

<표지>

(옆면)

(앞면)

18CTAP-
C133224-
02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제 2차 연도 최종보고서

R&D /
18CTAP-C133224-02

절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발 최종보고서
2019
굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발 최종보고서

2019. 3. 27.

주관연구기관 / 인하대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발’(연구개발 기간 : 2017. 6. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서(보완본)를 제출합니다.

2019 . 3 . 27 .

주관연구기관명 : 인하대학교 산학협력단 대표자 (서 태 범) (인)

주관연구기관책임자: 김 영 석

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C133 224-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01 ~ 2018.12.31	단계구분	2 / 2						
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업									
	세부사업명	창의도전연구									
연구과제명	대과제명										
	세부과제명	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발									
연구책임자	김 영 석	해당단계 참여연구원 수	총: 8명 내부: 8명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:220,000천원						
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10명 내부: 10명 외부: 명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:370,000천원						
연구기관명 및 소속 부서명	인하대학교 산학협력단			참여기업명							
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:							
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:							
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음											
연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급 분류 : 일반등급 본 연구개발 과제는 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 4 제1항에서 규정하고 있는 가~마 항목에 해당되는 보안과제가 아니므로, 본 연구과제의 보안등급은 일반으로 결정함이 타당함.										
9대 성과 등록·기탁번호											
구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	2	3				1					
국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황											
구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호			
요약								보고서 면수			
○ 강관말뚝 두부정리 작업 및 장비에 대한 이론적 고찰 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개념디자인 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술 선정 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 상세설계 ○ 구조해석을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 상세설계의 구조적 안정성(Stability) 분석 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술 개발 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품 개발 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능 및 경제성 분석 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 기술적 타당성 및 현장 적용성 분석 ○ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 및 현장 적용성 분석								81쪽			

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구의 최종목표는 기존 재래식 방식 대비 시공품질을 향상하고 노동자의 작업 생산성 제고 및 안전성 확보를 가능케 하는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품을 개발하는 것임. 본 연구의 최종 성과물은 500mm규격 내외의 강관말뚝 절단이 가능한 시제품 형태이며, 실험실 실험을 통해 시제품의 작업 성능을 검증하였고, LCC 기반의 경제성 분석을 수행하였음. 현재 강관말뚝 두부정리 공법은 1)노동자의 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면, 4)숙련공 부족 측면의 문제점을 지니고 있는 것으로 조사됨. 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 국내·외적으로 강관말뚝 두부정리 작업의 기계화 및 자동화를 위한 다양한 기술개발 노력이 이루어져 왔으나, 현재까지 국내 실정에 적합하며 실용성 및 현장 적용성이 우수한 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 개발 관련 실적은 전무한 실정임. 따라서 본 연구에서는 기존 강관말뚝 두부정리 공법이 지니는 문제점을 해결하고, 강관말뚝 두부정리 자동화 방식의 실용성 및 현장 적용성을 제고할 수 있도록 하는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위(기 절단된 말뚝 상부)핸들링 로봇 시제품을 개발하였음. 본 연구에서 개발한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 자동화 대상 범위는 1)측량 및 강관말뚝 절단선 표시를 포함한 2)강관말뚝 절단, 3)절단 부위 전도 및 인양, 4)절단 부위 운반 및 적재 등의 프로세스이며, 이를 자동화 로봇으로 구현하기 위해 정의된 주요 연구내용 및 기능은 다음과 같음. ● 강관말뚝 절단위치 자동인식 기술 개발 ● 강관말뚝 고정 기술 개발 ● 강관말뚝 두부절단 기술 개발 ● 절단된 강관말뚝 상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 기술 개발 ● 관련 요소기술의 통합을 통한 개발로봇의 시제품 개발 ● 성능 측정 및 LCC 기반 경제성 분석 ● 기술적 타당성 및 현장 적용성 분석				
연구개발성과	본 연구의 최종목표는 국내 실정에 적합하고 국제적 수준의 기술력을 지닌 최첨단의 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품을 개발하는 것으로서, 본 연구에서는 최종 연구개발 성과물을 활용하여 500mm 규격(국내 교량 구조물의 99% 이상) 내외의 강관말뚝을 대상으로 실험실 환경 내에서 개발로봇의 작업 품질과 성능을 검증하고, 기존 재래식 공법 대비 LCC 기반의 경제성 분석을 수행하였음.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 국내 실정에 적합하고 국제적 수준의 기술력을 지닌 최첨단의 로봇이 될 것으로 사료됨. 개발로봇은 교량, 항만시설 등과 같은 토목구조물 외에도 깊은 기초를 필요로 하는 고층 빌딩 등의 건축구조물 기초공사에 적용될 수 있으므로, 다양한 기술수요처가 존재하고 추후 개발기술은 강관말뚝, 복합말뚝 등 강관두부를 지닌 다양한 말뚝의 두부정리 작업에도 응용 및 활용될 수 있을 것으로 사료됨.				
핵심어 (5개 이내)	강관말뚝	두부정리	건설로봇	안전성 향상	경제성

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	The purpose of this research is to develop a steel pipe pile cutting and handling robot prototype based on excavator attachment that improves productivity, quality, and safety in steel pipe pile head cutting work. The proposed robot targets steel pipe piles with a 500mm diameter. The performance of the robot was verified by laboratory experiments, and its economic feasibility was validated by LCC analysis. The current methods in steel pipe pile head cutting work have difficulties in obtaining 1) labor safety, 2) consistent quality, 3) productivity, 4) skillful labors. Numerous studies have been focusing on developing various equipment trying to solve the limitations, however, it has been investigated that those studies have revealed practical constraints in the construction sites. Therefore, this study focuses on developing a cutting and handling robot that not only solves the stated problems but is expected to have practical application in the construction sites. The main scopes of the proposed robot are 1) estimating steel pipe pile and marking its cutting line 2) cutting steel pipe pile head, 3) separating and hoisting the severed steel pipe pile, 4) moving and loading the steel pipe pile. The main contents and functions required for the development of the robot are as follows: ● Development of automated pile head cutting location detection technology ● Development of steel pipe pile clamping technology ● Development of steel pipe pile head cutting technology ● Development of separating, rotating, hoisting and moving technology for the severed steel pipe pile ● Development of prototype of robot by integrating the technologies involved ● Development of performance estimation and LCC based economic analysis model ● Development of technological feasibility and practical application analysis model				
Results	The steel pipe pile cutting and handling robot prototype based on excavator attachment developed in this research will deal with the current difficulties found in domestic construction sites. Experiments will be conducted to verify the performance and quality of the robot. Furthermore, LCC based economic analysis will be conducted as compared with the existing methods. The proposed robot targets steel pipe piles with a 500mm diameter, the most widely used type in the domestic field.				
Expected Contribution	It is expected that the steel pipe pile cutting and handling robot prototype based on excavator attachment overcomes the limitations of the previous studies, mainly in practical terms. The proposed robot is expected to be applied not only in projects of apartment houses but also in other types of buildings such as office buildings, public offices, etc.				
Keywords	Steel Pipe Pile	Pile Head Cutting Work	Construction Robot	Safety Improvement	Economic Feasibility

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	12
3. 연구 수행 내용 및 성과	19
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	63
5. 연구개발성과의 활용 계획	67
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	69
7. 연구개발성과의 보안등급	72
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	73
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	74
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	78
11. 참고 문헌	79

< Contents >

1. Introduction of R&D project	1
2. Status of domestic and overseas technology development	12
3. Research contents and achievements	19
4. Achievement of goal and contribution to related field	63
5. Plan to utilize R&D achievements	67
6. Information on overseas technology obtained in the period of research	69
7. Security rating of R & D achievement	72
8. Status of research facilities and equipment registered in NTIS	73
9. Performance in implementation of safety measures in laboratories based on R & D tasks	74
10. Representative Research Achievements of R&D project	78
11. References	79

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 개요

- 말뚝기초는 비교적 직경이 작고 긴 구조체를 타격이나 진동에 의해 소정의 위치까지 지반에 관입시키는 기초로서, 이는 상부 구조물의 하중 지지, 지면(흙, 암반층)으로 구조물의 하중 전달, 지반의 다짐을 통한 지반의 지지력 증가, 구조물의 침하 방지, 측방압력에 저항 등 상부 구조물의 안정성을 확보하기 위한 역할을 수행하는 주요 구조체임(토목용어종합대사전, 2015). 현재 국내에서 사용되고 있는 말뚝의 종류로는 강관말뚝, 고강도 콘크리트 말뚝(PHC말뚝), 현장타설 콘크리트 말뚝 등이 있음.
- 이 중 강관말뚝(그림 1.1)은 국내에서 가장 오랜 기간 사용되어 온 말뚝기초 형식으로 단위면적당 하중지지능력이 타 말뚝에 비해 우수하고, 횡하중 및 휨모멘트에 대한 지지력 또한 높으며, 이음과 절단이 용이하므로 지지층의 깊이가 깊은 지반에서도 말뚝을 소요길이까지 시공할 수 있어 현장 적용성이 뛰어나다는 특징을 지니고 있음.



(a) 강관말뚝



(b) 강관말뚝 시공전경

그림 1.1 강관말뚝(Steel Pipe Pile)

- 이와 같은 특징으로 인해 강관말뚝은 현재 국내에서 PHC말뚝 다음으로 높은 사용량을 보이며 연평균 47만톤 이상의 출하량이 지속적으로 유지되고 있으며(그림 1.2), 특히 횡하중 및 휨모멘트가 크게 작용하는 교량, 항만시설 등과 같은 토목구조물 공사에서는 강관말뚝의 선호도가 높은 것으로 조사됨. 강관말뚝의 구조물별 시장규모를 조사한 결과, 교량이 40%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 이어서 항만시설, 플랜트가 각 20%의 점유율을 보이는 것으로 분석됨(그림 1.3).

구 분	시장규모 (ton)	출하금액 (백만원)
2006년	440,931	326,100
2007년	542,831	412,800
2008년	532,972	602,400
2009년	394,985	377,400
2010년	439,848	445,400

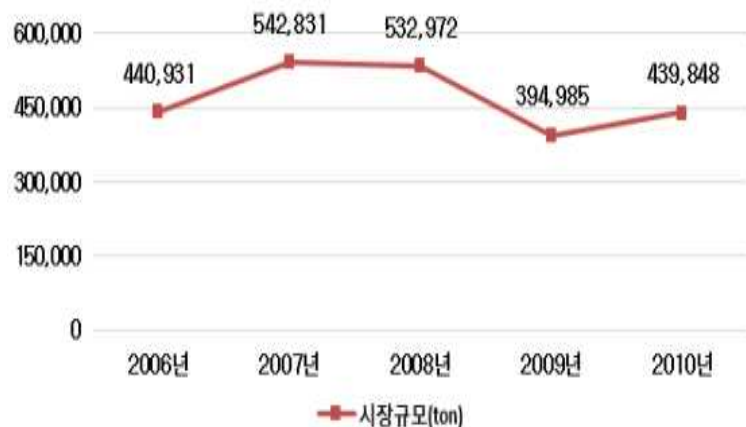


그림 1.2 2006-2010년 강관말뚝 출하량(건설산업정보연구원, 2011; 2019년 1월 기준 가장 최신 통계자료임)

구 분	시장 점유율(%)	시장규모 (ton)
건축물	10	43,984
교 량	40	175,939
항 만	20	87,969
플랜트	20	87,969
기 타	10	43,984
합 계	100	439,848

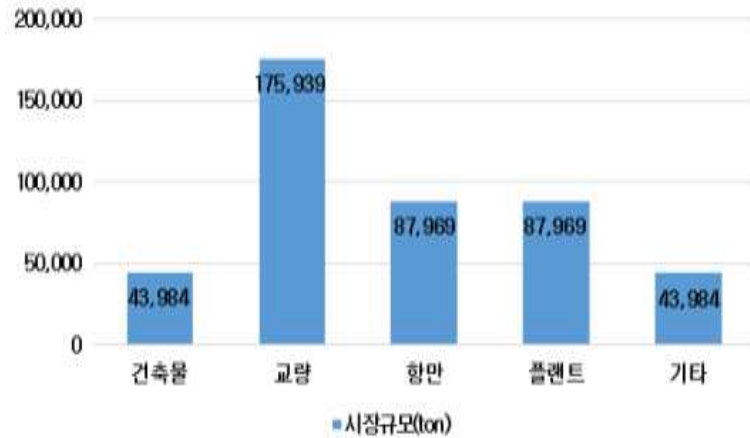


그림 1.3 2010년 강관말뚝 구조물별 시장규모(한국철강협회, 2011; 2019년 1월 기준 가장 최신 통계자료임)

- 2011년 한국철강협회에서 발표된 ‘강관말뚝 시장 및 기술동향 조사 보고서’에 따르면 2008-2010년 설계된 고속도로 교량(183개소)의 27.3%(50개소)가 강관말뚝으로 시공되었으며, 직접기초/PHC말뚝이 강관말뚝과 혼용된 사례, 복합말뚝이 적용된 사례를 포함할 경우 59.5%(109개소)의 사례에서 강관말뚝이 적용될 정도로 특히 토목구조물 공사에서 그 수요가 높은 것으로 조사됨(그림 1.4).
- 최근에는 강관 관련 재료의 내구성 향상 및 수명 증대, 외력에 대한 저항력 향상 등 강관말뚝에 대한 기술 개발 및 개량이 활발히 수행되고 있으며, PHC말뚝 대비 구조적 안정성이 우수한 복합말뚝(강관말뚝+PHC말뚝) 시장의 지속적인 성장을 고려해 볼 때 향후 강관말뚝의 수요 및 적용 범위는 비약적으로 확장될 것으로 기대됨(한국철강협회, 2011).

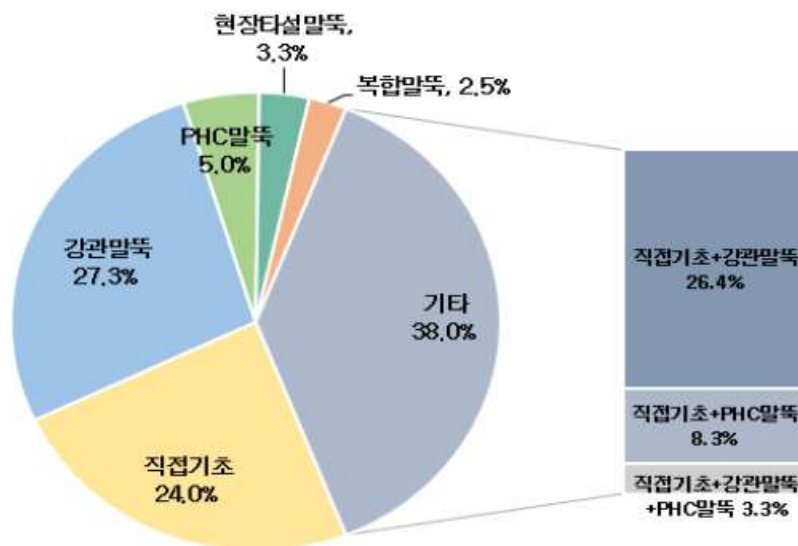


그림 1.4 고속도로 교량에 적용된 기초형식 현황
(한국철강협회, 2011; 2019년 1월 기준 가장 최신 통계자료임)

- 이러한 강관말뚝 공사는 크게 1)매입식/타입식 공법을 활용한 말뚝의 지반 관입, 2)강관말뚝 상부의 두부정리, 3)강관말뚝과 상부 구조물의 연결을 통한 지지력 확보의 3가지 작업으로 구분할 수 있음. 이 중 강관말뚝 상부의 두부정리 작업은 말뚝의 지반 관입 이후 말뚝기초의 시공에서 기초의 레벨을 맞추기 위해 수행되어야 하는 필수작업으로, 최근 현장에서는 관입된 말뚝의 상부를 일정한 높이로 절단하고 절단면 상부에 두부보강 캡을 씌우는 방식으로 작업이 수행되고 있음(그림 1.5).



그림 1.5 강관말뚝 두부정리 프로세스

- 강관말뚝 공사를 수행하고 있는 경기도 고양시 소재의 토목공사 현장을 대상으로 강관말뚝의 두부정리 작업 프로세스 분석 및 현장 전문가 인터뷰를 수행한 결과, 최근 현장에서 활용되고 있는 강관말뚝 두부정리 공법은 1)노무자 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면, 4)숙련공 부족 측면에서 문제점을 지니고 있어 이에 대한 개선 방안이 필히 요구되고 있는 것으로 조사 및 분석됨.
- 상기와 같은 문제점을 개선하기 위한 기술적 대안으로, 강관말뚝 두부정리 공법을 대상으로 한 여러 형태의 강관말뚝 두부정리 장비 개발이 국내·외적으로 수행된 바 있음. 그러나 현재까지 제시된 선행 개발기술의 기계화 대상 작업은 강관말뚝 두부정리 공법의 전체 작업 프로세스 중 강관말뚝 절단작업(그림 1.5-(2))에만 국한되어 있어, 기존 재래식 방식 대비 노무자의 안전성, 작업 생산성 및 편의성, 품질 제고 측면에서의 향상 효과가 극히 제한적이며, 특히 중량의 강관말뚝 두부 절단 후 이를 전도, 인양, 운반 및 적재하는 과정에서의 노무자 안전사고 발생 가능성 및 작업 생산성 저하 문제는 시급히 해결되어야 할 선계과제인 것으로 조사 및 분석됨.
- 따라서 본 연구의 목적은 강관말뚝 두부정리 작업에 있어, 두부보강 캡 설치작업(그림 1.5-(6))을 제외한 1)강관말뚝 절단선 인식, 2)강관말뚝 절단, 3)절단 부위의 전도 및 인양, 4)운반 및 적재 작업(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))의 쉼 과정을 기계화함으로써 노무자 안전사고의 발생가능성을 원천적으로 차단하고, 작업 생산성/편의성 향상은 물론 품질의 균일성 확보를 가능케 하는 ‘굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위(기 절단된 말뚝 상부) 핸들링 로봇’의 시제품을 개발하는 것임.
- 본 연구를 통해 개발될 ‘굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇’의 시제품은 교량, 항만시설 등과 같은 토목구조물 뿐만 아니라, 깊은 기초를 필요로 하는 고층 빌딩 등의 건축구조물 기초공사에도 적용될 수 있음. 또한 강관말뚝의 지속적인 수요와 상부말뚝이 강관말뚝으로 이뤄진 복합말뚝 사용량의 증가 추세를 고려해 볼 때 개발로봇의 적용 범위 및 추후 실용화를 통한 기대효과는 매우 클 것으로 예상되며, 본 연구 결과물의 현장 적용성 및 기술적/경제적 타당성이 확보될 경우, 민간으로의 성공적 기술이전 및 개발 기술의 수출을 통한 해외 시장성 확보까지도 가능할 것으로 기대됨.

2. 연구개발의 필요성

- 강관말뚝 두부정리 작업은 말뚝의 지반 관입 이후 말뚝기초의 시공에서 기초의 레벨을 맞추기 위해 수행되어야 하는 필수작업으로, 강관말뚝이 상부구조물의 하중지지 및 지반으로 구조물의 하중 전달 등 기초로서의 역할을 적절하게 수행하도록 반드시 요구되는 작업임.
- 현재 강관말뚝 두부정리 작업은 노무자가 강관말뚝에 절단 가이드레일을 설치하고, 가스 또는 플라즈마 방식이 적용된 자동절단기를 활용하여 강관말뚝을 절단하는 방식으로 수행됨. 그러나 이러한 두부정리 작업 방식은 절단기에서 발생하는 고열 및 노즐 폭발로 인한 노무자 상해, 절단된 말뚝상부의 전도 및 인양 중 노무자 충돌 등의 안전사고 발생 가능성이 높고, 작업자의 숙련도에 따라 작업 품질 및 생산성이 크게 상이하여 현장에서의 작업관리가 매우 어려운 공종임. 최근 건설현장의 숙련공 공급이 급격하게 저하되고 있는 현실로 미뤄볼 때 노무자의 안전사고 발생, 작업 품질 및 생산성 저하 문제는 날로 심화될 것으로 사료됨.
- 본 연구에서는 현재 강관말뚝 공사를 수행하고 있는 경기도 고양시 소재의 토목공사 현장을 방문하여 강관말뚝 두부정리 작업의 프로세스를 분석하고, 현장 전문가 인터뷰 및 강관말뚝 관련 자료조사를 통해 강관말뚝 두부정리 작업상의 문제점을 아래와 같이 1)노무자의 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면, 4)숙련공 부족 측면에서 분석하였음.

가. 노무자의 안전성 측면

- 최근 강관말뚝의 두부정리 작업을 위해 가이드레일과 자동절단기를 활용한 말뚝절단 방식이 주로 사용되고 있으나, 해당 방식은 가이드레일 및 자동절단기를 강관말뚝의 내주면 혹은 외주면에 설치/해체하기 위해 노무자의 현장투입이 필수적으로 요구된다는 단점을 지니고 있음. 특히 위험도가 상대적으로 높은 절단작업 중에도 노즐 및 배선의 꼬임 방지, 가이드레일 표면의 이물질 제거 등을 위해 1인 이상의 노무자가 절단기 주변에 반드시 상주해야 하므로, 강관말뚝의 두부정리 작업 중 발생할 수 있는 고열 및 노즐 폭발로 인한 노무자 상해, 절단된 말뚝상부의 전도 및 인양 중 노무자 충돌 등 안전사고 위험에 노무자가 지속적으로 노출되는 문제점을 지님.
- 특히 지반을 굴착하여 말뚝을 매입하는 말뚝공사의 특성상 지하수위가 상승하여 매입된 강관말뚝이 수몰되는 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 지속적인 지하수 유입으로 배수조차 용이하지 않아 작업환경이 부적합한 상황이 발생하고 있음(그림 1.6). 노무자는 이러한 작업환경 하에서도 말뚝 두부정리를 위해 가스 및 플라즈마 절단기를 활용한 절단작업을 수행해야 하므로, 실족에 의한 안전사고 및 지하수위에 따른 감전사고 발생 확률이 높은 것으로 조사됨.



그림 1.6 수몰된 강관말뚝 두부정리 작업현장

- 또한 절단된 강관말뚝의 상부를 전도 및 인양하기 위해서는 굴삭기 및 크레인이 활용될 수 있으나, 실제 대부분의 건설현장에서는 작업 생산성 제고 및 원가절감을 위해 굴삭기만을 활용하여 전도 및 인양 작업을 수행하고 있는 것으로 분석됨. 특히 인양작업 시에는 굴삭기에 로프를 연결하여 작업을 수행하게 되는데, 로프와 강관말뚝간의 견고하지 못한 체결방식으로 인한 강관말뚝의 낙하는 노무자의 비래사고로까지 이어질 수 있는 안전사고의 위험성이 있는 것으로 조사됨(그림 1.7).



그림 1.7 굴삭기만을 활용한 강관말뚝 전도 및 인양 작업

나. 품질의 균일성 측면

- 강관말뚝은 상부 구조물의 전체 하중을 지반에 전달하는 연결체 역할을 하므로 매설된 말뚝과 상부 구조물의 연결 상태는 구조물 전체 품질에 영향을 미친다고 할 수 있음. 과거에는 강관말뚝의 두부정리를 위해 노무자가 측량을 통해 절단선을 부분 표기하고 가스 절단기를 활용하여 노무자가 직접 강관말뚝의 절단작업을 수행하였으나, 최근 발주처의 안전 및 시공품질 확보에 대한 요구가 증가함에 따라 절단선 표기 이후 강관말뚝 외주면 혹은 내주면에 가이드레일 등의 절단 보조 장치를 설치하고 자동절단기를 활용하여 강관말뚝을 절단하는 방식으로의 전환이 이뤄지고 있음.
- 그러나 돌관공사와 같이 긴급한 작업이 요구되는 경우에는 여전히 노무자가 직접 강관말뚝의 절단작업을 수행하고 있어 이에 따른 작업품질 저하 문제가 발생하고 있으며(그림 1.8), 자동절단기를 활용하는 경우에도 절단장치가 발생시키는 고열에 의해 가이드레일이 변형되거나 절단장치의 내구성이 저하되는 등 절단작업을 지속적으로 수행할 경우 품질의 균일성을 유지하기 어렵다는 문제점이 있는 것으로 조사됨.



