

# SLM 기술종류 및 동향

□ 최희진 / 세종대학교

## 1. 서론

최근 들어 안경식 3차원 TV로 대표되는 여러 3차원 디스플레이 제품들을 선보임에 따라 누구나 쉽게 입체 영상을 즐길 수 있게 되면서, 기존의 3차원 디스플레이 기술이 갖는 한계점을 해결할 수 있는 차세대 3차원 디스플레이 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 중, 홀로그램 기술은 여러 공상과학 영화 등에서 단골로 등장하는 실재와 같은 입체 영상을 자연스럽게 구현하는 기술로서 많은 사람들이 입체 영상과 동일어로 생각할 만큼 친숙한 기술이다. 그러나 이러한 모습은 현재까지는 CG 또는 특수 효과를 통해 구현된 영화 화면에서만 가능하며, 실용화까지는 여러 난제를 극복해야 할 것으로 예상된다. 그 대표적인 원인 중 하나는 고품질의 대화면 홀로그램 영상을 구현할 수 있는 공간광변조기(Spatial Light Modulator:SLM) 기술

개발이 아직 이루어지지 않았기 때문으로 이는 본고의 주제이기도 하다. 공간광변조기(SLM)는 빛(light)을 공간변조(spatial modulation)하는 장치로서, 우리가 일상 생활에서 흔히 사용하는 모든 디스플레이들이 그 범위에 포함된다고 할 수 있다. 즉, 넓게 본다면 우리가 어떠한 영상 또는 패턴을 표시하기 위하여 사용하는 모든 소자들이 SLM으로서의 역할을 수행한다. 다만, 홀로그램에서 요구되는 SLM은 일반적으로 사용되는 디스플레이 소자보다 훨씬 높은 사양과 좋은 특성을 가져야 하며 현재 이러한 요구사항을 만족시키기 위하여 LCD, LCoS, OASLM 등을 이용한 여러 기술 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 고에서는 이러한 SLM 기술들의 종류별 장단점과 그 한계를 살펴보고 이를 극복하기 위한 최신 SLM 기술 동향을 소개하기로 한다.

## II. 본 론

### 1. SLM 기술 종류

#### 1) 투과형LCD 기술 기반 SLM

LCD(Liquid Crystal Display)는 가장 성공적인 디스플레이 기술 중 하나로서, 홀로그램 디스플레이를 위한 용도 외에도 휴대폰/노트북/모니터/TV를 망라하는 디스플레이 전 영역에 걸쳐 다양한 크기와 성능을 갖는 제품들에 사용되고 있다. 투과형 LCD의 기본 구조는 두 장의 유리기판 사이에 스위치 역할을 하는 TFT(Thin Film Transistor)회로와 액정이 삽입되며 전기 신호에 따라 액정의 움직임을 제어하여 빛을 변조할 수 있다. 이러한 LCD SLM의 일반적인 해상도는 일반적인 TV용 LCD의 동일한 2k급(1920 x 1080)이 가장 일반적이나 최근에는 3840 x 2160의 해상도를 갖는 4k LCD 패널이 점차 보급되면서 LCD SLM의 해상도도 향상될 것으로 기대된다.



(그림 1) 투과형 LCD SLM

이러한 투과형 LCD SLM의 가장 큰 장점은 빛

을 투과시키는 구조이기 때문에 한 번 변조된 영상을 적층 구조를 통해 다시 변조하기가 간단하다는 것이며, 이러한 특성은 본 고 말미에 언급할 복소 변조 SLM의 제작에 유용하게 사용될 수 있다. 또한 디스플레이 전 영역에 걸쳐 사용될 만큼 기술적인 완성도가 높아 현재의 평판 디스플레이 제품과 가장 유사한 형태의 홀로그램 제품을 개발하는 것을 목표로 한다면 투과형 LCD SLM이 이에 가장 적합한 특성을 갖고 있다고 볼 수 있다.

