

## 학부용 편광계와 543 nm에서 설탕의 비회전 측정

정세민<sup>†</sup>

동아대학교 자연대학 신소재 물리학과  
☎ 604-714 부산시 사하구 하단2동 840번지

(2012년 8월 7일 받음, 2012년 11월 22일 수정본 받음, 2012년 11월 23일 게재 확정)

광학 활성의 측정은 고분자, 광통신, 천문학, 물리학 등과 관련된 분야에서 매우 중요한 주제가 되고 있다. 따라서 이와 같은 경향은 이 주제를 학부 실험에 반영되도록 할 필요가 있다. 이 실험에서는 파장이 543 nm인 헬륨-네온 레이저와 학부용으로 시판되는 파스코 사의 검출기, 회전 엔코더 및 자료 수집기를 사용해서 저비용으로 믿을만한 결과를 주는 편광계를 구성하고 관련 이론과 실험식을 제시하였다. 장치 성능을 검증하기 위해 반파장판을 표준 시료로 사용했으며, 그 후 농도가 30 %인 설탕 용액을 측정 시료로 사용해 비회전을 측정해 보았다. 설탕의 비회전 측정 결과는 +76 deg.cc/g.dm로써, 기존의 CRC 자료<sup>[1]</sup>들의 내삽을 통해 추정된 값과 거의 동일했으므로, 대부분 학부 수준의 실험에서도 충분히 수용 가능하다고 판단되었다.

## An Undergraduate Level Polarimeter and Specific Rotation at 543 nm of Sucrose

Semin Jung<sup>†</sup>

*Department of New Material Physics, Dong-A University, 840 Hadan-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea*

(Received August 7, 2012; Revised manuscript November 22, 2012; Accepted November 23, 2012)

Measurements of the optical activity become very important issues in fields related to polymers, optical communications, astronomy, physics and many more. Hence it need to introduce this subject in our regular curriculum. In this experiment, an inexpensive, reliable, motorized polarimeter system which is suitable for undergraduate courses is constructed with PASCO's well-known Science Workshop 750 and a rotational motion sensor and light sensor, and the system is presented along with its experimental formulas. After responsivity of this system was checked by a half wave plate, and some repetitive experiments with 30% sucrose solution at 543.8 nm were performed. Comparing the experimental result with two calculated values from CRC data<sup>[1]</sup> showed that the specific rotation of the sucrose sample could be strongly suggested to be around +76 deg.cc/g.dm and it was an amply acceptable result for most undergraduate level courses.

Keywords: Polarimeter, Specific rotation, Experimental formula, Sucrose, 543 nm

OCIS codes: (000.2060) Education; (000.2170) Equipment and techniques; (000.2190) Experimental Physics; (000.2658) Fundamental tests; (120.5410) Polarimetry

### I. 서 론

송진(Turpentine) 기름, 설탕 용액, 장뇌(Camphor) 증기 등이 광학 활성을 가지고 있음을 1815년 Biot가 보고한 이래, 다수의 정방형 결정이나 단축성 및 이축성 결정, 생물에 의해 합성된 각종 유기 고분자들에서도 이와 같은 현상이 관찰됨에 따라서 이제는 엄연한 물질의 한 광학적 특성으로 자리 잡고 있으며, 생물 고분자의 특성을 다루는 분자 생물학의 중요한 주제들 중의 하나이다. 나아가 이 특성은 광학 회전

분산(ORD)<sup>[2]</sup>라는 이름으로 화학 공업, 생명 공학, 의공학, 제약 분야들에서 인공적으로 합성된 많은 고분자 물질들을 조사하는데 이용되고 있다. 뿐만 아니라 평소에는 광학 활성이 없는 많은 물질들조차 외부 인장 및 압축력 또는 외부 전기장이나 자기장 속에서 활성을 띄게 됨이 밝혀지면서 활성의 적용 분야를 더욱 넓히게 되었다. 광학 활성의 일반적인 응용 분야는 비선광도 측정을 통한 농도 측정이지만, 그보다도 광학 소자, 광 변조기, 표면 관찰 및 분석을 포함한 각종 광 관련 측정 및 통신 분야에서 핵심적인 기능을 담당

<sup>†</sup>E-mail: [smjung@dau.ac.kr](mailto:smjung@dau.ac.kr)

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

하고 있으며, 이론적인 면에서도 비선광도는 광학적 매질의 분자적 변수들에 직접 관련되므로, 거시적 물리량으로 부터 미시적 물리량을 직접 구할 수 있게 한다는 점에서 매우 흥미로운 점이 있다.

