

라이트필드 및 홀로그램 기반 근안 디스플레이 기술 동향

□ 박재형 / 인하대학교

요약

본 고에서는 라이트필드 혹은 디지털 홀로그램에 기반한 근안 디스플레이 기술에 대하여 알아본다. 헤드 마운티드 디스플레이로 불리기도 하는 근안 디스플레이는 사용자가 착용하는 안경 형태의 디스플레이 기기를 말하며, 가상현실 및 증강현실 응용의 핵심 기기 중 하나이다. 본 고에서는 라이트필드 및 디지털 홀로그램 기술이 근안 디스플레이에 적용될 경우 갖는 장점들을 살펴보고 관련 연구 동향을 소개한다.

1. 서론

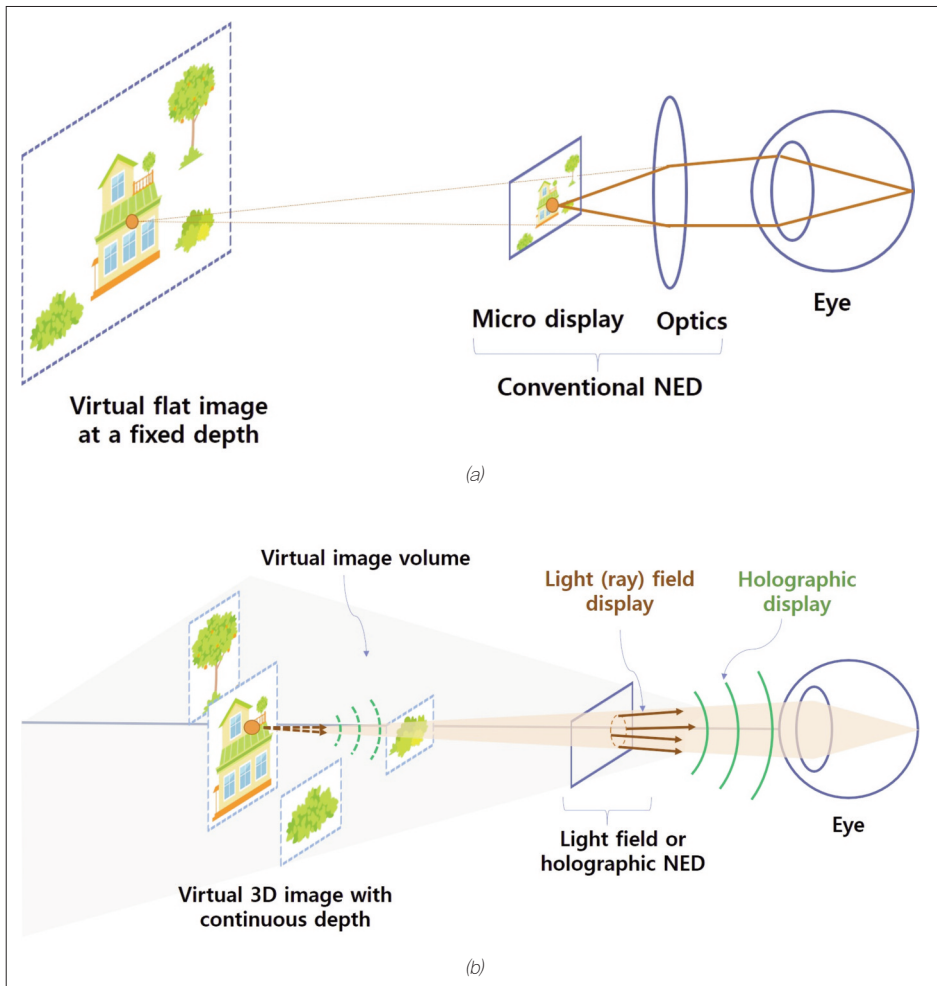
근안 디스플레이(Near to Eye Display, NED)는 디스플레이 패널이 사용자의 눈에 매우 가깝게 위치하여 사용자가 안경처럼 착용하는 형태의 디스플레이 기기를 말한다. NED는 사용자에게 개인화된 영상 정보를 제공하고, 사용자의 시야를 완전히 막고 가상의 영상만 전달하거나, 혹은 사용자의 시

야를 유지한 채 가상의 영상을 추가하여 전달할 수 있어, 가상현실(Virtual Reality, VR) 및 증강현실(Augmented Reality, AR)의 핵심 기기 중 하나로서 기능한다. 최근 AR 및 VR 응용의 확대와 더불어 NED에 대한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 삼성, Microsoft, Sony, Oculus 등 주요 기업들을 통해 그 상용화도 적극적으로 진행되고 있다. <그림 1>은 2018년과 2019년 각각 발표된 MagicLeap사의 One과 Microsoft사의 HoloLens 2이다.

현재 상용화된 NED의 기본적 광학적 구조는 <그림 2>(a)와 같다. 사용자의 눈 바로 앞에 위치한 마이크로 디스플레이 패널과 광학계로 구성되며, 사용자는 광학계가 사용자로부터 먼 거리에 형성하는 마이크로 디스플레이의 허상을 관측한다. 마이크로 디스플레이의 허상이 형성되는 거리는 광학계의 초점 거리와 마이크로 디스플레이와 광학계간



〈그림 1〉 AR NED의 예 (a) Magic Leap One (영상 출처: ref. [1]) (b) 마이크로소프트 HoloLens 2 (영상 출처: ref. [2])



〈그림 2〉 기존 NED와 라이트필드 및 홀로그래픽 NED의 개념도 (a) 기존 NED, (b) 라이트필드 및 홀로그래픽 NED

간격에 의하여 고정되므로, 사용자의 눈은 고정된 거리에 형성된 평면 허상 영상을 관측한다.

이와 같은 현재의 NED를 이을 차세대 NED 기술로서 라이트필드 혹은 디지털 홀로그래픽 NED에 대한 관심이 최근 높아지고 있다. 라이트필드 디스플레이와 홀로그래픽 디스플레이는 물체로부터 오는 빛의 광선 분포 혹은 파면을 광학적으로 재현하여 3차원 영상을 표시하는 디스플레이 기술이다.[3] 일반적인 3차원 디스플레이 기술과는 달리 정확한 단안 초점 정보(monocular focus cue)를 제공하므로, <그림 2>(b)와 같이 NED에 적용될 경우 사용자의 각 눈이 임의의 깊이 분포를 가지는 3차원 장면을 자연스럽게 관측할 수 있도록 한다.

