

# ThMn<sub>12</sub>형 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 미세구조 및 자기적 성질 연구

안성용 · 이승화 · 김철성

국민대학교 자연과학대학 물리학과, 서울 136-702

김윤배 · 김창석

한국표준과학연구원, 대전 305-606

(1997년 4월 10일 받음, 1997년 4월 25일 최종수정본 받음)

ThMn<sub>12</sub> 구조를 갖는 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 미세구조 및 자기적 성질을 Mössbauer 분광법과 X-선 회절 분석 그리고 VSM으로 연구하였다. NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> 합금은 알곤 가스 분위기의 아크 용해로에서 제조하였으며, X-선 회절 분석 결과 결정구조는 상온에서 tetragonal 구조를 갖고 있으며, 격자상수는  $a_0 = 8.637 \text{ \AA}$ ,  $c_0 = 4.807 \text{ \AA}$ 로 결정하였다. Mössbauer spectrum을 13 K에서 800 K 까지 취하였으며, Curie 온도는 600 K로 결정하였다. Mössbauer spectrum 분석은 Curie 온도 이하의 온도에서는 Fe-site가 (8i<sub>1</sub>, 8i<sub>2</sub>, 8j<sub>2</sub>, 8j<sub>1</sub>, 8f)의 5 site로 나타났으며, 400 K 근처에서  $\alpha$ -Fe 상이 나타나기 시작하여 온도가 증가함에 따라서 점진적으로 증가하여 Curie 온도에서 20.7%의  $\alpha$ -Fe 상이 존재함을 알았다. 각 site에서의 초미세 자기장은 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 그 크기는  $H_{hf}(8i) > H_{hf}(8j) > H_{hf}(8f)$  임을 알았고 spin과 여기에 의한  $T/T_c < 0.7$  이하에서의 평균 초미세 자기장  $H_{hf}(T)$ 의 변화는  $[H_{hf}(T) - H_{hf}(0)]/H_{hf}(0) = -0.34(T/T_c)^{3/2} - 0.14(T/T_c)^{5/2}$ 로 나타났다. 또한 원자간 결합력을 알 수 있는 Debye 온도는  $\Theta = 340 \pm 5 \text{ K}$ 로 나타났다.

## I. 서 론

Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 구조의 화합물과 함께 최근에 개발된 tetragonal ThMn<sub>12</sub> 구조를 갖는 Fe-rich 3원계 화합물인 R (Fe, M)<sub>12</sub> (R = Nd, Sm; M = Ti, Mo, V, Cr 등)은 새로운 영구자석의 출발재료로 주목되어 왔다. [1, 2] 특히 Y. Yang [3] 등은 NdFe<sub>11</sub>Ti 의 경우 상온에서 포화자화 값이 131.76 emu/g 으로 다른 희토류 합금에 비하여 가장 큰 값을 갖으며 Curie 온도는 570 K로 보고하였고 Y. Z. Wang [4]은 Curie 온도를 551 K로 발표하였다. 그러나 아크로 및 고주파를 이용하여 용해한 NdFe<sub>11</sub>Ti 합금에는 상당량의  $\alpha$ -Fe 상이 존재하며, 따라서 ThMn<sub>12</sub> 구조 용해 시  $\alpha$ -Fe 상의 소거를 위해 화학 양론적 조성 NdFe<sub>11</sub>Ti 보다 Ti의 함량을 높게 한 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub> 시료를 제조하여 X-ray 분석 및 Mössbauer 분광실험결과  $\alpha$ -Fe 상이 미량 존재하고 있음을 알 수 있었다[5].

따라서 본 연구에서는 용해 상태에서 완전한 ThMn<sub>12</sub> 단상 합금을 얻기 위하여 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub>에서 Ti 대신 일부를 Mo으로 치환한 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> 시료를 아크 용해 법으로 제조하여 X-ray 회절분석에 의해 결정구조를 확인하고 Mössbauer 분광법과 VSM 측정에 의해 자기적 성질을 규명하고자 한다.