광학 활성을 측정하는 기본 도구는 편광계로써 1882년 경 Laurent에 의해 Split-Field 방식의 편광계가 처음으로 제작된 후 지금까지 사용되고 있지만, 근래에 들어 사용 범위가 확대되면서 더욱 개량되고 복잡해진 모습으로 고체 물리학<sup>[3]</sup>, 천체 물리학<sup>[4]</sup>, 플라즈마 물리학<sup>[5]</sup>, 입자 물리학<sup>[5]</sup>, 핵 물리학<sup>[5]</sup> 등에서 사용되고 있다. 따라서 이와 같은 경향을 학부 실험에 반영할 필요가 있다고 본다.

현재 시판되고 있는 장치들은 육안 관측용인 Laurent 형 편광기 그대로이거나 아니면 전자적 측정계를 도입한 것으로써, 가격이 비싼 편이다. 또한 최근에는 레이저를 사용하는 레이저 편광계<sup>[8]</sup>가 소개되고 있지만, 이들 역시 연구용으로 아직 보편화되어 있지 않다. 하지만 폴라로이드 판으로 구성되는 단순한 편광계를 사용할 경우, 검광자를 수동으로 회전시키면서 측정 신뢰도를 높이기 위해 광 세기 변화를 전자적 검출기로 측정한다면, 결과는 대부분 Malus의 법칙으로부터 기대되는 것과는 다른 결과를 얻기가 쉽다. 이 원인은 주로 검광자의 수동 조작에 따른 측정기의 반응에 있으며, 그 외에도 장치의 진동 및 편광판의 고분자 배열에서 비롯되는 간섭상에 의한 잡음발생 문제, 편광판의 굴곡에 의한 세기변화 등에 있으므로, 최소한 검광자의 회전은 자동화되는 것이 바람직하다. 회전을 자동화하는 경우라도 관련 실험식이 잘 알려져 있지 않은 점과 적당한 가격의 장치 구입 문제가 있다. 다행히도 근래에 PASCO사의 신호 수집기가 소개되고 있는 데, 이것은 저렴할 뿐만 아니라, 애널로그 단자만으로 구성된 일반적인 수집기와는 달리, 애널로그 신호 입, 출력 단자 외에도 디지털 신호 입력 단자가 추가되어 있고, 이와 함께 다양한 학부실험에 필요한 검출기들 및 소품들과 프로그램도 함께 제공되고 있어 매우 편리하다. 특히 회전 검출기를 소품으로 추가한다면, 검광자의 수동 조작으로 인한 문제가 해소될 수 있어서 Malus의 법칙을 직접 확인해 볼 수 있을 뿐만 아니라, 검광자의 회전을 반드시 자동화할 필요도 없게 된다.

본 실험에서는 폴라로이드 편광자, 모터로 회전되는 검광자와 PASCO의 자료 수집기, 광검출기 및 회전 검출기로 구성된 학부 실습용 편광계와 관련된 실험식이 제시된다. 장치의 검증에는 반파장판이 시료로 사용되며, 자료가 잘 알려져 있지 않은 543 nm에서 자당(Sucrose)의 비선광도의 측정 결과가 참고로 제시된다.

## II. 광회전 이론

광 회전과 관련된 초보적인 이론들이 몇 가지 소개되어 있지만, 그 중에서 학부생에게 쉽게 접근될 수 있는 것은 프레넬(Fresnel)의 회전 이론<sup>[6]</sup>이다. 이 이론의 기본은 하나의 선 편광 상태를 서로 회전 방향이 반대인 두 원 편광의 합으로

보는 점이다. 즉, 어떤 단색 선형 편광  $x=a \cos\omega t$ 는 다음과 같이 두 원편광 성분으로 분해될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{cc} &= \frac{a}{2} \cos\omega t & y_{cc} &= \frac{a}{2} \sin\omega t \\ x_c &= \frac{a}{2} \cos\omega t & y_c &= -\frac{a}{2} \sin\omega t \end{aligned} \quad (1)$$

식에서 아래 첨자들은 각각 반시계 방향과 시계 방향을 의미한다. 프레넬에 의하면, 두 원 편광이 광학 활성인 매질을 통과할 때 서로 다른 속도로 전파됨으로써 두 성분 사이에 위상차  $\Phi$ 가 존재하게 된다.

