

Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄계의 Mössbauer 스펙트럼 연구

고정대 · 홍성락

제주대학교 물리학과
제주시 아라 1동 1, 690-756

백승도

강남대학교 이공대학
경기도 용인군 기흥읍 구갈리 산 6-2, 449-702

(1998년 4월 10일 받음, 1998년 8월 5일 최종수정본 받음)

Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄계의 Mössbauer 스펙트럼은 x 가 0.2이하인 경우에는 초상자성 이완 현상을, x 가 0.3~0.5인 경우는 준강자성에 의한 sextet를, x 가 0.7, 0.8인 경우에는 강자성 이완 현상, x 가 0.8이상인 경우에는 상자성에 의한 doublet가 나타난다. x 가 0.2이하인 시료에서 치환된 Cd²⁺이온은 주로 A-site의 Al³⁺이온을 B-site로 이동시키고, 계속적인 Cd²⁺이온의 증가에 따라 A-site의 Fe³⁺이온도 B-site로 이동하게 된다. Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄계의 초상자성 이완 현상은 A-site의 Al³⁺이온에 의한 것으로, 강자성 이완 현상은 치환된 Cd²⁺이온에 의한 것으로 설명할 수 있고, Yafet-Kittel 자기구조에 따라 Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄계의 자기적 성질을 해석할 수 있다.

I. 서 론

MN₂O₄의 분자식으로 표현되는 산화물 spinel은 tetrahedral site(A-site)와 octahedral site(B-site)의 부격자가 공존하고 있다. 여기서 M은 2가의 금속 양이온이고, N은 3가의 금속 양이온으로서, 일반적으로 N이 Fe³⁺이온인 경우를 페라이트라 부른다. 페라이트는 A-site와 B-site를 차지하는 금속 양이온의 종류에 따라 normal spinel과 inverse spinel로 구분할 수 있으며, 이에 따라 자기적 성질이 민감하게 변하기 때문에 각 site의 금속 양이온 분포에 대한 연구는 페라이트의 물성 연구에서 매우 중요한 부분으로서 최근까지도 연구가 지속되고 있다[1, 4]. 일반적으로 페라이트의 2가 금속 양이온인 M이 Mg, Mn, Fe, Ni, Cu 등과 같은 자성이온일 경우에는 inverse spinel구조로서 준강자성을 띠는 반면, Zn과 Cd와 같은 비자성이온인 경우에는 normal spinel구조로서 상자성 특성을 나타내며, 특히 같은 site에 자성 이온과 비자성 이온이 공존하게 되면 이들의 혼합 비율에 따라 자기적 성질이 민감하게 변화된다는 사실이 Ni-Zn, Mn-Zn, Mg-Zn, Ni-Cd등과 같은 혼합형 페라이트 연구를 통하여 잘 알려져 있다[5, 8]. 본 실험에서 사용할 Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄는 3가 금속 자성 이온인 Fe³⁺의 1/2을 비자성 이온인 Al³⁺이온으로 치환시킨 NiFeAlO₄의 2가 금속 자성 이온인 Ni²⁺을 비자성 이온 Cd²⁺로 치환시킨

물질이다. 페라이트의 Fe³⁺이온의 Al³⁺이온으로의 치환 가능성은 여러 학자들에 의해 잘 입증되었으며, 특히 NiFeAlO₄의 Al³⁺의 유입에 따른 금속 양이온의 site선호도도 구체적으로 알려져, Ni²⁺이온은 B-site, Fe³⁺이온은 A-site, Al³⁺이온은 B-site를 선호하는 것으로 알려져 있다[9, 11]. NiFeAlO₄의 자기적 특성에 관한 연구는 여러 학자들에 의해 이루어 졌으며[12, 14], 특히 S. K. Kulshreshtha[15]는 Mössbauer 스펙트럼 연구를 통하여 각 site의 금속 양이온 분포와 자기 스핀 배열에 관하여 논의한 바 있다. 그의 결과에 따르면 상온에서 측정된 NiFeAlO₄의 Mössbauer 스펙트럼은 초상자성 이완 현상을 나타내어 Zeeman 분열에 의한 한 쌍의 sextet와 상자성에 의한 doublet가 중첩되어 나타나며, B-site의 자기 스핀은 A-site의 자기스핀 방향에 대해 기울어진 배열을 갖는 Yafet-Kittel 자기구조를 갖는 것으로 설명하고 있다. 본 논문에서는 이러한 결과를 토대로 하여 NiFeAlO₄의 2가 금속 자성 이온인 Ni²⁺를 일정한 비율로 비자성 이온인 Cd²⁺로 치환시킨 Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄의 Mössbauer 스펙트럼에 Cd²⁺이온이 끼치는 효과를 Cd²⁺이온의 농도에 따라 조사하였다.