그림 1.8 노무자 직접절단 작업으로 인한 절단작업 품질저하

다. 작업 생산성/편의성 측면

- 강관말뚝의 두부정리 프로세스 중 말뚝 절단작업은 중량물을 대상으로 하는 작업이므로 노무자의 기술 숙련도에 따라 작업 생산성이 상이하다는 특징을 지니고 있음. 특히, 간척지 현장과 같이 지하수위 상승으로 인한 말뚝의 수몰이 빈번하게 발생하는 현장 환경(그림 1.6) 하에서는 노무자의 작업 접근성이 떨어지므로 작업 생산성 및 편의성 또한 크게 저하되는 문제점이 있는 것으로 분석됨.
- 최근 강관말뚝의 두부절단을 위해 사용되고 있는 자동절단기(그림 1.9-(a))의 경우, 노무자 직접 절단 방식과 비교해서 작업품질이 우수하다는 장점을 지니고는 있으나, 절단작업을 위한 설치 및 해체 과정이 매 강관말뚝마다 반복적으로 수행되어야 하며, 외주면 혹은 내주면에 가이드레일 등의 절단 보조 장치의 설치를 위해 지면에 관입된 말뚝의 최상부에서 작업을 수행해야 하므로 노무자 직접절단 방식 대비 작업 생산성 및 편의성이 저하되는 문제점을 지니고 있음.
- 또한 강관말뚝 두부정리 작업의 경우 말뚝절단 시 완전절단을 수행해야 하므로, 절단작업 중 중량의 말뚝상부가 전도되는 것을 방지하기 위해 매 절단작업마다 굴삭기 또는 크레인 등의 장비투입이 요구되며, 특히 두부정리 대상말뚝의 상부 길이가 길 경우 이를 수회에 걸쳐 분할 절단해야 하므로 작업 생산성 및 편의성 확보가 어려운 것으로 조사 및 분석됨(그림 1.9-(b)).
- 특히, 현장에서 수행되고 있는 강관말뚝 두부정리 작업은 각 작업 프로세스(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))마다 별도의 작업팀 및 건설장비(절단장치, 크레인, 굴삭기, 패이로더 등)가 투입되어야 하므로, 작업의 연속성이 저하되고, 이에 따른 작업 생산성 관리가 매우 어렵다는 문제점을 지니고 있음. 따라서 이와 같은 작업 생산성 저하 문제를 개선하기 위해서는 상기 작업 프로세스를 통합 수행하는 일체화된 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개발이 필히 요구되는 것으로 조사 및 분석됨.



(a) 강관말뚝 두부 자동절단기



(b) 노출된 강관말뚝 상부 높이

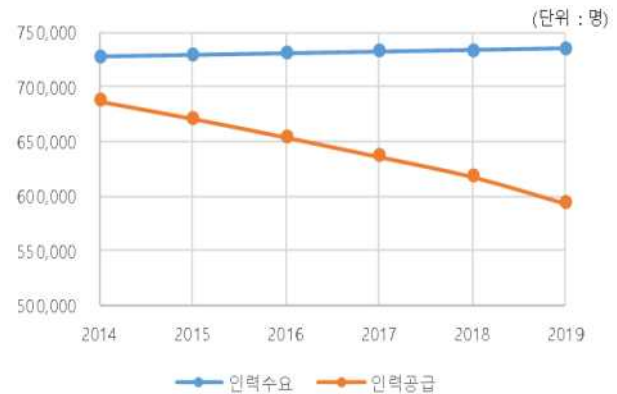
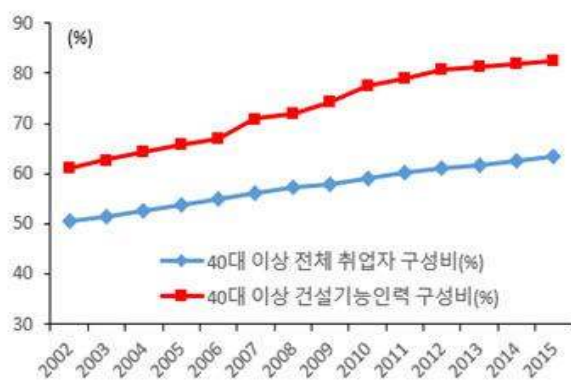
그림 1.9 작업 생산성 및 편의성 측면의 문제점

라. 숙련공 부족 측면

- 통계청에 따르면 2015년까지 전체 업종 취업자 중 40대 이상의 비중이 61.7%인 것에 비해 건설 기능인력 중 40대 이상의 비중은 81.8%로 건설산업의 인력 고령화 정도의 심각성을 보여주고 있음(그림 1.10-(a)). 또한 고용노동부에서는 건설 노무자 중 숙련공의 수요는 지속적으로 유지되나, 숙련공의 인력 공급은 2015년을 기점으로 급격하게 하락하여 2015년 약 6만명의 숙련공이 부족했는데 비해, 2019년은 숙련공 인력 공급의 지속적인 감소로 인해 약 14만명의 숙련공이 부족할

것으로 예측한 바 있음(그림 1.10-(b)).

- 그러나 건설산업은 건설 프로젝트 공사원가의 37% 이상을 노무비로 사용할 만큼 노동집약적이고(김석현, 2014), 노무 의존도가 높은 산업임. 실제 강관말뚝 절단작업을 수행하고 있는 현장 노무자 인터뷰 결과, 강관말뚝의 두부정리 작업은 고열의 절단장비를 활용하여 중량의 강관말뚝을 절단하는 고위험작업으로 노무자의 숙련도가 작업 안전성 및 품질, 생산성 및 편의성에 미치는 영향이 크며, 특히 최근 해당 직종으로의 신규인력 유입이 급격히 저하됨에 따라 노무자의 고령화 및 숙련공 부족 문제가 날로 심화될 것이라 응답하였음.



(a) 국내 취업자 및 건설 숙련공 구성비(통계청, 2016) (b) 건설 숙련공 수요 및 공급 전망(건설산업연구원, 2013)

그림 1.10 건설 숙련공의 고령화 및 공급 부족

- 이와 같은 강관말뚝 두부정리 작업의 1)노무자 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면, 4)숙련공 부족 측면 등의 문제점에 대한 현장에서의 인식을 조사하기 위해 강관말뚝 두부정리 작업 경력을 지닌 45인의 현장 전문가를 대상으로 설문조사를 수행하였음.
- 먼저 강관말뚝 두부정리 작업의 1)노무자 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면의 문제점을 대상으로 개선 우선순위에 대한 설문조사를 수행한 결과, 1)노무자 안전성 측면(56.8%), 2)품질의 균일성 측면(27.0%), 3)작업 생산성/편의성 측면(16.2%)의 순서로 개선이 시급하다고 응답하였음.
- 노무자 안전성 측면에서는 63.8%의 응답자가 절단된 강관말뚝상부의 인양 중 견고하지 못한 체결 방식으로 인한 충돌 및 낙하 사고를 개선하기 위한 방안 마련이 매우 시급하다고 응답하였으며, 품질의 균일성 측면에서는 72.3%의 응답자가 노무자의 작업 숙련도에 따른 절단면 품질 저하 문제를 개선해야 한다고 응답하였음. 또한 작업 생산성/편의성 측면에서는 57.4%의 응답자가 숙련공 부족으로 인한 작업 생산성 저하 문제를 작업 생산성 저하의 주요 요인으로 선정하였음.
- 상기의 문제점을 종합적으로 고려해볼 때, 95.7%의 응답자가 이와 같은 문제점에 대한 개선 필요성을 인지하고 있으며, 이를 개선하기 위한 자동화 로봇 개발 등의 대안마련이 시급하다고 응답하였음.
- 따라서 본 연구의 목적은 두부보강 캡 설치작업(그림 1.5-(6))을 제외한 강관말뚝 두부정리 작업의 쉐 과정(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))을 기계화함으로써 기존 강관말뚝 두부정리 작업의 위험성을 원천적으로 예방하고 품질의 균일성 확보, 작업 생산성 제고 등 강관말뚝 두부정리 작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 하는 ‘굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇’ 시제품을 개발하고, 실험실 실험을 통해 개발 기술의 성능 및 신뢰성을 종합적으로 평가하여 제안 로봇의 개발 타당성 및 추후 실용화 가능성을 검증하는 것임.

3. 연구개발 범위

가. 1차 연도

(1) 개발 목표

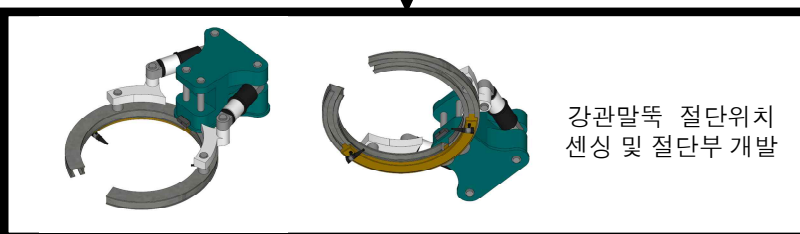
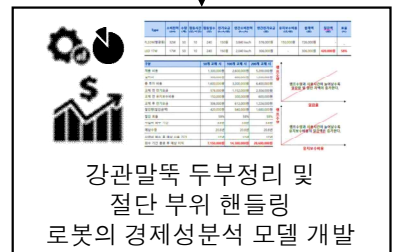
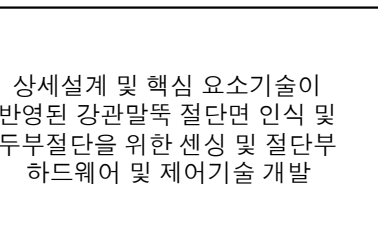
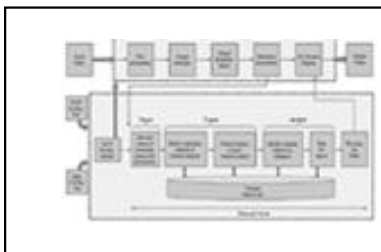
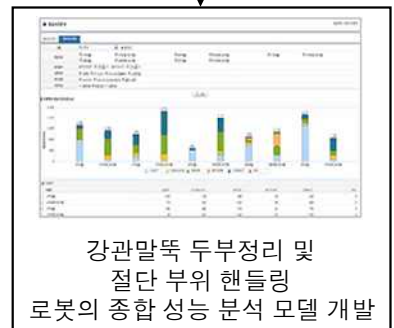
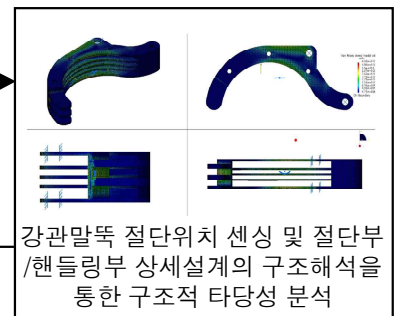
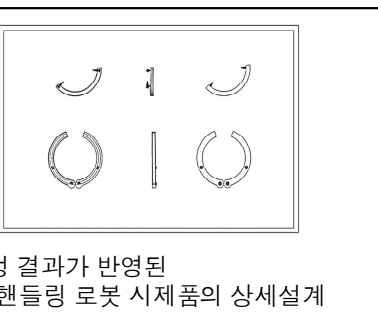
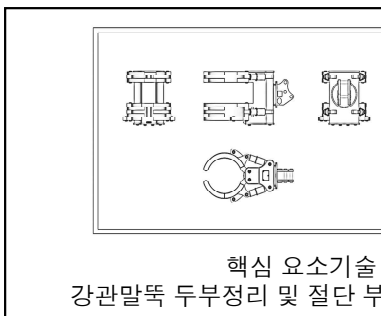
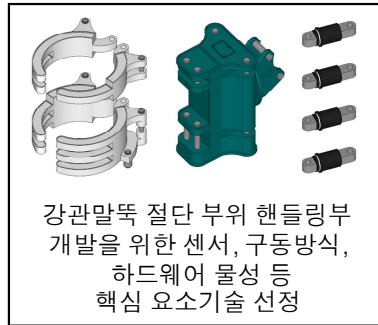
- 강관말뚝 절단위치 인식 및 절단 작업 수행을 위한 센싱 및 절단부 개발
- 구조해석을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 구조적 안정성 (Stability) 분석
- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 종합성능 및 경제성 분석 모델 개발

(2) 개발 내용 및 범위

- 본 연구에서는 1차 연도 연구개발을 통해 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발을 위한 핵심 요소기술을 선정하였고, 이를 기반으로 시제품의 상세설계, 핵심 요소기술 개발, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 센싱 및 절단부 시제품 개발을 수행하였음. 또한 개발된 시제품 및 상세설계에 대한 구조해석을 통해 구조적 안정성을 분석하고, 앞서 도출된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 상세설계 및 현장 요구사항을 반영하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 종합성능 및 경제성 분석모델을 개발함.

연차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차 연도	■ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발을 위한 핵심 요소기술(센싱 및 구동방식) 선정	✓ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부 개발을 위한 센서, 구동방식, 하드웨어 물성 등 핵심 요소기술 선정 ✓ 절단 부위 핸들링부 개발을 위한 센서, 구동방식, 하드웨어 물성 등 핵심 요소기술 선정
	■ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 상세설계	✓ 센싱 및 절단부, 절단 부위 핸들링부 개념디자인의 수정 및 보완 ✓ 핵심 요소기술 선정 결과가 반영된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 상세설계
	■ 강관말뚝 절단위치 인식을 위한 센싱 및 절단부의 핵심 요소기술 개발	✓ 센싱 기술(레이저 레벨기 및 디텍터)을 활용한 강관말뚝 절단위치 자동인식 기술 개발 ✓ 절단기술(유압 및 전동 장치, 플라즈마 절단 장치)을 활용한 강관말뚝 절단 기술 개발
	■ 상세설계, 핵심 요소기술 기반의 센싱 및 절단부 개발	✓ 상세설계 및 핵심 요소기술이 반영된 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부 하드웨어 및 제어기술 개발 ✓ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부 개발
	■ 구조해석을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 상세설계의 구조적 안정성(Stability) 분석	✓ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부 상세설계의 구조해석을 통한 구조적 타당성 분석 ✓ 절단 부위 핸들링부 상세설계의 구조해석을 통한 구조적 타당성 분석
	■ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부, 절단 부위 핸들링부의 성능 분석모델 개발	✓ 강관말뚝 절단위치 인식을 위한 센싱 및 절단부의 절단위치 자동 인식성능 및 절단성능 분석모델 개발 ✓ 절단 부위 핸들링부의 굴삭기 연결(링크) 및 절단 부위 핸들링 성능 분석모델 개발
	■ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능 및 경제성 분석 모델 개발	✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합 성능분석 모델 개발 ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석 모델 개발

1 차 연 도



나. 2차 연도

(1) 개발 목표

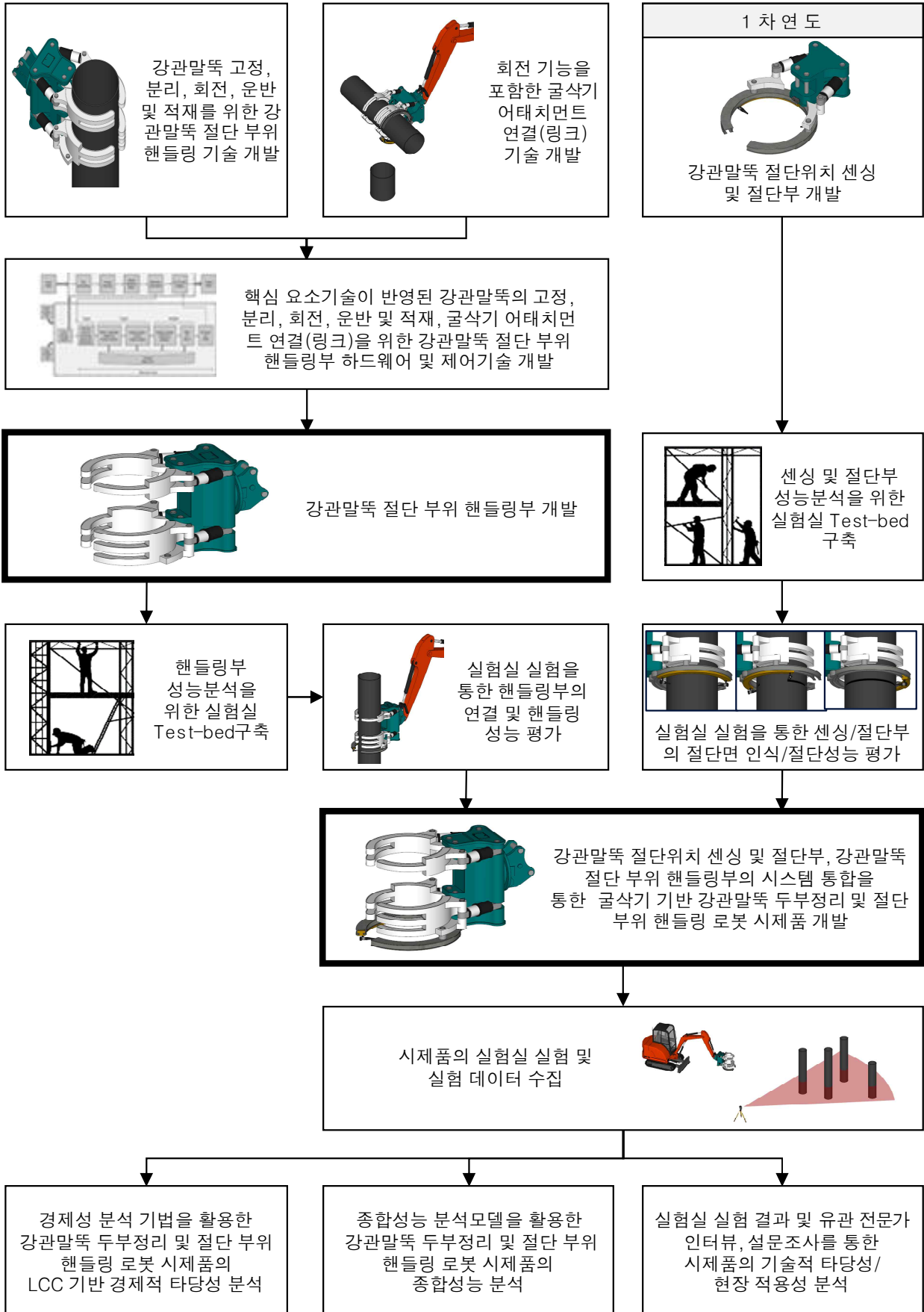
- 강관말뚝 고정, 분리, 회전, 운반 및 적재를 위한 절단 부위 핸들링부 개발
- 시스템 통합을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발
- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 종합성능 및 경제성 분석
- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 기술적 타당성 및 현장 적용성 분석

(2) 개발 내용 및 범위

- 본 연구에서는 2차 연도 연구개발을 통해 절단 부위 핸들링부 개발을 위한 핵심 요소기술을 선정하였고, 이를 기반으로 절단 부위 핸들링부 시제품의 상세설계 및 시제품 개발을 수행하였음. 또한 앞서 개발된 센싱 및 절단부 시제품과 절단 부위 핸들링부 시제품의 통합을 통해 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 최종 시제품을 도출하였고, 앞서 개발된 개발로봇의 종합성능 및 경제성 분석모델을 활용하여, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 종합성능 및 경제성, 기술적 타당성 및 현장 적용성 등을 도출함.

연차	주요 연구활동	세부 연구내용
2차 연도	■ 강관말뚝 고정, 분리, 회전, 운반 및 적재를 위한 절단 부위 핸들링부의 핵심 요소기술 개발	✓ 강관말뚝의 고정, 분리, 회전, 운반 및 적재를 위한 절단 부위 핸들링 기술 개발 ✓ 회전 기능을 포함한 굴삭기 어태치먼트 연결(링크) 기술 개발
	■ 상세설계 및 핵심 요소기술 기반의 절단 부위 핸들링부 개발	✓ 상세설계 및 핵심 요소기술이 반영된 강관말뚝의 고정, 분리, 회전, 운반 및 적재, 굴삭기 어태치먼트 연결(링크)을 위한 절단 부위 핸들링부 하드웨어 및 제어기술 개발 ✓ 절단 부위 핸들링부 개발
	■ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발	✓ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부, 절단 부위 핸들링부의 시스템 통합을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발
	■ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부, 절단 부위 핸들링부의 종합성능 분석	✓ 강관말뚝 절단위치 센싱 및 절단부의 성능분석을 위한 실험실 Test-bed 구축 ✓ 실험실 실험을 통한 센싱 및 절단부의 절단위치 인식 및 절단성능 평가 ✓ 절단 부위 핸들링부의 성능분석을 위한 실험실 Test-bed 구축 ✓ 실험실 실험을 통한 절단 부위 핸들링부의 연결(링크) 및 절단 부위 핸들링 성능 평가
	■ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 종합성능 및 경제성 분석	✓ 시제품의 실험실 실험 및 생산성, 경제성, 품질 분석 등을 위한 실험 데이터 수집 ✓ 종합성능 분석모델을 활용한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 종합성능 분석 ✓ 허가액법(Net Present Worth), 등가액법(Annual Cost), 편익비용비율(B/C Ratio) 분석, 손익분기점(Break-even Point) 분석, 수익률 분석(Rate of Return), 민감도(Sensitivity) 분석 등을 활용한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 LCC 기반 경제적 타당성 분석
	■ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 기술적 타당성 및 현장 적용성 분석	✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 실험실 실험 및 생산성, 품질, 경제성 분석 등을 위한 실험 데이터 수집 ✓ 실험실 실험 결과 및 유관 전문가 인터뷰, 설문조사를 통한 시제품의 기술적 타당성 및 현장 적용성 분석

2 차 연 도

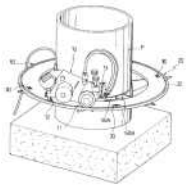
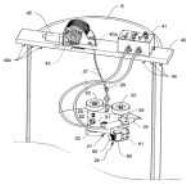
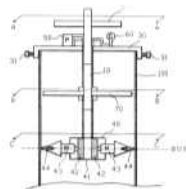
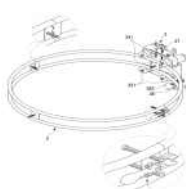


제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 강관말뚝 두부정리 장비 관련 국내특허 현황

○ 본 연구에서는 특허청에서 운영하는 특허 정보검색서비스를 바탕으로 국내에서 출원 및 등록된 강관말뚝 두부정리 장비 관련 특허를 분석함. 다음 표 2.1은 조사 및 분석된 국내 강관말뚝 두부정리 장비 관련 특허 중 적용된 기술요소가 상호 중복되는 특허를 제외한 대표적 특허 5건의 특징 및 단점을 요약한 것임.

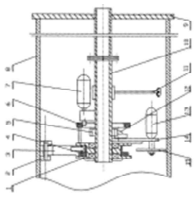
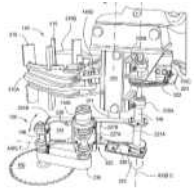
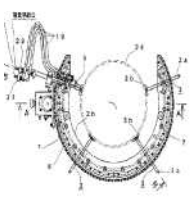
표 2.1 강관말뚝 두부정리 장비 관련 국내특허 현황 분석

구분	대표도	특징	단점
P1	 (대한민국 특허, 2002)	- 절단부, 원형 가이드레일부, 가이드레일 지지부로 구성됨. - 절단부가 모터에 의해 원형 가이드레일부를 따라 이동하며 절단작업을 수행함. - 절단방식으로 가스 절단 방식이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관말뚝 두부절단을 위한 별도의 측량 및 절단선 표시작업(그림 1.5-(1))이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단된 말뚝 상부의 인양 및 운반(그림 1.5-(4), (5))을 위한 별도의 장비 투입이 요구됨.
P2	 (대한민국 특허, 2002)	- 강관 상단에 설치되는 고정부, 와이어에 연결되어 강관에 삽입되는 절단부로 구성됨. - 자석의 자력에 의해 절단부가 강관 내부에 부착되고, 모터에 의해 강관의 내주면을 따라 이동하며 절단작업을 수행함. - 절단방식으로 플라즈마 절단 방식이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단된 말뚝 상부의 인양 및 운반(그림 1.5-(4), (5))을 위한 별도의 장비 투입이 요구됨. - 강관내부에서 절단작업이 수행되므로 장비의 작업현황 확인이 어려움. - 강관내부에서 작업이 수행되므로 절단작업 시 발생하는 고온에 의한 장비 손상 우려가 있음.
P3	 (대한민국 특허, 2006)	- 자석의 자력에 의해 절단부가 강관에 부착되어 가이드레일 없이 절단작업 수행이 가능하며, 모터에 의해 강관의 외주면을 따라 이동하며 절단작업을 수행함. - 절단방식으로 가스 절단 방식이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관말뚝 두부절단을 위한 별도의 측량 및 절단선 표시작업(그림 1.5-(1))이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단된 말뚝 상부의 인양 및 운반(그림 1.5-(4), (5))을 위한 별도의 장비 투입이 요구됨.
P4	 (대한민국 특허, 2007)	- 강관 상단에 설치되는 고정부, 절단부, 이를 연결하는 지지부로 구성됨. - 유압펌프에 의해 절단부가 강관 내주면에 밀착되고, 모터에 의해 지지부가 회전하며 절단작업을 수행함. - 절단도구로서 그라인더날 또는 커팅비트가 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단된 말뚝 상부의 인양 및 운반(그림 1.5-(4), (5))을 위한 별도의 장비 투입이 요구됨. - 절단도구의 마모로 인한 소모품 교체가 빈번히 요구됨. - 강관내부에서 절단작업이 수행되므로 장비의 작업현황 확인이 어려움.
P5	 (대한민국 특허, 2013)	- 조립/해체가 가능한 가이드레일부, 절단부로 구성됨. - 상기 가이드레일부는 경첩과 잠금쇠에 의해 펼쳐지는 형태로 조립/해체가 용이함. - 절단부가 모터에 의해 가이드레일부를 따라 이동하며 절단작업을 수행함. - 절단방식으로 가스 절단 방식이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관말뚝 두부절단을 위한 별도의 측량 및 절단선 표시작업(그림 1.5-(1))이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단된 말뚝 상부의 인양 및 운반(그림 1.5-(4), (5))을 위한 별도의 장비 투입이 요구됨. - 하나의 장비로 다양한 직경의 강관말뚝 절단을 수행할 수 없음.

