

돔펜던트 조명기구의 광학적 수치모델의 개발

(Development of numerical model for prismatic luminaire)

이준형* · 최안섭**

(*세종대학교 건축공학과 대학원 석사과정, **세종대학교 건축공학과 교수)
(Jun-Hyung Lee* · An-Seop Choi**)

Abstract

The prismatic luminaire named as a dome pendent is considered to save energy and improve visibility. This luminaire is using prismatic dome, and is designed to be used in commercial and industrial high-bay applications where quality light levels and energy savings are imperative. Although this kind of luminaire needs an accurate optic calculation process, the luminaires are manufactured without such a process. Therefore, the purpose of this study is to develop a numerical model to accurately predict luminous intensity distribution of luminaire with prism.

1. 서론

최근 개발되어 사용되고 있는 돔펜던트는 광원에서 나온 빛이 프리즘을 통과하여 굴절하게 함으로서, 배광을 조절하여 사용장소에 적절한 배광을 조절하는데 의의를 두고 있다. 이러한 돔펜던트는 그림 1에서 보는바와 같이 광원이 프리즘으로 둘러 싸여 있고, 프리즘으로 광원으로부터의 빛을 제어하여 눈부심을 방지하며, 상/하 배광을 균일하게 조절함으로써, 고효율 및 고조도 효과를 볼 수 있다. 돔펜던트는 백화점, 패션샵, 창고형 매장, 공장 및 물류창고등 주로 층고가 높고 넓은 공간을 중심으로 이용되고 있으며, 기존의 반사갓을 갖는 조명기구와는 다른 인테리어의 기능적 요소를 적용할 수 있으므로, 앞으로 그 사용이 확대될 전망이다.

돔펜던트의 제작은 램프의 배광 특성뿐 아니라 조명기구를 이루고 있는 구성요소들의 빛에 대한 특성을 고려한 조명기구 설계가 이루어져야 함으로, 광학설계에 있어서 복잡한 광선추적이나 다량의 기하 광학적 계산이 필요하다. 그러나 광학적 계산이 정확히 이루어지지 않으면 목표 배광에 이르는 프리즘들의 구조를 갖지 못하게 되고, 돔펜던트 본래의 기능을 상실하게 될 것이다.

본 연구에서는 돔펜던트 프리즘 디자인에 유용한 배광분포 수치모델의 개발을 통해 목표배광에 적합한 다양한 프리즘 디자인에 적용 하고자 한다. 본 수치모델의 기본 원리는 몬테 카를로 방법을 이용하여 광원으로부터 발산하는 광자의 방향을 결정하고, 광선추적 기법을 이용하여 광자의 도달 위치를 계산해 내는 방법이다.

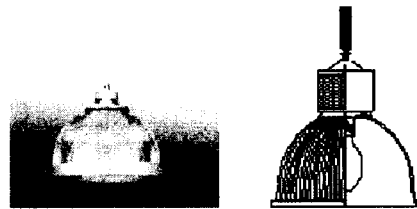


그림 1. 돔펜던트

Fig 1. Prismatic luminaire

2. 본론

2.1 몬테카를로 방법

몬테카를로 방법은 통계학적 확률이론과 난수(random number)를 기반으로 하는 통계적 기술이다. 몬테카를로 방법은 물리학에서 중성자의 거동, 빛의 반사, 신호의 발생, 통계학적 기계학 등에서 주로 쓰이는 방법이지만, 실제로는 경제학에서 핵물리학에 이르기까지 광범위하게 쓰인다[1]. 물론 각 분야마다 그 적용방법은 다양하지만, 정확히 말하면 몬테카를로 방법이란 난수를 이용한 통계적 추출 시도를 통해 적절한 확률적 모델을 제시하여 해결방법을 찾는 것을 말한다[2].

본 연구에서의 몬테카를로 방법은 광원의 기하학적 형상면 위에서 광자의 발생위치와 방사방향, 그리고 프리즘으로의 입사각을 결정하는데 적용되었다.

2.2 광선추적 기법

광선추적기법이란 광자의 거동에 따른 진행 방향과 크기를 벡터화 시켜 기하학 적으로 입자의 운동 경로를 계산해 내는 방법이다. 광자의 반사, 투과, 흡수 그리고 굴절과 같은 복잡한 광학적 움직임을 광자가 진행하는 방향과 크기로 벡터화 시킨 후 각 입자의 진행경로를 계산하여 나타낼 수 있다. 또한 광자가 진행하면서 만나는 면에 대한 반사와 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 특성 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 계산하게 된다.