## II. 실험 사항

NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> 합금은 순도가 99.9, 99.8, 및 99.9%의 Nd, Ti, Mo, Fe을 사용하여 아르곤가스 분위기에서 아크용해로 DAIA사 ACM-01을 이용하여 제조하였다[5, 6]. 아크용해시 시료의 균질성을 위해 5회이상 용해작업을 반복하였다. 이렇게 만들어진 잉곳트 시료를 석영관 속에 넣어 진공도가 10<sup>-5</sup> torr 하에서 진공 봉입한 후 1000 °C에서 1주일 동안 열처리를 하였다.

시료의 결정구조를 확인하기 위하여 CuK $\alpha$  선을 사용하는 Philips사 X' Pert (PW1827) X-선 회절기를 이용하여 X-선 회절도를 취하였으며, scanning 속도를 매분당 0.25 도로 천천히 하여 분해능을 증가시켰다.

Mössbauer 스펙트럼은 전기역학적 등가속도형 Mössbauer 분광기[7]로 취하였으며,  $\gamma$  선원은 Dupont 회사 제품의 Rh 금속에 들어있는 실온상태의 20 mCi의 <sup>57</sup>Co 단일 선원을 사용하였다. 시료두께의 균질성과 열전도를 위해 전체 시료 량을 40 mg으로 하여 BN<sub>2</sub> 분말을 시료와 함께 섞었으며 두께 0.005 인치 직경 1인치의 Be관을 양면에 막아서 사용하였다. 저온 실험을 위해서는 APD사 CS-202 displax 장치와 DMX-20 Mössbauer vacuum shroud를 이용하였고 온도 측정을 위해 silicon diode를

사용하였으며 온도 오차는 ± 0.05 K였다. 고온 실험은 Austin Science사 VF-1000 furnace를 이용하였고 저온 고온 실험 모두 10<sup>-6</sup> torr 이상의 진공도를 유지하였다. VSM은 Lake shore 7300을 이용하여 77 K에서 부터 800 K 사이의 온도 영역에서 외부자기장을 10 kOe 인가 하여 자기모멘트를 측정하였다.

### III. 결과 및 분석

Fig. 1은 상온에서 취한 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 X-선 회절도이다. 결정구조는 tetragonal ThMn<sub>12</sub>-type 구조이며 각 회절선에 Miller 지수를 붙인 후 얻은 결정상수 값을 computer에 의해 최소자승법으로 맞추어서 격자상수 a<sub>0</sub>, c<sub>0</sub>을 구하였으며 그 결과는 Table I 과 같다. NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub> 일 때 2θ=44.5° 근방에서 약한 α-Fe 상과 3% 미만의 약한 Fe<sub>2</sub>Ti 상이 나타났으나 Ti대신 Mo을 치환시킨 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>은 α-Fe 상이 존재하지 않는 순수한 tetragonal ThMn<sub>12</sub> 단상으로 형성됨이 확인되었으며, 이 때 격자상수 a<sub>0</sub>, c<sub>0</sub>는 Table I 에서처럼 증가됨을 알 수 있었다.

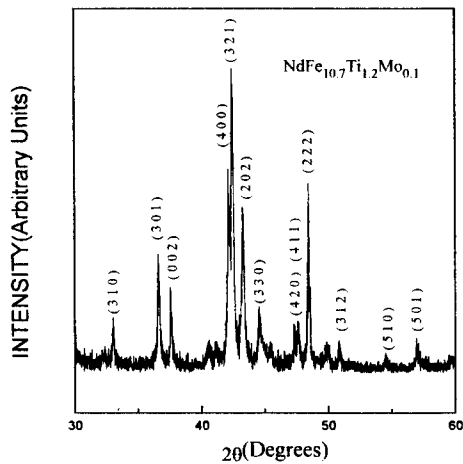


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>. The peaks are indexed by using the tetragonal ThMn<sub>12</sub> symmetry.

