

점광원 출력광의 이동 결과를 물체파로 사용하는 홀로그래프의 기록과 3차원 상의 재생*

이 승 걸

인하대학교 전자재료공학과

M. E. Marhic

Northwestern, University Evanston, Illinois, U.S.A.

(1995년 7월 29일 받음)

본 논문에서는 가상적인 물체를 기록하고 재생하는 새로운 홀로그래프 기록방법인 scanned-object holography를 제안하였으며 그 가능성을 이론과 실험을 통해 증명하였다. 이 방법에서는 점광원으로부터 방출되는 구면파의 이동결과와 정지된 기준파를 연속적으로 간섭시킴으로서 점광원의 이동 경로로 표현되는 가상적인 물체를 기록할 수 있었다. 이때 점광원을 실험적으로 구현하기 위해 광섬유 출력단과 펄스형 레이저를 사용하였다.

I. 서 론

일반적으로 홀로그래프(hologram)은 정지 상태의 물체(object)로부터 산란된 물체파(object beam)와 기준파(reference beam)의 간섭에 의해 기록된다. 그러므로 홀로그래프를 기록하기 위해서는 물체가 주어져야 하며, 몇 가지 예외가 있긴 하지만^[1] 물체파나 기준파 등이 홀로그래프 기록동안 진동 없이 안정되게 유지되어야 한다.

일반적인 홀로그래프 기록과 달리 존재하지 않는 물체를 홀로그래프로 기록할 수 있다면, 가상적인 물체의 3차원 시각화, 3차원 상의 전송 및 재현과 같은 다양한 응용을 기대할 수 있을 것이다. 이러한 시도는 computer-generated holography^[2,4]의 한 응용분야로서 연구되어 왔으나, 기록 장치의 space-bandwidth product가 한정되어 있고 많은 계산량이 요구되는 관계로 실질적인 이용이 용이하지는 않다. 여기서 존재하지 않는 물체란 물체의 존재 유무에 상관없이, 수치적인 정보에 의해 그 형상이 정의되는 물체를 의미하며 CAD 분야에서 이러한 정보는 흔히 다루어진다.

그런데, 물체를 점광원(point source)의 집합으로 간

주할 수 있으며 이들 점광원으로부터 방출되는 구면파의 중첩결과는 홀로그래프 기록과정에서 물체파를 대신할 수 있을 것이다. 이 점에 착안하여 존재하지 않는 물체의 홀로그래프를 기록하고자 한다. 즉, 물체 대신에 물체와 같은 형상으로 점광원들을 배열시킬 수만 있다면, 점광원들로부터 방출된 구면파를 통해 가상적인 물체의 홀로그래프를 기록하고 3차원 상을 재생할 수 있다.

그러나 수많은 점광원들을 공간에 배열시킨다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 점광원을 배열하는 대신 하나의 점광원을 가상적인 물체의 형상을 따라 이동시키며 홀로그래프를 기록하는 방법을 제안하고자 한다. 이 경우 이동 중인 점광원으로부터 방출되는 구면파와 정지된 기준파를 간섭시켜 가상적인 물체의 홀로그래프를 기록하게 된다. 일종의 다중 홀로그래프(multiplex hologram)^[5]으로 볼 수 있으나, 제안된 방법은 가상적인 3차원 물체를 홀로그래프로 기록하고자 하는 것이므로 다중 홀로그래프와 구분되며, 본 논문에서는 이를 scanned-object holography(이하 SOH라 칭함)로 정의한다.

본문에서 먼저 SOH 원리 및 이론을 설명한 다음, 홀로그래프 기록에 관한 기존 이론과 비교하여 SOH 이론의 특성에 대해 논의한다. 다음으로 SOH를 실험적으로 구현하는 방법과 실험 결과를 논의하고 끝으로 본 논문의 결론을 맺는다.

*본 연구는 1992년도 인하대학교 연구비와 1994년도 교육부 기초과학육성연구비(BSRI-94-2429)의 지원에 의해 수행되었습니다.

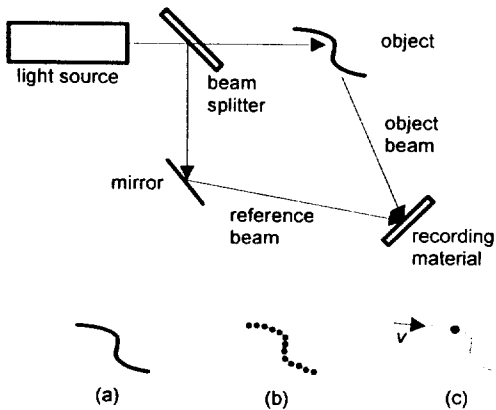


그림 1. Recording a hologram by interference of the reference beam with the object beam scattered from an object. (a) an object with the shape of a curve, (b) the spatial distribution of point sources on the same curve, and (c) a point source moving along the profile of the object.

