

마이크로 디스플레이를 이용한 프로젝션 TV용 광학계 설계

박성찬[†] · 이정열

단국대학교 첨단과학대학 전자물리학과
Ⓣ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2006년 3월 2일 받음, 2006년 6월 1일 수정본 받음)

본 논문에서는 LCOS형 마이크로 디스플레이를 이용하여 60인치 이상의 대화면에서도 고해상도 및 슬림형이 가능한 프로젝션 TV용 광학계를 설계하였다. 조명광학계, 투사광학계, 색분리 합성계 그리고 마이크로 디스플레이 사이의 상호관계를 정량화하여 최적의 광학엔진을 구현하기 위한 초기데이터를 설정하고, 이로부터 최적화 과정을 통하여 각각의 광학계를 설계하였다.

고휘도를 구현하기 위한 3-panel 방식을 도입하고, 4개의 프리즘을 대칭적으로 배열하여 RGB의 광경로가 동일하도록 색분리 합성계를 구성하여 조명광학계를 컴팩트하게 설정하였다. 또한 투사광학계의 렌즈 군 사이에 거울을 삽입하여 접은 형태로 구성하여 고해상도 및 슬림형이 가능한 광학엔진을 설계하였다.

주제어 : Micro display, Light engine, Projection lens, Relay lens, Fly-eye lens.

I 서 론

세계 디지털 TV 시장은 디지털 방송의 본격화 및 미국 연방 통신 위원회(FCC)가 2007년까지 디지털 튜너의 내장 의무화를 추진하는 등 본격적인 성장 단계의 진입으로 PDP, LCD, 프로젝션 TV의 시장 확대가 더욱 가속화 되고 있다. PDP TV와 LCD TV에 비해 프로젝션 TV의 경우 낮은 가격으로 50인치 이상의 대화면을 구현하기 쉽지만 제품의 슬림화와 고화질에 대한 보완이 요구되고 있다.

본 논문에서는 고휘도 및 고화질, 그리고 대화면을 위해 마이크로 디스플레이 소자(micro-display, MD)인 LCOS를 이용한 프로젝션 TV용 광학계를 설계하였다. 최적의 광학계를 설계하기 위해 필요한 프로젝션 TV의 핵심부품인 광학엔진의 구성에 대한 기본적인 원리에 대해 논의하겠다. 또한, 광학계의 설계 및 해석과정에서 사용되는 근축광학 및 광학 불변량을 이용하여 조명 광학계의 특성과 밀접한 관계가 있는 first orders에 대해 다루겠다.

조명광학계 및 투사광학계를 프로젝션 시스템에서 요구하는 기하학적인 구조와 특성을 만족시키도록 최적 설계하였으며, 프로젝션 TV용 광학계의 특성을 고려하여 성능을 평가한 결과, 모든 수차는 시스템에서 요구하는 범위내로 잘 보정되었으며, MTF 값은 전체 field에서 공간주파수 60 lp/mm에 대해 35 % 이상으로 full-HD급 고해상도를 만족하였다. 또한, 색분리 합성계를 대칭적으로 구성하여 그 크기를 최소화 시키고, 투사광학계의 화각을 넓혀 반사면을 이용한 접은(folding) 형태로 설계하여 고해상도 및 초슬림형 프로젝

션 TV를 구현할 수 있는 광학계를 구성하였다.

II 프로젝션 TV용 광학엔진의 구조

2.1 광학엔진의 구성

TV 영상 신호를 스크린에 확대 투사하는 핵심 부품을 광학엔진(light engine)이라 하며 광학엔진의 성능이 스크린에 맺힌 상의 해상도를 결정하고, 크기와 특성에 따라 프로젝션 TV의 두께를 결정한다.^[1] 그림 1은 프로젝션 TV용 광학엔진의 주요 부품 및 구조를 보여준다. 광학엔진의 구성은 마이크로 디스플레이, 조명광학계, 투사광학계 그리고 색분리 합성계로 되어있다. 여기서 마이크로 디스플레이 소자는 영상을 재생하며 조명광학계는 램프에서 나온 빛의 광도 분포를 균일하게 하여 마이크로 디스플레이 소자에 조명하는 역할

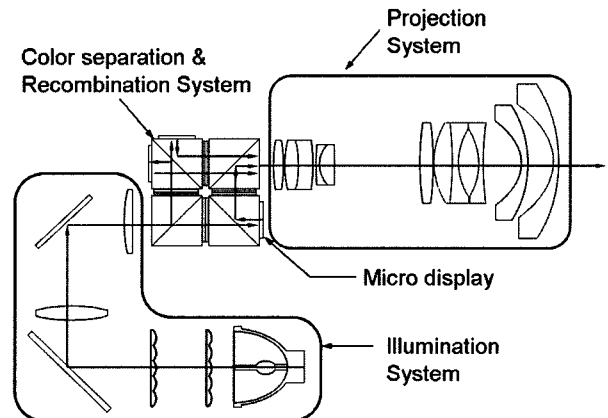


그림 1. 광학엔진의 구조.

[†] E-mail: scpark@dankook.ac.kr

을 한다. 조명광학계는 광도 분포를 균일하게 만드는 fly-eye lens와 마이크로 디스플레이에 정확히 조명하기 위해 사용되는 relay lens로 구성된다. 조명된 영상을 투사광학계에 의해 스크린에 확대투사하여 대화면의 TV 영상을 구현하게 된다. 색분리 합성계는 빛을 적색(R), 청색(G) 그리고 파랑색(B)으로 분리하고 마이크로 디스플레이에 각각 조명하여 얻어진 영상을 다시 합성하는 역할을 한다.^[2]

2.2 색분리 합성계

마이크로 디스플레이 기반의 프로젝션 TV용 광학엔진은 고성능, 고휘도를 위해 램프의 빛을 RGB로 분리하여 3개의 panel에 입사시킨다. 1개의 panel은 WSXGA에 해당되는 1920×1024개의 화소를 가지므로 3-panel을 사용할 경우 3배의 해상도를 가지게 된다. 또한 각 화소가 RGB로 분할되지 않으므로 개구율도 커져 고휘도를 얻는 것이 가능하다.

