《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 13, Number 3, June 2002

Fly-eye lens를 사용하는 액정 projector용 조명 광학계의 설계

류재명 · 조재홍

한남대학교 자연과학부 광 · 전자물리학 전공

㉮ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

정진호†

서울광학산업(주) 연구소

㉮ 369-841 충청북도 음성군 생극면 병암리 68-1

이종진

KOLEN(주)

㉮ 462-120 경기도 성남시 중원구 상대원동 517-13

(2001년 10월 22일 받음, 2002년 4월 30일 수정본 받음)

Fly-eye lens들을 사용한 3-패널 방식의 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.

주제어 : optical design, illumination system, fly-eye lens system.

I. 서 론

액정 projector는 멀티미디어 시대에 있어서 많은 사용이 기대되는 디스플레이 장치로서 TV나 비디오등 각종 영상 재생 장치나 PC로부터 신호를 받아 확대·투사시키는 역할을 한다. 기존의 projector는 CRT의 영상을 확대 · 투사시켰으나 부피와 무게 등의 문제로 최근에는 CRT 대신에 액정을 사용하는 방식이 점점 많이 사용되고 있다. 그렇지만 1장의 컬러 액정을 투사시키는 것보다 화면의 밝기를 높이고 고정도의 상을 얻기 위하여 적색(red), 녹색(green), 청색(blue) 3장의 액정을 사용하는 방법(이하 3-패널 방식이라 함)이 널리 쓰이고 있다. 3-패널 방식은 광원에서 나온 빛을 적색, 녹색, 청색으로 분리했다가 다시 합성하는 과정에서 평판형 이색성 필터(dichroic filter) 또는 프리즘형 이색성 필터를 사용하게 된다. 이 때 평판형 이색성 필터를 사용하는 경우는 광원에서 각각의 액정까지의 거리가 모두 같게 되도록 설계하지만,[1] 프리즘형의 경우에는 그림 1에서 보이는 것과 같이 광원에서 나오는 빛이 두 개의 액정, 즉 액정 1과 액정 2는 동일한 광로(이하 제 1 조명 광로라 함)를 가지게 되고, 액정 3에 도달하는 빛은 먼 광로정을 가진다(이하 제 2 조명 광로라 함).[1]

한편 초기의 액정 projector에서는 광원에서 발산된 빛을 반사경을 이용하여 평행광이나 약간 수렴하는 광으로 만들고, 최종적으로 액정 바로 앞에서 집광 렌즈를 사용하여 액정을 조명하는 방식을 사용했다. 그러나 이 방법은 스크린 중심부의 광량에 비하여 스크린 주변부의 광량이 30% 이하로 현저하게 줄어드는 문제가 발생하여, 균일한 광량으로 조명하기 위한 여러 가지 방법이 제안되고 있다.[1] 이 방법 중에 대표적인 것으로 fly-eye lens(FEL)를 사용하는 방법이 있다.[1] FEL란 여러 개의 작은 렌즈를 바둑판과 같이 2차원적인 배열로 구성한 것을 말한다. 이러한 조명 방식은 2개의 FEL과 집광 렌즈들로 구성되며, 두 개의 FEL의 크기가 같은 경우와 다른 경우가 있다.[1] 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 3-패널 방식 중에서 프리즘을 사용하는 방식에 대하여 각 조명 광로에 대한 원리를 설명하고, 기본 원리를 만족하는 기초식을 세우고 풀어서 각 렌즈의 굴절능과 간격을 구하였으며, 최종적으로 최적화를 통해 조명광학계를 설계하는 과정을 연구하고자 한다.

†E-mail: proopt@kornet.net

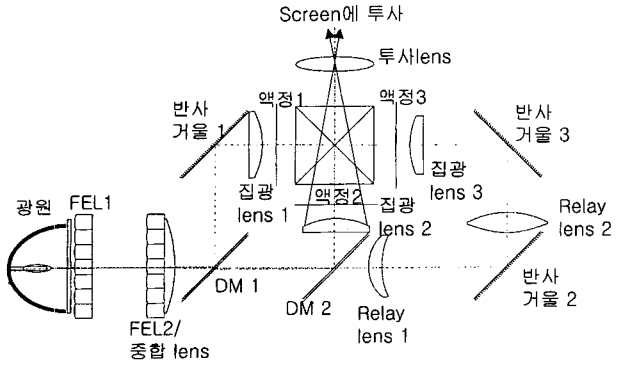

그림 1. 색합성 프리즘 방식 액정 projector의 구조.

II. 광학계의 구조

본 연구에 적용된 광학계는 그림 1에서 보는 것과 같이 색합성 프리즘을 사용하는 3-패널 방식 액정 projector로서 광원에서 발산한 광속은 포물경에서 반사하여 두 개의 FEL와 중합(重合, integrator) 렌즈를 거쳐 액정면에서 균일한 광도 분포를 가지게 된다. 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. 여기서 FEL 2와 중합 렌즈는 서로 붙어 있으며, 이를 두 번째 렌즈라 하고 해를 구하였다.

