

X-선 자기 원형 이색성

김재영*

포항공대 가속기 연구소, 경북 포항시 남구 효자동, 790-784

(2010년 8월 4일 받음, 2010년 9월 9일 최종수정본 받음, 2010년 9월 9일 게재확정)

X-선 자기 원형 이색성 측정은 자성물질을 구성하는 원소별 자기적 성질의 측정 및 궤도 자기 모멘트와 스핀 자기 모멘트를 구별하여 측정할 수 있다는 장점으로 인해 여러 가지 자성 신물질 및 다양한 기능성 자성 다층 박막의 연구에 많이 이용되어 왔다. 이 글에서는 이러한 X-선 자기 원형 이색성 현상의 원리 및 실험 방법 등을 설명하겠다. 또한 몇 가지 X-선 자기 원형 이색성을 이용한 최근 몇 가지 연구도 소개하려 한다.

주제어 : X-선 자기 원형 이색성, X-선 흡수분광, 궤도 자기 모멘트, 스핀 자기 모멘트

I. 서 론

X-선이 어떤 물질과 만나면 일부는 탄성 산란할 것이고, 또 다른 일부는 비탄성 산란할 것이다. 탄성 산란의 경우에는 대개 물질 내부의 연속적이고 반복적인 구조에 의해 보강, 소멸 간섭을 일으킬 것이므로 이를 통해서는 반복적인 결정구조, 스핀구조, 오비탈구조 등을 알아낼 수 있다. 비탄성 산란의 경우에는 전자, 또는 각종 준입자들의 에너지 준위 간의 전이에 따른 것이므로 이를 통해서는 전자구조에 대한 정보를 알아낼 수 있다. 이러한 X-선의 비탄성 산란을 이용한 실험들을 통칭하여 흔히 X-선 분광학(spectroscopy)이라 한다. 자성물질 내부 자기 모멘트의 대부분은 전자의 스핀에 의한 기여이므로, 직접적으로만 보면 자성 물질 연구를 위한 X-선 분광학을 X-선의 H-field와 스핀 간의 상호작용을 통한 실험이라 생각할 수도 있다. 그런데, 이 상호작용이 E-field와 전하(charge)간의 상호작용에 비해 1/1000~1/10000 정도로 대단히 작기 때문에[1] X-선 분광학을 이용한 자기적 성질의 측정은 X-선 이용 연구의 오랜 역사에 비교할 때, 아주 짧은 역사만을 가지고 있고 그 본격적인 시작은 1990년대 초 방사광 가속기에서의 X-선 자기 원형 이색성(X-ray Magnetic Circular Dichroism, XMCD) 실험에 의해 비롯되었다.

XMCD는 원형 편광 X-선의 helicity 방향이 시료의 자화 방향과 평행, 또는 반평행할 때 시료의 색이 바뀌는 현상, 즉 흡수율이 달라지는 현상이다.

$$\Delta I \sim \vec{k} \cdot \vec{M}$$

여기서, \vec{k} 는 입사하는 원형 편광 X-선의 helicity 벡터이며, \vec{M} 은 시료의 자화율이다. XMCD 측정이 가지는 장점은

