20CTAP
-C151928
-02

방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델 구축 최종보고서

2021

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호()

국토교통기술촉진연구 사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C151928-02

방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델 구축 최종보고서

2021.03.08.

주관연구기관 / 성균관대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

'방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델 구축'
(연구개발 기간 : 2019. 04. 15 ~ 2020. 12. 31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2021. 03. 08.

주관연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단 (대표자) 박 선 규 (인)

주관연구기관책임자: 김 성 아

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C151928-02	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. ~ 2020.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델 구축			
	세부과제명	방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델 구축			
연구책임자	김성아	해당단계 참여연구원 수	총: 6명 내부: 6명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:195,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:195,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부: 명	총 연구비	정부:337,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:337,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	성균관대학교 산학협력단			참여기업명	해당 사항 없음
국제공동연구	상대국명: 해당 사항 없음			상대국 연구기관명: 해당 사항 없음	
위탁연구	연구기관명: 해당 사항 없음			연구책임자: 해당 사항 없음	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호	5	1	-	-	-	3	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약	보고서 면수
- 최적화된 구조, 모듈화된 기능성 패널 시스템, 센서 통합에 의해 생산성 및 부가가치를 향상하고 관련 부품 사업의 생태계를 고도화할 수 있는 차세대 방음터널 플랫폼 설계 - 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 설계 자동화 시스템 개발 - 방음터널 디지털 트윈에 의한 빅데이터 플랫폼 개발	157

요약문

연구 목적

❍ 최적화된 구조시스템, 모듈화된 기능성 패널 시스템, 센서 통합에 의해 생산성을 향상하고 부가가치를 높이면서 관련 부품 사업의 생태계를 고도화할 수 있는 차세대 방음터널 플랫폼 설계

1) 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 설계 자동화 시스템 개발
2) 방음터널 디지털 트윈에 의한 빅데이터 플랫폼 개발

연구 내용

❍ 방음터널의 설계자동화 시스템은 파라메트릭 디자인, 디지털 패브리케이션, 성능 시뮬레이션, 최적화 기법, 가상현실, 디지털 트윈 시스템을 통합함.

① 차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출
- 차세대 방음터널 플랫폼의 정의
- 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인 정의
- 대표 디자인 유형 도출

② 파라메트릭 디자인 기반 설계 자동화 시스템 개발
- 터널 구조체 생성 알고리즘 개발
- 부재 및 센서 라이브러리 구축
- 부재 및 센서 배치 알고리즘 개발
- 도면화 및 물량 산출 알고리즘 개발
- 디지털 패브리케이션 지원 알고리즘 개발
- 성능 최적화 알고리즘 개발
- 구조 최적화 알고리즘 개발
- VR 기반 성능 가시화 기능 개발

③ 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용
- 방음터널 디지털 트윈 시스템 설계
- 센서 데이터의 디지털 트윈 연동 알고리즘 개발
- 빅데이터 기반 설계 최적화 알고리즘 개발

연구의 목적 및 내용

연구개발성과

<결과물>
- 차세대 방음터널 설계 자동화 프로그램
- 차세대 방음터널 디지털 트윈 시스템

<양적 성과>
- SCIE논문 3편, 비 SCI논문 2편, 특허 출원 및 등록 각 1건, 소프트웨어 3건

<예상되는 연구개발성과 유형>

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
예상성과 (N/Y)	Y	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)

○ 활용 방안
- 방음터널 디지털 트윈을 통한 시설물 및 도시 데이터 모니터링
- 실시간 시설물 모니터링 및 데이터 마이닝을 통한 선제적 시설물 유지보수 예측 및 대응
- 방음터널 차량 통제 없이 개발된 기능성 패널이나 구조체 변경 적용 효과를 시뮬레이션하기 위한 버츄얼 테스트 베드

	- 기계학습 및 인공지능 알고리즘을 활용한 통합 모니터링 데이터 추후 설계 최적화 및 개선안 제안 - 빅테이터 플랫폼으로 스마트시티 통합 센서 노드 및 허브의 역할 ○ 기대 효과 - 기술적 잠재 영향력 · 모듈화를 위한 표준화가 수반되므로 궁극적으로 한국형 방음터널 및 부재의 표준화 가능 - 사회적 잠재 영향력 · 모듈별, 재료별, 부재별 생산 다변화를 통한 신산업 창출 및 일자리 창출 가능성 증대 · 데이터 플랫폼으로 활용 가능한 차세대 방음터널 디지털 트윈 시스템으로 인한 데이터 허브 역할 가능 - 기초 원천기술 확보를 통한 기술적 기대효과 · 특허 출원 및 등록을 통한 방음터널 설계 자동화 기술의 기초 원천 기술 확보 가능 · 한국 지형 및 도시 최적화 및 특화 방음터널 디자인 유형 개발 가능 · 신 모듈 및 라이브러리 개발 시 테스트 베드로 활용 가능 · 지속적 모니터링을 통한 방음터널의 운용 및 재조립, 재건축, 최적화 기술 향상 · 도로시설물 엔지니어링 및 모니터링 기술 고도화를 통한 공공 시설물 지능화 촉진

국문핵심어 (5개 이내)	설계자동화	방음터널	디지털 트윈	가상현실	건물정보모델
영문핵심어 (5개 이내)	Design Automation	Sound Proof Tunnel	Digital Twin	Virtual Reality (VR)	Building Information Model (BIM)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 7

가. 연구 개발의 필요성 ····· 7

1. 연구 개발의 개요 ····· 7

2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황 ····· 8

나. 연구 개발의 목적 ····· 13

1. 연구 목적 ····· 13

2. 연구 목표 ····· 13

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 15

가. 연구 범위 및 연구 수행 방법 ····· 15

1. 연구 범위 ····· 15

2. 연구 개발 추진 전략 및 체계 ····· 16

나. 연구 내용 및 연구 결과 ····· 19

1. 차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출 ····· 20

2. 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템 개발 ····· 33

3. 설계 및 제작 정보 지원 기술 구현 ····· 52

4. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증 ····· 61

5. 성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화 ····· 68

6. 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용 ····· 93

7. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증 ····· 107

다. 연구 개발 성과 ····· 142

1. 논문 게재 성과 ····· 142

2. 국내 및 국제학술회의 발표 ····· 142

3. 특허성과 ····· 143

4. 소프트웨어 ····· 143

라. 연구 결과 요약 ····· 144

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 145

가. 정량적 및 정성적 목표 달성도 ····· 145

1. 목표 달성 개요 ····· 145

2. 정량적 목표 달성도 ····· 146

3. 정성적 목표 달성도 ····· 147

나. 관련 분야 기여도 ····· 152

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 153

가. 연구 결과의 활용방안 ····· 153

나. 기대성과 및 파급효과 ····· 154

붙임. 참고 문헌 ····· 156

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 개발의 필요성

1. 연구 개발의 개요

방음터널은 낙후된 설계 및 생산 방식에 의존하고 있으며, 공급율 포화 및 수익성 악화가 우려됨. 개별 영역의 연구 및 기술 경쟁력은 갖춘 반면, 이를 통합하여 관리하며 미래지향적 부가 서비스에 대한 대안이 부재한 실정임. 교통량이 많은 도로와 인구밀집지역 사이에 위치하는 방음터널의 입지 조건은 4차 산업혁명 시대의 핵심 서비스인 플랫폼(Platform)으로서의 입지 조건을 갖추고 있으며, 유무형의 플랫폼 서비스를 창출할 수 있음.

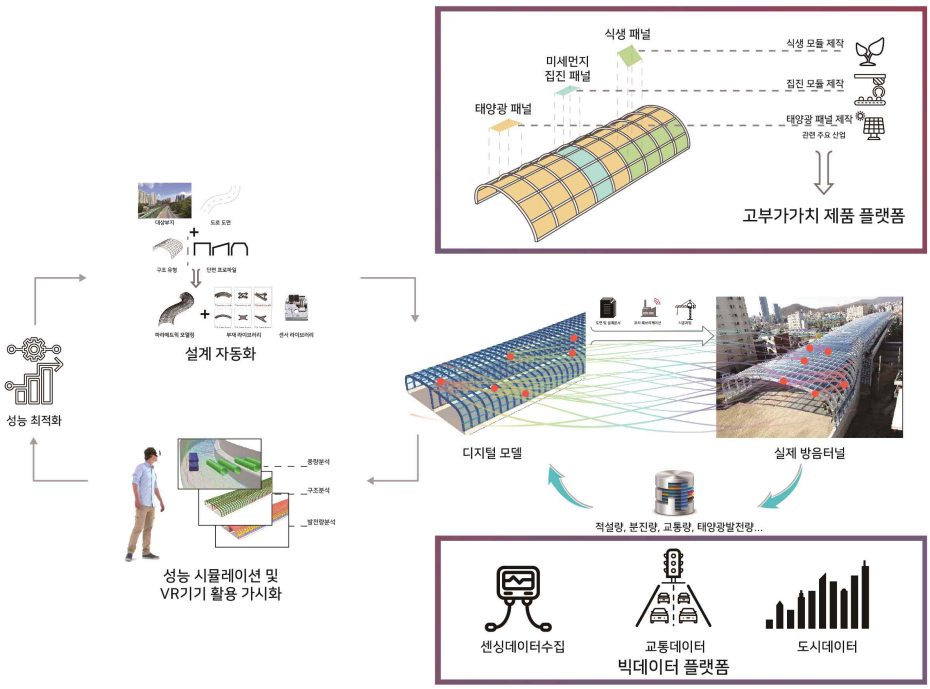


그림 1 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인

1) 고부가가치 제품 플랫폼: 기존의 방음판이 설치되는 방음터널의 프레임은 태양광 패널, 미세먼지 필터, 식생 모듈 등을 설치할 수 있는 모듈을 제공함으로써 타 산업과의 연계를 통한 산업 생태계 활성화와 도시미관 개선에 기여할 수 있음.

2) 빅데이터 플랫폼: 방음터널에 내장된 센서는 모니터링을 통한 방음터널의 스마트 유지관리를 가능하게 함. 빅데이터 분석을 통한 설계 최적화 기술로 활용됨.

본 연구는 방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델을 구축하고자 함 [그림 1]. 차세대 방음터널 플랫폼은 설계에서부터 디지털 트윈에 의한 유지관리에 이르는 모든 과정에서 일관되고 효율적인 데이터 관리가 가능함. 제너러티브/파라메트릭 디자인, 시뮬레이션, 최적화, 디지털 패브리케이션은 디지털 체인의 핵심기술임.

- 1차년 : 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인 시스템 전반을 구성함.
- 2차년 : 파라메트릭 디자인 시스템의 성능 중심 고도화 및 디지털 트윈 시스템과의 연동.

2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

○ 교통소음과 방음터널

경제 발전에 따른 인구의 도시 집중화는 교통 인프라 확충을 수반함. 대부분의 주요 교통수단이 인구밀집지역을 통과함에 따라 교통 소음 문제가 사회적인 이슈로 대두되고 있음. '터널형 방음시설(이하 방음터널)' 은 '교통소음의 저감을 목적으로 흡음 또는 차단효과를 얻을 수 있도록 설치하는 방음시설 중 형상이 터널과 동일하거나 유사한 구조를 갖는 방음시설' 임(환경부, 2014). 방음벽이 아파트 10층 이상의 높이에서는 그 효과를 발휘하지 못하는 반면, 방음터널은 소음원을 완전히 둘러쌈으로써 수음점까지의 직선음 및 회절음의 전달을 근본적으로 차단할 수 있음 [그림 2].



그림 2 교통소음 저감을 목적으로 하는 방음터널

○ 방음터널의 공급률 포화 및 수익성 악화

환경부의 2017년 소음진동관리시책 시도별 추진실적에 따르면, 2017년까지 전국에는 총 5521개소(1700㎞)의 방음벽(방음터널 포함)이 설치되어 있으며, 총 1조 8000억 원에 달하는 예산이 소요됨. 2019년 현재 기준, 전국의 신도시 아파트 단지에는 여전히 도로 소음 분쟁으로 인한 방음터널 설치 요구가 잇따르고 있음(광교 웰빙타운(A6블록), 평택 동부 고속화도로 사업 등) [그림 3]. 하지만 방음터널은 장기적인 관점으로 볼 때, '고속도로와 고층 아파트가 인접한 경우' 라는 한정된 수요를 대상으로 하고, 연계 산업에 대한 파급력이 미약하여 산업화 측면의 한계를 가짐. 연 매출 2,000억 규모의 방음터널 전문 기업 D사의 2018년 분석에 따르면 **향후 5년 이후에는 국내 방음터널 시장은 공급 포화 상태가 될 것이라 예측됨. 즉, 방음터널 시장의 수익성 악화가 우려되는 가운데 기 완공된 방음터널을 관리 및 활용할 대안이 부족한 실정임.**

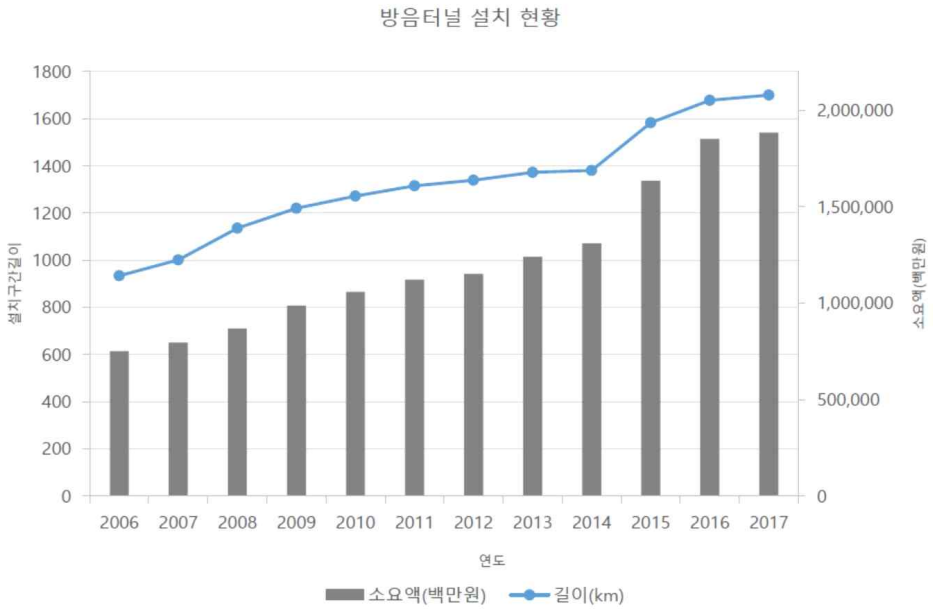


그림 3 전국 방음벽(방음터널 포함) 설치 현황(2006-2017년)

○ 국내 방음터널의 기술 현황

방음터널에 관한 연구는 방음, 환경(조명 및 환기), 구조, 기타(피난, 관리)로 구분될 수 있음. 방음터널 관련 선행연구 60여 건을 분석한 결과, 방음과 환경 관련 연구가 각각 45%(27건)와 28%(11건)로 연구의 대부분을 차지하였으며, 구조와 기타 분야가 나머지를 차지함 [그림 4]. 방음터널과 관련된 특허의 경우, 현재 약 1,000건 미만이 등록되어 있음. 개별 분야에 관한 연구는 성숙기에 이르렀으며, 국내 기업들이 해외 프로젝트를 수주하는 등 기술 경쟁력을 갖추고 있으나 분산된 기술을 통합하고 관리하는 측면의 연구는 전무함.

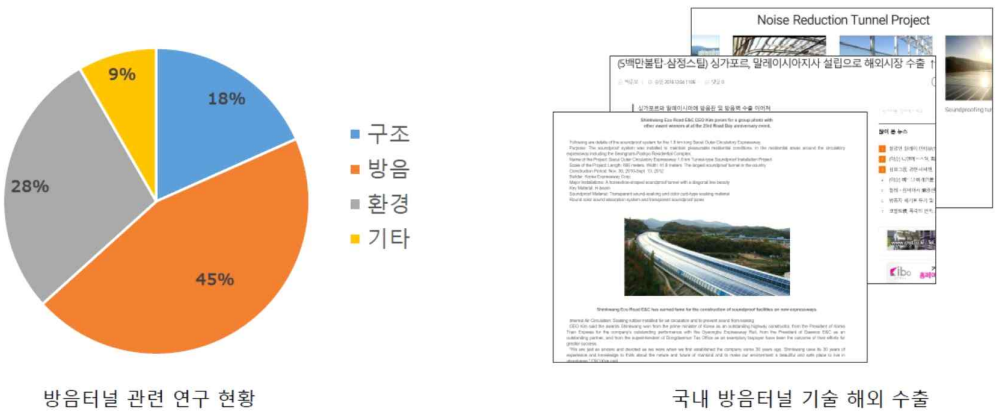


그림 4 국내 방음터널의 기술 현황

○ 방음터널의 새로운 사업 모델의 필요성

최근 4차 산업혁명에 부응하여 도로시설물의 고도화를 통해 추가적인 활용방안과 수요를 창출하고 국토 환경개선 및 국토 지능화의 기여하고자 하는 연구가 이루어지고 있음. 도로시설물을 에너지 생산 플랫폼으로 이용하기 위한 연구가 진행되고 있음을 고려할 때, 방음터널의 설계, 생산, 운영, 유지관리를 아우르는 새로운 사업 모델이 필요한 시점임.

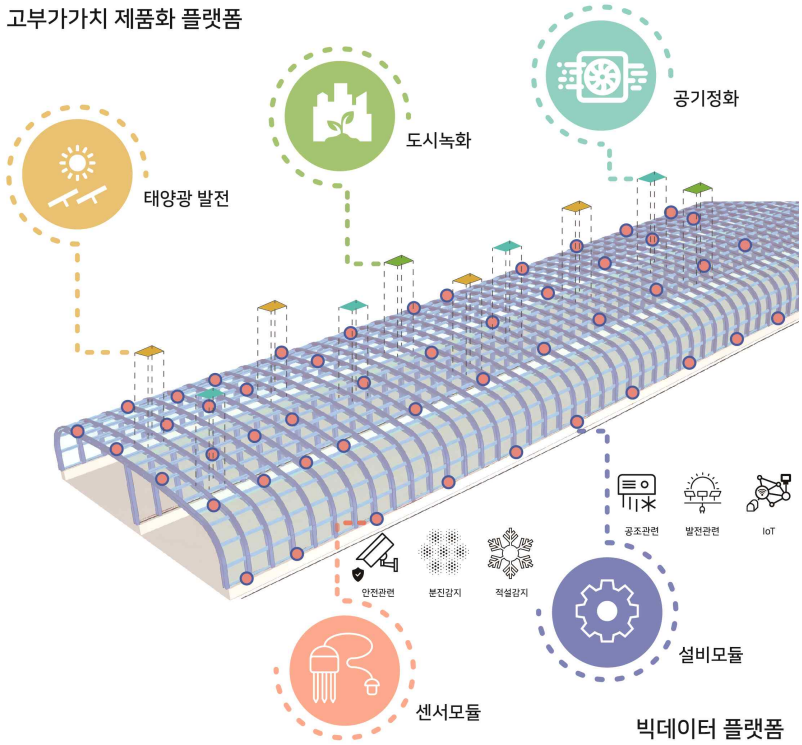


그림 5 차세대 방음터널 플랫폼

○ 플랫폼으로서의 방음터널 [그림 5]

방음터널의 구조 시스템과 입지조건은 4차 산업혁명 시대의 고부가가치 제품과 빅데이터 플랫폼으로서의 가능성이 있음. 구조체와 구조체 사이에 방음패널이 설치되는 방음터널의 구조 시스템은 부가적인 기능을 가진 패널로 대체될 수 있으며, 통행량이 많은 도로와 인구밀집지역 사이에 위치하는 입지조건과 전국적인 분포로 인해서 센서를 통한 빅데이터 수집에 활용될 수 있음.

1) 고부가가치 제품 플랫폼(Value-added Product Platform)

방음터널은 태양광 발전, 미세먼지 저감, 식생 등의 미래지향적 부가기능을 구현할 수 있는 고부가가치 제품 플랫폼으로 발전될 수 있음. 인필-스켈레톤 방식의 시스템은 다양한 기능을 수행하는 부가기능 유닛을 수용할 수 있으며, 관련 산업을 활성화할 수 있음.

2) 빅데이터 플랫폼(Big Data Platform)

방음터널은 디지털 트윈 기술을 적용하여 도로시설물과 도시 모니터링 역할이 가능한 빅데이터 플랫폼으로 발전될 수 있음. 모니터링을 통해 시설물의 스마트 유지관리가 가능하며, 빅데이터 분석의 결과는 추후 설계 최적화와 운용과정에 활용될 수 있음.



그림 6 차세대 방음터널 플랫폼을 위한 설계 자동화 시스템 예상 결과물

○ 차세대 방음터널 플랫폼의 개발 방향

다기능, 가변기능을 가지는 차세대 방음터널 플랫폼은 표준화, 모듈화, 시스템화가 뒷받침되어야 함. 단순히 방음터널에 태양광 발전, 사물인터넷 등의 기술이 추가되는 것이 아니라 설계 단계에서부터 유지관리 단계의 디지털 트윈 운영을 고려할 수 있어야 함.

디지털 트윈은 물리 세계의 방음터널에서 수집한 정보를 바탕으로 다음 역할을 수행함.

1) 시설물 모니터링: 방음터널의 구조

2) 선제적 시설물 유지보수 예측

3) 버추얼 테스트 베드 : 예를 들어 차량 통제 없이 새로운 기능성 패널이나 구조체 변경 적용의 효과를 시뮬레이션하기 위한 버추얼 테스트 베드

4) 통합 모니터링 데이터를 학습하여 추후 설계 최적화

5) 빅데이터 플랫폼으로 스마트시티 통합센서 노드 역할

○ 방음터널 설계 자동화 소프트웨어 및 디지털 트윈 운영을 위한 시스템 구축

본 연구는 4차 산업혁명의 제조혁신을 이끌고 있는 핵심기술을 적극적으로 도입함으로써 설계 자동화 및 디지털 트윈 운영을 위한 소프트웨어 및 시스템을 개발하는 것을 목표로 함.

금속 공작물 제조업에 머물러 있던 방음터널을 첨단 엔지니어링의 산물로 고도화하기 위해서는 다음 기술들을 고려해야 함.

(1) 파라메트릭 디자인: 도로를 따라 생성되는 방음터널의 구조 시스템과 설계 제한 요소는 파라미터간의 관계식으로 정리될 수 있으며, 이러한 알고리즘을 통해 변화하는 설계 요구 조건에 유연하게 대응할 수 있음.

(2) 성능 시뮬레이션과 최적화: 성능 시뮬레이션과 최적화는 기존의 설계 방식으로 해결할 수 없었던 상충되는 다양한 성능 조건을 해결할 수 있는 방법을 제공함.

(3) 디지털 패브리케이션: 방음터널의 비정형성은 정밀한 설계와 시공은 있어 변수로 작용하지만 디지털 패브리케이션을 통한 다품종 소량 생산은 이러한 문제를 해결함.

(4) 가상현실: 부재 간섭은 물론 성능 시뮬레이션의 결과를 가상현실을 통해 현실감 있게 체험함으로써 설계자 및 이해 당사자는 의사결정의 효율을 높일 수 있음.

(5) 디지털 트윈: 방음터널의 디지털 모델이 물리적 세계에 존재하는 방음터널과 네트워크로 통합되어 서로 피드백을 주고받을 수 있음을 의미함. 센서로 수집된 교통 및 환경 상황에 대한 데이터는 디지털 모델에 동기화되고 최적화 설계에 반영될 수 있음.

차세대 방음터널 플랫폼은 위 기술들에 활용되는 일련의 데이터가 디지털 체인 상에서 유통될 수 있을 때 비로소 작동하며, 그림 6은 위 기술들을 통합한 본 연구의 예상 결과물을 보여줌.

나. 연구 개발의 목적

1. 연구 목적

○ 연구 목적

- 최적화된 구조시스템, 모듈화된 기능성 패널 시스템, 센서 통합에 의해 생산성을 향상하고 부가가치를 높이면서 관련 부품 사업의 생태계를 고도화할 수 있는 차세대 방음터널 플랫폼 설계

- 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 설계 자동화 시스템 개발

- 방음터널 디지털 트윈에 의한 빅데이터 플랫폼 개발

2. 연구 목표

○ 최종 목표

차세대 방음터널 플랫폼의 설계 자동화 및 디지털 트윈 운영을 위한 소프트웨어 개발

○ 연차별 세부 목표 (1차 연도)

개발 목표

- 차세대 방음터널 플랫폼 정의

- 파라메트릭 디자인 기반 설계자동화 시스템 개발

개발 내용

1.1. 차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출

1.2. 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템 개발

1.3. 설계 및 제작 정보 지원 기술 구현

1.4. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증

○ 연차별 세부 목표 (2차 연도)

개발 목표

- 성능 기반 설계자동화 시스템 고도화

- 디지털 트윈 시스템 구축

개발 내용

2.1. 성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화

2.2. 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용

2.3. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증

연구 진행 계획 및 성과

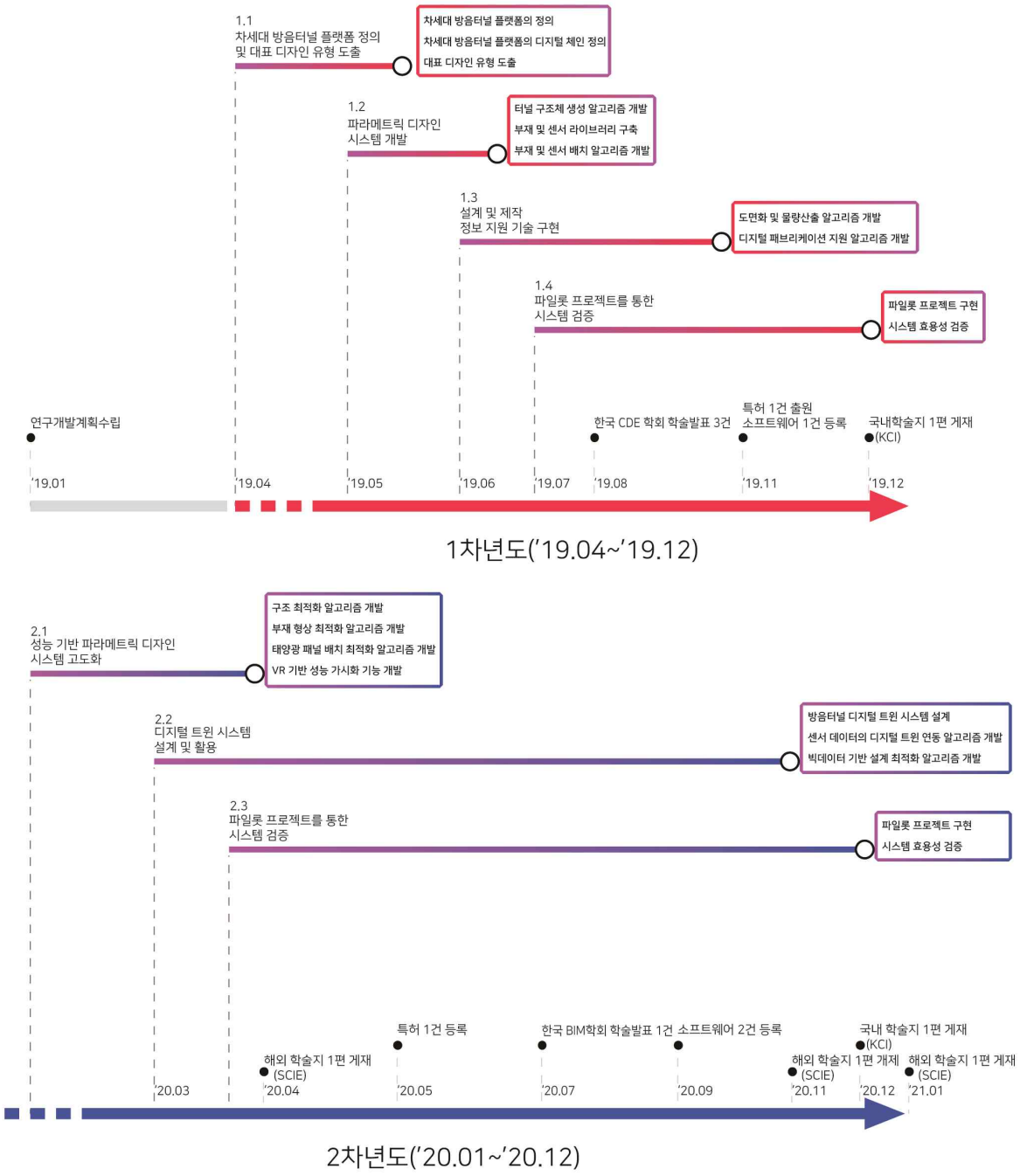


그림 7 연차별 개발 목표 및 내용

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구 범위 및 연구 수행 방법

1. 연구 범위

○ 1차년도

1. 차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출

- 차세대 방음터널 플랫폼의 정의, 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인 정의, 대표 디자인 유형 도출

2. 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템 개발

- 터널 구조체 생성 알고리즘 개발, 부재 및 센서 라이브러리 구축, 부재 및 센서 배치 알고리즘 개발

3. 설계 및 제작 정보 지원 기술 구현

- 도면화 및 물량산출 알고리즘 개발, 디지털 패브리케이션 지원 알고리즘 개발

4. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증

- 파일롯 프로젝트 구현, 시스템 효용성 검증

○ 2차년도

5. 성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화

- 구조 최적화 알고리즘 개발, 부재 형상 최적화 알고리즘 개발, 태양광 패널 배치 최적화 알고리즘 개발, VR 기반 성능 가시화 기능 개발

6. 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용

- 방음터널 디지털 트윈 시스템 설계, 센서 데이터의 디지털 트윈 연동 알고리즘 개발, 빅데이터 기반 설계 최적화 알고리즘 개발

7. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증

- 파일롯 프로젝트 구현, 시스템 효용성 검증

2. 연구 개발 추진 전략 및 체계

○ 연구 개발 추진 전략 개요

- 방음터널의 현장 니즈와 노하우를 반영하기 위해 방음터널 전문업체, 자재 전문업체의 상호 연계 및 자문.

- 디지털 체인 시스템을 개념화하고 개발하기 위해 전문가의 상호 연계 및 자문.

- 디지털 트윈 시스템을 구축하기 위해 관련분야 전문 IT 업체의 상호 연계 및 자문.

○ 전문가 활용

- 본 연구책임자는 아래와 같은 국내 전문가들을 적극 활용하여 핵심요소기술을 확보할 계획임.

- S대학교 S교수: 비정형 건축물의 파라메트릭 디자인 관련 다년간의 실무 건축 경험을 가지고 있음.

*해당 연구내용: 파라메트릭 디자인 시스템 개발 (2.나.2)

- D대학교 S교수: 도시 빅데이터 및 시뮬레이션 관련 연구를 수행하고 있음.

*해당 연구내용: 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용 (2.나.6)

- T 사 S 엔지니어: 디지털 디자인 엔지니어로서 BIM 관련 실무 건축 경험을 가지고 있음.

*해당 연구내용: 성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화 (2.나.5)

○ 관련 전문 업체 기술 협력

- 방음터널 전문업체(D사): 다년간의 국내 방음터널 설계 및 시공 경험이 있음.

*해당 연구내용: 차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출 (2.나.1)
파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증 (2.나.4)

- 자재 전문 업체(P사): D사의 자재 생산 및 조달 경험을 바탕으로 방음터널 부재 제작 경험이 있음.

*해당 연구내용: 설계 및 제작 정보 지원 기술 구현 (2.나.3)

- 디지털 트윈 플랫폼 보유업체(S사): BIM 모델 서버 기반 디지털 트윈 플랫폼 기술 보유.

*해당 연구내용: 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용 (2.나.6)
파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증 (2.나.7)

○ 연구 개발 추진 체계

연구개발과제		총 참 여 연 구 원
과제명	방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델 구축 도로시설물 모델 구축	주관연구책임자 (김성아)외 총 7명

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 학	1	7

주관연구기관명	
과 제 명	
연구책임자 김성아 외 6명	
담당기술개발내용	
1차년도	2차년도
· 차세대 플랫폼형 방음터널 설계 자동화 · 부재 및 센서 라이브러리 프로토타입 · 방음터널 제작 및 시공정보 지원 기술	· 설계 자동화 시스템 고도화 · 디지털 트윈 시스템 구축

○ 연구 개발 추진 일정

1차년도

일련번호	연구내용	추진 일정								
		1 (4월)	2 (5월)	3 (6월)	4 (7월)	5 (8월)	6 (9월)	7 (10월)	8 (11월)	9 (12월)
1	차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출	■	■							
2	파라메트릭 디자인 시스템 개발		■	■						
3	설계 및 제작 정보 지원 기술 구현			■	■	■	■			
4	파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증				■	■	■	■	■	

2차년도

일련번호	연구내용	추진 일정											
		1 (1월)	2 (2월)	3 (3월)	4 (4월)	5 (5월)	6 (6월)	7 (7월)	8 (8월)	9 (9월)	10 (10월)	11 (11월)	12 (12월)
1	성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화	■	■	■									
2	디지털 트윈 시스템 설계 및 활용			■	■	■	■	■	■	■	■	■	
3	파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증				■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	소프트웨어 등록 절차 진행										■	■	■

나. 연구 내용 및 연구 결과

세부 연구목표	세부 연구개발 내용	내용 설명
1.차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출	차세대 방음터널 플랫폼의 정의	차세대 방음터널 플랫폼을 고부가가치 제품 플랫폼과 빅데이터 플랫폼의 관점에서 정의함. 기능성 패널과 수집 데이터의 종류와 활용방안을 구체화함.
	차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인 정의	차세대 방음터널 플랫폼의 설계, 제작, 유지관리를 일관하는 디지털 체인을 정의함.
	대표 디자인 유형 도출	방음터널 실제 사례들을 분석하고 표준화하여 본 연구에서 다룰 대표 디자인 유형을 도출함.
2. 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템 개발	터널 구조체 생성 알고리즘 개발	방음터널 설계에 필요한 도로선, 구조체 배치, 종방향 구조체, 구조체 간격 등의 수학적 관계를 바탕으로 터널 구조체 생성 알고리즘을 개발함.
	부재 및 센서 라이브러리 구축	터널 구조체 생성 알고리즘에 따라 배치될 부재(구조체, 방음패널 등)와 각종 센서의 형상 및 속성을 라이브러리로 구축함.
	부재 및 센서 배치 알고리즘 개발	터널 구조체 상에 부재 및 센서 라이브러리를 배치하는 알고리즘을 개발함.
3. 설계 및 제작 정보 지원 기술 구현	도면화 및 물량산출 알고리즘 개발	도면화 및 물량산출을 자동화함으로써 설계자가 효율적인 의사결정을 수행할 수 있게 함.
	디지털 패브리케이션 지원 알고리즘 개발	디지털 패브리케이션 기법에 따라 필요한 형상 데이터 처리를 수행하는 알고리즘을 개발함.
4. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증	파일롯 프로젝트 구현	방음터널의 실제 프로젝트를 토대로 1차년도에 개발된 시스템을 적용한 프로젝트를 구현함.
	시스템 효용성 검증	실제 프로젝트와의 비교, 전문가 평가 등을 통해 설계자동화 시스템 효용성을 검증함.
5. 성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화	구조 최적화 알고리즘 개발	최소한의 부재로 구조 안정성을 확보하는 구조 최적화 알고리즘을 개발함.
	부재 형상 최적화 알고리즘 개발	생산 공정 및 운반 수단에 따른 제한 요소를 설계 단계에서 사전에 반영하여 시공상에 발생할 수 있는 알고리즘을 개발함.
	태양광 패널 배치 최적화 알고리즘 개발	태양광 패널은 생산되는 규격이 달라 배치하는 방식에 따라 손실율이 달라지며, 설치 각도에 따라 에너지 생산량이 달라짐. 방음터널 지붕이 가지는 경사와 곡률 등을 고려하여 패널 배치 최적화 알고리즘을 개발함.
	VR 기반 성능 가시화 기능 개발	VR(가상현실)을 통해 부재 간섭과 같은 시각적 평가에서부터 부재와 성능 분석 결과를 가시화하는 기능을 개발함. 설계에 참여하는 다양한 이해당사자가 VR을 통해 직관적으로 방음터널 내외부를 이해할 수 있음.
6. 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용	방음터널 디지털 트윈 시스템 설계	실제 방음터널에 대응하는 디지털 트윈 시스템을 설계함.
	센서 데이터의 디지털 트윈 연동 알고리즘 개발	방음터널에 설치된 센서 데이터와 디지털 트윈이 실시간 연동될 수 있도록 데이터의 교환 및 가시화를 위한 알고리즘을 개발함.
	빅데이터 기반 설계 최적화 알고리즘 개발	방음터널의 통합 모니터링 데이터를 학습하여 추후 설계를 최적화하는 알고리즘을 개발함.
7. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증	파일롯 프로젝트 구현	2차년도 연구개발 내용을 바탕으로 1차년도 파일롯 프로젝트를 고도화함.
	시스템 효용성 검증	전문가 평가 등을 통해 시스템 효용성을 검증함.

1. 차세대 방음터널 플랫폼 정의 및 대표 디자인 유형 도출

(1) 차세대 방음터널 플랫폼의 정의

▌차세대 방음터널 플랫폼을 고부가가치 제품 플랫폼과 빅데이터 플랫폼으로 정의하고 기능성 패널 제품과 센서 데이터의 종류 및 활용방안을 구체화함.

① 4차 산업혁명에 따른 패러다임의 변화

- 4차 산업혁명은 정보통신 기술(ICT)의 융합에 기반을 둔 혁명 시대를 말하며, 실제와 가상의 통합으로 사물들을 자동, 지능적으로 제어하는 가상 물리(Cyber Physical) 시스템이 구축되는 것을 포함함.[1)]
- 핵심은 빅데이터 분석, 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷, 무인 운송 수단, 3차원 인쇄, 나노 기술과 같은 6대 분야의 새로운 기술 혁신임.
- 4차 산업혁명의 핵심 요소는 개별적으로 발달한 각종 기술의 '융합' 이라 할 수 있으며, 이는 디지털, 바이오, 오프라인 기술들이 다양하고 새로운 형태로 융합되어 새로운 부가가치를 창출하는 것으로 볼 수 있음.
- 4차 산업혁명의 도래에 따른 산업과 경제 구조의 변화 상황은 향후 디자인 산업 구조에 대대적 변화를 초래하며, 이에 따른 디자인 패러다임의 조정 및 산업적 대응이 필요한 실정임.

② 스마트도시와 스마트도시 시설물

- 스마트도시가 도시화 문제, 미래 기후환경과 같은 문제에 대응할 수 있는 도시 모델로 주목받으며 이에 관한 연구 및 비즈니스 모델이 개발되고 있음.
- 국토연구원에 따르면 스마트도시는 향후 10년간 가장 빠르게 성장할 것으로 예상하였으며, Navigant Research는 산업 가치가 2016년 약 380억 달러 규모에서 2020년까지 1,000억 달러에 이를 것으로 전망하고 있음.
- 스마트도시 시장의 규모와 그에 따른 연구가 증가함에 따라 스마트도시를 구성하는 스마트도시 시설물에 대한 논의가 필요함.
- 스마트도시 시설물의 정의는 '스마트도시' 와 '도시시설물' 의 용어의 합성어로서 표면적 개념 또한 스마트도시의 도시시설물로 표현할 수 있음. 스마트도시 시설물은 가로시설물 정의와 스마트도시 정의를 통합한 개념을 적용함.
- 즉, 도시시설물에 건설기술 또는 정보통신 융합 기술을 적용하여 교통 및 안전 분야 등 지능형 시설 및 서비스를 제공하면서 본래의 목적에 따른 기능이 반영된 시설물로 정의할 수 있음.

---

1) Jung, J. and S.-A. Kim (2018). Digital Fabrication Integrated Architectural Design Process based on Lean startup. KIBIM Magazine 8: 23-33.

③ 차세대 비즈니스 모델 사례 (1) 카시타(KASITA)[2] [그림 8]



그림 8 KASITA에서 설계, 제공하는 모듈형 협소 주택

- 제프 윌슨(Jeff Wilson)이 설립한 기업 <카시타: Kasita>가 생산하고 있는 이 소형 조립식 주택은 2014년 33㎡(10평) 공간을 최대한 효율적으로 사용하는 방법을 연구하기 33㎡(10평) 크기의 대형 쓰레기통을 개조해 만든 집에서 1년간 거주한 제프 윌슨의 경험이 바탕이 되어 만들어졌음.
- 제프 윌슨은 극단적일 만큼 무모한 경험을 통해 사용자가 최대한의 만족을 느낄 수 있는 효율적이고 아름다운 공간을 구상하고 2015년부터 본격적인 제작을 시작해 사용자의 지속적인 피드백을 기반으로 최근 모바일 앱으로 제어 가능한 소형 조립식 주택을 선보였음.
- 사용자의 상황에 따라 창문의 유리 색을 변경할 수 있는 이 주택은 창 셰이딩 장치는 물론 방재, 방범 등의 홈 보안과 가전제품, 냉난방, 조명 등의 제어를 하는 홈 모니터 등이 모바일 앱으로 제어하는 홈오토메이션 시스템으로 조립식 주택의 새 장을 열었다는 평가를 받고 있음.

④ 차세대 비즈니스 모델 사례 (2) 카테라(KATERRA)[3] [그림 9]

- '카테라(Katerra)' 는 ' 15년에 前 테슬라 CEO인 마이클 마크스가 설립한 공동주택 전문 건설기업으로, 기업가치 3조 원의 美 25위권 주택 전문 건설기업으로 급성장.
- 빌딩 건축을 위한 원스톱 숍 (one-stop shop) 개념을 도입하여. 건축 디자인에서부

2) Kasita. Kasita-Hospitality for the Independent Traveler. Available on: https://kasita.com/ (accessed on 23 November 2019).

3) Katerra. Katerra:Home. Available on: https://www.katerra.com/country-selector/ (accessed on 23 November 2019).

터 실제 공사에 필요한 모든 과정을 Katerra를 통해서 진행할 수 있으며, 이에 필요한 자재를 구매하거나 생산하는 과정도 Katerra가 직접 담당하고 있음.

- 현재 미국 피닉스에 자체 공장을 확보하고 있으며, 전 세계에 자재 확보를 위한 네트워크를 보유하고 있음. 물론 고객이 원하는 건축 디자인을 가지고 빌딩을 건축하는 것 또한 가능함.



그림 9 Katerra의 자재 공장_벽, 문 단위의 반 조립형 모듈

- Katerra의 독창적인 사업 모델과 아이템을 다음과 같이 정리할 수 있음.
  IT 기술을 접목한 'Constructech(Construction+Technology)' 구현.
  설계에서부터 자재 납품, 현장 조립까지 모든 과정에서 IT 기반 기술, BIM, ERP를 활용하여 통합 수행.
  사전인증 및 검사를 통해 우수한 공급자 풀 네트워크를 확보·관리하여 품질과 가격 경쟁력 제고.
  사전에 벽, 문 단위의 반 조립품 형태로 제작, 현장에서 조립하여 공기 및 비용을 2/3 수준으로 절감.

⑤ 차세대 비즈니스 모델 사례 (3) 키에란 팀버레이크(KIERAN TIMBERLAKE)[4] [그림 10]

- Kieran Timberlake는 신재료와 시공 방법을 고안하기 위해 프로토타이핑 방법을 자체 개발하여 시스템으로 만들어온 연구기반의 건축설계회사임.
- Kieran Timberlake는 2008년도에 연구, 관리, 그리고 건축 서비스 발주에 대해서 ISO(International Organization for Standardization)에 관하여 인증을 받은 바 있음. (ISO 9001)
- 이들은 조직의 품질(또는 환경) 경영시스템이 국제규격에 적합하게 구축되어 있음

4) Kieran, S., & Timberlake, J. Kieran Timberlake | Architecture, Planning, Research. Available on: https://kierantimberlake.com/ (accessed on 23 November 2019).

을 증명한 것으로서, 업무절차를 편람에 의해 문서로 만들고 실행하고 있음. 이 점에서 통상적인 건축설계 사무소들과 차별화된 전략을 앞세우고 있음.

- Kieran Timberlake의 설계 프로세스는 크게 프리패브리케이션 (Prefabrication)과 임베디드 테크놀로지(Embedded Technology), 두 가지의 융합을 기반으로 함.
- 이 기술 간의 융합은 통상적인 건축설계에서는 생소한 재료들의 적용이 있어야 하며, 이로 인해 건축물의 구현에 대한 가정에 따라 형상과 구성방법을 계획하는 과정뿐만 아니라 그 계획을 수정하는 과정이 반복되어야 함.
- 이 과정에서 디지털 모델과 물리 모델을 상호보완적으로 활용하고 있음.[5)]
- 대표적으로 구조-기초의 연결(the structure-foundation connection), 외피-구조의 연결(the enclosure-structure connection), 외피-하부구조의 연결(the enclosure-infrastructure connection)의 섬세함 설계과정에서 디지털 모델과 물리 모델을 활용함.

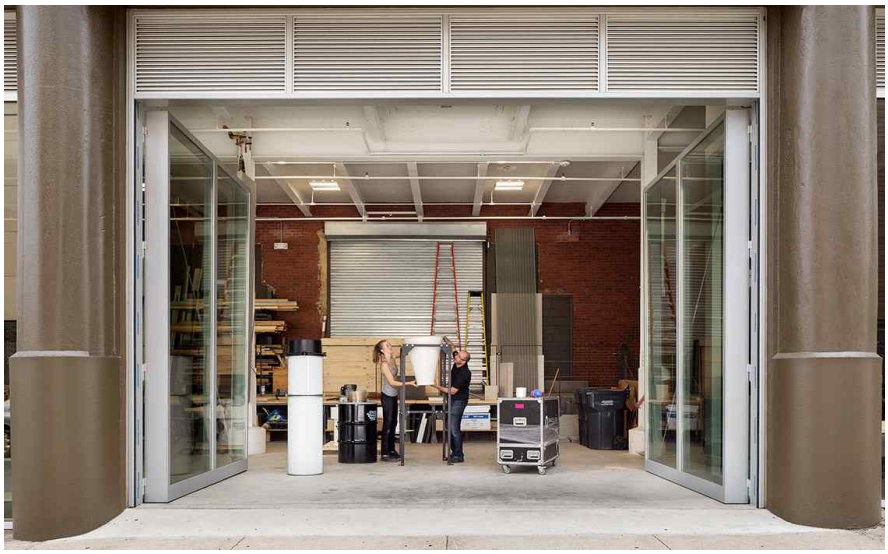


그림 10 Kieran Timberlake_Prototyping and Fabrication Process

⑥ 스마트도시 시설물로서의 방음터널 [그림 11]

- 방음터널은 크게 교통, 안전, 관리 기능이 포함되어야 하며, 교통량이 많으며 주거공간을 면한 도로를 입지 조건으로 갖고 있으므로 환경적인 기능 또한 필요함.
- 차세대 비즈니스 모델 사례를 미루어볼 때 방음터널 설계 단계에서 모듈화를 통한 고부가가치 가능성을 포함할 수 있어야 하며, 디지털 모델-물리 모델의 상호보완적 활용을 통한 가치 창출을 염두에 두어야 함.
- 빅 데이터 기반의 환경이 조성되는 스마트도시의 시설물로 기능하기 위하여 방음터널은 정보 플랫폼으로써의 역할을 해야 함.

5) Kim, D.-Y. (2019). Synergies between Digital Models and Physical Models in Convergence Design – Case Studies using Projects of Architectural Firms and Educational Environments–. KIBIM Magazine 9(2): 29-44.

⑦ 고부가가치 제품 플랫폼으로써의 방음터널

- 기존의 방음판이 설치되는 방음터널의 프레임은 태양광 패널, 미세먼지 필터, 식생 모듈 등을 설치할 수 있는 기반을 제공할 수 있음.
- 방음터널이 고부가가치 제품 플랫폼으로 기능하기 위해서는 도시시설물의 모듈화를 통해 다품종 대량생산이 가능한 체계를 갖추어야 하며, 제품의 표준화가 선결된 조건이어야 함.
- 이러한 Infill-Skeleton 방식의 시스템은 다양한 기능을 수행하는 부가기능 유닛을 수용할 수 있으며 이를 기반으로 타 산업을 활성화할 수 있음.

⑧ 빅데이터 플랫폼으로써의 방음터널

- 방음터널은 디지털 트윈 기술을 적용하여 도로시설물과 도시 모니터링 역할이 가능한 빅데이터 플랫폼으로 발전될 수 있음.[6)]
- 방음터널에 내장되는 센서는 모니터링을 통한 방음터널의 스마트 유지관리를 가능하게 함.
- 또한, 빅데이터 분석은 방음터널의 설계 최적화 기술로 활용될 수 있음.
- 빅데이터 플랫폼으로 기능하기 위해서는 지식정보 혹은 데이터가 도시 또는 기존 플랫폼과 상호 운용성이 보장되는 프로토콜을 기반으로 생성되고 가공되어야 함.

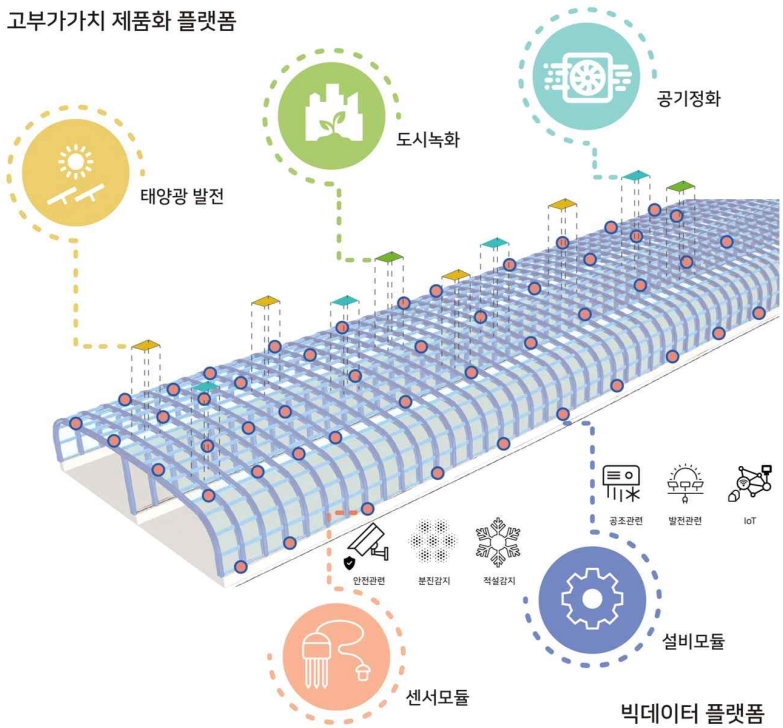


그림 11 고부가가치 제품 플랫폼과 빅 데이터 플랫폼이 적용된 차세대 방음터널 플랫폼

6) Kim, S.-A. (2017). BIM in the Age of Big Data. 建築士 578(-): 150-157.

⑨ 기능성 패널 제품과 센서 데이터의 종류 및 활용방안

- 방음터널 본연의 목적인 방음 성능과 배기가스를 정화할 수 있는 다목적 패널, 자체 에너지 수급을 위한 태양광 패널 그리고 도시녹화 기능을 수행할 수 있는 녹화 패널을 방음터널에 적용할 수 있음.
- 방음터널의 안전을 탐지하는 안전 관련 센서, 내부 분진을 감지하는 분진 감지 센서, 적설 현황을 탐지하는 적설 감지 센서를 방음터널에 적용할 수 있음.
- 이와 더불어 방음터널에 부착된 센서들을 통해 실시간 데이터가 도시 데이터 플랫폼, 이를테면 U-city 통합 관제 센터로 전송되어 실시간 도시 정보수집에 활용되고 부가가치를 높일 수 있음.

(2) 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인 정의

▌차세대 방음터널 플랫폼의 설계, 제작, 유지관리를 일관하는 디지털 체인을 정의함. 국내외 산업계의 디지털 체인 구현 사례를 참고하되 도로시설물인 방음터널의 특수성을 고려하여 데이터 플로우를 계획함 [그림 12].

① 디지털 트윈(Digital Twin)

- 디지털 트윈은 '물리적 사물 및 시스템의 동적 S/W 모델'로 정의할 수 있으며, 감지 데이터로 물리적 대상의 현재 상태를 파악하고, 변화에 대응하며, 운영을 개선하고 가치를 부가하는 기술임.[7)]
- 디지털 트윈은 크게 세 가지 형태로 활용되고 있음.[8)]
  - 관제 모델(Observation Model)
    데이터 스트림 (Data Stream)을 통해 물리적 대상의 상태를 모니터링
  - 운영 모델(Operation Model)[9)]
    디지털 트윈에 파라미터를 설정하여 물리적 대상을 제어
  - 최적화 모델(Optimization Model)
    대상의 기능 매개 변수(Functional Parameters), 상황 정보 (Contextual Data) 등을 활용하여 최적화하기 위한 시뮬레이션[10)]
- 물리적 대상의 설계, 제작, 운영, 폐기에 이르기까지의 전 주기에 걸쳐 디지털 트

7) Grieves, M., and Vickers, J., Digital Twin:Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Beahavior in Complex Systems, in Kahlen, F., Flumerfelt, S., Alves. A. (2017). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer.
8) Negri, E., et al. (2017). A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. Procedia Manufacturing 11: 939-948.
9) Tao, F., et al. (2018). Digital twin in industry: state-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics 15(4): 2405-2415.
10) Kim, S.-A. (2017). Op cit. 150-157.

윈이 작용할 수 있음.

- 단계별로 생성되는 트윈의 형상과 속성, 상태는 다를 수 있으나 디지털 트윈이 궁극적으로 지향하는 물리적인 요소와 디지털 요소의 융합이 이루어지기 위해서는, 전 주기에 걸친 정보가 빠지지 않고 이어져야 함.[11)]
- 디지털 트윈은 물리 방음터널에서 수집한 정보를 바탕으로 다음을 수행함.
  - 시설물 모니터링
  - 선제적 시설물 유지보수 예측
  - 가상 테스트 베드
  - 통합 모니터링 데이터를 학습하여 추후 설계 최적화에 활용
  - 빅데이터 플랫폼으로 스마트도시 통합센서 노드 역할[12)]
- 따라서 다기능, 가변기능을 가지는 차세대 방음터널 플랫폼이 설계되기 위해서는 표준화, 모듈화, 시스템화가 뒷받침되어야 함.
- 이는 단순히 기존 방음터널에 태양광발전, 사물인터넷 등의 기술이 추가되는 것이 아니라 설계 단계에서부터 유지관리 단계의 디지털 트윈 운영을 고려할 수 있는 여건이 마련되어야 함을 의미함.

② 방음터널 설계 자동화 소프트웨어 및 디지털 트윈 운영을 위한 시스템 구축

- 금속 공작물 제조업에 머물러 있던 방음터널을 첨단 공학의 산물로 고도화하기 위해서는 다음 기술들을 고려해야 함.
  - 파라메트릭 디자인(Parametric Design): 도로를 따라 생성되는 방음터널의 구조 시스템과 설계 제한 요소는 파라미터 간의 관계식으로 정리될 수 있으며, 이러한 알고리즘을 통해 변화하는 설계 요구 조건에 유연하게 대응할 수 있음.
  - 성능 시뮬레이션과 최적화(Performance Simulation & Optimization): 성능 시뮬레이션과 최적화는 기존의 설계 방식으로 해결할 수 없었던 상충하는 다양한 성능 조건들을 해결할 수 있는 방법론을 제공함.[13)]
  - 디지털 패브리케이션(Digital Fabrication): 방음터널의 비정형성은 정밀한 설계와 시공에 있어 변수로 작용하지만, 디지털 패브리케이션을 통한 다품종 소량 생산기술은 이러한 문제를 해결함.[14)]
  - 가상현실(Virtual Reality): 성능 시뮬레이션의 결과를 가상현실을 통해 현실감 있게 체험함으로써 설계자 및 이해 당사자는 의사결정의 효율을 높일 수 있음.

---

11) Lee, J., et al. (2015). "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems." Manufacturing letters 3: 18-23.
12) Kim, S.-A. (2017). Op cit. 150-157.
13) Kim, S.-A. (2017). On the Role of Digital Model - How the Parametric Design leads to the virtual Building. 建築士 580(-): 150-159.
14) Kim, D.-Y. (2018). Prototyping-based architectural design process using digital and physical models. Seoul, Sungkyunkwan University.

▪ 디지털 트윈(Digital Twin): 방음터널의 디지털 모델이 물리적 세계에 존재하는 방음터널과 네트워크로 통합되어 서로 피드백을 주고받을 수 있음을 의미함. 센서로 수집된 교통 및 환경 상황에 대한 데이터는 디지털 모델에 동기화되고 최적화 설계에 반영될 수 있음.[15)]

– 차세대 방음터널 플랫폼은 위 기술들에 활용되는 일련의 데이터가 디지털 체인화되어 유통될 때 비로소 작동함.

③ 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인[16)]

– 방음터널 플랫폼의 디지털 체인은 방음터널의 기획에서 설계, 시공, 유지관리, 해체에 이르기까지의 생애주기 전체에 사용되는 정보가 일관화되어 사용, 관리되는 체계를 표현하는 용어임.

