

무대조명용 LED 광학시스템 설계 및 시뮬레이션 결과

(The Optical Design and Simulation Results for LED Stage Lighting System)

박광우* · 주재영**

(Kwang-Woo Park · Jae-Young Joo)

Abstract

The principle of an illumination and projection system including LED light sources for a spot type stage lighting system was presented, and its optical system was designed with optimizing parameters by the analytical methods. A dichroic mirror incorporated with an illumination system to optimizing LED source positions and to obtain the compact system. The projection system was optimized with specific constraints such as a chromatic aberration, distortion aberration and angle of incidence angles. Optimized design system has a beam angle from 10° to 45° , and its illuminance was 4,500lux at distance of 6m on the work plane.

Key Words : Stage Lighting System, LED, Projection System, Illumination System, Optical System

1. 서 론

1.1 연구의 배경

세계 방송장비 시장규모는 '12년 기준 450억 달러로 추정된다[1]. 국내 무대조명 시장은 연간 500억 규모 수준의 고부가가치 시장이다. 최근 LED 광원에 대한 발전으로 기존 할로겐 광원에 대한 대체 수요가 증가되고 있다. 기존 광원보다 80%이상의 전력소모가 가

능하며, 발열이 적어 공조시설과 같은 부수 장치가 필요 없어 운용비용이 절감된다. 할로겐 광원의 10배 이상의 수명을 가지며 사용시간에 따른 색온도 변화가 거의 없다. LED 광원을 이용한 방송 조명에 대한 기술은 국내에서는 OEM 형태로 일부 업체에 의한 생산이 이루어지고 있으나 선진국의 기술 수준에 맞추기에는 부족한 기술력을 가지고 있는 현실이다. '11년 기준, LED 광원을 이용한 방송용 조명장비 개발시 900억원의 수입대체 효과와 600억원의 내수 창출 효과가 있을 것으로 보고된 바 있다[2]. 국내 시장에서의 수입품 대체 및 신 시장 창출을 위하여 LED 광원을 이용한 방송 조명 기술의 개발이 절실함을 의미한다.

그중 무빙헤드를 가지는 스포트라임(방송무대에서 피사체의 화질을 결정짓는 메인조명) LED 무대조명 시스템의 경우, 고효율 LED 광원엔진의 장착, 차광판을 이용한 다양한 연출 효과, 조리개와 렌즈군의 이동을

* Main author : Senior Researcher, Smart Lighting System Research Center, Korea Photonics Technology Institute (KOPTI)

** Corresponding author : Senior Researcher, Smart Lighting System Research Center, Korea Photonics Technology Institute (KOPTI)

Tel : 062-605-9397, Fax : 062-605-9580

E-mail : pkw@kopti.re.kr

Received : 2014. 12. 30

Accepted : 2015. 2. 7

통한 자유로운 조명사이즈의 가변성, LED 광원의 색 결합을 통한 다양한 색상 구현성의 이유로 많이 사용되고 있다[3]. 하지만 본 시스템은 조명계와 투사계의 결합으로 인한 기술 난이도 때문에 대부분 수입에 의존하고 있다.

본 연구에서는 배광각과 중심조도에 대한 목표성능을 만족할 수 있는 조명계와 투사계의 설계 및 방법을 제시하고자 한다. 또한 배광각(10°~45°), 중심조도(4,500lx)를 만족할 수 있는 LED 스팟타입 조명 광학 시스템에 대한 설계 및 분석적 결과를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 무대조명용 광학 시스템

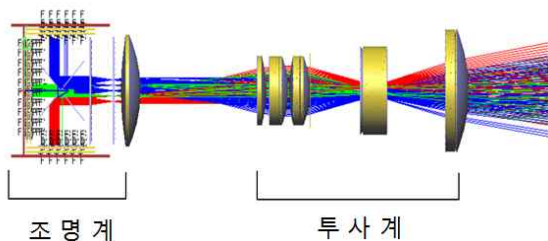


그림 1. 무대조명 시스템의 광학계 구성
Fig. 1. Optical system configurations of stage lighting system

스팟타입 무대조명 시스템의 광학계 구성은 그림 1과 같다. 광학계는 2개의 주요 하부 시스템으로 구성된다. 조명계, 투사계로 구성된다. LED에서 발산되는 광은 조명계에 의해 차광판에 균일하게 집광된다. 균일하게 집광된 빔은 투사계의 투사 광학계를 거쳐 원하는 위치에 일정한 크기의 이미지를 생성한다. 투사 광학계는 배율을 조정하는 렌즈군과 초점을 조정하는 렌즈군으로 구성된다. 각 렌즈군의 위치 변화에 따라 투광되는 빔 각도를 변할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 목표 배광각 10°~45°를 만족하며, 6m 거리에서 중심조도 4,500lx 이상 만족을 최종 목표로 제시한다. 목표성능 만족을 위한 상세 설계 내역은 아래 각 절에서 기술하기로 한다.