본 고에서는 이러한 라이트필드 및 홀로그래픽 NED의 기술 개발 동향을 간략히 소개한다. 먼저 라이트필드 및 홀로그래픽 디스플레이 기술을 NED에 적용하였을 경우 가질 수 있는 장점들을 살펴보고, 라이트필드 NED와 홀로그래픽 NED의 구현 기법들을 각각 알아본다.

II. 라이트필드 및 디지털 홀로그래프 기반 NED의 장점

1. 영상 초점 거리 및 심도 조절

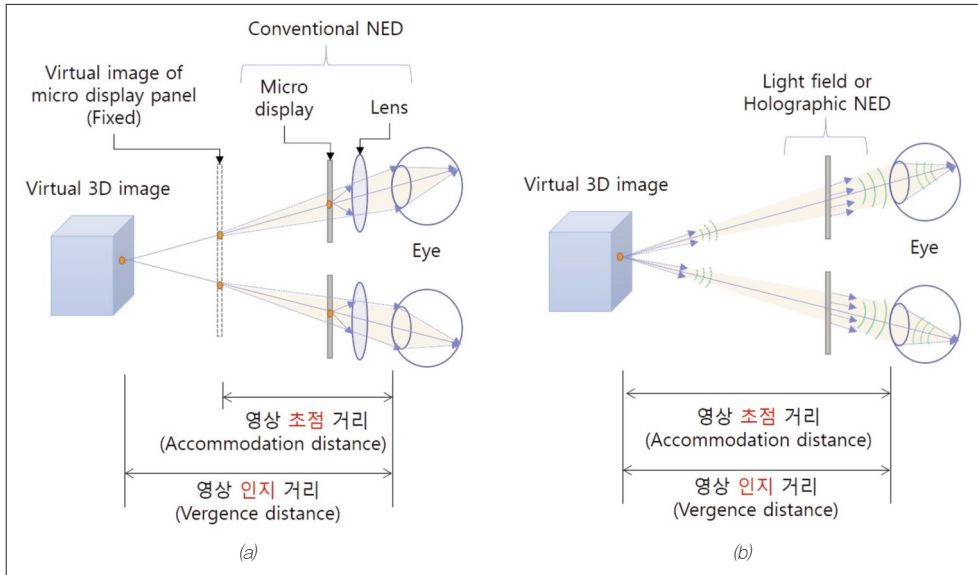
라이트필드 및 홀로그래픽 NED가 기존 NED에 대비하여 가지는 가장 큰 특징은 사용자의 각 눈에 정확한 초점 조절 정보를 제공한다는 것이다. <그림 3>(a)는 기존 NED에서 사용자가 인지하는 3차원 영상의 거리와 사용자 눈이 실제 초점을 맺는 거리를 보여준다. <그림 3>(a)에서 보는 바와 같이, 사용자가 인지하는 영상의 거리는 사용자의 양

안에 제공되는 스테레오 영상 간의 시차에 의하여 결정되므로 영상 콘텐츠에 따라 임의의 값으로 주어진다. 그러나 사용자의 각 눈이 실제로 초점을 맺는 거리는 광학계에 의하여 물리적으로 형성되는 마이크로 디스플레이 패널의 허상면으로 고정되므로, 사용자가 인지하는 영상 거리와 일반적으로 상이하다.

이러한 영상의 인지 거리와 초점 거리사이의 불일치는 수렴-조절 불일치(Vergence Accommodation Conflict, VAC)로 불리우며, AR, VR 응용에서 사용자에게 피로감을 일으키며, 영상의 인지 해상도를 저해하는 주요 원인 중 하나로 알려져 있다.[4-5] VAC는 실제 물체와 가상 영상을 동시에 관측하는 AR 응용에서 실제 물체와 가상 영상 간에 상이한 초점 조절 반응을 불러 일으키므로 특히 문제가 된다.

라이트필드 및 홀로그래픽 NED는 기존 NED의 VAC 문제를 해결한다. <그림 3>(b)에서 보는 바와 같이, 기존 NED처럼 고정된 거리에 단순 허상 영상면을 형성하는 것이 아니라, 표시하고자 하는 3차원 가상 영상의 각 점에서 발산하는 광선들의 집합 혹은 파면을 재현함으로써 연속적인 거리 분포를 가지는 3차원 영상을 사용자의 각 눈에 제공한다. 따라서 사용자의 눈은 인지되는 영상의 거리에 실제 초점을 맺게 되며 따라서 VAC 문제가 해소된다. 이와 같은 라이트필드 및 홀로그래픽 NED의 특징은 AR 및 VR응용에서 보다 사실적인 사용자 경험을 제공하고 장시간 사용에 따른 피로감을 감소시키는데 기여한다.

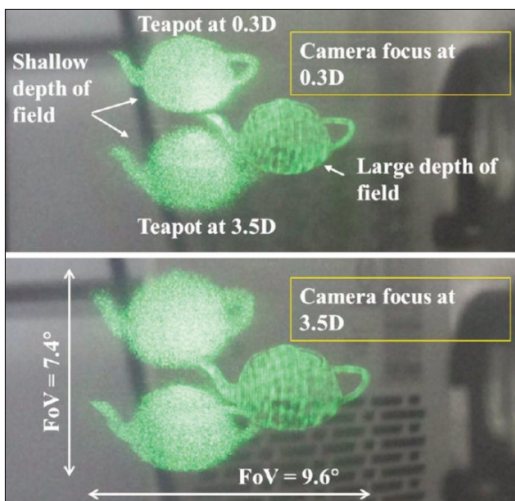
라이트필드 및 홀로그래픽 NED가 가지는 또 하나의 특징은 영상이 형성되는 거리뿐 아니라 그 영상의 심도(depth of field)도 제어할 수 있다는 것이다. 하드웨어 상의 변경 없이 라이트필드 혹은 홀로그래프 데이터의 변경만으로 표시되는 영상의 심도를 조절할 수 있다. 이에 따라 실제 물체와 같이 사용



〈그림 3〉 수렴 조절 거리 관계 (a) 기존 NED, (b) 라이트필드 혹은 홀로그래픽 NED

자 눈의 초점이 해당 영상의 거리에 맞을 때만 선명하게 관측되고 다른 경우에는 흐릿(blur)하게 보이도록 심도를 작게 할 수도 있고, 혹은 맥스웰리안(Maxwellian) 디스플레이와 같이 사용자 눈의 초점

거리에 상관없이 영상이 항상 선명하게 관측되도록 심도를 크게 설정할 수도 있다.[6-8] 이를 통하여 사용자에게 표시되는 영상 중 3차원 장면에 해당하는 부분은 심도를 작게 설정하여 실제 물체와 같은 사실감을 부여하고, 기기의 배터리 상황, 현재 시간 등의 정보는 심도를 크게 설정하여 사용자 눈의 초점 거리에 관계없이 언제나 선명하게 관측되도록 하는 등의 다양한 응용이 가능하다. 〈그림 4〉는 홀로그래픽 NED를 이용하여 영상별로 다른 심도를 부여한 예를 보여준다.[8]