Table I. Lattice parameters a<sub>0</sub> and c<sub>0</sub>, unit cell volume V<sub>0</sub>, Curie temperature T<sub>c</sub>, Debye temperature Θ (K) and saturation magnetization σ<sub>s</sub> of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>.

compound	a <sub>0</sub> (Å)	c <sub>0</sub> (Å)	V <sub>0</sub> (Å <sup>3</sup> )	T <sub>c</sub> (K)	Θ (K)	σ <sub>s</sub> (emu/g)	
						77 K	295 K
NdFe <sub>10.7</sub> Ti <sub>1.2</sub> Mo <sub>0.1</sub>	8.637	4.807	358.6	600	340	127.5	112.4
NdFe <sub>10.7</sub> Ti <sub>1.3</sub>	8.597	4.785	352.1	590	374	115.4	92.6

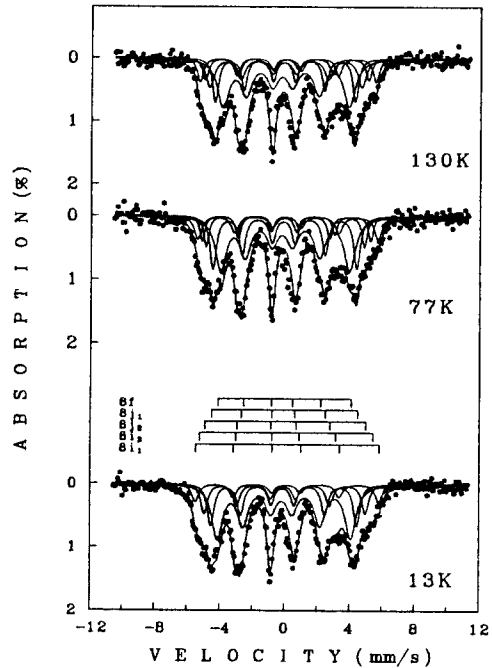


Fig. 2. Mössbauer spectra of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> at low temperature.

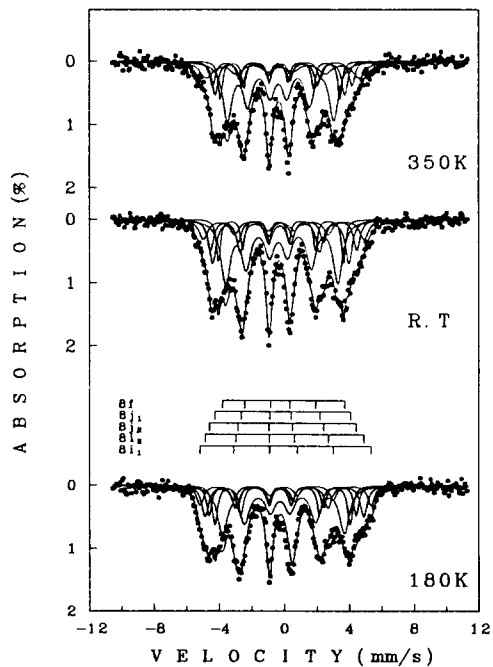


Fig. 3. Mössbauer spectra of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> near the room temperature.

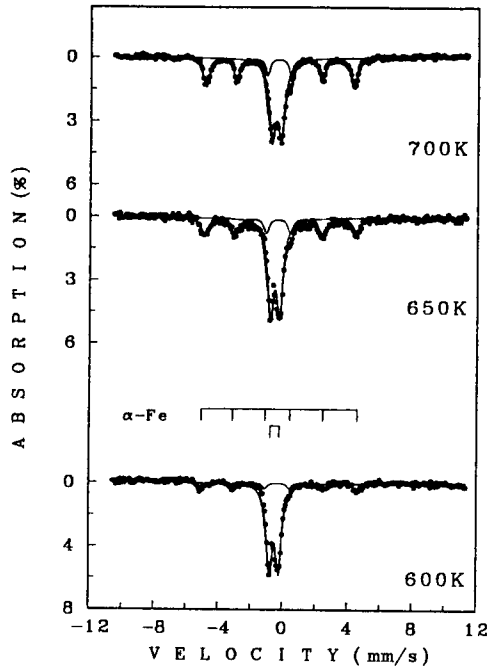


Fig. 4. Mössbauer spectra of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> near the Curie temperature.

NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 Mössbauer spectrum은 13 K 부터 800 K 까지 여러 온도에서 취하였으며 그 중 대표적인 것들이 Fig. 2, 3, 4에서 보여주고 있다.

