

18CTAP-
C129716
-02

플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한
주기적인 정도 관리 기술 개발 최종보고서

2018

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

Land Infrastructure and Transport R&D Report

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
18CTAP-C129716-02

플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발 최종보고서

2019. 03. 28.

주관연구기관 / 중앙대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

‘플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인
정도 관리 기술 개발 (연구개발 기간: 2017. 04. 01. ~ 2018. 12. 31.)’ 과제의 최종보고서
2부를 제출합니다.

2019 . 03 . 28 .

주관연구기관명: 중앙대학교 산학협력단 대표자 (김 원 용) (인)

주관연구기관책임자: 중앙대학교 건축학부 김 창 완

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	18CTAP-C129716-02	해당단계 연구기간	2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31	단계구분	(해당단계) 2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31 (총 단 계) 2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31
연구사업명	국토교통기술촉진연구사업				
연구과제명	세부과제명	플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발			
연구책임자	김 창 완	해당단계 참여 연구원수	총 : 9명 내부: 9명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 300,000천 원 기업: 천 원 계 : 300,000천 원
		총 연구기간 참여 연구원수	총 : 9명 내부: 9명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 300,000천 원 기업: 천 원 계 : 300,000천 원
연구기관명 소속부서명	중앙대학교 산학협력단 공과대학 건축학부		참여기업명	-	
요약				보고서 면수	117 페이지
○ 본 연구과제의 최종목표는 플랜트 시공 단계에서의 품질 향상과 효율적인 관리 업무 수행을 도모하기 위해 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발하는 것임. ○ 시공 단계에서는 기계, 배관, 전기 등 구성요소를 설치하는 과정에서 현장 시공에 따라 시공오차 및 설계변경이 빈번히 발생하나, 관리자의 육안에 의한 현장 점검 방식은 현장에서 발생한 시공오차 및 설계변경 현황을 정확하게 파악하기에 어려움이 있어, 주기적으로 수행되는 정도 (精度) 관리의 객관성이 결여될 가능성이 높음. 본 연구과제에서는 시공 단계에서 발생한 시공오차 및 설계변경 현황을 정확하게 파악함으로써 주기적으로 수행되는 정도 관리의 객관화 및 효율화를 위한 기술을 개발함. ○ 본 연구과제의 최종 목표를 달성하기 위한 주요 연구 목표는 다음과 같음. - 3차원 설계 모델에 기반을 둔 최적 스캔 계획 수립 기술 개발 - 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토를 통한 모델 갱신 기술 개발					
핵심어/ Keywords	한글	산업플랜트, 3차원 설계 모델, 최적 스캔 계획 수립, 시공오차 분석, 3차원 준공 모델 갱신			
	영어	Industrial Plant, 3D As-planned Model, Optimal Scan Planning, Deviation Analysis, 3D As-built Model Update			

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구과제는 플랜트 시공 단계에서의 품질 향상과 효율적인 관리 업무 수행을 도모하기 위해 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발을 최종목표로 설정함. 이는 해외 플랜트 시장에서의 국내 건설업체 경쟁력 강화 뿐만 아니라, 미래 경쟁 시장에서 우위 확보를 위해 필수적으로 요구되는 핵심 기술임. 본 연구과제의 최종목표를 달성하기 위한 주요 연구목표는 다음과 같음. ○ 3차원 설계 모델에 기반을 둔 최적 스캔 계획 수립 기술 개발 ○ 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토를 통한 모델 갱신 기술 개발
연구개발성과	○ 핵심성과 A: 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술 개발 (소프트웨어) - 전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산 - 국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완 - 비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발 - 테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가 ○ 핵심성과 B: 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발 (소프트웨어) - 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술 - 플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발 - 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 개발 - 테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가
활용계획 및 기대효과	○ 기술적 측면 - 플랜트 시공 단계에서의 주기적인 정도 관리에 대한 기술 확보 - 집중 투자를 통해 기술 개발의 한계를 극복함으로써 플랜트 시공 관리 기술 개발 분야에서의 국가 경쟁력 강화 ○ 경제적·산업적 측면 - 플랜트 시설의 완공에 이르기까지 철저한 기술적 검사 방식으로 현장 검사를 수행하여 시공 전 과정을 관리함으로써 품질 및 생산성 향상 기대 - 사전에 하자요인을 제거함으로써 운영·유지 관리 비용 절감 - 국내 건설업체가 해외 플랜트 시장에서의 수주 경쟁력을 확보함으로써, 더 나아가 기계, 전기, 배관, 전자계측 장비 등 제조업 수요유발, 엔지니어링, 금융서비스 등 서비스산업의 경기활성화에 기여 ○ 사회적 측면 - 선진 기술 수준에 근접함으로써 IT 강국으로서의 국가 이미지 제고와 더불어 국가 선진화 이미지 제고 - 고부가가치 핵심기술에 대한 연구개발을 통해 건설산업의 첨단화, 효율화를 꾀함으로써 해외 플랜트 시장에서의 국가 이미지 제고

(다음 페이지에 계속)

활용계획 및 기대효과	본 연구과제에서는 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술 개발을 통해 플랜트 시공 단계에서의 레이저 스캔 수행 시 효율성을 극대화할 뿐만 아니라, 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발을 통해 관리자의 육안에 의존하는 정도 관리 과정을 객관화 및 자동화 하는데 기여할 것으로 기대됨.				
핵심어	산업 플랜트	3차원 설계 모델	최적 스캔 계획 수립	시공오차 분석	3차원 준공 모델 갱신

〈 Summary 〉

Purpose & Contents	In this research, the ultimate goal is set to develop robust quality control and assurance tools to promote quality improvement and for efficient management work during the industrial plant construction. The proposed approach is mainly based on the use of 3D as-planned model and laser scanning technology. This is a core technology that is essentially required not only to reinforce the competitiveness of domestic construction companies in the overseas plant market, but also to secure superiority in the future competitive market. The main research objectives to accomplish the ultimate goal of this proposal are shown as follows. ○ Objective A: Technology development on optimal scan plan establishment based on the 3D as-planned model ○ Objective B: Technology development on model update through the construction error analysis and tolerance satisfaction review
Results	○ Objective A: Technology development on optimal scan plan establishment based on the 3D as-planned model (software) - Technology development on calculating additional secured areas for global scan data - Technology development on supplementation of scan data by acquiring additional local data and matching with global data - Technology development on optimized scan plan establishment using the nonlinear optimization technique - The field applicability evaluation of the technology based on the test bed result ○ Objective B: Technology development on construction error analysis and tolerance range satisfaction review (software) - Technology development on preprocessing for comparison between 3D design model and laser scan data - Technology development on the construction tolerance range satisfaction review for each components of the plant facility - Technology development on 3D as-planned model update based on the construction error tolerance satisfaction review - The field applicability evaluation of the technology based on the test bed result

(continued)

Expected Contribution	The technology development on the optimal scan plan establishment based on the 3D as-planned model is not only expected to maximize the efficiency of performing the laser scan in the plant construction stage, but also the technology development on the construction error analysis and tolerance range satisfaction review is expected to contribute to the objectification and automation on the manager's process of managing the level of visual dependence. ○ Technical perspective - Technology security on the robust quality control and assurance in the industrial plant construction - Overcoming the limitation in the technology development through concentrated investment to reinforce the national competitiveness in the technology development field of the plant construction management ○ Economic-Industrial perspective - To the completion of the industrial plant construction, field inspection is performed through strict technical inspection method to manage all processes of construction, and to expect improvement in the quality and productivity - Eliminating defect factors in advance to reduce the operation and maintenance costs - By the domestic construction companies obtaining competitiveness in the overseas plant market, it will cause demand to manufacturing companies in machinery, electricity, piping and electronic measurement devices and also contribute to the economic activation in the service industry such as the financial service, etc. ○ Social perspective - Enhancing the national image as IT power nation by approaching the advanced technology level, and also to enhance national advancement image - Enhancing the national image in the overseas plant market by promoting high-tech and efficiency in the construction industry through R&D on the higher value-added core technology					
	Keywords	Industrial Plant	3D As-planned Model	Optimal Scan Planning	Deviation Analysis	3D As-built Model Update

CONTENTS

Chapter 1. Overview of R&D Project	1
Section 1 Final goal and necessity of R&D project	1
Section 2 Key performance details of R&D project	3
Chapter 2. Domestic/Foreign Technology Development Status of the Relevant Field	7
Section 1 Domestic/Foreign technology development status	7
Section 2 Patent trends	10
Section 3 Adherence to government policy	11
Section 4 Evaluation of the originality R&D project	12
Chapter 3. R&D Details and Achievement	13
Section 1 Summary of R&D achievement	13
Section 2 Main contents of R&D – 1st year	15
Section 3 Main contents of R&D – 2nd year	63
Chapter 4. Achievement of Goal and Contribution to Relevant Field ...	91
Section 1 Qualitative research results	91
Section 2 Quantitative research results	95
Section 3 Contribution to relevant field	99
Chapter 5. Future Application Plan of the Research Result	101
Chapter 6. Collected Foreign Technology Development Information ...	105
Chapter 7. Security Rating of R&D Achievement	109
Chapter 8. Status of Research Facilities · Equipment Registered in NTIS ..	109
Chapter 9. Safety Measures in Laboratories based on R&D Tasks ...	109
Chapter 10. Representative Research Achievements of R&D Project ..	111
Chapter 11. Etc.	114
References	

목 차

제1장. 연구개발과제 개요	1
제1절 연구개발 최종목표 및 필요성	1
제2절 연구개발 핵심성과 설명	3
제2장. 국내외 기술 개발 현황	7
제1절 국내외 기술 개발 및 산업 동향	7
제2절 특허 동향	10
제3절 정부정책과의 부합성	11
제4절 연구개발과제의 차별성 및 중복성 검토	12
제3장. 연구수행 내용 및 성과	13
제1절 연구개발결과 요약	13
제2절 연구개발 주요내용 - 1차년도	15
제3절 연구개발 주요내용 - 2차년도	63
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	91
제1절 연구개발 목표 달성도	91
제2절 연구개발 성과지표 달성도	95
제3절 관련 분야 기여도	99
제5장. 연구개발성과의 활용계획	101
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	105
제7장. 연구개발성과의 보안등급	109
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ..	109
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..	109
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	111
제11장. 기타 사항	114
참고문헌	

제1장. 연구개발과제 개요

제1절 연구개발 최종목표 및 필요성

1. 연구개발 최종목표

- 본 연구과제의 최종 목표와 이를 달성하기 위한 주요 연구 목표는 다음 <표 1-1-1>과 같음.

<표 1-1-1> 최종 연구 목표 및 주요 연구 목표

구분	내용
최종 목표	플랜트 시공 단계에서의 품질 향상과 효율적인 관리업무 수행을 도모하기 위해 시공 단계에서 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적 (週期的) ¹⁾ 인 정도 관리 기술 개발
세부 목표	▪ 3차원 설계 모델에 기반을 둔 최적 스캔 계획 수립 기술 개발 ▪ 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토를 통한 모델 갱신 기술 개발

2. 연구개발 필요성

- 플랜트 프로젝트의 상세 설계 단계에서는 설계의 오류 및 변경에 의한 업무를 최소화하기 위한 목적으로 각 기술 분야 (기계, 배관, 전기 등)간 3차원 상세 설계 모델을 통합하여 시공 전 간섭체크 등의 시공성 검토를 수행하며, 검토 결과에 따라 초기 설계를 수정함. 시공 단계에서는 기계, 배관, 전기 등 구성요소를 설치하는 과정에서 현장 시공에 따라 시공오차 및 설계변경이 빈번히 발생하나, 관리자의 육안에 의한 현장 점검 방식은 현장에서 발생한 시공오차 및 설계변경 현황을 정확하게 파악하기에 어려움이 있어, 주기적으로 수행되는 정도 (精度) 관리의 객관성이 결여될 가능성이 높음.
- 초기 시공 과정에서 발생한 시공오차 및 설계변경 사항이 3차원 상세 설계에 반영되지 않은 채로 시공이 진행되는 경우, 이후 시공 과정에서 예상하지 못한 간섭 문제가 발생함. 이는 각 기술 분야 (기계, 배관, 전기 등)간 시공성 재검토, 재시공에 따른 공기지연 및 이에 따른 추가 비용 발생 등을 야기하는 주된 원인이 됨. 시공 과정에서 발생한 시공오차 및 설계변경 사항이 반영되지 않은 3차원 상세 설계 모델을 이후 운영·유지 관리 단계에서 증설 및 개보수를 위한 설계의 기초로 활용함에 따라, 이러한 문제는 단순히 시공 단계에서 그치지 않고 운영·유지 관리 단계까지 지속적으로 영향을 미침 (Construction Business Owner, 2013).

1) 플랜트 시공 중 주요 공정 (주기기 및 배관 설치 공사 등)이 완료된 이후, 공사 목적물의 합격 판정기준에 대해 요구되는 점검 시점을 의미하며, 상세한 점검 시점 및 주기는 시공자가 수립한 품질관리계획서에 명시하도록 규정함.

- 특히 해외 플랜트 시장에서의 플랜트 프로젝트 수주 계약이 설계, 구매, 시공, 시운전, 운영·유지 관리를 포함하는 일괄턴키 방식으로 진행됨을 고려할 때, 해외 플랜트 시장에서의 국내 건설업체 경쟁력 강화뿐만 아니라 미래 경쟁 시장에서 우위 확보를 위해 핵심 관리 기술의 개발이 필수적으로 요구되며 이에 대한 중요성은 더욱 커질 것으로 전망됨.
- 해양플랜트 분야를 예로 들면, 영국 브리티시 페트로리엄 (British Petroleum, BP)은 2010년 4월 발생한 멕시코 만 원유 유출사고 이후 모든 계약에서 ‘품질’을 강조함. 2011년 2월 ‘Q204’ 건조 계약시에도 현대중공업과 네덜란드 SBM Offshore가 각각 제작을 맡은 선박 본체와 터렛간의 호환성 문제를 강조하였으며, BP는 품질을 철저히 관리감독하기 위해 울산에 400여명의 전문인력을 파견함. 이에 현대중공업에서는 부유식 원유 생산·저장·하역설비 (Floating Production Storage and Offloading, FPSO) 제작시 FPSO의 정상 작동을 위해 오차 범위를 2mm 이내로 줄이고자 ‘3차원 (3D) 스마트 정도 (精度) 관리 시스템’을 자체 개발 및 도입함 (동아닷컴, 2013). 뿐만 아니라, 최근 해양플랜트 영역이 심해나 원양, 극한지역으로 확대되고 품질과 안전성에 대한 발주처의 요구수준이 높아짐에 따라, 현대중공업에서는 이 밖에도 해양플랜트 제작에 최신의 다양한 IT 기술을 도입해 경쟁력을 높이려고 함 (조선비즈, 2013). 이러한 기술의 활용을 통해 품질 극대화와 더불어 생산성 향상이라는 부수적인 효과를 낳았으며, 각 모듈 건조 상황에 대해 실시간 시뮬레이션 함으로써 필요한 자재에 대한 적기 구매가 가능해졌을 뿐만 아니라, 오차를 바로잡기 위한 수정작업도 대폭 줄이게 됨.
- 최근 해외 플랜트 시장에서의 플랜트 프로젝트 수주 계약시 공사 방식을 살펴보면, 설계, 구매, 시공, 시운전은 물론 플랜트 시설 완공 후 짧게는 1년에서 수년간 운영 및 유지 (Operation and Maintenance, O&M)까지 포함하는 일괄턴키 형태로 진행됨. 이에 따라, 국내 건설업계의 해외 플랜트 시장에서의 경쟁력 확보를 위해서는 플랜트 설계, 구매, 시공, 시운전, 운전 및 유지 전 과정에 걸친 관리 기술의 기술력 확보가 필수적으로 요구되며, 미래 경쟁 시장에서의 우위 확보를 위해서도 제안기술 개발이 필요함.
- 따라서 플랜트 시공 단계에서 발생한 시공오차 및 설계변경 현황을 정확하게 파악함으로써 주기적으로 수행되는 정도 관리의 객관화 및 효율화를 위한 기술의 확보가 필수적임. 이에 본 연구과제는 플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술을 개발 완료함.

제2절 연구개발 핵심성과 설명

1. 연구개발 핵심성과 요약

○ 본 연구과제의 연구개발 핵심성과 목표 및 내용은 다음 <표 1-2-1>과 같음.

<표 1-2-1> 연구개발 핵심성과 목표 및 내용

주관연구기관	구분	개발 목표	개발 내용 및 범위
중앙대학교 산학협력단	핵심성과 A	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	- 전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 기술 개발 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 기술 개발
		국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 기술 개발 - 영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 기술 개발
		비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발	- 스캔 커버리지 목적 달성을 위한 최적 스캔 횟수/위치 산정 기술 개발 - 최적 스캔 계획 (위치, 이동 경로, 예상 스캔 커버리지) 시각화 기술 개발
		테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 - 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
	핵심성과 B	3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	3차원 점군 데이터 감소 기술 개발 - 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 기술 개발
		플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발	- 구성요소별 위치 이동 및 설치 각도 (수직/수평) 변경 여부 판별 기술 개발 - 구성요소별 규격 준수 여부 판별 기술 개발
		시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 개발	- 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 기술 개발 - 시공오차 검토 결과 반영을 통한 3차원 설계 모델 자동 갱신 기술 개발
		테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	- 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 - 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완

2. 핵심성과별 세부설명

가. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술

○ 연구개발을 통해 개발 완료한 핵심성과 "3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술"에 대한 세부설명은 다음 <표 1-2-2>와 같음.

<표 1-2-2> 핵심성과 A 세부설명

핵심성과 A	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술	
정의	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술은 플랜트 시설 내의 접근 및 스캐너 설치 가능 구역 계산, 플랜트 시설 내 대상체 특성을 고려한 커버리지 영역 정의 및 계산을 통해 최적 스캔 횟수 및 위치를 산정하고, 최적 스캔 계획에 대한 정보를 시각화하는 기능을 포함하는 소프트웨어를 나타냄. 플랜트 시설에 대한 각종 관리 기술 개발에 필수 요소로 인식되는 레이저 스캔 수행시, 경험에 의존한 스캔 계획에 따른 높은 비효율성 및 획득되는 데이터의 복잡성 증가 등의 문제를 개선하기 위해 필수적으로 요구되는 기술임.	
목적	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술 개발을 통해 플랜트 시공 단계에서 주기적으로 수행하는 레이저 스캔 과정을 효율화하고자 함.	
성능목표	(기존기술 수준) 건설 현장에서 현장 상황 파악을 위해 효과적으로 레이저 스캔을 수행하기 위한 목적으로 최적 스캔 계획 수립 기술을 개발하고자 하는 시도가 있었으나, 국내에서의 기술 개발은 전무한 실정임. 뿐만 아니라, 해외에서 시도된 기술 개발 사례 역시, 플랜트 시설과 비교하여 소규모의 단순한 단층 건축물의 외피를 대상으로 하여 기술의 활용이 매우 제한적임. 이와 같이, 플랜트 시설에 특화된 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발은 전무한 실정임. (개발기술 수준) 최적 스캔 횟수 및 위치 산정을 위한 최적 스캔 계획 수립 기술은 스캔 소요 시간 최소화 및 스캔 커버리지 영역 최대화라는 목적을 달성할 수 있으며, 사용자가 최적 스캔 계획을 확인하고 레이저 스캔 수행시에 활용할 수 있도록 이를 시각화할 수 있음.	
성과달성 책임자 (소속기관)	김 창 완 (중앙대학교)	
소요기간	'17.04 ~ '18.12 (21개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 기술 적용 결과와 Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정 - 대상체 특성을 고려한 커버리지 영역 정의 방식에 대한 전문가의 합리성 평가 - 전문가의 주관적인 스캔 계획에 따른 커버리지와 기술 적용 결과와의 비교를 통한 비교 우위 평가 - 최적 스캔 계획 (위치, 이동 경로 등) 시각화 결과에 대한 예상 수요자 만족도 설문 - 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완 결과를 바탕으로 기술 수준 향상 정도 (%) 측정	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록: 출원 2건, 등록 1건	학술회의 발표: 국내 1건, 국외 1건
	논문 (SCI[E]): 연구 종료 이후 1건 예정	기타: 국내 학술단체 수상 1건
	S/W: 4건	-

나. 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술

○ 연구개발을 통해 개발 완료한 핵심성과 "시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술"에 대한 세부설명은 다음 <표 1-2-3>과 같음.

<표 1-2-3> 핵심성과 B 세부설명

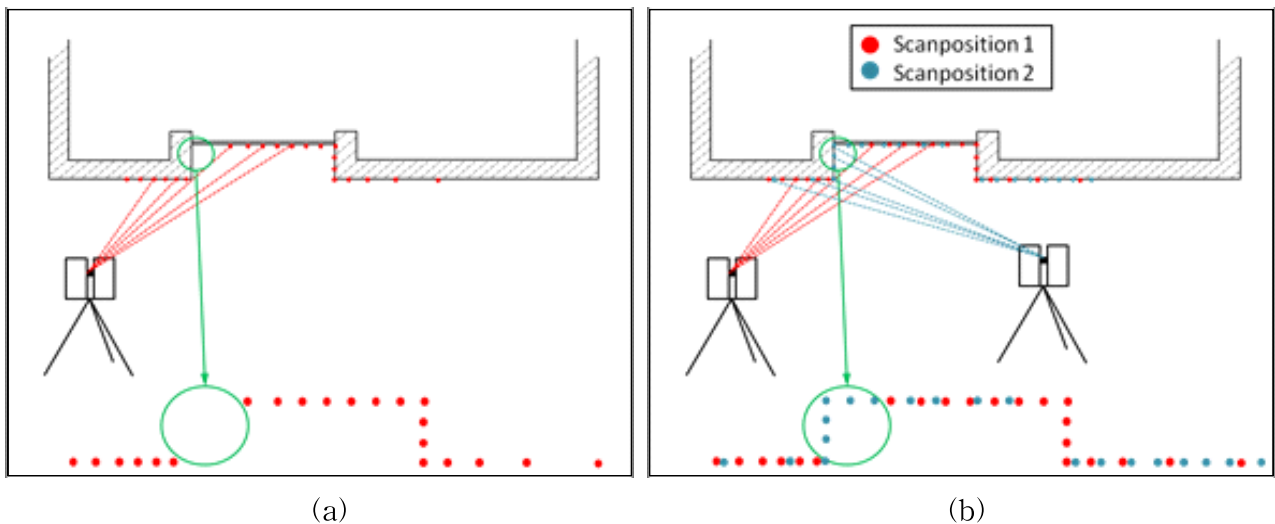
핵심성과 B	시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술	
정의	시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술은 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 차이 분석, 플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 및 시각화, 시공오차 검토 결과를 반영한 3차원 설계 모델 자동 갱신 기능을 포함하는 소프트웨어를 나타냄. 초기 시공 과정에서 발생한 시공오차 및 설계변경 사항이 3차원 상세 설계에 반영되지 않은 채로 시공이 진행되는 경우, 이후 시공 과정에서 발생하는 간섭 문제, 각 기술 분야간 시공성 재검토, 재시공에 따른 공기지연 및 이에 따른 추가 비용 발생 등의 문제를 개선하기 위해 필수적으로 요구되는 기술임.	
목적	시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발을 통해 관리자의 육안에 의존하는 정도 관리 과정을 객관화 및 자동화하고자 함.	
성능목표	(기존기술 수준) 관리자의 육안에 의존하는 시공오차 및 설계변경 사항 파악에 따른 부정확성, 비효율성 등의 문제를 개선하기 위한 방안으로 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터를 활용하기 위한 기술 개발이 이루어짐. 이러한 시도는 제조업에서 활용되어 온 표면 오차 계산을 통한 검사 (Inspection) 방식의 건설산업 정도 관리에의 활용 가능성을 보여주었으나, 국내에서의 플랜트 시설의 특성을 고려한 기술 개발은 전무한 실정임. (개발기술 수준) 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술은 구성요소별 위치 이동 및 설치 (수직/수평) 변경 여부 판별 및 구성요소별 규격 준수 여부 판별이 가능하며, 사용자가 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과를 확인하고 정도 관리에 활용할 수 있도록 이를 시각화할 수 있음.	
성과달성 책임자 (소속기관)	김 창 완 (중앙대학교)	
소요기간	'17.04 ~ '18.12 (21개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 기술 적용 결과와 Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정 - 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 방식에 대한 예상 수요자 만족도 - 전문가의 주관적인 시공오차 분석 결과와 해당 기술 적용 결과와의 비교를 통한 비교 우위 평가 - 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완 결과를 바탕으로 기술 수준 향상 정도 (%) 측정	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록: 출원 1건, 등록 1건	학술회의 발표: 국내 2건, 국외 1건
	논문 (SCI[E]): 연구 종료 이후 1건 예정	-
	S/W: 4건	-

제2장. 국내 외 기술 개발 현황

제1절 국내외 기술 개발 및 산업 동향

1. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술

- 지난 수년간 시공 단계에서 현장의 상황을 정확하게 파악하기 위해 레이저 스캐닝 기술의 활용에 대한 관심이 커지는 가운데 최적 스캔 계획 수립에 대한 필요성이 대두되었으며, 일부 연구 (Gordon 등, 2003; Latimer 등, 2004; Akinci, 2006; Akinci 등, 2006b; Tang 등, 2012; Song 등, 2014)에서 최적 스캔 계획 수립에 대한 문제를 다룸. 기존 연구에서는 플랜트 시설과 비교할 때 규모가 작을 뿐 아니라 비교적 단순한 형태의 단층 건축물에 대한 외피를 레이저 스캔 대상으로 고려함. 또한 레이저 스캐너의 높이가 고정된 것으로 간주함으로써 3차원 공간이 아닌, 2차원 평면상에서 스캔 계획을 수립하였으며, 구성요소 표면에 대해 중첩하여 레이저 스캔을 수행하게 될 때 발생하는 중복성 문제를 간과함 (다음 <그림 2-1-1> 참조).



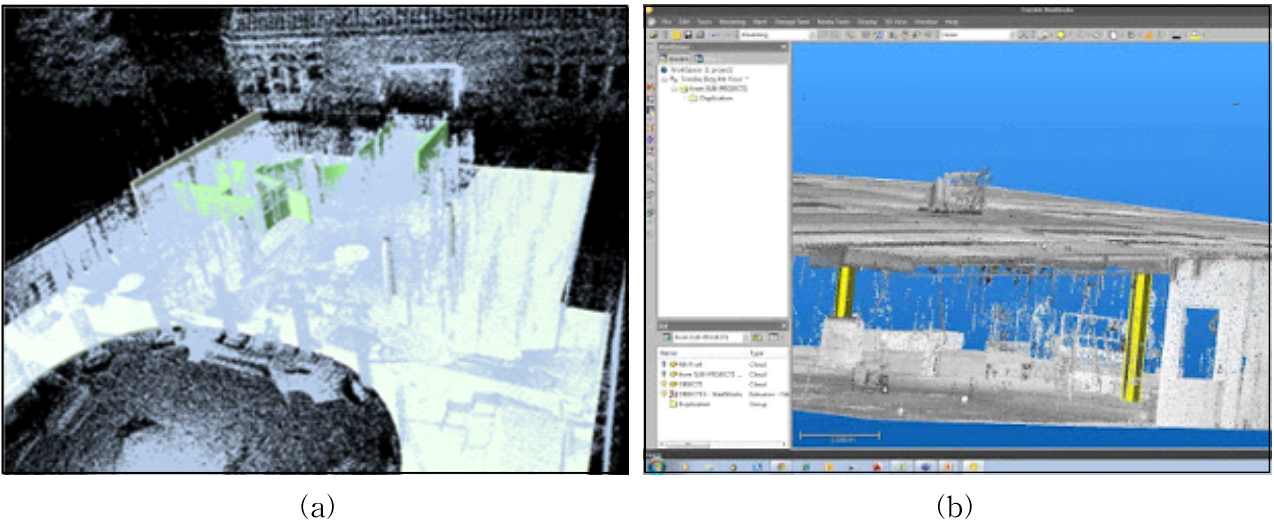
<그림 2-1-1> 기존 연구에서 제안된 2차원 평면상에서의 스캔 계획 수립 개념

(a) 단일 스캐너 설치시, (b) 복수 스캐너 설치시

- 대규모의 복잡한 플랜트 시설에서 기계, 배관, 전기 등 구성요소 표면에 대한 충분한 레이저 스캔 데이터를 확보하기 위해서는 여러 위치에서의 레이저 스캔 수행이 필수적임. 하지만, 최적의 스캐너 설치 위치 선정 및 이동 경로 파악에 대한 고려 없이, 단순히 스캔 횟수를 늘리거나 주관적인 경험에 의존하여 스캔 계획을 수립하는 경우 레이저 스캔 데이터의 양을 불필요하게 증가시킬 뿐만 아니라, 레이저 스캔 수행에 소요되는 물리적인 비용과 시간의 증가, 획득된 방대한 양의 데이터를 처리의 비효율성을 초래함. 그러나 관련 기술의 활용이 매우 제한적이며, 플랜트 시설에 특화된 최적 스캔 계획 수립 기술 개발은 전무한 실정임.

2. 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술

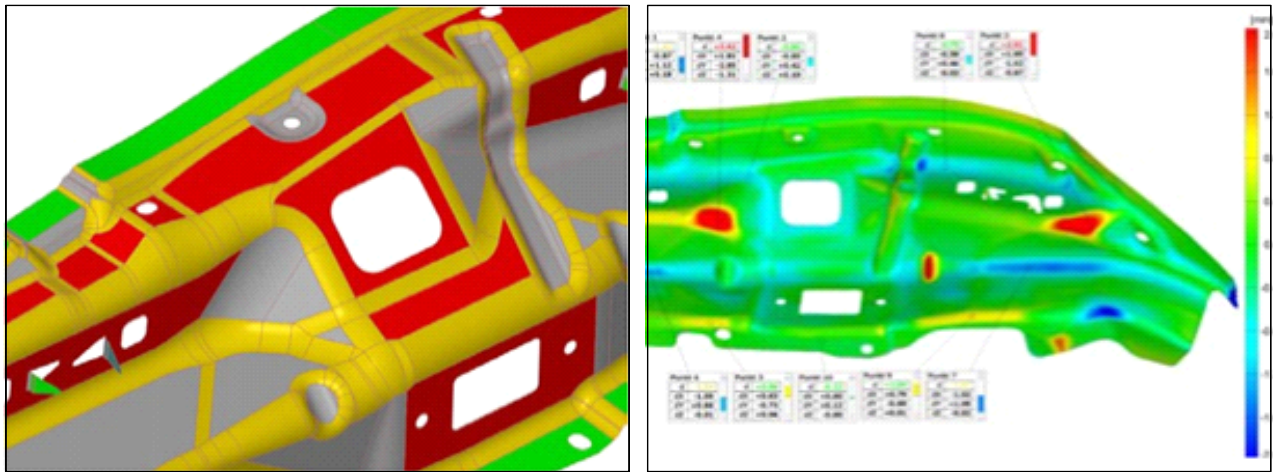
- 관리자의 육안에 의한 현장 점검 방식의 부정확성, 비효율성 등의 문제를 해결하기 위해 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용하여 현장에서 발생한 시공오차 및 설계변경 현황을 정확하게 파악하고, 이를 정도 관리에 활용하기 위한 기술 개발 노력이 다양한 건설 분야에서 이루어짐.
 - 미국 국립과학재단 (National Science Foundation, NSF)에서 후원한 ASDMCon (Advanced Sensor-based Defect Management at Construction Sites) 프로젝트 (ASDMCon, 2016)와 유럽 연합에서 후원한 DURAARK (Durable Architectural Knowledge) 프로젝트 (DURAARK, 2016)에서는 단층 건축물에 대한 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터를 자동으로 비교하여 시공오차를 측정하기 위한 기술을 개발함 (다음 <그림 2-1-2(a)> 참조).
 - Trimble사에서 개발하여 출시한 Trimble RealWorks 프로그램은 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터를 수동으로 중첩한 결과를 시각화함으로써, 사용자가 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간의 차이를 확인하고 판단하도록 돕는 기능을 지원함 (Trimble Navigation Limited, 2016).



<그림 2-1-2> (a) ASDMCon 프로젝트에서의 단층 건축물에 대한 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 자동 비교 및 시각화 (b) Trimble사의 Trimble RealWorks 프로그램에서의 단층 건축물에 대한 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 수동 비교 및 시각화 기능 (Geospatial Inc., 2019)

- 최근 현대중공업에서 개발한 3D 스마트 정도 관리 시스템은 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터를 비교하여, 선박 건조과정에서 해양구조물의 오차를 측정할 수 있는 기능을 지원함 (헤럴드경제, 2013; 삼인정보시스템㈜, 2016).

- 이러한 기술 개발 추이는 제조업에서 활용되어 온 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 차이 분석을 통한 표면오차 확인 및 검사 (Inspection) 기술 (다음 <그림 2-1-3> 참조)을 건설산업의 정도 관리에 도입하고자 하는 시도로 볼 수 있음.



(a)

(b)

<그림 2-1-3> GOM ATOS 검사 소프트웨어를 이용한 표면오차 확인 및 검사 예시

(a) 표면오차 확인 대상, (b) 검사 결과

(표면오차를 측정하고자 하는 특정 설계 모델의 영역 일부와 그에 상응하는 레이저 스캔 데이터 일부를 사용자가 직접 지정하면, 차이 분석을 통해 표면오차를 시각화함.)

- 기존 기술을 플랜트 시설에서의 시공오차 및 설계변경 현황 파악에 활용하기에는 다음과 같은 한계를 지님.

- 현 기술 개발은 표면오차를 측정하고자 하는 특정 설계 모델의 영역 일부와 그에 상응하는 레이저 스캔 데이터 일부를 사용자가 직접 지정하는 수준에 그침. 수백 또는 수천 개의 구성요소가 좁은 공간 내에 집합 설치되어 있는 플랜트 시설의 특성에는 적합하지 않으며, 이를 효과적으로 분석할 수 있는 자동화된 도구의 개발이 필수적임.
- 기존 오차 측정 방식은 설계 모델의 영역 일부와 레이저 스캔 데이터간 차이 분석시에 특정 표면으로부터 가장 가까운 3차원 포인트를 해당 물체 표면에 대한 측정 데이터로 간주함. 그러나 플랜트 시공 단계에서는 구성요소 설치시, 구성요소간 간격보다 위치 이동 범위 또는 설치 각도 (수직/수평 등)가 큰 시공오차가 발생 가능할 뿐만 아니라, 기존 개발 기술에서는 고려하지 않은 규격 변경이 발생하기도 함.

- 이를 종합할 때 플랜트 시설에 특화된 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술은 전무한 실정이며, 이를 효과적으로 수행할 수 있는 기술의 개발이 요구됨.

제2절 특허 동향

○ 본 연구과제와 관련이 있는 특허 분석을 위해 “WIPS 특허온라인검색 사이트 (<http://search.wips.co.kr>)”를 이용하여 2006년부터 2018년까지 전 세계에 공개된 특허를 검색함. “플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발”에 대한 연구와 관련한 특허 검색을 위해 사용된 키워드는 다음과 같음.

- 플랜트 + 3차원 + 설계 모델 + 최적 스캔 계획 수립 + 레이저 스캐너 + 시공오차 분석 + 준공 모델 업데이트/
(Plant + 3D (또는 Three-dimensional)+ As-planned Model (또는 Design Model) + Optimal Scan Planning + Laser Scanner + Deviation Analysis + As-built Model Update)
- 검토 결과, 본 연구과제를 통해 개발한 기술은 기존 특허들과 분쟁은 없을 것으로 예상됨.

제3절 정부정책과의 부합성

○ 「국토교통 R&D 중장기전략안 (‘14~’23)」 및 「국토교통 연구개발사업」

- “국토교통 기술을 통한 국민행복 및 국제적 가치 창조”라는 목표 아래, 노동·자본 집약적인 국토교통 산업을 기술·지식 중심의 신성장동력으로 전환하기 위해 융·복합 신산업 창출 기반 조성, 안전하고 편리한 국토공간 조성 및 국민 생활복지 향상 등 4대 전략을 수립함.
- 국토교통기술을 통한 국민행복 글로벌 가치 창조를 위해 국토교통기술 4대 전략을 실현하기 위한 전략별 10대 중점프로젝트 (Value Creator 2.0) 및 이와 연계한 「국토교통 연구개발사업」을 추진함.
- 사업 추진의 일환으로 “글로벌 TOP 플랜트 건설기술 - 플랜트 건설 지원 인프라기술” 개발은 플랜트건설의 시장 다변화 및 부가가치 제고를 위해 미래 유망 플랜트의 설계부터, 유지관리까지 전주기적 핵심기술 개발하는데 그 목적이 있음.
- 본 연구과제는 첨단 기술의 융·복합을 통해 플랜트 시공 관리에 필수적인 정도 관리의 객관화 및 효율화를 위한 기초·원천 및 핵심기술 확보와 플랜트 수주시 경쟁력의 핵심인 엔지니어링 능력 강화를 목적으로 한다는 점에서 「국토교통 R&D 중장기전략안 (‘14~’23)」의 10대 중점프로젝트 및 「국토교통 연구개발사업」과 연계하여 비전 및 전략 가치를 공유함.

○ 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

- 건설기술관리법/건설기술진흥법 (국토교통부): 건설기술의 연구·개발을 촉진하고 이를 효율적으로 이용·관리하게 함으로써 건설기술 수준의 향상과 건설공사 의 적정한 시행을 이루고 건설공사의 품질과 안전을 확보하여 공공복리의 증진과 국민경제의 발전에 이바지함을 목적으로 함.
- 건설산업기본법 제6조 (건설산업진흥기본계획의 수립) (국토교통부): 건설기술의 개발 및 건설기술인력의 육성에 관한 대책, 건설산업의 국제화와 해외 진출의 지원, 건설공사에 대한 안전·환경보전 및 품질의 확보대책, 건설공사의 생산성 향상 대책 등 건설산업의 육성, 건설기술의 개발, 건설공사의 안전 및 품질 확보 등을 위해 5년마다 건설산업진흥 기본계획을 수립·시행함.
- 건설산업기본법 제24조 (건설산업정보의 종합관리) (국토교통부): 건설산업정보를 체계적으로 관리하기 위해 건설산업정보 종합관리체계를 구축·운영하도록 함.
- 엔지니어링기술진흥법 (미래창조과학부): 엔지니어링활동주체의 기술집약화를 촉진하여 제조업등 관련산업과의 균형발전을 도모하고, 과학기술분야에서 연구개발결과의 실용화를 촉진함으로써 국민경제의 발전에 이바지함을 목적으로 함.

제4절 연구개발과제의 차별성 및 중복성 검토

- 본 연구과제와 관련이 있는 연구개발과제의 차별성 및 중복성 검토를 위해 “국가과학기술지식정보서비스 (<http://www.ntis.go.kr>)”를 이용하여 2000년부터 2018년까지 연구과제의 중복성을 조사함.
- “플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발”에 대한 연구 관련한 중복성 검토를 위해 사용된 키워드는 다음과 같음.
 - 플랜트 + 3차원 + 설계 모델 + 최적 스캔 계획 수립 + 레이저 스캐너 + 시공오차 분석 + 준공 (또는 완공) 모델 업데이트/(Plant + 3D (또는 Three-dimensional)+ As-planned Model (또는 Design Model) + Optimal Scan Planning + Laser Scanner + Deviation Analysis + As-built Model Update)
- 국내 기술개발 수준 요약
 - 건설 현장에서 현장 상황 파악을 위해 효과적으로 레이저 스캔을 수행하기 위한 목적으로 최적 스캔 계획 수립 기술을 개발하고자 하는 시도가 있었으나, 국내에서의 기술 개발은 전무한 실정임. 뿐만 아니라, 해외에서 시도된 기술 개발 사례 역시, 플랜트 시설과 비교하여 소규모의 단순한 단층 건축물의 외피를 대상으로 하여 기술의 활용이 매우 제한적임.
 - 관리자의 육안에 의존하는 시공오차 및 설계변경 사항 파악에 따른 부정확성, 비효율성 등의 문제를 개선하기 위한 방안으로 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터를 활용하기 위한 기술 개발이 이루어짐. 이러한 시도는 제조업에서 활용되어 온 표면 오차 계산을 통한 검사 (Inspection) 방식의 건설산업 정도 관리에의 활용 가능성을 보여주었으나, 국내에서의 플랜트 시설의 특성을 고려한 기술 개발은 전무한 실정임. 이와 같이, 플랜트 시설에 특화된 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발은 전무한 실정임.
- 최종성과물 달성을 위한 소프트웨어 개발 과정에서 실제 환경과 유사한 환경에서의 실험 및 테스트 결과 분석을 목표로 하여 다음과 같은 세부 수행 전략을 수행함.
 - 개발한 기술의 실제 환경에 대한 적용상의 문제점 및 한계점을 파악하고, 발생 가능한 오류를 개선하기 위해 핵심요소기술별 개별 모듈 및 통합된 소프트웨어 프로토타입 개발을 완료함.
 - 이와 동시에 다양한 특성을 가진 다수의 공정 (실제 시공 중인 플랜트 시설)을 테스트베드로 협의·선정하여 실제 환경에 가까운 조건에서 개별 모듈뿐만 아니라, 통합된 소프트웨어 프로토타입의 기술적 적용성 및 사용성을 테스트함.
- 검토 결과, 본 연구과제와 중복성 있는 연구과제는 전무한 것으로 나타남.

