

디지털 홀로그래픽 디스플레이 기술 동향

Digital Holographic Display Technology Trends

임용준 [Y. Lim, yongjun@etri.re.kr]

홍기훈 [K. Hong, khong@etri.re.kr]

박민식 [M. Park, pms@etri.re.kr]

김진웅 [J. Kim, jwkim@etri.re.kr]

디지털홀로그래피연구실 선임연구원

디지털홀로그래피연구실 선임연구원

디지털홀로그래피연구실 책임연구원/실장

기가서비스연구부 책임연구원

* 본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 ‘범부처 Giga KOREA 사업’의 지원을 받아 수행된 연구임[GK17D0100, 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 기술 개발].

Digital holography is generally regarded as one of the most possible candidates for achieving a real 3D display system in that it can fully record and reconstruct the wave characteristics of light. In addition, 3D display systems based on digital holographic technology do not cause a vergence-accommodation mismatch problem. In this report, the recent trends in digital holographic display technology are described, and recent research results related to the fields of augmented reality and virtual reality are also briefly reported.

2017

Electronics and
Telecommunications
Trends

텔레프레전스 & 홀로그래피
특집

- I. 서론
- II. 디지털 홀로그래픽
디스플레이의 장점
- III. 디지털 홀로그래픽
디스플레이 구현을 위한
주요 고려사항
- IV. 최근 디지털 홀로그래피
관련 기술 동향
- V. 결론



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

I. 서론

사물의 자연스러운 모습을 있는 그대로 기록하고 표현하는 기술에 대한 인간의 관심사는 다양한 형태의 3차원 디스플레이 기술 개발을 자극하는 주요 요인이 되어 왔다[1]. 자연스러운 3차원 영상을 구현하기 위해서는 물체로부터 반사되어 인간의 시각으로 전달되는 빛의 물리적인 특성을 파악하여 이를 디스플레이 소자로부터 구현할 수 있어야 한다[2], [3]. 빛의 특성을 디스플레이 소자에 적용하기 위해서는 밝음과 어두움을 구분 짓는 세기(Intensity)와 관련된 진폭(Amplitude) 정보뿐 만이 아니라 빛의 파동성에서 나타나는 파면(Wavefront)상의 시작 위치를 가리키는 위상(phase) 정보를 다루는 기술이 필요하다.

빛의 진폭 정보는 사람의 육안으로도 쉽게 볼 수 있는 빛의 특성이며, 일반적인 사진 기술에서 기본적으로 적용 및 확인되는 빛의 성질이다. 하지만, 빛의 위상을 확인하는 것은 육안으로 보는 것과 같이 직접적인 방법으로 관찰하는 것이 어려웠기 때문에, 빛의 위상을 다루는 기술과 이를 응용할 수 있는 구체적인 방법이 알려지게 된 것은 아직 채 100년이 되지 않는다. 빛의 위상 정보를 기록하고 이를 응용할 수 있는 방법은 1940년이 되어서야 당시 전자 현미경을 연구하던 헝가리 출생의 영국 물리학자 데니스 가보(Dennis Gabor, 1900~1979)에 의해서 착안되었다. 전체를 뜻하는 그리스어 ‘Holos’와 기록을 뜻하는 ‘Graphy’를 결합하여 빛의 중요한 물리적인 특성인 간섭현상으로부터 위상정보를 기록하고 이를 응용할 수 있는 기술을 홀로그래피(Holography)라 이름 지었다 [4]. 데니스 가보가 제안한 홀로그래피 기술은 결맞음성(Coherent) 광원인 레이저의 개발로 인해서 그의 제안 내용이 실험적으로 증명될 수 있었고, 이로 인해서 노벨상을 수상하게 되었다[4]. 이후 Emmett Leith 와 Juris Upatnieks, 그리고 Yuri Nikolaevich Denisjuk 등에 의해서 홀로그래피를 디스플레이로써

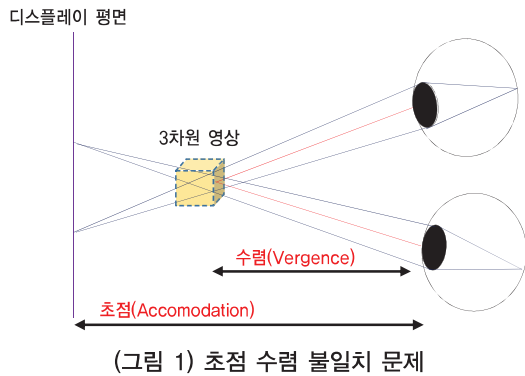
응용할 수 있는 방안이 연구되기 시작하였다[4]. 1990년대 이후부터, 디지털 정보를 표시할 수 있는 디스플레이 소자의 개발이 발전함에 따라서 디지털 홀로그래피 기술이 등장하였고, 본격적인 디지털 홀로그래픽 디스플레이(Digital holographic display) 기술 관련 연구들이 소개되기 시작하였다.

