김일성종합대학학보　　　　　　　　　　　　　　　　　주체108(2019)년
물리학　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　제65권　제1호

경사빛세기분포를 가진 한가지 조명광학체계에 대한 연구

김충성, 김영철

일부 대상들에서는 높이가 너비에 비해 훨씬 크고 웃부분이 아래부분보다 더 밝아야 하므로 조명구역이 거의 직4각형모양이고 웃부분과 아래부분의 빛세기가 서로 다른 경사분포를 가지도록 조명설계를 하여야 한다. 현재 개발리용되고있는 대다수 조명등은 축대칭성빛세기분포를 가지고있으므로[1－5] 이러한 요구를 만족시키도록 하자면 여러개의 등을 조합하여야 하며 따라서 빛에네르기손실을 피할수 없게 된다. 만일 조명구역이 거의 직4각형모양이고 웃부분의 빛세기가 아래부분의 빛세기보다 훨씬 큰 경사빛세기분포를 가진 등이면 1~2개로써 조명에 대한 이러한 요구를 만족시킬수 있다.

론문에서는 반사거울로 구성된 경사빛세기분포를 주는 조명광학체계를 제기하고 연구하였다.

1. 반사거울로 구성된 경사빛세기분포를 주는 조명광학체계의 원리도

그림 1에 점광원과 구면거울로 구성된 리상광학계의 원리도를 보여주었다. 점광원 S는 구면거울의 초점에 놓여있다. 구면거울의 수차를 무시한 경우 점광원에서 나온 광선들은 구면거울에서 반사되여 광축 OS에 평행인 광선들로 된다.[1]

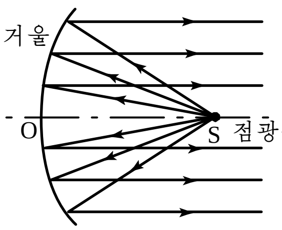

그림 1. 점광원과 구면거울로 구성된 리상광학계의 원리도

점광원은 등방성광원이므로 점광원에서 나와 구면거울에서 반사되여 평행으로 나가는 빛은 광축 OS에 대칭인 빛세기분포를 가진 평행빛묶음으로 된다.

점광원에서 거울을 바라보는 각을 $\alpha(0)$, 거울의 직경을 D, 광원의 빛출력을 $P(0)$이라고 하면 거울에서 반사되여 광축에 평행으로 나가는 빛세기는 근사적으로 다음과 같이 표시된다.

$$I(0) \propto P(0)/(\pi D^2/4) \cdot \alpha^2(0) \tag{1}$$

그림 2에 선광원과 구면거울로 구성된 리상광학계의 원리도를 보여주었다.

선광원의 크기 d는 구면거울의 크기 D보다 훨씬 작으며 구면거울의 초점에 놓여있다.

선광원의 한점 즉 광축으로부터 x만큼 떨어져있는 선광원의 한 점광원에서 나온 빛은 거울에서 반사된 후 광축과 β의 각을 이루고 나가는 평행빛으로 된다. 이때 각 β는 다음과 같이 표시된다.[4]

$$\beta = \frac{x}{f} \tag{2}$$

여기서 f는 구면거울의 초점거리이다.

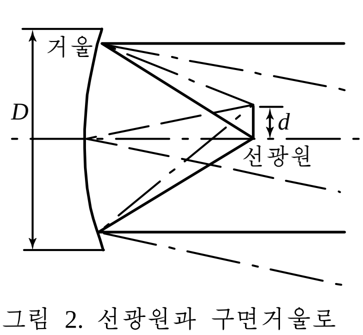

그림 2. 선광원과 구면거울로 구성된 리상광학계의 원리도

그림 2와 식 (2)로부터 알수 있는것처럼 광축으로부터 일정한 거리만큼 떨어져있는 점광원에서 나온 빛묶음은 거울에서 반사된 후 광축과 일정한 각을 이루는 경사평행빛묶음으로 된다. 선광원을 리용하면 선광원이 놓이는 면에 평행인 방향에서는 퍼짐각이 $\frac{d}{f}$로 되고 선광원이 놓이는 면에 수직인 방향에서는 퍼짐각이 령에 가까우므로 직4각형분포의 조명구역을 얻을수 있다.

