

전자계산기 홀로그램을 이용한 레이저 주사장치 (Laser Scanner Using a Computer-Generated Hologram)

尹熙喆*, 李鍾昌*, 張珠錫*, 申相永*

(Hee Cheol Yun, Jong Chang Yi, Ju Seog Jang and Sang Yung Shin)

要 約

전자계산기 홀로그램을 편향소자로 사용하는 레이저 스캐너를 보고한다. 지금까지 전자계산기 홀로그램 편향소자는 under-filled scanning을 목적으로 설계되었다. 여기에서는, 동일한 정확도의 제작설비를 사용하여, 기존 전자계산기 홀로그램보다 좋은 해상도와 긴 주사길이를 구현할 수 있는 over-filled scanning 용 전자계산기 홀로그램 소자를 제안하고 이를 제작하였다. 전자계산기 홀로그램의 선간 최소간격은 8 μm 로 설계하였는데, 제작된 레이저 스캐너의 주사특성을 측정한 결과 광점의 직경은 100 μm , 주사길이는 40cm 이었다.

Abstract

A laser scanner utilizing a computer-generated hologram (CGH) as beam deflector is reported. The CGH optical element has been used mainly for under-filled scanning. Here, a CGH optical element for overfilled scanning is proposed. It can achieve, under the same limitation of fabrication accuracy, better resolution and longer scan length than those for under-filled scanning. Measured scanning characteristics of the laser scanner show the scan length of 40 cm and the beam diameter of 100 μm , where the designed minimum distance between the lines of CGH is 8 μm .

I. 序 論

레이저 주사장치는 레이저광을 기계적 혹은 비기계적 방법으로 편향시켜 높은 해상도를 갖는 영상을 빠른 속도로 그리고 비충격식 방법으로 기록할 수 있는 장치로서 레이저 인쇄기, computer line printer, 집적회로 제작용 pattern generator, optical data storage, facsimile, graphics, 레이저 절단 등 광범위한 응용분야를 갖고 있다.^{1,2)}

특히 홀로그램 편향소자를 이용한 주사장치는 초기에 개발된 다면경 편향방식을 이용한 주사장치보다 다소 해상도나 주사속도는 떨어지나 홀로그램이 보다 더 가볍고, 제작이 용이하며, 대량생산이 가능하여 경제적으로 유리하다.^{3,4)}

이러한 홀로그램 주사장치에 사용되는 홀로그램 편

향소자는 레이저를 이용한 holography에 의해 제작할 수도 있으며, 전자계산기와 대형 plotter 및 lithography에 의한 이른바 전자계산기 홀로그램(computer-generated hologram; CGH)으로 제작할 수도 있다.

특히 CGH를 이용할 경우, 보조적인 광학장치들을 거의 사용하지 않고서 고해상도를 갖는 직선주사를 구현할 수 있다. 또한 하나의 원화가 제작되면 쉽게 복사가 가능하므로 대량생산이 용이한 장점이 있다.

1976년 O. Bryngdahl과 W. H. Lee가 처음 제작한 CGH 편향소자는 under-filled scanning method (UFSM)을 채택하였는데⁵⁾ 해상도가 매우 낮고 주사길이(scan-length)도 짧아 실제로 사용하기가 어려웠다.

본 논문에서는 UFSM을 사용한 CGH의 단점을 탈피하기 위하여 다면경 주사장치에서 retrace time을 줄이기 위해 사용해 왔던 over-filled scanning method (OFSM)⁶⁾를 채택하여, 해상도가 높고 주사길이가 긴 CGH 주사장치를 제작하였다.

본 논문에서는 먼저 OFSM의 동작원리 및 주사특성에 대하여 이론적으로 고찰하고 실제 홀로그램 함수의

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., KAIST)
接受日字: 1985年 8月 26日

결정과 이에 따른 CGH의 설계 및 제작 과정을 기술하였다. 다음에 주사장치를 구성하고 동기 및 신호발생 회로를 제작하여 실험을 통한 주사특성을 고찰하고 결론을 내렸다.

II. Over-filled Scanning Method

레이저 광의 주사방식에는, 빔 폭이 광편향소자 혹은 홀로그램 렌즈에 비해 작은 레이저 광을 입사하여 주사하는 UFSM (under-filled scanning method) 과, 레이저 광을 홀로그램 렌즈보다 더 큰 각도로 확산시켜 입사하는 OFSM (over-filled scanning method) 이 있다.