본고에서는 디지털 홀로그래피를 적용하는 디스플레이 기술이 다른 방식의 3차원 디스플레이 시스템과 구분될 수 있는 장점을 II장에서 설명하고, 이와 더불어 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템 구현에 필요한 핵심 기술에 대해서 III장에서 간략히 소개하고자 한다. 그리고 마지막으로 IV장에서 디지털 홀로그래픽 디스플레이 관련된 최근의 국내외 기술 동향을 소개하고자 한다. 또한, 최근 활발한 논의가 되고 있는 가상현실(VR: Virtual reality), 증강현실(AR: Augmented reality) 및 혼합현실(MR: Mixed reality)과 접목이 가능한 홀로그래피 기술에 대한 내용을 간략하게 마지막 절에 담고자 한다.

II. 디지털 홀로그래픽 디스플레이의 장점

홀로그래피는 빛의 진폭 및 위상정보를 다루는 기술로써 가장 자연스러운 형태의 3차원 디스플레이를 구현하는 것이 가능한 기술로 주목받고 있다[5]. 자연스러운 형태의 3차원 디스플레이의 구현이 가능한 이유들 가운데 주요한 하나는 홀로그래피를 응용한 3차원 디스플레이 시스템에서는 종래의 3차원 디스플레이에서 일어날 수 있는 수렴 초점 불일치(VAC: Vergence accommodation conflict)문제에 의한 피로감을 유발하지 않는 장점을 가질 수 있기 때문이다[5]. 수렴 초점 불일치에 대한 간략한 설명이 (그림 1)에 나타나 있다.

(그림 1)에서 나타나 있듯, 물리적인 디스플레이 평면과 이로부터 떨어진 3차원 영상이 구현되어 사람이 응시하게 되는 공간상의 위치와의 차이가 피로감을 유발



하는 주원인이 되는 것이다. 즉, 양안의 두 동공이 바라보는 각도가 수렴하는 지점은 3차원 영상이 구현된 공간인 반면, 눈의 초점은 디스플레이 평면으로 맞춰지기 때문에 두 눈이 수렴하는 공간상의 위치와 초점을 맞추고자 하는 디스플레이 면의 위치가 서로 다르게 되어(현실 시각에서는 양자가 일치함) 사람은 피로감을 느끼게 되는 것이다. 하지만 실제 사물로부터 산란되어 나오는 빛의 특성을 표현할 수 있는 홀로그래피 기술은 VAC에 의한 피로감 문제를 근본적으로 해결할 수 있다. 이러한 VAC 문제에 대한 근원적인 해결 방법으로서의 홀로그래피가 갖는 장점뿐만 아니라, 양안 시차 및 운동 시차를 통한 깊이 인지요소(Depth cue, depth perception)들의 표현이 가능하다.

〈표 1〉에는 3차원 디스플레이를 구성하는 인지 요소들에 대해 다른 디스플레이와 홀로그래픽 디스플레이 방식의 비교를 나타내었다[5]. 깊이감을 인지하는 것에 관한 더 많은 논의와 다양한 방식의 3차원 디스플레이 구현기술에 관한 자세한 내용은 Jason Geng이 미국광학회가 발행하는 Advances In Optics and Photonics에 게재한 논문 'Three dimensional display technology'[5]를 참고하기 바란다.