첫째, 이 실험이 특정 원소의 흡수선에서 이루어지기 때문에 시료 전체에서 특정 원소에 의한 자기적 성질을 분리해서 측정할 수 있을 뿐만 아니라[2], 같은 원소라 하더라도 다른 화학적 환경에 있는 원자들의 자기적 성질의 분리가 가능하다는 점이다[3, 4]. 이러한 성질로 인해 XMCD는 다른 원소들로 이루어진 다층 박막(GMR, TMR 등의 자기저항박막 구조물)의 층별 자기적 성질 연구 및 신자성물질의 자기적 성질의 고유성 연구에 많이 이용되었다[4, 5] XMCD가 가지는 두 번째 장점은 sum rule을 통하여 자기 모멘트의 두 가지 성분인 궤도 모멘트(orbital moment)와 스핀 모멘트(spin moment)의 구별이 가능하다는 점이다[6, 7]. 이러한 장점은 수직자기 메모리 연구 및 스핀과 격자 간의 상호작용이 중요한 역할을 하는 다강체 등의 연구에 많이 이용되어 왔다[8, 9]. XMCD 측정이 또 다른 장점이 될 수 있는 것은 표면에 대단히 민감하다는 점이다. VSM, SQUID 등의 측정방법으로는 시료의 체적이 대단히 작은 수 Å 정도의 초박막에 대해서는 충분한 민감도를 가질 수 없다. 그러나, XMCD의 측정 깊이는 수십 Å 정도로 표면에 민감하기 때문에 이러한 초박막에 대해서도 충분한 민감도를 가질 수 있어서 SMOKE (Surface Magneto-Optical Kerr Effect)와 함께 표면 자성연구에 있어서 독보적인 장치로 이용되어 왔다[10]. 이러한 장점으로 인해 XMCD는 1990년대 이후 분광학적으로 활발히 이용되어 왔을 뿐만 아니라, 대단히 빠르고 신호가 큰 현상이기 때문에 최근 들어서는 자구(magnetic domain) 관찰 등을 목적으로 한 자기 현미경 및 자기현상의 동역학 연구에도 많이 응용되고 있다[11, 12].

II. XMCD의 원리

XMCD의 신호가 큰 것은 이 현상이 일차적으로 자기 산란

*Tel: (054) 279-1988, E-mail: masson@postech.ac.kr

이 아니라 전자의 전하에 의한 비탄성 산란이라는 점에 있다. 이를 이해하기 위해서는 우선 X-선 흡수 분광학(X-ray Absorption Spectroscopy, XAS)의 기본 원리부터 알아야 한다. XAS는 시료에 X-선을 쬐어서 이에 의해 전자가 중심전자대(core level)에서 가전자대(valence level)로 여기될 때 X-선이 흡수되는 현상을 이용한 것이다. 여기서 중심전자대는 electron source로 생각될 수 있고, 측정된 스펙트럼은 비어 있는 전자 상태(unfilled state)의 정보를 주게 된다. 자성 물질이 한쪽으로 자화되어 있다면 가전자대의 스핀업(spin up)과 스핀다운(spin down) 상태 사이에 exchange splitting이 있을 것이고 이에 의해 두 상태 간의 전자점유율(population) 차이가 생기게 된다. X-선의 흡수가 이러한 전자점유율 차이를 반영하기 위해서 electron source가 되는 중심전자대가 이번에는 spin source가 되어야 한다. 이를 위해 필요한 것이 원형편광된 X-선과 중심전자대의 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)이다. Fig. 1에 3d 전이원소에 대한 예를 나타냈다. 3d 전이원소의 경우 XMCD 측정에 주로 사용되는 흡수선은 L edge로 2p 중심전자대에서 3d 가전자대로의 여기에 의해 X-선이 흡수된다. 2p 중심전자대에서 하나의 전자가 튀어 나갈 경우, 2p 전자대는 스핀-궤도 결합에 의해 스핀 방향과 오비탈 모멘트의 방향이 평행한 2p_{3/2} 상태와 반평행인 2p_{1/2} 상태로 축퇴가 깨지게 된다. 이렇게 될 경우 이 그림에 나타난 것처럼 같은 2p_{3/2} 상태 내에서도 스핀업 상태와 스핀다운 상태가 스핀만 달라지는 것이 아니라 오비탈 모멘트의 방향도 반대가 된다. 그런데, 선형편광된 X-선의 경우에

