

조명기구용 프리즘의 광학 설계법에 관한 연구

(Research of Optical Design Method for Prism Luminaire)

석대일* · 이창모 · 김 훈

(Dae-Il Seok · Chang-Mo Lee · Hoon Kim)

요 약

특정한 배광 구현을 위하여 부피를 갖는 실제 광원에 대한 프리즘 설계법을 연구하였다. 입사각을 알고 목표 방향으로 광선을 보내려 할 때, 프리즘 정각을 구하는 수식을 유도하였고, 순차적으로 프리즘 정각을 구하였다. 점광원으로 가정된 설계 결과의 문제점을 분석한 후 이를 보완하여 부피를 갖는 광원에 적용할 수 있는 설계법을 도출하였다. 각각의 설계 결과로 나온 배광과 효율을 비교, 분석하였고 보완된 설계법을 통해 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

We studied prism design method for actual light source that have bulk in order to accomplish particular intensity distribution. When we know incidence angle and try to send ray to given direction, numerical formula that yields prism vertical angle, and then vertical angles were calculated sequentially. After analyzing problem that supposing to point light source, supplemented this and derived applicable prism design method on bulk light source. The intensity distribution and efficiency that came out by each design results were compared and analyzed, we got improved results through supplemented design method.

Key Words : Prism, Intensity Distribution, Luminaire, Ray-Tracing

1. 서 론

조명기구의 효율과 성능 개선을 위해서 지금까지는 반사 특성을 이용하는 반사판 설계의 연구가 많이 이루어져 왔다. 반면에 굴절과 투과를 이용하는 프리즘 광학 설계에 관한 연구는 상대적으로 미비하였다.

광학 설계에서 반사판과 함께 적절한 프리즘의 광학적 설계도 중요하다. 반사판의 성형 한계나 재질 한계를 프리즘을 이용하여 교정 할 수 있다[1-2].

본 논문에서는 특정 배광을 구현하기 위한 조명기구용 프리즘의 설계법을 다룬다. 프리즘의 특성과 프리즘 내부에서 빛의 진행에 대한 설명은 여러 서적에 수록되어 있지만 특정 배광 구현과 배광 제어를 위한 체계적인 프리즘 설계법은 제시되어 있지 않다.

* 주저자 : 강원대학교 전기전자공학과 박사과정

Tel : 033-250-6290, Fax : 033-241-3775

E-mail : littlepeace99@hanmail.net

접수일자 : 2007년 3월 12일

1차심사 : 2007년 3월 16일

심사완료 : 2007년 4월 12일

조명기구용 프리즘의 광학 설계법에 관한 연구

기존 프리즘 설계법에는 작도법과 선형 프리즘군 설계법이 있다[3-4]. 작도법에 의한 설계는 점광원에서 나온 하나의 광선만 고려하여 프리즘의 기울기를 결정하는 것이다. 프리즘군 설계는 기구 사이즈가 광원에 비해서 매우 커지게 되며 광원과 마주하는 측면의 제한된 구간에만 적용할 수 있기 때문에 실제 배광 구현을 위해 적용하기에는 제한이 따른다.

프리즘의 다양한 각도, 형상과 재질의 굴절률에 따라서 빛의 진행 방향이 상이하게 변하므로 계산을 통해 광자의 진행 방향을 미리 예측하고 광선추적기법을 이용하여 광선의 경로를 추적함으로써 배광 구현과 배광 제어를 할 수 있는 체계적인 설계법을 정립하고 이를 검증하는 것이 본 연구의 목적이다.

프리즘에 관한 기본 이론과 특성을 고찰하고, 수식과 광선 추적을 이용하여 프리즘 정각을 결정해 주었다. 점광원을 가정한 설계법을 통해 실제 부피를 갖는 광원에 대한 설계법을 도출하고, 체계화하였다.

연구의 타당함을 확인하기 위해 계산에 의한 광선 추적과 배광예측 프로그램인 Photopia를 이용하였다.

2. 광학 프리즘 설계 및 평가

광선의 경로를 추적하고 Photopia를 이용한 시뮬레이션을 통해 광선의 지향각과 이루는 발산각을 계산하였고, 효율 변화를 확인하는 것으로 평가를 하였다.