2.3 굴절의 법칙

빛이 공기와 유리 같은 두 개의 서로 다른 매질의 경계 면을 통과할 때, 빛의 진행방향이 바뀌거나 혹은 굴절하게 된다. 이러한 굴절현상은 광원으로부터의 배광을 조절할 수 있는 광학적 디자인에 이용된다. 그림 2는 이러한 빛의 굴절을 나타낸 것이고, 다음은 굴절과 관련된 핵심적인 두 가지 법칙이다.

(a) 빛이 등방성(等方性) 매질에서 다른 등방성 매질로 입사해 굴절할 경우, 입사면(입사 광의 방향과 경계면의 법선을 포함하는 면)과 굴절면(굴절 광의 방향과 경계면의 법선을 포함하는 면)은 같은 평면 내에 있다.

(b) 입사각과 굴절각의 \sin 값의 비는 식(1)과 같으며, 이 값은 각 매질 중에서의 빛의 속도의 비와 같다. : snell의 법칙(단 n_1, n_2 = 굴절률).

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \cdot \sin(r) \quad (1)$$

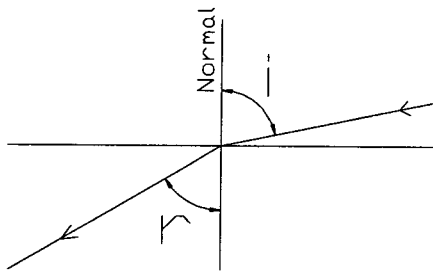


그림 2. 빛의 굴절
Fig 2. Refraction at a boundary

2.4 빛의 전반사(Total internal reflection)

전반사란 빛이 밀한 매질에서 소한 매질로 진행하다가 두 매질의 경계면에서 빛이 소한 매질로 통과하지 못하고 반사되는 현상을 말한다. 빛이 밀한 매질에서 소한 매질로 입사하면 굴절각은 입사각보다 커지게 되고, 입사각이 증가함에 따라 굴절각도 커지는데 굴절각이 90°가 될 때의 입사각을 임계각(Critical angle)이라고 한다(그림 3). 식(2)는 매질의 굴절률과 관련해 임계각을 구하는 식을 나타낸 것이다[3].

$$n_1 \cdot \sin(\theta_c) = n_2 \cdot \sin(90^\circ)$$

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (2)$$

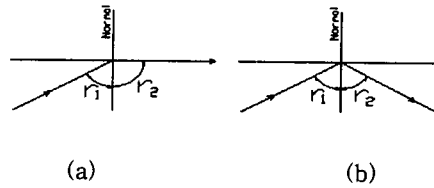


그림 3. 빛의 전반사
Fig 3. Total internal reflection

3. 수치모델의 계산과정

3.1 난수의 생성

난수의 생성은 크게 발산각과 입사각 두 가지로 이루어지고, 각각 수평/수직 각으로 나누어 생산한다. 발산각은 광원의 표면에서 광자가 발산하는 수평/수직 각을 의미하고(그림 4), 입사각은 프리즘 그룹마다의 법선과 이루는 수평/수직 각을 의미한다(그림 5)

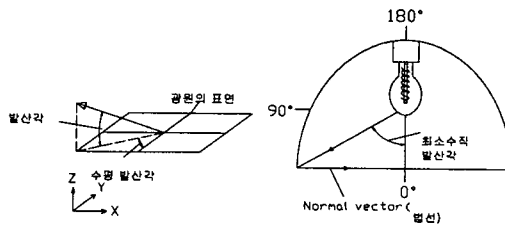


그림 4. 수평/수직 발산각과 최소발산 각
Fig 4. Horizontal and vertical radiation angle of the light and minimum angle

난수의 생성범위는 발산 각에서 수직/수평각이 모두 180°이고, 입사각에서는 수평각이 90°, 수직 각은 180°이다. 본 연구에서 수직발산 각의 역할은 발생한 광자의 프리즘 통과 여부를 결정짓는 역할을 한다. 그림 4와 같이 광원의 중심에서 발생한 수직 발산각이 미리 입력된 최소 수직 발산각보다 크면, 광자가 프리즘을 통과하여 굴절과정을 거치지만, 더 작을 경우에는 굴절과정 없이 작업 면에 도달하게 된다.

