

회절 광학 소자(Diffractive optical element)는 광학 시스템에 있어서 광을 조절하기 위하여 굴절(refraction) 또는 반사(reflection)보다는 주기 구조(periodic structures)에 의한 회절(diffraction)을 이용한 소자라 할 수 있다

DOE의 장점으로는 수차(aberration)가 없는 point-to-point 이미지가 가능하며 광 power를 사용한 평판(flat surface)이 가능하고 비구면과 같은 수차 조절이 가능하다. 단점으로는 HOE(Hologram Optical Element: DOE의 일종)의 수차가 이 구조의 특정 파장에서 나타나고 가시영역의 일정 영역에서 매우 분산적(dispersive)이다. 또한 상대적으로 시장의 성장에 비하여 찾는 고객의 수가 적다는 점이다.

DOE는 자체적으로 활용 되는 기술이 아니고 구면, 비구면 렌즈계에 적용되어 부가가치의 기능을 내는 것으로

사용 예를 들면 그림 1과 같다.

DOE의 형상은 Thin phase 격자(hologram과 DOE로 다양하게 불림)와 Thick phase 격자(일반적으로 hologram으로 불림)로 분류한다.

Thin phase 격자에는 일반적으로 프린터, 플로터 또는 합성 기법에 의해 생성된 CGH(Computer generated hologram), 평판 위에 다층 Mask의 Photo-etching에 의해 생성된 Binary Optics, 구면 또는 비구면 기판 위에 다이아몬드 turning 또는 평행한 기판 위에 laser writing에 의해 생성된 Kinoforms가 있다. Thin phase 격자는 상대적으로 광각과 넓은 스펙트럼 bandwidth에서 높은 회절 효율을 가진다. Thick phase 격자는 중 크롬산염 젤라틴과 같은 두꺼운(5 ~ 30 μ m) 감광 유체에 간섭 주름을 레코딩 함에 의해 형성된다.

특집 ■ 비구면 렌즈기술

회절광학 소자 렌즈 (Diffractive Optic Elements)

