

광폴리머를 사용한 두꺼운 홀로그래프의 수축에 의한 혼선잡음

황용섭[†], 김근율*, 박주연*, 남하은*

Crosstalk Noise by Shrinkage of Thick Holographic Photopolymer

Yongsop Hwang[†], Kun-Yul Kim*, Jooyoun Park*, and Haeun Nam*

Key Words : Crosstalk, Shrinkage, Photopolymer, Holography

ABSTRACT

The crosstalk noise of thick holographic photopolymer is studied. Three different experiments, (1) reading area dependency (2) post-exposure effect (3) effect of later recorded holograms on earlier recorded holograms, have been accomplished and a tendency of crosstalk noises has been found for each case. The larger reading area, the higher crosstalk noises for the later recorded holograms. Before the post-exposure the crosstalk noises are higher in the earlier recorded holograms, but after the post-exposure the crosstalk noises are higher in the later recorded holograms. The crosstalk noises of the earlier recorded holograms become higher as more holograms are recorded by multiplexing. To explain the tendency of crosstalk noises of these experiments, we suggest a model considering the anisotropic shrinkage of the photopolymer. According to the model, the shrinkage is more dominant at the center of the recorded region than the edge of that. After the post-exposure, however, the amount of shrinkage becomes the same for the whole recorded region. The results of all three experiments are well explained by this model.

1. 서론

홀로그래프 저장장치는 높은 저장밀도와 빠른 재생속도 때문에 새로운 세대의 저장매체로서 큰 관심을 받고 있다[1,2]. 저장밀도를 높이기 위해 같은 지점에 많은 홀로그래프를 중첩하여 기록하는데, 그에 따라 중첩된 홀로그래프 사이에 나타나는 혼선잡음이 데이터의 정확한 판별을 어렵게 하며 저장밀도에 한계를 가져오는 원인이 되고 있다[3].

혼선잡음의 원인을 밝히려는 여러 시도 가운데 저장물질이 수축됨에 따라 재생각도가 틀어지기 때문에 혼선잡음이 발생한다고 설명하는 연구가 보고된 바 있다[3,4]. 하지만 재생각도의 틀어짐만으로는 실제로 나타나는 다양한 혼선잡음을 설명

하기 어려우며, 본 논문에 포함된 실험결과도 기존의 이론으로 해석할 수 없었다. 본 논문에서는 자유 라디칼 유형의 두꺼운 광폴리머에 중첩기록한 경우에 나타나는 혼선잡음의 경향을 관측하였고, 광폴리머의 불균일한 수축을 고려한 해석 모형을 제시하였다.

2. 혼선잡음의 관측

2.1 재생영역에 따른 혼선잡음

실험의 기본구성은 Fig. 1에 나타냈으며 실험 조건은 Table. 1에 나타내었다. 532nm 파장의 레이저를 사용하여 두께 1mm 인 자유 라디칼 유형의 광폴리머에 각도중첩을 이용해 총 21 개의 홀로그래프를 중첩기록 하였다. 기록할 때에는 신호빛과 기준빛 모두 지름 3.56mm 의 평면파를 사용하였으며, 기록각도는 28 도로 하였다. 신호빛과 기준빛이 같은 각도로 입사하는 위치를 기준으로 -5 도에서 +5 도까지 0.5 도 간격으로 광폴리머를 회전

[†] 대우일렉트로닉스 선행기술연구소 DM 연구 2 팀
E-mail : yshwang@dwe.co.kr
TEL : (031)428-5318 FAX : (031)428-5321

* 대우일렉트로닉스 선행기술연구소

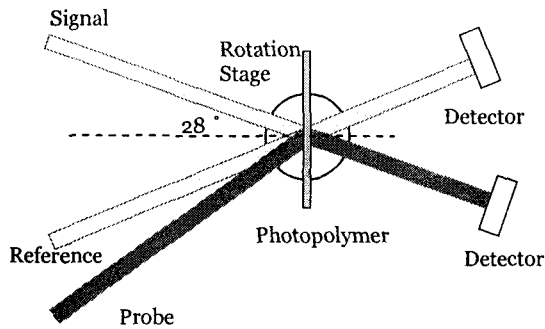


Fig. 1 Experiment Setup

Table. 1 실험조건

광폴리머 두께(mm)	1
기록빔 파장(nm)	532
재생빔 파장(nm)	632.8
신호빔 & 기준빔 지름(mm)	3.56
기록각도(°)	28
중첩각도(°)	0.5
중첩 홀로그램 개수	21
전노광(mJ/cm ²)	100
넓이당 총 에너지(mJ/cm ²)	1000

시켜 중첩기록 하였다. 후노광(Post-exposure)을 통해 남은 홀몸체(monomer)를 제거하였으며, 재생은 632.8nm 파장의 레이저를 사용하였다. 회절효율 곡선의 선형영역을 사용하기 위해 100mJ/cm²의 전노광(Pre-exposure)을 하였으며, 중첩기록을 통해 단위 넓이당 주어진 총 에너지(Fluence)는 1000mJ/cm²이다.

