

AR/VR 헤드셋을 위한 마이크로디스플레이 기술의 현재와 미래

김종찬

(연세대학교 디스플레이융합공학과)

1. 서론

증강현실 (AR)과 가상현실 (VR) 기술은 단순히 시각 정보를 확장하는 수준을 넘어, 인간의 지각 능력 자체를 확장하고 전혀 새로운 형태의 경험을 제공하는 차세대 IT 플랫폼으로 주목받고 있다. 이러한 몰입형 경험의 중심에는 사용자의 눈 바로 앞에서 작동하는 마이크로디스플레이가 존재한다. 디스플레이가 눈과 수 센티미터 이내의 거리에서 사용되는 AR·VR 환경에서는, 기존 평면 디스플레이와는 비교할 수 없을 정도로 높은 해상도와 휘도, 명암비, 시야각, 그리고 빠른 응답 특성이 동시에 요구된다.

AR/VR 헤드셋의 광학 엔진을 구성하는 마이크로디스플레이 기술은 현재 세 가지 축을 중심으로 발전하고 있다. 반사형 광학 구조를 기반으로 초고해상도 구현에 유리한 LCoS (Liquid Crystal on Silicon), 자발광 특성을 통해 높은 명암비와 얇은 폼팩터를 구현하는 OLEDoS (Organic Light Emitting Diodes on Silicon), 그리고 무기 반도체 기반의 마이크로 LED를 활용해 탁월한 휘도와 긴 수명을 제공하는 LEDoS (Light Emitting Diodes on Silicon)가 대표적이다.^[1] 이들 기술은 각기 다른 물리적 구조와 구동 방식, 광학 효율 및 제조 공정을 바탕으로 서로 다른 강점과 한계를 지니며, AR과 VR이라는 상이한 응용 환경에 맞춰 진화해 왔다.^[2]

본 기획기사에서는 AR/VR 헤드셋의 핵심을 이루는 세 가지 마이크로디스플레이 기술을 동일한 비교 프레임에서 살펴보고, 각 기술의 구조적 특징과 구동 방식, 적용 가능성과 한계를 정리한다. 더 나아가, 마이크로디스플레이의 화질, 휘도, 시야각, 명암비와 같은 핵심 성능을 정밀하게 평가하기 위한 측정 방법, AR 시스템에서 현실 영상과 가상 이미지를 결합하는 광학 콤바이너 (optical combiner) 및 VR 시스템에서 활용되는 렌즈 광학계 기술도 함께 소개한다. 이러한 종합적인 분석을 통해, 다가오는 AR/VR 시대를 맞아 OLED 기반 마이크로디스플레이 기술이 직면한 과제와, 이를 극복하기 위한 기술적 방향성을 살펴보고자 한다.

2. AR/VR 마이크로디스플레이의 기술적 요구사항

AR 및 VR 헤드셋에 적용되는 마이크로디스플레이는 기존 TV, 모니터, 모바일 디스플레이와는 전혀 다른 사용 환경에서 동작한다. 디스플레이가 사용자의 눈으로부터 수 cm 이내에 위치하는 근접 시청 구조는, 인간의 시각 시스템과 직접적으로 상호작용하는 조건을 형성하며, 이에 따라 해상도, 휘도, 명암비, 시야각, 응답 속도 등 거의 모든 성능 지표에서 기존 평판 디스플레이보다 훨씬 엄격한 기준을 요구한다. 이러한 요구사항은 개별 소자의 성능만으로는 충족되기 어렵고, 디스플레

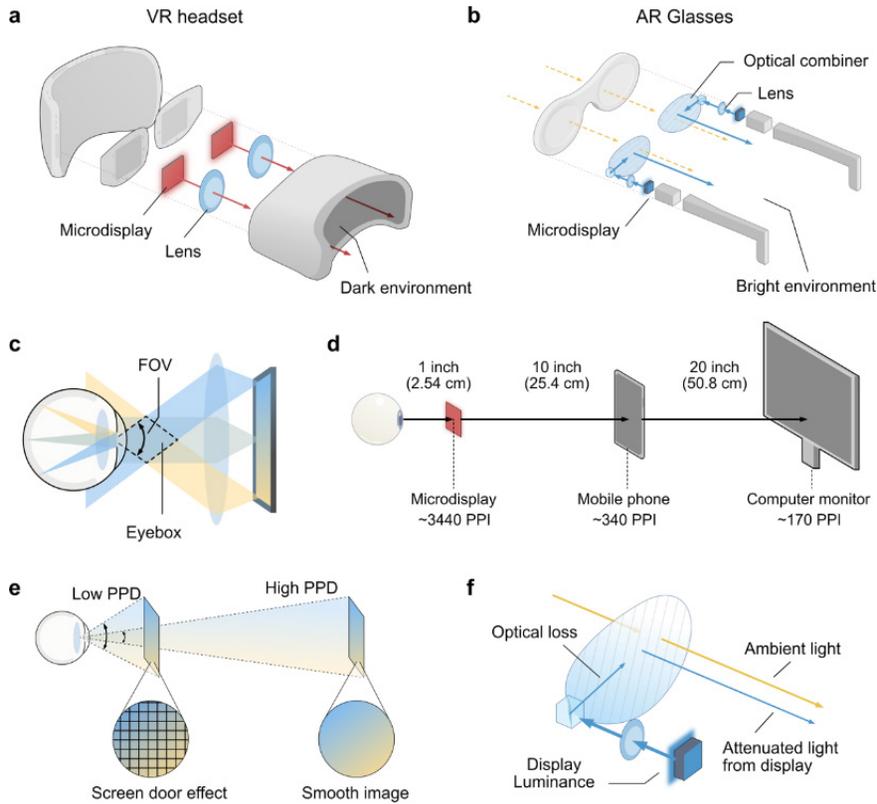


그림 1. AR/VR 기기의 구조 및 구조적 특성

이, 구동 회로, 광학계가 하나의 시스템으로 최적화되어 야만 달성될 수 있다.

2.1. 근접 시청 환경과 해상도

AR/VR 마이크로디스플레이의 가장 근본적인 특징은 디스플레이와 눈 사이의 짧은 거리이다. 이로 인해 사용자는 픽셀 구조를 직접 인지하기 쉬우며, 픽셀 간격이 격자 형태로 보이는 스크린 도어 효과 (Screen Door Effect, SDE)가 시각적 몰입을 크게 저해하는 요인으로 작용한다. 이러한 현상을 억제하기 위해서는 단순한 해상도 증가가 아니라, 시야각 대비 픽셀 밀도를 나타내는 각해상도 (pixels per degree)를 기준으로 한 설계가 필요하다.

각해상도는 디스플레이가 사용자의 시야 내에서 얼마나 세밀한 정보를 제공할 수 있는지를 나타내며, 인간 시각의 분해능을 기준으로 약 60 pixels per degree 수준이 목표치로 제시된다.^[3] 이 조건을 만족하기 위해서는 디스플레이와 눈 사이의 거리, 광학 배율, 시야각이

함께 고려되어야 하며, 결과적으로 수천 PPI 수준의 초고해상도 마이크로디스플레이가 요구된다. 예를 들어, 디스플레이가 눈으로부터 약 1 inch 거리에서 사용되는 경우, 60 pixels per degree를 확보하기 위해서는 3,000 PPI를 훨씬 상회하는 픽셀 밀도가 필요하다. 이는 평면 디스플레이에서 사용되는 해상도 기준과는 완전히 다른 수준의 해상도이며, 마이크로디스플레이 기술에 고해상도 픽셀 제작이 용이한 실리콘 기반 백플레인 이 결합되는 핵심적인 이유이다.

2.2. 시야각과 아이박스의 trade-off

AR/VR 시스템에서 시야각 (Field of View, FOV)은 몰입감을 결정짓는 핵심 요소 중 하나이다. VR 환경은 사용자의 시야 대부분을 가상 이미지로 채우는 것이 중요하므로, 넓은 시야각이 요구된다. 반면 AR 환경은 현실 세계 위에 정보를 중첩하는 방식이므로, 상대적으로 제한된 시야각을 갖더라도 안정적인 영상 전달이 가능하다.

이와 함께 고려해야 할 요소가 아이박스(Eyebow)이다. 아이박스는 사용자의 눈 위치가 변하더라도 전체 영상을 정상적으로 인식할 수 있는 공간을 의미하며, 착용 안정성과 직결된다. 일반적으로 시야각을 넓히면 아이 박스는 줄어들고, 아이박스를 확대하면 시야각이 제한 되는 상호 트레이드오프 관계가 존재한다. 이는 광학계에서 빛의 에탕두(étendue)가 보존되기 때문으로, 시야각을 확장할수록 빛은 더 넓은 각도로 분산되어 아이 박스가 축소되고, 반대로 아이박스를 확대하기 위해서는 각도 정보를 희생해야 하는 구조적 한계에서 기인한다. 따라서 마이크로디스플레이의 설계는 단독 소자의 성능이 아니라, 광학계와 결합된 시스템 차원에서 시야 각과 아이박스의 균형을 어떻게 설정할 것인지에 따라 달라진다.

2.3. 휘도와 명암비 요구조건

휘도와 명암비에 대한 요구사항은 AR과 VR 환경에서 근본적으로 다르게 설정된다. VR 헤드셋은 외부 광이 거의 차단된 폐쇄형 구조를 가지므로, 절대적인 휘도 보다는 명암비와 응답 특성이 사용자 경험에 더 큰 영향을 미친다. 특히 VR 환경에서는 사용자의 머리 움직임과 시선 이동이 매우 빈번하게 발생하며, 이 과정에서 디스플레이 영상이 시각적 움직임과 정합되지 않을 경우 잔상이나 멀미를 유발하기 쉽다.

이러한 문제를 완화하기 위해 VR 디스플레이에서는 픽셀을 한 프레임 동안 계속 발광시키는 대신, 매우 짧은 시간 동안만 발광시키는 저지속(low-persistence) 구동 방식이 널리 사용된다. 픽셀이 짧은 순간에만 발광하면, 사용자의 눈이 움직이는 동안 동일한 영상 정보가 망막에 지속적으로 남는 현상이 줄어들어 모션 블러(motion blur)와 잔상이 효과적으로 억제된다. 이는 머리 움직임과 영상 정보 사이의 시간적 불일치를 최소화함으로써, 시각적 불편감과 멀미를 줄이는 데 중요한 역할을 한다.