입사 선형 편광을 나타낸 좌표계를  $xy$ 계라 하고, 매질을 통과하는 두 원 편광을 매질 내부의 새로운 좌표계,  $x'y'$ 계로 표시하면,

$$\begin{aligned} x'_{cc} &= \frac{a}{2} \cos\omega t & y'_{cc} &= \frac{a}{2} \sin(\omega t + \Phi) \\ x'_c &= \frac{a}{2} \cos\omega t & y'_c &= -\frac{a}{2} \sin(\omega t + \Phi) \end{aligned} \quad (2)$$

두 원 편광을 합성하면

$$\begin{aligned} x' &= x'_c + x'_{cc} = \frac{a}{2} [\cos\omega t + \cos(\omega t + \Phi)] \\ y' &= y'_c + y'_{cc} = \frac{a}{2} [\sin\omega t - \sin(\omega t + \Phi)] \end{aligned} \quad (3)$$

이 식을 정리하면

$$\begin{aligned} x' &= a \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\Phi}{2}\right) \\ x' &= -a \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\Phi}{2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

이 결과는  $a \cos\omega t$ 인 단색 선형 편광이 매질을 통과하면서 위상차가  $\Phi$ 만큼 발생되었으나 새로운  $x'y'$  좌표계에서 볼 때는  $x'y'$  좌표계가  $xy$  좌표계에 대해  $\Phi/2$ 만큼 회전되었기 때문에 위상변화가 없어 보이지만,  $x'y'$  좌표계가  $xy$  좌표계에 대해  $\Phi/2$ 만큼 회전되었기 때문에 원래의  $xy$  좌표계에서 볼 때는  $a \cos\omega t$ 에서 위상차가  $\Phi/2$ 만큼 발생한  $a \cos(\omega t + \Phi)$ 인 선형 편광 상태로 보임을 의미한다. 따라서 알짜 회전각은  $\Phi/2$ 가 되므로 이 각을 회전각  $\alpha$ 라고 정의하면, 위상차의 정의로부터, 회전각  $\alpha$ 는

$$\alpha = \frac{\Phi}{2} = \frac{\pi d}{\lambda} (n_{cc} - n_c) \quad (5)$$

식에서  $n_{cc}$ 와  $n_c$ 는 각각 좌회전 및 우회전 원편광에 대한 굴절율로써  $n_{cc} \sim n_c$ 의 값이 양이면 회전은 반시계 방향(Levo-rotation)이고 음이면 시계 방향(Dext-rotation)이 된다. 좌,우의 기준은 좌표계의 설정에 따른 것으로 실험 이론은 광원의 시야에서 본 것이지만, 본 실험에서는 보편적으로 사용되고 있는 검출기의 시야에서 결정된 것이다(광원 관점의 방향과

서로 반대임).

일반적으로 광 회전각은 시료의 밀도 및 농도와 길이에 따라 달라지므로, 광 회전을 일의적으로 정의하기 위해 비회전(회전능, 선광도)  $[\alpha]$ 라는 양이 사용된다. 이  $[\alpha]$ 는 시료의 상에 따라 정의식의 형태가 다르게 표현되고 있다. 즉, 시료가 고체인 경우는 회전각  $\alpha$ 에 대해

$$[\alpha]_r^s = \frac{\alpha(deg)}{d(g/cm^3) \cdot l(dm)} \quad (6)$$

식에서  $d$ 는 시료의 밀도이며,  $l$ 은 광 투과 길이이다. 용액인 경우는

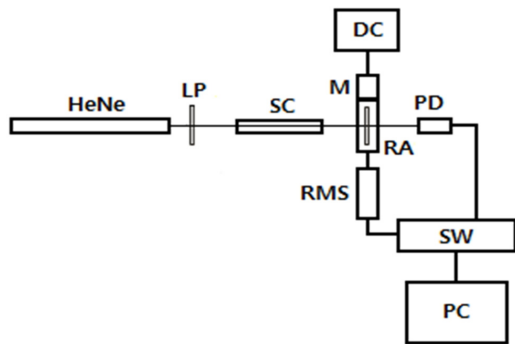
$$[\alpha]_r^l = \frac{\alpha(deg)}{c(g/dl) \cdot l(dm)} \quad (7)$$

식에서  $c$ 는 용액 시료의 농도이다.