2.1 점광원으로 가정한 프리즘 설계

먼저 광원을 점광원으로 가정한 설계법을 체계화하고, 실제 부피를 갖는 광원에 적합한 설계법을 도출하였다. 시뮬레이션 비교를 위해 사이즈가 다른 광원의 lamp library를 생성하였다. 반사판 영향을 무시할 수 있도록 광원 상단의 반사판 반사율은 0으로 가정하였다. 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 조건
Table 1. Simulation condition

광원	직경 [(mm)]	광속 [lm]	Prism		
			굴절률 (n)	재질	두께 [(mm)]
점광원	2.54	1,000	1.49	아크릴	3~6
시험 램프1	10				
시험 램프2	20				
시험 램프3	30				
:	:				
시험 램프8	80				

2.1.1 목표배광과 광속 분배

그림 1과 표 2는 각각 구현하려는 목표 배광과 광속 분배 결과를 보여준다[4-6].

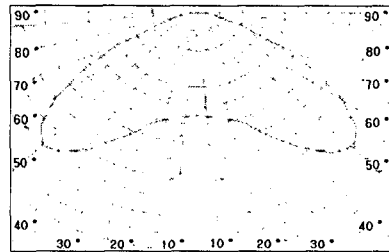


그림 1. 목표 배광 곡선
Fig. 1. Required polar curve of light distribution

표 2. 램프 광속의 분배
Table 2. Redistribution of luminous flux from lamp

1	2	3	4	5	6	7	8	9
수직각	중간각	램프 광도	방사 광속	상대 광도	상대 광속	광속	누적 광속	할당 영역
0~10	5	77.4	7.38	18	1.71	8.53	8.53	0~12
10~20	15	78.4	22.22	20	5.66	28.14	36.68	12~24
20~30	25	79.5	36.79	30	13.88	68.94	106.62	24~40
30~40	35	79.4	49.87	40	25.12	124.76	230.38	40~58
40~50	45	80.1	62.03	50	38.72	192.25	422.64	58~82
50~60	55	79.3	71.14	35	31.4	155.90	578.55	82~98
60~70	65	80	79.4	15	14.88	73.92	652.47	98~108
70~80	75	79	83.57	0	0	0	-	-
80~90	85	79.6	83.57	0	0	0	-	-
90~100	95	79.5	86.74	0	0	0	-	-
100~108	104	78.5	66.43	0	0	0	-	-
total			652.47		144.86	652.47		

2.1.2 프리즘 설계

그림 2는 설계의 기본 개념을 보여준다.

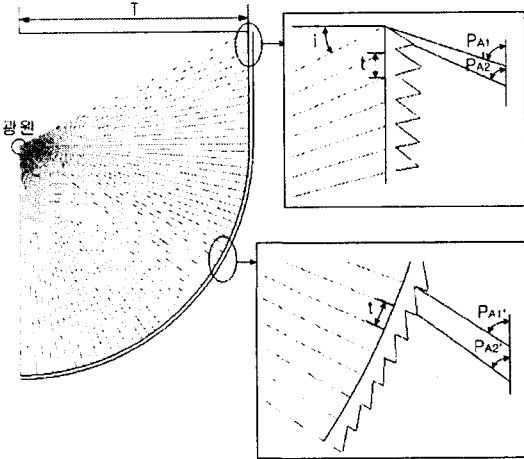


그림 2. 프리즘 설계의 기초
Fig. 2. Basic of prism design

광축 아래는 반구 형태로써 각 입사각이 동일하고, 광축 위는 입사면 기울기를 0[°]로 하여 입사면의 영향을 배제하였다. 광원 중심에서 등간격(2[°])으로 분할하면 하나의 프리즘 구간 t가 결정된다.

광중심으로부터 최상단의 프리즘에 입사하는 광선의 각이 상한 각이고, 지향각 P_{A1}이 컷오프 각이 된다.

P_{A1}과 P_{A2} 사이는 출사 광선의 방사 범위이다.

순차적으로 정각 A를 구하기 위해서 공식을 유도하였다[4-5, 7].

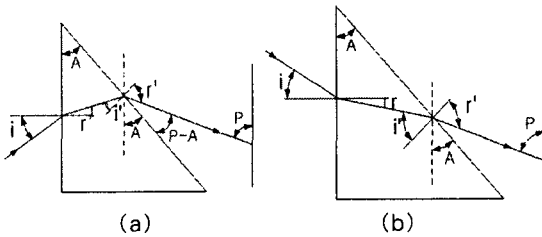


그림 3. 굴절 프리즘 광선 추적(1)
Fig. 3. Refracting prism ray tracing(1)

여기서 i, i'은 입사각, r, r'은 굴절각, P는 지향각,

A는 프리즘의 정각이다.

