

# 마이크로 디스플레이를 이용한 소형 헤드업 디스플레이 광학계 설계

한동진\*, 김현희

<sup>1</sup>전북대학교 대학원 나노과학기술학과

## Optical System Design of Compact Head-Up Display(HUD) using Micro Display

Dong-Jin Han<sup>1\*</sup>, Hyun-Hee Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Nano Science and Technology, Graduate School, Chonbuk National University

**요약** HUD는 투시형 정보 전시장치로서 최근에 마이크로 디스플레이와 LED 기술의 발달로 소형화가 이루어져 점차 응용 분야를 넓혀가고 있다. 본 논문에서는 마이크로 디스플레이 장치인 DLP를 이용하여 영상 전시영역 5인치 급의 양안 관측용 소형 헤드업 디스플레이(HUD) 광학계를 설계하였다. 소형 경량화된 HUD를 설계하기 위하여 광학계의 각 설계요소를 분석하였고 DLP, 프로젝션 광학계 및 오목렌즈형 영상결합기의 특성과 설계방식을 살펴보았다. 각 광학계의 연결구조 분석을 통하여 세부 설계사양을 설정하고 광학계를 상세 설계하였다. 프로젝션 광학계와 오목렌즈형 영상결합기 사이에 백색 확산 반사체를 넣어 접은 형태로 구성하여 광학계를 각각 독립적으로 설계하였다. 투사 영상의 전시거리는 약 2m ~ 무한대 까지 조정이 가능하고 관측거리는 1m로 설정하였다. 해상도는 HD(1,280 × 720 화소) 급으로 1 ~ 2화소 까지 인식이 가능하여 각종 문자, 기호를 판독할 수 있다. 또한, 컬러영상 구현이 가능하여 네비게이션 지도, 주간카메라 영상 및 열상카메라 영상 등을 전시할 수 있다.

**Abstract** The HUD has recently been downsized due to the development of micro display and LED technology as a see through information display device, gradually expands the application areas. In this paper, using a DLP micro display device designed a compact head-up display(HUD) optical system for biocular observation of the image exhibition area 5 inches. It was analyzed for each design element of the optical system in order to design a compacted HUD. DLP, projection optical system and concave image combiner were discussed the design approach and the characteristics. Through a connection structure analysis of each optical system, detailed design specifications were set up and designed the optical system in detail. Put a folded configuration in the form of a white diffuse reflector between the projection lens and concave image combiner was designed to be independent, respectively. Distance of the projected image is adjustable up to approximately 2m ~ infinity and observation distance is 1m. Resolution could be recognized by 1 ~ 2pixels in HD(1,280 × 720 pixels) class, various characters and symbols could be read. In addition, color navigation map, daytime video camera and thermal imaging cameras can be displayed.

**Keywords** : Biocular, Digital Micromirror Device, Head-Up Display, Micro Display, Projection Lens

### 1. 서론

HUD는 Head-Up Display의 두문자어로 비행기 조종사가 계기판을 내려다보는 동안 전방주시를 못하여 발생

하는 위험을 줄이기 위하여 고개를 들고 앞을 보면서 비행정보를 획득할 수 있도록 만든 장치이다. 캐노피(canopy) 전면의 계기판 위쪽에 투명유리판을 두고 기호, 문자 등을 투영시켜 외부풍경과 겹쳐 보이도록 하였

\*Corresponding Author : Dong-Jin Han(Chonbuk National University)

Tel: +82-10-4195-0665 email: odrjin@hanmail.net

Received July 30, 2015

Revised September 2, 2015

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

다. 이러한 HUD는 비상시 조종사의 반응속도를 빠르게 하고 눈의 피로도 줄여준다. 처음에는 군용 항법장치로 개발되었지만, 현재 HUD는 민간항공기, 자동차와 여러 전문 응용분야에서 사용되고 있다. 원거리 초점식 투시형 전시장치라 할 수 있는 HUD는 초기에 CRT 전시기와 굴절렌즈 식 대형 양안접안경으로 구성되어 무게가 수십 kg에 달했다. 초기 방식의 HUD는 아직도 F/A-18, F-16, Eurofighter 등 많은 전투기에 장착되어 운용되고 있다.

최근에 HUD는 마이크로 디스플레이와 고효율 광원인 LED가 적용되어 민간 항공기용은 물론 자동차용 네비게이션으로 소형화되는 등 다양한 분야에서 활발히 개발되고 있다. 하지만, 아직도 광학계 및 장비가 크고 고가여서 활용이 제한적인 것이 현실이다. 자동차용 HUD는 비교적 평판인 자동차 앞 유리면(windshield)에 실상을 투영하는 방식을 사용하고 대쉬보드(dashboard) 아래 공간에 장착되는 형태로 많이 개발되고 있다. 그러나 투영영상이 외부영상과 동시에 초점이 맞지 않아 초점조절로 인한 눈의 피로가 쌓이는 단점이 있다. 광 가이드 방식으로 영상결합기에 직접 영상을 투영시키는 HUD, 영상결합기를 홀로그래픽 방식으로 만든 HUD 및 레이저 광원을 써서 밝기를 높인 HUD 등 다양한 제품 개발이 시도되고 있다. 밝기가 밝아 실외환경에서 이용할 수 있는 HUD는 각종 차량, 함정, 항공기 등에서 정보전시기구로 쓸 수 있다.

