

레이저광의 최대·최소 편향법을 이용한 액체의 굴절률 측정

이재란 · 김석원[†]

울산대학교 물리학과

☎ 680-749 울산광역시 남구 무거 2동 산 29번지

이용산

대진대학교 물리학과

☎ 487-711 경기도 포천시 선단동

(2008년 5월 9일 받음, 2008년 6월 4일 수정본 받음, 2008년 6월 8일 게재 확정)

프리즘 분광기는 굴절률 측정을 위한 표준 장치로, 대학교 실험실에서 사용되는 전형적인 실험 기구이지만, 정렬할 때 많은 주의가 요구되고 장치의 견고함에 비해 측정된 굴절률의 정확도는 떨어진다. 이러한 단점을 보완한 최대·최소 편향법은 회전 플랫폼과 길이 측정용 테이프를 저렴하게 장치가 구성되고 넓은 스크린을 활용하여 비교적 정확하게 굴절률을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 한 변이 26 mm인 속이 빈 등변 프리즘을 제작하여 글리세린(C₃H₅(OH)₂), 사염화탄소(CCl₄), 아닐린(C₆H₄NH₂), 이황화탄소(CS₂), 크실렌(C₆H₄(CH₃)₂) 등의 액체를 채워, He-Ne 레이저의 파장 632.8 nm와 YVO₄ 레이저의 파장 532 nm에 대해 프리즘 분광기와 최대·최소법으로 이들 액체의 굴절률을 측정하였다. 측정결과 최대·최소법으로 얻어진 데이터가 프리즘분광기에 의해 얻어진 데이터보다 더 정확하고 정밀함을 확인하였다.

주제어: Prism spectrometer, Refractive index of liquid, Maximum and minimum deviated laser beam

I. 서 론

굴절률은 여러 가지 유형의 광학 데이터를 해석하기 위해 종종 요구되기 때문에 고체, 액체 기체의 굴절률을 측정하기 위한 방법이 매우 다양하게 제안되어 있으며,^[1] 굴절률을 결정하기 위한 가장 흔한 방법으로 프리즘 분광기법이 있다. 프리즘 분광기는 광학 실험실에서 가장 널리 사용되는 실험 장비이고 불확도 또한 작아서 굴절률을 결정하는 가장 정확한 방법으로 알려져 있다. 그러나 투명 매질(프리즘)에서 빛의 굴절현상을 이용하여 편향각을 정확하게 측정한 후 굴절률을 구하는 방법이므로 입사광과 망원경 렌즈를 정확하게 정렬해야하며 정각 측정 및 최소 편향각을 측정하려면 시간과 노력이 많이 들게 되어 측정 정확도와 신뢰도 역시 낮아지게 된다. 따라서 분광기 사용자들이 정렬 상태를 유지하고 검증하려면 정렬을 자주 해야 하며 그렇지 않으면 제대로 정렬이 되지 않은 상태에서 데이터를 수집하게 될 수도 있다. 이러한 단점을 보완하여 프리즘 분광기 대신 회전 플랫폼과 길이 측정용 테이프를 저렴하게 장치를 구성하고 넓은 스크린을 이용하는 최대·최소 편향법을 고안하였다. 그리고 실험을 통해 파장에 따른 투명 광학 매질의 분산현상^[2-7]을 연구하고, 여러 가지 액체 매질에 적용하여 그 결과를 기존의 방법으로 측정된 결과와 비교·검증해 보았다.

II. 이 론

프리즘을 통해 광선이 지나갈 때, 프리즘에 들어가는 광선과 나가는 광선은 굴절의 영향을 받는다. 단색광이 편향각 δ 로 편향될 때, 최소 편향각 δ_{\min} 과 프리즘의 정각 α 를 이용하면 파장에 의존하는 프리즘의 굴절률 $n(\lambda)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.^[2]

$$n(\lambda) = \frac{\sin[(\delta_{\min}(\lambda) + \alpha)/2]}{\sin(\alpha/2)} \quad (1)$$

또한, 등변프리즘에서는 그림 1에서 보이는 것처럼 6개의 빔을 쉽게 관찰할 수 있다. 입사 광선은 첫 번째 계면인 a 지점에서 빔 1로 반사되고, 첫 번째 계면을 통해 굴절되어 진행한 빔 2는 b 지점에서 공기 중으로 굴절된다. 이 빔들의 편향 각은 식 (1)에서 사용 된다. 빔 3은 b 지점에서 내부적으로 반사되어 c 지점에서 공기 중으로 굴절되고, 빔 4는 c 지점에서 내부적으로 반사되고 a' 지점에서 공기 중으로 굴절된다. 빔 5는 a' 지점에서 내부적으로 반사되고 b' 지점에서 굴절되고, 빔 6은 b' 지점에서 반사되고 c' 지점에서 공기 중으로 굴절된다. c' 지점에서 반사되는 빛은 언젠가는 a 지점의 표면과 상호작용 한 후에 모든 다른 빔의 경로를 따를 것이다.

