

## 저온에서 Hoya FR5 및 FR4 유리의 Faraday 회전\*

이현근 · 원영희

아주대학교 자연과학대학 물리학과

이 경 수

기초과학지원연구소 대형공동연구기기부

(1995년 7월 21일 받음)

Tb<sup>3+</sup> 이온이 첨가된 Hoya FR5 유리와 Ce<sup>3+</sup> 이온이 첨가된 Hoya FR4 유리의 Faraday 회전과 자기화를 4.2 K~10 K 저온 영역에서 자기장을 80 kG까지 증가시키면서 온도 T와 자기장 H의 함수로 측정하였다. 사용파장은 아르곤 레이저의 514.5 nm였다. H/T > 5 kG·K<sup>-1</sup> 이상에서 나타난 자기화 및 Faraday 회전의 포화현상을 상자성체 양자이론으로 해석할 수 있었다. 계산된 멱음변수들로부터 Ce<sup>3+</sup> 유리의 큰 Verdet 상수는 4f→5d 궤도 유효 전기쌍극자 전이효과에 기인되고 Tb<sup>3+</sup> 유리의 큰 Verdet 상수는 자기화에 기인됨을 알 수 있었다.

### I. 서 론

Faraday 효과가 크고 광흡수가 적은 광기능성 물질은 광 isolator, 광 switch 등 자기광학장치에 이용되고 있다. [1] 이러한 광학재료에서는 자기적 특성이 큰 이온을 첨가하거나 [2] 자기재료를 직접 사용하여 [3] Faraday 효과를 증대시키고 있다. 내부 자기화가 매우 큰 yttrium iron garnet(YIG) [4] 결정은 1.3 μm 파장에서 Faraday 회전각이 33 min/G·cm로 실용화 되고 있지만 1 μm 파장 이하에서 감쇠결수가 급격히 증가하기 때문에 가시광 영역에서는 ZnSe [5], terbium aluminum garnet(TAG) [6], CdMnTe [7] 및 상자성 유리가 자기광학 재료로 연구개발되고 있다. 상자성 유리중 총 각운동량 J가 큰 회토류 이온인 Tb<sup>3+</sup>를 첨가시킨 붕규산염유리 및 근자외선 영역에서 유효 전기쌍극자 전이흡수 특성이 매우 큰 Ce<sup>3+</sup> 이온을 첨가시킨 인산염유리가 각각 Hoya FR5 및 Hoya FR4 [8] Faraday 유리로 개발되었다.

본 논문에서는 이 상용 상자성 유리속에 첨가된 Tb<sup>3+</sup> 및 Ce<sup>3+</sup> 이온의 자기화와 Faraday 회전각의 상호관계를 체계적으로 규명하기 위하여 저온 고자장에서의 자기적 광학적 특성을 조사 분석하였다.

### II. 이론적 배경

Faraday 회전 효과는 매질에 인가된 자기장에 의하여 우회전 원편광 및 좌회전 원편광의 굴절률이 달라져 매질을 통과하는 광의 직선편광이 회전하는 현상으로서 회전각 θ<sub>F</sub>는 다음식으로 표현된다.

$$\theta_F = V(\lambda, T) l H \cdot n \quad (1)$$

여기서 H는 자기장의 세기, n은 광의 전파방향 단위 벡터, l은 매질의 길이이고, 비례상수 V(λ, T)는 Verdet 상수이다. Verdet 상수는 일반적으로 파장 λ, 온도 T 및 물질에 따라 다른 값을 갖으며, 대부분의 경우 상자성 물질에서는 음수이고 반자성체에서는 양수이다. [9] Faraday 회전은 양자역학적 표현 [10]에서 도출된 상자성항과 반자성항으로 나눌 수 있고, 상자성 유리인 경우의 Verdet 상수는 온도 T와 파장 λ의 함수이므로, 본 논문에서는 파장만의 함수인 파장 Verdet 상수 V<sub>F</sub>(λ)와 온도의 함수인 자기감수율 χ<sub>M</sub>(T)의 곱으로 표현되는 다음식을 사용한다. [11]

$$V_F(\lambda, T) = V_F(\lambda) \chi_M(T) \quad (2-a)$$

$$V_F(\lambda) = V_0 \sum \frac{c_n}{(\lambda^2 - \lambda_n^2)} \quad (2-b)$$

여기서 V<sub>0</sub>는 비례상수, λ<sub>n</sub>은 전기쌍극자 전이파장(tra-

\* 본 연구는 1993년도 교육부 기초과학육성사업(BSRI-93-237) 및 1995년도 과학기술처 연구사업의 지원으로 수행되었음.

nsition wavelength),  $c_n$ 은 전기쌍극자 전이율이다.

