

# 디지털 홀로그래피 기술

## 3차원 입체 영상

눈에 보이는 장면들을 그대로 기록하려는 인간의 노력은 1830년대 프랑스 다게르(Daguerre)가 발명한 최초의 은판 사진술을 시작으로 오늘날의 고선명 컬러 사진으로 발전하였다. 한편, 비슷한 시기에 영국의 찰스 휘스톤(Charles Wheatstone)은 양안 입체시에 대한 연구를 통하여 사람의 두 눈과 같이 다른 각도에서 찍은 두 장의 사진을 각각 양안에 보여주면 입체로 보인다는 3차원 입체 영상에 대한 원리를 이해하여 세계 최초의 입체경을 발명하였다. 1860년대에 미국에서는 양안 사진을 이용하는 방식을 상용화한 홈즈(Holmes)의 입체경이 큰 인기를 끌었고, 1880년대에는 안경 좌우에 적색과 청색 필름을 사용하고 적색과 청색으로 겹쳐 인쇄한 그림을 봄으로써 양안 영상을 보는 방식인 적정 안경식 입체 사진(anaglyph)이 다시 선풍적인 인기를 누렸다.

이러한 현상은 우리가 보는 것들을 그대로 기록하고, 이를 3차원으로 다시 재현시켜 보려는 욕구에 의한 것으로 볼 수 있다. 이후 1922년에는 적정 안경식 영화가 최초로 상영되었으며, 1937년에는 안경에 편광 필터를 이용하는 3차원 영상기술이 입체 영화에 적용되어 상용화를 시작하였다. 이후 몇 번의 3D에 대한 일시적인 붐이 일어나다가, 2009년에 드디어 3차원 영화인 아바타가 흥행에 성공하면서 3차원 영상에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되었고, 국내에서는 2002년 한일 월드컵을 양안식 고선명 영상(stereoscopic HD image)으로 중계하였으며, 수년 전에 시범적으로 양안식 3DTV 방송을 실시하였으나 대중화에는 이르지 못하고 있다. 기술적인 면에서 볼 때, 이와 같이 3차원 영상이 지속적인 인기를 얻지 못하는 가장 큰 이유는 시각적인 피로감에 기인한다.

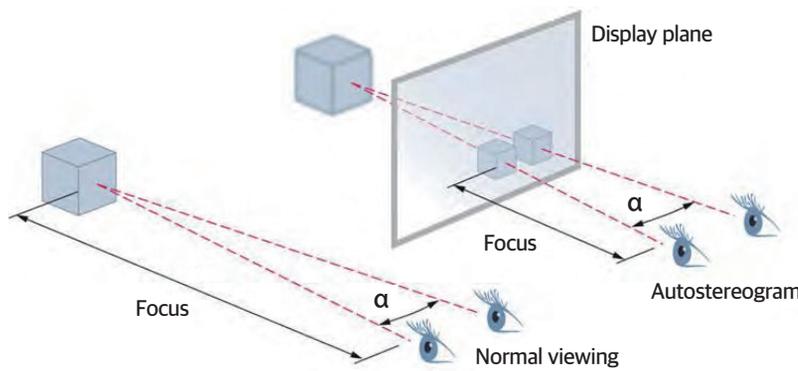


그림 1. 2차원 양안영상의 초점 위치와 3차원 재현 영상 위치의 불일치 [1]

원인을 살펴보면, 양안 영상에서는 스크린에 투사된 영상을 우리가 보게 되는데 영상이 형성된 스크린 상의 양안 영상에 눈의 초점을 맞추어 주시하면, 양안 시차(binocular disparity)에 의하여 입체를 느껴 공간상에 물체가 형성되어 나타나게 된다. 여기에서 양안 시차란 망막 영상을 겹쳤을 때 동일한 점의 이격 거리를 말한다. 계속하여 이 공간상의 물체를 주시하게 될 때 그곳에는 실제로 물체가 없으므로 우리 눈은 다시 스크린에 초점을 맞추어 2차원 영상을 보게 되며, 이 양안 영상에 의해 또다시 입체감을 느껴 공간을 주시하게 되는데, 이 과정이 계속 반복되므로 우리 눈은 초점을 맞추기 위해 수정체의 두께를 계속 바꾸게 되므로 시간이 흐름에 따라 시각계는 피로감에 빠지게 되는 것이다.