III. 제 1 조명광로의 해

3.1. 용어정리

k_1 : 첫 번째 렌즈(FEL 1)의 굴절능.

k_{21} : 두 번째 렌즈(FEL 2)의 1면의 굴절능.

k_{22} : 두 번째 렌즈의 2면(중합 렌즈)의 굴절능.

k_3 : 세 번째 렌즈(집광 렌즈 1)의 굴절능.

K_{21} : k_1에서 k_{21}까지 전제 굴절능.

z_1 : 첫 번째 렌즈의 제 2주점과 두 번째 렌즈의 제 1면 사이의 간격.

t : FEL 2(k_{21})과 중합 렌즈(k_{22}) 사이의 광학적 간격으로서 굴절률(n)을 곱하면 기하적인 두께(d=nt)가 된다.

3.2. 조명조건

– 조명 조건 1 : 그림 2의 광선 ①, 즉 FEL 1의 광축을 포함하는 중심 cell 렌즈의 가장자리를 평행으로 지나는 광선은 액정의 가장자리를 지나야 하며 최종적으로는 투사 렌즈의 입사동의 중심을 향하여야 한다. 여기서 광선 ①이 FEL 1에 입사하는 높이와 액정에 도달하는 높이의 비율이 조명 배율(M)

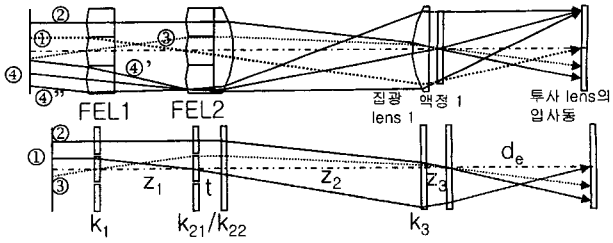

그림 2. 결상원리를 설명하는 제 1 광로도.

이며 광선의 경로상 음의 값을 갖게 된다. 이에 관한 식을 가우스 괄호[2-4]를 사용하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

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

– 조명 조건 2 : 그림 2의 광선 ③ 즉 FEL 1의 광축을 포함하는 cell 렌즈의 중심으로 경사를 가지고 입사하는 광선은 액정의 중심을 지나야 한다. 즉 조명 렌즈계만의 입사동은 첫 번째 렌즈(FEL 1)중 중심 cell 렌즈의 제 1면이고 출사동은 액정으로 보는 개념이다. 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 : 그림 2의 광선 ②, 즉 FEL 1의 주변부에 있는 cell 렌즈의 중심으로 광축과 평행하게 입사하는 광선은 액정의 중심을 지나야 한다. 이 때 FEL 1, 2는 크기 및 각 cell 렌즈의 중심이 같다는 최초의 가정에 의하여 아래와 같은 식 (4)를 얻었다.

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

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

3.3. 제 1조명 광로의 해

3.3.1 z_1과 k_{21}와의 관계

식 (3)과 식 (4)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

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

위 식 (5)를 만족하기 위하여

$$1 - z_1\ k_{21} = 0 \quad k_{21} = \frac{1}{z_1} \quad (6)$$

이 되어야 한다. 즉 z_1은 FEL 2의 초점거리(f_{21})와 같아야 한다.

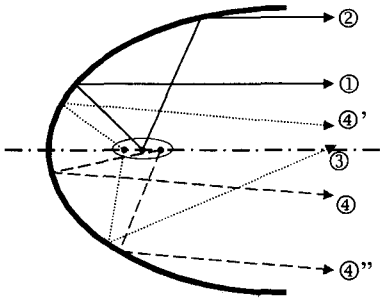

그림 3. 광원과 반사경에서 광원의 진행.

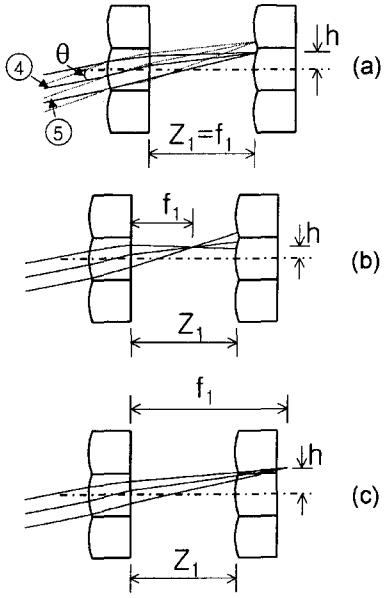

그림 4. FEL에서 광선진행. (a) $z_1=f_1$, (b) $z_1>f_1$, (c) $z_1<f_1$.

그림 3의 광원에 대하여 생각하여 보면 광원의 발광 중심은 반사경(포물면)의 초점에 있게 되므로 반사 후에 광축에 평행한 광선이 된다. 이것이 광선 ①, ②이다. 또, 광원의 발광점이 한 점이 아니고 약간의 크기를 가지므로 발광중심의 주위에서도 발광하는데, 이러한 빛은 반사경에서 반사하여 FEL 1에 입사하게 되고, 이들 광선 중에서 FEL 1에서 광축에 교차하는 광선이 광선 ③이며, 액정의 중심을 지난다. 또한 광축과 경사를 가지고 입사하는 광선 ④, ④', ④"은 액정 전체면을 골고루 조명하게 되고, 이것을 그림 2에 표현해 놓았다.

