

Applications of Holographic Optical Elements and Systems

Nam Kim[†] and Mei-Lan Piao

School of Electrical Engineering and Computer Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received April 15, 2014; Revised manuscript May 22, 2014; Accepted May 29, 2014)

Holographic optical elements (HOEs) provide systems of thin-film optics that could include a variety of functions and have many advantages as optical devices in various research fields. Research and developments based on the use of HOEs in the fields of communications and displays are in progress. This paper introduces the properties of HOEs and their applications in diffractive optical elements (DOEs), holographic projection screens, and head-mounted displays (HMDs). For widespread use of HOE technology in these various applications some challenges need to be solved, as discussed in this paper.

Keywords: Holographic optical element, Diffractive optical element, Holographic screen, Head mounted display
OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.2890) Holographic optical elements

홀로그래피 광학소자 및 시스템 응용

김 남[†] · 박미란

충북대학교 정보통신공학과
Ⓣ 361-763 청주시 흥덕구 내수동로 52

(2014년 4월 15일 받음, 2014년 5월 22일 수정본 받음, 2014년 5월 29일 게재 확정)

홀로그래피 광학소자는 투명하고 얇은 필름 또는 플라스틱 형태로 다양한 기능을 포함할 수 있는 장점을 갖고 있어 광학제품, 통신 및 디스플레이 분야에서 다양한 연구 개발이 진행되고 있다. 본 논문에서는 홀로그래피 광학소자의 원리 및 특성, 이를 활용한 회절 광학소자, 홀로그래피 투영 스크린, HMD 등 응용시스템에 대해 소개한다. 앞으로 홀로그래피 광학소자가 좀 더 보편화되고 활용가치를 높이기 위해 풀어야 할 당면과제에 대해 설명한다.

Keywords: 홀로그래피 광학소자, 회절 광학소자, 홀로그래피 투영 스크린, 헤드 마운티드 디스플레이
OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.2890) Holography optical elements

I. 서 론

1948년 Gabor에 의해 처음 소개된 홀로그래피는 현재까지도 유용한 기술로써 각광 받으면서 지속적인 연구가 진행되고 있다. 한마디로 홀로그래피는 빛의 회절과 간섭현상을 이용하여 빛의 진폭정보와 위상정보를 특정한 매질에 기록하고 재생하는 기술이다. 홀로그래피 광학소자(holographic optical elements: HOE)란 홀로그래피 기술을 이용하여 제작된 일종의 회절 광학소자(diffractive optical elements: DOE)를 말하며, 홀로그램에 기록된 파형을 재생시키거나 변형시켜서 투과되거나 반사된 빛을 원하는 기능을 갖도록 제작된 광학소자이다. 가간섭성을 갖는 한 대의 레이저에서 두 개 혹은 여러 개 레이저 빔을 이용하여 특정한 매질에 간섭무늬를 기록

하여 제작하기 때문에 간섭무늬의 간격이 정확한 균일도를 가지지는 않지만, 대체로 규칙적인 구조의 회절격자를 가지고 있다. 따라서 HOE는 반사나 굴절이 아닌 회절에 따라 동작하기 때문에 결합렌즈(combined lens), 빔 결합기/분파기 (beam combiner/splitter), 정합필터(matched filter) 등 여러 기능을 나타낼 수 있으며 컴퓨터 생성 홀로그램(computer generated hologram: CGH)을 이용해 복합적인 함수를 하나의 소자에 결합할 수 있다. 또한 높은 회절효율과 협대역 주파수 특성(narrow spectral bandwidth)을 갖고 있어, 회절 광학소자,^[1] 홀로그래피 투영 스크린(holographic projection screen),^[2] HMD(head mounted display),^[3] 디지털 홀로그래피 디스플레이(digital holography display)^[4] 등 응용분야에 널리 활용되고 있다. 본 논문에서는 HOE의 원리와 기본적인 특징, 또한 다

[†]E-mail: namkim@chungbuk.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

양한 시스템 응용 기술을 통해 그 활용가치와 전망을 살펴본다.