수평발산각은 1차적으로, 그림 5와 같이 톱니모양을 하고 있는 프리즘에서 광자가 프리즘이 갖고 있는 양쪽면중 어느 면으로 입사 할 것인지를 결정짓는다. 즉, 수평발산각 90°를 기준으로 광자가 한쪽 프리즘 면으로 입사할 것인지, 다른 쪽 면으로 입사할 것인지를 결정 짓게 되는 것이다. 2차적으로는 계산과정에서 광자의 수평각에 영향을 주게 된다.

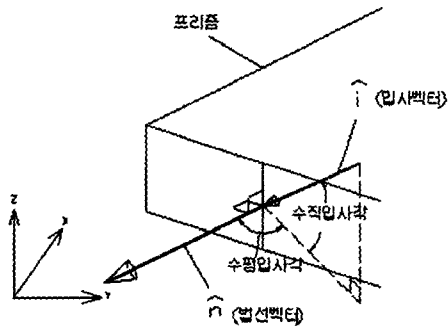


그림 5. 수평/수직 입사각
Fig 5. Horizontal & vertical incident angle

3.2 입사벡터의 계산

발산 각이 최소발산 각보다 클 경우 프리즘에 입사하게 되는데, 입사벡터는 그림 5와 같이 프리즘의 법선과 이루는 수평/수직입사각에 의해 결정된다.

그림 6에서 \hat{i} 는 광자의 진행 방향을 나타내는 입사벡터 이고, \hat{n} 은 프리즘 표면에 대한 법선벡터이다. θ 와 ϕ 는 각각, 법선과 이루는 수평/수직 입사각을 나타낸다. 단위벡터의 길이가 1이므로, 선분 B·C의 길이는 $\cos(\phi)$ 가 되고, 입사벡터의 X, Y, Z성분은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} X &= -\cos(\phi) \times \sin(\theta) \\ Y &= \cos(\phi) \times \cos(\theta) \\ Z &= \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

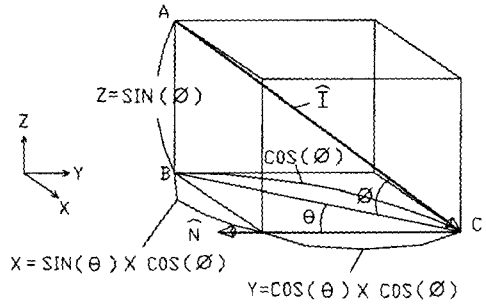


그림 6. 입사벡터의 계산
Fig 6. The calculation of incident vector

3.3 법선벡터의 계산

광자가 광원으로부터 발산하여 프리즘을 향하게 되면, 그림 7과 같은 모양의 단위 프리즘을 통과하게 된다. 이러한 단위 프리즘은 안쪽 면과 바깥쪽 면에 각각 다른 구조의 프리즘을 갖게 됨으로, 광자가 프리즘을 통과하는 동안 각각 서로 다른 법선벡터를 만나게 되는데, 처음에 만나게 되는 면 즉, 프리즘의 안쪽 면에 대한 법선벡터는 그림 8에 있는 프리즘 표면의 기울기인 θ 와 ϕ 에 의해 결정되고, 관계식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} X &= \sin(\theta) \\ Y &= \cos(\theta) \\ Z &= -\sin(\phi) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 ϕ 는 법선벡터의 수직 각을 의미하는 것이고, θ 는 그림 8의 (a)와 같이 광자가 입사하는 프리즘의 위치에 따라 변한다.

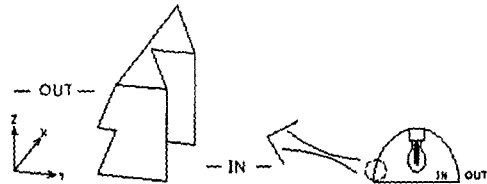


그림 7. 단위 프리즘
Fig 7. The unit of prism

광자가 프리즘을 통과하면서 만나는 두 번째 면에 대한 법선벡터는 프리즘의 바깥 면 기울기에 의해 결정된다(그림 9). 하지만 그림 8의 (a)와 같이 프리즘 면에 대한 Z성분 기울기인 ϕ 가 프리즘 그룹마다 다른 값을 가지므로, 그 식은 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{바깥면 기울기} + \phi \\ X &= 0 \\ Y &= \sin(\alpha) \\ Z &= \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

