

초고속 무선 광통신을 위한 송신광학계의 설계

권영훈[†] · 임천석

한남대학교 물리학과

Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

(2003년 10월 20일 받음, 2004년 2월 4일 수정본 받음)

유선 통신의 포화지역이나 도심에서 벗어난 인구밀도가 낮은 지역 등에서 고속 광통신을 위해 최근 무선 광통신이 새롭게 기대되고 있다. 본 논문에서는 이러한 무선 광통신을 위한 송신 광학계를 설계하였는데, 광원으로는 수평(7°) 및 수직(18°) 발산각이 다른 비대칭 타원형 빔을 발산하는 레이저 다이오드(중심 파장 830 nm)를 사용하였다. 제안되는 송신 광학계는 장거리 전송(500 m~1500 m)이 가능하고, 장거리 전송 후 수신단에서 빔 직경(3 m) 및 에너지 분포가 대칭형이 되도록 설계되었다. 이를 위해 비결상 광학계인 송신 광학계의 평가법으로 에너지 전달 효율과 복사 조도 분포를 계산하였다.

주제어 : optical communication, optical transmitter system, wireless, optical design.

I. 서 론

유선 광통신의 특징으로는 기존의 통신방식보다 대용량의 데이터를 고속으로 보낼 수 있다는 점이 가장 큰 장점이며, 손실면에서도 동케이블을 사용하는 전기통신의 무중계 전송 거리가 수백 m 내지 수 km 에 머물고 있는데 반해 광통신은 수십, 수백 km 의 차원이 다른 장거리 무중계 전송이 가능하다는 것이다. 또한 가설용 케이블이 전기통신의 동케이블에 비해 매우 가벼운 광섬유이므로 경량화를 실현할 수도 있다. 이와 같은 장점들로 인해 기존의 전기통신을 광통신이 신속히 대체해 나가고 있으며 현재 범용적으로 일상생활에서 사용되고 있는 초고속 인터넷 서비스도 그 혜택으로 여겨진다.

그러나 광섬유를 이용한 광통신도 폭증하는 통신수요를 따라잡지 못해 회선의 포화상태가 생길 수 있고, 이에 따라 신규매설로 인해 기매설된 주변 인프라와의 간섭이 문제가 된다. (상· 하수도, 전기, 가스 등) 또한 매설과정에서 수반되는 인력 및 시간 소요, 교통방해의 유발, 그리고 안전사고와 같은 기타 상황들로 인해 사회적 고비용을 필요로 할 수 밖에 없다. 이러한 회선(특히 인구밀집 지역)의 포화구간에서 유선 광통신의 단점을 상호보완하기 위한 하나의 해결방법으로, 매설 과정이 필요 없는 무선 광통신의 필요성이 기대되고 있다.

무선 광통신은 대기를 광전송로로 이용하여 송신부에서 광을 보내면 대기를 거쳐 수신부에서 신호를 받는 매우 간단한 방식이다. 이로 인해 대기 굴절이나 폭우, 폭설, 태풍과 같은 대기상태의 변화에 따라 통신의 품질이 저하될 수 있고, 광경로가 새나 기타 동적인 요인으로 인한 일시적인 통신장애가 생길 수도 있다. 이와 같은 단점에도 불구하고, 무선 광통신에는 기존 유선통신망의 일부를 일시적인 통신장애에 대

비하여 사용하기 때문에 적은 비용으로 비교적 안정적인 초고속 통신망의 구축(유선광통신의 보조역할)이 가능하다.

본 논문에서는 이와 같이 유선 광통신이 주로 사용되는 회선평화 지역에 유용하게 적용될 수 있는 초고속 무선 광통신용 송신 광학계를 설계하고자 한다.

II. 기초 설계

2.1. 설계사양 및 광로설계

시스템의 설계에 필요한 광원의 사양 및 요구조건은 표 1 과 같다.

표 1의 설계요구조건을 만족시키기 위해서, 먼저 전체적인 시스템을 원리적으로 구성해야 하는데, 광원으로써 비대칭 발산특성(수평 7°, 수직 18°)을 갖는 레이저 다이오드를 사용하므로 구면렌즈만으로는 송신계를 구성해서는 출사되는 빔의 직경이 50 mm인 원형이 될 수 없다. 즉, 송신 렌즈계의 구성은 토릭렌즈 또는 실린더 렌즈를 필요로 하는데 토릭렌즈는 제작상의 난점과 제작비용의 측면에서 상대적으로 불리하므로, 실린더 렌즈를 렌즈계 내의 구성요소로써 활용한다. 송신렌즈계의 배치로써는 레이저 다이오드를 구면렌즈의 초점에 위치시키는 방식을 쓰는데, 발산각이 큰 자오면(수직 18°)에서는 구면렌즈만으로 원하는 출사광의 직경을 얻고, 발산각이 작은 구결면(수평 7°)에서는 실린더 렌즈로 구성된 빔확대기(Beam expander, 역 망원경계)를 이용하여 최종적으로 원하는 출사광의 직경이 50 mm가 되도록 한다. 단, 본 논문에서 표현하고 있는 발산각은 LD에서 출사되는 각을 바로 측정할 것으로, 일반적으로 무선 광통신 시스템에서 표현되는 발산각(beam divergence, 보통 0.1°)와는 다른 개념임을 밝혀둔다. 한편, 수신단에서 요구되는 3 m의 빔직경은 광원과 송신렌즈계의 거리를 조절하여 적정 발산각(최대값 기준:

[†]E-mail: kwonyh26@micron.lg.co.kr

표 1. 시스템의 요구조건 및 설계사양

요 구 조 건		설 계 사 양	비 고
광 원		레이저 다이오드(Laser Diode)	출력: 150 mW at 50 °C 작동온도: -10 °C~+50 °C
		출력빔의 세기분포:가우스 분포	
		빔발산각: 7°(θ_{\parallel}), 18°(θ_{\perp})	단, $1/e^2$ 세기 기준 θ_{\perp} : 자오면(yz 평면) 방향 θ_{\parallel} : 구결면(xz 평면) 방향
		파장: 830 nm	최대 출력 파장(λ_p)
렌즈의 재질		BK7	직경 50 mm 빔경(송신단) 직경 3 m 빔경(수신단)
전송거리		500 m~1500 m (1.5 km)	
송광부의 전장길이		350 mm 이하	전장길이(OAL): 광원에서 렌즈끝면의 정점까지의 거리
수신단에서의 요구 복사조도(irradiance) 분포		중심 대비 주변부의 상대 복사조도: 완전히 감소하는 봉우리형 (주변부/중심부 복사조도 \geq 75%)	복사조도 \equiv Irradiance (W/cm ² 또는 W/m ²)
참조사항	수신부의 검출기	포토 다이오드(Photo Diode)	PD의 센서부 직경: 0.5 ~ 1.0 mm
	수신렌즈의 직경	50 mm~100 mm	

약 10분, 앞으로 전개될 3.2절에 자세히 설명)을 갖는 빔을 만족시킴에 의해 성취될 수 있다.

이상과 같이 논의된 전체적인 광학구성을 가지고 광학 요소들 간의 거리, 각 구성 렌즈들의 크기 및 매수, 그리고 굴절능(초점거리), 설계 사양상의 요구된 전장길이를 결정해야 하는데, 이러한 설계단계를 광로설계라고 하고, 설계의 단계 중 가장 기초적이고 근간이 되는 중요한 과정이다. 그리고, 본 광학계는 비대칭 구성(자오면과 구결면의 면배치가 다름)을 가지므로 두 평면에 대해 독립 설계를 진행해야 한다. 먼저 자오면 방향(yz 평면, 발산각 18°)에 대한 설계 논의를 진행시킨다.

그림 1에서 레이저 다이오드와 구면렌즈와의 거리는 l_1 으로 표현되어 있고, 구면렌즈에서 출사되는 직경 50 mm의 빔은 실린더 렌즈들을 굴절없이 통과한다. 여기서 각 렌즈 간의 거리는 10 및 120 mm로 주어져 있는데, 그 결정근거를 설명하고자 한다. 요구조건을 만족시키기 위한 l_1 값은 $l_1 = (50/2) / \tan(18^\circ/2) = 157.8 \text{ mm}$ 가 되고, 또 이 값은 구면렌즈의 초점거리이므로 굴절능 $K_1 = 1/l = 1/f_1' = 0.00634$ 가 된다.

