0	0	0	
O3	0	0	0.16	2q
O4	0	1/2	0.38	2r
O5	1/2	0	0.36	2s

수 있었다.

2) X선 회절분석

YBCO 고온 초전도체의 결정구조 분석은 X선 회절분석 실험을 하여, 그 구조상의 정밀화를 위한 File3.INT를 작성하였으며, 앞으로의 모든 시뮬레이션 데이터로써 사용할 수 있도록 측정범위를 $2\theta=20^\circ \sim 80^\circ$ 로 정하고, 총 데이터 수를 1200으로 하여 입력파일을 구성하였다. 그림 3은 실험에서 언급한 바와 같이 920°C 에서 24시간 열처리한 초전도체의 X선 회절 분석 피크를 보인것이다. 그림에서 보는 바와 같이 $2\theta=33^\circ$ 부근에서 YBCO 최대 피크가 나타났으며, 시뮬레이션된 결과와 비교하였다. 측정된 패턴에서는 YBCO의 주 피크 이외에 나타나는 피크들은 분석데이터를 얻기위해 XRD 회절패턴을 10000 이상으로 강조 처리하였기 때문에 나타나는 일부의 불순물 피크로 예상된다.

실험결과에서 결정구조와 격자 상수는 이론치와 일치되는 해석결과를 얻었으며, R인자의 정밀화를 통하여 오차를 최소화할 수 있었으며, 종래의 워크

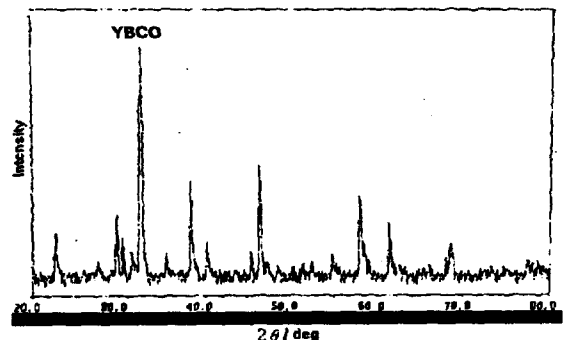


그림 3. YBCO 초전도체의 X선 분석 결과
Fig. 3. XRD results of YBCO superconductor.

스테이션급에 의한 작업수행으로부터 본 실험에서 수행한 퍼스널컴퓨터에 의한 프로그램의 사용이 가능해짐에 따라 보다 많은 분야에 적용이 가능함을 제시 하였다.

공간군은 광범위한 영역에서 다양한 분석방법이 있었으나, 본연구의 과정에서 P222, Pmm2 및 Pmmm으로부터 Pmmm(I-47)임을 정확하게 분석 하였다. 또 최적 파라미터 관계는 아직까지 R인자와 관련되는 분석자료가 제시된바는 없으나, 척도인자 반치폭(U,V,W)등을 정밀화 함으로써, 최적화에 주요한 파라미터로 분석 하였다.

3) 초전도체의 시뮬레이션

YBCO 초전도체의 출발물질인 $Y_2O_3, BaCO_3$, 및 CuO 등에 대한 각각의 리트벨트해석을 위해 NBEAM=1 과 NMODE=3을 입력하여, 해석결과를 직접 출력하는 시뮬레이션만을 수행 했을때의 데이터 패턴을 그림 4에 나타냈으며, 이는 그림에서 보는바와 같이 각각의 출발물질 경우에 대한 피크로 표 2 와 같이 나타났다.

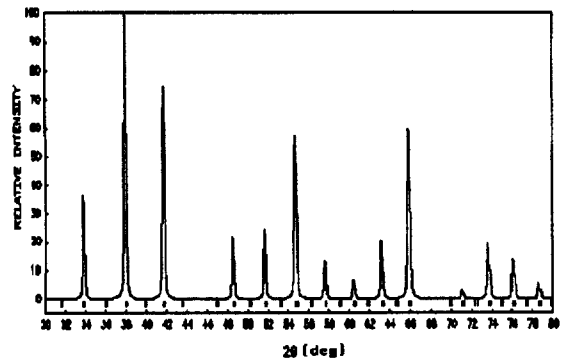
표 2. 시료의 시뮬레이션 피크

Table 2. Simulated peak of starting powder.

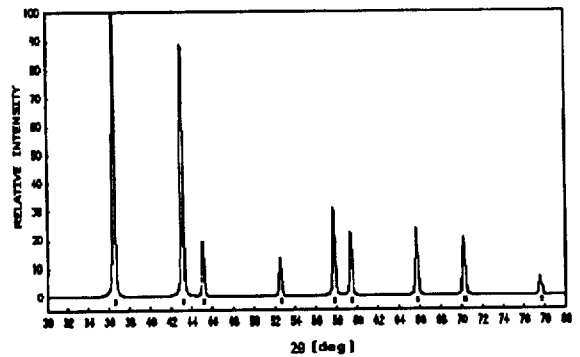
Fig.4	Powder	Peak (2θ)
a)	Y_2O_3	$34^\circ, 38^\circ, 42^\circ, 55^\circ, 66^\circ$
b)	$BaCO_3$	$37^\circ, 43^\circ, 58^\circ$
c)	CuO	$34^\circ, 48^\circ, 56^\circ, 64^\circ, 87^\circ$