II. 홀로그래피 광학소자의 개요

HOE의 원리는 홀로그래피의 기본원리와 같다. 보통 한 대의 레이저에서 만들어진 두 개의 레이저 빛을 사용하여 물체에 부딪혀 나오는 하나의 빛과 나머지 하나의 빛을 기록매질에서 만나게 하여 기록한다. 이 두 개의 빛이 만나면 물체의 각 부분에서 반사된 물체파의 위상의 차이에 따라서 밝고 어두운 수많은 선으로 이루어진 간섭무늬가 생기게 된다. 이 간섭무늬가 물체의 정보가 기록된 것이다. 그림 1에서 볼 수 있듯, 빔 하나를 물체 빔으로 정의하고 그 위치에 렌즈 같은 광학소자를 두고 그 홀로그램을 기록한다. 기록된 필름을 다시 재생하면 그 필름이 렌즈 기능을 하는 광학소자가 되는 것이다.

HOE는 보통 평면형과 체적형으로 구분이 된다. 평면형은 입사된 빛이 여러 방향으로 회절 되기 때문에 효율이 낮으며, 입사각을 변화시켰을 때 회절효율이 크게 변화된다. 반면, 체적형은 입사되는 빛이 한 방향으로만 회절이 가능하여 높은 회절 효율을 갖고, 입사각이 변화에 따른 회절효율의 변화가 크다. 기록 방식에 따라 구분을 하자면 반사형과 투과형으로 구분된다. 투과형 HOE는 기록 시 물체 빔과 참조 빔을 같은 방향에서 입사하는 구조이고, 재생 시에 빔이 기록매질을 투과하는 작용을 한다. 반사형 HOE는 기록시 물체 빔과 참조 빔의 방향이 서로 반대로 매질에 입사하는 구조이고, 재생 시 빔이 기록매질에 반사하는 작용을 한다. 그림 여기서 HOE의 유용한 특징 및 장점은 다음과 같다.^[5]

- 동일한 기록재료에 여러 가지 소자의 특성을 기록하여 하나의 HOE로 여러 기능을 수행할 수 있다.
- 일반적인 광학소자는 표면가공을 통해 얻어지므로 제작이 어려우나 HOE는 감광재료에 사진촬영과 같은 방법으로 기록하여 얻을 수 있으므로 제작과 복제가 용이하여 대량생산이 가능하다. 뿐만 아니라, 박막형 이므로 소자가 얇고 가볍다.
- 회절법칙에 따라 동작하기 때문에 좁은 대역폭 영역에서의 사용이 용이하다.
- 홀로그램은 대개 off-axis 형태로 제작되기 때문에 큰 수차를 갖지만 on-axis 형태의 제작도 가능하다.
- 가간섭성을 갖는 빔에 의해 형성된 간섭무늬를 기록 하

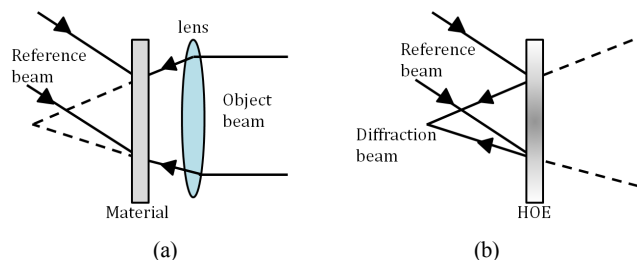


FIG. 1. Holographic optical element principle (a) recording and (b) readout.

여 제작하기 때문에 상대적으로 비구면 렌즈의 성질을 갖는 소자의 제작이 용이하다.

- 회절된 빛의 방향은 표면 또는 내부의 간섭무늬 모양에 의해 결정되는 반면 회절된 빛의 효율은 간섭무늬의 방향과 굴절률변조 등과 같은 간섭무늬의 내부 구조에 의해 결정된다.