제3장. 연구수행 내용 및 성과

제1절 연구개발결과 요약

1. 연차별 연구목표 및 내용

○ 본 연구과제의 연차별 연구목표 및 주요 연구내용을 요약하여 기술하면 다음 <표 3-1-1>과 같음.

<표 3-1-1> 연차별 연구목표 및 주요내용

연차	핵심성과	연구목표	주요 연구내용
1차년도	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	(1) 전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 기술 개발
			(2) 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 기술 개발
		국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	(1) 3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 기술 개발
			(2) 영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 기술 개발
	시공 오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술	3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	(1) 3차원 점군 데이터 감소 기술 개발
			(2) 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 기술 개발
		플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발	(1) 구성요소별 위치 이동 및 설치 각도 (수직/수평) 변경 여부 판별 기술 개발
			(2) 구성요소별 규격 준수 여부 판별 기술 개발
2차년도	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술	비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발	(1) 스캔 커버리지 목적 달성을 위한 최적 스캔 횟수/위치 산정 기술 개발
			(2) 최적 스캔 계획 (위치, 이동 경로, 예상 스캔 커버리지) 시각화 기술 개발
		테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	(1) 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립
			(2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
	시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 개발	(1) 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 기술 개발
			(2) 시공오차 검토 결과 반영을 통한 3차원 설계 모델 자동 갱신 기술 개발
		테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	(1) 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립
			(2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완

2. 핵심성과별 연구목표 및 연구수행 내용

○ 본 연구과제의 핵심성과별 연구목표 및 주요 연구내용을 요약하면 다음 <표 3-1-2>와 같음.

<표 3-1-2> 핵심성과별 연구목표 및 주요 연구내용

핵심성과	연차	연구목표	주요 연구내용
핵심성과 A	1차년도	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	(1) 전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 기술 개발 (2) 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 기술 개발
		국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	(1) 3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 기술 개발 (2) 영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 기술 개발
	2차년도	비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발	(1) 스캔 커버리지 목적 달성을 위한 최적 스캔 횟수/위치 산정 기술 개발 (2) 최적 스캔 계획 (위치, 이동 경로, 예상 스캔 커버리지) 시각화 기술 개발
			(1) 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 (2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
		테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	(1) 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 (2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
			(1) 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 (2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
핵심성과 B	1차년도	3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	(1) 스캔 데이터 감소 기술 개발 (2) 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 기술 개발
		플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발	(1) 구성요소별 위치 이동 및 설치 각도 (수직/수평) 변경 여부 판별 기술 개발 (2) 구성요소별 규격 준수 여부 판별 기술 개발
	2차년도	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 개발	(1) 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 기술 개발 (2) 시공오차 검토 결과 반영을 통한 3차원 설계 모델 자동 갱신 기술 개발
			(1) 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 (2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
		테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	(1) 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 (2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완
			(1) 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립 (2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완

제2절 연구개발 주요내용 - 1차년도

1. 질적성과 달성 검증을 위한 현장 스캔 데이터 획득

- 연구 초기 단계에서는 질적성과 달성 검증방법으로 기술성숙도 3단계 (기본성능검증)를 기준으로 3차원 설계 모델을 통해 생성된 가상 데이터에 해당 기술을 적용하여 오차 범위를 분석하도록 계획함. 이에 따라 시공 및 시운전 중이거나, 증축 계획이 있는 운영 중인 플랜트 현장으로부터 획득된 스캔 데이터를 활용하여 최종 개발된 기술에 대한 질적성과 달성도를 검증함.

(1) 테스트베드 선정·협의 결과

- 본 연구과제는 최종성과물 달성을 위한 ‘플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 (소프트웨어) 개발’ 과정에서 개발하고자 하는 기술의 실제 환경에 대한 적용상의 문제점을 파악함. 테스트 과정에서 실제 환경에 가까운 조건 하에 개발된 기술의 개별 모듈뿐만 아니라, 통합된 소프트웨어 프로토타입의 기술적 적용성 테스트를 진행하고자 다양한 특성을 가진 다수 공정 (시공 및 시운전 중이거나, 증축 계획이 있는 운영 중인 플랜트 시설)을 테스트베드로 협의·선정함. 선정된 테스트베드를 대상으로 개발된 기술의 현장 적용을 위한 협의를 진행하였으며, 플랜트 시설에 대한 효과적인 3차원 데이터 획득 계획을 수립하기 위해 국내 3차원 스캐닝 업체와의 기술교류를 추진함. 수립된 데이터 획득 계획에 기반하여 선정된 테스트베드를 대상으로 한 데이터 획득을 수행하였으며, 상세 연구수행 내용은 다음과 같음.

○ 테스트베드 선정 시 요구사항

- 총 연구기간 (2017년 4월~2018년 12월)을 기준으로 시공 중이거나, 완료되어 운영 예정인 다양한 특성을 가진 국내 플랜트 현장을 테스트베드로 선정하고자 함. 공사 및 시운전 기간 동안 여러 차례에 걸쳐 테스트베드를 방문하여 플랜트 시설에 대한 스캔 데이터를 획득하는 실험을 수행하고, 현장관계자와의 협의를 통해 개발된 기술을 적용 및 평가함으로써 실제 환경에 대한 적용상의 문제점을 파악하고, 발생 가능한 오류를 개선하여 지속적으로 보완할 수 있도록 국내에 소재한 플랜트 현장을 테스트베드 대상으로 고려함.

○ 공사 중인 국내 플랜트 현장 현황 및 공정정보 파악

- 테스트베드 선정을 위해 국내에서 플랜트 사업을 추진 중이며, 2016년 기준 플랜트 프로젝트 수주 실적 (국토교통부 해외건설정책과/해외건설 지원과, 2016)이 상위 20개사에 속하는 기업의 2016년도 12월 사업보고서를 분석함. 사업보고서 내 플랜트 수주상황에 제시된 계약일과 완공예정일을 기반으로 총 연구기간 중에 공사가 진행되거나, 완료되어 운영 예정인 다양한 특성을 가진 국내 플랜트 현장에 대한 현황을 파악함.

- 이중 다양한 플랜트에 적용 가능한 기술의 개발을 목적으로 현장의 공정과 환경 조건을 고려하여 전문가의 자문을 통해 다섯 곳의 국내 플랜트 현장을 테스트베드 후보로 선정함. 추가로 정유 플랜트에 대한 개발된 기술의 적용 및 평가를 위해 총 연구기간 중에 이미 준공되어 운영 중이며, 증축 계획이 있는 SK인천석유화학을 추가하여 총 여섯 곳의 테스트베드 후보를 선정하여 개발된 기술의 적용 및 평가 실험을 위한 협의를 진행하고자 사전 답사를 진행함 (다음 <표 3-2-1> 참조).

<표 3-2-1> 테스트베드 후보 국내 플랜트 현장 현황

조감도 (또는 사진)		
현장명	화성동탄2집단에너지	삼성바이오로직스 EDISON III PJT (이하, 삼성바이오직스)
조감도 (또는 사진)		
현장명	포천열병합발전소	신평택복합화력발전소
조감도 (또는 사진)		
현장명	과주열병합발전소	SK인천석유화학

○ 테스트베드 후보 플랜트 현장의 적합성 평가를 위한 사전 답사

- 여섯 곳의 테스트베드 후보 플랜트 현장 중 본 연구과제에서 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 검증하는데 가장 적합한 현장을 선정하기 위해 다음 <표 3-2-2>와 같이 사전 답사를 실시함.

<표 3-2-2> 테스트베드 적합성 평가를 위한 사전 답사

대상	사전 답사 일시 (시간)	인원	현장관계자	비고
			소속	
화성동탄2집단에너지	2017.07.26 (13:00~18:00)	4	황○○	
			두산중공업	
삼성바이오로직스	2017.07.27 (13:00~16:30)	4	박○○	
			삼성바이오로직스	
포천열병합발전소	2017.08.04 (09:15~15:00)	4	곽○○	
			GS건설	
신평택복합화력발전소	2017.08.11 (14:00~18:00)	3	박○○	
			포스코건설	
과주열병합발전소	2017.09.23. (13:00~18:00)	3	박○○	
			나래에너지서비스(O&M)	
SK인천석유화학	2017.11.01. (09:00~12:00)	3	김○○	
			SK인천석유화학	

- 대부분의 플랜트 현장은 국가보안시설의 일부로 외부 방문객 출입에 대한 보안이 철저하여 원활한 현장 방문을 위해 방문 전에 현장관계자와 충분히 협의를 거침.
- 다음 <표 3-2-3>~<표 3-2-8>은 2017년 7월 26일부터 2017년 11월 01일 사이 실시된 여섯 곳의 테스트베드 후보 플랜트 현장에 대한 사전 답사 상세 일정을 나타냄. 사전 답사에서는 총 연구기간 동안 해당 현장에 대한 지속적인 활용 가능 여부를 협의하기 위한 현장관계자와의 회의, 테스트베드 활용에 대한 적합성을 평가하기 위한 현장 답사를 진행함.

<표 3-2-3> 화성동탄2집단에너지 사전 답사 상세 일정

시간	일정
12:00~13:00	중앙대학교에서 화성동탄2집단에너지로 이동
13:00~15:00	화성동탄2집단에너지 현장관계자와의 회의
15:00~16:30	화성동탄2집단에너지 답사
16:30~18:00	화성동탄2집단에너지 현장 소장님과의 회의
18:00~19:30	화성동탄2집단에너지에서 중앙대학교로 이동

<표 3-2-4> 삼성바이오로직스 사전 답사 상세 일정

시간	일정
12:10~13:00	중앙대학교에서 송도 삼성바이오로직스로 이동
13:00~14:30	삼성바이오로직스 현장관계자와의 회의
14:30~16:00	삼성바이오로직스 답사
16:00~16:30	삼성바이오로직스 현장관계자와의 회의
16:30~18:20	삼성바이오로직스에서 중앙대학교로 이동

<표 3-2-5> 포천열병합발전소 사전 답사 상세 일정

시간	일정
07:25~08:15	동서울시외버스터미널에서 포천시외버스터미널로 이동
08:15~09:15	포천시외버스터미널에서 포천열병합발전소로 이동
09:15~10:30	포천열병합발전소 현장 소장님과의 회의
10:30~11:30	포천열병합발전소 현장관계자와의 회의
11:30~13:20	점심 식사
13:20~15:00	포천열병합 발전소 답사
15:00~16:00	포천시외버스터미널로 이동
16:00~17:50	포천시외버스터미널에서 동서울시외버스터미널로 이동

<표 3-2-6> 신평택복합화력발전소 사전 답사 상세 일정

시간	일정
11:52~13:35	서울남부시외버스터미널에서 평택항버스정류소로 이동
13:35~14:00	평택항버스정류소에서 신평택복합화력발전소로 이동
14:00~16:00	신평택복합화력발전소 현장관계자와의 회의
16:30~18:00	신평택복합화력발전소 답사
18:00~18:45	신평택복합화력발전소에서 평택항버스정류소로 이동
18:45~20:00	평택항버스정류소에서 서울남부시외버스터미널로 이동

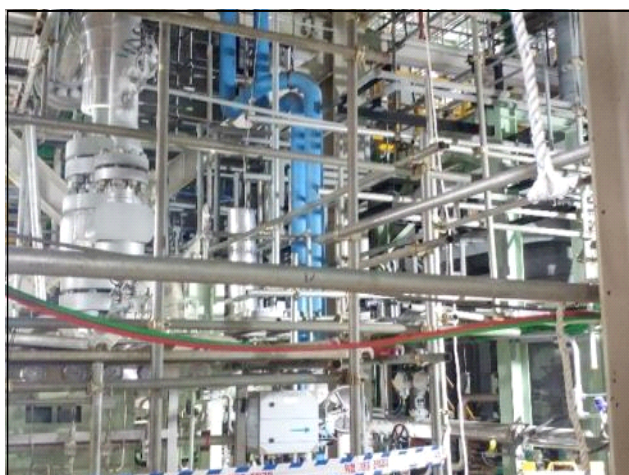
<표 3-2-7> 파주열병합발전소 사전 답사 상세 일정

시간	일정
12:00~13:00	중앙대학교에서 파주열병합발전소로 이동
13:00~15:15	파주열병합발전소 현장관계자와의 회의
15:15~17:00	파주열병합발전소 답사
17:00~18:00	파주열병합발전소 현장관계자와의 회의
18:00~19:40	파주열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

<표 3-2-8> SK인천석유화학 사전 답사 상세 일정

시간	일정
08:00~09:00	중앙대학교에서 SK인천석유화학으로 이동
09:00~10:15	SK인천석유화학 현장관계자와의 회의
10:15~12:00	SK인천석유화학 답사
12:00~13:00	SK인천석유화학에서 중앙대학교로 이동

- <그림 3-2-1>~<그림 3-2-6>은 각각 여섯 곳의 테스트베드 후보 플랜트 현장에 대한 사전 답사 당시 현장 사진과 현장관계자와의 협의 사진을 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-1> (a) 현장 사진, (b) 현장관계자와의 협의 (2017년 07월 26일 당시)



(a)

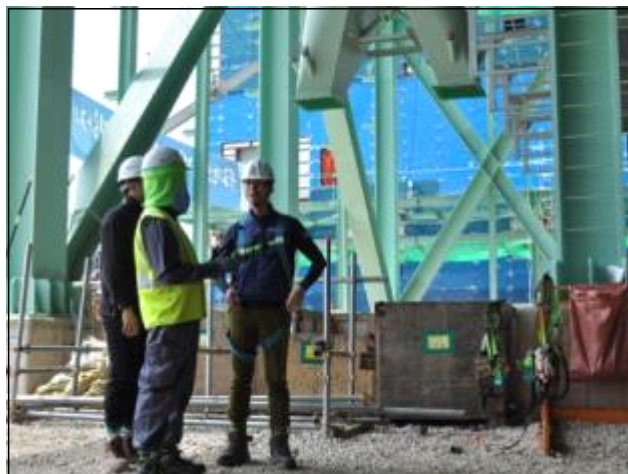


(b)

<그림 3-2-2> (a) 현장 사진, (b) 현장관계자와의 협의 (2017년 07월 27일 당시)



(a)



(b)

<그림 3-2-3> (a) 현장 사진, (b) 현장관계자와의 협의 (2017년 08월 04일 당시)



(a)



(b)

<그림 3-2-4> (a) 현장 사진, (b) 현장관계자와의 협의 (2017년 08월 11일 당시)



(a)



(b)

<그림 3-2-5> (a) 현장 사진, (b) 현장관계자와의 협의 (2017년 09월 23일 당시)



(a)



(b)

<그림 3-2-6> (a) 현장 사진, (b) 현장관계자와의 협의 (2017년 11월 01일 당시)

○ 사전 답사를 바탕으로 한 테스트베드 선정

- 여섯 곳의 테스트베드 후보 플랜트 현장에 대한 사전 답사 결과, 화성동탄2집단에너지와 SK인천석유화학은 보안 문제로 해당 시설에 대한 데이터 획득이 불가능을 파악함. 또한 토공사 중인 신평택복합화력발전소는 공정 진행률이 약 15%로 1차년도 연구기간 중 해당 시설에 대한 데이터 획득이 불가능을 파악함. 이에 삼성바이오로직스와 포천열병합발전소, 파주열병합발전소를 테스트베드로 선정하고, 현장관계자와의 협의를 완료함.

(2) 테스트베드를 대상으로 한 데이터 획득

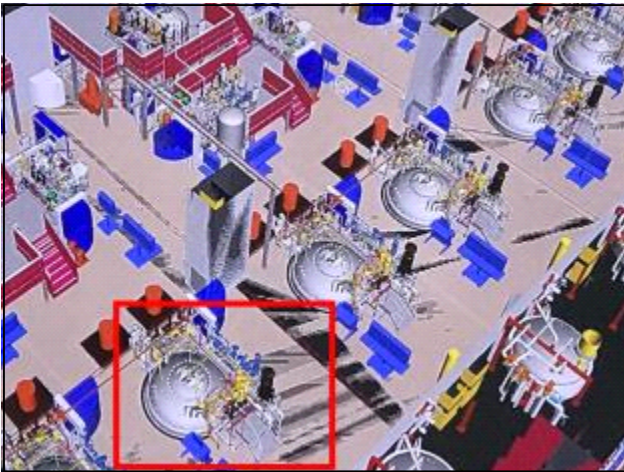
○ 데이터 획득 계획 수립의 중요성

- 개발된 기술의 현장 적용성을 검증하기 위해서는 대규모 플랜트 시설 내, 배관으로 연결되는 기기와 기기 간의 관계가 포함될 수 있도록 하는 스캔 데이터 획득이 필수적임. 플랜트 시설은 다수의 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 등이 복잡하게 얹혀있어 단일 위치에서 데이터 획득 시, 서로 다른 배관, 밸브 및 제거기기, 기기 등에 의한 가림현상이 발생함. 이에 플랜트 시설의 완전한 스캔 데이터 획득을 위해서는 여러 위치에서의 데이터 획득이 요구되며, 이를 위한 사전 계획 수립이 필수적임.

○ 데이터 획득 계획 수립 방법 및 절차

- 플랜트 시설 내, 배관으로 연결되는 기기와 기기 간의 관계가 포함되도록 스캔 데이터를 획득하기 위해, 공정배관계장도 (Piping and Instrument Diagram, P&ID) 및 공정배관계장도 정보가 포함된 3차원 설계 모델을 분석함. 공정배관계장도는 플랜트 시설 내에 존재하는 모든 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 등에 대한 정보를 포함함. 따라서 공정배관계장도를 활용하여 배관으로 연결되는 기기와 기기 간의 관계를 파악함으로써 데이터 획득 대상을 선정하고, 이를 바탕으로 데이터 획득 계획을 수립함.

- 다음 <그림 3-2-7>~<그림 3-2-9>는 각각 테스트베드 대상 현장인 삼성바이오로직스, 파주열병합발전소, 포천열병합발전소에 대한 공정배관계장도 정보가 포함된 3차원 설계 모델 또는 공정배관계장도, 현장 내 일부 영역에 대한 실제 현장 사진을 예시로 나타냄. 다음 <그림 3-2-7(a)>는 공정배관계장도 정보가 포함된 3차원 설계 모델의 일부를 나타내며, <그림 3-2-7(b)>는 공정배관계장도 내에 붉은색 상자로 표시된 영역에 대한 실제 현장 사진을 나타냄.



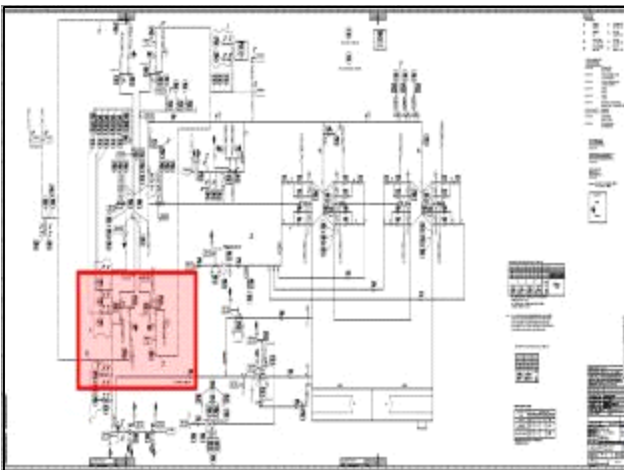
(a)



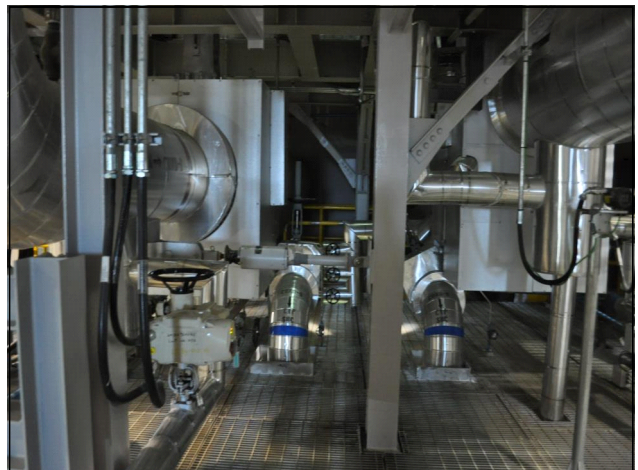
(b)

<그림 3-2-7> (a) 삼성바이오로직스에 대한 공정배관계장도 정보가 포함된 3차원 설계 모델의 일부, (b) 3차원 설계 모델 내 붉은색 상자로 표시된 영역에 대한 실제 현장 사진

- 다음 <그림 3-2-8(a)>는 공정배관계장도의 일부를 나타내며, <그림 3-2-8(b)>는 공정배관계장도 내에 붉은색 상자로 표시된 영역에 대한 실제 현장 사진을 나타냄.



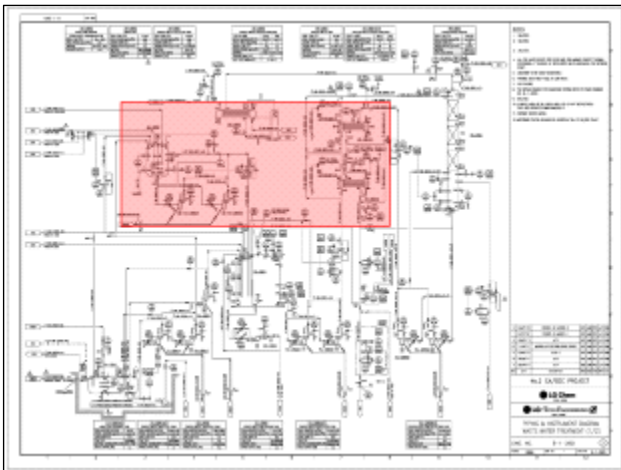
(a)



(b)

<그림 3-2-8> (a) 파주열병합발전소에 대한 공정배관계장도 예시, (b) 공정배관계장도 예시 2 내 붉은색 상자로 표시된 영역에 대한 실제 현장 사진

- 다음 <그림 3-2-9(a)>는 공정배관계장도의 일부를 나타내며, <그림 3-2-9(b)>는 공정배관계장도 내에 붉은색 상자로 표시된 영역에 대한 실제 현장 사진을 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-9> (a) 포천열병합발전소에 대한 공정배관계장도 예시,
(b) 공정배관계장도 예시 2 내 붉은색 상자로 표시된 영역에 대한 실제 현장 사진

- 특정 위치에서의 데이터 획득 시, 물체 간의 가림현상을 최소화하기 위해 삼성바이오로직스, 파주열병합발전소, 포천열병합발전소 답사 시 획득한 사진을 활용하여 다수의 데이터 획득 위치를 선정함.

○ 데이터 획득 계획 수립 결과

- 다음 <표 3-2-9>는 세 곳의 테스트베드를 대상으로 한 데이터 획득 일정, 인원 투입, 다수의 데이터 획득 위치 선정에 따른 획득 계획을 나타냄. 이를 통해 삼성바이오로직스 대상 두 차례 (총 19곳), 파주열병합발전소 대상 세 차례 (총 64곳), 포천열병합발전소 대상 한 차례 (총 12곳)에 걸친 데이터 획득 계획을 수립함.

<표 3-2-9> 테스트베드를 대상으로 한 데이터 획득 계획

대상	일정 계획 (시간)	인원	데이터 획득 횟수	비고
삼성바이오로직스	2017.09.12. (13:00~14:30)	3	6	
	2017.09.24. (10:00~15:30)	5	13	
파주열병합발전소	2017.10.07. (10:00~17:00)	4	16	
	2017.10.08. (10:00~17:00)	5	17	
	2017.10.28. (10:00~17:30)	5	31	
포천열병합발전소	2017.11.07. (09:00~13:30)	4	12	

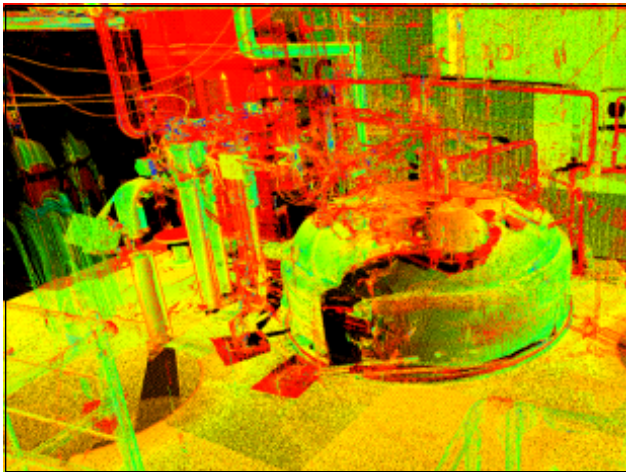
○ 삼성바이오로직스를 대상으로 한 데이터 획득 현황

- 삼성바이오로직스를 대상으로 한 데이터 획득은 총 두 차례 (2017년 9월 12일, 9월 24일)에 걸쳐 수행되었으며, 총 19곳의 위치에서 데이터 획득이 이루어짐. 다음 <표 3-2-10>은 2017년 9월 12일에 실시된 삼성바이오로직스에 대한 1차 데이터 획득 일정을 나타냄.

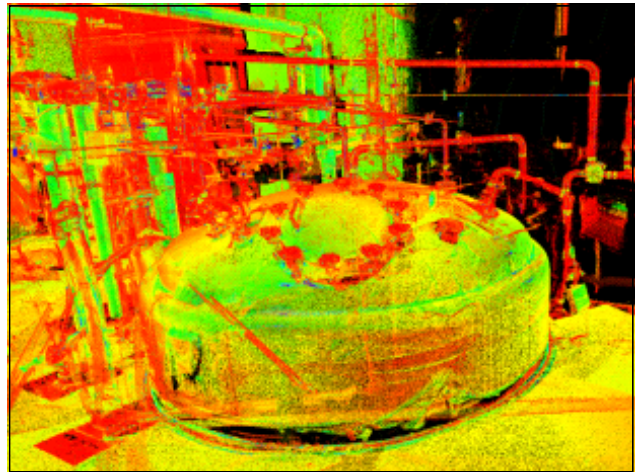
<표 3-2-10> 삼성바이오로직스를 대상으로 한 데이터 획득 일정

시간	일정
12:00~13:00	중앙대학교에서 삼성바이오로직스로 이동
13:00~13:30	삼성바이오로직스 도착 및 스캔 위치 선정
13:30~14:30	삼성바이오로직스 레이저 스캔 실시
14:30~16:30	삼성바이오로직스에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-2-10>은 획득된 스캔 데이터의 일부를 예시로 나타냄. 1차 데이터 획득 당시, 삼성바이오로직스의 전력 수급 중단으로 인해 색상 데이터 획득이 불가능한 관계로 스캔 데이터만 획득함.



(a)



(b)

<그림 3-2-10> 삼성바이오로직스에 대한 1차 데이터 획득 결과

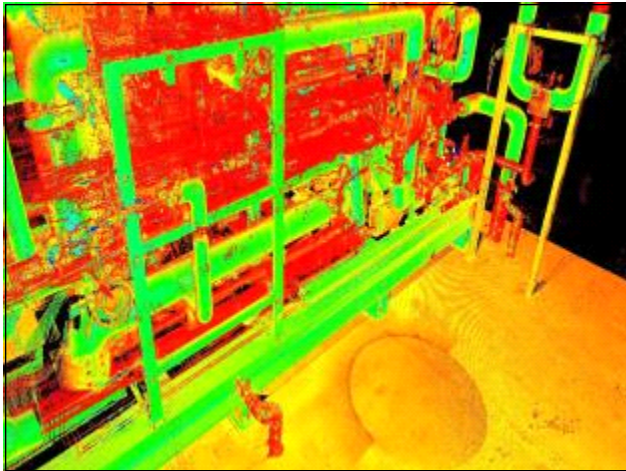
(a) 시점 1, (b) 시점 2

- 다음 <표 3-2-11>은 2017년 9월 24일에 실시된 삼성바이오로직스에 대한 2차 데이터 획득 일정을 나타냄.

<표 3-2-11> 삼성바이오로직스를 대상으로 한 데이터 획득 일정

시간	일정
09:00~10:00	중앙대학교에서 삼성바이오로직스로 이동
10:00~11:00	삼성바이오로직스 도착 및 스캔 위치 선정
11:00~15:30	삼성바이오로직스 레이저 스캔 실시
15:30~16:45	삼성바이오로직스에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-2-11>은 획득된 스캔 데이터와 색상값을 입힌 스캔 데이터의 일부를 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-11> 삼성바이오로직스에 대한 2차 데이터 획득 결과

(a) 스캔 데이터 일부, (b) 색상값을 입힌 스캔 데이터 일부

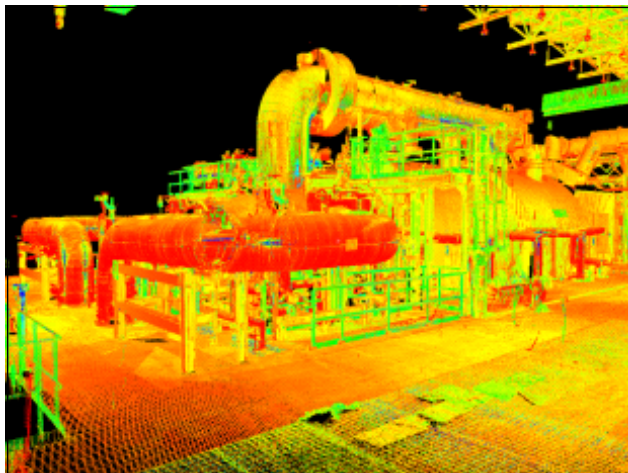
○ 파주열병합발전소를 대상으로 한 데이터 획득 현황

- 파주열병합발전소를 대상으로 한 데이터 획득은 총 세 차례 (2017년 10월 07일, 10월 08일, 10월 28일)에 걸쳐 수행되었으며, 총 64곳의 위치에서 데이터 획득이 이루어짐.
- 다음 <표 3-2-12>는 2017년 10월 07일에 실시된 파주열병합발전소에 대한 1차 데이터 획득 일정을 나타냄.

<표 3-2-12> 파주열병합발전소를 대상으로 한 1차 데이터 획득 일정

시간	일정
09:00~10:00	중앙대학교에서 파주열병합발전소로 이동
10:00~10:45	파주열병합발전소 현장 도착 및 스캔 위치 선정
10:45~17:00	파주열병합발전소 레이저 스캔 실시
17:00~19:10	파주열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-2-12>는 획득된 스캔 데이터와 색상값을 입힌 스캔 데이터의 일부를 예시로 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-12> 파주열병합발전소에 대한 1차 데이터 획득 결과 예시

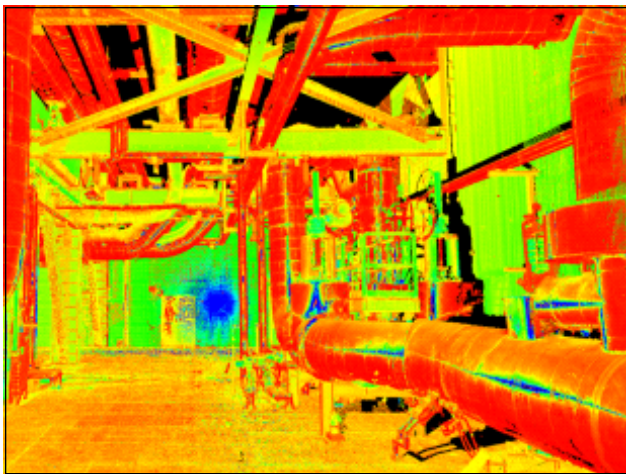
(a) 스캔 데이터 일부, (b) 색상값을 입힌 스캔 데이터 일부

- 다음 <표 3-2-13>은 2017년 10월 08일에 실시된 파주열병합발전소에 대한 2차 데이터 획득 일정을 나타냄.

<표 3-2-13> 파주열병합발전소를 대상으로 한 2차 데이터 획득 일정

시간	일정
09:30~10:40	중앙대학교에서 파주열병합발전소로 이동
10:40~11:00	파주열병합발전소 도착 및 스캔 위치 선정
11:00~16:55	파주열병합발전소 레이저 스캔 실시
16:55~19:00	파주열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-2-13>은 획득된 스캔 데이터와 색상값을 입힌 스캔 데이터의 일부를 예시로 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-13> 파주열병합발전소에 대한 2차 데이터 획득 결과 예시

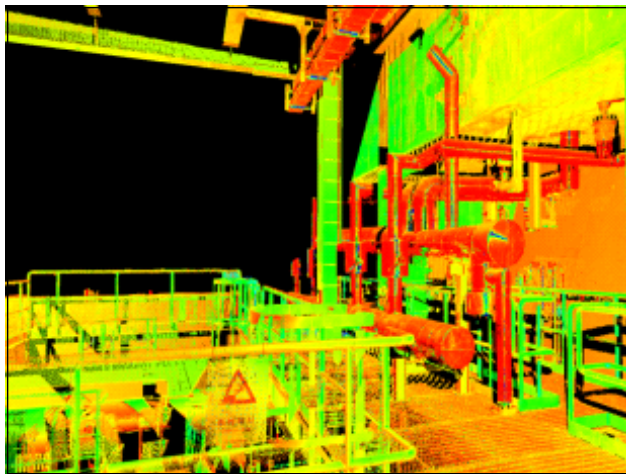
(a) 스캔 데이터 일부, (b) 색상값을 입힌 스캔 데이터 일부

- 다음 <표 3-2-14>는 2017년 10월 28일에 실시된 파주열병합발전소에 대한 3차 데이터 획득 일정을 나타냄.

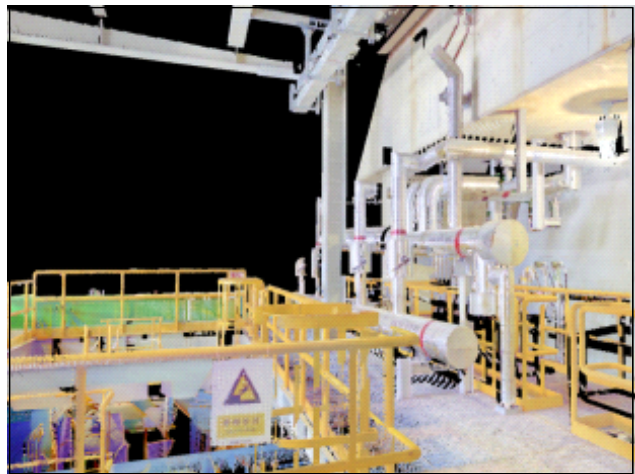
<표 3-2-14> 파주열병합발전소를 대상으로 한 3차 데이터 획득 일정

시간	일정
09:00~10:00	중앙대학교에서 파주열병합발전소로 이동
10:00~10:25	파주열병합발전소 도착 및 스캔 위치 선정
10:25~17:30	파주열병합발전소 레이저 스캔 실시
17:30~19:45	파주열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-2-14>는 획득된 스캔 데이터와 색상값을 입힌 스캔 데이터의 일부를 예시로 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-14> 파주열병합발전소에 대한 3차 데이터 획득 결과 예시

(a) 스캔 데이터 일부, (b) 색상값을 입힌 스캔 데이터 일부

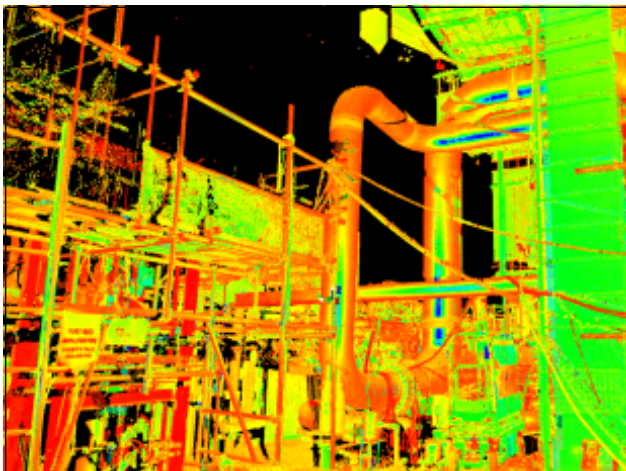
○ 포천열병합발전소를 대상으로 한 데이터 획득 현황

- 포천열병합발전소를 대상으로 한 데이터 획득은 1차례 (2017년 11월 07일) 수행되었으며, 12곳의 위치에서 데이터 획득이 이루어짐.
- 다음 <표 3-2-15>는 2017년 11월 07일에 실시된 포천열병합발전소에 대한 데이터 획득 일정을 나타냄.

<표 3-2-15> 포천열병합발전소를 대상으로 한 3차 데이터 획득 일정

시간	일정
08:35~09:40	중앙대학교에서 포천열병합발전소로 이동
09:50~10:30	포천열병합발전소 도착 및 스캔 위치 선정
10:30~15:47	포천열병합발전소 레이저 스캔 실시
16:25~18:50	포천열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-2-15>는 획득된 스캔 데이터와 색상값을 입힌 스캔 데이터의 일부를 예시로 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-15> 포천열병합발전소에 대한 3차 데이터 획득 결과 예시

(a) 스캔 데이터 일부, (b) 색상값을 입힌 스캔 데이터 일부

2. 핵심성과 A 주요 연구수행 내용

(1) 전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산

○ 대규모의 복잡한 플랜트 시설에서 기계, 배관, 전기 등 구성요소 표면에 대한 충분한 스캔 데이터를 확보하기 위해서는 여러 위치에서의 레이저 스캔 수행이 필수적임. 하지만, 최적의 스캐너 설치 위치에 대한 고려 없이, 단순히 스캔 횟수를 늘리거나 주관적인 경험에 의존하여 스캔 계획을 수립하는 경우 스캔 데이터의 양을 불필요하게 증가시킬 뿐만 아니라, 레이저 스캔 수행에 소요되는 물리적인 비용과 시간의 증가, 획득된 방대한 양의 데이터를 처리의 비효율성을 초래함. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 플랜트 시설 전역에 대한 스캔 데이터 획득 이후 형상 특징 (표면 점밀도, 법선 벡터 변화량을 기반으로 한 표면 곡률)을 고려하여 추가 데이터 확보 필요 영역을 자동 계산 및 시각화하는 기술을 개발함. 추가 데이터 확보가 필요한 국소 영역에 대한 데이터 획득시 해당 구역에 대해 레이저 스캐너 설치 가능 여부를 자동 계산하여 국소 (2단계) 데이터 획득 방법을 결정함. 결정된 데이터 획득 방법에 따라 데이터 획득을 실시하는 경우, 이를 전역 (1단계) 스캔 데이터와의 정합을 통해 보완하는 기술 개발을 완료함.

