

OLED 마이크로디스플레이 기술 동향

이현구

한국전자통신연구원 선임연구원

가상/증강현실 구현 기기의 핵심 부품 중의 하나인 마이크로디스플레이에 대한 정확한 의미 및 중요성에 대한 인식 확산이 필요하다. 자발광을 특징으로 하는 OLED 마이크로디스플레이는 가상/증강현실 기기에서 가장 유력한 차세대 디스플레이 솔루션으로 주목받을 정도로 그 중요성이 점점 증가하고 있다. 본 고에서는 OLED 마이크로디스플레이 기술에 대해 설명하고, 다양한 문헌들을 참고하여 현재 전 세계 주요 마이크로디스플레이 기업 및 연구소의 OLED 마이크로디스플레이 기술 수준에 대해 살펴보고자 한다.

I. 서론

최근 여러 분야에서 4차 산업혁명이 가장 큰 화두로 떠오르고 있다. 특히, 정보통신기술(Information and Communications Technologies: ICT) 분야에서는 4차 산업혁명을 선도할 수 있는 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가상/증강현실(Virtual Reality/Augmented Reality: VR/AR) 기술 역시 최근에 관심이 급격히 증가하고 있다. 가상/증강현실 분야에서 리더십을 잡기 위한 구글, 마이크로소프트, 애플, 페이스북, 인텔 등 거대 기업들의 경쟁이 치열하며, 국내에서도 삼성전자, LG전자, SK, KT와 같은 대기업뿐만 아니라 여러 중소기업 및 벤처기업에서 다양한 관련 기술을 선보이고 있다. 가상/증강현실 관련 시장조사 업체인 Digi-Capital의 전망에 따르면, 2022년 글로벌 가상/증강현실 분야의 예상 시장규모는 약 1,050억 달러인데, 특히 증강현실은 가상현실보다 6배 이상의 성장이 전망되고 있다[1].

가상/증강현실 기술은 크게 하드웨어 분야와 소프트웨어 분야로 나뉘질 수 있다. 우수한 품질의 가상/증강현실 구현을 위해서는 고성능의 하드웨어와 다양한 서비스를 제공할 수 있는 소프트웨어

* 본 내용은 이현구 선임연구원(☎ 042-860-5932, lhk108@etri.re.kr)에게 문의하시기 바랍니다.

** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

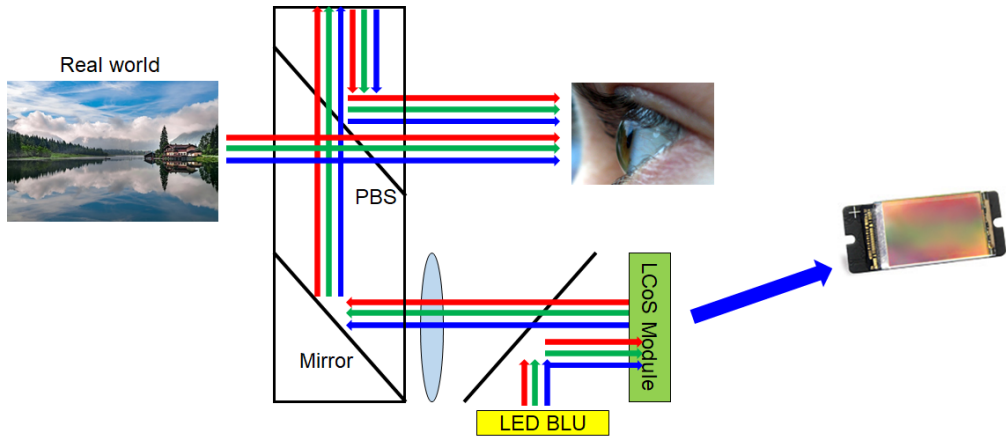
가 필요하다. 특히, 사용자의 몰입감을 증가시키기 위해서는 다감각 자극 경험을 제공하고 상호작용할 수 있는 기기가 필요하다. 여러 감각 중에 시각은 가장 많은 정보를 사용자에게 제공하므로, 최근에 나온 대부분의 가상/증강현실 기기는 시각정보 제공에 초점을 두고 있고, 이를 위해 기기의 형태는 두부 장착형(Head-Mounted Display: HMD)이거나 안경형이다. 이러한 기기의 사용자는 디스플레이 패널에서 나온 영상을 직접 보지 않고, 광학계를 통해 확대하여 보게 된다. 따라서 영상 정보를 제공하는 디스플레이 패널의 성능이 기존의 텔레비전이나 모바일 기기보다 훨씬 더 우수해야 한다. 2012년에 발표된 오쿨러스 리프트를 시작으로 현재까지 다양한 가상/증강현실 기기가 판매되고 있으나, 아직까지 스마트폰만큼 대중화가 되지 못한 이유 중 하나 역시 디스플레이의 성능이 높지 않아 사용자의 피로도를 증가시키거나 멀미 등을 유발하기 때문이다.