– 디지털 체인의 적용을 통하여 방음터널 생애주기 전체의 품질 향상을 꾀할 수 있으며 품질 보증 비용 절감 및 서비스 향상을 가능케 할 수 있음.[17)]

– 개발 비용 전반의 비용 절감과 기간 단축의 효과를 가져올 수 있으며 운영 단계에서의 지속적인 최적화를 통한 운영비용을 절감할 수 있음.

– 디지털 체인을 통한 정보의 보존과 연속성을 확보할 수 있으므로 이를 통한 분석 모델과 예측 모델을 구성할 수 있음.

– 차세대 방음터널 플랫폼은 설계에서부터 디지털 트윈에 의한 유지관리에 이르는 모든 과정에서 일관되고 효율적인 데이터 관리가 가능함.[18)] 제너러티브/파라메트릭 디자인, 시뮬레이션, 최적화, 디지털 패브리케이션은 디지털 체인의 핵심기술임.[19)]

④ 도로시설물인 방음터널의 특수성을 고려한 데이터 플로우

– 디지털 트윈의 구현 대상은 현실 세계에 존재하는 모든 물리적인 요소와 정보라고 할 수 있음. 하지만 그 구현 과정에서는 비용, 시간, 인력이 수반되기 때문에 항상 모든 것을 구현할 수는 없음. 따라서 실제로 구현되는 대상의 범위는 디지털 트윈의 활용 목적, 시나리오, 보유 데이터에 따라 결정됨.

– 방음터널의 계획 및 설계 단계에서 설계 자동화를 통해 생성된 디지털 모델은 성능 시뮬레이션 및 VR기기 활용 가시화 등을 통하여 성능 최적화 단계를 거치며 그 결과가 설계 자동화로 반영되어 디지털 모델이 수정될 수 있어야 함.

– 디지털 모델을 기반으로 도면 및 설계 문서가 작성되어야 하며, 사전제작 기법을 적용하여 시공 과정에서 발생하는 비용을 절감함.

---

15) Kim, S.-A. (2017). Op cit. 150-157.
16) Robertson, D. and K. Ulrich (1998). "Platform product development." Sloan management review 39(4): 19-31.
17) Piascik, R., et al. (2010). Technology area 12: Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing road map. NASA Office of Chief Technologist.
18) Tao, F., et al. (2019). Digital twin-driven product design framework. International Journal of Production Research 57(12): 3935-3953.
19) Jung, J. and S.-A. Kim (2018). Op cit.: 23-33.

- 결정된 디지털 모델을 기반으로 구축되는 물리 모델 간 센서 부착을 통해 상호 간의 데이터 연결이 되도록 하며, 이를 통해 물리 방음터널에서 수집된 데이터는 클라우드 시스템(Cloud System)을 비롯한 저장소에 저장토록 함.
- 수집되는 데이터의 종류는 적설량, 분진 양, 교통량, 태양광발전량, 방음터널 부재의 수명 등으로 하며, 해당 데이터를 기반으로 관제, 운영, 최적화 프로그램을 구동할 수 있음.
- 관제, 운영, 최적화 프로그램을 통한 현황 파악 및 기타 수요는 디지털 모델에 반영될 수 있도록 함.

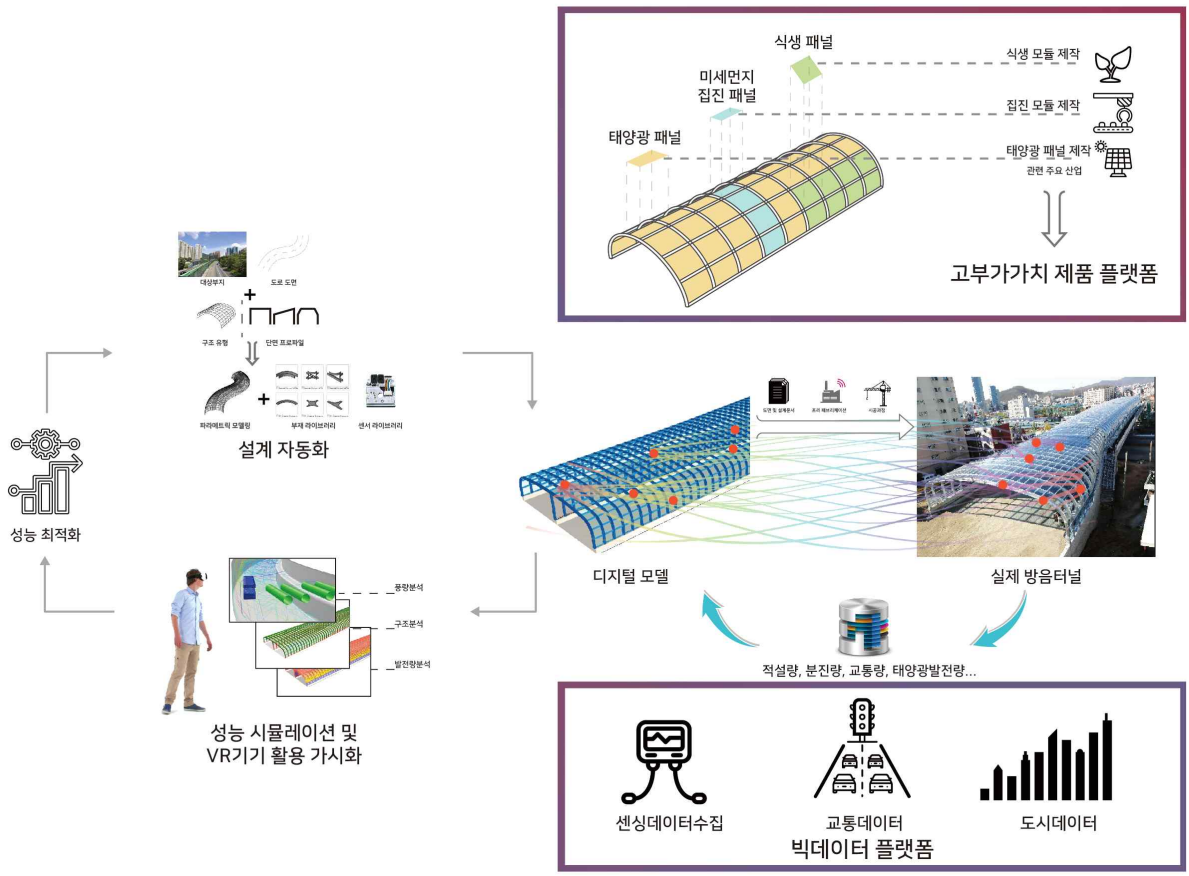


그림 12 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 체인

(3) 대표 디자인 유형 도출

❙ 방음터널의 실제 사례들을 분석하여 본 연구에서 다룰 대표 디자인 유형을 도출함. 표준화, 모듈화, 시스템화를 고려하여 제작 및 운용상의 효율을 높임.

① 방음터널 일반 사항

- 방음터널은 도로에서 발생하는 소음을 차단하기 위한 방음 시설물 중 터널형 방음벽을 지칭함.
- 방음 시설물은 주거지 인근에 있는 주요 도로, 고속도로, 중심도로, 철로에 설치되어 소음원으로부터 발생하는 소음을 차단.
- 방음터널의 경우 소음차단 효과뿐 아니라 매연, 미세먼지와 같은 공기 오염 물질을 물리적으로 차단할 수 있어서 선호도가 높음.
- 방음터널의 도입은 일반적으로 도시화가 진행 중인 국가에서 급격히 증가하고 있으며, 특히, 음 환경에 대한 거주자의 요구사항이 증가하고 있어서 수요가 꾸준히 증가할 것으로 전망 [그림 13].

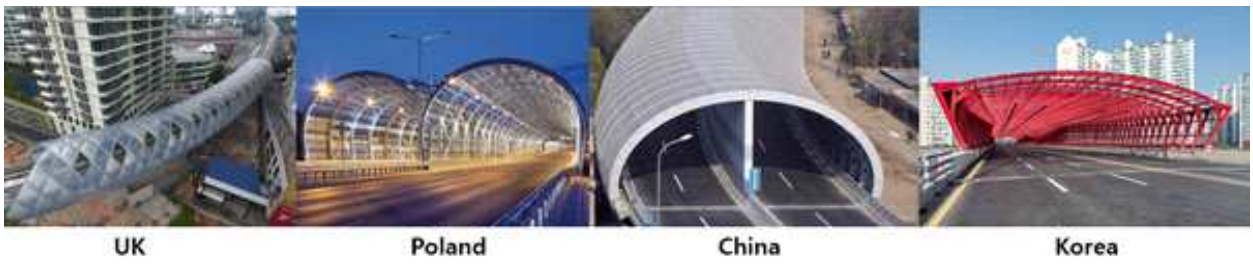


그림 13 국가별 방음터널 사례

② 방음터널 유형 도출을 위한 형태 특성 분석

- 방음터널의 형태는 일반적으로 도로의 폭에 따라 형태 유형이 결정되나, 지반 또는 도로의 특성, 지역적 특성도 방음터널의 형상에 영향을 미침.
- 2019년 기준 전국에 설치된 도로 위 방음터널의 총 숫자는 43개로 파악되었으며, 43개의 방음터널을 그림 14와 같은 4가지 유형으로 분류할 수 있음.

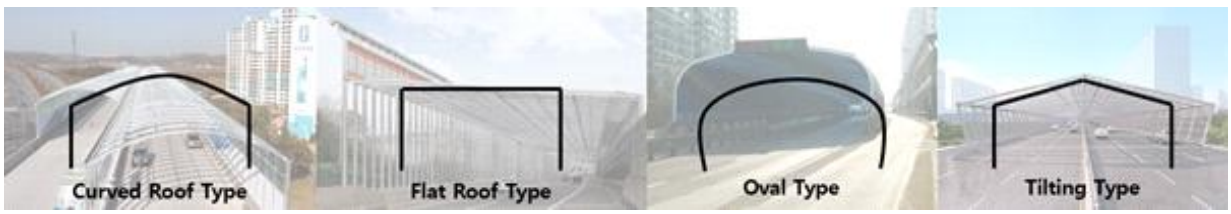


그림 14 방음터널의 형태 유형

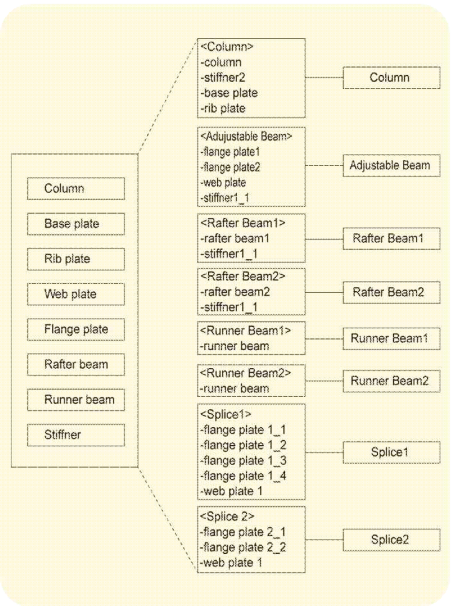
- Curved Roof Type: 2개 차선 이상의 도로에 주로 활용되며 곡선형 부재를 활용한 천장부분과 직선형 부재를 활용한 양 측면 기둥으로 구성된 형태. 공사 난도가 낮으나, 설치되는 부재의 종류가 많음.

- Flat Roof Type: 2개 차선 이하의 도로에 주로 활용되며, 본선에서 분리된 지선이나 합류 도로의 지선으로 활용됨. 이따금 도로변 보행자의 음 환경개선을 위해 설치하는 사례 증가. 공사 난도가 낮음.
- Oval Type: 2개 차선 이상의 도로에 주로 활용되며, 가장 많이 활용되는 형태. 상부 부재와 기둥 부재의 명확한 구분이 없는 것이 특징이며, 곡선형의 아치 부재가 강접합 되어 전체 부재를 지탱하는 형태. 부재의 숫자가 가장 적음.
- Tilting Type: 2개 차선 이상의 도로에 주로 활용됨, 그러나 Curved Roof Type이나 Oval Type의 형태에 장경간 Span에 대응하기 어려움. 박공지붕 형태의 지붕이 특징이며, 일반적으로 많이 활용되는 사례는 아님. 그러나, 태양광 방음터널의 태양광 패널의 입사각을 고려하는 경우에 특수한 목적으로 활용됨.

③ 방음터널의 구성 부재

– 방음터널 구성 부재를 크게 기초부, 구조부, 비 구조부로 나눌 수 있음.

- 방음터널 기초부: 방음터널 기초로 도로면 또는 노견과 방음터널이 연결된 부분
- 방음터널 비 구조부: 방음터널의 방음패널, 방음패널의 연결부분 등 비 구조적 역할을 하는 구성요소
- 방음터널 구조부: 일반적으로, Runner Beam, Rafter Beam, 기둥, Splice, 가변 Beam으로 구성되며 방음터널이 자립하기 위한 구조적 안정성과 관련성이 밀접함 [그림 15, 그림 16]



	Member	Curved Roof	Flat Roof	Oval	Tilting Roof
Structural part	Column	○	○		○
	Adjustable Beam	○			○
	Rafter Beam	○	○	○	○
	Runner Beam	○	○	○	○
	Splice	○	○	○	○
	Stiffener	○	○	○	○
	Vault				○
Foundation part	Foundation	○	○	○	○
Non-structural part	Panel	○	○	○	○

그림 15 방음터널 구성 부재와 (좌)와 방음터널 형태별 구성 부재(우)

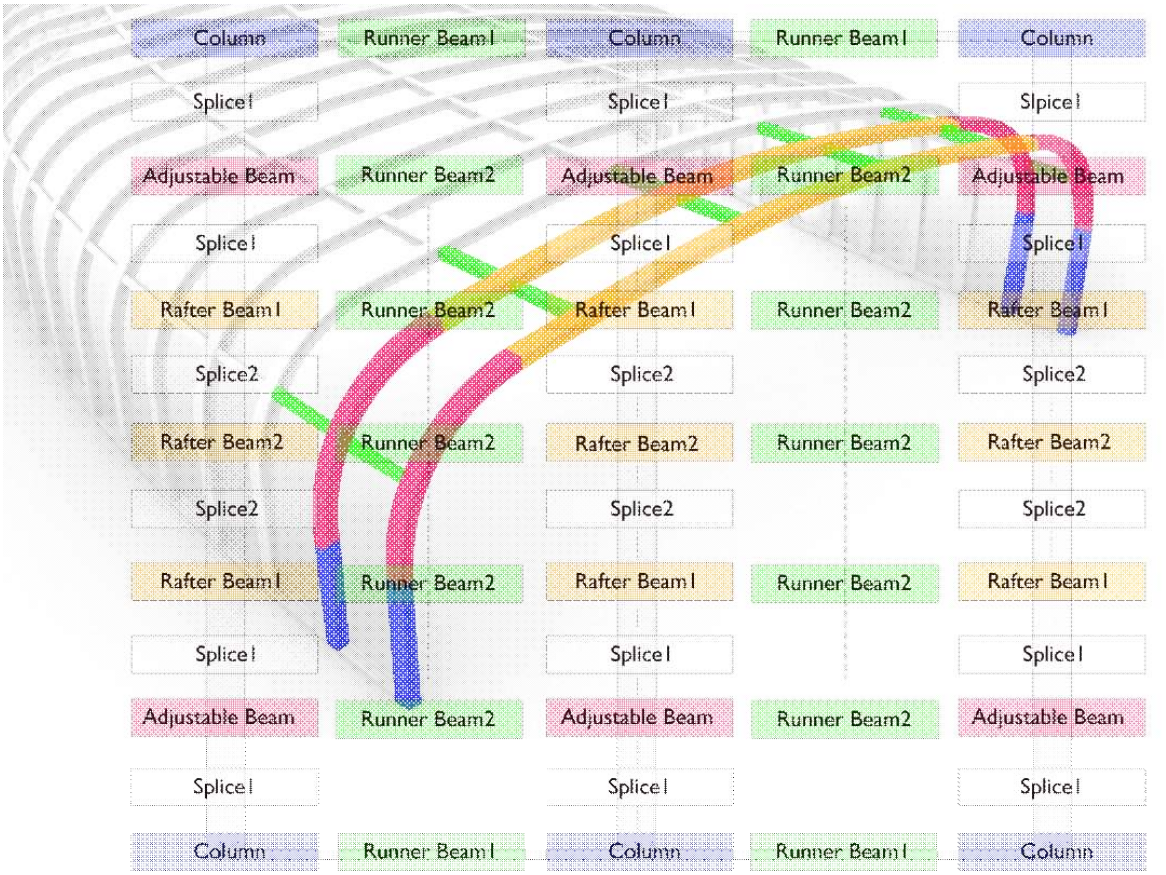


그림 16 방음터널 구성부재의 연결 관계도

④ 대표 디자인 유형 도출

- 설계 자동화를 위한 방음터널 형태 유형은 방음터널의 구성 부재가 가장 적으면서 방음터널의 형상을 구성할 수 있는 'Oval Type'으로 선정함 [그림 17, 그림 18].
- 'Oval Type' 방음터널에 방음터널 구성 부재인 기둥과 Rafter Beam, Runner Beam이 동일 부재가 사용된다고 가정할 때, 각 부재의 연결 관계에 대한 파라미터의 도출이 용이한 형태.
- 'Oval Type'은 Adjustable Beam과 Column의 구분이 없으므로 추후 고도화 단계에서 타 유형을 개발할 때, 각각의 부재를 구분할 필요가 있음.

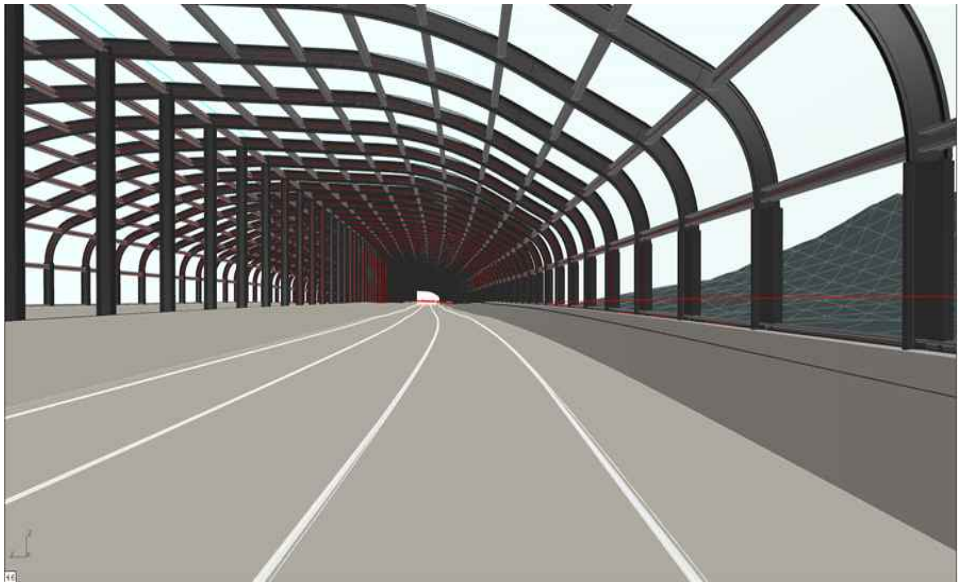


그림 17 대표 디자인 유형-투시도

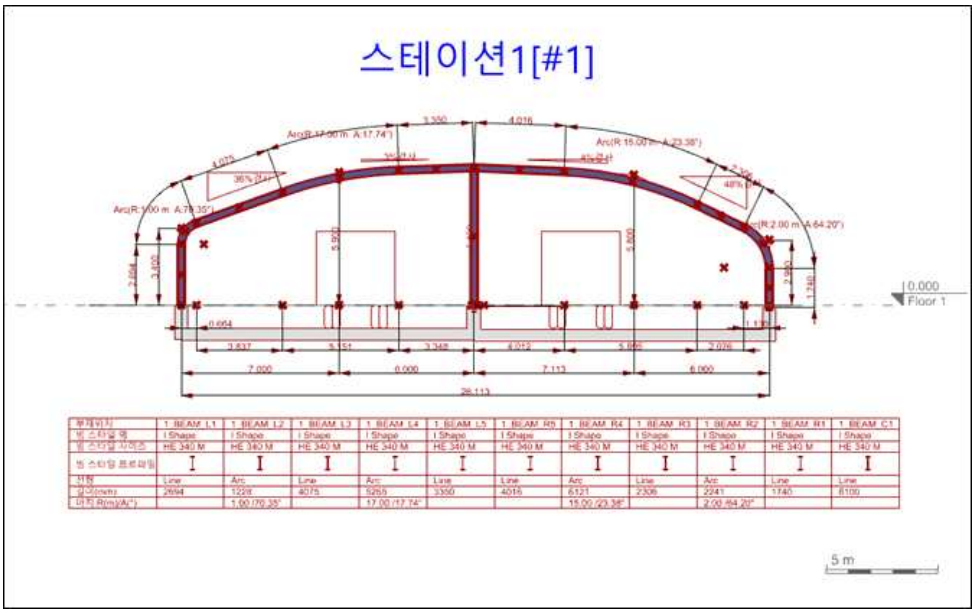


그림 18 대표 디자인 유형-단면 설계

2. 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템 개발

(1) 터널 구조체 생성 알고리즘 개발

❙ 방음터널 설계에 필요한 도로선, 구조체 배치, 종방향 구조체, 구조체 간격 등의 파라미터를 도출하고, 수학적 관계를 바탕으로 터널 구조체 생성 알고리즘을 개발함.

① 알고리즘 개발 환경

– 본 시스템은 NURBS 기반의 3D 모델링 프로그램인 Rhino 3D(Mcneel 社)와 시각적 프로그래밍 언어인 Grasshopper를 활용하여 개발됨. BIM(건축정보모델링) 플러그인으로는 VisualARQ(AsuniCAD 社)를 활용함 [그림 19].

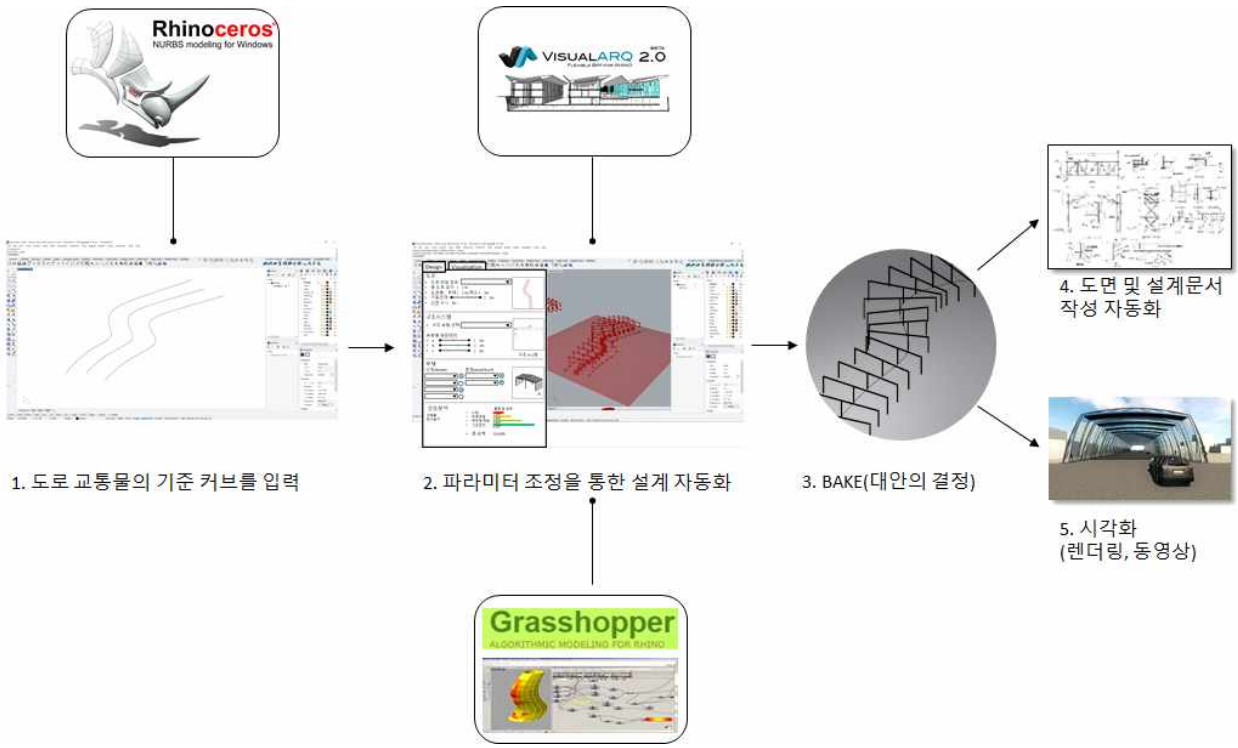


그림 19 방음터널 구조체 생성 알고리즘의 개념도

② 사용자 인터페이스

– 사용자 인터페이스는 Rhino 3D와 Grasshopper로 구성됨 [그림 20].

– Rhino 3D 뷰포트 : (1) Perspective(주 작업창), (2) Top(키맵), (3)Front(프로젝트 및 선택 구조 치수 확인창)

– Grasshopper: 개체 및 파라미터(도로 간격, 부재 치수) 입력, 데이터 가시화

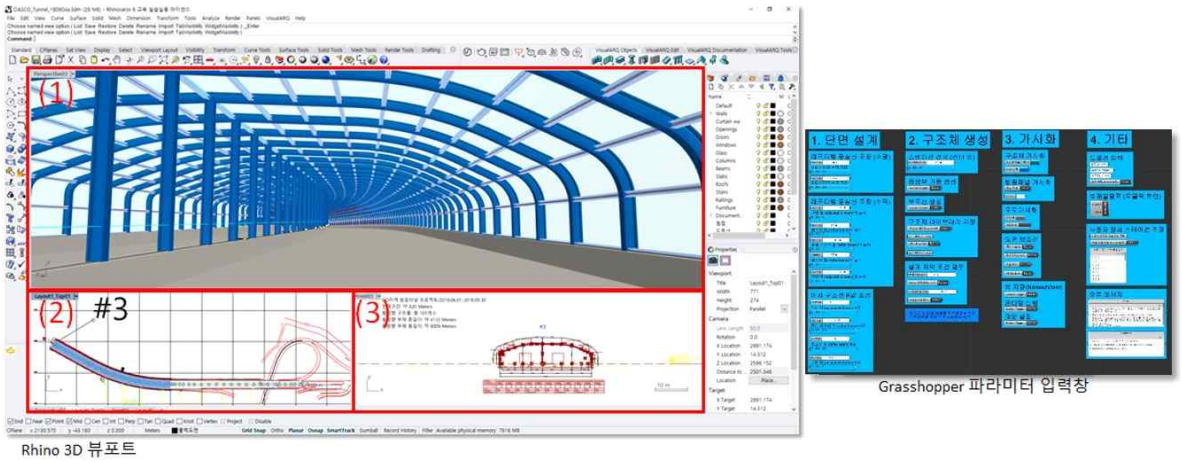


그림 20 사용자 인터페이스: Rhino3D + Grasshopper

③ 도로 도면을 활용한 도로선 생성

- 방음터널 생성의 기준이 되는 도로선은 중심선, 좌선, 우선으로 구성되며, grasshopper 알고리즘은 세 선을 모두 필요로 함.
- 좌표 전개도(2D)와 토공 종평면도(3D)를 Rhino 3D로 가져오기(import)하여 실측점을 통과하는 3D 커브 3개(중심선, 좌선, 우선) 생성하여 알고리즘에 입력함[그림 21].

※ 좌표 전개도, 토공 종평면도는 기존 방음터널 실무자가 지형 정보를 얻기 위해 활용해오던 자료임. 이 과정을 자동화하는 것은 본 연구에 포함되지 않음.

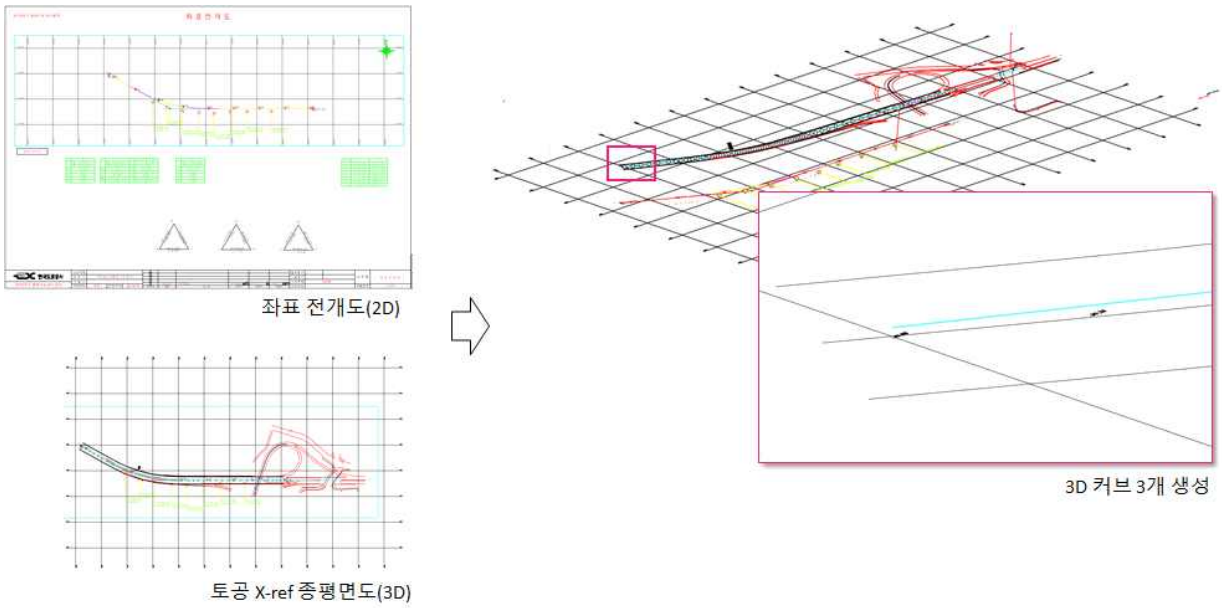


그림 21 도로 도면을 활용한 도로선 생성

※ 횡방향/종방향 구조체 중심선 입력

- 횡방향 구조체 중심선은 도로선을 기준으로 배열되며, 종방향 구조체 중심선은 횡방향 구조체 중심선 상에 생성됨.

※ 횡방향 구조체 중심선은 '대표 디자인 유형 도출' 에서 정의됨.

- 횡방향 구조체의 간격은 일정한 것이 원칙이나 장애물이 있을 시 일부 구간은 임의로 조정될 필요가 있음. 사용자는 횡방향 구조체 중심선의 규칙적인 간격과 불규칙적인 간격을 구분하여 입력할 수 있음 [그림 22].

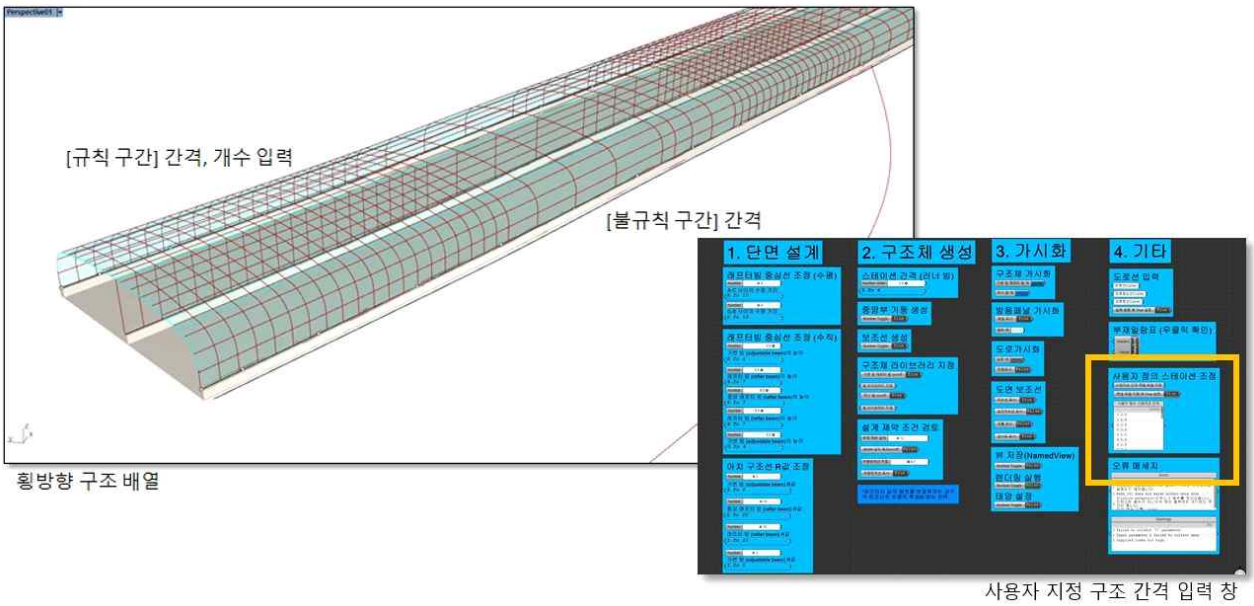


그림 22 횡방향/ 종방향 구조체 중심선 입력

④ 접속부를 가지는 방음터널 설계를 위한 쿼드 메쉬의 인덱스 정렬을 활용한 형상 정보 추출 방법

- 방음터널의 횡방향, 종방향 구조체 중심선은 Quad mesh의 같은 방향으로 맞닿아 있는 Mesh-edge를 join함으로써 획득될 수 있음. 하나의 Mesh-face를 구성하는 4개의 Mesh-vertice의 연결관계는 반시계방향으로 순서대로 배열되어 있음. 이 연결관계는 하나의 리스트 안에서 Mesh-edge의 순서도 결정함. 그러나 Mesh-vertex의 첫번째 점이 가지는 상대적인 위치가 다르기 때문에 특정 방향의 구조체 중심선이 일거에 검색(retrieve)될 수 없음.
- 따라서 Mesh-face를 구성하는 Mesh-vertex의 연결 순서가 도로 방향을 기준으로 재정렬될 필요가 있음. Mesh-face의 면적 중심점에 Plane을 만들고 도로의 진행방향을 기준으로 정렬함.
- 도로의 폭이 변화하거나 도로 가장자리가 다른 곡률을 가지면 하나의 보조커브로는 정확한 통제가 되지 않음. 복수의 임의의 커브를 입력하여 Mesh-face 중심점과 가장 가까운 보조커브의 통제를 받도록 함. Mesh-vertice의 상대적인 위치관계를 극좌표(Polar coordinates)로 변환하여 정렬함. 횡방향 구조체 커브를 추출, 결합, 중복된 것을 제거함. 이 과정에서 polyline을 구성하는 Mesh-vertex의 순서는 순서대로 정렬됨.
- 횡방향 구조체 커브의 리스트 순서는 도로 중심선의 커브 도메인(curve domain)을

기준으로 재정렬됨. 횡방향 구조체 커브를 활용하여 종방향 구조체 커브와 패널 서페이스도 생성함. 모든 오브젝트의 리스트 순서는 이미 정렬된 횡방향 구조체의 리스트 순서를 따름.

- Point의 리스트 순서를 활용하여 기존 Mesh의 Vertex가 정렬된 Mesh를 생성할 수 있음. 패널 서페이스의 데이터 순서를 활용하여 Mesh face의 순서도 정렬될 수 있음 [그림 23].

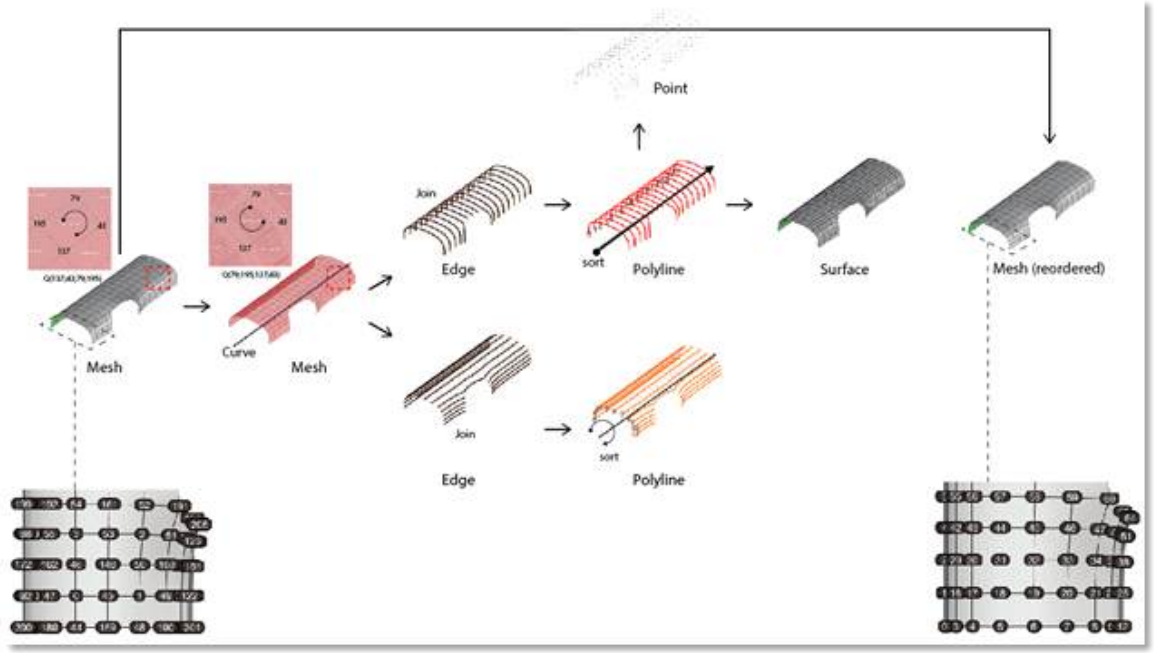


그림 23 쿼드 메쉬의 인덱스 정렬을 활용한 터널형 방음벽의 형상 정보 추출 프로세스

- 본 방법론을 8차선 주도로에 1차선 부도로가 합류하는 도로 상에 설치되는 터널형 방음벽 설계에 적용함 [그림 24].
- Y자 형태의 쿼드 메쉬(Mesh-vertex: 569개, Mesh-face: 512개)를 모델링하고 valence 5인 Mesh-vertex를 기준으로 각각의 도로에 해당하는 쿼드메쉬를 분리함.
- 주도로의 쿼드 메쉬(Mesh-vertex: 413개, Mesh-face: 368개)를 기준으로 본 방법론을 적용한 결과, Mesh-vertex와 Mesh-face의 인덱스가 왼쪽에서 오른쪽 순으로 정렬되었으며, 방향별 구조체 부재(횡방향 구조체: 16개, 종방향 구조체:25개) 생성에 필요한 point와 polyline을 추출할 수 있었음.

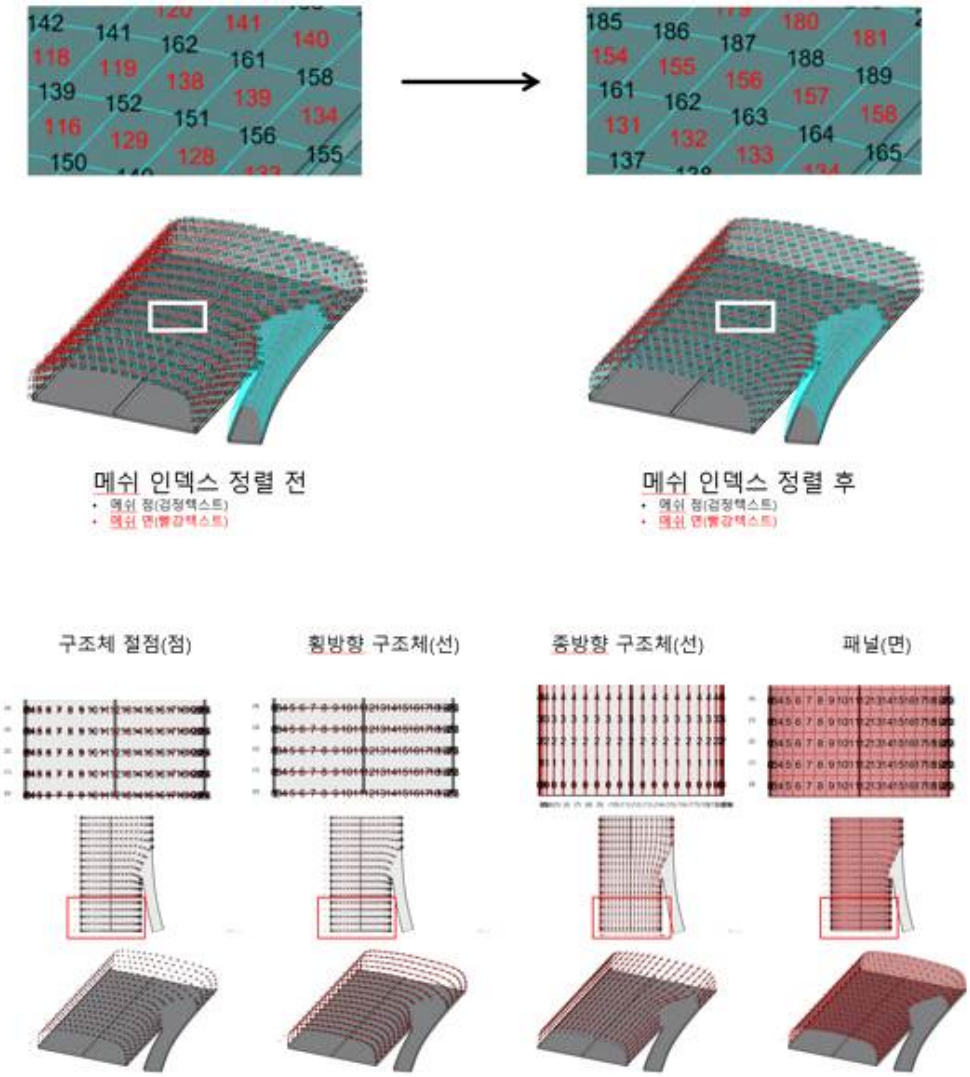


그림 24 터널형 방음벽의 사례를 활용한 방법론의 검증 결과 이미지

(2) 부재 및 센서 라이브러리 구축

▌터널 구조체 생성 알고리즘에 따라 배치될 부재(구조체, 방음패널 등)와 각종 센서의 형상 및 속성을 라이브러리로 구축함.

① 본 과제에서 BIM 저작도구로 활용한 VisualARQ는 부재별로 스타일(style)을 등록하여 라이브러리(library)화함. VisualARQ의 스타일은 Revit(Autodesk 社)의 패밀리(Family)와 동일한 개념임. 기존 BIM 저작도구에서 다루지 않는 방음판과 센서의 세부 스펙은 스타일의 파라미터(parameter)에 키(key), 밸류(value)로 구성된 딕셔너리(dictionary) 자료형으로 추가적으로 입력함.

- 주요 구조체(거더, 퍼린 등)를 구성하는 H-빔과 T-빔의 라이브러리를 KS 규격에 맞추어 생성함 [표 1, 표 2, 표 3]. 가변 H-빔은 거더의 각도에 유연하게 대응할 수 있는 부재로, 각도별로 라이브러리를 생성함 [표 4]. 기초는 구조 용량에 따라 두께를 달리하여 선택할 수 있도록 라이브러리를 생성함 [표 7].
- 방음패널은 구조체 간격을 고려하여 가로 2,000mm, 세로 1,000m으로 모듈화함 [표 5]. 일반, 투명, 태양광, 타일 방음패널로 구성됨.
- 센서는 종류별로 구분될 수 있도록 심볼릭한 기하형태로 표현함 [표 6]. 크기가 매우 작은 경우, 설계상의 시인성을 고려하여 일부 확대하여 표현함. 미세먼지, 자이로(경사), 온도, 모션, 가스 센서로 구성됨.

② 생성 라이브러리의 개수는 총 39종임(H-beam: 9종, T-beam: 9종, 가변 H-빔: 6종, 방음패널: 7 종, 센서: 5종, 기초: 3종).

- 구조 성능 분석에 의한 물량 절감에 대비하여 기존 방음패널에 활용되는 구조체 부재보다 다양한 사이즈의 부재를 라이브러리로 생성함.
- 방음패널 및 센서는 본 연구 계획에 포함되는 것만 생성함.

▌성과점검기준에 의한 질적 성과지표 달성 여부

① 관련 항목 및 검증 방법

- A-1-2 :방음터널 구성 주요부재의 라이브러리 생성
- 목표치 : 50%
- 달성치 : 100%
- 측정 및 검증 방법 : 생성 라이브러리 갯수 / 주요 부재 갯수 > 0.5

② 검증 결과

- 생성 라이브러리 개수 (시스템으로 생성 가능한): 기둥, 횡방향 빔 (래프터, 가변), 종방향 빔 (러너), 방음 패널, 센서, 기초 총 6개 항목 (Oval type 기준)

- 주요 부재 개수 (방음터널 모델링에 필요한): 기둥, 횡방향 빔 (래프터, 가변), 종방향 빔 (러너), 방음 패널, 센서, 기초 총 6개 항목 (Oval type 기준)
- 방음터널 모델링에 필요한 주요 부재를 모두 생성 가능하도록 라이브러리를 구성하였음. 생성 라이브러리 개수 / 주요 부재 개수 = 6/6 = 1로 성과 달성함.

표 1 라이브러리 리스트 표시 형식

스타일 등록 창			
스타일(패밀리) 명	사이즈명 세부내용	사이즈명 세부내용	사이즈명 세부내용

표 2 H-beam 라이브러리 리스트

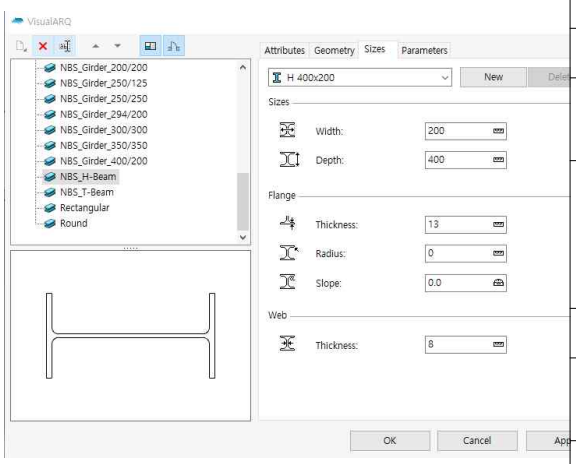
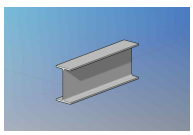
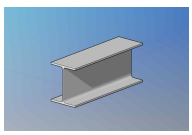
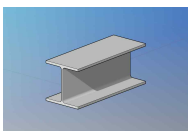
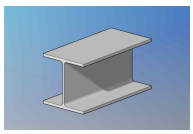
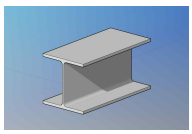
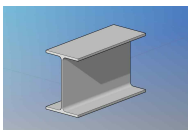
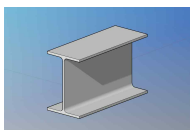
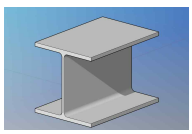
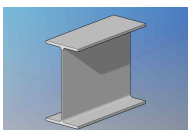
<table>
<tr><td rowspan="6"> 
</td><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>H 175x90</td><td>H 194x150</td><td>H 200x200</td></tr>
<tr><td>H-175x90x5x8 (r:9)</td><td>H-194x150x6x9 (r:13)</td><td>H-200x200x8x12 (r:13)</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>H 250x125</td><td>H 250x250</td><td>H 294x200</td></tr>
<tr><td>H-250x125x6x9 (r:12)</td><td>H-250x250x9x14 (r:16)</td><td>H-294x200x8x12 (r:18)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Beam Styles >> NBS_H-Beam</td><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>H 300x300</td><td>H 350x350</td><td>H 400x200</td></tr>
<tr><td></td><td>H-300x300x10x15(r:18)</td><td>H-350x350x12x19(r:20)</td><td>H-400x200x8x13 (r:16)</td></tr>
</table>

표 3 T-beam 라이브러리 리스트

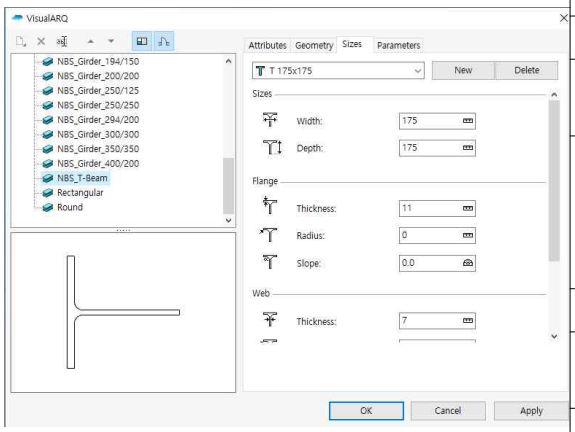
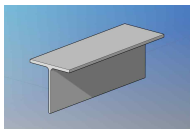
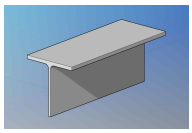
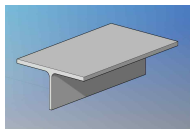
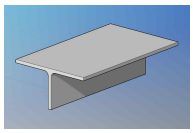
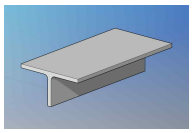
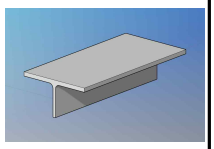
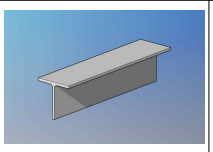
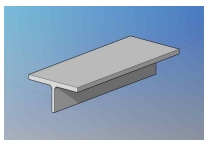
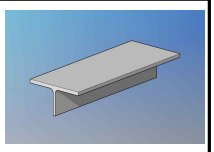
			
	T 175x175	T 200x200	T 150x300
	T-175x175x711 (r:14)	T-200x200x8x13 (r:16)	T-150x300x10x15(r:18)
			
	T 147x302	T 125x255	T 125x200
	T-147x302x12x12(r:18)	T-125x255x14x14(r:16)	T-125x200x9x14 (r:16)
			
Beam Styles >> NBS_T-Beam	T 125x125	T 104x202	T 100x200
	T-125x125x6x9 (r:12)	T-104x202x10x16(r:13)	T-100x200x8x12(r:13)

표 4 가변(Adjustable) H-beam

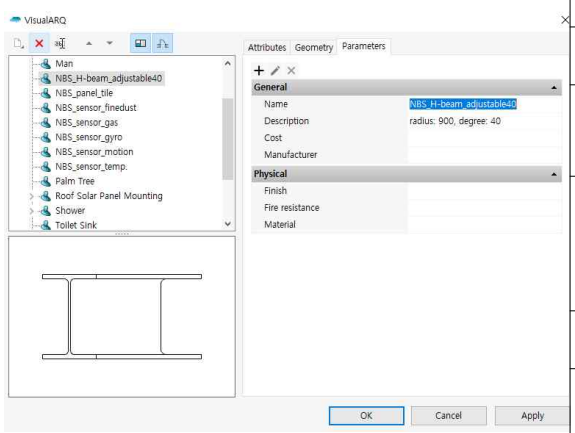
			
	H 300x300(90)	T 200x200(80)	H 300x300(70)
	H-300x300x10x15(r:18)	H-300x300x10x15(r:18)	H-300x300x10x15(r:18)
			
	H 300x300(60)	H 300x300(50)	H 300x300(40)
	T-147x302x12x12 H-300x300x10x15(r:18)	H-300x300x10x15(r:18)	H-300x300x10x15(r:18)
Element Styles >> NBS_H-Beam_adjustable			

표 5 기능성 방음패널 라이브러리

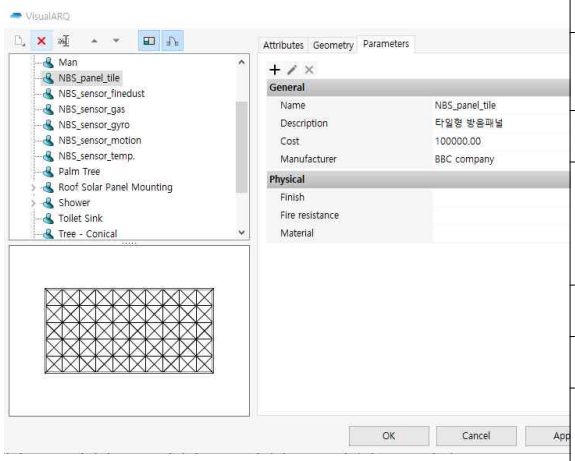
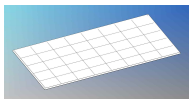
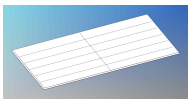
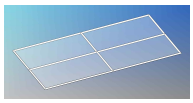
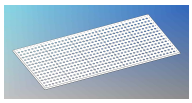
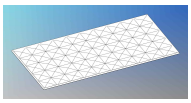
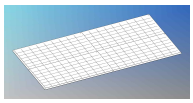
			
	NBS_panel_generic1	NBS_panel_generic2	NBS_panel_generic3
	일반 방음패널1	일반 방음패널2	일반 방음패널3
			
	NBS_panel_glass	NBS_panel_PMP	NBS_panel_tile
	투명 방음패널	타공 방음패널	타일 방음패널
			
Element Styles >> NBS_panel	NBS_panel_solar		
	태양광 방음패널		

표 6 센서 모듈 라이브러리

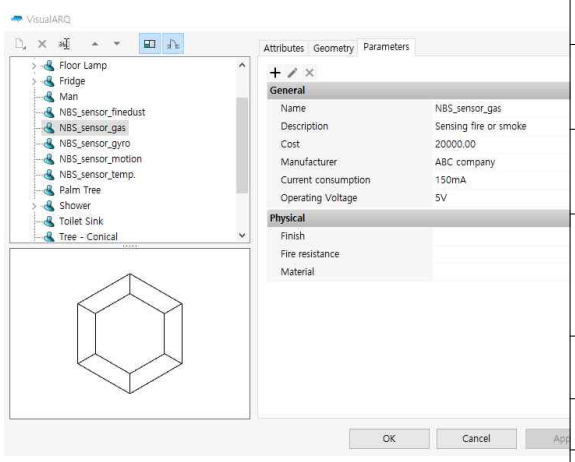
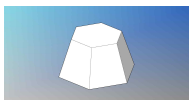
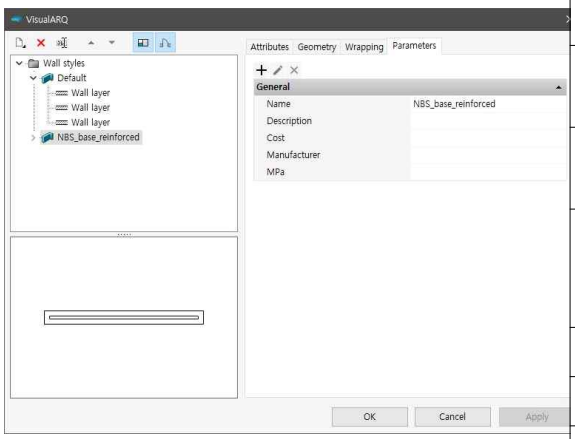
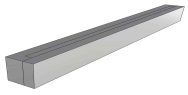
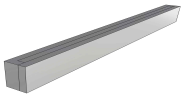
			
	NBS_sensor_finedust	NBS_sensor_gyro	NBS_sensor_temp
	미세먼지 센서	자이로(기울기) 센서	온도 센서
			
	NBS_sensor_motion	NBS_sensor_gas	
	모션 센서	가스(연기) 센서	
Element Styles >> NBS_sensor			

표 7 콘크리트 기초 라이브러리

			
	NBS_base_reinforced _THK400	NBS_base_reinforced _THK300	NBS_base_reinforced _THK250
	콘크리트 기초	콘크리트 기초	콘크리트 기초
Element Styles >> NBS_base_reinforced			

▌본 연구의 BIM 저작도구인 VisualARQ 이외에 다양한 상용 BIM 저작도구에서 사용 가능한 방음터널 부재의 라이브러리를 추가함 [그림 25]. 추가된 부재 라이브러리는 Revit에서 사용 가능하며 터널 구조체 생성 알고리즘에 따라 배치됨.

① 구조체 생성 알고리즘에 따라 변화하는 중심선에 대응하며 라이브러리를 배치하기 위하여 adaptive component 기능을 활용함. Adaptive component를 이용하여 단면의 규격은 KS 규격을 유지하며 구조체 중심선의 형태 변화에 대응하여 부재를 생성하고 배치할 수 있음 [그림 26].