본 논문에서는 마이크로 디스플레이 장치인 DLP를 이용하여 휴대가 가능한 투시형 컬러전시기로서 다양한 플랫폼에 간단히 장착하여 쓸 수 있는 헤드업 디스플레이 광학계 설계 방식에 대하여 논의하였으며 광학계를 상세 설계하고 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 HUD 광학계 구조

전형적인 HUD의 구성 요소는 영상전시기(display), 시준기(collimator), 영상결합기(combiner)이다. 항공기 훈련용으로 개발된 초기의 HUD는 비디오 신호 생성장치인 CRT, 접안렌즈(convex collimator), 유리판 빔결합기(glass plate beam combiner)로 구성되었다. 그림 1의 굴절식 HUD 광학계는 양안용으로 쓸 수 있게 접안렌즈

를 크게(직경 200mm 내외) 만들고 반사경으로 광경로를 90도 꺾어 준다. 빔결합기는 협대역 반사코팅을 하여 외부풍경과 전시영상을 합성시켜 눈높이에서 높은 대조비로 잘 보이게 만든다. 색상은 대개 초록의 단색이고, 문자나 기호를 전시하여 비행 운행정보 및 조준점을 제공하는데 쓰인다[1-2].

반사식 HUD 광학계는 그림 2와 같이 평행광을 만드는 시준기를 굴절렌즈 대신 오목렌즈를 써서 상평면에 위치한 전시기의 영상을 무한광(원거리 광)으로 만들어 준다. 굴절식 광학계의 영상결합기는 평판 유리로 45도 정도 기울여 놓고 단색의 영상을 반사시키는 협대역 코팅을 하여 관측자가 원거리 영상과 투영된 영상을 같은 디옵터(diopter)로 동시에 볼 수 있는 구조이다. 반사식 광학계는 중간에 상면을 하나 둔 릴레이 형태의 투사부와 영상결합기에 곡률을 준 구조를 이룬다. 반사식의 경우 전체시계가 굴절식보다 넓으며 부피와 무게를 줄일 수 있다[1-2].

과거의 HUD는 단색으로 문자나 기호 등을 전시했지만, 현대의 HUD는 컴퓨터그래픽, 가상(virtual)영상, 카메라영상 등의 컬러영상 전시가 요구된다. 또한, 전시부 앞을 가리면 전시된 영상만을 볼 수 있어 주간카메라나 야간에 열상카메라의 전시기로 사용이 가능해진다.

본 논문에서는 DMD(Digital Micromirror Device)마이크로 디스플레이, Fly's eye lens 조명광학계, 투사광학계 및 오목렌즈형 영상결합기(양안접안경)가 일체형으로 한 몸체 안에 들어갈 수 있는 소형의 고휘도 반사식 HUD 광학계를 설계하였다.

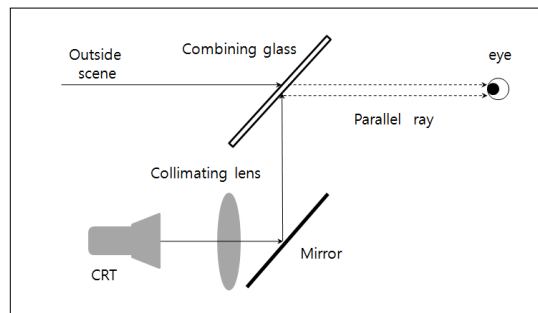


Fig. 1. Typical Refractive Optical System of a HUD

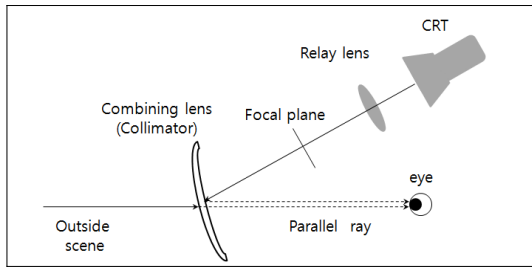


Fig. 2. Typical Reflective Optical System of a HUD

## 2.2 HUD 광학계 설계 요소

HUD 광학계에서 주요 설계인자는 시야각, 관측거리, 시준, 관측영역(eye-box), 밝기 등이며 이들은 상호 연관적이다[1-3]. 시야각(Field of View, FOV)은 관측자가 볼 수 있는 영상결합기의 전시영상과 외부풍경의 수직과 수평 각도이다. 시야각이 넓을수록 보는 영역이 커져 추가적인 영상정보를 얻을 수 있다. 사람 눈은 분리되어 있고 각각 다른 영상을 받아들이기 때문에 HUD 영상은 양쪽 눈으로 보는 전체시야각을 설정해야 한다. 한눈으로 볼 수 있는 시야각은 순간(instantaneous)시야각이라 한다. 본 설계에서는 영상결합기에서 투영되는 영상 크기 및 관측거리를 고려하여 전체시야각은 약  $\pm 6^\circ$ , 순간시야각은 약  $4^\circ$ 로 설정하였다.

투영된 영상의 빛살이 평행하게 되면 시준(collimated) 되었다고 한다. 평행한 빛살은 마치 무한대 거리에서 온 빛처럼 정상적인 시력의 사람 눈(망막)에서 선명한 영상을 맺는다. 영상결합기가 시준된 평행광을 만들어 주어야 사용자의 눈은 근거리와 원거리 초점을 번갈아 맞출 필요 없이 HUD 투영영상과 바깥 영상을 선명하게 겹쳐 볼 수 있다.

