

스마트 터널 기술위원회

Annual Technical Report

- 1. AI 분야**
- 2. BIM 분야**
- 3. 기타 분야**

2022

**터널 지하공간학회
스마트 터널 기술위원회**

■ 목 차 ■

1. AI분야.....	1
1.1 스마트 건설 기술.....	1
1.2 디지털 정보화.....	2
1.3 터널에서의 AI 적용.....	3
2. BIM분야.....	6
2.1 개요.....	6
2.2 BIM 활용 범위.....	8
2.3 생애주기별 BIM의 특징, 2D, 3D CAD와의 차이점.....	9
2.4 4D, 5D, 6D, 7D 개념.....	10
2.5 IPD(Integrated Project Delivery, 통합 프로젝트 수행 방식).....	11
2.6 LOD의 정의와 단계별 LOD 정의(Level of Detail, Level of Development).....	13
2.7 BIM 저작도구(BIM Authoring Tool).....	19
2.8 BIM 수행계획서(BIM Execution Planning).....	21
2.9 BIM Planning Guide for Facility Owners.....	26
3. 기타분야.....	31
3.1 개요.....	31
3.2 터널 유지관리 일반 현황.....	32
3.3 스마트 건설 기술의 현황.....	34
3.4 Scanning.....	35
3.5 Drone 및 UAV.....	41

■ 표 목 차 ■

<표 2.1> 전통적 발주 방식과 IPD 차이.....	13
<표 2.2> BIM 모델 상세수준별 표현 정도 예시.....	16
<표 2.3> 단계별 BIM 모델 상세수준 예시.....	16
<표 2.4> 수량산출을 위한 BIM 모델 구성 예시(터널분야).....	17
<표 2.5> BIM 기반 설계 수량 구분 예시(터널분야).....	18
<표 3.1> 터널 시공 방법에 따른 관리상의 차이점 비교.....	33
<표 3.2> 각종 조사기법의 장단점 비교.....	41

■ 그림 목 차 ■

[그림 1.1] 스마트 건설 개념.....	1
[그림 1.2] 데이터관리시스템 예시(Moreno et al., 2015)	3
[그림 1.3] TBM현장 인텔리전트 빅데이터 플랫폼(Zhang et al., 2018).....	3
[그림 1.4] 침하예측에서의 ML방법에 따른 결과(Chen et al., 2019).....	4
[그림 1.5] 영국 TIM 시스템의 결과 리포팅(http://www.mytimapp.com).....	5
[그림 2.1] BIM 모델 정보.....	7
[그림 2.2] BIM 활용 예시.....	8
[그림 2.3] 5D functionality can integrate design, cost, and schedule in a 3D output.....	10
[그림 2.4] LOD 표현정도.....	15
[그림 2.5] BIM 데이터 형식.....	19
[그림 2.6] BIM 수행계획서 작성 절차.....	23
[그림 2.7] BIM 수행계획서 작성 예시.....	25
[그림 2.8] 기술성숙도를 고려한 단계별 도입 전략 (영국).....	28
[그림 2.9] 정보전달체계에 따른 준공 데이터(출처 : BSi).....	29
[그림 2.10] 정보 예시.....	29
[그림 2.11] 정보관리를 위한 문서체계.....	30

[그림 3.1] 국내 터널의 관리 현황(2022년 3월 기준).....	31
[그림 3.2] 국내 터널에서 발생한 주요 사고 이력(2022년 3월 기준).....	32
[그림 3.3] 이미지 기반의 터널 라이닝 조사 기법	35
[그림 3.4] LiDAR 기반의 터널 라이닝 조사 기법	35
[그림 3.5] 이미지 기반의 터널 라이닝 결함 검출 예시.....	36
[그림 3.6] 이미지 기반의 터널 라이닝 결함 검출 예시2.....	37
[그림 3.7] 사진측량기법의 암반 조사 활용 예시	37
[그림 3.8] LiDAR의 촬영 원리(after Lee et al., 2021)	38
[그림 3.9] LiDAR 기반의 터널 유지관리 예시	39
[그림 3.10] 무인로봇과 LiDAR를 이용한 터널 계측 사례	39
[그림 3.11] LiDAR 기반의 암반사면 조사 활용 예시(Han et al., 2017, Lee et al., 2020).....	40
[그림 3.12] Drone의 구성 개요도(과학기술정보통신부, 2022)	42
[그림 3.13] 드론을 통해 촬영된 이미지를 통한 터널 3D모델 재현 예시.....	43
[그림 3.14] 드론을 통해 촬영된 이미지를 통한 터널 라이닝 결함 검출 예시.....	44

1. AI분야

1.1 스마트 건설 기술

최근 설계·시공·유지관리를 포함한 건설 분야 모든 단계에서 스마트 기술이 적용되고 있다. 설계 단계에서는 2D에서 3D설계가 되면서 VR, BIM 등을 이용한 최적 설계와 설계단계에서의 건설·운영 통합관리가 추구하고 있으며, 시공 단계에서는 모듈화 제조업화를 통해 날씨·민원 등에 영향을 받지 않고 부재를 공장 제작·생산할 뿐만 아니라, 비숙련 인력이 고도의 작업이 가능하도록 장비 지능화 및 자동화가 이루어지고 있다. 유지관리 단계에서는 드론, 센서를 활용한 예방적 유지관리가 수행되고 AI기반 시설물 운영기술이 시도되고 있다. 건설분야에서의 스마트기술 적용은 상대적으로 다른 사업에 비해 낮은 생산성을 향상시키는 동시에, 건설현장의 인력 부족을 해결하고 건설 안전성을 높이기 위해 필수가 되고 있다.



출처 : 건설 생산성 혁신 및 안전성 강화를 위한 스마트 건설기술 로드맵(국토부, '18.10)

[그림 1.1] 스마트 건설 개념

해외에서는 이미 Construction2025(영국, '13), i-Construction(일본, '17), Construction 21 운동(싱가포르, '16) 등으로 공통적으로 건설산업 생산성 향상을 위한 정책 추진하고 있으며, 그 핵심은 스마트 건설기술이라고 할 수 있다. 한국은 뒤늦게

「100대 국정과제」 중 건설분야에서 4차 산업혁명 기술을 확산·촉진시킬 수 있도록 건설 기술개발 및 인프라 구축 등을 국정과제로 선정하는 등 정책적 방향 제시하며, 2018년부터 건설산업 패러다임 변화에 맞춘 기술개발 지원 방안을 마련하고 있다.

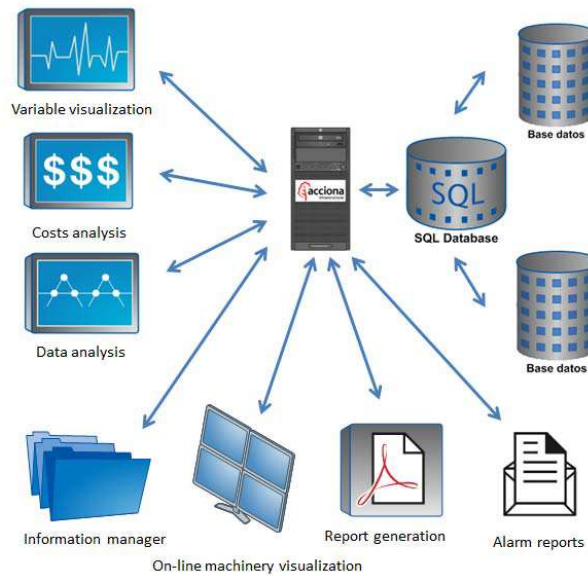
1.2 디지털 정보화

스마트 건설 기술 중 AI를 적용하기 위해서는 기본적으로 적용 대상 시설물에 대한 디지털 정보, 즉 데이터가 필요하다. 따라서 인프라 사업에서 발생하는 정보와 경험을 융합하는 Digital Transformation 과정을 통해 디지털화 작업이 선행될 필요가 있다. 관련 분야 연구를 위해서는 디지털 플랫폼을 개발하고 이를 통해 인프라의 객체, 공정, 인력과 장비, 참여주체에 부여되는 정보를 교환 가능한 형태의 디지털 정보로 구성해야 한다. 이렇게 건설현장에서 수집되는 데이터는 건설 프로젝트의 최적화를 위한 시뮬레이션 및 Digital Twin 모델 및 AR기반 건설정보 시각화 기술에도 사용될 수 있다.

국내 건설기업의 데이터 구축에 대한 조사에서도 비록 데이터 관리수준은 낮지만, 데이터를 축적하고 있는 것으로 나타났으며, 데이터의 의존도는 갈수록 높아질 것으로 전망하였다. 데이터 구축 목적으로 리스크관리가 30%로 가장 많았고, 그 뒤를 이어 시장 분석(26%), 원가 및 재무 관리(25%), 경영 전략(24%), 입찰/계약 관련 의사 결정(23%), 마케팅(23%) 등이 있었다(한국건설신문, 2014.08.20.).

국내에서 데이터 관리가 어려운 이유는 데이터 관리 문화 형성 및 인력 부족이 가장 크게 나타났으며, 유럽에서도 현장 관계자들이 수많은 원 데이터를 처리할 시간의 부족, 발주처/시공사/공급자의 필요에 따라 정보 필터링이 상이한 점, 현장별로 데이터 간의 상관관계 정보 부재 등의 이유로 관리가 어려운 것으로 나타났다.

데이터는 AI에서 매우 중요하다. 2012년 가트너(Gartner)는 빅데이터를 규모(Volume), 속도(Velocity) 그리고 다양성(Variety)으로 정의하였다. 빅데이터의 특성을 다량의 데이터를 빠르게 처리해야 한다고 봤을 때 다양성은 정형적이지 않은 데이터를 처리 할 수 있어야 함을 의미한다. 즉, 인공지능이 필요한 이유라고 할 수 있다. AI는 데이터를 통해 새로운 규칙을 만들어 내기 때문에 데이터는 AI의 중요한 밑바탕이 된다.



[그림 1.2] 데이터관리시스템 예시(Moreno et al., 2015)

1.3 터널에서의 AI 적용(출처: 국토교통부, 2022)

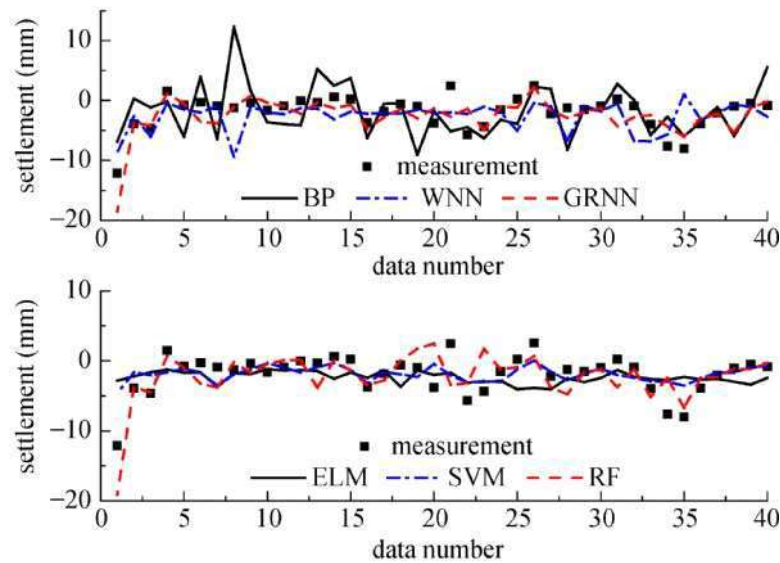
가. 중국

중국정부는 TBM 제조 및 터널기술에 대한 투자를 늘리고 있으며, TBM기술에 대한 연구프로젝트를 수행하기 위하여 2개의 국가핵심연구실(SKL : State Key Laboratory)도 설립하였다. 그중에서 2010년 CREG社가 운영하는 SKL of Shield TBM and Boring Technology를 통해 시스템 통합기술 연구, 즉, ①TBM 제어기술, ②원격 자동 진단 기술, ③의사결정 기술을 연구한 바 있다.



[그림 1.3] TBM현장 인텔리전트 빅데이터 플랫폼(Zhang et al., 2018)

또한 중국에서는 다양한 머신러닝 기법을 TBM 연구에 접목하는 사례가 증가하고 있는데, 주로 터널 굴진중 침하량을 예측하는 방법에 대한 연구가 시작되고 있다. 즉, Pourtaghi and Lotfollahi-Yaghin (2011)은 웨이블릿 이론과(Waveler theory) 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 이론을 사용하여 지반침하를 추정하려는 시도를 하였고, Chen 등 (2019)은 여러 가지 머신러닝 기법을 활용하여 지반 침하량의 예측 정확도 비교실험을 수행하여 각각 다른 입력변수들이 예측 결과에 미치는 영향을 분석하였는데, 여기에서는 Back propagation neural network, wavelet neural network, random forest 등을 사용하였다.



[그림 1.4] 침하예측에서의 ML방법에 따른 결과(Chen et al., 2019)

나. 스페인

스페인 ACCIONA社의 TBM 통합 관리에 필요한 데이터 및 조건에 대한 연구를 수행하여 TBM 물리적 작업 수행 능력 확인 및 장비 유지관리 시스템 구축한 바 있다. 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- TBM 컨트롤 데이터센터(TBM Control data Center, TCC) 개념 연구
- 인텔리전트 자가진단 도구(intelligent self-monitoring tool): 모든 시공 프로세스에 포함된 개별 관리 시스템들을 포함
- 굴진 데이터: 토크, 추력, 굴진율, 커트헤드 회전속도 등
- 지질조건: 암반등급, 지반공학적 특성 등
- 장비 유지관리(Machinery maintenance): 커터 마모, 참가제 소모량, 파손, 보수 등
- 실행계획(logistics) 및 품질: 세그먼트 잔고/설치/이력 감시 등의 업무를 수행

다. 미국

미국 Colorado School of Mines에서는 AI를 이용한 굴진 자동화 및 굴진율 예측에 관한 연구를 수행하였는데, 센서로 유입되는 정량적인 데이터에 의존하는 것이 아닌 AI를 활용하여 TBM 작업 환경에 대한 상호작용, 예측, 분석을 수행하였다. 또한 CSM에서는 AI를 이용한 굴진 자동화에 대한 연구 수행중: TBM-지반 상호작용 과정을 이해하기 위한 데이터 패턴 인식 연구(오퍼레이터-입력, 장비성능-출력)와 이산사건 시뮬레이션(Discrete event simulation) 모델 기반의 굴진율 예측에 관한 연구를 수행하였다.

라. 영국

영국에서 개발된 터널정보관리시스템(Tunnel Information Management, TIM)의 개요는 다음과 같다.

- TIM은 터널 시공/자산 관리를 위한 웹기반 정보관리시스템으로 다수의 사용자들을 대상으로 실시간 제어 접속을 제공하고, 시공 트러블과 같은 중요 이슈에 대해 즉각적인 알림과 더불어 부정적인 경향을 보이는 항목에 대한 자동 경고가 가능
- BIM모델과 통합하여 다양한 터널 정보(생산, 품질, 플랜트, 환경/지반변형 모니터링)를 생성하고 최신 정보로 의사결정이 가능케 하는 리포팅(Reporting) 가능
- 터널 굴착 전에 수치해석 및 분석을 통해 사전에 지반과 구조물에 대한 리스크를 검토할 수 있도록 했으며, 지반 특성을 고려한 최적 TBM 제작 사양 도출
- 시공 전 정보 제공과 더불어, 시공 중 지질/지하수 조건, 지반변형, 구조물 손상 등의 예측과 실제 결과의 모니터링 기능을 포함하여, TBM 운전변수들의 조건을 제안하는 기능을 가짐
- 시스템을 모듈 형태로 구성하여 프로젝트별 맞춤형으로 판매 가능



[그림 1.5] 영국 TIM 시스템의 결과 리포팅(<http://www.mytimapp.com>)

2. BIM 분야

2.1 개요

Building Information Modeling의 개념은 3차원 형상 모델에 원하는 정보를 담아서 다양한 용도로 활용하는 행위 혹은 기술을 의미한다. 1975년 이스트만 교수가 발표한 개념에 따르면 상호작용을 통해 구성요소를 정의함으로써 하나의 모델로부터 단면, 평면, 투시도를 뽑아내고 모델의 변경시 도면이 업데이트된다. 하나의 모델로부터 도면이 생성되기 때문에 모든 도면은 자동적으로 일치하고 어떤 종류의 정량적 분석도 연계할 수 있다. 즉, 물량 산출이 가능하고 시각적 정량적 분석을 위한 하나의 통합된 데이터베이스를 제공한다. 건축분야에서 주로 BIM을 “Product Model”이라는 초기 개념에서 연구개발에 따른 발전을 반영하여 Process를 포함하고 정보를 담을 뿐 아니라 이를 이용하는 것을 포괄하는 행위의 개념으로 발전하였다.