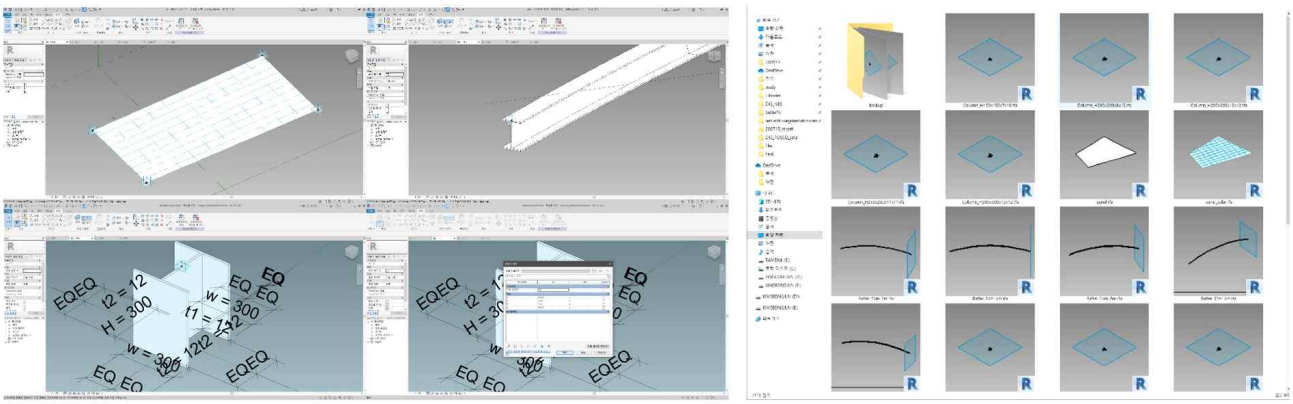


그림 25 Revit 환경에서 활용 가능한 부재 라이브러리

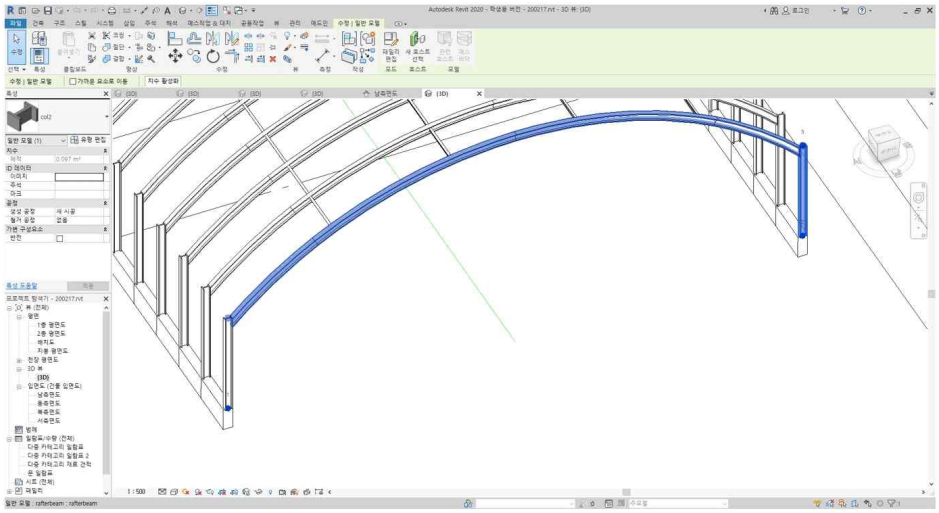


그림 26 Revit 환경에서 생성한 방음터널 구조체

(3) 부재 및 센서 배치 알고리즘 개발

❙ 터널 구조체 상에 부재 및 센서 라이브러리를 배치하는 알고리즘을 개발함. 부재 배치는 터널 구조체의 선형적 배열 특성을 반영함. 센서 배치는 센서의 공간적 감지 범위를 반영함.

① 횡방향/종방향 구조부재 라이브러리 매핑

– 횡방향/종방향 구조 부재 라이브러리를 구조체 중심선에 매핑함 [그림 27].

※ 구조 부재 라이브러리는 '부재 및 센서 라이브러리 구축' 결과물을 활용함.

– 부재 라이브러리가 매핑하지 않은 상태에서 구조체 중심선 간격 설정을 수행해야 컴퓨팅 부하가 적기 때문에 횡방향/종방향 구조체 매핑 on/off 기능 추가함.

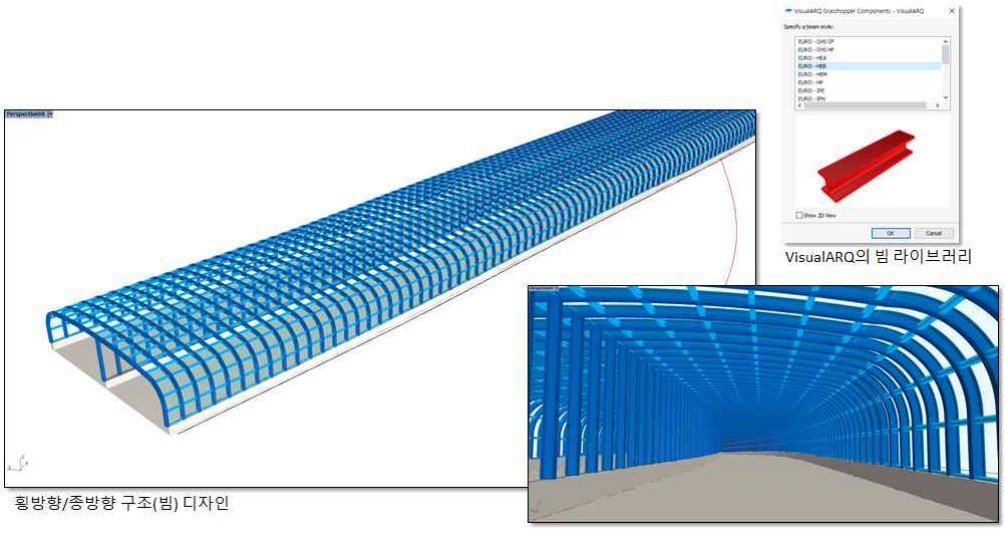


그림 27 횡방향/종방향 구조부재 라이브러리 매핑

② 설계 정보 추출 및 가시화

- 부재 제작 상의 제한 요소를 고려하여 부재 가시화에 반영함.
- 구조체는 운반 및 도금과 관련하여 일정 길이(12m) 이하로 생산되어야 함. 이에 해당하지 않는 부재를 표시하여 설계에 반영할 수 있도록 함 [그림 28].

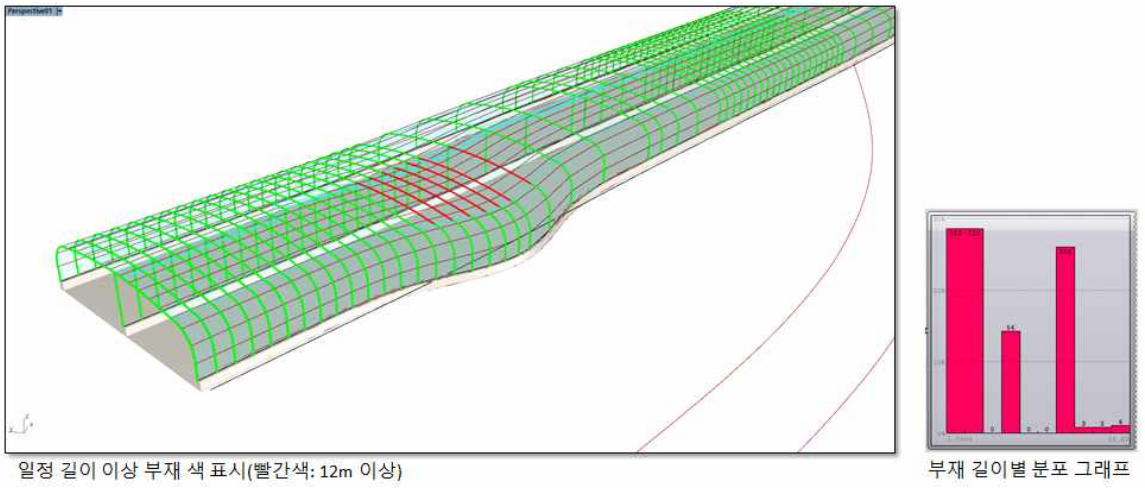


그림 28 설계 정보 추출 및 가시화

③ 방음터널 및 도로시설물에 적용 가능한 센서 유형 및 특징

- 센서 배치 알고리즘을 구현하기에 앞서 방음터널을 포함한 도로시설물에 적용되는 센서의 유형을 도출하기 위하여 관련 문헌 및 국제통상상품분류체계를 조사하였음[20)21)22)]. 방음터널에 주로 적용될 수 있는 센서는 표 8과 같이 분류됨.

표 8 용도별 센서의 분류와 생성 정보

분류	소분류	생성정보
역학	가속도(자이로센서)	구조체 가속도량
	압력	압력정보
	진동(모션센서)	진동정보
광센서	조도센서	터널 내 조도정보
온도	온도센서	온도정보
	써미스터	구조체온도정보
음향	음파센서	소음정보측정
	초음파센서	거리측정
화학	미세먼지센서	미세먼지량정보
	가스센서	유독가스정보
이미지	CCTV	영상정보

20) 강진아, 남상관, 권혁종, & 오윤석. (2009). 도시지상시설물 관리를 위한 최적 센서노드 배치 방법. 한국지리정보학회지, 12(4), 158-168.
21) 박주환, 한성호, 박재현, 박원규, 김현경, & 홍상우. (2012). 모바일 어플리케이션의 사용성 평가 방법 비교 분석. 대한인간공학회 학술대회논문집, 154-157.
22) 유지송. (2015). 도시시설물 센서정보 활용방안에 관한 연구. 석사학위논문. 안양대학교 일반대학원, 안양.

– 도출된 모든 센서는 방음터널의 주요 구조체 또는 패널에 구조적 영향을 거의 미치지 않으며 설치될 수 있지만 각 센서별 특징에 따라 배치되어야 하는 위치가 다름.

– 따라서 센서 배치 알고리즘을 이용하기 위하여 센서의 1) 설치 부위, 2) 유효 감지 범위, 3) 제약조건에 대한 선언이 이루어져야 함.

- 설치 부위 : 센서가 설치되어야 하는 부위. 구조체 또는 패널.
- 유효 감지 범위 : 센서가 감지할 수 있는 범위. m 로 명시.
- 제약조건 : 센서 설치 시 제약이 필요한 경우 추가적으로 명시. 명시된 제약조건을 위반하는 센서를 가시화함.

④ 방음터널 센서 배치 기능 구성

– 센서 배치 기능은 방음터널 파라메트릭 디자인 시스템과 동일한 환경인 Rhino3D 및 Grasshopper 환경에서 개발되었음. 디자인 시스템을 통해 방음터널 설계안이 생성된 후 센서가 설치될 구조체와 패널에 관한 정보가 추출됨. 추출된 방음터널의 정보와 추가적으로 입력되는 센서 정보는 센서 배치 알고리즘의 필수 입력값임. 센서 배치 알고리즘에서는 센서의 유효 감지 범위를 고려하여 최종적으로 센서의 배치안을 생성함 [그림 29].

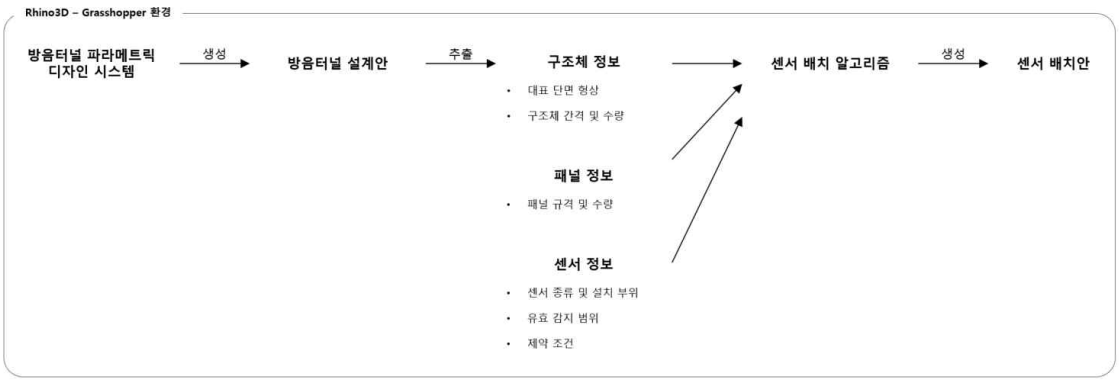


그림 29 방음터널 파라메트릭 디자인 시스템 및 센서 배치 알고리즘 기능 구성

⑤ 센서 배치 알고리즘

– 센서 배치 알고리즘은 1) 구조체 정보 및 패널 정보 추출, 2) 센서 정보 입력, 3) 대표 단면 및 패널 대상 센서 배치안 작성, 4) 유효 감지 범위를 고려한 센서 배치안 자동 생성, 5) 센서 배치안 가시화 과정으로 구성됨 [그림 30].

– 구조체 정보 및 패널 정보 추출

- 방음터널 파라메트릭 디자인 시스템에서 생성된 방음터널 설계안으로부터 구조체 및 패널의 정보를 추출함 [그림 31].
- 추출되는 정보에는 센서가 설치될 구조체 및 패널의 형상, 구조체 구간 간격, 수량 정보가 포함됨. 특히 간격에 관한 정보는 센서의 유효 감지 범위와 함께 센서 배치 간격을 정하기 위하여 필수적인 정보임.

– 센서 정보 입력

▪ 배치안을 작성하고자 하는 센서에 관한 정보를 기술하는 단계 [그림 32].

▪ 센서의 종류 및 설치하고자 하는 위치에 관한 정보, 센서의 유효 감지 범위, 제약조건에 관한 정보를 입력할 수 있음.

– 대표 단면 및 패널 대상 센서 배치안 작성

▪ 방음터널 설계안에서 추출된 대표 단면 혹은 패널을 대상으로 사용자가 센서의 설치 좌표를 직접 입력함 [그림 33]. 좌표 입력은 추출된 대표 단면 혹은 패널 상에 사용자가 포인트를 지정하는 방식으로 이루어짐.

– 유효 감지 범위를 고려한 센서 배치안 자동 생성

▪ 이전 단계에서 지정된 포인트로부터 추출된 좌표와 구조체 설치 간격 및 센서의 유효 감지 범위를 기반으로 자동으로 센서의 배치안 (센서 설치 좌표)을 생성함 [그림 34].

▪ 센서가 감지하지 못하는 음영지역을 제거하기 위하여 센서의 설치 간격은 반드시 유효 감지 범위 이하를 유지하도록 설정됨.

– 센서 배치안 가시화

▪ 생성된 센서 배치안 (센서 설치 좌표)에 미리 구축된 센서 라이브러리의 형상을 매핑하여 센서의 유효 감지 범위를 원형으로 가시화함[그림 35]

▪ 추가적으로 센서의 감지 범위를 3차원적으로 검토하기 위하여 원형 및 구형으로 가시화함. 센서의 평면적 배치 및 높이를 고려하여 감지 범위를 검토할 수 있음 [그림 36].

▪ 센서 정보 입력 단계에서 정의된 제약조건을 위반하는 배치안에 대해서는 다른 색상으로 표현하여 사용자가 즉각적으로 배치안을 수정할 수 있도록 함. 예를 들어 미세먼지 센서의 경우 환경부의 대기오염 측정망 설치·운영지침에 따라 1.5m ~ 10m 의 설치 높이를 준수하여야 함[23]. 이러한 제약조건을 위반하는 센서의 경우 표 24와 같이 다른 색상으로 가시화하여 사용자가 배치안을 수정할 수 있도록 함.

23) 환경부·국립환경과학원. (2018). 대기오염측정망 설치·운영지침.

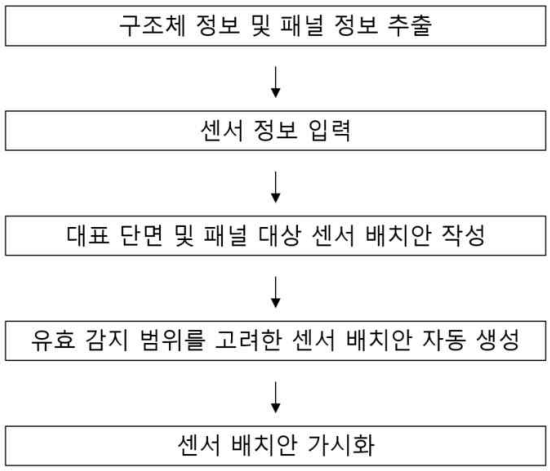


그림 30 방음터널 센서 배치 알고리즘

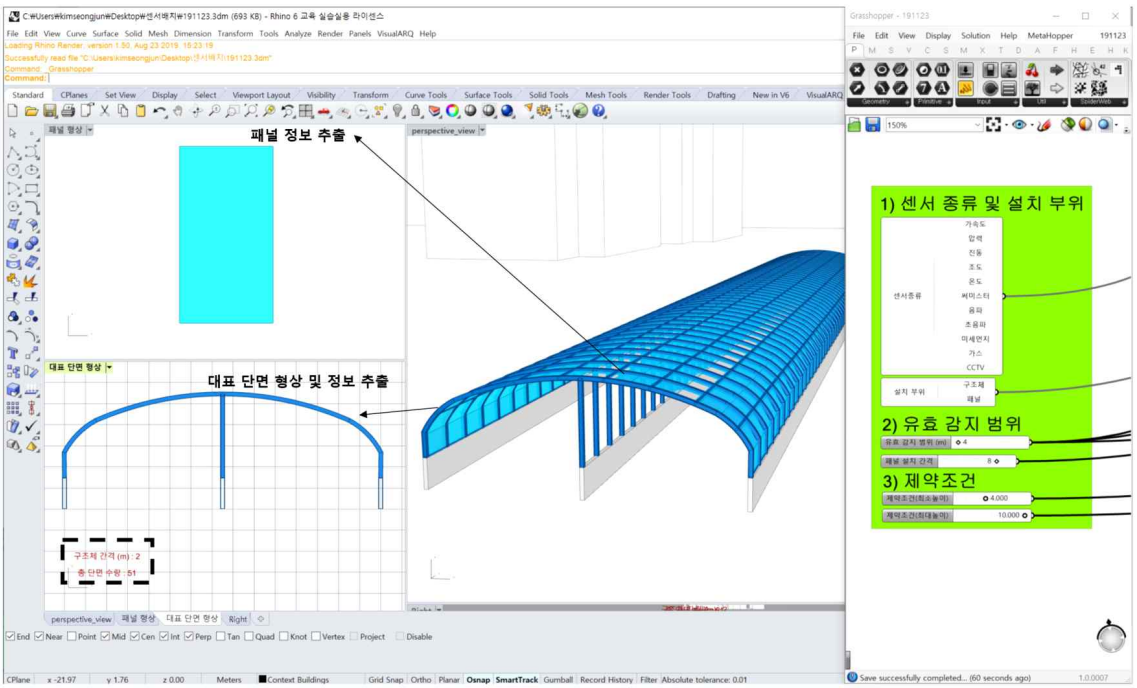


그림 31 구조체 정보 및 패널 정보 추출

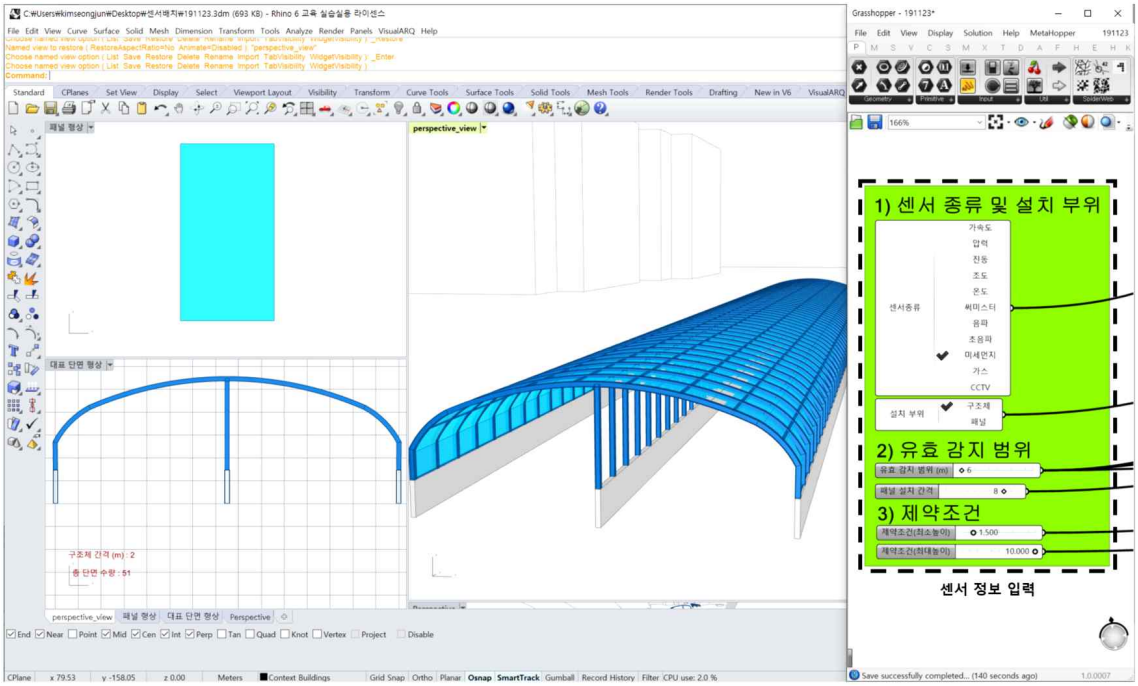


그림 32 센서 정보 입력

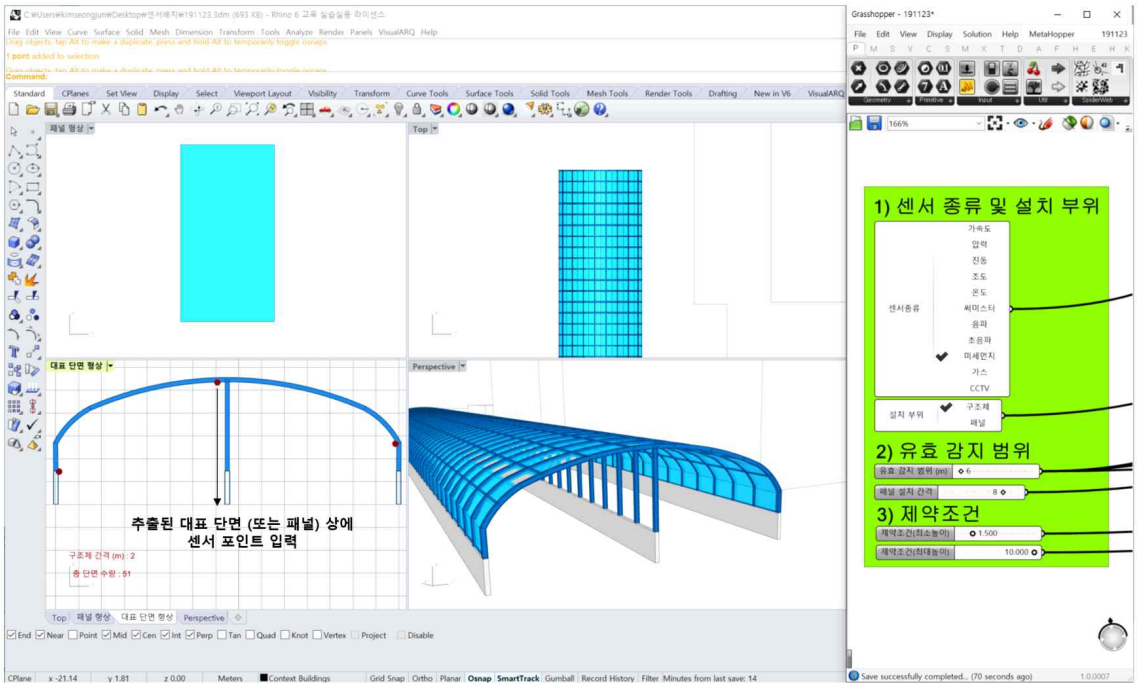


그림 33 대표 단면 및 패널 대상 센서 배치안 작성

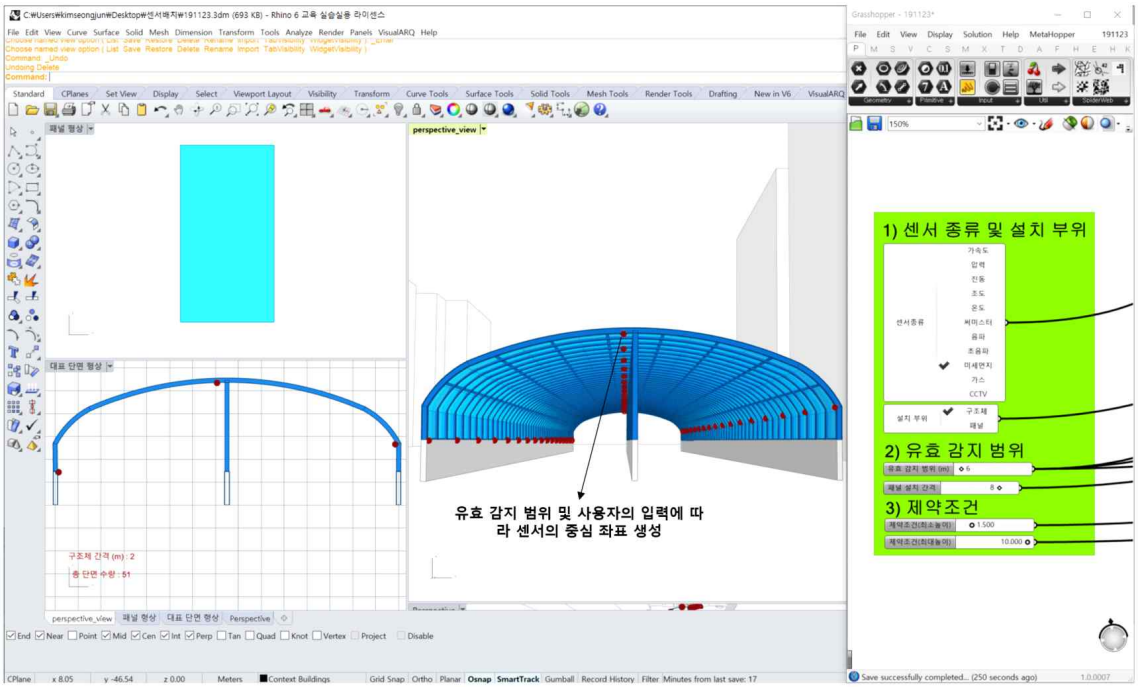


그림 34 유효 감지 범위를 고려한 센서 배치안 자동 생성

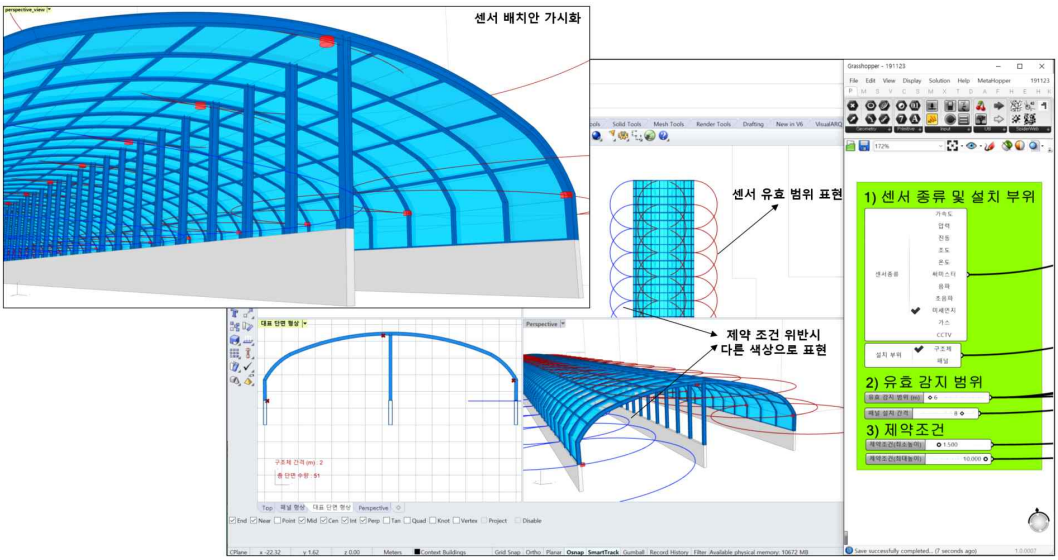


그림 35 센서 배치안 가시화

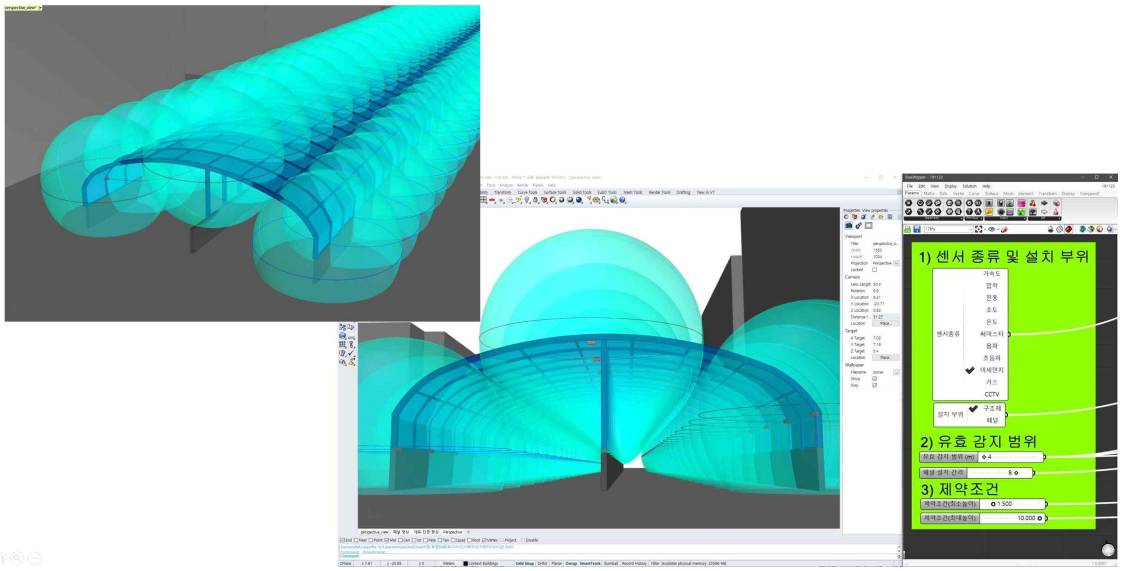


그림 36 센서 유효 감지 범위의 3차원적 가시화

▌AIA LOD 측정 기준 대비 디지털 모델 수준 분석[24)]

① LOD 개념은 미국 AIA(American Institute of Architects)에서 제시한 개념으로, 건설 산업의 실무자가 설계 및 시공 프로세스의 다양한 단계에서 BIM의 내용과 신뢰성을 매우 명확하게 지정하고 표현할 수 있는 기준임

② AIA는 LOD300의 수준을 다음과 같이 정의함

- 모델 요소는 모델 내에서 수량, 크기, 모양 위치 및 방향 측면에서 특정 시스템, 객체 또는 조립체가 그래픽으로 표시되는 것
- 비 그래픽 정보 또한 모델 요소에 첨부될 수 있음

③ BIM Forum에서는 다음과 같이 해석함

- 디지털 모델의 상태로 요소의 슈량, 크기, 모양, 위치 및 방향은 메모나 치수 설명과 같이 모델링 되지 않은 정보를 참조하지 않고 모델에서 직접 측정 가능한 상태
- 프로잭트 원점이 정의되고 요소는 프로젝트 원점과 관련하여 정확하게 위치한 상태
- 도면으로 출력할 수 있는 수준의 모델링이 가능한 상태

④ 즉, LOD300은 디지털 도구를 통해 수량, 크기, 모양, 위치, 방향이 확인할 수 있을 수준의 그래픽으로 표시되는 것을 의미하며, 본 연구에서는 모든 부재의 수량, 크기, 모양, 위치, 방향을 나타낼 수 있는 수준으로 규정함

⑤ 본 설계 자동화 프로그램은 도면 산출이 가능하므로, 수량, 크기, 모양, 위치, 방향의 확인이 가능하므로 LOD300이상의 모델링이 가능함.

24) BIM Forum. LOD | BIMFORUM. Available on: https://bimforum.org/lod/ (accessed on 23 November 2019).

▌ 성과점검기준에 의한 질적 성과지표 달성 여부

① 관련 항목 및 검증 방법

- A-1-1 : 사례분석에 기반한 대표 방음터널 유형 디지털모델 생성
- 목표치 : LOD 300
- 달성치 : LOD 300
- 측정 및 검증 방법 : LOD 측정 기준표

② 검증 결과

- LOD300 기준 : 디지털 도구를 통해 수량, 크기, 모양, 위치, 방향이 확인할 수 있을 수준의 그래픽
- 디지털 모델 생성 결과 : 방음터널 부재의 수량, 크기, 형태, 위치, 방향 모두 확인 가능하며 도면 산출 또한 가능함.
- 최종적으로 LOD 300 기준을 만족하여 성과 달성함.

3. 설계 및 제작 정보 지원 기술 구현

(1) 도면화 및 물량산출 알고리즘 개발

❙ 도면화 및 물량산출을 위해 부재의 형상 데이터를 추출 및 가공하는 알고리즘을 개발함.

① 도면화(1): 설계 정보 추출 및 가시화

– 같은 구조 유형이 적용되더라도 개별 개소의 도로의 높이와 폭이 다르므로 개별 구조체의 부재 치수는 다르게 적용됨.

– 설계자는 특정 횡방향 구조체의 설계 정보를 선택적으로 확인할 수 있으며, 이는 도면으로 반영될 수 있음 [그림 37].

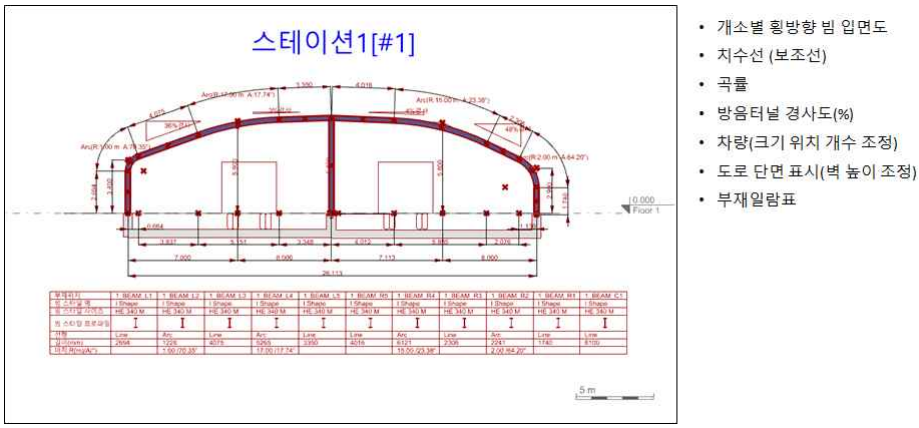


그림 37 도면화(1): 설계정보 추출 및 가시화

② 도면화(2): 도면 구성

– 개소별 횡방향 빔의 치수도면 및 부재 일람표, 디테일 레이아웃을 도면화함 [그림 38].

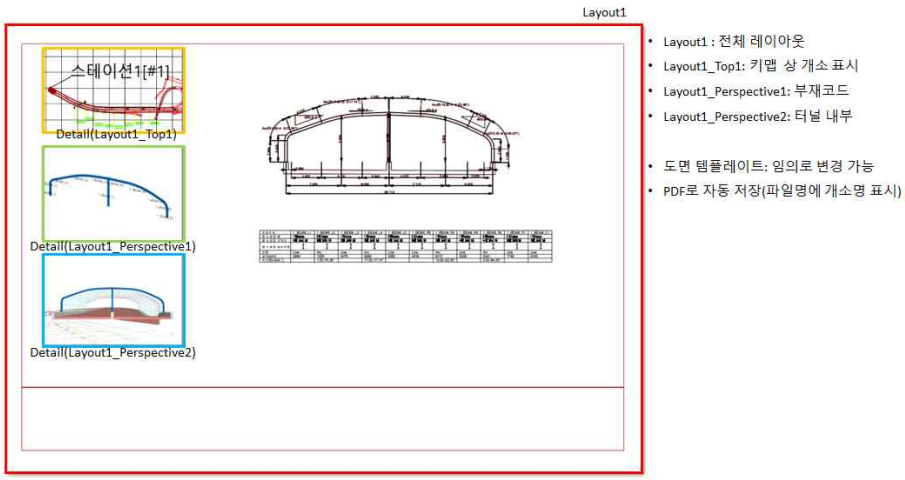


그림 38 도면화(2): 도면 구성

③ 도면화(3): PDF 출력

– 효율적인 도면 출력: 전 개소별 도면을 PDF로 한 번에 출력 가능함 [그림 39].

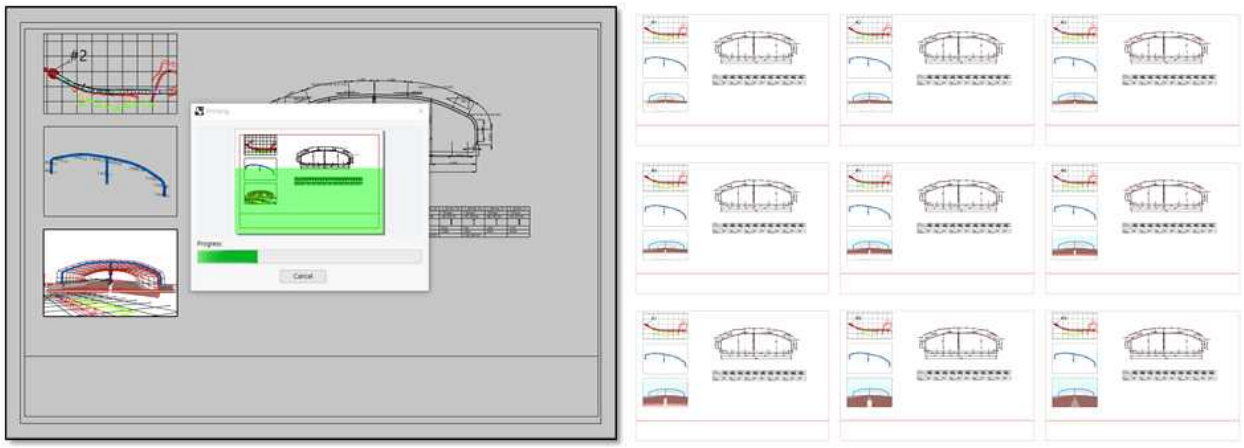


그림 39 도면화(3): PDF 출력

④ 도면화(4): DWG 내보내기

– 기존 작업 프로그램(AutoCAD)을 고려한 효율적인 파일 내보내기가 가능함 [그림 40].

– 전 개소별 도면을 Rhino 3D 파일 내에서 한번에 출력 가능함.>>DWG로 Export 후 AutoCAD로 import 하여 기존 업무 방식을 적용할 수 있음.

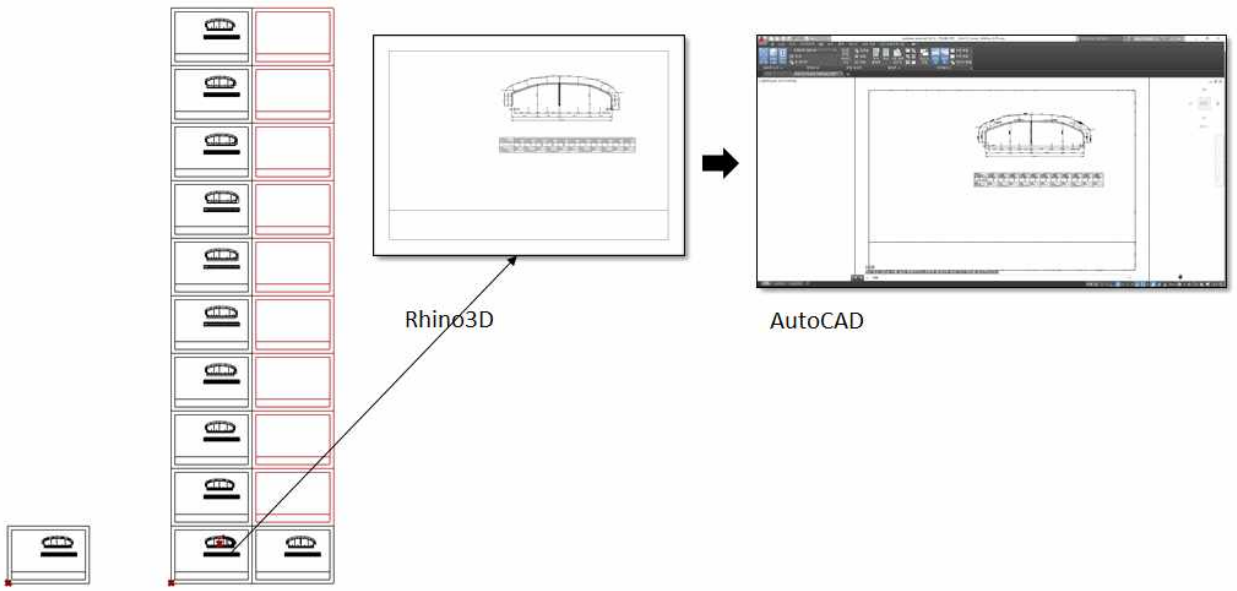


그림 40 도면화(4): DWG 내보내기

⑤ 물량산출서 및 부재 일람표 자동 생성

- 개소별 횡방향 부재 일람표(물량 산출서)를 CSV 형식으로 내보내기하여 Excel에서 활용 가능함.
- H 빔의 패브리케이션을 위해 필요한 길이 및 곡률 정보에 대한 항목을 추가하여 절단 및 절곡 가공 과정에서 활용할 수 있도록 제공함 [그림 41].
- 생성된 부재 일람표는 추후 항목별 비용 및 방음터널 건설로 인한 환경적 영향력을 검토하는 과정에서 활용됨.

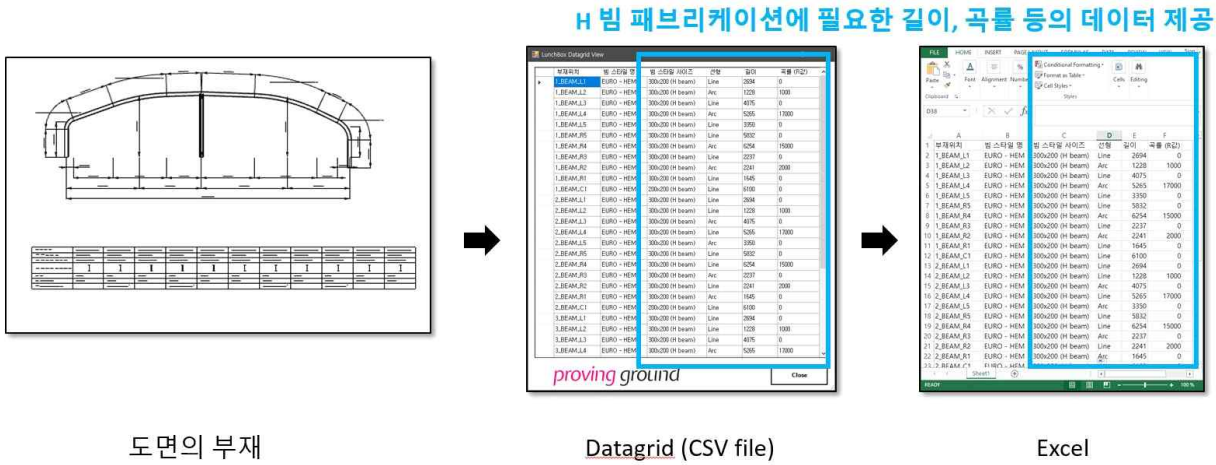


그림 41 물량산출서 및 부재 일람표 자동 생성

⑥ 항목별 비용 및 환경적 영향력 검토

- 방음터널의 자재 생산, 가공, 시공 등 각 과정에서 발생하는 비용 및 환경적 영향력에 대한 검토가 가능함. 환경적 영향력을 측정하기 위하여 온실가스의 주요 구성요소인 CO2의 발생량을 추정하여 방음터널로 인한 총 환경적 영향력을 검토할 수 있음.
- 비용과 환경적 영향력을 산출하기 위하여 1) 단계별 소요 자재 및 작업량, 2) 단위 비용 및 CO2 발생량에 관한 데이터가 필요함.
- 단계별 소요 자재 및 작업량에 관한 정보는 앞서 생성된 부재 일람표(물량 산출서)를 통해 확보 가능함.
- 단위 비용 및 CO2 발생량 데이터의 경우 기존 방음터널 업체의 자료, 한국환경산업기술원 (KEITI)의 LCI 데이터베이스를 참고하여 표 9와 같이 구축함[25)26)].
- 각 단계에서 요구되는 자재, 작업의 양과 단위 비용 및 CO2 발생량을 곱하여 각 단계마다의 비용, CO2 발생량을 산출할 수 있으며 전 단계를 고려하여 합산하여 최종적으로 방음터널 건설로 인한 비용 및 환경적 영향력 (CO2 발생량)을 측정함.

25) Kim, S., & Kim, S. A. (2020). Framework for Designing Sustainable Structures through Steel Beam Reuse. Sustainability, 12(22), 9494.
26) Korea LCI DB. Available online: http://www.epd.or.kr/eng/lci/lciIntro00.do (accessed on 16 July 2019).

– 비용 및 CO2 발생량 산출 기능을 스크립팅 언어인 Python을 이용하여 작성하였음. 항목별 비용 및 CO2 발생량 산출 결과는 Excel 형태로 내보내기하여 설계자가 검토 과정에서 활용할 수 있도록 함 [그림 42].

표 9 방음터널 항목별 비용 및 CO2 발생량

단계	발생원	설명	값	단위
건설, 해체	크레인카	스테이션 당 작업시간	0.536	h/station
	크레인카	5톤 크레인카 연비	5.1	L/h
	디젤 연료	CO2 발생량	2.677	kg/L
	-	건설 비용	429	USD/ton
	-	해체 비용	383.47	USD/ton
가공	밴드쏘우머신	전력소비량	7.2	kW
	밴드쏘우머신	Work time per unit	1/4000	hour/ea
	전기	전기 생산 CO2 발생량	0.495	kg/kWh
	밴드쏘우머신	절단 CO2 발생량	0.0007974	kg/ea
	-	절단 비용	289.02	USD/ton
	벤딩머신	전력소비량	8.4	kW
	-	단위 길이 당 작업 시간	1/1080	h/m
	벤딩머신	단위 길이 당 CO2 발생량	0.00385	kg/m
	-	절곡 비용	784.48	USD/ton
제조	용광로	CO2 발생량	2340	kg/ton
	-	자재 구입 비용	689.95	USD/ton
운송	트럭	25톤 트럭 연비	23	L/h
	디젤 연료	CO2 발생량	2.677	kg/L
	-	운송 비용	84.89	USD/h

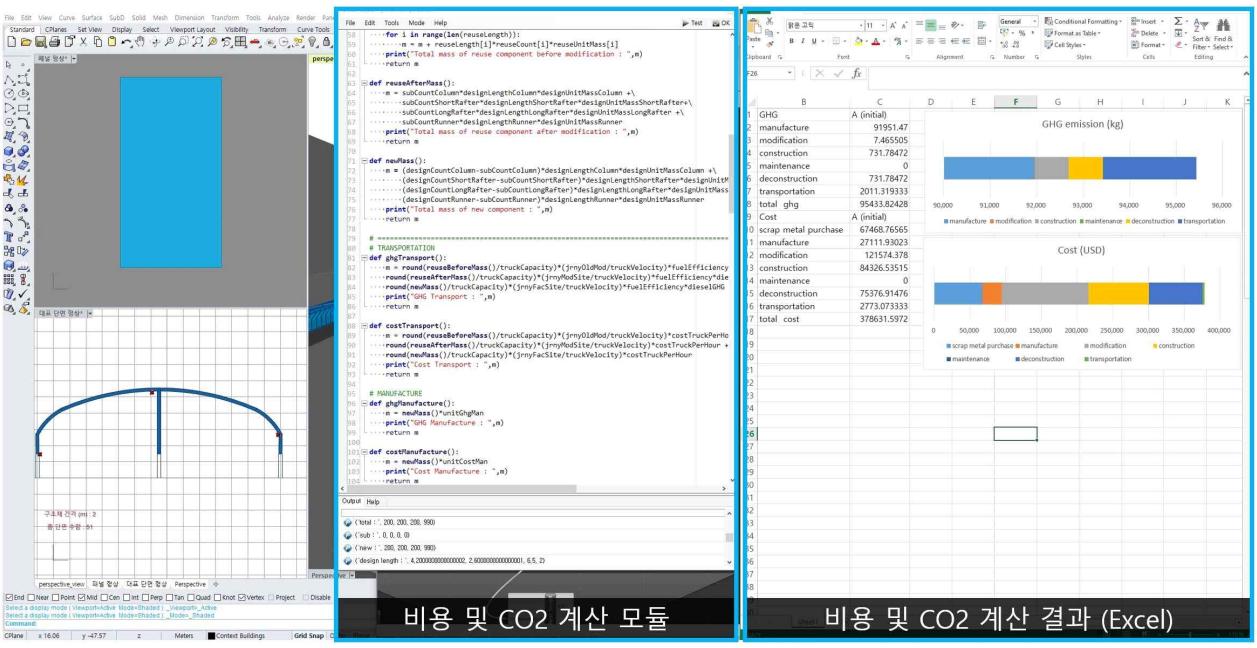


그림 42 방음터널의 항목별 비용 및 환경적 영향력 (CO2 발생량) 산출 기능

(2) 디지털 패브리케이션 지원 알고리즘 개발

▌디지털 패브리케이션 기법과 부재 및 재료 형상을 고려한 고유의 툴패스를 생성하는 알고리즘을 개발함.

① 디지털 패브리케이션 기법

- FDM 방식의 3D 프린터
  - 열가소성 필라멘트를 융용 및 압출하여 프린터 노즐이 출력 영역에 레이어별로 적층하며 3D 개체를 형성하는 방식을 취함.
  - 100만원 미만으로 판매되는 보급형 취미 프린터부터 250만 원 정도에 판매되는 중급 사용자용 프린터까지 범주를 둠.
  - FDM 방식의 프린팅은 다른 3D 프린팅 방식보다 해상도와 정확도가 낮으므로 기본 개념 증명 모델과 정제된 프로토타입, 최종 결과물의 출력보다 간단한 부품의 빠르고 저렴한 프로토타이핑에 적합함.

② 부재 형성 알고리즘

- Rhino+Grasshopper를 활용한 부재 및 형상 형성 알고리즘
  - 2.1에서 서술한 것과 같이, Rhino 상에서 기준 커브를 입력받아 방음터널의 형상을 구현하는 알고리즘을 Grasshopper를 활용하여 작성하였음.
  - Grasshopper의 알고리즘을 통해 구현된 방음터널의 각 부재는 Rhino 개체로 변환되며, 이는 3dm 형식의 파일임.
  - 툴패스의 형성을 위하여 3dm 형식의 파일을 stl(stereolithography)형식으로 변환하여 저장함.

③ 툴패스 생성

- 툴패스(Tool path)는 희망하는 부품 형상으로 가공하기 위한 공구 중심의 운동 궤적을 일컫는 것임.
- 디지털 패브리케이션을 수행하기 위하여 툴패스를 생성할 필요가 있음.
- Rhino+Grasshopper를 활용하여 형성된 개체는 Grasshopper 내부에서 3D 프린팅을 위한 툴패스 형성 알고리즘을 통하여 출력 가능한 코드를 추출할 수 있음 [그림 43].

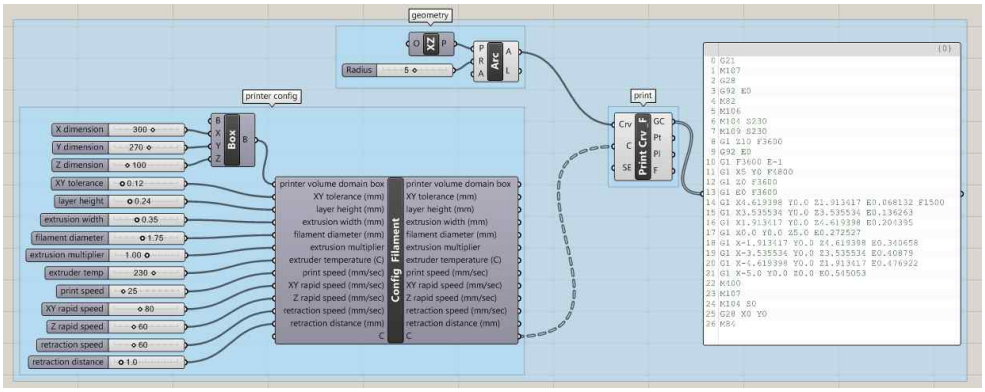


그림 43 Grasshopper - G-Code 형성 알고리즘과 G-Code 형식

- 하지만 특정한 3D 프린터를 사용하기에 적합한 툴패스 형성을 위하여 3DWOX, Cubicreator와 같은 해당 3D 프린터 전용 지원 프로그램을 활용함.
  - 3DWOX에서는 G-code 형식의 툴패스를, Cubicreator에서는 hfb 형식의 툴패스를 생성하는 알고리즘을 내부 기능에서 지원함.
  - Grasshopper를 활용하여 추출한 G-Code는 3D 프린팅 과정 중에 발생할 수 있는 오류를 사전에 방지하기 힘든 단점을 보임.
  - 따라서 프린터 사에서 제공하는 전용 지원 프로그램을 활용하여 수정된 툴패스를 확보하는 방법을 취함.

④ Mock-Up 모형 제작

- 3D 프린터를 활용한 출력 진행:

```
366723 G0 F10800 X159.934 Y88.941
366724 ;TYPE:SKIN
366725 ;EXTRUDER : 0
366726 G1 F2400 X159.845 Y88.569 E430.13959
366727 G1 X160.412 Y88.570 E430.15288
366728 G1 X160.447 Y88.039 E430.16616
366729 G1 X161.049 Y88.075 E430.17944
366730 G1 X161.084 Y87.545 E430.19274
366731 G1 X161.686 Y87.581 E430.20608
366732 G1 X161.721 Y87.050 E430.21940
366733 G1 X162.160 Y87.206 E430.23489
366734 G1 F1800 E424.23489
366735 G0 F10800 X164.330 Y96.165
366736 G1 F1800 E430.23489
366737 G1 F2400 X164.455 Y96.572 E430.24824
366738 G1 X163.852 Y96.535 E430.26155
366739 G1 X163.818 Y97.067 E430.27485
366740 G1 X163.374 Y96.906 E430.29056
366741 G1 F1800 E424.29056
366742 G0 F10800 X149.330 Y89.666
366743 ;TYPE:WALL-INNER
366744 ;EXTRUDER : 0
366745 G1 F1800 E430.29056
366746 G1 F2400 X148.274 Y89.312 E430.32760
366747 G1 X147.245 Y88.966 E430.36371
366748 G1 X149.330 Y89.666 E430.43686
366749 G1 F1800 E424.43686
366750 G0 F10800 X146.260 Y97.918
366751 G1 F1800 E430.43686
366752 G1 F2400 X146.531 Y98.009 E430.44637
366753 G1 X145.129 Y97.539 E430.49555
366754 G1 X144.822 Y97.436 E430.50632
366755 G1 X145.473 Y97.654 E430.52915
366756 G1 X146.260 Y97.918 E430.55676
366757 G0 F10800 X143.037 Y96.836
366758 G1 F2400 X143.677 Y97.051 E430.57922
366759 G1 X141.981 Y96.482 E430.63872
366760 G1 X143.037 Y96.836 E430.67576
366761 G0 F10800 X143.164 Y96.457
366762 ;TYPE:WALL-OUTER
366763 ;EXTRUDER : 0
366764 G1 F2400 X144.193 Y96.802 E430.71186
366765 G1 X145.095 Y94.116 E430.80610
366766 G1 X145.466 Y93.011 E430.84487
366767 G1 X145.837 Y91.907 E430.88360
366768 G1 X146.538 Y89.817 E430.95692
366769 G1 X146.738 Y89.218 E430.97793
366770 G1 X145.431 Y88.779 E431.02378
366771 G1 X144.274 Y88.391 E431.06437
366772 G1 X144.528 Y87.634 E431.09093
```

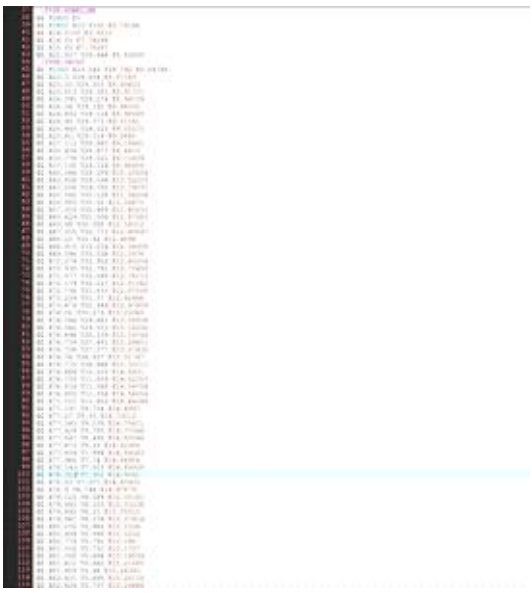


그림 44 형성된 툴패스(toolpath) : G-Code 형식과 hfb 형식

- 출력하는 모형은 Rhino+Grasshopper를 활용하여 형성된 방음터널의 약 1/10 길이에 해당하는 부분으로 설정함.
- 3D 프린터의 출력 규격을 고려하여 실물 크기의 1/10의 축적으로 모델링을 조정하고, 출력의 원활함을 위하여 부재들을 분할하고 각각의 stl 파일로 변환 후 툴패스를 추출함 [그림 44].
- 분할한 stl 파일의 툴패스를 각 Sindoh DP200 / Cubicon 310F 3D 프린터를 활용하여 출력을 진행함 [그림 45].