2.2 조명계

조명계는 그림 2에서와 같이 LED(red, green, blue, white), 시준 렌즈(collimator lens), dichroic mirror(DM), fly-eye lens(FEL), 집광렌즈로 구성된다.

LED에서 방출되는 램버시안 광은 시준 렌즈를 통과하여, 협각으로 바뀌게 된다. DM은 원하는 파장의 광만 투과·반사시킨다. 에텐듀 변화 없이 광량을 늘릴 수 있으며, 광원모듈의 소형화를 가능하게 한다. FEL은 다수의 렌즈 어레이를 이용하여 각 렌즈의 조명중첩을 유도한다. 조명 균일도를 확보하는 것이 특징이다[4-5]. 마지막으로 집광 렌즈를 통과하여 차광판에 균일하게 광이 모일 수 있도록 하였다.

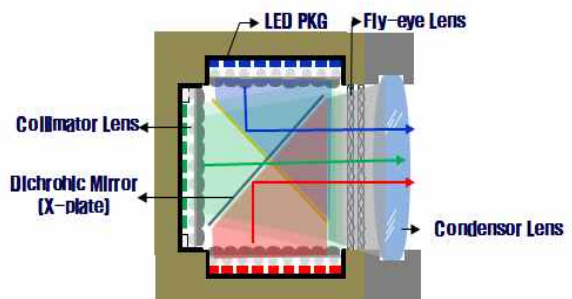


그림 2. 무대조명 시스템의 조명계 구성
Fig. 2. Illumination system layout

2.2.1 광원엔진에 따른 시스템 사양 선정

에텐듀는 전체 광학시스템의 효율 및 설계한계를 결정하는데 매우 중요한 개념이다[6]. 에텐듀는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Etendue = \pi \times A \times \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{(\pi \times A)}{(4(Fno))^2} \quad (1)$$

(A: 면적(mm²), θ : 방출각, Fno : F-수)

LED 광원에서 발산하는 주 방사각도를 120°로 가정하고 LED 칩 개수에 따른 에텐듀를 계산하였다. 본 시스템의 광원인 LED는 red, green, blue 각각 36개, white 40개가 사용된다. 광원 면적에 따른 에텐듀는 표 1과 같다.

표 1. 광원 면적에 따른 에텐듀
Table 1. Etendue by the source area

LED 칩	면적(mm ²)	에텐듀(mm ² sr)
Red, Blue, Green	108	254.47
White	40	187.37
Total	148	441.84

위의 에텐듀값을 바탕으로 광원, 차광판 그리고 투사렌즈 사이의 에너지가 보존된다고 가정하면 시스템의 손실은 발생하지 않는다. 그러므로 차광판도 같은 에텐듀값을 유지한다고 가정하고 투사렌즈 설계시 고려해야 할 Fno (F-수)값은 식 (2)에서와 같이 계산할 수 있다.

$$Fno = \sqrt{\frac{\pi \times \text{집광면적}}{4 \times \text{광원Etendue}}} \quad (2)$$

본 연구에서는 1차 집광면적인 차광판 사이즈는 25~30mm(직경)으로 정하였다. 이때 투사계의 F-수는 1.23 미만이어야 한다. 이 값은 이론적인 최대값이다. 즉 차광판에서 투사렌즈에 입사되는 주각도가 120°라는 의미이다.

2.2.2 시준 렌즈 설계

조명계에서 LED는 파장별로 red, blue, green 각각 36개, white 40개가 적용되었다. 시준렌즈는 LED가 ±90° 전방으로 방출되는 광을 FEL에 효율적으로 입사시키기 위하여, 조명영역 및 입사각을 적절하게 조절하는 것을 목적으로 한다. 설계방법은 다음과 같이 진행하였다.