2. 강관말뚝 두부정리 장비 관련 국외특허 현황

○ 국외에서 출원 및 등록된 강관말뚝 두부정리 장비 관련 특허를 분석한 결과, 다양한 형태의 두부정리 장비 관련 특허가 출원 및 등록된 것을 확인할 수 있음. 다음 표 2.2는 국외 강관말뚝 두부정리 장비 관련 특허 중 적용된 기술요소가 상호 중복되는 특허를 제외한 대표적 특허 4건의 특징 및 단점을 요약한 것임.

표 2.2 강관말뚝 두부정리 장비 관련 국외특허 현황 분석

구분	대표도	특징	단점
P6	 (중국특허, 2009)	- 강관 상단에 설치되는 고정부, 절단부, 이를 연결하는 지지부로 구성됨. - 절단부의 지지장치를 통해 작업 중심축이 고정되고, 모터에 의해 절단부가 강관 내주면에서 회전하며 절단작업을 수행함. - 절단도구로서 그라인더날이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단도구의 마모로 인한 소모품 교체가 빈번히 요구됨. - 강관내부에서 절단작업이 수행되므로 장비의 작업현황 확인이 어려움.
P7	 (미국특허, 2010)	- 말뚝상부를 고정 및 핸들링하는 클램프부, 절단부, 어태치먼트부로 구성됨. - 특정장비(트랙터)에 한정하여 어태치먼트(Attachment) 형태로 연결되며, 장비운전원에 의해 구동됨. - 절단도구로서 PHC말뚝 및 강관말뚝의 절단이 가능한 특수 그라인더날이 사용됨.	- 강관말뚝 두부절단을 위한 별도의 측량 및 절단선 표시작업(그림 1.5-(1))이 요구됨. - 특정장비(트랙터)에 한정적으로 적용되는 장비로 국내현장에서의 활용이 제한적임. - 절단도구의 마모로 인한 소모품 교체가 빈번히 요구됨.
P8	 (일본특허, 2012)	- 절단부, 회전형 가이드레일부, 가이드레일 지지부로 구성됨. - 절단부가 모터에 의해 회전형 가이드레일부를 따라 이동하며 절단작업을 수행함. - 절단방식으로 가스 절단 방식이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 작업자의 현장투입이 요구됨. - 강관말뚝 두부절단을 위한 별도의 측량 및 절단선 표시작업(그림 1.5-(1))이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함.
P9	 (미국특허, 2014)	- 베이스프레임, 고정부, 말뚝의 방향을 감지하는 센서와 절단부로 구성됨. - 프레임에 장착된 센서가 말뚝 고정위치와 회전경로를 감지하고, 고정홀더의 토치가 말뚝 외주면을 따라 회전하며 절단작업을 수행함. - 절단작업에는 플라즈마 절단 기술이 사용됨.	- 장비 설치를 위해 노무자의 현장 투입이 요구됨. - 강관말뚝 두부절단을 위한 별도의 측량 및 절단선 표시작업(그림 1.5-(1))이 요구됨. - 강관을 절단(그림 1.5-(2))하는 단편적 기능만 수행함. - 절단된 말뚝 상부의 인양 및 운반(그림 1.5-(4),(5))을 위한 별도의 장비 투입이 요구됨.

3. 국내 · 외 강관말뚝 두부정리 장비의 개발현황 및 문제점

- 국내 · 외 강관말뚝 두부정리 장비 관련 특허 분석 결과, 2000년대 중반부터 강관말뚝 두부정리 작업의 문제점 및 장비 개발의 중요성을 인지하여 관련 특허 기술 개발이 활발히 수행되어 왔으며, 개념적 수준의 특허뿐만 아니라 실용화 수준의 기술 개발까지도 일부 수행된 것으로 분석됨. 실제 개발이 추진된 강관말뚝 두부정리 장비의 개발현황을 조사한 결과, 국내의 W사(표 2.1의 P1), J사(표 2.1의 P2), 미국의 A사, 핀란드의 M사에서 개발된 4가지 장비가 대표적인 강관말뚝 두부정리 장비로 조사됨.

가. 국내 W사 강관말뚝 두부정리 장비

- 국내 W사에서 개발된 장비는 강관말뚝 최상단에 설치되는 고정장치, 와이어에 연결되어 강관에 삽입되는 내주면 플라즈마 절단장치로 구성됨. 해당 장비는 가스감지 장치를 활용하여 강관말뚝 내부의 폭발성 가스의 감지가 가능하므로 고온의 플라즈마에 의한 폭발사고를 미연에 방지할 수 있으며, 노즐 방향 조절장치를 활용하여 다양한 직경의 강관말뚝에 적용할 수 있다는 장점을 지님.
- 그러나 강관말뚝의 절단을 위해서 매번 노무자가 사다리 등을 활용하여 강관말뚝 최상단에 절단 장치를 설치/해체해야하므로 이로 인한 노무자의 위험 노출, 작업 생산성 저하 등의 문제를 야기할 수 있으며, 강관 내주면 이물질 및 요철에 의한 절단면 품질 저하, 강관 내부 가열에 의한 절단장치의 내구성 저하 및 장비 손상 등의 우려가 있음.
- 또한 해당 장비는 강관말뚝 두부정리 전체 작업 프로세스(그림 1.5) 중 강관말뚝을 절단하는 단편적 기능(그림 1.5-(2))만을 수행하고 있어, 절단작업 중 중량의 말뚝상부가 전도되는 것을 방지하기 위해 매 강관말뚝 절단작업마다 굴삭기 또는 크레인 등의 장비투입이 요구되며, 두부정리 대상말뚝의 상부 길이가 길 경우 이를 수회에 걸쳐 분할 절단해야하므로 작업 생산성 및 편의성에 문제가 있는 것으로 조사 및 분석됨. 아래 그림 2.1은 국내 W사 장비의 대표도 및 작업 프로세스를 나타낸 것임.



그림 2.1 국내 W사 장비의 대표도 및 작업 프로세스

나. 국내 J사 강관말뚝 두부정리 장비

- 국내 J사에서 개발된 장비는 강관말뚝의 절단위치 하부에 설치되는 지지장치, 원형 가이드레일, 외주면 가스 절단장치로 구성됨. 해당 장비는 지지장치에 설치된 수평조절 볼트를 활용하여 지지 장치의 수평도 조절이 가능하며, 지지장치의 규격 조절이 가능하므로 말뚝직경 변화에 대응이 가능하다는 장점을 지니고 있음.
- 그러나 강관말뚝의 절단을 포함한 장비의 설치/해체를 위해 노무자의 현장투입이 필히 요구되며, 절단 작업 중에도 노즐 및 배선의 꼬임 방지, 가이드레일 표면의 이물질 제거를 위해 1인 이상의

노무자가 절단기 주변에 반드시 상주해야 하므로 노무자의 위험 노출도가 높다는 문제점을 지님.

- 또한 해당 장비는 강관말뚝 두부정리 전체 작업 프로세스(그림 1.5) 중 강관말뚝을 절단하는 단편적 기능(그림 1.5-(2))만을 수행하고 있어, 절단작업 중 중량의 말뚝상부가 전도되는 것을 방지하기 위해 매 강관말뚝 절단작업마다 굴삭기 또는 크레인 등의 장비투입이 요구되며, 특히 두부정리 대상말뚝의 상부 길이가 길 경우 이를 수회에 걸쳐 분할 절단해야하므로 작업 생산성 및 편의성 확보에 문제가 있는 것으로 조사 및 분석됨. 아래 그림 2.2는 국내 J사 장비의 대표도 및 작업 프로세스를 나타낸 것임.



그림 2.2 국내 J사 장비의 대표도 및 작업 프로세스

다. 미국 A사 강관말뚝 두부정리 장비

- 미국 A사에서 개발된 장비는 강관말뚝 고정 및 핸들링용 클램프, 외주면 그라인더 절단장치, 어태치먼트부로 구성됨. 해당 장비는 특수 제작된 트랙터에 어태치먼트(Attachment) 형태로 장착되며, 강관말뚝 절단 및 절단된 말뚝상부의 고정 및 인양 등의 기능을 복합적으로 수행할 수 있어 노무자의 현장 투입을 최소화하고 작업 생산성 및 편의성 제고가 가능하다는 장점을 지니고 있음.
- 그러나 해당 장비는 특수 제작된 트랙터에 한정하여 적용하도록 개발된 장비로, 현장 적용을 위해 과도한 초기투자비가 소요되는 물론, 절단 방식의 특성상 특수제작된 절단장비(그라인더날 등) 및 소모품의 교체주기가 짧아 국내 건설현장에서의 활용실적은 전무하며, 미국 내에서도 현장적용이 활발히 이뤄지지 못하고 있는 실정임. 또한 측량 및 절단선 표시를 위해 노무자의 현장 투입이 필수적으로 요구된다는 단점을 지니고 있음. 아래 그림 2.3은 미국 A사 장비의 대표도 및 작업 프로세스를 나타낸 것임.



그림 2.3 미국 A사 장비의 대표도 및 작업 프로세스

라. 핀란드 M사 강관말뚝 두부정리 장비

- 핀란드의 M사에서 개발된 장비는 굴삭기 등 건설장비에 장착되어 사용되는 어태치먼트 형태의 장비로 말뚝의 고정 및 인양을 위한 클램프부, 절단부, 어태치먼트부로 구성됨. 해당 장비는 2017년 상반기에 개발된 최신 강관말뚝 두부정리 장비이며, 말뚝 절단과 절단된 말뚝 상부 인양 및

운반 기능을 복합적으로 수행하여 노무자의 현장 투입 최소화 및 작업 생산성을 향상시킬 수 있다는 장점을 지니고 있음.

- 그러나 해당 장비는 직경 140~270mm의 소형 강관말뚝만을 대상으로 두부정리 작업을 수행하도록 설계됨에 따라 500mm 규격 이외의 강관말뚝을 주로 사용하는 국내 현장에서는 활용할 수 없다는 문제점을 지니고 있음. 또한 측량 및 절단선 표시를 위해 노무자의 현장투입이 필수적으로 요구된다는 단점을 지니고 있음. 아래 그림 2.4는 핀란드 M사 장비의 대표도 및 작업 프로세스를 나타낸 것임.



그림 2.4 핀란드 M사 장비의 대표도 및 작업 프로세스

- 국내 기술개발 현황 및 특허 분석(표 2.1의 P1~P5) 결과, 2000년대 중반부터 강관말뚝 두부정리 작업의 문제점 및 장비 개발의 중요성을 인지하여 관련 특허들이 제시되어 왔음. 이를 절단방식에 따라 분류하면, 표 2.1의 P2, P4와 같이 절단부가 강관말뚝에 삽입되어 말뚝을 절단하는 내주면 절단방식의 장비와 표 2.1의 P1, P3, P5와 같이 강관말뚝 외부에서 말뚝을 절단하는 외주면 절단방식의 장비로 구분됨.
- 국내 내주면 절단방식의 장비(표 2.1의 P2, P4)는 매번 노무자가 현장에 투입되어 사다리 등을 활용하여 강관말뚝 최상단에 절단장치를 설치/해체해야하므로 이로 인한 노무자의 위험 노출 및 작업 생산성 저하 등의 문제를 야기할 수 있으며, 강관 내주면 이물질 및 요철에 의한 절단품질 저하, 강관 내부 고열에 의한 절단장치의 내구성 저하 및 장비 손상 등의 우려가 있음.
- 국내 외주면 절단방식의 장비(표 2.1의 P1, P3, P5)는 강관말뚝 두부정리 작업을 위해 2인 이상의 노무자가 현장에 투입되어야 하고, 특히 국내에서 가장 많이 사용되는 장비(표 2.1의 P1)의 경우 절단 작업 중에도 노즐 및 배선의 꼬임 방지, 가이드레일 표면의 이물질 제거를 위해 1인 이상의 노무자가 절단기 주변에 반드시 상주해야 하므로 노무자의 위험 노출도가 높다는 문제점을 지니고 있음.
- 국내 강관말뚝 두부정리 작업을 대상으로 제안된 상기의 모든 기술들(표 2.1의 P1~P5)은 전체 작업 프로세스(그림 1.5) 중 강관말뚝을 절단하는 단편적 기능(그림 1.5-(2))만을 수행하고 있어, 절단작업 중 중량의 말뚝상부가 전도되는 것을 방지하기 위해 매 강관말뚝 절단작업마다 굴삭기 또는 크레인 등의 장비투입이 요구되며, 특히 두부정리 대상말뚝의 상부 길이가 길 경우 이를 수회에 걸쳐 분할 절단해야하므로 작업 생산성 및 편의성 확보가 어려운 것으로 조사 및 분석됨.
- 국외 기술개발 현황 및 특허 분석(표 2.2의 P6~P9) 결과, 국외에서도 강관말뚝 두부정리 장비의 필요성을 인지하고 기술개발을 수행하였으며, 일부 장비는 실용화되어 국외 현장에 투입되고 있는 것으로 조사됨. 이 중 미국 A사, 핀란드 M사에서 개발된 장비는 어태치먼트(Attachment) 형태의 장비로, 말뚝 절단뿐만 아니라 절단된 말뚝 상부 인양 및 운반 기능을 복합적으로 수행할 수

있다는 장점을 지니고 있음. 그러나 미국 A사의 장비는 특수 제작된 트랙터만을 대상으로 개발됨에 따라 그 활용이 제한적이고 극히 일부 현장에서만 시범적으로 운용된 사례가 있으며, 핀란드 M사의 장비는 직경 140~270mm의 소형 강관말뚝만을 대상으로 두부정리 작업을 수행하도록 설계됨에 따라, 직경 500mm 내외의 강관말뚝 사용량이 대부분인 국내 현장에 적용하기에 적합하지 않은 것으로 조사 및 분석됨.

○ 따라서 본 연구에서는 두부보강 캡 설치작업(그림 1.5-(6))을 제외한 강관말뚝 두부정리 작업의 쏠 과정(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))을 기계화의 대상으로 선정하고, 기존 강관말뚝 두부정리 작업의 위험성을 원천적으로 예방함은 물론 품질의 균일성 확보, 작업 생산성/편의성 제고 등 강관말뚝 두부정리 작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 하는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개념디자인을 아래와 같은 주요 고려사항을 반영하여 도출함.

- 1) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 강관말뚝 두부정리 작업의 안전성 향상, 품질의 균일성 확보, 작업 생산성 및 경제성 제고 등을 위해, 두부보강 캡 설치작업(그림 1.5-(6))을 제외한 측량 및 강관말뚝 절단선 표시, 강관말뚝 절단, 절단 부위 전도 및 인양, 절단 부위 운반 및 적재(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))의 기능을 복합적으로 수행할 수 있는 다기능(All-in-one)의 장비로 설계되어야 함.
- 2) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 노무자의 현장 투입을 최소화하고, 로봇을 손쉽게 운용할 수 있도록 굴삭기 등의 국내 현장에서 범용적으로 활용되는 건설장비에 장착 가능한 어태치먼트(Attachment) 형태로 개발되어야 함.
- 3) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 현재 국내 강관말뚝 공사에 주로 사용되는 500mm 규격 내외의 강관말뚝을 대상으로 두부정리 작업을 수행할 수 있도록 개발되어야 함. 또한 개발로봇은 절단 부위(기 절단된 말뚝상부)를 인양하기 위한 충분한 강성 및 힘을 지녀야 하고, 말뚝 인양 시 건설장비의 전도를 방지할 수 있도록 설계되어야 함.

○ 본 연구에서는 위와 같은 주요 고려사항을 반영하여 1)측량 및 강관말뚝 절단선 표시, 2)강관말뚝 절단, 3)절단 부위 전도 및 인양, 4)절단 부위 운반 및 적재의 프로세스(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))를 자동화하기 위한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 개념디자인을 도출하였으며, 개념디자인의 주요기능(그림 2.5)은 다음과 같음.

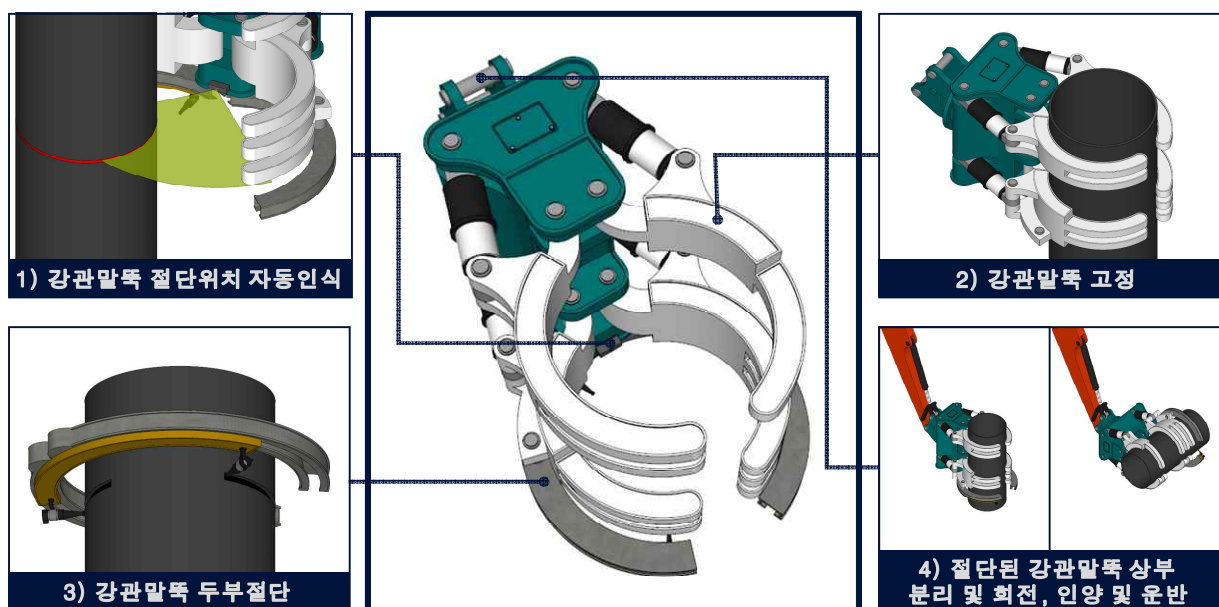


그림 2.5 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개념디자인 및 주요기능

- 아래 표 2.3은 기존 기술과의 1)절단 방식, 2)절단면 품질, 3)강관말뚝 두부정리 프로세스 적용 범위 등의 비교를 통해 본 연구의 창의성·혁신성을 분석한 결과임. 분석 결과, 본 연구를 통해 개발될 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 국내 실정에 적합하고 기존 기술에 비해 노무자의 안전성, 생산성 및 작업 편의성을 향상하고 품질의 균일성 확보가 가능하며, 두부보강 캡 설치작업을 제외한 강관말뚝 두부정리 작업의 쏘 과정에 적용할 수 있어 현장 적용성이 높을 것으로 사료됨.

표 2.3 기존 기술과의 상대적 비교를 통한 개발로봇의 창의성·혁신성 분석

개발국가	구분	절단 방식	절단면 품질	강관말뚝 두부정리 프로세스 적용 범위					비고
				(1)측량 및 강관말뚝 절단선 표시	(2)강관말뚝 절단	(3)강관말뚝 전도 및 인양	(4)절단 말뚝 운반 및 적재	(5)두부보강 캡 설치	
국내	 P1	외주면	중	×	○	×	×	×	
	 P2	내주면	하	×	○	×	×	×	
	 P3	외주면	하	×	○	×	×	×	
	 P4	내주면	중	×	○	×	×	×	
	 P5	외주면	중	×	○	×	×	×	
	 P6	내주면	하	×	○	×	×	×	
국외	 P7	외주면	상	×	○	○	△	×	국내 현장적용 불가 (표 2.2 참조)
	 P8	외주면	중	×	○	×	×	×	
	 P9	외주면	상	×	○	×	×	×	
	 핀란드	외주면	상	×	○	○	△	×	국내 현장적용 불가 (그림 14 참조)
	본 연구에서 제안하고 있는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇								
		외주면	상	○	○	○	○	×	

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구수행내용 및 성과

가. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술 선정

○ 본 연구에서는 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계에 앞서, 강관말뚝 두부정리 작업의 자동화/기계화 대상 프로세스(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))를 고려하여 개발로봇의 주요기능을 1)절단위치 센싱, 2)강관말뚝 절단, 3)강관말뚝 인양 및 운반의 세 가지로 구분하고, 해당 기능을 수행하기 위한 기능별 요소기술 분석을 수행하였음. 또한 요소기술별 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석 및 Trade-off Analysis를 수행하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요 기능별 핵심 요소기술을 선정하였음.

(1) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 요소기술 분석

(가) 강관말뚝 절단위치 자동 인식을 위한 요소기술 분석

- 강관말뚝 절단위치 자동 인식 기능은 기존 재래식 강관말뚝 두부정리 작업 프로세스(그림 1.5) 중 측량 및 강관말뚝 절단선 표시(그림 1.5-(1)) 작업 시 노무자의 현장 투입이 필수적으로 이뤄져야 한다는 한계점을 개선하기 위해 고안된 기능으로서, 본 연구에서는 이를 자동화하기 위한 기술적 대안을 아래 표 3.1와 같이 조사 및 분석하였음.

표 3.1 측량 및 강관말뚝 절단선 표시 작업의 자동화를 위한 기술 대안

구 분	레이저 레벨기 및 수광기 (Leveling laser, Laser detector)	광파거리계 (Optical range finder)	GNSS 및 IMU (Global Navigation Satellite System & Inertial Measurement Unit)
구성요소			
	레이저 레벨기, 수광기	광파거리계, 인식센서	가속도계, 회전속도계, 자력계, GPS 수신기
구동원리	레이저 레벨기로부터 조사된 레이저를 수광기가 감지	절단위치의 Z좌표를 인식	절단위치의 GPS 좌표를 인식
인식성능	오차범위 ±5mm	오차범위 ±5mm	오차범위 ±10mm
초기 구축비용	₩1,000,000 ~ 3,000,000	₩10,000,000 ~ 15,000,000	₩20,000,000 이상

- 기술 대안 조사 결과, 절단위치 센싱을 위해 사용 가능한 대표적인 요소기술은 레이저 레벨기와 수광기(Leveling laser, Laser detector), 광파거리계(Optical range finder), GNSS(Global Navigation Satellite System) 및 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서의 세 가지로 구분할 수 있음.
- 기술 대안에 대한 분석 결과, GNSS 및 IMU 기반의 절단위치 센싱 방식은 절단위치에 대한 절대좌표를 취득할 수 있고 굴삭기의 현재 상태에 대한 시각화된 정보 표현이 가능한 가장 진보된 기술이나, 초기 구축비용이 과도하게 높고 위치인식 정확도가 다소 떨어진다는 단점

을 지닌 것으로 분석됨.

- 광파거리계를 활용한 절단위치 센싱 방식은 절단위치에 대한 절대좌표 취득이 가능하고 비교적 높은 정확도를 지니고 있으나, 초기 구축비용이 다소 높고 광파거리계가 굴삭기 버킷 위치의 인식 센서를 인지하지 못할 경우 활용이 어렵다는 단점을 지닌 것으로 분석됨.
- 반면 레이저 레벨기와 수광기 기반의 절단위치 센싱 방식의 경우 레이저 레벨기로부터 발생하는 빛을 수광기를 통해 인식하는 방식으로 높은 인식 정확도와 더불어 초기 구축비용이 낮다는 장점을 지니고 있는 것으로 분석됨.

(나) 강관말뚝 두부절단을 위한 요소기술 분석

- 강관말뚝 두부절단 기능은 기존 재래식 강관말뚝 두부정리 작업 프로세스(그림 1.5) 중 강관말뚝 절단 작업 시 고위험 작업에 노무자가 직접 투입되는 현행의 문제점을 개선하기 위해 고안된 기능으로서, 본 연구에서는 이를 자동화하기 위한 기술적 대안을 아래 표 3.2과 같이 조사 및 분석하였음.