재생빔의 지름은 3.54mm 와 1.38mm 를 사용하였다. 재생빔의 지름이 3.54mm 인 경우에는 혼선잡음이 눈에 띄게 나타났으나, 재생빔의 지름이 1.38mm 인 경우에는 혼선잡음이 거의 나타나지 않았다. 혼선잡음을 평가하는 기준으로는 식(1)로 정의된 회절효율의 최소최대비(NPR: Null to Peak Ratio)를 사용하였다.

$$NPR(\%) = \frac{2\eta_n}{\eta_{p1} + \eta_{p2}} \times 100 \quad (1)$$

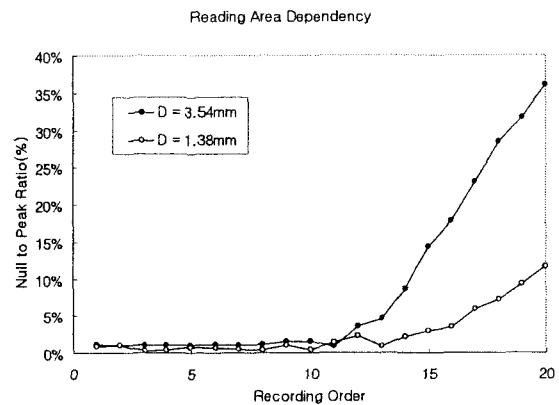


Fig. 2 Null to peak ratio (NPR) of holograms read by two probe beams of different sizes. The abscissa is the order of hologram recording. The larger reading area, the higher NPR's appear for the later recorded holograms.

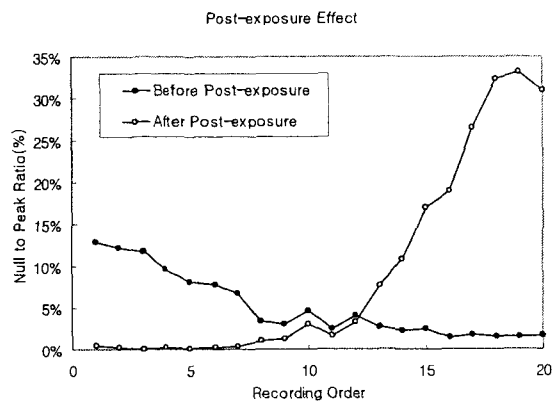


Fig. 3 Comparison of the case not post-exposed with the case post-exposed. The abscissa is the order of hologram recording. Before the post-exposure the earlier recorded holograms show higher NPR's, but after the post-exposure the later recorded holograms show higher NPR's.

이때 η_{p1} 과 η_{p2} 는 이웃한 첫 번째 홀로그램과 두 번째 홀로그램의 최대 회절효율을 각각 나타내며, η_n 은 최대 회절효율이 나타나는 두 재생각도 사이에서 나타나는 회절효율의 최소값이다.

재생영역에 따른 혼선잡음 실험의 결과는 Fig. 2 에 나타내었다. 그래프의 가로축은 기록된 홀로그램의 순서를 나타내는데, 예를 들어 가로축의 1 번은 첫 번째 기록한 홀로그램과 두 번째 기록한 홀로그램 사이의 최소최대비에 대응된다. 지름 3.54mm 인 재생빔으로 기록영역의 98.9%를 재생했을 때는 최소최대비가 최대 36%까지 나왔으나, 지름 1.38mm 인 재생빔으로 기록영역 중심부의

NPR vs Amount of Recorded Holograms

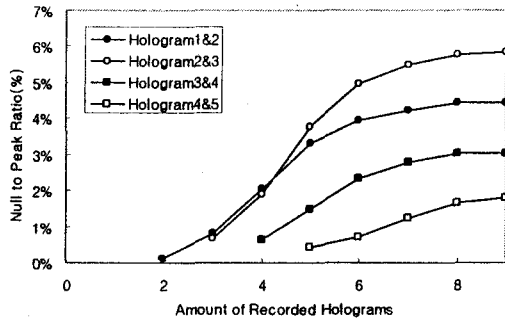


Fig. 4 The effect of multiplex recording on the earlier recorded holograms. The NPR's increase as more holograms are recorded by multiplexing.

