

Photopolymer를 이용한 반사형 회절격자의 효율 및 동적특성 분석

최윤선 · 윤병호 · 김 남
충북대학교 정보통신공학과

(1998년 6월 23일 받음, 1998년 9월 25일 수정본 받음)

홀로그래피 기록매질 중 광정보처리나 광메모리 등에 응용연구가 활발히 진행되고 있는 포토폴리머(photopolymer)의 특성과 구조를 분석하였다. 특히, Du Pont 포토폴리머 OmniDex 706 반사형 필름을 사용하여 노광량과 입사각도에 대한 실험을 하였고 유리건판에서 반사된 빛에 의해 생기는 간섭 패턴을 분석하였다. 광중합반응시 홀몸체(monomer)의 암반응을 이용하여 고정된 노광량에서 노출시간의 변화, 노출후 확산시간 지연이란 동적인 파라미터를 설정하여 노출시간(exposure time) 6.25초, 노출후 확산시간 지연(diffusion time delay) 2분에서 회절효율의 성능을 10[%] 향상시켰다.

I. 서 론

홀로그래피 기록매질에는 silver halide photographic emulsions, dichromated gelatin, photoresists, photopolymers, photochromics, photothermoplastics, photorefractive materials 등이 있다.^[1] 그 중에서 특히 포토폴리머는 홀로그램 특성이 우수하여 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

포토폴리머는 볼륨위상형(volume-phase) 홀로그래피 기록매질이다. 일반적으로 엠보싱(embossing)이나 foil 홀로그램은 홀로그램 표면의 양각으로 영상을 저장하나, 포토폴리머는 빛의 세기에 따른 굴절을 변화로 영상을 저장한다.^[2] 화학처리 없이 건조처리(dry processing)만으로 쉽게 홀로그램을 제작할 수 있는데 노출(exposure)이 곧 자체현상(self-developing)이므로 처리의 간편성을 갖는다. 또한, 폴리머에 첨가된 염료(dye)에 따라 반응 파장이 가시광선 전 주파수 대역에서 사용할 수 있고, 건조처리 후 암실 보관시 효율의 변화없이 오랜 시간을 보관할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이러한 특징들로 인해 포토폴리머의 응용분야는 광학소자(HOE), 3D 디스플레이(3D display), 메모리 디스크(memory disk), 칼라 홀로그램(color hologram) 등 점점 더 넓어져 가고 있다.^[3-5]

광중합(photopolymerization)이나 광망상결합(photocross-linking)에 의해 만들어진 이미지는 활판인쇄(letterpress), 식각인쇄(lithography), 홀로그래피(holography)에 널리 이용되며, 식각공정(etching process)과 연계하여 인쇄기판이나 IC의 제조에도 사용된다. 기존의 할로겐화 은염 사진술에서처럼 광중합도 원래의 광화학적 증폭을 제공하는데 이 때 증폭이란 부가중합에 의한 사슬간 반응(chain reaction)에 의하여 일어나는 것이다. 그러나 가장 빠른 광중합도 반응속도와 감도가 할로겐화 은염 계통의 평균 반응속도 및 감도의 1/1000에 불과하다. 광중합에 관한 연구는 보다 빠른 감광유제(emulsion) 개발을 가속화 할 것이다.^[2]

본 논문은 포토폴리머의 기본적인 구조 분석과 정보저장 방법에 대해 설명하고, Du Pont사의 포토폴리머 OmniDex

706[®] 반사형 필름을 이용하여 노광량, 각도(angle)의 변화에 대하여 회절효율 실험을 하였다. 또한 유리의 사용으로 굴절을 매칭이 되지 않아 발생하는 반사빔과 입사빔의 간섭형태를 두 입사빔의 입사각도를 달리하여 해결하였다. 그리고 포토폴리머의 광중합반응 속도와 감광속도는 은염매질의 1/1000 이므로 중합반응시 홀몸체의 암반응을 이용하여 고정된 노광량에 대한 노출시간의 변화, 노출후 확산시간 지연 즉, 암반응을 이용한 동적인 파라미터를 이용해 최대의 효율을 갖는 조건을 제안하였다.