두 번째로 양안 영상의 한계는 운동 시차(motion parallax)가 제공되지 않는다는 것이다. 현재까지 상용화된 양안식 3차원 입체 영상에서 시청자가 디스플레이의 정면에서 자리를 움직이지 않고 시청을 한다면 실제의 3차원 영상을 보는 것과는 크게 차이가 없을 수 있다. 그러나 영상을 다른 각도에서 볼 때 이에 대응하는 다른 면을 관찰할 수 없는 한계가 있다. 이러한 특성을 운동 시차라고 하는데 디스플레이에서 실세계와 같이 연속적으로 완전하게 운동시차를 제공하는 것은 기술적으로 매우 어려운 문제이다. 결국, 3차원 영상의 재현을 위해서는 시청자가 영상의 시청 시 3차원 공간상에 초점을 맞추면 그 위치에서 물체가 관찰되도록 할 수 있게 하는 기능(accommodation)과 운동 시차가 부여되는 영상을 제공하여야 한다. 그러나 이러한 중요한 두 가지 조건을 만족하는 형태의 입체 영상 재현은 기존의 스크린 방식으로는 가능하지 않다. 각 시청 위치에 매우 많은 수의 영상을 보여주는 방식의 초다시점 영상이 제한된 범위에서 이를 대신할 수 있겠으나, 홀로그래픽 영상만이 유일하게 위의 조건을 만족하는 완전한 3차원 입체 영상을 제공할 수 있다.

이러한 홀로그램은 1977년에 개봉된 스타워즈에서 소개되어 많은 사람들에게 3차원 홀로그램 영상에 대한 상상력과 기대감을 심어 주었다. 이후 마이너리티 리포트(2002), 아바타(2009), 아이언맨(2010), 프로메테우스(2012) 등에서 환상적인 홀로그램 영상이 등장하였는데, 영화 속의 홀로그램들은 실체가 아니고 단지 컴퓨터 그래픽으로 홀로그램을 모사한 것으로서, 사용자 인터렉션 기능까지 구현된 영화 속 수준의 홀로그램 영상을 재현하기 위해서는 아마도 수십 년이 소요될 것이라고 예상된다.

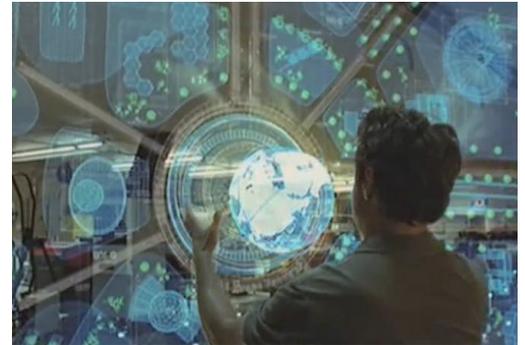


그림 2 영화 아이언 맨에 나오는 홀로그램 영상

한편, 플로팅 홀로그램(floating hologram)이라는 명칭으로 최근에 소개되는 유사 홀로그램(pseudo-hologram)은 아주 오래전인 19세기에 pepper's ghost라는 이름으로 연극에 사용되던 고전적 방법으로써, 2차원 영상을 45도 각도로 설치된 투명 비닐 반사막에 반사시켜 공간상에서 영상을 보여줌에 따라 사람들에게 마치 홀로그램 같이 느끼게 하고 있으나, 이는 공간상에 2차원 영상을 단지 프로젝션한 것으로서 홀로그램이 아니고, 기술적으로도 홀로그램과 무관한 것이다. 따라서 이 경우에는 어느 위치에서 시청하더라도 모두 같은 영상이 관찰되며 다른 면이 보이는 운동시차도 존재하지 않는다.

국내에서는 2010년부터 양안식 3DTV가 보급된 이후에 최근에는 입체 영상의 디스플레이 방식은 무안경 방식으로의 기술적 발전이 이루어졌다. 2013년부터 초다시점 영상의 연구가 활발히 진행되고 있고, 특히 수평과 수직으로 시차가 제공되는 완전 입체 디스플레이 방식의 홀로그래픽 디스플레이의 연구도 활발히 진행되고 있어서, 2020년 이후에는 휴대 단말 크기의 홀로그래픽 디스플레이가 등장할 것으로 예상되고 있다.