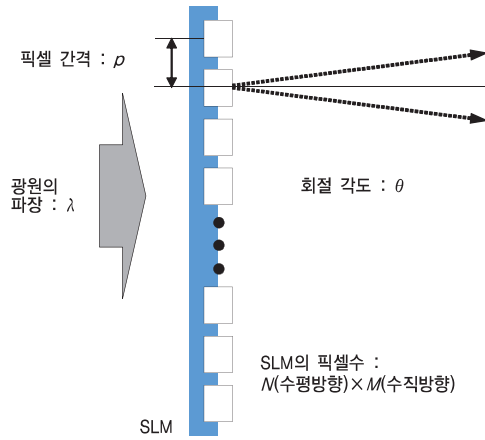
III. 디지털 홀로그래픽 디스플레이 구현을 위한 주요 고려사항

디지털 홀로그래픽 디스플레이를 구현하기 위한 가

〈표 1〉 3차원 디스플레이 방식에 따른 깊이 인지 요소[5]

구 분		디지털 홀로그래피	다시점 디스플레이	체적형 디스플레이
물리적 요인 (physiological depth cues)	초점조절 (accommodation)	가능	불가 (초다시점은 가능)	가능
	수렴 (vergence)	가능	가능	가능
	양안시차 (binocular disparity)	가능	가능	가능
	운동시차 (motion parallax)	가능	가능	가능
심리적 요인 (psychological depth cues)	선원근법 (linear perspective)	가능	가능	가능
	가려짐 또는 중첩 (occlusion or overlapping)	가능	가능	부분적으로 가능
	텍스처 구배 (texture gradient)	가능	가능	부분적으로 가능
	사전 인지 (prior knowledge)	가능	가능	가능

장 중요한 요소 가운데 하나는 빛의 진폭과 위상을 표시할 수 있는 소자이다. 빛의 진폭 또는 위상을 변조할 수 있는 소자를 공간 광 변조기(SLM: Spatial light modulator)라 하며, SLM은 디지털 홀로그래픽 디스플레이 구성에 있어서 가장 기본적으로 요구되는 디스플레이 소자이다. 현재 SLM으로서 사용할 수 있는 디스플레이 소자는 액정(LC: Liquid crystal)을 이용한 디스플레이 소자와 디지털 마이크로-거울 소자(DMD: Digital micro-mirror device)이다. 이상적인 디지털 홀로그래픽 디스플레이를 구현하기 위해서는 SLM을 구성하는 각 요소 픽셀의 크기가 작아야 하며, SLM의 전체 크기는 커야 한다. SLM의 작은 픽셀 크기 또는 픽셀 간격은 홀로그램 영상의 시야각을 결정하는 요소이며, SLM의 전체 크기는 디지털 방식으로 구현된 홀로그램의 영상 크기를 결정하는 요소가 된다. 따라서 디지털 홀로그램의 영상 크기와 홀로그램을 관찰할 수 있는 시야각을 동시에 나타내기 위해, 공간 대역폭(SBP: Space-bandwidth product)이라는 용어를 사용하여, 디지털 홀로그램의 영상 크기와 시야각을 동시에 나타낼



(그림 2) SLM의 단면 개략도

수 있는 용어로서 주로 사용한다[6].

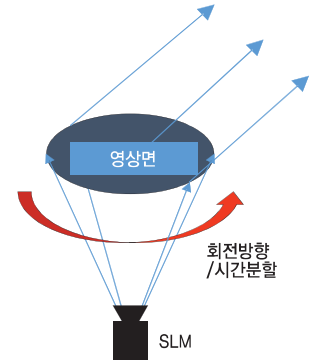
(그림 2)에 나타나 있는 SLM의 단면 개략도를 참조하여, 시야각은 SLM의 픽셀 간격(p)과 SLM으로 입사하는 레이저 광원의 파장(λ)으로부터 결정되는 회절 각도와 관련이 있으며, SLM으로부터의 회절 각도는 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다[7].

$$\text{회절 각도 } \theta = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda}{2p} \right]. \quad (1)$$

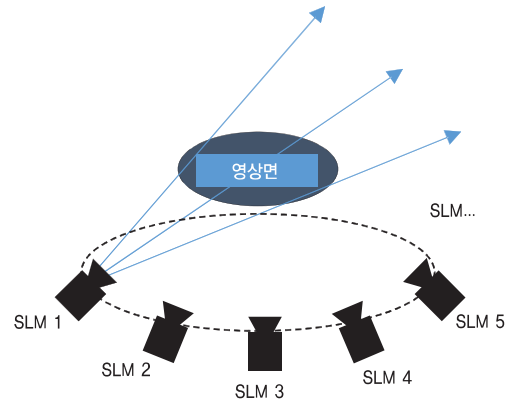
또한, SLM의 전체 크기는 수평 방향의 픽셀 수(N)와 수직 방향의 픽셀 수(M)에 각각 픽셀 간격(p)을 곱하여 나타낼 수 있으며, 다음과 같다[6], [7].