광축과 각 β만큼 경사져나가는 평행빛묶음의 빛세기 $I(\beta)$는 근사적으로 다음과 같이 쓸수 있다.

$$I(\beta) \propto P(x)/(\pi D^2/4) \cdot \alpha^2(x) \tag{3}$$

여기서 $\alpha(x)$는 광축에서 x만큼 떨어진 점광원에서 거울을 바라보는 각이고 $P(x)$는 x만큼 떨어진 점광원의 빛출력이다. 선광원의 크기 d가 거울의 직경 D에 비해 훨씬 작으므로 $\alpha(x) \approx \alpha(0)$으로 되며 식 (1)과 (3)을 비교하면 다음의 식을 얻을수 있다.

$$I(\beta) = I(0) \cdot \frac{P(x)}{P(0)} \tag{4}$$

식 (4)에서 알수 있는것처럼 경사빛묶음의 빛세기는 선광원의 상대빛출력분포 $P(x)/P(0)$에 비례한다. 따라서 빛출력분포가 광축에서 멀어질수록 빛출력이 작아지는 선광원을 리용하면 광축방향빛세기가 제일 크고 광축아래쪽으로 경사져나가는 빛세기가 점점 작아지는 경사빛세기분포를 얻을수 있다.

2. 비구면거울에 의한 경사분포선허광원의 형성과 해석모형

점광원으로부터 선허광원을 형성하는 광학계를 구성하자.

그림 3과 같은 점광원 S와 비구면거울 M으로 구성된 광학계를 보자.

비구면거울의 높이 z는 x만의 함수이다. 즉

$$z = g(x) \tag{5}$$

비구면거울의 높이 z가 x만의 함수이므로 점광원 S에서 나오는 요소빛묶음들이 비구면거울 M에서 반사된 후 형성하는 허영상점들은 오직 xz면우에만 놓인다.

비구면거울의 높이 z의 x방향에 대한 도함수 즉 비구면거울의 어떤 점에서의 접선이 x축과 이루는 각은 비구면거울의 점위치 x에 따라 다르다. 따라서 점광원에서 일정한 각 γ를 이루고 $\Delta\alpha$의 각으로 나가는 요소빛묶음이 형성하는 허광원은 광축 OS와 일정한 거리 $x'(\gamma)$만큼 떨어지게 된다. 허광원의 높이 $x'(\gamma)$는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$x'(\gamma) = 2S \cdot \frac{dg(x)}{dx} \tag{6}$$

식 (6)에서 알수 있는것처럼 도함수 $\frac{dg(x)}{dx}$는 일정한 값범위에 놓이게 되므로 S에서 다른 요소빛묶음에 의하여 형성된 비구면거울에 의한 허영상점들의 모임은 일정한 크기를 가진 선허광원을 형성한다.

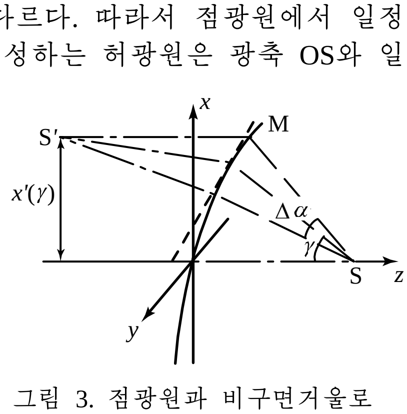

그림 3. 점광원과 비구면거울로 구성된 광학계의 원리도

비구면거울에 의하여 형성된 선허광원의 빛출력은 선허광원의 단위길이에 놓이는 요소점허광원들의 수에 비례한다.

