

# 국가 디지털트윈 개념과 구축방향

김대중 국토연구원 공간정보사회연구본부장 · 디지털트윈연구센터장 (djkim@krihs.re.kr)

## 디지털트윈의 개념    디지털트윈의 등장과정

컴퓨터 과학자인 데이비드 젤러터(David Gelernter)는 1991년 「거울 세계」란 책에서 디지털트윈과 유사한 세계가 다가온다고 예측한 바 있다. 현실 세계를 ‘크리스털 공’으로 보는 것처럼, 컴퓨터를 이용하여 보다 생생하게 들여다보고 상호 작용할 수 있는 혁신적인 세계를 예견한 것이다. 도시의 실시간 교통량이 지도에 표시되고 CCTV로 도시 구석구석을 모니터링하는 현재의 모습을 30년 전에 예측했다.

디지털트윈이란 용어는 1997년 ‘도시계획과 고속도로 설계를 위한 디지털 3D 모델 활용’이란 연구에서 처음 등장했다. 미래의 모습을 3차원 데이터로 시뮬레이션할 수 있어 다양한 장점이 있다는 연구였다. 현재 널리 인용되고 있는 디지털트윈은 미시간대학의 마이클 그리브스(Michael Grieves) 교수가 2002년 제조엔지니어협회 콘퍼런스에서 제품생애주기관리(product lifecycle mangement)의 기본개념 모델로서 제시한 것이다. 새로운 제품을 만들기 위해 3차원으로 설계하고, 생산과정에서 공정단계별로 센서를 부착하여 품질과 설비를 관리하며, 유통과정에서도 디지털트윈을 활용하는 개념이다.

디지털트윈이 세계적인 화두가 된 것은 가트너(Gartner)가 2017년부터 2019년까지 3년 연속으로 디지털트윈을 10대 유망기술로 선정하면서부터이다. 우리나라에서는 2020년 7월 ‘그린 뉴딜’과 ‘디지털 뉴딜’ 및 ‘지역균형 뉴딜’로 이루어진 ‘한국판 뉴딜’이라는 국가정책에 디지털트윈이 10대 중점과제 중 하나로 포함되면서, 국토교통부와 과학기술정보통신부 등 여러 부처에서 관련 정책을 추진하고 있다.

디지털트윈이 화두가 된 배경에는 다양한 정보기술의 발달이 있다. 현실의 모습을 3차원으로 표현하는 CAD(Computer Aided Design)와 BIM(Building Information Model) 등의 기술이 성숙해져, 새로 만들고자 하는 현실 세계(실체, reality)를 3차원으로 설계할 수 있게 해주었다. LiDAR(Light Detection and Ranging), Photogrammetry,

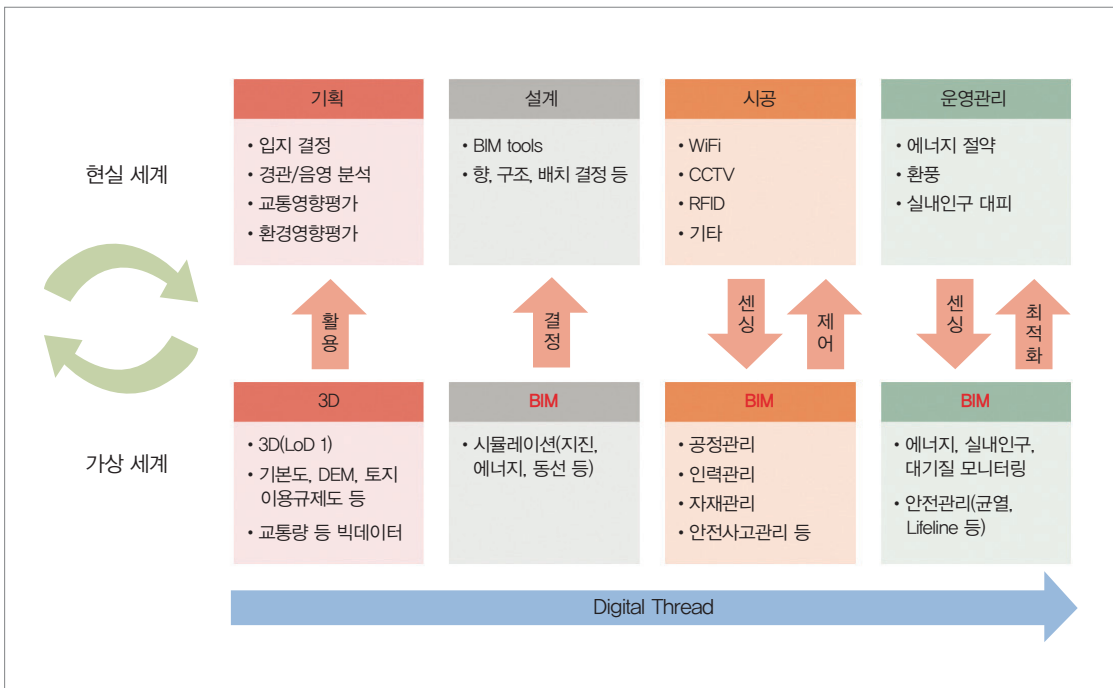
Pictometry와 같은 기술은 현실의 실체(건물, 도로, 하천, 산림 등)를 3차원 공간정보로 구현해주고, 센서의 발달은 실체에서 어떤 일이 벌어지고 있는지, 어떤 상황인지를 파악할 수 있게 해준다. 여기에 5G와 같은 통신망과 인터넷망은 센싱된 데이터를 실시간으로 전송해준다. 이처럼 3차원 모델의 시각화, 빅데이터와 인공지능 기술의 발달, 행위자 기반 모델(agent based model)과 같은 시뮬레이션 기술 등 다양한 기술을 융·복합하여 디지털트윈을 만들 수 있는 여건이 조성되었다고 할 수 있다.