는 오비탈 모멘트를 전자에 전달하지 않지만, 원형편광인 경우에는 그 helicity 방향에 따라 전자의 오비탈 모멘트에 ±1을 전달하게 되므로, 서로 반대방향의 오비탈 모멘트를 가진 전자들은 쌍극자 선택 규칙(dipole selection rule)에 의해 3d 가전자대로 여기할 수 있는 확률이 달라진다. 즉, 여기된 전자들의 스핀별 점유율이 이 확률만큼 달라지게 되는 것이다. 이렇게 중심전자대의 스핀-궤도 결합과 원형 편광 X-선에 의해 중심전자대가 스핀 source가 되고, 전자의 전이는 같은 스핀 사이에서만 일어나므로, 결과적으로 XMCD 현상이 발생하게 된다. 서론에서 X-선과 스핀과의 상호작용은 대단히 작다고 했는데, XMCD의 경우에는 흥미롭게도 중심전자대의 스핀-궤도 결합이 증폭기(amplifier) 역할을 하는 것이라 볼 수 있다. Fig. 1에 나타난 확률은 3d 가전자대가 모두 비어 있다고 가정했을 때 계산된 값이다.

III. 실험 방법 및 Sum Rule 분석

자성물질에서 가장 중요한 원소들은 3d 전이원소들과 희토류 원소들이다. 이들 원소들의 국지적 자기 모멘트(local magnetic moment)를 주는 것은 각각 3d 가전자대와 5f 가전자대이므로, XMCD는 dipole selection rule에 의해 허용되는 L edge(2p → 3d)와 M edge(3d → 5f)에서 측정하게 된다. 이들 흡수선들은 대개 400~1800 eV 사이의 연 X-선 영역에 존재하는데, 이 영역의 X-선에 대해서는 편광을 조절해줄 수 있는 적당한 polarizer가 없기 때문에 원형 편광 X-선을 발생시키는 광원 자체를 만들어야 한다. 이를 위해 1980년대 후반부터 방사광 가속기의 이극 전자석의 off-axis radiation을 이용하기 시작하였으며[13], 제 3세대 방사광 가속기들이 등장하기 시작한 1990년대 후반부터는 Fig. 2에 나타난 것과 같은 Elliptically Polarized Undulator(EPU)라는 특별한 삽입장치를 사용하여 원형 편광 X-선을 만들어내기 시작하였다. EPU는 4개 또는 6개의 영구자석 배열을 이용하여, 수평 및 수직 방향으로 자기장을 걸어주고 이들 사이에 45도의 phase

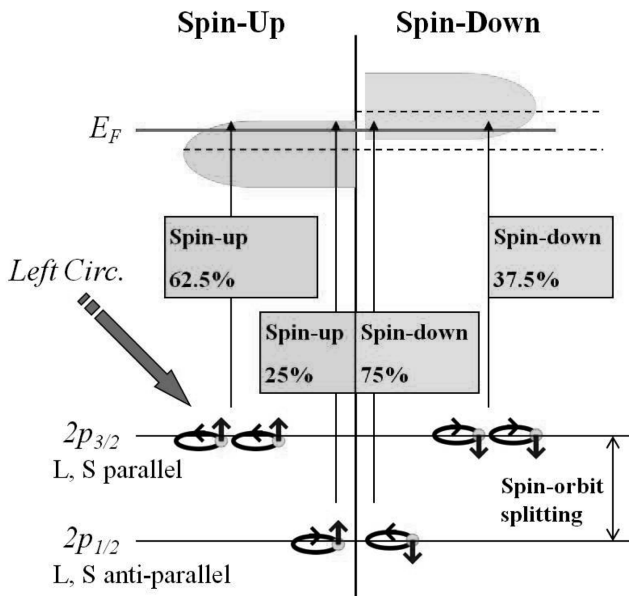


Fig. 1. Schematic diagram of XMCD phenomenon. Straight arrows and round arrows in core levels represent the spin momentum and the orbital momentum respectively.