본 고에서는 가상/증강현실을 구현할 수 있는 디스플레이 디바이스 중 하나인 마이크로디스플레이에 대해 간단히 설명한 후, 마이크로디스플레이 분야에서 현재 많은 관심을 받고 있는 Organic Light-Emitting Diodes(OLED) 마이크로디스플레이의 국내외 기술 동향에 대해 살펴보고자 한다. 먼저 II장에서는 마이크로디스플레이 기술에 대해 설명하고, III장에서는 국내외 OLED 마이크로디스플레이 기술 동향에 대해 살펴본다. 마지막으로 IV장에서는 본 고의 결론을 제시한다.

II. 마이크로디스플레이

1. 마이크로디스플레이 기술

마이크로디스플레이는 일반적으로 화면의 대각선 길이가 1인치 이하인 디스플레이를 의미한다. 따라서 마이크로디스플레이는 추가적인 광학계가 필요하다. [그림 1]에 가장 널리 사용되고 있는 마이크로디스플레이 중 하나인 Liquid Crystal on Silicon(LCoS)를 이용한 간단한 광학계 시스템을 나타내었다. 그림에서 보듯이 우리가 마이크로디스플레이를 통해 가상의 영상과 실제 세계를 동시에 보기 위해서는 여러 광학 부품이 필요하게 된다. 마이크로디스플레이의 경우 고해상도를 매우 작은 영역에 구현해야 하기 때문에, 기존의 유리 기반 박막트랜지스터(Thin-Film Transistor: TFT) 백플레인인 아닌 Si wafer 기판의 Complementary Metal-Oxide-Semiconductor(CMOS) 백플레인을 사용하게 된다. LCoS도 Si wafer를 사용하므로 하부 기판이 투명하지 않아 백라이트(Back Light Unit: BLU)가 일반적인 LCD와 같이 기판 뒤에 있지 않고, 디스플레이 모듈 바깥에 존재하게 된다. BLU에서 나온 적, 녹, 청의 빛이 LCoS에서 반사되어 거울과 반투과 반사판 등을



(자료) ETRI 자체 작성

[그림 1] LCoS를 이용한 See-through 광학계

통해 사용자는 영상을 볼 수 있게 된다.

마이크로디스플레이는 동작 방식에 따라 반사형(Reflective), 투사형(Transmissive), 그리고 자체발광형(Emissive)으로 분류할 수 있다.

반사형은 반사면의 특성을 변화시켜 가면서 외부로부터 입사되는 광을 변조시키는 방식을 이용하는 것으로, 광원이 마이크로디스플레이 패널 앞쪽에 존재하여 이미지를 반사시켜서 보는 형태로 LCoS와 Digital Micromirror Device(DMD)가 대표적이다. 투과형 마이크로디스플레이는 입사되는 광이 패널을 통과하면서 변조되는 방식을 이용하는 것으로, 광원이 디스플레이 뒤쪽에 있게 되는 형태로 기존의 LCD와 거의 동일한 구조를 가지고 있다. 자체발광형 마이크로디스플레이는 스스로 빛을 생성하여 별도의 광원이 불필요한 형태로 OLED 마이크로디스플레이가 가장 대표적이고 최근에는 마이크로LED를 적용한 패널도 주요 전시회에서 볼 수가 있다. Si 기판에 제작된 OLED 마이크로디스플레이는 OLED on Si(OLEDoS)이라고도 한다. [표 1]에 마이크로디스플레이 종류에 따른 주요 특징을 나타내었다[2].