Curie 온도 이하의 온도에서 Mössbauer spectrum은

J. M. D. Coey 모형[8]을 사용하여 Fe-site가 (8i<sub>1</sub>, 8i<sub>2</sub>, 8j<sub>2</sub>, 8j<sub>1</sub>, 8f)의 5 site의 공명흡수선으로 해석하였다. 이러한 스펙트럼을 자세히 분석하기 위하여 6 선을 Lorentzian 선형으로[9]

$$y = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \Gamma_i}{(x - V_i)^2 + (\Gamma_i/2)^2} \quad (1)$$

을 최소자승법에 의하여 컴퓨터로 각 스펙트럼에 맞추었다. 여기서 V<sub>i</sub>, A<sub>i</sub> 및 Γ<sub>i</sub>는 i번째 공명흡수선의 위치, 면적 및 선폭을 각각 나타낸다. N은 공명흡수선의 수를 나타내며 전기사중극자 상호작용이 초미세 자기장에 비해 상당히 약할 때 적용되는 구속조건[9]을 사용하였다. 이와 같이 분석한 결과를 Table II에 보여주고 있다.

Fig. 5는 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 온도에 따른 5 site (8i<sub>1</sub>, 8i<sub>2</sub>, 8j<sub>2</sub>, 8j<sub>1</sub>, 8f)의 초미세자기장의 변화를 나타내 보이고 있다. 상온에서 8i<sub>1</sub>, 8i<sub>2</sub>, 8j<sub>2</sub>, 8j<sub>1</sub> 및 8f-site의 면적비는 12.3%, 14.0%, 21.0%, 11.8%, 40.9% (8i = 26.3%, 8j = 32.8%, 8f = 40.9%)로 나타났으며 이 결과는 NdFe<sub>10</sub>Mo<sub>2</sub>의 8i, 8j 및 8f의 26%, 34%, 및 40%의 면적비와 거의 일치함을 확인할 수 있었다[10].

13 K에서 초미세자기장값은 가장 큰 8j<sub>1</sub> site가 350 kOe 이고 평균값은 305 kOe로 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub>의 8j<sub>1</sub> 및 평균값 347 kOe, 299 kOe 보다 증가함을 알 수 있었다. 또한 초미세자기장의 크기는 H<sub>hf</sub>(8i) > H<sub>hf</sub>(8j) > H<sub>hf</sub>(8f)의 크기를 갖음을 관찰하였고 이는 ThMn<sub>12</sub> 상인 NdFe<sub>10.7</sub>TiB<sub>0.3</sub>과 일치된 결과임을 알았다. [5].

Table II. Mössbauer parameters for NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> (M = Mo, Ti). H<sub>hf</sub> is the magnetic hyperfine field in unit of kOe, ΔE<sub>Q</sub> the quadrupole splitting, and δ the isomer shift relative to metallic iron at room temperature in unit of mm/s.

compound	T(K)	Mössbauer parameter	sites					Mean
			8i <sub>1</sub>	8i <sub>2</sub>	8j <sub>2</sub>	8j <sub>1</sub>	8f	
NdFe <sub>10.7</sub> Ti <sub>1.2</sub> Mo <sub>0.1</sub>	13	H <sub>hf</sub>	350	331	308	279	255	305
		ΔE <sub>Q</sub>	0.04	0.02	0.05	0.04	0.08	
		δ	0.13	0.06	-0.03	-0.08	-0.11	-0.01
NdFe <sub>10.7</sub> Ti <sub>1.3</sub>	13	H <sub>hf</sub>	347	320	303	276	252	300
		ΔE <sub>Q</sub>	-0.02	-0.03	0.00	0.00	0.02	
		δ	0.14	-0.02	-0.07	-0.08	-0.12	-0.03
NdFe <sub>10.7</sub> Ti <sub>1.2</sub> Mo <sub>0.1</sub>	RT	H <sub>hf</sub>	307	279	259	238	213	259
		ΔE <sub>Q</sub>	0.08	0.09	0.03	0.06	0.07	
		δ	-0.10	-0.11	-0.24	-0.26	-0.25	-0.19
NdFe <sub>10.7</sub> Ti <sub>1.3</sub>	RT	H <sub>hf</sub>	301	272	252	231	203	252
		ΔE <sub>Q</sub>	0.02	0.03	0.00	0.02	0.03	
		δ	-0.09	-0.15	-0.26	-0.25	-0.23	-0.20