표 3.2 강관말뚝 절단 작업의 자동화를 위한 기술 대안

구 분	그라인더 절단 (Grinder Cutter)	산소가스 절단 (Oxygen Cutter)	플라즈마 절단 (Plasma Cutter)
구성요소			
	그라인더날, 절단장치	산소 및 아세틸렌 가스, 절단노즐	플라즈마 발생기, 발전기, 에어컴프레서, 절단노즐
구동원리	그라인더날 회전에 의한 절단	금속과 산소 및 아세틸렌 가스의 반응열에 의한 절단	플라즈마 제트기류를 활용한 절단
절단시간	약 6분 (직경 500mm 기준)	약 7분 (직경 500mm 기준)	약 3분 (직경 500mm 기준)
초기 구축비용	₩300,000 ~ 600,000	₩400,000 ~ 600,000	₩1,000,000 이상

- 기술 대안 조사 결과, 강관말뚝의 절단 작업을 수행하기 위해 사용되는 대표적인 요소기술은 그라인더 절단(Grinder Cutter), 산소가스 절단(Oxygen Cutter), 플라즈마 절단(Plasma Cutter) 방식의 세 가지로 구분할 수 있음.
- 기술 대안에 대한 분석 결과, 그라인더 절단(Grinder Cutter) 방식은 그라인더 날을 활용해서 절단을 수행하는 작업의 특성상 별도의 장비를 필요로 하지 않으므로 초기 구축비용이 낮다는 장점을 지니고 있으나, 강재로 이뤄진 말뚝의 절단으로 인해 그라인더 날의 교체주기가 짧고, 고속으로 회전하는 그라인더 날을 활용하는 작업이므로 작업 위험성이 다소 높으며, 강관말뚝 1본 절단 시 소요되는 절단 시간이 약 6분으로 타 방식에 비해 길다는 단점을 지닌 것으로 분석됨.
- 산소가스 절단(Oxygen Cutter) 방식은 산소 및 아세틸렌 가스, 절단노즐로 구성됨에 따라 초기 구축비용이 낮다는 장점을 지니고 있으나, 산소 및 아세틸렌 가스를 활용하여 고열로 절단을 수행하는 작업의 특성상 역화 등으로 인한 안전사고 발생 가능성이 높고, 지속적인

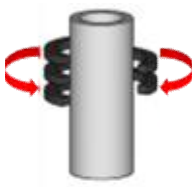
산소 및 아세틸렌 가스의 보충을 위해 소요되는 작업비용이 타 방식에 비해 높으며, 강관말뚝 1본 절단 시 소요되는 절단 시간이 약 7분으로 타 방식에 비해 길다는 단점을 지닌 것으로 분석됨.

- 플라스마 절단(Plasma Cutter) 방식은 플라스마 발생기, 발전기, 에어컴프레서, 절단노즐 등 절단작업을 위해 요구되는 구성요소가 많아 초기 구축비용이 높다는 단점을 지니고 있으나, 그라인더 절단(Grinder Cutter), 산소가스 절단(Oxygen Cutter) 방식에 비해 작업 안전성이 높고, 초기 구축비용 외 추가적으로 소요되는 작업비용이 타 방식에 비해 작으며, 강관말뚝 1본 절단 시 소요되는 절단 시간이 약 3분으로 타 방식에 비해 우수하다는 장점을 지닌 것으로 분석됨.

(㉔) 강관말뚝 고정, 절단된 강관말뚝 상부 분리 및 회전, 인양 및 운반을 위한 요소기술 분석

- 강관말뚝 고정, 절단된 강관말뚝 상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 기능은 기존 재래식 강관말뚝 두부정리 작업 프로세스(그림 1.5) 중 절단 부위 전도 및 인양 작업(그림 1.5-(3), (4)), 절단 부위 운반 및 적재 작업(그림 1.5-(5)) 시 안전사고 발생 가능성이 높을 뿐만 아니라 사고 발생 시 사고 강도가 높다는 현행 방식의 문제점을 개선하기 위해 고안된 기능으로서, 본 연구에서는 이를 자동화하기 위한 기술적 대안을 아래 표 3.3와 같이 조사 및 분석하였음.

표 3.3 강관말뚝 고정, 절단된 강관말뚝 상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 작업의 자동화를 위한 기술대안

구 분	스크랩 그래플 (Scrap Grapple)	버킷 그래플 (Bucket Grapple)	회전형 그래플 (Rotary Grapple)
구성요소			
구동원리			
핸들링 성능	말뚝 상부 고정 어태치먼트 회전 가능 수직 인양 작업 가능	말뚝 상부 고정 어태치먼트 회전 불가능	말뚝 측면 고정 어태치먼트 회전 가능
초기 구축비용	₩3,000,000 ~ 5,000,000	₩3,000,000 ~ 5,000,000	₩4,000,000 ~ 6,000,000

- 기술 대안 조사 결과, 강관말뚝 고정, 절단된 강관말뚝 상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 작업을 수행하기 위해 사용되는 대표적인 요소기술은 스크랩 그래플(Scrap Grapple), 버킷 그래플(Bucket Grapple), 회전형 그래플(Rotary Grapple)의 세 가지로 구분할 수 있음.
- 기술 대안에 대한 분석 결과, 일반적으로 건축 폐기물 등의 인양에 주로 활용되는 스크랩 그래플(Scrap Grapple)의 경우 저렴한 비용으로 인양 및 운반 기능을 구축할 수 있으나, 수직 작업만 수행 가능하고 강관의 인양 중 탈락 우려가 있다는 단점을 지닌 것으로 분석됨.
- 현업에서 소규모 건설자재 운반에 주로 사용되는 버킷 그래플(Bucket Grapple)의 경우 굴착 및 적재와 자재의 인양 및 운반을 별도의 교체작업 없이 동시에 수행할 수 있다는 장점을 지니고 있으나, 강관말뚝 절단장치와 동시 구동이 어렵다는 문제점을 지닌 것으로 분석됨.

- 반면 회전형 그래플(Rotary Grapple)의 경우 초기 구축비용이 높고 구동이 다소 복잡하다는 단점을 지니고 있으나, 강관말뚝의 자유롭고 안정적인 인양 및 운반이 가능하고, 자체 회전이 가능하므로 강관말뚝 절단장치와 동시 구동이 가능하다는 장점을 지닌 것으로 분석됨.

(2) AHP 분석을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술 선정

- 본 연구에서는 앞서 분석된 1)절단위치 센싱, 2)강관말뚝 절단, 3)강관말뚝 인양 및 운반 기능의 요소기술을 토대로 현업에서의 의견이 충분히 반영될 수 있도록 설문조사 기반의 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석 및 Trade-off Analysis를 수행하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요 기능별 요소기술을 정량적으로 평가하여 핵심 요소기술을 선정하였음.
- 핵심 요소기술의 선정을 위해 사용되는 AHP 분석 기법은 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교에 의한 판단을 통해 평가자의 지식, 경험 및 직관을 포착하는 의사결정방법으로, 해결해야 하는 문제를 몇 개의 계층(Hierarchy) 구조로 파악한 뒤 분석과정을 통해 상대적 우선순위를 선정하는 방식을 사용함(Saaty, 1980).
- AHP 분석 기법은 불확실한 상황이나 다양한 평가의 기준이 있을 때 활용할 수 있으며(Kim, 2012), 의사결정자의 판단에 대한 일관성을 측정할 수 있어 분석 결과의 신뢰성 확보가 가능함(Cho, 2005). 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술 선정을 위한 AHP 분석 프로세스를 아래 그림 3.1과 같이 도출하고 분석을 수행하였음.

Step 1: 구성 요소별 평가항목 가중치 산정

Step 1-1

기술조사 및 문헌조사를 통한 평가기준 설정 및 평가기준의 가중치를 도출하기 위한 1차 설문조사 실시

Step 1-2

구성요소별 평가항목의 쌍대비교 행렬

주 기능	평가항목1[a _i]	평가항목2[a _j]	...	평가항목N[a _n]
평가항목1[a _i]	a _{ii}	a _{ij}		a _{in}
평가항목2[a _j]	a _{ji}	a _{jj}		a _{jn}
⋮				
평가항목N[a _n]	a _{ni}	a _{nj}		a _{nn}
합계	Σ a _{ni}	Σ a _{nj}		Σ a _{nn}

Step 1-3

평가항목의 결과값 및 가중치 계산

① 일관성 분석(CR) = $\frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \cdot \frac{1}{RI} > 0.1$

CR: 일관성 비율 CI: 일관성 지수 = $\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$ RI: 난수지수 = 0.58, 0.90, 1.12 ...

② 평가항목의 결과값 [A₁...A_n] = $\left(\frac{a_{ij}}{\sum a_{ni}} + \frac{a_{ij}}{\sum a_{nj}} + \frac{a_{ik}}{\sum a_{nk}} \right)$

③ 평가항목의 가중치 [w₁...w_n]

= 결과값 (A₁...A_n) / 평가항목 개수

Step 2: 각 대안별 점수 산정

Step 2-1

평가기준 별 대안의 우선순위 평가를 위한 2차 설문조사 실시

Step 2-2

각 평가기준별 대안 점수 계산

① 우선순위별 점수 부여

1st-Rank = 3점 부여 2nd-Rank = 2점 부여 3rd-Rank = 1점 부여

② 각 평가기준별 대안 점수 = Σ K번째 설문조사 점수 (K=1,2...n)

Step 3: 최종 대안 선택

① 대안의 최종 평가점수 계산

최종 평가점수 = 평가항목의 가중치(w₁) × w₁의 대안점수 + ... + 평가항목의 가중치(w_n) × w_n의 대안점수

② 최종 대안 선택

그림 3.1 핵심요소기술 선정을 위한 AHP 분석 프로세스

(가) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요 기능별 평가 항목 선정

- 본 연구에서는 강관말뚝 두부정리 공사 경험을 지닌 45인의 현장 전문가 설문조사를 통해 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요 기능별 평가 항목을 1)안전성, 2)정확성, 3)작업 생산성, 4)경제성, 5)품질의 균일성의 다섯 가지로 구분하고, 주요 기능별로 평가가 필요한 항목을 아래와 표 3.4와 같이 선정하였음.
- 선정 결과, 1)절단위치 센싱 기능에서는 절단위치 인식 정확성, 작업 생산성, 경제성 항목이 선정되었으며, 2)강관말뚝 절단 기능에서는 작업 안전성, 작업 생산성, 경제성, 품질의 균일성 항목이 선정되었음. 또한 3)강관말뚝 인양 및 운반 기능에서는 작업 안전성, 작업 생산성, 경제성 항목이 개발로봇의 주요 기능별 평가항목으로 선정되었음.

표 3.4 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요 기능별 평가항목

주 기능	안전성	정확성	작업 생산성	경제성	품질의 균일성
절단위치 센싱 기능		○	○	○	
강관말뚝 절단 기능	○		○	○	○
강관말뚝 인양 및 운반 기능	○		○	○	

(나) 성능평가 항목별 쌍대비교를 통한 가중치 산정

- 본 연구에서는 앞서 선정된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요 기능별 평가 항목 선정 결과를 토대로, 평가 항목별 가중치 산정을 위한 9점 척도 기반의 1:1 쌍대비교 설문조사를 수행하였음.
- 설문조사는 45인의 현장 전문가를 대상으로 수행되었으며, 설문 결과의 신뢰성을 높이기 위해 설문지의 일관성 비율(CR; Consistency Ratio)이 0.1 미만(Saaty, 1980)으로 나타난 설문 결과만을 분석에 반영하였음.
- 일관성 비율(CR) 분석 결과, 1)절단위치 센싱 기능 28부, 2)강관말뚝 절단 기능 31부, 3)강관말뚝 인양 및 운반 기능 31부의 설문지가 일관성 비율 0.1 이하로 분석되었으며, 선정된 설문지를 활용한 가중치 산정 결과는 아래 표 3.5과 같음.

표 3.5 주요 기능별 평가항목의 가중치 산정 결과

주 기능	안전성	정확성	작업 생산성	경제성	품질의 균일성
절단위치 센싱 기능	-	0.458	0.284	0.258	-
강관말뚝 절단 기능	0.222	-	0.254	0.290	0.234
강관말뚝 인양 및 운반 기능	0.365	-	0.305	0.330	-

(다) Trade-off Analysis를 통한 요소기술별 평가점수 산정 및 핵심 요소기술 선정

- 본 연구에서는 표 3.5의 평가 항목 선정 결과를 토대로, 기계설계 및 제작 전문가 41인을 대상으로 요소기술별 평가점수 산정을 수행하였음. 평가점수는 설문을 통해 각 요소기술별 순위를 응답받고 순위별 점수를 합산하는 방식으로 수행됨.

① 절단위치 센싱

- ✓ 절단위치 센싱 기능 수행을 위한 1)레이저 레벨기 및 수광기(Leveling laser, laser detector), 2)광파거리계(Optical range finder), 3)GNSS 및 IMU 센서의 세 가지 요소기술에 대한 성능평가 항목별 평가점수 산정 결과는 아래 표 3.6과 같음.

표 3.6 센싱부 요소기술에 대한 성능평가 항목별 평가점수 산정 결과

평가항목	정확성	작업생산성	경제성	합계	순위
가중치	0.458	0.284	0.258		
레이저 레벨기 및 수광기	94	92	98	94.46	1
광파거리계	92	85	84	87.95	2
GNSS 및 IMU	60	69	64	63.59	3

- ✓ Trade-off Analysis 수행 결과, 표 3.6의 주요 기능별 평가항목의 가중치와의 연계를 통해 절단위치 인식 정확성, 작업 생산성, 경제성 측면에서 가장 우수하게 평가받은 1)레이저 레벨기 및 수광기(94.46점)가 절단위치 센싱 기능의 핵심 요소기술로 선정됨.

② 강관말뚝 절단

- ✓ 강관말뚝 절단 기능 수행을 위한 1)그라인더 절단(Grinder cutter), 2)산소가스 절단(Oxygen cutter), 3)플라즈마 절단(Plasma cutter)의 세 가지 요소기술에 대한 성능평가 항목별 평가점수 산정 결과는 아래 표 3.7과 같음.

표 3.7 절단부 요소기술에 대한 성능평가 항목별 평가점수 산정 결과

평가항목	안전성	작업생산성	경제성	품질의 균일성	합계	순위
가중치	0.222	0.254	0.290	0.234		
그라인더 절단	60	63	85	75	71.52	3
산소 절단	85	76	79	77	79.10	2
플라즈마 절단	107	107	82	94	96.72	1

- ✓ Trade-off Analysis 수행 결과, 표 3.6의 주요 기능별 평가항목의 가중치와의 연계를 통해 작업 안전성, 작업 생산성, 품질의 균일성 측면에서 가장 우수하게 평가받은 3)플라즈마 절단(96.72점)이 강관말뚝 절단 기능의 핵심 요소기술로 선정됨.

③ 강관말뚝 인양 및 운반

- ✓ 강관말뚝 인양 및 운반 기능 수행을 위한 1)스크랩 그레플(Scrap grapple), 2)버킷 그레플(Bucket grapple), 3)회전형 그레플(Rotary grapple)의 세 가지 요소기술에 대한 성능평가 항목별 평가점수 산정 결과는 아래 표 3.8과 같음.

표 3.8 핸들링부 요소기술에 대한 성능평가 항목별 평가점수 산정 결과

평가항목	안전성	작업생산성	경제성	합계	순위
가중치	0.365	0.305	0.330		
스크랩 그레플	66	75	83	74.36	3
버킷 그레플	80	73	81	78.20	2
회전형 그레플	100	98	82	93.45	1

- ✓ Trade-off Analysis 수행 결과, 표 3.6의 주요 기능별 평가항목의 가중치와의 연계를 통해 작업 안전성, 작업 생산성 측면에서 가장 우수하게 평가받은 3)회전형 그레플(93.45점)이 강관말뚝 인양 및 운반 기능의 핵심 요소기술로 선정됨.

- 요소기술별 평가점수 산정 결과, 절단위치 센싱 기능에서는 레이저 레벨기 및 수광기(94.46점), 강관말뚝 절단 기능에서는 플라즈마 절단(96.72점), 강관말뚝 인양 및 운반 기능에서는 회전형 그레플(93.45점)이 핵심 요소기술로 선정됨. 본 연구를 통해 선정된 핵심 요소기술은 현장 전문가 설문조사를 통해 현업에서의 의견이 충분히 반영된 결과가 활용됨에 따라 현장 적용성이 우수할 것으로 기대됨.

나. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 상세설계

- 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계를 도출하기 위해, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 주요기능에 따라 1)강관말뚝 절단위치 센싱부, 2)강관말뚝 절단부, 3)강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 세 부분으로 구분하여, 앞서 선정된 개발로봇의 핵심 요소기술 구현을 위한 하드웨어를 선정하고 선정된 하드웨어의 커스터마이징(Customizing) 및 위치 선정을 수행하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계를 도출하였음.

(1) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술별 하드웨어 선정

- 앞선 연구를 통해 도출된 1)강관말뚝 절단위치 센싱부에서는 레이저 레벨기 및 수광기(94.46점), 2)강관말뚝 절단부에서는 플라즈마 절단(96.72점), 3)강관말뚝 절단 부위 핸들링부에서는 회전형 그래플(93.45점)의 기술이 개발로봇의 핵심 요소기술로 적용되어야 함. 이를 위해 본 연구에서는 선정된 핵심 요소기술의 상세사양을 조사하고, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계에 적용하기 위한 하드웨어 커스터마이징(Customizing)을 수행하였음.

가) 강관말뚝 절단위치 센싱부의 하드웨어 선정

- 강관말뚝 절단위치 센싱부의 핵심 요소기술은 레이저 레벨기 및 수광기이며, 해당 기술이 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇에 적용되기 위해서는 레이저 레벨기의 경우 직경 100m 이상의 측정거리가 확보되어야 하며, 수광기의 경우 50mm 수준의 탐지감도가 확보되어야 하는 것으로 전문가 인터뷰를 통해 분석됨.
- 본 연구에서는 강관말뚝 절단위치 센싱부의 하드웨어로 기존 제품 중 레이저 감도 및 수광기 성능이 우수한 Sokkia社 LP510, LR300 장비를 아래 표 3.9와 같이 선정하였음. 선정된 하드웨어는 직경 800m 이상의 측정거리를 확보할 수 있고, 2mm 이내의 탐지감도를 지니고 있어 강관말뚝 절단위치 센싱부의 하드웨어로서 적합한 성능을 지닌 것으로 사료됨.

표 3.9 강관말뚝 절단위치 센싱부 하드웨어

대표도	제품명	상세사양
	레이저 레벨기 (SOKKIA LP510)	• 상부 레이저 광원이 회전하며 레이저를 발진함. • 측정 범위: 직경 800m • 수평 정밀도: 10" ($\pm 1.5\text{mm}/30\text{m}$) • 무게: 약 2kg
	수광기 (SOKKIA LR300)	• 레이저 광원과 Detector 간 수광 위치 차이를 계측함. • 탐지 범위: 50m • 탐지 감도: $\pm 1\text{mm}$(고정밀도), $\pm 2\text{mm}$(표준 정밀도) • 무게: 190g

(㉔) 강관말뚝 절단부의 하드웨어 선정

- 강관말뚝 절단부의 핵심 요소기술은 플라즈마 절단(Plasma Cutter)이며, 해당 기술이 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇에 적용되기 위해서는 플라즈마 절단기를 활용한 재래식 강관말뚝 절단 작업의 절단속도인 2분 수준의 강관말뚝 절단 속도가 확보되어야 함.
- 이를 위해 본 연구에서는 강관말뚝 절단부의 하드웨어로 설비용량 20KVA 이상의 플라즈마 절단기(CAPTAIN-130P)를 선정하였으며, 플라즈마 점화를 위한 발전기의 출력을 15KVA/KW 수준의 GD38S 모델로 선정하였음. 또한 플라즈마 절단기의 절단 속도를 제어하는 기어 모터(K9H90BTH)의 정격 회전 속도를 2,000rpm으로 선정하여 강관말뚝 절단부가 강관말뚝 외주면을 2분 이내에 일주할 수 있도록 하였음(표 3.10). 상기 하드웨어가 적용된 강관말뚝 절단부가 선정된 상세사양을 발휘하며 작동될 경우 재래식 방식 대비 우수한 강관말뚝 절단 생산성이 확보될 수 있을 것으로 사료됨.

표 3.10 강관말뚝 절단부 하드웨어

대표도	제품명	상세사양
	플라즈마 절단기 (CAPTAIN-130P)	- 인버터, 절단 노즐, 절단 토치로 구성된 플라즈마 절단기임. - 설비용량: 20kVA 이상 - 전압상수: 220/380 - 퓨즈: 100A - 컴프레서: 용량 2kW, 최소압력 7kgf - 중량: 60kg
	발전기 (GD38S)	- 플라즈마 점화를 위한 발전기 - 출력: 15KVA/KW - 전압: 220V - 전류: 90A - 여자전압: 24V - 여자전류: 2A - 회전수: 1800rpm
	기어 모터 (K9H90BTH)	- 플라즈마 절단기의 절단 속도를 조절하는 기어 모터임. - 정격출력: 90W - 전압: 200~230V - 정격회전속도: 2,000rpm - 속도제어범위: 100~2,000rpm - 기어비: 5~200

(㉕) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 하드웨어 선정

- 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 핵심 요소기술은 회전형 그래플(Rotary Grapple)이며, 해당 기술이 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇에 적용되기 위해서는 강관말뚝 상부의 일반적인 길이인 5m 길이의 강관말뚝에 대한 충분한 핸들링 성능이 확보되어야 함. 또한 일정의 강관말뚝 규격 변화에도 동일한 수준의 핸들링 성능이 확보되어야 함.
- 회전형 그래플(Rotary Grapple)과 관련된 기존 기술 조사 및 분석 결과, 다양한 종류의 회전형 그래플(Rotary Grapple) 하드웨어가 있으나, 강관말뚝의 고정 및 인양 등을 위해 특화된 장비는 존재하지 않으며, 대부분의 장비가 강관말뚝의 인양 시 다수의 마찰점점 확보가

어려워 안정적인 고정성능 확보에 어려움이 있는 것으로 사료됨.

- 본 연구에서는 절단된 강관말뚝 상부에 대한 충분한 고정성능 확보가 가능하고, 일정의 강관말뚝 규격 변화에도 동일한 수준의 핸들링 성능을 확보할 수 있도록 하는 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 하드웨어를 직접 설계 및 제작하고자 함. 이를 설계 및 제작하기 위해 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 구동을 위한 유압 실린더(KH001-SD80-S50), 유압 실린더의 구동을 위한 기어 펌프(GP20/6.5), 유압 펌프의 압력으로 장비를 구동시키는 유압 모터(KMH-03HK8)가 아래 표 3.11과 같이 선정되었음.

표 3.11 선정된 핸들링부 적용된 장비 상세

대표도	제품명	상세사양
	유압실린더 (KH001-SD80-S50)	• 핸들링부의 Grip을 구동하는 유압 실린더임. • 최대 stroke: 50mm • 최고사용압력: 10MPa
	기어펌프 (GP20/6.5)	• 한 쌍의 기어로 유압 실린더를 구동하는 기어 펌프임. • 변위: 6.3cc/rev • 작동압력: 220~280MPa
	유압 모터 (KMH-03HK8)	• 유압 펌프로 발생시킨 압력으로 장비를 구동시키는 유압 모터임. • 용량: 2kW • 주파수: 60Hz

(2) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계

- 본 연구에서는 앞서 도출된 핵심 요소기술 및 하드웨어 선정 결과를 반영하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계를 그림 3.2과 같이 도출하였음.
- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계에는 설계된 시제품의 실물제작이 용이하도록 기구설계 분야에서 가장 보편적으로 활용되는 Dassault Systemes社 CATIA v.21이 활용되었으며, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 주요 기능에 따라 1)강관말뚝 절단위치 센싱부, 2)강관말뚝 절단부, 3)강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 세 부분으로 구분하여 설계됨.

