

디스플레이 화질의 진화 : 디스플레이 중심에서 인간 중심으로

최원희, 김세훈, 이민우(삼성전자 무선사업부 선행 Display Lab)

1. 서론

과학 기술의 발전을 우리가 실감할 수 있는 경우는 많지만, 그 중에서도 항상 우리 주변을 둘러싸고 눈으로 확인할 수 있는 대표적인 예는 디스플레이일 것이다. TV에서 시작한 디스플레이 기술은 오늘날 실물과 같은 3차원 홀로그래픽 디스플레이까지 점차 현실화되고 있다.

기존의 TV는 실내의 고정된 환경에서 제공되는 흑백의 정보를 알아 볼 수 있게 전달하는 것만으로도 그 역할이 충분했다. 그러나 지금의 TV는 누가 더 현실에서 느끼는 것과 유사한 색 혹은 휘도 다이내믹 레인지(Dynamic Range, DR)를 표현하느냐를 경쟁하고 있다.^{[1],[2]} 심지어는 모바일 환경의 스마트폰에서조차 저 소비전력의 효율적 화질^{[3],[4]}을 뛰어넘어, 이제는 좀 더 편안한 화질, 좀 더 생생한 화질 경쟁을 하고 있다는 것을 알 수 있다.^[5]

디스플레이의 기술이 발전함에 따라 눈앞에 실제와 같은 세상을 느끼게 하는 디스플레이들도 등장하게 되었다. 그 선두에 있는 것은 가상현실용 디스플레이(Virtual Reality Head Mounted Display, 이하 VR HMD)이며, 다음으로는 증강현실용 디스플레이(Augmented Reality HMD, 이하 AR HMD)를 꼽을 수 있다. HMD 형태의 디스플레이들이 스마트폰 및 TV 수준의 화질을 달성하기 위해서는 신체에 착용하여 시청한다는 특성에서 기인하는

난제들을 극복해야 한다.

본 화질 기술 특집에서는 TV의 화질과 모바일 환경의 스마트폰 화질의 현주소를 점검하면서, 새로운 형태의 디스플레이인 VR 및 AR·HMD에서의 화질 이슈들이 추구하는 방향을 점검하고 그 원인들과 해결 방향을 모색하고자 한다.

2. 디스플레이 중심의 화질

실내에서 시청하는 TV와 모바일 환경의 스마트폰에 대한 최근 화질 분야의 기술 주제들을 각각 살펴보고 향후 발전 방향을 논의하고자 한다.

2.1. TV의 화질

디스플레이의 발전을 견인해 왔던 TV의 역할을 생각하면, 화질을 논할 때 TV를 가장 먼저 떠올리는 것은 당연하다. 본고에서는 다양한 TV 화질 항목들 중 최근 이슈가 되고 있는 해상도, 컬러, 및 DR에 대해서만 설명하도록 하겠다.

디스플레이 해상도에 대한 경쟁은 4K(3840 × 2160) UHD(Ultra-High Definition)를 정점으로 주춤한 상태이다. 5G 시대가 확산되기 전에는 더 이상의 고해상도 콘텐츠 공급도 어렵겠지만, 그보다 집안에서 시청하는 TV의 특성상 그 크기가 더 이상 커지는 것에는 한계에

기술특집

표 1. 시야각 및 시청거리에 따른 구분가능 화소수(시력 1.0기준)

시야각[°]	화면크기[inch]	시청거리[cm]	구분가능 최대 해상도 [pixels/inch]	가로 화소수
60	65	125	70	3970
	100	192	46	
90	65	72	121	6875
	100	111	79	

가까이 와있다. 그보다 우선하여, 일반 가정에서 구매하는 65인치 이하에서는 인간시각의 공간 분해능이 Full HD(1920×1080)의 4배 해상도를 갖는 4K 해상도를 구분할 수 있었으나, 4K 해상도에서 다시 4배 증가된 8K(7680×4320) 해상도와의 화질적 차이를 구분하지 못하기 때문이다. [표 1]과 같이, 극장의 앞자리 수준의 넓은 시청 각도를 원하는 사람에게도 8K 해상도의 디스플레이는 시각이 최대 구분 가능한 해상도를 넘어선 스펙이다.

한편, TV 컬러 표현력에 대해서는 방송 표준을 중심으로 설명하고자 한다. 기존의 ITU-R BT.709 표준을 따르던 콘텐츠들이 UHD TV 방송 서비스 도입과 함께 ITU-R BT.2020의 표준 색공간을 기준으로 생성되고 있다.^[1] 그에 따라 디스플레이 색공간 또한 ITU-R BT.709보다 더 넓은 색역을 지원하도록 진화하고 있다. 즉, ITU-R BT.709는 당시(1993년) CRT 디스플레이가 표현할 수 있는 색역을 기준으로 비직교성(non-orthogonal)의 색신호 포맷을 정의한 방송표준이다. 반면, BT.2020의 색공간은 세상에 표현 가능한 색들의 분포를 가장 많이 포함하고 있는 색역과 직교성 색신호 포맷을 정의하였다.^[1] 그래서 BT.709의 2배가 넘는 BT.2020의 색역을 표현하기 위해(표 2 참고), 광색역 디스플레이는 RGB의 3색 외에 추가 컬러를 사용하는 다색 디스플레이 및 레이저와 퀀텀닷(Quantum Dot)과 같은 좁은 파장대역을 갖는 광원을 백라이트(Backlight Unit)로 사용하는 디스플레이^{[6],[7]} 형태로 발전하고 있다. 그러나 궁극의 디스플레이 컬러 표현력은 인간 시각이 구분 가능한 가시 색역(full visible gamut, CIE xyY)을 표현하거나 세상에 존재하는 피사체의 색이 표현하는 컬러 스펙트럼을 인간 시각에서 반응할 수 있는 범위를 표현하는 것이다. BT.2020이 추구한 색공간이

