

論文2000-37SD-7-5

반사형 광 폴리머의 효율 안정을 위한 편광특성 분석

(Analysis of Polarization Characteristics of Reflection Type Photopolymer for Stabilization)

金銀錫*, 金男*

(Eun-Seok Kim and Nam Kim)

요 약

광 폴리머(photopolymer)에 의한 편광 회전과 제작된 격자에서 나타나는 회절효율의 불안정을 분석하였으며, 특히 반사형 광 폴리머의 내부 복굴절(birefringence)에 의해 회절효율의 변화가 발생함을 밝혔다. 광 폴리머를 지지하고 있는 Mylar 기판(base sheet)은 고분자 물질로, 가공 중에 발생한 연신에 의해 복굴절이 발생하여 빔의 편광 상태를 회전시킴으로써 격자의 회절효율을 불안정하게 만드는 원인이 된다. Mylar 기판을 통과하는 빔의 편광 상태를 감광성이 없는 He-Ne 레이저를 사용하여 유리판 위에 접촉된 상태에서 방향을 조절하여 광원의 편광 상태와 평행하게 고정시킬 수 있었으며, 이로 인해 매우 안정적인 회절효율을 갖는 회절격자를 제작할 수 있었다.

Abstract

Some polarization characteristics of reflection type photopolymer are investigated. Photopolymer on a Mylar substrate alters an incoming linearly polarized laser beam to an elliptical polarization. Due to the rotation of the polarization, the recording gratings show different diffraction efficiencies. The rotation angle is of order of 10-50% for the tested samples. It is found that the polymer layer does not change the polarization direction but the Mylar substrate alone distorts the incoming polarization to a comparable degree. As align the polarization states of photopolymers to be parallel with a laser using a He-Ne laser(633nm), which is not sensitive to that material, it was possible to make high diffraction efficiency gratings.

I. 서 론

광 폴리머는 화학처리 없이 자체 현상(self-developing)만으로 굴절을 변조가 가능한 볼륨 위상형(volume phase) 홀로그래픽 기록매질로서 빛의 세기에

따른 굴절률 변화로 정보를 저장한다. 또한, 폴리머에 첨가된 염료(dye)에 따라 반응 파장이 가시광선의 전 영역에서 사용할 수 있으며, 건조처리 후 암실에 보관할 경우 효율의 변화 없이 장시간 보관할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 특징들 때문에 Laser Eye Protection Filter^[1], LCD(liquid crystal display) 소자^[2], 광 연결 소자^[3], 광 메모리 소자^[4] 등에 널리 응용되고 있다.

현재 이러한 응용 분야에 주로 사용되고 있는 광 폴리머는 매질에 대한 특성과 기록 조건 등이 매우 안정화된 투광형이 주류를 이루고 있다. 그러나 반사형의

* 正會員, 忠北大學校 電氣電子工學部

(School of Electrical and Electronics Eng.)

※ 본 연구는 과학재단의 '97 특정연구과제(#97-0101-0301-3) 지원으로 수행되었습니다.

接受日字:1999年7月7日, 수정완료일:2000年5月30日

경우 상용제품에 대한 일반화된 논문이 거의 없을 정도로 그 특성이 아직까지 매우 불안한 것으로 알려져 있어 응용에 많은 제약을 받고 있다[5-7]. 이러한 불안전 요소 중에서도 편광 특성이 가장 지배적인 것으로 보고된 바 있지만^[8] 구체적인 이유는 아직 밝혀지지 않고 있다.

본 논문에서는 상용화되고 있는 DuPont 사의 반사형 광 폴리머인 OmniDex[®] 706을 사용하여 매질 내부에서 편광이 회전하고 있음을 확인하였으며, 이 때문에 발생하는 기록에서의 회절효율의 변화를 고찰하였다. 또한, 이러한 불안전 요소를 제거하기 위해 편광 상태를 일정하게 유지할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 통해 보다 안정된 회절효율을 갖는 반사형 회절격자의 제작이 가능함을 실험적으로 증명하였다. 마지막으로, 편광 상태를 변화시키는 주된 원인을 규명하기 위해 매질의 기록 전, 기록 후, UV처리 후, 열처리 후, 그리고 폴리머에 부착된 Mylar를 제거한 후 나타나는 편광의 회전 상태를 측정하여 반사형 광 폴리머에서 회절효율을 불안하게 만드는 요소를 규명하였다.