토목분야에서는 3차원 모델 기반의 업무가 완전히 새로운 것은 아니기 때문에 CIM(Civil Information Modeling) 혹은 BrIM(Bridge Information Modeling) 등의 용어가 등장하고 일부 사용되었다. 그러나, BIM이라는 용어가 일반화되면서 단순히 건물에 대한 영역을 넘어서 전반적인 건설 행위(Building)를 포괄하는 의미로 받아들여지고 이로부터 Civil BIM, Bridge BIM, Tunnel BIM 등 용어가 좀 더 일반화된 개념으로 여겨지고 있다.

미국에서는 E-construction, BrIM(Bridge Information Modeling) 등의 용어로 진행되는데 주로 Paperless를 목표로 하는 의사소통 방안의 혁신에 중점을 두고 있다. 일본의 CIM, i-construction 등의 용어 및 전략의 변화는 일본이 가장 강점을 갖고 있는 로봇틱스를 건설분야에 접목해서 핵심기술을 확보하기 위한 노력이다. 영국의 Digital Built Britain 전략 보고서에서는 BIM의 기술 성숙도를 Level로 구분하고 현재는 2차원 도면과 3차원 모델이 공존하는데 BIM은 참고 모델로서의 법적 의미를 갖는 Level-2 라고 보고 있다. 싱가포르의 Digital Twin의 개념으로 국가 인프라 전체를 디지털화하고 GIS 맵위에 서비스를 탑재할 수 있는 형태로 개발이 진행되고 있다.

※BIM(Building Information Modeling)

1. BIM(Building Information Modeling)

- 시설물 생애주기 동안 발생하는 모든 정보를 3차원 모델 기반으로 통합하여 건설 정보와 절차를 표준화된 방식으로 상호 연계하고 디지털 협업이 가능하게 하는 디지털 전환(Digital Transformation) 체계를 의미
- 정보(형상정보+속성정보)를 가지고 있으므로 단순히 3차원 형상을 가진 CG와는 구별됨

2. BIM 설계

- 설계·시공 등 건설사업 각종 업무수행에서의 활용을 목적으로, BIM 저작도구로 BIM 모델을 작성하고, 도면 등 필요한 설계도서는 BIM 모델로부터 추출하여 생성하는 것을 의미

3. BIM 모델

- 시설물의 3차원 형상 정보와 속성 정보를 포함하는 디지털 데이터를 의미
- 형상정보 : 그래픽적인 시설물의 외형, 위치, 좌표 등
- 속성정보 : 그래픽적인 것 이외의 시설물의 재료 속성, 수량, 이력 등



[그림 2.1] BIM 모델 정보

2.2 BIM 활용 범위

- 도면화 : BIM 모델로부터 2차원 도면 산출
- 시각화 : Visualization(VR/AR/MR), 렌더링, 동영상 제작
- 설계검토 : 법규 검토 및 공간 유효성 평가 등의 설계안 검토
- 환경분석 : 에너지 성능 및 일조, 일영 등의 분석
- 물량산출 : 자재의 수량 및 물량 산출
- 견적 : 물량 산출을 통한 비용 분석
- 4D : 공사일정 계획 및 검토(시공성 검토)
- 5D : 공정 기반 비용 분석
- 간섭체크 : 부재간 중복, 충돌, 겹침 등의 오류 검토
- 3D Laser Scanning : 기존 시설물의 컴퓨터 모델화
- 유지관리 : 준공후 시설관리를 위한 정보 플랫폼

<ul style="list-style-type: none"> ● 도면화 	<p>: BIM 모델로부터 2차원 도면 추출</p> 	<p>⇒ 단순·반복 작업 매크로/자동화 처리</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 시각화 ● 설계 검토 	<p>: Visualization(VR/AR/MR), 렌더링, 동영상 제작</p> <p>: 법규 검토 및 공간 유효성 평가 등 설계안 검토</p> 	<p>⇒ 접속부, 연결부, 확폭부 등 시각화</p> <p>⇒ 단면 적정성, 갱구부 및 갱문 위치</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 환경 분석 ● 물량 산출 / 견적 ● 4D / 5D ● 간섭 체크 ● 3D Laser Scanning ● 유지관리 	<p>: 에너지 성능 및 일조, 일영 등의 분석</p> <p>: 자재 수량 및 물량 산출 / 비용 분석</p> <p>: 공정 계획 및 검토(시공성) / 공정 기반 비용 분석</p> <p>: 부재간 중복, 충돌, 겹침 등의 오류 검토</p> <p>: 기존 시설물의 컴퓨터 모델화</p> <p>: 준공후 시설관리를 위한 정보 플랫폼</p>	<p>⇒ 직광 영향, 오염물 확산 등 검토</p> <p>⇒ 터널 수량 및 공사비</p> <p>⇒ 굴착·버력처리·라이닝 타설 공기</p> <p>⇒ 록볼트/보조공 겹침, 시설한계 간섭</p> <p>⇒ 지장물, 기존 시설물 이격, 영향 등</p> <p>⇒ 유지 보수 이력 정보</p>

[그림 2.2] BIM 활용 예시

2.3 생애주기별 BIM의 특징, 2D, 3D CAD와의 차이점

솔리드(Solid)를 모델링하는 방법에 경계표현법(B-rep, Boundary representation)과 구조적 입체 기하학(CSG, Constructive Solid Geometry)이 있다. 첫 번째 방법은 여러 개의 다면체를 합, 교차, 차감 연산(불리언 방법(Boolean operation))을 통해 표현하거나 모따기(Chamfer), 자르기, 구멍 이동 등과 같은 세밀화 연산을 이용하여 정의한다. CSG 방법은 형상을 기본형상(Primary Objects)과 그 기본형상간의 연산자로 만들어진 트리구조(불리언 방법(Boolean operation))로 표현한다(이강 등, 2008). 이러한 캐드에 관한 연구가 주로 기계분야에서 진행되었고 건설분야에서는 오랫동안 2차원 작업에 익숙해져 있었다.

객체(Object) 기반이라고 하는 것은 형상 모델이 거리나 각도 등의 규칙을 포함하는 변수를 이용하여 정의할 수 있다는 것이다. 이러한 규칙은 하나의 객체 스스로 혹은 다른 객체와의 관계를 다양한 방식으로 정의할 수 있게 한다. 건설분야에서 시공 혹은 제작 단계에서 직접적으로 객체들 사이에 적합성을 부여할 수 있기 때문에 경험을 객체에 포함시켜 자산화할 수 있게 된다. 특히, 객체 기반의 변수 모델링은 객체의 형상 및 정보를 수정하기 위해 세부적인 객체 수준에서 모두 수정하지 않고 상위 수준에서 일괄적으로 수정하거나 연관되어 수정되도록 하여 작업의 효율성과 정확성을 높일 수 있게 한다. 즉, 설계 변경이 발생할 때 관련된 부분의 자동 수정을 해주어 생산성 향상을 도모하는 핵심 기술이 될 수 있다. BIM 기술에서 이러한 객체 기반의 변수 모델링이 없다면 3차원 모델링이 시각화이외의 엔지니어링 측면에서 큰 의미를 가질 수 없다.

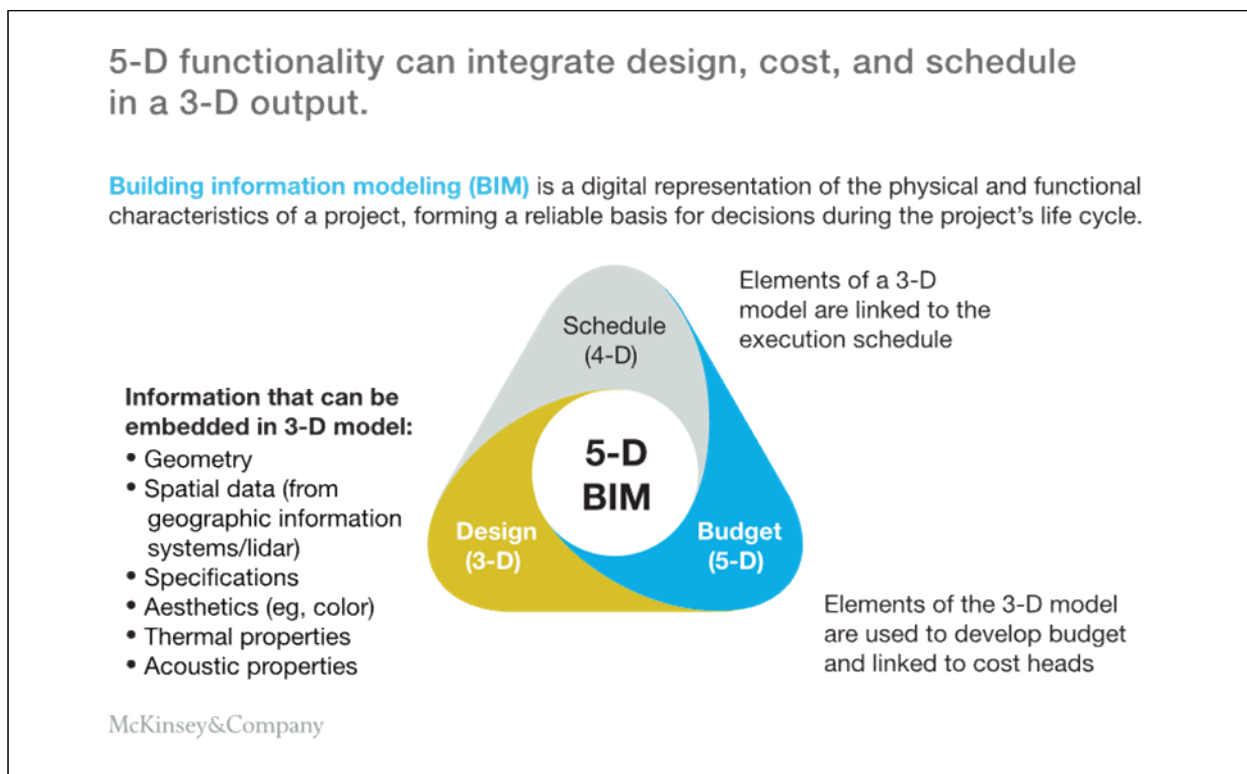
변수 모델링은 객체들 사이의 연관관계를 수치적으로 혹은 위상학적으로 연결할 수 있다. 또한, 다양한 속성을 부여하고 활용할 수 있는데 대표적인 것이 물량 속성, 재료 속성, 에너지 및 공간 속성 등이다. 물론, 최근에는 2차원 도면과의 연계 속성도 매우 중요한 특성이다. 이러한 변수 모델링을 지원하는 캐드 엔진들이 각자 고유의 객체 정의 방식에 기반하고 있기 때문에 이 부분의 호환성 확보가 매우 어렵고 문제를 개선하는데도 한계가 있다.

토목분야에서 몇가지 예를 살펴보면 첫 번째는 철근 모델링의 경우에 주로 사용하는 콘크리트 덮개 규정을 모델에 반영하는 것이다. 벤틀리의 Rebar가 기본적으로 제공하는 기능인데 많은 철근을 모델링할 때 이 규칙을 정의해두면 콘크리트의 형상 변화 혹은 덮개 규정의 변화를 신속하게 반영할 수 있다. 물론, 철근 모델 자체도 직경에 따라서 정착길이 혹은 갈고리 규정이 자동으로 수정되도록 된다. 두 번째는 교량의 선형 의존성을 반영하는

예인데 도로 혹은 철도의 선형에 맞게 단면을 구속해두면 선형이 변경될 경우에 이를 반영하여 단면이 변화하거나 부재들 사이의 상호 거리 등을 규정하여 자동으로 변경될 수 있도록 할 수 있다. 마지막으로 속성에 관련하여 모델링 후의 후속작업에서 주로 사용하는 물량 산정 부분인데 부피, 면적, 개수 등에 대한 정의를 반영하면 모델의 변화에 따른 후속 작업의 신속한 반영이 가능하게 된다.

2.4 4D, 5D, 6D, 7D 개념

운영 및 유지관리 단계의 정보를 추가한 정보모델을 6D 혹은 7D로 정의할 수 있다. 이는 3차원 형상 모델에 서로 다른 형태의 정보를 얼마나 포함하는가에 따라 다차원 모델의 정의가 달라질 수 있기 때문이다. BIM 모델의 활용목적에 따라 정보는 선택적으로 포함하거나 제거하여 생성할 수 있다.



[그림 2.3] 5D functionality can integrate design, cost, and schedule in a 3D output.

※BIM의 Dimensions : 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D ?

- 2D : 과거 수작업으로 작성했던 2차원(X, Y 좌표 기반) 도면을 컴퓨터를 이용하여 설계하는 시스템
- 3D : 3차원(X, Y, Z 좌표 기반) 형상을 솔리드 모델링 시스템을 이용하여 컴퓨터에서 구현하는 설계 시스템
- 4D : 3차원 형상 모델에 시간(공정) 정보를 포함한 시스템
⇒ 3D+시간(공정)
- 5D : 3차원 형상 모델에 시간(공정), 비용 정보를 포함한 시스템
⇒ 4D+비용
- 6D : 3차원 형상 모델에 시간(공정), 비용 그리고 자원을 포함한 시스템
⇒ 5D + 자원
- 7D : 3차원 형상 모델에 시간(공정), 비용, 자원 및 유지관리 기록을 포함한 시스템
⇒ 6D + 유지관리 기록

2.5 IPD(Integrated Project Delivery, 통합 프로젝트 수행 방식)

IPD의 명확한 개념은 2007년 5월 IPD Definition Task Group에 의해 성립되었으며 현재 건설산업이 안고 있는 낮은 생산성과 낭비, 공기 초과, 품질 저하, 각종 클레임 등을 해결하고자 Integrated Practice와 린(Lean) 건설의 개념을 바탕으로 하여 이루어진 것이다. 따라서, 각 참여자들의 상호존중과 신뢰를 바탕으로 하는 통합 프로젝트 수행을 주된 목표로 하여 비용을 고려한 프로젝트 가치의 극대화를 창출하고자 한다. 하나의 조직을 이루는 과정에서 주요 관계자들이 전통적인 방식에서처럼 직선적이고 상하적인 관계가 아닌 유기적이고 유연한 조직 관계가 이루어지도록 한다. 조직이 구성되면 각 구성원간의 협정을 통하여 역할과 의무를 정의하며, 각 관계자들의 참여가 프로젝트 초기단계부터 이루어져 효율적인 의사결정이 이루어지게 된다. 또한, 주요 구성원이 하나의 팀을 구성하므로 프로젝트의 이익과 리스크에 대한 책임 및 보상에 대해 공동화한다는 특징이 있다.

Integrated Project Delivery(이하, IPD)란 발주자/건축가/시공사/컨설턴트가 하나의 팀으로 구성되어 사업구조 및 업무를 하나의 프로세스로 통합하여 프로젝트를 수행하며, 모든 참여자가 책임 및 성과를 공동으로 나누는 발주방식을 의미한다.(AIA, "IPD : A

Guide” , 2007) 전통적인 건설사업 수행체계(Project Delivery System)는 각각의 단계별로 서로 다른 참여자가 업무를 수행하던 방식이고, IPD는 사업 초기단계부터 프로젝트 이해 당사자가 참여하여 이해관계 상충 등의 문제를 해결하는 등 건설사업을 통합적으로 수행하는 방식을 말한다. 일반적으로 각 단계별로 분리되어 수행되는 기존의 공사수행방식과 IPD와의 가장 큰 차이점은 기획단계(Predesign)에 이미 각 분야의 엔지니어, 시공업체 및 전문시공업체가 참여하게 된다는 점이다. 즉, 프로젝트를 누가, 어떻게 수행할 것인가 하는 ‘Who’ , ‘How’ 의 문제를 프로젝트 초기단계인 기획단계부터 충분한 의사소통과 상호간의 협력체계를 통해서 시공단계에서 야기될 수 있는 문제점을 조기에 해결하자는 것이다.

IPD 도입을 위한 원칙은 아래와 같다.

- Mutual Respect and Trust : 프로젝트 참여자간의 상호존중
- Mutual Benefit and Reward : 프로젝트 참여자간의 IPD로 부터 얻어지는 혜택 공유
- Collaborative Innovation and Decision Making : 협력적인 혁신과 의사결정
- Early Involvement of Key Participants : 핵심 인력의 프로젝트 조기 참여
- Early Goal Definiton : 프로젝트 목표의 조기 설정
- Intensified Planning : 계획의 중요도 부여
- Open Communication : 개방적이며 직접적이고, 솔직한 의사 소통
- Appropriate Technology : 적절한 개방형 첨단기술의 활용
- Organization and Leadership : 협력적 조직과 분야별 전문성에 따른 리더십

가. IPD의 적용 단계별 특징

IPD와 BIM의 경우 프로젝트를 수행하는 방식과 정보를 관리하는 방식의 관점에서 별개 영역이라 할 수 있으나 궁극적인 목적은 건설 프로젝트의 가치 향상에 있다. 즉, IPD의 경우 경영관리 기법적 측면에서의 문제에 대한 접근이 이루어지고 BIM의 경우 시스템 측면에서의 문제 해결에 대한 노력이 이루어진다는 차이점만 있을 뿐 실질적인 방향은 동일하다고 할 수 있다. 단순히 프로젝트의 가치를 향상시켜준다는 관점뿐만 아니라 IPD와 BIM의 경우 각각의 기대효과를 극대화함에 있어서의 전제조건을 상호간에 충족시켜주는 개념에서 다가갈 수 있다. IPD의 경우 각 관계자간의 빠르고 정확한 의사소통과 정보교환이 필수적 요소이며, BIM의 경우 각 관계자들의 조기 참여와 협력적 의사결정 체계를

바탕으로 프로젝트 초기부터 체계화된 정보 구축이 이루어져야 하는데 언급한 바와 같이 IPD와 BIM이 각기 상호간의 부족한 사항을 보충하는 형태로써 시너지 효과를 낼 수 있다.

