

펄초 레이저를 이용한 물질의 광학적, 기하학적 두께 및 굴절율의 동시 측정

*주기남, 김승우

한국과학기술원 기계공학과

Simultaneous measurement of the optical, geometrical thickness and the refractive index of a transparent plate using a femtosecond pulse laser

*K. N. Joo, S. W. Kim

Dept. of Mech. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

Key words : Femtosecond laser, geometrical thickness, refractive index, simultaneous measurement

1. 서론

물질의 두께 및 굴절율 측정은 광학 설계 및 제작에 있어서 필수적이며, 또한 의학적으로도 피부 내에서 빛의 진행 특성 등을 파악할 수 있는 중요한 정보를 제공하기 때문에 이에 대한 관심이 점점 높아지고 있는 추세이다¹. 일반적으로 단색광을 이용한 광학 간섭계는 2π 모호성 (ambiguity)으로 인하여 거리 측정에 제한을 받기 때문에, 이를 해결하기 위해 저결맞음 간섭계 (low coherence interferometry)¹⁻⁵ 나 공초점 현미경 (confocal microscopy)⁶ 원리를 이용하여 물질의 두께와 굴절율을 측정하기 위한 연구들이 진행되었다. 그러나 이러한 방법들은 물질의 두께와 굴절율을 동시에 측정할 수 있지만, 측정시 스캔 (scanning)을 위한 기계적인 구동이 필요하며, 측정 시간이 길어지는 단점을 가진다. 또한 구동시 시편의 위치가 달라지기 때문에 이로 인하여 오차가 발생하게 된다. 한편 기계적인 구동 없이 거리를 측정하기 위해, 백색광을 이용한 분산형 간섭계 (dispersive interferometry) 방법⁷이 연구되었으며, H. Delbarre⁸는 이를 이용하여 광학적 두께를 측정하고 미리 측정한 두께로부터 물질의 굴절율을 계산하는 연구를 보고하였다. 그러나 이 역시 분산형 간섭계의 측정 영역 제한으로 인하여, 그 이상의 물질에 대해서는 기계적인 구동부를 필요로 한다.

본 연구에서 우리는 펄초 레이저를 이용한 분산형 간섭계 원리를 이용하여 물질의 광학적, 기하학적 두께와 굴절율, 위상굴절율을 기계적인 구동부 없이 동시에 측정하기 위한 새로운 방법을 제안한다.

2. 광학적, 기하학적인 두께와 굴절율의 동시 측정

Figure 1은 본 연구에서 제안하는 펄초 레이저를 이용한 분산형 간섭계를 이용하여 물질의 두께와 굴절율을 동시에 측정하기 위한 방법을 나타낸다. 광원으로는 펄초 레이저인 티타늄 사파이어 (Ti:Al₂O₃, Ti:sapphire) 레이저를 사용하였으며, 펄스 폭은 10 fs에 해당하고, 반복률 (repetition rate)은 75 MHz, 중심주파수는 375 THz (800 nm), 대역폭은 80 THz를 가지고 있다. 펄초 레이저는 주파수 대역에서 빗살 (comb)의 수많은 레이저 모드들로 구성되어 있으며, 모드 각각의 선폭 (linewidth)은 1 MHz 이하이기 때문에 가간섭 거리 (coherence length)가 150 m에 해당한다. 간섭계는 마이켈슨 간섭계로 구성하였으며, 간섭된 신호는 3648 픽셀의 선형 CCD와 회절격자로 구성된 스펙트로미터에서 각 주파수 별로 검출된다. 페브리 페로 에탈론 (Fabry-Perot etalon, FPE)은 스펙트로미터 앞에 두어, 펄초 레이저의 모드 밀도 (mode density)를 낮추는 역할을 하며, 이로 인해 펄초 레이저의 모드간 간격 (mode spacing)은 페브리 페로 에탈론의 자유스펙트럼 영역 (free spectral range, F.S.R.)으로 확대된다. 결국 선형 CCD의 한 픽셀에 3~4개의 모드들이 검출되며 이로 인하여 기존의 백색광을 이용한 분산형 간섭계의 제한된 최대 측정 거리를 개선할 수

있다⁹.