최종곤*

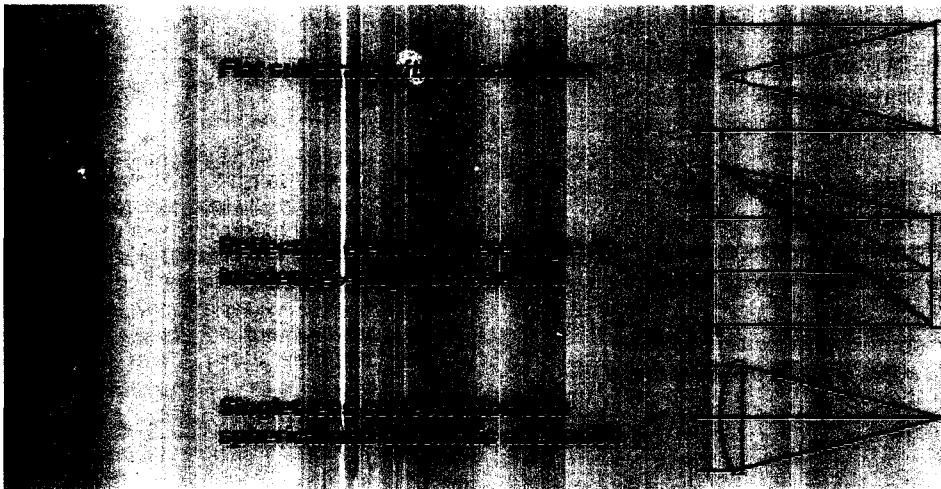


그림 1. DOE의 부가가치 기능

* (주)선양디지털이미지 연구소장

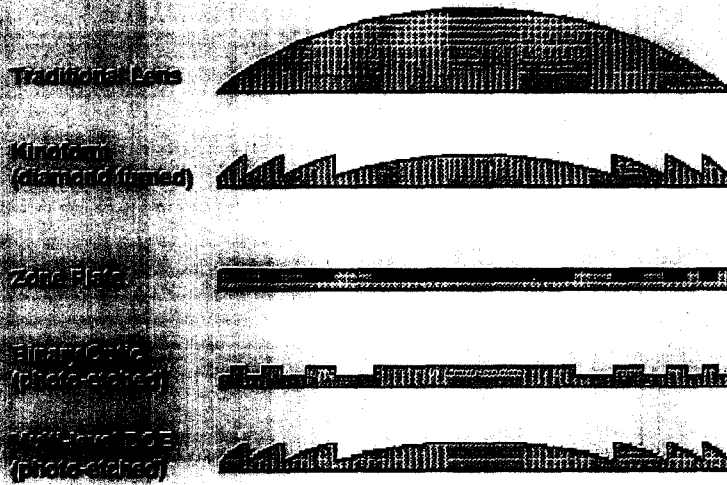


그림 2. 간섭 주름 형상

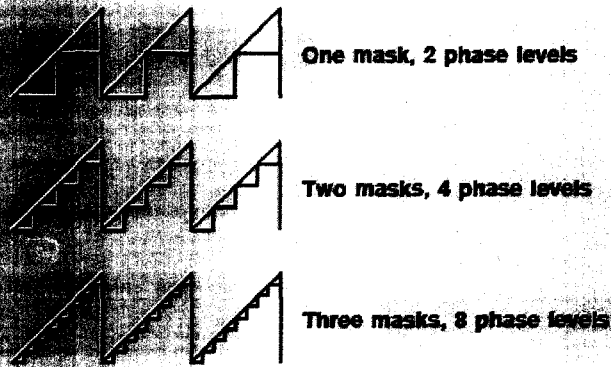


그림 3. Binary Optics

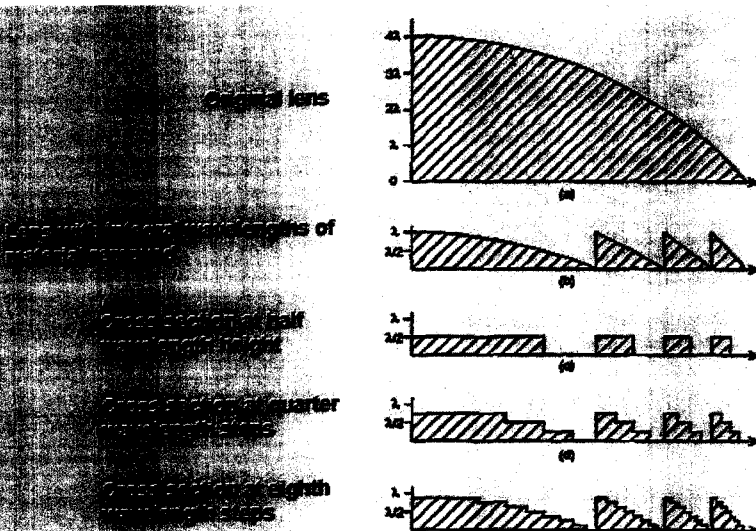


그림 4. Binary Optical Element의 구조

회절광학 소자 렌즈 (Diffractive Optic Elements)

형상을 예를 들면 그림 2와 같다.

일반적으로 Binary Optics은 요구되는 정밀도에 따라 다층의 mask를 사용하여 photo-etching을 수행함에 의해 평면 기판 위에 제조된 DOE이다. 사용된 mask의 수를 N 이라 하면 그 step의 수가 2^N 임으로 binary optics로 불린다(그림 3).

Binary Optical Element의 구조를 보면 그림 4와 같다.

1. 회절렌즈의 결상 원리의 특성

m번째 회절 원의 반경을 r_m 이라 하면 r_m 은 다음 식과 같게 된다.

$$r_m = (m^2 \lambda_0^2 + 2m \lambda_0 f)^{1/2} \quad (1)$$

$$\approx (2m \lambda_0 f)^{1/2} \quad (2)$$

이 때의 λ_0 는 파장을 나타낸다. 각 원 영역을 통과하는 광파의 위상 변화는 근접 축 영역을 고려하면 식 (3)과 같다.