### 지리공간 디지털트윈의 개념

디지털트윈은 현실 세계에 존재하는 실체와 동일하게 생긴 일관성 쌍둥이이다. 외부, 내부 모습만이 아니라 성격과 행동도 동일해야 하고, 실체가 바뀌면 디지털트윈도 바뀌어야 한다. 그 실체는 풍력발전기나 항공기 터빈과 같은 기계나 공장의 제품생산공정이 될 수도 있고, 건물과 도시, 댐과 하천 등도 디지털트윈으로 만들 수 있다.

가트너는 디지털트윈을 ‘현실 세계에 존재하는 실체(entity) 또는 시스템의 디지털 복제본’으로 정의하고 있다. 물리적 객체(object), 과정(process), 조직, 사람, 장소, 시스템 및 장치가 디지털트윈으로 만들어질 수 있다. 가트너는 향후 수많은 디지털트윈이 만들어질 것이며, 개별 디지털트윈을 연결하여 도시와 같은 더 넓은 차원의 디지털트윈을 볼

〈그림 1〉 같이 변해가는 현실 세계와 디지털트윈



수 있다고 말한다. 단위 디지털트윈을 연결하면 보다 넓은 공간 범위의 디지털트윈이 탄생할 수 있다는 얘기다.

수많은 디지털트윈을 모아서 도시 차원의 디지털트윈을 만들기 위해서는 개별 디지털트윈이 현실 세계와 동일한 위치 관계를 갖도록 해야 한다. 건축물과 도로, 하천 및 산림 등에 대한 개별 디지털트윈을 표준화된 좌표체계로 만든다면, 레고블록과 같이 연결하여 도시 디지털트윈을 만들 수 있다. 이처럼 표준화된 위치 좌표체계를 바탕으로 도시에 존재하는 수많은 디지털트윈을 모아서 만든 디지털트윈을 지리공간 디지털트윈(geospatial digital twin)이라 부르기도 한다(Conway 2017).

생애과정과 디지털 스레드(digital thread) 또한 디지털트윈의 특성이다. 건물을 예로 들어 보자. 어디에 지을 것인가를 결정한 후에는 어떤 모습으로 지을 것인지를 설계해야 하는데, 이때 형태와 구조만이 아니라 일조량과 경관을 미리 시뮬레이션하여 최적의 방향(向)과 배치를 결정할 수 있다. 건축물을 시공하는 과정에서도 디지털트윈을 활용할 수 있다. 인력과 자재 및 장비를 실시간으로 모니터링하여 안전사고를 방지할 수 있고, 공정의 효율화를 도모할 수도 있다. 건축물을 운영관리하는 단계에서는 입실 여부, 에너지 사용량 등을 모니터링하여 재난재해 대응이나 에너지 절약 등의 효과를 얻을 수 있다.

현실 세계는 한번 바뀌면 과거의 모습은 사라진다. 그러나 디지털트윈은 실타래처럼 그 변화과정을 데이터로 축적하여 관리할 수 있는데, 이를 디지털 스레드(digital thread)라고 한다. 건축물이나 도시가 바뀌기 전의 디지털트윈과 바뀐 후의 디지털트윈을 실타래처럼 연결하여 관리한다면 현실 세계 문제의 원인을 찾거나 운영관리하는 데 유리하기 때문이다. 뿐만 아니라 디지털 실타래가 체계적으로, 지속적으로 축적된다면 과거로의 여행이 가능해질 수도 있다.