점광원 S에서 비구면거울을 바라보는 각 γ는 비구면거울의 높이 $g(x)$가 점광원까지의 거리 S에 비하여 훨씬 작다고 가정하면 다음과 같이 쓸수 있다. 여기서 d는 비구면거울의 크기이다.

$$\gamma = 2\cdot\arctan\left(\frac{d}{2S}\right) \tag{7}$$

γ를 $2N$등분하였을 때 i번째 요소빛묶음이 비구면거울에서 반사되여 형성하는 요소점광원의 높이 x_i는 근사적으로 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\left.\begin{aligned} x_i &= S\cdot\tan\left[-\frac{\gamma}{2}+\frac{\gamma}{2N}(i-1)\right] \\ x_i' &= 2S\cdot\left.\frac{dg(x)}{dx}\right|_{x=x_i} \\ i &= 1,\ 2,\ \cdots,\ 2N+1 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

선허광원을 얻는 그림 3과 같은 점광원과 비구면거울로 구성된 광학계와 선허광원이 구면거울의 초점에 놓이는 그림 2와 같은 광학계를 조합하면 등방성점광원으로부터 경사빛세기분포를 가진 직4각형모양의 조명구역을 얻을수 있다.

비구면거울에 의하여 형성된 선허광원의 상대빛출력 즉 선허광원의 단위길이에 놓이는 요소점허광원의 수는 근사적으로 다음과 같이 쓸수 있다.

$$P(x') = \frac{1}{x_{i+1}'-x_i'} \tag{9}$$

3. 해 석 결 과

비구면거울의 크기가 비구면거울로부터 점광원까지의 거리 S의 2배 즉 $2S$라고 가정하고 해석을 진행하자. $S=1$이라고 하면 비구면거울의 x축자리표는 $[-1, 1]$의 범위에 놓인다.

비구면거울의 높이함수 z가 각각 다음의 식으로 표시되는 경우 해석을 진행하였다.

$$\left.\begin{aligned} z_1 &= (x+1)^2/(5\cdot 2^2) \\ z_2 &= (x+1)^3/(5\cdot 2^3) \\ z_3 &= (x+1)^4/(5\cdot 2^4) \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

여기서 $(x+1)$의 제곱형태로 함수를 정한것은 우리가 얻으려는 분포가 웃부분이 제일 높고 아래로 가면서 점차 작아지는 경사분포이므로 축대칭성을 가지지 않도록 하기 위해서이고 또한 임의의 비구면함수는 2차, 3차, 4차, …함수들의 결합으로 이루어지기때문이다.

다음으로 분포에 수 $5\cdot 2^2,\ 5\cdot 2^3,\ 5\cdot 2^4,\ \cdots$이 들어간것은 비구면거울의 최대높이가 점광원까지의 거리의 $\frac{1}{5}$정도로 되도록 하기 위해서이다.

식 (10)의 x에 관한 도함수는 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned} z_1' &= 2(x+1)/(5\cdot 2^2) \\ z_2' &= 3(x+1)^2/(5\cdot 2^3) \\ z_3' &= 4(x+1)^3/(5\cdot 2^4) \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

x가 $[-1, 1]$범위에 있으므로 선광원의 상대크기는 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned} d_1 &= \frac{2}{2}\cdot\left(\frac{1}{5}\right)\cdot 2 = \frac{2}{5} \\ d_2 &= \frac{3}{2}\cdot\left(\frac{1}{5}\right)\cdot 2 = \frac{3}{5} \\ d_3 &= \frac{4}{2}\cdot\left(\frac{1}{5}\right)\cdot 2 = \frac{4}{5} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

식 (12)에서 알수 있는것처럼 비구면거울의 높이함수에서 x의 제곱차수가 클수록 선광원의 상대크기가 커진다는것을 알수 있다.

그림 4에 x에 따르는 비구면거울의 높이함수를, 그림 5에 선허광원의 한점과 광축까지의 상대거리 x'에 따르는 상대빛출력을 보여주었다.

