

디지털 트윈 기술 발전방향

| 저자 | 이광기 PD / KEIT 산업융합 PD실

유호동 박사 / KAIST

김탁곤 교수 / KAIST

SUMMARY

/// 4차 산업혁명 시대에 경쟁력 제고의 중요 수단으로 디지털 트윈의 활용에 대한 세계적 관심이 급증하고 있는 상황에서 관련 기술 및 도구에 대한 국내역량 확보가 시급함

- ★ 미국, 독일, 프랑스 등의 선진국은 디지털 트윈 활용을 일상화 하려는 추세이며 세계적인 시장조사 기관들은 디지털 트윈 시장이 급성장 할 것으로 전망함
- ★ 디지털 트윈 환경 실현을 위한 요소기술 부문에서도 해외 선진기업들이 다양한 소프트웨어 플랫폼/솔루션 제품을 출시하여 시장을 넓혀가고 있음
- ★ ICT분야 국제적 경쟁력을 보유한 대한민국이 디지털 트윈 기술/도구 부문에서도 경쟁력을 확보하고 수익을 창출하려면 요소기술 이해 및 관련 이슈 식별을 통해 올바른 연구개발 방향을 수립, 시행해야 함

/// 시사점 및 정책제안

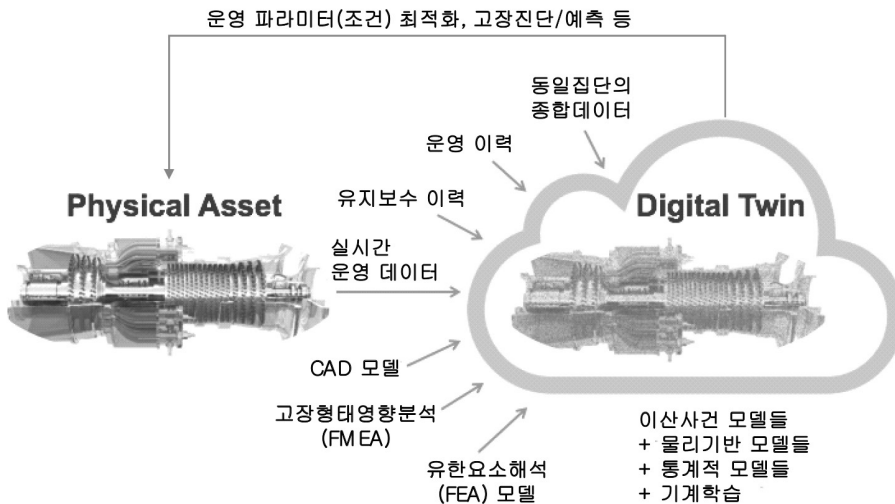
- ★ 공감대 형성 및 올바른 연구개발 방향 설정을 위해 디지털 트윈 아키텍처 정의 및 관련 기술/플랫폼 측면의 연구개발 로드맵 수립 필요
- ★ 디지털 트윈 요소기술 전문가 및 전문 업체의 협업을 통해 국산 디지털 트윈 개발/운용 소프트웨어 플랫폼 및 솔루션 확보를 위한 연구개발 적극 추진
- ★ 국내의 디지털 트윈 솔루션 시장 견인 및 산업경쟁력 제고를 위해 여러 산업분야 실증사업 확대, 경험/사례 공유기반 마련 및 기술발전에 선순환 유도 정책 시행

1. 디지털 트윈의 기술개요 및 산업응용

산업 발전의 키워드, 디지털 트윈의 개요

★ 사물인터넷(IoT), 빅데이터, 인공지능, 사이버물리시스템(CPS) 등 4차 산업혁명을 견인하는 기술들이 발전/보편화됨에 따라 이들을 응용하여 다양한 산업현장에서 생산성, 경제성, 안전성 등을 향상시키고자 하는 요구가 확산되고 있는데, 이러한 요구를 충족하기 위한 중요한 기술 트렌드로서 디지털 트윈(digital twin)이 주목받고 있음

- 2002년에 미국 미시간대학교에서 처음으로 유사 개념이 사용된 이후 디지털 트윈은 ‘현실 세계에 존재하는 대상이나 시스템의 디지털 버전’, ‘물리적 기계 혹은 프로세스의 소프트웨어 모델’, ‘물리적 자산에 대한 살아있는 디지털 시뮬레이션 모델’, ‘물리적 객체의 시뮬레이션 모듈’, ‘프로세스 또는 실제 제품의 최신 디지털 프로파일’, ‘물리적 시스템의 구조, 문맥, 동작을 나타내는 데이터와 정보(intelligence)의 조합’ 등의 의미로 언급되고 있음
- 이들을 정리하면, 디지털 트윈(digital twin)이란 물리적 객체(자산, 프로세스 및 시스템 등)들에 대한 디지털 복제(쌍둥이)로서, 수명주기 전체에 걸쳐 대상 객체 요소들의 속성/상태를 유지하며 이들이 어떻게 작동하는지의 동적 성질을 묘사하는 가상의 모델이라 정의할 수 있음



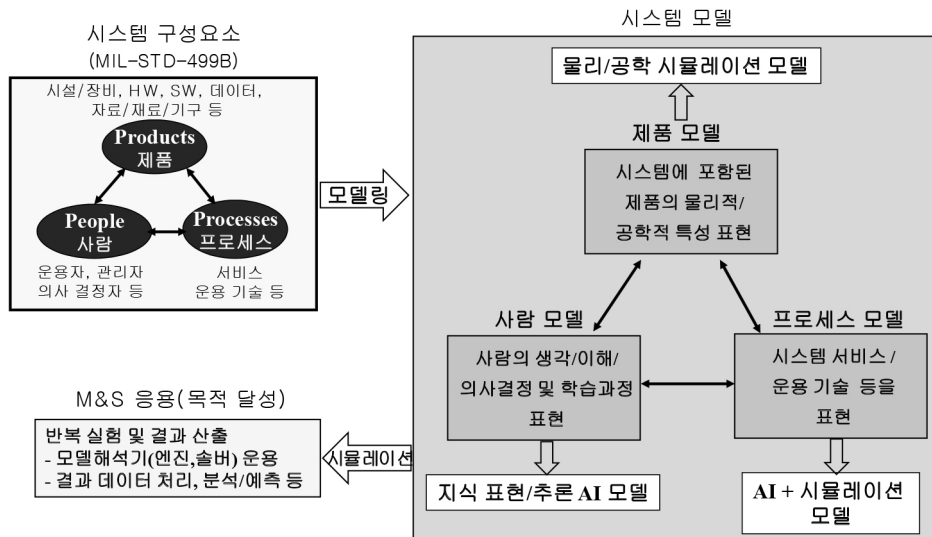
| 그림 1. 물리적 자산과 디지털 트윈의 관계 |

- 컴퓨터에 구현된 디지털 트윈(가상 모델)은 대상 객체(물리적 자산)와 연동하여 현실 상황을 반영하면서 현실에서 발생할 수 있는 상황을 예측하거나 운영 최적화 조건을 알려주는 등 산업 경쟁력 강화의 주요 수단으로 인식되고 있음

★ 디지털 트윈은, 사이버(디지털 세상)의 제어요소가 현실세상의 물리 시스템과 연결되어 동작하는 포괄적인 의미의 시스템으로 인용되고 있는 CPS의 고급형 기술 유형이라고 생각할 수 있음

- 기본 CPS 유형: 물리 시스템의 운용 데이터, 관련 규칙 및 지식 등에 기초하여 최적의 결정을 하고 제어를 실행하는 데이터/인공지능 기반의 CPS
 - 고급 CPS 유형: 데이터/인공지능에 기초한 제어결정 결과에 더해 제어대상 물리 시스템에 대한 디지털 모델을 통해 시뮬레이션으로 제어결과를 미리 판단하는 것 까지를 고려한 최적화 제어를 실행하는 디지털 모델 기반의 CPS
- ★ 디지털 트윈의 활용은 관심대상 물리적 객체의 데이터와 행위를 추상화한 디지털 모델을 만들고 이의 실행(시뮬레이션)을 통해 해당 실제계의 운영 관련 예측/최적화를 달성하고자 한다는 점에서 볼 때, 디지털 트윈 모델을 종래의 관점으로 표현하면 시뮬레이션 모델에 대응됨
- 디지털 트윈의 운용 특성을 고려할 때 실제의 대상 객체에 대한 시뮬레이션 모델이외에 시뮬레이션 실행 및 가시화 환경, 실제의 물리적 객체와의 연동 수단 등이 구비되어야 함
 - 디지털 트윈은 대응하는 물리적 요소들이 수명주기 동안 지속 변화되더라도 쌍둥이 성을 유지하기 위해 물리적 대상 객체에서 생성되는 데이터를 지속적으로 반영하여 갱신/변경되는 살아있는(진화하는) 디지털 모델을 필요로 함

