

융합연구리뷰

Convergence Research Review

박순기 (주식회사 레티널 책임연구원)
증강현실 디바이스 기술 동향

김휘 (고려대학교 세종캠퍼스 전자 및 정보공학과 교수)
3차원 공간 광 이미지 형성 기술

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 증강현실 디바이스 기술 동향
- 33 3차원 공간 광 이미지 형성 기술



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2019 April vol.5 no.4

발행일 2019년 4월 2일

발행인 김주선

편집인 최수영·권영만

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4980 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783



증강현실 디바이스 기술 동향

영화 아이언맨 시리즈를 보면 주인공인 토니 스타크가 아이언맨 슈트를 착용하면 눈앞에 펼쳐진 현실 위에 그때그때 필요로 하는 수많은 정보가 동시에 겹쳐져 투영된다. 이렇듯 먼 미래의 기술처럼 보이는 증강현실(AR) 기술은 아직 초기 단계이긴하나 마이크로소프트, 애플, 소니 등과 같은 대기업의 투자와 진출이 이루어지고 있으며, 그 활용처가 무궁무진하여 앞으로의 기술발전이 기대되는 대표적 융합기술 분야이다.

이에, 본 호 1부에서는 가상/증강현실 기술 개념을 간략하게 알아보고, 증강현실을 구현할 수 있는 디바이스의 기술 동향을 살펴보았다. 가상현실은 사용자가 현실 세계에서 제공되는 시각 정보와는 분리되고 완전히 가상세계의 정보만을 받아들일게 되는 개념을 의미하며, 증강현실은 현실 시각 정보에서 확장된(augmented) 가상 영상 정보를 동시에 접할 수 있도록 하는 개념을 말한다. 증강현실 디바이스는 크게 헬멧형, 고글형, 안경형으로 구분할 수 있으며, 기기의 틀(폼팩터)에 따라서 AR 디바이스의 성능 차이가 발생하게 된다.

본 호를 통해 광학, 디스플레이, 센서, 나노 소재, 초정밀 공정, 뇌 과학 등과 같은 다양한 분야의 연구와 발전을 기반으로 하는 증강현실 디바이스의 기술 동향을 간략하게 살펴보았다. 아직, 대중적 관심에 비해 증강현실 기술이 아직 초기 단계에 머물러있고, 전반적인 기반 기술의 한계와 콘텐츠 부족 등으로 인하여 완벽한 대중화까지는 시간이 소요 될 것으로 예상되고 있다. 하지만 증강현실 기술은 물리적 공간의 제약을 완화하며, 보다 저렴한 비용으로 양질의 서비스를 누릴 수 있게 하여 사회 계층별로 제공되는 정보의 편중을 해결하여 전반적인 삶의 질 향상을 가져올 수 있는 기술이기에 선제적 대응으로 국민생활에 도움이 될 수 있기를 기대해본다.

3차원 공간 광 이미지 형성 기술

미래를 배경으로 하는 공상과학영화에 흔히 등장하는 장면으로 허공에 인물이나 지형, 도시 등이 투영되어 거리와는 상관없이 정보교환이 가능한 장면이 연출된다. 영화 속 이러한 장면은 컴퓨터 그래픽을 통해 만들어진 허상이지만, 이를 실제로 구현하기 위해 복소 공간 광 변조기, 3차원 복셀(voxel) 디스플레이, 홀로그래픽 증강현실 기기 등 관련된 기술들이 활발히 연구되고 있다.

이에, 본 호 2부에서는 3차원 공간 광 이미지 형성 기술로서 볼륨 디스플레이 기술 두 가지와 대면적 홀로그래픽 디스플레이, 그리고 최근 각광 받고 있는 홀로그래픽 AR 디스플레이를 선정하여, 기본원리와 기술이슈를 소개한다. 특히, 복소 공간 광 변조기는 디스플레이의 화질 특성을 획기적으로 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 추가적인 노이즈 필터링 시스템을 필요로 하지 않으므로, 홀로그래픽 디스플레이 시스템의 소형화와 웨어러블(wearable), 포터블(portable) 디바이스 형태의 고품질 홀로그래픽 디스플레이의 구현이 가능해 진다.

본 호를 통해 3차원 디스플레이 기술 그 자체로 창의적인 신개념들의 각축장이자 혁신의 대명사격으로 인식되고 있으리만큼 기술 발전과 융합의 가속화가 빠르게 이루어지고 있는 3차원 공간 광 이미지 형성 기술에 대해 간략하게 살펴보았다. 디스플레이 산업이 국가 기간산업으로 구축되어 있는 우리나라가 세계최초로 복소 공간 광 변조기술의 원천기술을 선점하여, 향후 펼쳐질 4차 산업혁명 3차원 공간 디스플레이 시장의 세계적 선두주자로 나설 수 있기를 기대해본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 April vol.5 no.4



01

증강현실 디바이스 기술 동향

박순기 (주식회사 레티널 책임연구원)

I 서론

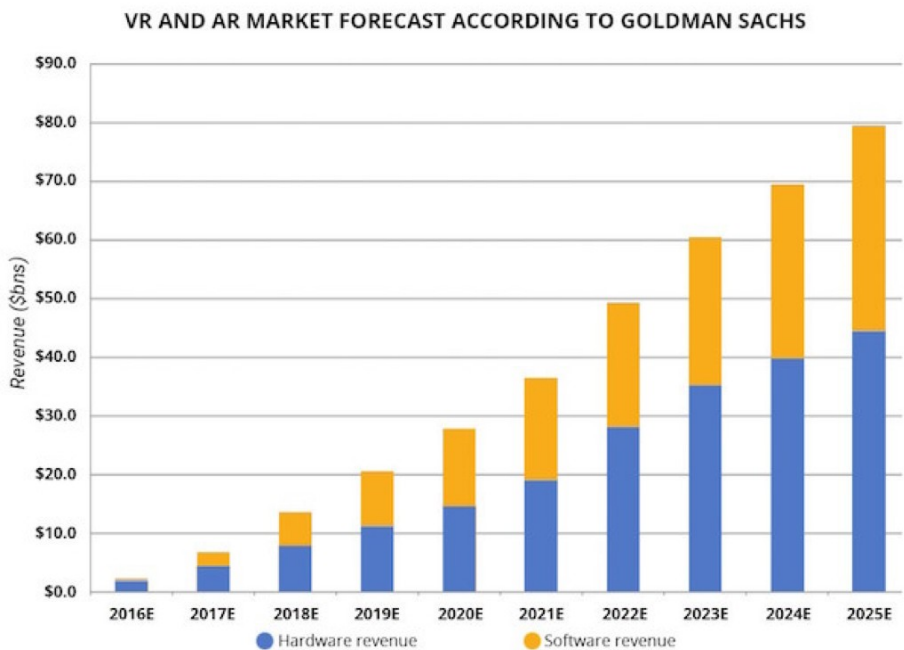
1. 개요

가상현실(Virtual Reality: VR) 및 증강현실(Augmented Reality: AR)은 기존의 개인용 컴퓨팅 플랫폼 단말인 데스크탑 컴퓨터와 휴대용 컴퓨터, 스마트폰의 다음 세대 기술로 주목을 받고 있다. AR/VR 기술은 인공지능과 초연결(hyper-connectivity)로 대표되는 4차 산업혁명 시대에 기존의 2차원 평판 디스플레이로 이어져있던 디지털 세상과 개인을 새로운 방법으로 연결하는 창구로서 역할을 할 것으로 기대되고 있기 때문에 더욱 더 그 중요성이 부각된다. 현실세계와 가상세계가 직관적으로 혼합되는 AR/VR 기술은 음성 인식, 시선 인식, 손동작 인식과 같은 직관적인 사용자 경험(User Experience)을 제공하고, 초고속 무선 통신 및 인공지능과 같은 4차 산업혁명의 핵심 기술들과 결합되어 기존의 기술보다 한 차원 높은 수준으로 현실에서의 물리적 공간의 제약을 낮추고, 교육, 산업, 의료, 엔터테인먼트 등 여러 분야에 더욱 다양하고 수준 높은 응용 서비스를 제공하는 것이 가능하다. 이러한 기술들의 예시는 그동안 공상과학영화에서 주로 등장했지만, 가까운 미래에 일상생활에서 흔하게 접할 수 있는 기술이 될 것으로 예상된다.

AR/VR 기술은 스마트폰과 마찬가지로, 미래에 우리 일상생활의 급격한 변화를 가져올 것으로 기대되며, 사람이 생활하는 근본적인 환경에 영향을 줄 것으로 예상된다. AR/VR 기술의 응용처는 무궁무진할 것으로 예상되며, 그로 인한 시장가치 또한 급격하게 성장하고 있다(그림1). 이러한 까닭으로 거의 포화 상태에 다다른 스마트폰 시장을 넘어 새로운 미래 시장을 선점하기 위해서, 마이크로소프트, 애플, 구글, 페이스북과 같은 IT 기술을 선도하고 있는 글로벌 대기업들이 앞 다투어 AR/VR 관련 기반 기술 및 응용 기술에 선행투자 하고 있으며, 많은 중소기업 및 스타트업들이 독립적으로 혹은 연합하여 생태계를 준비하며 본격적인 AR/VR 시장이 열릴 것에 대한 준비를 하고 있다. 2019년 2월 스페인 바르셀로나에서 개최된 모바일 월드 콩그레스(Mobile World Congress: MWC)에서는 전 세계의 최신 모바일 기술이 소개되는데, 여기서 가장 주목을 받은 기술이 마이크로소프트사의 2세대 홀로렌즈라는 점은 스마트폰의 시장에서 웨어러블(wearable) 증강현실 기기 시장으로 패러다임이 변화한다는 것을 시사한다.

본 기술 동향 보고서에서는 AR 시장 초기단계에서 중요한 하드웨어 기기에 대해 전반적인 기술 동향을 살펴보고, 증강현실 하드웨어 기술 개발에 선도적인 역할을 하고 있는 기업들과 기술의 장단점을 비교하고자 한다. 또한 AR/VR 기술들을 통해 제공될 수 있는 응용 서비스들을 소개하고, 그에 대한 영향력과 파급력을 살펴봄, 미래 삶에 막강한 영향력을 끼칠 AR/VR 기술의 대중화를 위해서 어떠한 요소 기술들이 어느 수준으로 도달되어야 하는지 알아보하고자 한다.

그림 1 VR/AR 하드웨어 및 소프트웨어 예상 시장 규모



(출처 : 골드만삭스)

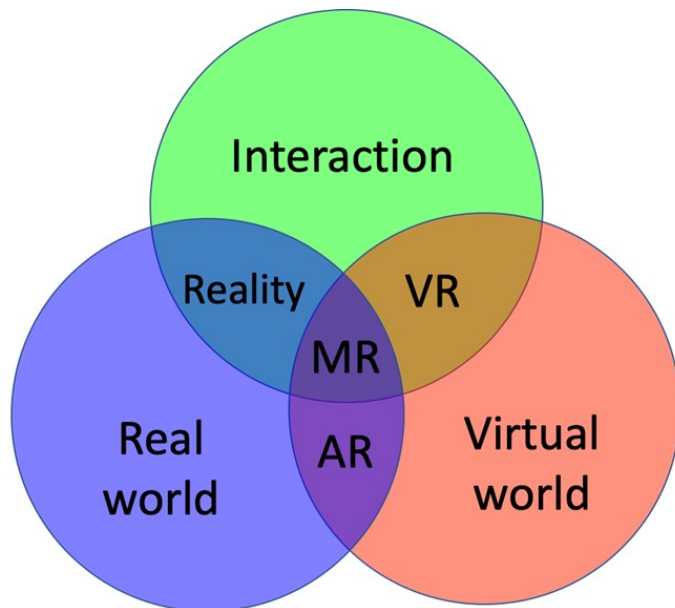
1.1 AR/VR 기술 개념

증강현실 및 가상현실은 최근에 완전히 새롭게 등장한 개념은 아니지만, 근래에 IT 산업의 전반적인 발전으로 인하여 그 실현 가능성이 높아짐에 따라 더욱 주목받게 된 기술이다. 증강현실과 가상현실은 기술적 특징에 따라서 엄격하게 구분되어 있다고 하기 보다는, 시각 정보를 제공하는 가상 영상 또는 현실 정보 둘 중 어느 쪽에 비중을 두는 기술인지에 따라서 구분되는 것이라고 볼 수 있다. 일반적으로 가상현실은 사용자가 현실

세계에서 제공되는 시각 정보와는 분리되고 완전히 가상세계의 정보만을 받아들이게 되는 개념을 말하며, 증강현실은 현실 시각 정보에서 확장된(augmented) 가상 영상 정보를 동시에 접할 수 있도록 하는 개념을 말한다.

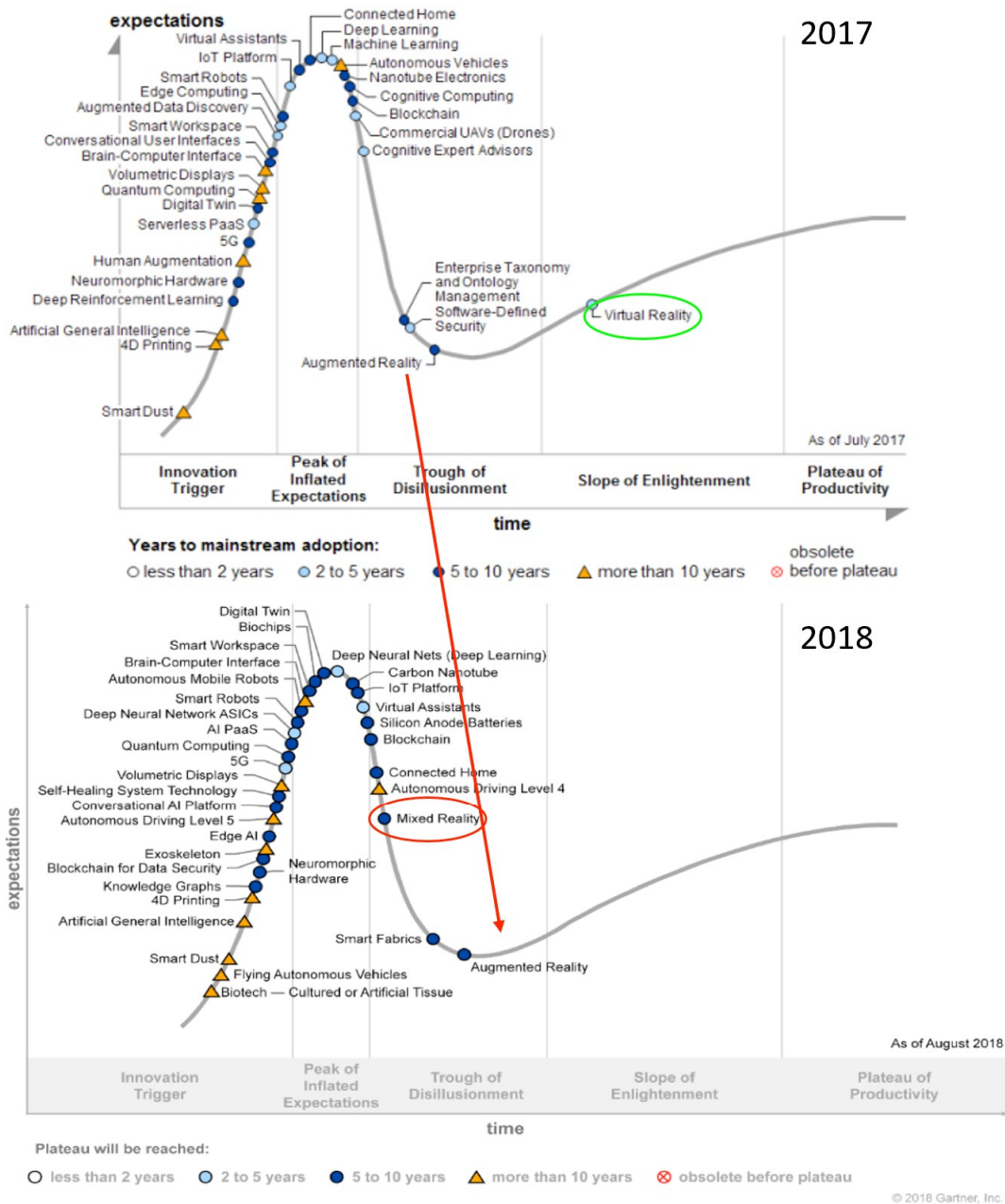
현실 시각 정보와 가상 영상 정보를 동시에 제공하는 방법은 여러 가지가 있는데, 그중에서도 광학적 영상 합성을 통해 현실과 가상 영상을 광학 합성부(optical combiner)를 통해 구현하는 경우를 좁은 의미에서 증강현실로 이야기하는 경우가 많다. 이러한 특징은 광학적 투시(optical see-through) 방법으로 불리며, 이와 대비하여 카메라센서 등을 통하여 현실 영상을 촬영하고 이를 컴퓨터 영상처리를 통하여 가상 영상과 합성하여 사용자에게 영상을 제공하는 방법은 비디오 투시(video see-through) 방법으로 불린다. 본 고에서 소개하는 증강현실 기술은 모두 광학적 투시를 기반으로 한 기술들이다. 추가로 최근 몇몇 회사들에서 이야기하고 있는 혼합현실(Mixed Reality: MR) 또는 확장현실(eXtended Reality: XR)과 같은 개념도 등장하고 있는데 이 역시 증강현실과 비슷한 개념으로 생각할 수 있다. 특히 혼합현실 기술은 기술 개발을 하는 회사의 마케팅적인 표현에 따라서 AR/VR 기술과 혼용되는 경우가 많지만, 일반적으로 AR/VR 기술에 주변 환경 인식 및 사용자 동작 인식과 같은 능동적인 사용자 인터랙션이 더해지는 기술을 일컫는다.

그림 2 AR/VR/MR 개념 포함도



시장 조사 기관 가트너(Gartner)에서 발표한 2018년 기술성숙도 그래프를 살펴보면, 2017년 성숙단계 초기로 접어든 VR 기술은 도표에서 누락 되었고, AR 기술은 '기대감으로 인한 거품'이 줄어들고 본격적인 상용화를 위한 개발 단계에 접어든 것으로 나타나 있다(그림3). 흥미로운 점은 2018년 혼합현실 기술이 새롭게 등장하여 가상 영상과의 인터랙션이 더욱 중요해짐을 나타낸다는 점이다. 이는 단순히 가상 영상 정보를 현실 정보에 추가적으로 제공하는 기술 단계에서 벗어나 본격적으로 가상 영상이 현실 공간 안에 녹아들게 되는 기술로 발전해 나가게 된다는 점을 시사한다.

그림 3 2017년 및 2018년 최신기술 하이프(Hype) 사이클



(출처 : Gartner)

II 증강현실 디바이스 기술 동향

2. 증강현실 디바이스 요소 기술

증강현실 기술이 많은 주목을 받고 있지만, 2019년 현재 개인 사용자가 증강현실 기술을 접해볼 수 있는 기회는 흔치 않다. 가장 큰 이유는 아직 기술성숙도가 부족하여 소비자의 눈높이를 만족시킬만한 제품이 개발되지 못했다는 점과 기술개발 초기단계이기 때문에 제품의 구입이 제한적이며 가격이 매우 고가인 점을 들 수 있다.

이에 비하여 가상현실 기술은 게이밍 및 엔터테인먼트 분야를 중심으로 어느 정도 대중화가 이루어졌다고 볼 수 있다. 스마트폰을 기반으로 한 삼성전자의 Gear VR이나 독립 구동기기인 오쿨러스(Oculus)사의 Oculus Go와 같은 제품은 \$300 이내의 상대적으로 저렴한 가격으로 VR기기의 대중화에 기여했다. 또한 일본 Sony사의 Playstation VR, 대만 HTC사의 Vive, 미국 Oculus사의 Oculus VR과 같은 장치들은 고성능 게이밍 장치 내지는 개인용 엔터테인먼트 장치로서 많은 게임 이용자들에게 보급되고 있다(그림4). 이러한 가상현실 기술은 과거 PC방과 마찬가지로 전문적으로 VR 게임, 영화를 접해볼 수 있는 VR체험방의 등장으로 더욱 대중이 손쉽게 경험해 볼 수 있어, AR기술에 대해서 간접적인 경험을 제공할 수 있다.