프리즘의 정각 A를 구하는 식 (1), (2)는 그림 3 (a), (b)를 통해 유도되었다.

$$A = \tan^{-1} \left[\frac{n \sin \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\sin i}{n} \right) \right\} + \sin(90^\circ - P)}{n \cos \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\sin i}{n} \right) \right\} - \cos(90^\circ - P)} \right] \quad (1)$$

$$A = \tan^{-1} \left[\frac{-n \sin \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\sin i'}{n} \right) \right\} + \sin(90^\circ - P)}{n \cos \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\sin i'}{n} \right) \right\} - \cos(90^\circ - P)} \right] \quad (2)$$

여기서 n은 굴절률, i는 입사각, P는 지향각이다.

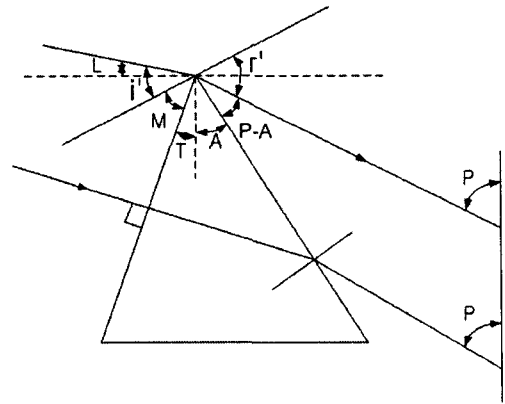


그림 4. 굴절 프리즘 광선 추적(2)
Fig. 4. Refracting prism ray tracing(2)

광축 하단 부분은 2[°] 간격으로 분할되고 입사면이 2[°]씩 기울어져 있다. T는 입사면의 기울기이고 L은 T와 1[°] 입사각에 대한 굴절각 0.7[°]의 합으로써 출사면에 입사하는 광선의 입사각이다. 그림 4를 통해 식 (3)이 유도된다.

$$A = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(90^\circ - P) - n \sin L}{n \cos L - \cos(90^\circ - P)} \right] \quad (3)$$

설계를 용이하게 하기 위해서 표를 작성하였고, 그 결과를 표 3에서 보여준다.

조명기구용 프리즘의 광학 설계법에 관한 연구

표 3. 굴절 프리즘에 대한 계산 데이터(점광원)

Table 3. Data of calculation for refracting prism (point source)

P	입사각	굴절각	프리즘 경각	상부 입사각	굴절각	출사각	하부 입사각	굴절각	출사각
70.0	18.0	12.0	51.5	39.5	71.5	70.0	40.8	77.0	64.5
68.0	16.0	10.7	50.4	39.8	72.4	68.0	41.1	78.4	62.1
65.0	14.0	9.3	49.7	40.3	74.7	65.0	41.7	82.1	57.6
64.0	12.0	8.0	48.3	40.2	74.3	64.0	41.6	81.3	56.9
62.0	10.0	6.7	47.1	40.4	75.1	62.0	41.8	83.0	54.1
61.0	8.0	5.4	45.7	40.3	74.7	61.0	41.7	82.2	53.5
59.0	6.0	4.0	44.6	40.5	75.6	59.0	41.9	84.1	50.5
58.0	4.0	2.7	43.1	40.4	75.1	58.0	41.8	83.1	50.0
57.0	2.0	1.3	41.7	40.3	74.7	57.0	41.7	82.2	49.5
55.0	0.0	0.0	40.5	40.5	75.5	55.0	40.5	75.5	55.0

