

무전극 광원의 프리즘조명기구 설계 알고리즘 개발에 관한 연구

(Development of the Design Algorithm of Prismatic Luminaire with Electrodeless Lamps)

김철한* · 최안섭** · 김 훈***

(*세종대학교 건축공학과 석사과정 · **세종대학교 건축공학과 교수 · ***강원대학교 전기공학과 교수)
(Cheol-Han Kim · An-Seop Choi · Hoon Kim)

Abstract

Development of light sources has been constantly grown after incandescent lamps had been invented by Thomas Edison. Recently, the electrodeless lamp is introduced as a new light source of a high efficacy and long life. But, despite of such advantages, luminaires of electrodeless lamps are not widely used. It is necessary to develop the design of the luminaire together with light source development. In this paper, design algorithm of the luminaire that is adaptable to electrodeless lamp and use Genetic Algorithm as a optimization method to find luminous intensity distribution required is introduced.

1. 서론

전기를 이용하는 광원은 에디슨이 1879년에 탄소전구를 발명한 후에 눈부시게 발전과 진보를 해오고 있다. 초기의 개발단계에 있어서는 긴 수명, 고효율화의 연구가 대부분이었으며, 현재도 이와 같은 연구는 중요한 과제로 남아 있다. 국외의 경우 광원의 에너지 절약에 관한 개발 중 수명 단축의 가장 큰 요인인 전극을 제거한 무전극 광원(그림1)이 이미 개발되었으며, 국내에서도 산업자원부와 에너지관리공단의 지원에 따라 개발 중에 있다. 하지만, 일반적으로 새로운 광원은 조명기구 업체가 조명기구를 설계하기전에 시장에 출시되므로 광원의 기술은 새롭지만, 조명기구가 쫓아오지 못하게 된다. 조명기구의 개발 없이는 사실상 광원의 경우 시장에서 응용되기는 어렵기 때문에 보급측면에서는 조명기구의 역할이 매우 크다. 무전극 광원의 경우 특이한 외형으로 제작될 수 있기 때문에 기존의 조명기구로는 쉽게 형상적으로 변형이 어렵고 새로운 광원에 맞추어 설계된 배광시스템이 필요하게 된다.

그러나 무전극 광원을 사용한 조명기구의 개발 사례는 아직 국제적으로도 그다지 많지 않으며, 실제 디자인한 조명기구의 경우 광학적 설계가 아닌, 경험과 시행오차에 의한 외형적 디자인에 그치고 있다. 또한 무전극 광원은 장수명의 특성에 의해 교체가 어려운 높은 곳에 설치하기 때문에 조명기구의 배광과 연관성이 깊다. 하지만, 현재의 조명기구 설계는 반사각과 관련한 효율 및 디자인 방법에 대한 것 즉, 광원에서 나온 빛이 반사각에 의해 반사되어 나가는 과정에 대한 연구가 대

부분이기 때문에 원하는 배광을 만족하기에는 한계를 가지고 있다[1].

그러므로 넓은 배광을 얻을 수 있고, 설치 장소에 따른 다양한 배광을 얻기 위해서는 반사 메카니즘과 더불어 다양한 각도, 형상, 굴절률을 갖는 프리즘에 의한 굴절 메카니즘의 연구가 필수적이다. 하지만, 현재 조명기구의 굴절 메카니즘에 대한 설계연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 새로운 광원인 무전극 광원에 대한 프리즘 조명기구의 광학적 설계알고리즘을 개발하여 원하는 배광을 얻을 수 있는 프리즘 조명기구를 개발하고자 한다.

