

# 홀로그램 영상 재생을 위한 SLM 기술 동향

□ 이승열 / 경북대학교

## 요약

물체가 지닌 3차원 정보를 가장 완벽하게 복원해 내는 디스플레이 기술인 홀로그램은 오랜 기간 사진과 같은 형태의 정지상 영상으로만 재현이 되었으나, 최근 급격하게 발전한 5G 수준의 데이터 통신기술과 초고해상도 디스플레이 기술의 발달로 동영상 재생이 가능한 수준에 다다르고 있다. 디지털 홀로그램 기술을 통해 만들어진 computer generated hologram 패턴을 실제 광학적으로 송출해 내는 디스플레이 장치라 할 수 있는 Spatial Light Modulator(SLM)은 최근 LCoS, DMD 등 다양한 방식으로 구현되고 있으나, 아직까지 구동 면적의 크기 및 픽셀 간격의 측면에서 아날로그 홀로그램과 비슷한 수준의 영상을 구현하기에는 다소 어려움이 있는 것이 사실이다. 이에 본 고에서는 다양한 방식으로 접근되고 있는 기존 SLM의 성능 분석 및 차세대 SLM 기술 동향을 소개하고 SLM의 성능 개선 없이도 홀로그램 영상의 화질 수준을 개선할 수 있는 다양한 기술들에 대해 소개하고자 한다.

## I. 서론

홀로그램이란 그리스어의 전체를 뜻하는 “Holos”와 의미, 정보를 뜻하는 “Gramma”가 합쳐진 단어로, 1948년 Dennis Gabor에 의해 그 원리가 최초로 제안된 이래, 70여년 간 가장 이상적인 형태의 3차원 디스플레이 기술로서 다각도로 연구가 이루어졌다. 특히 빛이 지나는 위상 정보를 간섭 무늬의 형태로 기록하는 방식은 기존의 3차원 디스플레이 기술들이 지니고 있었던 양안 시차에 의한 눈의 피로감, 제한적인 시점의 개수 등을 근본적으로 극복할 수 있으며, 이는 박물관이나 과학 전시관에서 쉽게 찾아볼 수 있는 아날로그 홀로그래피 기술을 통해 이미 증명된 바이다. 홀로그램 건판을 이용하는 고전적인 아날로그 홀로그래피 방식은 한번 기록된 간섭 무늬를 바꾸는 것이 불가능하기에, 방

송, 미디어 등에서 활용하고자 하는 동영상 제작 기술에는 적용이 어려웠고, 또 미디어의 특성 상 전송되는 신호들을 디지털화 할 필요가 있기 때문에, 컴퓨터 생성 홀로그램 방식(Computer Generated Hologram, CGH), 즉 디지털 홀로그램 방식을 활용한 홀로그램 기술이 최근 많은 관심을 받고 있다.

디지털 홀로그램은 보통 물체파와 참조파의 간섭 무늬를 가상의 물체를 가정한 뒤 계산을 통해 형성하거나, 간섭된 신호를 직접 획득한 뒤, 이를 공간 광 변조 장치(Spatial Light Modulator, SLM)라는 위치에 따라 빛의 위상을 다르게 구현해 주는 장치를 이용하여 출력해 내는 과정을 통해 만들어진다. 따라서 디지털 홀로그램의 필수적인 출력장치 중 하나인 공간 광 변조 장치의 성능은 곧 재생되는 디지털 홀로그램의 성능을 결정한다 해도 과언이 아니다. 이에 다양한 형태의 SLM장치들이 개발되어 홀로그램 재생과 관련된 분야에서 활발히 연구되고 있으며, 따라서 SLM의 성능 개선은 곧 하드웨어적인 관점에서 홀로그램의 성능을 개선시킬 수 있는 가장 확실한 방법이라 말할 수 있을 것이다. 그러나 초소형 픽셀 간격을 지닌 SLM은 수 천만원을 호가하는 고가의 비용과 사용의 어려움 등으로 인해 일반인들에게 사용되기에는 어려운 장치임에는 분명하며, 때문에 일각에서는 기존 수준, 혹은 일반적인 상용화 수준보다는 조금 더 높은 하이엔드급의 디스플레이 패널을 활용하여 홀로그램 영상을 재생하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 특히 랜덤형의 정지상 위상 변조 패널, 또는 간유리(Diffuser) 등을 활용하여 넓은 시야각의 홀로그램 이미지를 획득하고자 하는 시도들이 존재하기도 하였다. 본 고에서는 홀로그램 영상 재생에 필수적인 SLM소자의 기술 동향을 분석하고, 또한 SLM의 픽셀 크기를 줄이지 않으면서도 시야각을 확장시킬

