

# 복소변조 공간 광 변조 기술 동향

## Technology Trends of Complex Modulation Spatial Light Modulator

남제호 (J. Nam, namjeho@etri.re.kr) 디지털홀로그래피연구실 책임연구원  
 김현익 (H.-E. Kim, turnn@etri.re.kr) 디지털홀로그래피연구실 선임연구원  
 박민식 (M. Park, pms@etri.re.kr) 디지털홀로그래피연구실 책임연구원  
 김용해 (Y.H. Kim, yhakim@etri.re.kr) 실감디스플레이연구실 책임연구원  
 황치선 (C.-S. Hwang, hwang-cs@etri.re.kr) 실감소자원천연구본부 책임연구원/본부장

### ABSTRACT

In this study, we investigate the trends and prospects of spatial light modulation (SLM) technology that enables full complex modulation as a next-generation SLM. Current SLM technology, which is used as a key element in holography, augmented reality (AR), XR, and realistic displays, has performance limits that modulate only amplitude or phase. Notably, SLM capable of full complex modulation does not produce diffraction noise, unlike DC and twin image, and thus has a high-efficiency performance. In the future, the application field of next-generation SLM, which can be full-complex modulated, is expected to cover a wide range of holography-AR and XR devices, optical artificial intelligence, and 6G free space optics communications, which will greatly contribute to the development of a super-realistic metaverse platform and service.

**KEYWORDS** 공간 광 변조기(SLM), 복소변조, 위상변조, 진폭변조, 홀로그래피

## 1. 서론

메타버스 서비스는 홀로그래피·AR·XR과 같은 3차원 실감 디스플레이 장치를 이용하여 실현될 수 있다. 이때 고품질 실감 영상을 제공하는 대면적 초고해상도 3D 디스플레이를 구현하기 위한 필수적인 부품은 공간 광 변조 장치(SLM: Spatial Light Modulator)이다. SLM은 빛의 공간적 분포를 제어함으로써 3차

원 공간에서의 광 이미지 형성뿐만 아니라 넓은 의미에서 빛의 공간 분포를 제어하는 능동형 광학 소자이다[1-4].

현재 상용화된 4K급 초고해상도 SLM은 홀로그래피, AR 디바이스, HUD 등과 같은 실감 디스플레이뿐만 아니라 다양한 정보통신 분야에 핵심 부품 소자로서 그 활용도가 점차 높아지고 있다. 의료 기기로서 홀로그래피 광 집게(Optical Tweezer), 홀로

\* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370409>

\* 이 논문은 2021년도 ETRI 내부연구사업의 재원으로 '전략적 선행투자 사업(씨앗형 도전연구)'의 지원을 받아 수행된 연구임(고효율 복소 광파 변조 기반 차세대 공간 광 변조 장치 연구).



그래피 현미경, 토모그래피와 같은 의료기기 이외에도 광학 AI 컴퓨팅 엔진 구현에서도 SLM의 활용이 주목받고 있다. 또한 광 통신 분야에서는 SLM을 이용한 파장 선택 스위치(WSS: Wavelength Selective Switch)뿐만 아니라 최근 초대역·초고속 6G 위성통신을 위한 자유공간 광 통신(FSO: Free-Space Optics) 기술 구현에서도 SLM의 활용에 대한 연구가 진행되고 있다[5].

현재 가장 널리 사용되는 SLM은 크게 액정을 이용한 투과형 또는 반사형 SLM과 MEMS 기술을 이용한 DMD로 구분될 수 있으며 모두 픽셀화된(Pixelated) 구조를 가진다.

픽셀화되지 않은 SLM으로는 음파와 상호작용에 의해 빛을 변조시키는 음향 광학 변조기(AOM: Acousto-Optic Modulator), 빛에 의해 광 변조 기능이 구동되는 EASLM(Electrically Addressable SLM)을 이용한 OASLM(Optically Addressed SLM), 초미세 픽셀의 자기 광소자(Magneto-Optics) SLM 등이 있다. 이러한 픽셀화되지 않은 SLM은 연속적인 광 변조가 가능하고 픽셀화된 SLM에서는 필연적으로 발생하는 고차항의 회절 특성에 의한 잡음이 없다는 장점이 있으나 구현 시 부피가 커지므로 집적화가 어려워지는 단점이 있다[2,3].