다만 이러한 구동 방식은 새로운 요구조건을 동반한다. 발광 지속 시간이 짧아질수록 눈이 인식하는 평균 밝기는 감소하게 되므로, 동일한 채감 휘도를 유지하기 위해서는 발광이 이루어지는 짧은 순간 동안 훨씬 높은 밝기가 필요하다. 즉, VR 디스플레이에서는 평균 휘도 자

체보다도 순간 최대 휘도(peak luminance)에 대한 요구가 오히려 더 높아질 수 있으며, 이는 발광 소자의 구동 안정성과 수명 설계에 직접적인 부담으로 작용한다.

반면 AR 디스플레이는 현실 세계 위에 가상 이미지를 중첩하는 구조를 가지므로, 외부 환경광 조건이 화질을 좌우하는 핵심 변수로 작용한다. 밝은 실외 환경에서도 가상 이미지를 명확하게 인지하기 위해서는 절대 휘도뿐 아니라 주변광을 고려한 명암비, 즉 주변광 대비 명암비(Ambient Contrast Ratio)가 중요한 지표가 된다.^[4] 더욱이 AR 시스템에 적용되는 광학 컴바이너는 구조적으로 큰 광 손실을 수반하므로, 디스플레이 단계에서는 이를 보상할 수 있는 매우 높은 휘도가 요구된다. 이러한 차이는 AR과 VR 환경에서 요구되는 마이크로디스플레이 기술과 광학 설계 전략을 근본적으로 달라지게 만드는 요인이다.

2.4. 응답 속도와 구동 특성

AR/VR 디스플레이는 사용자의 머리 움직임과 시선 이동에 실시간으로 대응해야 하지만, 응답 속도와 주사율에 대한 요구 수준은 AR과 VR 환경에서 서로 다르게 나타난다. 이는 두 응용이 디스플레이를 사용하는 목적과 영상이 사용자에게 인지되는 방식이 근본적으로 다르기 때문이다.

AR 디스플레이는 현실 세계를 직접 관측하는 시야 위에 정보를 중첩하는 방식으로 사용되며, 디스플레이 영상은 보조적인 정보 전달 수단으로 인식된다. 이로 인해 화면 전체가 빠르게 움직이는 상황이 상대적으로 적고, 주사율보다는 정보의 가독성과 안정성이 더 중요하게 작용한다. 따라서 AR 환경에서는 60-90 Hz 수준의 주사율에서도 실사용에 큰 제약이 없는 경우가 많다.

반면 VR 디스플레이는 사용자의 시야 전체를 가상 영상으로 채우는 몰입형 환경을 제공하며, 머리 움직임과 영상의 움직임이 직접적으로 연동된다. 이때 주사율이 충분하지 않거나 응답 지연이 발생할 경우, 실제 움직임과 시각 정보 사이의 시간적 불일치로 인해 모션 블러와 멀미가 유발될 수 있다. 이러한 이유로 사용자의 머리 움직임과 영상 갱신 사이의 시간 지연을 최소화하기 위해 VR 환경에서는 최소 90 Hz, 최근에는 120 Hz 이상의 주사율이 요구된다.

응답 속도 역시 VR 환경에서 중요한 지표이다. 픽셀의 응답 시간이 프레임 간격보다 길 경우 이전 프레임의 잔상이 중첩되어 모션 블러가 발생하므로, VR 디스플레이에서는 일반적으로 ms 이하, 경우에 따라 수백 μ s 수준의 빠른 응답 특성이 요구된다. 이에 비해 AR 환경에서는 영상이 시야 전체를 지배하지 않기 때문에 응답 속도에 대한 요구 수준이 상대적으로 완화된다.

이러한 시간 응답 요구조건은 발광 소자의 물성뿐만 아니라 구동 방식과 백플레인 회로 설계와도 밀접하게 연결된다. 특히 픽셀 크기가 수 μ m 이하로 축소되는 마이크로디스플레이에서는 고주사율 구동 시 신호 안정성을 확보하기 위해 고속·고집적 구동이 가능한 실리콘 CMOS 백플레인이 사실상 필수적인 선택으로 자리 잡고 있다.

3. AR/VR용 마이크로디스플레이 기술동향

3.1. AR/VR 광학 엔진에서 마이크로디스플레이의 역할

AR/VR 헤드셋에서 마이크로디스플레이는 단순한 영상 출력 소자를 넘어, 광학 엔진 전체 성능을 규정하는 핵심 요소로 작동한다. AR/VR 시스템의 광학 엔진은 일반적으로 마이크로디스플레이, 광학 렌즈 또는 컴바이너, 그리고 구동 및 제어 회로로 구성되며, 이들 요소는 독립적으로 설계되기보다 하나의 통합된 시스템으로 최적화되어야 한다. 특히 근접 시정 환경에서는 마이크로디스플레이의 발광 특성, 해상도, 각도 분포가 이후 광학계 설계와 사용자 경험에 직접적인 영향을 미친다.

마이크로디스플레이는 광학 엔진에서 정보의 출발점에 해당한다. 픽셀에서 방출되거나 변조된 빛은 렌즈, 반사면, 혹은 광도파로와 같은 광학 소자를 거쳐 사용자의 눈으로 전달되는데, 이 과정에서 해상도 손실, 광량 감소, 색 왜곡이 필연적으로 발생한다. 따라서 광학계에서 발생하는 손실과 왜곡을 보상하기 위해 마이크로디스플레이 단계에서부터 충분한 해상도와 휘도, 그리고 제어 가능한 각도 분포를 확보하는 것이 중요하다.

이러한 이유로 AR/VR 마이크로디스플레이의 요구 성능은 일반 디스플레이와 근본적으로 다르다. 평면 디

스플레이에서는 패널 자체의 해상도와 휘도가 최종 화질을 좌우하지만, AR/VR 시스템에서는 마이크로디스플레이의 특성이 광학계와 결합되며 최종 영상 품질이 결정된다. 예를 들어, 동일한 해상도의 마이크로디스플레이라 하더라도 픽셀의 발광 각 분포나 반사 특성에 따라 시야각, 아이박스, 광학 효율이 크게 달라질 수 있다.

또한 마이크로디스플레이는 구동 회로 및 백플레인 기술과도 긴밀히 연결된다. 초고해상도를 구현하기 위해서는 수 μ m 이하의 픽셀 크기가 요구되며, 이는 기존 박막 트랜지스터 기반 구동 방식으로는 한계가 있다. 이로 인해 AR/VR 마이크로디스플레이 기술은 실리콘 CMOS 백플레인을 기반으로 발전해 왔으며, 이는 고집적 구동 회로, 안정적인 신호 제어, 고속 응답 특성을 동시에 만족시키기 위한 선택이라 할 수 있다.

결과적으로 AR/VR 광학 엔진에서 마이크로디스플레이 기술을 논할 때에는 개별 소자의 성능 비교를 넘어, 광학계 및 구동 구조와 결합된 시스템 관점에서 그 역할과 특성을 이해할 필요가 있다.

3.2. 실리콘 기반 마이크로디스플레이 기술 개요

AR/VR용 마이크로디스플레이 기술은 공통적으로 실리콘 기반 CMOS 백플레인과의 결합을 중심으로 발전해 왔다. 이는 단순한 공정 선택의 문제가 아니라, 앞서 살펴본 초고해상도, 고속 구동, 안정적인 신호 제어라는 요구조건을 동시에 만족시키기 위한 구조적 선택이라 할 수 있다. 픽셀 크기가 수 μ m 이하로 축소되는 마이크로디스플레이에서는, 개별 픽셀을 정밀하게 구동하고 균일한 화질을 유지하기 위해 고집적·고신뢰성 구동 회로가 필수적이다.

기존 평면 디스플레이에서 널리 사용되는 박막 트랜지스터 (TFT) 기반 백플레인은 대면적 구현과 비용 측면에서 장점을 가지지만, 마이크로디스플레이에 요구되는 픽셀 밀도와 구동 안정성을 확보하기에는 구조적 한계가 존재한다. 픽셀 크기가 감소함에 따라 트랜지스터 특성의 편차, 누설 전류, 구동 지연 문제가 더욱 두드러지며, 이는 화질 균일성과 응답 특성 저하로 이어진다. 이러한 문제는 근접 시정 환경에서 더욱 쉽게 인지되기 때문에, AR/VR 마이크로디스플레이에서는 치명적인 제약으로 작용한다.

이에 따라 마이크로디스플레이 기술은 단결정 실리콘 기반 CMOS 공정을 활용한 백플레인 구조로 빠르게 수렴해 왔다. 실리콘 CMOS 백플레인은 미세 공정을 통해 수천에서 수만 PPI에 이르는 픽셀 밀도를 구현할 수 있으며, 픽셀 단위 전류 및 전압 제어를 정밀하게 수행할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 고속 구동 회로와 보상 회로를 픽셀 어레이 내에 집적할 수 있어, 높은 주사율과 안정적인 구동 특성을 동시에 확보할 수 있다.

이러한 실리콘 기반 접근법 위에서 서로 다른 발광 및 변조 메커니즘을 갖는 세 가지 마이크로디스플레이 기술이 발전해 왔다. 외부 광원을 변조하는 반사형 구조의 LCoS, 자발광 유기 소자를 실리콘 위에 집적한 OLEDoS, 그리고 무기 반도체 기반 마이크로 LED를 활용한 LEDoS가 대표적이다. 이들 기술은 모두 동일한 CMOS 백플레인을 기반으로 하지만, 빛을 생성하거나 제어하는 방식에서 본질적인 차이를 가지며, 이에 따라 해상도, 휘도, 응답 속도, 수명, 광학 결합 방식에서 서로 다른 특성을 보인다. 3.3절부터는 이러한 공통 기반 위에서 발전한 LCoS, OLEDoS, LEDoS 기술을 각각 살펴보고, AR과 VR 환경에서의 적용 가능성과 한계를 비교한다.

3.3. LCoS (Liquid Crystal on Silicon)

LCoS는 실리콘 CMOS 백플레인 위에 액정 (Liquid Crystal) 변조층을 형성한 반사형 마이크로디스플레이 기술로, AR/VR용 광학 엔진 가운데 가장 오랜 기간 축적된 기술 성숙도를 가진 플랫폼이다.^[5] LCoS는 자발광 소자가 아니라 외부 광원을 사용해 입사된 빛을 변조하는 방식으로 동작하며, 이 구조적 특성은 해상도 구현과 광출력 측면에서 뚜렷한 장점과 한계를 동시에 만들어낸다.

3.3.1. LCoS의 기본 동작 원리와 구조적 특징

LCoS는 실리콘 기판 위에 형성된 CMOS 구동 회로와 반사 전극, 그리고 그 위에 배치된 액정층으로 구성된다. 외부 광원에서 공급된 빛은 편광 상태로 LCoS 패널에 입사되며, 액정층에 인가되는 전압에 따라 위상 또는 편광 상태가 변조된다. 변조된 빛은 다시 반사되어 광학계로 전달되며, 이를 통해 영상이 형성된다.

