

DuPont 포토폴리머를 이용한 다중 홀로그램 저장

이선균 · 손창원 · 최경희 · 정선주 · 김종표 · 임기수[†]

충북대학교 물리학과 및 기초과학연구소

Ⓣ 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48

이재봉

충북대학교 전기전자공학부

Ⓣ 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48

(2002년 8월 1일 받음, 2002년 10월 7일 수정본 받음)

본 연구에서는 514 nm 레이저를 이용하여 DuPont HRF-150-100 포토폴리머의 홀로그램 형성에 대한 격자간격과 빛의 강도에 따른 특성과 입사각에 따른 수축을 등을 측정 분석하였다. 또한 폴리머를 직접 회전시키는 시스템 뿐 아니라 기준 빔을 직접 회전시키는 시스템으로 각-회전 다중화 홀로그램 저장을 수행하였으며 이동-회전 다중화와 결합에 의한 저장도 수행하였다.

주제어 : hologram, photopolymer, multiplexing.

I. 서 론

정보화시대의 수요에 부응할 차세대 정보저장 기술의 하나인 홀로그램을 이용한 데이터 저장 시스템의 핵심재료에 대한 관심이 매우 고조되고 있다.^[1] 포토폴리머는 단결정이나 광굴절 폴리머보다도 비록 두께는 얇고 WORM 형태로만 가능함에도 불구하고 매우 높은 회절효율과 대량생산의 용이함 때문에 홀로그램을 이용한 데이터 저장 시스템의 핵심재료로서 연구되고 있다.^[2] 그리고 저장 시스템의 실용화를 위해 가장 핵심적인 부분이 적합한 정보저장 매질의 선택이긴 하지만 저장 용량을 향상시키려면 저장기법 역시 개선해야 할 여지가 많다. 다중화는 그 동안 각, 위상, 파장, 회전, 이동 다중화 기법 등 여러 가지 기법이 보고되어 왔다.^[3]

포토폴리머는 회절효율이 높고 UV처리와 열처리 후 격자가 그대로 남아 있기 때문에 높은 회절효율을 가진 채 오랫동안 보관할 수 있다. 최근에 Lucent^[4] 혹은 Aprilis^[5]에서도 다른 종류의 폴리머에 대한 연구와 응용이 진행되고 있으나 재료에 대한 특성 등이 잘 알려지지 않고 있다. DuPont 회사의 HRF-150 투과형 포토폴리머는 감도와 분해능이 좋아 청색이나 초록색 영역에서 홀로그램 저장용 재료로서 연구되어 왔다. 초기에는 38 μm 두께의 재료에 대해서 물성연구와 저장연구가 진행되었고,^[6] 폴리머가 두꺼울수록 각선택도가 향상되어 많은 양의 정보가 저장될 수 있기 때문에 Psaltis 등은 100 μm 두께의 매질에 대해서도 홀로그램 저장시스템 연구를 발표하였다.^[2] 저장용량의 극대화 목적으로 폴리머의 물질의 특성과 두께를 최대한 활용하기 위해 여러 가지 다중화 기법을 혼합하여 사용하는 연구가 시도되고 있다. 그러나 이러한 홀

로그램의 다중화를 이용한 대용량 정보저장 기술은 매질의 특성을 잘 이해하고 단점을 보완하지 않으면 실용화하기 어렵다. 특히 기록전 노광량과 기록감도, 그리고 노광량에 따른 폴리머의 수축 등은 저장 연구에서 고려되어야 할 부분이다. 본 연구에서는 두께가 100 μm 인 HRF-150-100 포토폴리머에 대한 홀로그램 저장특성과 수축 정도에 대한 분석 등을 수행하였고 입사각에 따른 회절특성과 Bragg 각선택도에 대한 특성을 측정하였으며 각도와 회전 다중화를 결합하여 여러 개의 홀로그램을 저장하였다. 회전 다중화의 경우 기존의 폴리머를 회전하는 시스템을 이용했을 뿐 만 아니라 이동 다중화와 각 다중화와의 결합이 용이하도록 기준빔을 직접 회전하는 시스템을 제작하여 저장하였다.

