

대형등명기의 렌즈 및 프리즘 설계

(Design of Lens and Prism used Lighthouse)

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, 절사프리즘부) 역할이다. 그래서 광학부에 대한 정밀한 설계가 이루어져야 하지만, 기존의 광학부 설계법은 어떤 설계 조건과 제작환경에 맞지 않는다.

따라서 본 논문에서는 Ray Tracing과 배광예측 프로그램인 Photopia 시뮬레이션을 통해 그 설계의 문제점을 찾고, 설계조건과 제작환경에 맞는 최적의 설계가 되도록 개선안을 제시하고 설계법을 도출하였다. 단, 초점에 위치한 광원은 모두 점광원으로 하였다.

1 서론

항만을 통해 선박들이 진출입할 때, 안전한 항해를 보장하기 위해 대양에서 연안까지 불빛의 밝기를 이용하여 선박들을 유도하는 것이 등명기의 역할이다.

등명기는 크게 렌즈와 프리즘의 광학부와 이를 일정 주기로 회전시키거나 점멸시키는 구동부로 구성된다. 광학부는 램프로부터 방사되는 ray들을 평행하게 나아가도록 하기 위함이고, 구동부는 등대의 성격을 나타내 주기 위한 등질부분¹⁾이다.

광학부는 다시 크게 중심렌즈부, 굴절링부²⁾ 그리고 절사프리즘부로 나뉘어진다. 이 모두 광원으로부터 방사된 ray들을 평행하게 진행하도록 ray의 진로를 바꾸어주는 역할을 한다.

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

먼저 중심렌즈부는 통상 렌즈설계공식을 이용하여 설

계하게 되지만, 이 식은 기하광학에 의해서 유도된 식으로 발광부와 수광부의 거리가 램프와 렌즈부처럼 인접한 상황에서는 오차가 있게 된다.

둘째, 굴절링부는 설계시 각 굴절링들의 구면 중심은 광축상에 놓여 있게 되지 않는다. 렌즈 제작법에 따라 그 설계가 제한되어 이루어지게 되는 것이 일반적이다. 우리나라에서는 광축에 구면 중심을 두고 렌즈 제작이 이루어진다.

셋째, 절사프리즘부도 굴절링부와 마찬가지로 제작법에 의해 설계가 된다. 절사프리즘부는 각 변의 중심에 굴절과 반사를 통해 통과된 ray들이 평행으로 진행시키기 위해 이등변 삼각형 형태로 제작이 되지만, 프리즘 각변의 중심을 기준으로 상,하부분으로 나누었을 때 프리즘을 통과한 ray들의 출사빔 기운각³⁾은 positive 성분과 negative 성분을 갖는다.

따라서 본 논문에서는 Ray Tracing과 배광예측프로그램 Photopia 시뮬레이션을 통해 문제를 찾고 이를 개선하는 방향으로 그 설계를 수행하였다.

2 본론

2.1. 광학부 설계 요건

3) 평행광(광축)을 기준으로 하였을 때, 평행광과 진행하는 ray가 이루는 각

1) 항로표지의 등광과 일반 등광에 대한 식별을 쉽게 하는 동시에 부근에 있는 다른 항로표지의 등광과 구별을 하기 위해 정해진 등광을 발사하는 상태를 등질이라 하고 등색과 등광의 주기를 합하여 넓은 의미로 등질이라 한다.

2) Fresnel lens라고 하며, 몇 개의 링으로 단을 이룬다고 해서 Stepped lens라고도 함, 빛의 경로상에서 굴절을 이용하고 ring의 형태를 갖기 때문에 본 논문에서는 굴절링이라고 명명하겠음

대형등명기의 광학부는 광축상의 점광원을 초점으로 하여 초점에서 발산되는 ray들을 광축과 평행하게 이루도록 진행방향을 바꾸는 것이다. 그렇지만 실제로는 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. 발산각은 수평, 수직 발산각으로 구분된다.

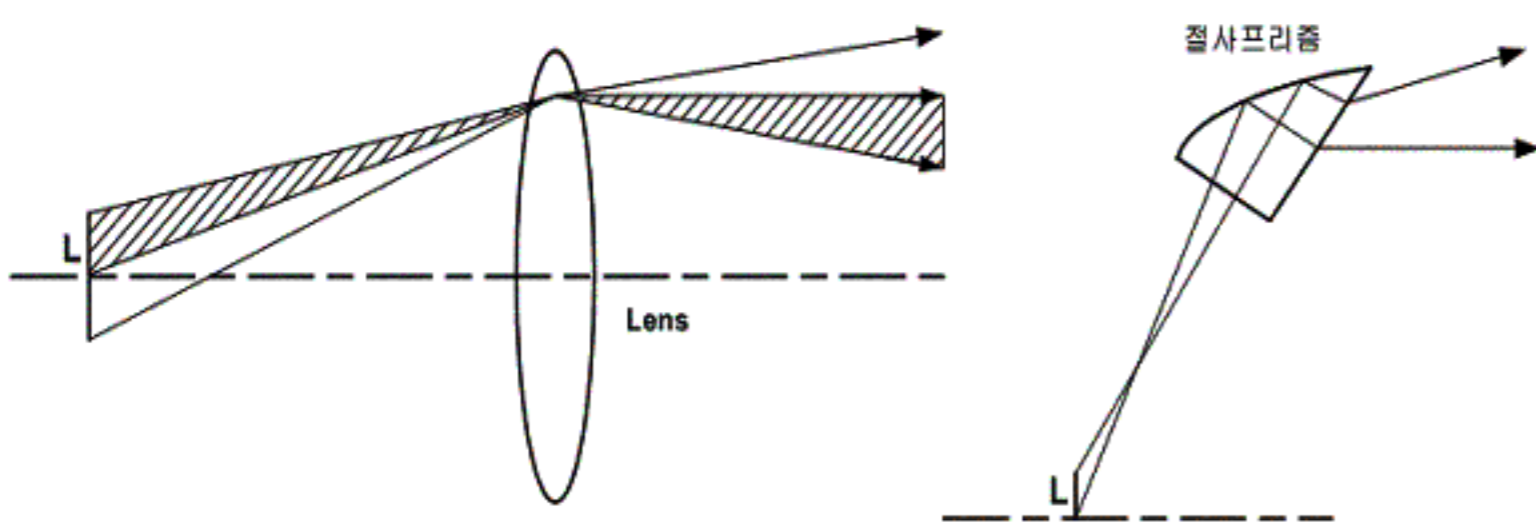


그림 1 렌즈와 프리즘의 ray 경로

2.2. 광학부 설계법

2.2.1. Lens

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

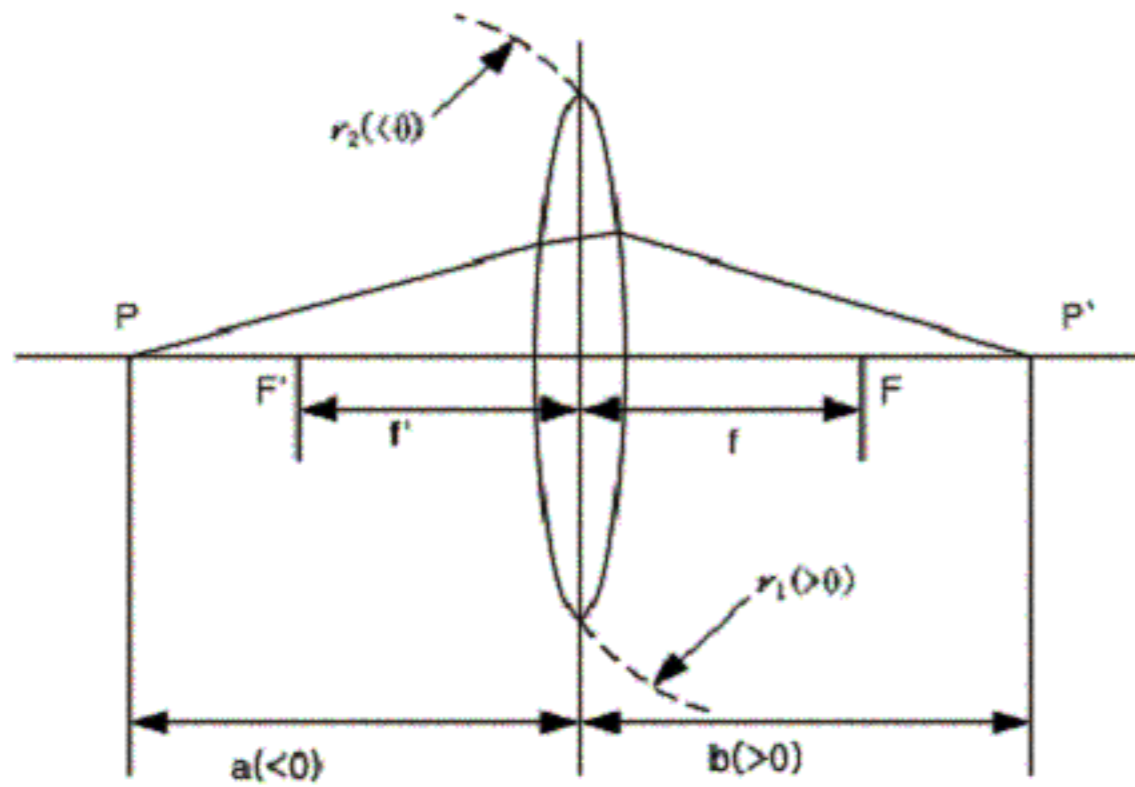


그림 2 얇은 렌즈

유도결과는 다음과 같다.[3]

$\sin \theta_i \approx \theta_i, \sin \theta_r \approx \theta_r, \cos \theta_i \approx 1, \cos \theta_r \approx 1$ 이므로,

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

2.2.2. 굴절링

굴절링은 다음과 조건들을 만족하도록 각각 분리된 형태의 굴절링을 설계해 나간다.[1][2]

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

굴절률이 n 일 때, A 점, B 점에 입사하는 ray가 매질에서 굴절되어 나가는 광로 AA', BB' 를 굴절법칙으로 알 수 있다.

