

배광데이터를 이용한 3차원 평면프리즘의 설계 알고리즘 개발

(Development of 3 Dimensional Planar Prism Design Algorithm Using Photometric Data)

김유신* · 최안섭**

(*세종대학교 건축공학과 석사과정 · **세종대학교 건축공학과 교수)

(Yu-Sin Kim · An-Seop Choi)

Abstract

Development of light sources has been constantly grown for a high efficacy and long life. And, the design of luminaires has been developed for the reflection and refraction of light mechanism. But it has been not enough to study for the refraction of light mechanism. Therefore, this study aims to study for the refraction of light mechanism to using Monte-Carlo method and Ray-tracing method. In addition, the purpose of this study is to show calculation process for development of 3 dimensional planar prism design algorithm in order to use the results of photometric data that is able to obtain various luminous intensity distribution.

1. 서론

1.1 연구의 배경

조명설계 과정 중에서 램프와 조명기구의 선택이 가장 중요하다고 할 수 있는 것은 같은 램프와 동일한 종류의 재질을 이용하여도 조명기구의 광학적 설계와 형태에 따라 조명기구 효율이 달라지기 때문이다. 그리고 같은 효율의 조명기구라 하더라도 사용되어지는 공간의 요건에 적합한 배광을 갖도록 설계를 한다면 조명률이 높아지고, 전체 조명시스템의 효율이 높아져 적은 수의 조명기구로도 더욱 좋은 조명환경을 제공할 수 있다[1].

조명기구의 광학설계란 조명기구가 설치환경에 맞는 목표배광에 이르도록 조명기구의 광원이나 반사각 혹은 프리즘 등의 형태를 디자인하는 것을 말한다[2]. 이는 조명기구를 제작할 때 가장 중요시해야 할 요건 중 하나이다. 이러한 광학설계 중 조명기구의 광학제어와 관련된 연구는 반사각과 관련한 효율에 관한 연구 및 광원의 빛이 반사각에 의해 반사되어 나가는 과정에 관한 연구와 프리즘에 의한 굴절 메카니즘에 관한 연구가 있다. 이 중에 프리즘의 사용은 기존의 반사각 조명기구의 휘도 감소와 더불어 다양한 각도, 형상, 굴절률을 가진 프리즘의 굴절 메카니즘에 의한 조명기구의 배광제어를 통해 사용 공간에 적합한 배광을 얻을 수 있다. 그리고 적합한 프리즘의 광학적 설계는 빛의 움직임을 시뮬레이션 할 수 있는 수치모델의 개발을 통해 가능하며, 광원으로부터 발생된 광자의 움직임을 추적하여 배

광을 예측해 볼 수 있다.

발광효율과 수명이 백열램프보다 우월한 형광램프는 실내 조명광원으로 광범위하게 사용되고 있는 주요한 광원중 하나이며, 형광램프의 전극을 없애 에너지효율을 높인 무전극 형광램프는 일반 형광램프에 비하여 수명이 길고, 실내의 어느 곳에서나 다양한 용도로 사용될 수 있다. 그러나 일반적으로 실내에 형광램프 조명기구를 천장에 설치한 경우 그 공간의 사용 목적이 변하더라도 조명기구의 변경은 드물다. 또한 무전극 형광램프의 경우 HID 램프에 비해 램프의 크기가 비교적 크다. 그리고 발광면적이 넓어서 반사광의 재흡수를 고려하지 않고 조명기구의 광학설계를 할 경우 효율이 떨어질 확률이 높다[1].

