

Micro fresnel lens 시뮬레이션 평가

신승연*, 박효덕, 박광범, 김건년, 이보나, 정석원, 김인희, 문현찬, 신상모
전자부품연구원

Simulation estimate of micro fresnel lens

SY.Shin*, HD.Park, KB.Park, KN.Kim, BN.Lee, SW.Jeong, IH.Kim, HC.Moon, SM.Shin
Korea Electronics Technology Institute

Abstract - Fresnel lens는 zone plate에 비해 공정은 쉬우나 회절 효율이 높은 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 micro fresnel lens를 설계하고 각각의 회절 효율 및 focal size를 계산하였으며, 비교적 공정이 용이한 계단 모양의 fresnel lens를 설계하여 회절 효율과 focal size를 계산하였다. 그리고, 광원의 파장과 초점거리에 따른 lens의 회절 효율을 비교하였으며, 계단의 수에 따른 회절 효율도 비교하였다.

1. 서 론

일반적으로 고정된 초점거리를 가지고 직경을 증가시키면, lens가 두껍고 무거워진다. 그러나 fresnel lens의 경우는 그렇지 않다. Fresnel lens의 광학적 특성은 본질적으로 일반적인 lens와 같다. Fresnel lens는 100여년 전에 빛을 평행광으로 만드는데 사용되었고, 오늘날 날에도 camera, overhead projector와 같은 제품에 널리 사용된다. Fresnel lens는 대개 상대적으로 큰 aperture와 작은 numerical aperture를 가진다. 최근에는 laser-disk player의 pickup lens와 광통신 시스템의 coupler lens와 같은 다양한 광학 시스템 분야에서 작은 aperture와 큰 numerical aperture를 요구하게 되었다. 지금까지 두 가지 형태의 micro lens, 즉 보통의 블록lens, graded-index lens와 같은 굴절형 lens와 holographic lens, zone plate와 같은 회절형 lens가 사용되었다. Micro fresnel lens는 두 형태의 중간이다. 중심부는 굴절형 lens와 같고 바깥쪽은 회절형 lens와 같다. Quasi-periodic structure때문에 fresnel lens는 파장에 따라 특성이 크게 달라진다. 본 실험에서는 fresnel lens를 설계하고 각각의 회절 효율을 계산하였으며, 비교적 공정이 용이한 계단 모양의 fresnel lens를 설계하여 회절 효율을 계산하였다. 그리고, 광원의 파장과 초점거리에 따른 lens의 회절 효율을 비교하였으며, 계단의 수에 따른 회절 효율도 비교하였다.

2. 본 론

2.1 Micro fresnel lens

2.1.1 Micro fresnel lens의 설계

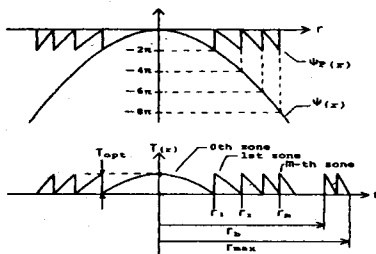


그림 1: Micro fresnel lens의 구조

그림 1은 각 구간마다 곡률을 가진 micro fresnel lens의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1에서 m번째 zone까지의 반지름은 식 (1)과 같다.

$$r_m = \sqrt{2m\lambda f + (m\lambda)^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 λ는 광원의 파장이고, f는 초점이다. m은 lens 내의 zone의 수이다.

그리고 각 zone에서 Gradient thickness structure는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(r) = \frac{\lambda}{2n} \left[\frac{\Psi_F(r)}{2\pi} + 1 \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 Ψ_F(r)은 phase distribution으로 m번째 구간인 경우 식 (3)과 같다.

$$\Psi_F(r) = k_0(f - \sqrt{f^2 + r^2}) + 2m\pi \quad r_m < r < r_{m+1} \quad (3)$$

식 (3)에서 첫 번째 항은 일반 lens의 phase distribution으로 그림 1에 잘 나타나 있다. 그리고, 식 (2)에서 1이 더해진 것은 0 < r < r_1 에서 Ψ_F(r)가 음수이기 때문이다. 따라서 Ψ_F(r)에 2π의 위상을 더하여 양수로 만든 것이다.

식(2)에 의한 lens의 두께는 lens와 진공의 굴절률의 차이와 광원의 파장에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그림 2는 두 종류의 파장과 두 종류의 초점에 대해 설계된 lens의 모양이다.