그러나 현재 SLM을 이용한 3차원 실감형 디스플레이의 성능 수준은 영상 크기와 시야각 측면에서 TV, PC 모니터, 휴대폰 화면과 같은 2D 디스플레이와 비교해보면 성능 한계가 존재한다. 특히 대화면 광시야각 홀로그래픽 디스플레이 구현을 위해서는 고해상도와 미세픽셀을 가지는 SLM이 요구되며, 이러한 성능 수준은 공간대역폭(Space-Bandwidth Product)으로서 정의될 수 있다[6]. 그러나 영상 크기와 시야각이라는 디스플레이의 성능 규격적 요소 이외에도 실제 재현되는 홀로그램 영상 품질, 즉 화질(Image Quality)을 고려하면 SLM의 광 변조 방식과

그 성능이 상당한 영향을 미친다.

본고에서는 대용량 데이터의 고밀도 집적 처리가 가능하며 현재 휴대폰, TV, 모니터 등 다양한 대면적 디스플레이로서 가장 널리 사용되고 있는 픽셀화된 SLM 기반의 복소변조 기술개발에 대한 최근 동향과 전망에 대하여 살펴본다.

## II. 공간 광 변조(SLM) 기술 동향

### 1. 픽셀구조(Pixelated)의 SLM

공간 광 변조기(SLM)는 3차원 공간상에서 광 이미지의 형성뿐만 아니라 넓은 의미에서 빛의 공간 분포를 제어하기 위해 사용되는 능동형 광학 소자이다[2-4]. 빛은 전자기 파동으로서 진폭과 위상을 가지는 전기장의 정현파(Sinusoidal) 형태로 공간을 진행한다. 빛이 공간적으로 일정한 배열을 갖는 SLM의 한 픽셀에 투과하거나 반사할 때 입사 광파의 위상 또는 진폭을 변화시키는 것을 광 변조라고 하며, 이러한 광 변조 픽셀을 2차원 형태로 배열한 것이 픽셀화된 구조의 공간 광 변조기이다[1].

빛의 세기(진폭) 또는 위상만을 변조시키는 (Amplitude-Only) SLM은 성능 한계가 있다. 광파의 진폭만을 변조하는 SLM은 0차(DC) 및 공액(Conjugate) 잡음이 발생하므로 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio)가 낮게 되어 화질과 대역폭이 낮아지는 단점이 있다[1-4].

한편 위상만을 변조하는(Phase-Only) SLM의 경우 진폭변조 SLM에 비하여 상대적으로 안정적인 변조 성능과 높은 회절 효율을 갖는다. 이상적으로는 위상만을 변조하는 SLM은 0차와 공액 잡음이 없어야 하지만, 픽셀 fill-factor의 공정상의 현실적 한계로 인해 회절되지 않는 빛에 의한 0차 잡음이 발생한다. 또한 위상변조용 홀로그램의 CGH 생성 과정은 높은 복잡도를 가지는 반복적 알고리즘 기법

(Iterative Method)에도 불구하고 홀로그래프 생성의 성능 한계로 인한 스펙클 잡음이 발생하여 화질이 열화되는 단점이 있다.

또한, 진폭 또는 위상만을 변조하는 SLM을 적용한 홀로그래프 디스플레이 시스템에서는 SLM의 제한된 변조 성능으로 인해 발생한 잡음과 왜곡을 저감하기 위한 4f 필터링 광학계 등이 필요하므로 전체 디스플레이 광학 시스템의 부피가 커지는 문제가 따르므로, 특히 착용형 AR glasses나 차량용 HUD에서와 같이 광학계 구성요소가 차지하는 공간적 크기가 제한되는 경우 중요한 고려사항이 된다.