시준된 빛은 원통모양의 빔다발 형태를 이루며, 특정 영역 안에서만 관측자는 시준된 빛살의 초점을 완전히 맺힐 수 있다. 이를 eye-box(관측영역) 혹은 머리의 움직임까지 고려하여 head motion box라 한다. HUD의 eye-box는 일반적으로 양안 관측을 할 수 있는 수평 5인치, 수직 3인치, 대각 6인치 및 깊이는 4 ~ 6인치의 크기를 요구한다. 사람의 평균적인 눈동자 중심간 거리가 65mm 이므로 어느 정도 머리의 움직임도 포함하는 크기이다[1]. 눈의 위치가 eye-box를 벗어나면 영상은 잘려 보이기 시작하며, 관측위치가 영상결합기에서 멀어지면 영상이 커지면서 잘려 보이게 된다. 따라서 관측위치는 3차원적인 eye-box를 고려하여 설계하여야 한다.

마이크로 디스플레이가 고휘도의 밝기라도 투사광학계는 영상을 확대하므로 투사된 영상의 밝기는 면적에 반 비례하여 급속히 줄어들게 된다. 디스플레이 크기, 밝기, 투사광학계 배율, 영상결합기 코팅 등이 설계인자에 영향을 준다. 위와 같은 사용자 설계사양이 결정되면 적절한 영상결합기와 투사광학계의 크기, 디스플레이 화소수/크기, 광량 등 광학계 상세 설계사양을 설정해야 한다.

## 2.3 마이크로 디스플레이

### 2.3.1 종류별 특성

최근에 개발된 마이크로 디스플레이는 LCD(Liquid Crystal Display), LCoS(Liquid Crystal on Silicon), DMD(Digital Micromirror Device) 및 OLED(Organic Light Emitting Diode)가 있다. 이중에서 자체적으로 발광하고 색 구현이 가능한 OLED를 제외하고는 외부에서 빛을 공급해 주어야 한다. LCD와 투과형 LCoS는 뒷면에서 균일하게 RGB 삼원색으로 조명해주며, 기본적으로 편광소자를 써야 하므로 광 효율이 낮고 밝기가 떨어진다[4]. DMD는 5.4 ~ 13.6 $\mu\text{m}$  크기의 미세한 거울들이 화소 수만큼 구성되어 있는 소자로 외부에서 RGB 삼원색의 균일한 빛을 거울 표면에 조사해 주어야 한다. DMD의 거울들은 각도를 조절하여 입사한 빛들을 반사시켜 원하는 세기의 빛 신호를 만든다. 또한, 반사율이 높은 알루미늄으로 만들어져 광 효율이 높고 밝아 낮에도 시현성이 좋은 영상을 얻을 수 있다. 반사식 LCoS와 DMD의 빔 균일화 조명광학계는 화소 앞면에서 조명하는 방식이 동일하다. 광학설계 시 화소 수는 영상 크기에, 화소 크기는 해상도에 영향을 준다.



Fig. 3. Applied DMD(DPL4500) in This Paper (Texas Instruments)

### 2.3.2 DLP 구조 및 특성

DMD를 DLP chip 이라고도 하며, 이를 제어하는 전

자회로를 포함하여 DLP(Digital Light Processing)라 한다. DLP와 광원, 빔 균일화 조명광학계로 구성된 디스플레이에 프로젝션 렌즈로 영상을 확대시키는 장치가 DLP 프로젝터이다. DLP 프로젝터는 휴대용, 회의용 및 극장용 프로젝터로 널리 쓰이고 있다. 예전에는 할로겐램프 등의 백색광원에서 RGB 삼원색을 만들기 위하여 컬러 필터를 돌려 부피가 크고 소음이 있었으나, RGB 삼원색의 고효율 LED를 써서 구조가 단순해지고 크기도 현격히 줄어들었다.

DLP의 빔 균일화 조명광학계는 광 파이프라인을 쓰거나 Fly's eye 렌즈를 쓰는 방법이 있다. 광 파이프라인 방식은 RGB 세 빛을 집광렌즈로 모아 광섬유와 같은 기다란 광 가이드에 집속시킨다. 빛은 그 속을 통과하면서 고르게 섞여 반대 방향으로 나온다. 이를 시준렌즈로 세기가 균일화된 평행광을 만들어 DMD에 조사시켜 준다. 광학계 길이가 길고 집광렌즈로 집속시킨 빔을 광 파이프라인에 잘 넣을 수 있도록 미세 정렬 절차를 거쳐야 한다.