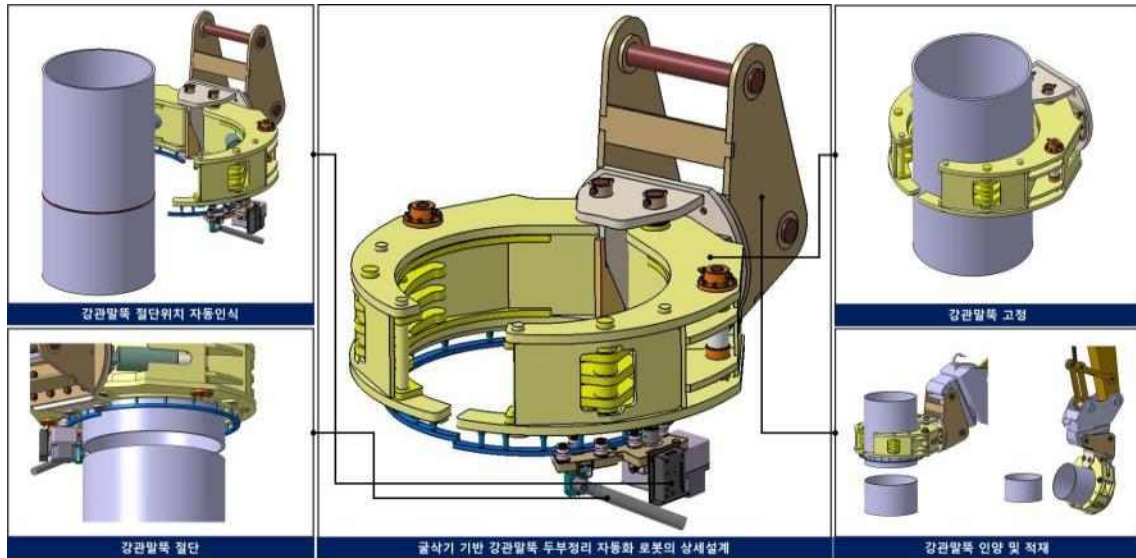


그림 3.2 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계

(가) 강관말뚝 절단위치 센싱부의 상세설계

- 강관말뚝 절단위치 센싱부의 핵심 요소기술로는 레이저 레벨기 및 수광기가 선정되었으며, 이를 구현하기 위해 레이저 레벨기 하드웨어로는 Sokkia社 LP510 모델이, 수광기 하드웨어로는 Sokkia社 LR300 모델의 사양을 토대로 개발된 별도의 강관말뚝 절단위치 센서 모듈이 적용되었음.
- 개발된 강관말뚝 절단위치 센싱부의 수광기 모듈(그림 3.3-(a))은 레이저 레벨기로부터 발생하는 빛의 인식이 용이하도록 그림 3.3-(b)와 같이 강관말뚝 절단부의 후면 중심에 위치하며, 레이저 레벨기에서 발생하는 빛의 사각지대에 위치하더라도 절단부의 이동을 통해 레이저 레벨기로부터 발생하는 빛을 인식할 수 있도록 설계되었음.

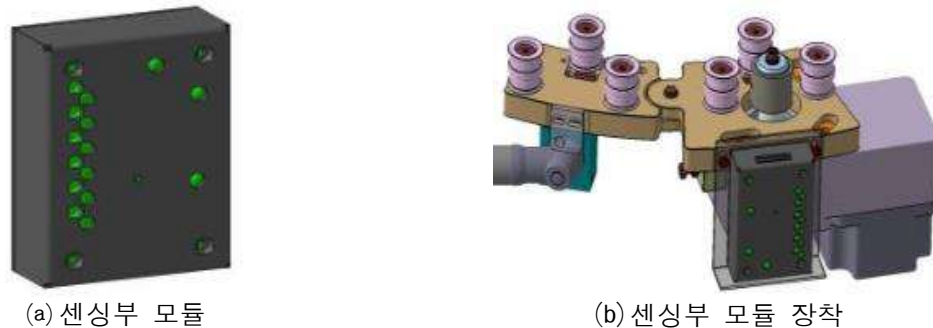


그림 3.3 강관말뚝 절단위치 센싱부 상세설계

- 상기에서 설계된 강관말뚝 절단위치 센싱부를 활용하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇이 강관말뚝의 절단위치를 인식하는 프로세스는 다음 그림 3.4와 같음.

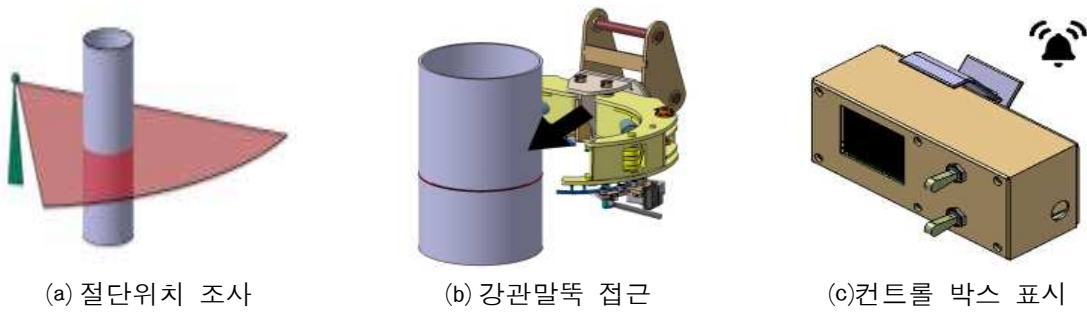


그림 3.4 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 절단위치 인식 프로세스

- 즉, 레이저 레벨기로부터 발진된 빛이 강관말뚝 절단위치에 조사(그림 3.4-(a))되면 강관말뚝 절단부에 장착된 수광기가 레이저 레벨기로부터 발진된 빛을 감지(그림 3.4-(b))하여 굴삭기 캐빈(Cabin) 내부에 설치된 컨트롤 박스(Control Box)를 통해 굴삭기 운전원에게 정확한 절단위치를 전달(그림 3.4-(c))하도록 설계되어 있음.

(나) 강관말뚝 절단부의 상세설계

- 강관말뚝 절단부의 핵심 요소기술로는 플라즈마 절단(Plasma Cutter)이 선정되었으며, 이를 구현하기 위해 인버터와 토치, 노즐로 구성된 플라즈마 절단기(CAPTAIN-130P), 플라즈마 점화를 위한 발전기(GD38S), 강관말뚝 절단부의 이동을 위한 기어 모터(K9H90BTH) 등의 하드웨어가 적용되었음.
- 상기 하드웨어가 적용된 강관말뚝 절단부는 두께 12mm 이상의 강관말뚝을 완전절단 할 수 있는 사양이며, 양측 반원형으로 설계된 그림 하단에 장착된 가이드레일을 따라 강관말뚝 절단부가 회전하며 강관말뚝을 절단하도록 설계됨.
- 강관말뚝 절단부(그림 3.5-(a))의 가이드레일(그림 3.5-(b))은 한지를 중심으로 두 부분으로 구분되며, 강관말뚝 절단부는 이동을 위한 1개의 구동롤러와 절단부의 탈락을 방지하기 위한 6개의 유지롤러(그림 3.5-(c))로 구성되어 있어 가이드레일을 따라 안정적인 주행이 가능함. 또한 강관말뚝 절단부의 절단 노즐은 그림 3.5-(d)와 같이 볼캐스터와 스프링을 적용하여 절단대상 강관말뚝과 항상 일정한 간격을 유지할 수 있도록 설계됨.

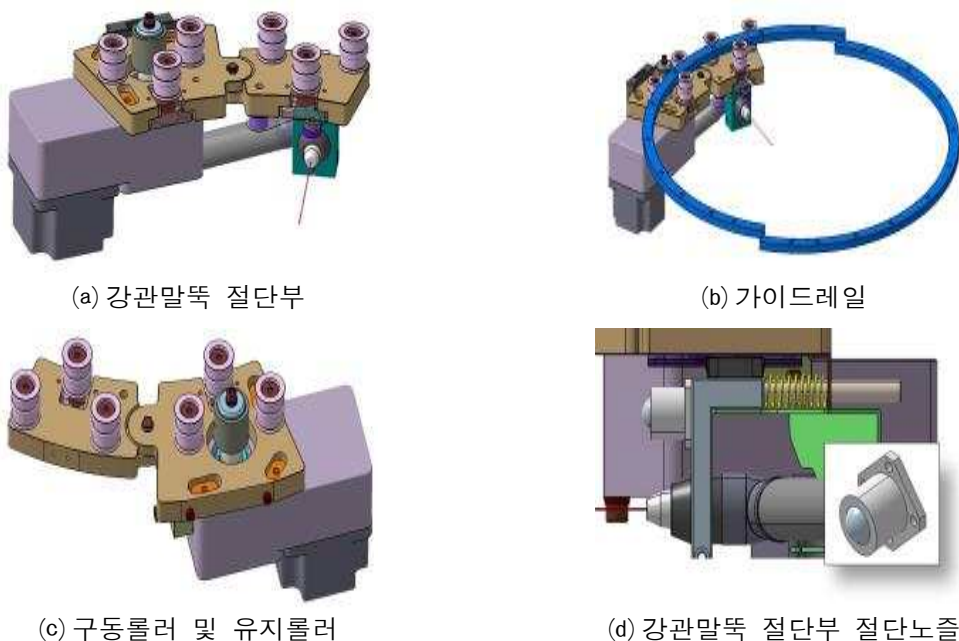


그림 3.5 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 절단부

- 상기에서 설계된 강관말뚝 절단부를 활용하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇이 강관말뚝의 절단 작업을 수행하는 프로세스는 다음 그림 3.6과 같음.

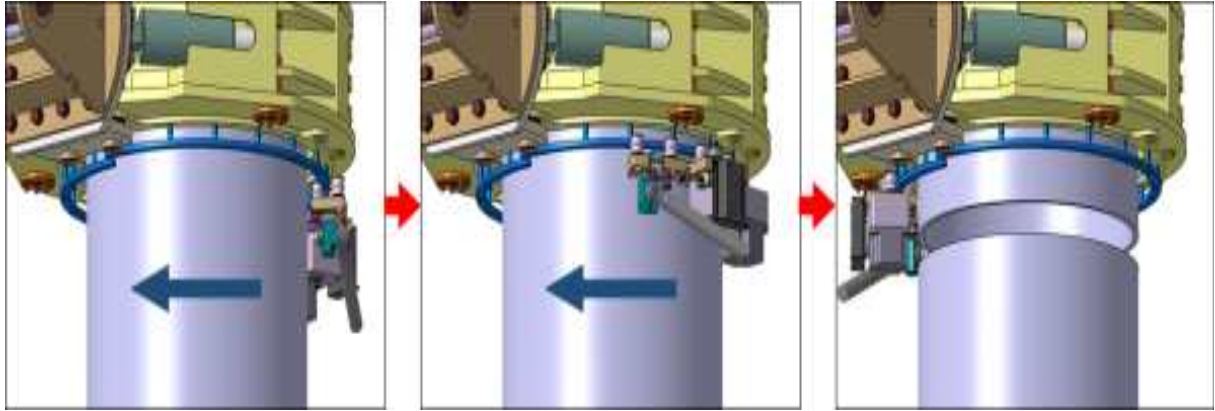
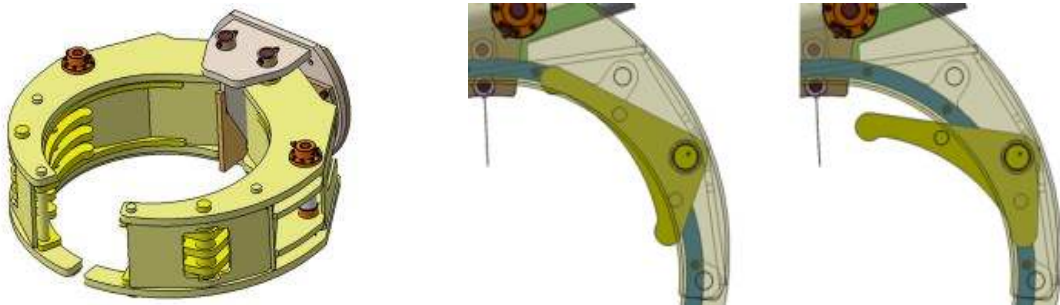


그림 3.6 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 절단부 구동 프로세스

(다) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 상세설계

- 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 핵심 요소기술로는 회전형 그레플(Rotary Grapple)이 선정 되었으며, 이를 구현하기 위해 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 구동을 위한 유압 실린더 (KH001-SD80-S50), 유압 실린더의 구동을 위한 기어 펌프(GP20/6.5), 유압 펌프의 압력으로 장비를 구동시키는 유압 모터(KMH-03HK8) 등의 하드웨어가 적용된 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 하드웨어를 다음 그림 3.7과 같이 설계하였음.

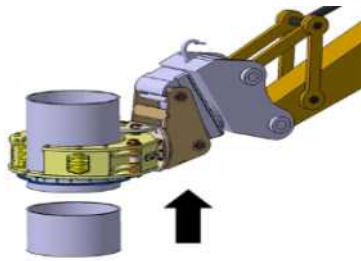


(a) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부

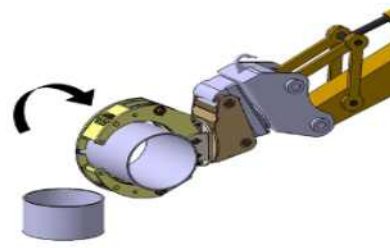
(b) 힌지가 포함된 클루(Claw)

그림 3.7 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핸들링부

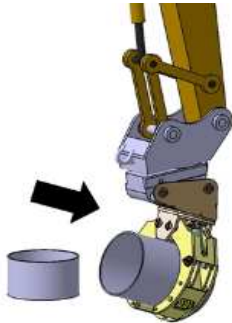
- 강관말뚝 절단 부위 핸들링부는 유압클램프 기반의 양측 반원형 그립을 활용하여 절단대상 강관말뚝을 안정적으로 고정할 수 있으며(그림 3.7-(a)), 이를 통해 강관말뚝의 전도로 인한 노무자의 안전사고를 원천적으로 예방하고, 절단작업의 안전성 및 안정성을 확보할 수 있도록 설계됨.
- 또한 직경 500~508mm의 강관말뚝 규격 변화에 대응할 수 있도록 양측 반원형 그립 내부에 힌지가 포함된 클루(Claw)를 적용하여 강관말뚝의 규격이 변화하더라도 일정의 마찰접점 확보를 통해 안정적인 강관말뚝 고정성능을 확보(그림 3.7-(b))하였으며, 강관말뚝 절단 부위 핸들링부가 폐곡면 구조를 형성하도록 설계함으로써 단면 모멘트 및 구조 안정성을 향상시킬 수 있도록 설계됨.
- 상기에서 설계된 강관말뚝 절단 부위 핸들링부를 활용하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇이 강관말뚝의 절단 부위의 핸들링 작업을 수행하는 프로세스는 다음 그림 3.8과 같음.



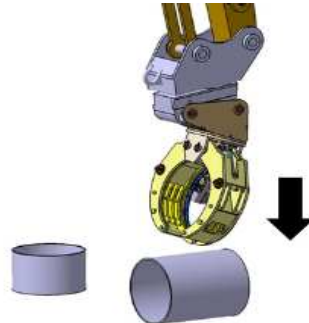
(a) 절단된 상부말뚝 인양



(b) 절단된 상부말뚝 회전



(c) 절단된 상부말뚝 운반



(d) 절단된 상부말뚝 적재

그림 3.8 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핸들링부 구동 프로세스

㉡ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 작업 프로세스

- 상기에서 설계된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계에 따른 자동화 방식의 작업 프로세스는 다음 그림 3.9와 같이 정의할 수 있음.



그림 3.9 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 작업 프로세스

다. 구조해석을 통한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 상세설계의 구조적 안정성(Stability) 분석

(1) 구조적 타당성 분석 개요

- 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 프로토타입 개발에 앞서, 상세설계에 대한 구조적 타당성을 분석하고자 함. 본 연구의 구조해석에는 상세설계에서 활용하였던 Dassault Systemes社 CATIA v.21의 구조해석 모듈이 활용되었으며, 구조해석 프로세스는 아래 그림 3.10과 같음.

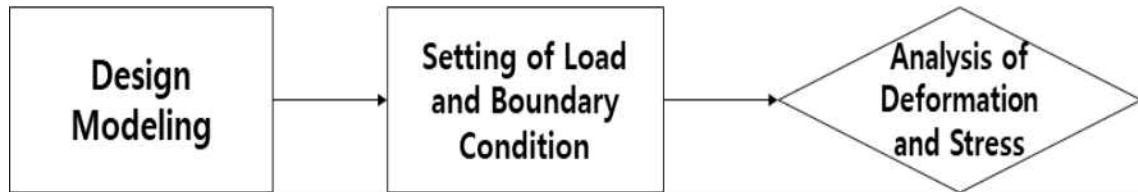


그림 3.10 구조적 안정성 분석 프로세스

- 구조해석을 위해 핸들링부에 작용하는 하중은 절단 대상 강관말뚝의 절단 작업 후 분리되는 상부말뚝의 중량 중 가장 무거운 것으로 예상되는 직경 508mm, 두께 12t, 높이 5m의 강관말뚝 중량으로 적용됨. 또한 절단된 강관말뚝 상부가 하중으로 작용할 경우 응력이 집중될 것으로 예상되는 3개 부재 1)그립부, 2)그립부 클루(Claw), 3)그립부 베이스를 모델링하여 구조 해석을 수행하였음.
- 구조해석 모델링은 유한요소 모델링 및 메쉬 작업을 진행하고, 2D, 3D 요소를 혼용하여 구성함. 구조해석을 위한 로봇의 소재로는 SM400A 강재가 적용되었으며, 아래 표 3.12는 SM400A 강재의 물성치를 나타낸 것임.

표 3.12 SM400A 강재의 물성치

소재	Density (밀도)	Young' s Modulus (탄성계수)	Poisson' s Ratio (푸아송비)	Yield Stress (항복강도)
SM400	7,850 kg/m³	200 GPa	0.266	220 MPa

주: SM400 소재는 A, B, C강종이 있으며 A강종의 탄소함유량이 가장 많음

(2) 상세설계의 구조해석 결과

(가) 그립부 구조해석

- 그립부에 작용하는 하중은 절단된 강관말뚝 상부의 무게로 설정되었으며, 그립부는 좌우 대칭 형상으로 쌍을 이루며 동일한 응력을 감당하기 때문에 본 연구에서는 한 개 그립에 대한 구조해석을 수행하였음. 이 때 경계조건으로는 그립 핀 삽입부에 Pivot 조건, 강관말뚝과 접하는 8개소에 Clamp 조건, 실린더 핀 삽입부 하중 50kN이 적용됨.
- 구조해석 결과, 그립부 클루(Claw)가 연결된 천공부 6개소 부위에 국부적으로 최대 응력이 발생하는 것으로 분석되었으며, 이 때 그립부에 발생하는 최대 응력은 33.2MPa로 그립부의 항복강도인 220MPa 대비 약 15%의 응력 수준인 것으로 분석됨(그림 3.11).
- 즉 설계된 그립부는 현재 설정된 절단대상 강관말뚝 하중의 6배 이상을 감당할 수 있으며, 구조적으로 매우 안정하다고 판단할 수 있음. 또한 강관말뚝과 접하는 돌출부 외 그립부 구조물의 전반적인 응력은 2~14MPa로 분포되어, 매우 안정한 구조적 강성을 나타낸다고 판단할 수 있음.

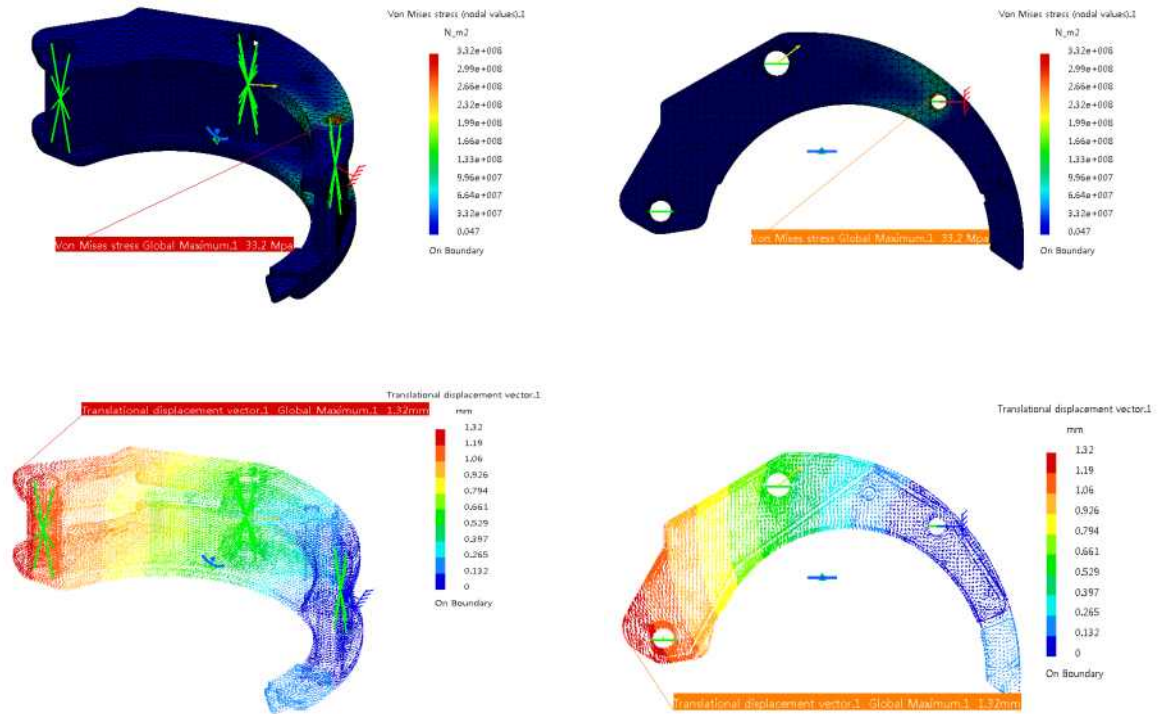


그림 3.11 그립부의 해석 경계 조건 및 해석 결과

(나) 그립부 클루(Claw) 구조해석

- 그립부 클루(Claw)에 작용하는 하중은 그립부와 마찬가지로 절단된 강관말뚝 상부의 무게로 설정되었으며, 그립부 클루(Claw) 또한 좌우 대칭 형상으로 쌍을 이루며 동일한 응력을 감당하기 때문에 한 개의 그립부 클루(Claw)에 대한 구조해석을 수행하였음.
- 구조해석 결과, 그립부 클루(Claw)의 중심부에 최대 응력이 발생하는 것으로 분석되었으며, 이 때 그립부 클루(Claw)에 발생하는 최대 응력은 100MPa로 그립부 클루(Claw)의 항복강도인 220MPa 대비 약 45%의 응력 수준인 것으로 분석되었음(그림 3.12).
- 즉 설계된 그립부 클루(Claw)는 현재 설정된 절단대상 강관말뚝 하중의 2배 이상을 감당할 수 있으며, 구조적으로 매우 안정하다고 판단할 수 있음.

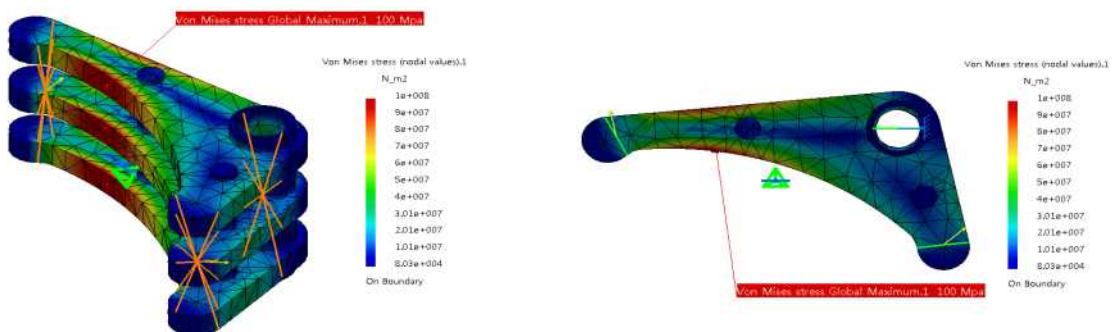


그림 3.12 그립부 클루(Claw)의 해석 경계 조건 및 해석 결과

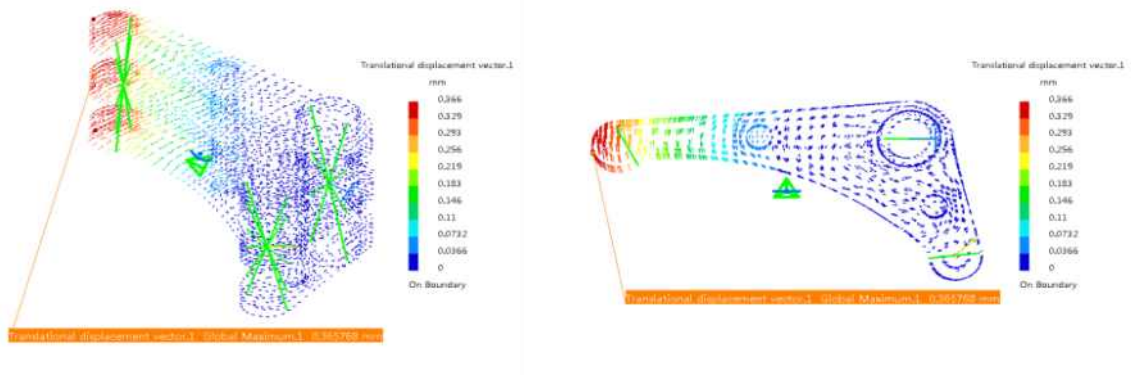


그림 3.12 그립부 클루(Claw)의 해석 경계 조건 및 해석 결과(계속)

(다) 그립부 베이스 구조해석

- 그립부 베이스에 작용하는 하중은 절단된 강관말뚝의 상부 무게로 설정되었으며, 이 때 경계조건은 캡 조립부에 Clamp 조건, 실린더 핀 삽입부 하중 11.9kN이 적용됨.
- 구조해석 결과, 그립 핀 지지 부위에 최대 응력이 발생하는 것으로 분석되었으며, 이 때 그립부 베이스에 발생하는 최대 응력은 10.61MPa로 그립부 베이스의 항복강도인 220MPa 대비 약 5.3%의 응력 수준인 것으로 분석되었음(그림 3.13).
- 즉 설계된 그립부 베이스는 현재 설정된 절단대상 강관말뚝 하중의 20배 이상을 감당할 수 있으며, 구조적으로 매우 안전한 것으로 판단할 수 있음.