T	P	입사각	T+0.7	프리즘 경각	상부 입사각	굴절각	출사각	하부 입사각	굴절각	출사각
1	55.0	1.0	1.7	38.3	40.0	73.3	55.0	42.0	85.8	42.6
3	55.0	1.0	3.7	35.6	39.3	70.6	55.0	41.3	79.4	46.2
5	54.0	1.0	5.7	33.2	38.9	69.2	54.0	40.9	77.1	46.1
7	53.0	1.0	7.7	30.7	38.4	67.7	53.0	40.4	74.9	45.8
9	52.0	1.0	9.7	28.2	37.9	66.2	52.0	39.9	72.9	45.4
11	50.0	1.0	11.7	26.2	37.9	66.2	50.0	39.9	72.9	43.4
13	48.0	1.0	13.7	24.2	37.9	66.2	48.0	39.9	72.9	41.4
15	46.0	1.0	15.7	22.2	37.9	66.2	46.0	39.9	72.9	39.4
17	45.0	1.0	17.7	19.7	37.3	64.7	45.0	39.3	70.9	38.8
19	44.0	1.0	19.7	17.1	36.8	63.1	44.0	38.8	68.9	38.2
21	43.0	1.0	21.7	14.5	36.1	61.5	43.0	38.1	66.9	37.5
23	42.0	1.0	23.7	11.8	35.4	59.8	42.0	37.4	64.9	36.8
25	41.0	1.0	25.7	9.0	34.7	58.0	41.0	36.7	63.0	36.1
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

2.1.3 설계 결과 및 분석

시뮬레이션 결과가 그림 5에 나와 있다. 목표 배광에 근접한 결과가 나왔음을 알 수 있다.

기구 효율 51.4%는 반사판에서의 흡수로 인한 것이다. 51.4%는 반사판을 포함한 기구 효율이고, 80%는 반사판을 제외한 프리즘만의 효율이라고 볼 수 있다.

그림 6은 동일한 프리즘 기구에 직경이 다른 구형

광원을 적용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 준다.

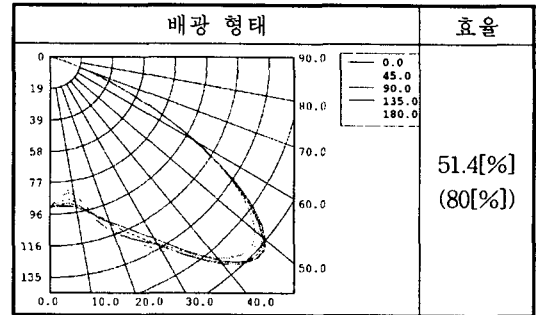


그림 5. 굴절 프리즘의 Photopia 시뮬레이션 결과 (점광원)

Fig. 5. Photopia simulation result of refracting prism (point source)

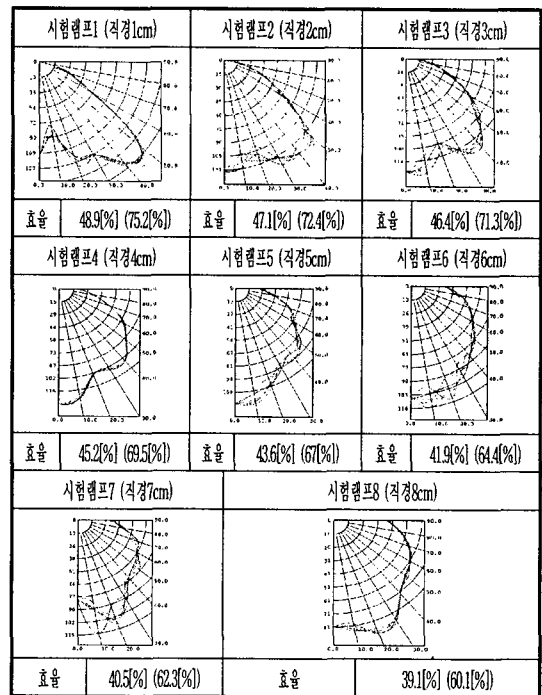


그림 6. 시험 램프의 Photopia 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Result of photopia simulation for test lamps

점광원으로 가정하고 설계한 기구에 실제 크기가 있는 광원을 적용하면 목표 배광을 얻을 수 없고, 광원의 크기가 커질수록 배광이 일그러지고 효율이 저

하됨을 알 수 있다. 그러므로 램프의 사이즈를 고려한 설계가 이루어져야 할 것이다.

2.2 부피가 큰 광원에 대한 프리즘 설계

광원의 부피가 커질수록 광선은 큰 입사각을 갖고, 한 점에서의 입사각은 점차 증가한다.

그림 7은 광원의 사이즈가 증가할수록 입사각이 증가하는 것을 보여주고 표 4는 각 시험 램프에 대해 증가된 각도를 구한 것이다.