II. 포토폴리머의 구조와 기록과정

이상적인 홀로그래피 매질은 레이저의 파장에 민감해야 하고, 선형적인 전달 특성을 갖고, 높은 해상도와 낮은 노이즈 성분을 갖고 저렴해야 한다. 이러한 조건을 만족하는 매질로 포토폴리머가 있으며, 포토폴리머를 이용하여 홀로그램을 기록하고 이를 광정보처리에 응용하려는 많은 연구가 진행되어 왔으나 Du Pont사에 의해 상용제품으로 출시되기 시작한 것은 최근의 일이다.^[5-8]

그림 1에서와 같이 Du Pont 포토폴리머는 Cover Sheet, Photopolymer Layer, Base Sheet의 3층 구조를 갖는다. Base Sheet는 50.8 μm (0.002") 두께의 Mylar 폴리에스테르 필름이나 25.4 μm (0.001")의 PVC 필름으로 구성되어 있고, Cover Sheet는 50.8 μm (0.002")의 PVC로 구성되어 있다. Photopolymer Layer의 두께는 7~25 μm 이다.

Cover Sheet와 Base Sheet는 포토폴리머 필름 취급시 먼지나 이물질이 Photopolymer Layer로 들어가는 것을 방지하는 역할을 하고, 특히 Base Sheet는 Photopolymer Layer를 지지하는 역할을 한다. Photopolymer Layer는 다시 polymeric binder, 홀몸체, 개시제(initiator system), sensitizing dyes로 구성되어 있다. Polymeric binder는 Photopolymer Layer를 Base Sheet에 고정시키는 역할을 하지만 이 역시 폴리머이기 때문에 광중합반응을 일으킨다. 홀몸체는 실질적인 정보를 저장하

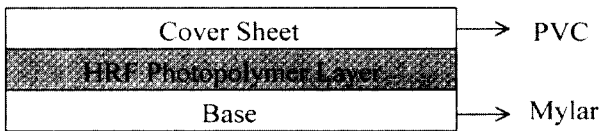


그림 1. 포토폴리머의 구조.

는 부분으로 광중합반응의 화학반응을 거쳐 굴절률 변화를 일으킨다. 개시제는 초기에 중합반응을 쉽게 일어나게 하는 역할을 하고, sensitizing dyes는 빛을 흡수하고 중합반응을 시작할 수 있도록 개시제를 상호작용 시키며 반응 파장을 선택할 수 있게 한다.

일반적으로 포토폴리머에서 홀로그래프 기록과정은 다음과 같다.⁹⁻¹¹⁾

첫 번째는 일반노출에 의한 간섭패턴 기록하는 과정이다. 그림 2와 같이 두 평행광이 기록매질에서 간섭을 일으켜 보강간섭이 일어나는 부분이 밝은 부분(bright)으로, 상쇄간섭이 일어나는 부분이 어두운 부분(dark)으로 가정하면 노출시 밝은 부분에는 많은 에너지가 흡수되 홀몸체가 폴리머로 되는 광중합반응이 활발히 일어난다. 물론 중합반응의 양은 입사하는 두 빔의 세기에 따라 결정된다.

두 번째 단계는 어두운 부분의 홀몸체가 밝은 지역으로 확산하여 광중합반응을 일으켜 광중합반응의 양을 결정한다. 이러한 과정이 끝나면 포토폴리머 필름은 binder-rich 지역과 photopolymer-rich 지역으로 나누어지고 binder-rich 지역은 낮은 굴절률을 갖는 반면, photopolymer-rich 지역은 높은 굴절률을 갖는다. 즉 굴절률 변조를 통하여 위상형 홀로그래프를 제작할 수 있다.

레이저 노출단계에서 광원은 UV~근 적외선까지의 파장을 사용하고 노출 후 UV~가시광선으로 100[mJ/cm²]의 노출로 홀몸체가 남아있는 지역의 암반응을 막기 위해 모든 지역에서 광 중합반응을 끝낸다. 이 과정을 UV Cure라고 한다. 마지막 단계로 열처리 단계로 100~160°C의 온도에서 2~120분 정도 두면 폴리머의 굴절률이 증가한다.