상자성 매질의 Faraday 회전 효과는 식 (2-a)와 같이 물질의 자기적 특성  $\chi_M(T)$ 과 관계되기 때문에 저온 고자장 영역에서의 자기광효과를 보다 자세하게 분석하기 위하여 매질의 자기화  $M$ 과 Verdet 상수  $V(\lambda, T)$ 와의 관계식을 도출하였다. 바닥상태에서 총각운동량  $J$ 로 국소화된 자유 상자성 이온의 경우, 자기화  $M$ 은<sup>[12]</sup>

$$\frac{M}{M_n} = B_J(x) \quad (3-a)$$

$$x = \frac{g_J \mu_B H}{k_B T} \quad (3-b)$$

$$M_n = N g_J \mu_B J \quad (3-c)$$

이고, 여기서  $N$ 은 단위체적당 이온수,  $M_n$ 는 포화 자기화,  $g_J$ 는 분광학 갈라지기 인자이며  $B_J(x)$ 는 Brillouin 함수로 아래와 같다.

$$B_J(x) = \left(\frac{2J+1}{2J}\right) \coth\left[\left(\frac{2J+1}{2J}\right)x\right] - \left(\frac{1}{2J}\right) \coth\left[\left(\frac{1}{2J}\right)x\right] \quad (4)$$

따라서 일반적 표현으로 상자성체의 자기감수율  $\chi_M(T)$ 을

$$\chi_M(T) = \frac{M}{H} = \frac{N g_J \mu_B J B_J(x)}{H} \quad (5)$$

으로 기술하면, 상자성체의 Verdet 상수도 식 (2)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V_F(\lambda, T) = V_F(\lambda) \frac{N g_J \mu_B J B_J(x)}{H} \quad (6)$$

특히  $x \ll 1$ 의 경우, 즉 상대적으로 온도  $T$ 가 높고, 자기장  $H$ 가 작으면  $B_J(x)$  함수의 근사로부터 식 (5)의 자기감수율은

$$\chi_M(T) = \frac{N g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} \quad (7)$$

이 되고, 온도가 높아지면 유리의 반자성 특성이 나타나 Verdet 상수를 온도에 의존하는 상자성항과 온도에 무관한 반자성의 보정항으로 나누어 쓸 수 있다.<sup>[13]</sup>

$$V(\lambda, T) = V_F(\lambda, T) + V_D(\lambda) \quad (8)$$

여기서 상자성 Verdet 상수는 식 (6)에서 다음과 같이

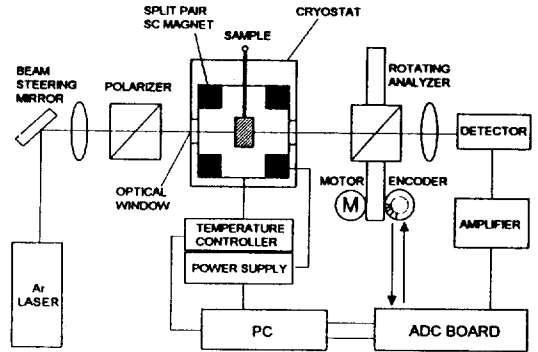


그림 1. Magneto-optical system schematic

온도에 반비례하는 식으로 기술될 수 있다.<sup>[13]</sup>

$$V_F(\lambda, T) = V_F(\lambda) \frac{N g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} \quad (9)$$

### III. 실험

본 실험에서는 양면이 광학면이 된 두께 1 mm 직경 10 mm인 원판형 Hoya FR5, FR4 상자성 광학유리를 시료로 사용하였는데, 이는 상용화된 유리 중에서 Verdet 상수값이 비교적 크고, 첨가된 희토류  $Tb^{3+}$  이온 및  $Ce^{3+}$  이온과 관련하여 선행연구가 많이 되어 있어,<sup>[13,14,15]</sup> 저온 고자장에서 상자성 특성과 관련하여 비교분석이 쉬웠기 때문이다.

Faraday 회전 측정 자기광학 시스템은 그림 1과 같이 구성하였다. 광원으로는 50 mW의 아르곤 레이저를 사용하였으며, 회전각 측정은 polarimetric 방법<sup>[16]</sup>을 채택하여 0.05°까지 정밀도를 유지하면서 자동화 하였다.

