

해상용 등명기를 위한 Fresnel Lens의 설계 및 제작에 관한 연구

김종태*

부경대학교 화상정보공학부, 부산 608-739

박승남 · 박철웅

한국표준과학원 광도복사도그룹, 대전 305-600

(2006년 9월 6일 받음)

일반적으로 등명기용 광학계는 광을 멀리 전달하는 목적으로 사용하고, 부피를 줄이기 위하여 Fresnel 형태의 lens를 사용한다. Fresnel lens는 광학 재질, 초점거리, groove개수 (zone 개수) 및 groove의 기울기 등의 광학요소로서 특징 지워진다. 이와 같은 Fresnel 형태의 대구경 광학계의 설계를 근축광학이론을 이용하여 해석적인 방법으로 각 sag별 광학적요소를 독립적인 렌즈의 일부 분으로 설정하여, 각각의 구속조건을 만족하도록 설계 변수를 결정하고, 중심 광점에 대하여 시준 빔(collimation beam)이 되도록 최적 설계하였다.

PACS numbers: 42.15.Eq

Keywords: 프레넬 렌즈, 등명기, 광학계 설계

I. 서 론

Mirror나 렌즈는 모든 광학계의 기본이 되는 광학 소자이다. 이러한 mirror나 렌즈로 구성된 광학계가 하는 역할은 광원에서 나온 빛을 효율적으로 이용하고자 하는 것이다. 다량의 복사에너지가 필요한 경우에는 대구경 시스템이 요구되어진다. 그러나 대구경 시스템은 부피가 아주 커지게 되고 가격 또한 비싸지게 된다. 구경이 클수록 광학계의 수차로 인하여 상면의 조도 분포가 불균일하게 되는데, 이러한 점들을 극복한 시스템을 만들기 위해 Fresnel 렌즈를 이용하는 것이다 [1].

기존에 광학소자로서 이용되어 온 것은, 렌즈나 프리즘과 같은 광의 반사, 굴절을 이용한 것이 대부분이었다. 그러나 최근 들어 array 광학소자나, 회절 광학소자에 대한 관심이 높아지고 있다. 광 집속 능력이 뛰어나 보통의 렌즈를 보완하는 중요한 광학 소자가 될 것이라고 생각하고, 또한 다양한 기능을 가진 광학소자를 저렴하게 제공할 수 있기 때문이다. Fresnel 렌즈는 모든 방향으로 빛을 전파해 줄 수 있는 광학계로서 항로 표지에 많이 이용되고 있는 광파표지용 등명기에 사용되는 기본 형태이다 [2]. 해상용 등명기 시스템은 크게 상부 등체와 하부 등체로 나눌 수 있으며, 상부 등체는 렌즈, 전구 교환

기, 해상용 전구로 구성되어 있고, 하부 등체는 하부케이스, 섬광기, 일광변 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 광학 부분은 렌즈부와 전구부로서 전체 시스템의 크기가 결정되고, 그 성능이 좌우되는 핵심부이다. 본 논문에서는 Fresnel 렌즈의 특징을 설계에 필요한 사항을 살펴보고, 해상용 대구경 등명기를 구성하는 광학계 중 렌즈부에 해당하는 250 mm Fresnel 렌즈를 근축광학이론을 이용하여 해석적인 방법으로 각각의 segments의 설계변수를 결정하여 성능분석을 통하여 설계 제작 하였다.

II. 해상용 등명기용 Fresnel 렌즈의 분석

1. Fresnel 렌즈의 개요

렌즈의 굴절면 형태는 그 렌즈의 초점 특성을 결정짓는 중요한 요소이고, 굴절면 사이에 있는 재료의 부피는 렌즈의 광학적 특성에 미치는 영향이 작다. 따라서 Fresnel 렌즈는 재료의 부피를 최소화하고, 초점 특성은 그대로 유지할 수 있도록 제작된 특수렌즈의 일종으로서 curved surface의 외형은 광속을 하나의 초점에 맺히도록 렌즈의 광학적 특성을 결정하는 곡면으로 구성되어 있는 curved prism surface 형태의 groove로 구성되어 있다. 프레넬 렌즈 중심 근처에서의 groove의 경사면은 렌