설계 사양상에 제한된 전장길이는 350 mm인데, l_1 값이 약 160 mm, 각 렌즈의 두께를 10 mm(3매: 총 30 mm), 구면렌즈와 첫 번째 실린더 렌즈사이의 거리도 조립상의 기구적 보편성을 고려하여 10 mm로 두면(160+30+10=200 mm), 실린더 렌즈사이 거리는 150 mm까지 가능하다. 설계 진행 과정 또는 조립시 기구물에서 추가적인 공간을 필요로 할 수 있기 때문에 전체 전장길이의 약 10%를 여유분으로 잡아서 본 설계에서는 120 mm를 실린더 렌즈간의 거리로 정한다.

다음으로, 구결면 방향(xz 평면, 발산각 7°)에 대해서 설계 논의를 진행시킨다(그림 2 참조). 구결면 방향은 발산각이 7°이므로 구면렌즈를 통과한 후 시준된 빔직경은 19.3 mm ($= \tan(7^\circ/2) \times 2 \times l_1$)가 되는데, 직경 50 mm의 빔을 얻기 위해서는 역 망원경계를 통한 확대가 필요하므로 배율 $M = (f_2'/f_3' = K_3/K_2)$ 은 0.386배(19.3/50)가 되어야 한다. 그리고 역 망원경계는 무초점계이므로 계의 총굴절능 $K = K_2 + K_3 - 120K_2K_3 = 0$ 이 된다. 결과적으로, 미지수가 2개(K_2, K_3), 조건식이 2개(배율 및 총굴절능식)이므로, 이를 연립해서 풀면 각 렌즈들의 굴절능(또는 초점거리)을 구할 수 있다.(식 (1),

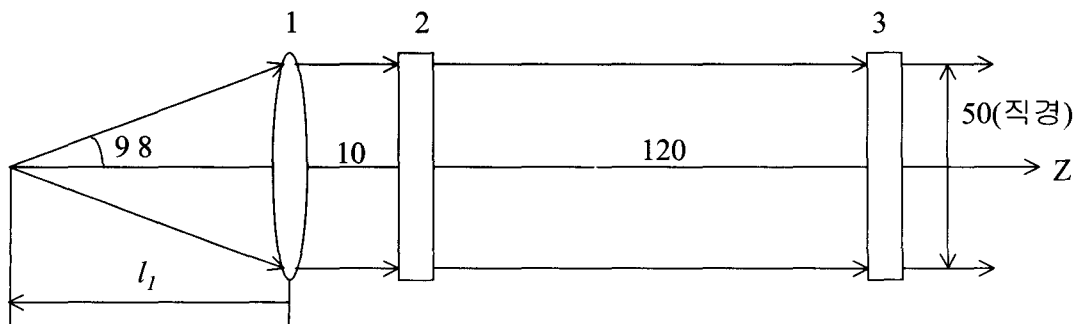


그림 1. 자오면(YZ 평면)의 광로설계도(단위: mm)

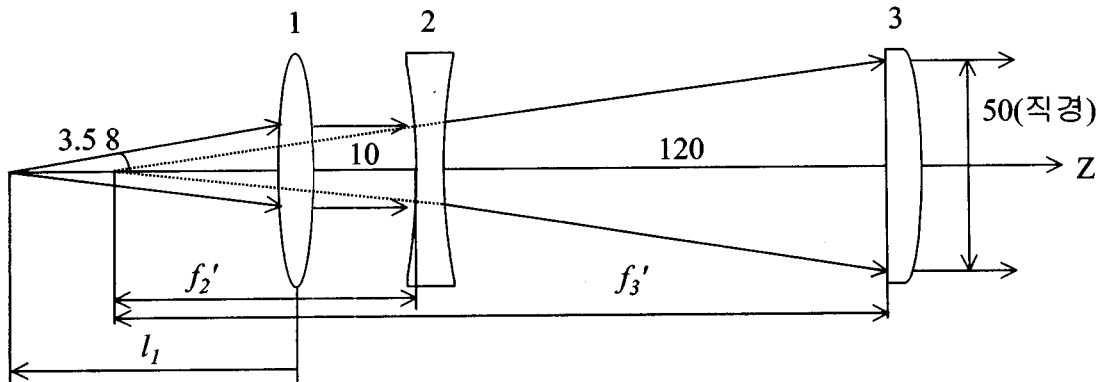


그림 2. 구결면의 광로설계도

(2)^[1,2]

$$f_2' = \frac{120M}{M-1} = -75.44 \text{ mm} \quad (1)$$

$$f_3' = -\frac{1}{M}f_2' = 195.44 \text{ mm} \quad (2)$$

$$K_2 = -0.01326$$

$$K_3 = 0.00512$$

역 망원경계에 대해 부연설명을 하면, 처음에 (-)렌즈로 광축과 평행하게 입사하는 빔을 발산시키고 이렇게 발산된 빔을 다음의 (+)렌즈로 원하는 직경의 평행한 출사빔으로 만드는 광학계를 의미하며, 이 때 (-)렌즈에서 발산된 빔은 마치 (+)렌즈의 초점에서 출발하는 것처럼 광로를 가지는 구조 또는 (-)렌즈와 (+)렌즈의 초점이 일치하는 구조를 하고 있다.

2.2. 송신 광학계의 기초형상설계

본 논문에서는 최적설계를 위한 초기 설계제원(송신광학계의 기초형상)을 구하기 위해 자이델 3차 수차론을 활용하고자 하는데, 통상 해석적으로 구해진 수차식들은 매우 복잡한 고차 비선형 다항식으로 표현되므로 수치적으로 다루기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 본 기초설계는 각 모듈 별 또는 각 굴절능 별((+)구면렌즈, (-)실린더 렌즈, (+)실린더 렌즈) 렌즈 수가 단매로 구성되어 있고, 광원도 점광원으로 근사할 수 있으므로, 고려대상 수차는 구면수차밖에 없다. 한편 자이델 3차 수차는 정확한 곡률값보다는 각 면의 형상을

결정하는 데 더 큰 의미가 있어서, 얇은 렌즈 근사가 가능하므로 본 설계에 한정해서 본다면 비교적 간단한 해석적인 취급을 통해서 쉽게 기초설계 할 수 있다.

각 모듈 별 설계개념은 동일한데, (+)구면렌즈와 (+)실린더 렌즈의 경우는 평행광이 입사하여 초점을 맺는 구조이고(실제로는 역구조: 초점에서 나온 빛이 평행광이 되는 구조), (-)실린더 렌즈의 경우는 평행광이 입사하여 허초점을 맺는 구조이다. 여기서 역구조로 설계된 (+)렌즈들은 수치들을 뒤집어 놓으면 목적하는 설계가 된다.

각 모듈 별 설계변수는 곡률변수 2개 뿐으로써 최대 만족시킬 수 있는 조건식의 개수도 2개 뿐인데, 본 논문에서는 구면수차와 각 모듈 별 굴절능이 된다. 다음 식 (3)에 유한물점을 갖는 단일렌즈의 구면수차 계수를 유도해 놓았는데 $a=1/l=0$ 일 때가 무한물점인 경우가 된다.^[3]

$$S_1/h^4 = c_1^2 K \left(\frac{n+2}{n} \right) - c_1 K \left[\left(\frac{-2n+1}{n-1} \right) K + \left\{ \frac{4(n+1)}{n} \right\} a \right] + \left[\left(\frac{-n}{1-n} \right)^2 K^2 - \left(\frac{3n+1}{1-n} \right) K a + \left(\frac{3n+2}{n} \right) a^2 \right] K \quad (3)$$

여기서, $a = \frac{1}{l}$, $K = \frac{1}{EFL}$ 이며, 무한물점의 경우 $a=0$ 이다.(그림 3 참조)

식 (3)은 곡률 c_1 에 대한 2차 방정식이므로 근의 공식을 사용하여 쉽게 해를 구할 수 있는데, 렌즈의 굴절능과 굴절률,

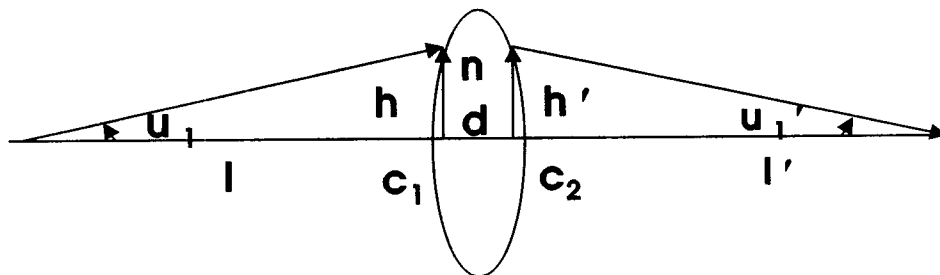


그림 3. 단일렌즈의 형상설계(여기서 n은 렌즈의 굴절률, d는 렌즈의 두께, c1,c2는 각 면의 곡률, h와 h'은 각각 광선이 렌즈에 입사하는 높이와 렌즈 통과후의 높이, l과 l'은 각각 물체거리와 상거리, 그리고 u와 u'은 각각 입사각과 출사각을 나타낸다. 여기서 $d \approx 0$ 인 얇은 렌즈로 가정)^[4]

