

융합연구리뷰

Convergence Research Review

하윤철 (한국전기연구원 차세대전지연구센터 책임연구원)
리튬 전고체전지 기술 동향

신승엽 (한국과학기술원 증강현실연구센터 연구원)
AR 테이블탑에서 Digital Twin으로의 진화

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 리튬 전고체전지 기술 동향
- 21 AR 테이블탑에서 Digital Twin으로의 진화



융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2019 May vol.5 no.5

발행일 2019년 5월 8일

발행인 김주선

편집인 최수영·권영만

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4980 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783



리튬 전고체전지 기술 동향

개인휴대 전자기기(Personal Electronic Devices: PEDs)의 보급으로 인해 많은 사람들이 한 개 이상의 배터리를 소지하고 다니는 시대가 되었다. 스마트폰 및 워치, 보조배터리와 같이 휴대용 전자기기에 사용되는 소형 이차전지에 서부터 전기자동차, 에너지저장장치(ESS) 등에 사용되는 중대형 이차전지에 이르기까지 리튬이온전지의 적용 및 사용이 확대되고 있다. 하지만 기존 액체 전해질을 포함한 리튬이온전지는 전기적, 열적 취약성을 가짐으로 셀, 모듈 및 시스템의 안전성이 새로운 산업적 이슈가 되고 있다.

이에, 본 호 1부에서는 에너지밀도와 출력밀도 측면에서 기존 이차전지들에 비해 월등히 우수한 특성을 갖고 있는 리튬이온전지에 대해 알아보았으며, 특히 고체 전해질을 활용한 리튬전고체전지의 기술 동향과 복합전극 제조기술 동향을 알아보았다. 고체 전해질의 종류에 따라 이온전도 특성과 화학적, 전기화학적, 물리적 장단점들이 알려져 있으며, 상용 리튬이온전지 수준의 에너지밀도와 출력밀도를 달성하기 위해서는 우선 액체 전해질의 리튬이온전도도에 필적하는 수준의 고체 전해질이 개발되어야 한다.

본 호를 통해 일본의 기업 및 대학에서 보유하고 있는 원천특허를 뛰어넘는 새로운 조성의 고이온전도 고체 전해질 원천기술 등의 확보를 위해 전고체전지 연구개발과 실용화를 위한 산업 생태계 조성의 필요성이 제기되었다. 전고체전지 연구개발에 대한 관심과 R&D 투자의 지속 및 실용화 관점에서의 현안들을 함께 풀어내는 협업과 융합의 기반이 마련되어 국내 산업체가 미래 이차전지 시장에서 경쟁 우위를 점할 수 있기를 기대해 본다.

AR 테이블탑에서 Digital Twin으로의 진화

일반 가정집, 식당, 사무실, 회의실 등 사람이 모이는 공간의 중간에는 테이블이 필수적으로 위치해 있다. 테이블을 중심으로 여러 명의 의견이 공유되고 조율되며 최종 결정으로까지 이어진다. 이러한 테이블이 4차 산업혁명과 디지털 문명을 만나 다시 진화의 로드맵에 참여되고 있다. 근래의 연구들은 테이블탑 기술을 통해 정보를 다양한 방법으로 융합하여 시각화하고, 이를 통해 이전과는 다른 레벨에서 참여자간 정보 공유를 촉진시킨다.

이에, 본 호 2부에서는 증강현실(Augmented Reality: AR)과 테이블탑 시스템을 이용한 디지털 트윈(Digital Twin)을 제작하는 과정에서 사용된 시각화, 상호작용(interaction), IoT 데이터 활용들을 예시를 통해 설명한다. 디지털 테이블탑은 스크린 화면으로 분리될 수 있는 2차원 화면 층위를 하나 더 포함할 수 있으며, 근래에는 다양한 분야에서 활용하기 위한 조짐이 보이고 있다. 특히, 생물 또는 무생물의 물리적 실체를 디지털 가상체로 복제한 Digital Twin과 증강/가상현실을 연결하려는 시도가 이루어지고 있다.

본 호를 통해 AR, 테이블탑 그리고 다양한 콘텐츠들의 결합이 여러 분야의 사람들을 위한 새로운 정보 교류 도구로 활용될 수 있기를 기대해 본다. 또한, 본 호에서 다루는 혼합현실(증강, 가상현실)은 Digital Twin을 위한 시각화로 사용하는 기술이 보다 미래 지향적 산업과 전문가와 일반인들이 함께 어우러져 스마트화에 동시에 참여할 수 있는 기술의 일반화를 견인하기를 기대해 본다.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 May vol.5 no.5



01

리튬 전고체전지 기술 동향

하윤철 (한국전기연구원 차세대전지연구센터)

I 서론

1.1. 리튬이온전지 개요

리튬이온전지(lithium ion battery)는 에너지밀도와 출력밀도 측면에서 기존 이차전지들에 비해 월등히 우수한 특성을 갖고 있어(그림 1), 휴대용 전자기기에 사용되는 소형 이차전지에서부터 전동공구, 전기자동차, 에너지저장장치 등에 사용되는 중대형 이차전지에 이르기까지 리튬이온전지의 적용이 확대되고 있다. 이러한 리튬이차전지는 1991년 일본 소니(Sony)사에서 리튬금속산화물계 양극활물질(LiCoO₂), 탄소계 음극활물질, 폴리에틸렌계 고분자 분리막 및 카보네이트 계열 용매(ethylene carbonate, dialkyl carbonate 등)에 리튬염(LiPF₆)을 용해시킨 전해질을 조합하여 전기화학 셀을 구현하면서 탄생하였다. 당시 전기화학적으로 활성이 가장 큰 금속인 리튬을 음극으로 적용하려는 연구개발이 활발히 진행되고 있었으나, 충전 중 리튬금속의 수지상(dendrite) 성장에 의한 내부단락(internal short-circuit)으로 휴대전화가 폭발하는 사고가 발생하는 등 리튬금속 음극을 이용한 이차전지가 기술적 장벽에 부딪혀 시장진입에 실패한 상황이었다. 리튬이온전지는 이러한 리튬금속의 산화환원 반응이 아닌 탄소 소재의 격자 내부로의 삽입(intercalation)과 탈리(de-intercalation) 반응을 음극반응으로 하는 방식으로 리튬금속의 수지상 성장 문제를 근원적으로 해결하였으며, 이를 통해 성공적으로 시장에 진입하였을 뿐만 아니라 에너지 신산업 등 새로운 시장을 주도하는 핵심 요소가 되고 있다. 이러한 리튬이온전지의 시장규모는 연간 27%의 성장세로 2025년에는 약 1,200억 달러에 이를 것이며, 전기자동차용 이차전지 분야가 이러한 성장을 주도할 것으로 예상되고 있다(그림2).

그림 1 이차전지별 에너지밀도 및 출력밀도를 비교한 Ragone 도표

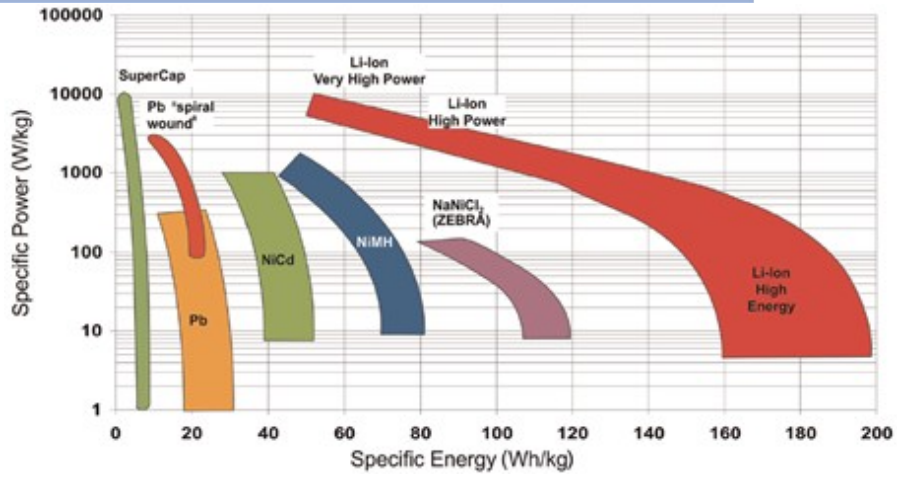
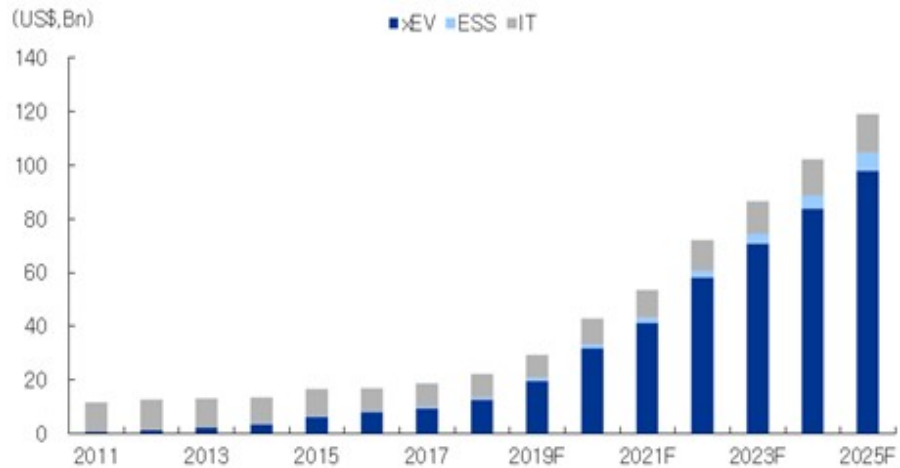


그림 2 리튬이온전지 세계시장 전망

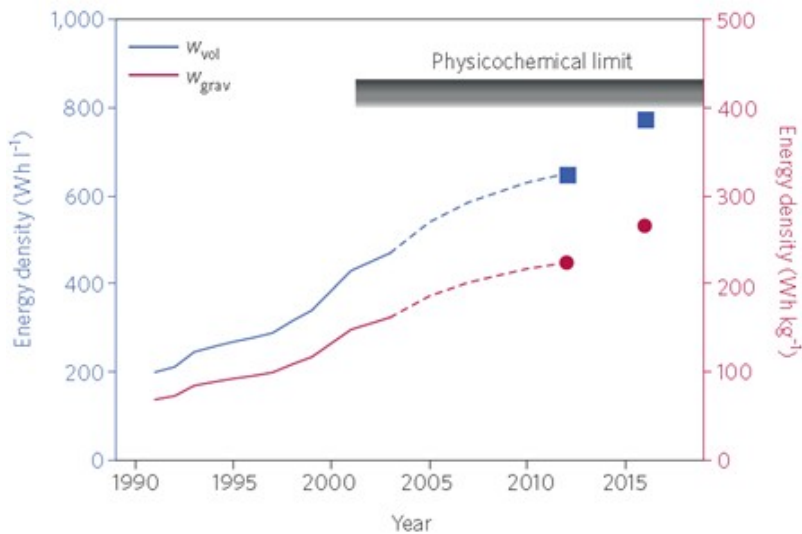


(출처 : SNE Research, 2018)

한편, 보다 높은 에너지밀도를 갖는 이차전지에 대한 산업적 요구에 따라 리튬이온전지는 활물질의 고전압화/고용량화와 함께 전지를 구성하는 부자재(집전체, 분리막 등)의 최소화를 통해 무게당 및 부피당 에너지밀도가 점진적으로 향상되어 왔다. 양극 활물질의 경우 기존의 LiCoO_2 (LCO) 소재를 비롯하여, LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA), $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NMC), LiFePO_4 (LFP) 등이 사용되고 있으며, 리튬이온전

지의 저가격화 수요에 맞춰 값비싼 원료인 코발트 금속을 줄여 나가는 방향으로 기술이 발전하고 있다. 음극 활물질의 경우 탄소 소재, 특히 저가의 흑연이 주로 사용되고 있으나, 고출력이 요구되는 분야에서는 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) 활물질을 사용하고 있으며, 고용량이 요구되는 음극에는 실리콘계 소재(SiO_x , Si/C, Si-금속합금 등)를 흑연과 혼합하여 사용하기도 한다. 이러한 노력들을 통해 리튬이온전지는 에너지밀도 측면에서 이미 재료의 이론적 한계치에 다가가고 있는 반면(그림3), 높아진 에너지밀도와 대형화, 집합화 추세에 따라 셀, 모듈 및 시스템의 안전성이 새로운 산업적 이슈가 되고 있다.