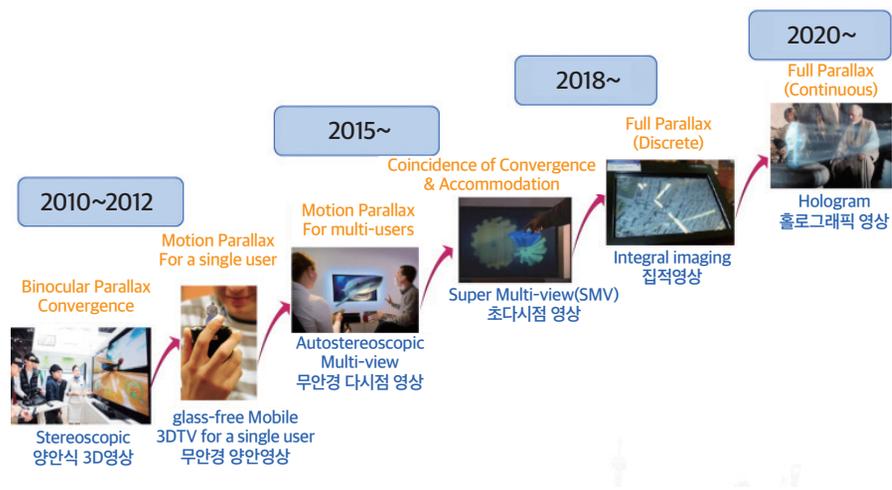


그림 3. 3차원 입체 영상의 향후 발전 전망

### 홀로그래피의 원리와 특징

인간은 오감을 통하여 주변 정보를 획득하는데, 이 중에서도 특히 시각을 통하여 주변 정보의 90% 이상을 획득한다고 알려져 있다. 시각 정보는 입체 정보이므로 저장이나 전송을 하려는 경우에는 3차원 데이터로 기록되어야 한다. 그러나 사진은 3차원 실세계가 평면에 투사된 2차원 영상이므로 완벽한 정보 기록이나 전달이 되지 않는 한계가 있다.

일반 사진은 어느 방향에서 보나 같은 영상이 보이지만, 홀로그래피는 사진과 달리 보는 방향에 따라 다른 면이 보인다. 얼굴을 찍은 홀로그래피의 경우에, 오른쪽에서 홀로그래피 영상을 보면 왼쪽 귀가 보이고 왼쪽에서 보면 오른쪽 귀가, 위에서 보면 머리 위가 보인다. 즉, 홀로그래피에는 모든 방향의 영상이 기록되어 있는 것이다.

일반 사진은 물체의 표면에 반사되는 빛을 렌즈로 모아 맺혀지는 상을 필름이나 촬상 소자에 기록하는 방법을 사용하며 반사광의 밝기 분포가 기록된다.

반면에, 홀로그래피는 빛의 간섭을 이용하여 3차원 영상을 만들어 낸다. 홀로그래피는 레이저를 비추고 물체에서 반사되어 생긴 빛과 반사시키지 않은 빛의 간섭무늬를 필름에 기록하는데 이를 통해 빛의 위상이 기록된다. 이 기록된 간섭무늬에 기록에 사용된 레이저를 비추면 원 물체가 입체적으로 보이게 되는 것이다.

홀로그래피는 헝가리게 영국 물리학자인 데니스 가버(Dennis Gabor)에 의해 1947년에 고안된 3차원 영상 기록 방법이며, 가버는 이 홀로그래피의 발명으로 1971년 노벨 물리학상을 수상하였다.

그 당시에는 간섭성이 좋은 광원이 없었으므로 수은등과 같은 광원을 이용하여 홀로그래피 기록 실험을 하였는데, 광의 위상이 동일한 파면이 일정하게 유지되는 특성인 가간섭성(coherent)이 낮았으므로 지금과 같은 수준의 홀로그래피 제작이 가능하지 않았다. 이후 1960년 레이저의 발명으로 광원 문제가 해결되어 오늘날의 홀로그래피 기술이 가능하게 되었다.

홀로그래피를 제작하는 방법은 그리 어렵지 않다. 다만 사진과 달리 홀로그래피는 렌즈를 사용하지 않으며, 광원으로 레이저를 이용하고, 최소한 수십 나노미터 간격의 간섭무늬가 기록되어야 하므로 홀로그래피 촬영 시 진동이 없어야 한다.