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 형광램프나 무전극 형광램프 등과 같은 반사각 조명기구의 배광데이터를 이용하여 3차원 평면프리즘 광학설계 알고리즘을 개발하는 데에 있다. 이는 공간의 사용 목적 변화에 따라 이미 설치된 반사각 조명기구의 배광을 프리즘 설계를 통해 목적 배광에 적합한 배광 모델링을 가능하게 하는 것에 있다. 또한 발광부의 면적이 넓은 무전극 형광램프와 같이 일반적인 반사판 설계의 적용만으로 광학설계가 미흡하게 되는 신평원의 형상과 특성, 그리고 반사각의 배광을 고려한 프리즘 설계를 통해 신평원 조명기구의 배광제어를 가능하게 하는데 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 몬테카를로 방법

몬테카를로 방법이란 통계학적 확률이론과 난수(Random number)를 기반으로 하는 통계학적 추출 시도를 통해 적절한 확률적 모델을 제시하여 해결방법을 찾는 방법을 말한다[3]. 몬테카를로 방법에서 가장 중요한 것은 분포가 균일한 난수를 발생시키는 것이다. 난수 발생기의 초기 조건이 같으면 동일한 난수를 발생시켜야 하고, 초기 조건이 약간이라도 변화하면 전혀 다른 난수를 발생시켜야 한다. 또한 컴퓨터가 다르더라도 초기 조건이 같으면 같은 난수를 발생시켜야 한다.

난수 발생에서 고려해야할 점을 요약해보면 다음과 같다[4].

- 1) 무작위성과 균일성을 갖는 좋은 분포를 가져야 한다.
- 2) 긴 주기를 가져야 한다.
- 3) 재생이 가능해야 한다.
- 4) 계산하는데 있어서 효율성을 가져야 한다.

몬테카를로 방법에 의한 난수 발생으로 광자의 초기 위치에서의 초기 진행방향이 결정되었으며, 프리즘으로의 입사각을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

2.2 광선추적기법

광선추적기법이란 광자가 이동한 경로를 진행하는 방향과 크기를 이용하여 벡터화 시키고, 광자의 반사, 투과, 흡수 그리고 굴절과 같은 복잡한 광학적 진행경로를 계산하여 광자의 위치를 추적하는 방법이다[5]. 광자가 프리즘을 통과하는 동안 일어나는 굴절과정을 계산하기 위해 광선추적기법을 이용하였으며, 광자가 프리즘을 만났을 때의 교점과 만난 프리즘 면의 법선벡터, 광자의 입사각 등의 계산을 통해 광자의 위치를 계산할 수 있다.

이 외에도 광자가 진행하면서 광자의 방향이나 크기에 변화를 주는 프리즘의 투과율이나 프리즘의 각도 등과 같은 특성을 고려하여 광자의 새로운 방향과 크기를 계산하는데 사용되었다. 광자를 벡터화 하였을 때, 일반적으로 (X,Y,Z) 를 축으로 하는 3차원 직교 좌표계를 사용하여 나타내며, 다음 그림 1은 진행하는 광자의 거동을 계산하기 위

해서 광자의 이동방향과 크기를 이용하여 벡터화시키는 원리를 나타낸 것이다.

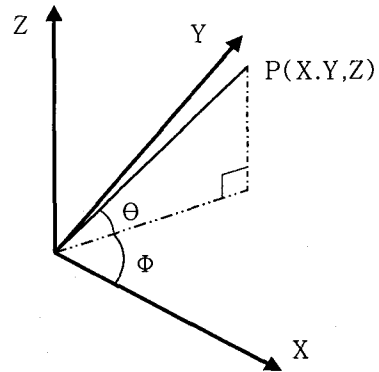


그림 1. 광자의 벡터화

Fig. 1. Vectorization of light photon

그림 1에서의 P점의 좌표 (X,Y,Z) 와 광자의 방향성분 (θ,ϕ) 사이의 관계식은 다음 식 (1)과 같다. 그리고 이 식은 광자의 진행 경로 추적을 하기 위한 가장 중요한 식으로 사용된다.

$$\begin{aligned} X &= \cos\theta \times \cos\phi \\ Y &= \cos\theta \times \sin\phi \\ Z &= \sin\theta \end{aligned} \quad (1)$$

3. 3차원 평면프리즘 설계 알고리즘 개발

3.1 설계 알고리즘 개요

3차원 평면프리즘 설계 알고리즘은 배광데이터를 사용하여 몬테카를로 방법과 광선추적기법을 적용, 광자의 진행방향 및 평면 프리즘을 통과하면서 굴절되는 과정을 계산한다. 그리고 광자의 최종 도달위치를 구분하여 광자들을 각 방향별(수직/수평각)로 개수화하고, 이것을 바탕으로 배광데이터를 출력하도록 구성되어 있다.

