

평면 프리즘 LED 조명기구 배광수치모델의 다양한 배광 제어를 위한 연구

(A Study for the Control of Various Luminous Intensity Distribution in
Numerical Model of Planar Prism LED Luminaire)

김유신* · 최안섭**

(Yu-Sin Kim · An-Seop Choi)

Abstract

There are several technological problems have to be resolved for LEDs to be used as a general purpose light source. In addition, there are several differences between existing luminaires and the general planer LED luminaire for the intensity distribution. Therefore, the optical engineer then faces the challenging a problem of designing for a spatially extended and non-uniform light source. In the previous studies on the optical design of luminaires, a lot of studies on reflectors and light source have been conducted but the ones on prisms and lenses are insufficient at present. This study developed the numerical model of planar prism LED luminaire to control luminous intensity distribution of LED luminaires. And this study presents an optical calculation process for the prism optical design of a planar prism LED luminaire and a comparison of the simulation results between the developed numerical model and Photopia 2.0 to verify the accuracy of the numerical model. In addition, this study showed a method for the control of various luminous intensity distribution from the developed numerical model.

Key Words : Numerical Model, Planar Prism LED Luminaire, Optical Design, Refraction

1. 서 론

1.1 연구의 배경

차세대 조명광원으로 각광받고 있는 LED (Lighting Emitting Diode)는 기존의 조명광원과 다른 광특성 때문에 기존 조명기구와 동일한 방법으로 LED 조명기구를 광학설계하기에는 어려움이 따른다. 특히 현재 사용되고 있는 평면 LED 조명기구는

* 주저자 : 세종대학교 건축공학과 박사과정
** 교신저자 : 세종대학교 건축공학과 교수
Tel : 02-3408-3761, Fax : 02-3408-4331
E-mail : aschoi@sejong.ac.kr
접수일자 : 2011년 10월 30일
1차심사 : 2011년 11월 9일
심사완료 : 2011년 12월 5일

LED 소자를 하향으로 향하게 설치하고, 확산판이나 불투명 커버를 설치하여 LED 소자의 직접적인 노출을 막는 조명기구 형태가 대부분이다. 이와 같은 평면 LED 조명기구는 등근 형태의 “Lambertian” 배광 형태를 지닌다. 이는 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 형광램프 조명기구의 옆으로 퍼지는 “Bat-wing” 배광형태와 차이를 보인다. 이러한 평면 LED 조명기구의 “Lambertian” 배광형태는 다양한 공간이나 불균일한 조명 환경에 적용이 힘들기 때문에 평면 LED 조명기구의 광학설계가 필요하다[1]. “Lambertian” 배광형태를 지닌 평면 LED 조명기구는 렌즈나 프리즘과 같은 광학부품의 설치를 통해 배광형태의 제어가 가능하다.

조명기구 광학부품의 광학설계에 관한 선행된 연구를 살펴보면, 먼저 광학설계의 기본이 되는 반사와 굴절 법칙 계산을 위한 기초적인 연구[2-5]가 있다. 그리고 LED 조명기구의 광학설계에 관한 연구로는 LED 소자의 반사판 설계를 통한 LED 소자의 광학 제어에 대한 연구[1]와 LED 소자의 렌즈 광학설계에 관한 연구[6-8]가 있다. 그 밖으로 자동차 헤드라이트용 LED 조명기구 반사판 광학설계에 관한 연구[9]나 LCD backlight 모듈 설계를 위한 프리즘 광학설계에 관한 연구[10-11]가 있다. 이와 같이 현재 이루지고 있는 LED 조명기구의 배광제어에 관한 연구들은 LED 소자의 2차 광학계 광학설계에 관한 연구가 대부분이며, 조명기구의 프리즘이나 렌즈 광학설계에 대한 연구는 미미한 상태이다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구에서 개발한 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광수치모델은 광선추적기법(Raytracing technique)을 이용하여 광원으로부터 발생된 광자의 움직임을 추적하였고, 광자가 프리즘을 통과하며 변화된 조명기구의 배광형태를 예측할 수 있다. 이와 같은 배광수치모델 시뮬레이션 결과와 상용화된 광학설계 소프트웨어인 Photopia 2.0 결과의 비교를 통해 사용 가능성을 검증하였다.

