

# Fresnel Lens를 이용한 조명 광학계의 설계 및 분석

김미령, 김종태

부경대학교 공과대학 화상정보공학부/광학연구실  
(2002년 1월 26일 접수, 2002년 2월 16일 최종본 접수)

## Design and Analysis of Illumination Optical System Using Fresnel Lens

*Mi-Ryoung Kim, Jong-Tae Kim*

Division of Imaging Science & Technology, Pukyong National University  
(Received 26 January 2002, in final form 16 February 2002)

### Abstract

We designed the illumination optical system to use Fresnel lens which is the most general type of large aperture system. The normal construction of Fresnel lens is a thin molded piece of material, usually some kind of plastic, with one side flat and the other comprising a series of concentric segments each angled in a way to provide for optimum focusing for a pair of conjugate points. The 155 mm Marine Signal Lantern is the approved for use on buoys and a maximum omnidirectional range of 8 nmi can be obtained with standard 12V equipment, respectively. Finally, Fresnel lens with 155 mm diameter was designed and evaluated. Also, we re-designed groove "out" of Fresnel lens and compared results of groove "in" type with groove "out" type. According to the results, Fresnel lens is obtained best optical results when grooved side faces the longer conjugate.

## 1. 서 론

기존에 광학소자로서 이용되어 온 것은, 렌즈나 프리즘처럼 광의 반사, 굴절을 이용한 것이 대부분이었으나, 최근에는 회절 광학 소자에 대한 관심이 높아지면서, 그러한 회절 광학 소자가 광집속 능력이 뛰어나 종래의 렌즈를 보완하는 중요한 광학소자가 될 것이라고 생각되고, 또한 다양한 기능을 가진 광학소자를 저렴하게 제공하기 때문에 주목을 받고 있다<sup>1)</sup>. 모든 방향으로 빛을 전파해 줄 수 있는 광학계의 기본형태인 Fresnel lens의 특징을 가지고, 해상용 등명기를 구성하는 광학계 중 렌즈부에 해당하는 155 mm Fresnel lens를 설계 사양에 따라 최적 설계한 뒤, 그것을 기본으로 groove의 위치를 반대로 하여 재설계 하고, 그 성능을 비교·분석하였다.

## 2. 이 론

종래 렌즈의 굴절면의 형태는 그 렌즈의 초점 특성을 결정짓는 것으로 인식되어 왔으며, 그 굴절면 사이에 있는 재료의 부피는 렌즈의 광학적 특성에 아무런 영향을 미치지 않기 때문에, Fresnel lens는 그러한 재료의 부피를 최소화하고, 초점 특성은 그대로 유지할 수 있도록 제작된 것이다. Groove들은 plane surface에 거의 평행하고, edge로 갈수록 경사가 가파르게 구성된다<sup>2)</sup>.

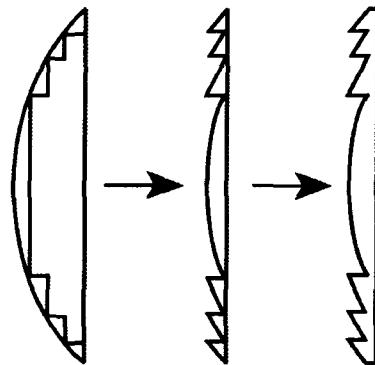


Fig. 1. Fresnel lens.

Fresnel lens는 Fig. 1과 같이 조각난 형태의 구면 또는 비구면 형상의 단일 렌즈가 각각의 segment에 다른 굴절능을 갖는 것으로, 렌즈의 부피를 줄이는 방법으로 고려된 렌

즈의 형태이다. 렌즈를 지나는 광선속에 각각 위상차를 줌으로써 어떤 원하는 평면에 광이 집중되게, 즉 그곳에서 모든 선속이 보강간섭을 일으키게 한다. Fig. 2에서 보듯이 부피가 큰 렌즈를 초점까지의 광로차가 각각 반파장의 정수배가 되는 곳을 잘라서 평면에 붙인 것과 같은 것으로 이해할 수 있다. 즉, 이 렌즈는 여러 가지 기울기와 폭을 가진 groove로 형성되고, plano convex thick lens처럼 이러한 lens들은 두께가 동심원의 ring으로서 curved face에 변화를 일으킴으로서 감소된다. Ring의 폭은 반경의 제곱에 따라 증가한다. 그때, 렌즈의 전체 두께는 일정해진다<sup>3)</sup>.