*E-mail: jtkim@pknu.ac.kr

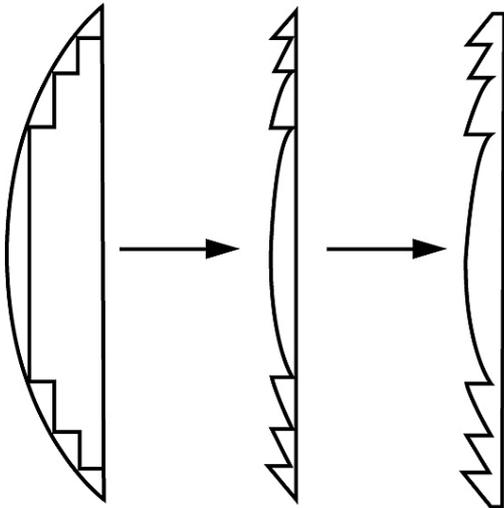


Fig. 1. Profile of a typical Fresnel lens.

즈 중심축에 가까운 면이 렌즈 중심축과 이루는 각도가 0°에 가까워서 렌즈의 중심축과 거의 평행하고, 중심축에서 벗어나 edge 쪽으로 갈수록 경사가 가파르게 구성된다. 이러한 각 groove을 기준 면으로 이동시킬 때 이동에 따른 각도 보정을 하기위하여 원래의 비구면 profile의 형태로부터 약간씩 보정되어야 한다. 최근 들어 optical-quality plastic의 출현으로 압축, injection molding 기술, 그리고 computer-controlled machining으로 제작이 쉬워졌고, 유리로 된 Fresnel 렌즈보다 더 높은 광학적 성능을 갖는 플라스틱 Fresnel 렌즈의 광범위한 응용이 가능하게 되었다 [3].

Fresnel 렌즈는 Fig. 1과 같이 조각난 형태의 구면 또는 비구면 형태의 단일 렌즈가 각각의 segment에 다른 굴절능 (power)을 갖는 여러 장의 curved prism 조각의 결합으로 구성된 array 렌즈로 생각할 수 있다. 렌즈는 일반적으로 원형의 축대칭 형태로서, over-head projector의 condenser와 같이 매우 정밀한 면으로 되어 있거나, 대형 렌즈의 부피를 줄이는 방법으로 Fresnel 형태의 렌즈가 사용되었다. 따라서 Fresnel 렌즈는 부피가 큰 렌즈를 초점까지의 광로차가 같도록 잘라서 평면에 붙인 것과 같은 것으로 이해할 수 있고, 원래 등대등과 같이 대형 렌즈의 제작을 위해서 사용된 방법으로서 대형 렌즈의 경우 너무 무거워서 다루기가 어렵기 때문에 그 부피를 줄이기 위한 용도로서의 대구경 조명 광학계에 많이 사용한다.

2. Fresnel 렌즈의 분석

Fresnel 렌즈는 광학 재질, 초점거리, groove 개수 (또는 zone 개수), groove의 기울기, surface의 형태 (spherical, aspherical)등의 요소로 특징 지워진다.

광학 재질은 가공성을 중요시 할 뿐만 아니라, 사용하고자 하는 파장 영역에 대해 투명도가 높아야 한다. 또한 대구경 가공시 외형 가공에 문제가 없어야 한다.

초점거리는 일반 렌즈에서와 동일하게 중심부 zone에 의해 근축 광학적으로 결정되는 요소이고, 고효율 광학계일수록 일정해야 하고, 광학계의 field angle에 의해 초평면 상에서 상의 크기를 결정하는 요인으로서, 빛의 손실이 없이 원거리까지 보내는 역할을 하도록 설정되어야 한다.