3-panel을 사용할 경우 램프에서 나오는 백색 광원을 dichroic filter를 사용함으로써 RGB로 각각 분리하여 panel에 입사시켜 얻은 영상을 mirror 및 색합성 프리즘을 사용하여 RGB 영상을 다시 결합하게 된다. 이러한 시스템을 색분리 합성계라고 하며, 광학엔진의 구성과 마이크로 디스플레이의 특성에 따라 여러 가지 구조를 가진다.

투과형 LCD와 같은 기존의 마이크로 디스플레이 경우 밝기가 어둡고 개구율이 낮아 각 화소간의 간격이 눈에 보이고, 반사형 DLP는 거울의 반사원리를 이용하여 광 효율은 좋지 않지만 가격이 높고 화소의 크기에 해당되는 거울의 크기에 대한 제한과 반응속도가 느려 full-HD급의 고해상도 구현이 어렵다. 그에 반해 반사형 LCOS의 경우 광 효율이 좋고 우수한 개구율과 많은 화소 수는 고해상도 구현을 가능하게 한다.

일반적인 색분리 합성계의 경우 RGB 각각의 광로정이 동일하지 않기 때문에 relay lens의 구성이 다르게 되며, 반사형 마이크로 디스플레이의 경우 각 panel에 프리즘을 사용하고 색합성을 위해 추가적으로 X-prism을 사용하게 되므로 구성이 복잡해진다.

본 연구에서는 3개의 color-select wave-plate와 dichroic filter, 그리고 PBS(Polarized Beam Splitter)를 포함한 프리즘 4개를 사용하여 색분리 합성계를 그림 2와 같이 대칭성을 갖도록 구성하였다.^[3] Polarizer를 사용하여 백색광을 편광시키고 프리즘에 입사하게 되면 color-select wave-plate에 의해 RGB 중 하나의 편광특성을 변화시켜 PBS에 의해 분리시킨다. 색분리된 RGB는 각각의 panel에 입사되고 영상을 다시 반사시킨 후 동일한 방식에 의해 RGB 영상을 합성하게 된다. 이 방식의 장점은 램프에서부터 각각의 RGB의 마이크로 디스플레이까지의 광로정이 같으므로 relay lens의 구성이 동일하며 프리즘 내에서 색분리 및 합성이 가능하므로 색분리 합성계 중 구성이 가장 단순하여 광학엔진의 부피 및 두께를 크게 줄일 수 있다.

결과적으로 그림 2와 같이 색분리 합성계를 구성함으로써 매우 컴팩트한 TV Set를 구현할 수 있다.

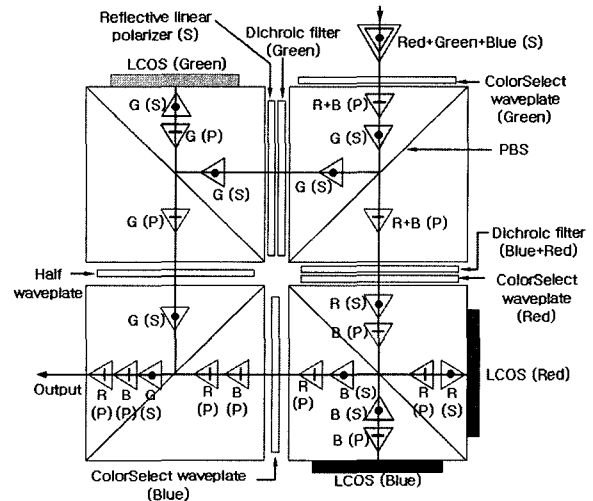


그림 2. 색분리 합성계의 원리.

III. 조명광학계 설계 및 성능 평가

3.1 조명광학계의 사양 결정

마이크로 디스플레이로 사용되는 LCOS panel은 액정의 특성상 자체발광이 불가능하므로 구현될 영상을 스크린에 투사하기 위해서는 광원이 필요하게 된다. 광학엔진의 광원으로는 초고압 수은(HID)램프를 사용하며 램프에서 나오는 불균일한 빛을 panel의 전면에 밝고 균일하게 조명하는 조명광학계가 요구된다. 본 연구에서 채택한 Köhler illumination system은 광원의 필라멘트의 상을 투사렌즈계의 입사동에 위치시켜 집광효율 및 광도 분포의 균일도를 증가시킨다. 램프에서 나오는 빛의 intensity는 단면에 대해 균일하지 않고, 이런 빛이 마이크로 디스플레이(LCOS)에 반사되어 나오면 스크린에서 상의 밝기가 균일하지 않게 되므로 균일도를 증가시키기 위해 fly-eye lens(FEL)를 사용한다. 조명광학계에서 FEL과 panel의 크기에 정확히 조명하도록 relay lens를 구성하여 조명 광도에 대한 조건을 설정하고, 그에 맞게 기본식을 세우고 풀어서 근축 설계값을 구한 다음 최적 설계과정을 통해 조명광학계를 설계하고자 한다.