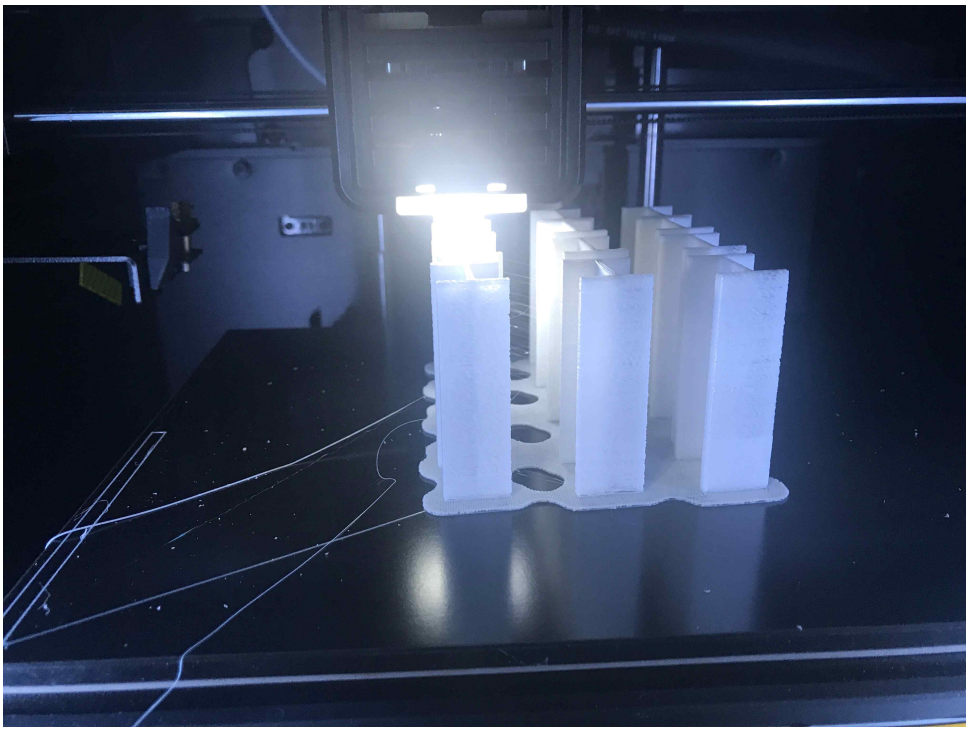


그림 45 3D 프린터를 활용하여 부재를 출력하는 모습

– 출력된 부재별 분류:

- 출력한 부재들을 종류와 위치별로 분류하여 접합 및 조립 시 용이하도록 함 [그림 46].
- 분류 과정에서 출력이 불량한 결과물을 선별하여 재출력을 진행함.
- 출력된 부재들은 Beam, Girder, Stiffener이며 이에 따라 분류를 진행함.



그림 46 출력된 부재들의 종류별 위치별 분류



그림 47 방음터널 단면 프로파일과 같은 형태의 부재 접합을 통한 구성

- 접합 및 조립:
  - Beam - Girder부를 접착제를 사용하여 방음터널 단면 프로파일과 형태를 구성.
  - 이후, 사이 Beam+Stiffener - 프로파일의 접합을 진행하여 전체적인 방음터널의 형태를 구성함 [그림 47].
  - 출력 시 각기 다른 색상의 필라멘트를 사용하였으므로, 통일감의 형성을 위하여 조립 후 도색을 진행함 [그림 48].



그림 48 조립 후 도색 완료한 방음터널 모형 (1/7 축소모형)

4. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증

(1) 파일롯 프로젝트 구현

▌방음터널의 실제 프로젝트를 토대로 1차년도에 개발된 시스템을 적용해 가상의 대지에 방음터널을 설치하기 위한 설계를 진행함

① 방음터널 설치 부지 선정

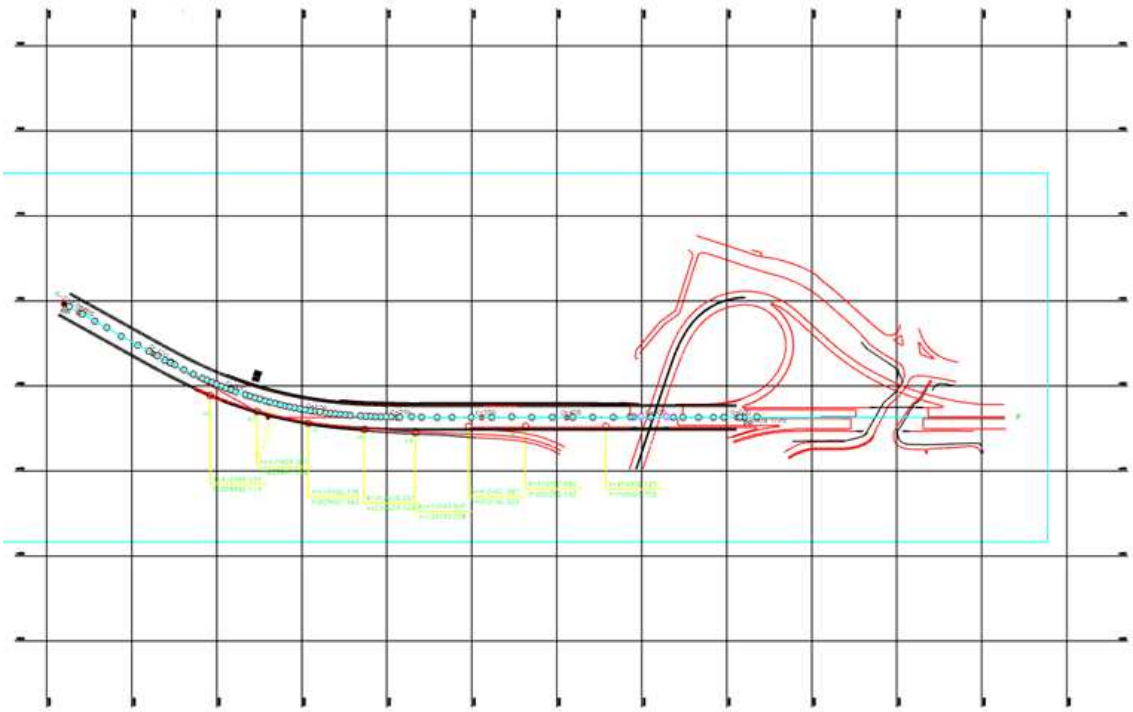


그림 49 실제 프로젝트를 토대로 가정한 방음터널 설치 도로

- 방음터널을 설치할 위치로 가정한 도로의 형상 [그림 49].
- 우측 IC의 합류지점을 기준으로 100m 좌측지점부터 300m길이의 방음터널 설치 예정
- 방음터널이 설치되는 도로의 기울기는 수평으로 가정

② 방음터널 형태 선정

- 방음터널의 형상을 결정하기 위한 도로 중심선 도출 및 도로 중심선 기준의 양 끝선 생성 [그림 50].

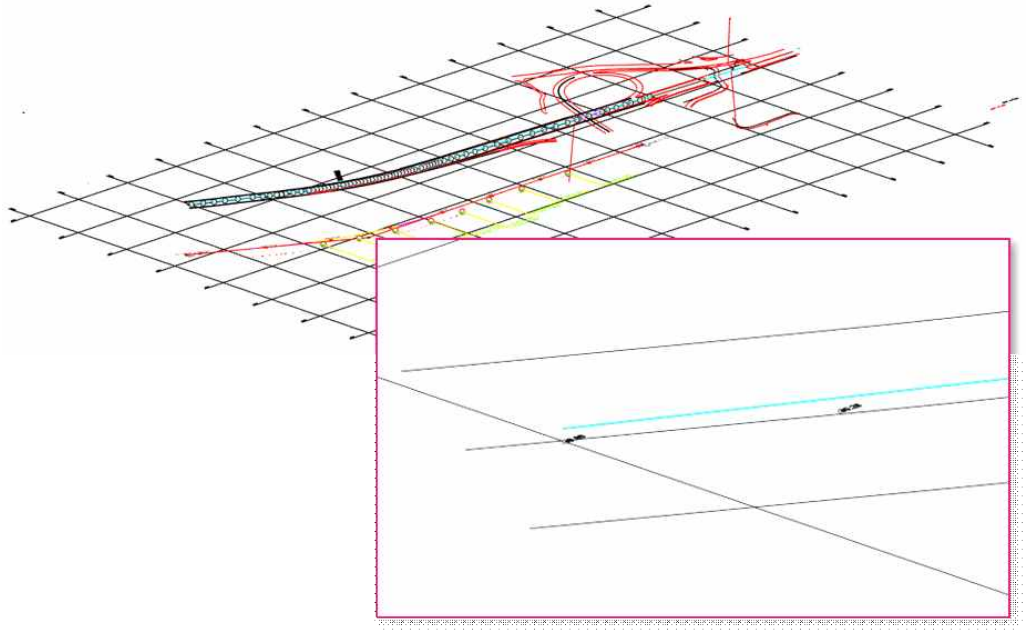


그림 50 방음터널 설치 대상 도로의 중심선 도출 및 도로 양 끝선 생성

- 횡방향 형상과, 종방향의 형상 두 가지 형태를 기준으로 방음터널의 전체 형상을 결정함
  - 방음터널 횡방향 형상: Curved Roof Type, Roof Type, Tilting Roof Type, Oval Type중 Oval Type으로 선정하며, 차량 진입 유효높이, 최고 높이와 같은 구속조건 필요.
  - 방음터널 종방향 형상: 방음터널 종방향 형상은 방음터널이 설치되는 도로와 도로 중심선을 기준으로 생성함.
- 방음터널의 차량 진입 유효높이 3.4m, 방음터널 고점 높이 5m 반영

③ 방음터널 형태 생성 및 도면화

- 방음터널 횡방향의 형상을 생성한 후, 형상에 부재를 매핑 [그림 51].
- 종, 횡방향 적용 부재는 방음터널 부재 라이브러리를 구축한 데이터를 기반으로 적용.
- 파일롯 프로젝트에서는 종, 횡방향 부재로 H-Beam으로 방음터널 구성 부재를 설정.

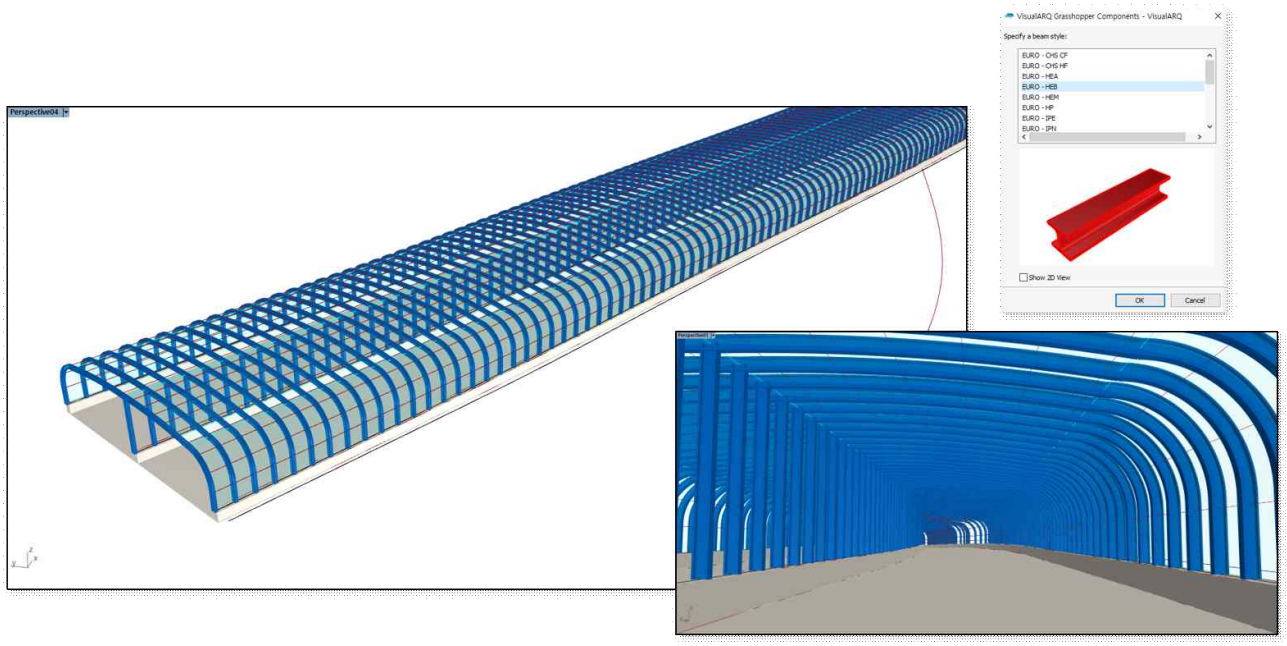


그림 51 방음터널 횡방향 형태 생성과 부재 적용

- 방음터널 종방향의 형상을 생성한 후, 형상에 부재를 매핑 [그림 52].

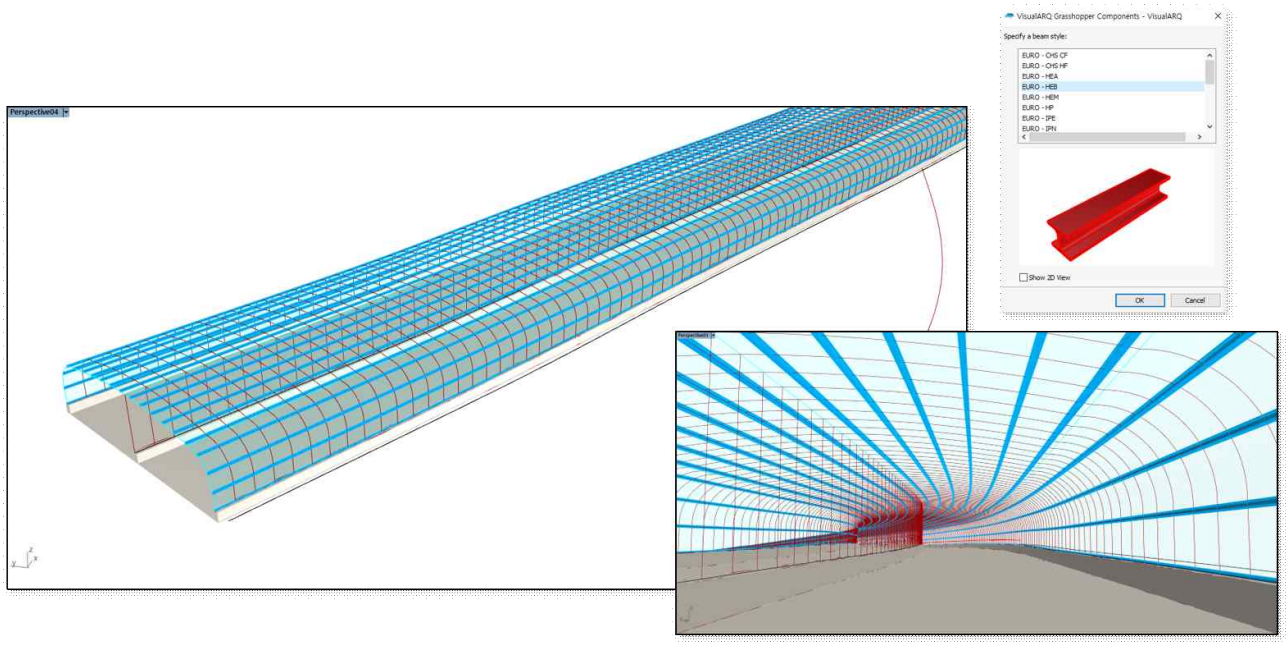


그림 52 방음터널 종방향 형태 생성과 부재 적용

- 종, 횡방향 부재 생성 후, 구조부재를 표현하고, 설계자의 의도와 부합 여부 확인 [그림 53]
- 설계자의 의도와 부합하지 않는 부분은 형상 선택 단계에서 수정 후 부재 재 반영
- 부재를 처음부터 매핑하는 경우 연산적 부하가 발생하기 때문에 형상 확정 후 부재 매핑 진행

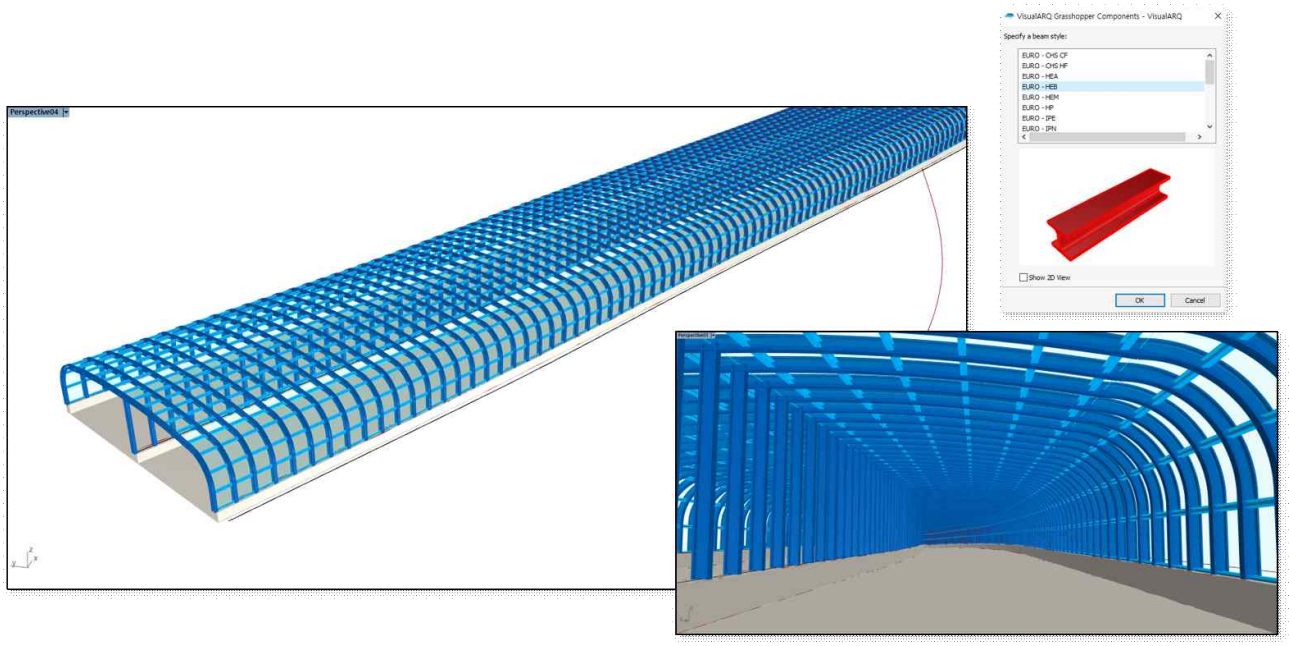


그림 53 방음터널 종, 횡방향 부재 생성 후 형태 확인 과정

- 방음터널 설치 구간 중, 피난 차선 필요 시, 주머니 차선 생성 [그림 54]
- 주머니 차선 생성 시 일부 부재 길이가 12M가 초과하는 경우, 해당 부분 마크업

※ 방음터널 부재는 생산과 운반의 문제로 인해 최대 12M 길이 이내로 생산 가능

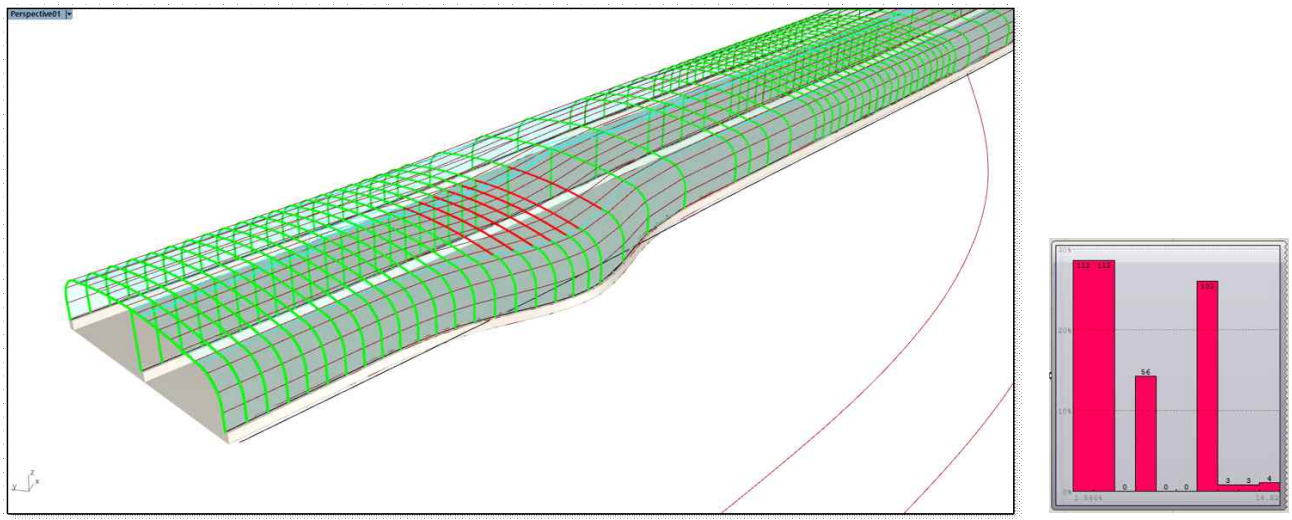


그림 54 방음터널 종, 횡방향 부재 생성 후 형태 확인 과정

- 방음터널 내부 구조물 및 장애물로 인한 기둥 간격 변경 대응 가능 [그림 55]
- 실제 사례에서 구간 길이 변경의 구조적 강성에 따라 다르지만, 일반적으로, 3M를 초과하지 않으며, 최소 1.5M 이상.

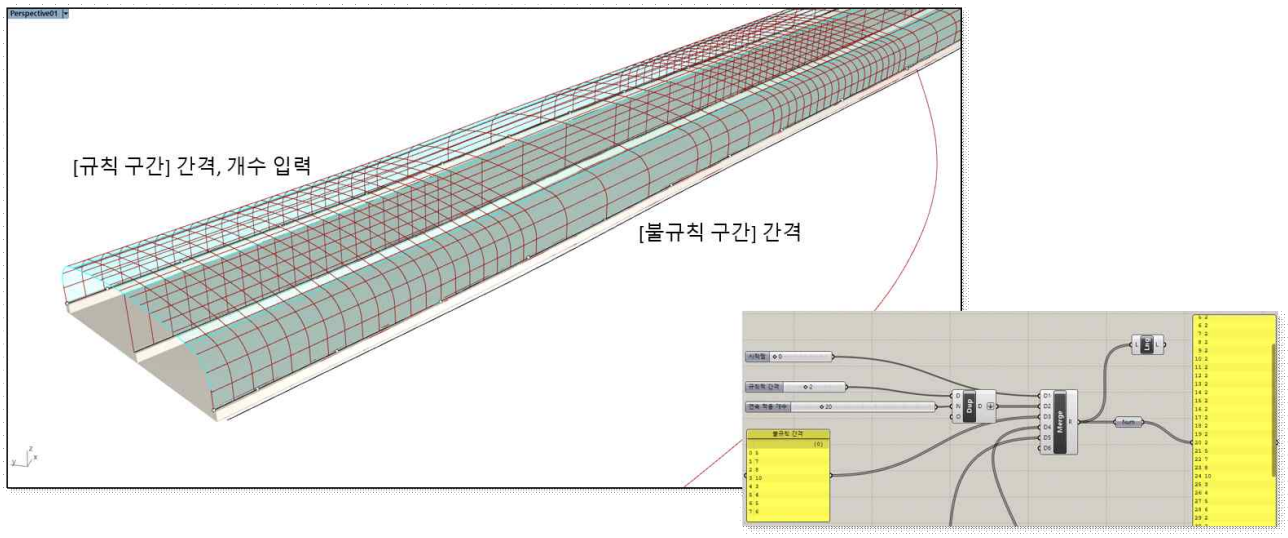
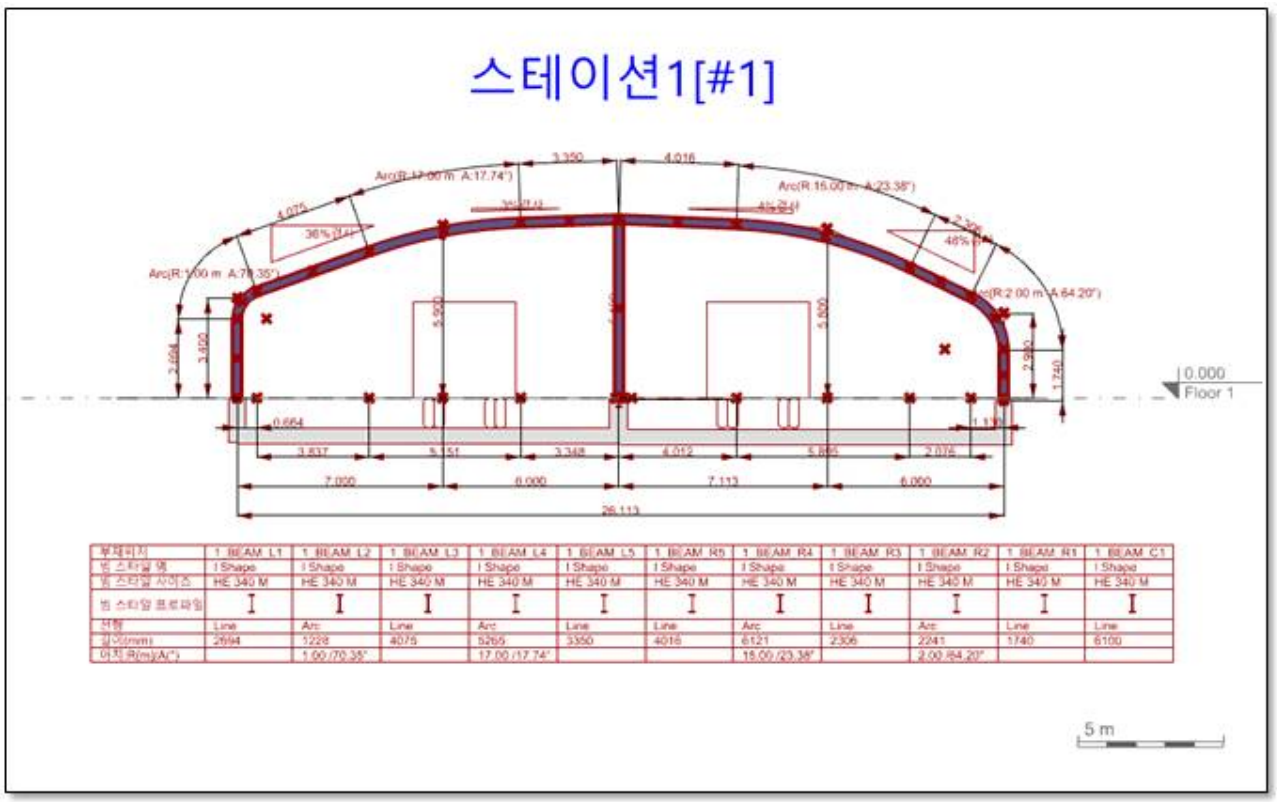


그림 55 방음터널 내부 장애물로 인한 기둥 간격 변경

- 방음터널 디지털 모델의 생성이 완료된 후 방음터널의 횡단면 기준 도면 산출
- 방음터널 도면은 형태가 다른 경우는 형태별로, 형태가 동일하다면 일정 수량별로 ‘스테이션’으로 구분함
- 각 스테이션별 도면 산출 및 투시도 가시화 가능 [그림 56, 그림 57, 그림 59].
- 도면의 가시성 향상을 위하여 도면 자동 생성 전 텍스트 표기법 (포맷, 형태) 등을 사용자가 조정할 수 있도록 함



부재이름	1 BEAM L1	1 BEAM L2	1 BEAM L3	1 BEAM L4	1 BEAM L5	1 BEAM R5	1 BEAM R4	1 BEAM R3	1 BEAM R2	1 BEAM R1	1 BEAM C1
빔 스타일 명	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape	I Shape
빔 스타일 사이즈	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M	HE 340 M
빔 스타일 프로파일	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
선형	Line	Arc	Line	Arc	Line	Line	Arc	Line	Arc	Line	Line
길이(mm)	2694	1228	4075	5265	3350	4016	6121	2306	2241	1740	6100
아치 (m)/(A°)		1.00 /70.35°		17.00 /17.74°			15.00 /23.38°		2.00 /64.20°		

그림 56 방음터널 스테이션별 도면 산출

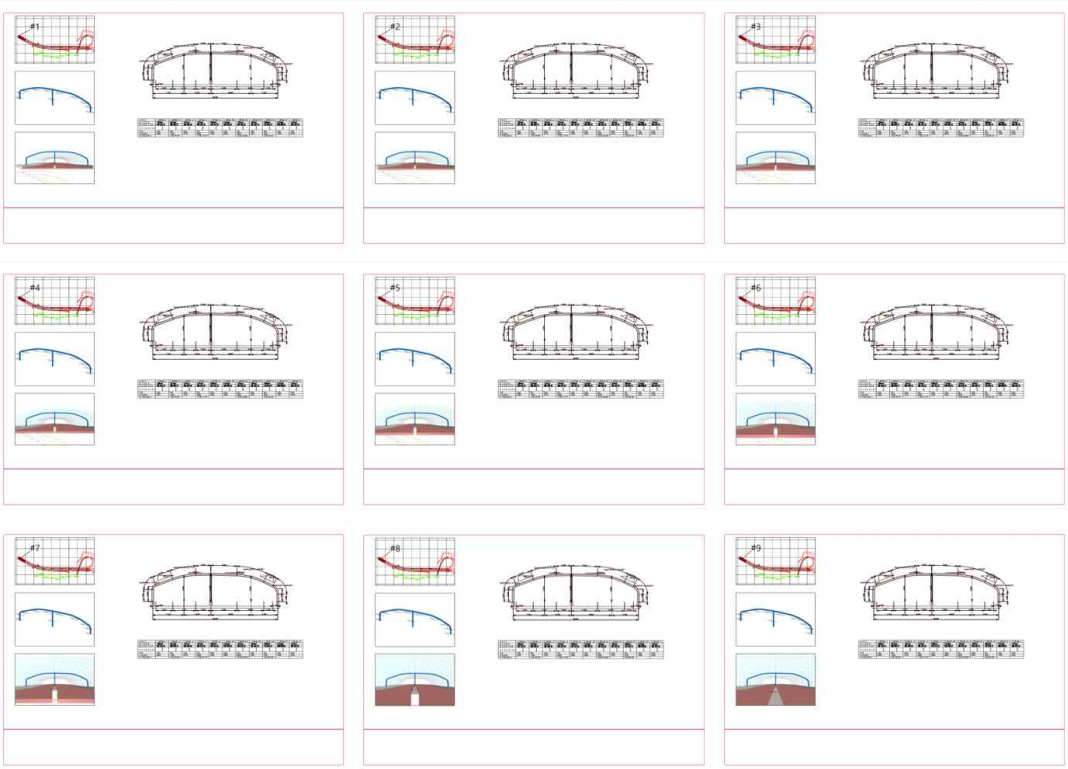


그림 57 방음터널 스테이션별 도면 산출 및 배치, 투시도 일괄 도출

- 방음터널의 도면을 기준으로 부재 일람표 생성 가능 [그림 58].

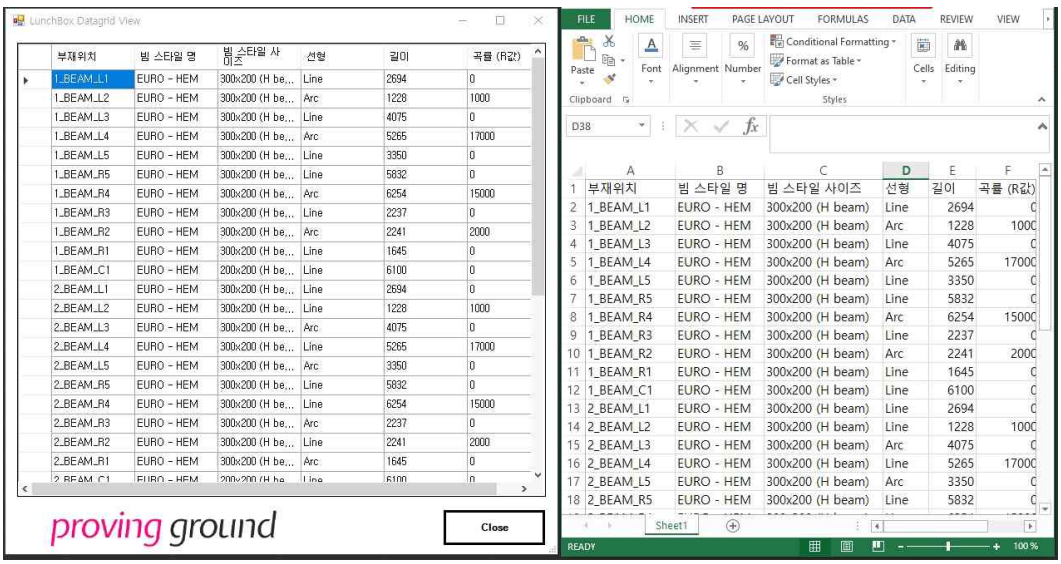


그림 58 방음터널 부재 일람표 생성

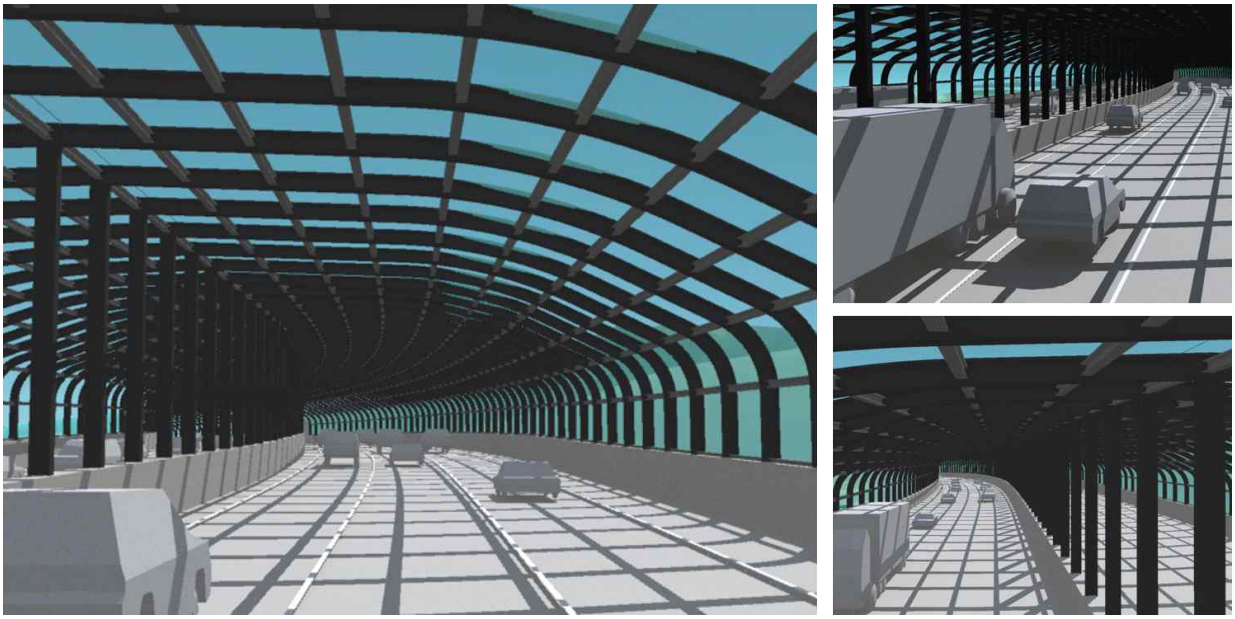


그림 59 완성된 방음터널의 투시도

(2) 시스템 효용성 검증

❙ 차세대 방음터널의 설계 자동화 시스템의 효용성을 검증하기 위하여 전문가 평가를 2회에 걸쳐 수행하였음. 전문가 평가 개요 및 개선 사항에 대한 내용을 '2.나.7 (2) 시스템 효용성 검증' 항목에서 1,2차년도 내용을 통합하여 서술하였음. (p.118 - p.130 참고)

5. 성능 기반 파라메트릭 디자인 시스템 고도화

(1) 구조 최적화 알고리즘 개발

▌현재 방음터널의 구조적 성능을 분석해 파라메트릭 디자인 시스템을 통해 더 나은 구조적 성능을 갖는 구조 형상 최적화 및 구조 형상 도출

① 방음터널의 구조적 성능을 향상하기 위해, 새로운 구조 형상 필요

- 기존의 방음터널 형태(Curved, Flat, Oval, Tilted)는 포탈프레임 구조로 기둥과 보의 강접합 및 힌지접합을 통해 강성을 높인 형태.
- 시공이 간편해 공기가 짧으나, 부재의 단위 규모가 크고, 구현할 수 있는 형상의 한계로 인하여 구조적 성능 이외의 방음 성능, 환경적 성능을 높이기 어려움.
- 따라서 방음터널의 구조적 성능 이외의 성능을 높이기 위한 연구가 진행되고 있으며, 구조적 성능 이외의 성능을 개선할 수 있는 새로운 형태가 필요함.
- 또한 차세대 플랫폼형 방음터널에 활용할 수 있는 구조형태로 부재의 탈부착 및 재사용이 가능한 형태로 제작되어야 함.

② 방음터널 성능 관련 연구 현황

- Google Scholar와 Research Gate를 통해 “Soundproof Tunnel”, “Noise Barrier Tunnel”, “Acoustic Barrier Tunnel”의 검색어로 검색한 결과 총 58개의 논문이 검색됨.
- 방음터널의 외부에서 측정하는 소음 저감에 대한 방법이 18개로 가장 많았으며, 방음터널 내부 소음에 대한 연구가 상대적으로 적음.
- 전체 방음터널 연구 중 약 5%인 3개의 연구가 방음터널 내부의 소음을 고려함. 상대적으로, 방음터널 내부의 소음에 대한 연구는 적게 진행되었으며, 특히, 내부 소음과 방음터널의 형상에 관한 연구는 거의 진행되지 않음.
- 축소 모형을 활용해 내부 소음 및 외부 소음이 가장 적은 방음터널의 형상을 도출했다. 그러나, 축소모형의 한계로 총 8개의 대안을 분석했으며, 내, 외부의 소음을 최대로 저감할 수 있는 형태로 제안한 것은 비용적인 단점이 존재하므로 활용성이 낮음.

③ 방음터널에 대한 대부분의 연구는 형태적 요소가 아닌 설비적 요소를 더함으로 방음터널의 성능을 높이는 것으로 한정됨 [표 10].

표 10 형태 및 설비에 의한 성능 향상 구분

	Performance	Form Factor	Facility Factor
General	Ventilation Lighting Noise Propagation (Outside) Noise Propagation (Inside)	× × × ○	○ ○ ○ ○
Sustainability	Component Amount Cost Reusable/ Repairable Component	○ ○ ×	○ ○ ○
Structure	Wind-Load Self-Weight Reinforcement (Safety)	○ ○ ○	○ ○ ○

- 방음터널에 설비적 요소를 더하거나 새로운 장비를 더하는 경우, 구조적으로 더 불리하므로, 구조적 안정성을 위해서는 형태를 개선해 구조적 부하를 줄여야 함.
- 구조적 부하를 줄일 뿐 아니라 기능적 개선을 포함해, 새로운 방음터널 유형의 효용을 높일 필요 있음.
- 특히, 초기 설계단계에서 Mass와 Form을 결정하는 단계는 후속되는 프로세스에 비해 성능과 비용에 더 큰 영향을 미치므로, 선행되는 프로세스인 형태를 결정하는 것에서 최적화 과정이 필요함.

④ 방음터널 형상에 Origami X-Form 형태 도입 [그림 60]

- 종이접기 기법인 오리가미는 2차원 시트에서 3차원 물체를 만들어내는 기술임.
- 기하학적 패턴 관계를 기반으로 다양한 엔지니어링 및 설계 응용프로그램을 개발하는데 사용되고 있음.
- 이중 X-Form-Span 구조는 한 장의 종이로 구현하지만 포물선 및 아치의 형태를 나타내므로 구조적 강성이 높음.
- X-Form-Span의 형태는 면의 굴절부위가 선재 역할을 하며 구조체가 받는 하중을 면과 선으로 분할하는 방식임.
- 강구조로 치환할 경우, 내부 트러스 형상을 구현하는 접합부를 모두 힌지 접합으로 구현하므로, 기존의 방음터널 접합방식에 비해 접합부 물량 감소 기대.
- 그러나 면재 또한 구조적 내성을 가져야하므로, 방음터널에 적용하기 위해 선형 부재에 하중을 집중할 수 있는 쉘 구조로 변경.
- X-Form-Span의 형태적 특성으로 내부에서 발생하는 소음의 완만한 분산이 가능할 것으로 예상됨.

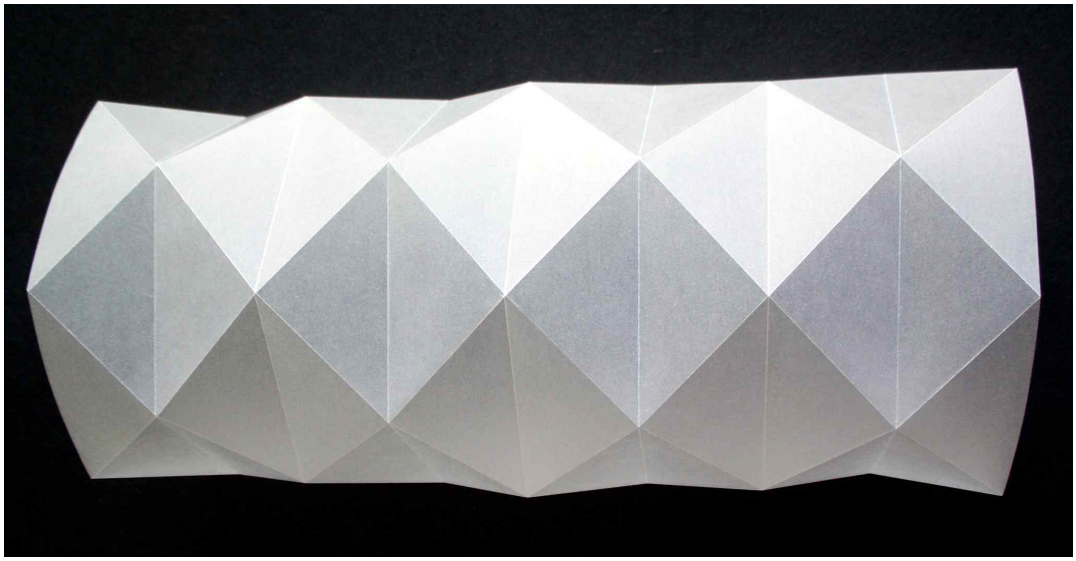


그림 60 Origami X-Form-Span 형상

⑤ 기존 방음터널의 소음성능 측정

- 기존 방음터널 4개 유형의 내부 소음 분산 정도와 제안하는 X-Form-Span 형태 유형의 개략적 비교를 위해 내부 소음 분산정도를 측정함 [그림 61].

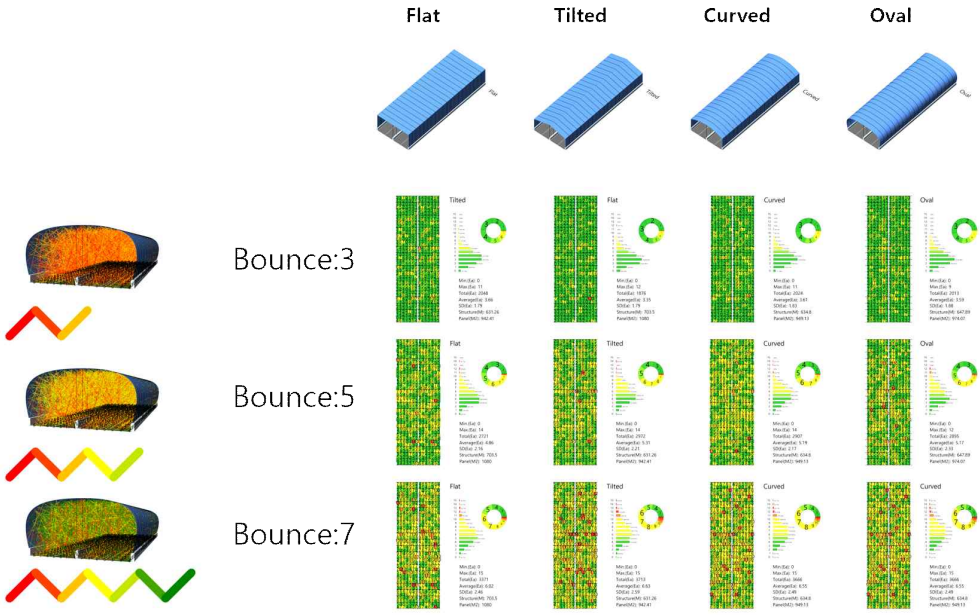


그림 61 RTM분석을 통한 내부 소음 분석

- 실내 공간 및 밀폐된 내부공간의 소음 측정은 RTM 방식이 수준이므로, 자체적으로 RTM 알고리즘을 구현해 활용함.

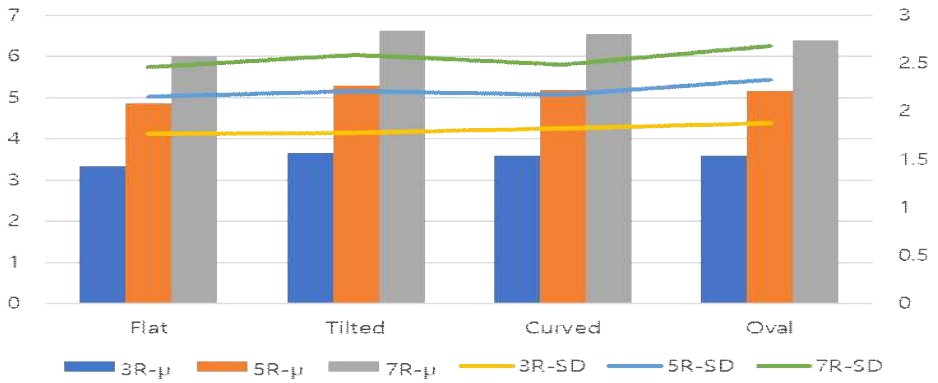


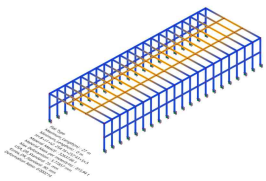
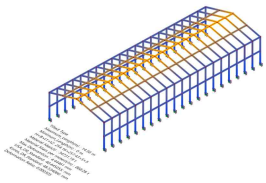
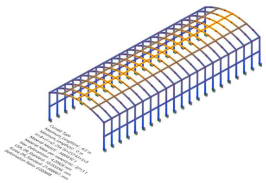
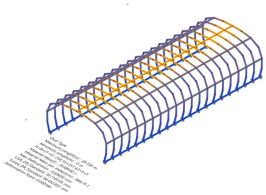
그림 62 형상에 따른 내부 소음 분석 결과

- RTM의 Bounce 숫자가 증가하더라도 방음터널 내부 소음의 평균과 분산의 정도를 나타내는 경향성은 차이가 없음, 실험의 효율을 위해 Bounce를 5로 한정함.
- 도로 표면에 충돌한 입자의 평균은 Flat이 가장 낮았으며, Oval, Curved, Tilted 순으로 높아짐 [그림 62].
- Flat은 평균이 가장 낮으나 분산이 가장 높으므로 소음이 균일하지 않다고 해석가능.
- Oval은 Flat 다음으로 평균이 낮지만 표준편차가 가장 높으므로 소음이 균일한 것으로 해석 가능.
- 따라서 Oval형태가 기존 방음터널 중 소음 성능으로 가장 이상적인 형태임을 확인.

⑥ 기존 방음터널의 구조적 효율성 측정

- 기존 4가지 유형의 방음터널의 구조적 효율성을 측정하기 위해 동일 규모의 방음터널에서 사용되는 구조체의 질량을 기준으로 분석함.

표 11 형상에 따른 구조체 하중 부하 분석

			
Flat Type	Tilted Type	Curved Type	Oval

- 방음터널의 규모는 4가지 유형을 동일하게 14m경간, 40m길이의 방음터널로 가정함 [표 11].

표 12 기존 방음터널 형상에 따른 구조체 소요량 및 최대처짐량 분석

	Flat Type	Tilted Type	Curved Type	Oval
Maximum_Length(m)	3.25(2.5)	3.25(2.5)	3.25(2.5)	2.849(2.5)
Minimum_Length(m)	2	1.82	2	2
H-B-t1-t2(mm)	300-200-8-4	300-200-8-4	300-200-8-5	300-200-8-4
Material Mass(t)	31.55	34.68	32.06	28.36
Material Mass/m	0.79	0.87	0.8	0.71
Max Deformation(mm)	7.305	5.79145	4.75954	4.11139
DR	0.002248	0.001782	0.001464	0.002349

- 최대 부재 길이는 3.25m이나 이는 기둥의 길이를 포함한 것이며, 기둥 부재를 제외한 보 부재의 최대 길이는 2.5m임 [표 12].
- 철골의 생산과정에서 일반적인 경우 방청작업을 할 수 있는 최대 규모가 3.25m이므로, 이를 고려해 부재 최대길이는 직선부재 기준 3.25m가 최대.
- 부재의 운송 측면에서 일반적으로 12m 내외의 부재를 운송 가능한 것으로 판단.
- 일반적으로 3.25m짜리 직선부재는 기둥 부재에만 활용함, 하중을 전달하는 거더부재의 경우 2.5m이하로 가정함.
- 300-200-8-4의 동일한 규격의 H-Beam을 적용하였으며, 구조적 형태를 독립변수로, 전체 부재 질량과 단위 부재 질량, 최대 처짐량은 종속변수로 설정함.
- 전체 부재 질량은 각각 Flat타입 31.55t, Tilted 타입 34.68t, Curved 타입 32.06t, Oval 타입 28.36t으로 Oval 타입이 동일 규모에서 부재를 가장 적게 사용하며, 단위질량 또한 동일함.
- 최대 처짐량은 Flat타입 7.305mm, Tilted 타입 5.79145mm, Curved 타입 4.75954mm, Oval 타입 4.11139mm 로 Oval 타입이 동일 규모에서 처짐량이 가장 낮음.
- 따라서, 구조적 안정성 또한 Oval 형태가 가장 효율적인 것으로 확인 가능.

⑦ 제안하는 Origami X-Form-Span 방음터널의 소음 분산 성능

- Origami X-Form-Span형태의 방음터널은 그림 63과 같은 원리로 생성됨.
- U방향 분할은 방음터널의 진행방향 (종방향)에 대한 패턴밀도를 나타내며, V방향 분할은 횡방향에 대한 패턴밀도를 나타냄.

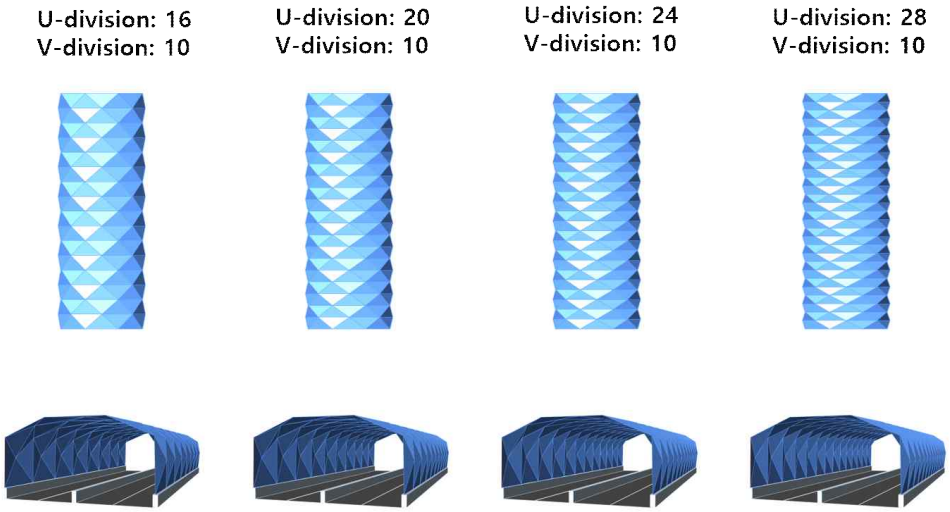
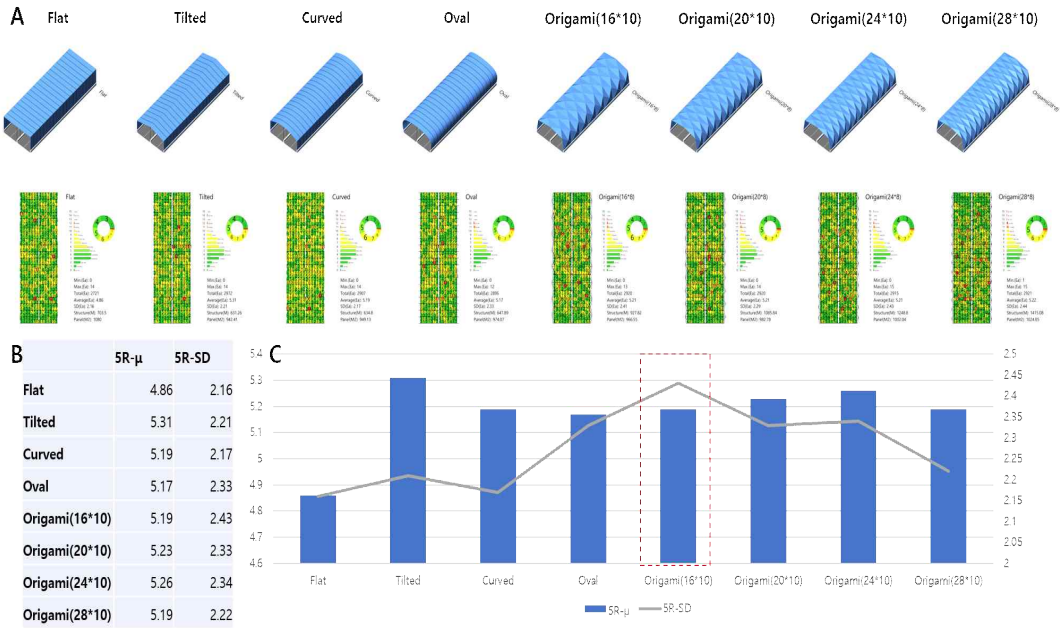


그림 63 Origami X-Form-Span을 적용한 방음터널 대안

- 14m 규모의 방음터널 스팬을 동일하게 비교하므로, V분할은 기존의 방음터널과 유사한 수준의 2.5m로 동일하게 설정하기 위해 10으로 고정하며, 종방향의 패턴밀도만을 독립변수로 활용함 [그림 63].
- 종속변수는 방음터널의 소음 수준(RTM 평균)과 소음 분산 수준 (RTM 표준편차)로 설정해 실험을 수행함.



B	5R-μ	5R-SD
Flat	4.86	2.16
Tilted	5.31	2.21
Curved	5.19	2.17
Oval	5.17	2.33
Origami(16*10)	5.19	2.43
Origami(20*10)	5.23	2.33
Origami(24*10)	5.26	2.34
Origami(28*10)	5.19	2.22

그림 64 기존 방음터널과 제안한 방음터널의 소음 성능 비교

- 실험 결과는 U 분할과 상관없이 소음의 정도는 Oval과 유사하지만, 소음 분산의 정도는 U분할이 낮을수록 분산의 정도가 높음 [그림 64].

- U분할 값이 높을수록 형태적으로 Oval의 형상에 수렴하며, 성능 또한 Oval의 값으로 수렴.
- U분할이 16일 경우와 20일 경우가 가장 소음 분산 성능이 높은 것으로 확인되었으며, 기존의 Oval 타입보다 우수함.

⑧ 제안하는 Origami X-Form-Span 방음터널의 구조 효율성

- Origami X-Form-Span의 네 가지 유형을 기존 방음터널과 비교함 [표 13].