〈그림 4〉 홀로그래픽 NED에서의 영상 심도 조절 예 (영상 출처: ret, [8])

2. 광학계 및 사용자 안구 수차 보정

라이트필드 및 홀로그래픽 NED가 가지는 또 하나의 특징은 광학계 수차의 선보상이 가능하다는 것이다. 라이트필드 및 홀로그래픽 NED는 임의의 광선 분포 혹은 파면을 재현할 수 있으므로, NED 광학계

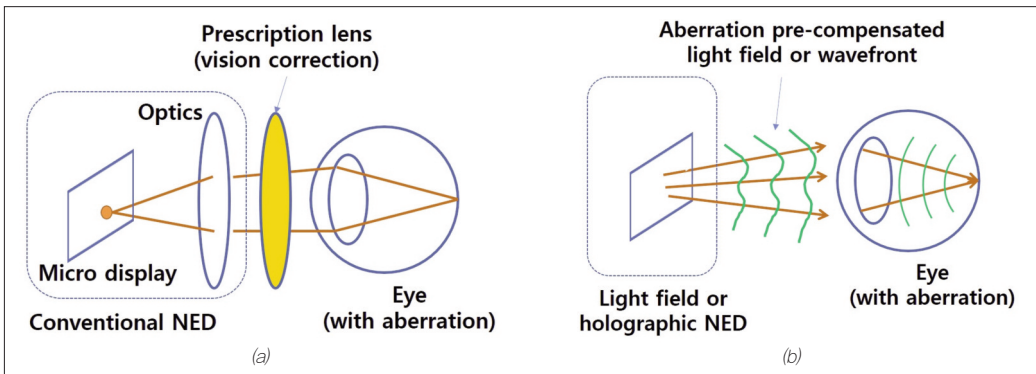
에 존재하는 다양한 수차들을 선보상한 광선 분포 혹은 파면을 재현함으로써 추가적인 수차 보정 광학계 없이 선명한 영상을 재현할 수 있다.[8-11] 이러한 특징은 비교적 큰 수차를 지니는 비축(off-axis) 광학계 혹은 홀로그래픽 광학 소자 등을 다른 수차 보정용 광학계 추가 없이 그대로 활용할 수 있도록 하여 간결한 NED 구성을 실현하는데 크게 기여한다.

이러한 선보상은 NED 광학계 자체의 수차뿐만 아니라 사용자 눈의 수차에도 적용될 수 있다. 사용자가 평소에 시력 교정을 위하여 안경을 착용하는 경우, 현재의 NED는 <그림 5>(a)와 같이 그 시력 교정 안경 위에 덧써야 하므로 그 사용성이 크게 떨어진다.

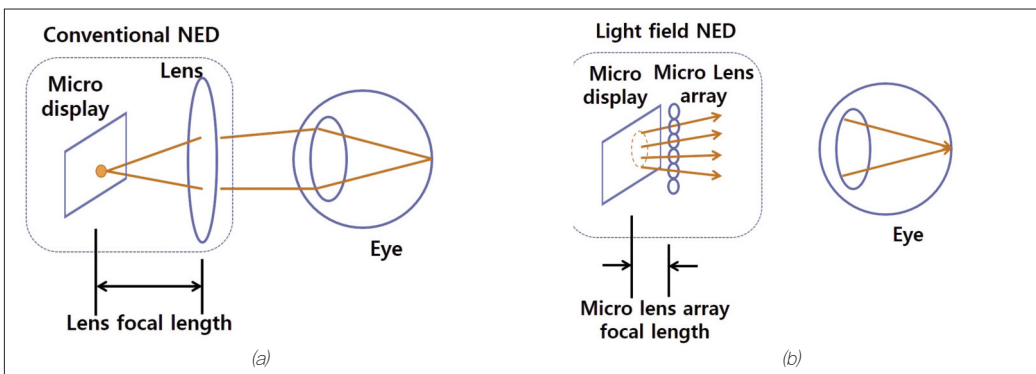
그러나 라이트필드 및 홀로그래픽 NED는 사용자 눈의 수차를 선보상함으로써 시력 교정 안경 없이 NED만으로 선명한 영상의 표시를 가능하게 한다.[7, 12]

3. 간략화된 시스템 구성

NED는 사용자가 착용하는 기기이므로 그 크기와 구성을 간략화 하는 것이 중요하다. 라이트필드 및 홀로그래픽 NED의 특성은 NED 시스템을 간략화 하는데도 활용될 수 있다. <그림 6>(a)에서 보는 바와 같이 기존 NED에서는 마이크로 디스플레이 패널의 허상을 사용자의 눈으로부터 먼 곳에 형성하기 위하



<그림 5> 사용자 눈의 수차 보정 (a) 기존 NED의 경우 사용자 시력 보정 안경을 NED에 추가하여 착용 필요. (b) 라이트필드 및 홀로그래픽 NED의 경우 수차 선보상을 통해 시력 보정 안경 없이 선명한 영상 표시 가능



<그림 6> NED 시스템 구성의 간략화 (a) 기존의 NED 구성 (b) 렌즈어레이를 이용하여 두께를 저감한 라이트필드 NED의 예

여 마이크로 디스플레이 패널과 광학계 사이의 간격을 광학계의 초점 거리만큼은 확보해야 한다. 또, 넓은 시야(Field of View, FoV)를 얻기 위해서는 추가적인 광학계가 필요하며 이는 시스템의 두께를 더욱 늘리는 원인이 된다. 그러나 이러한 일반적인 허상 광학계를 사용하지 않는 라이트필드 및 홀로그래픽 NED는 보다 얇고 단순한 구성으로 넓은 FoV와 영상 거리를 확보할 수도 있다. <그림 6>(b)는 렌즈어레이를 활용하여 시스템 두께를 저감하고 넓은 FoV를 확보하는 라이트필드 NED 구성의 예를 보여준다.[13]

