

# 현대물리실험

2011년 2학기

대구대학교 사범대학  
과학교육학부 물리교육전공



## 목차

1. 전자의 비전하( $e/m$ ) 측정실험 .....	1
2. Frank-Herz 실험 .....	5
3. ESR 장치를 이용한 $g$ -factor 측정실험 .....	9
4. Zeeman 효과 측정실험 .....	23
5. X-선 실험: Duane-Hunt의 법칙 .....	33
6. Hall 계수 측정실험 .....	43
*참고자료(매뉴얼 영문원본) .....	51



# 1. 전자의 비전하(e/m) 측정실험

## (1) 실험목적

전자의 전하와 질량의 비를 측정하며 대전입자가 자기장 내에서 운동할 때 받는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이해한다.

## (2) 실험원리

가열된 필라멘트 음극에 의해서 방출된 전자는 양극에 가해진 전위차에 의해 가속된다. 양극에 있는 작은 구멍을 통하여 전자가 자기장이 있는 곳으로 들어가면 전자는 속도와 자기장에 수직인 방향으로 힘을 받아 원운동을 한다. 이 실험기구의 관 내부에는 저압의 헬륨Gas가 들어 있어서 전자가 수은과 충돌하여 헬륨Gas를 여기(또는 들뜸, excitation) 시킨다. 여기 된 헬륨Gas에서 나오는 형광에 의하여 전자의 궤도와 위치를 결정할 수 있다.

전하량이  $e$ 인 전자가 전위차  $V$ 인 곳에서 가속될 때 얻는 운동 에너지는  $E = \frac{mv^2}{2} = eV$  이므로 전자의 질량을  $m$  이라고 할 때 전자의 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (1)$$

자기장  $B$  속에서 속도  $v$ 로 운동하는 전자가 받는 로렌츠 힘  $F$ 는

$$F = -e v \times B \quad (2)$$

이다. 이 힘은 속도에 수직인 방향으로 작용하므로 구심력이 되어 전자를 원운동하게 한다. 원운동의 반경을  $r$ 이라고 하면 전자에 작용하는 힘은 다음과 같이 주어진다.

$$F = \frac{mv^2}{r} = evB \quad (3)$$

이다. 식 (I)과 (III)으로부터

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2} \quad (4)$$

이 된다. 균일한 자기장은 헬름홀츠(Helmholtz) 코일에 의하여 생긴다. 코일의 반경이 R이고, 코일로부터 x만큼 떨어진 점에서의 자기장의 크기는 다음과 같다.

$$B = \frac{\mu_0 N I R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (5)$$

위 식에서  $\mu_0$ 는 진공 상태의 투자율( $4\pi \times 10^{-7} H/M$ ), N은 코일의 감은 총 횟수, I는 코일에 흐르는 전류이다.

### (3) 실험기자재

전자의 비전하 측정장치(SG-6132D)

전자의 비전하 전원장치(SG-6134D)

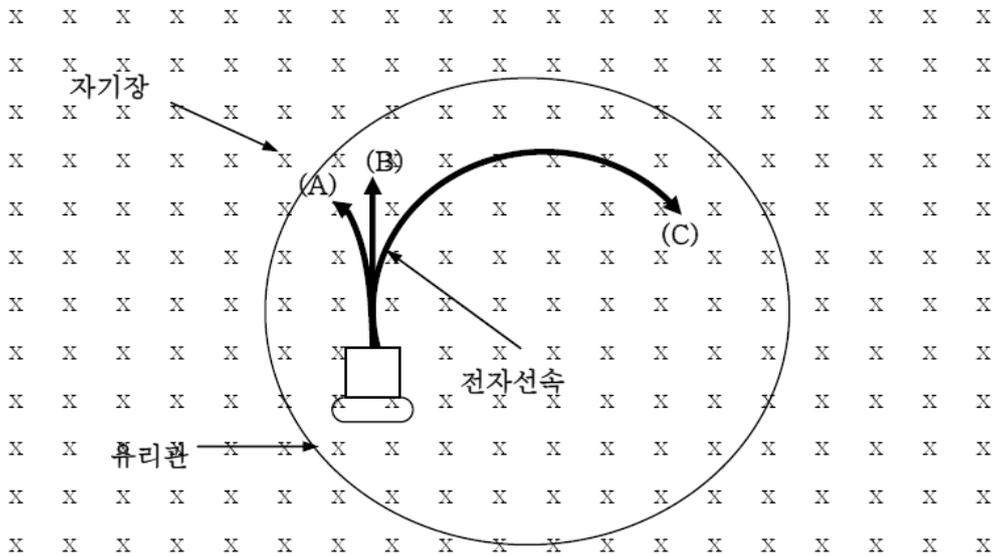


그림 1. e/m 측정관의 구조

#### 사용 주의사항

- 램프가 코일에 평행하게 고정되어 있지 않으면 전자선속이 안쪽이나 바깥쪽으로 나선형을 그리면서 휘어질 것이다. 이는 램프를 조금만 돌림으로서 원형으로 교정할 수 있다.

#### (4) 실험방법

- ① 전자의 비전하 측정장치에 전자의 비전하 전원장치를 연결한다.
- ② 필라멘트에 6.3V AC전원을 가한다. 필라멘트가 달구어질 때까지 2~3분 기다린다.
- ③ 전자 가속 전압을 0 V에서부터 서서히 증가 시켜 가속 전압이 150V가 되게 한다.
- ④ 필라멘트가 달구어지면 양전극의 작은 구멍을 통과하는 전자선 속이 관찰된다. 양전극에 흐르는 전류를 측정한다.
- ⑤ 헬름홀츠 코일의 전원에서 전류 조정 나사를 돌려 전류를 변화시키면 전자선 속의 방향이 변하는 것을 관찰할 수 있다.
- ⑥ 헬름홀츠 코일에 흐르는 전류를 차단시켰을 때 전자선 속이 직선으로 진행하는지를 관찰하라. 만일, 직선으로 진행하지 않을 경우에는 코일에 흐르는 전류를 미소 변화시켜 전자선 속이 직선으로 진행하게 하고 이때 코일에 흐르는 전류  $I_0$ 를 기록한다.
- ⑦ 헬름홀츠 코일의 전류를 증가시켜 전자선 속의 제일 바깥 부분이 눈금자의 끝 눈금에 도달하게 하고 이때의 전류  $I'$ 를 기록하라.
- ⑧ 다른 눈금에 대해서도 과정 ⑦을 반복해서 측정한다.
- ⑨ 다른 가속 전압에 대해서도 과정 ⑥, ⑦, ⑧을 반복해서 측정한다.
- ⑩ 측정값으로부터 식(4), (5)를 이용하여  $e/m$ 를 구하고  $\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11} C/kg$  과 비교한다.

(5) 측정 예

측정값

① 코일의 반경 :        m, 코일의 간격(2×) :        m, 감의 횟수(N) :

② 가속 전압 :        V,  $I_0 =$         A

	반경( $r$ )	$I'$	$I = I' - I_0$	B	e/m
1					
2					
3					
4					
5					
평균					

② 가속 전압 :        V,  $I_0 =$         A

	반경( $r$ )	$I'$	$I = I' - I_0$	B	e/m
1					
2					
3					
4					
5					
평균					

## 2. Frank-Hertz 실험

### (1) 실험목적

전자를 가속시켜 원자에 충돌시켰을 때 전자들의 에너지 변화를 관찰하여 본다.

### (2) 실험원리

열 음극에서 방출된 전자들은 수은 (또는 다른 기체)이 들어있는 관 내의 음극 C와 양극 A사이에서 가속되면서 수은 원자들과의 탄성충돌에 의해 산란 된다. 양극전압이 약 4.9 V가 되면 전자들의 운동에너지는 수은 원자의 가전자들을 비 탄성충돌에 의해  $6^3P^1$  레벨까지 올려놓기에 충분한 에너지가 된다. 이 때 전자들은 에너지를 잃어버리기 때문에 더 이상 전위가 양극보다 약간 낮은 전극 S까지 다다르지 못하게 된다. 이 때 전류  $I_S$ 는 최소가 된다. 양극전압을 더 높여가면 전자들의 운동에너지는 더욱 높아져서 여분의 에너지에 의한 전류  $I_S$ 의 증가가 시작된다. 양극의 전위가  $U_A = 2 \times 4.9 V$ 가 될 때까지 전자들의 운동에너지는 한 전자가 계속해서 두 개의 원자를 여기시킬 수 있게 된다. 이 때 두 번째의 낮은 전류 상태가 일어난다.  $U_A$ 에 따른  $I_S$ 의 그래프를 그리면 전류가 높은 점들과 낮은 점들끼리의 간격이 일정하게 나타난다.

양극과 음극 사이의 전압  $U_A$ 는

$$U_A = U + (\Phi_A - \Phi_C) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $U$ 는 가해진 전압이고  $\Phi_A$ 와  $\Phi_C$ 는 각각 양극과 음극의 일함수이다. 여기에너지  $E_A$ 는 낮은 점들 간의 전위차로 결정되기 때문에 여기서 일함수들은 별 의미가 없다. 고전적인 이론에 의하면 수은 원자들이 여기 되는 에너지 레벨은 임의적이다. 그러나 양자이론에 의하면 기본적인 과정에서 원자들은 어떤 에너지 간격이 있어야만 한다. 이러한 견지에서 에 다른 곡선의 의미가 처음으로 설명되었고 이것이 곧 양자이론을 뒷받침해 주는 계기가 되었다.

여기 된 수은 원자들은 흡수한 에너지를 빛으로 방출하게 되는데 여기에너지가 4.9 eV일 때 이에 해당하는 광자의 파장은

$$\lambda = \frac{Ch}{E_A} = 253 \text{ nm} \quad (2)$$

가 된다.

여기서  $C = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$  이고,  $h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  이다.

이 파장은 자외선영역(UV)에 해당한다.

### (3) 실험기자재

프랑크-헤르츠 실험 장치(SG-6142)

구성 및 규격

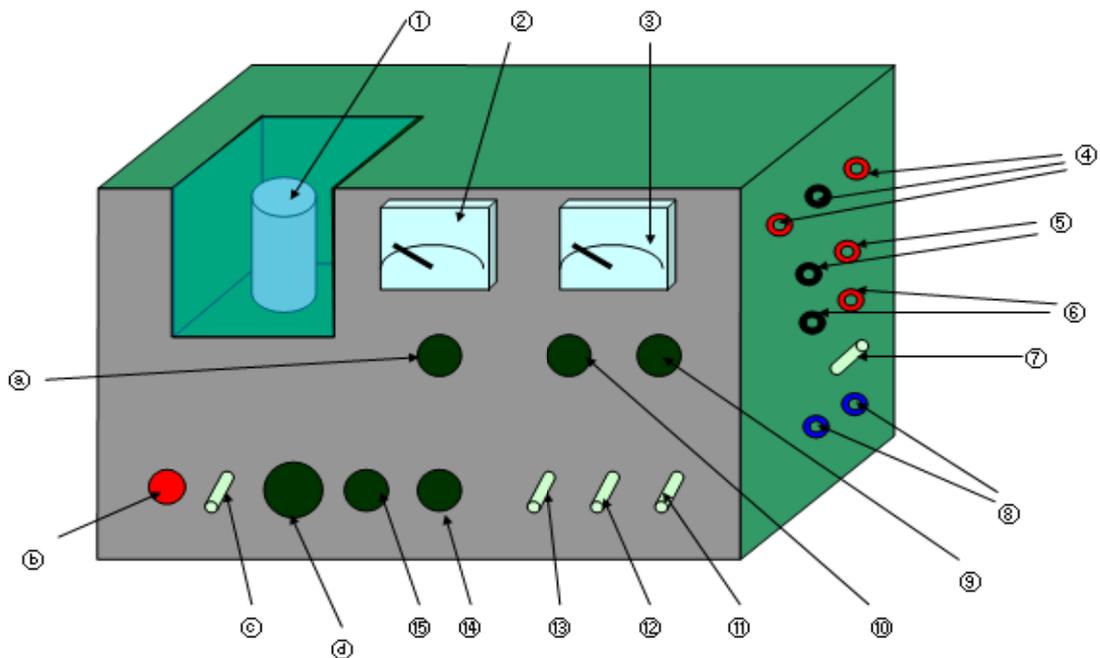


그림 1. Frank-Hertz 실험장치의 구성 및 규격

- ① 프랑크-헤르츠 관 (네온 봉 입)
- ② 전압계
- ③ 전류계
- ④ 오실로스코프 연결 단자
- ⑤ G1(2)-P 전류 외부 측정 단자
- ⑥ G2-K 전압 외부 측정 단자
- ⑦ Heater 전류 측정 mode (측정 시 open mode, 미 측정 시 short mode)
- ⑧ Heater 전류 측정 단자

- ⑨ Gain 조절 손잡이 : 전류계의 전류 변동 조정 (지시 눈금이 위를 향하도록 하는 것이 적당)
- ⑩ 영점 조절 손잡이 : 전류계의 영점을 조정한다.
- ⑪ OSC-Meter mode 선택 스위치
- ⑫ EXT - INT mode 선택 스위치 : 외부 전압계와 전류계 사용 시 EXT mode, 내부 전압계와 전류계 사용 시 INT mode
- ⑬ AUTO-MANU mode 선택 스위치 : X-Y 기록계를 사용할 때나, 자동으로 전압을 증가 시키며 전류의 변화를 관측할 때에는 AUTO mode를 선택하고, 수동으로 전압을 상승 시킬 때에는 MANU mode를 선택 한다.
- ⑭ G2-P 조절 손잡이 : 프랑크-헤르츠 관의 제2그리드와 플레이트 간의 전압 조절 손잡이
- ⑮ G2-K 조절 손잡이 : 프랑크-헤르츠 관의 제2그리드와 캐소드 간의 전압 조절 손잡이
- ㉑ G1-K 조절 손잡이 : 프랑크-헤르츠 관의 제1그리드와 캐소드 간의 전류 조절 손잡이
- ㉒ 전원 램프
- ㉓ 전원 스위치
- ㉔ Heater 전류 조절 손잡이

**사용 주의사항**

- 프랑크-헤르츠 관을 다룰 때에는 관이 파손되지 않도록 주의하고, 관의 유리부분을 손과 직접 접촉되지 않도록 주의한다.
- Heater 전류는 많이 흐르지 않도록 하여 실험하도록 한다.