먼저 UFSM^{2,4,5)}에서는 그림 1에서처럼 초점화 기능을 가지도록 제작된 홀로그램 렌즈 H에 직사광선을 입사하면 렌즈의 초점에 집광된다. 이때 입사광을 고정시키고 렌즈 H를 회전시키면 렌즈의 초점 역시 회전하게 되어 레이저 광이 이동하는 초점을 따라서 주사된다.

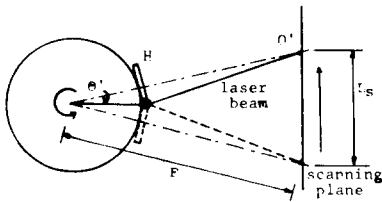


Fig. 1. Under-filled scanning method.

이와 반대로 OFSM은 작은 홀로그램 렌즈가 큰 각도 θ_s 로 확산되어 있는 레이저 광 속을 진행하면서 입사된 레이저 광을 주사하는 방식이다. 즉 그림 2에서 홀로그램 렌즈 H가 회전하면 렌즈의 초점 O' 역시 따라서 회전하게 되고 레이저 광 또한 회전하는 초점을 따라 집광되어 주사가 이루어진다.

그림 1, 2에서 주사길이 L_s 는 UFSM에서는

$$L_s \sim 2F\theta' \tag{1}$$

이 되고, OFSM에서는

$$L_s \sim 2F\theta_s \tag{2}$$

가 된다. 그런데 일반적으로 홀로그램 렌즈에서 최대 회절각 θ' 을 크게 하려면 Bragg 조건,

$$\theta' = \arcsin(\lambda/d) \tag{3}$$

으로부터 최소 격자간격 d 도 작게해야 한다(6). 그런데 상용 plotter와 photolithography 기술상의 한계에 의

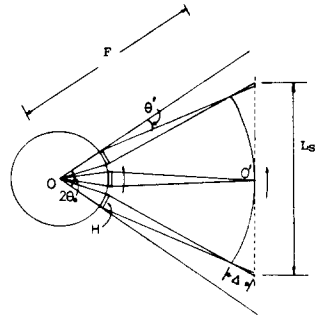


Fig. 2. Over-filled scanning method.

해 무한정 d 를 작게할 수 없어 θ' 의 크기에 제한이 생기게 된다. 그러나 OFSM에서는 이러한 최소격자 간격의 제한없이 임의의 주사거리를 얻어낼 수 있다. 즉 임의의 θ_s 를 θ' 보다 크게하면 식(1), (2)로부터 OFSM의 주사길이가 UFSM의 주사길이보다 크게 됨을 알 수 있다. 그러므로 OFSM에서는 그림 2에서처럼 θ' 이 작더라도 큰 주사거리를 얻을 수 있다.

또 초점거리 f , 입사면의 구경 W 인 홀로그램 렌즈에 대해 주사선 상의 레이저 광점의 직경(FWHM) D_s 는 Rayleigh criterion으로부터

$$D_s \sim \lambda f / W \tag{4}$$

이다. 여기서 UFSM에서의 W 값은 입사광선의 직경이고, OFSM에서의 W 값은 홀로그램 렌즈의 직경이 되므로, OFSM에서 광점의 크기 D_s 가 보다 작게 되어 훨씬 더 해상도가 높게 된다.

또한 한 주사선에 나타낼 수 있는 레이저 광점의 수 N_r 은

$$N_r = L_s / D_s \sim \begin{cases} 2\theta' W_1 / \lambda, & \text{UFSM} \\ 2\theta' W_2 / \lambda, & \text{OFSM} \end{cases} \tag{5}$$

이 된다. 단 W_1 은 그림 1에서의 입사광선의 직경이고 W_2 는 그림 2에서의 홀로그램 렌즈의 직경이다. 여기서 $\theta_s \gg \theta'$, $W_2 \gg W_1$ 이므로 OFSM의 주사선의 해상도가 크게 증가하게 된다.