나. 전통적 발주 방식과 차이점

<표 2.1> 전통적 발주 방식과 IPD 차이

구 분	전통적 발주방식	Integrated Project Delivery
조직구성	•독립적인 참여주체가 ‘필요요구’에 의해 단편적, 위계적, 통제적으로 구성	•프로젝트에 관계된 참여자가 집합적, 공개적, 협력적으로 하나의 팀으로 구성
프로세스	•업무가 일련의 단계로 분리되어 이루어지고, 관련 정보는 ‘필요요구’에 따라 순차적으로 저장되어 관리됨	•업무는 동시적으로 다중작업이 이루어지고, 조기협업이 가능하며 관련정보는 공개되어 참여자들에게 공유됨
리스크	•개별적으로 관리되며, 추후 큰 범위의 리스크로 바뀔 위험성이 있음	•협력적인 관리를 통하여 리스크를 적절하게 공유함
결과물	•개별적으로 관리되면, 일반적으로 견적의 기초자료가 됨	•팀작업으로 수행하며 품질을 우선으로 만들어진 결과물은 프로젝트의 성공으로 이어짐
의사소통/ 기술	•의사소통은 문서를 통하여 이루어지고, 2차원적인 아날로그 기술을 활용함	•디지털 기반의 BIM 기술을 활용함 (3D, 4D, 5D)
계약	•참여자중 하나의 일방적인 노력에 기인하고, 리스크는 각각 분담함	•참여자 공동의 협력을 통하여 이루어지며, 리스크 역시 공유함

2.6 LOD의 정의와 단계별 LOD 정의 (Level of Detail, Level of Development)

모델의 상세수준(LOD : Level of Detail 또는 Level of Development)은 3차원 BIM 모델의 용도와 사업단계에 따라 구분해서 설정해야 한다. LOD는 모델의 주된 활용목적인 수량 산출, 3차원 조정작업 및 계획에 따라 특정 상세나 정보가 모델에 어느 수준으로 표현되는지를 결정하는 것이다. 이는 BIM 사업수행계획서에 명시하여 일관성 있는 BIM 성과물 작성이 이루어지도록 한다. LOD는 100~150까지 정의할 수 있다.

설계단계별로 특정 수준의 LOD를 모든 구성요소에 적용하기보다는 발주자가 모델의 활용성과 투입 비용 및 시간을 고려하여 중요도가 높은 최소한의 모델 범위와 수준을 설정하여야 한다. 모델의 상세수준에는 비그래픽적 요소인 관련 정보가 포함될 수 있다. 이는 속성정보 혹은 관련 문서에 대한 연결 정보로 구성될 수 있다.

※BIM 모델 상세 수준

1. LOD(Level of Development) : 국제적으로 통용되는 BIM 모델 상세수준을 가리키는 용어
2. BIM 모델 상세 수준 구분
 - 상세수준(LOD : Level of Detail) : 표현할 구성요소의 형상 정보 수준을 표시
 - 정보수준(LOI : Level of Information) : 형상외 입력자료의 속성 정보 수준을 표시

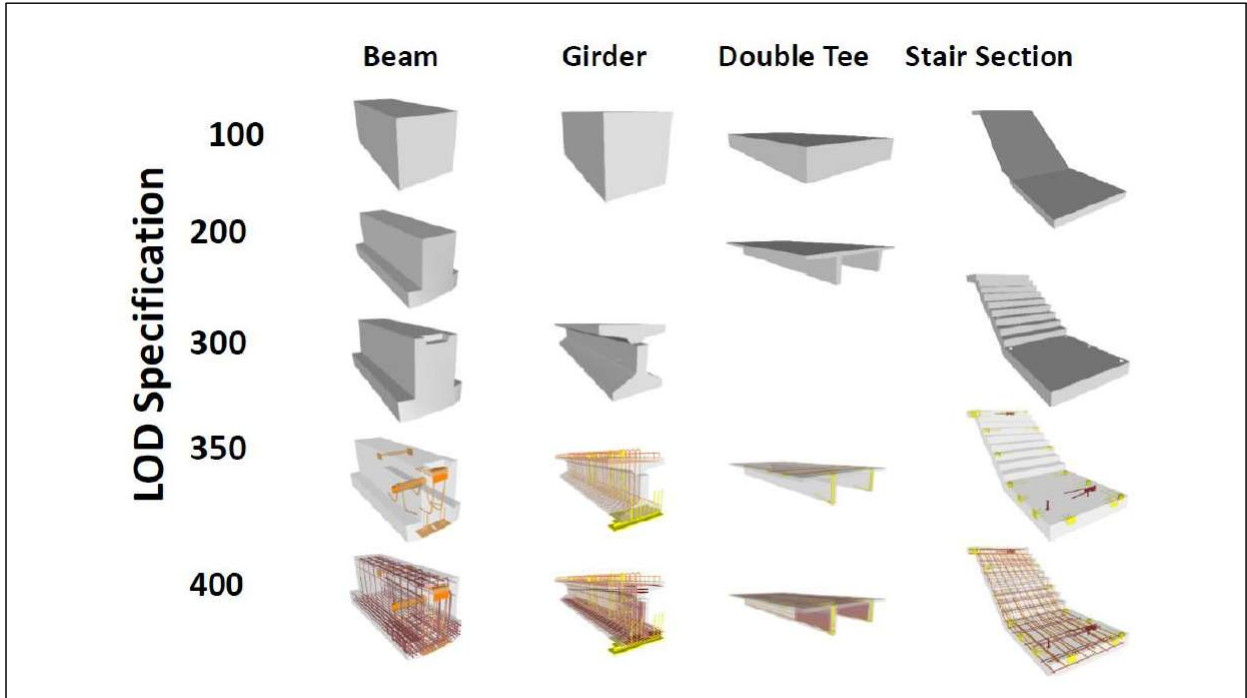
모델의 상세수준은 BIM 모델이 건설사업 수행과정에서 협업의 매개로 역할을 수행하기 위해 모델의 일관성을 보장하기 위한 것이다. 미국의 AIA(The American Institute of Architects)에서 LOD에 관해 제시한 가이드라인에 따르면 다섯 단계로 구분하여 모델을 진화시키도록 하고 있다.

- LOD 100 : 개념 모델 수준
(LOD 200을 만족하지 못하는 수준의 그래픽 표현만 가능한 수준)
- LOD 200 : 개략 형상 모델 수준
(개략적인 수량, 크기, 형상, 위치를 갖고 모델이 구성되는 수준)
- LOD 300 : 정밀 형상 모델 수준
(치수와 관련한 주요 사항이 모두 반영되는 수준으로 그래픽 정보 이외의 정보가 연계될 수 있음)
- LOD 350 : 정밀 형상과 연계정보 모델 수준
(LOD 300 수준에 타 시스템과 연계정보가 추가된 모델 수준)
- LOD 400 : 제작 모델 수준
(상세나 조합, 설치 정보가 포함되어 제작 도면이나 기계 가공이 가능한 모델 수준)
- LOD 500 : 준공 모델
(현장에서 검증된 모델로 크기, 형상, 위치, 수량 및 방향 정보가 포함되고 추가 정보가 연계될 수 있는 수준)

LOD 설정은 사업마다 달라질 수 있고 이는 BIM 사업수행계획서에서 제시될 수 있다. 예를 들어, 객체의 크기를 기준으로 10mm 이내는 모델링하지 않는다는 형태로 특정 구성요소의 모델 범위를 설정할 수 있다. 모델 요소는 두 가지 종류의 정보를 포함할 수 있는데 모델의 형상과 이에 연관된 수치적 혹은 물리적 속성정보이다.

영국 등에서는 LOD 1 ~ LOD 5로 다른 정의를 사용하는 사례가 있다. 따라서, 모델의 상세도와 정보의 수준(LOI : Level of Information)은 BIM의 활용목적에 맞게 설정되도록 협의해야 한다. 특히, 물량 산출이나 시공 상세도 도출은 면밀한 검토를 통해 결정되는 것이 필요하다.

LOD는 이해 당사자들의 관점에 따라 모델링되는 객체 정보를 분류하는 정보 분류체계와도 관련이 있다. 어떤 목적에 LOD가 300 이상 수준에서 상세화되어 있는데 이를 정보 분류체계가 따라가지 못한다면, 시설물 관리에 필요한 수량이나 견적을 통해 자재를 구매할 수 없다. 정보 분류체계가 없으니 어디에서 비용에 관한 정보와 수량에 관한 정보를 가져와 서로 연동해 견적을 낼지 알 수가 없다. 보통 구매 조달 및 자재 비용은 ERP 시스템이 관리하는데 이 시스템에서 사용하는 해당 정보 분류체계와 수준이 맞지 않으면(호환되지 않으면) 아무리 모델링을 잘 해봐도 아무런 소용이 없다.



[그림 2.4] LOD 표현정도

<표 2.2> BIM 모델 상세수준별 표현 정도 예시

구분	개념	상세수준(LOD)	정보수준(LOI)
LOD 100	<ul style="list-style-type: none"> 개념 모델 수준 형태나 재료가 구별되지 않음 		위치
LOD 200	<ul style="list-style-type: none"> 개략 형상 모델 수준 		위치, 고도, 좌표
LOD 300	<ul style="list-style-type: none"> 정밀 형상 모델 수준 		위치, 고도, 좌표, 재료 속성, 편경사 등
LOD 350	<ul style="list-style-type: none"> 정밀 형상과 연계정보 모델 수준 철근 및 강연선 등 표현 		위치, 고도, 좌표, 재료 속성, 편경사, 철근 등
LOD 400	<ul style="list-style-type: none"> 제작 모델 수준 겨입음을 포함한 철근 표현 		위치, 고도, 좌표, 재료 속성, 편경사, 철근(겹이름) 등

<표 2.3> 단계별 BIM 모델 상세수준 예시

구분	단계별 BIM 모델 상세수준	적용 단계		
		기본설계	실시설계	시공
LOD 100	<ul style="list-style-type: none"> 개념 모델 수준 - 기본설계 : 노선선정이 가능한 깎기, 쌓기 비탈면 정도 표현 - 실시설계 : 기본형상모델로 수량산출 불가 ⇒ 적용불가(×) 	○		
LOD 200	<ul style="list-style-type: none"> 개략 형상 모델 수준 - 기본설계 : 비교노선 검토가 필요한 비탈면이나 구조물 - 실시설계 : 기본형상모델로 수량산출이 가능한 구조물 	○	○	
LOD 300	<ul style="list-style-type: none"> 정밀 형상 모델 수준 - 기본설계 : 일부 공중에서 정밀 형상 표현이 필요한 구조물 - 실시설계 : 기본형상모델로 수량산출이 가능한 구조물 	○	○	
LOD 350	<ul style="list-style-type: none"> 정밀 형상과 연계정보 모델 수준 - 기본설계 : 기본설계 취지에 맞지 않는 과도한 모델 수준 - 실시설계 : 철근콘크리트 구조물 등 		○	○
LOD 400	<ul style="list-style-type: none"> 제작 모델 수준 - 시공 			○
LOD 500	<ul style="list-style-type: none"> 준공 모델 수준 - 시공완료 			○

<표 2.4> 수량산출을 위한 BIM 모델 구성 예시(터널분야)

<ul style="list-style-type: none"> •BIM 모델 구성 항목 : 최종 목적 구조물로서 각 항목별 수량 산출이 가능한 구조물로 한정 •BIM 모델 제외 항목 : 공사중 임시시설물, 운반 등 최종 목적 구조물이 아니거나 BIM 모델로 보여줄 수 없는 공중

구 분	BIM 모델		비 고
	모델 구성 항목	모델 제외 항목	
굴착공 버력처리	<ul style="list-style-type: none"> •총굴착, 설계굴착, 여굴 등 •버력(암, 숏크리트) 	<ul style="list-style-type: none"> •발파공 •굴착중 막장, 관통부 등 	LOD 200~300 LOD 200~300
지보공	<ul style="list-style-type: none"> •숏크리트 •록볼트 •강지보(격자지보, H형강) 등 	<ul style="list-style-type: none"> •강섬유, 와이어메쉬 등 •록볼트 충전재 등 	LOD 200~300 LOD 300 LOD 300
콘크리트 라이닝	<ul style="list-style-type: none"> •콘크리트 타설(철근, 무근) •철근 가공 및 조립 •시공이음, 신축이음 등 	<ul style="list-style-type: none"> •배면그라우팅, 거푸집 및 동바리(강재거푸집), 철근처짐 방지용 앵커 등 	LOD 300 LOD 350 LOD 200
방수공 배수공	<ul style="list-style-type: none"> •공동구뚜껑, 스틸그레이팅, 콘크리트 타설, 철근 등 •방수막(부직포), 배수관 등 	<ul style="list-style-type: none"> •필터콘크리트, 용수처리, 암반 청소, 거푸집 등 	LOD 200~350 LOD 200
보조공	<ul style="list-style-type: none"> •휘폴링, 선진보강그라우팅, 선지보네일 등 	<ul style="list-style-type: none"> •프리그라우팅, 선진수평보링공, TSP탐사 등 	LOD 300
갱문	<ul style="list-style-type: none"> •콘크리트 타설, 철근 가공 및 조립 •내장재, 지수관, 배수공 등 	<ul style="list-style-type: none"> •거푸집, 방수공, 비닐깔기 등 	LOD 300~350 LOD 200
터널부속 시설물	<ul style="list-style-type: none"> •갱문가시설(임시갱문), 영구시설(세척수처리시설 등) 	<ul style="list-style-type: none"> •방음문/방음커튼 등 	LOD 200
기타 부대공	<ul style="list-style-type: none"> •내장재(본선), 점검용 사다리 등 	<ul style="list-style-type: none"> •공사중 설비, 가B/P장, 식별번호판, 계측기, 자재 및 운반 등 	LOD 200~300

<표 2.5> BIM 기반 설계 수량 구분 예시(터널분야)

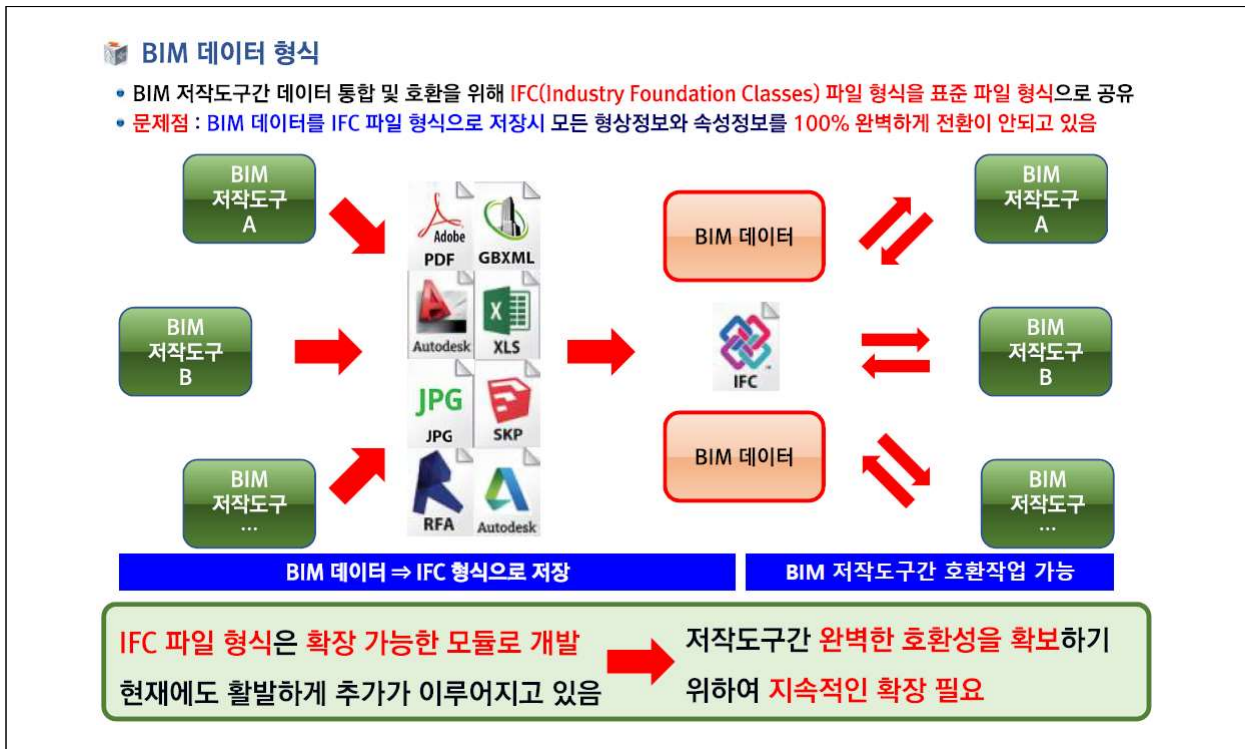
- 자동수량 : BIM 모델에서 개수, 길이, 면적, 체적 등이 자동으로 산출되는 수량
- 연동수량 : BIM 모델에서 자동수량과 연동시켜 산식으로 산출되는 수량으로, BIM 모델 변경 시 자동수량과 동시에 변경 가능
- 수동수량 : BIM 모델과 무관하게 수학적 접근 방식 등 수동으로 산출되는 수량