그림 1에서 빔 4는 빔 2가 최소 편향을 겪은 프리즘 방향에서 최대 편향되고, 빔3 또한 이 프리즘 방향에서 최대로 편향된다. 굴절률에 대한 어떤 빔이든 편향과 연관시킬 수

[†]E-mail: sokkim@ulsan.ac.kr

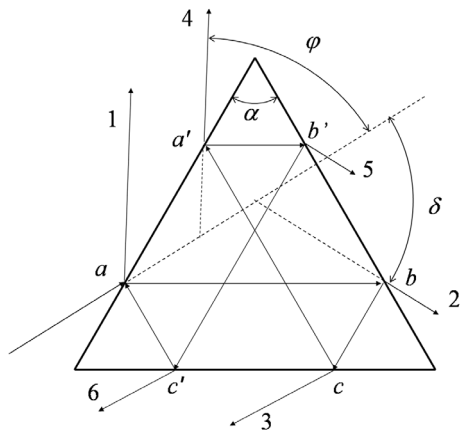


그림 1. 프리즘 경계면의 중심을 벗어나서 빛이 입사하는 경우, 경계면 내부로 들어간 빛은 내부 반사됨과 동시에 6개 갈래의 방향으로 진행하게 된다.

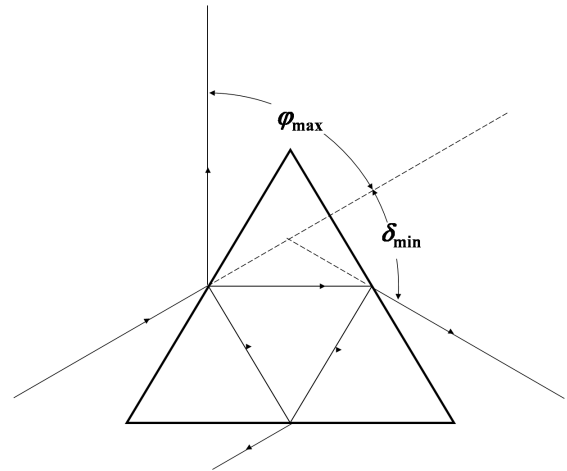


그림 2. 프리즘 경계면의 중심으로 빛이 입사하는 경우, 경계면 내부에서 반사되는 빛은 각 면의 중심을 꼭지점으로 하는 삼각형을 이룬다.

있으므로, 굴절률에 대해 세 가지 독립적인 측정법을 만들 수 있다.

좀 더 단순화 하기 위하여 그림 2와 같이 입사하는 빛이 등변 프리즘의 경계면 내부에서 등변 삼각형을 이룬다면, 프리즘에 의해 최소 편향 빛이 빔 2와 같은 방향으로 향할 때, 빔 1과 빔 4, 빔 2와 빔 5, 빔 3과 빔 6 각각의 반사와 굴절 빛이 겹쳐져 부합되는 동안, a 지점과 a' 지점, b 지점과 b' 지점, 그리고 c 지점과 c' 지점은 한 점에 모인다. 또한 반사에 의한 빔 1과 굴절에 의한 빔 4가 겹쳐지면서 굴절률과 최대 편향각 ϕ_{max} 의 관계는

$$n(\lambda) = \frac{\cos[\phi_{max}(\lambda)/2]}{\sin(\alpha/2)} \quad (2)$$

로 단순화되어 표현된다.