홀로그래피 촬영을 위해서는 가간섭성이 요구되므로 동일한 레이저 광원에서 분기되는 두 개의 빔이 필요하다. 광분할 장치(beam splitter)를 이용하여 하나는 홀로그래피로 촬영하고자 하는 물체에 비추게 되고, 또 하나는 필름에 직접 비추게 되며 이 두 빔 각각 물체파와 기준파라고 부른다. 홀로그래피 기록 시에는 암실 장치가 필요하며 진동의 영향이 적도록 가능한 짧은 시간 내에 레이저 광을 조사해야 하고, 필름의 감광 특성을 고려하여 레이저의 세기와 시간의 곱으로 정해지는 광에너지를 계산하여 레이저 물체파와 기준파를 조사한다. 이후 홀로그래피 간섭 패턴이 기록된 은염 필름은 현상 및 표백 처리를 해야 하고, 포토폴리머 필름이 사용되었을 경우에는 자외선을 조사하면 최종적으로 홀로그래피가 만들어진다.

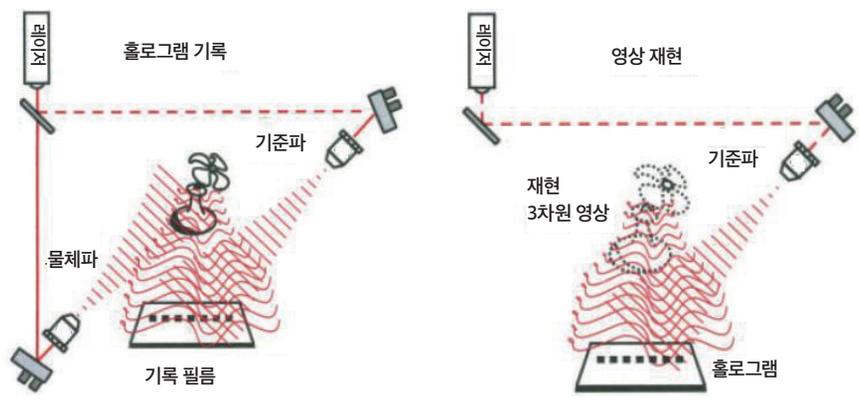


그림 4. 아날로그 홀로그래피의 기록과 재현 [2]

## 디지털 홀로그래피

아날로그 홀로그램에서는 1 $\mu\text{m}$ 당 최소 수 개 이상의 간섭무늬를 얻을 수 있도록 하기 위하여, 일반 카메라 필름에 비하여 더욱 미세한 감광 입자(30nm 크기)들이 도포된 필름 형태의 은염 매질이나 광의 세기에 따라 굴절률 변화를 일으키는 포토폴리머 필름 등에 간섭무늬(holographic fringe pattern)를 기록하여 원래 영상을 재현한다. 그러나 디지털 홀로그래픽 디스플레이에서는 상용화된 HD/UHD 디스플레이 패널이나 광변조용 공간광변조기(Spatial Light Modulator)를 홀로그래픽 회절 광학 소자로 활용하여 원래 영상을 재현한다.

홀로그래픽 디스플레이에 주로 사용되는 공간광변조기는 LCD와 LCoS(Liquid Crystal on Silicon)방식의 변조 소자들과 미세 반사 거울을 일정 각도로 기울이는 구동을 하는 DMD(Digital Micro-mirror Device)와 음향 변조 소자인 AOM(acousto-optic modulator) 소자 등이 있다.

홀로그래픽 디스플레이는 공간광변조기의 성능 한계 때문에 기존의 일반TV와 같은 크기와 화질로의 디스플레이 구현이 매우 어렵다. 그 이유로는 공간광변조기의 픽셀피치(pixel pitch)가 커서 시야각(viewing angle)이 매우 좁다는 점과 공간광변조기의 크기도 크지 않다는 점이다. 큰 화면으로 시야각이 충분히 큰 디스플레이 시스템을 구현하려면 좁은 간격에 신호 제어선이 너무 많아 구현이 용이하지 않으며 비용도 너무 많이 소요되는 문제점이 있다. 상용화 제품 중에서 활용이 가장 용이한 LCoS 방식의 공간광변조 소자는 픽셀 피치가 8 $\mu\text{m}$  정도이어서 시야각이 2도를 넘지 못하는 수준이고, 최대 frame rate도 120Hz 이하인 경우가 대부분이며 대당 가격도 수백만 원 수준의 고가이다.