- 1) LED 칩 사이즈 : 1×1mm, 대각길이 1.414mm 입사동으로 설정함 (공차감안 : 1.5mm)
- 2) LED 방사광 중 편측 60°이상에서의 광량은 전체 광량의 2-3% 수준으로 ±60°까지만 고려함.
- 3) 총 2개의 렌즈로 구성되며, 첫 번째 렌즈는 내열성이 강한 유리 재질, 두 번째 렌즈는 형상 성형이 자유로운 플라스틱 재질을 고려함.
- 4) 제1렌즈 초점거리 : 제2렌즈 초점거리=광원면적 : 목표 조명영역 비율을 이용함.

5) 목표 발산각 : 10°~15° 수준

설계는 LightTools 프로그램을 이용하였다. 그림 3은 시준 렌즈 설계 결과를 보여준다. 렌즈 설계사양은 표 2와 같다.

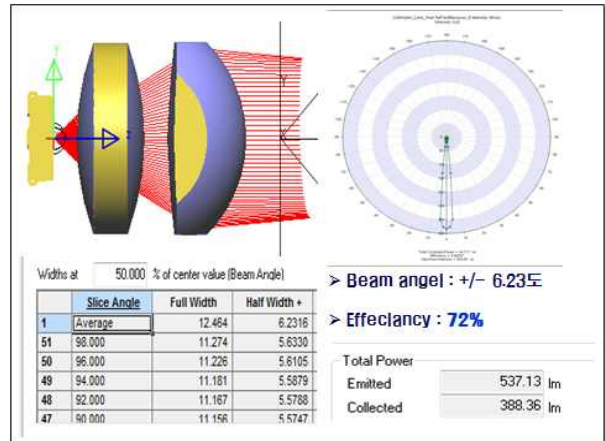


그림 3.시준 렌즈 설계 결과
Fig. 3.The design results of collimator lens

표 2. 시준 렌즈 설계사양
Table 2. Collimator lens data

구분	곡률(앞)	곡률(뒤)	두께	재질
제1렌즈	8.5mm	-8.5mm	3mm	Bk7
제2렌즈	12.4mm	-4.03mm	3.5mm	PMMA

제2 렌즈의 경우 앞면의 코닉 계수 : -45.063, 뒷면의 코닉 계수 : -0.18246, 1차 비구면 계수(A2) : -0.00091679를 포함한다.

2.2.3 이색성 미러 설계

DM은 red, blue, green, white 광원의 배치 및 광원 모듈의 소형화를 위해 설계되어 졌다. 각 면에 청색 투과, 적색 투과 코팅을 하여 원하는 색의 광원만 투과 또는 반사 하도록 하였다. 본 시스템에 적용된 LED의 파장특성은 그림 4와 같다.

DM은 2개의 평판으로 이루어져 있다. 원하는 형태의 파장은 통과시키고, 원하지 않는 파장은 흡수해 버릴 수 있도록 이색성 코팅을 적용하였다. 그림 5는 DM의 코팅성능을 보여준다.