프리즘 분광기에서 편향각을 측정하기 위해서는 분광기에 새겨진 각도 눈금이 정확해야하고, 프리즘에서 비편향된 빔과 편향된 빔이 만나는 점이 분광기의 중심과 일치해야한다. 분광기에서 이러한 정확한 정렬을 요구하는 것처럼, 최대·최소 편향법에서도 그림 3에서처럼 스크린과 레이저 광선이 정확하게 수직을 이루어야 한다는 제약이 따른다. 만약 스크린표면에 빛이 정확하게 수직으로 입사한다면 정렬에서 프리즘의 정각을 기준으로 오른쪽 면 중심으로 들어가는 빔과 왼쪽 면 중심으로 들어가는 빔은 프리즘에서 비편향된 빔을 기준으로 대칭을 이루게 된다.^[8,9]

이러한 대칭성으로부터 좌·우 면에 대한 편향빔들은 상호 보완관계에 있음을 알 수 있고, 수직으로부터 ϵ 만큼 기울어진 비편향 빔(그림 4)에 대해 최대 편향각에 대한 식을 정리하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \phi_{max} = \frac{s'^2 - d_r'^2 + (d_r' A')^2}{2s' d_r' A'} = \frac{s'^2 - d_l'^2 + (d_l' A')^2}{2s' d_l' A'} \quad (3)$$

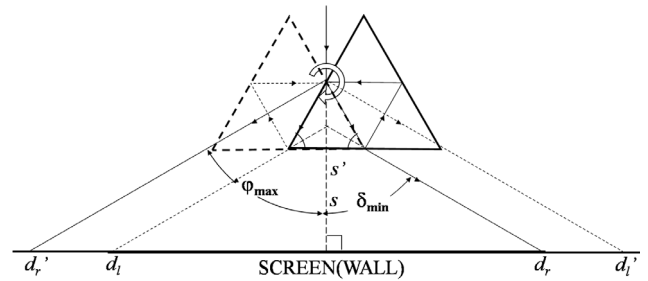


그림 3. 비편향 빔이 스크린에 수직으로 입사할 때, 최대·최소 편향 빔은 비편향 빔을 기준으로 좌·우가 대칭이다.

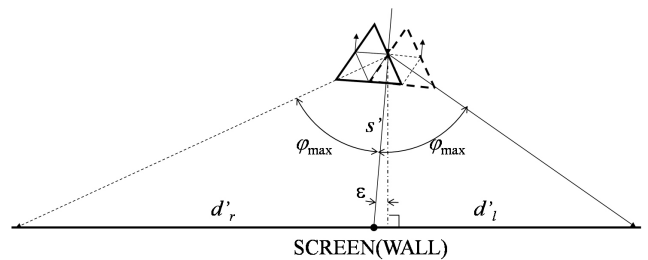


그림 4. 비편향 빔이 스크린에 수직으로 입사하지 않는 경우, 스크린에서 좌우 편향빔의 위치는 비대칭적이지만 편향각은 같다.

여기서 A' 은 비편향 빔이 스크린과의 수직으로부터 편향된 각과 관계된 향으로 편향 거리 측정에 의해서 찾을 수 있다.

$$A' = \sqrt{\frac{d_r' d_l' + s'^2}{d_r' d_l'}} \quad (4)$$

마찬가지로 최소 편향각에 대한 식도 정리하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \delta_{\min} = \frac{s^2 - d_r^2 + (d_r A)^2}{2s d_r A} = \frac{s^2 - d_l^2 + (d_l A)^2}{2s d_l A} \quad (5)$$

$$A = \sqrt{\frac{d_r d_l + s^2}{d_r d_l}} \quad (6)$$

III. 실험 및 논의

3.1. 속이 빈 프리즘 제작

속이 빈 프리즘은 물과 같은 액체를 채워 프리즘 용기 물질(유리)의 굴절률에 무관하게 속을 채우는 물질의 굴절률을 측정할 수 있는 프리즘이다. 얇고 평평하게 규격화되어 제작되어진 두께(1.3 mm)와 넓이(76×26 mm²)가 동일한 슬라이드 글라스 3장을 3각형으로 붙여 세 변의 길이가 각각 26 mm이고 높이가 76 mm인 속이 빈 프리즘을 제작하였다. 프리즘을 채우는 물질에 의해 접촉물질이 손상되는 것을 최소화하기 위해 진공용 접착제를 사용하여 유리판을 모두 고정하였다. 프리즘의 바닥은 옆면과 마찬가지로 진공용 접착제로 고정시켰고, 윗면은 고무찰흙을 이용하여 유리의 탈부착이 가능하도록 하였다. 실험에서 사용된 유리는 굴절률의 영향을 줄이기 위해 빔 지름(약 1.6 mm)보다 얇은 슬라이드 글라스를 사용하였다.