$$\text{SLM의 전체 크기 } L = (Np) \times (Mp). \quad (2)$$

SLM의 각 픽셀 크기를 키우면 전체 영상의 크기는 증가하지만, 홀로그래프의 영상의 크기를 볼 수 있는 시야각은 줄어들게 된다. 이와 마찬가지로, 픽셀의 크기를 매우 작게 하면, 홀로그래프 영상을 볼 수 있는 시야각은 넓어지게 되지만, 영상 크기는 줄어들게 된다. 따라서 시야각과 영상 크기를 모두 키우는 것이 가장 중요한 기술적 요소라 할 수 있다. 하지만 현재로서는 하나의



(가) 시간다중화 방식



(나) 공간다중화 방식

(그림 3) 시간다중화 방식과 공간다중화 방식 개념도

SLM으로부터 홀로그래프의 전체 크기와 시야각을 동시에 증대하는 것, 즉 SLM의 SBP 문제를 개선하는 것은 한계가 있는 상황에 있다. 따라서, 현재의 기술로써 이용 가능한 SLM으로부터 홀로그래픽 디스플레이를 구현하기 위해서는 추가적인 방법을 적용하는 것이 필요하다. 주로 이용되는 방법은 고속으로 동작이 가능한 SLM을 이용하는 시간 다중화(Temporal multiplexing) 방법이 있으며, 다수의 SLM을 이용하는 공간 다중화(Spatial multiplexing) 방법, 그리고 이러한 시간 및 공간 다중화 방법을 동시에 적용하는 시공간 다중화(Spatio-temporal multiplexing) 방법이 주로 사용되고 있다. (그림 3)에는 시간 다중화 및 공간 다중화에 대한 개념도가 나타나 있다.

IV. 최근 디지털 홀로그래피 관련 기술 동향

디지털 홀로그래피의 구현에 있어서 필요한 홀로그래픽 디스플레이용 SLM의 높은 가격과 다수의 SLM을 이용하게 될 경우에 증가하는 광학 시스템의 복잡도 문제로 인하여, 현재 연구 및 개발 단계에 있는 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템에서는 주로 최소 개수의 SLM을 활용하는 시간 다중화 방법에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 본 장에서는 2015년 이후 발표된 최근 디지털 홀로그래픽 디스플레이 관련 연구 동향을 간략히 기술하고자 한다. 다중화 기술 적용을 통하여 구현한 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템 관련 연구 내용 소개와 다중화 방법이 아닌 다른 접근 방법을 적용한 홀로그래픽 디스플레이 시스템에 대한 내용을 소개하고자 한다.

1. 다중화 기술을 적용한 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템 연구 동향

가. 일본 동경농공대학교

일본 동경농공대(Tokyo university of agriculture and technology)의 Yashuhiro Takaki 교수 연구진은 단일의 DMD로부터 시간 다중화 방법을 이용하여 수평 360도에서 홀로그램 영상을 관찰할 수 있는 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 그 연구 결과를 2015년 3월에 미국 광학회에서 발행하는 Optics Express지에 게재하였다[8]. 본 연구에서는 단색의 레이저 광원을 이용하여 1인치급 디지털 홀로그램 영상을 구현하였다. 회전하는 스크린은 모터에 의해서 구동되며, 회전 스크린에 부착된 Fresnel lens가 시야장을 형성하는 역할을 하여 관찰자가 홀로그램을 시청할 수 있게 된다. 이 시스템은 형성된 홀로그램 영상을 시청할 수 있는 수직 시야각 제한에 관한 문제는 렌티큘라 렌즈를 적용하여 개선하였지만, 보다 더 증대할 필요가 있는 것으로 보인다.

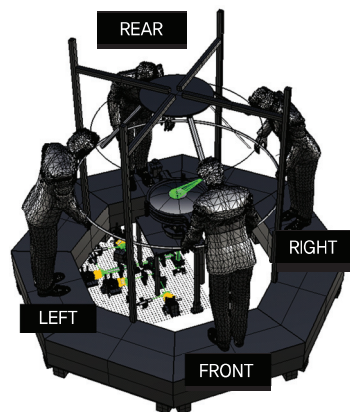
나. 영국 캠브리지 대학교

영국 케임브리지 대학교 Daping Chu 교수 연구팀과 중국 화웨이 그룹의 연구팀은 적색, 녹색, 청색 레이저 광원을 사용하여 컬러 홀로그래픽 디스플레이를 구현하였다[9]. SLM으로서 DMD를 적용하였으며, 광 격자 구조와 수직 방향의 시정각을 확보하기 위한 수직방향으로 빛을 산란하는 확산(Diffuser)판을 적용하였다. 재현된 영상의 크기는 60mm×30mm이며, 수평 시차(Horizontal parallax)만을 갖는 영상을 구현하였다.