15.0%만을 재생했을 때는 최소최대비가 가장 큰 곳이 11.6%에 그쳤다. 이는 혼선잡음이 주로 발생하는 영역은 기록영역의 가장자리 부분임을 추측할 수 있게 해준다. 재생영역에 따른 이러한 차이는 나중에 기록한 홀로그램일수록 더 크게 나타났다.

2.2 후노광 전후의 혼선잡음

Table. 1과 같은 조건으로 21 장의 홀로그램을 각도 증첩기록 한 뒤 후노광 전후의 회절효율의 최소최대비를 비교하여 Fig. 3에 보였다. 재생빛의 지름은 3.54mm 로 기록영역의 대부분을 덮었다. 후노광하기 전에는 먼저 기록한 홀로그램에서 회절효율의 최소최대비가 크게 나왔으나 후노광한 뒤에는 나중에 기록한 홀로그램에서 최소최대비가 크게 나왔다.

2.3 증첩기록에 따른 혼선잡음

먼저 기록한 홀로그램이 그 이후에 진행되는 증첩기록에 의해 어떻게 영향을 받는지 조사하였다. Table. 1과 같은 기록조건으로 -5 도 위치에서 첫 번째 홀로그램을 기록하고 0.5 도 회전시켜 두 번째 홀로그램을 기록한 뒤 632.8nm 레이저로 재생하였다. 그 상태에서 또 0.5 도 회전시킨 뒤 세 번째 홀로그램을 기록한 뒤 재생하였고, 이와 같은 과정을 되풀이하여 9 개의 홀로그램을 차례로 기록하고 재생하여 회절효율의 최소최대비를 구했으며 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다.

Fig. 4 를 보면 먼저 기록한 홀로그램이 나중에 기록한 홀로그램의 영향을 받아 회절효율의 최소최대비가 점차적으로 커짐을 알 수 있다. 이는 나중에 기록한 홀로그램의 영향으로 먼저 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음이 커짐을 뜻한다.

3. 해석 모형

3.1 광폴리머의 수축 모형

광폴리머는 빛을 쪼여줌에 따라 중합(polymerization)되면서 수축됨이 알려져 있다[5]. 이러한 수축이 모든 방향으로 균일하게 일어날 때에는 홀로그램을 재생하는 데 문제가 되지 않으나 수축이 균일하지 않게 일어날 때에는 혼선잡음이 발생하는 등의 문제가 생긴다.

광폴리머의 두께방향 수축이 기록영역의 가운데에서 두드러지게 일어나며 기록영역의 가장자리에서는 크게 일어나지 않는다고 가정하여 해석 모형을 세웠다. 가정한 형태의 수축은 기록빛의 세기(irradiance)분포에 의해서 발생되거나 중합이 일어남에 따라 광폴리머 안쪽에 생기는 장력에 의해서 발생할 수 있다. 먼저 기록한 홀로그램에 해당하는 모형은 Fig. 5에 나타냈다. 홀로그램을 기록하면 홀로그램의 에돌이발(grating)은 Fig. 5의 (a)처럼 광폴리머 속에 주기적으로 형성된다. 그러나 증첩기록을 해감에 따라 광폴리머의 두께방향 수축이 기록영역의 가운데에서 두드러지고 가장자리에서는 크게 일어나지 않기 때문에 광폴리머의 두께는 기록영역의 가운데가 얇고 가장자리는 두꺼운 모양으로 Fig. 5의 (b)처럼 변형된다. 그에 따라 먼저 기록한 홀로그램의 가운데 쪽 에돌이발이 기판(substrate)과 이루는 각도와 가장자리 쪽 에돌이발이 기판과 이루는 각도가 서로 다르게 된다. 그 상태에서 후노광을 하면 기록영역의 가운데와 가장자리 모두 같은 정도로 수축되기 때문에 Fig. 5의 (c)처럼 홀로그램의 에돌이발이 다시 하나의 각도를 가지고 배열되게 된다.

나중에 기록한 홀로그램에 해당하는 수축 모형은 Fig. 6에 나타냈다. 여러 홀로그램을 증첩기록함에 따라 수축이 일어나 기록영역의 가운데가 얇고 가장자리는 두꺼운 모양인 상태에서 홀로그램을 기록하게 되어 Fig. 6의 (a)처럼 불균일하게 수축된 광폴리머에 주기적인 에돌이발이 형성된다. 그 상태에서 후노광을 하면 Fig. 6의 (b)처럼 기록영역의 가운데와 가장자리가 같은 정도로 수축하게 되며 불균일하게 수축된 상태에서 기록되었던 홀로그램의 에돌이발이 기판과 이루는 각도는 기록영역의 가운데와 가장자리에서 서로 다르게 된다.