II. 포토폴리머의 홀로그램 저장 특성

포토 폴리머는 중합반응에 필요한 광자의 양만큼 사전 노출 광량이 필요하다. 물론 이것은 레이저의 입사각, 편광, 폴리머의 종류와 표면상태 등에 따라 달라진다. DuPont HRF-150-100 포토폴리머는 두께가 100 μm 로서 양면이 마일러로 덮여 있는 형태이다. 홀로그램 저장실험을 위해 한 면을 떼어내고 유리에 부착하여 사용하였고, 입사빔의 세기, 교차각, 시간분배를 이용한 각다중화와 회전 다중화 홀로그램 저장 실험을 수행하였다. 그림 1은 포토폴리머의 흡수스펙트럼으로서 본 실험에서는 30%정도의 흡수가 있는 514 nm에서 기록하고 흡수가 거의 없는 633 nm에서 약한 빔을 사용하여 회절효율을 측정하였다. 물론 488 nm에서 기록할 경우 흡수가 커서 작은 세기의 빛으로도 충분한 회절효율을 얻을 수 있으나 현재 쉽게 사용할 수 있는 레이저 광원이 녹색계열이므로 514 nm를 선택하였다. 그림 2에서 보듯이 입사 빔의 강도가 0.5 mW/cm²

[†]E-mail: kslim@trut.chungbuk.ac.kr

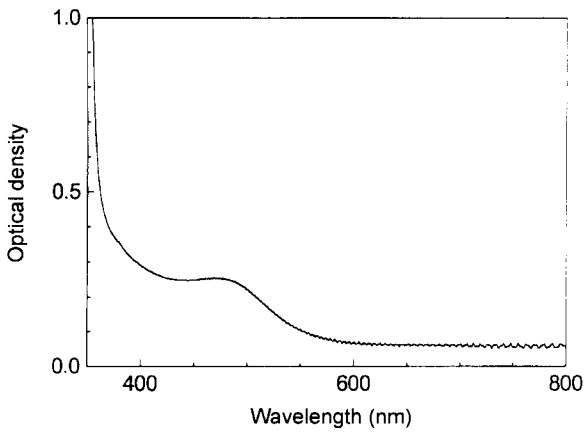


그림 1. HRF-150-100 DuPont 포토폴리머의 흡수스펙트럼.

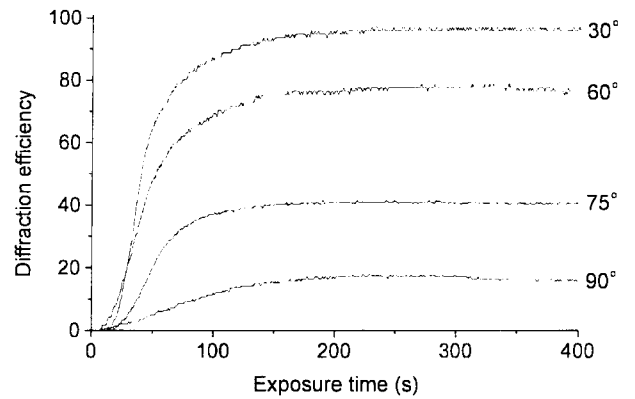


그림 3. 교차각에 따른 회절효율의 변화. 기록광세기 2 mW/cm²이다.

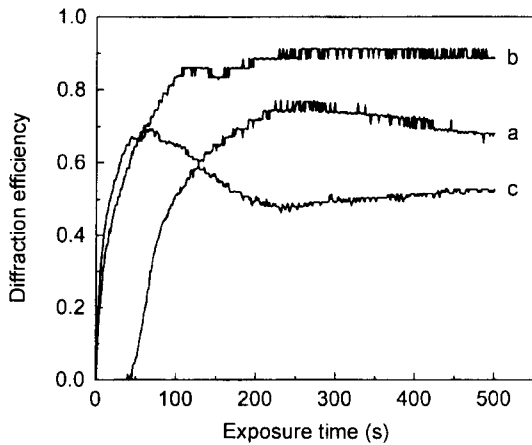


그림 2. 교차각 30°에서의 기록광 세기에 따른 회절효율 변화. a: 0.5 mW/cm², b: 2 mW/cm² c: 2.5 mW/cm².

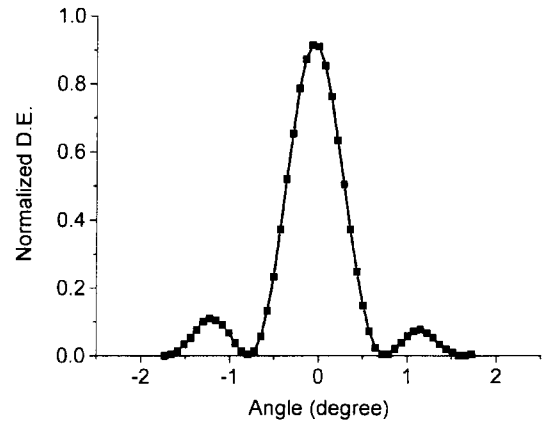


그림 4. 각 다중화를 위한 장치에서의 Bragg 각 30° 선택도.

