# 제34회 국제 물리 올림피아드

# 대만 타이베이

# 실험 경연

# 2003년 8월 6일 (수)

# 주어진 시간: 5시간

**먼저 다음을 읽으시오:**

1. 주어진 펜만 쓰시오.
2. 답안지와 종이는 앞면만 쓰시오.
3. 답에는 글을 될 수 있는 한 적게 쓰고, 주로 식, 수, 그림으로 나타내시오. 요구하는 결과가 수치라면 최종 결과 밑에 물결선을 그으시오.

4. 빈 종이에는 측정 결과와, 문제 풀이에 필요하고 채점받고 싶은 것을 모두 적으시오.

5. 쓴 종이마다 맨 위 칸에 국가(Country)와 학생 번호[Student No.]를 반드시 적어야 한다. 또 각 문제에 쓴 빈 종이에는 문제 번호[Question No.: 예 A-(1)], 각 종이의 일련번호[Page No.], 각 문제에 쓰고 채점받고 싶은 빈 종이의 전체 수[Total No. of pages]를 적으시오. 채점받고 싶지 않은 메모용 빈 종이는 종이 전체에 크게 ×표를 하고 번호에 넣지 마시오.

6. 시험이 끝나면 답안지와 그래프를 순서대로 정리하시오.
7. **그래프의 오차 막대는 실험 A 부분에서만 필요하다.**
8. **주의: 레이저 빛을 직접 들여다보지 마시오. 눈을 다칠 수 있다!!**

## 장치와 재료

1. 주어진 장치와 재료는 다음 표와 같다.

| 항목 | 장치와 재료 | 수량 |
|---|---|---|
| A | 광검출기(PD) | 1 |
| B | 회전 받침이 달린<br>편광판 | 2 |
| C | 90˚ TN 액정 셀(노란 선),<br>회전 액정 받침 포함 | 1 |
| D | 함수 발생기 | 1 |
| E | 레이저 다이오드(LD) | 1 |
| F | 멀티미터 | 2 |
| G | 평행 배향 액정 셀<br>(주황 선) | 1 |
| H | 가변 저항 | 1 |

| 항목 | 장치와 재료 | 수량 |
|---|---|---|
| I | 건전지 | 2 |
| J | 건전지 상자 | 1 |
| K | 광학대 | 1 |
| L | 반투명 종이 | 2 |
| M | 자 | 1 |
| N | 흰 테이프 *<br>(장치에 표시하는 용도) | 1 |
| O | 가위 | 1 |
| P | 그래프 용지 | 10 |

* 장치에 직접 표시하지 마시오. 필요하면 흰 테이프를 조금 잘라 붙이고 그 위에 표시하시오.