물체거리가 결정되면 구면수차 계수가 0이 되는 곡률값을 쉽게 구할 수 있다. 그러나 구면수차 계수가 0이 되는 곡률값은 허근으로 나오기 때문에 실제로는 존재하지 않으므로 (그림 4 참조), 그림 4에서 보듯이 구면수차의 최소값은 그래프의 정점이 되고 수학적으로는 식 (3)의 미분이 0이 되는 곡률값이 된다.^[5]

따라서 구면수차가 최소가 되는 곡률은 식 (3)을 미분하여 얻은 식 (4)로 결정된다.

$$c_1 = K \left[\left(\frac{2n+1}{n-1} \right) \left(\frac{n}{2n+4} \right) \right] + \left\{ \frac{2(n+1)}{(n+2)} \right\} \alpha \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{K}{1-n} + c_1 \quad (5)$$

(여기서, $\alpha = \frac{1}{l}$, $K = \frac{1}{EFL}$ 이며, 무한물점의 경우 $\alpha = 0$ 이다.)

식 (4)와 (5)로부터 각 모듈 별 곡률값을 구하여 표 2에 정리하여 놓았다(굴절률은 BK7의 굴절률 $1.510 < \lambda = 830 \text{ nm} >$ 을 사용).

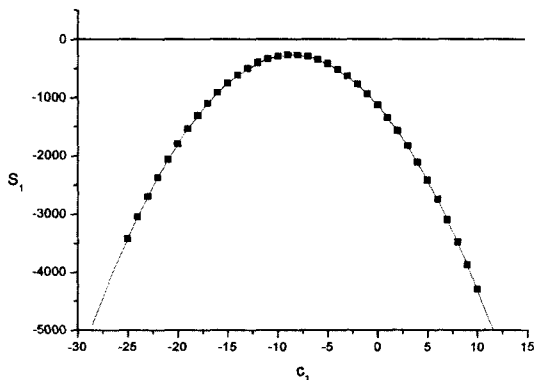
III. 최적 설계

3.1. 완전렌즈를 사용한 최적설계

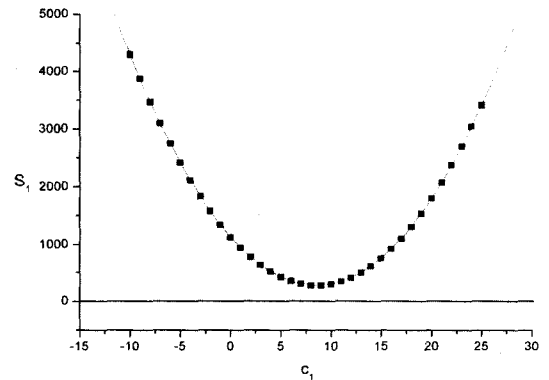
형상설계에서 구한 설계제원을 최적설계의 초기입력치로 사용하여 최적설계를 실시한다. 본 광학계와 같이 발산각이 미소한 경우(최대값 기준: 약 10분)를 설계하는 통상적인 방법은 평행광이 출사되는 비결상광학계로 먼저 설계하고, 다

음에 광원을 미소하게 이동시켜 원하는 발산각을 얻는다. 그러므로, 본 연구에서도 우선 평행광이 출사되는 광학계로 최적설계를 실시한 후, 발산조건에 맞도록 광원의 위치를 미세 조절한다.

한편, 비결상광학계의 설계방법으로는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 입사광과 출사광의 위치를 반대로 놓고 수렴광학계로 설계한 후, 광학계의 설계값을 반전시키는 역설계법이 있고, 다른 방법으로는 광학계의 마지막 면을 통과하는 출사광이 광축과 평행하게 되도록 한 후(비결상 광학계), 그 다음 면에 완전(perfect)렌즈를 사용하여 수렴광학계화하여 설계하는 방법이 있다. 그러나 역설계법은 반전 전후가 수차적인 관점에서 보면 정확히 같지 않고, 또 반전에서 오는 수차 조작의 오류가능성, 번거로움 등으로 인해 본 설계에서는 완전렌즈를 사용하여 최적설계 및 성능평가를 실시한다. 최적설계목표는 자오면(yz 면)과 구결면(xz 면)이 모두 직경 50 mm인 평행광으로 출사되도록 하는 것이며, 수차적으로는, 완전렌즈에 의한 스폿의 rms 직경(주광선을 기준으로 하는 xy 방향 광선오차의 표준편차 값)이 최소가 되도록 하였다. 그리고 이 과정에서 몇 가지 제한조건을 설정하였는데, 우선 요구사양에 맞도록 광학계의 전장길이를 제한하고, 렌즈의 두께는 렌즈의 가공성을 고려하여 적절한 가장자리 두께(약 3 mm 이상)를 만족시키면서 5 mm 또는 7 mm로 설계하였다(전장길이 축소효과). 최적설계로 얻은 결과는 자오면(yz 면, 발산각 18°) 및 구결면(xz 면, 발산각 7°) 방향의 렌즈그림인 그림 5와 6, 그리고 표 3(최적 설계제원)



(a) K=5 인 경우



(b) K=-5인 경우

그림 4. c_1 에 따른 구면수차의 변화(재질의 굴절률 1.5, 무한 물점일 때).

표 2. 형상설계 결과

요소	렌즈 종류	초점거리(mm)	굴절능	곡률반경(R1, mm)	곡률반경(R2, mm)
시준 렌즈	구면 렌즈	157.8	0.00634	596.48	-93.04
구면렌즈와 (-)실린더 렌즈간의 거리(mm): 10					
빔 확대기 (xz 면)	(-)실린더 렌즈	-75.4	-0.01326	-44.49	284.67
	(-)실린더 렌즈와 (+)실린더 렌즈간의 거리(mm): 120				
	(+)실린더 렌즈	195.4	0.00512	115.22	-737.26

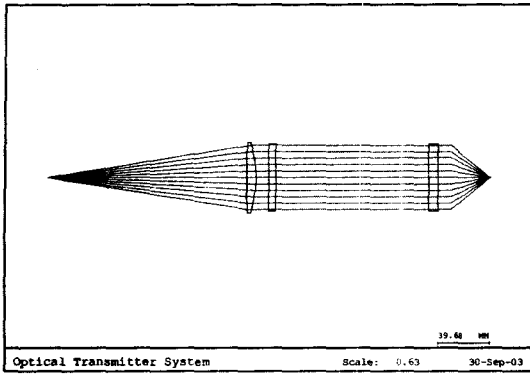


그림 5. 최적 설계된 자오면(yz 면) 방향 송신광학계의 그림-발산 각 18°.

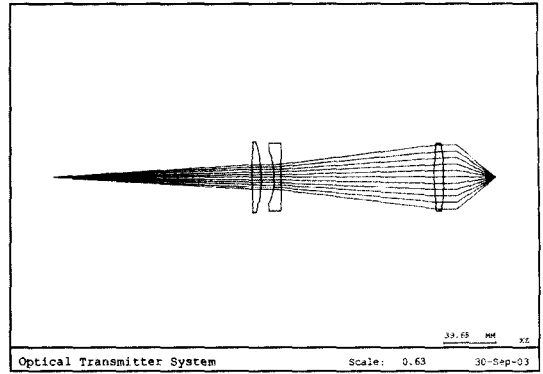


그림 6. 최적 설계된 구결면(xz 면) 방향 송신광학계의 그림-발산 각 7°.

표 3. 최적설계제원(단위: mm)

면 번호	곡률반경(xz)	곡률반경(yz)	두께	재질	면 형태
1	물체면(평면)		152.07		
2(조리개)	554.6168		7	BK7	구면
3	-93.8495				
			10		
4	-49.713	평면	5	BK7	실린더면
5	282.304	평면			
			115		
6	400.729	평면	7	BK7	실린더면
7	-144.769	평면			
			10		
8	완전 렌즈(초점거리 30)		30.067		완전 렌즈
9	상면(평면)				

과 같다.