$$\sin i_A = n \sin r_A, \sin i_B = n \sin r_B \quad (2)$$

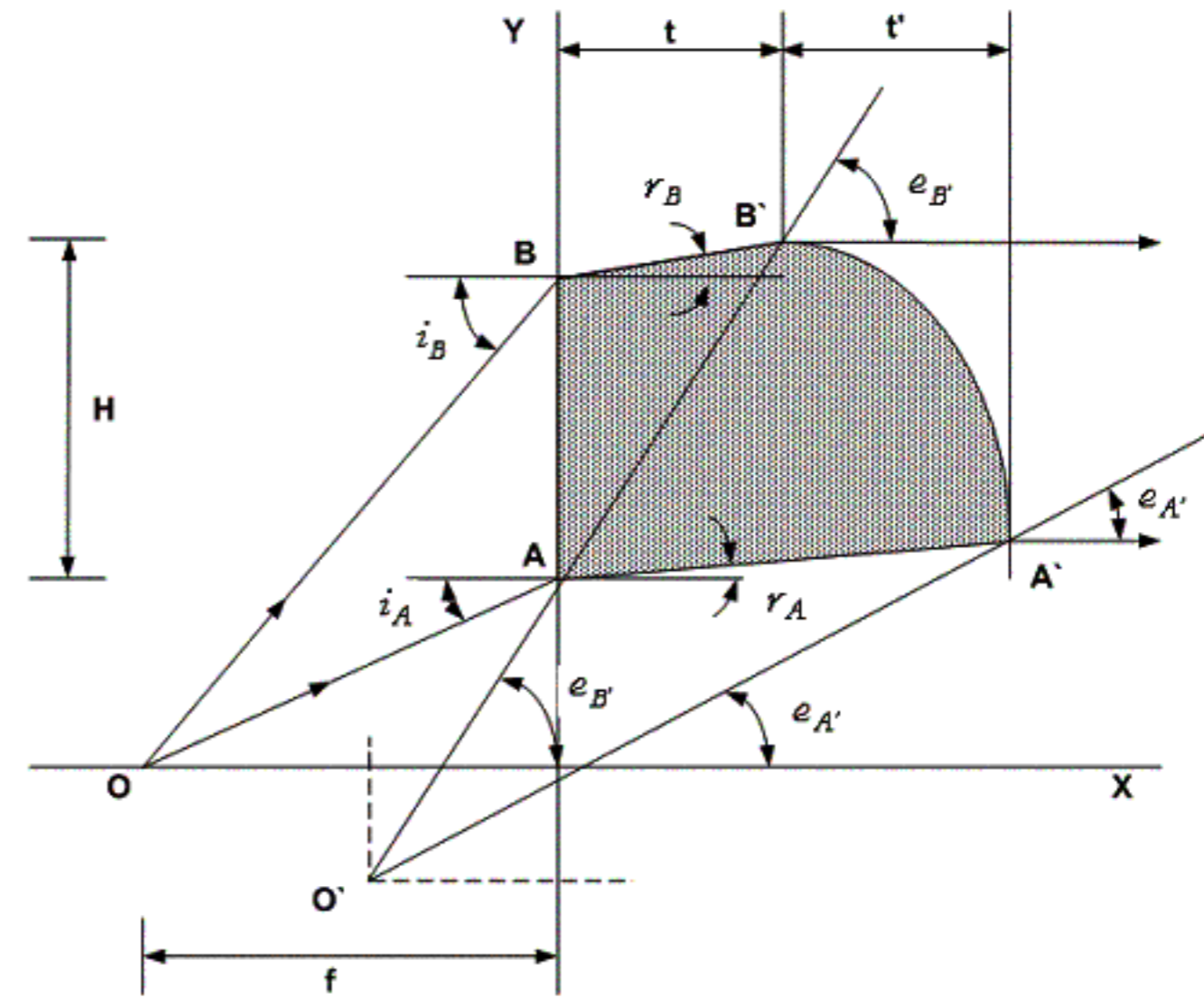


그림 3 굴절링 설계

광로 AA', BB' 는 굴절링의 두께 tt' 와 교차된다. 이 교차점에서 호 $A'B'$ 의 중심 O' 를 구한다.

두 직선 $O'A', O'B'$ 의 기울각 $e_{A'}$ 와 $e_{B'}$ 를 구하기 위해, 경계면 호 $A'B'$ 에서 굴절의 법칙을 적용한다.

$$\begin{aligned} \sin e_{A'} &= n \sin(e_{A'} - r_A) \\ \sin e_{B'} &= n \sin(e_{B'} - r_B) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 식 (3)을 풀면

$$\begin{aligned} \tan e_{A'} &= \frac{n \sin r_A}{n \cos r_A - 1} \\ \tan e_{B'} &= \frac{n \sin r_B}{n \cos r_B - 1} \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다.

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

이러한 방법으로 제2, 제3의 굴절률을 설계해 나간다.

2.2.3. 절사프리즘

그림 4는 광원 O 로부터 방사된 광선이 절사프리즘 UVW 통과 후 평행광으로 되는 절사프리즘 설계를 보여준다.[2]

광선 $OABCD$ 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 반사된다. 그리고 경계면 WV 상의 점 C 에 입사하여 평행광으로 굴절되어 나아간다.

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

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & i_A = L - P + 180^\circ \\
 (2) \quad & r_C = N - Q + 90^\circ \\
 (3) \quad & M = \frac{1}{2}(90^\circ - N - L + r_C + i_C) \\
 (4) \quad & i_B = 90^\circ - M - L + r
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

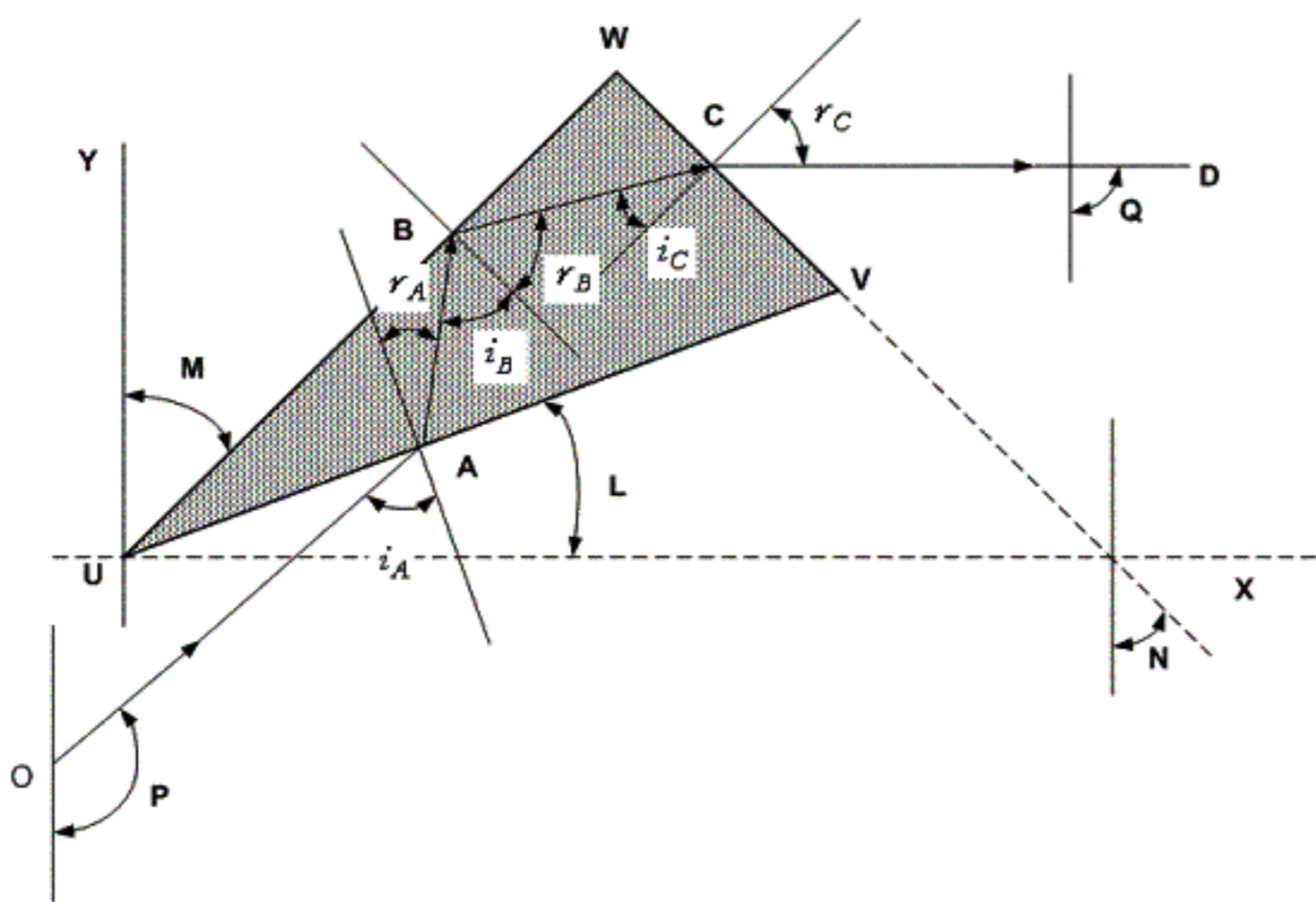


그림 4 절사프리즘 설계

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.

3. 광학부 설계 및 평가

3.1. 광학부 설계

대형등명기 광학시스템에 대해 배광 예측 프로그램인

Photopia를 이용한 시뮬레이션과 Ray-tracing(광선추적법)에 의해 문제점을 파악하고 이를 개선하는 재 설계 과정으로서 이루어진다.

3.1.1. 중심렌즈부

중심렌즈는 Lens 제작상의 규격을 기본으로 일반적으로 식(1)에 의해 설계한다.

렌즈초점거리 f 는 375[mm]이고 굴절률 n 값에 따라 곡률반지름 r 은 식(1)에서 설계된다.

Ray-tracing은 점광원의 중심 O 에서 방사되는 ray가 중심렌즈 평면에 입사점을 광축을 중심으로 상단 렌즈 10 point로 나누어 수행하였다.

계산결과 중심렌즈를 통과하는 ray들은 모두 빔의 기울기가 negative를 갖고 중심렌즈 평면에 입사각이 증가할수록 빔의 기울기는 더 커지게 된다는 것을 확인할 수 있다(그림 5).

