

Phase-code multiplexing 시스템에서 홀로그래프의 중첩기록 및 복원

Holographic optical memory in phase-code multiplexing system

김 유 현, 이 연 호

성균관대학교

정보통신 공학부

광굴절 결정체가 홀로그래픽 저장 매체로 이용될 수 있음이 Chen^[1]에 의해 제시된 이후, 광굴절 결정체는 대용량 광메모리로서 관심의 초점이 되었다. 그리하여 홀로그래픽 기법을 이용하여 이미지를 광굴절 결정체에 저장시키는 방법에 대한 연구가 광범위하게 이루어져 왔다. 보통 여러개의 홀로그래프를 저장 매체인 광굴절 결정체에 중첩하여 저장하는 경우, 먼저 기록된 홀로그래프가 뒤이어 기록되는 홀로그래프들에 의해서 지워지기 때문에 먼저 기록된 홀로그래프의 복원이 어려워진다. 이런 문제점을 보완하기 위해서 나중에 기록될 홀로그래프의 기록시간을 이전에 기록된 홀로그래프의 기록시간보다 더 짧게 해서 기록하는 방법이 대두되었다. Burke와 Sheng^[2]은 광굴절 결정체에 기록되는 각 홀로그래프의 순번에 역비례하는 기록시간으로 각 홀로그래프를 순차적으로 기록하는 방법을 처음으로 제시하였다. Psaltis *et al.*^[3]은 하나의 홀로그래프가 지수함수적으로 기록된다는 점과 그 홀로그래프는 또한 그 전까지 기록된 홀로그래프들을 지수함수적으로 지운다는 점을 고려하여 각 홀로그래프의 기록시간이 홀로그래프의 순번에 역비례한다는 것을 수식적으로 유도하였다. 한편, Strasser *et al.*^[4]은 중첩 저장된 홀로그래프의 회절효율이 기록시간에 의해 결정된다는 점을 고려하여 각 홀로그래프의 상대적인 기록시간이 지수함수적으로 감소하는 형태로 주어져야 한다고 가정하고 실험을 실시하였다.

본 논문에서는 Phase-code multiplexing 시스템에서 중첩 저장된 홀로그래프의 회절효율이 $\pm 5\%$ 의 오차 이내로 균일하게 주어지도록 컴퓨터 모의실험을 이용하여 각각의 홀로그래프의 기록시간을 계산하였다. 그 다음 이러한 기록시간을 표현할 수 있는 수학적 공식을 유도하였다. 그 다음 이러한 이론공식으로부터 구한 각 홀로그래프 기록시간을 이용하여 서로 다른 4개의 홀로그래프를 BaTiO₃ 결정체에 기록한 후 그 회절효율을 실험적으로 측정하였다. 이러한 실험에서 측정된 각 홀로그래프의 회절효율이 $\pm 15\%$ 이내의 오차로 균일하게 주어짐을 확인하였다.

일반적으로 Phase-code multiplexing 방법에서는 기준빔을 여러개의 픽셀로 나누어 각각의 픽셀에 Walsh-Hadamard 코드를 인가한다. 여기서 Walsh-Hadamard 코드의 0 혹은 1은 기준빔의 위상 0° 혹은 180° 에 해당한다. 본 논문의 모의실험에서는 기준빔이 8개의 픽셀로 구성되어 있다고 가정한다. 위상코드가 인가된 기준빔(그림 1의 R1~R8)을 신호빔과 교차시키면 각 지점(그림 1의 A~H)에는 독립적인 광굴절 격자가 형성된다. 그리하여 이 경우 신호빔에 포함된 광정보가 그림 1에서와 같이 8개의 광굴절 격자에 분산되어 기록된다. 그 다음 홀로그래프를 복원하기 위해 위상코드가 인가된 기준빔을 결정체에 입사시키면 기준빔의 각 픽셀은 해당 지점의 광굴절 격자에 의해 Bragg 회절되고 이들 Bragg 회절된 빔들이 합해져서 복원 홀로그래프의 신호를 형성한다. 만약에 홀로그래프 복원에 사용되는 위상코드가 홀로그래프 기록에 사용된 위상코드와 일치하지 않은 경우에는 각 지점에서 Bragg 회절된 빔들 사이에서 상호간섭이 이루어지므로 해당 홀로그래프가 복원되지 않는다.