표 2. 표준별 가시 색역(full visible gamut) 커버리지

표준	가시 색역 커버리지
HDTV(BT.709)	35.9%
Cinema(DCI-P3)	53.6%
UHD TV(BT.2020)	75.8%



그림 1. 실제 DR과 인지 가능 DR 범위비교^[2]

후자를 표방한 것이므로, 컬러에 대한 궁극의 디스플레이는 조만간 현실로 다가올 것이다.

UHD TV가 기존 TV에 비해 화질적으로 진일보하기 위해 채택한 가장 강력한 무기 중 하나는 High Dynamic Range(HDR)이다. HDR은 사실적이면서도 임장감 넘치는 화질을 제공하기 위해 TV의 표현력(DR)을 한 차원 끌어 올린 기술이다.

[그림 1]과 같이 사람이 인지할 수 있는 밝기 범위는 순응 특성을 고려하면 10^{-6} - 10^8 nit이므로, 이를 압축하지 않고 그대로 표현하려면 화소당 96-bit의 표현력이 필요하다. 이에 비해 기존 TV에 적용된 BT.1361 표준은 감마 인코딩을 기반으로 하여 10^{-1} - 10^2 nit의 밝기 범위만 8-bit로 압축하여 표현하고 있다. HDR 기술은 기존 TV 표현력과 사람의 인지 가능한 밝기 범위의 차이를 극복하고 보다 사실적인 영상을 전달하기 위해, 조도에 의한 순응을 고려하지 않은 고정 시청환경을 기준으로 TV 밝기 표현 범위를 10^{-3} - 10^4 nit로 향상시켰다. 이와 더불어 확장된 표현 범위를 효과적으로 압축하여 제한된 bit로 양자화하는 방법까지 개선되었다. Dolby는 사람의 시각 시스템을 기반으로 하여 다양한 디스플레이 DR 실험을 수행하였으며, 이를 바탕으로 Perceptual Quantizer(PQ)라는 인코딩 방식을 개발하여 Society of Motion Picture & Television Engineers(SMPTE)에 표준화하였다.^[8] PQ는 10-bit 데이터가 곧바로 특정

밝기에 매핑되는 방식으로, 미국의 영화사를 중심으로 UHD-Alliance 및 UHD Blu-ray 등에서 사용하고 있다. 한편, BBC(英)와 NHK(日)는 기존의 감마 인코딩 방식에 사람의 시지각 특성을 반영하여 HDR 형태로 발전시킨 Hybrid Log Gamma(HLG) 인코딩 기술을 개발하였고, 이를 International Telecommunication Union (ITU) 및 SMPTE에서 표준화 하였다.^[9] HLG는 PQ와 마찬가지로 10-bit의 표현력을 가지고 있으나 절대 휘도와 직접적으로 매핑시키지 않는 대신, 주변 조명 및 디스플레이 최대 휘도에 따라 상대적 값으로 매핑 되므로 방송국에서 1차 생성된 HDR 영상에 자막 및 각종 정보를 추가하는 것이 상대적으로 용이하다.

HDR을 활용한 휘도 표현력 확장은 디스플레이 밝기 뿐만 아니라 색상 표현력에도 동일하게 적용된다. 앞서 설명한 BT.2020 광색역 표준은 넓어진 색역만큼 기존보다 더 많은 데이터를 할당하여 증가된 표현력이 필요함을 뜻한다. 이렇게 표준화된 TV에서의 HDR은 영상의 화질적 향상 외에도 제작자의 의도(Intent)를 제대로 전달한다는 특징도 가지고 있다. 영화 제작사들 및 배급사들은 영화를 비롯한 Video 콘텐츠가 자신들의 Mastering Monitor를 기준으로 제작자의 의도가 최종 TV까지 그대로 전달되기를 원하고 이 의도가 지켜지는 TV에 대해 HDR 인증을 하는 체계를 구축 중이다. HDR 영상 콘텐츠는 기존과는 달리 메타 데이터가 함께 전송된다. 이 메타 데이터에는 Static 메타와 Dynamic 메타로 나뉘게 되며, Static 메타는 영상을 만들 때 사용한 PQ 등의 인코딩 정보와 색역 및 White 좌표, 디스플레이의 Peak 밝기 정보 등 해당 영상을 재생하기 위한 전반적인 정보가 수록된다. Dynamic 메타는 영상 내 각 장면에 따라 최적의 화질을 제공할 수 있는 Tone Mapping Curve 등의 참조 자료가 포함된다. 예를 들어, 스타워즈의 우주 전투 장면에서 우주는 완전한 검은 색을 띠고 사이사이 작은 별들은 형형색색으로 밝게 빛나는 가운데 태양에서 내뿜는 빛은 눈부시게 밝고 붉게 표현된다. 그리고 각 장면의 밝기와 색감은 영화사에서 지정한 그대로의 느낌을 지니고 있어 극장에서와 같은 사실감을 집안에서도 시청할 수 있다.