**(4) 실험방법**

- ① 장치는 다음과 같이 초기 설정을 한다.  
전원 스위치는 OFF, 각각의 조절 손잡이는 최소, 모드 선택 스위치는 아래로 하여 각각 MANUAL, INT, OSC를 선택한다.  
우측 면에 있는 HEATER 전류 측정 선택 스위치는 SHORT로 선택한다. (OPEN으로 선택할 때에는 교류 전류계를 반드시 연결해야 한다.)
- ② 판넬면의 뚜껑을 열어 프랑크-헤르츠 관을 삽입 한다. (유리관을 삽입할 때는 유리관에 지문이 생기지 않도록 주의한다.)  
*\*장치가 삽입되어 있으므로 눈으로 확인만 한다.*
- ③ 전원코드를 연결하고, 전원 스위치를 켜다.
- ④ 영점 조절 손잡이(ZERO. ADJ)를 조절하여 전류계의 영점을 조절한다.

- ⑤ GAIN 조절 손잡이를 적당히 조절한다. (표시된 부분이 위쪽을 향할 때가 대체로 적합하다.)
- 이 조절 손잡이는 G2-P 전류의 증폭을 조절하는 손잡이이다.
- ⑥ G2-K 조절 손잡이를 조절하여 전압계가 약30V가 되도록 한다.
- ⑦ HEATER 전류 조절 손잡이를 중간으로 조절하고, G1-K 조절 손잡이를 조금씩 증가 시켰을 때 전류계의 눈금이 가장 잘 움직이는 위치에서 HEATER와 G1-K의 손잡이를 고정한다. ( G1-K 손잡이를 조절하여도 전류계의 변화가 적으면, G1-K 조절 손잡이를 최소로 한 후, HEATER 전류를 조금 증가 시키고, G1-K 조절 손잡이를 조절하여 보아라. 전류계의 눈금이 영역을 벗어나면 HEATER 전류를 감소 시킨 후, G1-K 조절 손잡이를 조절하여 보아라. 단, HEATER 전류는 될 수 있는 한 적게 하는 것이 좋다.)
- ⑧ 다시 G2-K 조절 손잡이를 최소로 하고, 영점 조절 손잡이를 조절하여 전압계의 영점을 조정한다.
- ⑨ G2-K 조절 손잡이를 돌려 전압계의 눈금이 30V가 되게 조작한다.
- ⑩ G2-P 조절 손잡이를 돌려 전류계의 눈금이 30uA가 되게 조정한다. (현재 G1-K 의 전압 조절에 의해 전류계의 눈금은 30uA이상에 있을 것이다. 이때 G2-P를 이용해 전류계의 눈금을 30uA가 되게 조정한다.)
- ⑪ G2-K 조절 손잡이를 최소로 하고, 다시 영점 조정한다.
- ⑫ 이제 G2-K조절 손잡이를 돌려 전압을 증가 시키면서 전압에 따른 전류계의 눈금의 변화를 측정 기록한다. 그 결과를 이용하여 전압과 전류에 따른 그래프를 그린다. ( X-Y기록계를 이용한 측정 시 : Mode 선택 스위치를 Auto로 조정하고 G2-K스위치를 최대로 하고, 전압과 전류의 변화를 관찰한다. )
- ⑬ 전압의 증가에 따른 전류의 증가 감소의 변화가 일어나지 않을 때에는 G2-P조절 손잡이와 Heater 전류 조절 손잡이를 조절한다.

### 3. ESR 장치를 이용한 g-factor 측정실험

#### (1) 실험목적

- 선택한 주기  $\nu$ 의 함수인 공명 자기장  $B_0$  측정
- DPPH의 g-factor 측정
- 공명 신호의 선폭  $\delta B_0$  측정

#### (2) 기본원리

1945년 E. K. Zavoisky에 의해 발견된 이후, 전자스핀공명(Electron Spin Resonance, ESR)은 물리, 화학, 생물 그리고 의학 분야에서 분자와 결정의 구조, 화학반응 그리고 다른 여러 가지 문제를 조사하는 중요한 방법으로 현재까지 발전되고 있다. 전자스핀공명은 전자의 스핀상태를 분할시켜주는 외부 자기장내에 있는 상자성체 물질에 의한 고주파 복사의 흡수에 기초한다.

전자스핀공명은 상자성체 물질로 제한되는데 그 이유는 상자성체 물질에서는 전자의 궤도 각운동량과 전자의 스핀이 총각운동량이 0이 되지 않도록 결정한다. 적절한 화합물의 예는 원자의 내부껍질이 완전히 채워지지 않은 전이금속과 희토류이고, 상자성체 상태에서는 격자빈자리를 가진 결정 혹은 개별 홀전자(unpaired electron)를 포함하는 유기 분자(자유 라디칼)이다.

총 각운동량  $\vec{J}$ 와 관련된 자기 모멘트는

$$\vec{\mu}_J = -g_J \cdot \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \vec{J} \quad (1)$$

$$\left( \mu_B = \frac{\hbar \cdot e}{2 \cdot m_e}, \hbar = \frac{h}{2\pi}, \mu_B: \text{Bohr 마그네톤}, h: \text{Plank 상수}, \right.$$

$g_J: \text{Landé splitting factor}, m_e: \text{전자의 질량}, e: \text{전자의 전하량} \left. \right)$

이며, 자기장  $\vec{B}_0$  내에서 자기 모멘트  $\vec{\mu}_J$ 는 퍼텐셜 에너지

$$E = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B}_0 \quad (2)$$

를 얻는다.

$E$ 는 양자화 되어있는데 그 이유는 자기 모멘트와 총 각운동량이 자기장에 비례하여 불연속적인 방향만을 할 수 있기 때문이다. 각각의 각운동량의 방향은 자기장 내의 특정 궤선을 가진 상태에 상응한다. 총 각운동량의 성분  $J_z$ 는 자기장에 평행하며,

$$J_z = \hbar \cdot m_J \quad (m_J = -J, -(J-1), \dots, J) \quad (3)$$

와 같이 주어지는데, 이 때 각운동량의 양자수는 정수 혹은 반정수이다. 즉, 궤선 에너지는

$$E = g_J \cdot \mu_B \cdot B_0 \cdot m_J \quad (m_J = -J, -(J-1), \dots, J) \quad (4)$$

와 같이 불연속적인 Zeeman 준위에 따라 분리된다.

에너지 분리는 전자스핀공명법으로 직접 측정될 수 있다. 측정을 위해 고주파 교류 자기장은  $\vec{B}_1 = \vec{B}_{HF} \cdot \sin(2\pi\nu \cdot t)$ 이며, 시료에서 방출되는 정적 자기장  $\vec{B}_0$ 에 수직인 고주파 교류자기장  $B_1$ 는 시료와 관련되어 있다. 교류 자기장의 에너지  $h \cdot \nu$ 가 이웃하고 있는 두 개의 에너지 준위 사이의 에너지차이  $\Delta E$ 와 같다면, 즉, 조건이

$$\Delta m_J = \pm 1 \quad (5)$$

$$h \cdot \nu = \Delta E = g_J \cdot \mu_B \cdot B_0 \quad (6)$$

로 만족하면, 교류자기장은 자기장  $B_0$ 내에서 하나의 방향으로부터 다른 방향으로 자기 모멘트의 “들뜸”을 유도한다. 즉, 이웃한 준위 사이에서 전이가 유도되고, 시료 내로 방출되는 교류 자기장으로부터 에너지의 흡수로 나타나는 공명효과가 관찰된다.

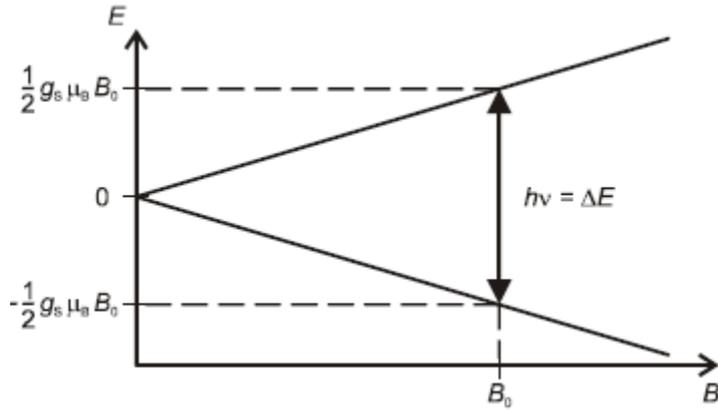


그림 1. 자기장에서 자유전자의 에너지 분리와 전자스핀 공명의 공명조건

수많은 화합물에서 궤도각운동량은 별로 중요하지 않으며, 전자의 스핀만 고려하자. 문제를 단순화하기 위해, 상황을 그림 4.1의 자유전자로 표현해보자. 여기서 총 각운동량은 단지 전자의 스핀  $\vec{s}$  이다. 각운동량 양자수는

$$J = s = \frac{1}{2} \text{이며, Landé 인자는 } g_J = g_s \approx 2.0023 \text{ 이다.}$$

자기장 내에서 전자의 에너지는

$$E = g_s \cdot \mu_B \cdot B_0 \cdot m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \quad (4a)$$

의 두 에너지로 분리되며, 이 두 에너지는 자기장에 따라 전자 스핀의 방향이 반평행과 평행에 해당된다. 두 개의 준위 사이의 전이에서 선택률 (4.5)는 자동으로 만족한다: 식 (4.6)과 같은 방법으로, 공명조건은

$$h \cdot \nu = g_s \cdot \mu_B \cdot B_0 \quad (6a)$$

와 같다.

만약 교류 자기장으로부터 흡수된 에너지를 자기장  $B_0$ 의 함수로서 고정 주파수  $\nu$ 에서 측정하였을 때, 반치폭  $\delta B_0$ 를 가진 흡수선을 측정된다. 가장 단순한 경우에, 균일한 자기장내에서 선폴은 전이의 불확정성  $\delta E$ 를 나타낸다. 불확정성의 원리에 따라

$$\delta E \cdot T \geq \frac{\hbar}{2} \quad (7)$$

가 되며, 여기서 T는 준위의 수명이다. 식 (5)로 인해,

$$\delta E = g \cdot \mu_B \cdot \delta B_0 \quad (8)$$

이 된다. 그래서 관계식

$$\delta B_0 = \frac{\hbar}{2 \cdot g_J \cdot \mu_B \cdot T} \quad (9)$$

는 진동수  $\nu$ 에 의존하지 않는다. 이 실험에서 시료의 ESR 스펙트럼내의 흡수선의 위치와 폭이 평가된다. ESR 스펙트럼 흡수선의 위치로부터, 시료의 Landé 인자  $g_J$ 는 식 (6)에 따라 결정된다. 자유 원자 혹은 이온의 경우에, 만약 자성이 전적으로 궤도 각운동량에 기인하면, Landé 인자  $g_J = 1$ 이 되며, 만약 스핀만이 자성에 기여한다면, Landé 인자는  $g_J \approx 2.0023$ 이 된다. 그러나 실제로 전자스핀공명 법에 의해 연구된 상자성체 중심은 이러한 사실과 잘 맞지 않는다. 상자성체가 결정격자에 삽입되거나 혹은 상자성체가 용액 안에 있는 용매화층으로 둘러싸일 때, 상자성체는 둘러싸인 원자에 의해 발생한 강한 전기장과 자기장을 받는다. 이들 전기장과 자기장은 에너지 이동을 유도하고 전자의 Zeeman 분리에 영향을 준다. 그렇게 함으로써 g-factor의 값이 변하게 된다. g-factor의 값은 자주 이방성이 되고 미세구조가 ESR 스펙트럼 내에서 발생한다. 그러므로 g-factor는 시료의 화학 구조와 전자결합을 나타낸다고 결론 지을 수 있다.

선폭으로부터 동적 특성이 유추될 수 있다. 만약 성분으로 분리되지 않은 미세구조를 무시한다면, 선폭은 자기모멘트의 정렬과는 반대되는 몇 가지 과정들에 의해 결정된다. 서로 정렬된 자기모멘트 사이의 상호작용은 스핀-스핀 완화(spin-spin relaxation)라고 하고, 자기모멘트와 전자기장의 요동은 자기모멘트와 전자기장의 요동 사이의 상호작용은 스핀-격자 완화(spin-lattice relaxation)이라고 하는데, 고체내의 격자 진동과 액체내의 원자의 열운동에 의한 것이다.

어떤 경우에는 선폭이 이른바 교환 상호작용(exchange interaction)에 의해 영향을 받고, 그리고나서 만약 스핀의 순수한 쌍극자-쌍극자 간 상호작용이 있다면 선폭은 기대한 것보다 훨씬 작다.

실제적인 응용을 위해 개발된 ESR 스펙트로미터는 약 10 GHz의 주파수에서 대체로 작동한다. 이에 상응하여 자기장은 0.1 T에서 1T에 이르는 크기이다. 이 실험에서 자기장  $B_0$ 는 상당히 약하다. 자기장은 헬륨홀츠 코일법으로 발생되며, 적절한 코일전류를 적절히 선택함으로써 0 mT와 4 mT사이의 값으로 조절될 수 있다. 50 Hz로 변조되는 전류는

일정한 코일 전류가 더해진다. 이에 상응하게 변조되는 자기장 B는 동일한 방향의 자기장  $B_0$ 와 50 Hz  $B_{mod}$ 로 구성된다. 시료는 고용량 진동회로의 부분인 HF(고주파용) 코일 내에 놓인다. 진동회로는 15 MHz와 130 MHz사이의 주파수를 갖는 가변주파수 HF 발전기에 의해 들뜬다.

만약 공명조건 식 (5)를 만족하면, 시료는 에너지를 흡수하고 진동회로는 만들어진다. 그 결과, 진동회로의 임피던스는 변하고 코일에 있는 전압은 감소한다. 이 전압은 정류와 증폭에 의해 측정신호로 변환된다.

측정신호는 변조 자기장에 대해 상대적인 시간지연을 가지고 조절부의 출력으로 나타낸다. 시간지연은 조절부 내에 있는 위상 변위로서 보상될 수 있다. X-Y 작동이 되는 2채널 오실로스코프를 사용하면, 자기장에 비례하는 전압과 함께 측정신호를 공명신호로서 나타낼 수 있다. 만약 동일한 방향의 자기장  $B_0$ 가 공명조건을 만족하고 위상 변위  $\phi$ 가 측정신호와 변조된 자기장이 상쇄된다면, 공명신호는 대칭적이 된다(그림 2).