II. 광 폴리머의 구조와 기록과정

Off-axis 홀로그래프에서 기록매질에 입사하는 물체파 $\alpha(x, y)$ 와 참조파 $r(x, y)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(x, y) = a_1 \exp[-i\phi_1], \quad (1)$$

$$r(x, y) = a_2 \exp[i\phi_2]. \quad (2)$$

여기서, a_1 과 a_2 , ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 물체파와 참조파의 진폭과 초기 위상이며, - 부호는 반대 방향에서의 진행을 뜻한다.

물체파의 세기를 I_1 , 참조파의 세기를 I_2 라고 하면, 두 파의 결합에 의한 기록매질에서의 세기 분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I &= |\alpha(x, y) + r(x, y)|^2 \\ &= a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \exp[-i\phi_1] \exp[-i\phi_2] \\ &\quad + a_1 a_2 \exp[i\phi_1] \exp[i\phi_2] \\ &= I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\phi_1 + \phi_2) \end{aligned} \quad (3)$$

회절된 파면의 진폭은 기록된 간섭패턴의 변조 깊이(modulation depth)가 증가할수록 커지므로, 고효율의

홀로그램을 제작하기 위해서는 간섭패턴의 콘트라스트가 매우 높아야만 한다. 콘트라스트는 간섭무늬의 선명도(visibility)에 의해 결정되며 다음과 같이 정의된다.

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (4)$$

여기서, I_{\max} 와 I_{\min} 은 기록면에서 간섭패턴의 최대 세기와 최소 세기이다.

식 (3)은 두 기록파의 편광이 같은 방향으로 입사할 경우이며, 만약 두 파의 편광이 θ 만큼 차이가 난다면, 간섭패턴에서의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \theta \cos(\phi_1 + \phi_2) \quad (5)$$

이 식에서 알 수 있듯이, 간섭무늬의 선명도는 두 기록빔의 편광차 θ 가 증가할수록 감소되며, $\theta = \pi/2$ 일 때 0이 된다. 이는 기록매질의 굴절률 변조가 θ 의 증가에 따라 변함을 나타내며, 회절효율의 변화를 의미한다.

이상적인 홀로그래피 기록매질은 레이저의 파장에 민감해야하고, 선형적인 전달 특성을 가지며, 높은 해상도와 낮은 노이즈 성분을 갖고 저렴해야 한다. 이러한 조건들은 모두 만족하는 매질로는 광 폴리머가 있으며, 이를 광 정보처리에 응용하기 위한 많은 연구가 현재 진행 중에 있다.

본 논문에서 사용된 DuPont 광 폴리머는 반사형의 경우 그림 1과 같이 50 μ m의 PVC로 된 cover sheet와 25 μ m의 광 폴리머 층(photopolymer layer), 그리고 50.8 μ m의 Mylar 필름으로 된 base sheet의 3층 구조로 되어있다. Cover sheet는 취급시 먼지나 이물질 등이 광 폴리머 층으로 들어가는 것을 방지하며, base sheet는 광 폴리머 층을 지지하는 역할을 한다. 광 폴리머 층은 polymeric binder, 모노머(monomer), 개시제(initiator system), 감광 염료(sensitizing dye)로 구성되어 있으며, 이곳에서 실질적인 광 중합반응(polymerization)을 일으킨다.

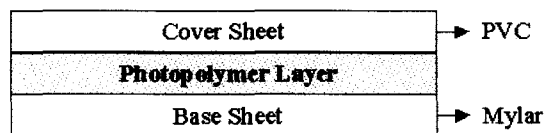


그림 1. 광 폴리머의 구조
Fig. 1. Structure of photopolymers.