본 실험은 리트벨트 해석을 이용하여 YBCO 초전도체의 정방정 구조에서 사방정 구조의 상전이 관계를 시뮬레이션에 의해 증명하였다. 그림 5는 $Y_1Ba_2Ca_3O_x$ 초전도체의 시뮬레이션 결과로서 컨트를 데이터 NBEAM=1, NMODE=3의 경우이며, 백그라운드를 고정하여 시뮬레이션 한 결과를 나타낸것이다. 시뮬레이션 결과는 선원으로 CU를 사용하였고, $K\alpha_1/K\alpha_2$ 피크 강도의 비는 0.497, 그리고 모노크로미터 사용시의 편광보정계수 CTHM은 0.8049를 입력하여 실험하였으며, 이 경우의 최대 피크는 $2\theta=34^\circ$ 부근에서 발생하였다. 따라서 그림 3의 측정된 YBCO 초전도체 시편의 XRD 패턴 피크위치와 그림 5의 백그라운드를 고정한 시뮬레이션된 패턴에 대한 피크를 비교 분석할 수 있다.

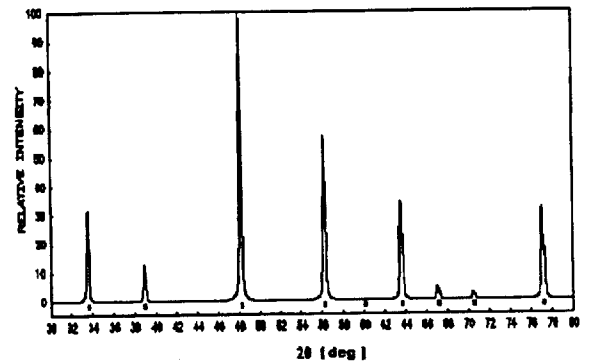
그림 3에서와 같이 시편의 XRD 측정결과 $2\theta=33^\circ$ 에서 최대 피크가 관찰됨으로써, 시뮬레이션된 결과의 피크와 근접함을 알수있으며, 또한 정밀화후의 시뮬레이션 피크를 나타낸 그림 6의 결과



a) peak of Y_2O_3



b) peak of $BaCO_3$



c) peak of CuO

그림 4. $Y_2O_3, BaCO_3$ 및 CuO의 시뮬레이션된 XRD 패턴

Fig. 4. Simulated XRD pattern of $Y_2O_3, BaCO_3$ and CuO.

와 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 YBCO 초전도체의 결정구조 파라미터 최적화를위한 정밀화 과정에 대하여 연구하였다. 동일조건에서 X선 회절 분석으로 NBEAM=1과 리트벨트 해석결과를 출력

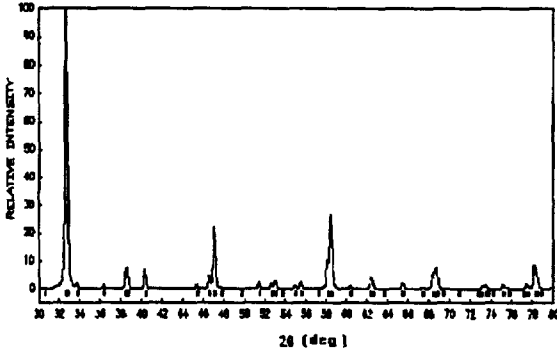


그림 5. 리트벨트 해석에 의한 YBCO 초전도체의 시뮬레이션 XRD 패턴

Fig. 5. Simulated XRD pattern of YBCO superconductor by Rietveld analysis.

하고 분석하기 위하여 NMODE=1에 대한 R인자를 정밀화하고, 보정된 파라미터를 입력함으로써 식 (1)~(6)로 표현되는 R인자 및 그에 대한 g.o.f 값을 계산하여 정밀화된 값들을 표 3에 나타내었다.

표 3. 정밀화 R 인자

Table 3. Riefinement of R factor.

	S	R _{WP} [%]	R _P [%]	R _I [%]	R _F [%]	R _E [%]	g.o.f
fig.6	2.0827×10^{-4}	8.83	6.47	10.08	7.19	3.76	2.35

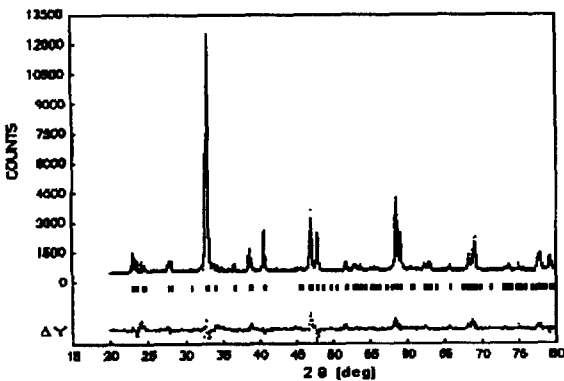


그림 6. YBCO 초전도체의 리트벨트 해석에 의한 정밀화 패턴

Fig. 6. Refined patterns by Rietveld analysis of YBCO superconductor.