사용된 시료물질은 1,1-diphenyl-2picryl-hydrazyl(DPPH) 이다. 이 유기화합물은 질소와 질소 결합다리의 한 원자에서 짝을 짓지 못한 가전자를 갖는 비교적 안정된 자유라디칼이다(그림 3을 참조).

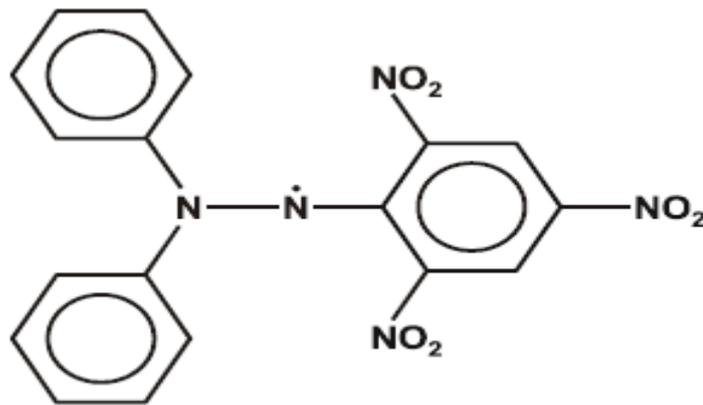
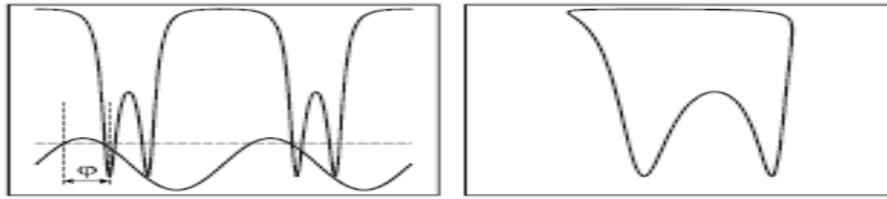
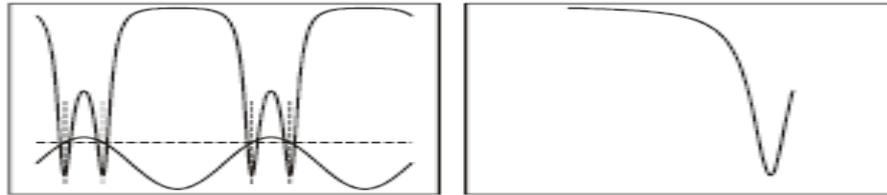


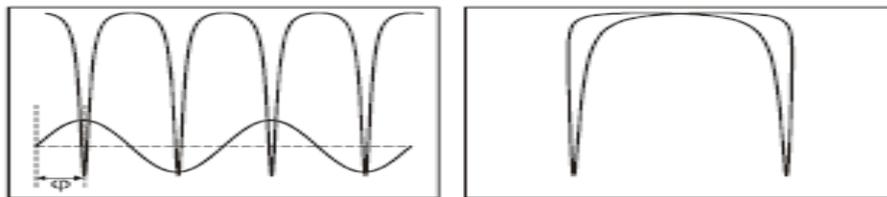
그림 3. 1,1-diphenyl-2picryl-hydrazyl(DPPH)의 화학구조



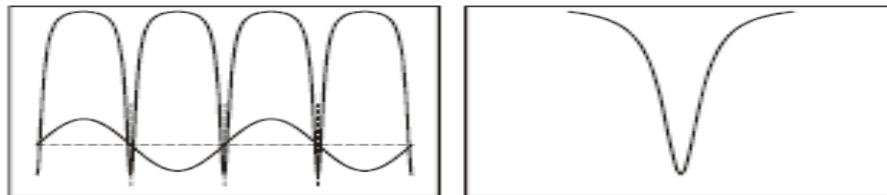
2a



2b



2c



2d

그림 2. 오실로스코프는 측정신호 중의 하나(각각 Y 혹은 I)와 변조 자기장(X 혹은 II)을 보여준다.

왼쪽: 2-채널은 채널 II에 연결된 DC를 보여준다.

오른쪽: XY는 채널 II에 연결된 AC를 보여준다.

그림 2a. 위상 이동  $\phi$ 는 상쇄되지 않았고, 동일한 방향의 자기장  $B_0$ 는 매우 약하다.

그림 2b. 위상 이동  $\phi$ 는 상쇄되었으며, 동일한 방향의 자기장  $B_0$ 는 매우 약하다.

그림 2c. 위상 이동  $\phi$ 는 상쇄되지 않았고, 동일한 방향의 자기장  $B_0$ 는 적절하다.

그림 2d. 위상 이동  $\phi$ 는 상쇄되었으며, 동일한 방향을의 자기장  $B_0$ 는 적절하다.

전자의 궤도운동은 분자구조에 의해 거의 상쇄된다. 그러므로 전자의 g-factor는 자유 전자의 g-factor와 거의 같다. 다결정질 형태의 물질은 전자스핀공명을 보여주기에는 아주 적절한데 그 이유는 강한 ESR 선을 갖는 좁은 선폭 때문이다.

### (3) 실험기자재

- ① ESR 기본장치, ② ESR조절부, ③ 헬름홀츠 코일 1쌍, ④ 2-채널 오실로스코프, ⑤ 1m 인 BNC 케이블 2개, ⑥ 새들 베이스 3개, ⑦ 25cm인 검정색 연결 전선 1개, ⑧ 50cm인 붉은색 연결전선 1개, ⑨ 50cm인 파란색 연결전선 1개.

### (4) 설치

\*그림 4와 5는 실험을 위한 장치도이다.

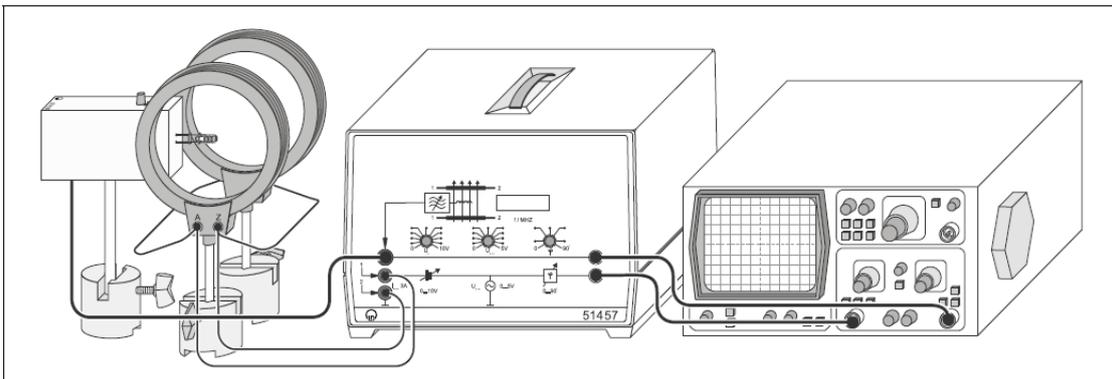


그림 4. 시료 DPPH를 사용한 전자스핀 공명의 실험설정

- 각각의 헬름홀츠 코일은 평균 거리가 6.8 cm가 되도록 역학적으로 평행하게 놓는다.  
(평균 반경 r은 같다.)
- 각각의 헬름홀츠 코일은 직렬로, 전류계는 ESR 조절부에 직렬로 연결한다.
- 6-pole 케이블은 ESR 조절부의 ESR 기본장치에 연결한다.
- BNC 케이블로 2채널 오실로스코프의 채널 I 에 ESR 조절부의 Y출력을 연결하고, 오실로스코프의 채널 II 에 ESR 조절부의 X출력에 연결한다.
- 오실로스코프는  
 $Y_I : AC; 0.5 \text{ V/cm}, \quad X : AC; 2 \text{ V/cm}$   
 로 설정한다.

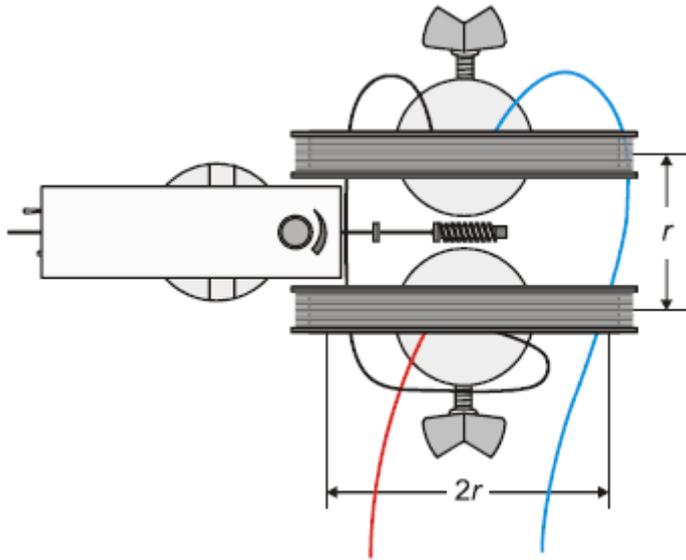


그림 5. 위에서 본 헬름홀츠 코일의 배열

## (5) 실험수행

### 공명자기장 $B_0$ 측정:

-교류 전류장의 진동범위에 해당되는 아래의 플러그인 타입의 코일을 하나 선택한다.



선택한 코일 내부에 DPPH 시료 **DPPH sample** 를 넣는다.

-교류 전류장의 진폭이 너무 작은 자석의 직류전류장과 겹쳐지면, 신호가 화면에 보일 때까지 자석의 직류전류장을 천천히 증가시킨다.

\*참고: 일반적으로 두 개의 공명신호가 보인다. 이것은 자석의 교류전류가 각 위상에 대하여 두 번의 공명점을 지나고, 오실로스코프에 나타난 전압들 사이에 위상상쇄가 있기 때문이다.

-위상이동자로 공명신호를 일치시키고, 직류전류장을 변화시킴으로서 화면의 중심에 공명신호가 대칭이 되도록 설정한다(그림 6 참조).

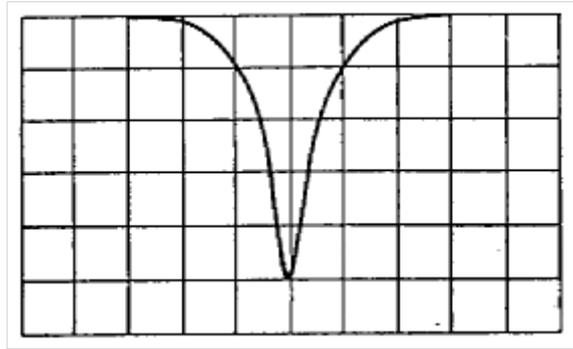


그림 6. 오실로스코프에 나타난 도형

- 고주파 발전기의 진동수  $f$ 를 증가시켜라  
자기력선속밀도  $B$ 가 클 때에만 공명선이 오실로스코프 화면에 나타난다.
- 직접 자석의 전류장을 증가시킴으로서 공명선이 원래의 위치로 재설정한다(화면의 정중점으로  $X = 0$ 에서 대칭이 되도록).
- 주기  $f$ 와  $B$ 에 비례하는 직류의 진폭  $I$ 를 측정하고,  $I$ 의 정확한 측정을 한다.  
외부자기장의 변조진폭을 감소시킴으로서 낮은 ESR 신호를 선택하고, 직류전류장이 있는 화면의 중심에서 대칭이 나타나도록 나머지 ESR 신호를 조절한다(그림 7 참조).
- 설명한 방법에 따라  $f$ 와  $I$ 를 측정한다(그림 8 참조).

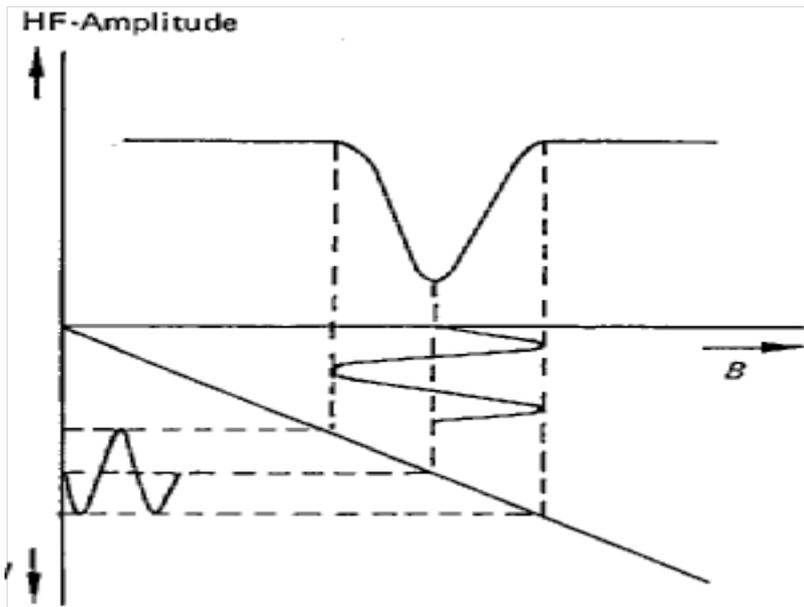


그림 7. 대칭인 공명 신호의 경우에 공명신호의 최대값은 I에 비례하는 자기력 선속밀도 B와 함께 자석의 직류전류장의 진폭을 표시한다.

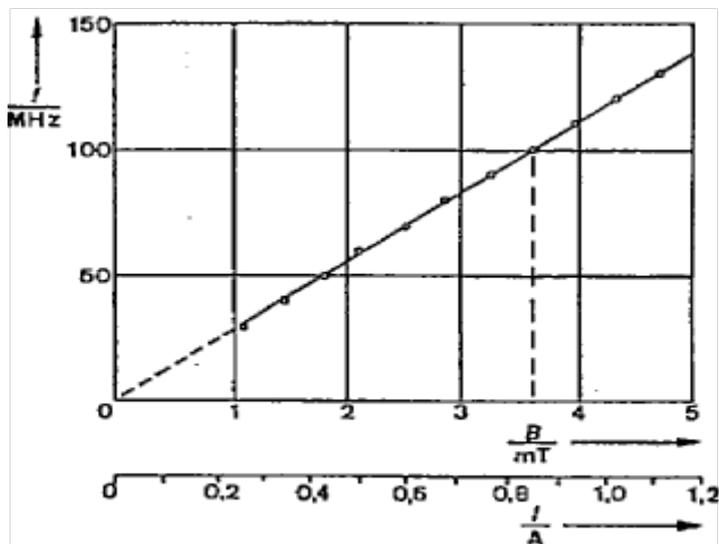


그림 8. 헬름홀츠 코일에 측정전류에 비례하는 자석의 공명자기장 강도 B의 함수로서 공명주기  $f$

(6) 측정 예

공명자기장  $B_0$  측정

표 1에서 공명의 경우, 직렬로 연결된 헬름홀츠 코일을 통하는 전류  $I_0$ 는 교류 고주파 영역의 주파수  $\nu$ 의 함수로 표시된다.