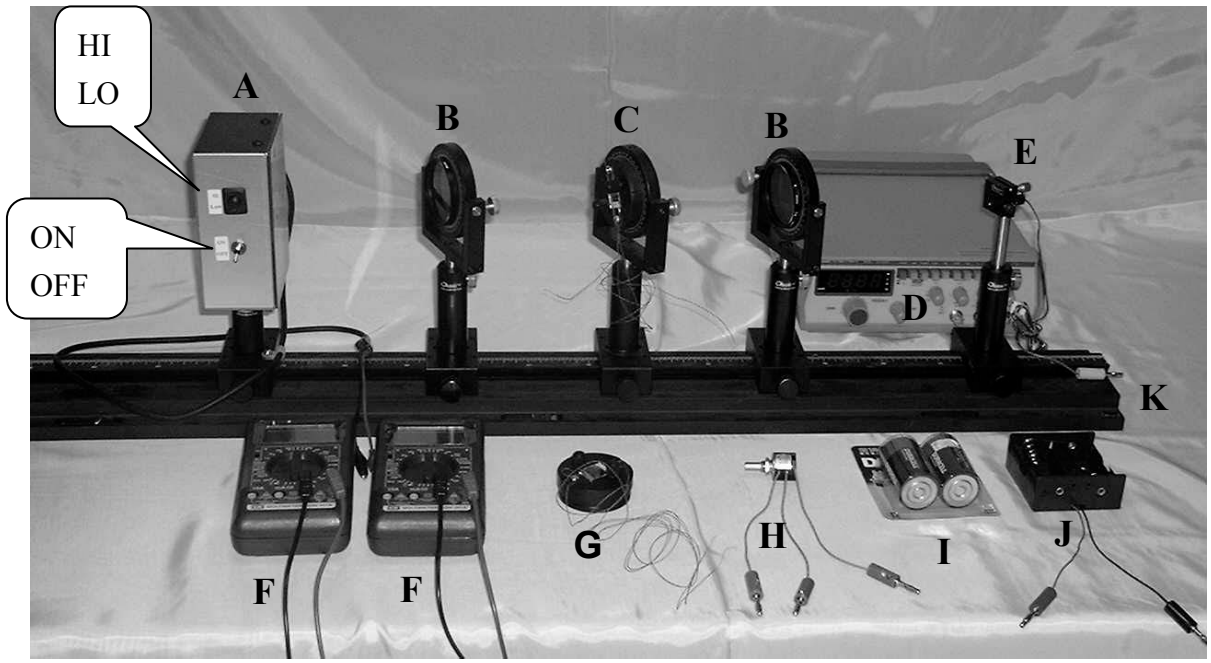



그림 1

2. 멀티미터 사용법:

- “DC/AC” 스위치로 직류(DC)나 교류(AC) 측정을 고른다.
- 전압과 저항을 잴 때는 “VΩ” 단자와 “COM” 단자를 쓴다.
- 작은 전류를 잴 때는 “mA” 단자와 “COM” 단자를 쓴다. 그러면 화면에 전류가 밀리암페어 단위로 나타난다.
- 기능 다이얼로 알맞은 기능과 측정 범위를 고른다. “V”는 전압 측정, “A”는 전류 측정, “Ω”는 저항 측정이다.

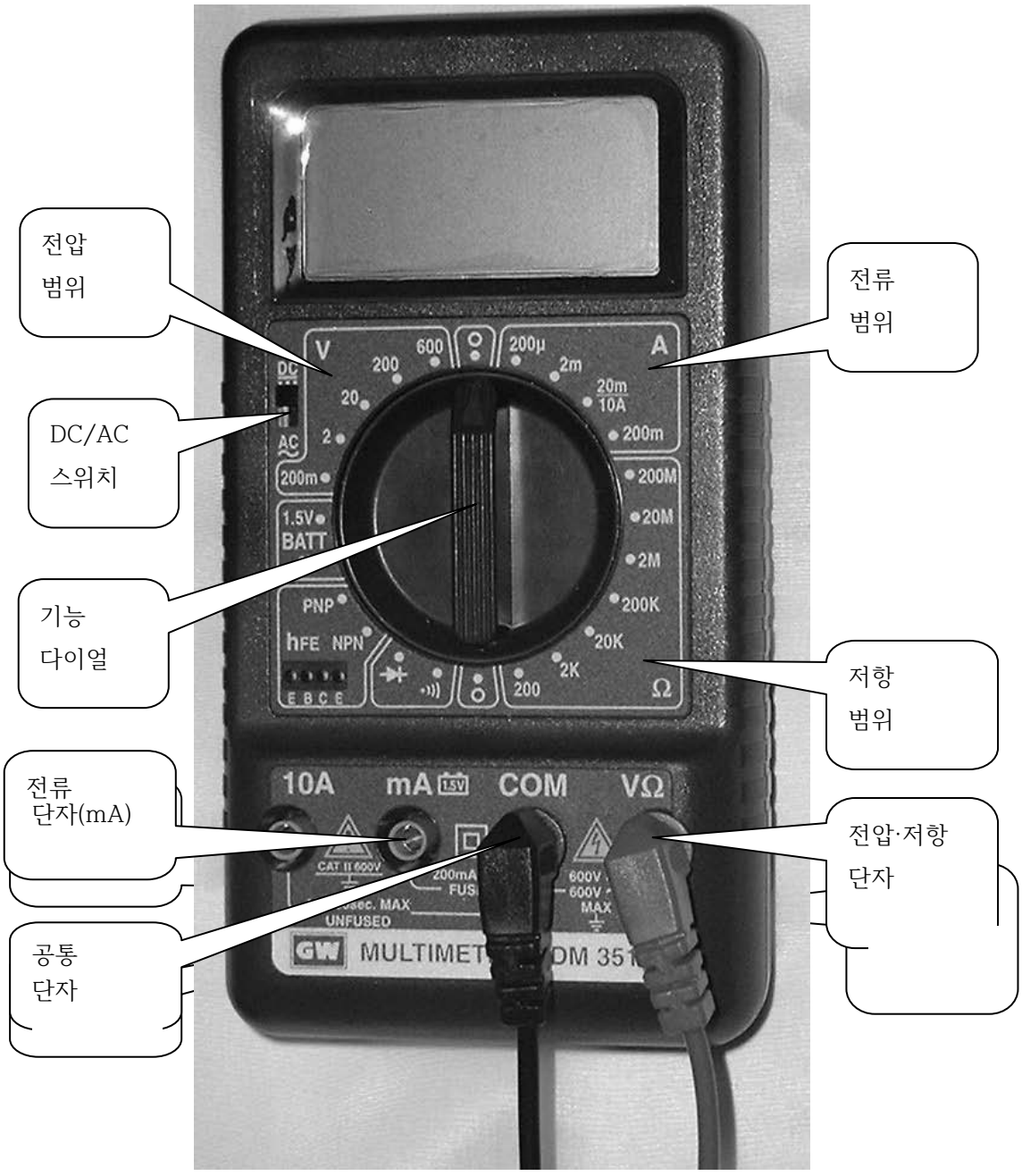



그림 2

3. 함수 발생기 사용법:

- 전원 단추를 한 번 누르면 켜지고(“ON”) 다시 누르면 꺼진다(“OFF”).
- 진동수 범위를 골라 해당 단추를 누른다.
- 진동수는 디지털 화면에 나타난다.
- 진동수 거친 조정 손잡이와 미세 조정 손잡이로 알맞은 진동수를 맞춘다.
- 맨 왼쪽 파형 단추를 눌러 사각파를 고른다.
- 진폭 조정 손잡이로 출력 전압을 바꾼다.

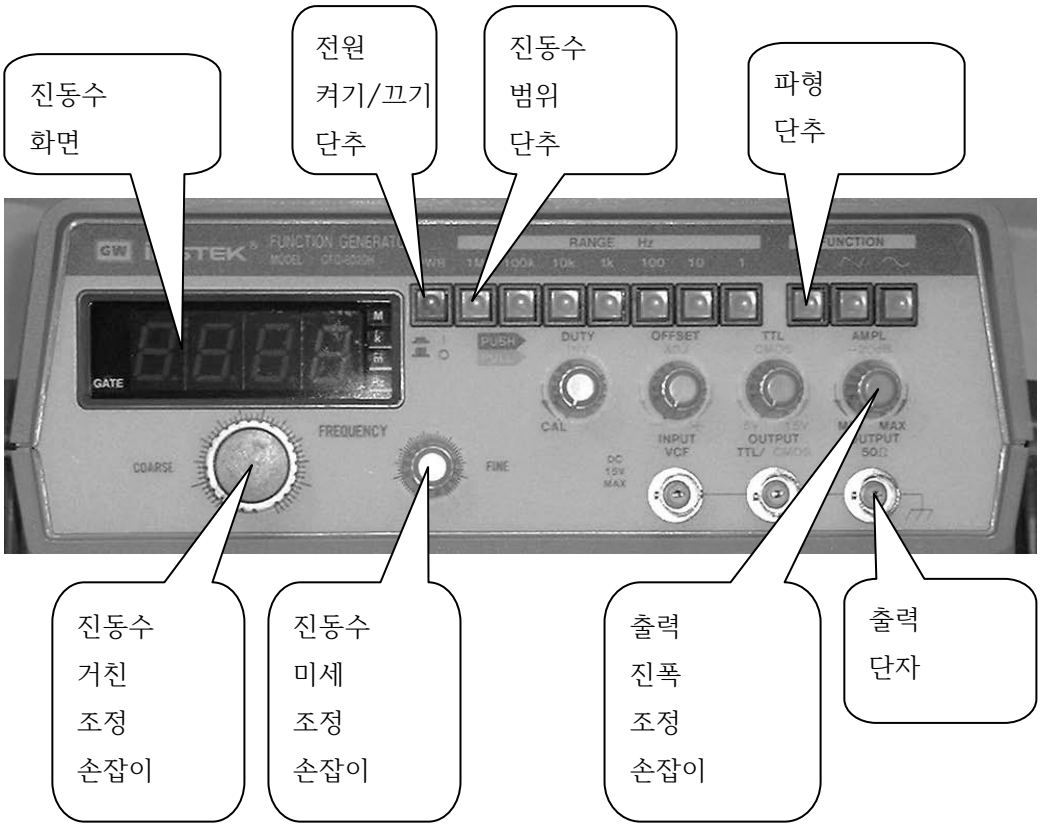



그림 3

# 부분 A: 레이저 다이오드의 광학적 성질

## I. 들어가며

### 1. 레이저 다이오드

이 실험의 광원은 파장 650 nm의 레이저 빛을 내는 레이저 다이오드이다. 레이저 다이오드(LD)의 전류가 문턱 전류보다 크면, 레이저 다이오드는 단색이고 부분적으로 편광된 결맞는 빛을 낼 수 있다. 레이저 다이오드의 전류가 문턱보다 작으면 나오는 빛의 세기는 매우 작다. 문턱 전류를 넘으면 빛의 세기는 전류에 따라 급격히 커지며 전류와 선형 관계를 유지한다. 전류가 더 커지면 레이저 다이오드의 온도가 높아지므로 전류에 대한 세기의 증가율이 작아진다. 그러므로 레이저 다이오드의 최적 작동 전류 범위는 세기가 전류에 선형인 영역이다. 일반적으로 문턱 전류 $I_{th}$는 선형 영역의 외삽선이 전류 축과 만나는 점으로 정의한다.

