

## 전자 스펙클 무늬 간섭계를 이용한 열광학계수 측정\*

윤 재 선

강릉대학교 물리학과

(1992년 4월 2일 받음)

물질 내에서의 열효과와 정도를 나타내는 계수 중의 하나인 열광학계수는 온도 변화에 따른 굴절률의 변화로, 이미 일반 간섭계에 의한 측정 방법이 개발되어 있으나, 본 연구에서는 일반 간섭계의 단점을 보완한 전자 스펙클 무늬 간섭계를 이용한 광학계를 새로이 개발하여 그 사용 가능성을 실험적으로 확인하였다.

### I. 서 론

1960년대 초에 레이저가 발명된 이후 레이저의 광세기 고출력화됨에 따라서 고출력 레이저광에 의한 광학소자들의 파손과 변형등에 큰 관심이 모아지게 되었다.<sup>[1]</sup> 이 중에 변형은 주로 열효과에 의하여 일어난다.<sup>[3]</sup> 물질의 열적 성질을 나타내는 계수로는 열팽창계수와 열광학계수가 있는데, 열광학계수는 눈으로 직접 관측할 수 있는 것이 아니므로 더 중요한 의미를 갖는다. 열광학계수라 함은 온도의 변화에 따른 굴절률의 변화량으로 각각의 물질에 따라 그리고 측정하는 광원의 파장에 따라 그 고유한 값을 갖는다.<sup>[4]</sup> 특히 레이저 융합이나 레이저 절단등에서와 같이 고출력 레이저광을 사용하는 분야에서는 아주 작은 광흡수율을 갖는 광학 소자에서라도 비교적 많은 양의 빛이 흡수되어 광학소자 자체가 가열이 된다. 이에 따라 매질내에서는 레이저광의 공간적 세기 분포와 비례하는 온도분포가 생긴다. 열광학적 성질에 의하여 이 온도분포는 매질내에 굴절률의 분포를 형성하며, 이 굴절률 분포는 레이저광의 성질을 저하시켜서 높은 광의 세기를 얻기 위한 완전한 집광을 방해한다. 이를 열렌즈 효과라 하는데, 열광학계수와 열팽창계수를 서로 상쇄시키는 물질의 개발이 고출력 레이저의 발전에 필요한 과제로, 이를 위해서는 열광학계수의 정밀한 측정이 요구된다.<sup>[5]</sup> 열광학계수의 또 한 응용으로는 고분자 용액의 미세한 구조변화 측정으로 온도의 변화에 따라 이 계수를 측정하므로써 구조변화를 예측할 수 있다.<sup>[6]</sup>

이는 고분자의 합성 및 성질 분석에 사용된다.

열광학계수의 연속적인 측정방법으로는 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 그 한쪽 팔에 시료를 놓고 온도의 변화에 따라 간섭무늬의 밝기 변화를 관측하는 일반 간섭기법이 이미 소개되었다.<sup>[7]</sup> 그러나 이 방법은 온도의 변화가 매우 느린 경우에는 비교적 정확한 계수의 값을 얻을 수 있으나, 온도의 변화가 빠른 경우에는 간섭무늬의 밝기 변화가 온도의 변화에 비하여 시간상으로 뒤로 밀리는 경향이 나타난다. 또한 이 간섭계는 외부 진동에 상당히 민감하나, 본 실험에서 사용하는 스펙클 간섭계는 외부 진동의 영향을 적게 받으며 임의의 온도 변화에 대해 측정이 가능하다. 본 실험에서는 스펙클 간섭계의 단점인 암실작업으로 인한 시간의 손실을 막기 위하여 전자 스펙클 무늬 간섭계(ESPI)를 사용하여 실시간적인 실험을 하였다.

### II. 이론 및 방법

그림 1은 본 실험에 사용한 광학계이다. 헬륨-네온 레이저(543 nm)에서 나온 광속은 광속 확대기를 통과하면서 확대된 후, 프리즘형 광속 가라개에서 둘로 나뉘운다. 이 중에 한 광속은 거울에서 반사되어 산란판의 면상에  $\theta_1$ 의 각으로 입사되어 기준광을 이루며, 다른 한 광속은 시료 용기를 통과하여 산란판의 면상에  $\theta_2$ 의 각으로 입사되어 탐사광을 이룬다. 산란판에서 산란된 광속들은 렌즈에 의하여 텔레비전 카메라의 촬상면에 산란판면의 상을 맺는다. 온도 변화가 시작되는 임의의 온도에서의 이 화상을 카메라로부터 컴퓨터로 전송하여 기준 화상

\* 본 논문은 문교부 지원 지방대 육성과제임.

