

광선 추적을 이용한 홀로그래픽 스캐너의 설계 및 제작

김종재 · 정만호

청주대학교 광학공학과

(1998년 12월 14일 받음, 1999년 3월 17일 수정본 받음)

수차가 적은 홀로그래픽 스캐너는 기존의 렌즈나 거울과 같은 광학 소자의 사용 매수를 줄임으로써 제작 가격을 낮출 수 있다는 잠재적인 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 홀로그래픽 스캐너 설계에 광선 추적법을 적용하여 스캔 기능과 초점을 맺는 기능을 동시에 할 수 있는 홀로그래픽 광학 소자를 설계하였으며, 수차가 없는 직선의 스캔 라인을 얻기 위한 기록 및 재생 구조와 hologon 구조에 대해 조사하였다. Prototype으로 제작된 홀로그래픽 스캐너에서 bow는 전체 스캔 폭 300 mm에서 $\pm 133 \mu\text{m}$ 이었으며, spot의 크기는 $100 \mu\text{m}$ 이하로 얻을 수 있었다. 실험 결과 광선 추적을 이용한 설계 데이터의 유용성을 검증하였고 레이저 프린터나 디스플레이 분야 등으로의 응용 가능성을 제시하였다.

I. 서 론

홀로그래픽 광학 소자(HOE: Holographic Optical Element)는 재래식 광학 소자와는 달리 박막 형태로 제작이 가능하기 때문에 기존의 시스템을 소형, 경량으로 만들 수 있으며, 복제가 용이하다는 홀로그래픽의 가장 대표적인 장점을 이용해 대량 생산 및 그에 따른 제작비용의 감소 효과를 얻을 수 있다.^[1] 또한 레이저빔을 수렴시키고 스캔 하는 기능, 빔의 분할 기능, 파장 선택적인 기능 등을 하나의 소자로 구현할 수 있다는 기능상의 장점으로 인해 그 동안 스캐닝 소자로 이용하려는 많은 연구가 있었다. 그 대표적인 예로 슈퍼마켓에서 사용되는 POS(point-of-sale) 스캐닝 시스템과^[2,3] 레이저 프린터^[4]가 있으나, 설계 상의 어려움과 기록 매질의 특수성 등이 실제 상용화엔 걸림돌로 작용하고 있다. 하지만 점차 주변 기술의 발전으로 스캐닝 장치를 이용하는 많은 응용 분야에서 홀로그래픽 스캐너의 역할이 기대되고 있다.^[5,6] 아직 국내에선 이 분야에 대한 연구가 극히 미비한 상태이다.

본 연구에서는 스캐닝 기능뿐만 아니라 초점을 맺는 기능까지 동시에 할 수 있는 HOE를 설계, 제작하여 스캐닝 장치를 구현하고자 하였다. 이 때 스캐너 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 스캔 라인이 직선에서 벗어나는 현상인 bow와 스캔 면에서의 spot quality이다. Bow가 최소화된 직선의 스캔 라인이 되게 하면서 수차에 의한 영향도 최소화시켜 광학적 특성이 양호한 시스템을 만들기 위한 조건을 찾기 위해 광선 추적법^[7,8]을 이용하였다. 본 연구에서는 실제 회전식 홀로그래픽 디스크 스캐너에 홀로그래픽 렌즈를 응용하였을 때, 회전에 따라 발생하는 scan line bow 및 scan linearity, 수차 등의 최적화를 위하여 일반적인 광선 추적이 아닌 회전 변환된 좌표에 대하여 광선 추적을 적용하였다. 이러한 과정에서 원하는 스캐너 성능을 얻기 위한 HOE의 기록 및 재생 구조와 홀로그래픽 디스크 스캐너의 구조에 대한 설계 데이터를 추출하였다. Prototype으로 설계된 HOE의 제작 실험을 통해

설계와 분석에서 얻어진 데이터의 유용성을 검증하였고, 실험 데이터와 설계 데이터와의 비교, 분석을 통해 레이저 프린터와 다른 응용 분야에서의 유용성을 제시하였다.

II. 광선 추적을 이용한 홀로그래픽 스캐너의 설계 및 분석

2.1. HOE에서의 광선 추적

광선 추적으로 주어진 회절 차수에 대한 광선의 회절된 방향을 알아내기 위해선 각 광선들을 단위 벡터로 표현한 후 벡터 관계를 이용하여 광선 추적 방정식을 유도한다.^[9] $\hat{r}_o = (L_o, M_o, N_o)$, $\hat{r}_r = (L_r, M_r, N_r)$, $\hat{r}_c = (L_c, M_c, N_c)$, $\hat{r}_i = (L_i, M_i, N_i)$ 를 각각 물체빔, 기준빔, 재생빔, 회절빔을 나타내는 단위 벡터라 하면 각각의 성분은 방향 여현(direction cosine)으로 나타낼 수 있다. 또 \hat{n} 는 HOE에 수직인 단위 벡터, λ_o 과 λ_c 는 기록 및 재생 파장이라 할 때 네 빔과 \hat{n} 와의 벡터 관계로부터 광선 추적 방정식은

$$\hat{n} \times (\hat{r}_i - \hat{r}_c) = \frac{m\lambda_c}{\lambda_r} \hat{n} \times (\hat{r}_o - \hat{r}_r) \quad (1)$$

로 유도된다.