고자장 저온 실험장치로는 9 tesla 분리형 초전도자성 시스템으로서, 자장이 수평으로 걸리도록 설계되어 있고 <sup>4</sup>He 기화 냉각법으로 상온에서 최저 1.5 K까지 온도가 변이 가능한 Oxford사의 Spectromag 4000을 사용하여 자기장의 세기는 0에서 80 kG까지, 온도는 300 K에서 4.2 K까지 가변시키면서 실험을 수행하였다. 자기화 측정은 Quantum Design사의 MDMS7 SQUID Magnetometer를 사용하여, 자기장 세기는 0에서 70 kG까지 온도는 300 K에서 1.75 K까지 가변시키면서 수행하였다. 본 실험에서는 자기화를 측정하여 얻은 data를 식 (3)에 맞추어  $N, J$  및 희토류 유리의 실효  $g$  인자  $g_{off}$  값을 확정하고 이 parameter 들을 사용하여 저온 고자장에서의 Faraday 실험 결과를 분석하였다.

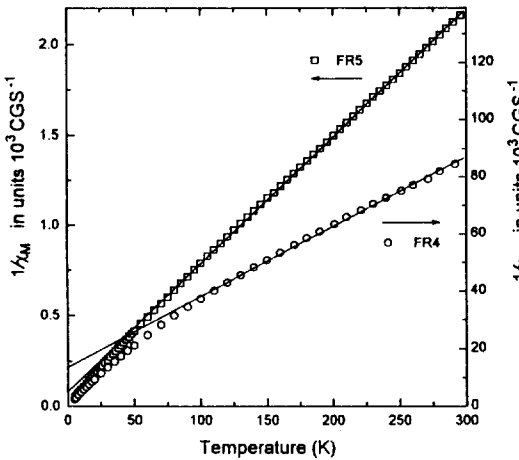


그림 2. Reciprocal susceptibility of Hoya FR5 and FR4 paramagnetic glasses at magnetic field 5 kG.

IV. 결과 및 논의

희토류 산화물의 자기적 특이성은 쌍으로 채워져있지 않은 전자들이 lanthanide contraction으로 4f 궤도에 국소화되기 때문에 나타나며 대체로 Curie 또는 Curie-Weiss 법칙에 따르는 것으로 알려져 있다. 특히 이들 산화물의 실효 자기모멘트는 4f 궤도의 전자수에 관계된다.<sup>[12,17]</sup> 사용된 시료중 FR5 유리의 경우의 기능성 이온인 Tb<sup>3+</sup>에는 8개의 4f 전자가 존재하고 바닥상태는 분광학적으로 <sup>7</sup>F<sub>6</sub>이며, FR4 유리의 경우의 기능성 이온인 Ce<sup>3+</sup>에는 1개의 4f 전자가 존재하여 바닥상태는 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>이다. 따라서 본 논문에서는 두 이온의 구조적 상이점을 고려하여 자기적 특성 실험 결과를 우선적으로 분석하고 다음 자기광학 특성 실험 결과를 논의하였다.

그림 2는 FR5 및 FR4 시료에서 자기장세기를 5 kG로 고정하고 5 K에서 300 K까지의 온도에 따른 역자기감수율 χ<sub>M</sub>(T)<sup>-1</sup>의 변화를 각각 측정한 결과이다. 그림 2의 고온영역에서(100 K 이상) 자기감수율은 식 (7)의 변형으로 아래 Curie-Weiss형에 따름을 보여주고 있다.

$$\chi_M(T) = \frac{C}{(T - \theta)} \tag{10a}$$

$$C = \frac{Ng_{eff}^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B} \tag{10b}$$

이며, C는 Curie 상수이고 g<sub>eff</sub>는 유리의 실효 g인자이며 희토류 자유 이온의 g<sub>J</sub>와 구별하였다. 100 K 이상의 고

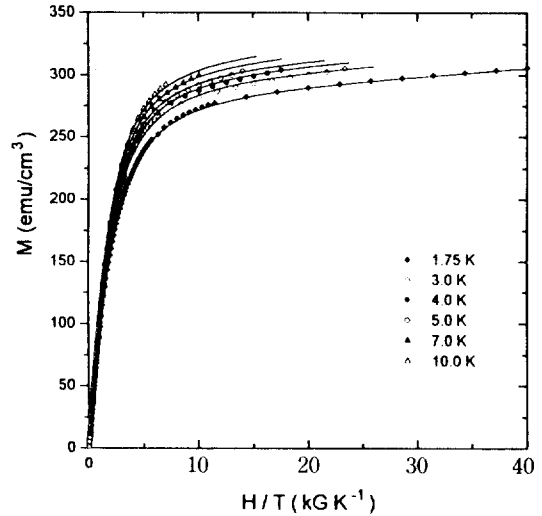


그림 3. Magnetization of Hoya FR5 glass at some cryogenic temperatures.