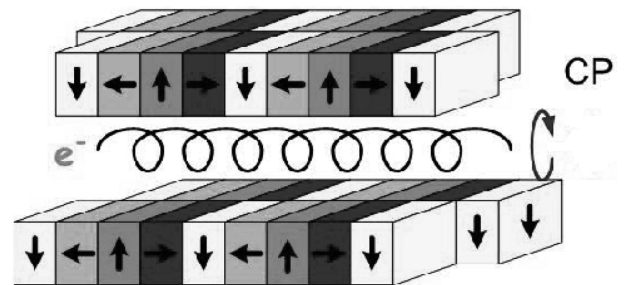


Fig. 2. Sasaki type Elliptically Polarized Undulator. It is composed of four arrays of permanent magnets and generates horizontal and vertical magnetic fields with 45° phase difference.

차를 줌으로써 이 사이를 지나가는 전자빔이 나선형 궤도를 따라 움직이게 하는 장치이다. 방사광의 편광은 전자빔 궤도 면에서 궤도의 접선 방향에 수직으로 정해지기 때문에 전자빔의 궤도가 나선형이면 원형 편광 방사광이 나오게 되며, 나선의 방향이 반대로 바뀌는 helicity가 반대인 원형 편광 방사광이 발생하게 된다.

이렇게 발생한 원형 편광을 이용하여 실제 XMCD를 측정하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 시료의 자화 방향을 고정하고 원형 편광 광원의 helicity를 바꿔가면서 측정할 수도 있고, 반대로 자화방향을 반전해 가면서 한가지 helicity를 가진 원형 편광만을 이용하여 측정할 수도 있다. 또한 시료를 회전시켜 반대방향을 보게 함으로써 자화 방향도 반전시켜 측정하기도 한다. 이러한 방법들은 모두 나름의 장단점이 있는데, 최근 들어 가장 보편화된 방법은 전자석을 이용하여 자화방향을 반전시켜 가면서 측정하는 것이다. Fig. 3에 XMCD 실험 장치 및 측정 예를 나타내었다.

이렇게 XMCD 스펙트럼이 측정되면, 3d 전이원소의 L 흡수선의 경우 다음과 같은 sum rule을 이용하여 자기 모멘트의 두 가지 근원인 궤도 자기 모멘트와 스핀 자기 모멘트가 이 스펙트럼으로부터 계산해낼 수 있다는 것이 잘 알려져 있다[13].

$$m_{orb} = -\frac{4\Delta\sigma}{3(\sigma^+ + \sigma^-)}(10 - n_{3d})$$

$$m_{spin} = -\frac{6\Delta\sigma L_3 - 4\Delta\sigma}{\sigma^+ + \sigma^-}(10 - n_{3d})\left(1 + \frac{7\langle T_z \rangle}{2\langle S_z \rangle}\right)^{-1}$$

$$\sigma^\pm \equiv \int \mu^\pm \quad \Delta\sigma \equiv \int (\mu^+ - \mu^-)$$

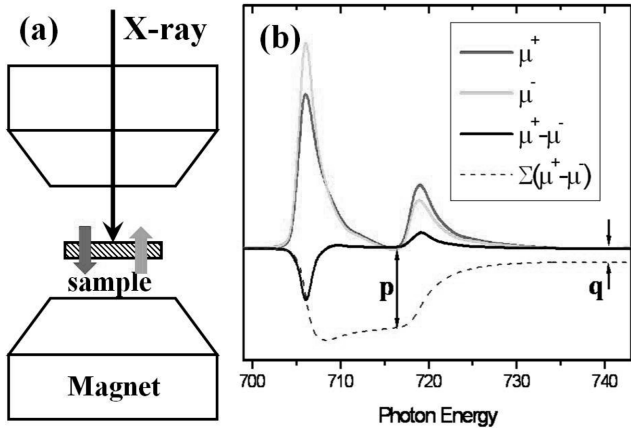


Fig. 3. (a) XMCD experimental set-up. The magnetization direction (blue and red arrows) is reversed by an electromagnet, and the X-ray impinges on the sample through a hole in the magnet. (b) an example of XMCD spectra (Fe L edges). Blue (Red) spectrum is obtained when the directions of the magnetization and the helicity of X-ray are parallel (antiparallel).