구분	BIM 기반 설계 수량		
	자동수량	연동수량	수동수량
굴착공	<ul style="list-style-type: none"> •총굴착량, 설계굴착량 •인력굴착(소화설비 Block Out) 	<ul style="list-style-type: none"> •맹암거 기계굴착 - 맹암거체적×30% 	
버력처리	<ul style="list-style-type: none"> •버력(암)=총굴착량 ※총굴착량=설계굴착량+여굴 	<ul style="list-style-type: none"> •버력(숏크리트) - 숏크리트타설량×탈락율 	
숏크리트	<ul style="list-style-type: none"> •체적 	<ul style="list-style-type: none"> •숏크리트량 - $\frac{\text{총굴착량} - \text{공제수량}}{1 - \text{리바운드율}}$ 	<ul style="list-style-type: none"> •강섬유 사용량 : 37kg/m³
강지보공	<ul style="list-style-type: none"> •격자지보/H형강 설치 개소 		
록볼트	<ul style="list-style-type: none"> •록볼트 직경, 개수, 길이 		
콘크리트 라이닝	<ul style="list-style-type: none"> •콘크리트량 •철근 직경, 개수, 길이 	<ul style="list-style-type: none"> •라이닝 단부 마감 거푸집 - $\frac{\text{마감부면적}}{\text{강재거푸집연장}}$ 	<ul style="list-style-type: none"> •배면그라우팅 - 천단부 높이 5cm •철근처짐방지용 앵커
방수공 배수공	<ul style="list-style-type: none"> •방수막 설치 면적 •배수관(측방, 종·횡) 길이 		<ul style="list-style-type: none"> •필터콘크리트 - 단위수량×연장 •용수처리, 비닐깔기
보조공	<ul style="list-style-type: none"> •휘폴링 직경, 공수 •선진보강그라우팅 직경, 공수 		<ul style="list-style-type: none"> •선진수평보링 •프리그라우팅 : 연장의 10%
기타 부대공	<ul style="list-style-type: none"> •내장재 설치 면적 		<ul style="list-style-type: none"> •방음문/방음커튼, 계측기 •자재 및 운반, 공사중 설비 등

2.7 BIM 저작도구(BIM Authoring Tool)

가. 분야별 소프트웨어

BIM은 기본적으로 3차원 캐드 엔진에 기반한다. Bentley, Autodesk Revit, AllPlan, ArchiCAD, Digital Project 등 모델링 도구가 사용중이고 각각의 장단점을 가지고 있다.



[그림 2.5] BIM 데이터 형식

※BIM 저작도구

- BIM 모델을 작성하는데 사용하는 소프트웨어 (Software)를 의미
- 예) Autodesk 사 ⇒ Infracore, Civil3D, Revit, NavisWorks
- Bentley 사 ⇒ OpenRoad, ConceptStation
- Dasault Systemes 사 ⇒ CATIA 등

나. 상호운용성 (Interoperability)

개인이나 기업이 2차원 업무에서 3차원 기반으로 전환할 때 만나는 가장 큰 고민은 어떤 캐드 엔진에 기반할 것인가 하는 것이다. 이상적으로는 모든 3차원 객체 기반의 캐드 엔진들이 상호 호환성을 보장하여 어느 캐드를 사용해도 원하는 성과물을 도출해 내는 것이 바람직하다. 이전에는 파일 기반의 교환 형식에 의존해 왔고 대표적인 것이 DXF(Drawing

eXchange Format)와 IGES(Initial Graphics Exchange Specification)이다. 물론, 형상에 대한 정보만 교환하는 형식이다.

1980년대 ISO STEP이 기계에 의해 읽혀질 수 있는 EXPRESS 언어에 기반하여 객체 모델을 지원할 수 있는 데이터 모델이 개발되었다. 이후에 IFC(Industry Foundation Classes)가 건물의 계획, 설계, 시공, 관리를 위해 개발되어 현재도 활발한 추가가 이루어지고 있다. 주목할 만한 사례는 CIS/2(CIMsteel Integration Standard Version 2)인데 이는 구조용 강재의 설계와 제작을 위해 EXPRESS 언어로 형상, 관계, 절차 및 재료 성능, 제작을 표현하도록 한 것이다. XML(eXtensible Markup Language) 기반의 교환 형식은 HTML의 확장으로 작은 규모의 사업에서 데이터를 교환하는데 유용하다. 3차원 모델을 담을 수 있는 PDF 파일 형식도 매우 유용한 정보교환 수단이 되고 있다.

다. IFC(Industry Foundation Classes)의 개념

IFC(Industry Foundation Classes)는 ISO와 별개로 산업계에서 개발한 건축물의 정보모델로, 건설산업계와 소프트웨어 업체의 연합으로 구성된 IAI(International Alliance for Interoperability)의 주도로 설계에서 유지관리까지 건축물 생애주기 전체에서 사용될 수 있도록 개발 중인 정보모델이다. IFC는 건설 관련 소프트웨어간에 건물의 구성요소와 관련된 방대한 정보를 일관되게 생성하고 교환하기 위하여 개발되었다. IFC는 몇가지 제약을 두고 ISO-STEP 표준인 EXPRESS 언어로 기술하여 정의하였다. 대부분의 ISO-STEP 정보모델이 특정 엔지니어링 영역에서의 소프트웨어 호환에 대해서 초점이 맞추어졌다. 이러한 접근방법을 건설산업분야에 적용할 경우 조각조각 나뉜 결과물이 만들어져 서로 호환이 되지 않는 표준이 양산되지 않을까 하는 우려가 있었다. 이에 따라 IFC는 확장 가능한 “골격 모델(Framework Model)”로 설계되었다. 즉, IFC의 초기 버전은 나중에 구체적 업무에 필요한 상세한 모델의 지원이 가능하도록 일반적인 용도의 객체와 데이터를 먼저 정의하였다. IFC는 건물 생애주기(타당성 검토, 기획, 설계, 시공, 유지보수, 운용) 전체에서 사용되는 건물설계와 관련된 모든 정보를 기술할 수 있도록 (분석과 시뮬레이션 관련 정보 포함) 만들어졌다.

EXPRESS 언어에서 모든 객체는 엔티티(Entity)라고 불린다. 이들 기본 엔티티는 공유된 객체(Shared Objects)라고 불리는 건축/건설산업에서 일반적으로 쓰이는 객체들이다. 이러한 구성요소에는 벽체, 바닥, 구조, 건축 서비스, 업무 프로세스, 관리 및 경영에 필요한 정보, 기본형상 등이었다. IFC는 확장 가능한 모델로 만들어졌고 객체 지향적이기 때문에

서브타이핑(Subtyping)을 통하여 하위 엔티티는 추가하여 모델을 더 정교하게 만들고 특화시켜 나갈 수 있다. 서브타이핑(Subtyping)은 건물 객체의 하나의 새로운 클래스가 ‘부모(Parent)’ 클래스의 속성을 ‘상속(Inherit)’ 받고, 부모 클래스와 구별되는 새로운 속성을 추가하여 새로운 ‘형제’ 클래스를 만드는 것이다. IFC 상위 클래스(Superclasses), 하위 클래스(Subclasses), 그리고 상속행위는 일반적으로 받아들여지고 있는 객체 지향 분석방법의 원리를 따른다.

IFC에는 3차원 형태를 기술하기 위한 다양한 기하학적 표현방법이 있다. 여기에는 2차원 다각형에서 3차원 도형을 뽑아내는 방법(압출, Extrusion), 3차원 도형을 구성하는 변과 선, 점 사이의 위상학적 관계를 이용하는 경계표현법(Boundary representation, B-rep), 3차원 다면체의 조합을 통해 복잡한 형태를 표현하는 구조적 입체 기하학(Costructive Solid Geometry, CSG) 등이었다. 표면은 하나의 선을 안내곡선(Guide Line)을 따라 연속시켜 얻을 수 있는 압출 곡면(Extruded Surface)과 베지어 곡면(Bezier Surface) 등을 이용해 정의할 수 있다. 이를 통해 건설산업에 필요한 형상 정보의 대부분을 표현할 수 있다. 일부 복잡한 곡면 표현방법은 IFC에서 빠져 있다. 예를 들면, 비균일 유리 B-스플라인(NURBS, Non-Uniform Rational B-Spline) 곡면 표현방법은 라이노, 폼z(Form-z), 마야(Maya), 디지털 프로젝트(Digital Project), 벤틀리의 일부 소프트웨어 등 여러 설계 소프트웨어에서 사용되고 있지만 이를 IFC 형식으로 내보내려할 경우 변환과정에서 해당 정보가 생략되거나 시스템 오류를 일으킬 것이다.

2.8 BIM 수행계획서(BIM Execution Planning)

미국의 PennState University는 프로젝트 고유의 목적과 특성에 최적화된 Planning Guide를 제공하기 위한 방안으로 BIM Project Execution Planning Guide를 개발하였으며, 프로젝트에 활용되는 정보의 목적, 용도, 프로세서상에서의 Input/Output 정보, 책임자 등에 대한 상세하고 효율적인 계획을 제시하여 프로젝트 초반부터 생성되는 모든 건설정보에 대한 관리를 가능하도록 가이드라인을 개발하였다. 특히, Plan, Design, Construction, Operation 단계별로 필수적으로 적용되어야 하는 BIM Uses(Primary BIM Uses), 프로젝트별로 선택적으로 적용되어야 하는 BIM Uses(Secondary BIM Uses)를 정의하였다. 본 가이드에서 제시한 BIM Project Execution Planning Procedure의 절차 및 주요 내용은 다음과 같다.

- Identify BIM Goals and Uses

BIM 목적 및 Uses를 설정하여 프로젝트와 팀에게 주는 가치를 정의함

- Design BIM Project Execution Process

BIM 기반 업무 및 정보 교환(Information Exchange)를 포함하는 프로세스를 작성함

- Develop Information Exchange

프로세스상의 각 단계에서 생성되는 정보 타입, LOD, Responsible Party를 정의함

- Define Supporting Infrastructure for BIM Implementation

BIM 기반 프로세스를 지원하기 위해 필요한 프로젝트 Infrastructure를 정의함

BIM Planning Guide for Facility Owners는 프로젝트의 성격과 마찬가지로 모든 조직은 그 조직의 설립 목적 및 형태에 따라 특화된 BIM 실행계획이 만들어져야 하는데, 본 가이드는 조직과 발주자를 대상으로 BIM 도입 계획을 수립하기 위한 절차서의 역할을 한다. BIM Planning의 주요 요소 및 내용은 다음과 같다.

- STRATEGY

조직의 BIM 비전 및 목표 정의, 변화에 대한 의지 평가, 관리 및 자원지원 검토

- BIM USES

발주자의 시설물과 관련된 정보를 생성/처리/교환/실행/관리하기 위한 BIM 구현 방식 정의

- PROCESS

현재의 방식 분석, BIM 기반의 새로운 프로세스 설계, 변화전략 개발 등을 통해 BIM Use를 달성하기 위한 방법 기술

- INFORMATION

조직 관점에서 정보(모델 객체 분류체계, LOD, 시설물 데이터 포함) 정의

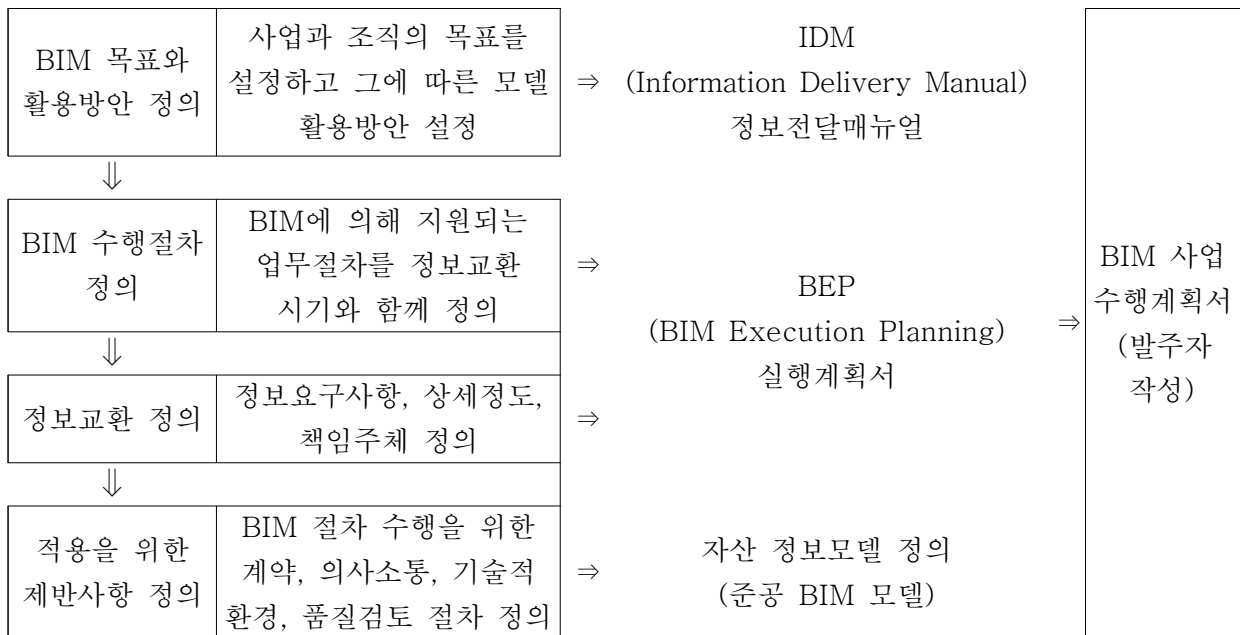
- INFRASTRUCTURE

BIM 지원을 위한 기술환경(컴퓨터 소프트웨어, 하드웨어, 네트워크, 물리적 작업공간 등 포함) 정의

- PERSONNEL

구축된 BIM 프로세스의 참여자 정보(역할, 책임/의무, 교육, 훈련 등) 정의

BIM 수행계획서의 작성 절차는 아래와 같고 각 단계별로 문서화하여 사업을 진행하는 동안 참여자들이 공유할 수 있도록 해야 한다.



[그림 2.6] BIM 수행계획서 작성 절차

BIM 수행계획서는 다음의 내용으로 구성될 수 있다.

- 1) BIM 사업 수행계획의 개요
- 2) 사업 정보
- 3) 주요 사업 책임자 : 사업에 참여하는 각 주체에서 최소한 한명의 책임자가 정해져야 하는데 발주자, 설계사, 시공사, 컨설턴트, 협력업체, 제조사, 제품 공급자가 이에 해당한다. BIM 관리자와 분야별 책임자가 정해지고 이에 대한 연락처가 공유되어서 협업이 진행되어야 한다.
- 4) 사업 목표 및 BIM 적용 목적
- 5) 조직 구성 및 역할
- 6) BIM 적용 절차
- 7) BIM 정보 교환
- 8) BIM 및 유지관리를 위한 정보 요구사항
- 9) 협업 절차

정보교환 시기에 대한 정의와 승인은 매우 중요하다. 다음 사항을 문서화해야 한다.