$\frac{\nu}{\text{MHz}}$	$\frac{I}{\text{A}}$	Plug-in coil
15	0.13	big
20	0.17	big
25	0.21	big
30	0.26	big
30	0.26	medium
35	0.30	medium
40	0.34	medium
45	0.38	medium
50	0.43	medium
55	0.47	medium
60	0.51	medium
65	0.55	medium
70	0.60	medium
75	0.64	medium
75	0.64	small
80	0.68	small
85	0.72	small
90	0.77	small
95	0.81	small
100	0.85	small
105	0.89	small
110	0.94	small
115	0.98	small
120	1.02	small
125	1.06	small
130	1.11	small

표 1. 교류 자기장의 주파수  $\nu$ 의 함수인 전류  $I_0$

### 반치폭 $\delta B_0$ 측정

오실로스코프로부터 읽은 반치폭은 1.5 cm이며, 이에 해당하는  $\delta U = 1.5 \text{ cm} \cdot 0.2 \frac{V}{\text{cm}} = 0.3 \text{ V}$  이다.

전체 변조 전압  $U_{\text{mod}}$ 의 보정은  $U_{\text{mod}} = 10 \text{ cm} \cdot 0.5 \frac{V}{\text{cm}} = 5 \text{ V}$ 이며,  $I_{\text{mod}} = 0.28 \text{ A}$  (교류 전류의 RMS 값)에 해당한다. 피크와 피크 사이의 진폭은 RMS값의  $2\sqrt{2}$  이다.

### (7) 수치계산

헬름홀츠 코일의 자기장 B는 각각의 코일을 통하는 전류로부터 계산될 수 있다.

$$B = \mu_0 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot \frac{n}{r} \cdot I, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad (n: \text{코일당 감긴 횟수}, r: \text{코일의 반경})$$

$n=320$ 이고,  $r=6.8 \text{ cm}$ 이면,  $B = 4.23 \text{ mT} \cdot \frac{I}{A}$ 가 얻어진다.

### 공명자기장 $B_0$ 측정

자기장에 대해 계산된 수치가 표 2에 작성되었다.

$\frac{\nu}{\text{MHz}}$	$\frac{B_0}{\text{mT}}$
15	0.55
20	0.74
25	0.93
30	1.08
35	1.27
40	1.46
45	1.63
50	1.82
55	1.99
60	2.12
65	2.33
70	2.54
75	2.75
80	2.86
85	3.07
90	3.28
95	3.38
100	3.60
105	3.81
110	4.02
115	4.12
120	4.23
125	4.44
130	4.65

표 2. 교류 자기장의 주파수  $\nu$ 의 함수인 자기장  $B_0$

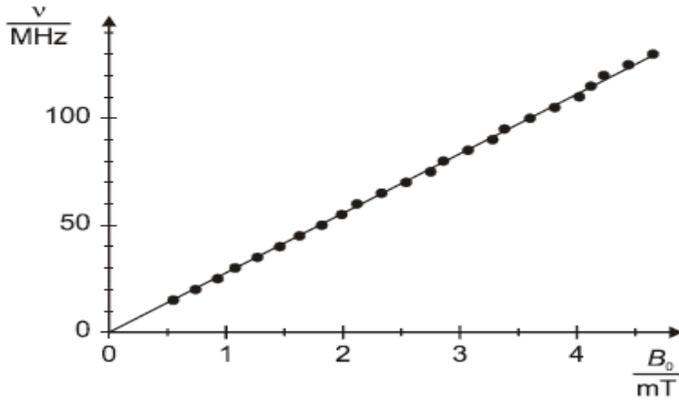


그림 9. 시료 DPPH에 대해 측정된 자기장의 함수인 공명 주파수

그림 9는 측정된 수치의 그래프를 보여준다. 그래프에서 원점을 지나는 직선의 기울기는

$$\frac{\nu}{B_0} = 27.8 \frac{MHz}{mT} \text{ 이다.}$$

이로부터 g-factor는 아래와 같다:

$$g = \frac{h \cdot \nu}{\mu_B \cdot B_0} = \frac{6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2}{9.273 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2} \cdot 27.8 \frac{MHz}{mT} = 1.99$$

문헌에서 인용되는 수치: g-factor(DPPH) = 2.0036

#### 반치폭 $\delta B_0$ 측정

$$\delta I = \frac{\delta U}{U_{\text{mod}}} \cdot I_{\text{mod}} = \frac{0.3 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 0.28 \text{ A} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 0.049 \text{ A}$$

$$\text{이로부터 } \delta B_0 = 4.23 \text{ mT} \cdot \frac{\delta I}{A} = 0.21 \text{ mT} \text{로 얻어진다.}$$

문헌에서 인용되는 수치:  $\delta B_0$  (DPPH) = 0.15 ~ 0.81 mT

선폭은 재결정화되는 물질 내에서 용매에 강하게 의존한다. 문헌에서 인용되는 가장 작은 값을 가진 물질은 용매로서  $CS_2$ (이황화탄소)이다.

## 4. Zeeman 효과 측정실험

### (1) 실험목적

- 정상 가로 Zeeman 효과에 대한 삼중분리선 관찰
- 삼중분리선 성분의 분극 상태 측정
- 정상 세로 Zeeman 효과에 대한 이중분리선 관찰
- 이중분리선의 분극 상태 측정

### (2) 기본원리

#### 정상 Zeeman 효과

Zeeman 효과는 외부 자기장의 작용으로 인한 스펙트럼 선 혹은 원자의 에너지 준위의 분리를 의미한다. Zeeman 효과는 전자의 고전이론의 한 부분으로서 1856년에 H. A. Lorentz에 의해 처음으로 예측되었고, 실험적으로는 수 년 후에 Zeeman에 의해 확증되었다. Zeeman은 자기장에 수직인 각도에서 단일 스펙트럼 선 대신에 삼중분리선(Triplet)을, 자기장에 평행인 각도에서는 이중분리선(Doublet)을 관찰했다. 이후에, 더욱 복잡한 스펙트럼선의 분리가 관찰되었는데, 이것은 비정상 Zeeman 효과로 알려지게 되었다. 이 같은 현상을 설명하기 위해, Goudsmit와 Uhlenbeck은 1925년에 처음으로 전자스핀에 대한 가설을 도입했다. 결국, 비정상 Zeeman 효과는 실제적인 법칙이며, 정상 Zeeman 효과는 하나의 예외라는 것이 명백해졌다.

정상 Zeeman 효과는 오직 총 스핀  $S=0$ 을 갖는 원자상태들 사이의 전이에서만 발생한다. 그런 뒤 이 상태의 총 각운동량  $J=L+S$ 는 순수한 궤도각운동량  $J=L$ 이 된다. 이에 해당하는 자기장에 대해, 우리는 다음과 같이 말할 수 있다.

$$\mu = \frac{\mu_B}{\hbar} J \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad (2)$$

( $\mu_B$ = Bore 마그네톤,  $m_e$ =전자의 질량,  $e$ =기본전하,  $\hbar$ =Plank 상수)

외부 자기장 B 내에서 자기 모멘트는 에너지

$$E = -\mu \cdot B \quad (3)$$

를 갖는다.

자기장의 방향내에서 각운동량 성분은

$$J_z = M_J \cdot \hbar \quad (M_J = J, J-1, \dots, -J) \quad (4)$$

의 값을 가질 수 있다.

그러므로, 각운동량  $J$ 는  $M_J$ 의 값에 의해 달라지는  $2J+1$ 인 등간격의 Zeeman 성분으로 분리된다. 인접 성분  $M_J, M_{J+1}$ 의 에너지 간격은

$$\Delta E = \mu_B \cdot B \quad (5)$$

이다.

예를 들면, 카드뮴의 붉은색 스펙트럼선( $\lambda_0 = 643.8 \text{ nm}$ ,  $f_0 = 465.7 \text{ THz}$ )에서 우리는 정상 Zeeman 효과를 관찰할 수 있다. 이것은 5번째 껍질의 전자의  $^1D_2 (J=2, S=0) \rightarrow ^1P_1 (J=1, S=0)$  전이에 해당한다.

자기장에서  $^1D_2$  준위는 5개의 Zeeman 성분으로 분리되고  $^1P_1$ 은 식 (5)를 사용하여 계산된 3개의 Zeeman 성분으로 분리된다.

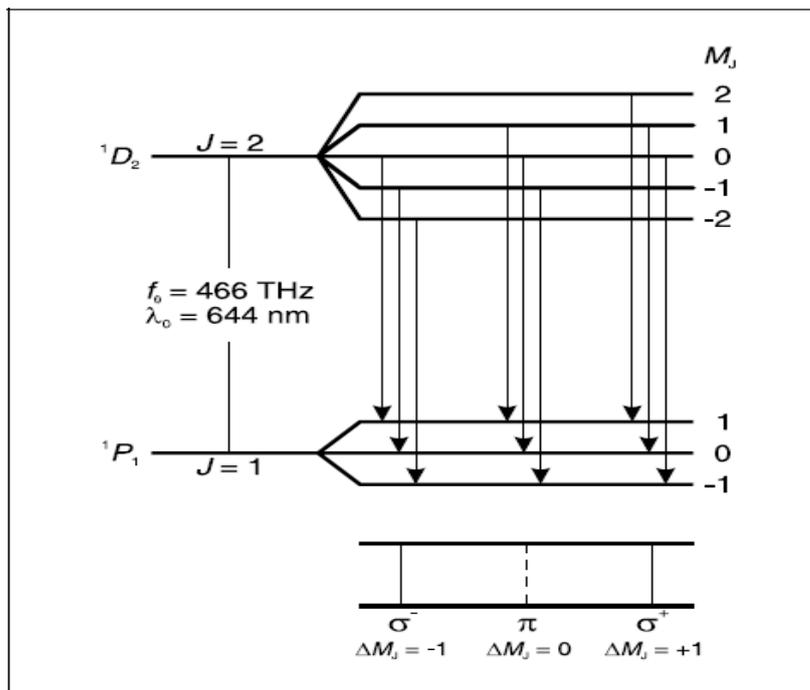


그림 1. 카드뮴 내에서 정상 Zeeman 효과의 준위 분리와 전이

이들 준위 사이에서 광학 전이는 오직 전기쌍극자 복사선의 형태로만 가능하다. 이 상태의 자기 양자수  $M_J$ 에 적용한 선택률은 아래와 같다.

$$\Delta M_J \begin{cases} = \pm 1 & \sigma \text{ 성분} \\ = 0 & \pi \text{ 성분} \end{cases} \quad (6)$$

따라서, 우리는 모두 3개의 스펙트럼선을 관찰한다(그림 1을 참고). 즉,  $\pi$  성분은 이동하지 않고, 두 개의  $\sigma$  성분은 원래 주파수에 대하여

$$\Delta f = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (7)$$

만큼 이동하는데, 위의 식에서  $\Delta E$ 는 식(5)에서 계산된 등간격 에너지 분리이다.

#### 각분포와 편광

자기장의 방향에서 각운동량 성분  $\Delta M$ 에 따라서, 방출된 광자는 서로 다른 각분포를 보인다. 그림 5.2는 2차원 극성 그림의 한 형태로 각분포를 보여준다. 자기장이 모든 카드뮴 원자에 대한 공통 축에 의해 나타내어지기 때문에 이들은 실험적으로 관찰될 수 있다.

고전적인 측면에서  $\Delta M_J = 0$ 인 경우는 자기장에 평행한 극미한 쌍극자 진동에 해당한다. 양자들은 자기장의 방향대로 방출되지 않는다. 즉,  $\pi$  성분은 자기장에 평행한 방향에서 관찰될 수 없다. 자기장에 수직으로 방출되는 빛은 선형적으로 편광되고, 그에 따라 E 벡터는 자기장에 평행한 방향과 쌍극자의 방향에서 진동한다(그림 3을 참고).

반대로,  $\Delta M_J = \pm 1$ 의 경우에 대부분의 양자들은 자기장의 방향으로 이동한다. 고전적인 측면에서, 이 경우는  $90^\circ$ 의 위상차를 갖는 두 개의 나란한 쌍극자 진동에 해당한다. 두 쌍극자의 중첩은 순환전류를 발생시킨다. 따라서 자기장의 방향내에서 원편광 빛이 방출된다. 양의 방향에서,  $\Delta M_J = +1$ 의 경우 시계방향이고  $\Delta M_J = -1$ 의 경우 반시계 방향이다(그림 3을 참고).

