

대형등명기의 렌즈 및 프리즘 설계법 연구

(Research of Lens and Prism Design Method for Large Beacon)

이창모* · 김 훈
(Chang-Mo Lee · Hoon Kim)

Abstract

원점(초점)에 놓인 광원(점광원)으로부터 방사된 ray들을 광축과 평행하게 진행하도록 그 진로의 방향을 바꾸어주는 것이 대형등명기의 광학부(중심렌즈부, 굴절링부, 질사프리즘부) 역할이다. 이러한 광학부에 대한 설계방법은 일부 서적에 소개되고 있지만, 광학부 설계시 각 부분마다 설계한계에 부딪히게 된다.

본 논문에서는 각각의 광학부에 대한 제한된 설계를 고찰하고 새로운 설계법을 도출하여 용이한 설계를 위해 설계법을 체계화 시키는 작업에 대하여 설명하고 이 작업의 타당함을 확인하기 위해 계산에 의한 Ray Tracing 과 배광에측프로그램인 Photopia 시뮬레이션의 결과를 제시하였다.

1 서론

등명기는 크게 램프로부터 방사되는 ray들을 평행하게 진행하도록 하는 렌즈와 프리즘의 광학부와 이를 일정주기로 회전시키거나 점멸시켜 등대의 성격(등질)을 나타내는 구동부로 구성된다.

본 논문에서는 대형등명기의 광학부에 대한 설계만을 다루었다. 광학부는 다시 크게 빛의 굴절을 이용하는 중심렌즈부, 굴절링부와 빛의 굴절과 반사를 이용하는 질사프리즘부로 나뉘어진다.

이러한 광학부에 대해서 설계하는 방법은 서적에 소개되고 있지만, 광학부 설계시 각 부분마다 설계한계에 부딪히게 된다.

먼저 중심렌즈부는 통상 렌즈설계공식을 이용하여 설계하게 되지만, 이 식은 기하광학에 의해서 유도된 식으로 발광부와 수광부의 거리가 램프와 렌즈부처럼 인접한 상황에서는 오차가 있게 된다. 따라서 계산에 의한 Ray Tracing을 통해, 중심렌즈를 통과한 ray들이 어떻게 진행되는가를 살펴보고 오차에 대한 중심렌즈의 재설계가 이루어져야 하며, 이러한 설계방법을 체계화 시킬 필요가 있다.

둘째, 굴절링부는 전통적인 방법의 설계시 각 굴절링들의 구면 중심이 광축상에 놓여 있게 되지 않는다. 렌즈는 제작법에 따라 그 설계가 제한되어 이루어지게 되는 것이 일반적이다. 따라서 굴절링부 설계시 각각의

굴절링의 하단이나, 상단부를 기준으로 광축에 구면 중심을 둔 설계가 이루어져야 하고 이러한 설계법을 체계화할 필요가 있다.

셋째, 질사프리즘부도 굴절링부와 마찬가지로 제작법에 맞추어 설계가 되어야 한다. 일반적으로 제작하기 수월하고 다른 질사 프리즘 설계법처럼 매질의 굴절률에 영향을 받지 않기 때문에 이등변 삼각형 형태를 갖는다. 이 이등변 프리즘은 매질의 굴절률에 관계없이 각변의 중심에 굴절과 반사를 통해 통과된 ray가 평행으로 진행하는 특징을 갖는다. 따라서 평행한 ray가 되도록 이등변 프리즘을 정렬 시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 각각의 광학부에 대한 제한된 설계를 고찰하고 새로운 설계법을 도출하여 용이한 설계를 위해 설계법을 체계화 시키는 작업이 이루어졌다.