다. 국내 한국전자통신연구원

한국전자통신연구원 디지털홀로그래피연구실에서는 시공간 다중화 방법을 적용하여 360도에서 시청 가능한 테이블 탑 형태의 단색 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 개발하였다[10]. 4개의 XGA급 SLM을 광학적으로 결합하여, 1,536(수평)×1,536(수직)의 홀로그램 영상 해상도를 갖는 3.2인치급의 디지털 홀로그램을 360도 전 방향에서 시청 가능한 시스템을 구현하였으며, 구현한 시스템이 (그림 4)에 나타나 있다.

또한, 적색, 녹색 및 청색 레이저 광원을 적용하여 4.5인치의 크기를 갖는 컬러 홀로그램을 수평 방향 360도 및 수직 방향 15도에서 시청 가능한 테이블 탑 형태



(그림 4) 한국전자통신연구원이 개발한 3.2인치급 360도 전방향 단색 홀로그래픽 디스플레이 시스템[10]



(그림 5) 한국전자통신연구원이 개발한 4.5인치급 컬러 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템[11]

의 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 개발하였다[11]. (그림 5)에는 4.5인치급 컬러 홀로그램이 구현되는 한국 전자통신연구원의 테이블 탑 컬러 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템이 나타나 있다. 본 연구에서는 각 색의 레이저 광원에 대응하는 1,920(수평)×1,200(수직)의 해상도를 갖는 DMD가 SLM으로 사용되었으며, 홀로그램 영상의 해상도는 360도 회전 특성을 고려하여 1,200(수평)×1,200(수직)을 적용하였다. 360도 전 방향에서 1,024 시점을 갖는 입체 영상이 시청 가능하도록 하였으며, 사용한 SLM은 약 15kHz의 고속 동작이 가능한 DMD를 적용하여, 시간 다중화 방법이 용이하게 하였다.

2. 다중화 방법없이 구현한 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템연구 동향

가. 일본 Chiba 대학교

일본 Chiba대학교 연구진은 아래위로 마주 보는 형태의 한 쌍의 포물경을 이용하여 단일 SLM으로부터 형성되는 디지털 홀로그램을 구현하였다[12]. LCOS (Liquid crystal on silicon) 방식의 SLM을 사용하였으며, 녹색 레이저 광원을 사용하여 단색 홀로그램을 형성

하였다. 이를 렌즈와 유사한 방식으로 이미지를 만들어 내는 한 쌍의 포물경의 위에서 홀로그램 영상이 나타나도록 구성하였다. 재생한 영상은 단색의 홀로그램이며 영상 크기는 1인치급이다.

나. 일본 Utsunomia 대학교

일본 Utsunomia 대학의 Yoshio Hayasaki 교수 연구 그룹에서는 마이크로 버블을 형성 및 제어하여 이를 산란체로 사용하고 계산으로 생성한 홀로그램(CGH: Computer generated hologram)패턴을 이용하여 물리적으로 제어된 산란체에 레이저 광원을 조사하여 3차원 영상을 구현하는 데 성공하였다[13]. 연구진에서는 산란체에 조사하는 레이저 광원을 원하는 형태의 패턴을 형성하기 위해서 SLM을 사용하였으며, 사용한 SLM 상에는 CGH 패턴에 의한 레이저 광원의 위상을 동적으로 제어하게 된다. 공간상에 형성된 마이크로 버블을 산란체로 이용하여 체적형 3차원 영상을 형성하였다. 산란체에서 퍼져나가는 영상을 관찰 가능하게 되어 시청할 수 있는 시야각이 넓어지는 장점이 있는 반면, 부족한 영상의 크기를 증대하는 방안이 필요한 것으로 보인다.