- 정보교환 명칭
- 정보교환 제공자

- 정보교환 수신자
 - 일회성 혹은 주기성
 - 시작시기와 만료일
 - 모델 파일 형식
 - 소프트웨어
 - 원 파일 형식
 - 교환 파일 형식
- 10) 모델 품질관리 절차 : BIM 성과물을 제출전에 각 참여자는 설계, 데이터 세트, 모델 속성을 검토해야 한다. 모델의 품질 검토는 다음의 사항으로 진행될 수 있다.
- 시각적 검토 : 네비게이션 소프트웨어 혹은 뷰어를 통한 시각적 모델 검토
 - 간접 검토 : 간접 검토 기능을 이용한 객체간 간접 여부 검토
 - 표준 검토 : 모델이 계획에서 제시된 표준을 만족하는지 검토
 - 객체 검증 : 각 객체의 데이터 세트의 정확성 검토
- 11) 하드웨어/소프트웨어/네트워크에 대한 요구사항
- 12) 모델 구조 : 모델의 정확성과 완결성을 다음 항목을 고려하여 검토한다.
- 파일 명칭 정의
 - 모델 구조 설명(Reference, Level, Layer 등)
 - 단위 및 좌표계
 - BIM 및 CAD 표준 준수
- 13) 사업 성과물 정의
- 14) 성과물 제출 및 계약 : 계약 사항에 다음 항목들이 고려되어야 한다.
- 모델 생성 및 책임 주체
 - 모델 공유 및 모델의 신뢰성
 - 상호 연동성 및 파일 형태
 - 모델 관리
 - 지적 재산권
 - BIM 실행계획서를 위한 요구사항

2.9 BIM Planning Guide for Facility Owners

National Institute of Standard & Technology(NIST) 연구인 Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry(NIST GCR 04-467)의 보고서에서 AEC(Architecture, Engineering and Construction) 분야에서 상호운용성으로 인해 발생하는 추가 비용은 매년 전체 AEC 관련 비용의 약 12.4%를 차지하고 있으며, 이는 빌딩 운영기간동안 발생되고 있다는 점을 기술하고 있다. 이 연구는 빌딩 전 생애주기인 계획, 디자인, 시공, 유지보수, 운영 단계에서 건설정보를 입력하는 모델링 작업의 중복성을 검토하고 시설물 유지관리 인력이 이러한 중복작업을 하는데 소모되는 비용과 시간을 모두 계산해 산출한 결과이다. 이러한 중복작업을 막을 수 있다면 재작업으로 인한 시간과 비용 낭비를 막을 수 있을 것이다.

이러한 관점에서 빌딩 전 생애주기동안 발생하는 정보를 하나의 데이터베이스에 입력하고, 체계적으로 관리하고 건설산업 전 생애주기에 걸친 정보를 재활용하고자 하는 FM 산업계의 니즈가 바탕이 되어, BIM 기술의 적극적인 검토와 적용이 이루어지고 있다.

효과적인 빌딩 시설물 유지보수와 운영을 위해서 필요한 정보를 수집, 접근, 갱신하는 기술과 방법은 매우 중요한 것이다. 대부분 기존 시설물에 관한 정보들은 청사진이나 문서와 같은 종이에 저장해 두며 이 또한 담당자가 바뀌면서 자료의 인덱스(Index)가 갱신되지 않거나 유실되는 바람에 제대로 활용되지 않고 있다. 건물의 구조나 시설물의 형상 정보는 도면으로 관리되며 시설물 종류별로 메뉴얼 및 유지보수 기록 문서 등으로 관리되고 있다. 이 문서들은 보통 계약서로써 발주자에 의해 시공후 전달된 것들이며 몇 달에서 몇 년 이상된 것들도 많다. 보통 이러한 자료들은 지하실에 보관되어있는 경우가 많아 접근이 어렵고 문서 자체가 훼손되어있는 경우도 발생한다.

일반적으로 FM 직원이 시간이 있을 때는 FM에 필요한 모든 자료를 손으로 입력한다. 이런 상황에서 FM 시스템 활용은 필요한 데이터가 모두 갖춰진 후, 데이터의 정확성과 완전성이 확인될 때까지 활용되기 어렵다. 이 시스템에 필요한 정보를 입력, 검증, 갱신하는 비용과 시간이 NIST 보고서에서 확인된 상호운용에 소모되는 비용이다. (BIM 기반 FM, 2014) 결국 NIST 보고서에서 지적된 재작업 문제들은 모든 데이터가 하나의 모델이나 하나의 시스템에 입력되지 않는 것부터 시작되는 것이다.

BIM은 구체적인 형상과 객체 정보를 기반으로 한 하나의 통합된 데이터베이스로 볼 수 있다. 이러한 특징 때문에 건물 전 생애주기 정보를 BIM 데이터베이스로 통합하여 관리할 수 있다. BIM에 형상 데이터가 함께 포함되어 있다는 점은 기존의 RDBMS(Relationship

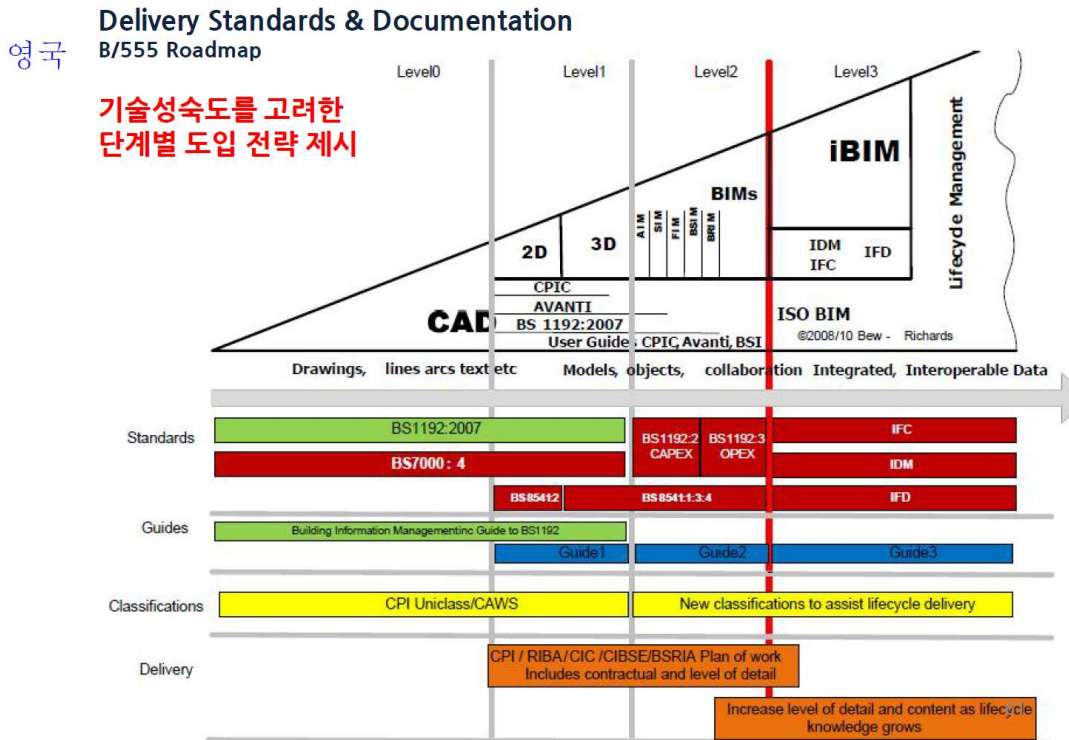
Database System)과는 차별적인 특징중 하나이다. RDBMS는 속성정보는 효과적으로 관리할 수 있지만 설계 단계에서 모델링되는 형상정보는 효과적으로 관리할 수 있는 방법이 없었다. BIM은 속성정보와 형상정보를 하나의 데이터베이스에서 다루는 방법을 제공해 줌으로써 시설물 운영 및 유지관리에 필요한 모든 유스케이스(Use-Case) 관점을 효과적으로 제공해 줄 수 있다.

COBie는 자산정보를 관리하기 위한 국제 표준으로 Construction Operations Building information exchange를 의미한다. 현재 COBie는 20개 이상의 상용 소프트웨어 시스템에서 생성되고 교환될 수 있다. U.S Army Corps of Engineers(미국 육군 공병단)와 NASA가 COBie의 주요 개발자였으며 몇몇 기관(미국 중앙조달기관(General Services Administration, GSA) 등)이 개방형 표준을 채택하기 위해 함께 하고 있다. COBie 현재 버전과 좀 더 상세한 설명은 Whole Building Design Guide(www.wbdg.org/resources/cobie.php)를 참고할 수 있다.

많은 자산관리(FM) 조직들은 상당한 수준의 재정, 조직, 인적 자원을 유지관리, 운영 및 보유 자산을 관리하기 위한 복잡한 시스템을 구매하여 사용하고 있음에도 불구하고 이러한 시스템들이 효과적으로 사용되어 투입된 비용효과를 확보하기는 어렵다. 이는 설계와 시공으로부터 엄청난 양의 데이터를 유지관리시스템으로 불러들이는데 상당한 시간과 비용이 요구되기 때문이다.

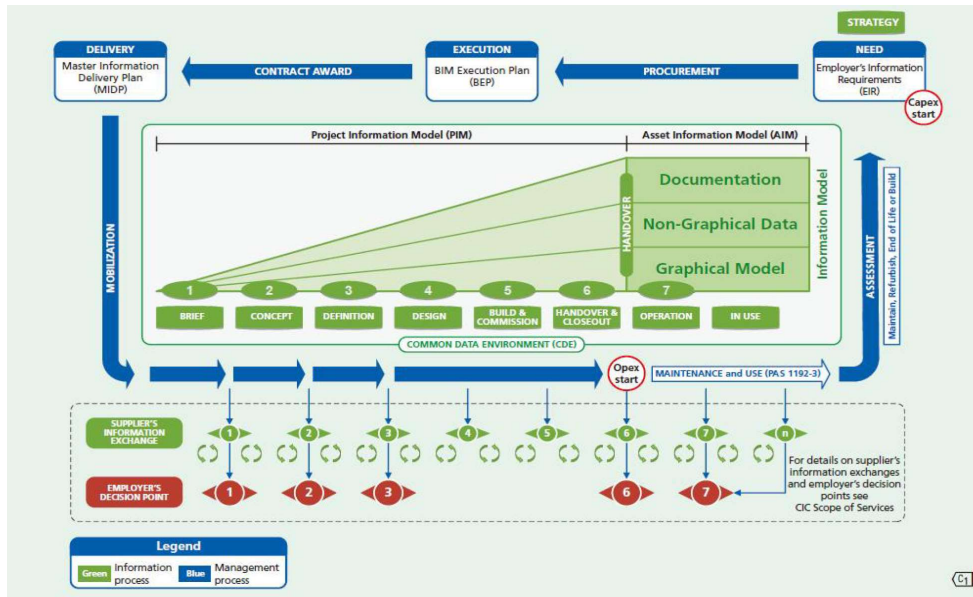
COBie에 포함되어야 하는 정보의 범위를 정하는데 있어서 기술적, 계약 및 프로세스의 제약사항들이 존재하기 때문에 현재 COBie 표준 범위는 완공시에 준공도서 혹은 계약에 의하여 전달되어야 하는 정보의 요구사항들을 주로 반영한다. 포함되는 정보에는 제품 생산자에 의한 정보, 제작자에 의한 정보, 시공자에 의해 수정된 정보 등이 포함된다. 완공 후 정보를 넘겨받을 때 시설물 관리자의 임무는 시설물의 고정자산이 시설물내의 각 공간에 필요한 서비스를 할 수 있도록 하는 것이다. 관리 자산은 관리 및 유지, 소모성 부품, 정기점검을 필요로 하는 자산을 의미한다. 공간과 같은 것을 컴퓨터 기반의 시설물 관리시스템인 CAFM(Computer-Aided Facility Management)을 통해 관리되는 자산이 있고 HVAC(Heating, Ventilation, & Air Conditioning, 공조 시스템), 전기, 수도와 같은 제공 서비스와 관련된 장치 및 제품 자산을 관리하는 유지관리시스템 CMMS(Computerized Maintenance Management System)을 통해 관리되는 자산이 있다. COBie는 모든 제품과 장비가 특정 공간내에서 인식될 수 있으면 된다.

BIM의 기술 성숙도를 영국에서는 Level-2로 현재의 전환설계를 정의하고 있고 BIM이 참조모델이 아닌 역할을 하게 되면 Level-3으로 발전할 것을 예상하고 있다. 이를 위해서는 용어체계, 정보전달체계(IDM), 개방형 모델 등이 정의되어야 하고 관련된 표준도 정비되어야 한다. BS 1192-2에서 시작하여 다양한 목적의 표준들을 개발하여 제시하고 있다.



[그림 2.8] 기술성숙도를 고려한 단계별 도입 전략 (영국)

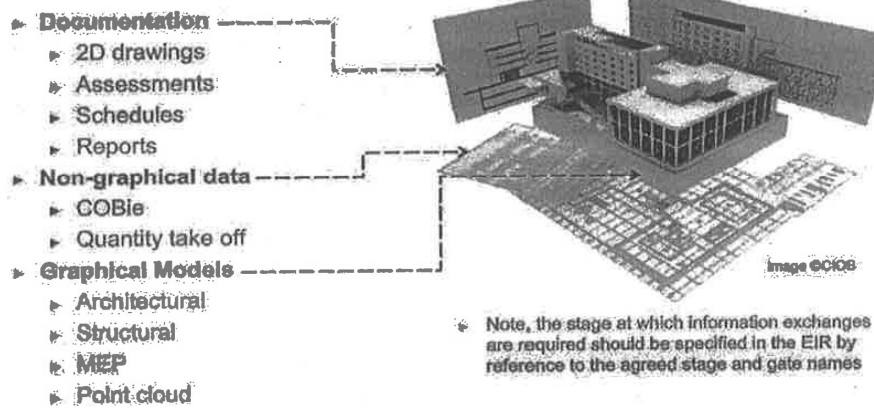
발주자 정보요구사항(EIR)에서 시작하여 실행계획서(BEP), 정보전달전체계획서(MIDP)를 수립하면 건설 단계별로 정보를 수집하게 된다. 이러한 정보는 크게 3종류로 구분되게 되고 준공시 성과품으로 제출된다. 이 제출된 성과품이 자산관리시스템의 정보 역할을 하게 된다.



[그림 2.9] 정보전달체계에 따른 준공 데이터(출처 : BSi)

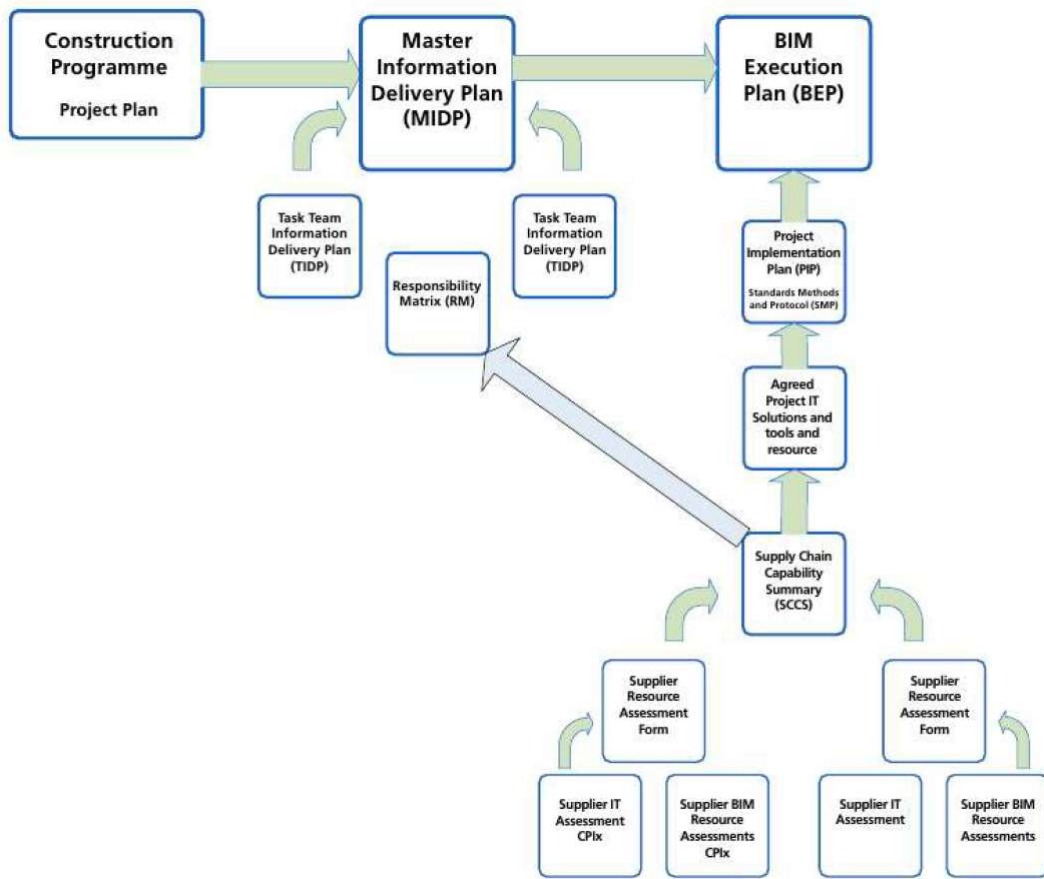
3종류로 구분되는 정보의 대표적인 예시는 다음과 같다.