2 본론

2.1. 광학부 설계 요건

실제 광원은 크기(필라멘트, 발광관)를 가지고 있기 때문에, 광학부로부터 나간 ray들은 평행광이 되지 않고 평행광에 대해서 어떤 기울기를 갖고 발산하게 된다(그림1). 이를 발산각이라 한다.[1]

발산각은 대체로 렌즈면에서 광원을 바라 본 각도라고 생각하여도 좋다. 따라서, 광원이 클수록, 광원과 렌즈 사이의 거리가 가까울수록 발산각은 커진다. 발산각

은 수평 발산각, 수직 발산각으로 구분되는데 등명기에 있어서의 발산각은 $\pm 4^\circ$ 로 규정되어 있다.[2] .

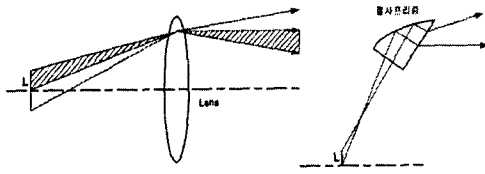


그림 1. 렌즈와 프리즘의 ray 경로

2.2. 광학부 설계법

2.2.1. Lens

렌즈가 얇아 두께를 무시할 수 있고, 입사각과 굴절 각이 매우 작다는 가정하여 초점거리와 곡률 반지름에 대한 렌즈 설계공식(식(1))을 유도할 수 있다.

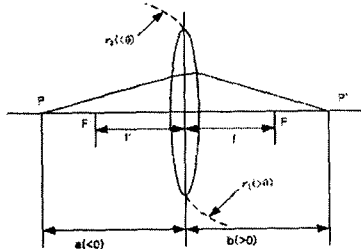


그림 2. 얇은 렌즈

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (1)$$

2.2.2. 중심렌즈 설계법

중심렌즈는 일반적으로 렌즈설계공식(식(1))에 의해서 구한다. 그러나 실제 렌즈를 통과한 ray들 모두 negative 성분의 기운각을 갖는다.

그렇기 때문에 평행광을 만들고자 하는 광학부의 정확성이 떨어진다. 따라서 초점거리와 곡률반지름을 변수로 하여 ray-tracing함으로써 좀더 정확한 설계치를 도출하여야 한다(그림3).

그림2에서 ray의 경로를 FABC라고 하면, ray가 제1 경계면인 평면과 제2 경계면인 구면을 통과한 ray의 입사각(i_A, i_B)과 굴절각(r_A, r_B) 그리고 평행한 ray의 출사각(r'_B)를 구한다.

구한 식들을 Table로 만들어 중심렌즈를 통과한 ray의 굴절각과 평행광의 출사각을 Trial and Error를 통해 비교하면서 최적의 곡률반지름 R을 찾는다. 여기서 초점거리(f)는 등명기의 크기 에 영향을 미치기 때문에 이 값은 고정된다.

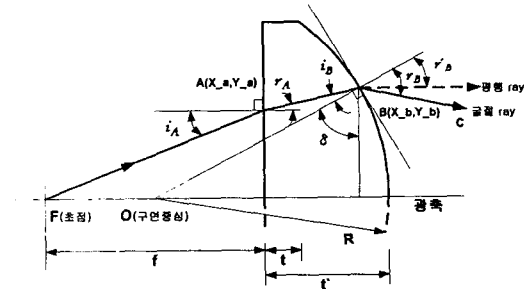


그림 3. 제안된 렌즈 설계법

2.2.3. 굴절링 설계법

굴절링은 다음과 조건들을 만족하도록 각각 분리된 형태의 굴절링을 설계해 나간다.[1][3]

- 1) 렌즈의 초점거리(f)
- 2) material의 두께(최소: t , 최대: t')
- 3) ring의 단층수 및 단층의 두께(H)