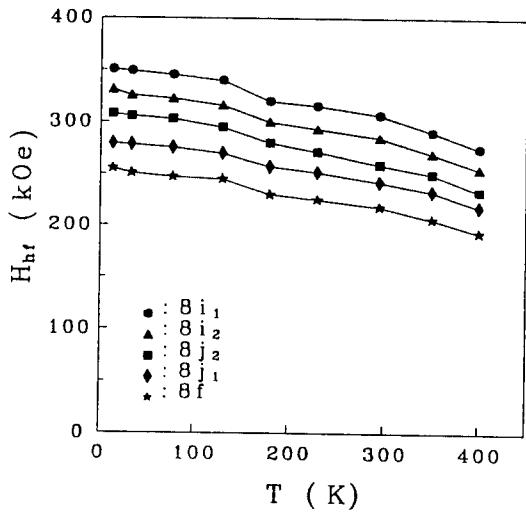


Fig. 5. Dependence of magnetic hyperfine fields,  $H_{hf}$ , on the temperature in  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ .

$NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ 의 Mössbauer 실험결과 Curie 온도는 600 K로  $NdFe_{10.7}Ti_{1.3}$ 보다 10 K 높음을 알았다. 또한 400 K 이상의 온도에서부터  $\alpha$ -Fe 상이 나타나기 시작하여 Curie 온도에서  $\alpha$ -Fe 상의 면적비는 20.7 %였으며 이 온도 이상에서는  $\alpha$ -Fe 상인 6선의 공명 흡수선과 ThMn<sub>12</sub> 상인 2선의 공명 흡수선이 함께 나타났으며 700 K에서는  $\alpha$ -Fe 상이 44.7 %로 온도가 증가함에 따라서 점진적으로 증가하였다. Fig. 6은  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ 의 초미세 자기장값의 평균값을 온도에 따른 변화로 Curie 온도  $T_C$ 에 대한 환산된 온도  $T/T_C$ 에서의 절대 영도에서의 초미세 자기장  $H_{hf}(0)$ 에 대한 환산된 초미세 자기장  $H_{hf}(T)/H_{hf}(0)$ 의 변화값을 나타내고 있다. 원으로 표시된 점들이 Mössbauer 실험 값이며 이에 대해 실선으로 표시된 값은 spin 값이  $S = 9/2$  Brillouin 이론 곡선으로써 오차 범위내에서 명확하게 잘 따르고 있다. 그러므로  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$  내의  $Fe^{3+}$  이온들은  $S = 9/2$ 의 high spin 상태를 알 수 있었다

Fig. 7은  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ 에 외부 자기장을 10 kOe로 가했을 때 온도에 따른 자기모멘트값의 변화를 나타낸다. 원으로 표시된 점들은 Mössbauer 실험에 의한 각 Fe-site들의 초미세 자기장의 평균치를 자기모멘트값에 규격화시킨 값이며 Curie 온도  $T_C = 600$  K로 나타났다.

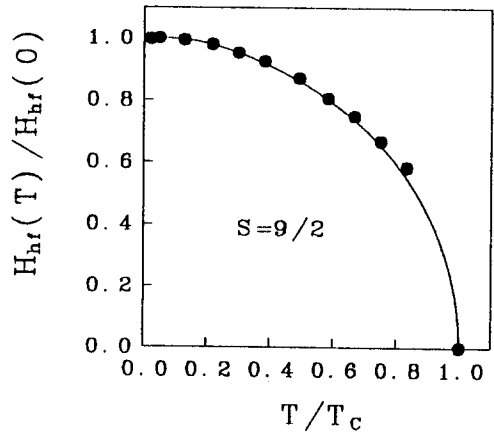


Fig. 6. Reduced magnetic hyperfine field  $H_{hf}(T)/H_{hf}(0)$  against reduced temperature  $T/T_C$  for  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ .

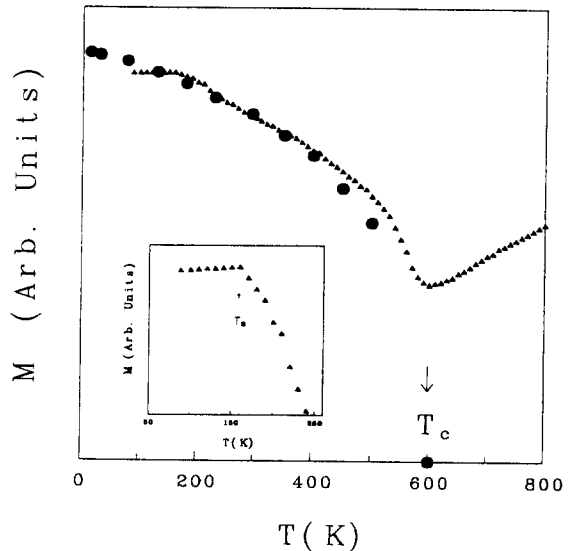


Fig. 7. Temperature dependence of the magnetic moment under an applied field of 10 kOe for  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ . Solid circles are average normalized magnetic hyperfine fields taken from Mössbauer spectra.

상온에서  $NdFe_{10.7}Ti_{1.2}Mo_{0.1}$ 의 자기모멘트는 Table I과 같다. Table I과 같이 Ti이 Mo으로 치환됨에 따라서 자기모멘트값이 증가함을 알 수 있었으며 이는 Mössbauer 실험결과 초미세 자기장이 증가하는 결과와 잘 일치한다. VSM 실험결과 자기 moment 값이

증가한 후 다시 감소하기 시작하는 160 K 근방에서 spin reorientation 현상이 관측되었으며 Mössbauer 실험 결과 Fig. 5의 초미세자기장값에서 Fe의 5 site 모두 130~180 K 온도영역에서 급격한 변화를 나타내며 180 K에서 130 K와 비교하여 8i<sub>1</sub> site 경우 ΔH<sub>hf</sub> = 20.0 kOe의 감소를 보이고 있다. NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub>은 spin reorientation 발생온도 T<sub>S</sub> = 180 K로 Ti 대신 Mo으로 치환됨에 따라 감소되었다. 이 결과는 K. Guslienko 등은 [11] NdFe<sub>11</sub>Ti에서 spin reorientation 발생온도 T<sub>S</sub> = 189 K로, NdFe<sub>12-x</sub>Mo<sub>x</sub>계에서 x = 1은 T<sub>S</sub> = 168 K, x = 2는 147 K, x = 3은 130 K로 Mo 원자가 증가함에 따라 T<sub>S</sub> 온도가 감소함을 보고한 결과와 잘 일치하며 이는 일축결정자기 이방성의 감소때문으로 이해할 수 있겠다. Spin reorientation 현상 [8][12]은 결정구조가 tetragonal 구조이며 3종류의 Fe-site (8i, 8j, 8f)로 인해 결정이방성이 크고 c 축이 자화용이축이기에 초미세자기장과 이성질체 이동값에서의 급격한 변화는 전기장기울기텐서 (EFG) 주축과 이루는 자화 방향이 c 축으로부터 일정한 각만큼 이동했기 때문으로 설명할 수 있겠다.

Fig. 8은 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>에 대한 평균 초미세자기장의 온도에 따른 변화를 절대영도에 대한 비로 나타내고 있다. 초미세자기장은 온도 증가와 더불어 감소하는데 그 식은 다음과 같다. [13]

$$\frac{H_{hf}(T) - H_{hf}(0)}{H_{hf}(0)} = -B_{3/2} \left(\frac{T}{T_c}\right)^{3/2} - C_{5/2} \left(\frac{T}{T_c}\right)^{5/2} \quad (2)$$

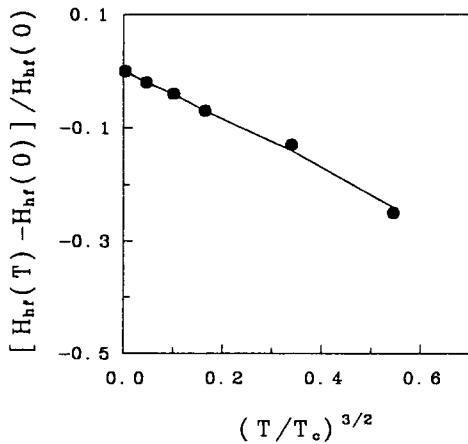


Fig. 8. Fractional change of the average magnetic hyperfine field  $H_{hf}$  as a function of  $(T/T_c)^{3/2}$ .