3.2. 프리즘의 정각 측정과 채워진 물질에 따른 굴절률 측정

그림 5(a)처럼 프리즘 분광기의 회전 플랫폼 위에 프리즘 정각이 광원으로 향하도록 프리즘을 두어 정각을 기준으로 양쪽 면에 의한 두 반사 빔이 이루는 각 β 를 측정하고 정각 α 는 $\beta/2$ 임을 이용하여 60°라는 것을 확인하였다. 그리고, 그림 5(b)처럼 대학교 실험에서 사용되는 방법으로 최소 편향각 δ_{\min} 을 10회씩 측정하여 식 (1)을 사용하여 굴절률을 구하였다.^[10,11]

최대·최소 편향법의 장치에서는 스크린으로부터 2 m 떨어진 곳에 레이저 광원을 두고, 광원과 스크린 사이에 회전 플랫폼의 중심 위를 광원이 지나가도록 회전 플랫폼을 설치하고 플랫폼 위에 액체로 채워진 프리즘을 두었다(그림 4). 회전 플랫폼의 위치를 고정하고, 미세하게 회전을 조절하여 프리즘 경계면에서 내부 반사되는 빔이 그림 3과 같이 등변 삼각형을 이루며 진행하도록 하였다. 스크린에 비편향 빔의 위치와 최대·최소 편향빔의 위치를 측정용 테이프를 붙여 펜으로 표시하고, 비편향 빔에서 편향 빔까지의 거리 d'_r , d_r 와 프리즘의 회전 중심까지의 거리 s' 를 측정하였다. s' 를 유지하면서 프리즘 정각을 기준으로 면을 바꿔서 비편향 빔에서 편향 빔까지의 거리 d'_l , d_l 를 측정하면 s' 와 d'_r , d'_l 만으로 식 (3)과 (4)로 최대 편향각을 구해 식 (2)로 굴절률을 계산하였다.^[8] 또한, s' 의 위치를 1 m 이동시켜 측정을 반복하고 식 (5)와 (6)의 s , d_r , d_l 을 프리즘의 이동거리 Δs 와 편향 빔의 거리 변화량 Δd_r , Δd_l 로 바꿔 최소 편향각을 구해 식 (1)

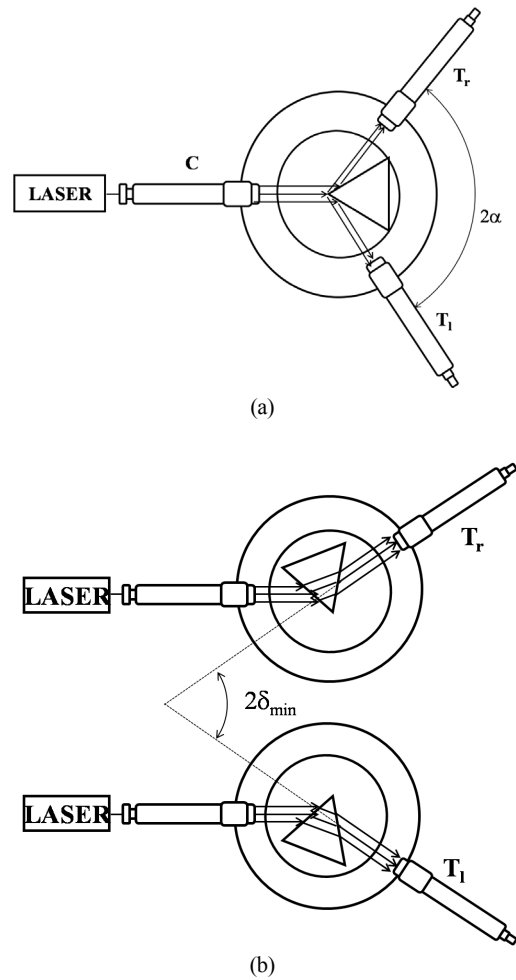


그림 5. 프리즘 분광기를 이용한 프리즘의 (a) 정각 측정과 (b) 최소 편향각 측정.

표 1. 실험에 사용된 액체 시료들

Sample	Name	Purity (%)
A	글리세린(C ₃ H ₅ (OH) ₂)	99
B	사염화탄소(CCl ₄)	99.5
C	아닐린(C ₆ H ₅ NH ₂)	99
D	이황화탄소(CS ₂)	99
E	증류수(H ₂ O)	deionized water
F	크실렌(C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂)	99
G	톨루엔(C ₆ H ₅ (CH ₃))	99

로도 굴절률을 계산하였다. 최대 편향법과 최소 편향법 각각에 대해 10회씩 반복 측정하여 평균값을 취하였다.