이러한 반사형 구조는 픽셀 내에서 발광 소자를 구현할 필요가 없기 때문에, 픽셀 크기를 극단적으로 축소하는데 유리하다. 실제로 LCoS는 수천 PPI 이상의 매우 높은 픽셀 밀도를 안정적으로 구현할 수 있으며,^[6] 이는 고해상도를 요구하는 AR 응용에서 중요한 장점으로 작용한

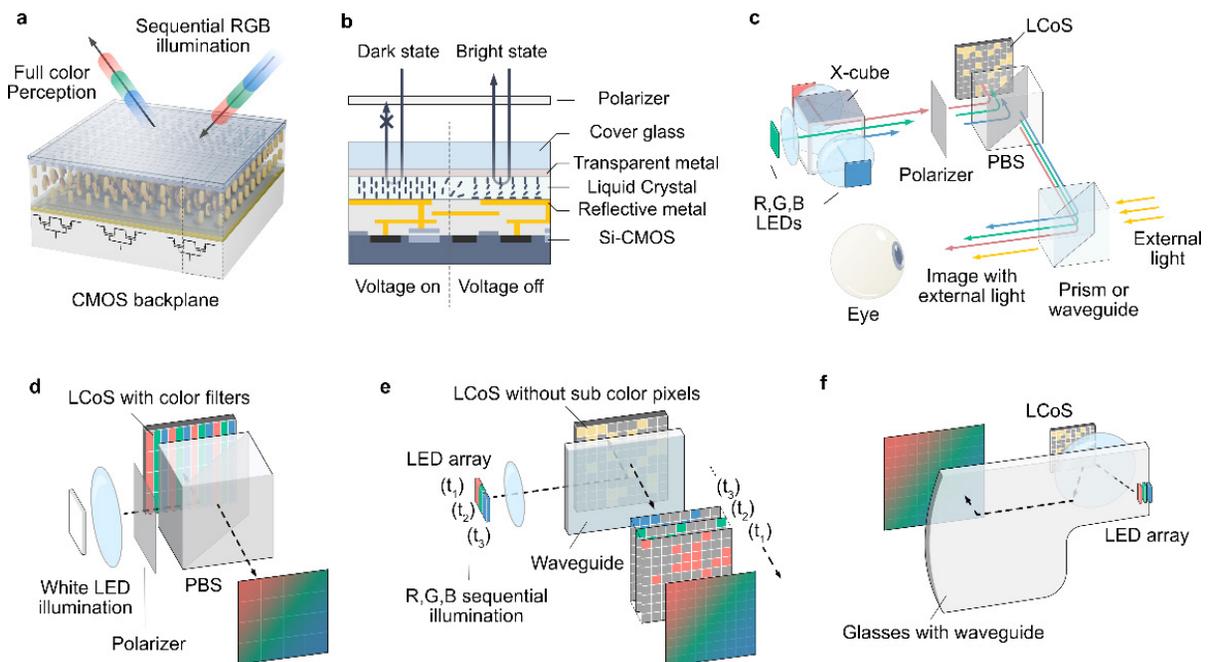


그림 2. LCoS의 원리 및 구조

다. 또한 RGB 색 구현을 순차 색 (field-sequential) 방식으로 처리할 수 있어, 단일 패널에서 매우 높은 공간 해상도를 확보할 수 있다.

3.3.2. AR 환경에서 LCoS의 강점: 해상도와 광출력

LCoS가 현재 AR 마이크로디스플레이 시장에서 가장 널리 사용되는 기술 중 하나로 자리 잡은 이유는, AR 환경이 요구하는 높은 해상도와 광출력을 비교적 안정적으로 제공할 수 있기 때문이다. AR 광학 엔진은 광도파관 또는 프리즘 기반 광학 컴바이너를 사용하며, 이 과정에서 상당한 광손실이 발생한다. 그럼에도 불구하고 LCoS는 고휘도 외부 광원을 사용하기 때문에, 광원 출력 자체를 높이는 방식으로 이러한 손실을 보상할 수 있다.

3.3.3. 시스템 관점에서의 제약: 편광, 광학계, 폼팩터

반면 LCoS의 구조적 장점은 동시에 시스템 수준의 제약으로 이어진다. LCoS는 액정의 광변조 특성상 편광된 빛을 전제로 동작하기 때문에, 광학 엔진 내에 편광판, 빔스플리터 등의 추가 광학 요소가 필수적으로 포함된다. 이는 광학 효율 손실을 유발할 뿐 아니라, 시스템 부피와 복잡도를 증가시키는 요인이 된다.

특히 소비자용 AR 글래스와 같이 경량·슬림한 폼팩터가 요구되는 응용에서는, 이러한 광학계 복잡성이 중요한 설계 제약으로 작용한다. 광학 엔진의 두께와 무게를 줄이기 위해서는 디스플레이 소자 자체의 성능 향상만으로는 한계가 있으며, LCoS 구조에서는 일정 수준 이상의 광학 부피를 감수해야 하는 경우가 많다.

3.3.4. 응답 속도와 동적 성능의 한계

응답 속도 측면에서도 LCoS는 구조적 한계를 가진

다. 액정 기반 변조는 본질적으로 분자 재배열에 의해 이루어지므로, 자발광 소자에 비해 응답 속도가 느리다. 고주사율 구동이 가능한 LCoS 시스템도 존재하지만, VR 환경에서 요구되는 저지속 (low-persistence) 구동이나 매우 빠른 시선 이동에 대응하는 데에는 제약이 따른다.

이로 인해 LCoS는 전체 시야가 가상 영상으로 채워지며, 사용자의 움직임에 민감하게 반응해야 하는 VR 응용보다는, 정보 전달 중심의 AR 응용에 더 적합한 기술로 분류된다. 즉 LCoS는 높은 해상도와 광출력이 중요한 환경에서는 강점을 보이지만, 시간 응답 특성이 핵심이 되는 몰입형 VR 환경에서는 구조적 한계를 드러낸다.

3.3.5. LCoS의 기술적 위치와 전망

LCoS는 현재 AR 마이크로디스플레이 기술 중 가장 높은 성숙도를 가진 플랫폼이다. CMOS 백플레인 기술, 액정 공정, 광학 엔진 설계가 오랜 기간 축적되어 왔으며, 신뢰성, 수율, 공급망 측면에서 비교적 안정적인 생태계를 형성하고 있다. 이러한 이유로 LCoS는 당분간 계속 AR 시장에서 중요한 역할을 수행할 가능성이 크다.

다만 장기적인 관점에서 보면, 경량화·저전력·슬림 폼팩터를 지향하는 소비자용 AR 글래스에서의 자발광 기반 마이크로디스플레이 기술과의 경쟁이 불가피하다. 결국 LCoS는 현재 AR 글래스를 위한 가장 현실적인 해법이지만, “어느 정도까지 광학계의 구조를 단순화할 수 있는가?”라는 물음은 차세대 AR 디스플레이 기술에서 LCoS가 미래에 어디까지 활용될 수 있는지를 평가하는 중요한 기준이 될 것이다.

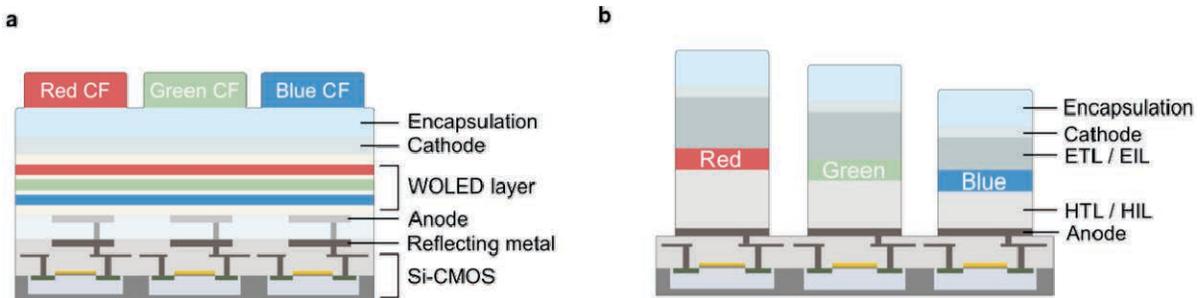


그림 3. OLED의 구조

3.4. OLEDoS (Organic Light Emitting Diodes on Silicon)

OLEDoS는 실리콘 CMOS 백플레인 위에 유기발광 다이오드 (OLED)를 집적한 자발광 마이크로디스플레이 기술로, AR/VR용 디스플레이 중 균형 잡힌 특성을 제공하는 플랫폼으로 평가된다. OLED가 지닌 높은 명암비와 빠른 응답 속도, 그리고 실리콘 백플레인의 고집적 구동 능력이 결합되면서, OLEDoS는 특히 VR 환경에서 최적의 대안으로 자리 잡았다.

3.4.1. OLEDoS의 구조와 자발광 기반 동작 특성

OLEDoS는 각 픽셀 자체가 빛을 생성하는 자발광 구조를 기반으로 한다. 실리콘 CMOS 백플레인 위에 유기발광층이 직접 형성되며,^[7] 픽셀 단위로 전류가 제어되어 영상이 구현된다. 이 구조는 외부 광원이 필요하지 않기 때문에, 광학 엔진을 단순화할 수 있고, 시스템 설계 자유도를 크게 높인다.

특히 자발광 구조는 검은색을 꺼버릴 수 있는 특성을 제공한다. 이는 VR 환경과 같이 외부 광이 차단된 조건에서 사실상 무한대에 가까운 명암비를 제공하여 몰입감을 크게 향상시킨다.^[8] 이러한 특성은 광원으로부터 반사되는 빛을 액정을 통해 조절하는 LCoS와 비교할 때 OLEDoS의 가장 큰 차별점이라 할 수 있다.

3.4.2. VR 환경에서 OLEDoS의 강점

앞서 2절에서 언급된 것과 같이 VR 디스플레이에서는 사용자의 시야 전체가 가상 영상으로 채워지기 때문에, 영상의 시간 응답 특성과 명암 특성이 사용자 경험을 직접적으로 좌우한다. 특히 사용자의 머리 회전과 시선 이동이 빈번하게 발생하는 VR 환경에서는, 픽셀 응답 지연이나 프레임 간 잔상이 누적될 경우 모션 블러와 멀미가 쉽게 유발된다.

OLEDoS는 유기 발광 소자의 본질적으로 빠른 발광 응답 특성 덕분에 이러한 요구조건을 충족하기에 유리하다. OLED의 발광 응답 시간은 일반적으로 수 μs 수준으로, 이는 액정 기반 디스플레이의 ms 단위 응답 시간에 비해 백배 이상 빠르다. 이러한 동작 특성은 90-120 Hz 이상의 고주사율 구동에서도 프레임 간 잔상을 최소화하는 데 중요한 역할을 한다.