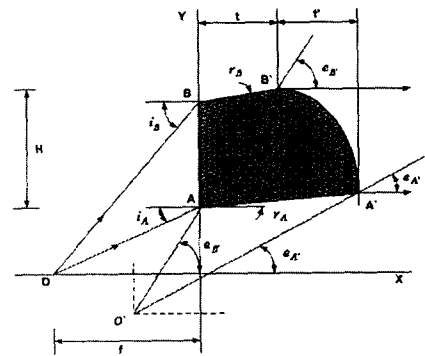


그림 4. 굴절링 설계

굴절률이 n 일 때, A점, B점에 입사하는 ray가 매질에서 굴절되어 나가는 광로 AA', BB' 를 굴절법칙으로 알 수 있고 또한 두 직선 $O'A', O'B'$ 의 기운각 $e_{A'}$ 와 $e_{B'}$ 를 구하기 위해, 경계면 호 $A'B'$ 에서 굴절의 법칙을 적용한다. 이를 계산하여 최종 결과 식(식(2))을 얻을 수 있다.

$$\tan e_{A'} = \frac{n \sin r_A}{n \cos r_A - 1} \quad (2)$$

$$\tan e_{B'} = \frac{n \sin r_B}{n \cos r_B - 1}$$

따라서 두 직선이 만나는 점 O' 가 호 $A'B'$ 의 중심이 된다.

이러한 방법으로 제2, 제3의 굴절링을 설계해 나간다.

2.2.4. 굴절링 설계법의 변형

현재 Lens 제작법(그림 5)에서는 Lens를 연마하는 축이 광축에 위치되어 있기 때문에 굴절링 구면 중심이 광축을 벗어나 위치에 있는 2.2.3절에서 소개된 설계법으로서는 제작이 불가능하다. 따라서 굴절링부 설계는 각각의 굴절링 구면의 중심이 광축상에 놓여있게 설계되어야 한다.

새로운 굴절링부를 설계하기 위해서 2가지 설계법을 구상하여 시도하였다.

- ① 각 굴절링의 하단부에 대한 설계
- ② 각 굴절링의 상단부에 대한 설계

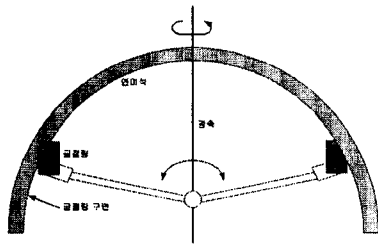
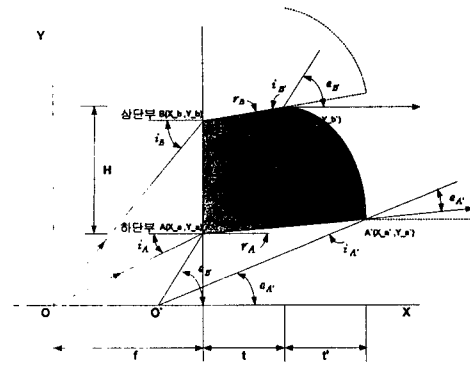


그림 5. 굴절링 제작 단면도

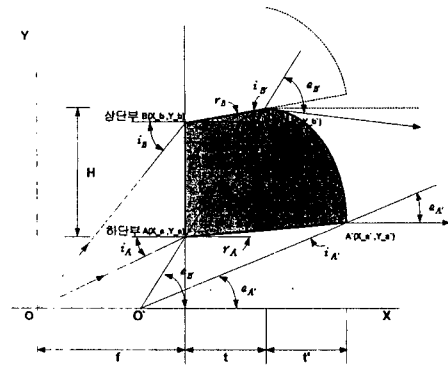
첫 번째 설계법은 그림 6(b)에서 보여준 것처럼 굴절링 하단부를 통과한 출사빔을 평행광으로 진행시키고, 2.2.2절에서의 굴절링 설계법을 적용한다. 이 설계법은 하단부에서 통과한 출사빔은 평행광에 만족이 되지만, 하단부와 상단부까지의 출사빔은 negative 기울기로 증가하면서 진행한다.

두 번째 방법은 그림 10(a)에서 보여준 것처럼 상단부를 기준으로 설계하는 것이다.