## 디지털트윈을 설명하는 개념 모델

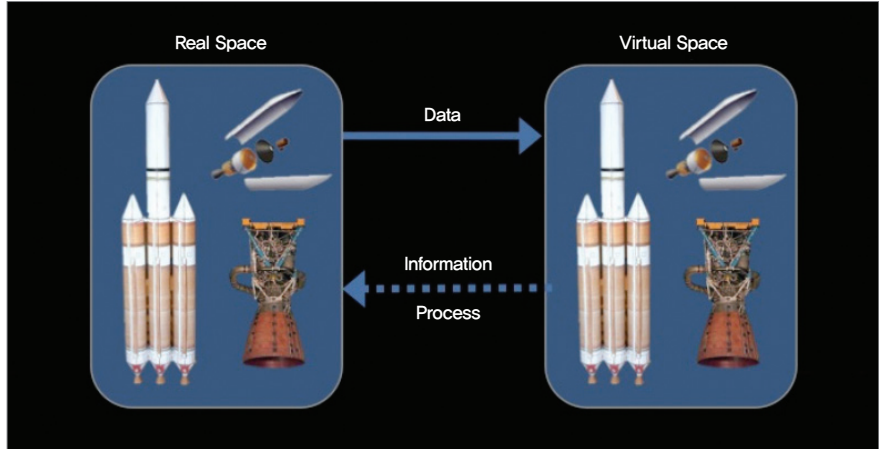
### 평면적 디지털트윈 개념 모델

디지털트윈을 현실 세계와 연결된 또는 동기화된 가상 세계라고 정의할 때, 그 모습을 어떻게 표현할 것인가가 개념 모델(conceptual model)에 대한 연구이다. 디지털트윈의 대상이 되는 현실 속 실체가 어떤 유형인지에 따라 다소 다를 수 있으나 실체와 가상 세계를 연결하여 활용한다는 목적은 동일하다.

그리브스 교수는 <그림 2>처럼 매우 간단한 개념 모델을 이용하여 디지털트윈을 설명한다. 현실공간에 존재하는 객체를 3차원의 동일한 형태로 가상공간에 구축하고, 현실공간의 센서에서 실시간으로 들어오는 데이터를 가상공간의 3차원 객체와 연결하여 시각화하고 분석하며, 이렇게 얻은 정보로 현실 세계를 가상공간에서 최적화한다는 개념이다.

델로이트(Deloitte)라는 컨설팅 회사는 <그림 3>처럼 '데이터 생산 → 송신 → 취합 → 분석 → 인사이트 → 현실 세계 최적화'라는 과정을 조금 더 상세한 개념 모델로 설명한

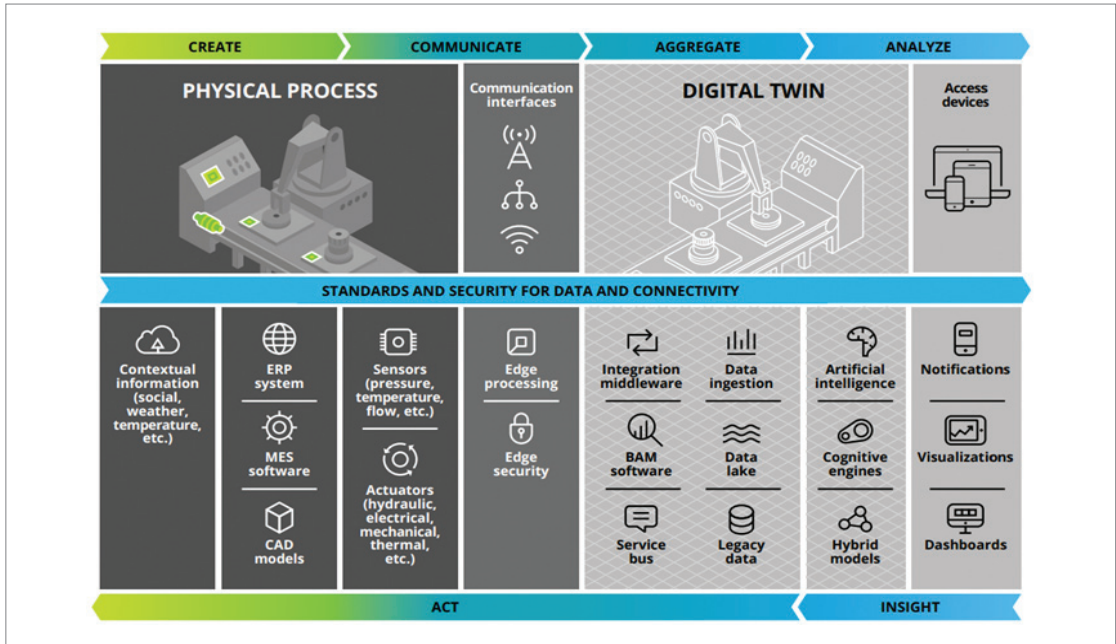
〈그림 2〉 그리브스 교수의 디지털트윈 개념 모델



자료: Grieves 2014.