II. 실험방법

본 실험에서 사용한 Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄는 미국 Aldrich

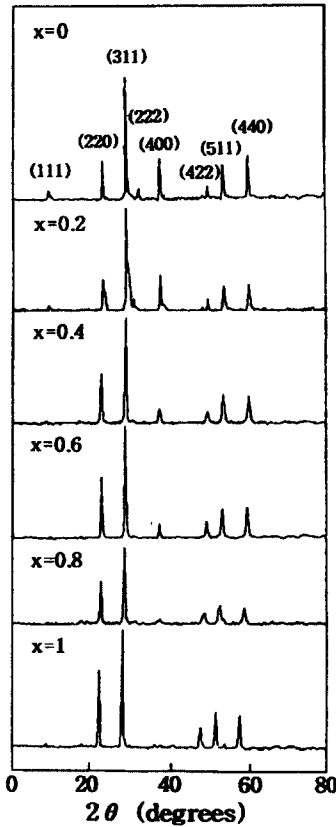


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄.

사의 순도 99%인 Fe₂O₃와 일본 Junsei사의 99% Al₂O₃, NiO, 그리고 Yakuri사의 99% CdO를 사용하여 x값을 0.1간격으로 하여 x=0~1까지 조성을 변화시키면서 합성하였다. 시료의 합성은 먼저 시약을 조성비에 맞게 정량하여 에틸 알코올을 첨가하여 ball mill을 사용하여 혼합한 후 전기로를 사용하여 600 °C에서 8시간동안 1차 하소한 후, 온도를 1150 °C로 높여서 24시간동안 2차 하소하였다. 하소된 시료의 반응 상태는 Mössbauer 스펙트럼을 측정하여 Fe₂O₃에 의한 공명 흡수선의 존재 여부로 판별한 후, 반응이 않된 Fe₂O₃가 존재하는 시료는 다시 하소하여 시료를 합성하였다. 합성된 시료의 구조는 Jeol사의 JDX-8030 X-ray 회절 장치를 사용하여 X-ray회절상을 측정하여 확인하였으며 그 결과 Fig. 1과 같은 X-ray 회절선을 얻었다. 본 실험에서 합성한 Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄의 X-ray 회절선은 Fig. 1에서 보는바와 같이 스피넬의 단일상 만으로 이루어져 있으며, x=0, 0.1, 0.2인 시료에서 보이던 (111) 면에 의한 피크가 x=0.3이상인 시료에서는 나타나지

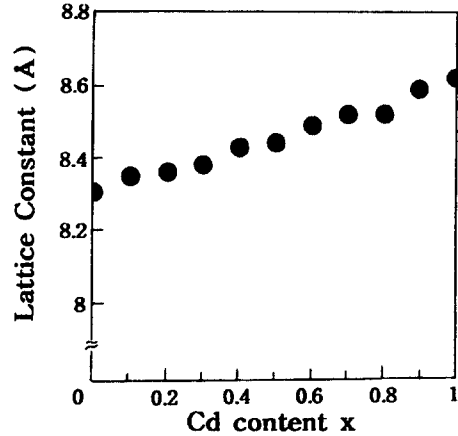


Fig. 2. Lattice constants as a function of Cd content x for the Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄.