또한 평면프리즘 설계 알고리즘을 개발하기 위해서 조명기구의 폭과 너비, 프리즘과 공기의 굴절률, 프리즘의 각도, 광자 초기 위치에서의 최소 발산각 등을 입력 데이터로 사용한다. 다음 그림 2는 평면프리즘 설계 알고리즘의 흐름을 도식화한 것이다[6].

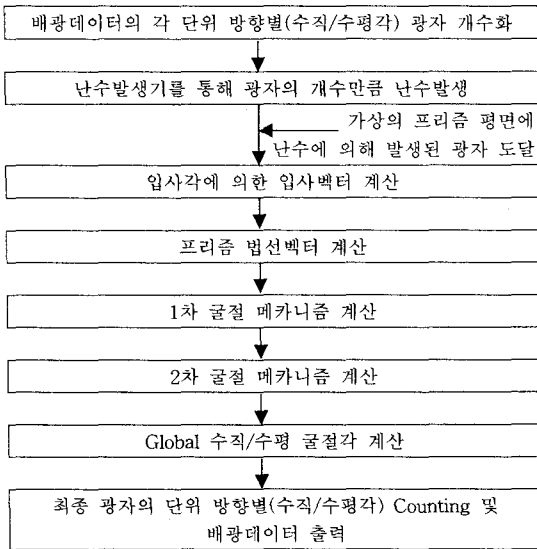


그림 2. 평면프리즘 설계 알고리즘의 흐름
Fig. 2. Flowchart of planar prism design algorithm

3.2 배광데이터를 이용한 광자 난수발생

반사각 조명기구에서 방사된 광자가 조명기구를 빠져나와 작업면에 도달하는 과정은 그림 3에서 보는 것과 같이 ① 광원에서 방사된 다음 직접 나오는 성분, ② 반사각에서 방사된 다음 빠져나오는 성분, ③ 반사각에 반사되고 다시 형광램프에 부딪친 다음 빠져나오는 성분으로 구분 될 수 있다[6].

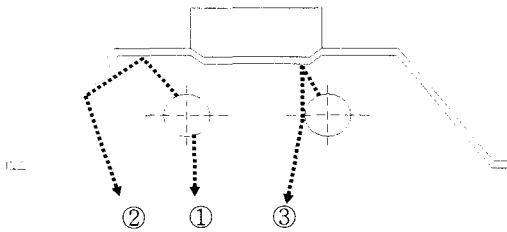


그림 3. 광자의 방사방향
Fig. 3. Radiation direction of light photon

이러한 일련의 과정을 통해 조명기구를 빠져나온 광자의 각 단위방향(수직/수평각)으로 나오는 광자의 개수에 따라 배광 데이터를 얻을 수 있다. 조명기구의 배광데이터를 이용하여 광자의 초기 발생위치를 계산하게 되면, 반사각의 형태들마다 수치 모델의 조건을 바꾸어야하는 경우의 계산 과정과 조명기구 내에서 일어나는 광자의 반사·재흡수에 의한 복잡한 광학계산을 생략할 수 있는 장점이 있다.