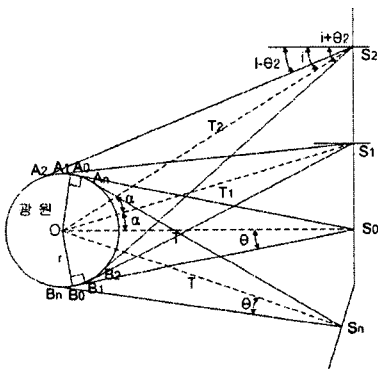


그림 7. 램프 사이즈에 대한 증가 각도의 결정
Fig. 7. Determination of increasing angle for lamp size

여기서 A_n, B_n 은 램프면 발광부, S_n 은 프리즘 입사면의 각 끝점, θ 는 광선들을 이등분하는 각이다.

표 4. 램프 사이즈에 따른 증가 각도
Table 4. Data of increasing angle for lamp size
단위 : mm, 도

	시험 램프1	시험 램프2	시험 램프3	시험 램프4	시험 램프5	시험 램프6	시험 램프7	시험 램프8
기구 반경	60	60	60	60	60	60	60	60
램프 반경	5	10	15	20	25	30	35	40
θ	4.8	9.6	14.5	19.5	24.6	30.0	35.7	41.8

2.2.1 프리즘 설계

비교, 분석을 위해 점광원일 경우와 조건은 동일하게 해 주었다. 점광원에 대한 설계에 적용하였던 공식을 변형하여 적용한다. 전반사의 발생 때문에 엄밀한 제어가 요구된다.

그림 8은 설계의 기본 개념을 보여준다.

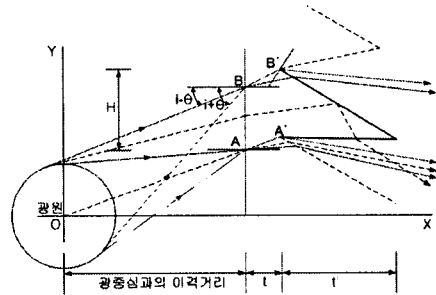


그림 8. 프리즘 설계의 기본
Fig. 8. Basic of prism design

B점에 입사하는 두 개의 광선 중 $i+\theta$ 각으로 입사하는 광선이 최대 입사각이고 점 B'를 통과하여 지향각으로 진행한다. 그리고 광원의 상단 접점부에서 입사하는 광선은 최소각으로 입사하는 광선이며 출사면에 입사할 때에는 최대 입사각을 갖는 광선보다 항상 큰 각으로 입사하게 된다.

최소각으로 입사한 광선은 출사면에 임계각 이상의 각으로 입사하기도 한다. 이 때 내부에서 전반사하게 된다. 프리즘 하단의 기울기는 전반사하는 광선을 고려하여 결정해 준다.

그림 9는 프리즘 밑면의 기울기를 결정해 주는 방법을 설명한다.

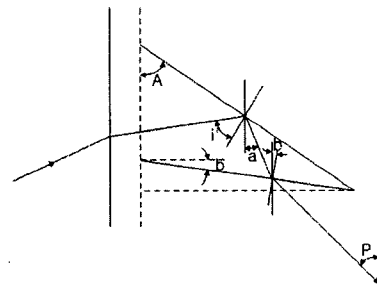


그림 9. 프리즘 설계의 기본(밑면 기울기)
Fig. 9. Basic of prism design(tilt of bottom)

여기서 a, b는 광선과 프리즘 면의 법선에 대한 사이각, A는 프리즘 정각, P는 지향각이다.

프리즘 정각을 알고 임계각 이상의 입사각을 알면 다음의 수식을 통해 반사 광선의 지향각에 따른 프

조명기구용 프리즘의 광학 설계법에 관한 연구

리즘 밑면의 기울기를 결정할 수 있다.

$$b = \tan^{-1} \left[\frac{\sin P - n \sin \alpha}{n \cos \alpha - \cos P} \right] \quad (14)$$

표 5. 굴절 프리즘에 대한 계산 데이터(시험 램프)
Table 5. Data of calculation for refracting prism (test lamp)