3.3.2. k_1의 결정방법

그림 4에서 광선 ④의 입사각에 관련된 식은 $\tan = h/f_1$로서 보다 큰 각도로 입사하는 광선 ⑤는 다른 cell 렌즈로 지나가므로 사용하지 못하게 된다. 그러므로 반사경의 형상, 램프의 arc length, FEL의 크기 등을 적절하게 선정하여야 한다. 한편 그림 4a는 $z_1=f_1$인 경우이다. z_1이 f_1과 일치하지 않고 $z_1>f_1$인 경우에는 그림 4b에서, $z_1<f_1$인 경우에는 그림 4c에서 보이는 것과 같이 광선의 일부가 다른 cell 렌즈를 지나게 되므로 광량을 효율적으로 사용할 수 없게 된다. 이러한 관점에서 FEL 1의 초점거리는 z_1과 반사경으로부터 입사되는 각도와 밀접한 관계를 가지게 됨을 알 수 있고 FEL 1의 초점거리 f_1(굴절능 k_1의 역수)을 결정하는 기준이 된다. 일반적으로 f_1은 z_1과 일치시키는 것이 좋다. 그러나 stepper와 같은 장치에 사용되는 광원은 출력이 높기 때문에 f_1과 z_1을 일치시킬 경우 FEL 2로 열이 집광되어 파손이 우려되는 등 제반 여건, 시스템의 크기 및 기타 다른 요소와의 관계를 고려하여 f_1과 z_1의 관계를 정립하는 것이 좋다. 본 조명계에서는 $z_1=f_1$으로 정하였다.

3.3.3 k_{22}, z_2, k_3 값의 결정

3.3.1과 3.3.2에서 제반 설계 여건을 고려하여 k_1, k_{21}, z_1를 결정하였다면 이제 결정하여야 할 설계 변수는 t, z_2, z_3, d_e등의 거리에 관계되는 요소와 k_{22}, k_3의 굴절능으로 모두 6개이다. 그러나 기본식은 식 (1), (2), (4)의 3개 밖에 없다. 또한 k_1, z_1, k_{21}은 앞에서 결정하였으므로 식 (1), (2)는

$$[-t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3] = \frac{M}{K_{21}} \tag{7}$$

여기서, $K_{21} \equiv [k_1,\ -z_1,\ k_{21}]$

$$[-t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -(z_3+d_e)] = 0 \tag{8}$$

로 표현할 수 있다. 이 식에 있는 모두 6개의 설계 요소 중에서 t는 두 번째 렌즈의 두께에 관한 값으로 제작 가능한 렌즈의 두께를 고려하여 적당히 결정하여 줄 수 있다. z_3는 집광 렌즈와 액정간의 거리로서 이것 역시 제작상의 요인을 고려하여 적당히 결정하여 줄 수 있는 값이며, d_e는 액정에서 투사 렌즈계의 입사동까지의 거리로서 투사 렌즈계의 설계에서 결정되는 값이므로 이것 역시 별도로 결정되는 설계 요소이다. 나머지는 k_{22}, z_2, k_3의 3개이고, 이것은 위 3개의 식 (7), (8), (4)를 풀어서 구하여 내면 된다. 따라서 식 (8)을 정리하면

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

이고, 여기에 식 (7)을 대입하여 정리하면

$$[-t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3] = \frac{M}{d_e K_{21}} \tag{9}$$

가 된다. 또한,

$$[-t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3]\ [k_{22},\ -z_2,\ k_3]$$
$$-[-t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3]\ [k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3] = -1$$

이라는 Gauss 괄호의 성질에 의해 식 (4), (7)을 대입하여 정리하면

$$[k_{22},\ -z_2,\ k_3] = -\frac{K_{21}}{M} \tag{10}$$

가 된다. 식 (9)를 정리한 후 식 (10)을 대입하면

$$(-t)\ [k_{22},\ -z_2,\ k_3] + [-z_2,\ k_3] = \frac{M}{d_e K_{21}}$$

$$[-z_2,\ k_3] = 1 - z_2\ k_3 = \frac{M}{d_e K_{21}} - \frac{K_{21}}{M} \tag{11}$$