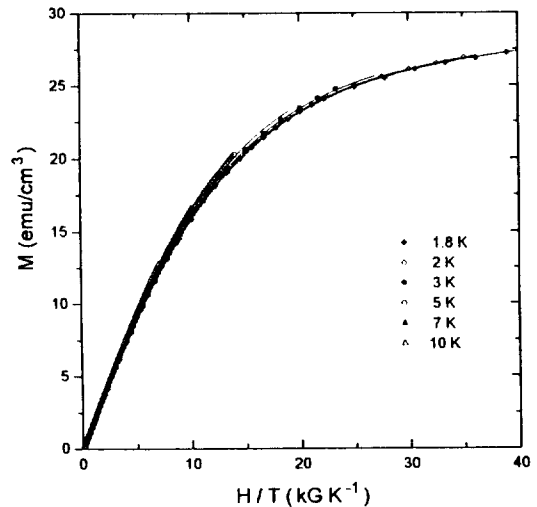


그림 4. Magnetization of Hoya FR4 glass at some cryogenic temperatures.

온영역 data만을 사용하여 직선으로 맞춘 결과 FR5의 경우 Tb<sup>3+</sup> 화합물의 Curie 상수 C<sub>Tb</sub> = 0.142(K<sup>-1</sup>)이고 Weiss 상수는 θ<sub>Tb</sub> = -11.5(K)였으며, FR4의 경우 C<sub>Ce</sub> = 0.407 × 10<sup>-2</sup>(K<sup>-1</sup>)이고 θ<sub>Ce</sub> = -55.7(K)이었다. 참고로 Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 θ<sub>Tb</sub> 값은 -12.7(K)로 알려져 있다.<sup>[18]</sup> 한편 저온영역에서(그림 2에서 50 K 이하) χ<sub>M</sub>은 Curie-Weiss형에서 벗어나 원점을 향하여 아래로 구부러졌으며 이와같은 저온에서의 상차성 메커니즘은 본 실험결과만으로는 확정하기 어렵다고 생각된다. 따라서 B<sub>J</sub> 곡선에서

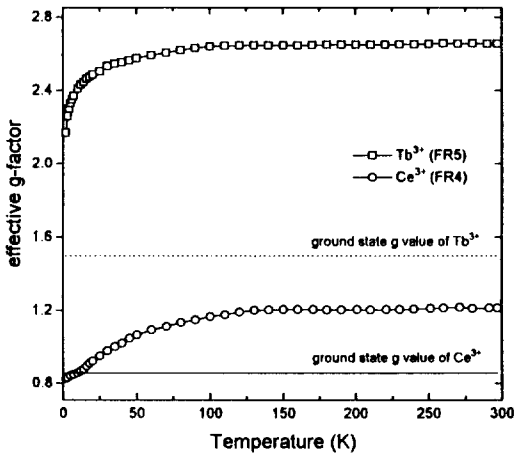


그림 5. Temperature dependent effective Lande g-factor of the rare earth ions doped in Hoya FR5 and FR4 glasses from magnetization and susceptibility.

$N$  및  $g_{eff}$  값을 구하여 위 저온특성을 다른 측면에서 알아보기 위하여 저온 고자장에서 자기화를 상세히 측정하였다.

그림 3 및 4는 1.75 K에서 10 K까지의 온도  $T$  영역에서 자기장세기  $H$ 를 70 kG까지 증가시킬 때 FR5 및 FR4의 자기화  $M$ 값을  $H/T$  함수로 나타낸 결과이다. 그림에서  $H/T$ 가  $2 \text{ kG} \cdot \text{K}^{-1}$  이하인 영역에서는 온도와 무관하게  $M$ 은 직선적으로 증가하여 Curie 상자성을 나타내지만,  $H/T$ 가 보다 큰 영역에서는 FR5는 각 온도에 따라 각각 다른 포화 자기화  $M_0$ 에 근접하였다. 모든  $\text{Tb}^{3+}$  및  $\text{Ce}^{3+}$  이온이 동일한 바닥상태 즉  $J=6$  및  $J=5/2$ 에 있다고 가정하고 자유 이온에 적용되는 식 (3)에서  $g_L$ 를  $g_{eff}$ 로 바꾸고, 고자장에서 FR5 상자성 유리의 특성을 보정하기 위한 보정항  $a \frac{H}{T}$ 를 첨가하여

$$M = N g_{eff} \mu_B J B_J \left[ \left( \frac{g_{eff} \mu_B J}{k_B} \right) \left( \frac{H}{T} \right) \right] + a \frac{H}{T} \quad (11)$$