HOE의 경우, 영상을 저장하기 보다는 주로 광 경로를 바뀌는 역할을 하며, 실제적으로 응용하려면 첫째 설계와 분석기술, 둘째 기록매질 특성 연구, 셋째 제작 및 평가기술 등의 분야들에 대한 연구가 필요하다. 설계에 있어서 DOE는 lithography, single-point diamond turning, single-point laser pattern generation 기술 등에 의하여 이미 상용화되었다. Far-field에서 원하는 빛의 세기를 만들어 내도록 DOE를 설계하는 것은 간단하지 않은 문제로서 반복적 푸리에 변환 알고리즘(iterative Fourier transform algorithm: IFTA)이 쓰이는데, 최적 설계를 위해 담금질 기법(simulated annealing: SA)과 유전 알고리즘(genetic algorithm: GA) 등과 같은 몇 가지 기법들이 제안되고 이용되어 왔다. 또한 HOE의 개발에 있어, DCG (dichromated gelatin),^[6] 은염감광제(silver-halide emulsion),^[7] PR(photoresist),^[8] 광굴절 결정(photorefractive crystal),^[9] 포토 폴리머(photopolymer)^[10] 등과 같은 기록매질들이 많이 응용되고 있다. 최근에는 은염감광제, 포토폴리머 등 얇은 플라스틱 필름 위에 원하는 패턴을 새겨서 제작하여 기존의 굴절 광학계에 비해 고성능, 양산성 및 집적화가 용이한 장점으로, 소형 또는 박형이 요구되는 휴대용 영상 기기, HMD, 필터 등에 응용되며 연구가 시도되고 있다. 그러나 반면 파장 의존성이 크다는 것과 넓은 파장 영역에서 높은 회절효율을 얻는 것이 어렵다는 단점이 있다.

III. 홀로그래피 광학소자의 시스템 응용

3.1. DOE

HOE는 회절격자의 기능, 렌즈 광분할, 편광선택 등의 여러 광 기능을 동시에 수행 할 수 있는 큰 장점을 갖고 있다.

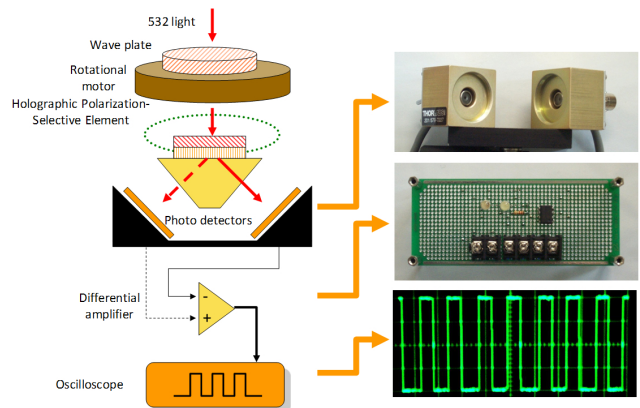


FIG. 2. Application in magneto-optical pickup head using holographic polarization-selective element.

그 중에서 홀로그래픽 편광 선택소자는 기존의 편광 분리 소자인 Wallaston, Rochon prism을 대체할 수 있고, 부피가 작기 때문에 현재 광 시스템에서 요구되는 고직접도를 만족시킬 수 있으므로 multistage interconnection network 등에서 기본적인 광 스위칭 cell로 이용할 수 있다. 광자기 데이터 저장 시스템을 위한 광 픽업헤드에서는 광자기 디스크 매질로부터 반사된 빛의 편광회전을 감지하기 위해 사용되고 있을 뿐만 아니라 편광특성은 내부 전반사 홀로그래피나 편광방향에 무관한 회절효율이 요구되는 광 통신용 집적소자 연구에도 많이 응용되고 있다. 그림 2는 holographic volume grating과 dove prism coupler를 이용한 편광 선택 소자 및 자기 광 픽업헤드 응용시스템을 보여준다.^[11]

