

Fly Eye Lens를 사용하는 액정 projector용 조명 광학계의 설계

본 논문은 지난 2월 13일 열린 한국광학회의 제 14회 정기총회 및 동계학술발표회에서 논문장려상을 수상한 한남대학교 물리학과 유재명씨의 'Fly Eye Lens를 사용하는 액정 projector용 조명 광학계의 설계'에 관한 것으로 '광학세계' 독자들을 위해 새로이 작성된 요점, 전체 내용을 게재하니 관심있는 독자들에게 많은 참고가 되기를 바란다.

편집자 주

Fly Eye Lens들을 사용한 3판식의 액정 projector용 조명 광학계의 원리를 분석하고, 해석적인 방법으로 근축 설계를 하였으며, OSLO 광학계 설계 프로그램을 이용한 최적 설계로 광학계를 완성하였다. 본 연구의 대상이 되는 projector는 두 개의 액정은 동일한 조명 광로를 가지는 반면에 제 3 액정은 다른 조명 광로를 가지는 구조로 되어 있다. 이들 두 가지 서로 다른 광로에 대한 조명 원리를 분석하여 설계 방법을 제시하고, 기초 설계를 위한 식을 세우고 풀어서 최대의 조명 효율을 얻기 위하여 광원에서 발광된 빛을 투사 렌즈계의 입사동으로 최대한 집광시키면서 균일하게 조명되는 근축 설계값을 구하였으며, 최적화 설계를 하였다.

분류코드 : SM010, SM020

I. 서론

액정 projector는 TV나 비디오등 각종 영상 재생장치나 PC로부터 신호를 받아 확대·투사시키는 디스플레이 장치이다. 최근에는 부피와 무게 등의 문제로 CRT 대신에 액정을 사용한다. 또한 조명 효율, 휘도 및 해상도등을 높일 목적으로 적색(red), 녹색(green), 청색(blue) 3장의 액정을 사용한다.^[1]

한편 초기의 액정 projector에서는 광원에서 발산된 빛을 반사경을 이용하여 평행광이나 약간 수렴하는 광으로 만들어 사용했으나, 이 방법은 스크린 중심부의 광량에 비하여 주변부의 광량이 30% 이하로 현저히 떨어진다. 이러

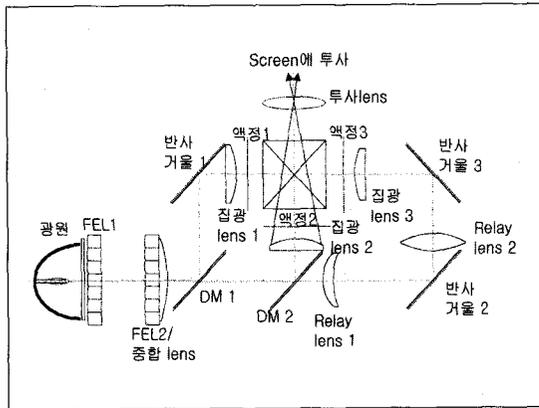


그림 1. 색합성 프리즘 방식 액정 projector의 구조

한 문제를 극복하기 위한 한 방법으로 여러 개의 작은 렌즈가 바둑판과 같은 2차원적인 배열로 구성된 Fly Eye Lens(FEL) 2장을 사용한다.[1] 이 때 두 개의 FEL의 크기가 다른 경우는 광원에서 발산된 광속이 타원반사경에서 반사한 후 수렴되는 경우에 주로 사용되며 광학계의 크기를 작게 하기 위한 목적으로 사용된다. FEL의 크기가 같은 경우는 포물반사경을 사용하여 평행광으로 진행하는 광로에 사용된다.

본 논문에서는 FEL을 대량 제작 시 금형가격에 의한 초기 비용이 적도록 같은 크기와 같은 곡률 반경을 갖는 두 개의 FEL를 사용하는 경우와 3판식 중에서 프리즘을 사용하는 방식에 대하여 각 조명 광로에 대한 조건을 설명하고, 그에 맞게 기초식을 세우고 풀어서 광학계의 초기 굴절능과 간격을 구했다. 본 논문의 설계 방법은 3판식의 이색성 필터 방식에 FEL을 사용하는 경우에도 적용이 가능하다.

