

투과형 기록구조에서 반사형 포토폴리머의 광학 특성 및 미세패턴 기록

정현섭[†] · 김 남 · 윤진선 · 박태형

충북대학교 전기전자컴퓨터공학부
Ⓣ 361-763 충북 청주시 개신동 충북대학교 제5공학관 410호

신창원

(주) 프리즘테크
Ⓣ 361-763 충북 청주시 개신동 충북대학교 학연산공동기술연구원 804호

(2006년 10월 18일 받음, 2006년 12월 19일 수정본 받음)

본 논문에서는 반사형 포토폴리머의 투과형 기록구조에서의 광학 특성을 분석하고 전반사 홀로그램 기법이 적용된 반사형 포토폴리머를 이용하여 미세패턴을 기록하였다. 투과형 포토폴리머는 대칭형 입사구조에서 40° 일 때 최대 효율을 보였으나 반사형 포토폴리머는 60°~80°에서 90% 이상의 회절효율을 보였다. 미세패턴 기록에서 10배 및 100배로 확대하여 측정한 결과 선 패턴과 점 패턴 간격 모두 1 μ m 까지 구분할 수 있었다.

주제어 : Photopolymer, Hologram, Diffraction grating

I 서 론

홀로그램을 이용한 데이터 저장 및 응용기술은 빠른 전송 속도, 높은 저장밀도, 병렬처리로 인한 빠른 데이터 접근 속도 등의 장점 때문에 차세대 정보 저장기술중의 하나로 고려되고 있다. 이러한 기술에 홀로그래픽 기록 매질의 개발은 필수적이라 할 수 있다. 또한 홀로그래픽 기록매질 중 포토폴리머는 고감도, 간단한 실시간 처리, 저렴한 가격 등의 장점 때문에 광굴절 결정보다 홀로그래픽 저장기술 응용에 보다 손쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 때문에 포토폴리머가 갖고 있는 광학적 특성을 조사하고, 레이저를 이용한 홀로그램 기록방식으로 마스크 패턴을 기록하는 소자 응용분야에 적용하기 위한 연구가 필요하다. 포토폴리머를 광소자 재료로 이용할 경우 경제성 및 다른 수동 광소자와의 집적이 가능하므로 최근 들어 활발한 연구가 이루어지고 있다.^[1] 일반적으로 포토폴리머는 기록방식에 따라 투과형 매질과 반사형 매질로 나누어진다. 본 논문에서는 반사형 매질을 이용하여 투과형 기록구조에서의 회절효율 특성 분석 및, 마스크 패턴을 기록하였다. 2장에서는 포토폴리머의 구조 및 기록 메커니즘을 기술하였으며, 3장에서는 반사형 포토폴리머의 열 노출 전과 후로 나누어 홀로그램의 회절 효율 특성을 분석하였다.

II. 포토폴리머를 이용한 홀로그램

2.1 포토폴리머에서 홀로그램 기록과정

홀로그램의 기록과정은 두 입사빔의 간섭에 의한 회절격자의 생성과정으로 설명할 수 있다.^[2,3] 포토폴리머를 구성하는 주성분으로 감광화 염료(Dye sensitizer), 모노머(Monomer), 폴리머(Polymer)가 있고 그밖에 고분자 결합제(Polymeric Binder), 개시제(Initiator)가 있다. 개시제는 기록빔과 참조빔이 입사되면 그 빛을 흡수하여 모노머를 폴리머로 변화시킨다. 모노머는 실질적인 정보를 저장하는 역할을 하며 광화학적인 반응을 통해 폴리머로 변화함에 따라 굴절률 변조를 발생시키게 된다. 이에 따라 회절효율이 변하게 된다. 고분자 결합제는 포토폴리머 층을 유리기판이나 베이스(Base sheet)에 고정시키고 개시제는 중합반응을 발생시키는 역할을 한다.

먼저 두 입사빔에 의한 노출이 시작되면 감광화 염료는 빛을 흡수하여 모노머를 폴리머로 변화시킨다. 즉, 두 입사빔의 간섭에 의해서 보강간섭이 일어난 부분은 밝은 영역으로 상쇄간섭이 일어난 부분을 어두운 영역으로 가정하면, 노출 시 밝은 영역에는 많은 에너지가 흡수되어 모노머가 폴리머로 전환되는 중합반응이 활발하게 일어난다. 어두운 영역에서도 중합반응이 일어나지만 밝은 영역과는 반응 속도에서 차이가 생기며, 중합반응 되는 양은 두 입사빔의 세기에 따라 결정된다. 이와 같은 과정으로 인하여 어두운 영역과 밝은 영역 사이에는 모노머의 밀도 변화에 따른 확산(diffusion) 현상이 노출이 시작됨과 동시에 발생한다. 즉, 어두운 영역의 모노머가 밝은 영역으로 이동하여 새로운 중합반응을 일으키게 되며, 정착(fixing) 과정이 종료될 때까지 또는 사용 가능한 모노머들이 모두 없어질 때까지 계속된다. 이러한 과

