

과제 소개

실사 객체 폐색 가능한 홀로그래픽 증강현실 3D 근안디스플레이 기술 개발

박재형 교수 / 서울대학교 전기·정보공학부

요약

증강현실(Augmented Reality, AR) 근안디스플레이(Near-to-eye display, NED)는 사용자 전방의 실제 환경과 디지털 영상을 자연스럽게 결합하여 보여주는 차세대 인간-컴퓨터 인터페이스로 주목받고 있다. 그러나 현재 대부분의 광투과형 증강현실 근안디스플레이는 실사 환경으로부터의 빛과 디지털 영상으로부터의 빛을 단순히 더하는 방식으로 동작하므로, 디지털 영상이 실제 물체를 가리지 못하고 항상 반투명하게 겹쳐 보이는 한계를 가진다. 이와 같은 폐색 부재는 야외 환경에서의 낮은 시인성, 가상 객체와 실제 객체 사이의 불명확한 깊이 순서, 낮은 실재감의 주요 원인이 된다. 본 연구개발 과제는 이러한 한계를 극복하기 위해 실사 객체 폐색이 가능한 홀로그래픽 증강현실 3D 근안디스플레이 기술을 개발하는 것을 목표로 한다. 특히 단일 공간광변조기 또는 공통 광학 구조를 활용하여 실사 객체 폐색과 디지털 영상 표시를 동시에 구현하고, 나아가 가변초점 3D 영상, 홀로그래픽 3D 영상, 그림자 표현, foveated holographic display 등 고도화된 3D 증강현실 표시 기술로 확장하는 연구를 수행하였다. 본 과제는 연구재단의 지원을 받아 2022년 3월에 시작되어 2027년 2월 종료 예정인 5년 과제로, 현재까지 단일 SLM 기반 2D hard-edge occlusion, 가변초점 3D occlusion, 풀 컬러 홀로그래픽 3D 영상과 실사 객체 폐색의 동시 구현, 폐색 기반 그림자 표현, 홀로그래픽 및 초다시점 근안디스플레이 화질 향상 기술 등 다양한 원천 성과를 도출하였다.

I. 연구개발 과제의 배경 및 필요성

증강현실(Augmented Reality, AR) 근안디스플레이(Near-to-eye display, NED)는 사용자가 안경과 같은 형태로 착용하고, 사용자 전방의 실제 환경 위에 디스플레이가 생성한 디지털 정보를 겹쳐 볼 수 있도록 하는 디스플레이 시스템이다. 최근 인공지능, 공간 컴퓨팅, 메타버스, 원격 협업, 실시간 정보 안내 기술이 발전하면서 증강현실 근안디스플레이는 단순한 영상 표시 장치를 넘어 차세대 인간-AI 인터페이스의 핵심 플랫폼으로 인식되고 있다. 특히 사용자의 주변 환경을 직접 인지하고, 그 위에 필요한 정보를 공간적으로 정합하여 표시할 수 있다는 점에서 증강현실 근안디스플레이는 스마트폰 이후의 개인형 정보 단말로 발전할 가능성을 가진다.

증강현실 근안디스플레이는 실사 환경을 사용자에게 전달하는 방식에 따라 크게 비디오투과(video see-through) 방

식과 광투과(optical see-through) 방식으로 구분된다. 비디오투과 방식은 카메라로 실사 환경을 촬영하고 이를 디스플레이 패널에 다시 표시하는 구조이므로, 디지털 영상과 실사 영상 사이의 합성 및 폐색 처리가 상대적으로 용이하다. 그러나 실사 환경의 해상도, 화각, 동적 범위, 지연 시간, 자연스러운 3D 깊이감 등이 카메라와 디스플레이의 성능에 의해 제한되며, 사용자가 실제 세계를 직접 보는 것이 아니라 카메라로 재구성된 영상을 보는 구조라는 근본적 한계를 가진다. 반면 광투과 방식은 사용자가 전방의 실제 환경을 광학적으로 직접 보면서, 그 위에 디지털 영상만을 광학적으로 합성하는 방식이다. 따라서 실사 환경의 자연스러운 해상도와 깊이감을 유지할 수 있고, 안경형 장치로 발전할 가능성이 높다.

하지만 현재 대부분의 광투과형 증강현실 근안디스플레이는 waveguide, bird-bath optics 등 optical combiner를 이용하여 실사 환경의 빛과 디지털 영상의 빛을 단순히 더해주는 방식으로 동작한다. 이 경우 디지털 영상은 언제나 실제 배경 위에 반투명하게 표시된다. 예를 들어 디지털 캐릭터나 정보 창이 사용자와 실제 물체 사이에 위치하도록 렌더링 되더라도, 실제 물체로부터 오는 빛을 차단하지 못하므로 디지털 영상 뒤의 실제 물체가 그대로 보인다. 이는 가상 물체가 실제 공간에 존재한다는 느낌을 약화시키며, 사용자에게 불명확한 깊이 순서를 제공한다.

실사 객체 폐색은 이러한 문제를 해결하기 위한 핵심 기술이다. 폐색은 어떤 물체가 다른 물체를 가리는 현상으로, 인간 시각계가 물체 간의 전후 관계를 판단하는 가장 강력한 깊이 단서 중 하나이다. 광투과형 증강현실에서 디지털 영상이 실제 물체보다 앞에 위치한다면, 디지털 영상은 실제 물체의 해당 부분을 가려야 한다. 이 상호 가려짐이 구현될 때 사용자는 가상 물체와 실제 물체가 동일한 공간 안에 존재한다고 더 자연스럽게 인지할 수 있다.