[표 1]과 같이 OLED 마이크로디스플레이는 다른 디스플레이 모드에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 예를 들어, LCoS에 비해 우수한 화질과 빠른 응답속도를 가지고 있고, 백라이트를 사용하지 않기 때문에 부피 및 무게가 작고 이로 인해 광학계 역시 더 간단해질 수 있다. 뿐만 아니라, 액정보다 사용가능 온도범위가 넓어 대부분의 군용 마이크로디스플레이에는 LCoS가 아닌 OLED 마이크로디스플레이가 적용된다. 그래서 기존에 LCoS 등을 생산하던 주요 마이크로디스플레이 업체들도 OLED 마이크로디스플레이에 대한 연구를 진행하고 시제품을 선보이고 있다.

[표 1] 마이크로디스플레이 종류에 따른 주요 특징

종류	성속도	화질	전력효율	최대밝기	부피 및 무게	응답속도
HTPS* LCD	High	Low-Med	Med	High	Med	Low
LCoS/DMD	High	Low-Med	Low	Very High	Low	Med
OLEDoS	Med-High	High	High	Med-High	High	High

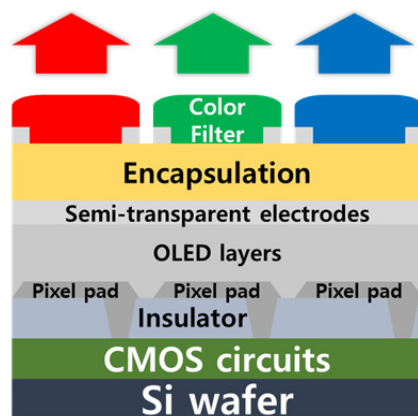
* High-Temperature-Poly-Silicon

<자료> G. Haas, "Microdisplays for Augmented and Virtual Reality," SID 2018 DIGEST, 2018, pp.506-509.

2. OLED 마이크로디스플레이 기술

OLED 마이크로디스플레이는 기존의 OLED 디스플레이와 완전히 다른 기술이 아니다. 하지만, 일부 구조 및 공정 측면에서 다른 점이 있다. 먼저, 화소 크기가 다르다. 텔레비전 및 핸드폰에 사용되는 OLED 패널의 화소 크기는 약 40~300 μ m인 반면, OLED 마이크로디스플레이의 화소 크기는 약 4~20 μ m로 10배가량 작다. 따라서 백플레인 역시 기존 OLED 디스플레이는 glass기판 기반의 Low-Temperature-Poly-Silicon(LTPS) 또는 Oxide TFT를 사용하는 반면, OLED 마이크로디스플레이는 Si-wafer 기반의 CMOS 공정을 사용한다. 이로 인해 OLED 마이크로디스플레이는 상부발광형 구조로만 제작이 가능하다. 그리고 하부전극은 일반적인 Indium-Tin-Oxide (ITO)가 아닌 CMOS 공정에 적용 가능한 소재만 사용이 가능하다.

풀칼라 표현을 위해서는 적, 녹, 청의 세 가지 보조화소가 필요하다. 현재 스마트폰 등에 널리 사용되고 있는 OLED 패널은 대부분 상부발광 구조이고, 적, 녹, 청 발광층을 Fine Metal Mask (FMM)를 이용하여 OLED 소자에 직접 적용하므로 칼라 필터가 필요 없다. 반면에, OLED 마이크로디스플레이의 경우 화소의 크기가 너무 작아 기존의 FMM 기술로는 적, 녹, 청 발광층을 정교하게 형성하기가 어렵다. 그래서 대부분의 풀칼라 OLED 마이크로디스플레이는 칼라 필터를 사용하게 된다. 현재 판매되고 있는 OLED TV도 백색 OLED와 칼라 필터를 적용하여 풀칼라를 표현하는데, 이때 OLED는 배면발광 구조로 기판을 통해 빛이 나오고, 칼라 필터 역시 OLED 하