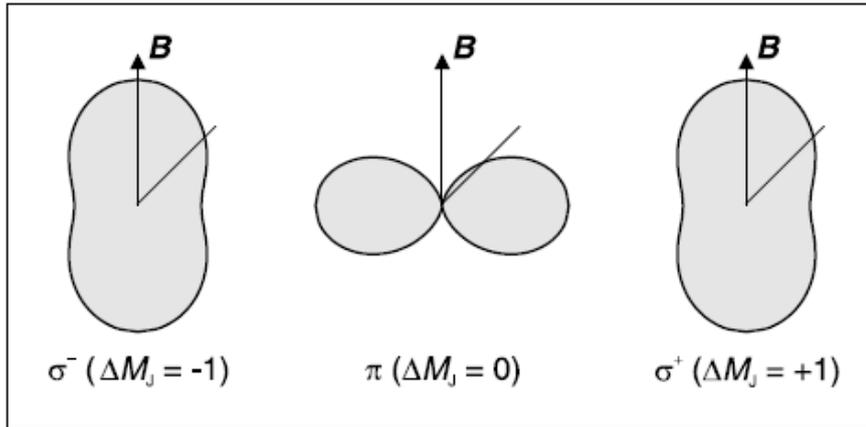


그림 2. 전기 쌍극자 복사선의 각분포( $\Delta M_j$ : 자기장의 방향에서 방출되는 광자의 각운동량 성분)

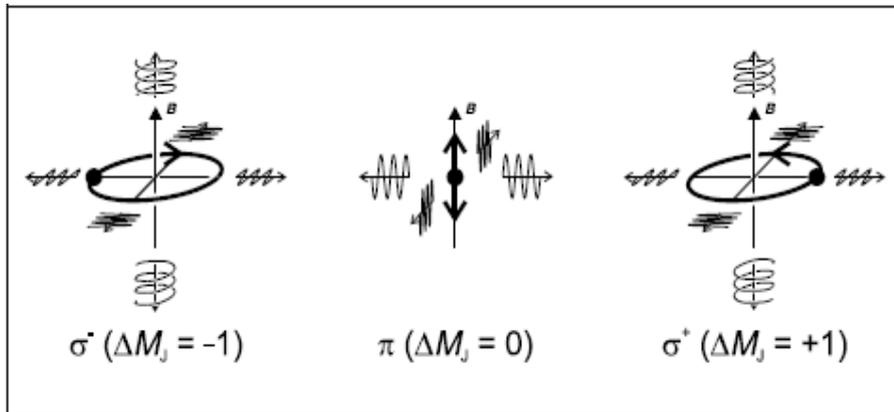


그림 3. Zeeman 성분의 분극 그림

### Zeeman 성분의 분광학

Zeeman 효과는 다르게 편광된 성분의 스펙트럼 분리가 가능하게 한다. 그러나 스펙트럼의 분리를 보이기 위해, 극히 높은 해상도를 갖는 스펙트럼 장치가 필요한데, 예를 들면, 각각  $\Delta\lambda = 0.02\text{nm}$ ,  $\Delta f = 14\text{GHz}$ 에 의한 자기선속밀도(magnetic flux density)  $B = 1\text{T}$  에서만 붉은색 카드뮴 선의 두  $\sigma$  성분이 이동된다.

Lummer-Gercke plate는 이 실험을 위해서 사용된다. 이 구성품은 표면의 편평함과 평행함에 대해 아주 큰 정밀도를 갖도록 제작되었다. 수직방향으로 발산하는 빛은 길고 평행한 유리판에 붙어 있는 프리즘을 거쳐 수평방향으로 통과한다(그림 4를 참조).

유리판 내부에서 빛은 매번 곧바로 생겨난 빛의 일부와 함께 앞, 뒤로 반사된다.

$\alpha = 90^\circ$ 의 각도에서 관찰 할 때, 유리판 내부의 반사는 전반사의 한계각도 내에서 거의 발생된다. 이 같은 결과는 높은 반사계수 때문인데 즉, 유리판이 충분히 길 때 많은

광선들이 서로 간섭을 일으킬 수 있기 때문이다. 간섭된 광선들은 무한대에 초점을 맞춘 망원경을 사용하여 관찰할 수 있다. 주어진 파장  $\lambda$ 에 대하여 수평선의 동일한 계에 있는 두 개의 거울상은 유리판 위와 아래에서 관찰될 수 있다. 각각의 간섭 선은 Lummer-gerhcke plate 으로부터 나오는 성분광선  $\alpha$ 와 프리즘으로 들어가는 입사각  $\beta$ 로부터 광선으로 할당된다.

$\alpha_k$ 의 각도로 나오는 광선은 아래와 같은 조건을 만족할 때 보강간섭이 일어난다.

$$\Delta = 2d \cdot (n^2 - \sin^2 \alpha_k)^{1/2} = k \cdot \lambda, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

( $\Delta$  = 광 경로차,  $d$  = plate의 두께,  $n$  = 유리의 굴절률,  $k$  = 간섭 차수)

$\delta \lambda$ 에 의한 파장내에서의 변화는  $\delta \alpha$ 의 각도만큼의 간섭 선의 이동으로 나타난다. 만약 스펙트럼선이 거리  $\delta \lambda$ 를 갖는 많은 광선 성분들을 포함한다면, 각각의 간섭 선들은  $\delta \alpha$ 를 갖는 성분의 수에 따라 갈라질 것이다. 따라서 Doublet 구조 내에서는 Doublet 스펙트럼선, Triplet 구조 내에서는 Triplet 스펙트럼선으로 나타난다.

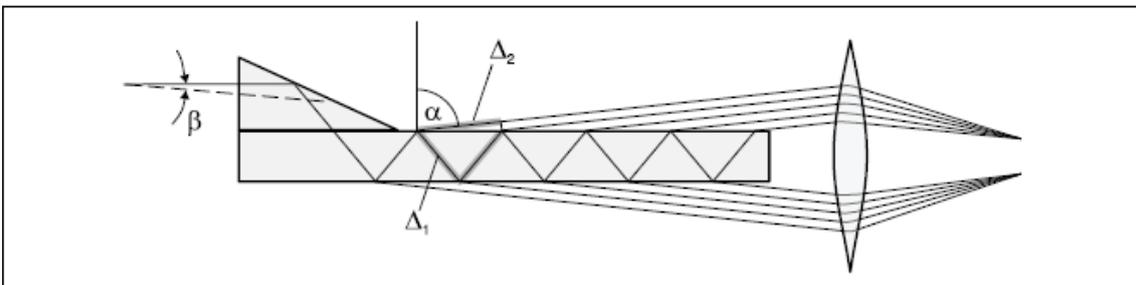


그림 4. 간섭분광계로서 Lummer-Gerchke plate(입사각  $\beta = 0$ 에 대한 빛다발은 굴절되지 않은 선들로 그려졌음). 두 인접 광선 사이의 광경로차는  $\Delta = n\Delta_1 - \Delta_2$  이다.

### (3) 실험기자재

- ① Zeeman 효과용 카드뮴 램프, ② Zeeman 효과 관찰용 광학시스템,
- ③ Lummer-Gehrcke plate, ④ Zeeman 효과용 전자석, ⑤ 고전류 전원공급장치

#### (4) 설치

##### 처음설정:

그림 5는 수평으로 배치하기 위한 장치도이다.

- 광학시스템의 밑판(base plate)위에 Zeeman 효과 실험을 위한 전자석을 올려놓는다. 육각나사를 밑판 아래와 고정시킨다.
- 10 mm 간격으로 전자석들을 올려놓는다.
- 카드뮴 램프(cadmium lamp) (b)를 전자석의 전기 연결부분에 설치한다.
- 전자석들과 유지 스트랩(retaining straps)을 사용한 카드뮴 램프(cadmium lamp)의 받침대가 고정되어 있는지 확인한다.
- 전선이 광선 다발의 경로를 막지 않도록 하기 위해 전기적으로 연결되어 측면으로 향하는 스펙트럼 램프위의 fused point를 돌린다.
- 광학 시스템의 지지대를 고정한다. 가능한 한 전자석에서 멀리 떨어지도록 설치한다.
- 덮개 (d)를 제거하고 velour-lined base위에 Lummer-Gehrcke plate를 조심스럽게 놓는다. 이 plate가 수평으로 잘 정렬되도록 설치하고 빛이 들어오는 쪽에 가능한 한 가깝게 프리즘을 밀어 넣는다.
- 덮개를 망원경 (e)를 향하는 원통부와 함께 돌리고, Lummer-Gehrcke plate가 불안정하지 않도록 망원경의 반대방향으로 조심스럽게 놓는다.
- 플러그 타입의 받침대 (c)에 적색필터를 설치한다.
- 외부 빛으로부터 간섭을 막기 위해, 덮개의 원통 위에 있는 빛 차단 screen을 끼워 넣고, 망원경 위에 고무링을 밀어 넣는다.

##### 수평배치에서 수직배치로 바꾸기

- 기둥 받침대 위의 멈춤나사 (i)를 풀고, 광학 시스템을 전자석으로부터 가능한 한 멀리 움직인다.
- 플러그 타입의 받침대로부터 붉은색 필터를 제거한다.
- 카드뮴 램프와 함께 전자석을 원하는 위치로 돌린다(그림 6 참고). 그리고 전자석의 받침대가 광학 시스템 받침대의 뒤쪽 가장자리에 평행하도록 놓기 위해 그림 6과 같이 정렬한다.
- 플러그 타입의 받침대에 적색필터를 설치한다.
- 광학시스템의 받침대를 가능한 한 전자석에 가깝게 놓는다.

## 전기 연결

- 카드뮴 램프(cadmium lamp)를 universal choke에 연결한다. 스위치를 켜 뒤, 충분히 강한 빛 강도를 얻을 때 까지 5분 정도 기다린다.
- 전자석의 코일을 병렬로 연결한다(socket 1은 socket 3에, socket 2는 socket 4에 연결한다). 그리고 이것을 고전류 전원공급장치에 연결한다.

## Zeeman 효과 관찰을 위한 광학시스템 조절

수직배치에서 광학 시스템의 높이를 조절하고, 수평배치로 바꿀 때는 광학시스템의 높이를 변경하지 않는다.

광학 시스템은 Lummer-Gehrcke plate의 위와 아래로 간섭무늬가 최대 밝기와 대비를 보일 때 최적화된 것이다.

-망원경 (f)의 접안렌즈를 제거하라; 밝기와 대조를 선택적으로 최적화하기 위해서임.

- a) 받침대 위에 있는 광학 시스템을 왼쪽과 오른쪽으로 이동시킨 뒤 돌린다.
- b) 전자석의 구멍과 카드뮴램프 사이의 완벽한 광학시스템의 높이를 맞춘다(멈춤나사 (h)를 고정시킨다).

-간섭무늬의 밝기와 대비를 향상시키기 위해 플러그 타입의 받침대 안에 있는 붉은색 필터 혹은 전체 덮개를 들어 올릴 필요가 있다. 밝은 내부의 간섭무늬들은 관찰하기에 가장 좋다.

## 미세조정

망원경이 Lummer-Gehrcke plate의 뒷부분에 정확하게 정렬되었을 때, 간섭무늬가 위아래로 대칭된다.

-접안렌즈를 빛을 향해 고정시키고, 십자선에 초점을 맞춘다.

-망원경의 경통 내에 접안렌즈를 대체하고 접안렌즈를 이동시켜 간섭무늬의 초점을 맞춘다.

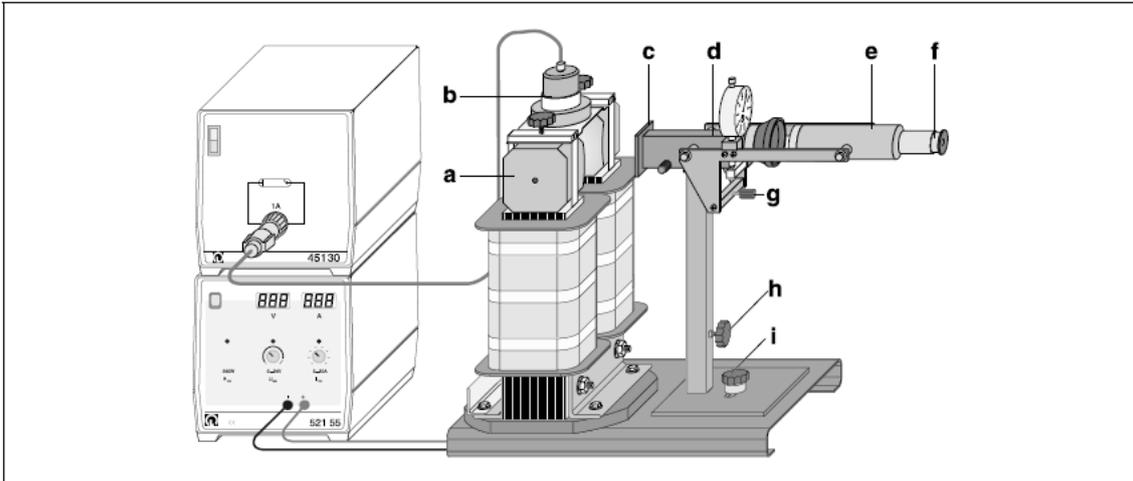


그림 5. Zeeman 효과 실험을 위한 실험설치의 측면그림.

(a) 전자석들, (b)받침대(holder)가 있는 카드뮴 램프(cadmium lamp), (c) 붉은색 filter를 위한 플러그 타입의 받침대, (d) 덮개, (e) 망원경, (f) 접안렌즈, (g) 망원경의 높이 조절나사, (h) 기둥의 멈춤나사, (i) 기둥받침의 멈춤나사

## (5) 실험수행

참고: 편광 필터는 1/4 파장 알루미늄 박(quarter-wavelength foil)보다 다소 어둡다.

### (a) 수평배치 관찰

- 먼저 자기장의 인가없이( $I=10\text{ A}$ ) 간섭무늬를 관찰하고, 접안렌즈의 십자선이 간섭 무늬 위에 놓이도록 망원경을 조절한다.
- 자기전류  $I=10\text{ A}$ 가 될 때까지 천천히 증가시키면서, 간섭무늬가 분명히 갈라지는지 관찰한다.

$\sigma^+$ 와  $\sigma^-$  성분을 구별하기 위해:

- 1/4 파장 알루미늄박의 받침대 위에 외부 빛 차단 스크린을 설치한다.
- 1/4 파장 알루미늄박과 이것의 지지대를 설치하고, 망원경에 편광 필터를 설치한다.
- Doublet 성분 중 하나가 사라질 때까지 편광필터를 회전시킨다. 다른 한 성분까지 사라지도록 편광 필터를  $90^\circ$  정도 회전시킨다.