이처럼 궁극의 화질에 가까운 HDR 기술 역시 현실과 이상의 차이에서 타협하는 과도기적 과정을 거치고



그림 2. 동일 영상의 휘도 표현력 차이에 의한 화질변화 예 (LDR(좌)와 HDR(우))

있다. 현재 대부분의 TV는 HDR에서 요구하는 최대 밝기인 10,000nit를 충족하지 못한다. 이는 LCD뿐만 아니라 OLED도 마찬가지이다. 현재 콘텐츠 제작자는 실물을 확보할 수 있는 디스플레이를 기준으로 삼아, TV 기준 휘도를 1,000nit로 설정하고 있으며, 색역 역시 BT.2020 색역 대신 [표 2]의 극장 표준인 DCI-P3 색역을 기준으로 메타 데이터를 생성하고 있다. HDR 기술은 디스플레이의 밝기 및 색역 등의 물리적인 제약 외에도 기존 Low Dynamic Range(LDR) 콘텐츠 및 LDR TV와의 호환성 이슈도 존재한다(그림 2). HDR 콘텐츠를 기존 LDR TV에 출력하기 위한 방법 또는 LDR 콘텐츠를 HDR TV에 표현하기 위한 방법들이 활발히 논의 중에 있다.

그럼에도 불구하고, TV의 경우 제한된 환경에서 시청하는 것을 전제로 하고 있어 앞으로 나올 다양한 디스플레이에서 발생하는 화질 이슈들보다는 디스플레이 본연의 문제에 충실한 기술 개발이 필요하다. 향후, 물리적인 한계에 도달하기 전까지 TV는 더욱 밝아지고, 색역은 더욱 넓어지는 방향으로 발전할 것이다.

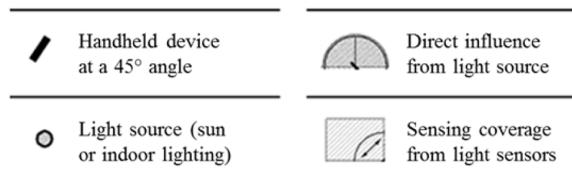
2.2. 모바일 디스플레이의 화질

모바일 환경에서의 화질은 두 가지 관점에서 발전하였다. 모바일 환경이라는 특수성에 의해, 제한된 배터리를 이용한 디스플레이의 저소비 전력 화질 표현^{[1],[4]}과 외부 조명 변화에도 콘텐츠를 항상 볼 수 있는 고시인성의 화질 표현^{[10],[11]}이 중심이었다. 그러나 휴대폰에서 스마트폰으로 변화되면서, 사람들이 단순한 통신 수단으로 사용하던 모바일 디바이스가 아침에 눈을 떠서 잠 자리에 들 때까지 항상 지니고 다니는 일상의 파트너로 자리매김을 하고 있다. 그와 함께 디스플레이의 역할도

정보 전달 수단을 넘어서 시각적으로 편안한 디스플레이를 원하는 단계에 이르렀다.^{[5],[12]} 본고에서는 외부 조명 변화에도 불편하지 않은 시인성을 표현하기 위한 모바일 디스플레이의 화질 기술이 진화하고 있는 방향을 소개하고자 한다.

모바일 디스플레이의 화질은 인간 시각 시스템이 주변 조명에 따라 변화하는 밝기 순응 특성과 같이, 디스플레이를 마치 사물을 바라보는 것과 같은 자연스러운 휘도와 명암비로 표현하는 것이 핵심이다. 그러나 지금까지의 모바일 디스플레이는 조명 검출의 낮은 정확도와 사물이 아닌 발광체로서의 디스플레이 휘도 성능 증가에만 집중된 기술개발로 인하여, 사물과 같은 자연스러운 휘도 및 명암 표현과는 다소 거리가 있었다.

스마트폰에서 조도 검출의 정확도가 낮은 주요 원인은 조도 측정 센서가 바라보는 방향과 시각 순응에 영향을 미치는 디스플레이를 바라보는 방향이 반대 방향으로 배치되어 있기 때문이다. 이는 태양과 같이 조명이 머리 위에서 조사되는 일반적인 경우를 가정하고 만들어진 구조이다. 그러나 조명 디자인의 발달로 다양한 방향에서 조사되는 조명은 스마트폰 디스플레이와 함께 시각으로 들어오거나, 주행 중 자동차 창으로 들어오는 태양광과



	FRONT LIGHT	PLANE LIGHT	CROSS LIGHT	BACK LIGHT
FRONT SINGLE	50%	50%	25%	0%
REAR SINGLE	0%	0%	25%	50%
FRONT/REAR SURFACE	50%	50%	50%	50%
FRONT/LATERAL SURFACE	75%	100%	75%	50%

그림 3. 조도센서 위치 및 추가 배치에 따른 조명 센싱 커버리지 비교



그림 4. 스마트폰 디스플레이의 자동 밝기 동작 비교(기존 방식(좌)과 제안된 방식(우))^[13]

같이 측면으로 조사되기도 한다. 이와 같이 다양한 각도로 조사되는 조명에 적응적으로 디스플레이의 밝기를 조정하기 위해 연구된 사례를 소개하고자 한다^[13]. 저자들은 [그림 3]에서 조도 센서 추가에 따른 조명 센싱 커버리지를 검토하였다. 그 결과 후면에 추가 센서를 장착함으로써 센싱 커버리지가 일정하게 유지됨을 추정하였다. 후면 조도센서 추가에 따른 알고리즘 개발 및 적용 효과는 [그림 4]와 같은 역광환경에서 극명한 차이를 보여주었다.