/// 디지털 트윈의 핵심기술, 모델링 시뮬레이션(M&S)



| 그림 2. 시스템 모델 및 시뮬레이션 개념 (출처: 도서 - 국방 모델링 시뮬레이션(2018)) |

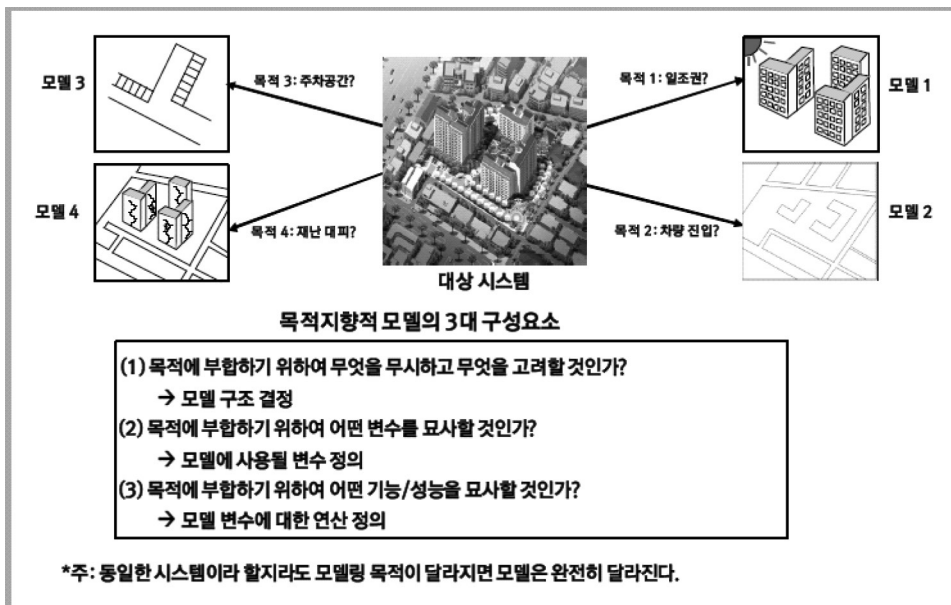
- ★ 기술적 내용은 잘 모르더라도 신문, 방송, 전문 잡지 등의 기사에서 ‘시뮬레이션’이란 단어가 자주 사용되고 있음을 알 수 있으며, 이것은 최근의 디지털 트윈 응용에서도 마찬가지임

- 이렇게 사용되는 '시물레이션' 용어는 관심의 대상이 되는 물리적 객체(시스템)를 소프트웨어로 추상화한 '모델'이 만들어져 있다는 것을 의미함
- 즉, 모델링 시물레이션(M&S)은 관심대상 시스템에 대한 모델을 만들고 이를 실행(시물레이션) 하면서 원하는 결과를 도출하고자 하는 시스템 공학 방법론임

★ M&S의 기본은 '목적 지향적'으로서 시물레이션 모델은 적용 대상 및 응용 목적에 따라 실제의 객체를 묘사하는 해상도(상세도) 및 충실도(정확도)를 다르게 모델링 함

※ 일반적으로 관심 대상의 크기/범위(예로서 군대의 소대, 중대, 대대, 사단 등)에 따라 모델의 해상도를 고↔저로 차별화하며, 교육훈련-분석/최적화-설계의 응용 순서로 충실도를 증가시킴

- 넓은 범위를 대상으로 고찰/분석이 필요한 경우에 목적에 따라 다중 해상도 모델링(하나의 모델에서 국면별 다른 해상도 모의기능 지원, 또는 서로 다른 해상도의 여러 모델들을 연동시킴)을 통해 시물레이션을 수행할 수 있음
- 저해상도(충실도)의 모델로 대상 시스템의 전반적인 성능/효과를 빠르게 개략분석하고, 필요시 특정 관심부분에 대해 고해상도(충실도) 모델로 상세분석을 수행함

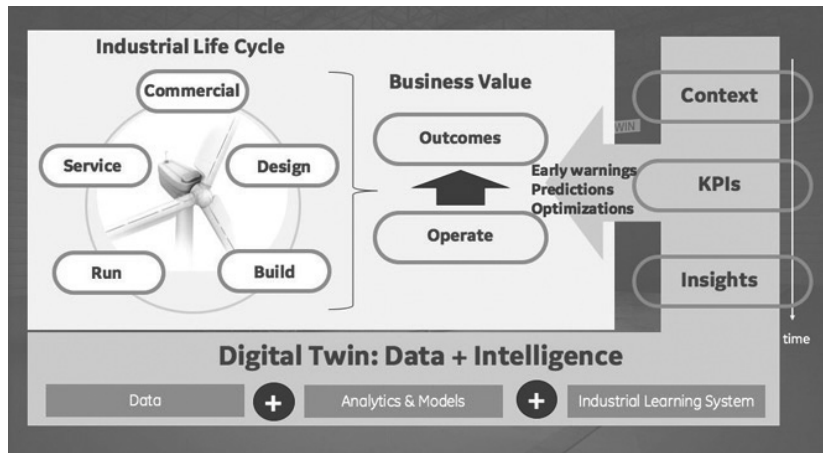


| 그림 3. 목적지향적 모델링 개념 (출처: 도서 - 국방 모델링 시물레이션(2018)) |

★ 일반적으로 M&S는 시스템 설계 및 분석, 교육훈련, 실험 및 임무 리허설, 시험평가 등의 목적으로 다양한 분야의 과학 및 공학 전반에 적용되고 있음

- 제품의 설계 내용을 실제 생산에 적용하기 전에 가상모델을 통해 시뮬레이션 함으로써 불필요한 시행착오 제거 및 최적의 제품 설계를 유도함
 - M&S 적용을 통해 특정 객체의 도입 운용에 따른 효과 산정, 최적의 운용조건 도출 등을 위한 분석을 수행함
 - 시뮬레이션 모델(또는 가상 시뮬레이터)을 사용하여 간접적으로 실제체계에 대한 사용법, 운영 절차, 정비 요령 등을 숙달하도록 교육, 훈련을 수행하고 현장에 실제로 적용하기 전에 해당 임무의 리허설도 수행할 수 있음
 - 항공기, 무기 등과 같은 고가의 장비 및 시스템을 개발하여 요구성능의 충족여부를 시험평가 할 때 비용과다 또는 안전성 등의 이유로 M&S를 기반으로 실행함
- ★ 시뮬레이션의 결과에 대한 신뢰성을 보장받기 위해서 대상 체계를 추상화한 모델이 목적에 맞게 개발되어 사용해도 되는지 일련의 점검 및 승인 과정이 필요함
- 검증(Verification): 구현된 모델이 설계서와 일치하도록 올바르게 만들어졌는지 확인
 - 실증/확인(Validation): 대상시스템(목적)에 맞는 올바른 모델이 만들어졌는지 확인
 - 인정(Accreditation): V&V 과정을 통과한 모델이 원래의 목적에 사용할 수 있음을 승인 또는 공식화
- ★ 시뮬레이션의 유형을 크게 Live 모의, Virtual 모의 및 Constructive 모의로 구분하며, 활용 목적에 따라 각 유형의 체계를 독립적으로 사용하거나 다른 유형의 체계들을 연동·통합하여 구성한 LVC 합성환경이 사용되기도 함
- Live 체계는 실제의 물리적 요소, Virtual 체계는 물리적 요소와 사이버(모의) 요소의 결합, Constructive 체계는 사이버(모의) 요소로만 구성됨
 - 필요에 따라 시뮬레이션 환경에 사람, 장비(하드웨어) 또는 응용정보체계(소프트웨어) 요소를 연동(참여)시켜 Human-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop, 또는 Software-in-the-Loop 형태로 목표 환경을 구성하여 활용하기도 함
- ★ M&S 분야에서 서로 다른 특성을 가진, 사이버 요소들 사이에 혹은 사이버 요소와 물리 요소 사이의 연결/연동 이슈는 이미 잘 정립된 분야라 할 수 있음

/// 디지털 트윈의 산업 응용



| 그림 . 산업 수명주기에서 디지털 트윈의 활용 (출처: Ansys社) |

★ 산업분야에서 사업의 가치 창출 등 긍정적인 효과를 기대할 수 있는 디지털 트윈의 적용 범위는 매우 다양함

- 설계, 제조(생산), 판매, 운영 및 유지보수 등의 단계에서 최적화, 성능관리, 고장진단, 예지정비 등의 응용 목적으로 적용할 수 있음
- 관심 대상에 따라 부품, 제품, 시스템, 공정, 공장 또는 공급망 전체를 범위로 디지털 트윈이 구축되어 활용될 수 있음