○ 효율적인 스캔 데이터 획득 관련 기존 문헌 및 특허 분석

- 플랜트 시설의 구성요소에 대한 효율적인 스캔 데이터 획득 기술 개발을 위해 기존 문헌 및 특허 분석을 수행함.
- 일부 연구 (Gordon 등, 2003; Latimer 등, 2004; Akinci, 2006; Akinci 등, 2006b; Tang 등, 2012; Song 등, 2014)에서 효율적인 3차원 스캔 데이터 획득에 대한 문제를 다뤘으나, 플랜트 시설과 비교할 때 규모가 작을 뿐 아니라 비교적 단순한 형태의 단층 건축물에 대한 외피를 레이저 스캔 대상으로 고려함. 또한 레이저 스캐너의 높이가 고정된 것으로 간주함으로써 3차원 공간이 아닌, 2차원 평면상에서 스캔 계획을 수립하였으며, 구성요소 표면에 대해 중첩하여 레이저 스캔을 수행하게 될 때 발생하는 중복성 문제를 간과함 (p. 7, <그림 2-1-1> 참조).
- 국내특허 (제10-1379400호; 제10-1076593호; 제10-2016-0072354호; 제10-1409802호)와 미국특허 (제7,961,934호)에서 효율적인 3차원 스캔 데이터 획득을 위한 기술을 제안하였으나, 사각 영역 없이 스캔 데이터를 확보라는 측면에서 제안된 기존 특허의 기술은 대상체에 대한 분석 과정에 필수적으로 요구되는 형상 데이터가 확보되었는지 여부에 대한 검증 과정이 없거나, 정량적으로 분석 및 판단하는 기준이 없다는 한계가 있음. 뿐만 아니라, 프로젝트의 대형화, 복잡화에 따라 다양한 형상의, 수백 또는 수천 개 3차원 요소들이 존재하는 플랜트 시설에서의 스캔 데이터 확보시 효율적으로 사각 영역을 복원하는 데에는 적용이 불가함.

○ 효율적인 스캔 데이터 획득 기술 정립

- 효율적인 스캔 데이터 획득 기술에 대한 문헌 및 특허 분석을 통해 본 연구에서는 플랜트 시설 내 구성요소의 형상 특징을 고려한 스캔 데이터 획득 기술을 정립하고, 프레임워크를 구축함. 이를 위한 효율적인 데이터 획득은 2단계 (1단계: 전역 데이터 획득, 2단계: 국소 데이터 획득)에 걸친 데이터 획득, 전역 (1단계) 스캔 데이터 획득 이후 형상 특징 (표면 점밀도, 법선 벡터 변화량을 기반으로 한 표면 곡률)을 고려한 추가 데이터 확보 필요 영역 자동 계산 및 시각화, 국소 (2단계) 데이터 획득시 해당 구역에 대해 레이저 스캐너 설치 가능 여부 자동 계산을 통한 국소 데이터 획득 방법 결정, 결정된 국소 데이터 획득 방법에 따른 데이터 보완 획득 보완하는 과정으로 구성됨. 이러한 데이터 획득 과정을 통해 플랜트 시설 내 구성요소 (배관, 기기 등)의 면을 표현하는 영역에 대해서는 일정 수준 이상의 밀도를 가진 점군 데이터를 확보할 수 있으며, 구성요소의 형상 특징을 고려하여 요소간 연결부, 모서리와 작은 요소 (플랜트 프로젝트 구성요소 예시: 소형 밸브, 제어기기 등)에 대한 점군 데이터를 확보할 수 있음.

○ 전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 기술 개발

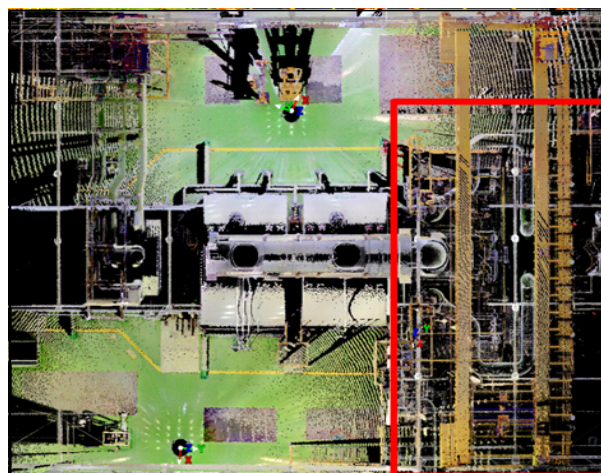
- 작업자가 건설 구조물 내 주요 구성요소에 대한 데이터 획득을 최대화할 수 있는 스캔 위치를 선정하여 건설 구조물에 대한 개략적인 데이터를 확보하여야 함. 테스트베드로부터 획득한 스캔 데이터 내에는 수백 또는 수천 개의 구성요소들이 존재하며, 이에 따라 개략적인 전역 데이터 확보만으로는 레이저 스캐너와 구성요소간 거리 차이에 따른 점 밀도 편차가 클 뿐만 아니라, 다른 주변 구성요소로 인해 가려져 사각 영역이 발생할 가능성이 높음. 따라서 본 연구에서는 전역 데이터 획득 이후, 추가 데이터 확보가 필요한 영역을 파악 및 판단할 수 있도록 데이터를 시각화함.

○ 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 기술 개발

- 스캔 데이터를 획득 시 데이터 획득 과정의 효율성 및 데이터 활용성 측면에서 다음 두 가지 요구사항이 만족되어야 함. 첫째, 테스트베드 내 구성요소의 면을 표현하는 스캔 데이터는 일정 수준 이상의 밀도가 확보되어야 함. 둘째, 테스트베드 내 구성요소의 형상 특징을 고려하여 요소간 연결부, 모서리와 소형 밸브 및 제어기기와 같은 작은 요소에 대한 스캔 데이터가 확보되어야 함. 따라서 본 연구에서는 획득된 전역 데이터로부터 법선 벡터 변화량을 이용하여 표면 곡률을 자동 분석하고, 요소간 연결부, 모서리, 작은 요소에 해당하는 부분을 상대적 곡률로 시각화함으로써 추가적으로 데이터가 확보되어야 하는 영역에 대한 정보를 제공함.

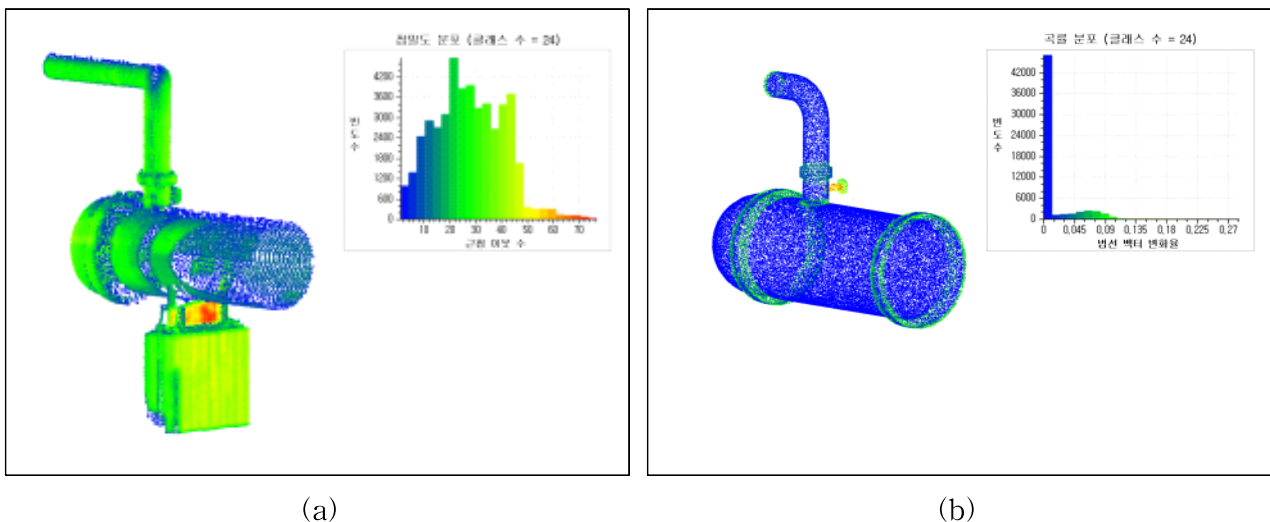
○ 전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산 기술의 테스트베드 적용 결과 (질적성과지표 A-1-①, ②)

- “질적성과지표 A-1-①”의 검증 목적은 작업자가 건설 구조물 내 주요 구성 요소에 대한 데이터 획득을 최대화할 수 있는 스캔 위치를 선정하여 구조물에 대한 개략적인 데이터를 확보하는데 있어 표면 점밀도 분석 오차 범위를 분석하는데 있음. 검증 방법을 요약하면 다음과 같음.
 - ① 대상 영역 복셀화
 - ② 복셀 중 추가 확보 영역 복셀 설정 (Ground Truth로 활용)
 - ③ 표면 점밀도를 복셀 중 추가 확보 필요 복셀 계산
 - ④ Ground Truth와 계산된 복셀간 네 가지 지표 (True Positive, False Positive, True Negative, False Negative) 계산
 - ⑤ 네 가지 지표를 이용하여 오차 범위 (1-Accuracy) 계산
- 다음은 해당 기술 적용 결과와 Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정 결과의 일부를 시각화한 예시를 나타냄. 연구개발계획서 작성 당시 초기계획에서의 검증방법은 3차원 설계 모델을 통해 생성된 가상 데이터에 해당 기술을 적용하여 오차 범위를 분석하는 것이었으나, 본 연구는 해당 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해 분석시 테스트베드로부터 획득한 3차원 점군 데이터를 활용하여 해당 기술의 현장 적용성을 검증함.
- 테스트베드로부터 획득한 3차원 점군 데이터 내에는 수백 또는 수천 개의 구성 요소들이 존재하며, 이에 따라 개략적인 데이터 확보만으로는 <그림 3-2-15(i)>에 보는 바와 같이 레이저 스캐너와 구성 요소간 거리 차이에 따른 점밀도 편차가 클 뿐만 아니라, 검은색으로 표시된 영역과 같이 다른 주변 구성 요소로 인해 가려져 사각 영역이 발생할 가능성이 높음.



<그림 3-2-15(i)> 레이저 스캐너를 이용한 전역 데이터 획득 예시

- “질적성과지표 A-1-②”의 검증 목적은 전역 스캔 데이터 획득 이후 표면의 점 밀도 및 법선 벡터 변화량에 기반한 표면 곡률을 이용하여 산출한 형상 특징을 고려하여 추가 데이터 확보 필요 영역의 자동 계산 및 시각화하는데 있어, 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석의 오차 범위를 분석하는데 있음. 검증 방법을 요약하면 다음과 같음.
 - ① 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 (Ground Truth로 활용)
 - ③ 점군 데이터로 변환한 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석
 - ④ Ground Truth와 계산된 복셀간 네 가지 지표 (True Positive, False Positive, True Negative, False Negative) 계산
 - ⑤ 네 가지 지표를 이용하여 오차 범위 (1-Accuracy) 계산
- 테스트베드를 대상으로 획득한 스캔 데이터에 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 분석 및 평가한 결과, 개발된 기술을 통해 대규모의 복잡한 플랜트 시설에 특화된 효율적인 스캔 데이터 획득이 가능함을 파악함.
 - 다음 <그림 3-2-16(a)>는 플랜트 시설의 전역 (1단계) 스캔 데이터로부터 구성요소에 대한 점밀도를 자동 분석하고, 레이저 스캐너와 구성요소간 거리 차이에 따라 발생할 수 있는 상대적 점밀도를 시각화한 예시를 나타냄.
 - 다음 <그림 3-2-16(b)>는 3차원 설계 모델 데이터로부터 법선 벡터 변화량을 기반으로 한 표면 곡률을 자동 분석하고, 요소간 연결부, 모서리, 작은 요소에 해당하는 부분을 상대적 곡률로 시각화한 예시를 나타냄. 테스트베드로부터 3차원 점군 데이터를 획득 시 데이터 획득 과정의 효율성 및 데이터 활용성 측면에서 다음 두 가지 요구사항이 만족되어야 함. 첫째, 테스트베드 내 구성 요소의 면을 표현하는 3차원 점군 데이터는 일정 수준 이상의 밀도가 확보되어야 하며, 둘째, 테스트베드 내 구성 요소의 형상 특징을 고려하여 요소 간 연결부, 모서리와 소형 밸브 및 제어기기와 같은 작은 요소에 대한 3차원 점군 데이터가 확보되어야 함.



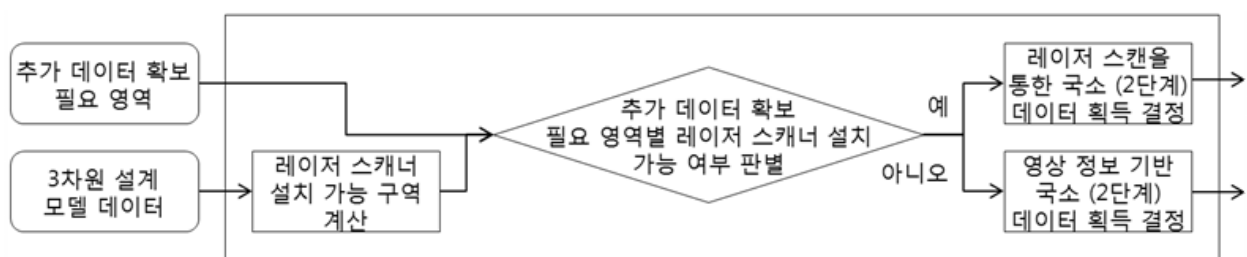
<그림 3-2-16> 플랜트 시설 내 구성요소의 스캔 데이터 확보 필요 영역 계산 결과 예시
 (a) 정합 완료된 전역 (1단계) 스캔 데이터로부터 점밀도 분포 및 시각화 예시,
 (b) 3차원 설계 모델 데이터로부터 곡률 분포 및 시각화 예시

- 세 곳의 테스트베드를 대상으로 획득한 3차원 설계 모델 및 점군 데이터에 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 분석 및 평가한 결과, “질적성과지표 A-1-①” 및 “A-1-②”에 대해 당초 목표로 한 오차 범위 5% 이내를 만족 (오차 범위 3.62%)하는 것으로 분석됨. 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 획득된 전역 데이터로부터 법선 벡터 변화량을 이용하여 표면 곡률을 자동 분석하고, 요소 간 연결부, 모서리, 작은 요소에 해당하는 부분을 상대적 곡률로 시각화함으로써 추가적으로 데이터가 확보되어야 하는 영역에 대한 정보를 제공하는 기술 개발을 완료함.

(2) 국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완

○ 3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 기술 개발 (질적성과지표 A-2-①)

- 전역 스캔 데이터 획득 이후 밀도 및 곡률 분석을 통해 선정된 추가 데이터 확보가 필요한 국소 영역에 대해 데이터 획득 시 해당 구역에 대해 레이저 스캐너 설치 가능 여부를 자동 계산하는 기술을 개발 완료함. 추가 데이터 확보가 필요한 국소 영역에 대한 데이터 획득 시 해당 구역에 대해 레이저 스캐너 설치를 통한 데이터 획득이 가능한지 여부의 판단이 필요함.
- 이에 본 연구에서는 3차원 설계 모델로부터 레이저 스캐너 이동 및 설치를 위해 요구되는 공간을 자동 계산하여, 추가 데이터 확보 필요 영역별로 계산된 레이저 스캐너 설치에 요구되는 공간을 비교하여 레이저 스캐너 설치 가능 여부를 판별함. 레이저 스캐너 설치가 가능한 구역에 대해서는 해당 위치에서 레이저 스캔을 통한 국소 데이터 획득을 결정함. 이 밖에 추가 데이터 확보 필요 영역 주변이 협소하여 레이저 스캐너의 설치가 불가능한 구역으로 판별된 경우, 해당 위치에서 영상 정보 기반 데이터 획득을 결정함.
- “질적성과지표 A-2-①”의 검증 목적은 전역 스캔 데이터 획득 이후 밀도 및 곡률 분석을 통해 선정된 추가 데이터 확보가 필요한 국소 영역에 대해 데이터 획득 시 해당 구역에 대해 계산된 레이저 스캐너 설치 가능 영역의 오차 범위를 분석하는데 있음.
- 레이저 스캐너 설치가 가능한 구역에 대해서는 해당 위치에서 레이저 스캔을 통한 국소 데이터 획득을 결정하며, 그 밖에 추가 데이터 확보 필요 영역 주변이 협소하여 레이저 스캐너의 설치가 불가능한 구역으로 판별된 경우는 해당 위치에서 영상 정보 기반 데이터 획득을 결정함 (다음 <그림 3-2-16(i)> 참조).



<그림 3-2-16(i)> 국소 데이터 획득 방법 결정부의 블록도

- 연구개발계획서 작성 당시 초기계획에서의 검증방법은 3차원 설계 모델을 통해 생성된 가상 데이터에 해당 기술을 적용하여 오차 범위를 분석하는 것이었으나, 본 연구는 해당 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해 분석시 테스트베드로부터 획득한 3차원 점군 데이터를 활용하여 해당 기술의 현장 적용성을 검증함. 검증 방법을 요약하면 다음과 같음.

- ① 대상 영역 복셀화
- ② 복셀 중 스캐너 설치 가능 복셀 설정 (Ground Truth로 활용)
- ③ 스캐너 설치 부피 (스캐너 및 설치 인원 2인)를 고려하여 복셀 중 설치 가능 복셀 계산
- ④ Ground Truth와 계산된 복셀간 네 가지 지표 (True Positive, False Positive, True Negative, False Negative) 계산
- ⑤ 네 가지 지표를 이용하여 오차 범위 (1-Accuracy) 계산

- 세 곳의 테스트베드를 대상으로 획득한 3차원 설계 모델 및 점군 데이터에 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 분석 및 평가한 결과, “질적성과지표 A-2-①”에 대해 당초 목표로 한 오차 범위 5% 이내를 만족 (오차 범위 4.48%)하는 것으로 분석됨. 추가 데이터 확보가 필요한 국소 영역에 대한 데이터 획득 시 해당 구역에 대해 레이저 스캐너 설치를 통한 데이터 획득이 가능한지 여부의 판단이 필요하며, 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 3차원 설계 모델로부터 레이저 스캐너 이동 및 설치를 위해 요구되는 공간을 자동 계산하여, 추가 데이터 확보 필요 영역별로 계산된 레이저 스캐너 설치에 요구되는 공간을 비교하여 레이저 스캐너 설치 가능 여부를 판별하는 기술을 개발 완료함.

○ 영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 기술 개발 (질적성과지표 A-2-②)

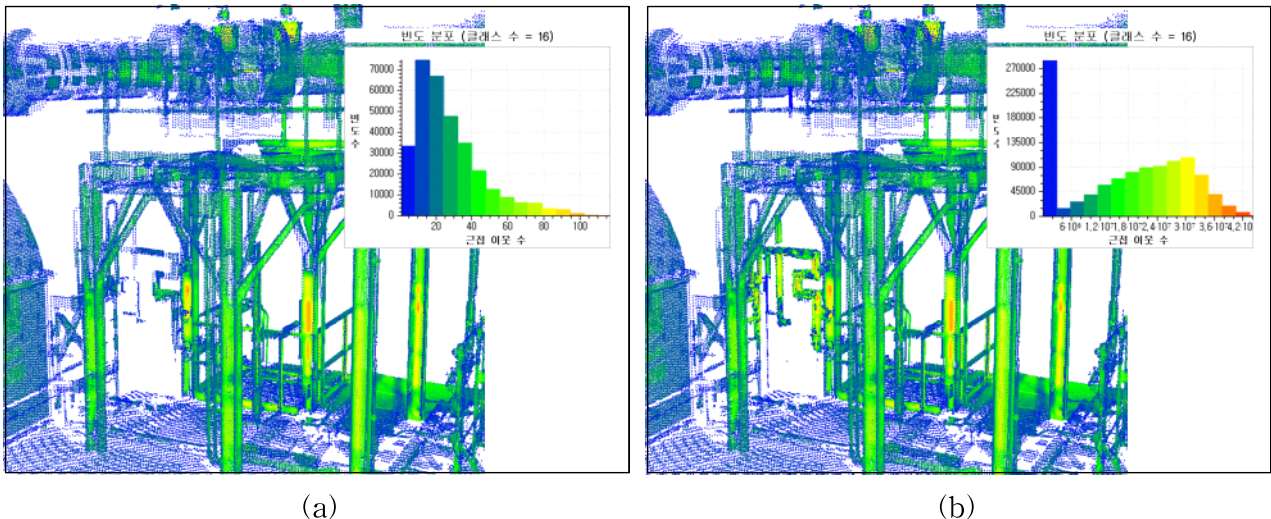
- 테스트베드로부터 획득한 전역 스캔 데이터 내에서 추가 데이터 확보 필요 영역으로 선정된 영역에 대해 추가 스캔 데이터 획득 또는 영상 정보 기반 데이터 회득을 통해 스캔 데이터를 보완하기 위한 기술을 개발 완료함. “질적성과지표 A-2-②”의 검증 목적은 테스트베드로부터 획득한 전역 스캔 데이터 내에서 추가 데이터 확보 필요 영역으로 선정된 영역에 대해 추가 레이저 스캔 데이터 획득 또는 영상 정보 기반 데이터 회득을 통해 보완된 3차원 점군 데이터의 보완 오차를 분석하는데 있음. 검증 방법을 요약하면 다음과 같음.

- ① 대상 영역 복셀화
- ② 복셀 중 데이터 보완 필요 복셀 설정 (Ground Truth로 활용)
- ③ 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통해 데이터가 보완된 복셀 계산
- ④ Ground Truth와 계산된 복셀간 네 가지 지표 (True Positive, False Positive, True Negative, False Negative) 계산
- ⑤ 네 가지 지표를 이용하여 오차 범위 (1-Accuracy) 계산

- 다음 <그림 3-2-17>과 <그림 3-2-18>은 추가 데이터 확보 필요 영역 주변이 협소하여 레이저 스캐너의 설치가 불가능한 구역으로 판별된 경우에 대한 결과 예시를 나타냄. <그림 3-2-17(a)>는 전역 스캔 데이터 내에서 표면 점 밀도 및 곡률을 이용해 산출된 형상 특징을 이용하여 추가 데이터 확보 필요 영역이 시각화된 결과를 나타냄.

○ 국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완

- 다음 <그림 3-2-17(a)>는 앞서 결정된 국소 (2단계) 데이터 획득 방법에 따라 데이터 획득 실시 및 전역 (1단계) 스캔 데이터와의 정합을 통해 보완된 결과를 나타냄. 해당 구역은 레이저 스캐너 설치 가능 여부 계산 결과 설치가 불가함. 다음 <그림 3-2-17(b)>는 플랜트 시설의 전역 스캔 데이터 중 형상 특징 (표면 점밀도)을 자동 계산하여 추가 데이터 확보 필요 영역을 계산하고, 해당 위치에서 영상 정보 기반 (2단계) 데이터 획득을 통해 전역 (1단계) 스캔 데이터와 정합하여 보완한 결과를 나타냄.

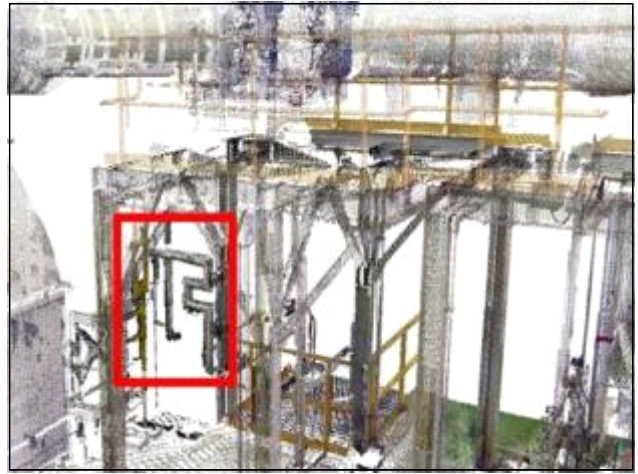


<그림 3-2-17> 추가 데이터 확보 필요 영역 계산 및 국소 (2단계) 데이터 획득 방법 결정에 따라, 해당 위치에서 영상 정보 기반 (2단계) 데이터 획득을 통해 전역 (1단계) 스캔 데이터와 정합하여 보완한 결과 (a) 전역 스캔 데이터 시각화 예시, (b) 전역 스캔 데이터와 정합하여 보완한 결과 예시

- <그림 3-2-18>은 <그림 3-2-17(b)>에 나타난 스캔 데이터에 색상값을 입혀 나타낸 결과임. <그림 3-2-18(b)>는 영상 정보 기반 데이터 획득을 통해 전역 스캔 데이터가 보완된 결과를 나타냄. <그림 3-2-18(b)>에서 보는 바와 같이, 자동으로 계산된 추가 데이터 확보 필요 영역이 보완되었음을 알 수 있음. 또한 보완된 결과에 대한 점 밀도 분석 결과, 추가 데이터 확보 필요 영역에 대한 점 밀도가 보완되었음을 알 수 있음 (상기 <그림 3-2-17(b)> 참조). 세 곳의 테스트베드를 대상으로 획득한 3차원 설계 모델 및 점군 데이터에 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 분석 및 평가한 결과, “질적성과지표 A-2-②”에 대해 당초 목표로 한 오차 범위 5% 이내를 만족 (오차 범위 3.94%) 하는 것으로 분석됨.



(a)



(b)

<그림 3-2-18> (a) 색상값을 입힌 스캔 데이터 내 추가 데이터 확보 필요 영역,
 (b) 국소 데이터 획득을 통해 보완된 색상값을 입힌 스캔 데이터 결과

3. 핵심성과 B 주요 연구수행 내용

(1) 3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술

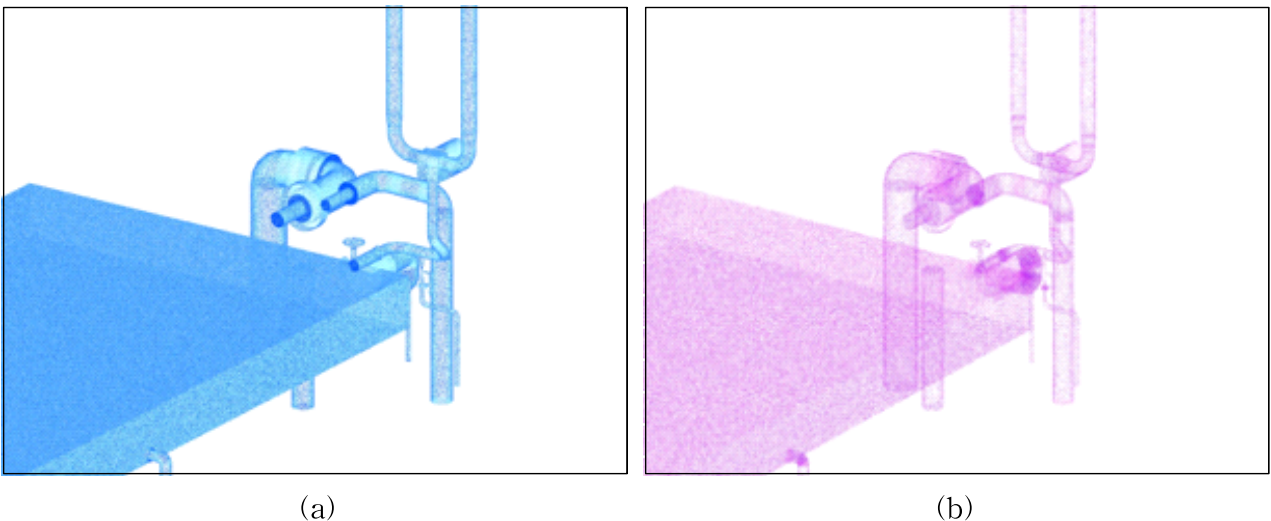
○ 복잡한 플랜트 시설의 3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 비교를 통한 자동화된 정도관리를 위해서는 효율적인 데이터 처리가 필수적임. 하지만 플랜트 시설에 밀집된 다수의 기기들에 대한 3차원 설계 모델을 스캔 데이터화하는 과정에서 불필요한 다수의 데이터가 생성될 수 있음. 또한 여러 위치에서 획득되는 스캔 데이터를 정합하는 과정에서 중복 데이터가 발생함. 따라서 3차원 설계 모델 및 스캔 데이터는 수백만 개에서부터 수천억 개에 이르는 방대한 양의 스캔 데이터로 구성됨. 이는 3차원 설계 모델 데이터와 스캔 데이터간 비교 시에 원시 데이터를 사용하기에는 상당한 계산량이 요구되므로 비교 분석 과정의 효율적인 계산을 위해 필요한 점 데이터를 선택적으로 추출할 수 있는 데이터 감소의 선행이 요구됨. 본 연구에서는 이를 위해 본 연구과제에 적합한 스캔 데이터 감소 기술을 정립한 결과를 바탕으로 차별적 스캔 데이터 감소 기술 개발을 완료함. 연구개발계획서 작성 당시 초기계획에서의 검증방법은 3차원 설계 모델을 통해 생성된 가상 데이터에 해당 기술을 적용하여 오차 범위를 분석하는 것이었으나, 본 연구는 해당 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해 분석시 테스트베드로부터 획득한 3차원 점군 데이터를 활용하여 해당 기술의 현장 적용성을 검증함. 상세 연구수행 내용 및 결과는 다음과 같음.

○ 상용 소프트웨어의 스캔 데이터 감소 기능 분석 및 개발 목표 기술의 요구사항 분석을 통한 스캔 데이터 감소 기술 정립

- 스캔 데이터 감소 기술 개발의 세계적인 경쟁력 확보를 위해 현재 활용되고 있는 최신의 3차원 점군 데이터 감소 기술에 대한 분석을 수행함.
- 상용소프트웨어에서는 주로 단순하면서도 빠르게 수행 가능한 방법인 점 또는 밀도 기반 3차원 점군 데이터 감소 방법을 제공함. 상용 소프트웨어에서 제공되는 점 또는 밀도 기반 데이터 감소 방법은 3차원 점군 데이터의 법선 벡터 (Normal Vector) 또는 형상의 변화량을 나타내는 곡률 (Curvature) 기반 감소, 점군 데이터가 이루는 표면상에서 n 개의 무게중심점을 추출하는 균일 감소 (Uniform Sampling), 설정된 크기의 공간에서 한 점을 추출하는 옥트리 (Octree) 분할 기반 감소, 점간 직선거리 (space) 기반 감소 방법 등이 해당됨. 이러한 방법들은 3차원 점군 데이터 내 밀도가 상대적으로 높은 영역의 점 데이터를 제거함으로써 3차원 점군 데이터의 밀도를 균일화함. 그러나 이 과정에서 스캔 데이터와 3차원 설계 모델과의 비교 분석 과정에서 고밀도 데이터가 요구되는 요소간 연결부, 모서리, 또는 소형 밸브와 제어기기 등의 작은 요소에 포함된 데이터의 일부를 유실시킬 가능성이 높음.
- 따라서 3차원 점군 데이터 감소시 데이터 내 구성요소의 형상 특징을 추출하여 고밀도 데이터 획득이 요구되는 영역을 산출한 뒤 해당 영역 내 데이터의 차별적 감소가 이루어져야함.

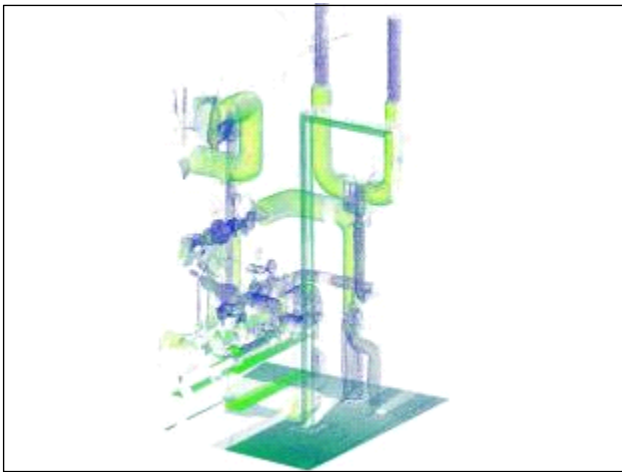
○ 스캔 데이터 감소 기술 개발 및 오차 범위 분석 (질적성과지표 B-1-①)

- 기술 정립을 통해 구축된 스캔 데이터 감소 기술의 프레임워크를 기반으로 하여 데이터 형상 특징을 고려한 차별적 스캔 데이터 감소 기술을 개발 완료함. 개발된 기술은 스캔 데이터 내 고밀도 데이터가 필수적인 부분을 구분하기 위해 점군 데이터의 법선 벡터를 계산하고, 법선 벡터의 변화량을 통해 점 데이터의 곡률값을 산출함.
- “질적성과지표 B-1-①”의 검증 목적은 테스트베드로부터 획득한 3차원 점군 데이터를 3차원 설계 모델과 비교하는 과정에서 효율적인 데이터 처리 과정을 위한 데이터의 형상 특징을 고려한 데이터 감소 기술의 오차 범위를 분석하는데 있음. 검증 방법을 요약하면 다음과 같음.
 - ① 대상 영역 복셀화
 - ② 복셀별 데이터 감소 범위 설정 (Ground Truth로 활용)
 - ③ 스캔 데이터 감소 기술 적용 후, 복셀별 실제 데이터 감소 범위 계산
 - ④ Ground Truth와 계산된 복셀간 네 가지 지표 (True Positive, False Positive, True Negative, False Negative) 계산
 - ⑤ 네 가지 지표를 이용하여 오차 범위 (1-Accuracy) 계산
- 세 곳의 테스트베드를 대상으로 획득한 점군 데이터에 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 분석 및 평가한 결과, 개발된 기술을 통해 효과적으로 대규모의 복잡한 플랜트 시설로부터 획득한 점군 데이터 감소가 가능함을 파악함. 데이터 감소 기술의 후처리 기술인 <그림 3-2-19>~<그림 3-2-21>은 세 곳의 테스트베드를 대상으로 한 점군 데이터 감소 기술 적용 결과를 요약하여 나타낸 것임.
- <그림 3-2-19(a)>는 포천열병합발전소를 대상으로 획득한 스캔 데이터를 나타내며 <그림 3-2-19(b)>는 데이터가 감소된 결과를 나타냄.

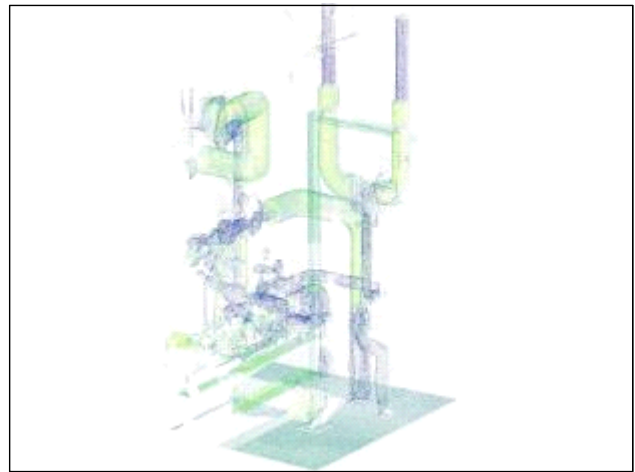


<그림 3-2-19> (a) 스캔 데이터로 변환된 3차원 설계 모델, (b) 감소된 데이터

- <그림 3-2-20(a)> 테스트베드에서 획득한 스캔 데이터를 나타내며 <그림 3-2-20(b)>는 차별적 데이터 감소 기술을 통해 데이터가 감소된 결과를 나타냄.



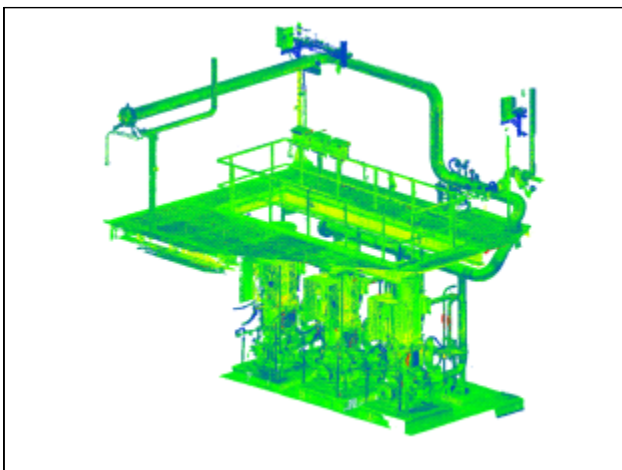
(a)



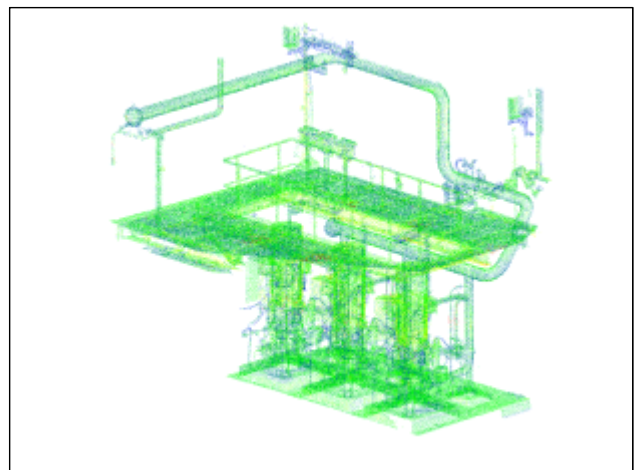
(b)

<그림 3-2-20> (a) 테스트베드에서 획득한 스캔 데이터, (b) 감소된 데이터

- <그림 3-2-21(a)>는 포천열병합발전소를 대상으로 획득한 스캔 데이터를 나타내며 <그림 2-2-21(b)>는 데이터가 감소된 결과를 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-21> (a) 테스트베드에서 획득한 스캔 데이터, (b) 감소된 데이터

- 테스트베드에서 획득한 3차원 점군 데이터는 수백만 개에서부터 수천억 개에 이르는 방대한 양의 점군 데이터로 구성되어 3차원 설계 모델과의 비교 간 상당한 계산량을 요구함. 3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터의 비교 간 필요한 최소한의 데이터는 구성 요소를 인식하기 위해 형상 특징을 대표하는 점군 데이터이며, 레이저 스캔 데이터 및 3차원 설계 모델의 3차원 점군 데이터는 불필요한 점군 데이터가 다수 포함되어 있음.

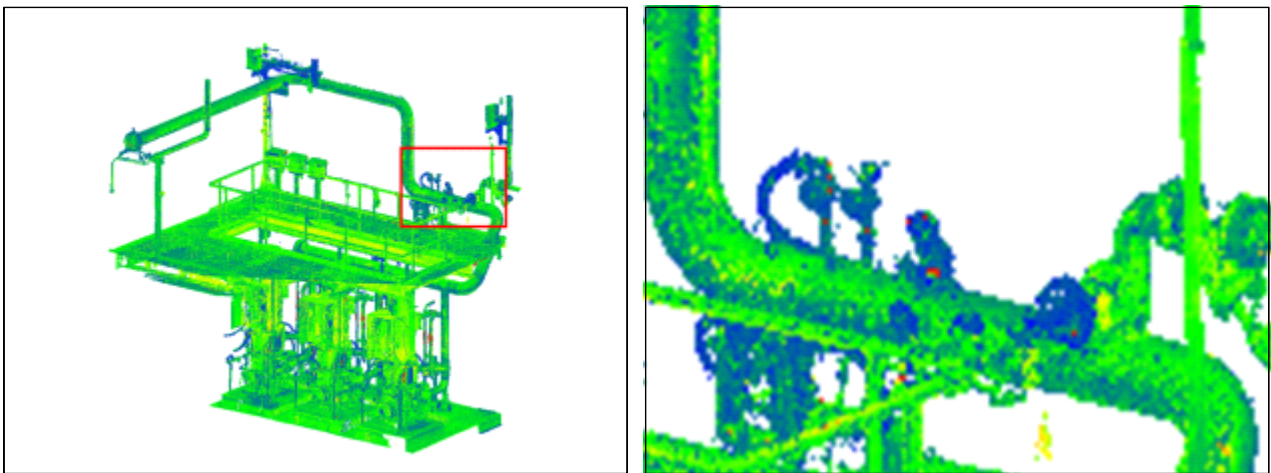
- 세 곳의 테스트베드를 대상으로 획득한 점군 데이터에 개발된 기술을 적용하여 현장 적용성을 분석 및 평가한 결과, “질적성과지표 B-1-①”에 대해 당초 목표로 한 오차 범위 5% 이내를 만족 (오차 범위 3.49%)하는 것으로 분석됨. 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 3차원 점군 데이터 내 구성 요소의 형상 특징을 기반으로 레이저 스캔 및 3차원 설계 모델의 3차원 점군 데이터를 감소시키는 기술을 개발 완료함.