않는데 Cd²⁺의 증가에 따라 나타나는 현상임을 ASTM card로부터 확인하였다. 또한 이 시료들의 격자상수를 Nelson-Riley법으로 계산한 결과 Fig. 2와 같이 x값이 증가함에 따라 커지는 현상을 확인할 수 있다. 이때 x=0인 NiFeAlO₄의 격자 상수는 8.321 Å이고, x=1인 CdFeAlO₄는 8.620 Å으로서, 이값들은 치환된 Al³⁺이온(0.57 Å)이 Fe³⁺이온(0.67 Å)보다 작기 때문에 각각 NiFe₂O₄나 CdFe₂O₄의 격자 상수에 비해 다소 작은 값으로 나타나게 된다. 그리고 Cd²⁺의 증가에 따라 격자 상수가 증가하는 현상도 Ni²⁺(0.69 Å)에 비해 치환되는 Cd²⁺이온(0.97 Å)이 더 크기 때문이며, 격자상수가 x의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 점으로 미루어 Ni²⁺대신 Cd²⁺가 잘 치환되고 있음을 확인할 수 있다. X-ray 회절선 분석이 끝난 분말 상태의 시료를 모든 조성비에 대해 동일한 양의 Fe³⁺이온을 함유하도록 시료의 양을 정하여 BN분말과 혼합하여 두께 1 mm정도의 원판형으로 유압기를 사용하여 성형한 후, Mössbauer 스펙트럼 측정용 시료로 사용하였다. Mössbauer 스펙트럼은 상온에서 측정하였으며, 측정에 사용한 Mössbauer 분광기는 등가속도형이고 감마선원은 로듐에 도프된 10 mCi Co⁵⁷이었다. 스펙트럼의 측정 속도 구간은 -10 mm/sec ~ +10 mm/sec의 범위로 설정하였으며, 이때 Doppler속도는 순수철의 공명흡수선에 대한 상대 속도로 계산하였다.

III. 결과 및 논의

상온에서 측정된 Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄의 Mössbauer 스펙

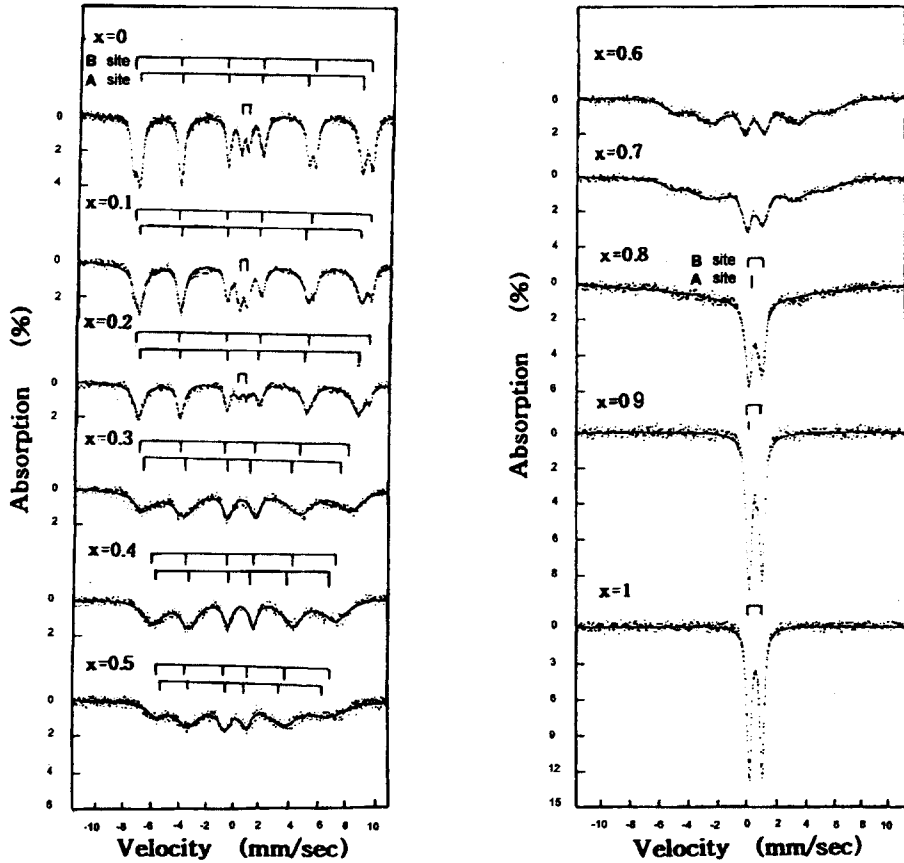


Fig. 3. Mössbauer spectra of the $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ at room temperature.