★ 디지털 트윈은 제조, 전력, 의료, 항공, 자동차, 스마트 도시 등 산업 전반에 걸쳐 사용됨

- 제조 부문에서는 제품 설계에서부터 플랜트 운영 감시, 작업량/로드 예측, 생산 손실 예측, 고장 진단/예측 등 제조 공정의 효율성 제고 및 최적화를 위해 널리 사용됨
- 항공 및 전력 산업에서는 프로펠러, 터빈 등 기계의 고장 진단, 예측 등의 목적으로 사용됨
- 자동차 분야에서 가상 모델은 차량의 성능을 분석하고 고객에게 맞춤형 경험을 제공하여 설계, 판매 등에 도움이 됨
- 의료 분야에서 IoT 플랫폼의 데이터를 활용한 개인화된 의료 서비스 제공 및 효율적인 환자 모니터링을 가능하게 함
- 스마트 도시에서는 해당 도시에 대한 교통, 에너지, 환경 등의 새로운 정책을 가상 도시(모델)를 통해 사전 검증할 수 있음

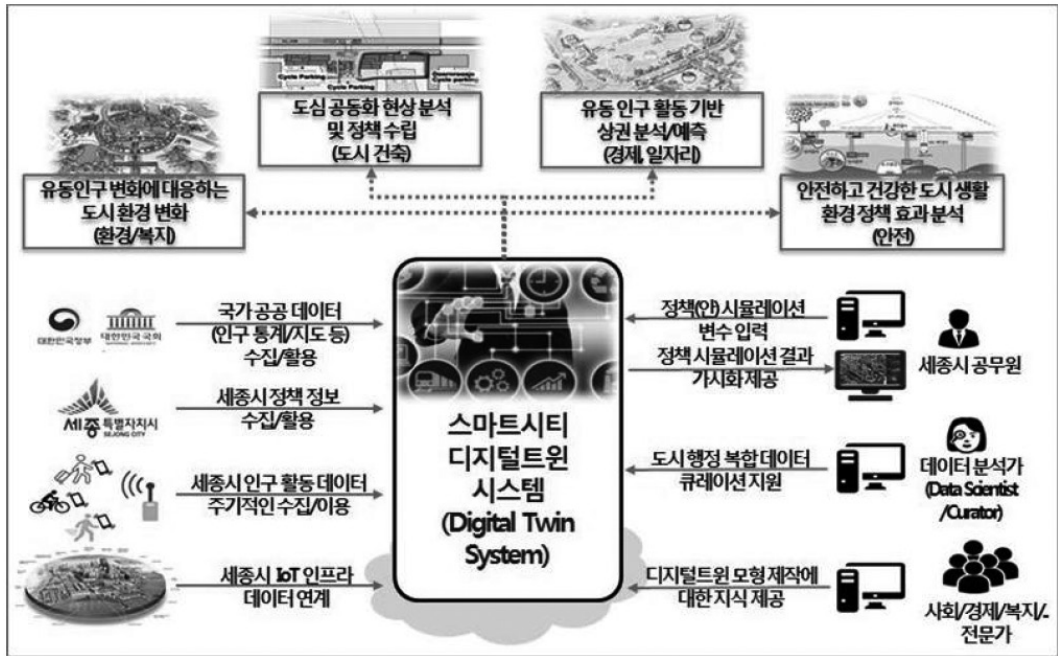


그림 5. 세종시 스마트 시티 디지털트윈 공동연구 과제 개요도(출처: 세종매일, 2018.4.20.)

- ★ 디지털 트윈 유형으로는 부품 트윈, 제품 트윈, 공정(프로세스) 트윈, 그리고 시스템 트윈으로 구분할 수 있으며 이들 중에서 공정 및 시스템 트윈은 넓은 기능성으로 인해 여러 산업분야에서 많이 사용될 수 있음

2. 디지털 트윈 기술발전의 주요이슈

/// M&S 및 디지털 트윈 연관 이슈

- ★ 디지털 트윈은 다음과 같은 질문에 답하기 위해 모델링 시뮬레이션이 요구되므로 디지털 트윈에서 시뮬레이션의 역할이 매우 중요함
 - 설계를 이렇게 수정하면 제품의 성능에 어떤 영향을 미치게 될까?
 - 왜 그런 결과가 발생하는가?
 - 성능을 최적화하기 위해 설계를 어떻게 수정해야 할까?

- 어떤 조건으로 운영하는 것이 가장 효율적일까?
- 어떤 상황/조건에서 고장이 발생하게 되는가?
- ★ 국내의 경우는 주로 외국에서 도입된 시뮬레이션 모델을 사용하여 업무의 필요에 따라 분석/실험/훈련 등을 수행하며, 시뮬레이션 모델 사용 경험자가 M&S 전문가로 인식되는 실정으로서 모델 개발능력 보다는 사용능력에 치중되어 있음
 - 모델개발 능력을 보유하고 있는 업체/기관이라도 특화된 분야로 한정되는 것이 일반적임
 - 참조할 수 있는 선행(또는 유사) 모델이 없는 경우는 신규모델 개발에 어려움을 겪고 있는 실정임
 - 모델링 대상 시스템에서 Physics 기반의 연속시간으로 묘사하는 물리/공학급 모델과 운용 논리/절차 기반의 이벤트 단위로 묘사하는 이산사건 모델이 혼합된 하이브리드 모델링 및 시뮬레이션 기술/경험이 부족함
- ★ 디지털 트윈의 핵심요소는 실제 객체에 대응하는 디지털 모델이므로, 디지털 트윈 분야의 경쟁력을 좌우하는 중요한 요인 중 하나는 목적에 맞는 모델을 어떻게 잘 만들 수 있는지에 대한 능력 보유 여부임
 - 일부의 항공기 엔진, 발전기(터빈) 등의 제품은 제조사가 이들에 대한 디지털 트윈(모델)을 함께 만들어 제공하는 추세로 발전하고 있음
 - 특화된 분야 이외의 다양한 실제 사물의 디지털 트윈 응용을 위한 모델을 어떻게 만들 수 있는지가 관건임
 - 특히 공정, 플랜트 등을 대상으로 디지털 트윈이 필요한 경우는 연속시간 모델과 이산사건 모델이 결합된 하이브리드 형태의 모델링 능력이 요구됨
- ★ 실제 대상 객체(시스템 등)의 디지털 트윈 모델은 구성요소 객체들의 속성/상태 정보들과 동작을 모의함으로써 가상 모델을 통해 해당 시스템에 대해 고찰할 수 있도록 하는 것이 기본임
 - 디지털 트윈 모델의 시뮬레이션을 통해 동작성능 확인, 최적의 운영조건 도출, 고장 진단 등이 필요한 경우에 분석기능이 중심이며, 기타의 기능은 부수적임
 - ※ 인간과 인공지능(알파고)의 바둑 대국에서 사람의(실제로는 사람의 바둑 능력에 대한) 디지털 트윈이라 할 수 있는 알파고는 현재의 상황을 인식하고 내부적으로 (바둑대국 모델의) 반복 시뮬레이션을 통해 최적의 수를 도출하여 사람에게 알려주는 역할 수행; 이 경우에 디지털 트윈(알파고)에 대한 가시화 기능은 필요하지 않음



| 그림 6. 디지털 트윈 관점에서 본 알파고 vs. 이세돌 기사의 대국 |

- 필요에 따라, 시뮬레이션 기반의 분석 결과를 기초로 인공지능/머신러닝 기법 등을 적용하여 예지 정비, 최적화 등의 디지털 트윈에 대한 고급응용을 구현하게 됨

★ 그러나 제조 산업분야로부터 적용되면서 발전하고 있는 디지털 트윈 응용에서는 가상 모델의 모습을 시각화해주는 기능이 강조되고 있음

- 디지털 트윈이 물리적 대상의 아이디어 구상 단계는 물론 설계, 제조/생산, 운영 및 유지보수 등 전체의 수명주기를 지원하는 기술로 활용됨에 따라 제품설계서에 해당하는 3D (시각화)모델 생성 기능이 강조되고 있음
- 이러한 맥락에서, 3D 모델링과 시뮬레이션 기능을 결합한 형태의 디지털 트윈 모델 개발도구가 필요함
- M&S의 경우에서와 같이 디지털 트윈을 교육, 실험 등에 활용하는 경우에는 가상현실, 증강현실 등과 같은 가상화 기능과의 결합이 중요할 수 있음