그림 4 상용 VR 제품 예시: a) Gear VR, b) Oculus Go, c) HTC Vive, d) PlayStation VR



(출처 : 삼성, Oculus, HTC, Sony)

기본적으로 증강현실 기기들은 스마트폰에서 확장된 개인용 컴퓨팅 디바이스로 볼 수 있다. 그렇기 때문에 증강현실 기기는 스마트폰의 프로세서, 센서, 통신기술, 배터리 기술과 같이 많은 기반기술들을 공유한다. 하지만 증강현실 기기들은 현실과 가상 영상을 동시에 보여주기 위한 광학계와 그를 위한 디스플레이 소자가 추가된다는 점이 스마트폰과의 가장 큰 차이점이라고 볼 수 있다. 이러한 착용형 장치의 특성에 맞추어 기존의 터치 인터페이스에서 동작/음성인식 인터페이스로 전환되어가고 있으며, 그에 따른 새로운 사용자 경험에 대한 개발도 이루어지고 있다. 최근 스마트폰 제조사 및 여러 IT 기업들이 적극적으로 도입하고 있는 음성인식 비서 서비스 또한 이러한 차세대 인터페이스로 옮겨가기 위한 노력의 일환이라고 볼 수 있다.

2.1 디스플레이 및 광학기술

디스플레이 및 광학기술은 증강현실 기기에서 가장 핵심이 되는 기술이라고 볼 수 있다. 현재도 스마트폰의 기술들을 활용하여 어느 정도 증강현실을 구현하는 것은 가능하지만, 소형, 경량화 된 안경형 폼팩터에서 자연스러운 가상 영상과 현실세계의 융합을 위해서는 완성도 있는 디스플레이 및 광학 기술의 개발이 가장 절실하다.

1) 디스플레이 기술

기존의 평판 디스플레이에서는 여러 평가 요소 중에서 화면 크기가 디스플레이의 용도를 구분 짓는 가장 중요한 요소로 여겨졌지만, 착용형 증강현실 기기에서는 단일 사용자를 전제로 하기 때문에 요구되는 디스플레이의 성능에 대한 개념이 달라진다. 대표적으로 증강현실 기기에서 디스플레이의 물리적인 크기는 착용감과 외형 디자인을 위해서 최소화 되어야 하지만 실질적으로 관찰하게 되는 영상의 크기와 품질은 대형 텔레비전 수준으로 최대화 되어야 한다. 그렇기 때문에 대부분의 증강현실 기기들은 전용 광학계를 통해 초소형 디스플레이를 확대시켜 관찰하게 되는 형태를 갖추고 있으며, 이러한 구조적 특징으로 인하여 기존의 중소형 및 대형 평판 디스플레이 기술은 직접적으로 적용하기가 어려워진다.

증강현실 기기의 초기 개발 단계부터 현재까지 널리 적용되는 디스플레이 소자는 기존의 빔프로젝터에서 널리 사용되던 LCoS(Liquid Crystal on Silicon) 또는 DMD(Digital micro-Mirror Device)와 같은 공간 광 변조기(spatial light modulator) 기술이다. 이러한 투사 광학계는 작은 크기의 소자로부터 큰 화면을 만들어 낼 수 있다는 점에서 증강현실 기기가 구현하고자 하는 바와 비슷한 광학적 특징을 갖기 때문에 많은 증강현실 기기에 적용되었다. 또한 어느 정도 상용화 기술로 개발된 상태이기 때문에 상대적으로 소자의 가격이 저렴하고 양산 기술이 마련되어있어 추후 시장 규모 확장 대응이 용이하다는 것이 가장 큰 장점이다. 하지만, 별도의 광원과 이를 위한 빔 형성 광학계가 요구되는 점, 반사형 소자를 위한 프리즘 광학계 내지는 편광 광학계가 추가로 필요하여 평판 디스플레이 대비 공간을 차지한다는 점, 광원이 상시적으로 구동되기 때문에 상대적으로 낮은 영상 대비도로 인하여 증강현실 영상 구현 시 영상의 품질이 떨어지는 점 등이 단점으로 지적된다.

최근에는 다양한 마이크로 디스플레이 기술이 발전해나가면서 빔프로젝터 기반 기술과 달리 추가적인 광학계가 필요 없는 micro OLED(Organic Light Emitting Diode)와 같은 초소형 평판 디스플레이 기술을 적용하는 경우가 많아지고 있다. OLED와 같은 자체 발광형 평판 디스플레이는 현실과 구분하기 어려운 수준의 색상 표현력, 매우 높은 대비도 구현과 같은 초고품질 영상표현 특징을 갖고 있기 때문에 현실과 가상 영상의 자연스러운 조화를 구현하는 것이 가능하다. 특히 micro LED(Light Emitting Diode)와 같은 기술의 경우 기존 디스플레이 방식에 비하여 고해상도와 $10,000\text{cd}/\text{m}^2$ 이상의 고휘도 구현이 용이한 특징을 갖기 때문에, 현재 해당 기술이 적용된 제품은 전무한 상황이지만, 증강현실 기기를 개발하고자 하는 글로벌 대기업들이 기술 선점을 위하여 앞 다투어 투자를 진행하고 있는 디스플레이 기술 분야이다(표 1).

표 1 주요 기업의 마이크로 디스플레이 투자 현황

인수 / 투자 기업	피인수 / 투자 유치 마이크로 LED관련 기업	시기
Apple	LuxVue	2014년 인수
Facebook	InfiniLED, mLED	2015년 인수
Google	glo	2017년 투자
Intel	Aledia	2018년 투자

표 2는 증강현실 디스플레이에서 사용되는 디스플레이 소자의 특징을 간략하게 정리한 것이다. 현재 디스플레이 각각의 장단점과 광학계의 다양성으로 인하여 여러 종류의 디스플레이가 용도에 맞추어 다양하게 적용되고 있다. 하지만 궁극적으로는 작은 부피와 고성능을 갖는 평판형 디스플레이의 형태로 발전되리라 예상할 수 있다.

표 2 증강현실용 디스플레이 기술 비교

구분	해상도	밝기	대비도	가격	특징
LCD	보통	낮음	낮음	낮음	
LCoS	좋음	매우 높음	낮음	낮음	추가 광원 필요
DMD	보통	매우 높음	중간	중간	추가 광원 필요
micro OLED	좋음	중간	매우 높음	높음	
micro LED	좋음	높음	매우 높음	개발 단계	
MEMS (micro electro-mechanical system) mirror	보통	높음	매우 높음	중간	레이저 광원 필요

2) 광학 기술

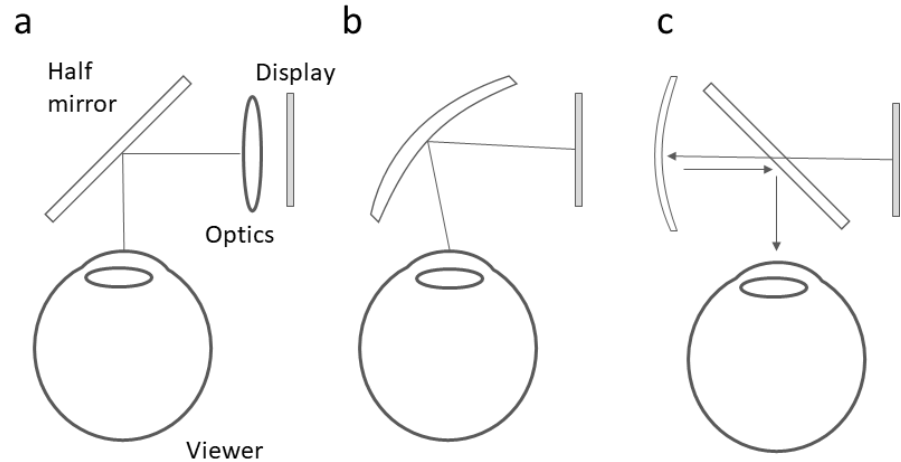
증강현실 기기에서 광학 기술은 디스플레이 기술과 더불어 가장 핵심적인 기술이라고 볼 수 있으며, 실질적으로 증강현실 기기가 대중화되는데 가장 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 궁극적인 광학기술은 소형 디스플레이 화면으로 사람의 시야영역을 대부분 포함할 수 있도록 100도 이상의 시야각을 제공하고, 해상도 또한 사람의 분해능 (약 1/60도) 수준으로 구현되며, 외부현실에 대한 왜곡이 없어야 한다. 이와 동시에 무게와 부피는 최소화되어 안경 프레임 내부에 광학계와 디스플레이가 모두 포함되어 편안한 착용감을 줄 수 있어야 한다.

하지만 이러한 기능들을 모두 동시에 만족시키기에는 현재의 기술로는 구현하는데 한계가 명확하며, 디스플레이 기술과 더불어 지속적으로 연구되고 있다.

현재 개발되고 있는 증강현실 기기의 광학 합성부는 크게 반거울 방식과 홀로그램/회절 광학 소자 (Holographic/Diffractive Optical Element : HOE/DOE) 방식으로 나뉜다. 하지만 각각의 방식 모두 뚜렷한 장단점을 갖고 있으며, 핀 미러(Pin Mirror) 방식과 같은 새로운 기술도 등장하여 증강현실 기기의 용도에 맞추어 다양한 방식의 기술이 적용되고 있다.

반거울 방식은 입사하는 빛의 반은 투과하고 반은 반사시키는 거울을 사용하여 현실과 가상 영상을 합성하는 방식이다. 이는 가장 기본적인 구조로 상대적으로 구현이 간단하고, 거울로 단순히 디스플레이 영상을 반사시켜 관찰하기 때문에 휘도 외에는 디스플레이의 영상 품질에 대한 저하가 거의 없으며, 현실 시각 정보에 대한 왜곡도 최소화 된다는 장점을 갖는다. 하지만 넓은 시야각을 제공하기 위해서는 거울의 크기가 커져야 하며, 그에 따라서 디스플레이 내지는 광학계의 부피도 증가하고, 또한 무게도 증가하여 편안한 착용감을 제공하기가 불가능하며, 큰 외형으로 인하여 일상생활에서 사용하기에 좋은 디자인을 구현하는데 큰 제약이 따른다. 반거울 방식은 곡면 반거울 등을 활용하여 렌즈의 기능을 일부 구현하여 부피를 줄이고 영상의 품질을 향상시키는 방법들이 제안된 바 있지만, 여전히 넓은 시야각을 제공하는 데에는 한계가 있어 증강현실 기기로서의 활용성에는 한계를 갖는다.

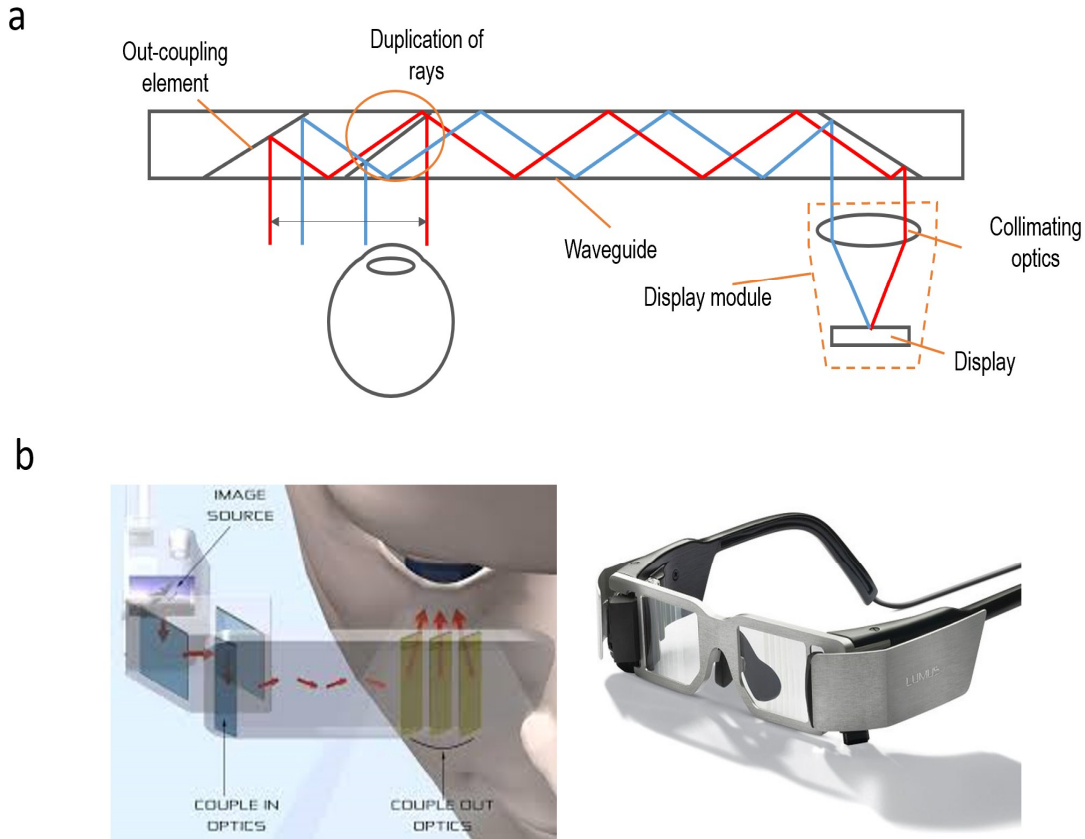
그림 5 반거울 방식의 광학 합성부



예시: a) 단순 반사 구조, b) 곡면 반사 구조, c) 복합 반사 구조

반거울의 방식의 부피를 줄이기 위하여 이스라엘의 Lumus社에서는 반거울을 여러 작은 조각으로 나누어 도파로(waveguide) 내부에 위치하도록 하여 광학 합성부의 두께를 수 mm 이내로 줄이는 기술을 발표하였다(그림 6). LOE(Light-guide Optical Element)라고 불리는 해당 기술은 반거울의 영상품질 특성을 그대로 유지하면서 얇은 두께와 40도 이상의 넓은 시야각을 제공할 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 이러한 기술은 반거울을 여러번 통과해야 하는 광학적 구조를 갖고 있기 때문에, 빛의 투과율이 영상이 도파로 안에서 진행함에 따라서 현저하게 감소하게 된다. 전반적인 영상의 밝기 균일도를 맞추기 위해서는 최종적으로 나오는 영상의 밝기에 나머지 부분을 맞추어야 하기 때문에, 전반적인 광 효율이 낮아져 매우 강한 광원을 사용하는 디스플레이가 필수적으로 요구된다.

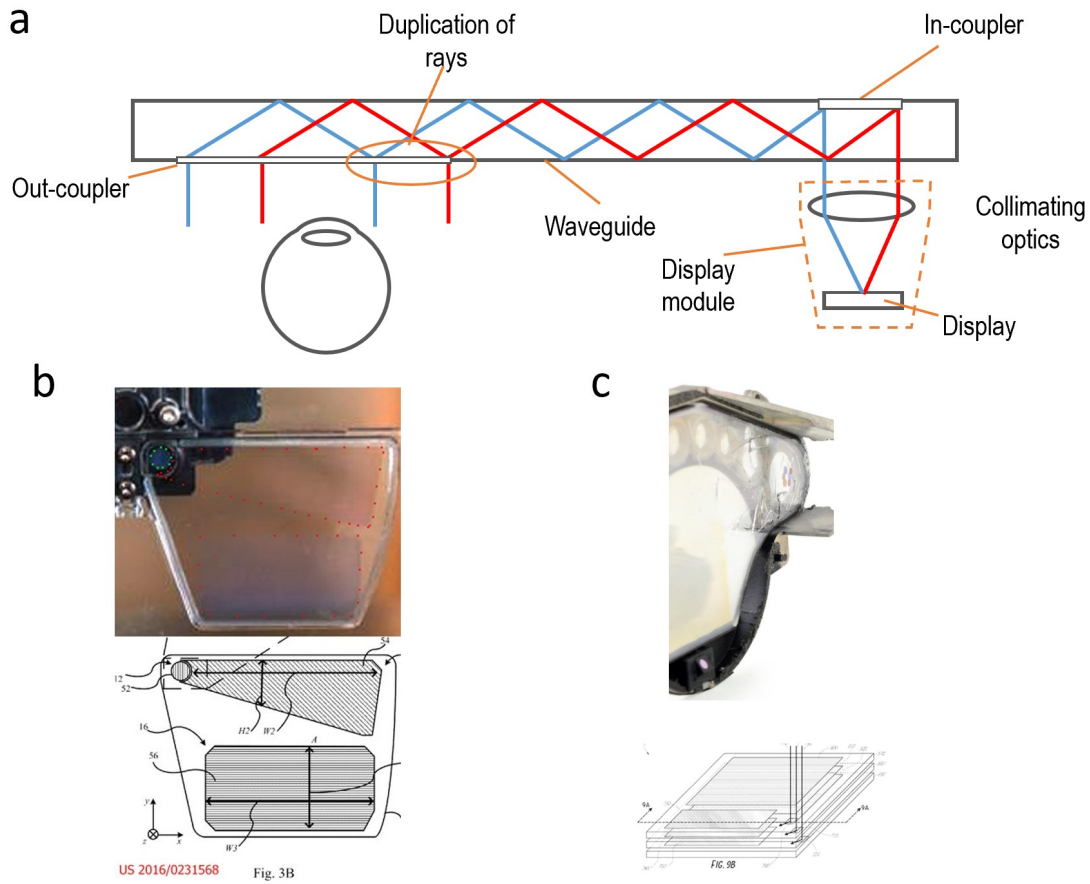
그림 6 LOE의 구조 및 LOE가 적용된 증강현실 기기



(출처 : Lumus)

회절 광학 기반 광학 합성부는 빛의 회절과 간섭 효과를 사용하여 광학 설계에 따른 특정 파장 대역에 대해서는 렌즈 또는 거울과 같은 광학 소자의 역할을 하지만, 나머지 파장 대역에서는 투명한 소자로 역할을 하는 광학적 특징을 갖는다. 그렇기 때문에 사용하는 디스플레이에서 나오는 빛의 파장 대역에 맞추어 소자를 설계하면, 연속적인 파장을 갖고 있는 외부 현실 정보는 대부분 투과하여 관찰되는 것과 동시에 디스플레이를 통해서 나온 특정 파장 대역의 가상 영상정보는 광학적 구조를 통해 관찰되는 효과를 갖는다. DOE 및 HOE 소자는 파장보다 작은 크기의 나노 구조물 격자를 이용하거나 광감응 고분자에 간섭무늬를 기록하여 발생하는 회절격자를 사용하여 제작한다. 회절 광학 기반 소자는 이러한 정밀 공정을 기반으로 제작되기 때문에 상대적으로 제작 단가가 높고 양산을 위한 수율이 낮다는 한계점을 갖는다. 또한 파장 대역 및 입사 각도에 따른 회절 효율의 차이점으로 인하여 색상이 분리되어 보이는 현상이 발생하여, 고품질의 디스플레이를 사용하더라도 색상 균일도 측면에서 화질 저하가 발생하게 되며, 설계 파장과 다른 파장을 갖는 빛의 경우 원하는 회절 각도가 아닌 다른 각도로 입사 또는 출사하게 되어 영상의 선명도에 영향을 끼쳐 화질의 감소를 가져온다는 한계점을 갖는다. 하지만 회절 광학 기반 소자는 LOE와 마찬가지로 도파로와 같이 적용되는 경우가 많다(그림 7). 따라서 수 mm 이내의 매우 얇은 두께로 광학 합성부를 구현하는 것이 가능하기 때문에 많은 제조사들이 해당 기술을 사용하고 있다.

그림 7 DOE를 적용한 광학 컴바이너

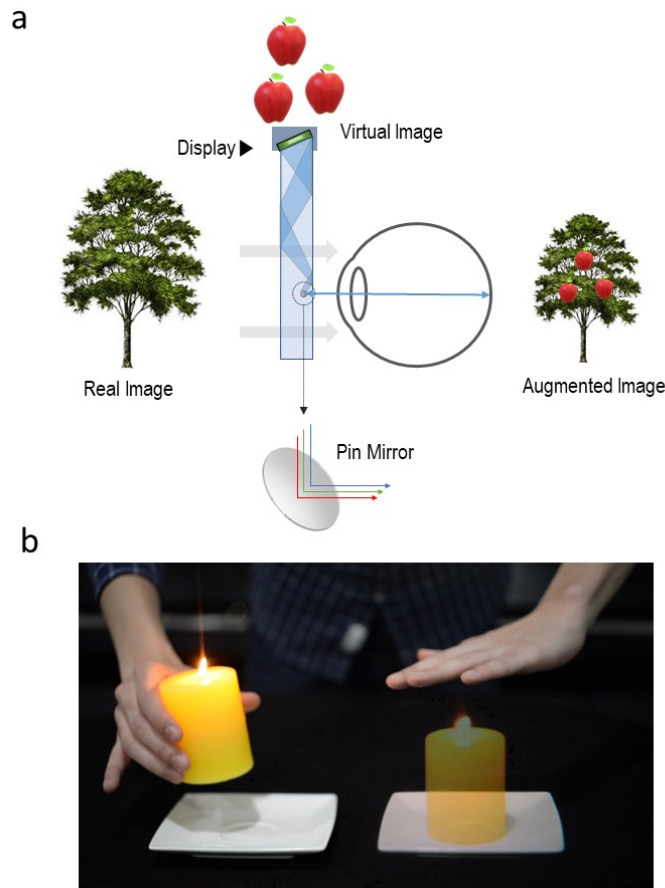


a) 도파로 구조에 적용된 예시, b) 홀로렌즈에 적용된 DOE 광학 합성부 및 관련 특허 그림, c) 매직립에 적용된 DOE 광학 합성부 및 관련 특허 (출처 : Karl Guttag, ifixit)

핀미러(pin mirror) 기술은 레티널에서 독자적으로 개발한 기술로, 핀 홀(pin-hole) 크기의 거울을 활용하여 가상 영상과 현실 시각 정보를 합성하는 것을 특징으로 한다. 핀미러는 동공보다 작은 크기의 반사 소자이기 때문에 눈의 최소 초점거리 이내에 위치하게 되면 눈의 구조상 해당 소자를 직접적으로 보는 것이 어려워 투명한 소자인 것과 비슷한 효과를 내는 점을 이용하여 광학 합성부의 역할을 한다(그림 8). 핀미러는 기본적으로 거울 기반 소자이기 때문에 반거울 방식과 마찬가지로 디스플레이의 특성을 그대로 유지할 수 있어 매우 고품질 영상을 표현할 수 있으며, 작은 소자 크기로 인하여 도파로 기술에도 적용될 수 있기 때문에 넓은 시야각을 제공하는 것과 동시에 수 mm 이내의 두께로 광학 합성부를 구현할 수 있다는 장점을 갖는다.