다. 현실 세계에 존재하는 실제 또는 과정을 3차원 모델링하고, 현실 세계의 날씨, 기온과 같은 상황정보와 다양한 정보시스템, 센서와 제어기(actuator)가 통신망과 에지 컴퓨팅(edge computing) 및 보안을 바탕으로 디지털트윈과 연결된다는 것을 보여준다. 디지털트윈에는 다양한 데이터가 지속적으로 축적되며, 인공지능 등 다양한 분석 모델을 이용하여 분석한 결과를 시각화하고 대시보드로 보여준다는 개념이다.

〈그림 3〉 딜로이트의 디지털트윈 개념 모델



자료: Parrott and Warshaw 2017.

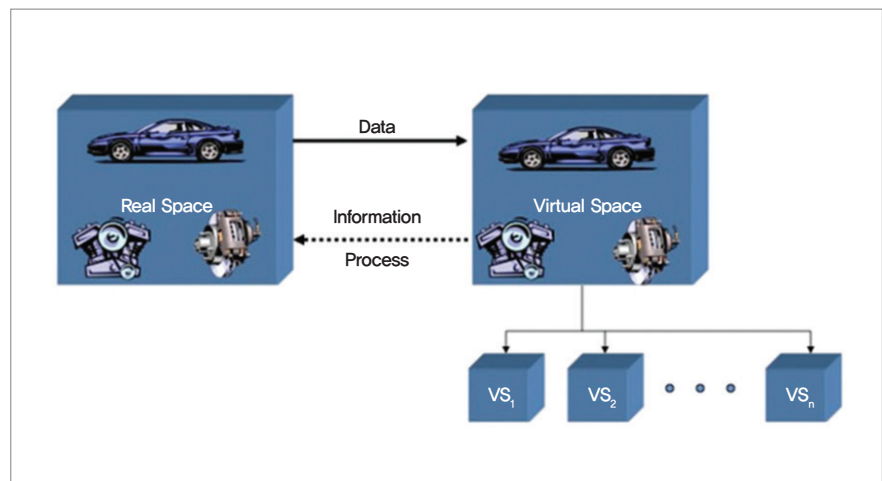
## 계층적 디지털트윈 개념 모델

그리브스와 비커스(John Vickers)는 2017년 연구에서 가상공간은 여러 개의 가상공간을 결합하여 이루어질 수 있다는 개념 모델을 제시하였다. 자동차라는 디지털트윈을 만들기 위해서는 현실 속 자동차에 존재하는 수많은 부품도 디지털트윈으로 만들고, 이들을 연결해야 한다는 것이다.

사공호상 외(2017)는 국토에 대한 디지털트윈을 디지털트윈 공간(digital twin space)으로 명명하면서 <그림 4>와 같은 개념 모델을 제시하였다. 먼저 현실 세계에 존재하는 정적인 환경(지형, 강, 건물, 시설물 등)을 드론과 모바일 매핑 시스템(MMS), 위성 등 다양한 기술을 이용하여 3차원 공간정보로 구축한다. 현실 세계에 존재하는 사람, 교통과 물류, 바람 등의 동적인 환경은 사물인터넷(IoT)을 이용하여 가상세계의 3차원 공간정보와 연결한다. 그 외 관련 데이터 또한 디지털트윈과 융복합하여 시각화, 분석, 시뮬레이션하고, 이렇게 얻은 정보로 현실 세계를 관리한다는 설명이다. 이때 디지털트윈의 공간 범위는 건물·시설물 단위에서 블록, 도시·지역 및 국토로 다양하다.

