

조명기구용 프리즘 설계법 개발

(Development of the prism design method for luminaires)

석대일* · 이창모 · 조문성 · 김 훈

(Dae-II Seok · Chang-Mo Lee · Mun-Sung Jo · Hoon Kim)

(강원 대학교 IT특성화학부대학 전기전자전공)

요 약

조명기구가 사용되는 장소와 용도에 맞는 배광을 얻어내기 위한 기구를 설계하는 과정에서 반사, 굴절 등의 메카니즘을 이용한다. 현재의 조명기구 설계는 주로 반사 메카니즘을 이용한 반사판의 설계에 치중되어 있다. 본 논문에서는 굴절 메카니즘을 이용하여 빛의 진행에 따른 굴절과 투과의 관계를 분석하고 조명기구에 적용시킬 수 있는 다양한 각도와 형상을 갖는 프리즘을 설계하는 방법을 제시하였다.

1. 서 론

현재까지 개발되어 사용되고 있는 광원의 종류는 매우 다양하다. 광원만으로는 조명에서 요구되는 다양한 배광을 충족시켜 줄 수 없으며 완벽한 조명시스템이 이루어지지 않는다. 조명기구 없이는 사실상 광원은 여러 분야에 적용되기 힘들다. 원하는 배광을 구현하고 기구 효율 측면에서도 우수한 성능을 달성하기 위해서는 적합한 광학 설계가 이루어져야 한다.

조명기구는 원하는 배광을 만들기 위해 반사, 굴절 등의 메카니즘을 이용한다. 현재의 조명기구 설계는 주로 반사 메카니즘을 이용하여 설계가 이루어진다. 반사판을 사용한 조명기구의 경우 배광을 만족시켜주려다 보니 종종 반사판의 사이즈가 커지게 되기도 하고 반사판에 의해서 광원으로 재흡수되는 경우가 발생한다. 그리고 광원의 형태는 다양하지만 광원에 적합한 기구 형태는 거의 제한적이다.

다양한 형태의 광원이 나와 있고 새로운 광원이 개발되고 있는 현 상황에서 반사 메카니즘만을 이용한 기구 설계로서는 부족한 점이 있다.

본 논문에서는 조명기구 설계에 있어서 굴절 메카니즘을 이용하여 빛의 진행에 따른 굴절과 투과의 관계를 분석하고 다양한 각도와 형태를 지니는 프리즘을 설계하는 방법을 제시할 것이다.

2. 굴절 메카니즘의 고찰

2.1 빛의 굴절

ray가 공기, 유리와 같은 광학 밀도가 다른 두 매질 사이를 통과할 때 진행 방향이 바뀌거나 굴절된다.

(1) 굴절된 ray와 입사 ray는 같은 평면에 존재하고 굴절 ray는 입사 ray에 대해서 법선 맞은편에 존재한다.

(2) 입사각과 굴절각의 sine은 일정한 비를 갖는다.

$$\sin i = \mu \sin r \quad (1)$$

i는 공기 내에서 진행하는 ray의 입사각.

μ 는 공기 중에서 매질의 굴절률.

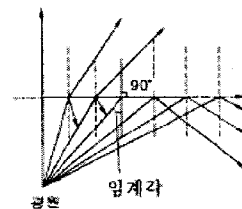
r은 광학 매질 내에서 진행하는 ray의 굴절각. [1]

식 (1)의 Snell의 법칙은 광학적으로 굴절률이 큰 매질로 입사할 때에는 ray가 법선 방향으로 휘지만 나올 때에는 법선으로부터 멀어진다는 것이다. 만약 굴절된 ray가 경계부에 평행이 되도록 굴절각이 증가한다면 이때의 입사각은 critical angle(임계각)이 된다.

이 경우에 굴절각이 90°이므로

$$\text{critical angle} = \sin^{-1} \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

입사각이 임계각보다 더 큰 값으로 증가되면 내부 전 반사가 일어나게 된다.

