



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년07월19일
(11) 등록번호 10-2687101
(24) 등록일자 2024년07월17일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 27/01 (2006.01) G02B 27/00 (2020.01)
G02B 3/00 (2022.01) G02B 30/00 (2020.01)
- (52) CPC특허분류
G02B 27/0172 (2013.01)
G02B 27/0075 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2019-7029319
- (22) 출원일자(국제) 2018년03월06일
심사청구일자 2021년03월04일
- (85) 번역문제출일자 2019년10월04일
- (65) 공개번호 10-2019-0131508
- (43) 공개일자 2019년11월26일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2018/021087
- (87) 국제공개번호 WO 2018/165117
국제공개일자 2018년09월13일
- (30) 우선권주장
62/469,097 2017년03월09일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
WO2015184409 A1*
US20140035959 A1*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자
아리조나 보드 오브 리전츠 온 비헤프 오브 더 유니버시티 오브 아리조나
미국 애리조나 85701 투손 4층 6번 스트리트 220 더블유
- (72) 발명자
후아 홍
미국 애리조나주 85721 투손 이스트 유니버시티 블러바드 1630
후앙 해쿤
미국 애리조나주 85718 투손 노스 카에 신 놉브레 6580
- (74) 대리인
김태홍, 김진희

전체 청구항 수 : 총 20 항

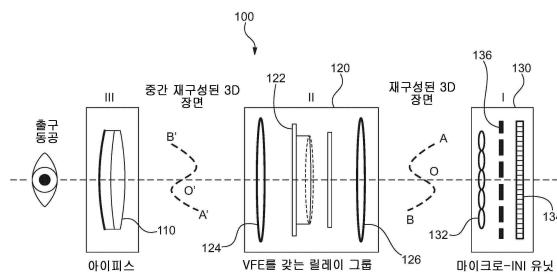
심사관 : 이정엽

(54) 발명의 명칭 통합 이미징 및 릴레이 옵틱스를 구비한 헤드 장착 광 필드 디스플레이

(57) 요약

통합 이미징 및 릴레이 그룹을 구비한 헤드 장착 광 필드 디스플레이

대표도



(52) CPC특허분류

G02B 3/0056 (2013.01)

G02B 30/27 (2020.01)

G02B 2027/0127 (2013.01)

G02B 2027/0134 (2013.01)

G02B 2027/0145 (2013.01)

G02B 2027/0185 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(integral imaging; InI) 시스템으로서,

상기 시스템의 광축을 따라 선택된 위치에서 선택된 3D 장면의 광 필드들을 생성하도록 구성된 마이크로스코픽 InI(마이크로-InI) 유닛;

가변 초점 요소(vari-focal element; VFE)가 배치된 릴레이 그룹 - 상기 릴레이 그룹은 상기 선택된 위치가 상기 릴레이 그룹의 광학적 켈레(optical conjugate)가 되게 하는 로케이션에서 상기 광축 상에 배치되고, 상기 릴레이 그룹은 상기 마이크로스코픽 InI 유닛에 의해 생성된 상기 광 필드들을 수신하고, 상기 선택된 3D 장면의 상기 광축 상에 중간 3D 장면을 생성하도록 구성되고, 상기 릴레이 그룹은 상기 중간 3D 장면의 상기 광축을 따라 상기 위치를 튜닝하도록 구성됨 -; 및

상기 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템의 사용자에게 의한 뷰잉(viewing)을 위해 상기 릴레이 그룹으로부터의 상기 중간 3D 장면을 상기 시스템의 출구 동공 내로 이미징하기 위한 아이피스 옵틱스(eyepiece optics)

를 포함하는 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 마이크로스코픽 InI(마이크로-InI) 유닛은 제한된 뷰잉 구역을 갖는 3D 장면의 최대 시차(full-parallax) 광 필드들을 재생하도록 구성된 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템의 사용자에게 의한 뷰잉을 위해 실세계(real world)의 뷰를 상기 아이피스 옵틱스에 전송하도록 상기 아이피스 옵틱스와 광학적으로 통신하는 시스루 유닛(see-through unit)을 포함하는 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 VFE는 상기 출구 동공에 광학적으로 켈레인 위치에 배치된 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 릴레이 그룹은 상기 광축을 따라, 상기 VFE를 사이에 두고 배치된 전방 렌즈 그룹과 후방 렌즈 그룹을 포함한 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 VFE는 상기 전방 렌즈 그룹의 후방 초점 거리(back focal length)에 위치해 있는 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 시스템의 시야는 상기 VFE의 광학적 파워(optical power)와는 무관한 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 8

제5항 또는 제6항에 있어서,

$$M_R = \frac{1}{(1-z_0\phi_R) - \frac{\phi_{VFE}(1-\phi_2 t_2) + \phi_2(1+\phi_1 t_2)}{\phi_1}}$$

상기 릴레이 그룹의 횡축 배율은 ϕ_1 에 의해 주어지며, 여기서 ϕ_1 , ϕ_{VFE} 및 ϕ_2 는 각각 상기 전방 렌즈 그룹, VFE, 상기 후방 렌즈 그룹의 광학적 파워이고, ϕ_R 은 상기 릴레이 그룹의 합성 파워(compound power)이고, z_0 은 전방 렌즈 그룹과 상기 선택된 위치 사이의 상기 광축을 따른 거리이고, t_1 과 t_2 는 각각, i) 상기 전방 렌즈 그룹과 상기 VFE 사이, 그리고 ii) 상기 VFE와 상기 후방 렌즈 그룹 사이의 상기 광축을 따른 거리들인 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서,

$t_2=1/\phi_2$ 이고, t_2 는 상기 VFE와 상기 후방 렌즈 그룹 사이의 상기 광축을 따른 거리이고, ϕ_2 는 상기 후방 렌즈 그룹의 광학적 파워인 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 릴레이 그룹은 객체 공간에서 텔레센트릭(telecentric)한 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 VFE는, 상기 릴레이 그룹의 합성 광학적 파워가 상기 VFE의 광학적 파워와는 무관하게 일정하게 유지되게 하는 로케이션에서 상기 광축 상에 배치된 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 마이크로스코픽 InI 유닛은 마이크로 디스플레이를 포함하고, 상기 아이피스 옵틱스를 통한 상기 마이크로 디스플레이의 원호 필드 각도(subtended field angle)는 상기 VFE의 광학적 파워와는 무관하게 일정하게 유지되는 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 릴레이 그룹은 이중 텔레센트릭한 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 14

제1항에 있어서,

상기 아이피스 옵틱스는 썸기 형상의 자유형 프리즘(freeform prism)을 포함한 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 15

제1항에 있어서,

상기 텔레이 그룹은 상기 위치를 최대 5 디옴터만큼 상기 아이피스를 통해 재구성된 3D 가상 장면의 위치의 광축을 따라 튜닝하도록 구성된 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 16

제1항에 있어서,

상기 VFE의 초점 범위는 75mm~100mm인 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 17

제1항에 있어서,

상기 아이피스 옵틱스의 초점 거리는 27.5mm인 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 18

제1항에 있어서,

상기 시스템의 대각선 시야는 35° 인 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 19

제1항에 있어서,

상기 시스템은 픽셀당 2분각(arc minute)만큼 높은 광학 해상도를 갖는 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

청구항 20

제1항 내지 제7항, 제10항 내지 제19항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 마이크로스코픽 InI 유닛은 마이크로 렌즈 어레이를 포함하고, 상기 마이크로 렌즈 어레이의 적어도 하나의 렌즈 표면은 다음 식,

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12}$$

으로 표현되고, 여기서, z는 국소 x, y, z 좌표계의 z축을 따라 측정된 상기 표면의 휨(sag)이고, c는 정점 곡률이고, r은 반경 거리이고, k는 원뿔 상수이고, A 내지 E는 각각 4차, 6차, 8차, 10차 및 12차 변형 계수인 것인, 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 출원은 2017년 3월 9일자로 출원된 미국 가출원 제62/469,097호의 우선권의 이익을 주장하며, 이 가출원의 전체 내용은 본 명세서에 참고로 포함된다.

[0002] 본 발명은 NSF에 의해 부여된 허가 번호 1422653에 따라 정부 지원으로 이루어졌다. 정부는 본 발명에서 소정의 권리를 갖는다.

[0003] 본 발명은 일반적으로 헤드 장착 디스플레이 분야에 관한 것으로서, 배타적이 아니라 더 구체적으로는 통합 이미징(integral imaging; InI)에 기초하는 헤드 장착 디스플레이에 관한 것이다.

배경 기술

[0004] 일반적으로 니어 투 아이 디스플레이(near-to-eye display: NED) 또는 헤드 착용 디스플레이(head-worn display: HWD)라고도 알려진 헤드 장착 디스플레이(head-mounted display: HMD)는 근년에 큰 관심을 받았으며 광범위한 소비자 응용을 위해 기술을 촉진하기 위한 엄청난 노력을 자극했다. 예를 들어, 물리적 세계에 대한

사용자의 직접 뷰 상의 디지털 정보의 광학적 중첩을 가능하게 하고 실세계(real world)에 대한 시스루 비전(see-through vision)을 유지하는 경량 광학 시스루 HMD(OST-HMD)는 증강 현실(augmented reality; AR) 응용에 대한 주요 가능 기술들 중 하나이다. 컴퓨터로 생성된 가상 세계 또는 원격 실세계의 고해상도 비디오 캡처에 사용자를 몰입시키는 넓은 시야(field-of-view; FOV)의 몰입형 HMD는 가상 현실(virtual reality; VR) 응용에 대한 주요 가능 기술이다. HMD는 게이밍, 시뮬레이션 및 훈련, 방어, 교육 및 기타 분야에서 수많은 응용을 발견한다.

[0005] VR 디스플레이 및 AR 디스플레이 양자의 개발을 위해 최근 이루어진 많은 약속 및 엄청난 진전에도 불구하고, 오랜 기간 동안 HMD의 착용에 수반된 시각적 불편을 최소화하는 것은 여전히 해결되지 않은 과제로 남아 있다. 시각적 불편의 주요 원인들 중 하나는 조절 큐(accommodation cue) 및 망막 이미지 흐림 효과를 포함하는 정확한 초점 큐를 렌더링하기 위한 능력의 결여로 인한 수렴-조절 불일치(vergence-accommodation conflict; VAC)이다. HMD의 VAC 문제는 이미지 소스가 주로 눈으로부터 고정된 거리에 위치하는 2D 평면이라는 사실에서 비롯된다. 도 1은, 주로 이미지 소스인 2D 마이크로 디스플레이 및 마이크로 디스플레이 상에 렌더링된 이미지를 확대하고 눈으로부터 고정된 거리에 나타나는 가상 이미지를 형성하는 아이피스를 포함하는 일반적인 단안(monocular) HMD의 개략적인 레이아웃을 도시한다. OST-HMD는 가상 디스플레이 및 실제 장면의 광학 경로들을 결합하기 위해 눈의 정면에 배치되는 광학 결합기(예를 들어, 빔 분할기)를 필요로 한다. 단안 또는 양안(binocular)인지, 시스루 또는 몰입형인지에 관계없이, 종래의 HMD는 가상 이미지 평면에 대응하는 거리와 다른 거리에 나타날 수 있는 디지털 정보에 대한 정확한 초점 큐를 렌더링하기 위한 능력을 갖지 못한다. 결과적으로, 종래의 HMD는 자연스러운 눈 조절 응답 및 망막 흐림 효과를 자극하지 못한다. HMD에서의 정확한 초점 큐의 결여 문제는 여러 시각적 큐 충돌을 유발한다. 예를 들어, 종래의 입체 HMD는 2개의 약간 다른 뷰잉(viewing) 위치에서 본 3D 장면의 양안 시차 및 다른 그림 깊이 큐와 함께, 각각의 눈에 대해 하나씩인 한 쌍의 이차원(2D) 투시 이미지로부터의 3D 공간 및 형상의 인식을 자극한다. 따라서, 종래의 입체 HMD는 조절 및 수렴 큐의 부자연스러운 분리를 강제한다. 조절 깊이에 대한 큐는 2D 이미지 평면의 깊이에 의해 지시되는 반면, 3D 장면의 수렴 깊이는 이미지 쌍에 의해 렌더링되는 양안 시차에 의해 지시된다. 디스플레이에 의해 렌더링되는 가상 객체에 대한 망막 이미지 흐림 큐는 자연적인 장면에 의해 생성되는 것과 일치하지 않는다. 많은 연구는 종래의 HMD에서의 부정확하게 렌더링되는 초점 큐와 관련된 이러한 충돌하는 시각적 큐가 다양한 시각적 아티팩트 및 시각적 성능의 저하에 기여할 수 있다는 강력한 지지 증거를 제공했다.

[0006] 이전에 제안된 여러 접근법은 볼륨 디스플레이, 수퍼 멀티 뷰 자동 입체 디스플레이, 통합 이미징 기반 디스플레이, 홀로그램 디스플레이, 다초점 평면 디스플레이 및 계산 다층 디스플레이를 포함하는 종래의 입체 디스플레이의 단점을 극복할 수 있다. 그들의 엄청난 하드웨어 복잡성으로 인해, 이러한 상이한 디스플레이 방법들 중 복수는 HMD 시스템에서의 구현에 적합하지 않다. 한편, 다초점 평면 디스플레이, 통합 이미징 및 계산 다층 접근법들은 일반적으로 광 필드 디스플레이로 지칭되며, 헤드 장착 응용에 적합하다. HMD에서의 그들의 사용은 헤드 장착 광 필드 디스플레이로 지칭된다.

[0007] 헤드 장착 광 필드 디스플레이들은 상이한 깊이들에서의 3D 장면의 투영들 또는 겹보기에 3D 장면에 의해 방출되고 상이한 눈 위치들로부터 뷰잉되는 광선들의 방향들을 샘플링함으로써 진정한 3D 장면을 렌더링한다. 이들은 정확한 또는 거의 정확한 초점 큐들을 렌더링하고, 종래의 VR 및 AR 디스플레이들에서의 수렴-조절 불일치 문제를 해결할 수 있다. 예를 들어, 통합 이미징(InI) 기반 디스플레이는 겹보기에 3D 장면에 의해 방출되고 상이한 눈 위치들로부터 뷰잉되는 광선들의 방향들을 각도 샘플링함으로써 3D 장면의 광 필드들을 재구성한다. 도 2에 도시된 바와 같이, 간단한 InI 기반 디스플레이는 일반적으로 디스플레이 패널, 및 마이크로 렌즈 어레이(microlens array; MLA) 또는 핀홀 어레이일 수 있는 2D 어레이를 포함한다. 디스플레이는 2D 요소 이미지들의 세트를 렌더링하며, 이들 각각은 3D 장면의 상이한 투시를 나타낸다. 요소 이미지들 내의 대응하는 픽셀들에 의해 방출된 원뿔형 광선 다발들은 교차하여, 광을 방출하고 3D 공간을 점유하는 것처럼 보이는 3D 장면의 인식을 통합적으로 생성한다. 2D 어레이들을 사용하는 InI 기반 디스플레이는 수평 및 수직 양방향에서의 최대 시차(full-parallax) 정보를 갖는 3D 형상의 재구성을 가능하게 하며, 이는 1차원 시차 장벽들 또는 원통형 렌티큘러 렌즈들을 사용하는 수평 시차만을 갖는 종래의 자동 입체 디스플레이와의 그의 중요한 차이이다. 1908년의 립만(Lippmann)에 의한 발표 이래로, InI 기반 기술은 실제 장면의 광 필드를 캡처하기 위한 것만 아니라, 무안경 자동 입체 디스플레이에서의 사용을 위해서도 광범위하게 탐구되었다. 이 기술은 낮은 횡방향 및 종방향 해상도, 좁은 피사계 심도(DOF) 및 좁은 뷰잉각에서의 그의 한계에 대해 알려졌다. 다른 모든 비입체 3D 디스플레이 기술에 비하여, InI 기술의 간단한 광학 아키텍처는 HMD 광학 시스템과 통합하여 착용 가능한 광 필드 디스플레이를 생성하는 것을 매력적이게 한다.

[0008] 그러나, 다른 통합 이미징 기반 디스플레이 및 이미징 기술과 마찬가지로, 현재의 InI 기반 HMD 방법은 여러 주요 한계: (1) 좁은 시야(대각선으로 <math><30^\circ</math>); (2) 낮은 횡방향 해상도(시각 공간에서 약 10분각(arc minute)); (3) 낮은 종방향 해상도(시각 공간에서 약 0.5 디오퍼); (4) 좁은 피사계 심도(depth of field; DOF)(10분각 해상도 기준에 대해 약 1 디오퍼); (5) 누화 없는 뷰잉에 대한 제한된 아이박스(<math><5\text{mm}</math>); 및 (6) 뷰잉각의 제한된 해상도(>뷰잉당 20분각)를 겪는다. 이러한 한계들은 기술을 고성능 솔루션으로 채택하는 것에 대한 상당한 장벽을 생성할 뿐만 아니라, 잠재적으로는 조절-수렴 불일치 문제를 해결하는 것에 대한 기술의 유효성을 저하시킨다.

[0009] 따라서, 본 개시는 위에 요약된 최신 기술의 성능 한계들의 일부 양태들을 극복하는 통합 이미징에 기초하는 고성능 헤드 장착 광 필드 디스플레이의 방법, 설계 및 실시예를 상술한다.