그림 3 리튬이온전지(18650 원통형)의 에너지밀도 추이



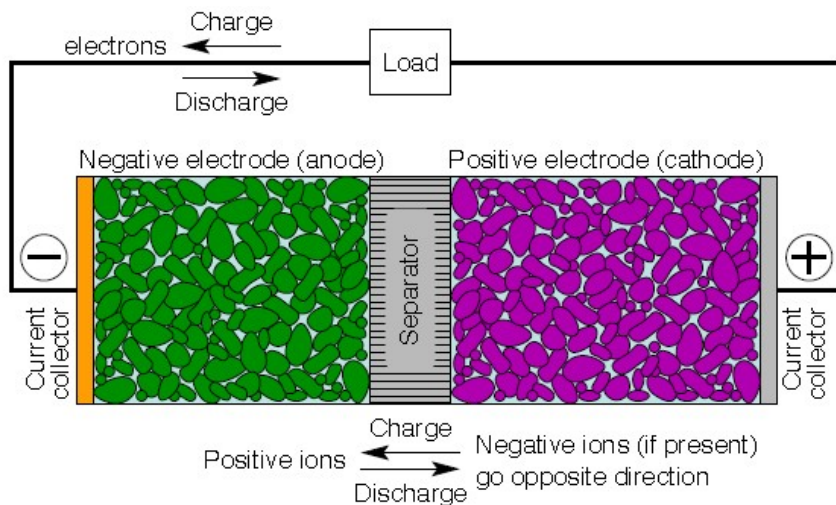
(출처 : Janek et al. 2016)

1.2. 리튬이온전지의 전기적 및 열적 취약성

2006년 소니社가 납품한 노트북용 리튬이온전지 화재사고는 Dell, Apple, IBM, Lenovo, Toshiba, Fujitsu, Hitachi 등 노트북 제조사들의 약 800만 대에 이르는 대규모 리콜사태와 이에 따른 수천억 원의 경제적 손실을 야기한 바 있다(방중민, 2006). 이 사고는 전지 제조과정에서 작은 금속조각이 배터리 내부에 들어가 내부단락을 일으킨 것으로 알려져 있다. 2016년에는 삼성전자 갤럭시노트7 모델의 배터리 결함에 의해 약

300만대의 리콜과 단종 사태로 약 7조원의 경제적 손실이 발생하였다. 이 사고도 배터리의 설계 및 제조공정 관리상의 문제로 내부단락이 발생한 것으로 발표되었다. 리튬이온전지는 그림 4와 같이 두 개의 집전판(current collector) 사이에 음극층, 분리막층, 양극층을 구성하고 각 층의 공극에 전해액이 함침되어 있는 구조이다. 음극 집전판으로 사용되는 구리 호일의 두께는 약 8~12 μm , 양극 집전판으로 사용되는 알루미늄 호일의 두께는 약 15~20 μm , 전극층의 두께는 대략 60~100 μm , 분리막층은 약 20~30 μm 로 충전 시 양극 활물질에 들어있던 리튬이 전해액으로 녹아남과 동시에 전해액 속의 리튬이온이 음극 활물질에 들어가게 되고, 방전 시에는 그 반대 현상이 일어난다. 내부단락은 양극과 음극을 분리하는 분리막의 설계 오류나 손상, 금속 이물질에 의한 관통 등에 의해 발생할 수 있으며, 이 때 흐르는 과도한 전류에 의해 국부적인 온도가 비정상적으로 상승하면서 사고에 이르게 된다.

그림 4 리튬이온전지의 구조

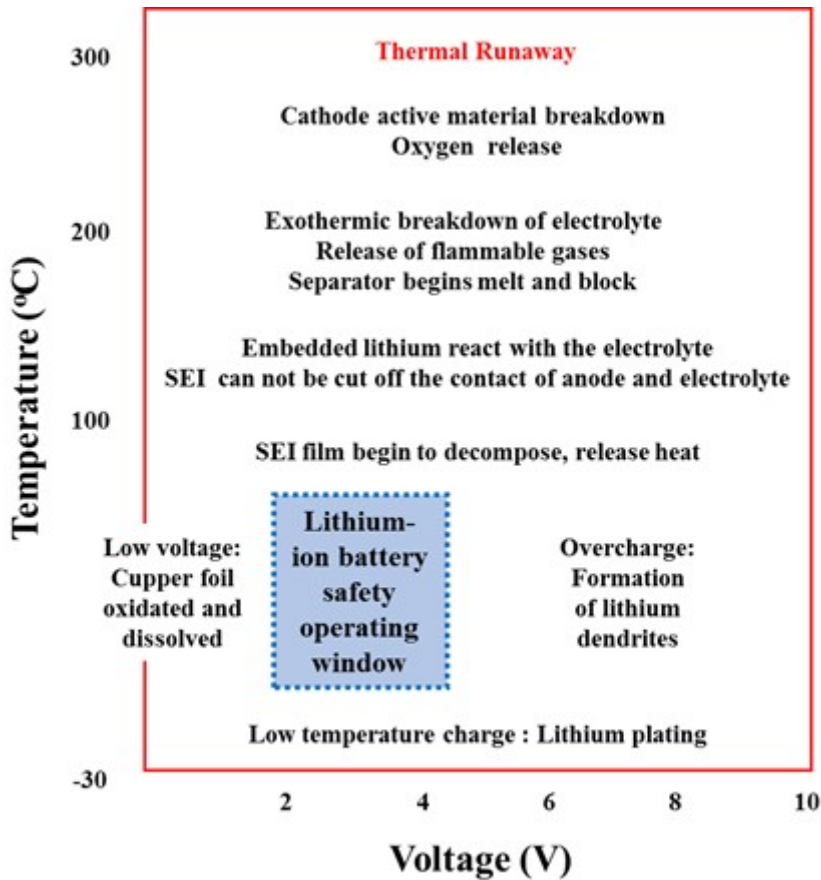


(출처 : Plett et al, 2015)

앞에서와 같은 설계나 제조공정상의 결함에 의한 내부단락이 아니더라도 리튬이온전지는 안전한 작동범위를 벗어나서 사용될 경우에는 사고에 이를 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 리튬이온전지는 대략 4.2~4.3V의 충전 상한 전압과 2.0~2.5V의 방전 하한 전압 사이에서 사용되어야 한다. 이를 벗어난 과충전의 경우는 음극에서의 리튬금속 석출과 수지상 성장, 양극 재료의 열화와 전해질 분해반응이 수반되고 과충전 전류가 지속적으로 흐를 경우 온도상승에 따른 부가적인 열화와 사고 상황이 발생할 수 있다. 또한 과방전의 경우

음극판으로 사용되는 구리 호일이 전해액에 녹아나고, 양극활물질이 분해되면서 내부단락에 이를 수 있다. 안전한 전압범위에서 사용하더라도 전지의 온도가 대략 영하 10도 이하로 내려갈 경우 리튬금속 석출반응이 발생할 수 있으며, 영상 80도 이상으로 상승할 경우 온도에 따른 다양한 부반응과 함께 축적된 열에 의해 자발적인 발화 과정인 열폭주에 이르게 될 수 있다. 특히, 고온에서의 부반응은 대부분 액체전해액의 분해반응과 관련된 발열에 기인하는 현상이므로 궁극적으로는 이러한 열폭주 가능성이 큰 액체전해질을 불연성의 고체전해질로 대체하면서 기존 리튬이온전지의 성능에 필적할 만한 특성을 갖는 고체전해질 기반의 차세대 이차전지 개발이 요구되고 있으며, 이러한 기술개발은 전지를 구성하는 재료 및 셀 공정 분야뿐만 아니라 산업적 적용 분야에 이르기까지 다학제적 융합연구를 통해서만 이루어질 수 있을 것이다.

그림 5 리튬이온전지의 전압과 온도에 따른 부반응



II 고체전해질 기술 동향

2.1. 고체전해질의 종류와 특성

가연성의 액체전해질을 대체할 수 있는 리튬이온 전도성 고체전해질은 표 1에서와 같이 고체전해질의 종류에 따라 이온전도 특성과 화학적, 전기화학적, 물리적 장단점들이 알려져 있다. 상용 리튬이온전지 수준의 에너지밀도와 출력밀도를 달성하기 위해서는 우선 액체전해질의 리튬이온전도도에 필적하는 수준의 고체전해질이 개발되어야 하는데, 액체전해질의 이온전도도는 약 10mS/cm 정도이며 음이온의 이동을 제외한 리튬이온 전달율(transference number)을 고려하면 액체전해질의 리튬이온 전도도는 약 3~4mS/cm 수준이라 할 수 있다. 현재 상업적으로 많은 관심을 받고 있는 고분자계 고체전해질의 경우 이온전도도 측면에서는 65~78℃의 온도 조건에서도 액체전해질의 1/10 수준 정도로 낮으나 리튬금속 음극을 적용한 차세대 전지로서의 가능성이 높고 대면적 멤브레인(membrane) 제조가 유리한 공정상의 장점으로 해외에서는 활발한 창업과 투자가 이루어지고 있다. 산화물계의 경우 약 1mS/cm 수준까지 전도도가 높은 고체전해질이 보고되고 있고, 리튬이온전지용 양극활물질과의 적합성도 우수한 반면, 치밀한 멤브레인 제조, 활물질-고체전해질 계면 형성 및 대면적화가 불리하여 대용량 이차전지로의 개발보다는 특수 용도의 소형 전지에 활용될 것으로 전망된다. 황화물계 고체전해질의 경우, 수분 및 산소에 민감하고 양극활물질 계면에서의 부반응 문제가 있으나, 최근 높은 이온전도도를 갖는 결정구조가 알려지면서 많은 관심을 받고 있다. 특히, 2011년 일본 동경공대와 도요타자동차에서 개발한 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) 전해질은 12mS/cm의 이온전도도를 나타냄이 발표되었고(Kamaya et al, 2011), 2016년 LGPS계열의 $\text{Li}_{9.54}\text{Si}_{1.74}\text{P}_{1.44}\text{S}_{11.7}\text{Cl}_{0.3}$ (LSiPSCl) 전해질은 25mS/cm의 이온전도도를 나타냄과 동시에 이를 이용한 전고체 셀의 고출력 특성이 발표된 이래(Kato et al., 2016) 황화물계 고체전해질 기반의 전고체전지 실용화 연구가 크게 주목받고 있다.

표 1 리튬이온 전도성 고체전해질의 종류와 장단점

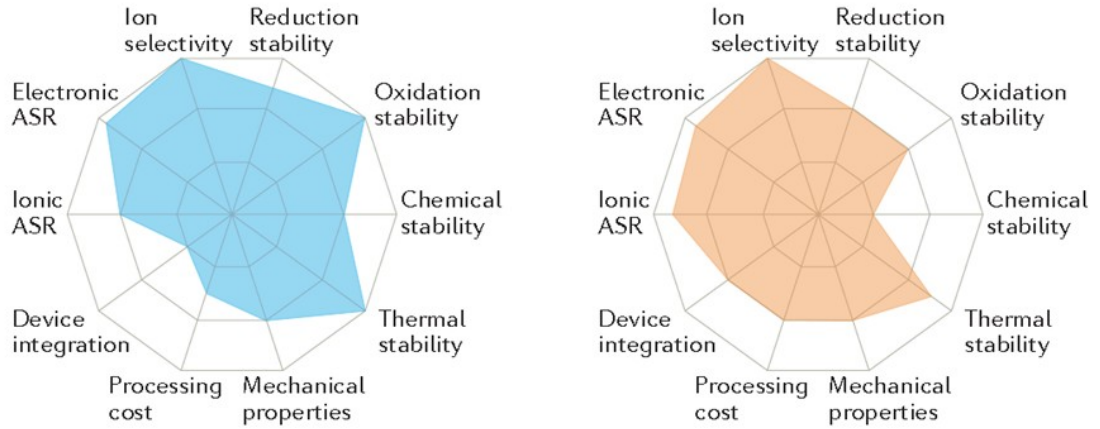
Type	Materials	Conductivity (S cm ⁻¹)	Advantages	Disadvantages
Oxide	Perovskite Li _{3-x} La _{0.56} TiO ₃ , NASICON LiTi ₂ (PO ₄) ₃ , LISICON Li ₁₄ Zn(GeO ₄) ₄ and garnet Li ₇ La ₃ Zr ₂ O ₁₂	10 ⁻⁵ –10 ⁻³	<ul style="list-style-type: none"> • High chemical and electrochemical stability • High mechanical strength • High electrochemical oxidation voltage 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-flexible • Expensive large-scale production
Sulfide	Li ₂ S–P ₂ S ₅ , Li ₂ S–P ₂ S ₅ –MS _x	10 ⁻⁷ –10 ⁻³ (LGPS > 10 ⁻² S/cm)	<ul style="list-style-type: none"> • High conductivity • Good mechanical strength and mechanical flexibility • Low grain-boundary resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Low oxidation stability • Sensitive to moisture • Poor compatibility with cathode materials
Hydride	LiBH ₄ , LiBH ₄ –LiX (X=Cl, Br or I), LiBH ₄ –LiNH ₂ , LiNH ₂ , Li ₃ AlH ₆ and Li ₂ NH	10 ⁻⁷ –10 ⁻⁴	<ul style="list-style-type: none"> • Low grain-boundary resistance • Stable with lithium metal • Good mechanical strength and mechanical flexibility 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitive to moisture • Poor compatibility with cathode materials
Halide	LiI, spinel Li ₂ ZnI ₄ and anti-perovskite Li ₃ OCl	10 ⁻⁸ –10 ⁻⁵	<ul style="list-style-type: none"> • Stable with lithium metal • Good mechanical strength and mechanical flexibility 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitive to moisture • Low oxidation voltage • Low conductivity
Borate or phosphate	Li ₂ B ₄ O ₇ , Li ₃ PO ₄ and Li ₂ O–B ₂ O ₃ –P ₂ O ₅	10 ⁻⁷ –10 ⁻⁶	<ul style="list-style-type: none"> • Facile manufacturing process • Good manufacturing reproducibility • Good durability 	<ul style="list-style-type: none"> • Relatively low conductivity
Thin film	LiPON	10 ⁻⁶	<ul style="list-style-type: none"> • Stable with lithium metal • Stable with cathode materials 	<ul style="list-style-type: none"> • Expensive large-scale production
Polymer	PEO	10 ⁻⁴ (65–78°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Stable with lithium metal • Flexible • Easy to produce a large-area membrane • Low shear modulus 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited thermal stability • Low oxidation voltage (<4 V)

(출처 : Manthiram et al, 2017)

2.2. 황화물계 고체전해질 기술

높은 이온전도도 이외에도 고체전해질이 가져야 할 핵심 특성들을 산화물과 황화물에 대하여 비교하면 그림 6과 같은 도표로 나타낼 수 있다. 산화물과 황화물은 리튬이온 전달을 측면에서는 1에 가까운 우수한 특성이 있으며(ion selectivity), 전자 전도에 대한 부도체 특성(high electronic ASR)과 이온 전도에 대한 슈퍼전도체(low ionic ASR) 및 우수한 열적, 기계적 특성을 갖고 있다. 산화물은 특히 고전압 안정성과 저전압 안정성이 우수하고 산소민감도 등 화학적 안정성도 어느 정도 우수한 반면, 제조공정 비용과 제품화 측면에서는 불리하여 대용량 전지로서의 개발은 어려운 실정이다. 반면 황화물의 경우 제조공정 비용이나 제품화 측면에서는 유리하나 고전압 안정성, 저전압 안정성 및 수분/산소 안정성 측면에서 불리하여 이를 극복하기 위한 계면 제어 공정기술 개발이 요구되고 있다.