실험에서 나온 결과값은 다음과 같이 세가지 방법으로 표현하였다. 먼저 회절효율 η_0 는 입사광량(I_0)에 대한 브래그각에서의 1차 회절광량(I_1)의 비로, 순수회절효율(intrinsic efficiency) η_i 는 입사광량(I_0)에서 물질내에서 반사되는 반사광량(I_R)을 뺀 값과 1차 회절광량(I_1)의 비, 그리고 전환효율(conversion efficiency) η_c 는 감광물질을 투과하는 투과광(I_t)

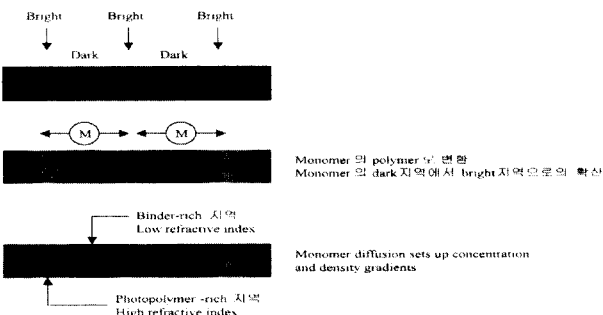


그림 2. 포토폴리머의 홀로그래프 기록 메카니즘.

에 대한 1차 회절광량(I_1)의 비로 각각을 나타내었다.

III. 노광량과 입사각도에 대한 회절효율 실험 및 결과

본 연구에서 사용된 OmniDex 706[®] 필름의 확산시간 지연과 효율과의 관계에 대하여 실험하기 전에 이 필름의 기본적인 조건을 잡기 위하여 실험을 하였다.

실험은 필름이 가장 높은 회절효율을 갖는 노광량과 입사각도에 대한 회절효율 특성에 중점을 두었으며 그림 3은 반사형 회절격자 광학 시스템도이다. 514 nm의 파장을 갖는 Ar⁺ 레이저에서 나온 빔은 빔 확장기와 공간필터를 이용해 평행광을 만들고 빔 분리기(beam splitter: BS)로 나눈 빔을 참조빔과 물체빔으로 하고 각각 거울을 통해 반대 방향에서 필름에 입사된다. 표 1은 본 논문에서 사용된 OmniDex 706[®] 필름의 사양이다.⁵⁾

먼저 물체광과 기준광의 입사각도를 각각 22.5°로 고정하고 노광량에 대하여 에너지량을 10~700[mJ/cm²]까지 바꿔가며 실험하였다.

그림 4는 각각 22.5°로 고정시킨 반사형 회절격자의 회절빔이다. 일반적으로 간섭무늬 차원에서 기록매질의 두께에 대한 간섭무늬의 비로 박막형과 부피형을 나누는데 단일 격자면이 감광유체의 표면에 수직이고, 단일 사인과 격자로 구성된 홀로그래프가 있다고 하면, Q 성분의 값에 따라 두껍거나 얇은 회절격자로 작용할 것이며, 파라미터 Q는

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 d}{n\Lambda^2} \tag{1}$$

이다.^{11,7)} 여기서 λ_0 는 재생동안 사용한 빛의 진공 중에서의 파장, n은 처리 후 감광유체의 굴절률, Λ 는 사인과 격자의 주기, d는 감광유체의 두께이다. $Q > 2\pi$ 인 경우, 격자는 “두껍다(thick)”라고 하는 반면, $Q < 2\pi$ 인 경우, 격자는 “얇다(thin)”라고 한다. 그러나 반사형 홀로그래프의 경우 항상 볼륨홀로그래프이다. 여기서 부피형 홀로그래프를 결정하는 Q 파라미터의 변

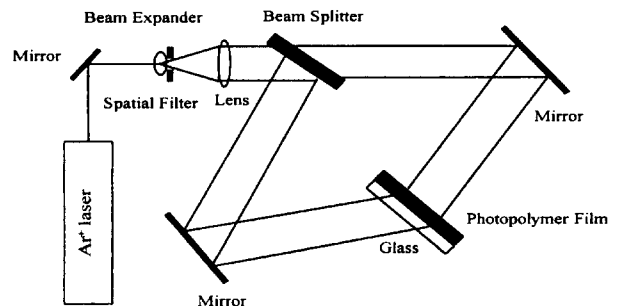


그림 3. 반사형 홀로그래프 기록을 위한 광학시스템도.