2.2.3절에서의 설계법에 따라 제안된 설계법의 계산 결과를 Ray-Tracing 계산을 용이하게 하기 위해 table로 만들었다.



(a) 상단부 기준



(b) 하단부 기준

그림 6. 제안된 굴절링 설계법

2.2.5. 절사프리즘 설계법

그림 4는 광원 O 로부터 방사된 광선이 절사프리즘 UVW 통과 후 평행광으로 되는 절사프리즘 설계를 보여준다.[3]

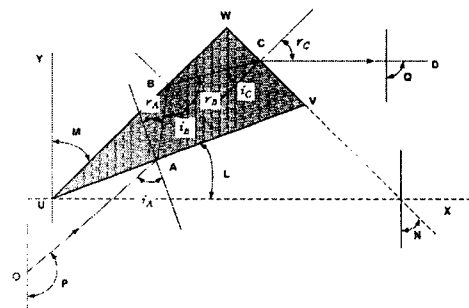


그림 7. 절사프리즘 설계

Ray $OABCD$ 는 각 P 를 가지고 광원 O 에서 출발하고 경계면 UV 상의 점 A 로 입사하여 굴절된다. 다음으로 경계면 UV 상의 점 B 에 입사하여 반사되고 경계면 WV 상의 점 C 에 입사하여 평행광으로 굴절되어 나아간다.

이러한 사실을 이용하여, 다양하게 표시된 각들 사이에서 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & i_A = L - P + 180^\circ \\
 (2) \quad & r_C = N - Q + 90^\circ \\
 (3) \quad & M = \frac{1}{2}(90^\circ - N - L + r_C + i_C) \\
 (4) \quad & i_B = 90^\circ - M - L + r
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서 우리가 알 수 있는 변수들은 입사각 i_A , 각 P , 각 Q 그리고 각 N 이다. 즉 면 UV 와 면 WV 의 기울기를 알고 면 UV 의 기울기를 구하는 것이다.

일반적으로 면 UV 는 프리즘 하부를 깎아내는 것을 피하고 제작상 더 용이하게 하기 위해 음의 기울기를 갖도록 설계가 이루어진다.

2.2.6. 절사프리즘 설계법의 변형

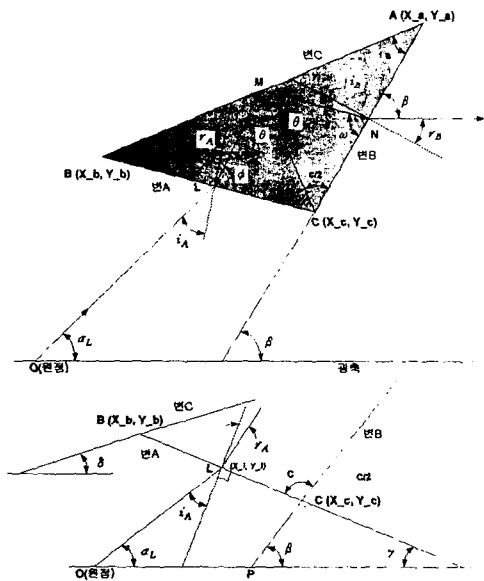


그림 8. 이등변 프리즘 정렬

서론에서 언급했듯이 절사프리즘을 일반적으로

제작하기 수월하고 다른 프리즘 설계법처럼 매질의 굴절률에 영향을 받지 않는다. 또한 각 변의 중심에 굴절과 반사를 통해 통과된 ray가 평행으로 진행하는 특징을 갖는 이등변 삼각형 형태를 갖는다. 따라서 평행한 ray가 되도록 이등변 프리즘을 정렬 시킬 필요가 있다(그림 8).

원점을 출발하여 각 변의 중심을 통과하는 ray를 굴절의 법칙과 반사의 법칙으로 위의 그림에서처럼 이등변 프리즘에 대해 각 β 를 계산한다.