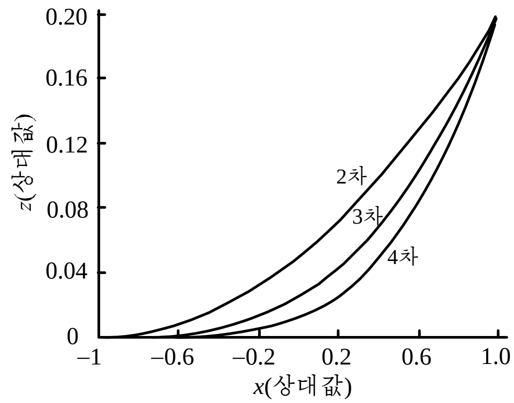

그림 4. 비구면거울의 높이함수

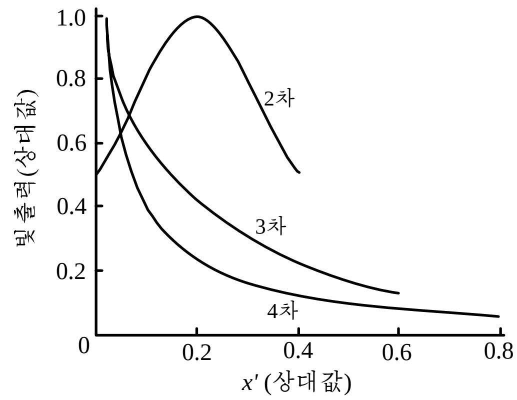

그림 5. 선허광원의 한점과 광축까지의 상대거리 x'에 따르는 상대빛출력

우선 비구면거울의 높이함수가 2, 3, 4차함수인 경우 선허광원의 상대크기가 각각 0.4, 0.6, 0.8이라는것은 차수가 높을수록 가로와 세로의 비가 더 커지는 직4각형모양의 조명구역을 얻을수 있다는것을 보여준다.

다음으로 비구면거울의 높이함수가 2차함수인 경우 상대빛출력은 선허광원의 가운데부분(그림 5에서 $x' = 0.2$)에서 제일 높고 웃부분과 아래부분(그림 5에서 $x' = 0, 0.4$)으로 가면서 점차 낮아진다. 이것은 2차함수모양의 거울을 리용하면 웃부분이 제일 높고 아래로 가면서 점차 낮아지는 경사빛세기조명분포를 얻을수 없다는것을 보여준다.

비구면거울의 높이함수가 3, 4차함수인 경우 선허광원의 상대빛출력은 광축근방($x' = 0$)에서 제일 높고 광축에서 멀어질수록 점점 낮아지며 그 정도는 차수가 높을수록 높다. 이것은 3차이상의 함수모양을 가진 거울을 리용하면 웃부분이 제일 높고 아래로 가면서 점차 낮아지는 경사빛세기분포를 얻을수 있으며 차수가 높을수록 빛세기가 더 급격히 낮아진다는것을 보여준다.

맺 는 말

경사빛세기분포를 주는 한가지 조명광학체계를 제기하고 비구면거울에 의한 경사분포선허광원의 해석모형을 세운데 기초하여 비구면거울의 비구면함수가 2, 3, 4차함수인 경우 선허광원의 상대크기와 상대빛출력특성을 정량적으로 연구하였다.

참 고 문 헌

[1] 석영범; 물리, 2, 30, 주체102(2013).

[2] K. Yamada et al.; J. Light and Vis. Env., 27, 2, 70, 2003.

[3] 周台明 等; 照明工程学报, 12, 37, 2007.

[4] 李志敏 等; 激光杂志, 29, 2, 2, 2008.

[5] 公文礼; 灯与照明, 32, 4, 12, 2008.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

Research on an Optical Illumination System with Gradient Light Intensity

Kim Chung Song, Kim Yong Chol

In this paper we proposed an optical illumination system with a gradient light intensity and built the analysis model of the gradient line image by non-spherical mirror. We researched quantitatively relative size and power characteristics of line image when non-spherical function of non-spherical mirror is parabolic, cubic and biquadratic function.

Key words: gradient, mirror