VR 디스플레이에서는 앞서 2절에서 언급된 저지속

(low-persistence) 구동 방식이 널리 활용되며, 이 때문에 발광 지속 시간이 짧아져 사용자가 인지하는 평균 휘도가 감소한다. 이를 보상하기 위해 발광이 이루어지는 짧은 기간 동안 더 높은 ‘순간 최대 휘도 (peak luminance)’가 요구되는데, OLED는 빠른 응답 특성으로 인해 이러한 펄스형 고휘도 구동에 비교적 유연하게 대응할 수 있다. 이러한 구동 특성은 OLEDoS가 VR용 마이크로디스플레이로 빠르게 자리 잡은 핵심적인 이유 중 하나이다.

3.4.3. 실리콘 백플레인과의 결합: 고해상도와 구동 정밀도

OLEDoS는 실리콘 CMOS 백플레인을 기반으로 하기 때문에, 픽셀 미세화와 고해상도 구현 측면에서도 강점을 가진다. 수천 PPI에 달하는 픽셀 밀도를 구현할 수 있으며, 픽셀별 전류 제어를 통해 균일한 화질을 유지할 수 있다. 이는 마이크로디스플레이가 요구하는 근접 시청 환경에서 매우 중요한 요소이다.

또한 CMOS 백플레인은 고주사율 구동, 정밀한 전류 제어, 픽셀 보정 회로 구현에 유리하여, OLED 소자의 개별 특성 편차를 보상할 수 있는 여지를 제공한다. 이러한 특성은 OLED가 지닌 재료적 불균일성과 수명 편차 문제를 시스템 수준에서 완화하는 데 기여한다.

3.4.4. AR 확장 가능성과 구조적 한계

OLEDoS의 가장 큰 한계는 AR 환경에서 요구되는 극단적인 휘도 조건이다. AR 시스템에서는 광도파관 기반 광학 컴바이너로 인해 구조적인 광손실이 발생하며, 밝은 실외 환경에서도 가상 영상이 명확하게 인지되어야 한다. 이로 인해 디스플레이의 매우 높은 휘도가 요구되며, 이는 OLED 소자의 수명과 효율 측면에서 부담으로 작용한다.

즉 OLEDoS는 AR 응용에 사용할 수 없는 기술은 아니지만, 장시간 고휘도 구동이 필요한 AR 환경에서는 유기 발광 재료의 열화와 효율 저하가 심각한 문제로 부각된다.^[9] 이러한 이유로 현재 OLEDoS는 VR 중심의 기술로 분류되며, AR 응용에서는 제한적인 조건 또는 보조 디스플레이 형태로 논의되는 경우가 많다.

3.4.5. 광학 관점에서의 특징: 발광 각 분포와 결합 효율

OLEDoS의 발광 특성은 광학 엔진 설계와도 밀접하게 연결된다. OLED는 본질적으로 비교적 넓은 발광 각

분포를 가지며, 이는 균일한 화질 구현에는 유리하지만, 광도파관과 같은 광학계와의 결합 효율 측면에서는 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 OLEDoS 광학 설계에서는 발광 각 분포를 제어하기 위한 마이크로 캐비티 구조, 광학 보조 구조, 또는 시스템 차원의 광 추출 설계가 함께 요구된다. 이러한 관점에서 OLEDoS는 단순히 밝은 OLED를 만드는 문제를 넘어, 발광 특성과 광학 컴바이너 요구조건을 동시에 만족시키는 공동 설계가 필요한 기술이라 할 수 있다.

3.4.6. OLEDoS의 기술적 위치와 전망

OLEDoS는 OLED 기술 중에서도 비교적 빠르게 상용화 단계에 도달한 마이크로디스플레이 플랫폼이다. 기존 OLED 산업에서 축적된 재료, 공정, 소자 설계 경험을 기반으로 기술적 진입 장벽이 상대적으로 낮으며, 수율과 신뢰성 측면에서도 일정 수준의 안정성을 확보하고 있다. 이러한 이유로 OLEDoS는 VR 시장에서 이미 중요한 위치를 차지하고 있으며, OLED 기술이 기존 디스플레이를 넘어 새로운 응용 영역으로 확장되는 대표적인 사례라 할 수 있다.^[10] 동시에 OLEDoS는 LEDoS가 지향하는 궁극적 해법과 현재 기술 사이의 현실적인 연결고리로서, OLED 기술이 앞으로 어디까지 확장될 수 있는지 보여주고 있다.

3.5 LEDoS (Light Emitting Diodes on Silicon)

3.5.1. AR 환경에서 LEDoS가 주목받는 이유: 광학 컴바이너와 휘도

AR 시스템은 현실 영상 위에 가상 영상을 중첩해 보여주기 때문에, 사용자가 처한 주변광 조건 자체가 디스플레이의 실효 명암비를 결정한다. 특히 광학 컴바이너가 광도파관 기반 구조를 채택하는 경우가 많은데, 디스플레이에서 생성된 빛은 광도파관 내부에 입사된 이후 다중 반사 및 출사 동공 확장 과정(Exit Pupil Expansion, EPE)을 거치며 단계적으로 손실된다. 결과적으로 눈으로 전달되는 광량은 디스플레이가 만든 광량의 ~1% 혹은 그 이하에 불과하며, 시스템 설계에 따라 상당한 광손실을 전제로 해야 한다.

따라서 AR에서 중요한 지표는 단순한 패널 휘도보다, 주변광 하에서 가상 영상이 돋보일 수 있는 실효 대

비 능력이며, 이 요구는 디스플레이 출력의 매우 높은 휘도로 귀결된다. 이 지점에서 무기 반도체 기반 마이크로 LED는 높은 전류 밀도에서도 상대적으로 안정적으로 동작할 수 있고, 열화 속도가 유기 발광 소자보다 낮게 설계될 여지가 크기 때문에, 고휘도 구동이 필수적인 AR 환경에서 크게 유리하다.

3.5.2. 응답 속도와 구동 자유도: 저지속 (low-persistence) 구동에 대한 적합성

마이크로 LED의 발광 응답은 매우 빠르며, 이는 고주사율 또는 저지속 (low-persistence) 구동에서 큰 장점이다. VR에서는 저지속 구동을 통해 잔상과 멀미를 억제하는 것이 중요하고, AR에서도 시선 이동 및 머리 움직임에 따른 흔들림을 최소화하기 위해 시간 응답 특성이 유리할수록 시스템 설계 여유가 커진다. LEDoS는 시간 응답 속도가 빠르다는 점에서, 주사율 및 발광 타이밍 제어 측면에서 근본적인 제약이 상대적으로 적다.

다만 실제 제품 성능은 발광 소자뿐 아니라, 픽셀을 구동하는 CMOS 백플레인의 전류 구동 능력, 신호 안정성, 픽셀 간 보상 구조, 그리고 열 관리 설계에 의해 함께 결정된다. 즉 LEDoS는 소자 특성과 실리콘 백플레인의 특성이 결합된 전기적·열적 설계가 성능을 규정하는 시스템 기술이다.

3.5.3. LEDoS의 핵심 문제: 집적/전사 공정과 수율 문제

LEDoS 상용화의 가장 큰 문제는 제조 및 집적 공정이다. 마이크로디스플레이가 요구하는 수천 PPI 수준의 픽셀 밀도는, 수 μm 수준의 LED 칩을 수백만 개 단위로 정확한 위치에 배치해야 함을 의미한다.^[11] 이때 발생하는 대표적 문제는 (1) 정렬 오차, (2) 결합 픽셀 발생, (3) 수율 저하이며, 특히 마이크로디스플레이는 눈앞에서 보는 용도이기 때문에 적은 결합 픽셀도 제품 품질에 치명적일 수 있다.

전사 공정 (transfer)은 보통 웨이퍼 수준에서 성장한 LED 칩을 대량으로 이동·배치하는 방식으로 구현되며, 픽셀 피치가 줄어들수록 정렬 허용오차는 급격히 감소한다. 또한 전사 과정에서 LED 칩의 파손이나 접촉 불량 발생할 수 있고, 이러한 결합은 마이크로디스플레이 특성상 소수만 존재하더라도 화질과 수율에 치명적인 영향을 미친다. 이 때문에 패널 단계에서 결합 픽

셀을 수리 (repair)하거나 보정하는 전략이 필수적으로 요구된다. 결국 LEDoS는 “소자를 만들 수 있는가?”보다 “수백만 개의 픽셀을 결함 없이 집적할 수 있는가?”가 기술 경쟁력을 좌우하는 분야라 할 수 있다.

이러한 제조적 한계를 극복하기 위해, 고수율 LEDoS 공정에서는 에피 성장 이후, 전사 이전 및 전사 이후 단계에 이르기까지 각 공정 단계별로 소자의 광학·전기적 특성을 정밀하게 평가하는 것이 필수적이다. 특히 웨이퍼 레벨에서의 결함 선별, 픽셀 단위의 광출력 균일성 평가, 전사 후 접촉 불량 및 손상 여부를 조기에 검출하기 위한 측정 기법들이 적극적으로 연구되고 있으며, 이는 LEDoS 상용화를 위한 핵심 기술 요소로 인식되고 있다.

또한 전사 이후에도 불가피하게 발생하는 불량 픽셀을 보완하기 위한 리페어 기술에 대한 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 대표적으로는 결함 픽셀을 선택적으로 제거하거나 비활성화하는 방식, 예비 픽셀을 활용해 기능을 대체하는 구조, 또는 국소적인 재전사를 통해 불량 픽셀을 교체하는 접근법 등이 제안되고 있다. 이러한 리페어 전략은 단일 소자의 성능 향상보다는, 시스템 차원에서의 수율 확보와 제품 신뢰성 향상을 목표로 하며, LEDoS 상용화를 위한 필수 기술 요소로 인식되고 있다.

3.5.4. 미세화에 따른 소자 성능 제약: 측벽 결함과 효율 저하

마이크로 LED는 크기가 작아질수록 표면/측벽의 영향이 커지는 구조적 특성이 있다. 소자가 미세화되면 부피 대비 표면 비율이 증가하고, 측벽에서의 비방사 재결합(non-radiative recombination)이 효율을 저하시킨다.^[12] 또한 공정 중 형성되는 결함과 패시베이션 품질

은 픽셀 간 균일성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 마이크로디스플레이에서 색 균일성과 휘도 균일성 문제로 연결된다.