여기서, n_{3d} 는 3d 전자궤도에 채워진 전자의 수이며, $\langle T_z \rangle$ 및 $\langle S_z \rangle$ 는 각각 magnetic dipole operator 및 스핀 모멘텀의 기대값을 나타낸다. 이 값들은 실험적으로 얻을 수 없기 때문에 sum rule 적용에 어려움을 느낄 수도 있는데, $\langle T_z \rangle / \langle S_z \rangle$ 의 값이 거의 0에 가까운 것으로 잘 알려져 있기 때문에 이를 무시하고 계산해도 큰 차이는 없다. 그러나, 최근에는 바나듐 등의 이른 전이원소(early transition metal)들의 경우 이를 무시하면 스핀 모멘트 계산에 큰 오차가 발생한다는 연구 결과도 있다[14].

IV. XMCD 실험의 예

서론에서 XMCD 측정이 특정 원소의 자기적 성질을 분리해서 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 같은 원소라 하더라도 다른 화학적 환경에 있는 원자들의 자기적 성질의 분리가 가능하다는 점을 언급한 바 있다. 이러한 측정의 대표적인 예가 몇 가지 원소로 구성된 자성 스피넬에 대한 분석이다. Fig. 4는 magnetite 및 maghemite에 대한 XMCD 측정 결과이다. 이 두 물질은 같은 spinel 구조를 가지며, 2+ Fe에 공공(vacancy)이 없으면 magnetite, 2+ Fe에 100%의 공공이 생긴 경우를 maghemite라 한다. 격자상수에 1% 정도의 차이 밖에 없기 때문에 XRD(X-ray diffraction) 분석을 통해서 두 물질을 구별하기는 쉽지 않으며 특히 최근에는 나노입자의 형태로 많이 만들어지기 때문에 XRD 측정을 하더라도 peak이 대단히 넓어져서 구별될 수 없다[4]. 이 경우에 local probe의 일종인 XMCD가 큰 강점을 가진다. 이 물질 내에서 Fe 이온은 서로 다른 세 가지의 자리를 가지는 것으로 잘 알려져 있다. 우선 local symmetry가 다른 O_h , T_d 두 가지 자리가 있고, O_h 에는 가전자수가 2+, 3+로 다른 Fe이 있다. 그

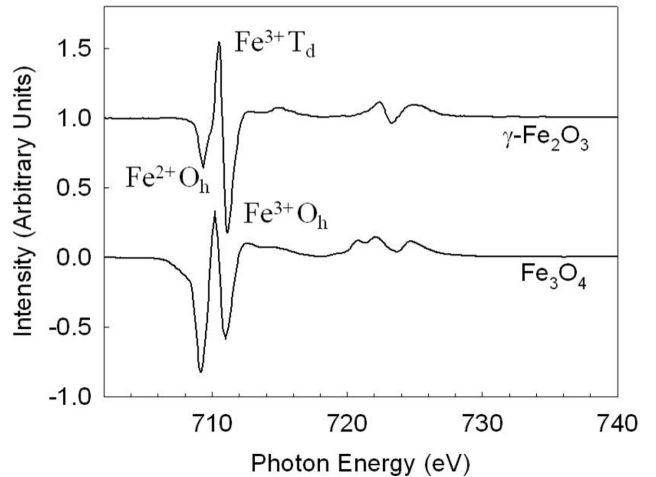


Fig. 4. XMCD of spinel Fe oxides. Three peaks of the spectra correspond to three different local sites of Fe.