핀미러 기술의 가장 큰 특징은 핀 홀 효과를 사용하여 가상 영상의 심도(depth of focus)를 확장시킨다는 점이다. 이는 증강현실에서 매우 중요한 요소인데, 실제 물체와 가상 물체간의 초점 불일치, 그리고 가상물체의 초점정보와 양안 시차 정보의 불일치는 사용자에게 시각 피로를 야기하기 때문에 사용 편의성 개선을 위해서는 필수적으로 해결되어야 하는 문제이다. 이러한 특징을 바탕으로 핀미러 기술은 국내외 대기업들과 언론에서 큰 주목과 관심을 받고 있다. 하지만 핀미러 기술은 단일 기업의 독점적인 기술인 점과 아직은 개발 초기 단계이기 때문에 외부의 다른 기업이나 연구소를 통해 충분히 검증이 되지 않았다는 점이 개선해야 될 부분으로 평가되고 있다.

그림 8 a) 핀미러 기술 개요 및 b) 핀미러를 통해 구현된 가상 영상



(오른쪽 촛불 및 받침) (출처 : 레터널)

표 3은 증강현실 기기에서 적용되는 주요 광학 기술들과 해당 기술의 특징 및 이를 활용하여 제품을 생산하는 기업을 정리한 것이다. 표에 정리된 광학 기술 이외에도 다중초점 기술, 가변초점 기술과 같은 다양한 방법들이 제안되고 있으나, 기술 구현의 난이도 및 성능의 한계로 인하여 대중화를 위한 기술로 발전되는 데에는 더 많은 연구와 노력이 필요할 것으로 생각된다.

표 3 광학 기술별 특징 비교

	반거울	반거울 배열	HOE/DOE	핀미러
폼팩터	제한적	우수	우수	우수
시아각	제한적	넓음	넓음	매우 넓음
초점 구현	제한적	제한적	제한적	가능
영상 품질	매우 우수	우수	보통	우수
광 효율	우수	낮음	낮음	보통
공정 난이도	매우 낮음	높음	매우 높음	낮음
주요 활용 기업	Google, Meta, ODG, nReal,	Lumus, Optinvent	마이크로소프트, 매직리프, DigiLens, WaveOptics	레티널

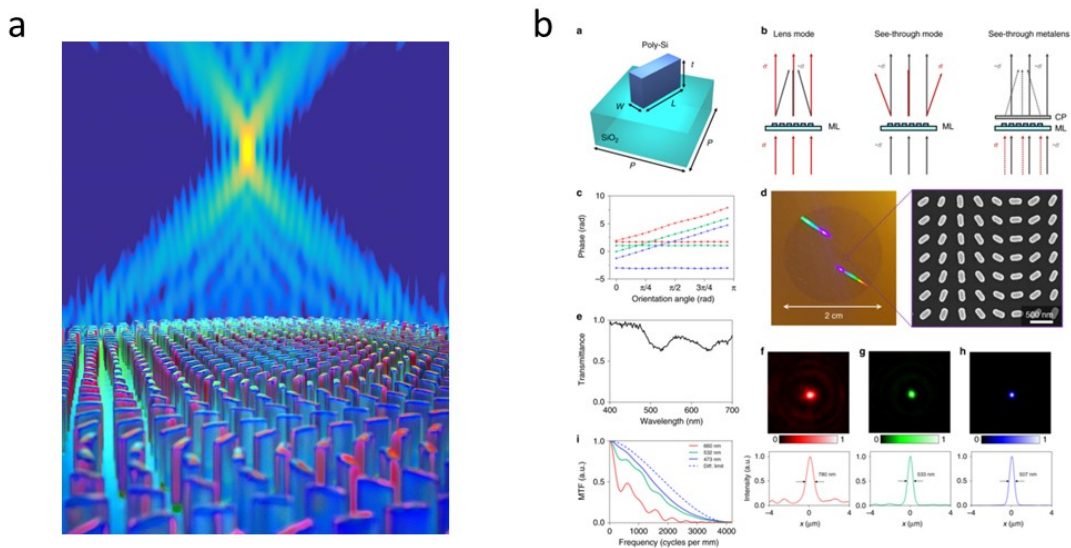
3) 차세대 광학 기술

광학 기술은 다른 기술 분야에 비하여 상대적으로 발전 속도가 더딘 편이라고 볼 수 있다. 이는 빛이 갖는 물리적인 특성으로 인하여 광학 소자들을 단순히 소형화하는 데에는 물리적 한계가 있으며, 빛의 파장, 간섭, 회절, 수차와 같은 특징들을 복합적으로 고려해야 하기 때문이다. 이러한 많은 광학 연구자들은 이러한 광학의 물리적 한계를 극복하고자 노력하고 있으며, 나노 광학 및 메타 소자에 대한 연구에서 그 해결에 대한 실마리를 찾아볼 수 있다. 메타 광학 소자는 빛의 파장보다 작은 나노 구조물을 특정한 형태로 배열함으로써 자연계에서는 볼 수 없는 특징을 갖는 광학 소자를 구현하는 것이 가능하다. 이러한 메타 표면을 갖는 렌즈는 그 두께가 수백에서 수십 나노미터에 불과하지만 실제 광학 소자와 동일하거나 더 뛰어난 특성을 갖기 때문에 차세대 증강현실 기기에서 광학적 성능의 한계를 뛰어넘을 수 있을 것으로 기대된다.

미국 하버드 대학교의 Capasso 교수 그룹은 Science지에 메타 표면으로 만든 렌즈에 대한 연구를 발표함으로써 메타 표면을 활용한 광학 소자의 물리적 한계 극복 가능성에 대한 가능성을 제시하였고, 서울대학교 이병호 교수 그룹은 메타 표면을 적용한 증강현실 광학 소자를 직접 제작하여 초경량 고성능 증강현실 기기의 구현

가능성에 대한 연구를 Nature Communication지에 소개한 바 있다. 이러한 기초 학문에 대한 심도 있는 연구는 미래의 고성능 증강현실 기기에 대한 구현 가능성을 더욱 높여주고 있으며, 조만간 증강현실 기기들이 보급되어 널리 사용될 것임을 예측할 수 있도록 해주고 있다(그림 9).

그림 9 메타렌즈



a) 메타 렌즈의 개념도, b) 증강현실 광학계로 적용한 메타렌즈 특성 예시 (출처 : Harvard Univ., 서울대학교)

2.2 센서 및 인터랙션 기술

디지털기기에 대한 사용자의 정보 입력 방식은 단추를 누르는 방식에서 출발하여 점차적으로 사람의 자연스러운 행동을 기계가 인식해가는 방향으로 발전하고 있다. 여전히 VR 게이밍에서는 여러 버튼 및 조이스틱이 달려있는 게임 패드와 같은 컨트롤러가 활용되지만, 게임 센서에도 자이로 센서와 적외선 센서들이 내장되어 사용자의 움직임과 연동되어 게임을 조작할 수 있는 방향으로 발전하고 있다.

이외에도 마이크로소프트社의 Kinect나 Leap Motion社의 손 인식 센서 같은 적외선 기반 깊이 인식 센서는 적외선 패턴 투사 영상으로 3차원 물체의 정확한 형태를 고속으로 인지하여 사람의 신체동작 내지는 손동작과 같은 구조를 파악하고 이를 입력 수단으로 활용한다. 이는 증강현실 기기에서 보다 자연스러운 입력수단을 제공하고, 입력 장치를 휴대해야 하는 번거로움을 없애주기 때문에 더욱 중요한 핵심기술로 자리

잡을 것으로 예상된다. 또한 시선 추적 기능도 증강현실 기기에서 그 중요성이 부각되고 있다. 시선 추적은 사용자가 관찰하고 있는 대상의 위치와 깊이 정보 등을 포함하는데, 이는 사용자가 안구를 이용하여 가상 정보를 제어하도록 할 수 있다. 뿐만 아니라, 사용자의 안구 방향, 간격 및 동공 크기와 같은 생리적 상태 정보와 더불어 사용자가 인지하는 깊이 정보에 맞추어 가상 영상 정보를 변화시켜 초점 조절 불일치 문제 등으로 인한 시각 피로를 해결하는데 매우 중요한 역할을 할 수 있기 때문이다.

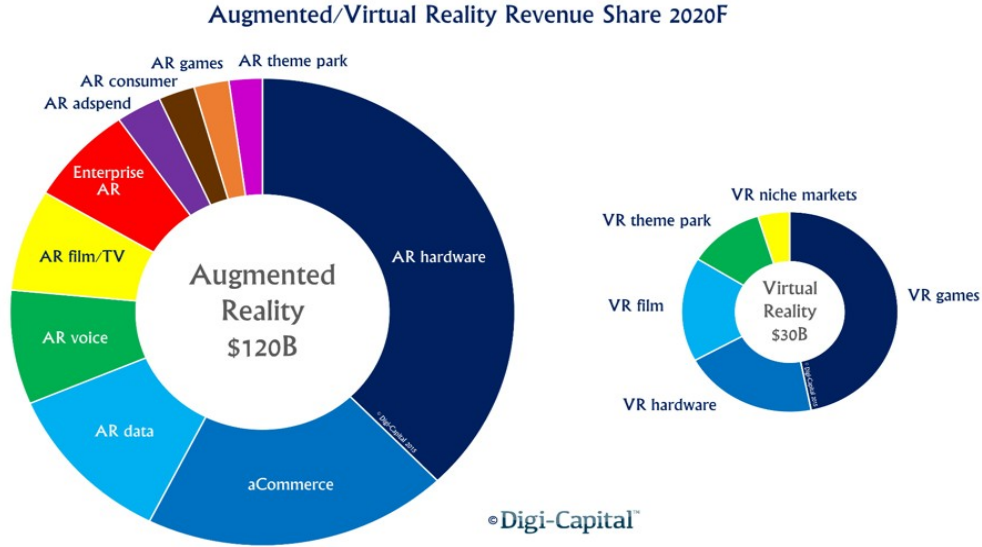
증강현실 기기에는 3차원 스캐너, 구조광(structured illumination), ToF 센서(Time of Flight) 등을 적용하여 깊이지도를 작성하는 기술들이 포함되고 있다. 이러한 센서들이 포함된 증강현실 기기는 실시간 주변 환경 인식(Simultaneous Localization And Mapping : SLAM) 기능을 바탕으로 사용자가 위치한 공간을 인식하여 가상 물체들이 현실의 타자위에 정확하게 올려져있는 것처럼 보이게 한다거나, 가상의 물체가 현실의 물체 뒤에 가려지는 것과 같은 효과를 구현하는데 활용되어 보다 자연스럽게 실생활 공간에 가상의 정보가 융합될 수 있도록 한다. 이와 더불어 자이로 센서와 같은 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서 및 다중 입체 카메라를 활용한 사용자의 자세와 움직임에 대한 정확한 추적은 사용자의 움직임에 맞추어 정확한 3차원 영상 표현을 구현하게 하는데 매우 중요한 역할을 한다.

이러한 행동 인식 및 환경 인식 기술들은 최근 활발하게 연구되고 있는 인공지능 및 기계학습과 연동되어 사물에 대한 정확한 분류와 사용자 행동의 정밀한 분석 및 예측을 통하여 사용자의 의도를 정확하게 인지할 수 있도록 성능을 높여가고 있다.

2.3 소프트웨어 기술

소프트웨어 기술은 기본적으로 플랫폼 기술, 센서 융합 기술, 응용 서비스 기술로 분류할 수 있다. 플랫폼 기술과 센서 융합 기술은 주로 하드웨어 개발사들이 주도적으로 참여하고 있으며, 이를 기반으로 SDK(Software Development Kit)를 공개함으로써 다양한 개발자들이 응용 서비스 기술을 개발할 수 있도록 하고 있다. 응용 서비스 기술은 다른 기술들에 비하여 하드웨어 기술에 종속적이지 않고, 진입 장벽이 낮기 때문에 대기업뿐만 아니라 중소규모의 개발사, 심지어 개인 개발자도 쉽게 제품을 만들 수 있다. 그러나 콘텐츠 및 응용 서비스는 직접 최종 소비자가 접하게 되는 제품으로 모든 서비스 기술 중에서 가장 큰 영향력이 있고, AR 기술이 널리 사용되고 보급되는데 가장 중요한 역할을 하게 되며, AR 기술이 어느 정도 성숙기에 다다르게 되면 시장 규모 또한 하드웨어만큼 중요해질 것으로 예상된다(그림 10).

그림 10 증강현실 및 가상현실 분야별 시장 규모 전망



(출처 : Digi-Capital)

증강현실 기술은 현실의 3차원 공간상에 영상 정보를 표현하기 때문에, 기존의 단순 2차원 정보만으로는 몰입감 있고 실감나는 서비스를 제공하는데 한계가 있다. 그렇기 때문에 Unity Technology社의 Unity 또는 Epic Games社의 Unreal Engine과 같은 3차원 게임 엔진 기반의 중간 플랫폼을 바탕으로 많은 서비스들이 개발된다. 이와 더불어 공간 인식, 행동 인식과 같은 하드웨어 센서와의 융합 기술이 필수적이므로, Apple의 AR Kit, Google의 AR core와 같은 센서 융합 기반 플랫폼 기술 또한 제공되고 있다. 하지만 현재 이를 바탕으로 개발된 응용서비스들은 AR 장비가 고가이기 때문에 VR 장비 내지는 스마트폰, 태블릿 컴퓨터를 기반으로 간접적으로 체험할 수 있지만, 그 몰입감과 활용성의 한계로 인하여 응용처와 파급력은 실제 AR기기를 사용하는 것에 비하여 많은 제약이 있다.

2.4 디바이스 기술

많은 소비자들과 전문가들은 궁극적인 AR 디바이스는 콘택트렌즈 내지는 가벼운 안경형태가 되어야 할 것으로 보고 있다. 하지만 그러기 위해서는 많은 기술적 난관을 극복해야하며, 단순히 AR 관련 기술뿐만이 아니라 초소형 센서, 고효율 배터리, 나노 소재, 초정밀 공정, 인간 과학, 뇌 과학과 같은 기초과학의 전반적인 분야의 발전이 전제되어야 한다.

이러한 연유로, 성능 및 외형에 맞추어 현재 디바이스 폼팩터(form factor)는 헬멧형, 고글형, 안경형의 세 가지로 크게 구분할 수 있으며, 이러한 폼팩터에 따라서 AR 디바이스의 성능 또한 차이가 발생하게 된다(그림 11). 일반적으로 크기가 큰 폼팩터를 갖춘 디바이스일수록 많은 하드웨어적 기능을 포함하기가 수월하며, 이를 활용하여 고화질 영상 및 능동적인 사용자 인터랙션 서비스를 제공하기에 적절하다. VR 디바이스의 경우 대부분 고성능 게임을 구동하기 위하여, 광시야각, 고해상도 3차원 영상 구현, 실시간 사용자 움직임 추적 기능 등을 제공하기 위해서 헬멧형 제품의 폼팩터를 채용하게 된다(그림 12). AR 디바이스의 경우 이러한 제품으로는 마이크로소프트의 홀로렌즈와 매직리프社의 매직리프원 등을 들 수 있다. 해당 제품들은 6자유도 추적기술과 동작인식센서 등을 갖추고 있어 자연스럽게 가상 영상이 현실 공간에 어우러질 수 있도록 구현하는 것이 가능하다.

그림 11 헬멧형 및 고글형, 안경형 폼팩터를 대표하는 증강현실 기기

Smart Glasses: The Race Is On

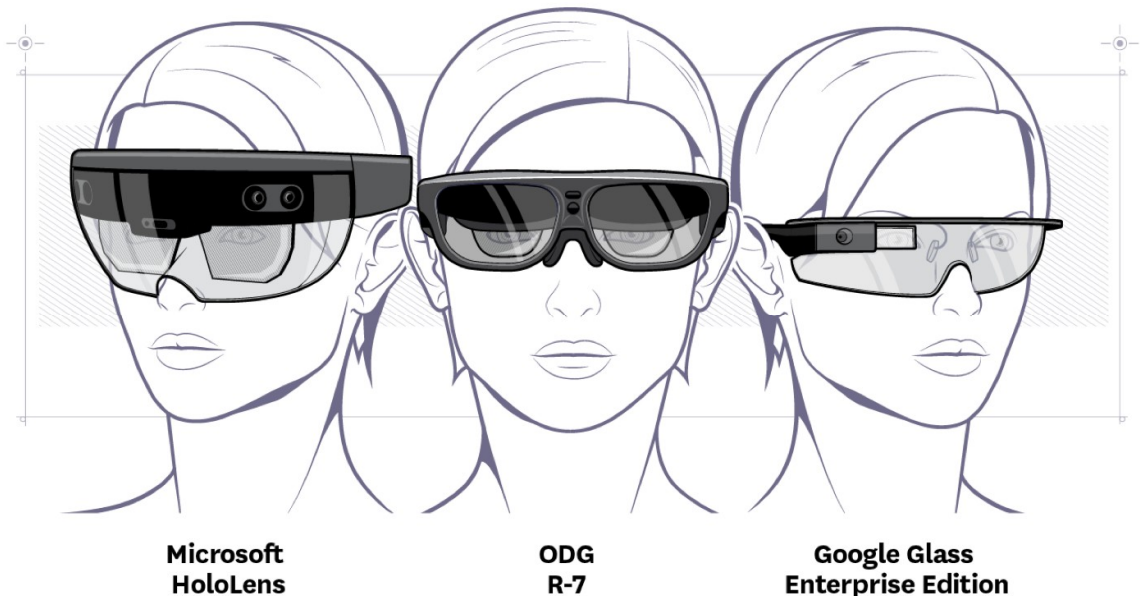
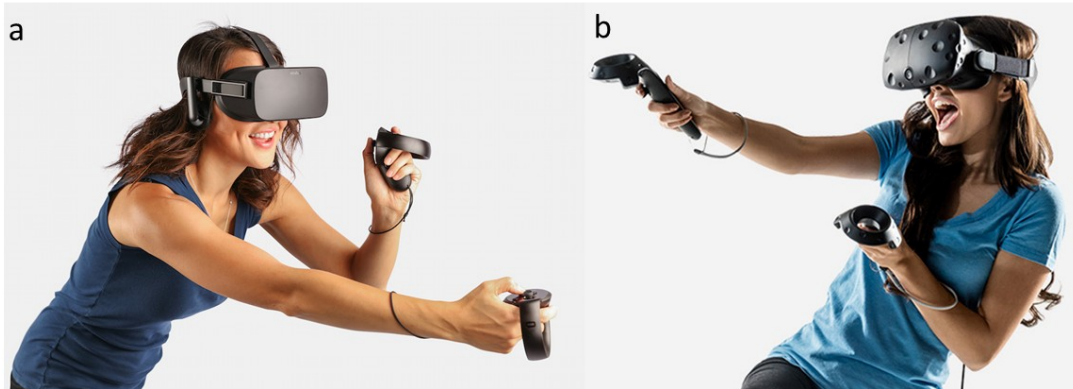


ILLUSTRATION BY CLINT FORD
 FROM "THE BATTLE OF THE SMART GLASSES,"
 BY MICHAEL E. PORTER AND JAMES E. HEPPERMANN, NOVEMBER–DECEMBER 2017

© HBR.ORG

(출처 : Harvard Business Review)

그림 12 VR 기기의 착용 예시



a) Oculus b) Vive (출처 : Oculus, HTC)

안경형 디바이스는 기존의 안경과 같은 폼팩터를 유지하면서 증강현실 기능을 구현하는 것을 목표로 한다. 작은 프레임 내부에 디스플레이 및 광학계, 연산 장치 및 배터리가 모두 포함되어야 하기 때문에, 광학적 성능이나 영상 처리 성능에는 많은 제약이 따른다. 그렇기 때문에 현재는 많은 디바이스들이 휴대전화와 같은 장치에 유선으로 연결되는(tethered) 형태를 갖춘 경우가 많으며, 제공되는 영상 또한 단안으로 제한되는 경우가 많다. 이러한 성능의 한계로 디바이스에서 제공되는 서비스 또한 일정, 날씨 안내, 간단한 메시지 표시와 같은 스마트폰에서 제공되는 서비스의 보조적인 개념으로 접근하고 있다.