Information Exchange



[그림 2.10] 정보 예시

정보관리를 위한 계획 문서는 상호 연계되어야 하고 사전에 이러한 계획 체계를 수립하는 것이 매우 중요하다. 업무절차나 체계가 변화되지 않으면 BIM 기술 적용의 효과를 보기가 어려울 수 있다.

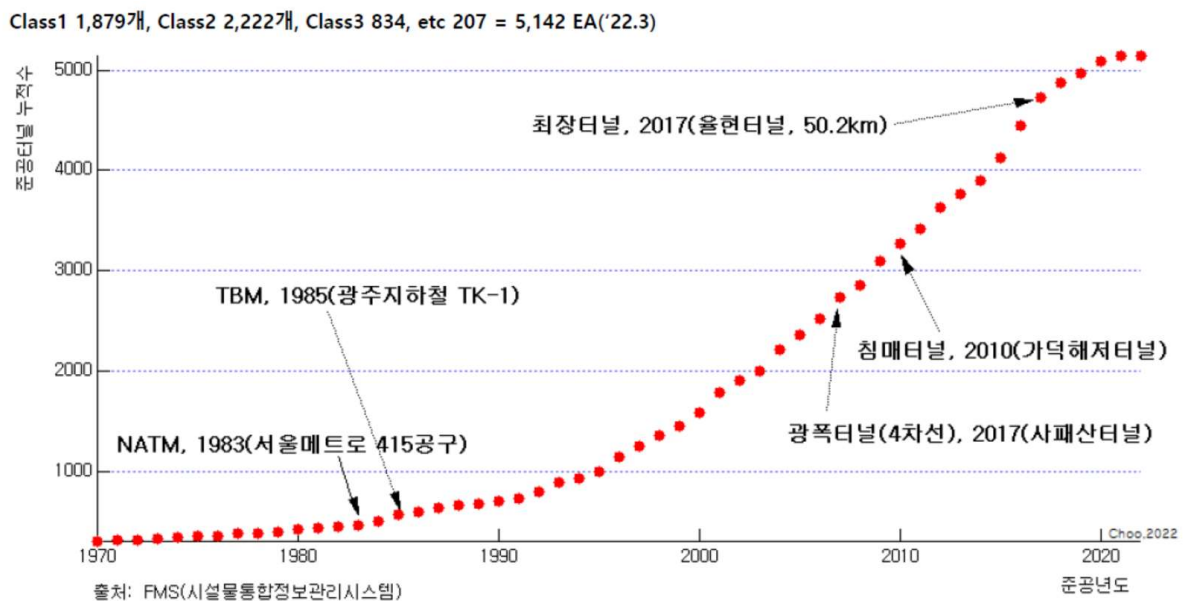


[그림 2.11] 정보관리를 위한 문서체계

3. 기타 분야

3.1 개요

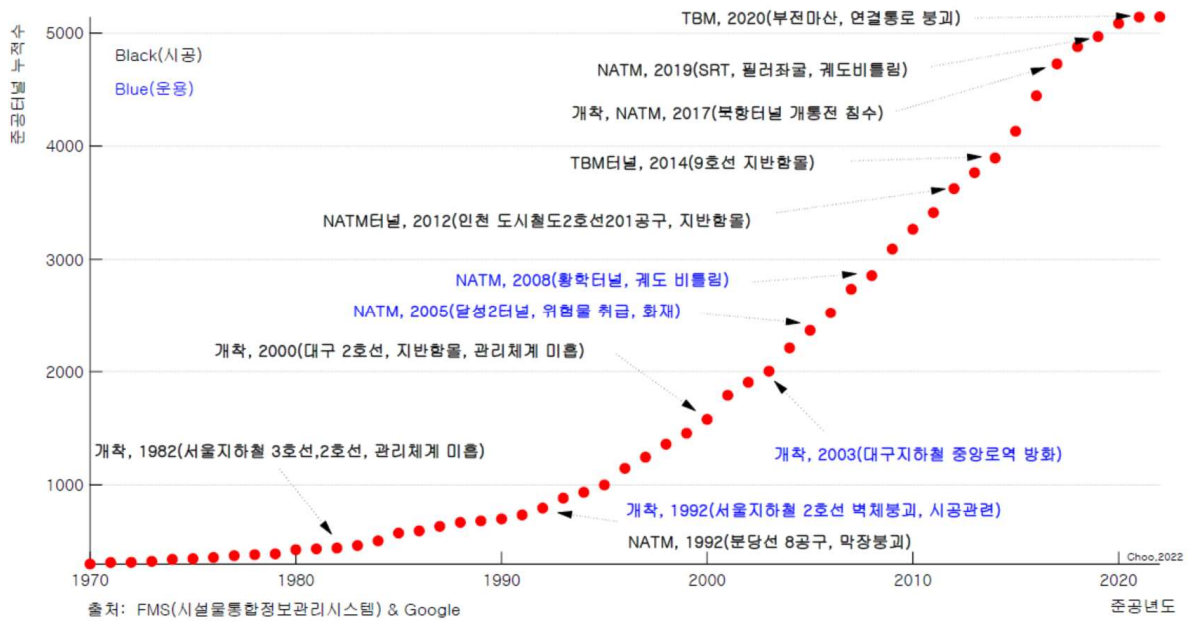
국내에 시공되어 운영되고 있는 터널은 2022년 3월을 기준으로 1종시설 1,879개, 2종 2,222개, 3종 834개에 달하며, 기타시설을 포함하여 5,142개소가 관리되고 있다. 시설물안전법에 의거 준공후 10년이 지난 시점부터 국토안전관리원과 민간전문진단기관이 최초 정밀안전진단을 관리주체로부터 의뢰받아 실시하고 있으며, 이후에는 시설물 등급에 따라 2-3년마다 정밀점검, 5-6년마다 정밀안전 진단을 수행하도록 관리체계가 이루어져 있다. 1995년 법 제정 이후 터널의 정밀안전진단은 외관조사, 내구성평가, 안전성평가 등 시설물의 합리적인 유지관리를 목표로 지속발전하고 있으며, 2018년에는 사용성 평가를 추진한 성능평가체계를 도입하고 있다.



[그림 3.1] 국내 터널의 관리 현황(2022년 3월 기준)

한편 국내에서 시공 또는 운영되고 있는 터널에서는 많은 사고들이 지속적으로 보고되고 있으며, 그림 3.2는 국내 터널에서 발생한 주요 사고들의 이력을 나타낸 것이다. 이와 같이 터널시설물의 설계-시공-유지관리에 이르는 전 생애주기에 걸친 안정성평가와 유지관리가 중요하게 고려되어야 한다고 할 수 있다. 본 보고서에서는 국내에서 시공되어 운영 중인 터널의 유지관리를 위한 기술 중 최근 개발되어 운영 중인 기술현황 및 적용사례들을

소개하고 향후 터널의 유지관리 및 보수를 위한 참고자료로 활용하고자 한다.

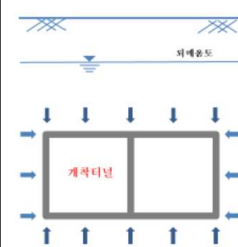
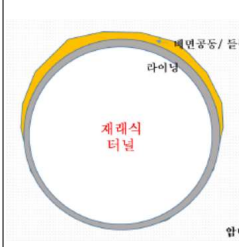
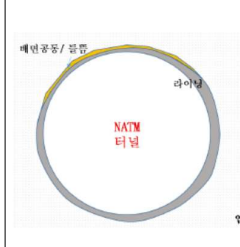
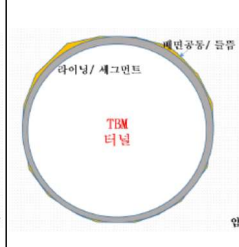


[그림 3.2] 국내 터널에서 발생한 주요 사고 이력(2022년 3월 기준)

3.2 터널 유지관리 일반 현황

국내에서 적용되어 건설되었거나 현재 적용되고 있는 터널 시공 방법으로는 개착식터널(Cut and Cover), 재래식터널(ASMM), NATM 공법, TBM 공법 등이 있다. 터널을 시공하는 방법에 따라 설계, 시공, 운영 측면에서 중점적으로 고려해야 할 사항이 다르며, 표 3.1과 같다. 철근 및 라이닝의 상태를 평가하기 위한 기준으로는 시설물안전법의 규정에 따라 조사 및 평가가 이루어져 유지관리가 수행되고 있으며, 최근에는 스캐너, 드론 MMS(Mobile Mapping System), Robot 등이 인력에 의한 조사과정에서 발생하는 오차와 정밀도, 작업 효율을 향상시키기 위해 적용되어 오고 있다. 시설물의 각종 결함을 판단하기 위해서는 AI와 bigdata 분석을 통해 결함을 인지, 구분, 판단하고 있으며, 인공지능 알고리즘 등을 활용하여 보수 및 보강의 우선순위를 최적화하여 관리가 수행되고 있는 것으로 보고되고 있다.

[표 3.1] 터널 시공 방법에 따른 관리상의 차이점 비교

구 분	개착식	재래식	NATM	TBM
설계	토압, 수압, 차량하중, 축압계수를 바탕으로 하중변화 고려	지반자체 및 지보강성으로 터널 안정성 검토, 경험식에 의한 이완영역만을 고려	지반과 1차지보재(숏크리트, 락볼트, 강지보)로 변위 및 소성영역을 고려	커터헤드에 의해 지지되는 막장안정성, 세그먼트라이닝의 작용하중 및 추진책 압력 고려
시공	구조물 기초부까지 굴착하여 바닥에서 슬래브의 구조물 시공, 구조물 보호공 및 지층구조물 재배치하여 되메움후 포장	측벽라이닝 시공 이후 조적 및 현장타설, 라이닝으로 암반면까지의 채움은 하지않으나 라이닝의 두께관리가 상대적으로 용이	슈트홀로부터 한 시공스팬을 시공, 압송압 및 타설시간 관리, 채움관의 고정 등의 보완체계 부족	굴진, 세그먼트 시공, 그라우트 주입으로 세그먼트 배면상태 평가 곤란
유지	굴착터널라이닝에 비해 건조수축 및 구속조건의 균열, 취약부 누수	방수에 대한 개념이 없어 천장부 누수 및 우기 시 집중 누수	2차 라이닝의 채움부족, 1차지보면의 불균형 등으로 방수지 내외측으로 빈공간 및 접합부 열화로 누수	추진책 압력에 의한 균열, 조립중 파손, 이음부 누수, 단차로 인한 형상 변화, 취약부에서의 내구성능 저하
현장	전단면 횡방향 균열 우세, 시공이음 누수	측벽, 천단 종방향 시공이음 누수 및 재료분리, 박락	천장부 종방향균열, 측벽 횡방향구속균열	추진책압력의 균열, 세그먼트 이음부 누수, 볼트 부식 등
개요도				

3.3 스마트 건설 기술의 현황

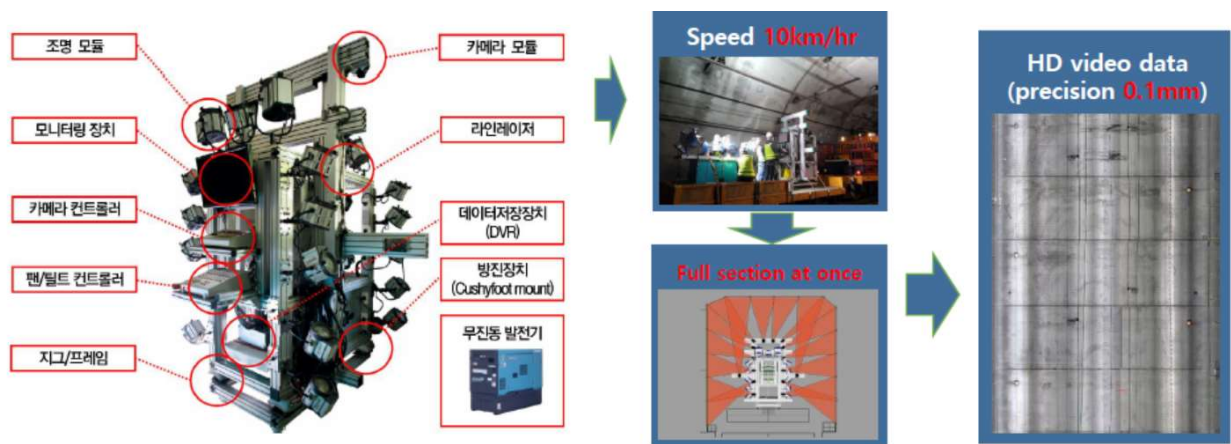
스마트 건설기술이란 전통 건설기술에 디지털 기술을 융합하여 건설의 생산성, 안전성, 품질 등을 향상시키는 건설 방식을 뜻하는 것으로 터널/건설의 전 단계에서 이러한 스마트 건설기술의 적용을 고려할 수 있다. 스마트 건설기술에 적용되는 기술로는 전통적인 건설기술에 BIM, IoT, 빅데이터, 드론(drone), 로봇 등 스마트 기술이 융합되어 건설 전 과정의 디지털화, 건설장비의 자동화, 가상 건설, 현장 안전 관리 등 건설 생산성 또는 안전성을 극대화하는 기술을 뜻한다.

현재까지 우리나라의 건설기업에서 활용하고 있거나 개발 중인 스마트 건설기술은 BIM 기술과 연계한 AR/VR 기술, 드론 및 자동화 토공 장비를 활용한 토공 자동화 시스템, 3D 프린팅 기술을 활용한 비정형 건축물 시공, 인공지능 기반의 지능형 설계 등이 고려되고 있다.

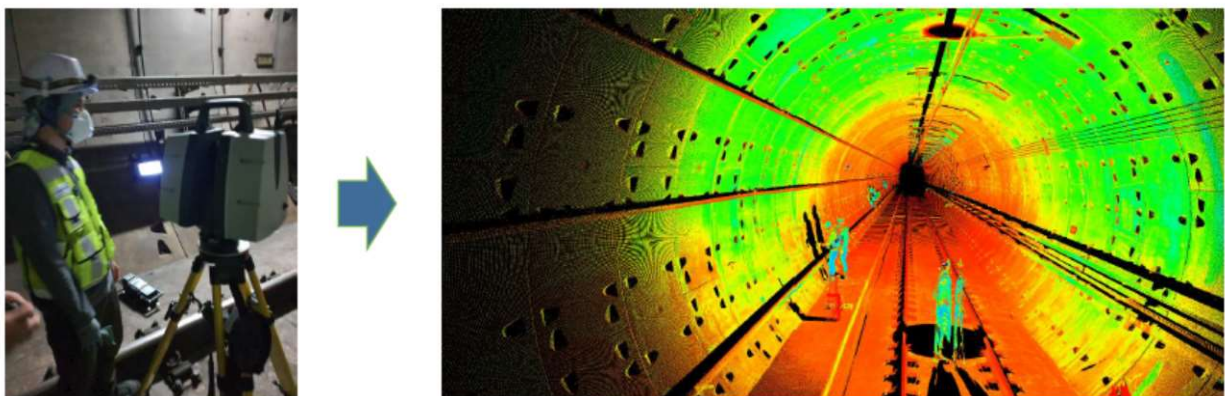
한편 해외의 여러 연구기관과 다국적 기업들이 스마트 건설기술의 핵심 기술로 공통적으로 제시하고 있는 것들을 살펴보면 BIM, 클라우드, 데이터 고급 분석, 블록 체인, 증강현실, 가상현실, 드론, 사물인터넷, 3D 프린팅, 로봇틱스, 지능형 건설 장비 등이다. 금번 보고에서 중점적으로 검토하는 기술들은 드론과 3D 스캐닝 기술로써 드론은 사람이 타지 않고 원격으로 조종하는 무인비행기를 뜻하는 것으로 건설 분야에서 드론의 활용은 비행계획 수립, 촬영허가 신청, 항공사진 촬영, 지상기준점 측량, 전처리 및 후처리 등의 과정이 수반된다. 고정익 무인비행기에 색상을 검출하는 RGB 센서를 장착하는 경우 정사사진과 수치표면 모형을 얻을 수 있는데, 정사 투영된 사진은 카메라의 센서, 표정, 지형의 굴곡, 오차 등을 제거하여 정확한 위치와 면적을 표현할 수 있어, 터널 및 기타 구조물의 유지관리를 위한 각종 자료를 취득할 수 있게 한다. 한편 3D스캐닝은 하드웨어 장비를 활용하여 물체의 3차원적 형태를 측정하는 방법으로, 대상과의 접촉 여부에 따라 접촉식과 비접촉식으로 구분하는데, 터널 및 건설 분야에서는 비접촉식 측정기가 주로 활용되고 있는 상황이다.