반면, 투과형 LCD SLM은 빛을 투과시켜야 하는 특성 상 유리 기판을 사용해야 하므로 SLM 제작 공정을 상대적으로 저온에서 진행해야 하고 이에 따라 픽셀들을 동작시키는 TFT에 사용되는 실리콘 박막의 결정 크기가 작아 성능이 떨어지게 된다. 이처럼 TFT의 성능이 떨어지게 되면, TFT 내부의 전자 이동통로인 channel의 폭을 일정 수준 이상으로 확보해야 하므로 TFT를 소형화 하는데 어려움이 있다. 따라서 상대적으로 TFT와 픽셀의 크기가 커지게 되며 이는 일반적인 디스플레이보다 훨씬 작은 픽셀 크기를 요구하는 홀로그램용 SLM의 특성상 중요한 단점이 될 수 있다. 그러나 50인치대를 넘어 100인치대를 아우르는 안정화된 LCD 패널 제조 기술은 향후 대화면 홀로그램을 구현하는데 있어서 큰 장점으로 작용할 것이다.

다만, 기존 해상도를 유지하면서 이러한 대화면 LCD를 구현하게 되면 픽셀의 크기가 홀로그램을 구현하기에는 너무 커지는 문제가 생기게 되므로, 결국 기존 해상도보다 훨씬 높은 해상도를 갖는 대형 LCD SLM을 개발해야 할 필요가 있다. 이에 따르는 어려움은 본 고 말미에 다시 논하기로 한다.



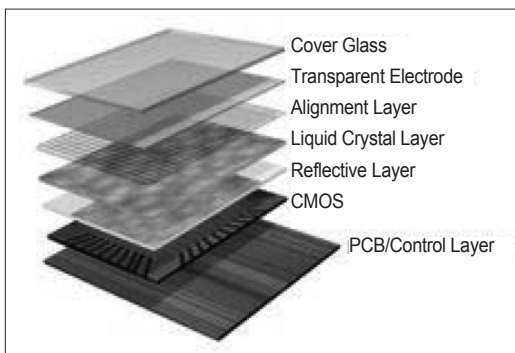
〈그림 2〉 55~110인치 크기의 4k 해상도 LCD (TV용)

### 2) 반사형 LCoS 기술 기반 SLM

LCoS(Liquid Crystal on Silicon) SLM은 기본적으로 액정의 광학적인 이방성을 이용하여 빛을 변조한다는 점에서는 LCD SLM과 동일하나 빛을 투과하지 않는 반사형 구조를 갖는다는 차이점을 갖는다[1]. 이러한 반사형 구조의 SLM은 단순히 빛의 경로만 바뀌는 것이 아니라, TFT 회로를 유리 기판 위에 생성하기 위한 저온 공정이 필요 없기 때문에 고순도의 결정 구조를 갖는 실리콘 박막을 형성할 수 있어 SLM내의 TFT의 성능을 향상시킬 수 있다. 이처럼 TFT의 성능이 향상되면, 작은 TFT를 갖고

도 동일한 성능을 발휘하는 소형화된 픽셀들을 만들 수 있어 SLM의 해상도를 향상시키는데 도움이 되며 픽셀 내에서 빛을 변조할 수 있는 영역이 넓어져 광효율 측면에서도 장점을 갖는다.

반면 LCoS의 반사형 구조는 빛의 입사 방향과 출사 방향이 서로 반대가 되므로 투과형 구조 대비 여러 개의 SLM을 적층하기가 어려워 복소 변조에 불리하고 입사각과 출사각이 겹치지 않아야 하므로 전체 시스템의 구조가 복잡해질 수 있다는 단점이 있다. 그러나 이러한 단점들에도 불구하고 LCoS 기술은 고해상도 SLM이 구현 가능하다는 큰 장점(현재 5 $\mu$ m급의 픽셀 크기를 갖는 최대 8k 해상도(8192 x 4320)의 SLM을 제작 가능한 수준) 때문에 가장 현실적인 고화질 홀로그램 디스플레이를 위한 SLM 기술로 평가 받고 있다[2]. 다만, 고순도 실리콘 기판의 대형화에 한계가 있어 투과형 LCD SLM과 같은 다양한 사이즈(특히 대형)를 구현하기에는 어려움이 있다고 여겨진다.