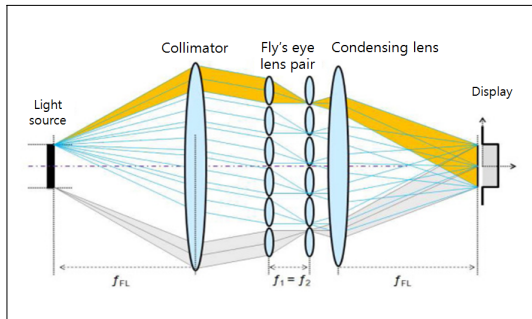


Fig. 4. Beam Homogenizer with Fly's eye lens

Fly's eye 렌즈 방식은 RGB 세 빛을 시준렌즈를 써서 평행광으로 만들어 초점길이 만큼 떨어져 있는 한 쌍의 Fly's eye 렌즈에 입사시킨 다음 집광렌즈로 DMD에 조사시켜 준다. 이때, 집광렌즈는 상면 전체에 빛을 고르게 비추어 균일화된 빔 분포를 가지게 한다. Fly's eye 렌즈는 마이크로렌즈 array를 써서 빛다발을 쪼개고 다시 재분배 시키는 것을 이용한 것으로 일반적인 구조는 그림 4와 같다. 미세 광학부품의 급형 및 사출 제조기술 발달로 플라스틱 사출품은 물론 유리재질의 Fly's eye 렌즈까지 다양한 크기와 개수로 제작이 가능해졌다. LCoS 및 DMD에 LED 광원과 Fly's eye 렌즈 조명광학계를 쓰면 소형화가 쉽다. 본 설계에서는 DMD에 LED 광원과 Fly's

eye 렌즈 조명광학계를 적용한 HUD를 고려했었다.

그림 5는 Fly's eye 렌즈 조명광학계를 적용한 일반적인 DLP 프로젝터의 구조를 보여준다.

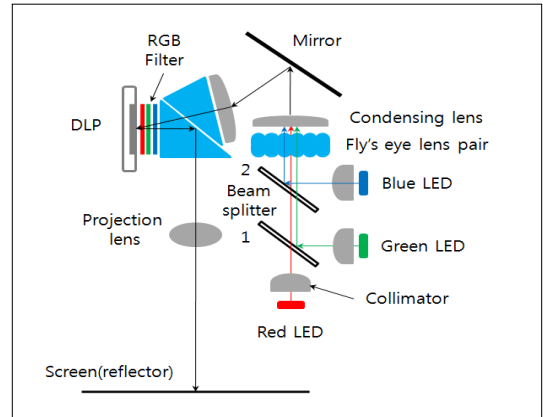


Fig. 5. DLP Projector's Optics with Fly's eye lens

본 논문에서는 0.45" DMD chip의 사양에 따른 투사광학계와 영상결합기(양안접안경)의 구조 및 렌즈들을 소프트웨어를 이용하여 상세 설계하고 시뮬레이션 분석을 하였다. 투사광학계와 영상결합기는 설계에 따라 제작하여야 하며, DMD chip과 구동 보드 및 조명광학계는 모듈화된 상용품을 적용하여 광학시스템 설계를 구현할 수 있다. 그림 6은 Fly's eye 렌즈 조명광학계를 쓴 Texas Instruments사의 DLP Module(DLP LightCrafter 4500 EVM)로 0.45" WXGA DMD chipset(DLP4500)과 DLPC350 digital controller를 내장하고 있다. 이 모듈에 포함되어 있는 투사렌즈는 쉽게 분해하여 설계된 투사광학계로 대체하여 HUD 광학계 구성 및 실험이 가능하다.

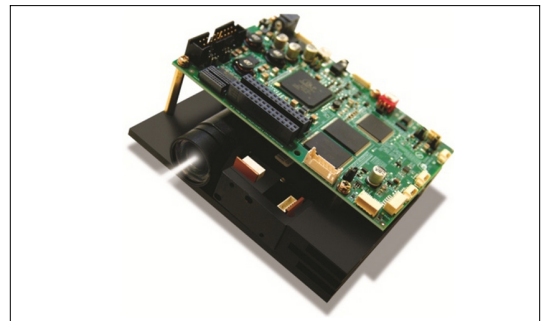


Fig. 6. DLP Module(DLP LightCrafter 4500 EVM)

## 2.4 HUD 광학계 설계

### 2.4.1 구조 설계

본 논문의 HUD 광학계는 조명광학계, 투사광학계와 오목렌즈형 영상결합기로 구성되는데 그림 7의 레이아웃과 같다. 광학설계의 기준이 되는 DMD(DLP4500, Video and data display용 모델)는 화소배열 1,280×800, 1 화소의 크기가 가로, 세로 각각 7.6 $\mu$ m이며 전시영역의 크기는 가로 9.73mm, 세로 6.08mm 이다. 광학계는 한 하우징에 구성할 수 있는 구조로 프로젝션 광학계가 영상을 확대시켜 반사체(스크린)에 투사시킨 후 투사된 영상을 반사식 양안접안경으로 관측하는 방식이다. 사용자의 관측거리는 1m, eye-box의 크기는 대각 약 6인치, 영상 전시거리는 2m ~ 무한대(조정 가능)이다. 영상결합기는 외부영상도 투과시켜야 하므로 반투과 코팅을 해야 하며, 크기는 대각으로 약 5인치이다.

DMD부터 눈 위치인 입사동(entrance pupil) 까지 설계하려면 중간에 상면을 하나 두어야 하고, 광학계 길이를 줄이기 위해 경로를 접었다. 반사경을 영상결합기 사이에 두면 반사경에 비친 주변 영상이 영상결합기를 통하여 관측된다. 이를 방지하기 위하여 반사경 대신 스크린 역할을 하는 백색 확산 반사체(White Optical Diffuse Reflector)를 적용하였다. 반사경은 초점 위치 뿐만 아니라 두 광학계 사이 어디든지 놓을 수 있지만 반사체는 반드시 초점면에 위치해야 한다. 그렇지만 투사렌즈를 앞뒤로 움직여 결상 위치를 조정할 수 있어 정렬이 용이하다.