또한 폐색은 야외 시인성 확보 측면에서도 매우 중요하다. 광투과형 증강현실 근안디스플레이에서는 디지털 영상이



<그림 1> 광투과형 증강현실 근안디스플레이에서 실사 객체 폐색의 필요성. 기존 광투과형 증강현실에서는 디지털 영상이 실제 배경 위에 반투명하게 중첩되지만, 폐색 지원 증강현실에서는 디지털 영상 위치의 실사 배경 빛을 선택적으로 차단하여 높은 시인성과 명확한 깊이 순서를 제공할 수 있다.

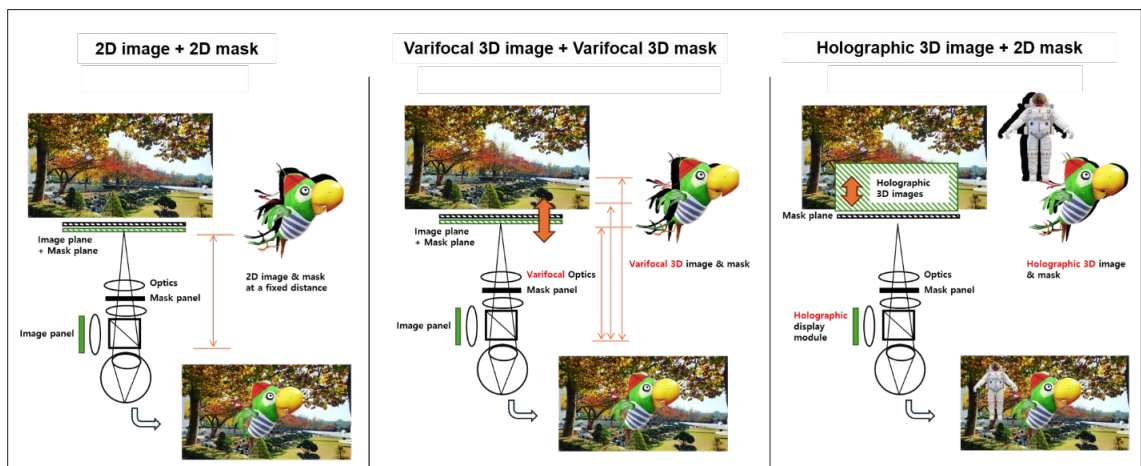
밝은 실사 배경 위에 중첩되므로, 야외와 같이 배경 휘도가 매우 높은 환경에서는 디지털 영상이 쉽게 묻혀 보이지 않는다. 디지털 영상의 휘도를 무작정 높이는 방식은 마이크로디스플레이 패널의 휘도 한계, optical combiner의 낮은 광효율, 배터리 소모 문제로 인해 실용적 한계가 명확하다. 반면 디지털 영상이 표시되는 영역의 실사 배경 빛을 선택적으로 차단할 수 있다면, 훨씬 낮은 영상 휘도에서도 높은 명암비와 시인성을 확보할 수 있다.

본 연구개발 과제는 이러한 문제의식에서 출발하였다. 즉, 광투과형 증강현실 근안디스플레이에서 실사 객체 폐색을 구현하고, 이를 단순한 2D 영상 표시가 아니라 홀로그래픽 3D 영상 표시와 결합함으로써, 시인성, 깊이감, 실재감을 동시에 향상시키는 새로운 근안디스플레이 원천 기술을 개발하고자 하였다.

II. 연구개발 과제의 목표와 접근 방법

본 과제의 최종 목표는 실사 객체 폐색이 가능한 작은 크기의 홀로그래픽 증강현실 3D 근안디스플레이 기술을 개발하는 것이다. 이를 위해 연구계획 단계에서 다음과 같은 핵심 목표를 설정하였다.

첫째, 하나의 공간광변조기(Spatial Light Modulator, SLM)를 이용하여 디지털 영상 표시와 실사 객체 폐색을 동시에 구현하는 것이다. 실사 객체의 폐색 기술은 폐색 마스크의 광학적 위치에 따라 마스크가 근안디스플레이면에 존재하는 soft-edge occlusion과 실제 물체면에 존재하는 hard-edge occlusion으로 나눌 수 있다. Soft-edge occlusion의 경우 마스크면과 디지털 영상 간의 광학적 거리 차이로 인하여 명확하고 해상도가 높은 폐색이 불가능하므로, 본 과제에서는 hard-edge occlusion 기술에 초점을 맞추었다. 이러한 hard-edge occlusion을 위한 기존의 방식은 대개 실사 객체 폐색을 위한 마스크 패널과 디지털 영상을 표시하기 위한 디스플레이 패널을 별도로 사용한다. 이 경우 두 패널을 위한 광학계가 각각 필요하고, 실사 영상 릴레이 광학계, 영상 투사 광학계, 광결합 광학계가 복잡하게 결합되므로 시스템이 매



<그림 2> 본 과제의 연구개발 목표와 단계별 접근 방법. (좌) 단일 SLM 기반 2D 폐색, (중) 가변초점 3D 폐색, (우) 홀로그래픽 3D 영상과 폐색의 결합

우 커진다. 또한 두 패널 사이의 공간적·시간적 정렬이 정확하지 않으면 디지털 영상과 페색 마스크 사이에 mismatch가 발생한다. 본 과제에서는 단일 SLM 또는 공통 광학계를 활용하여 표시와 페색을 동시에 구현함으로써 이러한 문제를 근본적으로 줄이고자 하였다.

둘째, 실사 객체 페색 마스크와 디지털 영상 사이의 per-pixel matching을 구현하는 것이다. 페색 마스크는 디지털 영상이 실제 물체를 가려야 하는 위치와 정확히 일치해야 한다. 특히 근안디스플레이에서는 사용자의 눈과 광학계 사이의 상대 위치, 영상 형성 거리, 실사 환경의 깊이 등이 복합적으로 작용하므로, 페색 마스크와 영상의 정합은 기술적으로 매우 중요한 문제이다. 단일 SLM 기반 구조는 동일한 픽셀 또는 동일한 광학 경로를 사용하므로, 두 개의 패널을 사용하는 구조에 비해 per-pixel matching 측면에서 큰 장점을 가진다.