○ 플랜트 시설 구성요소별 스캔 데이터 분할 기술

- 차별적 데이터 감소 기술과 더불어 복잡한 플랜트 시설의 구성요소 (배관, 밸브 및 제어기기 등)별 정밀한 정도관리를 수행하기 위해서는 구성요소별 상이한 시공허용오차 적용이 요구됨. 이를 위해 플랜트 시설에서 획득된 스캔 데이터의 구성요소별 데이터 분할 과정은 필수적임. 하지만, 스캔 데이터는 데이터 획득 영역 내 구성요소에 대한 x, y, z 좌표값과 색상값만을 포함하고 있어 점군 데이터 내 구성요소를 분할하기 위해서는 별도의 기술 개발이 요구됨. 따라서 본 연구에서는 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소를 인식하기 위한 전처리 과정으로 점군 데이터의 곡률을 기반으로 한 스캔 데이터 분할 기술 개발 및 최적화를 완료함.

○ 테스트베드를 대상으로 획득한 스캔 데이터의 특성 파악을 통한 스캔 데이터 분할 기술 정립

- 스캔 데이터 분할 기술의 현장 적용성을 높이기 위해 테스트베드를 대상으로 획득한 스캔 데이터의 특성을 파악함. <그림 3-2-22(a)>는 테스트베드로부터 획득한 스캔 데이터를 나타내며, <그림 3-2-22(b)>는 배관과 제어기기의 연결부를 포함하는 <그림 3-2-22(a)>의 일부분을 확대하여 나타냄.



(a)

(b)

<그림 3-2-22> (a) 테스트베드로부터 획득한 스캔 데이터, (b) (a)의 일부분 확대

- 테스트베드를 대상으로 획득한 스캔 데이터는 구성요소의 표면이 일정한 범위의 곡률을 가지는 것으로 분석됨. 또한 구성요소간 연결부에서는 상대적으로 높은 곡률 변화량이 나타남.

- 이에 개발 기술의 방향을 일정 곡률을 갖는 점군 데이터를 하나의 구성요소로 판단하여 스캔 데이터를 분할하는 Smoothness Constraint 기반 스캔 데이터 분할 방법을 활용하는 것으로 설정함. Smoothness Constraint 기반 스캔 데이터 분할 방법은 기준 점 데이터와 최근접 이웃 점 데이터 간의 곡률 변화 및 법선 벡터의 각도 변화 임계값을 통해 영역 구분 여부를 판단함. 이를 플랜트 시설의 스캔 데이터에 적용하기 위해서는 기준 점 데이터의 영역 구분에 활용된 최근접 이웃 점 개수뿐만 아니라, 곡률 변화 및 법선 벡터의 각도 변화에 대한 최적의 임계값을 설정하는 것이 필수적임. 따라서 스캔 데이터 내 플랜트 시설의 구성요소를 정확하게 구분하기 위해서는 실제 플랜트 시설로부터 획득한 스캔 데이터를 대상으로 최근접 이웃 점 개수, 곡률 변화 및 법선 벡터의 각도 변화 임계값을 최적화하는 것이 요구됨.

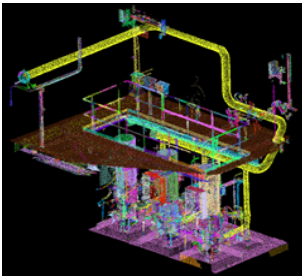
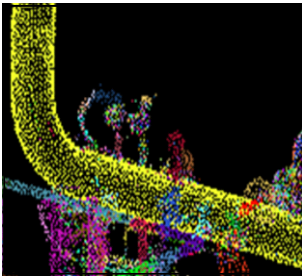
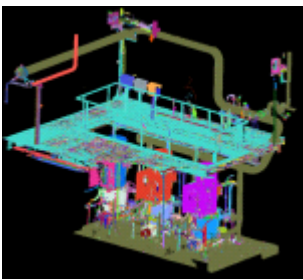
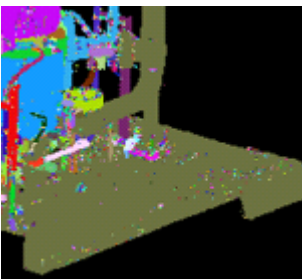
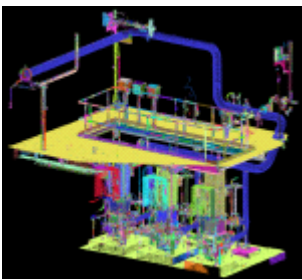
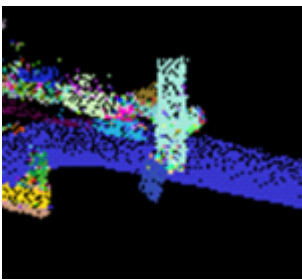
○ 스캔 데이터 내 플랜트 구성요소 분할 기술 개발 및 최적화 (질적성과지표 B-1-②)

- 기술 정립을 통해 테스트베드를 대상으로 획득한 스캔 데이터의 특성을 반영한 스캔 데이터 분할 기술 개발 및 최적화를 수행함. Smoothness Constraint 기반 스캔 데이터 분할 기술의 최근접 이웃 점 개수, 곡률 변화 및 법선 벡터의 각도 변화 임계값을 최적화하기 위한 실험은 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 분할결과를 분석함으로써 수행됨. 다음 <표 3-2-16>은 포천열병합발전소에서 획득한 스캔 데이터 대상 구성요소 분할 기술 최적화 실험 결과를 요약하여 나타냄.

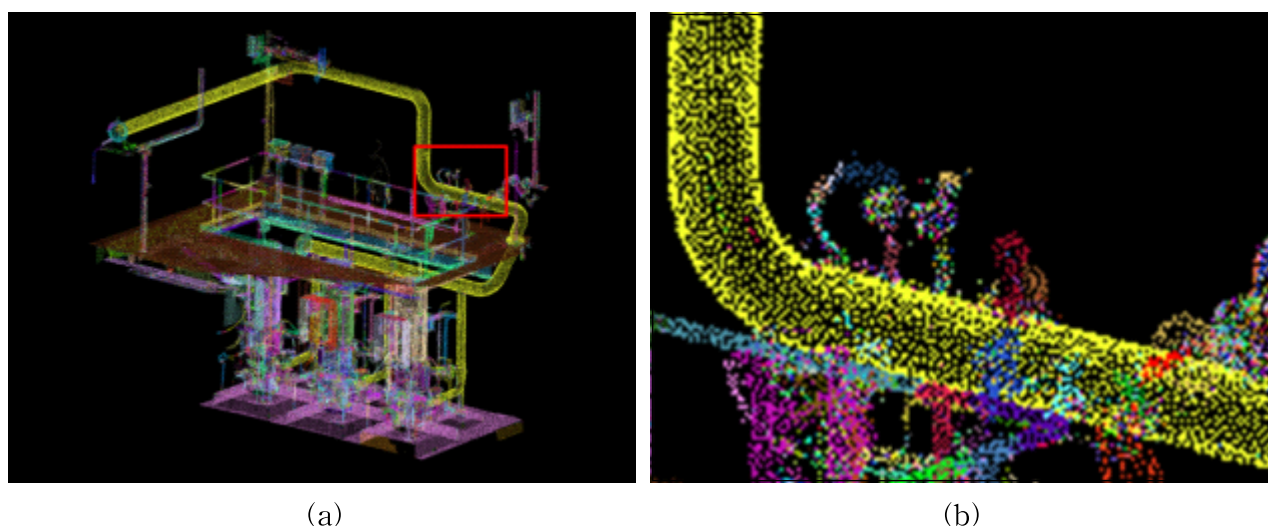
<표 3-2-16> 구성요소 분할 기술 최적화 실험 결과 요약 (포천열병합발전소 데이터 대상)
(다음 페이지에 계속)

스캔 데이터 분할 결과		스캔 데이터 분할 결과 상세	
최근접 이웃 점 개수	법선 벡터 각도 변화량 (°)	곡률 변화 임계값 (%)	
100	8	1.00	
스캔 데이터 분할 결과 오류 분석			제어기기와 배관이 동일한 요소로 인식됨.
80	8	1.00	
30	8	1.00	
연결된 배관이 상이한 요소로 인식됨.			플랜지가 배관과 동일한 요소로 인식됨.

<표 3-2-16> 구성요소 분할 기술 최적화 실험 결과 요약 (이전 페이지에 이어)

스캔 데이터 분할 결과		스캔 데이터 분할 결과 상세					
최근점 이웃 점 개수	법선 벡터 각도 변화량 (°)	곡률 변화 임계값 (%)		20	8	0.98	
스캔 데이터 분할 결과 오류 분석				제어기기와 배관이 동일한 요소로 인식됨.			
							
30	9	1.00		10	8	0.98	
바닥면과 배관이 동일한 요소로 인식됨.				일부 구조물이 배관과 동일한 요소로 인식됨.			

- 실험을 통해 도출된 스캔 데이터 분할 기술의 최적화된 최근점 이웃 점 개수, 곡률 변화 및 법선 벡터 각도 변화 임계값을 산출함으로써 스캔 데이터 분할 기술의 플랜트 시설 대상 최적화를 완료함. 최적화된 스캔 데이터 분할 기술은 본 연구에서 개발된 차별적 데이터 감소 기법을 활용하여 밀도가 감소된 스캔 데이터에 적용되었으며, 결과는 다음 <그림 3-2-23>과 같음.



<그림 3-2-23> 테스트베드로부터 획득한 스캔 데이터 대상 스캔 데이터 분할 기술 최적화 결과 (a) 스캔 데이터 분할 결과, (b) (a)의 일부분 확대

- 다음 <표 3-2-17>은 질적성과 달성 여부를 측정하기 위해 본 연구에서 개발된 차별적 데이터 감소 기술과 연계한 스캔 데이터 분할 기술에 대한 정확성을 정량적으로 평가한 것임. 개발된 기술을 통해 <그림 3-2-23>에 나타난 바와 같이, 구성요소별로 스캔 데이터가 분할되었으며, 본 연구에서 개발된 차별적 데이터 감소 기술 및 플랜트 시설 구성요소별 스캔 데이터 분할 기술의 정확도는 약 96.77% (오차 범위 3.23%)로 나타남.

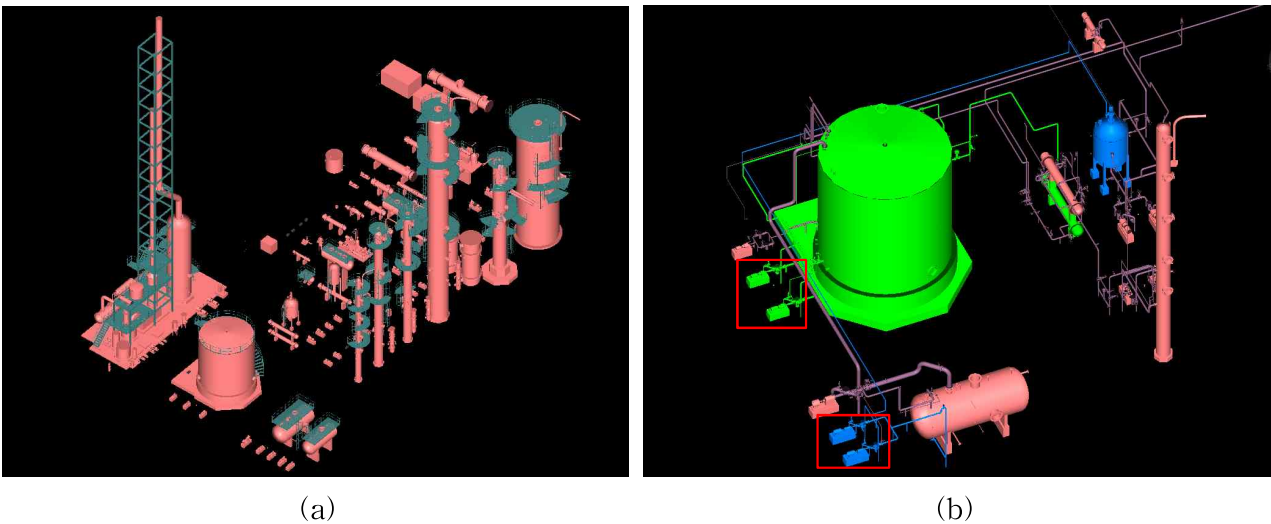
<표 3-2-17> 플랜트 시설 구성요소별 스캔 데이터 분할 기술의 정확도 분석

구분 대상 영역	실제 구분 영역 개수	분할된 영역 개수	평균 정확도 (오차 범위)
배관과 플랜지	5	5	96.77% (3.23%)
구조체와 배관	5	5	
제어기기와 배관	10	10	
기기와 배관	3	3	
배관과 밸브	6	6	
배관과 배관	0	1	

- 플랜트 시설에서 획득한 전체 점군 데이터로부터 배관 점군 데이터 추출 기술과 밸브 및 제어기기 점군 데이터 추출 기술, 플랜트 기기 점군 데이터 추출 기술을 적용함으로써 성공적으로 개별 플랜트 기기에 대한 점군 데이터 추출이 가능함. 본 연구과제에서는 앞서 추출한 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 점군 데이터 간의 위상학적 관계를 바탕으로 공정배관계장도 내의 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 간의 관계 정보, 플랜트 3차원 데이터베이스 내의 기기 모델 형상 정보를 활용하여 최적화된 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발을 위한 프레임워크를 정립 및 구축함.
- 구축된 프레임워크를 기반으로 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발을 추진함. 또한 테스트베드를 대상으로 개발한 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술을 적용하고, 해당 기술의 현장적용성을 평가 계획함. 이와 동시에 기술 자문을 통해 기술의 문제점 및 한계점을 검토하고, 이를 개선하기 위한 방안을 마련하고 전략을 도출하고자 함. 앞서 도출한 문제점과 개선사항을 바탕으로 기존에 구축된 기술 개발 프레임워크를 개선하고, 이를 다시 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발에 반영함.
- 테스트베드를 대상으로 획득한 점군 데이터 내 플랜트 기기 점군 데이터의 특성 파악
 - 대규모의 복잡한 플랜트 시설의 완전한 점군 데이터 획득을 위해 3차원 점군 데이터 정합 및 데이터 개선 소프트웨어를 이용하여 여러 위치에서 획득한 데이터 간의 정합 및 데이터 개선을 수행함. 정합이 완료된 점군 데이터 내 기기 점군 데이터의 특성을 요약하면 다음과 같음.
 - 기기 표면 점군 데이터의 불균일 분포 (Density Irregularity): 3차원 점군 데이터 정합 및 데이터 개선 소프트웨어를 통해 정합 및 개선이 완료된 점군 데이터는 플랜트 기기 표면에 불균일하게 분산되는 불균일 분포 특성을 가짐. 기기 표면 점군 데이터의 불균일 분포 특성은 데이터베이스 내에 존재하는 후보 모델과의 매칭 및 검색 시에 유사도를 계산하는 과정에서 오차를 발생시키는 요인이 되므로 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발 시 고려가 필요함.
 - 기기 표면 점군 데이터의 불완전성 (Incompleteness 또는 Partialness): 플랜트 시설은 다수의 배관, 밸브 및 제어기기, 기기, 구조물 등이 복잡하게 얹혀있는 특성이 있어 다수의 위치에서 데이터를 획득한다 하더라도 가시선 (Line of Sight)이 제한됨. 가시선의 제한에 의한 가림현상 외에도 서로 다른 배관, 밸브 및 제어기기, 기기, 구조물 등에 의한 가림현상이 발생함. 이러한 기기 표면 점군 데이터의 불완전한 특성은 데이터베이스 내에 존재하는 후보 모델과의 매칭 및 검색 시에 유사도를 계산하는 과정에서 오차를 발생시키는 요인이 되므로 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발 시 고려가 필요함.
 - 기기 표면 점군 데이터의 부정확성 (Inaccuracy 또는 Noise Corruption): 기기 표면은 반사율이 높은 특성을 가지며, 표면의 곡률에 따라 레이저 펄스가 빗겨서 입사되므로 기기 표면에 대한 점군 데이터는 노이즈를 수반할 가능성이 높음. 뿐만 아니라, 플랜트 시설과 같은 야외 환경에서 레이저 스캐너를 이용한 데이터 획득 시에는 대기의 온도, 습도, 바람, 먼지 등에 의해 오차가 발생할 수 있음. 이처럼 기기 표면의 점군 데이터는 부정확한 특성을 가지므로 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발 시 고려가 필요함.

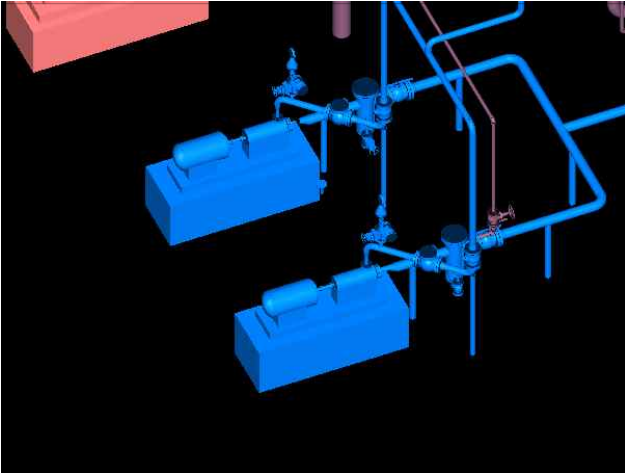
○ 플랜트 3차원 데이터베이스 내 기기 특성 파악

- 실무에서는 플랜트 기기 설계 시에 주로 3차원 데이터베이스를 활용하기 때문에 플랜트 기기 정보 모델 구축 시에 플랜트 시설을 구성하는 다양한 종류의 기기에 대한 3차원 데이터베이스의 활용이 가능함. 단, 기기 점군 데이터와의 매칭 및 검색을 통한 정확한 기기 모델 구축을 위해서는 플랜트 3차원 데이터베이스 내에 존재하는 기기 모델에 대한 특성을 파악하고, 이를 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발 시 고려하여야 함. 플랜트 3차원 데이터베이스 내에 존재하는 기기 모델에 대한 특성을 요약하면 다음과 같음.
- 기기 종류의 다양성: 플랜트 3차원 데이터베이스 내에는 다음 <그림 3-2-23-i>의 예시에서 보는 바와 같이 다양한 종류의 기기가 존재함.

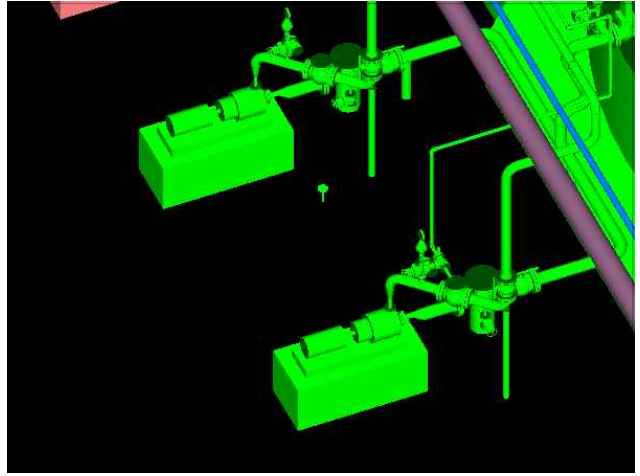


<그림 3-2-23-i> 플랜트 데이터베이스의 예시 (a) 기기 종류의 다양성, (b) 동종 기기의 다양성

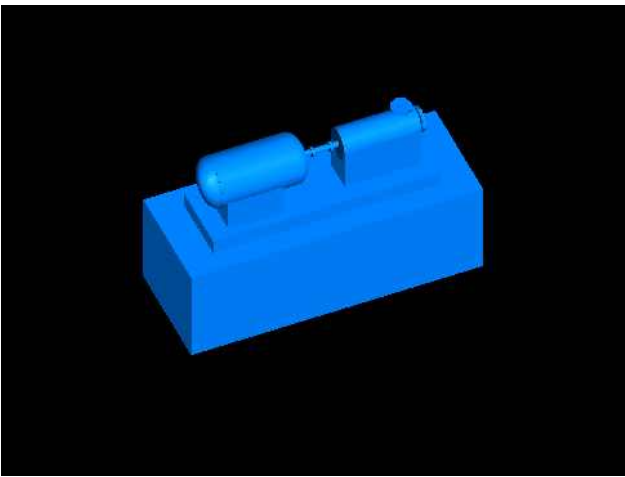
- 이러한 이유로 사용자가 직접 기기 점군 데이터에 해당하는 기기 모델을 찾는 과정은 플랜트 기기에 대한 지식이 요구되며, 오랜 시간이 소요되어 비효율적일 뿐만 아니라 플랜트 정보 모델 구축 결과가 부정확하고 일부 누락될 가능성이 있음.
- 동종 기기의 다양성: 플랜트 3차원 데이터베이스 내에는 다음 <그림 3-2-23-ii>의 예시에서 보는 바와 같이 동종 기기라 하더라도 다양한 형태가 존재함. 뿐만 아니라, 이러한 다양한 형태의 동종 기기는 붉은색 상자에 보이는 바와 같이 실제로 가까운 위치에 설치하는 경우가 발생함. 다음 <그림 3-2-23-ii>는 상기 <그림 3-2-23-i>에서 붉은색 상자로 표시한 영역을 확대하여 나타낸 것임. <그림 3-2-23-ii(c)>와 <그림 3-2-23-ii(d)>는 <그림 3-2-23-ii(a)>와 <그림 3-2-23-ii(b)>의 모델을 각각 확대하여 나타낸 것임. 그림에 나타낸 두 가지 펌프 모델은 매우 유사한 형태이나 배관과의 연결부와 바디 부분에서 분명한 차이를 보임.



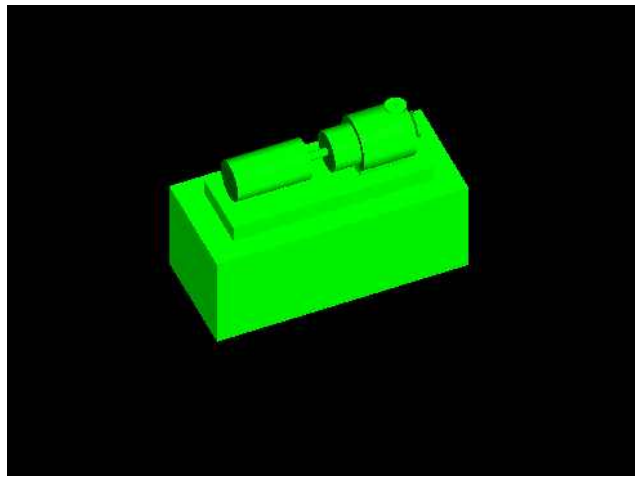
(a)



(b)



(c)

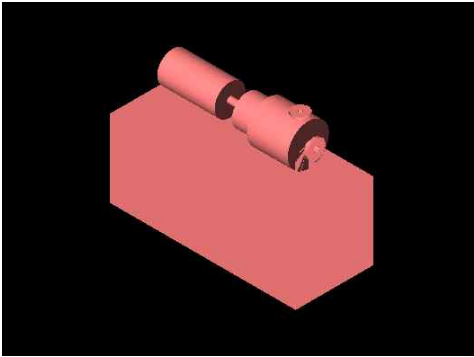
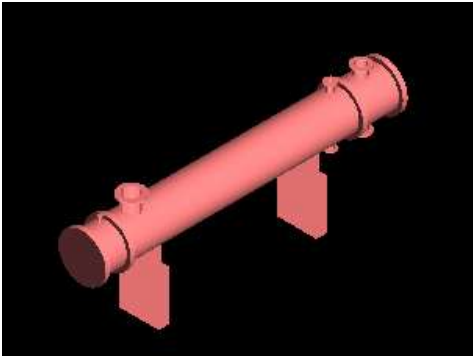
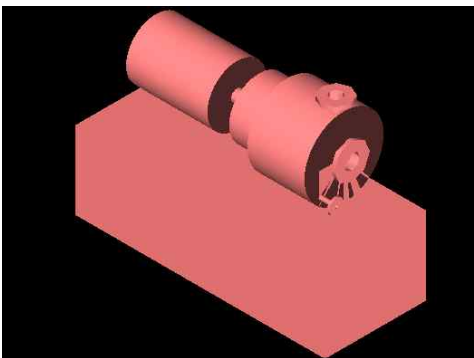
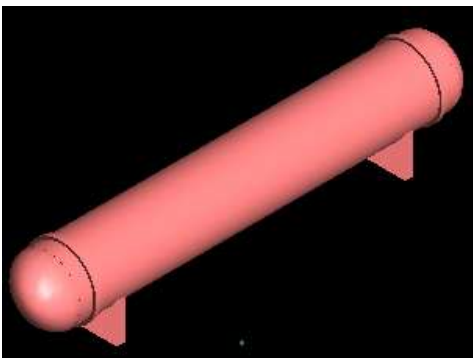
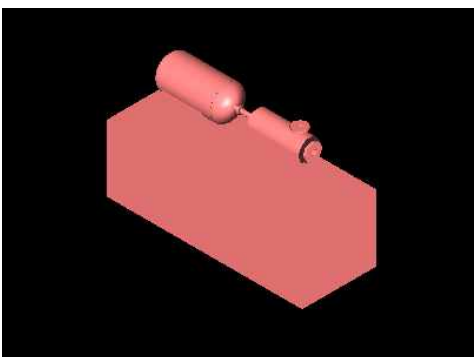
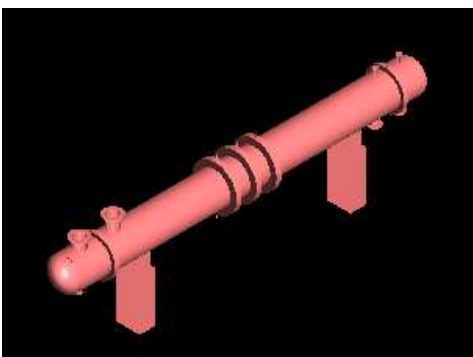
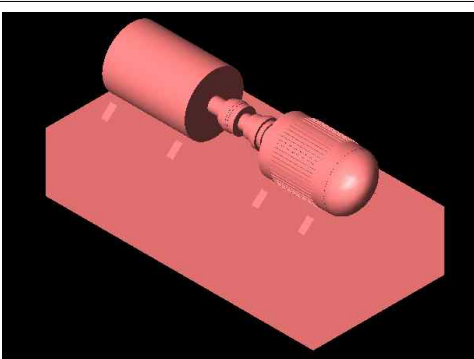
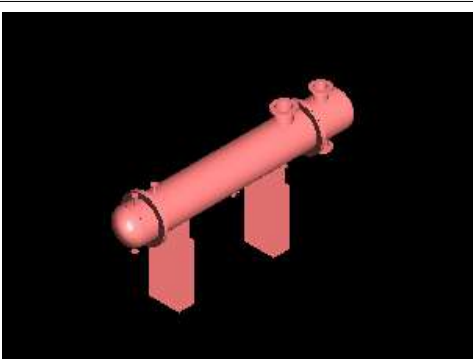


(d)

<그림 3-2-23-ii> 유사한 형태의 동종 기기 예시 (펌프) (a) 예시 1, (b) 예시 2,
(c) (a) 확대, (d) (b) 확대

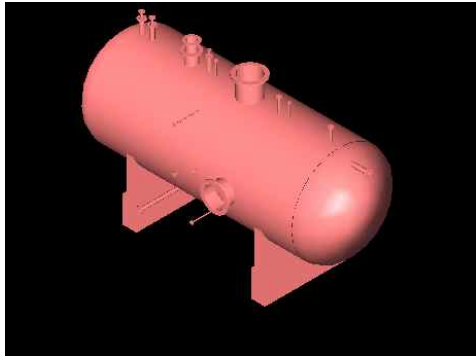
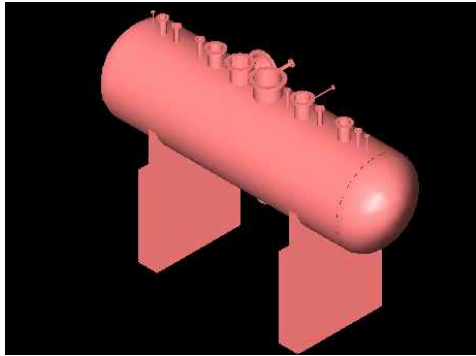
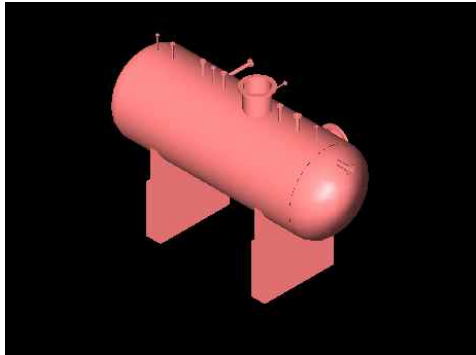
- 다음 <표 3-2-17-i>은 동종 기기 형태의 다양성을 나타냄. 열교환기는 펌프에 비해 형태의 다양성이 높은 것을 알 수 있음.

<표 3-2-17-i> 동종 기기 형태의 다양성 예시

구분	펌프	열교환기
예시 1		
예시 2		
예시 3		
예시 4		

- 플랜트 3차원 데이터베이스 내에는 앞서 설명한 동종 기기 형태의 다양성뿐만 아니라, 유사한 형태라 하더라도 다양한 크기의 기기가 존재함 (<표 3-2-17-ii> 참조). 이러한 동종 기기의 형태 및 크기 다양성은 사용자가 직접 기기 점군 데이터에 해당하는 기기 모델을 찾는 과정을 더욱 어렵게 함.

<표 3-2-17-ii> 동종 기기 크기의 다양성 예시

구분	데빗
예시 1	
예시 2	
예시 3	

- 기기 점군 데이터의 특성과 플랜트 3차원 데이터베이스 내에 존재하는 기기 모델의 특성 분석 결과를 종합하여 볼 때, 이러한 다양한 특성을 모두 고려함으로써 플랜트 분야에 특화된 자동화된 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발의 필요성이 절실함.
- 기존 연구에서 3차원 물체 매칭 및 검색을 위해 제안된 방법은 다음 <표 3-2-17-iii>과 같이 크게 특징 기반과 그래프 기반 방법으로 구분됨 (Tangelder와 Veltkamp, 2008). 특징 기반 방법은 사용되는 특징 값에 따라 전역적 특징, 전역적 특징 분포, 공간 맵, 지역적 특징을 사용하는 방법으로 구분됨. 그래프 기반 방법은 사용되는 특징 값에 따라 모델 그래프, 스켈레톤, Reeb 그래프를 사용하는 방법으로 구분됨.

<표 3-2-17-iii> 3차원 물체 매칭 및 검색 방법 분류 (Tangelder와 Veltkamp, 2008)

구분	사용되는 특징 값
특징 기반	- 전역적 특징 (Johnson과 Hebert, 1999; Paquet 등, 2000; Elad 등, 2001; Zhang과 Chen, 2001; Corney 등, 2002) - 전역적 특징 분포 (Ip 등, 2002; Ip 등, 2003; Ohbuchi 등, 2002; Osada 등, 2002; Ohbuchi 등, 2003) - 공간 맵 (Ankerst 등, 1999; Funkhouser 등, 2003; Kazhdan 등, 2003; Kriegel 등, 2003; Vranic, 2003; Yu 등, 2003) - 지역적 특징 (Shum 등, 1996; Chua와 Jarvis, 1997; Johnson과 Hebert, 1999; Zaharia와 Preteux, 2001)
그래프 기반	- 모델 그래프 (Cicirello와 Regli, 2001; Elad 등, 2001; McWherter 등, 2001; Funkhouser 등, 2003; El-Mehalawi와 Miller, 2003) - 스켈레톤 (Iyer 등, 2003; Lou 등, 2003; Sundar 등, 2003) - Reeb 그래프 (Hilaga 등, 2001; Bespalov 등, 2003; Biasotti 등, 2003; Tung과 Schmitt, 2005)

- 앞서 분석한 기기 점군 데이터의 특성과 플랜트 데이터베이스 내 기기 모델의 특성별로 기존 연구에서 제안된 특징 기반과 그래프 기반 방법 적용 시 기대 수준을 비교하여 요약하면 다음 <표 3-2-17-iv>와 같음. 기존 연구 분석 결과에 따르면, 기기 점군 데이터의 특성과 플랜트 3차원 데이터베이스 내에 존재하는 기기 모델의 특성을 모두 고려할 때, 플랜트 기기 매칭 및 검색에 적합한 방법이 전무한 실정임을 알 수 있음.

<표 3-2-17-iv> 기존 연구에서 제안된 3차원 물체 매칭 및 검색 방법 적용 시 기대 수준 비교

매칭 및 검색 방법 플랜트 기기 특성	특징 기반				그래프 기반		
	전역적 특징	전역적 특징 분포	공간 맵	지역적 특징	모델 그래프	스켈레톤	Reeb 그래프
기기 표면 점군 데이터의 불균일 분포	낮음	낮음	낮음	높음	높음	높음	높음
데이터 분석 효율성	높음	높음	높음	중간	중간	중간	중간
분류 정확도	낮음	중간	높음	중간	중간	중간	중간
기기 점군 데이터의 불완전성	불가	불가	불가	가능	가능	가능	가능
기기 표면 점군 데이터의 부정확성	높음	높음	높음	중간	중간	중간	중간

○ 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발 프레임워크

- 본 연구과제에서는 앞서 추출한 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 점군 데이터 간의 위상학적 관계를 바탕으로 공정배관계장도 내의 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 간의 관계 정보를 활용하여 플랜트 기기 매칭 및 검색 기술 개발 프레임워크를 구축함.

- 플랜트 기기 매칭 및 검색 시에는 앞서 추출한 배관, 밸브 및 제어기기, 기기 점군 데이터, 그리고 점군 데이터 간의 위상학적 관계를 입력받음. 입력된 점군 데이터의 형상 정보와 위상학적 관계 정보는 공정배관계장도 및 플랜트 3차원 데이터베이스로부터 추출한 정보와의 비교를 위해 그래프 형태로 변환함.
- 이와 동시에 해당 공정배관계장도 및 플랜트 3차원 데이터베이스를 입력받게 되며, 공정배관계장도 및 플랜트 3차원 데이터베이스로부터 추출하는 정보를 요약하면 다음 <표 3-2-17-v>와 같음. 플랜트 기기 매칭 및 검색을 위해 공정배관계장도 및 플랜트 3차원 데이터베이스로부터 추출하는 분석 대상 정보, 형상 정보, 위상학적 정보는 모두 그래프 형태로 변환함. 배관, 밸브 및 제어기기, 기기에 대한 점군 데이터와 공정배관계장도 및 플랜트 3차원 데이터베이스로부터 변환된 그래프 간의 그래프 매칭 방법을 이용하여 입력받은 데이터 내의 모든 그래프 쌍에 대한 유사도 계산을 수행하며, 두 그래프 간의 유사도가 가장 높은 모델이 최종으로 검색됨.

<표 3-2-17-v> 공정배관계장도 및 플랜트 3차원 데이터베이스로부터 추출하는 분석 대상, 형상 정보 및 위상학적 정보

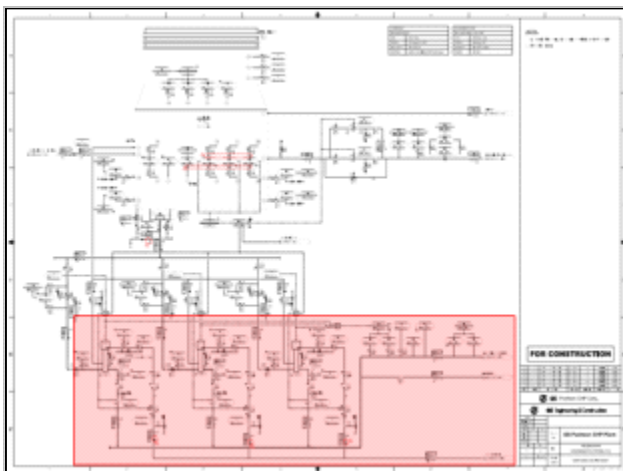
구분	종류	정보 예시 (태그 또는 규격)	구분	종류	정보 예시 (태그 또는 규격)
분석 대상 정보	기기	DV-2101	형상 정보	기기	2,600*7,700*5,200 (mm)
		PU-2101A			1,750*750*1,200 (mm)
		PU-2101S			1,750*750*1,200 (mm)
	밸브 및 제어기기	Check Valve 1-10"		밸브 및 제어기기	400*400*1,400 (mm)
		Gate Valve 1-10"			400*400*1,400 (mm)
		Gate Valve 2-10"			600*650*1,100 (mm)
		Globe Valve 2-10"			600*550*600 (mm)
		Globe Valve 1-14"			650*850*950 (mm)
분석 대상 정보	배관	10"-EC-21006-A26		배관	127.0 (mm)
		10"-EC-21008-A26			127.0 (mm)
		10"-EC-21039-A26			127.0 (mm)
		14"-EC-21007-A26			177.8 (mm)
		14"-EC-21038-A26			177.8 (mm)
태그		To	From	밸브 및 제어기기	
10"-EC-21006		DV-2101	HE-2101	-	
10"-EC-21008		RE-2101	PU-2101A	Check Valve 1-10" Gate Valve 1-10" Gate Valve 2-10" Globe Valve 2-10"	
10"-EC-21039		10"-EC-21008-A26	PU-2101S	Check Valve 1-10" Globe Valve 2-10"	
14"-EC-21007		PU-2101A	DV-2101	Globe Valve 1-14"	
14"-EC-21038		PU-2101S	14"-EC-21007	Globe Valve 1-14"	

(2) 플랜트 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술

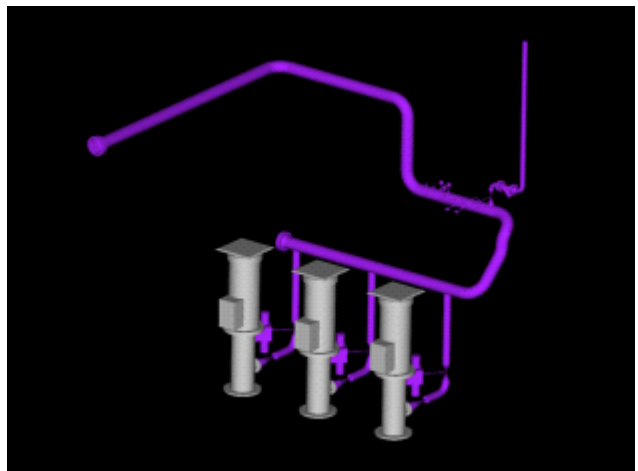
○ 3차원 설계 모델과 스캔 데이터를 활용한 자동화된 정도관리 과정에서 3차원 설계 모델 및 스캔 데이터 내 구성요소별 상이한 시공오차를 적용하는 것은 필수적임. 이를 위해 3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 구성요소별 비교분석과정이 요구됨. 하지만 3차원 설계 모델은 해당 구성요소에 대한 종류, 위치, 형상정보가 모두 포함된 반면 분할된 스캔 데이터는 위치 및 형상정보만을 포함하고 있음. 따라서 본 연구에서는 분할된 점군 데이터간 위치 관계 및 구성요소의 연결 관계를 활용하여 분할된 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 기술을 개발 완료함. 또한 테스트베드로부터 획득한 데이터를 활용하여 플랜트 시설 구성요소 인식 기술의 현장 적용성을 평가함.

○ 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 기술 개발

- 개발된 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해 포천열병합발전소 내 응축기 시스템으로부터 획득한 스캔 데이터를 활용하였음. 다음 <그림 3-2-24>는 현장 적용성 검증에 활용된 영역에 대한 공정배관계장도 및 3차원 설계 모델을 나타낸 것임.



(a)



(b)

<그림 3-2-24> (a) 공정배관계장도, (b) 3차원 설계 모델

- 다음 <표 3-2-18>은 공정배관계장도로부터 추출한 플랜트 시설 구성요소간 연결 관계를 나타냄.