[†] E-mail: hsjeong@osp.chungbuk.ac.kr

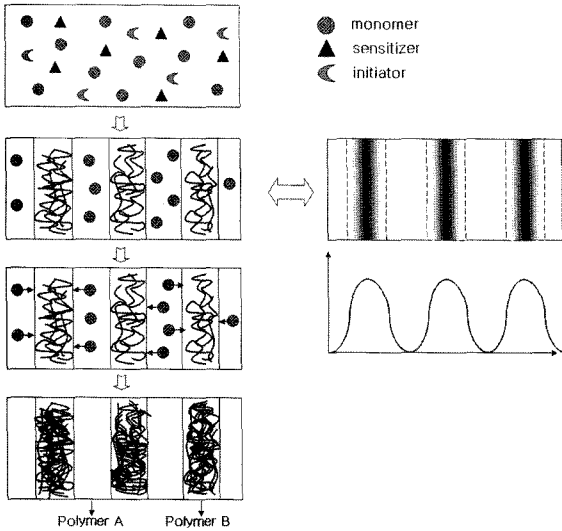


그림 1. 포토폴리머의 굴절률 변조과정.

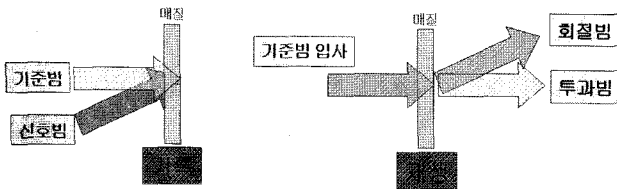


그림 2. 투과형 홀로그래프의 기록 및 재생원리.

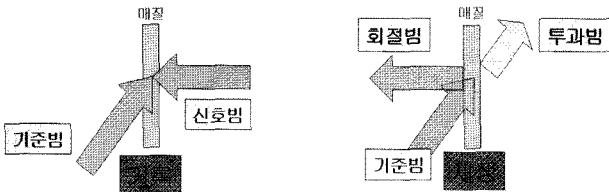


그림 3. 반사형 홀로그래프의 기록 및 재생원리.

정이 진행되면서 포토폴리머는 binder-rich 영역과 polymer-rich 영역으로 나누어지며, 두 영역 사이의 굴절률 변화가 발생한다. 즉, binder-rich 영역은 낮은 굴절률을, polymer-rich 영역은 높은 굴절률을 갖게 되므로 두 영역에서의 굴절률 차에 의해서 위상형 홀로그래프가 형성된다.^[4]

2.2 회절효율 및 굴절률 변조

홀로그래프는 매질에 입사되는 두 빔의 방향에 따라 투과형과 반사형으로 구분할 수 있다. 투과형은 신호빔과 참조빔이 같은 방향이고 반사형은 반대방향으로 빔이 입사된다. 그림 2와 3에서 각각의 기록 및 재생의 원리를 표시하고 그림 4에서 홀로그래프가 기록될 때 생성되는 격자의 형태를 볼 수 있다.

두 빔이 겹쳐서 보강간섭과 상쇄간섭을 일으킬 때 아래와 같은 식으로 격자가 생성되고 굴절률 n , 입사각 θ 에 따라 격자간격 A 가 변한다. 그리고 공간주파수는 격자간격 A 의 역수 값으로 정의된다.

$$A = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (\text{투과형인 경우}),$$

$$A = \frac{n\lambda}{2\cos\theta} \quad (\text{반사형인 경우}) \quad (1)$$

Kogelnik의 2광파 결합이론으로 유도되는 회절효율공식은 아래와 같다.^[5]

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos\theta_R \cos\theta_S)^{1/2}} (r \cdot s) \right] \quad (2)$$

Δn 는 최종 굴절률 변조, d 는 매질의 두께, θ 는 재생빔의 Bragg각도, λ 는 기록시의 파장, θ_R 은 매질의 법선 벡터를 기준으로 한 기준빔의 입사각이며, θ_S 는 매질면의 법선 벡터를 기준으로 한 신호빔의 입사각이다. r 과 s 는 기준빔과 신호빔의 편광(Polarization)단위 벡터이다. 만약 재생빔을 s-편광된 빔을 이용한다면 식 (2)에서 $r \cdot s$ 는 1이 되어 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, p-편광된 빔을 사용 한다면 식 (2)에서 $r \cdot s = \cos(\theta_S - \theta_R)$ 로 나타낼 수 있고, 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다. 결과적으로 회절효율 식 (2)은 아래 식 (3)과 같이 직교하는 두 개의 편광모드로 표현할 수 있다.