캐나다 North社의 Focals와 같은 경우는 기존의 안경과 동일한 형태의 폼팩터를 구현하는 것을 최우선으로 하여, 렌즈 안에 HOE로 만들어진 렌즈를 코팅하고 마이크로 프로젝터를 디스플레이로 사용한 시스템을 선보였다. 이를 바탕으로 기존 안경과 매우 흡사한 형태의 단안용 증강현실 스마트 글래스를 구현하였으며, 일반 안경 렌즈와 호환성을 갖춰 시력 교정을 위한 처방 기능을 넣는 것 또한 가능하다. 미국 Vuzix社의 Blade의 경우 HOE 및 도파로를 기반으로 선글라스와 유사한 형태의 스마트 글래스를 선보였다. 영국 DigiLens社의 경우 HOE 및 2매의 도파로 구조를 적용하여 높은 투과도와 밝기를 갖는 안경 형태의 단안용 스마트 글래스를 선보였다. 이 시스템은 핸드폰과 같은 외부 영상 소스를 연결하여 단순히 디스플레이로만 활용하는 방식을 채택하여 프로세서부를 제외하였고, 결과적으로 시스템의 부피 및 무게를 획기적으로 줄였다. 한국의 레티널 역시 외부 기기에 연결되는 형태의 단안용 증강현실 스마트 글래스를 선보였는데, 핀미러 기술을 적용하여 Focal 제품과 마찬가지로 일반 안경과 매우 흡사한 외관을 갖고 있으면서도 보다 고효율, 고품질의 영상을 제공할 수 있어 큰 주목을 받고 있다.

그림 13 안경형 증강현실 스마트 글래스

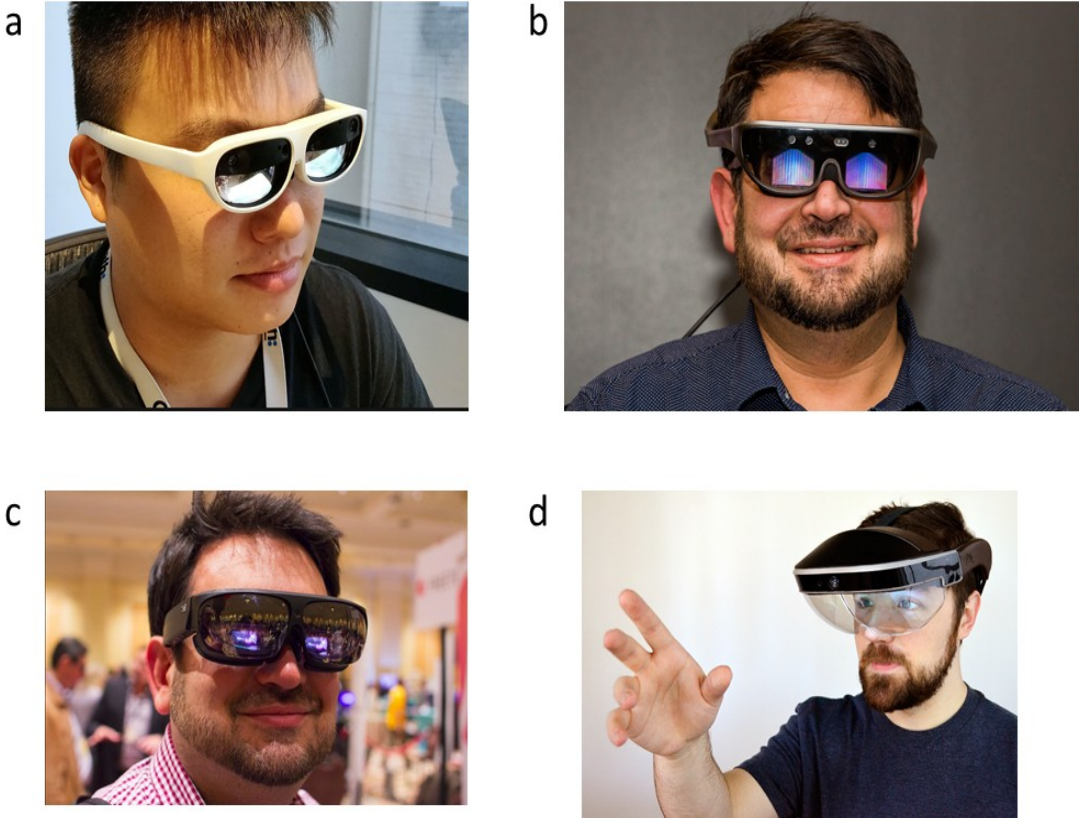


a) DigiLens, b) Vuzix, c) North, d)레티널 (출처 : Tom's hardware, the Verge, iMore, Road to VR)

고글형 제품의 경우 헬멧형과 안경형의 중간개념으로, 사용되는 용도에 맞추어 선택적으로 하드웨어 기능을 추가 또는 강화하여 활용성을 높인 제품이다. 장치의 사용감을 개선하면서 부족한 컴퓨팅 파워를 향상시키기 위하여 우선 연결된 프로세싱부를 따로 사용하는 방법도 많이 사용되지만, 궁극적으로는 무선 통신을 통하여 디스플레이와 프로세싱부를 분리하는 방법이 적용될 것으로 예상된다.

중국의 Rokid社는 영국 WaveOptics社의 HOE 기술을 적용하여 스마트 고글을 선보였다. 미국 ODG社와 중국의 nReal社는 반거울 구조의 광학계를 적용하여 다소 시스템의 부피는 크지만, 외부 환경 인식 센서를 추가하여 스마트 고글의 활용성을 높일 수 있도록 하였다. 미국 Meta社의 경우 곡면 반거울 구조를 사용하여 다소 부피는 크지만 넓은 시야각과 정밀한 사용자 추적 및 동작 인식 기능을 포함하여 산업용 디자인 분야에서 활용성을 높일 수 있는 제품을 선보인 바 있다.

그림 14 고급형 증강현실 기기



a) nReal, b) Rokid, c) ODG, d) Meta (출처 : Engadget, Cnet, Road to VR)

이번 장에서 살펴보았듯이, 초기의 증강현실 기기는 현장의 수요에 맞추어 기능 우선적인 형태를 띄게 될 가능성이 높다. 시간이 지남에 따라서 증강현실 기기가 보급되고 기기의 전반적인 성능이 발전함에 따라 점차적으로 많은 기능들이 하나의 디바이스 안에서 모두 구현되어 갈 것으로 예상되며, 이는 증강현실 기기의 활용성을 더욱 높여리라고 예상된다.

2.5 응용 서비스

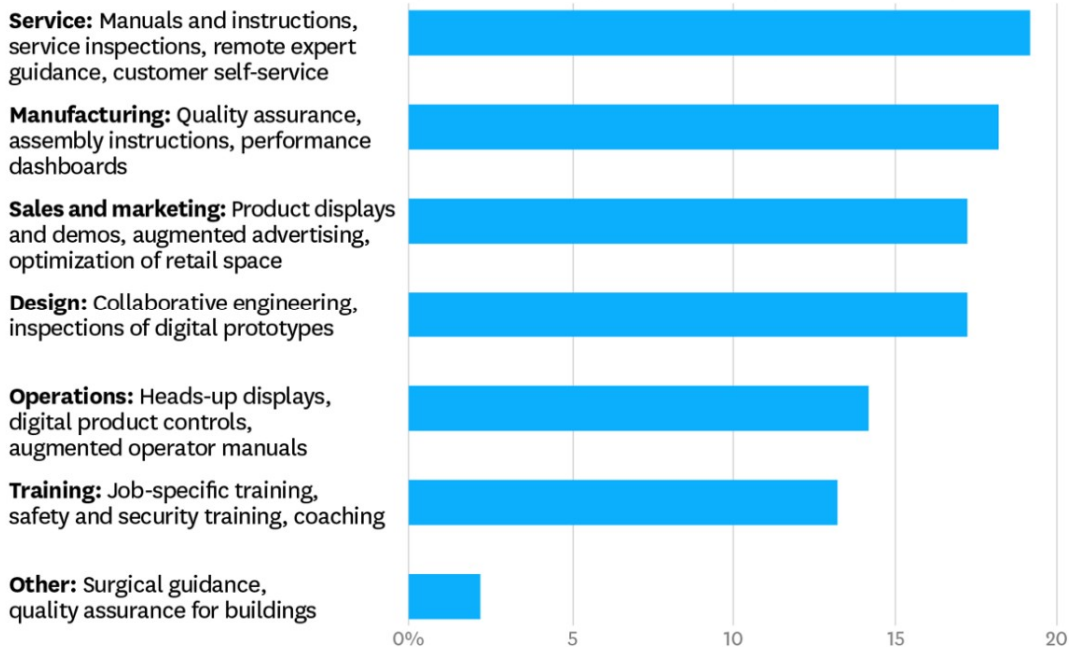
Harvard Business Review에서는 증강현실 기기의 응용서비스는 우선적으로 산업 분야에서 활용될 것으로 예상하고 있다(그림 15). 증강현실 기기를 활용한 실시간 원격 지원, 입체 매뉴얼과 같은 활용 예시는 전문적인 인력을 활용함으로써 소요되는 비용과 시간을 획기적으로 절감하는 동시에 전반적인 업무 효율성을 극대화

시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한 생산 공정에 대한 정확한 안내 및 교육, 품질 관리 등에서 그 활용성이 높을 것으로 예상되며, 제품에 대한 디지털 프로토타이핑, 원격 업무 협업과 같은 제품 설계 및 기획 단계에서의 활용성 또한 다양할 것으로 기대된다. 제품이나 서비스의 홍보, 간접 체험과 같은 마케팅적인 측면에서도 그 용도가 무궁하며, 게임, 영화와 같은 엔터테인먼트 시장은 이미 많은 사용자들을 확보하고 있다.

그림 15 산업 분야별 증강현실 적용 분야 예시

Enterprise Roles...

Percentage of surveyed developers creating AR experiences in each use category



(N=107)
FROM "AUGMENTED REALITY IN THE REAL WORLD,"
BY HARVARD BUSINESS REVIEW STAFF, NOVEMBER-DECEMBER 2017

© HBR.ORG

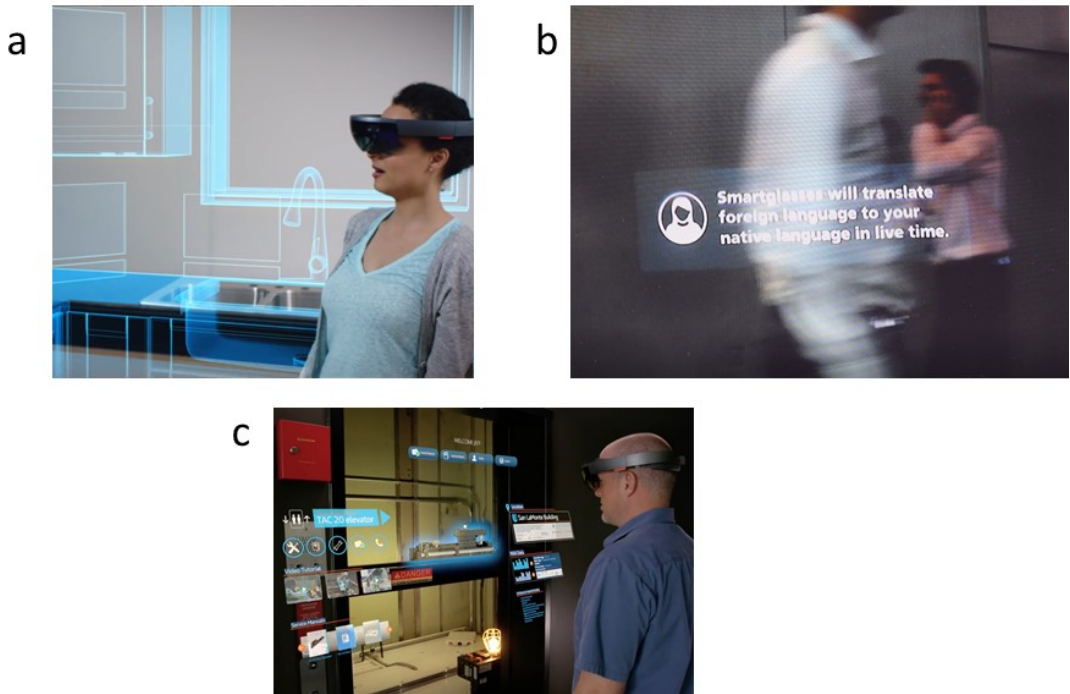
(출처 : [Harvard Business Review](#))

산업 분야 이외에도 의료, 군사와 같은 전문적인 분야에서의 증강현실 기술의 활용성 또한 막중할 것으로 기대된다. 마이크로소프트社は 미군에 10만대의 홀로렌즈를 납품하기로 계약하였으며, 매직리프社 또한 미군 군수용으로 제품을 제공하기 위하여 협의 중인 것으로 보고된 바가 있다. 이는 증강현실 기술이 군사 훈련 및 군사 작전 수행 등에 있어서 높은 활용성을 갖기 때문인 것으로 볼 수 있다. 2018년 10월에는 미국 FDA에서

홀로렌즈를 사용한 증강현실 시스템의 수술 활용을 승인했다. 이는 증강현실 기기를 활용하여 원격 수술과 같은 새로운 의료 서비스의 등장을 기대할 수 있게 하며, 전반적인 의료 서비스의 품질이 높아질 것이라는 기대감을 갖도록 한다.

이외에도 소셜 네트워킹, 원격 미팅, 내비게이션, 실시간 자막을 통한 통역, 보조 영상 활용과 같은 다양한 응용 예를 찾아볼 수 있으며, 증강현실 기기가 보급되어감에 따라 더욱 다양한 응용서비스들이 등장할 것으로 기대할 수 있다(그림 16).

그림 16 증강현실 응용 서비스의 예시



a) 증강현실 주방 설계 b)증강현실 자막 통역 서비스 c) 증강현실 시스템 정비 (출처 : Microsoft, 레티널, Thyssenkrupp)

III 결론

지금까지 증강현실 기술 개발 동향과 시장 전망, 증강현실 기술의 영향력과 파급력에 대하여 살펴보았다. 증강현실 시장은 급격하게 성장하는 시장으로 많은 기업들이 관심을 갖고 지켜보고 있으며, 시장 선점을 위하여 적극적으로 투자하고 있다. 기업의 규모에 관계없이 전반적인 증강현실 하드웨어 및 소프트웨어 서비스의 생태계의 구축을 위해 협력하고 있으며, 국내 기업들도 스마트폰 시장에서 축적된 기술력을 바탕으로 경쟁력을 갖추기 위해 투자와 노력을 아끼지 않고 있다. 물론 증강현실 기업의 선두주자로 인식되던 ODG社나 Meta社는 경영상의 어려움으로 인하여 2019년 사업을 정리하는 등 순탄치 않은 일도 있었지만, 유사한 기술을 바탕으로 중국의 nReal社나 DreamWorld社는 적극적으로 투자를 유치하고 있다.

많은 전문가들이 4차 산업혁명으로 인하여 기존의 생활 방식과 가치관을 비롯하여 많은 것들이 변화되고, 경제, 사회, 문화 전반적인 영역에 큰 영향을 끼칠 것으로 예상하고 있다. 인공지능을 필두로 하는 산업의 자동화는 단순한 노동 업무를 대체하여 일자리 감소를 가져오고, 개인의 활동을 수집/분석하는 센서 및 데이터 처리 기술 발달로 인하여 교육, 의료, 복지와 같은 많은 서비스들이 개인화 될 것으로 예상하고 있다. 하지만 4차 산업혁명의 중심에는 항상 사람이 있기 때문에, AR 디바이스는 새롭게 등장하는 많은 디지털 서비스와 사람을 이어주는 중심에 위치한 허브(hub)로서 핵심적인 역할을 하게 될 것이다.

현재는 AR 기술이 본격적으로 관심을 받기 시작한 초기 단계로, 전반적인 기반 기술의 한계와 소량 주문 생산으로 인한 높은 비용, 디바이스 보급 상황 및 응용서비스 개발자들의 비적극적인 참여에 따른 부족한 콘텐츠 등으로 인하여 증강현실 기술이 당장에 대중화되기에는 장벽이 높으며 시간이 더 소요 될 것으로 예상된다. 또한 증강현실 디바이스 및 서비스의 사용으로 인한 인체에 대한 부작용, 또는 사생활 침해, 보안 문제와 같이 증강현실 디바이스의 보급에 따라 예상되는 사회적 문제에 대한 조사도 미비한 상황이며, 이로 인한 증강현실 디바이스 보급에 대한 소비자들의 막연한 두려움과 거부감 또한 해결해야 할 과제이다. 그럼에도 불구하고, 증강현실 기술은 물리적 공간의 제약을 완화하며, 보다 저렴한 비용으로 양질의 서비스를 누릴 수 있게 하여, 사회 계층별로 제공되는 정보의 편중을 해결하여 전반적인 삶의 질 향상을 가져올 수 있을 것이다.

스마트폰에서 착용형 컴퓨팅 디바이스로 큰 패러다임이 변하는 현재 시점에서, 국내 기업들이 미래의 거대한 시장에서 경쟁력을 갖추고 영향력을 끼치기 위해서는 적극적인 기술 개발에 대한 투자와 신기술 발굴에 대한 신중한 검토가 필수적일 것이다.

저자_ 박순기 (Soon-gi Park)

• 학력

서울대학교 전기컴퓨터 박사
 경희대학교 정보디스플레이 석사
 경희대학교 정보디스플레이 학사

• 경력

現) 주식회사 레티널 책임연구원
 前) 한국과학기술연구원 연구원/선임연구원

참고문헌

- 1) Amitai, 2004, "Extremely compact high-performance HMDs based on substrate-guided optical element," SID 04 Digest, pp.310-313
- 2) Amitai, 2005, "A two-dimensional aperture expander for ultra-compact, high-performance head-worn displays," SID 05 Digest, pp.360-363
- 3) Khorasaninejad et al., 2016, "Metalenses at visible waelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging," Science 352(6290), pp 1190-1194
- 4) Lee et al., 2018, "Metasurface eyepiece for augmented reality," Nature Communications, 9, article 4562
- 5) 삼성, <https://www.samsung.com/sec/wearables/gear-vr-r325/>
- 6) AR Smart Glasses Go CPU-Free With New DigiLens Crystal, <https://www.tomshardware.com/news/digilens-crystal-ar-smart-glasses-augmented-reality,38300.html>
- 7) Augmented reality in the real world, Harvard Business Review, <https://hbr.org/2017/11/a-managers-guide-to-augmented-reality#how-does-augmented-reality-work>
- 8) Digi-capital, <https://www.digi-capital.com/>
- 9) Focals by North promise to bring smart glasses to all of us, <https://www.imore.com/focals-north-promise-bring-smart-glasses-all-us>
- 10) Hands-on: LetinAR Brings a Larger FOV & Depth of Field to AR with 'Pinhole Effect' Optics, <https://www.roadtovr.com/letin-ar-pinhole-effect-optics-larger-fov-mwc-2019/>
- 11) HTC Vive, <https://www.vive.com/>
- 12) Karl Gutttag on Technology, <https://www.kgutttag.com/>
- 13) LetinAR, <http://letin.com>
- 14) Magic Leap One Teardown, <https://ko.ifixit.com/Teardown/Magic+Leap+One+Teardown/112245>
- 15) META Raises \$50M in Funding to Accelerate "Groundbreaking" AR Tech, <https://www.roadtovr.com/meta-raises-50m-in-funding-to-accelerate-groundbreaking-ar-tech/>
- 16) Nreal Light are mixed reality glasses in disguise, <https://www.engadget.com/2019/01/08/nreal-light-mixed-reality-glasses-sunglasses-hands-on/>

- 17) Oculus, <https://www.oculus.com/>
- 18) Rokid Project Aurora USB-C smart glasses could be a wearable Nintendo Switch display, <https://www.cnet.com/news/rokid-project-aurora-aims-to-be-a-nintendo-switch-compatible-pair-of-usb-c-smartglasses/>
- 19) Sony, <https://www.playstation.com/en-us/explore/playstation-vr/>
- 20) Vuzix Blade AR glasses are the next-gen Google Glass we've all been waiting for, <https://www.theverge.com/2018/1/9/16869174/vuzix-blade-ar-glasses-augmented-reality-amazon-alexa-ai-ces-2018>
- 21) Why I still don't want to wear smartglasses, <https://www.cnet.com/news/i-still-dont-want-to-wear-smartglasses-not-now-at-least/>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 April vol.5 no.4



02

3차원 공간 광 이미지 형성 기술

김 휘 (고려대학교 세종캠퍼스 전자 및 정보공학과 교수)

I 서론

1. 3차원 공간 광 이미지 형성기술 개요

최근 4차 산업혁명의 시대적 트렌드와 함께 공간을 3차원으로 인식하고 공간을 있는 그대로 재현하는 인공지능적 3차원 기술들의 중요성이 부각되고 있다. 인공지능과 함께 융합된 3차원 디스플레이 기술은 시장성과 기술성에서 전망이 밝다고 할 수 있다. 3차원 디스플레이와 콘텐츠 시장은 그 자체만으로는 세계적인 규모의 시장을 형성할 수 없었지만, 인공지능 기반의 스마트, 모바일 기술 등과 개념적으로 결합하면서 새로운 4차 산업혁명 시대의 핵심 기술 아이콘으로 재조명되고 있다. 이와 동시에 3차원 디스플레이 기술 그 자체도 창의적인 신개념들의 각축장이자 혁신의 대명사격으로 인식되고 있는만큼 관련기술 발전과 융합의 가속화, 그에 따른 저변의 확대가 빠르게 이루어지고 있다.