<표 3-2-18> 공정배관계장도로부터 추출한 플랜트 시설 구성요소간 연결 관계

배관 태그	시작	끝	밸브
150-CS300-SC-LCA21	P-001	250-CS300-SC-LCA30	MO-021, CH-021
150-CS300-SC-LCA22	P-002	250-CS300-SC-LCA30	MO-022, CH-022
150-CS300-SC-LCA23	P-003	250-CS300-SC-LCA30	CH-023, MO-023

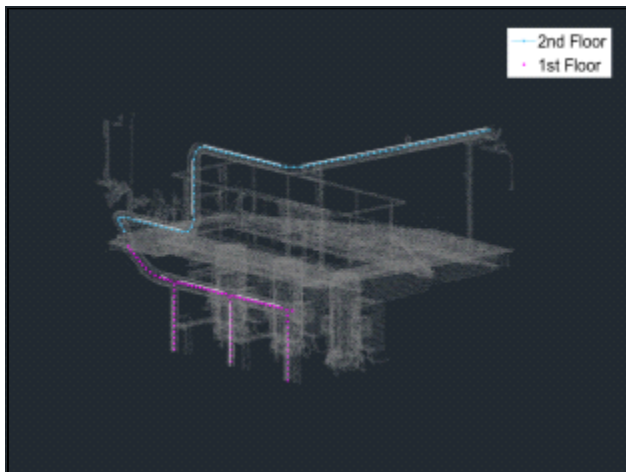
- 다음 <표 3-2-19>는 스캔 데이터 내 포함된 플랜트 시설 구성요소의 종류별 태그 및 3차원 형상정보를 나타냄.

<표 3-2-19> 공정배관계장도 및 3차원 설계 모델로부터 추출한 구성요소별 태그 및 형상정보

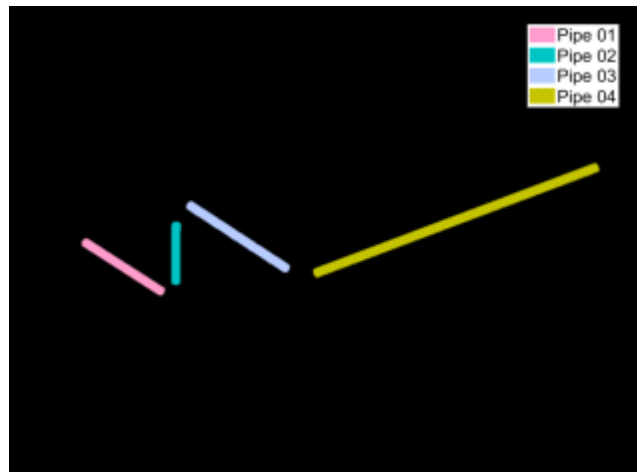
종류	태그	형상정보* (m)
기기	P-001	1.05×0.90×3.36
	P-002	1.05×0.90×3.36
	P-003	1.05×0.90×3.36
밸브	CH-023	0.44×0.17×0.17
	MO-023	0.95×0.98×0.93
	MO-021	0.95×0.98×0.93
	CH-021	0.44×0.17×0.17
	MO-022	0.95×0.98×0.93
	CH-022	0.44×0.17×0.17
배관	150-CS300-SC-LCA21	0.17
	150-CS300-SC-LCA22	0.17
	150-CS300-SC-LCA23	0.17
	250-CS300-SC-LCA30	0.27

※ 기기 및 밸브의 형상정보*는 가로폭, 세로폭, 높이를 나타내며, 배관의 형상정보*는 반지름을 나타냄.

- 다음 <그림 3-2-25>는 개발된 기술을 활용해 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 중 배관을 인식한 결과를 요약하여 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-2-25> 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 결과

(a) 스캔 데이터 내 배관 인식 결과, (b) 2층 내 인식된 배관의 3차원 모델화 결과

- 상기 도출된 인식 결과는 실제 해당 영역에 포함된 구성요소와 비교함으로써 요소 인식 정확성을 정량적으로 평가함. 다음 <표 3-2-20>은 질적성과 달성 여부 측정을 위해 개발된 기술의 인식 정확성을 요약하여 나타낸 것이며, 정확성 측정 결과 해당 영역 내 구성요소 인식에 대해 100%의 정확성을 보임.

<표 3-2-20> 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 정확성 평가 결과 요약

종류	태그	인식여부
배관	150-CS300-SC-LCA21	○
	150-CS300-SC-LCA22	○
	150-CS300-SC-LCA23	○
	250-CS300-SC-LCA30	○

○ 플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술

- 국토교통부 「산업·환경설비공사 표준시방서 (2012년도 개정), “제4편 제6장 발전설비건물배관공사” 및 “제4편 1장 일반공통사항”」에 따르면, 발전설비건물 내 배관의 중심축 및 높이는 시공 계획서 및 제작도서 내 계획된 위치와 일치해야함. 또한 개별 요소는 시공상세도면 및 각 공정별 시방에 명시된 허용공차를 만족해야 함. 따라서 본 연구과제에서 개발된 플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술은 구성요소별 위치 이동, 설치 각도뿐만 아니라 해당 요소별 규격 준수 여부를 판별하도록 개발 완료됨. 개발된 기술의 정확성 평가는 실제 플랜트 현장의 3차원 설계 모델을 활용하여 생성한 가상 데이터를 대상으로 수행함.

1.7 시스템 허용오차

- (1) “제1편 총칙 2-2 공무행정 및 제출물 1.8 시공상세도면”에 의해 제출되고 승인된 시공계획서에 따른다.
- (2) “제1편 총칙 2-2 공무행정 및 제출물 1.6.1 제작도서”에 의해 제출되고 승인된 제작도서에 따른다.
- (3) 관련도서 및 각 공정별 공사이방의 시스템 허용오차를 따른다.
- (4) 외부에 부착되는 배관의 중심선과 높이는 도면상에 나타난 위치와 일치하여야 한다.

(중간 생략)

3.3 시공기준

(4) 설치 및 기초볼트

- ① 설치하는 시공상세도면에 따라서 설치되어야 하며 도면상의 관련배관 및 높이를 정확하게 맞추며 체결작업과 마감작업도 본 작업에 포함된다.

(중간 생략)

3.5 시공허용오차

- (1) 본 편 제1장 일반공통사항의 3.5를 참조한다.

(다음 페이지에 계속)

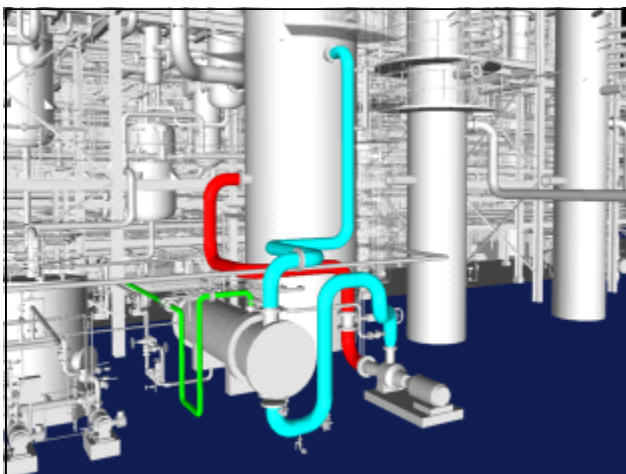
3.5 시공허용오차

- (1) 총칙 및 시공상세도면에 따른다.
- (2) 설치시 허용공차는 시공상세도면 및 각 공정별 시방에 따른다.
- (3) 허용공차는 누적공차를 적용하지 않는다.
- (4) 공차범위를 벗어나 조정이 곤란한 부분에 대해서는 반드시 제작자 및 공사감독자와 협의한 후에 처리하여야 한다.

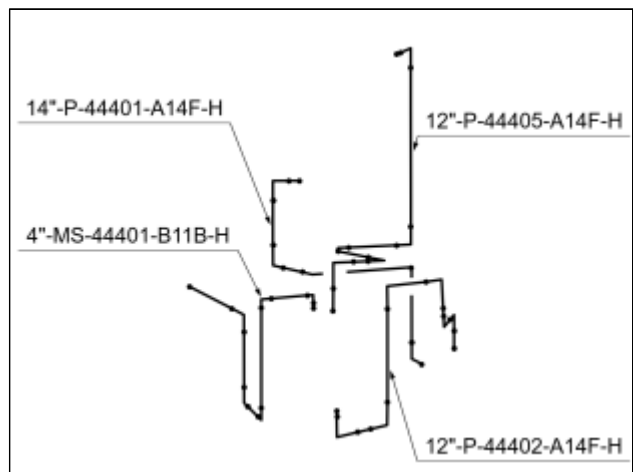
(이하 생략)

○ 플랜트 시설 내 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 정확성 평가를 위한 가상 데이터 생성 및 평가지표 설정

- 다음 <그림 3-2-26>은 질적성과지표 달성 여부를 측정하기 위해 생성한 가상 데이터의 일부를 나타냄. <그림 3-2-26(a)>는 플랜트 배관에 대한 시공상세도면 중 3차원 설계 모델의 일부를 나타내며, <그림 3-2-26(b)>는 플랜트 배관에 대한 시공상세도면 중 3차원 설계 모델로부터 추출한 시공 상세도 (Shop Drawing)를 나타냄.



(a)



(b)

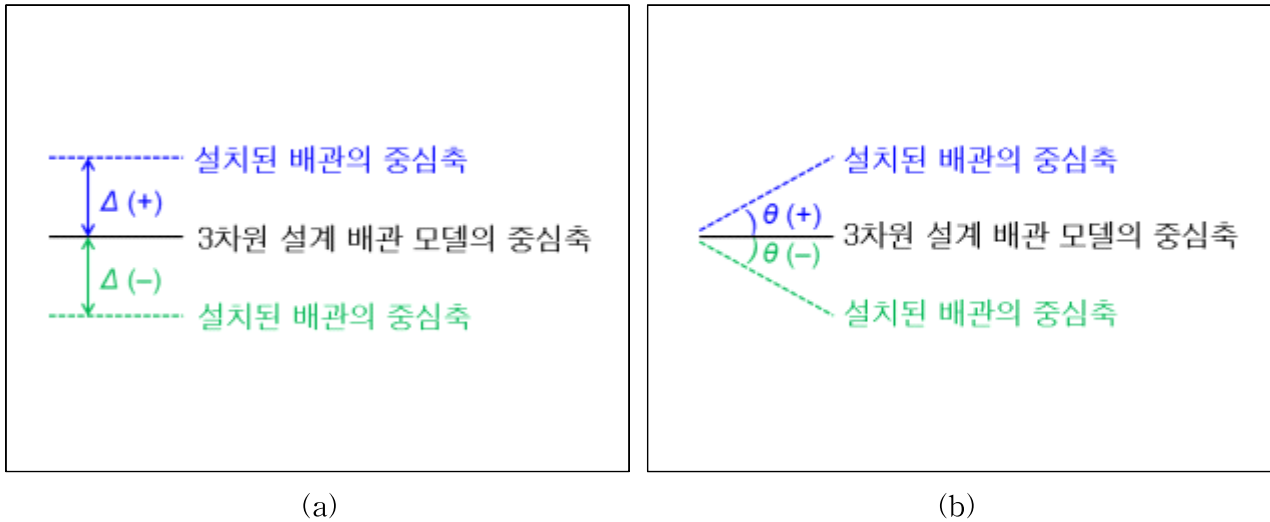
<그림 3-2-26> (a) 플랜트 배관에 대한 시공상세도면 중 3차원 설계 모델의 일부,
(b) 3차원 설계 모델로부터 추출한 시공 상세도

- 다음 <그림 3-2-27>은 상기 <그림 3-2-26>에 나타난 플랜트 배관에 대한 3차원 설계 모델과의 비교를 위해 가상으로 생성한 스캔 데이터를 나타냄. 가상 데이터 생성 절차는 다음과 같음. 먼저, 플랜트 배관에 대한 3차원 설계 모델 표면에 균일한 표면 데이터를 생성함 (다음 <그림 3-2-27(a)> 참조). 그러나 실제 플랜트 시공 현장으로부터 스캔 데이터를 획득하는 경우, 서로 다른 구성요소에 의해 발생하는 가림현상 때문에 3차원 점군 데이터의 완전성 및 밀도의 균일성을 확보하기 어려움. 또한 플랜트 시설 구성요소 표면의 반사율 또는 대기의 먼지로 인해 스캔 데이터 내 노이즈가 발생될 수 있음. 이에 실제 플랜트 시공 현장으로부터 획득한 데이터와 유사한 데이터를 생성하기 위해 <그림 3-2-27(a)>에 나타난 데이터에 가림현상, 데이터 불균일성, 노이즈 등을 반영하는 과정을 거침. 마지막으로 생성한 데이터로부터 x, y, z 축으로 각각 위치를 이동시킴으로써 가상의 시공오차를 부여함 (다음 <그림 3-2-27(b)> 참조).



<그림 3-2-27> (a) 플랜트 배관에 대한 3차원 설계 모델로부터의 표면 데이터 생성 결과,
(b) 원본 데이터 및 노이즈, 데이터 불균일성, 가림현상, 위치 오차를 반영한 데이터

- 개발된 기술을 활용하여 측정된 시공오차와 실제 가상데이터에 적용한 시공오차를 비교함으로써 해당 기술의 구성요소별 위치 이동, 설치 각도 변경 여부 판별 정확성을 평가함. 다음 <그림 3-2-28>은 구성요소별 위치 이동, 설치 각도 변경 여부 판별 정확성을 측정하기 위한 시공오차 지표를 나타냄.



<그림 3-2-28> (a) 구성요소별 위치 이동 변경 여부, (b) 구성요소별 설치 각도 변경 여부

- 개발된 기술의 구성요소별 규격 준수 여부 판별 정확성을 측정하기 위해 개발된 기술을 가상 데이터에 적용하여 도출된 요소별 규격 (길이 및 구경)를 가상 데이터 생성에 활용된 3차원 설계 모델 내 구성요소별 규격과 비교함으로써 해당 기술의 규격 준수 판별 여부 정확성을 측정함. 다음 <표 3-2-21>은 상기 <그림 3-2-26(b)>에 나타난 시공 상세도 내의 배관 정보를 나타냄.

<표 3-2-21> 상기 <그림 3-2-26(b)>에 나타난 시공 상세도 내의 배관 정보 (다음 페이지에 계속)

태그	파트	번호	길이 (m)	구경 (m)	비고
4"-MS-44401-B11B-H	스트레이트	01	3.86	0.11	수평
		02	0.51	0.11	수평
		03	1.59	0.11	수직
		04	0.84	0.11	수평
		05	2.07	0.11	수직
		06	0.79	0.11	수평
		07	0.15	0.11	수직
	파트	번호	규격		비고
	엘보우	01	90° (숫)		
		02	90° (숫)		
		03	90° (숫)		
		04	90° (숫)		
		05	90° (숫)		
태그	파트	번호	길이 (m)	구경 (m)	비고
14"-P-44401-A14F-H	스트레이트	01	0.31	0.35	수평
		02	1.15	0.35	수직
		03	1.53	0.35	수평
		04	1.68	0.35	수평
		05	0.68	0.35	수직
		06	0.25	0.35	수직
		07	0.34	0.35	수평
	파트	번호	규격		비고
	엘보우	01	90° (롱)		
		02	90° (롱)		
		03	90° (롱)		
		04	90° (롱)		
		05	90° (롱)		

<표 3-2-21> 상기 <그림 3-2-26(b)>에 나타난 시공 상세도 내의 배관 정보

태그	파트	번호	길이 (m)	구경 (m)	비고
12"-P-44402-A14F-H	스트레이트	01	0.15	0.32	수직
		02	0.32	0.32	수평
		03	1.90	0.32	수직
		04	0.42	0.32	수평
		05	0.76	0.32	수평
		06	0.20	0.32	수직
	파트	번호	길이 (m)	구경 (m)	비고
	엘보우	01	90° (롱)		
		02	90° (롱)		
		03	90° (롱)		
		04	90° (롱)		
		05	90° (롱)		
		06	90° (롱)		
태그	파트	번호	길이 (m)	구경 (m)	비고
12"-P-44405-A14F-H	스트레이트	01	0.46	0.32	수직
		02	0.28	0.32	수평
		03	1.94	0.32	수평
		04	1.38	0.32	수평
		05	4.02	0.32	수직
		06	0.25	0.32	수평
	파트	번호	규격		비고
	엘보우	01	90° (롱)		
		02	90° (롱)		
		03	90° (롱)		
		04	90° (롱)		
		05	90° (롱)		

○ 구성요소별 위치 이동, 설치 각도 변경 여부 판별 및 구성요소별 규격 준수 여부 판별 정확성 평가 결과 (질적성과지표 B-2-①, ②)

- 다음 <표 3-2-22>는 개발된 기술을 활용한 가상 데이터 내 수평 배관의 위치 이동, 설치 각도 변경 오차 분석 결과를 요약하여 나타낸 것임.

<표 3-2-22> 위치 이동, 설치 각도 변경 오차 분석 결과 - 스트레이트/수평 배관

태그 (반영된 시공오차 [m])	파트 및 번호	수직 이동* (m)	설치 각도* (°)	정확성 평가 결과
4"-MS-44401-B11B-H (x축: -0.1, y축: 0, z축: 0)	스트레이트 - 01	+0.008	+0.009	실제 반영된 오차와 0.433%의 오차 발생
	스트레이트 - 02	-0.006	+0.008	
	스트레이트 - 04	-0.008	+0.005	
	스트레이트 - 06	-0.006	+0.009	
	스트레이트 - 07	+0.008	+0.009	
14"-P-44401-A14F-H (x축: -0.1, y축: 0, z축: 0)	스트레이트 - 01	+0.010	-0.006	
	스트레이트 - 03	+0.006	-0.003	
	스트레이트 - 04	-0.003	+0.005	
	스트레이트 - 07	-0.009	-0.010	
12"-P-44402-A14F-H (x축: 0, y축: -0.3, z축: -0.1)	스트레이트 - 02	-0.101	+0.005	
	스트레이트 - 04	-0.100	-0.004	
	스트레이트 - 05	-0.099	-0.008	
12"-P-44405-A14F-H (x축: 0, y축: 0, z축: +0.2)	스트레이트 - 02	+0.199	-0.007	
	스트레이트 - 03	+0.200	+0.001	
	스트레이트 - 04	+0.201	-0.007	
	스트레이트 - 06	+0.199	-0.007	

※ 수직 또는 수평 이동*, 설치 각도* 및 정확성 평가 결과*는 소수점 넷째자리에서 반올림함.

- 다음 <표 3-2-23>은 개발된 기술을 활용한 가상 데이터 내 수직 배관의 위치 이동, 설치 각도 변경 오차 분석 결과를 요약하여 나타낸 것임.

<표 3-2-23> 위치 이동, 설치 각도 변경 오차 분석 결과 - 스트레이트/수직 배관

태그 (반영된 시공오차 [m])	파트 및 번호	수평 이동* (m)	설치 각도* (°)	정확성 평가 결과
4"-MS-44401-B11B-H (x축: -0.1, y축: 0, z축: 0)	스트레이트 - 03	-0.101	-0.005	실제 반영된 오차와 0.437%의 오차 발생
	스트레이트 - 05	-0.099	-0.006	
	스트레이트 - 07	-0.099	-0.010	
14"-P-44401-A14F-H (x축: -0.1, y축: 0, z축: 0)	스트레이트 - 02	-0.099	+0.005	
	스트레이트 - 05	-0.101	-0.006	
	스트레이트 - 06	-0.099	-0.002	
12"-P-44402-A14F-H (x축: 0, y축: -0.3, z축: -0.1)	스트레이트 - 01	-0.297	-0.001	
	스트레이트 - 03	-0.302	-0.007	
	스트레이트 - 06	-0.298	-0.005	
12"-P-44405-A14F-H (x축: 0, y축: 0, z축: +0.2)	스트레이트 - 01	+0.001	+0.001	
	스트레이트 - 05	-0.009	+0.001	

※ 수직 또는 수평 이동*, 설치 각도* 및 정확성 평가 결과*는 소수점 넷째자리에서 반올림함.

- 다음 <표 3-2-24>는 개발된 기술을 활용한 가상 데이터 내 스트레이트 배관의 위치 이동, 설치 각도 변경 오차 분석 결과를 요약하여 나타낸 것임.

<표 3-2-24> 배관 구성요소별 규격 (길이 및 구경) 오차 분석 결과 - 스트레이트 배관

태그	파트 및 번호	길이* (m)	구경* (m)	정확성 평가 결과
4"-MS-44401-B11B-H	스트레이트 - 01	3.836	0.109	실제 길이 및 규격과 0.568%의 오차 발생
	스트레이트 - 02	0.515	0.110	
	스트레이트 - 03	1.592	0.110	
	스트레이트 - 04	0.836	0.110	
	스트레이트 - 05	2.053	0.109	
	스트레이트 - 06	0.785	0.111	
	스트레이트 - 07	0.149	0.111	
14"-P-44401-A14F-H	스트레이트 - 01	0.312	0.350	
	스트레이트 - 02	1.161	0.352	
	스트레이트 - 03	1.521	0.352	
	스트레이트 - 04	1.689	0.352	
	스트레이트 - 05	0.687	0.353	
	스트레이트 - 06	0.253	0.348	
	스트레이트 - 07	0.339	0.352	
12"-P-44402-A14F-H	스트레이트 - 01	0.149	0.322	
	스트레이트 - 02	0.322	0.323	
	스트레이트 - 03	1.907	0.317	
	스트레이트 - 04	0.419	0.318	
	스트레이트 - 05	0.754	0.318	
	스트레이트 - 06	0.198	0.320	
12"-P-44405-A14F-H	스트레이트 - 01	0.460	0.319	
	스트레이트 - 02	0.278	0.321	
	스트레이트 - 03	1.952	0.322	
	스트레이트 - 04	1.387	0.322	
	스트레이트 - 05	4.004	0.322	
	스트레이트 - 06	0.249	0.322	

※ 배관 길이*, 구경* 및 정확성 평가 결과*는 소수점 넷째자리에서 반올림함.

- 개발된 기술은 구성요소별 위치 이동, 설치 각도 변경 여부 판별 및 구경 준수 여부 판별에서 모두 1% 이내의 오차를 가진 것으로 나타남. 따라서 두 정확성 모두 질적성과지표의 목표치인 오차 범위 5% 이내를 달성 완료함.

제3절 연구개발 주요내용 - 2차년도

1. 질적성과 달성 검증을 위해 시공 중인 발전플랜트를 대상으로 한 데이터 확보 및 획득

- 지난 1차년도 연구 종료 시점 (2017년 11월 28일)에 진행된 중간 모니터링 결과를 반영하여 2차년도에는 시공 단계에서의 품질 향상과 효율적인 관리업무 수행의 필요성이 높은 발전플랜트로 테스트베드 대상을 한정함. 이와 더불어 발전플랜트 내 주기기, 주요 배관, 집합부 등의 중요 구간에 대해 집중하여 정도 관리를 수행하는 것으로 연구 범위를 조정함.
- 이에 2차년도 연구기간 중에는 실제 시공 중인 발전플랜트를 테스트베드로 선정하였으며, 협의를 거쳐 개발된 기술의 질적성과 달성 여부를 검증하기 위해 필요한 데이터 (스캔 데이터, 3차원 설계 모델, 공정배관계장도)를 확보 및 획득함. 개발된 기술에 대한 질적성과 달성 여부는 기술의 비교 우위 평가, 예상 수요자 만족도 설문 분석, Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정, 과제 수행 전 기술과 비교한 기술 수준 향상 정도 측정 등을 통해 검증함. 상세 연구수행 내용은 다음과 같음.

(1) 테스트베드 선정·협의 결과

- 개발된 ‘플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 (소프트웨어)’을 실제 시공 중인 플랜트 현장으로부터 확보 및 획득한 데이터에 적용하여 도출한 결과를 바탕으로 소프트웨어 프로토타입에 대한 현장 적용성을 평가하기 위해 시공 중인 발전플랜트를 선정·협의함.

○ 테스트베드 선정 시 요구사항

- 개발된 기술은 플랜트 시공 단계에서의 정도 관리를 목적으로 하므로 테스트베드는 2차년도 연구기간 중 실제 공사가 진행 중이어야 하며, 기술 검증 및 개선에 필요한 다음 일련의 과정을 반복하여 수행하기 위해서는 2차년도 연구기간 중 여러 차례 방문이 가능해야 함. 이에 2차년도 연구기간 (2018년 1월~2018년 12월)을 기준으로 시공 중인 국내 소재의 발전플랜트를 테스트베드 후보지로 고려함. 또한 개발된 기술을 적용하기 위해서는 기술 검증에 필요한 데이터 확보 및 획득에 대한 협조가 필수적임. 이와 관련하여 발주처 및 시공사와의 협조 요청을 통해 긴밀한 협조가 가능한 발전플랜트를 최종 테스트베드로 고려함.

- ① 해당 플랜트 시설에 대한 데이터 확보 및 획득
- ② 개발된 기술 적용
- ③ 실제 환경에 대한 적용상의 문제점 파악
- ④ 발생 가능한 오류 파악 및 개선

○ 테스트베드 선정

- 1차년도 연구기간 중 협의를 진행한 플랜트 현장 중 상기 테스트베드 선정시의 요구사항을 만족하는 두 곳의 발전플랜트 (포천열병합발전소, 신평택복합화력발전소)를 테스트베드로 선정함.
- 포천열병합발전소는 지난 1차년도 연구기간 중 테스트베드로 선정하였으며, 1차년도 연구기간 동안 해당 플랜트 시설 내 응축기 시스템에 대한 데이터를 확보 및 획득함. 해당 플랜트 시설은 2018년 9월 시운전이 시작되어, 2차년도 연구기간 중 2018년 8월까지 테스트베드로 활용함.
- 신평택복합화력발전소는 지난 1차년도 연구기간 중 테스트베드로의 활용에 대한 적합성을 판단하기 위해 사전답사를 진행함. 2017년 8월 당시에는 15% 공사가 진행된 상태로 기기, 배관에 대한 설치가 진행되지 않아 해당 플랜트 시설에 대한 데이터를 확보 및 획득이 불가함. 이에 2차년도 연구기간 중 해당 플랜트 시설 내 기기, 배관에 대한 설치 여부를 확인하고 테스트베드로 선정하여 활용함.
- 다음 <그림 3-3-1>은 두 곳의 테스트베드에 대한 조감도를 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-3-1> 2차년도 테스트베드 대상지 두 곳에 대한 조감도
(a)포천열병합발전소, (b) 신평택복합화력발전소

(2) 테스트베드를 대상으로 한 데이터 확보 및 획득

○ 데이터 확보 및 획득을 위한 현장관계자와의 협의

- 포천열병합발전소는 민간 (GS E&R)에서 발주하고 GS건설에서 시공 중인 플랜트 시설로, 1차년도 당시 해당 플랜트 시설에 대한 스캔 데이터 획득 및 3차원 설계 모델, 공정배관계장도 확보를 위한 협의를 완료함.
- 신평택화력발전은 공공 (신평택발전(주) [한국서부발전(주), GS에너지, KB자산운용이 공동 설립한 특수목적법인])에서 발주하고 포스코건설에서 시공 중인 플랜트 시설로, 2차년도 연구기간 중 해당 플랜트 시설에 대한 스캔 데이터 획득 및 3차원 설계 모델, 공정배관계장도 확보를 위해 연구책임자의 주도하에 발주처 및 시공사와의 협조 요청을 위한 회의를 주최함. 다음 <표 3-3-1>은 진행된 회의에 대한 정보를 요약하여 나타냄.

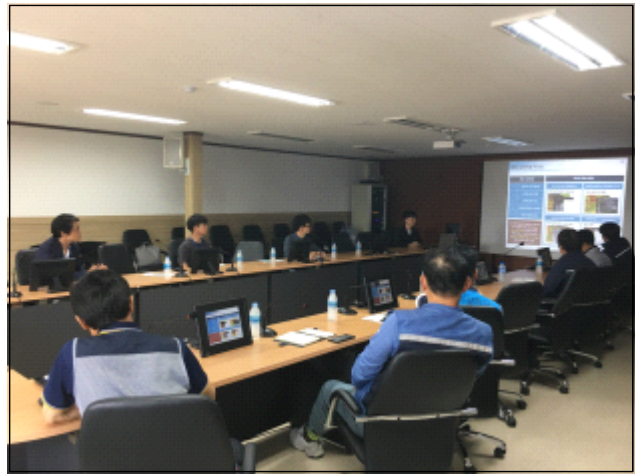
<표 3-3-1> 데이터 확보 및 획득을 위한 신평택화력발전 현장관계자와의 협의 회의 요약

구분	상세	
회의 명	테스트베드 활용을 위한 협조 요청 (스캔 데이터 획득 허가 및 3차원 설계 모델, 공정배관계장도 제공 협조)	
회의 주최자	중앙대학교 김창완 교수 (연구책임자)	
회의 일자	2018.08.14	
회의 장소	신평택발전본부	
참석자	연구진 성명 (소속)	현장관계자 성명 (소속)
	김창완 (중앙대학교)	김○○ (한국서부발전(주))
	성현우 (중앙대학교)	권○○ (한국서부발전(주))
	최현철 (중앙대학교)	손○○ (한국서부발전(주))
	김현수 (중앙대학교)	윤○○ (한국서부발전(주))
	전건우 (중앙대학교)	박○○ (포스코건설)
	-	박○○ (포스코건설)
협의 결과 요약	현장에서 확보 및 획득한 데이터 일체는 연구 목적으로만 활용되며, 외부에 공개되지 않는다는 내용의 보안유지서약서를 작성하는 조건하에 요청사항에 협조하는 것으로 협의 완료함. 또한 공사진행률을 고려하여 중요 구간 (주기기, 주요 배관, 접합부 등)의 설치가 예정되어 있는 2018년 11월 중 스캔 데이터 획득 실험을 결정함.	

- 다음 <그림 3-3-2>는 연구과제에 대한 소개, 데이터 획득 및 데이터 제공을 주제로 신평택발전본부에서 진행된 회의 당시 사진을 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-3-2> 신평택복합발전의 테스트베드 활용을 위한 협조 요청 회의 사진 (2018.08.14 당시)

(a) 연구과제에 대한 개요 소개, (b) 스캔 데이터 획득 허가 및 3차원 설계 모델, 공정배관계장도 제공 협조 협의

○ 스캔 데이터 획득 계획 수립의 중요성

- 개발된 기술의 현장 적용성을 검증하기 위해 대규모 발전플랜트 내 주기기, 주요 배관, 접합부 등으로 연결된 중요 구간에 대한 스캔 데이터 획득이 요구됨. 그러나 발전플랜트 내에는 다수의 기기, 배관, 밸브 및 제어기기 등이 복잡하게 얹혀있어 단일 위치에서 스캔 데이터 획득 시, 서로 다른 기기, 배관, 밸브 및 제어기기 등에 의한 가림현상이 발생할 수 있음. 이에 대상 중요 구간에 대한 완전한 스캔 데이터 획득을 위해서는 다수의 위치에서의 스캔 데이터 획득이 필수적이며, 확보된 스캔 데이터의 품질 및 획득 과정의 효율화를 위한 사전 계획 수립이 중요함.

○ 포천열병합발전소 내 중요 구간에 대한 스캔 데이터 획득

- 포천열병합발전소 내 중요 구간에 대한 스캔 데이터를 획득하기 위해 1차, 2차에 걸쳐 스캔 데이터 획득 실험이 수행되었으며, 각각 14곳, 21곳의 위치에서 스캔 데이터 획득을 수행함.

- 다음 <표 3-3-2>는 2018년 4월 2일에 수행된 1차 스캔 데이터 획득 실험의 상세 일정을 나타냄.

<표 3-3-2> 포천열병합발전소를 대상으로 한 1차 데이터 획득 일정

시간	일정
09:20 ~ 10:00	중앙대학교에서 포천열병합발전소로 이동
10:00 ~ 11:00	포천열병합발전소 도착 및 현장관계자와의 협의
11:00 ~ 12:10	중요 구간 선정을 위한 현장관계자와의 답사
12:10 ~ 13:20	점심 식사
13:20 ~ 16:50	중요 구간에 대한 1차 스캔 데이터 획득
17:00 ~ 18:50	포천열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-3-3>은 1차 스캔 데이터 획득 실험 중 스캔 데이터 획득 사진을 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-3-3> 포천열병합발전소 내 중요 구간에 대한 1차 스캔 데이터 획득 실험 사진
(2018.04.02 당시) (a) 중요 구간 선정을 위한 현장관계자와의 답사,
(b) 스캔 데이터 획득을 위한 레이저 스캐너 운용

- 다음 <표 3-3-3>은 2018년 4월 8일에 수행된 2차 스캔 데이터 획득 실험의 상세 일정을 나타냄.

<표 3-3-3> 포천열병합발전소를 대상으로 한 2차 데이터 획득 일정

시간	일정
08:00 ~ 09:10	중앙대학교에서 포천열병합발전소로 이동
09:10 ~ 12:10	중요 구간 선정을 위한 포천열병합발전소 현장관계자와의 협의 및 답사
12:10 ~ 13:20	점심 식사
13:20 ~ 15:20	중요 구간에 대한 2차 스캔 데이터 획득
15:20 ~ 16:30	포천열병합발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-3-4>는 2차 스캔 데이터 획득 실험 중 스캔 데이터 획득 사진을 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-3-4> 포천열병합발전소 내 중요 구간에 대한 2차 스캔 데이터 획득 실험 사진
(2018.04.08 당시) (a) 중요 구간 선정을 위한 현장관계자와의 답사,
(b) 스캔 데이터 획득을 위한 레이저 스캐너 운용

○ 신평택복합화력발전소 내 중요 구간에 대한 스캔 데이터 획득

- 신평택복합화력발전소 내 중요 구간에 스캔 데이터 획득 실험은 현장관계자와의 협의를 통해 중요 구간인 스팀터빈동 내 환수 및 보일러 시스템의 설치가 예정되어 있는 2018년 11월 중으로 결정함. 다음 <표 3-3-4>는 스캔 데이터 획득 실험의 상세 계획을 나타냄.

<표 3-3-4> 신평택복합화력발전소 내 중요 구간에 대한 스캔 데이터 획득 실험의 상세 계획

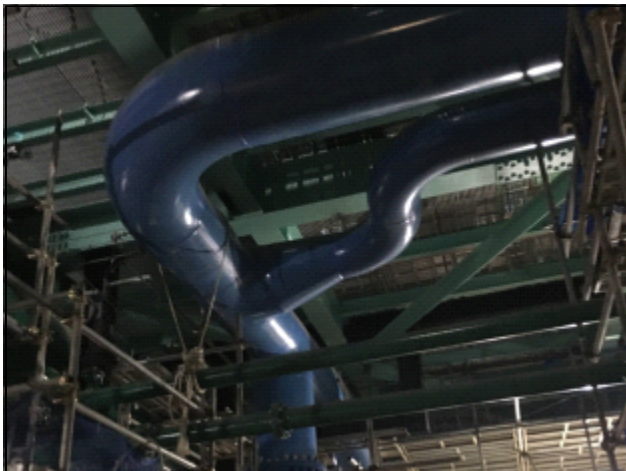
차수	일시	계획
1차	2018.11.14. (11:00~18:00)	전역 및 국소 스캔 데이터 획득
2차	2018.11.15. (09:00~15:00)	스캔 데이터 보완 획득

- 신평택복합화력발전소 내 중요 구간 (스팀 터빈동 지상 1층 열교환 시스템)에 대한 스캔 데이터를 획득하기 위해 1차, 2차에 걸쳐 스캔 데이터 획득 실험이 수행되었으며, 각각 16곳, 15곳의 위치에서 스캔 데이터 획득을 수행함. 다음 <표 3-3-5>는 2018년 11월 14일에 수행된 1차 스캔 데이터 획득 실험의 상세 일정을 나타냄.

<표 3-3-5> 신평택복합화력발전소를 대상으로 한 1차 데이터 획득 일정

시간	일정
11:20 ~ 13:00	중앙대학교에서 신평택복합화력발전소로 이동
13:00 ~ 13:20	신평택복합화력발전소 도착 및 현장관계자와의 협의
13:20 ~ 18:00	신평택복합화력발전소 중요 구간에 대한 1차 스캔 데이터 획득
18:00 ~ 20:35	신평택복합화력발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-3-5>는 1차 스캔 데이터 획득 실험 중 스캔 데이터 획득 사진을 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-3-5> 신평택복합화력발전소 내 중요 구간에 대한 1차 스캔 데이터 획득 실험 사진 (2018.11.14. 당시) (a) 스팀 터빈동 지상 1층 열교환 시스템 내 주요 배관 사진, (b) 스캔 데이터를 위한 레이저 스캐너 운용

- 다음 <표 3-3-6>은 2018년 11월 15일에 수행된 2차 스캔 데이터 획득 실험의 상세 일정을 나타냄.

<표 3-3-6> 신평택복합화력발전소를 대상으로 한 2차 데이터 획득 일정

시간	일정
09:00 ~ 10:30	중앙대학교에서 신평택복합화력발전소로 이동
10:30 ~ 11:00	신평택복합화력발전소 도착 및 현장관계자와의 협의
11:00 ~ 14:45	신평택복합화력발전소 중요 구간에 대한 2차 스캔 데이터 획득
14:45 ~ 16:10	신평택복합화력발전소에서 중앙대학교로 이동

- 다음 <그림 3-3-6>은 2차 스캔 데이터 획득 실험 중 스캔 데이터 획득 사진을 나타냄.