Zone의 개수 및 기울기는 광량의 손실이 없이 광학계에서 굴절이 일어나도록 기하학적인 구조에 의해 결정되는 양으로서 상면의 밝기를 결정하는 요인으로서 광원에서 나오는 광 전체가 모두 상면에 도달하지 못하고, 반사, 흡수, 산란 등에 의해 손실이 있을 수 있다. 이 중에서 경계면에서의 반사에 의한 손실이 중요한 인자로서 광학계의 투과율은 매질에서 공기로 입사하는 입사각이 약 41°보다 크면 내부 전반사에 의해 모든 광이 상면에 도달하지 못하게 되는 전반사에 의한 손실을 최대한 줄이기 위하여 각각의 zone의 기울기를 조절할 필요가 있다. 또한 surface 형태는 일반적으로 구면을 취하고 있으나, 정밀도를 높이기 위해서 비구면을 채용하기도 한다.

Fresnel 렌즈 설계에 있어 핵심 기술은 각 ring의 곡률 중심이 구면수차를 제거하기 위해 중심으로부터의 거리에 따라 축을 따라서 감소하도록 설계하는 것이다. 구면수차를 피하고, 모든 근축광선이 같은 점에 정확히 맺히도록 정밀하게 각 원추의 표면을 cut해야 한다. 여기서 더 발전된 방법은 정확한 비구면 형태에서 각 굴절면을 cut하는 것이다. 더욱이 초점의 sharpness를 위해 groove의 폭을 제한할 수도 있다. Fresnel 렌즈의 불연속적인 면에 의해 각 파면의 변화는 visible image의 질을 퇴화시킬 수도 있으므로, 각 groove는 빛이 매우 정밀하게 맺히도록 연마되어야 한다. 종래 광학계는 주로 구면을 사용하였는데, 구면은 광학계의 여러 annular section에서 나오는 광선들이 광축을 따라 여러 점에서 결상되는 중구면 수차를 갖기 때문에 비구면을 사용하여 보정하기도 한다.

Fig. 2은 비구면 프레넬 렌즈와 일반적인 비구면 (plano-convex) 렌즈를 비교하였다. 일반적인 비구면 렌즈는 두개의 주요면 (principal plane)의 위치에 의해 광학적 특징이 결정 되는데, 초점거리나 후초점거리는 주요면으로부터 측정되는 중요한 물리량이다. 그러나 프레넬 렌즈에서는 두 주요면이 일치한다고 보아야하기 때문

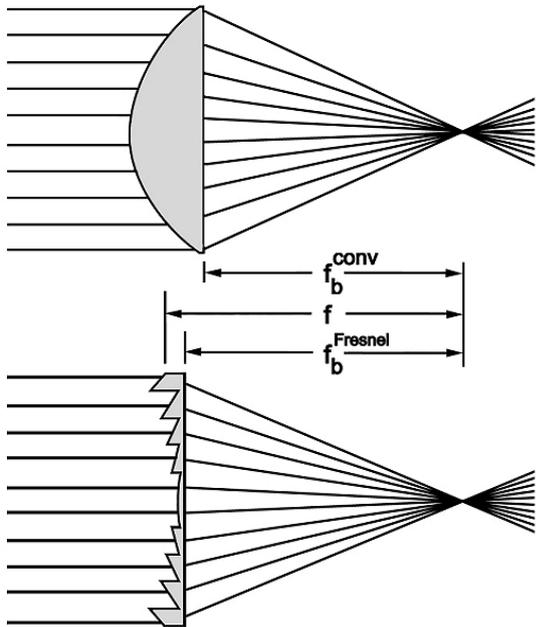


Fig. 2. Comparison between an aspherical conventional lens and an aspherical Fresnel lens.

에 grooved surface로부터 측정된다. 대부분의 프레넬 렌즈는 plano-convex 형태에서 변형된 형태이므로 이들의 비구면 profile과 대구경과 함께, 강한 asymmetric 반응을 따른다.