$$\eta_{s,p} = \sin^2 \nu_{s,p} \quad (3)$$

여기서, ν_s 와 ν_p 는 매질의 홀로그래픽 격자의 세기로 아래와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\nu_s = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos\theta_R \cos\theta_S)^{1/2}} \quad (4)$$

$$\nu_p = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos\theta_R \cos\theta_S)^{1/2}} \cos(\theta_S - \theta_R) \quad (5)$$

위에 표현된 수식을 근거로 하여 그림 5와 6에서 이론적 회절효율 변화를 매질의 굴절률 변조에 따라 시뮬레이션 한 결과를 매트랩을 이용해 나타내었다. 이 시뮬레이션에서 d 는 $38\mu\text{m}$, λ 는 532nm 를 기준으로 하였다. 대칭형 구조일 때 보다 비대칭형 구조에 일 때 더 작은 굴절률 변조량에서 최대 회절효율 특성 곡선이 나타남을 알 수 있다. 이는 같은 입사각이라도 대칭형과 비대칭형에 따라서 매질의 굴절률 변조량에 따라 회절효율 도달 지점이 달라질 수 있다는 것을 이론적으로 분석하였다. 다시 말하면 굴절률 변조는 기록 시간과 밀접한 관련이 있으므로, 매질의 최대 회절 도달 시간도 입사구조에 따라 달라짐을 유추할 수 있다. 또한 편광에 따라서 굴절률 변조 값이 변하여 반응속도가 다소 차이 남을 시뮬레이션 결과로 알 수 있다.

III. 광학특성 분석 및 미세패턴 기록과 재생

3.1 빔의 입사각도와 세기 비에 따른 회절효율

홀로그래프 기록매질의 광학적 특성 분석을 위해 우선 노출 시간에 대한 회절효율 특성실험을 수행해야 한다. 이는 매질

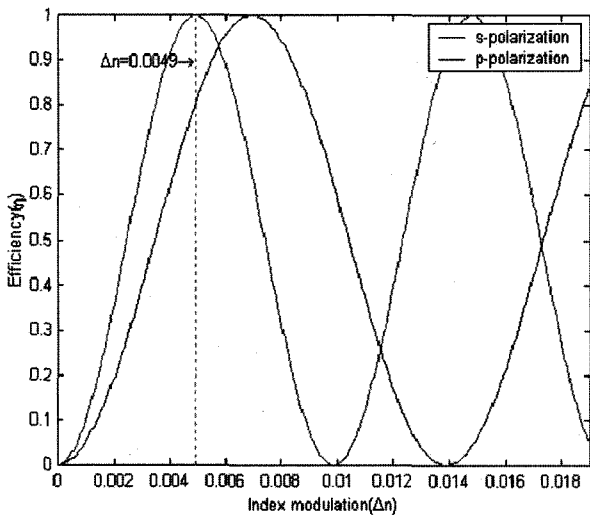


그림 5. 투과형 대칭36°(full angle=72°) 구조에서의 굴절률 변조에 따른 회절효율 곡선.

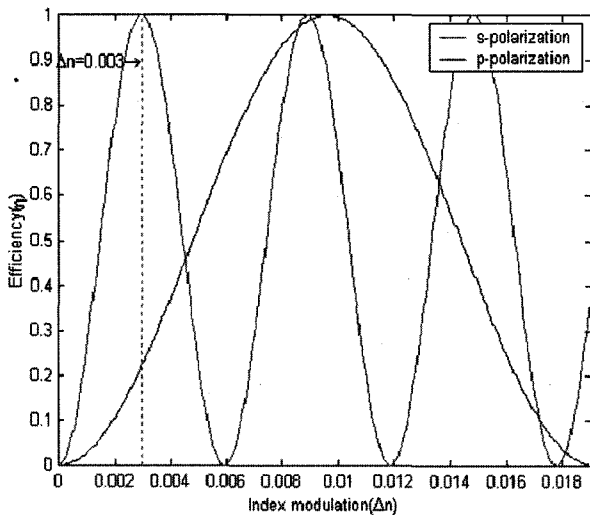


그림 6. 투과형 비대칭72°(full angle=72°) 입사구조에서의 굴절률 변조에 따른 회절효율 곡선.