표 1. OmniDex 706[®] 필름의 사양

OmiDex 706 [®]	Film Thickness	
Cover Sheet	60.9 μm	PVC
Photopolymer	20.0 μm	
Base Sheet	50.8 μm	200D Mylar [®]

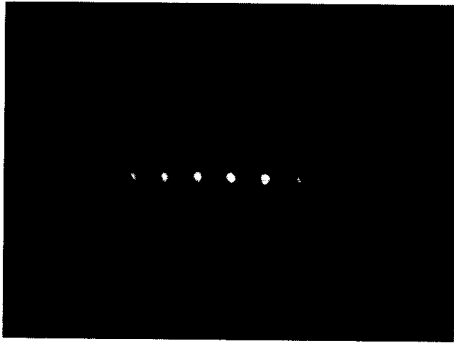


그림 4. 반사형 회절격자의 회절빔(3 mm 유리사용시).

수에서 파장(λ_0)은 514[nm], 감광유제의 두께(d)는 20[μ m], 감광유제의 굴절률(n)은 1.5로 고정되어 있다.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \cos \theta} \quad (2)$$

격자간격(Λ)은 식 (2)와 같이 입사빔의 입사각도에 대한 변수이므로 두 빔의 입사각도를 바꿔 가면서 같은 실험을 반복하였고, 포토폴리머 필름이 유리 건판을 사용하므로 1[mm], 3[mm] 두께를 갖는 유리를 사용하여 위 실험을 반복하였다. 그러나 결과는 3[mm], 1[mm] 두께를 갖는 유리는 각각 그림 4와 그림 5에서처럼 여러개의 회절빔을 만들었다.

즉, 참조빔의 일부는 포토폴리머 필름을 통과하여 유리건판을 투과하지 못하고 폴리머와 유리의 경계면에서 반사를 일으키는데 이러한 반사빔은 반대쪽에서 들어오는 물체빔과 간섭을 일으켜 회절격자를 생성하는데 이것을 secondary 투과형 회절격자라고 할 수 있다. 다시말해서 포토폴리머 필름 내에는 반사형 회절격자와 secondary 투과형 회절격자가 생성되므로 그림 4와 그림 5같은 여러개의 회절빔을 생성하는 것이다. 이것은 포토폴리머와 유리건판과 굴절률 매칭이 되지 않아 발생하는 것으로 이런 경우 정합오일을 사용하면 되나 반사형 홀로그래프의 경우 정합오일을 사용할 수가 없고 특히 포토폴리머 필름이 유리와 완전히 밀착하여 접합이 되지 않으면 홀로그래프 제작시 많은 잡음이 발생한다. 그리고 물체빔과 참조빔이 같은 각도로 입사하면 필름과 유리의 경계면에서 반사하는 빔의 각도와 참조빔의 각도가 같아 secondary 투과형 홀로그래프는 생성이 되지는 않지만 재생시 기록빔의

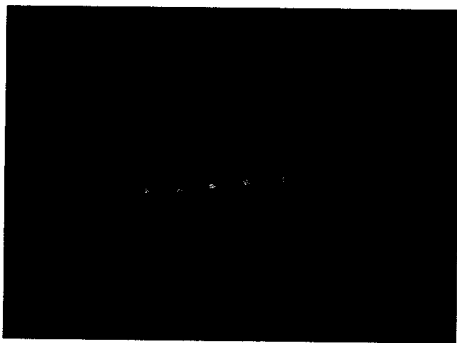


그림 5. 반사형 회절격자의 회절빔(1 mm 유리사용시).

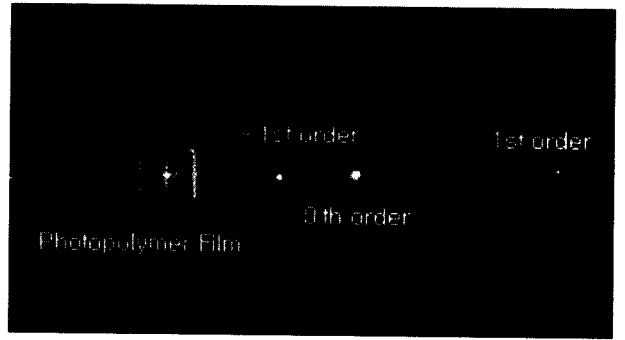


그림 6. 두 빔의 입사각도의 차이가 30°일 때 회절빔.