조명 조건을 만족하도록 조명광학계의 1차량을 결정하기 위해서는 램프 및 마이크로 디스플레이의 크기, 그리고 투사광학계의 F-number와 초점거리를 먼저 결정해야만 한다. 램프를 물체로 간주하면 조명광학계의 상의 위치는 투사렌즈계의 입사동이 되므로 조명계의 입사동 및 마이크로 디스플레이는 주어진 물상점(conjugate points)에서 주요면의 역할을 하게 된다. 이때 광학계의 특이점을 이용하여 주광선과 보조광선의 광선 추적을 통해 광학계의 1차량을 결정하였다.^[4] Fly-eye lens의 beta angle과 relay lens의 입사각은 동일하며, 이것은 광학 불변량 공식으로부터 구할 수 있다. 이러한 광학 불변량 값은 광학엔진 시스템 분석의 중요한 역할을 하며, 이로부터 빛의 Flux도 결정된다. 그림 3은 조명 조건을

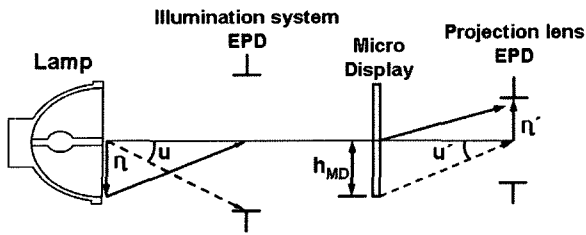


그림 3. 조명광학계의 구성도.

만족하는 조명광학계의 구성도이다.

광학 불변량 중의 Helmholtz's invariant(H)에 대한 식은 다음과 같이 주어진다.

$$H = n\eta \tan u = n'\eta' \tan u' \quad (H: \text{constant}) \quad (1)$$

그리고

$$\tan u = \frac{\eta'}{\eta} \times \frac{h_{MD}}{f'_{PL}} \quad (2)$$

이다. 여기서, n' 은 상측의 굴절률, η' 은 상크기, 그리고 u' 은 상측에서의 근축각이다. 또한 h_{MD} 는 마이크로 디스플레이의 반지름, f'_{PL} 은 투사렌즈의 초점거리이다. 상측의 광학 불변량 값은 투사렌즈의 초점거리 및 입사각의 크기를 이용하여 쉽게 구해지며, 이로부터 물체측의 램프크기(η)를 대입하여 입사각 u 에 해당하는 fly-eye lens의 beta angle을 구해 낼 수 있다. 이러한 조명조건과 그림 3의 조명광학계의 구성으로부터 relay lens의 초점거리(f'_{RL})에 대한 식은 다음과 같이 주어진다.

$$f'_{RL} = \frac{h_{MD}}{\tan u} \quad (3)$$

Fly-eye lens는 광도분포를 균일하게 해주는 역할을 하며 2번째 FEL은 사각에서의 입사되는 광선을 모아주므로 relay lens의 입사각에 영향을 주지 않는다. 따라서 relay lens는 FEL의 beta angle(u)과 동일한 입사각을 가지므로 마이크로 디스플레이 크기와 식 (3)으로부터 초점거리를 결정한다. 표 1은 본 연구에서 사용할 램프 크기, LCOS panel의 사양, 그리고 투사렌즈의 목표사양을 기본 값으로 하고, 근축광선 추적 및 광학계 불변량을 이용하여 얻어진 조명광학계의 1차량(first orders)이다.

3.2 Fly-eye lens 설계

Fly-eye lens는 여러 개의 lens cell로 구성되어 있으며, 각 cell은 렌즈 형상을 가진다. 본 논문에서는 16:9 와이드(wide)형의 마이크로 디스플레이(MD)를 사용하기 때문에 FEL cell의 형태도 16:9의 비율을 갖는 rectangular 형을 사용하였다. Rectangular 형은 일반적인 광학계 성질인 회전대칭성을 갖

표 1. 조명광학계의 설계 사양

NO	항 목	설정 값	단위
1	램프 크기	D : 60.02	mm
		H : 52 V : 30	
2	LCOS Panel 크기	0.7 inch, D/2 : 8.93	mm
3	투사렌즈	입사각 직경	4 mm
		초점거리	9.58(in air), 14.5(in LCOS) mm
4	Fly-eye lens beta angle (u)	3.56	deg.
5	Relay lens의 초점거리	143.88(in air), 218(in LCOS)	mm

지 않으므로 x-축(가로)과 y-축(세로)에 해당하는 각각의 구경(aperture) 크기와 입사 각도를 고려하여 fly-eye lens를 설계하였다.

Fly-eye lens는 사양에서 요구하는 램프의 크기 및 광도분포의 균일도를 고려하여 전체 array 수를 결정한다. FEL의 cell 크기가 작아질수록 lens array 수는 증가하여 MD에서의 균일도는 증가하게 되며, 또한 초점거리가 짧아져 더욱 슬림한 조명광학계 구성이 가능하다. 그러나 제작 및 단가적인 측면에서 부적합하며 조립 과정에서도 공차에 민감하게 반응한다. 반대로 cell의 수가 너무 적을 경우 충분한 효율을 내지 못하므로 25~40개의 cell을 사용하는 것이 효과적이다.

결정된 FEL의 array 수와 램프 크기에 해당하는 면적을 고려하면 각각의 cell 크기가 정해진다. 정해진 cell 크기는 FEL의 입사각에 해당하며 relay lens의 경우 MD의 크기가 입사각의 직경이 된다. 조명광학계의 효율을 극대화하는 조명조건을 만족시키기 위해 FEL과 relay lens의 F-number가 동일하도록 FEL의 초점거리를 결정하였다.