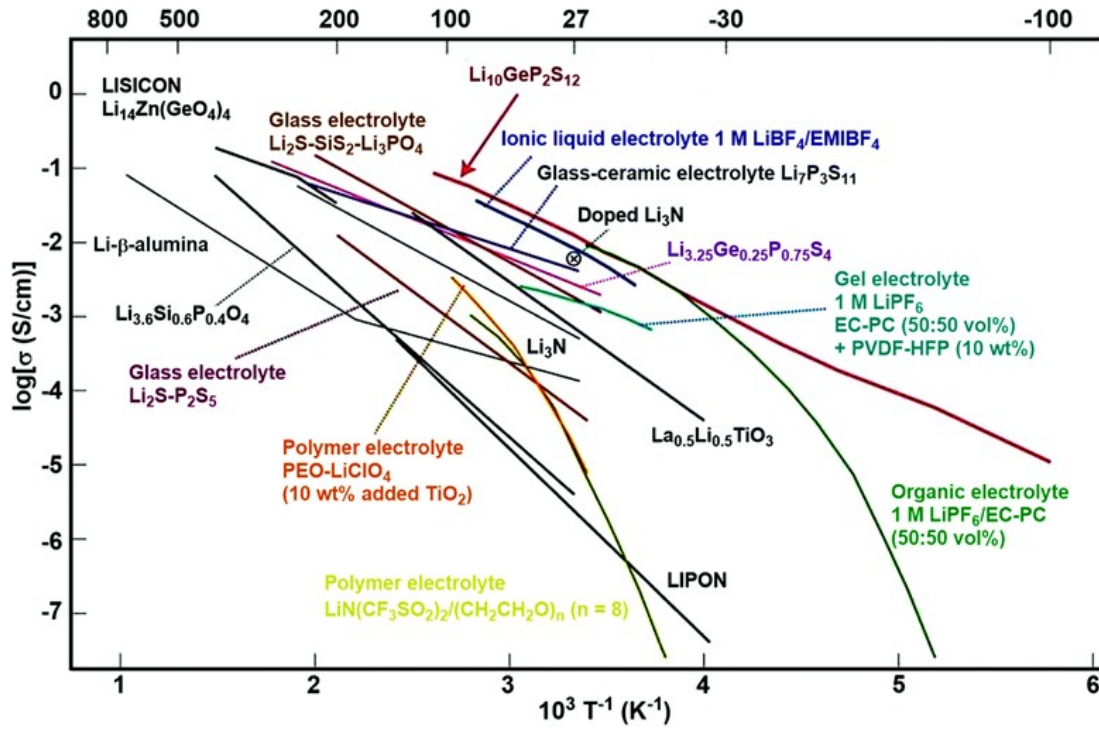
그림 6 산화물 및 황화물 고체전해질의 특성 비교



(출처 : Manthiram et al, 2017)

그림 7은 다양한 고체 및 액체 전해질들의 온도에 따른 이온전도도 특성을 비교한 것이다. 상용 액체전해질인 $\text{LiPF}_6/\text{EC-PC}$ 의 경우 상온에서의 이온전도도는 우수하나 영하 20도 이하에서는 급격히 이온전도도가 낮아져 상용 리튬이온전지가 저온에서는 제대로 작동하지 못하는 원인이 됨을 알 수 있다. 반면 2011년 발표된 LGPS 황화물 고체전해질은 상온, 저온 및 고온에서 우수한 특성을 유지함을 알 수 있다. 다만 이러한 특성은 고온 및 고압에서 가열압착하여 치밀도 95% 수준으로 가공한 펠렛형 고체전해질 막에 대한 것이므로 실제 전지를 구성하기 위한 복합전극 제조 공정에 사용되는 고체전해질 분말의 경우 표면 및 계면에서의 결정성이 떨어져 그림에서와 같은 특성이 나타나지 않을 수 있다. 한편 LSiPSCl 전해질은 고온압착한 치밀도 90% 펠렛으로 25mS/cm, 저온압착한 75% 펠렛으로 14mS/cm 수준의 높은 이온전도도가 유지된다고 발표되었다 (Kato et al., 2016). 결정질의 LGPS나 LSiPSCl 외에도 유리결정질(glass-ceramic) 고체전해질인 $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$ (LPS)도 가열압착시 17mS/cm의 이온전도도를 나타낸다고 보고되었다(Seino et al, 2014). 이러한 높은 이온전도 특성을 나타내는 황화물계 고체전해질은 일본의 기업 및 대학에서 원천특허를 보유하고 있어 새로운 조성의 고이온전도 고체전해질 원천기술 확보가 시급한 실정이다. 또한 이러한 황화물 고체전해질을 이용하여 고에너지밀도 전고체전지를 구현하기 위한 복합전극 제조에는 전기적, 화학적, 기계적 특성 향상을 위한 나노공정 및 고도분석기술들이 적용되는 대표적인 융합연구 분야라고 할 수 있다.

그림 7 리튬이온 전도성 전해질의 온도에 따른 이온전도도 추이



(출처 : Kamaya et al, 2011)

III 복합전극 제조기술 동향

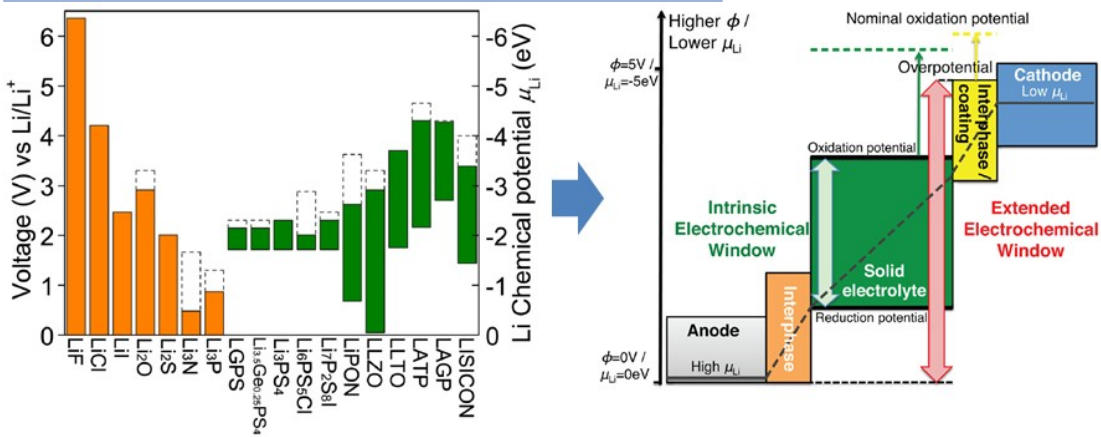
3.1. 복합전극의 기술적 현안

일반적으로 리튬이온전지는 앞의 그림 4와 같은 구조를 만들기 위해 먼저 활물질-도전재-결합제를 분산시킨 액상 슬러리를 집전체 위에 도포한 후 용매를 제거하는 방식으로 다공성 극판을 제조한 후, 양극판/분리막/음극판을 원통형, 각형, 파우치형 등 전지 형태에 따라 감거나 적층한 후 최종적으로 공극에 전해액을 함침시키는 방식으로 제조된다. 이를 통해 전극에는 활물질-도전재-결합제로 구성된 전자전도 경로와 전해액으로 연결된 이온전도 경로가 완벽히 확보됨과 동시에 활물질과 전해액의 계면이 자연스럽게 형성된다. 반면 전고체전지의 복합전극은 일반적으로 활물질-도전재-결합제-고체전해질이 섞여서 전자전도 경로와 이온전도 경로를 동시에 확보해야 하는 난점이 있다. 즉 균일한 분산이 되지 않을 경우 고립된 활물질이나 고립된 고체전해질로 인한 에너지밀도 및 출력밀도의 감소가 있을 수 있다. 이와 더불어 복합전극 내부에는 활물질과 고체전해질 분말 간의 접촉이 원활히 이루어져야 하는데, 연성이 커서 저온압착을 통한 소성변형이 가능한 황화물 고체전해질의 경우 계면 접촉 측면에서 산화물 고체전해질에 비해 장점이 있으나 황화물의 특성상 접촉된 계면에서의 화학적, 전기화학적, 기계적 안정성 확보를 위한 계면제어 기술이 필요하다.

다른 고체전해질에 비하여 황화물 고체전해질은 그림 8에서 보는 바와 같이 전기화학적 안정창이 매우 좁아서 초기 충전에서 전해질이 분해되는 부반응이 발생한다. 이러한 부반응을 최소화하기 위해 LGPS나 LSiPSCl의 경우 흑연 음극 대신 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 음극을 사용하거나 흑연 음극에 적용할 수 있는 LPS 또는 할로겐 원소를 첨가한 LPSX 고체전해질을 음극용으로 채용하기도 한다. 양극의 경우 활물질 표면에서의 분해를 억제하기 위해 리튬이온전도성이 있는 계면상(inter-phase)을 도입하여 황화물 고체전해질의 산화반응을 억제할 수 있다. 이러한 전기화학적 분해반응은 도전재로 사용되는 탄소재료와의 접촉 계면에서도 발생함이 알려져 있다. 또한, 충방전이 아닌 단순 접촉 상태에서도 리튬금속산화물과 황화물 고체전해질은 그림 9(a)와 같이 활물질과 전해질 내 리튬의 화학적 포텐셜(potential) 차이로 인해 공간전하층(space charge layer)을

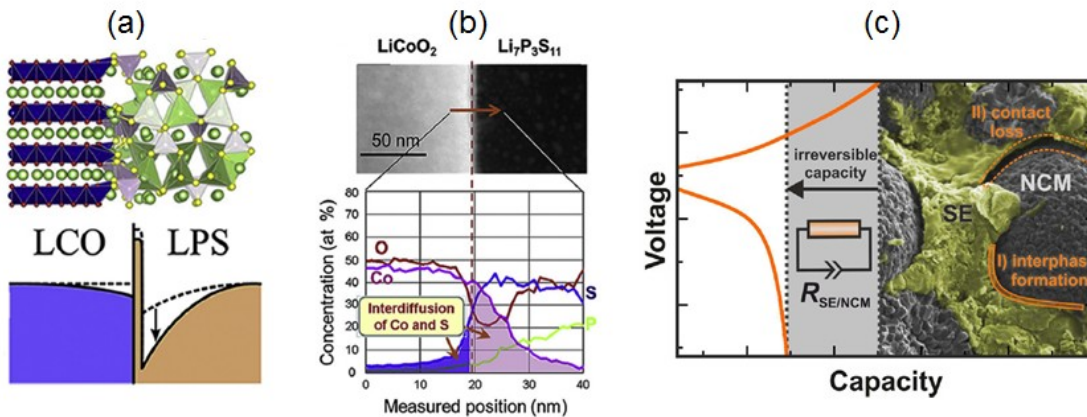
형성할 뿐만 아니라 그림 9(b)와 같이 활물질 내 금속원자와 전해질 내 황 원자의 상호 확산으로 인해 계면저항이 커지거나 계면의 재료물성이 열화되는 문제도 알려져 있다(Hao et al, 2018). 이러한 전기화학적, 화학적 부반응에 의한 계면 열화와 더불어 그림 9(c)와 같이 충방전 중 활물질의 부피변화에 의해서 계면접촉을 잃게 되는 현상도 보고되고 있다(Koerver et al, 2017).