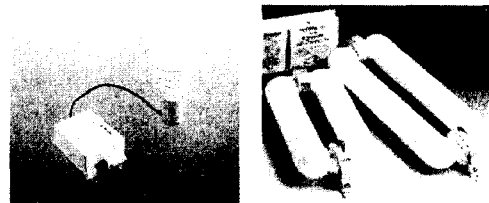


그림 1. 국외 회사의 무전극 광원
Fig 1. Electrodeless lamp

2. 이론적 고찰

2.1 몬테카를로 방법의 확률적 이론

주사위를 던졌을 때 나오는 수리든가 학생들의 시험 성적, 가스안의 분자의 순간 속도 등 정해진 구간 내에서는 값을 가지지만 똑같은 조건에서 여러 번 시도해도 구체적으로 어떠한 값이 나오게 될지를 사전에 미

리 알 수 없다. 결국 그 값을 얻기 위해서는 확률적으로 예측할 수밖에 없다. 몬테카를로 방법은 이러한 확률적인 값들을 통계학적 확률이론과 난수(Random Number)를 기반으로 통계적 기술로써 얻을 수가 있다. 정확히 말하면 몬테카를로 방법이란 난수를 이용한 통계적 추출 시도를 통해 적절한 확률적 모델을 제시하여 해결방법을 찾는 것을 말한다[1].

1949년에 Metropolis와 Ulam이 발표한“The Monte Carlo Method”란 제목의 논문에서 처음으로 언급된 몬테카를로 방법은 초기에 수작업이었던 난수를 컴퓨터의 발달로 수학적 적용이 가능해짐에 따라 지구의 복사 열전달과 같은 물리적 현상이나 핵반응과 같은 고에너지 물리적 현상의 시뮬레이션에 적용될 수 있다. 또한 물리학에서 중성자의 거동, 빛의 반사, 신호의 발생에서 주로 쓰이며 현재는 경제학에서 핵물리학에 이르기까지 광범위하게 쓰인다. 물론 각 분야마다 그 적용방법은 다양하다[2],[3].

본 연구에서의 몬테카를로 방법은 광원의 기하학적 형상면 위에서 광자의 발생위치와 방사방향, 그리고 프리즘으로의 입사각과 광자의 반사재료의 반사특성을 고려한 광자의 방향을 결정하는데 적용되었다.

2.2 빛의 움직임

빛의 정의에 따라 빛은 파장을 갖고 있다. 하지만, 그런 빛의 입자 즉, 광자의 흐름을 기하학적으로 표현하기에는 계산의 복잡함과 정확한 파장의 형태를 알 수 없기 때문에 한계를 갖고 있다. 광선 추적기법은 이러한 복잡한 과정을 수학적으로 예측할 수 있는 기법이다.

광선 추적기법(Ray-tracing Technique)이란, 광자가 광원에서 방사되었을 때 공간 내에서 광자의 반사, 투과, 흡수 그리고 굴절과 같은 복잡한 광학적 특성을 표현할 수 있도록 광자가 운동하는 방향과 크기를 벡터화시키고 각 입자들의 진행경로를 계산하여 최종 입자를 추적하는 방법이다. 방사된 광자는 공간내에서 이 방법을 적용시키기 위해서는 벡터가 공간상의 어떤 면과 만날 경우 만나는 점의 교점과 이루는 각 등을 계산하는 식을 알아야 한다. 교차한 면에 대한 반사특성, 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 특성 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 결정하게 된다. 이러한 계산 과정을 통해 광자의 최종 방향과 크기를 얻을 수 있다.

결과적으로 광자 하나가 광원에서 방사하여 광자의 최종 방향과 크기를 얻는 계산과정을 반복하여 Global한 좌표의 각 단위방향으로 나오는 광자의 개수에 따라 배광 데이터를 얻을 수 있다.

2.3 빛의 성질

빛의 성질에는 반사, 투과, 굴절, 회절 등 여러 성질이 있는데, 그 중 본 연구에서는 반사와 굴절의 법칙을 이용하였다. 빛의 반사에는 입사광선과 입사면에 세운 수직선사이의 각 반사광선과 수직선 사이의 각과 같은 정반사와 반사 재료의 특성에 따라 입사각에 관계없이 임의의 방향으로 반사되어 빛의 퍼짐과 같은 형상의 확산 반사가 있다. 반사는 광자가 조명기구의 반사갓과 만날 때 적용된다.

