

## 물매-굴절률 기판을 이용한 평판광학적 광신호 연결

조무희 · 김영식

단국대학교 물리학과

송 석 호

한양대학교 물리학과

(1997년 8월 11일 받음)

광신호 상호연결 및 입력물체의 결상을 위한 기존의 평판광학계에서는 굴절률이 일정한 유리기판을 광신호 전달매체로 사용하였는데 반하여, 본 연구에서는 물매-굴절률(*gradient-index*) 분포를 갖는 기판을 사용하는 새로운 개념의 평판광학계를 제안하였다. 물매기판에 의한 결상특성을 근축광선 추적에 의해 분석하였으며, 입력 광신호의 위치에 따라 결상된 위치가 변하는 실험결과로부터 새로운 결상광학계로의 응용 가능성을 검증하였다. 그리고, 물매기판을 이용한 평판광학계가 하나의 입력신호를 여러 출력면으로 동시에 분배할 수 있는 광신호처리계로도 응용될 수 있음을 제시하였다.

### I. 서 론

평판광학계(*Planar optics*)란, 모든 광학부품들이 한 장의 광학기판 위에 집적되어 있고 광신호는 광학기판 내부의 3차원 공간을 통하여 전달되는 구조를 갖는 광학계로서, 결상(*imaging*)<sup>[1]</sup>, 신호변환(*signal transforming*)<sup>[2]</sup>, 상관기(*correlator*)<sup>[3]</sup> 등 많은 광정보처리용 광학계 구현에 적용되고 있다. 평판광학계에서는 광학부품들이 주로 정교한 리소그래피 기술을 이용하여 이진위상(*binary phase*), 혹은 연속위상(*continuous phase*) 형태로 제작될 수 있기 때문에, 매우 높은 정렬 정확성을 얻을 수 있다. 또한, 광학계 구성 후에도 주변 환경(온도, 외부의 충격 등)의 변화에 대해 우수한 안정성을 유지할 수 있으며, 소규모로 광학계를 집적할 수 있다는 장점 등은 기존의 자유공간 광학계가 갖는 단점들을 보완해 주어, 3차원적인 광신호 처리계의 대규모 광신호 처리 능력을 실용화 수준으로 끌어올릴 수 있는 유력한 광학계 구성방식으로 인식되고 있다.

본 논문에서는, 물매-굴절률(*gradient-index; GRIN*) 분포를 갖는 기판(물매기판)을 사용하는 새로운 개념의 평판광학계를 제안하였다. 지금까지는 주로 굴절률이 일정한 유리와 같은 광학기판을 사용하여 평판광학계를 구성하여 왔는데, 입력신호를 원하는 출력면으로 결상(*imaging*), 혹은 연결(*interconnecting*)해 주기위해 기판위에 제작된 렌즈등의 마이크로 광학부품을 제작하였었다. 그러나, 본 연구에서 처음으로 제안코자 하는 방식은 물매기판 자체가 신호를 전달하는 매체일 뿐만 아니라, 결상렌즈의 역할도 동시에 수행하는 새로운 평판광학계 구성 개념이다. 즉, 기존의 방식에서 결상을 위해 요구되었던 렌즈를 사용하지 않고서도 입력면과 출력면을 물매기판 위에 일정한 거리를 두고 위치시키게 되면, 입력면에 위치한 입력 물체로부터 나오는 광신호가 물매기판 내부를 통과하면서 출력면으로 정확하게 결상될 수 있다. 따라

서, 물매기판을 이용함으로써 기존의 평판광학계를 보다 단순화시킬 수 있으며 입-출력면이 물매기판에 견고하게 부착될 수 있기 때문에, 전체 결상광학계를 소규모로 고 집적화할 수 있다. 그리고, 단순히 광신호만을 전달해주는 광학기판 자체에 결상이라는 광학적 기능을 부여함으로써, 자유공간 광학계(*free-space optics*) 뿐만 아니라 기존의 평판 광학계에서도 없었던 새로운 기능 및 자유도가 얻어진다는데 큰 의미가 있다고 하겠다.

제2장에서는 물매-굴절률 분포를 갖는 렌즈에 관한 이론이 분석되어 있으며, 제3장에 본 연구에서 제안코자 하는 물매기판을 이용한 결상광학계의 특성이 논의되어 있다. 그리고, 제4장과 제5장에 물매기판을 이용한 결상실험 과정 및 결과를 보였으며, 제6장에서 결과의 분석 및 대규모 신호처리를 위한 응용 가능성이 제시되어 있다.

### II. 물매-굴절률 렌즈의 특성

물매-굴절률 분포(*GRIN distribution*)란 매질의 굴절률이 위치에 따라 연속적으로 증가하거나 감소하는 분포를 말한다. 이러한 *GRIN* 분포를 갖는 광학부품은 주로 유리나 고분자 등의 매질을 이용하여 이온-교환(*ion-exchange*)이나 고분자화(*polymerization*) 등의 방법으로 만들어 지고 있으며, 기존의 곡면형 렌즈를 대체하여 매우 넓은 응용분야에서 사용되고 있는 광학 부품이다.<sup>[4]</sup> 물매-굴절률 렌즈는 일반 렌즈에 비해 비교적 용이하게 수차를 보정할 수 있으며, 양 단면이 곡면이 아닌 평면을 이루고 있기 때문에 사용하기에 편리한 기하학적 모양을 가지고 있고, 또한, 렌즈 양 단면이 결상계의 입-출력 면을 이룰 수 있어, 모든 광신호가 *GRIN* 렌즈의 내부로만 진행하여 외부의 영향에 대해 강한 내구성을 가지며 손실이 적다는 장점이 있다. *GRIN* 렌즈는 광섬유 통신에서 레이저 다이오드로부터 나오는 신호광을 광섬유로 접속시킬 때나,