정도로 작을 때는 중합반응속도와 확산속도가 모두 느리기 때문에 포화될 때까지의 시간이 길어져 회절효율이 느리게 증가하였다. 입사 빔의 세기를 더 증가하여 2 mW/cm²가 되면 회절효율은 증가하게 되며 바인더 영역에 있는 모노머와 폴리머의 비율이 같을 때 최대 회절효율을 얻는다. 그러나 그 이상의 강한 입사 빔을 조사하면 빠른 중합반응으로 인해 회절 효율이 빠르게 증가하게 된다. 하지만 어두워야 할 영역에서도 산란광 등으로 인해 바인더 영역에 남아있던 모노머들이 폴리머로 변하기 때문에 밝고 어두운 부분의 굴절률 변화가 다시 서서히 감소함을 볼 수 있다. 편광에 따른 회절효율을 측정할 결과 거의 변화가 측정되지 않았으며 이것은 이전에 보고된 DuPont 사의 HRF-150 폴리머의 편광성^[7]이 제조과정의 개선으로 거의 제거된 것으로 보인다. 그리고 포화되기 전에 기록광을 차단하고 수 시간 동안 회절효율을 측정할 결과 일정한 상태를 유지하였다. 격자 광감도(sensitivity)는 회절격자 형성을 위한 에너지 투자효율과 같은 것으로 격자형성의 시작인 동적 범위에서 시료두께 d , 기록광 세기 I , 초기 기록시간 t 인 경우에 대해 다음과 같이 정의할 수 있다.^[8]

$$S = \frac{\sqrt{\eta}}{I \cdot t \cdot d} \quad (1)$$

교차 각이 30° 경우 0.2 ~ 5 mW/cm²의 빔 세기의 범위에서 광감도가 1.5-3.0 cm/mJ 정도로 변화의 정도는 작았다. 평면과 홀로그램의 교차각 의존도는 대칭 입사 빔의 경우 교차각 2θ가 30일 경우 가장 높은 회절효율이 측정되었다. 교차각이 10° 이하로 감소하는 경우 약하긴 하지만 2차 회절 빔이 나타났으며 이것은 격자간격이 커지면서 Bragg 영역에서^[9] 벗어나기 시작하여 다중 홀로그램저장에 부적합함을 보여주었다. 그림 3은 2 mW/cm²의 세기의 대칭형 입사 빔의 교차각이 30°~90° 범위에서 변할 때 홀로그램 회절효율의 변화를 측정 한 것이며 교차각이 클수록 낮은 회절효율과 감도를 보여주고 있다. 이러한 것은 작은 격자간격으로 인해 모노머의 밀도차 변화가 충분히 이루어지지 못한 결과이다. 홀로그램 저장의 각 다중화를 위해서는 Bragg 각의 선택도가 매우 중요하다. 굴절률 n 인 기록매질에 대한 파장 λ 의 기록광에 대한 각도 선택도는

$$\Delta\theta_{ang} = \frac{\lambda}{2nd \sin\theta} \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있으며^[3] 2θ=30°일 때 이 값은 0.6°이다. 이것을 실험치와 비교하기 위해 Bragg각을 기준으로 최소분리각 0.036°로 좌우로 측정하여 각도 선택도 실험을 측정하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 반치폭(FWHM)은 0.69°로 측

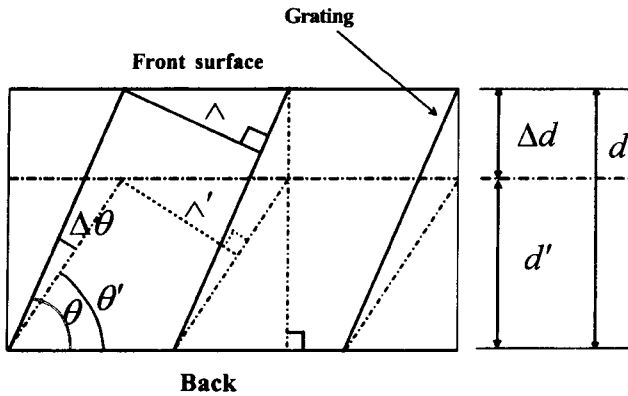


그림 5. 경사진 입사각에 의한 회절 격자(실선)와 수축에 의한 변화된 회절 격자(점선). d 는 처음 폴리머의 두께, d' 는 기록 후의 두께, θ 와 θ' 는 각각 노출전과 노출후의 격자면과 폴리머의 평면이 이루는 각이고 $\Delta\theta$ 는 변화 각이다.