순도가 표 1과 같이 주어진 7 종류의 액체 글리세린, 사염화탄소, 아닐린, 이황화탄소, 증류수, 크실렌, 톨루엔에 대해 최대·최소 편향법으로 편향각과 굴절률을 얻을 수 있었다. 프리즘 분광기법과 최대·최소 편향법으로 측정한 굴절률을 비교할 수 있는 측정값이 실험실 온도 21°C~24°C에 대해 표 2와 같이 나왔고 굴절률은 문헌값과 마찬가지로 파장 532 nm와

표 2. 프리즘 분광기와 최대·최소 편향법으로 얻은 파장에 따른 굴절률 측정값과 편차

(측정 온도 : 21°C~24°C)

Sample	Prism spectrometer				Maximum and Minimum Deviation beam			
	532 nm		632.8 nm		532 nm		632.8 nm	
A	1.479	±0.003	1.464	±0.003	1.47589	±0.00001	1.46426	±0.00005
B	1.463	±0.003	1.458	±0.004	1.46318	±0.00006	1.45668	±0.00003
C	1.593	±0.003	1.576	±0.004	1.59003	±0.00004	1.57568	±0.00005
D	1.639	±0.003	1.618	±0.003	1.63395	±0.00002	1.61726	±0.00002
E	1.337	±0.004	1.329	±0.002	1.33508	±0.00004	1.32937	±0.00005
F	1.507	±0.002	1.494	±0.003	1.50262	±0.00007	1.49301	±0.00002
G	1.502	±0.003	1.493	±0.003	1.50108	±0.00001	1.49222	±0.00004

표 3. 증류수와 톨루엔의 문헌값과 측정값의 차이

(온도 : 22.5°C)

Sample	$n(\lambda)$ (Bibliograph)		Deviation from Bibliograph			
	532 nm	632.8 nm	Prism spectrometer		Maximum and Minimum Deviation beam	
			532 nm	632.8 nm	532 nm	632.8 nm
E	1.33464	1.33138	±0.00236	±0.00238	±0.00044	±0.00201
G	1.50096	1.49244	±0.00104	±0.00156	±0.00012	±0.00022

632.8 nm에 대해서 물, 사염화탄소, 글리세린, 톨루엔, 크실렌, 아닐린, 이황화탄소 순으로 높아지는 것을 알 수 있었다. 프리즘 분광기법에서는 측정을 여러 번 반복 측정하여 ±0.002~±0.006의 편차가 나타났고, 최대·최소 편향법은 스크린으로부터 프리즘까지의 거리를 변화시키면서 측정하여 ±0.00001~±0.00007의 편차를 나타냄으로써 후자가 보다 높은 정밀도로 측정됨을 알 수 있었다. 실험에서 사용된 프리즘 분광기의 최소 측정 각은 0.05°임에도 반복 측정 과정에서 망원경의 정렬 상태에 따라 약 0.1°의 편차를 발생시키지만 편향 거리 측정은 복잡한 정렬 과정 없이 프리즘으로부터 2 m 떨어진 스크린에서 막대자의 눈금 두께를 고려하여 0.5 mm까지 길이를 읽음에 따라 각도 최소 눈금이 0.014° 이하로 읽어지는 것과 같으므로 편차는 줄어들게 된다.

상온 22.5°C의 증류수와 톨루엔에 대한 문헌값과^[12] 프리즘 분광기법과 최대·최소 편향법으로 구한 굴절률의 차이를 표 3에서 비교하였다. 증류수와 톨루엔이 실험실 온도 변화 범위에서 각각 0.0001과 0.0017의 굴절률 변화 폭을 가지는 것을 고려했을 때, 프리즘 분광법에 비해 최대·최소 편향법의 굴절률 오차 폭이 좁게 나타남에 따라 보다 정확하게 측정됨을 확인 할 수 있었다.