Fly-eye lens의 각 cell에 대한 초점거리(f')는 다음과 같이 주어진다.

$$f' \text{ of FEL} = \text{FEL cell size} \times \frac{f' \text{ of relay lens}}{\text{Micro display size}} \quad (4)$$

그림 4는 FEL의 구성도와 relay 렌즈에 의한 조명과정을 보여준다. 구성도를 보면 FEL의 cell이 입사각 역할을 하며 relay lens에서는 MD가 입사각 역할을 한다. 두 광학계는 동일한 F-number를 가져야 하므로 식(4)에 의해서 FEL의 초점거리가 결정된다. MD의 크기와 relay lens의 초점거리는 이미 식(3)으로부터 표 1에서 정했으며, FEL의 array 수를 결정하면 cell 크기 및 초점거리도 정해진다.^[5-7]

본 연구에서는 LCOS의 형태 및 제작단가를 고려하여 FEL의 각 cell은 직사각형으로 16:9 비율을 가지며 5×5 array (25개)로 구성된 FEL를 설계하였다. FEL은 몰딩(molding) 방식으로 제작을 하므로 convex-plano 형상으로 설계했으며, 첫 번째 FEL의 초점에 두 번째 FEL를 위치시켜 광학계의

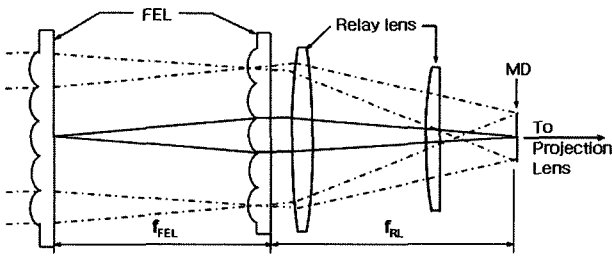


그림 4. Fly-eye lens 및 relay lens에 의한 조명 원리.

표 2. Fly-eye lens의 설계 사양

NO	항 목	설정 값	단위
1	Fly-eye lens의 셀 크기	D : 12.62	mm
		H : 11 V : 6.19	mm
2	Fly-eye lens의 beta angle	D : 3.56	deg.
		H : 3.09 V : 1.74	
3	Fly-eye lens array의 개수	5 × 5 (=25개)	EA
4	Fly-eye lens의 초점거리	101.8	mm
5	Fly-eye lens의 두께	2.5	mm
6	Fly-eye lens의 곡률반경	53.0831	mm
7	Fly-eye lens 간 거리	99.7	mm

초점거리를 변화시키지 않고, 평행광이 아닌 사각에서 입사되는 광선을 마이크로 디스플레이 소자에 모두 집속되도록 하여 조명효율을 최대화 하였다. 이러한 조명특성을 고려하고, 식(4)와 표 1에서 주어진 조명광학계의 1차량으로부터 최적의 fly-eye lens를 설계하였다. 표 2는 fly-eye lens의 설계 데이터 및 특성을 보여 주고 있다.

3.3 Relay lens의 설계

조명광학계의 주요 설계 변수에 해당하는 relay lens의 F-number는 투사광학계와 동일하게 설정하여 조명 조건을 만족시켰다. F-number가 작아지면 광학계의 밝기는 증가하지만 입사동에 해당하는 LCOS panel 크기와 설계 가능한 투사광학계의 사양을 고려하여 적절한 값을 결정하였다.

본 연구에서 relay lens의 설계사양은 F/2.4, 반화각 3.56°, 그리고 공기중에서 초점거리는 143.88 mm로 결정하였다. Relay lens는 광학계의 일반적인 성능보다는 LCOS panel의 크기에 맞게 조명하는 역할을 담당하므로 가장 중점이 되는 요소는 적은 왜곡수차와 텔레센트릭(telecentric) 조건을 만족하도록 설계하는 것이다. 여기서 왜곡수차는 상의 크기를 변화 시켜 결국 조명이 되는 면적을 바꿀 수 있으므로 일반적으로 ±0.5 % 미만으로 설계해야 한다.^[8] 그리고 텔레센트릭 조건은 광학계의 출사동에서부터 주광선을 광축과 평행하게 출사하여 panel에서의 입사각도가 0°에 가깝도록 설계하는 것이다. 프로젝션 TV용 광학계는 색분리 합성계 및 편광 특성을 이용하므로 많은 광학 부품을 사용한다. 각 광학부품

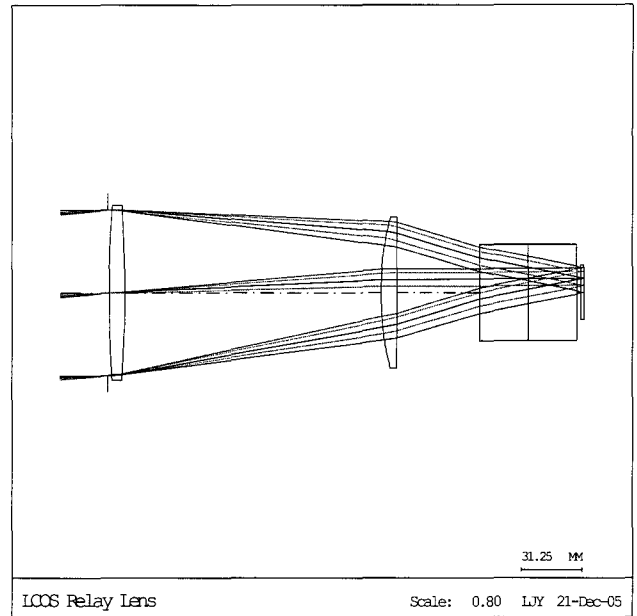


그림 5. 최적 설계된 relay lens의 구성도.