(a)



(b)

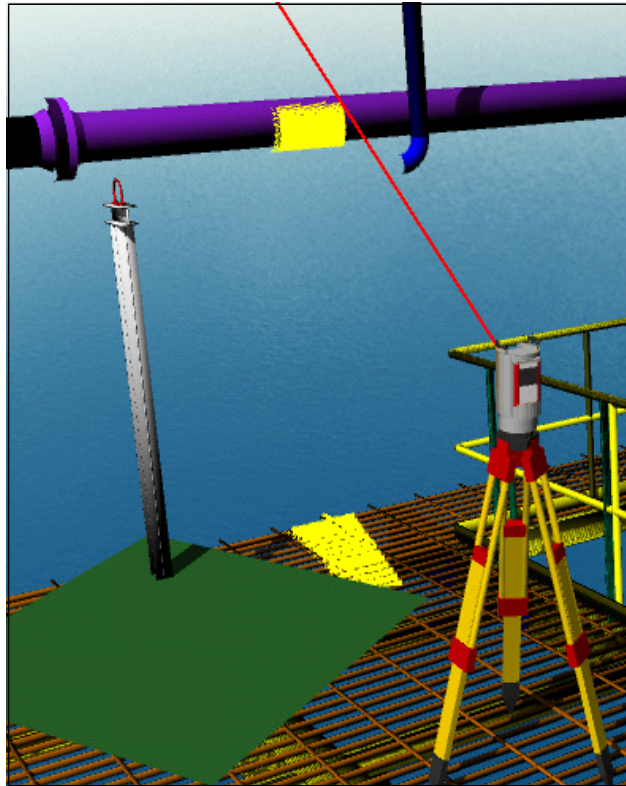
<그림 3-3-6> 신평택복합화력발전소 내 중요 구간에 대한 2차 스캔 데이터 획득 실험 사진
(2018.11.15 당시) (a) 중요 구간 선정을 위한 현장관계자와의 답사,
(b) 스캔 데이터 획득을 위한 레이저 스캐너 운용

2. 핵심성과 A 주요 연구수행 내용

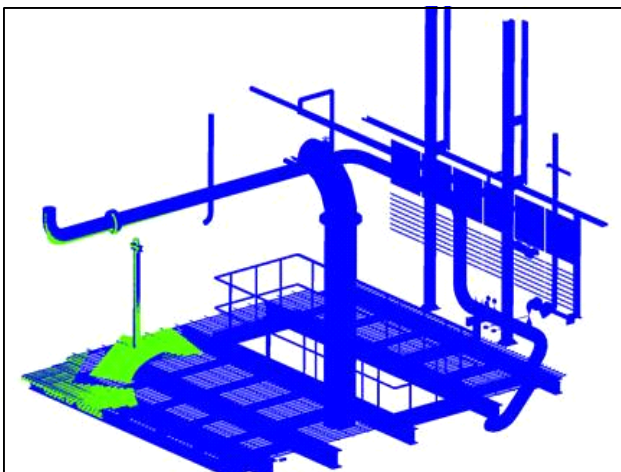
(1) 비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발

- 최적 스캔 계획 수립 기술은 경험에 의존한 스캔 계획에 따른 데이터 획득시 발생할 수 있는 데이터의 불완전성 및 획득 과정의 비효율성을 개선하기 위해 필수적으로 요구되는 기술임. 건설 현장의 공사 상황에 대해 효과적으로 스캔 데이터를 획득하기 위한 목적으로 최적 스캔 계획 수립 기술을 개발하고자 하는 시도가 있었으나, 아직까지 국내에서의 관련 기술 개발은 전무한 실정임. 뿐만 아니라, 해외에서 개발된 기술 또한 플랜트 시설과 비교할 때, 현저히 작은 규모의 단순한 단층 건축물의 외피를 대상으로 한다는 점에서 기술의 활용이 매우 제한적임.
- 1차년도에는 플랜트 시설 전역에 대한 스캔 데이터 획득을 통해 추가적인 스캔 데이터의 확보가 필요한 영역을 자동으로 계산 및 시각화하는 기술을 개발함. 또한 해당 영역에 대해 레이저 스캐너 설치 가능 여부를 자동으로 판별하고 추가 스캔 데이터 획득 방법을 결정하여 결정된 데이터 획득 방법에 따라 전역 데이터를 보완하는 기술을 개발함. 해당 스캔 계획 수립 기술을 활용하는 경우, 사용자의 주관적인 판단과 경험에 의존하는 기존 스캔 계획 수립 방식과 비교하여 상대적으로 효율적인 스캔 데이터의 획득이 가능함.
- 반면, 1차년도에 개발된 기술을 활용하기 위해서는 플랜트 시설에 대한 전역 스캔 데이터 획득이 선행되어야 함. 이에 2차년도에는 전역 스캔 데이터 획득의 효율화를 위해 확보한 3차원 설계 모델과 레이 트레이싱 알고리즘을 이용하여 대상체 스캔 커버리지를 산출 및 시각화하는 기술을 개발함. 뿐만 아니라, 비선형 기법을 이용하여 다수의 스캐너 설치 위치로부터 산출된 스캔 커버리지를 최적화함으로써 스캔 소요 시간 대비 커버리지 확대 효과를 최대화할 수 있는 기술을 개발함.
- 핵심성과 A의 최종 목표인 ‘3차원 설계 모델에 기반을 둔 최적 스캔 계획 수립 기술 개발’을 달성하기 위한 요소 기술인 ‘비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술’은 다음과 같은 과정을 통해 수행됨. 이 과정을 통해 확보된 가상 스캔 데이터를 시각화함으로써 사용자가 육안으로 가상 스캔 결과를 확인할 수 있으며, 다수의 위치에서 획득된 가상 스캔 데이터 중 필수적으로 획득이 필요한 주요 특징점 중 확보된 특징점의 수를 결과로 제공함. 초기 스캔 계획을 통해 도출된 스캔 시뮬레이션 결과를 바탕으로 스캐너 설치 위치를 추가하거나 불필요한 스캐너 설치 위치를 제외함으로써 스캔 계획을 수정할 수 있음.
 - ① 플랜트 현장 내 스캔 데이터를 획득하고자 하는 구역 선정 후, 해당 구역에 대한 3차원 설계 모델 시각화
 - ② 해당 구역 내 주요하게 정도 관리가 필요한 구성요소 (주기기, 주요 배관 등) 선정
 - ③ 해당 구성요소를 중심으로 다수의 가상 레이저 스캐너 설치 위치 설정
 - ④ 레이 트레이싱 알고리즘을 이용한 스캔 시뮬레이션 수행

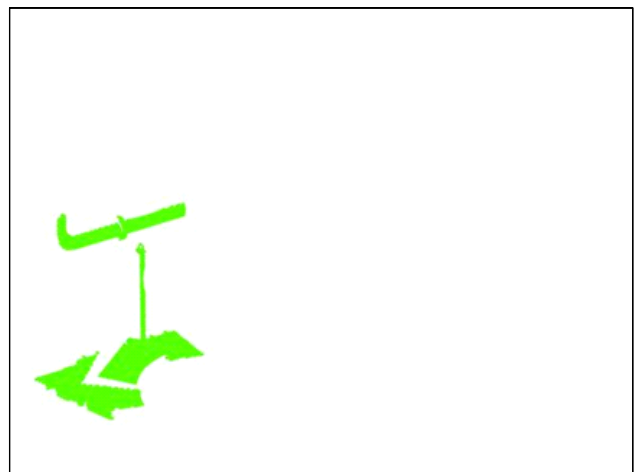
- 다음 <그림 3-3-6(i)>는 레이 트레이싱 알고리즘을 이용한 스캔 시뮬레이션 수행 화면의 일부를 나타내며, 시각화된 사용자 인터페이스 내에서 스캔 시뮬레이션을 통해 획득된 점군은 아래 그림과 같이 노란색 점으로 표시됨.
- 스캔 시뮬레이션 완료 후에 이를 통해 획득된 점군 데이터는 지정된 경로의 별도의 점군 데이터 파일로 출력되어, 정량적으로 스캔 시뮬레이션 결과를 분석하는데 활용됨 (다음 <그림 3-3-6(ii)> 참조).



<그림 3-3-6(i)> 레이 트레이싱 알고리즘을 이용한 스캔 시뮬레이션 수행 화면의 일부



(a)



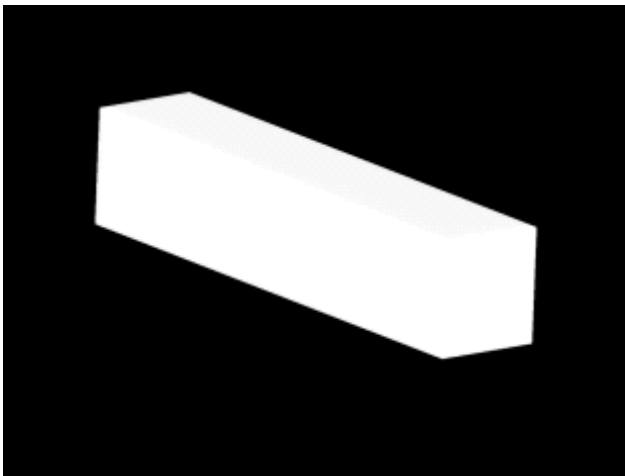
(b)

<그림 3-3-6(ii)> (a) 3차원 설계 모델 (청색)과 스캔 시뮬레이션을 통해 획득된 점군 데이터 (녹색), (b) 시뮬레이션을 통해 획득 및 출력된 점군 (ASII, xyz 파일)

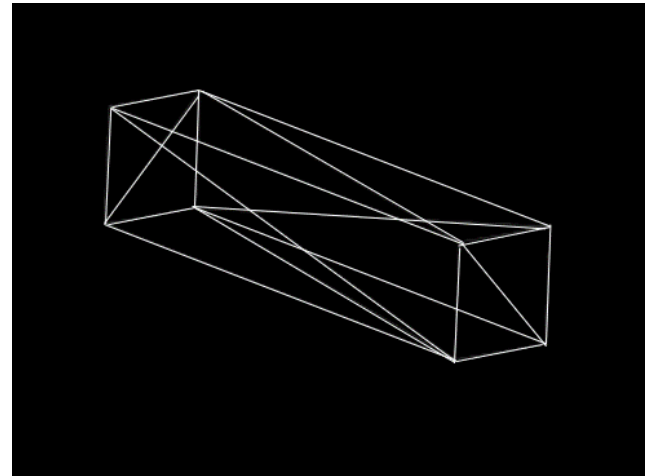
○ 수정된 스캔 계획에 따라 스캔 시뮬레이션을 재수행하여 그 결과를 분석함. 앞선 과정을 반복 수행함으로써 가장 많은 수의 특징점을 확보할 수 있는 최소의 스캐너 설치 위치를 도출하여 최적의 스캔 계획을 수립함.

○ 3차원 설계 모델로부터 주요 특징점 추출

- 3차원 모델의 표면은 다수의 정점 (Vertex)과 폴리곤 (Polygon)의 집합인 폴리곤 메쉬 (Polygon Mesh)로 표현됨. 예를 들어, 직육면체의 표면은 8개의 정점과 각 3개씩의 정점으로 이루어진 12개의 삼각형으로 구성됨. 정점과 폴리곤의 수가 많을수록 3차원 모델은 더욱 자세히 표현되나, 이를 시각화하기 위한 처리시간이 증가함. 다음 <그림 3-3-7>~<그림 3-3-9>는 각각 직육면체, 스트레이트, 엘보우에 대한 3차원 모델과 해당 모델에 대한 폴리곤 메쉬를 나타냄.

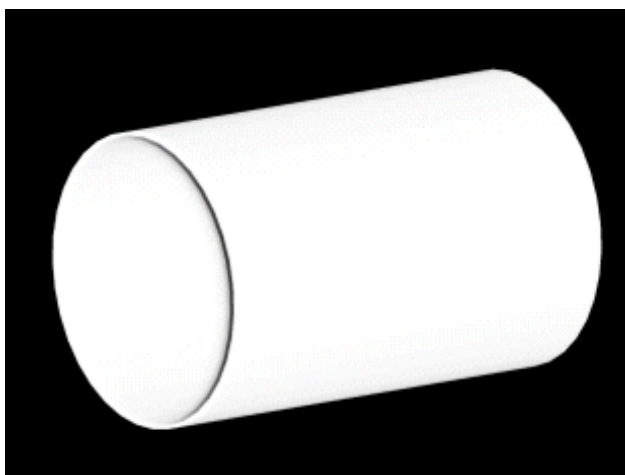


(a)

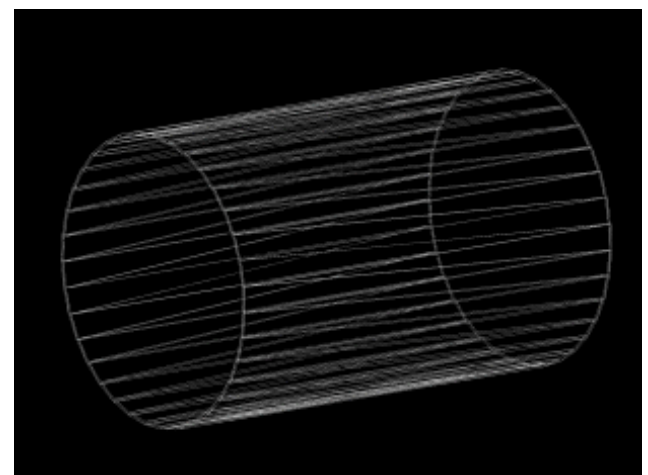


(b)

<그림 3-3-7> (a) 3차원 직육면체 모델, (b) (a)에 대한 폴리곤 메쉬

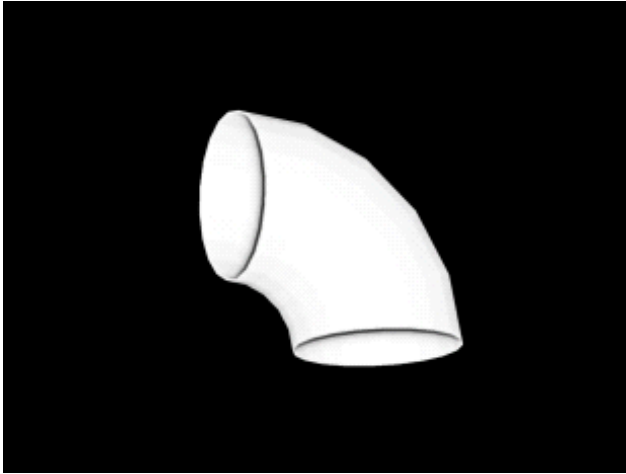


(a)

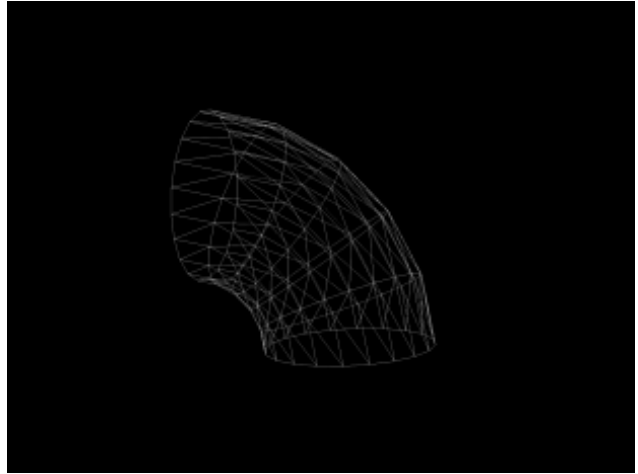


(b)

<그림 3-3-8> (a) 3차원 스트레이트 모델, (b) (a)에 대한 폴리곤 메쉬



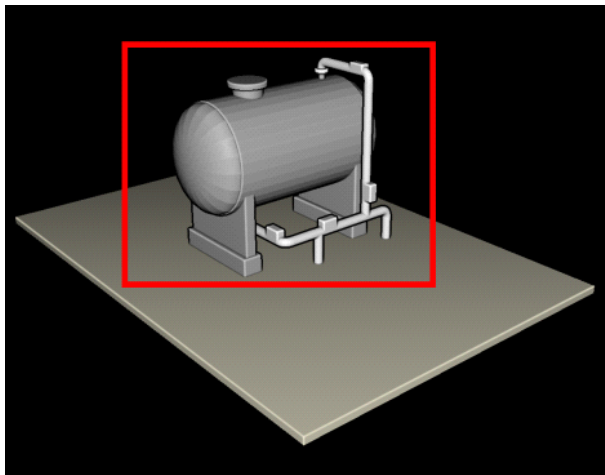
(a)



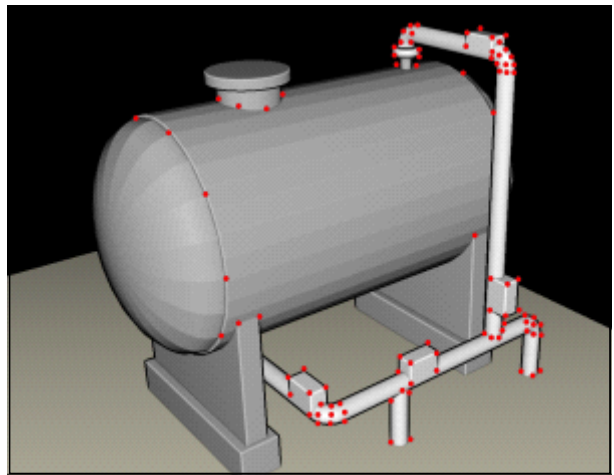
(b)

<그림 3-3-9> (a) 3차원 엘보우 모델, (b) (a)에 대한 폴리곤 메쉬

- 3차원 모델링에 사용되는 상용 소프트웨어 (Autodesk사의 3ds Max 등)에서는 3차원 모델 내 각 물체의 표면을 표현하는데 필요한 정점과 폴리곤의 개수를 조절할 수 있는 기능을 제공함. 직육면체는 8개의 정점과 각 4개씩의 정점으로 이루어진 12개의 삼각형으로 표현되며, 원기둥은 정점과 폴리곤의 개수에 따라 곡면에 대한 보다 자세한 표현이 가능함. 본 연구과제에서는 원기둥을 구성하는 정점의 수를 16개로 설정하였으며, 이를 필수적으로 획득이 필요한 주요 특징점으로 정의함. 다음 <그림 3-3-10>은 3차원 설계 모델을 개발된 소프트웨어에 입력하여 추출한 주요 특징점을 나타냄.



(a)

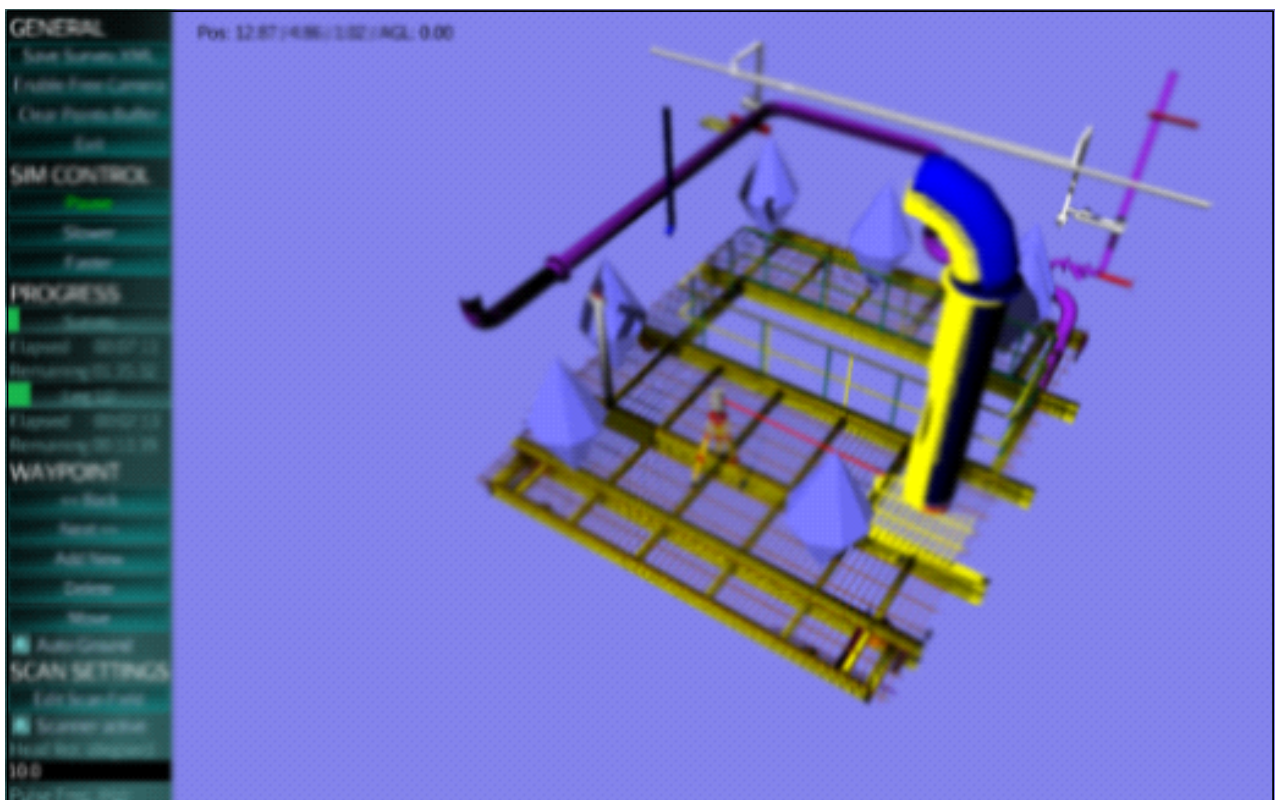


(b)

<그림 3-3-10> (a) 베셀과 배관에 대한 3차원 설계 모델, (b) (a)를 개발된 소프트웨어에 입력하여 추출한 주요 특징점 예시

○ 비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 상세

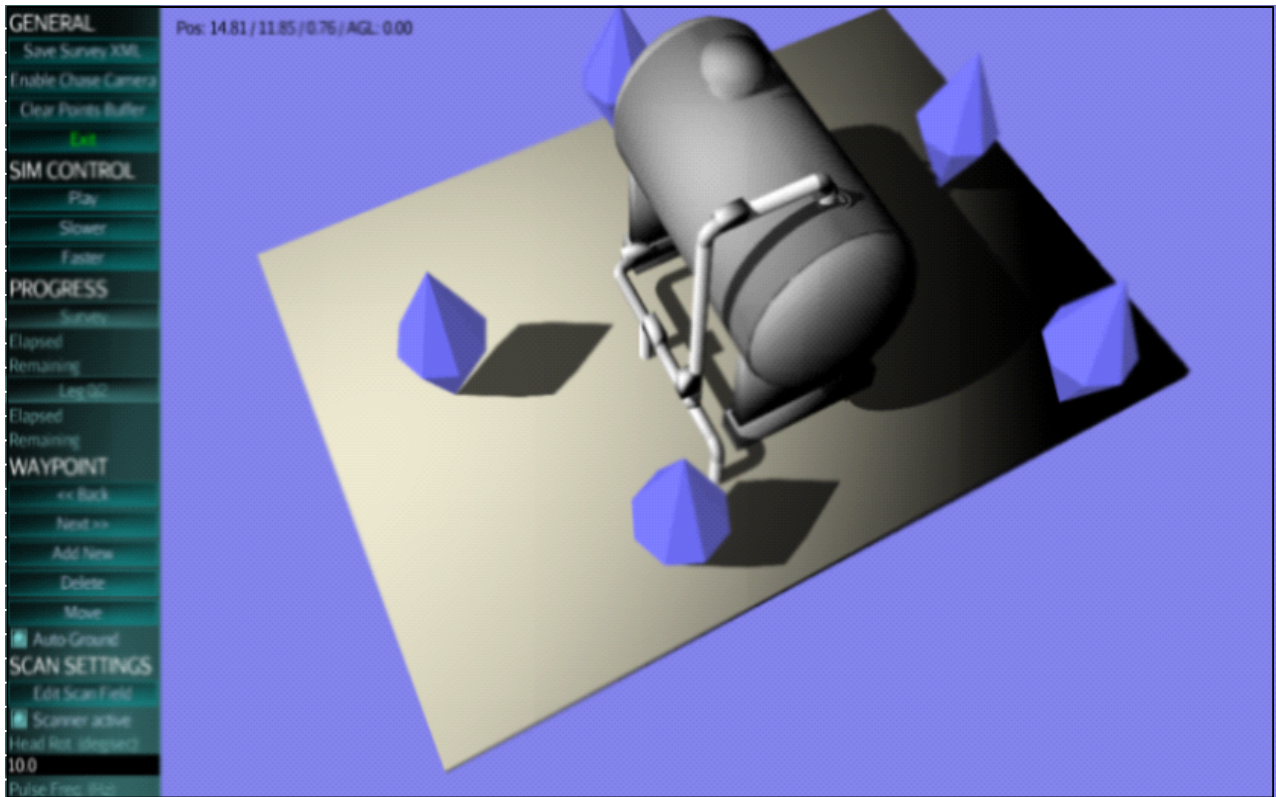
- 레이 트레이싱 알고리즘을 이용한 스캔 커버리지 산정
 - 물체의 표면은 광원으로부터 직접적으로 도달하는 빛과 주변 물체에 의해 반사된 빛에 의해 표현됨. 이러한 원리를 바탕으로 레이 트레이싱이라는 알고리즘이 개발되었으며, 주로 애니메이션과 게임 관련 산업에서 렌더링을 목적으로 활용됨. 본 연구과제에서는 플랜트 시설에 대한 3차원 설계 모델 내 가상으로 설치된 레이저 스캐너 (광원)로부터 방출되는 광선이 주요하게 정도 관리가 필요한 구성요소에 직접적으로 도달하는지 여부를 확인하기 위한 목적에서 가상으로 스캔 커버리지를 산정하는데 레이 트레이싱 알고리즘을 이용함.
 - 개발된 소프트웨어의 사용자 인터페이스는 다음의 기능을 제공하도록 구현되었으며 (개발 환경: Linux, 개발 언어: Python), 다음 <그림 3-3-11>은 해당 기능을 이용하여 선정한 다수의 스캐너 설치 위치를 나타냄. 각 스캐너 설치 위치는 소프트웨어 화면 내 3차원 마름모꼴로 표시됨.
 - ① 스캐너 설치 위치 조정
 - ② 스캔하고자 하는 영역 조정
 - ③ 선정된 스캐너 설치 위치에 대한 좌표값 저장
 - ④ 다수의 스캐너 설치 위치 지정



<그림 3-3-11> 개발된 소프트웨어의 기능을 이용하여 선정한 다수의 스캐너 설치 위치

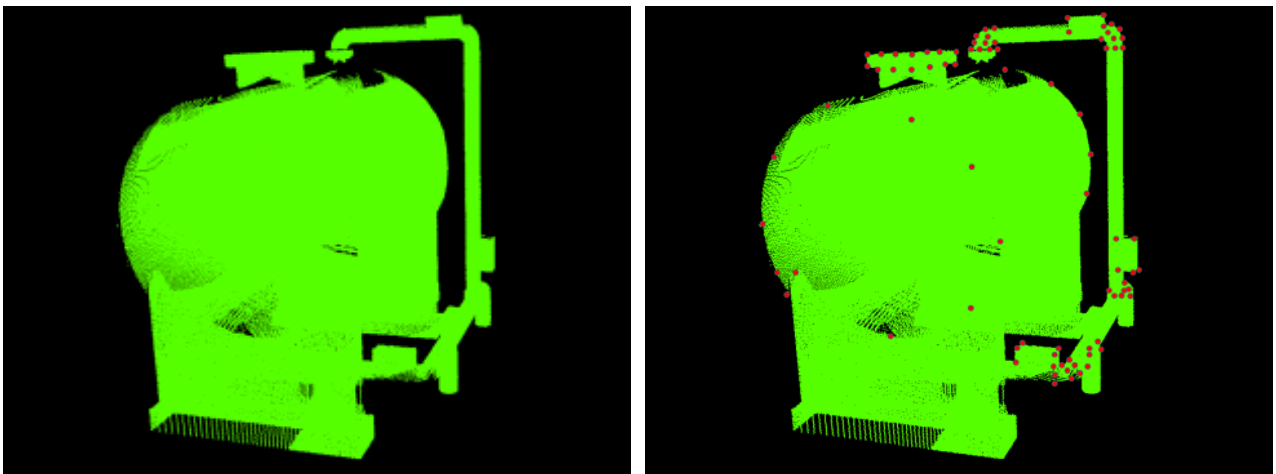
○ 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술 적용 결과

- 다음 <그림 3-3-12>는 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 이용하여 수립된 최적 스캔 계획을 시각화한 소프트웨어 화면을 나타냄.



<그림 3-3-12> 개발된 소프트웨어 화면 내 시각화된 최적 스캔 계획 수립 결과

- 다음 <그림 3-3-13>은 상기 <3-3-10>에 시각화된 최적 스캔 계획을 통해 확보된 가상 스캔 결과를 나타냄.



(a)

(b)

<그림 3-3-13> (a) 최적 스캔 계획 수립 결과에 따라 획득된 가상 스캔 결과
(b) 확보된 주요 특징점 시각화 결과

- 이와 같은 최적 스캔 계획을 통해 다음 <표 3-3-7>과 같이 15분 동안 총 60개의 주요 특징점 중 43개의 주요 특징점을 확보할 수 있음을 확인함.

<표 3-3-7> 개발된 기술을 이용하여 수립한 최적 스캔 계획에 따른 커버리지 산출 결과 요약 (가상 데이터 대상)

예상 스캔 소요 시간 (분)	확보된 주요 특징점 수/ 필수적으로 획득이 필요한 주요 특징점 수
15	43/ 60 (71.67%)

○ 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 계획 수립 (질적성과지표 A-3-①)

- 비교 우위 평가를 위해 플랜트 시설을 대상으로 레이저 스캔 계획 수립 및 획득 용역을 수행하는 레이저 스캔 용역 업체 (위프코(주), (주)지오시스템)에 재직 중이며, 4년 이상의 실무 경험을 가진 실무자를 비교 우위 평가를 위한 전문가로 선정함. 다음 <표 3-3-8>은 선정한 전문가에 대한 정보를 나타냄.

<표 3-3-8> 비교 우위 평가를 위한 전문가 (가상 데이터 대상)

이름	소속
김○○	위프코(주)
정○○	위프코(주)
박○○	(주)지오시스템

- 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가는 다음과 같이 계획함. 예상 스캔 소요 시간은 본 연구과제 수행 과정에 사용한 레이저 스캐너 (Z+F사의 5010X)의 스캔 속도를 기준으로 산정하였으며, 스캐너 설치 위치 당 스캔 소요 시간은 3분으로 간주함.

- ① 실무 경험을 바탕으로 제공된 3차원 설계 모델 내 다수의 스캐너 설치 위치 선정
- ② 선정된 위치에 대한 좌표값 저장
- ③ 레이 트레이싱 알고리즘을 이용한 스캔 시뮬레이션 수행
- ④ 스캐너 설치 위치를 이용한 예상 스캔 소요 시간 산정 및 가상 스캔 결과 내 확보된 주요 특징점 수 산정

- 전문가의 실무 경험을 바탕으로 수립된 스캔 계획에 따른 가상 스캔 결과와 개발된 기술을 통해 수립된 최적 스캔 계획에 따른 가상 스캔 결과를 비교함으로써, 스캔 소요 시간 대비 커버리지 확대 효과에 대한 비교 우위 평가를 실시함.

- 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 결과
- 다음 <표 3-3-9>는 전문가별 비교 우위 평가 결과를 요약하여 나타냄. 평가 결과, 개발된 기술을 적용하는 경우 전문가의 스캔 계획에 따른 스캔 소요 시간 대비 커버리지와 비교하여 약 2배 가량의 커버리지를 확대할 수 있는 것으로 분석됨.

<표 3-3-9> 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 결과 요약 (가상 데이터 대상)

이름	예상 스캔 소요 시간 (분)	확보된 주요 특징점 수	커버리지 확대 효과
김○○	21	30	2
정○○	30	44	1.95
박○○	24	38	1.81

○ 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술에 대한 예상 수요자 만족도 설문 (질적성과지표 A-3-②)

- 본 연구과제를 통해 개발된 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술에 대한 스캔 소요 시간 대비 커버리지 확대 효과를 검증하기 위해 개발된 기술에 대한 예상 수요자 만족도 설문을 추가 실시함.
- 개발된 기술에 대한 수요자 만족도를 검증하기 위해 레이저 스캔 용역 업체에 재직하는 실무진과 면대면 설문을 실시함. 설문을 실시하기 전 개발된 소프트웨어를 이용하여 최적 스캔 계획 수립 기술을 시연함. 다음 <그림 3-3-14>는 개발된 기술에 대한 질적성과 달성 여부를 검증하기 위해 작성한 예상 수요자 만족도 설문지를 나타냄. 설문지는 1) 현행 스캔 계획 수립 방식에 대한 만족도와 2) 개발된 기술의 만족도에 대한 의견을 수렴하기 위한 장으로 구성함. 이 중 현행 방식에 대한 만족도를 평가하기 위한 장은 개선 필요 여부, 소요 시간, 소요 비용, 효율성, 전반적인 만족도에 관한 문항으로 구성하였으며, 개발된 기술에 대한 만족도를 평가하기 위한 장은 기존 방식의 문제점 해결 가능 여부, 소요 시간, 소요 비용, 효율성, 전반적인 만족도에 관한 문항으로 구성함.

예상 수요자 만족도 설문지

[중앙대학교 첨단 건설기술 연구실]은 국토교통부 주관 '클라우드, 사물 인터넷과의 3 차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술 개발'에 대한 연구를 수행하고 있습니다. 이를 통해 개발하고자 하는 '3 차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술'에 대한 기술성숙도를 실시하였으며, 실시된 기술성숙도에 대한 의견을 수렴하고자 본 설문을 실시하게 되었습니다. 본 설문 내용은 연구 목적으로만 사용될 것이며, 귀중한 시간 내어주시어 감사합니다.

지도교수 김 창 환

조사관련 문의처: [중앙대학교 첨단 건설기술 연구실] (02) 825-5726

■ 개인정보

성명		회사명	
직급		부서명	

본 설문조사는 총 18개의 문항으로 구성되어 있습니다.

[중앙대학교 첨단 건설기술 연구실]에서 개발 중인 '3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술'에 대해, 귀하의 의견과 가장 가까운 번호를 선택하여 체크 (✓)해주시기 바랍니다.

1/2

■ 현행 스캔 계획 수립 방식

설문 내용	현재 그림이 없음	그림이 없다	그림이 있다	보통 이다	그만 한다	다소 그만 한다	매우 그만 한다
1. 현행 스캔 계획 수립 방식은 개선이 필요하다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2. 현행 스캔 계획 방식을 활용하여 클린트 시설의 레이저 스캔 데이터를 획득하는데 긴 시간이 소요된다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
3. 현행 스캔 계획 방식을 활용하여 클린트 시설의 레이저 스캔 데이터를 획득하는데 높은 비용이 소요된다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
4. 클린트 시설의 레이저 스캔 데이터 획득에 대한 현행 스캔 계획 방식의 효율성이 높다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
5. 현행 스캔 계획 방식에 대해 전반적인 만족도가 높다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

■ 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술

설문 내용	현재 그림이 없음	그림이 없다	그림이 있다	보통 이다	그만 한다	다소 그만 한다	매우 그만 한다
1. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 통해 현행 스캔 계획 방식의 문제점을 해결할 수 있다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 활용하여 클린트 시설의 레이저 스캔 데이터를 획득하는데 소요되는 시간을 단축할 수 있다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
3. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 활용하여 클린트 시설의 레이저 스캔 데이터를 획득하는데 소요되는 비용을 감소할 수 있다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
4. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술이 레이저 스캔 데이터 획득 효율화에 미치는 파급효과는 클 것이다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
5. 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 활용시 만족도가 클 것이다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

2/2

(a)

(b)

<그림 3-3-14> 개발된 기술 (핵심성과 A)에 대한 예상 수요자 만족도 설문지

(a) 표지, (b) 본문

- 설문을 위해 플랜트 시설을 대상으로 레이저 스캔 계획 수립 및 획득 용역을 수행하는 레이저 스캔 용역 업체 ((주)빌딩포인트코리아, 위프코(주), (주)지오시스템, (주)코세코)에 재직 중이며, 4년 이상의 실무 경험을 가진 실무자를 설문 대상으로 선정함. 다음 <표 3-3-10>은 설문 대상자에 대한 정보를 나타냄.

<표 3-3-10> 개발된 기술 (핵심성과 A)에 대한 예상 수요자 만족도 설문 대상자 정보

이름	소속	이름	소속
김○○	(주)빌딩포인트코리아	정○○	위프코(주)
윤○○	(주)빌딩포인트코리아	지○○	(주)코세코
김○○	위프코(주)	박○○	(주)지오시스템
김○○	위프코(주)	박○○	(주)코세코

○ 개발된 기술에 대한 예상 수요자 만족도 설문 결과 요약

- 다음 <표 3-3-11>은 개발된 기술에 대한 예상 수요자 (레이저 스캔 계획 수립 및 획득 용역을 수행하는 실무자) 만족도 설문 결과를 요약하여 나타냄. 설문 결과, 현행 스캔 계획 수립 방식에 대한 만족도는 낮은 것으로 나타났으며, 이는 현행 방식에 대한 개선이 필요함을 의미함. 반면, 개발된 기술에 대해서는 기존 방법에 비해 소요 비용을 감소할 수 있는 것으로 응답하였으며, 수요자 만족도에 대한 평균 평점 분석을 통해 질적성과지표의 목표치 (5점 이상)를 달성함을 확인함. 이를 통해 개발된 기술은 시공 중인 플랜트 현장에서 정도 관리를 목적으로 스캔 데이터를 확보하는 과정을 효율화하는데 기여할 것으로 기대됨.

<표 3-3-11> 개발된 기술의 예상 수요자 만족도 설문 결과 요약

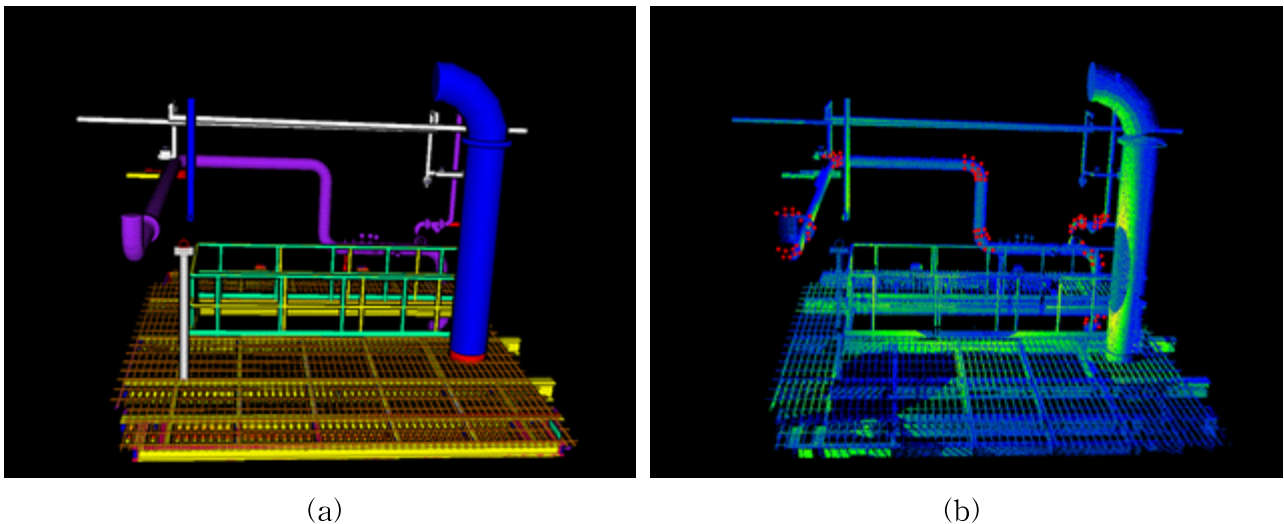
번호	항목	평균점수 (1:전혀 그렇지 않다~7:매우 그렇다)
1	현행 스캔 계획 수립 방식은 개선이 필요하다.	5.88
2	현행 스캔 계획 방식에 대해 전반적인 만족도가 높다.	5.88
3	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 활용하여 플랜트 시설의 스캔 데이터를 획득하는데 소요되는 비용을 감소할 수 있다.	5.75
4	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술이 스캔 데이터 획득 효율화에 미치는 파급효과는 클 것이다.	6
5	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술을 활용시 만족도가 클 것이다.	5.75

(2) 테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가

○ 개발된 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해 테스트베드로부터 확보한 3차원 설계 모델을 대상으로 개발된 기술을 적용함으로써 현장 적용성을 평가함.

○ 테스트베드 적용 결과를 바탕으로 한 개발 기술 평가

- 다음 <그림 3-3-15(a)>는 포천열병합발전소 내 응축기 시스템에 대한 3차원 설계 모델을 나타내며, <그림 3-3-15(b)>는 개발된 기술을 적용하여 수립한 최적 스캔 계획에 따라 획득된 가상 스캔 결과 및 확보된 주요 특징점 시각화 결과를 나타냄.



<그림 3-3-15> (a) 포천열병합발전소 3차원 설계 모델의 일부, (b) 최적 스캔 계획에 따라 획득된 가상 스캔 결과 및 확보된 주요 특징점 시각화 결과

○ 이와 같은 최적 스캔 계획을 통해 다음 <표 3-3-12>와 같이 27분 동안 총 62개의 주요 특징점 중 41개의 주요 특징점을 확보할 수 있음을 확인함. 해당 주요 특징점의 개수는 스캔 데이터를 이용한 역설계가 가능한 수준으로, 핵심성과 B 달성을 위해 개발된 기술을 적용하는데 있어 요구되는 스캔 데이터의 질에 부합함.

<표 3-3-12> 개발된 기술을 이용하여 수립한 최적 스캔 계획에 따른 커버리지 산출 결과 요약 (현장 데이터 대상)

예상 스캔 소요 시간 (분)	확보된 주요 특징점 수/ 필수적으로 획득이 필요한 주요 특징점 수
27	41/ 62 (66.13%)

○ 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 계획 수립 (질적성과지표 A-4-①)

- 비교 우위 평가를 위해 플랜트 시설을 대상으로 레이저 스캔 계획 수립 및 획득 용역을 수행하는 레이저 스캔 용역 업체 (위프코㈜, ㈜지오시스템)에 재직 중이며, 4년 이상의 실무 경험을 가진 실무자를 비교 우위 평가를 위한 전문가로 선정함. 다음 <표 3-3-13>은 선정된 전문가에 대한 정보를 나타냄. 비교 우위 평가는 앞서 가상 데이터를 대상으로 한 비교 우위 평가와 동일한 절차를 거침.

<표 3-3-13> 비교 우위 평가를 위한 전문가 (현장 데이터 대상)

이름	소속
김○○	위프코㈜
정○○	위프코㈜
박○○	㈜지오시스템

- 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가는 앞서 가상 데이터를 대상으로 한 비교 우위 평가와 동일한 절차를 거침. 다만, 본 평가는 가상 데이터가 아닌 실제 현장 (포천열병합발전소 내 응축기 시스템) 데이터를 대상으로 비교 우위 평가를 실시했다는 점에서 차이가 있음.

○ 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 결과 (질적성과지표 A-4-②)

- 다음 <표 3-3-14>는 전문가별 비교 우위 평가 결과를 요약하여 나타냄. 평가 결과, 개발된 기술을 적용하는 경우 전문가의 스캔 계획에 따른 스캔 소요 시간 대비 커버리지와 비교하여 약 2배 가량의 커버리지를 확대할 수 있는 것으로 분석됨.