복사기, 팩시밀리, CD 재생기 등에서 기존의 렌즈를 대체하여 널리 사용되고 있으며, 매우 다양한 굴절률 분포를 갖는 GRIN 렌즈들이 상용화 되어있다.<sup>[5,8]</sup>

GRIN 렌즈에는 굴절률 분포의 대칭성에 따라 구형(spherical) GRIN, 축방향(axial) GRIN, 반경(radial) GRIN 렌즈 등으로 분류될 수 있다.<sup>[5]</sup> 본 장에서는, 전체적인 모양은 막대 원통 모양을 하고 있으며, 굴절률이 임의의 반경에서는 일정하며 오직 반경이 변함에 따라 굴절률값이 다른 반경 GRIN 렌즈만을 고려하기로 하자. 그림 1(a)에 반경  $r=r_0$  이고, z-축을 광축으로 하는 길이가 L인 반경 GRIN 렌즈의 모양과, z-축에 수직인 단면에서 본 굴절률 분포  $n(r)$ 이 도시되어 있다.  $n(r)$ 은 광축방향으로는 동일한 굴절률을 가지고 있으며,  $r=0$ 인 위치에서 굴절률은  $n(0)$ 로서 가장 크며, r값이 커짐에 따라 점차 감소하여  $r=-r_0$ 와  $r=r_0$  일 때 가장 작은 굴절률 값인  $n_s$ 가 된다. 이러한 반경 GRIN 렌즈에 입사하는 광선의 궤적을 보다 간략하게 분석하기 위해, 광축을 포함하는 임의의 한 평면 내에서만 진행되는 자오 광선(meridional ray)의 경우만을 고려하면 다음과 같다. 렌즈에 입사하는 광선의 초기 위치를  $x_i$ , 초기 기울기 값을  $\dot{x}_i (= \tan \theta)$  라할 때, 초기 조건에 따른 렌즈 내에서의 광선 진행경로는 그림 1(b)와 (c)에 도시된 바와 같다. 그림 1(b)는  $z=0$ 인 지점에서  $x_i=0$ 인 위치에 놓인 점광원으로부터 발산되는 광선들이 진행하는 경로로서 사인곡선(sinusoidal) 모양을 하고 있으며,  $L=L_p/2$  일 때 마다 원래의 점광원 모양으로 다시 결상되고 있다. 그리고,  $x_i \neq 0$ 인 그림 1(c)의 경우를 보면,  $L=L_p/2$ 일 때는  $x=-x_i$  위치에서 결상되고  $L=L_p$ 일 때 원래의 위치로 돌아오고 있다. 이때,  $L_p$ 를 GRIN 렌즈의 주기(pitch)라 한다. 특히,  $L=L_p/2$ 인 GRIN 렌즈는 렌즈의 양 단면이 결상계의

입-출력면이 되며, 전체적으로는 초점거리가  $L_p/8$ 인 기존의 일반렌즈와 동일한 결상특성을 갖는다.

그림 1(a)에 도시된 GRIN 렌즈의 굴절률 분포는 다음과 같이 정의 된다.<sup>[9]</sup>

$$n^2(x) = n^2(0)[1 - (gx)^2], \quad x \leq r_0, \\ = n_s^2, \quad x > r_0 \quad (1)$$

여기서, g는 렌즈의 굴절률 분포를 나타내는 상수로서, 렌즈의 수차 및 결상특성은 이 상수 값에 따라 결정된다. GRIN 렌즈 내부를 z-축에 대해 각도  $\theta$ 로 진행하는 빛의 광선 방정식(ray equation)은 다음의 이차미분방정식으로부터 유도될 수 있다.

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{1}{2n^2(x_i) \cos^2 \theta_i} \cdot \frac{dn^2(x)}{dx} \quad (2)$$

그런데, 일반적으로 상용화 되어있는 GRIN 렌즈의 경우, 실제 굴절률 분포의 변화량은 거의 10%도 안되므로<sup>[10]</sup>,  $n^2(x_i) \approx n^2(0)$ 로 근사시킬 수 있으며, 근축광선의 경우를 고려하여  $\cos^2 \theta = 1$ 라 가정하면, 식 (1)을 식 (2)에 대입하여 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$x = x_i \cos gz + \frac{x_i}{g} \text{singz} \quad (3)$$

그러나, 입사광선이 광축으로부터 많이 떨어져 입사한다거나, 또는 광축과 큰 각도를 이루고 입사하는 일반적인 경우에는, 식 (1)을 보다 일반화 하여  $h_4$ 와  $h_6$  등의 고차 수차계수를 포함하는 좀더 정확한 굴절률 분포식으로 다음과 같이 표현해야 된다.<sup>[11]</sup>

$$n^2(x) = n^2(0)[1 - (gx)^2 + h_4(gx)^4 + h_6(gx)^6 + \dots] \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입한 후, 섭동이론(perturbation theory)을 사용하여 근사시키면, 다음과 같은 일반화된 광선 방정식을 얻을 수 있다.

$$x = x_i \cos \Omega z + \frac{x_i}{\Omega} \sin \Omega z \quad (5)$$

여기서,  $\Omega$ 는

$$\frac{\Omega}{g} = 1 - \frac{3}{4}(h_4 - \frac{2}{3})[(gx_i)^2 + \dot{x}_i^2] - \frac{3}{4}(h_4 - \frac{2}{3}) \\ \times [21(gx_i)^4 + 46(gx_i)^2 \dot{x}_i^2 + 17\dot{x}_i^4] / 12 - [\frac{3}{4}(h_4 - \frac{2}{3})]^2 \\ \times [7(gx_i)^4 + 46(gx_i)^2 \dot{x}_i^2 + 23\dot{x}_i^4] / 12 - \frac{15}{16}(h_6 + \frac{17}{45}) \\ [(gx_i)^2 + \dot{x}_i^2]^2 \quad (6)$$