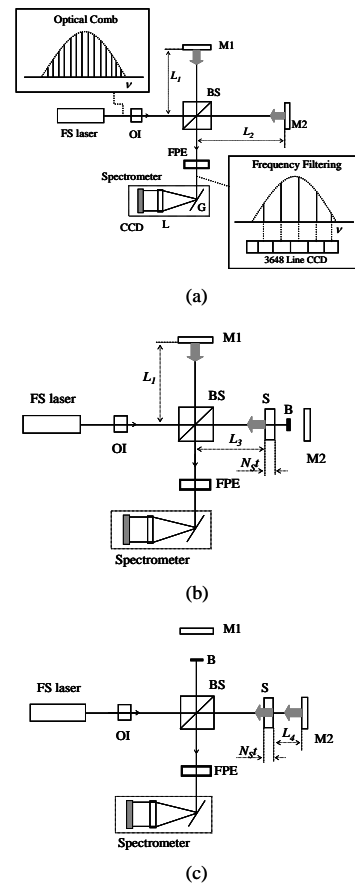


Fig.1 Three-step measurement of the physical thickness and refractive index of a specimen; (a) step 1 for measuring $d1=N_a(L_2-L_1)$, (b) step 2 for $d2=N_a(L_3-L_2)$, and (c) step 3 for $d3=N_aL_4$. FS laser: femtosecond laser, OI: optical isolator, BS: beam splitter, FPE: Fabry-Perot etalon, M₁ and M₂: mirrors, B: beam blocker, S: test specimen.

물질의 광학적, 기하학적 두께와 굴절율의 동시 측정은 전체 3 단계로 이루어진다. 첫번째 단계에서는 Fig.1 (a)에서와 같이 측정하려는 시편을 두기 전에 두 미러, M₁과 M₂ 사이의 광학 거리 $d1=N_a(L_2-L_1)$ 를 측정한다. 이때 N_a 는 공기의 균굴절율을 나타내며 중심 주파수를 알면 Edlén formula를 이용하여 계산이 가능하다. 두번째 단계에서는 측정 시편, S를 Fig.1 (b)와 같이 광 분할기 (beam splitter, BS)와 M₂ 사이에 놓고 S와 M₂ 사이는 빔 가리개 (blocker, B)를 두어서 막은 다음, M₁과 S에서 반사되어 돌아오는 빛들의 간섭을 측정한다. 그러면 결과적으로 M₁과 S의 앞면 사이의 광학 거리 $d2=N_a(L_3-L_1)$ 와 S의 광학적 두께 N_{st} , 그리고 M₁과 S의 뒷면 사이의 광학 거리 $[N_a(L_3-L_1)+N_{st}]$

를 동시에 측정할 수 있다. 세번째 단계는 Fig.1 (c)와 같이 B 를 BS 와 M1 사이에 두어 빔을 막은 다음 간섭무늬를 측정한다. 그러면 두번째 단계와 마찬가지로, M2 과 S 의 뒷면 사이의 광학 거리 $d3=N_aL_4$ 와 S 의 광학적 두께 N_{st} , 그리고 M2 과 S 의 앞면 사이의 광학 거리 ($N_aL_4+N_{st}$)를 동시에 얻을 수 있다.

전체 3 단계에서 얻어진 결과들을 정리하면, 두번째 단계와 세번째 단계의 결과로부터 측정 시편의 광학적 두께 N_{st} 를 결정할 수 있고, 또한 측정 결과들의 기하학적인 관계를 이용하면 시편의 물리적 두께 t 는 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$t = \frac{d1-d2-d3}{N_a} = \frac{N_a(L_2-L_1)-N_a(L_3-L_1)-N_aL_4}{N_a} \quad (1)$$

측정 시편의 균굴절율은 측정된 광학적 두께와 위 식을 이용해서 구한 기하학적 두께의 관계를 이용하면, 측정된 광학적 두께를 물리적 두께로 나누어 주는 것으로 간단히 구해낼 수 있다. 한편 시편의 위상굴절율은 푸리에 변환 방법 (Fourier transform method)을 이용할 때, 측정된 위상과 주파수 간의 관계를 통해 측정할 수 있다.

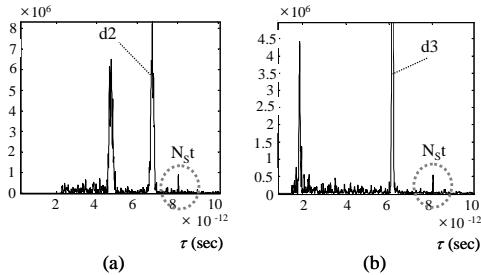


Fig.2 Fourier-transformed signals obtained in the three steps for a BK7 sample of 1 mm thickness; (a) step2 and (b) step3.