## 2. 초고해상도 SLM

### 가. 해외 기술 동향

현재 상용화된 SLM은 액정 마이크로 디스플레이에 기반한 1920×1080 Full-HD 해상도, 8μm급 픽셀피치의 사양을 넘어 3840×2160의 4K UHD급 초고해상도와 3μm급 픽셀피치 정도의 사양을 갖춘 반사형 LCoS 타입의 위상변조 SLM이 다양한 광학 응용, 레이저 재료처리, 홀로그래피 분야 등에 활용되고 있다[2].

글로벌 시장에서 시장점유율이 가장 높은 SLM 제조사로는 일본 Hamamatsu Photonics, 독일 HoloEye Photonics, 미국 Meadowlark Optics, 일본 Sante Corporation 등이 대표적이다[7]. 그 외 미국 Thorlabs, 독일 Jenoptik, 영국 Forth Dimension Displays, 대만 Jasper Display Corp, 중국 UPO Labs, 중국 CAS Microstar, 중국 Daheng Optics 등에서 상용제품을 제조, 판매 중이다.

### 나. 국내 기술 동향

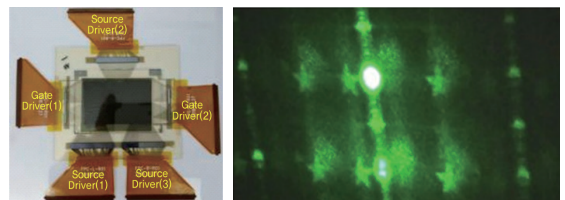
국내 유일의 4K LCoS 패널 제조와 생산 기업인 (주)메이는 UHD LCoS 패널 및 FPGA 구동보드

표 1 (주)메이 초고해상도 위상변조용 LCoS SLM

LCoS 제품명	모델: IRIS-U62
동작영역	0.62"
해상도	3840×2160
픽셀피치(PPI)	3.6μm (7100PPI)
용도별 제품 라인업	<ul style="list-style-type: none"> <li>디스플레이용 LCoS (VA LC)</li> <li>SLM용 LCoS (ECB LC)</li> </ul>

를 개발하여 상용화하였다. 아날로그 구동 기반의 backplane, FSC(Field Sequential Color) 방식의 컬러 재현 방식이 주요 특징이다. (주)메이의 LCoS는 제품마다 디스플레이용과 SLM용 패널로 분화되어 용도별로 총 8개 제품이 있으며, 대표적인 4K 패널 모델인 IRIS-U62의 주요 성능은 표 1과 같다[8,9].

한국전자통신연구원(ETRI)은 1μm급 픽셀 피치를 가지는 72K×3.2K 해상도의 반사형 위상변조 SLM 패널 및 구동 모듈을 개발하였다[10,11]. 반도체 공정 기술과 디스플레이 공정을 결합하여 유리 기판상에 구현한 SLMoG(SLM on Glass)와 6K 구동칩 및 72K 구동 시스템은 1μm 픽셀 피치를 구현하기 위하여 0.5μm의 매우 짧은 width를 가지는 VST(Vertically Stacked TFT) 구조를 적용하였다. Holoeye GAEA-2와 같은 상용 LCoS SLM과 비교하여 공간대역폭(SBP)이 23배 향상되었고, 30도의 시야각과 3.1인치 동작영역(Active Area)으로 대면적 홀로그래피 이미지 재현이 가능함을 확인하였다(그림 1)[11].



출처 Reproduced with permission from [11].

그림 1 ETRI 초고해상도 SLM(SLMoG) 및 홀로그래프 재현 영상

### III. 복소변조 SLM 기술 동향

이상적인 SLM은 빛의 진폭과 위상을 동시에 독립적으로 제어하는 복소변조(Complex Modulation) 방법으로서 회절 효율이 우수하고 0차상(DC)이나 공액상(Conjugate Image)이 발생하지 않는 장점이 있다.

또한, 필터링 시스템과 많은 계산량의 알고리즘이 필요하지 않으므로 전체 시스템 구조와 성능 측면에서 소형화, 고속화가 이루어지므로 초저잡음의 고화질 및 착용형, 휴대용 등 다양한 형태의 AR·VR 디바이스 구현이 가능해진다.