\hat{n} 방향을 z축으로 하는 좌표계에서 벡터 성분으로 (1)식을 표현하면, 다음 식으로부터 회절빔의 방향을 알아낼 수 있게 된다.

$$L_i = L_c + \frac{\lambda_c}{2\pi} \frac{\partial \phi_H}{\partial x_h} \quad (2)$$

$$M_i = M_c + \frac{\lambda_c}{2\pi} \frac{\partial \phi_H}{\partial y_h} \quad (3)$$

$$N_i = \pm [1 - L_i^2 - M_i^2]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 ϕ_H 는 두 기록빔에 의해 H점에서 형성된 위상 분포를 나타내며, $(1/2\pi) (\partial \phi_H / \partial x_h)$ 와 $(1/2\pi) (\partial \phi_H / \partial y_h)$ 는 각각 기록

빔에 의해 홀로그래프 면상의 임의의 점 (x_h, y_h) 에서 형성된 x_h, y_h 방향의 local spatial frequency(LSF)를 의미한다.

회절된 빔이 상면과 교차하는 점의 좌표는

$$x_i = DL_i + x_h \tag{5}$$

$$y_i = DM_i + y_h \tag{6}$$

$$D = \frac{z_i}{N_i} = \frac{z_i}{\sqrt{1-L_i^2-M_i^2}} \tag{7}$$

로부터 구할 수 있다.

홀로그래프에서의 결상 관계는 Champagne의 비축 결상식을 사용한다. 두 기록빔에 의해 홀로그래프 상의 임의의 점에서 형성된 위상과 재생빔 위상과의 비교로부터 다음과 같은 1차 근사된 결상식을 얻을 수 있다.^[10]

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_c} \pm \frac{\lambda_c}{\lambda_r} \left(\frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_r} \right) \tag{8}$$

$$\sin \theta_i = \sin \theta_c \pm \frac{\lambda_c}{\lambda_r} (\sin \theta_o - \sin \theta_r) \tag{9}$$

여기서 d_i, d_c, d_o, d_r 는 각각 홀로그래프 상의 임의의 점 $H(x_h, y_h)$ 에서 각 점광원까지의 거리를 나타내며, $\theta_i, \theta_c, \theta_o, \theta_r$ 은 각 점광원이 홀로그래프 면에 수직인 z축과 이루는 각도를 나타낸다.

2.2. 홀로그래픽 디스크 스캐너에서의 광선 추적

앞 절에서 논의한 HOE에서의 광선 추적을 실제 디스크 형태로 구동하는 홀로그래픽 스캐너에 적용하는 경우, hologon (holographic disk)의 회전과 상면(스캔 면)의 위치 선정에 대한 것이 함께 고려되어야 한다.

Hologon의 회전에 따른 재생 상점의 변화를 기술하기 위해 물체빔과 기준빔의 좌표를 hologon 중심 축을 기준으로 회전 변환한 후, 그 변환된 좌표와 (교정) 재생빔의 위치 관계를 적용하여 마치 hologon이 회전할 때와 같은 효과를 주게 된다. 그림 1은 이러한 계산을 하기 위해 선정된 좌표계를 나타낸다. 여기서 $O(x_o, y_o, z_o), R(x_r, y_r, z), C(x_c, y_c, z_c)$ 는 각각 물체빔, 기준빔, 재생빔의 위치를 나타내며 $I(x_i, y_i, z_i)$ 는 회절

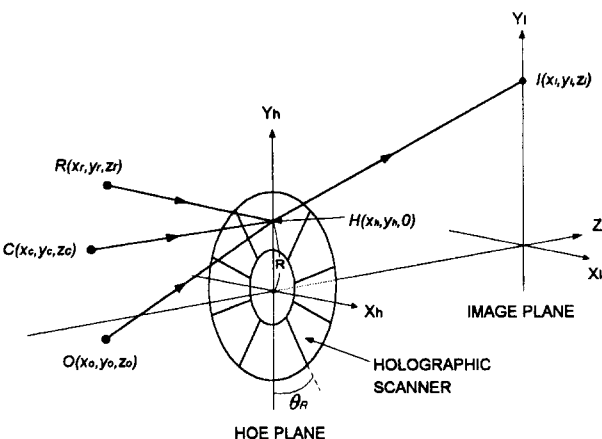


그림 1. 홀로그래픽 스캐너에서 홀로그래프의 기록과 재생 과정을 분석하기 위한 좌표계.

상점의 위치를 나타낸다. 또, R은 hologon의 중심에서 재생 입사점까지의 거리, θ_R 은 hologon의 회전각을 나타낸다.

물체빔과 기준빔의 회전 변환된 좌표는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{ot} &= x_o \cos \theta_R + y_o \sin \theta_R, & y_{ot} &= -x_o \sin \theta_R + y_o \cos \theta_R \\ x_{rt} &= x_r \cos \theta_R + y_r \sin \theta_R, & y_{rt} &= -x_r \sin \theta_R + y_r \cos \theta_R \end{aligned} \tag{10}$$

(10)식으로부터 hologon의 회전에 따른 물체빔, 기준빔, 재생빔의 방향 여현을 구하고 이 것을 (2)-(7)식에 적용하면, 회전에 따른 재생 상점의 위치를 알아낼 수 있게 된다.

일반적으로 스캔 면은 $\theta_R=0$ 일 때 입사된 주광선에 수직하게 위치시켜 수차에 의한 영향을 줄여준다. 이 때의 상점 위치를 구하기 위해 그림 2와 같은 벡터 해법을 사용한다. 여기서, $H(x_h, y_h, 0)=(0, 0, 0)$ 는 재생빔의 중심점, $I_0(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})$ 는 $\theta_R=0$ 일 때 주광선의 상점, $I(x_i, y_i, z_i)$ 는 z축에 수직한 X_i-Y_i 면에서의 상점, $I'(x'_i, y'_i, z'_i)$ 은 $\theta_R=0$ 일 때 주광선에 수직인 $X'_i-Y'_i$ 면에서의 상점을 나타낸다.