발명의 내용

[0010] 전술한 문제들에 응답하여, 본 발명의 양태들 중 하나에서, 본 발명은 높은 횡방향 및 종방향 해상도, 큰 피사계 심도, 누화 없는 아이박스 및 증가된 뷰잉각 해상도를 제공하는 통합 이미징에 기초하는 고성능 HMD를 제공한다. 이와 관련하여, 본 발명은 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템으로서, 시스템의 광축을 따라 선택된 위치에서, 선택된 3D 장면의 광 필드들을 생성하도록 구성된 마이크로스코픽 InI(마이크로-InI) 유닛, 및 가변 초점 요소(vari-focal element; VFE)가 배치된 릴레이 그룹을 포함하는 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템을 제공할 수 있다. 릴레이 그룹은 선택된 위치가 릴레이 그룹의 광학적 켈레(optical conjugate)가 되게 하는 로케이션에서 광축 상에 배치될 수 있으며, 릴레이 그룹은 마이크로스코픽 InI 유닛에 의해 생성된 광 필드들을 수신하고, 선택된 3D 장면의 광축 상에 중간 3D 장면을 생성하도록 구성될 수 있다. 릴레이 그룹은 중간 3D 장면의 광축을 따라 위치를 튜닝하도록 구성될 수 있다. 또한, 헤드 장착 디스플레이 시스템의 사용자에게 의한 뷰잉을 위해 릴레이 그룹으로부터의 중간 3D 장면을 시스템의 출구 동공 내로 이미징하기 위한 아이피스 옵틱스(eyepiece optics)가 제공될 수 있다. 마이크로스코픽 InI(마이크로-InI) 유닛은 제한된 뷰잉 구역을 갖는 3D 장면의 최대 시차 광 필드들을 재생하도록 구성될 수 있다. 헤드 장착 디스플레이 시스템의 사용자에게 의한 뷰잉을 위해 아이피스 옵틱스와 광학적으로 통신하여 실제계의 뷰를 아이피스 옵틱스에 전송하기 위한 시스루 유닛이 또한 제공될 수 있다. VFE는 출구 동공에 광학적으로 켈레인 위치에 배치될 수 있다. 또한, 시스템의 시야는 VFE의 광학적 파워(optical power)와는 무관할 수 있고, VFE는 릴레이 그룹의 합성 광학적 파워(compound optical power)가 VFE의 광학적 파워와는 무관하게 일정하게 유지되게 하는 로케이션에서 광축 상에 배치될 수 있다. 또한, 릴레이 그룹은 객체 공간에서 텔레센트릭(telecentric)할 수 있거나 이중 텔레센트릭할 수 있다. 아이피스 옵틱스는 쉐기 형상의 자유형 프리즘(freeform prism)을 포함할 수 있다. 헤드 장착 디스플레이 통합 이미징(InI) 시스템의 대각선 시야는 35° 일 수 있고, 픽셀당 2분각 정도의 높은 광학 해상도를 가질 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0011] 전술한 요약 및 본 발명의 예시적인 실시예들에 대한 다음의 상세한 설명은 첨부 도면들과 함께 읽을 때 더 이해될 수 있다. 도면들에서,

도 1은 아이피스가 마이크로 디스플레이 상에 렌더링된 이미지를 확대하고, 눈으로부터 고정된 먼 거리에 나타나는 가상 디스플레이를 형성하는 종래의 단안 HMD를 개략적으로 도시한다.

도 2는 통합 이미징에 기초하는 근안 광 필드 디스플레이(near-eye light field display)를 개략적으로 도시한다.

도 3a는 본 발명에 따른 고성능 InI 기반 헤드 장착 광 필드 디스플레이의 예시적인 구성을 개략적으로 도시한다.

도 3b는 본 발명에 따른 마이크로-InI 유닛의 예시적인 구성을 개략적으로 도시한다.

도 4a 내지 도 4d는 개구 어레이(도 4a), 프로그래밍 가능 공간 광 변조기(도 4b), 제어 가능한 지향성 방출 엔진을 갖는 디스플레이 소스(도 4c), 및 예시적인 제어 가능한 지향성 방출 엔진으로서 공간 광 변조기를 갖는 백라이트 소스(도 4d)를 사용함으로써 광선 방향 제어를 제공하도록 구성된 본 발명에 따른 마이크로-InI 유닛의 예시적인 구성을 개략적으로 도시한다.

도 5는 아이피스의 출구 동공에 켈레인 위치에 배치된 VFE(가변 초점 요소)를 갖는 본 발명에 따른 릴레이 그룹

의 예시적인 구성을 개략적으로 도시한다.

도 6a 내지 도 6d는 가변 초점 릴레이 그룹의 일부가 아이피스에 통합된 자유형 도파관 프리즘을 사용하는 본 발명에 따른 광학 시스템 InI-HMD 설계의 예시적인 구성을 개략적으로 도시하며, 도 6a는 디스플레이 경로 레이아웃을 나타내고, 도 6b는 시스템 뷰 레이아웃을 나타내고, 도 6c는 확장된 시스템 뷰를 위한 도파관 프리즘의 세그먼트화된 배면을 나타내고, 도 6d는 도파관 프리즘의 배면의 정면 뷰를 나타낸다.

도 7a와 도 7b는 본 발명에 따른 InI-HMD 설계 구성의 2D 광학 레이아웃의 예시적인 구성을 개략적으로 도시하며, 도 7a는 광 필드 디스플레이 경로를 나타내고, 도 7b는 시스템 경로를 나타낸다.

도 8a와 도 8b는 축상 필드들(도 8a) 및 MLA(마이크로 렌즈 어레이)의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 8b)에 대한 3 디오퍼터의 재구성 중앙 깊이 평면(CDP) 깊이에 대한 MTF(modulation transfer function; 변조 전달 함수) 플롯들을 도시한다.

도 9a와 도 9b는 MLA에 대한 축상 필드들(도 9a) 및 MLA의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 9b)에 대한 2 디오퍼터의 재구성 CDP 깊이에 대한 MTF 플롯들을 도시한다.

도 10a와 도 10b는 MLA에 대한 축상 필드들(도 10a) 및 MLA의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 10b)에 대한 0 디오퍼터의 재구성 CDP 깊이에 대한 MTF 플롯들을 도시한다.

도 11a와 도 11b는 MLA에 대한 축상 필드들(도 11a) 및 MLA의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 11b)에 대한 0.25 디오퍼터만큼 CDP로부터 시프트된 재구성 포인트들에 대한 MTF 플롯들을 도시한다.

도 12a와 도 12b는 MLA에 대한 축상 필드들(도 12a) 및 MLA의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 12b)에 대한 0.5 디오퍼터만큼 CDP로부터 시프트된 재구성 포인트들에 대한 MTF 플롯들을 도시한다.

도 13a와 도 13b는 MLA에 대한 축상 필드들(도 13a) 및 MLA의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 13b)에 대한 0.75 디오퍼터만큼 CDP로부터 시프트된 재구성 포인트들에 대한 MTF 플롯들을 도시한다.

도 14a와 도 14b는 MLA에 대한 축상 필드들(도 14a) 및 MLA의 에지 근처의 가장 먼 MLA 요소의 필드들(도 14b)에 대한 1 디오퍼터만큼 CDP로부터 시프트된 재구성 포인트들에 대한 MTF 플롯들을 도시한다.

도 15는 시스템 경로 FOV 65° x 40° 에 대한 MTF를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0012]

이제, 유사한 요소들이 전반적으로 유사하게 넘버링되는 도면들을 참조하면, 도 3a에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 HMD 시스템(100)은 3개의 주요 서브시스템: I) 마이크로스코픽 InI(마이크로-InI) 유닛(130), II) InI 유닛(130)으로부터 광 필드들을 수신하도록 배치된 가변 초점 요소(VFE)(122)를 갖는 릴레이 그룹(120), 및 III) 릴레이 그룹(120)으로부터 튜닝된 중간 3D 장면을 수신하기 위한 아이피스 옵틱스(110)를 포함할 수 있다. 도 3b에 도시된 바와 같이, 마이크로-InI 유닛(130)은 제한된 뷰잉 구역으로부터 뷰잉된 3D 장면의 최대 시차 광 필드들을 재생할 수 있으며, 최대 시차 광 필드들은 수평 및 수직 뷰잉 방향들 양자로부터의 3D 장면의 뷰 투시들의 변화를 제공한다. 제한된 뷰잉 구역은 마이크로-InI 유닛(130)의 개구를 제한하는 것에 광학적으로 대응하고, 제한된 뷰잉 구역은 뷰잉자의 눈이 재구성된 3D 장면을 보기 위해 배치되는 디스플레이 시스템(100)의 출구 동공에 대한 광학적 컬레이다. 릴레이 그룹(120)은 그의 중앙 깊이 평면(CDP)의 튜닝 가능한 위치와 함께 마이크로-InI 유닛(130)에 의해 재구성된 3D 장면의 중간 이미지를 생성한다. 아이피스 옵틱스(110)의 배열에 따라, CDP의 위치는 약 0.5mm 내지 수백 밀리미터의 정도의 범위에서 튜닝 가능하여 광학적 무한대(0 디오퍼터) 내지 20cm(5 디오퍼터) 정도에 걸치는 큰 깊이 범위를 갖는 3D 장면의 인식을 생성할 수 있다. 릴레이 그룹(120)은 또한 재구성된 3D 장면(A0B)의 요면(concavity)의 반전(flip)을 용이하게 할 수 있다. 아이피스 옵틱스(110)는 튜닝 가능한 3D 광 필드들을 뷰잉자의 눈 내로 리이미징하고, 3D 광 필드들의 튜닝 가능한 깊이 범위를 수 미터 내지 수 센티미터의 큰 깊이 볼륨 간격으로 확대한다. 빔 분할기 기능을 갖는 옵틱스일 수 있는 시스템 유닛(도시되지 않음)은 시스템 뷰가 요구되는 경우에 실세계 장면의 두드러지지 않은 뷰를 광학적으로 가능하게 하기 위해 아이피스 옵틱스(110)와 광학적으로 통신할 수 있다. 도 3a의 마이크로-InI 유닛(130)은 도 3b에 추가로 도시된 바와 같이 고해상도 마이크로 디스플레이 및 마이크로 렌즈 어레이(MLA)(132)를 포함할 수 있다.

MLA(132) 내의 렌즈릿들(133)의 초점 거리는 f_{MLA} 로 표시되고, 마이크로 디스플레이(134)와 MLA(132) 사이의 겹은 g로 표시된다. 각자가 3D 장면(A0B)의 상이한 투시를 나타내는 2D 요소 이미지들의 세트가 고해상도 마이크로 디스플레이(134) 상에 표시될 수 있다. MLA(132)를 통해, 각각의 요소 이미지는 공간적으로 코히어런트하

지 않은(spatially-incoherent) 객체로서 작용하고, 요소 이미지들 내의 픽셀들에 의해 방출되는 원뿔형 광선 다발들은 교차하며, 광을 방출하고 3D 공간을 점유하는 것처럼 보이는 3D 장면의 인식을 통합적으로 생성한다.

z_0 의 깊이 범위를 갖는 재구성된 미니어처 장면의 중앙 깊이 평면(CDP)은 MLA(132)로부터 측정된 거리 l_{cdp} 에 위치된다. 이러한 InI 시스템(130)은 수평 및 수직 양방향에서 시차 정보를 갖는 3D 표면 형상(AOB)의 재구성을 가능하게 한다. 재구성된 3D 장면(즉, 도 3b의 곡선 AOB)의 광 필드는 사용자에게 의한 뷰잉을 위해 릴레이 그룹(120)을 통해 아이피스 옵틱스(110) 내로 광학적으로 결합될 수 있다. 해상도 우선 InI 시스템($f_{MLA} \neq g$)에서, 재구성된 3D 장면의 중앙 깊이 평면(CDP)은 마이크로 디스플레이(134)에 대한 광학적 컬레이터, 그 로케이션은 다음 식에 의해 주어진다.

수학식 1

[0013] $l_{cdp} = gM_{MLA}$

[0014] 여기서, M_{MLA} 는 마이크로-InI 유닛(130)의 배율이며, 이는 다음 식으로 표현될 수 있다.

수학식 2

[0015] $M_{MLA} = \frac{f_{MLA}}{g-f_{MLA}}$

[0016] 도 3a와 도 4a에 도시된 바와 같이, 선택사항으로서, MLA(132)의 피치와 일치하는 광선 제한 개구들의 그룹을 포함하는 개구 어레이(136)가 마이크로 디스플레이(134)와 MLA(132) 사이에 삽입될 수 있다. 각각의 마이크로 렌즈(133)에 대응하는 작은 개구는 설계된 뷰잉 윈도우 내의 광선들이 옵틱스를 통해 전파되어 아이박스에 도달하는 것을 가능하게 하는 반면, 원치 않는 광선들이 인접한 마이크로 렌즈(133)에 도달하는 것을 차단하거나 인접한 요소 이미지들로부터의 광선들이 마이크로 렌즈(133)에 도달하는 것을 차단한다. 예를 들어, 개구 A1과 A2 사이의 흑색 구역은 포인트 P1에서 비롯된 점선 광선들이 렌즈릿(MLA1)에 인접한 MLA2에 도달하는 것을 차단한다. 이러한 차단된 광선들은 일반적으로 InI 디스플레이 시스템에서 관찰되는 뷰 누화 및 고스트 이미지들의 주요 요인이다. 마이크로 디스플레이(134)로부터 개구 어레이(136)까지의 거리는 g_a 로 표시되고, 개구 구멍의 직경은 p_a 로 표시되며, 이들은 다음 식들에 의해 제한될 수 있다.

수학식 3

[0017] $g_a \leq g_{a-max} = g \frac{p_{ei}}{p_{ei}+p_{mla}}$

수학식 4

[0018] $p_a \leq p_{a-max} = p_{ei} \frac{(g_{a-max}-g_a)}{g_{a-max}}$

[0019] 여기서, g_{a-max} 및 p_{a-max} 는 각각 최대 허용 가능 갭 및 개구 크기이고, p_{ei} 는 요소 이미지의 치수이고, p_{mla} 는 MLA(132)의 피치이다.

[0020] 고정된 개구 크기를 갖는 개구 어레이(136)를 사용하는 것의 하나의 단점은 요소 이미지의 크기가 변할 경우에 각각의 요소 이미지의 에지 근처에 위치하는 픽셀들에 대한 광선들을 부분적으로 차단할 수 있다는 점이다. 도 4a에 도시된 바와 같이, 렌즈릿(MLA1)을 통해 전파되어야 하는 포인트 P1로부터의 광선들의 작은 부분이 개구 A1과 개구 A2 사이의 흑색 구역에 의해 차단되어, 원축오차(vignetting)와 같은 효과를 유발하며, 따라서 뷰잉

자는 각각의 요소 이미지의 예지 근처의 포인트들에 대한 이미지 휘도의 감소를 관찰할 수 있다. 도 4b는 도 4a의 구성의 대안적인 구성을 도시하며, 이러한 대안적인 구성에서는 개구 어레이(136)가 프로그래밍 가능한 공간 광 변조기(SLM)(135)로 대체되어, 각각의 개구의 크기 및 형상이 원하는 광선들의 부분적 차단을 방지하도록 동적으로 적응될 수 있다. 도 4c는 마이크로 디스플레이(134) 및 개구 어레이(136)가 제어 가능한 지향성 방출을 갖는 디스플레이 소스(131)로 대체되는, 본 발명에 따른 마이크로-InI 유닛의 다른 실시예를 도시하며, 여기서 광 방출 방향은 각각의 픽셀로부터의 광선들이 그들의 대응하는 MLA 렌즈릿(133)에만 도달하도록 정밀하게 제어될 수 있다. 도 4d는 공간 광 변조기(135)가 비-방향 방출을 갖는 백라이트 소스(138)와 비-자기 방출 마이크로 디스플레이(137) 사이에 삽입되는 그러한 디스플레이 소스(131)의 하나의 가능한 구성을 도시한다. 공간 광 변조기(135)는 마이크로 디스플레이(137)를 조명하고 MLA(132)에 도달하는 광선들의 원뿔 각도를 프로그래밍하고 제어하도록 설정될 수 있다.

[0021] 종래의 InI 기반 디스플레이 시스템은 일반적으로 3D 재구성 포인트들의 깊이들이 CDP의 깊이로부터 시프트됨에 따른 공간 해상도의 급속한 저하로 인해 피사계 심도(DOF)의 제한을 겪을 수 있다. 예를 들어, 3D 장면 볼륨은 시각적 공간에서 3분각 이상의 공간 해상도를 유지하기 위해 0.5 디오퍼터 미만으로 제한될 필요가 있을 수 있다. 도 3a의 예시적인 구성에서와 같이, 높은 공간 해상도를 유지하면서 훨씬 더 큰 3D 장면 볼륨을 렌더링하기 위해, 내부에 샌드위치된 전자적으로 제어되는 가변 초점 요소(122)를 갖는 릴레이 그룹(120)이 마이크로-InI(130)와 아이피스(110) 사이에 삽입된다. 예시적인 VFE들(122)은 액체 렌즈, 액정 렌즈, 변형 가능한 미러, 또는 전기적으로 튜닝 가능한 광학 기술과 같은 임의의 다른 튜닝 가능한 광학 기술을 포함한다. VFE(122)에 상이한 전압들을 인가하여 릴레이 그룹(120)의 광학적 파워(ϕ_R)를 동적으로 제어함으로써, 릴레이 그룹(120)은 마이크로-InI(130)에 의해 생성된 재구성된 미니어처 3D 장면의 중간 이미지(A'O'B')를 형성한다. 릴레이된 중간 장면의 중앙 깊이 위치(CDP)는 아이피스(110)에 대해 축 방향으로(광축을 따라) 튜닝 가능하다. 결과적으로, 아이피스(110)에 의한 확대된 3D 가상 장면의 깊이 볼륨은 높은 횡방향 및 종방향 해상도를 유지하면서 매우 가까운 것(예를 들어, 5 디오퍼터)에서 매우 먼 것(예를 들어, 0 디오퍼터)으로 축 방향으로 시프트될 수 있다.