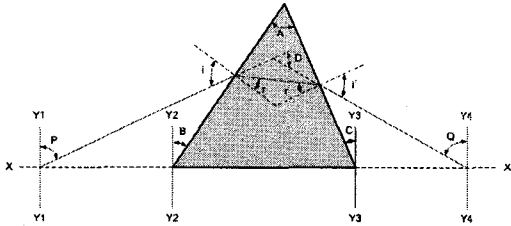


(그림 1) 빛의 굴절과 전반사

2.2 프리즘 시스템

프리즘은 크게 굴절 프리즘과 반사 프리즘 두 가지로 분류할 수 있다.

2.2.1 굴절 프리즘



[그림 2] 굴절 프리즘을 통과하는 ray의 진행 경로

[그림 2]는 굴절 프리즘을 통과하는 ray의 진행 경로를 보여준다. ray는 Y1Y1에 위치한 광원으로부터 각도 P 방향으로 진행하고 램프에 마주한 첫 번째 프리즘 면으로 입사한다. 입사 ray와 방사 ray를 연장해서 이루는 각인 편향각(deviation angle)이 원하는 특정 각이 되도록 프리즘의 정점의 각 A를 구해주는 것이 목적이 되겠다. 프리즘 정점을 형성하는 두 개의 면이 이루는 angle B와 angle C 둘 중의 하나는 프리즘이 전체적인 조명기구의 외형에 부합하도록 지정된다. XX'에 대한 프리즘 밑면의 기울기는 ray의 편향에는 영향을 주지 않지만 프리즘에 빛이 입사되어서 발광을 할 때에 빛이 도달하지 않는 non-working face를 형성하기도 한다.

굴절 프리즘을 통과하는 ray 경로를 추적하기 위해서 다음의 방정식이 사용된다.[1]

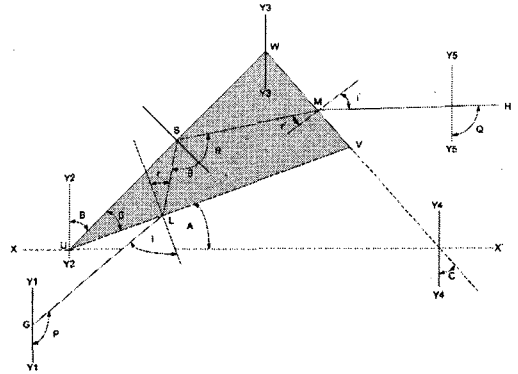
$$\begin{aligned}
 (1) \quad & D = (i - r) + (i' - r') \\
 (2) \quad & D = 180 - (P + Q) \\
 (3) \quad & A = B + C \\
 (4) \quad & A = r + r' \\
 (5) \quad & i = 90^\circ + C - Q \\
 (6) \quad & i' = 90^\circ + B - P
 \end{aligned} \tag{3}$$

2.2.2 반사 프리즘

반사 프리즘은 세 개의 면들이 빛의 진행에 모두 영향을 준다. 자칫 프리즘 면들의 각도가 잘못 정해지면 부정확한 제어를 유발할 수 있으며 특히 반사 작용을 하는 면은 잘못 정해진 각도에 의해서 입사각과 반사각 사이에 큰 오차를 발생할 수도 있다.

[그림 3]은 반사 프리즘 UVW를 통과하는 ray의 진행 경로를 보여준다. ray GLSMH는 수직선 Y1Y1에서 G에 위치한 광원으로부터 각 P 방향으로 나가고 면 UV의 점 L로 입사하여 굴절된다. ray는 면 UW의 점 S에 대한 법선에 대해 각 θ 만큼 반사되고 면 WV의 점 M을 통과해서 프리즘을 빠져 나가며 수직선 Y5Y5에 각 Q를 이루면서 점 H를 통과한다.