또한 고휘도 구동을 위해 전류 밀도를 높이는 경우, 열적 스트레스와 오제 결합 (Auger Recombination)에 의한 효율 저하 (roll-off)가 발생할 수 있으며, 이는 AR에서 요구되는 높은 평균 휘도를 장시간 유지해야 하는 시나리오에서 중요한 설계 변수로 작용한다. 따라서 LEDoS에서는 소자 구조 최적화뿐 아니라, 패시베이션, 열 확산, 전류 분포 제어가 함께 고려되어야 한다.

3.5.5. 풀컬러 구현 전략: RGB 직접 집적 vs 색변환 방식

AR/VR 디스플레이는 풀컬러 구현이 필수적이며, LEDoS에서는 이를 구현하는 방식 자체가 큰 기술 분기점이다. 대표적인 접근은 그림 4a에서 보이듯, 두 가지로 나뉜다.

첫째, RGB 마이크로 LED를 각각 집적하는 방식이다.^[13] 이 방식은 색 재현 관점에서는 직관적이지만, 서로 다른 LED 재료 및 공정 조건을 동시에 만족시키며 수백만 개를 정밀하게 집적해야 하므로 전사 공정 복잡도와 수율 부담이 매우 크다. 또한 청색과 적색, 녹색 LED의 효율 및 수명 특성 차이는 색 균일성 유지에 추가적인 어려움을 만든다.

둘째, 청색 파장 마이크로 LED를 광원으로 사용하고, 양자점과 같은 색변환층을 통해 RGB를 구현하는 방식이다.^[14] 이 방식은 집적 공정 복잡도를 줄일 수 있으나, 색변환 효율, 열 안정성, 변환층의 균일성, 그리고 청색 광원의 누설 (crosstalk)에 따른 색 순도 저하 문제가 동반된다. 또한 색변환층은 광도파관 결합 효율과도 연동되기 때문에, 단순히 색만 맞추는 문제가 아니라 광

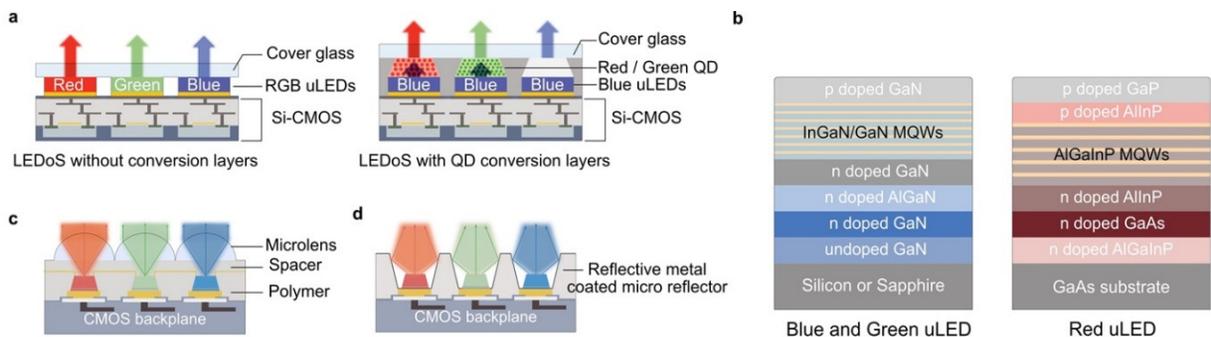


그림 4. LEDoS의 구조

학 엔진 전체 최적화 문제로 연결된다.

결국 LEDoS의 풀컬러 전략은 제조 가능성 (수율)과 광학 성능 (효율·색 순도) 사이에서 최적점을 찾는 과정이며, 제품 형태 (AR 글래스 vs VR 헤드셋)와 요구 휘도 조건에 따라 선택이 달라질 수 있다.

3.5.6. 광학 컴바이너와의 결합: 발광 각 분포

AR 시스템에서 LEDoS의 성능은 얼마나 밝게 만들 수 있는지 만으로 결정되지 않는다. 디스플레이에서 방출된 빛이 광도파관으로 결합되는 과정은 입사 각 분포와 편광 특성에 민감하며, 출사 동공 확장 및 최종 출사 과정에서 각 분포는 눈으로 전달되는 효율을 크게 좌우한다. 즉, LEDoS가 제공하는 높은 휘도 잠재력이 실제 사용자 눈앞의 밝기로 전환되기 위해서는, 발광 각 분포를 광학계 요구에 맞추어 제어하는 설계가 함께 필요하다.

이 부분에서 LEDoS는 장점과 한계를 동시에 가진다. 마이크로 LED의 발광은 기본적으로 비교적 지향성 특성을 가질 수 있으나, 픽셀 구조, 반사 전극, 미세 광학 구조에 따라 각 분포가 달라질 수 있다. 따라서 광도파관 결합 효율을 극대화하기 위해서는 그림 4c와 4d에서 보여주는 것과 같이 픽셀 수준에서의 광학 설계 (마이크로 렌즈, 반사 구조, 캐비티 효과 등)가 병행되어야 하며, 이는 단순한 소자 개발을 넘어 픽셀-광학 엔진 공동 설계 (co-design)의 영역에 해당한다.

3.5.7. LEDoS의 기술적 위치와 전망

LEDoS는 AR 마이크로디스플레이가 요구하는 고휘도·고내구성 조건에 가장 직접적으로 부합하는 물리적 강점을 지니며, 응답 속도와 구동 자유도 측면에서도 높은 잠재력을 가진다. 그러나 상용화 관점에서는 대량 집적 (전사) 공정, 결합 픽셀 수율, 미세화에 따른 효율 저하, 그리고 풀컬러 구현 전략이 동시에 해결되어야 한다. 특히 마이크로디스플레이는 근접 시청 환경 특성상 결합 허용도가 낮기 때문에, LEDoS의 기술 성숙도는 단일 지표가 아니라 제조·광학·구동·측정·수리 전략이 통합된 시스템 완성도로 평가되어야 한다.

결론적으로 LEDoS는 “AR의 최종 목표”로 자주 언급되는 이유가 분명한 기술이지만, 현재는 가능성과 제조 현실 사이의 간극을 줄이는 과정에 놓여 있다. 따라

서 향후 LEDoS의 진화는 고휘도 소자 성능 개선뿐 아니라, 광도파관 결합을 고려한 각 분포 설계, 대면적 고수율 전사 기술, 결합 보정 및 수리 전략의 성숙도에 의해 결정될 가능성이 크다.

3.6. 세 가지 마이크로디스플레이 기술의 비교와 적용 방향

LCoS, OLEDoS, LEDoS는 모두 실리콘 CMOS 백플레인을 기반으로 발전해 온 마이크로디스플레이 기술이지만, 빛을 생성하거나 제어하는 방식의 근본적인 차이로 인해 AR과 VR 환경에서 서로 다른 강점과 한계를 드러낸다. 따라서 이들 기술을 단순히 우열의 관점에서 비교하기보다는, 응용 환경이 요구하는 조건에 따라 어떤 기술이 합리적인 선택이 되는지를 기준으로 이해할 필요가 있다.

3.6.1. AR과 VR 환경에 따른 요구조건의 재정의

앞서 살펴본 바와 같이 AR과 VR은 동일한 ‘헤드셋’이라는 외형을 공유하지만, 디스플레이가 놓이는 광학적·인지적 환경은 근본적으로 다르다. VR은 사용자의 시야 전체를 가상 영상으로 채우는 몰입형 환경으로, 외부 광이 차단된 조건에서 해상도, 명암비, 응답 속도, 주사율이 사용자 경험을 좌우한다. 반면 AR은 현실 세계 위에 정보를 중첩하는 방식이므로, 주변광 조건 하에서 가상 영상을 인지할 수 있는 휘도와 주변광 대비 명암비가 핵심 지표로 작용한다. 또한 AR 시스템에서는 광도파관 기반 광학 컴바이너로 인한 광손실이 구조적으로 수반되기 때문에, 디스플레이 단계에서의 광출력 여유가 매우 중요하다.

이러한 차이는 곧 마이크로디스플레이 기술 선택의 기준을 명확히 갈라놓는다. VR에서는 화질과 시간 응답 특성이, AR에서는 휘도와 광학 결합 효율이 상대적으로 더 중요한 설계 변수로 작용한다.

3.6.2. LCoS, OLEDoS, LEDoS의 기술적 위치 비교

앞서 언급된 것과 같이, LCoS는 외부 광원을 사용하는 반사형 구조를 통해 초고해상도와 높은 광출력을 구현할 수 있는 기술로, 현재 AR 응용에서 가장 성숙된 기술로 평가된다. 광도파관과 결합되는 AR 광학 엔진에서 요구되는 높은 휘도를 외부 광원으로 비교적 안정적

으로 확보할 수 있으며, 순차 색 구동을 통해 픽셀 간격을 극단적으로 줄일 수 있다는 장점도 가진다. 다만 편광 기반 구조와 복잡한 광학계는 시스템 부피와 효율 측면에서 부담으로 작용하며, 경량·슬림 폼팩터를 지향하는 차세대 AR 글래스에서는 구조적 제약으로 남아 있다.

OLEDoS는 자발광 구조를 기반으로 높은 명암비와 빠른 응답 속도를 제공하며, 광학 엔진을 단순화할 수 있다는 점에서 VR 환경에 매우 적합한 기술이다. 외부 광이 차단된 VR 조건에서는 OLED의 낮은 흑레벨과 우수한 응답 특성이 직접적으로 사용자 경험 향상으로 이어진다. 또한, 재료, 소자, 공정 측면에서 축적된 OLED 산업 생태계와, 이를 통해 달성되는 높은 양산성은 OLEDoS를 VR 기술의 가장 현실적인 단기·중기 솔루션으로 제시한다. 반면 AR 환경에서는 광도파관 결합 과정에서 발생하는 광손실을 보상하기 위한 고회도 구동이 요구되는 점이 OLED 소자의 수명과 효율 측면에서 기술적 부담으로 작용한다.

LEDoS는 무기 반도체 기반 발광 소자의 특성상 고회도와 내구성 측면에서 AR 응용에 가장 직접적으로 부합하는 물리적 잠재력을 가진 기술이다. 광도파관 기반 AR 시스템에서 요구되는 극단적인 휘도 조건을 만족시킬 수 있는 거의 유일한 자발광 후보라는 점에서, LEDoS는 흔히 'AR 마이크로디스플레이의 최종 해법'으로 언급된다. 그러나 수 μm 이하 픽셀을 수백만 개 단위로 집적해야 하는 제조 공정, 수율 관리, 풀러린 구현 전략, 정밀한 측정 방식의 부재 등은 여전히 상용화를 가로막는 핵심 과제로 남아 있다.