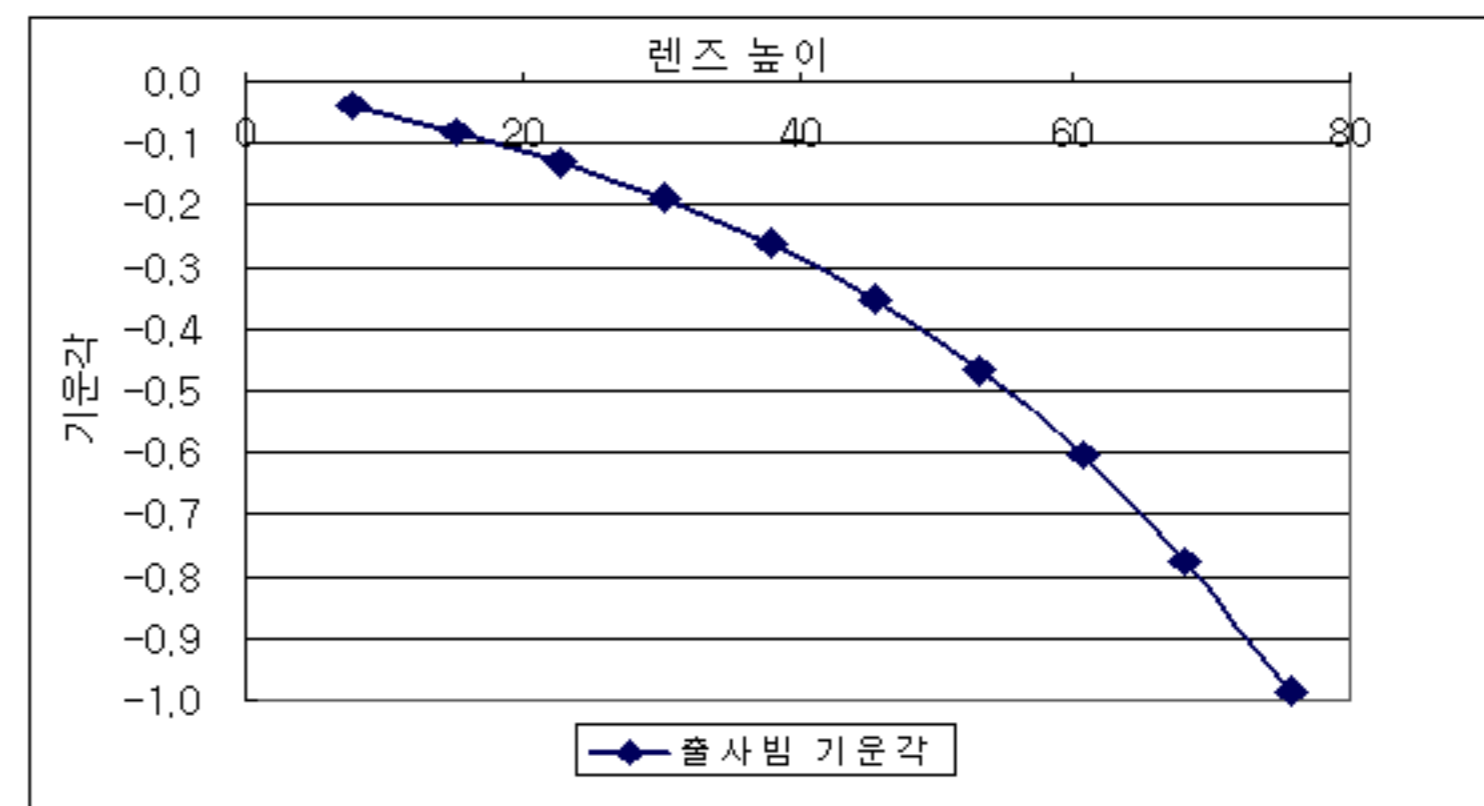


그림 5 중심렌즈를 통과한 빔의 기울기

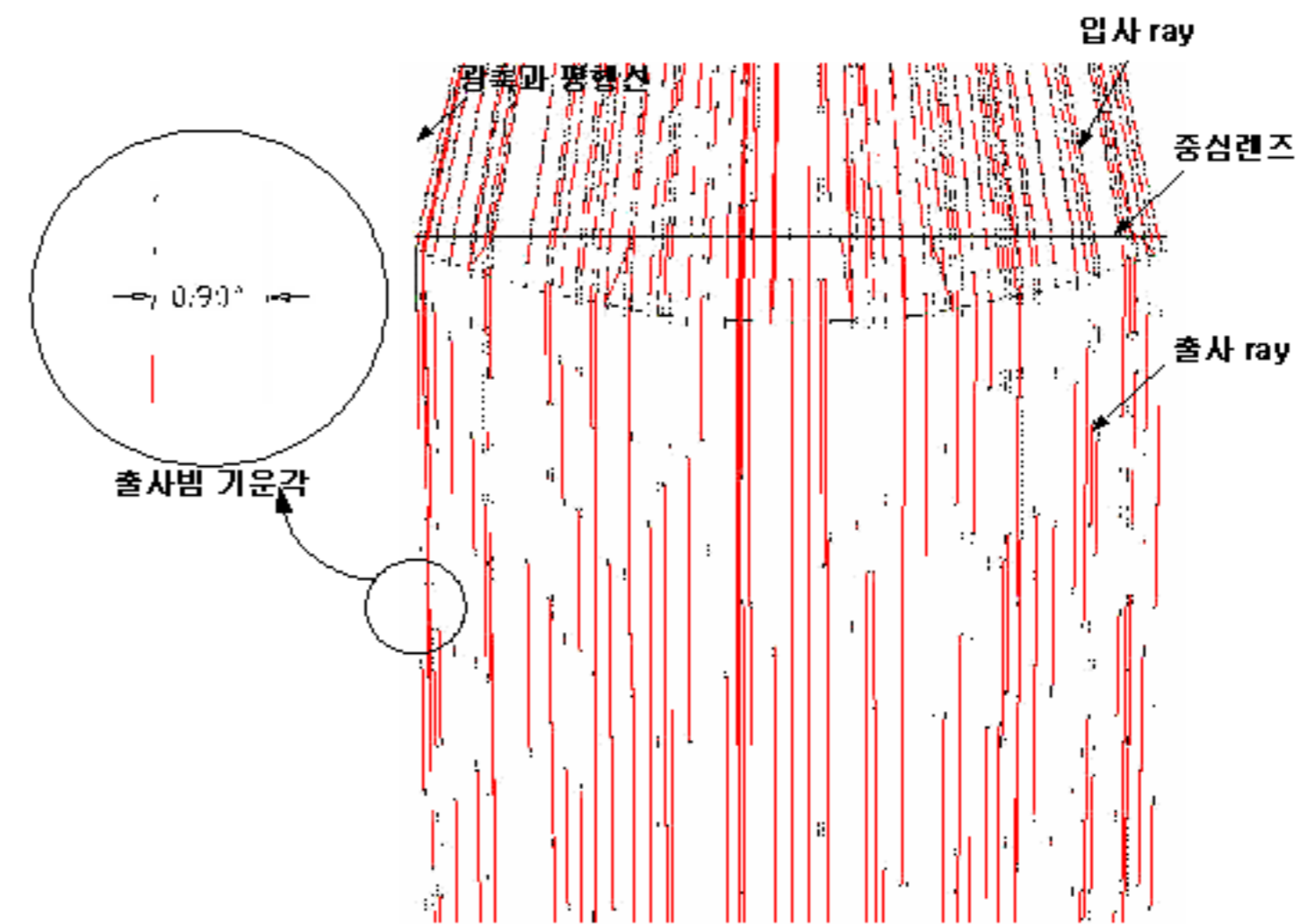


그림 6 Photopia 시뮬레이션 결과-기존 중심렌즈부

또한 이를 확인하기 위해 Photopia 시뮬레이션 과정을 거쳤다(그림 6). $P10$ 에서의 출사빔은 평행광과 1° 정도의 기울기가 된다. 최대한 평행광에 근접한 출사빔

을 만들기 위해 재 설계가 필요하게 된다.

곡률반지름 R 이나 초점거리 f 를 변수로 하여 Try and Error로 이를 수정하는 과정을 수행하였다.

여기서 초점거리 f 는 대형등명기 전체의 크기나 형태에 영향을 주기 때문에 곡률반지름 R 을 변수로 정하였다.

곡률 반지름을 변화시켜 주면서 기존 출사빔 기울각과 수정하려고 하는 출사빔의 기울각을 비교하면서 최적의 곡률 반지름을 도출한다(그림 7). 이러한 과정으로 최적의 곡률반지름을 정하였다.

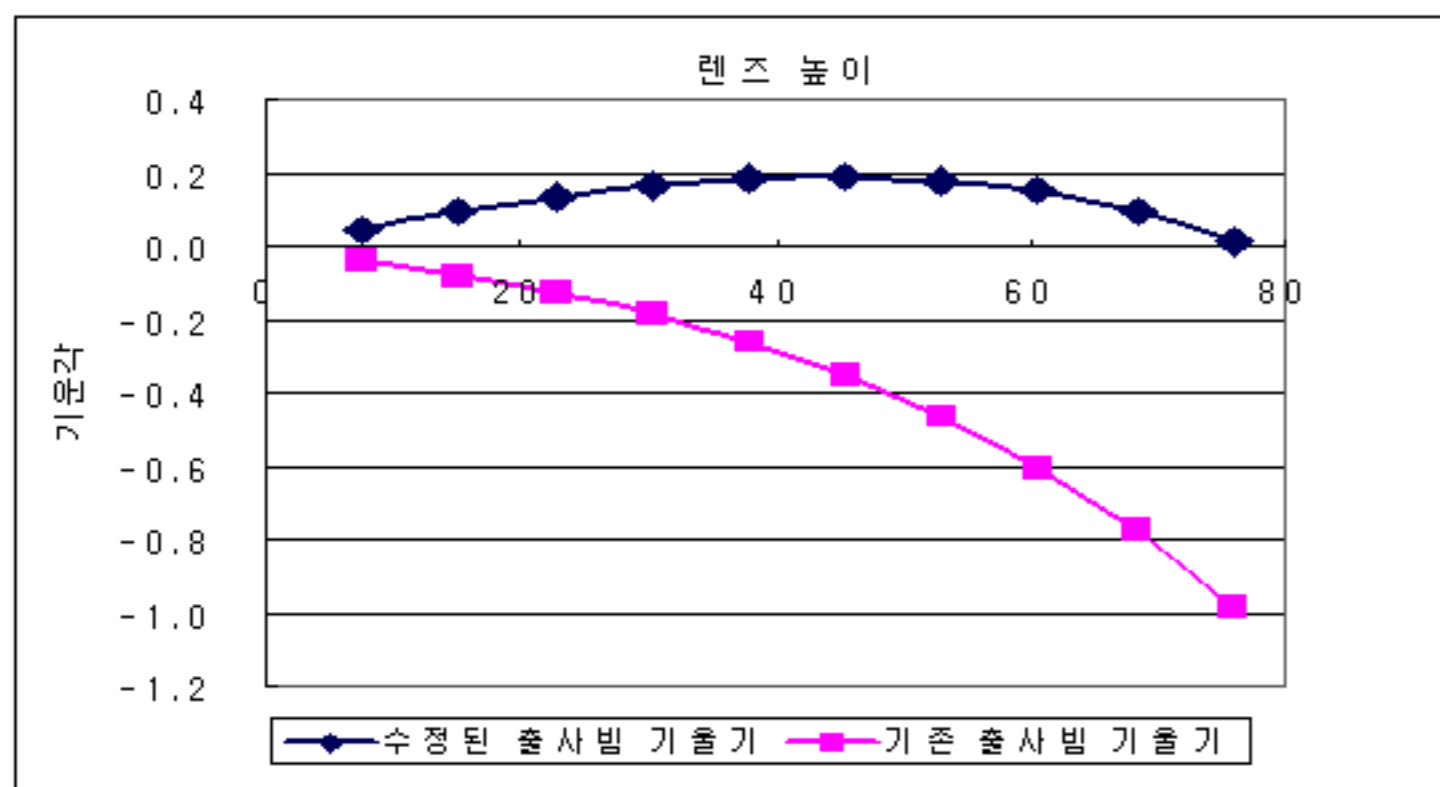


그림 7 곡률반지름(R) 개선(Try and Error)

Lens를 재 설계한 후 Photopia 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다(그림 8). 광원은 점광원으로 하였다.