수 있는 몇 가지의 최신 연구결과들을 소개함으로써 홀로그램 미디어 전송 기술들이 본격적으로 상용화 되기 위해 극복해 나아가야 할 과제들이 무엇이 있을지 점검해 보고자 한다.

## II. SLM 장치 기술 동향

SLM은 광범위하게는 위치에 따라 빛을 변조시키는 모든 종류의 장치를 일컫는 말로, 단순하게는 빔 프로젝터와 그림자를 이용한 새도우 아트 또한 공간 광 변조를 활용한 사레라 볼 수 있다. 그러나 홀로그램 구현에는 빛의 회절과 간섭 현상이 크게 개입되기 때문에, 이를 발생시킬 수 있을 수준의 미세 픽셀 크기를 지니는 광 변조 장치가 필요하게 된다. 빛의 회절현상은 격자, 개구와 같은 미세 구조물에 광파가 조사되었을 경우 나타나며 회절각은 다음과 같은 공식을 통해 주어진다.

$$\theta_b = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 조사된 빛의 파장이며,  $\Lambda$ 는 주어진 회절격자의 주기이다. SLM장치로부터 만들어질 수 있는 회절격자의 최소 주기는 SLM장치에서 0과 1의 입력이 반복될 경우이며, 따라서 SLM의 픽셀 간격을  $p$ 라 하면  $\Lambda=2p$ 이다. <그림 1>에서 정리된 바와 같이, TV 및 스마트폰에 사용되는 일반적인 디스플레이 장치들의 픽셀 크기는 대략적으로 20~60 마이크로미터 수준이며 이를 상기 공식에 대입하면 약 0.25~0.85도로 1도 미만의 회절각을 지녀 회절 현상을 이용하여 빛의 3차원 정보를 재생하는 홀로그램에 사용되기에는 역부족임을 알 수 있다. 상용화된 최고 성능의 SLM장치의 픽셀 크기

는 약 3.7마이크로미터 수준으로, 이를 활용하게 되면 약 4.65도까지 회절각을 향상시킬 수 있다.

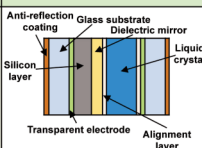
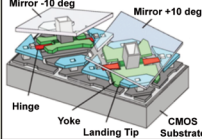
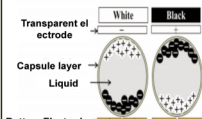
특히 이 회절각은 재생된 홀로그램 이미지가 지닐 수 있는 3차원 시야각의 한계치를 의미하기도 하며, 아날로그 홀로그램의 경우 파장보다도 작은 주기의 간섭무늬 기록이 가능하기에 큰 문제가 되지 않았으나, 디지털 홀로그램에서는 구동 SLM의 픽셀 성능이 중요한 이슈가 되는 까닭이기도 하다.

다시점 제공, 시야각 방식의 홀로그램 생성 기술 등을 활용하여 홀로그램의 시야각 문제를 개선할 수 있으나 궁극적으로는 SLM성능이 보다 개선될 필요가 있다.