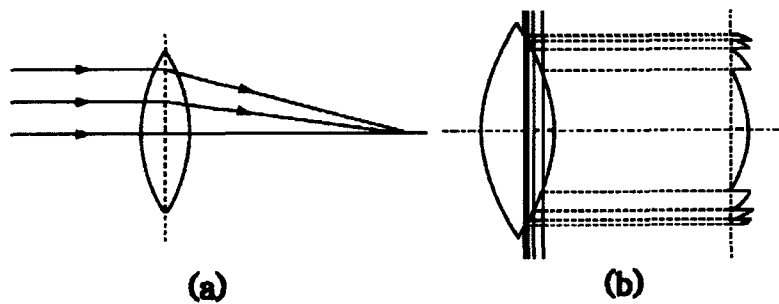


Fig. 2. Spherical lens(a) and conventional plane lens(b).

Fresnel lens는 광학 재질, 초점거리, groove 개수 및 기울기, surface의 형태 등의 요소로 특징 지워진다. 광학 재질은 가공성을 중요시 할 뿐만 아니라, 사용하고자 하는 파장 영역에 대해 투과도가 높아야 한다. 또한 대구경 가공시 외형 가공에 문제가 없어야 한다. 초점거리는 일반 렌즈에서와 동일하게 중심부 zone에 의해 근축 광학적으로 결정되는 요소로서, 고효율 광학계일수록 일정해야 하고, 광학계의 field angle에 의해 초평면 상에서 상의 크기를 결정하는 요인으로서, 빛의 손실이 없이 원거리까지 보내는 역할을 하도록 설정되어야 한다. Groove 개수 및 기울기는 광량의 손실이 없이 광학계에서 굴절이 일어나도록 기하학적인 구조에 의해 결정되어 상면의 밝기를 결정하는 요인으로 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 다음 식으로 주어진다.

$$T = \left[ 1 - \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)}{2\sin^2(\phi_1 + \phi_2)} - \frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_2)}{2\tan^2(\phi_1 + \phi_2)} \right] \times \left[ 1 - \frac{\sin^2(\phi_3 - \phi_4)}{2\sin^2(\phi_3 + \phi_4)} - \frac{\tan^2(\phi_3 - \phi_4)}{2\tan^2(\phi_3 + \phi_4)} \right] \quad (1)$$

$\phi_1$  : 공기와 물질의 경계면에서의 입사각,  $\phi_2$  : 공기와 물질의 경계면에서의 굴절각

$\phi_3$  : 물질과 공기의 경계면에서의 입사각,  $\phi_4$  : 물질과 공기의 경계면에서의 굴절각

Fig. 3을 보면, 매질에서 공기로 입사하는 입사각이 약  $41^\circ$  보다 크면 내부 전반사에 의해 모든 광이 상면에 도달하지 못하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 전반사에 의한 손실을 최대로 줄이기 위하여 각각의 groove의 기울기를 조절할 필요가 있다.

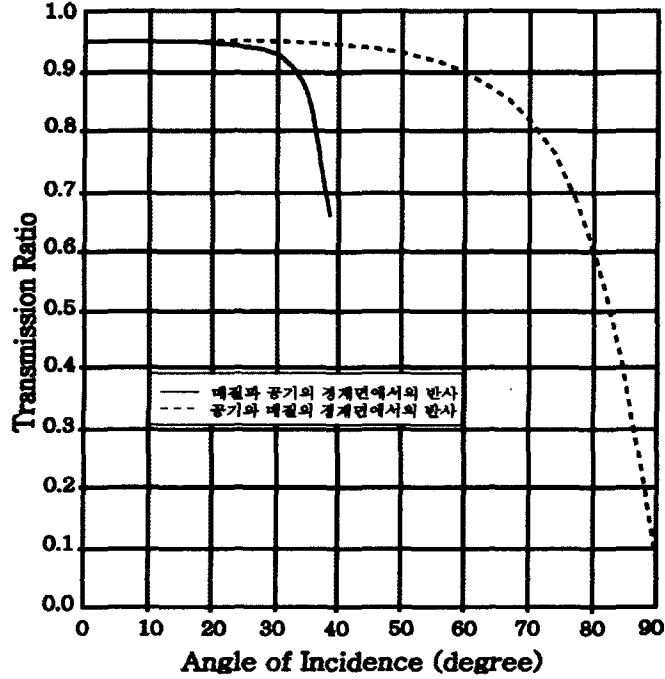


Fig. 3. Loss of light by reflection at interface.