이러한 시점에서 3차원 공간 광학 이미지 형성 기술에 대해서 살펴보고 핵심 난제는 무엇이며, 이를 해결하기 위해 연구개발이 나아가야 할 방향이 무엇인지 타진해보는 것은 시의적절하다고 판단된다. 종래의 3차원 디스플레이는 관찰자의 양안에 각각 다른 영상을 제공함으로써 양안시차를 생성하여 입체감을 제공하고, 눈의 초점 조절과 양안의 수렴 정보를 일치시킬 수 있도록 초점 조절 정보를 제공함으로써 실생활을 할 때와 같은 입체 정보를 제공하는 기술이 이용되고 있는데, 본 고에서는 이러한 양안시차 형성 기반의 3차원 디스플레이가 아니라, 실제로 3차원 공간상에 직접적으로 완전한 3D 입체 광 이미지를 형성하는 보다 물리적이고 직접적인 3차원 공간 광학 이미지 형성기술에 대해서 다루고자 한다.

홀로그램은 이론적으로 3차원 공간상에 존재하는 빛 분포를 가장 완전하게 제어할 수 있는 기술이고, 이를 기반으로 하는 홀로그래픽 3차원 디스플레이는 3차원 공간상의 물체를 현실 그대로 재현할 수 있는 가장 완전한 궁극의 3차원 디스플레이 기술이다. 스타워즈, 아바타, 아이언맨과 같은 공상과학 영화에 나오는 홀로그래픽 3차원 디스플레이 원천기술 개발에 이르기까지 3차원 디스플레이 기술의 스펙트럼이 넓어졌다. 물론 영화 장면에 나오는 홀로그램 영상들은 컴퓨터 그래픽을 통해 만들어진 허상일 뿐이며, 현재로서는 영화에 나오는

홀로그래프를 구현에는 초고해상도 공간 광 변조기(Spatial Light Modulator: SLM)의 부재, 벌크한 광학 시스템, 저해상도와 좁은 시야각(Field Of View: FOV) 등의 다양한 기술적 제약조건이 따른다.

하지만 연구자들은 이 제약조건들을 해결하기 위해 복소 공간 광 변조기 개발, 3차원 복셀(voxel)¹⁾ 디스플레이, 홀로그래픽 증강현실(Augmented Reality: AR) 스마트 글래스 기기 등 다방면으로 연구개발 해오고 있다. 영화 속 홀로그래프 기술을 실제로 구현하기 위해서는 더 깊고 심화된 연구개발이 필요하겠지만 실현 가능성은 충분하다.

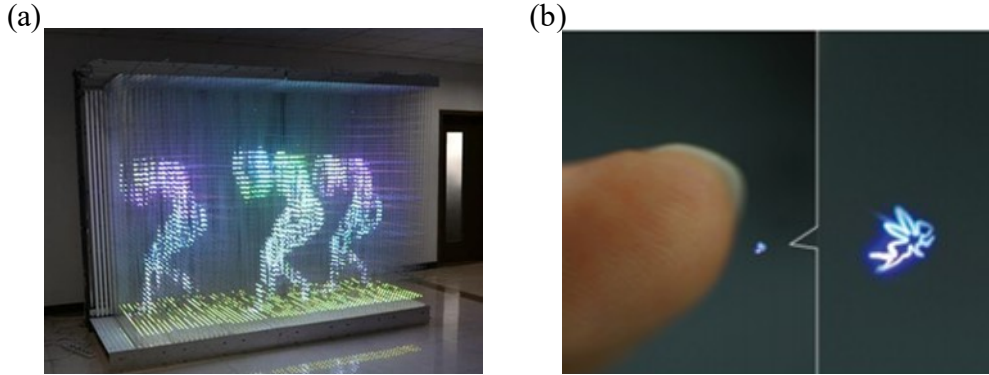
본 고에서는 Volumetric 3D 디스플레이, 홀로그래픽 3D 디스플레이 등 3차원 공간상에 실제로 직접적인 3차원 공간 광 이미지를 형성하는 3차원 공간 광학 이미지 형성 기술의 트렌드와 핵심 이슈, 그리고 본 저자가 생각하는 3차원 공간 광 이미지 형성 기술의 궁극적인 발전 방향에 대해 기술하고자 한다.

2. 3차원 공간 광 이미지 형성에 대한 분류

3차원 공간 광 이미지를 형성하기 위한 방법은 크게 다음과 같이 분류된다. 첫째, light emission voxel의 공간 분포에 의한 공간 광 이미지 형성이다. 공간상에 light emissive voxel의 분포를 직접적으로 만들어내어 객체의 3차원 공간 이미지를 형성하는 방식이다. 이해를 돕기 위한 가장 기본적인 방식으로 3차원으로 LED(Light Emitting Diode)를 배열하여 디스플레이를 구현한 것을 예로 들 수 있는데(그림1a), 이러한 LED 배열은 시스템의 프레임에 의해 공간상에 구현되며 각 LED의 상대적 위치를 점등하면서 3차원 좌표계상의 발광 점들의 집합으로 3차원 객체를 표현한다. 복셀(voxel)은 3차원 공간에서 정규 격자 단위으로써, volumetric 3D 디스플레이의 기본적인 구성 요소이며 최근 활발하게 연구되고 있다. LED 배열 광학계와 같은 고정 프레임이 없는 자유 공간상에 복셀 단위로 3차원 물체를 공간상에 형성하는 기술들이 제시되고 있다. 레이저 플라즈마 3차원 디스플레이는 가시광선 파장 이외의 파장을 가지는 참조 고출력 펄스 레이저로 특정 지점에서 공기 플라즈마를 발생시키고, 이 플라즈마 폭발에 의해 방출되는 빛을 복셀로 삼아 물체를 구현하는 볼륨 디스플레이 기술(그림1b)을 일컫는다.

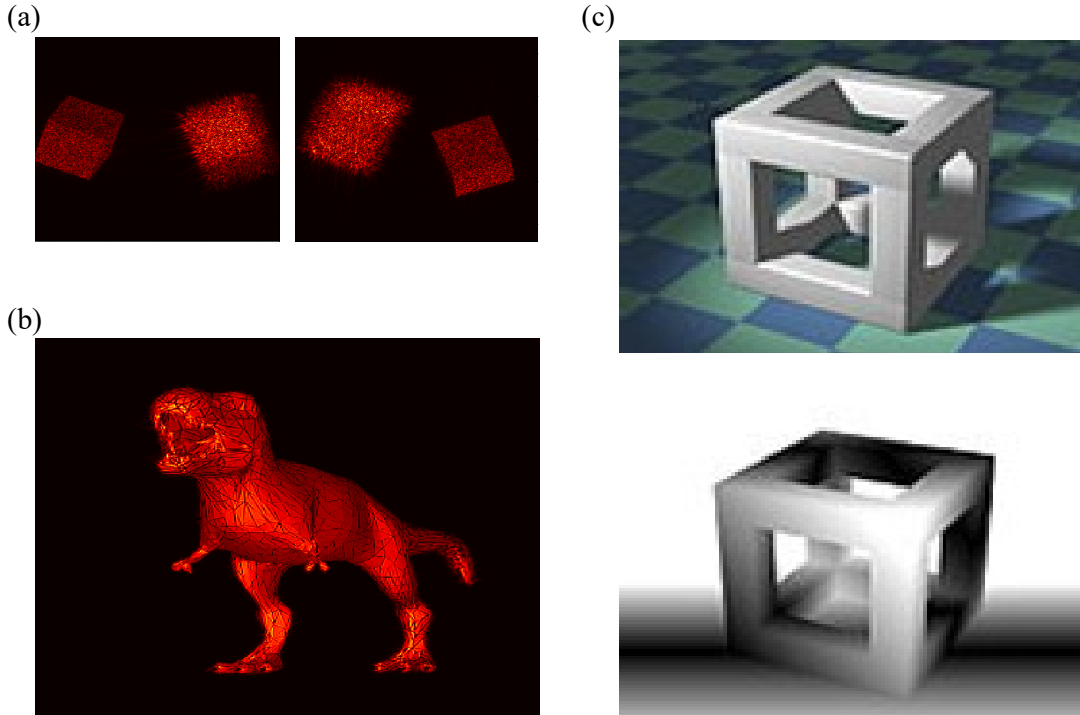
1) 체적(volume)과 픽셀(pixel)의 혼성어

그림 1 (a) LED volumetric emissive light field, (b) 3D 플라즈마 디스플레이



둘째, 디지털 홀로그래피 기반의 공간 광 이미지 형성 기술이 있다. 이는 3차원 물체 또는 영상의 공간 회절 패턴 형태로 기록되는 홀로그램을 디지털 형식으로 생성 및 후처리를 한 후, 공간 광변조 소자를 이용하여 전자식 홀로그래픽 디스플레이 상에서 재현하는 것이며, 이때 계산되는 간섭 패턴이 CGH(Computer Generated Hologram)이다. CGH 합성 알고리즘을 확립하는데 있어 입체 구조를 갖는 3차원 물체의 이미지 광파 모델을 설계하는 것이 필수적이다. 3차원 이미지 광파 모델과 관련하여 CGH의 합성의 계산속도 향상은 물론 다양한 3차원 물체의 질감, 조명 효과 등의 시각적 표현과 관련된 이론적 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 홀로그래픽 3차원 이미지 광파의 구조는 광파가 표현하고자 하는 3차원 물체의 표면의 구조, 텍스처 구조에 의해 직접적으로 결정된다. 기존의 포인트 클라우드(point cloud) 방법들에서는 3차원 이미지를 주로 점들의 공간적 집합(point cloud model)으로 표현했는데, 이 방법으로 모델링하여 홀로그램 이미지를 재생하면 마치 안개가 낀 것과 같이 뿌연게 표현되며, 점들이 많아야 하기 때문에 표면이 매끄러운 물체를 묘사하고 광파를 모델링 할 때의 계산량이 매우 크다. 3차원 물체의 표현법으로 컴퓨터 그래픽스 분야에서 일반적으로 쓰이는 삼각형 메쉬 방법(polygon)을 기반으로 한 CGH 합성이 많이 연구되고 있다. 삼각형 메쉬 방법은 3차원 물체 표현의 정밀성에 장점이 있다고 할 수 있다. 또한 Depth-map 방식의 CGH 합성 방법도 있다. Depth-map 방식은 2D intensity 이미지와 깊이를 표현하는 이미지를 부분 구조 합성하여 형성된다. 깊이를 표현하는 이미지는 물체와 관찰하는 시점 사이의 거리 정보를 담고 있는 이미지로써, 2D intensity 이미지 각 픽셀의 깊이를 나타낸다.

그림 2 CGH 합성 알고리즘



(a) point cloud방식, (b) polygon방식, (c) depth-map방식

3. 3차원 공간 광 이미지를 구현하기 위한 국내 연구 동향

디지털 홀로그래피의 3차원 공간 광 이미지의 디스플레이 기술에 있어서 가장 기본적인 소자는 빛의 진폭 또는 위상을 표현할 수 있는 소자인 공간 광 변조기이며, 이를 기본적인 영상 표시 장치로 이용하여 3차원 홀로그램 영상을 구현한다. 특히 최근의 가상(Virtual Reality: VR) 및 증강현실(AR) 기술의 트렌드에 발맞춰 증강 및 가상현실에서의 사실적이고 자연스러운 3차원 영상의 구현에 관한 연구가 주목받고 있다.

디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템의 홀로그램 영상의 크기를 증대하기 위해 제안된 시야창 방식의 기술의 대표적 예로 독일의 SeeReal社의 홀로그래픽 디스플레이 기술을 들 수 있는데, 이는 특정한 영상 영역을 사람의 동공 크기와 비슷하게 형성하여 디지털 홀로그램 영상을 시야창 내에서만 볼 수 있게 하는 기술이다. 해당기술에서 빛은 전자기 파동으로서 진폭과 위상을 갖는 전기장의 사인파 형태로 공간을 진행한다.

공간적으로 일정한 배열을 갖는 광 변조기의 한 픽셀에 입사한 광파가 투과하거나 반사할 때 입사 광파의 위상 또는 진폭을 변화시키는 것을 광 변조라고 하고 공간 광 변조기는 이러한 광 변조 픽셀을 2차원 형태로 배열한 소자로서, 회절파의 회절각도 제한에 의해 관찰자가 홀로그래픽 영상을 볼 수 있는 공간은 특정한 넓이의 시야창이라는 공간에 한정된다. 관찰자의 시야가 시야창을 벗어나게 되면 홀로그래픽 영상을 볼 수 없는 단점을 갖고 있어, 관찰자의 동공을 추적하여 시야창을 관찰자의 동공에 맞히도록 하는 추가적인 동공추적장치가 필요하다.

이러한 단점을 해소하기 위해 국내에서는 기가코리아 사업을 통해 한국전자통신연구원(ETRI)을 중심으로 결성된 연구팀이 7년간(2013년~2020년) 약 440억의 정부 출연금을 지원받아 연구를 수행하고 있으며 해당 연구를 통해 360도 시야각을 보이는 테이블 탑(table-top)형 홀로그래픽 디스플레이의 개발을 거의 완성하였고, 20인치 크기의 프로젝션형 홀로그래픽 디스플레이의 개발을 목표로 하고 있다. 이 기술은 고속 동작이 가능한 DMD를 적용하여 초당 15프레임 이상의 속도로 홀로그램 영상 콘텐츠를 시청할 수 있게 하며 렌티큘러 렌즈를 적용하여 수직 시야각을 증대함으로써 추가적인 동공추적장치가 필요 없는 새로운 시스템이다.

제한적인 공간 광 변조기를 가지고도 3차원 공간상에 이미지를 형성할 수 있는 기술 중 홀로그래픽 AR은 차세대 디스플레이로서 크게 주목받고 있다. 엄밀한 의미에서 홀로그래픽 AR 디스플레이는 관찰자의 안구내부 공간에 공간 광 이미지를 형성하는 기술이라고 할 수 있다. 대표적 예로, 최근 마이크로소프트社에서 선보인 홀로그램 광학 소자(Holographic Optical Element: HOE) 기반 증강현실용 HMD(Head-Mounted Display)를 들 수 있다. 이 기술은 홀로그래피 기술을 바탕으로 적색, 녹색 및 청색의 삼원색을 결합하는 광학 소자의 역할을 하며 이를 이용하여 See-through 디스플레이를 구현하여 증강현실을 체험할 수 있는 기기이다. 이는 마이크로소프트社의 홀로렌즈(Hololens) 제품과는 달리, 완전한 입체 홀로그램을 안구 공간 내부에 형성하는 홀로그래픽 AR 기술이다. 또한, 애리조나(Arizona) 대학 연구진은 자동차 또는 항공기에서 사용되는 HUD(Heads Up Display)의 아이박스(eyebow)를 획기적으로 증대시킨 HOE를 도파관(waveguide) 기반으로 구현하였으며, 국내 인하대학교 연구팀에서는 HOE를 이용하여 동적 방법으로 아이박스를 복제하고 초점심도를 제어할 수 있는 HMD 구현 기술을 개발하였다.

최근 주목받고 있는 차세대 원천기술로 메타물질(Meta-material)을 이용한 메타렌즈(Metalens)를 들 수 있는데 이는 나노 구조에 기반을 둔 반(半)투과형 렌즈로 기존 VR/AR 디스플레이를 위한 광학 소자들의 단점인 이미징 렌즈가 눈앞에 위치할 수 없는 문제와 낮은 집광률로 인한 좁은 시야각을 해소하기 위한 획기적인 기술로 주목받고 있다. 국내 주요 연구 기획현황으로는 한국기계연구원을 중심으로 결성된 연구팀이 글로벌프론티

어 사업(3기)을 통해 5년간(2019년~2023년) 약 163억 원의 정부 출연금을 지원받아 메타물질 연구를 진행 중이며, 이 연구사업의 세부 과제중 하나에서 반투과형 무수차 메타렌즈의 개발을 수행하여 VR/AR 디스플레이 기술에 획기적인 발전을 꾀하고 있다.

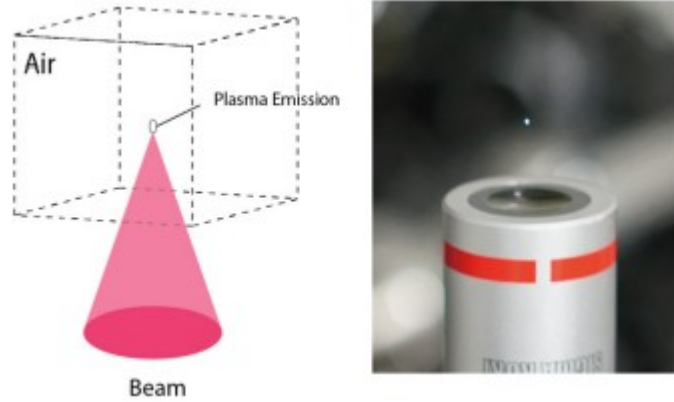
II 공간 복셀 분포 생성: 볼륨 3차원 디스플레이

영화 스타워즈에서 이미지화된 자유 공간상의 레아공주 이미지는 많은 사람들에게 차세대 디스플레이에 대한 영감을 제공하였다. 현재 이러한 스타워즈 스타일의 공간 광 이미지 형성에 근접해 있는 기술로 펨토초(femtosecond) 레이저를 이용하여 3차원 공간상에 레이저로 집중된 에너지가 공기를 이온화시키면서 생성되는 플라즈마 폭발을 복셀로 사용하는 기술과 적외선 레이저로 스캐터링(scattering) 입자를 포획하여 공간 복셀을 나타내는 기술이 연구되고 있다.

1. Aerial 플라즈마 3D 디스플레이 시스템

Aerial 플라즈마 3D 디스플레이 시스템은 레이저를 이용하여 공기 중에 플라즈마를 발생시켜 공간상에 이미지를 생성하는 공기 플라즈마 3차원 디스플레이를 일컫는다. 플라즈마 기반 3차원 디스플레이는 이전에 나노초(nanosecond laser)(Kimura et al. 2006)와 펨토초 레이저(femtosecond (100fs) laser)(Saito et al. 2008)를 사용하여 연구되었다. 플라즈마 기반의 3차원 디스플레이 연구는 레이저에서 발생하는 고온의 열 때문에 사용자와 공간상의 이미지 간에 상호작용이 불가하고 피부손상과 같은 위험성에 대한 문제점이 제기되었다. 최근 일본 도쿄대학교 요이치 오치아이 박사 연구팀은 펄스 지속시간이 30-100fs 및 269fs인 펨토초 레이저를 사용하여 기존의 연구들보다 더 안전한 공간상의 이미지를 만드는 시스템을 개발했다(Yoichi et al. 2016).