와 같이 일반화된 굴절률 분포상수가 된다.<sup>[12]</sup> 만약,  $h_4=2/3$ 와  $h_6=-17/45$ 인 경우에는  $\Omega=g$ 가 되므로 수차가 없게되며, 렌즈의 결상주기 또한 빛이 입사되는 조건에 의존하지 않고 동일한 값을 가진다. 그러나,  $h_4$  및  $h_6$ 가 위의 조건을 만족하지 않는 일반적인 경우에는, 렌즈에 입사되는 조건에 따라 수차가 커

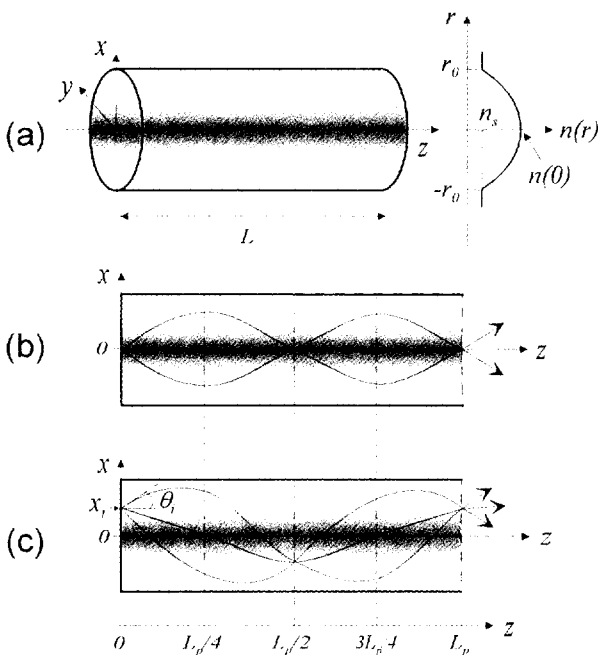


그림 1. (a) 반경 GRIN 렌즈의 모양 및 굴절률 분포. (b)  $x_i=0$ 인 지점과 (c)  $x_i>0$ 에 놓인 점광원으로부터 발산되는 광선들의 GRIN 렌즈 내에서의 진행경로. L; 반경 GRIN 렌즈의 길이.

질 수 있으며 다음과 같이 정의되는 결상주기 또한 달라진다.

$$L_p = 2\pi/\Omega \quad (7)$$

### III. 물매기판을 이용한 결상광학계

본 논문에서 제안코자 하는 물매기판과 이를 이용한 결상용 평판광학계가 그림 2에 도시되어 있다. 물매기판을 이루는 유리기판은 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 직육면체 모양을 하고 있으며, 내부의 굴절률 분포는 그림 1(a)에 도시된 일반적인 GRIN 렌즈를 광축을 중심으로 반으로 나누어 놓은 것과 같다. 즉, z-축에 수직인 한 단면에서의 굴절률분포를 나타내는 그림 2(b)에서 보면, 칠해진 명암의 농도로 표시된 바와 같이  $r=0$ 일 때 굴절률이 가장 높으며 광축으로부터 벗어날수록 굴절률이 점점 낮아진다.

이러한 물매기판을 이용한 결상용 평판광학계를 옆에서 본 모양과 위에서 본 모양이 각각 그림 2(c)와 (d)에 도시되어 있다. 기존의 GRIN 렌즈를 사용하는 경우에서는 신호광이 렌즈의 측면(xy-평면)과 수직방향으로 입력 또는 출력되는데 반하여, 평판광학계의 경우에는 그림 2(c)에서 보는 바와 같이 xz-평면에 수직 방향으로 신호광이 입-출력된다. 단, 물매기판 윗면(xz-평면)에 회절격자(diffraction grating)층을 두어 입력면(Input)을 수직으로 통과한 빛이 z-축 방향으로 편향되도록 하고 있다. 즉, 입력면을 통과한 빛은 회절격자를 거치면서 z-축에 대해 중심광선이  $\theta$  만큼의 각도를 이루며 꺾이게 되고,  $\theta$  각을 중심으로  $\Delta\theta$  각도로 발산하는 모든 광들은 물매기판을 거치면서 다시 출력면(Output)의 한 점으로 결상되게 된다. 그리고, 그림 2(d)에서 보는 바와 같이, 입력면 및 출력면의 중심은 물매기판 상의 z-축 상에 위치하고 있으며, 두 면의 중심 사이의 거리는 수식 (7)에 정의된 주기의 반인  $L_p/2$ 가 된다. 그리고, 회절격자의 주기  $A$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{\lambda_0}{n(0)\cos\theta} \quad (8)$$

여기서,  $\lambda_0$ 는 입사광의 파장이다.