표 13 Origami X-Form-Span을 적용한 방음터널의 구조성능 분석

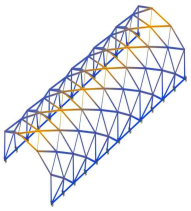
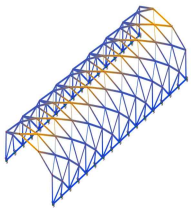
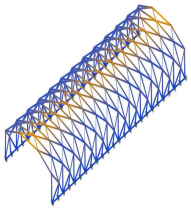
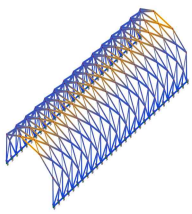
			
Origami_16*10	Origami_20*10	Origami_24*10	Origami_28*10

표 14 제안된 Origami X-Form-Span을 적용한 방음터널의 구조성능 분석 결과

	Origami 16*10	Origami 20*10	Origami 24*10	Origami 28*10	Oval
Maximum_Length(m)	5.652	5.652	5.652	5.652	2.849(2.5)
Minimum_Length(m)	2.5	2	1.667	1.429	2
H-B-t1-t2(mm)	300-200-8-4				
Material Mass(t)	35.46	41.11	46.98	52.99	28.36
Material Mass/m	0.89	1.03	1.17	1.32	0.71
Max Deformation(mm)	3.0846	2.78638	2.59116	2.45663	4.11139
DR	0.000546	0.000493	0.000458	0.000435	0.002349

- 독립변수는 제안하는 오리가미 방음터널의 U방향 분할수이며, 종속변수는 부재량과 부재의 처짐량으로 설정함 [표 14].
- 규모에 상관없이 같은 부재를 활용할 경우, 부재 처짐량은 모두 기존의 Oval에 비해 우수함.
- 그러나 제안한 방음터널 형태유형은 기존의 방음터널에 비해 선형 부재의 절재량이 크므로 물량면에서는 상대적으로 불리함.
- 동일한 규모에서 동일한 구조적 성능(같은 수준의 최대 처짐량)일 경우, 오리가미 방음터널이 비교적 더 나은 결과를 보여줄 것으로 예상함.
- 따라서, 다음 장에서는 독립변수를 부재 단면으로 상정하고 동일한 구조적 변량(처짐)이 발생할 경우, 최적화된 오리가미 방음터널의 부재 단면 치수를 도출하는 최적화 과정을 진행함.

▌ 방음터널의 구조적 성능 측정

① 디지털 트윈을 활용한 방음터널의 구조 성능 측정 가능성

- 전 생애주기적 관점에서 방음터널 구조물의 운용 과정에서의 구조적 안정성과 함께 해체 이후의 부재 별 구조적 성능과 수명에 관한 정보에 대한 중요성이 높아지고 있음.
- 따라서 전 생애주기에 걸쳐 구조물과 부재 단위의 구조적 성능에 대한 모니터링이 필요하며 이를 위하여 방음터널의 디지털 트윈이 활용될 수 있음.
- 방음터널 구조물에 부착된 물리적 센서에서 생성되는 정보와 이를 실시간으로 기록 및 분석하는 디지털 모델로 구성된 디지털 트윈을 구축하여 부재 수명과 같은 구조적 성능을 측정할 수 있음.

② 방음터널 부재 수명 예측 방법

- 방음터널의 경우 차량이 주변을 지속적으로 통과하며 이 과정에서 충격이 발생함. 이로 인하여 철골 구조물의 피로 균열 및 피로 파괴가 발생할 수 있음.
- 방음터널 구조물의 피로한도 곡선에서 피로 한도 이상의 응력이 발생하였을 경우 해당 응력의 진폭을 파악하여 수명을 예측할 수 있음. 응력의 진폭을 측정하기 위해서 구조물의 거동을 분석하는 계측 장비가 필요함. 따라서 방음터널 각 부재에 벡터 계측 기반의 자이로 센서를 활용하여 실시간으로 구조물의 거동에 관한 정보를 수집할 수 있음 [그림 65].

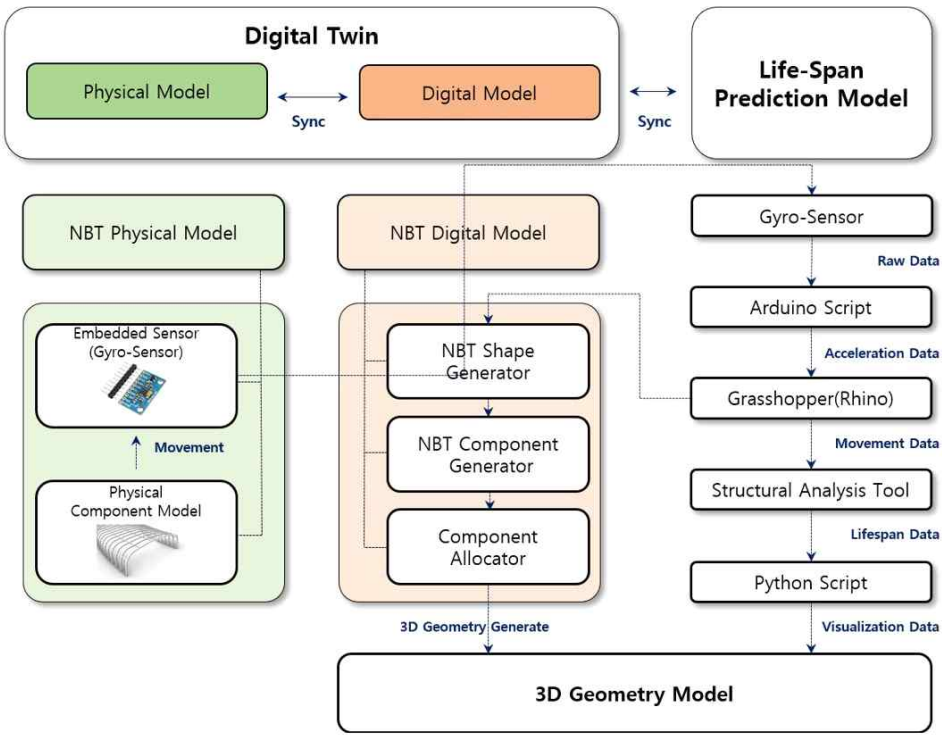


그림 65 디지털 트윈을 활용한 방음터널 부재 수명 예측 과정

- 3D 프린터를 통해 방음터널 부재의 프로토타입을 출력한 후 자이로 센서를 설치함. 디지털 모델을 함께 구축하여 프로토타입에 대한 디지털 트윈을 구성함. 이를 통해 센서 데이터를 실시간으로 수집하고 구조물에 가해지는 거동을 분석할 수 있음 [그림 66].

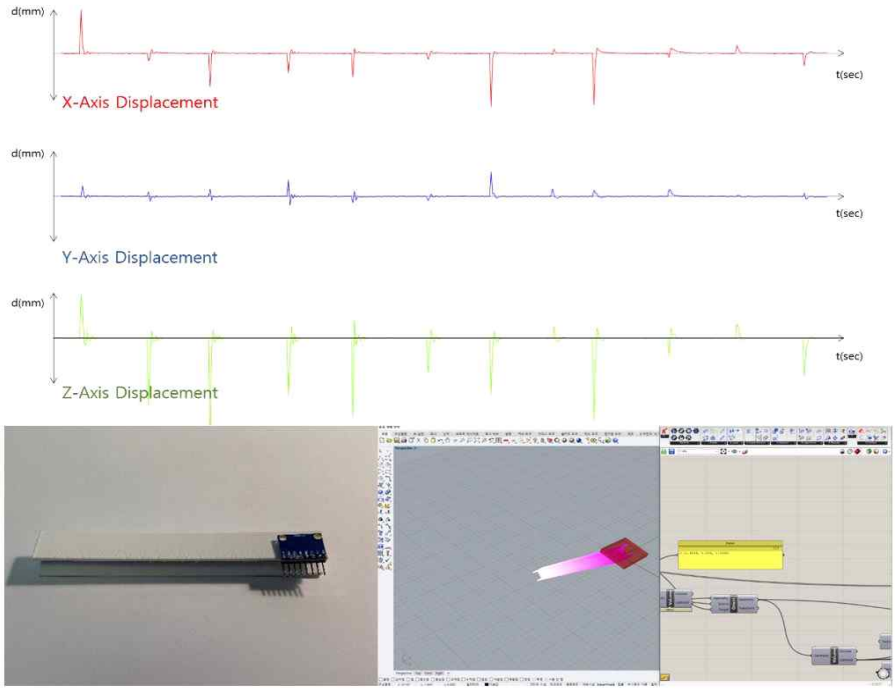


그림 66 방음터널 부재 프로토타입의 실시간 거동 분석

(2) 부재 형상 최적화 알고리즘 개발

① Origami X-Form-Span 방음터널의 부재 형상 최적화

- Origami X-Form-Span 방음터널이 기존 방음터널에 비해 소음 분산 성능이 높으며 구조적 성능이 높을 가능성에 대해 확인함
- 동일 부재를 사용할 경우, 선형 부재 사용량이 높은 X-Form-Span의 소요 물량이 더 높게 나타나나, 최대 처짐량을 비교할 경우, X-Form-Span이 우수함을 확인
- 따라서, X-Form-Span의 내부 부재 사이즈를 독립변수로 활용하고, 기존 방음터널(Oval)의 기준 처짐량인 4.11139mm와 유사한 수준(10x-4이내 절상)으로 수렴하는 최적 단면 치수 도출
- X-Form-Span의 4가지 형태유형을 각각 최적화하며, 각각의 최대 성능 혹은 기존 방음터널 형태 유형에 비해 향상된 성능을 가질 수 있는지 확인함
- 실험에 활용된 독립변수는 H-beam의 4종 치수(H,B,t1,t2)이며, 최적화에 활용된 알고리즘은 유전 알고리즘을 활용함 [표 15].

표 15 기존 방음터널 형상에 따른 구조체 소요량 및 최대처짐량 분석

	Flat Type	Tilted Type	Curved Type	Oval
Maximum_Length(m)	3.25(2.5)	3.25(2.5)	3.25(2.5)	2.849(2.5)
Minimum_Length(m)	2	1.82	2	2
H-B-t1-t2(mm)	300-200-8-4	300-200-8-4	300-200-8-5	300-200-8-4
Material Mass(t)	31.55	34.68	32.06	28.36
Material Mass/m	0.79	0.87	0.8	0.71
Max Deformation(mm)	7.305	5.79145	4.75954	4.11139
DR	0.002248	0.001782	0.001464	0.002349

표 16 Origami X-Form-Span을 적용한 방음터널 형상에 따른 구조체 소요량 및 최대처짐량

	Origami 16*10	Origami 20*10	Origami 24*10	Origami 28*10	Oval
Maximum_Length(m)	5.652	5.652	5.652	5.652	2.849(2.5)
Minimum_Length(m)	2.5	2	1.667	1.429	2
H-B-t1-t2(mm)	273.5-80-8-4	252.9-80-8-4	237.9-80-8-4	226.85-80-8-4	300-200-8-4
Material Mass(t)	18.89	21.12	23.49	25.95	28.36
Material Mass/m	0.47	0.53	0.59	0.65	0.71
Max Deformation(mm)	4.11186	4.11124	4.11153	4.11191	4.11139
DR	0.000727505	0.000727396	0.000727447	0.000727514	0.002349

- 결과적으로 플렌지 폭 80mm~100mm 사이에서 오리가미 방음터널의 부재는 최적 성능을 발휘하며, 구조물량은 U분할 수가 낮을수록 사용량이 낮아짐 [표 16].
- 건설을 위하여 표준 KS규격의 부재 중 최적화 결과의 범위 내에 해당하는 부재 이용을 고려.

(3) 태양광 패널 배치 최적화 알고리즘 개발

▌방음터널 태양광 패널 배치 최적화의 필요성

① 현재 방음터널에 설치되어 있는 태양광 발전 시스템은 방음터널의 구조체와 별개로 단순히 중앙부에 추가된 형태임. 본 과제의 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템의 태양광 최적화 과정을 통하여 일체형 태양광 모듈 및 발전 시스템의 발전 성능을 높이며 도심 지역의 음영에 대응할 수 있음.

- 현재 운용되고 있는 방음터널의 태양광 발전 시스템은 방음터널 구조체와 관계없이 단순히 기존 방음터널의 상부 중앙에 태양광 패널을 추가한 방식임. 또한 일반적으로 지역별 최적 각도를 따라 일률적으로 태양광 패널이 설치됨.
- 본 과제에서 다루는 방음터널 플랫폼에서는 모듈화 된 태양광 패널이 방음터널 구

조체에 직접 부착되는 형식임. 따라서 본 과제에서는 일률적으로 지역별 최적 각도에 따라 태양광 패널을 설치하는 방식을 적용할 수 없음. 또한 도심 지역에 위치하는 방음터널의 경우 주변 공동주택 및 기타 지형물로부터 발생하는 음영으로 인하여 태양광 발전량이 감소할 수 있는 가능성이 매우 큼.

- 따라서 본 과제의 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템의 태양광 최적화 과정을 통하여 방음터널에 설치될 태양광 패널을 배치하는 과정에서 미리 태양광 발전량을 검토하고 최적화를 수행해야 함.

▌방음터널 태양광 패널 배치 최적화 기능 구성

① 본 과제에서의 태양광 패널 배치 최적화는 태양광 패널의 수량을 동일하게 유지하며 연간 태양광 패널 발전의 총량을 증가시키는 것을 의미함.

② 태양광 패널 배치 최적화 기능은 본 과제의 방음터널 파라메트릭 디자인 시스템과의 원활한 연동을 위하여 동일한 개발 환경인 Rhino 3D 및 Grasshopper 환경에서 개발되었음. 방음터널 파라메트릭 디자인 시스템에서 생성된 설계안에서 패널에 관한 정보가 추출되며 태양광 패널 최적화의 입력값으로 사용됨. 추가적으로 태양광 발전량 산출을 위하여 필요한 기상 및 주변 건물, 지형 정보가 사용되며 최종적으로 최적의 태양광 패널 배치안이 생성됨 [그림 67].

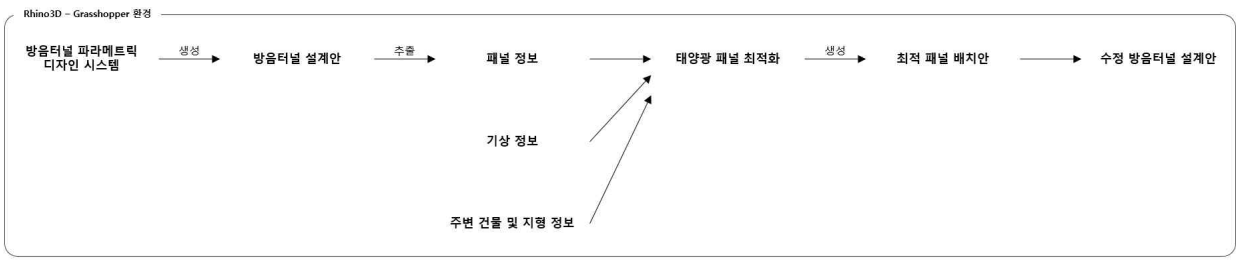


그림 67 태양광 패널 최적화 프로세스

③ 태양광 패널 배치 최적화 구성은 1) 방음터널 설계안 및 주변 지형 입력, 2) 필요 형상 정보 추출, 3) 연간 태양 복사량 분석, 4) 최적 패널 배치안 생성, 5) 연간 태양광 발전량 산출 및 검토 과정으로 구성됨 [그림 68].

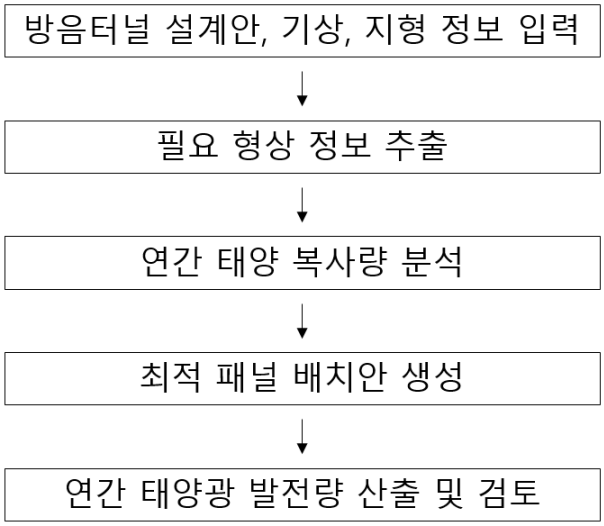


그림 68 태양광 패널 배치 최적화 기능 구성

④ 방음터널 설계안, 기상, 지형 정보 입력

- 태양광 패널이 설치될 방음터널의 형상 정보 및 주변 지형 정보를 입력함.
- 본 과제의 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템에서 생성된 패널 중 태양광 패널이 설치될 수 있는 패널과 주변 지형 정보를 각각 그림 69의 컴포넌트에 연결함으로써 입력이 이루어짐.

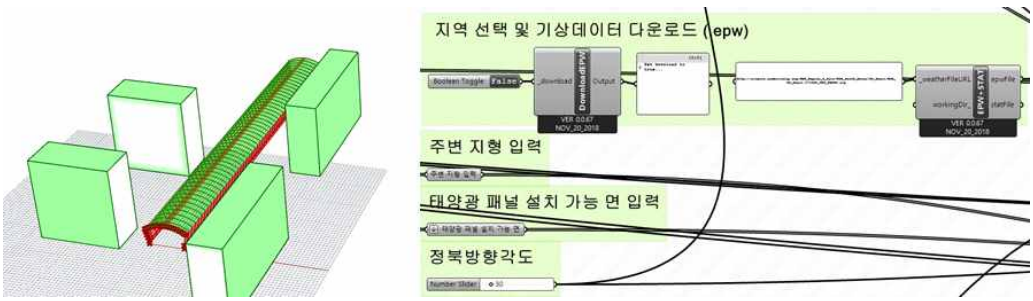


그림 69 패널 및 주변 지형 형상 정보 입력

⑤ 필요 형상 정보 추출

- 전 단계에서 입력 받은 패널 및 주변 지형의 형상정보로부터 필요 정보를 추출함.
- 입력 받은 패널 정보로부터 전체 패널의 수량, 가로, 세로, 패널 면의 법선 벡터 정보를 추출함.
- 공동주택 및 기타 건물 등을 표현하는 주변 지형의 형상으로부터 점, 구성 면 정보를 추출하여 패널면에 생성하는 음영의 영향을 분석하는 과정에서 활용함. 간략한 분석을 위하여 각 건물 형상의 bounding box를 생성하여 각 건물의 형상을 대체할 수 있음.

⑥ 연간 태양 복사량 분석

- 각 패널의 연간 태양광 발전량의 주요 요인인 연간 태양 복사량을 전체 패널면을 대상으로 분석함[27)]
- 건축 환경 분석을 위한 기상 데이터 포맷인 Energy Plus Weather File (.epw)에서 기상 정보를 추출함.
- 이전 단계에서 추출된 패널 및 주변 지형의 형상정보, 지역 별 기상 정보를 바탕으로 기상 분석을 위한 툴인 Ladybug를 이용하여 패널면의 연간 태양 복사량 (solar radiation)을 분석함[28)] [그림 70].

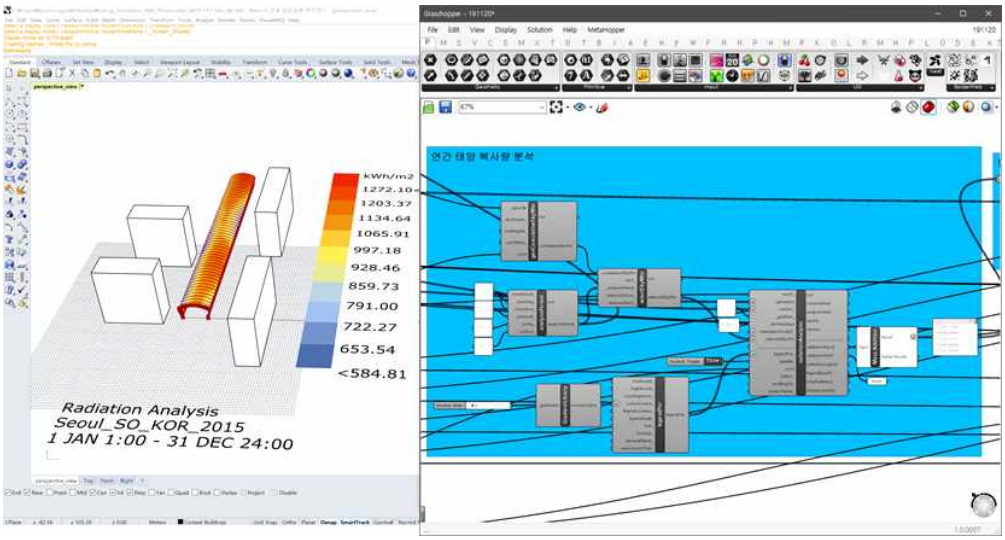


그림 70 패널 및 주변 지형 형상 정보 입력

⑦ 최적 패널 배치안 생성

- 이전 단계에서 분석된 연간 태양 복사량 결과를 바탕으로 최적 패널 배치안을 생성함.
- 사용하고자 하는 태양광 패널의 수량은 2열, 4열 등 일반적인 방음터널의 태양광 패널 설치 방식에 따라 입력된 방음터널 설계안으로부터 자동으로 산출됨. 또는 사용자가 직접 수량을 입력할 수 있음.
- 연간 태양 복사량이 높은 것으로 나타난 패널의 태양광 발전량 또한 크게 나타나는 경향이 있으므로 연간 태양 복사량이 높은 순으로 사용하고자 하는 태양광 패널 수량만큼의 패널을 도출하여 태양광 패널 배치안을 자동으로 생성하고 가시화함 [그림 71].

27) 조덕기, 강용혁, 이의준, & 오정무. (2004). 국내 태양광발전시스템의 최적 설치에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 24(3), 19-25.

28) Roudsari, M. S., Pak, M., & Smith, A. (2013, August). Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug.

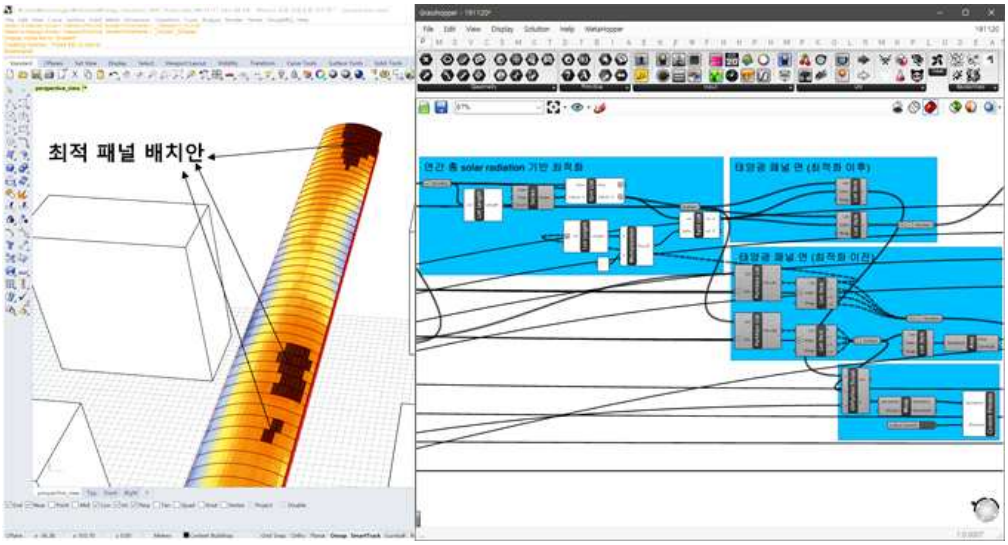


그림 71 최적 패널 배치안 생성

⑧ 연간 태양광 발전량 산출 및 검토

- 이전 단계에서 생성된 최적 태양광 패널 배치안을 검토하기 위하여 연간 태양광 발전량을 분석함.
- 현재 일반적으로 적용되는 방음터널 상부 중앙에 패널을 나열한 경우와 최적 배치안대로 태양광 패널을 설치한 경우의 태양광 발전량을 비교하여 최적 배치안의 효용성을 검증할 수 있음.
- 연간 태양광 발전량의 분석을 위하여 상용 건축 환경 분석 프로그램인 Energy Plus에서 이용하는 simple model 방식에 따라 연간 태양광 발전량을 산출함. 미국 에너지부 산하 국립재생에너지연구소에서는 초기 설계단계에서 태양광 발전량 산출을 위하여 simple model 활용을 권장하고 있음[29]. simple model 방식에 따른 태양광 발전량은 아래의 수식에 따라 계산됨.

  ※ 태양광발전량 = 패널면적 × 모듈면적비 × 태양복사량 × 셀효율 × 인버터효율

- 태양광 발전량 분석을 위하여 태양 복사량 분석 단계에서 활용한 기상 및 패널의 형상 정보, 태양광 패널의 최대출력, 태양광 패널의 셀 효율, 인버터 효율, 태양광 발전 모듈의 패널 대비 면적비를 입력해야 하며 사용자가 직접 입력 또는 BIM 라이브러리의 속성 정보로부터 추출하여 사용할 수 있음. 최종 결과는 연간 총 발전량 수치로 확인 가능함 [그림 72].

29) Griffith, B. T., & Ellis, P. G. (2004). Photovoltaic and solar thermal modeling with the EnergyPlus calculation engine (No. NREL/CP-550-36275). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).

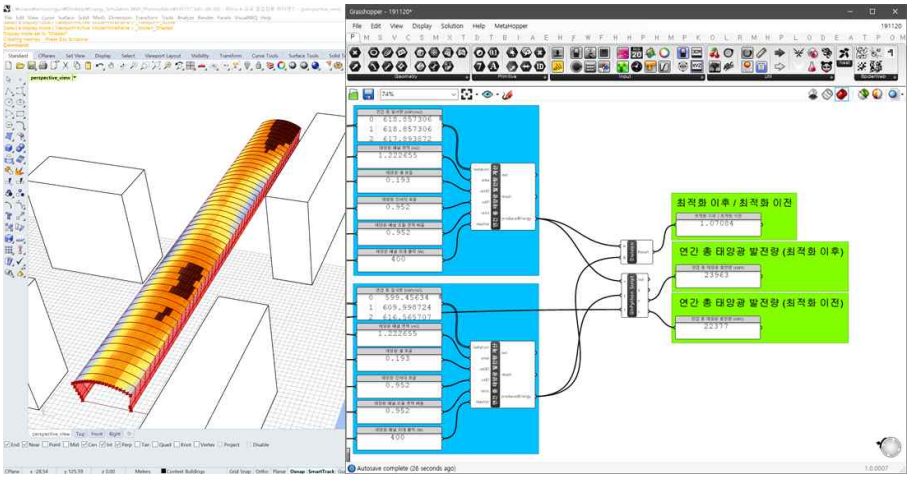


그림 72 연간 태양광 발전량 산출 및 검토

▌방음터널 태양광 패널 배치 최적화 기능의 시험 적용 결과

① 개발된 태양광 패널 배치 최적화 기능을 검증하기 위하여 기존 방식에 따라 방음터널 상부 중앙부에 일률적으로 배치되는 태양광 패널 시스템과 본 과제의 최적 태양광 패널 배치안에 따른 연간 총 발전량을 비교함.

② 서울시 동부간선도로 일부 구간 사례를 기반으로 길이 100m, 폭 10m의 방음터널 구조체 상부 패널을 대상으로 최적화를 진행함.

③ 기존 방식의 패널 배치안의 경우 상부 중앙부에 4열, 총 204개의 태양광 패널을 사용함.

④ 사용된 태양광 패널은 가로 2m, 세로 1m, 효율 19%의 시중 제품을 사용하는 것으로 가정하였음.

⑤ 기존 방식과 동일한 패널 수량을 유지하여 최적 패널 배치안을 생성한 결과 연간 41,339 kWh에서 44,398 kWh 로 약 7.3%의 태양광 발전량이 향상되는 것으로 확인됨 [그림 73, 표 17].

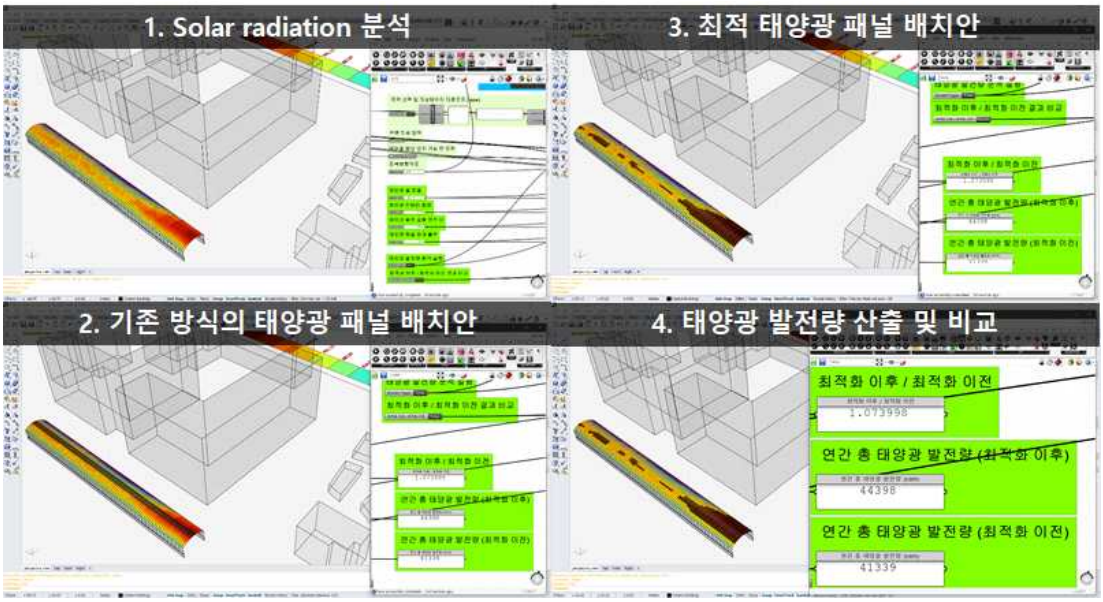


그림 73 연간 태양광 발전량 산출 및 검토

표 17 기존 대안 대비 최적 배치안의 태양광 발전량 개선 분석

대안	연간 총 태양광 발전량 (kWh)	비 고
기존 방식의 배치안	41,339	-
최적 배치안	44,398	7.3% 향상

▌ 성과점검기준에 의한 질적 성과지표 달성 여부

① 관련 항목 및 검증 방법

- A-1-3 : 디지털 시뮬레이션을 통한 디지털모델 태양광 패널 배치 최적화
- 목표치 : 5%
- 달성치 : 7.3%
- 측정 및 검증 방법 : 최적화 전 태양광 발전량 / 최적화 후 태양광 발전량 > 1.05

② 검증 결과

- 최적화 전 태양광 발전량 : 41,339 (kWh)
- 최적화 후 태양광 발전량 : 44,398 (kWh)
- 최적화 전 태양광 발전량 / 최적화 후 태양광 발전량 = 1.073
- 최적화를 통해 태양광 발전량이 약 7.3% 증가하는 것으로 나타나 성과 달성함.

▌ 태양광 방음터널 발전을 통한 경제성 분석

① 태양광 패널의 최적 배치와 더불어 실효성 있는 대안 생성을 위하여 태양광 패널 배치안에 따른 연간 발전 수익을 산출할 수 있도록 기능을 추가함 [그림 74].

② 태양광 발전에 따른 수익은 연간 총 발전량과 전기 판매 단가를 곱하여 산출됨. 또한 태양광 발전을 위한 설비에 소요되는 비용을 회수하기 위하여 걸리는 기간을 산출하여 설계자 및 프로젝트의 이해관계자들이 이를 근거로 경제성을 판단할 수 있도록 함.

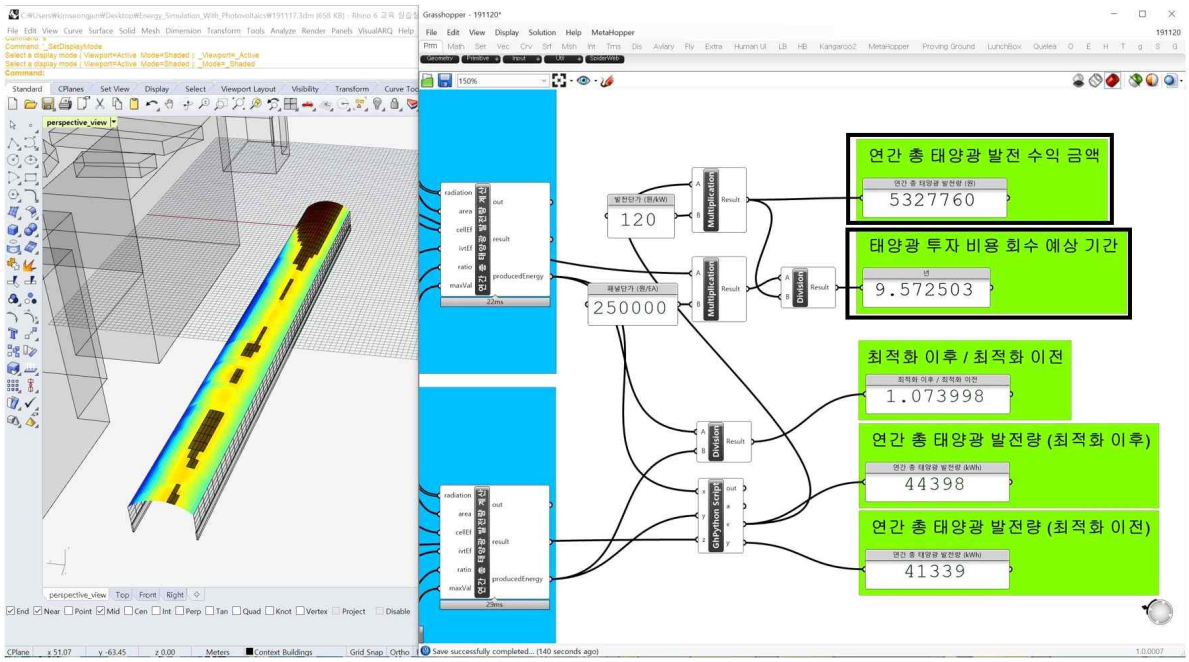


그림 74 연간 태양광 발전 수익 산출 및 경제성 검토

❙ 태양광 패널 배치 대상 사용자 조정 기능

① 구조적, 경제적 및 다양한 요인으로 인하여 방음터널의 특정 위치에 태양광 발전용 패널을 설치하지 못하는 경우가 있음. 태양광 패널을 제외시킬 위치를 설계자가 미리 지정함으로써 최적의 태양광 패널 배치안을 효율적으로 생성할 수 있음 [그림 75].

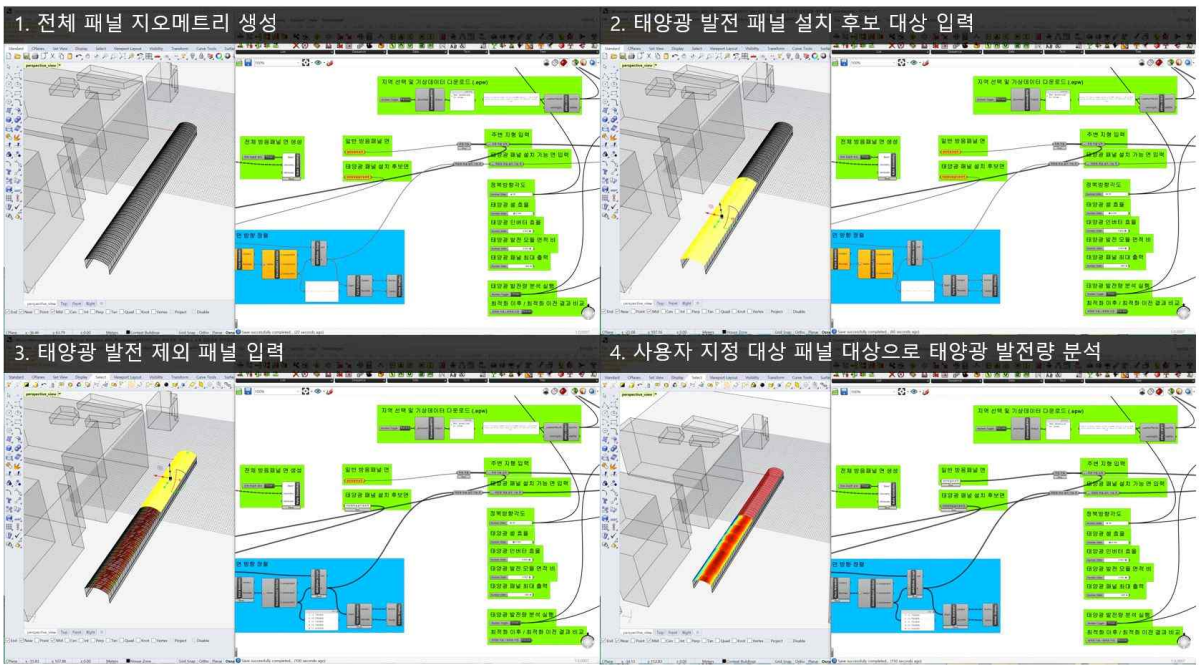


그림 75 태양광 발전 대상 패널 후보의 사용자 지정

(4) VR 기반 성능 가시화 기능 개발

▌VR 기반 방음터널 디자인 검토 및 주변 지형 검토

① 개요

– 앞선 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템을 통해 얻어지는 방음터널 디지털 모델의 디자인을 VR 환경에서 검토할 수 있는 프로세스를 구축함.

– 또한, 이 과정에서 방음터널의 적용이 고려되는 대상 부지 주변의 지형지물의 개략적 형상과 상황을 디지털 모델로 표현하는 알고리즘을 개발(C-2020-033190)하여 이 또한 VR 환경에서 검토할 수 있도록 함.

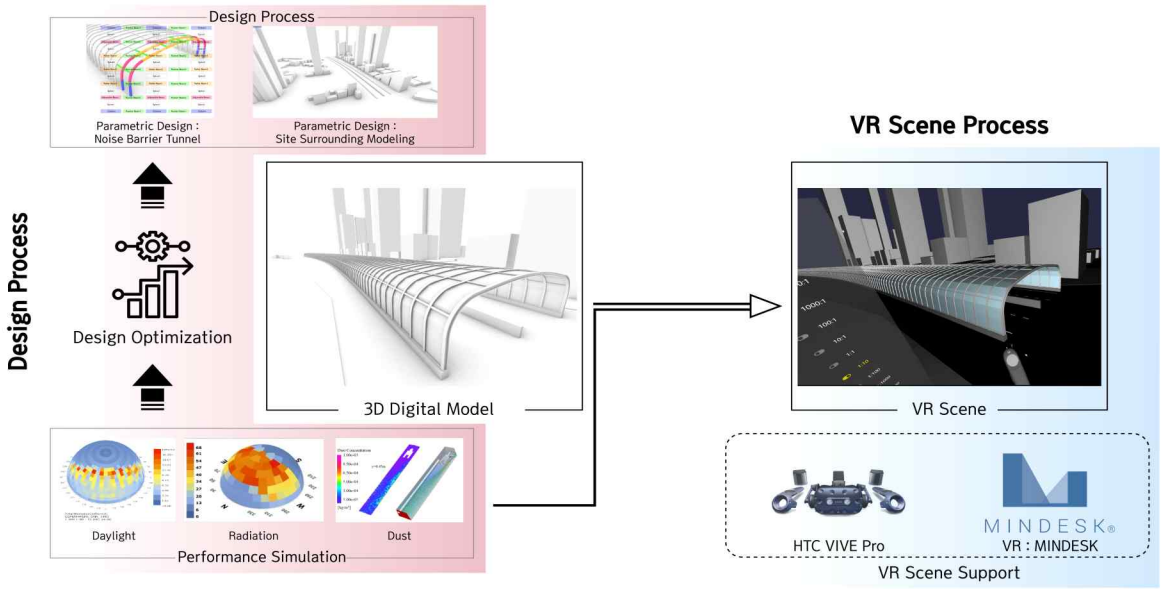


그림 76 VR 환경으로의 이식 과정도

– VR 기반 방음터널 디자인 검토 및 주변 지형 검토를 위한 과정은 다음과 같이 정리할 수 있음. 1) Rhinoceros & Grasshopper + 기 개발한 디자인 시스템과 알고리즘을 적용하여 방음터널 디지털 모델 혹은 지형지물의 디지털 모델의 생성 2) VR 환경으로 디지털 모델을 이식하기 위한 MINDESK社의 소프트웨어 적용 3) VR 환경에서의 시각화를 통한 디자인 검토 및 상황 검토 수행 가능 [그림 76].



그림 77 VR 환경으로 이식된 방음터널 디자인 및 기타사항 검토 수행

② VR 기반 방음터널 디자인 검토

- 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템을 통해 얻어지는 방음터널 디지털 모델의 VR 환경으로의 원활한 이식을 위하여 'BAKE' 작업을 수행, Rhinoceros에서 활용 가능한 Nurbs 개체로 변환함.
- 이후 MINDESK社의 소프트웨어로 Nurbs 개체를 내보내기 위한 레이어 분류 작업을 수행함.
- VR 환경의 이식 과정에서는 VIVE社의 HTC VIVE VR 기종을 대상으로 적용, 현세대에서 활용되는 VR기기의 적용이 가능함을 검토함.
- MINDESK社의 소프트웨어를 통한 VR 환경의 적용은 그림 과 같음. 단, 1:1 축적으로 제작된 디지털 모델이나 VR 환경에서는 임의 스케일로 변경되어 전체적 조감을 볼 수 있도록 기본 설정되어 있으므로 실제 공간감을 느끼기 위하여 사용자는 이를 적정한 스케일로 조정하여 VR 환경에서 디자인을 검토할 필요가 있음.

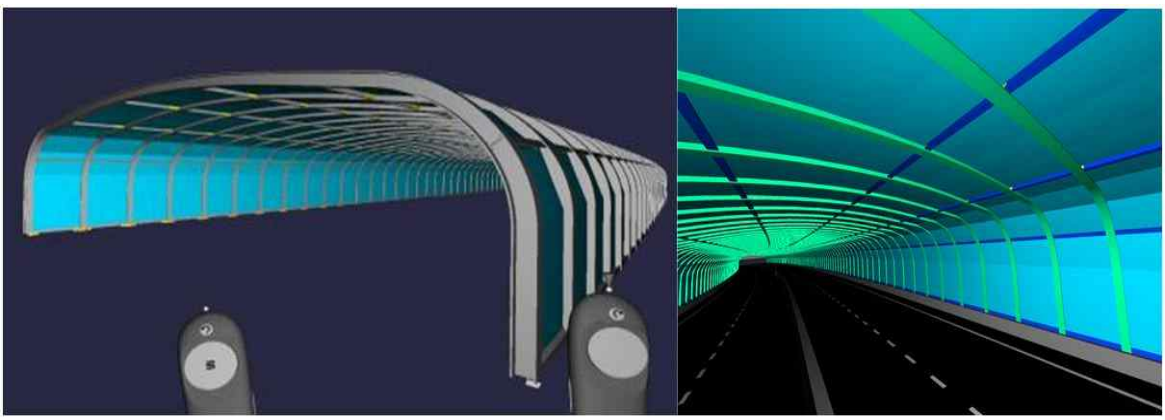


그림 78 VR 환경에서의 방음터널 디자인 검토

- MINDESK 내에서의 시점 및 위치 조정은 보조버튼의 활용과 더불어 Teleport 기능을 활용하여 사용자가 원하는 시점 및 방향에서의 디자인 검토를 가능하도록 지원하고 있음을 확인 가능했음 [그림 77, 그림 78].

③ 주변 지형 및 지물 상황 검토

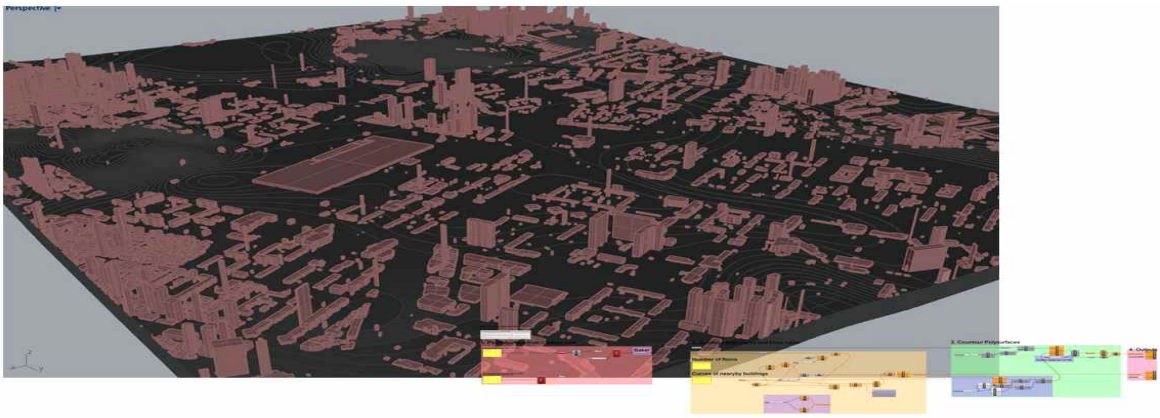


그림 79 Grasshopper 개체로 취득 가능한 지형지물 디지털 모델 및 알고리즘

- 방음터널의 적용이 고려되는 대상 부지 주변의 지형지물의 개략적 형상과 상황을 디지털 모델로 표현하는 알고리즘(C-2020-033190)의 적용을 통하여 Grasshopper 개체로 해당 디지털 모델을 취득할 수 있음 [그림 79].
- 알고리즘 개발 당시, 대상부지 주변의 지형지물의 모델링 구축에는 큰 문제가 없으나, 경사를 인지하기 어려운 Patch Surface의 형태로 나타났기에 이를 해결하기 위하여 Contour가 적용된 계단식 등고 표시 방식을 채택하여 알고리즘을 개선하여 사용자의 시인성을 높일 수 있도록 함 [그림 80].

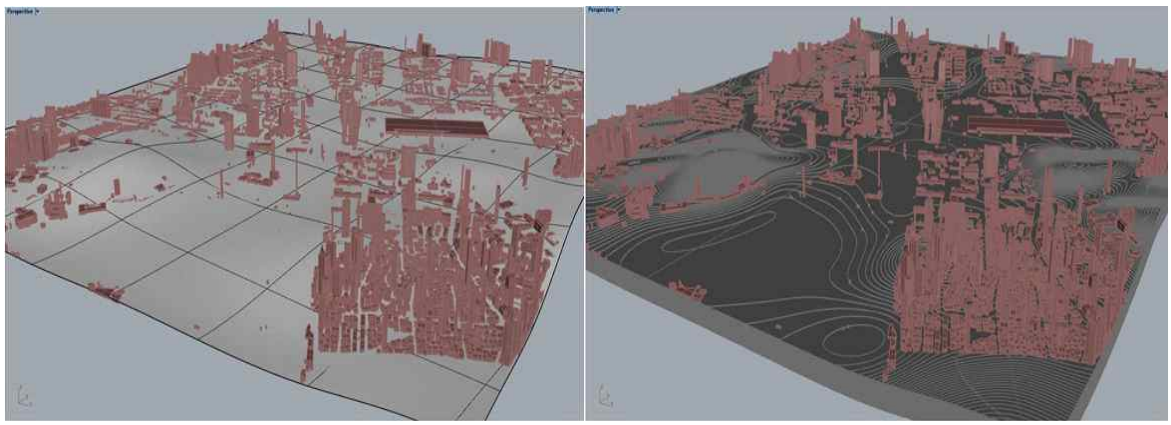


그림 80 등고 표시 방식 개선을 통한 시인성 확보

- 이후 MINDESK社의 소프트웨어로 Nurbs 개체를 내보내기 위한 레이어 분류 작업을 수행함.
  - 대상지 주변 지형의 계단형 개체
  - 대상지 주변 건물 개체
  - 단, 주변 도로 및 건물 블록의 경우 대상부지마다 참조 레이어가 변경되는 경향이 있으므로 추후 개발에서 이를 규칙화하여 적용해야 원활한 알고리즘의 적용이 가능할 것임.

- VR 환경의 이식 과정에서는 VIVE社의 HTC VIVE VR 기종을 대상으로 적용, 현세대에서 활용되는 VR기기의 적용이 가능함을 검토함.

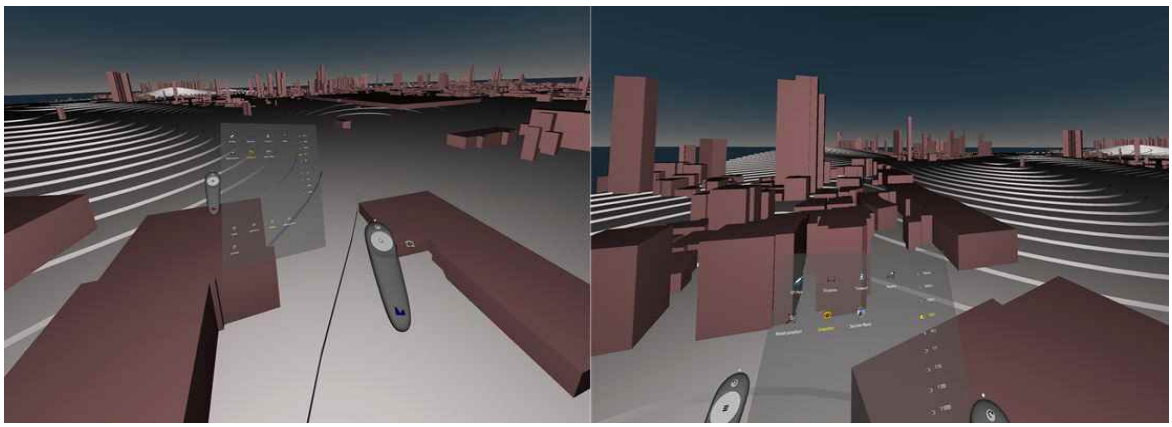


그림 81 VR 환경에서 대상부지 지형지물 디지털 모델 검토 수행

④ VR 기반 방음터널 디자인 및 지형지물 검토 수행

- 위 진행된 내용을 바탕으로, 해당 디지털 모델링 자료를 취합하여 VR 환경에서 검토를 수행가능함 [그림 81].
- VR 환경에서 방음터널 디자인 및 지형지물을 사용자는 확인하여 구축 전 · 후의 상황을 확인할 수 있음 [그림 82].
- 대상부지 모델링의 규모 및 정밀도는 사용자가 알고리즘의 조정을 통하여 결정할 수 있으며, 대략적인 방음터널의 형태와 주변과의 조화, 그리고 규모에 대한 논의를 VR 환경의 접목을 통하여 기존대비 원활하게 수행할 수 있음.

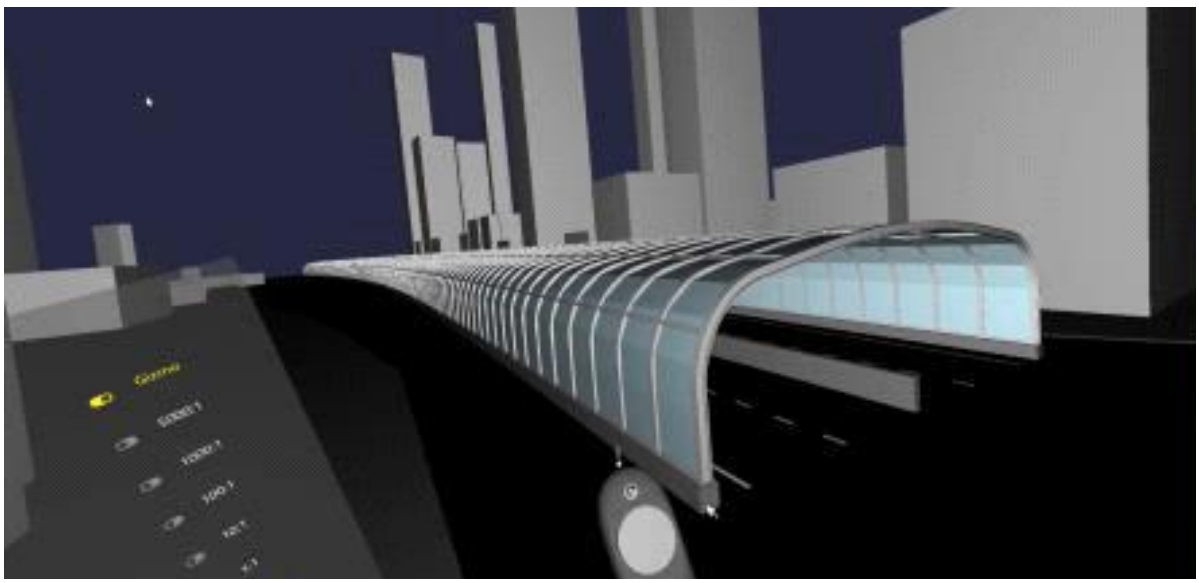


그림 82 VR 환경에서 방음터널의 및 대상부지 지형지물 디지털 모델 검토

❙ 방음터널 디자인 이후, VR 환경에서 부재 간섭 부위 표시를 통한 검토 과정 수행

– 디지털 모델을 제작 후 수정하는 과정에서, 각부 부재간 간섭은 충분히 발생할 수 있는 문제임. 따라서, 이를 조기에 발견하여 수정하기 위해 적절한 알고리즘의 적용과 VR 환경에서의 검토가 필요함.

– 이에 Rhinoceros 7.0부터 지원되는 Grasshopper의 'Clash' 컴포넌트를 활용한 알고리즘을 구성하여 MINDESK로 내보내어 VR 환경에서의 가시화를 수행할 수 있도록 계획함 [그림 83].

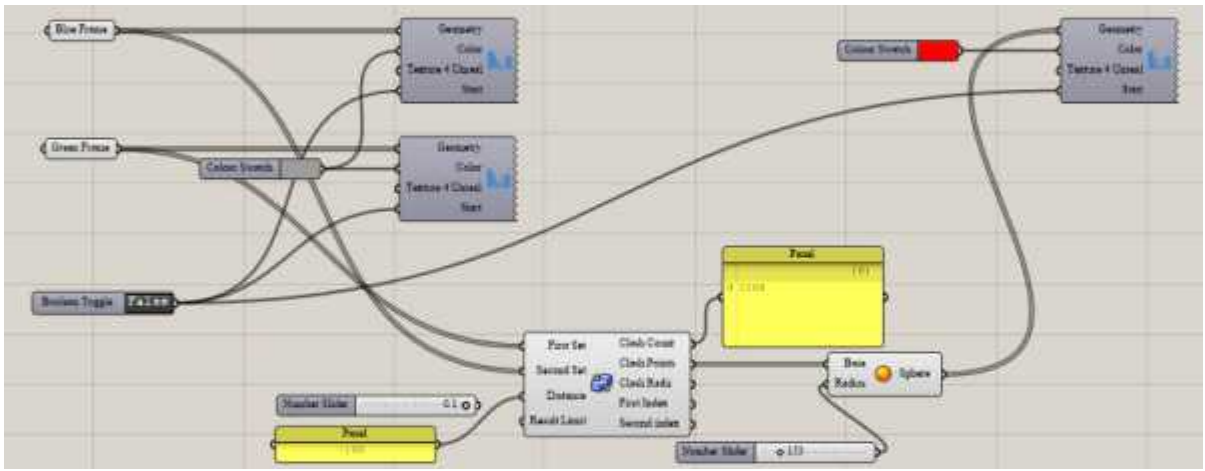


그림 83 VR 환경에서 부재 간섭 부위 확인 알고리즘의 구성

– 'Clash' 컴포넌트의 활용 결과는 일반적으로 점(Point) 개체의 형태로 나타나지만, VR 환경에서 사용자가 원활히 인지할 수 있도록 해당 점(Point)을 기준으로 구(Sphere)를 생성할 수 있도록 하였음. 또한, 비교 분석의 가시성을 높이기 위하여 분석 대상 터널 부재의 색상은 무채색으로 두었으며 간섭이 발생한 부분을 나타내는 구체의 색상은 붉은색이 되도록 설정하였음.

– 이러한 설정을 바탕으로 VR 환경에서의 부재 간석 부위 표시를 포함한 시각화를 수행할 수 있음[그림 84].

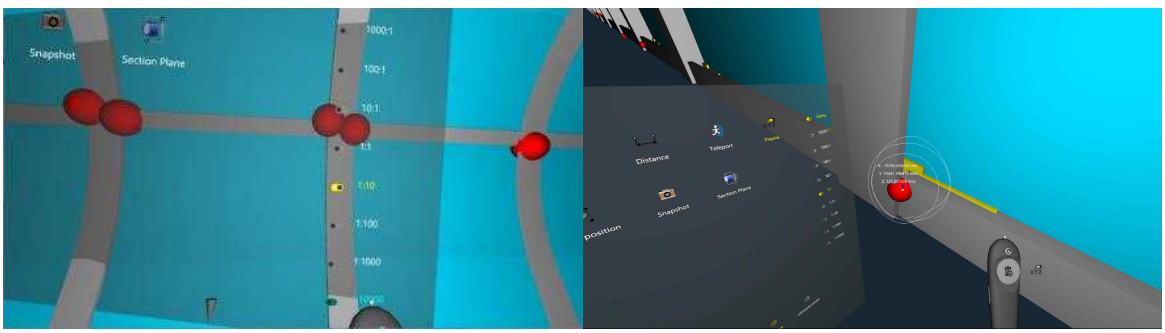


그림 84 VR 환경에서 부재 간섭 부위 검토 및 표기

– VR환경에서 확인할 수 있는 붉은 구체가 생성된 부분에 부재간 간섭이 있다는 의미이므로, 사용자는 해당 부분에 대한 추가 작업과 관련된 소요를 계획 및 수행할 수

있음.