확산 반사체는 반사경처럼 정반사만을 하는 소자가 아니므로 순차적(sequential) 광학설계 시 연결하여 설계하면 안 된다. 순차적 광학설계는 실제 빛살들의 일부만을 보여주기 때문이다. DLP에서 나온 영상이 반사체에서 초점을 맺고 확산되면서 다시 새로운 광원으로서 역할을 하므로 두 광학계를 분리하여 설계하면 더 많은 빛살의 경로를 추적할 수 있다. 또한, 두 광학계를 분리하여 설계하면 경계조건들을 모두 만족하지 않아도 되므로 설계 난이도가 줄어든다. 반사체는 일반 프로젝터의 백색 스크린과 기능은 같으나 반사율이 높고 평면도가 좋은 단단한 물질을 써야 한다.

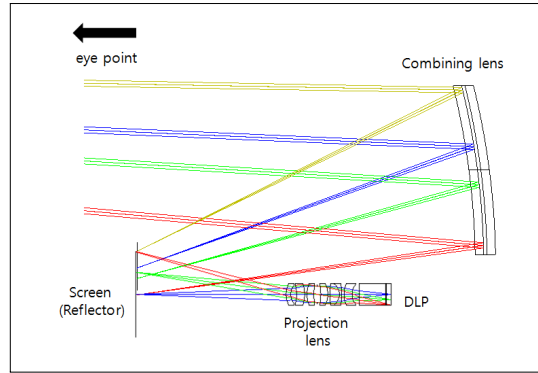


Fig. 7. Layout of The HUD Optical System

### 2.4.2 설계 사양

본 논문에서는 관측거리 1,000mm 기준에서 HD (92만 화소) 급 full-color 영상을 양안으로 관측할 수 있도록 관측영역(eye-box) 6인치 이상인 HUD를 설계하였다. 외부영상이 관측거리에 따라 크기가 변하는 것처럼 HUD에서 생성된 영상도 관측거리에 따라서 크기가 변하므로 관측거리에 따라 FOV와 디오퍼, 영상결합기 크기를 잘 선정하여야 한다. 투영영상의 위치는 영상결합기가 굴절력을 가지므로 조절할 수 있다. 해상도는 전 관측영역에서 최소 2화소는 구분해야 문자 등의 정보를 판독하는데 지장이 없다.

마이크로 디스플레이 크기와 확대된 영상의 크기, 영상결합기 크기 및 광학계 길이를 고려하여 프로젝션 광학계와 영상결합기의 배율을 적절히 배분해야 한다. HUD 광학계의 설계 목표사양은 표 1과 같다.

Table 1. Optical Specification of The HUD

Design Specification		Remarks	
Eye Relief	1,000mm	900~1,100mm	
Combiner Size	110×70mm	5 inches	
Wavelength	486~656nm	visible	
Total Field of View	± 6.1 Deg.		
Display Resolution	1,280×720	0.44 inch	
Virtual Image Size	16.8 inches	Max. @ 2m	
Virtual Image Distance	2m ~ ∞		
Resolution	Center	60 sec	1 pixel
	Edge	120 sec	2 pixels
Distortion	< ±5%	center	

### 2.4.3 프로젝션 광학계 설계

일반적인 프로젝션 광학계는 물체거리가 무한대인 결상광학계(infinite to focal)에서 물체거리를 수십 내지 수 m로 줄여 설계하며, 구조 및 설계과정이 결상광학계와 비슷한 특성을 가진다. 따라서 스크린의 크기를 각도로 환산하여 물체거리가 무한대인 결상광학계를 설계한 다음, 물체거리를 스크린 거리로 설정하여 설계한다. 물체거리가 수 m인 프로젝터의 광학계 까지 이러한 방식으로 설계된다.

릴레이렌즈(focal to focal)는 상 역전 및 상 전달을 위한 광학계로 물체거리 및 후초점길이를 비슷하게 구성한다. 중간에 고정 조리개를 둔 대칭구조로 설계하면 왜곡, 코마, 종색수차가 제거된 설계결과를 얻을 수 있다. 또한, 상면 근처에 고굴절 저분산 유리 재질의 field-flattener 렌즈를 사용하여 상면만곡을 줄일 수 있다[5]. 1차량 등을 계산하여 무한 물체 결상광학계를 설계하고 중간에 조리개를 넣어 마주보게 포개 놓으면 쉽게 설계를 진행할 수 있다.

본 연구의 소형 프로젝션 광학계는 DLP의 영상을 반사체 면에 확대하여 전달하는 기능을 하며 일반 프로젝션 광학계보다 물체거리가 수십 mm로 짧고 배율이 3 ~ 4배 이상인 비대칭 구조를 이룬다. 용도 및 기능은 프로젝션 광학계이므로 광원광학계 구조와 프로젝션 광학계의 위치 및 스크린 위치에 따른 설계요소를 반영하여야 한다. 또한, 마이크로 디스플레이 앞에 field-flattener 렌즈도 넣을 수 없고 조명광학계 프리즘이 삽입될 공간을 확보하기 위하여 긴 후초점길이를 가지면서 물체거리는 최대한 짧게 해야 전체적인 광학계 길이를 줄일 수 있다.