이러한 물매기판을 이용한 평판광학계의 결상특성이 그림 3에 도시되어 있다.  $g=0.339\text{ mm}^{-1}$  이고, 물매기판의 두께가  $r_0=0.9\text{ mm}$ 인 경우에, z-축에 대해 각각  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  그리고  $15^\circ$ 의 각도로 편향되어 입사되는 광선들의 결상경로로서,  $h_4$ 와  $h_6$ 에 따라 식 (5)에 의해 계산된 결과이다. 그림 3(a)는  $h_4=2/3$ 와  $h_6=-17/45$ 인 수차가 없는 경우로, 광신호의 편향되는 각도가 클수록 입사한 빛이 렌즈의 더 깊은 곳까지 들어감을 볼 수 있으며,  $L=L_p/2$ 인 거리마다 하나의 점으로 완전하게 결상되고 있다. 그런데,  $h_4=0$ 와  $h_6=0$ 인 경우의 그림 3(b)에서 보면, 물매기판으로 편향된 빛의 각도가 증가함에 따라 결상거리가 짧아지며, 입사각에 따른 결상 점들 사이의 거리는 z-축을 따라 진행하면서 더욱 벌어지고 있다. 한 예로,  $x=z=0$  지점에서  $5^\circ$ 와  $15^\circ$ 의 각도로 입사한 빛들에 대하여  $L_p/2$  거리에서의 z-축 좌표는 각각 9.23과 8.95 mm 로서 약 0.28 mm의 차이가 나며, 그 후  $L_p/2$  거리마다 0.28 mm의 배수 만큼씩 두 광선간의 결상위차가 더욱 벌어짐을 알 수 있다.

따라서, 그림 2(c) 또는 (d)에 도시된 물매기판을 이용한 결상용 평판광학계의 x-축방향에 대한 공간 대역폭(space bandwidth product) 즉, 결상되는 공간주파수(spatial frequency) 한계치는 GRIN 분포를 나타내는 상수들 값에 의해 큰 영향을 받는다. 물매기판의 공간대역폭은 기존의 물매굴절률 렌즈의 대역폭과 동일하게 다음과 같이 정의될 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$B = 460g / \left\{ \frac{3}{4} n(0)(1+gL) \left| h_4 - \frac{2}{3} \right| \right\} \quad (9)$$

한 예로,  $g=0.17\text{ mm}^{-1}$ ,  $n(0)=1.5$ ,  $gL=2\pi$ , 그리고  $|h_4-2/3|=0.1$  일 때,  $B$ 는 약  $95\text{ mm}^{-1}$ 가 된다. 즉, 입력면에 놓인 물체는 x-축 방향으로 약  $10\text{ }\mu\text{m}$  정도의 분해능을 갖고 결상될 수 있으며, 이는 1 mm 당 약 100개 이상의 광신호들이 입력면으로부터 출력면으로 전달될 수 있음을 의미하기도 한다. 그리고, 입력면에 놓인 물체가 출력면으로 결상된 상을 보면 x-축 방향으로로는 z-축에 대해 대칭을 이루지만, z-축 방향으로로는 입력면에

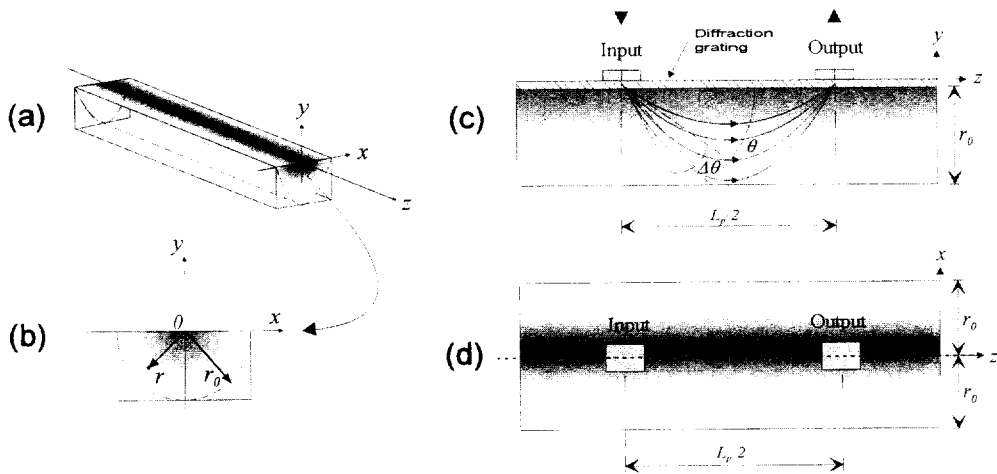


그림 2. 물매기판을 갖는 결상용 평판 광학계. (a) 물매기판 (b) 물매기판 단면에서의 굴절률 분포 (c) 결상용 평판광학계의 측면도 및 (d) 정면도.

서의 위치가 그대로 출력면에 유지된다. z-축방향으로는 위치에 상관없이 동일한 결상특성을 갖고 있다. 따라서, 입력면과 출력면 사이의 거리가  $L_p/2$  가 되도록 유지한 채, 두 면을 물매기판 z-축상의 어느 위치에 놓아도 결상관계를 이룰 수 있다는 특징을 갖는다.

IV. 실험방법 및 측정

실험에 사용된 물매기판의 제작방법은 다음과 같다. 우선, 그림 2(a)에 도시된 물매기판은 장파장용 레이저다이오드에서 나오는 빛을 광섬유에 집광하기 위해 널리 쓰이고 있는  $0.29 \times L_p$  GRIN 렌즈( $L=5.4 \text{ mm}$ ,  $r_o=1.8 \text{ mm}$ ,  $g=0.339 \text{ mm}^{-1}$ , MELLIS GRIOT사 06LGE114 렌즈) 7개를 사용하여 만들었다. 우선 7개의 렌즈들을 유리기판 위에 축방향으로 일렬로 놓은 후, 유리기판 위에 두 개의 슬라이드글라스로 렌즈들간의 간격이 없도록 고정된 채 자외선 접착제(UV Epoxy)로 경화시킨 다음, 렌즈들의 직경이 반이 될 때까지 갈아내었다. 즉, 일렬로 배열된 렌즈 7개를 사용하여 총 길이가  $2.03 \times L_p$  ( $37.8 \text{ mm}$ )인 물매기판을 만들어, 그림 3에서 보는 바와 같이  $L_p/2$  거리마다 순차적으로 결상점들이 나타나도록 함으로써, 길이가 충분히 긴 단일 물매기판을 사용하는 효과를 얻을 수 있도록 하였다.