본 모의실험에는 첫째로, 기록된 8개 홀로그래프의 회절효율이 $\pm 5\%$ 오차 이내로 주어지도록 각 홀로그래프의 기록시간 t_w 를 계산한다. 이 경우 8개 기록시간의 합이 광굴절 결정체의 기록시상수(Rise time constant) τ_R 이 되도록 한다. 또한 이러한 기록시간의 상대적인 크기를 비교하기 위하여 다음과 같이 정규화를 실시한다.

$$H(N) = \text{Ln} \left[\left(\frac{P_s}{8} \right) \left(\frac{t_N}{\tau_R} \right) * 100 \right] \quad (1)$$

여기서 N은 기록되는 홀로그램의 순번, P_s는 기준빔의 픽셀 수 (본 모의실험에서 P_s=8)를 의미하고 100은 자연로그의 값이 영보다 크게 하기 위해 도입하였다. 이런 방법으로 모의실험을 통하여 얻은 각 홀로그램의 기록시간이 그림 2에서 마름모, 세모, 네모, 혹은 동그라미등의 데이터로 표시되었다. 이 경우 서로 다른 데이터는 홀로그램 기록에 사용된 신호빔과 기준빔의 빔세기 변조율을 변화시키면서 얻은 값들이다.

그 다음 본 논문에서는 이러한 홀로그램 기록시간을 하나의 수학적인 공식으로 유도하기 위하여 아래의 식 (2)와 같이 정규화된 기록시간 H(N)이 홀로그램 순번 N의 power series 로 표시된다고 가정한다.

$$H(N) = a \left[\left(\frac{8}{P_s} \right) N \right]^3 + b \left[\left(\frac{8}{P_s} \right) N \right]^2 + c \left[\left(\frac{8}{P_s} \right) N \right] + d \quad (2)$$

여기서 a, b, c 및 d는 상수들이다. 이러한 상수들은 식 (2)를 그림 2의 모의실험 데이터에 line fitting하여 구한다. 그림 2의 실선은 홀로그램 기록시간에 대한 이론식 (2)를 표시한다.

그 다음 기록시간에 대한 이론식 (2)가 얻어지면 식 (1)로부터 각 홀로그램이 기록되는 시간을 계산하기 위한 이론식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$t_N = \left(\frac{8}{P_s} \right) \left(\frac{\tau_R}{100} \right) \exp[H(N)] \quad (3)$$

본 연구에서 유도한 이론식이 어느 정도로 정확한지를 알아보기 위하여 식 (3)에서 구한 기록시간을 이용하여 홀로그램의 기록을 컴퓨터 모의실험하였다. 이런 방법으로 기록된 8개의 홀로그램의 회절효율을 홀로그램 순번 N의 함수로 그림 3에 나타내었다. 여기서 서로 다른 데이터는 홀로그램 기록에 사용된 신호빔과 기준빔간