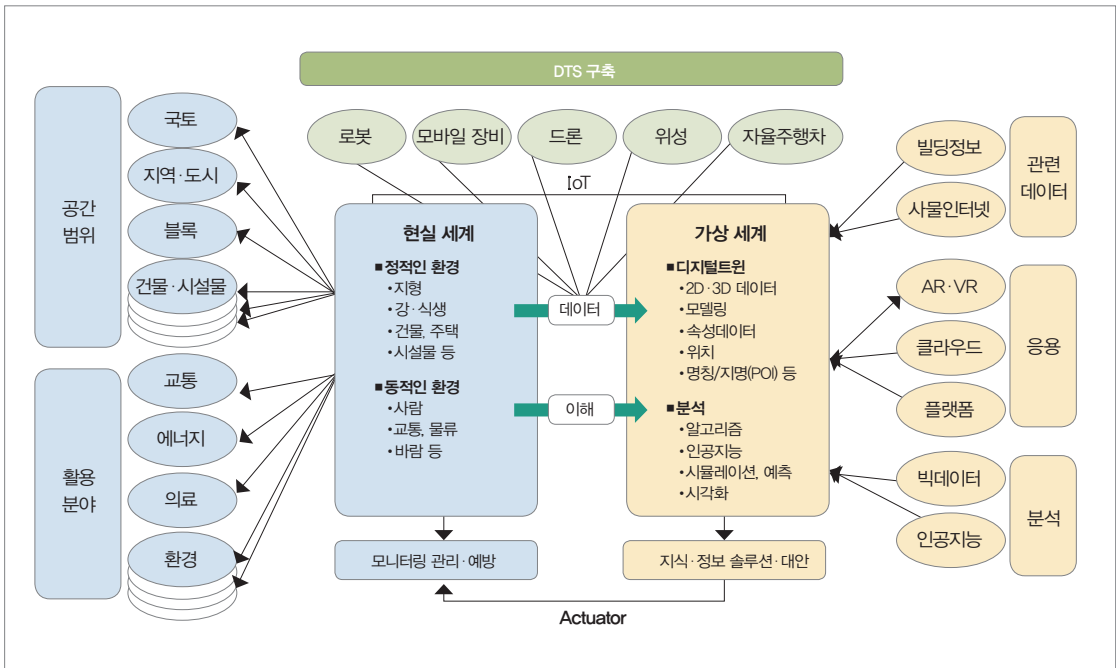
널리 알려진 바와 같이 디지털트윈에 대한 연구와 정책은 싱가포르와 영국에서 많이 진행되어 왔다. 싱가포르는 3차원 공간정보를 기반으로 가상 싱가포르(virtual singapore)를 구축하였고, 영국은 국가 차원에서 디지털트윈체계를 구축하기 위하여 케임브리지대학에 디지털트윈센터(Center for Digital Built Britain)를 설치하고, 디지털트윈 원칙(gemini principle)과 전략을 연구하고 있다. 디지털트윈은 국가 경쟁력의 핵심자원이나 공공재로 보아야 하며, 표준을 기반으로 수많은 디지털트윈을 연결한 도시와 국가를 만들겠다는 정책이다.

<그림 4> 그리브스와 비커스의 디지털트윈 개념 모델



자료: Grieves and Vickers 2017.

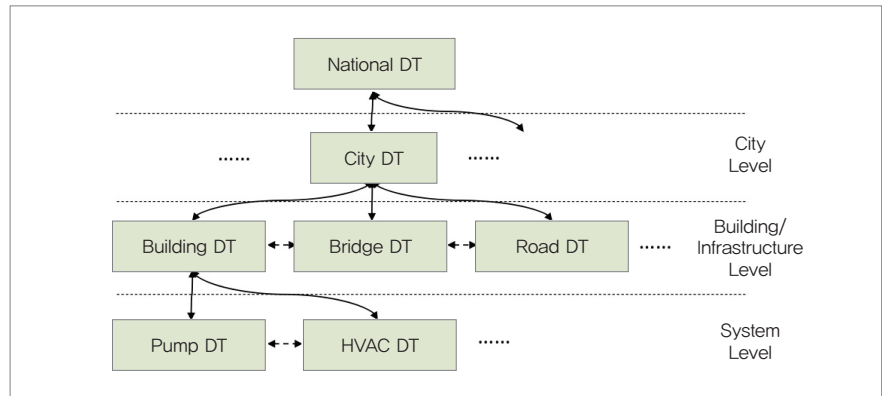
〈그림 5〉 디지털트윈 공간(digital twin space) 개념 모델



자료: 사공호상, 임시형, 성혜정 2017.

〈그림 6〉은 수많은 개별 디지털트윈을 체계적으로 연결하여 국가 차원의 디지털트윈을 만들어야 한다는 것을 나타내는 것으로, 영국의 국가 디지털트윈체계를 보여준다. 펌프나 냉·난방기기와 같은 시스템 수준의 디지털트윈이 모여 건물에 대한 디지털트윈을 만들고, 수많은 건물과 교량 및 도로 등을 연결하여 도시에 대한 디지털트윈을 만든다는 개념이다. 영국의 국가 디지털트윈은 표준 좌표체계를 바탕으로 수많은 개별 디지털트윈이 연결 및 결합되는 지리공간 디지털트윈이라 할 수 있다.

〈그림 6〉 영국의 국가 디지털트윈체계(National Digital Twin)



자료: Lu et al, 2020.