[0022] 도 5는 마이크로-InI 유닛(130)에 인접한 전방 렌즈 그룹 "전방 릴레이"(126), 시스템 스톱으로 기능하는, 중간에 위치하는 VFE 옵티크(122) 및 아이피스(110)에 인접한 후방 렌즈 그룹 "후방 릴레이"(124)를 포함하는, 도 3a의 릴레이 그룹(120)과 같은 가변 초점 릴레이 그룹(120)의 예시적인 구성을 개략적으로 도시한다. 릴레이 그룹(120)의 합성 파워(ϕ_R)는 다음 식에 의해 주어진다.

[0023] [수학식 4]

[0024]
$$\phi_R = \phi_1 + \phi_2 + \phi_{vfe} - \phi_1 \phi_2 (t_1 + t_2) - \phi_{vfe} (\phi_1 t_1 + \phi_2 t_2) + \phi_{vfe} \phi_1 \phi_2 t_1 t_2$$

[0025] 여기서, ϕ_1 , ϕ_{vfe} 및 ϕ_2 는 각각 전방 렌즈 그룹(126), VFE(122) 및 후방 렌즈 그룹(124)의 광학적 파워이다. t_1 및 t_2 는 전방 렌즈 그룹(126)과 VFE(122) 사이 및 VFE(122)와 후방 렌즈 그룹(124) 사이의 공간들이다. z_0 은 전방 렌즈 그룹과 마이크로-InI 유닛(130)에 의해 재구성된 3D 장면 사이의 축 방향 거리이다. 릴레이된 중간 장면의 축 방향 위치는 다음 식에 의해 주어진다.

수학식 5

[0026]
$$z'_0 = - \frac{1}{\frac{(1-z_0\phi_1) - [z_0 + (1-z_0\phi_1)t_1]\phi_{vfe}}{[z_0 + (1-z_0\phi_1)t_1] + \{(1-z_0\phi_1) - [z_0 + (1-z_0\phi_1)t_1]\phi_{vfe}\}t_2} - \phi_2}$$

[0027] 가변 초점 릴레이 시스템의 횡측 배율은 다음 식에 의해 주어진다.

수학식 6

[0028]
$$M_R = \frac{1}{(1-z_0\phi_1) - [z_0 + (1-z_0\phi_1)t_1]\phi_{vfe} - \{[z_0 + (1-z_0\phi_1)t_1] + [(1-z_0\phi_1) - [z_0 + (1-z_0\phi_1)t_1]\phi_{vfe}]t_2\}\phi_2}$$

[0029] ϕ_e 가 아이피스(110)의 광학적 파워이고, Z_{RCDP} 가 릴레이된 CDP에서 아이피스(110)까지의 거리라고 가정하면, 아이피스(110)을 통한 재구성된 3D 가상 장면의 겉보기 CDP 위치는 다음 식에 의해 주어진다.

수학식 7

[0030]
$$Z'_{RCDP} = \frac{1}{\phi_e - \frac{1}{Z_{RCDP}}}$$

[0031] 아이피스(110)을 통한 전체 시스템의 횡측 배율은 다음 식에 의해 주어진다.

수학식 8

[0032]
$$M_t = \left| M_{MLA} \cdot M_R \cdot \frac{Z'_{RCDP}}{Z_{RCDP}} \right|$$

[0033] 아이피스(110)을 통한 전체 시스템의 시야(FOV)는 다음 식에 의해 주어진다.

수학식 9

[0034]
$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{h_0}{[h_{vfe} + (u_{vfe} - h_{vfe}\phi_{vfe})t_1] + \{(u_{vfe} - h_{vfe}\phi_{vfe}) - [h_{vfe} + (u_{vfe} - h_{vfe}\phi_{vfe})t_1]\phi_1\}z_0}$$

[0035] 여기서, t_3 은 아이피스(110)와 후방 릴레이 렌즈(124) 사이의 간격이고; z_{xp} 는 출구 동공과 아이피스(110) 사이의 간격이고; h_0 은 재구성된 장면의 이미지 높이이며, 다음과 같이 추가로 정의된다.

[0036]
$$u_{vfe} = [(1 - z_{xp}\phi_e) - (z_{xp} + (1 - z_{xp}\phi_e)t_3)\phi_2], \text{ 및}$$

[0037]
$$h_{vfe} = [(1 - z_{xp}\phi_e) - (z_{xp} + (1 - z_{xp}\phi_e)t_3)\phi_2] - [(z_{xp} + (1 - z_{xp}\phi_e)t_3)\phi_2 + ((1 - z_{xp}\phi_e) - (z_{xp} + (1 - z_{xp}\phi_e)t_3)\phi_2)]t_2.$$

[0038] VFE(122)가 아이피스(110)의 출구 동공에 대한 광학적 컬레이도록 설정되고(즉, $h_{vfe}=0$ 이고), 눈의 입구 동공이 디스플레이(134)를 보도록 배치될 때, $h_{vfe}=0$ 이고, FOV는 VFE(122)의 광학적 파워와는 무관하다. 수학식 9의 방정식은 다음 식으로 단순화된다.

수학식 10

[0039]
$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{h_0}{u_{vfe}t_1 + [u_{vfe} - u_{vfe}t_1\phi_1]z_0}$$

[0040] 도 5에 도시된 바와 같이, 가변 초점 릴레이 그룹(120)의 바람직한 실시예는 VFE(122)로 하여금 아이피스(110)의 출구 동공에 대한 광학적 컬레가 되게 하기 위해(즉, $h_{vfe}=0$) 전방 릴레이 그룹(26)의 후방 초점 거리(back focal length)에 VFE(122)를 배치한다(즉, $t_1=1/\phi_1$). 이러한 바람직한 실시예에서, 수학식 4에 의해 주어지는 릴레이 그룹(120)의 합성 파워(ϕ_R)는 다음 식으로 단순화된다.

수학식 11

$$\varphi_R = \varphi_1 - \varphi_1 \varphi_2 t_2$$

[0041]

수학식 6에 의해 주어지는 가변 초점 릴레이 시스템의 횡측 배율은 다음 식으로 단순화된다.

수학식 12

$$M_R = \frac{1}{(1 - z_0 \varphi_R) - \frac{\varphi_{vfe}(1 - \varphi_2 t_2) + \varphi_2(1 + \varphi_1 t_2)}{\varphi_1}}$$

[0043]

그리고, 수학식 8에 의해 주어지는 전체 시스템의 횡측 배율도 마찬가지로이다.

$t_1 = 1/\varphi_1$ 및 $h_{vfe} = 0$ 일 때, 시스템의 FOV는 다음 식으로 더 단순화된다.

수학식 13

$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{h_0 \varphi_1}{u_{vfe}}$$

[0046]

수학식 10 내지 13에 의해 입증되는 바와 같이, 바람직한 방식에서의 VFE(122)의 세심한 위치는 릴레이 그룹(120)의 합성 광학적 파워가 객체-공간 텔레센트리시티(telecentricity)의 속성으로 인한 일정한 주 광선 방향으로 인해 VFE(122)의 광학적 파워와는 무관하게 일정하게 유지되는 것을 보장한다. 수학식 13에 의해 추가로 입증되는 바와 같이, 아이피스(110)를 통한 디스플레이의 원호 필드 각도(subtended field angle)는 또한 VFE(122)의 광학적 파워와는 무관하게 일정하게 유지된다. 릴레이 그룹(120)에 대한 일정한 광학적 파워를 유지하는 것은 가상적으로 재구성된 3D 장면이 CDP의 초점 깊이에 관계없이 일정한 시야를 달성하도록 돕는다. 따라서, 훨씬 더 큰 볼륨의 3D 장면이 시선 의존 또는 시간 다중화 모드에서 이음매 또는 아티팩트 없이 시각적으로 인식될 수 있다. 수학식 12에 의해 주어지는 릴레이 그룹(120)의 횡측 배율은 또한 $t_2 = 1/\varphi_2$ 가 충족되는 경우에 일정하게 유지될 수 있으며, 이는 가변 초점 릴레이 그룹(120)으로 하여금 이중 텔레센트릭 시스템이 되게 한다는 점에 유의할 가치가 있다.

[0047]

도 3a의 아이피스(110)는 많은 다른 형태를 취할 수 있다. 예를 들어, 광학 시스템 HMD의 간결한 광학적 설계를 달성하기 위해, 썬더기 형상의 자유형 프리즘이 채택될 수 있으며, 이를 통해 마이크로-InI 유닛(130) 및 릴레이 그룹(120)에 의해 재구성된 3D 장면이 확대되고 뷰잉된다. AR 시스템에 대한 시스템 능력을 가능하게 하기 위해, 표면들 중 하나가 빔 분할기 코팅으로 코팅된 자유형 교정기 렌즈가 프리즘 아이피스에 부착되어 자유형 프리즘에 의해 실세계 장면에 도입되는 뷰잉 축 편차 및 바람직하지 않은 수차를 교정할 수 있다.

[0048]

본 발명의 다른 양태에서, 릴레이 그룹(120)의 일부는 자유형 아이피스와 같은 아이피스 옵틱스(110)에 통합되어, 튜닝 가능한 중간 3D 장면이 자유형 아이피스 내에 형성되게 할 수 있다. 이러한 맥락에서, 아이피스는 예를 들어 썬더기 형상의 자유형 도파관 프리즘일 수 있다. 도 6a는 복수의 자유형 광학 표면에 의해 형성된 자유형 도파관 형태 프리즘(850)의 개념을 개략적으로 도시한다. 출구 동공은 사용의 눈이 확대된 3D 장면을 보도록 배치되는 곳에 위치한다. 이러한 설계에서, VFE(122)에 이어지는 전통적인 릴레이 그룹(220)의 일부는 프리즘(850)에 통합되며, "VFE를 갖는 릴레이 그룹"으로 표시된 박스 내에 포함된 자유형 도파관 프리즘(850)의 상부 부분(851)에 의해 충족된다. 3D 포인트(예를 들어, A)로부터 방출된 광선은 먼저 릴레이 그룹(220)의 가장 가까운 광학 요소(126)에 의해 굴절되어 프리즘(850) 내로 전송되고, 이어서 하나 또는 복수의 자유형 표면에 의해 반사되어 중간 이미지(예를 들어, A')를 생성한다. 중간 이미지(예를 들어, A')의 축 방향 위치는 VFE(122)에 의해 튜닝 가능하다. 후속 표면들에 의한 복수의 연속 반사 및 출구 표면(855)을 통한 최종 굴절은 광선이 시스템의 출구 동공에 도달하는 것을 가능하게 한다. 상이한 요소 이미지들로부터의 복수의 광선 다발

[0049]

이 존재할 수 있지만, 겹보기에는 동일한 객체 포인트로부터 그렇게 되며, 각각의 다발은 객체의 상이한 뷰를 나타내며, 출구 동공의 상이한 로케이션들 상에 입사한다. 이러한 광선 다발들은 눈앞에 위치하는 가상 3D 포인트(예를 들어, "A")를 통합적으로 재구성한다. 복수의 광학 요소를 필요로 하는 것이 아니라, 광학 경로가 다중 표면 프리즘(850) 내에서 자연스럽게 접히며, 이는 회전 대칭 요소들을 사용하는 설계와 비교할 때 옵틱스의 전체 볼륨 및 무게를 실질적으로 감소시키는 것을 돕는다. 전통적인 썬기 형상의 3-표면 프리즘을 사용하는 설계와 비교할 때, 도파관 형태의 아이피스 설계는 릴레이 기능의 일부를 통합하여 독립형 릴레이 그룹(120)을 3-표면 프리즘과 결합하는 것보다 훨씬 더 간결한 시스템을 가능하게 한다. 간결함의 이점 외에도, 도파관 형태의 다중 접음 아이피스 설계는 훨씬 더 유리한 폼 팩터를 제공하는데, 이는 나머지 릴레이 그룹 및 마이크로-InI 유닛을 관자놀이 쪽에 수평으로 접을 수 있게 하기 때문이다. 다중 접음은 훨씬 더 균형 잡힌 무게를 갖는 시스템을 생성할 뿐만 아니라, 썬기 형상 프리즘을 사용하는 것보다 실질적으로 더 큰 시스템 FOV를 가능하게 한다.

[0050] AR 시스템에 대한 시스템 능력을 가능하게 하기 위해, 도 6a의 프리즘(850)의, 아이피스 부분으로 표시된 배면의 하부 부분(853)은 빔 분할 미러로서 코팅될 수 있고, 적어도 2개의 자유형 광학 표면을 포함하는 자유형 교정기 렌즈(840)는 프리즘(850)의 배면에 부착되어, 자유형 프리즘(850)에 의해 실세계 장면에도 도입되는 뷰잉 축 편차 및 바람직하지 않은 수차를 교정할 수 있다. 시스템 개략 레이아웃이 도 6b에 도시되어 있다. 가상 광 필드로부터의 광선들은 프리즘(850)의 배면에 의해 반사되는 반면, 실세계 장면으로부터의 광선들은 자유형 교정기 렌즈(840) 및 프리즘(850)을 통해 투과된다. 자유형 교정기 렌즈(840)의 전면은 프리즘(850)의 배면의 형상과 일치한다. 자유형 교정기 렌즈(840)의 배면은 렌즈가 프리즘(850)과 결합될 때 실세계 장면으로부터의 광선들에 도입되는 시프트 및 왜곡을 최소화하도록 최적화될 수 있다. 추가적인 교정기 렌즈 "보정기"는 전체 시스템의 풋프린트 및 무게를 현저히 증가시키지 않는다.

[0051] 본 발명의 다른 양태에서, 도 6a의 프리즘(850)의, 아이피스 부분으로 표시된 배면의 하부 부분(853)은 세그먼트(853-1) 및 세그먼트(853-2)인 2개의 세그먼트로 분할될 수 있다. 도 6c에 개략적으로 도시된 바와 같이, 853-1의 세그먼트는 마이크로-InI 유닛에 의해 생성된 광 필드들을 수신하는 반사 또는 부분 반사 표면일 수 있다. 853-1 세그먼트 상의 빔 분할 미러 코팅은 또한 실세계 장면으로부터의 광선들의 투과를 가능하게 한다. 세그먼트(853-2)는 실세계 장면으로부터의 광선들만을 수신하는 투과성 또는 반투과성 표면이며, 마이크로-InI 유닛(130)에 의해 생성된 광 필드들을 수신하지 않는다. 도 6d는 프리즘(850)의 배면의 정면 뷰를 개략적으로 도시한다. 2개의 표면 세그먼트(853-1, 853-2)는 마이크로-InI 유닛(130)에 의해 재구성된 3D 광 필드들을 수신하는 데 필요한 개구 윈도우의 상부 경계에서 교차하며, 2개의 분리된 자유형 표면에 의해 형성될 수 있다. 배면(853)의 하부 부분을 상이한 광 경로들을 갖는 2개의 분리된 세그먼트(853-1, 853-2)로 분할하는 것은 가상 디스플레이 경로의 제약을 받지 않고 디스플레이 경로의 FOV를 넘어 시스템 뷰의 FOV를 실질적으로 확대할 수 있는 능력을 제공한다. 도 6c에 도시된 바와 같이, 자유형 교정기 렌즈(840)가 프리즘(850)의 배면에 부착되어, 자유형 프리즘(850)에 의해 실세계 장면에도 도입된 뷰잉 축 편차 및 바람직하지 않은 수차를 교정할 수 있다. 가상 광 필드로부터의 광선들은 프리즘(850)의 배면의 세그먼트(853-1)에 의해 반사되는 반면, 실세계 장면으로부터의 광선들은 프리즘(850)의 세그먼트들(853-1, 853-2) 및 자유형 교정기 렌즈(840) 양자를 통해 투과된다. 표면 세그먼트(853-2)는 자유형 교정기 렌즈(840)와 결합될 때 시스템 뷰의 시각적 아티팩트를 최소화하도록 최적화될 수 있다. 자유형 교정기 렌즈(840)의 전면은 프리즘(850)의 표면 세그먼트들(853-1, 853-2)의 형상과 일치한다. 자유형 교정기 렌즈(840)의 배면은 자유형 교정기 렌즈(840)가 프리즘(850)과 결합될 때 실세계 장면으로부터의 광선들에 도입되는 시프트 및 왜곡을 최소화하도록 최적화될 수 있다.