표 2와 표 3의 최적설계 전후 수치를 비교해 보면, 먼저 시준 렌즈인 구면렌즈와 빔 확대기의 첫 번째 실린더 렌즈의 곡률반경은 기초설계 수치와 큰 차이를 보이지 않고 있는데 반해 빔 확대기의 두 번째 실린더 렌즈의 곡률반경은 최적화 후 변화량이 가장 두드러지게 나타났다(표 4). 이는 기초설계 시 광학계를 독립된 단일렌즈로 분리하여 개별 설계하였기 때문에 입사광에 수차가 없다는 전제조건과 최적화 조건의 차이, 3차 수차 외의 고차 수차 무시, 그리고 렌즈의 두께

조정 때문인 것으로 판단된다. 그러나 곡률반경의 변화는 다소 있었지만, 초기형상은 최적화 전후에도 유지되었기 때문에, 기초설계의 목적은 달성한 것으로 생각된다.

최적화 후의 결상특성은 그림 7 (b)와 같이 스폿 다이어그램을 사용하여 평가하였는데, 여기서 그림 7 (a)와 같이 직경 50 mm로 시준된 빔을 결상시키기 위해 완전렌즈를 사용하였다. 스폿 다이어그램으로부터 자오면과 구결면의 수차값이 상이함을 알 수 있는데(스폿의 직경이 타원형), 이는 자오면의 경우에는 구면렌즈 두개의 면만으로 수차를 보정하고, 구

표 4. 최적화 전후의 곡률반경 비교

렌즈 종류	곡률반경	최적화 전(mm)	최적화 후(mm)	변화량(mm)	변화율(%)
구면 렌즈	R1	596.48	554.6168	41.8362	7.01
	R2	-93.04	-93.8495	0.8095	0.01
첫 번째 실린더 렌즈	R1(xz 면)	-44.49	-49.713	5.223	11.7
	R2(xz 면)	284.67	282.304	2.366	0.83
두 번째 실린더 렌즈	R1(xz 면)	115.22	400.729	285.509	247.8
	R2(xz 면)	-737.26	-144.769	592.491	80.36

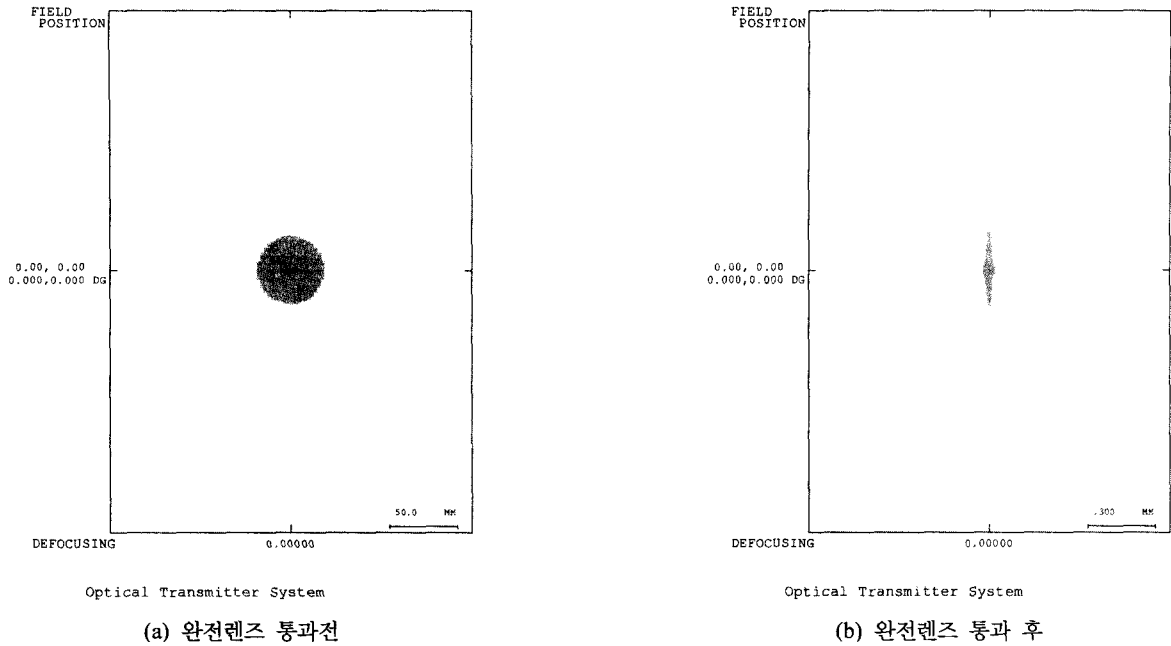


그림 7. 완전렌즈에 의한 상면에서의 스폿 다이어그램.

결면의 경우에는 실린더 렌즈를 포함하여 총 여섯 개의 면으로 수차를 보정하므로 자오면에 비해 수차값이 상대적으로 작을 수밖에 없다. 이는 전송광학계로부터 출사된 빔이 장거리(500 m ~ 1.5 km) 진행 후, 자오면과 구결면의 에너지 분포가 두드러진 차이를 보일 수 있음을 의미한다. 그러므로 구결면 방향과 자오면 방향의 수차가 크기가 같도록 최적화를 실시할 필요가 있음을 알 수 있다.

이를 달성하기 위한 방법으로 최적화동안에 축상에서 출발한 광선을 자오면 및 구결면 방향으로 각각 5등분하여(입사

동 기준) 광선을 추적하였고, 이 광선들의 각 방향별 출사각이 거의 같은 값을 가지도록 여러 번 반복적으로 최적화과정을 실시하였다. 그림 8과 표 5에 스폿 다이어그램 및 설계제원을 제시한다.

3.2. 전송거리에 따른 발산각 조절 및 평가

본 절에서는 송신 렌즈계를 출사할 때 50 mm인 빔 직경이 전송거리(500 m ~ 1,500 m)를 통과하면서, 수신단에서 3 m의 빔 직경이 되도록 적절한 광원의 위치(적정 발산각 확보)를 결정하고자 한다. 아래에 각 방향별(자오면 및 구결면)로 관련 계산과정을 설명한다.

3.2.1 자오면 방향의 광원 위치

자오면방향의 경우에는 그림 9에서 보듯이 송신 렌즈계 중 굴절능을 가지는 요소는 구면 렌즈밖에 없으므로 구결면에 비해 계산은 한층 간단하다. 즉, 원하는 발산각을 얻기 위한 광원의 위치는 구면렌즈에 입사하는 광선의 입사각이 거의 같다는 가정(그림 9에서 $h(t) \approx h'(t)$)하에 다음 식(6)과 같이 간단히 표현된다.

$$\bar{l}_1(t) \approx \frac{L}{(H/h(t)) - 1 + K_1 L} \quad (6)$$

먼저, 전송거리(L)가 500 m인 경우 식 (6)을 이용하여 광원의 위치를 구한다(나머지 전송거리에 대해서도 동일). 즉, $h = 25 \text{ mm}$, $H = 1.5 \text{ m}$, $K_1 = 0.00634$ 를 (7)식에 대입하여 $\bar{l}_1 = 154.85 \text{ mm}$ 를 얻는다.

3.2.2 구결면 방향의 실린더 렌즈 사이 거리

다음으로, 광원의 위치와 구면렌즈는 자오면 방향과 구결

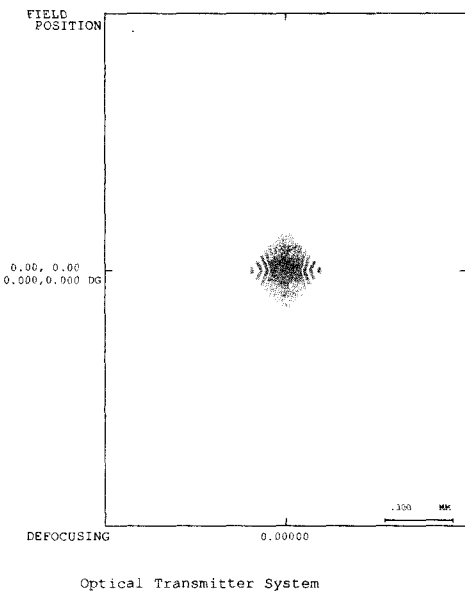


그림 8. 수차값 조절 후의 스폿 다이어그램

표 5. 최적설계제원(단위: mm)

면 번호	곡률반경(xz)	곡률반경(yz)	두께	재질	면 형태
1	물체면(평면)		152.07		
2(조리개)	554.6168		7	BK7	구면
3	-93.8495				
4	-49.785	평면	5	BK7	실린더면
5	277.734	평면			
6	223.206	평면	7	BK7	실린더면
7	-193.08	평면			
8	완전 렌즈(초점거리 30)		10		
9	상면(평면)		30.067		완전 렌즈