홀로그램의 기록 정보인 간섭무늬는 레이저를 이용한 실사로부터 CCD 카메라를 통하여 얻을 수도 있고, 다른 방법으로는 재현을 원하는 물체의 3차원 정보를 이용해 물체 표면 각 점을 광원으로 간주하고 모든 점에서의 회절 파면의 전파(propagation)를 컴퓨터로 계산함으로써 공간광변조기에서의 간섭무늬를 산출할 수가 있다.

카메라로 수백 나노미터 간격의 홀로그램 간섭무늬를 직접 촬영하려면 기존 CCD 카메라 센서 대비 수백 배의 고해상도가 요구되므로, 일반적으로는 컴퓨터로 생성시킨 홀로그램(Computer Generated Hologram)의 간섭무늬를 공간광변조기에 입력한 후에 레이저를 이용한 기준파를 조사하게 되는데, 공간광변조기는 간섭무늬의 형태에 따라 회절시킨 파면을 출력함으로써 아날로그와 같은 형태의 홀로그램을 디지털 처리 절차와 디지털 소자로 재현(reconstruction)하게 된다. 이 기술 분야 전체를 일컬어 디지털 홀로그래피라고 부른다. 더욱 엄밀한 분류에서는 단일 영상의 경우에는 디지털 홀로그래피(digital-holography)라고 하며 실시간 또는 동영상 재현이 되는 경우에는 전자식 홀로그래피(electro-holography)라고 부르기도 한다.

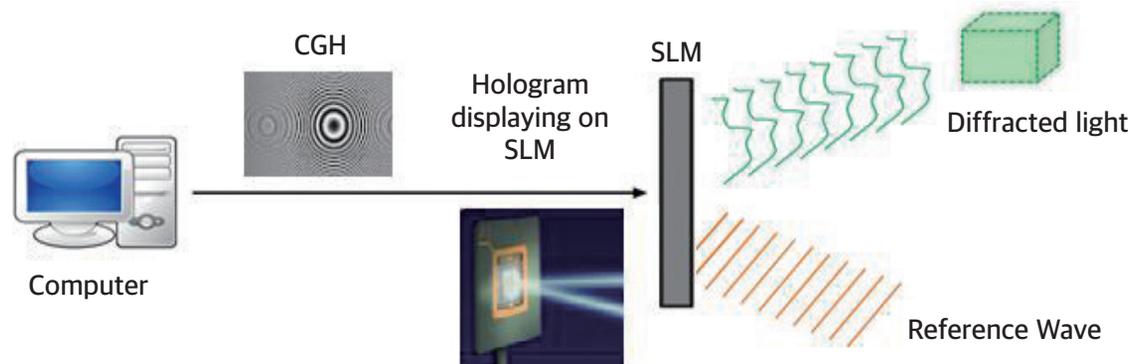


그림 5. 공간광변조기(SLM)를 이용한 디지털 홀로그램 재현 개념도

공간광변조기의 픽셀 간격이 1 $\mu\text{m}$  수준이 된다면 약 30도 정도의 시야각을 제공할 수 있으나 현재 사용 중인 10 $\mu\text{m}$  전후의 공간광변조용 소자로는 단지 1~2도 정도의 시야각을 제공하게 되고 이 각도 내에서는 운동시차가 거의 인지되지 않는 한계를 갖는다.

기존 2D 컬러 TV나 디스플레이의 시야각은 거의 180도가 되어서 편리한 위치 어디에서나 시청이 가능하다. 그러나 홀로그래픽 디스플레이에서 시야각이 좁다고 하면, 거리에 따라 초점을 맞출 수 있는 기능은 제공할 수 있지만 시청자는 한정된 위치에서만 시청을 해야 하고, 홀로그램의 또 다른 장점 중 하나인 운동 시차를 경험하기에는 매우 부적합하다.

따라서 디지털 홀로그래피 분야에서는 공간광변조기의 크기를 공간으로 픽셀피치는 대역폭으로 간주하여 공간-대역폭 곱(SBP, space-bandwidth product)이라는 개념을 사용하는데, 디스플레이 소자용 공간광변조기의 크기는 커야 큰 영상을 재현할 수 있으며, 동시에 픽셀 간 간격인 픽셀피치는 작아야 넓은 시야각을 가질 수 있다. 그러나 시야각 확보를 위해 픽셀 피치를 작게 하면 변조기의 크기도 작아지며, 큰 홀로그램 영상용 공간광변조기를 구현하려면 엄청난 수의 화소를 만들어야 하는 어려움이 있게 되므로, 이에 대한 지수로 SBP를 사용하고 있다.