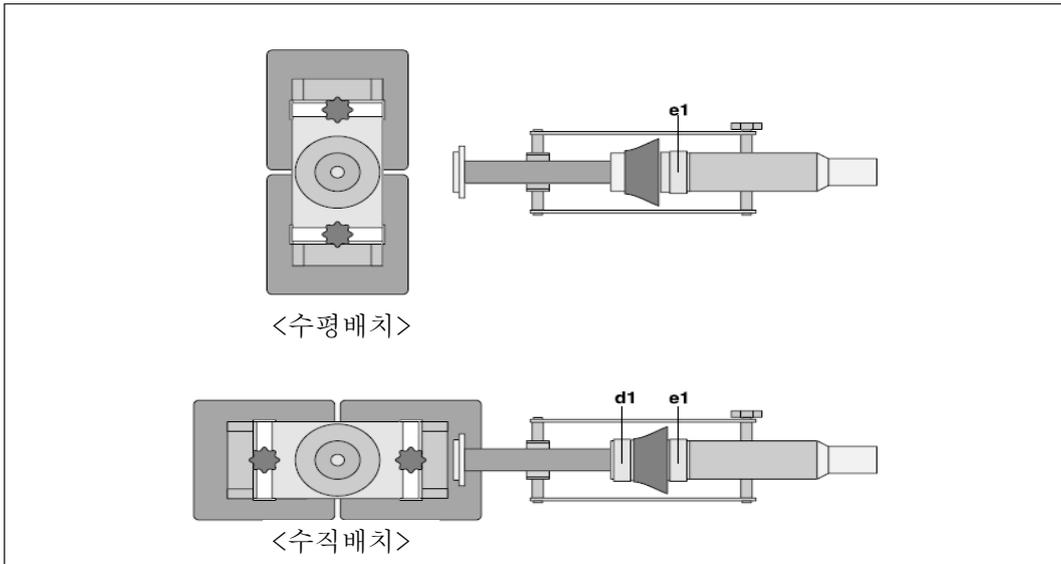


그림 6. 수평 배치의 평면도(위 그림)와 수직 배치의 평면도(아래 그림)  
 (d1) 1/4 파장의 알루미늄 박이 있는 받침대  
 (d2) 편광필터가 있는 받침대

## (6) 측정 예와 수치 계산

### a) 수평 배치 관찰

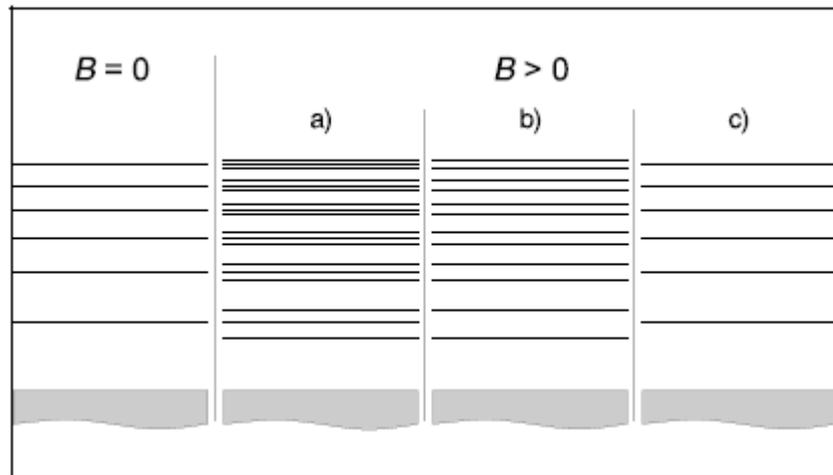


그림 7. 수평배치에서 Zeeman 효과의 간섭 무늬

- a) 편광필터 없이 관찰했을 때,
- b) 편광방향으로 관찰했을 때,
- c) 자기장에 평행한 필터의 편광방향에서 관찰했을 때

b) 수직 배치 관찰

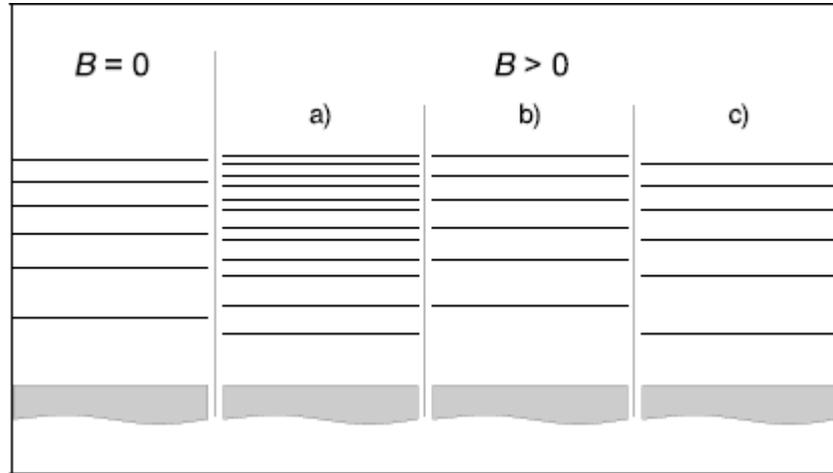


그림 8. 수직배치에서 Zeeman 효과의 간섭무늬

- a) 1/4 알루미늄 박과 편광필터없이 관찰했을 때,
- b)와 c) 시계방향과 반시계 방향 편광을 보이기 위한 편광 필터와 1/4 알루미늄 박을 사용하여 관찰했을 때

## 5. X-선 실험: Duane-Hunt의 법칙

### (1) 실험목적

- X-선 튜브의 고전압  $U$ 의 함수로서 연속 제동복사의 한계파장  $\lambda_{\min}$  측정
- Duane-Hunt 관계 확인
- Planck 상수 측정

### (2) 기본원리

X-선 튜브의 방출 스펙트럼에서 연속 제동복사는 한계 파장  $\lambda_{\min}$ 에 의해 결정되며(그림 1), 한계파장은 튜브의 고전압이 증가함에 따라 점점 작아진다. 1915년에 미국 물리학자 William Duane과 Franklin L. Hunt는 튜브의 고전압과 한계 파장 사이의 반비례관계를 발견했는데 그 관계는 아래와 같다:

$$\lambda_{\min} \sim \frac{1}{U} \quad (1)$$

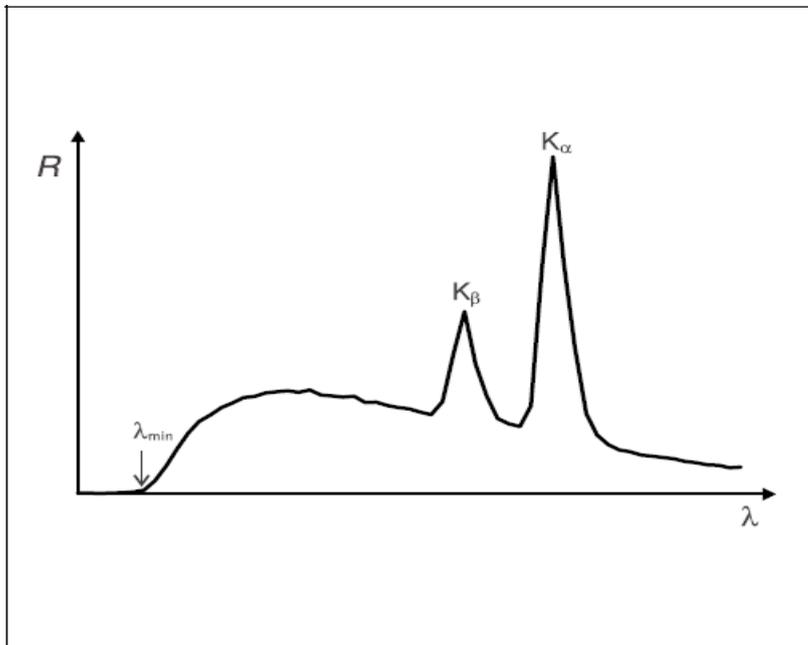


그림 1. 연속 제동복사의 한계파장  $\lambda_{\min}$ 과 특성  $K_{\alpha}$ 와  $K_{\beta}$  선을 갖는 X-선 튜브의 방출 스펙트럼

이 Duane-Hunt 관계는 몇 가지 기본적인 양자역학적 고려로서 충분히 설명될 수 있다: 전자기 방사에 대한 파장  $\lambda$ 와 주기  $\nu$ 가 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2)$$

( $c : 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ : 빛의 속도)

최소 파장  $\lambda_{\min}$ 은 방출된 X-선 양자들의 최대 에너지는

$$E_{\max} = h \cdot \nu_{\max} \quad (3)$$

( $h$ : Planck 상수)

로 최대 주기  $\nu_{\max}$ 에 해당한다. 그러나 X-선 양자는 양극에서 감속되는 전극의 총 운동에너지

$$E = -e \cdot U \quad (4)$$

( $e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ : 기본전하)

를 얻는 정확한 순간에 최대 에너지를 달성한다.

따라서, 이 때의 주기와 파장은 각각

$$\nu_{\max} = \frac{e}{h} \cdot U \quad (5)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \frac{1}{U} \quad (6)$$

과 같다.

식 (6)은 Duane-Hunt 법칙에 해당한다. 비례계수는

$$A = \frac{h \cdot c}{e} \quad (7)$$

$c$ 와  $e$ 의 값이 알려져 있어서 Planck 상수를 결정하는데 사용될 수 있다.

Bragg 실험배치에서 NaCl의 각조정기(Goniometer)와 Geiger-Muller 계수관은 이 실험에서 분광계를 구성한다. 결정이 입사 X-선에 대해서  $\theta$ 의 각도로 회전할 때, 계수관은  $2\theta$ 가 되도록 회전한다(그림 2를 참고).

Bragg 반사법칙에 따라서 1차 회절의 산란각  $\theta$ 는 파장

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (8)$$

( $d = 282.01 \text{ pm}$ : NaCl의 격자 간격)

에 해당한다.

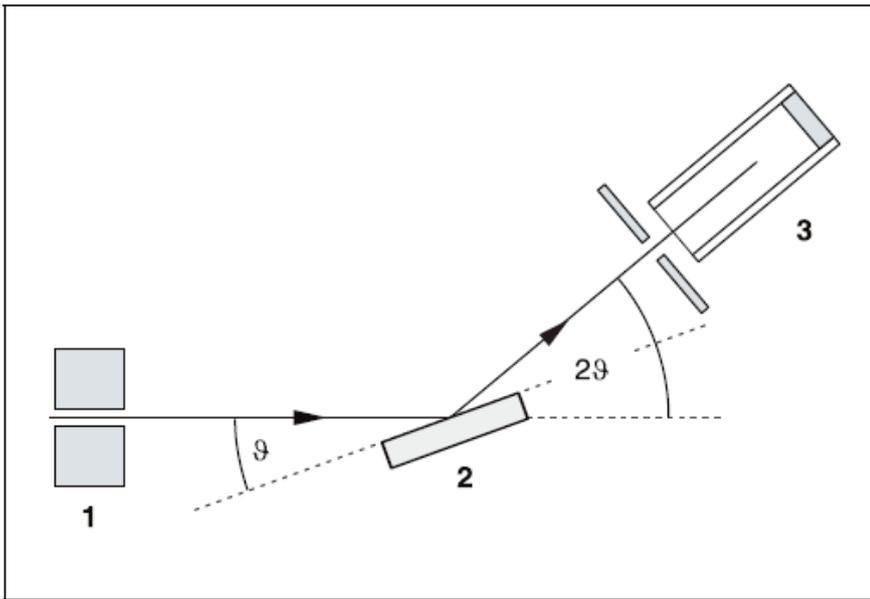


그림 2. 단결정에서 X-선 회절, 계수관 각도와 산란각(스침각) 사이의  $2\theta$  결합의 개략도

1 집속기, 2 단결정, 3 계수관

### (3) 실험기자재

①X-선 장치, ②  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 와 X-선 방사를 위한 End-window counter, ③PC

### 안전 주의사항

X-선 장치는 모든 관리규정을 만족해야 하고, 교육용으로 완전히 보호된 장비로 독일에서 교육용으로 보증되었다.

보호장치와 차폐가 내부에 설치되어 X-선 장치의 외부선량을  $1\mu Sv/h$  이하인 자연방사선의 범위로 줄인다.

■ X-선 장치를 작동하기 전에 장치의 손상이 있는지, 미닫이 문이 열렸을 때 고전압의 전원이 내려가 있는지 반드시 확인한다.

■ X-선 장치는 권한이 없는 사람이 접촉하지 못하도록 한다.

X-선 튜브의 Mo 양극이 과열되지 않도록 한다.

■ X-선 장치의 스위치를 켰을 때, 튜브 챔버에 있는 환풍기가 돌아가는지 반드시 확인하라.

각조정기는 electric stepper motor에만 놓여 있다.

■ 각조정기의 표적부분과 센서 부분이 방해받지 않게 하고, 이것들을 강제로 움직여 사용해선 안된다.

## (4) 설치

### Bragg 실험 배치

그림 3은 실험 설치의 중요한 몇 가지 세부사항을 보여준다. 실험 설치를 위해 아래의 과정을 따른다.

-집속기 장착부 (a)에 집속기를 장착한다(안내 홈을 참조).

-집속기의 슬릿 칸막이와 표적부분 사이의 거리  $s_1$ 이 대략 5 cm가 되도록 각조정기를 안내막대 (d)에 붙인다. 각조정기를 조절하기 위해 리본 케이블 (c)를 연결한다.

-End-window counter의 보호캡을 제거하고 센서 자리 (e)에 end-window counter를 놓고 계수관을 장착 표시된 GM TUBE에 연결한다.

-센서 고정대 (b)를 이동시킴으로서 표적부와 센서 수신기의 슬릿 칸막이 사이의 거리  $s_2$ 가 대략 6 cm가 되도록 설정한다.

-표적부를 표적 고정대 (f)에 장착한다.

-표면에 홈이 있는 나사 (g)를 풀고, NaCl 결정을 표적부에 편평하게 놓고, 중지시키는 방법으로 단결정이 있는 표적부를 조심스럽게 들어 올리고, 홈이 있는 나사를 천천히 돌려 조인다(약간의 압력을 주어 결정이 비스듬히 움직이는 것을 막는다).

-필요하다면, 각조정기의 기계적인 영점 위치를 조절한다.

참고:

NaCl 결정은 축축해지기 쉽고 극히 깨지기 쉽다. 건조한 곳에 NaCl 결정을 보관한다; 결정이 기계적인 변형력을 받지 않게 한다; 작은 표면으로만 결정을 다룬다.

만약 수율이 너무 낮다면, 표적과 센서 사이의 거리  $s_2$ 를 줄인다. 그러나 이 거리가 너무 짧아선 안되며, 거리가 너무 짧으면 각조정기는 더 이상 충분한 각(angular) 해상도를 갖지 못한다.