Fresnel lens 설계에 있어 핵심은 각 ring의 곡률 중심이 구면수차를 제거하기 위해 중심으로부터의 거리가 축을 따라 감소한다는 것이다. 구면 수차를 제거하고, 모든 근축 광선이 같은 점에 정확히 맺히도록 정밀하게 각 원추의 표면을 잘라야 한다. Fresnel lens의 불연속적인 면에 의해 각 파면의 변화는 visible image의 질을 퇴화시킬 수도 있으므로, 각 groove는 빛이 매우 정밀하게 맺히도록 연마되어야 한다. 종래 광학계는 주로 구면을 이용하였는데, 그러한 구면은 광학계의 여러 annular section에서 나오는 광선들이 광축을 따른 여러 가지 점에서 맺혀지는 중구면 수차를 가진 광학계를 만들어낸다<sup>8)</sup>. 일반적으로 단일 구면 렌즈는 이보다 아주 작은 aperture로 제한된다. 왜냐하면, Fig 4(a)에서 보여지는 크기의 중구면 수차를 가지는 렌즈는 일반적으로 사용하기에는 곤란함이 따르기 때문이다. Fig. 4(b)에서는 Fig. 4(a)에 나타낸 렌즈의 사양과 똑같은 초점거리와 F/#를 갖는 비구면을 나타낸다. Surface 형태가 광선이 렌즈 위의 모든 점을 통과하여 광축 상에 같은 위치에 맺히도록 하기 위해 구면 형태로부터 변화시킨 것이다. 따라서,

Fig. 4(b).에서는 광축에 평행한 광선에 대해 종구면 수차가 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 종구면 수차가 제거된 비구면과 실질적으로 재료의 흡수 손실의 감소와 렌즈 형태를 지나는 손실의 변화인 thickness 결함은 대구경 aperture 시스템으로 만듦으로서 만족할 만한 성능을 가지는 Fresnel lens가 가능하게 된다<sup>6)</sup>.

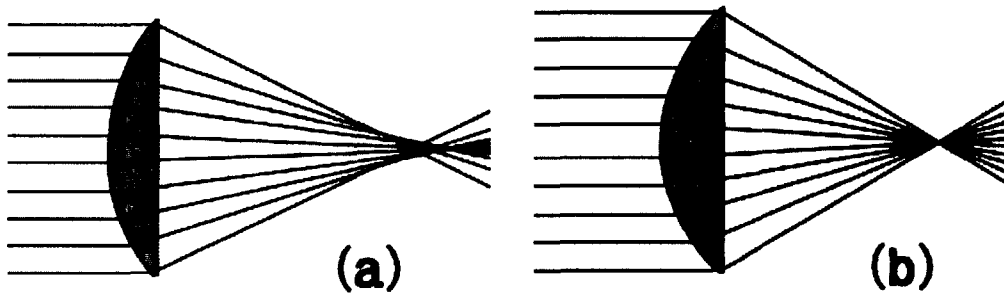


Fig. 4. (a) Spherical lens and (b) Aspherical lens.

일반적으로 Fresnel lens는 평행빔을 향해 groove가 있고, 초점을 향해 plano side가 있는 경우를 주로 다루지만, Fresnel lens는 크게 두 가지 경우로 생각할 수 있다. 이 두 가지 경우는 앞에서 설명한 Fresnel lens의 특징을 결정짓는 step 중심에서의 반경( $r$ ), 렌즈에 사용되는 물질의 굴절률( $n$ ), 초점거리( $f.d.$ ), lens의 두께( $t$ ), 그리고 마지막으로 step 폭( $\omega$ ), 이 다섯 가지 변수에 의해 groove의 기울기  $\alpha$ 가 결정된다고 할 수 있다<sup>2)</sup>.