각 LSU와 WSM이 같다는 점을 이용하면 다양하게 표기된 각들 사이의 관계를 알아낼 수 있다.



[그림 3] 반사 프리즘을 통과하는 ray의 진행 경로

반사 프리즘을 통과하는 ray 경로를 추적하기 위해서 다음의 방정식이 사용될 수 있다.[1]

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & i = A - P + 180^\circ \\
 (2) \quad & i' = C - Q + 90^\circ \\
 (3) \quad & B = \frac{1}{2}(90^\circ - C - A + r + r') \\
 (4) \quad & D = P - Q \\
 (5) \quad & \beta = 90^\circ - A - B \\
 (6) \quad & \theta = 90^\circ - B - A + r
 \end{aligned} \tag{4}$$

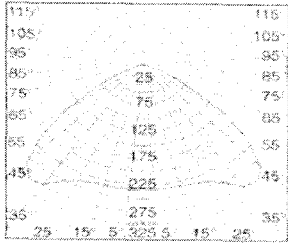
3. 선형 prism bank의 설계

본 논문에서는 여러 광원 중에서 원통형 광원인 T5 형광 램프를 이용하여 프리즘을 설계하였다. 램프 선정의 기준은 직관형 형광 램프가 가장 일반적으로 사용되는 광원이고 제시하고자 하는 프리즘 설계법을 설명하는데 용이하기 때문에 형광 램프로 선정하였다.

3.1 목표 배광의 결정

형광 램프를 사용한 조명기구로써 실내에 적용하여 사용할 수 있는 조명기구를 설계하였다. 기구를 설계하는 과정을 통해서 설계법을 제시하고 최종적인 기구 형상과 광학적 성능을 확인한다. 일반적으로 형광등기구는 전반 조명용인 경우에 작업면을 균일하게 조명하는 것이 바람직하고 복도나 좁은 공간에서 사용되는 경우에는 좁은 폭의 바닥면과 벽면을 효과적으로 조명하는 것이 필요하다. 직관형 형광등 기구의 경우에 기구 단면에서의 광도는 모든 방향에서 동일하다는 가정 하에 계산 과정을 거쳐서 배광 분포를 결정할 수 있다.

[그림 4]는 설계하려는 조명기구의 최종적인 목표 배광이다.

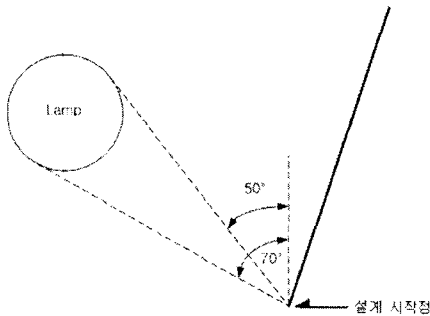


(그림 4) 목표 배광

3.2 프리즘 설계

3.2.1 측면부 설계

반사판이나 프리즘과 같은 광학적 기구 없이 단지 램프판의 배광을 보면 전 방향으로 빛이 퍼져 나간다. 조명하고자 하는 영역은 기구 하단의 작업면이므로 램프의 측면부를 프리즘으로 설계하여 90° 이상의 방향으로 향하는 빛들을 최대한 90° 이하 방향으로 향하게 하고 목표 배광에서 정해진 cut-off각을 만족시키도록 프리즘 기구의 측면부를 설계하였다. 먼저 램프의 위치를 정하고 나서 조명기구의 사이즈를 예측하여 결정하였다. 구체적인 기구의 사이즈는 설계를 거쳐서 결정이 되지만 설계 전에 미리 어느 정도의 사이즈는 염두 해 두었다. 최대한 기구 사이즈를 작게 하려고 하였다. 램프의 위치는 1등용 기구를 기준으로 기구의 중앙에 위치시켰다. 프리즘의 처음 설계 시작점은 램프의 하단과 상단 접선 부에서 연장선을 그어서 교차하는 한 점이 되겠다. 램프 하단에서 도달한 ray는 prism bank에 의해 램프가 차단되는 cut-off 각이 되고 램프 상단에서 도달한 ray가 이루는 각은 최대 광도를 발생하는 각이다.