II. 광학계의 구조

그림 1은 색합성 프리즘을 사용하는 3판식 액정 projector의 광학구조를 그린 것이다. 광원에서 발산한 광속은 포물경에서 반사하여 두 개의 FEL과 중합(重合, integrator) 렌즈를 거친다. 이 때, 제 1 조명 광로는 이색성 필터 1(이하 DM 1)에서 반사한 빛(red)이 반사

거울 1에서 반사하고 집광 렌즈 1을 거쳐 액정 1에 조명되는 경로와 DM 1에서 투과한 후 DM 2에서 반사한 빛(green)이 집광 렌즈 2를 거쳐서 액정 2에 조명되는 경로이다. 또한 제 2 조명 광로는 DM 2를 투과한 빛(blue)이 두 개의 relay 렌즈와 두 개의 전반사 거울 그리고 집광 렌즈 3를 거쳐서 액정 3에 조명되는 경로이다. 각 액정에서 전기 신호에 의하여 만들어진 영상은 색합성 프리즘과 투사 렌즈를 거쳐서 스크린에 확대·투사된다.

III. 각 조명광로의 해⁵⁾

3.1. 조명조건

- 조명 조건 1 : 첫 번째 FEL(FEL 1)의 광축을 포함하는 중심 cell 렌즈의 가장자리를 평행으로 지나가는 광선은 액정의 가장자리를 지나야 하며 광원을 효율적으로 이용하려면 투사 렌즈의 입사동의 중심을 향하여야 한다. 이에 관한 식을 가우스 괄호²⁻⁴⁾를 사용하여 아래와 같이 쓸 수 있다. 여기서 k_1 은 FEL 1의 굴절능, k_{21} 은 두 번째 FEL(FEL 2)의 굴절능, k_{22} 은 중합 렌즈의 굴절능, k_3 는 첫 번째 집광 렌즈의 굴절능, t 는 FEL 2에서 중합렌즈까지 광학적 두께, z 는 각 렌즈간의 간격, M 은 조명 배율로서 FEL의 입의 cell 크기와 액정의 비율이다.

$$[k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3] = M \quad (1)$$

$$[k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -(z_3 + d_e)] = 0 \quad (2)$$

- 조명 조건 2 : 첫 번째 FEL의 광축을 포함하는 cell 렌즈의 중심으로 경사를 가지고 입사하는 광선은 액정의 중심을 지나야 한다. 이를 식으로 표현하면 아래 식 (3)과 같다.

$$[-z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3] = 0 \quad (3)$$

- 조명 조건 3 : 첫 번째 FEL의 주변부에 있는 cell 렌즈의 중심으로 광축과 평행하게 입사하는 광선은 액정의 중심으로 지나야 한다. 이 때 FEL 1, 2는 크기 및 각 cell 렌즈의 중심이 같다고 놓았으므로 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$[k_{22}, -z_2, k_3, -z_3] = 0 \quad (4)$$

또 하나의 조명 조건으로 주변부 cell 렌즈의 중심으로 경사를 가지고 입사하는 광선은 액정의 중심을 지나야 하는 조건이 추가된다. 이것은 첫 번째 렌즈의 각각의 cell 렌즈가 입사동으로 대응된다는 개념이나 이는 조건 2과 조건 3을 복합한 것으로서 식 (3)과 식 (4)로부터 구할 수 있다.

3.2. 제 1조명 광로의 해

z_1 과 k_{21} 와의 관계는 식 (3)과 식 (4)로부터 얻을 수 있다. 이들 식으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [-z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3] &= (1-z_1, k_{21}) \\ [-z_2, k_3, -z_3] &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