로 자기화  $M$ 을 다시 표현하였다. 여기서  $a$ 는 비례상수이다. (예 : 참고문헌[19]) 식 (11)에서  $N$ 과  $g_{eff}$  인자를 뱃음변수로 하여 최적화로 맞춤형 계산치가 그림의 실선이다. 이 경우 도출된  $N$ 값은  $N_{Tb} = (2.31 \pm 0.05) \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ,  $a_{Tb} = 6.7$  및  $N_{Ce} = (1.50 \pm 0.05) \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ,  $a_{Ce} \sim 0$ 였으며, 실효  $g$  인자  $g_{eff}$  값은 온도의 함수로 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 이 값들은 Butler와 Venturini [16]가 FR5를 시료로 온도 5 K 및 7 K에서 자기장세기를

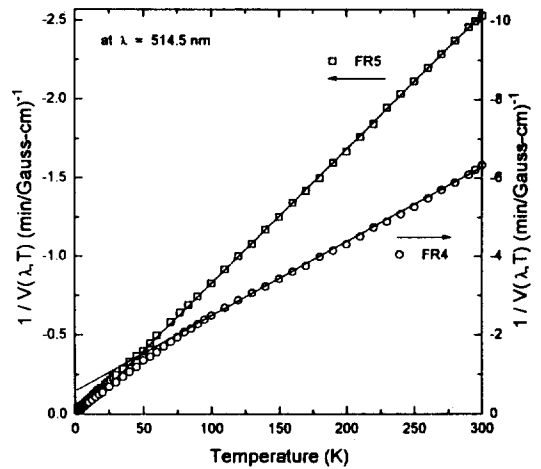


그림 6. Temperature dependent Verdet constant of Hoya FR5 and FR4 glasses at wavelength 514.5 nm and magnetic field 5 kG.

5 kG에서 50 kG까지 가변시키면서 측정한 실험치  $N_{Tb} = 2.5 \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  및  $g_{eff}$  값 2.3과 거의 일치한다.

그림 5는 온도에 따른 실효  $g$  인자 변화를 나타낸 것이다. 10 K 이하 저온의 data는 그림 3 및 4의 자기화  $M$  곡선에 맞춤형 결과값이고 그 이상의 고온 data는 그림 2의  $\chi_M$  곡선의 순간기울기와 식 (10)에서 산출한 값이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 온도  $T$ 가 2 K 이하로 감소하면 FR5 및 FR4의  $g_{eff}$ 는 18% 및 31% 감소하여  $\text{Tb}^{3+}$  자유 이온의 계산치  $g_J = 1.5$  및  $\text{Ce}^{3+}$ 의  $g_J = 0.857$ 에 근접하였다.  $g_{eff}$ 의 저온에서 온도 의존성은 희토류 이온의 4f 전자껍질 특성과 복합 Hamiltonian [20]으로 해석될 수도 있지만 본 논문에서는 단순한 맞춤형 뱃음변수로 간주하고 Faraday 회전효과의 계산에 사용하고저 한다.

그림 6은 파장  $\lambda = 514.5 \text{ nm}$ 에서 자기장세기  $H = 5 \text{ kG}$ 일 때 Faraday 회전각을 측정하여 산출한 Verdet 상수  $V(\lambda, T)$ 의 역수를 4.2 K에서 300 K까지 온도의 함수로 나타낸 것이다. 그림 6에서 실선은 100 K 이상 data를 식 (8) 및 식 (10-a)에서 도출한 아래 Curie-Weiss 법칙과 동일형의 직선에 맞춤형 결과이다.

$$V(\lambda, T) = \frac{V_P}{T - \theta} + V_D \quad (12)$$

여기서  $V_P$ 는 Curie 상수에 대응되는 상자성 유리의 Verdet 비례상수로 FR5의 경우  $V_{PTb} = -138.9 \text{ (min/G} \cdot \text{cm)} \text{ (K}^{-1}\text{)}$ ,  $\theta_{Tb} = -11.5 \text{ (K}^{-1}\text{)}$ ,  $V_{D,FR5} = 0.055 \text{ (min/G} \cdot \text{cm)}$ 이며,

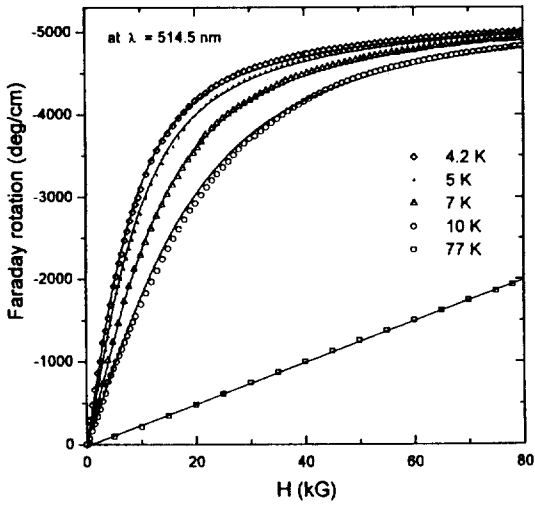


그림 7. Faraday rotation of Hoya FR5 glass at some cryogenic temperatures and wavelength 514.5 nm.