그림 2로부터 $\theta_R=0$ 일 때 주광선에 수직한 평면의 방정식은

$$x_{i0}(x'_i - x_{i0}) + y_{i0}(y'_i - y_{i0}) + z_{i0}(z'_i - z_{i0}) = 0 \tag{11}$$

또, 직선의 대칭적 방정식으로부터

$$\frac{x'_i - x_i}{x_i} = \frac{y'_i - y_i}{y_i} = \frac{z'_i - z_i}{z_i} \tag{12}$$

로 표현할 수 있으며 (11)식과 (12)식을 연립하여 x'_i, y'_i, z'_i 에 대해 풀면, $\theta_R=0$ 일 때의 주광선에 수직한 면에서의 상점 위치를 다음 식으로 알아낼 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} x'_i &= \frac{x_i(x_{i0}^2 + y_{i0}^2 + z_{i0}^2)}{y_{i0}y_i + x_{i0}x_i + z_{i0}z_i} \\ y'_i &= \frac{y_i(x_{i0}^2 + y_{i0}^2 + z_{i0}^2)}{y_{i0}y_i + x_{i0}x_i + z_{i0}z_i} \\ z'_i &= \frac{z_i(x_{i0}^2 + y_{i0}^2 + z_{i0}^2)}{y_{i0}y_i + x_{i0}x_i + z_{i0}z_i} \end{aligned} \tag{13}$$

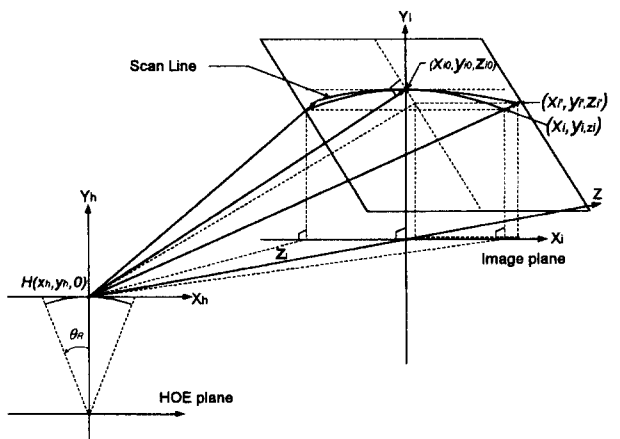


그림 2. $\theta_R=0$ 일 때 회절된 주광선에 수직한 스캔 면에서 상점 위치를 추적하기 위한 좌표계.

2.3. 홀로그래픽 스캐너의 설계 예

홀로그래픽 스캐너를 설계하는 과정은 많은 변수들에 대한 고려와 변수들 간의 적절한 조절을 필요로 하는 상당히 복잡한 과정이다. 스캐너 성능과 관련된 변수로는 spot의 크기, 스캔 길이, 스캔 라인의 직선화(straightness), 스캔 선형도(linearity), duty cycle(latency), 상면 만곡(field curvature), 스캔 속도 등이 있으며, 스캐너 동작과 관련된 변수로는 작동 거리(working distance), facet의 개수와 크기, 회전축에서 홀로그램 중심까지의 거리, 기록빔과 재생빔의 위치, 회전 속도 등이 있다. 이 중 주된 고려 사항은 개발하려는 응용 분야에서 요구되는 스캔 quality(스캔 라인의 형태, spot quality)로 광원의 선택과 함께 홀로그램 제작 형태, 스캐너 구동 형태, 기록 매질 등을 결정하는데 큰 영향을 끼친다. 이러한 스캐닝 시스템 설계의 기본 목표는 시스템이 복잡해지고 제작 단가가 높아지는 것을 최대한 피하면서 고성능이 되도록 광학적 구조와 기계적 구조를 선택하는 것이다.

본 연구에서는 $\lambda_r = \lambda_c = 633 \text{ nm}$ 의 파장으로 기록, 재생하며 초점거리(d_i) = 300 mm에서 $\pm 150 \text{ mm}$ 의 폭을 직선 스캔할 수 있는 레이저 스캐너를 prototype으로 설계하였다. 홀로그램은 기계적인 진동과 배치 상에서 발생하는 오차가(반사형에 비해) 덜 민감한 투과형 구조를 선택하였고, 스캐너 구동 형태는 복제가 편리한 평면 디스크 구조로 선택되었다. 그림 3에 설정된 홀로그래픽 스캐너의 형태를 보여주고 있다. 여기서 발산 기준빔과 수렴 물체빔으로 기록하여 다시 발산 기준빔으로 재생하는 구조이기 때문에 d_o 가 곧 초점거리(d_i)가 된다.

Bow를 최소화하여 스캔 라인이 직선이 되도록 하는 것과

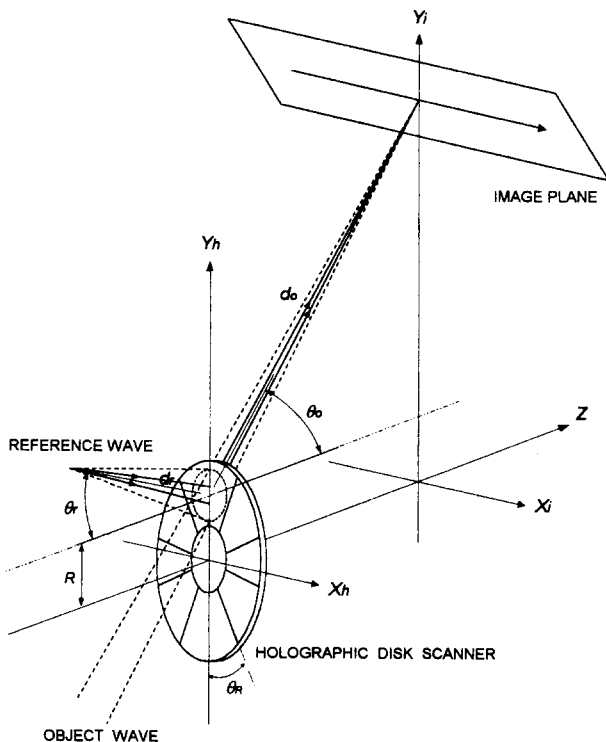


그림 3. Prototype으로 설정된 홀로그래픽 스캐너에서 HOE의 기록 및 재생 구조.