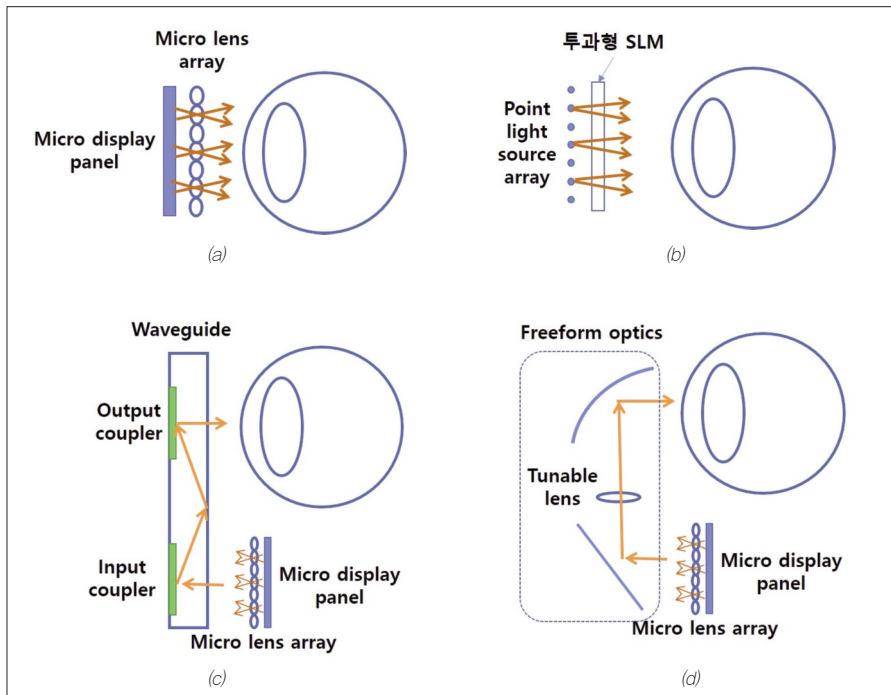
III. 라이트필드 기반 NED 구현 기술

라이트필드 NED는 표시하고자 하는 가상 3차원

영상에 해당하는 위치별 각도별 광선 분포(spatio-angular ray distribution)를 재현하여 사용자의 눈에 전달한다. 이를 위하여 개별 광선들의 밝기 및 방향성을 제어하는 구조가 필요하다. 본 장에서는 이를 구현하는 대표적인 세 가지 구조, 즉 렌즈어레이, 패널 적층, 사용자 동공면 스캐닝을 각각 간단히 살펴본다.

1. 렌즈어레이 혹은 점광원어레이 이용

라이트필드 디스플레이를 구현하는 가장 대표적인 방법은 디스플레이 패널과 렌즈 어레이의 조합을 활용하는 집적 영상 기법(integral imaging)이다. 디스플레이 패널에서 애초 방향성 없이 출발한 빛은 렌즈어레이에 의하여 픽셀별로 다른 각도로 진행하게 되며 광선 분포를 재현한다.[3]



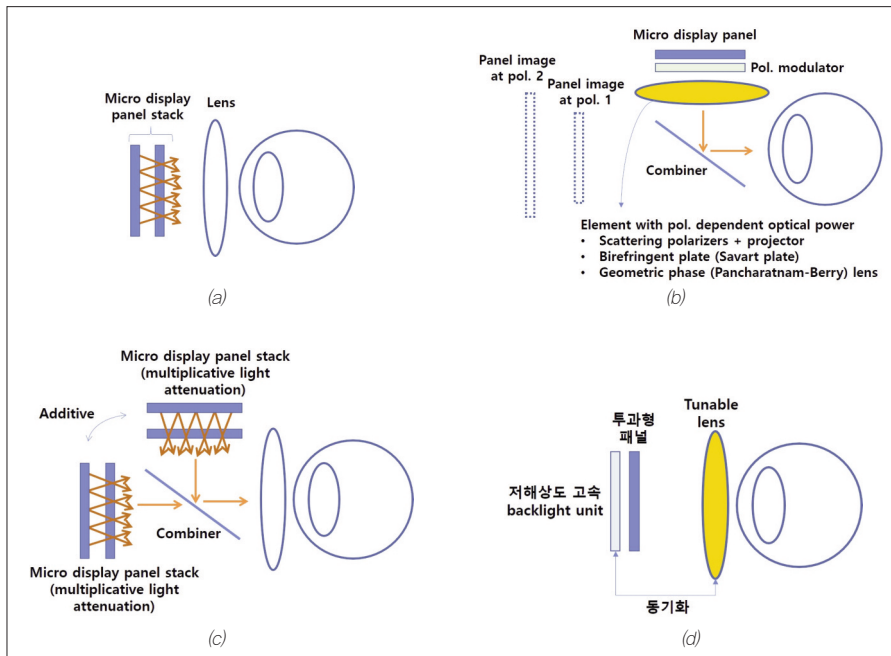
<그림 7> 렌즈어레이 혹은 점광원어레이를 이용한 라이트필드 NED 구성 (a) 렌즈어레이 이용[14, 19] (b) 점광원 어레이 이용[15], (c) waveguide 이용[16-17], (d) Freeform 광학계와 초점 가변 렌즈 이용[18]

〈그림 7〉은 이러한 집적 영상 기법을 NED에 적용한 다양한 구현예들을 보여준다. 〈그림 7〉(a)와 같이 마이크로 디스플레이 패널과 마이크로 렌즈 어레이를 다른 추가적인 광학계 없이 바로 사용자의 눈 앞에 위치시켜 VR용 라이트필드 NED를 구현하는 기법이 가장 먼저 보고되었으며[14], 〈그림 7〉(b)와 같이 마이크로 렌즈 어레이 대신 점광원 어레이와 투과형 디스플레이 패널을 사용자 눈 앞에 위치시킴으로써 AR용 라이트필드 NED를 구현한 예도 보고되었다.[15] 그러나 투과형 패널의 투과도가 높지 못하므로 보다 밝은 사용자 시야를 확보하는 AR NED의 구현을 위하여 〈그림 7〉(c), 〈그림 7〉(d)와 같이 waveguide나 free-form 광학계를 활용하여 렌즈어레이-디스플레이 패널에서 생성된 광선 분포를 사용자 눈에 전달하는 구조도 최근 보고되고

있다.[16-18] 이러한 마이크로 렌즈 어레이 패널 구조는 표현할 수 있는 영상의 깊이 영역이 일반적으로 크지 않고 그 해상도의 손실이 있는데, 이를 보상하기 위하여 초점 가변 렌즈를 광선 분포 전달 광학계 내부에 추가하거나[18], 액정 기반 렌즈 어레이를 사용하는 구조도 제안되고 있다.[19]

2. 다중 영상면 이용

라이트필드 디스플레이를 구현하는 또 다른 방법은 디스플레이 패널을 두 장 이상 적층하는 것이다. Backlight unit에서 출발한 광선들이 그 위치와 방향에 따라 패널 스택을 다른 픽셀 조합으로 통과하며 밝기 변조되어, 표시하고자 하는 3차원 영상에 해당하는 광선 분포를 이룬다.[20-21]