의 기록 빔에 대한 반응시간을 알 수 있기 때문에 최적의 회절효율을 위한 기록시간을 측정할 수 있다. 그리고 입사각도 및 빔의 세기비에 따른 회절효율을 측정하였다. 이러한 기초 특성 광학실험을 위한 시스템 구성도는 그림 7과 같고 실제 광학 시스템을 그림 8에 나타내었다. 매질로서 듀폰사의 HRF-150-38 투과형 포토폴리머와 Ommidex 반사형 매질을, 광원으로는 Coherent사의 100mW, 532nm 파장을 가지는 Nd-Yag 레이저를 사용하였다. 또한 회절효율 측정을 위해 Probe Beam 대신 전자셔터를 사용하였다. 정밀한 각도조절을 위해 회전스테이지를 미리쪽에 장착하여 보다 쉽게 제어할 수 있도록 구성하였다.⁶⁾

두 빔의 입사각도는 20° 부터 10° 간격으로 80° 까지 변화시켰고 신호빔과 참조빔의 세기는 2.5mW/cm²로 고정하였다. 각각의 입사각도 및 노출시간에 대한 회절효율 측정결과 투

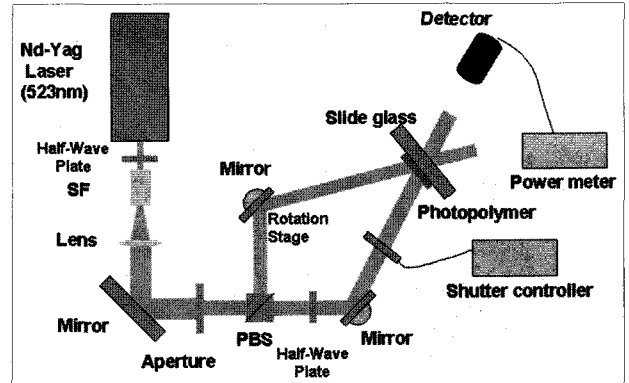


그림 7. 회절효율 측정 시스템 구성도

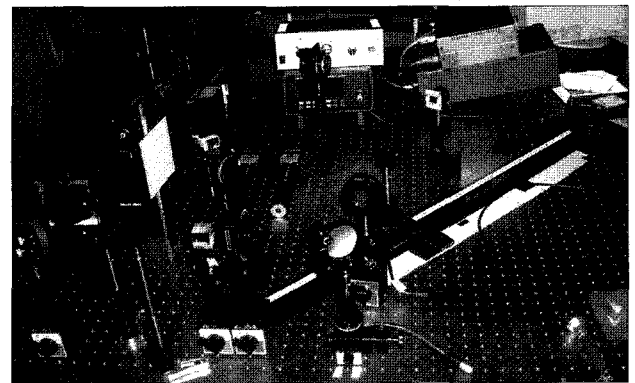


그림 8. 이광파 결합 광학 시스템.

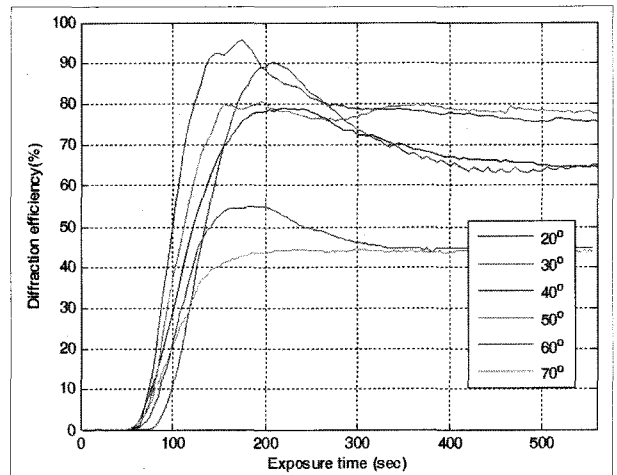


그림 9. 투과형 포토폴리머의 입사각도에 대한 회절효율.

과형 포토폴리머는 그림 9, 반사형 포토폴리머는 그림 10과 같은 결과를 볼 수 있다. 반사형 포토폴리머의 경우 모든 각도에서 공통적으로 빔의 입사시간이 대략 50초 일 경우 매질의 굴절률 변조가 포화상태가 되는 것을 알 수 있었다. 그리고 입사각도가 20°일 때 회절효율이 30% 정도였으며 각도가 증가할수록 점점 증가하여 60°부터 90% 이상의 회절효율을 보였다. 입사각도에 대한 회절효율 변화를 투과형 매질과 비교한 그림을 그림 11에 표시하였다. 투과형 매질은 입사각도