### III. 실험

#### 3.1. 편광계의 구성

편광계의 구성은 Fig. 1과 같다. 그림에서 HeNe의 출력은 선형 편광자 LP를 지나면서 선편광되며, 이 선편광은 다시 시료 용기를 지나서 모터로 회전되는 검광자 RA를 통해 광검출기 PD(CI-6504A, PASCO, USA)에 입사된다. 검광자의 회전 각도는 RA와 오-링으로 연결된 회전 검출기 RMS(Rotary Motion Sensor, PASCO, USA)에 의해 검출되어 DAQ(Science Workshop 750, PASCO, USA)로 보내진다. 시료 용기는 두께 2 mm인 투명 아크릴로 만든 창과 두께 5 mm인 벽을 가진 것으로, 가로 10 cm, 세로 1 cm, 높이 3 cm가 되게 제작된 것이다. 신호 기록과 정리에는 PASCO의 각종 측정 관련 프로그램들이 수록되어 있는 Data Studio의 Polarization of Light가 사용되었다.



**FIG. 1.** Experimental set-up of the Polarimeter. (HeNe: Laser (543.8 nm), LP: Linear Polarizer, SC: Sample Cell, RA: Rotating Analyzer, PD: Photo-Detector, RMS: Rotary Motion Sensor, M: Motor, DC: DC Power Supply, SW: Science Workshop 750, PC: Personal Computer)

#### 3.2. 편광계의 출력

Fig. 1에서 편광자( $\alpha$ )와 검광자( $\Phi$ )가  $\Phi = \alpha + \pi/2$ 로 직교 배치된 경우, 광 검출기의 출력비는 흡수나 반사가 없는 이상적인 경우라면 다음 식처럼 유도될 수 있다. 식에서  $I_0$ 는 시료에 입사되는 광의 세기이며,  $\theta$ 는 시료에 의한 선 편광의 회전각,  $\omega$ 는 검광자의 회전 각속도이다. 만일 회전 검출기를 사용하더라도 검광자를 수동으로 회전시키거나, 모터를 사용하더라도 본 실험처럼 검광자의 회전과 자료 수집의 동기화가 곤란한 경우라면,  $\omega$ 가 일의적이지 않아 이를 보완하기 위해 광학 비활성( $\theta=0$ )인 표준 용액(초순수)을 사용할 필요가 있다.

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \sin^2[\omega t - \theta] \quad (\theta \neq 0) \quad (8)$$

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \sin^2[\omega t] \quad (\theta = 0)$$

$\alpha = \Phi$ 로 평행 배치된 경우, 출력비는

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \cos^2[\omega t - \theta] \quad (\theta \neq 0) \quad (9)$$

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \cos^2[\omega t] \quad (\theta = 0)$$

위의 식들은 직교 또는 평행 배치 상태의 검광자가 각속도  $\omega$ 로 연속 회전하는 경우에 관한 Malus의 법칙으로 볼 수 있다. 각 조의 식들에서 임의 기준점들의 각 차이가 곧 시료에 의한 회전각임을 알 수 있으므로, 회전 검출기와 표준 시료가 사용될 경우에는 반드시  $\omega$ 를 알아야 할 필요는 없다.

#### 3.3. 측정 방법

##### 3.3.1. 장치의 검증 절차

- ① PC를 켜고 Data Studio 창을 연 다음 Polarization of Light 창을 연다.
- ② 시료 용기들을 제외한 상태에서 Fig. 1과 같이 장치를 정렬시키고 광원을 켜다.
- ③ Polarization of Light의 Start 아이콘을 마우스로 클릭한 다음 회전 거치대의 반파장판을 거치대의 눈금을 보면서 임의 소각(가령, 2, 4, 6도..순)으로 증가시킨 후 검광자를 회전시키면서 출력 상태를 관찰한다. 이 때 반파장판의 최대 회전 범위는 입사 편광에 대해  $\pm 45$ 도이다.
- ④ 기준 신호부의 출력과 측정부의 출력에서 특정 위치(보통 처음 피크)의 각 차이를 읽는다.
- ⑤ 반파장판은 그 광축에 대해 임의 소각으로 입사된 선편광을 2 배만큼 회전시키므로 측정된 각 차이가 이를 증명하고 있다면 장치에 대한 검증은 완료된다.