그림 3 플라즈마 기반 3차원 디스플레이



플라즈마 기반 3차원 디스플레이에서 공간상에 이미지를 생성하기 위해서는 공기 중에서 빛을 방출 시켜야 한다. 고강도의 레이저를 공기 중에 비추면 레이저 초점 근방에서 공기가 플라즈마 이온화하면서, 광자를 방출하며 관측자가 빛을 시인할 수 있게 된다. 이때 방출된 빛은 약하게 푸른색을 띤 흰색으로 보이게 된다(그림 3).

그림 4 플라즈마 기반 3차원 디스플레이 시스템 광학계

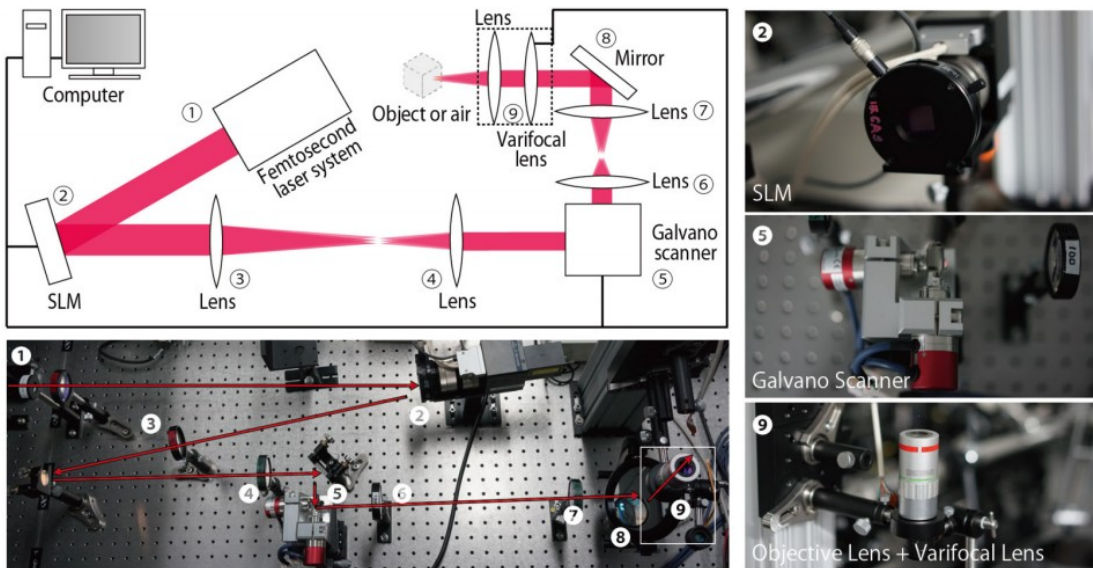
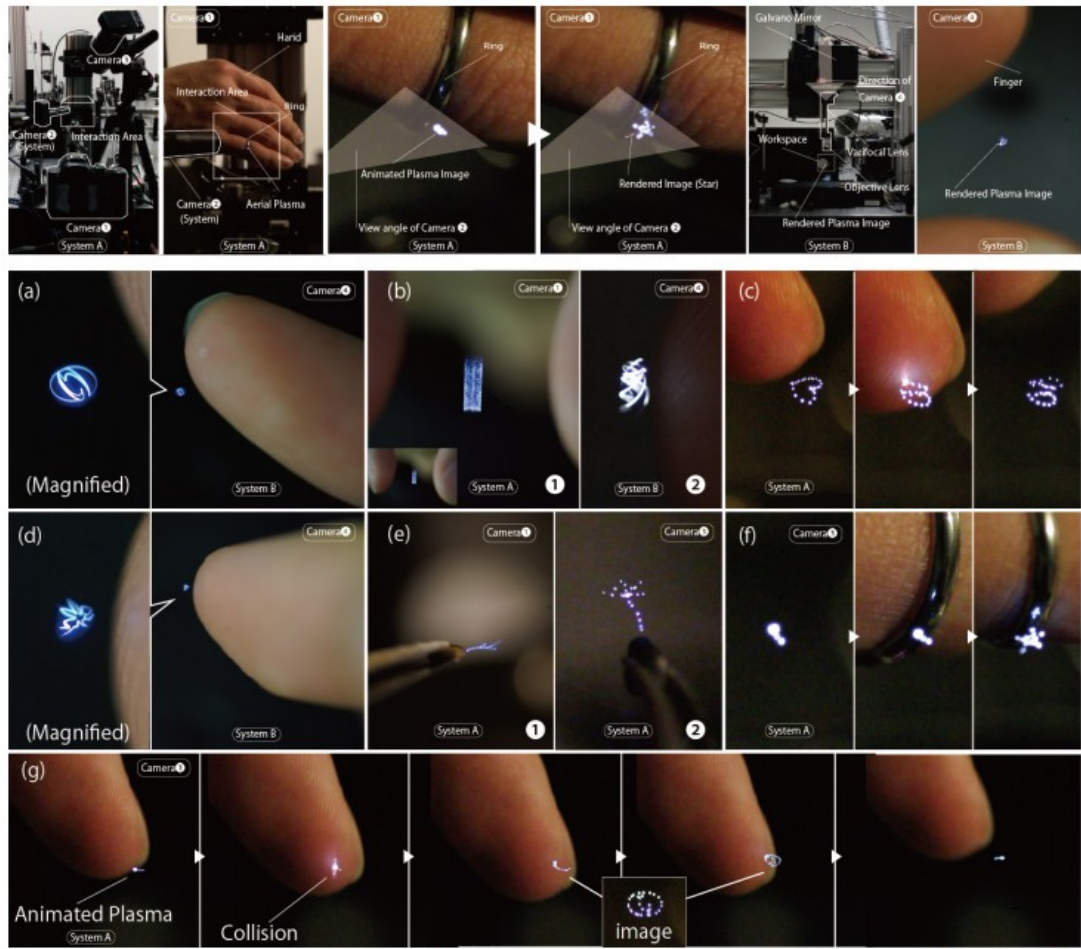


그림 4는 Galvano 스캐너와 가변 초점 렌즈를 이용하여 펄초 레이저의 초점을 자유공간상에 스캐닝 하는 시스템을 보여준다. 특히 반사형 공간 광 변조기에 CGH를 띄워 레이저 초점의 광축 방향의 위치를 조절하고 있는 점에서 홀로그래픽 기술을 사용하고 있는 시스템이라고 할 수 있다.

그림 5 플라즈마 기반 3차원 디스플레이 실험 결과



공중에서 만들어지는 플라즈마 3차원 공간 이미지는 3차원 공간 어느 곳에서나 볼 수 있다(그림 5). 플라즈마는 높은 에너지를 가지고 있으므로 피부에 닿았을 때 데미지를 줄 수 있고 안정성 부분에서 이전의 연구들에서 플라즈마 기반 3D 디스플레이의 단점으로 거론되었다. 그림 5의 시스템에서는 펄초 레이저의 펄스(pulse)폭을

좁히고, 에너지를 더 집약하는 방식의 초단파(ultra-short) 레이저로 플라즈마를 생성하여, 복셀에 손가락을 접촉했을 시 약 17ms이하의 노출 시간을 갖도록 펄스초 레이저를 개선하여 안정성을 증가시켰다. 2,000ms 이상 노출 시켰을 시 피부에 데미지를 주지만 그 이하의 노출 시간 주기를 가지면 피부에 영향이 크지 않다고 보고되고 있다(그림6). 공기 중에 생성된 플라즈마 복셀에 손가락을 댔을 경우 손가락이 자극을 느낄 수는 있다고 한다.

그림 6 노출 시간에 따른 피부 데미지 정도 측정

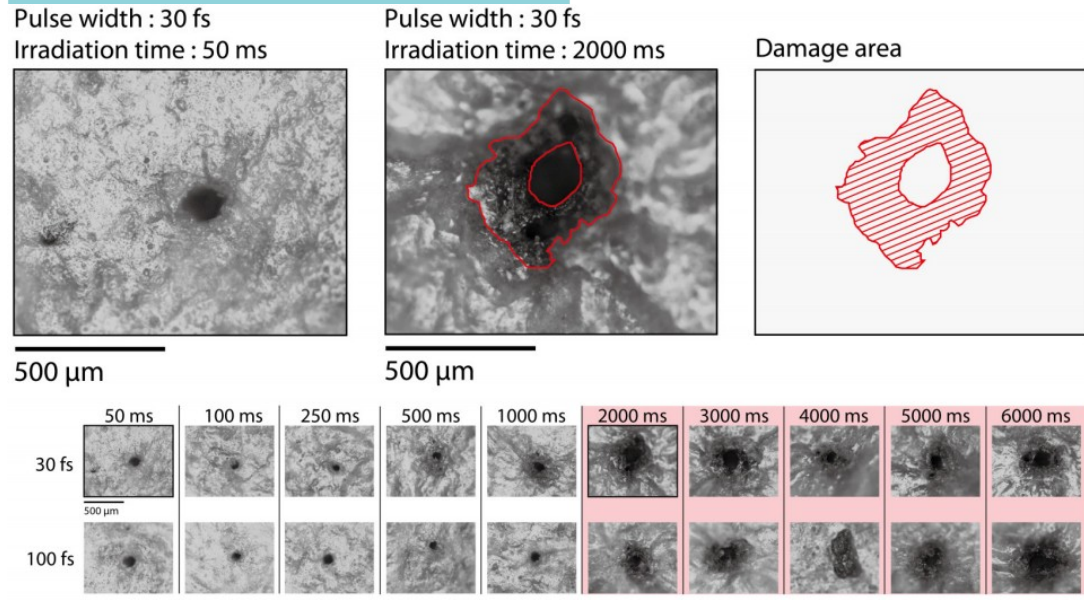
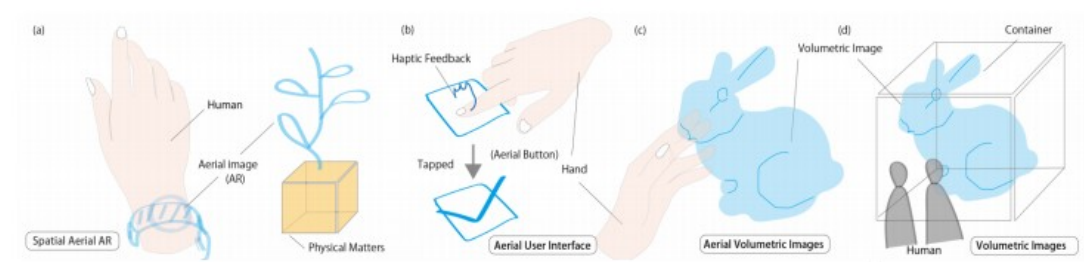


그림 7 플라즈마 기반 3차원 디스플레이를 사용한 어플리케이션 예시



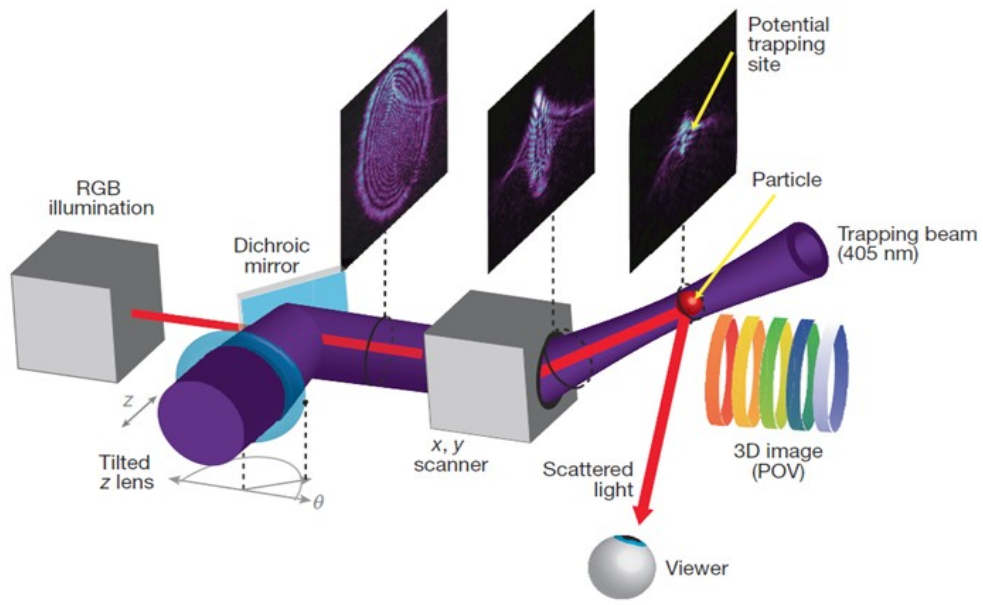
공중 플라즈마 복셀 형성 기술은 초기단계의 연구결과이고, 앞으로 빛의 복셀 위치를 스캐닝 하는 홀로그래픽 광학계와 펄스 레이저가 보다 진보하면, 그림 7에서 보는 것과 같은 다양한 어플리케이션이 가능할 것으로 예상된다.

2. Photophoretic trap 3D 디스플레이 시스템

최근 미국 브리검 영 대학교(Brigham Young University)에서 디스플레이 공간상에 $10\mu\text{m}$ 의 이미지 포인트를 형성시키는 photophoretic-trap 기술을 기반으로 한 자유 공간 Volumetric 3D 디스플레이를 발표하였다 (Smalley et al. 2006). 이 시스템의 핵심 기술은 자유 공간상에서 마이크로 스케일의 미세 스캐터링 입자를 광학적으로 붙잡아 놓는 photophoretic optical trap 기술로써, 405nm 파장의 레이저의 구면 및 비점수차 굴절에 의해 생기는 수차를 갖는 초점필드 내의 어두운 영역에 미세 입자가 붙잡히는 현상이다. 미세 스캐터링 입자의 표면에 온도차가 존재하면, 고온인 측면에 접해있는 기체 분자에 열에너지가 가해지면서 빠른 속도로 운동하게 된다. 이 때, 빠른 속도로 운동하는 기체 분자가 미세 입자와의 충돌이 많아지면서 저온인 측면의 방향으로 밀어내게 된다. 이러한 기체 분자와 미세 스캐터링 입자의 온도로 인한 상관관계를 이용하여 405nm 트랩 빔의 수차가 발생한 초점 필드로 빛에너지로 인한 열에너지가 발생하지 않는 어두운 영역에 미세 입자를 붙잡아 놓는 원리이다. 여기서 미세 입자는 셀룰로오스 입자 또는 텅스텐 입자를 사용하였고, 트랩 빔의 파워, 파장, 시간 및 공기 흐름의 오차에 의해 영향을 받는다. 그 중 미세 입자는 장시간 열에너지로 인해 분해되기 때문에 트랩 빔의 파워가 미세 입자 트랩의 품질에 가장 큰 영향을 미친다. 실험적으로 532nm 파장의 레이저로 3.0W의 출력에서 평균 홀딩 시간은 1.1시간이며 최소 파워는 24mV 미만이다.

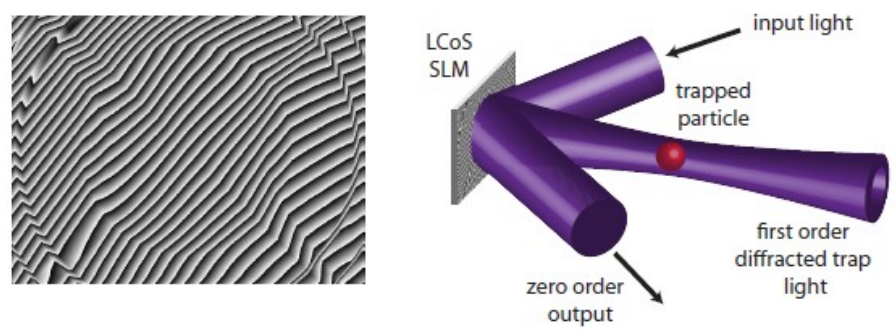
이러한 photophoretic optical trap 기술로 붙잡은 자유 공간상의 미세 입자를 붙잡아 놓고 입자를 빠르게 움직여서 볼륨을 형성한다.

그림 8 기하광학 기반 Photophoretic-trap volumetric 디스플레이 시스템

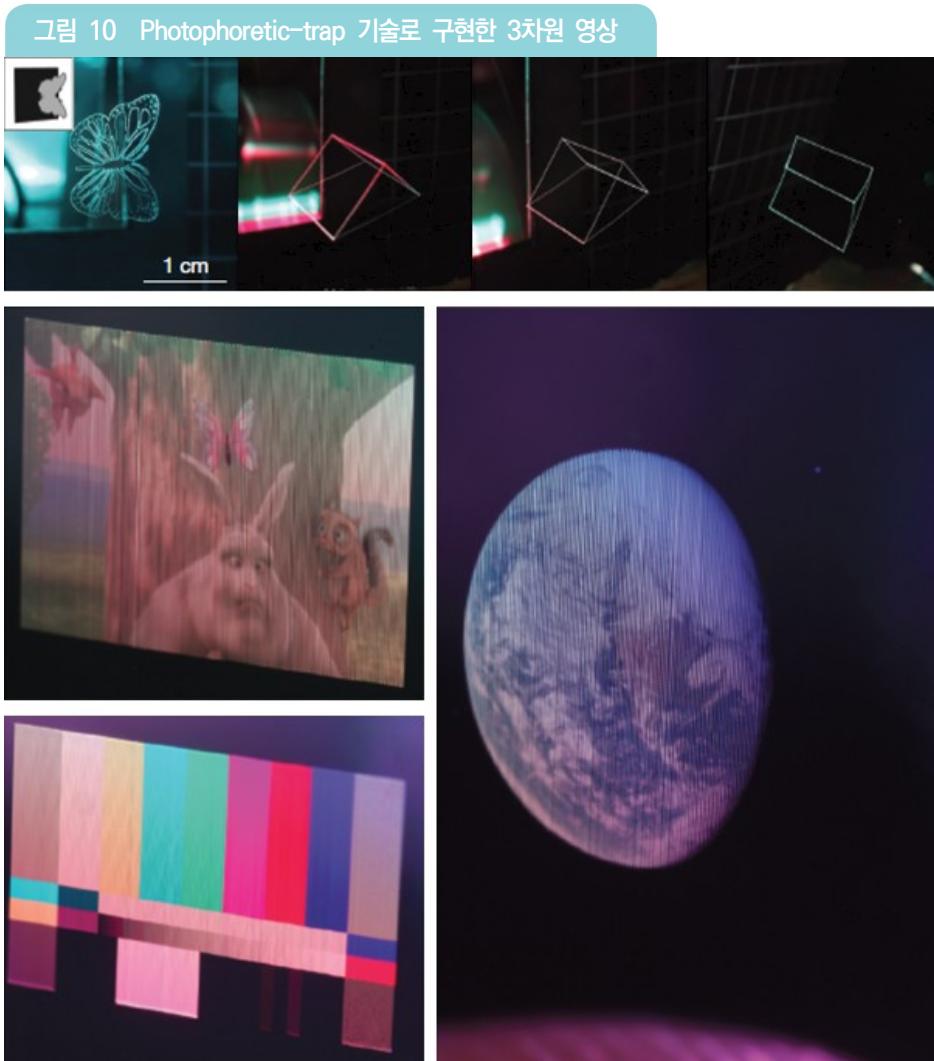


두 가지 타입의 트랩 시스템이 만들어졌으며 하나는 기하학적인 광학 영역에서 작동하고, 다른 하나는 공간 광 변조기를 이용한 파동광학 기반 시스템이다. 기하학적 트랩에서 405nm 파장의 낮은 가시광선이 광축에서 1° 기울어진 렌즈를 통과한다. 이 트랩 빔에 대한 횡단면 및 트래핑 위치는 그림 6에서 볼 수 있다. 이 기하학적 photophoretic-trap 시스템은 가볍고 효율적이며 구현하기 쉽다는 장점이 있다.

그림 9 파동광학 기반 Photophoretic-trap volumetric 디스플레이 시스템



파동광학 기반 photophoretic-trap 시스템은 그림 9와 같이 LCoS(Liquid Crystal on Silicon) 공간 광 변조기를 이용한 시스템이다. 고차 회절 영역에서 수차 광학적 트랩을 하기 위해 계산된 위상 홀로그램 패턴을 공간광변조기에 인코딩하여 정적인 3차원 이미지를 공간상에 구현하는 시스템이다.