빛의 굴절은 빛이 공기와 유리 같은 두 개의 서로 다른 매질의 경계면을 통과할 때, 빛의 진행방향이 바뀌어 지거나 혹은 굴절하게 되는 현상으로 광원으로부터의 배광을 조절할 수 있는 광학적 디자인에 이용된다. 굴절 과정에서는 빛이 밀한 매질에서 소한 매질로 진행하다가 두 매질의 경계면에서 빛이 소한 매질로 통과하지 못하고 반사되는 전반사 현상이 일어나는데 만약 굴절각이 90°일때의 입사각을 임계각(Critical angle)이라 한다. 그림 2는 빛의 성질을 도식화 한 것이다[4].

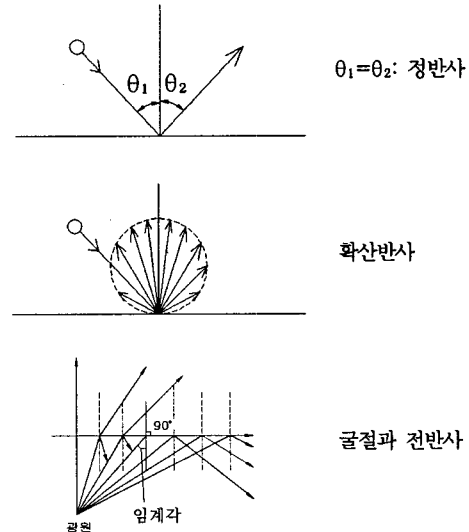


그림 2. 빛의 반사 및 굴절과 전반사
Fig. 2. Reflection, Refraction and Total internal reflection

3. 설계 알고리즘 과정

3.1 광자의 위치와 방사방향

무전극 광원의 형태는 전구형, 환형, 직관형이 있다. 그 중 본 연구에서는 기본적인 광원의 형태인 직관형과 평면프리즘 조명기구에 대한 수치모델을 제시하고자 한

다. 광자의 발생위치와 방향은 난수발생에 의해 정의되어진다. 광자의 위치는 확률 이론인 몬테카를로 방법에 의해 직관형무전극 광원 표면의 임의의 점을 선택하게 되고 방사 방향은 직관형무전극 광원의 형태가 일반적인 직관형 형광등과 유사하여 Linear source의 방사 형태를 적용한다.

즉, 직관형의 형광물질은 완전 확산 투과 물질이므로 광원의 표면에서 광자가 모든 방향으로 똑같은 확률을 갖고 방사하는 것이다. 그러므로 식(1)에 의해 임의의 점에서 광자의 방사방향을 구할 수 있다[5].

$$\theta = \frac{\text{COS}^{-1}(1-2R)}{2}$$

$$\phi = 2\pi R \quad (1)$$

단, R : 난수

θ : 광원면에서의 수평각

ϕ : 광원면에서의 수직각

3.2 광자 거동의 경우의 수

조명기구 내에서의 광자의 거동은 그림 3과 같이 3가지의 경우로 나눌 수 있다. 첫째, ①은 광자가 광원에서 방사하여 평면프리즘으로 바로 입사하는 것이고, 둘째, ②는 광원에서 나온 광자가 반사각에 반사되어 평면프리즘으로 입사하는 경우가 있다. 셋째, ③은 광자가 반사각에 반사되어 다시 광원으로 입사 후 반사되는 경우

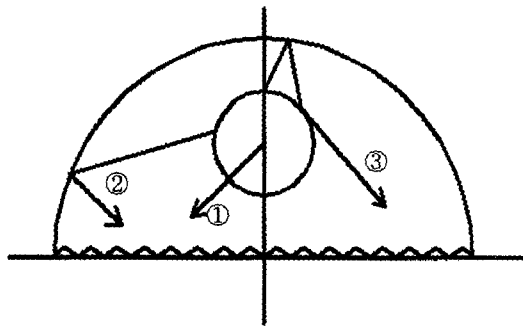


그림 3. 광원에서 나오는 광자의 거동
Fig. 3. Movements of Light photons

이다.[3] 그림 3은 광원의 거동을 위한 임의적인 반사각의 형상이다. 조명기구의 반사각은 다양한 여러 가지의 형태가 있는데, 본 연구에서는 광자의 광학적 거동에 의한 프리즘의 입사 광자의 확률적 경우를 위해 모델링한 것이다.