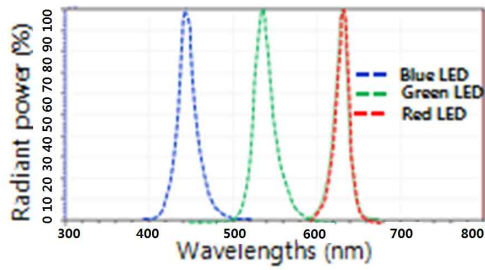


그림 4. LED의 파장특성
Fig. 4. LED spectrum properties

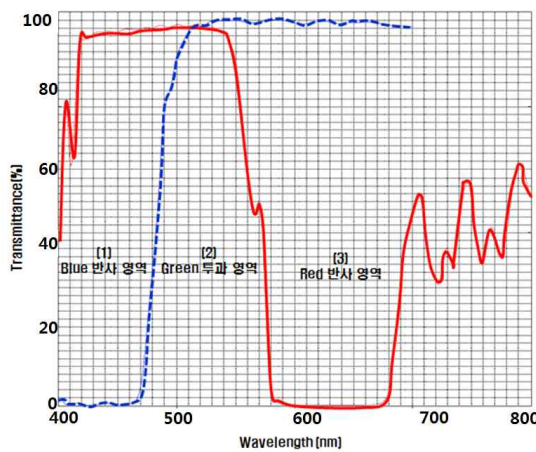


그림 5. 이색성 코팅 성능
Fig. 5. Optical performances of the dichroic coating

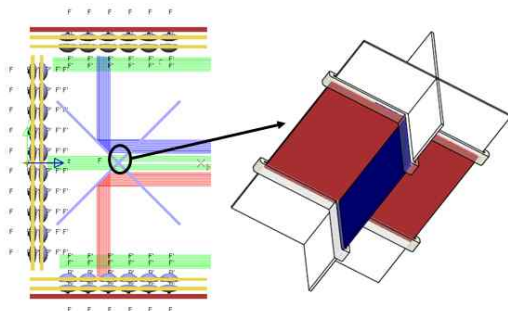


그림 6. 이색성 미러 형상
Fig. 6. Configurations of the dichroic mirror

첫 번째 평판은 blue LED에서 나오는 파장에 대해 반사할 수 있도록 밴드패스 코팅을 적용하였다. 그림 5에서 (1)번 영역에 해당한다. 두 번째 평판은 red LED에서 나오는 파장에 대해 반사할 수 있도록 밴드 패스 코팅하였다. (3)번 영역에 해당한다. 또한 각 코

팅 모두 green에서 나오는 파장은 투과할 수 있도록 하였다. (2)번 영역에 해당한다. 그림 6은 설계된 DM의 형상을 보여준다.

2.2.4 Fly-eye 렌즈 & 집광렌즈 설계

FEL은 여러 개의 작은 렌즈를 바둑판과 같이 2차원 배열로 구성한 것을 말한다. 이러한 조명방식은 2개의 FEL과 집광렌즈로 구성된다. 전체적인 시스템의 크기에 따라 FEL의 셀 렌즈와 조명영역의 배율을 결정하게 된다. 설계방법은 다음과 같이 진행하였다.

- 1) 배율 : 5~6배
- 2) FEL 크기와 목표 조명영역의 비율은 셀렌즈 초점 거리와 집광렌즈의 초점거리 비로 산정.
셀렌즈 크기(p) : 조명영역 크기(X2) = 셀렌즈 초점 거리(f) : 집광렌즈 초점거리(F)
- 3) 목표 조명영역 : 25~30mm
- 4) 셀 렌즈 : 5~6mm

셀 렌즈를 많이 사용할수록 광원을 잘게 쪼개서 중첩시키므로 보다 좋은 균일도를 얻을 수 있으나 원하는 영역을 조명하기 위해서는 그 만큼 큰 배율이 필요하므로 전체적으로 시스템의 크기가 커지는 현상을 유발한다. 본 연구에선 시준 렌즈에서 방사되는 빔이 5×5셀에 조명이 들어올 수 있도록 셀 개수를 산정하였다.

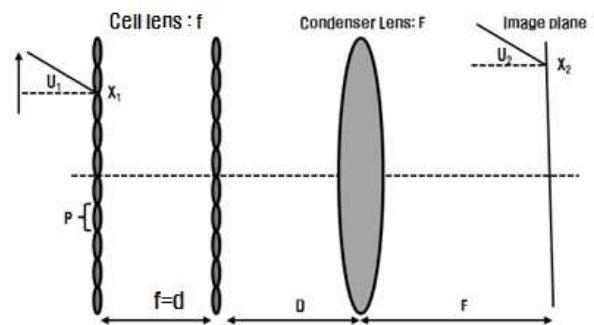


그림 7. Fly-eye 렌즈 시스템 구성도
Fig. 7. Configurations of fly eye lens system

FEL에서 입사각에 관련된 식은 그림 7[7]에서 보이는 바와 같이 $\tan = p/f$ 로서, 보다 큰 각도로 입사하는 광선은 다른 셀로 지나가므로 사용되지 못한다. 초점

거리(f)와 셀 렌즈 사이의 거리(d)를 일치시킬 수 있도록 하였다. FEL의 제작을 고려하여 플라노 컨벡스 형태로 설계를 진행하였다. 첫 번째 FEL의 초점의 위치에 두 번째 FEL을 위치시킬 수 있도록 하였다. 두 번째 FEL의 경우 광학계의 초점거리를 변화시키지 않고 조명의 효율을 높이며, 사각에서 입사되는 광선을 조절하는 역할을 수행한다. FEL과 집광렌즈의 설계 결과는 그림 8과 같다.