II. 홀로그램 기록에 관한 기존 이론과 scanned-object holography의 비교

새로이 제안되는 SOH에 대한 이해를 돕기 위해, 그림 1을 통해 홀로그램 기록에 관한 기존 이론과 SOH 이론의 차이를 살펴본다. 그림 1에서 (a)는 홀로그램 기록에서 사용된 곡선 형태의 물체이며, (b)는 이를 대신하는 점광원들의 적절한 분포이고, (c)는 하나의 점광원이 v 의 속력으로 물체의 형상을 따라 이동하는 것을 의미한다.

그림 1의 실험 장치도에서와 같이 기존의 홀로그램 기록과정에서는 물체로부터 산란되는 물체파와 기준파가 기록매질 상에서 중첩되어 홀로그램이 기록된다^[6]. 한편, 장치도에 있는 물체[그림 1(a)와 동일]를 그림 1(b)와 같은 점광원들로 대체한다면, 배열된 각 점광원으로부터 방출된 모든 구면파의 중첩결과는 그림 1(a)로부터 산란된 물체파를 대신할 수 있다. 그러므로 모든 구면파의 중첩으로 주어지는 물체파와 기준파를 간섭시킴으로서 동일한 홀로그램을 얻게된다. 사실 그림 1(a)나 그림 1(b)를 물체로 사용하는 홀로그램 기록과정은 본질적으로 동일한 것으로 기존의 홀로그램 기록과정에 해당한다. 그러나, 물체가 존재하지 않을지라도 공간에 점광원들을 적절히 배열할 수 있다면, 가상적인 물체에 대한 홀로그램을 기록하고 재생할 수 있다는 점이 간과되어서는 안된다.

서론에서도 언급한 바와 같이 많은 수의 점광원을

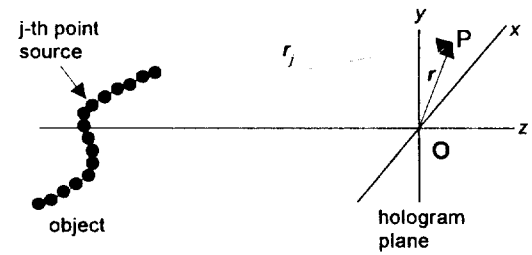


그림 2. A simplified 3-D object which is composed of point sources. The object beam is represented by the superposition of spherical waves from all point sources.

공간에 배열하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 SOH에서는 점광원의 공간적인 배열 대신에 하나의 점광원을 그림 1(c)처럼 이동시킴으로서 그림 1(b)의 효과를 얻고자 한다. 어떤 형상을 따라 이동하는 점광원으로부터 방출되는 구면파와 기준파를 간섭시킴으로서 점물체(point object)에 해당하는 홀로그램들이 연속적으로 기록될 것이며, 최종적으로 그림 1(a)와 같은 재생상(reconstructed image)을 얻게 될 것이다.

SOH의 실현 가능성은 이동하는 하나의 점광원이 점광원들의 공간적인 분포를 대체할 수 있는 가에 달려 있다. 그림 2에서처럼 곡선 형태를 갖는 3차원 물체를 가정하여 홀로그램 기록에 관한 기존 이론과 SOH 이론을 전개하고 두 가지 이론 결과를 비교한다. 여기서 기존 이론이란 점광원들의 공간적인 배열로부터 주어지는 홀로그램의 수학적 표현을 의미하며, SOH 이론이란 이동하는 하나의 점광원으로부터 주어지는 홀로그램의 표현을 의미한다. 이때 기준파는 z 축과 나란하게 입사하는 평면파이며, 물체파 혹은 점광원으로부터 방출되는 구면파와 기준파는 가간섭성(coherence)을 갖는다고 가정한다. 또한, 홀로그램 기록매질에 입사하는 모든 파는 y 축으로 선편광되었다고 가정하여 홀로그램 기록과정을 스칼라로 취급한다.

1. 홀로그램 기록에 관한 기존 이론

편의상, 그림 2의 물체를 점광원들의 적절한 배열로 근사하자. 물체의 형상을 따라 N 개의 점광원이 등간격으로 배열되어 있으며 배열된 N 개의 점광원이 동시에 같은 시간(T_{exp}) 동안 구면파를 방출한다. 물론 각 점광원으로부터 방출되는 구면파들은 서로 가간섭성을 갖는다고 가정한다. 이 절에서 유도된 표현식은 기존 이론에 따른 결과임을 나타내기 위해 모두 아래첨자 C 를 붙였다.