본 연구에서 개발한 알고리즘은 LED 소자의 배광

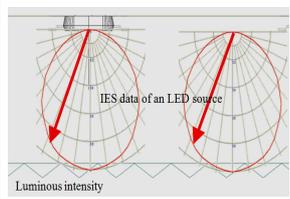
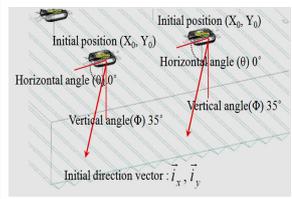
형태나 설치 위치, 반사판의 반사율, 프리즘의 굴절률 등 광학부품의 광학적 특성을 입력변수로 설정이 되어진다. 이러한 광학부품 설정에 따라 평면 프리즘 조명기구의 배광형태는 매우 다양한 변화를 보일 수 있다. 다양한 광학부품 중에서 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광형태 변화에 가장 큰 영향을 주는 변수는 프리즘의 각도의 변화이다. 이에 본 연구에서는 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광수치모델을 이용하여 일반적인 반사판 광학설계의 적용만으로 도출하기 어려운 평면 LED 조명기구의 다양한 배광 제어를 위한 프리즘 각도의 광학설계 방법론을 제시하고자 한다.

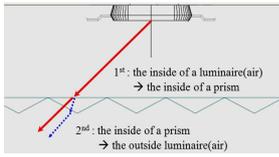
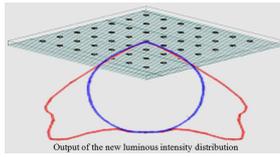
2. 배광수치모델 시뮬레이션 개발

2.1 배광수치모델 개발

본 연구에서 개발한 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광수치모델 알고리즘은 LED 소자의 배광데이터를 이용하며, LED 소자에서 발산된 광자의 거동은 광선추적기법에 의해 계산된다. 본 연구의 배광수치모델 알고리즘은 다음과 같이 크게 4단계로 이루어져 있다.

표 1. 평면 프리즘 LED 조명기구 배광수치모델의 흐름도
Table 1. Optical design process for the planar prism LED luminaire

(a) LED 소자의 배광데이터	(b) 광자의 초기 위치 및 방향 벡터 설정
	
LED 배광데이터의 각 수직 각별 광도값 → 광자의 에너지	LED 소자의 설치 위치 → 광자의 초기 위치 LED 배광데이터의 수직각 → 광자의 초기 방향 벡터

<p>(c) 광자의 굴절 과정 계산</p>  <p>1st: the inside of a luminaire (air) → the inside of a prism</p> <p>2nd: the inside of a prism → the outside luminaire (air)</p>	<p>(d) 새로운 배광형태 출력</p>  <p>Output of the new luminous intensity distribution</p>
<p>입사 벡터와 광자의 위치 계산을 통한 광자의 굴절 과정 계산</p> <p>1st 굴절 과정 : 조명기구 내부(공기) → 프리즘 내부</p> <p>2nd 굴절 과정 : 프리즘 내부 → 조명기구 외부(공기)</p> <p>※ 2nd 굴절 과정에서 전반사와 확산광을 고려한 알고리즘 개발</p>	<p>프리즘을 통과한 광자의 최종 위치 계산</p> <p>→ 최종 Global angle 계산</p> <p>→ 새로운 배광형태 출력</p>

첫째, 평면 LED 조명기구에 사용되는 LED 소자의 배광데이터를 사용하였으며, 배광데이터의 수직 각별 광도를 광자의 에너지로 사용하였다. 둘째, LED 설치 위치와 배광데이터를 이용하여 LED 소자의 초기 위치와 방향벡터를 설정하고, 셋째, 광선 추적기법과 굴절법칙을 이용하여 프리즘을 통과하는 광자의 움직임에 따른 위치와 방향벡터를 계산하였다. 그리고 마지막으로 광자의 최종 도달 위치를 계산하고, 조명기구의 중심에서 광자의 최종 위치가 이루는 각(Global angle)으로 다시 계산하고, 이것으로 평면 LED 프리즘 조명기구의 새로운 배광형태를 출력하였다.