**주의: 레이저 빛을 직접 들여다보지 마시오. 눈을 다칠 수 있다!!**

### 2. 광검출기

이 실험에 쓰는 광검출기는 포토다이오드와 전류 증폭기로 이루어져 있다. 포토다이오드에 외부 바이어스 전압을 걸면 다이오드에 들어오는 빛에 의해 광전류가 생긴다. 온도가 일정하고 들어오는 빛이 단색이면 광전류는 빛의 세기에 비례한다. 한편 전류 증폭기는 광전류를 출력 전압으로 바꾸는 데 쓰인다. 이 광검출기에는 두 가지 변환비, 곧 높은 이득과 낮은 이득이 있다. 이 실험에서는 낮은 이득만 쓴다. 그러나 포토다이오드 자체의 한계 때문에 빛의 세기가 너무 크면 출력 전압이 약 8 V에서 포화되어 포토다이오드가 더 이상 제대로 작동하지 못한다. 그러므로 광검출기의 알맞은 작동 범위는 출력 전압이 실제로 빛의 세기에 비례하는 범위이다. 빛의 세기가 너무 커서 포토다이오드가 포화되면 광검출기의 읽은 값은 들어오는 빛의 세기를 올바르게 나타내지 못한다.

## II. 실험과 절차

### 레이저 다이오드와 광검출기의 특성

실험을 성공적으로 하려면 실험 장치의 여러 부분 사이에서 빛살의

광학 정렬이 매우 중요하다. 또 광원과 검출기를 알맞은 조건에서 작동해야 한다. 부분 A는 이러한 문제들과 편광도 문제에 관한 것이다.

1. 그림 4처럼 레이저 다이오드와 광검출기를 광학대 위에 수평으로 일직선이 되게 놓으시오. 가변 저항, 건전지 묶음, 전류계, 전압계, 레이저 다이오드, 광검출기를 그림 5처럼 연결하시오. LD에 흐르는 전류가 약 25 mA가 되어 레이저 다이오드가 레이저 빛을 제대로 내도록 가변 저항을 맞추시오. 광검출기는 낮은 이득을 고르시오. 레이저 빛이 검출기 상자의 작은 구멍 높이에 오고 광검출기 읽은 값이 최대가 되도록 레이저 다이오드와 광검출기를 정렬하시오.

   **주의: 합선을 막으려면 건전지의 검은 선과 빨간 선이 서로 닿지 않게 하시오.**

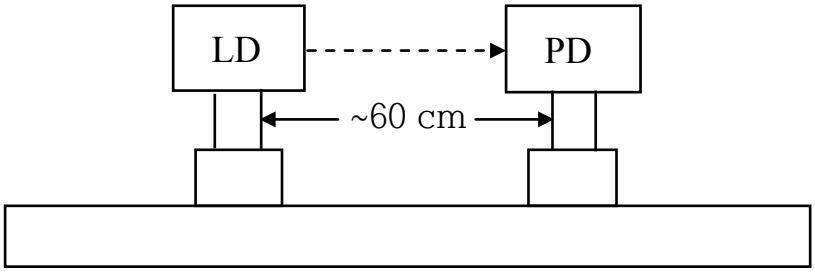



그림 4 광학 장치 (LD: 레이저 다이오드, PD: 광검출기)

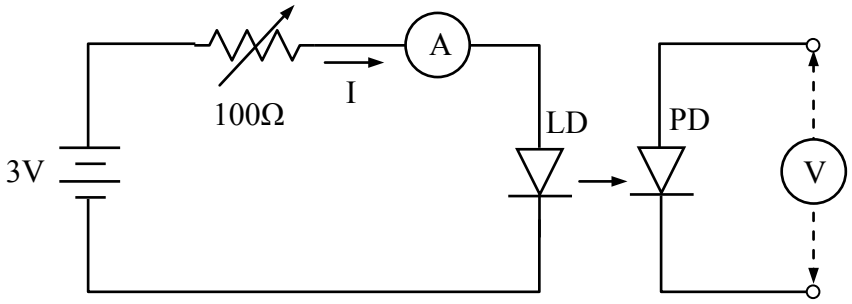



그림 5 레이저 다이오드 연결의 등가 회로

2. 광검출기의 출력 전압으로 레이저 빛의 세기 J를 나타내시오. 가변 저항을 조절해 레이저 다이오드의 전류 I를 0부터 최댓값까지 바꾸며 I가 커짐에 따라 J를 재시오. 측정할 때 전류 증가 간격을 알맞게 고르시오.