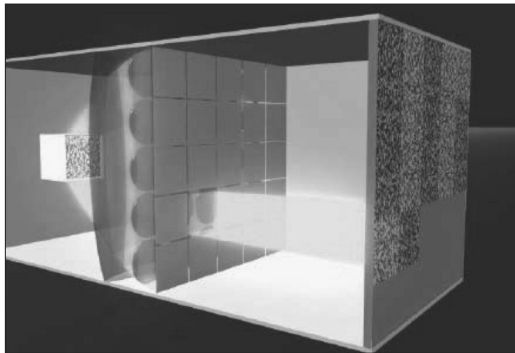


〈그림 3〉 반사형 LCoS SLM 구조도(출처: <http://www.holoeyesystems.com/lcos-microdisplays>) [1]

### 3) OASLM

OASLM(Optically-Addressed SLM)은 전기 신호가 아니라 광신호에 의해 빛을 변조하는 SLM으

로서, 일반적으로 1차 SLM을 거쳐 변조된 빛을 입력 광신호로 사용한다[3]. 따라서 2중 구조를 거치기 때문에 기존의 SLM 대비 복잡한 구조를 갖는다. 그러나 이러한 복잡한 구조에도 불구하고, OASLM은 1차 SLM을 거친 광신호를 조합하여 초고해상도 대형 SLM을 구현할 수 있는 방법 중 하나로 주목 받고 있다. OASLM은 기본적으로 전기신호를 필요로 하지 않기 때문에, 기존의 SLM에서 대형화와 광효율 향상에 걸림돌이 되는 전기 회로 및 구동 소자를 최소화 하는 것이 가능하다. 또한 여러 대의 SLM을 멀티비전어레이 형식으로 배치하지 않고도 대화면 구현이 가능하여 SLM간에 보이는 seamline이 없이 자연스러운 영상을 구현할 수 있다.



(그림 4) OASLM의 구조도 및 동작 원리(참고문헌 3의 Figure 10에서 발췌)

다만, OASLM을 구동하기 위해서는 결국 1차 변조된 광신호가 필요하며 이러한 광신호를 생성하기 위한 1차 SLM이 화면 전체의 영상 데이터를 모두 표시해야 하는 부담이 따른다. 현실적으로 해상도를 높이면서도 화면의 크기를 키우기 위해서는 1차 SLM이 OASLM의 화면을 여러 개의 블록으로 나누어 순차적으로 광신호를 입력해 주어야 한다. 따

라서 1차 SLM의 변조 속도가 매우 빨라야 한다. 또한, 1차 SLM과 OASLM사이에 광신호를 원하는 블록으로 전달해주는 추가적인 광학계가 필요하며 이러한 광학계 역시 광신호의 진행방향을 순차적으로 바꾸어 주어야 하므로 상대적으로 시스템의 전체 구조가 복잡해지고 부피가 증가하게 된다는 단점이 있다.

## 2. 성능 고찰 및 최근 동향

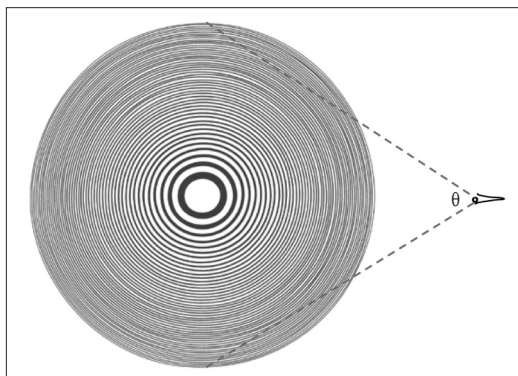
### 1) 현 SLM 성능 수준 및 한계점

홀로그램 영상의 화질은 관찰자에게 보이는 광신호를 변조하는 SLM의 특성과 성능에 따라 크게 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 실제와 같은 대화면 고화질 홀로그램 영상을 재생하기 위해서는 그에 맞는 화면 크기와 높은 해상도를 갖춘 SLM이 필요하다. 이를 구현하기 위해 해결해야 할 여러 문제점들을 살펴보기 위해, 우선 현재 가정용 TV로 사용되고 있는 평판 디스플레이 제품에 준하는 성능을 홀로그램으로 구현하기 위한 SLM의 성능 요구치를 우선 분석해 보기로 한다.