<자료> ETRI 자체 작성

[그림 2] 풀칼라 OLED 마이크로디스플레이의 일반적 구조

부에 존재하므로 칼라 필터 공정이 OLED에 영향을 미치지 않는다. 반면에, OLED 마이크로디스플레이는 상부 발광 구조이므로 칼라 필터도 OLED의 상부에 형성되어야만 한다. 그런데 OLED는 수분 및 산소에 취약하고, 칼라 필터 패턴 공정에 사용되는 용액, 자외선 및 고온 등에도 손상을 받을 수 있다. 이에 따라 OLED 상부에는 OLED를 보호할 수 있는 봉지 및 보호층이 필요하고, 칼라 필터 공정도 100도 이하의 저온에서 진행되어야 한다. [그림 2]에 풀칼라 OLED 마이크로디스플레이의 일반적 구조를 나타내었다.

III. 국내외의 OLED 마이크로디스플레이 기술 동향

국외의 여러 기업 및 연구소에서 빠르게는 약 20년 이상 전부터 OLED 마이크로디스플레이에 대한 연구를 진행해 왔고, 일부 업체는 실제 제품을 양산 및 판매하고 있다. 본 단원에서는 세계 최대 디스플레이학회인 Society for Information Display(SID)의 발표 결과를 바탕으로 주요 기관의 OLED 마이크로디스플레이 기술 동향을 살펴보고자 한다.

1. MICROOLED

MICROOLED는 2007년에 관련 연구를 시작한 회사로 OLED 마이크로디스플레이를 제공하고 있으며, 현재 회사는 프랑스에 위치하고 있다. MICROOLED에서 발표한 시제품의 주요 스펙을 [표 2]에 정리하였다[2].

[표 2] MICROOLED사 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.38" WVGA-Red Green	852×480 (+20 extra lines & columns)	10 μ m×10 μ m	All Colors composed of R and G primary	3,000cd/m ²	10,000:1	25mW
0.19" ultra-low power	304×256	12 μ m×12 μ m	Monochrome, color under development	20,000cd/m ²	10,000:1	2-3mW
0.61" SXGA	1280×1024 (+20 extra lines & columns), 2600×2088 (monochrome)	9.4 μ m×9.4 μ m (full color), 4.7 μ m×4.7 μ m (monochrome)	Full color or monochrome	3,000cd/m ²	10,000:1	200mW

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.98" WUXGA	1920×1200 (+20 extra lines & columns), 3840×2400 (monochrome)	11μm×11μm (full color), 5.5μm×5.5μm (monochrome)	Full color or monochrome	3,500cd/m ² , 20,000cd/m ²	10,000:1	200mW

[표 2]와 같이 MICROOLED는 소비전력이 매우 작은 것부터 초고해상도의 고휘도 제품까지 다양한 종류의 OLED 마이크로디스플레이를 선보였다. 픽셀 피치를 통해 유추할 수 있는 바와 같이 고해상도 구현을 위해 적, 녹, 청 화소구조는 전통적인 스트라이프 타입이 아닌 펜타일 구조를 사용한 것으로 보인다.

2. Fraunhofer

Fraunhofer는 독일의 국가 연구소로 OLED 마이크로디스플레이 관련 연구를 꾸준히 진행해 왔다. 회사가 아닌 연구소이므로, 제품 생산보다는 CMOS설계, OLED 제조 공정, 시스템 설계, 파일럿 공정, 테스트 키트 개발 등과 같은 OLED 마이크로디스플레이 관련 다양한 기술 서비스를 제공하고 있다. Fraunhofer 연구소에서 발표한 시제품의 주요 스펙을 [표 3]에 정리하였다[3],[4].