조도 센싱이 정확하더라도, 어두운 저조도 환경에 순응된 사람에게는 약간의 디스플레이 불빛에도 눈부심을 줄 수 있다. 이런 특성을 착안한 연구자들은 콘텐츠의 명암 구성에 의해서도 눈부심 정도의 차이를 확인하였다.^[5] 즉, 저자들은 어두운 바탕에 흰색 자극을 제시하여 실험한 결과, 흰색 자극의 크기가 클수록 또한 바탕 영역과 자극영역의 명암비가 클수록 약간의 디스플레이 휘도 변화에도 눈부심을 느낀다는 것을 확인하였다. 결과적으로, 암순응 환경의 불편감 없는 디스플레이의 휘도는 [그림 5]와 같이 콘텐츠의 전경자극 면적과 대비비에 반비례함을 알 수 있다. 이러한 관계들을 이용하여 생성된 모델을 이용하여 조명뿐만 아니라 콘텐츠의 특성에 따라 디스플레이 휘도를 조정하는 방법을 제안 및

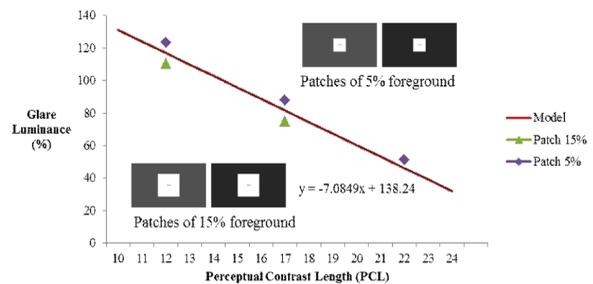


그림 5. 콘텐츠의 명암비(PCL)를 기준으로, Full white 기준의 디스플레이 휘도 대비 눈부심 없는 디스플레이의 상대 휘도값(%) 표시^[5]

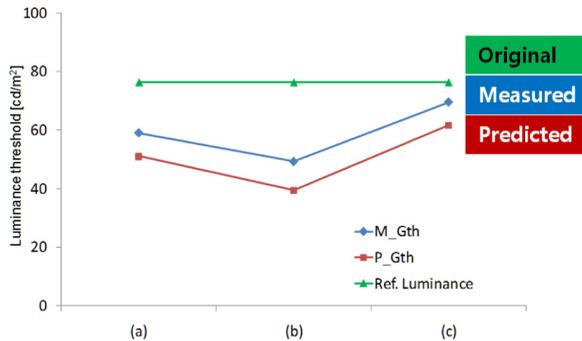
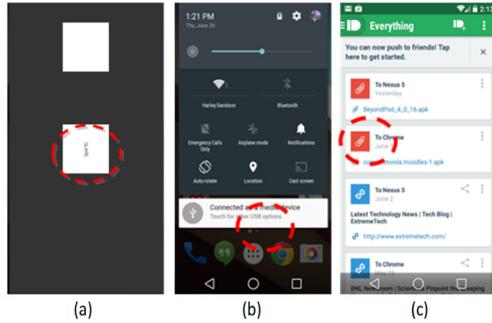


그림 6. 테스트 영상별 제안된 모델을 이용한 디스플레이 휘도 예측(Predicted) 및 눈부심 없는 디스플레이 적정 휘도 측정값(Measured) 비교(단, 조명에 의한 디스플레이 휘도 설정 기준(Original))⁵⁾

검증하였다(그림 6).

밝은 태양광 아래에서 스마트폰에 표시된 콘텐츠를 선명한 화질로 보는 것 또한 모바일 디스플레이에서 풀어야 할 난제이다. 물론 외부 50000Lux 이상의 강한 조명에서도 수천 nit를 표시할 수 있는 디스플레이는 걱정할 필요가 없을 것이다. 그러나 스마트폰의 디스플레이 수명과 배터리 사용시간을 고려할 때 1000nit 이상의 휘도 표시는 현재 기술로는 한계가 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 동시대비 및 로컬 콘트라스트를 이용하는 방법이 연구되고 있다. 그 중 0-40000Lux의 조도변화 환경에서 컬러 및 DR 변화를 평가하고, 이를 시각적으로 유사한 화질을 표현하도록 보상하는 알고리즘을 개발한 예도 있다.^[14] 해당 연구에서는 하플로스코프 검사(haploscope test)를 이용하여 시각적으로 실내 화질 수준의 컬러 및 휘도 값의 매핑 관계를 조사하고, 이를 이용하여 로컬 콘트라스트 및 컬러 향상값을 조명에 따라 적응적으로 제어하였다. [그림 7은 조도별로 선명한 화질을 위해 원본 영상대비 2-3배 증가된 DR을 표현하며, 특히 조도 5000Lux 이상에서는 3배 이상