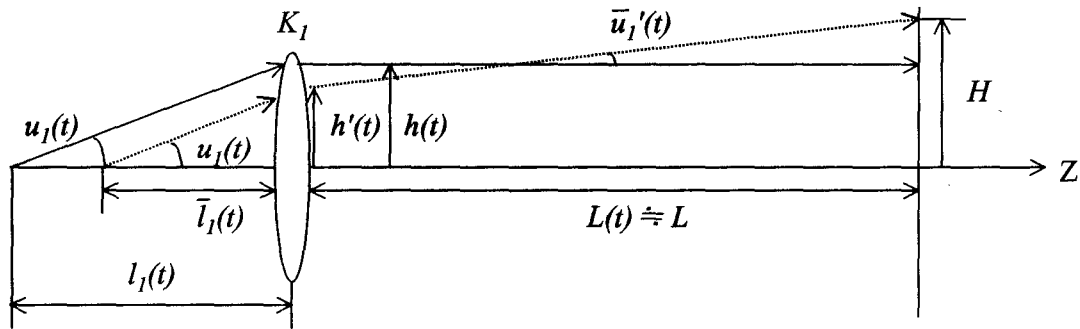


그림 9. 출사각의 변화에 따른 물체거리의 결정(자오면).

(여기서 그림상의 렌즈는 얇은 렌즈로 근사함. $\bar{l}_1(t)$ 는 평행광이 출사되는 물체거리, $l_1(t)$ 는 원하는 발산광이 출사되는 물체거리, L 은 전송거리, $L(t)$ 는 자오면 상에서의 전송거리, $h(t)$, $h'(t)$ 는 구면렌즈 상에서의 광선의 높이, H 는 전송 후 수신단에서의 광선높이이다. 그리고 $u_1(t)$ 는 레이저 다이오드의 수직 발산각($18^\circ/2$)이고, $u_1'(t)$ 는 $\bar{l}_1(t)$ 에 대응되는 출사각을 나타낸다.)

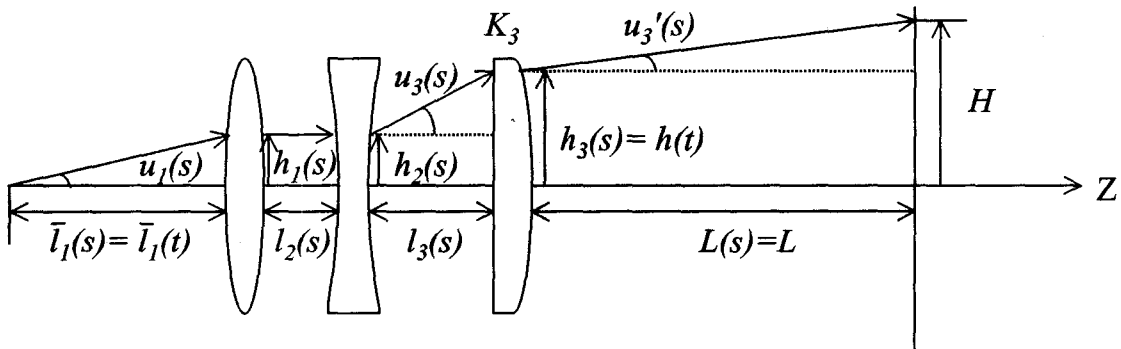


그림 10. 발산각에 따른 빔확대부의 조정. (여기서 발산각 조절은 $l_3(s)$ 로만 실시하므로 $l_2(s)$ 는 10 mm로 고정하고, $L(s) = L$ 이다.)

면 방향이 동일하므로 자오면 방향에서 결정된 광원의 위치 $\bar{l}_1(t)$ 는 구결면에서의 광원 위치 $\bar{l}_1(s)$ 가 된다. 다만 발산각의 차이로 인해 입사각이 다르기 때문에 구면렌즈를 통과한 후의 출사각이 자오면과 달라지고, 구결면의 마지막 실린더 렌즈 통과 후 최종출사각이 자오면의 구면렌즈 통과 후 최종출사각과 같게 하기 위해서는 실린더 렌즈 사이의 거리를 조

절함으로써 가능하다. 이 때의 거리 $l_3(s)$ 는 식 (7)로 구할 수 있다.

$$l_3(s) = \frac{L - L \frac{1}{2} u_1(s) \bar{l}_1(s) / h_3(s) \frac{3}{4}}{(H/h_3(s)) - 1 + K_3 L} \quad (7)$$

식 (7)로 부터 자오면의 발산각과 동일한 최종 발산각

($u_3'(s)$)을 얻기 위한 실린더 렌즈 사이의 거리 $l_3(s)$ 는 $L=500\text{ m}$, $h_3(s)=25\text{ mm}$, $H=1.5\text{ m}$, 광원인 레이저 다이오드의 수평 발산각 $u_1(s)=\tan 3.5^\circ=0.06116$, $\bar{l}_1(s)=\bar{l}_1(t)=154.85\text{ mm}$, $K_3=0.00512$ 를 대입하면 $l_3(s)=118.52\text{ mm}$ 를 얻을 수 있다.

나머지 전송거리에 대해서도 같은 방법으로 구할 수 있으며 그 결과는 표 6과 같다.

단, 표 6에서 제시한 거리들은 렌즈의 두께와 수차를 고려하지 않은 값들이고, 또 입사각의 미세한 차이도 무시하였기 때문에 실제 평가에서는 약간의 조정이 필요함을 알려 준다. 즉, 전송거리 500 m를 예로 들면 조절 후의 \bar{l}_1 는 147.27 mm이며 l_3 는 110.16 mm이므로, 변화량은 각각 약 5% 및 7%이다.

3.2.3 성능 평가

먼저, 전송거리 500 m에 대하여 앞서 계산한 값들을 적용시켜 스폿 다이어그램을 사용하여 성능을 평가하고자 한다. 그림 11에서 보듯이, 스폿 다이어그램은 정량적인 평가로써는 적합하지 않고, 단지 에너지 분포를 개략적으로 살펴볼

표 6. 수신단에서 3 m의 빔직경을 얻기 위한 렌즈 위치

전송거리	LD와 구면렌즈 사이 거리	실린더 렌즈사이 거리
500 m	154.85 mm	118.59 mm
750 m	155.80 mm	119.04 mm
1000 m	156.27 mm	119.27 mm
1250 m	156.56 mm	119.41 mm
1500 m	156.76 mm	119.49 mm

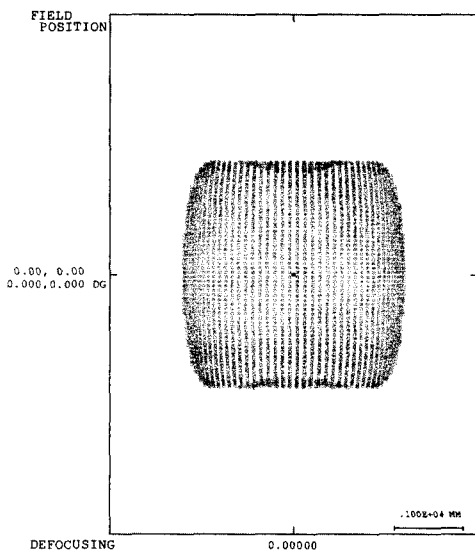
수 있는 정성적인 정보만 제공할 뿐이다.

그림 11의 (a)는 자오면 및 구결면의 수차 값이 최소가 되도록 설계한 경우이고(그림 7 (b)의 타원형 스폿), (b)는 자오면과 구결면의 수차 값이 같도록 조절된 경우이다. 두 경우 모두 직경 50 mm로 출사된 빔이 500 m 전방의 전송거리에서 설계 사양에서 요구하는 대로 3m×3 m의 빔 크기를 얻을 수 있음을 알 수 있고, 스폿의 중심부 대비 주변부에 에너지(스폿의 밀도)가 집중되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 요구되는 복사조도 분포의 정확한 계산과, (a) 및 (b)의 조도 분포의 명확한 차이를 확인하기 위해서는 다른 수단이 강구되어야 함을 알 수 있는데, 다음 절에서 논의하기로 한다.