[표 3]과 같이 Fraunhofer는 연구 초반에는 단색의 저소비전력 OLED 마이크로디스플레이를

[표 3] Fraunhofer연구소 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.6" Bi-directional	800×600	16μm×16μm	24 bit, Full color (RGBW)	250cd/m ²	-	-
0.19" ultra-low power	304×256	12μm×12μm	4 bit, Monochrome green	1,000cd/m ²	10,000:1	1-3mW
0.16" ultra-low power	304×128	12μm×12μm	4 bit, Monochrome green	1,000cd/m ²	10,000:1	1-3mW
0.15" ultra-low power	720×256	5μm×5μm	1 bit, Monochrome green	1,000cd/m ²	10,000:1	1-3mW
1" WUXGA	1920×1200 (+20 extra lines & columns)	11μm×11μm	24 bit (32 bit incl. white) Full color(RGBW)	300cd/m ²	100,000:1	200mW

주로 선보였다. 그러나 최근에는 연구소임에도 불구하고 풀HD급의 초고해상도 full color 패널을 선보인 것에서 알 수 있듯이 OLED 마이크로디스플레이와 관련한 다양한 기술을 축적한 것으로 보인다.

3. Sony

Sony는 세계적인 일본의 전자회사로 OLED TV를 세계 최초로 출시하는 등 OLED에 대한 연구를 꾸준히 진행해 왔다. OLED 마이크로디스플레이 분야에 있어서도 최근에 매우 뛰어난 성능을 자랑하는 제품을 전시회 등에 출품하고 있다. 소니 연구소에서 발표한 시제품의 주요 스펙을 [표 4]에 정리하였다[5],[6].

마이크로디스플레이의 크기가 커지면 시야각(Field of View: FOV)이 넓어지는 장점이 있다. 그런데 마이크로디스플레이 관련 기업이나 연구소 등에서는 1인치 이상의 대각 크기를 갖는 시제품이나, 관련 기술의 개발 결과를 발표하지 못하고 있다. 이러한 문제는 CMOS 백플레인 공정에서는 초고해상도 패턴을 위해 사용하는 스테퍼(stepper)라는 장비에서 유래되는 것으로, 이 장비로 한 번에 찍을 수 있는 shot의 크기가 보통 1인치 내외여서 이보다 큰 사이즈의 마이크로디스플레이는 수율저하 등으로 구현에 많은 어려움이 따르기 때문이다. Sony의 경우 이러한 문제를 해결하고, [표 4]와 같이 1.25"라는 매우 큰 사이즈의 OLED 마이크로디스플레이를 선보였다. 뿐만 아니라, 4,000ppi급의 초고해상도 패널도 선보이는 등 OLED 마이크로디스플레이 관련 기술을 선도해 나가고 있는 것으로 판단된다.

[표 4] Sony사 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.5" QVGA	1280×960	2.6 μ m×7.8 μ m	Full color	1,000cd/m ²	100,000:1	310mW (at 60fps 200cd/m ²)
1.25" WQXGA	2560×1600	3.5 μ m×10.5 μ m	Full color	200cd/m ²	100,000:1	-
0.5" UXGA	1600×1200	6.3 μ m	Full color	2,000cd/m ²	100,000:1	310mW (at 60fps 200cd/m ²)

4. eMagin

eMagin은 1996년에 설립된 회사로, OLED 마이크로디스플레이 분야를 꾸준히 연구해온 미

[표 5] eMagin사 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.47" VGA	640×480	15 μ m	Full color	750-800cd/m ²	10,000:1	125mW
0.61" SVGA+	852×600	15 μ m	Full color	200cd/m ²	300:1	200mW
0.77" SXGA	1280×1024	12 μ m	Full color	150cd/m ²	10,000:1	180mW
0.86" WUXGA	1920×1200	9.6 μ m	Full color	150cd/m ²	10,000:1	350mW
1.06" 2K×2K	2048×2048	9.3 μ m	Full color	500cd/m ²	10,000:1	-

국의 회사이다. 역사가 오래된 만큼 다양한 제품군을 가지고 있고, 주로 군용으로 관련 제품을 판매하고 있다. eMagin의 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙을 [표 5]에 정리하였다[7],[8].