셋째, 실사 객체 페색 마스크의 광학적 깊이를 동적으로 제어하는 것이다. 단순한 2D 증강현실 영상에서는 페색 마스크가 고정된 영상면에 형성되어도 충분할 수 있다. 그러나 3D 증강현실에서는 디지털 영상이 여러 깊이에 표시될 수 있으며, 이때 페색 마스크도 해당 디지털 영상의 깊이에 맞추어 형성되어야 한다. 특히 홀로그래픽 3D 영상은 실제 3D 파면을 재생하므로, 페색 역시 깊이 정보를 반영하여야 자연스러운 실재감을 얻을 수 있다.

넷째, 페색 비율 또는 디지털 영상의 투명도를 제어하는 것이다. 증강현실에서는 모든 디지털 객체가 항상 완전히 불투명할 필요는 없다. 정보 창, 반투명 객체, 그림자, 조명 효과 등 다양한 표현을 위해 실사 배경 차단 비율과 디지털 영상 밝기를 독립적으로 제어할 수 있어야 한다. 본 과제에서는 SLM의 고속 구동 및 시분할 구동을 이용하여 이러한 표현 자유도를 확보하는 것을 목표로 하였다.

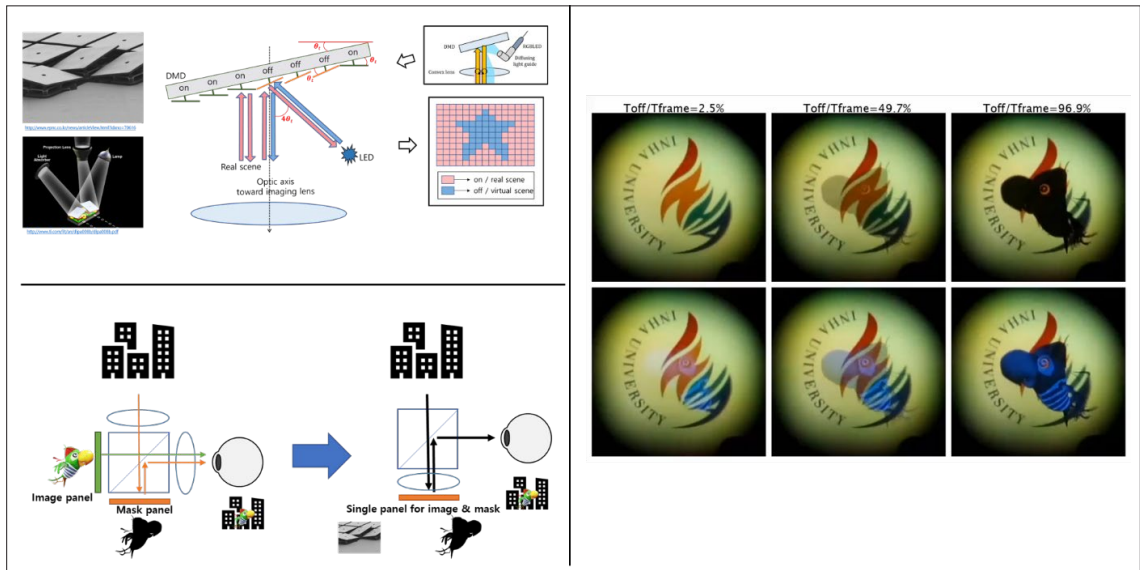
본 과제는 이러한 목표를 달성하기 위해 단계적으로 연구를 수행하였다. 1차년도에는 단일 SLM 기반 3D 페색 아이디어를 검증하고, 기존 3D 페색 기법들을 조사·분석하였다. 2차년도에는 가변초점 3D 영상과 3D 페색 마스크를 결합한 근안디스플레이 원리 구현에 집중하였다. 3차년도에는 풀컬러 홀로그래픽 3D 영상 표시와 실사 객체 페색을 결합한 benchtop 시스템을 구현하였다. 4차년도에는 시스템 form factor 개선, 페색을 활용한 그림자 표현, 동적 푸리에 필터링을 고려한 홀로그램 합성 알고리즘 개발 등을 수행하였다. 마지막 5차년도에는 시스템 고도화와 응용 확장을 추진하고 있다.

Ⅲ. 주요 연구개발 내용 및 성과

1. 단일 SLM 기반 2D 영상 표시 및 2D hard-edge occlusion

본 과제의 출발점은 하나의 SLM을 이용하여 디지털 영상 표시와 실사 객체 페색을 동시에 구현하는 기술이다. 기존의 hard-edge occlusion 구조에서는 마스크 패널과 디스플레이 패널이 별도로 존재하고, 각각의 광학 경로가 필요하다. 이에 비해 본 연구에서는 DMD(Digital Micromirror Device)의 이진 픽셀 거울 동작과 고속 구동 특성을 활용하여, 하나의 DMD가 실사 객체에 대해서는 페색 마스크로, 디지털 영상에 대해서는 표시 패널로 동작하도록 하였다.

〈그림 3〉의 좌상단에서 보는 바와 같이 DMD의 각 픽셀 거울은 두 개의 기울어진 상태 중 하나를 선택할 수 있다. 실사 환경으로부터 들어온 빛이 DMD에 결상되었을 때 특정 방향으로 반사되면 다시 사용자 눈으로 되돌아가 실사 장면



<그림 3> 단일 DMD 기반 2D 영상 표시 및 실사 객체 폐색 구조. (좌상단) DMD의 이진 거울 각도를 이용한 실사 객체 빛의 차단 및 디지털 영상 조명의 눈으로의 전달 동시 구현, (좌하단) 두 개의 SLM과 별도 광학계를 사용하는 기존 구조와 하나의 SLM과 공유 광학계를 사용하는 제안 구조의 비교, (우) 실험 결과 예시 (Y.-G. Ju, M.-H. Choi, P. Liu, B. Hellman, T. L. Lee, Y. Takashima, and J.-H. Park, “Occlusion capable optical-see-through near-eye display using a single digital micromirror device,” *Optics Letters* 45(13), 3361-3364 (2020).)