위 식 (5)를 만족하기 위하여 $1-z_1 \cdot k_{21}=0$ 이어야 하므로 z_1 은 FEL 2의 초점거리(f_{21})와 같아야 한다. 이렇게 해서 k_1, k_{21}, z_1 를 결정하였다면 이제 결정하여야 할 설계 변수는 t, z_2, z_3, d_e 등의 거리에 관계되는 요소와 k_{22}, k_3 의 굴절능으로 모두 6 개이다. 그러나 기본식은 식 (1), (2), (4)의 3개 밖에 없다. 또한 $1-z_1 \cdot k_{21}=0$ 이므로 식 (1), (2)는

$$[-t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3] = \frac{M}{k_{21}} \quad (6)$$

$$[-t, k_{22}, -z_2, k_3, -(z_3+d_e)] = 0 \quad (7)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 K_{21} 은 FEL 1에서 중합렌즈까지의 굴절능으로 $K_{21}=[k_1, -z_1, k_{21}]$ 이다. 이 식에 있는 모두 6개의 설계 요소 중에서 t 는 중합 렌즈의 두께

에 관한 값으로 제작 가능한 렌즈의 두께를 고려하여 적당히 결정하여 줄 수 있다. z_3 는 집광 렌즈와 액정간의 거리로서 이것 역시 제작상의 요인을 고려하여 적당히 결정하여 줄 수 있는 값이며, d_e 는 액정에서 투사 렌즈계의 입사동까지의 거리로서 투사 렌즈계의 설계에서 결정되는 값이므로 이것 역시 별도로 결정되는 설계 요소이다. 나머지는 k_{22}, z_2, k_3 3개이고, 이것은 식 (6), (7), (4)를 풀어서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z_2 = -\frac{1 + \frac{z_3}{d_e} - \frac{k_{21}^2 z_3}{M^2}}{k_{21}} \quad (8)$$

$$k_{22} = -\frac{1 + k_{21} \frac{z_3}{M}}{z_2} \quad (9)$$

$$k_3 = -\frac{1 - \frac{M}{d_e k_{21}} + \frac{k_{21} t}{M}}{z_2} \quad (10)$$

3.3. 제 2조명 광로의 해

$$[k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3, k_4, -z_4, k_5, -z_5] = M' \quad (11)$$

$$[k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3, k_4, -z_4, k_5, -(z_5+d_e)] = 0 \quad (12)$$

$$[k_{22}, -z_2, k_3, -z_3, k_4, -z_4, k_5, -z_5] = 0 \quad (13)$$

식 (11), (12), (13)은 제 2 조명 광로의 개념을 나타내는 식으로 여기서 미지수는 $z_2, z_3, z_4, k_3, k_4, k_5$ 정도라고 볼 수 있다. 식이 3개이므로 한꺼번에 6개의 미지수를 구하여 낼 수 없다. 그러므로 전체 조명계의 크기 및 각 광학 부품의 배치 등을 고려하여 간격을 적당히 정하면서 굴절능을 구한다.

우선 FEL 1에서 광축이 통과하는 cell 렌즈(중심 cell 렌즈)를 통과하는 광선이 k_2 렌즈와 k_4 렌즈(즉 relay 렌즈 2)에서 광축을 통과한다는 조건으로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$k_3 = \frac{[-t, k_{22}, -(z_2+z_3)]}{[-t, k_{22}, -z_2]z_3} \quad (14)$$

앞의 식 (11)을 적당히 변형한 식에, 중심 cell 렌즈에 입사하는 광선이 relay 렌즈 2에서 광축을 통과한다는 조건을 고려하면

$$[-z_4, k_5, -z_5] = \frac{M'}{k_4} \quad (15)$$

이 된다. 또한 식 (12)부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$z_4 = \frac{1 - \frac{M'}{d_e k_3}}{k_5} \quad (16)$$

식 (15), (16)에서 z_4 를 소거하면서 k_5 에 대하여 정리하면

$$k_5 = \frac{1 - \frac{d_e k_3}{M'}}{d_e + z_5} \quad (17)$$

이다. 식 (13)에서 k_4 를 묶어내면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$k_4 = \frac{[k_{22}, -z_2, k_3, -(z_3+z_4)k_5, -z_5]}{[k_{22}, -z_2, k_3, -z_3] [-z_4, k_5, -z_5]} \quad (18)$$

이 때 식 (17), (16), (18)에서 차례대로 k_5 , z_4 , k_4 를 구한다.

IV. 초기설계

4.1. 설계조건

설계를 하기 위한 조건은 아래와 같다.

조건 1 : 광원의 중심에서 발산한 빛은 반사경에서 반사한 후에 광축에 평행하게 진행한다.