5. 결 론

본 연구는 페롭스카이트형의 침상구조를 갖는

YBCO 초전도체를 제작하여, X선 회절 분석으로부터 $2\theta = 33^\circ$ 의 최대피크와 R-T특성 측정으로부터 $T_c = 88.94K$ 를 얻어, 이를 기초자료로하여 YBCO 고온 초전도체의 결정 구조의 분석을 위한 연구로서, 각 파라미터에 대한 정밀화 및 시뮬레이션의 수행 결과, 제작된 시편의 XRD 회절 패턴과 실험에 의한 패턴을 보정하여, 그에 따른 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 의 초전도체의 결정구조는 사방정계의 Pmmm 공간군으로 I-47 정계의 분류에 속하는 $a = 3.8887(8) \text{ \AA}$, $b = 3.8238(4) \text{ \AA}$, $c = 11.7079 \text{ \AA}$ 의 격자상수를 얻음으로써 이상적인 초전도체의 격자상수와 일치됨을 증명하였다. 제작된 시편과 리트벨트 해석에 의한 시뮬레이션 분석 결과의 정밀화를 위한 주요 파라미터로서 척도인자는 2.0827×10^{-3} , 반치폭 값으로 $U = 4.2761 \times 10^{-2}$, $V = 1.7983 \times 10^{-2}$, $W = 2.6768 \times 10^{-2}$ 값으로 최적화하여 보정함으로서 정밀화 R인자의 각 값으로 $R_{wp} = 8.83[\%]$, $R_p = 6.47[\%]$, $R_I = 10.08[\%]$, $R_F = 7.19[\%]$ 를 얻었다.

따라서 제작된 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 초전도체의 시편의 구조와 시뮬레이션된 모델의 구조분석결과 파라미터의 최적화에 따른 일치성을 증명하여 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 초전도체의 정확한 분석방법을 제시하고, 그 특성향상을 위한 원자 구조 및 정방정구조와 사방정구조에서의 상전이에 관여되는 주요 파라미터를 분석할 수 있는 자료로 응용할 수 있음을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Yong-il Kim, F.Izumi, "Structure Refinements with a New Version of the Rietveld-Refinement Program RIETAN", J. Ceram. Soc. Japan, 102[4], pp401-404,1994.
2. A.Albinati, B.T.M. Willis, "The Rietveld Method in Neutron and X-ray Powder Diffraction", J.Appl. Cryst. 15, pp.361-374, 1982.
3. F. Izumi, H. Asano, "Crystal Structure of a Ba-Y-Cu-O Superconductor as Revealed by Rietveld Analysis of X-Ray Powder Diffraction Data", Jpn. K. Appl. Phys. Vol. 26, No.5, pp.611-612, 1987.
4. D.L. Bish and J.E. Post, *Modern Powder Diffraction*, THE MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 1989.
5. Y.Takemura, M.Hongo, "The Effect of Pb Substitution on the Bi-Sr-Cu-O Super-

- conductor ”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.28, pp. 916-919, 1989.
6. H.P.Scholch, M.Weiser, “Hydrogen Profiling of High Temperature Superconductors”, Jpn. J. Appl.Phys. Vol.28, No.6, pp. 920-992, 1989.
 7. Yoshiteru Maeno, Frank Lichtenberg, Tim Willims, Janusz Karpinski and George Bednorz. “A New Series of compounds in the T^* Structure : $La_{2-x}Ln_xSr_xCuO_{4-y}$ (Ln=Eu, Gd, Tb and Dy)”, Jpn.J. Appl. Phys. Vol 28, No 6, pp L926-L929, 1989.
 8. 채기병, 강기성, 소대화, “ Y-Sm-Ba-Cu-O 초전도체의 특성연구 ”, 명지대학교 산업기술연구소 논문집. Vol.9,p.81, 1990.
 9. 채기병, 이상운, 소대화, Fan Zhangguo “ YBCO 고온 초전도체의 Rietveld 해석연구 ” 한국전기전자재료학회 춘계학술발표회, pp182-186,1995.
 10. 신형섭 “분말 X-선 회절법에 의한 산화철 구조 연구” 포항공대 박사학위논문, 1992.
 11. R. A. Young, *The Rietveld Method* International Union of Crystallography Oxford University Press pp 236-253,1993.

저자소개



채기병

1960년 2월 16일생. 1987년 2월 인천대학교 전자공학과 졸업. 1990년 2월 명지대학교 대학원 졸업(석사). 1995년 8월 명지대학교 대학원 졸업(공학). 현재 중국 동북대학 표면처리기술연구소 위촉연구원, 명지대학 강사.



소대화

1945년 2월 25일생. 1972년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1975년 2월 명지대학교 대학원 졸업(석사). 1987년 2월 경희대학교 대학원 졸업(박사). 1994년 3월 중국 동북대학 겸직교수, 현재 명지대학교 전자공학과 교수.