N 개의 점광원이 동시에 구면파를 방출하므로 홀로그래프 기록매질 상의 점 P 에서 물체파 $E_{OC}(r, t)$ 는 구면파들의 중첩에 의해 주어진다.

$$E_{OC}(r, t) = \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

식 (1)에서 r 은 점 P 의 위치벡터이며, r_j 는 그림 2에 표시된 것처럼 j -번째 점광원과 점 P 간의 거리이다. 또한 ω 는 빛의 각진동수이며 $E_{Oj}(r_j)$ 는 j -번째 점광원으로부터 방출되는 발산 구면파로서

$$E_{Oj}(r_j) = \frac{A_r}{r_j} \exp[i(kr_j + \phi)] \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 식 (2)에서 k , A_r , ϕ 는 각각 파수 벡터 (wavevector)의 크기, source strength, 초기 위상이다. 한편, 기준파는 z 축과 나란하게 입사하는 평면파로 가정하였으므로,

$$E_{RC}(r, t) = E_{R0} \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

와 같이 주어지며 E_{R0} 는 진폭을 의미한다. 이상의 결과에 의해 점 P 에서 물체파와 기준파의 중첩결과로 주어지는 합성과 $E_C(r, t)$ 의 표현은

$$E_C(r, t) = E_{OC}(r, t) + E_{RC}(r, t) \\ = \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) \exp(-i\omega t) + E_{R0} \exp(-i\omega t) \quad (4)$$

와 같으며 비례상수를 무시하면 식 (4)로부터 합성파의 세기(intensity) I_C 는

$$I_C(r) = E_C(r, t) \cdot E_C(r, t)^* = \left| \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) + E_{R0} \right|^2 \\ = |E_{R0}|^2 + \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{Ol}(r_l)^* + E_{Oj}(r_j)^* \cdot E_{Ol}(r_l)] \\ + \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) \cdot E_{R0}^* + \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j)^* \cdot E_{R0} \quad (5)$$

와 같이 주어진다.

물체파와 기준파가 T_{exp} 동안 기록매질에 입사하므로 점 P 에서 노출량 $P_C(r)$ 는

$$P_C(r) = \int_0^{T_{exp}} I_C(r) dt = I_C(r) T_{exp} \\ = T_{exp} |E_{R0}|^2 + T_{exp} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{Ol}(r_l)^* \\ + E_{Oj}(r_j)^* \cdot E_{Ol}(r_l)]$$

$$+ T_{exp} \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) \cdot E_{R0}^* + T_{exp} \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j)^* \cdot E_{R0} \quad (6)$$

로 주어진다.

식 (6)으로 표현되는 홀로그래프에 기준파와 동일한 빛을 입사시킴으로서 홀로그래프에 기록된 물체의 정보를 재생할 수 있다. 이 경우 식 (6)의 우변 항에서 세번째 및 네번째 항은 각각 물체의 허상과 실상을 형성하는데 기여하게 된다.

2. 홀로그래프 기록에 관한 SOH 이론

SOH 이론을 전개하기 위해서는 이동하는 점광원으로부터 방출되는 구면파와 정지된 기준파간의 간섭을 다루어야 하지만, 취급을 단순화하기 위해 이동하는 점광원 대신 다음과 같은 상황을 가정한다. 먼저 1절에서와 같이 물체의 형상을 따라 N 개의 점광원이 등간격으로 배열되어 있다고 가정한다. 그러나, 배열된 모든 점광원들이 동시에 구면파를 방출하는 것이 아니라 전체 노출시간 T_{exp} 중에 각 점광원들이 순차적으로 한번씩만 빛을 방출한다고 가정한다. 첫번째 점광원은 $t=0$ 부터 $t=t_p$ 까지 구면파를 방출하며 두번째 점광원은 $t=\tau$ 부터 $t=\tau+t_p$ 까지, 그리고 j -번째 점광원은 $t=(j-1)\tau$ 부터 $t=(j-1)\tau+t_p$ 까지 구면파를 방출한다고 가정한다. 그 외 다른 점광원들도 같은 방식을 따라 순차적으로 점멸하며 이와 동시에 기준파도 같은 유형으로 점멸한다고 가정한다. 이때 방출주기 τ 와 노출시간 T_{exp} 와의 관계는 $T_{exp} = N\tau$ 로 주어진다. 또한, 각 점광원으로부터 구면파가 방출되는 시간폭 t_p 를 $t_p < \tau$ 로 제한함으로써 어떤 시각에서 물체파는 한 광원으로부터 방출되는 구면파만으로 기술된다.