디스플레이 장치에서 회절각 사이에서 적색, 녹색, 및 청색 파장이 공존하지 않고 무지개와 같이 색 분산 문제를 해결하기 위한 홀로그래픽 확산판은 DOE 소자 응용분야 중 한 가지 예다. 회절격자를 이용하여 홀로그래픽 확산판 설계에서 분산에 의한 색감 불균형 요인을 최소화하기 위해 CGH 계산 단계에서 회절격자의 패턴크기를 분산영역과 동일하도록 결정하고, 그 패턴으로 확산판을 설계함으로써 프리즘시트로 입사되는 빛의 파장분포를 균일하게 유지할 수 있도록 한다. 이렇게 제작된 홀로그래픽 확산판은 액정 디스플레이 장치와 더불어 다양한 형태의 확산판 설계에 적용 될 수 있으며, CGH 패턴의 크기를 줄임으로써 계산시간을 줄이는 효과를 갖는다. 그림 3은 설계한 CGH의 광 분포 실험을 보여주며, 그림과 같이 빛이 널리 퍼짐을 알 수 있으며 확산필름으로 사용 가능한 실험 결과를 보여준다.^[12]

LCD(liquid crystal display)에서 투과형보다 상대적으로 소비전력이 적은 반사형 LCD에 대한 관심이 높아지면서 컬러 필터의 광 손실 감소, 개구율 향상, 고 투과율 편광판 개발, 반사판의 반사효율 증대 등이 필요하다. 기존의 반사형 컬러 필터보다 안정적인 제작을 위한 새로운 압착에 의한 컬러 튜닝(press-based color tuning)방식이 제안되었다. 청색의 반사

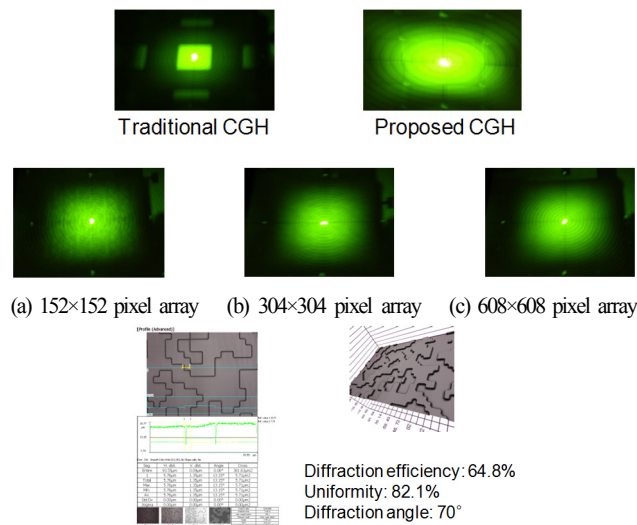


FIG. 3. Holographic diffuser using CGH pattern design.

형 격자에 깊이가 다른 액정 구조의 마스크 패턴으로 압착시킴으로써 내부 격자 간격을 변형시켜 서로 다른 파장으로 기록된 것과 같은 격자간격을 구현하여 광 효율이 우수하고 컬러 필터의 기능을 포함하는 제조방식이다.^[13] 그림 4에 일반적인 TFT-LCD(thin film transistor-LCD)와 홀로그래픽 컬러 필터를 적용한 TFT-LCD의 구조를 나타내었다. 전형적인 TFT-LCD의 경우 백라이트에서 나온 빛은 편광판, 확산판, TFT 패널, 액정(liquid crystal: L/C), ITO(indium-tin-oxide), 컬러 필터, 그리고 편광판을 통과하면서 TFT 패널에 인가되는 전압에 따라 빛의 세기가 조절된다. 액정에서 빛의 흡수는 거의 없으며, 제작사별 차이는 있지만 ITO 5~10%, TFT 패널 40~50%, 컬러 필터 약 70%, 그리고 편광판 60~70%의 감쇠가 발생한다. 백라이트의 실제 효율은 60% 이하이지만, 여기서 나온 빛의 양을 100으로 할 경우, 약 3~6%의 빛만이 실제 영상 디스플레이에 사용된다. 그러나 홀로그래픽 컬러 필터를 적용할 경우 반사판이 놓일 자리에 컬러 필터가 위치되는 구조적 변형이 요구되지만 홀로그래픽 컬러 필터 자체의 흡수율이 구조에 따라 5~30% 정도이므로 전체 효율은 9.5~22%까지 상승하는 효과를 나타낸다. 따라서 투과형 액정보다 컬러 필터 자체의 흡수율을 50% 이하로 낮출 수 있어 3배 이상의 광 효율을 가지며, 낮 시간 대비 70% 소비전력 감소와 함께 하부 편광판이 불필요하고 컬러 필터와 확산판의 기능을 동시에 수행함으로써 제조비용 절감 효과를 갖는다.