으로 보이고, 반대 방향으로 반사되면 사용자 눈으로 전달되지 않아 해당 부분이 폐색된다. 반대로 디지털 영상용 조명은 실사 빛이 차단되는 방향에서 DMD에 입사하도록 구성할 수 있으며, 이 경우 실사 빛을 차단하는 픽셀이 디지털 영상의 밝은 픽셀로 동작하게 된다. 이 원리를 이용하면 하나의 DMD 픽셀이 실사 객체 폐색과 디지털 영상 표시라는 두 가지 역할을 동시에 수행할 수 있다.

이 구조의 중요한 장점은 두 가지이다. 첫째, 마스크와 디스플레이가 동일한 SLM에서 구현되므로 마스크와 영상 사이의 픽셀 정렬 문제가 근본적으로 해소된다. 둘째, 실사 결상 광학계와 디지털 영상 투사 광학계를 공유할 수 있으므로 전체 광학계의 부피를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 편광 기반 double-pass 광학 구조를 이용하여 실사 환경의 결상, DMD에서의 선택적 폐색, 폐색된 실사 장면의 재결상, 디지털 영상의 투사를 하나의 공유 광학 구조 안에서 구현하였다.

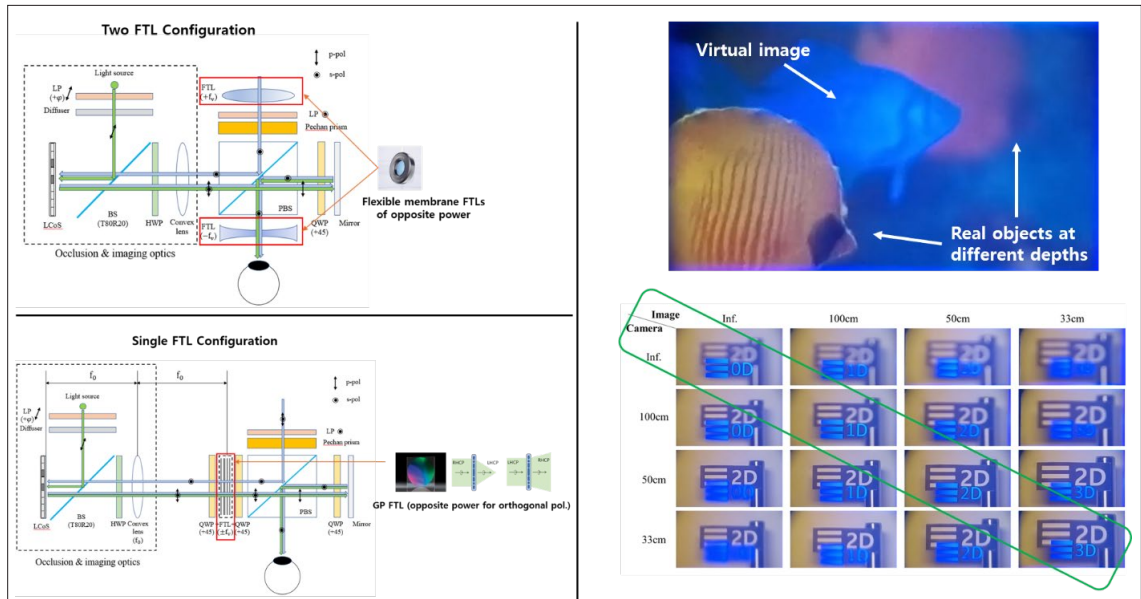
이 연구는 본 과제의 핵심 아이디어를 형성한 선행 기반이 되었으며, 이후 가변초점 3D 폐색과 홀로그래픽 3D 폐색으로 확장되는 출발점이 되었다. 특히 단일 패넌을 이용한 hard-edge occlusion은 기존 두 패넌 기반 구조의 복잡성을 줄이고, 폐색 마스크와 영상의 per-pixel matching을 자연스럽게 확보할 수 있다는 점에서 본 과제의 원천성을 잘 보여준다.

2. 가변초점 3D 영상과 가변초점 3D 폐색 마스크의 동시 구현

단일 SLM 기반 2D 폐색 기술은 디지털 영상과 폐색 마스크가 하나의 고정 영상면에 형성되는 경우에 효과적이다. 그러나 사용자에게 온전한 3D 정보를 제공하기 위하여 실제 증강현실 응용에서는 디지털 객체가 다양한 깊이 위치에 위치해야 하며, 이에 대응하는 폐색 마스크 역시 동일한 깊이에 형성되어야 한다. 이를 위해 본 과제에서는 가변초점(varifocal) 3D 영상과 가변초점 3D 폐색 마스크를 동시에 구현하는 광투과형 근안디스플레이 구조를 개발하였다.

본 연구에서는 Liquid Crystal on Silicon(LCoS) 기반 단일 SLM을 디지털 영상 표시와 폐색 마스크 표시 양쪽에 활용하고, 가변초점 렌즈를 이용하여 이 영상면과 마스크면의 광학적 깊이를 동적으로 조절하였다. 특히 실사 환경의 시인 깊이는 유지하면서, SLM이 생성하는 영상과 폐색 마스크의 깊이만 변화하도록 광학계를 설계하였다. 이를 통해 사용자는 실제 물체를 본래 위치에서 보면서도, 디지털 영상과 폐색 마스크가 원하는 깊이에 형성되는 증강현실 장면을 관측할 수 있다.