시험램프의 정각													
거리	63.09	62.42	61.84	61.34	60.93	60.59	60.33	60.15	60.04	60			
θ	4.55	4.59	4.64	4.68	4.71	4.73	4.75	4.77	4.78	4.78			
P	입사각		굴절각		정각		상부 입사각		굴절		출사		
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
70.0	22.5	13.5	14.9	9.0	55.4	40.5	46.4	75.4	70.0	41.8	47.8	82.9	62.5
69.5	20.6	11.4	13.7	7.6	53.9	40.3	46.3	74.4	69.5	41.6	47.7	81.2	62.7
69.0	18.6	9.4	12.4	6.3	52.7	40.4	46.5	74.7	69.0	41.6	47.8	81.8	60.9
67.0	16.7	7.3	11.1	4.9	51.4	40.3	46.5	74.4	67.0	41.6	47.8	81.3	60.1
66.0	14.7	5.3	9.8	3.5	50.0	40.2	46.4	74.0	66.0	41.5	47.8	80.7	59.3
64.0	12.7	3.3	8.5	2.2	48.9	40.4	46.7	74.9	64.0	41.7	48.1	82.4	56.5
63.0	10.8	1.2	7.2	0.8	47.5	40.3	46.7	74.5	63.0	41.6	48.0	81.7	55.8
62.0	8.8	-0.8	5.9	-0.5	46.1	40.2	46.6	74.1	62.0	41.5	47.9	81.0	55.1
59.0	6.8	-2.8	4.5	-1.9	45.2	40.7	47.1	76.2	59.0	42.0	48.4	85.8	49.4

- A : 광원의 상단 점점으로부터 프리즘에 입사하는 광선
- B : 광원의 하단 점점으로부터 프리즘에 입사하는 광선

측면부와 반구 형태의 하단부에 대한 프리즘 정각은 앞서 표 3을 토대로 광원의 사이즈에 따른 증가 각도 θ 를 감안하여 구한다.

2.2.2 설계 결과

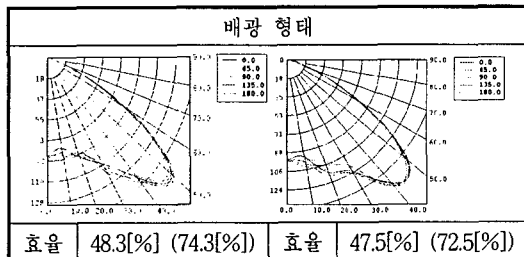


그림 10. 굴절 프리즘의 photopia 시뮬레이션 결과 (시험 램프 1, 시험 램프 3)
Fig. 10. Photopia simulation result of refracting prism(test lamp 1, test lamp 3)

3. 결과 분석 및 평가

부피가 큰 광원에 대한 설계 결과는 점광원으로 가정된 설계 결과보다 배광곡선과 효율면에서 개선된 것을 알 수 있다.

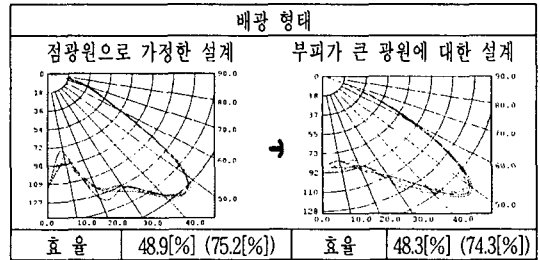


그림 11. Photopia 시뮬레이션 결과(시험 램프 1)
Fig. 11. Result of photopia simulation (test lamp 1)

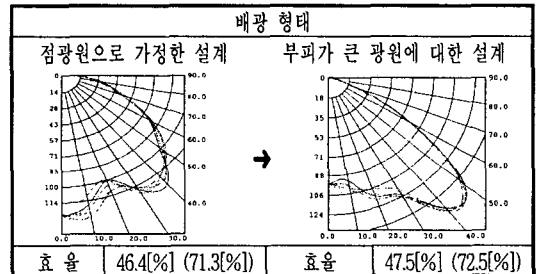


그림 12. Photopia 시뮬레이션 결과(시험 램프 3)
Fig. 12. Result of photopia simulation (test lamp 3)

표 6. 시험 램프1과 시험 램프3의 시뮬레이션에 의한 배광 데이터
Table 6. Data of candela distribution rate by simulation for test lamp 1 and test lamp 3