3.6.3. 시스템 최적화가 중요한 문제이다

중요한 점은 이 세 가지 기술이 상호 배타적인 관계가 아니라는 것이다. AR과 VR은 요구조건이 다르며, 동일한 AR 환경이라 하더라도 목표 휘도, 광도파관 구조, 아이박스 크기, 폼팩터에 따라 최적의 마이크로디스플레이 기술은 달라질 수 있다. 예를 들어 산업·군수용 AR과 같이 극단적인 휘도 및 경량화가 요구되는 경우에는 LEDoS가 유력한 선택이 될 수 있는 반면, 상대적으로 완화된 휘도 조건이 요구되는 소비자용 AR에서는 LCoS가 현실적인 대안이 될 수 있다.

이러한 관점에서 마이크로디스플레이 기술 경쟁은

단순한 소자 성능 비교가 아니라, 디스플레이-구동-광학 컴바이너-시스템 설계가 결합된 공동 최적화(co-design) 문제로 이해되어야 한다. 특히 광도파관과의 결합 효율, 발광 각 분포, 아이박스 확장 전략은 디스플레이 기술 선택과 분리해서 논의할 수 없는 요소이다.

3.6.4. OLED 기반 마이크로디스플레이의 현재와 미래

이러한 기술 지형 속에서 OLEDoS는 중요한 위치를 차지한다. OLEDoS는 LEDoS가 도달하고자 하는 궁극적인 AR 성능 목표와, LCoS가 현재 제공하는 시스템 안정성 사이에서, 가장 빠르게 현실화 가능한 균형점을 제공하는 기술이라 할 수 있다. 특히 VR 환경에서는 이미 충분한 경쟁력을 확보하고 있으며, 고회도 OLED 재료, 발광 증폭 구조 및 tandem 구조, 광 추출 및 광학 설계의 진전 여부에 따라 AR 영역으로의 확장 가능성도 지속적으로 논의되고 있다.

즉, 마이크로디스플레이 기술의 미래는 단일 기술의 승부로 귀결되기보다는, 응용 환경과 시스템 요구조건에 따라 서로 다른 기술이 공존하며 진화하는 다층적 구조로 전개될 가능성이 크다. 이러한 맥락에서 OLED 기반 마이크로디스플레이는 단순한 대안 기술이 아니라, AR/VR 시대에 디스플레이 기술이 어떻게 진화해야 하는지를 보여주는 중요한 시험대로 기능하고 있다.

3.7. AR/VR 시스템 관점의 분석 및 측정

AR/VR용 마이크로디스플레이의 성능은 단일 수치로 정의되기 어렵다. 해상도, 휘도, 명암비, 응답 속도와 같은 지표는 모두 중요하지만, 이들 성능은 디스플레이 소자 단독으로 결정되기보다 광학 엔진 및 구동 조건과 결합된 상태에서 최종 사용자 경험으로 나타난다. 따라서 AR/VR 마이크로디스플레이의 측정은 기존 평면 디스플레이에서 사용되던 측정 방식만으로는 충분하지 않으며, 근접 시청 환경과 광학 결합을 반영한 새로운 측정 관점이 요구된다.

3.7.1. 해상도 측정: PPI에서 각해상도(PPD)로

마이크로디스플레이의 해상도를 논할 때 가장 흔히 사용되는 지표는 픽셀 밀도(PPI)이지만, AR/VR 환경에서는 이 값만으로 시각적 품질을 설명하기 어렵다. 사용자의 눈과 디스플레이 사이 거리가 매우 짧고, 중간에

광학계가 개입되는 구조에서는 실제로 사용자가 인지하는 해상도는 시야각 대비 픽셀 밀도, 즉 각해상도 (pixels per degree, PPD)에 의해 결정된다.

각해상도는 디스플레이 해상도, 광학 배율, 시야각이 결합된 결과로 나타나며, 동일한 PPI를 가진 디스플레이라 하더라도 광학 설계에 따라 체감 해상도는 크게 달라질 수 있다. 따라서 AR/VR 마이크로디스플레이의 해상도 측정에서는 단순한 패널 해상도 측정이 아니라, 실제 광학 엔진을 통과한 영상 기준에서의 각해상도 평가가 필수적이다.

3.7.2. 휘도 및 명암비 측정: 절대 휘도와 ACR의 구분

휘도 측정 역시 AR/VR 환경에 따라 서로 다른 의미를 가진다. VR 디스플레이의 경우 외부 광이 차단된 상태에서 사용되므로, 디스플레이 자체의 절대 휘도와 명암비가 비교적 직접적으로 체감 화질로 연결된다. 이때는 일반적인 휘도계나 이미징 포토미터를 이용한 패널 휘도 측정이 유효한 지표가 된다.

반면 AR 디스플레이에서는 절대 휘도보다 주변광 대비 명암비 (Ambient Contrast Ratio, ACR)가 핵심적인 성능 지표로 작용한다. AR 환경에서는 밝은 실외광이 사용자의 눈에 직접 유입되며, 가상 영상은 이 배경 위에서 식별되어야 한다. 따라서 AR 마이크로디스플레이의 측정에서는 디스플레이의 휘도를 단독으로 측정하는 것이 아니라, 실제 주변광 조건을 패널 뒤에서 입사한 상태에서 가상 영상이 어느 정도의 대비로 인지되는지를 평가해야 한다.

이러한 측정은 광도파관을 포함한 광학 컴바이너를 통과한 후의 출사 광을 기준으로 이루어져야 하며, 디스플레이 단계에서의 휘도 수치와 최종 눈 위치의 휘도 사이에는 상당한 차이가 발생한다. 이는 AR 마이크로디스플레이의 성능 평가가 본질적으로 시스템 레벨 측정임을 의미한다.

3.7.3. 각도 분포 측정과 광도파관 결합 평가

AR/VR 마이크로디스플레이에서 빛의 각도 분포는 해상도나 휘도 못지않게 중요한 특성이다. 디스플레이에서 방출된 빛의 각 분포는 광도파관과의 결합 효율, 출사 동공 확장, 아이박스 크기를 직접적으로 결정한다. 따라서 발광 소자의 총 광량만을 측정하는 방식은 AR

시스템의 실제 성능을 반영하지 못한다.

이를 위해 각도 분해 측정 (angle-resolved measurement) 또는 후면 초점면 (Fourier-plane) 기반 측정이 활용된다. 이러한 측정 방식은 픽셀에서 방출되는 빛이 어떤 각도 범위에 분포하는지를 시각화할 수 있으며, 광도파관 결합에 유리한 각 영역으로 얼마나 많은 광이 분포하는지를 정량적으로 평가할 수 있다.

각도 분포 측정은 단순히 소자 특성을 확인하는 데 그치지 않고, 광학 컴바이너 설계와의 공동 최적화를 가능하게 한다. 예를 들어 특정 각도 범위에서 광 출력이 집중되도록 설계된 마이크로디스플레이는, 동일한 절대 휘도를 가지더라도 광도파관 결합 효율이 크게 향상될 수 있다.

3.7.4. 응답 속도 및 구동 특성 측정

AR/VR 디스플레이의 응답 속도 측정은 주사율과 발광 지속 시간 (duty cycle)을 함께 고려해야 한다. 특히 VR 환경에서는 저지속 (low-persistence) 구동이 사용되기 때문에, 단순한 상승·하강 시간 측정만으로는 실제 사용 조건을 반영하기 어렵다. 프레임 주기 내에서 발광 타이밍과 지속 시간을 시간 분해 측정으로 분석함으로써, 잔상 억제와 체감 휘도 간의 트레이드오프를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

또한 마이크로디스플레이에서는 픽셀 크기 축소에 따라 구동 전압, 전류 안정성, 픽셀 간 특성 편차가 응답 특성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 응답 속도 측정은 발광 소자뿐 아니라, 백플레인 회로와의 결합 상태를 포함한 조건에서 수행되어야 한다.

3.7.5. 마이크로 디스플레이 측정의 핵심: 소자 평가보다 중요한 시스템 평가

AR/VR 마이크로디스플레이 측정의 가장 중요한 특징은, 평가 대상이 더 이상 디스플레이 소자 단독이 아니라는 점이다. 동일한 마이크로디스플레이 소자라 하더라도 광도파관 구조, 광학 결합 방식, 구동 조건에 따라 사용자에게 전달되는 영상 품질은 크게 달라진다. 따라서 마이크로 디스플레이의 성능 분석을 위해서는 단일 픽셀 소자의 성능뿐 아니라, 광학 시스템 전체의 성능 파악이 필수적이다. 이러한 관점에서 AR/VR 마이크로디스플레이의 측정은 디스플레이 패널 기술과 광학

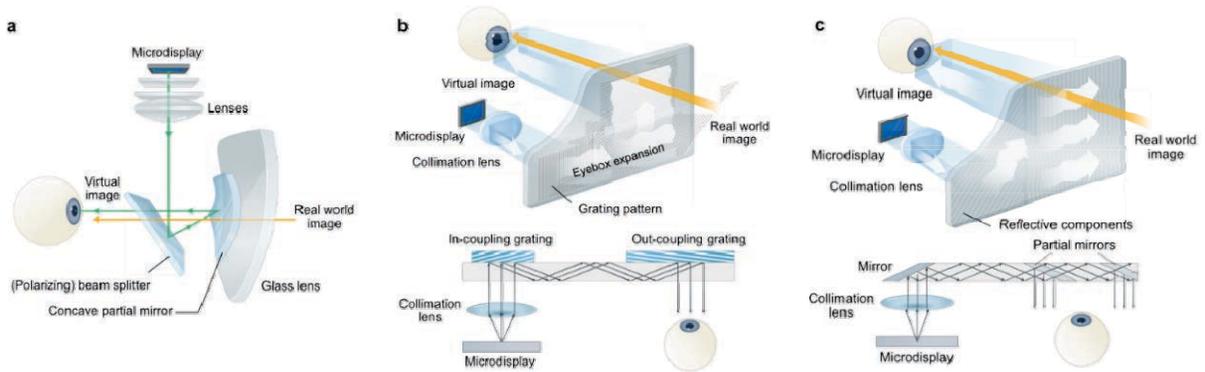


그림 5. Optical Combiner의 구조. (a) Birdbath 방식, (b) 회절 광도파관 방식, (c) 기하 광도파관 방식

엔진 설계 간의 조합을 정량화하는 작업이라고 할 수 있다. 즉, 각해상도, ACR, 각도 분포, 응답 특성에 대한 정밀한 측정은 어떤 기술이 더 우수한가를 판단하기보다 어떤 설계 조합이 주어진 응용 환경에 가장 적합한가를 결정하는 과정이다.