/// 디지털 트윈 운영환경 및 개발지원 도구

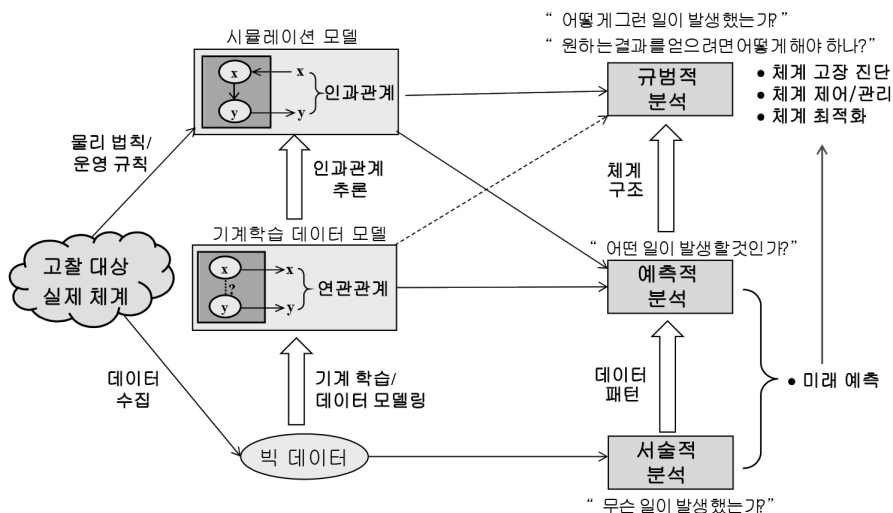
★ 인터넷을 검색해보면 디지털 트윈에 대한 많은 기사들을 접할 수 있는데, 이들은 대부분 디지털 트윈의 활용과 이의 긍정적인 효과에 대한 내용이 주를 이루고 있음

- 디지털 트윈 도입효과를 달성하기 위해서는 디지털 트윈이 적절하게 만들어져야 하며, 이 과정에 상당한 노력이 요구된다는 점을 고려할 때 이러한 투자/노력이 없이 지나치게 장밋빛 미래의 모습을 생각하는 우를 범할 수 있음

- ★ 관심대상 현실 객체의 디지털 트윈 운영환경을 확보하기 위해 구비해야 하는 소프트웨어(SW) 측면의 주요 구성요소들은 다음과 같음
 - 현실의 객체 운용(환경)에서 발생/관찰되는 의미 있는 데이터 (수집/전달/저장/처리 기능 SW)
 - 해당 객체에 대한 진화/변경 가능한 디지털 모델 (모델링 및 튜닝 SW)
 - 디지털 모델들의 실행/시뮬레이션 환경 (런타임 엔진 및 연동 SW)
 - 응용 목적에 따른 진단/분석/예측 결과 산출응용 모듈 (응용 SW)
 - 진단/분석/예측 결과의 현실 반영을 위한 제어정보 (결정/제어 SW, 인적요소 포함)
 - 3D 객체 설계 및 운용/결과 시각화를 위한 그래픽스 모듈 (2D/3D 그래픽스 SW)
 - ※ 사실상 위의 구성요소들 중에서 실제계의 대상 객체에 대한 디지털 트윈 모델을 만들고 유지(튜닝)하는 모델링(튜닝) SW 이외에는 다른 목적의 많은 응용분야에서 이미 활용되고 있는 SW 임
- ★ 산업분야의 응용에서 실제로 디지털 트윈을 운용하기 위해서는 소프트웨어 요소들 이외에 클라우드(서버, 저장장치 등), 네트워크 및 보안체계, 제어 및 센서 장치를 포함하는 사물인터넷(IoT) edge 장치 등의 하드웨어 및 시스템 소프트웨어 인프라도 구비되어야 함
- ★ 결국 디지털 트윈 기반의 ICT융합형 산업환경 실현은 컴퓨팅 인프라와 함께 사물인터넷(IoT), 빅데이터, 인공지능(인식, 학습), 시뮬레이션, 분석 및 가시화 등의 기술 활용을 필요로 함
- ★ 디지털 트윈 개발을 지원하기 위해 가용한 국내외의 소프트웨어 플랫폼 또는 도구들을 적절히 사용할 수 있다면 위에 나열된 소프트웨어 요소들을 보다 손쉽게 구현할 수 있을 것임
 - 디지털 트윈을 위한 플랫폼/도구는 일반적으로 대상 객체와의 연결을 위한 IoT 모듈, 빅데이터 처리 모듈, 디지털 트윈 모델링 모듈 및 모델 라이브러리, 지능형 분석/예측 응용 등을 포함함
 - 실제에 준하는 디지털 트윈의 가시화 기능을 강조하여 기존의 3D 모델링 기능에 시뮬레이션 기능을 접목하여 확장한 3D 모델링 SW 기반의 도구들이 많이 있음
 - ※ 디지털 트윈이 실제의 대상 객체보다 먼저 만들어지는 제품설계의 응용에서는 특히 3D 모델링 기능이 중요하게 요구되고 있음
 - 각각의 플랫폼/도구들은 지원 가능한 분야/기능이 특화되어 있는 경우가 대부분이기 때문에, 디지털 트윈 개발의 목적/대상 등을 고려하여 개발 단계별 적절한 도구들을 선택하여 사용해야 함
 - 일반적으로 가용한 디지털 트윈의 모델링 방법/도구들은 특정 도메인, 특정 유형의 객체에 한정되는 경우가 많기 때문에 디지털 트윈의 대상과 획득 가능한 정보/데이터의 정도에 따라 신중히 선택해야 하며, 경우에 따라서는 새로운 방법론/도구 개발이 필요할 수도 있음

/// 디지털 모델링 방법의 발전 필요성

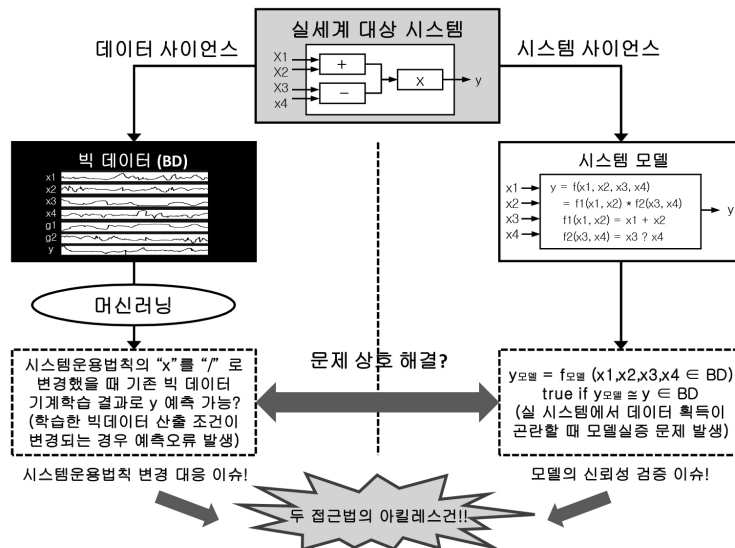
- ★ 디지털 트윈 기술을 활용함으로써 얻을 수 있는 많은 이점과 이에 대한 투자 촉구 논의에도 불구하고 디지털 트윈의 핵심요소인 디지털 모델을 어떻게 만들 것인지 등에 대한 기술적 논의는 부족한 상태임
 - 디지털 트윈을 만드는데 IoT, 빅데이터 및 인공지능(머신러닝) 기술이 활용된다고만 언급되고 있는 정도임
- ★ 디지털 트윈을 고려하는 물리적 대상에 대한 정보의 가용 여부 및 충분성 정도를 고려하여 요망되는 디지털 트윈의 활용 목적에 맞는 모델의 구현 방법 개발이 필요함
- ★ 디지털 트윈 모델을 개발하기 위해서는 실제 해당 객체의 속성, 프로세스, 다이내믹스 등을 적절하게 묘사할 수 있는 수단이 필요함
 - 활용목적에 따라 디지털 트윈 모델의 추상화 정도가 달라질 수 있으나 이를 통해 현실에서 운용되는 실제계에 직접적인 영향을 준다는 점을 고려할 때 일반적으로 고충실도, 고해상도의 모델이 필요함
 - 물리/공학 수준의 모델을 사용하면 복잡한 시스템의 동작을 정확하고 자세하게 파악할 수 있으므로 디지털 트윈의 개념이 갖고 있는 잠재력을 실현하려면 물리/공학 수준의 시뮬레이션 모델이 중요함
- ★ 디지털 트윈 구현에 필요한 디지털 모델은 일반적으로 이론/지식 기반의 시뮬레이션 모델링 방법 또는 데이터 기반의 모델링을 통해 만들어짐