기본구조는 릴레이광학계와 같으나 프로젝션 조건을 고려해야한다. 프로젝션 광학계의 일반적인 구조는 그림 8과 같다. 프로젝터가 스크린에 영상을 투영하기 위해 보통 수직 벽면의 스크린을 이용하고 프로젝터를 기울이게 된다. 그러면 키스톤(Keystone)이라는 왜곡 현상이 발생되고 기울기가 크면 한쪽부분의 해상도까지 저하된다. 이런 현상을 방지하기 위하여 디스플레이를 한쪽으로 이동시켜 사용한다. 즉, FOV를 2배로 키워 디스플레이 면과 스크린 상면의 반쪽씩을 쓴다. 이때, 광량 손실을 줄이기 위하여 렌즈 구경도 2배로 키운다[5].

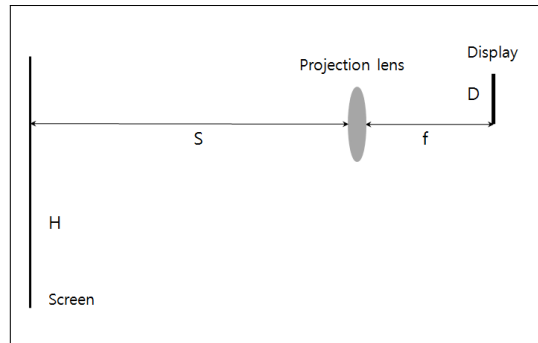


Fig. 8. Schematic of a Projection Optics

그림 8에서 D는 전시기의 크기, H는 스크린의 크기, S는 스크린까지의 거리, f는 프로젝션 렌즈의 유효초점 길이이다. 프로젝션 광학계 내부에는 대칭 릴레이렌즈처럼 고정 조리개를 설치하여 왜곡 및 수차를 최대한 줄이고 비네팅(vignetting)을 제거하여 스크린 상의 상대조도가 균일하도록 설계해야 한다. 또한, f#를 낮추어 최대한 밝게 설계하여야 한다. 프로젝션 광학계의 설계 목표 사양은 표 2와 같고 렌즈 설계 데이터는 표 3과 같다. 화소는 HD급에 맞추어 1,280×720 화소만 고려하여 설계하였다.

Table 2. Specification of The Projection Optics

Design Specification		Remarks	
Effective Focal Length	22.5mm		
Magnification	4.2×		
Wavelength	486~656nm	visible	
f/#	2.2		
Resolution(MTF)	16 lp/mm	1 pixel	
DMD	Number	1,280×720	921,600 pixels
	Pixel Size	7.6×7.6μm	
	Area Size	9.73×5.47mm	Dia.11.16mm

그림 9에서 보듯이 광학계 구성은 맨 왼쪽부터 DMD 거울면, 색필터(RGB), 프리즘, 렌즈(6군 7매)이고 오른쪽은 확산 반사체의 면으로 이루어졌다. 조리개는 3군과 4군 렌즈 사이에 두어 최대한 대칭성을 두었다. 1차 렌즈는 빔을 모으는 필드렌즈 역할을 하며, 광원 쪽으로 오목한 형태의 메니스커스 렌즈를 사용하였다[6]. DMD와 반사체의 크기 비를 고려하여 배율은 4.2배, 전체 길이는 약 165mm 이다.

Table 3. Lens Data of The Projection Lens

Surface	Radius	Thickness	Glass	Semi Dia.
1	infinite	0		7.32
2	infinite	3.00	517-642	7.5
3	infinite	0.75		7.5
4	infinite	16.93	517-642	7.5
5	infinite	4.65		7.5
6	-10.68	5.24	569-560	6.8
7	-18.42	1.50		7.5
8	56.26	1.50	847-238	7.5
9	9.44	6.00	723-380	7.5
10	-98.93	1.50		7.5
11	16.85	4.50	773-496	7.5
12	43.17	2.25		7.5
Stop	infinite	2.25		5.6
14	-51.78	4.50	728-285	6.8
15	-21.10	1.50		7.5
16	23.44	5.25	773-496	7.5
17	27.36	3.75		6.0
18	-9.22	3.00	847-238	6.0
19	-15.54	97.40		7.5
Image	infinite	-		29.1

그림 10에서 MTF(Modulation Transfer Function)는 16 lp/mm 기준으로 중심영역이 약 60%, 최외곽이 약 40%이다. 이는 전체 영상전시 영역에서 1화소를 선명히 볼 수 있는 해상도이다. 왜곡은 -1.2%, 비네팅은 없고 최외곽에서 상대조도는  $\cos^4\theta$  법칙에 의한 91.2% 였다.