런데, 전체적으로 ferrimagnet이고, O_h 자리의 Fe과 T_d 자리의 Fe 이온은 서로 반대방향의 자기 모멘트를 가진다. 이것은 Fig. 4에서 XMCD의 방향이 아래 위로 두 가지라는 것으로부터 잘 구별된다. 즉, 아래쪽으로 향한 peak이 두개, 위쪽으로 향한 peak이 하나이므로, 아래쪽으로 향한 peak은 O_h 자리의 Fe을, 위쪽으로 향한 peak은 T_d 자리의 Fe을 나타낸다. 그리고, $2+$ 이온이 $3+$ 이온에 비해 낮은 에너지에서 흡수가 이루어지므로 이 두 가지 상태도 에너지 차이에 의해 쉽게 구별된다. 결과적으로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 세 가지 다른 화학적 상태에 있는 원자 자리들이 대응되는 XMCD peak들을 찾을 수 있다. 이렇게 되면 Fe $2+$ 자리의 공공의 정도를 정량적으로 알아낼 수 있으므로, magnetite와 maghemite간의 구별뿐만 아니라 그 중간상태에 있는 화합물도 정량적인 성분분석이 가능해진다.

이제 다른 예로 sum rule을 통해 분석한 경우를 소개하겠다. 대부분의 자성 물질을 이루는 $3d$ 전이원소 화합물의 경우 결정장(crystal field) 내에서 궤도 자기 모멘트는 퀸칭되어 없애지고, 자기 모멘트에 대한 대부분의 기여는 스핀 자기 모멘트로부터 비롯된다. 그런데, 스핀 자기 모멘트는 외부 자기장에 직접적으로 반응하는 성분이고 순수하게 이들에 의한 자기 이방성은 shape anisotropy 밖에 없다. 그러므로, 궤도 자기 모멘트가 없다면 $3d$ 전이원소로 만들어진 화합물들은 모두 보자력(coercivity)이 거의 없는 연자성 물질이 되어야 한다. 그러나, 실제로는 그렇지 않기 때문에 $3d$ 전이원소를 이용한 다양한 자성 메모리 소자, 기억 매체 등을 만들 수 있다. 이렇게 될 수 있는 이유는 궤도 자기 모멘트가 스핀 자기 모멘트에 비해 대단히 작다 하더라도 이들은 격자구조에 잡혀 있는 고정된 모멘트이고 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)을 통해 스핀 자기 모멘트를 다시 붙잡기 때문이다. 그러므로, 다양한 자기적 성질이 나타나는 대부분의 원인은 궤도 자기 모멘트에 있고, 이를 분리해서 측정할 수 있다면 특정한 자기적 성질의 원인 분석에 대단히 유리할 수밖에 없다. 이것이 XMCD 측정을 통한 분석이 방사광 가속기라는 특정한 장소에서만 이루어질 수 있어서 접근성이 대단히 나쁘다는 단점에도 불구하고, 보편성을 가질 수밖에 없는 이유이다. 이러한 궤도 자기 모멘트의 측정은 다양한 자성물질에 대해 이루어져 왔는데 최근 고체물리학의 집중적인 관심사가 되고 있는 다강체에 적용된 예를 들어 보겠다. 다강체는 여러 가지 강성이 동시에 존재하는 물질로 이를 위해서는 격자와 스핀 사이의 상호작용이 절대적으로 요구되기 때문에 궤도 자기모멘트가 충분히 클 수 있는 물질에서만 그러한 성질을 기대할 수 있다. 그러므로, 대부분의 다강체는 망간화합물에서 발견되었으며, 가전자대가 $3d^7$ 가 되는 철화합물에서는 다강성을 기대하기는 힘들다. 그러나, $GaFeO_3$ 는 $3d^6$ 임에도