**3.3.2. 실험 방법**

- ① 시료(탈이온 수지를 거친 초순수와 자당)와 광경로가 10 cm인 두 개의 시료 용기를 준비한다.
- ② 초순수 100cc에 원하는 농도의 자당을 녹여 시료용 용액을 준비한다. (본 실험의 경우는 30g)
- ③ 두 용기에 초순수와 시료 용액을 적당량 채운다. (측정 시료용과 초순수 만을 채운 참조용).
- ④ Fig. 1과 같은 장치를 구성한다.(편광자와 검광자의 배열: 평행, 0° 또는 90°)
- ⑤ He-Ne, SW750과 PC의 전원을 켜고, 바탕 화면에서 Science Workshop 750의 USB를 연결한다.
- ⑥ Data Studio의 Polrization of Light 프로그램을 활성화 시킨다.
- ⑦ Set Up 창에서 실험 조건을 설정한다.(본 실험은 각분해능: 1440, Large Pulley, Sample Rate: ≤40)
- ⑧ 편광자와 회전 검광자의 초기 위치를 정한 다음 Light Intensity vs. Angle 그래프 창에서 실험을 대기한다.
- ⑨ 표준 시료 용기를 삽입하고 Start 아이콘을 누르고 직류전원을 켜서 회전 검광자를 돌려 측정을 시작한다.
- ⑩ 측정 시료 용기를 삽입하고 Start 아이콘을 누르고 직류전원을 켜서 회전 검광자를 돌려 측정을 시작한다.
- ⑪ 측정 결과는 작업줄에 있는 File-Export Data-해당 자료 선택-OK하면 저장 창이 나타나는데 이 때 파일명(x.txt)을 기재하고 OK를 클릭하면 된다.(필요하다면 저장 위치를 변경)
- ⑫ 그래프 창에 있는 Fit 기능을 이용해서 각 결과를 Fitting 한다.
- ⑬ 필요하다면 측정 결과들에 대해 Measure 커서 기능을 이용해서 구체적인 수치들을 확인해 볼 수 있다.
- ⑭ 참조용 시료와 측정용 시료에 관해 Fitting된 각들(또는 측정된 각)을 평균하고 이들의 차이(회전각)를 구한다.
- ⑮ 구해진 회전각으로 용액에 관한 비회전 공식에서 비회전값을 구한다.

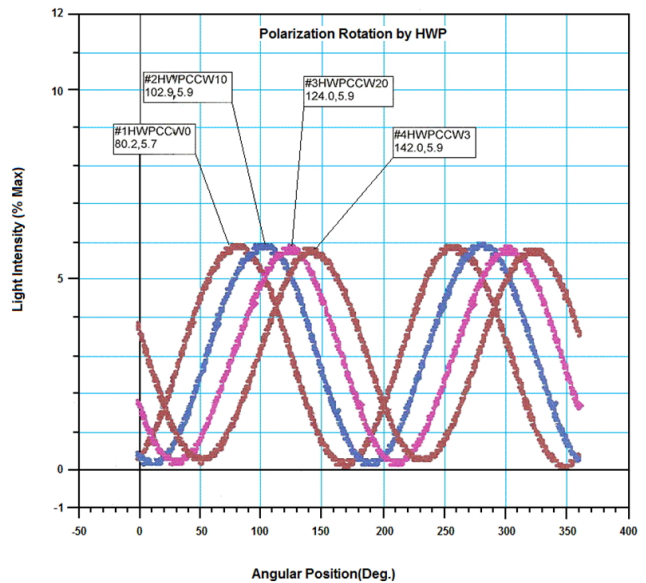
**IV. 결과 및 논의**

Fig. 2는 장치의 신뢰성을 확인하기 위해 실시한 반파장판 시료에 대한 측정 결과들이다.