(그림 5) 프리즘 시작점 결정

[그림 5]는 프리즘 설계의 초기 시작점을 결정하는 것을 보여준다. 램프의 두 접선이 교차하는 점으로부터 위 방향으로 설계를 진행해 나갔다.

발광면 프리즘의 각도 계산은 식 (3), (4), 그리고 스넬의 법칙으로부터 유도된

$$\tan i = \frac{\mu \sin(i-r)}{\mu \cos(i-r) - 1} \quad (5)$$

식 [5]를 이용하고 spreadsheet에서 계산된 결과를 적용하여 설계를 진행하였다.

Prism Group	P	Q	B	B+r-90°	r	i-r	D	i-r'	r'	r'	A	C
1	70.0	60.0	10.0	-10.0	-6.8	-3.4	10.0	13.4	37.0	23.7	17.0	7.0
2	79.1	60.0	10.0	-9.9	-6.5	-3.3	19.1	19.4	50.2	30.9	30.2	20.2
3	87.1	60.0	10.0	-9.1	-6.2	-3.2	27.1	26.7	60.0	35.3	40.0	30.0
4	94.0	60.0	10.0	-8.4	-5.9	-3.1	34.0	29.3	67.2	37.9	47.2	37.2
5	99.8	60.0	10.0	-7.8	-5.6	-3.0	39.9	25.1	72.6	39.5	50.8	42.8
6	104.9	60.0	10.0	-7.3	-5.4	-2.9	44.9	20.3	76.8	40.5	52.8	46.8
7	109.3	60.0	10.0	-6.9	-5.2	-2.8	49.3	15.0	80.1	41.1	80.1	50.1
8	113.0	60.0	10.0	-6.5	-5.1	-2.7	53.0	11.7	82.7	41.4	62.7	52.7
9	116.2	60.0	10.0	-6.2	-5.0	-2.6	56.2	43.2	84.8	41.9	64.8	54.8
10	118.9	60.0	10.0	-5.9	-4.9	-2.5	58.9	44.7	85.9	41.7	65.9	55.9
11	121.3	60.0	10.0	-5.7	-4.8	-2.4	61.3	46.1	87.8	41.8	67.8	57.8
12	123.3	60.0	10.0	-5.5	-4.7	-2.3	63.3	47.2	89.0	41.8	69.0	59.0
13	125.0	60.0	10.0	-5.4	-4.6	-2.2	65.0	48.1	89.9	41.9	69.9	59.9

[표 1] 프리즘 정점각 A와 C 구하는 spreadsheet

[표 1]은 각 Prism group의 정점 각 A와 C를 구하는 계산을 간편하게 하기 위해서 이용한 spreadsheet이다. 광원으로부터 방사하는 각 P, 프리즘을 통과하여 진행하는 ray의 지향각 Q, Prism group이 램프와 마주한 면에 대해 기울어진 각 B를 정하고 spreadsheet에 입력해 주면 순차적으로 나머지 변수들이 계산된다.

cut-off각이 되는 각 P는 70°, B는 bowl 한 쪽의 기울기이며 10°로 지정하였다. bowl의 기울기는 미리 염두해 두었던 조명기구의 형태나 사이즈에 따라서 임의로 지정해 주었다. 최대 광도가 50° 방향에서 발생한다고 가정하고 조사면에 도달하는 빛이 이루는 각 Q는 조금 여유 있게 60°로 지정해 주었다. 계산 결과로 나온 프리즘의 정점 각 A는 17°이다.