## 우리나라의 국가 디지털트윈체계의 구축방향

### 국가 공간정보 기반(NSDI)을 국가 디지털트윈체계(NDTI)로 전환

공간정보는 현실 세계에 대한 이해뿐만 아니라 현실 세계를 관리하는 데에도 매우 중요한 기반이므로, 각국은 국가 공간정보 기반(National Spatial Data Infrastructure: NSDI)을 구축하는 정책을 수행해오고 있었다. 그러나 디지털트윈의 등장으로 이러한 정책의 한계가 뚜렷하게 드러났다. 근본적으로 NSDI는 현실 세계를 특정 시점에서 공간정보로 구축하여 활용하는 개념이기 때문이다. 현실 세계와 데이터 세계의 연결고리 또는 동기화하는 구조가 없기 때문에 시간이 지나면서 현실 세계와 데이터 세계가 달라지는 한계가 있다.

국가 디지털트윈체계(National Digital Twin Infrastructure: NDTI)를 구축하기 위해서는 데이터, 표준, 유통, 기술개발, 법제도, 인력양성, 거버넌스, 파트너십 등 NSDI의 구성요소 모두를 NDTI에 맞도록 개선할 필요가 있다. 실시간으로 갱신되면서 IoT와 연결되는 3차원 모델, 수많은 개별 디지털트윈을 모아서 도시와 국토의 디지털트윈으로 만들 수 있는 체계를 구축하기 위해서는 모든 구성요소를 근본적으로 혁신해야 한다. 또한, 국가 디지털트윈체계를 만들어내기 위해서는 범부처 차원의 제도 및 컨트롤타워를 마련해야 한다. 여러 부처에서 다양한 법에 근거하여 만들어지는 수많은 디지털트윈을 계층적·체계적으로 연결하고 통합하기 위해서는 협력이 필수이기 때문이다. 이를 위하여 대통령 직속의 위원회나 국무총리실 산하에 전담조직을 두는 방안을 고려해볼 수 있다. 법제도 측면에서는 다양한 요소기술, 특히 3차원 공간정보와 센서데이터를 융·복합하여 활용하는 체계를 구축하기 위해 요소기술을 포괄할 수 있는 새로운 제도적 근거를 마련하는 것이 바람직해 보인다.

### 점진적 상향식의 디지털트윈 연합체계 구성

영국의 디지털트윈 원칙(gemini principle) 중 하나인 연합(federation)은 수많은 디지털트윈이 체계적·계층적으로 연결될 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 개별 디지털트윈을 연결하여 국토·도시의 디지털트윈을 만들기 위해서는, 존재하는 객체에 대한 디지털트윈이 만들어져 있어야 한다는 것이 전제 조건이다. 디지털트윈 정책이 시작된 시점이나 기술이용의 저변 확대가 아직 초기단계이기 때문에, 많은 시간이 흘러야 개별 디지털트윈을 연합한 국가 디지털트윈이 만들어질 수 있을 것이다.

현재 국토지리정보원은 디지털트윈의 기초가 되는 3차원 공간정보를 생산하는 사업을 추진하고 있다. 현실 세계에 존재하는 객체의 지붕이나 창, 실내 공간정보를 구축하지는 않지만, 3차원 형태에 겹모습의 사진을 입힌 수준으로 디지털트윈을 구축하고 있다. 전국토에 걸쳐 일관된 품질의 3차원 공간정보이다. 지자체 또한 특수 목적에 따라 별도의 3

차원 공간정보를 구축하는 사업을 추진하고 있다. 그러나 모두 하향식의 데이터 구축사업으로, 일정 시점에서 만들어지고 시간이 지나면서 현실 세계와 달라지는 문제가 발생한다. 또한, 실내 공간정보가 없다 보니 객체의 주인 입장에서는 디지털트윈으로 활용하는 데 한계가 있다. 실내 공간정보를 추가로 구축해야만 층별, 호수별 사람 수나 에너지 사용량 등의 센싱데이터를 연결할 수 있기 때문이다.

국가 디지털트윈체계가 만들어지기 위해서는 하향식의 3차원 공간정보 생산체계를 상향식으로 전환해나갈 필요가 있다. 또한, 새로이 만들어지는 건물, 도로, 교량 등의 객체는 디지털트윈으로 활용할 수 있는 BIM을 활용하도록 의무화해야 한다. 기존의 객체에 대해서는 BIM 데이터가 존재하는 경우 이를 가공하여 구축하되, BIM 데이터가 갱신되면 같이 갱신될 수 있는 체계를 마련해야 한다. 그 외의 지역에 대해서는 국토지리정보원이나 지자체가 구축한 3차원 공간정보를 활용하고, 실내가 매우 큰 공공시설 등은 실내 공간정보를 추가로 구축해야 한다.