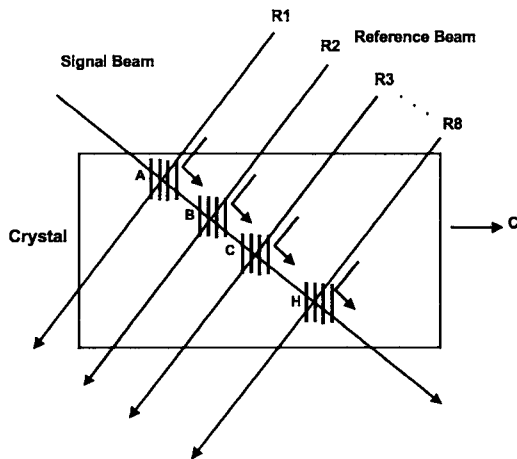


그림 1. 8개의 픽셀로 구성된 기준빔을 이용한 홀로그램 중첩 저장 및 복원을 위한 개략도

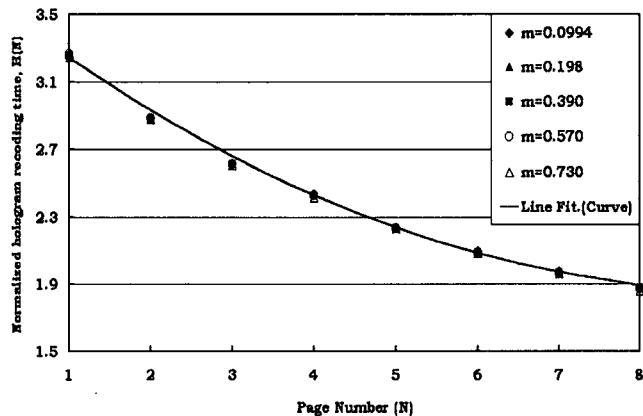


그림 2. 모의실험에서 얻은 정규화된 기록시간을 홀로그램 순번 N의 함수로 표시(서로 다른 빔세기 변조율에 대하여 모의실험을 실시). 실선은 본 논문에서 유도한 이론 공식을 표시.

의 빔세기 변조율의 변화를 의미한다. 이 경우 홀로그래ムの 회절효율은 약 $\pm 8\%$ 이내의 오차로 균일하게 주어진다.

그림 4는 Phase-code multiplexing 시스템에서 여러개의 홀로그래ムの 중첩 저장 및 복원을 위한 실험 장치도이다.

그림 5는 기준빔이 4 픽셀로 이루어진 경우, 이론식 (3)으로부터 구한 기록시간을 이용하여 4개의 서로 다른 홀로그래మ్을 중첩저장한 후 복원하였을 때 측정된 신호빔의 크기를 표시한다. 이러한 실험에서 복원되는 홀로그래మ్의 회절효율은 $\pm 15\%$ 이내의 오차 범위내에서 균일하게 주어진다. 그림 6은 Burke가 제시한 방법 즉, 각 홀로그래మ్의 순번에 역비례하는 기록시간으로 4개의 홀로그래మ్을 순차적으로 중첩 저장한 후, 복원할 때 회절빔의 크기를 측정된 결과이다. 그림 7은 Strasser가 제시한 방법 즉, 지수함수적으로 감소하는 기록시간을 이용하여 4개의 홀로그래మ్을 순차적으로 중첩 저장한 후, 복원할 때 회절빔의 크기를 측정된 결과이다.

본 논문에서는 Phase-code multiplexing 시스템에서의 홀로그래మ్의 중첩 저장 및 복원을 모의실험하기 위한 컴퓨터 프로그램을 완성하였다. 그 다음 컴퓨터 모의실험을 이용하여 회절효율이 균일하게 주어지는 각 홀로그래మ్의 기록시간을 계산하였다. 그 다음 이러한 기록시간을 예측하기 위한 이론공식을 유도하였다. 이러한 이론공식으로부터의 기록시간을 이용하여 4개의 홀로그래మ్을 중첩 기록한 결과 그 회절효율이 $\pm 15\%$ 이내의 오차 범위내에서 균일하게 얻을 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. 또한 Phase-code multiplexing 기법으로 홀로그래మ్을 중첩할 경우에는 본 논문에서 제시한 새로운 Recording Schedule 방법을 이용하면 기존의 방법에 비해 매우 개선됨을 알 수 있다.

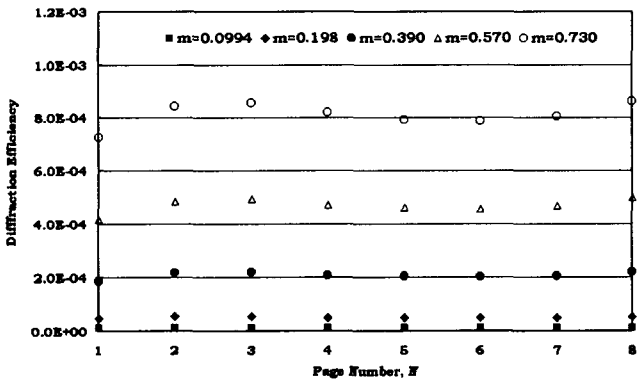


그림 3. 서로 다른 변조율에 대해서 이론공식로부터 예측한 기록시간을 사용하여 8개의 홀로그래మ్을 중첩 저장한 후, 각 홀로그래మ్을 복원할 때의 회절효율