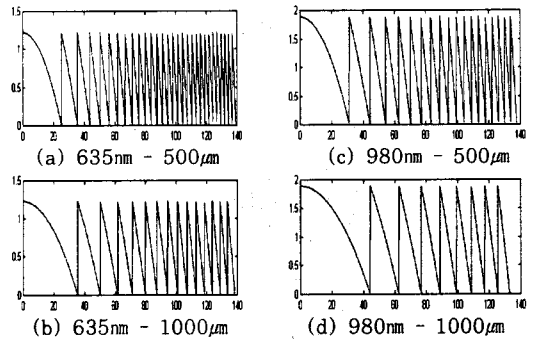


그림 2: 설계된 micro fresnel lens

Lens의 반지름을 140μm으로 설정한 경우 그림 2의 lens 모양은 파장과 초점에 따라 그림 1의 r_max가 주어진 lens 반지름 즉 140μm를 넘지 않도록 설계된 것이다. 따라서 파장과 초점의 변화에 따라 micro fresnel lens의 r_max는 각기 다르다.

그림 2에서 (a)는 광원의 파장이 635nm이고 초점거리가 500μm인 경우 설계된 micro fresnel lens이며, (b)는 광원의 파장이 635nm이고 초점거리가 1000μm인 경우 설계된 micro fresnel lens이다. 같은 방법으로 그림 2의 (c)와 (d)도 나타내었다. 파장이 635nm인 경우 렌즈의 두께는 1.22μm이며, 980nm인 경우는 1.89μm이다. (a)의 경우 zone의 수는 30개이고, (b)의 경우는 15개이며, (c)와 (d)의 경우는 각각 19개와 9개이다.

파장이 커질수록 zone의 수가 작아지고 초점거리가 길어질수록 zone의 수가 작아짐을 볼 수 있다.

2.1.2 계단형 micro fresnel lens의 설계

실제로 그림 2와 같이 lens를 설계하기 위해서는 electron-beam 방법을 써야 하는데 이 방법은 정교한 구조를 만들 수 있기는 하지만 비용이 너무 비싸다. mask-etching 방법을 쓰면 적은 비용으로 계단형 fresnel lens를 설계할 수 있다.

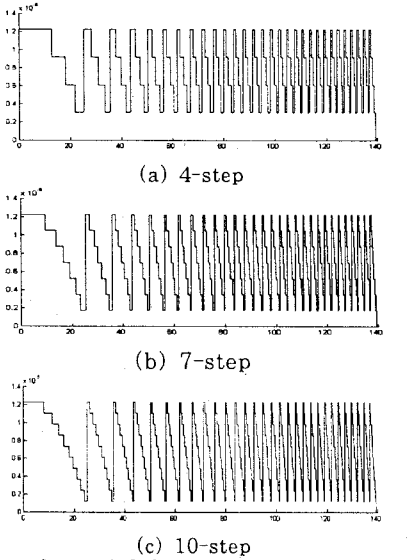


그림 3: 계단형 micro fresnel lens

그림 3은 그림 2의 곡률을 가진 micro fresnel lens (a)를 계단형 fresnel lens로 나타낸 것이다. 그림 3의 (a)는 4개의 계단을 가진 micro fresnel lens이며, (b)는 7개, (c)는 10개의 계단을 가진 계단형 micro fresnel lens이다. 그림 3에서 계단 높이는 렌즈의 두께를 원하는 계단의 수로 등분하여 얻었다.

2.1.3 Micro fresnel lens의 회절 효율

본 실험에서는 micro fresnel lens에서의 회절 효율을 계산하기 위하여 Rayleigh-Sommerfeld의 회절 공식을 사용하였다[1]. Rayleigh-Sommerfeld의 회절 공식에 의하면 회절되고 나서 점 P_0 에서의 complex amplitude는 식 (4)과 같이 나타난다.

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \int \int_s U(P_1) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\vec{n}, \vec{r}_{01}) ds \quad (4)$$

Complex amplitude를 구체적으로 설명하면, 빛의 파동(전기장)을 크기와 위상 성분을 포함시켜 복소수로 나타낸 것이다.

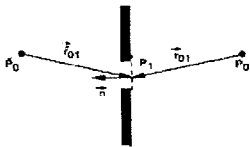


그림 4: Rayleigh-Sommerfeld 회절 공식의 참고

그림 4를 참고하면 P_1 은 micro fresnel lens 면상의 점을 뜻하고 s 는 그 영역을 뜻한다. 또한 r_{01} 은 P_0 와 P_1 사이의 거리를 뜻하며, $\cos(\vec{n}, \vec{r}_{01})$ 은 lens의 면에 수직인 법선과 \vec{r}_{01} 과의 각도에 대한 cosine을 뜻한다. 식 (4)에서 micro fresnel lens의 초점거리가 f 라면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \int_{r=0}^{\max} U(P_1) \frac{\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{r^2+f^2})}{\sqrt{r^2+f^2}} \frac{f}{\sqrt{r^2+f^2}} 2\pi r dr$$

$$= \frac{2\pi f}{jk} \int_{r=0}^{\max} U(P_1) \frac{\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{r^2+f^2})}{r^2+f^2} r dr \quad (5)$$