일반적으로 Fresnel 렌즈는 평행빔을 향해 groove가 있고, 초점을 향해 plano side가 있는 경우를 주로 다루고 있지만, Fresnel 렌즈는 크게 두 가지 경우로 생각할 수 있다. 이 두 가지 경우는 앞에서 설명한 Fresnel 렌즈의 특징을 결정짓는 step 중심에서의 곡률반경, 렌즈제작에 사용되는 재질의 광학적 특성을 나타내는 굴절률, 빛의 집속성의 정도를 나타내는 parameter로서의 초점거리, 렌즈의 부피와 관계되는 중심부 두께 그리고 각각의 groove step의 폭 등과 같은 5가지 변수에 의해 groove의 기울기로 구분된다고 할 수 있다. 또한 groove의 설치 방향에도 두 가지 방법이 있는데 일반적으로 프레넬 렌즈

Table 1. The design parameter of an Fresnel lens with the diameter 250 mm.

Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
63.00319*	4.0	PMMA
infinity	125.0	

* Aspherical coefficient

* $k=0.877591$

eff=127.6784

bff=125.00

는 groove가 평행광 쪽을 향하고 groove의 밑면인 평평한 면이 초점을 향하도록 제작한다. 이런 형태를 groove out이라고 하며, 이와 반대로 groove가 초점을 향하고 평평한 면이 평행광을 향하는 형태를 groove in이라고 부른다. 보통 out의 형태가 in의 형태보다 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 일반적으로 groove가 평행광을 향하도록 설계하는 경우를 광학적으로 더 선호 한다 [4].

III. 해상용 등명기용 200 mm Fresnel 렌즈의 설계 및 분석

250 mm 해상용 등명기용 fresnel 렌즈의 형상은 해양수산부 규격에 맞도록 하여야 하며, 중심 segment를 기준으로 하여 상부 27, 37개의 segment로 구성되어 있으며 각 segment의 크기는 중심부에서 벗어날수록 작아지고 있으며, 또한 각 sag의 깊이는 4 mm로서 일정한 값을 가지고 있다 [5,6]. 일반적인 형태는 truncated right circular cone으로서 내부는 cylindrical 형태이고, 외부 surface는 cylindrical Fresnel 렌즈의 원주 형태로서 cone의 중심에 광원이 위치하는 구조로 되어 있다. 이상과 같은 제작 규격을 토대로 Fresnel 렌즈의 광학적인 원리를 이용하여 설계사양을 결정하면 다음과 같다.

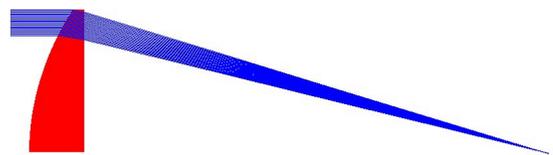


Fig. 3. Passage of a ray through a groove number 3.

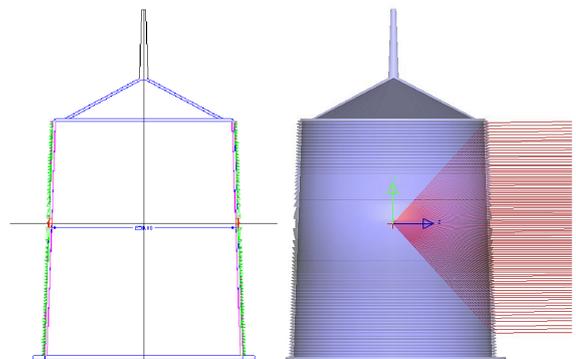


Fig. 4. The shape of an aspherical Fresnel lens with the diameter 250 mm of the marine signal lantern(upside:27 grooves, downside:37 grooves).

Table 2. Information of the sag with the diameter 250 mm of the marine signal lantern(base thickness=3.0 mm, sag=4.0 mm, upside= 27 grooves, downside= 37 grooves).