3. 실험 및 측정결과

Figure 2 는 1 mm 두께를 가진 BK7 을 시편으로 하여 측정한 분산형 간섭계의 간섭무늬의 푸리에 변환 결과를 나타낸다. Fig.2 (a)는 두번째 단계의 실험결과를, Fig.2 (b)는 세번째 단계의 실험결과를 각각 나타낸다. 이때 Fig.2 (a), (b)에서 공통적으로 나타나는 첨두 (peak)는 측정 시편의 광학적 두께 N_{st} 를 나타내며 측정 결과는 $1720.517 \mu\text{m}$ 였다. 그리고 시편의 두께는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있으며 측정 결과 $1128.365 \mu\text{m}$ 였다. 또한 두 결과로부터 균굴절율은 1.5231 로 측정되었다.

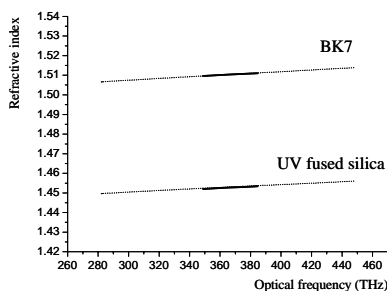


Fig.3 Measured phase refractive indices (solid line) compared with their reference value (dashed line).

위상굴절율은 측정시 위상과 주파수 관계를 이용하여 계산하였으며 Fig. 3 은 그 결과를 나타내고 있다. fused silica

에 대해서도 같은 실험을 수행하였으며, 각 실험들은 15 번 반복 측정하여 그 결과들은 표 1 에 정리하였다.

Table 1. Measurement results

| sample material | group refractive index | optical thickness (μm) | geometrical thickness (μm) | σ-repeatability (nm) |
|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|
| BK7 | 1.5231 | 1717.839 | 1127.831 | 34 |
| fused silica | 1.4673 | 1556.348 | 1060.689 | 31 |

4. 결론

본 연구에서는 물질의 광학적, 기하학적 두께와 굴절을 측정을 위해 펄스 레이저를 이용한 분산형 간섭계를 제안하였다. 제안한 분산형 간섭계는 기존의 백색광 분산형 간섭계에 비해 최대 측정 거리를 확대할 수 있기 때문에 두꺼운 시편을 측정할 때에도 기계적인 구동을 필요로 하지 않는다. 그리고 제안한 3 단계의 측정 방법은 한 번의 측정으로 물질의 광학적, 기하학적 두께 및 굴절을 동시에 측정할 수 있다. 제안한 방법을 검증하기 위해 BK7 과 fused silica 를 측정하였다.

후기

본 연구는 창의적 연구진흥사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern, B. E. Borna, M. R. Hee and J. G. Fujimoto, "Determination of the refractive index of highly scattering human tissue by optical coherence tomography," *Opt. Lett.* **20**, 2258(1995)
- R. C. Youngquist, S. Carr and D. E. N. Davies, "Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique," *Opt. Lett.* **12**, 158(1987)
- M. Haruna, M. Ohmi, T. Mitsuyama, H. Yajiri, H. Maruyama and M. Hashimoto, "Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry," *Opt. Lett.* **23**, 966(1998)
- D. F. Murphy and D. A. Flavin, "Dispersion-insensitive measurement of thickness and group refractive index by low-coherence interferometry," *Appl. Opt.* **39**, 4607(2000)
- A. Hirai and H. Matsumoto, "Low-coherence tandem interferometer for measurement of group refractive index without knowledge of the thickness of the test sample," *Opt. Lett.* **28**, 2112(2003)
- I. K. Ilez, R. W. Waynant, K. R. Byrnes and J. J. Anders, "Dual-confocal fiber-optic method for absolute measurement of refractive index and thickness of optically transparent media," *Opt. Lett.* **27**, 1693(2002)
- J. Schwider, and L. Zhou, "Dispersive interferometric profilometer," *Opt. Lett.* **19**, 995(1994)
- H. Delbarre, C. Przygodzki, M. Tassou and D. Boucher, "High-precision measurement in anisotropic crystals using white-light spectral interferometry," *Appl. Phys. B* **70**, 45(2000)
- K. N. Joo and S. W. Kim, "Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser," *Opt. Express*, **14**, 5954(2006)