문제 A-(1) (1.5점)
J 대 I 곡선을 재고, 표로 만들고, 그리시오.

문제 A-(2) (3.5점)
J 대 I 곡선의 선형 영역에서 최대 전류 $I_m$을 불확도와 함께 어림하시오. J-I 곡선 그림에 화살표(↓)로 선형 영역을 표시하고, 문턱 전류 $I_{th}$를 불확도와 함께 정하시오.

3. 레이저 다이오드와 광검출기가 잘 작동하도록 레이저 다이오드의 전류를 $I_{th} + 2(I_m - I_{th})/3$으로 고르시오.
4. 부분 B 실험 준비: 그림 6처럼 레이저 다이오드 가까이 광학대 위에 편광판을 놓으시오. 레이저 빛이 편광판의 가운데를 지나게 하시오. 들어오는 레이저 빛이 편광판 면에 수직이 되도록 편광판을 맞추시오. (도움말: 반투명 종이를 시험 화면으로 끼워 넣어 들어오는 빛과 반사된 빛의 점이 겹치는지 확인할 수 있다.)

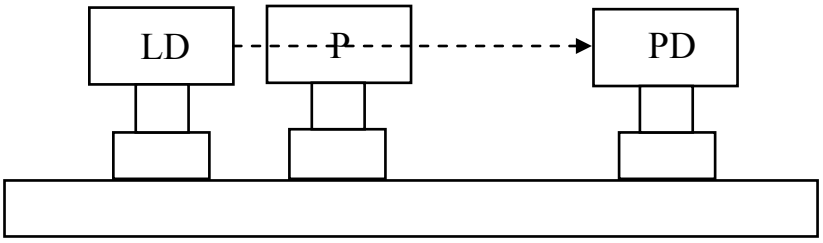



그림 6 편광판 정렬 (P: 편광판)

5. 레이저 다이오드의 전류를 그대로 두고, 둘째 편광판을 광학대 위에 놓아 제대로 정렬하시오. 곧, 광원, 검출기, 편광판들을 일직선에 놓고 각 편광판 면이 빛살에 수직이 되게 하시오.

## 부분 B 네마틱 액정의 광학적 성질:

90˚ TN 액정 셀의 전기 광학 스위칭 특성

### I. 들어가며

1. 액정

액정(LC)은 결정 고체와 비정질 액체의 중간에 있는 물질 상태이다. 네마틱 액정은 길쭉한 바늘 모양 분자로 이루어진 유기 화합물이다. 분자의 방향은 전기장을 걸어 쉽게 정렬하고 조절할 수 있다. 대부분의 액정 소자에는 액정 분자의 방향이 균일하거나 잘 정해져 있어야 한다. 이 실험에 쓰는 액정 셀의 구조는 그림 7과 같다. 폴리이미드 막을 문지르면 기판 표면에서 액정 분자가 잘 정렬된 선호 방향을 갖게 되고, 분자 사이 상호작용 때문에 액정 층 전체가 균일한 분자 방향을 이룰 수 있다. 어떤 점에서 분자의 국소 방향을 그 점에서 액정의 방향자라 한다.

액정 셀은 두 주굴절률을 가진 이른바 겹굴절 현상을 보인다. 빛이 방향자 방향으로 진행하면 모든 편광 성분이 같은 속력 $v_0 = c/n_0$으로 진행하며, $n_0$을 정상

굴절률이라 한다. 이 진행 방향(방향자 방향)을 액정 셀의 광축이라 한다. 빛살이 광축에 수직인 방향으로 진행하면 일반적으로 진행 속력이 두 가지이다. 광축에 수직(또는 평행)으로 편광된 빛의 전기장은 속력 $v_0 = c/n_0$(또는 $v_e = c/n_e$)으로 진행하며, $n_e$를 이상 굴절률이라 한다. 겹굴절(광학적 비등방성)은 이상 굴절률과 정상 굴절률의 차 $\Delta n \equiv n_e - n_0$으로 정의한다.