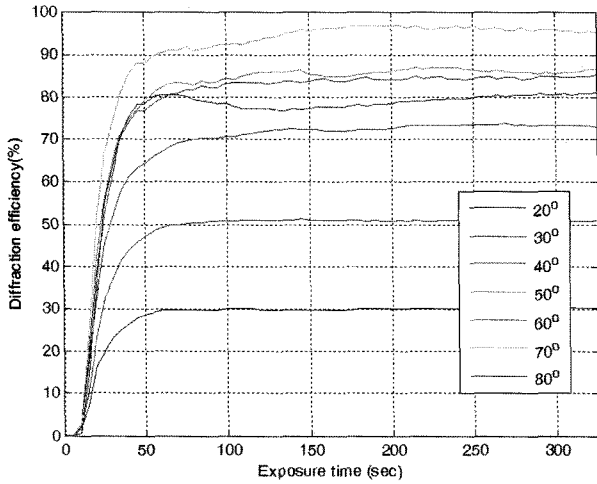


그림 10. 반사형 포토폴리머의 입사각도에 대한 회절효율.

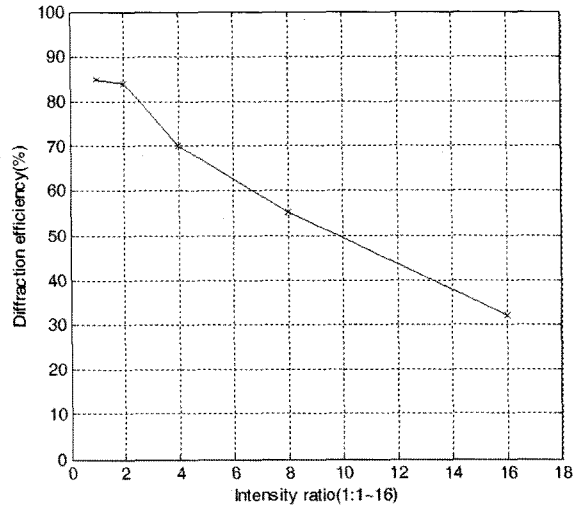


그림 12. 입사 빔의 세기비에 따른 회절효율.

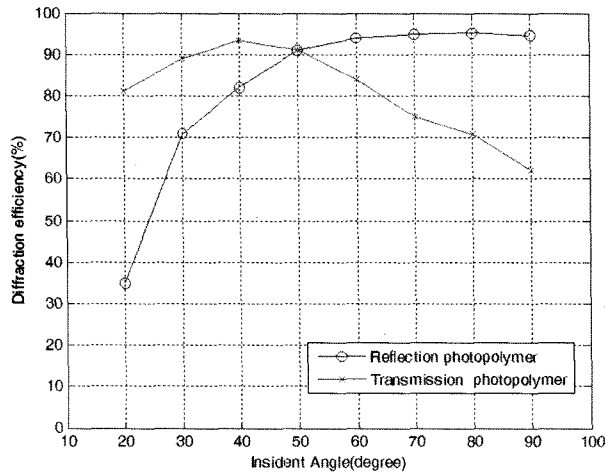


그림 11. 각도에 따른 반사형 및 투과형 매질의 최대 회절효율.

가 40° 부근에서 회절효율이 최대값을 보였고, 이 각도를 기준으로 좌우에서 회절효율 값이 감소됨을 볼 수 있다. 이는 회절격자가 생성될 때 두 빔의 입사각도에 따라 생기게 되는 격자사이의 간격에 원인이 있다. 이 간격이 너무 좁게 되면, 폴리머가 많은 지역과 다음 폴리머가 많은 지역의 거리가 짧아 binder가 많은 지역과의 대조가 잘 되지 않아 회절효율이 떨어지고, 반대로 격자가 너무 멀게 되면 동일한 영역에서의 회절격자 수가 작아지므로 효율이 떨어지게 된다.^[7]

두 빔의 세기비가 1:1일 때 일반적으로 최대 회절효율이 나타나지만, 반사형 매질을 사용하여 투과형 입사구조에서 기록하는 실험이므로 빔의 세기비를 조절하여 최적의 빔 세기비를 측정하였다. 실험 결과 그림 12에서 볼 수 있듯이 신호빔과 기준빔의 세기비가 1:1 ~ 1:2 정도에서 최대의 회절효율이 측정되었고 두 빔의 세기비 차가 커질수록 회절효율이 낮아졌다. 세기비가 1:1일 때 기준빔과 신호빔의 세기는 1.6mW/cm², 1:2일 때 기준빔의 세기는 1mW/cm², 신호빔의 세기는 2.1mW/cm² 였다.