여기서  $T_c$ 는 Curie 온도이며  $H_{hf}(T)$ 는 온도  $T$ 에서의 초미세 자기장이고,  $H_{hf}(0)$ 는 절대영도에서의 초미세 자기장 값이다. 초미세자기장 실험값에 (2)식을 최소자승법으로 계산한 결과 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 경우  $B_{3/2} = 0.35 \pm 0.05$ 이었으며 이 값은  $\alpha$ -Fe ( $B_{3/2} = 0.11$ ) 및 Ni ( $B_{3/2} = 0.12$ )에 비하여 훨씬 크다 [14]. 이는 결정의  $\alpha$ -Fe 나 Ni 보다 비정질과 비슷한 성질을 갖는 결과로 장파장의 spin-wave가 잘 여기됨을 말할 수 있겠다.

NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 Debye 온도를 결정하기 위해 되튐없는 확률 (recoil free fraction)  $f$ 에 Debye 모델을 도입하면 다음과 같이 된다. [15]

$$f = \exp\left[-\frac{3E_R}{2k_B\Theta} \left(1 + \frac{4T^2}{\Theta^2} \int_0^{\Theta/T} \frac{xdx}{e^x - 1}\right)\right] \quad (3)$$

여기서  $E_R$ 은 14.4 keV  $\gamma$ -선에 대한 <sup>57</sup>Fe의 되튐에너지이고  $\Theta$ 는 Debye 온도이며,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수를 나타낸다. 온도  $T$ 에서 Mössbauer spectrum의 전체 공명흡수 면적  $F$ 는  $f$ 에 비례하므로  $\ln f = \ln F + const.$ 의 형태로 쓸 수 있다. NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>의 Debye 온도는 Mössbauer spectrum 공명흡수면적의  $\ln F$ 와 온도  $T^2$ 과의 함수관계를 Fig. 9에 나타냈으며 이로부터 얻은 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> 및 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub> 각각의 Debye 온도는  $340 \pm 5$  K,  $374 \pm 5$  K로, Mo으로 치환시킴에 따라 Debye 온도가 감소하는 특징이 나타났다.

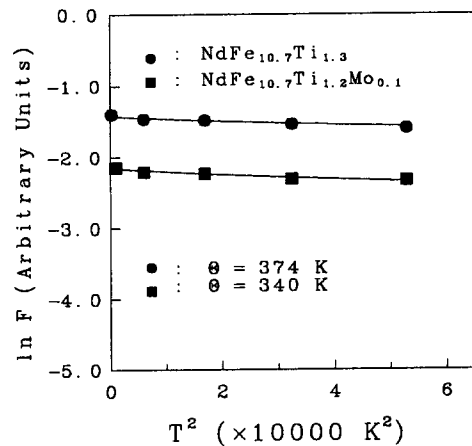


Fig. 9. Natural logarithm of the absorption area,  $F$ , vs  $T^2$  for the spectra of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> ( $M = \text{Mo, Ti}$ )