표 1. 514 nm 파장에서 2 mW/cm²의 세기의 기록광의 경사각에 따른 폴리머의 수축

기준빔 입사각(°)	신호빔 입사각(°)	폴리머 두께
10	20	99.8 μ m
5	25	99.4 μ m
0	30	98.3 μ m

정되었고 좌우 최소치의 사잇각 1.584°를 얻을 수 있었다.

재료에 따라 다르기는 하지만 홀로그램 저장의 실용화에 장애가 되는 것 중의 하나가 노출에 의한 폴리머의 수축현상이다. 수축현상은 포토폴리머처럼 화학변화를 이용해 회절 격자를 만드는 경우에는 불가피한 현상으로 나타난다. 이러한 수축현상은 두 빔이 대칭으로 입사하는 경우는 격자가 기울어지지 않고 곧게 생성되므로 수축현상이 일어나도 재생 각이 변하지 않는다. 그러나 각다중화에서는 비대칭 입사를 피할 수 없으므로 문제가 될 수 있다. 그림 5는 비대칭 입사 경우 수축에 의한 두께의 변화로 인해 격자면이 찌그러지게 되는 것을 보여주고 있다. 신호빔과 참조빔이 비대칭 입사하면, 격자는 경사지게 놓이며 수축현상에 의해 격자는 더 기울어지게 되므로 재생 각도가 바뀌게 된다. 따라서 이를 줄이는 것이 부피형 홀로그램에 있어서 아주 중요한 요소가 됨을 알 수 있다. 두 입사빔이 이루는 각을 30°로 유지하면서, 두 입사빔과 매질의 법선이 이루는 각을 다르게 하여 2 mW/cm² 세기의 빔으로 홀로그램을 저장한 후, 각도를 좌우로 0.0036°도씩 회전하며 회절 효율을 측정하는 실험하였다. 여러 가지 입사 조건에 대한 측정 결과를 Zhao 등이^[10] 사용한 방법으로 수축정도를 계산한 결과는 표 1과 같으며 경사가 심할수록 수축률이 크게 나타났다. 교차각이 같아도 15° 기울어 졌을 때 약 2% 정도의 수축률이 측정되었으며 이것은 각 다중화의 범위가 크게 제한을 받을 수 있음을 의미한다.

III. 각회전 다중화

각 다중화와 회전 다중화를 결합하는 실험은 두 가지 방법

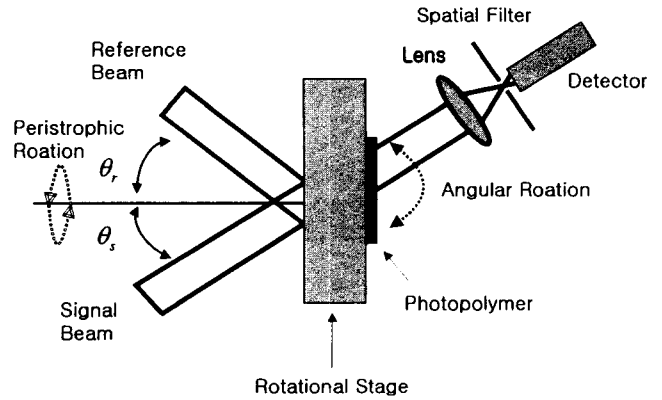


그림 6. 각-폴리머 회전 다중화를 위한 장치 개략도.