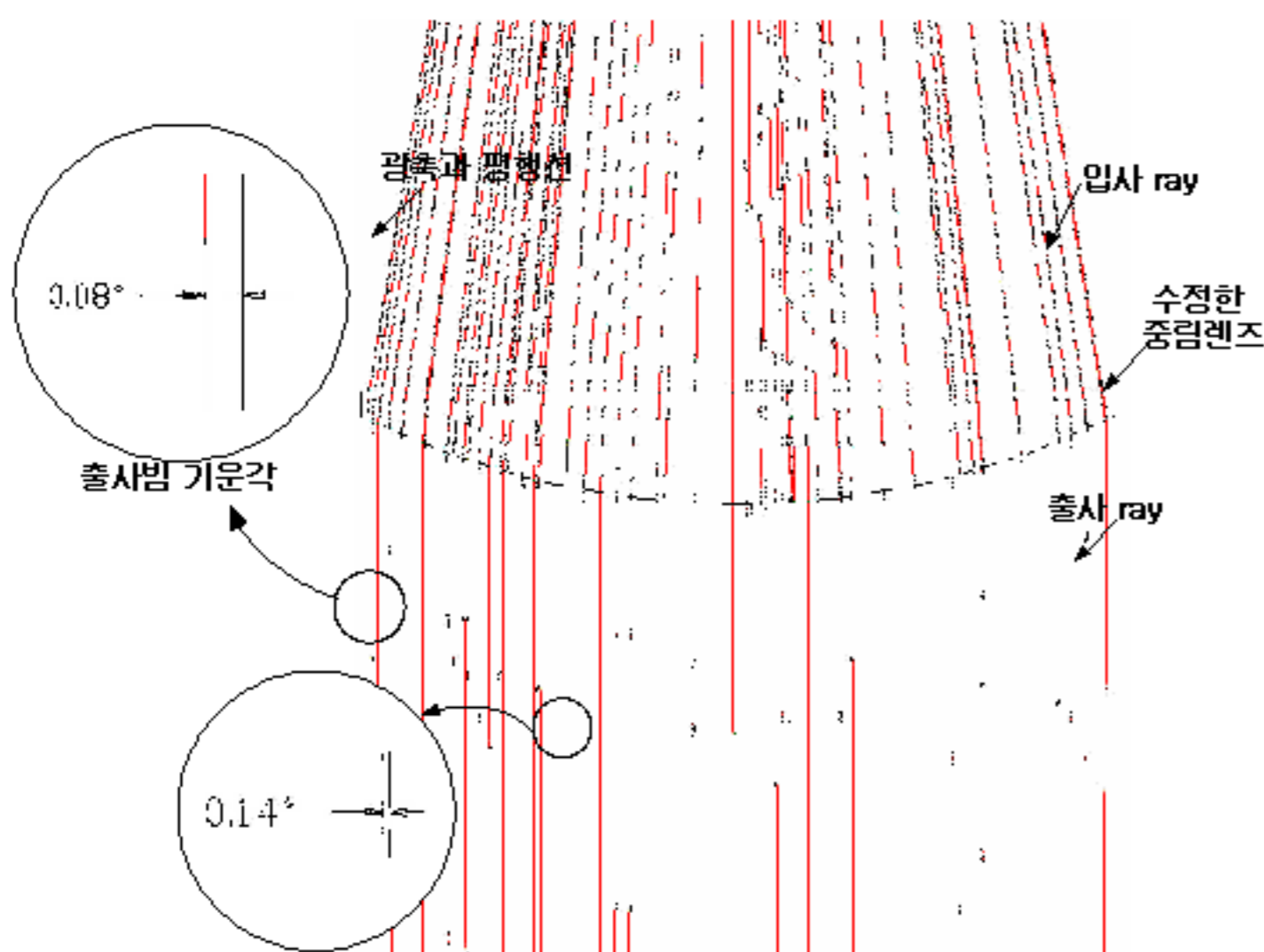


그림 8 Photopia 시뮬레이션 결과-수정된 중심 렌즈부

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 기울각은 $0.1^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ 범위내에 존재한다.

3.1.2. 굴절링부

2.2.2절에서 소개된 설계법은 각각의 굴절링 구면 중심은 광축을 벗어난 위치에 있다. 그러나 Lens를 연마하는 축이 광축에 위치되어 있기 때문에 현재 Lens 제작법(그림 9)으로는 제작이 불가능하다. 따라서 굴절링부 설계는 각각의 굴절링 구면의 중심이 광축상에 놓여 있게 설계되어야 한다.

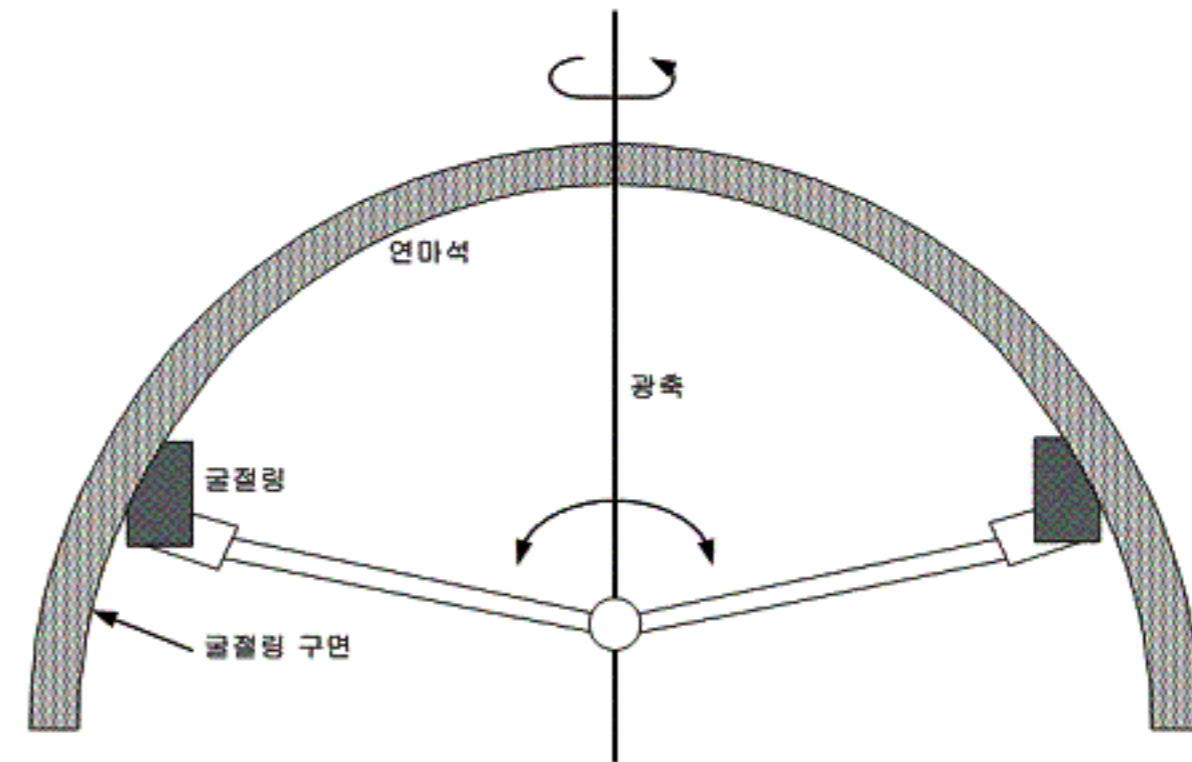
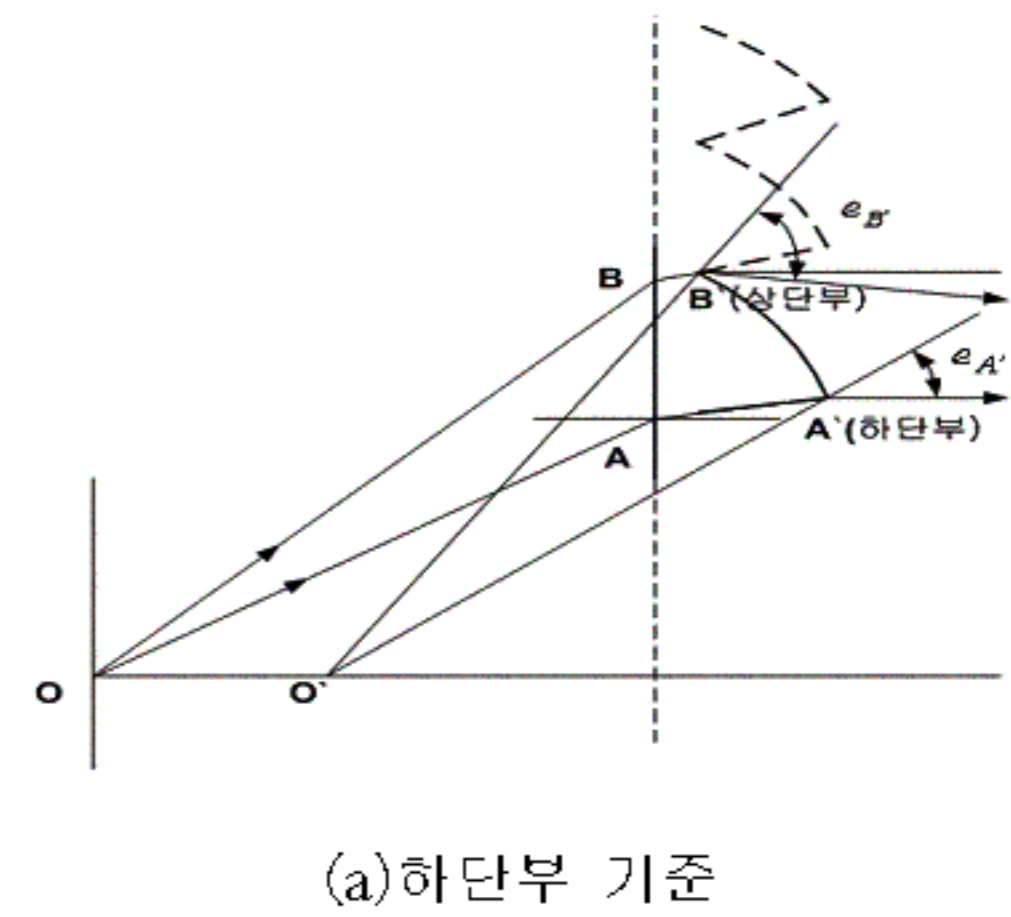