이때 광자의 최종 도달 위치는 조명기구 장변의 길이의 5배 거리만큼 떨어진 지점으로 설정하였다. 이는 조명 계산 방법 중에 하나인 “Luminous flux transfer method”에 사용되는 규칙인 5-Times rule을 이용한 것이다. 5-Times rule은 조명기구에 의한 조도의 직접 성분을 계산할 때 사용되며, 이는 크기가 있는 광원(조명기구)를 점광원으로 간주하기 위해 조명기구의 위치에서 조도를 구하는 지점의 거리를 조명기구 장변 크기의 5배 이상 떨어져야 한다는 규칙이다[12]. 다음 그림 1은 본 연구에서 개발한 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광수치모델 알고리즘의 순서도를 나타낸 것이다.

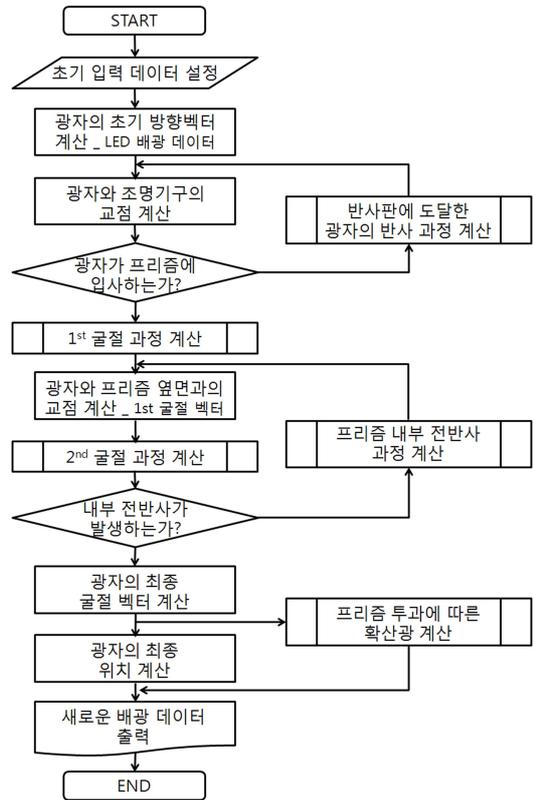


그림 1. 배광수치모델의 알고리즘 순서도
Fig. 1. Flow chart of the algorithm of numerical model

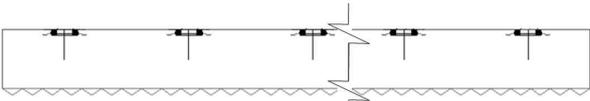
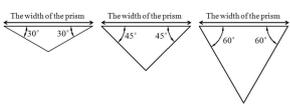
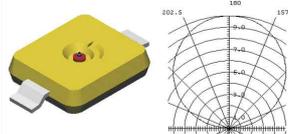
2.2 배광수치모델 검증

본 연구에서 개발한 배광수치모델 알고리즘의 시뮬레이션 결과 검증을 위하여 광학설계 프로그램인 Photopia 2.0을 이용하여 동일한 조건으로 광학설계 시뮬레이션을 수행한 결과와 배광수치모델 알고리즘 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 다음 표 2는 본 연구의 광학설계 시뮬레이션에 사용된 광학부품의 특성을 나타낸 것으로 광학설계 시뮬레이션은 실제 사용되는 평면 LED 조명기구의 형태를 이용하였다.

본 연구의 광학설계 시뮬레이션에 사용된 프리즘의 형태는 이등변삼각형이고, 프리즘의 정각이 하부를 향하도록 하였다. 그리고 프리즘의 너비는 10[mm]로 하여 시뮬레이션을 수행하였으며, LED 소자는 Photopia 라이브러리에 제공되고 있는 O사의 2[W] LED 소자의 배광데이터를 사용하였다. 또한 조명기구 반사판

