

## 지연각 변조를 이용한 2차원 복굴절 분포 측정

### Two-dimensional birefringence distribution measurement using liquid crystal variable retarders

예상현, 곽윤근, 김수현, 조현모\*, 조용재\*, 제갈원\*,

한국과학기술원, \*한국표준과학연구원

wildfire@kaist.ac.kr

동일한 물성으로 이루어진 투명한 물체에 빛을 입사시키게 되면 투과되어 나오는 빛에는 아무런 변화가 없다. 물론 완전한 균일 분포를 가지고 있지 않기 때문에 정밀한 측정을 하게 된다면, 물체 내에 존재하는 불균일 물성 분포, 이물질, 잔류응력 등에 의해 투과되어 나오는 빛은 영향을 받을 것이다. 특히, 핸드폰용 렌즈, 스캐너와 복사기에 사용되는 f-theta 렌즈의 경우 크기가 작고, 그 형상이 복잡하기 때문에 기존의 연삭 과정을 통해서 생산해 낼 수 없는 광학 부품들로써, 이런 렌즈들은 사용하고자 하는 유리나 같은 굴절률을 가진 플라스틱 재료를 이용하여 사출을 통하여 제작되어 지고 있다.

이런 경우 높은 압력으로 인해 표면에 잔류응력이 존재하게 되며 이로 인하여 광학 부품의 이미지 결상 능력 저하 및 광학 수차 증가 등이 문제시 되고 있다. 만약 사출을 통해 만들어진 광 부품의 잔류응력을 측정하게 된다면 금형의 압입 및 압출 조건을 제어함으로써 이미지에 사용되는 가운데 부분이 아닌 가장자리 부분에 잔류응력이 집중되도록 할 수 있을 것이다. 이 잔류응력을 측정하기 위해서는 응력에 의해 물질에 생기는 광학적 특성인 복굴절을 현상을 이용하여 측정이 가능하다. 가해지는 응력의 크기에 따라 서로 직교한 방향의 굴절률이 달라지기 때문에 그 위상 지연 정도가 틀려지게 된다. 물론 주응력 방향과 복굴절 물질에서 흔히 말하는 fast-axis와도 관련이 있는 것은 자명한 사실이다.

복굴절 성질을 나타내는 물질에서 측정하고자 하는 것은 fast-axis의 방향과 fast-axis와 slow-axis간의 위상차이인 지연각을 찾아내는 것이다. 이와 관련된 기존의 연구 중에서 2차원으로 측정한 연구를 살펴보면, 우리에게 잘 알려진 타원 편광 분석기(ellipsometer)를 이용한 방법<sup>(1)</sup>이 제시되었다. 두 개의 wave plate를 일정 비율의 회전비를 가지도록 동시에 회전시키는 dual-rotating wave plate 형태를 취하고 있다. 이 경우 빠른 회전 속도로 인해 detector로 사용되는 CCD(charge coupled device)의 요구 프레임 수가 높으며 또한 이를 실현하기 위해서는 CCD의 가운데 일부분 영역만을 사용해야지만 가능하다는 단점이 있다. 또한 신호의 처리를 푸리에 변환을 해야 하기 때문에 각 픽셀에 대한 푸리에 계수 값을 계산해야 하기 때문에 계산량에 있어서도 단점으로 지적되고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 측정 대상을 2차원으로 정보를 얻기 위해서는 많은 수의 이미지를 측정하기 보다는 최소한의 측정 횟수를 통하여 얻은 정보를 이용하여 각 픽셀에 대한 측정 대상의 물성을 측정하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 회전형 형태가 아닌 liquid crystal을 이용한 위상 지연각을 조절함으로써 Stokes vectors를 측정하고자 하는 연구가 있었다.<sup>(2,3)</sup>

회전형 타입의 측정 장치에 비해 liquid crystal을 이용하는 경우 빛의 입사 허용각도가 크며, 움직이는 부품이 없기 때문에 이미지의 흔들림이 없으며, 최소 4번의 측정으로 Stokes vectors를 구할 수가 있게 된다. 이를 이용하여 2차원으로 분포한 복굴절에 대한 정보를 측정 할 수 있게 된다.

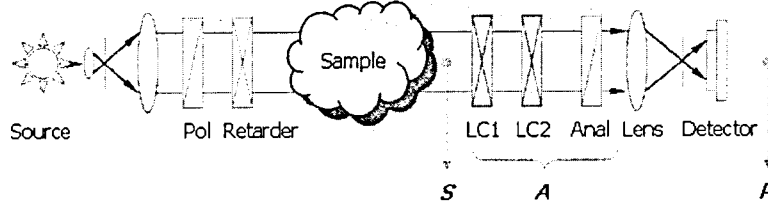


그림 1. 복굴절 물질을 측정하기 위한 간략한 실험 장치도

그림 1에서 광원을 통해 나온 빛을 평행광으로 만든 후 polarizer의 투과축과 retarder의 fast-axis 사이 각이 45°가 되도록 하여 retarder를 통해서 나온 빛이 원편광이 되도록 세팅을 한다. 이렇게 하는 이유는 측정 물체의 fast-axis가 일정하지 않기 때문에 입사광이 물질의 특성을 가지고 투과할 수 있도록 하기 위한 것이다.

$$P = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_{p-1} \end{pmatrix} = AS = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{p-1,0} & a_{p-1,1} & a_{p-1,2} & a_{p-1,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

그림 2. 측정을 통해 얻게 되는 시스템 변수 행렬식

그림 2의 행렬식은 시료를 투과해 나온 빛은 Stokes vectors 형태를 가지게 되고 행렬  $S$ 로 정의 한다.  $P$ 는 detector를 통해서 얻게 되는 빛의 전자기적 세기를 측정 한 값이 된다. 또한  $A$  행렬은 liquid crystal 2개와 analyzer의 광 특성을 나타내는 Muller matrix를 전개하여 얻은 시스템 행렬이 된다. 이 경우  $A$  행렬은 liquid crystal의 fast-axis축 고정 각도 2개와 한번 측정마다 각 liquid crystal의 지연각 set이 필요하게 되는데, 만약 4번 측정을 하여 시스템 행렬  $A$ 를 얻고자 한다면 두 개의 지연각으로 이루어진 4개의 set이 필요하게 되는 것이다. 결국 구하고자 하는 물체의 Stokes vectors를 얻기 위해서는 시스템 행렬의 역행렬을 구하여 detector를 통해서 얻은  $P$ 에 곱하게 되면 결국 얻게 된다. 하지만 역행렬의 존재 여부와 측정 신호의 노이즈 균일화를 위해서 시스템 행렬  $A$ 를 최적화하는 과정이 필요하며 이를 수행한 과정 및 결과 또한 제안된 시스템을 이용하여 측정 한 결과를 발표하고자 한다.

참고문헌

[1] Justin Wolfe, "High speed imaging polarimeter", Proc of SPIE, (2003)  
 [2] Michael Shriba, Rudolf Oldenbourg, "Techniques for fast and sensitive measurements of two-dimensional birefringence distributions", Applied optics, Vol.42, No.16, p.3009-3017, (2003)  
 [3] B. L. Boulesteix, A. De Martino, B. Drevillon, L. Schwartz, "Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals", Applied optics, Vol.43, No.14, p.2824-2832, (2004)