표 1. 계산 결과

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| 기록 및 재생 파장(He-Ne Laser) | 633 nm |
| 디스크 축에서 재생빔의 중심까지의 거리(R) | 43 mm |
| 회전 각도(θ_R) | $\pm 17^\circ$ |
| 디스크에서 스캔 면까지의 거리(d_i) | 300 mm |
| 스캔 길이(L) | 297.952 mm |
| 재생빔의 반경(D) | 1.5 mm |
| $d_c (= d_r)$ | -78 mm |
| $\theta_c (= \theta_o)$ | 44° |
| $\theta_c (= \theta_i)$ | -8.5° |
| 직선에서 벗어난 정도(bow) | $\pm 54.75 \mu\text{m}$ |
| Spot의 크기(FWHM) | $\sim 78 \mu\text{m}$ |

동시에 수차로 인한 spot의 변형이 최소가 되는 기록 및 재생 구조와 hologon의 구조를 알아내기 위해 앞 절에서 서술한 홀로그램에서의 광선 추적을 사용하였다. 먼저 초기 조건 ($\lambda_r, \lambda_c, d_i, L$)을 먼저 결정한 후, $\theta_o, \theta_r, d_r, \theta_R, R$ 변수들을 연속적으로 변화시키면서 원하는 스캔 quality를 만족시키는 구조 데이터만을 추출하는 반복 계산 과정을 사용하였다. 계산 결과 얻은 d_r, θ_o, θ_r 로부터는 물체빔과 기준빔의 기록 위치를 알 수 있으며, R은 hologon의 크기를 결정하고 θ_R 은 hologon에 기록될 facet의 개수를 결정하기 때문에 이로부터 hologon의 제작 구조를 알아낼 수 있게 된다.

표 1은 설계 데이터 및 계산 결과를 보여 주고 있다. 여기서 spot의 크기는 회절 한계(diffraction-limited)에 의해 실질적으로 얻을 수 있는 최소 크기로 계산되었다.^[11] 본 설계에서 얻을 수 있는 최소 spot의 크기는 약 $78 \mu\text{m}$ 이었다. 재생 입사빔의 직경은 수차의 영향은 적게 받으면서 최대한 작은 spot을 얻을 수 있는 최적의 크기로 선택되었다.

표 1과 같은 제원의 홀로그래픽 스캐너에서 얻을 수 있는 스캔 라인의 직선에서 벗어난 오차량은 입사빔의 주광선을 추적해 본 결과, 약 $\pm 54.75 \mu\text{m}$ 이었으며 스캔 라인의 모습은 그림 4와 같이 예상되었다.

스캔 면에서 spot의 형태는 스캔 가장자리로 갈수록 수차의 영향(특히, 코마와 비점수차)을 받는다는 것을 그림 5를 통해 알 수 있다. 그림 5-(a)는 z축에 수직인 $X_i - Y_i$ 면에서의 spot 형태를 나타내며, 5-(b)는 $\theta_R = 0$ 일 때 주광선에 수직인 $X'_i - Y'_i$ 면에서의 spot 형태를 보여주고 있다. 그림 5-(b)에서의 spot이

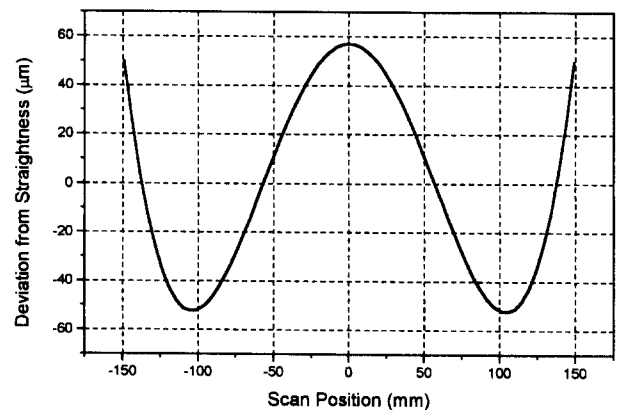


그림 4. 광선 추적에 의해 예상된 scan line bow의 모습.

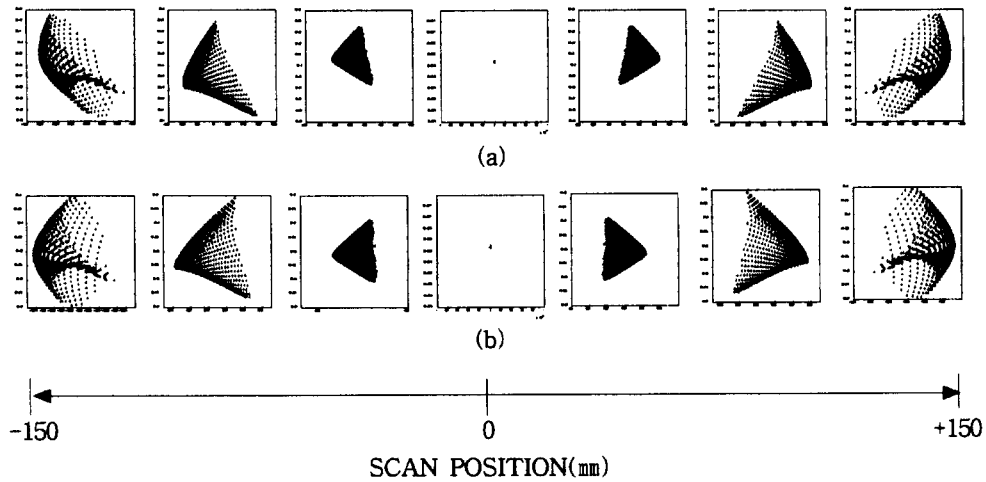


그림 5. (a) X_r - Y_r 면과 (b) X_r' - Y_r' 면에서 광선 추적에 의해 예상된 spot의 형태.