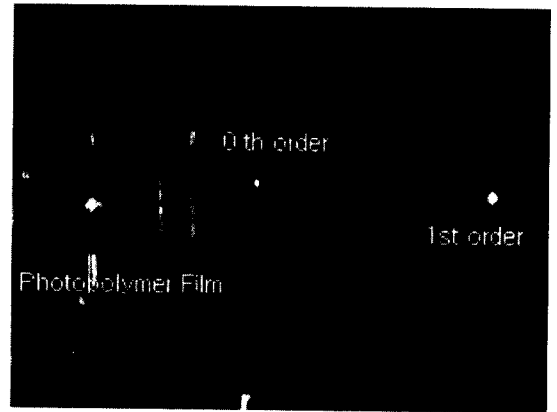


그림 7. 두 빔의 입사각도의 차이가 35°일 때 회절빔.

각도와 같은 각도로 재생빔을 입사하면 필름과 유리의 경계면에서 내부반사가 일어나 그림 4와 5처럼 여러개의 회절빔이 발생하는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

반사빔과 입사빔의 간섭으로 인한 다중 회절빔을 방지하기 위해 물체빔의 각도와 참조빔의 각도를 다르게 하여 실험하였다. 두 빔의 입사각도 차이가 10°, 20°, 30°로 점점 벌어지면서 회절빔의 개수는 줄어들고 그림 6에서 처럼 두 빔의 입사각도 차이가 30°일 때 $\pm 1st$ order만 생성되었다. 이 각도는 secondary 투과형 홀로그래프와 재생시 내부반사를 최대한 줄일

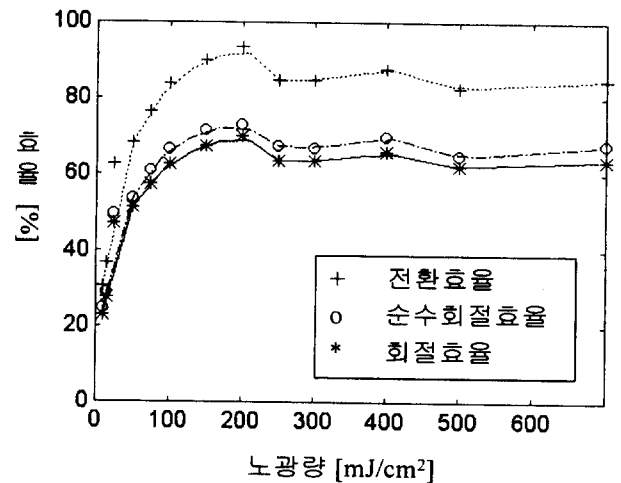


그림 8. 포토폴리머 회절격자의 노광량에 따른 회절효율.

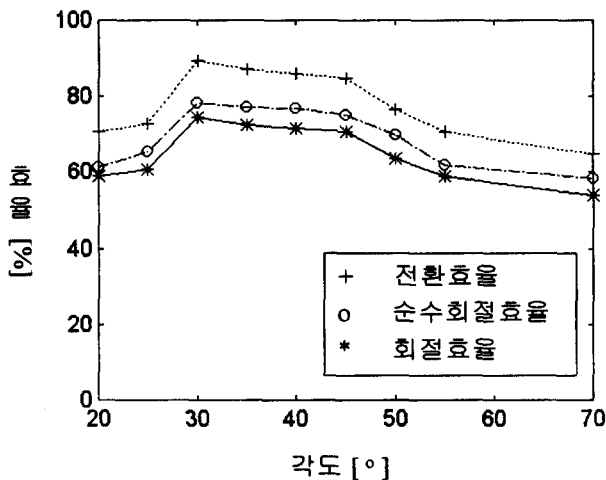


그림 9. 포토폴리머 회절격자의 각도에 따른 회절효율.

수 있는 각도이다. 그리고 그림 7에서와 같이 물체빔의 입사각도와 참조빔의 입사각도가 35° 이상의 차이에서 원하는 부피형 회절격자의 회절빔을 얻을 수 있었다.