그림 8 고체전해질의 전기화학적 안정창 및 계면상 도입 필요성



(출처 : Zhu et al, 2015)

그림 9 활물질-고체전해질 계면에서의 화학적, 기계적 부반응

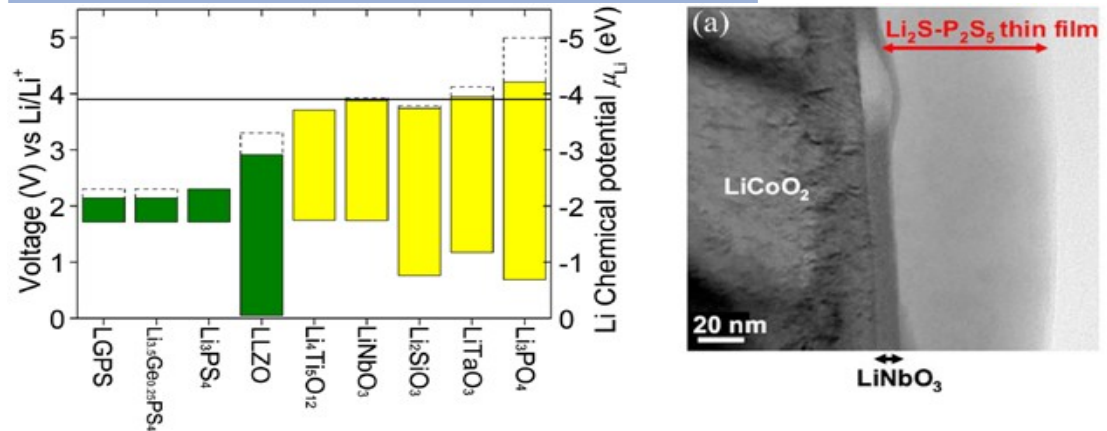


(출처 : Koerver et al. 2017)

3.2. 복합전극의 현안 극복 방안

양극활물질-고체전해질 계면에서의 전기화학적, 화학적 부반응의 문제는 일반적으로 LiNbO_3 와 같은 산화물 고체전해질을 활물질 표면에 나노크기 두께로 코팅함으로써 해소할 수 있음이 알려져 있다(그림 10). LiNbO_3 의 코팅은 주로 유동층 코팅 장비를 사용하여 이루어지는데 Nb의 전구체로 사용되는 Nb-ethoxide 가격이 비싸 나노크기 두께에도 불구하고 활물질의 단가를 크게 높이는 것으로 알려져 있어 저가 전구체, 코팅두께 최적화 및 새로운 코팅 기법 개발이 필요한 실정이다. 음극활물질-고체전해질 계면에서의 부반응 문제는 궁극적으로는 리튬금속을 도입한 고에너지밀도 전고체전지를 고려해야 하며(Janek et al, 2016), 고체전해질의 환원반응으로 생성되는 계면상을 제어함으로써 리튬금속과의 전기화학적, 화학적 안정성을 확보할 수 있다. 특히 할로겐 원소의 도입을 통해 리튬금속 적합성이 크게 향상됨이 보고되고 있다(Choi et al, 2018a).

그림 10 계면상 코팅 기술을 이용한 전기화학적, 화학적 부반응 억제

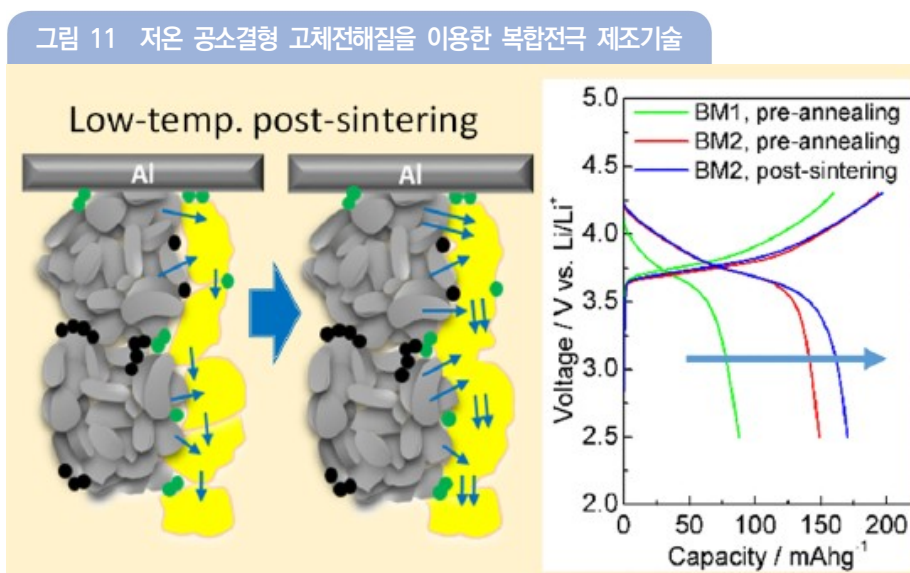


(출처 : Zhu et al, 2015; Sakuda et al, 2010)

도전재-고체전해질 계면에서의 전기화학적 부반응의 문제는 비정질 탄소 표면에 존재하는 다수의 작용기가 직접적인 영향을 미침이 밝혀졌고 고온 열공정을 통해 새로운 형태의 도전재인 결정성 증공형 나노탄소 소재를 제조하고 이를 도전재로 사용함으로써 부반응 문제를 해소한 연구가 보고되었다(Park et al, 2019). 활물질의 부피변화에 따른 기계적 계면 열화 문제는 부피변화를 최소화할 수 있는 활물질의 조합, 이를테면 LiCoO_2 활물질과 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 의 부피변화 특성이 반대인 것을 이용한 혼합 양극을 통해 해소하거나(Koerver et al, 2018), 그림 11과 같이 복합전극 내에서 저온 공소결이 가능한 고체전해질 개발을 통해 활물질-고체전해질

계면의 접촉 특성을 향상시키는 연구(Choi et al, 2018b) 등이 진행되고 있다. 흑연 음극의 경우 부피변화가 더 크고 리튬금속 음극의 경우 훨씬 큰 부피변화를 수반하고 있어 음극의 부피변화를 최소화할 수 있는 전극구조 연구에도 관심이 증가하고 있다.

이러한 노력과 함께 보다 우수한 특성의 복합전극 제조를 위한 새로운 공정기술 연구도 활발히 진행되고 있다. 일반적인 분말 혼합과 슬러리 코팅 방식 외에도 극판에 액상 고체전해질 전구체를 침투시키는 방식이나 다공성 고체전해질 층을 먼저 구성하고 전극물질을 침투시키는 방식 등 전자/이온 전도 경로의 최적화와 활물질-고체전해질 계면 특성의 향상을 위한 노력이 경주되고 있다.



(출처 : Choi et al, 2018b)

IV 결론

일본의 도요타자동차와 파나소닉은 리튬 전고체전지를 포함한 전기자동차용 차세대 이차전지 개발을 위한 합작회사 신설을 추진하는 등 전고체전지의 실용화를 위한 연구개발에 박차를 가하고 있다(Nikkei, 2019). 국내에서도 갤럭시노트7 배터리 사고 이후 전고체전지 연구개발에 대한 관심과 연구개발 투자가 증가하고 있으나 실용화 관점에서의 현안들을 공동으로 풀어내고자 하는 협업과 융합의 기반은 마련되지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 최근 고체전해질, 전고체전지용 활물질 및 셀 제조 분야에 관심 있는 국내 중소중견기업들과 전고체전지 연구개발을 수행해 오고 있는 연구기관들 사이에 관련 산업 육성과 전고체전지 실용화를 위한 협의체를 구성하는 등 산업 생태계 조성을 위한 노력들이 이루어지고 있음은 그나마 다행스러운 일이다. 이러한 노력들이 모여 에너지밀도와 출력밀도, 가격 및 안전성에서 상용 리튬이온전지를 능가할 수 있는 차세대 전고체 이차전지 개발을 앞당김으로써 국내 산업체가 미래 이차전지 시장에서 경쟁 우위를 점할 수 있기를 기대해 본다.

저자_ **하윤철** (Youn Cheul Ha)

• 학력

서울대학교 재료공학부 박사
서울대학교 자원공학과 석사
서울대학교 자원공학과 학사

• 경력

現) 한국전기연구원 차세대전지연구센터 책임연구원

참고문헌

- 1) 방종민 (2016). SONY 노트북배터리 리콜사과의 교훈, 삼성방재연구소 위험관리지 가을호
- 2) Choi, S. J., Lee, S. H., Ha, Y. C., Yu, J. H., Doh, C. H., Lee, Y., Park, J. W., Lee, S. M. and Shin, H. C. (2018a). Synthesis and electrochemical characterization of a glass-ceramic Li₇P₂S₈I solid electrolyte for all-solid-state Li-ion batteries, *Journal of Electrochemical Society* 165, A957-A962
- 3) Choi, S. J., Choi, S. H., Bui, A. D., Lee, Y. J., Lee, S. M., Shin, H. C. and Ha, Y. C. (2018). LiI doped sulfide solid electrolyte: enabling a high-capacity slurry-cast electrode by low-temperature post-sintering for practical all-solid-state lithium batteries, *ACS Applied Materials & Interfaces* 10, 31404-31412
- 4) Hao, F., Han, F., Liang, Y., Wang, C. and Yao, Y. (2018). Architectural design and fabrication approaches for solid-state batteries, *MRS Bulletin* 43, 775-781
- 5) Janek, J. and Zeier, W. G. (2016). A solid future for battery development, *Nature Energy* 1, 16141
- 6) Kato, Y., Hori, S., Saito, T., Suzuki, K., Hirayama, M., Mitsui, A., Yonemura, M., Iba, H. and Kanno, R. (2016). High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy* 1, 16030
- 7) Kayama, N., Homma, K., Yamakawa, Y., Hirayama, M., Kanno, R., Yonemura, M., Kamiyama, T., Kato, Y., Hama, S., Kawamoto, K. and Mitsui A. (2011). A lithium superionic conductor, *Nature Materials* 10, 682-686
- 8) Koerver, R., Aygun, I., Leichtweiß, Dietrich, C., Zhang, W., Binder, J. O., Hartmann, P., Zeier, W. G. and Janek, J. (2017). Capacity fade in solid-state batteries: interphase formation and chemomechanical processes in nickel-rich layered oxide cathodes and lithium thiophosphate solid electrolytes, *Chemistry of Materials* 29, 5574-5582
- 9) Koerver, R., Zhang, W., Biasi, L., Schweidler, S., Kondrakov, A. O., Kolling, S., Brezesinski, T., Hartmann, P., Zeier, W. G. and Janek, J. (2018). Chemo-mechanical expansion of lithium electrode materials - on the route to mechanically optimized all-solid-state batteries, *Energy & Environmental Science* 11, 2142-2158

- 10) Manthiram, A., Yu X. and Wang, S. (2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes, *Nature Review Materials* 2, 16103
- 11) Park, S. W., Oh, G., Park, J. W., Ha, Y. C., Lee, S. M., Yoon. S. Y., Kim, B. G. (2019). Graphitic hollow nanocarbon as a promising conducting agent for solid-state lithium batteries, *Small*, in press, <https://doi.org/10.1002/sml.201900235>
- 12) Plett, G. L. (2015). *Battery management systems vol 1*, Artech House
- 13) Sakuda, A., Hayashi, A., Ohtomo, T., Hama, S. and Tatsumisago, M. (2010). LiCoO₂ electrode particles coated with Li₂S-P₂S₅ solid electrolyte for all-solid-state batteries, *Electrochemical and Solid-State Letters* 13, A73-A75
- 14) Seino, Y., Ota, T., Tanaka, K., Hayashi, A. and Tatsumisago, T. (2014). A sulphide lithium super ion conductor is superior to liquid ion conductors for use in rechargeable batteries, *Energy & Environmental Science* 7, 627-631
- 15) Zhu, Y., He, X. and Mo, Y. (2015). Origin of outstanding stability in the lithium solid electrolyte materials: insights from thermodynamic analyses based on first-principles calculations, *ACS Applied Materials & Interfaces* 7, 23685-23693
- 16) Nikkei (2019). <https://asia.nikkei.com/Business/Business-deals/Toyota-and-Panasonic-to-build-electric-car-batteries-together>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 May vol.5 no.5



02

AR 테이블탑에서 Digital Twin으로의 진화

신승엽, 우운택 (KAIST, 증강현실연구센터)

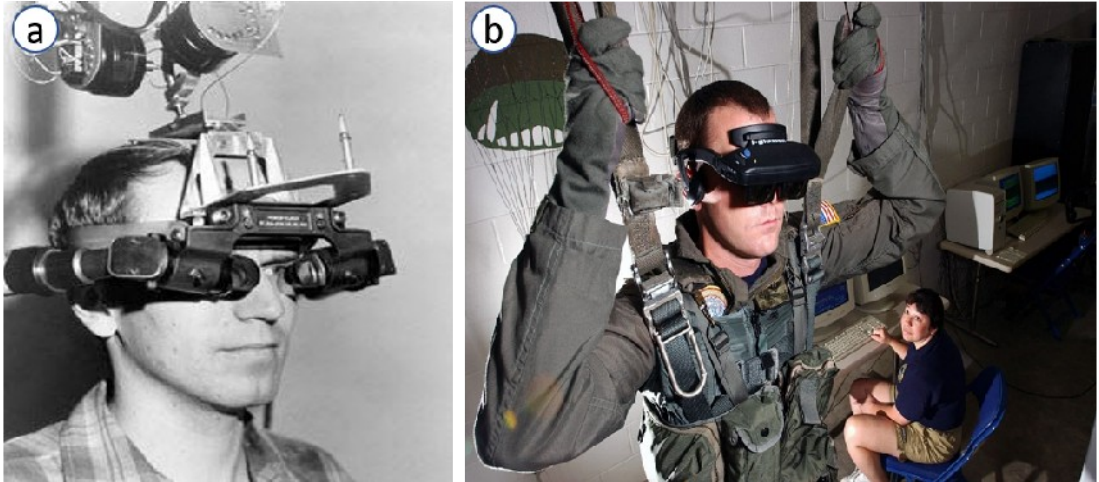
I 서론

최근 정보통신기술(ICT)의 융합 솔루션들이 제4차 산업혁명(第四次 産業 革命; Fourth Industrial Revolution)이라는 큰 주제로 서서히 일반인들의 삶에 다가오고 있다. 18세기 이후 인류가 경험하는 네 번째 산업 혁명이다. 이 네 번째 혁명의 주요한 이슈는 디지털을 우리 일상과 결합하는 것으로서 사물인터넷(Internet of Things: IoT), 인공지능(AI), 가상/증강 현실, 로봇 등과 같은 분야에서 새로운 기술 혁신이다.