[0052] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 도 7a는 도 6a의 개념적 시스템을 구현하는 물리적 시스템의 광학 설계를 개략적으로 도시한다. 도 7a는 광 필드 디스플레이 경로의 2D 광학 레이아웃을 도시하고, 도 7b는 시스템 경로의 광학 레이아웃을 도시한다. 광 필드 디스플레이의 광학 시스템은 마이크로-InI 유닛, VFE를 갖는 릴레이 그룹 및 자유형 도파관을 포함한다. 릴레이 그룹의 일부는 도파관에 통합될 수 있다. 마이크로-InI 유닛은 마이크로 디스플레이(S0), 편환 어레이(S1) 및 마이크로 렌즈 어레이(S2)를 포함할 수 있다. 릴레이 그룹은 4개의 렌즈, 시판되는 VFE(Optotune Inc.의 전기 렌즈 EL 10-30) 및 2개의 자유형 표면(표면 S19 및 S20)을 포함할 수 있다. 자유형 도파관 프리즘(900)은 각각 S19, S20, S21 및 S22로 표시된 복수의 자유형 광학 표면에 의해 형성될 수 있다. 이러한 설계에서, VFE에 이어지는 전통적인 릴레이 그룹의 일부는 프리즘(900)에 통합될 수 있고, 표면 S19 및 S20에 의해 충족될 수 있다. 3D 포인트(예를 들어, A)로부터 방출된 광선은 먼저 프리즘(900)의 표면(S19)에 의해 굴절되고, 이어서 표면(S20)에 의해 반사되어 중간 이미지(예를 들어 A')를 생성한다. 중간 이미지(예를 들어, A')의 축 방향 위치는 VFE에 의해 튜닝 가능하다. 표면 S21' 및 S22-1에 의한 2개 이상의 연속 반사 및 표면 S21을 통한 최종 굴절은 광선이 시스템의 출구 동공에 도달할 수 있게 한다. 상이한

요소 이미지들로부터의 그러나 겹보기에는 동일한 객체 포인트로부터의 복수의 광선 다발이 존재하며, 이들 각각은 객체의 상이한 뷰를 나타내며, 출구 동공의 상이한 로케이션들 상에 입사한다. 이러한 광선 다발들은 눈 앞에 위치하는 가상 3D 포인트를 통합적으로 재구성한다. 도파관의 표면 S21'에 의해 반사된 광선들은 내부 전 반사의 조건을 만족시켜야 한다. 프리즘(900)의 배면들(S22-1, S22-2)은 실세계 장면의 뷰를 차단하는 몰입형 HMD 시스템을 구축하기 위해 미리 코팅으로 코팅될 수 있다. 대안적으로, 표면(S22-1)은 도 7b에 도시된 바와 같이 보조 렌즈를 사용하여 광학 시스루 능력이 요구되는 경우에 빔 분할 코팅으로 코팅될 수 있다.

[0053] 여기에 개시된 설계에서, Z축은 뷰잉 방향을 따르고, Y축은 동공 사이 방향과 정렬되는 수평 방향과 평행하고, X축은 헤드 배향과 정렬되는 수직 방향이라는 점에 유의해야 한다. 결과적으로, 전체 도파관 시스템은 수평 (YOZ) 평면에 대해 대칭이고, 광학 표면들(S19, S20, S21, S22)은 수평 Y축을 따라 디센터링되고, 수직 X축에 대해 회전된다. 광학 경로는 수평(YOZ) 평면에서 접힌다. 이러한 배열은 마이크로-InI 유닛 및 가변 초점 릴레이 그룹이 사용자 헤드의 관자놀이 쪽에 장착되는 것을 가능하게 하여, 결과적으로 균형 잡힌 인체 공학적 시스템 패키징을 가능하게 한다.

[0054] 표 1은 도 7a의 시스템에 대한 주요 성능 사양들 중 일부를 강조하였다. 시스템은 35°의 대각선 FOV에 대응하는 3D 장면의 진정한 3D 광 필드를 렌더링하는 능력을 제공하며, 시각적 공간에서 픽셀당 2분각 정도의 높은 광학 해상도를 달성한다. 또한, 시스템은 단안 디스플레이에 대해 약 0.1 디오퍼터의 높은 종방향 해상도와 함께 0 내지 5 디오퍼터로 튜닝 가능한 큰 깊이 범위를 제공한다. 또한, 시스템은 약 0.5/mm²의 높은 뷰 밀도를 달성하며, 뷰 밀도 σ는 출구 동공 상의 단위 면적당 고유 뷰들의 수로 정의되고, 다음 식에 의해 주어진다.

$$\sigma = \frac{N}{A_{XP}}$$

[0056] 여기서, N은 뷰들의 총 수이고, A_{XP}는 디스플레이 시스템의 출구 동공의 면적이다. 0.5/mm²의 뷰 밀도는 0.2 디오퍼터의 거리에 있는 객체에 대한 약 1분각의 뷰잉각 해상도와 같다. 디스플레이의 아이박스로도 알려진, 누화 없는 뷰잉을 위한 출구 동공 직경은 약 6mm이다. 이 실시예에서, 출구 동공 직경은 상업용 VFE의 개구 크기에 의해 제한되며, 다른 더 큰 개구의 VFE가 채택되는 경우에 증가될 수 있다. 마지막으로, 시스템은 수평 65° 및 수직 40°보다 큰 시스루 FOV를 제공한다. 본 출원인의 프로토타입에서 이용되는 마이크로 디스플레이는 8 μm 컬러 픽셀 및 1920x1080의 픽셀 해상도를 갖는 0.7 인치 유기 발광 디스플레이(OLED)(소니의 ECX335A)이다. 그러나, 광학 설계 자체는 상이한 치수의 OLED 패널 또는 다른 타입의 마이크로 디스플레이, 예를 들어 6μm보다 큰 컬러 픽셀 크기를 갖는 액정 디스플레이를 지원할 수 있다.

표 1

[0057] 중앙 깊이 평면(CDP)의 튜닝 가능 깊이 범위	0 ~ 5 디오퍼터
시야 (가상 디스플레이)	CDP에서 35° (대각선), 또는 30.5° (수평) x 17.5° (수직)
시야 (시스루)	>75° (대각선), 또는 >65° (수평) x 40° (수직)
전방 릴레이 그룹의 초점 거리	24 mm
후방 릴레이 그룹의 초점 거리	24 mm
튜닝 가능 렌즈의 초점 범위	75~100mm (8.5 디오퍼터)
아이피스 초점 거리, f _{eye}	27.5 mm
출구 동공 직경	6 mm
MLA 내의 렌즈렛의 피치	1 mm
MLA의 F 넘버	3.3

[0058] <표 1 - 1차 시스템 사양들>

[0059] 표 2 내지 5에서 광학 표면 데이터의 형태로 도 7a의 시스템의 예시적인 구현이 제공된다. 표 2는 디스플레이 경로의 기본 파라미터들을 요약한 것이다(단위: mm). 표 3 내지 5는 비구면 광학 표면들을 정의하는 최적화된 계수들을 제공한다.

표 2

요소 수 또는 명칭	표면 No.	표면 타입	Y 반경	두께	재료	굴절 모드
개구		구면	무한대	2.215		굴절
MLA	S1	비구면	-5.32	3	PMMA	굴절
	S2	비구면	-1.48	13.833		굴절
	S3	구면	무한대	10.547		굴절
전방 릴레이 그룹	S4	구면	35.09	6.6	NBK7_SCHOTT	굴절
	S5	구면	-35.09	9.970		굴절
	S6	구면	12.92	4.3	NBK7_SCHOTT	굴절
	S7	구면	무한대	2.457		굴절
	S8	구면	-39.78	2.5	NSF11_SCHOTT	굴절
	S9	구면	39.78	1.75		굴절
	S10	구면	무한대	1.15		굴절
VFE	S11	구면	무한대	0.5	BK7_SCHOTT	굴절
	S12	구면	무한대	2.758		'OL1024'
	S13	구면	-28.5714	4.492		굴절
	S14	구면	무한대	0.5	BK7_SCHOTT	굴절
	S15	구면	무한대	1.15		굴절
	S16	구면	무한대	1		굴절
	렌즈	S17	구면	40.67	5.3	NBK7_SCHOTT
S18		구면	-40.67	0	굴절	
도파관	S19	XY 다항식	31.04167	0	PMMA	굴절
	S20	XY 다항식	-54.2094	0		반사
	S21	XY 다항식	-145.276	0	PMMA	반사
	S22	XY 다항식	-47.3572	0		반사
	S21'	XY 다항식	-145.276	0		굴절

<표 2 - InI-HMD 디스플레이 경로의 광학 사양들>

고해상도 가상 재구성 3D 이미지를 얻기 위해 6µm 정도의 작은 픽셀들을 갖는 고해상도 마이크로 디스플레이가 채택된다. 마이크로-InI 유닛에 대한 이러한 고해상도 이미지를 달성하기 위해, 비구면 표면들에 의해 형성된 마이크로 렌즈 어레이(MLA)가 특별히 설계될 수 있다. MLA의 비구면 표면들 각각은 다음과 같이 설명될 수 있다.

수학식 14

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12}$$

여기서 z는 국소 x, y, z 좌표계의 z축을 따라 측정된 표면의 휨(sag)이고, c는 정점 곡률이고, r은 반경 거리이고, k는 원뿔 상수이고, A 내지 E는 각각 4차, 6차, 8차, 10차 및 12차 변형 계수이다. MLA의 재료는 PMMA이다. 표 3은 표면들(S1, S2)에 대한 계수들을 제공한다.

표 3

	S1	S2
Y 반경	-5.32	-1.48
원뿔 상수 (K)	30	-0.809
4차 계수 (A)	-0.157	-0.013
6차 계수 (B)	-0.092	0.002

<표 3 - 마이크로 렌즈 어레이(MLA)에 대한 비구면 표면 정의들>

[0067] 확대된 시스루 FOV를 가능하게 하기 위해, 자유형 도파관 프리즘(900)은 각각 표면 S19, S20, S21/S21', S22-1 및 S22-2로 표시된 5개의 자유형 표면에 의해 형성될 수 있다. 자유형 교정기 렌즈는 2개의 자유형 표면에 의해 형성될 수 있으며, 이들 중 전면은 도파관 프리즘(900)의 표면들(S22-1, S22-2)과 동일한 표면 사양들을 공유하고, 배면은 표면 S23으로 표시된다. S22-1의 표면 세그먼트는 마이크로-InI 유닛에 의해 생성된 광 필드들을 수신하는 반사성 또는 부분 반사성 표면이다. S22-1의 세그먼트 상의 빔 분할 미러 코팅은 또한 시스루 능력을 위해 실세계 장면으로부터의 광선들의 투과를 가능하게 한다. 표면 세그먼트 S22-2는 실세계 장면으로부터의 광선들만을 수신하는 투과성 또는 반투과성 표면이며, 마이크로-InI 유닛에 의해 생성된 광 필드들을 수신하지 않는다.

[0068] S19, S20, S21/S21', S22-1 및 S23을 포함하는 자유형 표면들은 수학적으로 다음과 같이 설명될 수 있다.

수학식 15

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^{66} C_j x^m y^n \quad j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1$$

[0070] 여기서, z는 국소 x, y, z 좌표계의 z 축을 따라 측정된 자유형 표면의 휨이고, c는 정점 곡률(CUY)이고, r은 반경 거리이고, k는 원뿔 상수이고, C_j는 x^myⁿ에 대한 계수이다. 도파관 프리즘 및 보정 렌즈 양자의 재료는 PMMA이다. 표 4 내지 8은 각각 표면 S19 내지 S21, S22-1 및 S23에 대한 계수들을 제공하며, 표 9는 각각의 광학 표면의 표면 기준들을 제공한다.

[0071] 설계 프로세스 동안, 표면 세그먼트(S22-1)의 사양들은 마이크로-InI 유닛, 릴레이 렌즈 그룹 및 표면들(S19, S20, S21/21', S22-1)로 구성된 프리즘(900)을 통한 광 필드 디스플레이 경로의 최적화 후에 획득되었다. 표면들(S20, S22-1)의 필요한 개구 치수들은 광 필드 디스플레이 경로에 대해 먼저 결정되었다. 이어서, 표면들(S22, S21, S22-1)은 표면(S22-2)을 생성한 Solidworks[®]와 같은 3D 모델링 소프트웨어 내로 넣어졌다. 표면(S22-2)의 형상은 다음 요건들: (1) 디스플레이에 의해 정의된 표면(S22-1)에 대한 필요한 개구의 상부 경계 라인을 따라 또는 그 위에서 표면(S22-1)과 교차하는 요건; (2) 표면 S22-2와 S22-1 사이의 교차 라인을 따라, 표면(S22-2) 상의 교차 포인트들에서의 표면 기울기들이 표면(S22-1) 상의 그러한 대응하는 포인트들과 동일하지는 않더라도 대략 일치하여, 2개의 표면이 거의 연속적으로 보이는 것을 보장하여, 일치하는 자유형 교정기 렌즈와 결합될 때 시스루 뷰에 대한 시각적 아티팩트를 최소화하는 요건; (3) 표면(S22-2)이 디스플레이 경로에 의해 정의된 표면(S20)에 대한 필요한 개구의 하부 경계 라인을 따라 또는 그 아래에서 표면(S20)과 교차하는 요건; 및 (4) 표면 S21과 S22-2 사이의 전체 두께가 최소화되는 요건을 충족시킴으로써 모델링 소프트웨어에서 생성되었다. 마지막으로, 밀폐된 자유형 도파관 프리즘을 생성하기 위해 표면들(S19, S20, S21/21', S22-1)과 결합되는 표면(S22-2)의 자유형 형상이 3D 모델링 소프트웨어에서 획득된다. 도 7b는 전술한 방법을 통해 실질적으로 확대된 시스루 FOV를 나타낸다.

표 4

Y 반경	31.0417
Y 곡률	3.2215e-2
원뿔 상수 (SCO K C1)	-30
X (SCO X C2)	0
Y (SCO Y C3)	0
X**2 (SCO X2 C4)	-0.0181749
X * Y (SCO XY C5)	0
Y**2 (SCO Y2 C6)	-0.03201
X**3 (SCO Y3 C7)	0
X**2 * Y (SCO X2Y C8)	-0.002337
X Y**2 (SCO XY2 C9)	0
Y**3 (SCO Y3 C10)	-0.00340584
X**4 (SCO X4 C11)	2.214179429e-005
X**3 * Y (SCO X3Y C12)	0
X**2 * Y**2 (SCO X2Y2 C13)	-8.34173481e-005

X * Y**3 (SCO XY3 C14)	0
Y**4 (SCO Y4 C15)	-0.00012019
X**5 (SCO X5 C16)	0
X**4 * Y (SCO X4Y C17)	-1.9551358e-006
X**3 * Y**2 (SCO X3Y2 C18)	0
X**2 * Y**3 (SCO X2Y3 C19)	-5.7523828e-007
X * Y**4 (SCO XY4 C20)	0
Y**5 (SCO Y5 C21)	-2.18978576e-006
X**6 (SCO X6 C22)	-1.08276112e-007
X**5 * Y (SCO X5Y C23)	0
X**4 * Y**2 (SCO X4Y2 C24)	-3.584137e-007
X**3 * Y**3 (SCO X3Y3 C25)	0
X**2 * Y**4 (SCO X2Y4 C26)	9.1214167e-008
X * Y**5 (SCO XY5 C27)	0
Y**6 (SCO Y6 C28)	-5.28011679e-009
X**7 (SCO X7 C29)	0
X**6 * Y (SCO X6Y C30)	0
X**5 * Y**2 (SCO X5Y2 C31)	0
X**4 * Y**3 (SCO X4Y3 C32)	0
X**3 * Y**4 (SCO X3Y4 C33)	0
X**2 * Y**5 (SCO X2Y5 C34)	0
X * Y**6 (SCO XY6 C35)	0
Y**7 (SCO Y7 C36)	0
X**8 (SCO X8 C37)	0
X**7 * Y (SCO X7Y C38)	0
X**6 * Y**2 (SCO X6Y2 C39)	0
X**5 * Y**3 (SCO X5Y3 C40)	0
X**4 * Y**4 (SCO X4Y4 C41)	0
X**3 * Y**5 (SCO X3Y5 C42)	0
X**2 * Y**6 (SCO X2Y6 C43)	0
X * Y**7 (SCO XY7 C44)	0
Y**8 (SCO Y8 C45)	0
X**9 (SCO X9 C46)	0
X**8 * Y (SCO X8Y C47)	0
X**7 * Y**2 (SCO X7Y2 C48)	0
X**6 * Y**3 (SCO X6Y3 C49)	0
X**5 * Y**4 (SCO X5Y4 C50)	0
X**4 * Y**5 (SCO X4Y5 C51)	0
X**3 * Y**6 (SCO X3Y6 C52)	0
X**2 * Y**7 (SCO X2Y7 C53)	0
X * Y**8 (SCO XY8 C54)	0
Y**9 (SCO Y9 C55)	0
X**10 (SCO X10 C56)	0
X**9 * Y (SCO X9Y C57)	0
X**8 * Y**2 (SCO X8Y2 C58)	0
X**7 * Y**3 (SCO X7Y3 C59)	0
X**6 * Y**4 (SCO X6Y4 C60)	0
X**5 * Y**5 (SCO X5Y5 C61)	0
X**4 * Y**6 (SCO X4Y6 C62)	0
X**3 * Y**7 (SCO X3Y7 C63)	0
X**2 * Y**8 (SCO X2Y8 C64)	0
X * Y**9 (SCO XY9 C65)	0
Y**10 (SCO Y10 C66)	0