트럼은 Fig. 3과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 x 가 0, 0.1, 0.2인 시료에서는 B-site와 A-site의 Fe^{3+} 이온의 Zeeman 분열에 의해 잘 분리된 한쌍의 sextet와 중앙에 상자성에 의한 작은 doublet이 나타나고 있으며, x 가

0.3, 0.4, 0.5인 시료는 doublet은 사라지고, site를 구분할 수 없을 정도로 중첩된 한 쌍의 sextet만 나타나고, x 가 0.6, 0.7인 시료의 경우에는 매우 이완된 형태의 흡수선으로 나타나다가 x 가 0.8이상이 되면 상자성에 의

Table 1 $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 의 Mössbauer parameter

Cd content x	I.S. (mm/sec)			Q.S. (mm/sec)			H_{hf} (kOe)	
	sextet		doublet	sextet		doublet	sextet	
	B-site	A-site		B-site	A-site		B-site	A-site
0	0.364	0.305	0.352	0.034	-0.022	0.586	505.7	486.6
0.1	0.387	0.342	0.323	0.027	0.006	0.599	498.5	482.2
0.2	0.401	0.354	0.335	0.010	0.029	0.624	495.8	480.5
0.3	0.343	0.287		-0.031	0.013		475.6	456.1
0.4	0.287	0.275		-0.010	-0.044		433.9	395.0
0.5	0.263	0.248		0.008	0.012		376.4	354.4
0.6								
0.7								
0.8	0.487	0.158		0.903				
0.9	0.558	0.174		0.893				
1.0	0.566			0.890				

한 doublet으로 변환되는 것을 알 수 있다. 따라서 이 스펙트럼을 분석하여 Mössbauer parameter를 구하기 위해 각 시료에 대해 나타나고 있는 공명흡수선의 수에 맞게 Lorentzian 선형으로 계산하였으며, 계산된 이성질체 이동치(I.S.), 사중극자 분열치(Q.S.), 내부자기장(H_{int})을 표에 나타내었다.

