

복굴절의 이해와 렌즈의 복굴절 측정

복굴절이란 하나의 매질로부터 다른 매질로 진입하는 파동이 그 경계면에서 나가는 방향을 바꾸는 현상으로 등방성 매질에서 이방성 매질로 나아갈 때는 경계면에서 굴절파가 두 개로 나뉘어 굴절하게 되는 것을 말한다. 휴대폰용 카메라모듈 렌즈의 사출성형공정에서 발생하는 렌즈 내의 잔류응력에 의한 복굴절률은 사출공정에서의 렌즈불량 발생의 원인이 되며, 잔류응력은 또한 사출성형 이후에 완화되어 렌즈의 외관 치수의 변형을 가져오게 된다. 그러나 플라스틱류를 사용하는 정밀가공 생산 공정 등 실생활에서는 제품의 제조에 있어서 복굴절은 광학적 특성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나로서 성형시 복굴절을 최소화할 필요가 있다. 이를 어느 정도 달성했는가의 수준에 따라 플라스틱 정밀 성형 제품의 등급이 결정되는 중요한 측정요소이다.

편집자 주

IT 기술의 발달과 정보통신 환경의 발전추세에 비례하여 우리들은 많은 플라스틱 수지 제품을 접하고 일상적으로 사용하며 살아가고 있다. 또한 금속재료나 무기재료 등이 플라스틱 재료로 대체됨으로써 이러한 플라스틱 제품의 사용 빈도 증가양상은 더욱 가속화되고 있다. 그런데 많은 플라스틱제품들은 사출성형공정을 통하여 생산되고 있으며, 최근에는 광학관련 제품의 재료들이 플라스틱으로 변경되면서 플라스틱 제조공정인 사출성형상의 여러 조건들이 광학제품의 광학적 특성에 많은 영향을 주게 되었다. 특히 사출성형품내의 잔류응력에 의한 광학제품의 복굴절 발생과 치수 변형은 사출성형시 보압, 사출속도, 금형온도, 용융수지의 온도 등이 공정 변수로 작용하여 이의 적정화가 최대 과제로 받아들여지고 있다. 특히 휴대폰 등의 카메라모듈

에 사용되는 렌즈가 좋은 예이다.

휴대폰용 카메라모듈 렌즈의 대부분은 사출성형공정에 의해 생산되어지고 있으며, 사출성형공정에서 발생하는 렌즈 내의 잔류응력에 의한 복굴절률은 사출공정에서의 렌즈불량 발생의 원인이 되며, 잔류응력은 또한 사출성형 이후에 완화하게 되어 렌즈의 외관 치수의 변형을 가져오게 된다.

복굴절이란 하나의 매질로부터 다른 매질로 진입하는 파동이 그 경계면에서 나가는 방향을 바꾸는 현상으로 등방성 매질에서 이방성 매질로 나아갈 때는 경계면에서 굴절파가 두 개로 나뉘어 굴절하게 되는 것을 말한다. 복굴절된 두 개의 광파는 그 진동 방향이 서로 수직인 편광이다. 투명한 방해석 결정을 어떤 물체에 위에 올려 놓으면 물체가 겹쳐서 보이는데 이것은 복굴절 현상

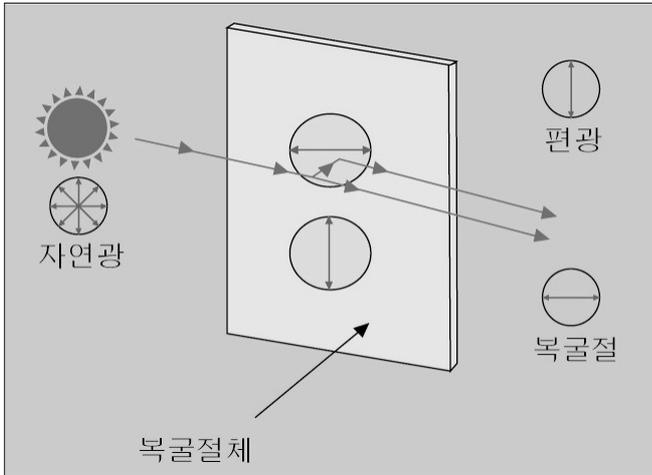


그림 1.



그림 2.