인류에게 다가오는 이런 새롭게 진화된 형태의 기술혁신들은 디지털화 되고 생물학적, 물리적, 실세계를 빅데이터의 관리 관점에서 융합시켜서, 경제와 산업의 모든 분야에 영향을 미치는 다양한 신기술로 대두되고 있다. 디지털인 가상 세계와 물리적인 실세계의 통합은 O2O(Online to Offline)를 통해 진행되고, 생물학적 세계에서는 인체의 정보를 디지털 세계에 접목하는 기술인 스마트 스킨, 스마트 watch 등을 이용하여 원격 모바일 헬스케어 등을 실현하고 있다. 가상현실(Virtual Reality: VR)과 증강현실(Augmented Reality: AR) 기술 역시 물리적 세계와 디지털 세계의 융합 기술로써 과거 상상으로만 존재하던 기술이 이제는 실생활에 응용되고 유용한 도구로 발전하고 있다.

미국의 컴퓨터 과학자이자 인터넷기반의 컴퓨터 그래픽의 선구자인 이반 에드워드 서덜랜드(Ivan Edward Sutherland)는 1966년에서 1968년 사이 하버드대학 전기공학과와 교수로 재직하며 제자 밥 스프렐(Bob Sproull)의 도움으로 최초로 VR과 AR 헤드 마운트 디스플레이(Head Mounted Display: HMD) 시스템을 1968년에 고안하였다. 이 최초의 시스템은 사용자 인터페이스나 실용성 면에서 초보적인 수준이었다. 머리에 써야 하는 HMD의 무게 때문에 천장에 연결하여 사용했고, 가상현실 환경은 단순선(wireframe)으로 만들어진 공간에 지나지 않았다.

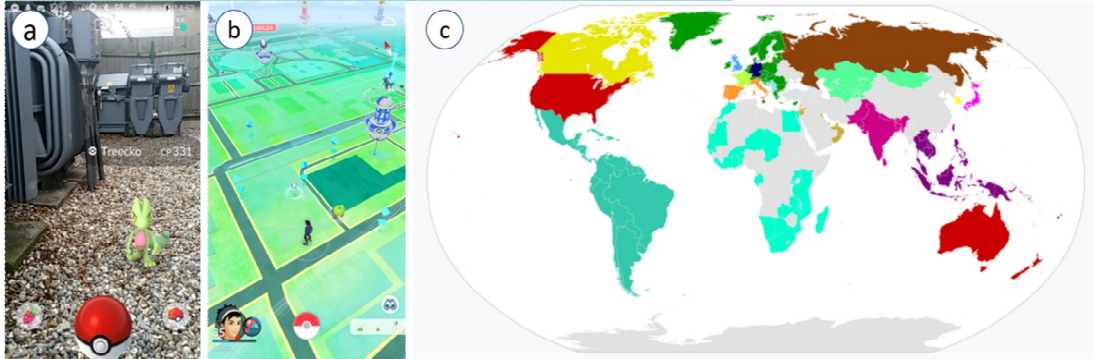
그림 1 (a)초기 AR/VR HMD의 시작과 (b)초기활용



(출처 : Geslin, 2013; Wikipedia, 2018)

이렇게 시작된 AR은 미래지향적 기술로써 연구소 중심으로 성장하다가 2016년에 ‘포켓몬 고(Pokémon GO)’의 상업적 성공으로 사업성과 일반인을 위한 서비스로서의 가능성을 보여주었다(그림 2). 포켓몬 고는 부분 유료화인 위치 기반 증강현실 iOS, 안드로이드 게임으로 나이앤틱(Niantic, Inc.)사가 개발한 엔터테인먼트 모바일 어플리케이션이다. 2016년 7월 6일 미국, 오스트레일리아, 뉴질랜드에서 출시되어, 소셜미디어를 통해 큰 화제를 불러일으켰다. 대한민국에는 2017년 1월 24일, 구글 플레이 스토어와 앱 스토어를 통해 배포되었다. 이용자의 현실 공간 위치에 따라 모바일 기기 상에 출현하는 가상의 포켓몬을 포획하고 훈련시켜, 대전을 하고 거래도 할 수 있는 것이 이 게임의 특징이다. 2016년 구글 올해의 검색어에서 전 세계 기준으로 1위를 차지하였고(Webster, 2019), 닌텐도 주가는 1주일 새 93%나 폭등하였다(YTN, 2016).

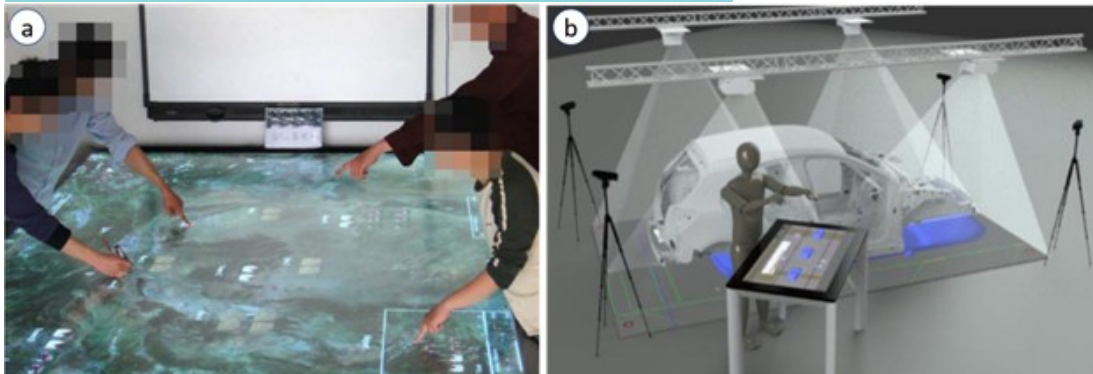
그림 2 (a)포켓몬 고의 게임화면과 (b)게임내의 지도, (c)분포영역



(출처 : Wikipedia, 2019)

AR과 함께 본고에서 다루는 또 하나의 주요항목인 테이블탑(table-top)은 인간의 역사와 함께할 만큼 오랜 시간 우리 삶과 직접적인 관련이 있어 왔다. 오랜 역사 동안 식탁 형태로 각 가정의 중앙에 위치하고 있고, 사무실과 도서관에 책상 형태로 배치되어 있는 모습은 자연스러운 우리 삶의 모습이다. 현대 디지털 문명은 이 테이블탑을 다시 진화의 로드맵에 참여시키고 있다. 또한 근래 연구들로부터 테이블탑이 가지는 성격 중 자연스럽게 토론 환경을 구성하는 기능과 디지털 기술로 정보를 다양한 방법으로 융합하여 시각화하고, 손쉽게 입출력하는 기술들이 연구과제로 남아있다. 그림 3은 응급상황을 지원하는 테이블탑과 제조공정을 관리하는 분야에 테이블탑을 이용하려는 연구들의 사례를 보여주고 있다.

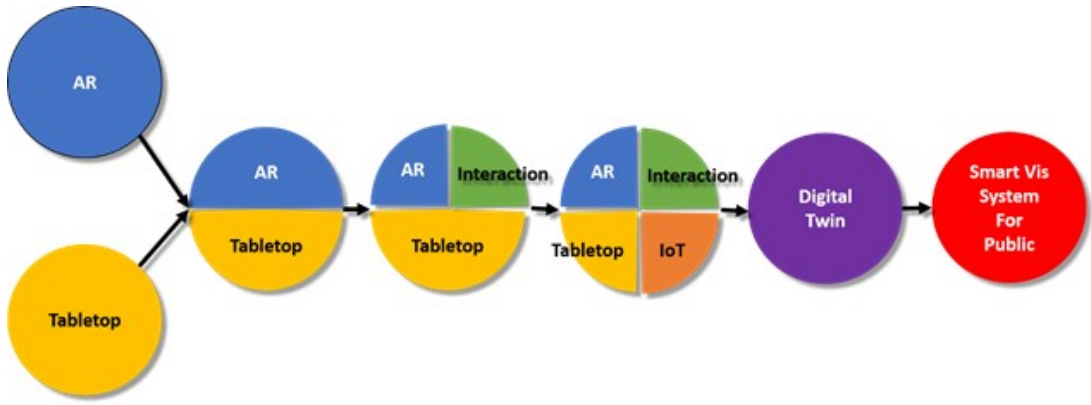
그림 3 테이블탑 관련 연구: (a) 응급상황지원, (b) 제조과정관리



(출처 : Qin, Liu, Wu, & Shi, 2012, Otto, Prieur, Agethen, & Rukzio, 2016)

본고에서는 증강현실(AR)과 테이블탑 시스템을 이용한 디지털 트윈(Digital Twin)을 제작하는 과정에서 사용된 시각화, 상호작용(interaction), IoT 데이터 활용들을 예시를 통해 설명한다. 이 AR 테이블탑의 목표는 일반인들을 위한 Digital Twin 시각화 도구를 제공하는 것으로, AR이 주는 상호 보완적인 시각화(Complementary Visualization)의 기능을 활용하고, 테이블탑의 기본적 속성으로 다수의 유저가 동시에 접근 가능한 성격을 이용하여 함께 논의하는 환경을 구성하는 것이다. 그리고, 이런 환경에서 적합한 상호작용을 논의하고, IoT센싱으로 실시간 정보를 융합하여 지원할 수 있는 Digital Twin 서비스들을 구성할 수 있다. 아래 그림 4는 본 기고문이 다룰 AR 테이블탑 시스템이 활용하게 될 지식과 아이디어들을 단계별로 보여준다.

그림 4 AR과 테이블 탑이 Digital Twin으로 진화되는 과정

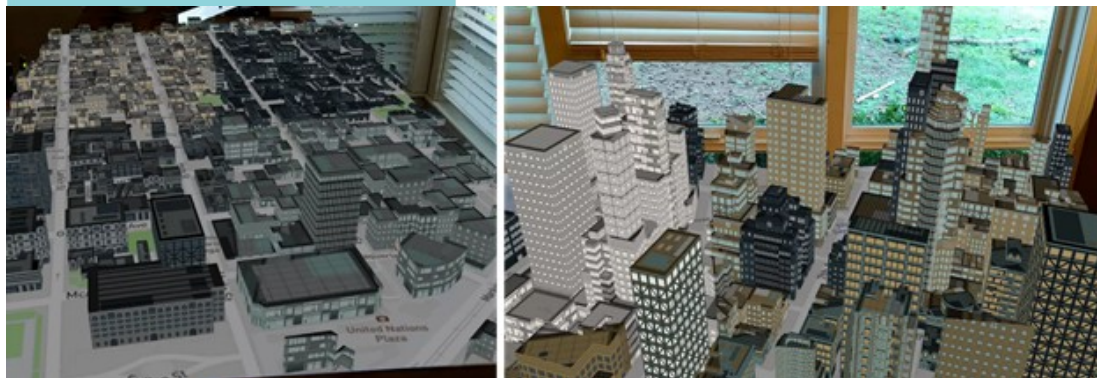


II 본론

1. AR과 테이블 탑의 융합

이 글에서 최종적으로 말하는 테이블탑은 유저 상호작용이 가능한 디지털 테이블탑이다. 큰 식탁과 같은 일반 테이블도 테이블탑으로 표현될 수 있겠지만, 디지털 테이블탑은 스크린 화면으로 분리될 수 있는 2차원 화면 층위를 하나 더 포함할 수 있다. AR은 그림 2의 게임처럼 엔터테인먼트 분야에서 대체로 성공 사례를 보여주었고, 근래에는 다양한 분야에서 활용하기 위한 조짐이 보이고 있다. 그림 5는 3차원으로 제작된 모델을 기반으로 AR 도심을 보여주고 있다. 특징적인 것은 테이블 탑 위의 미니어처로 보이고 있는 AR 도시이다. 이렇듯, AR, 테이블탑 그리고 다양한 콘텐츠들의 결합은 여러 분야의 사람들을 위한 새로운 정보 교류 도구로 활용될 수 있다. 그림 5는 MapBox의 Tabletop AR 예제를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 테이블 위로 AR 도시를 보여주고, Unity의 AR 인터페이스와 위치 서비스를 이용하여 3D 지도와 위치 데이터를 AR 카메라 피드로 증강할 수 있는 기술을 구현한다.