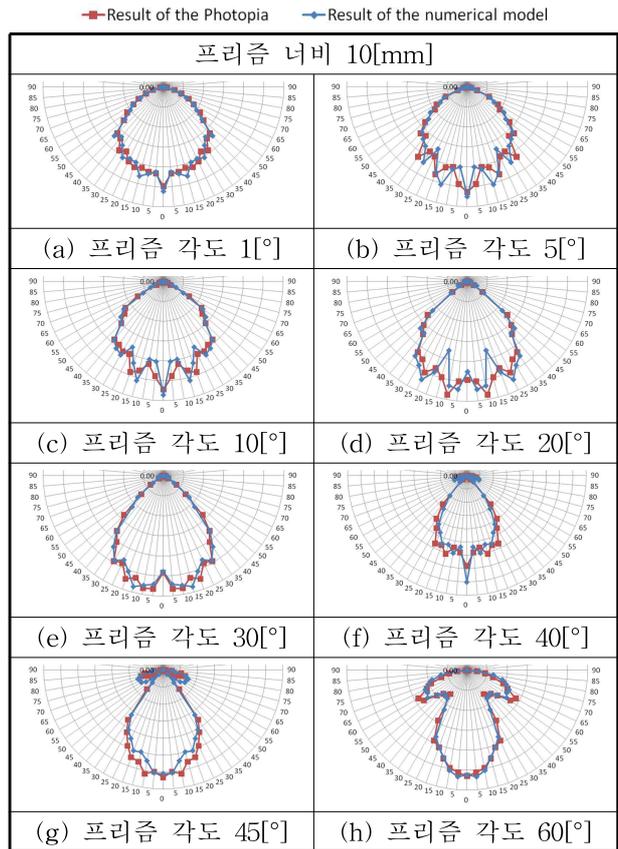
의 반사율은 90[%], 프리즘의 굴절률은 일반적인 아크릴 재질의 굴절률인 1.491로 설정하였다.

표 2. 광학설계 시뮬레이션 광학부품 특성
Table 2. Specific character of optical part for the optical design simulation

(a) 평면 프리즘 LED 조명기구 형태	
	
크기 : 500×500×30[mm], 소자 : 8×8개	
(b) 평면 프리즘 형태	(c) LED 소자 배광 형태
	
(d) 광학부품 특성	
반사판 재질	White paint
반사율	90[%]
프리즘 재질	Standard acrylic
굴절률	1.491
LED 소자	2[W], 31.1[lm]

본 연구에서 개발한 배광수치모델 알고리즘의 사용 가능성을 검증하기 위하여 프리즘 각도를 1[°]와 5[°], 10[°], 20[°], 30[°], 40[°], 45[°], 60[°]로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 프리즘 내부에서 발생할 수 있는 전반사 횡수를 50번, 확산광의 비율은 20[%]로 설정하였다. 표 3은 본 연구에서 개발한 배광 수치모델 시뮬레이션과 Photopia 2.0 시뮬레이션의 결과를 비교한 것으로 거의 동일한 배광형태를 보였다. 그리고 배광수치모델 알고리즘과 Photopia 2.0의 시뮬레이션 결과가 프리즘의 각도에 따라 다소 차이를 보이는데, 이는 Photopia 2.0은 전반사가 이루어지는 횡수와 측정된 매질의 투과율과 확산광 비율의 차이에서 발생하는 오차로 사료된다. 그러나 배광의 형태는 큰 차이가 없으며, 이로써 본 연구에서 개발한 평면 프리즘 LED 조명기구 배광수치모델 알고리즘의 사용 가능성이 검증되었다.

표 3. 프리즘 각도 따른 시뮬레이션 결과
Table 3. Results of simulation by change of the prism angle