3.2. 홀로그래픽 투영 스크린

홀로스크린은 프로젝터를 통해 전달된 영상을 투영 디스플레이에 투영시켜주는 혁신적인 홀로그래픽 필름이다. 홀로그래픽 스크린은 렌즈, diffuser의 기능을 가진 HOE로, 참조광이 점광원이고 물체광 또한 점광원인 홀로그래프를 제작할 경우에, 제작된 홀로그래프는 한점을 한점으로 상 맺히게 하는 렌즈역할을 한다고 볼 수 있다. 홀로그래픽 투영 스크린(holographic projection screen)은 프로젝터의 투영면에 코팅된 유리를 사용하는 기술로 주로 마이크로렌즈(micro-lens)로 구성된 코팅면을 포함한다. 이 렌즈는 오버헤드 영사기(overhead projector)에 사용되는 프레넬 렌즈와 매우 유사하며, 매우 투명한 화면에 영상을 나타내기 때문에 공간 디스플레이 효과를 나타낸다. 또한 렌즈 조작에 의해 유리면 앞뒤로 영상이 나타나는 효과를 줄 수 있지만 이 기술은 2차원만을 위한 것

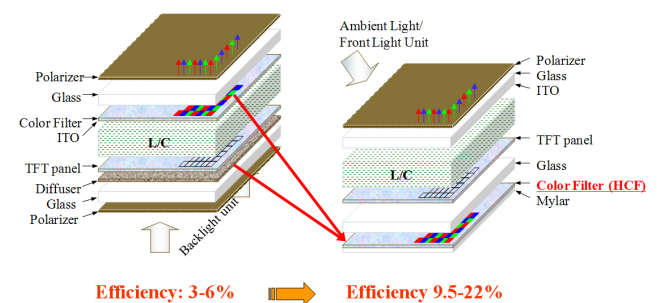


FIG. 4. Holographic reflective color filter applied TFT-LCD structure.



FIG. 5. Holographic projection screen (Source: http://www.bridgat.com/holographic_screen-o34550.html).

으로 3차원 영상을 재생하지는 못한다. 디스플레이 형태에 따라 전방투영(front projection) 또는 후방투영(rear projection) 설계가 가능하며 하나 또는 여러 개의 프로젝터가 유리판을 향하도록 구성할 수 있다. 각각의 프로젝터에서 나온 빔은 스크린 표면에 닿은 후 유리판 위에 기록된 렌즈 배열에 의해 다시 모아진다. 이렇게 하면 원래 영상에 대한 허상(virtual point)이 만들어지며 가상의 물체가 유리판 근처에 나타나게 된다. 후방 투영방식에서 영상은 유리판을 통과하면서 보이게 되고 전방 투영방식에서는 영상이 스크린에서 반사되어 나타나게 된다. 그림 5는 홀로그래픽 투영 스크린을 보여준다.

일반적인 홀로그래픽 투영 스크린은 수동적으로 영상을 보여주기만 하는 반면 최근에는 사용자의 동작을 감지하여 이에 대응하는 화면을 나타내는 진보된 형태의 대화형 홀로그래픽 스크린(interactive holographic screen)도 선보이고 있다. 이 시스템은 프로젝터, 컴퓨터, 그리고 crystal support 위에 screen film과 tactile membrane film을 붙여 만들어진 홀로그래픽 스크린으로 구성된다. 우선, 컴퓨터는 영상을 프로젝터로 전송하고 프로젝터는 스크린에 투영될 영상을 만든다. 사용자가 스크린을 터치하면 tactile membrane film은 이 동작에 반응하여 전기신호를 발생하고 이 신호는 다시 컴퓨터로 전송된다. 컴퓨터는 수신된 신호를 해석하여 수신신호에 따라 투사된 영상을 변형시킨다.