미디어·디스플레이로의 산업적 활용성 측면에서는 픽셀화된 구조의 복소변조 SLM 개발이 필요하지만, 그동안 국내외 산업체, 대학 및 연구기관에서 복소변조 특성을 확인하였으나 아직은 원천연구 단계에서 연구개발이 진행되고 있다. 복소변조 SLM 구현을 위한 기술적 접근 방법과 최근 연구개발 동향을 다음과 같이 살펴본다.

#### 1. Dual-SLM을 이용한 복소변조

2개 SLM(Double-SLM)의 광 결합 방식을 통한 복소변조 SLM 구현 방법은 높은 변조 정확성과 진폭 및 위상변조에 대한 독립적인 제어가 비교적 유연하다. 그러나 2개 SLM의 크기가 같아야 하고, 광 결합 시 매우 높은 정밀도의 정렬(Alignment) 작업이 필요하므로 시스템 구성이 대체로 복잡하고 부피가 커지는 단점이 있다[12]. 2개 SLM의 광 결합을 이용하여 복소수를 구성하기 위해서 진폭과 위상의 곱셈(Multiplicative) 또는 실수와 허수의 덧셈(Additive)으로서 복소변조를 구현하는 것이 대표적인 방법이다[12].

2개 SLM 간의 광 결합은 2개 SLM들의 상응하는 픽셀 간 빛의 회절에 의한 크로스토크(Crosstalk) 잡

음을 없애기 위하여 회절격자, 프리즘, 렌즈 어레이 등과 같은 다양한 광학소자를 적용하게 되며, SLM의 변조방식에 따라 다음과 같이 나누어 살펴본다.

#### 가. 진폭과 위상 SLM의 광 결합 방식

일본 Seiko-Epson사는 1992년에 최초로 TN(Twisted Nematic) 구동되는 진폭변조용 액정과 전압 제어복굴절(ECB) 위상변조용 액정 기기를 4f 광학계를 통해 순차적(Cascaded)으로 통과되는 입력 광의 복소파면(Complex Wavefront)을 제어하는 기기를 구현하였다[13].

캐나다 라발대(Universite Laval)는 1996년에 2개의 TNLC-SLM을 통해 광파의 진폭과 위상을 변조, 결합함으로써 복소변조를 구현하였다. 또한 룩업테이블(Look-Up Table) 인코딩으로 위상-진폭 결합에 의한 TNLC-SLM의 비선형적(Non-Linear) 변조 왜곡을 보정하였다[14].

대만 국립타이페이대학은 2개의 투과형 TNLC-SLM을 4f 광학계를 통해 순차적으로 결합하고 SLM의 변조 특성을 측정 후 진폭 보정을 달성하기 위해 두 번째 SLM의 진폭변조를 최적화함으로써 복소변조 성능을 향상시켰다[15].

스페인 바르셀로나대학교는 진폭과 위상을 변조하는 2개의 투과형 LCD를 별도의 광학계 없이 간단한 구조의 2f 광학계로 순차적으로 구성함으로써 복소변조 기능을 구현하였다[16].

또한, 대표적인 국내 연구진의 복소변조 SLM 기술개발 동향으로는 고려대학교와 LG디스플레이가 Double IPS(In-Plane Switching) 방식의 액정모드를 적용하여 투과형 풀 컬러 복소변조 SLM을 구현한 바 있다[17]. 특정 각도를 가진 Polarizer + Double IPS Cell + Analyzer로 결합된 구조이며, 결과적으로 적층된 Layer 간 연속된 두 Pixel의 변조 조합으로 위상변조 영역  $0\sim 2\pi$ , 진폭변조영역  $0\sim 0.2$ 으로

Full Range 복소변조가 가능함을 이론적으로 확인하였고 샘플을 제작하였다. Double IPS SLM의 패널 간 정밀 합착을 위한 Panel Align System을 이용하여 Double IPS SLM 합착 시간을 단축하고 Align 정확도를 향상(Target  $\pm 2\mu\text{m}$ )시켰다[17].