[0073] <표 4 - 자유형 표면 S19에 대한 표면 정의>

표 5

Y 반경	-54.2094
Y 곡률	-1.845e-2
원뿔 상수 (SCO K C1)	-13.0997
X (SCO X C2)	0
Y (SCO Y C3)	0
X**2 (SCO X2 C4)	0.0011699
X * Y (SCO XY C5)	0
Y**2 (SCO Y2 C6)	0.00676927
X**3 (SCO Y3 C7)	0
X**2 * Y (SCO X2Y C8)	-4.52710486e-005
X Y**2 (SCO XY2 C9)	0
Y**3 (SCO Y3 C10)	-0.00011081
X**4 (SCO X4 C11)	-1.1510996e-005
X**3 * Y (SCO X3Y C12)	0
X**2 * Y**2 (SCO X2Y2 C13)	-9.13752747e-006
X * Y**3 (SCO XY3 C14)	0
Y**4 (SCO Y4 C15)	-5.5289301e-006
X**5 (SCO X5 C16)	0
X**4 * Y (SCO X4Y C17)	-8.8179807e-007
X**3 * Y**2 (SCO X3Y2 C18)	0
X**2 * Y**3 (SCO X2Y3 C19)	-1.06187669e-006
X * Y**4 (SCO XY4 C20)	0
Y**5 (SCO Y5 C21)	-3.38263553e-007
X**6 (SCO X6 C22)	4.77710263e-008
X**5 * Y (SCO X5Y C23)	0
X**4 * Y**2 (SCO X4Y2 C24)	6.21915481e-008
X**3 * Y**3 (SCO X3Y3 C25)	0
X**2 * Y**4 (SCO X2Y4 C26)	1.43552488e-007
X * Y**5 (SCO XY5 C27)	0
Y**6 (SCO Y6 C28)	5.362211474e-008
X**7 (SCO X7 C29)	0
X**6 * Y (SCO X6Y C30)	1.193262499e-008
X**5 * Y**2 (SCO X5Y2 C31)	0
X**4 * Y**3 (SCO X4Y3 C32)	-6.01716948e-009
X**3 * Y**4 (SCO X3Y4 C33)	0
X**2 * Y**5 (SCO X2Y5 C34)	-8.19603928e-009
X * Y**6 (SCO XY6 C35)	0
Y**7 (SCO Y7 C36)	-2.505270966e-009
X**8 (SCO X8 C37)	-8.149026e-010
X**7 * Y (SCO X7Y C38)	0
X**6 * Y**2 (SCO X6Y2 C39)	-1.84757517e-010
X**5 * Y**3 (SCO X5Y3 C40)	0
X**4 * Y**4 (SCO X4Y4 C41)	2.388128888e-010
X**3 * Y**5 (SCO X3Y5 C42)	0
X**2 * Y**6 (SCO X2Y6 C43)	1.61835037e-010
X * Y**7 (SCO XY7 C44)	0
Y**8 (SCO Y8 C45)	3.966177607e-011
X**9 (SCO X9 C46)	0
X**8 * Y (SCO X8Y C47)	0
X**7 * Y**2 (SCO X7Y2 C48)	0
X**6 * Y**3 (SCO X6Y3 C49)	0
X**5 * Y**4 (SCO X5Y4 C50)	0
X**4 * Y**5 (SCO X4Y5 C51)	0
X**3 * Y**6 (SCO X3Y6 C52)	0
X**2 * Y**7 (SCO X2Y7 C53)	0
X * Y**8 (SCO XY8 C54)	0

[0074]

Y**9 (SCO Y9 C55)	0
X**10 (SCO X10 C56)	0
X**9 * Y (SCO X9Y C57)	0
X**8 * Y**2 (SCO X8Y2 C58)	0
X**7 * Y**3 (SCO X7Y3 C59)	0
X**6 * Y**4 (SCO X6Y4 C60)	0
X**5 * Y**5 (SCO X5Y5 C61)	0
X**4 * Y**6 (SCO X4Y6 C62)	0
X**3 * Y**7 (SCO X3Y7 C63)	0
X**2 * Y**8 (SCO X2Y8 C64)	0
X * Y**9 (SCO XY9 C65)	0
Y**10 (SCO Y10 C66)	0

[0075] <표 5 - 자유형 표면 S20에 대한 표면 정의>

표 6

[0076]

Y 반경	-145.276
Y 곡률	-6.88e-3
원뿔 상수 (SCO K C1)	-1.5654
X (SCO X C2)	0
Y (SCO Y C3)	0
X**2 (SCO X2 C4)	-0.0142277
X * Y (SCO XY C5)	0
Y**2 (SCO Y2 C6)	0.00392684
X**3 (SCO Y3 C7)	0
X**2 * Y (SCO X2Y C8)	0.000646111
X Y**2 (SCO XY2 C9)	0
Y**3 (SCO Y3 C10)	2.44041e-005
X**4 (SCO X4 C11)	0.000151
X**3 * Y (SCO X3Y C12)	0
X**2 * Y**2 (SCO X2Y2 C13)	-8.2192e-006
X * Y**3 (SCO XY3 C14)	0
Y**4 (SCO Y4 C15)	-3.028061e-007
X**5 (SCO X5 C16)	0
X**4 * Y (SCO X4Y C17)	-4.13244e-006
X**3 * Y**2 (SCO X3Y2 C18)	0
X**2 * Y**3 (SCO X2Y3 C19)	2.964542e-008
X * Y**4 (SCO XY4 C20)	0
Y**5 (SCO Y5 C21)	1.127521e-009
X**6 (SCO X6 C22)	4.4371187e-008
X**5 * Y (SCO X5Y C23)	0
X**4 * Y**2 (SCO X4Y2 C24)	2.7676459e-008
X**3 * Y**3 (SCO X3Y3 C25)	0
X**2 * Y**4 (SCO X2Y4 C26)	-3.277381e-011
X * Y**5 (SCO XY5 C27)	0
Y**6 (SCO Y6 C28)	-1.4480674e-012
X**7 (SCO X7 C29)	0
X**6 * Y (SCO X6Y C30)	0
X**5 * Y**2 (SCO X5Y2 C31)	0
X**4 * Y**3 (SCO X4Y3 C32)	0
X**3 * Y**4 (SCO X3Y4 C33)	0
X**2 * Y**5 (SCO S2Y5 C34)	0
X * Y**6 (SCO XY6 C35)	0
Y**7 (SCO Y7 C36)	0
X**8 (SCO X8 C37)	0
X**7 * Y (SCO X7Y C38)	0
X**6 * Y**2 (SCO X6Y2 C39)	0

X**5 * Y**3 (SCO X5Y3 C40)	0
X**4 * Y**4 (SCO X4Y4 C41)	0
X**3 * Y**5 (SCO X3Y5 C42)	0
X**2 * Y**6 (SCO X2Y6 C43)	0
X * Y**7 (SCO XY7 C44)	0
Y**8 (SCO Y8 C45)	0
X**9 (SCO X9 C46)	0
X**8 * Y (SCO X8Y C47)	0
X**7 * Y**2 (SCO X7Y2 C48)	0
X**6 * Y**3 (SCO X6Y3 C49)	0
X**5 * Y**4 (SCO X5Y4 C50)	0
X**4 * Y**5 (SCO X4Y5 C51)	0
X**3 * Y**6 (SCO X3Y6 C52)	0
X**2 * Y**7 (SCO X2Y7 C53)	0
X * Y**8 (SCO XY8 C54)	0
Y**9 (SCO Y9 C55)	0
X**10 (SCO X10 C56)	0
X**9 * Y (SCO X9Y C57)	0
X**8 * Y**2 (SCO X8Y2 C58)	0
X**7 * Y**3 (SCO X7Y3 C59)	0
X**6 * Y**4 (SCO X6Y4 C60)	0
X**5 * Y**5 (SCO X5Y5 C61)	0
X**4 * Y**6 (SCO X4Y6 C62)	0
X**3 * Y**7 (SCO X3Y7 C63)	0
X**2 * Y**8 (SCO X2Y8 C64)	0
X * Y**9 (SCO XY9 C65)	0
Y**10 (SCO Y10 C66)	0

[0077] <표 6 - 자유형 표면 S21/21'에 대한 표면 정의>

표 7

[0078]

Y 반경	-47.3572012741099
Y 곡률	-2.111611e-2
원뿔 상수 (SCO K C1)	-4.32135
X (SCO X C2)	0
Y (SCO Y C3)	0
X**2 (SCO X2 C4)	0.000908
X * Y (SCO XY C5)	0
Y**2 (SCO Y2 C6)	0.005975
X**3 (SCO Y3 C7)	0
X**2 * Y (SCO X2Y C8)	4.66442802e-005
X Y**2 (SCO XY2 C9)	0
Y**3 (SCO Y3 C10)	0.000101981
X**4 (SCO X4 C11)	-5.17499005e-006
X**3 * Y (SCO X3Y C12)	0
X**2 * Y**2 (SCO X2Y2 C13)	-4.7451096e-006
X * Y**3 (SCO XY3 C14)	0
Y**4 (SCO Y4 C15)	-2.4419368e-007
X**5 (SCO X5 C16)	0
X**4 * Y (SCO X4Y C17)	-1.9769907e-007
X**3 * Y**2 (SCO X3Y2 C18)	0
X**2 * Y**3 (SCO X2Y3 C19)	3.352610999e-008
X * Y**4 (SCO XY4 C20)	0
Y**5 (SCO Y5 C21)	1.61592149e-008
X**6 (SCO X6 C22)	8.08067957e-009
X**5 * Y (SCO X5Y C23)	0
X**4 * Y**2 (SCO X4Y2 C24)	7.3374791e-009

X**3 * Y**3 (SCO X3Y3 C25)	0
X**2 * Y**4 (SCO X2Y4 C26)	6.611479e-009
X * Y**5 (SCO XY5 C27)	0
Y**6 (SCO Y6 C28)	9.4341645e-011
X**7 (SCO X7 C29)	0
X**6 * Y (SCO X6Y C30)	7.9369652e-010
X**5 * Y**2 (SCO X5Y2 C31)	0
X**4 * Y**3 (SCO X4Y3 C32)	6.27173598e-010
X**3 * Y**4 (SCO X3Y4 C33)	0
X**2 * Y**5 (SCO S2Y5 C34)	1.332732e-010
X * Y**6 (SCO XY6 C35)	0
Y**7 (SCO Y7 C36)	-1.5647943e-011
X**8 (SCO X8 C37)	-2.12470728e-012
X**7 * Y (SCO X7Y C38)	0
X**6 * Y**2 (SCO X6Y2 C39)	3.27745944e-011
X**5 * Y**3 (SCO X5Y3 C40)	0
X**4 * Y**4 (SCO X4Y4 C41)	1.07463864e-011
X**3 * Y**5 (SCO X3Y5 C42)	0
X**2 * Y**6 (SCO X2Y6 C43)	1.347790032e-012
X * Y**7 (SCO XY7 C44)	0
Y**8 (SCO Y8 C45)	-9.599201503e-014
X**9 (SCO X9 C46)	0
X**8 * Y (SCO X8Y C47)	0
X**7 * Y**2 (SCO X7Y2 C48)	0
X**6 * Y**3 (SCO X6Y3 C49)	0
X**5 * Y**4 (SCO X5Y4 C50)	0
X**4 * Y**5 (SCO X4Y5 C51)	0
X**3 * Y**6 (SCO X3Y6 C52)	0
X**2 * Y**7 (SCO X2Y7 C53)	0
X * Y**8 (SCO XY8 C54)	0
Y**9 (SCO Y9 C55)	0
X**10 (SCO X10 C56)	0
X**9 * Y (SCO X9Y C57)	0
X**8 * Y**2 (SCO X8Y2 C58)	0
X**7 * Y**3 (SCO X7Y3 C59)	0
X**6 * Y**4 (SCO X6Y4 C60)	0
X**5 * Y**5 (SCO X5Y5 C61)	0
X**4 * Y**6 (SCO X4Y6 C62)	0
X**3 * Y**7 (SCO X3Y7 C63)	0
X**2 * Y**8 (SCO X2Y8 C64)	0
X * Y**9 (SCO XY9 C65)	0
Y**10 (SCO Y10 C66)	0

[0079] <표 7 - 자유형 표면 S22-1에 대한 표면 정의>

표 8

[0080]

Y 반경	149.3605
Y 곡률	6.695e-3
원뿔 상수 (SCO K C1)	9.81433
X (SCO X C2)	0
Y (SCO Y C3)	0
X**2 (SCO X2 C4)	-0.024663
X * Y (SCO XY C5)	0
Y**2 (SCO Y2 C6)	0.0612683
X**3 (SCO Y3 C7)	0
X**2 * Y (SCO X2Y C8)	0.0010723
X Y**2 (SCO XY2 C9)	0

Y**3 (SCO Y3 C10)	2.4386556e-005
X**4 (SCO X4 C11)	0.00013098
X**3 * Y (SCO X3Y C12)	0
X**2 * Y**2 (SCO X2Y2 C13)	-1.2892527e-006
X * Y**3 (SCO XY3 C14)	0
Y**4 (SCO Y4 C15)	2.62995523e-006
X**5 (SCO X5 C16)	0
X**4 * Y (SCO X4Y C17)	-6.0819504e-006
X**3 * Y**2 (SCO X3Y2 C18)	0
X**2 * Y**3 (SCO X2Y3 C19)	-1.3155971e-007
X * Y**4 (SCO XY4 C20)	0
Y**5 (SCO Y5 C21)	4.0503658e-008
X**6 (SCO X6 C22)	1.3439432e-007
X**5 * Y (SCO X5Y C23)	0
X**4 * Y**2 (SCO X4Y2 C24)	2.5855823e-008
X**3 * Y**3 (SCO X3Y3 C25)	0
X**2 * Y**4 (SCO X2Y4 C26)	-2.699141e-008
X * Y**5 (SCO XY5 C27)	0
Y**6 (SCO Y6 C28)	5.31499927e-009
X**7 (SCO X7 C29)	0
X**6 * Y (SCO X6Y C30)	-3.738121e-009
X**5 * Y**2 (SCO X5Y2 C31)	0
X**4 * Y**3 (SCO X4Y3 C32)	2.69691705e-012
X**3 * Y**4 (SCO X3Y4 C33)	0
X**2 * Y**5 (SCO S2Y5 C34)	4.84174393e-011
X * Y**6 (SCO XY6 C35)	0
Y**7 (SCO Y7 C36)	-1.39752199e-010
X**8 (SCO X8 C37)	4.2757097e-011
X**7 * Y (SCO X7Y C38)	0
X**6 * Y**2 (SCO X6Y2 C39)	1.1630807e-011
X**5 * Y**3 (SCO X5Y3 C40)	0
X**4 * Y**4 (SCO X4Y4 C41)	3.4775484e-011
X**3 * Y**5 (SCO X3Y5 C42)	0
X**2 * Y**6 (SCO X2Y6 C43)	3.6136367e-012
X * Y**7 (SCO XY7 C44)	0
Y**8 (SCO Y8 C45)	-5.8509308e-013
X**9 (SCO X9 C46)	0
X**8 * Y (SCO X8Y C47)	0
X**7 * Y**2 (SCO X7Y2 C48)	0
X**6 * Y**3 (SCO X6Y3 C49)	0
X**5 * Y**4 (SCO X5Y4 C50)	0
X**4 * Y**5 (SCO X4Y5 C51)	0
X**3 * Y**6 (SCO X3Y6 C52)	0
X**2 * Y**7 (SCO X2Y7 C53)	0
X * Y**8 (SCO XY8 C54)	0
Y**9 (SCO Y9 C55)	0
X**10 (SCO X10 C56)	0
X**9 * Y (SCO X9Y C57)	0
X**8 * Y**2 (SCO X8Y2 C58)	0
X**7 * Y**3 (SCO X7Y3 C59)	0
X**6 * Y**4 (SCO X6Y4 C60)	0
X**5 * Y**5 (SCO X5Y5 C61)	0
X**4 * Y**6 (SCO X4Y6 C62)	0
X**3 * Y**7 (SCO X3Y7 C63)	0
X**2 * Y**8 (SCO X2Y8 C64)	0
X * Y**9 (SCO XY9 C65)	0
Y**10 (SCO Y10 C66)	0

[0081] <표 8 - 자유형 표면 S23에 대한 표면 정의>

표 9

[0082]

	표면 기준의 원점			표면 배향
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X축에 대한 회전 $\theta(^{\circ})$
표면 S19	0	4.912722	5.374900	2.588056
표면 S20	0	-5.688113	25.091300	36.309581
표면 S21	0	-128.220891	77.884058	18.362678
표면 S22-1	0	-35.523862	76.539845	-13.778904
표면 S23	0	-82.2906	81.8565	82.6660

[0083] <표 9 - 전역 좌표계에서의 국소 표면 기준들의 정의>

[0084]

설계 프로세스 동안, 선택된 OLED 마이크로 디스플레이 내의 청색, 녹색 및 적색 방출기들의 피크 방출 스펙트럼들에 대응하는 3개의 대표적인 파장 465nm, 550nm 및 630nm가 선택되었다. MLA 내의 총 21개의 렌즈릿이 샘플링되었고, 이들 각각은 9개의 요소 이미지 포인트를 나타내며, 이들은 총 189개의 필드 샘플을 추가했다. 이미지 품질을 평가하기 위해, 아이피스와 동일한 파워를 갖는 이상적인 렌즈가 시스템의 출구 동공(뷰잉 윈도우)에 배치되었으며, 결과적으로 마이크로 디스플레이의 픽셀 크기에 의해 제한된 최종 이미지에 대한 20.83 lp/mm의 컷오프 주파수를 유발하였다. 설계된 시스템의 광학 성능은 3개의 설계 파장에 대한 대표적인 필드 각도들에서 평가되었다. 튜닝 가능 렌즈 VFE의 광학적 파워를 변경함으로써, 광학적 성능의 현저한 저하 없이 중앙 깊이 평면이 예를 들어 0 내지 3 디오퍼의 큰 범위에서 축 방향으로 시프트될 수 있었다. 도 8 내지 10은 각각 3, 1 및 0 디오퍼의 깊이에서 CDP 세트 상에 재구성된 포인트들에 대한 다색 변조 전달 함수(MTF)를 플로팅한다. 각각의 CDP 위치에 대해, 2 세트의 MTF들이 플로팅되었고, 이들 중 하나는 축상 MLA에 대응하는 필드들에 대한 것이고, 다른 하나는 예지 근처의 가장 먼 MLA에 대응하는 필드들에 대한 것이다.