3.4 Scanning

스캐닝(Scanning) 기법은 터널 유지관리를 위한 대상이 되는 라이닝 면을 이미지(사진 혹은 영상)나 각종 계측센서를 이용하여 3차원 포인트 클라우드를 획득하여 조사하는 방법을 통칭한다. 그림 3.3과 그림 3.4는 스캐닝기법으로 가장 대표적으로 활용되고 있는 이미지 기반의 기술과 LiDAR에 의한 터널 라이닝의 조사 예시를 나타낸다. 이미지 기반의 계측장비의 경우에는 이미지의 획득을 위한 카메라 모듈, 라인레이저 센서, 컨트롤러, 데이터 저장장치 등이 결합된 형태로 구성되어 있다.

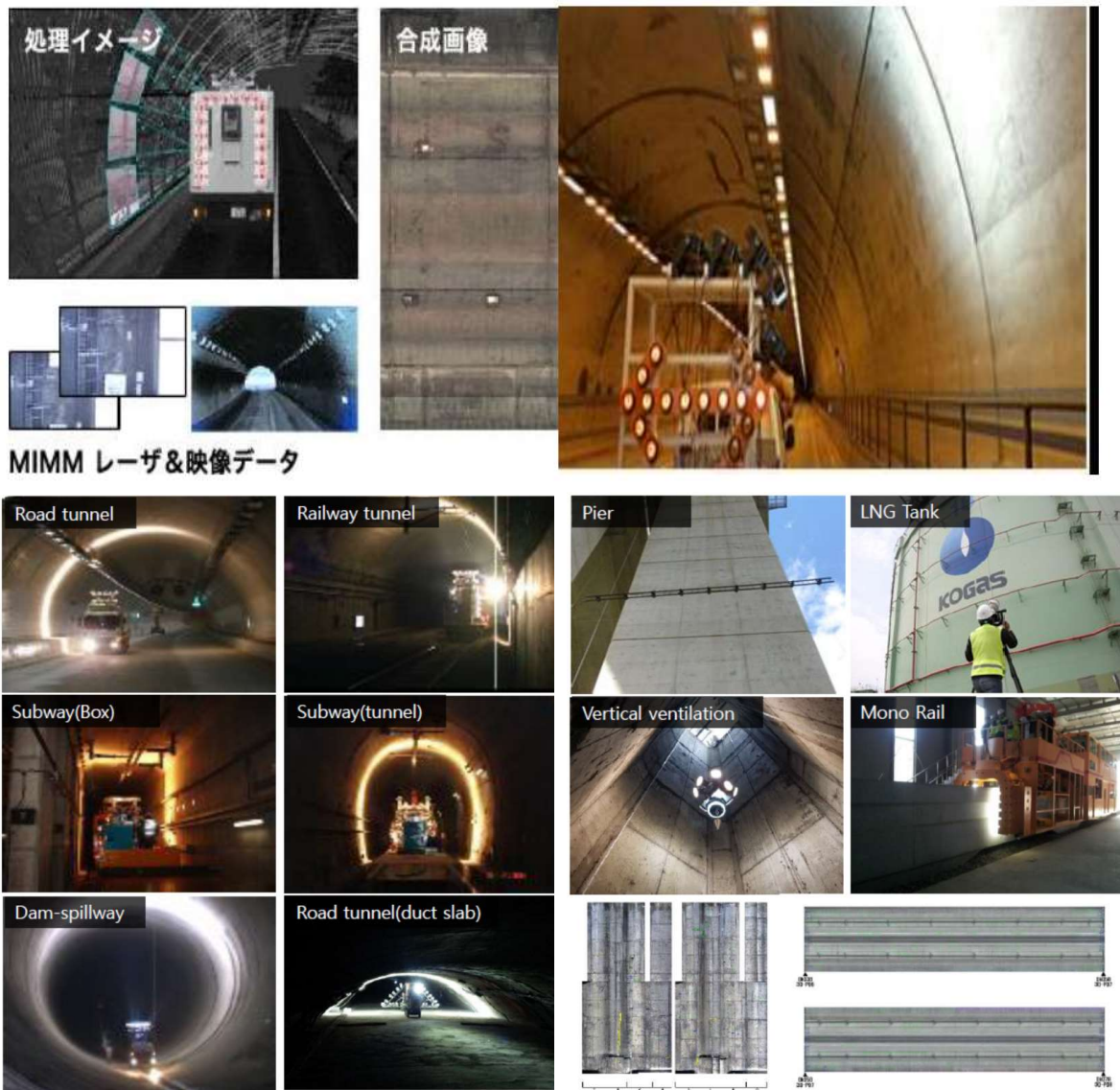


[그림 3.3] 이미지 기반의 터널 라이닝 조사 기법



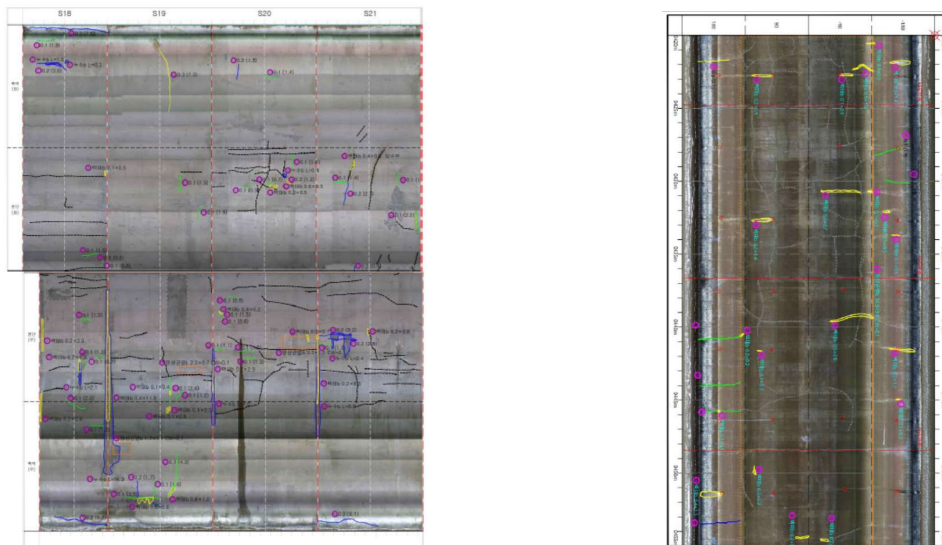
[그림 3.4] LiDAR 기반의 터널 라이닝 조사 기법

스캐닝기법은 현재 그림 3.5과 같이 각종 터널의 정밀안전진단에 널리 활용되고 있는 것으로 조사되었으며, 향후에는 교량, LNG 탱크, 환기구 등 기타 시설물들의 유지관리에도 유용하게 활용될 것이라 판단된다.



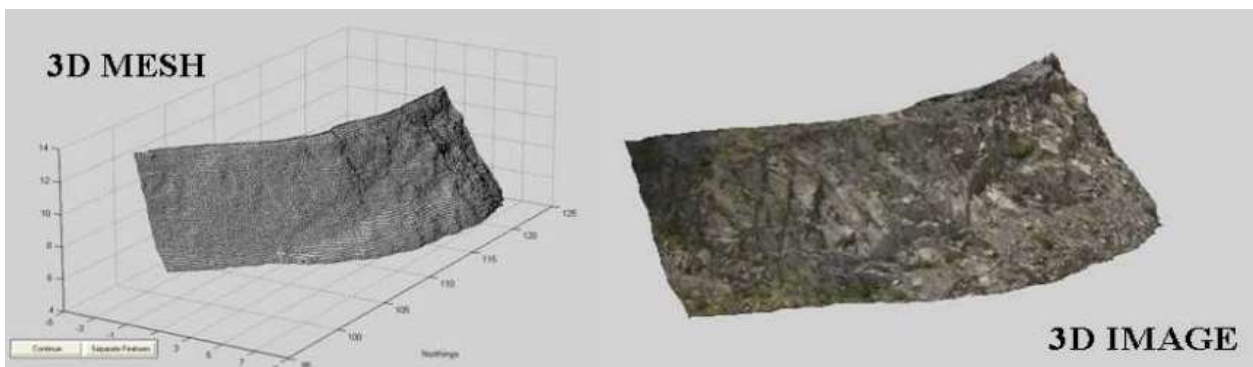
[그림 3.5] 이미지 기반의 터널 라이닝 결함 검출 예시

그림 3.6는 이미지기반의 조사를 통한 라이닝의 결함 검출 예시를 나타내고 있으며, 결함을 감지하는 방법으로는 인공지능(딥러닝)기반의 신경망 알고리즘이 활용된다. 적용되는 알고리즘에 따라 검출되는 결함의 형태는 다르지만 결함의 확률, 종류, 위치 등을 평가할 수 있으며, 이를 통해 균열, 백태, 누수, 철근 노출 등을 검출할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그림 2.5는 상술한 결함의 형태를 분류하는 개요도를 나타낸 것이다.



[그림 3.6] 이미지 기반의 터널 라이닝 결함 검출 예시2

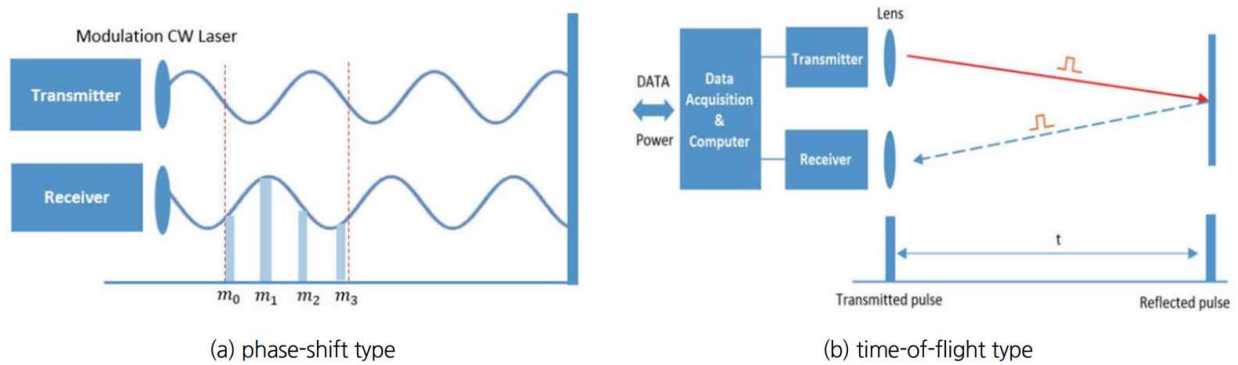
또한 이미지 기반의 사진측량기술은 터널 혹은 사면에 존재하는 암반조사를 목적으로 주로 활용되고 있으며, 기존에는 암반 내 분포하는 불연속면의 방향, 크기, 거칠기 등을 측정하여 기존의 인력조사를 대체하기 위한 목적으로 활용되었으나 최근에는 암종판별, 암반의 풍화도의 변화를 정량적이고 안전하게 조사하기 위한 목적으로 연구개발이 이루어지고 있다.



[그림 3.7] 사진측량기법의 암반 조사 활용 예시

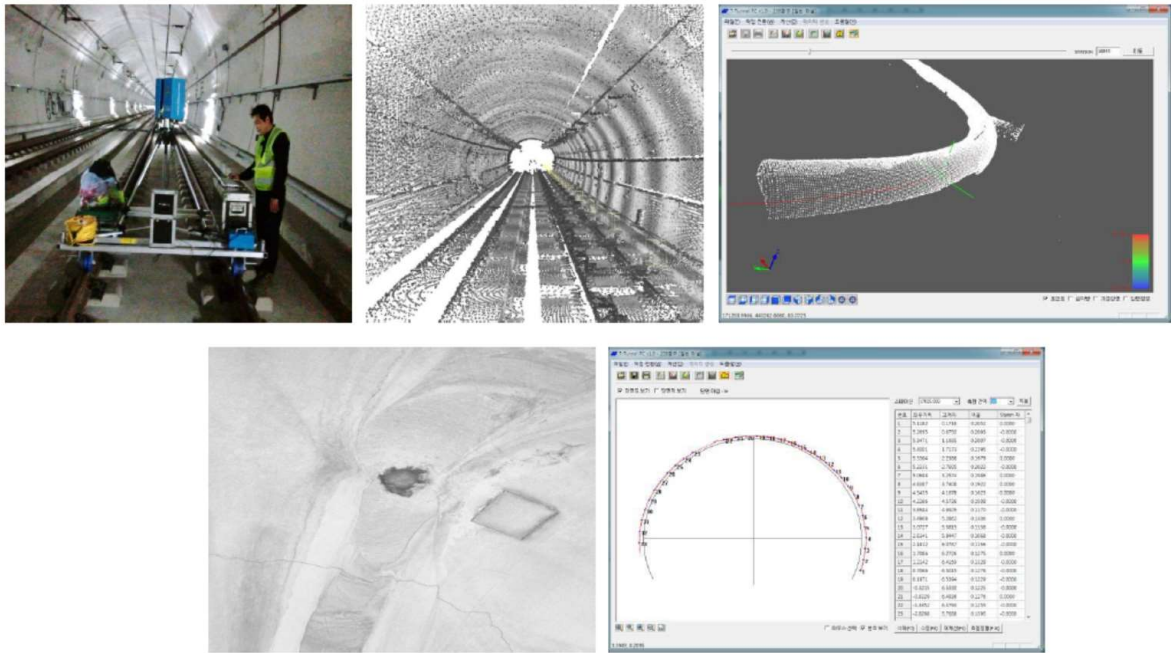
한편 LiDAR는 최근 광학, 전기, 레이저 기술의 발달에 큰 영향을 받아 터널 및 건설분야에도 활발하게 적용이 이루어지고 기술이다. 정밀한데이터의 취득과 장비의 소형화를 강점으로 자율주행차, 증강현실, 스마트 IoT, 드론 산업 등 첨단산업의 핵심기술로 활용이 이루어지고 있다. LiDAR는 대상물을 향해 조사된 레이저가 반사되어

다시 돌아오는 시간의 측정을 통해 거리를 계산하는 TOF(Time of Flight)방식과 특정한 주기를 갖는 레이저 파형을 대상물에 조사하여 반사되어 돌아오는 레이저 파형의 위상 차이를 통해 거리를 계산하는 phase-shift 방식으로 분류할 수 있다(그림 3.8). 두 형식의 장비를 비교하였을 때, TOF방식은 수 km의 측정 가능 거리를 가지며, phase-shift 방식의 경우 TOF보다는 빠른 측정속도를 갖는 장점이 있지만 수백 미터의 상대적으로 짧은 측정거리를 갖는 단점이 있다. 하지만 LiDAR 촬영을 통한 암반면 촬영의 경우에는 최대한 정확도를 확보하기 위한 수십~수백 미터 이내의 비교적 근거리에서의 촬영이 요구되는 등 조사 목적에 맞게 LiDAR의 종류를 취사선택하는 것이 중요하다.



[그림 3.8] LiDAR의 촬영 원리(after Lee et al., 2021)

그림 3.9는 LiDAR를 활용한 터널의 유지관리에의 활용예시를 나타내고 있으며, 터널의 변위 측정에 활용되고 있는 것을 알 수 있다. 이미지기반의 조사기법과 마찬가지로 LiDAR의 경우에도 대상 구조물에 대한 스캐닝 과정에서 스캐너에 내장된 CCD 카메라나 외장 디지털카메라로 3차원 점군자료(point cloud)와 더불어 라이닝 표면에 대한 이미지의 획득이 가능하므로 이미지기반의 결함검출 분석 등 여러 분석 작업에 활용 가능한 데이터를 생산할 수 있다.



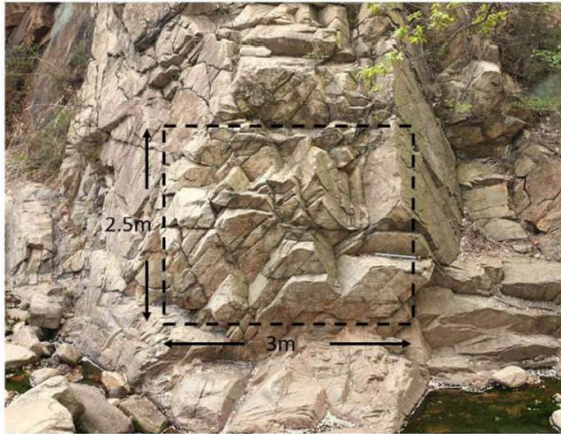
[그림 3.9] LiDAR 기반의 터널 유지관리 예시

그림 3.10은 국내 현장에서 자율보행 로봇과 LiDAR를 결합한 기술을 적용한 예시를 나타낸다. 터널 내부의 시공오류 및 균열 등을 확인하는 기술을 시범적용하여 그 효과를 확인하였는데, 자율보행 로봇은 바퀴 대신 4족을 달아 장애물이 있거나 복잡한 지형에서도 이동할 수 있어 군사적인 목적으로 이용하거나 석유 굴착 현장에서 가스 누출을 탐지하기 위한 목적으로 사용되고는 있으나, 터널 공사에서 활용한 사례는 국내에서 처음이다.