5-(a)에서 보다 더 일정하면서 크기도 더 작는데 이로부터 $\theta_R = 0$ 일 때의 주광선에 수직하게 스캔 면을 위치시키는 것이 스캔 quality를 더 좋게 하는 것임을 알 수 있었다.

III. Prototype 홀로그래픽 스캐너의 제작 실험 및 결과

스캐닝 기능과 초점을 맺는 기능을 동시에 할 수 있는 비축 홀로그래픽 렌즈 형태의 스캐닝 소자를 제작하여 그 스캔 성능 및 광학적 특성을 측정하였다. 또 광선 추적에 의해 예상된 결과와의 비교, 분석을 통해 그 유용성을 검증하였다.

3.1. HOE의 제작

앞서 광선 추적에 의해 추출된 설계 제원(표 1참조)을 바탕으로 그림 6과 같은 기록 장치를 구성하였다. 기록 광원은 35 mW급의 He-Ne 레이저(633 nm)를 사용하였으며, 홀로그램 형성시 간섭도를 높여주기 위해 PBS 하나와 두 개의 $\lambda/2$ plate를 사용하여 두 빔의 세기와 편광 방향이 같도록 제어하였다. 그림에서처럼 공간 필터 SF2를 사용하여 기준빔을 형성하였고, SF1과 L의 조합으로 물체빔을 형성하였다. 이 때 L의 위치는 기록 부분의 중심(hologon 반경)에서 O까지의 거리가 스캐너의 초점거리가 되도록 배치되었으며, 또 L의 직경과 초점거리에 따라 기록 면적이 달라지기 때문에 hologon의 회전각을 만족하도록 선택되었다. 기준빔을 만드는 SF2 역시 배율을 조정하여 원하는 기록 면적을 얻도록 선택되었다.

기록 매질은 은염(silver halide) 사진건판인 Agfa8E75HD plate를 사용하였다. 일반적으로 은염 사진건판의 화학 처리 과정에서 emulsion의 수축 또는 변형되는 현상이 발생하는데 이러한 것은 스캔 quality를 저하시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 영향을 최소화하기 위해 정착 과정이 없는 은염 재생성법(fixation-free rehalogenating bleaching : Mod R-10)을 사용하였다. 현상 과정에서 빛에 노광된 부분은 금속은(Ag)으로 환원되었다가 표백 과정에서 AgBr로 다시 재생성된다. 이 때 Ag^+ 이 노광되지 않은 부분으로 확산 이동되면서 노광되지 않은 부분과의 굴절률 차가 더 커지게 되고 이로 인

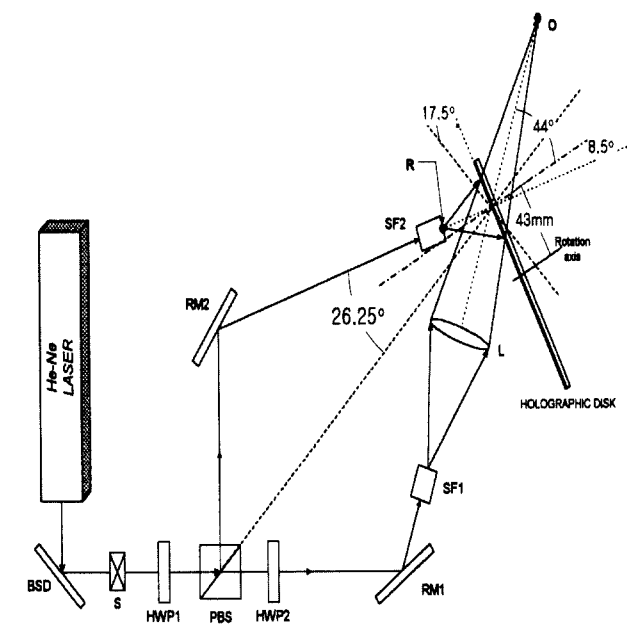


그림 6. 홀로그래픽 스캐닝 소자의 제작을 위한 기록 장치 구성도. BSD: Beam Steering Device, S: Shutter, HWP: Half Wave Plate, PBS: Polarizing Beam Splitter, RM: Rotating Mirror, SF: Spatial Filter, L: Lens.

표 2. 화학 처리 과정(모든 용액은 20°C에서 사용되었음)

| | | |
|---|---|-------|
| 1 | Develop (Kodak D-19) | 5 min |
| 2 | Rinse | 2 min |
| 3 | Bleach : KBr (17.5 g) K ₂ Cr ₂ O ₇ (1 g) H ₂ SO ₄ (5 ml) Distilled water to make 500 ml | 3 min |
| 4 | Wash | 5 min |
| 5 | 50% Isopropyl alcohol | 5 min |
| 6 | 100% Isopropyl alcohol | 5 min |
| 7 | Dry (20°C and > 50% RH) | |

해 효율이 증가되는 특징을 갖고 있다. 또 수축이 없기 때문에 산란에 의한 noise가 작다는 장점이 있다. 이렇게 사용된 화학 처리 과정을 표 2에 제시하였다.

