

홀로그래픽 저장장치의 실시간 광 노출시간 제어 Real-time Beam Exposure Time Control of Holographic Data Storage

한초록[†], 김낙영*, 송희찬**, 임성용**, 박노철**, 박영필**, 양현석**
Cho-Lok Han[†], Nakyeong Kim*, HeeChan Song**, Sung-Yong Lim**
Hyunseok Yang**, No-Cheol Park** and Young-Pil Park**

(2010년 9월 8일 접수; 2010년 9월 15일 심사완료; 2010년 9월 17일 게재확정)

Abstract

Holographic data storage system is one of next generation high density optical memories. Thereby storing multiple data pages using multiplexing method in one spot, we can achieve high store density and fast access time. However, for uniform writing, we must control exposure time properly by the change of writing material characteristics. Many studies have been investigated about exposure time scheduling. However, once it is decided, we cannot change the scheduled time. Therefore, it is hard to obtain uniform data intensity. In this study, we propose exposure time control method using additional red beam as the monitoring signal. Through reconstructed red beam intensity in real time, we can adjust exposure time by the writing condition change. We construct compensation method mathematically and verify the feasibility of proposed method through the experiments.

Key Words : 홀로그래픽 정보저장장치 (Holographic Data Storage)

1. 서론

홀로그래픽 정보저장장치는 디지털 정보를 페이지 단위로 다중 기록함으로써 높은 데이터 전송률과 고밀도 기록이 가능한 장점을 지닌 차세대 정보저장장치이다 [1-2].

홀로그래픽 정보저장장치에서는 지금까지 여러 종류의 기록물질을 사용해왔다. 그 중 포토폴리머 (Photopolymer) 는 한번 쓰고 계속 읽을 수 있는 WORM (Write Once, Read Many) 형태의 기록물질로서 모노머 (Monomer) 라는 분자로 구성되어 있다.

Figure 1 은 포토폴리머 안에서 데이터가 형성되

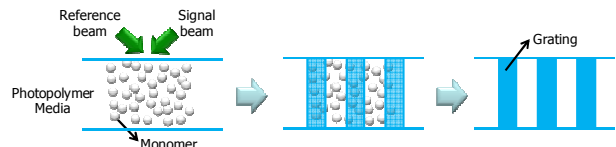


Fig. 1 Mechanism of hologram formation in photopolymer system

는 과정을 나타낸다 [1]. 포토폴리머에 빛이 입사되면 불특정하게 분포되어 있던 모노머들이 반응을 일으키며 입사되는 빛의 세기가 강한 쪽으로 이동을 한다. 빛이 입사되는 동안 모노머가 밀집되어 있는 부분과 그렇지 않은 부분이 포토폴리머 내의 굴절률 차이를 만들면서 격자무늬 (Grating) 를 형성하게 되고 이 격자무늬가 곧 페이지 단위의 데이터가 된다.

포토폴리머의 주 성분인 모노머는 앞서 언급한 기록과정을 보면 알 수 있듯이 빛에 매우 민감한 특성을 가지고 있다. 이러한 민감도는 회절 효율에 비례하고 기록 물질에 가해지는 빔의 강도,

[†] 연세대학교 정보저장기기 연구센터

E-mail : hsyang@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4677 FAX : (02)365-8460

* 연세대학교 정보저장공학 협동과정

** 연세대학교 기계공학과

빔의 조사 시간 등에 반비례한다 [1]. 모노머의 민감도가 감소하면 같은 시간 동안 빔을 조사하더라도 그 기록 효율은 큰 비율로 감소하게 된다. 하지만 다중 기록을 위해서 모노머는 수 십 번씩, 많게는 수 백 번씩 빔을 조사받기 때문에 그에 따라 민감도가 감소하여 회절효율 또한 감소한다. 이렇게 되면 데이터를 재생할 때 나중에 기록된 데이터일수록 온전한 데이터의 재생이 어려워진다.