3. 광학부 시뮬레이션 및 평가

본 논문에서는 대형 등명기 광학부에 대한 기존 설계의 문제점을 찾고, 보다 정확한 설계를 위한 새로운 설계법을 도출하고 이를 체계화시켜 보다 용이한 광학부 설계가 이루어지도록 하였다. 그리고 배광 예측 프로그램인 Photopia를 이용한 시뮬레이션 결과로 최대광도 (I_{max} [cd]), ray의 경로를 계산하고 그 결과로 평행한 ray와 이루는 발산각을 계산하는 방법으로 광학부 설계에 대한 평가가 이루어졌다(그림 9).

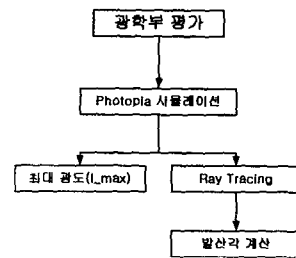


그림 9. 광학부 평가방법

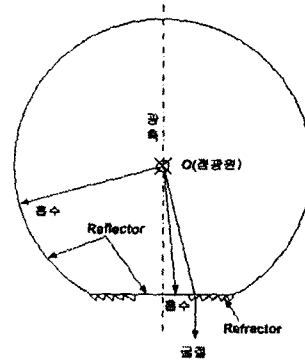


그림 10. Photopia 시뮬레이션 방법

그리고 Photopia 시뮬레이션을 하기 위한 조건은 그림 10과 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 조건

광학부	광원	광속[mm]	Reflector	Reflector
			굴절률[n]	반사율[ρ]
중심 렌즈부	점광원	1,000	1.52	0(black body)
굴절링부				
절사 프리즘			1.5049	

대형 등명기의 광학부 설계 및 평가는 중심 렌즈부, 굴절링부, 절사 프리즘부의 세부분으로 나누어 수행하였고, 모든 설계는 정해진 광학부의 치수에 맞추었다.

3.1. 광학부 시뮬레이션

3.1.1. 중심렌즈부

중심렌즈 설계는 chart를 구성하여 그림11에서 보여준 것 처럼 기존 출사빔 기운각과 수정하려고 하는 출사빔의 기운각을 변수 R을 변화시켜주는 과정(Try and Error)을 통해 최적의 곡률 R을 정한다.

Lens를 제작한 후 Photopia 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 12에서 보였다.

시뮬레이션 결과, 광축으로부터 40~50[mm]의 위치에서의 출사 ray들의 기운각은 설계대로 약간 positive 성분으로 진행하고 있고 이 위치에서 출사빔들의 기운각은 약 0.1° ~ 0.2° 범위내에 존재하였다.

렌즈중심과 양 끝부분에서의 출사빔들은 광축과 평행하게 진행하고, 광축으로부터 40~50[mm]의 위치에서의 출사빔들의 기울기는 설계대로 positive로 진행하고 있는 것을 알 수 있다. 이 위치에서 출사빔들의 기운각은 0.1° ~ 0.2° 범위내에 존재한다.

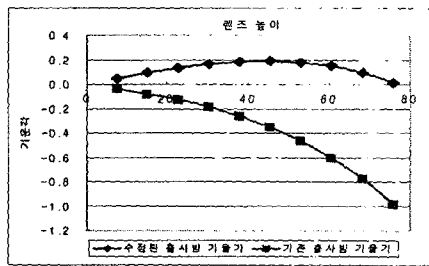


그림 11. 최적의 곡률반지름 계산 (Try and Error)