물체빔의 입사각도는 0°로 참조빔의 입사각도는 45°로 고정하고 노광량에 대한 회절효율 실험을 하였다. 실험결과 그림 8에서와 같이 노광량 200[mJ/cm²]에서 최고의 회절효율을 보였으므로 노광량은 200[mJ/cm²]으로 고정하고 물체빔과 참조빔의 입사각도에 따른 회절효율을 실험한 결과가 그림 9에 있다. 기록매질이 반사형 필름이므로 식 (2)에서와 같이 격자간격이 코사인(cosine)으로 표현된다. 그러므로 입사각도 θ 가 작아지면 그만큼 격자간격이 작아지고 공간주파수가 높아진다. 그러나 두빔의 입사각도 차가 30°이하에서는 여러개의 회절빔이 생성하므로 그림 9에서 1st order의 세기만을 측정하면 효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 본 실험의 입사각도에 대한 회절효율은 부피형 회절격자의 회절빔을 얻을 수 있는 두 빔의 입사각도 0°, 35°에서 최대 회절효율조건이라 할 수 있었다.

IV. 홀몸체의 확산시간(diffusion time) 영향 및 결과분석

홀로그램 자체는 노출전후 동안에 연속적인 변화가 있으므로 동적인 특성을 자세히 살펴보기 않고는 적절한 특성을 완성하기 어렵다. 특히 포토폴리머의 광 중합반응 속도와 감광 속도는 은염매질보다 현저히 느리므로 중합반응시 홀몸체의 암반응이 포토폴리머의 회절효율에 큰 영향을 줄 것이다. 그러므로 동적인 파라미터인 고정된 노광량에 대한 노출시간의 변화, 노출후 확산시간 지연을 변수로 하였다.

노광량과 입사각도에 대한 회절효율 실험의 최대회절효율 조건이 노광량 200[mJ/cm²], 두 빔의 입사각도를 각각 0°, 35°로 고정하고 표 2와 같이 노출시간과 노출후 확산시간 지연을 변화하여 포토폴리머의 동적인 특성을 실험하였다.

실험을 위한 광학 시스템도는 그림 3과 같다. 그림 10은 노출후 확산시간 지연을 주지 않고 고정된 노광량에서 노출시

표 2. 확산시간 지연에 따른 실험 방법

Laser exposure (총 노광량: 200[mJ/cm ²])	노출시간 (초)	두빔의 세기 [mW/cm ²]	노출후 시간지연 (분)
	50	4	4
1			
2			
25	8	8	0
			1
			2
12.5	16	16	0
			1
			2
6.25	32	32	0
			1
			2

간의 변화에 대한 회절효율이다. 50초의 긴 노출을 준 경우 진동과 같은 잡음 성분으로 인해 효율이 낮은 것을 보여주고 있고, 6.25초의 짧은 노출을 준 경우 홀몸체의 확산이 많이 일어나지 않아 역시 낮은 효율을 보여주고 있다. 그러나 12.5초의 노출시간을 준 경우 홀몸체의 적절한 확산으로 높은 효율을 나타내므로 본 실험에 사용된 포토폴리머 필름의 경우 12.5초가 적절한 노출시간임을 알 수 있다.

그림 11은 확산시간 지연에 대한 회절효율 결과이다. 그림 11(a)인 경우 참조빔의 세기(P_r)와 물체빔의 세기(P_o)는 각각 2[mW]로 하고 그림 11(b)는 P_r=P_o=4[mW]로, 그림 11(c)는 P_r=P_o=8[mW]로, 그림 11(d)는 P_r=P_o=16[mW]로 하였다. 노출후 확산시간 지연(T_d)는 다같이 0, 1, 2분으로 나누었다. 각각의 회절효율은 OmniDex 706® 필름이 레이저 노출 후에 회절격자가 생성되지 않기 때문에 UV와 baking 처리후에 회절효율을 측정하였다.

그림 11(a)(b)의 경우 5[%]이내의 성능 향상을 보였으나 이 값은 회절효율 측정시 레이저 파워 에러 변동률과 비슷하고, 그림 11(d)에서와 같이 짧은 노출시간을 준 경우 노출 후 시간지연이 10[%]의 성능향상을 보였다.