Groove No.	Ent. pupil size	Center thickness	Center radius	Effective aperture size
0	6	4	63.003	6
1	22.33	6.95	63.439	16.32
2	31.63	10.86	65.285	9.31
3	38.69	14.81	64.844	7.05
4	44.64	18.42	67.657	5.95
5	49.82	22.09	68.996	5.18
6	54.52	25.21	76.688	4.7
7	58.87	29.30	71.339	4.33
8	62.83	32.86	71.623	3.98
9	66.84	34.78	95.568	4.0
10	70.83	35.75	161.602	4.0
11	74.85	39.09	173.033	4.0
12	78.84	46.39	110.681	4.0
13	82.86	52.47	84.545	4.0
14	86.84	69.28	46.341	4.0
15	90.83	65.01	67.748	4.0
16	94.83	67.02	82.183	4.0
17	98.82	68.78	119.320	4.0
18	102.85	75.07	94.500	4.0
19	106.85	79.06	121.459	4.0
20	110.83	83.07	145.059	4.0
21	114.84	87.04	144.585	4.0
22	118.83	91.06	161.613	4.0
23	122.85	95.11	174.601	4.0
24	126.85	99.15	340.745	4.0
25	130.84	103.03	351.022	4.0
26	134.83	112.79	415.886	4.0
27	138.87	119.61	627.649	4.0
28	142.87	114.16	321.880	4.0
29	146.85	117.96	379.007	4.0
30	150.88	133.02	183.478	4.0
31	154.86	151.65	111.494	4.0
32	158.87	141.50	220.897	4.0
33	162.90	138.96	275.589	4.0
34	166.88	149.61	298.734	4.0
35	170.82	159.64	213.910	4.0
36	174.78	146.09	1018.908	4.0
37	178.85	150.15	1196.911	4.0

설계 사양으로서는 250 mm 직경의 중심에 해상용 전구가 위치하기 위해서는 back focal length가 $250/2 = 125$ mm가 되어야 하며, 광학 재질로서 사용되는 Acrylic은 다양한 분야에 응용되고 있는 플라스틱 재질로서 가시광선 전 영역에 거의 92 % 투과율을 보이고 있으며, 이에 비하여 polycarbonate는 아크릴과 유사한 특성을 갖고 있으나, 자연광에 대하여 얼은 yellow 색을 띠고 있다.

다음은 렌즈의 형상을 결정하기 위하여, 외부의 base curvature를 c_2 라 하면 근축 광학에 의한 power 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$k = k_1 + k_2 - d/nk_1k_2 \tag{1}$$

여기서 $k_1 = c_1(n - 1)$, $k_2 = c_2(1 - n)$ 이고, 초점거리 $f = 1/k$ 이고, 후 초점거리 (back focal length) 즉,

광원의 위치에서 Fresnel cone의 첫 번째 면까지의 거리 $bfl = (1 - \frac{k_2}{n}d)/k$ 로 주어진다.

따라서 광학재질 PMMA ($n = 1.483115$, $\lambda = 550$ nm)에 대하여 c_2 을 구해보면 다음과 같이 주어진다.

$$c_2 = 1/\gamma_2 = \frac{1}{(1-n)f} \simeq \frac{1}{(1-n)bfl} \quad (2)$$

식 (2)으로부터 $gamma_2 = -60.39$ mm을 얻을 수 있다.

이와 같이 초기설계 값으로 곡률반경 -60.39 mm에 대한 구면에 대하여 비구면화 계수와 두께 3 mm에 대하여 최적화를 행하면 설계변수를 결정할 수 있다. 일반적인 비구면 방정식은 식 (4)와 같이 주어진다 [7].

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + [1 - (1+k)c^2\rho^2]^{1/2}} + a_4\rho^4 + a_6\rho^6 + a_8\rho^8 + a_{10}\rho^{10} + \dots \quad (3)$$

여기서 $\rho^2 = x^2 + y^2$ 이고, k 는 conic constant, $a_2, a_4 \dots$ 는 비구면 계수이다. Fresnel 렌즈도 일반적으로 비구면으로 취급되고, 그 형태가 각 segment가 step 형태를 취하고 있다.