에 입사하는 각도가 작을수록 효율을 높일 수 있으며 조립 과정에서 공차에 의한 손실도 최소화 할 수 있다. 따라서 텔레센트릭 조건을 만족하는 광학계는 panel의 이동에 따른 조명크기의 변화를 줄일 수 있고 색분리 프리즘에 입사하는 각도를 작게 할 수 있다.^[9]

이러한 요구조건을 고려하여 최적 설계된 조명광학계용 relay lens가 그림 5이다. 제작을 고려하여 bi-convex, convex-plano의 형태로 설계하였으며 색분리 프리즘 및 기타 광학 부품이 위치할 수 있도록 후초점거리(BFL)는 96 mm로서 충분히 길게 하였다. 왜곡수차는 전 field에서 -0.5 %미만이며, 상면에서 주광선의 AOI(Angle of Incidence)는 0.3°미만으로 텔레센트릭 조건을 만족시킨다. 표 3은 최적 설계된 relay lens의 렌즈 데이터이다. 표 3에서 주어진 relay lens의 입사동 직경은 60 mm 이고, LCOS 매질내에서 초점거리는 218 mm 이다.

IV. 투사광학계 설계 및 성능평가

4.1 투사광학계의 설계 목표 사양

본 연구에서 설계하고자 하는 투사광학계는 60인치 이상의 대형 화면, 얇은 두께 그리고 고품질 프로젝션 시스템에 필요한 성능조건을 만족시키면서도 긴 후초점거리를 갖고 광각이며 텔레센트릭 조건을 만족시키는 구성이다. 이러한 특징들을 고려하여 광학계의 설계목표, 디스플레이 규격, 그리고 성능 평가기준을 결정했다. 마이크로 디스플레이 기반의 투사광학계에서만 볼 수 있는 first order 특성을 최적화할 때 구속조건으로 설정하였다.

표 3. Relay lens의 설계 데이터

NO	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
OBJ	INFINITY	INFINITY	
STO	INFINITY	0.5	
2	335.50	8.0	BSC7
3	-335.50	130.95	
4	78.487	8.0	BSC7
5	INFINITY	42.52	
6	INFINITY	25.0	BSC7
7	INFINITY	25.0	BSC7
8	INFINITY	2.0	
9	INFINITY	1.5	BSC7
IMG	INFINITY	0.0	

투사광학계 및 조명광학계 그리고 디스플레이 규격, 이 세 가지의 상관관계를 적절히 고려하여 설계목표 사양을 결정해야 경쟁력이 있는 광학계를 구현할 수 있다. 표 4는 투사광학계의 설계목표 사양 및 성능평가 기준을 열거하고 있다. 디지털 프로젝션 TV용 0.7인치 LCOS 마이크로 디스플레이를 사용하였고, 마이크로 디스플레이의 크기와 스크린의 크기를 고려하여 투사광학계의 화각(FOV) 및 투사거리를 결정하였다. 광학엔진의 두께를 줄이기 위해서 투사광학계의 화각은 80°이상으로 설정하였고, 따라서 초점거리는 10.2 mm정도가 적절하며, 이는 LCOS 내의 매질의 굴절률을 고려할 때 15.5 mm에 해당된다. LCOS panel의 경우 반사형 디스플레이 소사이므로 굴절률을 고려하여 초점거리를 결정해야 한다.

광학계의 화각을 크게 하기위해 파워 배치는 retro-focus 형이 적절하다. Retro-focus 형태는 2군 광학계로서 1군은 (-)power, 2군은 (+)power 배치를 통해 유효 초점거리가 후초점거리보다 짧은 광학계를 말하며, 투사광학계에 색분리 합성체를 위치시키기에 적당히 형태이다.^[10] HDTV용 투사광학계를 설계하기 위해 중요시해야할 광학 특성은 넓은 화각, 비교적 작은 F-number, 렌즈군의 파워 분배, 배율, 전장, 조리개 위치 등이다. 실제 광학엔진의 두께는 투사광학계가 folding 됐을 때 첫 번째 면부터 반사면까지의 거리가 된다.^[11,12]

4.2 설계 개념 및 최적화 과정

수차, F-number, 화각, 초점거리 등의 광학계의 성능, 크기, 무게 등을 고려하여 광학계의 장단점을 검토한 후 초기 광학계들에 대한 단점을 보완할 수 있도록 최적화 과정을 실행한다. 초기 광학계의 상태에 따라 변화시킬 수 있는 설계변수와 오차함수 및 그 가중치가 정해지게 되며 이를 설계 사양에 맞게 적절히 설정하여 원하는 광학계 성능을 최적화 과정을 통해 얻을 수 있다. 본 논문에서는 F/2.4, 화각 81°, 그리고 초점거리가 10.2 mm인 광학계를 목표로 설계하였다.

표 4. 투사광학계의 설계목표 사양 및 성능평가 기준

NO	PARAMETERS	FIRST ORDERS	단위	
1	Micro display	type	0.7" LCOS	inch
		resolution	WSXGA(1920×1024)	
		size	17.86(D) × 15.32(H) × 9.18(V)	mm
		unit pixel	8.5×8.5	μm
2	Screen size	62", 71"	inch	
3	F-number	2.4		
4	Field of View	80~85	deg.	
5	Effective Focal Length	10.2 (in air) 15.5 (in LCOS)	mm	
6	Back Focal Length	60	mm	
7	Over All Length	300 이하	mm	
8	Wavelength	620, 550, 460	nm	
9	Relative Illumination	80~90	%	
10	Angle of Incidence	0.5 미만	deg.	
11	Optical Distortion	0.5 미만	%	
12	TV-Distortion	0.5 미만	%	
13	Image Quality (MTF)	0.0F	70%이상 at 60 lp/mm	%
		0.7F	50%이상 at 60 lp/mm	
		1.0F	30%이상 at 60 lp/mm	