Groove "out"은 평행빔을 향해 groove가 있고, 초점을 향해 plano side가 있는 경우로서, 이때에는 양쪽 면에서 굴절이 조금씩 다 일어난다. Groove "in"은 반대의 경우로서, 광축을 따라 평행하게 진행하는 평행빔에 대해 plano side에서 굴절이 전혀 일어나지 않는다.

위 두 가지 경우의 가장 큰 차이는, groove "in" 경우에, 렌즈의 바깥 표면에 있는 groove가 구면 또는 groove "out" 렌즈보다 plano surface에 대해 훨씬 더 작은 각도를 이룬다는 것이다. 왜냐하면, plano surface와 이루는 각도가 상대적으로 렌즈의 바깥쪽을 향해 작기 때문에, 어떤 렌즈 표면의 작은 warpage나 tilt, 또는 광축에 평행한 광선의 작은 이탈은 광선과 렌즈 표면 사이의 각도에서 실제로 매우 큰 이탈을 유도하게 된다. 이것은 groove "in" 렌즈가 똑같은 초점거리와 F/#의 groove "out" 렌즈에 대해 상대적으로 collection 효율의 감소를 유도하게 된다.

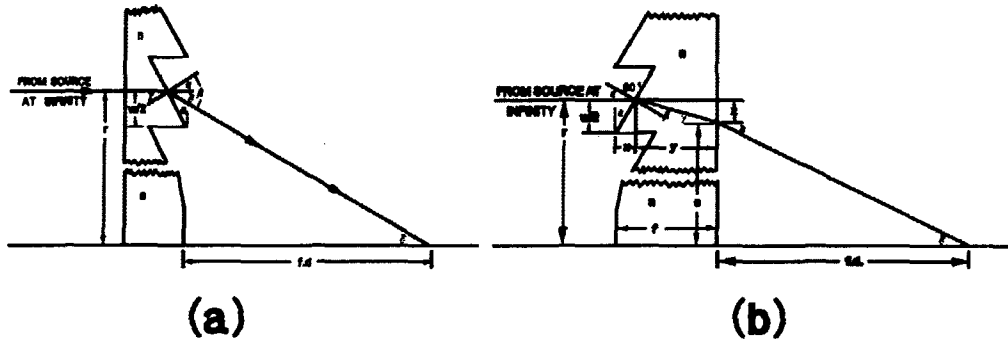


Fig. 5. (a) groove "in" and (b) groove "out".

### 3. 설계 및 분석

해상용 등명기의 렌즈부에 Fresnel Lens를 사용한 것은 해상용 전구에서 발광하는 빛을  $4\pi$  steradian 방향으로 균일한 밝기를 가지고 최대한 멀리 전파하도록 하기 위함이다<sup>9)</sup>.

155 mm 해상용 등명기용 Fresnel Lens를 분석한 결과 유효 구경은 상부 87.5 mm, 하부 76 mm에 중심 segment를 기준으로 하여 각각 17, 16 개의 segment로 구성되어 있으며 각 sag의 깊이는 3 mm로서 일정한 값을 가지고 있다. 일반적인 형태는 truncated right circular cone으로서 내부는 cylindrical 형태이고, 외부 surface는 cylindrical Fresnel Lens의 원주 형태로서 cone 중심에 광원이 위치하도록 되어 있다. 설계 사양으로서는 155 mm 직경의 중심에 해상용 전구가 위치하기 위해서는 BFL이  $155/2=77.5$  mm가 되어야 하며, 사용된 광학 재질은 PC이다. 외부의 base curvature를  $c_2$ 라 하면 근축 광학에 의한 power 방정식으로부터 다음과 같이 주어진다<sup>10)</sup>.

$$k = k_1 + k_2 - d/nk_1k_2$$

여기서,  $k_1 = c_1(n-1)$ ,  $k_2 = c_2(1-n)$ 이고, 초점거리  $f = 1/k$ 이고, 후초점 거리 (Back Focal Length) 즉, 광원의 위치에서 Fresnel cone의 첫 번째 면까지의 거리  $BFL = (1 - \frac{k_2}{n}d)/k$ 로 주어진다. 따라서 광학 재질 PC ( $n=1.589590$ ,  $\lambda=550\text{nm}$ )에 대하여  $c_2$ 를 구해보면 다음과 같이 주어진다.