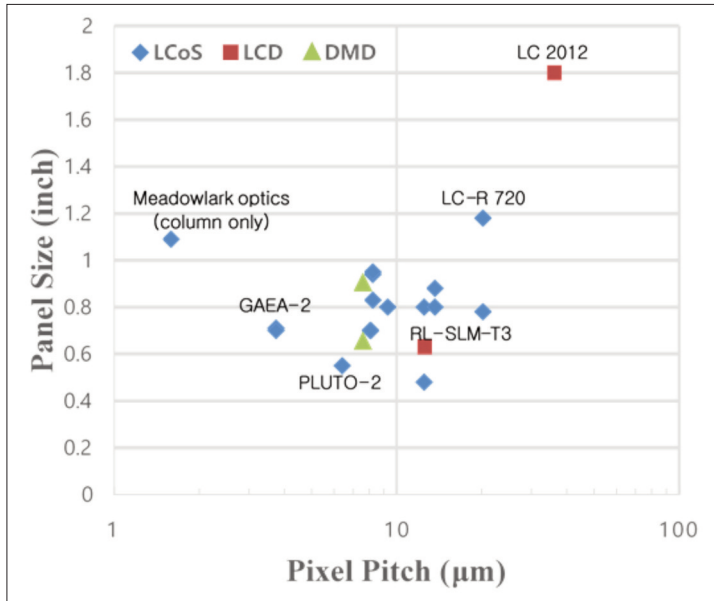
SLM은 그 동작원리에 따라 진폭변조 혹은 위상 변조 SLM으로 나뉜다. 위상 변조 방식이란 투과 또는 반사되는 빛의 세기는 유지한 채 그 위상만을 변화시키는 방식으로, 굴절율의 변화나 구조적 위

사진			
종류	Premium UHD TV	QLED TV	Mobile
모델명 (회사)	UN65NU8000F (Samsung)	QN85Q900RAFVKR (Samsung)	Galaxy S10+ (Samsung)
PPI (Pixel per inch)	68	104	522
해상도	3840 x 2160	7680 x 4320	3040 x 1440
화면크기 (cm)	163	214	16.35

〈그림 1〉 기존 디스플레이 장치들의 해상도와 픽셀 간격

종류	특징	주요 사용분야
<b>LCoS</b> (Liquid Crystal on Silicon) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반사형</li> <li>- LCD의 하판 유리를 Silicon Waver로 대체</li> <li>- LCD에 비해 더 밝은 화면 구현 가능 및 응답속도가 빠름</li> <li>- 셀과 셀 사이의 틈이 좁아 높은 해상도 구현 가능</li> <li>- 위상 변조형 SLM에 많이 사용됨.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SLM</li> <li>- HMD</li> <li>- Projector</li> </ul>
<b>DMD</b> (Digital Micromirror Device) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반사형</li> <li>- 해상도에 상응하는 수 만분의 미세 거울로 구성</li> <li>- 입사되는 빛이 디지털로 제어되는 거울에 의해 반사</li> <li>- 거울의 기울어짐 정도로 빛의 반사량 조절</li> <li>- 진폭 변조형 SLM에 많이 사용됨.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DLP projector</li> </ul>
<b>EPD</b> (Electronic paper display) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반사형</li> <li>- 음전하를 띤 Black Ink와 양전하를 띤 White Ink가 capsule에 구성</li> <li>- 인가되는 전기장에 의해 전하를 띤 Ink가 이동</li> <li>- 외부의 빛이 입자의 위치에 따라 흡수 또는 반사</li> <li>- 다시 신호가 오기까지 이전 상태를 유지해서 동영상이므로는 사용 불가</li> <li>- 시장에서 많이 사용되지는 않음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- E-book</li> </ul>

〈그림 2〉 대표적인 공간 광 변조 방식의 원리와 특징



〈그림 3〉 다양한 상용 SLM 장치들의 픽셀 간격과 구동 면적

상을 활용하여 조절이 가능하다. 일반적으로 디지털 홀로그래밍의 재생에는 위상변조 방식 SLM이 진폭변조 방식보다 재생된 영상의 질적인 면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 〈그림 2〉는 다양한 공간 변조 방식들과 그에 따른 특성을 정리한 표이다. 진폭변조 방식에는 DMD(Digital Micromirror Device)가 대표적이며, 위상변조 방식에는 LCoS(Liquid Crystal on Silicon) 방식 등 액정을 활용한 방식이 대표적이다.