$$n \equiv n_e - n_o .$$

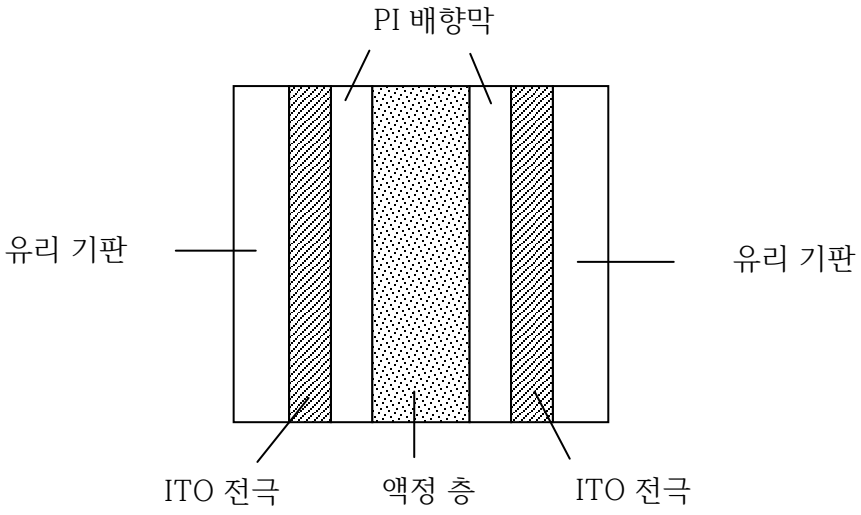



그림 7 액정 셀의 구조

2. 90˚ 꼬인 네마틱 액정 셀

그림 8의 90˚ 꼬인 네마틱(TN) 셀에서는 뒷면의 액정 방향자가 앞면에 대해 90˚ 꼬여 있다. 앞면의 국소 방향자는 편광판의 투과축에 평행하게 맞춘다. 들어오는 편광되지 않은 빛은 앞 편광판에 의해 선편광된 빛으로 바뀐다.

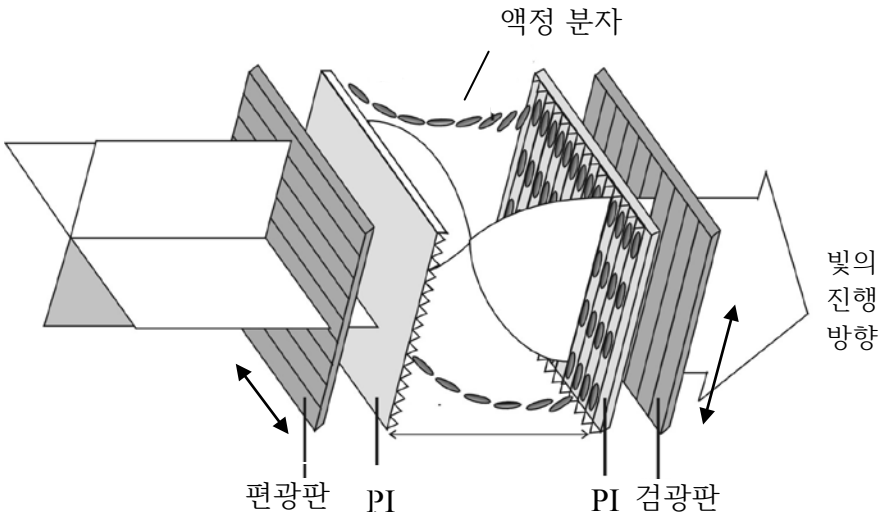



그림 8 90˚ TN 액정 셀

선편광된 빛이 90˚ TN 셀을 지나가면 그 편광이 액정 방향자의 꼬임을 따라가므로(편광된 빛은 $n_e$만 느낀다) 나오는 빛은 편광축이 90˚ 돌아간 것을 빼면 여전히 선편광이다(이를 $n_e$에 의한 편광 회전 효과라 하며, 비슷하게 $n_0$에 의한 편광 회전 효과도 있다). 따라서 90˚ TN 셀을 쓰는 정상 흑색(NB) 방식에서는 그림 9처럼 검광판(둘째 편광판)의 투과축을 편광판의 투과축에 평행하게 맞춘다. 그러나 액정 셀에 걸어 준 전압 V가 임계값 $V_c$를 넘으면 액정 분자의 방향자가 걸어 준 외부 전기장, 곧 빛의 진행 방향으로 정렬하려 한다. 그러면 액정 셀의 편광 안내 효과가 차츰 줄어들어 빛이 검광판을 새어 나온다. 전기 광학 스위칭 기울기 $\gamma$는 $(V_{90} - V_{10})/V_{10}$으로 정의하며, 여기서 $V_{10}$과 $V_{90}$은 나오는 빛 신호가 최대 세기의 10%와 90%에 이르게 하는 전압이다.