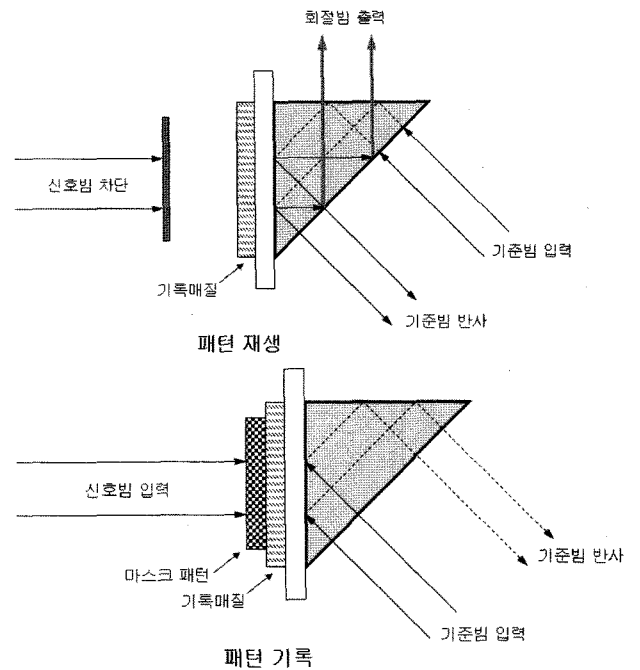


그림 13. 마스크 패턴 기록 및 재생 구성도.

3.2 마스크 패턴을 이용한 이미지 기록과 재생

마스크 패턴을 기록하기 위해 내부 전반사 홀로그래프를 이용하였다. 내부 전반사 홀로그래프는 기하학적인 수차가 적으며, 마스크 패턴과 매질이 거의 붙어있는 근접노광방식이기 때문에 높은 개구수가 가능하고 재생면의 면적을 홀로그래프 마스크의 면적에 따라 크게 할 수 있으며, 광 경로가 간단하고 높은 분해능을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.^[8]

마스크 패턴의 기록 및 재생을 위해 그림 13와 같이 기준 빔 입력방향에 프리즘을 부착하였다. 이 구조는 그림 14에서 볼 수 있듯이 반사형 비대칭 135° 구조이면서 동시에 실제 매질 내부에서 매질의 경계면에서 전반사 되는 빔에 의한 투

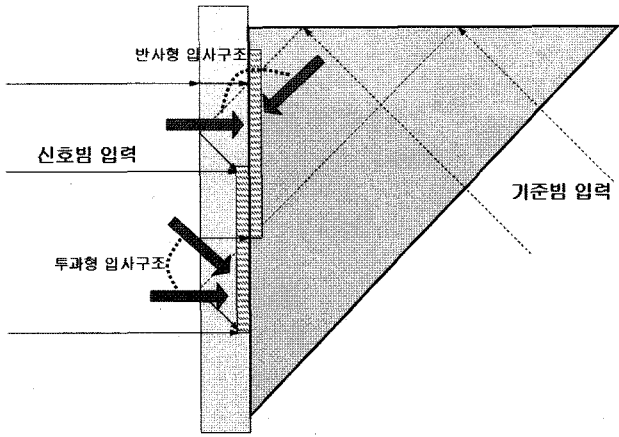


그림 14. 프리즘을 부착한 매질에서 신호빔과 기준빔의 결합구조.

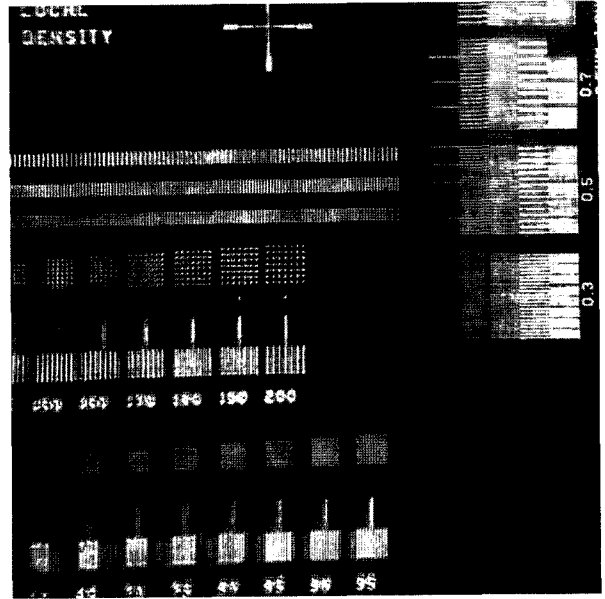


그림 16. 반사형 매질에서의 이미지 기록.