3.2 광자의 광학적 거동 판단

광원에서 광자가 방사한 후, 3가지 경우에 대한 광자의 거동을 판단하게 된다. 그림 4를 보면 먼저 조명기구의 양 끝점과 광자가 발생한 임의의 점이 이루는 각도(α)는 그 점에서 나오는 확률분포에 의한 광자가 프리즘으로 입사하는지 반사판으로 입사하는지를 판단하게 된다. 즉, 광자의 방향이 각도(α)보다 크게 되면 반사각으로 입사하며 그 반대는 직접 평면프리즘으로 입사하게 된다. 두 번째는 생성된 임의의 점과 그 점에서 조명기구의 반사각에 직교인 점을 지나는 직선이 있을 때, 만약 광자의 방향이 그 선과 중심선과의 이루는 각(β)보다 클 경우는 광자가 반사각에 반사되고 다시 광원으로 입사, 반사하게 된다.

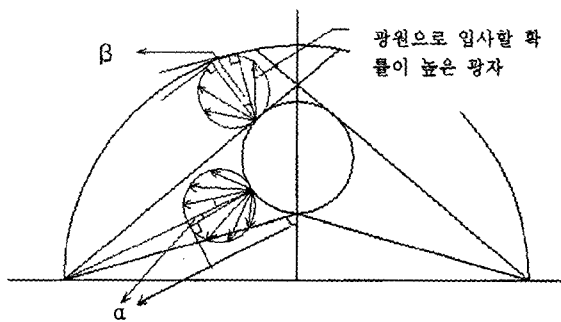


그림 4. 광자의 거동 판단
Fig 4. Determination of movements of Light photon

3.3 광자의 평면프리즘 굴절

조명기구내에서 나오는 광자는 전부 평면프리즘을 통과 하게 된다. 이때 일어나는 굴절 과정 또한 몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의해 일어난다. 광원에서 직접 나오는 광자의 경우는 방사각과 단위프리즘의 법선 벡터와 이루는 각에 의해 굴절 계산과정을 하게 된다. 하지만, 그 외의 경우에 대해서는 정확한 광자의 흐름을 추적하기에는 많은 계산과 시간이 필요하며, 또한 조명기구의 반사각의 형태가 다양하기 때문에 정확성에서 한계가 있다.

그래서 확률적인 방법으로 이 광자들의 개수를 합하여 평면프리즘과 만나는 좌표평면에서 그 개수만큼 난수를 발생한 다음, 그 광자의 방사각을 재생성한다. 재생성된 광자는 직접 입사하는 광자의 경우와 같은 굴절 계산 과정을 하게 되는 것이다.

4. 평면프리즘 굴절 계산 과정

4.1 입사 벡터의 계산

광자가 평면프리즘과 굴절 과정을 하기 위해서는 먼저 입사 벡터를 계산한다. 그림 5와 같이 입사벡터(I)는 광자의 진행 방향을 나타내고 벡터(N)은 프리즘 평면과 평행한 벡터이다. θ 와 ϕ 는 각각, 벡터(N)과 이루는 수직/수평 입사각을 나타낸다. 단위벡터의 길이가 1이므로, 입사벡터의 길이는 $\cos(\theta)$ 가 되고, 입사벡터의 X, Y, Z 성분은 식(2)와 같다.