물체의 길이를 L 이라 한다면, 이러한 상황은 점광원이 $v=L/T_{exp}$ 의 속력으로 이동하며 구면파를 방출하는 상황을 근사적으로 묘사할 수 있을 것이다. 물론 점광원의 이동에 따른 각진동수의 Doppler shift가 무시될 수 있어야만 이러한 근사가 가능하다. 이렇게 설정된 상황에서 한 점광원으로부터 방출된 구면파와 기준파는 주기마다 간섭하여 홀로그래프를 형성하므로 전체 노출시간동안 모두 N 개의 홀로그래프가 동일한 기록매질 상에 중첩된다. 이때 점광원으로부터 방출된 구면파들은 시간적으로 중첩되지 않으므로 가간섭성을 가질 필요는 없으며, 단지 기준파와 동일한 상대위상을 유지하면 충분하다. SOH 이론의 결과식에는 아래첨자 S 를 붙여 1절의 결과와 구분한다.

편의상, 각 점광원으로부터 t_p 동안 방출되는 구면파의

파형을 사각 파형(square wave)으로 가정하자. 홀로그래프의 노출시간동안 물체파는 모든 점광원으로부터 방출되는 구면파들의 시간적인 합으로 주어지므로, 그 표현식은

$$E_{OS}(r, t) = \exp(-i\alpha t) \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) f(t, j) \quad (7)$$

와 같다. 여기서 $f(t, j)$ 는 각 점광원들로부터 구면파가 순차적으로 방출되는 것을 나타내는 함수로서 아래와 같이 정의된다.

$$f(t, j) = \begin{cases} 1 & (j-1)\tau < t < t_p - (j-1)\tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f(t, j) \times f(t, l) = \begin{cases} 0 & j \neq l \\ f(t, j) & j = l \end{cases} \quad (8)$$

점광원으로부터 방출되는 구면파와 같이 기준파도 순차적으로 방출되므로 그 표현식은

$$E_{RS}(r, t) = E_{R0} \exp(-i\alpha t) \sum_{j=1}^N f(t, j) \quad (9)$$

와 같이 주어진다. 이상의 표현으로부터 시간 t 에서 점 P에 입사된 합성파의 표현은

$$E_S(r, t) = E_{OS}(r, t) + E_{RS}(r, t)$$

$$= \exp(-i\alpha t) \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) f(t, j) + E_{R0} \exp(-i\alpha t) \sum_{j=1}^N f(t, j) \quad (10)$$

가 된다. 1절과 마찬가지로 비례상수를 무시할 때 합성파의 세기 I_S 는

$$I_S(r, t) = E_S(r, t) \cdot E_S^*(r, t)$$

$$= \left| \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) f(t, j) + E_{R0} \sum_{j=1}^N f(t, j) \right|^2$$

로 주어지며 식 (8)에 주어진 함수 $f(t, j)$ 의 성질을 이용하여 위식을 정돈하면

$$I_S(r, t) = |E_{R0}|^2 \sum_{j=1}^N f(t, j) + \sum_{j=1}^N |E_{Oj}(r_j)|^2 f(t, j) + \sum_{j=1}^N [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{R0}^* + E_{Oj}^*(r_j) \cdot E_{R0}] f(t, j) \quad (11)$$

와 같다. 이상의 결과로부터 T_{exp} 동안 점 P에 입사된 노

출량 $P_S(r)$ 를 구하면,

$$P_S(r) = \int_0^{T_{exp}} I_S(r, t) dt$$

$$= \int_0^{T_{exp}} \left[|E_{R0}|^2 \sum_{j=1}^N f(t, j) + \sum_{j=1}^N |E_{Oj}(r_j)|^2 f(t, j) + \sum_{j=1}^N [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{R0}^* + E_{Oj}^*(r_j) \cdot E_{R0}] f(t, j) \right] dt$$

$$= N t_p |E_{R0}|^2 + t_p \sum_{j=1}^N |E_{Oj}(r_j)|^2 + t_p \sum_{j=1}^N [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{R0}^* + E_{Oj}^*(r_j) \cdot E_{R0}]$$

$$P_S(r) = T_{exp} \frac{t_p}{\tau} |E_{R0}|^2 + t_p \sum_{j=1}^N |E_{Oj}(r_j)|^2 + t_p \sum_{j=1}^N E_{Oj}(r_j) \cdot E_{R0}^* + t_p \sum_{j=1}^N E_{Oj}^*(r_j) \cdot E_{R0} \quad (12)$$

로 표현된다.

식 (12)는 점광원들이 순차적으로 구면파를 방출한다는 가정 하에서 유도된 홀로그래프의 수학적인 표현이지만, 점광원의 수 N 을 무한대로 수렴시킴으로서 식 (12)는 하나의 점광원이 $v = L/T_{exp}$ 의 속도로 이동하며 구면파를 방출하는 경우를 설명할 수 있다. 식 (12)에서 우변의 첫번째 및 두번째 항은 상의 재생과정에서 잡음을 형성하게 된다. 그러나 식 (12)의 세번째 항과 네번째 항은 기존이론의 결과식인 식 (6)의 세번째 항과 네번째 항과 완벽하게 일치하므로, 이들 항은 기존 이론에서와 마찬가지로 곡선형태의 물체에 대한 허상과 실상을 각각 형성하게 된다. 즉, 식 (12)로부터 점광원의 이동을 통한 가상적인 물체의 기록과 재생이 가능함을 이론적으로 입증할 수 있다.