입사하는 ray가 cut-off 각 70°와 Q 각 60° 이상으로 진행하게 되는 프리즘의 최종 범위를 찾아주었다. 이 프리즘 범위를 벗어나서 진행하는 빛들을 제어하기 위해서 또 다른 정점 각을 갖는 Prism group을 설계하여야 한다. 이 한도 내 범위를 결정하기 위해서 [표 2]에 주어진 spreadsheet를 사용하였다.

Prism Group	P	Q	A	C	90°-C-Q	r	i-r	r'	i	D	(i-r)²-(i-r')	P
1	70.0	17.0	7.0	27.0	11.6	8.4	-0.6	9.4	-0.3	9.1	79.3	70.0
2	70.0	30.2	20.2	40.2	26.5	14.7	4.7	7.1	2.4	17.1	87.1	70.0
3	70.0	40.0	30.0	50.0	30.7	19.3	9.3	14.0	4.7	24.0	94.0	70.0
4	70.0	47.2	37.2	57.2	34.1	23.1	13.1	19.8	6.8	29.8	99.8	70.0
5	70.0	52.8	42.8	62.8	36.3	26.3	16.3	24.9	8.8	34.9	104.9	70.0
6	70.0	56.8	46.8	66.8	37.8	29.0	19.0	29.3	10.2	39.3	108.3	70.0
7	70.0	60.1	50.1	70.1	38.8	31.3	21.3	33.0	11.7	43.0	113.0	70.0
8	70.0	62.7	52.7	72.7	39.5	33.2	23.2	35.2	13.0	46.2	116.2	70.0
9	70.0	64.8	54.8	74.8	40.0	34.8	24.8	36.9	14.2	48.9	118.9	70.0
10	70.0	66.5	56.5	76.5	40.4	36.1	25.1	41.3	15.2	51.3	121.3	70.0
11	70.0	67.9	57.9	77.9	40.7	37.2	27.2	43.3	16.1	53.3	123.3	70.0
12	70.0	69.0	59.0	79.0	40.9	38.1	28.1	45.0	16.9	55.0	125.0	70.0

[표 2] 프리즘 범위 결정하는 spreadsheet

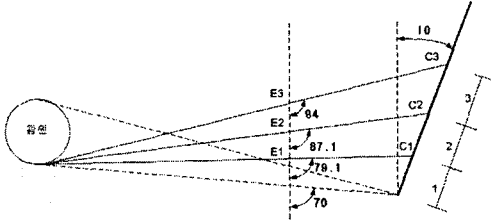
[표 2]는 한 개 Prism group이 위치하는 범위를 결정해 주기 위해서 이용한 spreadsheet이다. 프리즘 정점부를 벗어난 ray들은 cut-off 각과 최대 광도 각의 방향을 이탈한다. 따라서 다른 정점 각을 지니는 Prism group을 설계하여야 한다. 지향각 Q 값과 앞서 결정된 각 A와 각 C를 입력하여 다음 프리즘으로 입사하는 P 각을 결정하였다. P 각이 결정되면 다음 Prism group은 프리즘이 배열되는 선분과 교차하는 점에서부터 다시 설계

를 해 나갔다.

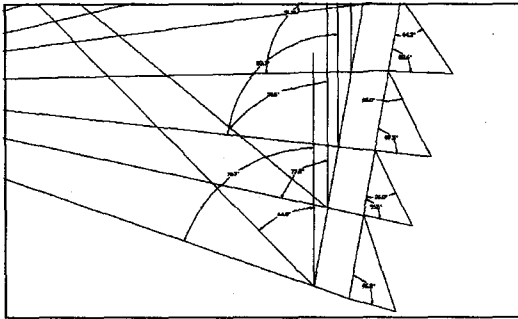
Prism group 2에서 79.1°의 P 값을 [표 1]의 spread sheet에 입력해 주면 A는 30.2°이고 [표 2]의 spread sheet에 30.2°와 20.2°의 A와 C 값을 입력하면 P는 87.1°이다.