으로 수행하였다. 첫 번째는 이미 알려진 방법으로서 폴리머를 폴리머에 수직인 축과 수평인 축으로 각각 독립적으로 회전하는 방법이고 두 번째는 폴리머에 수직인 축을 중심으로 폴리머를 회전하는 대신 레이저 빔을 직접 회전하고, 폴리머에 수평인 축 중심의 회전은 그대로 사용하는 방법이다. 두 번째 방법은 시스템이 더 복잡해지는 문제가 있으나 이동다중화와 결합할 수 있다는 장점이 있다. 두 방법 모두 각회전 다중화라고 할 수 있으며 이것을 각-폴리머 회전 다중화 결합과 각-기준빔 회전 다중화 결합으로 구분할 수 있다. 그림 6은 이러한 각-폴리머 회전 다중화 시스템의 개략도이다. 회전대 위에 올려진 폴리머가 다시 면에 수직인 축을 중심으로 회전하는 방식으로 Pu 등이 시도한 방법이다.^[7] 이 시스템으로 교차각이 30°, 45°, 60°, 75°에 대해서 각다중화 경우 Bragg 각의 좌우 최소치 사잇각을 측정하고 각각 1.51°, 1.08°, 0.94°, 0.86°를 나타내었다. 폴리머 회전 다중화에 대해 측정된 결과는 약 2°로 측정되었다. 먼저 공통적으로 사용하는 각 다중화 경우는 일정한 회절효율을 얻기 위해서 각 홀로그램에 대한 정확한 노광량이 필요하므로 우선 동일한 노광량으로 여러 개의 홀로그램을 저장하였다. 514 nm의 기록광을 대칭형으로 30°의 교차각을 유지하며 입사면에 수직인 축을 중심으로 각도 선택도에서 얻은 1.584°의 간격으로 변화시키며 2 mW/cm²의 세기로 3초씩 조사하며 회절효율을 측정하였다. 이러한 일정한 노출시간 간격으로 기록된 홀로그램의 회절효율의 제공근 값을 계속 더해서 누적 격자 강도를 얻을 수 있다. 그러나 균일한 회절효율을 갖는 각다중화 기록실험을 위해서는 각 홀로그램에 대한 노광 시간배분을 재조정해야 하므로 균일 노광실험의 누적 격자강도와 누적 노출에너지에 대한 다음과 같은 6차 다차항 식 최적 조절법을 이용하였다.^[11]

$$A = a_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 E^3 + a_4 E^4 + a_5 E^5 + a_6 E^6 \quad (3)$$

여기서 A 는 누적격자 강도이고 E 는 누적 노출 에너지이다. 이 결과를 이용하여 계수를 구하면 기록광의 세기 I 에 대해 M 개의 균일한 홀로그램을 얻기 위한 N 번째 홀로그램에 대한 노출시간은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.^[11]

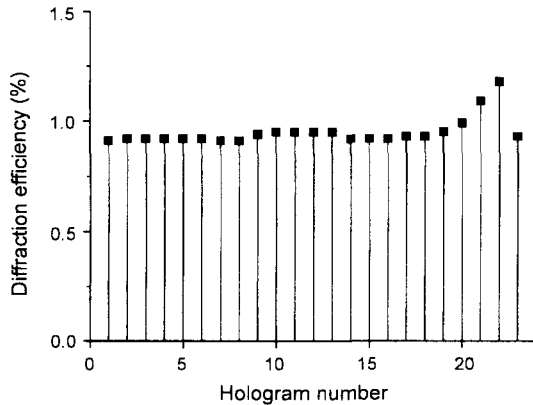


그림 7. 노출시간 조정 방법과 사전노출을 거치고 각 다중화 방법에 의해 저장된 균일한 회절효율의 23개의 홀로그램.

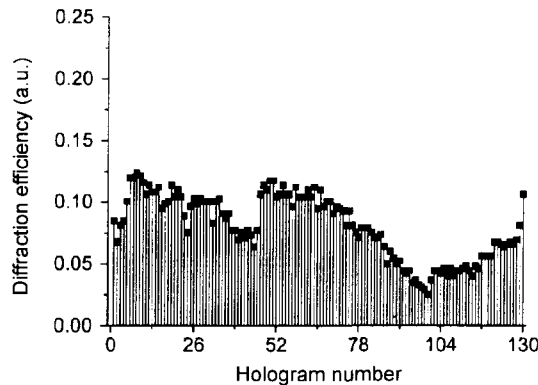


그림 8. 노출시간 조정 방법과 사전노출을 거치고 각-폴리머 회전 다중화 방법의해 저장된 130개의 홀로그램.

$$t_N = \frac{A_s}{M} \left[\frac{a_1 + 2a_2 \sum_{i=1}^{N-1} E_i + 3a_3 \left(\sum_{i=1}^{N-1} E_i \right)^2 + 4a_4 \left(\sum_{i=1}^{N-1} E_i \right)^3}{5a_5 \left(\sum_{i=1}^{N-1} E_i \right)^4 + 6a_6 \left(\sum_{i=1}^{N-1} E_i \right)^5} \right] \quad (4)$$