| 그림 7. 분석방법의 산출가능 분석 수준 (출처: 도서 - 국방 모델링 시뮬레이션(2018)) |

- 시뮬레이션 모델링 방법 적용: 대상 객체와 관련한 이론/지식을 충분히 확보할 수 있는 경우

- 데이터 모델링 방법 적용: 대상 객체의 운영을 통해 수집 가능한 데이터가 충분한 경우; 또는 실시간(더 빠른)으로 모델의 실행결과 산출이 필요한 경우
- ★ 대상 객체(시스템 등)가 포함하는 물리적인 법칙이나 동작 규칙 등의 지식을 활용하여 추상화 모델을 만드는 모델링 시뮬레이션 (M&S) 기술은 제어된 입력과 해당 출력 사이의 인과관계를 포함하여 진단, 예측, 규범적(prescriptive) 분석이 가능함
 - 시뮬레이션 모델링은 대상 객체에 대한 상세정보를 이용하여 해당 객체를 상태 정보와 물리(physics)를 나타내는 수학방정식 및/또는 논리적 알고리즘 형태의 상태천이함수로 표현하는 White box 접근방법임
 - 실제 객체의 동작 특성에 따라 연속시간 모델, 이산사건 모델 또는 이들이 혼합된 하이브리드 모델 형태로 추상화 되며, 실행(시뮬레이션)을 위해 해당 유형의 시뮬레이션 엔진이 필요함
- ★ 인공지능(머신러닝) 기반 모델로 대표되는 데이터 모델링 기술은 대상 시스템에서 관찰된 (빅)데이터 내의 특정 패턴 또는 데이터요소들 간의 상관관계 분석을 통해 진단 및 예측 분석이 가능함
 - 데이터 모델은 현실의 대상 객체 내부보다는 외부에서 관찰되는 입출력 데이터의 관계를 회귀분석 등의 통계학적 방법을 통해 입력과 출력의 관계식으로 해당 객체를 모델링하는 Black box 접근방법임
 - 최근에는 대상 객체로부터 수집되는 빅데이터를 머신러닝 알고리즘으로 학습하여 입력 데이터와 출력 데이터 간의 비선형적이고 복잡한 상관관계를 다 계층의 인공신경망 형태로 모델링하여 분석/예측에 활용하는 사례가 급증하고 있음



| 그림 8. 데이터 모델링 및 시뮬레이션 모델링의 제한사항 |

- ★ 디지털 모델 개발에 전통적인 데이터 기반의 모델링(데이터 사이언스) 또는 이론/지식 기반의 시스템 모델링(시스템 사이언스 접근) 방법이 개별적으로 사용될 수 있으나, 각 방법 고유의 제한사항 때문에 충분하지 않음
 - 시스템 사이언스 접근방법(시뮬레이션 모델링)은 대상 체계의 속성, 동작특성 등에 대한 상세한 정보를 확보할 수 있어야 하며, 구현된 모델이 운용목적의 관점에서 실제체계를 대신할 정도로 신뢰할 수 있는지 확인이 필수적이라는 이슈가 있음
 - 데이터 사이언스 접근방법(데이터 모델링)은 대상 체계로부터 모델정의(학습)에 필요한 충분한 종류와 양의 데이터가 확보되어야 하고, 문제의 원인을 규명하는 인과관계 분석이 곤란하며, 시스템의 구성 또는 운용 법칙·환경 등이 변경되면 이전에 학습된 모델로 미래를 예측할 수 없다는 한계점이 있음

| 표 1. 데이터 모델링 vs. 시뮬레이션 모델링 비교 |

구분	데이터 모델	시뮬레이션 모델
모델 표현력	변수들 간의 상관관계	변수들 간의 인과관계
대상 시스템 지식	시스템 지식 불필요	시스템 지식 필요
모델 다이내믹스	입력 → 출력 정적 매핑 $x \rightarrow \boxed{y = f(x)} \rightarrow y$ No state within model	(입력, 상태) → 출력 동적 매핑 $x \rightarrow \boxed{\begin{matrix} Q \\ q' = f(q, x) \\ y = g(q, x) \end{matrix}} \rightarrow y$ State Q within model
모델링 수단	데이터 마이닝, 기계학습	물리 이론 및/또는 운영규칙
분석 수준	서술 → 예측 (제어정책 결정 無)	예측 → 규범적 (제어정책) → 인지적 (계획수립)
예측의 타당성 확보 조건	학습전후 시스템 구조 불변	모델 V&A
모델 실행 소요시간	매우빠름 ~ 실시간	비교적 긴시간 ~ 거의 실시간
특별한 상황, 또는 존재하지 않는 시스템	적용 불가	적용 가능

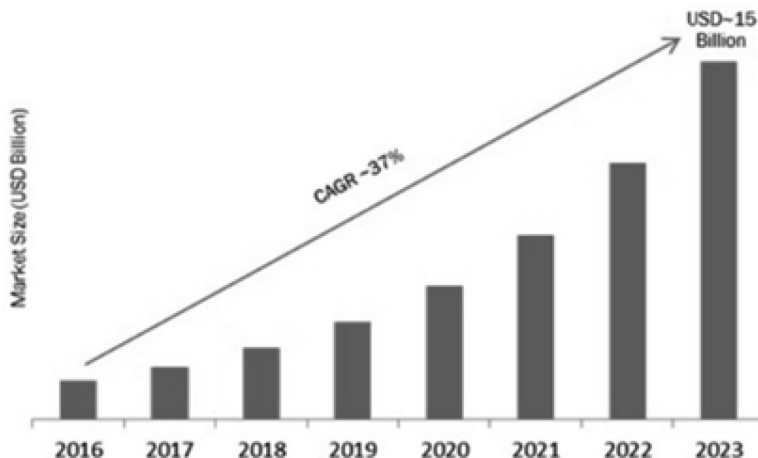
- ★ 각각의 기술 응용이 내포하는 한계점을 다른 기술의 장점으로 보완함으로써 각각에 의한 모델링 제한점을 극복하는 한편 기술융합을 통해 실제 대상에 대한 모델링 가능 범위를 확장하기 위해 새로운 모델링 방법론 개발이 필요함
 - 모델링 방법에 데이터에 기초한 귀납적 학습과 이론/지식에 기초한 연역적 학습의 융합을 통해 조건에 맞는 모델링 접근방법을 선택하고 모델의 정확성/신뢰성 향상에도 기여 가능함
- ★ 머신러닝(기계학습)과 시뮬레이션의 융합을 통해 감소된 비용으로 새롭고 더 정확한 통찰력(insights)을 얻을 수 있음

- 머신러닝을 통해 시뮬레이션 모델을 튜닝하거나, 모델을 축소하여 온라인 실시간 시뮬레이션을 가능케 함
- 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터를 이용한 머신러닝으로 데이터 모델 생성이 가능함
- 모델링 대상에 대한 불충분한 지식을 관찰 데이터의 학습을 통해 보완하는 방식으로 시뮬레이션 모델을 완성할 수 있음

3. 국내외 동향 및 전망

// 세계의 디지털 트윈 시장 전망

- ★ 국제적인 시장조사 전문기관인 가트너(Gartner)는 2017년과 2018년에 ‘디지털 트윈(digital twin)’을 디지털 변혁시대를 맞아 기업들이 주목해야 할 10대 전략 기술 트렌드 중 하나로 지속적으로 언급하고 있음
- ★ 또 다른 시장조사 기관인 마켓스 앤 마켓스(Markets and Markets)에 따르면 2016년의 2조원 시장규모가 2023년에는 18조원이 될 것이며 2017~2023년 동안에 연평균성장률이 37.87%나 될 것으로 전망함
 - 전자 및 전기/기계 제조업계는 2016년 디지털 트윈 시장에서 가장 큰 비중을 차지
 - ※ 산업 장비, 컴퓨터, 프린터, 변압기, 발전기, 모터 및 가전 장비와 같은 전자 장비의 설계 및 제조 프로세스와 함께 일반적으로 매출 흐름의 상당한 성장으로 이어지는 판매 후 서비스를 위한 디지털화의 필요성 증가에 기인



| 그림 11. 디지털 트윈 시장 성장 전망 (출처: Market Research Future, 2018. 6) |

- ★ 가트너는 “3~5년 내에 수백만 개의 사물이 디지털 트윈으로 표현될 것이다”, “기업은 디지털 트윈을 통해 장비 수리,

서비스 계획 수립, 제조 공정 계획, 공장 가동, 장비고장 예측, 운영 효율성 향상, 개선된 제품 개발 등을 할 수 있다”라고 강조함

- ★ 각국의 정부 및 지방자치단체는 물론 다양한 산업분야의 기업/기관들이 조직 내부의 효율성 향상 및 대외 경쟁력 제고를 위해 관련 시스템(제품, 프로세스, 사람)에 대한 디지털화, 스마트화를 추진하는 등 디지털 트윈 시장이 촉진되고 있음
 - 프로세스 최적화, 비용 효율성, 제품의 출시 소요시간 단축 등의 요구와 ICT 기술의 가용성 증가로 비즈니스 성과를 개선해야 할 필요성이 증가하고 있음
 - 디지털 트윈 적용을 통한 긍정적 효과 입증 사례가 증가하면서 다양한 산업 분야에서 디지털 트윈 솔루션에 대한 수요가 증가하고 있음
 - 클라우드 기반 플랫폼에 대한 수요가 증가하고 사물 인터넷의 인기가 높아지면서 디지털 트윈 시장의 성장을 주도함
 - 산업용 사물 인터넷(IIoT) 채택의 급증과 스마트 폰, 스마트 TV 및 스마트 그리드와 같은 스마트 기술 및 장치들이 증가하고 있음
 - 비즈니스 인텔리전스에 대한 중요성 인식 및 솔루션 채택 증가는 디지털 트윈 시장의 성장을 주도하는 주요 요인 중 하나임