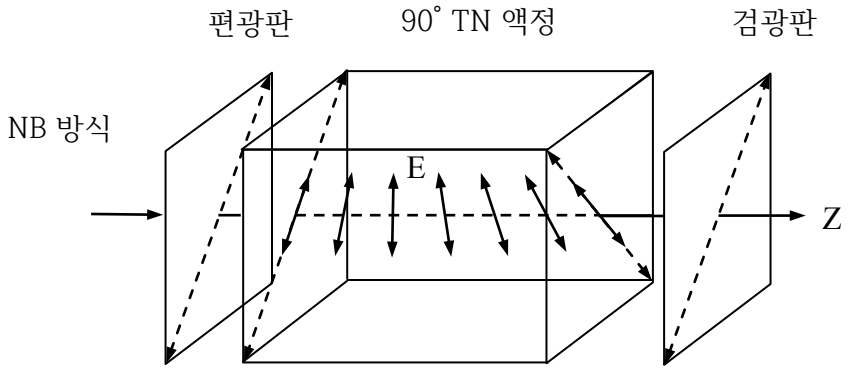



그림 9 90° TN 셀의 NB 방식 작동

## II. 실험과 절차

1. 투과축이 평행한 두 편광판 사이에 NB 90° TN 액정 방식을 꾸미고, 함수 발생기로 두 유리 기판의 ITO 부분에 100 Hz 사각파 전압을 걸어 걸어 준 전압($V_{rms}$)을 0부터 7.2 V까지 바꾸시오.
   * 결정적으로 꺾이는 곳에서는 필요하면 데이터를 더 얻으시오.

문제 B-(1) (5.0점)
NB 90° TN 액정의 전기 광학 스위칭 곡선(J 대 $V_{rms}$ 곡선)을 재고, 표로 만들고, 그리고, 스위칭 기울기 γ를 구하시오. 여기서 γ는 $(V_{90} - V_{10})/V_{10}$으로 정의한다.

문제 B-(2) (2.5점)
이 NB 90° TN 액정 셀의 임계 전압 $V_c$를 정하시오. $V_c$ 값을 어떻게 정했는지 그래프로 분명히 보이시오.
도움말:* 외부에서 걸어 준 전압이 임계 전압을 넘으면 빛의 투과가 빠르고 갑작스럽게 커진다.

## 부분 C 네마틱 액정의 광학적 성질:
## 평행 배향 액정 셀의 전기 광학 스위칭 특성

### I. 들어가며

**균일한 평행 배향 액정 셀**

평행 배향 액정 셀에서는 그림 10처럼 앞뒤 기판의 방향자가 서로 평행하다. 선편광된 빛이 액정 방향자(문지른 방향)에 평행하게 편광된 채 평행 배향 셀에 들어가면, 빛은 이상 광선으로만 행동하므로 순수한 위상 변조가 이루어진다.

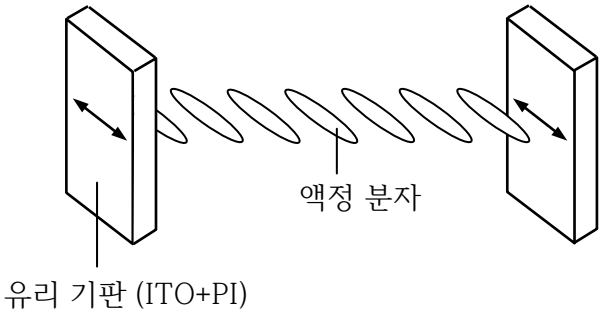



그림 10 균일한 평행 배향 액정

한편 선편광된 빛이 평행 배향 셀에 수직으로 들어가되 그 편광이 배향된 액정 방향자 방향에 대해 θ = 45°를 이루면(그림 11), 액정 매질 속에서 이상 광선과 정상 광선의 진행 속력이 달라서 위상 지연이 생긴다. 이 θ = 45° 배치에서 두 편광판이 평행하면 평행 배향 액정 셀의 규격화된 투과율은 다음과 같다.

$$T_{\parallel} = \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

위상 지연 δ는 다음과 같이 나타낸다.

$$\delta = 2\pi d \Delta n(V, \lambda) / \lambda$$

여기서 d는 액정 층의 두께, λ는 공기 속 빛의 파장, V는 걸어 준 교류 전압의 제곱평균제곱근, Δn은 λ와 V의 함수인 액정의 겹굴절이다. V = 0에서 Δn (= $n_e - n_0$)이 최댓값을 가지며 δ도 그렇다는 점에도 주의하시오. 또 V가 커지면 Δn은 작아진다. 일반적인 경우에는 다음과

같다.

$$T_{//} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

$$T_{\perp} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

여기서 //와 ⊥는 검광판의 투과축이 편광판의 투과축에 각각 평행하고 수직임을 나타낸다.