광 폴리머에서 홀로그래프의 기록과정은 다음과 같다. 우선, 그림 2(a)와 같이 두 빔의 간섭면에서 보강간섭이 일어나는 부분(bright)은 많은 양의 에너지가 흡수되어 모노머가 폴리머로 변환하는 광 중합반응이 활발히 일어나며, 인접한 모노머는 확산에 의해 폴리머 쪽으로 이동한다. 상쇄간섭이 일어나는 부분(dark)은 상대적으로 적은 에너지가 흡수되어 광 중합반응이 서서히 진행되며, 확산에 의해 잔류 모노머의 양이 감소한다. 이러한 과정이 끝나면 광 폴리머는 binder-rich 영역과 polymer-rich 영역으로 나누어지고, binder-rich 영역이 낮은 굴절률을 갖는 반면 polymer-rich 영역은 높은 굴절률을 갖는다.

그림 2(b)와 같이 간섭무늬를 기록한 기록매질에 균일한 세기의 UV를 조사하면, 매질 내부의 모든 모노머가 폴리머로 변하면서 광 중합반응이 종료된다. 결과적으로 확산에 의한 농도 차가 발생하여 굴절률이 변하는 위상형 격자가 생성되며, 이를 UV cure라고 한다. 이 과정에서 식 (5)에 나타난 것과 같이, 간섭을 일으키는 에너지의 합은 두 빔의 편광상태에 매우 크게 의존하게 된다. 편광상태가 동일한 경우 최대 에너지가 광 중합반응에 사용되어 확산에 의한 굴절률 변화가 분명해지지만, 편광상태가 달라지면 에너지의 분포가 평탄해져 굴절변화가 작게 일어난다. 마지막으로, 100~160°C의 온도에서 2~120분 정도의 열처리를 함으로써 회절효율을 향상시킬 수 있다^[9].

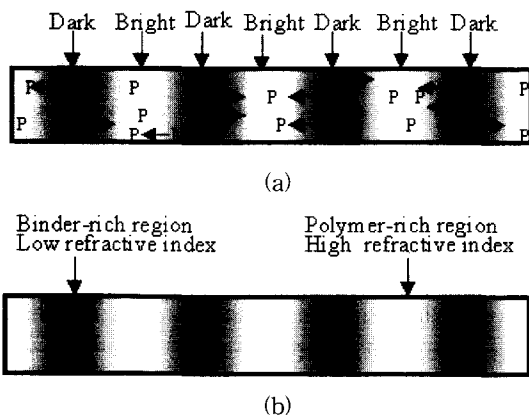


그림 2. 기록 과정. (a) 노출, (b) UV cure
Fig. 2. Recording mechanism. (a) Exposure, (b) UV cure.

III. 실험 및 결과분석

1. 광 폴리머의 방향에 따른 투과빔의 세기 변화
투과형 홀로그래프의 경우, 입사되는 두 빔의 방향이 동일하므로 매질 내부의 복굴절 현상에 의한 영향을 거의 받지 않고 안정된 회절효율을 갖는 격자를 제작할 수 있다. 그러나, 반사형 홀로그래프에서는 매질 내부에서 복굴절 현상이 발생한 경우 양방향에서 입사되는 빔의 편광 방향이 서로 달라 완전한 결합을 이루지 못하며, 따라서 회절격자의 효율이 저하되는 중요한 원인이 된다. 본 실험에서는 레이저에서 나온 선형 편광된 빔이 광 폴리머 내부를 통과한 후 변화되는 편광 상태의 회전량을 측정하였다. 광 폴리머를 통과할 때 발생하는 편광의 회전 정도와 매질 전체에 분포된 편광 회전의 분포 특성을 측정하여 상용 광 폴리머의 편광 특성에 대한 의존도를 밝혔다.

그림 3은 매질의 편광 측정을 위한 광학계로써, 레이저에서 나온 빔은 수직 방향으로 맞춰진 두 개의 편광기(polarizer) 사이를 통과하여 검출기에 입사된다. 두 편광기 사이에 광 폴리머를 위치시키면 복굴절 정도에 따라 광 폴리머를 투과한 빔의 편광 방향이 결정되며, 두 번째 편광기를 통과하는 빔은 매질 내부에서 편광의 회전 정도에 따라 출력 세기가 결정된다.