– 또한, MINDESK에서 지원하는 표기 기능을 활용하여 붉은 구체가 생성된 부분에 VR 사용자는 좌표값 및 간단한 스케치를 통한 표기를 수행할 수 있으며, 이는 PC 화면에 공유되는 VR 환경에서의 화면을 통해 다른 사용자들과의 협업을 원활하게 만들어 줄 수 있음.

▌VR 기반 성능 가시화 : 태양광 발전량 가시화

– VR 환경에서 일부 성능의 가시화를 수행하기 위한 조건은 다음과 같음.

- 점과 선의 경우, VR 환경에서 표현할 수는 있으나 그 규모는 사용자가 쉽게 인지할 수 없는 경우가 많으므로, 성능의 결과를 면, 입체의 형태로 표현할 수 있어야 함.
- 시뮬레이션 결괏값이 수치를 비롯한 데이터로 나오는 경우, 이를 구현된 모델링에 표현할 수 없다면 별도 그래프의 생성 등, 다른 방안에 대한 고려가 요구됨.
- 따라서, 면으로 표현 가능한 태양광 발전량 시뮬레이션의 결과를 VR 환경에서 가시화하여 사용자가 이에 대해 검토할 수 있도록 함.

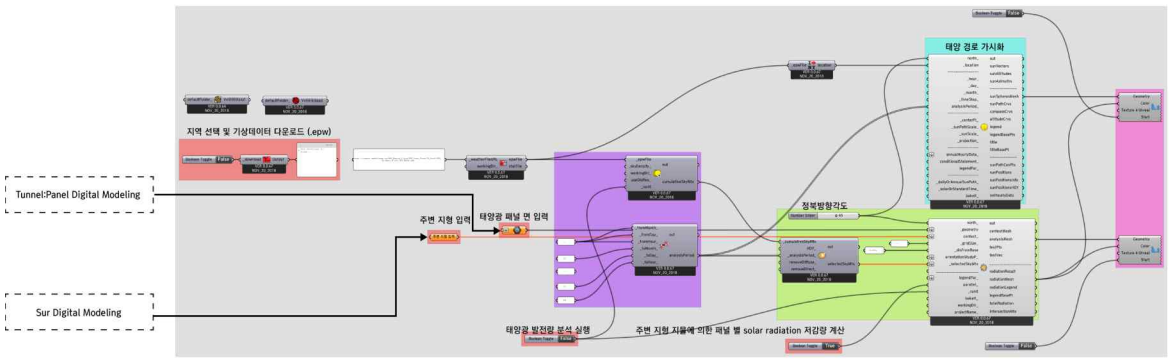


그림 85 VR 환경에서 태양광 발전량을 가시화하기 위한 알고리즘의 구성

– 태양광 발전량을 VR 환경에서 가시화하기에 앞서, 이를 Grasshopper에서 면으로 표현하기 위하여 다음과 같은 과정을 거침 [그림 85].

- Rhinoceros 7.0의 Nurbs 개체로 형성된 방음터널의 패널면과 주변 지형지물의 디지털 모델링 데이터를 Grasshopper로 불러와, 태양광 발전량 시뮬레이션 알고리즘의 대상 분석요소로 지정함.
- 건축 환경 분석을 위한 기상 데이터 포맷인 Energy Plus Weather File (.epw)에서 기상 정보를 추출함.
- 이전 단계에서 입력된 패널 및 주변 지형의 형상정보, 지역별 기상 정보를 바탕으로 기상 분석을 위한 Grasshopper 애드온인 Ladybug를 이용하여 패널면의 연간 태양 복사량을 기초로 계산된 태양광 발전량 값을 측정함.
- 해당 결과로 도출되는 태양광 발전량은 Ladybug의 시각화 기능을 통하여 방음터

널 패널의 각 면을 Mesh 형태로 변환하여 범례에 맞는 색상으로 표현됨.

- 가시화된 태양광 발전량 데이터는 면으로 표현되게 되므로, MINDESK로 내보내어 해당 결과를 VR 환경에서 구축, 검토할 수 있음 [그림 86].

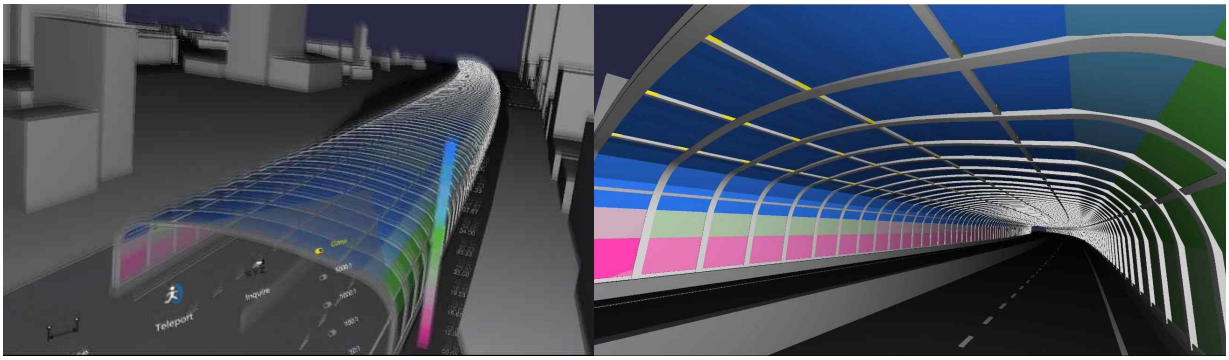


그림 86 VR 환경에서의 태양광 발전량 검토를 위한 가시화 수행

- 대상패널면의 태양광 발전량 예측값의 표현 정밀도는 사용자가 알고리즘의 조정을 통하여 결정할 수 있으며, 이에 대한 수치와 관련된 논의를 VR 환경의 접목을 통하여 기존대비 원활하게 수행할 수 있음.

6. 디지털 트윈 시스템 설계 및 활용

(1) 방음터널 디지털 트윈 시스템 설계

① 디지털 트윈 구성

- 디지털 모델과 피지컬 모델로 구성된 방음터널의 디지털 트윈 시스템을 설계함 [그림 87]. 디지털 모델과 피지컬 모델을 연동하는 피지컬 컴퓨팅(Physical computing)은 마이크로 컨트롤러(Micro controller)와 각종 센서(Sensor)로 프로타이핑됨. 피지컬 모델에 부착된 센서로부터 측정된 센서 정보는 마이크로 컨트롤러를 통해 디지털 모델로 수신됨.

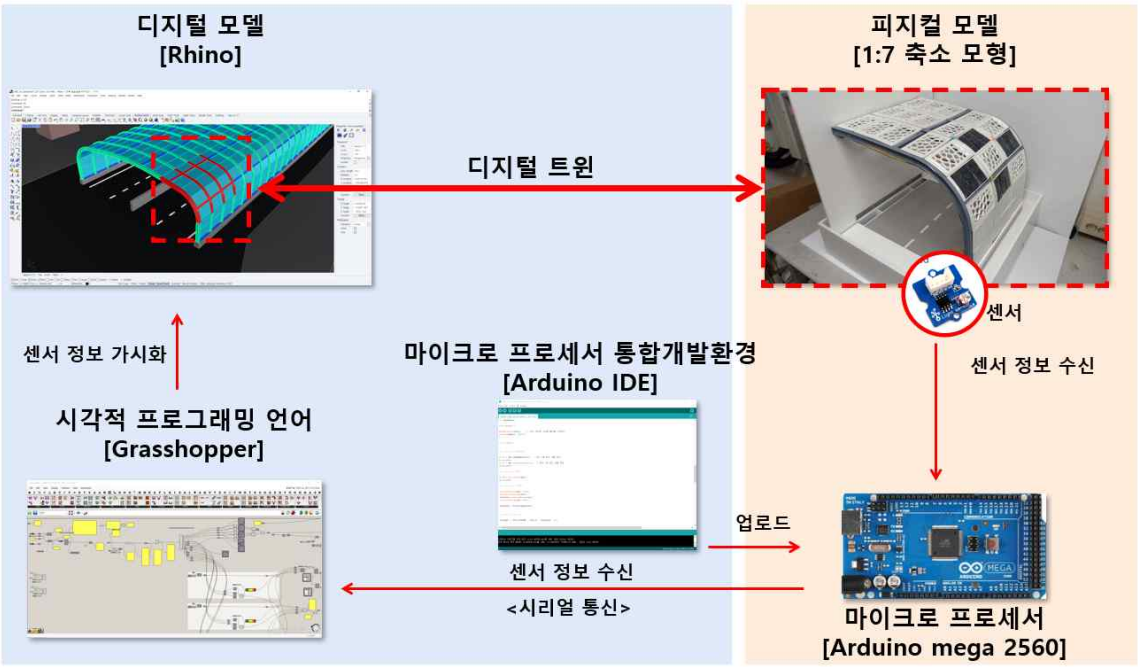
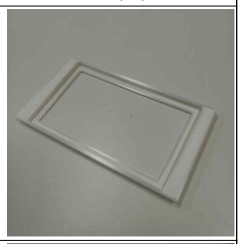
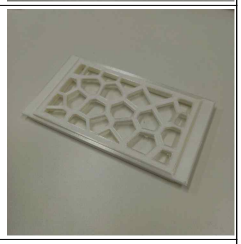
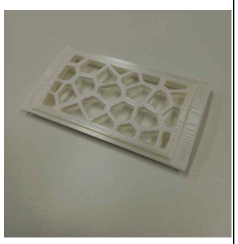


그림 87 디지털 트윈 구성

② 피지컬 모델의 제작

- 피지컬 모델은 실제 방음터널의 1:7 크기로 제작됨. 1방향 도로(2차선)를 덮는 스테이션(구조체) 4개소 규모로 제작됨.
- 구조체와 패널 프레임은 3D 프린팅을 통해 제작됨. 패널 프레임은 평면형과 곡면형이 있으며, 플러그엔플레이(Plug and Play) 방식으로 각종 기능성 패널과 결합될 수 있음 [표 18].
- 식생 패널: 식생 패널의 친환경적인 컨셉을 보로노이 다이어그램(Voronoi Diagram)을 활용하여 디자인함. 식생의 고정 및 물 공급이 가능함.
- 태양광 패널: 에너지 생산을 담당하는 태양광 패널과 환경 정보를 측정하는 센서가 피지컬 모델에 부착됨. 태양광 패널은 3장씩 개별 패널 프레임에 삽입되며, 총 4개(태양광 패널 총 12개)의 패널 프레임이 설치됨.

표 18 패널 프레임과 기능성 패널

부재명	기능	상세 명칭	사이즈	이미지
패널 프레임	각종 기능성 패널이 구조체에 안정적으로 부착될 수 있도록 함.	패널 프레임 (평면형)	132 * 73 * 6 ㎜	
		패널 프레임 (곡면형)	132 * 73.9 * 11.3 ㎜	
식생 패널	보로노이 형상으로 디자인되어 식생의 고정 및 물 공급이 가능함.	식생 패널 (평면형)	68 * 112 * 3 ㎜	
		식생 패널 (곡면형)	66.3 * 112 * 7 ㎜	
태양광 패널	태양광 패널 3개 결합하여 구성함.	태양광 패널+ 패널 프레임 (곡면형)	68 * 112 * 3 ㎜	

③ 피지컬 컴퓨팅 구성

- 마이크로 컨트롤러는 피지컬 컴퓨팅에서 장치, 통신, 프로세서 등의 제어를 담당함.
- 피지컬 컴퓨팅 플랫폼으로 아두이노(Arduino)를 활용함. 아두이노는 광범위한 센서를 지원하기 때문에 디지털 트윈 설계를 위한 프로토타이핑 도구로 적합함.
- 각종 센서는 구조체에 설치됨. 센서는 기성품이므로 축소모형의 비율(1:7)이 동일하게 적용되지 않음. 각 센서는 각 스테이션에 하나씩 설치되며, 센싱 범위를 고려하여 4개 스테이션 간격으로 동일한 센서가 반복 설치되는 것을 전제로 함.
- 마이크로 컨트롤러 및 각종 센서의 용도와 재원은 표 19, 표 20과 같음.

표 19 마이크로 컨트롤러(아두이노 메가)의 재원

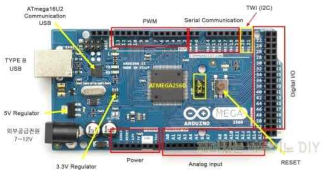
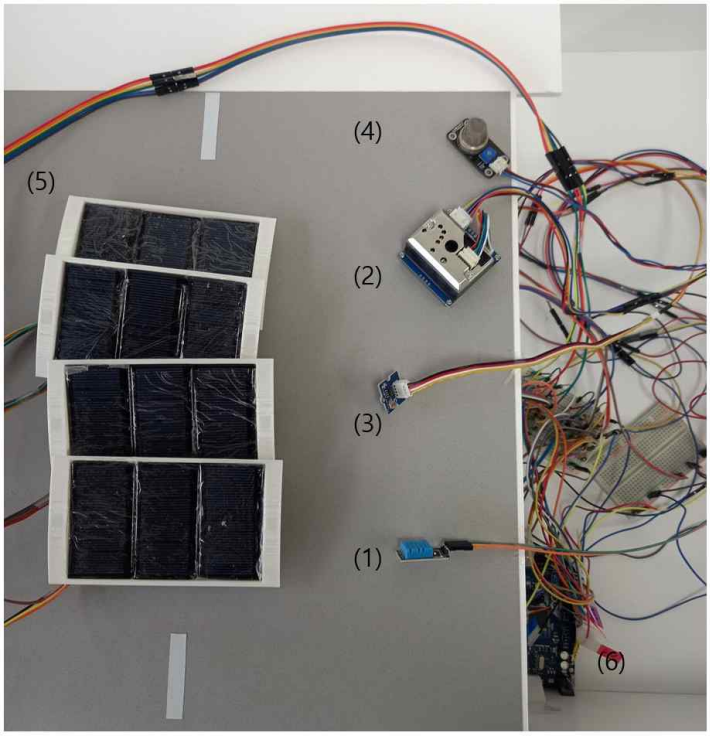
제품명	재원		사진
Arduino Mega 2560	마이크로 컨트롤러 칩	ATmega2560	 
	작동 전압	5V	
	정격전압	7-12V	
	허용전압	6-20V	
	디지털 입출력핀	54개	
	아날로그 입력핀	16개	
	DC 입출력핀 출력 전류	40mA	
	DC 3.3v 의 출력 전류	50mA	
	플래시 메모리	256KB	
	SRAM	8KB	
	EEPROM	4KB	
	클럭 스피드	16MHz	
	크기	100*53mm	

표 20 센서의 용도 및 재원

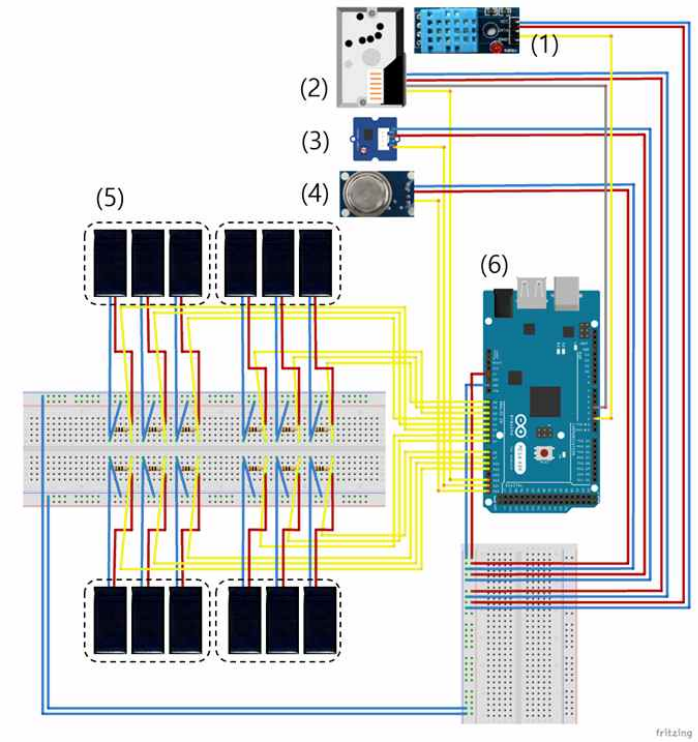
센서	용도	재원		사진
온/습도 센서	대기의 온, 습도 측정에 사용 >> 방음터널 내외부 및 식생 모듈 패널에 설치하여 온/습도 관리에 활용	제품명	DHT-11	
		작동 전압	5V	
		측정 범위	온도 - 0~50℃ 습도 - 20~90%	
		정밀도	온도 - ±2℃ 습도 - ±5%	
		크기	31 * 19 * 8 mm	
광학식 미세먼지 센서	공기 중의 먼지를 검출 >> 방음터널 외부(도시) 및 내부 미세먼지 측정에 활용	제품명	GP2Y1010AU0F	
		작동 전압	4.5V ~ 5.5V	
		측정 범위	0 ~ 240 μg/m3	
		정밀도	±15%	
		크기	46 * 34 * 17.7 mm	
가스 센서	프로판, 부탄, LPG, 천연가스를 검출하는 아날로그/디지털식 센서 >> 방은터널 내부 가스 측정에 활용	제품명	MQ-6 LPG 센서 모듈	
		작동 전압	5V	
		측정 범위	300 ~ 1000 ppm	
		크기	40 * 20 mm	
광센서	측정된 빛의 센기에 따라 저항 값이 변함. >>방음터널 내부의 조도를 측정하여 조명 제어에 활용함.	제품명	SEN11302P	
		작동 전압	3~5V	
		측정 범위	20kΩ ~ 1MΩ	
		크기	19 * 19 mm	
태양광 패널	태양광을 전류로 변환 >>방음터널 표면에 부착되어 전기 생산에 활용	제품명	AK68X37	
		작동 전압	5V	
		전원	0.3W	
		전류	60mA	
		크기	68 * 37mm	

- 피지컬 컴퓨팅 회로 구성
- 아두이노와 태양광 패널 및 센서를 연결하는 회로를 구성하고 [그림 88] 회로도 [그림 89, 단, 센서의 실제 크기를 반영하지 않음]로 나타냄.



(1) 온/습도센서
(2) 미세먼지 센서
(3) 광 센서
(4) 가스센서
(5) 태양광 패널
(6) 아두이노 메가

그림 88 피지컬 컴퓨팅 구현 사진



(1) 온/습도센서
(2) 미세먼지 센서
(3) 광 센서
(4) 가스센서
(5) 태양광 패널
(6) 아두이노 메가

그림 89 피지컬 컴퓨팅 회로도

(2) 센서 데이터의 디지털 트윈 연동 알고리즘 개발

① Arduino IDE를 활용한 센서 정보 수신

- 1차적으로 복수의 센서와 태양광 패널에서 센서 정보 및 에너지 발전량을 수신하는 알고리즘은 아두이노 전용 통합개발환경인 Arduino IDE를 통해 편집 및 컴파일되어 USB를 거쳐 아두이노 메가에 업로드됨 [그림 90].
- 아두이노 메가가 복수의 센서 (센서 4종, 태양광 패널 12개)에서 동시에 센서 정보를 수신하는 것은 전력 및 통신 부하로 안정적이지 않음. 모든 센서 정보를 100ms 간격을 두고 수신하고 CSV(comma-separated values) 형식으로 시리얼 모니터에 2000ms 간격으로 표시함.
- '온도(℃), 습도(%), 밝기(Lux), 미세먼지(μg/m3), 태양광 패널 A1, 태양광 패널 A2, 태양광 패널 A3, 태양광 패널 B1, 태양광 패널 B2, 태양광 패널 B3, 태양광 패널 C1, 태양광 패널 C2, 태양광 패널 C3, 가스(ppm)' 가 단위 없이 순서대로 입력됨.
- 예) 19,24,697,231.52,370,400,363,323,328,239,341,443,378,261,355,363,271
- 태양광 패널의 에너지 발전량은 0V에서 5V 사이의 아날로그 전압을 0에 1024 사이의 디지털 상수로 변환됨. 즉, 디지털 상수 1은 약 0.0049V와 같음.



그림 90 아두이노 IDE

② Rhino Grasshopper를 활용한 센서 정보 가시화

- 2차적으로 센서 정보를 재수신하여 가시화하는 알고리즘은 Rhino의 시각적 프로그래밍 언어인 Grasshopper로 개발됨. Firefly(피지컬 컴퓨팅을 지원하는 플러그인)를 활용한 Grasshopper와 아두이노 간 시리얼 통신을 통해 센서 정보 수신이 가능함.

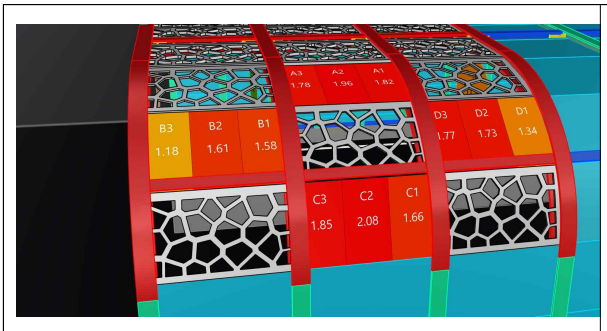
- 태양광 패널의 에너지 생산량:센서 수신 과정에서 ADC(Analog to Digital Convert)로 정수화되지만, 가시화 과정에서 실제 규모의 태양광 패널의 에너지 생산량에 맞게 보정됨 [표 21].

표 21 에너지 생산량 보정에 활용된 태양광 패널 재원

용도	특장점	재원		사진
태양광 패널	양면발전의 초고효율 N타입 모듈	제품명	LG420N2W-V5(LG전자)	
		셀 개수	6 x 12	
		셀 타입	Monocrystalline / N-type	
		전면 재료	Tempered Glass with AR Coating	
		모듈 크기	2,024 * 1,024 * 40 mm	
		최대 출력 (W)	420 W	
		최대출력 동작전류 (A)	9.98 A	
		최대출력 동작전압 (V)	42.1 V	
		개방전압 (V)	49.6 V	
		모듈 효율 (%)	20.3 %	

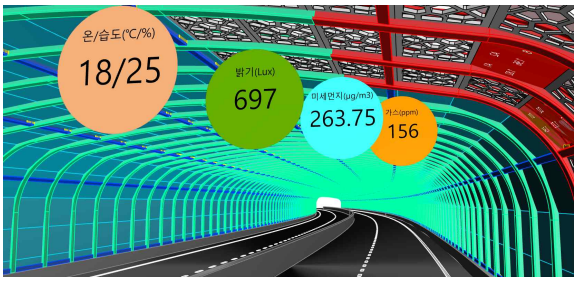
- 에너지 발전량이 높아짐에 따라 초록색-노란색-빨간색 순으로 표시되도록 설정함 [표 22].

표 22 태양광 패널 에너지 생산량 가시화

	
디지털 모델	피지컬 모델

- 센서 정도 가시화: 각 센서는 고유의 표시 색을 가지며 센서 정보의 수치에 따라서 채도가 조절되어 유사시 쉽게 식별할 수 있도록 함 [표 23].

표 23 센서 정보 가시화

	
디지털 모델	피지컬 모델

- 디지털 트윈 활용 시나리오
- 축소모형을 활용한 디지털 트윈은 실제 방음터널을 구성하기 위한 프로토타입인 동시에 현장 관리자가 방음터널의 단위 모듈을 관리하기 위한 플랫폼으로 활용될 수 있음.

③ 센서정보 모니터링을 위한 센서정보의 형식 변환

- Grasshopper의 플러그인 Lunchbox(Data 형식 변환을 지원)를 활용하여 센서정보를 CSV에서 JSON(JavaScript Object Notation)으로 변환함 [그림 91].
- 사물인터넷 클라우드 서비스 ThingSpeak (www.thingspeak.com)를 활용하여 센서정보 및 태양광 에너지 발전량을 웹상에서 모니터링함 [그림 92].

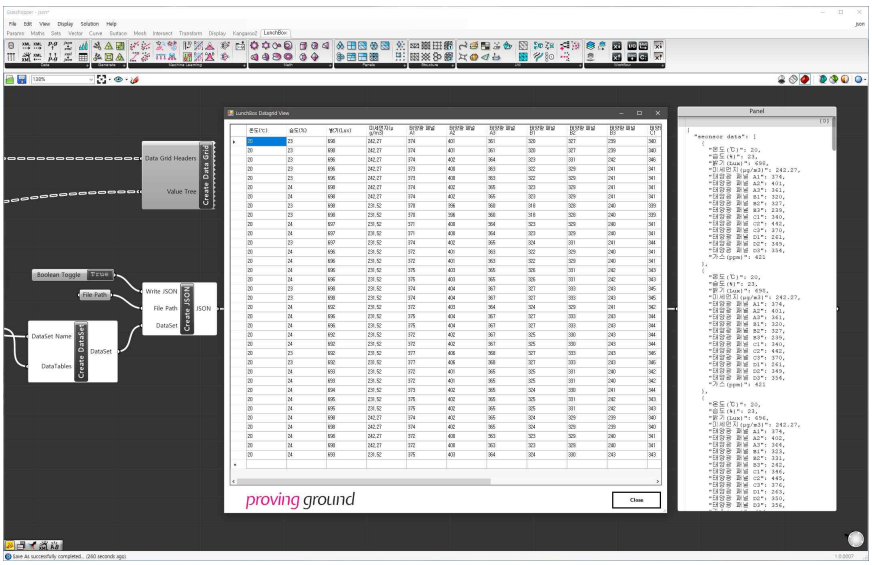


그림 91 센서정보를 CSV에서 JSON으로 변환

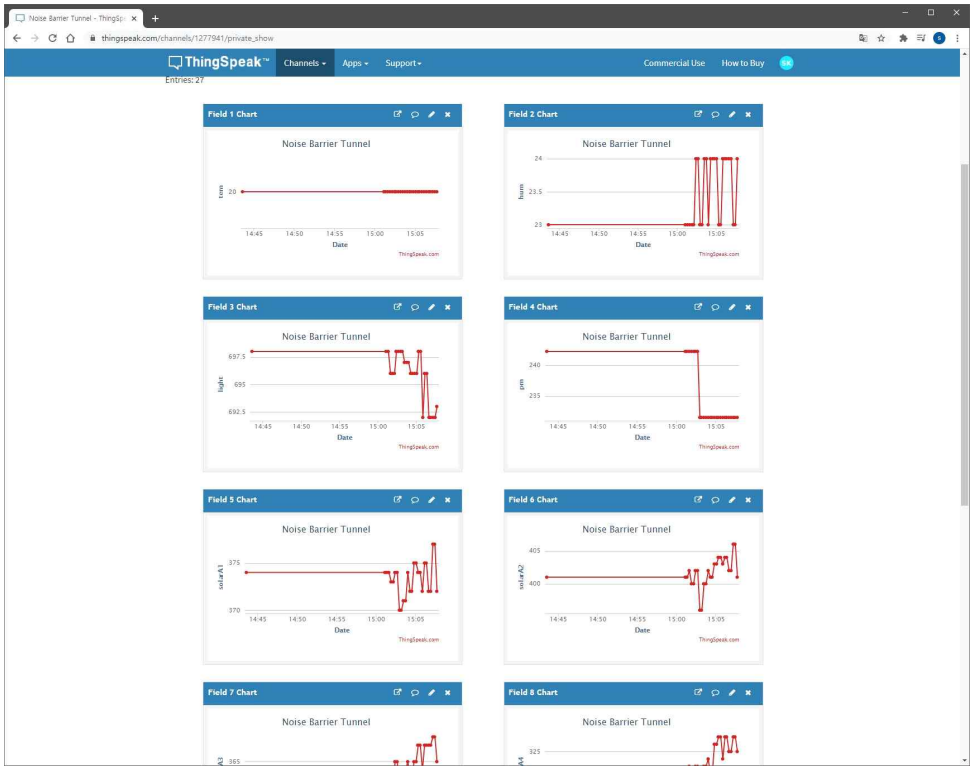


그림 92 JSON으로 변환된 센서정보를 IoT 플랫폼에서 모니터링

▌성과점검기준에 의한 질적 성과지표 달성 여부

④ 관련 항목 및 검증 방법

- A-2-1 : 센서 데이터 수신 및 가시화
- 목표치 : 20%
- 달성치 : 100%
- 측정 및 검증 방법 : 데이터 출력 센서 수 / 데이터 입력 센서 수 > 0.2

⑤ 검증 결과

- 데이터 출력 센서 수 : 16(센서 4종, 태양광 패널 12개)
- 데이터 입력 센서 수 : 16(센서 4종, 태양광 패널 12개)
- 데이터 출력 센서 수 / 데이터 입력 센서 수 = 1.00
- 총 16개 센서의 데이터 모두 원활한 입출력을 한 것으로 나타나 성과 달성함.

(3) 빅데이터 기반 설계 최적화 알고리즘 개발

❙ 방음터널에 설치된 센서로부터 수집되는 빅데이터는 새로운 방음터널 설계 과정에서 활용될 수 있음. 구조물의 안정성을 측정하기 위해 사용되는 자이로 센서는 부재의 수명 예측에 활용될 수 있음. 부재 재사용에 필요한 부재의 수명에 대한 정보를 확보함으로써 재사용을 촉진하고 환경 및 비용적 최적화의 가능성이 있음.

❙ 센서 데이터 (빅데이터) 기반 설계 최적화 알고리즘은 1) 센서 데이터 수집 및 분석을 통한 부재 수명 예측, 2) 예측된 부재 수명 데이터를 이용한 방음터널 최적 설계안 및 자재조달계획안 생성 과정으로 구성됨 [그림 93]. 물리 모델은 3D 프린팅, 6축 자이로센서, 아두이노를 이용하여 구축되었으며 디지털 모델의 구현 및 최적화는 Rhino-Grasshopper, VisualARQ, Python, Gurobi등을 이용하여 수행되었음.

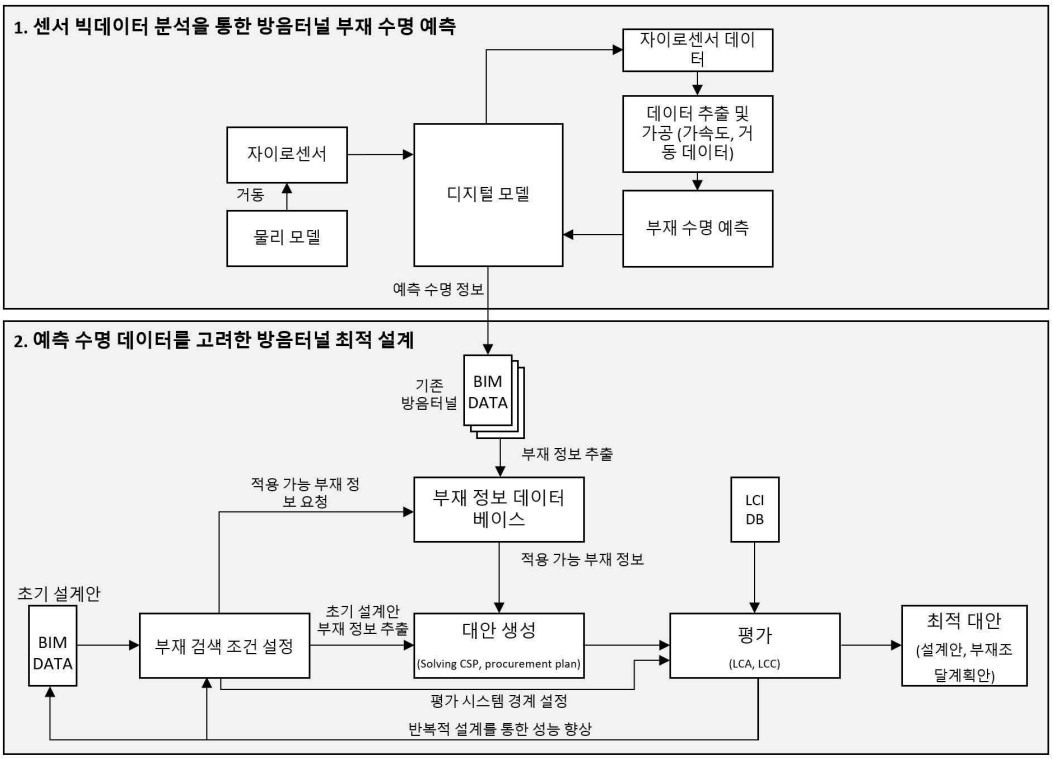


그림 93 센서 빅데이터 기반 설계 최적화 프로세스

① 센서 빅데이터 분석을 통한 방음터널 부재 수명 예측[30)]

- 방음터널 구조물에 가해지는 충격으로 인한 피로 균열 및 피로 파괴가 발생할 수 있음.
- 방음터널 구조물의 피로 한도 곡선에서 피로 한도 이상의 응력이 발생하였을 경우 해당 응력의 진폭을 파악하여 수명을 예측할 수 있음. 각 부재에 벡터 계측 기반의

30) Kim, J., & Kim, S. A. (2020). Lifespan Prediction Technique for Digital Twin-Based Noise Barrier Tunnels. Sustainability, 12(7), 2940.

자이로 센서를 활용하여 실시간으로 구조물의 거동에 관한 정보와 응력의 진폭에 관한 정보를 수집함.

- 6축 자이로 센서를 이용하여 각속도, 축 가속도를 측정함. 각속도의 측정을 통해 부재의 회전 방향과 속도를 도출할 수 있음. 축 가속도 측정을 통해 부재의 변위를 측정함. 두 정보를 통합하여 휨 모멘트를 측정하여 이를 통해 부재에 가해지는 응력의 크기를 분석할 수 있음. 디지털 모델은 응력에 관한 정보를 수집하며 시각화함 [그림 94].
- 연동된 디지털 모델에서 확인할 수 있는 부재의 응력을 기록하여 응력의 진폭을 확인할 수 있음. 응력 데이터와 부재의 물성 정보를 이용하여 피로한도 곡선을 도출함. 도출된 피로한도 곡선은 동일 응력이 N회 반복될 때 파괴되는 것이므로, N값은 부재의 총 수명임. 부재에 작용하는 응력의 크기에 비례하여 상대적인 잔여 수명을 예측할 수 있음.

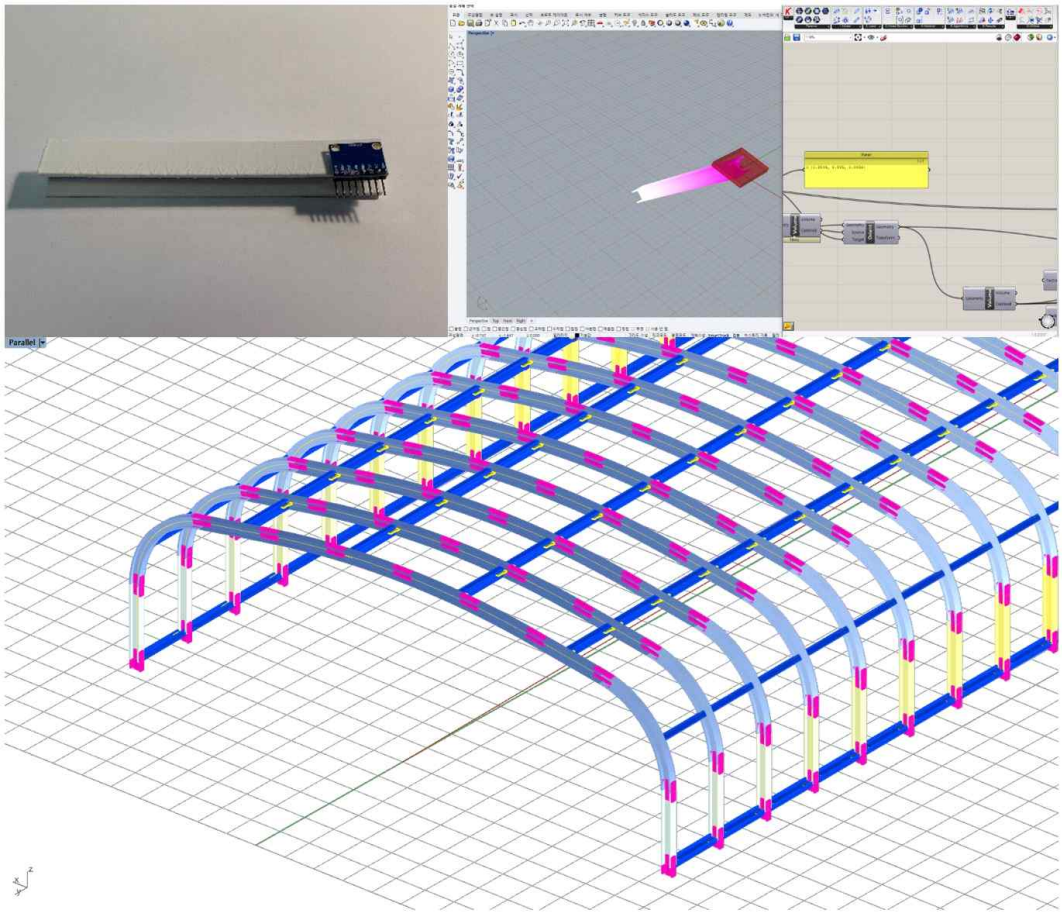


그림 94 자이로 센서를 이용한 방음터널 프로토타입의 부재 수명 예측 및 가시화

② 예측 수명 데이터를 고려한 방음터널 최적 설계[31)]

- 예측 수명 데이터를 고려한 방음터널의 최적 설계 과정을 통해 방음터널의 생애주기동안 발생하는 1) 환경 부하와 2) 비용 측면의 최적 대안이 도출됨.
- 최적 설계를 위한 프레임워크는 부재 정보 데이터베이스와 대안 생성 모듈로 구성됨. 설계자는 설계안과 자재 재사용에 관한 설정을 설계 지원 도구에 입력함. 설계자는 설계에 관한 제약조건 등을 입력함 [그림 95]. 제약조건은 부재의 규격, 방음터널 구조물의 목표 수명 등이 포함됨. 입력된 정보를 바탕으로 부재 정보 데이터베이스에 가용한 재사용 부재의 목록을 요청함. 데이터베이스로부터 가용한 재사용 부재의 목록과 정보가 도출된 후 대안 생성 모듈은 부재를 이용하여 생성 가능한 효율적인 재고 절단 계획과 부재 조달 계획을 생성함 [그림 96, 그림 97]. 대안이 생성된 후 Life Cycle Assessment (LCA)와 Life Cycle Cost (LCC) 기반의 환경·경제적 비용 평가가 수행됨. 설계자는 산출된 평가를 바탕으로 반복적으로 디자인을 수정하고 최종적으로 최적 대안을 도출할 수 있음.
- 부재의 수명이 방음터널 구조물의 목표 수명보다 짧을 경우 구조물의 생애주기동안 주요 구조체의 안정성을 보장할 수 없으며 부재 교체로 인한 추가적인 비용 등이 발생할 우려가 있어 부재의 수명에 관한 데이터를 반드시 고려해야 함. 따라서 센서 빅데이터 분석을 통해 생성한 부재의 예측 수명이 부재 정보 데이터베이스를 통해 관리되어야 함.

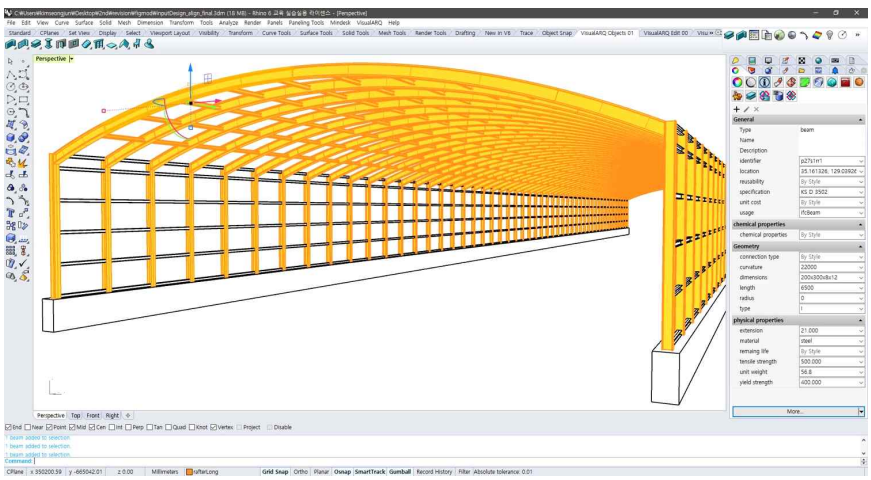


그림 95 최적화 이전의 방음터널 설계안

31) Kim, S., & Kim, S. A. (2020). Framework for Designing Sustainable Structures through Steel Beam Reuse. Sustainability, 12(22), 9494.

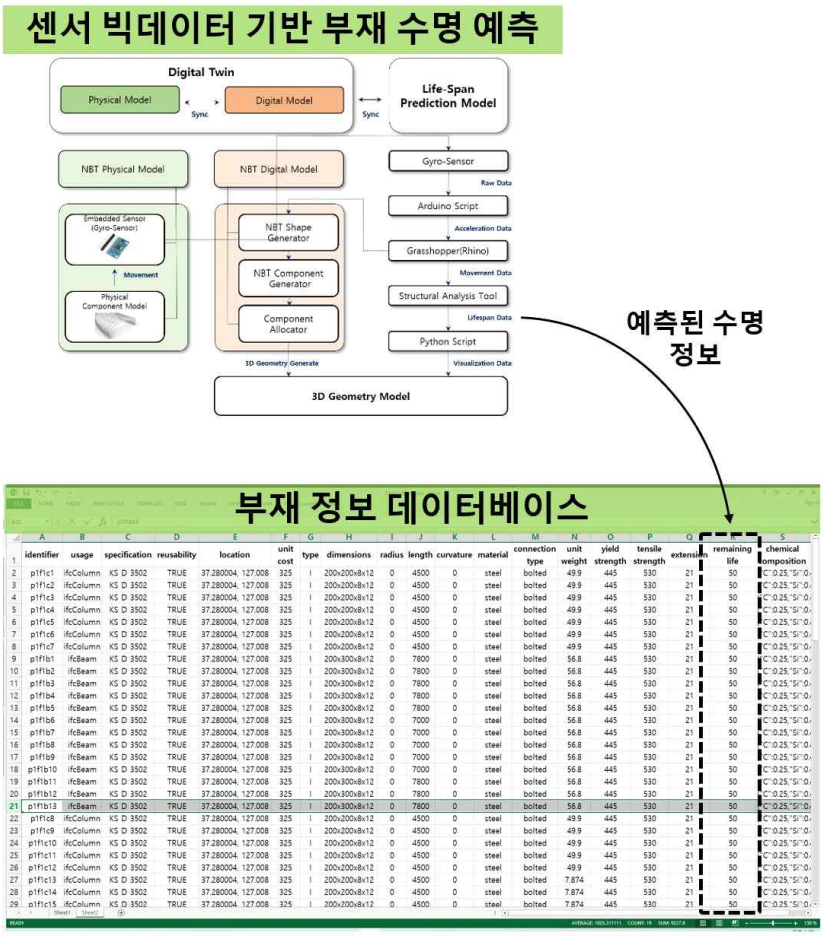


그림 96 부재 정보 데이터베이스를 통한 예측 수명 정보 관리

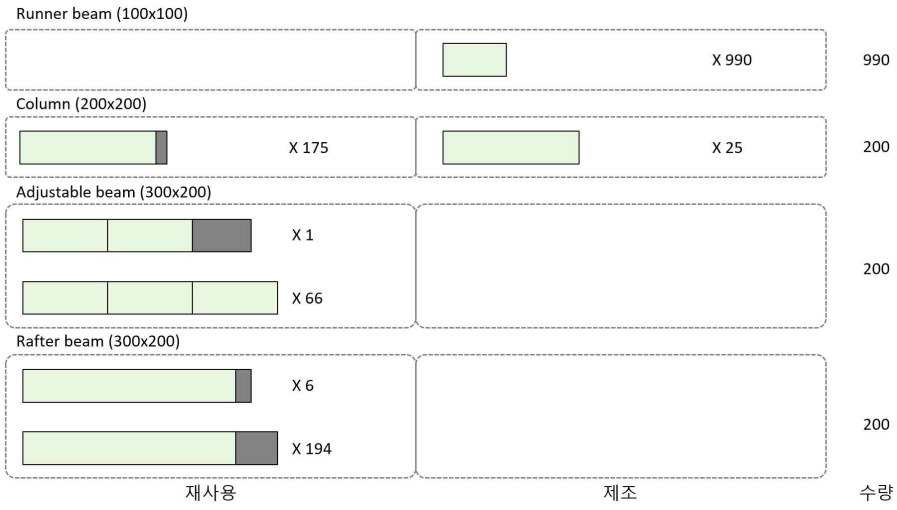


그림 97 최적 부재 조달 계획안

- 설계자에 의하여 초기 설계안의 BIM 모델과 설계 제약조건 (목표 수명 및 부재 규격 등)에 대한 정보가 입력된 후 가용한 재사용 부재의 목록이 부재 정보 데이터베이스로부터 도출됨. 예를 들어 방음터널의 목표 수명을 40년으로 설정하였을 경우 예측 잔여 수명이 40년 미만인 부재는 검색에서 제외됨.

- 가용한 재사용 부재의 목록을 고려하여 설계안에 따라 건설하기 위해 요구되는 부재를 조달하기 위한 최적의 대안이 생성됨. 재사용 자재와 같이 한정된 자원을 고려하여 최적의 조달 계획안을 생성하기 위하여 재고 절단 최적화를 수행해야 함. 본 연구에서는 재고 절단 최적화를 수행하기 위한 상용 프로그램인 Gurobi를 이용함.
- 최적의 부재 조달 계획안이 생성된 후 LCA, LCC를 기반으로 하여 환경 및 경제성 평가가 수행됨. 설계자는 환경 및 경제적 성능을 검토한 후 반복적으로 설계안을 수정하여 최적의 설계안과 부재 조달 계획안을 도출할 수 있음.

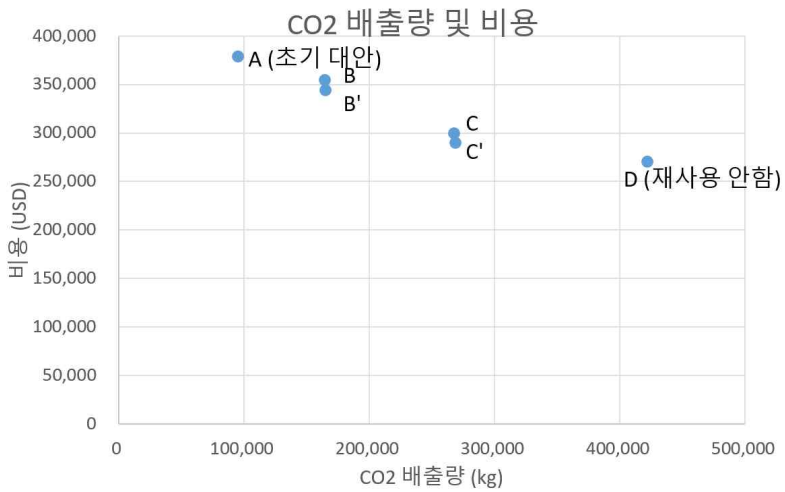


그림 98 반복적 수정을 통한 최적 대안 생성 (A,B,B’,C,C’)

- 200m 길이의 직선 구간에 방음터널을 설치하는 상황을 가정하고 방음터널의 설계를 진행함. 환경적 요인과 비용의 절감을 동시에 절감하지 못하는 것으로 나타났지만 설계자가 환경적, 경제적 요인의 가중치에 따라 최적의 대안을 선택할 수 있음 [그림 98].

7. 파일롯 프로젝트를 통한 시스템 검증

(1) 파일롯 프로젝트 구현

▌파라메트릭 디자인 시스템을 이용한 형태 및 디지털 모델 생성

① 방음터널 설치 부지 선정

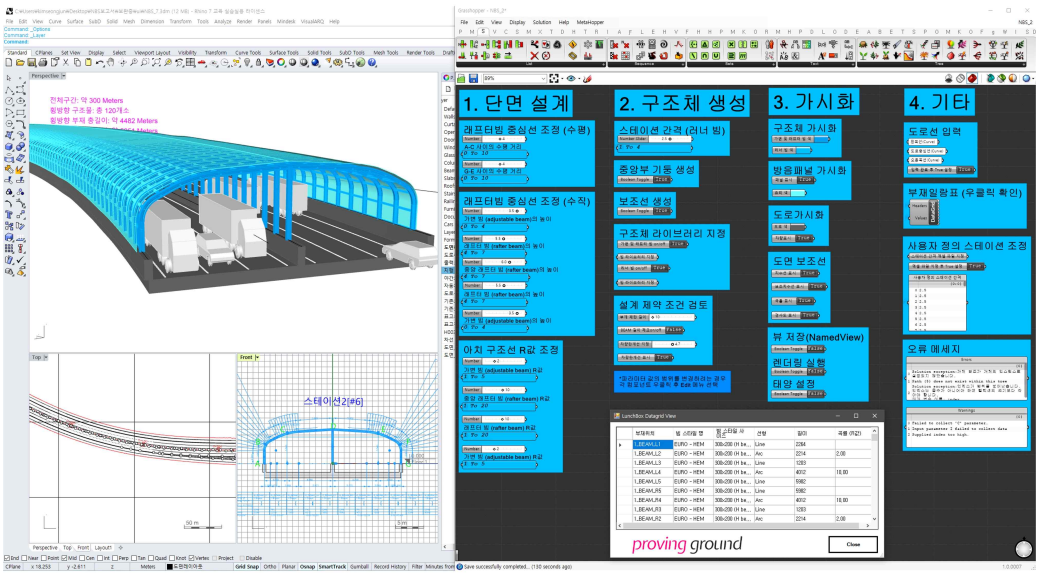


그림 99 파라메트릭 디자인 기반의 방음터널 설계 자동화 시스템

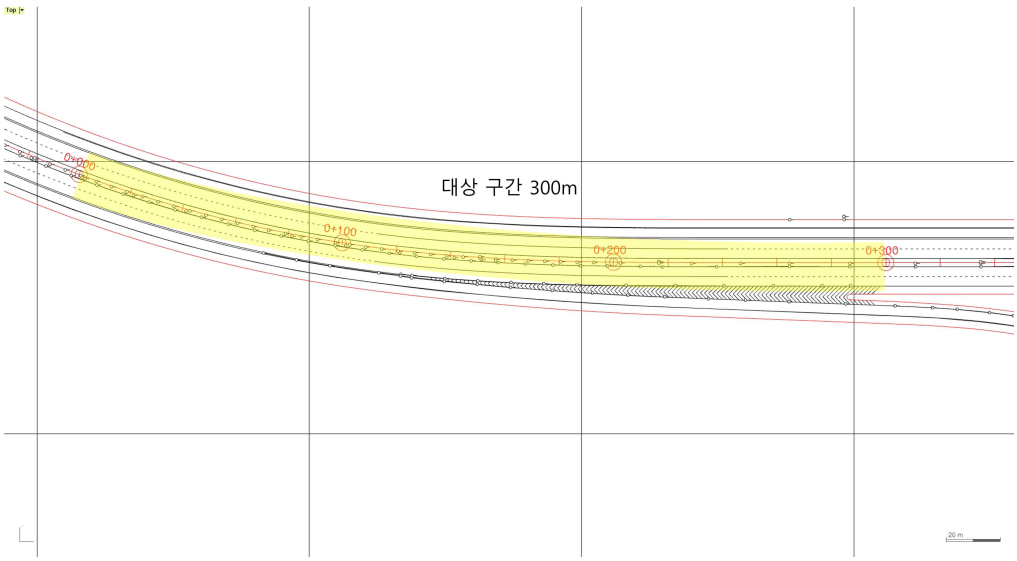


그림 100 파일롯 프로젝트 대상 방음터널 설치 대상 도로

- 실제 방음터널 프로젝트를 참고하여 설계 자동화 시스템을 적용하여 가상의 대지에 방음터널을 건설하기 위한 설계안을 생성함 [그림 99].
- 설치 대상 구간의 길이는 300m 이며 도로의 폭은 약 26m 내외 [그림 100].

② 방음터널 유형 선정

- 방음터널 설치 사례를 참고하여 Oval type의 방음터널을 선정.
- 26m 내외의 도로폭을 고려하여 중앙부에 추가적으로 기둥을 배치.
- 방음터널 내부의 원활한 차량 통행을 위하여 차량 진입 유효 높이를 3.4m로 설정.

③ 방음터널 단면 설계 및 형태 생성

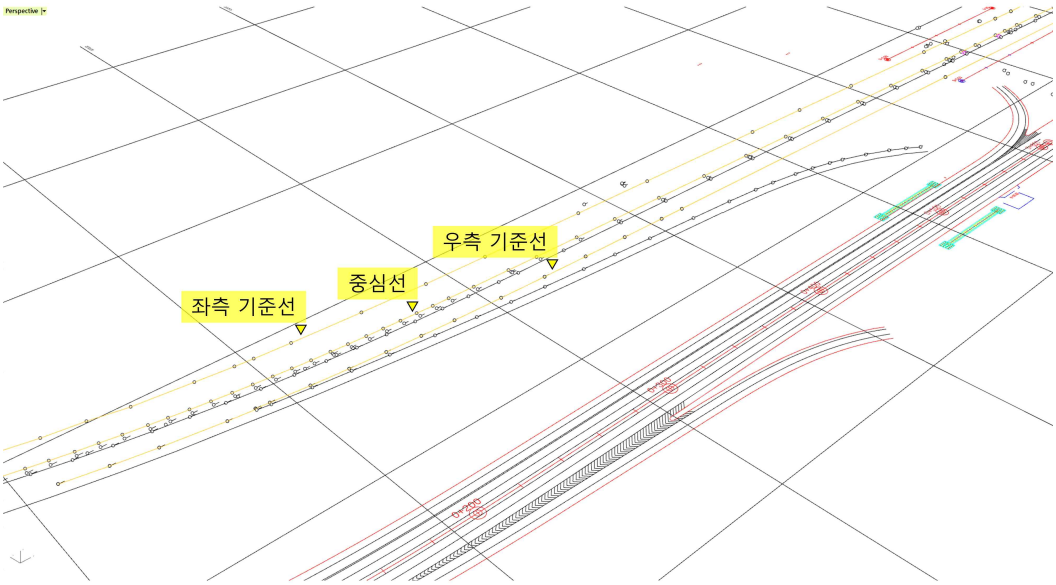


그림 101 방음터널 형태 생성을 위한 도로 기준선

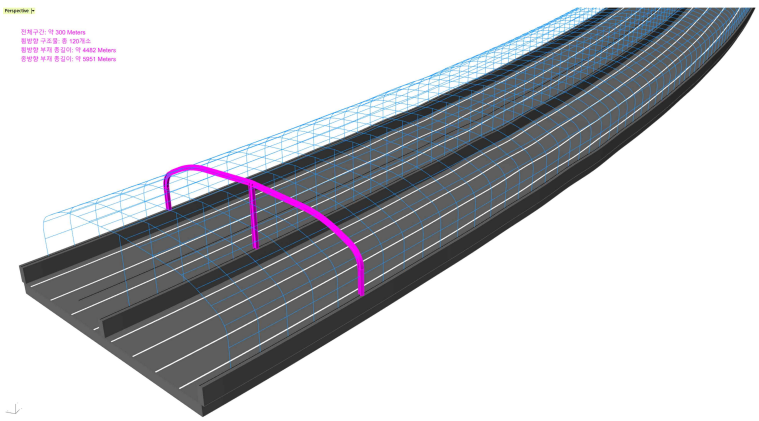


그림 102 구조체 중심선을 통한 방음터널 형태 검토

- 방음터널의 형태 생성에 기준이 되는 도로 중심선 및 좌우측 기준선을 설계 자동화 시스템에 입력 [그림 101].
- 설계 자동화 시스템 UI 내 단면설계 그룹의 파라미터 조작을 통해 방음터널 단면부 설계 진행.
- 생성된 구조체 중심선으로 표현되는 방음터널의 형상을 확인하여 설계안 수정 [그림 102].