이 되고, 또 식 (4)를 정리한 후 식 (10)을 대입하면

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

$$[k_{22},\ -z_2] = \frac{K_{21} z_3}{M} \tag{12}$$

가 된다. 또한 식 (10)은

$$[k_{22},\ -z_2]\ k_3 + k_{22} = -\frac{K_{21}}{M} \tag{13}$$

이고, 식 (12), (13)에서 $[k_{22},\ -z_2]$를 소거하면

$$-\frac{K_{21} z_3 k_3}{M} + k_{22} = -\frac{K_{21}}{M}$$

$$k_{22} = \frac{(z_3 k_3 - 1) K_{21}}{M} \tag{14}$$

가 된다. 이 식 (14)를 식 (12)에 대입하면

$$[k_{22},\ -z_2] = 1 - k_{22}\ z_2 = -\frac{K_{21} z_3}{M}$$

$$= 1 - \frac{K_{21} z_2 k_3 z_3}{M} + \frac{K_{21} z_2}{M} \tag{15}$$

이다. 또한, 식 (11)에서

$$z_2 k_3 = 1 - \frac{M}{d_e K_{21}} + \frac{K_{21} t}{M} \tag{16}$$

이 되고, 식 (16)을 식 (15)에 대입하며 z_2에 대하여 풀면

$$z_2 = -\frac{\left(1 + \frac{z_3}{d_e} - \frac{K_{21}^2 t z_3}{M^2}\right) M}{K_{21}} \tag{17}$$

이 된다. 이와 같이 하여 z_2를 구하여 낸다. 구하여진 z_2를 가지고 식 (12)로부터

$$k_{22} = \frac{1 + K_{21} \frac{z_3}{M}}{z_2} \tag{18}$$

k_{22}를 구하고, 식 (11)로부터는

$$k_3 = \frac{1 - \frac{M}{d_e K_{21}} + \frac{K_{21} t}{M}}{z_2} \tag{19}$$

k_3를 구하면 된다.

IV. 제 2 조명광로의 해

4.1. 제 2 조명광로의 기본식

$$[k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3, k_4, -z_4, k_5, -z_5] = M' \tag{20}$$

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

$$[k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3,\ k_4,\ -z_4,\ k_5,\ -z_5] = 0 \tag{22}$$

식 (20), (21), (22)는 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.

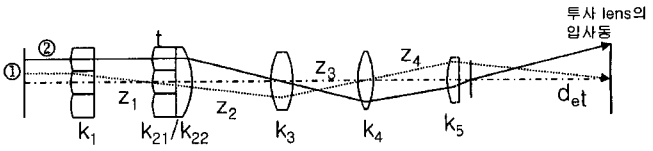

그림 5. 제 2 조명 광로도.

4.2. Relay 렌즈 1(k_3)의 해

우선 그림 5의 광선 ①이 k_2 렌즈와 k_4 렌즈(즉 relay 렌즈 2)에서 광축을 통과한다는 조건으로부터 아래의 두 식 (23), (24)를 구하고

$$[k_1,\ -z_1] = 0 \tag{23}$$

$$[k_1,\ -z_1,\ k_{21},\ -t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3] = 0 \tag{24}$$

위 두 식에서

$$[-t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3] = 0 \tag{25}$$

을 유도하여 내고, 여기서

$$k_3 = \frac{[-t,\ k_{22},\ -(z_2 + z_3)]}{[-t,\ k_{22},\ -z_2] z_3} \tag{26}$$

가 나온다.

4.3. k_4, z_4, k_5의 해

위 식 (20)은

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

이다. 식 (24)를 대입하여 정리하면

$$[-z_4,\ k_5,\ -z_5] = \frac{M'}{K_4} \tag{27}$$

이 되고, K_4에 역시 식 (24)를 대입하면

$$K_4 = [k_1,\ -z_1,\ k_{21},\ -t,\ k_{22},\ -z_2,\ k_3,\ -z_3,\ k_4]$$
$$= [k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2, k_3, -z_3]\ k_4 + [k_1, -z_1, k_{21}, -t, k_{22}, -z_2,\ k_3]$$
$$= K_3$$

가 되어 K_4에서 k_4의 값이 생략된 것을 알 수 있다. 그래서 식 (27)은

$$-z_4(1 - k_5 z_5) - z_5 = \frac{M'}{K_3} \quad \therefore z_4 = -\frac{\frac{M'}{K_3} + z_5}{1 - k_5 z_5} \tag{27'}$$

이 된다. 또, 식 (21)도

$$[-z_4,\ k_5,\ -(z_5 + d_e)] = [-z_4,\ k_5,\ -z_5] + [-z_4,\ k_5]\ (-d_e) = 0$$

이므로, 여기에서 다음 식이 유도된다.

$$z_4=\frac{1-\frac{M'}{d_eK_3}}{k_5} \tag{28}$$

식 (27'), (28)에서 z_4를 소거하면서 k_5에 대하여 정리하면

$$k_5=\frac{1-\frac{d_eK_3}{M'}}{d_e+z_5} \tag{29}$$

이다. 식 (22)에서 k_4를 묶어내면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$k_4=-\frac{[k_{22},-z_2,k_3,-(z_3+z_4),k_5,-z_5]}{[k_{22},-z_2,k_3,-z_3][-z_4,k_5,-z_5]} \tag{30}$$

이 때 식 (29), (28), (30)에서 차례대로 k_5, z_4, k_4를 구한다.

V. 초기설계

5.1. 설계조건

설계를 하기 위한 조건은 아래와 같다.

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

조건 2: 반사경은 포물경으로 되어 있고 광원은 반사경의 초점에 놓인다.