여기서,

$$U(P_1) = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(nT(r) + T_{\max} - T(r))\right]$$

$$= \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\Delta n T(r) + \frac{\lambda}{\Delta n}\right)\right]$$

$$= \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta n T(r)\right] \exp\left(j\frac{2\pi}{\Delta n}\right) \quad (6)$$

이고, P_1 의 위치에 무관한 상수를 생략하여 나타내면 식(6)은 식 (7)과 같이 나타난다.

$$U(P_1) = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta n T(r)\right] \quad (7)$$

식 (4)을 이용하면 초점 평면에서의 intensity profile을 구할 수 있다. 그림 5는 그림 2의 micro fresnel lens 각각의 초점 평면에서의 intensity profile로서, 양의 부분만 나타낸 것이다.

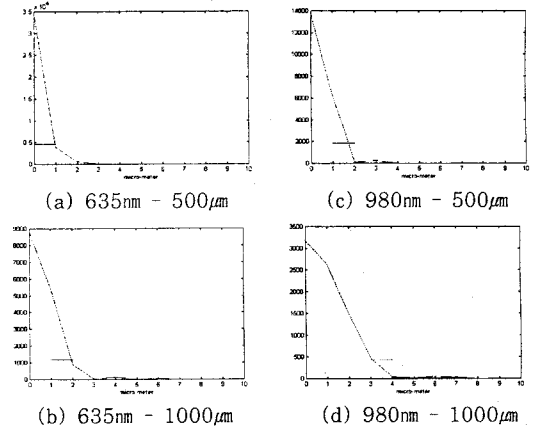


그림 5: 설계된 lens의 초점평면에서의 intensity profile

그림 5에서 (a)는 광원의 파장이 635nm이고 초점거리가 500 μ m인 경우 초점 평면에서 intensity profile을 나타낸 것이며, (b),(c),(d)도 같은 방법으로 나타낸 초점 평면에서의 intensity profile 그래프이다. 초점 평면에서의 intensity profile을 구하였다면 이제 회절 효율을 계산할 수 있다. 회절 효율은 식 (8)과 같다.

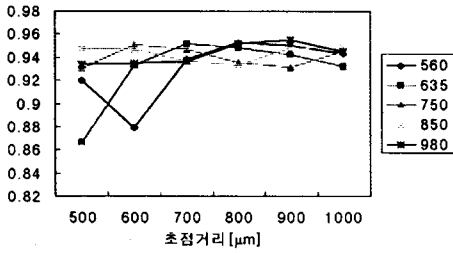
$$\text{회절효율} = \frac{\text{FWHM에 속한 빛의 량}}{\text{렌즈에 투과한 빛의 총량}} \quad (8)$$

식 (8)에서 FWHM(full width half maximum)은 intensity profile 최대값의 $\frac{1}{e^2}$ 로 정의하였다. 그림 5에서 그래프 중간에 가로선에 해당하는 부분이 FWHM 지점이 intensity profile과 만나는 지점을 나타낸 것이다. Focal size는 FWHM에 해당하는 초점평면 값으로 생각하면 된다. 즉 그림 4에서 focal size는 FWHM을 나타내는 가로선과 그래프의 곡선이 만나는 지점의 가로축 값이며, 반지름값이다.

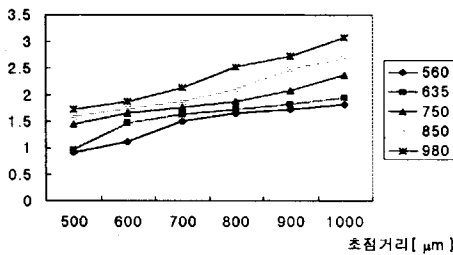
계단형 micro fresnel lens의 회절 효율을 계산하기 위해서는 식 (7)에서 $T(r)$ 값을 등분된 micro fresnel lens의 높이 값으로 하면된다. Rayleigh-Sommerfeld의 회절 공식을 이용하여 회절 효율을 계산하는 경우 곡률을 가진 fresnel lens와 계단형 fresnel lens의 차이점은 식 (7)에서만 나타나기 때문이다. 이 때 적분은 계단마다 구분하여 한다.

2.2 시뮬레이션 및 결과

Micro fresnel lens의 설계를 위하여 먼저 설정한 값들이 있다. Lens의 재질은 BK7이며, 따라서 렌즈의 굴절률은 1.5185이다. 그림 6은 광원의 파장과 초점거리 변화에 따른 회절 효율의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.