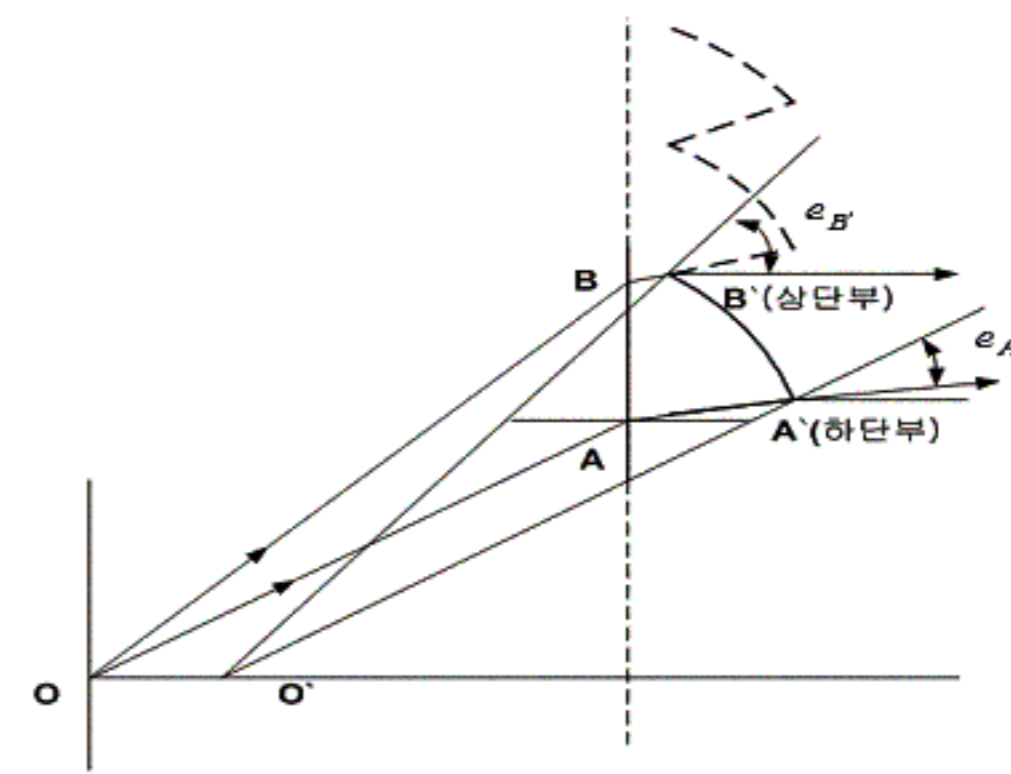
그림 9 굴절링 제작 단면도

새로운 굴절링부를 설계하기 위해서 2가지 설계법을 구상하여 시도하였다.

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



(a)하단부 기준



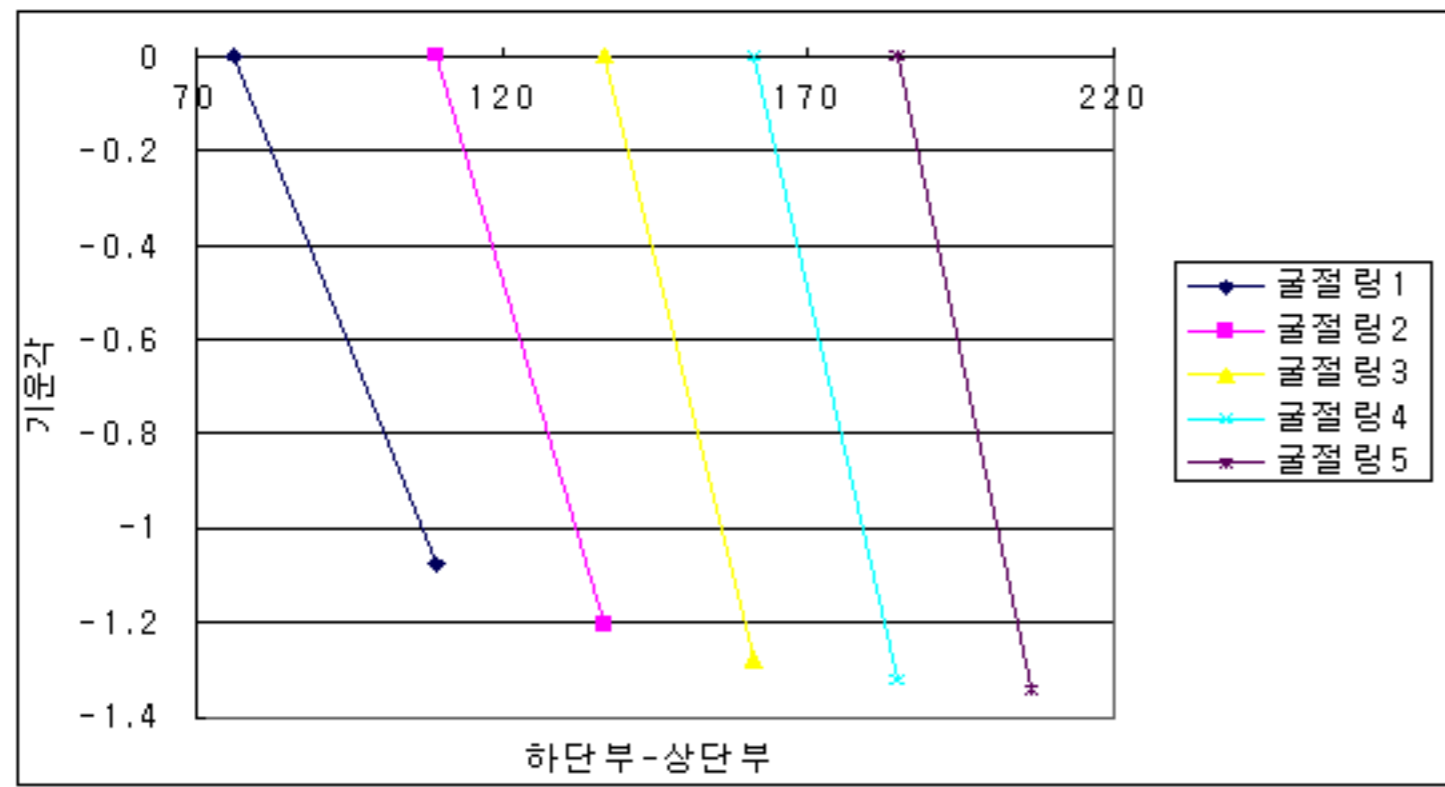
(b)상단부 기준

그림 10 굴절링 설계 방법

첫 번째 설계법은 그림 10(a)에서 보여준 것처럼 굴절링 하단부를 통과한 출사빔을 평행광으로 진행시키고,

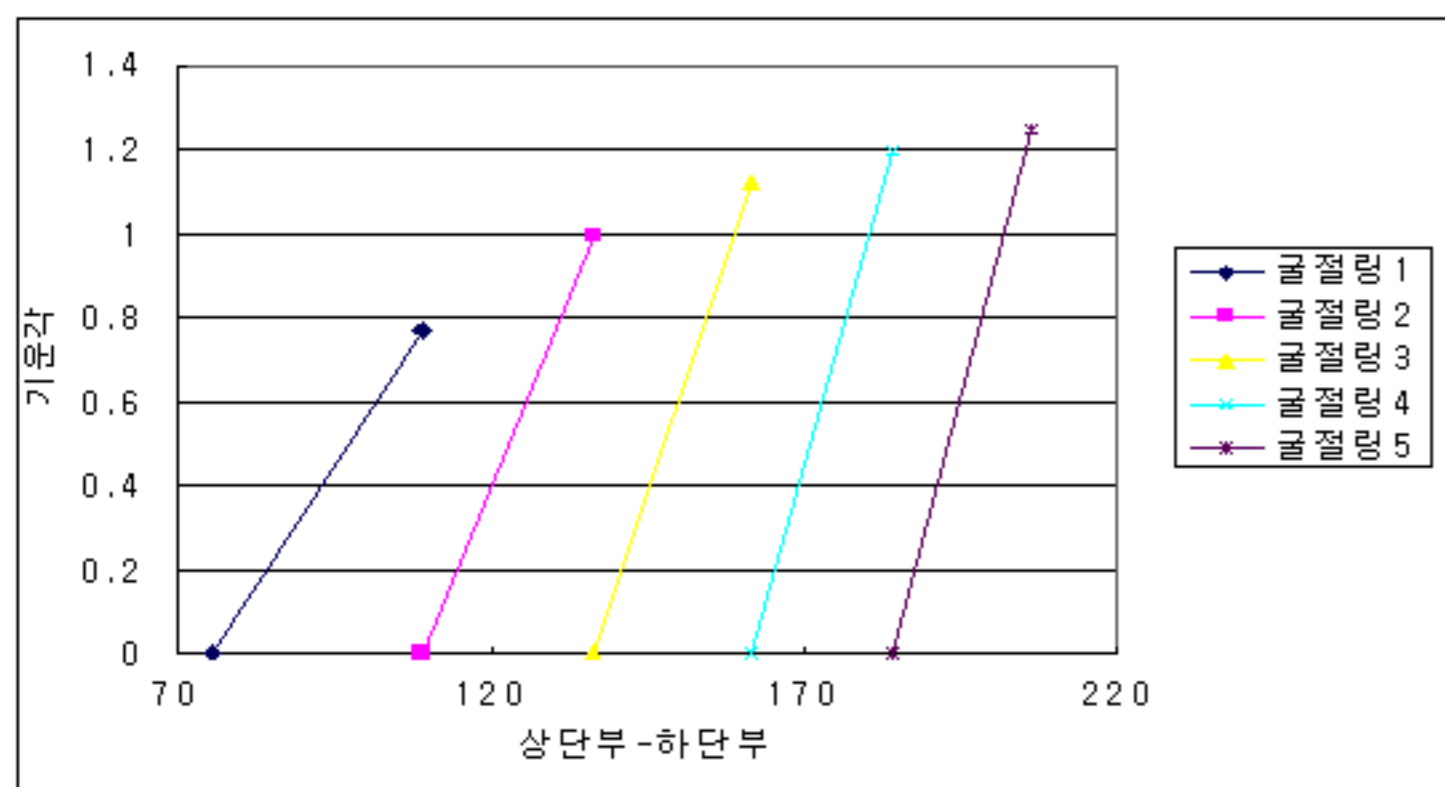
2.2.2절에서의 굴절링 설계법을 적용한다. 이 설계법은 하단부에서 통과한 출사빔은 평행광에 만족이 되지만, 하단부와 상단부까지의 출사빔은 negative 기울기로 증가하면서 진행한다.