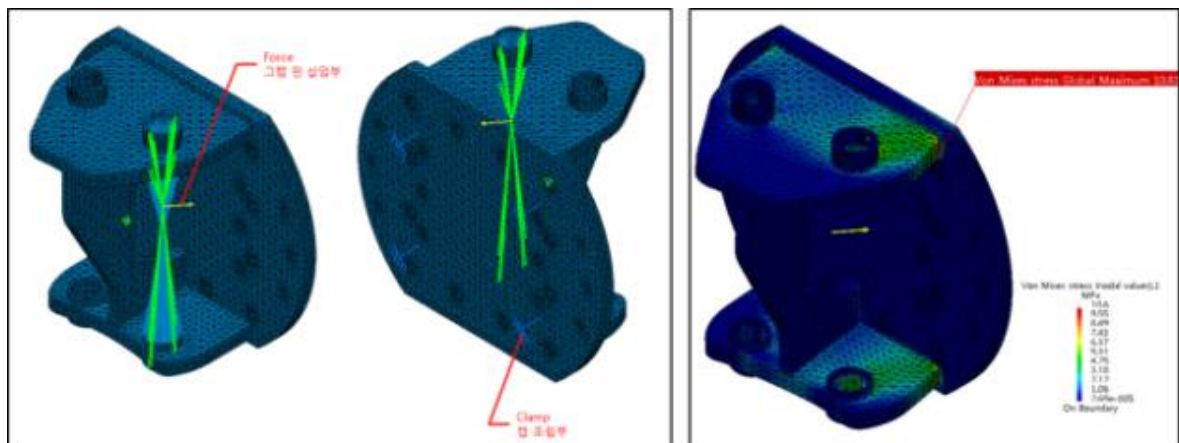


그림 3.13 그립부 베이스의 해석 경계조건 및 해석 결과

(3) 상세설계의 구조해석 결과 분석

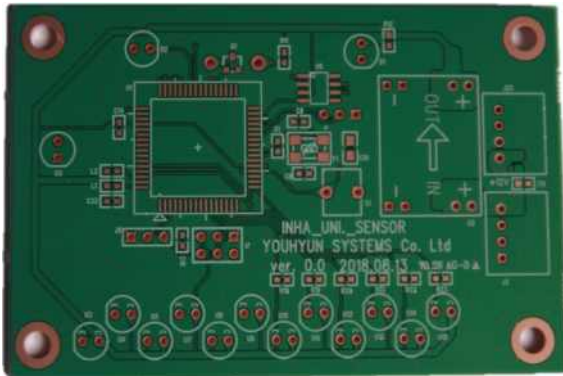
- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 상세설계에 대한 구조해석 결과, 구조적으로 가장 취약할 것으로 판단되는 3개 부재인 그립부, 그립부 클루(Claw), 그립부 베이스에서 최소 2배 이상의 구조적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석됨. 즉, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계는 구조적으로 안정하여 실물제작 시 목표한 성능을 충분히 발휘할 수 있을 것으로 사료됨.

라. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 핵심 요소기술 개발

- 본 연구에서는 앞서 도출된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상세설계를 토대로, 핵심 요소기술인 1)강관말뚝 절단위치 센싱부, 2)강관말뚝 절단부, 3)강관말뚝 절단 부위 핸들링부를 개발하였음.

(1) 강관말뚝 절단위치 센싱부

- 본 연구에서는 그림 3.3의 강관말뚝 절단위치 센싱부 상세설계를 토대로 레이저 레벨기로부터 발진되는 빛을 인식하기 위한 강관말뚝 절단위치 센싱부의 타겟보드(Target Board)를 그림 3.14-(a)와 같이 개발하고, 이를 그림 3.14-(b)와 같이 모듈화하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 프로토타입 개발에 적용하였음.



(a) 강관말뚝 절단위치 센싱부 타겟보드



(b) 강관말뚝 절단위치 센싱부 모듈

그림 3.14 강관말뚝 절단위치 센싱부 - 센싱부 모듈

- 본 연구를 통해 개발된 강관말뚝 절단위치 센싱부 모듈은 레이저 레벨기로부터 발진된 빛을 인식하여 정확한 절단위치를 개발로봇의 운용을 수행하는 굴삭기 운전원에게 전달할 수 있음. 이 때 정확한 절단위치의 인식 방법은 비프음의 간격을 통해 운전원이 직관적으로 절단위치를 판단하거나, 굴삭기 캐빈(Cabin) 내부에 설치된 소형 LCD 디스플레이를 통해 모니터링 할 수 있도록 개발됨(그림 3.15).

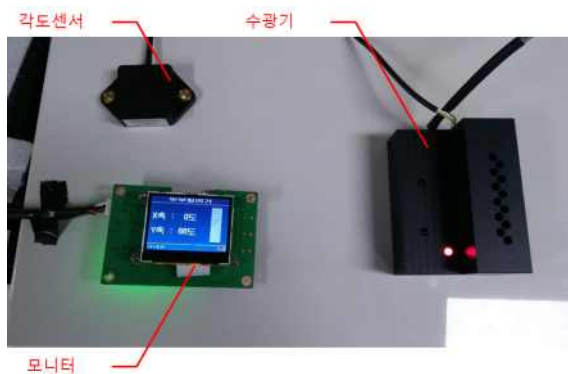


그림 3.15 강관말뚝 절단위치 센싱부 - 절단위치 인식 모듈

- 개발된 강관말뚝 절단위치 센싱부의 성능분석을 위해 레이저 레벨기와 수광기 사이의 거리를 5m로 유지하면서, 수광기의 정밀도 및 인식 범위(최대 탐지 감도) 측정을 수행하였음(그림 3.16). 각 방식별로 30회 이상의 실험을 수행한 결과, 개발된 센싱부 요소기술의 절단위치 인식 정확도는 고정밀도에서 30회 평균 1.20mm, 표준 정밀도에서 30회 평균 3.39mm로 분석되었으며, 수광기가 레이저를 처음 인식하기 시작한 위치부터 인식하지 못하게 되는 위치까지의 인식 범위(최대 탐지 감도)는 고정밀도, 표준 정밀도에서 동일하게 30회 평균 57.35mm로 분석되었음(표 3.13).



그림 3.16 센싱부 요소기술의 성능 평가를 위한 실험실 실험 방법

표 3.13 센싱부 요소기술의 성능평가 결과

구분	고정밀도	표준 정밀도	레이저 인식 범위
탐지 감도	1.20 mm	3.39 mm	57.35 mm

- 절단위치의 인식 오차는 작을수록 강관말뚝의 정확한 절단에 유리할 수 있으나, 플라즈마 절단기를 활용한 절단 폭 두께가 약 3.0mm로 평균 정밀도 기준(3.39mm) 수준과 유사하므로, 현재의 절단위치 센싱 기능에 대한 성능은 매우 신뢰할 만한 수준으로 사료됨.

✓ 질적성과(강관말뚝 절단면 인식 정확도)

- 1) 목표치: 10 cm 이내
- 2) 달성치: 1.20 mm(고정밀도), 3.39 mm(표준 정밀도)

(2) 강관말뚝 절단부

- 본 연구에서는 그림 3.5의 강관말뚝 절단부 상세설계를 토대로 강관말뚝의 절단을 위한 강관말뚝 절단장치를 그림 3.17-(a)와 같이 개발하고, 절단장치의 이동을 위한 가이드레일 설비가 그림 3.17-(b)와 같이 핸들링부 하단에 적용됨.



(a) 강관말뚝 절단장치



(b) 가이드 레일에 장착된 절단장치

그림 3.17 강관말뚝 절단부 - 강관말뚝 절단장치 및 가이드레일

- 본 연구를 통해 개발된 강관말뚝 절단부는 플라즈마 절단 방식이 적용된 강관말뚝 절단장치가 가이드레일을 따라 이동하며 강관말뚝 외주면을 절단하는 방식으로 구동됨. 이 때 플라즈마

발생(점화) 및 강관말뚝 절단장치의 구동은 굴삭기 캐빈(Cabin) 내부에 설치된 조작 레버를 통해 운전원이 간단히 조작할 수 있도록 고안됨(그림 3.18).

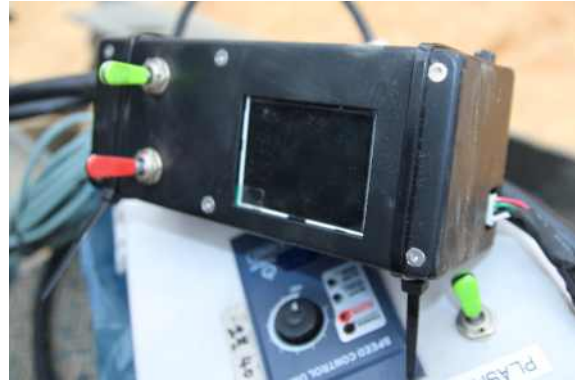


그림 3.18 강관말뚝 절단부 - 절단부 구동 장치

- 개발된 강관말뚝 절단부의 성능분석을 위해 굴삭기를 대신하여 개발로봇을 지지할 수 있는 높이 8,500mm의 스탠딩지그(Standing Jig)와 3,000x3,000mm 크기의 베이스 프레임(Base Frame)을 설계하고, 그림 3.19과 같이 실험실 환경 내에 테스트베드(Test-bed)를 구축하여 강관말뚝 절단부의 절단성능 분석을 수행하였음.

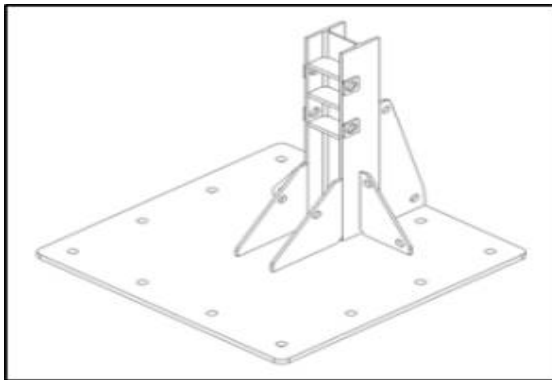


그림 3.19 성능분석을 위한 실험실 환경 내 테스트베드(Test-bed) 및 강관말뚝 절단부 성능분석

- 강관말뚝 절단부에 대한 절단성능 분석 결과, 강관말뚝 절단부는 직경 500mm, 두께 12t, 높이 5m, 약 734kg 중량의 강관말뚝에 대해서 10회 평균 1분 31초의 절단성능을 보이는 것으로 분석되었음(표 3.14). 이는 재래식 강관말뚝 절단 방식의 강관말뚝 절단 속도(약 2분) 대비 30% 이상 우수한 성능으로, 개발로봇의 현업 적용 시 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성이 향상될 것으로 기대됨.

표 3.14 절단부 요소기술의 성능평가 결과

구분	1회	2회	3회	4회	5회	평균
절단시간	1' 32"	1' 28"	1' 30"	1' 27"	1' 27"	1' 31"
구분	6회	7회	8회	9회	10회	
절단시간	1' 32"	1' 34"	1' 33"	1' 34"	1' 33"	

✓ 질적성과(강관말뚝 절단 속도)

- 1) 목표치: 1분당 15분 이내
- 2) 달성치: 1분당 평균 1분 31초

(3) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부

- 본 연구에서는 그림 3.7의 강관말뚝 절단 부위 핸들링부 상세설계를 토대로 강관말뚝의 고정, 전도 및 인양을 위한 강관말뚝 그래프를 그림 3.20-(a)와 같이 개발하고, 강관말뚝 절단 부위 핸들링부와 굴삭기의 연결을 위한 링크(Link) 장치를 그림 3.20-(b)와 같이 개발하였음.



(a) 강관말뚝 고정, 전도 및 인양을 위한 그래프



(b) 굴삭기 연결 링크(Link)

그림 3.20 강관말뚝 절단 부위 핸들링부 - 강관말뚝 그래프 및 굴삭기 연결 링크(Link)

- 본 연구를 통해 개발된 강관말뚝 절단 부위 핸들링부는 클루(Claw)의 적용으로 500~508mm 강관말뚝의 규격 변화에도 안정적인 강관말뚝 고정, 전도 및 인양 작업을 수행할 수 있음(그림 3.21-(a)). 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 구동에는 굴삭기 자체 유압이 활용되며, 굴삭기 유압 용량을 고려하여 0.2~0.6m³ 규모 굴삭기에 범용적으로 적용 가능하도록 하였음. 이 때 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 구동은 굴삭기 캐빈(Cabin) 내부에서 굴삭기 조종 레버의 운동을 통해서 굴삭기 운전원의 별도 교육 없이 손쉽게 조작 가능하도록 고안됨(그림 3.21-(b)).



(a) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부 클루(Claw)



(b) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부 조작 방법

그림 3.21 강관말뚝 절단 부위 핸들링부 - 클루(Claw) 및 조작 방법

- 개발된 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 성능분석을 위해 그림 3.19의 테스트베드(Test-bed)와 실험실 내 설치된 호이스트를 활용하였으며, 직경 500mm, 두께 12mm, 높이 5m, 약 734kg 중량의 강관말뚝을 대상으로 호이스트의 지지력을 제거하여도 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 안정적인 고정 성능 확보가 가능한지를 판단하는 방식으로 성능분석을 수행하였음(그림 3.22).
- 강관말뚝 절단 부위 핸들링부에 대한 성능분석 결과, 약 734kg 중량의 강관말뚝을 대상으로 호이스트의 하중을 제거하여도 대상 강관말뚝이 핸들링부에 의해 안정적으로 고정되는 것을 확인할 수 있으며, 개발된 강관말뚝 절단 부위 핸들링부를 활용하여 강관말뚝의 두부 정리 작업을 수행할 경우 재래식 방식 대비 노무자의 안전성 확보, 작업 생산성 및 편의성이 향상 등을 기대할 수 있음.

- ✓ 질적성과(강관말뚝 인양 능력)
- 1) 목표치: 허용 중량 0.1t 이내
 - 2) 달성치: 0.734t 안정 고정



그림 3.22 강관말뚝 절단 부위 핸들링부 성능분석

마. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품 개발

- 앞선 연구를 통해 도출된 핵심 요소기술인 1)강관말뚝 절단위치 센싱부, 2)강관말뚝 절단부, 3) 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 시스템 통합을 통해서 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품이 아래 그림 3.23과 같이 개발됨.



그림 3.23 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품

- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 구동을 위해서는 발전기, 플라스마 발생기, 에어 컴프레셔 등의 장비가 요구되며, 본 연구에서는 이를 그림 3.24-(a)와 같이 패키지 모듈로 구성하여 굴삭기에 탈부착 가능하도록 제작하였음. 또한 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 구동을 위해 굴삭기 내부의 유압을 활용하여 별도의 전원 연결 없이 강관말뚝 절단 부위 핸들링부의 구동이 가능하도록 고안되었음(그림 3.24-(b)).



그림 3.24 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 구성

- 또한 굴삭기 회전형 링크(Link)와 회전형 어태치먼트와의 연결을 통해 개발로봇 시제품을 활용한 강관말뚝 절단, 전도 및 인양 등의 작업을 용이하게 수행할 수 있음(그림 3.25-(a)). 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품은 회전링크 캡의 변경을 통해 다양한 사양의 굴삭기에 적용될 수 있으며, 0.6m³ 규격의 굴삭기(타이어)에 장착된 시제품은 아래 그림 3.25-(b)와 같음.



(a) 회전형 어태치먼트 연결



(b) 0.6m³ 규격 굴삭기에 장착된 시제품

그림 3.25 회전링크 캡 및 굴삭기에 장착된 시제품

- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품의 운반을 위한 이동 지그(Zig)가 아래 그림 3.26-(a)와 같이 개발되었으며, 이를 통해 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 운반 시 외부 충격에 의한 파손을 막아 안정적인 운반이 가능함. 이동 지그(Zig)에 장착된 개발로봇 시제품은 아래 그림 3.26-(b)와 같음.



(a) 이동 지그(Zig)



(b) 이동 지그(Zig)에 장착된 시제품

그림 3.26 이동 지그(Zig) 및 이동 지그(Zig)에 장착된 시제품

- 다음 그림 3.27은 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품을 활용하여 현장 환경 내에서 진행된 실험의 전경을 나타낸 것임. 개발로봇의 시제품은 현장 환경 내에서도 실험실 실험에서 도출된 성능을 동일하게 발휘하였으며, 추후 장시간 운용 테스트 등을 통해 개발로봇 시제품의 내구성 등을 검증할 필요성이 있을 것으로 사료됨.



그림 3.27 개발로봇 시제품의 현장 환경 내 실험

바. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능 및 경제성 분석

(1) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능 및 경제성 분석 모델

- 건설 자동화 로봇의 성능이란 생산성, 안전성, 품질, 경제성 등의 측면에서 자동화 장비가 갖고 있는 특성이나 기능을 의미하며, 성능 평가란 자동화 로봇의 구동 실험을 통해 얻은 실험 데이터를 토대로 재래식 방식과 비교하여 자동화 로봇의 성능을 분석 및 평가하는 것임.
- 특히 본 연구를 통해 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품은 강관의 절단 작업시간 단축뿐만 아니라, 두부정리 작업의 각 프로세스에서 발생할 수 있는 연속성 저하 및 유휴시간 발생 문제를 크게 개선할 수 있어 작업 공정 측면에서의 생산성 제고 효과가 매우 우수할 것으로 기대됨.
- 따라서 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 재래식 방식 대비 생산성 및 경제성을 측정 및 평가하기 위한 종합성능 및 경제성 분석 모델을 아래와 같이 도출하고, 현장 환경 내 실험 데이터를 토대로 성능 분석 및 평가를 수행하고자 함.

(가) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능 분석 모델

- 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능(재래식 방식 대비 생산성) 분석을 위한 분석모델을 재래식 및 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 프로세스를 토대로 아래 그림 3.28과 같이 도출하였음.
- 도출된 분석 모델에서 확인할 수 있는 것처럼 자동화 방식의 경우 하나의 장비로 작업 프로세스 순과정의 수행이 가능하므로, 절단 장비의 설치/해체, 추가 장비 투입 등의 과정이 필수적으로 이루어져야 하는 재래식 방식 대비 작업 과정이 단순화되는 것은 물론 지속적으로 발생하는 유휴시간을 제거할 수 있는 것으로 분석되었음.
- 또한 강관말뚝 1본을 절단 하는데 소요되는 단위 작업시간의 측정을 통해 재래식 방식과 자동화 방식의 생산성 비교가 가능하며, 이에 따라 재래식 및 자동화 방식의 소요시간을 고려함으로써 재래식 방식과 비교하여 자동화 방식을 활용할 경우 발생하는 작업 시간의 단축이나 지연을 측정할 수 있음.

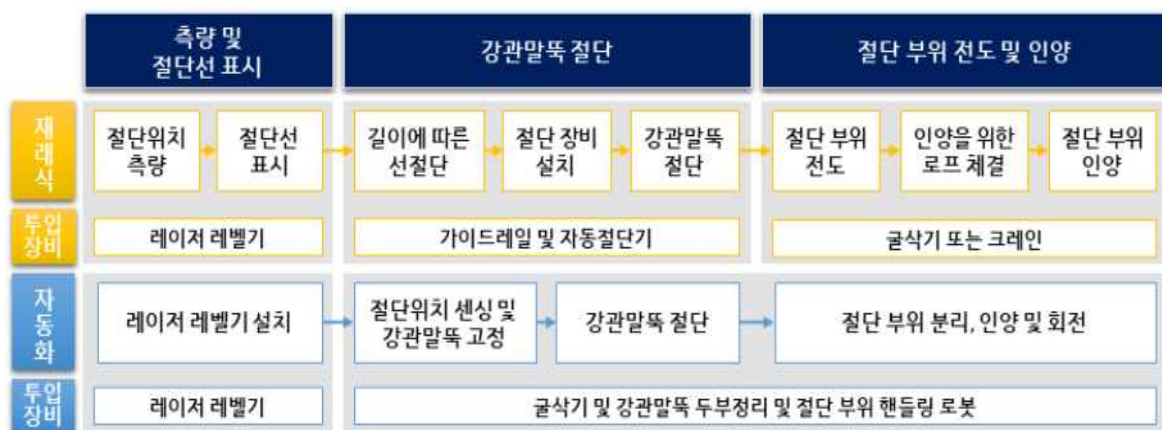


그림 3.28 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 종합성능 분석모델

(나) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 재래식 방식 대비 경제성 분석 모델

- 개발된 자동화 로봇이 재래식 방식 대비 안전성, 생산성, 품질 등이 우수하더라도 로봇의

경제성이 확보되지 않으면 지속적인 연구개발에 어려움이 있으며, 로봇의 개발이 완료되었다 할지라도 로봇을 실용화하여 실제 작업 현장에 적용하는 데는 어려움이 따름.

- 즉 자동화 방식의 생애주기비용(Life Cycle Cost) 분석을 통해 재래식 방식과 비교하여 경제성 측면의 우위를 입증하는 것은 로봇의 연구 개발 및 개발로봇의 실용화 관점에서 매우 중요함.
- 따라서 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품 도입에 따른 재래식 방식 대비 발생 이익을 다양한 경제성 평가 기법을 통해 분석하고, 그 실용화 가능성을 검증할 수 있도록 하는 경제성 분석 모델을 아래 그림 3.29와 같이 도출하였음. 개발된 분석모델은 분석을 위한 합리적인 가정 및 변수의 설정이 가능하므로 분석 결과에 대한 신뢰성이 높을 것으로 사료됨.