$$c_2 = 1/r_2 = \frac{1}{(1-n)f} \approx \frac{1}{(1-n)bfl} \quad (2)$$

즉, 식 (2)로부터  $r_2 = -45.69$  mm를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 위에서 서술한 설계 사양을 갖는 일반적인 비구면 광학계의 형상으로서 그림에서 알 수 있듯이 일반 광학계로 설계된다면 광학계의 부피가 약 100 mm 두께를 갖는 대형 렌즈의 형태를 취하게 된다. Fig. 7은 Fresnel Lens의 두 가지 형태 중, groove "out"의 경우로서 yz-단면의 광선도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이, 각 sag 면을 압축 형태의 Fresnel Lens로 함으로서 7 mm의 두께로도 그 광학계의 성능을 유지하게 된다. Fig. 8은 똑같은 사양을 갖는 groove "in"의 형태로 재설계한 것이다.

일반적으로 비구면 광학계 설계시에는 conic constant와 비구면 계수를 변수로 놓고 최적화를 행한다. 기존의 groove "in"의 성능을 분석해 보면, Fig. 9(a)는 Fresnel 형태의 광학계로 구성했을 때 조명 광원의 위치에 해당하는 상면에서의 spot diagram으로서 RMS(root mean square) spot 직경으로서 약 0.84 mm 이내에 모든 광선이 분포함을 알 수 있다. 이것은 해상용 전구의 특성인 필라멘트 폭 0.4~0.6 mm와 높이 7~9.3 mm가 충분히 cover되는 양이다. 그러나 groove "in"의 경우를 보면, Fig. 9(b)에서 보듯이 7 mm의 두께로도 그 광학계의 성능이 충분히 유지되었음에도 불구하고, 구면수차가 groove "out"의 경우보다 크게 나타났고, 이 경우에는 렌즈의 두께에는 그다지 민감하지 않기 때문에 7 mm로 고정하여 최적화를 하였다. 또한 광원의 분포를 보게 되면, groove "out"의 경우는 균일하게 분포하는 반면에 groove "in"의 경우는 backcut부분에서 내부 전반사가 일어나서 광원이 균일하게 분포되지 못하고 손실되는 부분이 생겼다. 따라서, groove "in"의 경우는 광학적으로 그다지 좋은 성능을 나타내지 못한다는 것을 알 수 있었다.

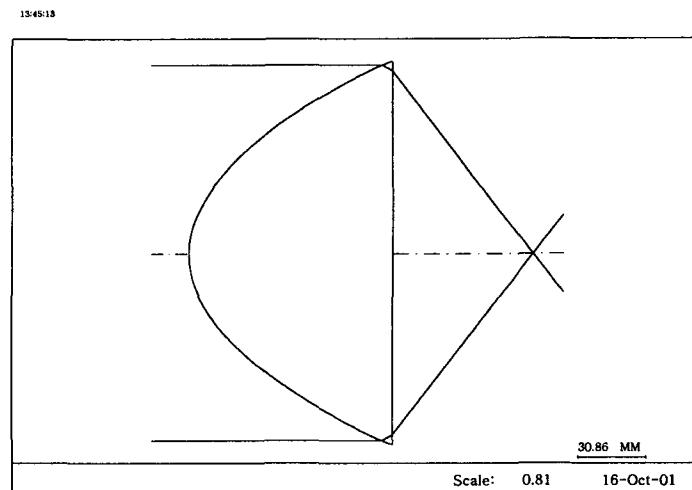


Fig. 6. 155 mm conventional aspherical Lens.