eMagin은 최근에 기존의 OLED 마이크로디스플레이와 다르게 적, 녹, 청 OLED 발광층을 직접 패터닝하여 칼라 필터 없는 Full color를 구현하였다. 칼라 필터가 없기 때문에 더 높은 휘도를 낼 수 있고, 효율도 증가시킬 수 있다. 따라서 OLED 마이크로디스플레이의 가장 큰 문제 중 하나인 휘도 문제를 개선할 수 있는 중요한 결과로 판단된다. 이와 관련하여 eMagin은 초미세 패턴을 할 수 있는 마스크 및 증착 관련 특허도 다수 출원하였다.

5. Kopin

Kopin은 웨어러블 헤드셋 관련 다양한 제품 및 기술을 개발하는 미국 업체로, 마이크로디스플레이의 경우 백플레인 설계에 강점을 가지고 있다. 기존에 LCoS 관련 사업을 하였고, 최근에는 OLED 마이크로디스플레이 관련 연구도 진행하고 있다. Kopin의 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙을 [표 6]에 정리하였다[9].

Kopin은 최근 OLIGHTTEK, BOE, Goertek와 협력 협정을 맺었다. OLIGHTTEK는 OLED 패널 메이커이며, BOE는 중국에서 가장 큰 TV, 핸드폰용 OLED 및 LCD 패널 메이커이고, Goertek는 VR 헤드셋 공급업체이다. 이들 업체들은 OLED 마이크로디스플레이용 FAB을 위해 중국 쿤밍(Kunming)에 2억 달러를 투자할 계획이다. Kopin은 2019년에 2.6K×2.6K(2,800ppi), 2020년에는 3K×3K 패널을 개발할 예정이다.

[표 6] Kopin사 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.99" 2K×2K	2048×2048	2.88 μ m×8.64 μ m	Full color	150cd/m ²	3,000:1	500mW

6. 국내

국내에는 마이크로디스플레이 관련 업체가 많지 않다. 라온텍이 국내에서 거의 유일하게 LCoS 관련 사업을 진행하고 있고, OLED 마이크로디스플레이 관련 사업을 진행하는 기업은 국내에 없는 실정이다. 삼성에서는 2011년도에 IDW학회에서 full color OLED 마이크로디스플레이를 발표하기도 하였으나 양산으로 연결되지는 않았다. 한양대학교에서도 마이크로디스플레이 관련 연구를 1990년대 후반부터 지속적으로 해오고 있다. ETRI는 정부출연연구소로서 OLED 관련 연구를 1994년부터 꾸준히 진행해오고 있다. 2016년 하반기부터 군용 OLED 마이크로디스플레이 개발 관련 과제를 수행하면서 2018년에 국내 최초로 SXGA급 단색 OLED 마이크로디스플레이를 SID2018 및 IMID2018 전시회에 전시하였다. 국내 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙을 [표 7]에 정리하였다[10],[11].

[표 7] 국내 OLED 마이크로디스플레이의 주요 스펙

종류	해상도	픽셀 피치	색상	휘도	명암비	소비전력
0.6" XGA (Samsung)	1024×768	12 μ m	Full color	235cd/m ²	-	500mW
0.7" SXGA (ETRI)	1280×1024	3.6 μ m×0.8 μ m	Monochrome green	460cd/m ²	25935.3:1	232mW (at 400cd/m ² , 60Hz)

[그림 3]은 ETRI에서 개발한 실제 OLED 마이크로디스플레이의 구동 이미지이다. 현재 ETRI는 백색 및 full color OLED 마이크로디스플레이를 개발 중에 있다.