한편 각 주사방식의 광효율은 UFSM에서는 입사광 전부가 홀로그램 렌즈에 입사되지만 OFSM에서는 입사광의 일부만 홀로그램 렌즈에 입사된다. 이때 UFSM에 대한 OFSM의 광효율비 η 은,

$$\eta = (\theta' / \theta_s)^2 \tag{6}$$

이 되어 광효율이 상대적으로 감소된다.

그러므로 OFSM은 UFSM에 비해 광효율을 희생함으로써 증가된 주사길이와 높아진 해상도를 얻게된다.

본 논문에서는 홀로그램 렌즈의 초점거리 f 를 90cm로 하고, 홀로그램 렌즈의 직경 W 는 6.7mm로 하였다. He-Ne 레이저(파장 633nm)를 광원으로 사용하는 경우 식(4)로부터 직경 D_s 를 구하면 87 μ m가 되나 대략적인 계산이므로 약 100 μ m로 보자. 또한 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 주사점이 0'에서 멀어짐에 따라 초점이 주사면에 맺히지 않아 광점의 크기가 커지게 되는데 가장 바깥의 주사점에서 광점의 직경이 0'에서의 광점 직경 값의 1.1배 이내로 유지 하여야 한다. 다시말하면 그림 2의 Δ 는 depth of field 값 $[\approx 4\lambda(f/D_s)^2]$ 의 1/2 이하가 되어야 한다.¹⁷⁾ 이에 따라 주사길이 L_s 를 정하면 약 42cm가 된다.

III. Hologram 함수의 결정

OFSM에서 사용하게 될 홀로그램 렌즈의 전방초점거리와 후방초점거리는 그림 3(a)에서 각각 주사 drum의 반지름 R_a 와 drum에서 주사선까지의 거리 R_b 와 일치한다. 이러한 구조를 좌표공간에 나타내면 그림 3(b)와 같이 된다.

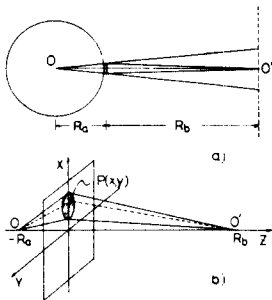


그림 3. 홀로그램 함수의 결정
Fig. 3. Determination of hologram function.

전방초점 0에서 홀로그램 평면상의 임의의 점 $P(x, y)$ 를 통과하여 후방초점 0'에 이르는 레이저광의 자유공간 내에서의 위상변화는 광경로 $0-P(x, y)-0'$ 의 길이와 자유공간 내에서의 레이저 광의 파수 (wave number)의 곱으로 나타내므로

$$\phi'(x, y) = 2 \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + R_a^2} + \sqrt{r^2 + R_b^2}) \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이다.

그림 3에서 전방초점 0에서 나오는 레이저 광이 후방초점 0'에 집광되기 위해서는 홀로그램 평면에 의한 위상변화가 식(7)에서의 $\phi'(x, y)$ 와 같은 값을 가

져야 한다.

그런데 이러한 위상변화를 줄 수 있는 홀로그램의 이진합성 방법에는 Lohmann 등이 제안한 detour phase hologram^{8,9,10}과 Wai-Hon Lee가 제안한 방법¹¹⁾이 있는데 본 논문에서는 Wai-Hon Lee에 의한 방법을 사용하였다. 이는 만들고자 하는 파면의 위상 함수로부터 홀로그램의 fringe를 계산하여 직접 그리는 방법이다.

그러므로 CGH의 fringe 형태는 이러한 이진합성 홀로그램으로 할 때

$$\begin{aligned} \phi_0(x, y) &= 2 \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + R_a^2} + \sqrt{r^2 + R_b^2}) \\ &= 2n\pi \end{aligned} \quad (8)$$

를 만족시키는 r 의 집합으로 표현된다. 식(8)의 fringe 형태는 그림 3에서 점 0로부터 발산하는 광파와 점 0'으로 수렴하는 광파가 서로 간섭하여 만드는 투과형 (transmission type) 홀로그램의 fringe 형태와 일치한다.^{11,12)}

여기서 위상함수 $\phi_0(x, y)$ 에 상수항을 더해도 아무런 영향이 없으므로 $n=0$ 일때 $r=0$ 가 되게 하기 위해서 상수항 $-2(\pi/\lambda)(R_a + R_b)$ 를 더해 주었다.