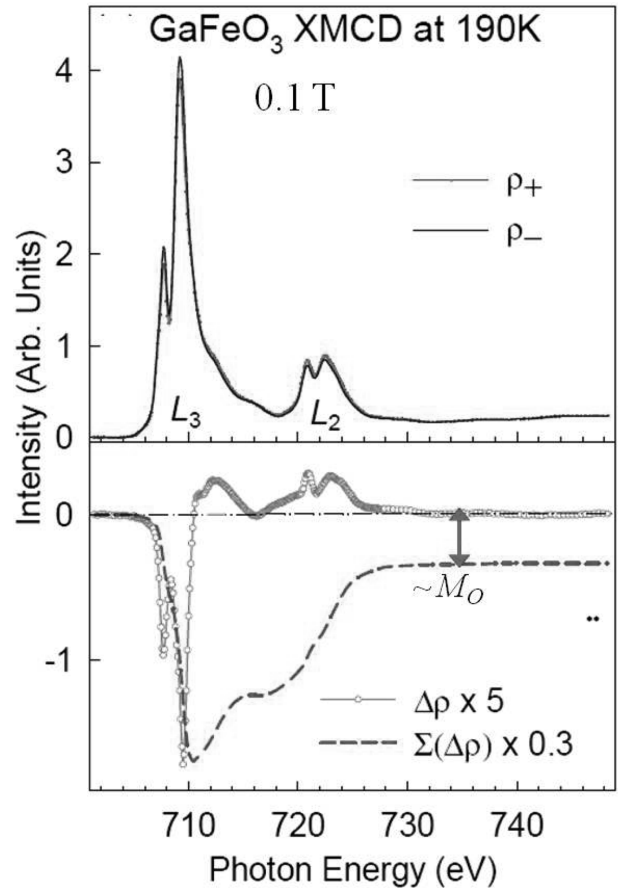


Fig. 5. XMCD analysis of multiferroic $GaFeO_3$ (Reference [9]).

불구하고 piezoelectricity와 ferrimagnetism을 동시에 가지고 그 둘 사이에 연관작용까지 존재하는 특이한 물질이다. $3d^6$ 가 되면 한쪽 스핀 밴드가 완전히 채워지기 때문에 스핀-궤도 결합 에너지를 고려하거나 대칭구조가 낮아지더라도 궤도 자기 모멘트가 0이 될 수밖에 없다. 그래서 $GaFeO_3$ 에서의 준다강성의 원인은 이 물질이 합성된 이래 수십 년 동안 의문시되어 왔다. 이를 해결하기 위하여 최근에 XMCD 측정을 통한 연구가 시도되었으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 XMCD를 적분하여 수렴하는 값이 궤도 자기모멘트의 값에 해당하는데, 궤도 자기 모멘트가 없는 경우 0으로 수렴하게 된다. 그런데, 이 그림에 보인 바와 같이(빨간색 양방향 화살표) 상당한 양의 궤도 자기모멘트가 확인되었고 다른 분광학적 방법을 함께 적용하여 다강성의 원인이 밝혀진 바 있다[9].

V. 결 론

이 글에서 XMCD의 기본원리 및 측정 방법, 분석 방법 등을 설명하였다. 또한 XMCD가 다른 자성 측정 방법에 비

해 가지는 장점도 두 가지 분석 사례와 함께 소개하였다. XMCD는 다른 자성 측정방법 및 X-선 측정 방법에 비해 대단히 짧은 역사만을 가지고 있지만, 그 중요성으로 인해 짧은 시간 내에 대단히 빠른 속도로 분석 방법, 측정 방법이 정립되어 왔다. 그러나, 기본적으로 시료에서 튀어 나온 전자를 측정하는 방법이기에 때문에 부도체에서는 측정되기 힘들고, 측정 깊이에 한계가 있어서 표면이 변질되거나 오염되기 쉬운 물질, 다른 물질로 덮여있는 시료에 대해서는 측정이 불가능하다는 단점도 가지고 있다. 그러므로, 다른 자성 측정 방법들과 마찬가지로 구체적인 연구 대상에 따라 독보적인 정보를 줄 수도 있는 반면에 어떤 경우에는 더 불리할 수도 있다. 따라서, 자성 물질 연구자들이 서로의 연구 방법 및 접근 방법에 대해 이해를 깊이하고 상호 교류를 활발히 하는 것이 절실히 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0078402).