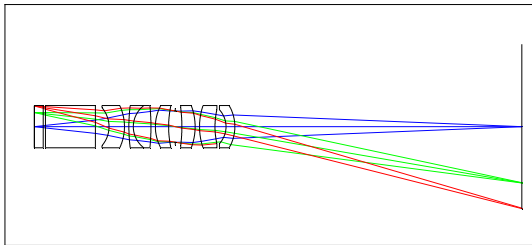


Fig. 9. Layout of The Projection Lens

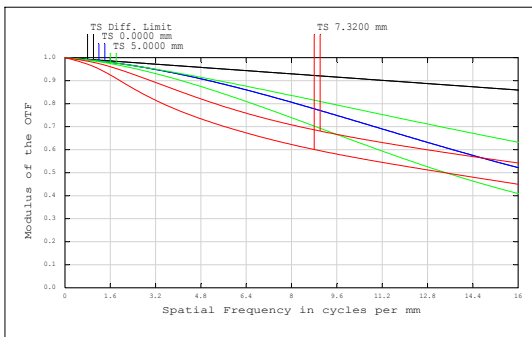


Fig. 10. MTF of The Projection Lens

### 2.4.4 영상결합기 설계

논의되는 HUD의 영상결합기는 단순한 빔결합기가 아닌 양안접안경(Biocular)으로 초점면(반사체)에 생성된 영상을 무한광으로 만들어준다. 반사식 양안접안경은 구면 한 장이나 비구면(포물면) 한 장 혹은 접합렌즈(중간 면이 반사면)로 설계하는 방법 등이 있다. 그림 11과 같이 원형렌즈의 반쪽부분을 잘라 쓰며, 비축(off-axis) 광학계 특성을 지닌다[5,7,8]. 양안으로 관측하기 위하여 eye-box의 크기, 왜곡 및 해상도를 만족하여야 한다. 영상결합기의 크기는 대각으로 약 5인치이며, 전시되는 영상이 보이는 거리는 영상결합기 위치를 조정(상면으로 약 40mm)하면 무한대에서 2m까지 변화된다. 밝은 외부에서 투영된 영상을 잘 보기 위하여 반사영상과 투과영상의 밝기 비는 60:40 내지 70:30로 코팅하는 것이 일반적이다[1]. 한편, 렌즈의 굴절능으로 인한 외부영상의 왜곡을 제거하기 위하여 영상결합기 렌즈는 1배율의 무초점(afocal) 조건을 만족하도록 설계하여야 한다. 본 설계의 영상결합기는 비구면 1매로 설계하였으며, 플라스틱 재질(E48R)에 설계 목표사양은 표 4와 같고 렌즈 설계 데이터는 표 5와 같다.

Table 4. Specification of The Combiner(Biocular)

Design Specification		Remarks
Effective Focal Length	220mm	
Combiner Size	110×70mm	5 inches
Wavelength	486~656nm	visible
Total Field of View	± 6.1 Deg.	
Instantaneous Field of View	4 Deg.	
Resolution(MTF)	Min. 8 lp/mm	2 pixels

Table 5. Lens Data of The Combiner(Biocular)

Surface	Radius	Thickness	Material	Semi Dia.
1	infinite	infinite		100.0
Stop	infinite	1000		100.0
3	-440.00	5	Mirror/E48R	90.0
4	-441.47	-220		90.0
Image	infinite	-		29.1

\* Surface 3 : Aspheric, conic coefficient, -0.274  
 Surface 4 : Aspheric, conic coefficient, -0.275

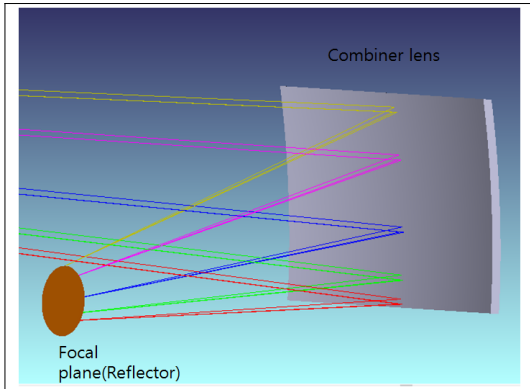


Fig. 11. Figure of The Combiner(Biocular)

입사동(눈동자 동공 크기)은 4mm, 동공 간 간격은 65mm, 순간시계는 4°로 분석하였다. 그림 12, 13에서 MTF는 8 lp/mm 기준으로 중심영역이 약 60%, 최외곽이 약 40% 이상으로 전체 영상전시 영역에서 1 ~ 2화소를 선명히 볼 수 있는 해상도이다.

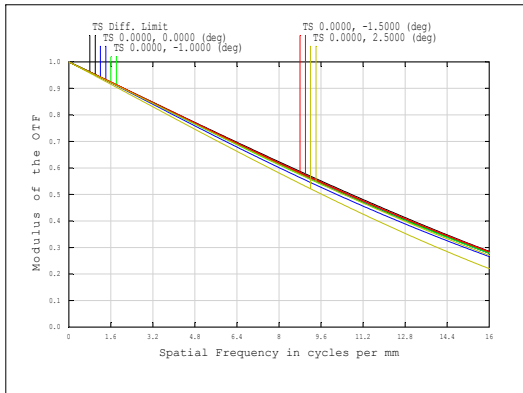


Fig. 12. MTF of The Combiner(Center)

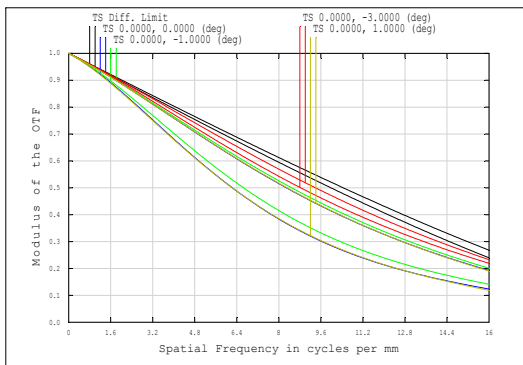


Fig. 13. MTF of The Combiner(edge)