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



(a) 하단부 기준 설계시

(하단 point-굴절링 상단부, 상단 point-굴절링 하단부)



(b) 상단부 기준 설계시

(하단 point-굴절링 상단부, 상단 point-굴절링 하단부)

그림 11 출사빔 기울기

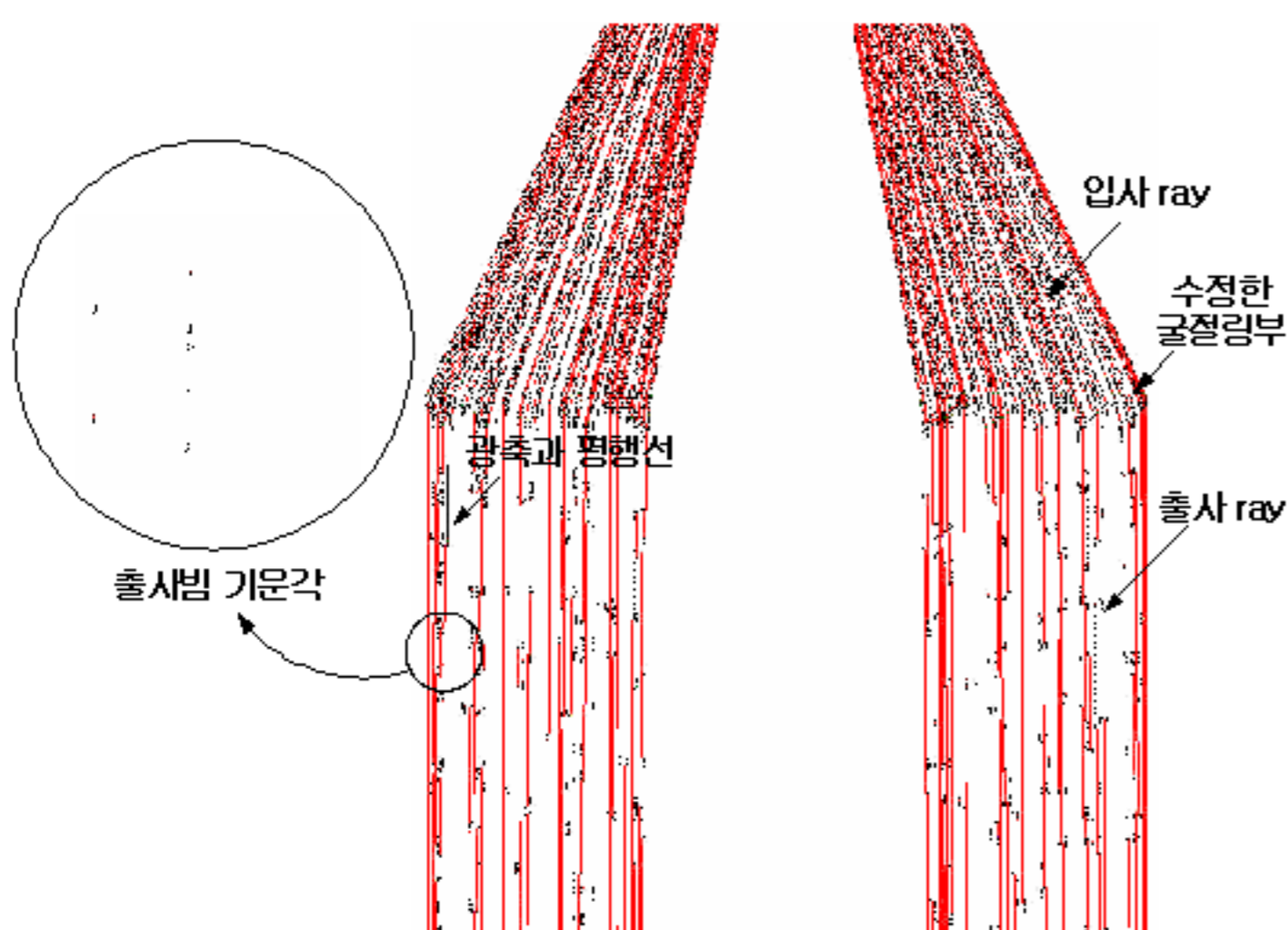


그림 12 Photopia 시뮬레이션 결과

이 설계법에서는 상단부를 통과한 출사빔은 평행으로 가는 반면, 상단부와 하단부까지의 출사빔은 positive 기울기로 증가하면서 진행한다. 이 두가지 설계법에 의

한 Ray-tracing 결과를 그림 11에 보였다.

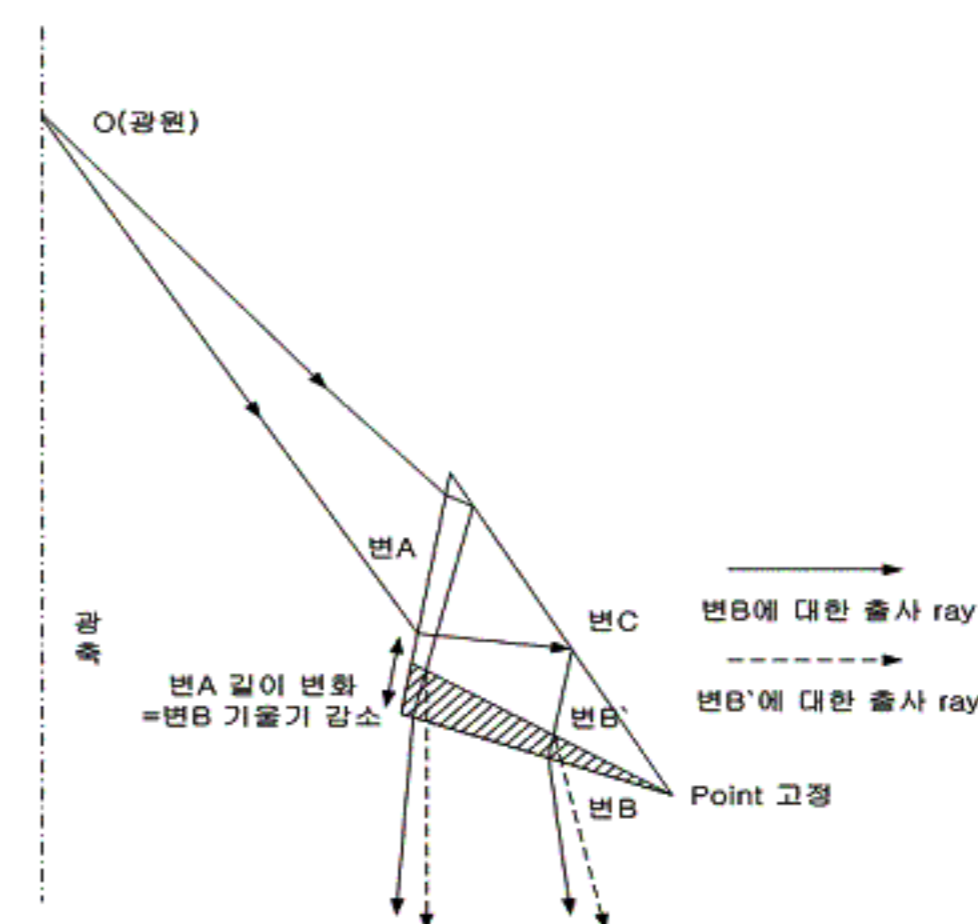
가로축은 굴절링의 하단부와 상단부를 나타내고, 세로축은 하단부와 상단부를 통과한 출사빔의 기울기를 나타낸다.

굴절링 설계(상단부 기준) 후 Photopia 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다(그림 12). 광원은 점광원으로 하였다.

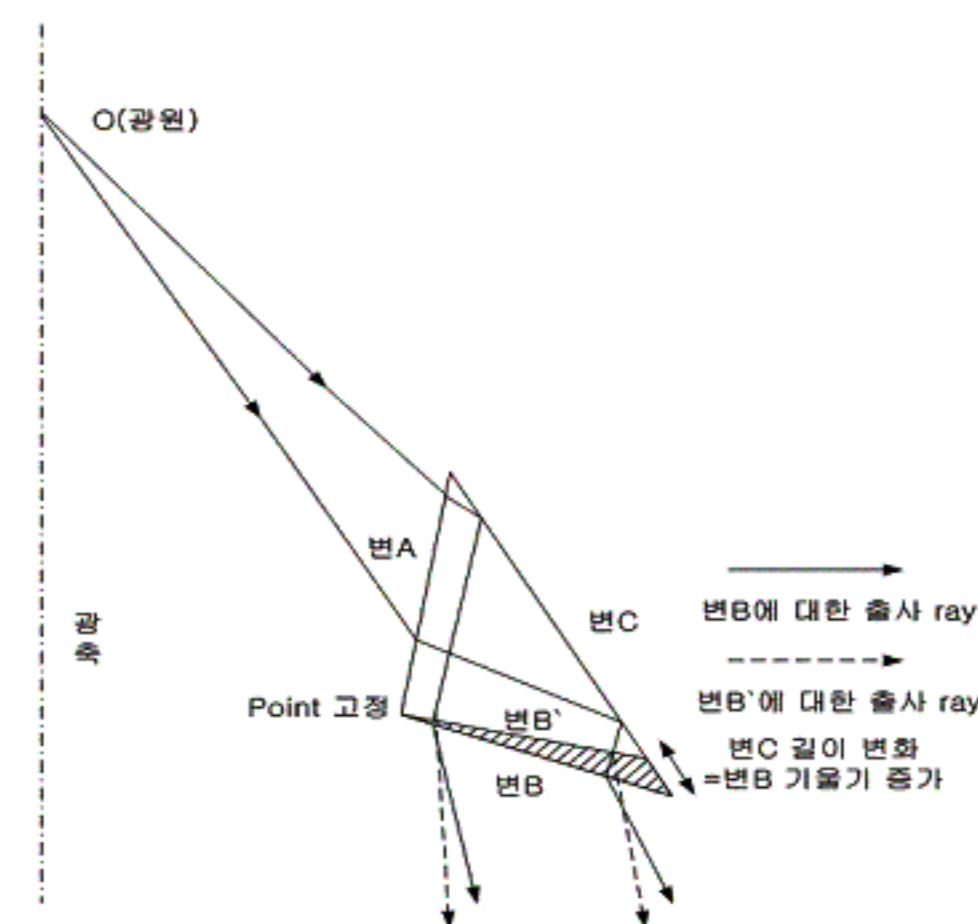
각각의 굴절링 상단의 출사빔들은 광축과 평행하게 진행해 나가고, 하단부의 출사빔들은 약 1.2° 의 positive로서 퍼져 진행한다.

3.1.3. 절사프리즘부

이등변 삼각형 형태의 프리즘은 제작하기 수월하다는 제작상의 이점은 있으나 삼각형 중심을 기준으로 프리즘 상,하 부분을 통해 전달되는 출사빔의 기울기는 positive 성분과 negative 성분을 가지고 진행되는 단점이 있다.