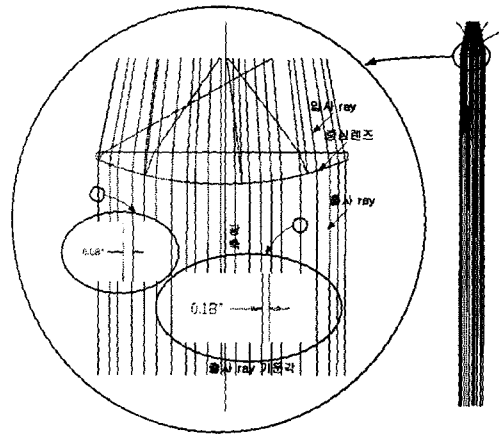


그림 12. 새로운 중심렌즈의 Photopia 시뮬레이션 결과

3.1.2. 굴절링부

굴절링부 설계는 상단부를 기준한 chart를 구성하여 설계가 이루어졌다.

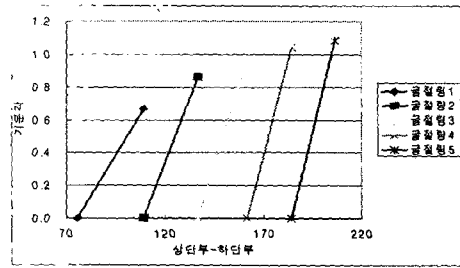


그림 13. 출사빔 기운각(상단부 기준 설계)

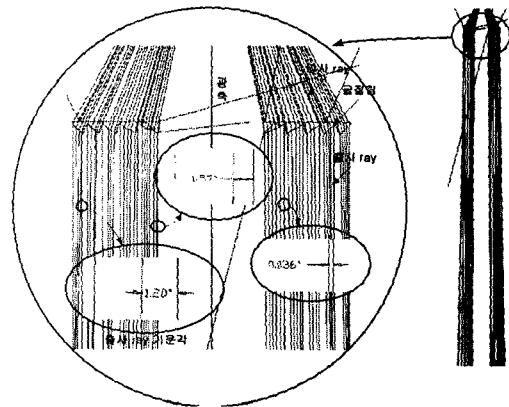


그림 14. photopia 시뮬레이션 결과(상단부 기준)

링의 상단부를 기준으로 설계한 이유는 하단부를 기준으로 설계한 것 보다 출사 ray의 기운각이 다소 작고 기운각이 positive이기 때문에 하단부를 기준으로 설계한 것보다 다소 유리하다고 판단된다.

결과로 링의 상단부를 통과한 출사 ray의 기운각은 0° 이고, 하단부를 통과한 출사빔의 기운각은 굴절링 1에서 0.78°, 굴절링 2에서 0.99°, 굴절링 3에서 1.12°, 굴절링 4에서 1.19° 그리고 굴절링 5에서 1.24°로 positive로 증가하고 있다.

그림 14는 photopia 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 각각의 굴절링 상단의 출사빔들은 광축과 평행하게 진행해 나가고, 하단부의 출사빔들은 약 1.2°의 positive로서 퍼져 진행한다.

3.1.3. 절사프리즘부

각각의 이등변 프리즘에 대하여 ray가 입사하는 변에 대해 중심을 기준으로 상, 하단 영역으로 3등분하여 각각 point에 입사한 ray가 굴절, 반사, 굴절의 과정을 거치면서 프리즘을 통과한 출사 ray의 기운각이 어떻게 변하는지 계산하였다(그림 16).

이등변 삼각형의 각 변 중심을 기준으로 프리즘 상단과 하단영역을 통해 전달되는 출사 ray의 기운각은 positive 성분과 negative 성분을 가지고 진행한다.

그림 17은 이등변 절사프리즘 P1에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

결과에서 변 B상단 영역에서의 최대 기운각은 1.86°(-), 하단 영역에서의 최대 기운각은 1.88°(+)로서 중심렌즈부와 굴절링부에서보다 기운각이 다소 크다.

또한 그림 17에서처럼 변A 하단 영역으로 갈수록 변A에 입사되는 ray의 입사각이 점점 작아지기 때문에 변 C에 입사하지 못하고 바로 변B에 입사하여 전반사가 일어나는 단점을 가지고 있다.