**나. 위상변조 SLM의 광 결합 방식**

중국 Huazhong 과학기술대는 2개의 위상변조 SLM을 이용하여 빛의 전체 광 필드를 조각함으로써 임의의 진폭과 위상 분포를 독립적으로 동시에 가지는 Laguerre-Gaussian 빔과 Bessel 빔과 같이 다양한 특수 종류의 빔을 생성하였다[18].

폴란드 바르샤바대는 2개의 반사형 위상변조 SLM에 2개의 Fresnel 홀로그래프를 동시에 디스플레이하고 첫 번째 SLM의 위상분포를 두 번째 SLM의 반복기법에 의한 왜곡 보상 과정을 통해 SLM 변조 성능을 최적화함으로써 1개의 SLM에 확산판(Diffuser)을 적용한 방법과 비교하여 0차와 스펙클 노이즈가 상당히 저감되어 개선된 홀로그래프 영상 화질을 보였다[19].

**다. 실수부와 허수부의 광 결합 방식**

스페인 바르셀로나대학교는 2개의 반사형 아날로그 강유전체 액정 기반의 SLM과 PBS, 1/4 파장판(QWP), 편광기를 이용하여 각각의 SLM에 복소 광파의 실수부와 허수부를 표현함으로써 복소변조 기능을 구현하였다[20].

**2. Single-SLM을 이용한 복소변조**

한편 1개의 SLM(Single-SLM)만을 이용하여 합성계수(Synthetic Coefficient) 방식의 복소진폭 공간 광 변조 기술 구현이 가능하다. 복소평면에서의 복소벡터를 정의하는 하나의 복소수 값을 2개나 3개 또는 4개의

위상 페이저(Phasor)로 구성되는 매크로 픽셀(Macro-Pixel)로 인코딩함으로써 복소수를 표현할 수 있다.

진폭변조 SLM에서 3개의 픽셀에 각각 120도 위상차를 가지는 Burckhardt 인코딩 방법으로 매크로 픽셀 단위의 복소변조를 표현할 수 있다[21]. 또한, 위상변조 SLM의 경우 2개의 픽셀(매크로 픽셀)로 구성된 double-phase 인코딩이 대표적인 복소변조 구현 방법이다[22]. 그러나 1개의 복소수 값을 표현하기 위하여 매크로 픽셀과 같이 다수개의 SLM 픽셀들을 합성해야 하므로 1개의 SLM을 이용한 복소변조 SLM의 구현은 해상도의 손실을 수반하는 단점이 있다.

**가. 픽셀 합성계수 기반 복소변조 기술**

미국 Texas Instruments사는 1개의 DMD(Digital Micromirror Device) SLM을 이용하여 매크로 픽셀 내 서브픽셀들의 상대적 위상을 제어함으로써 복소변조를 구현하였다[23].

영국 Sussex대학은 위상변조되는 아날로그 강유전체 액정 SLM의 인접한 2개 픽셀에 실수와 허수부를 표현한 2x1 매크로 픽셀의 복소 푸리에(Fourier) 스펙트럼으로 복소변조 기능을 구현하였다[24].

멕시코 INAOE(National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics) 연구소는 double-phase의 매크로 픽셀 인코딩을 1x2 또는 2x2 형태로 수정함으로써 복원 영상의 신호 대 잡음비(SNR) 화질이 성능 개선되는 복소변조 방법을 제안하였다[25].

스페인 Jaume I 대학교는 위상변조 SLM에 4f 광학계를 적용함으로써 공간적으로 샘플된 2개의 위상 요소의 결합으로써 단일픽셀 인코딩에 의한 복소 광 필드를 생성하였다[26].

미국 마이크로소프트사는 2017년에 위상변조 SLM을 이용한 안경형(Near-Eye) 홀로그래픽 디스플레이 구현에 효율적인 위상분포를 가지는 double-



phase 인코딩 기반 홀로그램 생성 기법을 적용하였다[27].