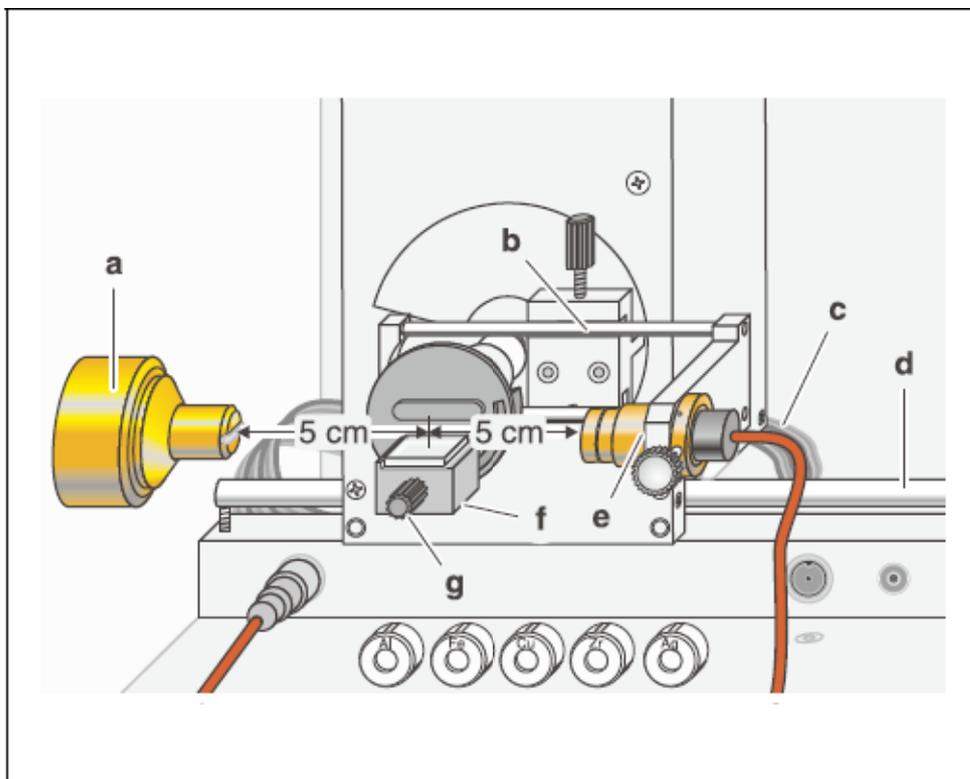


그림 3. Bragg 실험배치도

### PC기반 측정 준비(MS-DOS 기반)

-본 실험장치는 GM 계수관으로부터 신호를 PC로 측정하도록 구성되어 있다.

-9핀 V.24 케이블을 사용하여(X-선 장치에 공급된) RS-232 출력과 컴퓨터(대개 COM1 혹은 COM2)의 직렬 인터페이스를 연결한다.

-PC를 켜 다음, 비번 “staff” 를 입력하여 Windows 95 운영체제를 실행한다. 바탕화

면에 있는 아이콘  을 더블클릭하여 DOS기반 X-선 실험 프로그램을 활성화

한다.

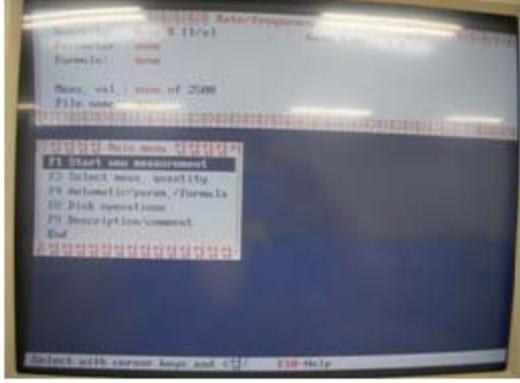
	
<p>① X-선 실험 더블클릭 하면, 위와 같은 첫 화면이 나타난다. 아무 키를 누르면 ②의 화면으로 넘어간다.</p>	<p>② 이 화면에서 Duane-Hunt 실험에서 사용되는 측정은 <b>F3 Rate meter</b> 이다.</p>
	
<p>③ 측정 전 실험조건(측정시간)을 설정한다. F3 Select meas. &gt; Rate meas. &gt; Free gate에서 측정시간을 설정한다.</p>	<p>④ 설정이 완료 되었으면, Enter를 누르고, 위의 그림과 같이 F1 Start new measurement를 누른다.</p>
	<p>참고:</p> <p>*측정 이후 계수 N과 계수율 R은 저장되지 않으니, 반드시 측정결과를 기록해두어야 한다.</p> <p>*재측정을 원할 경우, F1을 한 번더 누르면 되며, 화면의 좌측 하단에 측정횟수가 표시된다.</p>
<p>⑤ 준비완료된 상태에서 다시 F1을 누르면, 위의 그림과 같이 측정시간동안 N(계수)와 R(계수율;계수/측정시간)이 표시된다.</p>	

표 1. X-선 Duane-Hunt 실험을 위한 CASSY 프로그램 설정과정

## (5) 실험방법

-스위치 (a)로 X-선 측정장치의 전원을 켜다.

(매뉴얼 영문원본 X-ray apparatus 42V p. 22쪽 필독.)

; 시간 (b)에서 작동시간을 "> 1h"로 선택한다 ; 검출기 (f)에 대한 다단계 설정 스위치 (e)의 setting 1에서 고전압  $U_A$  ( $U_A = \sqrt{2} \cdot 10^3 \cdot U$ )를 켜다. 다단계 설정 스위치 (e)를 가지고 setting 8까지 올려 고전압을 설정해 본 뒤, lever를 사용하여 1mA까지 방출 전류  $I_{EM}$ 를 설정하라.

-전압 U를 조절부(b)를 가지고 확인한다 ; 이것은 데모미터(demonstration meter)에서 고전압에 비례한다. 회전하는 결정의 배치를 "crystal angle"  $\theta = 2.5^\circ$  (포인트 (h))와 "counter tube angle"  $2\theta = 5^\circ$  로 설정한다.

-100 초 이내에서 계수 n을 측정한다.(주어진 실험시간 내에서 실험수행이 가능하도록 시간을 정할 것.)

-각도  $\theta$ 는  $0.5^\circ$  에서  $6.5^\circ$  까지 증가시키고, 모든 측정은 100 초 내에서 계수 n을 측정한다.

-측정이 완료되면 voltage 값을 7로 바꾼다.

-측정 데이터 값을 그래프로 그려보고  $\theta_{\min}$ 을 구한다.

-시료의 격자상수와  $\theta_{\min}$ 을 이용하여  $\lambda_{\min} = 2d \sin\theta_{\min}$  식에 대입하여  $\lambda_{\min}$ 을 구한다.

- $h = \frac{e}{c} U_A \cdot \lambda_{\min}$ 에 위에서 구한 값을 대입하여 플랑크 상수 h를 구한다.

## (6) 측정 예와 수치 계산

\*영문매뉴얼의 측정 결과 참조(X-ray 6.3.2-7의 p.4-5)

튜브 고전압 U의 함수로서 한계파장  $\lambda_{\min}$  측정

Duane-Hunt 관계의 확인과 Plack 상수의 측정

측정예

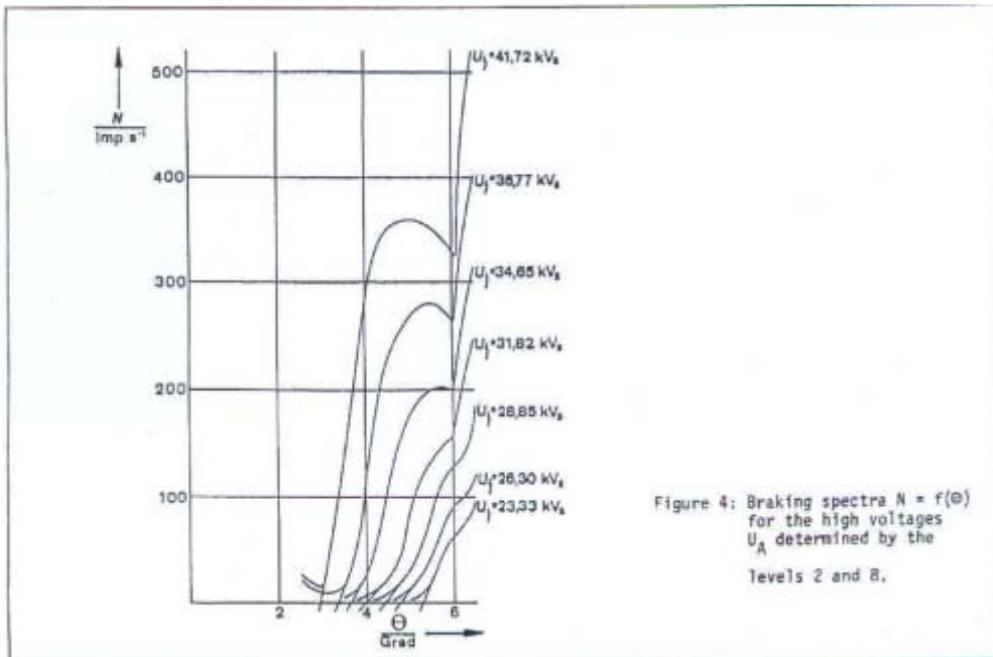


그림 4. 측정 결과의 그래프 예시

$U_A$ level	.	8	7	6	5	4	3	2
$U_A$	$kV_s$	41,72	36,77	34,65	31,8	28,85	26,30	23,33
$\theta_{min}$	Grad	2,95	3,35	3,60	3,92	4,42	4,77	5,30
$\lambda_{min}$ from (7)	pm	29,0	32,9	35,4	38,6	43,5	46,9	52,7
$\frac{1}{U_A}$	$kV_s^{-1}$	0,0240	0,0272	0,0289	0,0314	0,0347	0,0380	0,0429
$h$ from (6)	$10^{-34} J_s$	6,465	6,464	6,555	6,563	6,700	6,591	6,570

표 2. 측정 결과의 계산 예시

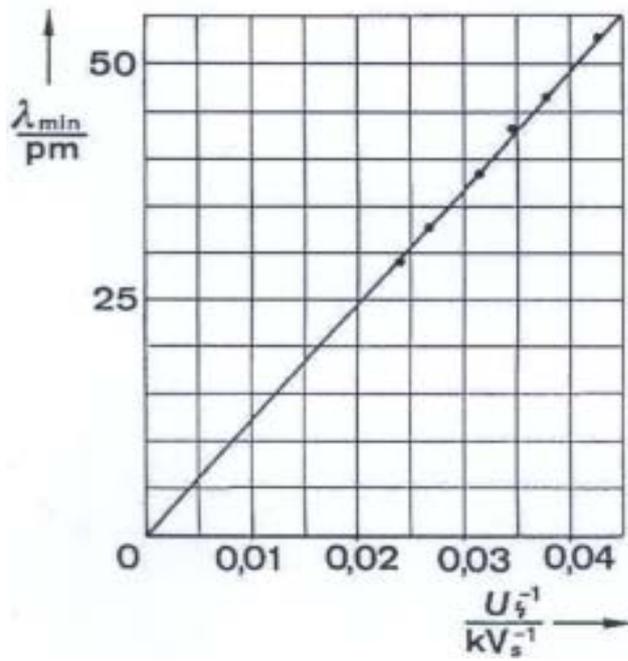


그림 5.  $\lambda_{\min} = f(1/U)$

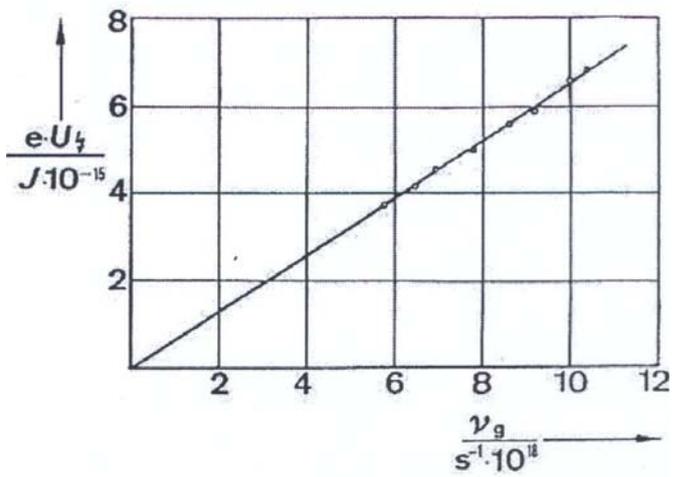


그림 6.  $e \cdot U_A = f(\nu_0)$



## 6. Hall 계수 측정실험

### (1) 실험목적

- Hall 계수와 자기선속밀도(Magnetic flux density)의 비례관계 확인하기
- 전하운반자(charge carriers)의 극성 결정하기
- Hall 계수와 전하운반자 농도  $n$  계산하기

### (2) 기본원리

만약 전류가 흐르는 금속성 전도체(Metallic conductor) 스트립(strip)이 전류  $I$ 에 수직인 자기장  $B$ 에 놓여 있다면, 가로축 방향인 전기장  $E_H$ 와 전위차(potential difference)가 발생하는데 이것을 Hall 효과라 한다.

아래의 식은 Hall 전압  $U_H$ 에 관한 것이다.(그림 1을 참조)

$$U_H = \frac{1}{n \cdot e} \frac{B \cdot I}{d} \quad (1)$$

( $B$ : 자기선속밀도,  $I$ : 금속 전도체를 통과하는 전류,  $d$ : 띠 모양 전도체의 두께,  
 $n$ : 전하운반자의 농도,  $e = 1.602 \times 10^{-19} C$  으로 기본전하)

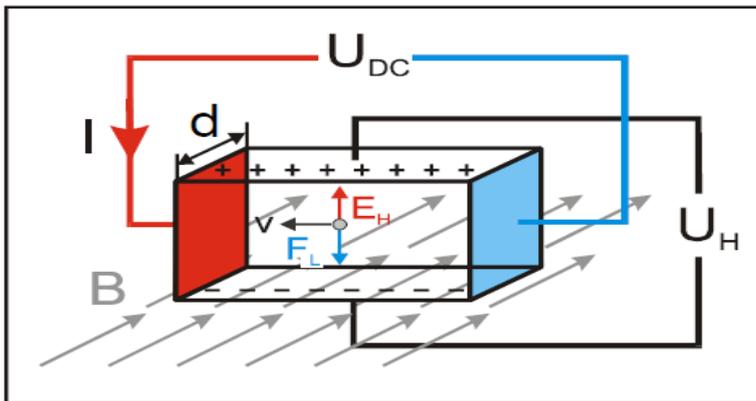


그림 1. Hall 효과의 그림. 자기장  $B$ 에 놓인 전하를 운반하는 금속성 전도체 내부의 로렌츠 힘  $F_L$ 은 전기장  $E_H$ 의 원인이 되며, 그 결과 Hall 전압  $U_H$ 가 발생.