그림 2(c)에 도시된 회절격자는 위에서 설명된 바와 같이 제작된 물매기판위에 감광제 PR(photoresist, Hoechst사 HKT501)를 약  $1.0 \mu\text{m}$  두께로 스핀코팅한 후, He-Cd 레이저를 사용하여 위상간섭형 격자형태로 제작하였다. 회절격자를 만들기 위한 여러 준비 과정을 자세히 설명하면 다음과 같다.

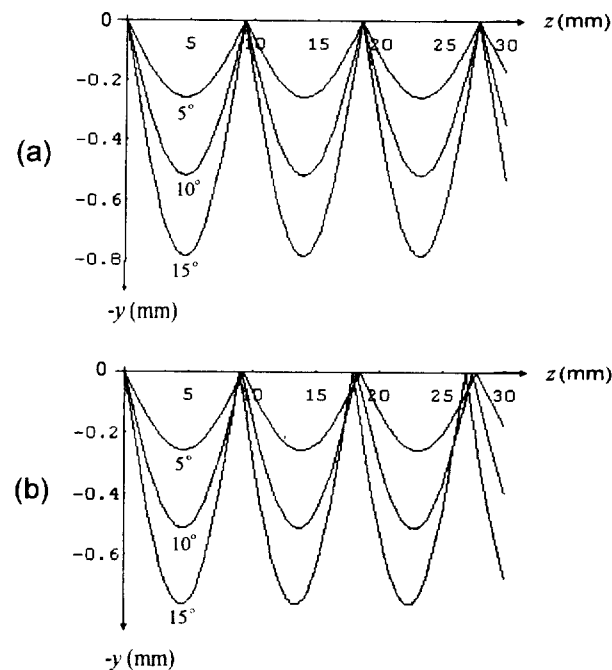


그림 3. 물매기판 내에서의 3개의 다른 각도로 진행하는 근축 광선에 대한 궤적계산 결과. (a)  $h_4=2/3$ ,  $h_6=-17/45$ 인 경우 (b)  $h_4=0$ ,  $h_6=0$ 인 경우.

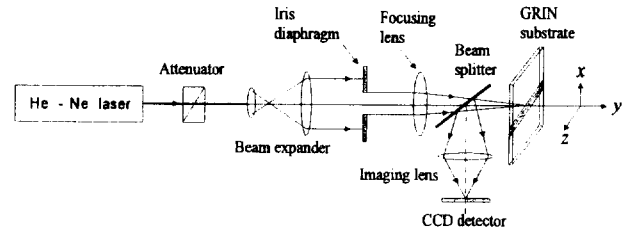


그림 4. 물매기판을 이용한 결상용 평판광학계의 실험 장치도.

먼저 시료의 세척은 초음파세척기를 사용하면 접촉된 렌즈들이 떨어져 나갈 수도 있기 때문에, 거즈에 아세톤을 적셔 손으로 문질러 세척을 한 후 흐르는 증류수로 다시 세척을 하였다. 세척을 끝낸 후 시료에 남아있는 수분을 제거하기 위해  $100^\circ\text{C}$ 인 건조기 내에 10분간 넣어두었다. PR의 접착력을 높이기 위해 물매기판위에 primer를 코팅한 후, PR을 30초 동안 RPM 4000으로 스핀코팅 하였다. 코팅이 끝난 시료는 다시  $100^\circ\text{C}$  건조기 내에 10분간 넣어두어 PR에 녹아 있는 용매를 제거하였다. 이와 같이 준비한 시료위에 식 (8)과 같이 정의된 주기를 갖는 회절격자를 제작하였는데, 본 실험에서는  $\theta=6^\circ$ ,  $n(0)=1.608$ ,  $\lambda_0=633 \text{ nm}$  인 경우로서, 이때 회절격자의 주기는  $0.396 \mu\text{m}$  이었다. 회절격자 제작에 사용된 광원으로는 He-Cd 레이저(Liconix사 3210N, 출력  $12 \text{ mW}$ , 파장  $325 \text{ nm}$ )를 사용하였다. He-Cd 레이저의 파장과 시료에 입사하는 두 빛들의 시료에 수직인 방향에 대한 입사각  $\phi_1$ 과  $\phi_2$  간에는 다음과 같은 관계를 가져야 한다.<sup>[1]</sup>

$$n_o \Lambda (\sin \phi_1 + \sin \phi_2) = \lambda_{\text{He-Cd}} \tag{10}$$

$n_o$ 와  $\lambda_{\text{He-Cd}}$ 는 각각 공기의 굴절률과 He-Cd 레이저의 파장으로서,  $n_o=1$  이므로  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 가  $24.25^\circ$ 이 되도록 하였다. 노출시의 레이저 출력은  $7.0 \text{ mW}$  이었으며, 노광시간은 1분 30초 이었다. 노광이 끝난 후 PR 현상은 현상액(AZ351) : 증류수가 1 : 4로 혼합된 용액을 사용하여 30초 동안 현상한 후 증류수를 1분간 흘려주며 세척하였다.