### 1. LC 기반의 위상 변조 SLM

LC방식의 SLM에서는 또 다시 투과형 방식과 반사형 방식 SLM으로 나눌 수 있으며, 투과형 방식의 경우 백라이트 광원을 SLM과 동일 축 상에 놓기가 용이하여 TV 스마트폰 등 일반적인 디스플레이에 적용이 좀 더 용이할 것으로 보이나, SLM의

구동을 위한 TFT가 포함되는 구동부가 차지하는 면적으로 인해 black matrix가 넓어지는 문제가 있어 단위 픽셀의 크기를 줄이기에는 어려운 면이 있다. 반사형 SLM의 경우 현존하는 가장 작은 픽셀 크기의 상용 SLM들이 주로 이러한 LCoS 방식 SLM에 해당되는데, 투과형과는 달리 LCD의 하판을 silicon으로 대체함으로써 그 집적도를 높힐 수 있으며, 구동부를 반사 액정의 하단에 배치함으로써, black matrix로 인해 손실되는 면적을 최소화할 수 있다.

LCoS 기반의 주요 상용 SLM으로는 Holoeye 사의 제품이 대표적이다. Holoeye 사의 GAEA-2 제품은 픽셀 간격 3.74 마이크로미터, 4160×2464 급의 해상도의 반사형 위상 변조 SLM으로 구동 면적은 약 0.77인치이다. 8비트 신호를 입력받아 256단계로 위상 변조가 가능하며 약 60Hz의 구동 속도를 보유하고 있다. 동일 사의 PLUTO-2 모델은

8마이크로미터급, 1920×1080 급의 픽셀 간격과 해상도를 지니고 있으나 GAEA-2 제품군 대비 보다 넓은 스펙트럼에서 동작 가능한 모델이 존재한다. 그 외에도 초기 모델로서 SLM LC 2012가 있으며, 이 모델은 투과형 방식이라는 점이 특징인 SLM으로 LCoS방식이 아닌 일반적인 LCD의 방식을 따른다. 본 모델의 픽셀 크기는 36 마이크로미터이다. 최근 Thorlabs 사에서도 GAEA-2 모델과 거의 비슷한 사양의 SLM으로 Exulus-4k 제품을 내놓았으며, 이 제품 또한 픽셀 간격 3.74 마이크로미터, 3820×2160급의 해상도, 구동 면적은 0.71 인치이다.

그 외에도 Electro optical components 사의 SLM 모듈인 RL-SLM-T3는 해상도는 1024×768급으로 타사 대비 다소 낮으나 픽셀 크기는 12.5 마이크로미터로 양호한 편이며, 진폭 변조와 위상 변조 모드를 선택하여 동작시킬 수 있다는 점이 특징이다. 또한 Hamamatsu 사에서도 X13138과 같은 상용

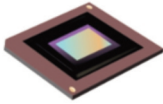
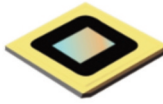
SLM 장치를 제공하고 있으며 픽셀 크기 12.5 마이크로미터, 1280×1024 해상도 성능을 보유하고 있다. 2차원 배열이 아닌 1차원 배열의 경우 픽셀의 간격이 1.6 마이크로미터까지 내려간 meadowlark optics사의 Linear Series SLM 모듈이 존재한다. 이 경우 일차원 배열의 해상도는 1×12288이며 구동 면적의 크기는 대략 1.09 인치이다. <그림 3>에서는 대표적인 외국 기업들의 LCD 혹은 LCoS 기반의 상용 SLM 제품들을 정리하였다.