구분	내용	
기존 상용 SLM 소자	DMD(Digital Micro-mirror Device)	TI 픽셀피치가 7.5 $\mu$ m이고 화면크기가 1.38인치 micro-mirror칩을 개발함(시야각 2도)
	LCoS(Liquid Crystal on Sillion)	SONY 픽셀피치가 4 $\mu$ m이고 화면크기가 0.7인치 패널을 개발함(시야각 8도)
	LCD(Liquid Crystal on Sillion)	LGD 픽셀피치가 58 $\mu$ m이고 화면크기가 5인치 패널을 개발함(시야각 0.5도)
최근 SLM 기술연구	AOM(Acoustic-Optic Modulator)	MIT 표면 탄성파 소자에 광도파관을 사용하여 빛을 회절시켜 광시야각을 제공하는 소형 SLM을 연구 중(시야각 25도)
	OASLM(Optically Addressed SLM)	QinetiQ 빛을 전기신호로 변환해주는 광센서 배열을 사용하여 대용량 홀로그램 데이터로 고속으로 처리할 수 있는 SLM을 연구 중(시야각 5도)
	MOSLM(Magneto Optical Light SLM)	NHK 디스플레이 셀에서 자기장을 변화시켜 입사되는 파면의 위상을 제어함으로써 픽셀피치를 1 $\mu$ m이하로 줄이는 SLM을 연구 중(시야각 30도)
	DND(Diffractive-Nano Device)	IMEC MEMS(micro-electro mechanical system)기술을 이용하여 1.5 $\mu$ m의 SLM 개발(시야각 30도)

표 1. 기존 상용 공간광변조기 및 최근 연구개발 중인 소자들

현재 개발되거나 연구 중인 디지털 홀로그래픽 디스플레이에서 사용하고 있는 대부분의 공간광변조기 소자들은 홀로그램을 위해 개발된 것이 아닌 HD 또는 UHD TV용 디스플레이 소자들이다. 홀로그램은 회절 현상을 이용하여 영상을 재현하게 되므로 화소 간의 간격이 가시광 파장 정도로 작아야 하는 반면에, 저가의 가용한 소자들은 화소 간 간격이 보통 수십  $\mu$ m 정도이므로 홀로그램 재현에 있어서 기술적인 한계에 당면하고 있고 결국 이를 타개하기 위한 다양한 추가적 방법을 동원하여 홀로그래픽 디스플레이를 구현하고 있는 실정이며, 홀로그래피 연구의 많은 부분은 이러한 소자의 한계를 극복하려는 노력과 연관되어 있다.

### 디지털 홀로그래픽 디스플레이 기술 개발 현황

홀로그래픽 디스플레이는 1990년 초부터 미국의 MIT를 선두로 하여 영국의 QinetiQ, 독일의 SeeReal, 일본의 동경농공대(TUAT)에서 개발을 진행하였다.[5]

MIT의 미디어 랩(Media Laboratory)에서는 1990년대 초부터 다양한 홀로그래픽 비디오 시스템인 Mark series를 개발하였다[2]. 평면파의 광변조를 위하여 압전 소자에 전기신호를 인가하여 압전소자에 대한 기계적인 진동을 발생시키면 입사되는 평면 광파가 회절되

는 음향광학(acousto-optic)적인 현상이 발생된다. 이런 현상을 이용하여 홀로그램 패턴 신호를 전기신호로 변환하여 음향 평면파를 발생시키며 입사된 입사파(incident wave)를 회절시킴으로써 홀로그램 영상을 재현할 수 있다. MIT는 AOM 소자를 공간광변조기로 사용하여 홀로그래픽 비디오 시스템 Mark I을 개발하였는데, 수평 회전경을 이용하여 수평선상에 영상을 생성시키는 수평 스캐닝을 제공하고 수직 미러는 수평 미러보다 저속으로 회전시킴으로써 수직 스캐닝을 하였다. 약 3도의 회절각을 제공하는 AOM으로 15