Fig. 7을 통해 이 모형을 k-공간에서 도식적으로 나타냈다. Fig. 7의 (a)는 홀로그램을 기록할 때를 나타내며 (b)는 재생할 때를 나타낸다. 기록에서 형성된 에돌이발 벡터(grating vector)인 \mathbf{K} 는 광폴리머가 불균일하게 수축됨에 따라 기록영역의 가운데와 가장자리의 에돌이발 벡터의 방향이 서로 달라지게 된다. 그래서 기록영역의 가운데에 생성

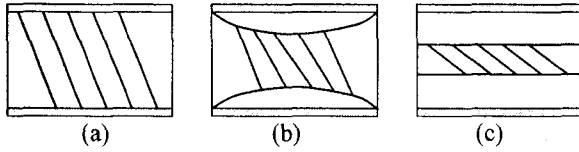


Fig. 5 The case of earlier recorded hologram. (a) Just recorded hologram; (b) anisotropic shrunken hologram; (c) post-exposed hologram.

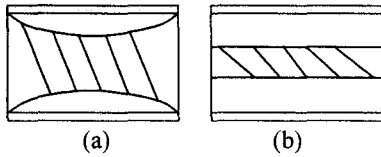
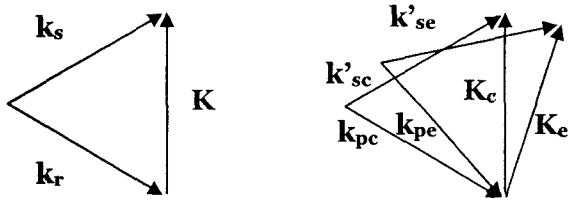


Fig. 6 The case of later recorded hologram. (a) Just recorded hologram on the anisotropic shrunken hologram; (b) post-exposed hologram.



(a) Recording (b) Reading the center and edge

Fig. 7 k-space description of the anisotropic shrunken grating.

된 에돌이발 벡터 K_c 의 브래그 조건을 만족하는 각도로 재생빛이 들어가면 기록영역의 가장자리 생성된 에돌이발 벡터 K_e 는 브래그 조건을 만족하지 않기 때문에 적은 양만 회절되어 나온다. 반면에 광폴리머를 회전시켜 기록영역의 가장자리의 에돌이발 벡터 K_e 의 브래그 조건을 만족하는 각도로 재생빛이 들어가면 기록영역의 가장자리에서는 높은 회절효율로 재생 되지만 기록영역의 가운데는 브래그 조건을 만족하지 않기 때문에 적은 양만 회절되어 나온다.

3.2 관측결과 해석

3.1절에서 제시한 모형에 따라 2장의 세 가지 실험을 해석하였다.

3.2.1 재생영역에 따른 혼선잡음 해석

2.1절의 실험에서 재생영역을 다르게 함에 따라 나타나는 혼선잡음의 정도 차이는 나중에 기록한 홀로그램 사이에서 두드러지게 나타나는 것으로 관측되었다. 즉 먼저 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음은 기록영역 대부분(98.9%)을 재생했을 때와 기록영역 중심부의 작은 부분(15.0%)을 재생했을 때의 차이가 거의 보이지 않았지만 나중에 기

록한 홀로그램 사이의 혼선잡음은 큰 차이를 보였다.

모형에 따르면 먼저 기록한 홀로그램을 재생할 때 광폴리머의 상태는 Fig. 5의 (c)이다. 이 때 홀로그램의 에돌이발은 주기적으로 나란히 배열되어 있으며 기록영역의 가운데와 가장자리에서 동일한 에돌이발 벡터를 가진다. 그렇기 때문에 먼저 기록한 홀로그램의 경우 재생영역을 작게 잡거나 크게 잡거나 상관없이 같은 정도의 혼선잡음을 보인다.

하지만 나중에 기록한 홀로그램의 경우는 모형에 따라 Fig. 6의 (b)가 된다. 이 때 홀로그램은 국소적으로는 하나의 에돌이발 벡터를 가진다고 볼 수 있지만 기록영역 전체를 보면 수 많은 에돌이발 벡터가 섞여있다고 볼 수 있다. 그렇기 때문에 기록영역 중심부의 작은 부분만을 재생하면 하나의 에돌이발 벡터에 의한 홀로그램만 재생되기 때문에 혼선잡음이 작으나, 기록영역 대부분을 재생하면 수 많은 에돌이발 벡터가 섞여서 재생되기 때문에 혼선잡음이 커진다.