[0085]

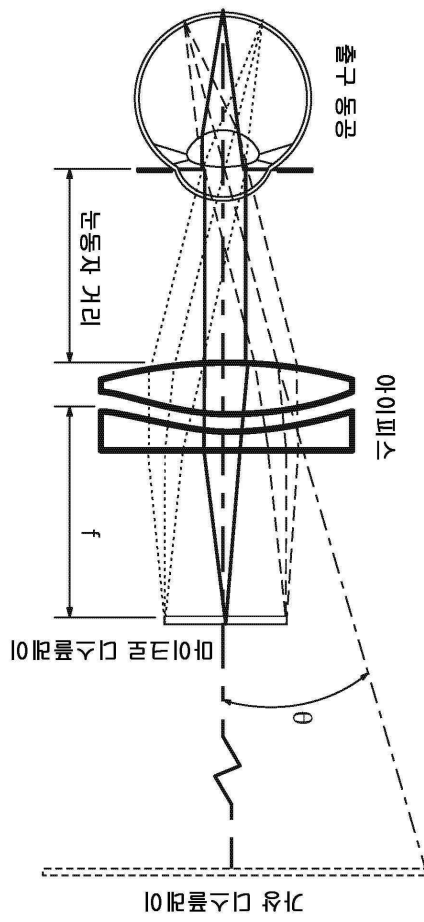
한편, 재구성된 이미지가 특정 튜닝 가능 상태에 대해 중앙 깊이 평면으로부터 시프트될 때 3D 재구성 포인트의 이미지 품질이 어떻게 저하되는지를 평가하는 것도 똑같이 중요하다. 이것은 튜닝 가능 렌즈의 광학적 파워를 변경하지 않고 중앙 깊이 평면을 적은 양의 거리만큼 시프트시킴으로써 평가될 수 있다. 도 11 내지 14는 각각 0.25, 0.5, 0.75 및 1 디오퍼만큼 CDP로부터 시프트된 재구성된 포인트들에 대한 다색 MTF를 플로팅한다. 각각의 깊이에 대해, 2 세트의 MTF들이 플로팅되었으며, 이들 중 하나는 축상 MLA에 대응하는 필드들에 대한 것이고, 다른 하나는 예지 근처의 가장 먼 MLA에 대응하는 필드들에 대한 것이다.

[0086]

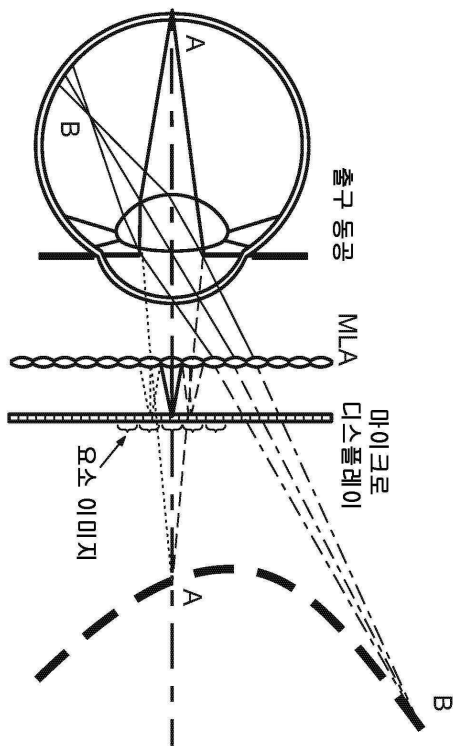
도 15는 65° x 40° FOV에 대한 다색 MTF를 플로팅한다. 전체 FOV에 걸쳐, 시스루 경로는 20/20 정상 비전에 대응하는 30 사이클/각도 주파수에서의 50% 초과 및 20/20 비전 또는 0.5분각의 시력에 대응하는 60 사이클/각도 주파수에서의 약 20%의 평균 MTF 값을 달성하였다.

