오감미디어 서비스를 위한 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 기술 개발

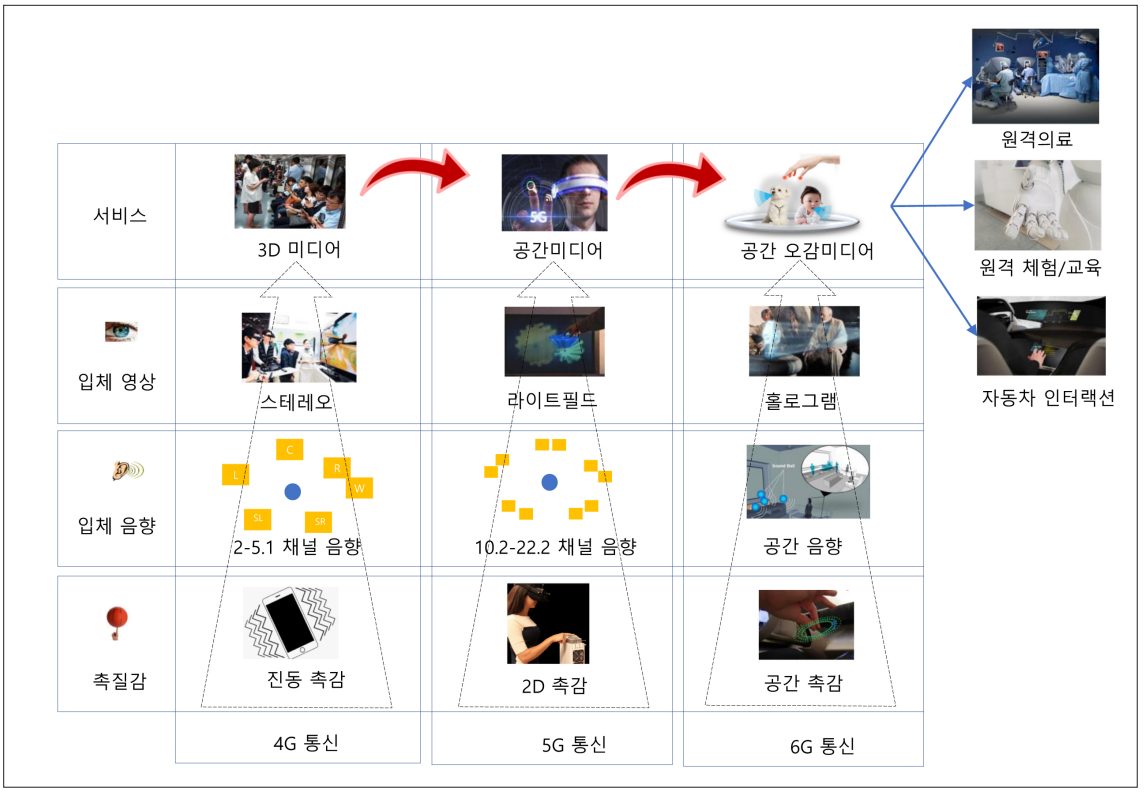
□ 박민식, 피재은, 황치선, 김주연, 김용해, 염한주, 김혜진, 진한빛, 주훈표 / 한국전자통신연구원

요 약

현재 메타버스는 주로 2차원 영상과 음성 미디어를 중심으로 구현되고 있다. 이는 사용자에게 실재감이나 몰입감을 충분히 제공하지 못하는 저해 요인으로 작용하고 있다. 이러한 한계를 극복하고자 더욱 실감나는 가상 세계를 구현하려는 시도가 진행되고 있으며, 그 중심에는 공간 오감미디어 기술 개발이 있다. 공간 오감미디어는 사용자가 HMD, 안경, 장갑 등의 특별한 장치를 착용하지 않아도 3차원 공간에서 오감(시각, 청각, 촉각, 후각, 미각)을 경험할 수 있게 하는 기술이다. 시각 측면에서 공간 오감미디어를 구현하는 데 있어 가장 주목받는 기술 중 하나는 홀로그램 기술이다. 홀로그램은 어떠한 착용 장치 없이도 3차원 영상을 생성할 수 있게 함으로써 사용자가 실제와 같은 영상을 볼 수 있게 한다. 이 기술은 빛의 간섭과 회절을 이용하여 물체의 3차원 영상을 공간에 재현한다. 사용자는 이를 통해 가상 객체를 실제처럼 느낄 수 있으며 연속 시점에서 객체를 관찰할 수 있다. 촉각 측면에서 공간 오감미디어를 제공하기 위해 초음파를 활용한 기술이 개발되고 있다. 초음파는 손이나 피부에 직접 닿지 않고도 촉각적인 느낌을 전달할 수 있는 물리적 성질을 가지고 있다. 이 기술은 초음파를 특정 패턴으로 공간에 발생시켜 사용자가 실제로 물체를 만지는 것처럼 느끼게 한다. 이를 통하여 사용자는 장갑이나 기타 촉각을 전달하는 장치를 착용하지 않고도 가상 객체의 질감이나 모양을 느낄 수 있게 된다. 한국전자통신연구원(ETRI)은 이러한 홀로그램 기술과 공간 촉각 기술을 통합한 공간 오감미디어 서비스를 제공하기 위한 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템의 핵심 요소 기술을 개발하고 있다. 이 시스템은 사용자가 가상 환경에서 더 실감나고 자연스러운 새로운 차원의 오감을 체험할 수 있게 함으로써 메타버스의 활성화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

I. 서 론

디지털 미디어 기술은 인간이 현실 세계에서 실제 객체를 눈으로 보고(시각), 귀로 듣고(청각), 코로 냄새를 맡고(후각), 손으로 만질 수 있고(촉각), 혀로 맛을 느낄 수 있는(미각) 다양한 감각을 디지털 가상 세계에서 생생하게 재현하고 각 요소 간에 상호작용할 수 있는 오감미디어 기술을 개발하는 방향으로 발전하여 왔다. 특히 시각



<그림 1> 미디어 서비스 발전 전망 (참고: IITP, ICT R&D 기술로드맵 2023)

요소와 촉각 요소 간의 인터랙션은 오감미디어를 실감 있게 재현하는 데 매우 효과적일 수 있다[1]. 시각적 요소의 핵심은 사용자에게 자연스러운 3차원 입체영상을 제공하는 것이다. 이를 위하여 양안 스테레오, 라이트필드 기술의 발전을 거쳐 현재는 실제 물체를 완벽하게 3차원 공간에 재현할 수 있는 최신 기술인 홀로그램 기술 개발이 진행되고 있다[2][3][4]. 촉각적 요소 같은 경우, 초기에는 촉각 디바이스를 통하여 전기 신호 또는 물리적인 신호를 통하여 감각기관에 직접 접촉하여 해당 감각을 묘사하는 기술 개발이 이루어졌고, 현재는 어떤 촉각 디바이스 없이도 해당 촉각을 해당 공간에 생성하여 이용자가 객체의 촉각을 직접 느끼게 할 수 있는 기술 개발이 추진되고 있다[5][6][7]. 디지털 미디어 기술은 〈그림 1〉과 같이 향후 5G으로부터 6G 통신기술로 발전됨에 따라 대용량 홀로그램 데이터를 초고속으로 전송할 수 있고, 촉각 데이터를 초저지연으로 전송할 수 있게 됨에 따라 홀로그램과 동기화된 촉각 인터랙션이 가능해짐에 따라 이용자에게 실재감 및 몰입감이 향상되는 공간 오감미디어 서비스가 제공될 것으로 전망된다. 공간 오감미디어는 원격 의료, 원격 체험 및 교육, 자동차 인터랙션 등의 응용으로 활용될 것으로 기대된다.