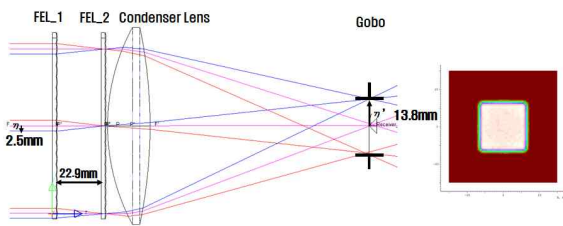


그림 8. Fly-eye 렌즈 & 집광렌즈 설계결과
Fig. 8. Design results of FEL & condenser lens

설계된 FEL은 18×18 에레이 구조를 갖는 형태이다. 차광판에서의 집광된 빔의 사이즈는 27.6mm이다. 균일도는 94%이다. FEL의 초점거리는 22.933mm, 집광 렌즈의 초점거리는 126.74mm이며, 배율은 5.5 (126.74/22.933)이다. 목표한 배율 및 집광영역을 모두 만족한다. 표 3은 FEL과 집광 렌즈의 상세 설계사항을 나타낸다.

표 3. Fly-eye 렌즈와 집광 렌즈 설계 사양
Table 3. FEL & condenser lens data

항목	FEL_1	FEL_2	집광렌즈
직경	5mm	5mm	89.95
곡률(앞면)	0	0	92.610
곡률(뒷면)	11.320	11.320	212.13
초점거리	22.933	22.933	126.74
재질	PMMA	PMMA	NSF4

2.3 투사계

조명계를 통과하여 차광판에 1차 집광된 상은 투사광학계를 거쳐 원하는 위치에 일정한 크기의 이미지를 생성하게 된다. 설계시 투사거리, 투사영역의 크기,

차광판의 크기를 고려하여 화각과 초점거리를 정할 수 있다. 설계 사양 결정시 다음 세 가지 요소를 고려하였다.

- 1) 텔레센트릭 구조 : 입사각에 따른 효율 변화를 적게 하기 위함.
- 2) 낮은 F-수 : 광원의 면적 및 출사각이 클 경우 입사되는 모든 빛을 수용할 수 있기 위함.
- 3) 낮은 왜곡수차 : 1차 집광된 상과 투사화면의 배율이 몇 십 배 정도 차이가 나기 때문에 왜곡수차에 의해 투사화면에서 왜곡이 더욱 확대되어 보이기 때문임.

투사렌즈 설계를 위하여 첫 번째, 광원의 에텐듀를 계산한다. 두 번째, 투사계를 통해 조사되는 면적에 대해 F-수를 산출한다. 식 (2)에서 산출식을 잘 보여준다. 세 번째, 광원의 에텐듀와 투사계의 집광 조명영역에서의 에텐듀가 동일함을 이용하여 조명렌즈의 입사각 및 출사각을 예측한다. 네 번째, 이를 바탕으로 F-수를 다시 계산한다. 첫 번째 에텐듀와는 다르게 조명영역의 에텐듀로 계산을 수행한다. 이를 통해 본 연구에서는 투사렌즈의 설계 F-수를 2.2로 정의하였다. 본 연구의 투사렌즈의 초점거리는 식 (3)에 의하여 빔각 10°일 때 약 155mm, 빔각 45°일 경우 약 35mm로 산출되었다. 본 시스템의 투사거리는 6,000mm를 기준으로 한다.

$$\text{투사렌즈초점거리}(f) = \frac{(\text{투사거리} \times \text{조명영역크기})}{(\text{투사영역크기})} \quad (3)$$

왜곡수차는 2% 이내로 설정하였다. 이미지 해상도는 심각하게 고려하지 않았다. 대신 이미지의 중심의 광량에 대한 외각의 광량비로서 주변 광량비 90% 이상을 설계사양으로 설정하였다. 일반적인 DMD (Micro mirror Device) 패널을 사용하는 프로젝터 시스템의 경우 이미지 해상도는 MTF(Modulation Transfer Function)로 정의된다. 이때의 값은 프로젝터 시스템에 사용되어지는 패널의 픽셀수로 결정된다. 무대조명 시스템은 패널의 이미지를 전달하는 것이 아니다. 차광판에 집광된 빛만 투사렌즈를 통하여 스크린에 전달하여 눈으로만 보이면 된다. 패널에 대한

정의가 없기 때문에 MTF 산정 기준이 모호하다. 또한 MTF를 기준으로 해상도를 좋게 설계할 경우, 오히려 광원 형상이 스크린에 투영되는 문제를 발생한다. 기술된 내용을 고려한 투사렌즈의 설계 목표사양은 표 4에서 보여준다.