본 과제에서는 두 장의 편광 비의존적 가변초점 렌즈를 사용하는 구조와, 기하위상렌즈(Geometric Phase Lens, GP lens)의 편광 의존적 초점거리 반전 특성을 활용한 단일 가변초점 렌즈 구조를 함께 검토하였다. GP lens와 전기적으로 제어 가능한 반파장판을 결합하면, 편광 상태에 따라 렌즈의 초점거리가 변화하므로 기계적 이동 없이도 폐색 마스크와 디지털 영상의 광학적 위치를 제어할 수 있다. 이는 기존의 물리적 마스크 이동 방식에 비해 구조가 간단하고, 향후 안



<그림 4> 가변초점 3D 영상 및 가변초점 3D 폐색 마스크 구현 구조. (좌상단) 가변초점 렌즈쌍을 이용한 구조, (좌하단) 하나의 GP lens 기반 가변초점 광학계를 이용한 구조, (우) 실험 결과 (W. Han, J.-W. Lee, J.-Y. Shin, M.-H. Choi, H.-R. Kim, and J.-H. Park, "Varifocal occlusion in optical see-through near-eye display with single phase-only liquid crystal on Silicon," *Photonics Research*, vol 12, no 4, pp.833-854 (2024).)

경형 form factor로 발전할 가능성이 높다.

실험적으로는 0.3m에서 optical infinity에 이르는 범위에서 3D 영상 표시와 3D 폐색을 구현하고, 가상 영상이 위치한 깊이에 맞추어 실사 객체가 폐색되는 것을 확인하였다. 또한 디지털 영상이 실제 물체 앞에 위치할 때 실사 객체의 해당 부분이 선명하게 차단되어, 깊이 순서가 명확하게 인지됨을 확인하였다. 이 성과는 3D 폐색과 3D 영상 표시를 하나의 근안디스플레이 구조 안에서 구현한 결과로서, 기존의 2D hard-edge occlusion을 3D 증강현실 표시 기술로 확장했다는 의미를 가진다.

3. 풀컬러 홀로그래픽 3D 영상 표시와 실사 객체 폐색의 동시 구현

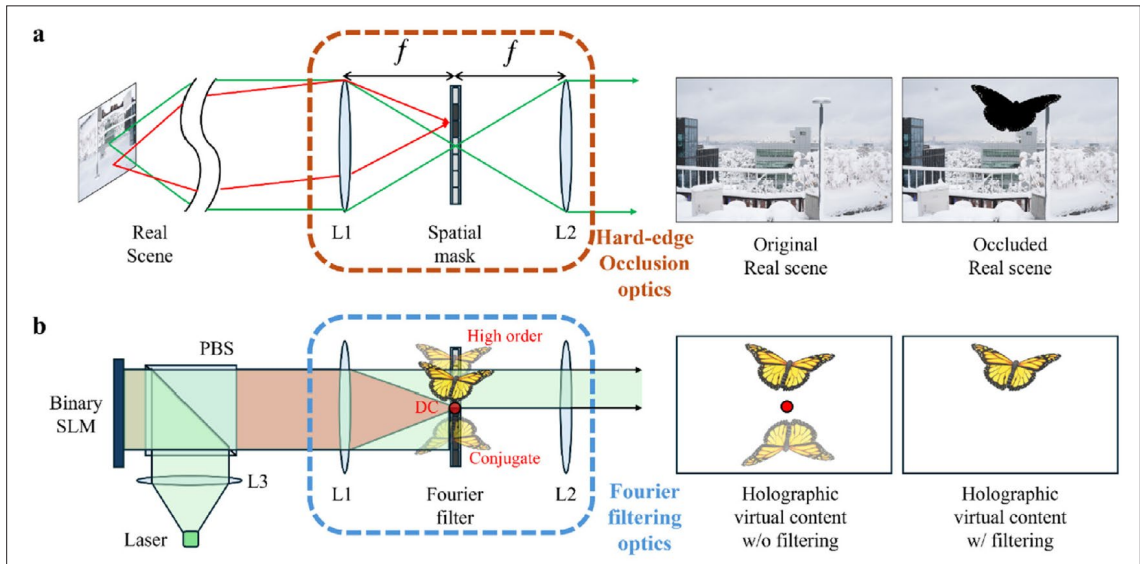
본 과제의 핵심 목표는 단순한 2D 또는 가변초점 영상 표시를 넘어, 홀로그래픽 3D 영상과 실사 객체 폐색을 결합하는 것이다. 홀로그래픽 디스플레이는 SLM을 이용하여 빛의 파면을 제어하고, 실제 3D 물체에서 나오는 것과 같은 복소광파를 재생하는 기술이다. 따라서 사용자에게 수렴-조절 불일치가 없는 자연스러운 3D 초점 단서를 제공할 수 있다. 그러나 홀로그래픽 디스플레이를 광투과형 증강현실에 적용하면서 동시에 실사 객체 폐색까지 구현하는 것은 매우 도전적인 문제이다.

홀로그래픽 영상 생성에는 일반적으로 푸리에 필터링이 필요하다. 특히 위상 또는 진폭 SLM으로 홀로그램을 표시할 때 원하는 회절 차수 이외에 DC 성분, conjugate image, 고차 회절 잡음 등이 발생할 수 있으며, 이를 제거하기 위해 4f 광학계와 푸리에 필터가 사용된다. 본 연구에서는 이 점에 착안하여, 실사 객체 폐색을 위한 DMD가 동시에 홀로그래픽 디스플레이의 동적 푸리에 필터로 동작하도록 하는 새로운 구조를 개발하였다.