(a) 변B 기울기 감소



(b) 변B 기울기 증가

그림 13 절사프리즘 수정

출사빔의 기울기를 최대한 줄이고, 각각의 프리즘에 대해서 출사빔의 방향을 일치시키기 위해 변B의 기울기를 감소시키거나 증가시키는 설계를 수행하였다.

변B의 기울기를 감소시키면 그림 13(a)에서처럼 변B

에 입사하는 ray의 입사각이 커지기 때문에 출사빔의 기운각은 positive로 증가하게 된다. 단, 수정전 출사빔의 기운각보다 다소 커지게 될 것이다.

변B의 기울기를 증가시키면 그림 13(b)에서처럼 변B에 입사하는 ray의 입사각이 작아지기 때문에 출사빔의 기운각은 negative 성분으로 감소하게 된다.

이 두가지 방법으로 최적의 출사빔 기운각을 계산에 의해 도출할 수 있다.

변B의 기울기를 변화시킨 결과를 그림 14에서 보였다. 모든 절사프리즘의 출사빔 기운각이 다소 크기는 하지만, 모든 절사프리즘에 대해서 출사 ray들은 모두 거의 같은 방향으로 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다.

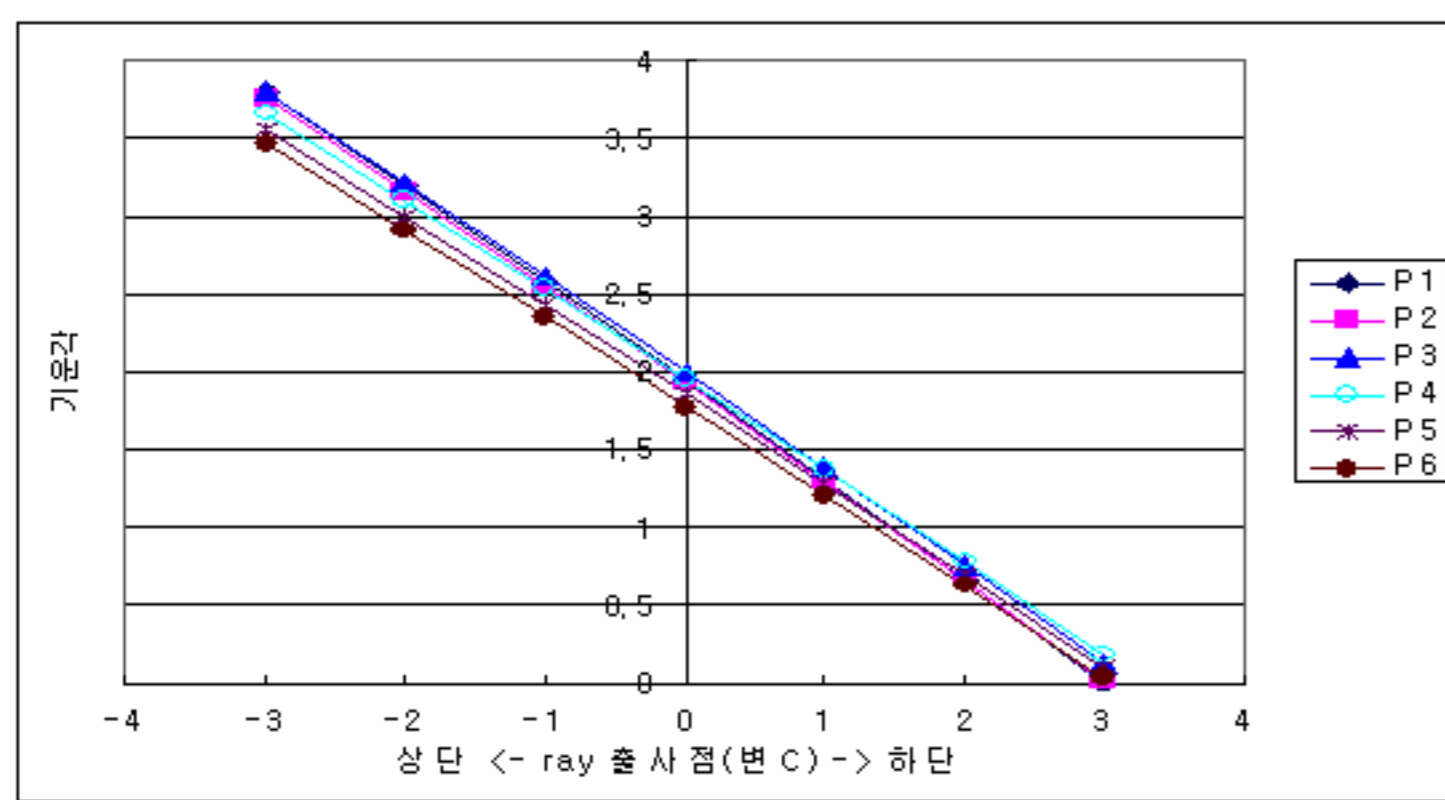


그림 14 수정된 절사프리즘에 대한 기운각

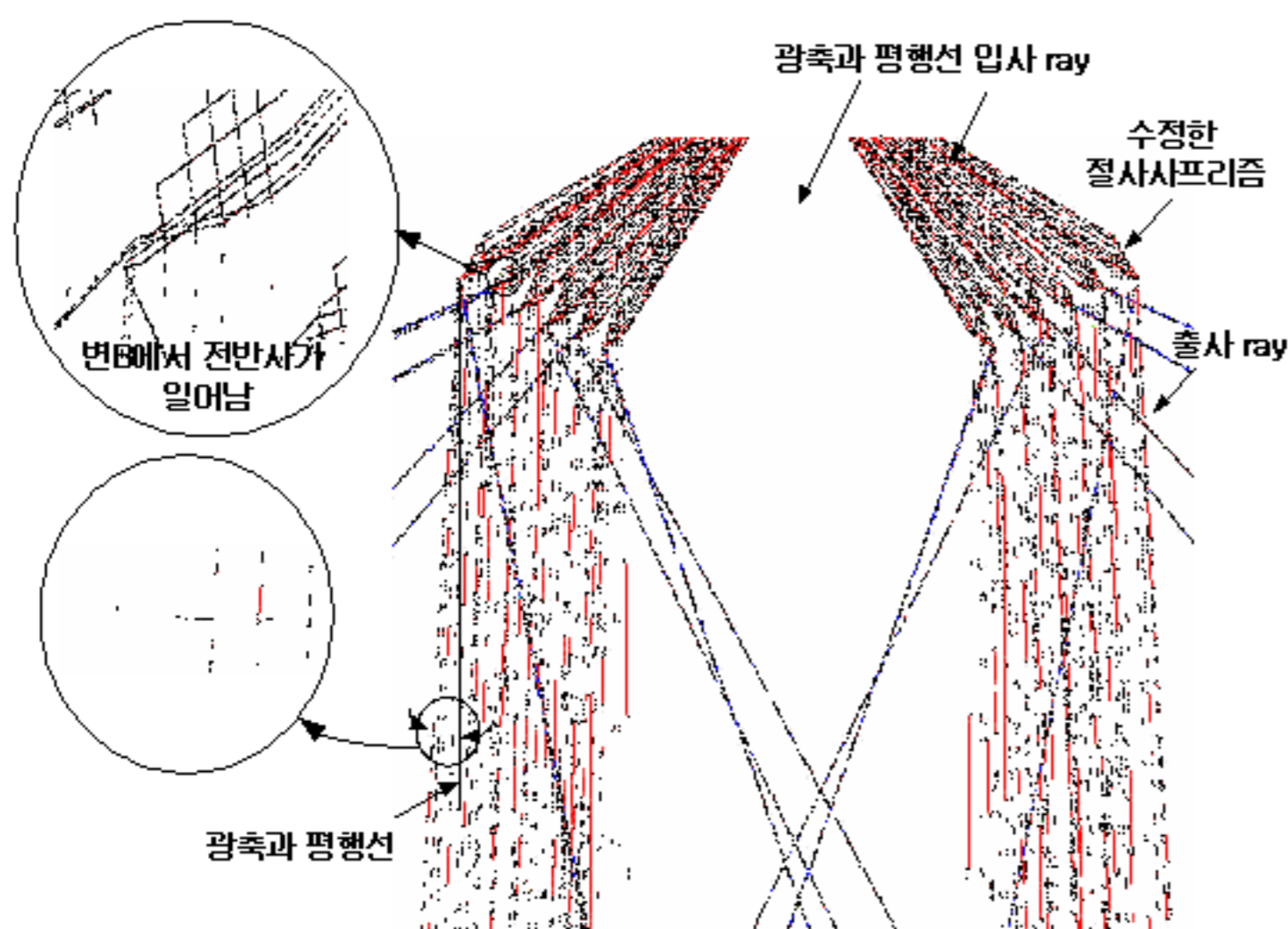


그림 15 Photopia 시뮬레이션 결과-수정된 절사 프리즘부

절사프리즘을 재 설계 후 Photopia 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다(그림 15). 광원은 점광원으로 하였다.

각각의 절사프리즘을 통과한 출사 ray들은 positive 성분을 가지고 퍼져나가고 있는 것을 확인했다.

그러나 변A하단부근에 입사하는 ray들은 손실로서 넓게 퍼져 나간다.

3.2. 광학부 설계 평가

3.2.1. 광학부 평가 방법

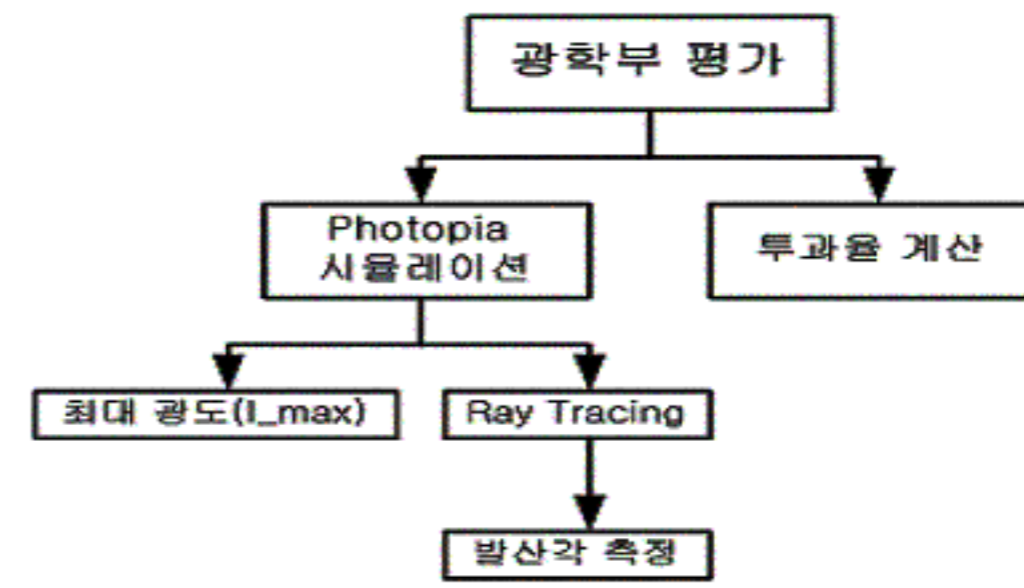


그림 16 광학부 평가 방법

지금까지 설계한 광학부 대한 평가를 위해서 그림 16과 같이 2가지 방법에 의한 계산을 수행하였다.