공간 오감미디어에서 시각과 촉각이 결합된 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 핵심 요소 기술은 홀로그램 생성 및 재현 기술, 공간 촉각 기술로 구성된다. 홀로그램 재현은 전자기파처럼 자유공간상에서 전파되는 광파(light wavefront)의 세기(amplitude) 및 방향(위상, phase)을 제어함으로써 자유공간(free space)상에 점광원(point light source)들을 실제 물체의 표면 위치 정보를 참고하여 회절(diffraction) 수식에 따라 계산된 가상의 위치에 생성한다. 사용자는 이렇게 생성된 연속된 점광원들

을 육안으로 보면, 마치 자유공간상에 떠 있는 실제 물체의 표면을 보는 것처럼 느낀다. 이를 구현하기 위한 광파의 용이한 제어를 위하여 시공간 가간섭성(temporal and spatial coherence)이 우수한 레이저(LASER)를 광원(light source)으로 사용하고, 레이저로부터 출력된 광파의 크기 및 위상을 제어하기 위해 공간광변조기(Spatial Light Modulator, SLM)라는 장치를 이용한다. 홀로그램을 재현하는 홀로그래픽 디스플레이는 레이저 광원과 공간광변조기를 핵심 구성 요소로 하여 개발된다. 공간광변조기는 광원으로부터 출사된 광파의 파장(wavelength) 크기 근처(수 μm ~ 수백 nm)의 작은 개구(aperture) 단위로 빛의 세기 및 위상 제어가 가능한 어떤 회절 소자(diffraction element)로도 개발이 가능하다. 공간광변조기 소자로써 마이크로미러의 고속 on-off를 통하여 입력 광필드의 세기 또는 전파속도(위상)를 제어하는 DMD(Digital Micromirror Display)[8][9], 전압 세기 조정을 통하여 픽셀 단위로 전기 극성이 있는 액정의 위치를 변화시켜 입력 광파의 세기 또는 전파속도(굴절율, refractive index)를 제어함으로써 홀로그램 재현에 요구되는 광파를 출력하는 LCD(Liquid Crystal Display)[4][10] 등이 주로 이용된다.

자유공간상에 3차원 물체가 홀로그램으로 재현되도록 공간광변조기가 입력 광파의 위상 또는 크기를 제어하는 데 필요한 입력 데이터 생성이 요구된다. 홀로그램 재현에 요구되는 공간광변조기의 홀로그램 입력 데이터는 일반적으로 3차원 물체의 공간 위치 및 컬러 정보를 입력 받아 각스펙트럼 방법(angular spectrum method)[10], 프레넬 회절(Fresnel diffraction)[10], 점광원 및 메쉬 기반 회절(diffraction based on point light source/mesh)[10] 등과 같은 회절 수식을 통하여 컴퓨터 계산을 통해 수치적으로 생성한다. 그러나 제조 공정상 오차가 존재하는 공간광변조기를 통하여 재현된 홀로그램은 파면 수차(wave aberration)를 항상 내포하고 있고, 레이저 광원의 가간섭성 때문에 스페클 노이즈(speckle noise)가 발생할 수 밖에 없어 사용자가 고화질의 홀로그램을 관찰할 수 없는 문제점이 있다. 최근에는 이를 해결하기 위하여 실제 자유공간상에 3차원 물체가 홀로그램으로 재현된 영상을 일반 카메라로 촬영하여 원영상(original image)과 차이가 최소화되도록 경사 하강법(gradient descent)과 같은 최적화 방식[12]으로 홀로그램 데이터를 생성하는 연구가 이루어지고 있다. 이런 최적화 방식은 반복적인 연산이 필요하므로 고속으로 홀로그램을 생성할 수 없어서 딥러닝 네트워크(deep learning network)를 활용한다. 해당 딥러닝 네트워크는 상기 카메라 촬영 영상 기반의 최적화 방식을 통하여 생성된 훈련용 데이터 세트(training data set)를 통하여 훈련된다.

사용자는 홀로그래픽 디스플레이를 통하여 자유공간상에 홀로그램으로 재현된 3차원 객체를 볼 수 있을 뿐만 아니라, 햅틱스(촉각) 장치를 통하여 해당 객체에 대한 촉각도 함께 제공받을 수 있다. 햅틱스 장치는 장갑 또는 패드 등을 통하여 촉각을 사용자 손에 전달하는 착용 방식과 자유공간에 촉각을 생성하면 사용자가 해당 위치에 손을 갖다 대서 촉각을 느낄 수 있는 비착용 방식 등이 있다. 비착용 방식으로써 초음파를 이용하여 자유공간상에 촉각을 생성하는 방식에 대한 연구 개발이 현재 활발히 이루어지고 있다[5][6][7]. 초음파 촉각 장치는 주기적인 초음파 신호를 자유공간상으로 전파시키는 초음파 지향성 스피커들을 배열하여 구현된다. 각각의 스피커에서 출력되는 주기적인 초음파 신호의 위상 지연을 제어함으로써 일정한 방향으로 초음파 촉각이 전파되게 하거나, 각각의 스피커로부터 전파된 초음파 신호들이 한점에 집중되게 하거나, 점/선/면 등과 같은 임의의 기학적인 형태로 자유공간상에 초음파 촉각을 생성할 수 있다[13].

한국전자통신연구원은 〈그림 2〉와 같이 홀로그램 기반 공간 촉각 인터랙션 서비스를 제공할 수 있는 기술 개발을 2022년부터 "오감·감성 체험 초실감 상호작용 기술 연구['22-'27]" 과제를 통하여 수행하고 있다. 본 논문에서는 공간 오감미디어의 핵심 요소인 홀로그램 기술과 공간 촉각 기술이 통합된 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템의

<그림 2> 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 기술 개념도

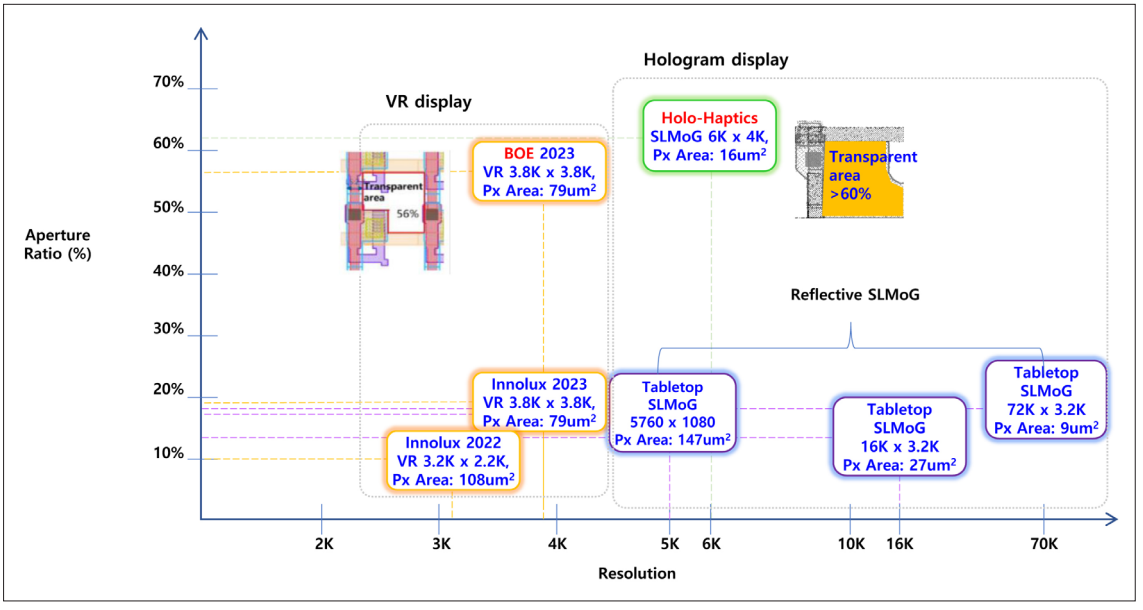
핵심 요소 기술을 소개한다.