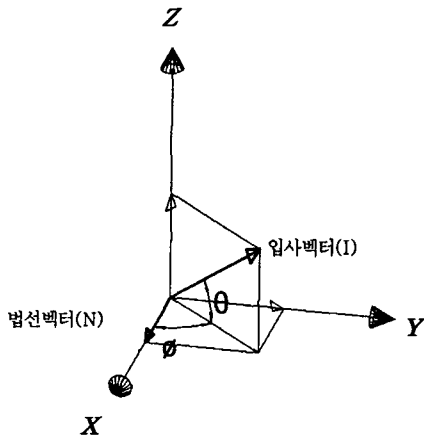


그림 5. 입사벡터의 계산

Fig. 5. Calculation of the incident vector

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

4.2 법선 벡터의 계산

입사벡터를 가진 광자는 프리즘의 법선벡터를 만나게 된다. 그때의 내부 법선벡터는 프리즘의 각도에 의해 정의 되어 진다. 즉, 그림 6에서의 안쪽 프리즘각도(θ)에 의해 법선벡터는 식(3)과 같다. 그 반대방향의 법선 벡터는 X성분의 부호만 바꾸면 된다. 또한 프리즘의 굴절하여 나가는 방향의 법선은 프리즘의 좌표평면과 일치하므로 그 평면에 수직인 선이 외부 법선벡터가 된다.

$$\begin{aligned} X &= -\sin(\theta) \\ Y &= 0 \\ Z &= \cos(\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

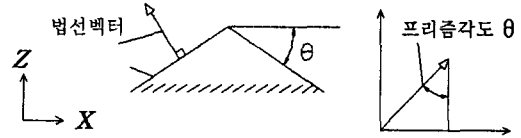


그림 6. 안쪽 프리즘 각도

Fig 6. Angles of prism related with normal vector

4.3 굴절 벡터의 계산

굴절 벡터를 구하기 위해서는 굴절각을 알아야 한다. 굴절각(R)은 샤넬의 법칙에 의해서 식(4)로 정의 되어 진다.(단 N_1, N_2 = 굴절률)

$$N_1 \cdot \sin(I) = N_2 \cdot \sin(R)$$

$$R = N_1/N_2 \cdot \sin^{-1}(\sin(I)) \quad (4)$$

먼저 입사벡터와 법선벡터가 이루는 사잇각 θ 을 계산하게 된다. 사잇각(I)은 입사벡터(i)와 법선벡터(n)가 이루고 있는 직접적인 각도이고, 이것의 계산은 식(5)와 같이 Dot product에 의해 이루어진다.

$$\cos(\theta) = i \cdot n$$

$$\theta = \cos^{-1}(i \cdot n) \quad (5)$$

사잇각을 계산하고 나면, 굴절의 법칙을 이용하여 굴절각을 계산한다. 굴절각을 계산하면, 식(6)의 방정식을 이용하여 굴절벡터(r)를 구한다.

$$r \cdot i = \cos(i - r)$$

$$r \cdot n = \cos(r)$$

$$pn \cdot r = 0 \quad (6)$$

단, $pn = i \times n$ (벡터 i 와 벡터 n 과의 Cross product)

그러므로 굴절벡터는 안쪽 프리즘을 통과시의 1차 굴절 벡터와 바깥쪽 프리즘 면을 통과하는 2차 굴절 벡터로 나뉘지는데, 그 계산은 식(6)을 통하여 구할 수 있다. 광자의 굴절되는 최종 방향은 바깥쪽 프리즘을 통과한 최종 굴절벡터에 의해 결정되며, Global좌표축과 이루는 각으로써 단위각에 들어오는 광자의 개수를 합한다.

이것에 의해 배광 데이터가 작성된다.

5. 결과 및 최적 설계 방법론

본 설계 알고리즘은 크게 두 부분으로 나뉜다. 즉, 광원에서 나오는 광자가 조명기구 반사갓과의 광학적 이동과 평면프리즘과의 굴절 과정이다. 연구 초기에는 모든 광자가 평면프리즘으로 들어오기 때문에 광자와 반사갓 사이의 광자의 이동을 배제하였다. 그러나 반사갓 개발에 있어 그 형태와 반사에 의한 광자에너지 손실에 따라 크게 달라지기 때문에 배제할 수가 없게 되었다. 다음의 그림 7은 본 설계알고리즘의 과정을 나타낸 것이다.