## 2. DMD 기반의 진폭 변조 반사형 SLM

LCD 혹은 LCoS 기반의 SLM 제품들은 변조 방식으로 액정이 지나는 비등방성을 활용한다. 이는 액정의 배열 방향에 따라 세밀한 위상 지연 효과를 얻을 수 있으나, 액정 동작속도의 한계로 인하여 구동 속도는 60Hz~120Hz 수준으로 제한된다. 진폭

제품 사진				
모델명 (회사)	GAEA-2 (HOLOEYE)	PLUTO-2 (HOLOEYE)	LC 2012 (HOLOEYE)	EXULUS-4K (thorlab)
픽셀 간격	3.74	8	36	3.74
해상도	4160×2464	1920×1080	1024×768	3840×2160
크기(inch)	0.7	0.7	1.8	0.71
변조 방식	LCoS	LCoS	LCD	LCoS
제품 사진				
모델명 (회사)	RL-SLM-T3 (Electro optical components)	X13138-01 (Hamamatsu)	Linear Series Spatial Light Modulator (Meadowlark optics)	
픽셀 간격	12.5	12.5	1.6	
해상도	1024×768	1280×1024	1×12,288	
크기(inch)	0.63	0.8	1.09	
변조 방식	LCD	LCoS	LCoS	

<그림 4> LCoS기반의 대표적인 SLM 제품들과 그 성능 [1]

그림		
모델명 (회사)	DLP6500FYE (TEXAS INSTRUMENTS)	DLP9000 (TEXAS INSTRUMENTS)
픽셀 간격	7.56	7.56
해상도	1920 x 1080	2560 x 1600
크기 (inch)	0.65	0.9
변조 방식	DMD	DMD

〈그림 5〉 DMD기반의 대표적인 SLM 제품들과 그 성능 [2]

변조 SLM의 대표적인 장치인 Digital micromirror array device는 해상도에 상응하는 수 마이크로미터 수준의 미세 거울들의 배열 구조로 이루어져 있으며, 거울의 물리적인 각도를 조절함으로써 빛의 반사량을 조절한다. 이 경우 액정 기반의 SLM 장치보다 월등히 빠른 구동 속도(~kHz 급 이상)를 지닐 수 있다는 장점이 있으며, 픽셀 크기 또한 MEMS 기술을 활용하여 제작된 DMD의 경우 약 8마이크로미터 수준으로 홀로그램 영상에 활용하기에도 적합한 수준이다.

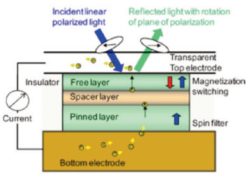
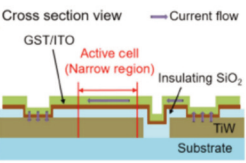
대표적인 DMD 장치는 TEXAS INSTRUMENTS 사의 DLP9000이 있는데, 픽셀 간격이 7.56 마이크로미터, 해상도는 2560×1600, 구동 영역의 크기는 약 0.9 inch이다.

### 3. 차세대 광 변조 장치 기술동향

위와 같이 하이엔드급 상용 SLM들의 성능을 살펴해보았으나, 홀로그램 영상에서 이상적인 시야각을 확보하기 위해서는 식 (1)에 의해 동작 파장과 비슷한 수준의 픽셀 크기를 지닌 SLM이 필요하다. LCoS 방식은 현재 가장 안정적으로 구동하는 위상 변조 SLM이나, 액정 간에 발생하는 crosstalk으로

인해 3 마이크로미터 이하로 SLM 픽셀 간격으로 줄이는 것은 쉽지 않은 상황이다. 한국전자통신연구원(KETI)의 기가코리아사업단에서는 현재 3마이크로미터 이하의 SLM 개발을 통해 세계 최고 수준의 SLM 기술을 확보하고자 노력하고 있으며, 삼성디스플레이에서는 11k 2250ppi 수준의 디스플레이 패널을 개발하여 대면적 디스플레이 패널에서도 홀로그램 영상을 비롯한 다양한 3차원 이미징이 가능한 수준의 디스플레이 장치를 개발하는 연구를 진행 중에 있다.