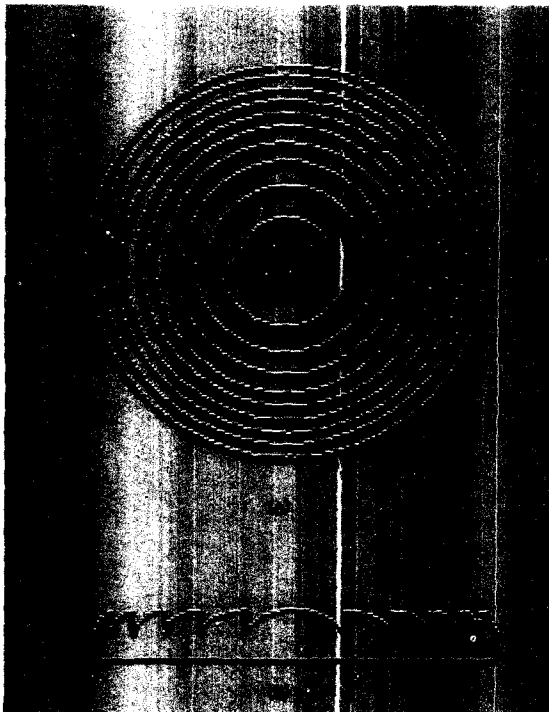


그림 5. (a) 회절 렌즈 (b) 양각 위상형 Zone Plate

$$\phi_m = a2\pi(m-r^2/2\lambda_0f), r_m \leq r < r_{m+1} (m = 0,1,2,\dots) \quad (3)$$

zone plate의 굴절률을 $n(\lambda)$ 라 하면,

$$a = [\lambda_0 \{n(\lambda) - 1\}] / [\lambda \{n(\lambda_0) - 1\}] = \lambda_0 / \lambda \quad (4)$$

여기서, $\xi = r^2 / (2\lambda_0 f)$ 라 할 때, 식 (3)은,

$$\phi_m(\xi) = a2\pi(m-\xi), m \leq \xi < m+1$$

이 되며 zone plate 전체의 투과계수 $t(\xi)$ 는 주기 1의 ξ 의 주기계수에 해당하는 차식의 푸리에 급수 전개로 표현된다.

$$t(\xi) = \sum_{(k=-\infty, \infty)} c_k \exp(i2\pi k \xi) \quad (5)$$

여기서, c_k 는 다음과 같이 표시된다.

$$c_k = \exp[-i\pi(\alpha+k)] \sin[\pi(\alpha+k)] / \pi(\alpha+k) \quad (6)$$

그림 5b의 zone plate의 진폭 투과율은 최종적으로 다음과 같다.

$$t(r) = \sum_{(k=-\infty, \infty)} \exp[-i\pi(\alpha-k)] \sin c[\pi(\alpha-k)] \exp[-i\pi r^2 k / (\lambda_0 f)] \quad (7)$$

$$\sin c(x) = \sin(\pi x) / \pi x \quad (8)$$

k 를 $-k$ 로 치환하면 식(7)의 파장 λ 의 평행광 입사는 다음과 같이 표시된다.

$$f_k = \lambda_0 f / \lambda k \quad (9)$$

이 때에 곡률반경에 대하여 다수의 구면파가 발생하는 현상이 나타난다. 이 상황에서 k 차 회절 광의 회절 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_k = \sin^2(\alpha - k) \quad (10)$$

식 (10)에서 $\lambda = \lambda_0$ 가 될 때, $\eta_1 = 1$ 이 되며, 1차 회절



광에 대하여 100% 회절 효율을 얻을 수 있는 것으로 해석된다. 파장에 있어서 기준 파장은 회절 효율이 저하되는 $\alpha = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ 을 식 (10)에 대입하여 계산하여 회절 효율의 파장 의존성을 그림 6에 나타내었다.

초점 거리는 기준 파장 대비 초점 거리를 f_0 라 할 때, 식 (9)에서 다음과 같이 표현된다.

$$f = (\lambda_0/\lambda)f_0 \quad (11)$$

이 굴절률 n_{eqv} 는 통상 굴절렌즈를 고려하여

$$1/f = (n_{eqv} - 1) c \quad (12)$$

가 되며, $n_{eqv} = 1 + 1/cf$ 가 성립한다. 여기에서 c 가 곡률을 의미한다.

2. 회절소자의 광선 추적법

광선 추적법에는 격자 방정식을 이용한 방법과 Sweatt model을 이용한 방법(고굴절률법)의 두 가지 방법이 있다.