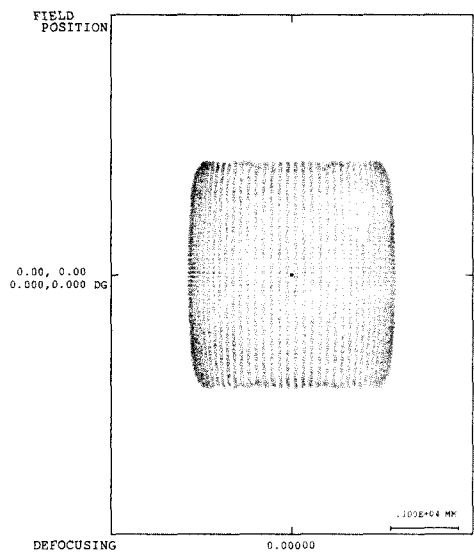
본 절에서는 500 m만 논의되었는데, 이는 1000 m, 1500 m 등에서도 유사한 결과를 보이므로 생략하였다. 앞으로의 논의는 500 m에 대해서만 진행될 것인데, 같은 이유에서 생략한다.

IV. 복사 조도 계산에 의한 비결상 광학계의 성능평가

앞 절에서 최적설계의 평가에 사용했던 스폿 다이어그램만으로는 정확한 복사조도를 계산할 수 없다는 문제가 있었다. 이에 본 절에서는 비결상 광학계의 성능평가에 code v의 조명분석 기능을 이용한다.^[6] 복사 조도 계산에 있어서 광원은 레이저 다이오드 발광점의 크기와 송신계의 초점거리에 대한 고려로부터 점광원으로 정의하고, 레이저 다이오드의 출력은 계산 결과가 상대조도로 나타남을 고려하여 단위출력, 즉 1 W로 정의한다. 그리고 레이저 다이오드로부터 출력되는 빔의 세기분포는 가우스형으로 정의하고, 자오면과 구결

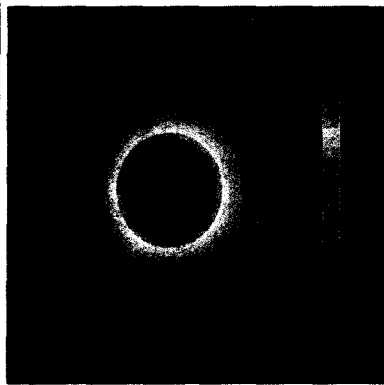


Optical Transmitter System
(a) 자오면 및 구결면의 수차값이 최소

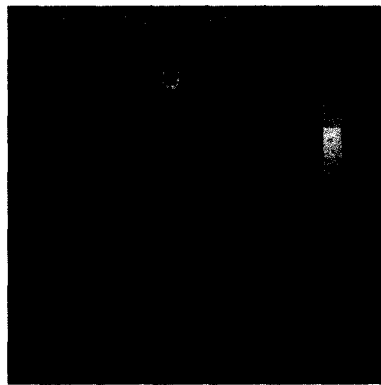


Optical Transmitter System
(b) 자오면과 구결면의 수차 값이 같은 경우

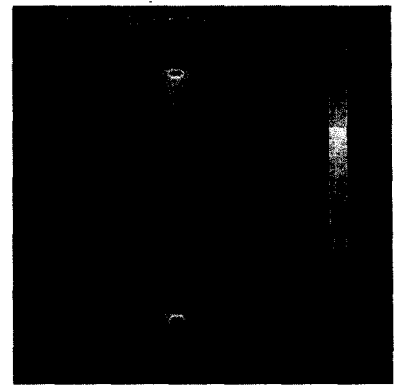
그림 11. 500 m 전송 후의 스폿 다이어그램.



(a)전송거리 10 mm(50 mm × 50 mm)



(b)전송거리 500 m(0.6 m × 0.6 m)



(c)전송거리 1,500 m(1.7 m × 1.7 m)

그림 12. 전송 거리에 따른 빔 프로파일(발산각 조절 전 단계), 단, 그림 (a), (b), (c)에서 ()안의 수치는 테두리 크기.

면의 발산각을 각각 18° 및 7°로 정의하였다. 이와 같은 조건 하에 앞 절에서 완전렌즈를 통해 최적 설계한 광학계를 다시 평가해 보았다.

그림 12와 같은 조도 분포의 계산을 통해 빔 직경, 상대조도의 분포, 전달 에너지 효율 등을 확인할 수 있는데, 이에 대한 논의는 발산각 조절 후의 결과분석부터 시작한다. 먼저 전송거리가 길어질수록 빔 직경의 크기가 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 출사되는 평행광이 실제로는 완벽한 평행이 아니기 때문에 발생하는 것이다. 즉, 초기 출사되는 빔이 아주 미세하게나마 수렴 또는 발산하므로 전송거리가 길어지면 길어질수록 빔 직경의 차이는 더 커지게 된다. 그리고 전송거리가 가까울 경우에는 거의 원형에 가까운 조도 분포를 나타내지만(그림 12 (a)), 전송거리가 길어지면 원형과는 전혀 다른 조도 분포를 보임을 알 수 있다. 이는 자오면과 구결면이 회전대칭형이 아니므로 수차 값이 상이하여, 전송거리가 길어질수록 그 차이는 더욱 커지기 때문이다. 결과적으로 그림 12 (b), (c)와 같이 자오면과 구결면의 빔직경이 서로 다른 형태로 나타나게 된다.

다음은 전송거리가 500 m인 경우에 대하여 발산각 조절을 실시한 경우의 조도 분포를 확인해 보았다. 기하적인 계산을 통해, 수신단에서의 직경이 3 m가 되도록 발산각을 조절한 결과는 그림 13과 같다.

그림 13으로부터 빔의 형태는 스폿 다이어그램과 거의 유사함을 알 수 있고, 크기는 테두리의 크기가 4 m × 4 m인 사각형 내에 들어 있음을 알 수 있는데, 수치적으로는 약 3.5 m(자오면) × 3 m(구결면) 정도이다. 이로부터 자오면과 구결면 모두 3 m의 직경을 만족함을 알 수 있다. 한편, 상대조도 분포를 살펴보면 자오면의 경우 그림 13의 (a)와 (b)에서 보듯이 모두 중심부에서는 대체적으로 균일하고, 주변부에서는 상대조도가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 11의 스폿 다이어그램과도 일치하는 결과이다. 그러나 구결면에서는 (a)에서는 완만히 감소하는 형태를 보이고 있으나 (b)에서는 전반적으로 균일한 형태를 보이고 있는데, 이는 그림 7 (b)와 그림 8에서 설명했듯이 자오면과 구결면

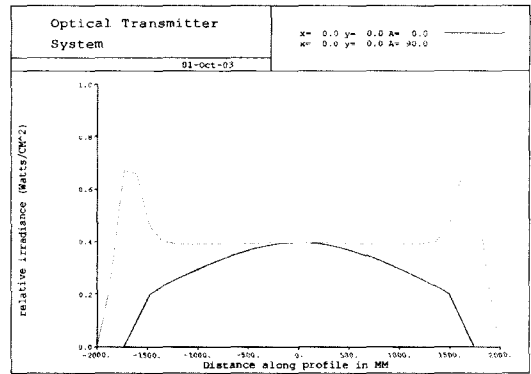
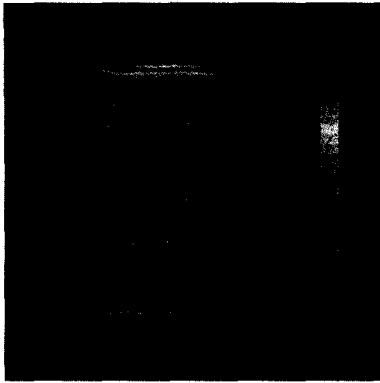
의 수차특성 때문이다. 즉, (b)의 경우가 (a)보다 자오면과 구결면의 상대조도 분포의 차이가 적음을 알 수 있다. 장거리 전송 광학계에서는 광원(레이저 다이오드)에서 출사한 에너지가 수신단에 도달하는 비율 즉, 에너지 전송률을 계산하는 일은 매우 중요한데, 본 연구에서는 백만개의 광선을 추적하여, 이로부터 3 m × 3 m 내에 들어오는 광선의 숫자를 세어서 계산하였다. 본 시스템의 에너지 전송률은 약 62%로 계산되었다. 또한, 여기서 수신부의 렌즈 직경(50 mm~100 mm)에 해당하는 구간의 전송률은, 3 m × 3 m 내 구간에서의 조도분포가 균일하다는 가정 하에 0.017~0.07 % 정도로 계산된다. 이를 dB로 표현하면 -37.7 dB ~ -31.6 dB로써, 출사 에너지 대비 약 1/5000 ~ 1/1430 정도의 에너지가 수신된다. 다음에 그림 13의 결과를 기하광학적으로 분석을 시도하였다.