▌ 파라메트릭 디자인 시스템을 이용한 디지털 모델 생성

① 방음터널 디지털 모델 (BIM 모델) 생성

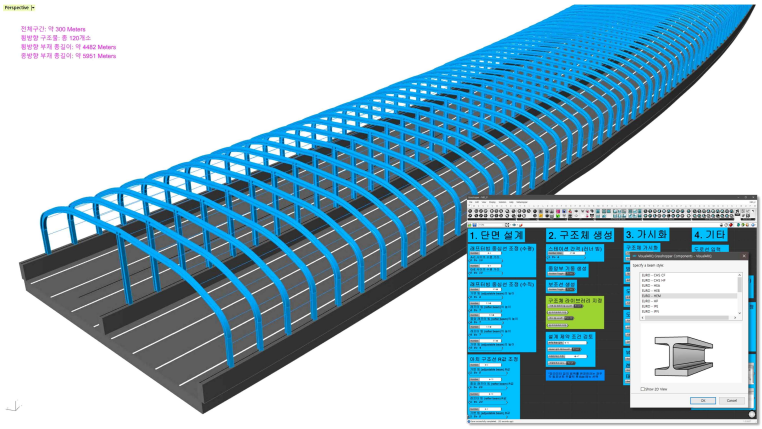


그림 103 횡방향 구조체 생성 (가변 빔, 래프터 빔)

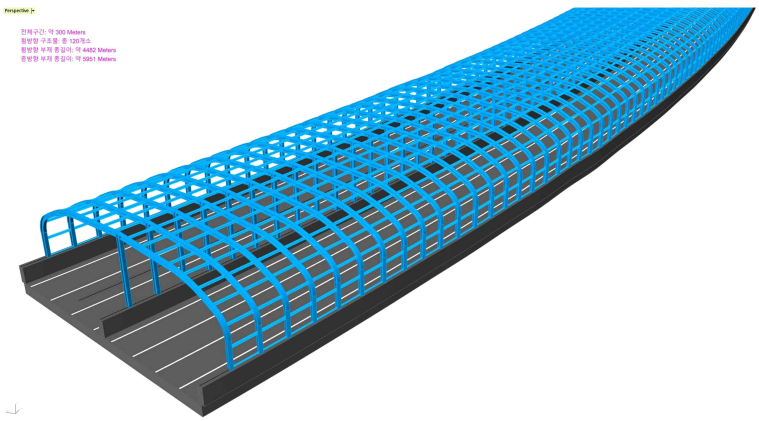


그림 104 종방향 구조체 생성 (러너 빔)

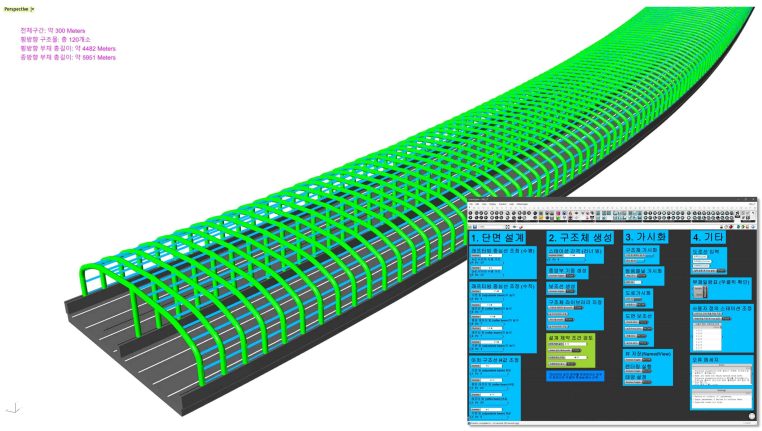


그림 105 설계제약조건 위반 부재 검토

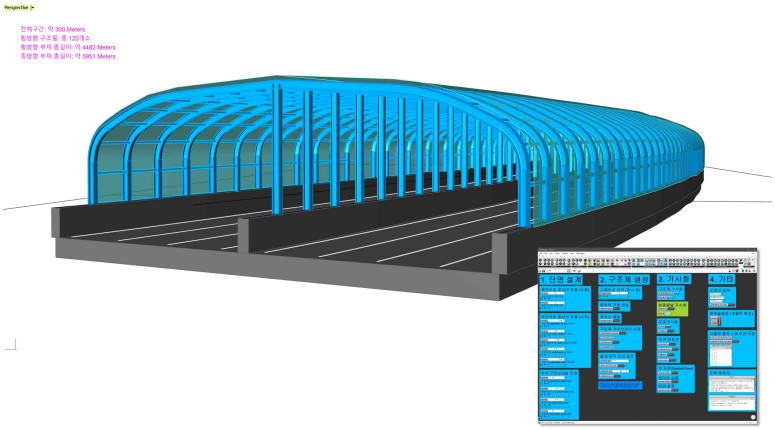


그림 106 방음터널 패널 배치

- 설계안이 확정된 이후 구조체 중심선을 기준으로 방음터널 부재를 배치. 설계자는 부재 라이브러리 내에서 배치하고자 하는 종류를 선택 (H-beam 등) [그림 103, 그림 104].
- 일반적으로 사용되는 300x200 규격의 H-beam을 적용함.
- 추가적으로 부재의 제작 및 운송 가능 여부를 판단하기 위하여 미리 설정한 설계제약조건을 위반하는 부재가 존재하는지 검토 진행. 위반하는 부재가 있는 경우 적색으로 구분하여 설계자에게 안내 [그림 105].
- 구조체와 동일한 방식으로 방음터널 패널 생성 진행 [그림 106].
- 최종적으로 생성된 BIM 기반의 디지털 모델은 디지털 트윈 구현과 건설을 위한 데이터 저장 및 교환을 위해 사용됨.

② VR을 이용한 방음터널 설계안 검토



그림 107 VR 장비를 이용한 방음터널 설계안 검토

- 사용자 시점에서 방음터널 설계안을 검토하기 위하여 HMD장비를 착용하여 VR환경에서 검토 작업을 수행 [그림 107].
- 건설 과정에서 문제가 될 수 있는 부재 간의 간섭에 대한 검토를 미리 진행.

▌방음터널 도면생성

① 도면 생성

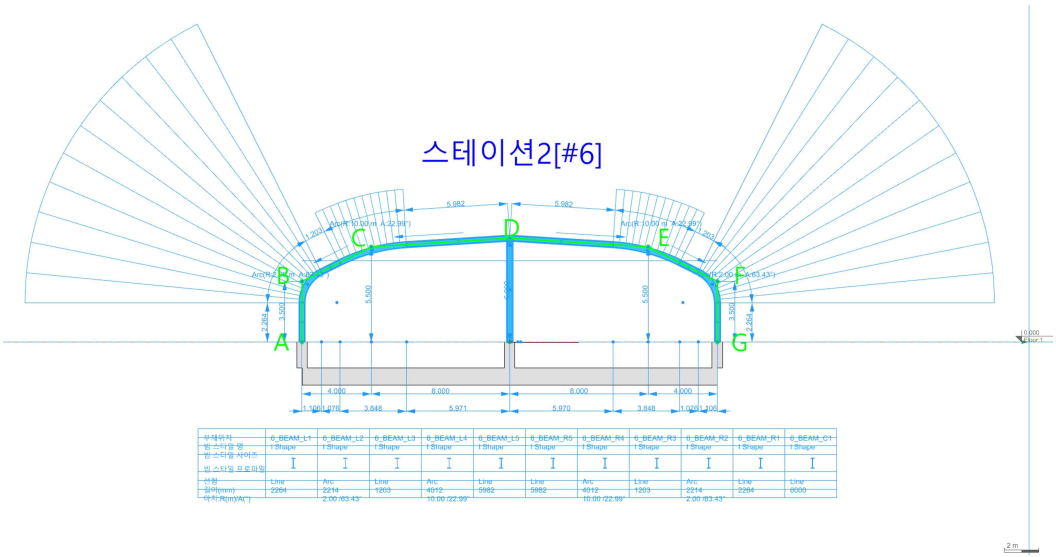
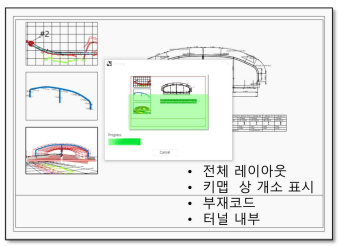
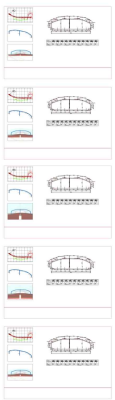


그림 108 스테이션 별 도면 생성



스테이션 별 도면 생성



도면 출력 (PDF 형식)



도면 출력 (DWG 형식)

그림 109 전체 구간 도면 출력

- 방음터널 디지털 모델 생성 후 횡단면을 기준으로 도면을 생성함 [그림 108].
- 방음터널 시공의 기준이 되는 각 구간의 단면 (스테이션)별로 도면을 생성.
- 생성된 도면의 추가적인 가공을 위하여 CAD 도구와 호환 가능한 DWG형식 및 PDF형식으로 플롯 기능 지원 [그림 109].
- 도면의 이해도를 높이기 위하여 각 스테이션 지점, 3차원 투시도 등을 함께 제공.

② 물량 산출표 및 패브리케이션을 위한 부재별 데이터 생성

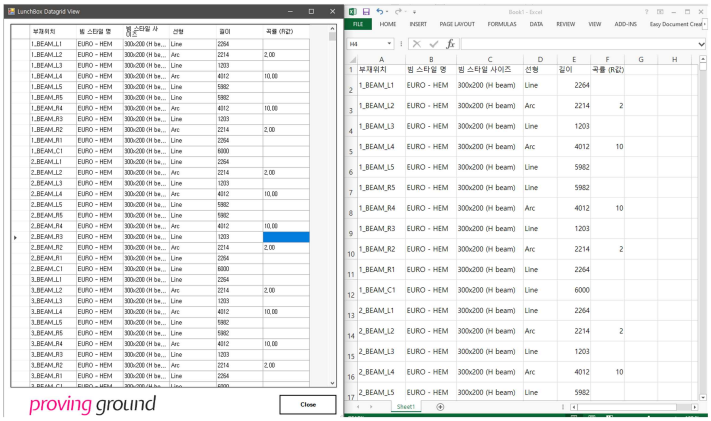


그림 110 견적 산출, 부재 패브리케이션을 위한 물량 산출표 제공

- 견적 산출 부재 제작에 활용하기 위하여 물량산출표 생성. 물량 산출표는 설계자의 편의를 위하여 설계 자동화 시스템의 팝업창을 이용하여 제공하거나 원활한 데이터 교환을 위하여 엑셀 형식으로 제공됨 [그림 110].
- 부재의 가공 및 제작을 위하여 절단, 절곡 과정에서 필요한 규격, 수량, 길이, 곡률 (R값)에 관한 정보를 함께 제공.

▌3D 프린팅을 이용한 물리 프로토타입 모델 생성

① 3D 프린팅을 이용한 부재 출력

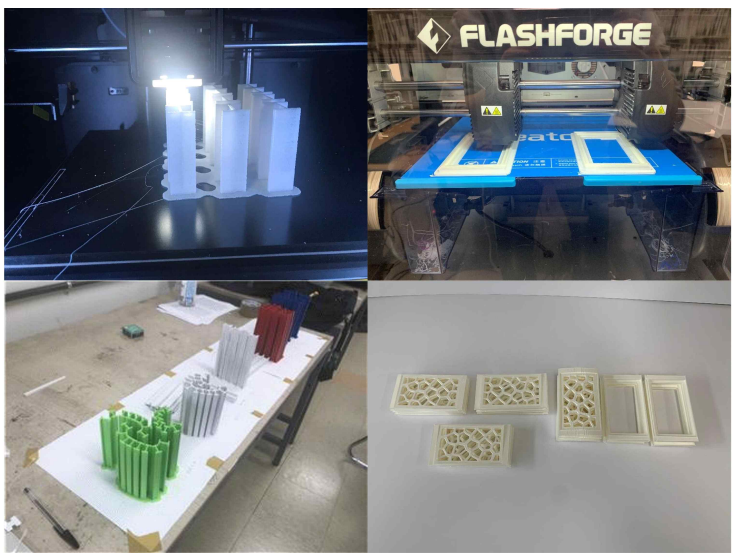


그림 111 3D 프린터를 이용한 부재 출력 (빔 및 패널 프레임)

- 생성된 설계안의 일부 구간을 대상으로 디지털 트윈을 구현하기 위한 물리 프로토타입 모델을 진행함. 1방향 도로 2차선 내 스테이션 4개소에 해당.
- 물리 프로토타입 모델은 3D 프린터의 출력 가능 규격을 고려하여 1:7 스케일로 제

작됨 [그림 111].

- 본 연구에서 제안된 차세대 방음터널 플랫폼 개념에 따라 플러그 엔 플레이 방식으로 탈부착 가능한 방음패널 모듈 제작. 파일롯 프로젝트에서는 태양광 패널, 식생 패널 2종의 패널을 제작.

② 부재 조립 및 센서 설치



그림 112 출력된 방음 패널 부재 및 센서와 통합된 방음 패널

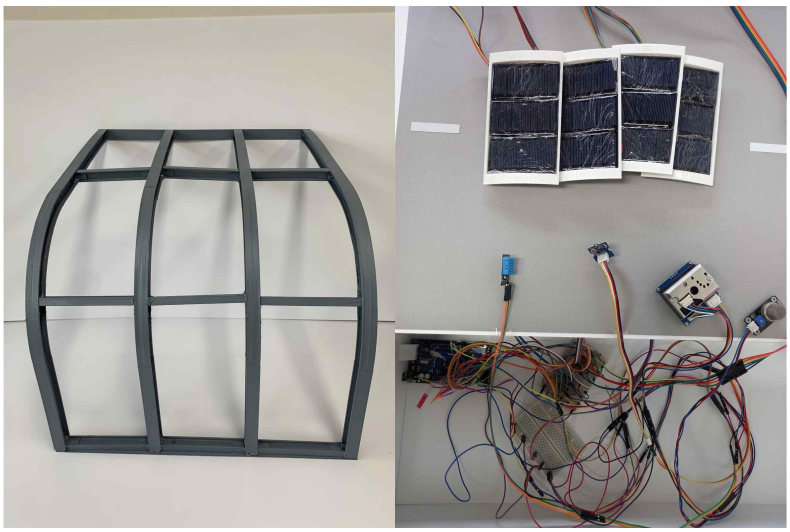


그림 113 부재 별 센서 결합 및 전체 부재 조립 과정



그림 114 최종 방음터널 물리 프로토타입 모델

- 출력된 부재에 센서를 결합하여 방음터널 주변의 데이터를 수집하고 디지털 모델로 송신 [그림 112].

- 센서 데이터의 수집 및 디지털 모델과의 통신을 위하여 마이크로 컨트롤러 (아두이노) 플랫폼을 기반으로 피지컬 컴퓨팅을 구성함 [그림 113].
- 온/습도 센서, 광학식 미세먼지 센서, 가스 센서, 광센서, 태양광 패널을 각 부재에 결합. 결합된 전체 부재를 조립하여 물리 모델을 구축함 [그림 114].

▌디지털 트윈 시범 운용 (센서 데이터 송수신 및 데이터 가시화)

① 디지털 트윈 시스템 설계

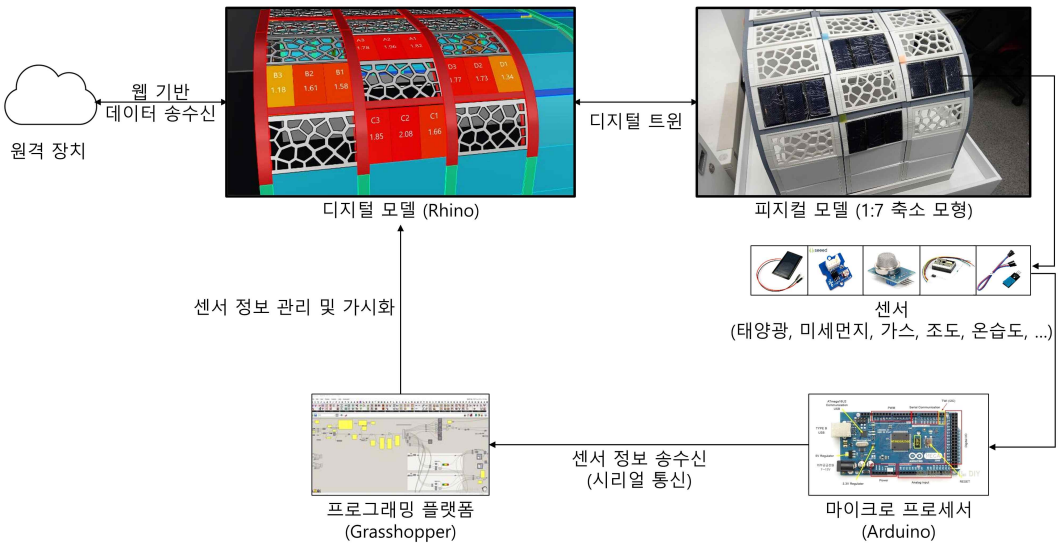


그림 115 파일롯 프로젝트 디지털 트윈 시스템 구성

- 방음터널의 디지털 모델과 물리 모델로 구성된 디지털 트윈 시스템을 구축함. 피지컬 모델에 부착된 센서는 주변의 환경에 관한 정보를 분석하여 수집하며 이 정보는 마이크로 프로세서를 이용하여 디지털 모델로 전송함.
- 정보 전송 과정에서 시리얼 통신 기반의 데이터 송수신이 이루어지며 시각적 프로그래밍 플랫폼을 이용하여 정보를 디지털 모델에 반영하고 가시화함.
- 또한 실제 방음터널 디지털 트윈의 운용 상황을 고려하여 원격 장치를 이용하여 방음터널에 관한 데이터를 모니터링하기 위하여 웹 기반으로 정보를 통신함.

② 센서 데이터 송수신 테스트

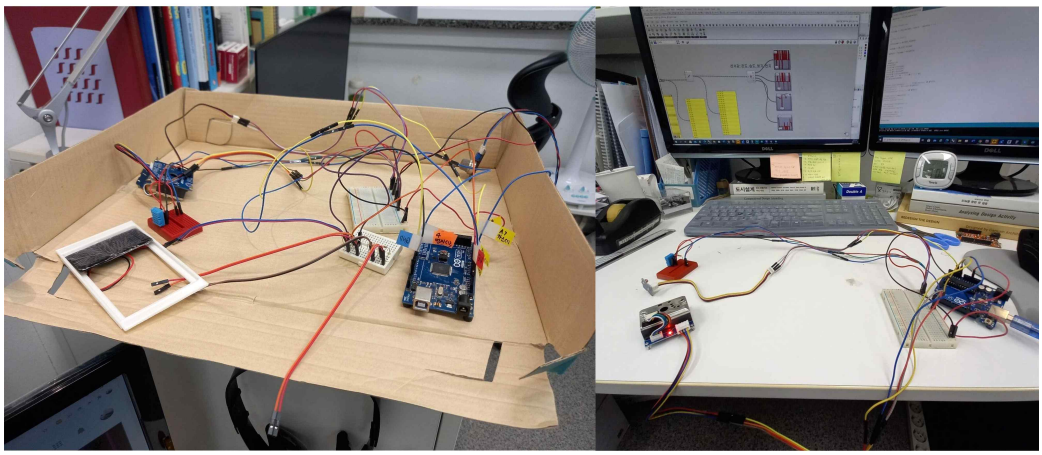
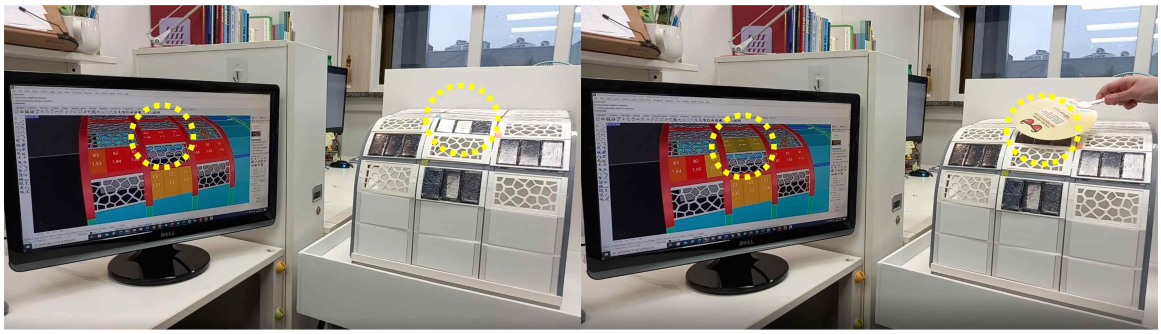


그림 116 개별 부재에 결합된 센서 데이터의 송수신 테스트



음영 생성 전　　음영 생성 후

그림 117 태양광 패널 발전량 데이터 수집 테스트

- 피지컬 모델에 부착된 온/습도 센서, 광학식 미세먼지 센서, 가스 센서, 광센서, 태양광 패널로부터 수집된 데이터의 송수신 과정을 테스트함 [그림 116].
- 센서 데이터는 CSV 형식을 통해 2000ms 간격으로 수집됨.
- 센서 데이터에서 수집된 값의 단위와 스케일 조정을 수행. 예를 들어 축소모형에 설치된 태양광 패널의 발전량을 실제 설치할 420W급의 태양광 패널의 출력으로 변환함 [그림 117].

③ 센서 데이터 가시화



그림 118 디지털 트윈 활용 시나리오 - 태양광 발전량 모니터링

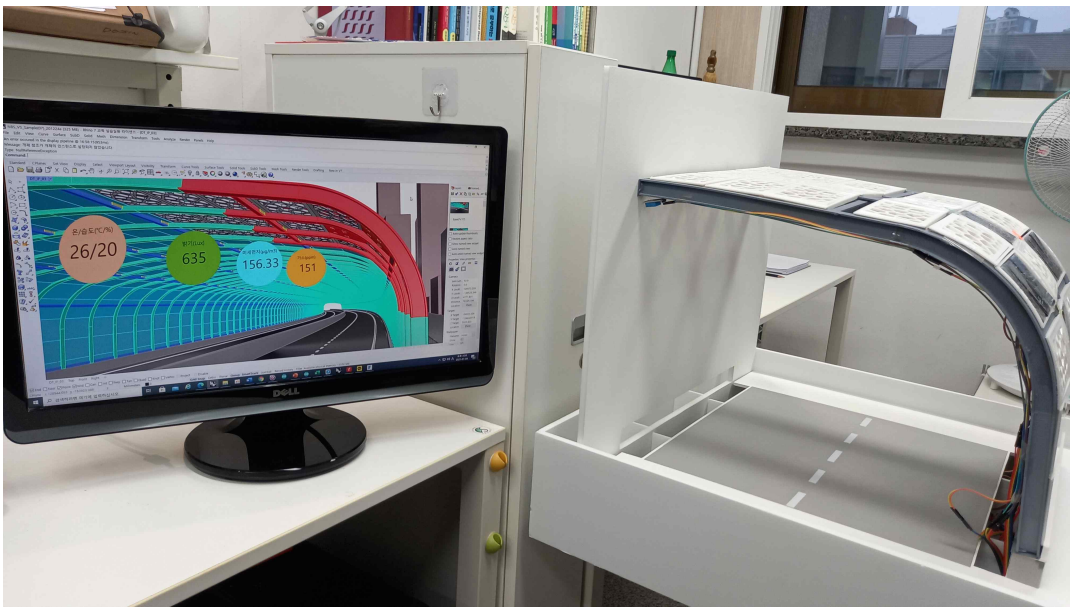
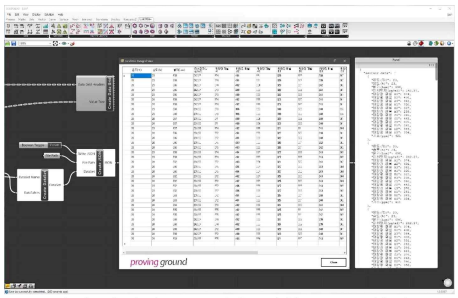
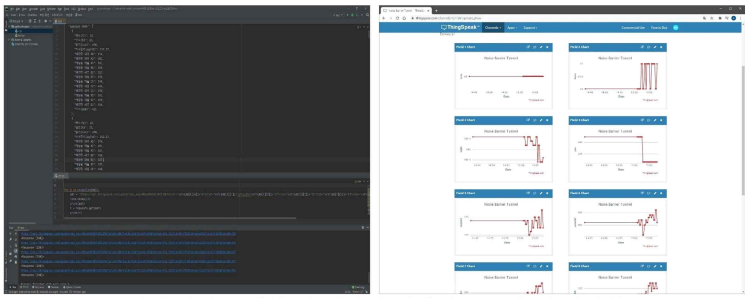


그림 119 디지털 트윈 활용 시나리오 - 방음터널 주변 센서 정보 및 기상 데이터 모니터링



센서 데이터 송수신을 위한 JSON 형식



원격 관리를 위한 웹 기반의 데이터 송수신 및 가시화

그림 120 원격장치를 이용한 모니터링을 위한 웹 기반 데이터 통신 및 가시화

- 수신받은 센서 데이터를 디지털 모델에 반영하고 가시화함.
- 센서 데이터를 각 항목에 따라 분리하고 디지털 모델에 표현함.
- 파일롯 프로젝트에서는 1) 태양광 발전량 모니터링, 2) 기상 데이터 모니터링 과 같은 두가지 상황을 고려하여 디지털 트윈 운용을 테스트함 [그림 118, 그림 119].
- 태양광 발전량 모니터링 : 태양 일사각과 태양광 패널의 각도에 따른 에너지 생산량 차이를 확인할 수 있음.
- 기상 데이터 및 방음터널 내부 환경 모니터링 : 방음터널 내부 환경의 온/습도, 밝기, 미세먼지, 가스량의 실시간 상태를 확인할 수 있음.
- 원격장치를 통한 모니터링을 테스트하기 위하여 수신된 센서 데이터를 JSON 형식으로 변환하여 웹 기반의 플랫폼에서 가시화함 [그림 120].

(2) 시스템 효용성 검증

▌개요 : 방음터널 설계 자동화 시스템의 효용성을 검증하기 위하여 전문가 평가를 수행함. 방음터널 실무 전문가 및 파라메트릭 디자인 전문가를 대상으로 시스템의 실무 활용 가능성에 대한 평가를 수행하였음.

▌평가방법 : 방음터널 설계 자동화 시스템 평가는 **휴리스틱 평가**[32] 방법에 기반하여 수행되었으며 총 2회에 걸쳐 진행되었음. 휴리스틱 평가 방법론은 제품의 사용성을 평가하기 위해 주로 사용됨. 제품의 사용성을 확보하기 위한 원칙을 판단 기준으로 평가 대상의 원칙 위반 여부를 전문가가 판단 및 평가하는 방법임. 일반적으로 휴리스틱 평가는 소수의 전문가를 대상으로 진행하여도 대부분의 중요한 문제를 도출할 수 있는 것으로 알려져[33][34] 평가 본 연구의 평가방법으로 채택되었으며 과정은 다음과 같음.

① 평가자 선정

② 평가 원칙 및 평가지 구성

③ 1차 평가 수행

④ 1차 평가 결과 검토 및 보완

⑤ 2차 평가 수행

⑥ 최종 결과 도출

▌평가자 선정 : 전문가 평가 집단은 총 5임. 전문가 평가를 수행한 선행 연구에 따르면 약 4~5인의 전문가의 의견을 취합하여[35] 개선점을 효과적으로 도출할 수 있는 것으로 나타남. 방음터널 전문 시공 업체의 전문가와 설계 자동화 시스템 개발 전문가로 구성되었음. 자세한 내용은 p.141의 참여 자문단 항목 참고.

① 평가자 1 : 방음터널 전문 업체 (D사)

② 평가자 2 : 건축학과 교수 (C대학)

---

32) Nielsen, J. (1992, June). Finding usability problems through heuristic evaluation. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 373-380.

33) Yen, P. Y., & Bakken, S. (2009). A comparison of usability evaluation methods: heuristic evaluation versus end-user think-aloud protocol-an example from a web-based communication tool for nurse scheduling. In AMIA annual symposium proceedings (Vol. 2009, p. 714). American Medical Informatics Association.

34) 최찬진. (2019). 휴리스틱 평가를 이용한 의료기기 사용자 인터페이스 개선에 관한 연구. 석사학위논문. 동국대학교, 서울.

35) 박주환, 한성호, 박재현, 박원규, 김현경, & 홍상우. (2012). 모바일 어플리케이션의 사용성 평가 방법 비교 분석. 대한인간공학회 학술대회논문집, 154-157.

③ 평가자 3 : 철강 생산 및 철골 구조물 전문 업체 (P사)

④ 평가자 4 : 디지털 트윈 전문 업체 (S사)

⑤ 평가자 5 : 설계 자동화 시스템 구축 전문 업체 (D사)

▌평가원칙 및 평가지 구성 : 시스템의 효용성을 평가하기 위하여 1) 설계 자동화 시스템을 구현에 필요한 구성 요소와 2) 일반적으로 프로그램의 평가 과정에서 활용되는 사용성 원칙을 함께 고려하여 평가 원칙을 구성하였음. 평가 원칙의 위반 여부를 총 위반 건수와 심각도를 이용하여 기록함. 1, 2차 평가 모두 동일한 원칙을 기준으로 평가를 진행하여 개선 여부를 판단함. 평가지는 표 24와 같이 구성함.

① 설계 자동화 시스템 필수 요건 : 방음터널 설계 자동화 시스템 구현에 필요한 필수 구성 요소를 평가 항목으로 활용함.

② 사용성 원칙 : 프로그램을 평가하기 위한 Nielsen의 사용성 10원칙을 기반으로 설계 자동화 시스템에 특화된 평가 항목으로 구성함.

③ 위반 건수 : 각 항목의 원칙에 대한 위반 건수의 총합.

④ 심각도 : 위반 항목의 심각도를 측정하기 위하여 리커트 척도를 활용함. 심사위원마다 각 항목에 대하여 0점 (개선할 사항 없음) - 5점 (반드시 수정 필요)으로 평가하도록 하였으며 심사위원 5인의 평균 점수로 각 항목의 심각도를 도출하였음. 심각도가 3 이상인 항목은 우선적으로 수정이 필요한 것으로 판단함.

▌1차 평가 수행

① 평가 기간 : 2019년 11월 ~ 2019년 12월.

② 평가 방법 : 5인의 평가자를 개별적으로 방문하여 전문가 평가를 수행함. 평가에 앞서 평가자에게 시스템의 구성과 사용 시나리오, 사용자 인터페이스에 대하여 설명을 진행함. 평가자는 설명을 듣고 평가지에 제시된 평가 원칙을 기준으로 시스템의 위반 여부를 판단하였음 [그림 121]. 연구자는 평가자의 평가를 정리하여 기록함. 평가자별 평가 내용은 표 28 ~표 32를 참고.



그림 121 전문가 평가 실시 (방음터널 전문 건설 업체 D사 방문)

▌1차 평가 결과 검토 및 보완 : 평가위원 5인의 평가를 취합하여 1차 평가 결과를 도출함. 총 24개의 항목 중 12개의 항목의 심각도가 3이상으로 나와 우선적인 수정이 필요한 것으로 나타남.

① 시스템 성능 관련 보완 요구 항목

- 방음터널 설계안 생성과 관련하여 방음터널 유형별 기준성 생성 기능
- 부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부
- 센서의 감지 범위 검토 기능, 일람표 자동 생성 기능
- 패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)
- 도로 주행 상황 가시화 기능, 운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능
- 태양광 발전량 분석 기능
- 태양광 패널 배치 최적화 기능
- 예를 들어 다양한 BIM 저작 도구에서 활용 가능한 부재 라이브러리 구축, 방음터널 주변 지형 및 건물의 가시화 성능의 고도화 등의 항목에 대한 보완이 요구되었으며 자세한 항목별 내용은 표 25와 같음.

② 시스템 사용성 관련 보완 요구 항목

- 사용성과 관련된 항목에서는 오류 입력 변수 방지 및 알림 기능
- 예상되는 입력 값 제시
- 시스템-실무 용어간의 일치
- 설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성
- 특히 시스템-실무 용어간의 일치와 관련된 항목에 대응하기 위하여 실무 업체의 방음터널 설계 자료를 참고하였음. 이외의 자세한 항목별 내용은 표 25와 같음.

③ 대표 보완 항목 : 1차 평가 결과를 바탕으로 시스템을 보완함. 대표적인 보완 항목은 다음과 같음.

- 시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형 추가 [그림 122]

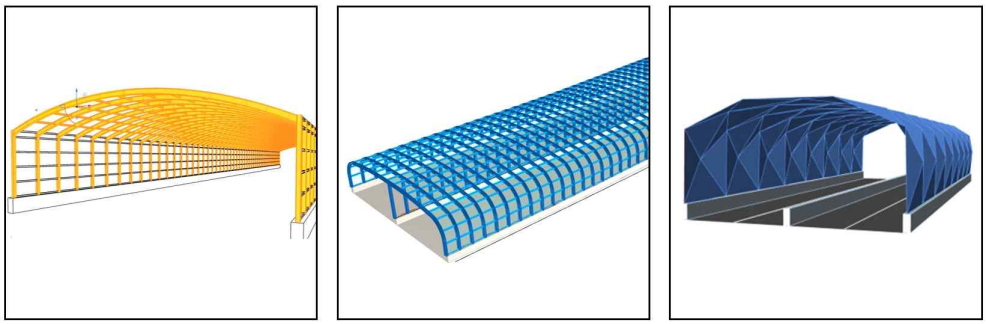


그림 122 설계 자동화 시스템에서 지원 가능한 방음터널 유형

- 다른 BIM 저작 도구에서 사용할 수 있는 부재 라이브러리의 추가 [그림 123]

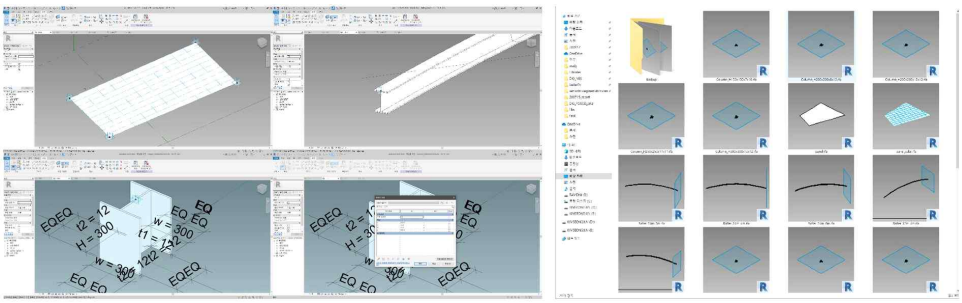


그림 123 Revit 환경에서 활용 가능한 부재 라이브러리

- 항목별 비용 검토. 환경적 영향력에 대한 검토 기능 추가 [그림 124]

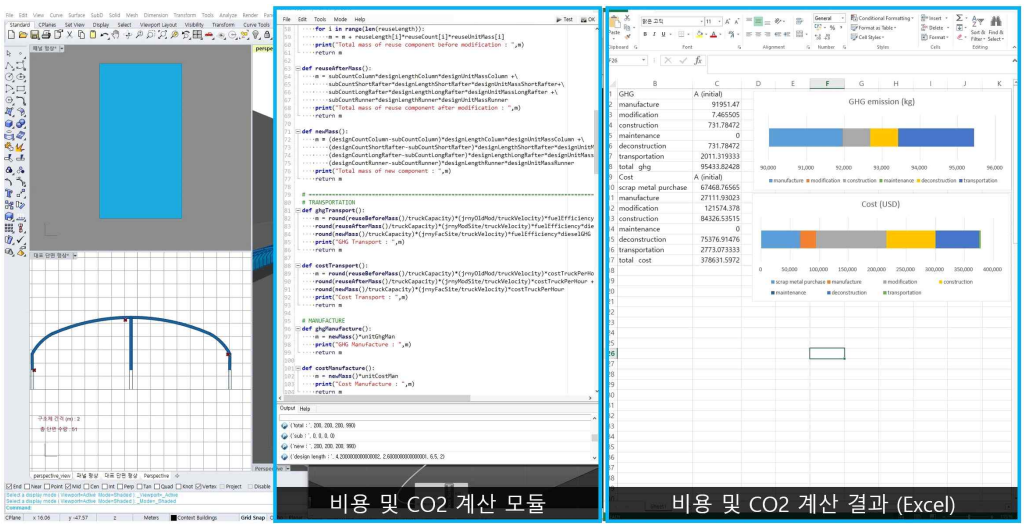


그림 124 방음터널의 항목별 비용 및 환경적 영향력 (C02 발생량) 산출 기능

– H빔의 패브리케이션을 위한 부재 별 길이 데이터 도출 [그림 125]

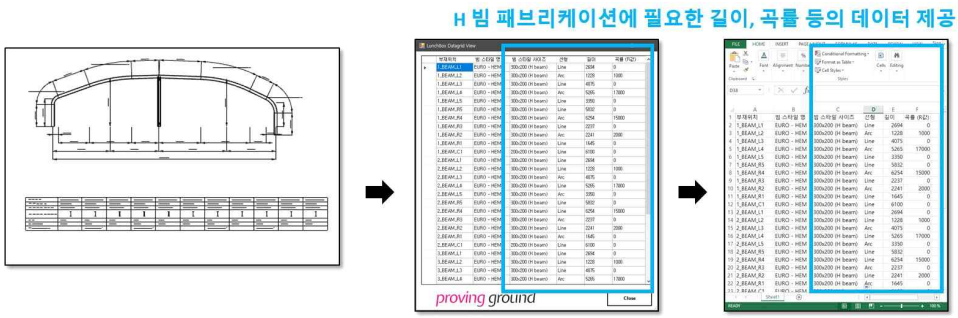


그림 125 H빔의 패브리케이션을 위한 부재 별 길이 및 곡률 데이터 도출

– 방음 터널 주변 지형 및 건물 가시화 기능 추가 [그림 126]

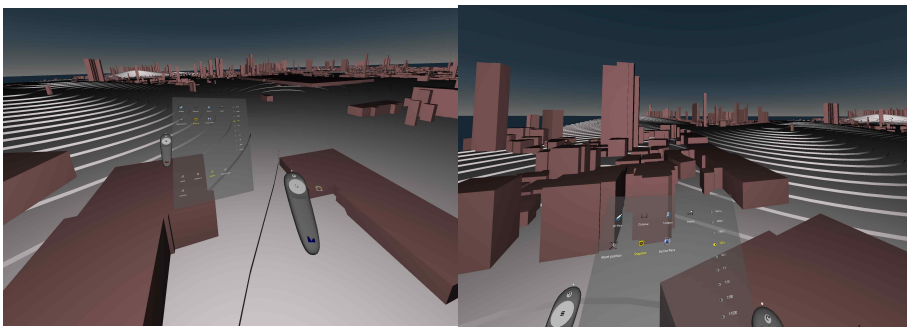


그림 126 VR 환경에서 대상부지 지형지물 디지털 모델 검토 수행

– 시스템에서 운송 규격에 대한 제약조건 변경 허용 [그림 127]

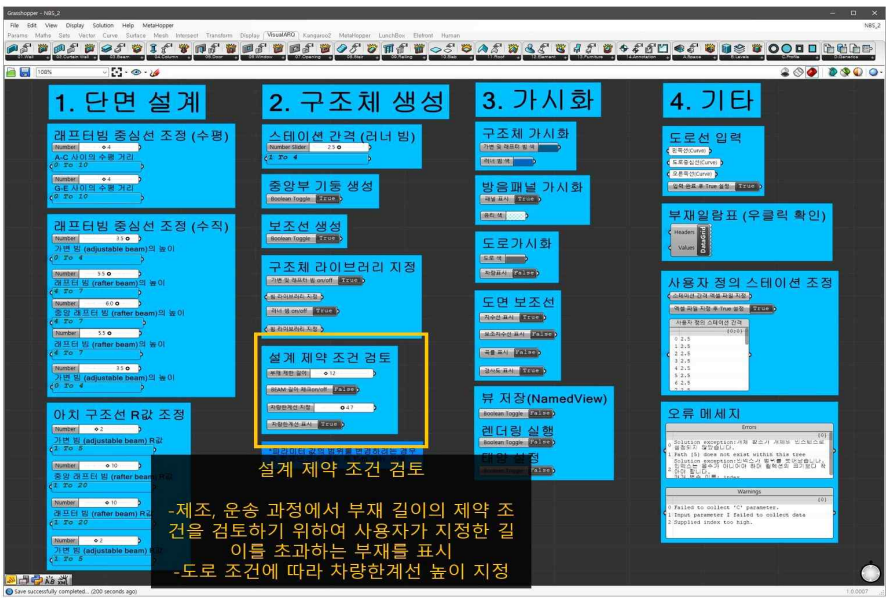


그림 127 운송규격 등 설계 제약조건에 대한 설정

– 태양광 발전량 및 수익 추정 기능 추가 [그림 128]

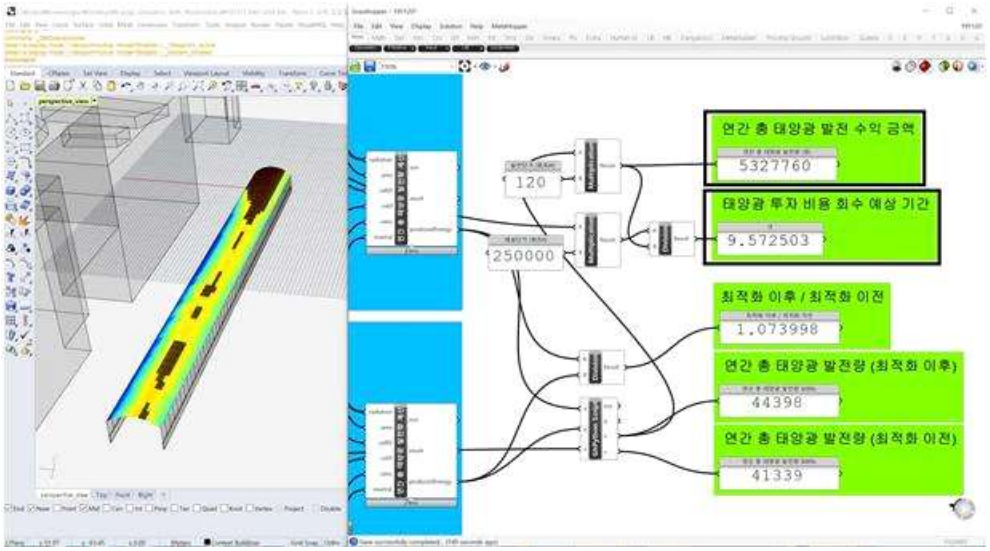


그림 128 태양광 발전량 및 수익 추정 기능 추가

– 시스템에서 태양광 패널 배치 최적화에서 제외할 부분을 설정 가능하도록 허용 [그림 129]

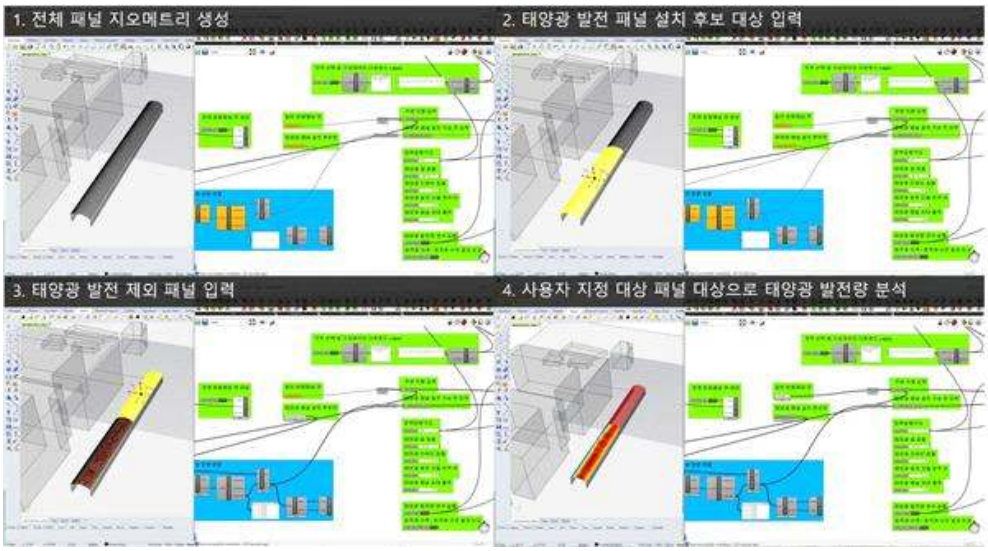


그림 129 태양광 발전 후보 패널의 사용자 지정

– 실무에서 사용되는 용어와의 일치, 용어의 단일화 [그림 130]

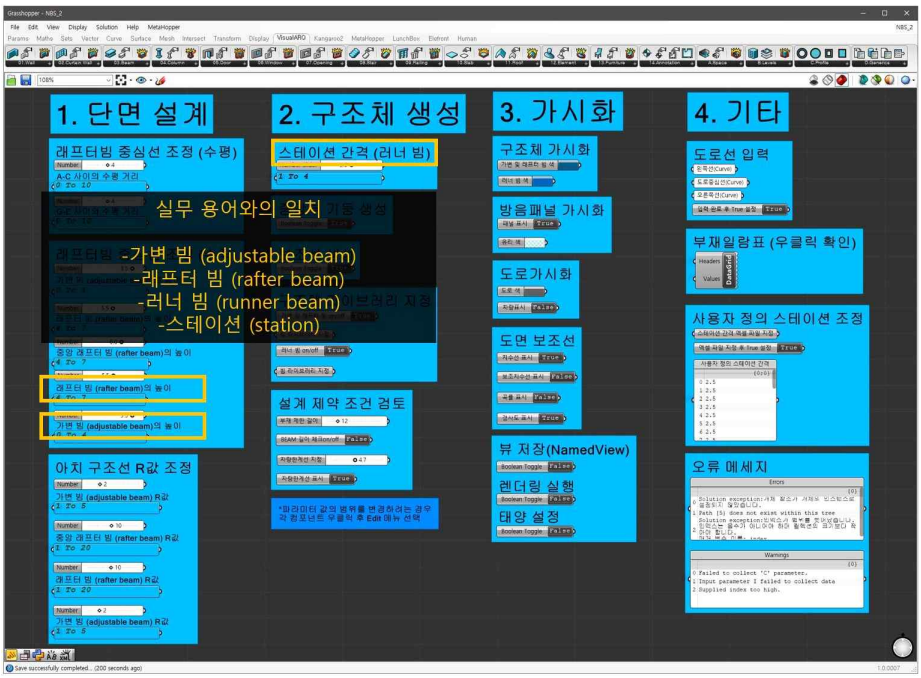


그림 130 실무에서 사용되는 용어의 반영

– 파라미터 조작부의 그룹화, 조작순서에 따른 사용자 인터페이스 구성, 간결한 사용자 인터페이스 구성 [그림 131]

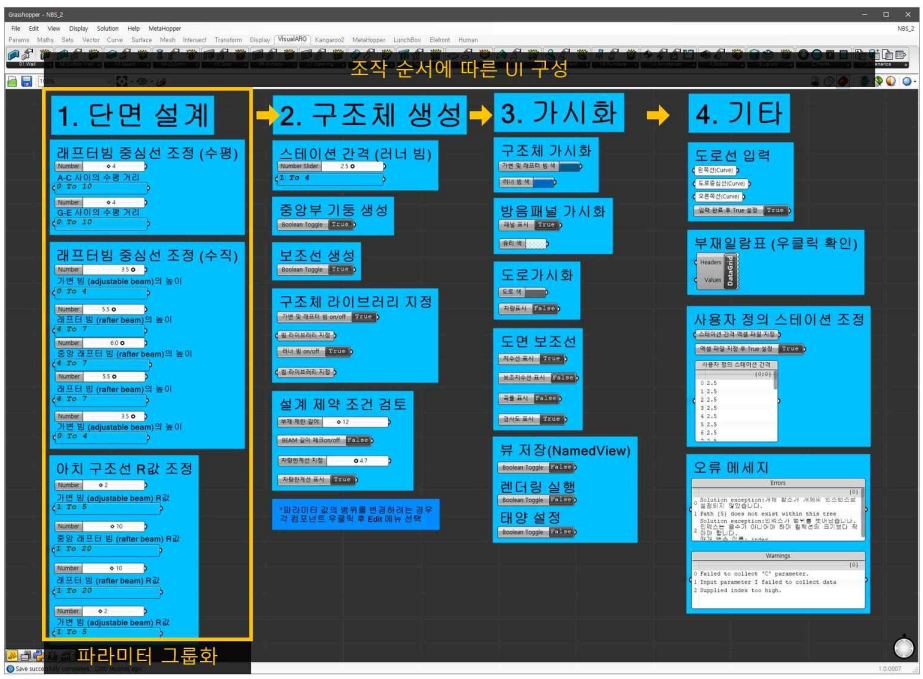


그림 131 항목 및 조작 순서에 따른 사용자 인터페이스 구성

– 입력 가능한 값의 범위에 대한 안내, 파라미터 값에 대한 사용자 정의 기능 안내, 오류 메세지 표시 기능 추가 [그림 132]

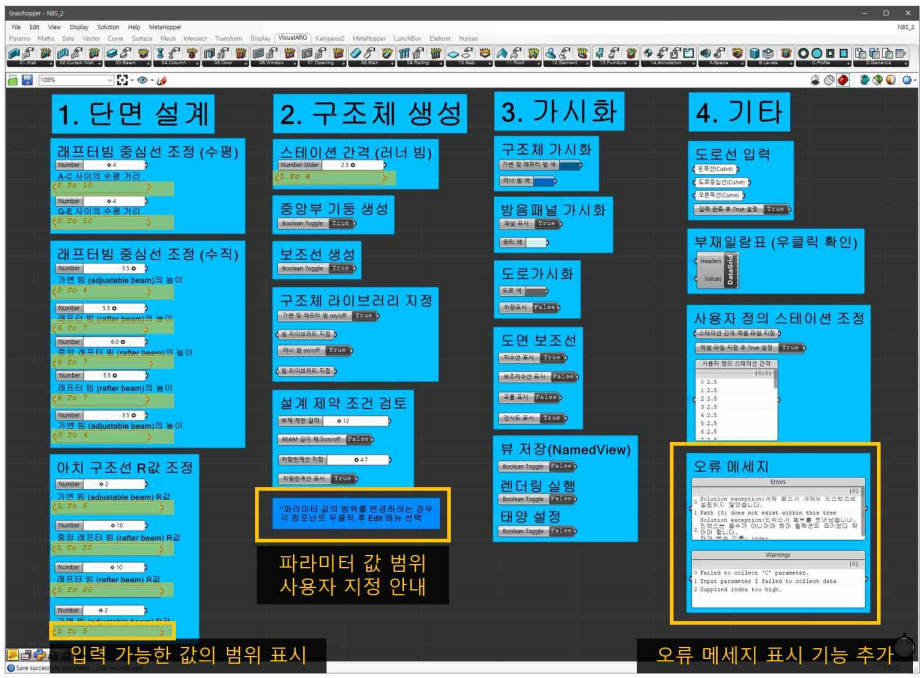


그림 132 파라미터 값 범위, 조정 및 오류 메시지에 대한 안내

❙ 2차 평가 수행 : 1차 평가와 동일하게 평가에 앞서 평가위원에게 시스템의 구성과 사용 시나리오, 사용자 인터페이스에 대하여 설명을 진행함. 평가위원은 1차 평가와 동일한 평가지에 제시된 평가 원칙을 기준으로 시스템의 위반 여부를 판단함. 항목별 내용은 표 26을 참고.

① 평가 기간 : 2020년 9월 ~ 2020년 11월.

② 평가 방법 : 1차 평가와 동일. 5인의 평가자를 개별적으로 방문하여 전문가 평가를 수행함. 평가에 앞서 평가자에게 시스템의 구성과 사용 시나리오, 사용자 인터페이스에 대하여 설명을 진행함. 평가자는 설명을 듣고 1차 평가와 동일한 평가지에 제시된 평가 원칙을 기준으로 시스템의 위반 여부를 판단하였음 [그림 121]. 연구자는 평가자의 평가를 정리하여 기록함. 평가자별 평가 내용은 표 33 ~표 37을 참고.

❙ 최종 결과 도출 : 평가위원 5인의 평가를 취합하여 2차 평가 결과를 도출함. 총 24개의 항목 중 모든 항목에 대하여 개선이 이루어졌으며 심각도가 3 이상인 항목은 없는 것으로 나타남. 3개 항목의 경우 심각도가 1 이상인 것으로 나타났으며 추후 연구로써 고려 가능성이 있다는 의견이 제안됨. 자세한 평가 결과는 표 27과 같음.

① 방음터널 유형별 기준성 생성 기능 : 시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형 추가.

② 일람표 자동 생성 기능 : 자재의 가공 및 시공 과정에 필요한 상세 데이터 및 세부 내용 도출 기능의 보완.

③ 패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션) : 세부적인 부재 가공 과정에 대한 추가적인 고려 필요. (절곡, 절단, 타공, 접합 등)

▌성과점검기준에 의한 질적 성과지표 달성 여부

① 관련 항목 및 검증 방법

- A-2-2 : 실무 활용 가능성 전문가 평가
- 목표치 : 50% 이하
- 달성치 : 0%
- 측정 및 검증 방법 : 전체 항목 중 심각도 3 이상인 항목의 비율 < 0.5

② 검증 결과

- 1차 전문가 평가 결과 전체 24개 항목 중 12개 항목의 심각도가 3이상인 것으로 나타남. 따라서 전체 항목 중 심각도 3이상인 항목의 비율은 0.5임.
- 1차 전문가 평가에서 도출된 전문가의 의견을 바탕으로 시스템 개선 후 2차 평가를 실시함. 2차 전문가 평가 결과 전체 24개 항목 중 0개 항목의 심각도가 3이상인 것으로 나타남. 따라서 전체 항목 중 심각도 3이상인 항목의 비율은 0임.
- 최종적으로 전체 항목 중 심각도 3이상인 항목의 비율이 0이므로 0.5 미만인 것으로 나타나 성과 달성함.

표 24 평가지 항목

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반 건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능			
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능			
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부			
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능			
			센서의 감지 범위 검토 기능			
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능			
			일람표 자동 생성 기능			
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)			
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능			
			VR을 이용한 설계안 검토 기능			
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능			
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능			
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능			
			태양광 패널 배치 최적화 기능			
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성			
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시			
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능			
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치			
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치			
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지			
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권			
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행			
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성			
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성			

표 25 1차 평가 결과

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반 건수	심각도 평균	1차 평가 주요 지적 내용 요약
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	5	1.2	도로 합류 구간에 대한 고려가 필요함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	5	4.2	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	6	3	다른 BIM 저작 도구에서 사용할 수 있는 부재 라이브러리의 구축이 필요함.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	3	0.8	기타 BIM 저작 도구에서 동일한 방식으로 부재 라이브러리를 배치할 수 있는지 검토가 필요함.
			센서의 감지 범위 검토 기능	6	3	센서의 감지 범위를 3차원으로도 검토할 수 있어야 함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	5	1.2	도면 텍스트 표기법의 조정이 필요함.
			일람표 자동 생성 기능	6	4	항목별 비용을 검토할 수 있어야 함. 추가적으로 환경적 영향력에 대한 검토도 필요함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	7	3.4	H 빔의 패브리케이션을 위하여 부재 별 길이에 대한 데이터가 필요함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	5	3	방음 터널 주변의 지형 및 건물도 함께 확인할 수 있어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	4	0.6	추가 검토가 필요한 곳에 마킹이 가능해야 함.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	3	1	추후 자재의 재사용을 위해 수명 예측 기능 추가에 대한 검토가 필요함.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	6	3	운송 규격에 대한 제약조건을 설계자가 변경할 수 있어야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	6	3	태양광 발전량과 수익을 함께 추정할 수 있어야 함.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	5	3.2	태양광 패널 배치 최적화에서 제외할 부분을 설정할 수 있어야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	2	0.4	구조체 생성 시 진행 상황 안내 기능 추가에 대한 고려가 필요함
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	7	3.2	입력 가능한 값의 범위를 미리 표시해야 함.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	7	1.8	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 및 에러 메시지를 확인할 수 있어야 함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	5	4.2	방음터널 업체에서 실제로 사용하는 용어를 사용해야 함.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	1	0.2	시스템 내 용어의 단일화가 필요함.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	4	1.2	파라미터 조작부의 그룹화가 필요함.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	5	1.8	파라미터 값의 범위를 조정할 수 있도록 시스템 유연성에 대한 고려가 필요함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	4	1	설계 자동화 알고리즘 외부에서도 조작 가능한 값의 대상이 확대되어야 함.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	5	3.2	사용자 인터페이스를 간결하게 구성할 필요가 있음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	5	1.6	설계 자동화 시스템 조작 순서에 대한 도움말에 대한 접근성을 높일 필요가 있음.