〈그림 8〉 다중 영상면을 이용한 라이트필드 NED 구성 (a) 패널 2장 적층[22] (b) 편광 선택성을 이용한 다중 영상면 구현[23-26] (c) Additive-Multiplicative 하이브리드 구성[27] (d) 토폴로그래픽 영상면 구현[28]

다중 영상면을 이용한 라이트필드 NED는 <그림 8>(a)와 같이 사용자의 눈 앞에 두 장의 패널을 적층한 VR용 NED의 구조로 처음 제안되었으며[22], 그 후 시스템 간소화를 위하여 <그림 8>(b)와 같이 하나의 패널을 사용하되 편광을 이용하여 두 개의 패널 영상면을 형성하는 기법들이 보고되었다. 이를 위하여 큰 복굴절 플레이트를 이용하거나[23], 편광 선택적 산란판을 이용하는 등의[24] 구성이 보고되었으며, 최근에는 Geometric phase lens를 이용한 구성이 활발히 연구되고 있다.[25-26] 또, 적층 패널 라이트필드 디스플레이의 라이트필드 재현 정확도 및 깊이 영역을 넓히기 위하여 <그림 8>(c)와 같이 additive-multiplicative 하이브리드 형태의 NED도 제안되었으며[27], 초점 가변 렌즈와 그에 동기화되어 동작하는 저해상도 고속 backlight unit을 통해 고속 동작하지 않는 일반적인 투과형 패널을 이용하여 깊이맵에 따른 토모그래픽 영상면을 형성하는 기법도 <그림 8>(d)와 같이 제안되어 관심을 받고 있다.[28]

3. 사용자 동공면 스캐닝 이용

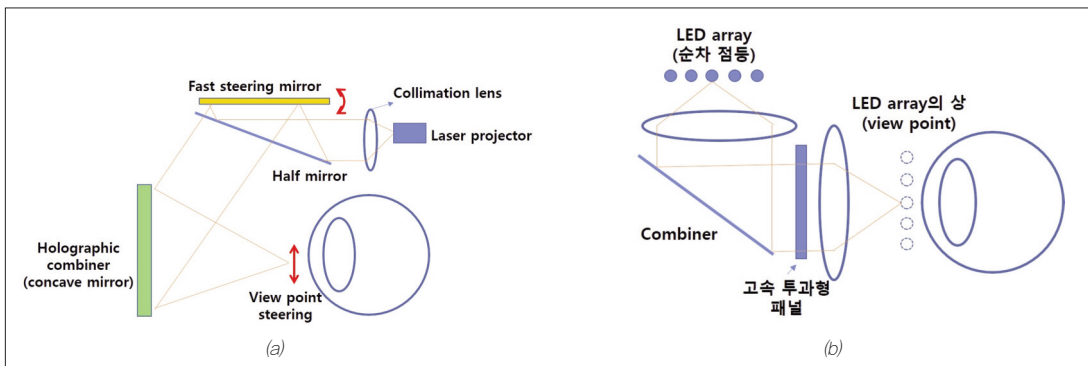
고속 디스플레이를 활용하여 사용자의 동공

면에서 시점 영상을 스캐닝함으로써 초다시점 디스플레이 혹은 라이트필드 디스플레이를 구현하는 NED 기법도 최근 큰 관심을 받고 있다. <그림 9>는 steering mirror나[6], LED 어레이를 사용하여[29] 라이트필드 NED를 구현한 예를 보여준다.

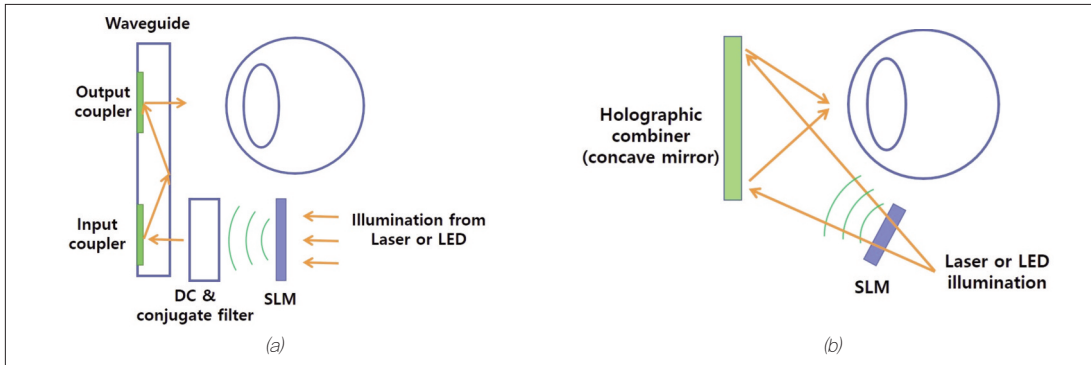
IV. 디지털 홀로그램 기반 NED 구현 기술

1. 개괄

디지털 홀로그래픽 디스플레이는 가간섭성 광원과 공간광변조기(Spatial Light Modulator, SLM)을 사용하여 3차원 영상에 해당하는 파면을 재현하는 디스플레이 기술을 말한다. 3차원 물체를 이루는 각 voxel마다 연속적인 파면을 가지는 완전한 구면파를 재현할 수 있고, 표현할 수 있는 깊이 범위가 라이트필드 디스플레이를 포함한 타 기술보다 넓어 가장 진화된 형태의 3차원 디스플레이 기술로 생각되고 있다. 그러나 실제 구현에 필요한 SLM의



<그림 9> 사용자 동공면에서의 시점 스캐닝을 통한 라이트필드 NED의 구성 (a) Steering mirror 이용[6]. (b) LED 어레이 이용[29]



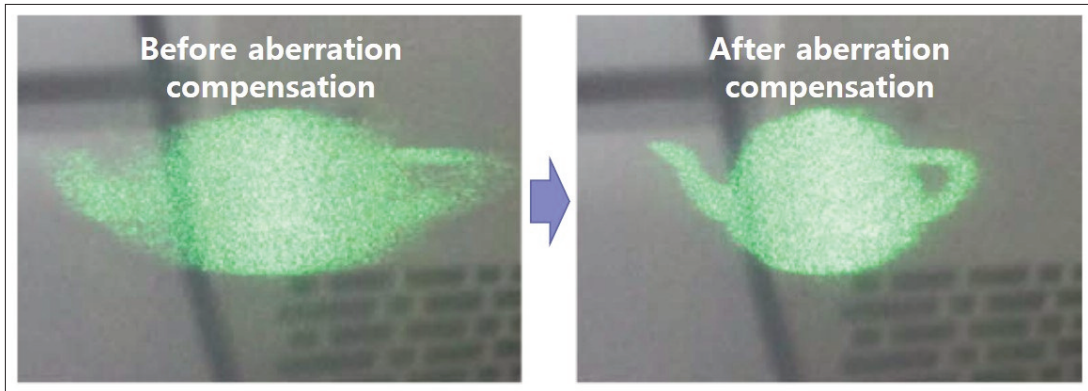
〈그림 10〉 디지털 홀로그램 기반 NED 구현 예 (a) Waveguide 이용[8,9], (b) 직접 반사 이용[10,11]