기존의 LC 혹은 MEMS 기반의 광 변조 방식을 벗어나서 아예 새로운 형태의 광변조 시스템을 개발하고자 하는 노력 또한 활발히 이루어지고 있다. 한국전자통신연구원에서는 1um SLM을 개발하고자 하는 목표로 초고밀도 집적이 가능한 상전이 물질을 활용하여 칼라 홀로그램 디스플레이를 구현하고자 하는 연구를 진행중에 있으며, magneto-optics 기반의 자기 광소자를 활용한 최신의 연구결과는 구동 픽셀의 크기는 0.5 마이크로미터 수준으로 줄이고, 동작속도는 0.015μs라는 매우 짧은 응답속도를 얻는데 성공하였다. 그러나 이러한 초소형 픽셀과 관련된 연구결과는 아직까지 안정적인 구동이 어려워 단위 픽셀의 구동으로만 검증되어

종류	특징	
<p>STS MO-SLM (Spin transfer switching Magneto optical SLM)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spin-polarized current flow를 이용한 새로운 SLM 기술</li> <li>- Active-matrix 디바이스 없이 구동 가능하며, 해상도가 수백 나노미터 정도임</li> <li>- 기존 SLM과는 다르게 움직이는 3D 홀로그래프에 사용 가능할 정도로 픽셀 크기(0.5<math>\mu</math>m)가 작으며, 응답 속도(0.015<math>\mu</math>s) 또한 빠름</li> <li>- 하지만 현재 개발된 정도는 한 개의 픽셀에서만 실험적으로 성공하며, 상용화하려면 연구가 좀 더 필요함</li> </ul>
<p>SLM with ultra-thin GST film</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 상태(State)에 따라 투과율과 굴절률이 변하는 물질인 GST를 이용한 새로운 SLM 기술</li> <li>- 상태를 변화시켜 빛의 위상 조절을 함으로써 1마이크로미터 수준 이하의 픽셀 크기 제작 가능하며, 3D 홀로그래프에서 필요한 넓은 시야각 확보 가능</li> <li>- 인듐 주석 산화물(ITO)의 두께를 조절하여 컬러 필터 없이 다양한 색상의 홀로그래프 이미지 생성 가능</li> <li>- GST의 상태변화를 전기적 신호뿐만이 아닌 광 신호로 가능하기 때문에, 사용범위가 넓어짐</li> </ul>

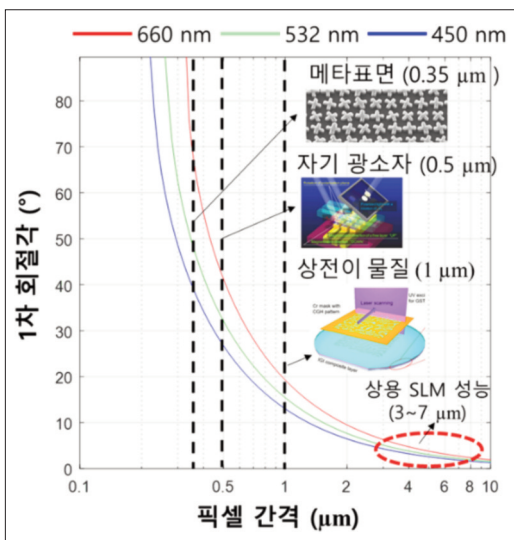
〈그림 6〉 상전이 물질 기반, 자기 광소자 기반의 차세대 광 변조 기술 [3, 4]

있는 상태이며, 기존 SLM과 같은 대면적의 4k×2k급 이상의 픽셀 해상도를 지니는 수준으로 발전하기까지는 좀 더 시간이 필요할 것으로 사료된다.