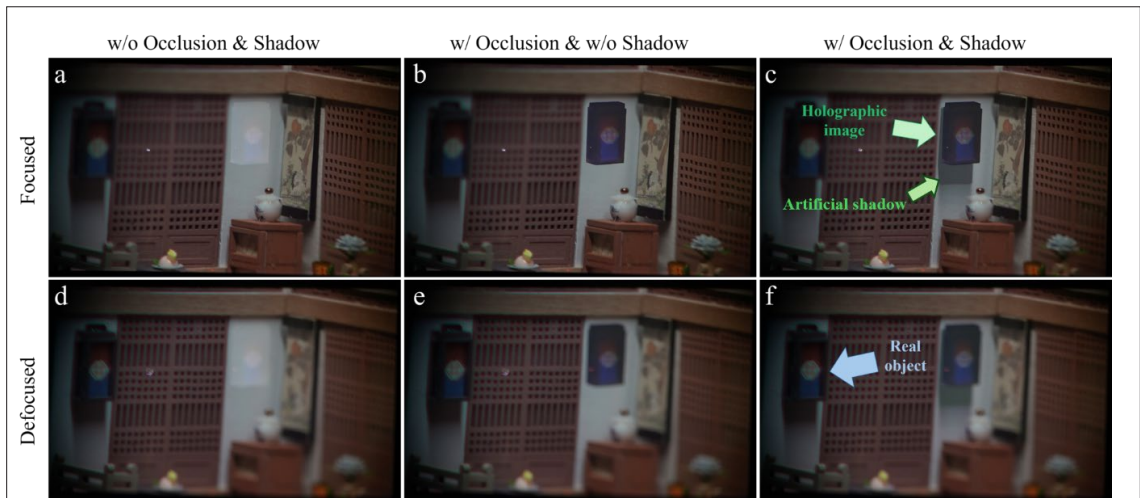
구체적으로, 본 연구에서는 강유전성 액정 패널(Ferro-electric LCOS, FLCoS)과 DMD 두 개의 SLM을 사용한다. FLCoS는 홀로그래픽 3D 영상을 표시하는 위상 변조 SLM으로 사용하고, DMD는 두 가지 역할을 수행한다. 첫째, 홀로그래픽 영상 표시 sub-frame에서는 DMD가 동적 푸리에 필터로 동작하여 홀로그래픽 영상의 DC 및 불필요한 회절 성분을 제거한다. 둘째, 실사 객체 폐색 sub-frame에서는 DMD가 실사 장면에 대한 폐색 마스크로 동작한다. 이 두 동작을 시분할로 수행함으로써, 동일한 DMD와 folded 4f 광학 구조를 이용하여 홀로그래픽 3D 영상 표시와 실사 객체 폐색을 동시에 구현할 수 있다.

먼저 RGB fiber-coupled laser, FLCoS, DMD, folded 4f optics를 이용하여 풀컬러 홀로그래픽 3D 영상 표시와 실사 객체 폐색이 가능한 benchtop 시스템을 구현하였다. 이 과정에서 RGB 파장별 색수차를 보정하기 위해 파장별 홀로그램 사전 보상과 동적 푸리에 필터 패턴 제어를 적용하였다. 또한 홀로그래픽 영상 표시 sub-frame과 폐색 sub-frame의 시간 배분을 조절함으로써, 풀컬러 동작 조건에서도 높은 폐색 비율을 구현하였다.

이후 이 구조를 더욱 고도화하여, DMD가 동적 푸리에 필터와 폐색 마스크로 동시에 활용된다는 점을 홀로그램 합성 단계에서 고려하는 알고리즘을 개발하였다. 푸리에 필터의 형태를 단순 고정 aperture가 아니라 표시하고자 하는 객체와 장면에 최적화된 형태로 설계함으로써, 재생 홀로그래픽 영상의 품질을 크게 향상시켰다. 또한 폐색 기능을 단순히 배경 차단에만 사용하는 것이 아니라, 디지털 객체의 그림자를 실사 환경 위에 표현하는 데 활용하였다. 즉, 가상 객체가 실제 공간에 그림자를 드리우는 것과 같은 효과를 폐색 마스크 패턴을 통해 생성함으로써, 증강현실 장면의 실재감을 크게 높였다.



<그림 5> 실사 객체 폐색 가능 풀컬러 홀로그래픽 3D 근안디스플레이 구조 (W. Han, C. Lee, and J.-H. Park, "Enhancing realism in holographic augmented reality displays through occlusion handling," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 19, no. 19, e01052 (2025).)



<그림 6> 폐색 및 그림자 표현을 통한 광투과 홀로그래픽 증강현실 장면의 사실감 향상 실험 결과. (좌) 기준과 같이 폐색과 그림자가 없을 때, 배경 실사 객체의 높은 휘도로 인하여 홀로그래픽 영상이 거의 보이지 않음, (중) 폐색을 통해 홀로그래픽 영상의 시인성이 크게 향상됨. 그러나 배경 실사 객체에 자연스럽게 융합되지는 않음, (우) 폐색과 그림자 추가를 통해 시인성과 실재감이 크게 향상됨 (W. Han, C. Lee, and J.-H. Park, "Enhancing realism in holographic augmented reality displays through occlusion handling," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 19, no. 19, e01052 (2025).)

이 성과는 홀로그래픽 3D 영상, 실사 객체 폐색, 동적 푸리에 필터링, 그림자 표현을 하나의 광학 시스템과 계산 알고리즘 안에서 결합했다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 특히 광투과형 증강현실에서 디지털 객체가 실제 물체를 가리고, 동시에 실제 환경에 그림자를 드리우는 장면을 홀로그래픽 3D 영상으로 구현함으로써, 차세대 실감형 AR 근안디스플레이의 가능성을 제시하였다.

4. Foveated 홀로그래픽 3D 근안디스플레이 기술

본 과제 수행 과정에서는 주 목표인 실사 객체 폐색 가능 홀로그래픽 증강현실 디스플레이 기술 외에도, 홀로그래픽 근안디스플레이의 화질과 시스템 효율을 높이기 위한 다양한 파생 연구가 수행되었다. 그중 하나가 foveated 홀로그래픽 3D 근안디스플레이 기술이다.