이 현상은 원자의 질량  $m$ , 원자간 거리를  $R_0$ 라고 할

때 고체의 녹는 온도  $T_S \propto m \cdot \Theta \cdot R^2$ 에 비례하므로 Debye 온도는 물체의 균기를 나타낸다고 할 수 있기에 NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub> 화합물에서 Ti 대신 Mo으로 치환시킴에 따라 원자간 결합력이 감소함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구과제 연구비 및 한국과학재단 연구비(961-0210-065-2) 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [ 1 ] B. D. Mooij and K. H. J. Buschow, Philips J. Res. **42**, 246(1987).
- [ 2 ] K. Ohashi, Y. Tawara, R. Osugi, and M. Shima, J. Appl. Phys., **64**, 5714(1988).
- [ 3 ] Y. C. Yang, X. D. Zhang, S. Ge, Q. Pan, L. S. Kong, B. S. Zhang, Y. Ding and C. T. Ye, J. Appl. Phys., **70**, 6001(1991).
- [ 4 ] Y. Z. Wang and G. C. Hadjipanayis, J. Appl. Phys. **70**, 6009(1991).
- [ 5 ] S. W. Lee, Y. J. Lee, S. Y. An, C. S. Kim, Y. B. Kim, C. S. Kim, J. Korean Mag. Soc. **6**, 361(1996)
- [ 6 ] C. S. Kim, Y. J. Lee, S. W. Lee, Y. B. Kim and C. S. Kim, J. Appl. Phys. **79**, 5516(1996)
- [ 7 ] C. S. Kim, S. W. Lee, S. I. Park, J. Y. Park, Y. J. Oh J. Appl. Phys. **79**, 5428(1996).
- [ 8 ] Q. Qi, B. P. Hu and J. M. D. Coey, J. Appl. Phys. **75**, 6235(1994).
- [ 9 ] C. S. Kim, H. M. Ko, M. Y. Ha and J. Y. Park, IEEE Trans. on Mag. **27**, 5456(1991).
- [10] Y. Z. Wang, G. C. Hadjipanayis, Z. X. Tang, W. B. Yelon, V. Papaefthymiou, A. Moukarika, and D. J. Sellmyer, J. Mag. Mag. Mat. **119**, 41(1993).
- [11] K. Yu. Guslienko, E. H. C. P. Sinnecker, and R. Gr ssinger, J. Appl. Phys. **80**, 1659(1996) ; K. Yu. Guslienko, X. C. Kou and R. Gr ssinger, J. Mag. Mag. Mat. **150**, 383(1995).
- [12] Z. W. Li, X. Z. Zhou and A. H. Morrish, Phys. Rev. B. **41**, 8617(1990).
- [13] C. L. Chien and R. Hasegawa, Phys. Rev. B, **16**, 2115(1977).
- [14] B. E. Argyle, S. H. Charap and E. W. Pugh, Phys. Rev. **132**, 2051(1963)
- [15] H. N. Ok, K. S. Baek, E. C. Kim and C. S. Kim, Phys. Rev. B, **48**, 3212(1993).

# Magnetic Properties of ThMn<sub>12</sub>-type NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub>

Sung Yong An, Seung Wha Lee and Chul Sung Kim  
*Department of Physics, Kookmin University, Seoul 136-702*

Y. B. Kim and C. S. Kim  
*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606*

(Received 10 April 1997, in final form 25 April 1997)

We have studied crystallographic and magnetic properties of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> by Mössbauer spectroscopy, X-ray diffraction and vibrating sample magnetometer (VSM). The alloys were prepared by arc-melting under an argon atmosphere. The NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> has pure a single phase, whereas NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.3</sub> contains some  $\alpha$ -Fe, conformed with X-ray diffractometry and Mössbauer measurements. The NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> has a ThMn<sub>12</sub>-type tetragonal structure with  $a_0 = 8.637 \text{ \AA}$  and  $c_0 = 4.807 \text{ \AA}$ . The Curie temperature ( $T_C$ ) is 600 K from the result of Mössbauer measurement performed at various temperatures ranging from 13 to 800 K. Each spectrum of below  $T_C$  is fitted with five subspectra of Fe sites in the structure (8i<sub>1</sub>, 8i<sub>2</sub>, 8j<sub>2</sub>, 8j<sub>1</sub>, 8f). The area fractions of the subspectra at room temperature are 12.3 %, 14.0 %, 21.0 %, 11.8 %, 40.9 %, respectively. Magnetic hyperfine fields for the Fe sites decrease in the order,  $H_{hf}(8i) > H_{hf}(8j) > H_{hf}(8f)$ . The abrupt changes in the magnetic hyperfine field, an magnetic moment observed at about 160 K in NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> are attributed to spin reorientations. The average hyperfine field of the NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> shows a temperature dependence of

$$[H_{hf}(T) - H_{hf}(0)] / H_{hf}(0) = -0.34 (T/T_C)^{3/2} - 0.14 (T/T_C)^{5/2} \text{ for } T/T_C < 0.7,$$

indicative of spin wave excitation. The Debye temperatures of NdFe<sub>10.7</sub>Ti<sub>1.2</sub>Mo<sub>0.1</sub> is found to be  $\Theta = 340 \pm 5 \text{ K}$ .