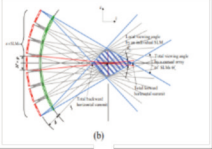
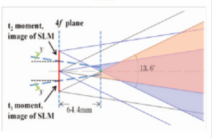
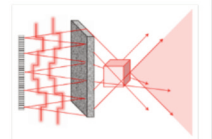
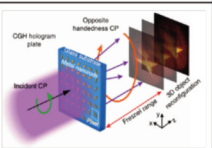
### III. 홀로그래밍 시야각 향상을 위한 기술 동향

이전 장에서는 홀로그래밍 영상을 구현하는데 있어 필수적인 장치인 SLM들의 종류와 그 성능들을 비교해 보았다. SLM의 성능 자체가 개선되어 더 작은 픽셀 크기와 더 넓은 구동 면적을 가지는 것이 홀로그래밍 영상의 시야각을 높일 수 있는 가장 확실한 방법이겠으나, 그렇게 되면 마이크로 픽셀의 공정 한계 뿐 아니라 구동 픽셀의 개수가 기하급수적으로 늘어나게 되는 문제가 존재한다. 본 장에서는 이러한 SLM을 활용하여 실질적으로 홀로그래밍 영상을 구현하되, 다중화 기법이나 산란 매질의 사용 등을 통해 SLM자체가 보유한 한계 시야각보다 더 넓은 시야각을 지닌 홀로그래밍 영상을 제공하는 기법들에 대해 소개해 보고자 한다.

〈그림 8〉에서는 홀로그래밍 기존의 SLM장치를 활용하면서도 홀로그래밍의 시야각을 확장시킬 수 있는



〈그림 7〉 차세대 광변조 기술들의 성능 로드맵

종류	특징	단점
공간 다중화	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 여러 SLM을 사용하여 홀로그램을 생성</li> <li>• SLM들을 곡선으로 배열하는 방식으로 시야각을 확장</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 여러 SLM을 사용함으로써 비용 문제 발생</li> <li>• 구조적으로 복잡</li> </ul>
시간 다중화	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>t_1</math>과 <math>t_2</math>시간에 상이한 위상을 SLM에 추가함으로써 공간적으로 분리를 하여 시야각을 확장</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구조적으로 복잡</li> <li>• 화면 전환이 느리면 깜박거리는 현상이 발생 가능</li> </ul>
산란하는 매질의 사용	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 적절하게 조절된 파면을 산란하는 매질에 입사를 하여 시야각을 확장</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 파면을 적절하게 조절하는데 시간이 많이 필요</li> </ul>
다른 소재의 사용	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• SLM의 픽셀 피치를 줄이는데 한계가 있으므로 서브파장 단위에서 빛을 제어할 수 있는 메타표면, 그래핀 등의 다른 소재를 이용하여 시야각 확장</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공정 이후 고정된 이미지만 재생이 가능</li> <li>• 특정 파장대역에 대해서만 홀로그램 재생가능</li> </ul>

〈그림 8〉 홀로그램 시야각을 확장시키는 방법들 [5-8]

다양한 방법들에 대해 표로 정리하였다. 가장 잘 알려진 방법 중 하나는 하나의 SLM대신 여러 개의 SLM을 구면을 따라 배치하여 시야각을 확장시키는 공간 다중화 기법이다. 평면 상에 SLM이 배치된 경우 각각의 SLM으로부터 만들어지는 관측 영역이 분산되어 시야각 확장이 어려우나, 원통면 또는 구면의 형태로 여러 SLM을 배치하고, 각각의 SLM에 알맞은 CGH패턴을 입력함으로써 더 넓은 시야각의 확보가 가능하다. 그러나 이 방법은 여러 개의 SLM이 사용되어야 하는 만큼, 장치의 가격이 높아지게 되며, 시스템의 전체적인 크기 또한 매우 크고 복잡해지는 문제가 존재한다. 다른 방법으로는 공간 다중화 방식 대신 시간 다중화 기법을 활용하는 방법이 있다. 이 경우, SLM을 공간적으로 분할하고 두 분할한 영역을 다른 각도로 분리한 뒤,

관측단에서 합침으로써 얻어지는 공간적 다중화 효과와, 두 분할 영역에서 띄우는 홀로그램 패턴을 시간에 따라 바꾸는 시간적 다중화 기법이 동시에 적용되었다. 이를 통해 SLM자체의 성능으로 얻을 수 있는 시야각을 약 4배 가량 개선시킬 수 있었다.