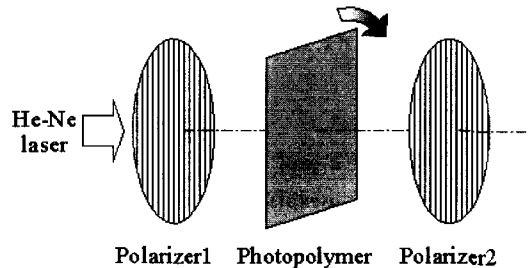


그림 3. 편광 측정을 위한 광학계
Fig. 3. Optical setup for polarization measurement.

좀 더 명확한 편광 상태 변화를 측정하기 위해 검출기 앞에 놓인 편광기를 첫 번째 편광기와 수직하게 놓고 편광 방향의 회전을 관찰하였다. 그림 4는 서로 수직하는 두 개의 편광기 사이에 광 폴리머를 위치시키고 He-Ne 레이저(633nm)를 통과시켰을 때 매질의 회전에 따라 검파되는 빛의 세기를 기록한 사진이다. 입사의 샘플을 10° - 90° 까지 10° 씩 회전시키면서 촬영하였으며, 사진에서 광 폴리머의 위치가 50° 일 때 가장 많은 양의 수직 편광 성분이 수평 편광으로 회전

됨을 볼 수 있다.

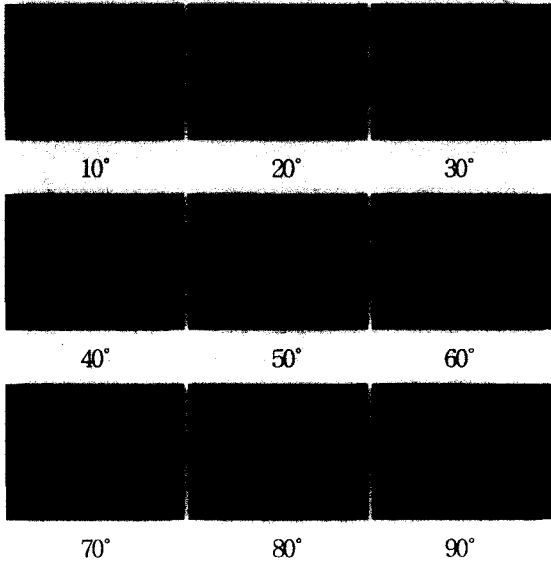


그림 4. 직교 편광기 구조에서 매질의 회전에 대한 투과량의 사진

Fig. 4. Photographs of polarization-rotating at each degree when the two polarizer are orthogonal with each other.

또한, 임의의 새로운 샘플에 대해 두 편광기가 평행하게 놓인 경우와 직교된 경우 출력면에서의 세기 변화 값을 각각 측정하였다. 광원으로는 역시 $5[\mu W]$ 의 He-Ne(633nm) 레이저를 사용하였으며, 그림 5의 실험 결과와 같이 $5[\mu W]$ 의 입사빔에 대해 $\pi/2$ 를 주기로 최고 $2[\mu W]$ 정도의 출력 변화가 발생하였으며, 매질내부에 편광을 회전시키는 성분이 있음을 분명히 나타내고 있다. 즉, 반사형 광 폴리머에 격자를 기록할 경우 같은 세기를 갖는 기록빔이 입사되어도 유리판에 부착된 매질의 방향에 따라 입사빔의 편광이 최고 약 40% 정도까지 회전 가능하다. 따라서, 기록면에서 두 빔의 세기비는 정확히 1:1로 유지되지 못하며, 기록에 사용되는 결합 에너지 역시 감소하여 회절효율이 저하될 것이라는 예측을 가능하게 한다.