3. 기존 이론과 SOH 이론의 차이

제 2장 1절과 2절의 결과를 비교함으로써 홀로그래프 기록에 관한 기존 이론과 SOH 이론의 차이점을 이해할 수 있다. 이를 위해 식 (6)의 우변항에서 두번째 항을 아래와 같이 변형하고

$$\sum_{j \neq l} [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{Ol}(r_l)^* + E_{Oj}^*(r_j) \cdot E_{Ol}(r_l)]$$

$$= \sum_j |E_{Oj}(r_j)|^2 + \sum_{j \neq l} [E_{Oj}(r_j) \cdot E_{Ol}(r_l)^* + E_{Oj}^*(r_j) \cdot E_{Ol}(r_l)]$$

노출량 표현을 다시 정돈하면

$$\begin{aligned}
 P_C(\mathbf{r}) = & T_{exp} |E_{R0}|^2 + T_{exp} \sum_j |E_{Oj}(\mathbf{r}_j)|^2 \\
 & + T_{exp} \sum_{j \neq l} \sum [E_{Oj}(\mathbf{r}_j) \cdot E_{Ol}(\mathbf{r}_l)^* + E_{Ol}(\mathbf{r}_l) \cdot E_{Oj}(\mathbf{r}_j)^*] \\
 & + T_{exp} \sum_{j=1}^N E_{Oj}(\mathbf{r}_j) \cdot E_{R0}^* + T_{exp} \sum_{j=1}^N E_{Oj}(\mathbf{r}_j)^* \cdot E_{R0} \quad (13)
 \end{aligned}$$

와 같이 주어진다.

식 (13)과 SOH 이론의 결과식인 식 (12)으로부터 크게 두 가지 차이를 지적할 수 있다. 첫째, 다른 점광원으로부터 방출된 구면파들이 중첩한 결과 즉, $E_{Oj}(\mathbf{r}_j) \cdot E_{Ol}(\mathbf{r}_l)$, ($j \neq l$) 항이 식 (12)에는 없음을 알 수 있다. SOH의 경우 각 점광원으로부터 방출된 구면파는 시간적으로 서로 중첩되지 않으므로 당연한 결과이지만, 이들 항은 홀로그래프 재생과정에서 image halo⁶라 불리는 잡음을 발생시키므로 이러한 항의 존재는 재생상의 질에 직접적인 영향을 주게된다. 그러므로 SOH 이론을 따라 홀로그래프를 기록하는 경우, 기존 방법에 비해 이들 항에 의한 잡음 효과가 그만큼 줄어들 수 있을 것이다.

둘째, 각 이론식에서 첫번째 항과 재생상의 형성에 관련된 항들을 비교하면, 첫번째 항의 기여 정도가 서로 다를 수 있다. 재생과정에서 첫번째 항은 0차 회절광(undiffracted beam)을 형성하므로 첫번째 항의 기여 정도에 따라 재생상의 질이 저하되지는 않지만, 재생상의 회절효율이 감소될 수도 있다. 비교를 위해 물체파와 기준파의 비 E_{Oj}/E_{R0} 가 1이라고 가정하자. 기존 이론에서는 첫번째 항과 재생상의 형성에 관련된 항[식 (13)의 4번째 및 5번째항]의 크기가 비슷하지만, SOH의 경우 첫번째 항이 재생상의 형성에 관련된 항[식 (12)의 3번째 및 4번째항]에 비해 대략 T_{exp}/t_b 배정도 크다는 것을 알 수 있다. 즉, SOH의 경우 재생상의 회절효율이 상대적으로 감소할 것으로 예상될 수도 있다. 그러나, 단순한 비교를 통한 이러한 결론이 실제 홀로그래프의 기록과정에서 적용되지는 않는다. 왜냐하면, 기존의 홀로그래프 기록과정에서는 기록매질의 비선형성⁶ 때문에, 물체파에 비해 기준파의 크기를 일부러 크게 해 주며 이로 인해 첫번째 항이 다른 항에 비해 큰 값을 갖는다. 그러므로 SOH의 경우 기존의 홀로그래프 기록과정과는 달리 물체파의 크기를 상대적으로 크게 해 줌으로서 기록매질의 비선형성 문제를 야기하지 않으면서 회절효율을 높일 수 있을 것이다.