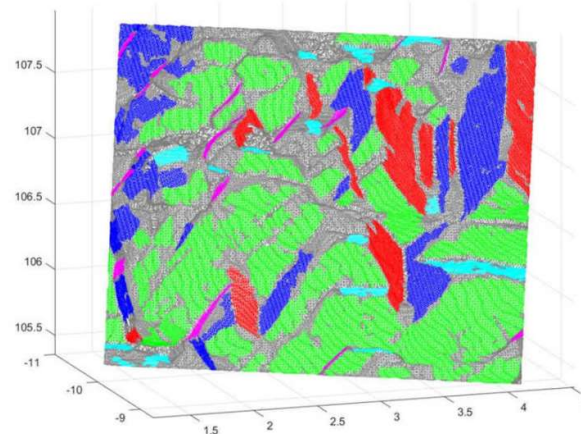


[그림 3.10] 무인로봇과 LiDAR를 이용한 터널 계측 사례

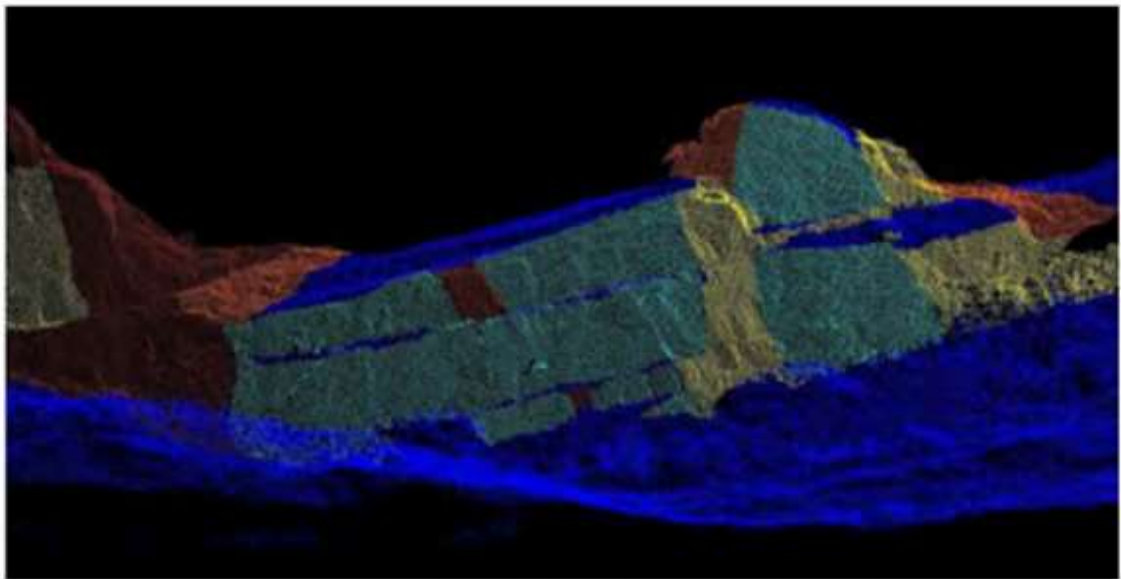
한편 LiDAR의 계측자료를 통해 암반 조사에 필요한 각종 정보를 취득하기 위해서는 LiDAR를 통해 측정된 점군자료의 각 점을 연결하여 면을 생성시키는 과정이 필요하며, 삼각망 구조의 영역확장, 점 구조의 영역 확장, 법선 방향을 이용한 점의 영역 확장, RANSAC 등 다양한 알고리즘이 활용되어 오고 있다. 그림 3.11는 LiDAR를 활용한 암반 사면 조사에의 활용 예시를 나타낸다.



(a) Picture of the target area



(b) Patch extraction result of (a)



[그림 3.11] LiDAR 기반의 암반사면 조사 활용 예시(Han et al., 2017, Lee et al., 2020)

[표 3.2] 각종 조사기법의 장단점 비교

구 분	장점	단점
사진측량기법	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 좌표와 칼라이미지 동시 획득 • 정확도가 높음 • 취득이미지의 해상도는 현장작업시간에 영향 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 조명시설 필요 • 조사결과의 현장 확인 불가 • 매번 기준점 설치 및 측량 필요 • 내업 분석시간 과다 소요
레이저스캐닝 (LiDAR)	<ul style="list-style-type: none"> • 조명시설 불필요 • 조사결과 현장 확인 가능 • 기준점 측량 필요 없음 • 현장 및 내업 작업시간 신속 	<ul style="list-style-type: none"> • 좌표, 이미지 별개 취득 후 병합 • 해상도에 따라 후처리 작업시간 비례
디지털 비디오카메라	<ul style="list-style-type: none"> • 각종센서 장착을 통한 복합이미지 취득 • 조사결과 현장 확인 가능 • 지속적으로 반복 검사 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 좌표와 칼라이미지를 별개로 취득 후 병합 • 환경(속도, 풍속)에 영향을 받을 수 있음

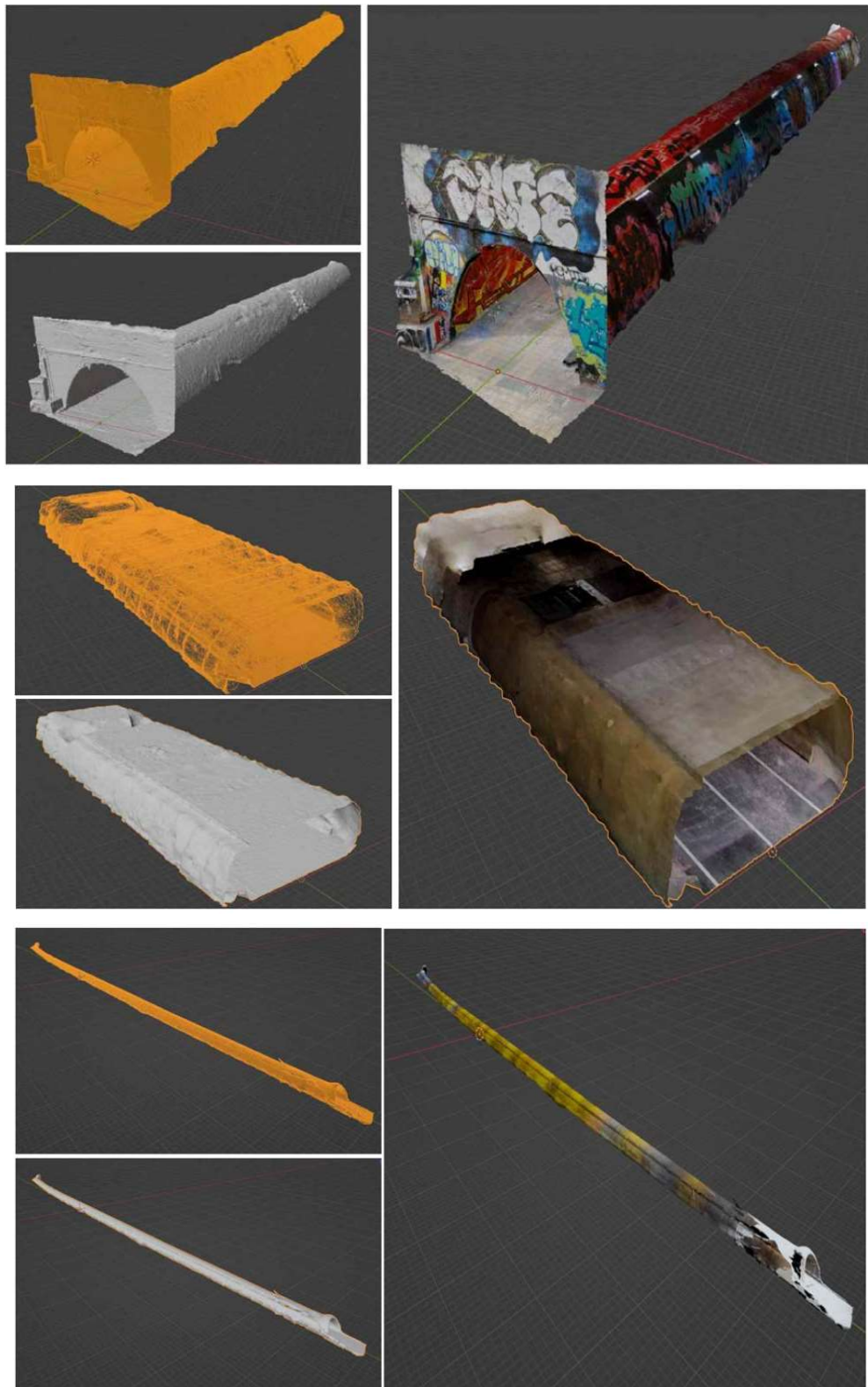
3.5 Drone 및 UAV

상술한 이미지 및 LiDAR기반의 기술들은 사람이 계측장비를 직접 조종하거나 운반하여 조사를 실시하는 형태를 의미한다면, 본 절에서 소개하고자 하는 내용은 앞선 기술들을 드론이나 무인항공시스템에 결합한 형태를 뜻한다(그림 3.12). 드론의 활용과 관련한 주요 기술로는 항법 및 제어 시스템, 하드웨어 설계/제작 기술, 예측 불가능한 상황에 대처하는 기술 등이 다루어지고 있는 상황이다. 이와 더불어 드론 및 무인항공체를 통해 측정된 이미지를 통해 3D 모델을 재생성하는 기술들에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다.

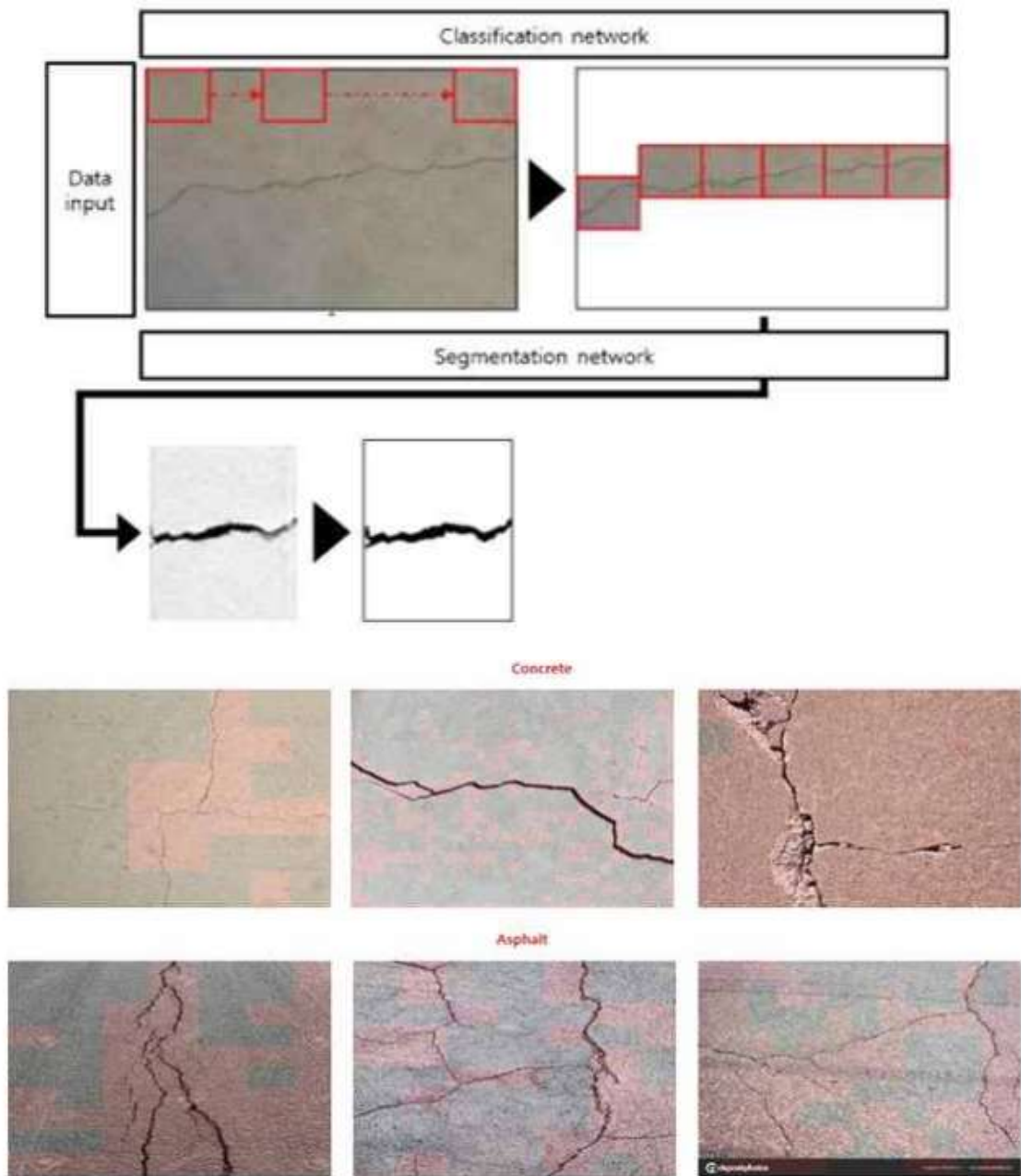


[그림 3.12] Drone의 구성 개요도(과학기술정보통신부, 2022)

그림 3.13은 드론을 통해 획득된 이미지를 통해 재구성된 터널의 3D모델의 예시를 나타낸다. 컴퓨터 비전 및 그래픽 기술 등을 활용하여 실제 물체의 모습이나 모양을 복원하는 과정을 통해 이루어지며, 삼각 측량법을 통해 여러 장의 2D 이미지로부터 3D이미지를 획득하게 된다. 한편 그림 3.14는 3D 모델을 구성하는 각 영역에서 획득되는 이미지를 통해 터널 라이닝에 발생한 결함을 판별하는 예시를 나타내고 있으며, 앞선 이미지기반의 결함검출 과정과 유사한 분석과정에 따라 여러 결함 형태를 구분하게 된다. 이미지를 획득하는 방식에 있어 차이를 보이는 것을 제외하면 결함을 판별하거나 구분하기 위한 과정에서 인공지능, 딥러닝 기반의 알고리즘을 활용하는 것은 동일하다고 볼 수 있다.



[그림 3.13] 드론을 통해 촬영된 이미지를 통한 터널 3D모델 재현
예시(과학기술정보통신부, 2022)



[그림 3.14] 드론을 통해 촬영된 이미지를 통한 터널 라이닝 결함 검출 예시

참고문헌

1. 국토교통부(2018), 스마트 건설기술 개발사업 기획보고서(국토교통과학기술진흥원)
2. 국토교통부(2022), 인텔리전트 TBM 실시간 시공·안전 통합 관리 시스템 기술개발사업 기획보고서(국토교통과학기술진흥원)
3. 한국건설신문 (2014), “건설기업 데이터 축적은 충분, 활용도는 저조”, (2014.08.20.)
4. Moreno, P. et al.(2015), TBM Process Data Management System, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 432–437.
5. TIM(Tunnel Information Management), <http://www.mytimapp.com>
6. Zhang, N. et al.(2018), Development and Research Trends of TBM Manufacturing Technology in China, 한국자원공학회지, 제55권 제4호, pp. 314–322
7. 한국 BIM 학회 교육자료
8. Ex-BIM 교육(2020.05), 한국도로공사
9. 스마트 건설기술 로드맵(2018.10.31), 국토교통부
10. 스마트 건설기술 현장 적용 가이드라인(2021.03), 국토교통부
11. 실무 기술자를 위한 무료 기술강좌(2021.12), 한국터널지하공간학회
12. BIM 도입의 국제 동향 - 선진 외국의 BIM 활용 동향
13. 건축 1001(2016, 권순욱), 성균관대학교
14. 고속도로 스마트설계 지침(2020.09), 한국도로공사
15. 철도인프라 BIM 가이드라인 v1.0(2018), 국가철도공단
16. 건설산업 BIM 기본지침(2020.12), 국토교통부
17. 시설사업 BIM 적용 기본지침서 v2.0(2019.12), 조달청
18. EX_BIM 가이드라인 v1.0(2016.06), 한국도로공사
19. Choo, J.H. and Lee, I.M. (2019), Analysis and cause of defects in reinforced cement concrete lining on NATM tunnel based on the Precise Inspection for Safety and Diagnosis - Part I, J. of Korean Tunn Undergr Sp. Assoc., 21(1), 1–29.
20. Han, X., Yang, S., Zhou, F., Wang, J., and Zhou, D.(2017), An effective approach for rock mass discontinuity extraction based on terrestrial LiDAR scanning 3D point clouds, Ieee Access, 5, 26734–26742
21. Lee, S.(2020), Automated Characterization of Rock Mass Discontinuities Using LiDAR Point Cloud, Ph.D thesis, Seoul National University
22. 과학기술정보통신부(2022), 자율계측을 통한 터널 및 지하공간 구조물 안전점검 기술, 최종보고서
23. 전원정(2022), 국내 건설기업의 스마트 건설기술 도입 활성화 방안 연구, 석사학위논문, 강원대학교 대학원.