그림 14 및 15로부터 알 수 있듯이 구결면은 입사동 상의 위치증가에 따라서 발산각의 크기도 증가하지만, 자오면의 경우에는 입사동 상의 0.6에서 1.0 위치 구간을 통과한 광선은 수신단의 외곽 부위에 집중함을 보이고 있다. 즉, 이로부터 빔의 조도 분포(그림 13)에 있어서 자오면의 외곽 부분의 상대 조도값이 급격히 증가하는 현상을 설명할 수 있다.

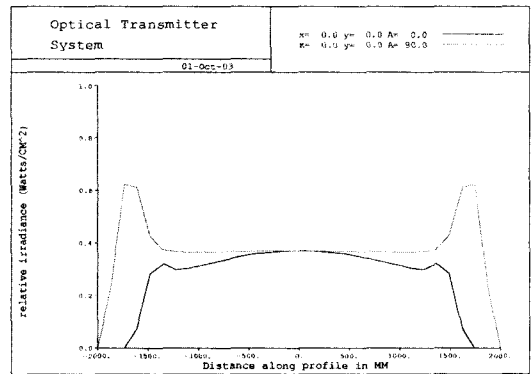
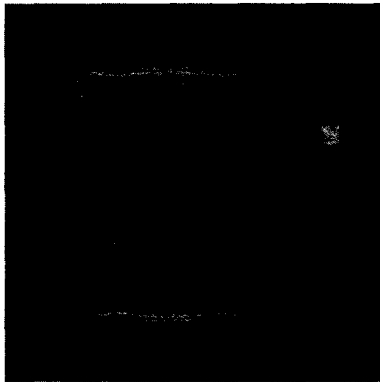
그러나 그림 13의 결과들은 자오면과 구결면의 조도 분포가 대칭적이지 아니고, 또 빔의 중심 위치를 기준으로 봉우리형으로 완만히 감소하는 조도 분포를 가지지 못하므로, 당초 목표했던 조도 분포를 얻기 위해 각 렌즈간의 위치를 조절하고 이에 따른 조도 분포를 조사하였다. 다음 표 7은 대칭형

표 7. 대칭형의 완만한 봉우리형 조도 분포를 얻기 위한 렌즈 위치

전송거리	광원과 구면렌즈 사이 거리	실린더 렌즈사이 거리
500 m	164.5 mm	130 mm
750 m	161.5 mm	127 mm
1000 m	160.5 mm	124 mm
1250 m	159.5 mm	123 mm
1500 m	158.5 mm	122 mm



(a) 자오면과 구결면의 수차 값이 최소가 되도록 설계한 경우



(b) 자오면과 구결면의 수차 값이 같도록 설계한 경우

그림 13. 500 m 전송 후의 빔 크기와 상대 조도 분포. 단, 그림 상에서 테두리 크기는 4 m×4 m

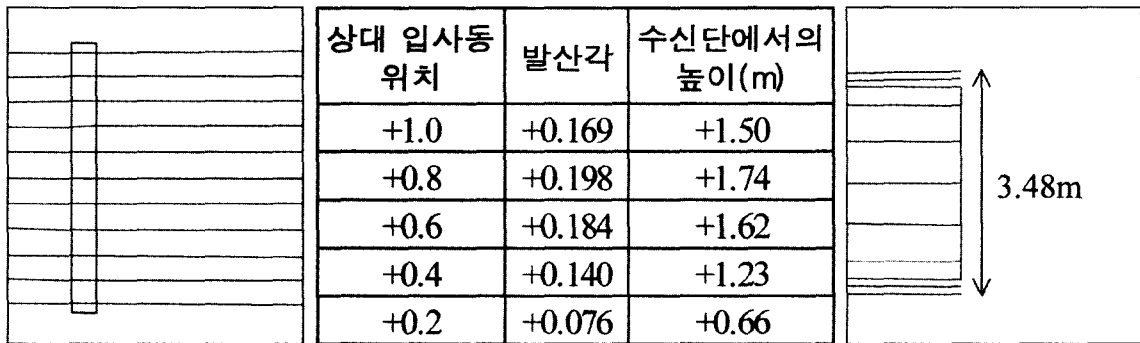


그림 14. 500 m 전송 후 수신단에서의 기하광학적인 분석(자오면)

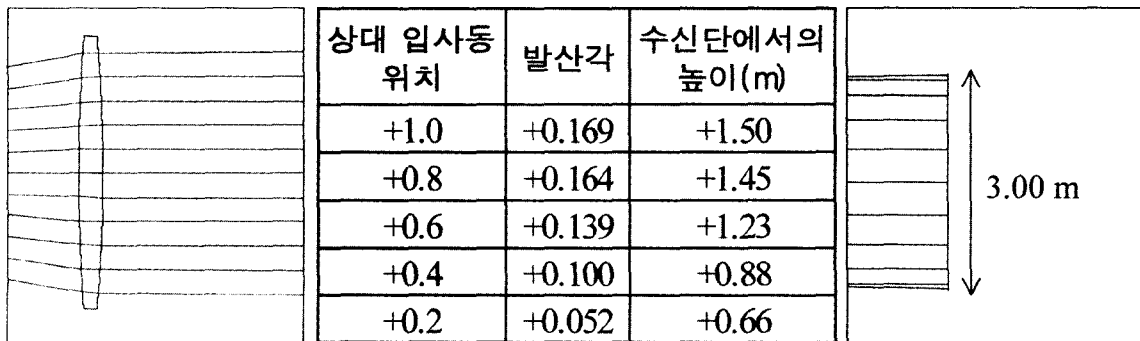


그림 15. 500 m 전송 후 수신단에서의 기하광학적인 분석(구결면)

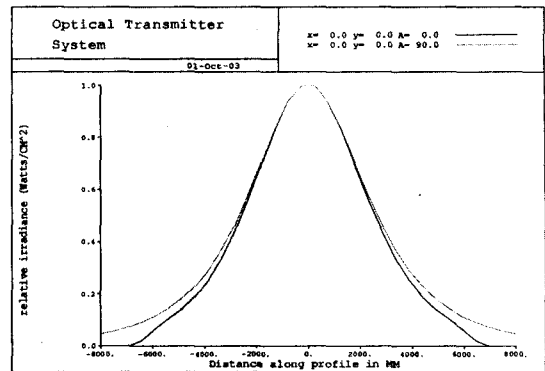


그림 16. 렌즈 간 위치 조절에 의한 봉우리형 조도 분포. 단, 그림 상에서 테두리 크기는 16 m × 16 m.

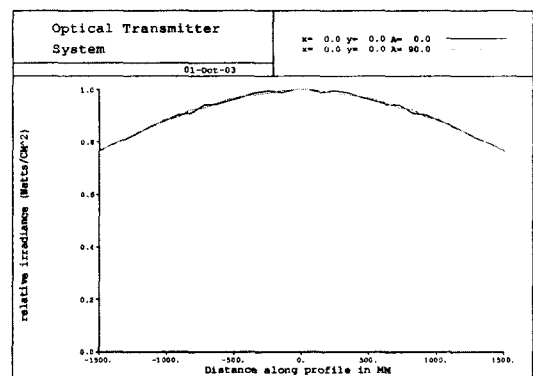
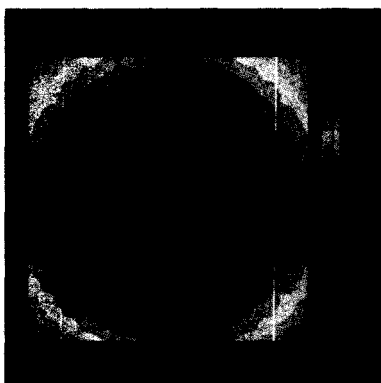


그림 17. 렌즈 간 위치 조절에 의한 봉우리형 조도 분포. 단, 그림 상에서 테두리 크기는 3 m × 3 m.

의 완전한 봉우리형 조도 분포를 얻기 위해 전송 거리별로 반복적인 시도를 통해 구해진 렌즈 위치에 대한 결과이다.

렌즈형태의 변경없이 두개의 거리변수만 조절하여 조도 분포를 계산한 결과, 전송거리와는 관계없이 거의 유사한 조도 분포를 보였으며, 다음은 전송거리가 500 m 일 때의 조도 분포이다.