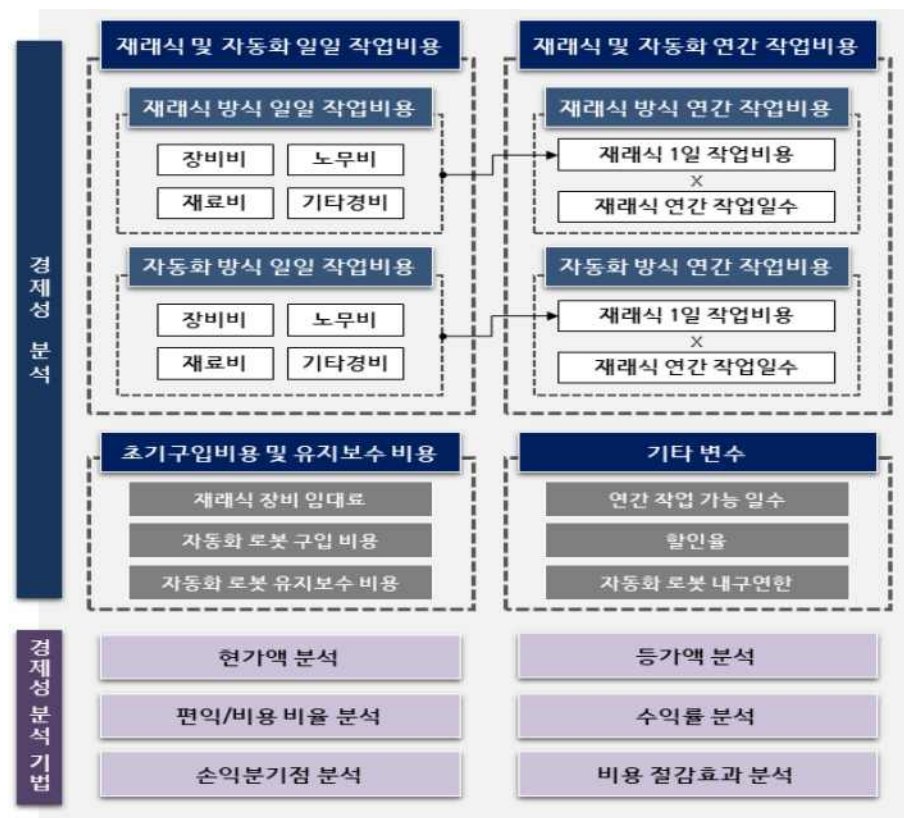


그림 3.29 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석모델

(2) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 생산성 비교 분석

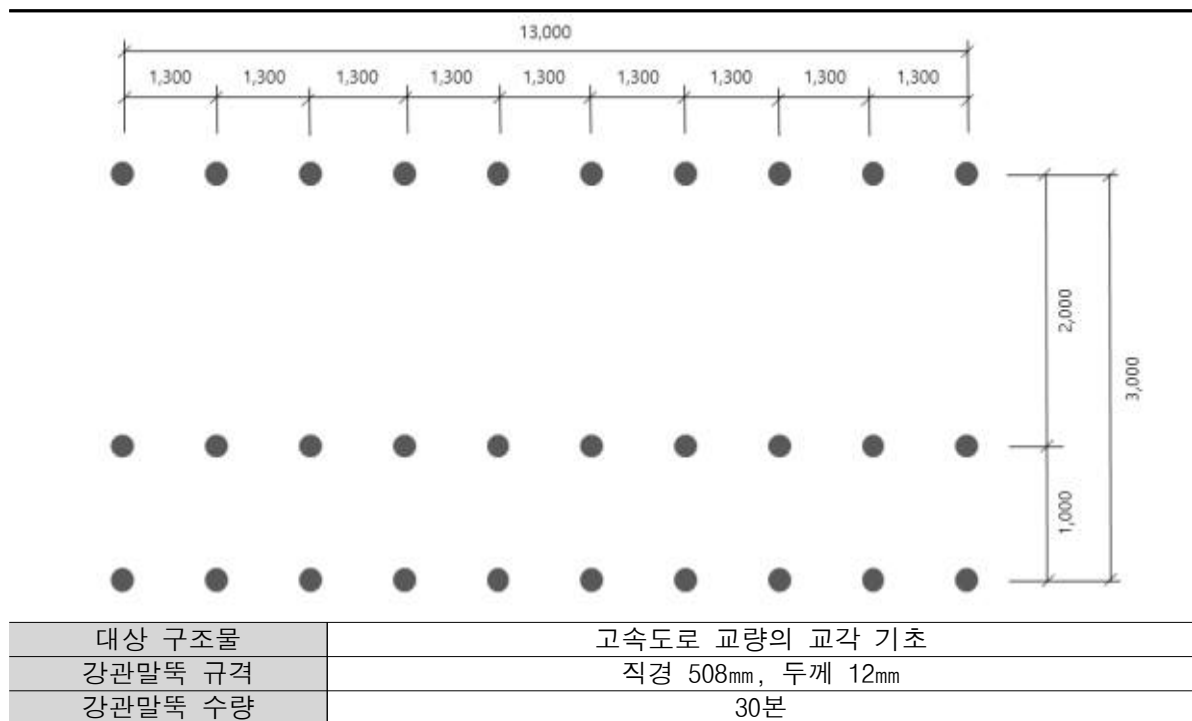
- 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석에 앞서 그림 3.28의 분석모델을 활용하여 재래식 및 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 생산성을 비교·분석하였음.
- 재래식 방식의 강관말뚝 두부정리 작업은 시공 업체마다 작업 방법 및 투입 인원이 상이하고, 동일한 방법으로 작업을 수행하더라도 현장 여건에 따라 작업 생산성의 차이가 발생하기 때문에 이를 일반화하여 도출하기에는 현실적으로 어려움이 존재함.
- 따라서 본 연구에서는 문헌조사 및 전문가 인터뷰를 통해 국내 대다수의 현장에서 보편타당하게 적용 가능한 재래식 강관말뚝 두부정리 작업을 아래와 같이 설정하고 생산성 분석을 수행함.

- 1) 재래식 강관말뚝 두부정리 작업의 프로세스는 ① 절단위치 측량, ② 절단위치 표시, ③ 가이드레일 설치 및 강관말뚝 절단, ④ 절단된 상부말뚝 인양 및 적재의 순으로 수행되며, 선행 작업이 완료되면 후행 작업이 수행됨.
- 2) 강관말뚝의 절단위치는 지표고보다 높고, 지하수 유입에 의해 강관말뚝이 수몰되어 있지 않은 작업 환경을 지님.
- 3) 최초 절단대상 강관말뚝에 가이드레일을 설치한 후 절단작업이 시작되며, 최종 절단대상 강관말뚝을 절단하고 이에 설치된 가이드레일이 해체되면 ③ 가이드레일 설치 및 강관말뚝 절단작업이 종료됨.
- 4) 가이드레일은 3개, 강관말뚝 절단기는 1개가 투입되며, 가이드레일 설치/해체 작업과 강관말뚝 절단작업은 유휴시간 없이 연속적으로 수행됨.
- 5) 절단된 상부말뚝은 별도의 전도 과정 없이 집게형 버킷에 의해 인양되며, 관입된 강관말뚝 인근에 적재됨.

(가) 재래식 방식을 활용한 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성 분석

- 본 연구에서는 상기에서 설정된 재래식 강관말뚝 두부정리 작업에 따라 작업을 수행하고 있는 충남 아산시 소재의 고속도로 교량 시공현장에 대한 조사를 수행하였음. 해당 현장의 두부정리 작업 대상 강관말뚝은 교량 하부 구조물인 교각 기초에 사용되는 것으로, 아래 표 3.15는 작업 생산성 측정 대상인 교각 기초 시공현장의 개요를 나타낸 것임.

표 3.15 작업 생산성 측정 대상 교각 기초 시공현장의 개요



- 본 연구에서는 교각 기초에 사용되는 직경 508mm, 두께 12mm의 강관말뚝 30본에 대한 두부정리 작업의 생산성 측정을 수행하였음. 작업 생산성은 강관말뚝 두부정리 작업이 시작되는 시점부터 종료되는 시점까지의 작업 과정을 영상 촬영하고, 세부 작업 프로세스별로 작업 소요 시간을 분석하여 도출하였음. 도출된 재래식 강관말뚝 두부정리 작업의 프로세스별 소요시간 및 생산성 분석 결과는 아래 표 3.16, 그림 3.30와 같음.

표 3.16 재래식 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 프로세스별 소요시간 및 생산성 분석 결과

구 분	절단위치 측량	절단위치 표시	가이드레일 설치 및 해체	강관말뚝 절단	절단된 상부말뚝 인양 및 적재	작업 생산성
재래식 방식	자동화 방식과 동일	13초/본	50초	2분 10초/본	30초/본	166본/일



그림 3.30 재래식 방식을 활용한 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성 분석

- 재래식 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 생산성 분석 결과, 절단위치 측량에 소요되는 시간은 자동화 방식과 동일하므로 생산성 분석대상에서 제외되었고, 절단위치 표시 작업은 1본당 13초, 최초 가이드레일 설치 및 최종 가이드레일 해체 작업은 50초, 강관말뚝 절단은 1본당 2분 10초, 절단된 상부말뚝 인양 및 적재는 1본당 30초의 시간이 소요되는 것으로 분석되었음.
- 상기의 결과를 토대로 도출된 재래식 방식 강관말뚝 두부정리 작업의 1일 생산성은 166본/일인 것으로 분석됨.

(나) 자동화 방식을 활용한 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성 분석

- 본 연구에서는 자동화 방식을 활용한 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성 분석을 위해 재래식 강관말뚝 두부정리 작업이 수행된 교량 시공 현장과 유사한 현장 작업환경을 조성하여 현장 환경 내 실험을 수행하였음. 또한 굴삭기 운전원은 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 운용 방법에 대해 충분히 숙지한 상태에서 실험을 진행하였음.
- 현장 환경 조성을 위해 사용된 강관말뚝은 직경 508mm, 두께 12mm의 강관말뚝으로 재래식 방식의 생산성 측정과 동일한 강관말뚝이 적용되었으며, 총 10회 동안 강관말뚝 두부정리 프로세스를 반복하여 작업의 생산성 측정을 수행하였음. 도출된 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업의 프로세스별 소요시간 및 생산성 분석 결과는 아래 표 3.17, 그림 3.31과 같음.

표 3.17 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 프로세스별 소요시간 및 생산성

구 분	절단위치 측량	절단위치 인식	강관말뚝 고정	강관말뚝 절단	절단된 상부말뚝 인양 및 적재	작업 생산성
자동화 방식	재래식 방식과 동일	15초/분	3초	1분 31초/분	10초/분	242본/일



그림 3.31 자동화 방식을 활용한 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성 측정 실험

- 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 생산성 분석 결과, 절단위치 측량에 소요되는 시간은 재래식 방식과 동일하므로 생산성 분석 대상에서 제외되었고, 절단위치 인식은 1분당 15초, 강관말뚝 고정은 1분당 3초, 강관말뚝 절단은 1분당 1분 31초, 절단된 상부말뚝 인양 및 적재는 1분당 10초의 시간이 소요되는 것으로 분석되었음.
- 상기의 결과를 토대로 도출된 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업의 1일 생산성은 242본/일인 것으로 분석됨.
- 최종적으로 재래식 및 자동화 방식 강관말뚝 두부정리 작업의 생산성 비교 분석을 수행한 결과, 재래식 방식 대비 자동화 방식의 작업 생산성 향상 효과는 약 45.78%인 것으로 분석되었음. 본 연구에서는 이를 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 재래식 방식 대비 경제성 분석을 위한 기초자료로 활용하였음.

(3) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 재래식 방식 대비 경제성 분석

(가) 경제성 분석을 위한 가정 및 변수 설정

- 본 연구에서는 재래식 및 자동화 방식의 강관말뚝 두부정리 작업 생산성을 바탕으로 각각의 작업 투입 노무비용 및 장비비용을 도출하고, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용 및 연간 유지보수 비용, 연간 작업가능일수, 할인율 등을 경제성 분석을 위한 가정 및 변수로 설정하였음.

① 작업 투입 노무비용 및 장비비용

- ✓ 작업 투입 노무비용은 대한건설협회에서 제공하는 2018년 상반기 적용 건설업 임금실태 조사 보고서의 직종별 노임단가를 활용하여 적용하였음.
- ✓ 재래식 방식의 경우, 용접공 2인으로 구성되어 작업이 수행되므로 재래식 방식의 1일 총 노무비는 338,402원으로 산정되었으며, 자동화 방식의 경우, 굴삭기 운전원 1인에 의해 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 활용하여 두부정리 작업이 가능하도록 개발되었으나, 본 연구에서는 보다 보수적인 경제성 분석을 위해 용접공 1인을 추가 투입시키는 것으로 가정하여 자동화 방식의 1일 총 노무비는 169,201원으로 산정되었음.
- ✓ 재래식 및 자동화 방식의 1일 작업 노무비용 비교·분석 결과, 자동화 방식을 활용할 경우 1일 노무비 절감액은 169,201원인 것으로 분석되었음(표 3.18).

표 3.18 재래식 및 자동화 방식의 1일 작업 노무비용 비교·분석

재래식 방식				자동화 방식			
구 분	투입 인원	일일단가 (원)	노무비용 (원)	구 분	투입 인원	일일단가 (원)	노무비용 (원)
용접공	2	169,201	338,402	용접공	1	169,201	169,201
소 계			338,402	소 계			169,201

자동화 방식의 1일 노무비 절감액 : 338,402 - 169,201 = 169,201원

- ✓ 작업 투입 장비비용은 한국물가협회에서 발간한 2018 종합적산자료의 건설공사 일위대 가에 근거하여 굴삭기의 1일 임대료를 산정하여 적용되었음.
- ✓ 본 연구에서는 재래식 및 자동화 방식 모두 0.6m³ 규격의 굴삭기(타이어)를 활용하는 것으로 가정하였고, 굴삭기 운전원의 노무비용이 포함된 해당 굴삭기의 1일 8시간 작업 기준 임대료는 597,200원인 것으로 산정되었음.

② 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작 및 유지보수 비용

- ✓ 본 연구를 통해 제작된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 실험 투입 제작비용 및 유관전문가 인터뷰를 통해 도출된 세부 부품별 내구연한이 아래 표 3.19와 같이 분석됨.

표 3.19 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용

부품명	내구연한(년)	제작비용(원)
Grapple Assy.	4	7,202,352
Cutting Assy.	2	981,200
Sensing Assy.	5	1,800,000
Rotation Rink	4	7,664,000
Power Package	5	9,480,000
Control Part	5	1,656,000
Unit Accessories	5	240,000
소 계(원)		29,023,552
굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용(원)		29,023,552

- ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용은 부품별로 강관 말뚝 절단 부위 핸들링부 7,202,352원, 강관말뚝 절단부 981,200원, 강관말뚝 절단 위

치 센싱부 1,800,000원, 회전형 링크 7,664,000원, 발전부 9,480,000원, 제어부 1,656,000원, 기타 부속품 240,000원으로 산정되었으며, 이에 따른 총 제작비용은 29,023,552원이 소요되는 것으로 조사되었음.

- ✓ 또한 자동화 로봇의 예상수명 동안 소요되는 유지보수 비용은 로봇의 사용 방식 및 환경에 따라 변동 가능성이 있어 예측이 어려우므로, 본 연구에서는 보수적인 경제성 분석을 위해 자동화 방식의 유지보수 비용을 세부부품의 내구연한에 따른 전면 교체비용으로 설정하였음.

③ 연간 작업가능일수

- ✓ 본 연구에서는 강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업가능일수를 산정하기 위하여 문헌조사 및 전문가 인터뷰를 수행하였음.
- ✓ 건축공사표준시방서와 토목공사표준일반시방서에는 강관말뚝 두부정리 작업이 제한되는 기후 조건은 별도로 명시되어 있지 않으며, 전문가 인터뷰 결과 눈이나 비 등 강수량에 영향을 받는 것으로 조사되었음.
- ✓ 이에 따라 보다 보수적인 경제성 분석 수행을 위해 서울지역의 최근 10년간 강수량 통계자료를 분석하여 강수량 및 강설량이 시간당 0mm를 초과하는 경우를 작업이 불가능한 것으로 가정하였고, 법정 공휴일과의 중복 여부를 고려하여 강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업가능일수를 172일로 산정하였음(표 3.20).

표 3.20 강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업가능일수 산정

구 분		연도별 강관말뚝 두부정리 작업이 불가능한 일수									
연 도		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
자 작 업 가 능 일 수	휴일	110	113	116	114	116	117	111	118	120	114
	강수 (0mm/h 초과)	113	135	108	110	129	101	104	109	99	107
	중복일수	36	38	37	30	38	27	31	34	38	27
작업가능일수		178	155	178	171	158	174	181	172	184	171

강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업가능일수 : 172일

④ 연간 작업투입비용

- ✓ 본 연구에서는 앞서 분석된 재래식 및 자동화 방식의 작업 생산성과 표 3.20의 연간 작업가능일수를 고려하여 재래식 및 자동화 방식을 활용한 강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업투입비용을 분석하였음.
- ✓ 강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업가능일수 172일 동안 재래식 방식의 작업 생산성(166본/일)에 따른 연간 작업가능물량은 28,552본으로 산정됨. 이 때, 동일한 물량(28,552본)을 대상으로 자동화 방식의 작업 생산성(242본/일)에 따른 작업 소요일수는 118일로 분석되었으며, 이에 따라 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 활용에 따른 재래식 방식 대비 연간 발생편익은 70,488,226원으로 분석됨(표 3.21).

표 3.21 재래식 및 자동화 방식의 연간 작업투입비용 비교 · 분석

재래식 방식(연간 172일 작업)			자동화 방식(연간 118일 작업)		
구 분	일일 작업 투입비용(원)	연간 작업 투입비용(원)	구 분	일일 작업 투입비용(원)	연간 작업 투입비용(원)
장비비	597,200	102,718,400	장비비	597,200	70,469,600
노무비	338,402	58,205,144	노무비	169,201	19,965,718
소 계	935,602	160,923,544	소 계	766,401	90,435,318
자동화 방식 도입에 따른 연간 발생편익					
160,923,544 - 90,435,318 = 70,488,226 원/년					

⑤ 할인율

- ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 도입함에 있어 발생하는 비용과 편익은 로봇을 운용하는 장기간에 걸쳐 발생하므로, 각기 다른 시점에서 발생하는 모든 비용과 편익을 합산하여 비교하기 위해서는 특정 시점에서의 가치로 환산해야 함. 미래 시점에서의 비용과 편익을 현재가치로 환산하는 것을 할인(discount)라고 하며, 이 때 적용되는 이자율을 할인율(discount rate)라고 정의함.
- ✓ 경제성 분석 과정에서의 할인율은 분석자의 주관적 선택에 의해 결정되나, 할인율에 따라 경제성 분석 결과가 상이하므로 주요 국제기구의 기준이나 유사 사업의 할인율을 참고하여 최선의 할인율을 적용하는 것이 현실적인 방법임(KOICA, 2017).
- ✓ 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석에서 적용될 할인율을 결정하기 위해 아래 표 3.22과 같이 최근 10년간의 소비자물가지수 등락률과 최근 10년간의 한국은행 기준금리, 세계은행(The World Bank) 및 미국 예산관리국(OMB; Office of Management and Budget), 아시아개발은행(ADB; Asian Development Bank)에서 제시하는 할인율을 분석하였음.

표 3.22 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석을 위한 할인율

구 분	소비자물가지수 등락률(%)	한국은행 기준금리(%)	세계은행 및 미국 예산관리국	아시아개발은행
2008년	4.67	3.00	10~12%	9%
2009년	2.76	2.00		
2010년	2.95	2.50		
2011년	4.00	3.25		
2012년	2.21	2.75		
2013년	1.29	2.50		
2014년	1.30	2.00		
2015년	0.70	1.50		
2016년	1.00	1.25		
2017년	1.90	1.50		
평 균	2.28	2.23		

- ✓ 본 연구에서는 최근 10년간 소비자물가지수 등락률의 평균치인 2.28%를 할인율로 적용하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇에 대한 경제성 분석을 수행하였으며, 경제성 분석의 신뢰성을 제고하기 위해 최근 10년간 한국은행 기준금리 평균치인 2.23%와 세계은행과 미국 정부의 예산관리국에서 제시하는 할인율인 10~12%, 아시아개발은행에서 제시하는 9%에 대한 민감도 분석을 추가적으로 수행하였음.

(나) 재래식 방식 대비 자동화 방식의 경제성 분석

- 본 연구에서는 앞서 설정된 경제성 분석을 위한 가정 및 변수를 바탕으로 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 내구연한(10년) 동안의 현금흐름도를 그림 3.32와 같이 도출하였으며, 이를 토대로 편익/비용 비율(Benefit/Cost Ratio) 분석, 수익률(ROR; Rate of Return) 분석, 손익분기점(Break-even Point) 분석, 민감도(Sensitivity) 분

석을 수행하여 재래식 방식 대비 자동화 방식의 경제적 타당성을 분석하였음.

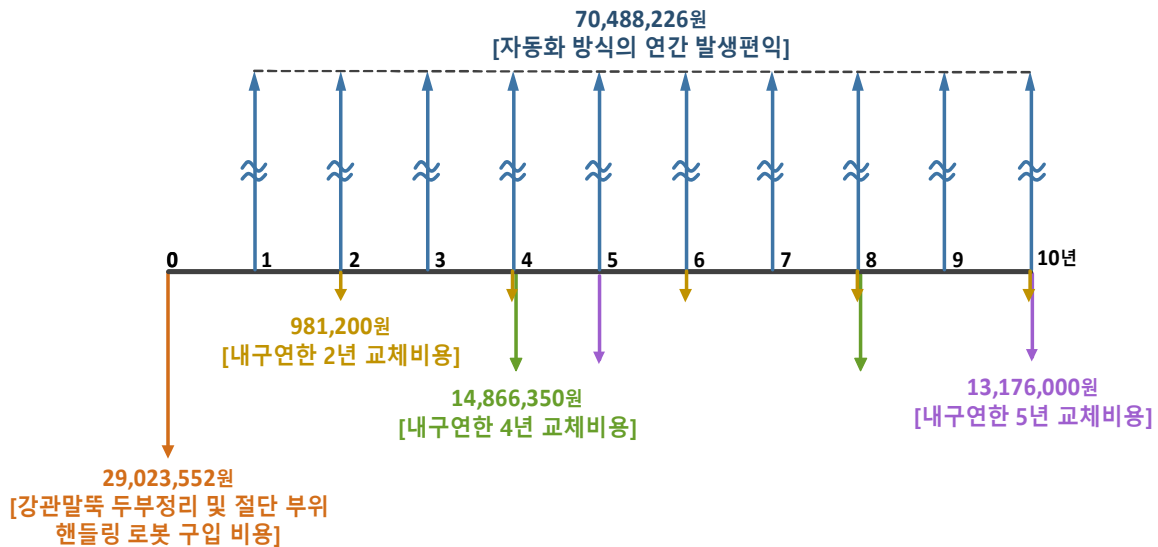


그림 3.32 경제성 분석을 위한 현금 흐름도

① 편익/비용 비율(B/C Ratio) 분석

- ✓ 편익/비용 비율(B/C Ratio) 분석이란 투자대안에 따라 발생하는 편익의 현재가치(PW; Present Worth)와 추가되는 비용의 현재가치와의 비율, 즉 편익/비용 비율을 구하여 경제적 채산성을 판단하는 일반적인 경제성 분석방법임(김영석, 2004).
- ✓ 아래 표 3.23에서 분석된 바와 같이 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 현장에 도입할 경우의 연간 발생편익은 70,488,226원이며, 이를 할인율 2.28%, 운용기간 10년을 적용하여 환산한 발생편익의 현재가치는 623,990,118원인 것으로 분석되었음.
- ✓ 한편 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 현장 도입에 따라 추가적으로 소요되는 비용은 로봇 제작비용과 로봇 운용과정에서 발생하는 유지보수비용으로 구성되며, 이를 할인율 2.28%, 운용기간 10년을 적용하여 환산한 추가비용의 현재가치는 81,603,152원인 것으로 분석되었음.
- ✓ 따라서 아래와 같이 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 도입에 대한 편익/비용 비율은 623,990,118원/81,603,152원인 7.65로 도출되었으며, 편익/비용 비율 분석에서 경제적 타당성이 있다고 판단하는 지표인 1.0의 값을 크게 상회하는 수치가 도출됨에 따라 재래식 방식 대비 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 경제성이 있는 것으로 분석되었음(표 3.23).

■ 연간 발생편익(B)

$$\begin{aligned} B &= C_c \times D_c - C_a \times D_a \\ &= 935,602 \times 172 - 766,401 \times 118 \\ &= 160,923,544 - 90,435,318 \\ &= 70,488,226 \text{원} \end{aligned}$$

C_c : 재래식 방식의 일일 작업투입비용 (Cost of Conventional Method)

C_a : 자동화 방식의 일일 작업투입비용 (Cost of Automatic Method)

D_c : 재래식 방식의 연간 작업가능일수 (Annual Work Day of Conventional Method)

D_a : 자동화 방식의 연간 작업가능일수 (Annual Work Day of Automatic Method)

■ 연간 발생편익의 현재가치(B_{pw})

$$\begin{aligned} B_{pw} &= B(P/A, i, n) \\ &= 70,488,226(P/A, 2.28\%, 10) \\ &= 623,990,118 \text{원} \end{aligned}$$

■ 추가비용의 현재가치(C_{pw})

$$\begin{aligned} C_{pw} &= RP + MC \\ &= 29,023,552 + 981,200(P/F, 2.28\%, 2) + 981,200(P/F, 2.28\%, 4) \\ &\quad + 981,200(P/F, 2.28\%, 6) + 981,200(P/F, 2.28\%, 8) + 981,200(P/F, 2.28\%, 10) \\ &\quad + 14,866,350(P/F, 2.28\%, 4) + 14,866,350(P/F, 2.28\%, 8) \\ &\quad + 13,176,000(P/F, 2.28\%, 5) + 13,176,000(P/F, 2.28\%, 10) \\ &= 81,603,152 \text{원} \end{aligned}$$

RP : 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용 (Price of Robot)

MC : 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 유지보수비용 (Maintenance Cost of Robot)

■ 편익/비용 비율(B/C ratio)

$$\begin{aligned} B/C \text{ ratio} &= \frac{PW \text{ of Benefit}}{PW \text{ of Cost}} = \frac{B_{pw}}{C_{pw}} = \frac{623,990,118}{81,603,152} \\ &= 7.65 \end{aligned}$$

② 수익률(ROR) 분석

- ✓ 예비타당성조사 단계에서는 경제적 타당성을 평가하고 다수의 사업간 우선순위 비교 등을 위하여 편익/비용 비율뿐만 아니라 순현재가치, 내부수익률을 모두 고려하는 것이 바람직함.
- ✓ 순현재가치(NPV; Net Present Value)는 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 현재가치로 할인하여 총편익에서 총비용을 제한 값을 의미하며, 내부수익률(IRR; Internal Rate of Return)은 현재가치로 환산한 편익과 비용의 값이 같아지는 할인율(R), 즉 사업의 시행으로 인한 순현재가치를 0으로 만드는 할인율을 의미함(한국개발연구원, 2004).
- ✓ 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 대한 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 현재가치로 할인하여 총편익에서 총비용을 제한 값인 순현재가치와 현재가치로 환산한 편익과 비용의 값이 같아지는 할인율, 즉 사업의 시행으로 인한 순현재가치를 0으로 만드는 할인율인 내부수익률을 분석하였음.
- ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 도입함에 따라 발생하는 총편익의 현재가치는 623,990,118원, 총비용의 현재가치는 81,603,152원으로, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 운용하는 10년간 현재가치로 542,386,966원의 비용이 절감되는 것을 의미함.
- ✓ 아래 표 3.24와 같이 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 도입에 대한 총편익과 총비용의 현재가치가 같아지는 내부수익률은 240.84%로, 신제품 개발과

관련된 최소기대수익률(MARR; Minimum Attractive Rate Of Return)인 25~30%를 크게 상회하는 수치가 도출됨에 따라 재래식 방식 대비 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 충분히 경제성이 있다고 판단할 수 있음(표 3.25, 그림 3.33).