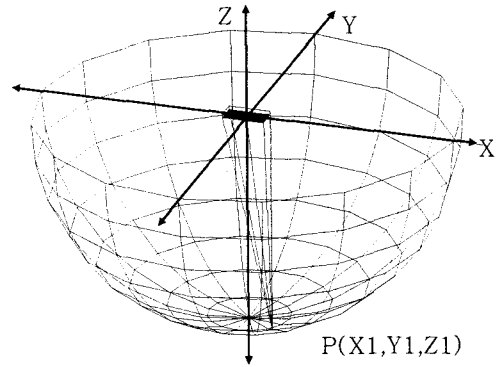


그림 4. 배광데이터를 이용한 입사 광자 난수 발생
Fig. 4. Creation of light photon incidence using photometric data

그리고 그림 4와 같이 조명공학에서 조도계산에 이용되는 광속전달법 중 조도의 직접성분을 계산할 때 사용되는 5-Times rule을 역으로 이용하고, 조명기구 길이의 5배 되는 곳에서 배광데이터의 각 단위방향(수직각, 수평각)별 광도값을 광자개수화 하여 광자의 초기 난수발생 지점을 계산한다[6]. 그리고 수평각 θ , 수직각 ϕ 인 광자의 초기 난수발생 지점 $P(X1, Y1, Z1)$ 는 광자의 벡터화를 통하여 식 (2)와 같이 계산 할 수 있다.

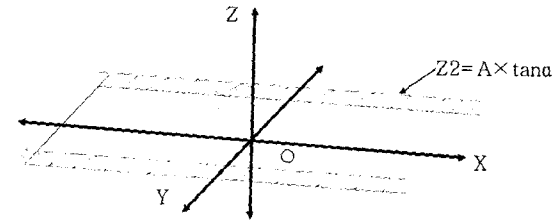
$$\begin{aligned} X1 &= R \times \sin\theta \times \sin\phi \\ Y1 &= -R \times \cos\theta \times \sin\phi \\ Z1 &= -R \times \cos\phi \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 평면프리즘으로의 광자 입사

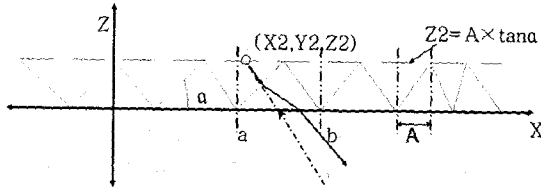
광자의 초기위치에서 광자는 조명기구로 발산되는 수평각, 수직각이 난수발생기를 통해 배광데이터의 광도값의 개수화한 만큼 생성이 된다. 그리고 식 (3)과 같이 광자가 발산하는 수직각, 수평각에 의해 광자의 방향 벡터가 정해지게 된다.

$$\vec{d} = (\cos\theta \times \sin\phi, -\cos\theta \times \cos\phi, -\sin\phi) \quad (3)$$

광자의 초기 위치에서 식 (3)의 방향 벡터를 가진 광자가 그림 5와 같이 가상의 평면프리즘 평면에 도달하면, 그 점에서 다시 식 (3)의 방향 벡터와 역 방향의 방향 벡터를 가지고 평면프리즘으로 입사를 한다. 이때 가상의 평면프리즘 평면은 프리즘의 각도 중 가장 작은 각도(α)와 프리즘의 너비(A)에 의해 결정되어 진다.



(a) 광자가 가상의 평면프리즘 평면에 도달



(b) 광자가 평면프리즘으로 입사

그림 5. 광자의 평면프리즘 입사
Fig. 5. Incidence of light photon into planar prism

광자가 프리즘으로 입사할 때 프리즘의 각도(α)가 각기 다르기 때문에 광자가 가상의 평면 프리즘에 도달하는 점의 위치에 따라서 평면프리즘으로 입사를 할 때 사용되는 법선벡터가 다르다. 프리즘의 법선 벡터는 다음 식 (4)에 의해 계산되어진 광자와 프리즘의 면이 만나는 교점 $(X3, Y3, Z3)$ 에 의해 결정되어 진다.

$$\begin{aligned} X3 &= X2 - x \times \frac{X2 \pm \cot \alpha \times Z2 - (a + A)}{x + z \times \cot \alpha} \\ Y3 &= Y2 - y \times \frac{X2 \pm \cot \alpha \times Z2 - (a + A)}{x + z \times \cot \alpha} \\ Z3 &= Z2 - z \times \frac{X2 \pm \cot \alpha \times Z2 - (a + A)}{x + z \times \cot \alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