여기서 A_s 는 포화 회절효율이고 M 은 총 저장 홀로그램 개수이다. 이를 적용하여 각다중화 실험을 수행한 결과 그림 7과 같이 23개의 균일한 회절효율을 얻었다. 각다중화와 회전다중화의 결합은 기존의 각회전 외에 폴리머의 면의 수직 축에 대한 회전을 추가함으로써 수행할 수 있었다. 이 시스템으로 각다중화를 위해 1.512° 간격으로 수직축에 대한 회전을, 회전다중화를 위해서 3.5° 간격으로 폴리머 중심축에 대한 회전을 하며 평면파에 대한 각다중화와 회전다중화 결합실험을 수행하였다. 그리고 회전다중화와 각다중화에 대해서 분해능이 0.004° 인 동일한 형태의 스테핑 모터를 사용하였으며, 폴리머 회전다중화 51개, 각 다중화 3개를 이용하여 약 20 mm^2 영역에 총 153개의 홀로그램에 대해 홀로그램당 4.4 mJ/cm^2 의 동일한 노광량으로 다중화를 수행하였다. 즉 일정한 각에서 51개의 회

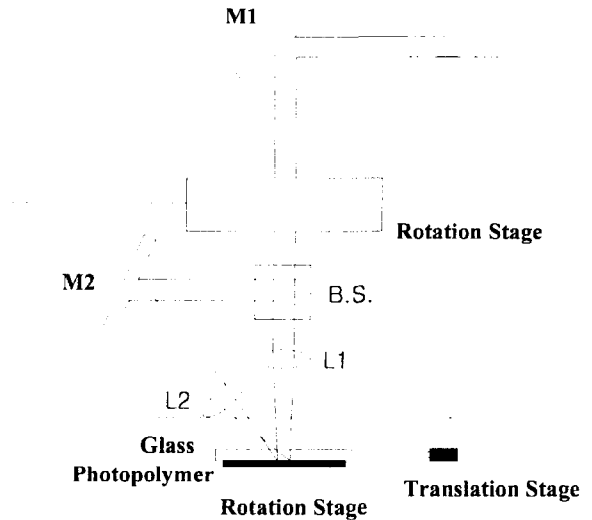


그림 9. 각-기준회전 다중화를 위한 장치 개략도. L1, L2: 렌즈, M1, M2: 거울, B.S.: 프리즘 빔가르개.

전 다중화로 저장하고 다시 다른 각으로 이동해서 51개를 저장하는 방식을 택하였다. 물론 수축현상을 고려하지 않는다면 이보다 각 다중화 영역을 확대할 수 있을 것이다. 이러한 각-폴리머 회전 다중화에서 66 mJ/cm^2 의 사전노출량이 필요함을 알 수 있었고 누적격자강도에 대한 다항식 최적조절을 2차례 적용하여 각 홀로그램에 대한 적절 노출시간을 얻을 수 있었고 이를 이용해 그림 8과 같이 회절효율이 비교적 균일한 130개의 홀로그램을 저장할 수 있었다. 그러나 3개의 다른 각의 위치로 이동 과정에서의 원활하지 못한 결과를 볼 수 있다. 이러한 다중화의 결합방법은 두 개의 모터의 정지와 시작과정에서 시간적 오차와 기계적 진동도 고려되어야 할 것이다. 이러한 문제를 해결하여 동일노광량 기록 당시와 노출계획 수립 후 분배된 노광량에 의한 기록 당시의 모든 시스템의 조건이 동일해야만 보다 균일한 회절 효율을 얻을 수 있을 것이다. 이러한 다중화 방법은 입사되는 두 레이저 빔의 위치를 고정시키고 포토폴리머를 두 개의 서로 수직인 축을 중심으로 회전하여 Bragg 각을 변화시키는 것이다. 이와 달리 두 번째 방법인 각-기준회전 다중화는 그림 9와 같은 실험장치를 사용하였으며 2개의 회전대와 1개의 선형 이동대 위에 폴리머가 놓이도록 하여 각과 회전과 이동 다중화가 모두 가능하도록 하였다. 프리즘 빔가르개를 사용하여 동일한 세기의 두 빔으로 분리하였고 신호빔은 폴리머 면에 항상 수직입사하도록 하였다. 각다중화를 위해서는 지면에 수직인 방향의 회전축을 사용하였으며 이동다중화를 위해서는 수평방향의 선형이동대를 사용하였다. 폴리머는 각다중화와 이동 다중화를 위해서만 움직이고 회전다중화를 위해서는 폴리머는 정지한 상태에서 신호빔을 고정하고 거울을 회전함으로써 기준빔을 움직이며 다중 홀로그램을 저장하였다. 거울이 부착된 팔이 회전하는 방식을 택하였고 다중화 과정에서는 다른 다중화 경우와 마찬가지로 다음 스텝으로 이동하는 동안 빛의 차단을 위해 전기셔터를 사용하였다.