때문이다. 그러나 플라스틱류를 사용하는 정밀가공 생산 공정 등 실생활에서의 제품 제조에 있어서 복굴절은 광학적 특성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나로서 성형시 복굴절을 최소화할 필요가 있다. 이를 어느 정도 달성했는가의 수준에 따라 플라스틱 정밀성형 제품의 등급이 결정되는 중요한 측정요소이다. 특히 광섬유 및 광디스크, LCD의 반사판, 카메라 렌즈 등 광학관련 제품에 있어서 제품의 밀도나 성형의 오차에 따라 굴절률이 달라지게 되면, 방해석이나 여러 비등방성 광석, 그리고 stress가 가해진 투명 고분자에서처럼 원하지 않는 복굴절 현상이 나타날 수 있다. 즉, 방해석(calcite), 운모(mica) 등 복굴절 결정(double-refracting crystal)속에서 광축(optical axis)방향으로 나아가는 빛은 편광방향에 관계없이 그 진행속도는 같지만, 그 외의 방향으로 나아가는 빛은 두 가지 속도를 가지고 있는 것처럼 성형상의 오차 정도에 따라 광축에 수직인 방향으로 진행하는

빛과 광축방향의 빛에 있어 두 속도의 차이가 발생할 수 있다. 이는 광축방향에 수직방향으로 편광된 빛(ordinary wave)의 속도와 광축방향의 빛(extraordinary wave)의 속도 차이가 오차 범위만큼 발생하게 되는 것이다.

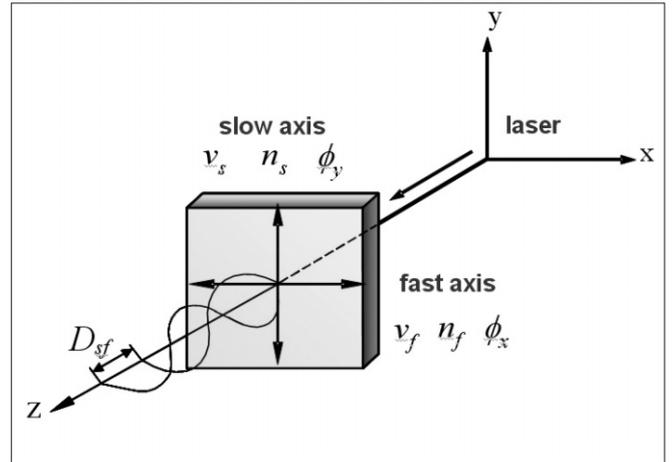


그림 3.

$$D_{sf} = (t_s - t_f) c = \left(\frac{d}{v_s} - \frac{d}{v_f} \right) c = (n_s - n_f) d$$

$$\Delta n = \frac{D_{sf}}{d} = (n_s - n_f)$$

t : transit time

v_s : velocity of the slow axis

v_f : velocity of the fast axis

c : velocity of light "in" vacuum

d : thickness of the sample

n_s : refractive "index" of the slow axis

n_f : refractive "index" of the fast axis

D_{sf} : retardation between the two axis

Δn : birefringence

where

다시 말하면, 비편광된 빛을 x축에 대하여 ϕ 기울어진 편광판(polarizer)을 통과시킨 후, 광축이 x방향이고 두께가 d인 복굴절체를 통과시키는 상황을 고려하여, 이 빛의 편광상태를 분석하기 위하여 복굴절체 다음에 기울어진 검광자(analyzer: 편광상태를 알아 보기 위한 편광자)를 놓는 경우, 막 복굴절체에 입사하는 빛의 x, y 성분은 각각 식 1과 같다.

$$E_x = E \sin \phi \cdot \sin(ut)$$

식 1

$$E_y = E \cos \phi \cdot \sin(ut)$$

한편, 두께 d인 결정 속을 통과하는 데 두 파의 진행속도가 달라서 위상차가 생기게 되는 데, 그 위상차는

$$= \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d \quad \text{식 2}$$

이다. 여기서 n_o, n_e 는 두 속도에 대한 굴절률, λ 는 진공에서의 파장이다. 복굴절체의 두께를 적당히 하여 위상차를 $\pi/2$, 즉 파장을 $\pi/4$ 차이 나게 하면

$$\begin{aligned} E_x &= E \sin \phi \cdot \sin(\omega t) \\ E_y &= E \cos \phi \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad \text{식 3}$$

로 되어 타원편광이 된다. 이때 ϕ 가 $\pi/4$ 이어서 복굴절체에 입사하는 파의 크기가 같으면 완전한 원형편광이 된다. 이를 1/4 파장판이라 한다. 한편 파장차를 $\lambda/2$ 되게 하면 y 성분이 $-$ 가 된다. 이를 1/2 파장판이라 한다. 이는 1/4 파장판을 두개 겹쳐서 만들 수 있으며, 백색광원에서의 간섭패턴은 다음과 같은 모양을 보인다.