결론적으로, 홀몸체의 암반응은 그림 11(a)와 같이 50초의 긴 노출시간을 준 경우, 노출시간동안 홀몸체의 확산으로 남아있는 홀몸체를 폴리머로 변화시켜줄 수 있는 충분한 시간을 제공하므로 노출후 시간 지연을 주어도 효율의 증가가 없었고, 반대로 짧은 노출을 준 그림 11(d)는 홀몸체가 확산할

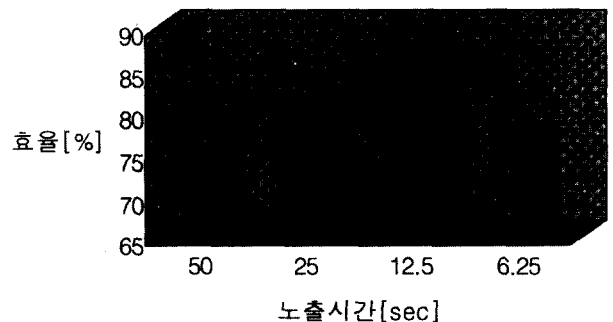


그림 10. 노출시간의 변화에 대한 회절효율(총 노광량: 200[mJ/cm²]일 때).

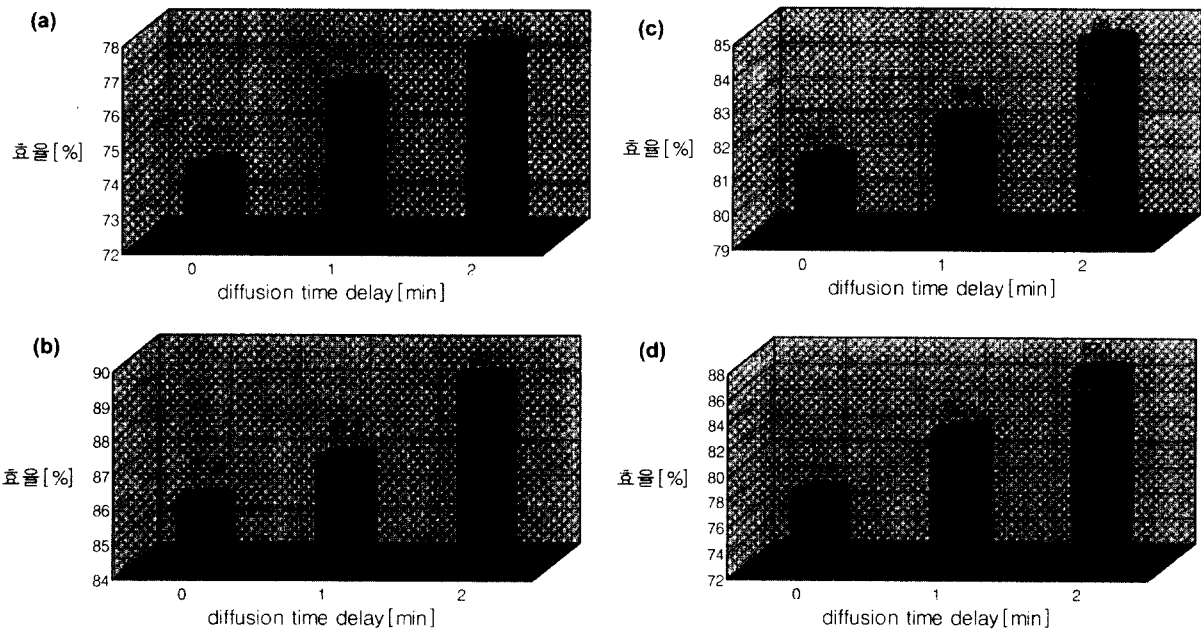


그림 11. 확산시간 지연에 따른 회절효율 (a) $P_i=P_o=2$ [mW], (b) $P_i=P_o=4$ [mW], (c) $P_i=P_o=8$ [mW], (d) $P_i=P_o=16$ [mW].

시간이 없으므로 노출후 시간지연에 의해 홀몸체의 확산이 일어나 효율이 증가하는 것을 볼 수 있다.

홀로그래피 기록매질은 진동으로 인한 효율저하를 막기 위해 짧은 노출시간을 주지만, 포토폴리머의 경우 이 실험을 통해 짧은 노출 시간을 준 경우 UV 노출 전에 2분의 확산시간 지연을 주면 효율이 10[%] 증가하는 것을 실험으로 확인하였다.