공간상에 붙잡힌 미세 입자에 단색뿐만 아니라 405nm 트랩 빔과 동일 선상으로 진행되는 적색(635nm), 녹색(532nm), 청색(445nm) 광원을 입사시켜서 Color volumetric 3D 디스플레이를 구현하였다. 각 색의

레이저 광은 8비트(bit) 펄스 폭 변조를 사용하여 좀 더 넓은 색 영역(color gamut), 세부적인 묘사 및 스펙클이 나타나는 3차원 이미지가 형성된다. 색상은 채도가 높고 레이저 조도와 일치하며, 시스템의 색상 가법과 그레이스케일을 이용하여 다양한 색상도 구현하였다. 그리고 3cm × 2cm의 이미지 상에 소프트 톤 및 뚜렷한 이미지도 구현할 수 있다. 가장 높은 이미지 해상도는 각 면에 2인치의 최대 선형 치수와 약 1인치의 깊이를 가진 피라미드 형태의 체적인데, 약 50억 개의 점에 대해 인치당 1,600개의 점(dot per inch: dpi)으로 이루어져 있다. 아직은 작은 크기의 이미지라고 할 수 있지만, 실제 자유 공간상에서 비교적 자유롭고 사용자와 상호작용을 통한 제어가 가능한 점에서, 누구나 한 번쯤은 상상하거나 영화로 접하였던 공간상에서 3차원 이미지를 관측하고 직접 다룰 수 있는 상황이 머지않아 가능해질 것으로 예상된다.

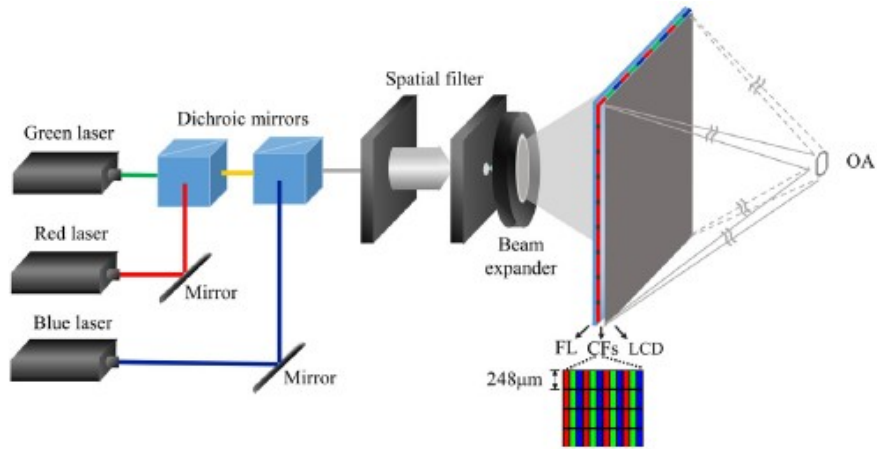
III 공간 초점 분포 생성: 홀로그래픽 3차원 디스플레이

1. 대화면 홀로그래픽 3차원 디스플레이 기술

무안경 3차원 기술 중 진폭변조 패넌을 이용하여 홀로그래픽 필드를 형성하는 기술은 빛의 진폭 또는 위상을 변조할 수 있는 공간 광 변조기를 이용한다. 픽셀 간의 간섭성을 이용하여 계산하기 때문에 픽셀 주기와 해상도의 영향을 크게 받는 기술로, 넓은 시야각, 대면적, 그리고 고화질 홀로그램을 생성하기 위한 기술 등 한계점을 극복하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

대면적 홀로그램을 생성하기 위한 기술로서 21인치 LCD(Liquid Crystal Display)를 이용하여 홀로그램 시스템을 구성한 연구 사례가 있다(He et al. 2019). 픽셀 주기의 영향을 많이 받는 홀로그램 특성상 수 cm 단위의 공간 광 변조기는 대부분 사용할 수 있었으나, 대형화하기 위해서는 시스템이 커지는 문제가 있었다. 따라서 이 연구에서는 시스템의 복잡성을 줄이기 위해 기존 렌즈보다 얇고 가벼운 프레넬 렌즈를 사용하였으며, 공간 멀티플렉싱 컬러 필터를 공간 광 변조기에 덮는 방법을 이용하여 디스플레이 구조를 단순화하면서 대형화할 수 있는 시스템을 제안하였다(그림 11).

그림 11 대형 3차원 풀 컬러 홀로그래픽 디스플레이 시스템



공간 광 변조기의 홀로그램 정보는 특정한 영역에서만 관측이 가능하며 해당 영역을 시야창이라 칭한다. 기존 LCD의 경우 제한된 픽셀 크기와 해상도로 인해 초점거리가 긴 렌즈만 표현할 수 있고, 이는 곧 시야각이 좁음을 의미하며, 매우 작은 시야각이 형성됨을 의미한다(그림12). 하지만 다수의 렌즈를 활용하여 표현한다면 다수의 시야창이 형성되며 관측할 수 있는 영역이 넓어지는 효과를 가져온다(그림13).

그림 12 홀로그래픽 디스플레이의 좁은 시야창

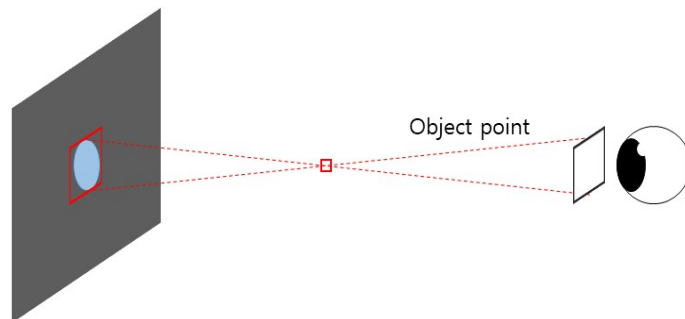


그림 13 홀로그래픽 디스플레이의 시야창 확장

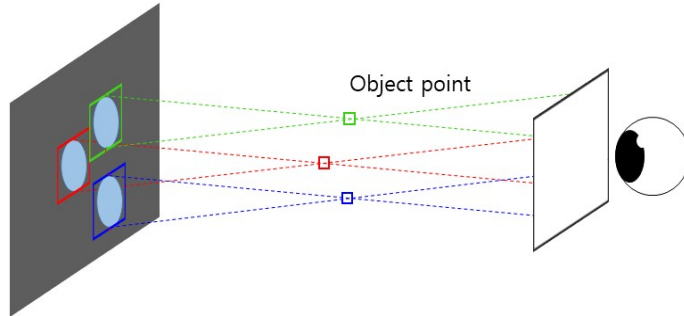
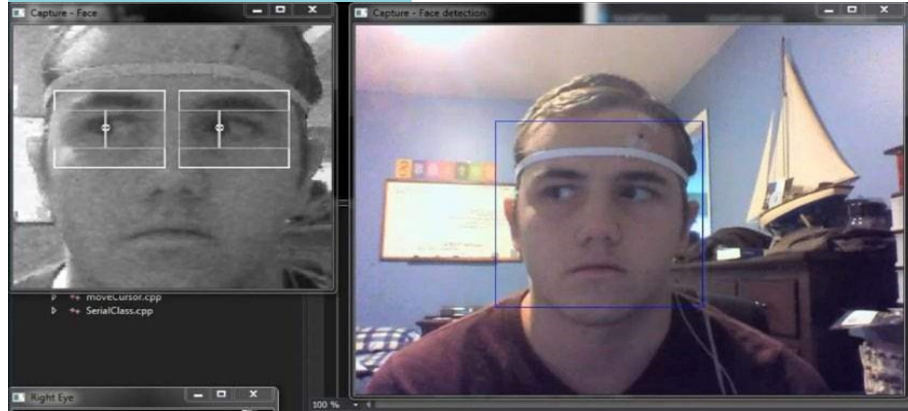


그림 14 SeeReal社의 초점에 따른 홀로그램 관측



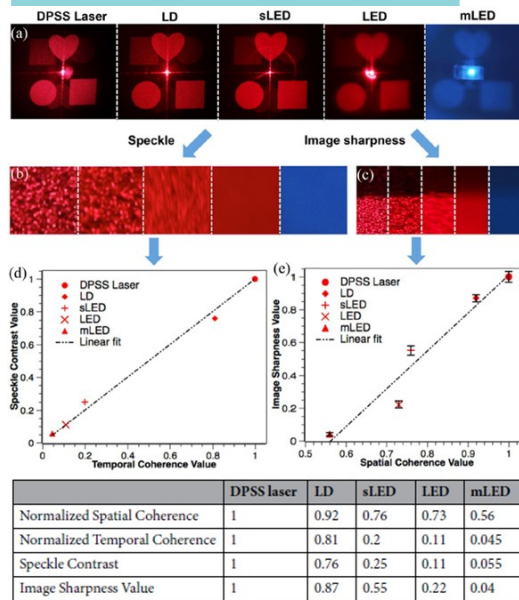
SeeReal社에서는 인코딩된 수많은 국소-홀로그램(Sub-hologram) 정보를 공간 광 변조기 상에 표현하며, 동공추적시스템이 관찰자 눈의 위치를 실시간으로 계산하여 가상의 시야창을 형성하고 3차원 이미지를 재현한다. 관찰자가 이동 시 조향 광학 장치가 시야창을 옮겨준다. 이때 시야창의 이동이 매우 빠르고 정밀하여 홀로그램으로 재구성된 3차원 이미지를 연속적으로 볼 수 있다. 이러한 방식은 전송할 홀로그램 데이터의 양이 적기 때문에 안경형 HMD에서 유리하여 많이 채택되고 있는 방법 중 하나이다.

그림 15 동공 추적 시스템의 예

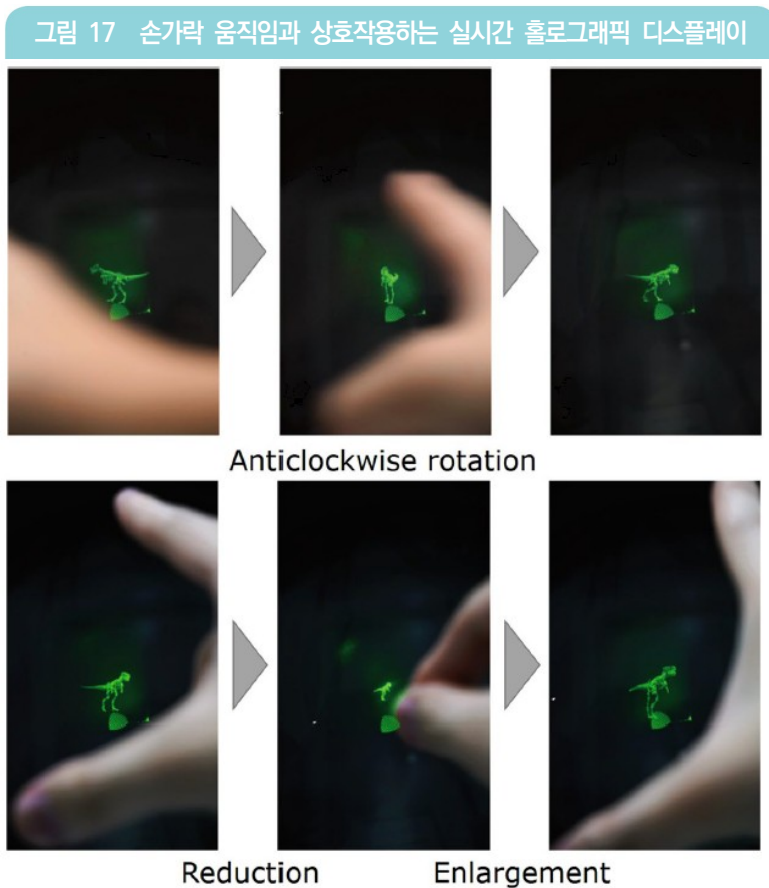


시스템 측면에서 홀로그램의 품질을 향상시키기 위한 연구로, Deng et al(2017)은 다양한 광원에 따른 간섭성과 홀로그램 이미지 품질의 상관관계를 비교하였다. 간섭성은 광원의 고유한 스펙트럼 대역폭에 의해 결정되며 광원의 스펙트럼을 필터링하여 향상시킬 수 있고, 높은 공간 간섭성과 낮은 시간 간섭성을 가지는 광원이 이상적인 홀로그래픽 품질을 가지는 광원으로 적합하다는 것을 확인하였다(그림 16).

그림 16 광원에 따른 특성 분석 결과



또한 홀로그래픽 이미지를 이용한 콘텐츠 관련 연구도 진행되고 있다. Yamada et al(2018)은 손가락의 움직임을 인식하여 실시간으로 홀로그래픽 디스플레이와 상호작용하는 연구를 진행하였다. Leap motion 센서를 이용하여 손가락 움직임을 인식하고 홀로그램 이미지의 회전, 확대, 축소 등의 변환을 실행하며, 풀 컬러 홀로그램을 실시간으로 생성하기 위해 GPU 계산 방법을 이용하였다(그림 17).



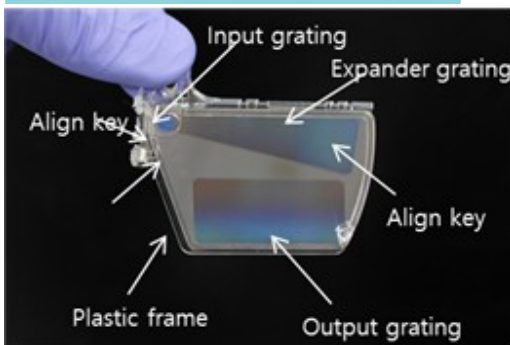
2. 홀로그래픽 AR 디스플레이 기술

증강현실(Augmented Reality: AR)은 사용자가 눈으로 보는 현실 세계에 가상 물체를 겹쳐 보여주는 기술이다. 현실세계를 가상 세계로 보완해주는 개념인 증강현실은 컴퓨터 그래픽으로 만들어진 가상환경을 사용하지만, 주역은 현실 환경이고 컴퓨터 그래픽은 현실 환경에 필요한 정보를 추가 제공하는 역할을 한다.

사용자가 보고 있는 실사 영상에 3차원 가상 영상을 오버랩함으로써 (See-Through 디스플레이) 현실 환경과 가상화면과의 구분이 모호해지도록 한다. 종래의 증강현실 HMD 기기에서는 증강현실을 구현하기 위해 안경형 디바이스에 디스플레이와 광학계를 부착시키는 방법을 사용하고 있다. Lumus, Hololens, Google Glass, Epson BT-200 등 현재 많은 종류의 HMD 디바이스가 있으며, 이러한 방식들은 도파관 타입의 AR 광학계를 채택하고 있다.

도파관 방식의 증강현실 기기에는 대표적으로 마이크로소프트사의 홀로렌즈(Hololens)가 있다. 일반적으로 웨이브가이드의 표면에 회절격자가 배치되어 있는데, 전체 웨이브가이드는 입력, 확장, 출력 세 가지의 영역의 회절격자로 이루어져 있다. 웨이브가이드 방식의 AR 광학 시스템은 다음과 같다. 프로젝터에서 나온 빛이 입력 격자 구조를 통과하면 빛이 확장 격자 구조 방향으로 회절이 된다. 회절 된 빛들은 확장 격자 구조에 의하여 출력 격자 구조 방향으로 회절이 되면서 동시에 복제가 된다. 복제된 빛들은 다시 확장 격자 구조에 의하여 회절과 복제를 반복하게 되고, 출력 격자 구조에 입사한 빛들은 입력된 빛과 평행한 방향으로 출력이 된다. 이를 통해 하나의 빛이 수많은 빛으로 복제되어 출력된다. 출력된 빛들을 통해 사용자는 프로젝터에서의 이미지를 관측하게 된다. 웨이브가이드 방식의 증강현실 기기의 경우, 증강 현실 이미지가 2차원 이미지로 Far field 영역에 결상되는데, 2차원 양안 이미지를 AR로 보여주는 방식이므로, 기존 안경형 3D 디스플레이가 갖는 피로감 문제를 여전히 가지고 있고, 실세계와 가상현실 이미지간의 깊이 미스매치 문제도 해결되지 않은 설계적 한계가 있다.

그림 18 마이크로소프트사의 홀로렌즈



마이크로소프트 연구팀에서 레이저 광의 간섭을 이용해 위상 홀로그램 기반 HMD용 홀로그래픽 디스플레이 시스템의 기초 실험결과를 ‘Holographic Near-eye displays for VR and AR’(Andrew et al. 2018)과 같이 보고하였는데, DOE(Diffractive Optical Element)를 사용한 홀로렌즈와는 달리, HOE(Holographic Optical Element) 반투명 미러를 사용하여, 결상 시야각과 홀로그래픽 디스플레이의 특성을 고르게 갖추도록 하였다. HOE는 안경에 부착되어 사입사하는 프로젝션형 CGH 광파를 안구내부로 전달하여, 안구 내부에서 3차원 공간 광 이미지를 형성하여, 홀로그램 입체상을 볼 수 있게 한다. 그림 19는 홀로그래픽 AR 디스플레이의 실험 set-up을 보여주고 있는데 LCoS Phase SLM에서 CGH를 형성하고 HOE를 통해 관측하는 광학계이며, 반사형 홀로그래픽 시스템이라 할 수 있다. 또한, 마이크로소프트는 시선 추적 센서를 장착하여 동공 추적을 통하여 가변적인 눈의 위치를 고려한 CGH를 계산하고자 하였다. 따라서 실시간으로 CGH를 계산하기 위하여 GPU를 사용하여 실시간으로 CGH를 업데이트할 수 있는 시스템을 구성하였다.

그림 19 마이크로소프트사의 홀로그래픽 AR 프로토타입

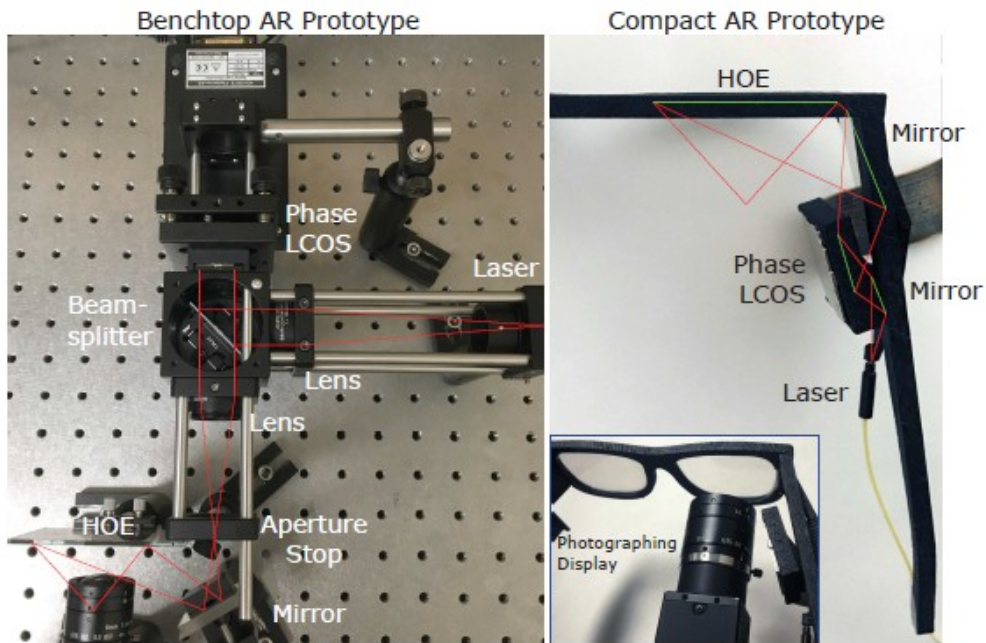
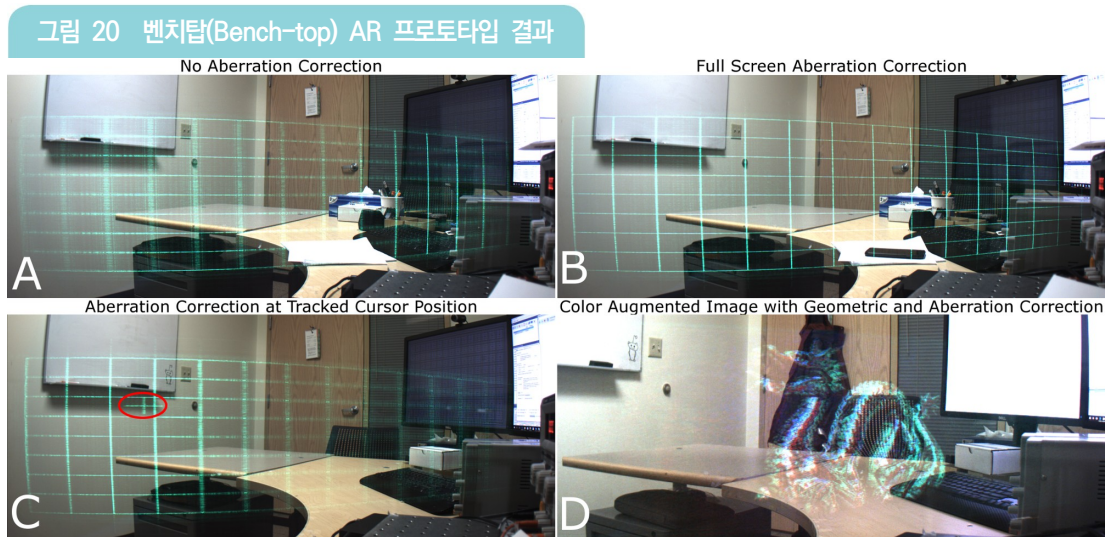


그림 20에서 홀로그래픽 AR 디스플레이 실험 결과를 보여주고 있다. A는 수차 보정이 적용되지 않은 결과로 그리드가 선명하지 않다. B는 공간적으로 변화하는 수차 보정이 적용된 전체 그리드를 나타낸다, C는 빨간색 원으로 표시된 부분에서 추적된 커서의 주변에 수차 보정된 결과를 나타낸다. D는 수차 및 기하학적 보정이 적용된 풀 컬러 이미지를 나타낸다. 사용자의 동공을 추적하는 방식으로 눈 추적 근사 홀로그램을 사용하는데 기존의 하드웨어를 사용하여 고대비, 고해상도 및 풀 컬러 디지털 홀로그램을 형성하여 시야각(Field Of View: FOV)이 가로 방향으로 약 70도이다.