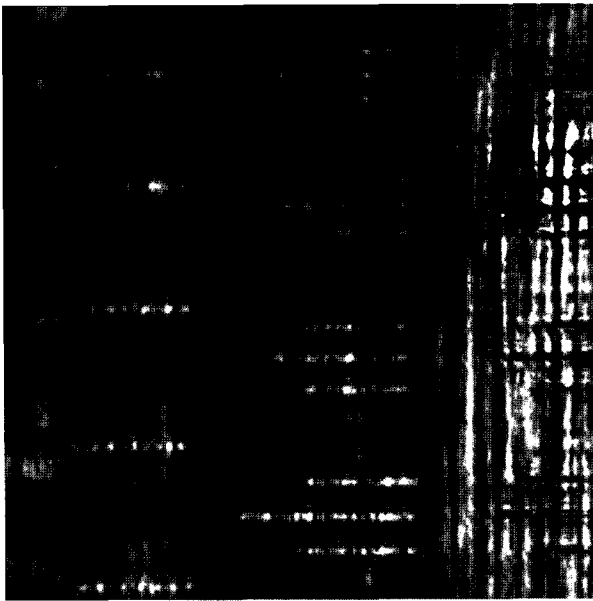


그림 15. 투과형 매질에서의 이미지 기록.

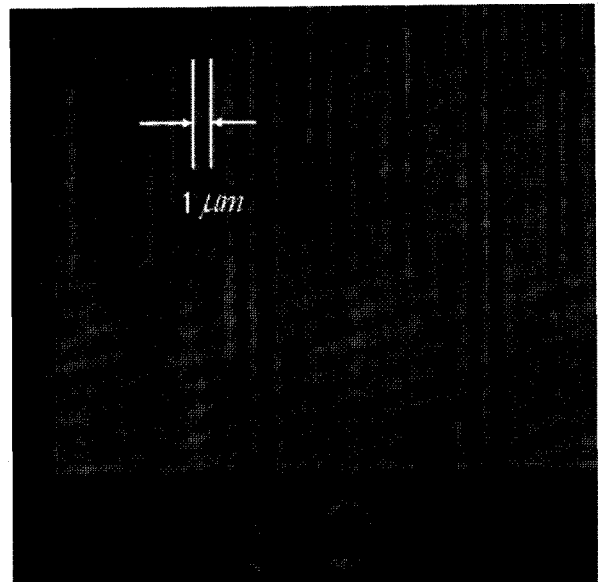


그림 17. 반사형 매질에서의 기록(X100).

과형 비대칭 45° 구조이다.

기록을 위한 광원으로 위 실험에서와 같은 532nm의 Nd-Yag 레이저를, 마스크 패턴의 이미지 캡처를 위해 Kodak의 ES1.0 카메라를 사용하였으며 100배 확대 영상을 위해 Mitutoyo사의 100배율 렌즈를 사용하였다. 마스크 패턴 기록 결과 투과형 매질은 그림 15, 반사형 매질은 그림 16과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 투과형 매질은 뭉개져 기록된 반면 반사형 매질은 일부를 제외하고는 가장 작은 격자간격까지 구분될 정도로 깨끗하게 기록되었다. 반사형 매질의 패턴을 100배율로 확대한 결과 그림 17에서와 같이 1 μ m 패턴의 간격까지 구분됨을 볼 수 있었다. 다음으로 선이 아닌 점으로 된 패턴을 기록한 결과 그림 18과 같이 1 μ m 간격의 Dot 이미지를 구분할 수 있을 정도로 기록되었다. 이러한 결과들을 종합해보면 1mm² 크기의 포토폴리머 안에 1Mbit, 1cm² 크기 안에는 100Mbit의 디지털 데이터를 기록할 수 있을 것이다.

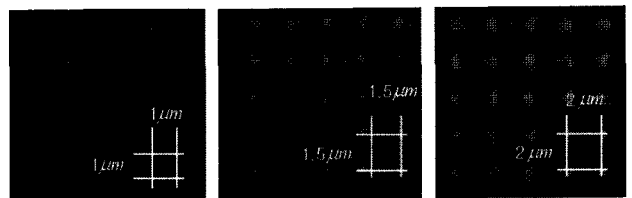


그림 18. 반사형 매질에서 dot 패턴 기록결과(X100).

IV. 결 론

본 논문에서는 반사형 포토폴리머의 광학적 특성을 투과형 포토폴리머와 비교, 분석하고 마스크 패턴을 기록하여 분해

능을 알아보았다. 반사형과 투과형 포토폴리머는 매질의 화학적 구조가 다르므로 광학 특성 또한 다를 수 있었다. 이번 측정에서의 결과를 보면 빔의 입사구조가 투과형 일 경우 투과형 매질은 30~40도에서 최대 회절효율을, 반사형은 60도 이상에서 빔의 세기가 1:1~2 일 경우 최대 회절효율을 볼 수 있었다. 마스크 패턴 기록결과 투과형 매질에 비해 반사형 매질이 선명하게 기록되었다. 이미지 확대결과 최대 1 μ m 간격까지 기록되는 것을 볼 수 있었다.