매질의 전체 면적에 대한 편광 특성의 변화를 측정하기 위해 3mm의 아이리스(iris)를 사용하여 5mm 간격으로 약 7cm 범위에서의 매질의 회전에 의한 편광의 변화를 측정하였다. 광원으로는 $15[\mu W]$ 의 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 두 편광기의 방향은 서로 평행하게 위치시켰다. 그림 6의 결과 그래프에서 알 수 있듯이

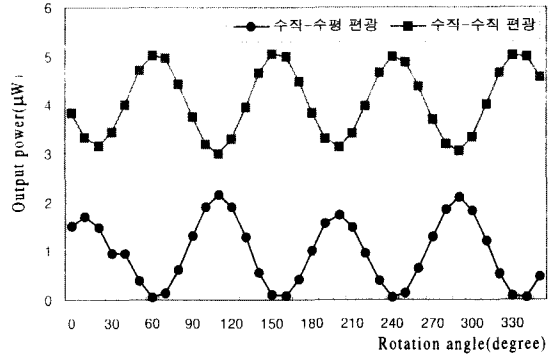


그림 5. 광 폴리머의 회전에 대한 투과량

Fig. 5. Output power of photopolymer as the rotation angle.

각 측정 부분에서 매질의 방향에 따라 최소 투과량의 세기는 위치에 따라 최대 투과량의 약 10% - 50% 정도 범위에서 변화하고 있음을 볼 수 있으며, 전체적으로 매우 불규칙적인 분포를 나타내었다. 최대 투과량의 세기가 다소 일정하지 않은 것은 매질을 유리기판에 붙이는 과정에서 발생한 기포와 검출기와 아이리스의 상대적인 위치변화에 의한 것이며, 이러한 오차 원인은 무관하게 매우 심한 변화를 보이고 있다. 이 결과는 기록매질의 각도에 따른 출력 세기의 변화가 심할수록 회절효율은 기록매질의 위치에 매우 민감한 반응을 보일 것이며, 전체적으로 불규칙적인 특성이 나타날 수 있음을 나타내고 있다.

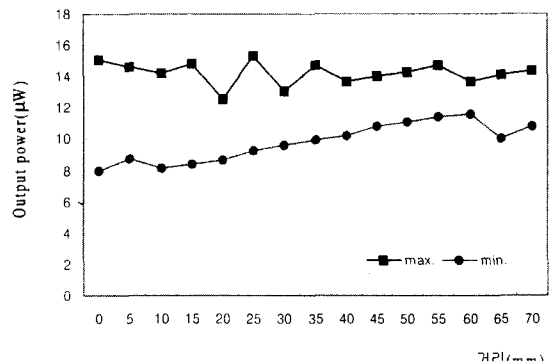


그림 6. 넓은 범위에서의 최대 투과량과 최소 투과량

Fig. 6. Maximum and minimum output power in a wide range.

2. 회절효율의 안정

반사형 광 폴리머를 사용하여 홀로그램 소자를 만들

경우 매질 내부의 편광 변화에 의한 회절효율의 변화를 측정하기 위한 장치도가 그림 7에 나타나 있다. 이러한 광학 구조는 유리판 내부의 반사에 의해 다중스팟이 발생하는 단점을 갖고 있지만 충분한 각도를 이룸으로써 이를 제거할 수 있다¹⁶⁾. 광 폴리머에 도달하는 두 빔 중 유리판을 통과한 물체파는 유리에 의한 복굴절이 없으므로 원래의 편광 상태를 유지하지만, 기록매질을 통과하는 참조파는 앞에서 측정된 것과 같이 편광의 방향이 변형된 상태로 간섭을 일으킨다.

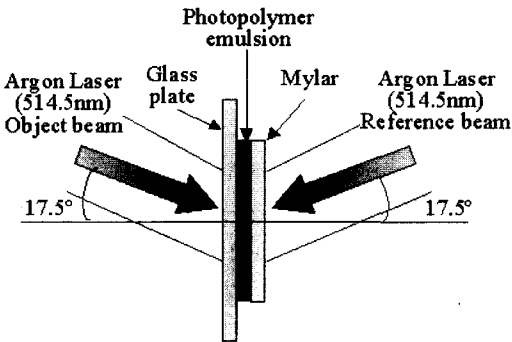


그림 7. 반사형 격자 기록을 위한 장치도
Fig. 7. Optical setup for reflection type grating.