[그림 3] ETRI에서 개발한 OLED 마이크로디스플레이 구동 이미지

IV. 결론

가상/증강현실 기술은 향후 ICT 시장을 혁신할 수 있는 4차 산업혁명 시대의 핵심 기술 분야로 기존 ICT 시장을 크게 변화시키고 신규시장을 창출할 수 있는 파괴적인 기술이다[1]. 가트너가 발표한 ‘Top 10 Strategic Technology For 2018’에서도 차세대 디지털 비즈니스 생태계 구축을 위한 핵심 미래 기술로서 가상/증강현실 기술을 선정하였다. 가상/증강현실 기술은 미래를 위해 매우 중요한 기술이고, 전 세계의 주요 IT 기업들이 관련 연구에 집중하고 있다. 가상/증강현실을 구현하기 위한 디스플레이 부품 중 하나로 마이크로디스플레이 역시 지속적인 기술 발전이 필요하다. 특히, 보다 우수한 성능을 위해 전 세계의 마이크로디스플레이 업체들은 OLED 마이크로디스플레이에 대한 기술 개발을 진행하고 있다. 안타깝게도 국내에서는 아직까지 OLED 마이크로디스플레이를 사업화한 사례가 없다. 우리나라는 세계 최고의 OLED 및 반도체 기술을 가지고 있다. 따라서 4차 산업혁명 시대의 핵심 영역 및 핵심 동력인 가상/증강현실의 핵심 부품인 OLED 마이크로디스플레이에 대한 관심과 투자가 조금만 더 이루어진다면, 이 분야에서도 우리나라가 독보적인 위치에 오를 수 있을 것이며, 이를 통해 신규 시장 및 일자리 창출에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] 임상우, 서경원, “AR/VR 기술”, KISTEP 기술동향브리프, 2018.
- [2] G. Haas, “Microdisplays for Augmented and Virtual Reality,” SID 2018 DIGEST, 2018, pp.506-509.
- [3] Fraunhofer FEP 홈페이지, https://www.fep.fraunhofer.de/en/Geschaeftsfelder/Mikrodisplays_und_Sensorik.html#tabpanel-1.
- [4] P. Wartenberg, M. Buljan, B. Richter, G. Haas, S. Brenner, M. Thieme, U. Vogel, P. Benitez, “High Frame-Rate 1“ WUXGA OLED Microdisplay and Advanced Free-Form Optics for Ultra-Compact VR Headsets,” SID 2018 DIGEST, 2018, pp.514-517.
- [5] K. Kimura, Y. Onoyama, T. Tanaka, N. Toyomura, H. Kitagawa, “New Pixel Driving Circuit Using Self-discharging Compensation Method for High-Resolution OLED Microdisplays on a Silicon Backplane,” SID 2017 DIGEST, 2017, pp.399-402.
- [6] T. Fujii, C. Kon, Y. Motoyama, K. Shimizu, T. Shimayama, T. Yamazaki, T. Kato, S. Sakai, K. Hashikaki, K. Tanaka, Y. Nakano, “4032ppi High-Resolutino OLED Microdisplay,” SID 2018 DIGEST, 2018, pp.613-616.
- [7] eMagin 홈페이지, <http://emagin.com/products/>.
- [8] A. Ghosh, E. P. Donoghue, I. Khayrullin, T. Ali, I. Wacyk, K. Tice, F. Vazan, O. Prache, Q. Wang, L. Sziklas, D. Fellowes, R. Draper, “Ultra-High-Brightness 2K×2K Full-Color OLED Microdisplay Using Direct Patterning of OLED Emitters,” SID 2017 DIGEST, 2017, pp.226-229.

- [9] C. Chinnock, "Understanding Trade-offs in Microdisplay and Direct-View VR Headset Designs," Insight Media, 2017.
- [10] C. Y. Park, C.-H. Hyun, S. K. Kang, B.-C. Kwak, O.-K. Kwon, "XGA OLED Microdisplay for Personal Display Application," IDW'11 Proceeding, 2011, pp.815-818.
- [11] H. Lee, H. Cho, C.-W. Byun, C.-M. Kang, J.-H. Han, J.-I. Lee, H. Kim, J. H. Lee, M. Kim, N. S. Cho, "Device Characteristics of Top-Emitting Organic Light-Emitting Diodes Depending on Anode Materials for CMOS-Based OLED Microdisplays," IEEE Photonics Journal, Vol.10, No.6, 8201809, 2018.