마지막으로, 원리적인 측면에서 홀로그래프 기록 중에 발생된 진동이 재생상의 질에 어떤 영향을 주는 지를 생각해 보자. 홀로그래프 기록과정 동안 물체파나 기준파 등이 진동하는 경우, 홀로그래프 기록에 관한 기존 방법

에서는 이러한 영향이 재생상을 흐리게(blurring) 하거나 심할 경우 상이 전혀 재생되지 못하는 문제를 야기한다. 그러나 SOH의 경우 기록과정 동안에 일어나는 진동은 상의 흐려짐보다는 점광원이 원하는 형상을 따라 이동하는 것을 방해할 뿐이다. 그 결과, 재생된 상이 부분적으로 변형될 수는 있지만, 상이 재생되지 않는 문제는 일어나지 않을 것이다. 특히, 점광원으로부터 방출되는 구면파의 시간폭 t_b 가 짧다면 진동으로 인해 재생상이 흐려지는 문제는 거의 일어나지 않을 것이다.

III. Scanned-object holography의 실험적인 구현

1. 광섬유를 이용한 점광원의 구현

제 2장에서 SOH에 의해 가상적인 물체를 홀로그래프로 기록하고 재생할 수 있음을 이론적으로 입증하였다. 그러나 실험적인 관점에서 SOH의 가능성은 어떻게 점광원을 구현하며 점광원을 얼마나 쉽게 이동시킬 수 있는가에 달려있다. 물론 구현될 점광원은 가능한 작은 크기를 가져야 할 것이며 점광원에서 방출되는 구면파는 기준파와 가간섭성을 가져야 한다.

점광원을 구현하기 위해 본 논문에서는 광섬유와 펄스형 레이저의 사용을 제안한다. 레이저 출력광의 일부를 광섬유의 입력단에 입사시키고 나머지를 기준파로 활용함으로써, 광섬유의 출력단으로부터 방출된 빛은 점광원의 역할을 대신할 수 있으며 동시에 기준파와 항상 가간섭성을 가지게 된다. 이때 점광원의 크기는 광섬유의 core 크기로부터 결정되므로 비교적 작은 값을 가질 수 있다. 아울러 기계적인 장치로 광섬유의 출력단을 이동시킴으로서 점광원의 이동이라는 문제도 쉽게 해결할 수 있다. 한편, 펄스형 레이저의 발진 주기를 τ , 출력 펄스의 펄스폭을 t_b 라 하면, 이동하는 점광원은 τ 시간마다 한번씩 구면파를 방출하며 방출되는 구면파의 펄스폭은 t_b 가 된다. 그러므로 이렇게 방출되는 구면파들은 그림 1(c)에서처럼 $v\tau$ 간격으로 배열된 점광원들이 순차적으로 구면파를 방출하는 것과 같은 효과를 주게 된다. 결국 광섬유와 펄스형 레이저를 사용함으로써 SOH 이론에서 요구되는 점광원의 성질을 충족할 수 있다.

2. 실험 방법

그림 3은 SOH에 의해 홀로그래프를 기록하는 실험장치의 개략도로서 광섬유의 출력단을 점광원으로 사용하는 실험이다. 이 실험에서 repeatedly Q-switched Nd-YAG 레이저(펄스 반복율 $f=1$ kHz, $\tau=1$ ms)를 광원으로

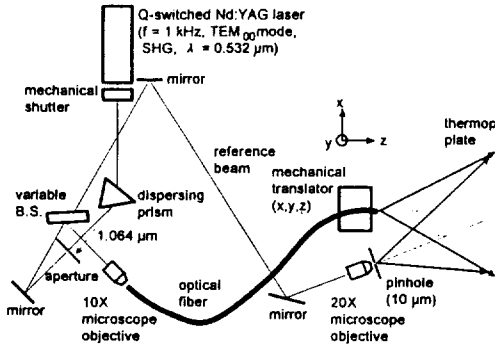


그림 3. The schematic diagram of experimental setup for recording a synthetic object by scanned-object holography. The shape of object is given with the trajectory of the end face of an optical fiber which acts as a moving point source.



그림 4. Reconstructed images from the hologram recorded by scanned-object holography. Since the object was composed of two lines placed at different positions, different images are obtained according to the position of an observation plane, and both a sharp and a defocused image of two lines are shown from each photograph. They are (a) the sharp image of the short line placed at the near position from the recording material and (b) that of the long line at the distant position.