광원으로는 OmniDex[®] 706에 최적인 Ar⁺ 레이저(514.5nm)를 사용하였으며, 빔분리기(beam-splitter)로 나뉜 두 빔은 매질 내부 반사에 의한 다중스팟의 발생을 억제하기 위해 입사각을 145°로 고정시켰다. 격자 기록에 사용된 샘플들은 상용제품으로 시판되는 OmniDex[®] 706 반사형 기록매질의 임의의 영역에서 추출하였으며, 유리기판에 부착시킨 방향은 절단면에 대해 0° - 80°까지 10°씩 변화시키면서 기록하였다. 모든 기록에 사용된 입사 광량은 본 실험실에서 최적으로 되어있는 200[mJ/cm²]으로 하였으며⁷⁾, 100[mJ/cm²]의 UV에서 2분간 노출시킨 후 140°C 오븐에서 8분간 열처리하였다. 기록된 각 샘플의 회절효율 곡선이 그림 8에 나타나 있다. 이 결과에서 각 샘플들의 회절효율은 최소 15%에서 최대 95%까지 어떤 규칙 없이 검출되고 있으며, 이러한 매질은 안정된 상태가 아니므로 광학 소자로서 대량 생산이 불가능하다.

그림 5에서 광 폴리머를 투과한 빔의 편광 상태는 매질을 놓는 위치에 따라 매우 다르게 나타났으며, 십자 방향으로 균일하게 분포되어 네 번의 주기를 갖고 있음을 확인하였다. 매질내부의 복굴절 방향과 입사빔

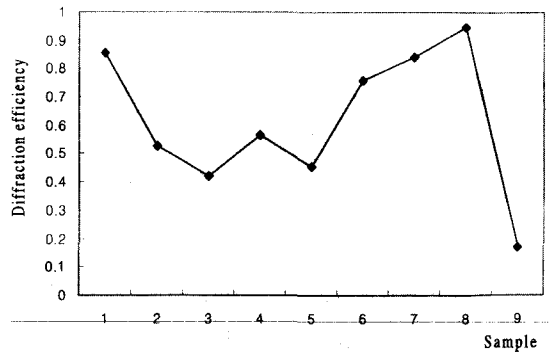


그림 8. 임의의 샘플에 대한 회절효율 곡선
Fig. 8. Diffraction efficiencies of randomly selected samples.

표 1. 샘플의 최대-최소 투과광

Table 1. Maximum and minimum transmission intensities of samples.

Sample	Max.(μ W)	Min.(μ W)
1	100	60
2	100	73
3	100	21
4	100	43

의 편광 방향이 일치하는 경우 입력빔의 모든 세기가 검출기에서 검출되었으므로 이 위치에서의 회절효율을 측정하였다. 두 기록빔의 편광 상태를 동일하게 만들기 위해 회절격자를 만들기 전에 감광성이 없는 100[μ W]의 He-Ne 레이저(633nm)를 사용하여 다시 한번 편광 상태를 측정하였다. 실험에 사용된 네 개의 샘플 역시 상용제품의 임의의 위치에서 선택되었으며, 측정결과 표 1에 나타난 것과 같이 최대 투과량은 측정에 사용된 He-Ne 레이저의 출력과 동일하였지만 최소 투과량은 각 샘플마다 매우 다른 값을 나타내었다. 각 샘플을 투과빔의 세기가 최대가 되도록 고정시킨 후 514nm의 Ar⁺ 레이저를 이용하여 간섭무늬를 기록하였다. 두 빔의 사이의 각은 145°, 노광량은 200[mJ/cm²], 100[mJ/cm²]의 UV에서 2분간 정착시킨 후 140°C의 오븐에서 8분간 열처리를 하였다. 제작된 회절격자의 회절효율 결과가 그림 9에 나타나 있다. 약 5% 정도의 편차는 있었지만 90% 정도의 균일한 회절효율을 갖는 회절격자를 제작할 수 있었다. 5%의 편차는 측정에 사용된 샘플을 고정시킬 때 발생하는 위치 부정합에 의

한 것으로 추측된다. 이 결과는 내부에 복굴절 특성이 있는 기록매질의 경우 그 방향을 미리 알아 기록에 적용하면 안정된 회절효율을 유지할 수 있음을 뜻한다. 따라서, 반사형 광 폴리머를 이용해 회절격자를 제작할 경우에는 기록빔의 편광 상태가 변할 수 있으므로 감광성이 없는 He-Ne 레이저를 이용하여 편광 상태를 광원과 일치하도록 조절한 후 기록할 것을 적극 제안한다.