3.2. 제작된 홀로그래픽 스캐너의 성능 측정

제작된 prototype 홀로그래픽 스캐너가 스캔 면에서 라인을 형성할 때, spot의 위치와 quality를 측정하기 위해 그림 7과 같은 장치를 구성하였다. 그림에서처럼 입사된 레이저빔은 제작된 홀로그래픽 스캐닝 소자에 의해 회절되어 스캔 면에 초점을 맺는다. 디스크가 회전하면서 상면에서 x축 방향으로 스캔 라인을 형성하게 된다. 스캔 라인을 따라 CCD 카메라를 평행 이동시키며 spot quality를 측정하였다. 촬상 소자의 유효 화소가 768×496인 칼라 CCD 카메라와(pixel size : 수평 10.35 μm×수직 13.05 μm) MATROX사의 color PCI frame grabber를 측정에 사용하였다.

스캔 선형도는 facet을 일정한 각도로 회전시키면서 각도에 따른 스캔 면에서의 spot 위치를 측정하였다. Bow는 CCD 카메라에서 관측된 spot의 y축 변화량을 측정하였다. Spot의 크기는 CCD 카메라에서 관측된 spot의 모양을 분석하여 측정하였다. 회절 효율은 스캔 라인 상의 각 위치에서 detector로 측정하였다. 실험상의 오차를 줄이기 위해 각 측정 데이터들은 반복 측정한 후 그 평균을 구해 추출하였다.

3.3. 실험 결과 및 분석

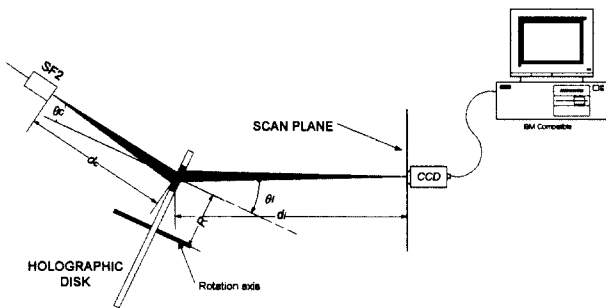


그림 7. 제작된 홀로그래픽 스캐너의 성능을 측정하기 위한 실험 장치 구성도.

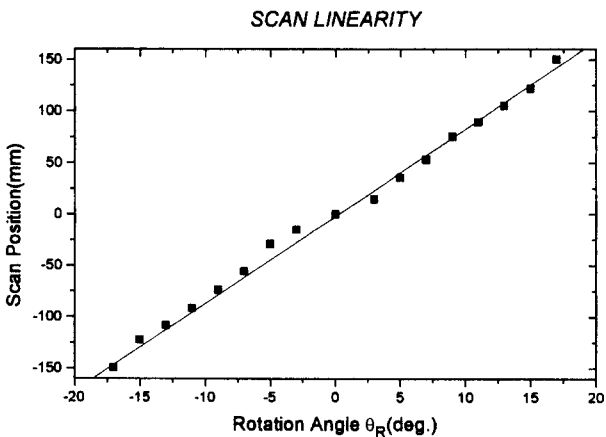


그림 8. Hologon의 회전에 따른 스캔 선형도.

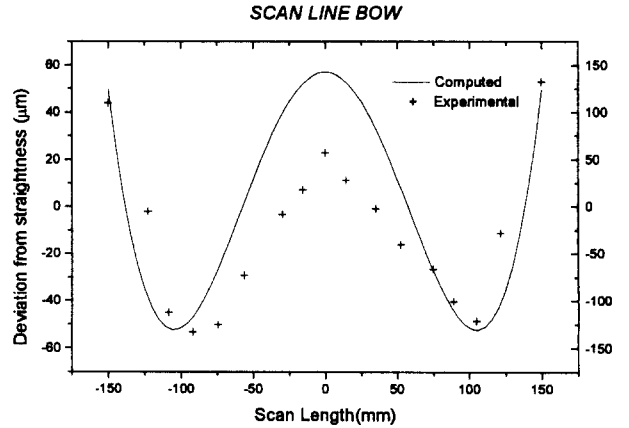


그림 9. 스캔 길이(L)=±150 mm에서 계산된 bow와 측정된 bow와의 비교.

제작된 홀로그래픽 스캐너의 성능을 측정한 결과를 앞서 계산된 결과와 비교, 분석하였다.

그림 8에선 hologon 회전에 따른 스캔 면에서 측정된 spot의 위치(스캔 선형도)를 나타내고 있다. 전체적인 변화 모습은 선형적이거나, 스캔 가장자리로 갈수록 스캔 속도가 서서히

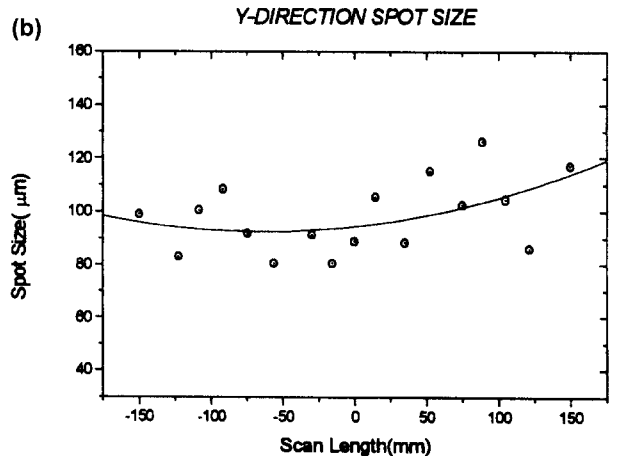
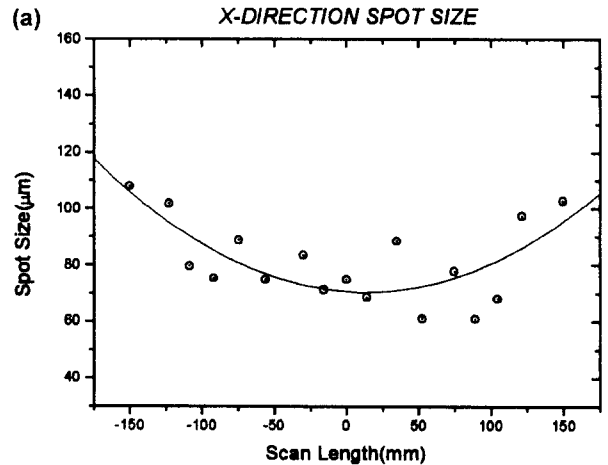


그림 10. 스캔 면에서의 Spot 크기(FWHM). (a) X 방향의 spot 크기, (b) Y 방향의 spot 크기.