- $X2, Y2, Z2$: 가상평면에서의 광자 위치
- x, y, z : 광자의 프리즘 입사 방향 벡터 x, y, z 성분
- α : 프리즘 각도 중 최소 각도
- a : $X2$ 가 위치한 단위 프리즘의 작은 값 ($a \leq X2 \leq b$)
- A : 단위 프리즘 너비/2
- \pm : 입사방향의 기울기가 (+, -)에 따라 결정

3.4 프리즘에 의한 굴절 메카니즘 계산

광자와 프리즘의 기울어짐 면과의 교점을 알고, 광자의 입사 방향벡터의 계산이 되어진 후에는 프리즘의 법선 벡터를 이용하여 굴절 메카니즘을 수행한다. 광자가 프리즘을 통과하면서 굴절 메카니즘은 두 번 이루어진다. 한번은 공기에서 기울어진 프리즘 면을 통과 할 때

와 또 다른 한번은 프리즘에서 공기로 진행되어질 때이다. 그렇기 때문에 그림 6에서 보는 것과 같이 두 가지의 법선 벡터가 필요하다.

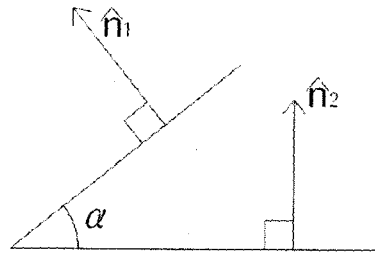


그림 6. 프리즘의 법선 벡터
Fig. 6. Normal Vector of Prism

이때 그림 5에서와 같이 프리즘면의 형태가 Y축으로 는 각도의 변화나 형상의 변화가 없다. 즉, 벡터는 Y축은 굴절 메카니즘에 영향을 끼치지 않음을 알 수 있고, 프리즘의 법선 벡터를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 프리즘에서 공기로 통과하는 과정에서 필요한 두 번째 법선 벡터는 Z가 0인 XY평면에 수직인 법선 벡터로써 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{n}_1 = (\mp \sin \alpha, 0, -\cos \alpha) \quad (5)$$

$$\hat{n}_2 = (0, 0, 1) \quad (6)$$

α : 프리즘 각도 중 최소 각도

\mp : 광자 입사 방향의 기울기가 (+, -)에 따라 결정

프리즘으로 입사한 광자는 광선추적기법과 굴절법칙에 의해 프리즘 면을 통과하고 굴절되어지며, 광자의 입사벡터는 첫 번째 법선벡터에 의해 방향벡터가 바뀐다. 그리고 바뀐 방향벡터는 다시 두 번째 법선벡터에 의해 최종으로 굴절된 방향벡터를 갖게 된다. 최종적으로 발산되어 나온 광자들은 단위방향별(수직/수평각)로 개수화하여 배광데이터를 출력한다.

3.5 평면프리즘의 단위프리즘 각도군

일반적으로 프리즘을 사용한 조명기구의 경우, 프리즘각도는 일률적으로 같은 각도를 갖는다. 하지만, 일률적인 프리즘각도로는 배광의 다양성이 결여될 수 있다는 단점을 지닌다[7]. 이러한 단점을 보완하고자 선행 연구에서는 단위프리즘 각도군을 이용하여 일률적인 프리즘각도를 다양하게 적용시켰다. 동펜던트 프리즘

조명기구의 단위프리즘 각도군은 그림 7과 같이 총 8개로 나누어 배광수치모델의 최적화 시뮬레이션을 하였다.