조건 2 : 반사경은 포물경이고 광원은 반사경의 초점에 놓인다.

조건 3 : 광원의 arc gap은 반사경에서 반사되어 출사되는 광이 광축에 대해 $\pm 5^\circ$ 의 범위 내에 거의 모든 빛이 출사되도록 충분히 작은 것을 사용한다.

조건 4 : 각 액정의 바로 앞에 집광 렌즈가 있는 방식으로 설계한다.

조건 5 : 사용하는 액정의 가로 세로 비율은 16 : 9이고 대각선 크기는 1.35"로 가로 29.93 mm, 세로 16.9 mm이다. 조명 범위는 가로 2.8 mm, 세로 약 2.423 mm 정도씩의 여유를 두어 32.7 mm, 19.323 mm 정도를 조명하기로 한다. 반사경의 크기는 ϕ 70 정도이고 조명 배율이 약 3배이면 각 cell 렌즈의 크기는 11 mm \times 6.5 mm이고 가로 5개, 세로 9개가 배치된다.

4.2. FEL계와 제 1 조명 광로의 집광 렌즈의 초기 설계

상기의 5가지 조건을 고려하면서 초기 입력 값으로 조명 부분의 통상의 값들, 즉 $z_3=17$ mm, $d_e=500$ mm, $t=16.5$ mm, $M=-3$ 으로 두고, 식 (10)을 고찰하여 보면, 괄호안 두 번째 항(z_3/d_e)에서 z_3 는 d_e 에 비하여 대단히 적은 값이고, 세 번째 항($K_{21}^2 t \cdot z_3/M^2$) 중에서 $K_{21}^2(t \cdot z_3)$ 도 M^2 에 비하여 대단히 작은 값이다. 따라서 두 항 모두 zero에 접근한다. 그러므로 식 (10)은 $z_2 \approx -M/K_{21}$ 가 된다. 여기서 z_2 는 기구적인 크기로 보아 145 정도가 되어야 하고 $M=-3$ 이라면 $K_{21} \approx -M/z_2=0.021$ mm⁻¹이다. 또한 $K_{21}=[k_1, -z_1, k_2]$ 이고 $1-z_1 \cdot k_2=0$ 이다. 여기서 FEL의 재질은 B270($n_d=1.52299$), 집광 렌즈의 재질은 BK7($n_d=1.5168$)을 사용한다면 FEL의 곡률 반경 및 두 FEL 사이의 거리를 구할 수 있다. 이어서 식 (8), (9), (10)로부터 z_2 , k_{22} , k_3 를 구하면 렌즈의 초기 설계를 그림 2와 같이 얻을 수 있다.

4.3 제 2 조명 광로의 relay 렌즈와 집광 렌즈의 초기 설계

Relay 렌즈와 집광 렌즈를 초기 설계하기 위해 $z_2=150$ mm, $z_3=125$ mm, $M'=3$, $z_5=17$ mm, $d_e=500$ mm로 두고, 재질을 각각 PMMA($n_d=1.49173$), BK7($n_d=1.5168$)을 사용하여 초기 설계를 구하면 그림 3과 같다.