이 때의 홀로그램 함수는

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= 2 \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{R_a^2 + r^2} - R_a + \sqrt{R_b^2 + r^2} - R_b) \\ &= 2n\pi \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다.

이 때 식(9)에서의 fringe 형태는 동심원들의 집합이 되며, 각 정수값 n 에 대응하는 원의 반경 r 을 $R(n)$ 이라고 하면 식(9)에서

$$R(n) = \frac{n\lambda(n\lambda + 2(R_a + R_b))}{2(n\lambda + R_a + R_b)} \quad (10)$$

가 된다.

이 식에 의해 나타나는 fringe 모양을 개략적으로 그리면 그림 4(a)와 같다. 여기서 0차 회절광과 1차 회절광을 분리시키기 위해 홀로그램 H를 동심원들의 중심 0를 포함하지 않고 한쪽으로 치우치게 함으로써 그림 4(b)에서처럼 입력 레이저 P_i 에 대한 1차 회절파 P_1 과 0차 회절파 P_0 이 분리되게 하였다.

IV. CGH의 제작

실제로 CGH를 만들기 위하여, 먼저 IBM 360 computer에 내장된 Calcomp plotter용 basic software를 사용하여 plotting data를 계산하고 원화를 그렸다. 원화의 크기는 축소할 때 사용하게 될 기존의 photolithography 장비의 축소비율과 Calcomp plotter의 능력을

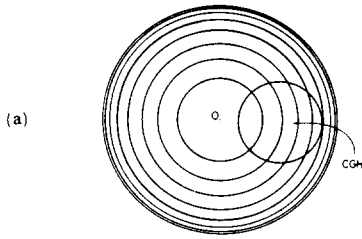


그림4(a). CGH 렌즈의 패턴
Fig. 4(a). Pattern of CGH lens.

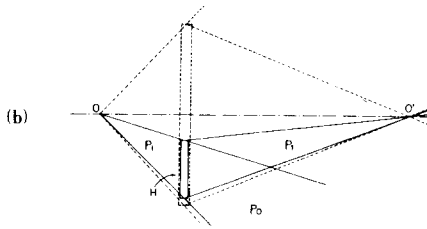


그림4(b). 1차 회절광과 다른 회절광과의 분리
Fig. 4(b). Separation of 1st order diffracted beam from others.

고려하여 실제로 제작할 CGH 크기의 112배가 되도록 설계하였다. Calcomp plotter로써 그릴 수 있는 최소 선간격은 0.125mm이나 여기서는 좀 더 신뢰도를 높이기 위해 0.9mm 정도가 되게 하였다. 이것을 112 배로 축소했을 때의 CGH의 최소 선간격은 0.9mm / 112 μm 가 된다. 따라서 식 (10)에 의해

$$R(n) - R(n-1) = 8\mu\text{m} \quad (11)$$

의 조건에 의해 $n=405$ 가 되므로 405개의 fringe까지 그릴 수 있게 된다. 이때 원화의 직경은 $112 \times R(405) = 76\text{cm}$ 로 된다.

이렇게 제작한 원화는 1/8로 1차 축소하고 1/14로 2차 축소하여 반도체 집적회로 mask 제작용 HRP (High Resolution Plate)에 기록하였다. HRP에 기록된 CGH를 바로 홀로그램 렌즈로 사용할 수 있으나, 회절 효율을 높이기와 동시에¹³⁾ 대량 제작을 용이하게 하기 위하여, slide glass 위에 집적회로 제작용 photoresist를 spin-coating 한 다음, 그 위에 HRP 상에 만들어진 CGH를 밀착인화(contact printing)하여 홀로그램 렌즈를 쉽게 대량 제작하였다.

그림 5에 실제 CGH 렌즈의 패턴을 8.1배 확대한 사진이 실려 있다.