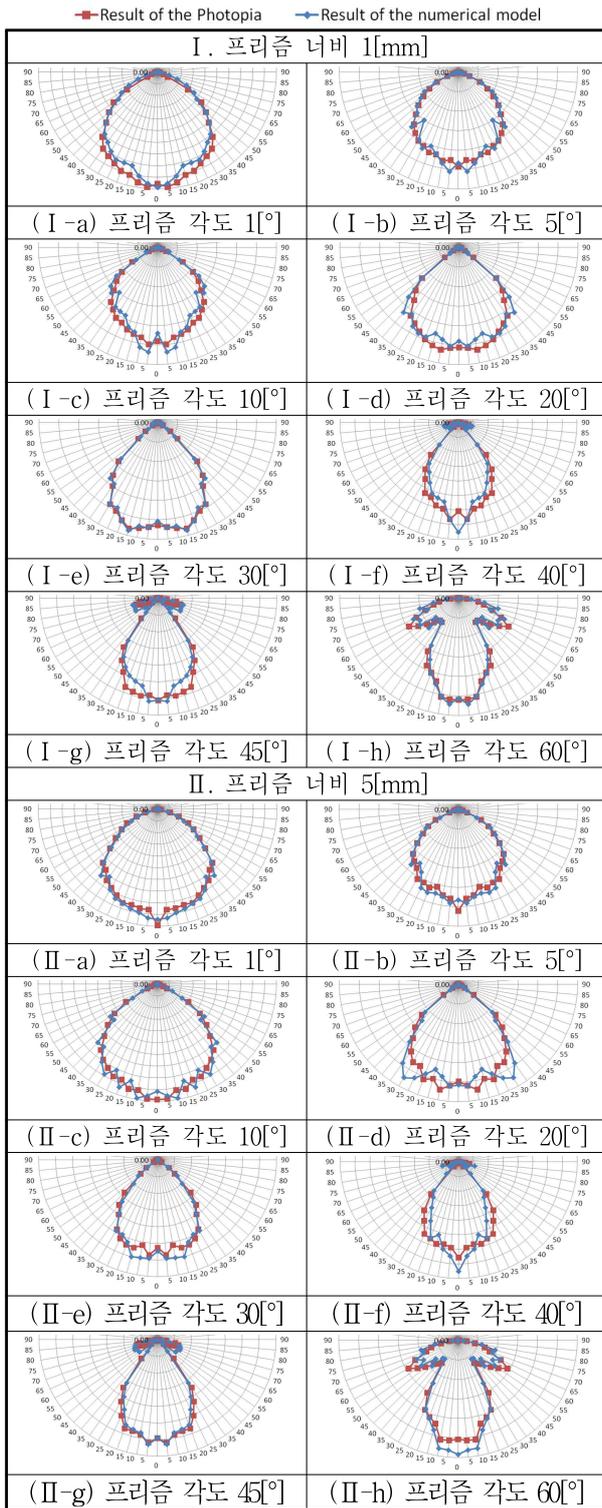
3. 배광수치모델 시뮬레이션 결과

본 연구에서 평면 프리즘 LED 조명기구의 다양한 배광형태 구현을 위해 먼저, 프리즘의 너비의 변화에 따른 배광형태 변화를 비교하였고, 단위 프리즘 각도군 설정을 통한 배광형태 변화를 비교하였다. 이때 단위 프리즘 각도군이란 현재 일률적인 각도를 지닌 프리즘이 아닌 서로 다른 각도를 설정하기 위해 평면 프리즘을 같은 너비로 나눈 것을 의미한다.

3.1 프리즘 너비에 따른 배광형태 비교

본 연구에서 프리즘의 너비에 따른 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광형태 변화를 비교하기 위하여

표 4. 프리즘 너비에 따른 시뮬레이션 결과
Table 4. Results of simulation by change of the prism width



프리즘 너비를 5[mm]와 1[mm]로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 표 4는 프리즘 너비의 변화에 따른 배광수치모델 시뮬레이션 결과와 Photopia 2.0 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다.

표 3과 표 4에서 나타내는 것과 같이 프리즘의 너비가 짧고, 프리즘 각도가 작을수록 등근 형태인 “Lambertian” 배광형태를 보였는데, 특히 프리즘 너비가 짧은 1[mm]인 경우, 각도가 작을수록 일반적인 확산판이나 불투명 커버와 유사한 성격을 나타내는 것으로 보인다. 그리고 프리즘 각도가 커짐에 따라 프리즘 너비 변화에 따른 배광형태의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

그리고 다음 표 5와 같이 조명기구의 효율 또한 프리즘 너비와 상관없이 프리즘 각도에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 이때 프리즘 너비 1[mm], 프리즘 각도 1[°]와 5[°]인 경우, Photopia 2.0 시뮬레이션을 위한 프리즘 모델링에 있어 프리즘의 크기가 매우 작아 먼 깨짐 현상으로 효율이 다소 떨어지는 결과를 나타난 것으로 사료된다. 이와 같이 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광형태 변화에 프리즘 너비 변화보다 각도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