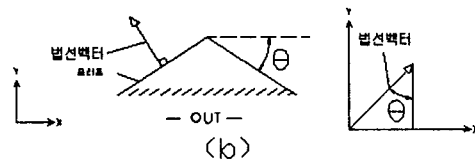
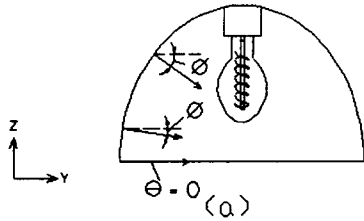


그림 8. 법선벡터와 프리즘 안쪽면 기울기
Fig 8. Angles of prism related with normal vector

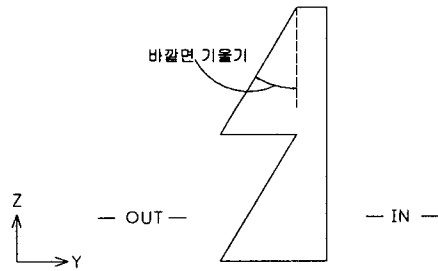


그림 9. 프리즘의 바깥면 기울기
Fig 9. Angle of the outside prism

3.4 사잇각의 계산

입사벡터 그리고, 안쪽 면과 바깥 면에 대한 법선벡터의 계산이 이루어지면, 프리즘에 의한 굴절각을 계산하기 위해, 먼저 입사벡터와 법선벡터가 이루는 사잇각 θ 을 계산하게 된다. 사잇각은 입사벡터와 법선벡터가 이루고 있는 직접적인 각도이고, 수직/수평 입사각과의 차이는 그림 10에 설명되어 있다. 그 식은 식(5)와 같이 dot product에 의해 이루어진다.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \hat{i} \cdot \hat{n} \\ \theta &= \cos^{-1}(\hat{i} \cdot \hat{n}) \end{aligned} \quad (5)$$

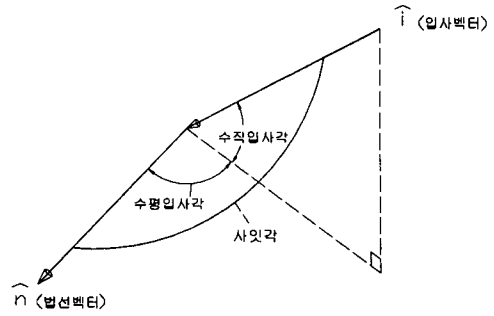


그림 10. 사잇각
Fig 10. Angle between \hat{i} and \hat{n}

3.5 굴절각의 계산

사잇각을 계산하고 나면, 굴절의 법칙인 식(1)을 이용하여 굴절각을 계산해 내는데, 그 식은 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} n_1 \cdot \sin(i) &= n_2 \cdot \sin(r) \text{이므로,} \\ r &= n_1/n_2 \cdot \sin^{-1}(\sin(i)) \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 r 은 1차 굴절각을 나타낸다. 1차 굴절각을 계산하고 나면, 식(7)과 같은 방정식을 만들어 낸다(단 i 는 사잇각, r 은 굴절각, \hat{i} 는 입사벡터, \hat{n} 은 법선벡터, $\hat{p}n = \hat{i} \times \hat{n}$).

$$\begin{aligned} ① \hat{r} \cdot \hat{i} &= \cos(i-r) \\ ② \hat{r} \cdot \hat{n} &= \cos(r) \\ ③ \hat{p}n \cdot \hat{r} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)을 이용해 1차 굴절벡터를 계산해내고 나면, 이 벡터와 두 번째 면에 대한 법선벡터가 이루는 사잇각을 계산한다. 이때, 두 번째 사잇각이 임계각이상이 되면, 전반사(total internal reflection)으로 간주하여 소멸한 것으로 취급하고, 새로운 난수를 발생하여 계산과정을 수행하게 된다.

한편, 두 번째 사잇각이 임계각보다 작으면 광자가 프리즘을 통과하여 굴절하는 것으로 간주한다. 두 번째 사잇각을 이용하여, 다시 식(6)을 이용하여 2차굴절 각 r 을 계산하고, 식(7)을 이용해 2차 굴절 벡터를 계산해 낸다.

3.6 광자의 최종 방향 결정

광자가 굴절되는 최종 방향의 결정은 식(7)을 이용하여 2차 굴절벡터를 계산한 다음, 광원중심의 Y 및 Z축과 이루는 각도를 계산하면 프리즘에 의한 광원으로부터의 굴절각을 나타내는 것이다(그림 11). 그림 12와 같이 본 연구에서 개발한 수치 모델은 총 8부분으로 이루어

어져 있지만, 크게 세단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 난수를 생산하는 단계이고, 두 번째 단계는 벡터의 계산 단계, 세 번째 단계는 굴절각의 계산 단계로 나뉘어진다.