II. 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템 개요

홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템은 사용자가 눈에 어떤 착용 장치 없이 완전 입체영상을 볼 수 있도록 자유공간상에 3차원 물체 정보를 실감나게 재현하는 홀로그램 재현 기술, 재현되는 홀로그램 화질을 급격하게 향상시킬 수 있도록 딥러닝 네트워크를 통하여 홀로그램 입력 데이터를 생성하는 기술, 손에 착용 장치 없이 촉각을 느낄 수 있도록 자유공간상에 촉각을 초음파로 생성하는 공간 촉각 생성 기술로 구성된다.

1. 홀로그램 재현 기술

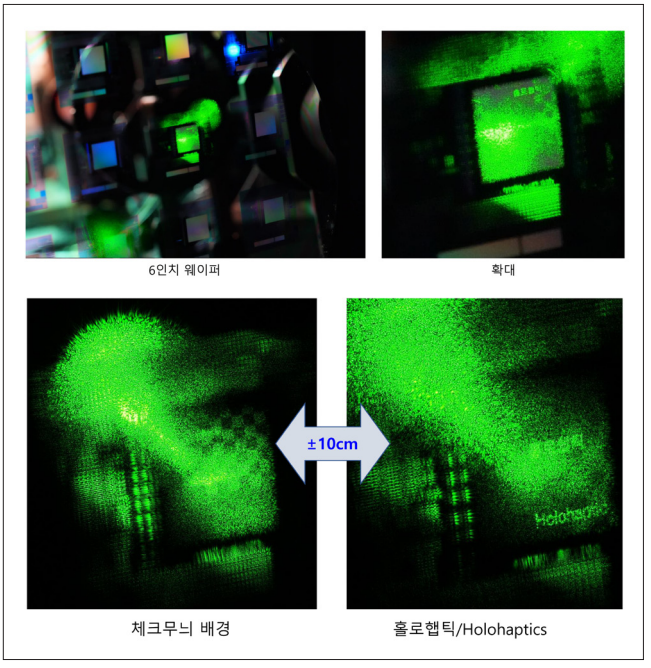
홀로그램을 재현하는 공간광변조기의 세계 최고 기술은 3.76 μm x 11 μm (42.41 μm^2)의 픽셀로 구현한 삼성디스플레이의 연구 결과물[14]이 있으며, 본 과제에서는 이를 뛰어넘는 4 μm x 4 μm (16 μm^2) 개구율(aperture ratio) 60% 이상의 초소형 투과모드 픽셀을 개발하였다. 최근 VR용으로 개발 중인 초고해상도 TFT-LCD(Thin-Film-Transistor Liquid Crystal Display) 디스플레이 산업에서 더욱 높은 해상도와 개구율 확보가 중요한 이슈로 부각되고 있는 가운데, 중국 BOE에서는 3.8K x 3.8K 해상도에 6.8 μm x 12.6 μm (79.38 μm^2) 픽셀 사이즈와 56% 개구율의 TFT-LCD 패널을 SID 2023에서 발표한 바 있다[15]. 한편 LCoS(Liquid Crystal on Silicon) 타입의 SLM 중에는 HOLOEYE에서 상업용으로 판매 중인 세계 최대 해상도(4,160 x 2,464)의 GAEA-2[16]가 있으며 실리콘 기판에 회로와 픽셀을 집적하므로 광원 반사형으로 홀로그램을 재현 가능하기 때문에 SLM 패널 전면에 광원과 광학계들이 위치하게 되어 공간상에 홀로그램과 공간 촉각 인터랙션을 동시에 구현하기에 공간상 제약이 있다. 한국전자통신연구원은 투과형 SLM으로는 세계 최대급인 6K x 4K 해상도와 4 μm 픽셀 피치에서 60% 이상의 개구율을 달성하기 위하여 투과 영역의 비율을 최대로 만드는 백플레인



<그림 3> 초고해상도 디스플레이 기술 현황 (digital holography & VR)

소자 설계 기술을 적용하였다.

ETRI는 초고해상도 투과형 SLMoG(SLM on Glass) 픽셀인 새로운 구조의 초단채널 박막 트랜지스터를 유리 기판(glass wafer) 위에 구현하여 픽셀 동작 스위치로 활용하고 주변 회로를 실장하여 고품질의 홀로그래픽 디스플레이를 개발 중이다. 여기에 적용된 초단채널 산화물 박



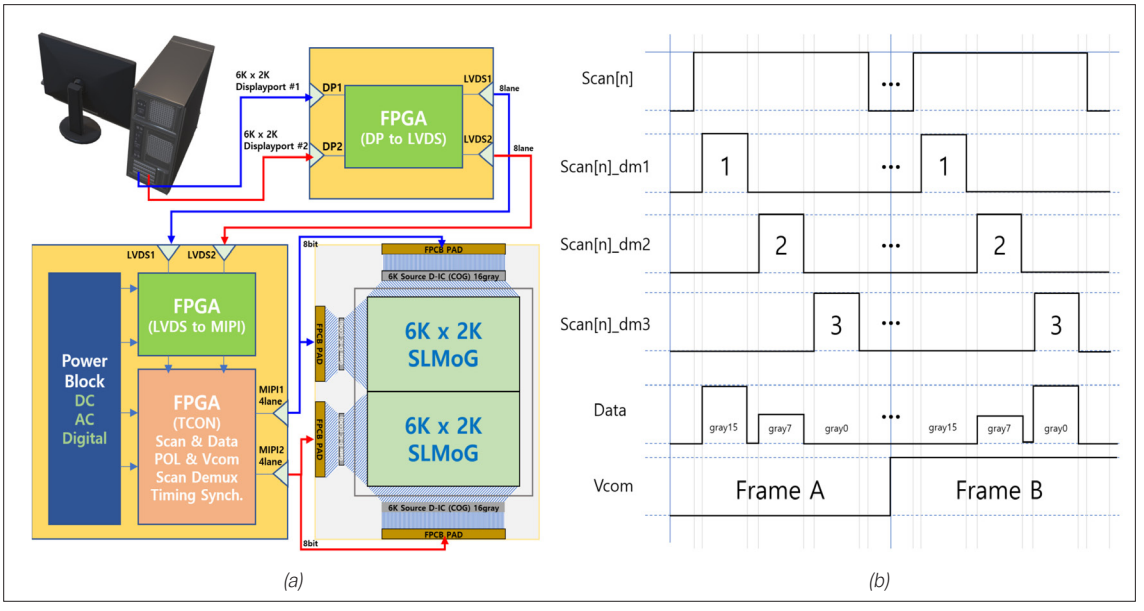
<그림 4> PoC TEG 제작 후 홀로그램 관측 평가 결과

막 트랜지스터 기술은 낮은 오프(off) 전류와 높은 전기적 균일도 특성이 최대 강점이고 소자를 작게 만들어도 높은 전류 구동 능력을 확보할 수 있기 때문에 고해상도 디스플레이용 백플레인(backplane)으로서 활발히 연구되고 있다.