디지털트윈은 에너지 절약 등 다양한 효과가 있으며 그린 뉴딜의 '탄소제로' 정책과도 연결되므로, 각 시설의 주체가 디지털트윈을 구축하여 운영·관리할 경우 인센티브를 제공하는 등의 정책도 추진할 필요가 있다. 민간부문의 주체가 디지털트윈 데이터를 공유하는 것을 유도하는 인센티브 정책도 필요하다.

## 스마트도시와 디지털트윈의 연계

디지털트윈을 적용하는 공간단위 중 가장 많은 논의가 이루어지고 있는 공간단위는 바로 도시이다. 에너지 소비가 많고, 탄소배출 등 기후변화 위기의 원천이 도시이기 때문이다. 도시의 디지털트윈을 구축하여 활용하면 에너지 절감, 교통 최적화 등으로 탄소를 줄일 수 있고, 다양한 시뮬레이션으로 도시를 여러 측면에서 최적화할 수 있어 스마트도시의 목적과 동일하다고 할 수 있다.

우리나라에서는 스마트도시와 디지털트윈이 서로 분리되어 추진되고 있다. 근거법이 다르고 주관 부처와 주관 부서가 다르기 때문이다. 그러나 사일로(silo)처럼 분리되어서는 디지털트윈도 스마트도시도 경쟁력을 잃을 수밖에 없다. 디지털트윈과 스마트도시를 연계하여 추진할 수 있는 거버넌스가 시급하다.

## 융·복합하는 디지털트윈 생태계와 거버넌스 조성

국가 디지털트윈은 개별 디지털트윈이 서로 연결된, 지상과 지하, 실내와 실외가 자연스럽게 연결되는 3차원 모델을 바탕으로 수많은 현실공간에서 이루어지는 다양한 현상을 센싱하는 사물인터넷이 결합된 형태로 구축해야 한다. 3차원 공간정보뿐만 아니라 다양



한 센서를 통신망으로 연결하는 사물인터넷(IoT)과 융·복합해야 한다는 것이다. 다양한 기술을 융·복합한다는 것은 요소기술을 가지고 있는 기업들이 함께 협업해야 한다는 것을 의미한다. 3차원 공간정보 따로, 사물인터넷 따로 해서는 디지털트윈이 만들어질 수 없다. 특히 3차원 공간정보와 사물인터넷의 접점에 대해서는 어떻게 연결할 것인지 서로 협력하여 위치 기반의 IoT, 즉 GeoIoT와 같은 방안을 찾아내야 한다.

요소기술을 보유하고 있는 기업들이 협업하는 생태계를 구축하기 위해서는 사일로처럼 칸막이로 나누어져 있는 IT 생태계, BIM 생태계 및 공간정보 생태계의 벽을 없애거나, 개별 생태계를 포괄할 수 있는 커다란 생태계를 만들어야 한다. BIM과 3차원 공간정보 및 IoT 등 다양한 디지털트윈의 요소들을 포괄하는 제도가 필요한 이유이다. 3차원 공간정보 생태계만으로는 디지털트윈을 만들 수 없다. BIM만으로는 개별 디지털트윈의 효과만 얻을 수 있을 뿐, 디지털트윈 기반의 스마트도시는 불가능하다. 반면, BIM, 공간정보 및 IoT가 융·복합될 수 있다면 개별 분야에서는 얻을 수 없는 커다란 효과를 얻을 수 있을 것이다.

국가 디지털트윈체계가 만들어지기 위해서는 수많은 디지털트윈 생산자들이 협력할 수 있는 거버넌스가 만들어져야 한다. 공공부문뿐만 아니라 민간부문이 모두 참여해야 하는 것이 중요하다. 특히 민간부문에서 만들어지는 디지털트윈이 다른 디지털트윈과 연결되어야만 더 큰 디지털트윈을 만들 수 있기 때문에, 공공재의 소유자로서 참여하도록 유도하는 제도환경이 필요하다.

## 디지털트윈을 위한 기술개발

현실에 존재하는 객체와 가상 세계, 즉 디지털트윈의 객체를 연결하는 페어링(pairing)도 고려해야 한다. 스마트폰과 스마트시계가 블루투스로 페어링되어 정보를 주고받고 제어하는 것과 같은 원리이다. 현실 속 실체에 센서와 제어를 설치하고 여기서 생산되는 센싱데이터를 통신망을 통해 디지털트윈으로 전달한다. 센싱된 데이터를 시각화하고 분석하여 얻은 정보로 실체를 제어할 수 있는 쌍방향 소통체계가 되어야 한다.