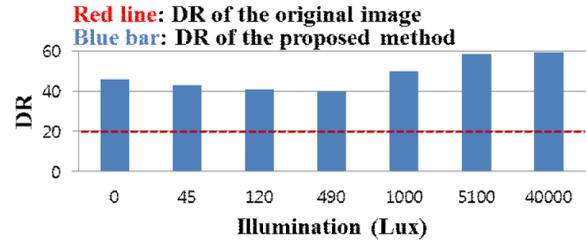


그림 7. 조도별 알고리즘 적용 전후 로컬 콘트라스트(DR) 변화 비교

로컬 콘트라스트를 증가시켜 디스플레이 휘도 증가의 한계를 어느 정도 극복될 수 있음을 보여준다.

앞에서 언급한 모바일 디스플레이의 불편감 없는 시인성 향상 기술들은, 향후 웨어러블 디스플레이의 콘텐츠 휘도 제어 시에도 고려되어야 할 것이다.

3. 인간 중심의 화질

앞장에서 살펴본 TV와 모바일 디스플레이의 화질 기술 동향으로부터 고정된 시청환경을 벗어나는 순간 디스플레이 본연의 성능에 의한 화질보다 그 환경에서 사람이 어떻게 느끼느냐가 더욱 중요하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 스마트폰 형태의 디스플레이보다 눈앞에 장착한 HMD의 경우 더욱 인간의 시각계가 어떻게 HMD에서 제공하는 콘텐츠를 받아들일 것인가가 중요할 것이다. 본 장에서는 HMD의 대표적인 VR과 AR을 통하여 이러한 이슈들을 검토하고자 한다.

3.1. VR HMD의 화질

2013년 Oculus사가 Rift DK1을 발표한 이후, VR HMD시장은 폭발적으로 성장하고 있으며 그에 따른 VR 디스플레이에 관한 연구도 매우 활발히 진행되고 있다. 대부분의 VR 디스플레이는 두 개의 렌즈를 통해 좌안과 우안 영상을 각각 디스플레이로 분할하여 보여주는 형태이며, 사용자로 하여금 현장감(immersion)을 느끼게 하기 위해 기존 디스플레이 대비 넓은 시야각(Field-of-View, FoV)를 제공한다. 이러한 VR 디스플레이의 특징 때문에, 2장에서 서술한 전통적인 디스플레이 화질 외에, 렌즈 배열에 의해 디스플레이 화소가 직접 눈에 보이는 SDE(screen door effect), 정량적 평가가 어려운 어지

러움, 및 시각의 불편함과 피로 등이 VR HMD의 중요한 화질 요소로 부각되고 있다. 본고에서는 디바이스의 성능 발전으로 해결 가능한 SDE 이슈를 제외한 어지러움과 시각 피로감에 대해 최근 연구 동향을 소개하고자 한다.

연구 결과에 따르면, VR HMD 체험자중 50~80% 이상이 어지러움 증상을 체험했다고 한다.^{[15],[16]} VR에서의 어지러움은 일상생활의 멀미와 마찬가지로, 시각과 전정기관에서 들어오는 정보간의 불일치로 인해 발생한다는 이론이 가장 널리 받아들여지고 있다.^[17] 예를 들어, VR을 착용한 상태로 소파에 앉아 레이싱 게임을 한다고 가정하면, 시각정보는 마치 사용자가 직접 움직이고 있는 듯한 감각을 느끼지만, 전정기관의 정보는 아무런 움직임을 전달하지 못하기 때문에 뇌에서 이를 강제로 보상하기 위한 작용으로 어지러움이 발생한다는 가설이다. VR HMD의 넓은 시야각과 외부 세계와 차단된 시각정보 입력이 이러한 시각계-전정계간 감각차이를 크게 하기 때문에 어지러움이 발생이 용이하고, 그 증상도 심할 것으로 추정된다.

VR HMD의 어지러움을 줄이는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 사용자의 움직임이 있을 경우, 전정계의 움직임 정보대비 시각계의 정지된 정보를 움직임을 고려한 보상처리이다. 즉, 머리 움직임을 센싱하고 보여 지는 시각정보를 가상공간에서 렌더링하여 디스플레이에 그려주는 일련의 처리 과정을 Motion-to-Photon(MTP)이라고 하며, 이 과정에서 발생하는 지연 시간(Latency)을 줄이는 방법이다. 대표적인 방법으로는 Oculus의 time-warping 기술이 있다.^[18] 다음은 사용자의 움직임은 없으나 영상에서 움직임이 발생하는 경우, 영상 신호 처리를 이용하여 시각 움직임 자극을 줄이는 방법이다. 대표적인 방법으로는 영상의 일부에 움직임 없는 고정된 cue(pattern 혹은 그림)를 포함시켜 전정감각과의 차이를 줄이는 IVB(Independent Visual Background) 방법과 게임 패드 등 사용자의 화면 제어 방향(전진, 좌우 이동 등)과 크기(화면 이동 속도) 등에 따라 동적으로 FoV를 줄여주는 방법이 있다.^{[19],[20]} 한편, VR HMD에서 발생하는 어지러움의 평가 및 측정 방법으로는 항공 시뮬레이션에서 사용하던 주관적 설문 방법(SSQ, Simulator Sickness Questionnaire)^[21]과 의료 분야에서 사용하는 postural instability 측정법^[22]

이 주로 사용되고 있다. 전통적인 화질을 해결하기 위한 영상신호 처리는 아니지만, 이와 같은 VR HMD의 어지러움은 소비자가 VR HMD의 지속적인 사용과 구매에 부정적인 영향을 끼칠 수 있으므로 이를 해결하기 위한 지속적이고 체계적인 연구가 필요하다.