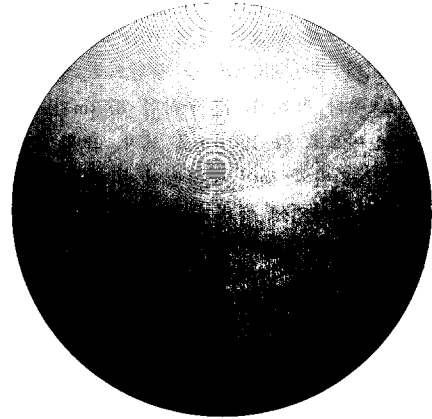
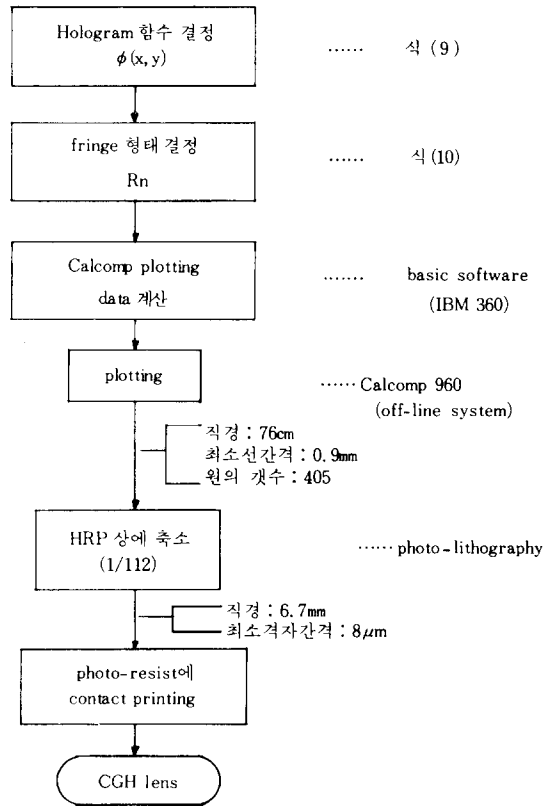


그림 5. CGH 렌즈의 실제 패턴을 8.1배로 확대한 사진
Fig. 5. Enlarged picture of CGH lens by 8.1times.

표 1. CGH 제작의 흐름도



치의 구조는 그림 6과 같다. Photoresist에 기록된 16개의 CGH 렌즈를 아크릴 drum에 고정하고서 레이저 광을 현미경 대물렌즈와 pinhole로 spatial filtering

V. 주사특성 실험 및 결과

본 논문에서 제작하여 실험한 OFSM CGH 주사장

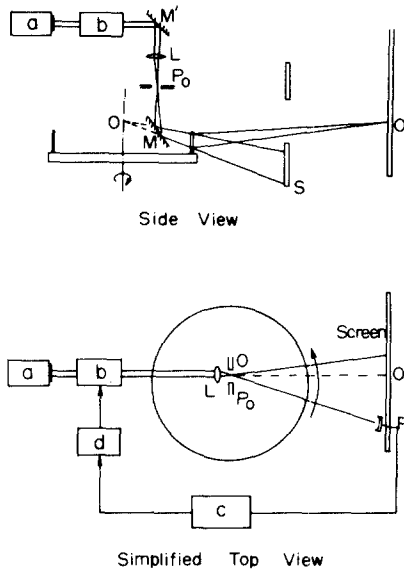


그림 6. OFSM CGH 주사장치의 요해도

- a. laser
- b. A-O 변조기
- c. 동기 및 신호발생 회로
- d. A-O 변조기 구동기

Fig. 6. Schematic diagram of over-filled CGH scanner.

- a. laser
- b. A-O modulator
- c. synchronization and signal generating circuit
- d. A-O modulator driver

을 환후 거울 M을 이용하여 CGH 렌즈에 정확하게 입사하도록 하였다. 그리고 CGH 렌즈로부터 나오는 0차 회절파를 막기 위해 슬릿 S를 놓았다.

제작된 주사장치의 주사특성을 측정하기 위해 먼저 음향 광학 변조기를 사용하지 않고 He-Ne 레이저 광을 입사시키며 drum을 1800 rpm의 속도로 회전시키면서 주사면 상에서의 주사선의 특성을 관찰하였다. 주사선의 굵기를 측정하기 위하여, 주사면 상에 Agfa-Gevaert 10E75를 놓고 주사선을 직접 노출(exposure)하였다. 그림 7이 그 결과로서, 오른쪽에 표시된 횡수만큼 같은 위치에 주사할 경우의 주사선의 모양을 보여주고 있는데, 현미경으로 주사선의 폭을 측정할 결과 같은 위치에 60회 주사하여 노출한 경우에는 주사선폭이 200 μ m 정도 되었으며, 30회 정도 주사할 경우 100 μ m 정도가 되어, 실제 해상도 즉 광점의 직경은 100 μ m 이하가 됨을 알 수 있다. 또한 주사각이 커짐에 따른 주사선 굵기의 미세한 변화로부터 주사 길이는 40cm 정도가 되는 것을 관찰 하였다.