Hall 전압  $U_H$ 는 로렌츠 힘으로 인하여 자기장내에서 움직이고 있는 전하 운반자의

편향에 의해 야기되며, Hall 전압의 방향은 오른손 법칙에 의해 예측될 수 있다.  $\frac{1}{ne}$  인자는 Hall 계수  $R_H$  라고 한다.

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (2)$$

Hall 계수  $R_H$ 의 부호는 전하 운반자의 극성에 의해 결정된다.

Hall 계수는 재료와 온도에 의존된다. 왜냐하면 금속의  $R_H$ 는 매우 작지만, 반도체의  $R_H$ 는 매우 커지기 때문이다.

전하 운반자의 극성은 Hall 전압의 방향으로부터 결정될 수 있다. 전하 운반자  $n$ 의 농도는 다양한 전류  $I$ 에 따른 자기장  $B$ 의 함수인 Hall 전압  $U_H$ 를 측정함으로써 실험적으로 결정될 수 있다.

### (3) 실험기자재

Hall 효과 장치(은-Ag), 굴레가 있는 U자 형태의 코어, 한 쌍의 전자석, 250회 감긴 코일, 고전류 전원 공급장치, 가변 저전압 변압기, 멀티미터, 1m인 붉은색 및 파란색 (19Ω) 전선 4쌍, 1m인 검정색(32Ω)의 연결 전선 2쌍

#### 안전 주의사항

- 가로 전류(transverse current)가 15 A 혹은 자기장에 의한 유도전류가 5 A 이상이 되면, 장치의 전원을 켜라(연결 전선이 과열되거나 코일이 과부하되는 것은 최대 부하가 5 A로 설계되었기 때문이다).
- 가로 전류(transverse current) 회로에서 최대부하 20 A로 정해진 전선을 사용하라(예를 들면, 검정색 연결전선은 32 A이며, 노란색 및 녹색 연결 전선은 최대 32 A이다).
- Hall 전압을 측정하는 동안에 임시보관대에서 실험 설정을 유지하라.

#### (4) 설치

\*실험은 두 단계로 수행된다.

##### a) 자기장의 보정

굴레가 있는 U자 형태의 코어, 한 쌍의 전자석과 250회 감긴 코일을 그림 8.2와 같이 설치하라. 전자석들은 Hall 효과 장치(은-Ag)의 보조판 두께에 맞게 정확하게 놓는다. 설정을 위해 고정 장치를 느슨하게 하고, 전자석 사이에 있는 Hall 효과 장치(은-Ag)를 다른 한 곳에 두어라. 250회 감긴 코일을 저전압 변압기에 직렬로 연결하고 전자석 사이에 자기장 센서를 놓는다.

##### b) 자기장의 함수인 Hall 전압의 측정

보정 곡선을 기록한 뒤에 전자석 사이에 Hall 효과 장치(은-Ag)를 끼워라. 전자석의 극 간격은 하단의 지지대에 가능한 한 가깝게 한다.

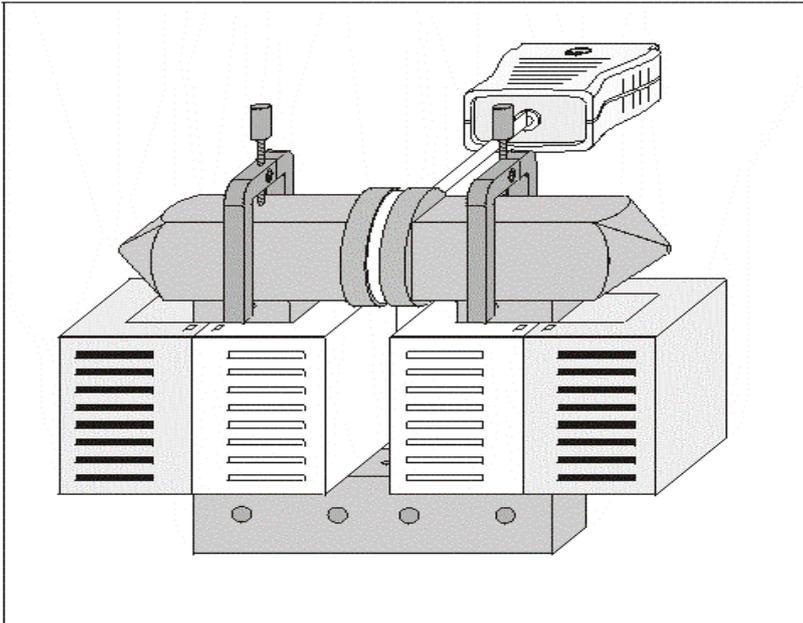


그림 2. 자기장 보정을 위한 개략도

Hall 전압을 측정하기 위해, Hall 효과 장치(은-Ag)의 보조판에 마이크로전압계를 연결한다.

그림 3과 같이 고전류 전원 공급장치에 Hall 효과 장치(은-Ag)를 연결한다. 자기장 B의 방향은 보조판에 인쇄된 것처럼 되어야 한다. 멀티미터를 사용하여 코일을 통과하는 전류 I를 측정한다.

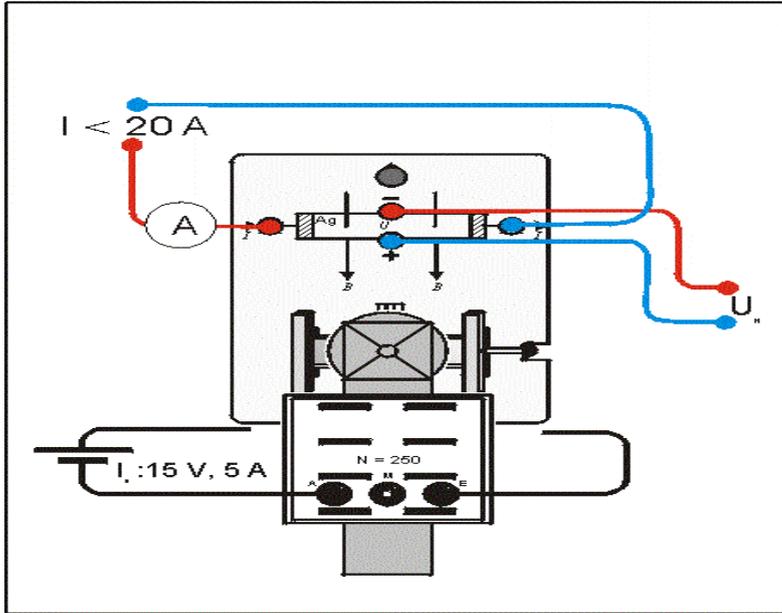


그림 3. Hall 효과 실험 설정(배선 도해)

## (5) 실험수행

### a) 자기장의 보정

-250회 감긴 코일을 통해 교류전류  $I=5A$ 에 의한 전류  $I$ 의 함수로서 자기장을 기록하기 전에 전자석의 철에 의한 자기장을 짧은 시간 동안에 제거한다. 그런 뒤, 전류가 0이 될 때까지 점차적으로 줄인다.

-코일을 통해 흐르는 전류를 측정하기 위해 변압기의 (+) 극과 코일 사이에 전류계를 연결한다.

-직류전류를 0.5 A씩 증가시키면서 전류  $I$ 의 함수로서 자기선속밀도  $B$ 를 측정한다.

### b) 자기장의 함수인 Hall 전압의 측정

-전자석 사이에 Hall 효과 장치(은-Ag)를 끼운다.(그림 3을 참조)

-Hall 효과 장치(은-Ag)를 자기장에 노출하기 전에, 영점을 조절한다.

: 예를 들어 10 A의 가로 전류  $I$ 를 인가하고, Hall 효과 장치(은-Ag)의 조절 손잡이를 사용하여 Hall 전압  $U_H$ 가 0에 이르도록 측정하는 동안 눈금 표시기를 놓는다. 전원을 끈 뒤에도 표시창의 눈금이 변한다면, 가로 전류를 다시 켜 뒤 영점 조절을 반복한다.

-Hall 효과 장치(은-Ag)에 가로 전류  $I=15A$ 를 인가하고 자기장  $B$ 의 함수인 Hall 전압

$U_H$ 를 측정한다(첫 번째 실험의 보정 곡선으로부터 효과적인 자기장의 눈금수치를 읽는다). Hall 전압  $U_H$ 에 대한 평균값을 측정하기 위해 수 회의 측정을 수행한다.  
-가로 전압  $I=2.0A$ 에 대한 측정을 반복한다.

## (6) 측정 예

a) 자기장의 보정

$\frac{I}{A}$	$\frac{B}{T}$
0.0	0.000
0.5	0.118
1.0	0.200
1.5	0.295
2.0	0.374
2.5	0.455
3.0	0.520
3.5	0.585
4.0	0.630
4.5	0.665
5.0	0.695
5.5	0.715
6.0	0.735
6.5	0.748
7.0	0.760
7.5	0.780
8.0	0.790
8.5	0.800
9.0	0.810

표 1. 코일을 통과하는 전류  $I$ 의 함수인 자기장  $B$

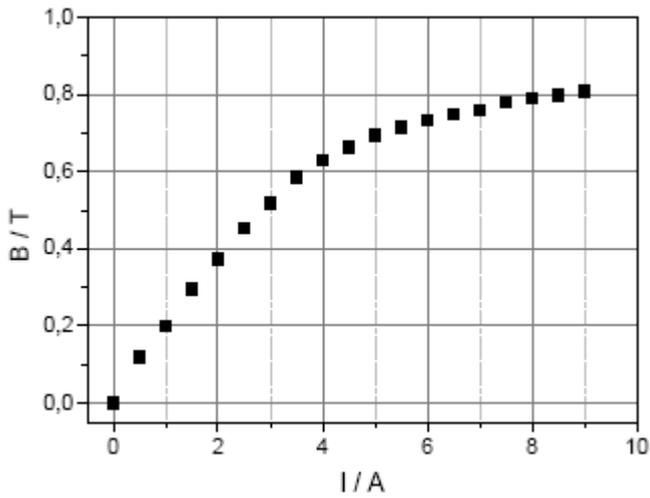


그림 4. 전류 I의 함수인 자기장 곡선의 보정

b) 자기장의 함수인 Hall 전압의 측정

$\frac{B}{T}$	$\frac{U_H}{\mu V} (I = 15 A)$	$\frac{B}{T}$	$\frac{U_H}{\mu V} (I = 20 A)$
0.20	4.6	0.20	6.25
0.35	8.2	0.38	11.7
0.51	12.0	0.50	15.0
0.62	14.1	0.61	18.1
0.70	16.1	0.68	20.5
0.73	17.0	0.70	21.0
0.76	17.7	0.72	21.6
0.78	18.1	0.76	22.7
0.80	18.6	0.80	24.0

표 2. 일정한 가로 전류 I에 대한 자기장의 함수인 Hall 전압  $U_H$

## (7) 측정결과(예시)

b) 자기장의 함수인 Hall 전압의 측정

가로 전류(transverse current)  $I=15A$ 와  $I=20A$ 에 대한 표 2의 기록된 데이터는 그림 5의 그래프와 같다.

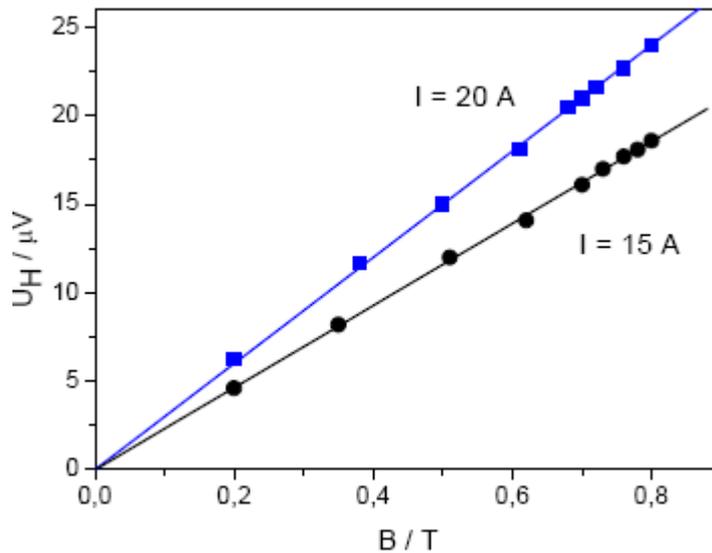


그림 5. 전류 I=15A(원형)과 전류 I=20A(사각형)에 대한 자기장 B의 함수인 Hall 전압  $U_H$ . 사각형 연결선은 식(1)에 대응된다.

### (8) 수치 계산

-그림 8.5로부터 Hall 전압  $U_H$ 는 자기장 B에 비례하므로

$$U_H \sim B \quad (3)$$

위와 같은 식이 나온다.

-또한, 그림 5로부터 가로 전류 I가 증가할수록 Hall 전압  $U_H$ 도 증가하므로

$$U_H \sim I \quad (4)$$

위와 같은 식이 나온다.

\*참고: Hall 전압  $U_H$ 와 가로 전류(transverse current) I 사이의 비례상수는 일정한 자기장 B에 대한 가로 전류 I의 함수인 Hall 전압  $U_H$ 를 측정함으로써 실험적으로 결정될 수 있다.

-실험결과를 식(1)에 대입한 기울기의 결과는 아래와 같다.

$$A_H = \frac{1}{n \cdot e} \frac{I}{d}$$

$$A_H(I=15A) = 23.2 \frac{\mu V}{T}, \quad A_H(I=20A) = 30.4 \frac{\mu V}{T}$$

-두께  $d = 5 \cdot 10^{-5} m$ 인 Hall 계수는 아래와 같이 계산(절대값)될 수 있다.

$$R_H(I=15A) = 7.7 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{C}, \quad R_H(I=20A) = 7.6 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{C}$$

$$\text{문헌 수치: } R_H = 8.9 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{C}$$

-Hall 전압은 음의 부호로 결정된다. 이것은 은(Ag)내에서의 전도(conduction) 메커니즘이 주로 음의 전하 운반자(charge carrier)에 의한 것임을 보여준다.

-기본전하  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$  은 전하 운반자의 밀도를 따르는데 아래와 같다:

$$n(I=15A) = 8.1 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3}, \quad n(I=20A) = 8.2 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3}$$

$$\text{문헌 수치: } 6.6 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3} \quad (\text{원자들의 밀도: } 5.8 \cdot 10^{22} \frac{1}{m^3})$$

## (9) 추가 정보

1916년에 Tolman은 전자가 금속내의 전하 운반자라는 확실한 증거를 얻었다.

# 참고자료

-매뉴얼 영문원본-