조건 3: 광원의 arc gab은 반사경에서 반사되어 출사되는 광이 광축에 대해 5의 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 크기는 대각선 크기 1.35"형으로 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 크기가 ϕ70 정도이므로 각 cell 렌즈의 크기는 11 mm× 6.5 mm이고 이러한 cell 렌즈가 가로 5개, 세로 9개 배치되는 구조를 택하였다. 조명 배율이 약 2.97배이면 원하는 영역을 조명할 수 있다.

5.2. 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 (17)을 고찰하여 보면

$$z_2=-\frac{\left(1+\frac{z_3}{d_e}-\frac{K_{21}^2tz_3}{M^2}\right)M}{K_{21}}$$

에서 괄호안 두 번째 항(z_3/d_e)에서 z_3는 d_e에 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_2에 비하여 대단히 작은 값이다. 따라서 두 항 모두 zero에 접근한다. 그러므로 위 식은 $z_2\approx -M/K_{21}$가 된다. 여기서 z_2는 기구적인 크기로 보아 145 정도가 되어야 하고 $M=-3$이라면

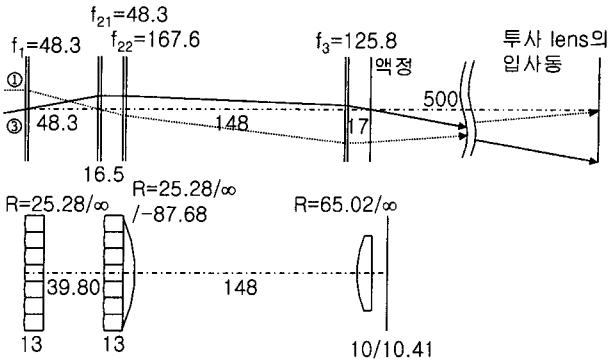

그림 6. 제 1 조명 광로의 초기 설계.

$$K_{21}\approx -\frac{M}{z_2}=0.021\ \text{mm}^{-1}$$

이다. 또한 $K_{21}=[k_1,-z_1,k_{21}]$이고 식 (6)에서 $k_{21}=1/z_1$이므로

$$K_{21}=k_1+k_{21}-z_1k_1k_{21}=k_1+k_{21}-k_1=k_{21}=\frac{n-1}{r_{21}}=0.021\ \text{mm}^{-1}$$

이다. FEL의 재질은 B270(n_d= 1.52299), 집광 렌즈의 재질은 BK7(n_d= 1.5168)을 사용한다면

$$r_{21}=\frac{n-1}{k_{21}}\approx 25.3\ \text{mm}$$

로 둘 수 있게 된다. 또한 제작 상 편하게 하기 위하여 $k_1=k_{21}$로 두어

$$f_1=f_{21}=z_1=\frac{25.3}{1.522990-1}\approx 48.3\ \text{mm}$$

로 된다. 이어서 식 (17), (18), (19)로부터

$$z_2=-\frac{\left(1+z_3/d_e-\frac{K_{21}^2tz_3}{M^2}\right)M}{K_{21}}\approx 148\ \text{mm}$$

이 된다. 위에서 구하여진 값을 기초로 렌즈의 초기 설계를 하여 보면 그림 6과 같다.

5.3. 제 2 조명광로의 relay 렌즈와 집광 렌즈의 초기 설계

Relay 렌즈와 집광 렌즈를 초기 설계하기 위해 $z_2=150$ mm, $z_3=125$ mm로 두면, 식 (26)에서

$$k_3=\frac{[-t,k_{22},-(z_2+z_3)]}{[-t,k_{22},-z_2]z_3}=0.01394\ \text{mm}^{-1}(f_3\approx 71.7\ \text{mm})$$

이 되고, $M'=3$, $z_5=17$ mm, $d_e=500$ mm로 두면

$$K_3=[k_1,-z_1,k_{21},-t,k_{22},-z_2,k_3]=-0.02511\ \text{mm}^{-1}$$

가 되고, 식 (29)에서

$$k_5=\frac{1-\frac{d_eK_3}{M'}}{d_e+z_5}=0.010031\ \text{mm}^{-1}(f_5\approx 99.7\ \text{mm})$$

가 된다. 식 (28)에서

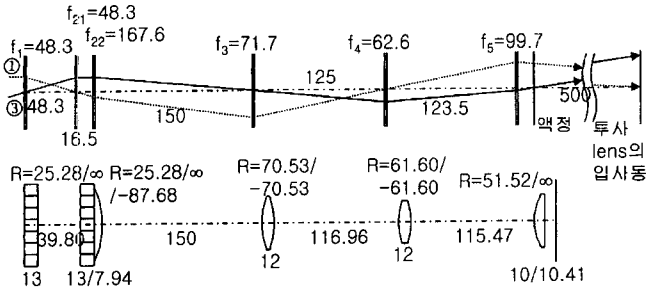

그림 7. 제 2 조명 광로의 초기 설계.

$$z_4=\frac{1-\frac{M'}{d_e K_3}}{k_5}=123.5\ \text{mm}$$

이고, 식 (30)에서

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

$$=0.015967\ \text{mm}^{-1}(f_4=62.6\ \text{mm})$$

가 된다. Relay 렌즈의 재질은 PMMA(n_d= 1.49173), 집광 렌즈의 재질은 BK7(n_d= 1.5168)을 사용하여 초기 설계의 결과를 정리하면 그림 7과 같다.