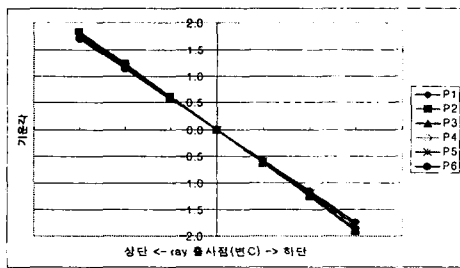


그림 16. 프리즘을 통과한 ray의 기운각

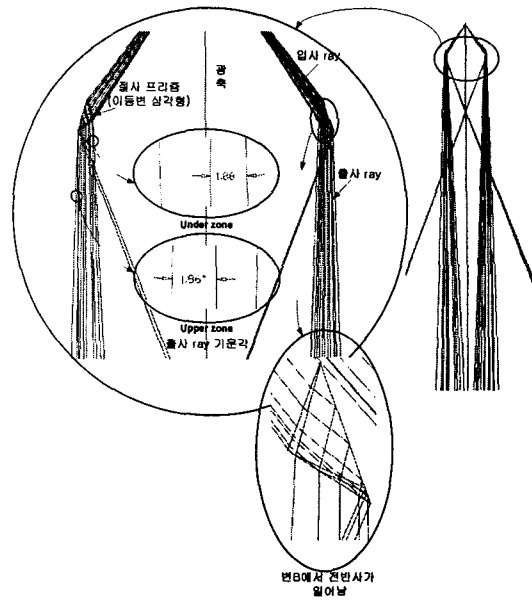


그림 17. Photopia 시뮬레이션 결과 (P1)

3.2. 광학부 설계 평가

3.2.1. 최대광도 (I_{max}) 비교 (S_1 과 S_2)

표 2는 광학부에 대해 최대광도를 비교한 결과를 보인 것이다. 여기서 S_1 은 광학부에 대해서 일반적으로 교과서에서 소개된 설계법으로 이루어진 시뮬레이션 결과이고, S_2 는 본 논문에서 제시한 설계법으로 이루어진 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 중심렌즈부에서 광도값은 큰 차이는 없지만 약간의 증가를 보였고, 굴절링부에서는 굴절링부의 한 영역을 기준으로 설계가 이루어져 있기 때문에 S_2 가 보다 감소함을 보였다. 그리고 절사 프리즘에서는 약 1.2배 정도의 높은 광도값을 얻었다.

표 2. 최대광도 비교

구분	중심렌즈부	굴절링부	
		F(F1~F5)	절사프리즘부
S_1	1,569[cd]		P(P1~P6)
		7,712.2[cd]	P1만
S_2	1,661[cd]		2,352.82 [cd]
		상단부기준	20.383.3 [cd]
		하단부기준	3.029.9 [cd]

3.2.2. Ray의 기운각(발산각) 비교

중심렌즈부 S_1 의 기운각(발산각)은 최대 $0.9^\circ (-)$ 로 다소 크지만, S_2 의 기운각은 최소 $0.08^\circ (+)$, 최대 $0.24^\circ (+)$ 로 S_1 보다 작다는 것을 확인하였다.

굴절링부 S_1 의 기운각은 상단, 하단 영역에 대해 설계가 이루어졌기 때문에 모든 굴절링에서 거의 0° 에 가깝고, S_2 의 기운각은 상단, 하단 영역의 한 영역에 대해서 설계가 이루어졌기 때문에 그 영역에서의 기운각은 거의 0° 에 가깝지만, 다른 영역에서는 최대 1.15° 로 S_1 보다 크다(표 3).

그리고 질사프리즘부의 경우 기운각은 변 B 중심영역에서는 S_1 과 S_2 의 차이는 없지만, 상단, 하단 영역에서의 기운각은 S_1 이 다소 컸다(표 7).