서두에 언급한 바와 같이, VR HMD는 양쪽 눈에 각각의 영상을 투영하는 방식이다. 이때 좌안과 우안 영상이 양안 시차(disparity)를 가질 경우, 우리는 3차원 영상을 볼 수 있다. 이러한 방식을 3차원 양안시청(stereoscopic 3D) 방식이라고 하며, 좌안과 우안 디스플레이가 공간적으로 나뉘어져 있다는 점을 제외하면, 3차원 TV와 동일한 원리이다. 그런데, 양안시청 방식의 3차원 디스플레이의 수렴-초점 불일치(Vergence-Accommodation Conflict, VAC)가 눈의 피로감과 불편함을 유발한다는 것은 이미 알려져 있다.^[23] [그림 8]과 같이, 현실 세계에서는 양쪽 눈이 모이는 점(수렴, Vergence)과 수정체 두께에 의한 초점 거리(Accommodation)가 일치한다. 그러나 stereoscopic 3D 디스플레이에서는 초점이 항상 디스플레이 면에 맞춰져 있기 때문에, 수렴과 초점에 의한 거리 감각에 차이가 발생한다. 또한 사람의 눈은 초점을 맞춘 곳에서 일정 거리 범위만 선명하게 볼 수 있으나, 3차원 디스플레이에서는 물체의 거리 차와 무관하게 선명한 영상을 보기 때문에, 수렴과 초점에 의한 거리 감각에 차이가 발생하게 된다. 이러한 불일치는 눈과 뇌에서 이를 보

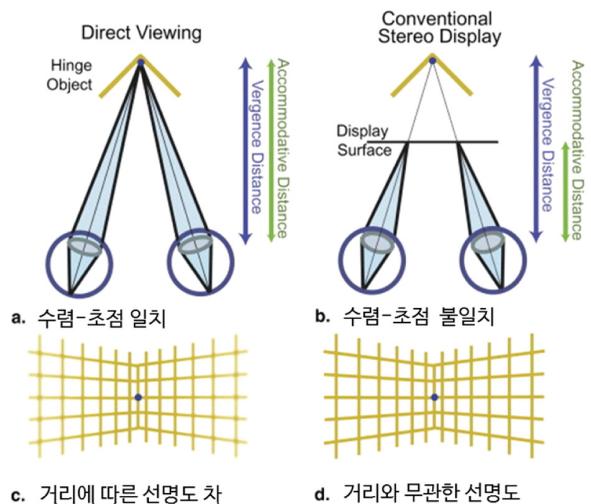


그림 8. 수렴-초점 불일치(Vergence-Accommodation Conflict, VAC)

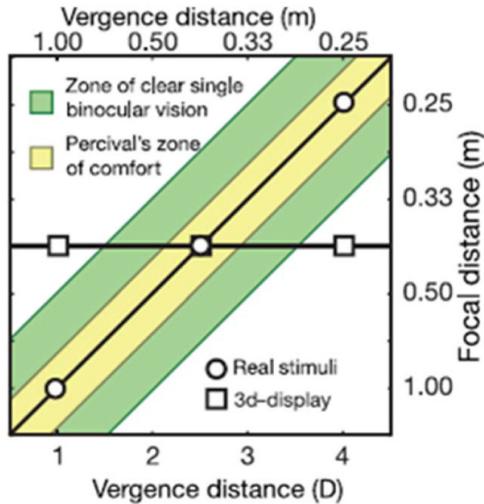


그림 9. 양안 시청 3차원 디스플레이의 수렴-초점 일치 영역 (Percival's zone of comfort)^[24]

상하기 위한 메커니즘이 동작하게 되고 이것이 피로감의 원인이 된다고 할 수 있다. 이와 같은 VAC에 의한 피로감을 해결하는 방법은 두 가지로 구분된다. 먼저 눈이 허용하는 불일치 범위(그림 9의 Percival's zone of comfort^[24] 참고) 내의 양안시차를 재매핑하는 방법이 있다.^[25] 다른 하나는 광학 소자를 사용하여 영상의 초점 거리를 변경할 수 있는 디스플레이를 사용하는 방법이다. 최근 발표된 micro-lens array를 사용한 stereoscopic lightfield HMD 기술이 그 대표적인 예이다.^[26]

3.2. AR HMD의 화질

실제 공간에 디지털 가상 정보를 겹쳐 보여주는 AR의 개념은 오래되었지만, 그간 기술과 가격 장벽 때문에 일부 군사용 기기에만 사용되어 왔다.^[27] 그러나 최근 들어 Microsoft가 hololens를 발표하면서 AR HMD의 상용화에 대한 기대감이 높아지고 있다. AR을 구현하는 방식에는 포켓몬고와 같이 Video-see-through의 형태도 있지만, 본고에서는 Optical-see-through 방식에 한정하여 살펴보고자 한다.