VI. 최적화 설계

최적화 설계를 위하여 렌즈 설계 프로그램인 OSLO(premium edition 6.1)를 사용하였다. 최적화 목표는 다음 그림 8과 같이 선정된 5개의 cell 렌즈에 각각 9개의 광선이 입사하도록 했으며, 그 광선이 각각 액정과 투사 광학계의 입사동에서 정해진 위치(x, y 좌표)에 도달하도록 설정하였다. 여기서, 액정의 정해진 위치에 도달하는 것은 균일 조명을 하기 위한 조건이고, 입사동의 정해진 위치에 도달하는 조건은 액정을 통과한 광선이 투사 광학계에서 손실되지 않고 모두 사용되게 하기 위한 것이다.

조건식(merit function)은 각 cell에 입사하는 광선이 액정면에서 균일한 분포를 만족시키는 위치에 도달하도록 270개의

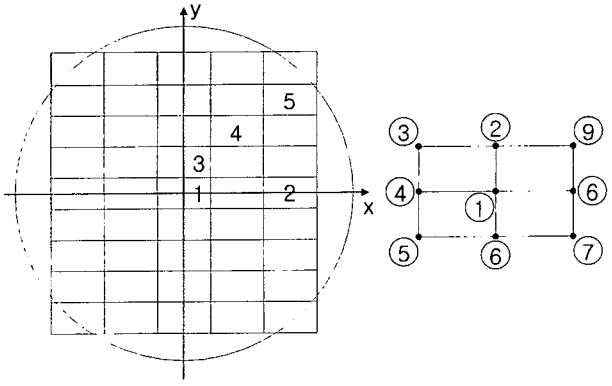

그림 8. 최적화에 사용되는 광선의 입사점.

표 1-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 구면)

면번호	곡률반경	원추계수	두께	재질	비고
STOP~7		제 1 조명 광로(green)와 동일.			
8	inf		2.00	BK7	이색성 필터
9	inf		24.48	AIR	
10	120.235		8.00	PMMA	relay 렌즈 1
11	-111.099		91.11	AIR	
12	inf		-26.23	AIR	거울
13	-46.383		-18.00	PMMA	relay 렌즈 2
14	73.855		-46.77	AIR	
15	inf		66.59	AIR	거울
16	110.081		9.00	BK7	집광 렌즈
17	-56.810		10.41	AIR	
18	inf				액정

표 1-d. 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

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, y 좌표)×3(축상광선 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 사용한다.

FEL와 중합 렌즈는 광원 근처에 위치하게 되므로 열에 강한 재질인 B270을 사용하였다. 또 제 1 조명 광로는 적색과 녹색 파장에서 사용하므로 열에 영향을 많이 받는다. 그래서 집광 렌즈의 재질은 플라스틱에 비해 열변형이 적은 BK7을 사용하였다. 그러나 제 2 조명 광로는 청색 파장이 사용되고, 빛이 적색과 녹색을 반사시키는 이색성 필터를 두 번 통과하므로 열선에 의한 영향이 적을 것으로 판단되므로 relay 렌즈에는 사출에 의한 대량이 가능한 PMMA를 사용하였다. 제 2 조명 광로에 사용되는 relay 렌즈와 집광 렌즈를 각각 구면과 비구면으로 설계하여 성능을 비교하여 보았다.

실제 조명 광로 중에는 이색성 필터가 45도 각도로 놓여 있어 조명 광로에 영향을 주므로 본 설계에서 이색성 필터를 삽입하여 최종 설계를 진행하였다. 최종 설계값은 표 1이고, 광로도는 그림 9와 같다.

설계의 타당성을 검증하기 위해 최적화 조건에서 사용한 광선이 정해진 좌표에 벗어나는 정도를 계산하여 표 2에 정리해 놓았다. 또한 광선이 액정면의 정해진 곳에 도착하는 x, y 좌표를 그려 보았다. 이것이 그림 10, 11, 12, 13이다.

표 2에서 평균값은 최적화에 사용된 광선이 액정의 정해진 위치에서 벗어나는 x, y 좌표 성분을 각각 계산한 값이며, 그 값이 0이면 광선이 정해진 위치에 도달하는 것을 의미한다. 최대값은 정해진 영역 밖으로 광선이 벗어나는 최대값이고, 최소값은 전해진 영역 안으로 침투하는 최대값을 의미한다.

그림 10, 11, 12, 13에서 숫자 없이 'Y' 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 8과 같이 광선이 입사되는 FEL의 cell 번호이다.