Prism group 3에서 87.1°의 P 값을 [표 1]의 spread sheet에 입력해 준다. 이러한 과정을 반복해서 최종적으로 전체 Prism group에 대한 정점 각을 결정하였다.

[그림 6]은 이 과정을 순차적으로 반복하여 결정된 각 Prism group의 범위를 보여주고, [그림 7]은 위의 순차적인 과정을 통해서 결정된 각도에 따라서 설계된 Prism group의 형상을 보여준다.



[그림 6] Prism group 범위 결정



[그림 7] 프리즘 측면부 형상

3.2.2 하단부 설계

램프에서 나온 빛들이 램프 직하 방향을 향하므로 단 순히 평면으로 해 주게 되면 기구 직하 방향으로 향하는 빛이 많고 광도가 높게 된다. 따라서 직하 방향의 빛들을 일정 방향의 지향성을 지니고 퍼져서 진행하도록 해 주었다. 하단부에 프리즘을 적용하여 직하 방향으로 향하는 빛들이 지향성을 갖도록 해 주었다. 하단부의 경우에도 측면부에 적용했던 방식을 동일하게 적용할 수 있지만 하단부 가장자리로 갈수록 기구 직하 방향으로부터 큰 각으로 입사하여 진행하기 때문에 측면부와는 다른 방법을 적용하였다.

램프로부터 1차면에 도달하여 2차면을 통해 나가는 ray에 대해서 입사각과 굴절각을 따져보고 프리즘의 각도를 결정해 주는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r' &= P + A - 90 \\ (90 - r) + (90 - i') + A &= 180 \\ i' &= A - r \end{aligned} \quad (6)$$

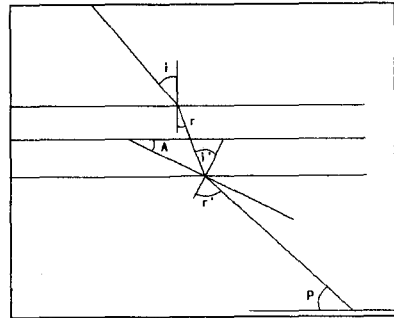
P-90을 B라고 하고 Snell의 법칙에 대입하면

$$\begin{aligned} \mu \sin i' &= \sin r' \\ \mu \sin(A - r) &= \sin(P + A - 90) \\ \mu \sin(A - r) &= \sin(B + A) \end{aligned} \quad (7)$$

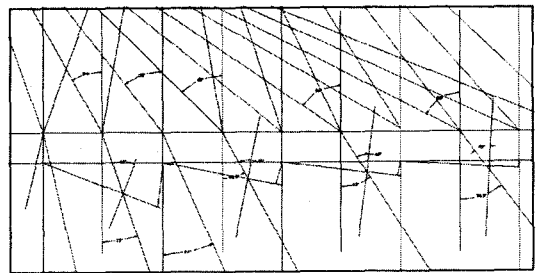
위의 식을 정리하면

$$A = \tan^{-1} \frac{\mu \sin r + \sin(P - 90)}{\mu \cos r - \cos(P - 90)} \quad (8)$$

[그림 8]은 식 (6), (7), (8)을 유도하는 과정에서 적용된 입사와 굴절의 관계를 보여주는 그림이고 [그림 9]는 하단부 프리즘의 형상을 설계하는 과정을 보여준다. 하단부의 경우에는 측면부와 달리 각 Prism group이 동일한 지향각을 가질 필요가 없고 목표 배광에 따라 기구 직하 방향의 광도가 다른 방향의 광도에 비해 상대적으로 너무 높지 않아야 한다. ray 추적을 이용하여 입사와 굴절을 따져보고 각 Prism group의 범위를 결정해 주었다.