지리공간 디지털트윈에서는 현실 세계에 존재하는 센서를 가상 세계 3차원 모델의 어떤 객체와 연결하여 시각화할 것인지에 대한 고민이 필요하다. 특정 건물의 특정 위치에 설치되어 있는 온도 센서는 특정 방이나 해당 층의 공간으로 연결할 것인지, 또는 x, y, z 좌표값을 갖는 점으로 연결할 것인지를 결정해야 한다. 전자의 방법은 3차원 객체의 속성값으로 처리하여 시각화할 수 있으나, 해당 공간에도 중앙과 창측은 온도가 다르다는 것을 표현하기 어렵다. 반면 후자는 센서의 정확한 위치(x, y, z)를 알아야 한다는 것과 점으로 표현되기 때문에 추가적인 시각화 방법이 필요하다.

센서를 촘촘하게 설치할수록 현상에 대한 정보를 상세하게 얻을 수 있으나 비용이 문제이다. 또, 센싱하고자 하는 현상에 따라 그 간격과 위치가 달라질 수도 있다. 가령, 미

세면지 센서는 고가이고 소규모의 도시에서는 그 농도가 유사하기 때문에 하나만 있어도 괜찮을 수 있다. 반면 온도 센서는 도심지, 산, 구릉 등 다양한 높이에 설치해야 미세한 차이를 알 수 있다.

디지털트윈을 구현하기 위해서는 현실 세계와 가상 세계가 연결되어 동시에 변해가는 체계를 구축해야 한다. 3차원 모델링, IoT, BIM, 3차원 동적 시각화, 인공지능 기반 빅데이터 분석, 행위자 기반 시뮬레이션(agent based model) 등 다양한 기술개발이 필요한 이유이다.

## 맺음말

앞서 논의한 바와 같이 건축물, 시설물 등 현실 세계에 존재하는 객체에 대한 디지털트윈이 구축되어야 하고, 이들 개별 디지털트윈을 연결하고 결합해야 도시 차원 더 나아가 국가 차원의 디지털트윈이 만들어진다. BIM 등 개별 디지털트윈을 구축하고 활용하는 생태계가 먼저 조성되어야 하는 이유이다. 개별 디지털트윈을 연합하여 활용할 수 있는 제도적, 기술적 기반도 필요하다. 국가 차원에서 정책방향을 설정하고 밑그림을 그려야 하는 이유이다.

한편으로는 많은 기관이 앞 다투어 디지털트윈 관련 사업을 추진하고 있다. 많은 경우 항공측량이나 드론을 이용하여 실내가 없는 3차원 공간정보를 구축하고 활용하는 데 그치고 있다. 일조권, 바람길 등 분석도 제한적이다. 개별 디지털트윈을 관리하는 주체가 없다 보니 시간이 지나면서 현실 세계와 달라지는 문제도 발생한다. 개별적으로 구축되고 있는 BIM 데이터를 활용하지 못하여 중복 구축하는 경우도 발생한다. 난개발과 중복 구축이 우려되는 상황이다.

최근 초현실 메타버스가 화두가 되고 있다. 디지털트윈과 5G가 결합되어 만들어지는 새로운 세상이다. 하지만 제대로 된 디지털트윈체계가 만들어지지 않으면 메타버스는 허상에 불과하다. 긴 호흡으로 국가 디지털트윈체계에 대한 밑그림을 그리고, 레고블록처럼 개별 디지털트윈이 연결되어 도시와 국토가 만들어지는 체계를 구축해야만 한다. 느리지만 차곡차곡 채워져 가는 디지털트윈체계를 기대해본다. 🍀

## 참고문헌

- 사공호상, 임시형, 성혜정, 2017. 지능정보사회에 대응한 차세대 국가공간정보 전략 연구. 세종: 국토연구원.
- Gelernter, D. 1991. *Mirror Worlds: or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox — How It Will Happen and What It Will Mean*. New York: Oxford University Press.
- Grieves, M. 2014. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper* 1: 1-7.
- Grieves, M, and Vickers, J. 2017. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems*: 85-113. Springer, Cham.
- Hernández, L. A. and Hernández, S. 1997. Application of digital 3D models on urban planning and highway design. *Trans Built Environ* 33: 391-402.
- Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., and Xie, X. 2019. Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *Journal of Management in Engineering* 36, Issue 3. 05020004.
- Conway, N. 2017. Geospatial, IoT and the Digital Twin. <https://www.gim-international.com/content/article/geospatial-iot-and-the-digital-twin> (2021년 3월 25일 검색).
- Parrott, A. and Warshaw, L. 2017. Industry 4.0 and the digital twin. In *Deloitte University Press*: 1-17.