표 5. 프리즘 너비와 각도에 따른 조명기구의 효율
Table 5. Efficiency of luminaire by change of the prism width and angle

	1[°]	5[°]	10[°]	20[°]	30[°]	40[°]	45[°]	60[°]
1[mm]	82.6	77.1	82.1	72.6	67.6	55.6	53.0	64.7
5[mm]	89.7	86.8	82.5	72.6	67.5	55.5	53.1	64.8
10[mm]	89.6	86.8	82.5	72.6	67.5	55.5	53.4	64.8

3.2 단위 프리즘 각도군 설정에 따른 배광 형태 비교

일반적으로 평면 프리즘의 각도는 일률적이지만, 본 연구에서는 다양한 배광 형태 구현을 위하여 그림 2와 같이 단위 프리즘 각도군을 설정하여 여러 각도를 적용하였다. 이때 단위 프리즘 각도군의 개수(N)는 배광 수치모델 알고리즘의 입력데이터에서 설정하며, 개수

에 따라 단위 프리즘 각도군 너비를 균등하게 분할하였다.

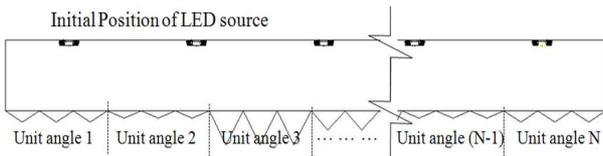


그림 2. 단위 프리즘 각도군 설정
Fig. 2. Division of the unit prism angle zone

단위 프리즘의 개수와 각도는 임의의 값으로 설정하였으며, 그에 따른 배광수치모델 알고리즘과 Photopia 2.0 시뮬레이션 결과는 표 6과 같다. 이와 같이 단위 프리즘의 개수와 각도에 따라 일률적인 각도를 적용한 경우와는 다른 배광형태가 구현됨을 알 수 있다. 이는 향후 평면 프리즘 LED 조명기구 배광수치모델의 최적화 알고리즘 개발에 적용되어 다양한 목표 배광형태에 적합한 단위 프리즘 각도군의 최적화된 각도 도출에 이용될 수 있다.

표 6. 단위 프리즘 각도군 변화에 따른 최적화 시뮬레이션 결과
Table 6. Results of optimization simulation by change of the unit prism angle zones

프리즈م 너비 1[mm]	
Result of the Photopia	Result of the numerical model
(a) 단위 프리즘 각도군 3개 : 10[°], 30[°], 10[°]	(b) 단위 프리즘 각도군 5개 : 5[°], 20[°], 45[°], 20[°], 5[°]
(c) 단위 프리즘 각도군 7개 : 5[°], 10[°], 20[°], 30[°], 20[°], 10[°], 5[°]	(d) 단위 프리즘 각도군 10개 : 45[°], 40[°], 5[°], 20[°], 10[°], 10[°], 20[°], 5[°], 40[°], 45[°]

4. 결 론

본 연구에서는 LED 소자의 크기가 작고, 집속성이 강해 일반적인 조명기구와 같이 반사판 광학설계만으로 배광제어가 어려운 평면 LED 조명기구의 배광제어를 위한 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광수치모델 알고리즘을 개발하였다. 본 연구의 배광수치모델 알고리즘은 LED 소자의 배광데이터를 사용하였으며, 광선추적기법을 이용하여 광자의 움직임을 계산하였다. 그리고 프리즘 각도와 입사각에 의해 발생하는 전 반사와 프리즘을 투과하며 발생하는 확산광을 고려한 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 배광수치모델의 시뮬레이션 결과와 광학설계 소프트웨어인 Photopia 2.0의 시뮬레이션 결과를 비교한 결과, 프리즘 각도에 의해 도출되는 배광곡선의 형태가 거의 동일하게 나타났다. 이로써 본 연구에서 개발한 평면 LED 프리즘 조명기구의 배광수치모델 알고리즘의 사용 가능성이 검증되었다.