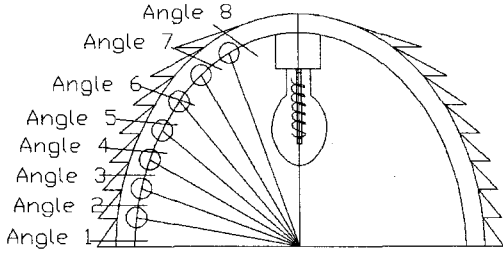


그림 7. 돔펜던트 프리즘 조명기구의 단위프리즘 각도군
Fig. 7. Unit prism angle of dome pendant prism luminaire

그리고 조명기구 광학설계 과정에서 평면프리즘의 설계를 할 때, 프리즘 각도를 개별적으로 하나하나 설계하기는 어렵고, 비효율적이라 할 수 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 3차원 평면프리즘의 설계를 위해 선행연구에서 사용한 프리즘 각도군을 그림 8과 같이 10개로 나누어 이용하였다.

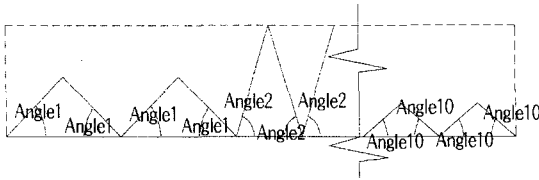


그림 8. 평면프리즘 조명기구의 단위프리즘 각도군
Fig. 8. Unit prism angle of planar prism luminaire

4. 결론 및 향후 과제

본 연구에서 제시한 광학설계 계산과정은 3차원 평면프리즘 설계 알고리즘에 있어서 일반 반사자 조명기구의 배광데이터를 이용하였다. 그리고 평면프리즘의 굴절 메카니즘 과정을 몬테카를로 방법과 광선추적기법을 통해 계산하고, 최종적으로 배광데이터를 도출해 낼 수 있는 시스템의 계산과정이다.

알고리즘의 계산 과정은 총 8단계로 이루어지지만 크게 네 단계로 나눌 수 있다.

- 1) 배광데이터를 이용한 광자의 난수가 발생하는 단계, 즉, 광자의 입사벡터를 결정하는 단계
- 2) 광자와 평면프리즘 면이 접하는 부분의 계산 과정, 즉, 광자가 프리즘으로의 입사하게 되는 조건을 결정하는 단계

- 3) 입사한 광자가 평면프리즘을 통과하며 발생하는 굴절 벡터의 계산 과정
- 4) 최종 발산된 광자의 방향 벡터의 계산과 방향별 배광데이터를 산출해 내는 단계

이러한 일련의 계산 과정을 통해 평면프리즘의 3차원 설계가 가능하고, 이로써 평면프리즘의 광학적 설계를 통한 배광제어의 예측을 할 수 있다.

본 연구는 3차원 평면프리즘 설계 알고리즘의 계산 과정을 제시하였고, 향후에는 이것을 이용하여 평면프리즘 설계에 따른 배광분포를 예측할 수 있다는 것을 증명하여 3차원 평면프리즘 설계의 도구로써 사용 가능성을 확인하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김진모 외 4, "고효율 무전극 형광등용 등기구 개발", 한국조명·전기설비학회지, 제17권 제1호, 2003.2
- [2] 지철근, 조명원론, 문운당, 1996
- [3] M. Nagata, "Calculation of Illuminance in concave interior by the Monte Carlo simulation", J.Illum. Engng. Jpn. Vol. 72, No. 10, 1988
- [4] 유기형, "몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의한 아트리움의 자연채광 성능 예측에 관한 연구", 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1997.12
- [5] 이준형, "몬테카를로 방법을 이용한 돔펜던트 조명기구의 배광수치모델 개발", 세종대학교 대학원 석사학위논문, 2002.12
- [6] 김유신 외 2, "배광데이터를 이용한 평면프리즘 조명기구의 배광모델링", 한국조명·설비학회 춘계학술대회논문집, 2005.5
- [7] 김철환, "유전알고리즘을 이용한 프리즘 조명기구 배광수치모델의 최적화", 세종대학교 대학원 석사학위논문, 2005.2