제 1 조명 광로의 경우, 모든 렌즈를 구면으로만 설계할 수 있었으며, 적색와 녹색에 대해서 모두 좋은 성능을 갖는 것을 그림 10, 11에서 시각적으로 확인할 수 있다. 그러나 제 2 조

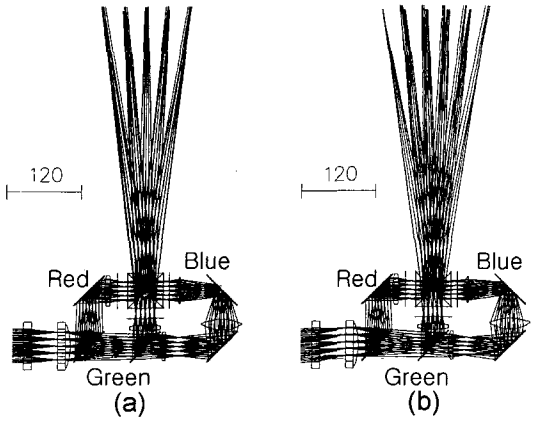

그림 9. 광로도. (a) 축상 광선 입사, (b) 비축 광선 입사.

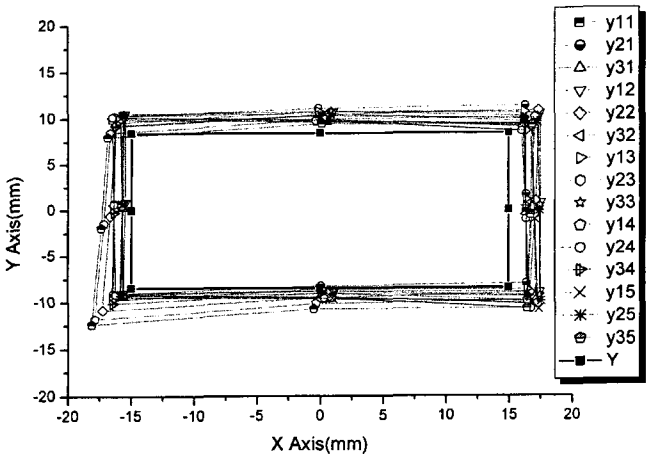

그림 10. 적색 액정에서 광선의 도달 위치.

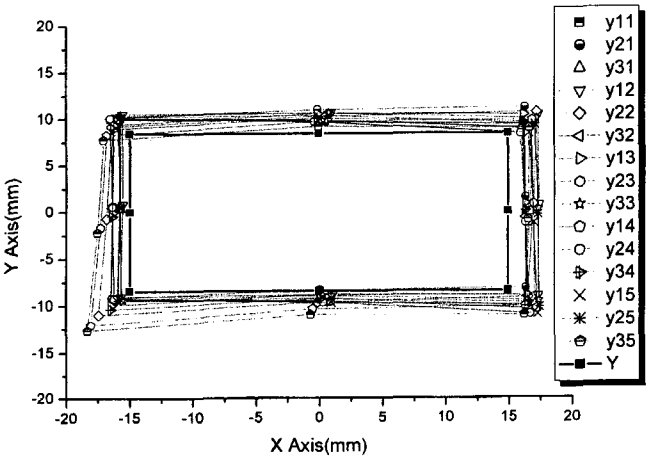

그림 11. 녹색 액정에서 광선의 도달 위치.

표 2. 광선이 빗나가는 정도(단위 : mm)

	green		red	
	x	y	x	y
평균	0.265641	0.047279	0.320227	0.185846
표준편차	0.544155	0.799928	0.543318	0.771771
최소값	−1.93654	−2.97045	−1.7551	−2.68845
최대값	1.152145	1.494701	1.231346	1.621194

	blue (relay 렌즈 구면 설계)		blue (relay 렌즈 비구면 설계)	
	x	y	x	y
평균	0.282192	−0.06579	0.284107	−0.05277
표준편차	0.860776	0.43586	0.721216	0.396731
최소값	−1.33136	−0.75919	−1.0168	−0.75143
최대값	3.611466	1.702288	3.014617	1.104073

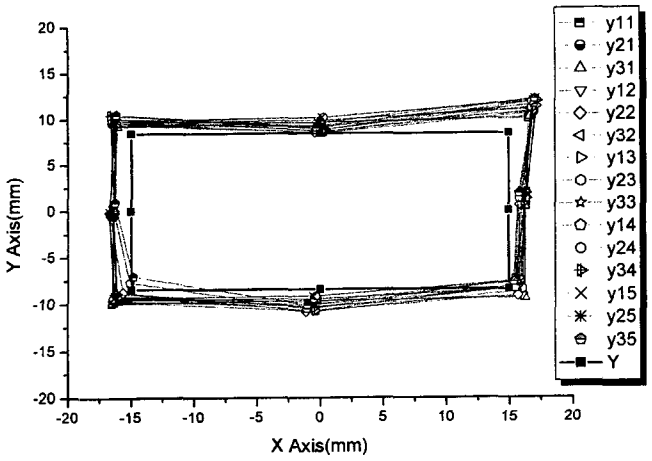

그림 12. 청색 액정에서 광선의 도달 위치(relay 렌즈 구면 설계).