다음으로 음향 광학 변조기를 사용하면서 주사되는

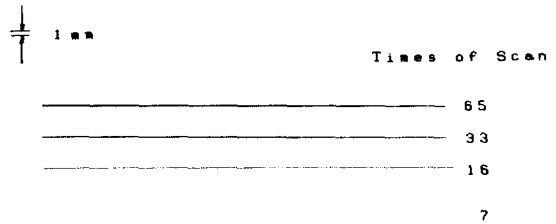


그림 7. Agfa-Gevaert 10E75 사진 건판 위에 노출된 주사선

Fig. 7. Scanned lines exposed on the Agfa-Gevaert 10E75 photographic plate.

광점들을 관찰하기 위하여, 주사된 레이저 광을 photodetector로 감지, 음향광학 변조기를 구동하는 신호를 동기화시키는 회로를 그림 8과 같이 구성함으로써 주사면 상에 정지된 주사점을 얻었다. 여기서 음향광학 변조기는 PbMoO₄를 재료로 한 ISOMET 제품 모델 1205C-1을 사용하였고 photodetector는 구경이 큰 실리콘 PIN 다이오드를 사용하였다.

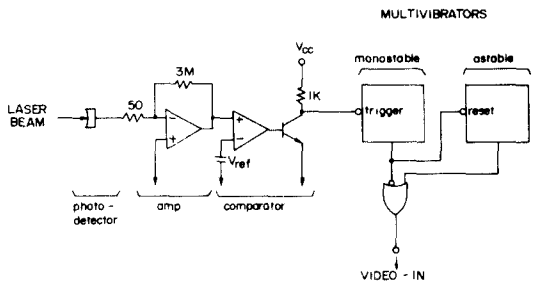


그림 8. 동기 및 신호 발생회로

Fig. 8. Synchronization and signal generating circuit.

주사면 상에 사진건판 Agfa-Gevaert 10E75를 놓고 주사 광점들을 직접 노출한 결과가 그림 9에 실려 있다. 여러번 주사하는 과정에서 정확한 위치에만 주사하지 못하여 좀더 명확한 광점의 형태를 기록 하지는 못하였으나, 광점의 직경이 100 μ m 정도임을 볼 수 있다.

따라서 주사길이가 40cm일 때

$$N_r = 4,000 \text{ (pixels/scan)} \tag{12}$$

이 되어 Bryngdahl과 Lee의 UFSM 주사장치에 비해 현저한 개선을 보여준다.

표 2는 본 논문에서 제작한 OFSM 주사장치와 Bryngdahl과 Lee의 UFSM 주사장치와의 여러 특성에 대한 비교를 보여주고 있다.



그림 9. 변조된 주사선 (한 눈금이 1mm이다)
 Fig. 9. Modulated scanning line (the scale is 1 mm long).

표 2. 각 주사방식의 특성비교

	UFSM 주사장치	OFSM 주사장치
광점의 크기	190 μm	100 μm
주사길이	6 cm	40 cm
Nr	320 p/s	4000 p/s
축점거리	300 cm	90 cm
원화의 크기	120 cm	76 cm
fringe 수	640 개	405 개
렌즈의 크기	6 cm	0.67 cm
최소격자간격	62 μm	8 μm

VI. 結 論

Bryngdahl과 Lee에 의한 UFSM CGH 주사장치는 현재의 photolithography로써 제작할 수 있는 한계와 방식 자체의 구조적 결함으로 인해, 주사선의 길이가 짧고 해상도가 낮아 실제로 사용하기에 난점이 예상된다.

본 논문에서는, 다면경 주사장치에서 retrace time을 줄이기 위하여 사용해 왔던 OFSM을, 주사길이를 길게하고 해상도를 개선하기 위한 목적으로 CGH 주사장치에 적용하였다.