#### 나. 블록 합성계수 기반 복소변조 기술

대만 핑차(Feng Chia) 대학교는 투과형 SLM의 2개 블록영역에 각각 프레넬(Fresnel) 홀로그램의 실수와 허수부의 진폭 정보를 나누어 입력한 후 정현파 격자(Sinusoidal Grating)의 푸리에 평면에서 중첩시킴으로써 복소변조 기능을 구현하였다[28].

독일 SeeReal은 double-phase 홀로그램 방법을 이용하여 진폭과 위상을 동시에 독립적으로 변조하는 방법을 개발하였다. 위상변조 SLM에서 편광감응요소(Polarized-Sensitive Components)를 사용하여 2개의 인접한 픽셀들의 간섭을 위해 중첩시키는 방식을 적용하였다[29,30].

한편 국내 연구개발 동향으로 삼성종합기술원(SAIT)은 평면 액정패널을 이용하여 위상변조된 2개의 빛을 프리즘과 회절격자로 광 결합하여 복소변조하였다. 이때 1개의 SLM에서 대칭적으로 분리된 영역에 표시되는 double-phase로 구성된 2개의 위상 홀로그램을 결합하기 위하여 4f 시스템과 이진 위상 격자(Phase Grating) 필터를 푸리에 평면에 위치시켰다[31].

### 3. 메타표면 SLM

인공적으로 제작된 메타물질은 나노 단위의 매우 작은 크기를 가지는 구조에 따라 새로운 물질 특성을 구현할 수 있다[32]. 특히 메타물질의 2차원 박막 형태인 메타표면(Meta-Surface)으로 가시광 파장 이하의 초미세 픽셀의 구현뿐만 아니라 빛의 파장보다 작은 크기를 가지는 메타표면의 나노 구조를 이용하여 빛의 위상과 진폭을 독립적으로 변조할 수 있으며 픽셀 간의 간섭도 원천적으로 차단하는 것

이 가능하다. 그러나 공정 이후 고정된 영상만이 재현되고 특정 파장대역에서만 동작한다는 단점이 있다[32,33].

최근 다양한 파장대역에서 동작되는 메타물질의 소재 개발뿐만 아니라 수동소자 혹은 단순 스위칭 소자 수준에서 광메타 기술을 이용한 메타표면 홀로그램 구현에 대한 연구들이 최근 활발히 진행되고 있다.

#### 가. 메타물질 소재 기술

메타광학 또는 메타물질 기술로서 그래핀 소재는 마이크로파, 테라헤르쯔, 적외선 대역에서 활용 가능하며, 금속 및 유전체의 다양한 조합에 의한 유효 매질 메타소재에 대한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다[33,34]. 메타표면이 홀로그래픽 디스플레이와 같은 산업적 용도의 SLM으로 활용되기 위해서는 외부 구동 신호에 따라 능동적으로 빠르게 동작하는 능동 메타물질의 소재가 반드시 필요하다. 특히 가시광 파장 대역에서 실시간으로 동작할 수 있는 능동형 메타구조 기술은 어려운 과제임에도 지속적인 연구개발이 필요한 주제이다.

#### 나. 능동 광메타 기반 복소변조 디바이스

능동 광메타 디바이스 기술은 새로운 메타소재 개발과 나노기술, 반도체·디스플레이 기술이 결합되어야 구현이 가능하다. 비록 기술개발 초기 단계이지만 국내 대학과 연구소는 세계적으로 광메타 분야를 선도하는 수준의 연구를 진행하고 있다[35]. 최근 ETRI와 포항공대는 고화질 광시야각의 홀로그램용 복소 광변조 능동 메타소재 및 물질 개발을 위한 원천연구 과제를 착수했으며, 삼성종합기술원은 적외선 대역에서 tunable 메타표면 기반의 복소변조 SLM을 구현함으로써 3D 스캐닝용 LiDAR에 적용 가능성을 보였다[36].