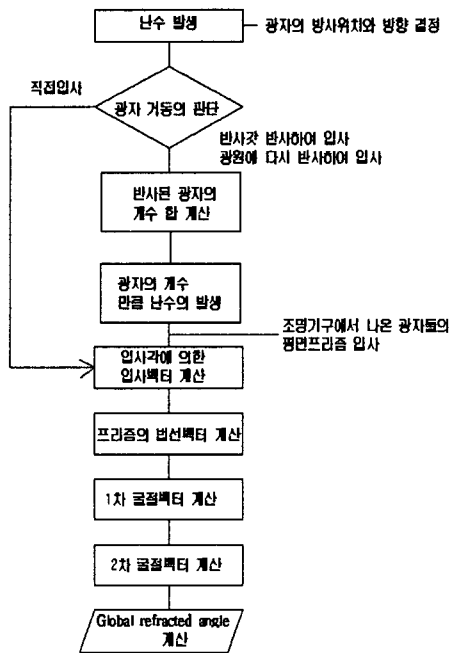


그림 7. 설계 알고리즘 계산 과정
Fig. 7. Flow chart of the design algorithm

본질적으로 조명기구의 반사갓이나 프리즘은 어떤 주어진 광원을 가지고 원하는 배광을 얻고자 하는 목적을 가지고 있다. 하지만, 대부분 조명기구 설계디자인들은 많은 시간과 시행오차를 통해서 설계되며, 정확한 광학적 설계디자인 보다는 외형적인 설계디자인에만 집중되어 있다. 또한 목표 배광을 얻기 위한 조명기구의 설계 디자인을 찾는 것은 상당히 어렵다. 이것은 형태에 미치는 변수와 조건들이 상당히 많이 존재하고 그 많은 변수와 조건들을 매번 조건을 바꿔가며 실험과 계산이 필요하기 때문이다.

이러한 디자인 설계의 경직성을 개선하기 위한 방향으로 최적화 이론인 유전자알고리즘(Genetic Algorithm)

이론을[6] 소개하고자 한다. 현재 다양한 분야에서 최적화를 위한 공학적 이론으로서 그 활용이 증가하고 있는 유전자알고리즘은 다윈이 주장한 자연 진화의 원리인 적자생존을 이용하여 진화와 도태의 자연현상을 구현한 알고리즘이다. 즉, 다양한 변수를 유전자화하여 원하는 목표에 맞는 변수를 찾아낼 때까지 유전 연산자인 교배 및 돌연변이의 연산을 반복하는 최적화 이론이다[7]. 유전자 알고리즘의 기본적인 구조는 그림 9와 같으며, 유전자 알고리즘을 접목하기 위해서는 변수가 적합한지를 평가 할 수 있는 적합도 함수의 선정이 중요하다.

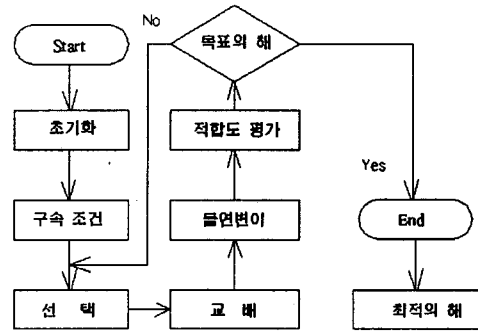


그림 8. 유전자 알고리즘의 흐름
Fig. 8. Flow chart of the Genetic Algorithm

원하는 목표를 찾는다는 것은 원하는 배광을 갖는 조명기구의 해를 찾을 수 있다는 것과 같다. 본 연구는 유전자 알고리즘을 접목시킬 수 있는 다양한 방법 중에서 광자의 최종 도달 각도에서의 개수를 이용하였다. 적합도 함수로써 개수들의 차이를 선정한 것이다. 개수 차이의 합의 평가는 식(7)과 같이 목표 배광의 각 각도 광도 값을 각도 별로 개수화 한 것과 수치모델 배광의 광자 개수와의 차이를 평가 하는 것이다. 구체적으로 말하면, 각 각도별 광자의 개수차이를 최소화 하면 최적의 해를 구할 수 있다.