폴리머 회전 다중화는 이동다중화와 결합할 경우 두 레이저

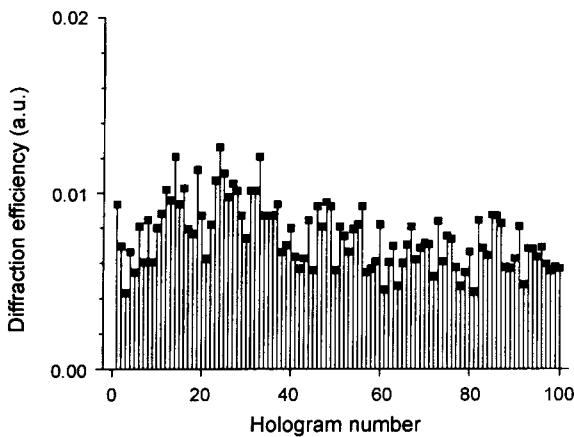


그림 10. 노출시간 조정 방법과 사전노출을 거치고 각-기준빔 회전 다중화 방법에 의해 저장된 100개의 홀로그램.

빔 자체가 이동하거나 폴리머의 회전 축이 선형이동해야 하지만 기준빔 회전 다중화는 이동다중화와 결합할때 단순히 폴리머 자체를 선형이동하기만 하면 되는 장점이 있다. 따라서 각, 회전, 이동 다중화의 세 가지 결합에 용이하다. 구면파를 이용하기 위해 두 개의 렌즈를 기준빔과 신호빔의 경로에 사용하였고 기준빔은 포토폴리머 면의 조금 앞에, 신호빔은 조금 뒤에 푸리에 면이 형성되도록 하였다. 그러나 이것은 대칭형 구조에서 구면파 기록일 때 수축에 의한 각의 변화를 최소화하기 위한 방법이나 본 시스템은 비대칭 구조이므로 수축문제는 여전히 남아있다.^[12] 각다중화와 회전 다중화의 결합을 위해 스텝 1.584°, 회전다중화 스텝 2°를 유지하며 각각 10 스텝씩 이동하며 저장함으로써 총 100개의 비교적 동일한 회절효율을 갖는 홀로그램을 저장할 수 있었으며 이를 위해 역시 누적격자강도와 다항식을 이용한 노출시간 계획을 통해 수행하였다. 그림 10은 동일노광량과 시간계획에 의한 노광량에 의한 홀로그램의 회절 효율이다. 그러나 사전 노출량은 100 mJ/cm²로써 첫 번째 방법보다 더 컸으며 회절효율도 감소하였다. 이것은 두 번째 방법이 구면파를 이용했기 때문인 것으로 사료된다.^[13] 그리고 간섭거리가 짧은 레이저를 사용하면 그림 9와 같은 장치에서 광경로를 동일하게 할 수 있도록 해야 하며 비대칭구

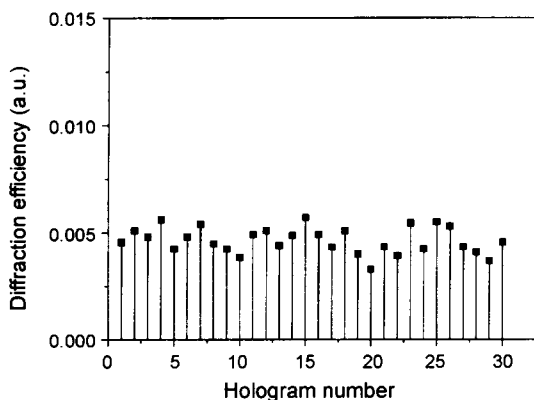


그림 11. 이동-기준빔 회전 다중화 방법에 의해 저장된 30개의 홀로그램

구조로 인해 수축현상을 고려해야하고 회전하는 동안 두 빔의 중첩이 잘 유지되어야 하므로 광정렬이 정확해야 하고 시스템의 기계적 안정화가 필요함을 알 수 있었다. 기준 빔 회전과 이동다중화의 결합은 10개의 회전스텝과 3개의 이동스텝으로 30개의 홀로그램을 저장하였다. 이동저장간격은 각각 0.5 mm로 하였고 회전 각 스텝은 2°이고 노출시간은 15초로 하였다. 결합 다중화의 노출계획을 거쳐 저장한 홀로그램에 대한 결과는 그림 11과 같다.