해상도, 혹은 Space-Bandwidth Product(SBP)가 너무 높아, 현재 SLM의 수준에서는 모니터나 TV 형태의 대화면 광시야각 홀로그래픽 디스플레이를 구현하는 것이 요원하다. 그러나 NED의 경우 사용자가 한 명으로 고정되어 있고, 디스플레이 시스템과 사용자 눈의 상대적인 위치가 일정하므로, 요구되는 SLM의 해상도가 다른 응용 대비 훨씬 낮아, 홀로그래픽 NED의 구현이 상대적으로 훨씬 용이하여 최근 학계 뿐 아니라 산업계에서도 매우 활발히 연구되고 있다.

홀로그래픽 NED는 Laser, LED 등의 가간섭성(coherent) 혹은 부분적 가간섭성(partially coherent) 광원과 SLM으로 구성된 홀로그래픽 디스플레이 모듈과, 재현된 파면을 사용자 눈으로 전달해 주는 영상 전달 광학계로 구성된다. 많은 경우, 불완전한 SLM의 광변조로 인한 DC 및 Conjugate 항, 그리고 SLM의 이산 픽셀 구조에 의한 고차 회절항들을 제거하기 위한 필터도 광 전달 경로에 추가된다. 〈그림 10〉은 이러한 홀로그래픽 NED의 구현 예로서, waveguide를 사용하는 경우[8, 9]와 combiner에 직접 반사시켜 눈으로 입사시키는 경우[10, 11]를 보여준다.

2. 광학계 및 사용자 안구 수차 보상

라이트필드 NED는 공간과 각도 방향으로 불연속적인 광선들을 재생하는데 반하여, 홀로그래픽 NED는 연속적인 파면을 가지는 물체광을 재생한다. 이는 홀로그래픽 NED가 라이트필드 NED보다 훨씬 넓은 3차원 영상 표시 가능 깊이 영역을 가지는데 기여하기도 하며, 또 홀로그래픽 NED의 광학계 및 사용자 눈 수차 보상 정확도를 높이는 데 기여하기도 한다. 홀로그래픽 NED에서의 광학계 수차 선보상을 통한 영상 왜곡 저감은 다양한 시스템에서 보고되고 있다.[8-11] 이러한 광학계 수차 선보상은 광학계 모델로부터의 계산이나 제작된 시스템의 실제 측정을 통하여 얻어진 광학계 수차를 상쇄시키는 파면을 생성하기 위한 홀로그래픽 콘텐츠를 컴퓨터 생성 홀로그램(Computer Generated Hologram, CGH) 기법으로 얻고 이를 SLM에 적용함으로써 이루어진다. 〈그림 11〉은 이와 같은 광학계 수차 선보상의 효과를 보여준다. 같은 방법이 사용자 눈의 수차를 보상하는데도 활용될 수 있으며 이미 그 적용 사례가 보고된 바 있다.[12]



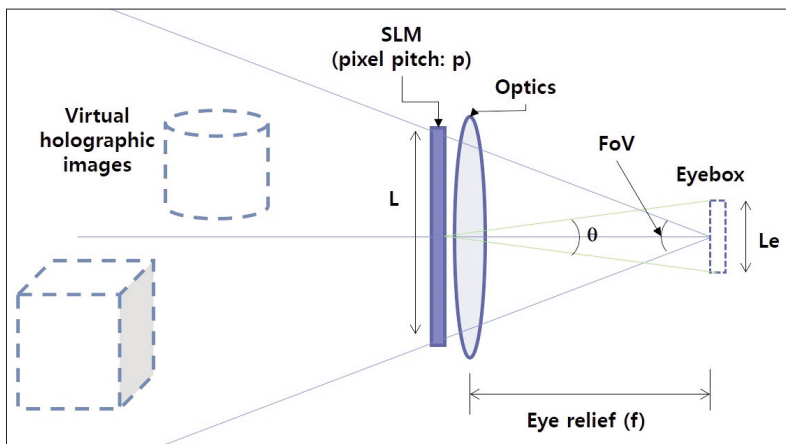
〈그림 11〉 홀로그래픽 NED에서의 수차 사전 보상의 예 (영상 출처: ref. [8])

3. 아이박스 확장 및 동적 제어

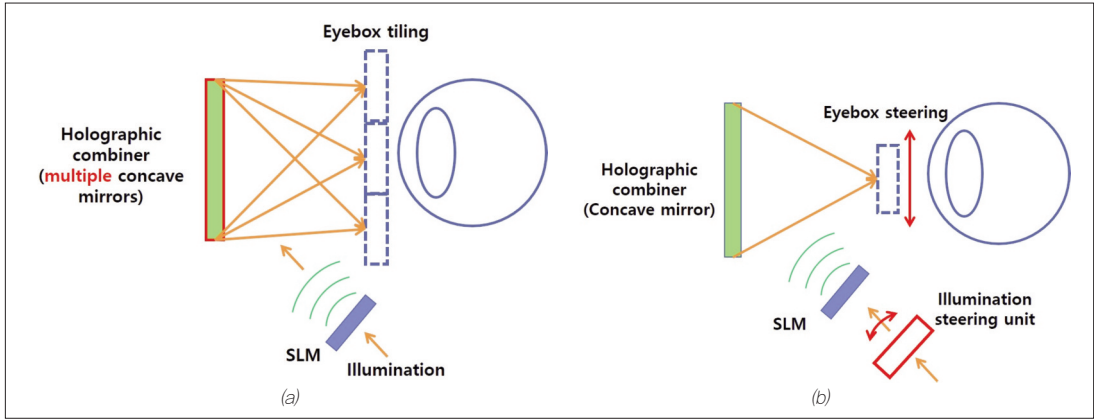
여러 가지 장점에도 불구하고 홀로그래픽 NED가 현재 가지는 이슈 중 하나는 부족한 아이박스 크기이다. 〈그림 12〉는 홀로그래픽 NED에서의 FoV와 아이박스 크기 사이의 trade-off 관계를 보여준다. 〈그림 12〉와 같이 SLM의 크기가 L , 픽셀 피치가 p 이고, 아이박스를 형성하는 광학계의 초점 거리가 f , 빛의 파장이 λ 라면, 표시되는 영상의 FoV는

L/f , 아이박스의 크기는 $f\lambda/p$ 로 주어지며 따라서 FoV와 아이박스 크기의 곱은 $\lambda L/p = \lambda N$ (단 $N=L/p$ 는 SLM의 픽셀 개수)으로 광학계의 초점 거리 f 와 관계없이 일정하다. 이 값은 결국 SLM의 픽셀 개수, 즉 해상도에 의하여 결정되며, 현재의 SLM 해상도 수준은 합리적인 FoV에서 필요한 아이박스 크기를 형성하는데 부족하다.