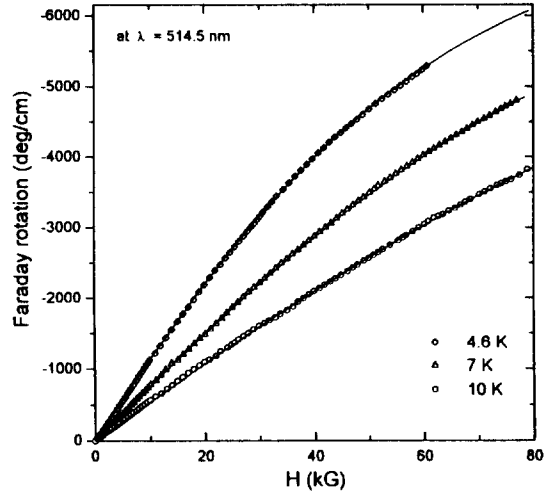


그림 8. Faraday rotation of Hoya FR4 glass at some cryogenic temperatures and wavelength 514.5 nm.

FR4 경우  $V_{PCr} = -66.2$ ,  $\theta_{Cr} = -55.7$ ,  $V_{DFR4} = 0.026$ 이다. 따라서 식 (2), 식 (10) 및 식 (12)에서

$$V_P(\lambda, T) = \frac{V_P}{C} \tag{13}$$

이므로, 자기감수율에서 구한 Curie 상수  $C_{Tb}$  및  $C_{Ce}$ 를 사용하여 온도와 무관한 파장 Verdet 상수  $V_P(\lambda)$ 를 구하면  $V_P(\lambda)_{Tb} = -16.3 \text{ deg/G}\cdot\text{cm}$ 이고,  $V_P(\lambda)_{Ce} = -271 \text{ deg/G}\cdot\text{cm}$ 이었다. 참고로 FR4의 반자성 값은 La 이온이 첨가된 인산염유리인 경우  $V_D = 0.021$ <sup>[21]</sup>과 비교된다.

그림 7 및 8은 파장 514.5 nm 사용하여 4.2 K에서 10 K까지의 저온에서 80 kG까지의 자기장의 세기에 따른 FR5 및 FR4의 Faraday 회전각  $\theta_F$  변화를 나타낸 결과이며, 그림 3 및 4의 자기화  $M$  곡선에서와 같은 포화 현상을 나타내고 있다. 저온에서의 반자성항을 무시하면 식 (1) 및 (6)에서

$$\theta_F = V_P(\lambda)MI \tag{14}$$

이므로 자기적 특성 측정 결과에서 얻은  $N$ ,  $g_{eff}$  및  $l = 1 \text{ mm}$ 을 대입한 맞춤으로 구한  $V_P(\lambda)$ 를 식 (14)에 넣어서 계산된 결과를 그림 7 및 8의 실선으로 표시하였다. 이 저온 고자장 실험에서 구한  $V_P(\lambda)$ 값은  $V_P(\lambda)_{Tb} = -16.3 \pm 0.5 \text{ deg/G}\cdot\text{cm}$  및  $V_P(\lambda)_{Ce} = -271 \pm 5 \text{ deg/G}\cdot\text{cm}$ 였다. 이 결과는  $\chi_M^{-1}$  및  $V(\lambda, T)^{-1}$ 의 Curie-Weiss형에서 구한 결과와 일치한다.

아르곤 및 헬륨네온 레이저를 사용하여 FR5 및 FR4

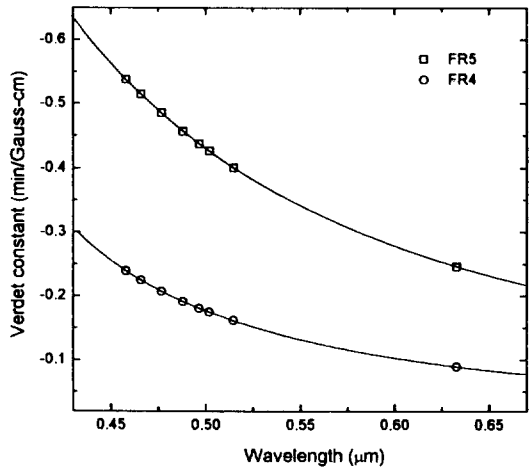


그림 9. Verdet constant of Hoya FR5 and FR4 glasses as a function of wavelength at room temperature.