본 연구에서는 민감도가 감소하더라도 균일한 회절 효율로 재생할 수 있도록 기록 시 빔의 조사시간을 실시간으로 제어하는 방법을 제안하였다. 또 제안된 방법을 실험을 통해 확인함으로써 그 방법에 대한 가능성을 확인하였다.

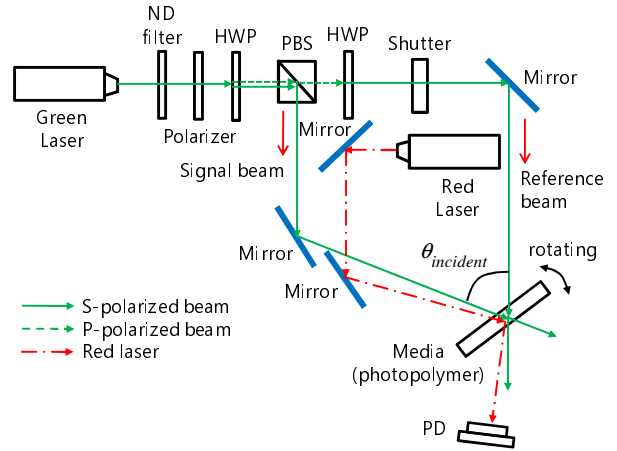
2. 실시간 재생 빔 강도 측정 방법

포토폴리머는 빔이 조사되면서 데이터가 기록되는 동시에 실시간으로 구축되는 이미지를 재생하는 것이 가능하다 [1]. 또한 평행광 (Collimated light) 조건 하에서 파장, 편광 방향에 영향을 받지 않고 데이터 재생이 가능하다. 포토폴리머는 기록에 사용되는 빔의 파장에 적합하게 제작 되기 때문에 특정 파장 이외에는 반응을 하지 않는다. 따라서 우리는 데이터를 실시간으로 재생하기 위해 적색 빔을 사용하였다. 적색 빔을 사용하면 녹색 빔에만 반응하는 포토폴리머를 사용하였을 때 데이터를 기록하는 과정에 영향을 주지 않으면서 실시간으로 데이터의 재생이 가능하다. 또한 기록에 사용되는 녹색 빔과 적색 빔은 파장이 서로 다르기 때문에 브래그 조건 (Bragg condition) 이 달라져 녹색 빔이 재생되어 나오는 각도와 적색 빔이 재생되어 나오는 각도가 서로 다르다. 따라서 적색 빔의 강도만 측정을 할 수가 있다.

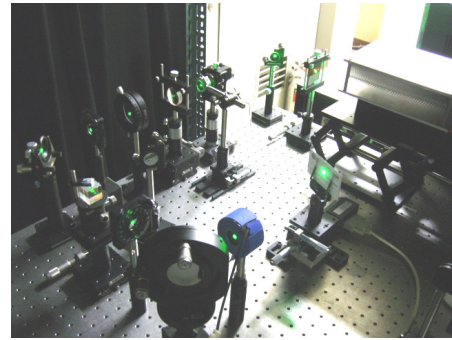
브래그 조건을 만족하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\theta_{incident} = -\theta_B = -\sin^{-1}\left(\frac{\lambda_0}{2n_0\Lambda}\right) \quad (1)$$