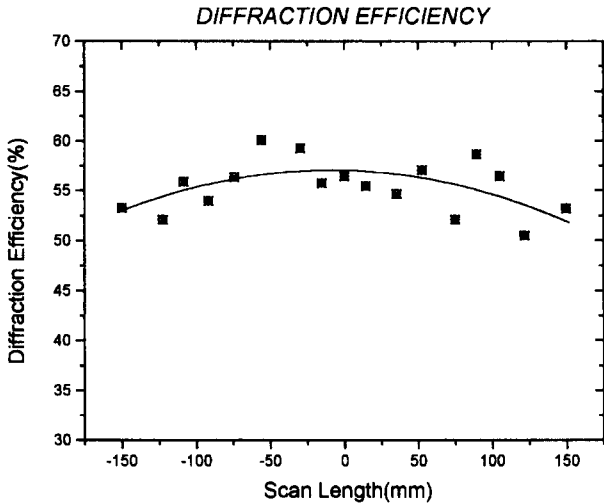


그림 11. 상면에서 스캔 라인을 따라 측정된 회절 효율.

증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 프린팅 시스템 분야에서 중요한 문제가 되나 dot rate를 전자적으로 변화시켜 보정할 수 있다고 알려져 있다.^[12]

그림 9는 계산된 bow와 실제 측정된 bow의 모습을 비교한 것이다. 앞서 예상된 bow의 크기는 $\pm 54.75 \mu\text{m}$ 이었으나 측정된 bow는 약 $\pm 133 \mu\text{m}$ 이었다. 이러한 계산 값과의 오차는 실험 장치를 구성할 때 발생하는 오차와 spot의 크기에 비해 CCD의 pitch 크기가 커서 일어나는 측정 상의 오차 등에 의해서 발생한 것으로 판단된다. 하지만, 전체적인 경향 면에선 유사한 결과를 얻은 것으로 평가된다.

그림 10에는 x방향, y방향으로 각각 측정된 spot의 크기를 보여주고 있다. 회절 한계(diffraction-limited)에 의해 얻을 수 있는 최소 spot의 크기는 $78 \mu\text{m}$ (FWHM)이었으나, 실제 측정된 값은 x방향으로 약 $80 \mu\text{m}$, y방향으로 약 $100 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 측정 결과, y방향의 크기가 약간 더 크게 측정되었으며, 또 스캔 라인의 가장자리로 갈수록 점차 커지는 경향을 보였다. 이러한 경향은 앞서 광선 추적에 의한 결과로부터 예상되었듯이 스캔 가장자리로 갈수록 수차의 영향을 받고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

그림 11은 스캔 라인을 따라 측정된 회절 효율을 보여준다. 높은 회절 효율을 얻는 것이 우선이지만 전체 스캔 폭에서 균일한 효율을 나타내는 것이 스캐너에선 더 중요하다. 본 실험에서 제작된 홀로그래픽 스캐닝 소자의 회절 효율은 전체 스캔 폭 $\pm 150 \text{ mm}$ 에서 약 $55 \pm 5\%$ 의 고른 분포를 나타

표 3. Prototype으로 설계, 제작된 홀로그래픽 스캐너의 특성

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| 기록 및 재생 파장(He-Ne Laser) | 633 nm |
| 홀로그래픽 디스크의 직경 | 100 mm |
| 디스크에서 스캔 면까지의 거리 | 300 mm |
| 스캔 길이(L) | ~300 mm |
| 재생빔의 반경(D) | 1.5 mm |
| 직선에서 벗어난 정도(bow) | $\pm 133 \mu\text{m}$ |
| Spot 크기(FWHM) | within $100 \mu\text{m}$ |
| 회절 효율 | $55 \pm 5\%$ |

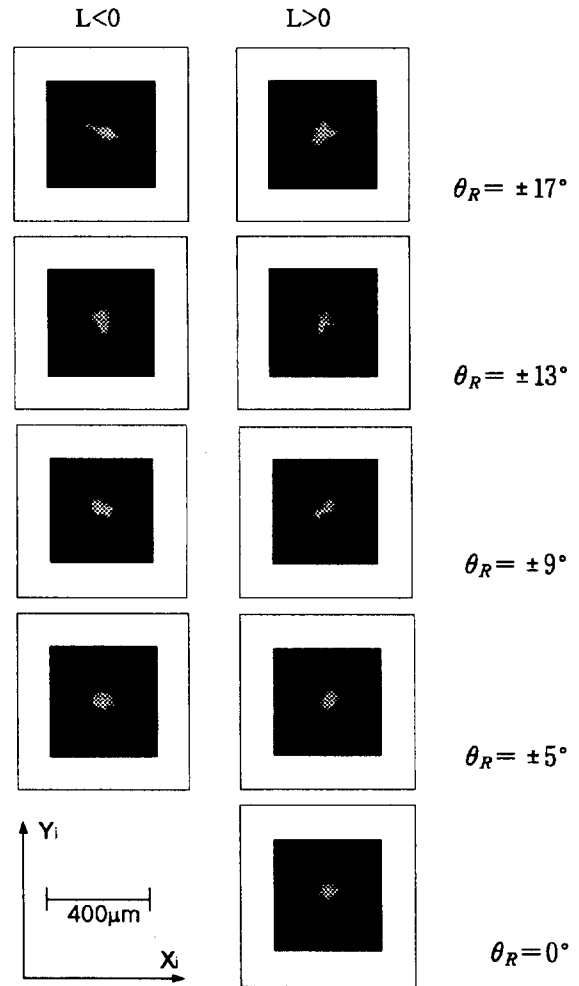


그림 12. CCD로 관측된 spot quality.