Retro-focus 형태의 투사광학계의 경우 화각이 커짐에 따라 왜곡수차가 크게 발생하게 되므로 (-)군의 렌즈를 meniscus 형태로 구성하는 것이 효과적이며, 첫 번째 렌즈는 비구면을 적용하였다. 초기의 power 배치가 정해지면 렌즈는 최적화 과정을 통하여 광학계의 error 함수의 값을 줄여 나간다. 최적화시 고려해야 할 요소는 주광선의 출사각, 비구면 렌즈의 위치, stop의 위치, 주변광량비등이며, 특히 광선이 광학면에 입사하는 각도가 클 경우 수차 발생 및 성능저하의 요인이 될 수 있으므로 설계시 주의해야 한다. 왜곡수차 보정을 위한 비구면 렌즈는 주광선의 입사각이 높은 위치에 설정하고, 구면수차를 보정하기 위해서는 조리개에 가까운 면에 비구면을 설정하는 것이 효과적이다.^[13]

본 연구에서 사용된 비구면 방정식은 다음과 같다.

$$Z = \frac{h^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1+k)h^2/r^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + \dots \quad (5)$$

여기서, $h = \sqrt{x^2 + y^2}$ 는 $x-y$ 좌표에서 정점으로부터의 수직거리, $k = -e^2$ 는 conic 상수, 그리고 e 는 이심률(eccentricity)이다.

3-panel을 사용하는 투사광학계의 경우에는 색분리 과정에서 각 panel에 입사되는 빛의 파장대가 다르게 된다. 각 panel에서 사용되는 파장 범위만을 고려하기 위해 색분리 합성체와 각 panel 간의 간격을 zoom 변수로 설정하였다. 첫

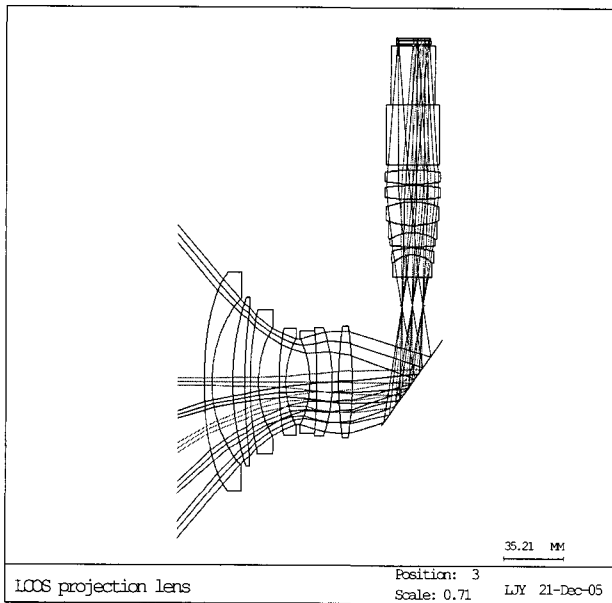


그림 6. 최적 설계된 투사광학계의 접은 형태의 구성도

번째 줌 위치(zoom position)에서는 Red (650~590 nm)에 해당하는 파장 범위만을 가중치를 주고, 두 번째와 세 번째 줌 위치의 경우 각각 Green (580~520 nm), Blue (485~440 nm)에 해당하는 파장 범위에 가중치를 주었다. Zoom 설정으로 색분리 합성계와 panel 간의 간격을 조절하여 색수차를 최소화함으로써 투사광학계의 렌즈 매수를 줄이고 성능을 높일 수 있다. 모든 줌 위치에서 목표 성능을 만족할 수 있도록 각 줌 위치에 대해 적절한 가중치를 설정하고 최적화 과정을 통하여 투사광학계를 설계하였다.^[14]

4.3 설계 결과 및 평가

프로젝션 TV용 투사광학계가 만족해야 하는 특성 및 구조를 고려하여 성능을 평가하였다. 표 5는 최적 설계된 투사광학계의 설계 데이터이다. 그림 6은 최적 설계된 투사광학계를 반사면을 사용하여 접은(folding) 형태의 구성도이다. 접은 형태의 투사광학계에서 첫 번째 면에서 반사면까지의 거리가 122 mm이며, 이는 프로젝션 TV의 두께를 결정하게 된다. 그림 7은 최적 설계된 투사광학계의 줌 위치 2(Green)에서의 수차특성을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 수차 특성이 안정적이며 중요시되는 종색수차 및 왜곡수차를 최소화하였다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 각각의 줌 위치에서 최적 설계된 투사광학계의 MTF 특성이다. 그림 9는 줌 위치 2에서 Through Focus MTF의 특성이며 상면이 약간 이동되어도 투사렌즈는 안정적인 성능을 구현함을 알 수 있다. 또한 각각의 줌 위치에서도 주광선의 AOI (Angle of Incidence)는 전 field에서 0.3°미만으로 설계 목표 값을 만족한다.