여기서 $\theta_{incident}$ 는 참조빔이 입사되는 각도 (정보



(a) Schematic diagram



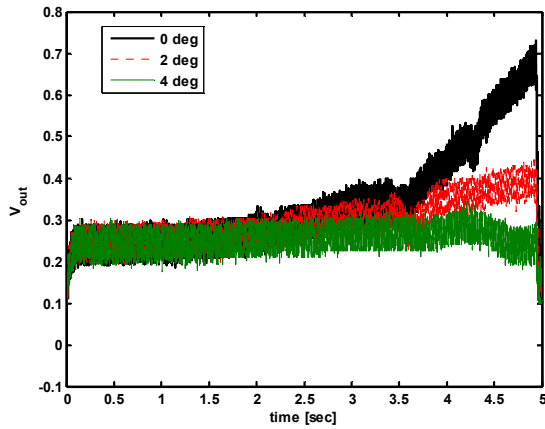
(b) Real system

Fig. 2 Experimental set-up

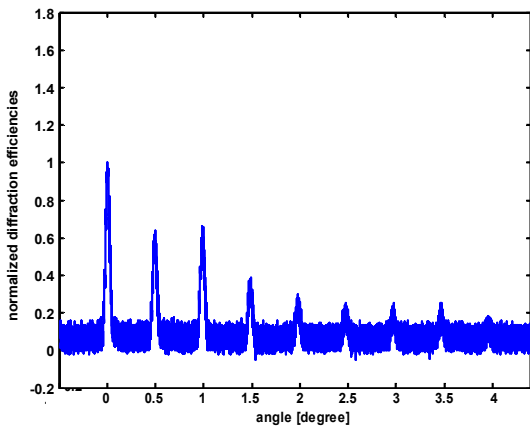
빔 기준), θ_B 는 브래그 각, λ_0 는 입사 빔의 파장, n_0 는 굴절률, Λ 는 격자 공간 (Grating space) 을 나타낸다 [3]. 녹색 빔에 대한 입사각을 결정 한 후 격자 공간, 굴절률의 영향이 무시할 수 있을 만큼 작다는 가정 하에 적색 빔의 파장을 대입하면 적색 빔과 녹색 빔 사이의 브래그 조건을 만족시키기 위한 각도가 결정된다. 이를 통해서 적색 빔에 의해 기록된 데이터가 적색 빔에 의해 가장 강하게 재생되는 위치를 찾을 수 있다.

3. 사전 실험

Figure 2에서 실험에 사용된 장비 구성이 나타나 있다. 기록 과정에서 적색 빔의 강도와 기록 후의 재생 효율이 가지는 관계를 찾기 위해 진행된 사전 실험은 두 가지 방법으로 진행되었다.



(a) During writing



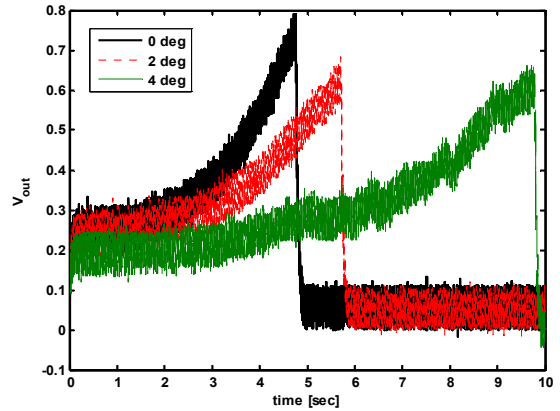
(b) After writing

Fig. 3 Reading beam intensity : expose green beam in equal time to each page

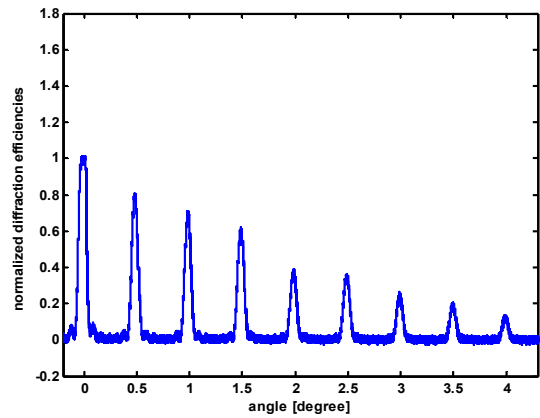
첫 번째 실험에 사용된 참조빔의 강도는 0.69 mW, 정보빔은 0.51 mW이며 0.5°에 한 페이지씩 5 초간 균일하게 기록을 하였다. Figure 3(a)는 녹색 빔에 의해 실시간으로 구축되고 있는 이미지를 적색 빔으로 재생하였을 때 0°, 2°, 4° 에서의 강도를 나타낸다. 첫 페이지가 기록된 0° 를 기준으로 다중 기록이 계속될수록 적색 빔의 강도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

기록과정이 완료된 후에 데이터를 재생하면 figure 3(b)와 같이 재생 효율이 균일하지 않은 것을 볼 수 있다.