도면

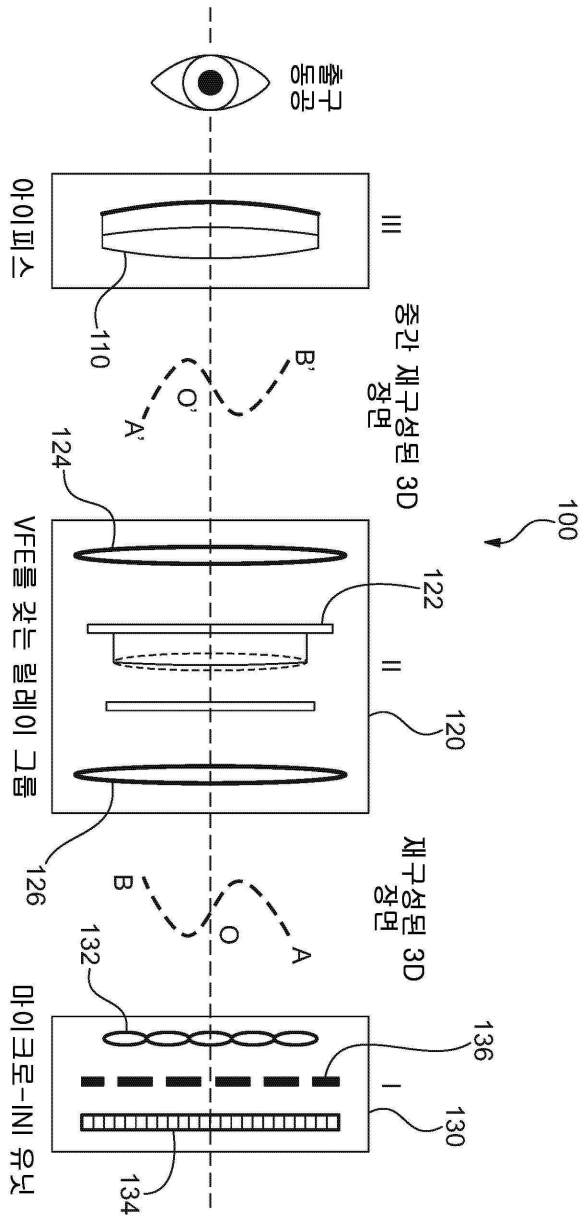
도면1



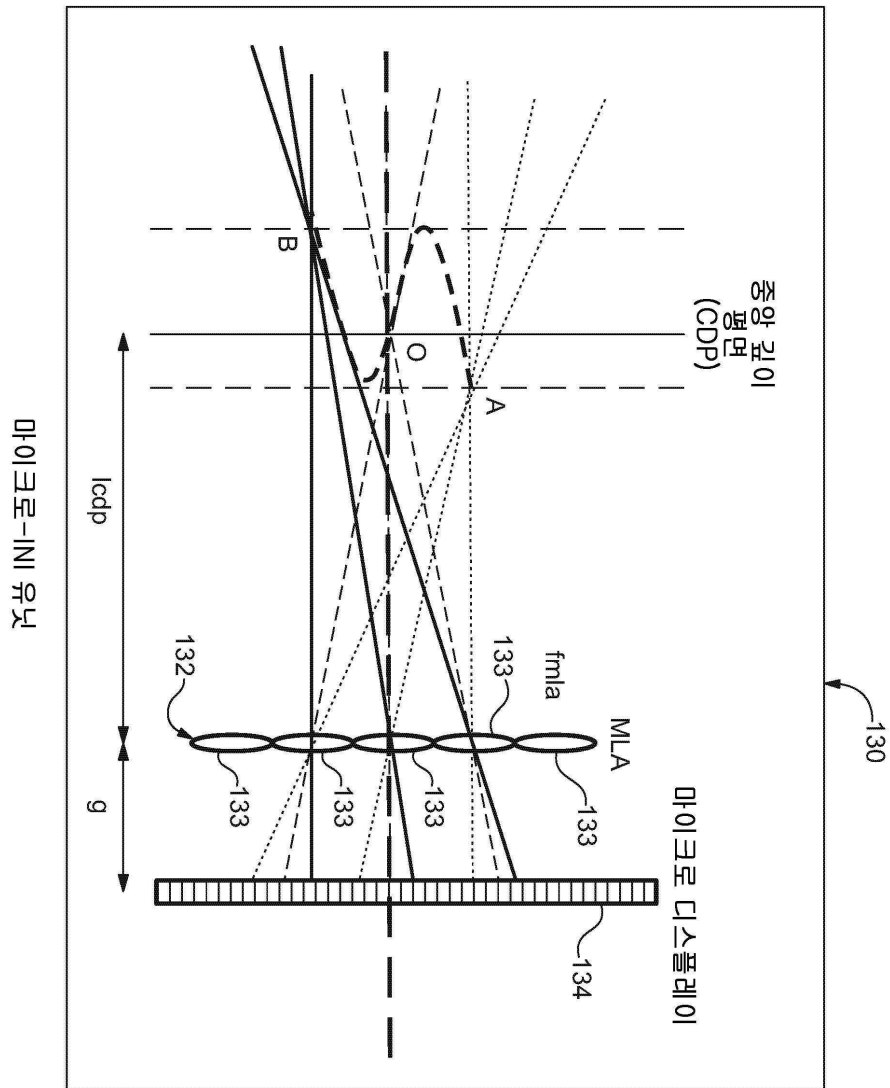
도면2



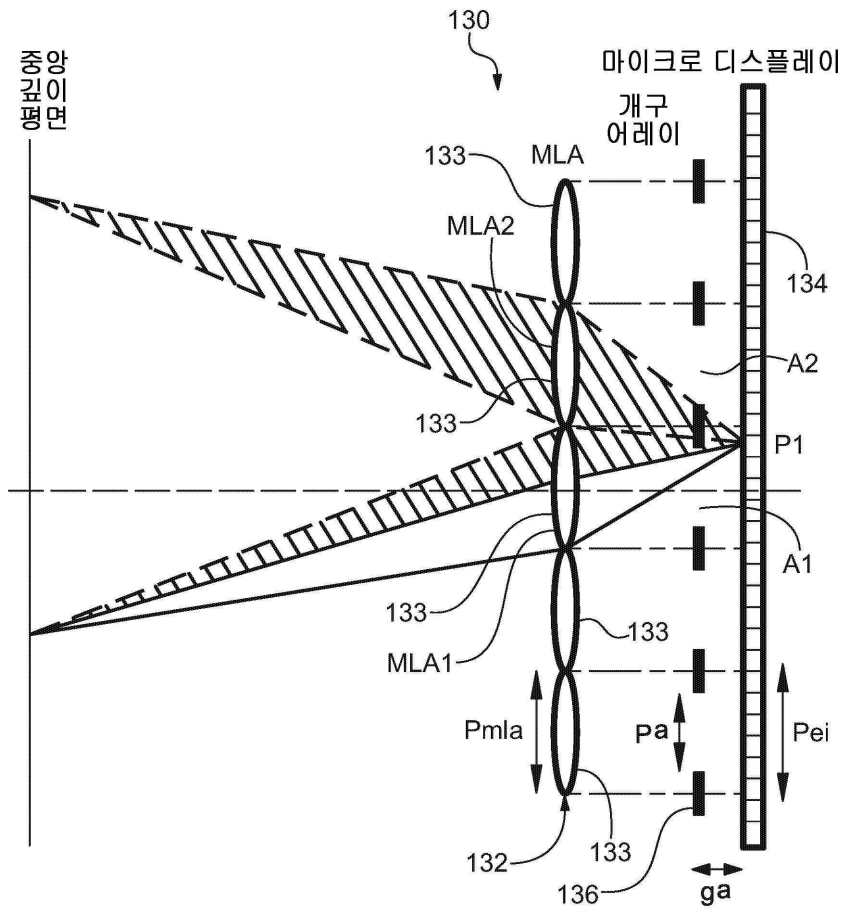
도면3a



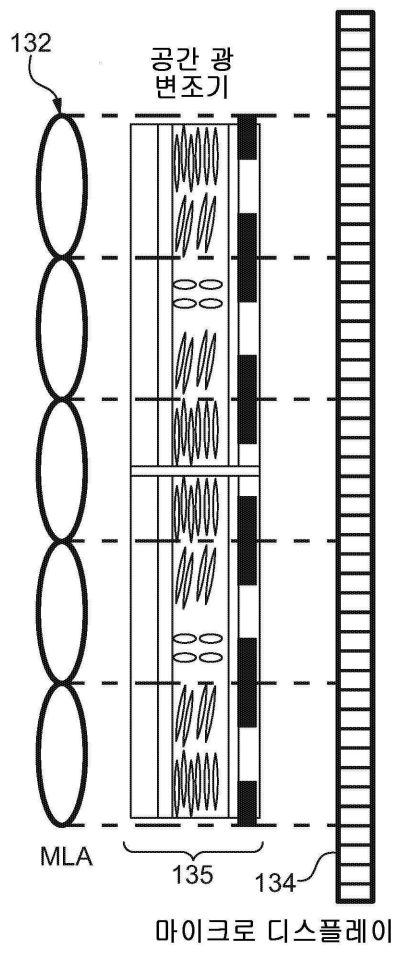
도면3b



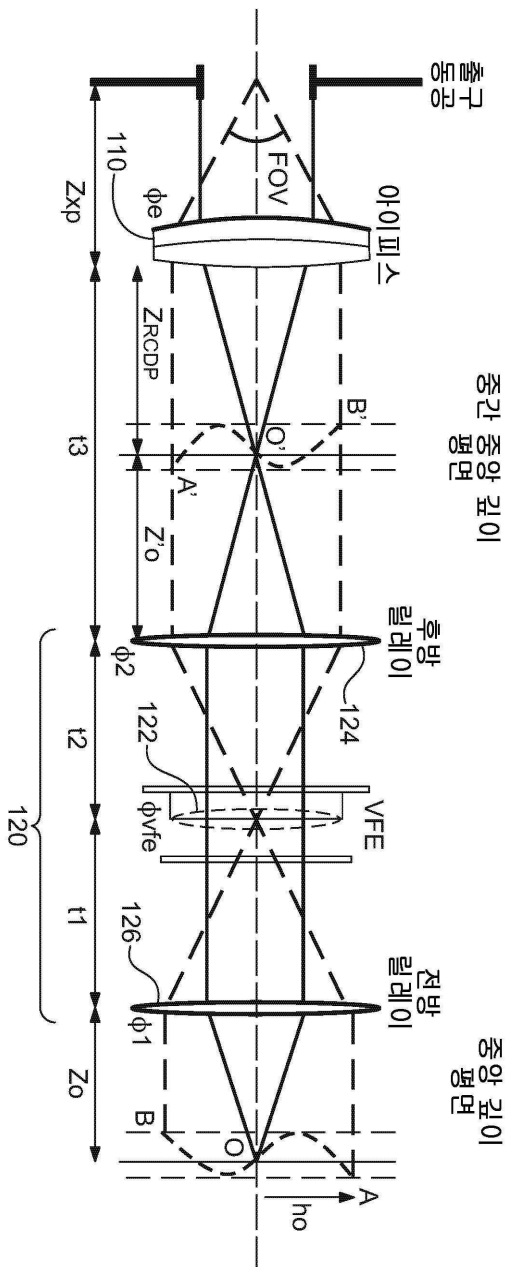
도면4a



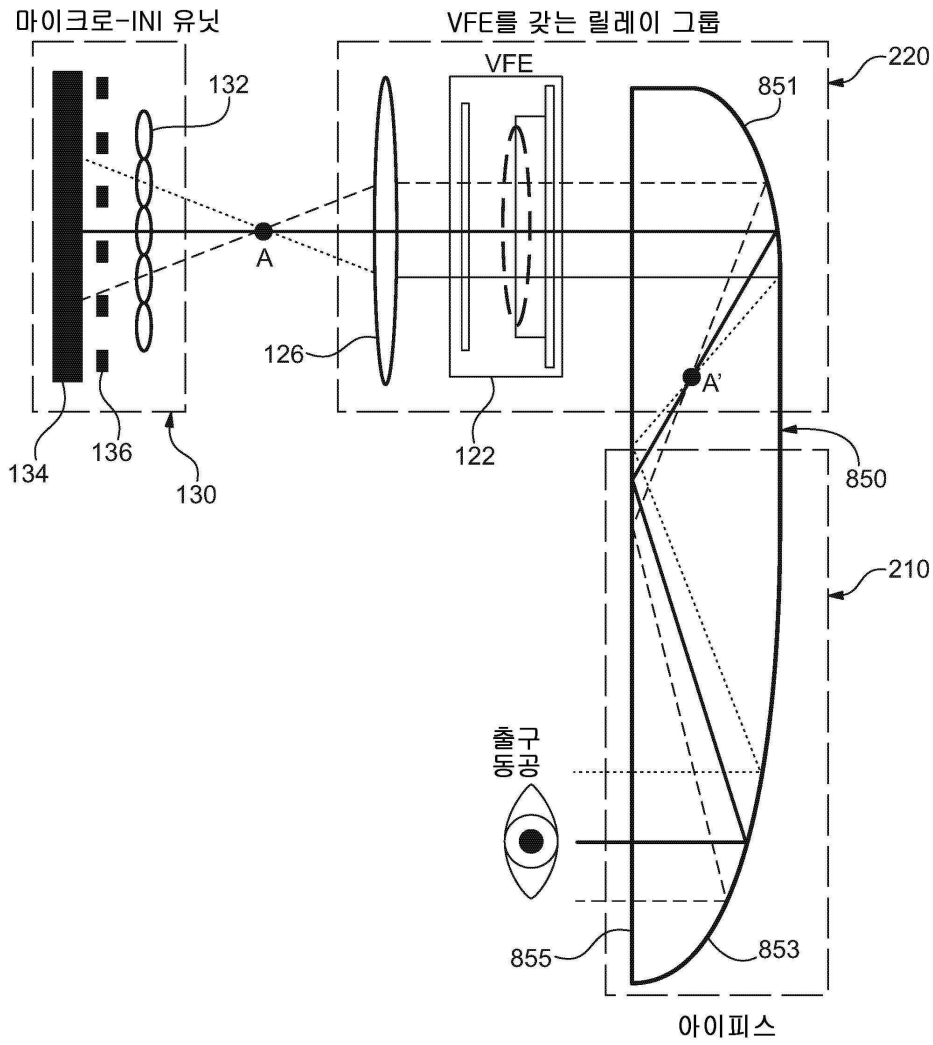
도면4b



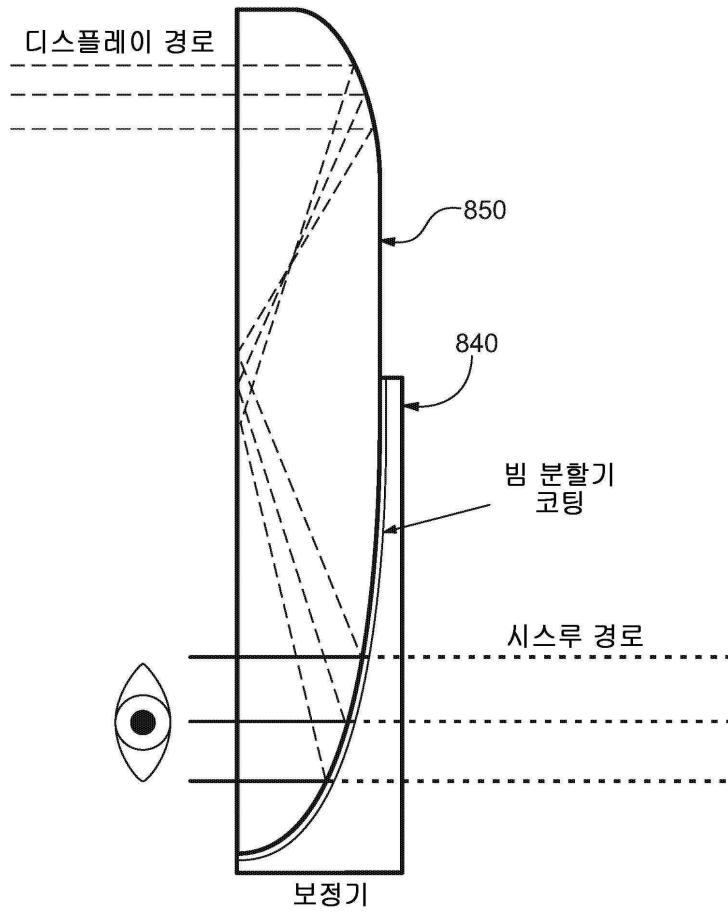
도면5



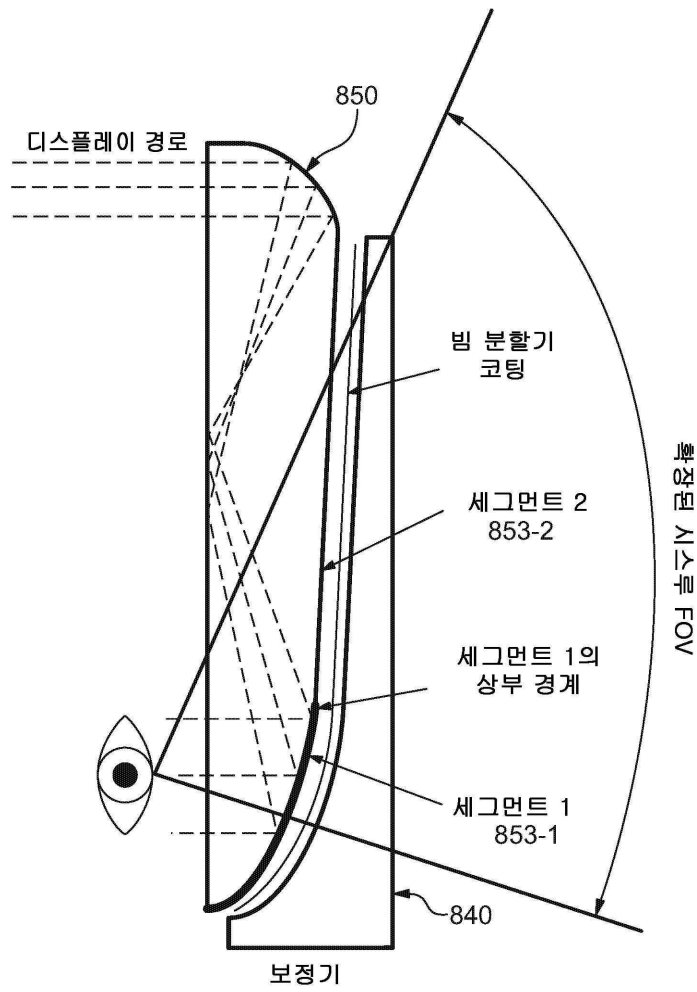
도면6a



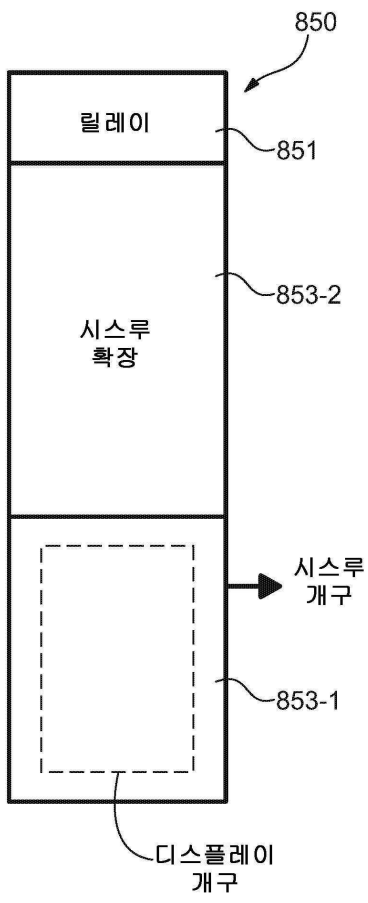
도면6b



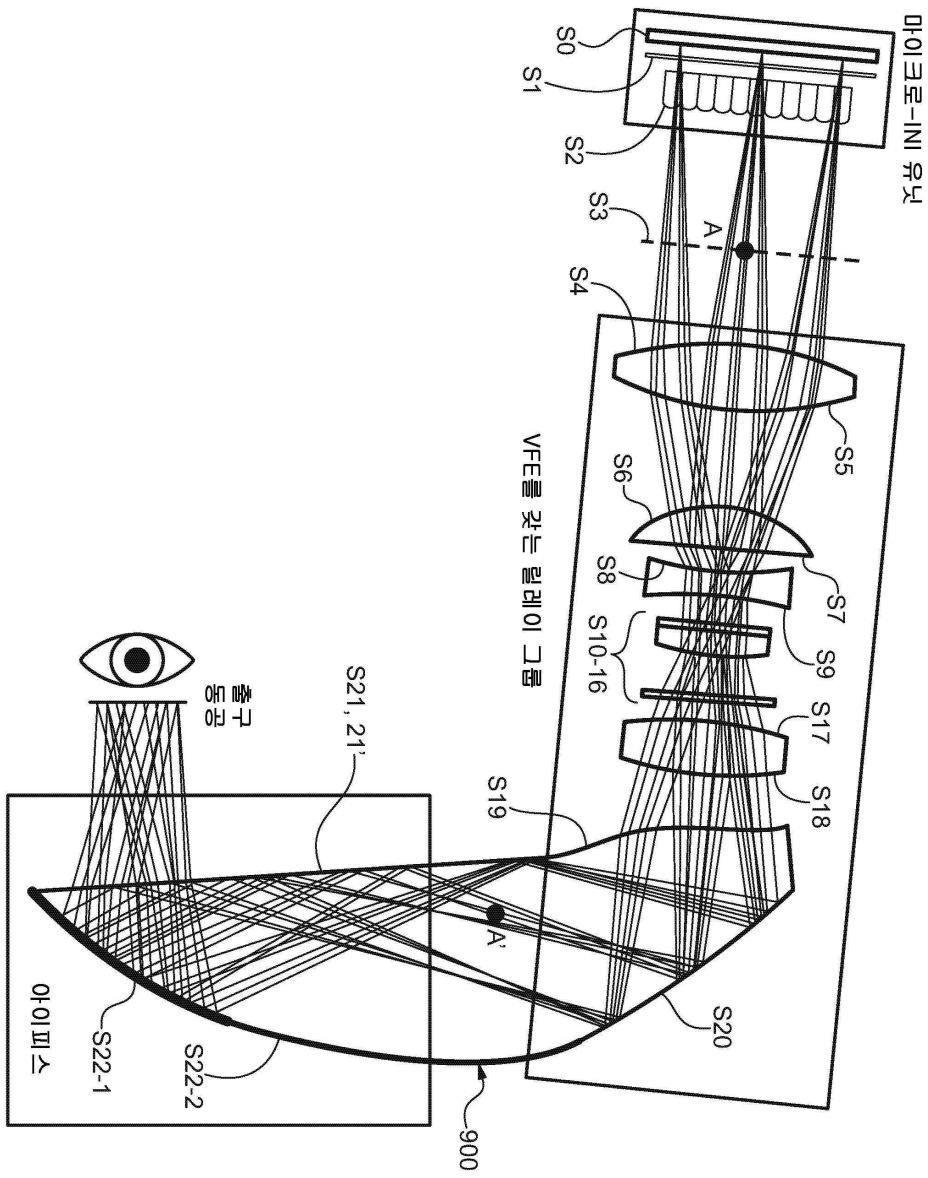
도면6c



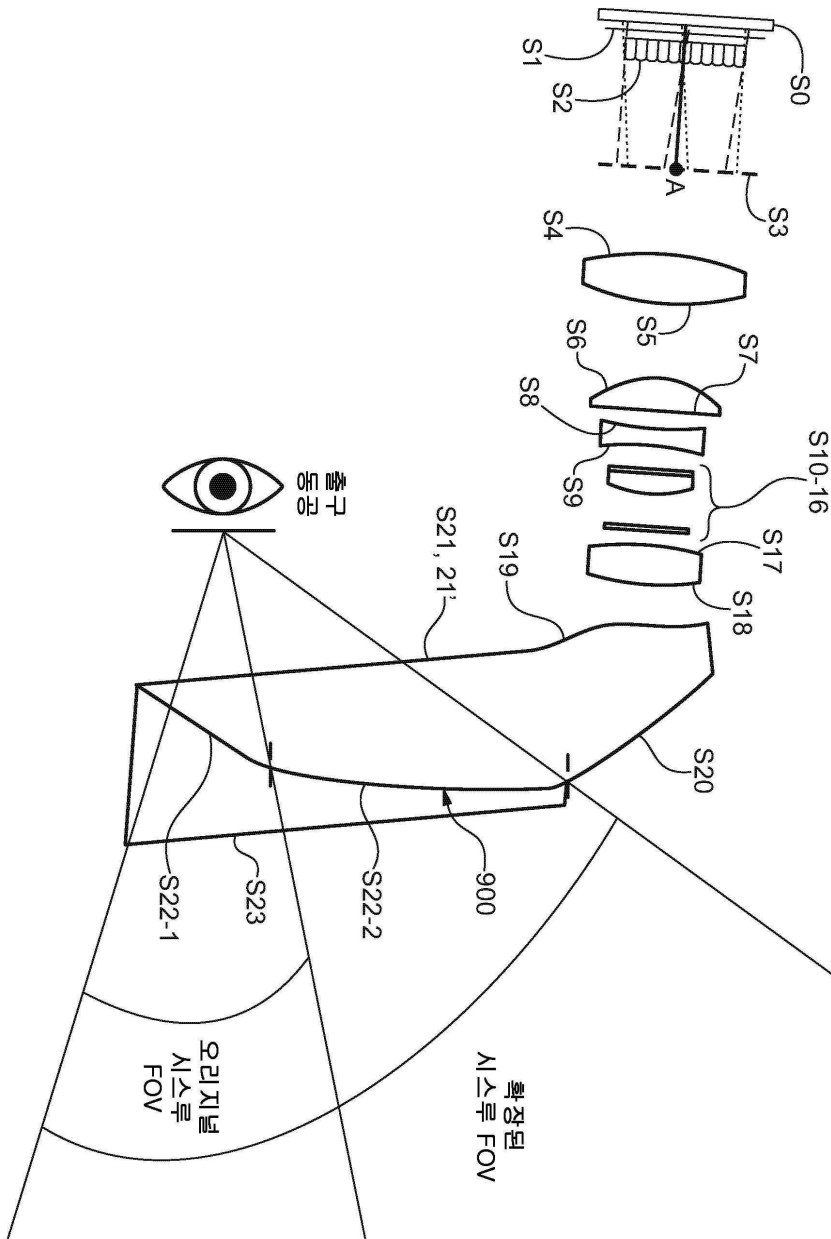
도면6d



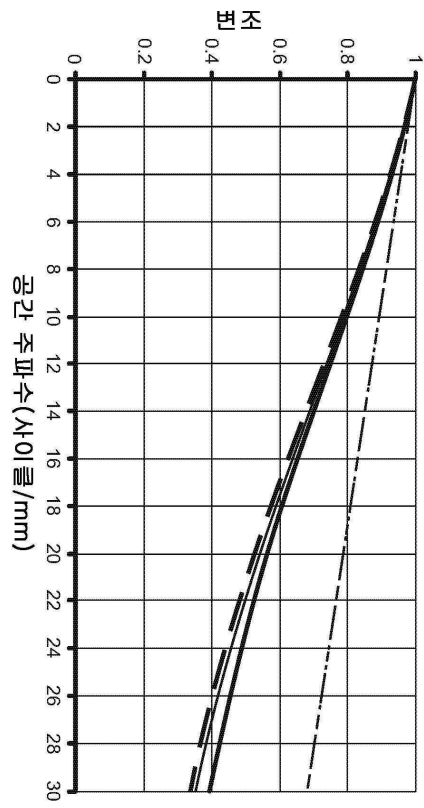
도면7a



도면7b

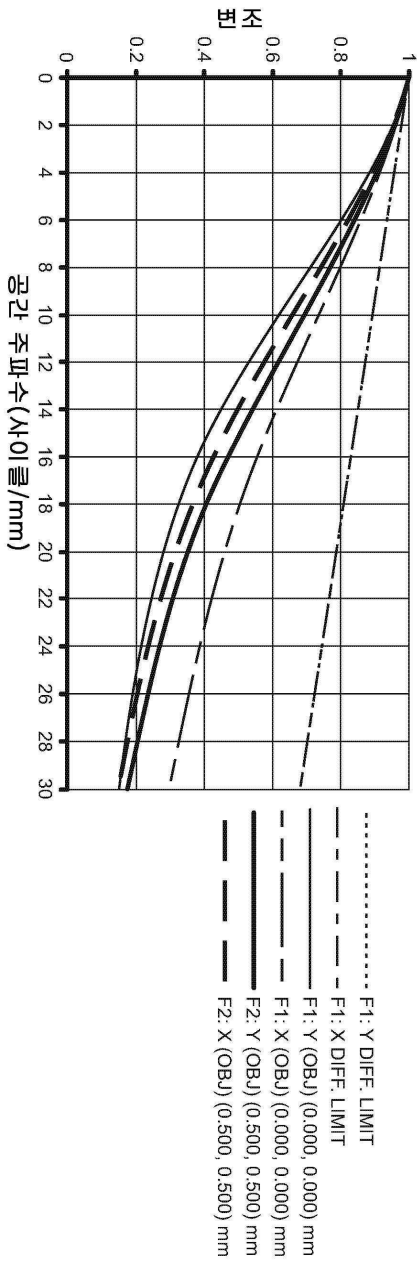


도면8a

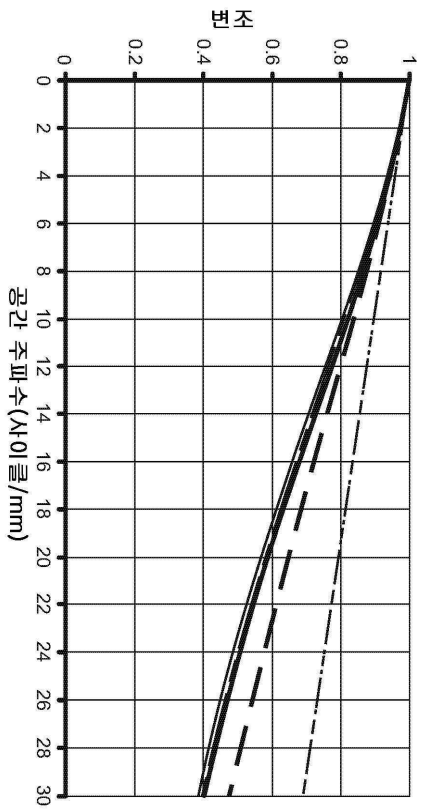


..... F1: Y DIFF. LIMIT
 - - - - - F1: X DIFF. LIMIT
 _____ F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
 - - - - - F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
 _____ F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
 _____ F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면 8b