수직각	A		B		C		D		E			
	점광원		시험 램프1 (점광원)		시험 램프1 (개선)		시험 램프3 (점광원)		시험 램프3 (개선)			
	광도	rate	광도	rate	광도	rate	광도	rate	광도	rate		
0-10	18	1	87.5	1	101	1	85.9	1	123	1	104.5	1
10-20	20	1.1	102.6	1.2	105	1.04	92.4	1.05	112.5	0.91	116.5	1.1
20-30	30	1.6	125.5	1.4	123.5	1.22	106.3	1.19	110	0.89	118	1.2
30-40	40	2.2	148.5	1.7	142.5	1.41	128	1.44	116.5	0.95	136.5	1.3
40-50	50	2.7	167	2	156	1.54	149	1.67	111.5	0.91	152	1.5
50-60	35	1.9	136.5	1.6	113.6	1.12	127.5	1.43	93.3	0.76	113.45	1.09
60-70	15	0.8	63.15	0.7	56.4	0.56	55.3	0.62	66.3	0.54	52.75	0.5
70-80	0		12.28	0.14	21.4	0.21	10.02	0.11	41.95	0.34	15.565	0.1
80-90	0		0.775	0	2.2	0.02	3.35	0.04	19.23	0.16	4.31	0.04

표 6에서 목표 광도에 대한 각 구간별 광도 비율을 비교하고 있다. B열과 C열, D열과 E열을 비교하면 부피를 갖는 동일한 램프의 경우 점광원으로 가정할 설계 결과보다 부피를 갖는 설계 결과가 더 개선되었다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 배광 구현을 위한 조명기구용 프리즘의 체계적인 설계법을 도출하였다. 입사각을 알고 지향각으로 광선을 보내려 할 때 프리즘 정각을 구하는 수식을 유도했고, 이 수식들을 이용하여 순차적으로 프리즘을 설계하는 일련의 과정을 보여주었다.

실제 광원은 부피를 갖기 때문에 점광원으로 가정할 설계법을 그대로 적용할 수는 없다. 광원의 사이즈가 커질수록 동일한 기구의 배광은 심하게 왜곡되고 효율이 저하되는 것을 알 수 있었다. 점광원으로 가정할 설계 방법을 개선, 보완하여 부피를 갖는 광원에 적용할 수 있는 설계법을 도출하였다.

결과들을 비교 분석한 결과 목표 배광에 근접한 배광을 구현하였고 상대적인 광도 비율로 제시하였다.

본 연구를 통해 프리즘을 이용한 배광을 구현하였지만 모든 배광을 달성하기 위해 이 설계법을 적용할 수는 없다. 광원 형태와 사이즈가 다르고 목표 배광이 바뀐다면 설계 방법을 수정하여 적용할 수는 있을 것이다. 그리고 설계된 프리즘의 실제 제작 가능 여부의 문제가 있다. 또한 반사판과 조합하여 사용하는 경우 반사판까지 고려하여 원활하게 제어할 수 있는 방법을 연구해야 할 것이다. 반사 메커니즘 뿐만 아니라 굴절, 투과 메커니즘과 관련된 광학 설계의 연구가 활발히 이루어진다면 보다 더 효율적이고 향상된 조명환경을 이루어 낼 수 있을 것이다.

References

- (1) 지철근 외 5명, “조명환경원론”, 문운당, 2004.
- (2) 김진모 외 3명(태양전자), “조명등기구의 설계 및 적용 기술”, 전기설비지, 2003년 6월.
- (3) IESNA, “Lighting Handbook 9th edition”, IESNA, 1999.
- (4) R.H. Simons and A.R. Bean “Lighting Engineering applied calculations”, MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, pp.234~258.
- (5) David C Pritchard, “Lighting FOURTH EDITION”, Longman Scientific & Technical.
- (6) 강원대학교 전기공학과 조명연구실, “빛과 조명”.
- (7) Joseph B. Murdoch, “Illumination Engineering”, From Edison’s Lamp to the LED.

◇ 저자소개 ◇

석대일 (石大鎭)

1981년 1월 6일생. 2007년 강원대학교 일반대학원 전기전자공학과 석사 졸업.

이창모 (李昌模)

1975년 2월 12일생. 2003년 강원대학교 일반대학원 전기공학과 석사 졸업. 현재 강원대학교 일반대학원 전기전자공학과 박사 수료.

김 훈 (金 勳)

1958년 8월 6일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1993년 호주 국립대학 방문교수. 현재 강원대 공대 전기전자정보통신공학부 교수. 본 학회 총무이사.