결과적으로 최적 설계된 투사광학계는 full-HD급 프로젝션

표 5. 최적 설계된 투사광학계의 설계 데이터 (단위: mm)

NO	Radius	Thickness	Glass	NO	Radius	Thickness	Glass
OBJ	INFINITY	850.0		15	-486.325	9.0	FC5
1	127.273 (비구면)	4.5	'E48R' $n_d = 1.5299$ $n_F = 1.5365$ $n_C = 1.5270$	16	-22.225	3.0	LAF2
				17	-49.883	0.5	
				18	465.745	6.0	BSC7
2	40.0 (비구면)	12.261		19	-32.038	3.0	EADF50
				20	64.743	8.5	FC5
3	83.120	7.0	BSC7	21	-54.721	2.729	
4	167.230	3.176		22	133.492	6.0	EBACED 20
5	105.023	5.0	EFD4	23	-133.492	0.5	
6	35.0	12.0		24	127.650	6.0	BACD14
7	80.926	4.0	BACD16	25	-127.650	2.285	
8	29.119	14.118		26	INFINITY	25.0	BSC7
9	-31.379	4.042	BACD16	27	INFINITY	25.0	BSC7
10	-250.90	9.250	EFD5	28	INFINITY	1.0	
11	-54.156	3.653		29	INFINITY	1.25	BSC7
12	113.746	8.0	EFD15	30	INFINITY	0.534	
13	-113.746	70.5		31	INFINITY	0.7	BSC7
STO	INFINITY	12.207		IMG	INFINITY	0.0	

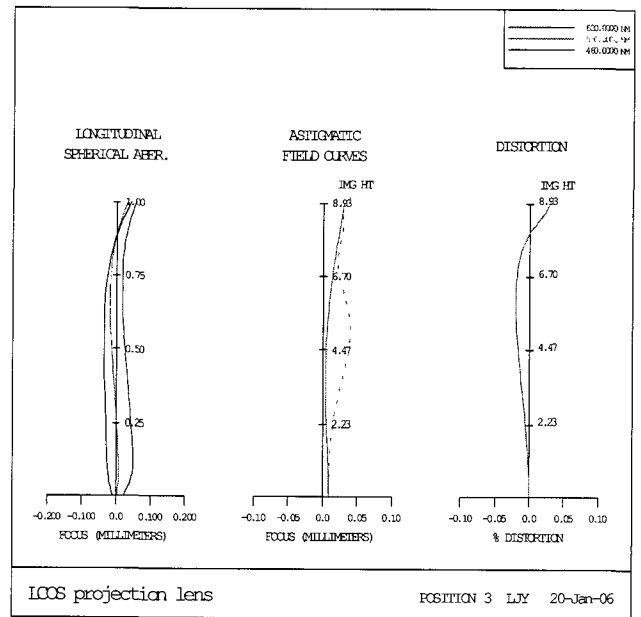
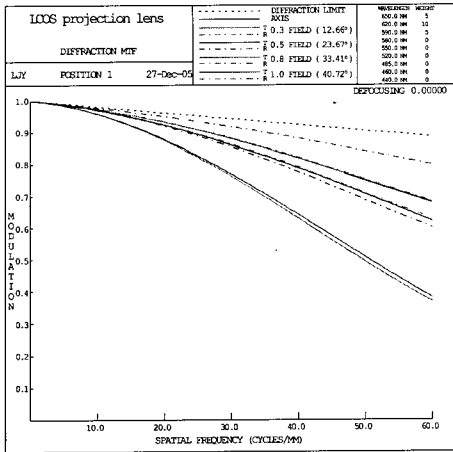
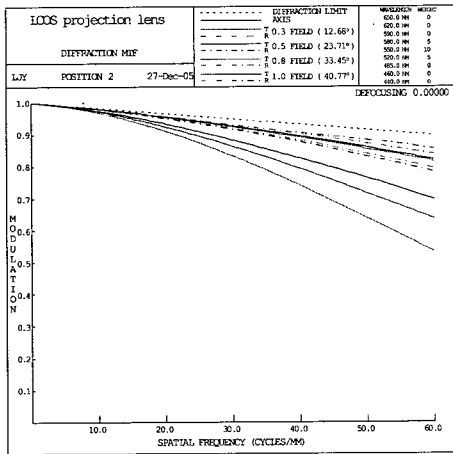


그림 7. 최적 설계된 투사광학계의 수차 특성(줌 위치 2, Green).

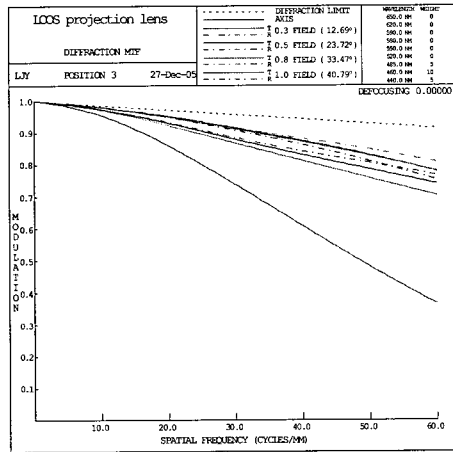
TV용 광학계의 요구조건에 해당하는 성능을 모두 만족시키며, 마이크로 디스플레이의 해상도, 그리고 기하학적인 특성을 고려한 광학계의 성능평가 결과 고휘도 및 고해상도를 구현하고 있음을 확인하였다. 또한 투사광학계를 접은 형태로 설계하여 결과적으로 광학엔진의 두께를 160 mm 이내로 슬림형 제작이 가능할 것으로 기대된다.



(a) 줌 위치 1 (Red)



(b) 줌 위치 2 (Green)



(c) 줌 위치 3 (Blue)

그림 8. 최적 설계된 투사광학계의 MTF 특성.