사용하였으며, 공진기 내에 KDP 결정을 설치함으로써 제 2고조파(second harmonic wave) 출력을 얻을 수 있었다. 레이저의 출력광은 TEM₀₀ 모드이며 펄스폭은 대략 400~500 ns이다. 제 2고조파 출력만을 선택하기 위해 실험 장치도와 같이 분산용 프리즘과 조리개(aperture)를 사용하였다. 파장 0.532 μm인 출력광은 광속분리기(beam splitter)에 의해 분할되었는데 광속분리기로부터 반사된 빛은 광섬유의 입력단에 입사되며, 투과된 빛은 기준파로서 현미경 대물렌즈(10X)와 pinhole(직경 10 μm)을 지나 홀로그램 기록매질에 입사된다.

사용된 광섬유의 core 직경은 4 μm이며 임계파장(cutoff wavelength)은 0.633 μm이므로 출력파장에 대해 대략 two-mode fiber가 될 것으로 기대된다. 한편 광섬유의 길이가 627 mm이므로 경로차를 결맞음 길이(coherence length; 수 cm 정도) 이하로 유지하기 위해 정렬(alignment)에 주의하였다. 홀로그램 기록매질로는 thermoplastic plate(Newport사의 HC-300)를 사용하였으며 홀로그램의 기록과 재생과정을 반복적으로 수행할 수 있었다. 한편, 0차 회절광과 재생상을 공간적으로 분리시키기 위해 광섬유의 출력단으로부터 방출된 빛과 기준파의 사이 각을 대략 26°가 되도록 정렬하였으며 기록매질에 입사되는 물체파와 기준파의 출력은 모두 50 μW 정도 이었다. 기존의 홀로그램 기록과정에서는 물체파의 출력이 기준파에 비해 매우 낮지만, 본 실험에서는 재생상의 회절효율을 높이기 위해 물체파와 기준파의 출력비를 대략 1:1이 되도록 하였다. 광섬유 출력단은 xyz-translator 위의 고정대에 고정되어 있으며 출력단을 y축과 z축 방향으로 이동시킬 때는 마이크로미터를 사용

하였다. 그러나 x축 방향으로 출력단을 이동시킬 때에는 x-translator의 레일을 따라 손으로 고정대를 밀어 주었다. x축 방향의 이동 속력은 정확하지는 않지만, 노출시간과 재생된 상의 크기로부터 대략 10~30 mm/s 정도로 예상된다.

실험적으로 SOH의 가능성을 입증하기 위해 두개의 직선으로 구성된 가상적인 물체를 기록하였다. 물론 기록될 물체는 광섬유 출력단의 이동을 통해 주어지는데 직선 경로를 따라 광섬유를 이동시킴으로서 직선에 해당하는 물체를 홀로그래피로 기록하게 된다. 비록 단순한 형태이지만, 두 직선(광섬유 출력단의 이동 경로)이 서로 다른 위치에 있으므로 3차원 물체를 대신할 수 있다. 기록매질로부터 가까운 곳에 놓인 직선은 먼 곳에 놓인 직선에 비해 그 길이가 반 정도이며 두 직선의 방향은 기록매질 면과 모두 나란하게 배열된다(그림 3에서 x축 방향으로 배열됨).

먼저, 광섬유 출력단을 기록매질의 왼쪽 가까운 곳에 위치시킨 다음, 광섬유 출력단을 x축 방향으로 이동하면서 mechanical shutter를 50 ms 동안 열어주었다. 이때 이동하는 광섬유 출력단으로부터 방출된 파와 기준파는 홀로그램 기록매질에서 중첩된다. 두번째로 레이저 출력광을 차단한 다음, 광섬유 출력단을 기록매질로부터 먼 곳으로 이동시킨 후(-z축 방향과 +y축 방향으로 이동) 앞에서와 같은 방법으로 광섬유 출력단을 x축 방향으로 밀면서 레이저 출력광을 기록매질에 입사시켰다. 두번째 노출과정에서는 출력단을 앞의 경우에 비해 대략 두배 정도 빨리 이동시킴으로서 광섬유 출력단이 더 긴

거리를 이동하도록 하였다. 두번의 노출과정을 모두 마친 다음, thermoplastic plate를 현상하였으며 최적의 회절 효율을 얻기 위해 현상시간은 HC-300 장치에 의해 자동적으로 결정되었다.