## IV. 결론 및 제언

앞서 살펴보았듯이 현재 상용화된 SLM은 모두 위상 또는 진폭만을 변조하는 제한된 공간 광 변조 기능으로 동작하므로 회절 시 발생하는 0차 및 공액 이미지와 함께 스펙클과 같은 회절 및 변조 성능 한계로 인해 다양한 비선형적 노이즈가 발생하므로 광 변조의 결과로서 완벽한 복원이 불가능하다. 이는 낮은 광 효율과 함께 완전한 black 화면 재현의 어려움, 낮은 contrast 성능 및 부정확성 등으로 인한 재현 영상의 화질 저하로 나타난다. 특히 회절 노이즈를 제거하기 위한 4f 필터와 같은 광학계로 인한 기술적·경제적 부담은 홀로그래피·AR·XR 디바이스의 상용화를 어렵게 한다. 이를 근본적으로 해결하기 위하여 완전한 변조 및 복원이 가능한 복소변조 SLM 기술이 필수적이다. 구체적인 구현 방법으로는 기존 상용 SLM의 활용을 통하여 SLM의 광학적 결합 시 발생하는 다양한 노이즈를 제거하기 위한 광 결합용 소자 개발과 같은 광학적 접근 방법이 필요하다. 또한 복소변조 기능 구현 과정 전체에서 복합적으로 발생하는 다양한 비선형적 잡음 저감과 함께 이용되는 SLM 자체의 변조 및 회절 성능을 통합적으로 최적화하기 위한 인공신경망을 이용한 신호처리적 접근도 효과적인 성능 개선이 가능할 것이다. 또한 장기적인 관점에서는 메타표면 기반의 SLM을 위한 가시광 영역에서 실시간으로 동작하는 능동형 광메타물질에 대한 연구개발을 통하여 복소변조 기능과 함께 광시야각 제공이 가능한 초미세픽셀에 의한 SLM 개발을 통하여 기존 성능 한계를 근본적으로 뛰어넘을 수 있을 것으로 기대한다. 완전한 복소변조가 가능한 차세대 SLM 기술은 홀로그래피·AR·XR 디바이스, 광학 AI, 6G 자유공간 광 통신 등에 광범위하게 활용됨으로써 초실감 메타버스 플랫폼 구축과 서비스 실

현에 이바지할 것이다.

### 용어해설

**SLM(공간 광 변조기)** 일정한 면적에서 입사광의 위상 혹은 세기 등을 변조하는 소자  
**LCoS(실리콘 기판상의 액정)** 실리콘 소자를 구동소자로 한 액정 디스플레이 패널  
**CGH(Computer-Generated-Hologram)** 물체광의 빛의 분포나 물체광과 참조광의 간섭패턴을 계산하여 컴퓨터로 생성한 디지털 홀로그램

### 약어 정리

AOSLM	Acousto-Optic SLM
CGH	Computer Generated Hologram
DMD	Digital Micro-mirror Device
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSC	Field Sequential Color
LC	Liquid Crystal
LCD	Liquid Crystal Display
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
OASLM	Optical Addressed SLM
SBP	Space-Bandwidth Product
SLM	Spatial Light Modulator
SLMoG	SLM on Glass

### 참고문헌

- [1] 최희진, "SLM 기술종류 및 동향," 방송공학회지, 제18권 제3호, 2013, pp. 57-63.
- [2] 김용해 외, "디지털 홀로그래피를 위한 SLM 기술," 한국통신학회지(정보와 통신), 제31권 제2호, 2014, pp. 21-28.
- [3] 이승열 외, "디지털 홀로그램 영상을 위한 차세대 공간 광변조 장치 기술," 인포메이션 디스플레이, 제18권 제2호, 2017, pp. 20-26.
- [4] B. Kress et al., "Spatial light modulators—status and potential for holography," SPIE Webinar, 2021.
- [5] El-mehdi et al., "OAM mode selection and space-time coding for atmospheric turbulence mitigation in FSO communication," IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 88049-88057.
- [6] 한준구, "디지털 홀로그래피의 공간 대역폭," 방송공학회지, 제16권 제2호, 2013, pp. 63-72.
- [7] Global Info Research, "Global phase only spatial light