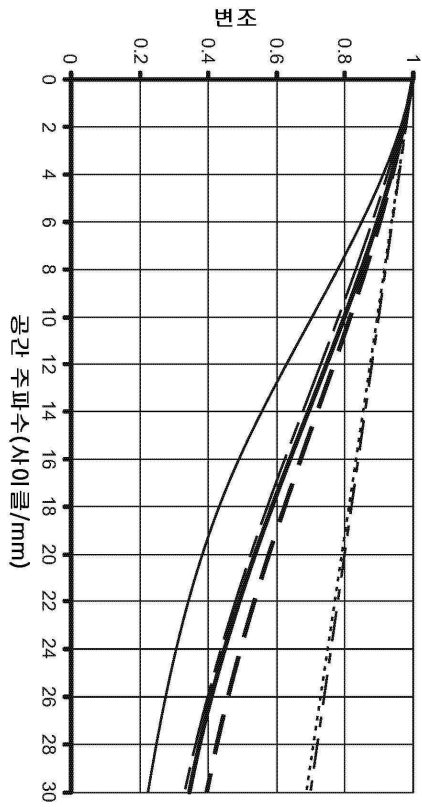


도면9a



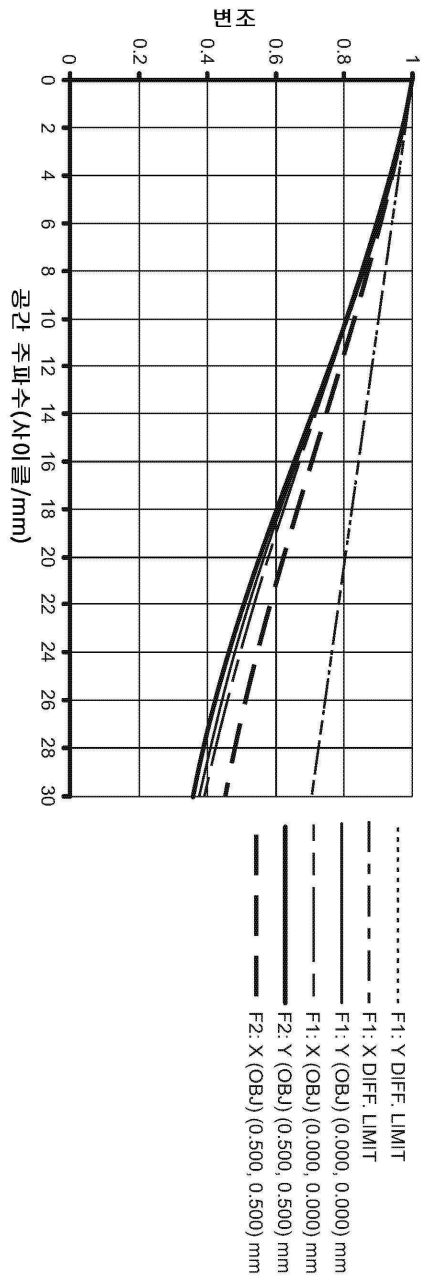
- F1: Y DIFF. LIMIT
- F1: X DIFF. LIMIT
- F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
- F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면9b

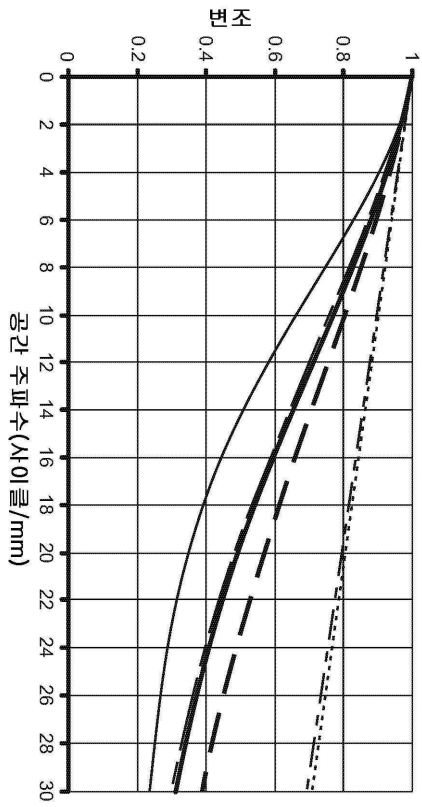


- F1: Y DIFF. LIMIT
- - - - - F1: X DIFF. LIMIT
- F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
- F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면10a

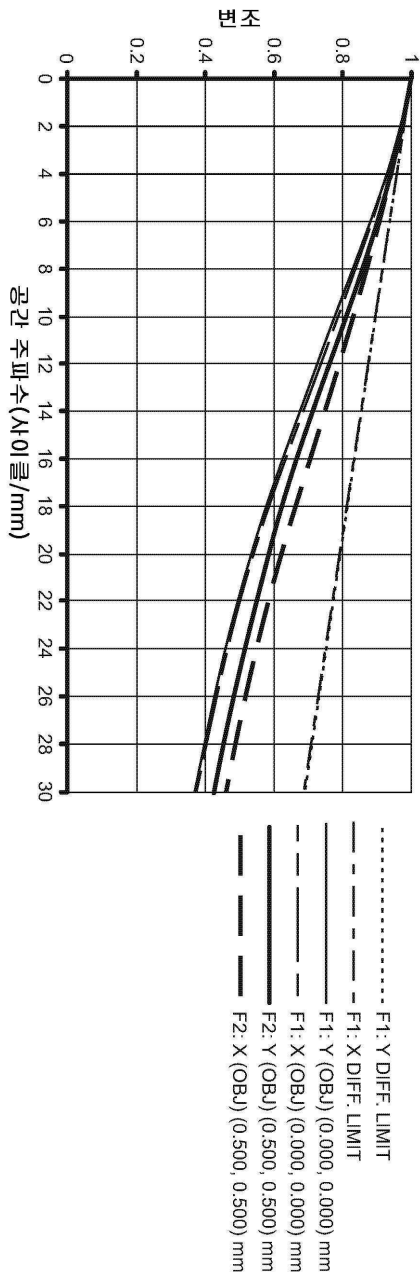


도면10b

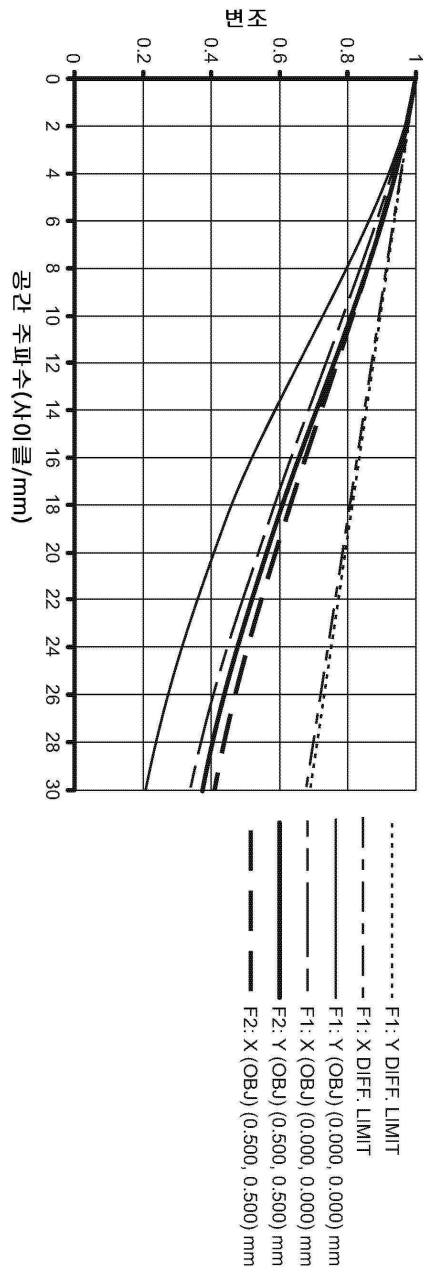


- F1: Y DIFF. LIMIT
- - - - F1: X DIFF. LIMIT
- F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- - - - F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
- - - - F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

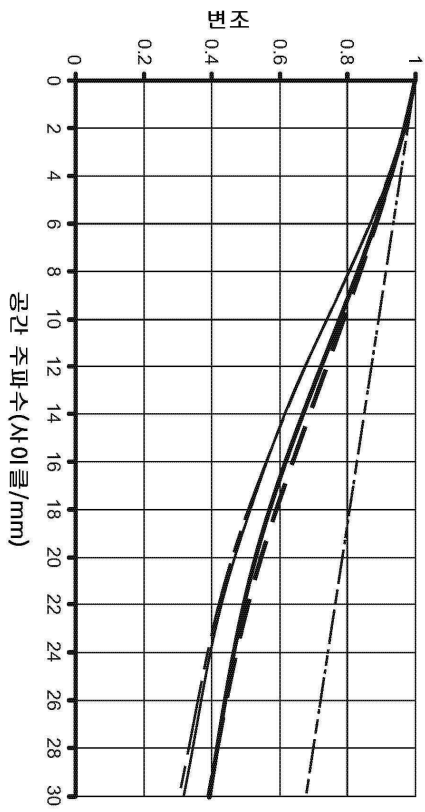
도면11a



도면11b

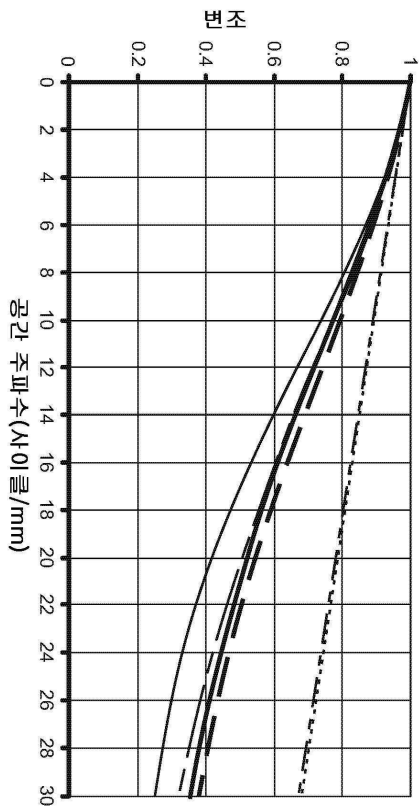


도면12a



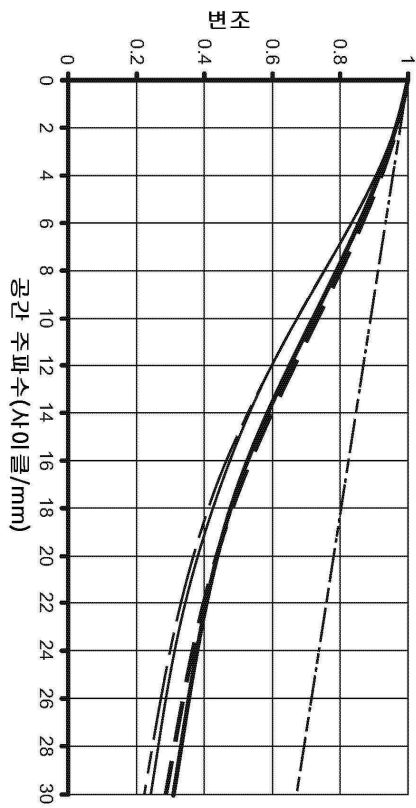
- F1: Y DIFE LIMIT
- F1: X DIFE LIMIT
- F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
- F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면12b



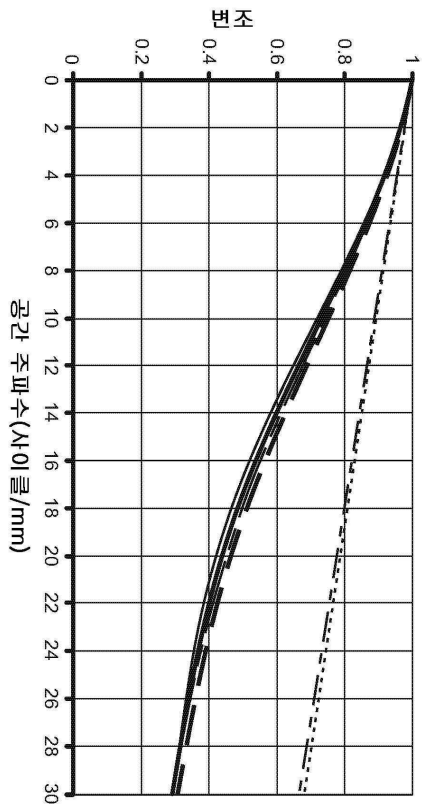
- F1: Y DIF, LIMIT
- F1: X DIF, LIMIT
- - - - F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- _____ F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
- F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면13a



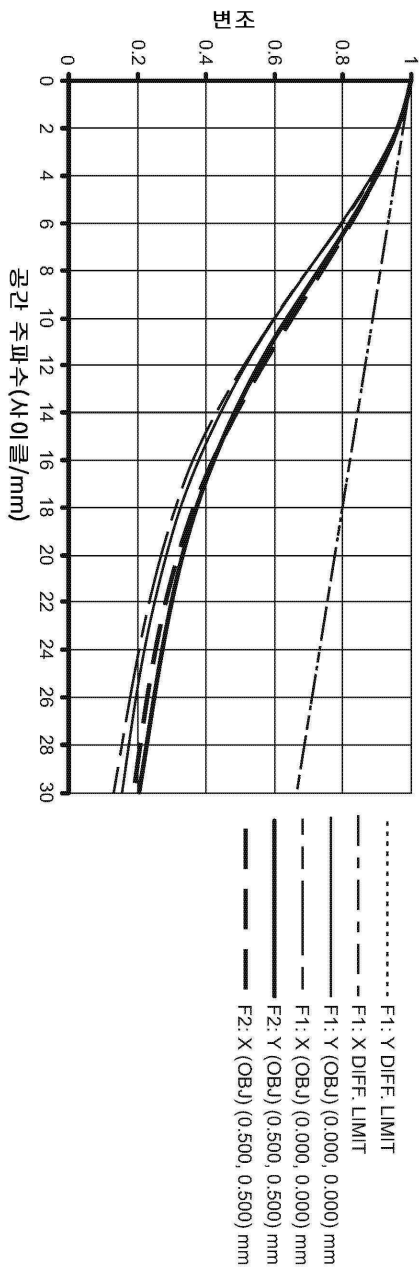
..... F1: Y DIFF. LIMIT
 - - - - - F1: X DIFF. LIMIT
 _____ F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
 - - - - - F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
 _____ F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
 - - - - - F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면13b

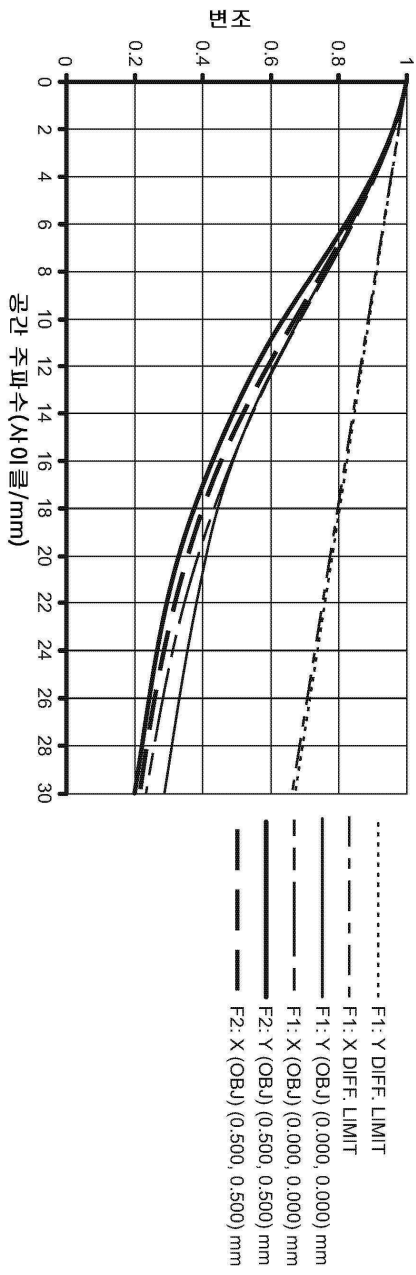


- F1: Y DIF. LIMIT
- F1: X DIF. LIMIT
- F1: Y (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F1: X (OBJ) (0.000, 0.000) mm
- F2: Y (OBJ) (0.500, 0.500) mm
- F2: X (OBJ) (0.500, 0.500) mm

도면14a



도면14b



도면15