어떤 형태이건 홀로그래픽 투영 스크린은 일반 스크린과 달리 빛의 진행방향을 바꿔주는 동작을 수행하므로 프로젝션 방향에 사용자가 위치하면 영상이 사용자의 눈에 직접 들어갈 수 있어 30~40° 범위에서 사선으로 투영하는 것이 일반적이다. 이러한 투영각도는 상대적으로 프로젝터와 스크린 사이의 거리를 넓게 유지해야 하며 투영각을 좁힐 경우 홀로그래픽 스크린의 효율이 저하되는 단점을 갖고 있다.

홀로그래픽 투영 스크린은 쇼 윈도우와 같이 건물 전면에 부착된 유리에 제품관련 동영상을 보여주는 광고용으로 활발히 사용되고 있으며 대화형인 경우 주변을 지나는 소비자와 상호 작용을 통해 광고효과를 극대화할 수 있는 장점을



FIG. 6. Large scale hologram projector (Source: <http://www.tradeshowhologram.com/largehologram.html>).

갖고 있다. 현재 컴퓨터를 사용하던 화상회의에서 벗어나 모니터가 아닌 바로 옆에서 회의를 하는 것과 같은 효과를 주는 차세대 화상회의 시스템으로 진화하고 있으며 일부 공연 등에서 환상적인 효과를 주기 위한 도구로 사용되기도 한다. 또한 앞으로 이 기술은 증강현실과 결합하여 보다 다양한 응용제품을 만들어낼 것으로 예상된다. 그림 6은 홀로그래픽 투영 스크린을 이용한 화상회의 모습을 나타낸다.

3.3. HMD

홀로그래피 광학소자를 이용한 HMD는 광학적으로 투명한 유리판 위에 상황에 대한 문자나 숫자의 기호를 투영하는 장치로, 초기 항공기 특히 전투기에 부착되어 비행시 조종사에게 비행정보의 제공의 군사적 목적으로 개발되었다. 홀로그래피 광학소자를 HMD 시스템에 적용하면, 광학소자의 매수가 현저히 줄어들기 때문에 좁은 공간에 시스템을 용이하게 구성할 수 있을 뿐 아니라, 기존의 HMD 시스템보다 상당히 가볍고 상대적으로 높은 광효율과 넓은 시야각을 가지는 장점이 있다. 또한, 높은 파장 선택성과 각도 선택성을 가지므로 표시장치에서 투사되는 영상정보 중 해당 파장만을 선택적으로 반사시키며 다른 각도에서 들어오거나 파장이 다른 광산을 모두 투과하게 된다. 따라서 HMD에 적용된 홀로그래피 광학소자는 필요한 정보와 함께 깨끗한 외부환경을 동시에 관찰자에게 전달할 수 있게 된다.

BAE system 은 HMD 기술 및 기술적인 혁신 분야의 세계적인 선도 기업이다.^[14] BAE system 의 HMD는 스트라이커 헬멧과 HMD 제품의 Q-Sight 제품군을 포함한다. 그림 7은 BAE system의 HMD 시스템 구성도와 실제 군인이 착용한 모습을 보여준다. Q-Sight 헬멧은 양자 도파관 기술을 사용하여 LCD 프로젝터의 출력을 결합하여 중간 렌즈에 대한 필요성을 제거한다. 이로 하여 비행 안전을 개선할 뿐만 아니라 목 피로를 감소하고 낮과 밤 사이의 원활한 전환을 보장한다. BAE system에서의 HMD 디자인은 매우 작고 간단



FIG. 7. Key functional component of Q-sight 100 display of BAE system and experimental flight prototype.

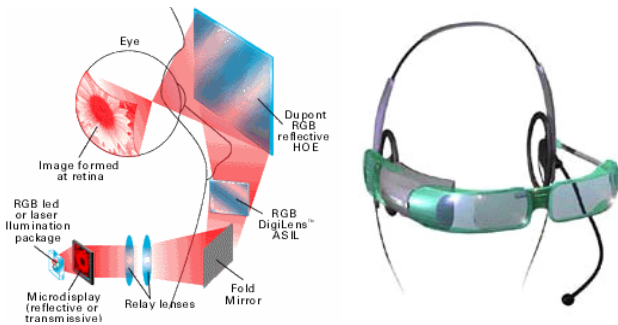


FIG. 8. HMD Digilens enables “heads-up” holographic imagery.