CGH 렌즈는, 레이저 광의 간섭을 이용한 일반적인 holography에 의해 제작한 홀로그래프 렌즈에 비해 회절효율이 낮다는 단점이 있으나, 보다 정확하고 대량

제작이 용이한 장점이 있다.

CGH의 제작 과정은, 먼저 OFSM의 구조로부터 제작할 CGH의 홀로그래프 함수를 구하고, 이것으로부터 computer와 plotter를 사용하여 원화를 그렸다. 다음으로 원화를 집적회로 제작용 HRP 상에 축소하여 목적한 크기의 CGH를 만들고, 다시 유리기판위의 photoresist에 contact printing하여 회절효율을 높임과 동시에 대량 제작을 쉽게 하였다.

이러한 CGH 렌즈를 사용하여 OFSM 주사장치를 구성하고 동기 및 신호 발생 회로를 제작하여 주사특성을 측정한 결과, 긴 주사길이(40cm), 높은 해상도(100 μm)를 얻어내어 한 주사선에 대한 광점의 수가 4000(pixels/scan) 정도로서 Bringdahl과 Lee의 주사 방식에 비해 현저한 개선을 보여 주었다. 그리고 OFSM 자체의 power 효율이 낮은 단점을 시정하기 위하여, CGH에 입사하는 광파를 spherical lens로 퍼뜨리는 대신에 cylindrical lens로 퍼뜨려 손실광을 줄이는 방법¹²⁾이 가능하다.

끝으로, 본 연구를 지원해준 과학재단에 감사한다. 또한 실험 장치 설계 및 수행에 도움을 준 본 연구실의 박사과정 윤태훈, 이창희씨에게도 감사드립니다.

參 考 文 獻

- [1] J.C. Urbach, T.S. Fisli and G.K. Starkweather, "Laser scanning for electronic printing," *Proc. IEEE*, vol. 70, pp. 597-618, June 1982.
- [2] C.J. Kramer and J.C. Wilson, "Holographic laser scanning for nonimpact printing," *Laser Focus*, vol. 17, pp. 70-82, June 1981.
- [3] R.A. Sprague, J.C. Urbach and T.S. Fisli, "Advances in laser and E-O printing technology," *Laser Focus*, vol. 19, pp. 101-109, Oct. 1983.
- [4] D.H. McMahon, A.R. Franklin and J.B. Thaxter, "Light beam deflection using holographic scanning technique," *Appl. Opt.*, vol. 8, pp. 399-402, Feb. 1969.
- [5] R.V. Pole, H.W. Werlich and R.J. Krusche, "Holographic light deflection," *Appl. Opt.*, vol. 17, pp. 3294-3297, Oct. 1978.
- [6] O. Bryngdahl and W.H. Lee, "Laser beam scanning using computer-generated holograms," *Appl. Opt.*, vol. 15, pp. 183-194, Jan. 1976.
- [7] J.R. Lewis and L.M. Hubby, Jr., "Optical system design for the laser printing

- system," *Hewlett-Packard Journal*, vol. 33, pp. 3-10, July 1982.
- [8] A.W. Lohmann and D.P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.*, vol. 6, 1739, 1967.
- [9] 안경식, 윤원형, 신상영, "새로운 부호화 방법에 의하여 전자계산기로 제작된 홀로그램" 대한 전자공학회, 1982년도 하계 종합학술대회 논문집, vol. 5, no. 2, pp. 64-67, 1982. 11. 20.
- [10] 윤원형, 신상영, "문자식별을 위한 전자계산기 홀로그램 정합 필터의 제작" 대한전자공학회 1982년도 추계 종합학술대회 논문집, vol. 5, no. 2, pp. 64-67, 1982. 11. 20.
- [11] Wai-Hon Lee, "Binary synthetic hologram," *Appl. Opt.*, vol. 13, pp. 1677-1682, July 1974.
- [12] 윤희철, "전자계산기 홀로그램을 이용한 레이저 주사장치" 석사학위논문, 한국과학기술원, 1985.
- [13] H. Bartelt and S.K. Case, "High-efficiency hybrid computer-generated holograms," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 2886-2890, August, 1982.
-