V. 결 론

본 연구에서 LCOS형 마이크로 디스플레이를 이용하여 60인치 이상의 대화면에서도 full-HD급의 고해상도 및 초슬림

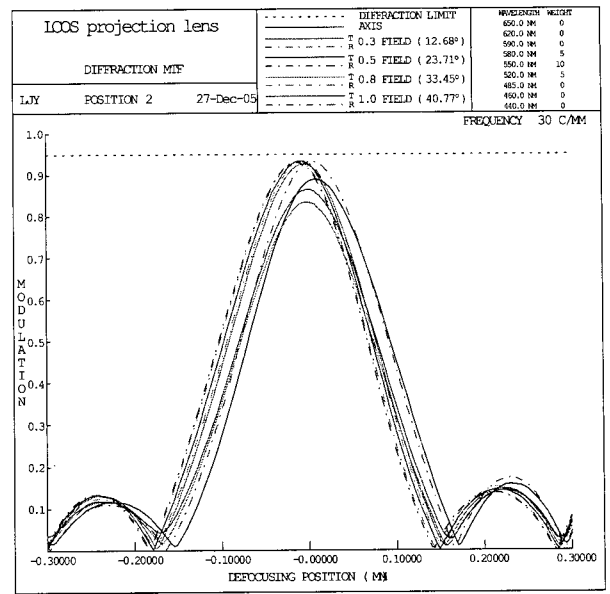


그림 9. 최적 설계된 투사광학계의 Through Focus MTF(줌 위치 2, Green).

형이 가능한 프로젝션 TV용 광학계를 설계하였다. 조명광학계, 투사광학계, 색분리 합성계 그리고 마이크로 디스플레이 사이의 상호관계를 정량화하여 최적의 광학엔진을 구현하기 위한 초기데이터를 설정하였다. 즉, 화각, 투사거리, F-number, 램프 크기, 그리고 마이크로 디스플레이의 특성 및 해상도와의 관계를 고려하여 조명광학계 및 투사광학계의 1차량을 결정하였고, 또한 안정적인 성능 확보를 위해 텔레센트릭 조건을 만족하도록 설계하였다.

색분리 합성계와 LCOS panel간의 간격을 zoom 변수로 설정하여 각각의 panel 별로 투사렌즈의 색수차를 보정하였고 4개의 프리즘을 대칭적으로 배치하여 광경로를 최소화함과 동시에 광학엔진을 콤팩트하게 구성할 수 있었다. 조명광학계는 스크린에서의 균일한 광도분포를 위해 fly-eye lens를 2매 사용하였고, 휘도를 높이기 위해 투사광학계의 입사동에 모든 광선이 수렴되도록 relay lens를 설정하였다. 또한 TV의 두께를 줄이기 위해 투사광학계의 화각을 80°이상으로 설정하였고, 렌즈군 사이에 반사면을 사용하여 접은 형태로 구성하여 보다 슬림한 제품 설계가 가능하도록 하였다.

본 연구과정에서 제안된 내용 및 결과는 60인치 이상의 대화면과 full-HD급의 고해상도를 추구하면서도 제품의 슬림화가 가능한 프로젝션 TV 시장에 주요한 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2004학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- [1] Edward H. Stupp and Matthew S. Brennessoltz, *Projection Displays*, (JOHN WILEY & SONS, England, 1998), pp. 5-9, 116-123.
- [2] 佐ヶ木正, *液晶ビデオプロジェクタ技術*, (トリケップス, 日本, 1992), pp. 33-41.
- [3] Arthur Berman, "Method and apparatus to increase the color gamut produced by LCOS and other projection systems", U.S. Patent 2005185147, 2005.
- [4] 이상수, *幾何光學* (교학연구소, 서울, 1985), pp. 55-61.
- [5] Optical Research Associates, "CODE V Reference Manuals", (Ver. 9.5, Pasadena, 2004)
- [6] Melvyn H. Kreitzer and Jacob Moskovich, "Projection lenses having reduced lateral color for use with pixelized pnaels", U.S. Patent 6,195,209, 2001.
- [7] Yoshihiro Masumoto, "Optical illumination system and projection display apparatus using the same", U.S. Patent 5,418,583, 1995.
- [8] W. T. Welford, *Aberration of Optical Systems* (Adams Hilger Ltd, Bristol and Boston, 1986), pp. 131-161.
- [9] 류재명, 조재홍, 정진호, 이종진, "Fly-eye lens를 사용하는 액정 projector용 조명 광학계의 설계", 한국광학회지, 제 13권 3호, pp. 173~181, 2002.
- [10] Robert C. Fischer and Biljana Tadic-Galeb, *Optical System Design*, (McGraw-Hill, New York, 2000), pp. 130-138.
- [11] Jacob Moskovich, "LCD projection lens", U.S. Patent 5,841,587, 1998.
- [12] 江原 克典, "DLP用投影ズーム렌즈", J.P. Patent 2001215411, 2001.
- [13] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering : The design of optical systems*, (McGraw-Hill, New York, 1990), pp. 403-411.
- [14] 김동하, 박종명, "프로젝션 디스플레이 장치의 프로젝션 장치", K.R. Patent 20010045373, 2001.

Optical System Design for Projection TV using Micro Display

Sung Chan Park[†], and Jung Yul Lee*Electro Physics Major, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA*[†]*E-mail: scpark@dankook.ac.kr*

(Received March 2, 2006, Revised manuscript June 1, 2006)

This paper discusses the optical system design for projection TV using LCOS type micro display, which provides the high resolution, slim depth, and a large screen of more than 60 inches. We analyzed the relationship between the illumination system, projection lens, color separation & recombination system, and micro display. From this quantitative analysis, the starting data for the optimum light engine was defined, and all optical systems were designed by an optimization process. Three RGB panels were proposed for a high luminence system, and the four prisms symmetrically located make equal optical path lengths for the RGB rays. This color separation & recombination system enables the a compact illumination system. Also, in order to the slim light engine with high resolution, the folded projection lens system was designed by inserting a mirror between projection lenses.

OCIS Codes : 080.2740, 080.3620, 220.2740, 220.4830.