Table 1에 실은 값에서 x가 0.2이하인 시료는 한 쌍의 sextet와 중앙의 doublet에 의한 14개의 흡수선으로, x가 0.3 0.5인 시료는 한 쌍의 sextet에 의한 12개의 흡수선으로, x가 0.8 1.0인 시료는 B-site에 의한 doublet와 A-site에 의한 단일선이 중첩된 3개의 흡수선으로 계산한 값들이다. x값이 0에서 0.2까지의 시료에서 나타나는 Zeeman 분열에 의한 한쌍의 sextet는 시료내의 A-site와 B-site에 존재하는 Fe³⁺이온에 의한 공명 흡수선으로서, 흡수선의 끝이 잘 분리되어 있음을 알 수 있다. 이 공명흡수선은 Cd²⁺이온의 농도가 증가함에 따라 A-site에 의한 공명 흡수선의 선폭이 B-site보다 넓어지는 사실을 확인할 수 있었다. 일반적으로 고체내의 양이온들의 질서도가 공명 흡수 선폭에 영향을 준다는 점을 고려하면, Ni_{1-x}Cd_xFeAlO₄에서 Cd²⁺이온의 증가가 흡수 선폭에 영향을 준다는 사실은 치환된 Cd²⁺이온에 의해 각 site의 금속 양이온의 분포가 변화되는 과정에서 야기되는 것으로 볼 수 있다. 이 시료들의 중앙에 나타나는 상자성에 의한 doublet은 초상자성 효과에 의한 것으로 설명되고 있으며[15], Cd²⁺농도가 증가함에 따라 초상자성 효과에 의한 doublet의 흡수선 강도가 점차적으로 약화되어 x가 0.3인 시료에서 사라진다는 사실을 알 수 있다. 또한 이 시료들의 sextet를 계산한 결과, A-site와 B-site의 공명 흡수 면적의 비율이 x가 0인 시료는 약 1.3, x가 0.1인 시료는 약 1.72, x가 0.2인 시료는 약 2.3정도임을 알 수 있었다. 따라서 Mössbauer 스펙트럼의 공명 흡수면적은 Fe양에 비례한다는 점과, J.J. Bara등[11]이 밝힌 바와 같이 NiFeAlO₄에서 Ni²⁺ 이온은 모두 B-site에 놓인다는 점을 고려하여 각 site의 금속 양이온 분포식을 표시하면 각 시료에 대해 x가 0인 시료는 (Fe_{0.57}Al_{0.43})^A[NiFe_{0.43}Al_{0.57}]^BO₄가 되며, Ni²⁺대신 치환된 Cd²⁺이온은 A-site를 선호하는 경향에 따라 치환된 Cd²⁺이온이 모두 A-site에 놓인다는 가정 하에 금속 양이온 분포식을 표현하면, x가 0.1인 시료는 (Cd_{0.1}Fe_{0.63}Al_{0.175})^A[Ni_{0.9}Fe_{0.37}Al_{0.71}]^BO₄이고, x가 0.2인 시료의 경우에는 (Cd_{0.2}Fe_{0.7}Al_{0.1})^A[Ni_{0.8}Fe_{0.3}Al_{0.9}]^BO₄이 된다. 이미 밝혀진 실험 결과에 따르면

NiFeAlO₄의 A-site에 놓인 Fe³⁺와 Al³⁺의 비 Al³⁺/Fe³⁺는 0.25 0.538의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서 사용한 시료 중 x값이 0인 시료의 Al³⁺/Fe³⁺는 0.75로서 다소 차이를 보이고 있는데, 이것은 시료의 소결 온도나 소결 시간 또는 측정온도에 의한 차이인 것으로 이해할 수 있으며 x가 0.1, 0.2인 시료의 Al³⁺/Fe³⁺ 값은 각각 0.43과 0.14로서 Cd이온의 증가에 따라 A-site의 Al의 점유율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 사실에 따르면 x가 0~0.2인 시료에서는 치환된 Cd²⁺이온이 주로 A-site의 Al³⁺이온을 B-site로 이동시키는 역할을 하는 것으로 해석할 수 있으며, 이러한 사실로부터 앞에서 언급한 초상자성 효과가 나타나는 주된 원인은 A-site의 Al³⁺이온일 것으로 생각한다. 또한 x가 0인 NiFeAlO₄의 이성질체 이동치는 A-site가 0.305 mm/sec, B-site가 0.364 mm/sec로써 NiFe₂O₄의 이성질체 이동치[16]에 비해 작은 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 치환된 Al³⁺이온이 Fe³⁺이온에 비해 크기가 작기 때문에 이미 앞의 격자 상수에서 알 수 있듯이 단위체적의 감소에 따른 격자 구조상의 Fe³⁺-O²⁻의 결합거리의 변화에 따른 현상으로 생각된다. 또한 내부 자기장은 A-site가 486.6 kOe, B-site가 505.7 kOe으로서 NiFe₂O₄의 내부 자기장[16]에 비해 작은 것을 알 수 있는데, 이것은 치환된 비자성 Al³⁺이온에 의해 A-B 자기결합의 수가 감소되어 A-B 초교환 상호작용을 약화시킨 결과로 해석될 수 있다. 시료내의 Cd²⁺이온이 증가하여 x가 0.3~0.5의 값이 되면 Fig. 3에서 보는 바와 같이 초상자성에 의한 중앙의 doublet은 나타나지 않고, Zeeman분열에 의한 sextet는 A-site와 B-site에 의한 흡수선을 구분할 수 없을 정도로 매우 중첩되어 나타나게 되며, Fig. 4와 Fig. 5의 이성질체 이동치와 내부자기장에도 뚜렷한 변화를 볼 수 있다. 즉 x가 0에서 0.2까지 증가하는 과정에서는 이성질체 이동치는 증가하고 x가 0.3이상부터는 뚜렷히 감소하는 경향을 보이며, 내부 자기장은 x가 0.2까지는 거의 변화가 없으나 0.3이상부터는 뚜렷한 감소현상을 보이는 것을 알 수 있다. 페라이트에서 비자성이온의 농도에 따른 내부 자기장의 감소 현상은 Ni-Zn, Mn-Zn, Ni-Cd와 같은 혼합형 페라이트에서 많이 관찰되는 현상으로서 Yafet-Kittel 자기 구조에 따른 현상으로 설명되고 있다. 본 실험에서 사용한 시료의 경우 x가 0인 NiFeAlO₄의 경우 이미 S.K. Kulshreshtha[14]에 의해 Yafet-Kittel의 자기구조에 의한 canted spin각이 B-site에 존재한다는 사실을 밝힌