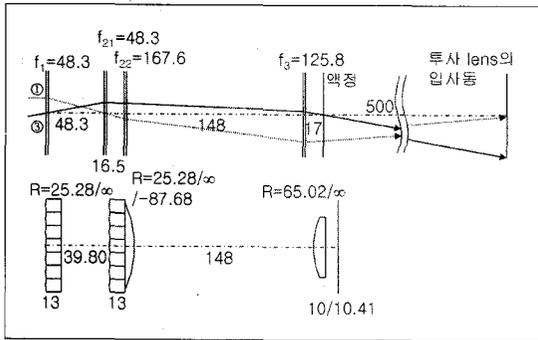


그림 2. 제 1 조명 광로의 초기 설계

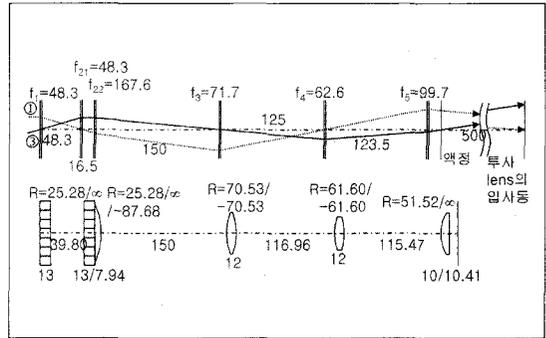


그림 3. 제 2 조명 광로의 초기 설계

V. 최적화 설계

최적화 설계를 위하여 렌즈 설계 프로그램인 OSLO (premium edition 6.1)를 사용하였다. 최적화 목표는 다음 그림 4와 같이 선정된 5개의 cell 렌즈에 각각 9개의 광선이 입사하도록 했다. 그 광선이 균일한 조명을 위해 액정의 정해진 위치(x, y 좌표)와 광원을 효율적으로 이용하기 위해 투사 광학계의 입사동에 도달하도록 설정하였다.

조건식(merit function)은 각 cell에 입사하는 광선이 액정면에서 균일한 분포를 만족시키는 위치에 도달하도록 270개의 조건과 FEL cell에 입사하는 광선이 투사 광학계의 입사동의 정해진 위치에 수렴하도록 270개의 조건으로 총 540개로 정하였다. [5(cell 개수) × 9(cell에 입사하는 광선의 개수) × 2(x, y좌표) × 3(축상 광선 1개와 비축광선 2개) × 2(액정 도달 조건, 투사 광학계 입사동 도달 조건)=540개]

제 1 조명 광로는 최적화 변수가 적으므로 전체 가시광선의 중심 파장인 녹색 파장에 대해 먼저 최적화하여 FEL와 중합 렌즈를 결정하고, 이 설계 값을 제 2 조명 광로에서 그대로 사용하였다. 또한, 제 1 조명 광로에서 적색 경로는 집광 렌즈를, 제 2 조명 광로에서는 relay 렌즈와 집광 렌즈만을 최적화 변수로 사용했고, 각각 비구면으로 설계했다. 최종 설계값은 표 1이고, 광로도 그림 5와 같다.

설계의 타당성을 검증하기 위해 광선이 액정면의 정해진 곳에 도착하는 x, y 좌표를 그림 6, 7, 8과 같이 그

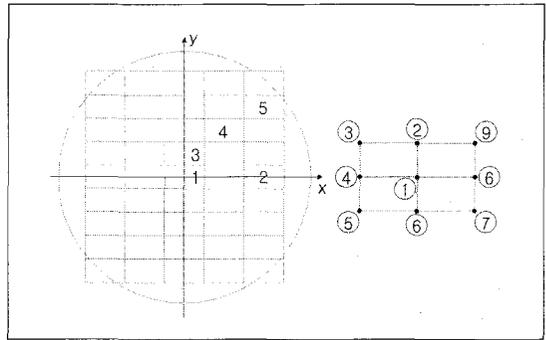


그림 4. 최적화에 사용되는 광선의 입사점

려 보았다. 그림에서 숫자 없이 'Y'로 표기된 것은 CCD 액정의 크기이고, 'y' 옆 첫 번째 숫자는 field 번호로서 1은 zero-field, 2는 0.7-field, 3은 full-field이다. 두 번째 숫자는 그림 4와 같이 광선이 입사되는 FEL의 cell 번호이다.

제 1 조명 광로의 경우, 모든 렌즈를 구면으로만 설계할 수 있었으며, 적색과 녹색에 대해서 모두 좋은 성능을 갖는 것을 그림 6, 7에서 시각적으로 확인할 수 있다. 그러나 제 2 조명 광로에서는 relay 렌즈를 구면으로 설계해도 원하는 조명 균일도를 얻을 수 있으나 투사 렌즈계 입사동에 수렴하는 정도를 비교해 보면 그림 9에서 보는 것처럼 비구면으로 설계하는 것이 더 좋을 것을 알 수 있다. 한편 집광 렌즈는 비구면을 사용하여도 성능의 변화가 거의 없었다[5]. 이러한 이유는 집광 렌즈는 액정에 가까이 있으므로 액정에서 멀리 떨어진 relay 렌즈에서 보다 빛의 경로에 영향을 적게