참고문헌

[1] S. W. Lovesey and S. P. Collins, *X-ray Scattering and Absorption by Magnetic Materials* (OXFORD, New York 1996).
 [2] J.-S. Kang, G. Kim, H. J. Lee, D. H. Kim, H. S. Kim, J. H. Shim, S. Lee, Hangil Lee, J.-Y. Kim, B. H. Kim, and B. I. Min,

Phys. Rev. B **77**, 035121 (2008).
 [3] J.-Y. Kim, J.-H. Park, B.-G. Park, H.-J. Noh, S.-J. Oh, J. S. Yang, D.-H. Kim, S. D. Bu, T.-W. Noh, H.-J. Lin, H.-H. Hsieh, and C. T. Chen, Phys. Rev. Lett. **90**, 017401 (2003).
 [4] J. Park, K. An, Y. Hwangm, J.-G. Park, H.-J. Noh, J.-Y. Kim, J.-H. Park, N.-M. Hwang, and T. Hyeon, Nat. Mater. **3**, 891 (2004).
 [5] H.-K. Seong, J.-Y. Kim, J.-J. Kim, S.-C. Lee, S.-R. Kim, U. Kim, T.-E. Park, and H.-J. Choi, Nano Lett. **7**, 3366 (2007).
 [6] B. T. Thole, P. Carra, F. Sette, and G. van der Laan, Phys. Rev. Lett. **68**, 1943 (1002).
 [7] P. Carra, B. T. Thole, M. Altarelli, and X. Wang, Phys. Rev. Lett. **70**, 694 (1993).
 [8] J.-S. Lee, J.-Y. Kim, J. H. Shim, B. I. Min, K.-B. Lee, and J.-H. Park, Phys. Rev. B **76**, 060403(R) (2007).
 [9] J.-Y. Kim, T. Y. Koo, and J.-H. Park, Phys. Rev. Lett. **96**, 047205 (2006).
 [10] J.-M. Lee, J.-Y. Kim, S.-U. Yang, B.-G. Park, J.-H. Park, S.-J. Oh, and J.-S. Kim, Phys. Rev. B **76**, 052406 (2007).
 [11] J. Stöhr, Y. Wu, B. D. Hermsmeier, M. G. Samant, G. R. Harp, S. Koranda, D. Dunham, and B. P. Tonner, Science **259**, 658 (1993).
 [12] C. Boeglin, E. Beaurepaire, V. Halté, V. López-Flores, C. Stamm, N. Pontius, H. A. Dürr, and J.-Y. Bigot, Nature **465**, 458 (2010).
 [13] C. T. Chen, Y. U. Idzerda, H.-J. Lin, N. V. Smith, G. Meigs, E. Chaban, G. H. Ho, E. Pellegrin, and F. Sette, Phys. Rev. Lett. **75**, 152 (1995).
 [14] Chinthia Piamonteze, Piter Miedema, and Frank M. F. de Groot, Phys. Rev. B **80**, 184410 (2009).

X-Ray Magnetic Circular Dichroism

Jae-Young Kim*

Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, Pohang 790-784, Korea

(Received 4 August 2010, Received in final form 9 September 2010, Accepted 9 September 2010)

X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) has been used as an important tool of magnetism due to its unique abilities to measure element-specific magnetic properties and to separate the orbital and the spin magnetic moments. These abilities allow researchers to access the microscopic origin of the magnetic properties of transition metal and rare earth compounds. In this report, I explain the principle of XMCD and the experimental set-up. Recent a few research examples using XMCD will be also introduced.

Keywords : X-ray magnetic circular dichroism, X-ray absorption spectroscopy, orbital magnetic moment, spin magnetic moment