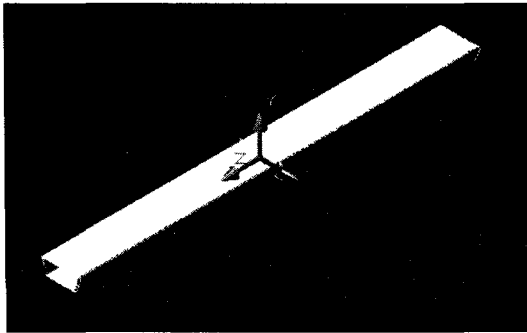
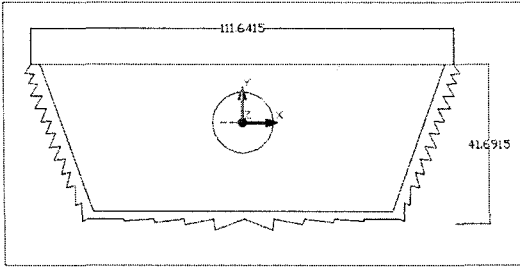


[그림 8] 하단부 프리즘 각도 결정



[그림 9] 프리즘 하단부 형상

[그림 10]은 측면부 설계와 하단부 설계를 완료하여 최종적으로 구현한 기구의 형태를 보여준다.



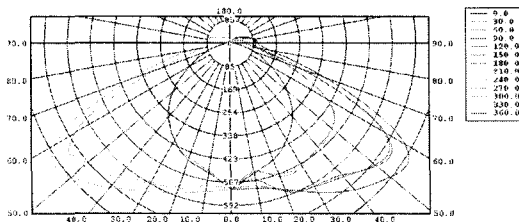
[그림 10] 조명용 프리즘 조명기구 형상

3.3 Photopia를 이용한 광학성능 예측

설계가 완료된 프리즘 조명기구를 조명 관련 시뮬레이션 프로그램인 Photopia를 이용하여 기구에 의한 배광 결과를 알아보았다.

램프 상단부는 단순한 평면으로 확산 반사를 하는 흰색 페인트로 선정하고 측면부와 하단부는 굴절률 1.49의 아크릴로 선정하였다.

[그림 11]은 Photopia를 이용한 시뮬레이션 결과로써 프리즘을 통과하여 나타나는 배광의 형태를 보여준다. 설계 초기에 설정하였던 목표 배광과 거의 흡사한 배광 형태를 가짐을 알 수 있다.



[그림 11] 프리즘 기구의 배광 형태

시뮬레이션 결과 목표 배광과 유사한 형태를 보였다. 광학적 효율은 87.8%였다.

4. 결론

현재까지 조명기구 설계가 반사판 설계에 많이 치중

되어 있고 굴절 메카니즘에 대한 기구 설계 연구가 부족한 실정에서 프리즘을 적용한 조명기구 설계를 한 결과 목표 배광을 달성할 수 있다는 결과를 얻어냈다.

본 논문에서는 형광 램프를 사용해서 한 가지 배광에 대해서만 설계를 해 본 것이고 모든 배광을 프리즘만으로 달성한다는 것은 무리일 것이다. 단지 프리즘을 사용했을 때 일부 배광은 달성할 수 있다는 것을 알 수 있었고 최적의 배광을 위해서라면 반사판과 프리즘을 접목하여 반사판만으로는 한계가 있는 배광 제어를 프리즘을 이용하여 보완해 줄 수 있을 것으로 보인다. 반사판으로 넓은 배광을 얻을 수 없다면 프리즘을 겸용하여 배광을 넓혀 줄 수도 있을 것이다.

광원의 종류가 다양하고 광원마다 사이즈와 형태가 다르기 때문에 본 논문에서 제시한 설계법을 동일하게 적용하기에는 한계가 있다. 크기와 형태가 다른 광원에 대한 설계법은 향후 연구가 더 필요하다.

참고 문헌

- [1] R.H. Simons and A.R. Bean "Lighting Engineering applied calculations", MFC Books Ltd, Bodmin, Cornwall, pp.234~258