다. 국내 KAIST

KAIST 박용근 교수 연구팀에서는 간유리와 빛의 산란을 유발하는 매질을 바탕으로 공간 광 변조기의 제약 사항인 SBP 문제를 획기적으로 개선하는 원천 연구를 수행하였다[14]. 구현한 홀로그램의 영상 크기는 800mm^3 크기의 체적공간에서 30도 이상의 시야각을 제공하는 영상을 구현하였다. 이는 기존의 SLM이 갖는 공간대역폭 기준으로 볼 때, 약 2,000배 이상의 개선 효과를 타내는 것이라 할 수 있다. 사용된 간유리와 입사하는 빛의 산란을 유도하는 산란 매질의 사용으로 인하여 발생하는 낮은 밝기 문제가 존재할 수 있지만, 높은 휘도의 레이저 광원을 사용한다면 더 좋은 홀로그램 영

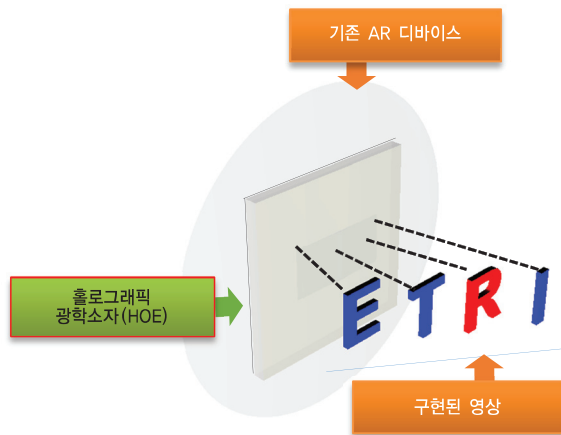
상을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 증강 및 혼합 현실과 접목이 가능한 홀로그래피 응용 기술

최근 AR, VR 그리고 MR 이 구현 가능한 머리 착용 디스플레이(HMD: Head mounted display) 제품을 구글 및 마이크로소프트와 같은 글로벌 기업에서 출시함에 따라서 관련된 요소기술들이 부각되고 있다. 특히, 마이크로소프트에서 출시한 홀로렌즈(Hololens) 제품은 시스루(See-through)를 구현하기 위한 광 결합 소자 기술로서 회절 광학 소자(DOE: Diffractive optical element) 기술을 적용하였다. 회절 광학 소자는 기존의 광학 거울과 렌즈 등의 광학 제품 역할을 할 수 있는 소자를 $100\mu\text{m}$ 이하의 두께를 갖는 박막 형태로 구현할 수 있는 기술이며, 광학적으로 투명한 물질에 제작이 될 수 있어 다양한 형태의 AR 및 MR 제품에 접목이 가능하다. 홀로그래피 기술을 바탕으로 구현한 DOE를 홀로그래픽 광학 소자(HOE: Holographic optical element)라 하며, 주로 포토폴리머(Photopolymer)와 같은 광 반응성 물질에 레이저 광원의 간섭을 바탕으로 광학 소자를 구현하는 기술을 일컫는다. 광 반응성 물질에 홀로그램을 구현하는 것은 아날로그 방식의 홀로그램 연구의 초창기부터 주로 사용 되어왔다. 그러나 최근에는 간섭무늬를 계산하여 디지털 방식으로 광 반응성 물질에 기록하는 방법의 연구가 진행되고 있어, 다양한 형태로 각종 디스플레이 장치에 적용되어 AR 및 MR기기의 성능 향상을 위해서 적용이 될 것으로 보인다. (그림 6)에는 AR 및 MR 관련된 기기에 부착하는 홀로그래픽 광학 소자(HOE)의 적용에 관한 개념도를 나타내었다.

가. 일본 정보통신연구기구(NICT)

일본의 정보통신연구기구(NICT: National Institute of Information and Communications Technology) 연



(그림 6) AR 디바이스에 HOE를 추가하여 서로 다른 깊이 위치에 있는 영상을 구현하는 방법에 관한 개념도

구진에서는 간섭무늬 파면을 계산하여 기록하는 방식으로 HOE를 제작하고 이를 스크린으로 이용하여 디지털 홀로그래픽 프로젝션 시스템(Digital holographic projection system)을 구현하였다[15]. 파면 기록 방식에 대한 기술은 종래에도 보고되었지만, NICT 연구진이 구현한 파면 기록 방식의 홀로그래픽 프린팅 기술을 이용하여 $73.6\text{mm} \times 41.4\text{mm}$ 크기의 스크린에서 홀로그램 영상을 시청 가능하게 하였다. 디지털 홀로그래픽 프로젝터에 사용된 SLM의 픽셀 간격은 $4.8\mu\text{m}$ 이며, 픽셀 수는 $7,680(\text{가로}) \times 4,320(\text{세로})$ 이다. LCOS 방식의 SLM을 사용하였으며, 영상 크기를 2배로 확대하는 광학계를 적용하여 디지털 방식으로 제작된 HOE 스크린으로부터 20cm 떨어진 위치에서 홀로그램 영상을 재현되도록 하였으며, 형성된 영상의 시야각은 20.8° 이다. 디지털 파면 기록 방식의 시스템 기록 시간뿐만 아니라 간섭무늬를 계산하는 시간을 줄이는 연구를 바탕으로 HOE 스크린을 제작하는 시간을 단축하는 것이 필요한 것으로 보인다.