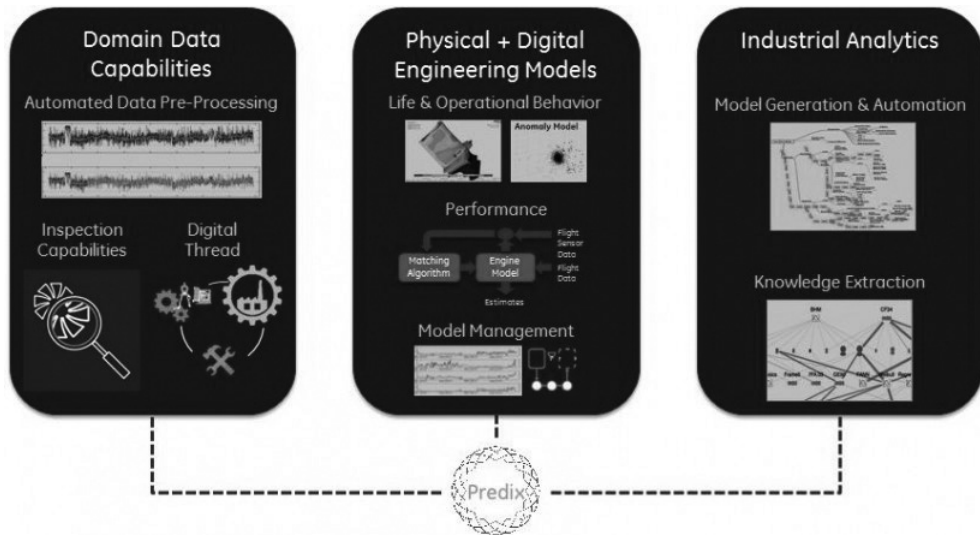
/// 디지털 트윈 기술시장 동향

- ★ 세계시장 조사 보고서에서 언급되는 디지털 트윈의 주요업체로 제너럴 일렉트릭(GE), 다쏘(Dassault), PTC, Ansys, 지멘스(Siemens), SAP, Sight Machine, TIBCO Software, AT&T, Infosys, TwinThread, Prodea System, Cosmo Company Sas, Autodesk, SimScale, DIGITAL TWIN, Concurus, Computer Science Corporation, Bosch 등이 있으며 국내업체는 전무한 실정임
- ★ 국내의 경우는 소수의 대기업 플랜트 운영사를 중심으로 디지털 트윈 기술 적용 타당성을 검토하거나 외산 제품을 기반으로 특정 분야/응용에 대한 디지털 트윈(또는 플랫폼) 개발 초기단계에 있는 것으로 판단됨
 - 제조 엔지니어링 및 디지털 트윈 SW 전문기업/도구, 인력 및 관련 데이터 기반 미비로 디지털 트윈 기술의 부분적인 적용으로 제한되고 있음
- ★ 항공기 엔진 및 발전기 제조 분야의 세계적인 선도 업체들이 자사 제품에 대한 디지털 트윈 제작의 경험/노하우를 바탕으로 디지털 트윈 관련 기술 및 플랫폼 솔루션 분야에서도 시장을 확대하고 있음
 - 미국 GE사의 Predix, 독일 Siemens사의 MindSphere는 발전기 중심의 디지털 트윈 플랫폼으로 시장 확대
 - 정유/석유화학 플랜트의 디지털 트윈을 위해 GE(Predix), Siemens(MindSphere) 외에도 미국 Honeywell사의 Uniformance, 프랑스 Total사의 TrendMiner 제품 출시
 - 노르웨이 DNV-GL사의 Veracity 플랫폼은 선박 및 해양플랜트 중심의 디지털 트윈 구축에 적용

- ★ 3D CAD/CAE 전문기업들이 3D 모델링 기능에 디지털 정보관리 및 시뮬레이션 기능을 확장하여 PLM 기반의 디지털 트윈 소프트웨어 시장을 선도하고 있음
 - 미국 Ansys사, 독일 Siemens사, 프랑스 Dassault사는 CAD/CAE/Simulation 솔루션들을 망라하는 제품수명주기관리(PLM) 솔루션 포트폴리오 보유
 - 미국 PTC사는 3D CAD/CAE 기반의 PLM 소프트웨어 제품 및 서비스, IoT 플랫폼 솔루션 판매
 - 미국의 다국적 소프트웨어 회사인 AutoDesk는 건축, 엔지니어링, 건설, 제도 등 다양한 분야의 소프트웨어를 제공하며 CAD 기반의 3D 솔루션 보유
 - 미국의 의료장비 제조사인 iCAD는 실제 물리적 장치를 가상 3D 모델로 구성하여 예상 동작을 검증하고, 다른 제조 기계들과 통합한 대규모 제조라인 구축을 지원
- ★ 세계적 선도 회사들은 디지털 트윈 소프트웨어 플랫폼 판매만으로도 상당한 수익을 창출하고 있음
 - 미국 GE사의 소프트웨어(Predix) 서비스 연매출 규모는 2016년에 60억 달러로 2020년까지 150억 달러 달성을 목표로 함
 - 독일 Siemens사는 2016년의 디지털 서비스 매출액이 10억 유로인데 비해 소프트웨어(MindSphere) 매출액은 33억 유로임
- ★ 국내에서는 ICT 선진국으로서 여러 업체/기관에서 디지털 트윈 제작 및 운용에 필요한 기본적인 SW 및 HW는 다수 보유하고 있으나, 특정 부분에 특화되어 있으며 제품의 수명주기 전체를 아우르는 디지털 트윈의 통합솔루션은 부재한 실정임
 - CAD/CAE 및 시뮬레이션 기술/솔루션 분야에 상당한 역량을 보유하고 있으나 핵심기술 부분은 외국 글로벌 기업의 기술에 많이 의존하고 있는 편임
 - 사물인터넷(IoT), 빅데이터, 인공지능(머신러닝) 등 디지털 트윈의 요소기술 관련 프레임워크 또는 플랫폼 도구의 연구개발 노력도 활발히 진행되고 있음
 - 요소기술 관련 역량을 디지털 트윈 제작/운용을 위한 통합기술로의 융합 활용사례는 찾아보기 어려움
 - 디지털 트윈과 연계한 최적화, 수명예측, 예지정비 등을 위한 국내의 응용 소프트웨어 역량도 매우 미흡한 수준으로 판단됨

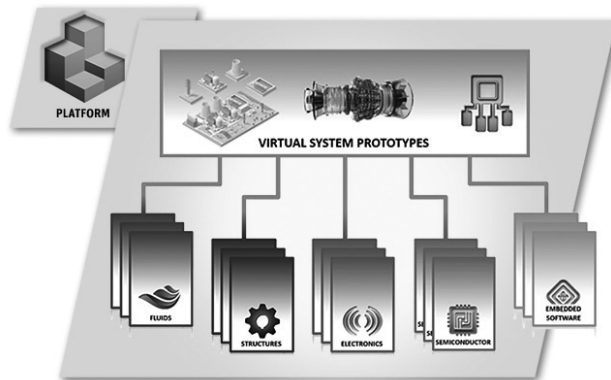
// 디지털 트윈 플랫폼/도구

- ★ 미국 GE사의 Predix는 산업 인터넷 플랫폼을 통해 제조업 분야의 디지털 응용서비스 제공을 목적으로 개발된 디지털 트윈 개발/운영 플랫폼