표 4. 투사렌즈 설계 목표사양
Table 4. Optical design specification of the projection lens

항목	규격	비고
Fno	2.2	f/D
Field of View(FOV)	10~45	Deg(°)
Effective Focal length(f)	35~155	mm
Optical distortion	2 미만	%
Uniformity	90	%

* D:차광판직경, f:투사렌즈 초점거리

목표성능을 만족하기 위하여 투사렌즈는 11개의 3군 줌렌즈로 구성하였다. 첫 번째 군은 초점 조정을 목적으로 한다. 두 번째 군은 배율zoom을 목적으로 하며, 세 번째 군은 고정되어진다. 줌렌즈 최적화시 배율에 따른 색수차, 왜곡수차, 입사각에 따른 효율 변화를 적게 하기 위하여 주광선 입사각등을 구속조건으로 설정하였다. 목표성능을 만족할 수 있도록 렌즈모듈 설계법에 수차이론을 적용하였다. 그림 9는 설계결과를 보여준다. 그림 10은 최적화 설계된 투사렌즈의 줌 형상을 보여준다. 목표배광 10°~45°를 만족한다.

2.4 시스템 분석

앞 절에서 설계된 조명계와 투사계를 결합하였다. 목표로 하는 배광각도, 중심조도에 대한 분석을 수행하였다. 추가적으로 균일도와 시스템 효율을 분석하였다. 그림 11은 시스템 결합 및 조명 사이즈를 보여준다. 시뮬레이션 수행시 화면에 보이는 사이즈를 고려하여 3m 거리 기준에서 조명 사이즈를 분석하였다. 최소 빔각도 $10^\circ(\theta = \tan^{-1}(250mm/3000mm))$ 를 만족하였다.

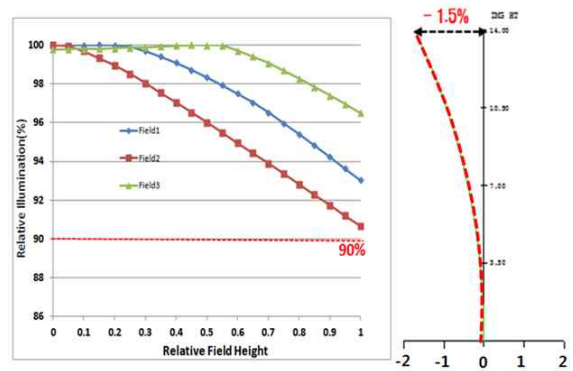


그림 9. 투사렌즈 설계 결과(주변광량비(좌) & 왜곡수차(우))
Fig. 9. The optical design results of projection lens (relative illumination ratio & distortion)