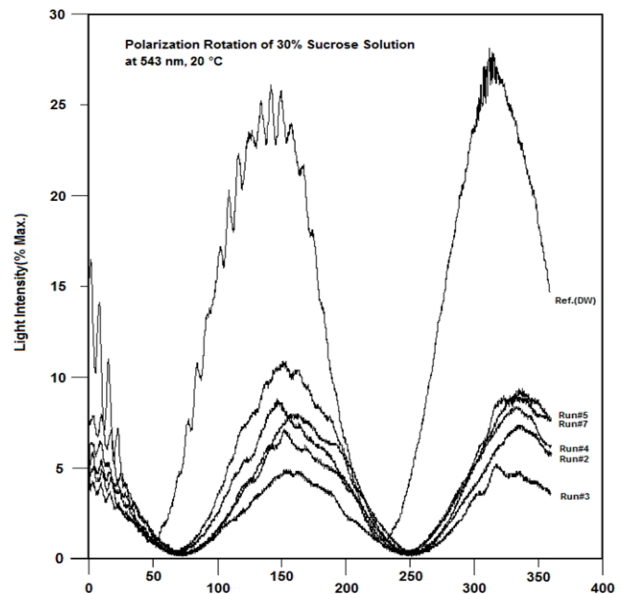
Fig. 2에서 보듯이 반파장판의 +40, +50, +60, +70도 회전에 대응해서 각각 대략 +80.2, +102.9, +124, +142도 정도로 편기됨을 알 수 있다. 또 다른 측정에서 반파장판의 회전각을 +10, +20, +30도로 회전시켜 보았을 때 정확한 대응각이 +20, +40, +60도가 되어야 했지만 결과는 +22, +42, +62도라서, 반파장판의 광축이 회전대의 기준과 약 1도 정도 어긋나 있음을 알 수 있었다. 이는 초기 반파장판을 설치할 때와 관련된 것으로서, 개선되어야 할 사항이었지만, 실험식에서 요구되는 측정값이 이상차였고, 표준 시료와 회전 운동 검출기가 사용되었으므로, 전반적으로 학부 실습용으로는 무난하게 보아 수정하지 않았다. 실험과정에서 회전각이 증가되더라도

대응각들이 2배가 되지 않는 경우가 있었는데, 이는 주로 오링의 연결 상태와 장치 배열 상태 또는 검광자의 회전 개시와 자료 수집의 동기와 같은 문제들과 관련되었으므로, 실험할 때 유의할 필요가 있다고 판단되었다.

Fig. 3은 농도 30%인 자당 용액과 초순수 표준 시료에 대한 측정 결과 측정 결과들로서, 측정 결과들이 실험식에 의한 곡선과는 달리 균일하거나 매끄럽지 못한 이유로는 광원의 세기 변화, 주변광의 변화, 폴라로이드 검광판에서의 간섭, 검광판의 회전에서 판의 굴곡에 의한 산란광의 세기 변화, 회전 검광대의 진동, 신호 수집기의 표본 수집을 설정 등에서 비롯된 문제들로 추측되었지만, 정확한 이유는 조사되



**FIG. 2.** Results from a reference sample(HWP).



**FIG. 3.** Results from a sample (30% Sucrose) and a reference solvent (pure water).

지 않았다. 초순수 표준 시료가 사용된 이유는 측정 초기 조건을 확인하기 위한 것인데, 두 편광자가 평행 배치된 경우에는 그래프의 시작이 극대에서 시작되어야 함에도 불구하고 편기되어 있었다. 이는 측정 조건 및 측정과 장치의 동기화 문제로 추정되었지만, 참조 시료가 사용되었으므로 보정할 필요는 없었다. 만일 참조 시료가 사용되지 않았다면, 이 초기 편기값들은 시료의 회전각 측정에 반영되어야 큰 차이를 보였을 것이다.

Fig. 4는 Fig. 3의 결과들을 Fitting한 것으로써, 회전각을 측정할 자료이다. 그림에서 처음 피크들을 기준으로 회전각을 측정했을 때, 표준 시료(Ref(DW))의 처음 최대각은 +137도였으며, 5차에 걸친 자당 용액에 대한 결과들의 처음 최대각들은 각각 +159도, +159도, +162도, +159도, +159도로써 평균 +160도였다. 따라서 평균 알짜 변화각은 +23도로써, 이에 해당하는 비회전은  $[\alpha]_{20}^{543} = +76 \text{ deg.cc/g.dm}$ 였다. 이 결과는 두 종류의 비회전 값들을 기지의 Na-D선의 비회전 +66~66.5 deg.cc/g.dm에 비교해 볼 때, 일반적으로 파장이 짧아질수록 자당의 비회전이 증가되는 경향<sup>6)</sup>과 일치될 뿐만 아니라, 기기 오차나 측정 오차의 개입 요소가 처음부터 예상되었던 본 실험의 경우에서, 평균 회전각으로부터 구한 결과가 비회전의 분산 자료<sup>11)</sup>로부터 제한된 범위(500-600 nm)에서 구한 일차 근사식의 추정값 +76 deg.cc/g.dm와 동일했으며, 비록 차이는 있지만, 파장 전 구간에 대한 제곱 근사식으로 구한 +83.01 deg.cc/g.dm와 비교하더라도, 엑셀에서 파장 전 구간에 대한 근사 차수가 2-6 정도로 광범위하게 제시될 수 있다는 점(이 결과는 측정된 비회전값이 Na-D 선의 결과보다는 클 것이라는 것을 시사하는 점 외에는 큰 의미를 부여할 수 없었다)와 분산 자료를 구한 농도 조건이 명시되지 않은 점 및 본 실험에 사용된 장치의 정도를 고려한다면, 학부 실험 결과로써 수용함이 적당하다고 생각되었다. 여기서 농도에 의존되는 비회전이 CRC 자료에 의하면 Na-D 선에서