홀로그래픽 디스플레이는 이상적인 3D 파면을 제공할 수 있지만, SLM의 space-bandwidth product 제한으로 인해 넓은 화각과 높은 해상도를 동시에 구현하기 어렵다. 인간 시각계는 중심시(foveal vision) 영역에서는 높은 해상도를 요구하지만 주변시(peripheral vision) 영역에서는 상대적으로 낮은 해상도에도 민감도가 낮다. 본 연구에서는 이러한 인간 시각 특성을 활용하여, 중심시 영역에는 고해상도 홀로그래픽 영상을, 주변시 영역에는 넓은 화각의 홀로그래픽 영상을 제공하는 foveated holographic NED 구조(M.-H. Choi, K.-S. Shin, and J.-H. Park, “Foveated holographic near-eye display with geometric phase lens and camera feedback,” SPIE AR/VR/MR, Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) V, paper 12913-14, San Francisco, United States, Jan. 2024.)를 개발하였다.

초기 구조에서는 편광 의존성을 갖는 기하위상렌즈를 활용하여 foveal 영역과 peripheral 영역의 홀로그래픽 영상을 광학적으로 분리하고, 각각 다른 확대율과 해상도 특성을 갖도록 하였다. 이어서 active beam deflector를 결합하여 사용자의 gaze 변화에 따라 foveal 영역을 동적으로 이동시키는 기술을 개발하였다. RGB 풀컬러 구현에서는 편광 격자의 파장별 회절각 차이로 인한 색수차를 홀로그램 생성 단계에서 사전 보상하여, 색수차가 억제된 풀컬러 foveated 홀로그래픽 영상을 구현하였다. 또한 camera-in-the-loop 기법을 적용하여 실제 광학계의 수차와 오차를 반영한 홀로그램 최적화를 수행하였다.

이 연구는 실사 객체 폐색과 직접적으로 동일한 주제는 아니지만, 홀로그래픽 AR 근안디스플레이가 실용적 장치로 발전하기 위해 반드시 필요한 광화각, 고해상도, 고화질 표시 문제를 해결하는 데 기여한다. 또한 향후 폐색 지원 홀로그래픽 AR 구조와 결합될 경우, 사용자의 시선에 따라 고해상도 3D 영상과 정밀 폐색을 동적으로 제공하는 고성능 AR 근안디스플레이로 확장될 수 있다.

5. 초다시점, Maxwellian, waveguide 기반 근안디스플레이 관련 성과

본 과제에서는 홀로그래픽 AR 및 폐색 기술과 밀접하게 연관된 다양한 3D 근안디스플레이 요소 기술도 함께 개발하였다. 먼저 LED array와 DMD, lightguide combiner를 이용한 초다시점(super multi-view) 3D 근안디스플레이 기술(W. Han, J. Han, Y.-G. Ju, J. Jang, and J.-H. Park, “Super multi-view near-eye display with a lightguide combiner,”

Optics Express, vol. 30, no. 26, pp. 46383-46403 (2022).)을 개발하였다. 초다시점 방식은 사용자의 눈에 여러 방향의 광선을 제공하여 초점 단서를 개선하는 방식으로, 홀로그래픽 방식과 함께 수렴-조절 불일치 문제를 줄일 수 있는 대표적인 3D 근안디스플레이 기술이다. 본 연구에서는 lightguide 구조를 이용하여 compact한 형태를 유지하면서 실사 환경과 3D 디지털 영상을 동시에 제공하는 초다시점 근안디스플레이를 구현하였다.

또한 micro lens array와 point light source array(PLSA)를 이용한 Maxwellian 가상현실 근안디스플레이 기술(M. Kim, W. Han, and J.-H. Park, “Slim Maxwellian near-eye display for virtual reality using point light source array,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 30, no. 2, article 3372001 (2024).)을 개발하였다. Maxwellian 방식은 동공면에 작은 exit pupil을 형성하여 넓은 초점심도를 제공할 수 있으므로, 사용자가 다양한 깊이 of 가상 영상을 비교적 선명하게 볼 수 있다. 본 연구에서는 point light source array를 물리적 광원 배열뿐 아니라 holographic optical element를 이용한 virtual PLSA로 구현하여 시스템 두께를 줄이는 방식을 제안하였다. 이러한 결과는 향후 얇고 가벼운 VR/AR 근안디스플레이 설계에 활용될 수 있다.

Waveguide 기반 AR 근안디스플레이와 active beam deflector를 결합한 이미지 steering 기술도 개발하였다. 사용자의 눈동자 회전 또는 gaze 변화에 맞추어 디지털 영상을 적절히 조향하는 기술은 foveated display, eyebox 확장, 사용자 적응형 AR 표시에서 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 slim한 active beam deflector를 waveguide combiner와 결합하고, 색수차를 사전 보상한 영상을 표시함으로써 가상 영상의 조향을 실험적으로 구현하였다.

마지막으로, 초다시점 근안디스플레이의 인지 화질을 향상시키기 위한 Stochastic Gradient Descent 기반 elemental image array 최적화 기법과, 레이저 색역을 고려한 홀로그래픽 디스플레이의 인지 색상 향상 기법(C. Chen, M. Chae, S.-W. Nam, M.-H. Choi, M. Kim, E. Lee, Y. Jeong, and J.-H. Park, “PAColorHolo: A Perceptually-Aware Color Management Framework for Holographic Displays,” ACM Transactions on Graphics, vol. 45, no. 2, article 22 (2026).)도 개발하였다. 이들 연구는 동일한 하드웨어에서 사용자가 실제로 지각하는 화질과 색 품질을 개선한다는 점에서, 본 과제의 최종 목표인 실감형 증강현실 3D 표시 기술의 완성도를 높이는 데 기여한다.