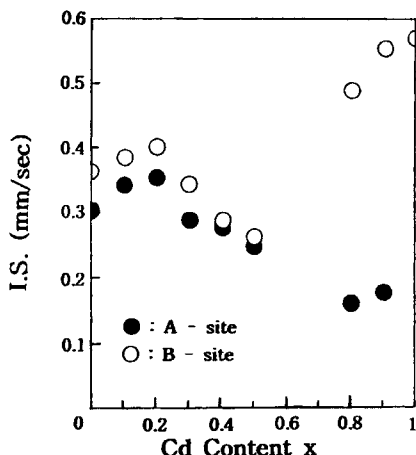


Fig. 4. Isomer shifts as a function of Cd content x for the $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$.

점에 주목하면, $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 의 Cd^{2+} 이온의 증가에 따른 내부 자기장의 감소 현상은 Yafet-Kittel 자기구조에 의한 B-site의 canted spin에 의한 현상임이 명백한 것으로 생각된다. 따라서 Yafet-Kittel 자기구조에서 자기적 성질은 주로 A-B 초교환 상호작용에 의해 지배된다는 점을 고려하면, $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 의 경우에는 Cd^{2+} 이온의 증가에 따라 Ni^{2+} 이온이 감소하기 때문에 $Fe^{3+}A-O^{2-}-Ni^{2+}B$ 의 자기결합의 수가 감소하여 A-B 초교환 상호작용이 약화되는 것으로 설명할 수 있다. x가 0.6, 0.7인 시료의 공명 흡수선은 일반적으로 2가 금속 자성이온을 비자성 이온으로 치환시킨 혼합형 페라이트에서 비자성 이온의 증가에 따라 나타나는 자기 이완 현상과

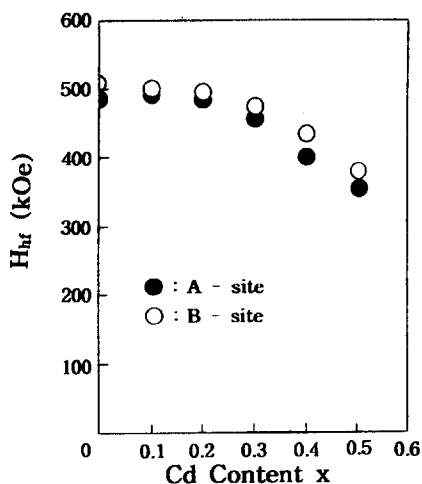


Fig. 5. Magnetic hyperfine fields as a function of Cd content x for the $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$.