물매기판을 이용한 결상실험을 위한 장치도가 그림 4에 도시되어 있다. He-Ne 레이저로부터 나온 빛은 감쇠기(attenuator)에 의해 광 세기가 조절되며, 빔 확대기(beam expander)와 조리개(iris diaphragm)를 사용하여 집광렌즈(focusing lens)에 도착하는 빛의 직경을 조절함으로써, 그림 2(c)에 설명된  $\Delta\theta$  값을 변화시킬 수 있도록 하였으며, 물매기판은 집광렌즈의 초점거리( $10.5 \text{ cm}$ )에 위치시켰다. 그림 3과 같이 여러 위치에서 나타나는 결상점들을 측정하기 위해 결상렌즈(imaging lens)와 CCD 광검출기를 사용하였다.

V. 실험결과

물매기판을 이용한 평판광학계의 결상실험 결과가 그림 5에 나타나 있다. 그림 5(a)는 실험결과를 설명하기 위한 그림으로서,  $P_m$  빛이 물매기판에 입사되어  $L_p/2$  거리마다  $P_1$ ,  $P_2$ 의 출력빛이 결상결과로서 나타나는 것을 보여준다. 그림 5(b), (c), (d)는 실험을 통하여 얻은 결과들이다. 그림 5(b)는 입력

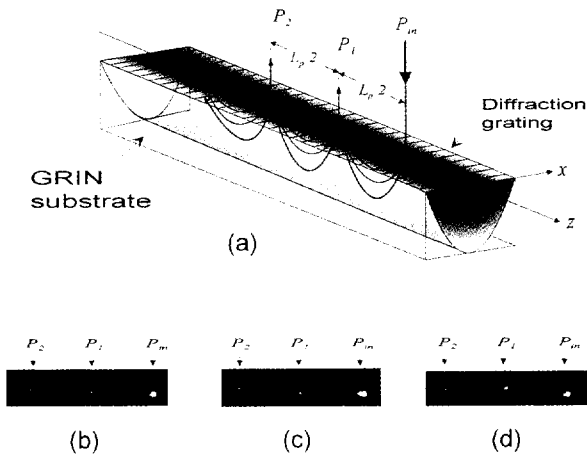


그림 5. 평판 광학계를 이용한 결상실험 결과. (a)는 실험결과를 설명하기 위한 그림으로서,  $P_m$ 은 입력광을,  $P_1$ 과  $P_2$ 는 각각 순차적으로 결상되는 출력광을 나타냄. (b), (c), (d)는  $P_m$ 의 위치가 각각  $x_i=0$ ,  $x_i>0$ ,  $x_i<0$ 인 경우,  $P_1$ 과  $P_2$ 로 결상된 사진임.

광이 물매기판의 z-축상에 놓여있는 즉,  $x_i=0$  인 지점으로 입사할 때 얻어진 결과로서,  $L_p/2$  마다 2개의 결상점들을 z-축상에서 검출되었다. 그림 5(c)와 (d)는 입력광이 물매기판의 z-축상에서 벗어나 각각 x-축 방향으로 약간 위( $x_i>0$ ) 또는 아래( $x_i<0$ )에 위치할 때 얻어진 결과들이다. 즉, 그림 1(c)에서 설명한 바와 같이 그림 5(c)는 렌즈에 입사하는 광원의 위치가  $x_i>0$  일 때, 거리  $L_p/2$ 를 지난 후 얻어진  $P_1$  결상점은  $x_i<0$  위치에 있으며,  $P_2$ 는 다시  $x_i>0$ 인 지점에서 검출되었다. 마찬가지로, 그림 5(d)의 경우에서도 입사광의 위치가  $x_i<0$  일 때,  $P_1$ 과  $P_2$ 의 위치가 x-축 방향에 대해 반대로 나타났다. 따라서, 그림 5의 실험결과를 통하여 본 연구에서 제안된 물매기판을 이용한 평판광학계가 결상용 광학계로서 사용할 수 있음을 검증할 수 있었다.

### VI. 결과분석

본 실험에서 사용된 GRIN 렌즈는 개구수(numerical aperture)가 0.46이었다. 이는 외부로부터 입사되는 입력광의 최대 입사각이  $\theta_{max}=27.5^\circ$  임을 의미하는데, 수식 (6)에서  $h_4=2/3$ 와  $h_6=-17/45$ 가 만족되어  $\Omega=g$ 가 되는 수차가 없는 이상적인 경우에 가질 수 있는 입사각도를 의미한다. 그러나, 상용화되어 있는 일반적인 반경 GRIN 렌즈의 경우, 유효 개구수(effective numerical aperture)는 이상적인 개구수의 55% 정도 밖에 안된다고 보고되어 있다.<sup>[14]</sup> 따라서, 본 실험에서 사용된 렌즈의 유효 개구수는 0.25,  $\theta_{max}=14.7^\circ$ 라 예측될 수 있으며, 렌즈 내부에서 볼 때의 최대 입사각은  $14.7^\circ/n(0)=8.9^\circ$  정도가 된다. 즉, 그림 2(c)에 표시된  $\theta+\Delta\theta/2$ 의 최대값은  $8.9^\circ$ 라 할 수 있다. 그러므로, 회절격자로부터 편향된 빛이 z-축에 대해  $\theta=6^\circ$ 를 이루는 경우, 물매기판 내부로  $\Delta\theta$ 가  $5.8^\circ$  보다 작은 범위로 지나가는 광선들만이 출력면으로 제대로 결상된다고 볼 수 있으며, 이보다 큰 각도를 이루는 광선들은 제대로 결상되지

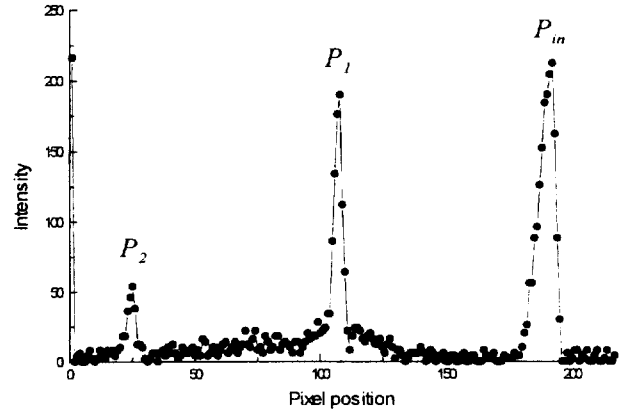


그림 6. 그림 5(b)의 실험결과에서 입력광과 두 출력광들 간의 세기 분포도.