3.8. AR 헤드셋의 광학 컴바이너 (Optical Combiner) 기술과 디스플레이

AR 헤드셋에서 마이크로디스플레이는 단독으로 사용자에게 영상을 전달하지 않는다. 디스플레이에서 생성된 영상은 광학 컴바이너 (optical combiner)를 통해 사용자의 눈으로 전달되며, 이 과정에서 영상의 밝기, 해상도, 시야각, 아이박스 특성은 근본적으로 재정의된다. 즉 AR 시스템에서 최종 화질을 결정하는 것은 마이크로디스플레이와 광학 컴바이너가 결합된 결과이며, 두 요소는 분리해서 논의될 수 없다.

3.8.1. 광학 컴바이너의 역할과 기본 구조

광학 컴바이너의 핵심 역할은 디스플레이에서 생성된 가상 영상을 현실 세계의 시야 위에 정확하게 중첩시키는 것이다. 이를 위해 컴바이너는 디스플레이 광을 사용자의 눈 방향으로 유도하는 동시에, 외부에서 들어오는 현실 광은 최대한 왜곡 없이 통과시켜야 한다. 이러한 상충하는 기능은 AR 시스템 설계를 복잡하게 만드는 근본적인 원인이며, 대부분의 AR 광학 컴바이너는 투과형 (optical see-through) 구조를 기반으로 한다(그림 5).^[15]

대표적인 광학 컴바이너 구조로는 자유형 프리즘 (birdbath) 방식과 광도파관 기반 방식이 있다. 프리즘 방식은 비교적 높은 광효율과 단순한 설계가 가능하지

만, 부피와 무게가 커져 경량 AR 글래스 구현에는 한계가 있다. 반면 광도파관 기반 컴바이너는 슬림한 폼팩터와 확장된 아이박스를 구현할 수 있어 차세대 AR 글래스의 핵심 기술로 주목받고 있다.

3.8.2. 광도파관 기반 컴바이너와 광손실

광도파관 기반 광학 컴바이너에서는 디스플레이에서 나온 빛이 입사 결합부 (in-coupler)를 통해 광도파관 내부로 들어간 후, 내부 반사 및 회절 구조를 따라 전파되며,^[16] 출사 결합부 (out-coupler)를 통해 눈으로 전달된다. 이 과정에서 아이박스를 확장하기 위해 다중 출사 구조가 사용되며, 그 결과 광은 여러 경로로 분산된다. 이러한 구조는 본질적으로 상당한 광손실을 수반한다. 디스플레이에서 생성된 광 중 일부만이 실제로 사용자의 눈에 도달하며, 나머지는 결합 효율, 회절 효율, 내부 흡수 및 산란 과정에서 손실된다. 따라서 광도파관 기반 AR 시스템에서는 광학 컴바이너가 밝기를 크게 억제하는 요소로 작용하며, 이 손실을 보상하기 위해 디스플레이 단계에서 매우 높은 휘도가 요구된다.

이 지점에서 마이크로디스플레이 기술 간의 차별성이 명확해진다. 동일한 광학 컴바이너를 사용하더라도, 디스플레이의 최대 휘도, 발광 각 분포, 편광 특성에 따라 최종 눈 위치에서의 체감 밝기는 크게 달라진다. 따라서 광학 컴바이너는 디스플레이에 기존과 다른 추가적인 조건을 부여한다. 기존 디스플레이는 단순히 밝고 해상도가 높은 것으로 충분하였으나, AR 디스플레이는 광학 컴바이너가 요구하는 입사 각 분포, 편광 상태, 공간적 균일성을 만족해야 한다. 이 때문에 AR용 마이크로디스플레이 개발에서는 소자 성능 향상과 함께, 광학

컴바이너와의 결합을 전제로 한 설계가 필수적이다.

3.8.3. 시야각 (Field of View)-아이박스 (Eyebox)

트레이드오프와 etendue

광학 컴바이너 설계에서 가장 중요한 제약 조건 중 하나는 시야각과 아이박스 사이의 trade-off이다. 시야각을 넓히기 위해서는 더 넓은 각도의 빛을 사용자 눈으로 전달해야 하는데, 반대로 아이박스를 확장하기 위해서는 빛을 공간적으로 분산시켜야 한다. 이 두 요구는 광학계에서 보존되는 etendue에 의해 동시에 만족되기 어렵다.

결과적으로 AR 광학 컴바이너 설계에서는 시야각, 아이박스, 휘도 사이에서 불가피한 균형점이 형성되며, 이 균형은 디스플레이의 발광 특성과 직결된다. 예를 들어 특정 각도 범위에 광을 집중적으로 방출할 수 있는 디스플레이는 동일한 총 광량을 가지더라도 광도파관 결합 효율을 개선할 수 있으며, 이는 시스템 차원의 휘도 요구를 완화한다.

3.8.4. 광학 컴바이너는 병목이자 기회

광학 컴바이너는 AR 시스템에서 가장 큰 병목으로 인식되지만, 동시에 디스플레이 기술 차별화를 가능하게 하는 핵심 요소이기도 하다. 동일한 마이크로디스플레이라 하더라도 어떤 광학 컴바이너와 결합되느냐에 따라 최종 성능은 크게 달라지며, 반대로 광학 컴바이너의 한계를 정확히 이해하고 이에 맞춘 디스플레이를 설계할 경우 시스템 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

결국 AR 헤드셋의 광학 엔진은 마이크로디스플레이-광학 컴바이너-구동 조건이 통합된 시스템으로 이해되어야 하며, 광학 컴바이너는 이 시스템에서 디스플레

이 기술의 방향성을 규정하는 중요한 기준점으로 작용한다. 이러한 이유로 차세대 AR 기술 경쟁은 단순한 디스플레이 성능 경쟁을 넘어, 광학 컴바이너와의 공동 설계를 얼마나 정교하게 수행할 수 있는가의 문제로 확장되고 있다.

3.9 VR 헤드셋의 렌즈 광학계 기술과 디스플레이

VR 헤드셋에서 렌즈 광학계는 디스플레이 이후 (back-end)에 배치되어, 마이크로디스플레이에서 생성된 영상을 사용자의 시야 전체로 투영하는 역할을 수행한다. AR 시스템에서 광학 컴바이너가 현실 영상과 가상 영상을 중첩하는 핵심 요소라면, VR에서는 렌즈 광학계가 시야각 (Field of View), 각해상도 (Pixels Per Degree, PPD), 아이박스 (Eyebox), 그리고 왜곡 특성을 동시에 규정하는 중심 요소로 기능한다. 특히 VR은 외부 광을 차단하는 폐쇄형 구조를 가지므로, AR에서와 같이 투과율이나 주변광 대비 (ACR)를 고려할 필요는 상대적으로 적다. 대신, 디스플레이에서 방출된 광을 얼마나 효율적으로 눈으로 전달하고, 제한된 폼팩터 내에서 넓은 시야각과 충분한 각해상도를 동시에 확보할 수 있는지가 광학계 설계의 핵심 과제로 작용한다.

3.9.1 VR 광학계의 구성과 설계 제약

전형적인 VR 광학계는 마이크로디스플레이, 접안 렌즈 (eyepiece), 그리고 렌즈 왜곡을 보정하기 위한 소프트웨어 기반 렌더링 파이프라인으로 구성된다. 디스플레이는 고정된 평면에 위치하며, 렌즈는 짧은 디스플레이-눈 거리에서 가상 영상을 무한대 또는 특정 거리로 형성하도록 설계된다. 이 과정에서 VR 렌즈는 매우 짧

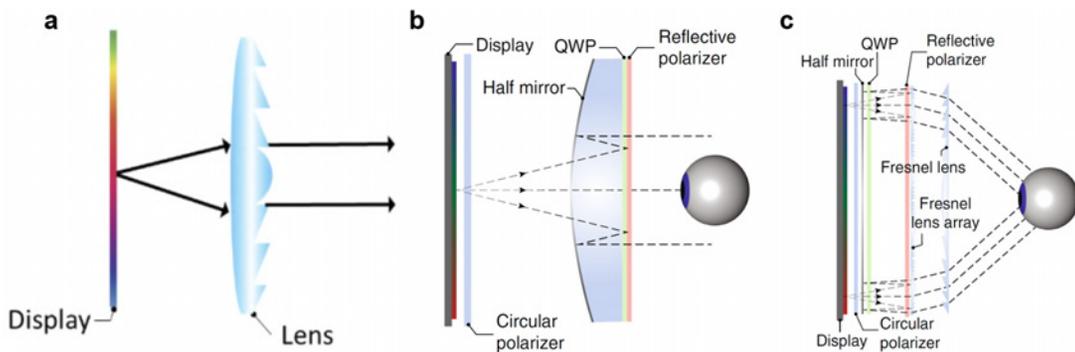


그림 6. VR 광학계를 구성하는 (a) Fresnel Lens, (b) Pancake Lens, 그리고 (c) Hybrid Lens

은 초점거리와 큰 개구각을 동시에 요구받으며, 강한 비구면 (aspheric) 특성을 필연적으로 동반한다. 이에 따라 배럴 왜곡과 주변부 해상도 저하가 발생하며, 이러한 광학적 왜곡은 렌즈 단독으로 제거되기보다는 디스플레이 구동 단계에서의 사전 왜곡 (pre-distortion) 렌더링을 통해 보정되는 것이 일반적이다(그림 6).

3.9.2 Fresnel 렌즈: 구조적 단순성과 한계

Fresnel 렌즈는 두꺼운 굴절 렌즈를 동심원 형태의 단차 구조로 분해함으로써 렌즈의 두께와 무게를 줄이는 방식이다. 이러한 구조는 비교적 간단한 설계로 넓은 시야각을 확보할 수 있어, 상용 VR 헤드셋에서 오랫동안 표준적인 선택으로 사용되어 왔다. 그러나 Fresnel 렌즈는 단차 구조로 인해 필연적으로 산란 (scattering) 과 고스트 이미지, 링 형태의 광학적 결함을 동반한다. 이러한 결함은 고대비 영상에서 더욱 두드러지게 인지되며, 명암비가 높은 자발광 디스플레이에서는 화질 저하 요소로 작용한다. 따라서 Fresnel 렌즈는 경량화와 비용 측면에서는 유리하지만, 고화질을 지향하는 최신 VR 시스템에서는 점차 한계를 드러내고 있다.

3.9.3 Pancake 렌즈: 폼팩터 개선과 광손실 증가

Pancake 렌즈는 다중 반사 구조를 이용해 광학 경로를 접는 (folded optics) 방식으로, VR 헤드셋의 두께를 획기적으로 줄일 수 있는 광학계이다. 일반적으로 편광 제어 요소와 반사면을 결합하여, 빛이 렌즈 내부에서 여러 번 반사되도록 설계된다. 이 방식은 짧은 디스플레이-눈 거리에서도 넓은 시야각을 확보할 수 있어, 최근 고급형 VR 헤드셋에서 적극적으로 채택되고 있다.