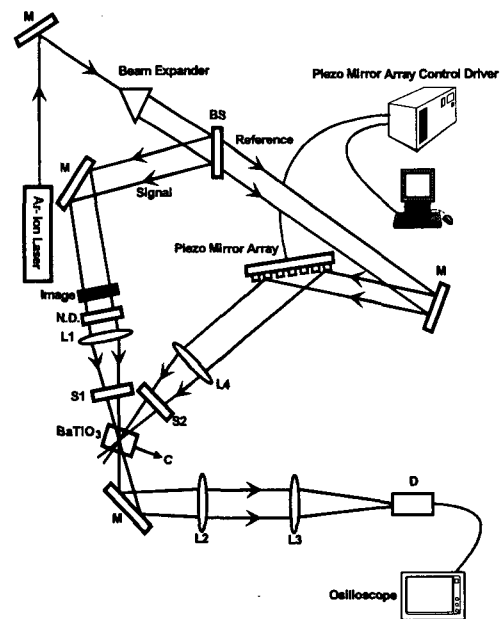


그림 4. Phase-code multiplexing 방법을 이용한 홀로그래మ్ 중첩 저장 및 복원을 위한 실험 장치도

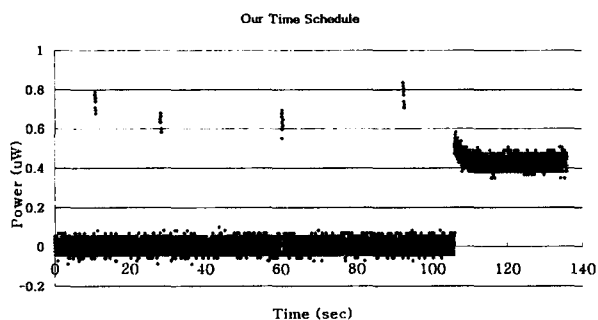


그림 5. 본 논문에서 제시한 이론 공식으로부터 얻은 기록시간을 이용하여 4개의 홀로그램을 기록한 후, 복원하였을 때의 회절빔의 크기

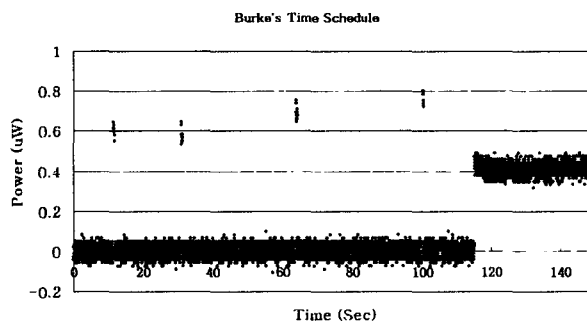


그림 6. Burke가 제시한 홀로그램의 순번의 역수에 하는 기록시간을 이용하는 4개의 홀로그램을 기록한 후 복원하였을 때의 회절빔의 크기

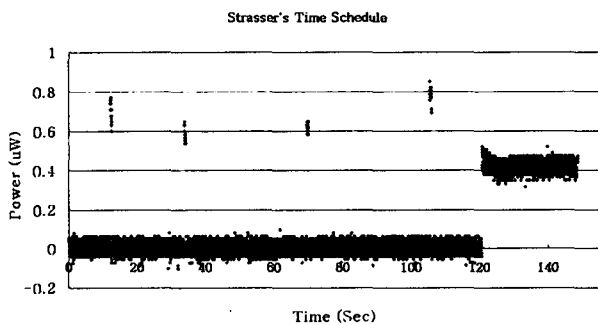


그림 7. Strasser가 제시한 지수함수적으로 감소하는 기록시간을 이용하여 4개의 홀로그램을 기록한 후, 복원하였을 때의 회절빔의 크기

참고문헌

[1] F. S. Chen, J. T. LaMacchia, and D. B. Fraser, "Holographic storage in Lithium Niobate", Appl. Phys. Lett., 13(7), pp. 223, 1968

[2] W.J. Burke and Ping Sheng, "Crosstalk noise from multiple thick-phase holograms," J. Appl. Phys., 48(2), 681, 1977.

[3] D. Psaltis, D. Brady, and K. Wagner, "Adaptive optical networks using photorefractive crystals," Appl. Opt., 27(9), 1752, 1988.

[4] A.C. Strasser, E.S. Maniloff, K.M. Johnson, and S.D.D. Goggin, "Procedure for recording multiple-exposure holograms with equal diffraction efficiency in photorefractive media," Opt. Lett., 14(1), 6, 1989.

T
B