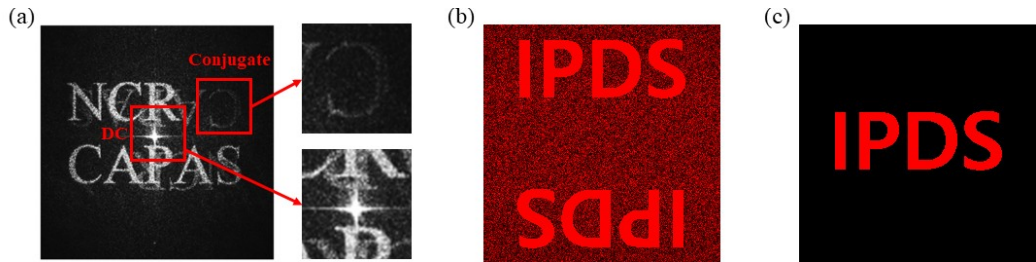
IV 연구개발 전망: 3차원 공간 광 이미지 형성을 위한 복소 변조 디스플레이 핵심 기술 개발

1. 홀로그래픽 필드 형성을 위한 복소 변조 디스플레이 기술의 필요성

앞에서 소개한 복셀 분포 형성 볼륨 디스플레이 시스템과 대면적 홀로그래픽 디스플레이 시스템, 그리고 홀로그래픽 AR 디스플레이 시스템 모두 공통적으로 빛의 공간 분포를 제어하는 공간 광 변조기를 사용한다. 공간 광 변조기는 3차원 공간 광 이미지 형성뿐만 아니라 넓은 의미에서 빛의 공간 분포를 제어하는데 필수적인 소자이다. 빛은 전자기 파동으로서 진폭과 위상을 갖는 전기장의 사인파 형태로 공간을 진행한다. 공간적으로 일정한 배열을 갖는 광변조기의 한 픽셀에 입사한 광파가 투과하거나 반사할 때 입사 광파의 위상 또는 진폭을 변화시키는 것을 광변조라고 하고 이러한 광변조 픽셀을 2차원 형태로 배열한 것이 공간 광 변조기이다. 현재는 액정 또는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)를 활용한 진폭변조 공간 광 변조기와 위상변조 공간 광 변조기가 상용화되어 있으나, 홀로그래픽 필드의 생성과 제어를 위해서는 광파의 진폭과 위상을 동시에 독립적으로 변조하는 복소 공간 광 변조기의 개발이 필요하다. 기존의 홀로그래픽 디스플레이는 그림 21(a),(b)와 같이 빛의 위상 또는 진폭만을 제어할 수 있는 공간 광변조기를 사용하기 때문에, DC 잡음과 conjugate 잡음이 필연적으로 발생하여 신호 대비 잡음비가 낮고 화질과 대역폭이 낮은 문제가 있으며, 이러한 잡음을 저감하기 위해서 Hahn et al(2018)에서와 같이 알고리즘을 최적화하거나 저감 방법론에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 복소공간 광변조 홀로그램의 경우, 그림 21(c)에서 표현되어 있듯, 잡음이 상당히 저감되어 실제 이미지와 거의 유사한 품질을 갖게 된다. 기존의 위상변조 또는 진폭변조

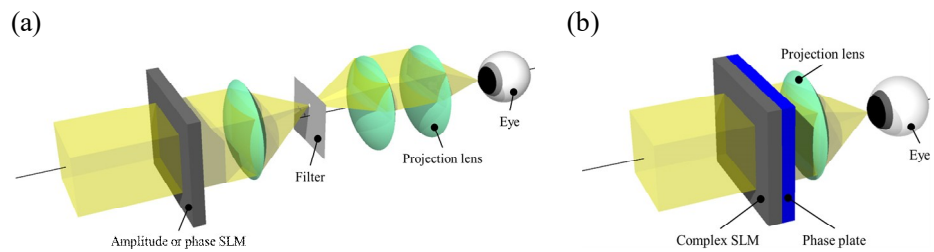
홀로그래픽 디스플레이에서는 홀로그램 잡음을 필터링하여 관측하기 때문에 시스템이 상당히 별크해지는 문제가 있다.

그림 21 (a) 실험을 통한 잡음이 발생하는 홀로그램 복원 이미지, 시뮬레이션을 통한 (b) 잡음이 발생하는 홀로그램 복원 이미지와 (c) 복소 변조 홀로그램 복원 이미지



복소 공간 광 변조기가 개발되면 앞에서 소개한 Aerial 플라즈마 볼륨 디스플레이, photophoretic 볼륨 디스플레이, 대면적 홀로그래픽 디스플레이, 홀로그래픽 AR 디스플레이의 화질 특성을 획기적으로 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 추가적인 노이즈 필터링 시스템을 필요로 하지 않으므로, 홀로그래픽 디스플레이 시스템이 소형화되고 스마트폰이나 증강현실 디스플레이와 같은 웨어러블(wearable), 포터블(portable) 디바이스 형태의 고품질 홀로그래픽 디스플레이의 구현이 가능해 진다.

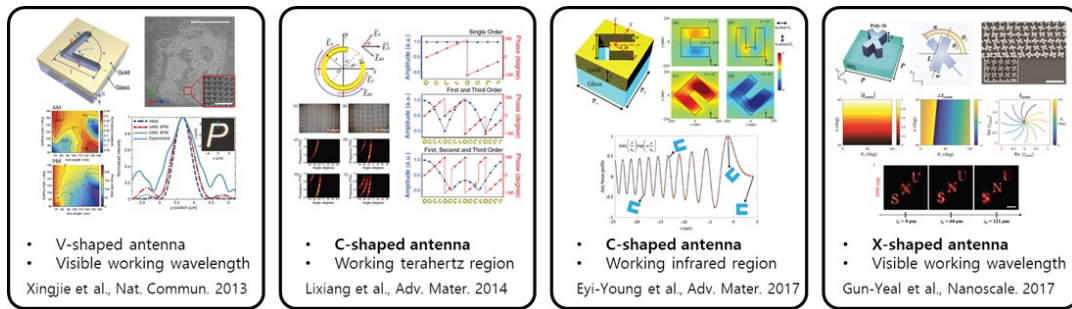
그림 22 (a) 진폭 또는 위상 공간 광 변조기를 사용한 홀로그래픽 이미지 관측 시스템, (b) 복소 공간 광 변조기를 사용한 홀로그래픽 이미지 관측 시스템



복소 공간 광 변조기술은, 서브파장 스케일의 나노광학 구조를 기본 유닛으로 다양한 광학 기능을 구현하는 메타표면(meta-surface) 기술 분야에서 활발히 논의되고 있다. 특히 최근 몇 년 동안 Lee et al(2018), Song et al(2018), Liu et al(2018), Ni et al(2018) 및 본 저자를 위시한 몇몇 그룹에서 진폭과 위상변조

자유도를 동시에 메타표면에 부여하려는 시도들을 발표하였다. 그림 23은 대표적인 복소 변조 메타 홀로그램 관련 연구들을 나타내는데, 픽셀 구조를 보면 대부분 연속적인 복소 값을 변조할 수 없고, 픽셀 구조가 비대칭인 경우가 많아 신호 대 잡음비와 복소 효율이 낮음을 예상할 수 있다.

그림 23 복소 변조 메타홀로그램 선행연구들



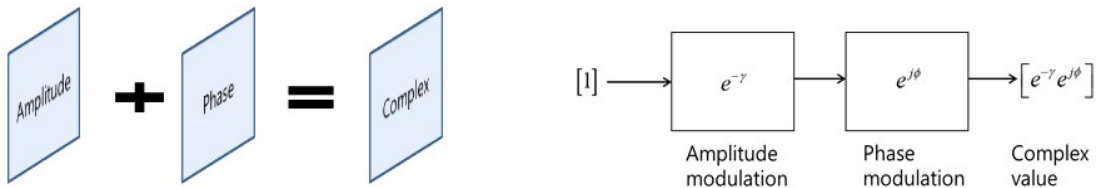
또한, 근래의 연구 동향을 살펴보면 고정된 패턴인 수동 구조에서의 제한적인 광변조에 대해서도 활발히 발표되고 있다. 하지만 궁극적으로 복소 변조 홀로그래픽 디스플레이는 수동 구조에 머무르는 것이 아닌 능동 복소 변조가 가능한 효율적인 픽셀 구조의 개발이 요구되는 바이다. 특히 가시광 복소 변조에 대해서는 보고된 연구가 매우 드물기 때문에 가시광 대역에서의 능동 복소 변조 기술은 연구 발전성에 대한 큰 기회와 가치가 있다.

2. 더블 패널 구조

현재 상용 공간에서 활용되는 광 변조기는 진폭 변조형 공간 광 변조기와 위상 변조형 공간 광 변조기만이 개발되어 있으며, 복소 공간 광 변조기는 아직 연구 단계에 머물러 있다. 기존 진폭 변조형 공간 광 변조기는 DC 잡음과 conjugate 잡음이 필연적으로 생성되어 특별한 필터링 과정이 필요하다. 위상 변조형 공간 광 변조기의 경우 Iterative Fourier Transform Algorithms(IFTA)와 같은 반복적 보상 알고리즘을 필수로 요구하기 때문에 계산 시간이 상당히 많이 소요되며, 만약 보상 알고리즘을 수행하지 않는다면 영상 품질이 매우 저하된다. 복소 변조 공간 광 변조기는 진폭 공간 광 변조기처럼 잡음을 생성하지도 않고, 위상 변조형 공간 광 변조기처럼 보상 알고리즘을 수행하지 않아도 되므로 시스템의 간소화 및 계산속도 증가와 더불어

초저잡음 고화질의 재현 이미지를 관찰할 수 있는 장점이 있는 장치로서, 홀로그래픽 디스플레이의 핵심이라 볼 수 있다. 이를 구현하기 위한 방법으로 진폭 변조형 패널과 위상 변조형 패널을 정렬하여 사용하는 Cascaded amplitude-phase SLMs 구성이 있다. 360도 위상변조 패널과 진폭변조 패널의 픽셀크기가 동일해야 얼라인(alignment)이 가능하고, 두 패널 사이의 간격이 작지 않은 경우, 패널 간의 공간에서 빛의 회절이 발생하여 SNR을 감소시킬 수 있는 단점이 있다. 두 장의 공간 광 변조기를 구동하여야 하므로 구동이 복잡해지고 부피가 커지는 문제점이 있어 개선의 여지가 존재한다.

그림 24 스칼라 광파 복소 변조



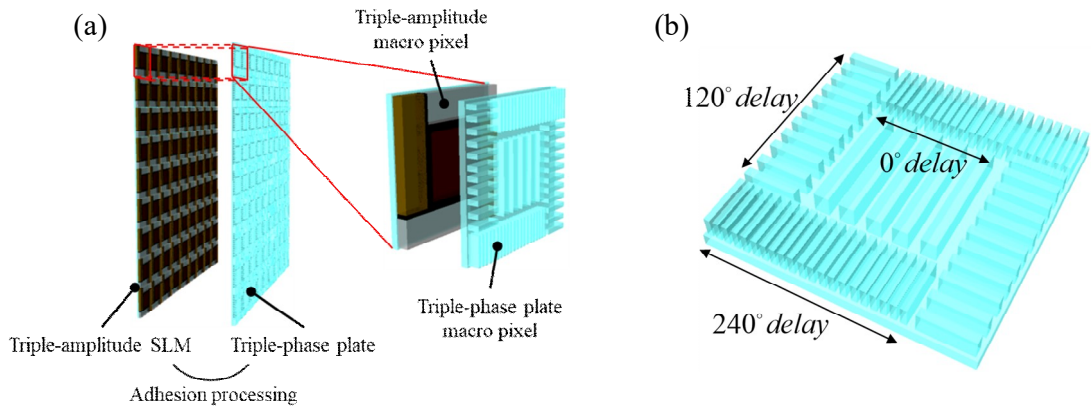
3. 단일 패널 매크로 픽셀 구조

만약 하나의 패널로 복소 변조 디스플레이 구현이 가능하다면, 특히 홀로그래픽 AR 디스플레이와 같이 소형 홀로그래픽 디스플레이 기술이 요구되는 분야에서는 혁신적인 기술이 아닐 수 없을 것이다. 앞서 소개한 필터 시스템이 필요 없는 더블 패널 구조를 사용한 복소 변조 디스플레이 역시 완전하게 간소화된 시스템을 구현한 것은 아니므로 단일 패널로 이루어진 복소 변조 패널을 개발하는 것이 소형 홀로그래픽 디스플레이 분야의 궁극적인 목표라 할 수 있다. 현재까지 가시광 대역에서의 능동 복소 변조 단일 패널에 관한 기술은 선행 연구가 거의 없지만, 최근 국내 연구자들을 중심으로 연구가 진행되고 있다.

본 저자의 연구팀에서는 시판된 고해상도 진폭변조 공간 광 변조기와 위상 지연 소자를 활용하여 능동 복소 변조 패널을 구현하는 기술에 관해 연구하고 있다. 그 원리를 간략하게 소개하면, 진폭변조 공간 광 변조기의 픽셀을 일정 개수만큼 그룹화 하여 매크로 픽셀을 구현하고 각 서브픽셀의 진폭 값을 조절하여 공간상에서 변조될 빛의 진폭과 위상을 모두 제어할 수 있는 '3상 진폭 복소 변조'라 명명한 수학적 이론을 반영한다. 하나의 복소수는 3개의 고정 위상과 각각의 가변 진폭으로 구성된 복소수들의 선형결합으로 나타낼

수 있다. 이때, 하나의 복소수는 복소 홀로그램의 매크로 픽셀을 의미하고, 3개의 복소수는 각 서브픽셀을 의미한다. 이처럼 3개의 고정된 위상에 대한 각 진폭을 조절하여 결국 하나의 복소 픽셀을 표현하는 기술을 활용하여 다음과 같은 복소 변조 디스플레이를 구현할 수 있다. 그림 25는 시판된 진폭변조 공간 광 변조기와 위상 지연을 발생시키는 위상 지연 판(Phase retarder plate), 그리고 각 소자의 서브픽셀을 그룹화한 형태와 매크로 픽셀의 구성을 나타내고 있다. 위상이 정렬된 빛이 입사하면 진폭변조 공간 광 변조기의 각 매크로 픽셀에서는 3개의 변조된 진폭정보가 출력되고 각각 할당된 위상 지연 판으로부터 고정된 위상만큼 변조가 이루어진다. 결과적으로 3개 영역으로 나뉜 매크로 픽셀은 설계된 방향대로 복소 홀로그램을 구현할 수 있으며, 노이즈가 거의 없으므로 매우 우수한 퀄리티의 관측 이미지를 출력할 수 있게 된다.

그림 25 (a) 3상 진폭 복소 변조 패널 구성과 매크로 픽셀 구조, (b) 3상-phase plate 구조



V 결론

본 고에서는 3차원 공간 광 이미지 형성 기술로서 볼륨 디스플레이 기술 두 가지와 대면적 홀로그래픽 디스플레이, 그리고 최근 각광 받고 있는 홀로그래픽 AR 디스플레이를 선정하여, 기본원리와 기술이슈를 소개하였다. 이들 기술의 공통적인 목표는 자유공간 상에 3차원 이미지를 표현하는 광파 분포를 형성하는 것인데, 공통적으로 복소 변조 공간 광 변조기술에 의해 혁신이 이루어질 수 있는 공통점을 가지고 있다. 따라서 본고에서는 복소 공간 광변조 기술을 시급히 개발해야 하는 원천 기술로 소개하고, 기본 동작 원리를 간략히 설명하였다. 디스플레이 산업이 국가 기간산업으로 구축되어 있는 우리나라가 세계최초로 복소 공간 광 변조기술의 원천기술을 선점하여, 향후 펼쳐질 4차 산업혁명 3차원 공간 디스플레이 시장의 세계 선두주자로 나설 수 있기를 기대해본다.

저자_ 김 휘 (Hwi Kim)

• 학력

서울대학교 전기컴퓨터공학 박사
 서울대학교 전기컴퓨터공학 석사
 서울대학교 전기컴퓨터공학 학사

• 경력

現) 고려대학교 세종캠퍼스 전자 및 정보공학과 학과장
 現) 고려대학교 세종캠퍼스 전자 및 정보공학과 교수
 現) 고려대학교 세종캠퍼스 세종창업교육센터 센터장
 現) 고려대학교 세종캠퍼스 BT융합창업보육센터 센터장
 前) 고려대학교 세종산학협력단 부단장

참고문헌

1. Andrew, M., Andreas, G., Joel S. (2017). Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, v.36 n.4
2. Deng, Y., & Chu, D. (2017). Coherence properties of different light sources and their effect on the image sharpness and speckle of holographic displays. *Scientific reports*, 7(1), 5893.
3. D. E. Smalley, E. Nygaard, K. Squire, J. Van Wagoner, J. Rasmussen, S. Gneiting, K. Qaderi, J. Goodsell, W. Rogers, M. Lindsey, K. Costner, A. Monk, M. Pearson, B. Haymore and J. Peatross, (2018). A photophoretic-trap volumetric display. *Nature* 553, 486-490.
4. E.-Y. Song, G.-Y. Lee, H. Park, K. Lee, J. Kim, J. Hong, H. Kim and B. Lee. (2017). Compact generation of airy beams with c -aperture metasurface. *Advanced Optical Materials*, Vol. 5, Issue 10, 1601028.
5. G. Lee, G. Yoon, S. -Y. Lee, H. Yun, J. Cho, K. Lee, H. Kim, J. Rho, and B. Lee (2018). Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces. *Nanoscale*, Vol. 10, No. 9, pp. 2437-4245.
6. Hahn, J., Kim, H., & Lee, B. (2008). Optimization of the spatial light modulation with twisted nematic liquid crystals by a genetic algorithm. *Applied optics*, 47(19), D87-D95.
7. He, P., Liu, J., Zhao, T., Han, Y., & Wang, Y. (2019). Compact large size colour 3D dynamic holographic display using liquid crystal display panel. *Optics Communications*, 432, 54-58.
8. L. Liu, X. Zhang, M. Kenney, X. Su, N. Xu, C. Ouyang, Y. Shi, J. Han, W. Zhang and S. Zhang(2014). Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude. *Advanced materials*, Vol. 26, Issue 29, 5031-5036
9. Saito, H., Kimura, H., Shimada, S., Naemura, T., Kayahara, J., Jarusirisawad, S., Nozick, V., Ishikawa, H., Murakami, T., Aoki, J., Asano, A., Kimura, T., Kakehata, M., Sasaki, F., Yashiro, H., Mori, M., Torizuka, K., and Ino, K. (2008). Laser-plasma scanning 3D display for putting digital contents in free space. *Proc. SPIE* 6803, 680309-680309-10.
10. Sato, H., Kakue, T., Ichihashi, Y., Endo, Y., Wakunami, K., Oi, R., ... & Ito, T. (2018). Real-time colour hologram generation based on ray-sampling plane with multi-GPU acceleration. *Scientific reports*, 8(1), 1500.

11. X. Ni, A. V. Kildishev and V. M. Shalaev(2013). Metasurface holograms for visible light. Nature communication, Vol. 4, 2807.
12. Yamada, S., Kakue, T., Shimobaba, T., & Ito, T. (2018). Interactive holographic display based on finger gestures. Scientific reports, 8(1), 2010.
13. Yoichi, O., Kota K., Takayuki H., Jun, R., Satoshi, H., Yoshio H. (2016). Fairy Lights in Femtosecond s: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields. ACM Transactions on Graphics, vol. 35, issue. 2, no. 17.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 April vol.5 no.4



02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02.958.4980