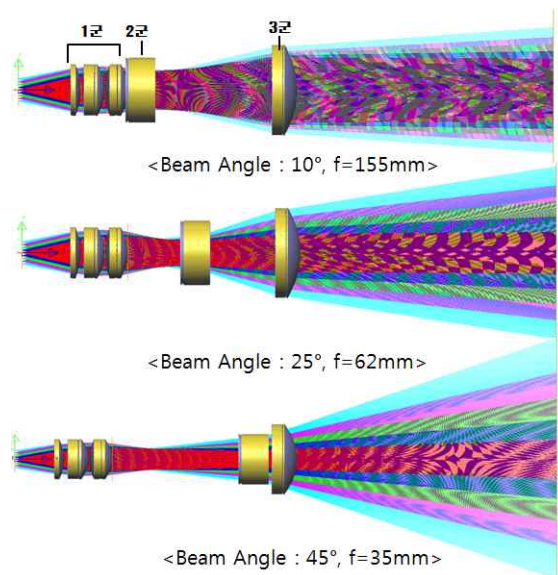


그림 10. 투사렌즈 최적설계 형상
Fig. 10. Optimized design configuration of projection lens

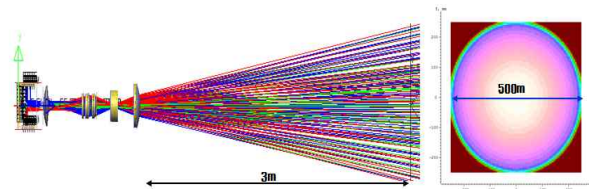


그림 11. 시스템 결합 시뮬레이션
Fig. 11. Simulation of integrated system

균일도, 효율, 중심조도는 6m 거리의 조도분석 결과를 제시한다. 화면 균일도는 75%의 성능을 보였다. 효율은 약 40.85%이다. 조명계 효율 51%, 투사계 효율 81.7%에 의해 도출된다. 마지막으로 중심조도는 본 시스템의 광원 광속 12,500lm 설정시, 약 5,000lx를 얻을 수 있었다. 목표 사양인 6m에서 4,500lx 이상을 만족한다. 결과는 표 5에서 보여준다.

표 5. 중심조도 해석 결과 (@6m)
Table 5. Central illuminance results (@6m)

Statistics Based on Smoothed Mesh Data			
Illuminance			
Min	1622.5 Lux	Contrast Ratio	0.50734
Max	4994.9 Lux	Standard Deviation	412.14
Average	3038.6 Lux	Average Deviation	0.13563

3. 결 론

본 논문에서 LED 광원을 이용하여 무대조명에 사용되는 조명계와 투사계의 원리를 분석하여 해석적으로 풀고, 최적화 설계를 진행하는 등의 설계 체계를 완성하였다. 조명계는 균일한 조명을 얻는 것을 목적으로 하므로 시준 렌즈를 통과하여 FEL, 집광렌즈의 가장자리로 입사하는 광선이 조사되는 면의 가장자리로 도달하도록 하였다. 조명계의 입사각 및 출사각을 기초로 투사계의 시스템 사양을 선정하였다. 설계시 색수차, 주광선 입사각, 왜곡수차등을 구속조건으로 최적화를 수행하였다. 설계결과 목표 배광 10°~45°를 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 6m에서의 최대 중심 조도값이 4,500lx 이상을 만족하였다. 본 논문에서 연구되어진 결과는 향후 스팟타입 LED 무대조명 시스템 개발에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2014년 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

감사의 글

본 연구는 “산업통상자원부”, “한국산업기술진흥원”, “호남 지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] KEA(Korea Electronics Association), “The guide line for broadcasting equipment system set-up(2013)”, p.8, 2013.
- [2] <http://www.koenergy.co.kr/news/articleView.html?idxno=55767>.
- [3] Steven Louis Shelley, “A Practical Guide to STAGE LIGHTING, 2nd ed”, Focal Press, PP. 34-35, 2009.
- [4] Jae Myung Ryu, Jae Heung Jo, Jin Ho Jung and Jeong Jin Lee, “Illumination system design for the liquid crystal display projector using fly-eye lenses”, Hankook Kwanghak Hoeji, Vol. 13, No.3, pp.173-181, 2002.
- [5] Lee Dong-Jin, “Optical Design of Micro LED Projector”, Industrial Technology & Management Korea polytechnic University, 2007.
- [6] Matthew S. Brennessholtz, Edward H. Stupp, “Projection Display, 2nd ed”, WILEY Press, Chapt.11, 2008.
- [7] Peter Schreiber, Serge Kudaeu, Peter Dannberg, Uwe D.Zeitner, “Homogeneous LED-illumination using microlens arrays”, SPIE Proc. Vol.5942, Nonimaging Optics and Efficient Illuminations System II, 59420K, 2005.

◇ 저자소개 ◇



박광우 (朴廣祐)

1980년 12월 23일생. 2009년 청주대학교 레이저광정보공학과 대학원 졸업(석사). 2009년 5월~2012년 12월 국방과학연구소 연구원. 2013년 1월~현재 한국광기술원 신조명 연구본부 스마트 조명연구센터 선임 연구원.



주재영 (主財永)

1977년 8월 30일생. 2011년 광주과학기술원 기전공학과 대학원 졸업(박사). 2009년 8월~현재 한국광기술원 신조명 연구본부 스마트 조명연구센터 선임연구원, 센터장.