V. 결 론

포토폴리머의 구조 및 특성에 대하여 논의하였으며, 기초 실험으로 Du Pont 포토폴리머 OmniDex 706[®] 반사형 필름을 이용하여 기본적인 파라미터인 노광량과 입사각도에 대하여 최대회절효율 조건을 제안하였다. 그러나 본 실험에서 노광량에 대한 최대효율조건은 듀폰사에서 제공하는 데이터와는 상당한 차이를 갖는다. 듀폰사는 25[mJ/cm²]이 최대노광량인데 반해 그림 8과 같이 본 실험은 200[mJ/cm²]이 최대노광량이다. 이는 듀폰사의 실험은 one빔을 이용하여 실험하였고 본 실험은 two빔을 이용하였으면 특히 사용된 파장이 듀폰사는 495~510[nm]에서 최대효율을 갖지만 본 실험은 514[nm]의 파장만을 사용하여 실험하였기 때문이다.

포토폴리머 반사형 필름이 유리건판을 사용하므로써 굴절을 정합이 이루어지지 않아 발생하는 여러개의 회절빔을 제거하기 위하여 두 빔의 입사각도를 달리하여 실험한 결과 두 빔의 입사각도 차가 30° 이상에서 원하는 회절격자의 회절빔을 얻을 수 있었다.

특히 일반 홀로그래피 기록매질과 달리 포토폴리머의 경우 느린 광 중합반응과 암반응을 이용하여 제안한 파라미터인

노출시간과 노출후 확산시간 지연을 이용하여 본래 매질이 갖고 있는 정적인 최대효율조건 이외의 동적인 메커니즘을 이용하여 노출시간이 짧은 경우 확산시간 지연 2분을 주어 회절효율의 성능을 10[%] 정도 향상시켰다.

본 논문에서 나타낸 포토폴리머의 암반응을 이용하여 성능을 향상시키는 방법은 향후 Du Pont의 다른 포토폴리머의 성능향상과 홀로그래피 응용시 유용한 자료를 제공할 것이다.

참고문헌

- [1] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (McGraw-Hill, 1996).
- [2] H. R. Allcock and F. W. Lampe, Contemporary polymer chemistry(Prentice-Hall, 1992), 1.
- [3] S. Piazzolla and B. K. Jenkins, Opt. Lett. **21**(14), 1075 (1996).
- [4] A. M. Weber, W. K. Smothers, T. J. Trout, and D. J. Mickish, SPIE, **1212**, 30 (1990).
- [5] S. A. Zager and A. M. Weber, SPIE, **1461**, 58 (1991).
- [6] B. L. Booth, Appl. Opt. **14**(3), 593 (1975).
- [7] W. J. Gambogi, S. R. Mackara, and T. J. Trout, SPIE, **1914**, 145 (1993).
- [8] S. Martin, C. A. Feely, J. T. Sheridan, and V. Toal, SPIE, **3294**, 60 (1998).
- [9] U. S. Rhee, H. J. Caulfield, C. S. Vikram, and J. Shamir, Appl. Opt. **34**(5), 846 (1995).
- [10] W. K. Smothers, B. M. Monroe, A. M. Weber, and D. E. Keys, SPIE, **1212**, 20 (1990).
- [11] A. Fimia, N. Lopez, F. Mateos, R. Sastre, J. Pineda, and F. A. Guerri, Appl. Opt. **32**(20), 3706 (1993).

**Dynamic characteristics and diffraction efficiency of
reflection grating in photopolymer**

Yoon-Sun Choi, Byeong-Ho Yoon and Nam Kim

Department of Computer and Communication Eng., Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received June 23, 1998, Revised manuscript received September 25, 1998)

The characteristics and structures of photopolymer are analyzed in this paper, which recently have various applications in optical information processing and optical memory. Especially, Du Pont's photopolymer OmniDex 706 reflection film is used in many experiments of different exposures and incident angles, and analyzed by the diffraction pattern generated by glass plate's reflection beam. With the dark reaction of the monomer in photopolymerization, dynamic parameters are considered due to the variation of exposure time and diffusion time delay after exposure. The performance of diffraction efficiency is improved by 10%, when an exposure time is 6.25 sec, and a diffusion time delay is 2 minute.