3.2.2 후노광 전후의 혼선잡음 해석

2.2 절의 실험에 따르면 후노광 전에는 먼저 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음이 컸으나 후노광 뒤에는 나중에 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음이 커졌다.

모형에 따르면 먼저 기록한 홀로그램을 후노광 전에 재생할 때 광폴리머의 상태는 Fig. 5의 (b)이다. 이는 수 많은 에돌이발 벡터가 섞여있는 모양이며 그에 따라 혼선잡음도 커졌다고 볼 수 있다. 반면 후노광을 거치고 나면 먼저 기록한 홀로그램은 Fig. 5의 (c)의 모양이 되어 하나의 에돌이발 벡터로 이루어진 홀로그램임을 알 수 있다. 그렇기 때문에 후노광 뒤에는 먼저 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음이 작아진다.

모형에 따르면 나중에 기록한 홀로그램을 후노광 전에 재생할 때 광폴리머의 상태는 Fig. 6의 (a)이다. 비록 광폴리머는 불균일하게 수축되어 있는 상태지만 홀로그램은 기록영역 전체에 걸쳐 하나의 에돌이발 벡터를 갖는다. 그러므로 후노광 전에는 나중에 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음은 작게 나타난다. 하지만 후노광을 거치면 광폴리머의 상태는 Fig. 6의 (b)가 되어 기록영역 전체로 보면 홀로그램에는 수 많은 에돌이발 벡터가 섞여있는 상태가 된다. 그러므로 후노광 뒤에는 나중에 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음이 커진다.

3.2.3 중첩기록에 따른 혼선잡음 해석

2.3절의 실험에서 먼저 기록한 홀로그램 사이의 혼선잡음이 중첩기록을 함에 따라 점차적으로 커짐이 관측되었다.

모형에 따르면 먼저 기록한 홀로그램은 Fig. 5의 (a)이며 증첩기록을 해감에 따라 Fig. 5의 (b)로 변형된다고 볼 수 있다. Fig. 5의 (b)는 수 많은 에돌이발 벡터가 섞여있는 상태로 재생할 때 혼선잡음이 크게 나타난다. 홀로그램을 증첩할 때마다 변형이 조금씩 심해지게 되며 그에 따라 혼선잡음도 심해진다고 볼 수 있다.

4. 결론

(1) 재생영역에 따른 혼선잡음 실험 (2) 후노광 전후의 혼선잡음 실험 (3) 증첩기록에 따른 혼선잡음 실험의 세 가지 실험을 통해서 두꺼운 광폴리머에 증첩기록 할 때에 나타나는 혼선잡음을 관측하였고 그 경향을 파악하였다. 광폴리머의 불균일한 수축을 고려한 모형을 제시하였으며 제시한 모형으로 위 세 실험의 결과를 모순 없이 설명하였다. 본 논문은 각도증첩의 경우만 실험으로 보였지만 제시한 해석 모형은 수축을 일으키는 광폴리머에 대해서 특정한 증첩방법과 상관없이 적용할 수 있다.

관측으로 나타난 혼선잡음과 광폴리머의 수축 사이의 관계를 구체적으로 연결해주는 본 논문의 결과를 고려하여 기록하고 재생한다면, 데이터를 포함한 실제 저장장치를 제작할 때 혼선잡음이 적은 좋은 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

앞으로 수축을 일으키는 구체적인 원인을 밝혀내며, 그에 따른 수학적 모형을 구하는 일이 진행될 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대 신기술 개발사업 중 전자부품연구원이 총괄 관리하는 "차세대 대용량 정보저장장치의 개발" 사업의 지원으로 (주)대우일렉트로닉스에서 수행되었다. (00008145)

참고문헌

- [1] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox (Eds.), 2000, "Holographic data storage," Springer, pp.3-20

- [2] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, 1995, "Volume holographic memory system: techniques and architectures," *Opt. Eng.*, Vol.34, No.8, pp.2193-2203
- [3] X. Yi, P. Yeh, C. Gu, and S. Campbell, 1999, "Crosstalk in volume holographic memory," *Proc. IEEE*, Vol.87, No.11, pp.1912-1930
- [4] D. A. Waldman, H. -Y. S. Li, and M. G. Horner, 1997, "Volume shrinkage in slant fringe grating of a cationic ring-opening holographic recording material," *J. Imaging Sci. Tech.*, Vol.41, No.5, pp.497-514
- [5] G. Zhao and P. Mouroulis, 1994, "Diffusion model of hologram formation in dry photopolymer materials," *J. Mod. Opt.*, Vol.41, No.10, pp.1929-1939