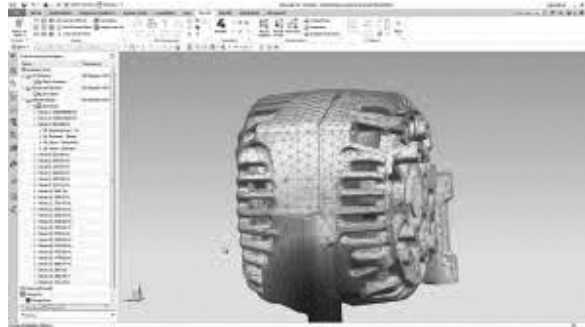
| 그림 12. Predix 플랫폼 개념도 (출처: GE社) |

- 운영체제, 클라우드, 빅데이터, 분석 SW 등을 종합 지원하는 솔루션으로, 소재/부품/설비/시스템을 포함하는 GE사 발전 플랜트의 전체주기 운용 데이터 활용/분석 툴 및 서비스 제공
 - IoT기반 산업 인터넷/빅데이터/클라우드 플랫폼으로 플랜트 운영관리 과정에서 생성된 각종 정보 수집, 처리·저장 및 분석 지원
 - GE사는 생산하는 모든 산업 기계의 디지털 프로파일을 구축하고 기계에 대한 공학적 모델을 확보하고 있으며, Predix 상에서 실행되는 55만 1,000개의 디지털 트윈을 개발함(2016년 말 기준)
- ★ 미국 Ansys사는 3D 설계, 공학분야의 구조/물리 해석 및 시스템 모델링 시뮬레이션을 제공하는 ANSYS 솔루션 다수 보유
- 전자기학, 유체, 반도체, 구조 및 임베디드 소프트웨어 분야의 엔지니어링을 지원하는 다양한 제품 보유
 - 구성품 수준의 여러 물리모델들을 연계하여 시스템 단위의 디지털 트윈 제작 및 서비스를 지원하는 ANSYS Twin Builder 제품도 보유



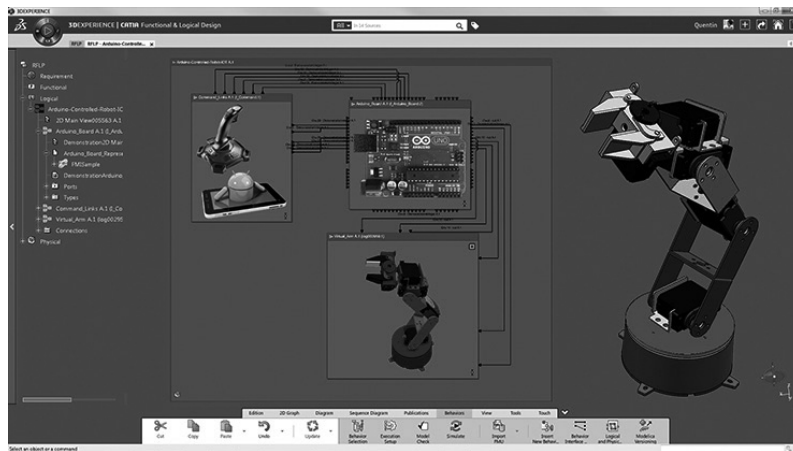
| 그림 13. ANSYS Twin Builder 솔루션 개념도 (출처: Ansys社) |

- ★ 독일 Siemens사의 MindSphere는 클라우드 기반 개방형 IoT 솔루션으로 전사적 정보의 취합, 처리·저장 및 분석을 지원하는 플랫폼
 - IoT를 활용하여 장치 혹은 시스템 데이터의 가시화 및 해석을 수행하며 다양한 분석 툴을 통한 최적의 운전 및 자산운용 방안 제시 가능
 - 공장 설비들에 대한 디지털 트윈을 생성하고, 현실에 대응되는 가상세계를 구현하는 기술과 획득된 데이터 처리 및 분석, 분석결과와의 활용을 지원하는 플랫폼
 - 사용자 맞춤형 제품 개발이 가능하도록 개방형 인터페이스 제공
- ★ 독일 Siemens사의 PLM 소프트웨어인 SimCenter 포트폴리오는 제품의 설계부터 운영 관리까지의 제품단위(물리/역학 중심) 디지털 트윈을 위한 솔루션들을 제공함
 - 설계, 시뮬레이션, 테스트 및 데이터 관리 기능과 연계된 성능 및 기능 확장이 가능한 개방형 통합 3D CAE(Computer Aided Engineering) 환경인 SimCenter 3D 포함
 - 구조, 음향, 유동, 열, 모션 및 복합소재 해석뿐만 아니라 최적화 및 다중 물리 시뮬레이션을 포함하는 통합형 시뮬레이션 솔루션 제공
 - 모든 CAE 솔루션을 하나의 통합 플랫폼에 결합하고 각각의 애플리케이션에 대한 산업 표준 솔버들을 통합 활용함으로써 효율적인 다중 물리적 개발 프로세스 구현 가능
 - 효율적인 어셈블리 모델링 도구, 대형 문제해석에 대한 필요 성능을 갖춘 솔버, CAE 전문가를 위해 특별히 설계된 데이터 관리 기능이 포함됨
 - MATLAB Simulink 소프트웨어에서 설계 및 시뮬레이션된 제어 장치와 모션 해석을 결합할 수 있는 공동 시뮬레이션 기능 포함; 기계 및 제어 장치를 동시에 해석하고, 스마트 제품의 작동 방식을 효율적으로 평가할 수 있음



| 그림 14. SimCenter 3D 화면 예시 (출처: Siemens社) |

- ★ 프랑스 다쏘시스템사의 3DEXPERIENCE 플랫폼은 3D 설계 및 엔지니어링 부문의 포트폴리오를 제공함
 - 제품에 대한 3D 컴퓨터기반설계(CAD), 3D 모델링, 유한요소 해석 및 다중 물리 시뮬레이션 기능을 제공하는 CATIA, SIMULIA 등의 솔루션 제공



| 그림 15. 3DEXPERIENCE 플랫폼 솔루션 CATIA (출처: 다쏘시스템社) |

- 제품 영역의 가상화를 제조로 확대하여 물리적 플랜트나 생산 라인이 구축되기 전에 제조 프로세스를 시뮬레이션 할 수 있도록 지원하여, 실시간 생산 활동 추적, 일정 변경 수행, 새로운 프로그램 시작, 모델 전환 도입, 유지 관리 작업 일정 등을 처리할 수 있는 DELMIA 솔루션 제공
- ★ 미국 Ansys사의 ANSYS Twin Builder는 PTC사 및 GE사의 산업용 IoT 플랫폼, SAP사의 지능형 응용 솔루션인 Leonardo와의 인터페이스를 제공함으로써 기술협력을 통한 디지털 트윈 환경의 구축 가속화를 가능하게 함

- ★ 위에 언급된 해외 소프트웨어 플랫폼/솔루션들이 지원하는 기능을 고려하여 디지털 트윈 대상의 계층과 (국방)모의수준에 대비하여 분류하면 다음과 같음

| 표 2. 디지털 트윈 SW 플랫폼/솔루션 분류 |

디지털 트윈 대상		SW 플랫폼/솔루션	(국방)모의수준 참조
사회구성 관점	제조 관점		
사회/국가	공급망	* 여러 솔루션의 조합 필요	전구/임무급
조직	공장	MindSphere, Predix	임무/교전급
프로세스	제조/생산	DELMIA	교전급
개체 또는 단위시스템	구성부품 및 제품	CATIA, SIMULIA, SimCenter, ANSYS Twin Builder 등	물리/공학급

4. 시사점 및 정책제언

/// 디지털 트윈 기술/응용 관련 시사점

- ★ 기본적으로 모델링 시뮬레이션 기술의 특성을 계승하는 디지털 트윈을 가능하게 하는 3가지 핵심 역량은 다음과 같이 정의할 수 있음

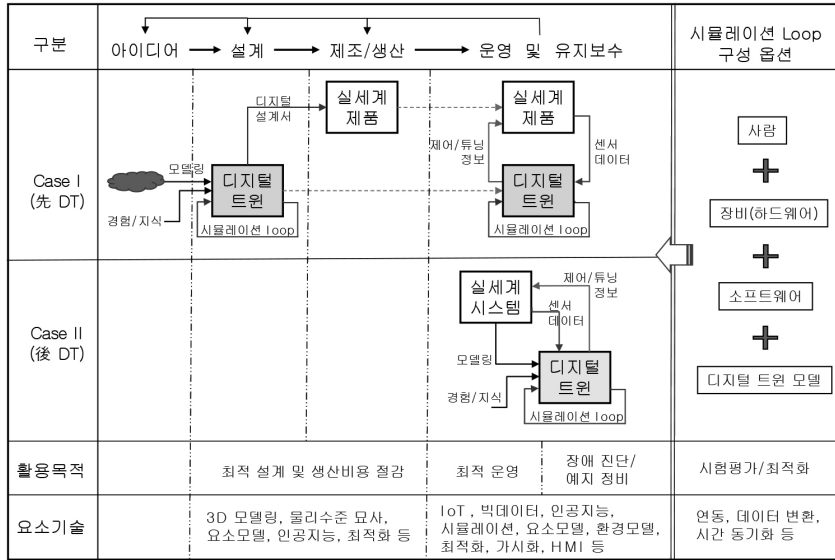
- 사업 분야에 대한 전문적인 데이터 역량 - 데이터 수집 및 전처리 자동화, 디지털 스레드(digital thread)¹⁾ 등
- 다학제 공학적 물리 모델과 (3D)디지털 모델 도출 역량 - 제품의 특성, 수명, 거동 등을 묘사하는 모델
- 빅데이터 분석 및 지식 추출 역량 - 산업분야 응용목적에 맞는 분석, 예측 수행 어플리케이션 SW