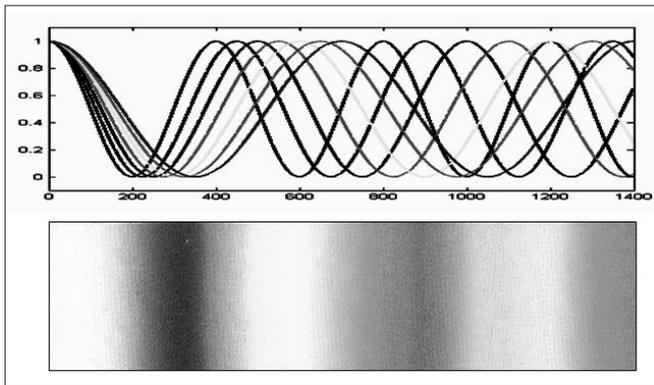


그림 4.

1. 일반적 복굴절 측정방법(cross system)

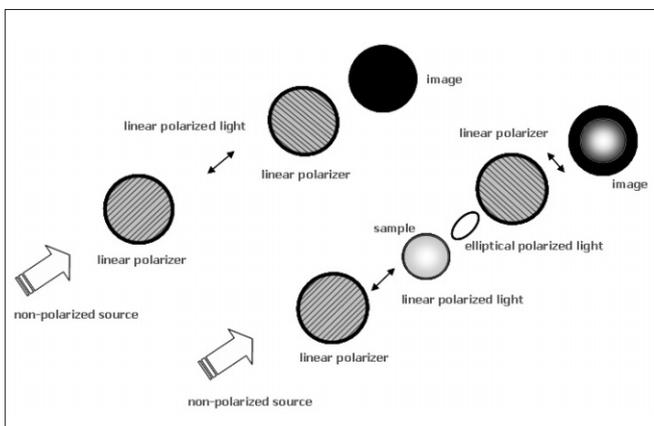


그림 5.

Jones Matrix에 의해 cross system에서 샘플을 θ 만큼 회전시키면,

$$\begin{aligned} \text{image} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_x(\lambda)} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_y(\lambda)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \\ &= e^{i\phi_x(\lambda)}(1 - e^{ia(\lambda)})(\cos 2\theta) \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

where $\phi_y = (\lambda) = \phi_x(\lambda) + a(\lambda)$
 $\therefore I_{interference} \propto \cos^2 2\theta \cdot \cos a(\lambda)$

이 경우 간섭은 편광판에 대하여 빠른 축의 방향에 종속적이기 때문에 샘플의 방향에 따라 패턴이 달라진다.



그림 6. Birefringence Meter BM200L

2. 새로운 복굴절 측정 방법(parallel system with two $\lambda/4$ plates)

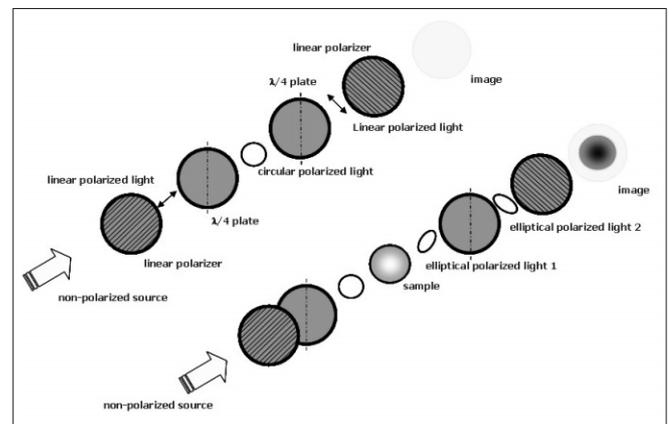


그림 7.