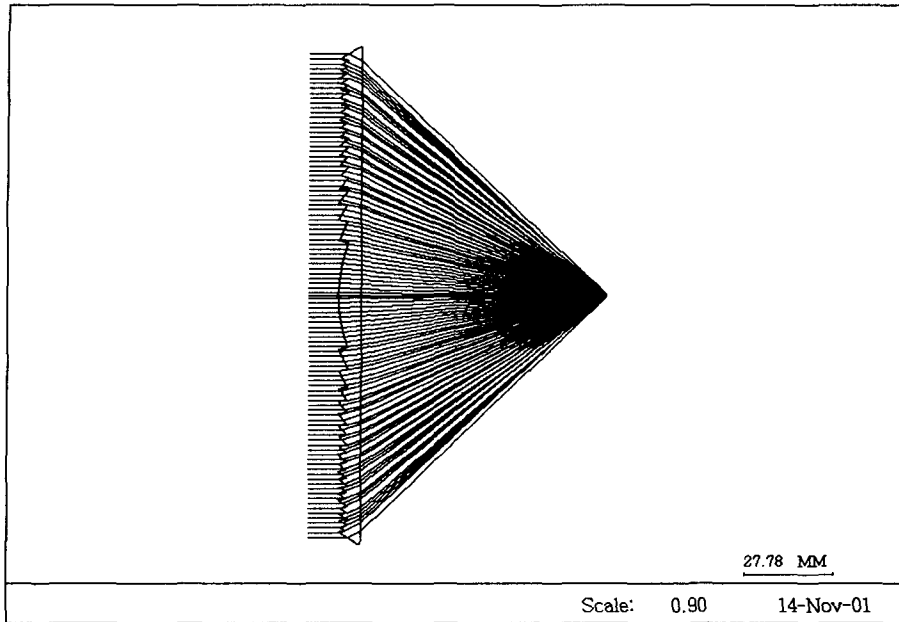


Fig. 7. Groove "out" of 155 mm Fresnel Lens.

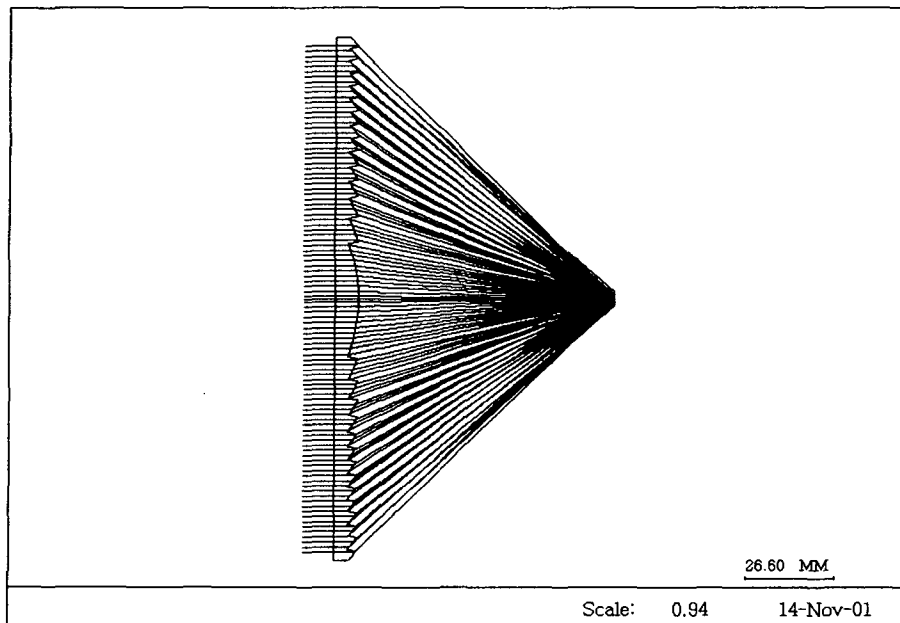


Fig. 8. Groove "in" of 155 mm Fresnel Lens.