최근 보고된 가장 혁신적인 형태의 시야각 확장 기술은 산란체를 활용하는 방법이다. 일반적으로 SLM의 픽셀 크기가 수 마이크로미터 수준으로 시야각이 수 도에서 그치는 것과 대비하여, 랜덤 배열된 산란체의 경우 산란체 내부에는 별도의 주기구조가 없고 산란체의 크기가 수십 나노미터 수준에 그치기 때문에 산란체를 통과한 빛은 매우 큰 시야각(산란각)을 지닌다. 그러나 산란체를 통과한 이후의 빛은 산란체의 랜덤성 때문에 스펙클이라 불리는 노이즈 패턴으로 변화하게 되는데, 최신의 연



구결과에서는 이 노이즈 패턴을 최적화하여 산란체를 통과한 후의 빛이 초점을 맺을 수 있게 하는 연구결과가 보고되었다. 이러한 초점을 바탕으로 point cloud를 형성하여 홀로그램 이미지를 만드는 것이 가능한 것으로 보고되었으나, 초점을 최적화 하는데 걸리는데까지 연산량이 매우 많아 오랜 시간이 걸린다는 문제가 있다.

## IV. 결론

빛의 회절과 간섭 현상을 바탕으로 3차원 광 이미지를 기록하고 재생하는 기술인 홀로그래피는 기존의 2차원 디스플레이 대비 훨씬 더 많은 정보를 평면 상에 기록해야 하기 때문에 SLM이라 불리우는 미세 픽셀의 진폭 또는 위상 정보를 조절할 수 있는 장치가 필수적이다. 현재까지 개발되어 있는 상용 SLM의 픽셀 크기는 최소 3.7 마이크로미터에

서 20마이크로미터 수준까지 다양하며, 그 동작 원리를 기반으로 하여 액정을 이용한 LCoS, 기계적인 동작을 이용한 DMD 등으로 나눌 수 있다. 현재 최소 픽셀의 SLM을 이용하더라도 그 시야각은 4~5도 수준이기 때문에, 이를 더 확장하기 위하여 공간 다중화, 시간 다중화, 또는 랜덤 산란체를 이용한 방법에 이르기까지 다양한 형태의 홀로그램 시야각 확장과 관련된 연구가 보고되고 있으며, 다른 한편에서는 기존 SLM과 동작 원리부터 차별화된 차세대 광변조 소자 기술들을 개발하여 1마이크로미터 이하의 초소형 광 변조 소자를 제작하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 최근 5G통신기술의 발달로 더 많은 정보들을 손쉽게 전송할 수 있게 된 바, SLM 기술과 이를 응용한 홀로그램 시야각 확장 기술이 지금과 같은 추세로 발전한다면 머지않은 미래에는 누구나 손쉽게 홀로그램 영상을 가정에서 감상할 수 있는 날이 올 수 있을 것이라 기대한다.

### 참고 문헌

- [1] <https://holoeeye.com>
- [2] <https://www.ti.com>
- [3] S.-Y. Lee, et al. "Holographic image generation with a thin-film resonance caused by chalcogenide phase-change material," Scientific Reports 7 (2017), DOI: 10.1038/srep41152.
- [4] K. Aoshima, et al., "Submicron Magneto-Optical Spatial Light Modulation Device for Holographic Displays Driven by Spin-Polarized Electrons," Journal of Display Technology 6, 9 (2010).
- [5] J. Hahn, et al. "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators." Optics express 16 (2008), 12372-12386.
- [6] Y.-Z. Liu, et al. "Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling" Optics express 21 (2013), 12068-12076.
- [7] H. Yu, et al. "Ultrahigh-definition dynamic 3D holographic display by active control of volume speckle fields." Nature Photonics 11 (2017), 186.
- [8] L. Huang, et al. "Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface." Nature communications 4 (2013), 2808.

## 필자소개



### 이승열

- 2009년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사
- 2014년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 (석박사통합과정)
- 2016년 : 한국전자통신연구원 ICT소재부품연구소 연구원
- 2016년 ~ 현재 : 경북대학교 전자공학부 조교수
- 주관심분야 : 나노광학, 전자물리, 홀로그램 디스플레이