못하고 손실되게 된다. 이러한 유효개구수의 효과를 확인하기 위해, 그림 4의 실험장치에서 사용된 조리개의 개구 크기를 변화시키면서  $\Delta\theta$ 에 따른 결상특성을 실험하여 보았다. 실험결과,  $\Delta\theta$ 가 대략  $1^\circ$  보다 작은 경우에서만 깨끗한 결상결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 비록 실험에서 사용된 렌즈의  $h_4$ 와  $h_6$  값을 알 수 없었지만, 이러한 실험결과로부터 본 실험에 사용된 렌즈의 개구수는 위에서 예측된 유효개구수 보다도 더욱 작을 것이라는 것을 알 수 있었으며, 두 계수 값이 수차가 없는 조건에서 매우 벗어나 있는 것으로 사료된다. 또한, 물매굴절률 렌즈의 굴절률분포가 그림 1(b)와 같은 이상적 분포가 아닌 렌즈의 광축과 인접한 부분에서만 이상적 분포를 하고있는 것으로 여겨진다.<sup>[12]</sup> 이와같이 두 계수값이 수차가 없는 조건에서 벗어나 있음은  $L_p/2$  값을 측정해 봄으로써도 확인할 수 있었다. 그림 6은 그림 5(a)의 실험결과에서 입력광  $P_m$ 과 2개의 결상된 광들인  $P_1$ 과  $P_2$  간의 세기와 상대적인 거리를 측정한 것이다. 그림에 표기된 각 점들 사이의 거리는 0.11 mm 로서, 측정된  $L_p/2$ 는 9.13 mm로 일정하였다. 따라서, 실험에 사용된 GRIN 렌즈의 수차가 없는 경우인  $L_p/2=9.27$  mm와는 큰 차이를 보이므로, 두 계수값이 수차가 없는 경우에서 벗어나 있음을 간접적으로 다시 한번 확인할 수 있었다. 수차계수의 보다 정확한 측정을 통하여 수차 값을 정확히 구하고, 이들의 보상되는 GRIN 렌즈를 사용하게 되면 회절한계에 가까운 결상결과를 얻을 것으로 사료된다.<sup>[12]</sup>

그림 2에 도시된 물매기판을 이용한 평판광학계는 대규모 광신호 병렬처리를 위한 광신호 상호연결(optical interconnections)에 응용될 수 있다. 그림 7에 입력광신호(Input) 및 광검출기(P)들로 구성된 광전집적회로(OEIC; opto-electronic integrated circuits)에서 광신호 연결용으로 사용될 수 있는 하나의 예를 도시하였다. 입력신호로서 단일 광원 혹은 어레이 광원들로부터 나온 빛들이 물매기판을 통하여 양쪽에 배열된 출력광들로 신호가 전달된다. 따라서, OEIC에 있는  $P_i$  간의 거리와 같은  $L_p/2$ 를 갖는 물매기판을 사용하면, 어떠한 결상용 렌즈를 사용하지 않고도 입력 광원 어레이로부터 나오는 광신호들을 여러 광검출기 어레이로 동시에 분배할 수 있다. OEIC와 물매기판과의 정렬에 있어서도 단지 z-축과의 정렬만이 필요하기 때문에, 두 회

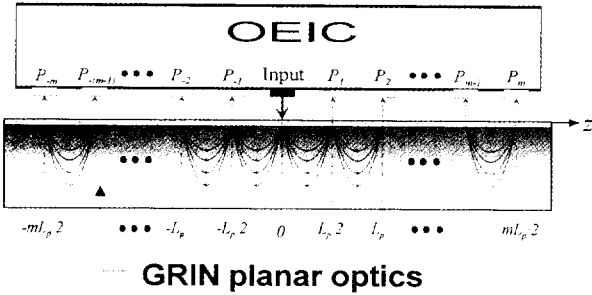


그림 7. 물매기판을 이용한 평판광학적 대규모 광신호 연결계의 구조도.

로간의 집적화도 매우 간단해 진다. 또한, 렌즈를 별도로 사용하지 않는다는 것은 신호의 분배손실을 크게 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 물론,  $P_i$ 들 마다 균일한 광세기로 신호를 분배하기 위해서는 회절격자의 효율을 위치에 따라 변화시켜야 하는 문제점도 있으나, 이는 기존의 광신호 분배 방식에서도 해결해야 되는 동일한 문제이다.<sup>[15]</sup> 물매기판을 제작하는데 있어서도, 본 실험에서 사용된 기존의 물매 굴절률 렌즈를 사용하는 대신 유리기판에 직접 이온교환(ion-exchange) 방법을 사용하여 그림 1과 같은 형태의 물매기판을 제작할 수 있다. 이러한 방식은 지금까지는 주로 수  $\mu\text{m}$  정도의 폭을 갖는 광도파로를 제작할 때 주로 사용되고 있었는데, 최근에는 수백  $\mu\text{m}$  폭을 갖는 도파로형 물매굴절률 소자도 제작되고 있다.<sup>[16]</sup> 따라서, 이온교환 방법을 사용하여 물매기판을 만들게 되면, 일직선 모양의 물매굴절률 분포를 갖는 기판 뿐만 아니라 임의의 2차원 형태를 갖는 물매기판도 제작할 수 있기 때문에, 그림 7과 같은 대규모 광신호 연결회로를 2차원 적으로 구성할 수 있을 것이다. 또한, 고분자 매질을 이용하여 수 mm 이상의 폭을 갖는 GRIN 렌즈 제작이 가능해지고 있으므로<sup>[17]</sup>, 본 논문에서 제안된 물매기판을 이용한 평판광학적 결상 및 광신호 연결의 용량(공간대역폭)을 대규모화 할 수 있을 것으로 판단된다.