표 a. 최종 설계값(제 1 조명 광로, green)

면번호	곡률반경	원추계수	두께	재질	비고
STOP	26.587		13.00	B270	FEL1
2	inf		42.13	AIR	
3	26.587		13.00	B270	FEL2
4	inf		7.94	B270	중합 렌즈
5	-98.562		30.00	AIR	
6	inf		2.00	BK7	이색성 필터
7	inf		90.52	AIR	
8	inf		-25.00	AIR	거울
9	-143.132		-10.00	BK7	집광 렌즈
10	125.420		-10.41	AIR	
11	inf				액정

표 1-b. 최종 설계값(제 1 조명 광로, red)

면번호	곡률반경	원추계수	두께	재질	비고
STOP~5		green 파장의 경로와 동일			
6	inf		-90.00	AIR	이색성 필터
7	inf		25.00	AIR	거울
8	136.215		10.00	BK7	집광 렌즈
9	-129.083		10.41	AIR	
10	inf			BK7	액정

표 1-c. 최종 설계값(제 2 조명 광로, relay lens 비구면)

면번호	곡률반경	원추계수	두께	재질	비고
STOP~9		relay 렌즈 구면 설계와 동일.			
10	53.041	-6.97029	8.00	PMMA	relay 렌즈 1
11	inf		91.11	AIR	
12	inf		-26.23	AIR	거울
13	-50.303	-1.80335	-18.00	PMMA	relay 렌즈 2
14	66.224	-4.17582	-46.73	AIR	
15	inf		66.64	AIR	거울
16	248.721		8.00	BK7	집광 렌즈
17	-41.246		10.41	AIR	
18	inf				액정

주기 때문이다.

VII. 결론

본 연구에서는 3판식 액정 projector에 사용되는 조명 광학계의 조건을 분석하여 해석적으로 풀어 원하는 광학계의 초기 설계를 얻어서 최적화 설계를 진행하는

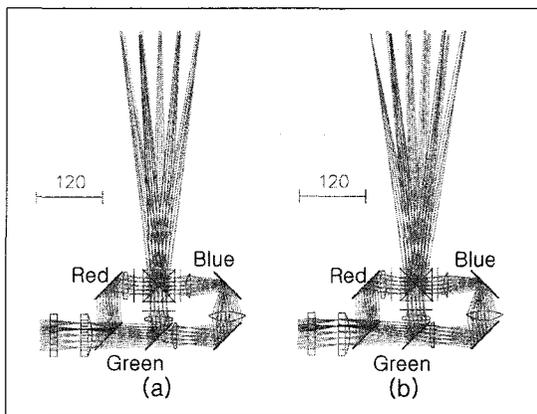


그림 5. 광로도. (a) 축상 광선 입사 (b) 비축 광선 입사

등의 설계 체계를 완성하였다. 조명 광학계는 균일한 조명을 얻는 것이 목적이므로, 최적화 조건으로는 FEL 각 cell 렌즈의 가장자리로 입사하는 광선이 액정면의 가장자리로 도달하도록 하였고, 도달된 위치 좌표는 최종 설계된 결과를 분석하기 위해 다시 사용되었다. 또한 단순히 액정 위치에서 균일한 조명을 얻는 것에 그치지 않고 조명된 광선이 투사 광학계를 거쳐서 스크린에 투사될 경우 최대의 밝기를 가질 수 있도록 투사 광학계의 입사동으로 광속을 수렴하도록 식을 세우고 풀었다.

최종 설계 결과 제 1 조명 광로와 제 2 조명 광로 모두 집광 렌즈는 비구면화하여도 전체 성능에는 별 영향을 주지 않으므로 구면으로 설계하였으나 제 2 조명 광로에서는 광로 변화에 많은 영향을 주는 relay 렌즈를 구면과 비구면으로 각각 설계하여 성능을 비교해 보았다. 그 결과 균일한 조명 성능에는 큰 차이를 보이지 않았으나, 투사 광학계에 입사되는 조명 효율면에서는 relay 렌즈를 비구면화하는 것이 더 우수하였다.