유리의 파장에 따른 Verdet 상수를 상온(300 K)에서 측정한 결과를 그림 9에 나타내었다.  $Tb^{3+}$  및  $Ce^{3+}$  이온에서 양자상태의 바닥준위로부터 들뜬준위로의 전기쌍극자 전이들의 합은 4f 준위의 중앙점에서 5d 준위 중앙점으로서의 단일 전이효과로 대체한 경우 유효 전이흡수파장을  $\lambda_n$ 라 하면,<sup>[22]</sup> 식 (2), 식 (8) 및 식 (9)를 결합하면 아래와 같이 Verdet 상수를 기술할 수 있다.

$$V(\lambda, T)|_{T=300} = \frac{P}{(\lambda^2 - \lambda_n^2)} + V_D \tag{15-a}$$

$$\text{단, } P = (V_0 c_n) \frac{Ng_m^2 u_B^2 J(J+1)}{3k_B(T-\theta)} \Big|_{T=300} \quad (15-b)$$

이 식 (15)에서 맞추하여 계산된 결과를 그림 9에서 선으로 표시하였다. FR5의 경우  $P = -0.115(\text{min/G}\cdot\text{cm})\cdot(\mu\text{m})^2$ ,  $\lambda_w = 0.122 \mu\text{m}$ 를 얻었으며 이 값은  $\text{Tb}^{3+}$  이온이 첨가된 봉산유리에서 계산된  $\lambda_w = 0.126 \mu\text{m}$ 와 일치한다.<sup>[13][22]</sup> FR4의 경우  $P = -0.038 (\text{min/G}\cdot\text{cm})\cdot(\mu\text{m})^2$ ,  $\lambda_w = 0.258 \mu\text{m}$ 이고,  $\text{Ce}^{3+}$  이온이 첨가된 인산유리의 경우 계산값  $\lambda_w = 0.200 \mu\text{m}$ <sup>[22]</sup>와 비교된다. 한편 앞에서 구한  $J, N, g_M$  값들을 대입하여,  $V_0 c_n$  값을 구해보면, FR5의 경우  $V_0 c_n = -4.14(\text{deg/G}\cdot\text{cm})\cdot\mu\text{m}^2$ 이고, 이것을 역으로 식 (2)와 식 (15)에 대입하여  $V_p(\lambda)_{FR}$ 를 구해보면  $-16.6 (\text{deg/G}\cdot\text{cm})$ 이었으며 FR4의 경우  $V_0 c_n = -54.6 ((\text{deg/G}\cdot\text{cm})\cdot\text{m}^2)$ 이고,  $V_p(\lambda)_{FR} = -275 (\text{deg/G}\cdot\text{cm})$ 로 본 논문의 두가지 다른 방식으로 구한 상자성 파장관련 계수와 일치하였다.

### V. 결 론

회토류  $\text{Tb}^{3+}$  및  $\text{Ce}^{3+}$  이온이 각각 첨가된 Hoya FR5 및 FR4 Faraday 상자성 유리의 Verdet 상수  $V_p(\lambda, T)$ 를 분산관련 계수  $V_p(\lambda)$ 와 온도관련 계수인 자기감수율  $\chi_M(T)$ 의 곱으로 보고  $V_p(\lambda)$  계수를 1) 고온에서  $\chi_M^{-1}$  및  $V(\lambda, T)^{-1}$ 의 Curie-Weiss 형에 맞추하여 구하고 2) 자기화  $M$  및 Faraday 회전각  $\theta_F$ 의 저온·고자장에서 포화현상을 Brillouin 함수형에 맞추하여 구하였으며 3) 상온에서  $V(\lambda, T)$ 의 파장에 따른 분산특성에서 구하였다. 그 결과  $V_p(\lambda)$ 는  $\pm 2\%$  오차범위내에서 FR5의 경우  $-16.3 \text{ deg/G}\cdot\text{cm}$  및 FR4의 경우  $-271 \text{ deg/G}\cdot\text{cm}$ 으로 일치하였다. 또한 본 맞춤과정에서 유리속에 첨가된 회토류 이온  $\text{Tb}^{3+}$  및  $\text{Ce}^{3+}$ 의 단위체적당 이온수  $N$ , Curie 상수  $C$  및 실효  $g$ 인자를 각각 구하였다. 이상 두 시료에 관한 실험의 결과를 종합하면 FR5 및 FR4의 Verdet 상수가  $\text{Tb}^{3+}$  및  $\text{Ce}^{3+}$ 의 자기감수율 및 전기쌍극자 전이흡수 특성에 따라 결정됨을 알 수 있었다. 즉 자기감수율 계수는 FR5가 FR4 보다 35배만큼 크고, 파장관련 계수  $V_p(\lambda)$ 는 FR5가 FR4 보다 17배 정도 작았으나 상온에서의 FR5 Verdet 상수는 FR4 보다 2.7배 크며 알려진 결과<sup>[8]</sup>와 일치하였다.