$$\text{Minimize } F = |C_w - C_s| \quad (7)$$

F : 임의의 한 방향에서의 목적함수

C_w : 원하는 배광의 광자개수

C_s : 시뮬레이션한 배광의 광자개수

하지만, 배광의 결과 값은 3차원 데이터이기 때문에 각 방향별로 평가를 해야 한다. 또한 유전자알고리즘을 적용하기 위해서는 하나의 목적함수가 필요하므로 식(8)과 같이 전 방향의 목적함수를 합하여 전 방향을 평가할 수 있도록 한다. 결과적으로 전 방향을 합한 f 값의 최소화가 기본 수치모델 최적화 시키는 목적이 되는 것이다.

$$\text{Minimize } f = \sum_{i=1}^k F_i \quad (8)$$

참고문헌

f : 전 방향에 대한 목적함수

k : 전 방향을 나타낼 수 있는 단위 각도의 개수

다음은 본 수치모델의 최적화 방법론으로 제시한유전자 알고리즘의 과정의 순서를 나타내고 있다.

- ① 목표배광을 설정하기 위한 정확한 배광 데이터 수집 및 적용도를 평가할 수 있는 실제 광도 값의 개수화
- ② 세가지 변수의 제약조건을 바탕으로 광범위한 전역해를 탐색할 수 있도록 임의의 해집단의 형성
- ③ 해집단의 개체에 의한 수치모델의 시뮬레이션 실행
- ④ 목표배광의 광자 갯수와 시뮬레이션 개수의 차이를 이용한 적용도 계산
- ⑤ 평가 후 해집단의 개체를 선택교배의 과정 수행
- ⑥ 최적의 해가 나올 때까지 ②번에서 ⑤번까지 반복 수행

6. 결 론

본 연구는 고 효율성과 장수명을 가진 무전극 광원의 조명기구를 개발하고자 프리즘 조명기구의 설계 알고리즘을 제시 하였다. 아직 개발단계에 있는 무전극 광원에 대한 정확한 자료가 부족하지만, 확률적 이론과 광선 추적기법을 이용하여 배광을 예측 할 수 있는 알고리즘을 수치모델화 한 것이다.

제시한 설계 알고리즘은 반사각과 프리즘의 형태가 다양하기 때문에 배광 설계시 요구되는 광학적, 기하학적인 과정을 형태에 따라서 좀더 정밀한 연구가 필요하며, 또한 최적화 이론을 접목하여 원하는 배광을 쉽게 얻을 수 있는 하나의 도구로써 그 개발 가능성을 높이고자 한다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단 2003년 에너지자원기술개발연구비(고효율 무전극 형광등 시스템 개발)에 의하여 연구 되었음.

- (1) 이준형, "몬테카를로 방법을 이용한 돔펜던트 조명기구의 배광수치모델 개발", 세종대학교 대학원 석사학위논문, 2002.
- (2) 김재삼, "몬테카를로 방법의 물리학적 응용", 민음사, 1997.
- (3) L. Chen, M. Suzuki, T. Goda, N. Yoshimura, "Luminous intensity characteristics of luminaires: Monte Carlo simulation", Lighting Research and Technology, Vol. 30. 4, 1998.
- (4) R. H. Simons, A. R. Bean, Lighting Engineering, MPG Books, pp.264, 2001.
- (5) 이정호, "형광등의 기하학적 형상 및 광학적 거동의 수치모델 개발" 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1999.
- (6) D.E.Golberg, "Genetic Algorithms in search, Optimization and machine learning", Addison-Wesley, 1989.
- (7) 공성곤 외4, "유전자알고리즘", 그린 출판사, 1996.