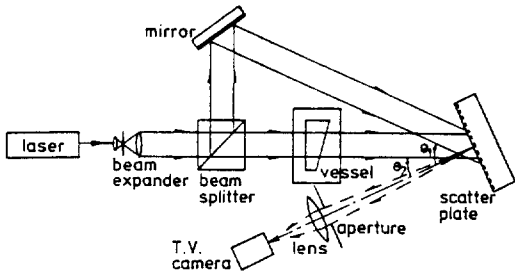


Fig. 1. Schematic diagram of the ESPI for measuring the thermo-optic coefficient.

으로 기억시켜 놓는다. 시료의 온도를 변화시키에 따라 그때 그때의 화상을 컴퓨터로 전송시켜서, 기준 화상과 각각의 화상간에 뺄셈작업을 함으로써 얻어지는 화상들을 텔레비전 모니터로 전송한다.<sup>[8]</sup> 이 화면에 나타나는 간섭무늬들을 분석하여 굴절률의 변화를 얻어낼 수 있으며, 이로부터 열팽창 계수를 구할 수 있다. 이 실험에서 사용하는 시료 용기는 단면을 췌기 모양으로 만들었다. 이 모양이 아닌 직사각형의 단면인 경우에는 온도 변화에 따라 산란판면 상의 모든 광속들이 일률적인 위상 변화를 일으킴으로 모니터상에 나타나는 화상은 전체적인 명암의 변화만 보여줄 뿐 간섭무늬는 나타나지 않는다. 그러나 췌기형의 경우는 그림-2에서 보는 바와 같이 시료의 굴절률 변화에 따라 굴절각이 변화하여, 산란판 상에서 볼 때 기준광에 대하여 탐사광이 수평 이동을 하게 된다. 이는 반대 관점에서 볼 때, 산란판의 횡변위 측정 실험과 대응이 된다. 그림 2에서와 같이 액체 시료의 굴절률을  $n$ , 유리용기의 굴절률을  $n_g$ , 공기의 굴절률을  $n_o$ 라 하고 유리 용기를 이루는 벽의 안쪽 면과 바깥쪽 면이 서로 평행하다고 놓으면, 굴절의 법칙에 의하여  $n \sin\theta = n_g \sin\theta_g = n_o \sin\theta_o$ 가 성립된다. 췌기형 용기의 앞면을 탐사광에 수직이 되게 놓으면, 뒷면에서의 입사각  $\theta$ 는 췌기의 사이각이 되며  $\theta_g$ 와  $\theta_o$ 는 각각 유리와 공기에서의 굴절각이 된다. 위와 같은 상황에서는 유리용기 자체를 무시하고 액체시료와 공기간의 굴절로만 생각하여도 된다. 여기서 공기의 굴절률을 1로 놓고 사이각  $\theta$ 를 아주 작게 놓으면

$$(n + \Delta n)\theta = \theta_o + \Delta\theta, \text{ 또는 } \Delta\theta_o = \Delta n\theta \quad (1)$$

와 같은 관계식이 성립된다. 위 식에서  $\Delta\theta_o$ 는 시료의 굴절률이  $\Delta n$ 만큼 변화될 때의 굴절각의 변화량이다. 시료 용기와 산란판 간의 거리를  $l$ 이라 하면 굴절률 변

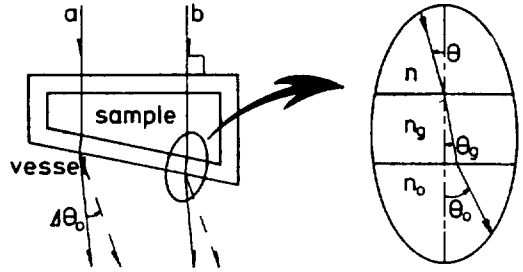


Fig. 2. Vessel cross section of a wedge shape.

화에 의한 탐사광의 산란판 위치에서의 횡변위는  $\Delta n\theta \cdot l$ 이 된다. 이를 반대 관점에서 보면 탐사광에 대한 산란판의 이동으로 볼 수 있으므로, 온도 변화  $\Delta T$ 를 변화 구간내에서의 굴절률의 변화를 거의 선형으로 볼 수 있을 만큼 충분히 작게 잡으면, 이중광을 이용한 산란판의 횡변위 이론으로부터 열팽창 계수  $dn/dT$ 는

$$dn/dT = MN\lambda / [(\sin\theta_g - \sin\theta) \Delta T \theta l] \quad (2)$$

와 같은 표현식을 갖게 된다.<sup>[9]</sup> 여기서  $N$ 은 화면상에 나타나는 스펙클 간섭무늬의 갯수이고  $M$ 은 화상의 배율을 나타내며  $l$ 는 광원의 파장이다.