<표 3-3-14> 전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 결과 요약 (현장 데이터 대상)

이름	예상 스캔 소요 시간 (분)	확보된 주요 특징점 수	커버리지 확대 효과
김○○	30	23	2
정○○	33	21	2.41
박○○	33	28	1.79

- 다음 <표 3-3-15>는 과제 수행 전과 비교한 기술 수준 향상 정도 측정을 위해 선정한 설문 대상자에 대한 정보를 나타냄.

<표 3-3-15> 개발된 기술 (핵심성과 A)에 대한 기술 수준 향상 정도 설문 대상자 정보

이름	소속
김○○	위프코(주)
정○○	위프코(주)
박○○	(주)지오시스템

- 다음 <표 3-3-16>과 <표 3-3-17>은 개발된 기술과 최신 소프트웨어와의 기술 수준 향상 정도 및 선진국과의 기술 능력 격차 축소 정도 측정을 위한 설문 결과를 나타냄. 분석 결과, 기술 수준 향상 정도 및 선진국과의 기술 능력 격차 축소 정도는 각각 평균 147% 및 153%로 나타났으며, 설문에 응답한 전문가들은 과제 시작 전과 비교한 기술 수준 향상 효과와 선진국과의 기술 격차 축소 효과가 높은 것으로 평가함.

<표 3-3-16> 기술 수준 향상 정도 측정 결과 요약

설문 대상자	기술 수준 향상 정도 (%)									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
김○○										
정○○										
박○○										

<표 3-3-17> 선진국과의 기술 능력 격차 축소 정도 측정 결과 요약

설문 대상자	선진국과의 기술 능력 격차 축소 정도 (%)									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
김○○										
정○○										
박○○										

3. 핵심성과 B 주요 연구수행 내용

(1) 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술

- 국토교통부 「산업·환경설비공사 표준시방서 (2012년도 개정), “제4편 제6장 발전설비건물배관공사”」 내 준공도면 제출 규정에 따르면, 플랜트 시설 내 기기, 배관, 밸브 및 제어기기에 대한 설치 상태를 정확히 기록하도록 규정함. 이에 본 연구과제는 3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 비교를 통해 구성요소별 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과를 도출하고, 이를 기반으로 정확히 3차원 설계 모델을 갱신하는 기술을 개발함 (개발 환경: Windows, 개발 언어: C++). 개발 과정에 예상 수요자 의견을 반영하기 위해 구성요소별 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 방식에 대한 설문을 실시하였으며, 설문 분석 결과를 반영함. 또한 개발된 기술의 설계 모델 갱신 오차를 측정하기 위해 가상 데이터를 활용하여 Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정을 실시함.

3.1 현장품질관리

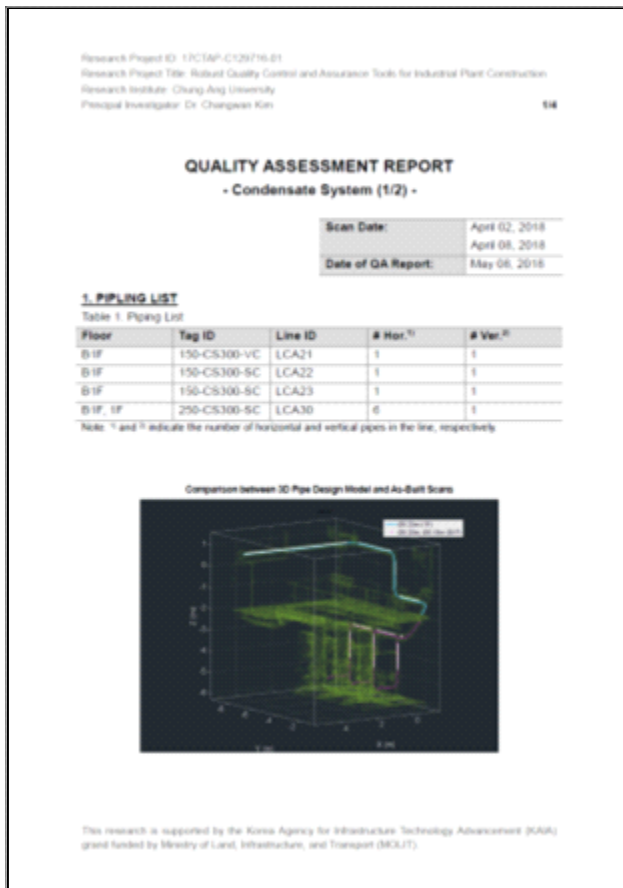
(중간 생략)

- (4) 수급인은 발주자가 영구보관할 수 있는 수급인 지입관련 기자재의 준공도면을 제출토록 하며, 여기에는 현장 설치와 설계도면과의 전반적이고 구체적인 차이점이 정확히 기록되어야 한다.

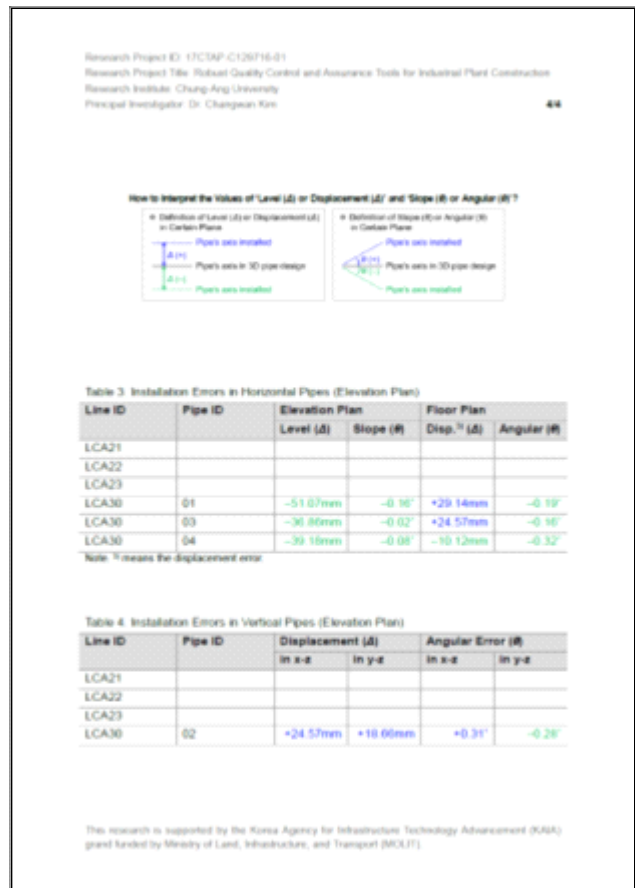
(이하 생략)

○ 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 방식에 대한 예상 수요자 만족도 설문 (질적성과지표 B-3-①)

- 개발된 기술에 대한 수요자 만족도를 검증하기 위해 시공 중인 플랜트 현장에 방문하여 시공오차 측정 및 3차원 설계 모델 갱신을 담당하는 실무자 (발주처 및 시공사)와의 면대면 설문을 실시함. 설문을 실시하기 전 개발된 소프트웨어를 이용하여 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화를 포함한 자동화된 정도 관리 기술을 시연함. 다음 <그림 3-3-16>은 현장에서 시연한 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과의 일부를 나타냄.



(a)



(b)

<그림 3-3-16> 시공 허용오차 범위 만족도 검토 결과 보고서

(a) 각 객체 별 시공오차 분석 결과 요약 예시, (b) 수직 및 수평 시공오차에 대한 예시

- 다음 <그림 3-3-17>은 개발된 기술에 대한 질적성과 달성 여부를 검증하기 위해 작성한 예상 수요자 만족도 설문지를 나타냄. 설문지는 1) 기존 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 모델 갱신 방법에 대한 만족도와 2) 개발된 기술의 만족도에 대한 의견을 수렴하기 위한 장으로 구성함. 이 중 기존 방법에 대한 만족도를 평가하기 위한 장은 개선 필요 여부, 소요 시간, 소요 비용, 정확성, 전반적인 만족도에 관한 문항으로 구성하였으며, 개발된 기술에 대한 만족도를 평가하기 위한 장은 기존 방법의 문제점 해결 가능 여부, 소요 시간, 소요 비용, 정확성, 전반적인 만족도에 관한 문항으로 구성함.

예상 수요자 만족도 설문지

[중앙대학교 첨단 건설기술 연구실]은 국토교통부 주관 '플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 검토 관리 기술 개발'에 대한 연구를 수행하고 있습니다. 이를 통해 개발하고자 하는 '시공 오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술'에 대한 기술사항을 실시하였으며, 실시된 기술사항에 대한 의견을 수렴하고자 본 설문지를 실시하게 되었습니다. 본 설문 내용은 연구 목적으로만 사용될 것이며, 귀중한 시간 내어주셔서 감사합니다.

지도교수 김 장 한

조사관련 문의처: [중앙대학교 첨단 건설기술 연구실] 02) 825-6726

■ 개인정보

성명		직사명	
직급		부서명	

본 설문조사는 총 10개의 문항으로 구성되어 있습니다.

[중앙대학교 첨단 건설기술 연구실]에서 개발 중인 '시공 오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술'에 대해,

위하의 의견과 가장 가까운 번호를 선택하여 체크 (✓)해주시기 바랍니다.

1/2

■ 기존 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법

질문 내용	전혀 그렇지 않다	그렇지 않다	약간 그렇다	보통	약간 그렇다	그렇다	전혀 그렇다
1. 기존 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법을 개선이 필요하다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2. 기존 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법을 활용하여 3차원 설계 모델을 갱신하는데 긴 시간이 소요된다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
3. 기존 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법을 활용하여 3차원 설계 모델을 갱신하는데 높은 비용이 소요된다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
4. 기존 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법의 정확성이 높다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
5. 기존 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법에 대해 전반적인 만족도가 높다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

■ 자동화된 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술

질문 내용	전혀 그렇지 않다	그렇지 않다	약간 그렇다	보통	약간 그렇다	그렇다	전혀 그렇다
1. 자동화된 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술을 통해 기존 방법의 문제점을 해결할 수 있다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2. 자동화된 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술을 활용하여 3차원 설계 모델을 갱신하는데 소요되는 시간을 단축할 수 있다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
3. 자동화된 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술을 활용하여 3차원 설계 모델을 갱신하는데 소요되는 비용을 감소할 수 있다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
4. 자동화된 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술이 검토 관리 효율화에 미치는 효과는 큰 것이다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
5. 자동화된 시공 오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 활용시 만족도가 큰 것이다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

2/2

(a)

(b)

<그림 3-3-17> 개발된 기술 (핵심성과 B)에 대한 예상 수요자 만족도 설문지

(a) 표지, (b) 본문

- 다음 <표 3-3-18>은 설문 대상자에 대한 정보를 나타냄.

<표 3-3-18> 개발된 기술의 예상 수요자 만족도 설문 대상자

이름	소속	이름	소속
권○○	한국서부발전(주)	박○○	나래에너지서비스(O&M)
손○○	한국서부발전(주)	곽○○	GS건설
한○○	한국서부발전(주)	남○○	삼성물산
박○○	포스코건설	이○○	삼성물산

○ 개발된 기술에 대한 예상 수요자 만족도 설문 결과 요약

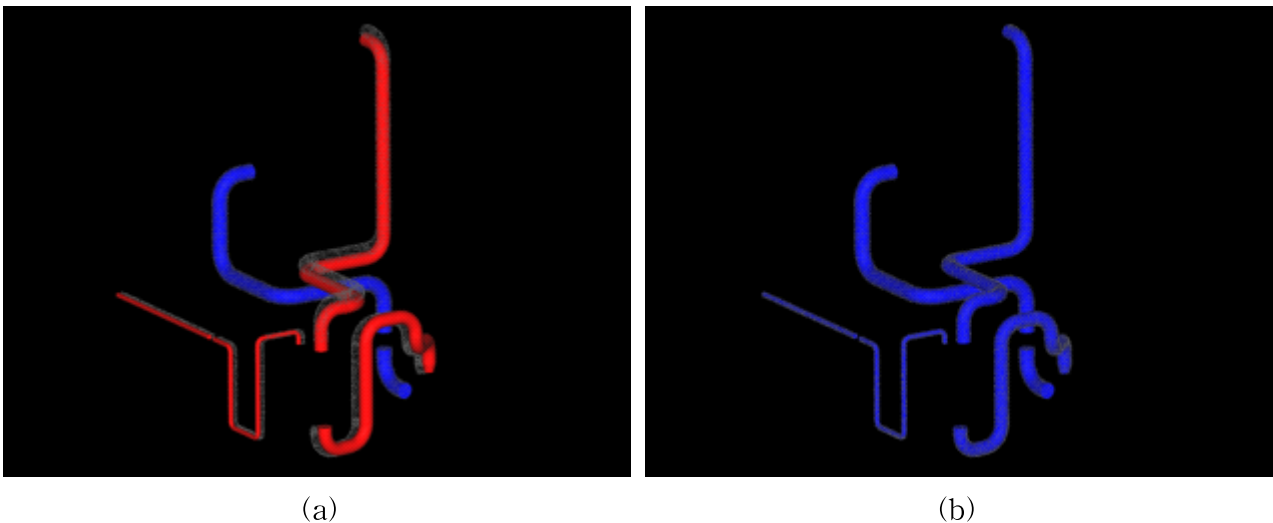
- 다음 <표 3-3-19>는 개발된 기술에 대해 총 4명의 예상 수요자 (시공오차 측정 및 3차원 설계 모델 갱신을 담당하는 실무자) 만족도 설문 결과를 요약하여 나타냄. 설문 결과, 기존의 방법에 대한 정확성 및 만족도는 보통 이상으로 나타남. 개발된 기술에 대해서는 기존 방법에 비해 소요 시간 및 비용을 감소할 수 있는 것으로 응답하였으며, 개발된 기술 활용시 만족도는 높은 편인 것으로 나타남.

<표 3-3-19> 개발된 기술의 현장 적용성을 평가하기 위한 설문 결과 요약

번호	항목	평균점수 (1:전혀 그렇지 않다~7:매우 그렇다)
1	기존 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법의 정확성이 높다.	5
2	기존 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 방법에 대해 전반적인 만족도가 높다.	5
3	자동화된 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술을 활용하여 3차원 설계 모델을 갱신하는데 소요되는 시간을 단축할 수 있다.	6
4	자동화된 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술을 활용하여 3차원 설계 모델을 갱신하는데 소요되는 비용을 감소할 수 있다.	5.75
5	자동화된 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 활용시 만족도가 클 것이다.	5.75

○ 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 오차 범위 측정 결과 (질적성과지표 B-3-②)

- 개발된 기술의 설계 모델 갱신 오차를 측정하기 위해 생성한 가상 데이터로부터 측정된 시공오차를 반영하여 3차원 설계 모델을 갱신함. 다음 <그림 3-3-18>은 단위성과 B-2에서 도출된 구성요소별 위치 이동, 설치 각도, 규격 변경 여부 판별 결과와 시공오차를 반영하여 갱신한 3차원 설계 모델을 나타냄. 분석 결과, 설계 모델 갱신 오차는 변경 여부 판별 오차와 동일하게 1% 이내의 오차를 보였으며, 이를 통해 해당 질적성과지표의 목표치 (오차 범위 5% 이내)를 달성함을 확인함.



<그림 3-3-18> 3차원 설계 모델 갱신 결과

(a) 시공 허용 범위 만족도 검토 결과, (b) 설계 모델 갱신 결과

(2) 테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가 (질적성과지표 B-4-①, ②)

- 개발된 기술의 현장 적용성을 평가하기 위해 테스트베드로부터 획득한 스캔 데이터를 대상으로 개발된 기술을 적용함으로써, 도출된 결과와 기존 방법을 통해 측정된 시공오차 측정 결과와의 비교를 통해 비교 우위를 평가하였으며, 해당 결과를 바탕으로 기술 수준 향상 정도를 측정함. 이를 위해 포천열병합발전소 내 응축기 시스템을 대상으로 확보 및 획득한 데이터를 대상으로 기존 시공오차 측정 방법과의 비교 우위 평가를 진행함. 기술 수준 향상 정도를 측정하기 위한 설문은 시공오차 측정 관련 최신 소프트웨어인 ClearEdge3D사의 Verity에 대한 활용 경험이 있는 실무자를 대상으로 실시함.

○ 전문가의 시공오차 분석 결과와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 계획 수립

- 플랜트 시공 현장에서 수행되는 현행 시공오차 측정 방법을 파악하기 위해 테스트베드에 방문하여 시공오차 측정을 담당하는 실무자와의 인터뷰를 진행함. 인터뷰 결과, 현행 방법에서는 관리자가 줄자 및 수평계를 이용하여 배관의 구성요소별 위치 이동, 설치 각도, 규격 변경 여부를 직접 측정하여 시공오차를 분석함. 이에 비교 우위 평가는 테스트베드 내 대상 구역에서 줄자 및 수평계를 이용하여 배관의 구성요소별 시공오차를 측정한 결과와 개발된 기술을 적용하여 도출된 결과를 비교하는 것으로 계획함.

- 전문가의 시공오차 분석 결과와 개발된 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가 결과
- 다음 <그림 3-3-19>는 포천열병합발전소 내 시공오차 측정 대상 구역을 나타냄.



(a) (b)
 <그림 3-3-19> 포천열병합발전소 내 응축기 시스템
 (a) 대상 구역의 일부 사진, (b) 시공오차 측정 영역

- 다음 <표 3-3-20>은 상기 <그림 3-3-19>에 나타난 대상 구역에 대해 실제 현장에서 수행되는 시공오차 측정 방법을 통해 측정한 결과와 개발된 기술을 적용하여 도출된 결과를 요약하여 나타냄. 현행 방법을 활용하여 시공오차 측정에 소요된 시간은 배관의 구성요소 (스트레이트, 엘보우 등)별 위치 이동, 설치 각도, 길이 측정 및 도면 내 측정치 기록에 소요된 총 시간을 나타냄. 개발된 기술을 적용한 시공오차 측정 소요 시간은 해당 구간에 대한 스캔 데이터 획득, 처리에 소요된 총 시간을 나타냄. 비교 결과, 개발된 기술을 적용하는 경우 시공오차 측정에 현행 방법보다 짧은 시간이 소요된 것으로 나타남. 이를 통해 개발된 기술은 시공 중인 플랜트 현장에서 정도 관리에 대한 업무를 객관화, 효율화하는데 기여할 것으로 기대됨.

<표 3-3-20> 현행 시공오차 측정 방식과 개발 기술의 적용 결과 비교

측정 대상 태그	구성요소	현행 방식을 활용한 시공오차 측정 소요 시간	개발 기술을 활용한 시공오차 측정 소요 시간
250-CS300-SC	스트레이트 - 01	3분 22초	5분 40초
	스트레이트 - 01	6분 12초	
	엘보우 - 01	1분 32초	
	엘보우 - 02	1분 45초	
	엘보우 - 03	3분 20초	
	엘보우 - 04	4분 22초	
합계		20분 33초	5분 40초

○ 개발된 기술의 테스트베드 적용 결과 기반 기술 수준 향상 정도 측정 결과

- 개발된 기술의 테스트베드 적용 결과를 기반으로 기술 수준 향상 정도 측정을 위한 설문을 실시함. 해당 설문은 개발된 기술과 시공오차 관리 관련 최신 소프트웨어를 테스트베드를 대상으로 확보 및 획득한 데이터에 적용하여 비교함으로써, 기술 선진도 및 효율성에 대한 의견을 수렴하기 위한 장으로 구성함. 다음 <표 3-3-21>은 설문 대상자에 대한 정보를 나타냄.

<표 3-3-21> 개발된 기술 (핵심성과 A)에 대한 기술 수준 향상 정도 설문 대상자 정보

이름	소속
김○○	위프코(주)
정○○	위프코(주)
박○○	(주)지오시스템

- 다음 <표 3-3-22>와 <표 3-3-23>은 개발된 기술과 최신 소프트웨어와의 기술 효율성 (정확성) 개선도 및 선진도 비교 설문 결과를 나타냄. 분석 결과, 기술 효율성 개선도 및 선진도 각각 평균 113% 및 107%로 나타났으며, 설문에 응답한 전문가들은 과제 시작 전과 비교한 기술 효율성 개선 효과와 선진국과의 기술 격차 축소 효과가 높은 것으로 평가함.

<표 3-3-22> 기술 효율성 (정확성) 개선도 측정 결과 요약

설문 대상자	기술 효율성 (정확성) 개선도 (%)									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
박○○										
김○○										
정○○										

<표 3-3-23> 기술 선진도 측정 결과 요약

설문 대상자	기술 선진도 (%)									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
박○○										
김○○										
정○○										

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제1절 연구개발 목표 달성도

1. 연차별 연구개발 목표 달성도

가. 1차년도

○ 본 연구과제의 최종목표를 달성하기 위해 수행한 1차년도 연구개발 수행 진도율은 다음 <표 4-1-1>과 같음.

<표 4-1-1> 1차년도 연구개발 수행 진도율

핵심 성과	연구목표	세부 연구내용	연구개발기간 ('17.04~'17.12)										진도율 (%)
			04	05	06	07	08	09	10	11	12		
A	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 기술 개발										100	
		3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 오차 범위										100	
	국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 오차 범위										100	
		영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 오차 범위										100	
B	3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	3차원 점군 데이터 감소 기술 오차 범위										100	
		스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 오차 범위										100	
	플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발	구성요소별 위치 이동, 설치 각도 변경 여부 판별 기술 개발										100	
		구성요소별 규격 준수 여부 판별 기술 개발										100	

※ ■■■■: 당초계획, ■■■■: 실적

○ 본 연구과제의 최종목표를 달성하기 위해 수행한 2차년도 연구개발 수행 진도율은 다음 <표 4-1-2>와 같음.

<표 4-1-2> 2차년도 연구개발 수행 진도율

핵심 성과	연구목표	세부 연구내용	연구개발기간 ('18.01~'18.12)												진도율 (%)
			01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
A	비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발	커버리지를 고려한 최적 스캔 횟수/위치 산정 기술 개발	■	■	■	■	■	■							100
		최적 스캔 계획 (위치, 이동 경로 등) 시각화 기술 개발			■	■	■	■	■	■					100
	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립	■	■											100
		해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완				■	■	■	■	■	■	■	■	■	100
B	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 개발	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 기술 개발	■	■	■	■									100
		시공오차 검토 결과 반영을 통한 설계 모델 갱신 기술 개발					■	■	■	■	■	■	■		100
	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	시공오차 분석 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립	■	■	■	■									100
		해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완				■	■	■	■	■	■	■	■	■	100

※ ■■■■: 당초계획, ■■■■: 실적

2. 핵심성과별 연구개발 목표 달성도

가. 핵심성과 A: 3차원 설계 모델에 기반을 둔 최적 스캔 계획 수립 기술 개발

○ 본 연구과제의 핵심성과 A에 대한 연차별 연구개발 목표의 달성도는 다음 <표 4-1-3>과 같음.

<표 4-1-3> 핵심성과 A에 대한 연차별 연구개발 목표의 달성도

연차	연구목표	주요 연구내용	달성도 (%)
1차년도	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	(1) 전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 기술 개발	100
		(2) 3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 기술 개발	100
	국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	(1) 3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 기술 개발	100
		(2) 영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 기술 개발	100
2차년도	비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술 개발	(1) 스캔 커버리지 목적 달성을 위한 최적 스캔 횟수/위치 산정 기술 개발	100
		(2) 최적 스캔 계획 (위치, 이동 경로, 예상 스캔 커버리지) 시각화 기술 개발	100
	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	(1) 3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립	100
		(2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완	100

나. 핵심성과 B: 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토를 통한 모델 갱신 기술 개발

○ 본 연구과제의 핵심성과 B에 대한 연차별 연구개발 목표의 달성도는 다음 <표 4-1-4>와 같음.

<표 4-1-4> 핵심성과 A에 대한 연차별 연구개발 목표의 달성도

연차	연구목표	주요 연구내용	달성도 (%)
1차년도	3차원 설계 모델과 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	(1) 스캔 데이터 감소 기술 개발	100
		(2) 스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 기술 개발	100
	플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술 개발	(1) 구성요소별 위치 이동 및 설치 각도 (수직/수평) 변경 여부 판별 기술 개발	100
		(2) 구성요소별 규격 준수 여부 판별 기술 개발	100
2차년도	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술 개발	(1) 시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 시각화 기술 개발	100
		(2) 시공오차 검토 결과 반영을 통한 3차원 설계 모델 자동 갱신 기술 개발	100
	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	(1) 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술의 현장 적용성 평가 계획 수립	100
		(2) 해당 기술의 테스트베드 적용 및 개발 기술 평가/보완	100

제2절 연구개발 성과지표 달성도

1. 1차년도 성과지표 달성도

○ 본 연구과제의 1차년도 연구수행기간 동안의 질적성과 성과지표 달성도는 다음 <표 4-2-1>과 같음.

<표 4-2-1> 1차년도 질적성과 성과지표 달성도

단위성과		질적성과지표		목표수준		측정방법	검증방법
				목표치	달성치		
A-1	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	①	전역 스캔 데이터의 표면 점밀도 분석 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
		②	3차원 설계 모델 데이터의 표면 곡률 분석 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
A-2	국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	①	3차원 설계 모델 기반 레이저 스캐너 설치 가능 영역 계산 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
		②	영상 정보를 이용한 국소 데이터 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 데이터 보완 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
B-1	3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	①	3차원 점군 데이터 감소 기술 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
		②	스캔 데이터 내 플랜트 시설 구성요소 인식 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
B-2	플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술	①	구성요소별 위치 이동, 설치 각도 변경 여부 판별 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
		②	구성요소별 규격 준수 여부 판별 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용

○ 본 연구과제의 1차년도 연구수행기간 동안의 양적성과 성과지표 달성도는 다음 <표 4-2-2>와 같음.

<표 4-2-2> 1차년도 양적성과 성과지표 달성도

단위성과		양적성과	목표 건수	달성건수	달성도 (%)
A-1	전역 스캔 데이터에 대한 추가 확보 영역 계산	소프트웨어 등록	1	1	100
A-2	국소 데이터 추가 획득 및 전역 데이터와의 정합을 통한 스캔 데이터 보완	국내 특허 출원	1	1	100
		국내 학술회의 발표	-	1 (추가 달성*)	-
		국내 학술단체 수상 실적	-	1 (추가 달성*)	-
B-1	3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 비교를 위한 전처리 기술	소프트웨어 등록	1	1	100
		국내 학술회의 발표	-	1 (추가 달성*)	-
B-2	플랜트 시설 구성요소별 시공 허용오차 범위 만족도 검토 기술	국내 특허 출원	1	1	100
		소프트웨어 등록	1	1	100

※ 추가 달성*이란, 협약 당시 연구개발계획서를 기준으로 최종목표를 달성하기 위해 연차별로 설정한 정량적 성과목표에는 포함되어 있지 않으나, 당해연차 연구기간 내 본 연구진의 노력을 통해 추가로 달성한 성과지표를 의미함.

2. 2차년도 성과지표 달성도

가. 2차년도

○ 본 연구과제의 2차년도 연구수행기간 동안의 질적성과 성과지표 달성도는 다음 <표 4-2-3>과 같음.

<표 4-2-3> 2차년도 질적성과 성과지표 달성도

단위성과		질적성과지표		목표수준		측정방법	검증방법
				목표치	달성치		
A-3	비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술	①	스캔 소요 시간 대비 커버리지 확대 효과	비교 우위	약 2배	전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 해당 기술 적용 결과와의 비교	가상 데이터 생성 및 적용
		②	예상 수요자 만족도	5점 이상	5.9점	최적 스캔 계획 시각화 결과에 대한 예상 수요자 만족도 설문 (7점 척도)	예상 수요자 만족도 설문
A-4	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	①	스캔 소요 시간 대비 커버리지 확대 효과	비교 우위	약 2배	전문가의 스캔 계획에 따른 커버리지와 해당 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가	현장 데이터 수집 및 적용
		②	과제 수행 전 기술과 비교한 기술 수준 향상 효과	100%	150%	테스트베드 적용 및 기술 평가/보완 결과를 바탕으로 기술 수준 향상 정도 (%) 측정	현장 데이터 수집 및 적용
B-3	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술	①	예상 수요자 만족도	5점 이상	5.5점	시공오차 허용 범위 만족 검토 결과 시각화 방식에 대한 예상 수요자 만족도 설문 (7점 척도)	예상 수요자 만족도 설문
		②	설계 모델 갱신 오차 범위	오차 범위 5% 이내	5% 이내	Ground Truth와의 비교를 통한 오차 범위 측정	가상 데이터 생성 및 적용
B-4	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	①	시공오차 분석 정확성 확대 효과	비교 우위	효율성 (정확성) 개선도 약 113%	전문가의 시공오차 분석 결과와 해당 기술 적용 결과와의 비교 우위 평가	현장 데이터 수집 및 적용
		②	과제 수행 전 기술과 비교한 기술 수준 향상 효과	100%	약 107%	테스트베드 적용 및 기술 평가/보완 결과를 바탕으로 기술 수준 향상 정도 (%) 측정	현장 데이터 수집 및 적용

○ 본 연구과제의 2차년도 연구수행기간 동안의 양적성과 성과지표 달성도는 다음 <표 4-2-4>와 같음.

<표 4-2-4> 2차년도 양적성과 성과지표 달성도

단위성과		양적성과	목표 건수	달성건수	달성도 (%)
A-3	비선형 최적화 기법을 이용한 최적 스캔 계획 수립 기술	소프트웨어 등록	1	2 (추가 달성*)	100
		국내 특허 출원	-	1	-
A-4	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	국내 특허 등록	-	1 (추가 달성*)	-
		소프트웨어 등록	-	1 (추가 달성*)	-
		국외 학술회의 발표	-	1 (추가 달성*)	-
		국외 SCI급 학술지 논문 게재	1	-	-
B-3	시공오차 허용 범위 만족도 검토 결과 기반 3차원 설계 모델 갱신 기술	국내 특허 등록	1	1	100
		소프트웨어 등록	-	1 (추가 달성*)	-
		국내 학술회의 발표	-	1 (추가 달성*)	-
		국외 학술회의 발표	-	1 (추가 달성*)	-
B-4	테스트베드 적용 결과를 바탕으로 기술의 현장 적용성 평가	국외 SCI급 학술지 논문 게재	1	-	-
		소프트웨어 등록	-	1 (추가 달성*)	-

※ 추가 달성*이란, 협약 당시 연구개발계획서를 기준으로 최종목표를 달성하기 위해 연차별로 설정한 정량적 성과목표에는 포함되어 있지 않으나, 당해연차 연구기간 내 본 연구진의 노력을 통해 추가로 달성한 성과지표를 의미함.

제3절 관련 분야 기여도

○ 기술적 측면

- 국내 건설업체는 해외 시장에서의 플랜트 수주 시 경쟁력의 핵심인 엔지니어링 능력이 부족하며, 특히 플랜트 시공 관리에 필수적인 정도 관리에 대한 기술력과 이에 대한 R&D 투자가 전무한 실정임. 본 연구과제를 통해 플랜트 시공 단계에서의 주기적인 정도 관리에 대한 기술 확보가 가능하며, 집중 투자를 통해 기술 개발의 한계를 극복함으로써 플랜트 시공 관리 기술의 주도국으로서 자리매김하는 계기가 될 것으로 기대됨.
- 객관적이며 자동화된 프로세스를 통해 정확한 시공오차 분석이 가능해 짐으로써, 현재 해외 업체 및 연구 기관에서 주도하고 있는 관련 기술 개발 분야에서의 국가 경쟁력을 강화할 수 있을 것으로 기대됨. 또한 플랜트 시공 단계에서의 주기적인 정도 관리 기술 개발을 통해 시공 관리뿐만 아니라, 운영·유지 관리 기술의 획기적인 발전을 도모하며 국내 건설업체의 세계적인 기술력 확보가 가능할 것으로 예상됨.

○ 경제적·산업적 측면

- 본 연구과제를 통해 개발한 플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술을 활용하여 플랜트 시설의 완공에 이르기까지 철저한 기술적 검사 방식으로 현장 검사를 수행하여 시공 전 과정을 관리함으로써 품질을 향상시키고 생산성 향상의 긍정적인 결과를 가져올 수 있으며, 사전에 하자요인을 제거함으로써 운영·유지 관리 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대됨.
- 플랜트 산업은 전후방연관효과가 큰 고부가가치 산업이며, 생산유발효과가 2.9~3.0 (산업연구원 동향분석실, 2013)으로 비교적 높은 수준인 것으로 인식됨. 다시 말해, 플랜트 부문에서 1단위 수주가 발생할 경우, 국내 관련 산업 전반에 걸쳐 3단위에 가까운 생산유발효과가 나타남을 의미함. 본 연구과제를 통해 개발한 기술을 통해 국내 건설업체가 해외 플랜트 시장에서의 수주 경쟁력을 확보함으로써, 더 나아가 기계, 전기, 배관, 전자계측 장비 등 제조업 수요유발, 엔지니어링, 금융서비스 등 서비스산업의 경기활성화에 기여할 것으로 예상됨.

○ 사회적 측면

- 고부가가치 핵심기술에 대한 R&D 투자 및 연구개발을 통해 건설산업의 산업적 위상을 높일 수 있으며, 궁극적으로는 산업 자체의 이미지를 첨단 산업의 이미지로 격상시키는데 일조할 것으로 예상됨. 개발된 기술은 선진 기술 수준에 근접함으로써 IT 강국으로서의 국가 이미지 제고와 더불어 국가의 선진화 이미지를 제고하고, 개발된 기술을 통한 건설산업의 첨단화, 효율화를 꾀함으로써 해외 플랜트 시장에서의 국가 이미지 제고에도 기여할 것으로 기대됨.
- 본 연구진은 연구과제의 연구기간뿐만 아니라, 연구 종료 이후에도 지속적인 연구개발을 통해 미래 지향적인 플랜트 시공 관리에 대한 건설 정보화 기술 관련 전문 인력 양성에 기여하고자 함.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

가. 기술수요처

○ 본 연구과제의 핵심성과별 예상 기술수요처는 다음 <표 5-1-1>과 같음.

<표 5-1-1> 핵심성과별 기술수요처

연번	핵심성과 (CTE)	기술수요처
1	3차원 설계 모델 기반 최적 스캔 계획 수립 기술	발주처, 감리자, 시공사, 엔지니어링사
2	시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술	발주처, 감리자, 시공사

나. 미래원천기술 확보

- 본 연구과제의 최종성과물을 현업에 적용할 수 있도록 하는 실용연구에 초점을 맞추었으며, 연구 종료 이후에도 주요 요소기술의 보완 개발이 완료되는 단계별로 국내외 지적재산권 (특허 출원/등록, 소프트웨어 등록 등)을 계획함.
- 이를 통해 플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리에 필수적인 요소기술에 대한 국내 원천기술을 확보함.

다. 신산업 창출

- 플랜트 시공 관리의 정보화를 통해 IT 기술 파급에 기여할 수 있을 것으로 예상되며, 본 연구과제를 통해 개발한 최종성과물의 활용을 통해 플랜트 시공 관리 정보화를 위한 투자가 촉진되어 국내 IT 분야의 새로운 시장이 형성될 것으로 예상됨.
- 본 연구과제를 통해 개발한 플랜트 시공 단계에서의 3차원 설계 모델과 레이저 스캐닝 기술을 활용한 주기적인 정도 관리 기술과 같이 특정 산업 분야에 특화된 정보화 기술은 비단 건설산업의 플랜트 분야에만 국한되는 것이 아니라, 개발된 원천기술과 타 산업 분야와의 융합을 통해 새로운 산업 분야의 창출이 가능함. 이러한 새로운 산업 분야 창출을 기반으로 국내외 산업의 새로운 시장 개척 및 선점이 가능해질 것으로 기대됨.

마. 추가연구 필요성

- 본 연구과제의 연구개발단계는 건설교통 R&D 소프트웨어 유형에 대한 기술성숙도 (Technology Readiness Level, TRL) 9단계 중 3단계인 “【기본성능검증】 분석적 연구를 통해 개념/아이디어의 실현 가능성을 입증 및 연구실에서 환경에서 알고리즘 단계”에 해당함. 그럼에도 본 연구에서는 개발된 기술이 향후 추가 연구개발을 통해 사장되지 않고 상품화되어 시장 또는 공공부문 정도 관리에 활용될 것을 고려하여 TRL 3단계에 정의된 연구 수준 (관련 개념을 기술적으로 구현하기 위한 실험적 연구 수행)을 넘어, 연구 착수 시점부터 테스트베드를 선정·섭외·협업하고 기술을 적용함으로써 현장 적용성 평가 등의 부가적인 노력을 기울임.
- 본 연구과제를 통해 개발된 기술 및 핵심성과물별 최종성과물의 추후 실용화 추진을 위해서는 실제 현장에서의 적용을 통한 기술의 검증 및 보완, 상품화 및 신뢰성 확보, 국제 시장에서의 상용화 및 지속적인 유지관리 등 건설교통 R&D 소프트웨어 유형에 대한 기술성숙도 (Technology Readiness Level, TRL) 9단계 중 TRL 4~9단계 (실험, 시제품, 실용화 및 양산 단계)²⁾에 이르는 추가 연구개발이 요구됨.
- 실제 현장 적용을 통한 기술의 검증 및 보완, 신뢰성 확보의 필요성
 - 본 연구과제를 통해 개발된 기술 및 핵심성과물별 최종성과물의 기술의 검증 및 보완을 위해서는 다양한 특성을 가진 다수의 공정 (실제 시공 중인 플랜트 시설)을 대상으로 한 기술의 적용이 필수적임. 이를 위해 연구 종료 이후 추가 연구개발을 통해 최종성과물의 검증 및 보완에 참여할 수 있는 국내/외 플랜트 도급순위 상위 대형 건설사를 대상으로 개발된 기술 적용 관련 상호 협조체제 구축 및 개발된 기술의 검증을 위한 현장 적용 연구 수행이 필요함.
 - 연구 종료 이후 기술의 검증 및 보완을 위해 추가 연구과제 지원을 통해 요구되는 단계별 기술성숙도 개선 필요사항을 요약하면 다음과 같음.
 - 테스트 과정의 일부로 일부데이터를 대상으로 개별적인 기능 및 모듈 실험 단계 (TRL 4단계): 최종 운영 시스템/환경/데이터 등의 차이점을 고려하여 실험실 환경에서 제한적으로 핵심적인 기능 또는 모듈에 대한 체계 구성 및 개발된 기술 또는 모듈의 테스트 결과 분석
 - 테스트 과정의 일부로 일부데이터를 대상으로 개별적인 기능 및 모듈의 통합 가능성 검증 (TRL 5단계): 거의 모든 측면에서 최종 환경과 유사한 상태에서 기본적인 S/W 프로토타입의 성능 시험

2) 건설교통 R&D 소프트웨어 유형에 대한 기술성숙도 (Technology Readiness Level, TRL) 9단계 중 TRL 4~9단계

- 4단계: 【부품/시스템 성능검증】 테스트 과정의 일부로 일부데이터를 대상으로 개별적인 기능 및 모듈 실험 단계
- 5단계: 【장치/시스템 시제품 제작】 테스트 과정의 일부로 일부데이터를 대상으로 개별적인 기능 및 모듈의 통합 가능성 검증 단계
- 6단계: 【시제품 성능평가】 S/W 프로토타입 모델의 성능 및 신뢰성 평가단계
- 7단계: 【시제품 신뢰성평가】 실제 환경과 조건에서 통합된 S/W 프로토타입 모델의 적용 및 사용가능성 증명단계
- 8단계: 【시제품 인증】 S/W 완제품의 제한된 실제 현장에서 사용가능성 증명단계
- 9단계: 【사업화】 S/W 완제품의 실제 현장에서 사용적합성 증명 단계

- S/W 프로토타입의 성능 및 신뢰성 평가 (TRL 6단계): 개발 기술이 실제 환경에서 구현될 수 있도록 발전, 개별 모듈을 구성하는 기능 요소들이 통합 작동됨을 시험하고 적합한 신뢰도를 갖추었는지를 수요자 또는 고객의 실제사용 환경과 유사한 환경에서 검증, 실제 운용환경과 유사한 환경에서 S/W 프로토타입의 테스트 완료

○ 국내외 시장에서의 실용화 및 지속적인 유지관리의 필요성

- 본 연구과제를 통해 개발된 기술 및 핵심성과물별 최종성과물의 실용화 및 지속적인 유지관리를 위해서는 연구 종료 이후 추가 연구개발을 통해 TRL 4~6단계를 거쳐 검증 및 보완, 신뢰성이 확보될 기술에 대한 국내외 시장에서의 실용화에 참여할 수 있는 참여기업 확보를 바탕으로 상용제품 생산, 사업화, 지속적인 유지관리를 위한 적극적인 기술이전 및 협력체계 구축이 필요함.
- 또한 현재 미국 소프트웨어 회사가 주도하는 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 기술 소프트웨어 시장에서의 상용화 및 경쟁력 강화를 위해서는 연구 종료 이후 추가 연구과제 지원을 통해 국외 특허를 선점함으로써 선진국과의 기술 능력 격차를 최소화하고, 시공오차 분석 및 허용오차 범위 만족도 검토 분야의 선진 원천기술 개발 수준에 근접함과 동시에 기술 주도국의 우위를 확보하기 위한 전략이 필요함.
- 연구 종료 이후 국내외 시장에서의 실용화 및 지속적인 유지관리를 위해 추가 연구과제 지원을 통해 요구되는 단계별 기술성숙도 개선 필요사항을 요약하면 다음과 같음.
 - 실제 환경과 조건에서 통합된 S/W 프로토타입의 적용 및 사용가능성 증명 (TRL 7단계): 최종 S/W의 설계를 거의 완성하고, 완전히 통합된 S/W 프로토타입 테스트 수행 및 실제 환경에서 S/W 내 알고리즘의 수행 가능 여부 검증
 - S/W 완제품의 제한된 실제현장에서 사용가능성 증명단계 (TRL 8단계): 사실상의 기술개발 종료 및 베타테스트 단계로 개발된 S/W가 실제 사용현장에서 목적을 달성하는지 시험, S/W의 핵심기능을 중심으로 사용자의 관점에서 사용 가능한지 점검, 실제 환경에서 발생하는 오류 도출 및 수정
 - S/W 완제품의 실제 현장에서 사용적합성 증명 단계 (TRL 9단계): 기술개발사업의 목표가 달성되는 최종 형태의 기술 완성 및 실제 적용 환경 운용 단계, S/W의 모든 기능과 성능, 사용 가능성을 사용자의 관점 및 실제 환경에서 검증

○ 건축/토목 분야에의 활용을 위한 응용 기술 개발

- 실제 현장조사를 통해 국내 4곳의 공공주택 도면과 철근콘크리트 건축 구조물을 구성하는 구조 부재의 지어진 형상 간의 시공 오차를 분석한 연구에 따르면, 슬래브와 기둥 및 보의 경우, 각각 561개 부재 중 40%, 210개 부재 중 44% 설계치수보다 작은 것으로 나타남. 또한 조사한 부재 중 34%의 슬래브, 14%의 기둥, 10%의 보, 2%의 벽이 「건축공사표준시방서」에서 정의하는 최소 및 최대 허용오차 범위를 초과한 것으로 나타남 (윤상천 외, 2010). 이와 같이 시공 단계에서 발생하는 설계 변경이나 시공 오차가 반영되지 않은 부정확한 준공도면은 운영·유지관리 단계에서의 안전사고 대응, 안전진단 등의 사후관리, 재건축·재개발 공사, 리모델링 시의 건축 구조물 파악에의 활용이 어려움.