- ★ 디지털 트윈은 다양한 산업 분야의 다수 계층의 객체를 대상으로, 수명주기 전체에 대해 여러 가지 목적으로 널리 활용될 수 있기 때문에 지속적인 시장 확대 예상

- 스마트 공장, 스마트 국방, 스마트 도시 등 디지털 트윈 활용 요구 증가
- 디지털 트윈 모델 개발 및 운용 지원 소프트웨어 플랫폼/도구의 중요성 증대
- 산업 분야별 제품수준의 재활용 가능 고충실도 물리/공학 요소모델 필요성 증가

1) 디지털 스레드는 전통적인 제조 공정에서 독립적인 요소들을 연결하는 통신 프레임워크로 디지털 제조 환경에서 제품의 설계, 제조, 판매, 운영 등의 단계에서 발생하는 데이터들의 매끄러운 흐름(활용)을 지원하여 제품의 수명주기 전체에 걸쳐 자산의 통합된 view를 제공함; 제품 수명주기 전체의 디지털 데이터 리포지토리 및 공유·활용 체계라고 생각할 수 있음

- 디지털 모델 시뮬레이션 기반의 최적화, 예측 등을 위한 지능형 SW 요구 증가
- 클라우드, 산업용 사물인터넷(IIoT), 보안 등 디지털 트윈의 인프라 확대 요구



| 그림 . 제품 수명주기 단계별 디지털 트윈(DT) 유형, 활용 및 요소기술 |

★ 디지털 트윈 시장 확대 및 관심 증가 추세에도 불구하고 디지털 트윈의 개념/활용 등에 대한 인식의 차이 존재

- 모델링 및 시뮬레이션(M&S)의 기본개념에 대한 이해 없이 디지털 트윈이 IoT, 빅데이터 및 인공지능 기술로만 실현되는 것으로 인식되고 있음
- 디지털 트윈 운용환경 구성요소의 다양성과 각각의 관련 기술에 대한 이해 부족

★ 세계적으로 여러 국가의 많은 기업들이 디지털 트윈 시장을 공략하기 위한 다양한 플랫폼/솔루션을 출시하여 다양한 응용사례들을 만들어가고 있음

- 기계, 장비, 설비 등 하드웨어 부문의 선도업체들이 ICT 기술접목으로 디지털 변혁의 선도업체로 변신
- 3D CAD/CAE 부문의 선도업체들도 IoT, 시뮬레이션 기술 등의 융합을 통해 디지털 트윈 솔루션 시장에서 경쟁하고 있음
- 선진기업들은 제품의 아이디어/개념화 및 설계, 제조/생산, 운영관리 및 유지보수까지 수명주기 전체에 적용할 수 있도록 다수의 요소기술 전문업체에 대한 인수합병(M&A)을 통해 종합도구 세트를 구비함

★ 해외 선진기술 예측화 방지 및 국내 관련 산업 생태계 구축을 위해 국산 기술/도구의 연구개발에 적극적인 투자 필요

- 특정 응용분야에 활용되고 있는 국내의 개별적 소프트웨어 역량을 결합하여 디지털 트윈 운영환경 구축을 지원하는 종합 플랫폼(도구) 개발 필요
- 필요시 해외 선진기업과의 기술협력 또는 구매 가능 품목을 활용한 연구개발 추진

R&D 관련 정책제언

- ★ 디지털 트윈에 대한 올바른 이해와 공감대 형성을 위해 정부차원에서 디지털 트윈의 표준 아키텍처 정의 및 구성요소별 연구개발 로드맵 수립 추진
 - 디지털 트윈 구현을 위한 기술요소 정의 및 연구개발 로드맵 정립
 - 디지털 트윈 대상 산업분야, 계층 등 응용서비스 측면의 연구개발 로드맵 포함

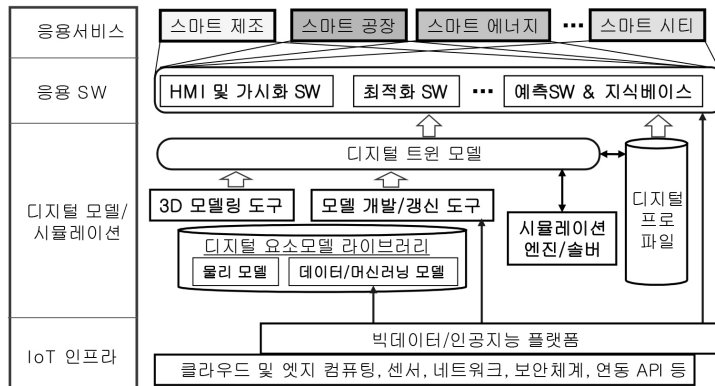


그림 17. 디지털 트윈 아키텍처 구성요소 예시 |

- ★ 국내외 기술제휴/협력을 바탕으로 디지털 트윈 운영환경 구축을 위한 소프트웨어 플랫폼/도구 포트폴리오 확보를 위한 연구개발 추진 필요
 - 3D CAD/CAE SW의 시뮬레이션 기능 확장 또는 통합형 SW 신규 개발
 - 빅데이터, 인공지능(학습), 시뮬레이션 기술 융합을 통한 모델링 접근방법 확장
 - 다학제적 공학/물리 요소모델 확보를 위한 연구개발
 - 물리/공학 요소모델 저장, 관리, 검색 및 조합을 통한 모델개발용 플랫폼 개발
 - 여러 계층의 대상에 대한 디지털 트윈 지원을 위해 제품 요소모델과 프로세스 및 인간 요소모델을 결합하는 다중 해상도/충실도 하이브리드 M&S 환경 개발
 - 산업분야의 디지털 트윈 응용서비스 실현을 위한 지능형 분석/예측 응용 SW 개발

- ★ 국내의 디지털 트윈 솔루션 시장 견인 및 산업경쟁력 제고를 위해 여러 산업분야에 실증사업 확대, 경험/사례 공유 기반 마련 및 기술발전에 선순환 유도 정책 시행
 - 응용 분야 전문가팀과 디지털 트윈 기술 전문가팀(기관, 업체 등)의 긴밀한 협력에 기초하여 실증사업이 추진될 수 있도록 연구개발 수행팀 구성 내실화
 - 국산 소프트웨어 솔루션/도구 개발 활용을 통한 실증사업 수행 유도
 - 실증사업에서 식별된 추가 필요기능의 솔루션 개발 또는 기능·성능 개선 장려
 - 디지털 트윈 실증사업의 산출물 공유 홈페이지 운영 및 자료공개 보장 등

[참고문헌]

1. “국방 모델링 시뮬레이션”, 김탁곤, 한티미디어, 2018.3.2.
2. “Digital Twin: 물리적 세계와 디지털 세계를 잇는 교량”, 월간 HRD, 한국HRD협회, 2018.2.2.
3. “디지털 트윈과 CAE의 미래”, RecurDyn Technical Support, FunctionBay, 2018.6.4.(검색일자)
4. “인더스트리 4.0과 디지털 트윈”, A. Parrott & L. Warshaw, Deloitte Anjin Review, No. 9.
5. “스마트 공장에서의 디지털 트윈(上)”, 산업일보, 2018.1.28.
6. “스마트공장 성공을 위한 소프트웨어의 역할과 과제”, 진희승, SPRI Issue Report, 2007-007호, 소프트웨어정책연구소, 2018.1.5.
7. “Simcenter 3D: 3D 시뮬레이션을 통한 혁신 실현”, Siemens 코리아 홈페이지, 다운로드 파일, 2018.7.22.
8. “Digital twin”, Wikipedia, 2018.
9. “GE Technology Story for Disruptive Innovation”, GE Korea Communication, 2016.4.
10. “Modeling and Simulation (M&S) Technology Landscape”, Ernest H. Page, Chapter 2, Book – Guide to Simulation-Based Disciplines Advancing Our Computational Future, Springer, 2017.
11. “The Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2017, 2018”, Gartner, 2016 & 2017.
12. GE, Siemens, 다쏘시스템, Ansys, PTC 및 AutoDesk 社 홈페이지 제품설명자료
13. 다수의 ‘세계 디지털 트윈 시장’ 연구보고서 판매 홍보자료(인터넷 검색), 조사기관: Markets and markets, TechSci Research, Market Research Future, Infoholic Research, Future Market Insights & IT Security