여기서 광속의 위상 변화를 알기 위하여 그림 2에서 광선 a와 b 간의 위상 변화의 차이를 살펴보자. 시료 내에서 온도의 변화에 따른 굴절률의 변화에 의한 a와 b간의 위상변화는 굴절각의 변화에 의한 위상변화와 서로 상쇄되어 간섭무늬의 생성에는 무관하게 된다. 즉 간섭무늬 갯수의 증감에는 아무런 영향을 주지 못한다. 또한 열팽창에 의한 효과는 액체 시료와는 관계 없이 시료 용기 자체의 팽창에 의한 것으로, 용기를 이루는 유리의 열팽창 계수에 비례한다. 일반 광학 유리의 열팽창 계수는  $\alpha \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  정도로 용기의 췌기각을 작게 하고 a와 b간의 간격을 작게 할 때에는 열팽창에 의한 위상의 변화 역시 오차 범위 내에서 무시 가능하다. 실제 이를 실험하기 위하여 시료를 담지 않은 빈 용기를 가지고  $16^\circ\text{C}$ 를 기준으로 잡아  $43^\circ\text{C}$ 까지 온도를 변화시켜 가면서 간섭무늬의 생성을 관측하였다. 이 결과 아무런 간섭무늬도 확인하지 못하였으며, 이는 간섭무늬에 대한 열팽창의 효과가 무시 가능함을 보여준다. 따라서 열팽창 계수를 (2)식으로부터 구하여도 그 타당성이 인정된다.

본 실험에서는 시료로 에틸알코올을 택하여 실험하였다. 산란판으로는 황동판을 800번 사포로 한 방향으로 곱게 갈아서 사용하였으며, 활상면의 광량 및 스펙클의

크기를 적당히 조절하기 위하여 직경이 16 mm인 조리개를 사용하였다( $F\#=15$ ). 썬기형 시료 용기( $2.5 \times 4$  cm)의 썬기각은  $4.3^\circ$ 로 제작하였으며 용기로부터 산란판까지의 거리는 49 cm로 하였다. 시료의 온도 조절은 통속에 장치되어 있는 열선에 걸어주는 전압을 변화시킴으로써 가능하였으며, 온도 측정은 측정 부위 근처의 용기 내부에 장치된 Nickel-Chromium 합금 열전대와 미소 전압계로 하였다. 고체 촬상 카메라로는 Mintron사의 MTV-1801CA를 사용하였으며, 화상처리 장치로는 Data Translation의 DT2803을 사용하였다.

### III. 결과 및 결론

$11.11^\circ\text{C}$ 에서의 화상을 기준 화상으로 하여, (2)식에서, 온도의 변화  $\Delta T$ 를 x축으로  $MN\lambda/[(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\theta]$ 을 y축으로 작도한 것이 그림-3이다. 그림에서 각각의 실험치를 선형회귀하면  $Y = (4.97X - 12.17) \times 10^{-4}$ 와 같은 회귀선을 얻을 수 있다. 이 식에서 회귀선의 기울기인  $4.97 \times 10^{-4}$ 은 543 nm 파장에서의 에틸 알코올의 열광학계수에 해당된다. 온도가 증가함에 따라 스펙클 간섭무늬는 한쪽 방향으로 조금씩 이동하면서 무늬가 증가되는데, 이 이동 방향이 썬기의 두꺼운 쪽을 향하면 굴절률의 증가를 나타내어 열광학계수가 양의 부호를 갖게 되며, 반대로 이동 방향이 얇은 쪽을 향하면 음의 부호를 갖게 된다. 앞의 실험에서 무늬의 이동 방향을 관측한 결과 음의 부호를 가지므로 실제 열광학계수는  $-4.97 \times 10^{-4}$ 이 된다. 이와 같이 이 실험에서 사용하는 광학계는

일반 간섭계와는 달리 부호의 결정 기능까지도 갖는다.