인간의 눈은 수정체를 통과해 망막상에 맺힌 물체의 상(image)을 시세포가 감지하는 구조로 되어 있다. 따라서 망막 상 시세포들의 밀도로부터 인간이 느낄 수 있는 해상도의 한계치를 구할 수 있으며 대략 60 cycles/degree에서 인지 한계를 갖는 것으로 알려져 있다[4]. 이를 바탕으로 55인치급의 TV를 3m 정도 떨어진 거리에서 보는 것을 가정하면, 대략 400 $\mu$ m 정도의 픽셀 크기가 인지 해상도 한계와 거의 일치한다. 즉, 이보다 작은 픽셀은 사람의 눈에 구별이 되질 않는다고 볼 수 있다. 이 때, 화면 크기와 픽셀 크기로부터 구한 TV의 해상도는 대략 4k급 정도가 되며, 시야각은 대략 좌우 합산 30도

정도가 된다.

이를 홀로그래프 입체 영상으로 구현하기 위한 SLM의 스펙은 다음과 같이 계산해 볼 수 있다. 홀로그래프의 시야각( $\theta$ )은 각 픽셀에서 빛이 어느 정도의 각도로 회절 되느냐가 좌우하게 되는데, 30도의 시야각(회절각)을 갖기 위해서는 픽셀 크기가 약  $0.6\mu\text{m}$ 가 되어야 하며(이는 인지 해상도를 매우 크게 상회하는 스펙임), 이러한 픽셀들이 모여 55인치 화면을 구성하려면 대략 2,000k 정도의 해상도를 가져야 한다. 또한 이는 가로방향만 계산했을 때이므로 화면 전체로 계산하면 4k 해상도의 패널보다 약 25만배 정도 많은 픽셀 수를 갖는 SLM이 필요하다는 결론이 나온다. 이는 평판 디스플레이 공정 및 구동 기술을 고려했을 때 현재로서는 구현이 불가능한 수준임을 쉽게 유추할 수 있다.



(그림 5) 홀로그래프 영상의 시야각과 SLM 픽셀 크기와의 관계. 시야각이 넓어질수록 가장자리 fringe pattern이 조밀해져 이를 표현하기 위해서는 더 작은 픽셀이 필요함

보다 현실적으로 현재 개발되어 있는  $5\mu\text{m}$ 급의 픽셀 크기를 갖는 8k 해상도의 LCoS SLM을 55인치 크기로 확장시키는 경우를 가정해 보면, 약 240k 정도의 해상도로 4k 패널보다 약 3,600배 정도 많은 픽셀 수가 필요하게 된다. 이러한 SLM은 현재

구현 가능한 크기의 픽셀들이 모여 있는 것임을 고려할 때 언뜻 실현 가능한 것처럼 보이기도 하지만, 각 픽셀을 동작시킬 수 있는 시간이 기존 4k 패널보다  $1/60$ 으로 줄어들게 되어 현재의 TFT의 성능으로는 SLM이 동작하지 않을 가능성이 높다. 또한 이렇게 구동 시간이 줄어들게 되면 대화면 디스플레이에서 흔히 나타나는 RC delay 등에 의한 신호의 작은 왜곡도 전체 영상에 악영향을 끼칠 수 있다. 뿐만 아니라 고순도의 실리콘 박막을 55인치 크기로 균일하게 성장시켜 이 박막에 약 280억개의 픽셀을 만드는 공정도 결코 쉽지 않은 도전이 될 것이다. 그리고 비록 이러한 SLM을 통해 홀로그래프 영상을 구현한다 하더라도 시야각이 5도 미만이어서 화면의 일부만 보인다는 근본적인 문제가 발생하게 된다.

계다가 위 계산들은 모두 흑백영상일 때를 가정한 것으로 컬러를 구현하기 위해서는 Red/Green/Blue 색상을 따로 변조해야 한다. 또한 위에서 소개한 기술들은 광파(light wave)가 전달하는 두 가지 정보인 진폭과 위상 중 한 가지만 변조 가능한 SLM 기술로써, 이를 보완할 수 있는 복소 변조 기술의 개발 역시 필요하다. 이러한 점들을 고려하면 홀로그래프의 디스플레이의 실용화를 위해서는 현재의 SLM 기술에서 많은 도약점을 거쳐야 함을 알 수 있다.