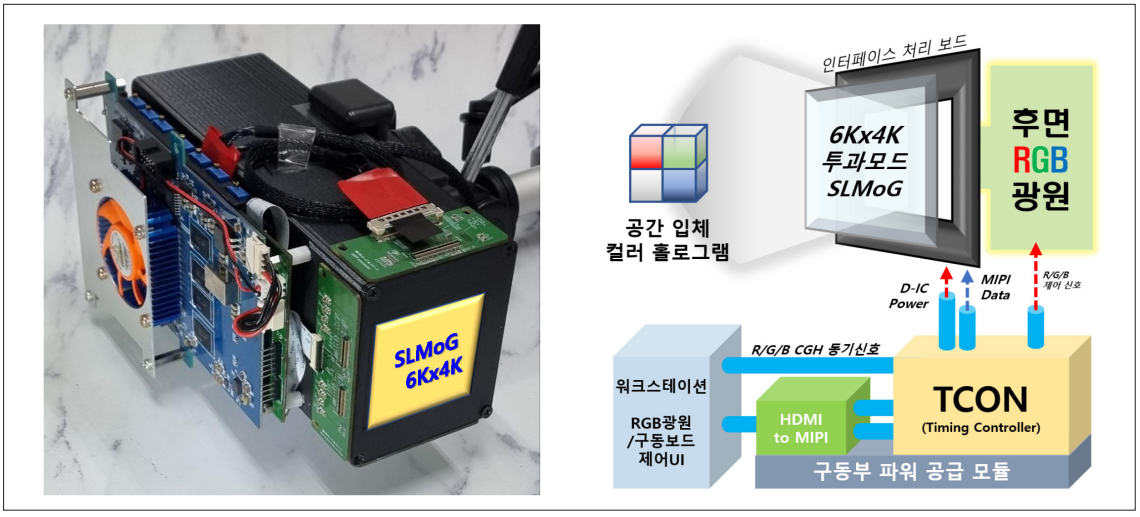
투과형 SLMoG의 기본적인 동작을 확인하기 위하여 PoC(Proof of Concept) TEG(Test Element Group)의 일부에 홀로그램 패턴을 생성하여 재현된 홀로그램 관측을 하였는데, 패널에서 15cm 떨어진 영역에 체크무늬를 관측하였고, 패널에서 25cm 떨어진 영역에서는 한글로 "홀로햅틱"과 영어로 "Holohaptics"이 정상적으로 재현된 것을 확인하였다.

6K x 4K 초고해상도 SLMoG용 대용량 홀로그램 데이터는 그래픽카드의 GPU(Graphics Processing Unit)를 활용하여 무압축 형태로 DisplayPort 인터페이스 2개를 사용하여 실시간으로 패널부에 전달한다. SLMoG 구동을 위한 디스플레이 인터페이스 처리는 PC로부터 입력된 DisplayPort 신호를 LVDS(Low-Voltage Differential Signaling) 신호로 변환하는 인터페이스 변환 보드를 통하여 이뤄지는데, 확장성을 고려해서 최대 해상도 규격을 8K급으로 개발하였다. SLMoG 제어 보드는 SLMoG 패널의 DDI(Display Driver IC) 구동을 위해 PC로부터 입력된 LVDS 신호를 MIPI(Mobile Industry Processor Interface) 신호로 변환하는 기능을 수행하고, 스캔-데이터 신호라인을 정밀하게 제어하여 패널을 구성하는 각각의 픽셀에 홀로그램 데이터가 정상적으로 입력되게 하는 T-CON(Timing Controller) 기능을 수행한다.

〈그림 5〉의 SLMoG 시스템은 6K x 4K 패널을 6K x 2K 두 개 영역으로 나눠서 구동한다. 패널 스캔라인의 부하 저항/커패시턴스가 이상적으로 구동되는 경우에 한해서 패널의 동작 속도가 최대 80Hz까지 가능할 것으로 보인다. DisplayPort 1.4는 HBR3(High Bit Rate 3) 규격으로 데이터를 전송하여 120Hz의 구동 주파수까지 데이터를 전달한다. DisplayPort to LVDS 인터페이스 변환 시에는 해당 신호를 6.4 Gbps의 대역폭으로 변환하며, LVDS to MIPI 인터페이스 처리 보드는 해당 신호를 4 Gbps 대역폭으로 DDI(Display Driver IC)에 전달한다. 결과적으로 SLMoG 패널의 수평 및 수직 동기 구



<그림 5> SLMoG 시스템 (a)기능 블록 구성 및 (b)패널 구동 제어 타이밍도 예시



<그림 6> 6K x 4K 급 SLMoG 시스템 프로토타입과 최종 결과물 개념도

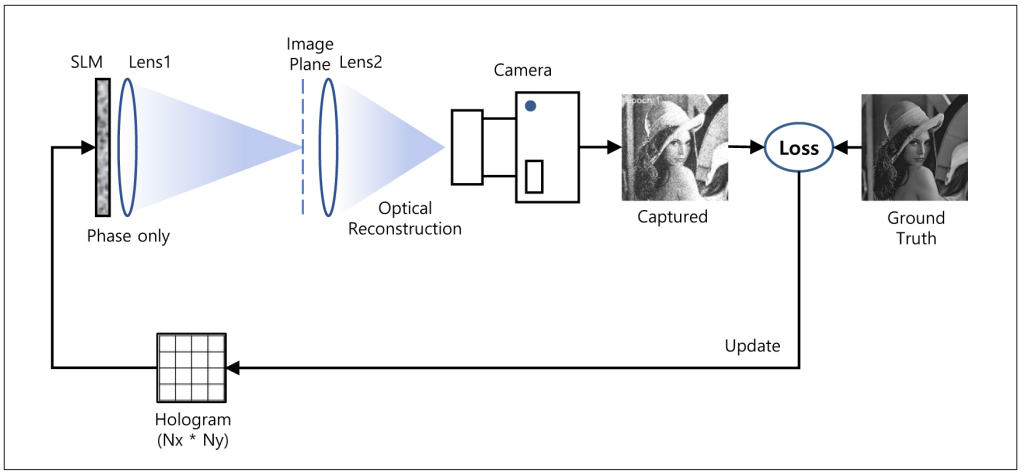
간 앞뒤의 블랙 구간인 포치(porch) 구간을 4% 마진으로 적용하면 80Hz의 프레임율을 달성할 수 있을 것으로 보인다.