한 렌즈를 사용하여 이미지를 시준하고 회절 도파관 구조를 배열하여 사출 동공의 크기를 증가시키고 사용자에게 디스플레이를 제시한다. 광학소자는 Dichromated Gelatine(DCG) 기록 매질을 사용하며, 이는 매우 선명하고 알갱이 없는 이미지를 제공하고 빛을 잘 반사한다. 반면, BAE system은 사출 동공이 크고 낮과 밤사이에 매끄러운 전환이 진행되는 반면에 광 효율이 낮은 단점이 있다.

Digilens 는 off-axis 광학계를 사용하여 디스플레이의 무게 중심을 귀 뒤로 위치하도록 하였다.^[15] 이는 머리의 움직임에 따라 이동하지 않고 시스템의 무게를 보다 큰 공간에 옮김으로 디스플레이가 훨씬 가볍게 느껴진다. RGB 층 홀로그래피 광학소자는 손은 일을 유지할 때 데이터의 참조를 수요로 하는 선명한 see-through 작용을 제공한다. 그림 8은 Digilens 제품의 구성도를 보여준다. Digilens는 장기간 사용에도 편안하고 see-through타입이며 넓은 시야각을 제공하며 높은 해상도를 가지는 특징을 가지고 있다. 사용한 광학소자 기록매질은 포토폴리머다.

Holographic waveguide type HMD는 기존의 광학계 중 디스플레이 소자에서 유리 기판 안으로 들어오는 couple in 광학계와 유리 기판 안에서 내부 전반사에 의해 진행되는 영상을 동공으로 입사시키는 couple out 광학계를 홀로그래피 광학소자로 구현 하였다.^[16] 여기서 문제점은 풀 컬러를 위한 R, G, B 레이저를 사용하기 때문에 색 분산이 존재한다. 한 개 파장으로 기록된 홀로그래피 광학소자는 같은 각도에서 다른 파장이 입사되면 동일한 굴절률을 갖는 격자에 대해 상대적 파장의 차이에 의해 회절 각이 달라진다. 또한, 홀로그래피 광학소자가 갖는 고유 파장의존성에 대해 간섭무늬를

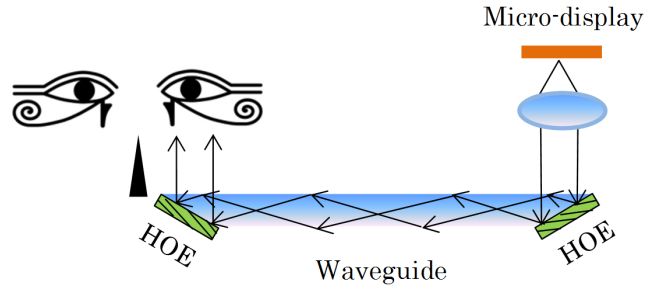


FIG. 9. Structure of the wedge-shaped waveguide type HMD.

노광하는데 사용한 중심파장에 대해서는 높은 회절효율을 갖는 반면, 중심파장에서 멀어질수록 회절효율이 저하되는 단점을 갖고 있다. 기존에 제안된 HMD 구조에 있어, waveguide 양쪽에 부착된 풀 컬러 홀로그래피 광학소자(layer) 층을 두 개 겹쳐서 표현한 시스템이다. 컬러 홀로그래피 광학소자의 회절효율을 보장하면서 균일도를 향상하는 순차적 노출방식이 제안되었다. 그림 9는 제안된 wedge형 holographic waveguide type HMD 시스템 구성도를 보여준다. 홀로그래피 광학소자 기록매질은 포토폴리머를 사용하였다. 즉, 한 장의 포토폴리머 층(layer)으로 고 효율 및 컬러 균일도를 갖는 풀 컬러 홀로그래피 광학소자를 제작한 시스템이다.