### 2.4.5 설계 결과 및 분석

투사광학계는 조명광학계의 프리즘으로 인하여 후초점길이를 늘려야 했다. 이로 인해 전체적으로 수차가 증가하였지만 영상전시 영역에서 1화소를 선명히 볼 수 있는 해상도를 얻었다. 한편, 조리개 구경을 조절하여  $f\#$ 는 2.2에서 2.8 까지 조절 할 수 있다. 영상결합기의 성능 평가는 관측 위치를 이동시키면서 eye-box 내에서 수행했다. 분해능은 전 영역에서 DMD의 1 ~ 2화소를 식별할 수 있는 60 ~ 120초를 만족하였다[8]. 중심 관측영역에서 왜곡수차는 투사렌즈가 -1.2%, 영상결합기가 -3.7%로 총 -4.9% 이었다. 외곽으로 갈수록 왜곡수차는 -7.2% 까지 증가하였다. 마이크로 디스플레이 투사방식에서 영상결합기가 5인치 보다 커지면 왜곡이 커지며 광학성능이 저하되고 중간상의 크기가 커져 전체적인 광학계가 커진다.

## 3. 결론

본 논문에서 마이크로 디스플레이 장치인 DLP를 이용하여 영상 전시영역 5인치 급의 양안관측용 소형 헤드업 디스플레이(HUD) 광학계를 설계하였다.

DMD, Fly's eye 렌즈 조명광학계, 프로젝션 광학계 및 오목렌즈형 영상결합기(양안접안경)의 특성과 설계방식을 살펴보고 최적의 연결구조 분석을 통하여 설계 사양을 설정하였다. Zemax 13(2014) 광학 설계 및 분석 소프트웨어를 사용하여 프로젝션광학계와 영상결합기를 상세설계 하였다.

프로젝션 광학계와 영상결합기 사이에 백색 확산 반사체를 넣어 접은 형태로 분리하여 설계하였고, 일체형의 컴팩트한 휴대용 장치로 제작이 가능하다. 관측 중심영역에서 DMD의 1화소를 식별할 수 있었고 시스템 왜곡수차는 -4.9% 이었다. 영상결합기 위치를 조정하면 무한대에서 2m까지 투영된 영상이 보이는 거리를 조절할 수 있다. 또한, 외부풍경의 왜곡을 줄이기 위하여 영상결합기는 1배율의 무초점 (afocal) 조건을 만족하도록 설계 하였다.

HD(92만 화소) 급으로 full-color 구현이 가능하고 각종 문자, 기호뿐만 아니라 네비게이션 지도, 주간카메라 영상이나 열상카메라 영상 등의 전시가 가능하다. 소형화된 HUD는 차량, 헬기, 함정 등 다양한 플랫폼에서 디



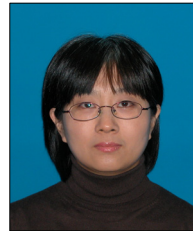
스플레이 장치로 사용할 수 있으며, 견고화된 DLP가 개발되면 군용 무기체계의 전시기로도 활용이 가능할 것으로 기대된다. 향후 Full HD급 해상도 및 큰 전시영역을 구현하기 위한 2개의 DMD를 적용한 광학계 설계 연구 등이 필요하다.

### References

- [1] Robert B. Wood and Peter J. Howells, "The Avionics Handbook, Head-Up Displays, SECTION I Elements(Chap 4)", pp. 1-8, CRC Press LLC, 2001.
- [2] Andres Ingman, "The Head Up Display Concept", School of Aviation Lund University, pp. 1-10, 2005.
- [3] James E. Melzer & Kirk Moffitt, "Head-Mounted Displays: Designing for the User", pp. 59-69, Lexington, KY, 2011.
- [4] James E. Melzer, "The Avionics Handbook, Head-Mounted Displays, SECTION I Elements(Chap 5)", pp. 5-6, CRC Press LLC, 2001.
- [5] Milton Laikin, "Lens Design(4th ed)", pp. 169, 265-280, 299-304, CRC Press, 2007.
- [6] Jose Sasian, "From the Landscape lens to the planar lens", Proc. of SPIE Vol. 586501, pp. 1-5, 2005.
- [7] Warren J. Smith, "Modern Lens Design(2nd ed)", pp. 471-475, McGraw-Hill, 2007.
- [8] Warren J. Smith, "Modern Optical Engineering(3rd ed)", pp. 291-295, 520-523, McGraw-Hill, 2000.

**김 현 희(Hyun-Hee Kim)**

[준회원]



- 1995년 2월 : 전북대학교 물리학과 (이학사)
- 2002년 8월 : 전북대학교 대학원 물리기술학과 (이학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 나노과학기술학과 (박사과정)

<관심분야>  
광학기기, LED 조명

**한 동 진(Dong-Jin Han)**

[정회원]



- 1995년 2월 : 인하대학교 물리학과 (이학사)
- 2000년 11월 ~ 2015년 3월 : (주) 이오시스템 수석연구원
- 2012년 2월 : 전북대학교 대학원 나노과학기술학과 (이학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 나노과학기술학과 (박사과정)

<관심분야>  
광학설계, 3D 영상