IV. 결 론

본 실험에서는 대학교 실험에서 사용되는 프리즘 분광기보다 원리적으로 간단하면서 저렴한 장치 구성으로 굴절률을 측정하는 최대·최소 편향법을 고안하고 실험실에서 제작된 속이 빈 프리즘을 이용하여 액체의 굴절률을 측정함으로써 충분한 교육적 가치를 찾을 수 있었다. 프리즘 분광기법은 광원의 위치, 회전 플랫폼의 중심과 망원경들의 평행 위치

조절 등과 같이 장치를 정렬 하는 과정에서 시간이 많이 걸리고 정확성이 떨어지게 되는 반면 최대·최소 편향법에서는 광원과 프리즘이 같은 평면 위에 놓이기 때문에 정렬에서 시간이 많이 걸리지 않고 원리적으로도 간단하고 실험적으로도 쉽게 측정이 됨을 알 수 있었다. 프리즘 분광기법으로 측정된 굴절률이 눈금의 한계에 의해 ±0.002~±0.006의 편차를 보이는 반면 최대·최소 편향법은 ±0.00001~±0.00007의 편차를 가졌고, 프리즘 분광법이 0.00104~0.00238의 오차를 보이는 반면 최대·최소 편향법이 0.00012~0.00201의 오차를 보여 정밀하면서 보다 정확한 측정법임이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 2008년 대진대학교 교내학술연구비의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- [1] S. Singh, "Refractive Index Measurement and its Applications" *Physica Scripta*. Vol. 65, pp. 167-180, 2002.
- [2] S. Chang and J. H. Jo *et al.*, *Introduction to Classical and Modern Optics* (Doo Yang Press, Seoul, 2003), pp. 12-17.
- [3] S. Waldenstrom, K. R. Naqvi, A simple accurate alternative to the minimum-deviation method for the determination of the refractive index of a prism, *Am. J. Phys.* 46, pp. 1009-1011, 1978.
- [4] B. P. Chandra, S. C. Bhaiya, A simple accurate alternative to the minimum deviation method of determining the refractive index of liquids, *Am. J. Phys.* 51, pp. 160-161, 1983.
- [5] A. Fedman, Refraction Through a prism, *Am. J. Phys.* 51,

- pp. 929-931, 1983.
- [6] D. V. Sathe, Fixed angle of incidence method for the refractive index of a prism, *Am. J. Phys.* 53, pp. 488-490, 1985.
- [7] E. R. Van Keuren, Refractive index measurement using total internal reflection, *Am. J. Phys.* 73, pp. 611-614, 2005.
- [8] F. El-Ghoussein, J. M. Wrobel, M. B. Kruger, "Dispersion measurements with minimum and maximum deviated beams", *Am. J. Phys.* Vol. 74(10), pp. 888-891, 2006.
- [9] E. Hecht, *Optics 2nd ed.* (Addison Wesley Publishing Company, Inc., New York, 1987) pp. 231-233.
- [10] G. S. Monk, *Light Principles and Experiments* (McGraw-Hill, New York, 1937).
- [11] C. H. Palmer, *Optics: Experiments and Demonstrations* (The Johns Hopkins University Press, 1962), p.147.
- [12] D. R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics 73rd Edition* (CRC Press, Boca Raton, 1994) chap.10, pp. 300-301.

Measurement of Refractive Index of Liquids by the Maximum and Minimum Deviated Laser Beam

Jaeran Lee and Sok Won Kim[†]

Department of Physics, University of Ulsan, Muger-Dong, Nam-Gu, Ulsan Metropolitan City, Ulsan 680-749, Korea

[†]*E-mail: sokkim@ulsan.ac.kr*

Yong San Lee

Department of Physics, Daejin University, SunDan-Dong, GyeongGi-Do 487-711, Korea

(Received May 9, 2008; Revised manuscript June 4, 2008; Accepted June 8, 2008)

The prism spectrometer is a standard device for the measurement of refractive index; it is used in undergraduate laboratories. Typically, however, lots of attention is required in the alignment, and the accuracy of the obtained refractive index is not so high in spite of the durability of the device. The maximum and minimum deviation method, which compensates the disadvantages of the prism spectrometer, can be composed cost effectively using a length marking tape and a rotating platform. It can measure the refractive indices accurately by utilizing a wide screen. In this study, the equal sided hollow prism whose length is 26 mm was fabricated and measured the refractive indices of seven kind of liquids (pure water, $C_3H_5(OH)_2$, CCl_4 , $C_6H_4NH_2$, CS_2 , $C_6H_4(CH_3)_2$) by using the prism spectrometer and maximum and minimum deviated laser beam method at the wavelengths of He-Ne laser ($\lambda = 632.8$ nm) and YVO4 laser ($\lambda = 532$ nm). The result shows that the data obtained by the latter method are more accurate and precise than those obtained by the former device.