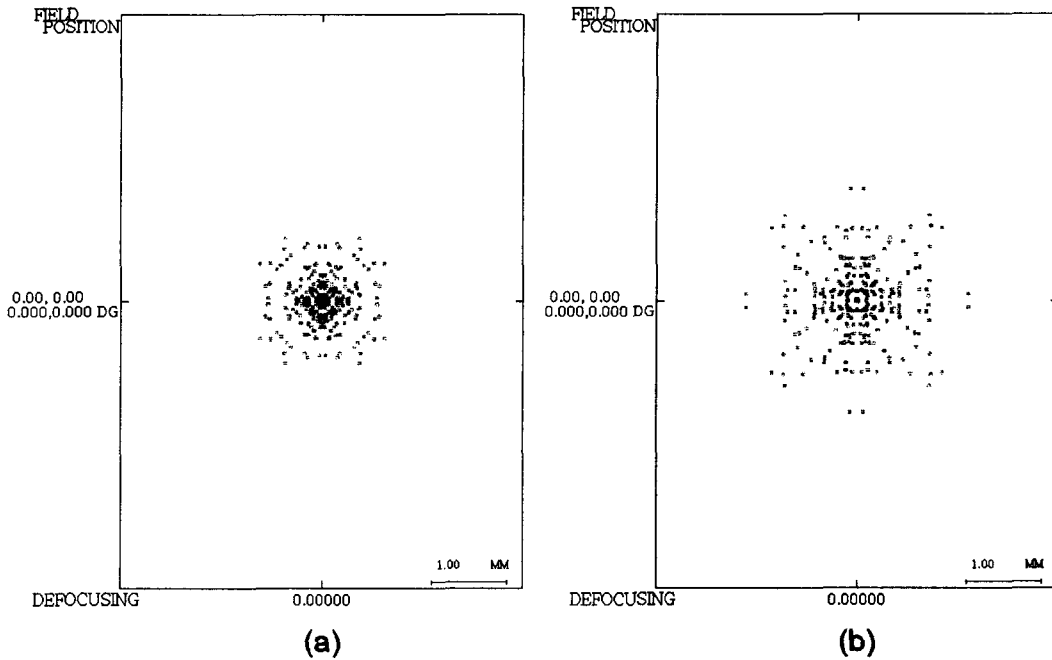


Fig. 9. Spot diagram of 155 mm Fresnel Lens's groove "out"(a) and groove "in"(b).

#### 4. 결 론

본 논문에서 논의하였던 Fresnel Lens의 특징과 해상용 전구의 특징을 고려하여 155 mm 해상용 등명기에 사용된 Fresnel Lens를 분석하여 각각을 설계하였다.

155 mm Fresnel Lens는 optical plastic 중 PC를 사용하였고, conic constant와 비구면 계수를 변수로 놓고 최적화를 행하였다. 또한 똑같은 사양을 가지고 groove "in"의 형태로 재설계하였다. 그 결과 똑같은 사양으로 설계된 groove "in"의 경우는 형태는 나타났으나 backcut 부분에서의 내부 전반사에 의한 빛의 손실 때문에 광원의 분포가 불균일하여 광학적으로 그 성능이 떨어진다는 것을 확인하였다.

따라서 앞서 이론에서 설명하였듯이, Fresnel Lens는 무한 conjugate 쪽을 향해 grooved surface가 있는 것이 더 나은 광학적 성능을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) (社)応用物理學會 日本光學會 光設計 研究 グループ "回折光學素子入門"
- (2) E. A. Boettner, N. E. Barnett, "Design and Construction of Fresnel Optics for Photoelectric Receiver" J. Opt. Am. Vol. 41, No. 11 (1951).
- (3) Lan Powell, "Tracing finite rays through a Fresnel lens", Applied Optics Vol. 22, No. 1 / 15 September (1983).
- (4) Miller, O. E, McLeod, J. H, and Sherwood, W. T. "Thin Sheet Plastic Fresnel Lenses of High Aperture", J. Opt. Am. Vol. 41, No. 11 (1951).
- (5) Arthur Davis, Robert C. Bush, John C. Harvey and Michael F. Foley "Fresnel Lenses in Rear Projection Display" Fresnel Optics, Rochester, NY, USA
- (6) Egger, John R. "Use of Fresnel Lenses in Optical System: some advantage and limitations", Proceedings of SPIE, Vol. 193, Optical System Engineering (1979).
- (7) Yuji Yamazaki, Kazuhito Nakamura and Hiroshi Hashimoto "Development of an LED with a Fresnel Lens" 情密工學會誌 Vol. 59, No. 4 (1993).
- (8) Erwin Delano "Primary aberrations of Fresnel Lenses" J. Opt. Am. Vol. 64, No. 4 (1974).
- (9) 海洋水産部 "航路標識基礎理論"
- (10) P. Mouroulis, J. Macdonald "Geometrical Optics and Optical Design"