- 이에 터키 방식으로 수행된 해외 박물관 신축공사 (L사 수주)에서는 3차원 설계를 진행하고, 이를 바탕으로 시공 전 부분 시뮬레이션을 통한 간접 체크를 수행하였음에도 발주처에서는 준공 후에 3차원 공간 정보를 확보하고, 확보된 공간 정보를 설계도면과 오버랩하여 검토한 후 정확한 As-Built BIM을 제출하도록 계약에 명시함. 사용 중인 건축 구조물의 경우, 재건축·재개발 공사, 리모델링 시에 구조안전진단 및 공간 계획을 위해 시공 당시 설계 변경 및 시공 오차와 준공 후의 용도 변경을 나타낸 정확한 3차원 As-Built BIM이 요구되나, 지난 2001년 한국시설안전공단의 10,217개 사용 중인 건축 구조물을 대상으로 한 조사에서 약 55%만이 준공도면을 보유한 것으로 나타남. 준공도면을 보유한 경우라도 앞선 이유로 신뢰하기 어려워 건축 구조물의 현 상태를 파악하기 위한 실측 및 조사 과정을 필요로 하는 실정이며, 이로 인해 추가적인 비용이 초래됨.
- 또한 실제 현장조사를 통해 한 대학 내 공과대학 건물의 도면과 건축 구조물을 구성하는 기계, 전기, 배관 (Mechanical, Electrical, Plumbing, MEP) 부재의 지어진 형상 간의 시공 오차를 분석한 연구에 따르면, 위치 오차 측정 결과에서 10mm를 초과한 부재가 31%, 70mm를 초과한 부재가 13%로 나타남 (Bosche 등, 2013). 이와 같이 시공 단계에서 발생하는 설계 변경이나 시공 오차가 반영되지 않은 부정확한 준공도면은 전 생애주기 정보 관리 측면에서 활용이 어려움. 이는 특정 프로젝트에 한정된 것이 아니며, 모든 준공도면에는 본질적으로 위치, 형상, 치수, 수직/수평도 측면에서 일정 수준 이상의 오차가 존재하는 것으로 알려져 있음.
- 이처럼 시공 및 운영·유지관리 단계에서의 빌딩 정보 모델 활용 측면에서 시공 중이거나 사용 중인 건축 구조물의 현 상태를 나타내는 정확한 3차원 As-Built BIM 구현을 위한 기술 개발이 요구됨. 이에 본 연구과제를 통해 개발된 플랜트 시설에 특화된 시공오차 및 설계변경 현황 파악에 관한 기초·원천 기술 기반으로 건축 구조물 내 구조 부재 또는 MEP 부재의 시공오차 및 설계변경 현황을 파악할 수 있는 응용 기술을 개발하기 위한 추가 연구개발이 요구됨.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 본 연구진은 연구 기간 내 개발 기술의 세계 선진수준을 확보하기 위해 3차원 설계 모델과 스캔 데이터 관련 기술 관련 정보를 수집함. 이를 위해 3차원 설계 모델과 스캔 데이터를 활용한 시공오차 관리 소프트웨어인 ClearEdge3D사의 Verity에 관한 세미나 (2017.08.24.)에 참석함 (다음 <그림 6-1-1(i)(a) 참조). 또한 해외 우수 대학 석학 및 관련 업체 전문가와의 기술교류를 위해 전 세계 20여 개국에서 300여명의 인원이 참가하는 국외 학술회의인 International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) 2018 (2018.07.20.~2018.07.25.)에 참가함 다음 <그림 6-1-1(i)(b) 참조).



(a)

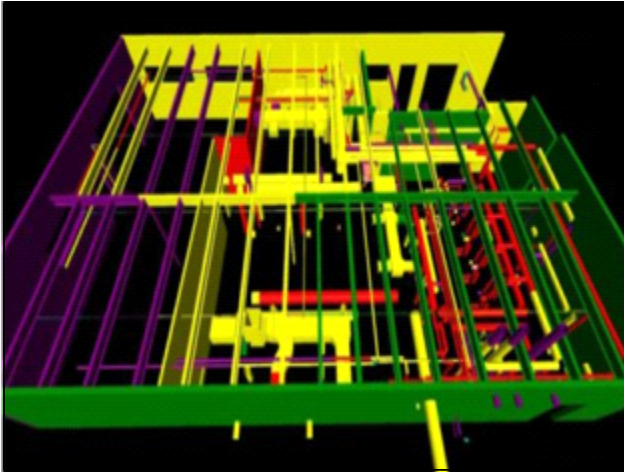


(b)

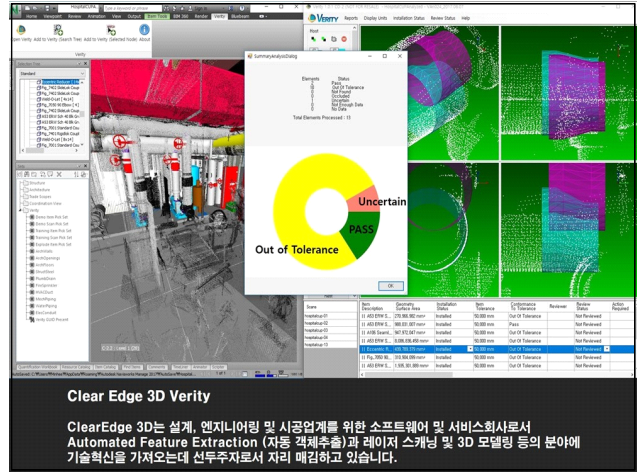
<그림 6-1-1(i)> (a) ClearEdge3D사의 Verity에 관한 세미나 소개 자료 일부, (b) 플랜트 유지 보수 개선을 위한 4차원 설계 모델의 활용에 관한 발표 자료 일부

- 스캔 데이터와 3차원 설계 모델을 활용한 시공오차 관리 최신 소프트웨어 기능 및 한계점 파악

- 스캔 데이터와 3차원 설계 모델을 활용한 시공오차 관리 관련 최신 소프트웨어의 한계점을 파악하기 위해 본 연구진은 ClearEdge3D사 및 (주)라인테크시스템에서 주최한 Verity 소프트웨어에 관한 “시공 검수 프로세스의 디지털화 (Find Mistakes Before They Become Expensive Problems)” 세미나에 참석함.
- ClearEdge3D사의 Verity는 스캔 데이터를 획득한 후 이를 3차원 설계 모델과 하나의 좌표계로 정렬한 후 개별 구성요소의 위치를 비교함으로써 시공오차를 측정하여 사용자에게 시공오차 분석 결과를 제공함. 다음 <그림 6-1-1>은 Verity 소프트웨어에서 제공하는 결과 예시를 나타냄. 해당 기술은 스캔 데이터 내 구성요소 인식 과정에서 3차원 설계 모델과 가장 가까운 거리에 있으며 규격이 동일한 스캔 데이터를 3차원 설계 모델 내 해당 요소로 인식하는 거리 기반 인식 방법을 활용함. 따라서 해당 방법은 시공오차 또는 설계변경으로 인해 구성요소의 규격이 변경되는 경우 스캔 데이터 내 구성요소 인식 과정에서 오류가 발생함.



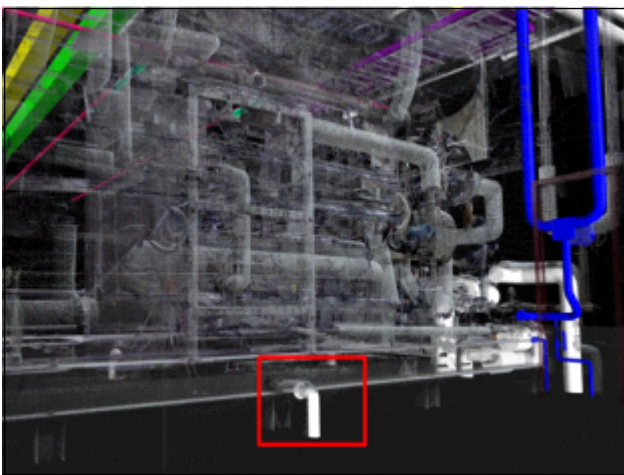
(a)



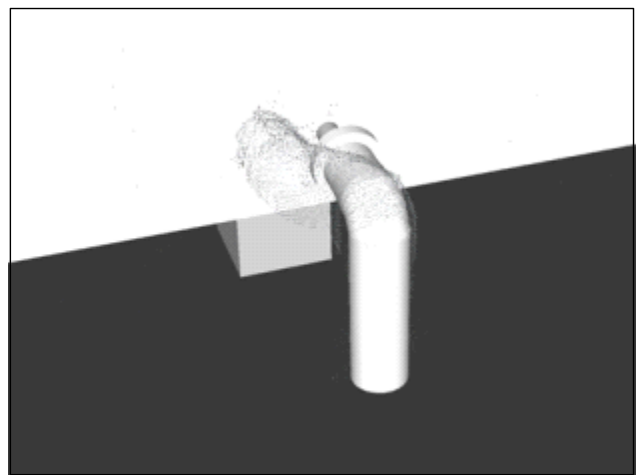
(b)

<그림 6-1-1> (a) 스캔 데이터와 3차원 설계 모델을 활용한 시공오차 관리 최신 소프트웨어 결과 예시 (Verity 홈페이지), (b) 시공검수 프로세스의 디지털화 세미나 자료 일부

- 테스트베드를 대상으로 수행한 인터뷰 결과, 플랜트 시설은 배관 및 기타 구성요소의 간섭 및 시공오차로 인해 잦은 설계변경이 발생함. 이는 실제 스캔 데이터 획득 및 3차원 설계 모델과의 비교 결과에서 규격이 상이한 배관이 설치되는 경우가 확인됨. 다음 <그림 6-1-2>는 삼성바이오로직스를 대상으로 획득한 스캔 데이터와 3차원 설계 모델의 비교 결과를 나타내며, <그림 6-1-2(b)>는 구성요소의 규격 변경이 발생한 것을 나타냄.
- ClearEdge3D사의 Verity 소프트웨어에서는 시공오차 측정 대상에 대해 동일한 시공오차 범위를 적용하며, 사용자가 직접 구성요소별 시공 허용오차 범위를 설정함. 플랜트 시설은 다수의 구성요소가 좁은 공간에 밀집되어 설치되므로 다수의 구성요소에 대해 개별 허용오차 범위를 입력하는 것은 많은 시간이 소모되며 노동 집약적일 수 있음.



(a)



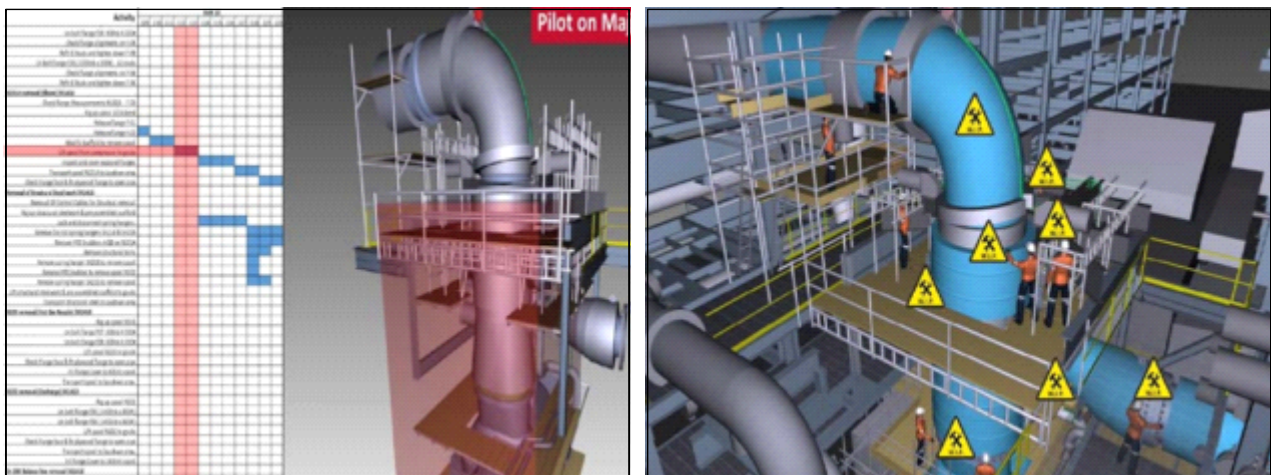
(b)

<그림 6-1-2> 삼성바이오로직스로부터 획득한 스캔 데이터와 3차원 설계 모델과의 비교 결과
(a) 하나의 좌표계에 정렬된 3차원 설계 모델 및 스캔 데이터, (b) 일부 영역 확대

- 상기 기술된 최신 소프트웨어의 한계점을 해결하기 위해 본 연구진은 공정배관계장도 및 3차원 설계 모델로부터 추출한 구성요소간 연결 관계 및 형상정보를 활용하여 스캔 데이터 내 구성요소를 인식한 후 각 요소를 3차원 설계 모델 내 요소와 비교 분석하는 기술을 개발 완료함. 또한 시공오차 분석 대상에 대해 개별 요소로 인식함으로써 요소별 상이한 시공오차 허용범위 적용이 가능토록 개발함.

○ 국외 학술회의 참가를 통한 3차원 설계 모델 및 스캔 데이터 관련 해외 선진 기술 정보 확보

- 본 연구진은 산업적 기술수준뿐만 아니라 한 해외 우수 대학 석학 및 관련 업체 전문가와의 기술교류를 위해 ISARC 2018에 참가하여 3차원 설계 모델 및 스캔 데이터 관련 과학기술정보를 수집함.
- 3차원 설계 모델 및 스캔 데이터는 시공 단계뿐만 아니라, 플랜트 시설의 운영 유지단계까지의 활용성을 가지고 있음. Shou 등 (2018)은 플랜트 시설의 턴어라운드 유지보수 (Turnaround Maintenance) 단계의 비용, 시간, 안전 측면의 효율성을 확보하기 위해 3차원 설계 모델을 활용 프레임워크를 제안하였음. 해당 연구에서 제안된 프레임워크는 플랜트 시설의 턴어라운드 유지보수 단계에서 발생하는 비용 및 시간을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 해당 작업에서 발생할 수 있는 위험 요소를 사전에 탐지할 수 있는 잠재력을 가진 것으로 나타남. 다음 <그림 6-1-3>은 해당 연구의 결과 예시를 나타냄.



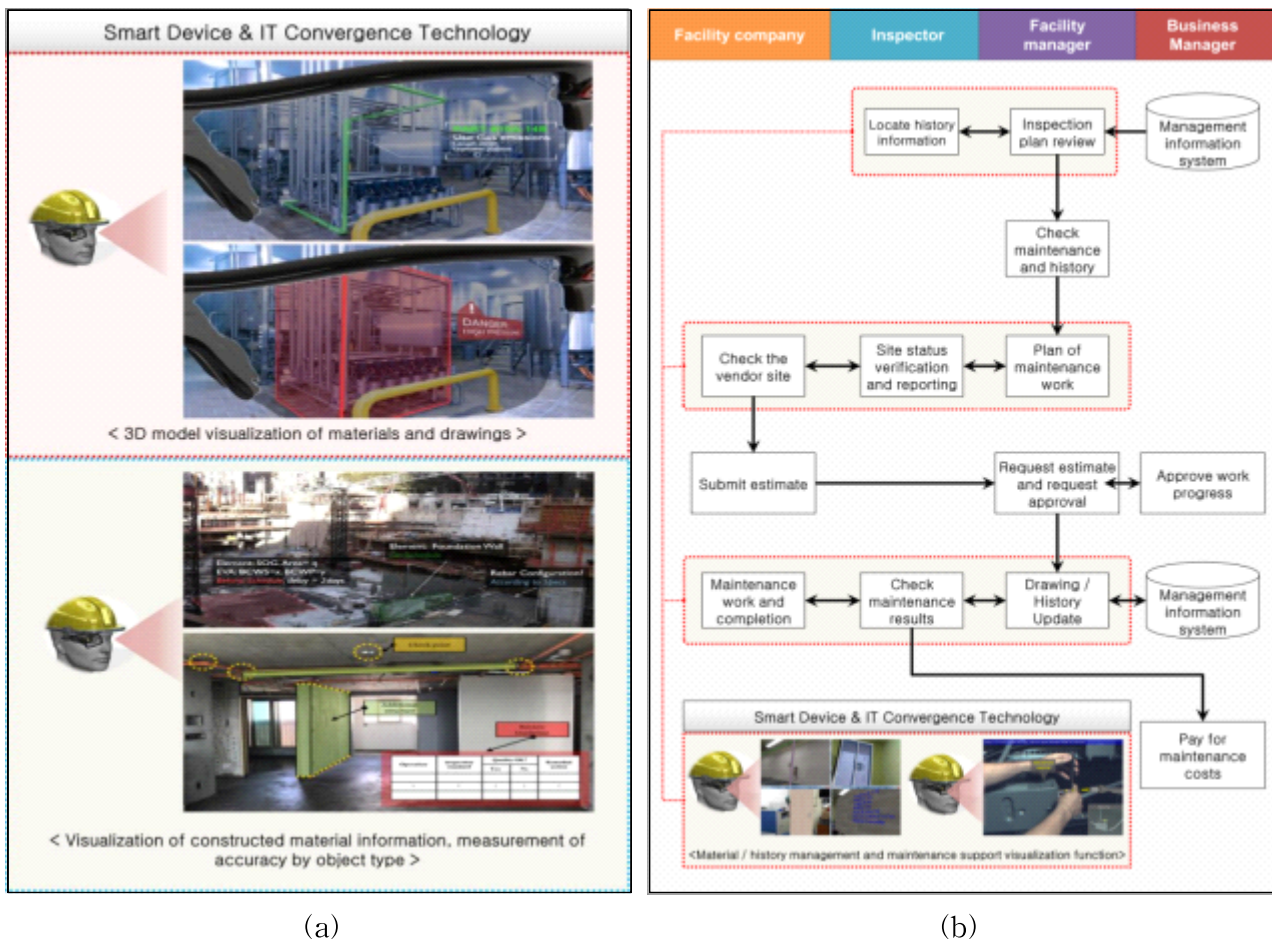
(a)

(b)

<그림 6-1-3> 플랜트 시설의 유지 보수 단계에서의 3차원 설계 모델 활용 예시

(a) 예시1, (b) 예시2

- 플랜트 시설의 3차원 설계 모델은 최근 높은 관심을 받고 있는 증강현실 기술과 깊은 연계성을 보임. Lee 등 (2018)은 플랜트 시설의 3차원 설계 모델과 증강현실 기술을 연계하여 플랜트 시설 구성요소에 대한 실시간 유지 보수 정보 제공 기술을 개발함. 해당 연구는 스마트 센서와 IT기술을 융합하여 관리자가 현장에서 실시간으로 해당 요소에 대한 정보를 제공받아 유지 보수 관련 의사결정에 도움을 주도록 개발됨. 다음 <그림 6-1-4>는 해당 연구 결과를 요약하여 나타냄.



<그림 6-1-4> 3차원 설계 모델과 증강 현실 기술 연계를 통한 플랜트 시설의 유지 보수 단계에서의 실시간 정보 제공 기술 관련 연구 결과

(a) 예시1, (b) 예시2

- 상기와 같이 국외 학술회의 참가를 통해 해외의 선진 기술들에 대한 과학기술정보를 수집하였으며, 플랜트 시설의 3차원 설계 모델의 다양한 활용가능성에 따른 본 연구의 필요성 정립 및 기술 개발의 방향을 설정함. 유지 보수 단계 작업에 관한 시뮬레이션 또는 증강 현실과의 연계를 통한 실시간 정보 제공 기술 모두 플랜트 시설의 준공 3차원 설계 모델이 실제와 동일하다는 가정을 기반으로 함. 스캔 데이터와 3차원 설계 모델을 활용한 시공오차 관리 및 3차원 설계 모델 갱신 기술은 해외에서 개발되고 있는 3차원 설계 모델 기반 기술들이 활용되기 위한 핵심 기반 기술로 사용될 것으로 기대됨.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	본 연구과제는 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 제1항에서 규정하고 있는 가~마 항목에 해당되는 보안과제가 아니므로, 본 연구과제의 보안등급은 일반으로 결정함이 타당함.	

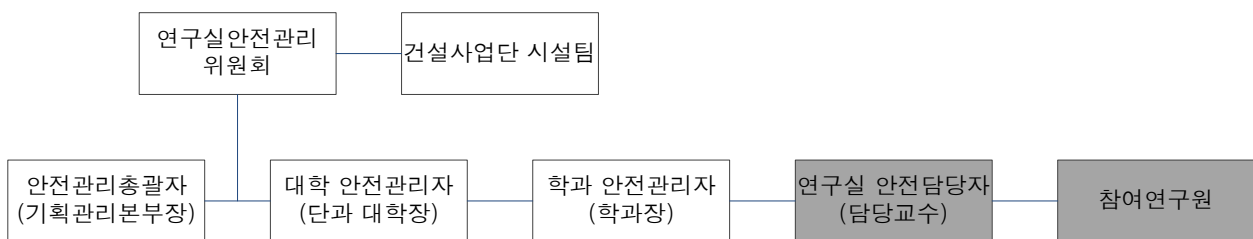
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

※ 해당사항 없음.

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

- 연구실의 안전조치 이행계획은 다음 <그림 9-1-1>과 같은 안전관리 조직도에 의해 참여연구원에 대한 안전관리를 목적으로 연구실 안전 점검 체계 및 안전교육으로 이수함.



<그림 9-1-1> 연구실의 안전관리 조직도

- 연구실 안전 점검 체계는 연구실 안전담당자 (담당교수)의 책임 하에 참여연구원들이 연구개발 활동에 사용되는 기자재에 대한 관리실태 및 안전용품의 보관 상태를 육안으로 점검하고 기록하는 일상점검과 매년 전문기관으로부터의 정기안전점검을 통하여 연구실에서 발생할 수 있는 안전사고를 미리 예방하고, 또한 안전용품의 상태를 점검하여 안전사고에 대비할 수 있도록 구축함.

- 연구실의 안전교육은 다음 <표 9-1-1>과 같이 연구실에서 연구 활동에 참여하고 있는 참여연구원들을 대상으로 연구실 안전 환경 조성에 관한 법률 제18조 (교육·훈련 등)에 의해 실시함. 안전교육은 학기당 6시간의 온라인 안전교육을 실시하였으며, 실시된 과목은 아래의 표에 기재된 바와 같음.

<표 9-1-1> 연구실의 안전교육 과목

과목	차시명	비고
연구실 안전일반	연구실안전	
	연구실안전 수칙 및 사고 시 행동요령	
연구실내 위험요인	전기안전	
	건설안전	
	컴퓨터안전	
소방안전	소방안전	
	화재 시 행동요령 (소화기, 소화전 사용법)	
사고사례	사고사례	

- 온라인 안전교육만으로는 안전사고를 예방하기 위한 지식 확보에는 부족하다고 판단되어, 매달 추가적인 오프라인 안전교육을 통해 진행하여 안전사고를 예방할 수 있는 지식을 확보함.
- 현재까지 본 연구실에서 발생되었던 안전사고는 전무하나, 이번 국가연구개발사업 수행 시, 발생할 수 있는 안전사고에 대비하여 연구실 환경개선공사, 전문화된 안전교육 실시, 연구실 안전용품의 교체 등의 추가 이행함.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

○ 본 연구과제의 당해년도 연구 목표를 달성하기 위한 정량적 성과목표별 연구개발 성과실적 중 공개 발표된 연구개발성과를 요약하면 다음과 같음.

가. 학술 대회 발표 성과

○ 본 연구과제의 수행을 통해 달성한 국내 학술회의 논문 발표 실적은 다음 <표 10-1-1>과 같음.

<표 10-1-1> 국내 학술회의 논문 발표 실적 - 3건

발표일	발표명	저자	학술회의명
2017.10.27	플랜트 시설의 3차원 모델 구축을 위한 레이저 스캐닝 정보 및 영상 정보 융합 프레임워크 개발	손효주, 성현우, 최현철, 조혁만, 김창완*	대한건축학회 2017 추계학술발표대회
2017.10.27	레이저 스캐닝 기술과 3차원 설계 모델을 이용한 플랜트 건설공사의 정도관리 자동화 프레임워크 개발	손효주, 성현우, 최현철, 조혁만, 김창완*	대한건축학회 2017 추계학술발표대회
2018.07.06	플랜트 시공 단계에서의 클라우드 컴퓨팅 기반 공간 빅데이터 분석 및 시각화를 통한 모바일 플랜트 정도 관리 시스템 개발	성현우, 최현철, 손효주, 김창완*	2018 한국플랜트학회 학술대회

○ 본 연구과제의 수행을 통해 달성한 국제 학술회의 논문 발표 실적은 다음 <표 10-1-2>와 같음.

<표 10-1-2> 국제 학술회의 논문 발표 실적 - 2건

발표일	발표명	저자	학술회의명
2018.07.23	Resolution Enhancement for Thermographic Inspection in Industrial Plant Using Deep Convolutional Networks	성현우, 최현철, 손효주, 김창완*	ISARC* 2018
2018.07.24	Image-based 3D Building Reconstruction Using A-KAZE Feature Extraction Algorithm	최현철, 성현우, 손효주, 김창완*	ISARC* 2018

※ ISARC*: International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining

나. 특허 성과

○ 본 연구과제의 수행을 통해 달성한 국내외 특허 출원 및 등록 실적은 다음 <표 10-1-3>과 같음.

<표 10-1-3> 특허 출원 및 등록 실적 - 국내 출원 3건, 등록 2건

출원/등록된 특허				
출원연도	특허명	출원/등록인	출원/등록국	출원번호
등록연도				등록번호
2017	건설 시공 단계에서의 3차원 설계 모델 데이터와 레이저 스캔 데이터 간 비교 분석을 위한 차별적 데이터 감소 방법 및 시스템	중앙대학교 산학협력단	대한민국	10-2017-0156648
2018				10-1890536
2017	건설 구조물의 구성요소 형상 특징을 고려한 3차원 데이터 획득 방법 및 시스템	중앙대학교 산학협력단	대한민국	10-2017-0156649
2018				10-1910751
2018	플랜트 시공 단계에서의 클라우드 컴퓨팅 기반 공간 빅데이터 분석 및 시각화를 통한 모바일 플랜트 정보 관리 시스템 및 방법	중앙대학교 산학협력단	대한민국	10-2018-0106637
-				-

다. 소프트웨어 성과

○ 본 연구과제의 수행을 통해 달성한 소프트웨어 (S/W) 등록 실적은 다음 <표 10-1-4>와 같음.

<표 10-1-4> 소프트웨어 (S/W) 등록 실적 - 8건 (다음 페이지에 계속)

등록된 소프트웨어				
등록연도	프로그램 명칭	신청인	신청종류	등록번호
2017	레이저 스캐너로 획득된 3차원 데이터와 영상 정보 기반 3차원 정보의 정합 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2017-029644호
2017	3차원 설계 모델 데이터와 레이저 스캔 데이터간 비교 분석을 위한 차별적 데이터 감소 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2017-029643호

<표 10-1-4> 소프트웨어 (S/W) 등록 실적 - 8건 (이전 페이지에 이어)

등록된 소프트웨어				
등록연도	프로그램 명칭	신청인	신청종류	등록번호
2018	3차원 설계 모델과 레이저 스캔 데이터간 차이 분석을 위한 데이터 분할 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2018-004227호
2018	플랜트 시설에 최적화된 파라미터를 활용한 레이저 스캔 데이터 객체 구분 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2018-026900호
2018	플랜트 시설로부터 획득된 레이저 스캔 데이터의 효율적인 분석을 위한 바닥 점군 데이터 제거	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2018-026901호
2018	곡률 기반 레이저 스캔 데이터 초기 정합 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2018-026969호
2018	곡률 기반 레이저 스캔 데이터 최종 정합 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2018-026970호
2018	레이저 스캔 데이터 점밀도 균일화 프로그램	중앙대학교 산학협력단	프로그램 등록	제 C-2018-026971호

라. 포상 성과

○ 본 연구과제의 수행을 통해 달성한 국제 학술단체 수상 실적은 다음 <표 10-1-5>와 같음.

<표 10-1-5> 국내 학술단체 수상 실적 - 1건

학회명	내용	수상일자	수상내용
대한건축학회	플랜트 시설의 3차원 모델 구축을 위한 레이저 스캐닝 정보 및 영상 정보 융합 프레임워크 개발	2017.10.27	최우수 논문상 (대한건축학회 2017 추계학술발표대회)

마. 인력활용/양성 성과

○ 본 연구과제의 수행을 통해 달성한 인력 양성 배출 실적은 다음 <표 10-1-6>과 같음.

<표 10-1-6> 인력 양성 배출 실적 - 3건 (박사 1명, 학사 2명)

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
3	1		2		2	1	3		

바. 연구성과 확산 노력 성과

○ 본 연구과제의 연구개발 결과를 홍보하기 위한 실적은 다음 <표 10-1-7>과 같음.

<표 10-1-7> 연구개발 결과 홍보 실적 - 2건

홍보내용	홍보일자	비고
개발된 기술에 대한 시연 및 기술 수요 조사	2018.09.18. ~2018.09.20	2018 스마트시티 서밋 아시아
개발된 기술에 대한 시연 및 기술 수요 조사	2018.10.19	국토교통부 공공기술 이전 로드쇼

제11장. 기타 사항

※ 해당사항 없음.

참고 문헌

- [1] 국토교통부 해외건설정책과/해외건설지원과 (2016). 보도자료 내 “해외건설 수주 기타 통계,” 국토교통부.
- [2] 동아닷컴 (2013). ‘3D 精度시스템’ 적용한 현대重 FPSO 생산현장, <http://news.donga.com/3/01/20131027/58498096/1#csidxa6146d7ce410f02b84735b80560b89>.
- [3] 산업연구원 동향분석실 (2013). KIET 경제·산업동향, 산업연구원.
- [4] 삼인정보시스템(주) (2016). <http://www.saminis.com/html/10/01.php>. (2016.03)
- [5] 윤상천, 지남용, 최기봉 (2010). “현장조사를 통한 철근콘크리트 구조 부재의 시공오차에 관한 연구.” 구조물진단학회지. 14(3), 201-208.
- [6] 조선비즈 (2013). 현대重, 3D기술로 해양플랜트 오차 잡는다, http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2013/09/30/2013093002260.html#csidxd14928af21c90aeb984332caaf3052f.
- [7] 헤럴드경제 (2013). 현대重, 세계 최초 3D 접목한 해양플랜트 오차 교정기술 개발, http://biz.heraldcorp.com/common_prog/newsprint.php?ud=20130930000602.
- [8] Akinci, B., Boukamp, F., Gordon, C., Huber, D., Lyons, C., and Park, K. (2006a). “A Formalism for Utilization of Sensor Systems and Integrated Project Models for Active Construction Quality Control.” *Automation in Construction* 15(2), 124-138.
- [9] Akinci B. (2006b). “Using Sensor Systems and Standard Project Models to Capture and Model Project History for Building Commissioning and Facility Management.” In *Proc. Facility Area Network Workshop*, 1-9, Urbana-Champaign, IL.
- [10] ASDMCon (2016). <http://www.ce.cmu.edu/~itr/>. (2016.03)
- [11] Bosche, F., Guillemet, A., Turkan, Y., and Haas, C.T. (2013). “Tracking the Built Status of MEP Works: Assessing the Value of a Scan-vs-BIM System.” *Journal of Computing in Civil Engineering*. 28(4), 05014004-1-13.
- [12] Chua, C.S., and Jarvis, R. (1997). “Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition.” *International Journal of Computer Vision*. 25(1), 63-85.
- [13] Cicirello, V., and Regli, W.C. (2001). “Machining Feature-Based Comparisons of Mechanical Parts.” *Proceedings of the 2001 International Conference on Shape Modeling and Applications*. Genova, Italy.
- [14] ClearEdge3D (2018). Verity 1.0, <https://www.clearedge3d.com/products/verity>. (2018.10)
- [15] Construction Business Owner (2013). “Making BIM Bigger.” <http://www.constructionbusinessowner.com/technology/project-management/january-2014making-bim-bigger>.
- [16] Corney, J., Rea, H., Clark, D., Pritchard, J., Breaks, M., and Macleod, R. (2002). “Coarse Filters for Shape Matching.” *IEEE Computer Graphics and Applications*. 22(3), 65-74.

- [17] DURAARK (2016). DURAARK Project, <http://duraark.eu/>. (2016.03)
- [18] El-Mehalawi, M., and Miller, R.A. (2003). "A Database System of Mechanical Components Based on Geometric and Topological Similarity. Part II: Indexing, Retrieval, Matching and Similarity Assessment." *Computer-Aided Design*. 35(1), 95-105.
- [19] Elad, M., Tal, A., and Ar, S. (2001). "Content Based Retrieval of VRML Objects - An Iterative and Interactive Approach." *Proceedings of the Eurographics Workshop*. Manchester, United Kingdom.
- [20] Funkhouser, T., Kazhdan, M., Shilane, P., Min, P., Kiefer, W., Tal, A., Rusinkiewicz, S., and Dobkin, D. (2004). "Modeling by Example." *ACM Transactions on Graphics*. 23(3), 652-663.
- [21] Geospatial Inc. (2019). Trimble Realworks, https://docs.google.com/document/d/1BO2cu0F2WE439E014DrFftTbi5c0eFJg_nXhP65CgMk/edit. (2019.03)
- [22] Gordon, C., Boukamp, F., Huber, D., Latimer, E., Park, K., and Akinci, B. (2003). "Combining Reality Capture Technologies for Construction Defect Detection: A Case Study." In *Proc. 9th EuroPLA International Conference (EIA9: E-Activities and Intelligent Support in Design and the Built Environment)*, 99-108, Istanbul, Turkey.
- [23] Ip, C.Y., Regli, W.C., Sieger, L., and Shokoufandeh, A. (2003). "Automated Learning of Model Classifications." *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*. Seattle, WA.
- [24] Ip, C.Y., Lapadat, D., Sieger, L., and Regli, W.C. (2002). "Using Shape Distributions to Compare Solid Models." *Proceedings of the 7th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*. Saarbrücken, Germany.
- [25] Johnson, A.E., and Hebert, M. (1999). "Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 21(5), 433-449.
- [26] Kazhdan, M., Funkhouser, T., and Rusinkiewicz, S. (2003). "Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors." *Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Aire-la-Ville, Switzerland.
- [27] Kriegel, H.P., Brecheisen, S., Kroger, P., Pfeifle, M., and Schubert, M. (2003). "Using Sets of Feature Vectors for Similarity Search on Voxelized CAD Objects." *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. San Diego, CA.
- [28] Lee, K., Kwon, S., Ko, T., and Kim, Y. (2018). "A Study AR Based Smart Device for Work Management at Plant Construction Sites." In *Proc. 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2018*, Berlin, Germany.
- [29] Latimer, E., Latimer, D., IV, Saxena, R., Lyons, C., Michaux-Smith, L., and Thayer, S. (2004). "Sensor Space Planning with Applications to Construction Environments." In *Proc. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4454-4460, New Orleans, LA.

- [30] McWherter, D., Peabody, M., Regli, W.C., and Shokoufandeh, A. (2001). "Transformation Invariant Shape Similarity Comparison of Solid Models." Proceedings of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences. Pittsburgh, PA.
- [31] Paquet, E., Rioux, M., Murching, A., Naveen, T., and Tabatabai, A. (2000). "Description of Shape Information for 2-D and 3-D Objects." Signal Processing: Image Communication. 16(1), 103-122.
- [32] Saupe, D., and Vranic, D.V. (2001). "3D Model Retrieval with Spherical Harmonics and Moments." Pattern Recognition. 2191, 392-397.
- [33] Shoua, W.C., Wanga, J., and Wanga, X.Y. (2018). "4D BIM for Improving Plant Turnaround Maintenance Planning and Execution: A Case Study." In Proc. 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2018, Berlin, Germany.
- [34] Shum, H.-Y., Hebert, M., and Ikeuchi, K. (1996). "On 3D Shape Similarity." Proceedings of the 1996 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA.
- [35] Song, M., Shen, Z., and Tang, P. (2014). "Data Quality Oriented 3D Laser Scan Planning." In Proc. Construction Research Congress 2014, 984-993, Atlanta, GA.
- [36] Tang, P. and Alaswad, F. (2012). "Sensor Modeling of Laser Scanners for Automated Scan Planning on Construction Jobsites." In Proc. Construction Research Congress, 1021-1031, West Lafayette, IN.
- [37] Tangelder, J.W., and Veltkamp, R.C. (2008). "A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods." Multimedia Tools and Applications. 39(3), 441-471.
- [38] Trimble Navigation Limited (2016). <http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/realworks.aspx>. (2016.03)
- [39] Zaharia, T., and Preteux, F.J. (2001). "3D Shape-Based Retrieval within the MPEG-7 Framework." Proceedings of the SPIE Conference on Nonlinear Image Processing and Pattern Analysis XII. San Jose, CA..
- [40] Zhang, C., and Chen, T. (2001). "Efficient Feature Extraction for 2D/3D Objects in Mesh Representation." Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing. Atlanta, GA.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.