### VII. 결 론

기존의 결상광학계가 입력면에 위치한 영상을 출력면에 결상시키는데 있어서 입력면과 출력면 사이에 렌즈를 사용하는 데 반하여, 입력면과 출력면 사이에 렌즈를 사용하지 않고도 기존의 결상방식들과 동일한 결상능력을 갖는 물매기판을 이용한 평판광학적 결상광학계를 제안하였다. 입-출력면을 물매기판 광축상의 일정한 거리에 위치시키기만 하면, 입력면에 위치한 물체로부터 나오는 광신호가 물매기판의 내부에서 사인곡선 모양의 경로를 따라 진행하여 정확하게 출력면에 결상됨을 실험적으로 보였다. 따라서, 기존의 자유공간에서 입력면-공간-렌즈-공간-출력면과 같이 개개의 구별된 광학소자들을 사용하여 구성된 광학결상계와는 달리, 입력면-물매기판-출력면이라는 단순화되고 보다 견고히 집적화된 결상계

를 실현할 수 있다. 그리고, 렌즈와 같은 별개의 광학소자를 사용하지 않고도 회절한계에 가까운 결상 결과를 얻을 수 있으며, 2차원적으로 구성된 광전집적회로에서 광신호를 상호 연결하는데 있어서도 매우 우수한 신호 전달 특성을 가질 수 있다. 특히, 광신호가 전달되는 공간인 광학기판이 렌즈와 같은 새로운 광학적 기능을 가질 수 있다는 개념을 처음 제안하였는데, 이는 기존의 자유공간 광학계에서는 공기 매질의 굴절률 분포를 다르게 한다는 것을 의미하므로 실제로는 불가능하였던 개념으로서, 광학계 구성방식중의 하나인 평판광학계가 갖는 또하나의 장점을 창출하였다는 의미도 갖고 있다. 따라서, 광학기판에 결상이라는 새로운 기능을 부여할 수 있다는 평판광학적 방식이 갖는 새로운 자유도에 의해, 기존의 자유공간 광학계에서는 할 수 없었던 새로운 광학계를 구성하는 것이 가능하게 될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] Jürgen Jahns and Susan J. Waker, *Opt. Commun.*, **76**, 313 (1990).
- [2] Seok Ho Song, Suntak Pak, El-Hang Lee, Pill Soo Kim, and Cha Hwan Oh, *Opt. Commun.*, **137**, 219 (1997).
- [3] Seok Ho Song, Jong-Sool Jeong, Suntak Park, and El-Hang Lee, "Planar optical implementation of fractional correlation," to be published in *Opt. Commun.*, August, (1997).
- [4] K. Matsushita and M. Toyama, *Appl. Opt.*, **19**, 1070 (1980).
- [5] M. Kawazu and Y. Ogura, *Appl. Opt.*, **19**, 1105 (1980).
- [6] W. J. Tomlinson, *Appl. Opt.*, **19**, 117 (1980).
- [7] K. Komiya, M. Kanzaki, Y. Hatate, and T. Yamashita, *Trans. IECE Jpn.* **IE80**, 72 (1980).
- [8] T. Miyazawa, K. Okada, T. Kubo, I. Kitano, K. Nishizawa, and K. Iga, *Appl. Opt.*, **19**, 1113 (1980).
- [9] Y. Suematsu and K. Iga, *Trans. IECE Jpn.* **49**, 1645 (1966).
- [10] Duncan T. Moore, *Appl. Opt.*, **19**, 1035 (1980).
- [11] K. Iga, K. Yodomori, and T. Sakayori, *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 578 (1975).
- [12] Noboru Yamamoto and Kenichi Iga, *Appl. Opt.*, **19**, 1101 (1980).
- [13] Kenichi Iga, *Appl. Opt.*, **19**, 1039 (1980).
- [14] T. Yamagishi, K. Fujii, and I. Kitano, *Appl. Opt.*, **22**, 400 (1983).
- [15] Seok Ho Song and El-Hang Lee, *Appl. Opt.*, **34**, 5913 (1995).
- [16] Jochen Bähr and Karl-Heinz Brenner, *Appl. Opt.*, **35**, 5102 (1996).
- [17] Jui-Hsiang Liu and Hung-Tsai Liu, *Opt. Lett.*, **22**, 668 (1997).

## **Planar-optical interconnections by using a novel gradient-index substrate**

Mu Hee Cho and Yeong Sik Kim

*Department of Physics, Dankook University, Cheonan 330-714, S. Korea*

Seok Ho Song

*Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, S. Korea*

(Received : August 11, 1997)

A gradient-index (GRIN) substrate is proposed as a novel signal propagation medium of planar optics. The GRIN substrate provides planar-optics designers not only a 3-dimensional signal propagation space, but also an additional smart optical functioning component like as a diffraction-limited imaging lens. The novel and smart functioning of the GRIN substrate was confirmed by experiment on imaging of an input signal to multiple destinations.