표 26 2차 평가 결과

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반 건수	심각도 평균	2차 평가 주요 지적 내용 요약
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	2	0.4	도로 합류 구간에 대응 하기 위한 일부 기능 구현이 개발됨.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	5	1.6	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	1	0.2	다양한 BIM 저작 도구(Revit)에서 사용 가능한 부재 라이브러리가 구축됨.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	2	0.4	기타 BIM 저작 도구 환경을 대상으로 한 검토가 이루어짐.
			센서의 감지 범위 검토 기능	2	0.4	센서의 감지 범위 검토를 위한 가시화 기능의 개선이 이루어졌음
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	0	0	도면 텍스트 표기법에 대한 조정이 이루어짐
			일람표 자동 생성 기능	5	1.2	비용 및 환경적 영향력의 산출 기능의 개선이 이루어짐. 가공 및 시공 과정의 세부 내역 반영이 필요.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	4	1	H 빔의 패브리케이션을 위한 데이터 생성의 개선이 이루어짐. 세부적인 부재 가공 과정에 대한 고려도 필요.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	0.2	가시화 기능의 개선이 이루어짐.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	마킹 기능 구현됨.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	2	0.4	추후 자재의 재사용을 위해 수명 예측을 위한 기능의 프로토타입이 개발됨.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	1	0.2	사용자가 제약조건을 변경할 수 있도록 기능 개선이 이루어짐.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	1	0.2	태양광 발전량 및 비용 산출 기능 개선이 이루어짐.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	3	0.6	태양과 패널 배치 최적화 기능의 개선이 일부 이루어짐. 추가적인 속도 개선 방안이 고려되어야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	2	0.4	추후 연구에서 진행 상황 안내 기능이 개선되어야 함.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	0	0	입력 가능 값에 대한 사용자 안내가 이루어짐.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	1	0.2	오류 및 에러 메시지 안내 기능이 추가됨.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	0	0	실무 용어가 시스템 상에 반영됨.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	시스템 내 용어가 단일화됨.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	파라미터 조작부의 그룹 조정이 이루어짐.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	2	0.4	파라미터 범위 조정에 대한 안내가 추가됨.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	설계 자동화 알고리즘 외부에서 조작 가능한 값의 대상이 추가됨.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	3	0.6	사용자 인터페이스가 간결하게 구성됨.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	3	0.6	설계 자동화 시스템 조작 순서에 대한 도움말이 추가됨.

표 27 평가 결과 총괄

대분류	중분류	소분류	설명	위반 건수 (1차)	위반 건수 (2차)	위반 개선 건수	심각도 (1차)	심각도 (2차)	심각도 개선량	평가 총괄
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	5	2	3	1.2	0.4	0.8	도로 합류 구간에 대응하기 위한 일부 기능 구현이 개발됨.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	5	5	0	4.2	1.6	2.6	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	6	1	5	3	0.2	2.8	다양한 BIM 저작 도구(Revit)에서 사용 가능한 부재 라이브러리가 구축됨.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	3	2	1	0.8	0.4	0.4	다른 BIM 저작 도구 환경에서 부재 라이브러리 구축 및 배치 가능성이 검토됨.
			센서의 감지 범위 검토 기능	6	2	4	3	0.4	2.6	센서의 감지 범위 검토를 위한 가시화 기능의 개선이 이루어졌음
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	5	0	5	1.2	0	1.2	도면 텍스트 표기법에 대한 조정이 이루어짐
			일람표 자동 생성 기능	6	5	1	4	1.2	2.8	비용 및 환경적 영향력의 산출 기능의 개선이 이루어짐. 가공 및 시공 과정의 세부 내역 반영이 필요.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	7	4	3	3.4	1	2.4	H 빔의 패브리케이션을 위한 데이터 생성의 개선이 이루어짐. 세부적인 부재 가공 과정에 대한 고려도 필요.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	5	1	4	3	0.2	2.8	가시화 기능의 개선이 이루어짐.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	4	0	4	0.6	0	0.6	마킹 기능 구현됨.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	3	2	1	1	0.4	0.6	추후 자재의 재사용을 위해 수명 예측을 위한 기능의 프로토타입이 개발됨.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	6	1	5	3	0.2	2.8	사용자가 제약조건을 변경할 수 있도록 기능 개선이 이루어짐.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	6	1	5	3	0.2	2.8	태양광 발전량 및 비용 산출 기능 개선이 이루어짐.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	5	3	2	3.2	0.6	2.6	태양과 패널 배치 최적화 기능의 개선이 일부 이루어짐. 추가적인 속도 개선 방안이 고려되어야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	2	2	0	0.4	0.4	0	추후 연구에서 진행 상황 안내 기능이 개선되어야 함.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	7	0	7	3.2	0	3.2	입력 가능 값에 대한 사용자 안내가 이루어짐.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	7	1	6	1.8	0.2	1.6	오류 및 에러 메시지 안내 기능이 추가됨.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	5	0	5	4.2	0	4.2	실무 용어가 시스템 상에 반영됨.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	1	0	1	0.2	0	0.2	시스템 내 용어가 단일화됨.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	4	0	4	1.2	0	1.2	파라미터 조작부의 그룹 조정이 이루어짐.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	5	2	3	1.8	0.4	1.4	파라미터 범위 조정에 대한 안내가 추가됨.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	4	0	4	1	0	1	설계 자동화 알고리즘 외부에서 조작 가능한 값의 대상이 추가됨.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	5	3	2	3.2	0.6	2.6	사용자 인터페이스가 간결하게 구성됨.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인 시스템으로의 전환 용이성	5	3	2	1.6	0.6	1	설계 자동화 시스템 조작 순서에 대한 도움말이 추가됨.

표 28 1차평가 평가지 (평가자 1)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	1	1	도로 합류 및 분기점 등 도로 차선 변화 구간에 대한 고려가 필요함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	4	Oval type 이외에 다양한 유형의 단면에 대한 고려가 필요함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	1	3	Revit, Archicad 등 기타 BIM 도구에서 사용할 수 있는 부재 라이브러리의 구축이 필요함.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	0	0	지적 사항 없음.
			센서의 감지 범위 검토 기능	1	2	센서의 감지 범위를 3차원으로도 검토할 수 있어야 함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	1	1	기존 방음터널 도면 및 문서를 참고하여 도면 텍스트 표기법의 조정해야 함.
			일람표 자동 생성 기능	1	4	구조 및 자재의 항목별 비용을 검토할 수 있어야 함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	2	3	H 빔의 패브리케이션을 위하여 부재 별 길이에 대한 데이터가 필요함. / 절단 및 절곡에 대한 고려가 필요함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	2	방음 터널 주변의 건물도 함께 확인할 수 있어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	1	1	추후 구조 관련 센서에서 획득한 데이터 활용에 대한 고려가 필요함.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	1	3	도금 가능 규격 및 운송 가능 규격에 대한 제약 조건을 경우에 따라 변경할 수 있어야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	1	2	태양광 발전량과 수익을 함께 추정할 수 있어야 함.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	3	태양광 패널 배치 최적화의 시간을 줄일 수 있는지 검토해야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	0	0	지적 사항 없음.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	1	3	입력 가능한 값의 범위를 미리 표시해야 함.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	1	1	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 및 에러 메시지를 확인할 수 있어야 함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	1	3	실무 용어의 반영이 필요함.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	지적 사항 없음.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	1	파라미터 값의 범위를 조정할 수 있도록 시스템 유연성에 대한 고려가 필요함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	1	1	설계 자동화 알고리즘 외부에서도 조작 가능한 값의 대상이 확대되어야 함.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	3	사용자 인터페이스 디자인 개선이 필요함.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	1	설계 자동화 시스템 조작 순서에 대한 도움말에 대한 접근성을 높일 필요가 있음.

표 29 1차평가 평가지 (평가자 2)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	1	2	도로 합류 구간에서 구조체 간의 연결 방식에 대한 고려가 필요함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	5	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	2	3	다른 BIM 저작 도구에서 사용할 수 있는 부재 라이브러리의 구축이 필요함. / 다른 BIM 저작 도구와의 호환성을 높여야 함.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	1	2	다른 BIM 저작 도구에서 동일한 방식으로 부재 라이브러리를 배치할 수 있는지 검토가 필요함.
			센서의 감지 범위 검토 기능	1	3	센서의 감지 범위를 3차원으로도 검토할 수 있어야 함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	1	1	도면 텍스트 표기법의 조정이 필요함.
			일람표 자동 생성 기능	1	4	항목별 비용을 검토할 수 있어야 함. 추가적으로 환경적 영향력에 대한 검토도 필요함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	3	H 빔의 패브리케이션을 위한 데이터를 추가해야 함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	4	방음 터널 주변의 지형 및 건물도 함께 확인할 수 있어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	1	1	추가 검토가 필요한 곳에 마킹이 가능해야 함.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	1	2	추후 자재의 재사용을 위해 수명 예측 기능 추가에 대한 검토가 필요함.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	2	4	운송 규격에 대한 제약 조건을 설계자가 변경할 수 있어야 함. / 제작과 관련된 제약 조건도 고려해야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	1	3	태양광 발전량과 수익을 함께 추정할 수 있어야 함.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	2	태양광 패널 배치 최적화에서 제외할 부분을 설정할 수 있어야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	1	1	구조체 생성 시 진행 상황 안내 기능 추가에 대한 고려가 필요함
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	2	4	입력 가능한 값의 범위를 미리 표시해야 함. / 범위를 조정할 수 있어야 함.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	2	2	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 및 에러 메시지를 확인할 수 있어야 함. / 확인 후 문제에 대응할 수 있도록 안내가 추가되어야 함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	1	5	방음터널 업체에서 실제로 사용하는 용어를 사용해야 함.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	1	1	시스템 내 용어의 단일화가 필요함.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	1	1	파라미터 조작부의 시인성을 개선해야 함.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	2	파라미터 값의 범위를 조정할 수 있도록 시스템 유연성에 대한 고려가 필요함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	1	2	설계 자동화 알고리즘에서 설정된 값에 대한 수정이 용이해야 함.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	4	사용자 인터페이스를 간결하게 구성할 필요가 있음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	2	설계 자동화 시스템 조작 방법에 관한 안내가 필요함.

표 30 1차평가 평가지 (평가자 3)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	3	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 구조의 유형을 증가 되어야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	1	2	Revit과 같은 다른 BIM 저작 도구에서 사용할 수 있는 부재 라이브러리가 추가되어야 함.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	0	0	지적 사항 없음.
			센서의 감지 범위 검토 기능	1	3	센서의 감지 범위를 수직적인 차원에서도 검토할 수 있어야 함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	1	1	도면 텍스트의 가시성을 높일 필요가 있음.
			일람표 자동 생성 기능	1	4	비용과 함께 온실가스 배출량과 같이 환경적 영향력에 대한 검토가 필요함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	3	H 빔의 가공을 위한 데이터를 엑셀로 출력할 수 있어야 함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	3	방음 터널 주변의 물리적 상황도 함께 확인할 수 있어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	2	1	원하는 지점으로의 이동이 쉬워야 함. / VR 상에서 중요 사항을 기록할 수 있어야 함.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	1	4	도금 과정에서 허용 가능한 부재의 규격이 존재하는데 이와 같은 제약에 대한 고려가 추가되어야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	2	4	태양광 발전량과 수익을 함께 추정할 수 있어야 함. / 전기 판매 방식에 따른 비용 추산이 가능한지 검토해야 함.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	3	태양광 패널 배치 최적화의 속도를 개선해야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	0	0	지적 사항 없음.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	1	3	입력 가능한 값의 범위를 안내해야 함.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	1	3	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 발생 시 안내사항을 추가해야 함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	1	4	실무에서 사용하는 용어를 사용해야 함.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	1	2	기능별로 파라미터 묶어 배치해야 함.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	3	파라미터와 제약조건의 설정값을 변경하는 등 시스템 유연성에 대한 고려가 필요함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	지적 사항 없음.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	3	사용자 인터페이스의 디자인을 간결하게 구성해야 함.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	2	시스템 조작 순서에 대한 도움말을 제공해야 함.

표 31 1차평가 평가지 (평가자 4)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	1	1	도로 합류 구간에 대한 고려가 필요함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	4	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	1	3	Revit과 같이 실제 업계에서 점유율이 높은 소프트웨어에도 대응할 수 있는 부재 라이브러리 구축이 필요하며 디지털 트윈 운용을 위하여 IFC 모델로의 출력이 원활한지 검토해야 함.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	1	1	디지털 트윈 운용을 고려하여 BIM 모델상에서 센서 정보를 실시간으로 확인할 수 있도록 자재에 센서 값에 대한 속성 정보를 구축한 후 다양한 BIM 도구에서 배치할 수 있어야 함.
			센서의 감지 범위 검토 기능	1	3	센서의 감지 범위를 3차원으로도 검토할 수 있어야 함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	1	1	도면 텍스트 표기법의 조정이 필요함.
			일람표 자동 생성 기능	1	3	일람표 내 개체의 항목별로 비용을 검토할 수 있어야 함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	3	H 빔의 패브리케이션을 위하여 부재 별 길이에 대한 데이터가 필요함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	3	방음 터널 주변의 지형 및 건물도 함께 확인할 수 있어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	1	2	운송 규격에 대한 제약 조건을 설계자가 변경할 수 있어야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	1	3	태양광 발전량과 수익을 함께 추정할 수 있어야 하며 이를 위해 디지털 트윈을 통해 수집한 과거 발전량 데이터의 활용도 고려할 수 있음.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	4	태양광 패널 배치 최적화의 속도 향상이 필요함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	0	0	지적 사항 없음.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	1	3	입력 가능한 값의 범위를 미리 표시해야 함.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	1	1	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 및 에러 메시지를 확인할 수 있어야 함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	1	4	방음터널 업체에서 실제로 사용하는 용어를 사용해야 함.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	1	2	파라미터 조작부의 그룹화가 필요함.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	2	파라미터 값의 범위를 조정할 수 있도록 시스템 유연성에 대한 고려가 필요함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	1	1	설계 자동화 알고리즘 외부에서도 조작 가능한 값의 대상이 확대되어야 함.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	2	사용자 인터페이스를 간결하게 구성할 필요가 있음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	2	설계 자동화 시스템 조작 순서에 대한 도움말에 대한 접근성을 높일 필요가 있음.

표 32 1차평가 평가지 (평가자 5)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	2	2	여러 개의 도로가 합류되는 구간에 대한 고려가 필요함. / 곡선 구간의 접합부에 대한 고려가 필요함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	5	생성 가능한 구조체의 유형이 증가되어야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	1	4	다른 BIM 저작 도구와의 호환성을 높여야 함.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	1	1	다른 BIM 툴에서 사용 가능한 설계 자동화 시스템에 대한 검토 필요.
			센서의 감지 범위 검토 기능	2	4	센서의 감지 범위를 3차원으로도 검토할 수 있어야 함. / 센서 배치 최적화가 3차원 적으로 가능한지 검토되어야 함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	1	2	도면의 가시성을 개선시킬 필요가 있음.
			일람표 자동 생성 기능	2	5	항목별 비용을 검토할 수 있어야 함. / 온실가스 발생량에 대한 검토가 필요함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	2	5	H 빔의 가공을 위한 데이터를 추가해야 함. / 사용 가능한 H 빔 목록이 함께 첨부되어야 함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	3	터널 주변의 지형,지물도 함께 가시화되어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	1	1	검토가 필요한 곳에 메모가 가능해야 함.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	1	2	추후 자재의 재사용을 위해 수명 예측 기능 추가에 대한 검토가 필요함.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	1	2	제작과 관련된 제약 조건도 고려해야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	1	3	태양광 발전량과 수익에 관한 정보를 함께 제공해야 함.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	4	태양광 패널 배치 최적화의 속도 개선이 필요하며 패널 배치 대상을 정의하여 탐색 범위를 축소하기 위한 기능의 구현도 고려해야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	1	1	시스템 사용시 진행상황에 대한 안내가 필요함.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	2	3	입력 가능한 값의 범위를 미리 표시해야 함. / 범위를 조정할 수 있어야 함.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	2	2	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 및 에러 메시지를 확인할 수 있어야 함. / 확인 후 문제에 대응할 수 있도록 안내가 추가되어야 함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	1	5	방음터널 업체에서 실제로 사용하는 용어를 사용해야 함.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	1	1	파라미터 조작부의 시인성을 개선해야 함.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	1	파라미터 값의 범위를 조정할 수 있는 방법을 안내해야 함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	1	1	설계 자동화 알고리즘에서 설정된 값에 대한 수정이 용이해야 함.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	4	사용자 인터페이스에 필요한 파라미터 및 조작 버튼을 재구성해야 함.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	1	설계 자동화 시스템에 관한 안내가 필요함.

표 33 2차평가 평가지 (평가자 1)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	1	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	0	0	지적 사항 없음.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	0	0	지적 사항 없음.
			센서의 감지 범위 검토 기능	1	1	센서 종류별로 가시화 방법을 특화할 필요가 있음.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			일람표 자동 생성 기능	1	1	시공 과정의 인건비 등 세부 내역에 대한 고려가 추가되어야 함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	1	용융아연도금 등 세부적인 부재 가공 과정에 대한 고려도 필요.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	0	0	지적 사항 없음.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	0	0	지적 사항 없음.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	0	0	지적 사항 없음.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	1	속도 개선을 위하여 다른 종류의 최적화 알고리즘에 대한 고려가 필요함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	0	0	지적 사항 없음.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	0	0	지적 사항 없음.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	0	0	지적 사항 없음.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	0	0	지적 사항 없음.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	지적 사항 없음.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	0	0	지적 사항 없음.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	지적 사항 없음.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	1	사용자 인터페이스를 간결하게 구성할 필요가 있음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	1	설계 자동화 시스템 전반에 대한 도움말에 대한 접근성을 높일 필요가 있음.

표 34 2차평가 평가지 (평가자 2)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	1	1	도로 합류 구간의 경우 설계자가 수동으로 형태를 생성할 수 있어야 함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	2	시스템에서 지원 가능한 방음터널과 구조체 단면의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	1	1	다른 BIM 저작 도구와의 호환성을 증가 시킬 필요가 있음.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	1	1	설계자가 직접 필요한 센서 라이브러리를 추가할 수 있어야 함.
			센서의 감지 범위 검토 기능	1	1	다양한 센서의 감지범위가 겹치는 경우 시인성이 떨어져 개선이 필요함.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			일람표 자동 생성 기능	2	2	가공 및 시공 과정의 세부 내역 반영이 필요. / 공정별 인건비 등도 함께 고려되어야 함.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	1	세부적인 부재 가공 과정을 추가적으로 고려해야 함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	0	0	지적 사항 없음.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	1	1	추후 자재의 재사용을 위해 수명 예측 기능 추가에 대한 검토가 필요함.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	0	0	지적 사항 없음.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	1	1	태양광 발전량과 수익을 함께 추정할 수 있어야 함.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	0	0	지적 사항 없음.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	1	1	시스템 전반에 걸쳐 사용시 진행 상황 안내 기능이 추가되어야 함.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	0	0	지적 사항 없음.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	0	0	지적 사항 없음.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	0	0	지적 사항 없음.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	지적 사항 없음.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	1	파라미터 값의 범위 조정이 용이해야 함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	지적 사항 없음.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	0	0	지적 사항 없음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	0	0	지적 사항 없음.

표 35 2차평가 평가지 (평가자 3)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	2	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	0	0	지적 사항 없음.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	0	0	지적 사항 없음.
			센서의 감지 범위 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			일람표 자동 생성 기능	1	1	가공 및 시공 과정의 세부 내역 반영이 필요.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	1	부재 제작 및 시공 과정에 대한 세부적인 고려가 추가되어야 함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	1	1	야간 주행시 터널 내부의 가시성 검토도 추가되어야 함.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	0	0	지적 사항 없음.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	0	0	지적 사항 없음.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	0	0	지적 사항 없음.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	0	0	지적 사항 없음.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	0	0	지적 사항 없음.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	0	0	지적 사항 없음.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	0	0	지적 사항 없음.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	지적 사항 없음.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	0	0	지적 사항 없음.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	지적 사항 없음.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	1	사용자 인터페이스의 심미성이 개선되어야 함.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	0	0	지적 사항 없음.

표 36 2차평가 평가지 (평가자 4)

대분류	중분류	소분류	설명	총위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	1	시스템에서 지원 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	0	0	지적 사항 없음.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	1	1	다양한 기능이 통합된 다목적 센서 모듈을 배치안을 최적화하기 위한 방안, 기준에 대한 고려가 필요함.
			센서의 감지 범위 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			일람표 자동 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	0	0	지적 사항 없음.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	0	0	지적 사항 없음.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	0	0	지적 사항 없음.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	0	0	지적 사항 없음.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	1	알고리즘 변경으로 속도 개선이 어려운 경우 운영중인 디지털 트윈의 태양광 발전량 데이터를 토대로 태양광 패널 배치안을 변경하고 최적화하는 방안을 고려해 볼 필요가 있음.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	0	0	지적 사항 없음.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	0	0	지적 사항 없음.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	1	1	설계 자동화 알고리즘 내의 오류 발생시 대처 방안에 대한 안내가 필요함.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	0	0	지적 사항 없음.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	지적 사항 없음.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	0	0	지적 사항 없음.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	지적 사항 없음.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	1	1	디지털 트윈의 구축 및 운용을 고려하여 디지털 트윈과 설계 자동화 시스템의 사용자 인터페이스의 일관성을 확보할 필요가 있음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	1	설계 자동화 시스템 내의 조작부에 대한 안내가 개선되어야 함.

표 37 2차평가 평가지 (평가자 5)

대분류	중분류	소분류	설명	총 위반건수	심각도	지적 사항
시스템 성능	설계안 생성	구조체 생성 알고리즘	주요 구조체 기준선 생성 기능	1	1	도로 합류 구간에 대한 고려가 필요함.
			방음터널 유형별 기준선 생성 기능	1	2	생성 가능한 방음터널의 유형을 증가시켜야 함.
		부재 및 센서 라이브러리 구축	부재 및 센서 BIM 라이브러리 생성 구축 여부	0	0	지적 사항 없음.
		부재 및 센서 배치 알고리즘	구축된 부재 및 센서 라이브러리 배치 기능	0	0	지적 사항 없음.
			센서의 감지 범위 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
		문서화	주요 구조체 도면 자동 생성 기능	0	0	지적 사항 없음.
			일람표 자동 생성 기능	1	2	가공 및 시공 과정의 세부 내역 반영이 필요.
			패널 및 주요 부재의 전개도 및 개별 도면 생성 기능 (패브리케이션)	1	2	세부적인 부재 가공 과정에 따른 다양한 데이터를 출력할 수 있어야 함.
		가시화	도로 주행 상황 가시화 기능	0	0	지적 사항 없음.
			VR을 이용한 설계안 검토 기능	0	0	지적 사항 없음.
	설계 최적화	구조 최적화	변위량 및 물량 검토 기능	1	1	추후 자재의 재사용을 위해 구조물의 데이터를 관리하기 위한 시스템이 추후 연구에서 추가될 필요가있음.
		부재 형상 최적화	운송 가능 규격을 고려한 부재 분할 기능	1	1	제작과 운송과 관련된 제약 조건을 설계자가 조정할 수 있어야 함.
		태양광 패널 배치 최적화	태양광 발전량 분석 기능	0	0	지적 사항 없음.
			태양광 패널 배치 최적화 기능	1	1	태양광 패널 배치 최적화의 속도 개선을 위해 다양한 최적화 알고리즘을 적용할 수 있어야 함.
시스템 사용성	정확성	시스템 상태의 시각화	피드백의 존재 유무, 명확성, 즉시성	1	1	구조체 생성 및 가시화 과정에서 진행 상황 안내 기능이 개선되어야 함.
		에러방지	오류 입력 변수 방지 및 알림 기능, 예상되는 입력 값 제시	0	0	지적 사항 없음.
		에러의 인식, 진단, 복구	시스템 에러 발생 감지, 원인 진단, 복구 기능	0	0	지적 사항 없음.
	일관성	시스템과 실세계의 일치	시스템-실무 용어간의 일치	0	0	지적 사항 없음.
		일관성과 표준	설계 자동화 시스템 내의 용어 일치	0	0	지적 사항 없음.
		기억보다 인식	시각적 계층 구조, 그룹화, 가시성, 명확한 명칭, 쉬운 인지	0	0	지적 사항 없음.
	유연성	제어의 자유	설계자의 자유도, 취소 가능성, 주도권	1	1	파라미터 값의 범위를 조정이 용이하도록 시스템 유연성이 개선되어야 함.
		유연성 및 효율성	전문성에 따른 유연한 사용, 옵션의 제공, 개인화, 신속 및 자동화된 수행	0	0	지적 사항 없음.
	의미성	간소화된 디자인	설계 자동화 시스템 사용자 인터페이스의 심미성, 간결성	0	0	지적 사항 없음.
		도움말과 문서화	도움말의 내용, 표현 방법, 메인시스템으로의 전환 용이성	1	1	시스템 전반에 대한 도움말에 대한 접근이 용이해야 함.

▌ 참여 자문단

① 방음터널 전문 엔지니어링 업체 실무 전문가 : (주) DASCO. 남민균. 차장.

② 설계 자동화 시스템 학계 전문가 : 충남대학교 건축학과. 성우제. 교수.

③ 철강·철골 생산 및 철골 구조물 실무 전문가 : (주) POSCO. 유영동. 수석연구원.

④ 디지털 트윈 구축 실무 전문가 : (주) 석영시스템즈. 손영석. 대표.

⑤ 설계 자동화 시스템 개발 실무 전문가 : DIGIT. 한기준. 대표.

다. 연구개발 성과

1. 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	디지털 트윈 개념을 적용한 프로토타이핑 기반 디자인 프로세스:기초연구	한국BIM학회 논문집 (KIBIM Magazine)	김진웅, 김성아	9호 4권	한국	한국 BIM학회	비SCI	2019.12.31
2	Life Prediction Technique for Digital Twin-Based Noise Barrier Tunnel	Sustainability	김진웅, 김성아	12호 7권	스위스	MDPI	SCIE	2020.04.07
3	Framework for Designing Sustainable Structures through Steel Beam Reuse	Sustainability	김성준, 김성아	12호 22권	스위스	MDPI	SCIE	2020.11.15
4	차세대 스마트도시 시설물의 플랫폼 정의와 디지털 체인	한국BIM학회 논문집 (KIBIM Magazine)	양승원, 김진웅, 김성아	10호 4권	한국	한국 BIM학회	비SCI	2020.12.31
5	Optimization design method for noise barrier tunnel junction on merging lanes using quad meshes	Journal of Asian Architecture and Building Engineering (JAABE)	장도진, 김성아	20호 1권	영국	Taylor & Francis	SCIE	2021.01.12

- 추가로 SCIE급 학술지 1건 심사중

2. 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국 CDE학회	김진웅	2019.08.21	제주	대한민국
2	한국 CDE학회	김성준	2019.08.21	제주	대한민국
3	한국 CDE학회	양승원	2019.08.21	제주	대한민국
4	한국 BIM학회 정기학술대회	양승원	2020.07.02	서울	대한민국

3. 특허 성과

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	쿼드메쉬를 이용해, 터널형 도로의 형상 정보를 추출하는 방법, 이를 저장하는 컴퓨터 판독 가능 기록 매체, 및 이 매체에 저장되는 컴퓨터 프로그램	한국	성균관대학교 산학협력단	2019.11.26.	10-2019015339 7	성균관대학교 산학협력단	2020.05.21	10-2115945	100%

4. 소프트웨어

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1	방음터널 설계 자동화 도구	2019.08.25.	성균관대학교 산학협력단	2019.11.18.	C-2019-033981	성균관대학교 산학협력단	100%
2	방음터널 구축 및 기획 단계에서 주변 지형지물 모델링 자동화 도구	2020.08.10.	성균관대학교 산학협력단	2020.09.28.	C-2020-033190	성균관대학교 산학협력단	100%
3	방음터널의 차양 설치 자동화를 위한 설계 자동화 도구	2020.09.07.	성균관대학교 산학협력단	2020.09.28.	C-2020-033189	성균관대학교 산학협력단	100%

라. 연구 결과 요약

○ 차세대 방음터널 플랫폼 및 디지털 체인

- 차세대 방음터널 플랫폼의 정의를 수행함. 플랫폼은 1) 고부가가치 플랫폼과 2) 빅데이터 플랫폼의 기능을 겸비한 도로시설물의 역할을 수행함. 고부가가치 플랫폼은 방음 이외의 태양광 발전, 도시녹화 등의 기능을 가진 플러그앤플레이 방식의 다기능 패널을 통해 다양한 기능을 수행함. 빅데이터 플랫폼은 도시 및 기상 등의 데이터를 수집하여 도시 및 시설물의 모니터링을 가능케 함.

- 방음터널의 기획, 설계, 시공, 유지관리 및 해체에 이르는 전 생애주기에 걸쳐 생산되는 정보가 일관화 되어 사용 및 관리되는 디지털 체인이 요구됨. 이를 구현하기 위해 제너러티브/파라메트릭 디자인, 시뮬레이션, 최적화, 디지털 패브리케이션 및 디지털 트윈 기술이 필요함.

○ 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템 개발

- 터널 구조체 생성 알고리즘, 방음터널 부재 라이브러리, 사용자 인터페이스 구축을 통해 방음터널의 파라메트릭 디자인 시스템을 개발함.

- 방음터널의 설계는 도로선, 구조체 중심선, 구조체 배치, 구조체 간격 등을 정하는 것임. 파라메트릭 디자인 기반 방음터널의 설계 자동화 시스템을 구현하기 위하여 방음터널 설계안을 생성하기 위한 각 파라미터를 도출하고 수학적 관계를 바탕으로 터널 구조체 생성 알고리즘을 구축함. 구조체의 생성은 구조체 기준선 생성-부재 라이브러리 배치를 통해 이루어짐.

- 방음터널의 시공과 디지털 트윈 구축을 고려하여 설계 자동화 시스템은 방음터널의 건물 정보 모델 (BIM)을 생성함. 생성된 건물 정보 모델을 활용하여 방음터널 부재의 수량, 패브리케이션 데이터, 비용, 도면 등을 자동으로 생성하고 검토하는 것이 가능함. 또한 생성된 건물 정보 모델은 디지털 트윈에서 활용하기 위한 디지털 모델로 활용할 수 있음.

○ 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 트윈 시스템

- 디지털 모델과 피지컬 모델로 구성된 방음터널의 디지털 트윈 시스템을 구축함. 마이크로 컨트롤러와 센서로 구성된 피지컬 컴퓨팅 시스템을 이용하여 방음터널의 물리 프로토타입 모델을 생성함. 센서 데이터는 피지컬 컴퓨팅 시스템을 이용하여 수집 및 가공되어 디지털 모델로 전송됨. 디지털 모델은 수신 데이터를 시각화하며 데이터를 저장 및 관리함.

- 태양광 발전 패널, 온습도, 조도, 미세먼지 센서 등을 이용하여 디지털 트윈의 테스트를 수행함. 방음터널 디지털 트윈 시스템 구축을 통해 실시간으로 센서 데이터를 수집하고 모니터링이 가능한 것을 확인함. 도로시설물의 특성을 고려하여 원격지에서의 모니터링을 위하여 JSON 형식의 데이터 포맷을 이용하여 센서 데이터를 가공하였으며 웹기반의 IoT 플랫폼을 이용하여 데이터를 전송하고 시각화 할 수 있는 것으로 나타남.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 정량적 및 정성적 목표 달성도

1. 목표 달성 개요

○ 핵심 연구 성과 목표

단위 성과물 :

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	차세대 방음터널 설계 자동화 프로그램	차세대 플랫폼형 방음터널의 설계 자동화 프로그램 프로토타입 개발	소프트웨어	주관	2	4
2	차세대 방음터널 디지털 트윈 시스템	차세대 플랫폼형 방음터널 디지털 트윈 시스템을 구현하여 실시간 도시 정보 가시화 및 데이터 플랫폼으로서의 역할	시스템	주관	2	4

양적 성과 목표 :

- SCI 논문 3건
- 비SCI 논문 1건
- 특허 출원 1건
- 특허 등록 1건
- 인력 양성 2건 (박사급)
- 소프트웨어 1건

○ 목표 달성 결과

- 단위 성과물 : 전 항목 달성 완료
- 양적 성과 : 인력 양성 1건 외 전 항목 달성 완료

2. 정량적 목표 달성도

구분			목표	실적	달성도 (%)
국외논문 게재	SCI		3	3	100
	비SCI		-	-	-
	계		3	3	100
국내논문 게재	SCI		-	-	-
	비SCI		1	2	200
	계		1	2	200
특허출원	국내		1	1	100
	국외		-	-	-
	계		1	1	100
특허등록	국내		1	1	100
	국외		-	-	-
	계		1	1	100
인력양성	석사		-	-	-
	박사		2	1	50
	계		2	1	50
기술이전	계약건수		-	-	-
	계약액		-	-	-
	징수액		-	-	-
국제 표준화	기고서 제출		-	-	-
	기고서 채택		-	-	-
	표준안 채택		-	-	-
국내 표준화	기고서 제출		-	-	-
	기고서 채택		-	-	-
	표준안 채택		-	-	-
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		-	-	-
	연구시설 · 장비		-	-	-
	기술요약정보		-	-	-
	생명자원	생명정보	-	-	-
		생물자원	-	-	-
		신품종	-	-	-
	소프트웨어		1	3	300
	화학물		-	-	-
기타	시제품		-	-	-
	성과 홍보		-	-	-
	일자리 창출		-	-	-

○ 목표 미달성 항목의 원인 보완 방안

- 목표 미달성 항목 : 인력양성 2건 중 1건 미달성

- 보완 방안 : 현재 박사급 2명의 학위 심사 진행중으로 추후 보완 인력양성 달성 가능할 것으로 예상됨.

- 이외 전 항목 목표 달성함.

3. 정성적 목표 달성도

구분	핵심 성과물 (CTE)	단위 성과물	성과점검기준							양적성과현황	
			질적 성과지표 (관련 페이지)		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	목표성과	달성성과
주관	[A] 방음터널 디지털 체인 및 디지털 트윈 구현을 통한 차세대 플랫폼형 도로시설물 모델	[A-1] 차세대 방음터널 플랫폼의 파라메트릭 디자인 시스템	①	사례분석에 기반한 대표방음터널 유형 디지털모델 생성 (p.43-p.51)	L0D300	L0D300	L0D 측정 기준표	L0D 측정 기준표	10	특허 : 출원 1건 등록 1건 논문(SCI) : 1건 논문(비SCI) : 1건 S/W : 1건	특허 : 출원 1건 등록 1건 논문(SCI) : 1건 논문(비SCI) : 2건 S/W : 3건
			②	방음터널 구성 주요부재의 라이브러리 생성 (p.38-p.43)	50%	100%	생성 라이브러리 갯수/주요부재 갯수	생성 라이브러리 갯수/주요부재 갯수 > 0.5	20		
			③	디지털 시뮬레이션을 통한 디지털모델 태양광 패널 배치 최적화 (p.77-p.85)	5%	7.3%	최적화 전 태양광 발전량/최적화 후 태양광 발전량	최적화 후/전>1.05	20		
		[A-2] 차세대 방음터널 플랫폼의 디지털 트윈 시스템	①	센서 데이터 수신 및 가시화 (p.98-p.101)	20%	100%	데이터 출력 센서 수 /데이터 입력 센서 수	데이터 출력 센서 수 /데이터 입력 센서 수> 0.2	25	논문(SCI) : 2건	논문(SCI) : 2건
			②	실무 활용 가능성 전문가 평가 (p.118-p.130)	50% 이하	0% (달성 성공)	전체 항목 중 심각도 3 이상인 항목의 비율 < 0.5	전체 항목 중 심각도 3 이상인 항목의 비율 < 0.5	25		
계									100	특허 : 출원 1건 등록 1건 논문(SCI) : 3건 논문(비SCI) : 1건 S/W : 1건	특허 : 출원 1건 등록 1건 논문(SCI) : 3건 논문(비SCI) : 2건 S/W : 3건

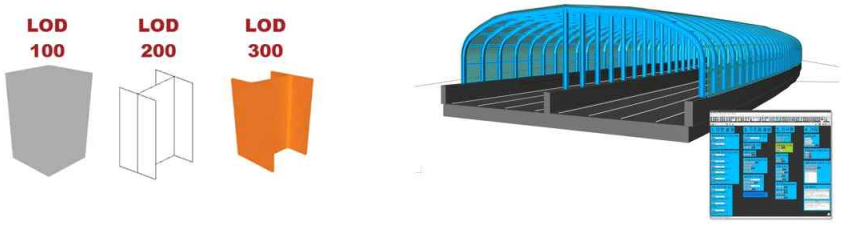
▌A-1-1 : 사례분석에 기반한 대표방음터널 유형 디지털모델 생성 (p.43-p.51)

① 관련 항목 및 검증 방법

- 목표치 : LOD 300
- 달성치 : LOD 300
- 측정 및 검증 방법 : LOD 측정 기준표

② 검증 결과

- LOD300 기준 : 디지털 도구를 통해 수량, 크기, 모양, 위치, 방향이 확인할 수 있을 수준의 그래픽
- 디지털 모델 생성 결과 : 방음터널 부재의 수량, 크기, 형태, 위치, 방향 모두 확인 가능하며 도면 산출 또한 가능함.
- 최종적으로 LOD 300 기준을 만족하여 성과 달성함 [그림 133].



LOD에 따른 부재 표현　　방음터널 디지털 모델

그림 133 LOD 300 기준을 만족하는 방음터널 디지털 모델의 생성

▌A-1-2 :방음터널 구성 주요부재의 라이브러리 생성 (p.38-p.43)

① 관련 항목 및 검증 방법

- 목표치 : 50%
- 달성치 : 100%
- 측정 및 검증 방법 : 생성 라이브러리 갯수 / 주요 부재 갯수 > 0.5

② 검증 결과

- 생성 라이브러리 개수 (시스템으로 생성 가능한): 기둥, 횡방향 빔 (래프터, 가변), 종방향 빔 (러너), 방음 패널, 센서, 기초 총 6개 항목 (Oval type 기준).
- 주요 부재 개수 (방음터널 모델링에 필요한): 기둥, 횡방향 빔 (래프터, 가변), 종방향 빔 (러너), 방음 패널, 센서, 기초 총 6개 항목 (Oval type 기준)
- 방음터널 모델링에 필요한 주요 부재를 모두 생성 가능하도록 라이브러리를 구성하였음. 생성 라이브러리 개수 / 주요 부재 개수 = 6/6 = 1로 성과 달성함 [그림 134].

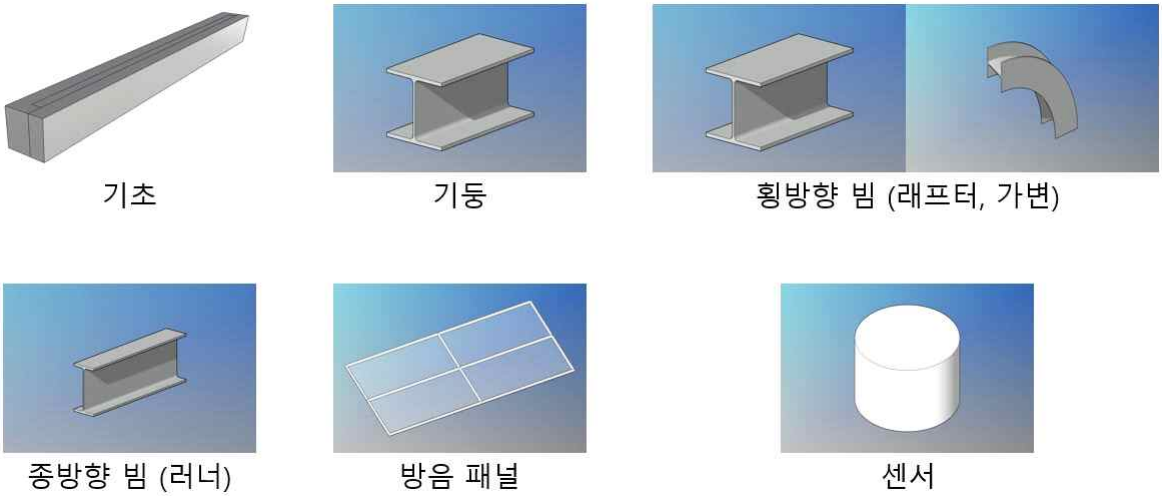


그림 134 방음터널 구성 주요 부재 라이브러리의 생성

▌A-1-3 :디지털 시뮬레이션을 통한 디지털모델 태양광 패널 배치 최적화 (p.77-p.85)

① 관련 항목 및 검증 방법

- 목표치 : 5%
- 달성치 : 7.3%
- 측정 및 검증 방법 : 최적화 전 태양광 발전량 / 최적화 후 태양광 발전량 > 1.05

② 검증 결과

- 최적화 전 태양광 발전량 : 41,339 (kWh)
- 최적화 후 태양광 발전량 : 44,398 (kWh)
- 최적화 전 태양광 발전량 / 최적화 후 태양광 발전량 = 1.073
- 최적화를 통해 태양광 발전량이 약 7.3% 증가하는 것으로 나타나 성과 달성함 [그림 135].

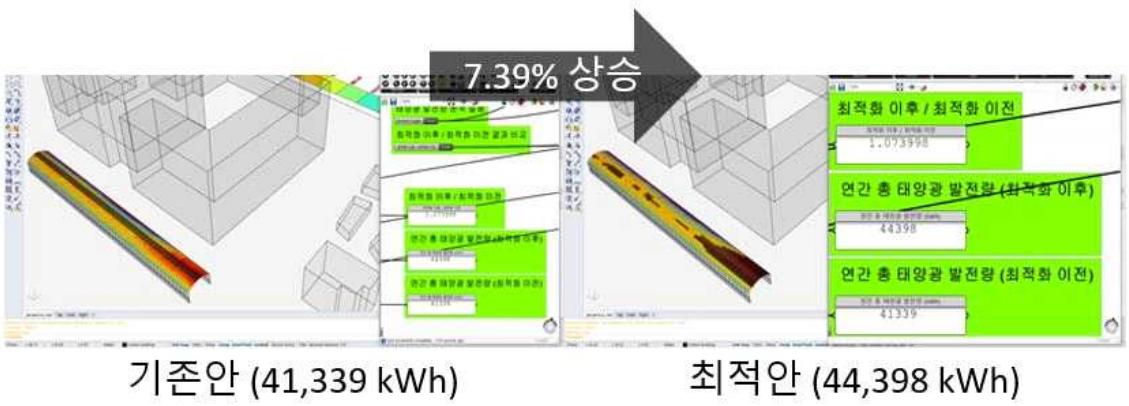


그림 135 태양광 최적화 전후 결과 비교

▌A-2-1 : 센서 데이터 수신 및 가시화 (p.98-p.101)

① 관련 항목 및 검증 방법

- 목표치 : 20%
- 달성치 : 100%
- 측정 및 검증 방법 : 데이터 출력 센서 수 / 데이터 입력 센서 수 > 0.2

② 검증 결과

- 데이터 출력 센서 수 : 16(센서 4종, 태양광 패널 12개)
- 데이터 입력 센서 수 : 16(센서 4종, 태양광 패널 12개)
- 데이터 출력 센서 수 / 데이터 입력 센서 수 = 1.00
- 총 16개 센서의 데이터 모두 원활한 입출력을 한 것으로 나타나 성과 달성함 [그림 136].



그림 136 센서 데이터 수신 및 가시화 테스트

▌A-2-2 : 실무 활용 가능성 전문가 평가 (p.118-p.130)

① 관련 항목 및 검증 방법

- 목표치 : 50%
- 달성치 : 0%
- 측정 및 검증 방법 : 전체 항목 중 심각도 3 이상인 항목의 비율 < 0.5

② 검증 결과

- 1차 전문가 평가 결과 전체 24개 항목 중 12개 항목의 심각도가 3이상인 것으로 나타남. 따라서 전체 항목 중 심각도 3이상인 항목의 비율은 0.5임.
- 1차 전문가 평가에서 도출된 전문가의 의견을 바탕으로 시스템 개선 후 2차 평가를 실

시함. 2차 전문가 평가 결과 전체 24개 항목 중 0개 항목의 심각도가 3이상인 것으로 나타남. 따라서 전체 항목 중 심각도 3이상인 항목의 비율은 0임.

- 최종적으로 전체 항목 중 심각도 3이상인 항목의 비율이 0이므로 0.5 미만인 것으로 나타나 성과 달성함 [그림 137].

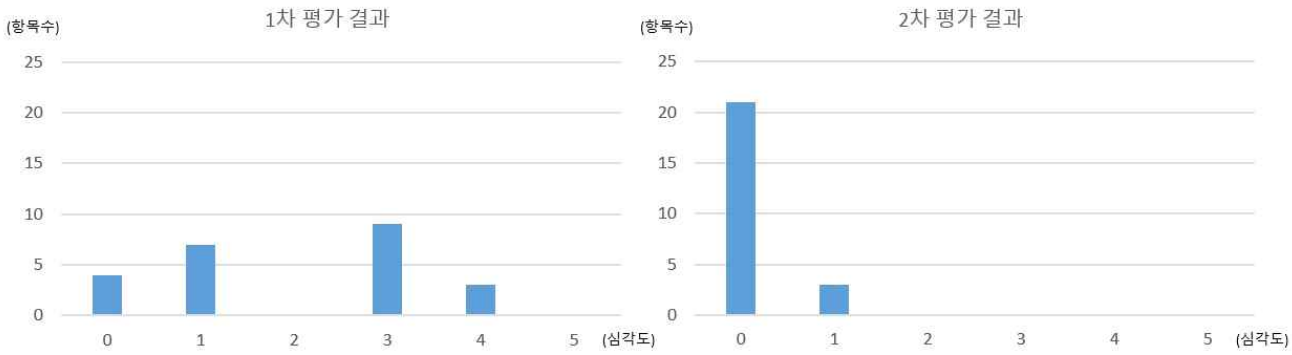


그림 137 심각도 별 항목 수

나. 관련 분야 기여도

○ 공공적 성과 및 기여

- 방음 기능 위주의 도로시설물인 방음터널을 다양한 기능성 패널을 설치하고 데이터를 생성해낼 수 있는 플랫폼으로 활용할 수 있도록 개념과 방안을 제시함.

- 방음터널 이외의 도로시설물의 지능화 및 고부가가치화에 대한 가능성을 제안.

○ 기술적 성과 및 기여

(설계 자동화 시스템)

- 제너러티브 및 파라메트릭 디자인 기반의 설계 자동화 기술을 통하여 설계 데이터의 전산적 관리 및 설계 품질 향상을 가능케 함.

- 도로 접속부에 설치되는 방음터널의 복잡한 형상을 고려하여 자동으로 설계하는 기술 확보 및 특허 등록.

- 초기 설계 단계에서 방음터널의 태양광 발전 성능을 검토하고 최적화하기 위한 기술 확보.

(디지털 트윈 시스템)

- 기후 및 도시 데이터의 수집 및 도로시설물을 실시간 모니터링하기 위한 방안 제시.

- 설계 자동화 시스템과의 연계를 통한 디지털 트윈용 건물 정보 모델 생성 기술 확보.

○ 학술적 성과 및 기여

- 도로시설물을 차세대 스마트도시 플랫폼으로 활용하기 위한 개념 및 방법론 제안.

- 기계학습 기법을 이용하여 접속부를 가지는 방음터널 구조체의 최적화를 위한 방안 제시.

- 방음터널 철골 부재 및 기타 철골 부재의 재사용을 통한 비용 및 온실가스 최소화 방안 제시.

- 방음터널의 설계 과정에서 디지털 트윈 개념을 적용한 프로토타이핑 방법론 제안.

- 방음터널의 디지털 트윈 시스템 구축을 통하여 구조 성능을 모니터링하기 위한 방법론 제시.

○ 경제적 성과 및 기여

- 본 연구의 설계 자동화 시스템을 통하여 실시간으로 기본 도면을 생성하는 것이 가능하므로 최소 30일 이상 소요되는 기존 방음터널의 설계과정에 소요되는 시간과 인력 및 비용을 감축할 수 있음.

- 초기 설계 단계에서부터 소요되는 부재의 수량, 비용, 패브리케이션 데이터를 자동으로 생성 및 검토할 수 있어 방음터널 건설 전체의 시간과 비용을 감축하는 것이 가능함.

○ 기타 성과 및 기여

- 도로시설물을 데이터 생성 및 부가기능 플랫폼으로 활용하여 국토 공간의 효율적 사용 및 태양광 발전 등 신재생 에너지 생산에 활용할 수 있음.

- 설계 자동화 시스템 및 디지털 트윈 시스템에서 생성되는 데이터를 자동으로 전산화하며 관리할 수 있어 추후 설계 및 연구 과정에서 활용할 수 있는 데이터를 제공할 수 있음.

4. 연구개발성과의 활용 계획

가. 연구 결과의 활용방안

○ 방음터널 통합 설계 자동화 시스템

- 플랫폼 기반 차세대 방음터널의 최적화 및 초기설계에 활용
- 방음터널 디지털 트윈 시스템에서 수집된 시설물 데이터를 연동하여 시설물 개선에 활용
- 디지털 트윈을 위한 가상 방음터널 모델 제작 및 유지, 관리에 활용
- 설계 · 생산 · 운영을 고려한 통합 관리 모델 플랫폼으로 활용

○ 방음터널 디지털 트윈 시스템 프로토타입

- 방음터널 디지털 트윈을 통한 시설물 및 도시 데이터 모니터링
- 실시간 시설물 모니터링 및 데이터 마이닝을 통한 선제적 시설물 유지보수 소요 예측
- 차량 통제 없이 기능성 패널이나 구조체 변경 결과를 시뮬레이션 하기 위한 버츄얼 테스트 베드로 활용
- 기계학습 및 인공지능 알고리즘을 활용한 통합 모니터링
- 빅데이터를 활용한 추후 설계 최적화 및 개선안 제안
- 빅데이터 플랫폼으로서 스마트시티 통합 센서 노드 및 센서 데이터 허브의 역할
- 방음터널 초기 설계에서부터 다학제적 팀에 의한 성능지향적 프로세스를 진행
- VR을 활용한 사용자 참여형 고부가가치 제품 관리

나. 기대성과 및 파급효과

○ 차세대 방음터널 설계 자동화 시스템

- 기술적 잠재 영향력

· 제너러티브/ 파라메트릭 디자인 기반의 설계 자동화 기술의 기타 도시시설물 설계 자동화 기술 개발에 적용 가능

· 지반의 하중 및 시설물의 하중을 고려한 설계를 통해 시공 단계의 지반보강 및 교량 보강 소요 감소

· 방음터널의 모듈별 제작과 유통을 통해 유지·관리 프로세스의 단축 및 비용 절감 가능

· 부재 모듈의 조합과 방음터널 운영에서 발생하는 데이터를 통한 부가가치 창출 가능

· 모듈화를 위한 표준화가 수반되므로 궁극적으로 한국형 방음터널 및 부재의 표준화 가능

· 데이터에 기반한 수량 산출 및 자재 필요 소요량 결정되므로 설계에서 시공까지의 디지털 체인 구현 가능

· 설계 자동화 시스템을 통해 생산된 설계 대안의 데이터베이스화를 통한 설계 품질 향상 가능

- 사회적 잠재 영향력

· 지형 및 지역에 특화된 방음터널 형상 디자인이 가능해지므로 방음터널의 사회적, 지형적 순응형 디자인 유형 도출 가능

· 모듈별, 재료별, 부재별 생산 다변화를 통한 신산업 창출 및 일자리 창출 가능성 증대

· 센서 및 태양광 발전 패널과 같은 첨단 소재 및 기술의 융합을 통해 중소형 및 대형 제조업체의 경쟁력 향상

· 데이터 플랫폼으로의 활용을 통한 학술적, 기술적 데이터 획득 가능

· 방음터널 이외의 도시시설물의 지능화 및 고부가가치화에 대한 가능성 도출

- 경제적 잠재 영향력

· 제너러티브/파라메트릭 디자인 기반의 설계 자동화 시스템의 도입을 통한 공기 단축 및 인건비 절감 가능

(기존 도로 시설물 설계 소요일 : 최소 30일, 설계 자동화 시스템 도입을 통한 설계 소요일: 최대 3일, 설계 기간 최소 90% 단축)

· 자재의 수량 산출이 가능해짐에 따라 잉여 생산물 및 원재료 낭비 감소

(할증률 2% 및 안전율 5%의 자재 소요 및 잉여 생산량 감소)

- 기초 원천기술 확보를 통한 기술적 기대효과

· 특허 출원 및 등록을 통한 방음터널 설계 자동화 기술의 기초 원천기술 확보 가능

· 방음터널 구조, 형상, 태양광 패널 최적 설계 및 배치의 기초 원천기술 확보 및 관련분야 경쟁력 강화

· 디자인 유형 추가개발을 통한 한국 지형 및 도시 최적화 방음터널 디자인 유형 개발 가능

· 새로운 기능성 패널이나 구조체 변경시 신 모듈의 테스트 베드로서 활용 가능

○ 차세대 방음터널 디지털 트윈 시스템

- 기술적 잠재 영향력

· 도시 데이터의 정보화를 통한 실시간 도시시설물의 모니터링 및 유지 · 관리 가능

· 도시 데이터 예측을 위한 빅 데이터 마이닝과 빅 데이터 기반의 서비스 창출 가능

· 디지털 트윈 시스템을 통한 버추얼 테스트베드 및 VR과의 연계를 통한 고부가가치 창출 가능

· 방음터널 외피와 VR을 활용한 미디어 플랫폼으로서의 활용 가능성 재고

참고문헌

BIM Forum. LOD | BIMFORUM. Available on: https://bimforum.org/lod/ (accessed on 23 November 2019).

Grieves, M. W. (2018). Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. Complex Systems Engineering: Theory and Practice 7: 175.

Grieves, M. W. and Vickers, J., Digital Twin:Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Beahavior in Complex Systems, in Kahlen, F., Flumerfelt, S., Alves. A. (2017). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer.

Griffith, B. T., & Ellis, P. G. (2004). Photovoltaic and solar thermal modeling with the EnergyPlus calculation engine (No. NREL/CP-550-36275). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).

Jang, D. J., & Kim, S. A. (2020). Optimization Design Method for Noise Barrier Tunnel Junction on Merging Lanes Using Quad Meshes. Journal of Asian Architecture and Building Engineering.

Jung, J. and S.-A. Kim (2018). Digital Fabrication Integrated Architectural Design Process based on Lean startup. KIBIM Magazine 8: 23-33.

Kasita. Kasita-Hospitality for the Independent Traveler. Available on: https://kasita.com/ (accessed on 23 November 2019).

Katerra. Katerra:Home. Available on: https://www.katerra.com/country-selector/ (accessed on 23 November 2019).

Kieran, S., & Timberlake, J. Kieran Timberlake | Architecture, Planning, Research. Available on: https://kierantimberlake.com/ (accessed on 23 November 2019).

Kim, D.-Y. (2018). Prototyping-based architectural design process using digital and physical models. Seoul, Sungkyunkwan University.

Kim, D.-Y. (2019). Synergies between Digital Models and Physical Models in Convergence Design - Case Studies using Projects of Architectural Firms and Educational Environments-." KIBIM Magazine 9(2): 29-44.

Kim, J., & Kim, S. A. (2020). Lifespan Prediction Technique for Digital Twin-Based Noise Barrier Tunnels. Sustainability, 12(7), 2940.

Kim, S., & Kim, S. A. (2020). Framework for Designing Sustainable Structures through Steel Beam Reuse. Sustainability, 12(22), 9494.

Kim, S.-A. (2017). BIM in the Age of Big Data 建築士 578(-): 150-157.

Kim, S.-A. (2017). On the Role of Digital Model - How the Parametric Design leads to the virtual Building. 建築士 580(-): 150-159.

Korea LCI DB. Available online: http://www.epd.or.kr/eng/lci/lciIntro00.do (accessed on 16 July 2019).

Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry

4.0-based manufacturing systems. Manufacturing letters 3: 18-23.

Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. Procedia Manufacturing 11: 939-948.

Nielsen, J. (1992, June). Finding usability problems through heuristic evaluation. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 373-380.

Piascik, R., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Calomino, A. (2010). Technology area 12: Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing road map. NASA Office of Chief Technologist.

Robertson, D. and K. Ulrich (1998). Platform product development. Sloan management review 39(4): 19-31.

Roudsari, M. S., Pak, M., & Smith, A. (2013, August). Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug.

Tao, F., Sui, F., Li., A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S., Nee, A. (2019). "Digital twin-driven product design framework." International Journal of Production Research 57(12): 3935-3953.

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. (2018). Digital twin in industry: state-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics 15(4): 2405-2415.

Yen, P. Y., & Bakken, S. (2009). A comparison of usability evaluation methods: heuristic evaluation versus end-user think-aloud protocol-an example from a web-based communication tool for nurse scheduling. In AMIA annual symposium proceedings (Vol. 2009, p. 714). American Medical Informatics Association.

Yoo, J. S., & Shin, D. B. (2016). Utilizing urban facility sensor information in U-City: Multi-dimensional scaling approach. Spatial Information Research, 24(2), 53-64.

강진아, 남상관, 권혁종, & 오윤석. (2009). 도시지상시설물 관리를 위한 최적 센서노드 배치 방법. 한국지리정보학회지, 12(4), 158-168.

박주환, 한성호, 박재현, 박원규, 김현경, & 홍상우. (2012). 모바일 어플리케이션의 사용성 평가 방법 비교 분석. 대한인간공학회 학술대회논문집, 154-157.

유지송. (2015). 도시시설물 센서정보 활용방안에 관한 연구. 석사학위논문. 안양대학교 일반대학원, 안양.

장명호. (2012). BIM 연동 시설물 센서 정보 가시화 시스템 프레임워크. 석사학위논문. 성균관대학교 일반대학원, 서울.

조덕기, 강용혁, 이의준, & 오정무. (2004). 국내 태양광발전시스템의 최적 설치에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 24(3), 19-25.

최찬진. (2019). 휴리스틱 평가를 이용한 의료기기 사용자 인터페이스 개선에 관한 연구. 석사학위논문. 동국대학교, 서울.

환경부 · 국립환경과학원. (2018). 대기오염측정망 설치 · 운영지침.

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

210㎜×297㎜[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]