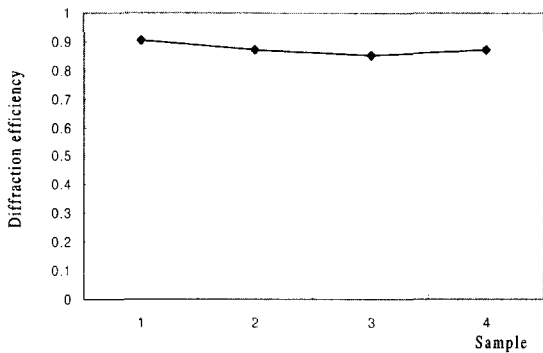


그림 9. 편광 상태를 고려한 격자의 회절효율
Fig. 9. Diffraction efficiencies of polarization-considered samples.

3. 편광을 회전시키는 성분

광 폴리머는 Mylar 기판 위에 폴리머가 코팅된 것을 유리판에 붙여 사용하므로, 어떤 성분에 의해 이러한 효과가 발생하는지를 측정하였다. 광 폴리머를 이용한 격자 생성의 각 단계별 특성변화를 조사하기 위해 노출 후, UV cure 후, 열처리 후, 그리고 Mylar를 제거한 후 Bragg 부정합 상태에서 He-Ne 레이저를 이용하여 매질을 회전시키면서 그림 5의 실험을 반복하였다. 그림 10에 각각에 대한 실험 결과가 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 3단계 기록과정에서의 편광특성은 동일하였다. 폴리머와 Mylar를 분리시킨 경우, 폴리머 자체로는 5% 정도의 흡수만 있을 뿐 편광 상태의 변화는 관찰되지 않았고, Mylar에서 나타나는 변화량이 그림 5, 6에서 나온 값과 거의 일치하여 대부분의 복굴절 특성이 base sheet에서 발생함을 확인하였다.

Mylar 기판과 같은 고분자 매질은 가공 중에 발생한 압력에 의해 연신이 발생하며 이 방향을 따라 고분자 사슬이 배열되어 복굴절이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이렇게 복굴절 특성을 갖는 매질에 홀로그래픽 기

록매질을 코팅할 경우 반사형 격자 제작에 있어 매우 심각한 불안전 요소로 작용하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 복굴절 특성이 없는 유리판이나 주물로 만들어진 플라스틱 기판에 감광물질을 코팅하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

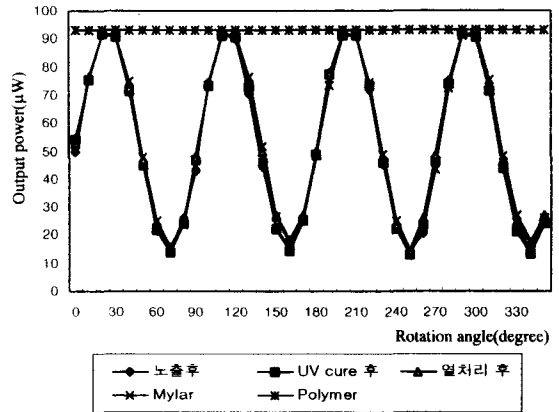


그림 10. 단계별 편광 상태
Fig. 10. Polarization states at each recording step.

IV. 결 론

DuPont OmniDex[®] 706 반사형 광 폴리머에서의 편광 상태를 측정하였으며, 매질의 위치에 따라 입사빔 중 15 - 50% 정도의 편광이 회전됨을 관찰하였다. 이후 실험을 통해 실제로 10 - 90% 정도까지 변하고 있음을 확인할 수 있었다. 매질의 넓은 면적에 대한 편광의 회전 정도는 매우 불규칙적으로 나타남을 볼 수 있었으며, 따라서 제작된 격자의 회절효율도 매우 불안정함을 관찰하였다. 이러한 기록매질의 특성을 불안하게 만드는 요인이 폴리머를 지지하는 Mylar 기판의 복굴절 특성에 의한 것임을 실험을 통해 밝혔다. 투과형 격자를 기록하는 경우에는 같은 방향으로 빛이 입사되기 때문에 복굴절에 의한 편광 회전이 큰 문제가 되지 않지만, 반사형의 경우에는 결합되는 빛의 편광 상태가 서로 다르기 때문에 회절효율에 매우 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다.