IV. 연구개발 성과의 의의 및 활용 방안

본 과제의 가장 중요한 의의는 광투과형 증강현실 근안디스플레이에서 실사 객체 폐색과 3D 영상 표시를 결합하는 원천 기술을 제시했다는 점이다. 기존 광투과형 AR 기술은 optical combiner를 이용하여 실사 환경과 디지털 영상을 단순 합성하는 데 머물렀다. 이로 인해 디지털 영상은 실제 세계와 깊이 순서가 맞지 않고, 밝은 배경 위에서는 시인성이 크게 저하되었다. 본 과제는 실사 환경으로부터 오는 빛을 디지털 영상의 위치에 맞추어 선택적으로 차단함으로써, 이러한 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방향을 제시하였다.

특히 단일 SLM 기반 폐색 및 표시 구조는 기존 두 패널 기반 hard-edge occlusion 구조의 부피와 정렬 문제를 줄일 수 있는 핵심 접근이다. 가변초점 3D 폐색 기술은 2D 영상이 아닌 깊이 가변 3D 영상에 대응하는 폐색 마스크를 구현함으로써, 실제 3D 증강현실 장면에 필요한 깊이 정합 문제를 다루었다. 풀컬러 홀로그래픽 3D 영상과 실사 객체 폐색의 결합은 광학적 true focal cue와 인지적 depth order cue를 동시에 제공할 수 있다는 점에서, 차세대 실감형 증강현

실 근안디스플레이의 핵심 기술로 발전할 수 있다.

본 과제의 성과는 다양한 응용 분야로 확장될 수 있다. 첫째, 안경형 증강현실 디스플레이의 야외 시인성 향상에 활용될 수 있다. 실사 배경 빛을 선택적으로 차단하면 낮은 디스플레이 휘도에서도 높은 명암비를 확보할 수 있으므로, 마이크로디스플레이의 휘도 한계와 배터리 소모 문제를 완화할 수 있다.

둘째, 산업용 / 교육용 / 의료용 증강현실에서 정확한 깊이 순서 표현에 활용될 수 있다. 예를 들어 수술 보조, 장비 조립, 원격 협업, 과학 교육, 군사·재난 대응 등에서는 가상 정보가 실제 물체의 앞뒤 중 어느 위치에 있는지 명확히 표현되어야 한다. 페색 지원 증강현실 디스플레이는 이러한 상황에서 사용자의 공간 이해도를 높일 수 있다.

셋째, 차량용 디스플레이와 대면적 증강현실 표시로 확장될 수 있다. 본 과제에서 개발된 페색, 광결합, 홀로그래픽 영상 표시, 동적 푸리에 필터링, form factor 저감 기술은 차량용 head-up display, window display, rear-seat display 등에도 적용 가능하다. 특히 도로 환경 위에 표시되는 정보가 실제 물체와 정확한 깊이 관계를 갖도록 표현되면 운전자 보조 정보의 직관성과 안전성을 높일 수 있다.

넷째, 차세대 인간-AI 인터페이스로서 증강현실 스마트글래스의 핵심 표시 기술로 활용될 수 있다. AI가 사용자의 주변 환경을 이해하고, 필요한 정보를 실제 공간 위에 표시하는 미래형 인터페이스에서는 디지털 정보가 실제 환경과 자연스럽게 상호작용해야 한다. 실사 객체 페색, 그림자 표현, foveated holography, gaze-driven image steering은 이러한 목표를 달성하기 위한 중요한 기반 기술이 될 수 있다.

V. 결론

본 연구개발 과제는 광투과형 증강현실 근안디스플레이의 핵심 한계인 실사 객체 페색 부재 문제를 해결하고, 이를 홀로그래픽 3D 영상 표시와 결합하기 위한 원천 기술 개발을 목표로 수행되었다. 연구재단의 지원을 받아 2022년 과제 시작 이후 단일 SLM 기반 2D hard-edge occlusion, 가변초점 3D 영상 및 3D 페색 마스크의 동시 구현, 풀컬러 홀로그래픽 3D 영상과 실사 객체 페색을 결합한 benchtop 시스템, 페색을 이용한 그림자 표현 및 홀로그램 합성 알고리즘, foveated holographic NED, 초다시점 및 Maxwellian 근안디스플레이 등 다양한 성과를 도출하였다.

이러한 연구 결과는 광투과형 증강현실 근안디스플레이에서 디지털 영상이 실제 세계와 단순히 겹쳐 보이는 수준을 넘어, 실제 물체와 상호 가려지고, 깊이 순서가 명확하며, 그림자와 초점 단서를 포함하는 실감형 3D 증강현실 장면을 구현할 수 있음을 보여준다. 아직 시스템 form factor, 화각, 광효율, 사용자 착용성 등 실용화를 위해 해결해야 할 과제는 남아 있으나, 본 과제에서 개발된 기술들은 차세대 증강현실 근안디스플레이의 시인성, 실재감, 3D 표시 품질을 동시에 향상시키는 핵심 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 현재의 benchtop 및 prototype 수준의 시스템을 더욱 소형화하고, waveguide 및 초박형 4f 구조와 결합하여 안경형 form factor에 가까운 페색 지원 홀로그래픽 AR 근안디스플레이로 발전시키는 것이 중요하다. 또한 eye tracking, foveated rendering, 사용자 시력 보정, 실시간 장면 인식 및 AI 기반 렌더링 기술과 결합한다면, 실사 환경과 디지털 정보가 자연스럽게 상호작용하는 차세대 증강현실 스마트글래스 구현에 크게 기여할 수 있을 것이다.

저 자 소 개



박재형

- 2000년 : 서울대학교 전기공학부 학사
- 2002년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
- 2005년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2005년 - 2007년 : 삼성전자 책임연구원
- 2007년 - 2012년 : 충북대학교 정보통신공학부 전임강사, 조교수, 부교수
- 2013년 - 2023년 : 인하대학교 정보통신공학과 부교수, 교수
- 2024년 - 현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 부교수
- 주관심분야 : 3차원 디스플레이 광학, 홀로그래피, 라이트필드, AR/VR 근안디스플레이, 증강현실 표시 기술