나. 독일 SeeReal Technologies

독일의 SeeReal Technologies에서는 HOE를 바탕으로 입사하는 레이저 광원의 콜리메이션(Collimation)과

집속하는 기능을 구현한 소자를 적용한 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 구현하였다[16]. 기존의 홀로그래픽 디스플레이 시스템에서는 일반적인 굴절 광학 렌즈의 부피와 광원의 확대 및 평행광을 형성하는 콜리메이션 관련된 광학 부품들의 크기로 인해서 전체적인 시스템의 크기가 커지는 주요한 요인이 되어 왔다. 하지만 본 연구에서는 콜리메이션과 집속을 하는 렌즈의 역할을 수행하는 HOE를 구현하여 시스템을 간소화하였다.

제작한 HOE의 회절 효율은 적색, 청색, 그리고 녹색의 레이저 광원에 대해서 60% 이상의 효율을 나타내었으며, 액정 기반의 SLM을 사용하여 대각선 방향으로 350mm 크기의 화면에서 홀로그램 영상을 시청할 수 있게 구성하였다. SLM 상에 표시되는 각 CGH가 갖는 해상도는 720(수평)×960(수직)이며, SLM이 갖는 수직 및 수평 방향의 픽셀 간격은 각각 $35\mu\text{m}$ 와 $135\mu\text{m}$ 이다. 본 연구진의 시스템에 적용한 LC 기반의 SLM이 갖는 동작 속도는 40Hz이다. 일반적으로 HOE 또는 DOE가 광원을 원하는 형태로 바꾸기 위하여나 방향을 전환하기 위한 목적으로 사용될 경우 깊이감을 갖는 3차원 영상을 구현하기 어려운 단점을 가지는 반면, 본 연구진이 구현한 HOE를 사용한 시스템에서는 SLM에 CGH를 바탕으로 깊이감이 있는 3차원 영상을 구현하였다.

다. 국내 서울대학교

국내의 서울대학교 이병호 교수 연구그룹에서는 HOE를 적용한 시스루(See-through) 디스플레이 대한 연구를 수행하였다. 적색, 청색, 녹색의 레이저 광원의 간섭을 이용하여 기존의 렌즈 어레이를 HOE로 대체한 집적 영상 기반의 충전연색 시스루 3차원 디스플레이로 구현하였다[17]. 시스루 디스플레이에 HOE를 적용 시 발생 하는 Astigmatism 문제를 해결하여 증강 현실용 HMD에 실질적으로 적용할 수 있는 연구[18]와 본 개념을 Light-field 디스플레이로 확장한 연구를 소개하였고

HMD에 적용 가능한 형태로 구현하였다[19]. 또한, 비등방성 물질의 특성을 반영하여 입사하는 빛의 편광성에 따라 시스루 특성과 렌즈 특성을 갖는 AR-HMD를 제안하였다[20].

V. 결론

본고에서는 최근의 디지털 홀로그래픽 디스플레이 기술 동향을 소개하였다. 기존의 SBP를 개선하기 위한 시간 및 공간 다중화 기술을 바탕으로 하는 최근의 디지털 홀로그래픽 디스플레이 시스템에 대한 연구 동향을 기술 하였으며, 새로운 개념을 적용하여 SBP를 개선하는 최근의 디지털 홀로그래픽 디스플레이에 대한 국내외 주요 연구 결과들에 대해서 간략히 소개하였다. 또한, 최근 많은 관심이 되고 있는 AR 및 MR 분야에 적용이 가능한 HOE 연구 동향 및 연구 결과에 대한 내용을 포함하였다. 홀로그래픽은 3차원 디스플레이뿐만 아니라 각종 광학 기기를 모사할 수 있는 광학 소자로서도 많은 응용 분야를 기대할 수 있으며, 이후로도 많은 혁신적인 연구결과를 바탕으로 다양한 정보 통신 기기 분야에 활용될 것으로 보인다.