표 4. 프리즘에 대한 기운각 비교

구분	S_1			S_2		
	변 B 하단	변 B 중심	변 B 상단	변 B 하단	변 B 중심	변 B 상단
P1	3.25°	0.05°	3.24°	1.88°	0.08°	1.86°
P2	3.07°	0.15°	2.95°	2.09°	1.05°	1.95°
P3	2.81°	0.10°	2.77°	2.17°	0.04°	1.91°
P4	2.62°	0.04°	2.07°	2.15°	0.04°	1.93°
P5	2.54°	0.05°	2.24°	2.14°	1.10°	1.95°
P6	2.46°	0.03°	2.20°	2.13°	0.01°	2.06°

표 3. 굴절링부의 기운각 비교

구분	F1		F2		F3		F4		F5		
	상단 영역	하단 영역	상단 영역	하단 영역	상단 영역	하단 영역	상단 영역	하단 영역	상단 영역	하단 영역	
S_1	0.11°	0.12°	0.08°	0.08°	0.09°	0.01°	0.06°	0.07°	0.10°	0.11°	
S_2	상단부 기준 설계	0.04°	0.57°	0.09°	0.83°	0.12°	0.75°	0.01°	0.85°	0.06°	1.20°
	하단부 기준 설계	0.60°	0.09°	0.83°	0.14°	1.00°	0.14°	1.15°	0.17°	1.25°	0.12°

4. 결론

등화표지는 non-imaging으로서 매우 정밀한 ray 제어가 문제로 대두되지 않는다는 점에서 광학부 모든 경계면들이 평면이나 구면으로 설계가 되었다.

중심렌즈부에서의 설계는 지금까지 렌즈설계공식을 이용하여 설계되어 왔지만, 발광부와 수광부의 거리가 매우 근접한 즉, 입사각과 굴절각을 무시할 수 없는 상황에서 설계가 이루어져야 한다. 본 논문에서는 이러한

문제 해결을 계산에 의한 Ray 추적을 통해 곡률반지름을 변수를 두고 Trial and Error 방식으로 중심렌즈부 설계를 용이하게 수행될 수 있도록 계산 tool를 제공하였고, 이를 바탕으로 Excel를 이용하여 용이하게 최적의 곡률반지름을 도출 할 수 있었다.

그리고 굴절링부에서는 좀더 정확한 설계법으로 설계가 되어야 하지만, 어떤 제작 환경에서 그 환경에 맞는 최적의 설계가 이루어져야 한다. 그래서 본 논문에서는 제작법에 맞게 모든 굴절링 구면의 중심을 광축상에 놓여 있는 설계가 이루어졌고 이를 보다 쉽게 설계하기 위해 계산 tool를 제공하였다. 그러나 굴절링부는 각각의 굴절링 상,하단을 광축에 기준으로 설계가 이루어졌기 때문에 어느 정도의 출사빔 기운각을 갖는다는 단점이 있다.

마지막으로 질사 프리즘부는 설계 및 제작의 용이성과 매질의 굴절률에 관계없이 각 변 중심을 통과하는 ray를 평행한 ray로 만들 수 있는 장점을 가진 이등변 프리즘으로 설계가 이루어 졌다. 따라서 ray를 평행하게 보내기 위한 이등변 프리즘 정열법을 소개하고 이를 계산하는 tool를 소개함으로써 보다 쉽게 설계할 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 상기와 같은 새로운 광학부 설계법을 제시함으로써 수치적이고 체계적으로 그 설계가 이루어져 대형 등명기의 광학적 성능을 향상시킬 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 해양수산부, "항로표지기초이론".
- [2] 해양수산부 항로표지 업무편람
- [3] R. H. Simons and A. R. Bean, "Lighting Engineering Applied Calculations", Plant a Tree, 2001.
- [4] 이원진 외 11인, "기하광학", 수문사, 2000.