따라서 홀로그래픽 NED에서 주어진 FoV를 유지하며 아이박스 크기를 키우기 위한 다양한 기법들



〈그림 12〉 홀로그래픽 NED에서의 아이박스과 FoV 사이의 trade-off 관계

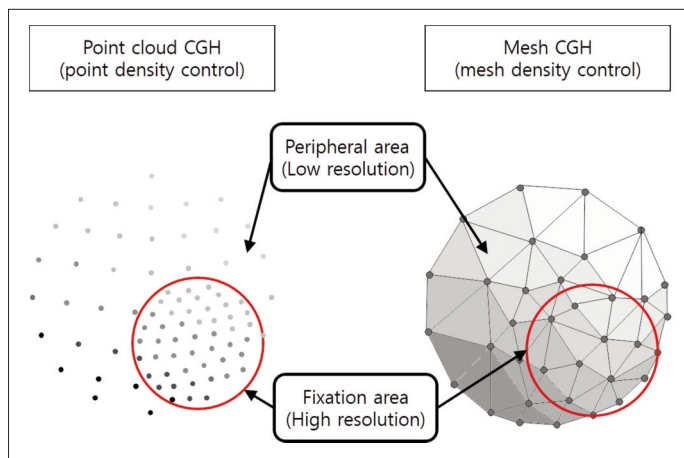


〈그림 13〉 홀로그래픽 NED에서 아이박스를 확장하기 위한 기법들 (a) 다중 오목 거울이 기록된 HOE를 활용한 아이박스 다중화 기술[8, 30], (b) 조명 광 steering을 통한 아이박스 steering 기술[11]

이 연구되고 있다. 〈그림 13〉은 그 대표적인 예들로서, combiner로 활용되는 홀로그래픽 광학 소자 (Holographic Optical Element, HOE)에 이격된 초점을 갖는 여러 오목 거울들을 다중화 함으로써 아이박스를 타일링하여 확장하는 기법[8, 30]과 SLM에 가해지는 조명광의 방향을 steering함으로써 최종적으로 형성되는 아이박스의 위치를 동적으로 steering하는 기법[11]을 보여준다.

4. 포비티드 홀로그램 콘텐츠 생성

홀로그래픽 NED가 갖는 또 하나의 이슈는 그 콘텐츠로 활용되는 CGH의 연산 속도이다. CGH는 표시하고자 하는 3차원 영상에 해당하는 파면의 분포를 계산적인 방법으로 획득하는 기법으로서 일반적인 영상 렌더링보다 훨씬 높은 수준의 계산량과 계산 시간을 요구한다.[31] 이는 시간 지연 없이 사용자와



〈그림 14〉 포비티드 CGH 기술 개념

가상 영상간의 상호 작용을 가능하게 해야 하는 AR 및 VR 응용에서 중요한 장애로 작용한다. 이와 같은 이슈를 극복하기 위하여 CGH의 계산 속도를 향상시키기 위한 다양한 기법들이 개발되고 있다.

이와 관련하여 일반적인 NED에서 영상 렌더링 속도를 향상시키기 위하여 제안되었었던 포비티드 렌더링(foveated rendering) 기법을 홀로그래픽 NED에 적용하기 위한 포디티드 CGH 기법이 최근 관심을 받고 있다. 포비티드 렌더링이란, 사용자 눈의 해상도가 중심 시야에서만 높고 주변 시야에서는 낮은 점에 착안하여, 영상 렌더링 해상도를 중심 시야에서만 높게 유지하고 주변 시야에서는 낮게 함으로써 영상 렌더링 속도를 높이는 기법이다. 이러한 개념을 홀로그램에 적용하여, <그림 14>와 같이 중심 시야와 주변 시야 사이의 point cloud 밀도를 조절하여 홀로그램 생성 속도를 높이는 point cloud 기반 포비티드 CGH 기법[32], 삼각형 mesh 밀도를 조절하여 같은 효과를 얻는 mesh 기반 포비티드 CGH 기법[33] 등이 제안되고 있으며, 향후 홀로그래픽 NED의 발전과 더불어 관련한 CGH 콘

텐츠 생성 기법도 크게 발전할 것으로 예상된다.

V. 결론

본 고에서는 라이트필드 NED와 디지털 홀로그래픽 NED의 기본 원리와 장점, 그리고 구현 기법들을 살펴보았다. 본 고에서 살펴본 두 기술은 완전한 단안 초점 정보를 사용자의 각 눈에 제공하여 기존 NED가 가지고 있는 VAC 문제를 해결하여 피로감 없이 실제 물체와 광학적으로 정합되는 가상 영상의 표시를 가능하게 하고, NED 광학계나 사용자 눈의 수차를 선보상하며, 경우에 따라 기존 NED보다 간결한 시스템 구성으로 구현할 수도 있어, 현재 상용화되어 있는 NED를 잇는 차세대 NED 기술로서 기능할 것으로 예상된다. 활발하고 지속적인 연구 개발을 통하여, 차별화된 성능을 갖는 라이트필드 및 홀로그래픽 NED가 상용화되고, 이들이 AR, VR을 포함한 다양한 새로운 응용 분야에 활용되기를 기대한다.