(a) 회절 효율 그래프



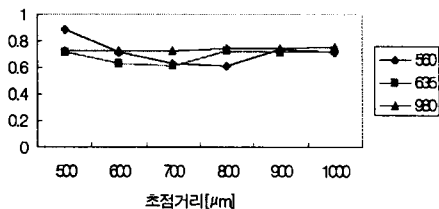
(b) focal size 그래프

그림 6: 곡률을 가진 fresnel lens의 파장과 초점거리 변화에 따른 회절 효율과 focal size의 변화

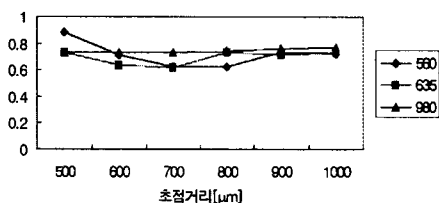
그림 6에서 가로축은 초점거리의 변화를 나타내며, 세로축은 (a)의 경우 회절 효율을 나타낸 값이며, (b)의 경우 focal size의 1/2을 나타낸 것이다. 광원의 파장을 560nm, 635nm, 750nm, 850nm, 980nm에 대해서 나타내었다. 그림 6의 (a)에서 보면 파장이 커질수록 초점거리에 대한 회절 효율의 변화가 거의 없다. 그러나 대부분의 경우 0.9 이상의 높은 효율을 보였다.

그림 6의 (b)를 통해 파장이 짧을수록 그리고 초점거리가 짧을수록 focal size가 작음을 볼 수 있다.

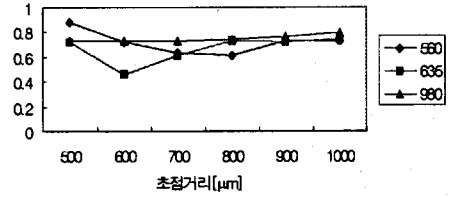
계단 모양의 fresnel lens의 경우 광원의 파장과 초점거리의 변화에 대한 회절 효율의 변화는 그림 7과 같다.



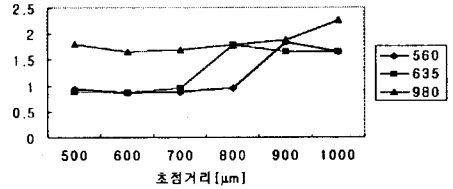
(a) 4-step fresnel lens의 회절 효율



(b) 7-step fresnel lens의 회절 효율



(c) 10-step fresnel lens의 회절 효율
계단형 fresnel lens의 focal size



(d) 계단형 fresnel lens의 focal size

그림 7: 계단형 fresnel lens의 파장과 초점거리 변화에 따른 회절 효율과 focal size의 변화

그림 7의 (a)는 4개의 계단을 가진 micro fresnel lens의 회절 효율을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 가로축은 초점거리의 변화를 나타내며 단위는 μm 이다. 광원의 파장을 560nm, 635nm, 980nm의 세 가지 경우에 대해서 나타낸 것이다. 세로축은 회절 효율을 나타낸 것이다.

그림 7의 (b)는 7개의 계단을 가진 micro fresnel lens에 대한 회절 효율을 나타낸 것이며, (c)는 10개의 계단을 가진 경우에 대한 그래프이다. (d)는 focal size의 1/2을 나타낸 것으로 세로축의 단위는 μm 이다.

그림 7을 보면, 계단형 fresnel lens의 경우 곡률을 가진 fresnel lens에 대해 전체적으로 회절 효율이 낮게 나타났다. 계단형 fresnel lens에 대해서도 파장이 커질수록 초점거리의 변화에 대한 회절 효율의 변화는 거의 나타나지 않았다. 그리고 계단수가 증가할수록 회절 효율은 나아지지 그 정도는 크지 않았다.

계단형 fresnel lens의 경우 focal size는 곡률을 가진 fresnel lens보다 작다. 초점거리가 짧을수록 그리고 파장이 짧을수록 작아진다. 계단 수의 변화에 대한 focal size의 변화는 거의 없었다.

3. 결론

본 실험에서는 일반적 fresnel lens 모양인 곡률을 가진 micro fresnel lens를 설계하고 Rayleigh-Sommerfeld 회절 공식을 이용하여 다양한 광원의 파장과 초점거리에서의 회절 효율과 focal size를 계산하였다. 그리고 렌즈를 실제 설계함에 있어서 설계가 용이한 계단형 fresnel lens를 설계하여 이 때의 회절 효율과 focal size를 계산하였다. 회절 효율의 경우 계단형 fresnel lens의 설계 결과에서 계단 수의 증가에 따른 효율 변화는 거의 없었으며, focal size의 경우는 파장 및 초점거리가 짧을수록 작게 나타났다.

이상의 결과로 micro fresnel lens의 실제 제작에 있어서 그 공정을 보다 단순화 할 수 있을 것으로 기대된다.

(참고 문헌)

- [1] 서울대학교 광학연구회, 현대광학, 1996.
- [2] N. Kitaura, S. Ogata, Y. Mori, Optical Engineering, Vol. 34, No. 2, 1995