## 2) 최근 동향

이처럼 현재의 평판 디스플레이 기술 기반으로 SLM의 성능을 향상시키고 또 이를 통해 고품질 대화면의 홀로그래프를 구현하는 것은 어느 정도 이상의 한계점이 분명히 존재한다. 따라서 현재의 기술 한계를 넘어설 수 있는 새로운 기술들이 연구되고 있다. 우선 Magneto-Optics를 이용한 SLM 기술



은  $0.5\mu\text{m}$ 의 크기와  $0.015\mu\text{s}$ 라는 매우 짧은 응답속도를 갖고 있는 픽셀을 구현할 수 있어 시야각(회절각)과 시분할 동작 모두를 만족시킬 수 있다는 장점을 갖고 있으나, 고해상도의 픽셀 어레이 구조가 구현 가능한지는 아직 검증이 되지 않은 상태이다 [5]. 또한 기존의 SLM 소자가 아닌 polymer 또는 thin film을 이용한 rewritable 홀로그램 기술도 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나이다. 이러한 rewritable 홀로그램에 사용되는 소재는 기본적으로 현재의 SLM보다 높은 해상도를 갖는 홀로그램을 기록하고 재생할 수 있기 때문에 화질을 향상시킬 수 있으나 rewriting을 통한 영상 재생률이 초당 60번에 크게 못 미쳐 현재로서는 동영상을 구현하기에 무리가 있다[6].

다음으로 복소 변조 기술을 구현하기 위해서는 기본적으로 입사된 광파의 진폭 정보와 위상 정보를 모두 변조해 주어야 하므로 진폭 SLM과 위상 SLM이 모두 필요함을 유추할 수 있으며, 이를 구현하는 가장 쉬운 방법은 투과형 LCD SLM을 이용하여 진폭 SLM과 위상 SLM을 적층 하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 각 SLM을 픽셀 단위로 정확히 정렬시켜야 하기 때문에 약간의 진동이나 작은

외부 요인에도 제대로 동작하지 않을 가능성이 높다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근에는 하나의 위상 SLM의 픽셀들을 조합하여 복소 변조를 구현하는 기술이 활발히 연구되고 있다[7].

### III. 결론

홀로그램은 가장 완전한 형태의 입체 영상을 구현할 수 있는 기술로서, 현재의 안경식/무안경식 3차원 디스플레이 기술의 가장 큰 단점인 입체 영상의 불완전성 문제와 입체 피로 현상을 모두 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이를 위한 SLM 기술은 고품질 대화면 홀로그램 디스플레이를 구현하기 위해서는 아직 많은 개선이 필요한 상황이다. 특히 이러한 SLM의 성능을 기존의 평판 디스플레이 기술 기반으로 향상 시키는 것에는 어느 정도의 한계점이 예상되고 있다. 따라서 새로운 구조의 SLM 기술을 지속적으로 연구하는 것이 필요하며, 시간/공간 다중화와 같은 성능 향상 기술들의 개발도 지속적으로 이루어져야 할 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

- [1] <http://www.holoeyesystems.com/lcos-microdisplays>
- [2] G. Lazarev, et al., "Optical Imaging and Metrology: Advanced Technologies," Wiley-VCH VerlagGmBH& Co. KGaA (2012).
- [3] S. Coomber, et al., "Optically Addressed Spatial Light Modulators for Replaying ComputerGenerated Holograms," Proc. of SPIE, 4457 (2001).
- [4] <http://webvision.med.utah.edu>
- [5] K. Aoshima, et al., "Submicron Magneto-Optical Spatial Light Modulation Device for Holographic Displays Driven by Spin-Polarized Electrons," Journal of Display Technology, 6, no. 9 (2010).
- [6] N. Peyghambarian, et al., "Rewritable Holographic 3D Displays," OPN July/August (2008).
- [7] S. Reichelt, et al., "Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography," Optics Letters, 37, no. 11 (2012)

## 필자소개



### 최희진

- 1997년 ~ 2002년 : 서울대학교 전기공학부 학사
- 2002년 ~ 2004년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
- 2005년 ~ 2008년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2007년 ~ 2009년 : 삼성전자 LCD 사업부
- 2010년 ~ 현재 : 세종대학교 물리학과 조교수