두 번째 실험은 첫 번째 실험과 같은 조건에서 균일한 시간으로 기록하지 않고 각 페이지마다



(a) During writing



(b) After writing

Fig. 4 Reading beam intensity : expose green beam in equal red beam intensity

빔을 조사하는 시간을 변경하였다. 시간을 조절하는 기준으로는 적색 빔의 실시간 재생 강도를 사용하였다. 이를 측정함으로써 적색 빔의 재생 강도가 고정된 기준 값에 도달하였을 때 셔터를 차단함으로써 기록 시간을 조절하였다.

Figure 4에서 두 번째 실험에 의한 결과를 나타내었다. 이와 같은 방식으로 실험을 진행한 결과 기록시간이 다중 기록을 할수록 점차 길어지면서 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 하지만 모든 기록을 마친 후 데이터를 재생했을 때 그 효율이 균일하지 않았다. 따라서 이를 보상해주기 위한 방법이 필요하다.

4. 균일한 기록을 위한 보상법 및 실험 결과

재생되는 적색 빔의 강도가 균일할 때 셔터를 차단함으로써 각 페이지에 입사되는 에너지를 조절하면 기록 후의 데이터 재생 효율은 지수적으로 감소한다. 이를 바탕으로 한 균일한 기록을 위한 보상 방법은 다음과 같다.

적색 빔의 실시간 재생 강도와 재생 효율에 대한 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\eta_n \propto e^{-V_1\theta} \Rightarrow \eta_o \propto V_1 e^{-V_1\theta} \quad (2)$$

여기서 η_n 은 첫 번째 페이지에 대해 정규화 된 재생 효율이고 V_1 은 첫 번째 페이지의 실시간

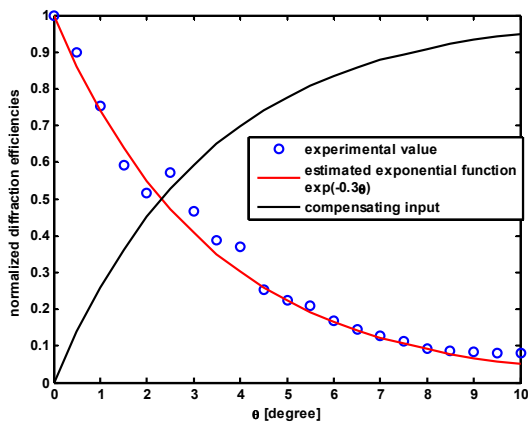
적색 빔 재생 강도이다. θ 는 데이터가 기록된 위치를 각도로 표시한 것이고 η_o 는 재생 효율을 나타낸다. Figure 5에서 3절에서 언급한 두 번째 실험 데이터가 지수함수를 따라 감소하는 것을 두 가지 경우에 대해 나타내었다. 이 데이터는 V_1 이 어떤 값을 가지느냐에 따라서 n 번째 페이지의 재생 강도인 V_n 의 값이 결정된다는 것을 가시적으로 보여주고 있다. 이러한 결과를 고려했을 때 균일한 재생 효율을 얻기 위해 추가로 얻어지는 실시간 적색 빔 재생 강도 V_{nc} 는 지수적으로 증가하는 경향을 가지게 된다.

각 페이지마다 보상되는 값 V_{nc} 는 아래와 같다.

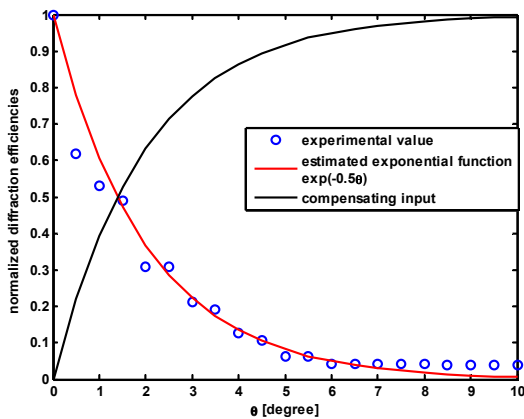
$$V_{nc} = V_1(1 - e^{-V_1\theta}) \quad (3)$$