### 감사의 글

본 연구의 주요 측정은 기초과학지원연구소의 Spect-

romag4000 및 MPMS7 SQUID 기기를 사용하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. J. Gaunther, P. Narum and R. W. Boyd, *Opt. Lett.* **11**, 623(1986).
- [2] K. Shiraishi, S. Sugagya, and S. Kawakami, *Appl. Opt.* **23**, 1103(1984).
- [3] J. F. Dillon, *J. Appl. Phys.* **39**, 922(1968).
- [4] S. T. Kirsch, W. A. Biolsi, S. L. Blank, P. K. Tien, R. J. Martin, P. M. Bridenbaugh, and P. Grabbe, *J. Appl. Phys.* **52**, 3190(1981).
- [5] J. A. Wunderlich and L. G. DeShazer, *Appl. Opt.* **16**, 1584(1977).
- [6] F. J. Sansalone, *Appl. Opt.* **10**, 2329(1971).
- [7] A. E. Turner, R. L. Gunshor, and S. Datta, *Appl. Opt.* **22**, 3152(1983).
- [8] Hoya Faraday Rotator Glass Catalogue.
- [9] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, (Addison-Wesley, London, 1972) pp 100-111.
- [10] Y. R. Shen, *Phys. Rev.* **133**, A511(1964).
- [11] J. H. Van Vleck and M. H. Hebb, *Phys. Rev.* **46**, 17(1934).
- [12] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*(6th edn), (Wiley, New York, 1986) pp 400-416.
- [13] N. F. Borrelli, *J. Chem. Phys.* **41**, 3289(1964).
- [14] J. A. Davis and R. M. Bunch, *Appl. Opt.* **23**, 633(1984).
- [15] M. A. Butler and E. L. Venturini, *Appl. Opt.* **26**, 1581(1987).
- [16] S. Y. Kim, Y. H. Won, and H. N. Kim, *J. Appl. Phys.* **67**, 7026(1990).
- [17] R. Kubo and T. Nagamiya, *Solid State Physics*, (McGraw-Hill, New York, 1969) pp. 450-459.
- [18] D. H. Martin, *Magnetism in Solids*, (London Iliffe Books Ltd., London, 1967) pp. 181-204.
- [19] S. Chikazumi and N. Miuraed, *Physics in High Magnetic Fields*, (Springer-Verlag, Berlin, 1981) pp. 326-335.
- [20] R. M. White, *Quantum Theory of Magnetism*, (Springer-Verlag, Berlin, 1983) pp. 55-96.
- [21] S. B. Berger, C. B. Rubinstein, C. R. Kurkjian, and A. W. Treptow, *Phys. Rev.* **133**, A723(1964).
- [22] G. H. Dieke and H. M. Crosswhite, *Appl. Opt.* **2**, 675(1963).

## Faraday Rotation of the Hoya FR5 and FR4 Glasses at Cryogenic Temperature

Hyeon-Gon Lee, Y. H. Won

*Department of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, Korea*

G. S. Lee

*Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-333, Korea*

(Received: July 21, 1995)

Measurements of the Faraday rotation and magnetization of terbium-doped Hoya FR5 glass and cerium-doped Hoya FR4 glass have been made as a function of temperature  $T$  in the range 4.2 K~10 K and of magnetic field  $H$  of up to 80 kG at the  $\text{Ar}^+$  laser wavelength of 514.5nm. The saturations of magnetization and Faraday rotation above  $H/T > 5 \text{ kG} \cdot \text{K}^{-1}$  can be analyzed by the quantum theory of paramagnetism. Calculated parameters show that the large Verdet constant of  $\text{Ce}^{3+}$  glass is due to the effective  $4f \rightarrow 5d$  electric dipole transition effect and that of  $\text{Tb}^{3+}$  glass is due to the magnetization effect.