약어 정리

AR	Augmented Reality
CGH	Computer Generated Hologram
DMD	Digital Micro-mirror Device
DOE	Diffraction Optical Element
HMD	Head Mounted Display
HOE	Holographic Optical Element
LC	Liquid Crystal
LCOS	Liquid Crystal On Silicon
MR	Mixed Reality
NICT	National Institute of Information and Communications Technology
SBP	Space Bandwidth Product
SLM	Spatial Light Modulator

VAC Vergence Accommodation Conflict
 VR Virtual Reality

참고문헌

- [1] B. Lee, "Three-Dimensional Displays, Past and Present," *Phys. Today*, vol. 66, no. 4, 2013, pp. 36-41.
- [2] J. Hong et al., "Three-Dimensional Display Technologies of Recent Interest: Principles, Status, and Issues," *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 34, 2011, pp. H87-H115.
- [3] G. Nehmetallah, R. Aylo, and L. Williams, *Analog and Digital Holography With MATLAB*, Bellingham, WA, USA: SPIE, Aug. 2015.
- [4] S.A. Benton and V.M. Bove, *Holographic Imaging*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [5] J. Geng, "Three-Dimensional Display Technologies," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 5, no. 4, 2013, pp. 456-535.
- [6] 한준구, "디지털 홀로그래피의 공간 대역폭," *방송과 미디어*, 제16권 제2호, 2011. 6, pp. 63-72.
- [7] A.W. Lohmann et al., "Space-Bandwidth Product of Optical Signals and Systems," *J. Opt. Soc. America A*, vol. 13, no. 3, 1996, pp. 470-473.
- [8] Y. Takaki and S. Uchida, "Table Screen 360-Degree Three-Dimensional Display Using a Small Array of High-Speed Projectors," *Opt. Express*, vol. 20, no. 8, 2012, pp. 8848-8861.
- [9] J. Jia, et al., "A Scalable Diffraction-Based Scanning 3D Colour Video Display as Demonstrated by Using Tiled Gratings and a Vertical Diffuser," *Sci. Rep.*, vol. 7, 2017, p. 44656.
- [10] Y. Lim et al., "360-Degree Tabletop Electronic Holographic Display," *Opt. Express*, vol. 24, no. 22, 2016, pp. 24999-25009.
- [11] J. Kim et al., "360-Degree Tabletop Color Holographic Display," in *Digital Holography Three-Dimensional Imag.*, Jeju Island, Rep. of Korea, May 29-June 1, 2017.
- [12] T. Kakue et al., "Aerial Projection of Three-Dimensional Motion Pictures by Electro-Holography and Parabolic Mirrors," *Sci. Rep.*, vol. 5, 2015, p.11750.
- [13] K. Kumagai, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, "Volumetric Bubble Display," *Optica*, vol. 4, no. 3, 2017, pp. 298-302.
- [14] H. Yu et al., "Ultrahigh-Definition Dynamic 3D Holographic Display by Active Control of Volume Speckle Fields," *Nature Photon.*, vol. 11, no. 3, 2017, pp. 186-192.
- [15] K. Wakunami et al., "Projection-Type See-through Holographic Three-Dimensional Display," *Nature Commun.*, vol. 7, 2016, p. 12954.
- [16] R. Häussler et al., "Large Real-Time Holographic 3D Displays: Enabling Components and Results," *Appl. Opt.*, vol. 56, no. 13, 2017, pp. F45-F52.
- [17] K. Hong et al., "Full-Color Lens-Array Holographic Optical Element for Three-Dimensional Optical See-Through Augmented Reality," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 1, 2014, pp. 127-130.
- [18] S. Lee et al., "Analysis and Implementation of Hologram Lenses for See-through Head-Mounted Display," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 29, no. 1, Jan. 2017, pp. 82-85.
- [19] S. Lee et al., "Additive Light Field Displays: Realization of Augmented Reality with Holographic Optical Elements," *ACM Trans. Graph.*, vol. 35, no. 4, July 2016.
- [20] J.-Y. Hong et al., "See-Through Optical Combiner for Augmented Reality Head-Mounted Display: Index-Matched Anisotropic Crystal lens," *Sci. Rep.*, vol. 7, 2017, Article. 2753.