2. 홀로그램 생성 기술

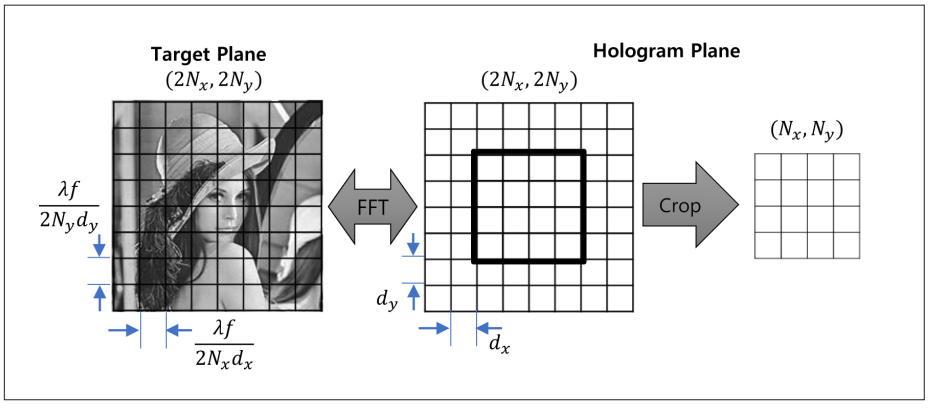
근안 홀로그래픽 디스플레이(Near Eye Holographic Display)에 적용한 기존 홀로그램 재현 영상 카메라 획득 피드백 기반의 CITL(Camera In The Loop) 알고리즘[12]을 일반적인 홀로그래픽 디스플레이에 그대로 적용할 경우에 아이박스(eye-box: 눈동자가 위치하면 홀로그램 영상이 보이는 영역) 제한, 재현된 홀로그램의 다중 깊이 촬영 등의 문제점이 존재한다. 한국전자통신연구원은 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템의 고품질 홀로그램 생성을 위하여 상기 문제점을 효과적으로 극복하기 위한 기술 개발을 수행하였다. 고품질 홀로그램 생성 딥러닝 모델의 학습을 위하여 입력 데이터와 그에 대응하는 정답(ground truth) 데이터로 구성된 대용량 데이터셋이 필요하다. 딥러닝 모델의 학습을 위해 임의의 입력 데이터에 대해 상관도가 높은 정답 데이터를 생성하여 데이터셋을 구축하는 것이 요구된다. 고품질 홀로그램을 생성할 수 있어야 하므로 데이터셋은 실제 홀로그래픽 디스플레이를 구성하는 SLMoG와 광학계에서의 오차가 반영되어야 한다. 이를 위하여 실제 홀로그래픽 디스플레이를 위한 고품질 홀로그램 최적화 알고리즘 구현 및 대용량 데이터셋 생성이 요구된다. 카메라 피드백 기반 위상 홀로그램 최적화를 통해 고품질 홀로그램을 생성할 수 있지만, 최적화 알고리즘에 의해 많은 시간이 소요되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 고품질 홀로그램을 추론하는 딥러닝 네트워크가 필요하다.

홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템에 광 경로 발생 오차 최소화를 위한 CITL 알고리즘[12]을 적용하면 〈그림 7〉과 같다. 홀로그램으로부터 광학 복원된 영상(Captured)과 정답 영상(Ground Truth) 사이의 차이를 이용해 경사 하강법으로 홀로그램을 업데이트한다. 하지만 기존의 CITL 알고리즘을 본 시스템에 그대로 적용하면 홀로그램 재현 품질 향상은 있으나, 여전히 스페클 노이즈(speckle noise)가 남아 있는 문제가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 광학 복원을 위한 홀로그램을 생성할 때 〈그림 8〉과 같이 입력 해상도를 2배 보간하여 대역폭을 제한하는 방법[18]을 CITL 알고리즘에 적용하는 방법을 제안한다. 보간된 입력 영상으로부터



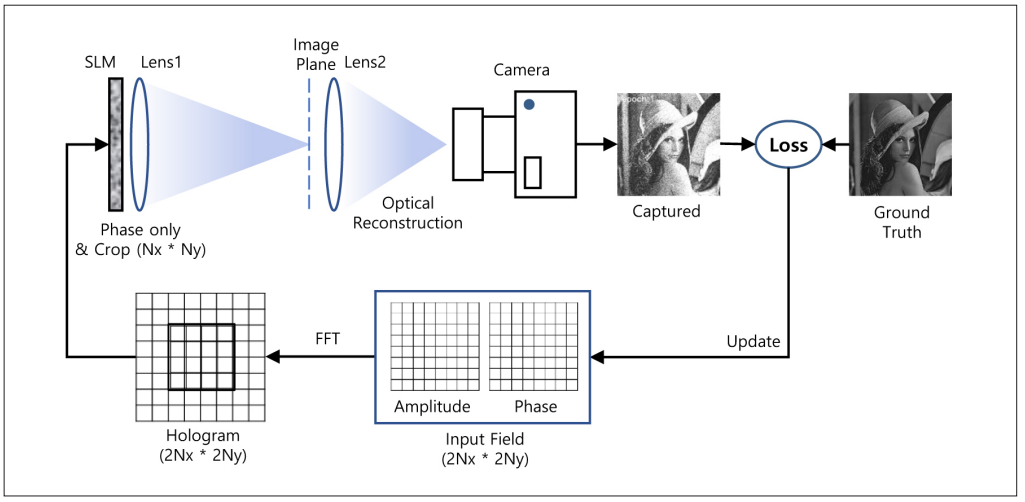
<그림 7> 기존 CITL 알고리즘을 적용한 홀로그램 품질 최적화 개념도



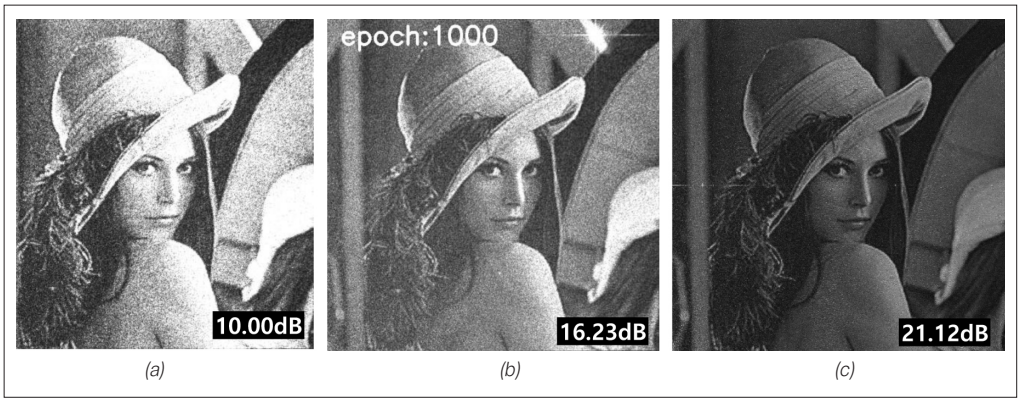
<그림 8> 대역폭 제한을 통한 최적화된 홀로그램 생성 방법

FFT(Fast Fourier Transform) 연산을 통해 SLM에 입력되는 푸리에 홀로그램(Hologram Plane)을 생성한다. 이렇게 생성된 홀로그램은 SLM의 해상도(Nx, Ny)보다 넓은 영역이므로, 중심을 기준으로 내부 영역을 잘라내서(crop) SLM 해상도와 일치하는 입력 홀로그램을 추출한다. CITL 알고리즘에 대역폭 제한을 적용하면 스페클 노이즈가 감소되어 홀로그램 재현 화질이 크게 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