최종적으로 균일한 재생 효율을 위해 얻어져야 하는 각 페이지의 재생 강도 V_o 는 V_1 와 V_{nc} 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_o &= V_1 + V_{nc} = V_1(2 - e^{-V_1\theta}) \\ n &= 1, 2, 3, \dots \\ \theta &= 0.5(n-1) \end{aligned} \quad (4)$$



(a) Output 0.3V



(b) Output 0.5V

Fig. 5 Normalized diffraction efficiency : shutter off at equal real-time red laser intensity

Figure 6은 보상 방법을 적용시켰을 때 대한 기록 후의 정규화 된 재생 효율이다. 보상 방법을 적용시키지 않았을 때의 재생 효율인 figure 3(b)와 비교해 보았을 때 그 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. Table 1은 보상법이 적용되었을 때와 적용되지 않았을 때에 대한 재생효율을 비율적으로 나타냄으로써 다중 기록이 될수록 보상법에 의한 성능 향상이 증가함을 볼 수 있다.

5. 결론

포토폴리머는 빛에 매우 민감한 물질이다. 홀로그래픽 정보저장장치는 그 특성을 이용해

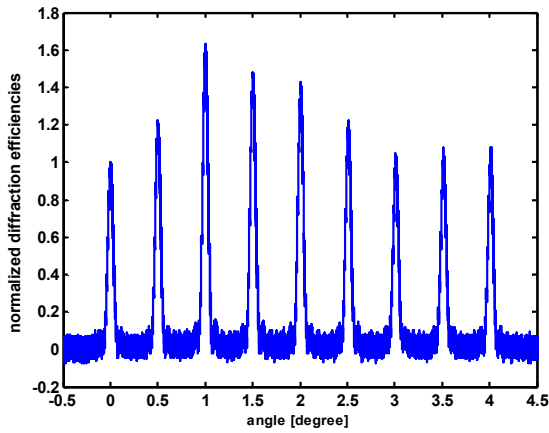


Fig. 6 Normalized diffraction efficiency with compensation

Table 1 Normalized diffraction efficiency

Angle [deg]	Normalized diffraction efficiency		Diffraction efficiency ratio $\frac{\eta_w}{\eta_{wo}}$
	Without compensation	With compensation	
0	1	1	1
0.5	0.67	1.23	1.84
1	0.7	1.64	2.34
1.5	0.4	1.5	3.75
2	0.32	1.44	4.5
2.5	0.26	1.23	4.73
3	0.27	1.05	3.89
3.5	0.26	1.09	4.19
4	0.19	1.09	5.74

데이터를 기록하지만 다중 기록이 계속 될수록 재생 효율이 감소하는 현상을 보인다. 이를 보완하기 위해 데이터 기록 도중에 재생되는 적색 빔의 강도를 측정함으로써 실시간으로 데이터가 구축되는 정도를 알 수 있었다. 사전 실험 결과 재생 효율이 지수적으로 감소한다는 것을 확인하였고 이를 역으로 이용하여 재생 빔의 강도를 지수적으로 증가시키는 보상 방법을 수학적으로 제안하였다. 보상되지 않은 시스템에서는 다중 기록이 계속될수록 정규화된 재생 효율이 0.19 까지 감소하는 모습을 보이는 반면 보상 방법을 적용시킨 시스템에서는 모든

페이지에서 정규화된 재생 효율이 1 보다 크게 나타나 결과적으로 제안된 보상 방법이 재생 효율 성능을 향상시키는 것을 확인하였다.

후기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0028140).

참고문헌

- [1] Hans J.Coufal, Demetri Psaltis and Glen T. Sincerbox, 2000, "Holographic Data Storage", Springer.
- [2] Geoffrey W, Burr, C. Michael Jefferson, Hans Coufal, Mark Jurich, John A. Hoffnagle et al., 2001, "Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in²", Optics Letters, Vol. 26, No. 7, pp.444-446.
- [3] Pochi Yeh, 1993, "Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics", Wiley-Interscience.