동일한 형태임을 알 수 있다. 일반적으로 Mössbauer 스펙트럼 상으로 나타나는 페라이트의 자기 이완 현상은 Zeeman분열에 의한 sextet와 doublet가 뚜렷이 공존하는 형태의 초상자성 이완 현상[17, 18]과 Zeeman 분열에 의한 sextet가 약화되는 과정에서 doublet가 나타나는 강자성 이완 현상[19, 20]으로 구분할 수 있다. 본 실험에서 사용한 $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 의 자기 이완 현상은 x가 0~0.2인 경우는 Al^{3+} 이온에 의한 초상자성 이완 현상을, x가 0.6, 0.7인 시료에서는 Cd^{2+} 이온에 의한 강자성 이완현상이 뚜렷이 구분되어 나타나고 있다는 사실이 매우 흥미로우며, 이러한 사실은 페라이트의 3가와 2가의 금속 양이온의 분포에 따른 자기 특성 연구에 있어서 하나의 연구 과제가 될 것으로 생각된다. Cd^{2+} 농도가 더 증가하여 x가 0.8이상이 되면 상자성에 의한 doublet의 공명 흡수선만 나타나게 된다. 페라이트의 상자성 특성은 normal spinel구조일 때 나타나는 현상으로서 결국 x가 0.8이상이 되면 $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 는 normal spinel구조로 전환된다는 것을 확인할 수 있다. 특히 상자성으로 전환된 doublet 공명흡수선의 강도는 x가 0.8인 시료에서는 비대칭성을 보이지만 x가 0.9, 1로 증가함에 따라 이 비대칭성은 사라지는 현상을 보이게 된다. 이러한 상자성 흡수선의 비대칭성은 시료의 금속 양이온의 site분포에 의한 것으로서 Cd^{2+} 의 계속적인 증가에 따라 A-site의 Al이온 뿐만 아니라 Fe이온도 B-site로 이동하여, 결국은 x가 1인 시료에서는 $(Cd)^A [FeAl]^B O_4$ 의 양이온 분포식에 따라 B-site에 의한 이중선만 나타나기 때문이다. 특히 x가 1인 $CdFeAlO_4$ 시료의 이성질체 이동치와 사중극자 분열치는 각각 0.566 mm/sec, 0.89 mm/sec로서 $CdFe_2O_4$ 에 비해 크다는 것 [21]을 알 수 있으며, 이것은 B-site의 Fe^{3+} 이온과 치환된 Al^{3+} 이온의 크기차이로 발생하는 결정 격자의 왜곡에 의한 현상으로 해석된다.

IV. 결 론

$Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 의 Cd^{2+} 이온의 농도에 따른 Mössbauer 스펙트럼은 x가 0.2이하인 시료에서는 Zeeman 분열에 의한 sextet와 상자성 doublet이 중첩된 초상자성 이완 현상이 나타나며, Cd^{2+} 이온의 농도가 증가하면 doublet의 흡수선 강도가 점차적으로 약화되어 x가 0.3이상이 되면 사라지고 Zeeman분열에 의한 sextet만 나타난다. 그리고 x가 0.6과 0.7인 시료에서는 강자성

이완현상에 의한 공명흡수선을 보이다가 x 가 0.8이상 이 되면 상자성에 의한 doublet가 나타난다. 이때 Zeeman 분열에 의한 sextet의 이성질체 이동치는 x 가 0.2까지는 Cd^{2+} 이온의 농도에 따라 증가하나, x 가 0.3이상이 되면 감소하는 경향을 보이고, 내부 자기장은 x 가 0.2까지는 거의 일정하게 유지되다가 0.3이상이 되면 감소하는 현상을 보이게 된다. 이러한 결과에 따르면 $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 의 자성이온인 Ni^{2+} 를 비자성 이온인 Cd^{2+} 로 치환하게 되면 x 가 0.2이하에서는 치환된 Cd^{2+} 이온이 주로 A-site의 Al^{3+} 이온을 B-site로 이동시키게 되고, 계속적인 Cd^{2+} 이온의 증가에 따라 A-site의 Fe^{3+} 이온도 점차적으로 B-site로 이동하게 된다. 이때 x 가 0.2이하인 시료에서 나타나는 초상자성 이완현상의 주된 원인은 A-site의 Al^{3+} 이온이고, x 가 0.6, 0.7인 시료에서 나타나는 강자성 이완현상의 주된 원인은 Cd^{2+} 이온인 것으로 해석할 수 있었으며, $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ 는 Yafet-Kittel 자기구조에 따른 자기특성을 갖는 것으로 설명하였다.