일정 범위의 농도 구간에서는 값에 큰 변화가 없음이 보고되어 있는 데, 본 실험에서는 이에 대한 검증은 하지 않았다. 덧붙여서, 실험식에 의하면, 회전각은 이미 각 측정 곡선의 시작 부분에서 출현되어야 함에도 불구하고, 회전각의 측정을 첫째 피크에서 실시한 이유로는, 위상 변화는 기록 전 구간에서 동일하게 반영되므로 굳이 초기값을 선택해야 할 필요가 없었으며, 본 실험에서 해결되지 않은 장치 문제의 보완과 측정의 편의성 때문이었다.

### V. 결 론

1. 일반 학부 실험실에서 감당할 수 있는 비용으로 광학 활성 측정용 편광계를 구성하였으며, 실험식을 제공하였다.
2. 실험식에 의한 측정에서 파장 543.8 nm에서 30% 자당의 비회전은 +76 deg.dl/g.dm로 CRC의 파장별 비회전 자료에 대한 제한된 범위(500-600 nm)에 대한 일차 추세식에서 구한 값과 일치되었다.
3. 파장 전 구간에 대한 제곱 추세식으로 구한 +83.01 deg.dl/g.dm과는 차이를 보였다. 하지만 자료들에 대한 추세식의 차수 범위가 2-6 정도로 광범위하며, CRC의 자료에 측정 농도가 명시되지 않았으므로 비회전값이 Na-D 선의 값보다는 클 것이라는 사실 외에는 큰 의미는 부여할 수 없었다. 이에 대한 검증이 필요하다.
4. 비록 학부용으로는 무난하다고 보지만, 연구용으로 사용하자면 부품을 고급화하고, 실험에서 해소되지 못한 동기 문제나 회전각의 정확한 결정 문제 등이 해소되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 실험은 동아대학교 신소재 물리학과 의 재료 물성 수강 학생들에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

### References

1. R. C. Weast, *Handbook of Chemistry and Physics*, 68th. ed. (CRC Press, USA, 1987), E-413.
2. J. W. Park, *Biochemistry and Biophysics of Mucopolysaccharides* (MinEumSa, Seoul, Korea, 1984), p. 151.
3. E. West and N. Wilkins, "DC bias modulation characteristics of longitudinal KD\*P modulator," *Proc. SPIE* **1746**, 386-394 (2012).
4. J. Hough, "Polarimetry: Imaging polarimetry," in *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, P. Mardin ed. (IOP Publishing Ltd., Bristol, UK, 2006).
5. CNI Polarimeter Group, <http://www4.rcf.bnl.gov/~cniopol>.
6. R. S. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics*, 3rd Ed. (Longman, USA, 1973), pp. 575-577.

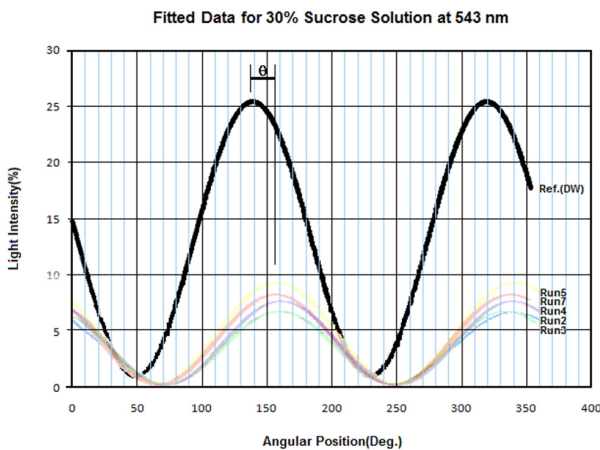


FIG. 4. Data fittings of Fig. 3.