2.1 격자방정식 이용법

(p_x, p_y) 와 (p'_x, p'_y) 을 각각, 회절 소자에 입사와 출사하는 광의 방향여현(vector)이라 하면,

$$\begin{aligned} p'_x &= p_x + m\lambda \nu_x \\ p'_y &= p_y + m\lambda \nu_y \end{aligned} \quad (14)$$

가 성립한다. 여기서 m 은 회절 차수, (ν_x, ν_y) 는 추적 장소의 국소적 공간 주파수를 표시한다. 홀로그래프에 대하여 물체 광은 참조 광의 간섭 격자를 만들게 되므로 차식을 이용하여 풀어보면, 다음과 같다.

$$n \times (r'_0 - r'_1) = m\lambda/\lambda \times n \times (r_0 - r_1) \quad (15)$$

여기서 n 은 홀로그래프 면의 법선 단위벡터, $(r_0 - r_1)$ 는 홀로그래프 작성 시의 물체에 대한 참조 광의 방향여현 성

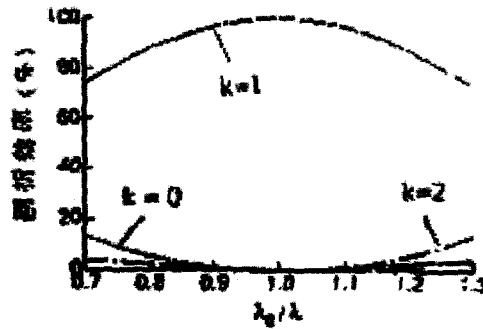


그림 6. 회절효율 대 파장의존성

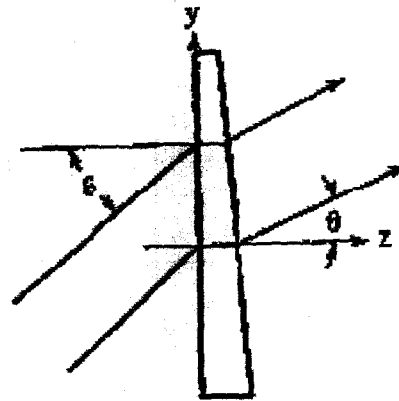


그림 7. 굴절률이 큰 시정의 렌즈 모델

분의 단위벡터. $(r'_0 - r'_1)$ 는 각각, 홀로그래프의 재생 시의 입사광에 대한 출사광의 같은 양에 대한 단위벡터로 표시된다.

2.2 Sweatt model을 이용한 방법

구면파의 발생시 홀로그래프는 굴절률 $n \rightarrow \infty$, 곡률 반경 $R = (n-1)f$, conic constant $K \approx -n^2$ 의 쌍곡면에 대하여 광학적으로 등가이다. 결과적으로 두꺼운 부분의 비상 차가 작을 때, 굴절률의 비상이 커지는 렌즈를 가상하면, 회절 렌즈의 광선 추적은 통상, 굴절 광학계의 프로그램을 이용하게 된다. 그림 7에서처럼, 굴절률의 비상(非常)이 크면, 글라스의 두꺼운 부분인 Z 는 다음의 식 (16)을 성립하게 된다.

회절광학 소자 렌즈(Diffractive Optic Elements)

$$(n-1) \frac{dZ}{dy} = \sin\theta' - \sin\theta \quad (16)$$

위의 식에 격자방정식을 비교하면,

$$(n-1) \frac{dZ}{dy} = m\lambda \nu \quad (17)$$

의 관계가 성립한다. 여기서 ν 는 격자의 국소적 공간주파수를 표시한다. 렌즈 형상 $Z = f(y)$ 의 부분은 식 (17)을 사용하여 zone plate의 격자간격 $P (=1/\nu)$ 가 계산된다. 비구면적 효과를 고려하면, F number가 최소인 격자간격 P_{\min} 은 식 (18)과 같이 계산된다.

$$P_{\min} = 2\lambda F(1 + 1/4F^2)^{1/2} \quad (18)$$

회절 광학 소자의 응용 범위는 광학렌즈의 수차 보정, 광 픽업용, 광 정보처리용, conductor laser 등 여러 분야에서 사용되며 이외에 계측용에 필요한 파면 생성의 파면 변환을 수행하는 기능소자 등 홀로그래픽 소자를 이용한 사례가 다양하게 알려지고 있다. 또한 head-up display 등, 표시용 display의 부류인 micro-optics 용에도 광범위하게 고려되고 있다.

1989 : 인하대학교 금속공학과 졸업
 1989~2002: 삼성전자 반도체 근무
 현 (주)산양디지털이미지 연구소장