내었다.

그림 12에선 CCD로 관측된 스캔 면에서의 spot 형태를 보여주고 있다. 스캔 가장자리로 갈수록 수차의 영향으로 변형이 생기는 모습을 볼 수 있으며, 이는 앞서 광선 추적에 의해 예상된 결과와 일치하는 모습이다.

이상과 같이 prototype으로 설계, 제작된 홀로그래픽 스캐너의 특성을 표 3에 정리하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 스캔 기능과 초점을 맺는 기능을 동시에 할 수 있는 HOE를 이용하여 홀로그래픽 스캐너를 구현하고자 하였다. 홀로그램에서의 일반적인 광선 추적법을 회전하는 홀로그래픽 스캐너에 적용하여, bow를 최소화하여 스캔 라인이 직선이 되도록 하는 것과 동시에 수차로 인한 spot의 변형이 최소가 되게 하는 기록 및 재생 구조와 hologon의 구조를 조사하였다. Prototype으로 $\lambda_s = \lambda_c = 633 \text{ nm}$ 의 파장으로 기록, 재생하며 초점거리 300 mm에서 $\pm 150 \text{ mm}$ 의 스캔 폭을 얻을 수 있는 홀로그래픽 스캐너를 설계, 제작하였다.

설계 데이터를 바탕으로 홀로그래픽 스캐닝 소자(비축 홀

로그래픽 렌즈)를 제작하여 스캔 quality를 측정된 결과, bow는 약 $\pm 133 \mu\text{m}$, spot의 크기(FWHM)는 가로 방향이 약 $80 \mu\text{m}$, 세로 방향은 약 $100 \mu\text{m}$ 이었으며, 이러한 결과는 설계 과정에서 예상된 결과와 유사한 것으로 평가되었다. 노광된 기록 매질을 정착 과정이 없는 은염 재생성법을 사용한 화학 처리와 알콜 건조 방법을 사용하여 전체 스캔 폭에서 약 $55 \pm 5\%$ 의 고른 회절 효율을 얻을 수 있었다. 이상과 같이 spot 크기, 수차 특성, 스캔 라인 bow, 스캔 선형도 등에서 광학적 특성이 종합적으로 만족할 만한 홀로그래픽 스캐너를 제작할 수 있었다. 본 연구에서 prototype으로 제작된 홀로그래픽 스캐너를 레이저 프린터에 적용하는 경우, 최하 300dpi 급 이상의 프린팅 시스템은 쉽게 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 홀로그래픽 스캐너의 광학적 특성을 분석할 수 있었으며, 원하는 성능 얻기 위한 설계 제원을 추출할 수 있게 되었다. 이는 다른 HOE 응용 분야에서도 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다. 앞으로 홀로그램의 장점을 최대한 이용하면서 고성능의 시스템이 되도록 하려면 이 분야에서 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] D. H. Close, *Opt. Eng.* **14**, 408 (1975).
- [2] L. D. Dickson, G. T. Sincerbox, and A. D. Wolfheimer, *IBM J. Res. Dev.* **26**, 228 (1982).
- [3] H. Ikeda, M. Ando, and T. Inagaki, *Appl. Opt.* **18**, 2166 (1979).
- [4] H. Funato, *Proc. Soc. Photo.-Opt. Instrum. Eng.* **390**, 174 (1983).
- [5] L. Beiser, *Opt. News*, **10**, 16 (1986).
- [6] Y. Ono and N. Nishida, *Appl. Opt.* **22**, 2128 (1983).
- [7] J. N. Latta, *Appl. Opt.* **10**, 2698-2710 (1971).
- [8] J. N. Latta and E. B. Champagne, *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 486A (1973).
- [9] W. T. Welford, *Aberrations of Optical Systems* (Adam Hilger Ltd, 1986) pp. 75-77.
- [10] E. B. Champagne, *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 51-55 (1967).
- [11] T. A. Shankoff, *Appl. Opt.* **7**, 2101-2105 (1968).
- [12] M. Araragi, M. Imamoto, H. Murayama, and H. Shirahata, *Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Jpn.* **J68-C**, 171 (1985).

Design and fabrication of a holographic scanner using the ray tracing method

Jong Jae Kim and Man Ho Jeong

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

(Received December 14, 1998, Revised manuscript received March 17, 1999)

Low-aberration holographic scanners that eliminate the need for lenses and mirrors promise to greatly reduce the cost of laser printers and image scanners. In this study, a holographic optical element that can simultaneously scan and focus a laser beam is designed with analytic ray tracing method. An analytic and experimental work is conducted in which we investigated the hologram structure and hologon configuration for linear aberration-free scanning. For a prototype scanner, a He-Ne laser is used to manufacture and reconstruct the hologram, and the measured bow is about $\pm 133 \mu\text{m}$ and spot size(half-intensity beamwidth) is under $100 \mu\text{m}$ for a 300 mm scan length without using a correcting lens or mirror. The diffraction efficiency is about $55 \pm 5\%$, which is acceptably flat. The experimentally measured results agrees with the computed values. From this fact, we can conclude that the computed results using ray tracing method are practical and useful values, and have a potential for use in high resolution laser printers.