AR HMD의 가장 큰 특징은 실제 공간과 디지털 콘텐츠가 동시에 보여야 한다는 것이다. 따라서 [그림 10]에서 보는 바와 같이, 두 정보가 겹치는 부분은 색이 섞여 보이는 혼색이 나타나며, 외광이 투사되기 때문에 앞장의 모바일 화질에서 언급한 영상 시인성이 중요한 이



그림 10. AR 디스플레이 시인성 및 화질 표현 예

수가 된다. 또한 콘텐츠를 눈에 투영하기 위해서는 반사/굴절/회절 등의 여러 광경로를 거치게 되는데, 이 과정에서 밝기 손실, 색 왜곡 그리고 대비 감소 등의 문제가 발생하게 된다. 특히 회절을 이용하는 waveguide 방식의 AR은 광(光) 파장대별 회절각 차이에 의한 색 번짐(chromatic aberration)도 디바이스 개발 과정에서 해결해야 하는 문제이다. 최근 AR에 대한 관심과 AR 디스플레이 기술의 비약적 발전에 따라, 위의 AR 화질 문제를 해결하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[28],[29],[30]}

그러나 VR과 마찬가지로 AR도 디스플레이의 광학적인 화질 보상만으로는 극복할 수 없는 문제들이 남아 있다. 즉, AR HMD도 사용자의 움직임에 맞추어 영상을 변형해주어야 하기 때문에 MTP latency가 중요한 디스플레이 화질 요소 중 하나이다. MTP는 사람의 전정-안반사(VOR, Vestibular Ocular Reflex^[31])의 반응 시간인 7ms-15ms 이하여 한다고 한다.^[32] 하지만 AR은 실제 공간 정보가 지연 없이 눈으로 들어오기 때문에, 가상 콘텐츠에 대한 MTP latency의 민감도가 VR HMD보다 더 크다고 알려져 있다.^[33]

또한, AR 디스플레이를 통해서 실제 사물과 디지털 정보를 이질감 없이 동시에 보기 위해서는, 디지털 영상이 실제 사물과 동일한 양안-수렴각(Vergence)과 초점 거리(Accommodation)를 가져야 한다. 만약 수렴각이 맞지 않는다면, 실제 사물 혹은 영상이 두개로 갈라져 보이게 되며, 반대로 초점 거리가 맞지 않는다면 실제 사물 혹은 영상이 번져(흐려) 보이게 된다(그림 11). 수렴각은 stereoscopic rendering을 통해 조절이 가능하지만, AR 영상의 초점 거리를 조절하는 기술은 매우 복잡한 광학 및 디스플레이 기술을 필요로 한다. 실제로 Microsoft의 Hololens도 영상의 수렴각은 조절 하지만, 영상의 초점거리는 고정되어 있는 것으로 알려져 있다. 최근 MagicLeap이라는 회사에서 초점 거리 조절이



그림 11. 초점 표현 디스플레이의 필요성

가능한 다양한 AR 디스플레이 기술을 제안하여 큰 주목을 끌고 있다.

4. 앞으로의 화질 연구

고전적인 디스플레이 화질 성능으로 논의될 수 있는 해상도, BT.2020 광색역 및 HDR 기술들은 디바이스의 성능을 높이기 위한 화질 항목들이었으나 그 성능의 목표점은 인간 시각의 한계점과 맞닿아 있다. 이는 모바일 환경으로 접어들면서, 시각의 순응 시스템과 눈부심이라는 시지각 반응 등은 디스플레이가 더욱 인간 시지각계를 이해하도록 다그치고 있다.

한걸음 더 나아가, 다음 세대의 디스플레이인 VR 및 AR HMD는 자연스러운 사물을 바라보는 것처럼 표시되지 않는 시각 정보를 이용하여 시각뿐만 아니라 체성 감각까지 혼란을 야기함으로써, 디스플레이 및 화질 연구자들에게 인간의 시지각 체계를 이해하고 기술을 개발하기를 촉구하고 있다. 이에 우리 연구자들은 LC 및 OLED와 같은 디스플레이 물성 만큼이나 시지각 시스템의 시각정보 처리과정을 명확히 이해하도록 노력함과 동시에 이 문제를 해결할 수 있는 디스플레이 개발에 박차를 가해야 할 것이다.