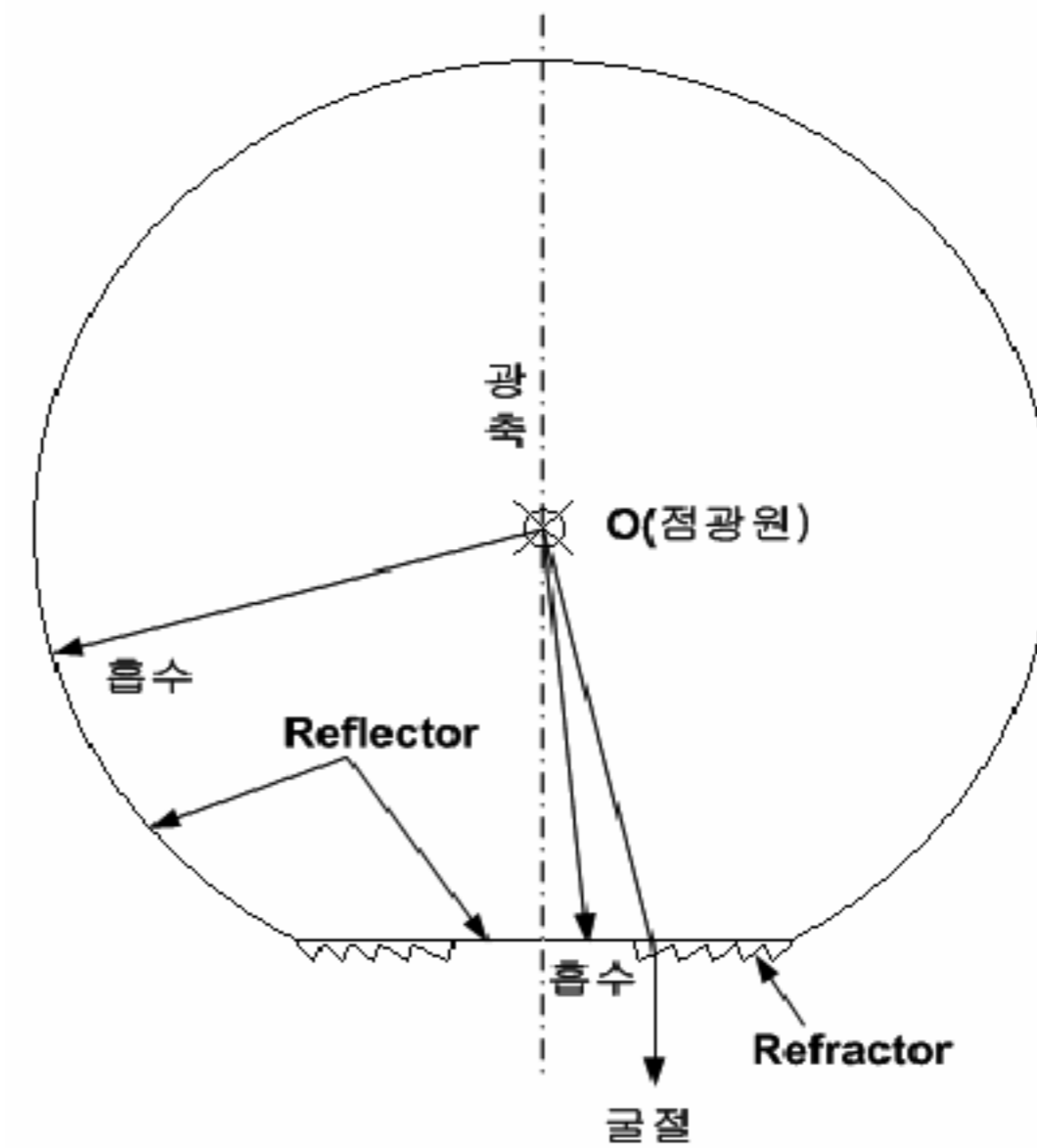


그림 17 Photopia 시뮬레이션 방법

첫 번째 방법은 배광예측프로그램인 Photopia를 이용하여 최대광도, ray를 추적한 결과, 그리고 ray를 추적한 결과에서 평행광과 ray가 이루는 발산각을 보는 것이다.

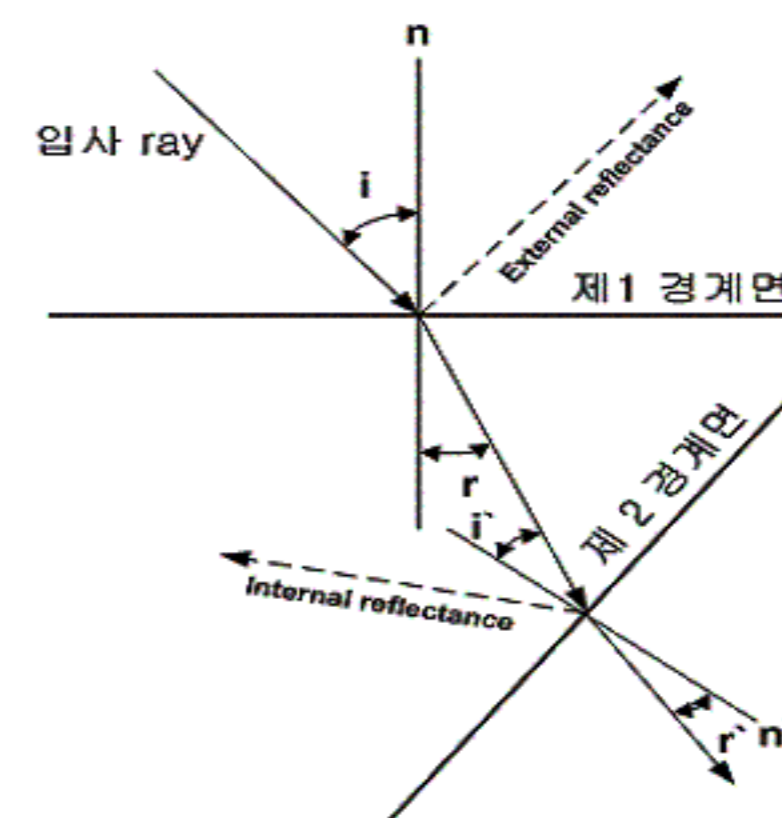


그림 18 경계면에서의 반사

Photopia 시뮬레이션을 하기 위해 그림 17과 같이 광원은 점광원으로 하고 점광원에서 방사되는 ray들은 Refractor를 통과하고, Reflector에서는 모두 흡수되도록 하였다.

두 번째는 광학부의 각각의 경계면에 대해서 반사율을 계산하고 그 결과 광학부를 통과하는 투과율을 계산하는 것이다.

경계면에서의 반사율은 그림 18에서와 같이 각각의 경계면에서의 입사각(i)와 굴절각(r)에 대해서 식 (6)으로 계산 된다.[2]

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \tan^2(i-r) / \tan^2(i+r) \\ \rho_1 &= \sin^2(i-r) / \sin^2(i+r) \\ \rho &= \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

3.2.2. 광학부 평가

①Photopia 시뮬레이션

Ray를 추적한 결과는 그림 8(중심렌즈부), 그림 12(굴절링부), 그리고 그림 15(절사프리즘부)에서 보였다.

중심렌즈부와 굴절링부의 경우 발산각은 수직발산각, 수평발산각이 약 1.2°로 목적에 적합하고 광축을 벗어나는 ray들 없이 광축과 평행하게 퍼져 나간다. 하지만, 절사프리즘부는 2등변 프리즘의 한 변만을 개선하는 방법으로 설계가 이루어졌기 때문에 수직발산각이 다소 크다. 그리고 하단부에 입사한 ray들이 손실로서 나타나고 있다.

표 1 수정전과 수정후의 광도 비교

구분	수정전[cd]	수정후[cd]
중심렌즈부	1,569	1,661
굴절링부	7,165.1	7,655.87
절사프리즘부	7,485.74	13,938.5
전체 광학부의 합	16,198	22,915.6

표 2 유효 ray에 대한 투과율 비교

구분	수정전[T]	수정후[T]
중심렌즈부	91.469	91.475
굴절링부	91.034	90.96
절사프리즘부	76.12	76.21

표1은 광학부에 대해 수정전과 수정후의 최대광도 (I_{max})를 비교한 결과를 보여주고 있다.

수정후의 광학부는 수정전의 광학부보다 약 1.5배 높은 광도를 얻었다.

②투과율

광학부의 수정전과 수정후의 투과율은 큰 차이가 없었다(표 2).

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, 입사각과 굴절각을 무시할 수 없는 상황에서의 설계가 이루어져야 하고 굴절링부에서는 좀더 정확한 설계법으로 설계가 되어야 하겠지만, 어떤 제작 환경에서 그 환경에 맞는 최적의 설계가 이루어져야 한다.

마지막으로 절사프리즘부는 이등변 프리즘으로 이루어져 있기 때문에, 모든 프리즘의 변을 수정하기는 곤란하다. 따라서 절사프리즘부에서 문제가 되었던 큰 출사빔 기운각과 불규칙하게 퍼져나간 ray들을 수정하는 방법으로 설계가 이루어졌다.

지금까지 기존의 광학부에 대해 개선하는 방향으로 광학부 설계가 이루어 졌다.

설계 및 시뮬레이션에서 알 수 있듯이 중심렌즈와 굴절링부의 문제는 입사하는 ray의 point에 따라 출사빔 기운각이 일정치 않다는 것과, 정확한 제어가 되지 않는다는 것이다.

이는 중심렌즈와 굴절링부 모두 경계면이 평면과 구면으로 이루어져 있기 때문이다. 정확한 제어를 위해서는 경계면이 비구면 형태의 조합으로 이루어져야 하지만, 제작비, 제작법등의 제작상의 문제, 계산의 복잡성, 그리고 등화표지는 정밀광학의 imaging이 아닌 non-imaging으로 정밀한 제어가 문제 되지 않기 때문에 이루어지지 않고 있다. 그래서 좀더 정확한 ray의 제어를 하기 위해서는 ray가 최대한 평행하게 될 수 있도록, 그 설계가 좀더 세분화되어 설계가 이루어져야 하겠다.

그리고 절사프리즘의 경우 좀더 작은 발산각을 달성하고 손실 ray들이 발생하지 않게 설계가 이루어져야 하겠고 프리즘 배열을 수정하는 것 또한 고려해야 할 것이다.

참고문헌

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