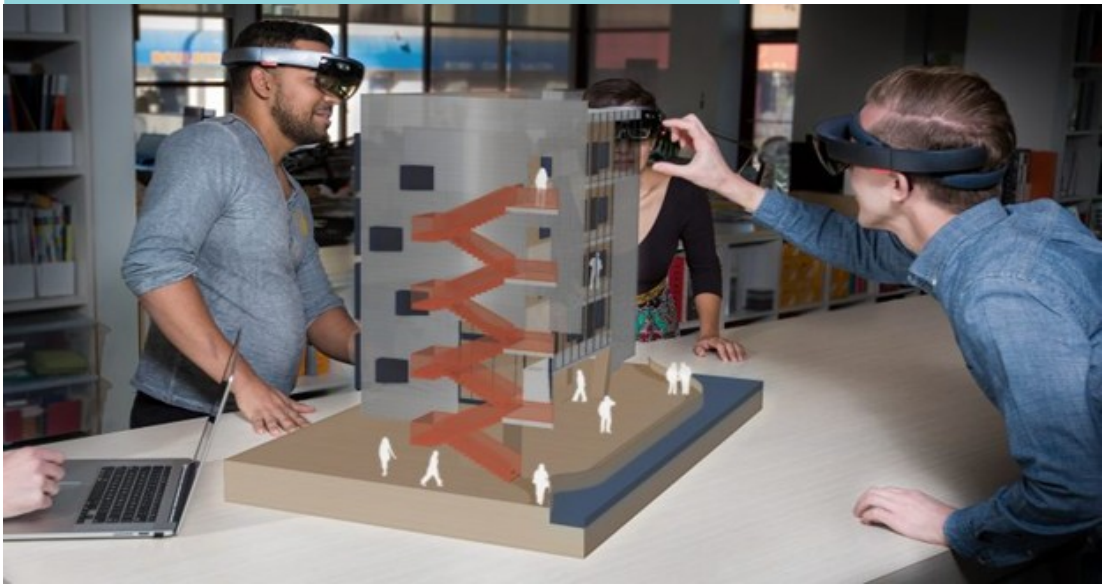
그림 5 MapBox의 Tabletop AR 중



(출처 : mapbox, 2018)

마이크로소프트社의 홀로렌즈(HoloLens)같은 AR 디바이스의 발전은 사용자들이 미래에 실제 거주할 건물의 설계, 시공 및 운영에서 품질, 통신 및 효율성을 향상시킬 수 있게 해준다. 그림 6의 SketchUp Viewer는 Windows 스토어에서 사용할 수 있는 최초의 확장 가능한 상업용 HoloLens 응용프로그램이다. 이렇게 과거 HMD형태(그림 1a)의 AR 디바이스들을 단계적으로 스마트 글라스 형태로 소형화되고, 성능도 일반 PC에서 처리하는 데이터를 렌더링 할 수 있을 만큼 계속적으로 진화되고 있다.

그림 6 트리블의 마이크로소프트 HoloLens용 SketchUp Viewer

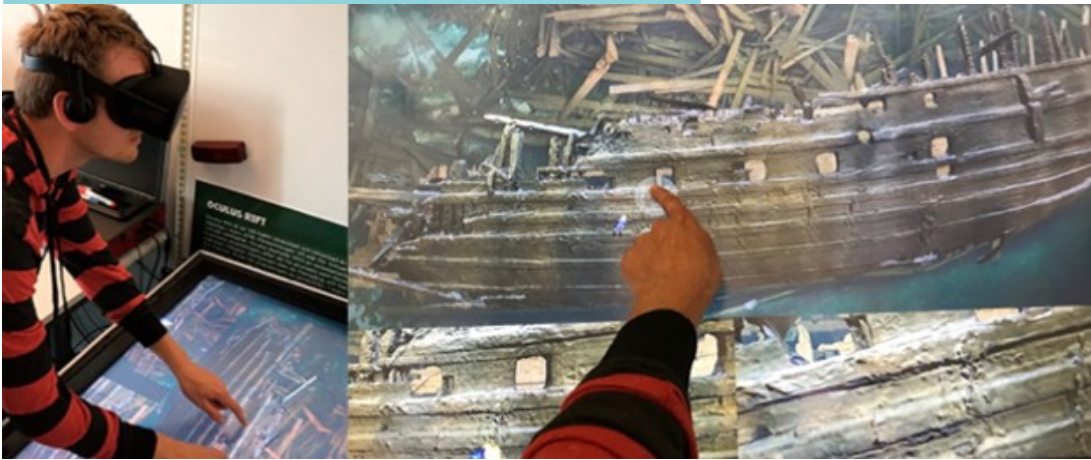


(출처 : Desk, 2016)

리서치 분야에서도 테이블탑과 AR/VR을 결합하려는 시도들은 있어 왔다. Sundén et al(2017)은 문화유산의 가치가 있는 오래된 난파선의 상태 파악과 복원을 VR과 결합된 테이블탑을 이용하여 협업하는 방법을 연구하였다. 이런 일반인을 위한 시각화 도구와 문화유산의 결합은 박물관이나 과학센터를 방문하는 사람들을 대상으로, 과학데이터 탐사를 위한 상호적이고 몰입적인 해결책을 제시함으로써, 방문객들은 스스로 문화적, 역사적 또는 고고학적으로 중요한 물체의 3D 스캔과 같은 과학적 데이터의 관람을 자기중심적으로 감상 할 수 있다. 이 솔루션은 스크린 터치와 제스처 같은 직관적인 사용자 인터페이스를 갖춘 대화형 멀티 터치 테이블로 구성되며, HMD 디스플레이와 옵션 무선 제어가 결합되어 제공된다. 사용자는 과학적 자료를 탐색할 수 있지만, 실제로 찾아보고 탐험하는 것이 불가능할 수도 있는 역사적 사물이 형성된 환경도 탐색할 수 있다.

또한, 사용자들은 함께 자료를 탐구하고 다른 사용자들은 조작을 통해 정보를 습득할 수 있다. 이런 상호작용을 이용한 정보 교류는 데이터를 탐구하기 위한 수많은 상호작용 기법만이 아니라 데이터의 다양한 시각화 기법과 결합하여 다양한 연령 또는 장애를 가진 방문객에게 유용하게 설계되었다. 그림 7의 시나리오 구성은 물리적으로 해저에 놓여 있는 침몰된 16세기 선박의 재구성된 데이터를 탐사하고 이해하는 것이다.

그림 7 문화유산 탐색을 위한 테이블탑과 VR의 상호작용 연구

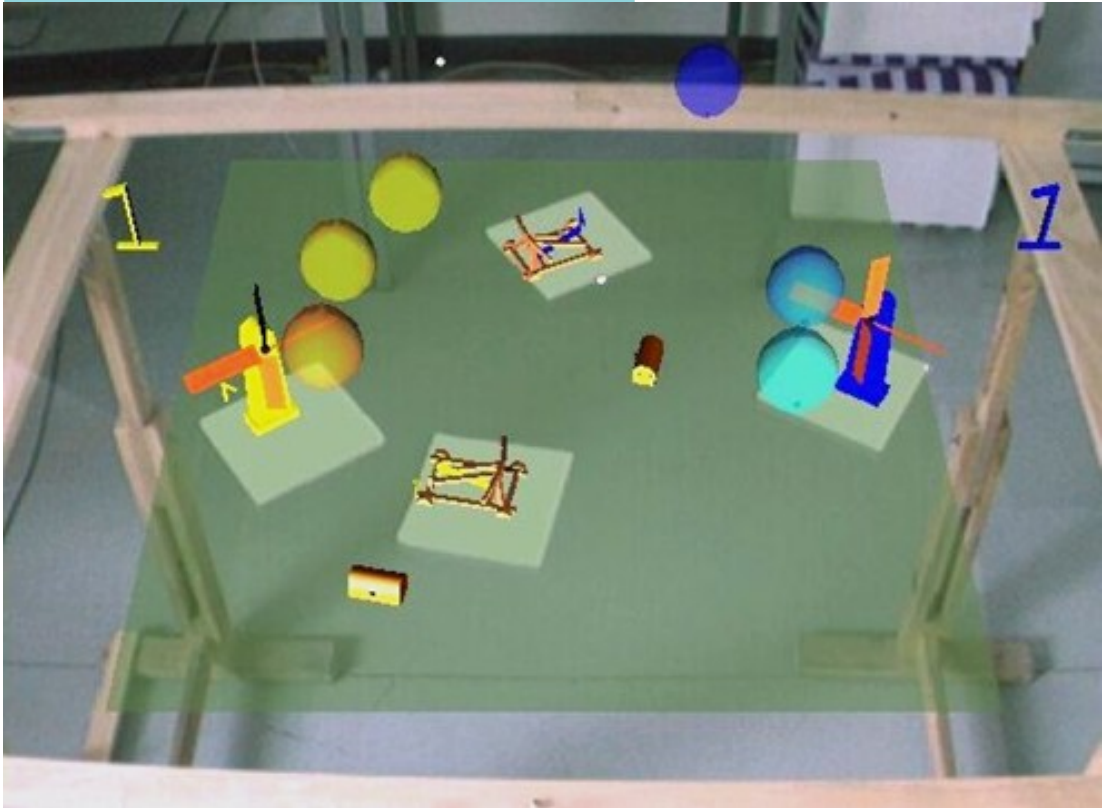


(출처 : Sundén, Lundgren, & Ynnerman, 2017)

2. 새로운 Interaction의 발굴

또한 AR과 테이블탑이 결합된 학습과 정보공유 기술은 사용자가 직접 제어할 수 있는 상호작용(interaction) 기술과 함께 발전하고 있다. Ulbricht and Schmalstieg(2003)는 유형 증강 현실(Tangible Augmented Reality: TAR)이 멀티플레이어 컴퓨터 게임에 매우 효과적인 환경이라는 것을 증명하려고 노력하였다(그림 8). TAR은 유형 사용자 인터페이스(Tangible User Interfaces, TUIs) 내의 유형 객체(Tangible Objects)를 제어장치로 이용하는 사용자 인터페이스방식이다. TUI는 Natural User Interface(NUI)와는 달리 제스처와 같은 이벤트 기반의 제어 보다는 정밀한 제어를 위해 사용된다(Fitzmaurice & Buxton, 1997). 그림 8의 게임은 이런 정밀한 제어를 통해 상대방을 정확히 공격하고 방어하는 방식으로 게임을 구성하였다. 이 연구는 AR, TUIs, 테이블탑이 다양한 상호작용을 서로 지원할 수 있는 조화로운 시스템이 될 수 있는 가능성을 보여주었다.

그림 8 오브젝트 상호작용을 이용한 AR 테이블탑 게임



(출처 : Ulbricht & Schmalstieg, 2003)

이런 AR, TUIs, 테이블탑 기술을 융합하여 시스템으로 제작하고, 실제 상황에 응용하려는 시도는 계속 이어지는데, Nilsson et al(2011)은 위기관리 시나리오에서 AR 기술이 구조대, 경찰, 군 장병의 협력 (collaboration of non-technical experts)을 지원하는 도구로 활용된 사례를 보여준다. 전통적으로 통합 AR 시스템을 설계하는 방법으로 서로 다른 조직의 전문가 간 협력을 개선하는 동시에 개인의 요구를 반영하는 연구는 거의 없었다. 이 연구는, AR 융합 시스템을 공유 맵 상으로 조작할 수 있는 양방향 데이터 뷰(data view)를 제공하여 공동 업무를 지원하였다. 시스템이 개발되는 동안 각 조직의 대표실무자들과 실제 환경과 가깝게 수행된 모의 위기 상황을 시뮬레이션 하여 사용자들이 AR 융합 시스템에 대해 긍정적인 반응을 보였으며, 실제 환경에서 사용하고 싶어 한다는 것을 보여주었다. 이 AR 시스템을 전통적 도구(Standalone 환경)와 비교 실험함으로써 몇 가지 성능상의 이점을 보여주었다. 결론적으로, 협업을 위한 시스템 설계 뿐만 아니라

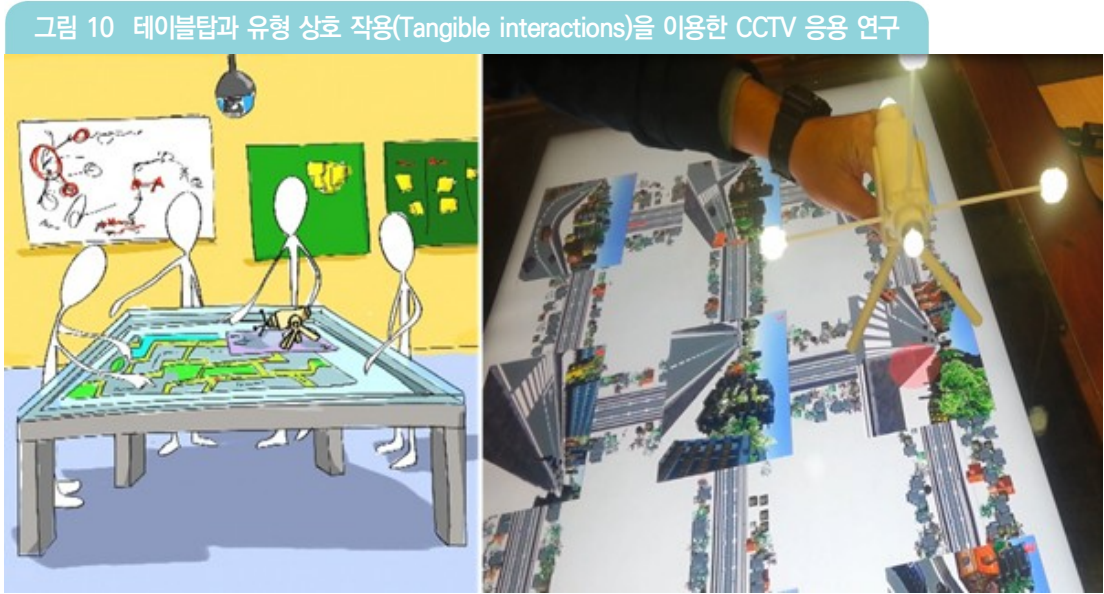
계속적으로 사용될 수 있는 시스템임을 증명하였다. 그림 9는 군인과 경찰 관계자들이 위기상황을 서로 잘 지원하기 위한 상황과 정보를 공유 중인 모습을 보여준다.