IV. 결 론

본 연구에서는 DuPont HRF-150-100 포토폴리머의 빛의 세기와 교차각의 변화에 따른 홀로그램 저장특성을 측정 분석하였다. 또한 평면파 홀로그램저장을 0.2cm² 면적에 23개의 각다중화, 130개의 각-폴리머 회전 다중화, 100개의 각-기준빔 회전 다중화를 수행하였다. 각-기준빔 회전 다중화는 새로운 시도로서 이동 다중화와 결합이 용이한 시스템 제작을 통해 장점을 확인 할 수 있었다. 노출시간 계획을 이용한 동일 회절효율의 홀로그램 저장에서도 각-기준빔 회전 다중화가 우수하였으나 평면파와 구면파 홀로그램의 차이, 대칭형과 비대칭형 입사빔, 2축시스템과 3축시스템 등의 차이로 인해 절대 회절효율에서도 많은 차이를 나타내어 두 시스템의 방법상의 장단점을 비교하기 어려웠다.

감사의 글

이 연구는 과학기술 정책관리 연구소의 차세대 포토닉스 사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] D. Psaltis and F. Mok, "Holographic Memory," *Sci. Am.* vol. 275, no. 11, pp. 52-58, 1995.
- [2] A. Pu and D. Psaltis, "High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2389-2398, 1996.
- [3] J. H. Hong, I. M. Michael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory systems : techniques and architectures," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp 2193-2203, 1995.
- [4] L. Dhar, K. Curtis, M. Tackitt, M. Schilling, S. Campbell, W. Wilson, A. Hill, C. Boyd, N. Levinous, and A. Harris, "Holographic storage of multiple high-capacity digital data pages in thick photopolymer systems," *Opt. Lett.* vol. 23, no. 21, pp. 1710-1712, 1998.
- [5] J. A. Frantz, R. K. Kostuk, D. A. Waldman, "Coherent Scattering Properties of a Cationic Ring-Opening Volume Holographic Recording Material," *Proc. SPIE* vol. 4296 pp. 267-273, 2001.
- [6] U. S. Rhee, H. J. Caulfield, C. S. Vikram, and J. Shamir, "Dynamics of hologram recording in DuPont photopolymer," *Appl. Opt.* vol. 34, no. 5, pp. 846-853, 1995.
- [7] A. Pu, "Holographic 3-D Disks and Optical Correlators

- using Photopolymer Materials,” Ph.D. Dissertation of California Institute of Technology (1997).
- [8] P. Gunter, *Nonlinear Optical Effects and Materials*, (Springer-Verlag, New York, 2000), Chapter 4.
- [9] G. Zhao and P. Mouroulis, “Second order grating formation in dry holographic photopolymers,” *Optics Comm.* vol. 115, pp. 528-532, 1995.
- [10] C. Zhao, J. Liu, Z. Fu, and R. T. Chen, “Shrinkage-corrected volume holograms based on photopolymeric phase media for surface-normal optical interconnects,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 71, no. 11, 1464-1466, 1997.
- [11] A. Pu, K. Curtls, and D. Psaltis, “Exposure schedule for multiplexing holograms in photopolymer films,” *Opt. Eng.* vol. 35, no. 10, pp. 2824-2829, 1996.
- [12] D. H. R. Vilkomerson and D. Bostwick, “Some Effects of Emulsion Shrinkage on a Hologram’s Image Space,” *Appl. Opt.* vol. 6, no. 7, pp. 1270-1272, 1967.
- [13] G. Barbastathis, M. Levene and D. Psaltis, “Shift multiplexing with spherical reference waves,” *Appl. Opt.* vol. 35, no. 14, pp. 2403-2417, 1996.

Multiplexed hologram storage in DuPont photopolymers

Sun-Kyun Lee, Chang-Won Son, Kyung-Hee Choi, Sun-Ju Chung, Jung-Pyo Kim, and Ki-Soo Lim[†]

Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, KOREA

†E-mail: kslim@trut.chungbuk.ac.kr

Jae-Bong Lee

School of Electronic and Computer Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, KOREA

(Received August 1, 2002; Revised manuscript received October 7, 2002)

We studied 100 μm DuPont photopolymers (HRF-150-100) for characteristics of hologram formation and shrinkage at 514 nm with various grating spacings and light intensities. For combinations of rotational and angular multiplexings, we employed two different techniques by rotating the photopolymer and the reference beam. We also performed shift-rotational multiplexing with the rotating reference beam.

Classification codes : OM.010, IP.010, DI.010.