매질을 통과한 빔의 편광 방향은 매질의 위치를 조절함으로써 입사빔의 방향과 일치시킬 수 있었으며, 약 5% 정도의 편차는 있었지만 90% 정도의 매우 안정된 회절효율을 구할 수 있었다. 따라서, 기존의 상용 제품

으로 반사형 회절격자를 기록할 경우에는 감광성이 없는 633nm의 He-Ne 레이저를 사용하여 두 편광기 사이에서 최대 출력이 나오도록 위치를 조절한 후 노출 시킴으로써 안정된 고효율의 회절격자 제작이 가능할 것이다. 또한, 이러한 불안정 특성의 원인이 폴리머를 지지하는 Mylar에 의한 것이므로 유리판이나 주물과 같이 자체 복굴절 현상이 없는 기관으로 대체하는 것이 바람직할 것이다.

본 논문에서는 이상의 측정된 데이터를 통해 그 동안 간과되어왔던 기관의 문제점을 제기함으로써 앞으로 있을 광 폴리머의 제작과 활용에 많은 도움이 되리라 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Salter and M. F. Loeffler, "Comparison of dichromated gelatin and DuPont HRF-700 photopolymer as media for holographic notch filter", in Proc. SPIE on Computer and Optically Generated Holographic Optics, vol. 1555, pp. 268-278, Dec., 1991.
- [2] A. Sato and L. M. Murillo-Mora, "Holographic reflector for reflective LCDs", in Proc. SPIE on Diffractive and Holographic Device Technologies and Applications IV, vol. 3010, pp. 293-299, Jun, 1997.
- [3] B. L. Booth, J. E. Marchegiano and C. T. Chang, "Polyguide polymeric technology for optical interconnect circuits and components", in Proc. SPIE on Optoelectronic Interconnects and Packaging IV, vol. 3005, pp. 238-251, May, 1997.
- [4] A. Pu, K. Curtis and D. Psaltis, "Exposure schedule for multiplexing holograms in photopolymer films", Opt. Eng., vol. 35, no. 10, pp. 2824-2829, Oct., 1996.
- [5] 김은석, 조영래, 윤병호, 김 남, 전석희, 손정영, "HUD 응용을 위한 포토폴리머 특성 분석", Photonics Conference '98, 299-300쪽, 1998년 11월
- [6] 최윤선, 윤병호, 김 남, "Photopolymer를 이용한 반사형 회절격자의 효율 및 동적특성 분석", 한국광학회지, 제9권 5호, 315-320쪽, 1998년 10월
- [7] N. Kim, E. S. Kim, Y. S. Choi, Y. R. Cho, S. H. Kim, J. U. Eum and R. S. Kim, "Dynamic characteristics using dark reaction in photopolymer", in Proc. SPIE on Holographic Materials V, vol. 3638, pp. 2-8, Jan., 1999.
- [8] D. Blitz and B. J. Pernick, "Polarization properties of photopolymers for use in holographic and coherent optical systems", Appl. Opt., vol. 32, no. 32, pp. 6501-6502, Nov., 1993.
- [9] S. H. Stevenson, M. L. Armstrong, P. J. O'Connor and D. F. Tipton, "Advances in photopolymer films for display holography", in Proc. SPIE on Fifth International Symposium on Display Holography, vol. 2333, pp. 60-70, Feb., 1995.

저 자 소 개

金 銀 錫(正會員) 第 35 卷 D編 第 2號 參照

현재 충북대학교 정보통신전공 박사과정

金 男(正會員) 第 33 卷 A編 第 3號 參照

현재 충북대학교 전기전자공학부 정교수