그림 9 AR 테이블탑과 Hand-held 디바이스를 이용한 위기관리 지원



(출처 : Nilsson, Johansson, & Jonsson, 2011)

그림 9의 Nilsson et al(2011)은 위기 상황 지원 연구와 동일한 연결선상에서 CCTV를 활용하기 위한 테이블탑 연구도 진행되었다. Ssin et al(2017)은 보안전문가의 영역인 CCTV센터에 비전문가들도 접근할 수 있는 손쉬운 방법을 연구하였다. CCTV의 접근성 문제에 대한 해결책으로, 지도 위로 CCTV 스크린을 달아, CCTV의 위치를 이용자가 더욱 쉽게 파악할 수 있도록 하였고, 테이블의 터치 기능 보다 더 직관적인 판단을 할 수 있게, TUIs와 CCTV의 방향을 동기화 하였다. CCTV는 기본적으로 실시간 감시 카메라 기능 지원이 가능하기 때문에 Digital Twin을 구성하기에 좋은 요소이다. 여기에 테이블탑의 자연적 논의 환경 구성 성격을 첨가한다면 비전문가도 특별한 학습 없이 CCTV를 전문가처럼 사용할 수 있는 좋은 도구가 된다.



(출처 : Ssin, Zucco, Walsh, Smith, & Thomas, 2017)

3. IoT 센싱정보를 이용한 모니터링

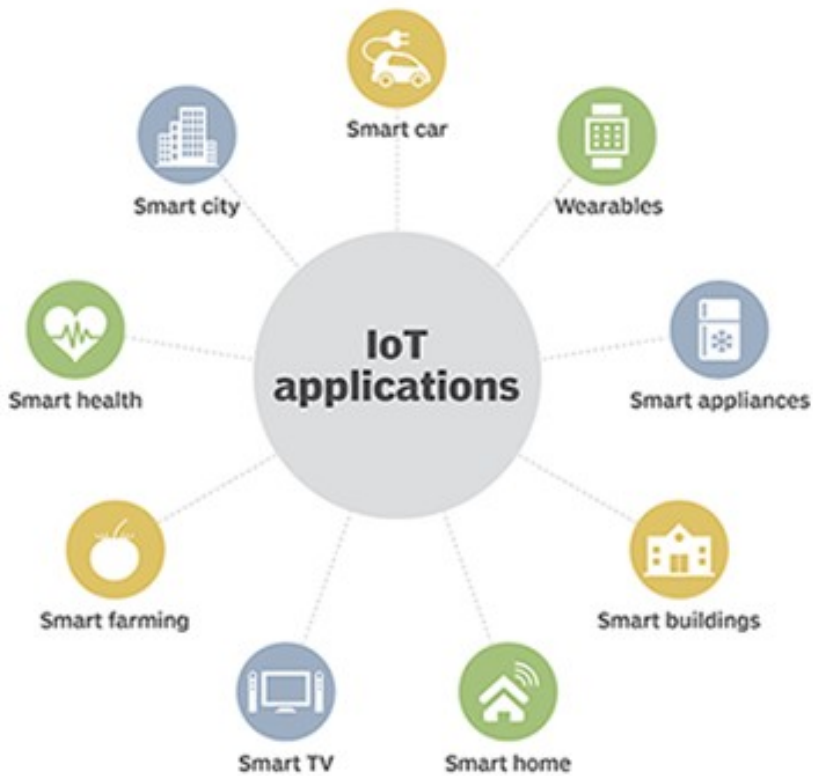
사물인터넷(IoT)은 인간과 인간 사이의 직접적인 상호작용을 요구하지 않고 네트워크를 통해 데이터를 전송하는 능력과 고유한 식별자(UID)를 제공하는 일반 기계 및 디지털 기계, 물체, 동물, 사람 그리고 정보를 필요로 하는 모든 환경과 상호작용을 지원하는 다양한 종류의 센서를 이용하는 통합 컴퓨팅 장치 시스템이다. IoT 생태계는 임베디드(embedded) 프로세서, 센서 및 통신 하드웨어를 사용하여 환경에서 얻은 데이터를 수집, 전송 및 처리하는 인터넷 기반으로 된 스마트 기기로 구성된다. IoT 장치는 데이터가 클라우드에 전송되거나 광역 단위에 있는 IoT 게이트웨이나 다른 엣지(edge)장치에 연결하여 수집한 센싱 데이터를 공유한다. 때때로 이러한 장치는 다른 관련 장치와 통신하고 서로에게서 얻은 정보에 따라 여러 종류에 이벤트를 발생시킨다. 예를 들어 IoT 기기는 설정, 지시 또는 데이터 액세스와 같은 상호작용을 할 수 있지만 여러 센서를 통해 대부분의 작업을 사람의 개입 없이 진행한다. 이러한 인터넷이 가능한 센서와 함께 사용되는 연결, 네트워크 및 통신 프로토콜은 주로 배치된 특정 IoT 애플리케이션에 의존적이다.

IoT를 사용하는 주요 목적은 다음과 같다.

- 감시기능 (monitoring)
- 경험을 통한 개선 (improve from experience)
- 절약 (save time and money)
- 생산성강화 (enhance productivity)
- 현명한 결정 (make wise decisions)
- 새로운 이윤 창출 (create new revenue)

그림 11은 IoT를 이용한 어플리케이션들이 다양한 스마트 세상을 지원할 수 있음을 시사한다.

그림 11 IoT 어플리케이션으로 구성되는 스마트 콘텐츠들



(출처 : Rouse, 2016)

본고에서 주된 관점은 이 IoT 센서들로부터 수집된 대용량 데이터들을 활용하는 스마트 콘텐츠들을 쉽게 직관적으로 보여줌과 동시에 중요 정보를 일반인들도 제어가 가능한 시스템을 생각해보고 제안해보는 것이다. 여기에 재미 요소(재미있는 시각화, 제어, 보상 시스템 등)를 추가적으로 지원할 수 있다면 보다 스마트 콘텐츠 아이디어와 부합될 것이라고 본다. 이 IoT데이터들을 시각화하기 위한 방안으로 Digital Twin을 지원하기 위한 시스템을 고려할 수 있다.

4. Digital Twin으로 발전

Digital Twin은 생물 또는 무생물의 물리적 실체를 디지털 가상체로 복제한 것이다(Saddik, 2018). 물리적, 가상의 세계를 브리징(연결 또는 동기화) 함으로써 데이터를 원활하게 전송하여 가상 실체가 물리적 실체와 동시에 존재할 수 있도록 한다. Digital Twin이란 다양한 용도로 사용할 수 있는 물리적 자산, 프로세스, 사람, 장소, 시스템 및 장치의 디지털 복제품들로 이루어진다. 이 트윈의 디지털 표현은 IoT로부터 모든 데이터 요소와 정보를 모두를 제공받는다. 그리고 근래에는 이 Digital Twin을 증강/가상현실과 연결하려는 시도가 이루어지고 있다.

Sergey Nivens(2018)는 미래 산업이 가상화를 기반으로 발전해야 할 10가지 이유를 말하고 있다. 그 중에서도 “미디어는 메시지(The Medium is The Message), 불가능을 삶으로 가져옴(Bring the Impossible to Life), 가상의 몰입감을 통한 체험(Experience Emotions through Virtual Immersion), 전망대를 치어리더로 변신(Turn Prospects into Cheerleaders, 즐거운 관람 지원), 리얼리티를 혼합한 큰 그림 시각화(Visualize the Big Picture with Mixed Reality)”는 Digital Twin을 사용하는 근본적인 이유와 동일하다.

그림 12 가상환경으로 가는 중요요소로 큰 그림(big picture)을 시각화 함



(출처 : Sergey Nivens, 2018)

이런 가상화가 주는 장점들을 Digital Twin과 결합하고, 거대규모의 도시에 적용하는 것은 계속해서 학문과 산업에 융합이 이루어지고 있는 요즘 또 한 번의 필수적인 융합 과정으로 보인다. 본고는 특히 이런 장점들의 융합을 테이블탑과 연관하여 말하고 있다. 즉, 가상 환경의 기반에 테이블탑이 가지는 상호작용 기능과 논의환경을 구성하는 능력을 활용하는 것이다.

그림 13 아마라바티의 Digital Twin



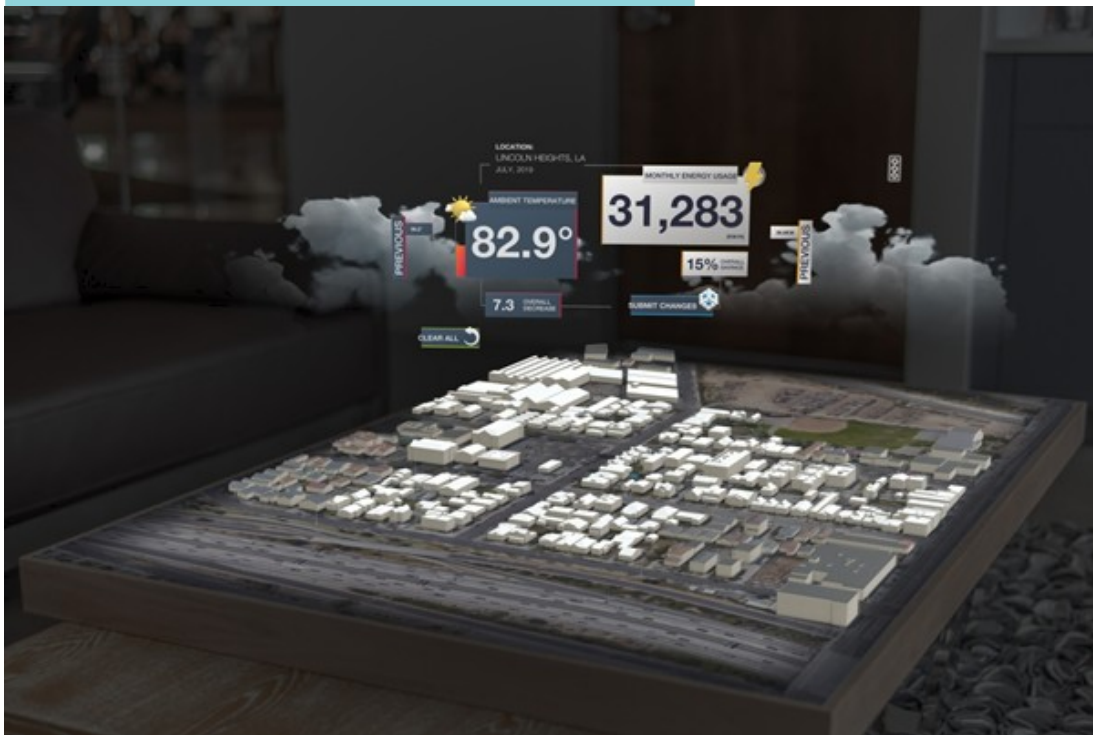
(출처 : Weekes, 2019)

Weekes(2019)에 따르면 2019년에 스위스 알프스의 한 작은 마을이 세계에서 가장 기술적으로 발달한 도시들 중 하나로 Digital Twin 기술로 만들어 진다고 한다. 그리고 인도 안드라프라데시 주의 새로운 수도인 아마라바티는 Digital Twin이 적용된 첫 번째 도시로 여겨진다(그림 13). 시티 제니스(city zenith)의 스마트 월드 프로 소프트웨어를 이용해 만든 이 도시의 초기 3D 프로토타입(prototype)은 다보스에서 열리는 세계경제포럼 연례총회에서 공개되었다. 해당 포럼에서 시티 제니스의 CEO인 마이클 얀센(Michael Jansen)에 따르면, "아마라바티에서 일어나는 모든 일은 결과를 최적화하기 위해 "사전 시나리오화"될 것이며, 이것은 도시들이 어떻게 디자인되고, 건설되고, 관리되고 있는가에 대한 거대한 도약을 의미한다"고 말했다. 이는, Digital Twin을 실제 도시 건설에 적용하고, 도시진화의 흐름을 한눈으로 파악하려는 노력을 보여준다.