IV. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 HOE는 DOE소자, 홀로그래픽 투영스크린, HMD 등 응용분야에 힘을 쓰고 있다. 이러한 디스플레이는 높은 해상도를 가지며, 필름형태로 제공되기 때문에 매우 저렴한 가격으로 시스템을 구성할 수 있어, 홀로그래피 광학소자의 활용도와 필요성은 나날이 높아질 것으로 예측된다. 홀로그래피 광학소자 개발을 위해서는 기본적으로 기록매질과 개발 시스템, 그리고 대량 생산을 위한 복제기술이 요구되며, 아직 대중화를 위한 장벽이 남아 있음을 알 수 있다. 특히 국내의 경우 일부 대학을 중심으로 홀로그래피 광학소자 개발에 대한 활발한 연구가 진행되고 있지만 재료 수급이 어려운 문제가 있고, 복제기술 분야의 기술은 전무한 것으로 알려져 있다. 따라서 기록매질과 복제기술의 개발이 선행되어야만 홀로그래피 광학소자 분야의 발전을 기대할 수 있을 것이다.

References

1. M. Ornelas-Rodriguez, S. Calixto, Y. L. Sheng, and C. Turck, “Thermal embossing of mid-infrared diffractive optical elements by use of a self-processing photopolymer master,” *Appl. Opt.* **41**, 4590-4595 (2002).
2. J. J. Lunazzi and P. M. Boone, “One-step technique for enlarging straddling holographic images by white-light projection onto a diffractive screen,” *Opt. Lett.* **19**, 1897-1899 (1994).

3. J. A. Piao, G. Li, M. L. Piao, and N. Kim, "Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer," *J. Opt. Soc. Korea* **17**, 242-248 (2013).
4. T. J. Trout, W. J. Gambodi, K. W. Steijn, and S. R. Mackara, "Volume holographic components for display applications," *SID'00* **31**, 202-206 (2004).
5. V. Lukin, "Holographic optical elements," *Journal of Optical Technology* **74**, 65-70 (2007).
6. T. Kubota and T. Ose, "Lippmann color holograms recorded in methylene-blue sensitized dichromated gelatin," *Opt. Lett.* **1**, 8-9 (1979).
7. J. M. Kim, B. S. Choi, Y. S. Choi, H. I. Bjelkhagen, and N. J. Phillips, "Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part 2. Reflection holographic optical elements," *Appl. Opt.* **41**, 1522-1533 (2002).
8. L. L. Soares and L. Cescato, "Metallized photoresist grating as a polarizing beam splitter," *Appl. Opt.* **40**, 5906-5910 (2001).
9. P. Yeh, A. E. Chiou, J. Hong, P. Beckwitt, T. Chang, and M. Khoshnevisan, "Photorefractive nonlinear optics in optical computing," *Opt. Eng.* **28**, 328-343 (1989).
10. D. Jurbergs, F. K. Bruder, F. Deuber, T. Fäcke, R. Hagen, T. Hönel, T. Rölle, S. M. Weiser, and A. Volkov, "New recording materials for the holographic industry," *Proc. SPIE* **7233**, 72330K-K10 (2009).
11. C. W. Shin, V. T. Vu, N. Kim, J. W. An, D. W. Suh, Y. W. Park, H. J. Ryu, M. C. Paek, and H. B. Pyo, "Holographic polarization-selective module based on a small Dove prism coupler for magneto-optical pickup heads," *Appl. Opt.* **44**, 4248-4254 (2005).
12. E. S. Kim, M. Y. Shin, and N. Kim, "BLU light tool holographic diffuser design and its application," in *Proc. Photonics Conference* (Jechun, Korea, 2008), pp. 459-460.
13. E. S. Kim, "Press-based color tuning in holographic optical elements using photopolymer," Thesis, Chungbuk National University (2004).
14. Cameron, "The application of holographic optical waveguide technology to QSight™ family of helmet mounted displays," *Proc. SPIE* **7326**, 73260H (2009).
15. "Digilens HMD," http://www.digilens.com/Head_Mounted_Display.html.
16. M. L. Piao and N. Kim, "Achieving high levels of color uniformity and optical efficiency for a wedge-shaped waveguide head-mounted display using a photopolymer," *Appl. Opt.* **53**, 2180-2184 (2014).