다만 Pancake 렌즈는 구조적으로 큰 광손실을 수반한다. 다중 반사와 편광 변환 과정에서 광량이 단계적으로 감소하며, 결과적으로 사용자 눈에 도달하는 광은 디스플레이가 생성한 광의 일부에 불과하다. 따라서 Pancake 렌즈를 사용하는 VR 시스템에서는 디스플레이 단계에서 더 높은 휘도와 광출력 여유가 요구되어, 발광 소자의 더 높은 구동 안정성과 수명을 요구한다.

3.9.4 Hybrid 렌즈

Hybrid 렌즈는 Fresnel 구조와 굴절 렌즈, 혹은 부분적인 folded optics를 조합하여, 화질 · 효율 · 폼팩터

간의 균형을 맞추려는 접근 방식이다. 특정 영역에서는 Fresnel 구조를 활용해 경량화를 달성하고, 다른 영역에서는 굴절 렌즈를 사용해 산란과 왜곡을 완화하는 식의 설계가 대표적이다.

이러한 구조는 단일 렌즈 방식에 비해 설계 자유도가 높지만, 동시에 광학계 복잡도가 증가하며 제조 및 정렬 공정에 대한 요구 수준도 높아진다. 따라서 Hybrid 렌즈는 고성능 VR 시스템에서 제한적으로 적용되며, 디스플레이 특성과의 조합에 따라 성능 편차가 크게 나타날 수 있다.

3.9.5 렌즈 선택이 OLEDoS 사양에 미치는 영향

VR 렌즈 광학계의 선택은 OLEDoS의 요구 사양을 직접적으로 규정한다. Fresnel 렌즈를 사용하는 경우, 디스플레이에는 극단적인 고휘도보다는 균일한 발광과 낮은 산란 특성이 중요하게 작용한다. 반면 Pancake 렌즈에서는 구조적 광손실을 보상하기 위해 높은 순간 최대 휘도 (peak luminance)가 요구되며, 이는 OLED 소자의 전류 구동 능력과 수명관리에 더 높은 요구조건을 제시한다.

또한 렌즈의 배율과 왜곡 특성은 디스플레이 해상도 요구조건에도 영향을 미친다. 강한 왜곡 보정이 필요한 렌즈일수록, 디스플레이 중심부와 주변부의 유효 해상도 차이가 커지며, 이를 보상하기 위해 더 높은 패널 해상도와 정밀한 픽셀 제어가 요구된다. 이 과정에서 OLEDoS의 실리콘 CMOS 백플레인 은 고해상도 구현과 픽셀 단위 보정 측면에서 중요한 역할을 수행한다.

응답 속도 측면에서도 렌즈와 OLEDoS의 결합은 중요하다. 고배율 렌즈는 미세한 잔상과 시간 지연을 확대하여 인지시키기 때문에, OLED의 빠른 발광 응답 특성과 저지속 (low-persistence) 구동 능력은 VR 광학계에서 구조적 이점으로 작용한다. 이는 OLEDoS가 VR용 마이크로디스플레이로 높은 적합성을 가지는 핵심적인 이유 중 하나이다.

3.9.6 VR 렌즈 광학계는 디스플레이 성능을 재설계

VR 헤드셋에서 렌즈 광학계는 디스플레이 성능을 단순히 전달하는 요소가 아니라, 해상도, 휘도, 명암비, 체감 화질을 재정의하는 시스템 구성 요소이다. Fresnel, Pancake, Hybrid 렌즈는 각각 서로 다른 장점과 제약

을 가지며, 이 선택은 곧 OLEDoS의 휘도 요구, 해상도 사양, 구동 조건으로 귀결된다. 한편, 렌즈에서 발생하는 왜곡과 광학적 부담을 완화하기 위해 디스플레이의 폼팩터를 구부린 curved 디스플레이 기반 접근도 제안되어 왔으나, 마이크로디스플레이 단계에서의 구현 난이도, 공정 복잡성, 집적 수율 문제로 인해 현재 VR 시스템에서는 제한적으로만 검토되고 있다.

이러한 관점에서 VR 디스플레이 기술 경쟁은 패널 단독 성능의 문제가 아니라, 렌즈 광학계와의 결합을 전제로 한 시스템 최적화 문제로 이해되어야 한다. AR에서 광학 컴바이너가 디스플레이 기술의 방향성을 규정하듯, VR에서는 렌즈 광학계가 OLED 마이크로디스플레이의 설계 목표를 결정짓는 기준점으로 기능하고 있다.

4. 결론 및 전망

본 기획기사에서는 AR/VR 헤드셋에 적용되는 대표적인 마이크로디스플레이 기술인 LCoS, OLEDoS, LEDoS를 동일한 비교 프레임 내에서 살펴보고, 각 기술이 서로 다른 응용 환경에서 어떤 강점과 한계를 가지는지를 정리하였다. 이를 통해 마이크로디스플레이 기술 경쟁이 단순한 성능 우열의 문제가 아니라, 응용 환경과 시스템 요구조건에 따른 선택의 문제임을 확인하였다.

VR 환경에서는 외부 광이 차단된 조건에서 높은 명암비와 빠른 응답 특성이 사용자 경험을 좌우하며, 동시에 디스플레이 이후에 배치되는 렌즈 광학계가 시야각, 채감 해상도, 밝기 요구조건을 결정하는 핵심 요소로 작동한다. VR 헤드셋에 적용되는 Fresnel, Pancake, Hybrid 렌즈는 각각 폼팩터, 화질, 광효율 측면에서 서로 다른 트레이드오프를 가지며, 이 선택은 곧 디스플레이의 해상도, 휘도 여유, 구동 안정성에 직접적인 영향을 미친다. 이 부분에서 자발광 구조를 기반으로 한 OLEDoS는 매우 현실적인 해법으로 자리 잡고 있다. 특히 저지속 (low-persistence) 구동과 고주사율 환경에서 OLED의 빠른 응답 특성과 낮은 흑레벨은 몰입감을 향상시키는 핵심 요소로 작용한다. 반면 AR 환경에서는 광도파관 기반 광학 컴바이너로 인한 구조적 광손실과 밝은 주변광 조건이 동시에 존재하며, 이에 따라 디스플

레이 단계에서의 고휘도와 주변광 대비 명암비가 결정적인 요구조건으로 부상한다. 이 맥락에서 LEDoS는 물리적 잠재력 측면에서 매우 매력적인 후보이지만, 제조 공정과 집적 수율이라는 현실적인 과제가 여전히 남아 있으며, 현 시점 가장 안정적인 솔루션은 LCoS이다.

중요한 점은 이러한 기술들이 상호 배타적으로 경쟁하는 관계라기보다, 서로 다른 시간축과 응용 영역에서 공존하며 발전할 가능성이 크다는 점이다. 단기적으로는 LCoS와 OLEDoS가 각자의 장점을 바탕으로 AR과 VR 시장을 견인하고, 중장기적으로는 LEDoS를 포함한 새로운 발광 기술이 점진적으로 적용 범위를 넓혀갈 것으로 예상된다. 이 과정에서 디스플레이 기술의 선택은 소자 성능만이 아니라, 광학 컴바이너와의 결합, 구동 방식, 측정 방법까지 포함한 시스템 최적화 문제로 귀결될 것이다.

특히 본 기사에서 강조한 정밀한 측정은 향후 마이크로디스플레이 기술 발전을 이끌어가는 중요한 기준을 제공한다. AR/VR 환경에서는 더 이상 PPI나 패널 휘도와 같은 단일 지표만으로 화질을 설명할 수 없으며, 각 해상도 (PPD), 주변광 대비 명암비, 발광 각 분포, 시간 응답 특성과 같은 시스템 레벨 지표가 핵심적 평가 기준이다. 이는 디스플레이 개발과 광학 설계, 구동 회로 설계가 분리될 수 없음을 의미한다.

이러한 맥락에서 OLED 기반 마이크로디스플레이는 단순히 기존 기술의 연장선이 아니라, AR/VR 시대에 요구되는 디스플레이-광학-구동 통합 설계가 어떤 방향으로 진화해야 하는지를 보여주는 중요한 사례라고 할 수 있다. 향후 AR/VR 기술 경쟁은 특정 디스플레이 기술의 승패로 귀결되기보다는, 응용 환경에 맞는 최적의 조합을 얼마나 정교하게 구현할 수 있는가에 의해 결정될 가능성이 크다. 그리고 마이크로디스플레이는 그 중심에서 차세대 몰입형 디스플레이 플랫폼의 핵심 기술로 기능할 것이다.

참고문헌

- [1] I. Sim et al., Nature Reviews Electrical Engineering, 2, 634-650 (2025).
- [2] A. K. Bhowmik, J. Soc. Inf. Disp. 32, 605-646 (2024).

- [3] J. Xiong, E. L. Hsiang, Z. He, T. Zhan and S.T. Wu, *Light Sci. Appl.* 10, 216 (2021).
- [4] Y. Huang et al., *Light Sci. Appl.* 9, 105 (2020).
- [5] K. Yin et al., *Light. Sci. Appl.* 11, 161 (2022).
- [6] Y.-W. Li et al., *J. Opt. Microsyst.* 3, 041205 (2023).
- [7] S. Hillebrandt et al., *Adv. Mater.* 36, 2300578 (2024).
- [8] G. Tan et al., *Opt. Express* 25, 33629 (2017).
- [9] N.C. Giebink et al., *J. Appl. Phys.* 105, 124514 (2009).
- [10] J. Kang et al., *J. Inf. Disp.* 25, 219-234 (2024).
- [11] K. Behrman & I. Kymissis, *Nat. Electron.* 5 564-573 (2022).
- [12] H. Cho et al., *J. Soc. Info Disp.* 31, 289-297 (2023).
- [13] L. Zhang et al., *J. Soc. Inf. Disp.* 26, 137-145 (2018).
- [14] J. Chen et al., *Adv. Opt. Mater.* 12, 2300873 (2024).
- [15] Y. Zhang & F. Fang, *Precis. Eng.* 60, 482-496 (2019).
- [16] J.-Y. Wu & J. Kim, *Opt. Express* 28, 6225-6241 (2020).

저자약력

김종찬



- 2014년 ~ 2021년 : Ph.D., University of Michigan, Electrical Engineering and Computer Science
- 2021년 ~ 2022년 : Postdoc, UC Berkeley, Lawrence-Berkeley National Lab
- 2023년 ~ 현재 : 연세대학교 디스플레이융합공학부 조교수
- 관심분야 : 차세대 디스플레이, 나노분광학, 나노광전소자, 엑시톤 기반 광소자, 차세대 광센서