IV. 실험 결과 및 논의

기록된 홀로그램을 재생하기 위해 기준파만을 홀로그램에 입사시켰으며, 결상용 렌즈를 이용하여 재생되는 상 중에서 허상을 관찰하였다. 기록매질로부터 서로 다른 위치에 놓인 두 직선을 기록하였으므로, 관찰면을 홀로그램의 가까운 곳에 혹은 먼 곳에 두느냐에 따라 각각 다른 직선의 상이 관찰되어야 한다. 이와 같은 재생과정을 통해 SOH 이론에 따라 가상적인 물체를 홀로그램으로 기록하고 재생할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 그림 4에서 두 직선에 해당하는 상이 선명하게 재생되었음을 볼 수 있는데, (a)는 관찰면을 기록매질의 먼 곳에 위치시켰을 때 짧은 직선의 재생상이 관찰된 결과이며 (b)는 관찰면을 기록매질의 가까운 곳에 위치시켰을 때 긴 직선의 재생상이 관찰된 결과이다. 그림에서 각 직선에 해당하는 선명한 상 외에도 희미하고 두꺼운 직선을 동시에 볼 수 있는데, 이는 나머지 직선의 상이 defocus 된 결과임을 알 수 있다. 한편, 손으로 광섬유 출력단을 이동시켰기 때문에 노출과정 중에 진동이 영향을 미치겠지만, 이론에서 언급한 바와 같이 재생결과는 진동의 영향을 거의 받지 않음을 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 간단한 물체를 기록하고 재생하였지만, 컴퓨터로 제어 가능한 translator를 활용한다면 복잡한 형태의 물체도 SOH에 의해 기록하고 재생할 수 있을 것이다. 특히, CAD 분야에서처럼 가상적인 물체의 형태가 수치적인 정보로 주어진다면, 이 정보에 따라 translator를 구동함으로써 존재하지 않는 물체를 홀로그램으로 저장할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 응용에서 기록매질의 기록 특성은 고려되어야 한다^[7]. 예를 들어 본 실험에서 사용된 thermoplastic plate의 경우 노출시간이 길어지면 초기에 저장된 물체의 정보가 제대로 재생되지 못하게 되므로 총 노출시간을 줄이기 위한 방안이 필요하다고 본다.

V. 결 론

이동 중인 점광원으로부터 방출되는 구면파와 정지된

기준파의 간섭을 이용하는 scanned-object holography를 제안하였으며, 제안된 방법에 의해 가상적인 3차원 물체를 기록하고 재생할 수 있음을 간단한 이론과 실험을 통해 입증하였다. 또한, SOH 이론과 기존 이론을 비교함으로써 SOH의 경우에 image halo가 감소될 수 있으며, 기록과정 중에 일어나는 진동이 재생상의 질에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

SOH에 의해 가상적인 물체의 홀로그램을 기록하기 위해서는 점광원의 실험적인 구현이 매우 중요한 문제인데, 본 연구에서는 광섬유 출력단을 사용함으로써 점광원의 구현과 점광원의 이동이라는 문제를 동시에 해결할 수 있었다. 실험에서는 단순한 물체를 기록하였지만, 보다 복잡한 3차원 물체도 홀로그램으로 기록하고 재생할 수 있을 것이다. 물론 복잡한 형상의 물체를 표현하기 위해서는 컴퓨터로 제어 가능한 translator를 활용하여 광섬유 출력단을 이동시켜야 할 것이다. 그러나, 이 경우, 전체적인 노출시간이 길어지므로 기록매질의 기록특성이 시간에 따라 변하는 특성이 기록과정에서 고려되어야 한다.

본 논문에서는 SOH에 대한 이론을 근사적으로 취급하였으나 이에 대한 계속적인 연구가 필요하다고 생각된다. 예를 들어 실험적인 측면에서 구현되는 광원은 항상 유한한 크기를 가지므로, 광원의 크기가 재생상에 어떠한 영향을 주는 지가 규명되어야 하며, 광원의 이동 속도에 따른 영향도 다루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] E. I. LeBaron and E. A. Boettner, *Appl. Opt.* **19**, 891(1980).
- [2] T. Yatagai, *Appl. Opt.* **15**, 2722(1976).
- [3] J. S. Kollin, S. A. Benton, and M. L. Jepsen, *SPIE* **1136**, 178-185(1989).
- [4] P. W. McOwan, W. J. Hossack, and R. E. Burge, *Opt. Comm.* **82**, 6(1991).
- [5] K. Okada, T. Honda, and J. Tsujiuchi, *SPIE* **402**, 33-37(1983).
- [6] P. Hariharan, *Optical Holography*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1986), pp. 11-22.
- [7] E. S. Gaynor, W. T. Rhodes, and H. J. Caulfield, *Appl. Opt.* **26**, 4373(1987).

Scanned-Object Holography: Recording and reconstruction of a Hologram Using a Wave Emitted from a Moving point source as object beam

Seung Gol Lee

*Department of Electronic Materials and Devices, Inha Univ.,
Inchon 402-751, Korea*

M. E. Marhic

Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A.

(Received: July 29, 1995)

The new method of recording and reconstructing a synthetic object, which was called as scanned-object holography (SOH), was proposed and its feasibility was demonstrated theoretically and experimentally. The hologram was recorded by interfering the fixed reference beam with spherical waves emitting from a moving point source, whose trajectory determined the shape of the synthetic object to be recorded. The end face of an optical fiber and the output from a pulsed laser were utilized in order to implement a moving point source experimentally.