그림 16의 빔 크기는 실제 직경이 16 m 정도로 매우 큰데, 중심부 근처 즉, 3 m 빔경에 대해서는 조도 분포가 대칭적이고 완전한 봉우리형을 보이고 있다. 그림 17은 그림 16의 조도 분포에서 직경 3 m 부분만 취하여 다시 표현한 것이다. 그림에서 보듯이 자오면과 구결면의 상대조도는 대칭 및 원

형이고, 중심부 대비 주변부의 조도는 약 76% 정도인 완전한 봉우리형의 형태를 보이고 있다. 그러나 에너지 전송률은 약 10% 정도로 계산되는데 앞서서의 62% 대비 큰 차이를 보이고 있다. 수신부의 렌즈 직경에 해당하는 구간은 -45.6 dB ~ -39.5 dB이다. 즉, 에너지 전송률 면에서 본다면 앞서의 그림 13과 같은 렌즈 배치를 가지는 것이 유리하다고 판단된다.

그림 14 및 15에서처럼 그림 16의 대칭 봉우리형 조도 분포를 기하광학적으로 분석하였다.

흥미있는 사실은 그림 16의 분포를 얻기 위해서는 실제로는 전송 광학계에서 출사된 광선이 발산하는 것이 아니라 수렴한다는 것이다. 즉, 그림 18에서 살펴보면 입사동의 +1.0

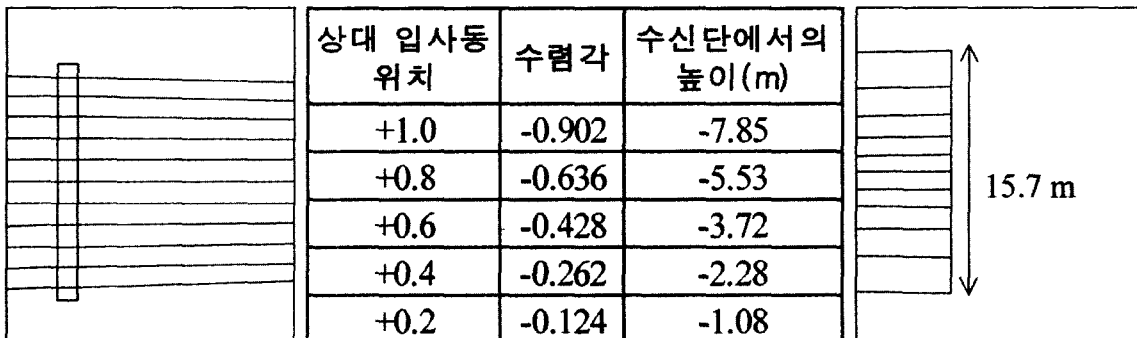


그림 18. 자오면에서의 기하광학적인 분석

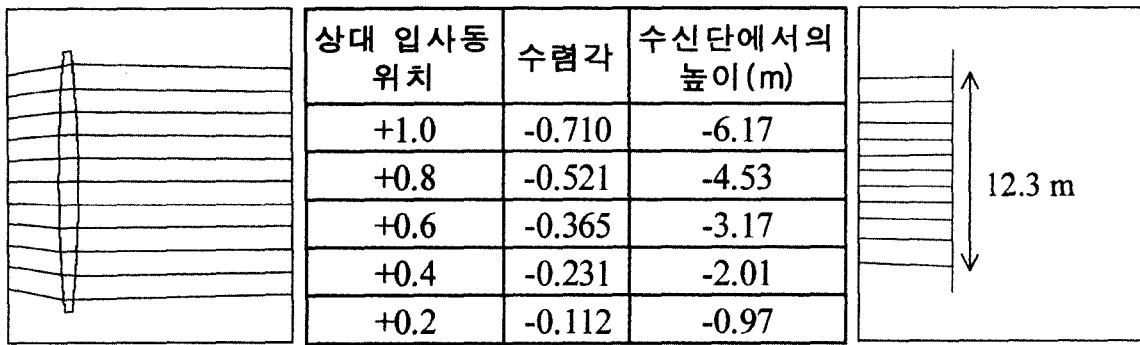


그림 19. 구결면에서의 기하광학적인 분석

을 지나는 광선은 수신단에서 -7.85 m를 지난다는 것이다. 이는 수신단 앞에서 수렴 후 다시 발산한다는 것을 의미한다. 이것은 자오면 및 구결면 공히 일치하는 결과이다.

V. 결 론

본 논문에서는 유선 통신의 포화지역이나 도심에서 벗어난 인구밀도가 낮은 지역 등에서 활용이 기대되는 장거리 무선 광통신용 송신 광학계를 설계하였다. 여기서 광원으로는 비대칭 타원형 빔이 출사되는 레이저 다이오드를 사용하였고, 출사된 비대칭 빔은 장거리 전송 후 수신단에서 직경이 3 m 가 되도록 하였다.

본 설계의 특징으로는 레이저 다이오드에서 출사되는 비대칭 빔을 장거리 전송 후 원하는 크기의 대칭형 빔으로 변조시키기 위한 체계적인 접근법을 위해, 먼저 근축 광학적인 해석을 통하여 필요한 관계식들을 일반화하여 표현하였다.

그리고 최적설계의 방법으로도 기존의 자오면 및 구결면의 수차가 최소가 되도록 하는 최적화 기법보다는 자오면 및 구결면 간 수차의 균형을 통해 장거리 전송 후 보다 우수한 에너지 균일도를 달성할 수 있었다. 결과적으로 이와 같은 비결상 광학계는 기존의 최적화 개념과는 다른 새로운 설계 개념이 필요함을 확인할 수 있었다.

한편, 이와 같은 비결상 광학계의 평가에 있어서도 기존의 결상 광학계를 평가하는 방법(예; 스폿 다이어그램)과는 달리, 수신단에 수광면을 설정하고, 이 수광면에 백만 개 정도의 광선을 날려, 광선들의 위치 및 분포를 계산하는 방법에 의해 복사 조도를 계산하였다. 이로부터 복사 조도의 분포와 에너지 효율을 계산할 수 있었고, 정량적으로 의미있는 평가를 실시할 수 있었다. 여기서, 광원으로부터 출사되는 광선의 분포는 자오면과 구결면의 발산각이 다름(수평 7°, 수직

18°)과 레이저 빔의 특징인 가우스형 세기 분포가 고려되었다.

이와 같은 방법으로 도출된 평가결과를 이해하는 수단으로 전통적인 몇 개의 광선을 추적하여 현상 이해에 대한 분석을 시도하였고, 체계적이고 종합적인 이해를 얻을 수 있었다.

결론적으로 본 논문에서 제시하는 전송광학계는 에너지 전달 효율은 높지만(약 60%) 상대적으로 자오면과 구결면의 조도 분포의 차이를 보이는 경우와, 에너지 전달 효율은 낮지만(약 10%) 복사 조도 분포가 완만한 봉우리형의 대칭형 분포를 가지는 경우로 요약할 수 있고, 두 경우 간에는 렌즈 설계제원의 변경없이 렌즈간 거리 조절에 의해 상호 변환이 가능함을 밝혀 둔다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 한남대학교 교비학술연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. J. Smith, Modern Optical Engineering(McGraw-Hill, Inc., 2000).
- [2] 이상수, 기하광학(교학연구사, 1985).
- [3] 이종용, 김건수, “등가렌즈 변환의 일반화와 일반화된 등가렌즈의 3차 수차식”, 한국광학회지, 제 7권 4호, pp. 305-313, 1996.
- [4] 이환선, 임천석, 조재홍, 장수 “초소형 영상 전송 모듈용 DOE렌즈의 설계 및 평가”, 한국 광학회지, 제 12권 3호, pp. 240-249, 2001.
- [5] Hecht, Optics(Addison-Welsey, Inc., 1987).
- [6] CODE V Reference Manual(Version 9.30).

Design of optical transmitter system for high-speed wireless optical communication

Young Hoon Kwon[†] and Cheon Seog Rim

Applied Optics and Electromagnetics, School of Nature Science, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

[†]*E-mail: kwonyh26@micron.lg.co.kr*

(Received October 20, 2003, Revised manuscript February 4, 2004)

Wireless optical communication is expected for high-speed optical communication in the areas of saturated optical fiber communication and low population density. In this paper, we present an optical transmitter system for wireless optical communication with new design concepts different from the usual optical imaging system. The specifications are the following: the source is a laser diode(LD) of wavelength 830 nm in which the divergent angle from the tangential plane differs from that from the sagittal plane. Here, the requested transmission distances are very long range such as 500 m to 1500 m and beam diameter is 3 m at the receiver with symmetrical energy distribution. For the evaluation characteristics of this kind of non-imaging system, two optical quantities, the relative illumination distribution and energy transfer efficiency, are numerically calculated through lots of ray tracing.

OCIS Codes : 220.4830, 220.3620.