그리고 본 연구에서 평면 프리즘 LED 조명기구의 프리즘 너비 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 프리즘 너비 변화에 따른 배광형태 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 평면 프리즘 LED 조명기구의 다양한 배광형태 구현을 위한 방법으로 단위 프리즘 각도군 설정을 제안하였고, 임의의 단위 프리즘 각도군을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 단위 프리즘 각도군 설정에 따라 다양한 배광형태의 구현이 가능함을 알 수 있었다.

향후 본 연구에서 개발한 평면 프리즘 LED 조명기구의 배광수치모델을 기본으로 목표 배광에 맞는 배광제어가 가능한 최적화된 프리즘 각도군을 도출할 수 있는 최적화 알고리즘 개발이 필요하며, 이때 단위 프리즘 각도군의 적용을 통해 다양한 형태의 목표 배광 형태를 도출할 수 있다. 이를 통해 기존의 최적화 광학설계 프로그램의 일률적인 프리즘 각도가 도출됨과 다르게 단위 프리즘 각도군의 적용을 통해 보다 다양한 목표 배광 구현이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No. 20110013621)이며, 본 연구의 저자의 일부는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았음.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2011년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

[1] F. Vandeghinste, G. Durinck, S. Forment, G. Deconinck, P. Hanselaer, A Narrow Beam Reflector for a Two-Dimensional array of Power Light Emitting Diodes, LEKOS, 4(4) (2008) 243-254.

[2] P. R. Bhattacharjee, Momentum conservation leading to the generalized vectorial laws of reflection and refraction, International journal for Light and Electron Optics, 120 (2009) 642-646.

[3] P. R. Bhattacharjee, The generalized vectorial laws of reflection and refraction applied to the rotation problems in ray optics, International journal for Light and Electron Optics, 121 (2010) 2128-2132.

[4] W. Sun, G. Videen, B. Lin, Y. Hu, Q. Fu, Beyond Snell's law: Refraction of a nano-beam of light, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 112 (2011) 174-176.

[5] K. Wandachowicz, K. Domke, Using BRDF for radiance and luminance calculation, Simulation Modeling Practices and Theory, 14 (2006) 641-648.

[6] W. Chen, T. Lai, M. Wang, H. Hung, An optimization system for LED lens design, Expert Systems with Applications 38 (2011) 11976-11983.

[7] Y. C. Lo, K. T. Huang, X. H. Lee, C. C. Sun, Optical design of a Butterfly lens for a street light based on a double-cluster LED, Microelectronics Reliability (2011).

[8] J. Jiang, S. To, W.B. Lee, B. Cheung, Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight, International journal for Light and Electron Optics, 121 (2010) 1761-1765.

[9] M.S. Huang, C. C. Hung, Y. C. Faang, W. C. Lai, Y. L. Chen, Optical design and optimization of light emitting diode automotive head light with digital micromirror device light emitting diode, International journal for Light and Electron Optics, 121 (2010) 944-952.

[10] C. J. Li, Y. C. Fang, M.C. Dheng, Prism-pattern design of an LCD light guide plate using a neural-network optical model, International journal for Light and Electron Optics, 121 (2010) 2245-2249.

[11] C. F. Lin, U. B. Fang, P. H. Yang, Optical film with microstructures array for slim-type backlight applications, International journal for Light and Electron Optics, 122 (2011) 1169-1173.

[12] IESNA, The IESNA Light handbook, 9th ed., Illuminating Engineering Society of North America, 2000.

◇ 저자소개 ◇



김유신 (金有信)

1981년 1월 2일생. 2005년 세종대 건축공학과 졸업. 2007년 세종대 건축공학과 건축환경설비전공 졸업(석사). 현재 세종대 건축공학과 박사과정.



최안섭 (崔安燮)

1967년 10월 4일생. 1991년 한양대 건축공학과 졸업. 1993년 The Pennsylvania State University 건축공학 건축조명시스템 전공 졸업(석사). 1997년 The Pennsylvania State University 건축공학 건축조명시스템전공 졸업(박사). 현재 세종대 건축공학과 교수. 본 학회 이사.