지금까지는 기록상의 안정성과 높은 회절효율 때문에 투과형 매질이 주로 사용되었으나 이번 실험결과 반사형 매질도 투과형과 비슷한 높은 회절효율을 볼 수 있었고 패턴 기록에서는 오히려 더욱 선명한 이미지를 얻을 수 있었다. 또한 투과형 매질은 투과형 구조에서만 기록이 되지만 반사형 매질은 투과형 입사구조, 반사형 입사구조 모두 기록이 가능하므로 응용범위가 넓다고 볼 수 있다. 예를 들어 입사구조가 50° 이상 커져야 하는 MUX/DEMUX 시스템^[9]에서는 투과형보다 반사형 폴리머에서 더 좋은 결과가 나타날 것이다. 그 밖에 디지털 홀로그래프를 이용한 보안카드 제작, 폴리머를 이용한 광통신소자나 필터 등의 광학소자와 같은 응용분야에서 반사형 포토폴리머가 광범위하게 사용되리라 판단된다.

감사의 글

“본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-C1090-0603-0018)”

“이 논문은 2006년도 교육인적자원부 지방연구중심대학 육성사업의 지원에 의하여 연구되었음”

참고문헌

- [1] 김정희, 이행수, 김남, 전석희 “포토폴리머 홀로그래프의 실용적 응용을 위한 그 열적 특성 분석,” 한국광학회지 제16권, 제2호, pp. 121, 2005.
- [2] K. Curtis and D. Psaltis, “Characterization of the Dupont photopolymer for three-dimensional holographic storage,” Appl. Opt., vol. 33, no. 23, pp.5396-5399, 1994.
- [3] Raymond K. Kostuk, “Dynamic hologram recording characteristics in Dupont photopolymers,” Appl. Opt., vol. 34, no. 8, pp. 1357-1363, 1999.
- [4] S. Piazzolla and B. K. Jenkins, “Holographic grating formation in photopolymers,” Opt. Lett., vol. 21, no. 14, pp. 1075-1077, 1996.
- [5] H. Kogelnik, “Coupled wave theory for thick hologram grating,” Bell System. Tech. J. vol. 48, pp. 2909-2947, 1969.
- [6] N. Kim, E. S. Hwang and C. W. Shin, “Analysis of optical properties with photopolymers for holographic application,” Journal of the Optical Society Korea vol. 10, No 1, pp. 1-9, 2006.
- [7] 손창원, 포토폴리머를 이용한 투과형 홀로그래프 저장의 특성과 각도와 회전 다중화 (충북대학교 대학원, 2002), pp. 19.
- [8] 김대준, 박기수, 권진혁, “내부 전반사 홀로그래프를 이용한 미세 패턴의 결상,” Journal of Optical Society of Korea, vol. 6, no. 3, pp 239-240, 1995.
- [9] J. W. An, N. Kim, K. Y. Lee and S. K. Gil, “Experimental demonstration of holographic demultiplexer using volume diffraction grating based on photopolymer,” Journal of the Optical Society Korea, vol. 6, No 4, pp. 161-164, 2002.

Optical Characteristic and Image Recording of Reflection Type Photopolymer in Transmission Structure

HyenSeop Jeong[†], Nam Kim, JinSeon Yun and TaeHyeong Park

Dept. of Computer&Communication Eng., Chungbuk Nat'l Univ., 410, 5th Engineering Research Center, San 48, Gaesindong Cheongju Chungbuk 361-736, Korea

[†]E-mail: hsjeong@osp.chungbuk.ac.kr

ChangWon Shin

PrismTek Co., Industrial Technology Research Park 804, San 48, Gaesindong Cheongju Chungbuk 361-736, Korea

(Received October 18, 2006, Revised manuscript December 19, 2006)

In this paper, we analyze the optical properties of the transmission grating recorded in a reflection-type photopolymer. Recording and reconstruction of the micropattern using a total internal reflection hologram applied to a reflection type photopolymer are studied. The transmission-type photopolymer was shown to have the maximum diffraction efficiency in 40° symmetric structure. However, that of reflection type photopolymer was more than 90% at 60 ~ 80°. The line and point patterns with the interval of 1 μ m are recorded successfully and can be observed when the micro objective lenses with 10 and 100 time magnification are used.

OCIS code : 160.5470, 090.2900, 090.7330, 050.1950.