참고문헌

[1] 곽영신, *인포메이션 디스플레이*, **15**, 14 (2014).
 [2] R. Boitard et al., *IEEE CE Magazine*, **75** (2015).
 [3] L. Kerofsky and S. Daly, *J. Soc. Inf. Disp.*, **14**, 1111 (2006).
 [4] I. Kim, W. Choe and S.-D. Lee, *Proc. SPIE*, **6057**,

425 (2006).
 [5] W. Choe and M. W. Lee, *2015 IEEE 5th Int'l Conf. on, Berlin, Consumer Electronics - Berlin(ICCE-Berlin)*, 471, (2015).
 [6] K. Masaoka, Y. Nishida and M. Sugawara, *Opt. Express*, **22**, 19069 (2014).
 [7] R. Zhu, Z. Luo, H. Chen, Y. Dong and S.-T. Wu, *Opt. Express*, **23**, 23680 (2015).
 [8] Society of Motion Picture and Television Engineers, High dynamic range electro-optical transfer function of mastering reference displays table. In Proc. SMPTE ST, The Society of Motion Picture and Television Engineers, ST2084, (2014).
 [9] International Telecommunication Union, Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange, BT.2100, (2016).
 [10] M.-Y. Kim, C.-H. Son, J.-M. Kim, C.-H. Lee and Y.-H. Ha, *J. Imaging. Sci. Techn.*, **51**, 44 (2007).
 [11] C. Yang, J. Zhang and X. Zhao, *J. Opt. Soc. Korea*, **18**, 809 (2014).
 [12] N. Na, J. H. Jang and H. J. Suk, *Proc. SPIE 9014*, **90140I** (2014).
 [13] S. Lee, W. Choe and H. Jung, "Uniform Brightness Mobile Display using Multiple Light Sensors", ICCE-ASIA (2016).
 [14] W. Choe and S. Y. Lee, "Always Optimal Visibility for HVS on Mobile Display", ICCE-ASIA (2016).
 [15] B.D. Lawson et al., *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*, 589 (2002).
 [16] K.M. Stanney et al., *Human Factors*, **45**, 504 (2003).
 [17] K.M. Stanney et al., *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*, 721 (2002).
 [18] J. Carmack, "Latency Mitigation Strategies," [online]. Available: <https://vrwiki.wikispaces.com/Time+warping> (2013).
 [19] H.B.L. Duh et al., *Journal Presense: Teleoperators and Virtual Environments*, **13**, 578 (2004).
 [20] A.S. Fernades et al., "Combating VR Sickness through Subtle Dynamic Field-Of-View Modification," IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 201 (2016).
 [21] R.S. Kennedy et al., *Int. J. Aviation Psychology*, **3**, 203 (1993).
 [22] A. Thomas et al., *Brain Research Bulletin*, **47**, 437 (1998).
 [23] K. Carnegie and T. Rhee, *IEEE Computer*

Graphics and Applications, **35**, 34 (2015).

[24] T. Shibata et al., *Journal of Vision*, **11**, 11 (2011).

[25] K. Terzic and M. Hansard, *Signal Process.: Image Comm.*, **47**, 402 (2016).

[26] F.C. Huang et al., *ACM Transactions on Graphics*, **34**, 60 (2015).

[27] J. Rolland and H. Hua, "Head-Mounted Display System," *Encyclopedia of Optical Engineering* (2005).

[28] Y. Itoh et al., *IEEE Trans. on Visual, and Computer Graphics*, **21**, 1269 (2015).

[29] S.K. Sridharan et al., "Color correction for optical see-through displays using display color profiles," *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (2013).

[30] J. Han et al., *Optics Express*, **23**, 3, 3534 (2015).

[31] "Vestibuloocular reflex testing," [online]. Available: <http://emedicine.medscape.com/article/1836134-overview> (2012).

[32] F. Zheng et al., "Minimizing Latency for Augmented Reality Displays: Frames Considered Harmful," *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, (2014).

[33] P. Lincoln et al., *IEEE Trans. on Visual, and Computer Graphics*, **22**, 1367 (2016).

저 자 약 력

최 원 희



- 2016년 5월~현재 : 삼성전자 무선사업부 선형 Display Lab 랩장
- 2013년 4월~2016년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 멀티미디어팀 수석연구원
- 2001년 8월~2013년 3월 : 삼성종합기술원 (SAIT) 전문연구원
- 2000년 2월~2001년 7월: 현대 오토넷 AVN & AVICS 개발팀 연구원
- 2008년 3월~2016년 8월 : 서울대학교 대학원 인지과학 협동과정 Ph.D.
- 1998년 3월~2000년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 석사
- 1994년 3월~1998년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
- 관심분야 : human visual system, visual fatigue (discomfort), image enhancement, camera and display system

김 세 훈



- 2016년 5월~현재 : 삼성전자 무선사업부 선형 Display Lab. 책임연구원
- 2011년 3월~2016년 5월 : 삼성전자 DMC 연구소 멀티미디어팀 책임연구원
- 2004년 3월~2011년 2월 : POSTECH 전기 전자공학 박사
- 2002년 3월~2004년 2월 : POSTECH 전기 전자공학 석사
- 1996년 3월~2002년 2월 : 광운대학교 제어계측공학 학사
- 관심분야 : computer vision, machine learning, image enhancement, Visual fatigue in VR/AR

이 민 우



- 2016년 5월~현재 : 삼성전자 무선사업부 선형 Display Lab. 책임연구원
- 2006년 2월~2016년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 멀티미디어팀
- 2011년 3월~현재 : 인하대학교 정보통신공학과 박사과정
- 2004년 3월~2006년 2월 : 동아대학교 전자공학 석사
- 1998년 2월~2004년 2월 : 동아대학교 전자공학 학부
- 관심분야 : HVS based Image Enhancement, VR/AR/Holography System, Highly Efficient Driving methods for Various Displays