## II. 실험과 절차

1. NB 90° TN 액정 셀을 평행 배향 액정 셀로 바꾸시오.
2. 그림 11처럼 V = 0에서 θ = 45° 배치를 꾸미시오. 검광판의 투과축을 편광판의 투과축에 수직으로 둔 다음, 투과광의 세기가 최댓값(T⊥)에 이를 때까지 평행 배향 액정 셀을 돌리시오. 이 과정으로 θ = 45° 배치가 정해진다. T⊥ 값을 적은 다음, 검광판의 투과축을 편광판의 투과축에 평행하게 두고 같은 액정 셀의 투과광 세기(T//)를 재시오(역시 V = 0에서).

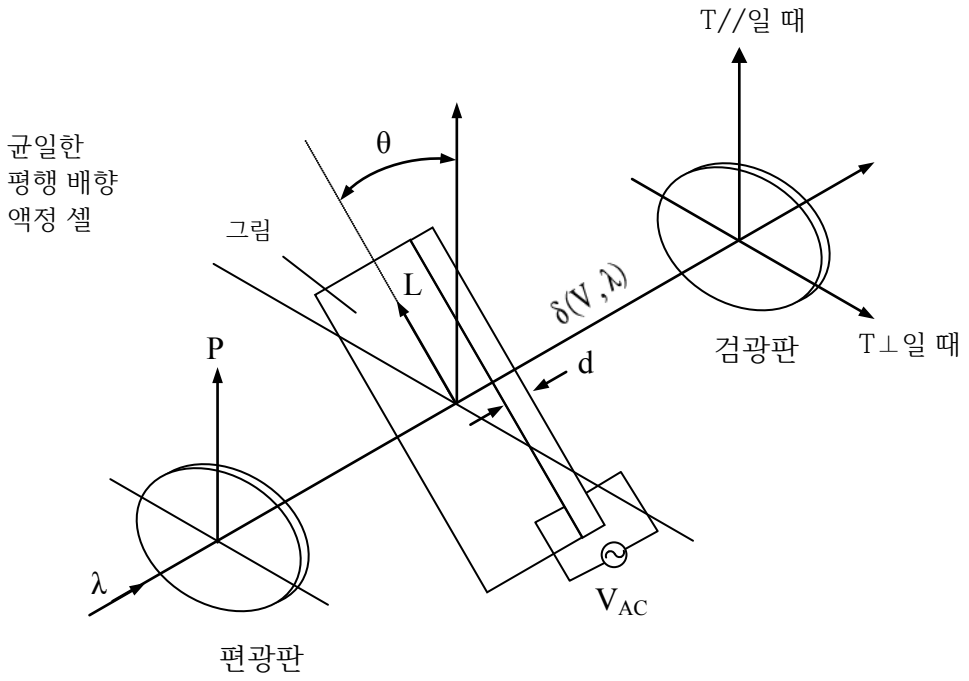



그림 11 실험 장치의 개략도
(화살표 L은 배향 방향이다.)

문제 C-(1) (2.5점)
레이저 빛의 파장 650 nm, 액정 층 두께 7.7 μm, Δn의 근삿값 ≈ 0.25가 알려져 있다고 하자. 위에서 얻은 실험 데이터 T⊥와 T∥로부터 V = 0에서 이 액정 셀의 위상 지연 δ의 정확한 값과 겹굴절 Δn의 정확한 값을 계산하시오.

3. 위 실험 (1)과 비슷하게, θ = 45° 배치에서 함수 발생기로 두 유리 기판의 ITO 부분에 100 Hz 사각파 전압을 걸고, 걸어 준 전압($V_{rms}$)을 0부터 7 V까지 바꾸며 검광판의 투과축이 편광판의 투과축에 평행할 때의 전기 광학 스위칭 곡선(T∥)을 재시오. (도움말: T⊥ 스위칭 곡선을 재 두면 위 T∥ 측정의 데이터 정확도를 높이는 데 도움이 된다. T⊥ 데이터는 다음 문제들에 필요하지 않다.)

*** 결정적으로 꺾이는 곳에서는 필요하면 데이터를 더 얻으시오(특히 0.5-4.0 V 범위에서).**

문제 C-(2) (3.0점)
θ = 45° 배치에서 이 평행 배향 액정 셀의 T∥에 대한 전기 광학 스위칭 곡선을 재고, 표로 만들고, 그리시오.

문제 C-(3) (2.0점)
전기 광학 스위칭 데이터로부터 외부에서 걸어 준 전압 V_π의 값을 구하시오.
도움말: * V_π는 이 비등방성 액정 셀의 위상 지연을 π(곧 180°)로 만드는 걸어 준 전압이다.
* Δn은 걸어 준 전압의 함수이고, V가 커지면 Δn이 작아진다는 것을 기억하시오.
* V_π의 정확한 값을 정할 때는 아마 보간이 필요할 것이다.