이렇게 결정된 중심부 광학계의 설계 변수를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3은 Groove 3번에 사용되는 렌즈의 layout으로서 back focal length 125 mm에 대하여 직경 77.38 mm의 대구경 렌즈의 edge 부분인 7.05 mm (중심부 차폐 31.64 mm)만 사용이 가능하도록 최적 설계된 광학계의 광선 추적도이다. 이와 같이 상부 27개, 하부 37개의 Groove에 대하여 edge 부분을 유효구경으로 갖는 독립된 하나의 렌즈로서 비구면 계수를 변수로 하여 최적화 방법으로 광학계의 설계변수들을 결정하였다.

이렇게 결정된 광학계의 중심부 base 곡률반경과 설계 parameter를 Table 2에 정리하였다.

이와 같은 설계변수를 갖는 일반적인 비구면 광학계의 형상으로서 Fig. 4에서 알 수 있듯이 일반 광학계로 설계된다면 광학계의 부피가 약 42 mm³($d = 14.82$ mm)를 갖는 대형렌즈의 형태를 취해야 하나, 각 sag면을 압축 형태의 Fresnel 형태로 함으로써 5 mm 두께로써 광학계의 성능을 유지할 수 있다. 또한 광선도에서 Fresnel 형태의 광학계로 구성했을 때 조명광원의 위치에 해당하는 초평면에 점광원이 위치했을 때 광선의 layout으로서 전 영역에 대하여 collimation이 되고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 해상용 등명기 시스템에 사용되는 직경이 250 mm인 대구경 조명 광학계를 프레넬 압축 렌즈 형태를 갖는 광학계를 근축광학 이론에 의해 중앙부의 형상을 결정하였고, 상부 27개 하부 37의 array 형태의 segment 렌즈로 구성하여 광학계의 부피와 형상이 최적 이 되도록 설계하였다. 이렇게 설계된 광학계는 금형 가공과 plastic 사출 과정을 통하여 그 성능을 확인할 수 있었으며 [8], 기존 수입에 의존하던 제품의 국산화를 통하여 250 mm 표준 해상용 등명기를 국내에 보급할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2003학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구 되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] E. A. Boettner and N. E. Barnett, J. of Opt. Soc. of America **41**, 849-856 (1951).
- [2] Fresnel technologies inc, *Fresnel lenses*, www.fresnel tech.com.
- [3] Fernando Erismann, Opt. Eng. **36**, 988-991 (1997).
- [4] Ian Powell, App. Opt. Vol **22**, 2924-2926 (1983).
- [5] Seung Nam Park, Chul Woung Park, Yong Wan Kim, Hyun Seok Cho, Jae Heung Jo and Jong Tae Kim, Proc. of SPIE **5638**, 892-901 (2005).
- [6] Hyun Seok Cho, Jae Heung Jo, Seung Nam Park, Chul Woung Park, Yong Wan Kim and Jong Tae Kim, Hankook Kwanghak Hoeji **15**, 511-518 (2004).
- [7] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 3rd ed. (McGraw Hill, New York, 2000), pp. 312-317.
- [8] http://www.hellodd.com/Kr/DD_News/Article_View.asp?Mark=11329.

Optical Design and Fabrication of Fresnel Lens for Marine Signal Lanterns

Jong Tae KIM*

Division of Imaging Science and Technology, Pukyong National University, Busan 608-739

Seung Nam PARK and Chul Woung PARK

Photometry and Radiometry Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340

(Received 6 September 2006)

We designed a marine signal lantern optical system by using a Fresnel form. The Fresnel lens was constructed with an optical material, a focal length, a groove number (or zone number), and optical elements of a groove's slope. Such optics have several advantages over conventional lens systems; large aperture systems may be constructed cheaply and are light in weight. The radiant energy can be distributed uniformly over the sensitive surface area. The large-aperture Fresnel-lens groove parameter, where each optical sag element is part of an independent lens, was obtained by using an analytic method, and a design variable was identified decided to satisfy the constraint.

PACS numbers: 42.15.Eq

Keywords: Fresnel lens, Optical design, Marine lantern, Collimation

*E-mail: jtkim@pknu.ac.kr