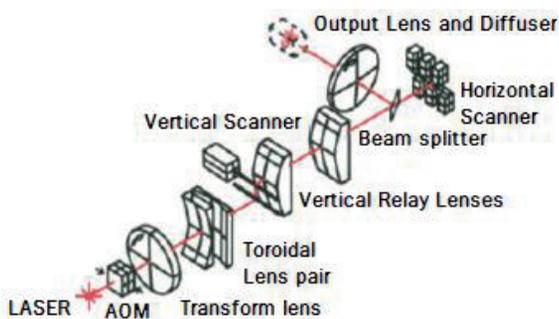


그림 6. MIT의 Mark II 디스플레이 시스템 [2]

도 정도의 시야각이 생성되도록 광학적으로 영상을 생성하였고, 25mm<sup>3</sup> 정도의 홀로그램 영상을 20fps로 재현하였다. 성능이 향상된 Mark II에서는 AOM을 사용하여 18개 채널을 구성하였으며, 시간 다중화를 위해 병렬로 18개의 스캔 라인들을 출력하도록 하였고, 선형으로 배열된 갈바노미터 스캐너(galvanometric scanner)를 이용하여 기존 미러들을 교체하였다. 이와 같은 구조로 많은 AOM 채널과 수평 미러를 추가하여 홀로그램 영상의 크기와 해상도를 크게 증가시켰다. 이로써 Mark II는 시야각 36도를 갖고, 150mm×75mm×150mm 체적(W×H×D)을 갖는 홀로그램을 홀로그래픽 디스플레이에서 2.5fps로 재현하였다.

영국의 QinetiQ 사에서는 active tiling system이라고 불리는 홀로그래픽 디스플레이를 개발하였다[3]. 시공간 다중화 방법이 적용된 홀로그래픽 디스플레이에서는 높은 공간대역폭을 얻기 위하여 하나의 EASLM(Electrically addressed SLM)을 사용하여 여러 개의 홀로그램 영상을 고속으로 생성하여 타일링을 하면 공간대역폭이 증가한 홀



그림 7. QinetiQ 사의 active tiling 방식의 홀로그래픽 디스플레이 [3]

로그램 영상을 생성할 수가 있는데, 광학적 셔터(shutter) 배열을 이용하여 하나의 EASLM로부터 5×5개로 타일링된 홀로그램 영상을 OASLM(Optically Addressed SLM) 영역에 투영함으로써, 1,024×1,024 해상도를 5,120×5,120로 25배 증가시키는 것이 가능하다. 또한 광학계를 통하여 투영되는 홀로그램 영상을 축소시킴으로써, OASLM에 투영되는 홀로그램 영상의 픽셀피치가 줄어들어 EASLM의 시야각이 증가되도록 하였다.

독일의 SeeReal 사에서는 서브홀로그램(sub-hologram) 방식의 홀로그램 디스플레이를 구현하였다[4]. 일반적으로 홀로그래픽 디스플레이를 구현하기 위해서는 홀로그래픽 영상을 실시간으로 생성하고 재현하여야 하는데, 이 경우에 막대한 양의 데이터를 처리해야 하므로 기술적인 어려움이 있게 된다. 이를 극복하기 위하여, SeeReal 사에서는 시청자의 동공에 해당하는 작은 시야창(viewing window)을 형성하고 이 영역에 대해서만 홀로그램을 생성하였다. 이렇게 되면 전체 화면의 홀로그램 영역보다 처리량이 작아지며, 처리 데이터양이 급격히 감소하여 홀로그램 영상의 실시간 생성이 가능해 지는데 이 기술을 서브홀로그램이라고 한다. SeeReal 사는 20.1인치 LCD 패널을 이용하여 VISIO 20이라는 서브홀로그램 방식의 홀로그래픽 디스플레이를 구현하였는데 동공 추적을 하게 되므로 1인용 디스플레이이며 수평시차만 있는 컬러 홀로그램이다.