그림 3에서 보는 바와 같이 실험치들이 몇개 씩 몰려 있는 것은 다음 이유에서이다. 텔레비전 모니터 상에 나타나는 간섭무늬의 갯수를 정확하게 측정하기 위해서는 적어도 2개 이상의 무늬가 발생되어야 가능하며, ESPI에 의한 횡변위 측정한계를 넘어서게 되면 간섭무늬의 식별이 어려워지므로,<sup>[10, 11]</sup> 이 한계점을 넘기전에 미리 기준화상을 다시 정해주어야 한다. 각각의 몰려있는 실험치들 중에 끝에 있는 실험치가 이에 해당된다. 그림-3에서 6 번째 실험치(A)까지는  $11.11^\circ\text{C}$ 에서의 화상을 기준화상으로 화상처리를 하여 얻은 값들이며, 7번째 실험치(B)부터는  $19.44^\circ\text{C}$ 를 다시 기준점으로 하여 화상(A)를 기준화상으로 놓고 실험하였다. 이와 같은 기준점의 이동으로 인하여 엄밀한 의미에서의 연속실험은 되지 못한다고 말할수도 있겠지만 실험 자체는 온도의 변화에 따라 계속 연속성을 갖는다. 이 실험에서 얻은 회귀선의 결정계수는 0.994로 에틸 알코올의 열광학계수가 선형성을 가짐을 보여준다. 이 실험에서 사용한 빛의 파장과는 약간 다르나 화학 및 물리 편람에는, 파장이 589.3 nm 나트륨 빛에서의 에틸 알코올의 열광학계수가  $-4.31 \times 10^{-4}$ 으로 나와있다.<sup>[12]</sup> 이 계수에 대한 많은 실험자료들이 나와있지 않아 정확한 비교는 어려우나 이는 근사한 비교치는 되리라 본다.

앞에서 본 바와 같이 ESPI를 이용하여 액체시료의 열광학계수를 측정하는 광학계를 고안하였으며, 에틸 알코올을 시료로하여 이의 사용 가능성을 확인하였다. 회귀선의 결정계수가 높게 나온 것으로 미루어 이 광학계는 열광학계수가 선형으로 변화하는 시료 뿐만 아니라 비선형으로 변화하는 시료에 까지도 사용 가능하리라 생각하며, 이 실험에 이은 실험으로 이 광학계를 사용하여 열광학계수의 변화를 측정하므로써 고분자 용액 내에서의 고분자의 구조변화를 여러 실험조건 하에서 관측할 예정이다. 또한 고체 매질의 열광학계수를 측정하기 위해서는 역시 액체 시료의 측정에서와 마찬가지로 매질을 썬기 모양으로 연마하여 측정하면 가능하리라 생각한다.

### 참 고 문 헌

[1] D. Milam, J. B. Willis, F. Rainer, and G. R. Wirtenson, *Appl. Physic. Lett.* **38**, 402 (1981).  
 [2] A. V. Kats and I. S. Spevak, *Sov. J. Quantum Electron.* **9**, 857 (1979).  
 [3] M. Sparks, *J. Appl. Phys.* **42**, 5029 (1971).

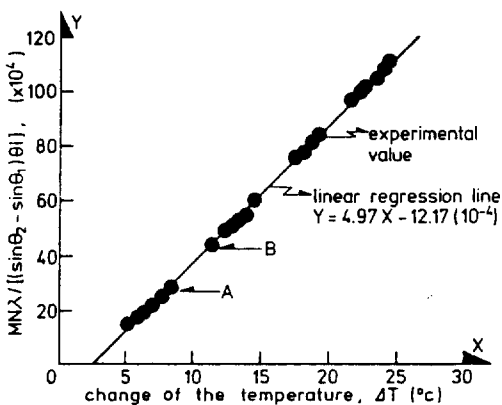


Fig. 3. Plots of experimental values versus temperature change, here a gradient of linear regression line corresponds to a thermooptic coefficient of ethanol.

- [4] R. J. Harris, G. T. Johnston, G. A. Kepple, P. C. Krok, and H. Mukai, *Appl. Opt.* **16**, 436 (1977).  
[5] E. I. Babadzhan, Yu. N. Lokov, and V. S. Mospa-nov, *Sov. J. Quantum Electron.* **6**, 675 (1976).  
[6] J. S. Yoon, S. I. Jeon, and Y. S. Kim, *J. Nat. Sci. Res. Inst. KANU* **4**, 6 (1988).  
[7] J. S. Yoon and J. H. Chung, *New Phys.* **27**, 129 (1987).  
[8] J. S. Yoon, S. I. Jeon, and K. S. Kang, *New Phys.* **29**, 526 (1989).  
[9] Robert K. ERF, *Speckle Metrology* (Academic press, 1978) P. 52.  
[10] J. S. Yoon, *Korean Appl. Phys.* **2**, 358 (1989).  
[11] J. S. Yoon, *J. Nat. Sci. Res. Inst. KANU* **7**, 35 (1991).  
[12] R. C. Weast, *CRC handbook of chemistry and physics* 59th edition (CRC press, 1978) E-356.

### **Measurement of Thermooptic Coefficient by Electronic Speckle Pattern Interferometer**

Jae-Sun Yoon

*Department of Physics, Kangnung National University, Kangnung 210-702*

(Received: April 2, 1991)

One of coefficients showing the degree of thermal effects is the thermo optic coefficient. It is the ratio of the refractive index change versus the change of temperature and was already measured by other general interferometric method. In this research, an optical system with the electronic speckle pattern interferometer complementing faults of the general interferometer was developed and its potentiality was validated experimentally.