그리고 Weekes(2019)에 따르면 많은 스마트시티 Digital Twin 제작자들은 이러한 정보 공유체계가 시민들과 정부관계자들의 생각의 갭을 줄이고 소통의 도구가 될 것이라고 믿는다. 안드라프라데시 수도 지역개발청(APCRDA) 위원인 세드하르 체루쿠리 박사는 아마라바티가 시민의 "행복"을 비전의 핵심으로 하는 그린필드

(Greenfield) 도시라고 말한다. 그는 시의 모든 이해당사자들이 이 공통의 목표에 기여할 수 있는 디지털 플랫폼을 갖는 것이 시작부터 매우 중요하다고 주장한다. 이와 같이, 시물레이션 측면에서 어떻게 스마트 시티가 Digital Twin으로 시각화 될지 그 방안을 마련하기 위해 마이크로 소프트나 시티 제니스와 같은 거대 기업들도 공동으로 개발, 협력하고 있다(그림 14).

그림 14 마이크로소프트 Azure와 Itron에 의한 LA의 가상화



(출처 : Weekes, 2019)

5. 일반인을 위한 Smart visualization system

혼합 현실(AR/VR/MR)은 필요한 문맥적 관련(Context-Relevant) 정보를 직관적으로 제공하고, 물리적 세계와 디지털 세계의 장점을 혼합하여 일반 사용자에게 정보 취득의 편리함을 가져다 준다. 이런 혼합현실의 장점은 게임뿐만 아니라 다양한 산업으로 계속 확산되고 있다. 그리고, 현재 AR/VR 디바이스들의 발전 수준은

이런 대중화 패러다임의 가능성을 설명한다. 예를 들어, 어떤 공장의 Digital Twin 시스템이 기계의 한 곳을 수리할 필요가 있다고 신호를 보낸다고 하자. 매니저와 엔지니어는 Digital Twin을 사용해서, 그 문제를 해결하기 위해 가상화 된 버전의 트윈 시스템을 커뮤니케이션 도구로 사용할 수 있다. 그림 15는 글라스 형태(Microsoft HoloLens)의 디바이스를 이용하여 공장의 문제가 되는 부분을 진단하는 것을 제시한다. 그림에서 눈 여겨 볼 것은 테이블위의 미니어처가 실시간으로 동기화되는 AR Digital Twin이고, 전문가와 비전문가가 동시에 이해하고 작업할 수 있는 좋은 커뮤니케이션 도구가 될 수 있음을 보여준다.

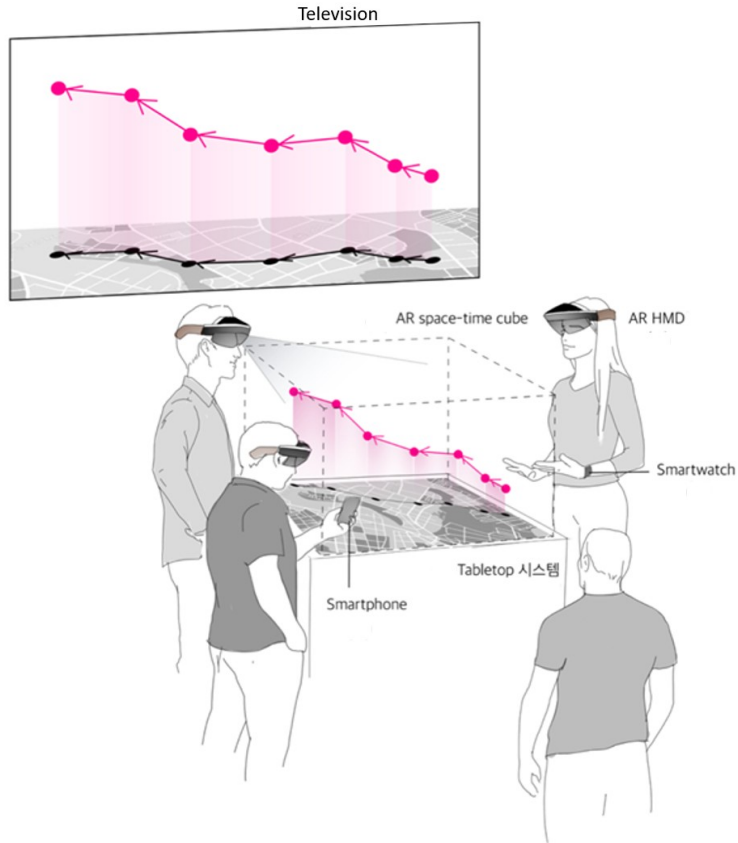


(출처 : TIERNEY, 2019)

III 결론

본고는 근래 화두가 되고 있는 스마트 시티, 스마트 팩토리, 스마트 관광 등과 같은 스마트 콘텐츠들의 기반이 되는 4차 산업의 사물인터넷(IoT)기술을 이용하여 Digital Twin을 제작하는 사례들을 연구에서 산업으로 아이디어가 이동하는 방식으로 소개하였다. 그리고, 혼합현실(증강, 가상현실)을 Digital Twin을 위한 시각화로 사용하는 것은 산업을 미래 지향적인 방향으로 이끌고, 전문가와 일반인들이 스마트화에 동시에 참여할 수 있는 기술의 일반화를 이끌고 있음을 설명하였다. 이런 전문가와 비전문가 사이의 다양한 소통이 한 공간에서 이루어 질 수 있게 하는 기술로 테이블탑과 AR의 상호작용을 언급하였다. 이 모든 것이 하나의 시스템으로 만들어진다면 그림 16과 같은 모습을 상상해 볼 수 있다.

그림 16 테이블탑을 기반의 스마트 시티를 위한 Digital Twin구상도



(출처 : KAIST 증강현실연구센터(ARRC))

Digital Twin은 미래지향적으로, 도시에서는 시민과 관리자가 도시에서 발생하는 데이터를 한눈에 볼 수 있게 하고, 공장에서는 공장 내에서 발생하는 모든 위험요소와 작업의 연결을 한눈에 볼 수 있게 하지만 아직도 극복해야할 도전과제들이 많다. 우선, IoT로부터 발생하는 대용량의 데이터를 시각화 하는 방법이 고안되어야 할 것이다. IoT 센서에서 발생하는 데이터는 기본적으로 실시간으로 Digital Twin으로 반영될 것이다. 또한, 모든 정보는 데이터베이스에 기록되고, 과거의 정보는 통계와 분석 등 다른 중요한 의미로 재사용될 것이다. 이렇게 실시간 정보를 보여주는 방법, 기록된 과거 정보를 보여주는 방법, 이 둘을 모두 한눈에 보여주는 방법은 아직 초보적인 수준이다. 이런 대용량 정보를 보여주는 방법은 아직 2D또는 기초적인 3D웹 기반 프로그램에 의존하고 있으며, 일반 PC로 구성된 스탠드얼론(standalone) 기반의 시스템에 적합하다.

그림 16과 같은 AR 테이블탑 기반의 시각화에는 새로운 정보 시각화 디자인이 필요하다.

그리고, 3차원 그래픽화 된 Digital Twin을 지원하기 위한 개발 부하도 예상된다. Google Map, MapBox, BingMap등 무상지도 서비스를 지원하는 거대 벤더들은 3차원 지도를 지원하기 위해 비용을 부과하지 않는 빌딩 모델들을 배포하고 있다. 그렇지만, 한국 지역은 지원되지 않는 곳도 있고, 빌딩 모델의 섬세함 또한 많이 부족하다. 자세한 모형을 지원하기 위해서는 3D 빌딩 모델 디자이너의 작업이 필수적이고, 이 부분은 오랜 시간을 소요하는 수작업이 될 가능성이 높다.

또한, 3차원 고 퀄리티의 모델을 제작하더라도 렌더링 퍼포먼스를 고려하지 않으면 안 된다. VIVE 같은 VR디바이스는 렌더링을 일반 PC의 GPU에서 하지만, HoloLens, MagicLeap과 같은 포터블 AR 디바이스는 앞으로도 계속 내부 렌더링 방식을 고수할 것으로 보인다. 문제는 이런 디바이스들이 고 퀄리티의 렌더링 옵션을 아직 지원하지 못한다는 것이다. 이것은 실제 렌더링 되어 보일 수 있는 정보의 양이 한정적임을 반증하는 것이다.

또한, 테이블탑을 기반 시스템으로 사용하면, 기존 컴퓨터를 제어하는 장치인 키보드와 마우스는 컨트롤러로서 적합하지 않다. 그림 16은 스마트 폰과 스마트 와치가 제어장치로 사용되는 것을 보여주고 있다. 이렇게 새로운 시스템에 맞는 새로운 상호작용 컨트롤러의 개발도 필요하다. 이런 한계에도 불구하고, 계속되는 도시, 공장, 공원, 길, 박물관, 미술관, 교육, 보건, 안전 등에서 스마트화는 4차 산업화의 필연적 추세로 계속되고 있다. 그러므로, Digital Twin의 개발 및 발전의 의지는 갈수록 더해질 것으로 보인다. 또한, 일반인을 위한 Digital Twin 시스템의 개발과 미래 지향적인 AR/VR의 다양한 분야로의 진출과 적용은 계속적으로 이루어 질 전망이다.

저자_ 신승엽 (Seung Youb Ssin)

• 학력

University of South Australia
컴퓨터&정보과학 박사
동국대학교 게임개발 석사
건양대학교 의공학 학사

• 경력

現) 한국과학기술원 증강현실연구센터 연구원
前) 동국대학교 조교수
前) 네오위즈 과장
前) 웹젠 과장

참고문헌

1. Desk, N. (2016). Trimble's SketchUp Viewer for Microsoft HoloLens enables users to experience designs. <https://www.geospatialworld.net/news/trimbles-sketchup-viewer-microsoft-holens-enables-users-experience-designs/>
2. Fitzmaurice, G. W., & Buxton, W. (1997). An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input. Paper presented at the CHI.
3. Geslin, E. (2013). Le HMD d'Ivan Sutherland. © Photo courtesy of Ivan Sutherland. https://www.researchgate.net/figure/Le-HMD-d'Ivan-Sutherland-C-Photo-courtesy-of-Ivan-Sutherland_fig19_261984085.
4. mapbox. (2018). Tabletop AR. <https://docs.mapbox.com/unity/maps/examples/tabletop-ar/>.
5. Nilsson, S., Johansson, B. J. E., & Jonsson, A. (2011). Cross-Organizational Collaboration Supported by Augmented Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(10), 1380-1392. doi:10.1109/TVCG.2010.249
6. Otto, M., Prieur, M., Agethen, P., & Rukzio, E. (2016). Dual Reality for Production Verification Workshops: A Comprehensive Set of Virtual Methods. *Procedia CIRP*, 44, 38-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.140>
7. Qin, Y., Liu, J., Wu, C., & Shi, Y. (2012). uEmergency: a collaborative system for emergency management on very large tabletop. Paper presented at the Proceedings of the 2012 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces, Cambridge, Massachusetts, USA.
8. Rouse, M. (2016). internet of things (IoT). <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>.
9. Saddik, A. E. (2018). Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies. *IEEE MultiMedia*, 25(2), 87-92. doi:10.1109/MMUL.2018.023121167
10. Sergey Nivens, A. S. (2018). Top 10 Reasons to Use Virtualities for Your Next Presentation. <https://www.stambol.com/2017/04/18/top-10-reasons-to-use-virtualities-for-your-next-presentation/>.
11. Ssin, S. Y., Zucco, J. E., Walsh, J. A., Smith, R. T., & Thomas, B. H. (2017, 7-10 Nov. 2017). SONA: Improving Situational Awareness of Geotagged Information using Tangible Interfaces. Paper presented at the 2017 International Symposium on Big Data Visual Analytics (BDVA).

12. Sundén, E., Lundgren, I., & Ynnerman, A. (2017). Hybrid Virtual Reality Touch Table : An immersive collaborative platform for public explanatory use of cultural objects and sites. Paper presented at the 15th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Graz, Austria, September 27-29, 2017. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-143305>
13. TIERNEY, S. (2019). The top technology trends for business in 2019. <https://cloudblogs.microsoft.com/industry-blog/en-gb/cross-industry/2019/01/16/top-technology-business-trends-2019/>.
14. Ulbricht, C., & Schmalstieg, D. (2003). Tangible augmented reality for computer games: Citeseer.
15. Webster, A. (2019). Pokémon Go spurred an amazing era that continues with Sword and Shield. <https://www.theverge.com/2019/2/28/18243332/pokemon-go-sword-shield-franchise-history-niantic-nintendo-switch>.
16. Weekes, S. (2019). The rise of digital twins in smart cities. <https://www.smartcitiesworld.net/special-reports/special-reports/the-rise-of-digital-twins-in-smart-cities>.
17. Wikipedia. (2018). Virtual Reality. <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EA%B0%80%EC%83%81%ED%98%84%EC%8B%A4>.
18. Wikipedia. (2019). Pokémon Go. https://en.wikipedia.org/wiki/Pok%C3%A9mon_Go.
19. YTN. (2016). 닌텐도 주가 '포켓몬 고' 출시 후 93% 급등. https://www.ytn.co.kr/_ln/0104_201607152218316733.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 May vol.5 no.5



02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02.958.4980