참고문헌

- [1] 小原章男, 坂本幹雄, 澤井靖昌, 光技術CONTACT, 37(9), (1999), pp. 606~643.
- [2] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics*,

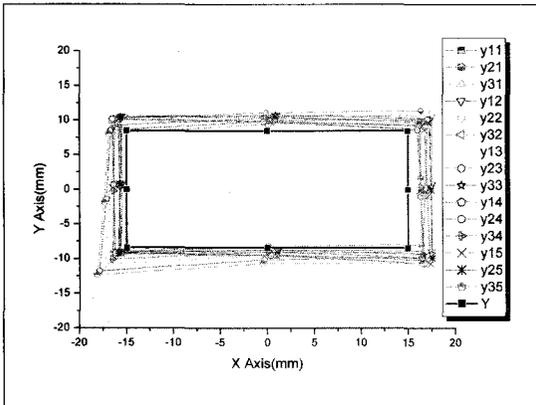


그림 6. 적색 액정에서 광선의 도달 위치

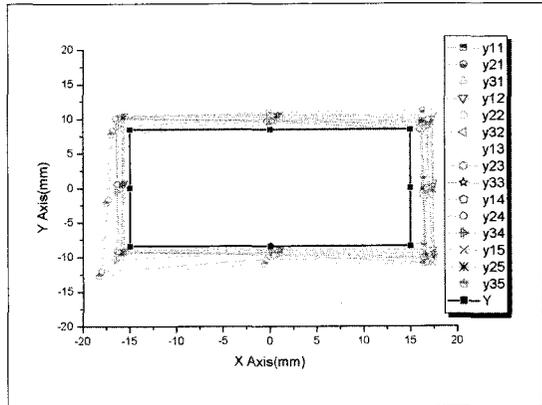


그림 7. 녹색 액정에서 광선의 도달 위치

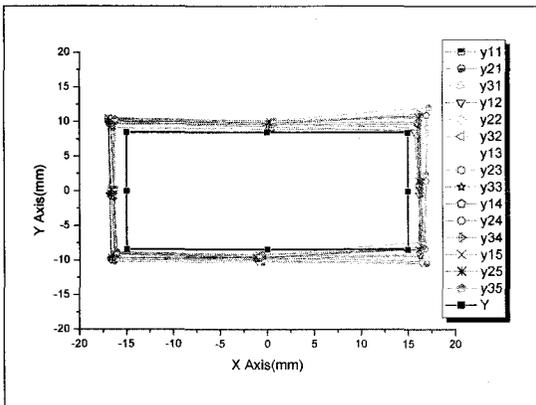


그림 8. 청색 액정에서 광선의 도달 위치(relay 렌즈 비구면 설계)

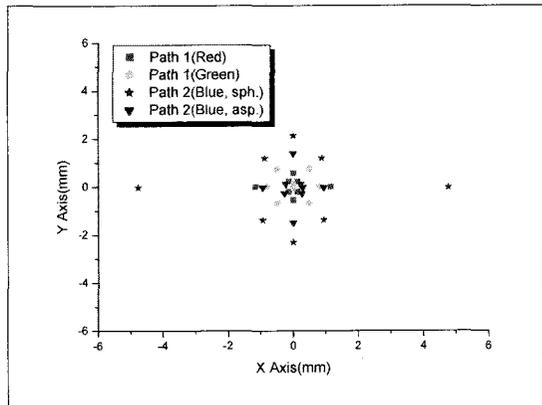


그림 9. FFL 중심 cell에 입사한 광선의 투사 광학계 입사등 도달 위치

Interscience Publisher, Inc., New York, (1958), Chap. 5.

- [3] M. Herzberger, J. Opt. Soc. Amer., 42, 637 (1952)
- [4] 정진호, 줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석, 경남대학교 박사학위논문, (1994)
- [5] 류재명, 조재홍, 정진호, 이종진, "Fly-eye Lens를 사용하는 액정 projector용 조명광학계의 설계," 한국광학회지 vol. 13, no. 3, 2002



류재명

한남대학교 물리학과 박사과정/
서울광학산업(주) 연구소

조재홍 한남대학교 자연과학부 광·전자물리학 전공

정진호 E-mail: proopt@kornet.net
프로옵틱스 연구소

이종진 KOLEN(주)