CITL 알고리즘으로 구축한 데이터셋을 고품질 홀로그램 고속 추론 딥러닝 모델에 활용하기 위해 데이터셋 간의 상관도를 개선할 필요가 있다. 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템의 홀로그램은 CITL 알고리즘의 Ground Truth와 상관도가 전혀 없다. CITL 알고리즘으로 구축한 데이터셋 간의 상관도를 높이기 위해 홀로그램을 업데이트하지 않고, 〈그림 9〉와 같이 2배로 보간된 입력 영상(Input Field)을 업데이트하는 방법을 제안한다. 제안된 방법으로 생성된 Input Field가 주어진다면, 그 이후의 연산인 FFT, Phase 추출 및 Crop은 수치적 고속 처리가 가능하다. 이를 통해 상관도가 높은 Ground Truth와 Input Field로 구성된 데이터셋을 구축할 수 있으며, 이는 고품



<그림 9> 제안된 CITL 알고리즘을 적용한 홀로그램 품질 최적화 개념도



<그림 10> 홀로그램 생성 방법에 따른 광학 복원 결과와 PSNR (a) 단순 회절 수식 계산을 통하여 생성된 홀로그램 광학 복원 결과(PSNR = 10.00dB) (b) 기존 CITL 알고리즘을 통하여 최적화된 홀로그램의 광학 복원 결과(PSNR = 16.23dB) (c) 제안된 CITL 알고리즘을 통하여 최적화된 홀로그램의 광학 복원 결과 (PSNR = 21.12dB)

질 홀로그램 고속 추론 딥러닝 모델 학습에 이상적인 데이터셋으로 활용될 수 있다.

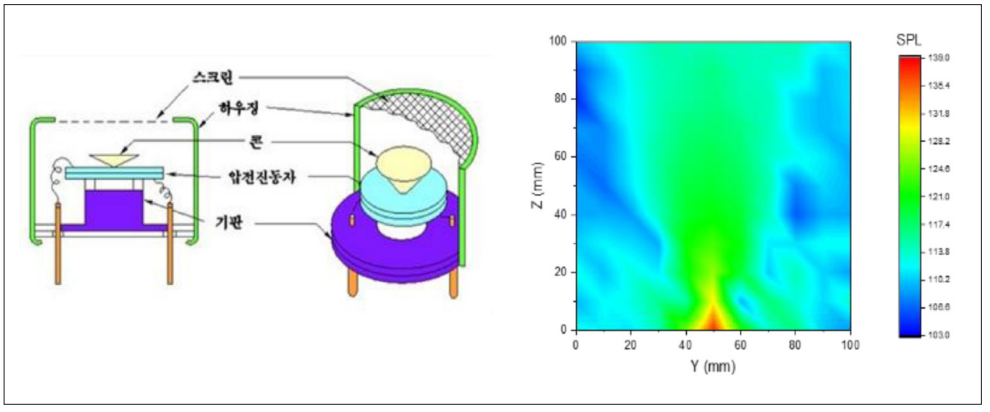
〈그림 10〉은 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템에서 홀로그램 생성 방법에 따른 광학 복원 결과와 PSNR을 보여준다. 단순 회절 수식 계산을 통해 생성된 홀로그램 생성은 광학 재현 경로에서 발생하는 오차가 수치 계산에 반영되지 않아 스페클 노이즈 등의 화질 열화가 발생한다. 기존 CITL 알고리즘 기반 홀로그램 최적화 방법은 단순 회절 수식 계산 방법 대비 화질 향상이 있으나, 스페클 노이즈가 관측되며 DC 노이즈가 새롭게 발생한다. 제안된 CITL 알고리즘 기반 홀로그램 최적화 방법은 기존 방법 대비 스페클 및 DC 노이즈를 크게 줄일 수 있어 높은 품질의 광학 복원 결과를 확인할 수 있다.

3. 공간 촉각 생성 기술

최근 햅틱 분야에서 공각 촉각이라는 이름으로 직접적인 접촉 없이 공간상에서 피부에 촉감 피드백을 줄 수 있

는 기술이 활발하게 연구되고 있다. 해당 기술은 초음파 소자 배열을 통해 공기 중에 음파를 발생시키고, 각 소자에서 발생한 음파의 중첩을 활용하여 특정 지점에 고출력의 음파 영역을 형성하는 방식을 활용한다. 이렇게 공기 중 특정 위치에 초음파 중첩 지점이 형성되게 되면, 그 부분에서 피부에 특정 감각을 느껴지게 할 수 있다. 이와 같은 햅틱 피드백 방식은 홀로그램 및 VR/AR과 연동되어 몰입감 있는 가상 환경을 구현할 수 있으며, 향후 원격 조작, 의료 및 교육 분야 등 다양한 분야에서 활용될 수 있는 획기적인 기술이다. 그러나, 현재 공간 촉각 기술에 활용되고 있는 압전 세라믹 기반의 초음파 소자는 본래 차량용 거리 센서 용도로 개발되었으며, 해외 기업이 높은 시장 점유율[17]로 기술을 선도하고 있어 국내 기술로 개발된 초음파 소자가 부족한 상황이다. 또한, 기존 거리 센서용 초음파 소자 기술은 공간 촉각 생성에 특화된 출력 특성 및 형태가 고려되지 않아 소형화의 어려움, 출력 부족, 사이드 로브 발생 등 자연스럽고 사실적인 공간 촉각 패턴 구현에 제약이 있다. 한국전자통신연구원에서는 이런 제약을 해결하기 위해 공간 촉각 생성을 위한 관련 기술 개발을 수행하고 있으며, 공간 촉각 생성을 위한 초음파 소자 개발을 위해 소자의 구성 요소인 세라믹 소재 제작에서 패키징까지 전 공정을 자체 기술로 개발하고 있다. 기존 초음파 소자보다 경박단소하며 향상된 출력 성능을 갖는 초음파 소자와 다수의 소자 어레이로 구성된 공간 촉각 디바이스, 그리고 공간상에 복합 촉각을 생성할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것을 목표로 한다.

홀로그램 공간 촉각 인터랙션 구현을 위한 핵심 기술은 크게 고출력 초음파 소자 기술과 공간 촉각 생성 알고리즘 기술로 나눌 수 있다. 〈그림 11〉의 고출력 초음파 소자는 평평한 원형 세라믹에 금속기판(metal plate)과 혼(horn) 구조가 부착되어 개발되고 있으며, 특히 높은 압전성(piezoelectricity)과 큐리온도(Curie temperature), 품질계수를 갖는 압전 세라믹 소재에 저온 소결이 가능한 전극재를 적용하여 공간상에 높은 음압(Sound Pressure Level, SPL)을 생성할 수 있는 소자로 개발한다. 또한, 세라믹 및 금속판의 지름과 두께, 혼의 형상과 크기 등 트랜스듀서(transducer) 디자인 변수에 대한 다중 물리 유한요소 해석(Finite Element Analysis, FEA) 시뮬레이션을 기반으로 최대 출력 음압과 넓은 지향성 특성을 확보할 수 있도록 소자를 고도화하고 있다. 혼의 구조는 중심부의 세라믹 옆으로 원형 날개를 가지고 있는 형태로 압전 세라믹의 진폭을 증폭시키는 역할을 하기 때문에, 음향 임피던스 정합을 통해 공기를 효과적으로 밀어내어 높은 음압을 만들 수 있는 구조로 설계된다. 압전 세라믹의 두께와 형상은 트랜스듀서의 공진주파수를 고려하여 최적화된 구