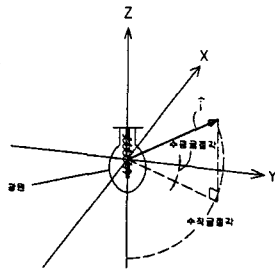


그림 11. 굴절 벡터와 굴절각
Fig 11. Refracted vector and angle

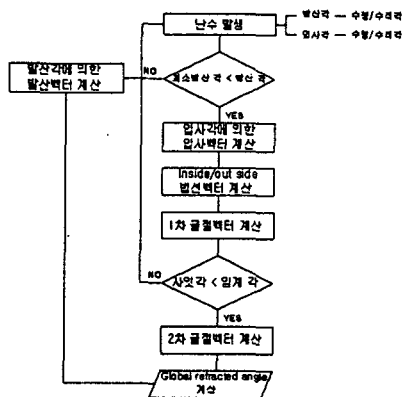
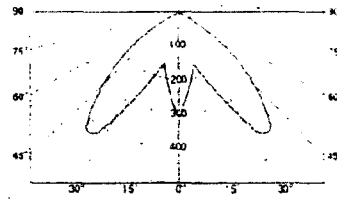


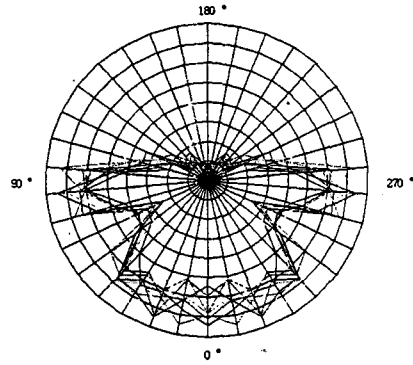
그림 12. 수치모델 계산과정
Fig 12. Flow chart of the numerical model

3.5 결과 분석

그림 13의 (a)는 이미 상용화되고 있는 T사의 돔펜던트 조명기구 배광곡선이고, (b)는 본 연구에서 개발한 수치모델로 계산한 결과 값이다. 프리즘의 사양이나 광원의 배광특성, 조명기구에서의 광원의 정확한 위치 등의 자세한 조건이 일치하지 않기 때문에 배광분포가 완벽히 일치하지는 않지만, 프리즘 돔이 시작되는 부분과 굴절을 거치지 않고 통과하는 부분과의 경계가 확실히 드러나고, 날개모양의 대칭형을 띠고 있는 점등을 볼 때 유사한 결과 값이 나왔음을 알 수 있다. (b)는 프리즘 안쪽과 바깥면 기울기를 45°, 투과율 80%, 프리즘 굴절률 1.5를 적용시킨 결과 값이다. 광자의 수는 10,000개로 정하여 계산하였고, 광자의 개수를 점차 늘려도 프리즘에 관한 데이터를 변화시키지 않는 한 배광의 분포에는 영향을 미치지 못하였다.



(a)



(b)

그림 13. 배광곡선
Fig 13. Candle power distribution

4. 결론

돔펜던트는 프리즘을 이용하여 배광을 조절하는 조명기구이다. 이러한 배광 조절 방식은 정확한 광학적계산의 필요성이 절실히 요구되는 방식이다. 본 연구에서는 프리즘을 이용한 조명기구의 배광 설계시 핵심인 프리즘 디자인에 요구되는 기하학적 계산과정을 제시하였다. 그러나 광원으로부터의 배광을 고려한 난수의 발생을 적용시키지 못한 점, 빛의 전반사가 이루어지면 광자가 소멸하는 것으로 간주 한점, 등은 앞으로 발전시킬 과제로 남아 있다.

참고 문헌

- (1) L. Chen, M. Suzuki, T. Goda, N. Yoshimura, "Luminous intensity characteristics of luminaires: Monte Carlo simulation", *Lighting Research and Technology*, Vol. 30. 4, 1998.
- (2) Lafortune E, *Mathematical Methodes and Monte Carlo Algorithms for Physically Based Rendering*, Doctoral Thesis, <http://www.graphics.cornell.edu/~eric/thesis/>, 1996.
- (3) R. H. Simons, A. R. Bean, *Lighting Engineering*, MFG Books, pp.264, 2001