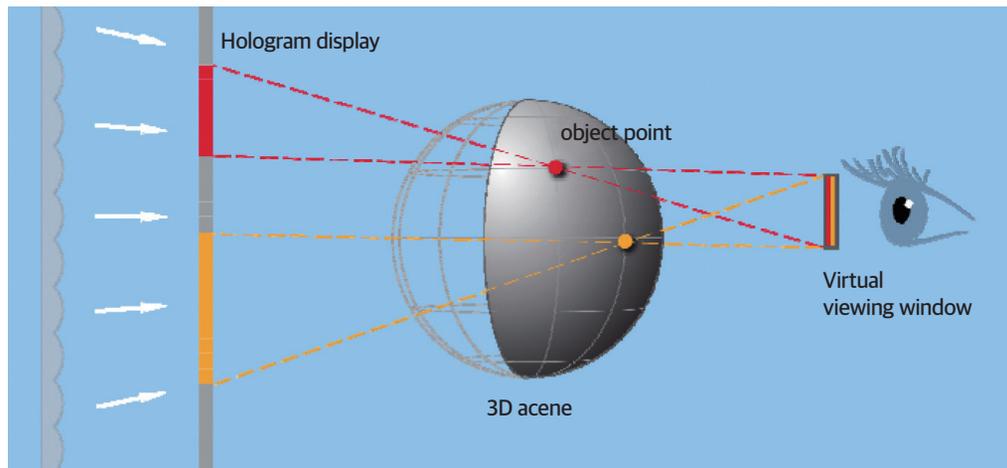


그림 8. SeeReal 사의 서브 홀로그램 방식과 시야창의 개념도 [4]

## 디지털 홀로그래피의 전망

빛의 간섭성을 이용하여 입체 정보를 기록하고, 이를 다시 복원하여 실제 사물과 동일한 3차원 입체 효과를 제공하는 홀로그래피 기술은 기존의 3차원 영상 디스플레이 방식이 지니고 있는 시각 피로와 같은 문제점을 없앨 수 있는 기술로서 실제 물체를 보는 것과 같은 자연스러운 입체감을 제공한다.

이 기술은 2010년 IBM이 선정한 “향후 일어날 5대 혁신 기술”의 하나이며 2011년 및 2012년에 KISTEP과 지식경제부에서 선정한 정부 투자가 시급한 “10대 유망 기술과 100대 전략 제품 기술”로 선정되었다. 미래창조과학부에서는 2013년도부터 기가코리아(GK) 사업을 통해 홀로그래픽 디스플레이 기술 개발을 적극 추진하고 있다. 해외에서도 홀로그램 기술을 미래의 신기술로 인식하여 많은 연구가 이루어지고 있는데, 미국의 MIT 미디어랩에서는 2013년에 저가의 고성능 공간광변조기를 이용한 홀로그래픽 비디오 시스템 개발을 발표하였고, 2014년에 Zebra Imaging 사에서는 홀로그래픽 프린팅 기술을 상용화하였다.

그러나 디지털 홀로그래픽 디스플레이를 기존 2D 텔레비전과 비슷한 크기와 시야각으로 보여주기 위해서는 결국 화소의 크기를 1 $\mu$ m 이하 수준으로 현저히 작게 구현해야 하며, 동시에 화면을 크게 제작해야 하는 기술적 난제가 존재한다. 또한 막대한 홀로그램 데이터를 실시간으로 처리하고 압축하는 기술과 이를 고속으로 전송하는 기술도 필요하다.

1930년대 미국에서 흑백TV 방송이 시작된 이래, 아날로그 컬러TV 방송을 거쳐 수많은 과학 기술자들이 기술적 난관을 타개하며 2000년대 초 디지털 HDTV를 구현하였듯이, 부단한 연구 개발을 통하여 디지털 홀로그래피 분야에서도 현재 산적한 난제들을 극복하고, 영화에 나오는 것과 같은 환상적인 디지털 홀로그래픽 디스플레이를 활용하며 각 가정에서는 홀로그래픽 TV를 보게 되는 미래를 기대해 본다. 

### 참고 자료

- [1] Stephan Reichelt, Ralf Haussler, Norbert Leister, “Holographic 3-D Display-Electro-holography within the Grasp of Commercialization”, *Advances in Lasers and Electro Optics*, pp.683-710, 2010. 4.
- [2] Stephen A. Benton, V. Michael Bove Jr., “Holographic imaging”chap.10 & 21, 2008
- [3] Chris Slinger, Colin Cameron, Maurice Stanley, “Computer-Generated Holography as a Generic Display Technology”, *Computer(IEEE)*, 2005.8.
- [4] Norbert Leister, Armin Schwerdtner, “Full-color interactive holographic projection system for large 3D scene reconstruction”, *The Conference on Emerging Liquid Crystal Technologies*, vol.6911, 2008. 4.
- [5] 김재한, 박민식, 남제호, 문경애, 김진웅, “디지털 홀로그래픽 테이블탑형 디스플레이 기술”, *정보와 통신*, 2014.