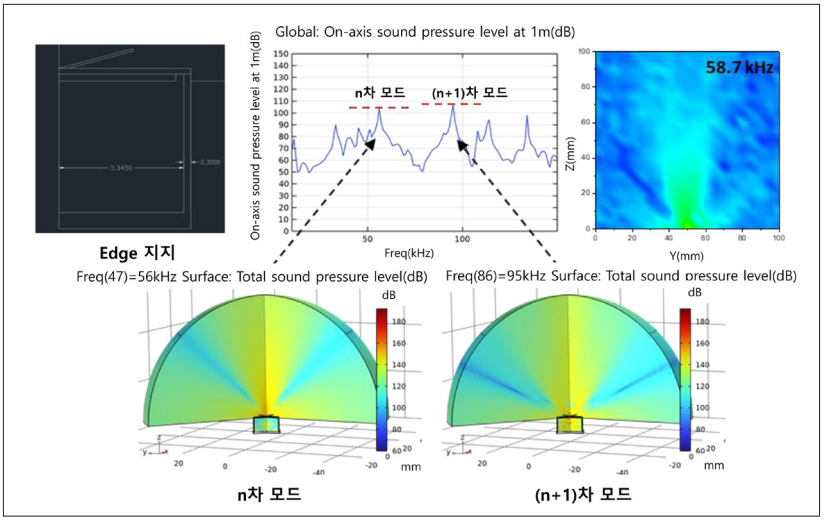


<그림 11> 플랫 타입 초음파 소자의 기본 구조와 출력 음압 분포 특성

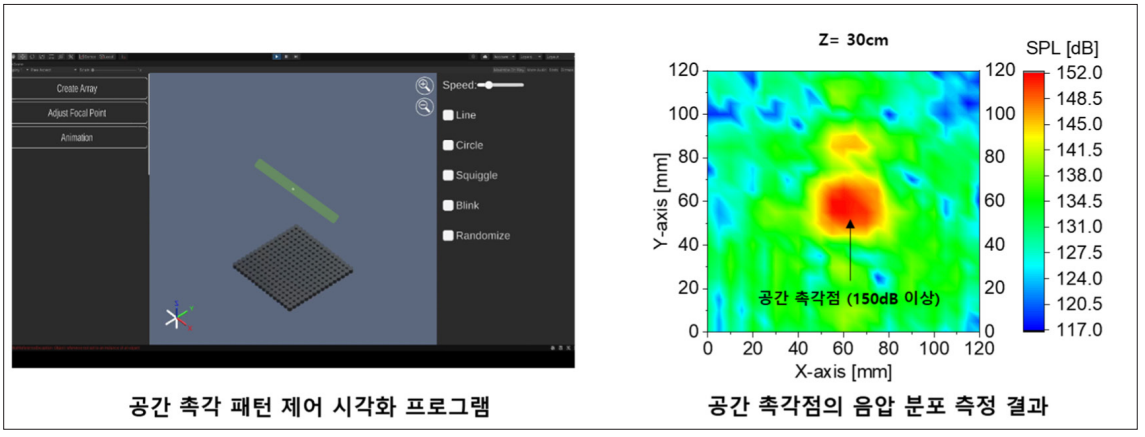
조로 설계되고, 구조체가 포함된 압전 소자의 기계적 진동 모드를 고려한 지지 방식과 전기적 연결 편의성, 향후 대량생산에 있어서의 성능 재현성을 고려한 초음파 소자 패키징 조립 공정 등도 함께 개발된다.

초음파 트랜스듀서의 기계적 진동을 극대화하기 위해서는, 진동체인 압전 세라믹의 패키징 구조에 따른 출력 특성이 중요하다. 따라서, FEA 시뮬레이션을 통해 압전 세라믹 소자 조립 방식에 따른 공진 주파수와 출력 음압 특성을 비교 분석하는 것이 필요하다. 〈그림 12〉에 나타난 바와 같이, 압전 트랜스듀서는 다수의 공진점을 보이게 되고, 이 중 가장 높은 출력 음압 특성과 높은 Q-factor를 갖는 공진주파수를 선택하여 구동하게 된다. 세라믹의 부착 및 지지 방식 등 다양한 파라미터 최적화를 통해 압전 초음파 트랜스듀서의 고출력 특성뿐만 아니라 소형화를 동시에 달성할 수 있다.

비접촉 공간 촉각 인터랙션을 구현하기 위해서는, 소재 및 구조 시뮬레이션을 기반으로 최적화된 초음파 트랜스듀서 소자를 어레이로 배치하고 각 초음파 픽셀 소자의



<그림 12> 플랫 타입 초음파 소자 패키징에 따른 공간 음압 시뮬레이션 결과



<그림 13> 공간 촉각 패턴 제어 시각화 프로그램과 공간 촉각점의 음압 분포 측정 결과

위상을 제어하는 알고리즘을 적용하여야 한다. ETRI에서 개발된 압전 초음파 어레이 디바이스는 13x13 배열로 개별 초음파 소자를 탈착할 수 있게 제작되었으며, FPGA 보드와 연결하여 어레이 소자 각각의 위상을 조절할 수 있도록 개발되었다. 공간 촉각 생성 알고리즘 기술은 사람의 피부에서 가장 민감하게 느낄 수 있는 주파수 대역의 진동으로 촉각점을 제어하도록 개발되었다. 이러한 알고리즘 최적화를 통해 공간상에 생성된 촉각점에 대한 인지 강도는 향상시키면서도 소음 발생을 줄일 수 있는 디바이스 구현이 가능하다. 더 나아가 공간 촉각 패턴 제어를 위한 3차원 시각화 프로그램을 개발하여 FPGA를 통해 적용되는 비접촉 공간 촉각 알고리즘을 확인하도록 하였으며, 13x13 초음파 어레이를 활용하여 공간 촉각 패턴을 형성했을 때 3차원 공간상의 음압 분포를 측정할 수 있는 평가 환경도 구축하였다. 〈그림 13〉은 ETRI에서 개발된 초음파 어레이 디바이스를 활용하여 공간상의 하나의 점으로 공간 촉각점을 생성하였을 때 출력 음압 분포 측정 결과를 보이고 있다. 공간 촉각점은 약 150dB 이상의 높은 출력 음압을 보였으며, 약 20mm 지름의 점 형태로 생성되었음을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서 소개한 홀로그램 공간 촉각 인터랙션 시스템은 사용자에게 어떤 착용 장치 없이 인간의 오감에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있는 공간 시각 및 공간 촉각을 동시에 재현할 수 있는 오감미디어를 제공할 수 있다. 공간 시각을 구현하기 위하여 이용되는 홀로그램 공간광변조 기술은 3차원 물체가 실제로 있는 것처럼 보이도록 화질 및 해상도 향상이 필요하고, 공간 촉각을 생성하기 위한 초음파 제어 기술은 재현된 객체와 시공간적으로 정확하게 동기화될 수 있도록 해상도 높은 촉각 생성 기술이 요구된다. 그러나 현재 이런 홀로그램 촉각 인터랙션 핵심 요소 기술은 아직 초기 개발 단계에 있으므로 지속적인 연구 개발이 필요하다. 이를 통해 현실 세계에서만 느낄 수 있는 오감을 가상 세계에서도 생생하게 재현할 수 있게 함에 따라 사용자가 현실과 가상을 구별하지 못하는 궁극적인 메타버스 서비스를 제공하는 데 크게 일조할 것으로 기대된다.