같은 방법으로 Jones matrix에 의해 parallel system에서 샘플을 θ 만큼 회전시키면,

$$image = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \sin\theta \\ -\sin\theta \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_x(\lambda)} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_y(\lambda)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$$

$$= e^{i\phi(\lambda)}(1 + e^{ia(\lambda)})(\cos 2\theta) \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

where $\phi_y = (\lambda) = \phi_x(\lambda) + a(\lambda)$
 $\therefore I_{interference} \propto \cos a(\lambda)$

이 식에 의하면 편광은 방향성을 관련됨이 없이 간섭 패턴은 오직 a 변수에 의한 함수가 되기 때문에 샘플의 방향에 관계없이 동일한 패턴을 보이게 된다.

이것은 BM200L 복굴절 측정기구를 통하여 직접 확인할 수 있다. 동일한 플라스틱 샘플을 사용하여 cross system에서 촬영한 결과는 다음과 같다. 즉, 광축에 대한 각 θ 변화에 따라 편광 패턴이 현저하게 대비되고 변화되는 모습을 보인다.

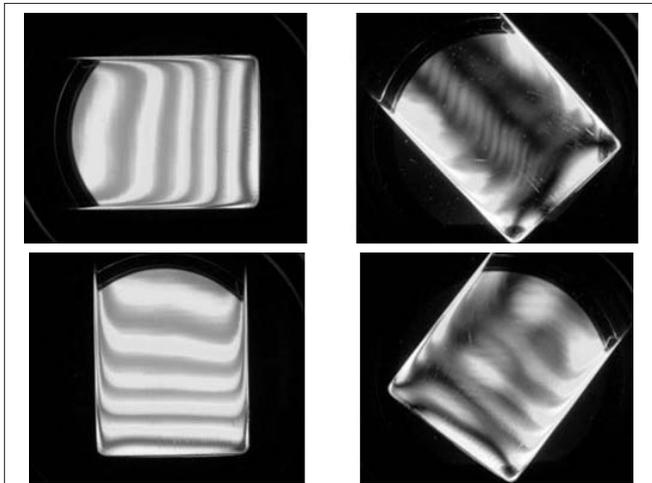


그림 7.

이와는 대조적으로 동일한 샘플을 사용하여 parallel system에서 촬영한 결과는 다음과 같다.

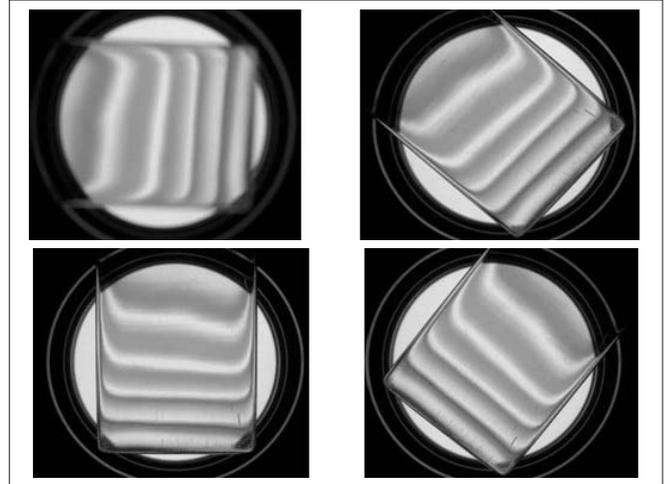


그림 8.

부연하여 설명하면, parallel system에서 복굴절이 발생하는 샘플의 경우 위치변화에 관계없이 동일한 패턴을 보이게 된다. 이는 주로 원형 샘플이나 시료를 사용하는 경우 복굴절 측정에 매우 유용하게 활용될 수 있음을 시사하고 있다.

따라서 샘플에 방향에 영향을 받지 않는 독립적 특성을 이해한다면 parallel system을 이용한 복굴절 측정이 훨씬 더 실제 생산공정이나 산업 적용에 있어서 유용하다고 말할 수 있다.

참고자료

1. 광학(조재흥, 두양사, 2002),
2. 기초광학(윤재선, 두양사, 2002)
3. Useful Optics (Walter T. Welford, Univ of Chicago Pr, 1991),
4. Optical Waves in Crystals(Yariv & Yeh, Wiley, 2002),
5. 현대 광학 (서울대학교, 1996)



최유화

(주)지엔오
이사



김영준

삼성전기(주)
책임연구원