참고 문헌

- [1] <https://www.magicleap.com/press-resources>
- [2] <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>
- [3] J. Hong, Y. Kim, H.-J. Choi, J. Hahn, J.-H. Park, H. Kim, S.-W. Min, N. Chen, and B. Lee, "Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues," *Appl. Opt.* 50, H87, (2011).
- [4] S. J. Watt, K. Akeley, M. O. Ernst, and M. S. Banks, "Focus cues affect perceived depth," *J. Vis.* 5, 7, (2005).
- [5] T. Shibata, J. Kim, D.M. Hoffman, and M. S. Banks, "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays," *J. Vis.* 11, 1, (2011).
- [6] C. Jang, K. Bang, S. Moon, J. Kim, S. Lee, and B. Lee, "Retinal 3D: Augmented reality near-eye display via pupil-tracked light field projection on retina," *ACM Trans. Graph.* 36, article 190, (2017).
- [7] Y. Takaki, and N. Fujimoto, "Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display," *Opt. Express* 26, 22985, (2018).
- [8] J.-H. Park, and S.-B. Kim, "Optical see-through holographic near-eye-display with eyebox steering and depth of field control," *Opt. Express* 26, 27076, (2018).

- [9] H.-J. Yeom, H.-J. Kim, S.-B. Kim, H. Zhang, B. Li, Y.-M. Ji, S.-H. Kim, and J.-H. Park, "3D holographic head mounted display using holographic optical elements with astigmatism aberration compensation," *Opt. Express* 23, 32025, (2015).
- [10] A. Maimone, A. Georgiou, and J. S. Kollin, "Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality," *ACM Trans. Graph* 36, article 85 (2017).
- [11] C. Jang, K. Bang, G. Li, and B. Lee, "Holographic near-eye display with expanded eye-box," *ACM Trans. Graph.* 37, article 195, (2018).
- [12] F.-C. Huang, G. Wetzstein, B. A. Barsky, and R. Raskar, "Eyeglasses-free display: towards correcting visual aberrations with computational light field displays," *ACM Trans. Graph.* 33, article 59 (2014).
- [13] K. Aksit, J. Kautz, and D. Luebke, "Slim near-eye display using pinhole aperture arrays," *Appl. Opt.* 54, 3422, (2015).
- [14] D. Lanman and D. Luebke, "Near-eye light field displays," *ACM Trans. Graph.* 32, 220 (2013).
- [15] A. Maimone, D. Lanman, K. Rathinavel, K. Keller, D. Luebke, and H. Fuchs, "Pinlight displays: wide field of view augmented reality eyeglasses using defocused point light sources," *ACM Trans. Graph.* 33, 1, (2014).
- [16] S.-B. Kim, and J.-H. Park, "HMD type integral imaging system by using waveguide configuration," The 16th International Meeting on Information Display (IMID 2016), paper P2-74, ICC Jeju, Jeju, Korea, August 2016.
- [17] N. Darkhanbaatar, C.-W. Shin, M.-U. Erdenebat, K.-Y. Lee, and N. Kim, "Holographic waveguide-type three-dimensional augmented-reality display using the holographic optical element-mirror array," *Proc. SPIE* 10942, 1094216, (2019).
- [18] H. Huang and H. Hua, "High-performance integral-imaging-based light field augmented reality display using freeform optics," *Opt. Express* 26, 17578, (2018).
- [19] P.-Y. Chou, J.-Y. Wu, S.-H. Huang, C.-P. Wang, Z. Qin, C.-T. Huang, P.-Y. Hsieh, H.-H. Lee, T.-H. Lin, and Y.-P. Huang, "Hybrid light field head-mounted display using time-multiplexed liquid crystal lens array for resolution enhancement," *Opt. Express* 27, 1164, (2019).
- [20] G. Wetzstein, D. Lanman, M. Hirsch, and R. Raskar, "Tensor displays: compressive light field synthesis using multiplayer displays with directional backlighting," *ACM Trans. Graph.* 31, article 80, (2012).
- [21] Y. -M. Ji, and J.-H. Park, "Dual layered display that presents auto-stereoscopic 3D images to multiple viewers in arbitrary positions," *J. Soc. Inf. Display* 24, 641, (2016).
- [22] F.-C. Huang, K. Chen, and G. Wetzstein, "The light field stereoscope: immersive computer graphics via factored near-eye light field display with focus cues," *ACM Trans. Graph.* 34, article 60, (2015).
- [23] C.-K. Lee, S. Moon, S. Lee, D. Yoo, J.-Y. Hong, and B. Lee, "Compact three-dimensional head-mounted display system with Savart plate," *Opt. Express* 24, 19531, (2016).
- [24] S. Moon, C.-K. Lee, D. Lee, C. Jang, and B. Lee, "Layered display with accommodation cue using scattering polarizers," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 11, 1223, (2017).
- [25] Y.-H. Lee, G. Tan, K. Yin, T. Zhan, and S.-T. Wu, "Compact see-through near-eye display with depth adaption," *J. Soc. Inform. Disp.* 26, 64, (2018).
- [26] C. Yoo, K. Bang, C. Jang, D. Kim, C.-K. Lee, G. Sung, H.-S. Lee, and B. Lee, "Dual-focus waveguide see-through near-eye display with polarization dependent lenses," *Opt. Lett.* 44, 1920, (2019).
- [27] D. Kim, S. Lee, S. Moon, J. Cho, Y. Jo, and B. Lee, "Hybrid multi-layer displays providing accommodation cues," *Opt. Express* 26, 17170, (2018).
- [28] S. Lee, Y. Jo, D. Yoo, J. Cho, D. Lee, and B. Lee, "Tomoreal: Tomographic displays," *arXiv preprint arXiv:1804.04619* (2018).
- [29] T. Ueno, and Y. Takaki, "Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict," *Opt. Express* 26, 30703, (2018).
- [30] S.-B. Kim and J.-H. Park, "Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox," *Opt. Lett.* 43, 767, (2018).
- [31] J.-H. Park, "Recent progresses in computer generated holography for three-dimensional scene," *J. Inform. Display* 18, 1, (2017).
- [32] J. S. Hong, Y. M. Kim, S. H. Hong, C. S. Shin, and H. J. Kang, "Gaze contingent hologram synthesis for holographic head-mounted-display," *Proc. SPIE* 9771, 97710K6, (2016).
- [33] Y.-G. Ju, and J.-H. Park, "Fast generation of mesh based CGH in head-mounted displays using foveated rendering technique," *Digital Holography and 3-D Imaging (DH 2018)*, OSA Imaging and Applied Optics Congress, Wyndham Orlando Resort International Drive, Orlando, FL, USA, paper DTu5F.6, June 2018.

필자소개



박재형

- 2000년 : 서울대학교 전기공학부 학사
- 2002년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
- 2005년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2005년 ~ 2007년 : 삼성전자 책임연구원
- 2007년 ~ 2013년 : 충북대학교 정보통신공학부 전임강사, 조교수, 부교수
- 2013년 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학과 부교수, 교수
- 주관심분야: 라이트필드 및 홀로그래피 기술 기반 3차원 정보 처리 및 디스플레이, 증강현실 근안 디스플레이, 계산 광학