- modulators(SLMs) market growth 2022-2028," LP Information, 2022.
- [8] (주)메이, <http://may-display.com/>
- [9] MAY Co., Ltd., "Product Specification 0.62" UHD (2160P) LCOS Panel," 2019. 12.
- [10] J.H. Choi et al., "The new route for realization of 1- $\mu$ m-pixel-pitch high-resolution displays," *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 27, no. 8, 2019, pp. 487-496.
- [11] 황치선 외, "디지털 홀로그래피를 위한 대면적 공간광변조기 패널 기술," *전자통신동향분석*, 제31권 제6호, 2016, pp. 48-56.
- [12] D.A. Gregory et al., "Full complex modulation using liquid-crystal televisions," *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 2, 1992, pp. 163-165.
- [13] J. Amako et al., "Wave-front control using liquid-crystal devices," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 23, 1993, pp. 4323-4329.
- [14] L.G. Neto et al., "Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid crystal televisions," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 23, 1996, pp. 4567-4576.
- [15] M.-L. Hsieh et al., "Improvement of the complex modulated characteristic of cascaded liquid crystal spatial light modulators by using a novel amplitude compensated technique," *Opt. Eng.*, vol. 46, no. 7, 2007, article no. 070501.
- [16] R. Tudela et al., "A simple method for displaying Fresnel holograms on liquid crystal panels," *Opt. Commun.*, vol. 214, 2002, pp. 107-114.
- [17] 장성우 외, "이중 IPS 시스템을 이용한 풀 컬러 복소변조 3D 홀로그램," *한국광학회 동계학술발표회*, F1C-III.04, 2022.
- [18] L. Zhu et al., "Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators," *Sci. Rep.*, vol. 4, 2014, article no. 7441.
- [19] A. Simemion et al., "Diffuserless holographic projection working on twin spatial light modulators," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 24, 2012, pp. 5064-5066.
- [20] R. Tudela et al., "Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices," *J. Opt. A*, vol. 5, no. 5, 2003.
- [21] C.B. Burckhardt, "A simplification of Lee's method of generating holograms by computer," *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 8, 1970, p. 1949.
- [22] C.K. Hsueh and A. Sawchuk, "Computer-generated double-phase holograms," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 24, 1978, pp. 3874-3883.
- [23] J.M. Florence et al., "Full complex spatial filtering with a phase mostly DMD," in *Proc. Wave Propag. Scattering Varied Media II*, (San Diego, CA, USA), Nov. 1991.
- [24] P.M. Birch et al., "Two-pixel computer-generated hologram with a zero-twisted nematic liquid-crystal spatial light modulator," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 14, 2000.
- [25] V. Arrizon, "Complex modulation with a twisted-nematic liquid-crystal spatial light modulator: Double-pixel approach," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 15, 2003.
- [26] O. Mendoza-Yero et al., "Encoding complex fields by using a phase-only optical element," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 7, 2014, pp. 1740-1743.
- [27] A. Maimone et al., "Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality," *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 4, 2017.
- [28] J.-P. Liu et al., "Complex fresnel hologram display using a single SLM," *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 34, 2011, pp. H128-H135.
- [29] S. Reichelt et al., "Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 11, 2012.
- [30] S. Reichelt et al., "Computational hologram synthesis and representation on spatial light modulators for real-time 3D holographic imaging," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 415, 2012.
- [31] H. Song et al., "Optimal synthesis of double-phase computer generated holograms using a phase-only spatial light modulator with grating filter," *Opt. Express*, vol. 20, no. 28, 2012.
- [32] 이승열, "메타물질과 메타표면 광학 기술," *전기전자재료*, 제29권 제9호, 2016, pp. 13-19.
- [33] Y. Yao et al., "Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin midinfrared optical modulators," *Nano Lett.*, 2014, pp. 6526-6532.
- [34] H. Ren et al., "Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 15, 2020, pp. 948-955.
- [35] 황치선 외, "능동 광메타 디바이스 기술 동향," *전자통신동향분석*, 제33권 제6호, 2018, pp. 82-92.
- [36] 박정현, "메타광학을 이용한 복소변조 공간 광 변조기 및 응용," *제12회 홀로그래피 심층기술 워크숍*, 2021.