※ This research was supported by Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) grant funded by the Korean government (24ZC1200, Research on hyper-realistic interaction technology for five senses and emotional experience)

참 고 문 헌

[1] Gori, Monica, et al. “Cross-sensory facilitation reveals neural interactions between visual and tactile motion in humans.” Frontiers in psychology 2 (2011): 55.

[2] Park, Minsik, et al. “Digital holographic display system with large screen based on viewing window movement for 3D video service.” ETRI journal 36.2 (2014): 232-241.

[3] Blanche, Pierre-Alexandre. “Holography, and the future of 3D display.” Light: Advanced Manufacturing 2, no. 4 (2021): 446-459.

[4] Choi, Ji Hun, Jae-Eun Pi, Jong-Heon Yang, Yong-Hae Kim, Gi HeonKim, Hee-Ok Kim, Won-Jae Lee et al. “World-first 1um pixelated 72K large area active matrix spatial light modulator on glass for digital holographic display.” In 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp. 9-3. IEEE, 2021.

[5] Suzuki, Shun, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. “AUTD3: Scalable airborne ultrasound tactile display.” IEEE Transactions on Haptics 14, no. 4 (2021): 740-749.

[6] Onishi, Ryoya, Takaaki Kamigaki, Shun Suzuki, Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. “Two-dimensional measurement of airborne ultrasound field using thermal images.” Physical Review Applied 18, no. 4 (2022): 044047.

[7] Yang, Tae-Heon, Jin Ryong Kim, Hanbit Jin, Hyunjae Gil, Jeong-Hoi Koo, and Hye Jin Kim. “Recent advances and opportunities of active materials for haptic technologies in virtual and augmented reality.” Advanced Functional Materials 31, no. 39 (2021): 2008831.

[8] Lim, Yongjun, Keehoon Hong, Hwi Kim, Hyun-Eui Kim, Eun-Young Chang, Soohyun Lee, Taeone Kim et al. “360-degree tabletop electronic holographic display.” Optics express 24, no. 22 (2016): 24999-25009.

[9] Lee, Byounghyo, Dongheon Yoo, Jinsoo Jeong, Seungjae Lee, Dukho Lee, and Byoungho Lee. “Wide-angle speckleless DMD holographic display using structured illumination with temporal multiplexing.” Optics letters 45, no. 8 (2020): 2148-2151.

[10] Liu, Shuxin, Yan Li, and Yikai Su. “Recent Progress in True 3D Display Technologies Based on Liquid Crystal Devices.” Crystals 13, no. 12 (2023): 1639.

[11] Shimobaba, Tomoyoshi, Jiantong Weng, Takahiro Sakurai, Naohisa Okada, Takashi Nishitsuji, Naoki Takada, Atsushi Shiraki, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. “Computational wave optics library for C++: CWO++ library.” Computer Physics Communications 183, no. 5 (2012): 1124-1138.

[12] Peng, Yifan, Suyeon Choi, Nitish Padmanaban, and Gordon Wetzstein. “Neural holography with camera-in-the-loop training.” ACM Transactions on Graphics (TOG) 39, no. 6 (2020): 1-14.

[13] https://www.ultraleap.com/haptics/

[14] Lee, Hyun Sup, Sanghee Jang, Hyungil Jeon, Byung-Seok Choi, Seong Heon Cho, Won Tae Kim, Keunkyu Song et al. “46-1: Invited Paper: Large-area Ultra-high Density 5.36” 10Kx6K 2250 ppi Display.” In SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 49, no. 1, pp. 607-609. 2018.

[15] Zhou, Tianmin, Jinchao Zhang, Lizhong Wang, Zhen Zhang, Binbin Tong, Wenqing Xue, Guoteng Li, Ce Ning, and Guangcai Yuan. “85-2: 2117PPI VR LCD with ultra-high aperture opening ratio.” In SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 54, no. 1, pp. 1196-1199. 2023.

[16] https://holoeye.com/products/spatial-light-modulators/gaea-2-phase-only/

[17] https://www.fortunebusinessinsights.com/piezoelectric-devices-market-108923

저 자 소 개

박 민 식

- 1997년 : 광운대학교 전기공학과 학사
- 1999년 : 광주과학기술원 기전공학과 석사
- 2016년 : 충남대학교 컴퓨터공학 박사
- 1999년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원
- 주관심분야 : 홀로그래피, 기학/파동/나노광학, 영상처리/압축, 기계학습, 양자센싱/컴퓨팅

피 재 은

- 2009년 : 건국대학교 전자공학과 학사
- 2011년 : 건국대학교 전자공학과 석사
- 2011년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원
- 주관심분야 : 반도체 디스플레이 회로/구동 설계

황 치 선

- 1991년 : 서울대학교 물리학과 학사
- 1993년 : KAIST 물리학과 석사
- 1996년 : KAIST 물리학과 박사
- 2000년 : 현대전자 메모리 연구소
- 2000년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 초실감메타버스연구소
- 주관심분야 : 산화물 TFT 및 FPD용 백플레인, 홀로그램용 SLM, 홀로그램용 메타소재

김 주 연

- 2000년 : 한남대학교 고분자학 학사
- 2002년 : 한남대학교 고분자학 석사
- 2006년 : 한남대학교 신소재화학공학 박사
- 2007년 ~ 2010년 : 스위스로잔연방공과대학교 post doctor
- 2010년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원
- 주관심분야 : 전자종이, OLED, AR/VR/XR, 페로브스카이트 소재/소자, 유무기 기반 레이징 소자, 디스플레이 소재/소자, CGH 기반 홀로그램 응용

김 용 해

- 1991년 : KAIST 물리학과 학사
- 1993년 : KAIST 물리학과 석사
- 1997년 : KAIST 물리학과 박사
- 1997년~ 2001년 : 하이닉스 반도체
- 2001년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원
- 주관심분야 : 능동 메타, 광시야각 홀로그래피, 수직채널 TFT

저 자 소 개

염 한 주

- 2015년 : 인하대학교 정보통신공학 학사
- 2017년 : 인하대학교 정보통신공학 석사
- 2017년 ~ 2019년 : 삼성디스플레이
- 2019년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원
- 주관심분야 : 홀로그래피, 딥러닝 기반 CGH 생성

김 혜 진

- 1998년 : 전북대학교 물리학과 학사
- 2001년 : 서울대학교 물리학과 석사
- 2013년 : KAIST 신소재공학과 박사
- 2001년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
- 주관심분야 : 유연전자소자, 촉각센서, 생체센서, 햅틱

진 한 빛

- 2014년 : 전기통신대학 전자공학과 학사
- 2016년 : 도쿄대학 전자공학과 석사
- 2019년 : 도쿄대학 전자공학과 박사
- 2019년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 주관심분야 : 웨어러블 일렉트로닉스, 텔레햅틱, 전자피부

주 훈 표

- 2015년 : 경북대학교 기계공학부 학사
- 2017년 : 광주과학기술원 기계공학부 석사
- 2022년 : 광주과학기술원 기계공학부 박사
- 2022년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 주관심분야 : 공간햅틱 기술, 초음파 소자