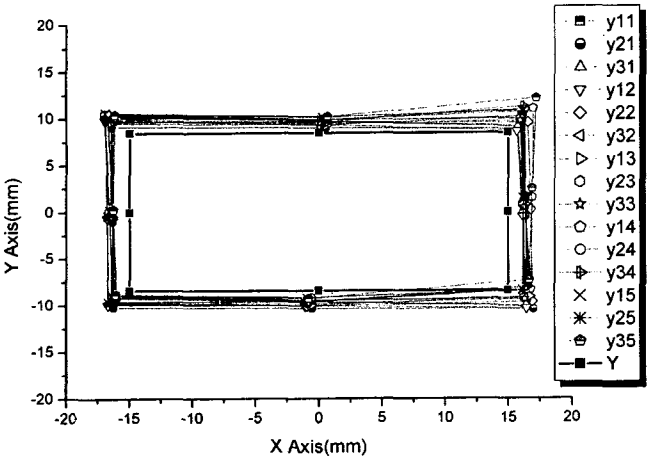

그림 13. 청색 액정에서 광선의 도달 위치(relay 렌즈 바구면 설계).

명 광로에서는 relay 렌즈를 구면으로 설계하였으나 더 좋은 성능을 얻기 위해 relay 렌즈를 비구면화하여 설계하였다. 그러나 집광 렌즈는 비구면을 사용하여도 성능의 변화가 거의 없었다. 이러한 이유는 집광 렌즈는 액정에 가까이 있으므로 액정에서 멀리 떨어진 relay 렌즈에서 보다 빛의 경로에 영향을 적게 주기 때문이다.

relay 렌즈의 비구면화에 의한 성능 변화는 표 2 및 그림 12와 13을 비교하면 큰 차이는 없는 것으로 보이나, 투사 광학계 입사동 중심에 수렴하는 정도는 그림 14에서 그 차이를 시각적으로 확인할 수 있다. 따라서 조명 균일도 뿐만 아니라 투사 광학계의 입사동으로 수렴하는 것도 고려하면, relay 렌즈를 비구면화하는 것이 좋을 것으로 생각한다.

VII. 결 론

본 연구에서는 3-패널 방식의 액정 projector에 사용되는 조명 광학계의 원리를 분석하여 해석적으로 풀고, 최적화 설계

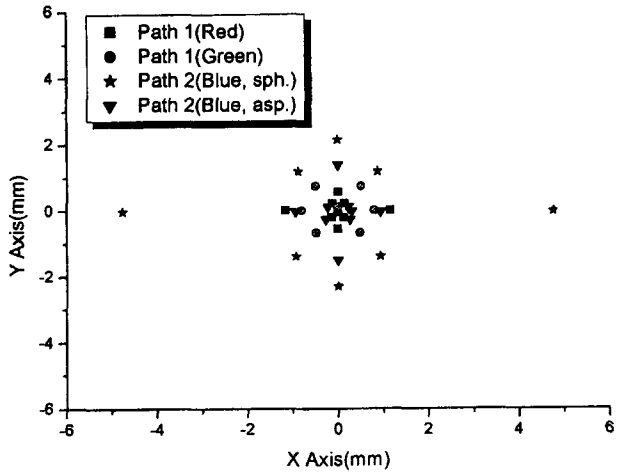

그림 14. FEL 중심 cell에 입사한 광선의 투사 광학계 입사동 도달 위치.

를 진행하는 등의 설계 체제를 완성하였다. 여기에는 동일한 크기를 갖는 FEL 2개를 사용하는 방법을 채택하였고 FEL를 사용하는 조명계의 원리를 분석하여 이에 맞게 수식을 해석적으로 유도하고, 여기서 얻은 수식에 원하는 조명계 사양을 대입하여 조명 광학계의 초기 설계를 얻었다. 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, "液晶プロジェクター의照明光學系," 光技術コンタクト, vol. 39, no. 9, pp. 606-643 1999.

[2] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (Interscience Publisher, Inc., New York, 1958), Chapter 5.

[3] M. Herzberger, "Precalculation of Optical Systems," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 42, p. 637, 1952.

[4] 정진호, 줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석, 경남대학교 박사학위논문(1994).

Illumination system design for the liquid crystal display projector using fly-eye lenses

Jae Myung Ryu and Jae Heung Jo

Applied Optics and Electromagnetics, School of Natural Sciences, Hannam University, Daejeon 306-791, KOREA

Jin Ho Jung†

R&D center, Seoul Opt. Ind. Co., LTD. Eumsung 369-841, KOREA

†E-mail: proopt@kornet.net

Jeong Jin Lee

KOLEN Co., LTD. Sungnam 461-191, KOREA

(Received October 22, 2001 ; revised manuscript received April 30, 2002)

The principle of an illumination system including fly-eyes lenses for a liquid crystal display (LCD) projector with 3-panels was presented and its optical system was designed by using the OSLO (premium edition 6.1) optical system design program. Two panels of the illumination system are well aligned for so that the illumination path length is the same, and the third panel has a longer pass length than the others. The two illumination types with the same or different illumination path lengths were derived by using the paraxial ray design method. Refraction powers and positions of each lens were analytically determined by the method, and the damped least square method was utilized to obtain the optimized uniform illumination system.

Classification codes : SM010, SM020.