참 고 문 헌

[1] Sk Mohammad Yusuf, V. C. Sahni and L. Madhav Rao, *J. Phys.: Condens. Matter.* **7**, 873 (1995).
 [2] M. A. Amer, M. A. Ahmed, M. K. El-Nimer and M. A. Mostafa, *Hyperfine Interactions* **96**, 91 (1995).
 [3] C. R. Bluncson, G. K. Thompson and B. J. Evans,

Hyperfine Interactions **90**, 353 (1994).
 [4] J. Neamtu, V. Spinu and G. Filoti, *J. Magn. Magn. Mater.* **133**, 481 (1994).
 [5] L. K. Leung, E. J. Evans and A. H. Morrish, *Phys. Rev. B* **8**, 29 (1973).
 [6] M. Petrera, A. Gennaro and N. Burriesci, *J. Mater. Sci.* **17**, 429 (1982).
 [7] R. G. Kulkarni and H. H. Joshi, *Solid State Commun.* **53**, 1005 (1985).
 [8] W. Karner, R. Wappling and T. Nagarajan, *Phys. Scr. (Sweden)* **36**, 544 (1987).
 [9] L. R. Maxwell and S. J. Pickart, *Phys. Rev.* **92**, 1120 (1953).
 [10] M. D. Osborne, M. E. Fleet and G. M. Bancroft, *J. Solid State Chem.* **53**, 174 (1984).
 [11] J. J. Bara *et al.*, *J. Phys. C-1* **41**, 173 (1980).
 [12] J. J. Bara, *Phys. Stat. Sol.(a)* **44**, 737 (1977).
 [13] S. Niziol, *Phys. Stat. Sol.(a)* **17**, 555 (1973).
 [14] V. F. Belov *et al.*, *Sov. Phys. Solid State Phys.* **13**, 1692 (1971).
 [15] S. K. Kulshreshtha, *J. Mater. Sci. Lett.* **5**, 638 (1986).
 [16] N. L. Pakhomova *et al.*, *Sov. Phys. Solid State* **19**, 1060 (1977).
 [17] W. Kundig *et al.*, *Phys. Rev.* **142**, 327 (1966).
 [18] T. K. McNab, R. A. Fox and A. J. F. Boyle, *J. Appl. Phys.* **39**, 5703 (1968).
 [19] F. van der Woude and A. J. Dekker, *Phys. Stat. Sol* **9**, 775 (1965).
 [20] I. Nowick and H. H. Wickman, *Phys. Rev. Lett.* **17**, 969 (1966).
 [21] R. J. Evans, S. S. Hafner and H. P. Weber, *J. Chem. Phys.* **55**, 5282 (1971).

A study on Mössbauer Spectra of the $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ system

Jeong-Dae Ko and Sung-Rak Hong

Department of Physics, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

Seung-Do Baek

College of Science & Engineering, Kang Nam University, Yong In 449-702, Korea

(Received 10 April 1998, in final form 5 August 1998)

The Mössbauer spectra of the $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ system were investigated with the Cd content x at room temperature. The spectra of the samples exhibit various patterns as follows 1) superparamagnetic relaxation for $0 \leq x \leq 0.2$, 2) ferrimagnetic sextet for $0.3 \leq x \leq 0.5$, 3) ferromagnetic relaxation for $x=0.6, 0.7$, 4) paramagnetic doublet for $0.8 \leq x \leq 1$, with the Cd content x . In the samples with x values from 0 to 0.2, the substituted Cd^{2+} ions transfer the Al^{3+} ions from A-site to B-site mainly. The superparamagnetic relaxation effect and the ferromagnetic relaxation effect are derived from the Al^{3+} , Cd^{2+} respectively. The magnetic structure of the $Ni_{1-x}Cd_xFeAlO_4$ system was explained by the Yafet-Kittel model.