표 3.24 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 순현재가치 및 내부수익률

■ 순현재가치(NPV)

$$\begin{aligned} NPV &= PWof\ benefit - PWof\ cost \\ &= 623,990,118 - 81,603,152 \\ &= 542,386,966\text{원} \end{aligned}$$

■ 내부수익률(IRR)

$$\begin{aligned} NPV &= PWof\ benefit - PWof\ cost = 0 \\ &= 70,488,226(P/A, i_r, 10) \\ &\quad - \left\{ \begin{aligned} &29,026,552 + 921,200(P/F, i_r, 2) + 981,200(P/F, i_r, 4) \\ &+ 981,200(P/F, i_r, 6) + 981,200(P/F, i_r, 8) + 981,200(P/F, i_r, 10) \\ &+ 14,866,350(P/F, i_r, 4) + 14,866,350(P/F, i_r, 8) \\ &+ 13,176,000(P/F, i_r, 5) + 13,176,000(P/F, i_r, 10) \end{aligned} \right\} = 0 \\ \therefore i_r &= 240.84\% \end{aligned}$$

i_r : 내부수익률(IRR)

표 3.25 위험정도 및 투자안에 따른 최소기대수익률 범위(유일근, 2017)

위험정도	투자안	최소기대수익률 범위
높음	신제품 개발 / 해외투자	25~30 %
보통	생산 능력 확대 / 시장에서 이미 증명된 신기술 도입	18~20 %
낮음	생산성 향상	13~17 %
없거나 법적 구속력 있음	원가절감 / 공해방지 / 안전관련 사업	0~11 %

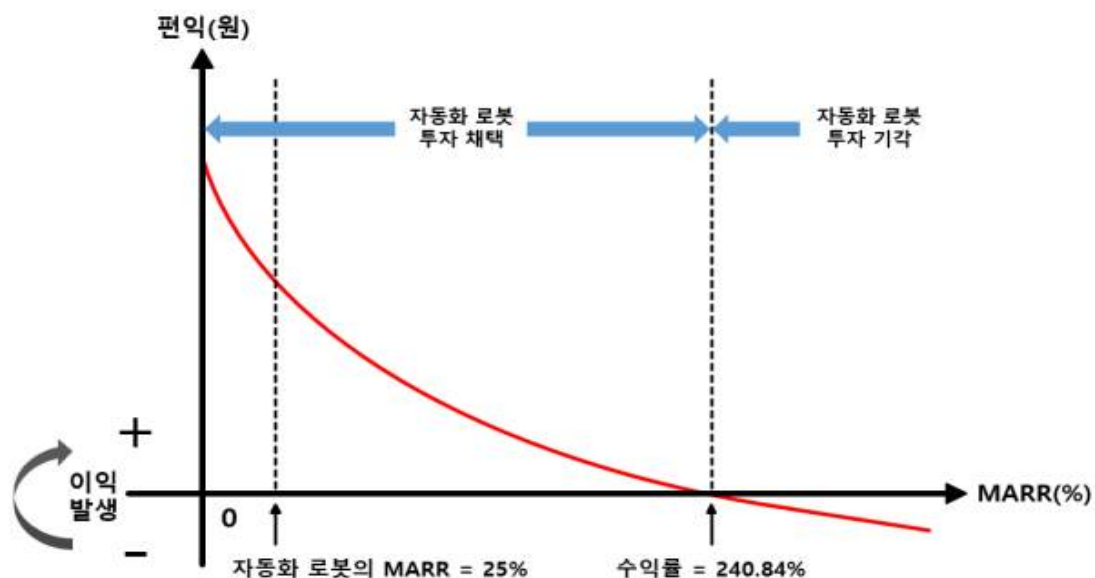


그림 3.33 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 수익률 그래프

③ 손익분기점 분석

- ✓ 손익분기점(Break-Even Point)이란 일정 기간의 총수입과 총비용이 일치하는 지점을 말하며(시사경제용어사전, 2010), 이는 사업의 시행 후 어느 시점으로부터 순이익이 발생하는지 판단할 수 있게 하는 지표로 활용됨. 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두

부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 따라 발생하는 총편익의 현재가치와 총비용의 현재가치가 일치하는 지점으로 정의하여 손익분기점을 분석하였음.

- ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 손익분기점 분석 결과, 아래 표 3.26과 같이 손익분기점이 약 1.16년(1년 2개월)으로 도출됨에 따라, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 현장에 도입하고 1년 2개월이 경과 되면 투자비용을 모두 회수할 수 있으며, 그 이후부터는 순이익이 발생하는 것으로 분석됨(그림 3.34).

표 3.26 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 손익분기점

■ 손익분기점(N)

$$PW_{of\ benefit} - PW_{of\ cost} = B_{pw} - C_{pw} = 0$$

$$\Rightarrow 70,488,226(P/A, 2.28\%, N) - 81,603,152 = 0$$

$$\Rightarrow (P/A, 2.28\%, N) = \frac{81,603,152}{70,488,226} \approx 1.1577$$

$\therefore N \approx 1.16\text{년}(1\text{년 } 2\text{개월})$

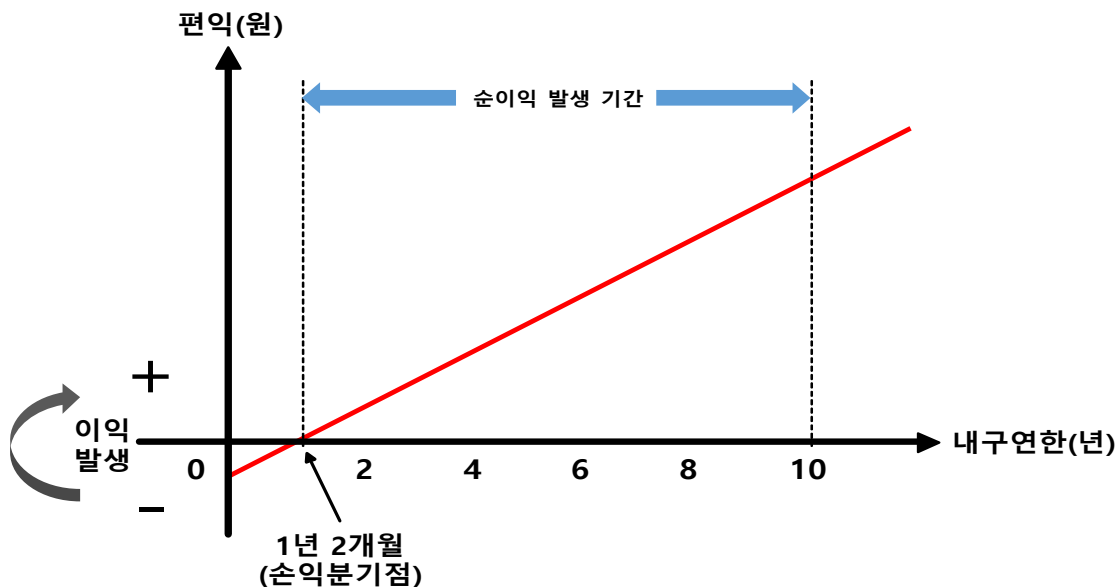


그림 3.34 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 손익분기점 그래프

④ 연간 공사비용 절감효과 분석

- ✓ 본 연구에서는 연등가액법을 활용하여 재래식 방식 대비 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 따른 연간 공사비용 절감효과를 분석하였음.
- ✓ 연등가액법은 둘 이상의 대안에 있어 일정 분석기간 동안 발생하는 편익 및 비용이 매년 균등하게 발생하는 것으로 가정하여 이를 비교·분석 방법으로, 재래식 방식의 연간 총 공사투입비용과 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 활용한 자동화 방식의 연간 총 공사투입비용을 비교·분석하는 방식이 활용됨. 분석 결과, 재래식 방식 대비 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 따른 연간 공사비용 절감효과는 약 38.07%인 것으로 분석됨(표 3.27, 그림 3.35).

표 3.27 재래식 방식 대비 자동화 방식의 연간 공사비용 절감효과

■ 재래식 방식의 연간 총 공사투입비용(AC_c)

$$\begin{aligned} AC_c &= C_c \times D_c \\ &= 935,602 \times 172 \\ &= 160,923,544 \text{원} \end{aligned}$$

■ 자동화 방식의 연간 총 공사투입비용(AC_a)

$$\begin{aligned} AC_a &= C_a \times D_a + MC \\ &= 766,401 \times 118 + 81,603,152(A/P, 2.28\%, 10) \\ &= 90,435,318 + 9,218,193 \\ &= 99,653,511 \text{원} \end{aligned}$$

■ 재래식 방식 대비 자동화 방식의 연간 공사비용 절감효과

$$\frac{AC_c - AC_a}{AC_c} \times 100 = \frac{(160,923,544 - 99,653,511)}{160,923,544} \times 100 = 38.07\%$$

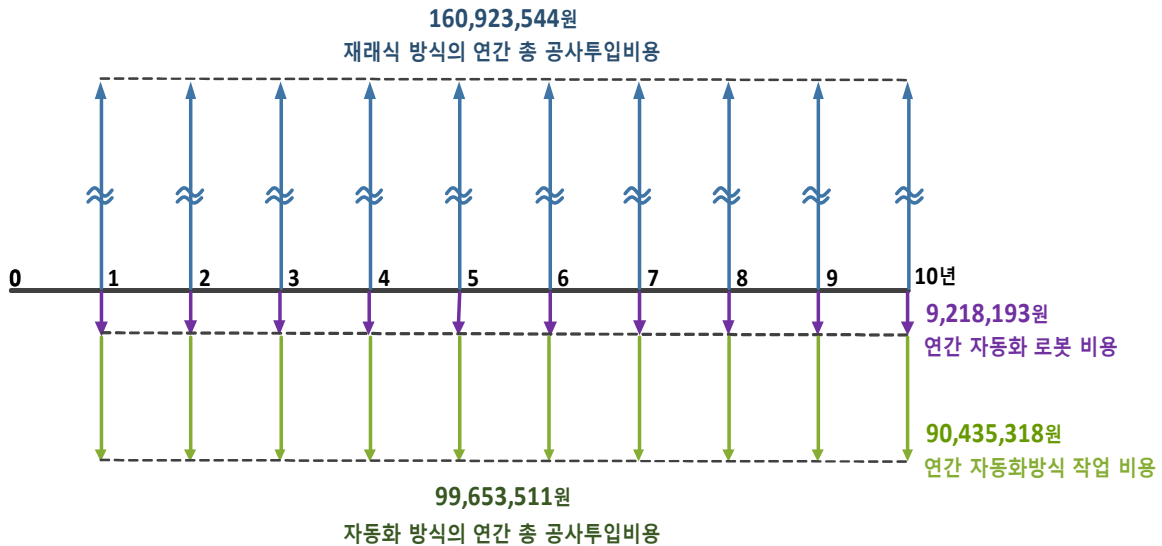


그림 3.35 재래식 및 자동화 방식의 연간 총 공사투입비용

- 상기 분석결과를 토대로 도출된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석 결과는 아래 표 3.28과 같음.

표 3.28 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석 결과

편익/비용 비율	수익률(%)	손익분기점(년)	연간 공사비용 절감효과(%)
7.65	240.84	1.16	38.07

(다) 민감도 분석

- 앞서 설정된 경제성 분석을 위한 가정 및 변수들은 경제적 환경 및 현장 여건에 따라 다양한 변동사항이 발생할 수 있어, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석 결과에 영향을 미칠 수 있음. 따라서 민감도 분석을 통해 특정 변수나 가정의 변화에 따른 경제성 분석 결과를 재고할 필요성이 있음(김영석, 2004).
- 본 연구에서는 경제성 분석의 신뢰성을 제고하기 위해 경제적 환경이나 여건에 따라 변동사항 발생 가능성이 크다고 판단되는 1)굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용, 2)작업 소요시간, 3)할인율, 4)연간 작업가능일수를 변수로 설정하여 민감도 분석을 수행하였음.

① 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용 변화에 따른 민감도 분석

- ✓ 본 연구를 통해 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용은 29,023,552원으로 경제성 분석에 적용되었음. 그러나 본 연구를 통해 제작된 개발로봇은 단품으로 제작됨에 따라, 해당 로봇이 실용화 단계에 이르고 대량 생산이 가능해질 경우 제작비용의 절감이 가능할 것으로 판단됨. 반면 해당 로봇을 제작함에 있어 경제적 환경이나 여건이 변동되어 추가적인 제작비용이 발생할 가능성 또한 배제할 수 없음.
- ✓ 따라서 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용을 기존 제작비용의 50%~200% 범위 내에서 변화를 주면서 로봇의 제작비용에 따른 민감도 분석을 수행하였음(표 3.29).

표 3.29 제작비용 변화에 따른 민감도 분석

제작비용 변화율	편익/비용 비율	수익률 (%)	손익분기점 (년)	연간 공사비용 절감효과(%)
50 %	9.30	484.24	0.98	39.09
60 %	8.91	403.19	1.01	38.89
70 %	8.56	345.26	1.05	38.69
80 %	8.23	301.79	1.09	38.48
90 %	7.93	267.95	1.13	38.28
100 % (29,023,552원)	7.65	240.84	1.16	38.07
120 %	7.14	200.20	1.25	37.67
140 %	6.69	171.12	1.33	37.26
160 %	6.30	149.29	1.41	36.85
180 %	5.95	132.30	1.49	36.44
200 %	5.64	118.70	1.57	36.04
702 %	2.43	30.01	3.70	26.60
1,968 %	1.00	2.27	9.63	2.29
2,216 %	0.90	0.02	11.18	-1.35

- ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 제작비용 변화에 따른 민감도 분석 결과, 개발로봇은 기존 제작비용의 200%가 제작비용으로 소요된다 해도 편익/비용 비율 5.35, 수익률 112.22%, 손익분기점 1.65년, 연간 공사비용 절감효과 36.40% 등의 경제적 편익이 도출됨에 따라 충분히 경제성이 있는 것으로 분석됨.
- ✓ 편익/비용 비율의 값이 1.00으로 하락하는 로봇의 제작비용은 기존 제작비용의 1,968% 수준으로 로봇의 제작비용이 19배 이상 상승할 확률이 매우 낮으므로 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 제작비용의 변화가 자동화 방식의 경제성에 미치는 영향이 다소 낮은 것을 확인할 수 있음.

- ✓ 한편 선행연구(유일근, 2017)에 따르면 신제품 개발이 목적일 경우 최소기대수익률 범위는 25~30%로 도출되어야 한다고 명시되어 있으므로, 수익률 측면에서도 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성을 확보하기 위해 제작비용의 상한가는 기존 제작비용의 702%(203,745,335원)로 제한해야 할 것으로 사료됨.

② 작업 소요시간 변화에 따른 민감도 분석

- ✓ 본 연구에서는 표 3.21, 3.22와 같이 재래식 및 자동화 방식의 작업 소요시간을 분석하였음. 분석 결과, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 생산성에 가장 큰 영향을 미치는 작업 프로세스는 강관말뚝 절단 작업인 것으로 분석되었음.
- ✓ 또한 시공 업체마다 강관말뚝 절단 작업 방식이 다를 수 있고, 현장 여건에 따라 생산성이 상이할 것으로 판단되어, 본 연구에서는 강관말뚝 절단 작업의 소요시간 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였음(표 3.30).

표 3.30 작업 소요시간 변화에 따른 민감도 분석

강관말뚝 절단 작업시간	편익/비용 비율	수익률 (%)	손익분기점 (년)	연간 공사비용 절감효과(%)
1분 31초	7.65	240.84	1.16	38.07
1분 40초	6.90	216.74	1.29	33.79
1분 50초	6.07	189.84	1.46	29.03
2분 00초	5.24	162.73	1.68	24.26
2분 20초	3.57	107.31	2.51	14.74
2분 40초	1.91	46.91	3.76	5.21
2분 44초	1.58	32.88	6.05	3.31
2분 45초	1.49	29.11	6.32	2.83
2분 51초	1.00	1.43	10.03	-0.03

- ✓ 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 작업 소요시간 변화에 따른 민감도 분석 결과, 강관말뚝 절단 작업시간이 2분 51초가 소요될 경우 편익/비용 비율은 1.00, 수익률은 1.43%, 손익분기점은 10.03년, 연간 공사비용 절감효과는 -0.03%로 경제성을 상실하는 것으로 분석되었음.
- ✓ 즉, 강관말뚝 절단 작업시간이 평균 2분 51초 이내로 소요될 경우에만 편익/비용 비율 측면에서 강관말뚝 두부정리 자동화 로봇의 경제성이 있다는 것을 의미함.
- ✓ 한편 선행연구(유일근, 2017)에 따르면 신제품 개발이 목적일 경우 최소기대수익률 범위는 25~30%로 도출되어야 하며, 수익률 측면에서도 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성을 확보하기 위해서는 강관말뚝 절단 작업시간의 최대허용시간을 수익률이 30%를 초과하는 평균 2분 44초 이내로 제한해야 할 것으로 사료됨.

③ 할인율 변화에 따른 민감도 분석

- ✓ 경제성 분석 과정에서의 할인율은 분석자의 주관적 선택에 의해 결정되나, 할인율에 따라 경제성 분석 결과가 상이하므로 주요 국제기구의 기준이나 유사 사업의 할인율을 참고하여 최선의 할인율을 적용하는 것이 현실적인 방법임(KOICA, 2017).
- ✓ 본 연구에서는 최근 10년간 소비자물가지수 등락률의 평균치인 2.28%를 할인율로 적용하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇에 대한 경제성 분석을 수행하였으며, 경제성 분석의 신뢰성을 제고하기 위해 최근 10년간 한국은행 기준금리 평균치인 2.23%와 세계은행과 미국 정부의 예산관리국에서 제시하는 할인율인 10~12%, 아시아개발은행에서 제시하는 9%에 대한 민감도 분석을 추가적으로 수행하였음(표 3.31).

표 3.31 할인을 변화에 따른 민감도 분석

할인율	편익/비용 비율	수익률 (%)	손익분기점 (년)	연간 공사비용 절감효과(%)
2.23 %	7.65	240.84	1.17	38.08
2.28 %	7.65		1.16	38.07
9.00 %	7.05		0.91	37.59
10.00 %	6.96		0.88	37.51
11.00 %	6.87		0.86	37.42
12.00 %	6.77		0.83	37.33

- ✓ 할인을 변화에 따른 민감도 분석 결과, 변수로 설정된 모든 할인율에 대하여 편익/비용 비율은 1.00 이상으로 도출되었고 수익률은 변동이 없으며, 손익분기점과 연간 공사비용 절감효과는 할인율 변화에 따라 큰 영향이 없는 것으로 분석되었음. 즉 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성은 할인율의 변화에 민감하게 반응하지 않는 것으로 사료됨.

④ 연간 작업가능일수 변화에 따른 민감도 분석

- ✓ 본 연구에서는 서울지역의 최근 10년간 강수량 통계자료를 분석하여 연간 작업가능일수를 172일로 산정하여 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성을 분석하였음.
- ✓ 그러나 지역마다 강우 및 강설량의 차이가 발생할 뿐만 아니라 현장마다 작업이 불가능한 환경과 조건이 상이할 것으로 판단되어, 본 연구에서는 편익/비용 비율이 0.99(≒ 1.00)로 도출되는 연간 작업가능일수인 25일과 최근 10년간 법정 공휴일을 제외한 연간 작업가능일수의 평균치인 250일의 범위 내에서 민감도 분석을 수행하였음(표 3.32).

표 3.32 연간 작업가능일수 변화에 따른 민감도 분석

연간 재래식 작업가능 일수(일)	연간 자동화 작업가능 일수(일)	편익/비용 비율	수익률 (%)	손익분기점 (년)	연간 공사비용 절감효과(%)
25	17	0.99	4.65	9.73	1.61
26	18	1.08	11.05	8.76	5.39
35	25	1.47	28.17	6.39	13.34
36	25	1.58	32.78	5.35	15.75
50	35	4.19	56.93	4.27	22.95
100	69	35	135.59	2.07	33.63
150	104	69	206.38	1.35	36.64
172	118	104	240.84	1.16	38.07
200	138	118	278.67	1.02	38.55
250	172	138	350.52	0.80	39.70

주 : 연간 재래식 작업가능일수에 따른 강관말뚝 작업물량을 기준으로 연간 자동화 작업가능일수를 산출하였음.

- ✓ 강관말뚝 두부정리 작업의 연간 작업가능일수 변화에 따른 민감도 분석 결과, 편익/비용 비율이 0.99(≒ 1.00)로 도출되는 연간 작업가능일수는 25일로, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇을 연간 17일 동안 활용할 경우 수익률은 4.65%, 손익분기점은 9.73년인 것으로 분석되었음.
- ✓ 한편 선행연구(유일근, 2017)에 따르면 신제품 개발이 목적일 경우 최소기대수익률 범위는 25~30%로 도출되어야 하며, 수익률 측면에서도 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성을 확보하기 위해서는 연간 최소 36일 이상 작업을 수행해야 할 것으로 사료됨.

사. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 기술적 타당성 및 현장 적용성 분석

- 본 연구를 통해 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품에 대한 기술적 타당성 및 현장 적용성을 분석하기 위해 본 연구에서는 강관말뚝 두부정리 공사 관련 경력을 지닌 현장 전문가 45인(경력 10년 미만 20명, 10~20년 13명, 20년 이상 12명)을 대상으로 기술적 타당성 및 현장 적용성에 대한 설문조사를 수행하였음.
- 설문조사는 본 연구를 통해 개발된 시제품의 1)강관말뚝 절단위치 자동인식, 2)강관말뚝 고정 및 절단, 3)절단된 강관말뚝상부 분리 및 회전, 인양 및 운반의 세 가지 기능에 대한 기술적 타당성을 5점 척도로 평가하고, 재래식 강관말뚝 두부정리 작업의 문제점으로 도출된 1)노무자의 안전성, 2)품질의 균일성, 3)작업 생산성/편의성의 세 가지 측면에 대한 개발로봇의 도입에 따른 개선 정도를 5점 척도로 평가하는 방식으로 수행됨.

(1) 설문응답의 신뢰도 분석

- 본 연구에서는 회수된 설문응답에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 통계분석 프로그램인 SPSS 18.0을 활용하여 신뢰도 분석을 수행하였음. 신뢰도 분석을 수행할 경우, 설문응답의 신뢰도를 파악하기 위한 통계값은 Cronbach' s alpha값으로써 이는 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 설문응답의 신뢰도가 높다고 해석됨. 일반적으로 Cronbach' s alpha값이 0.6 이상의 값이 도출되면 신뢰도가 유효하다고 판단할 수 있음.
- 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 개발을 위한 기술요소의 가중치 산정 문항과 서술형 답안을 필요로 하는 문항을 제외하고 재래식 강관말뚝 두부정리 작업에 대한 인식조사, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 기술적 타당성 및 현장 적용성과 관련된 리커트 5점 척도 기반의 총 13문항에 대하여 신뢰도 분석을 수행하였음.
- 신뢰도 분석 결과, 아래 그림 3.36과 같이 Cronbach' s alpha값은 0.826으로 도출됨에 따라 설문응답의 신뢰도가 유효한 것으로 분석되었음.

신뢰도 통계량

Cronbach의 알파	항목 수
.826	13

항목 총계 통계량

	항목이 삭제된 경우 척도 평균	항목이 삭제된 경우 척도 분산	수정된 항목- 전체 상관관계	항목이 삭제된 경우 Cronbach 알파
문항1	44.80	28.573	.300	.828
문항2	45.31	31.674	-.041	.858
문항3	45.64	32.053	-.050	.845
문항4	45.56	31.253	.040	.843
문항5	44.38	27.331	.571	.806
문항6	44.16	26.725	.660	.800
문항7	44.11	26.056	.698	.796
문항8	44.09	26.037	.689	.796
문항9	44.33	25.636	.742	.792
문항10	44.18	27.468	.564	.807
문항11	43.93	26.200	.709	.796
문항12	44.36	26.734	.607	.803
문항13	44.36	25.098	.804	.786

그림 3.36 신뢰도 분석 결과(I)

- 한편, 그림 3.36에서 항목 총계 통계량 표의 가장 우측 열인 ‘항목이 삭제된 경우 Cronbach 알파’ 값이 0.826보다 큰 문항2, 문항3, 문항4, 문항1을 순차적으로 제거하여 나머지 문항만으로 신뢰도 분석을 수행할 경우, Cronbach’s alpha값은 0.914로써 보다 유효한 신뢰도가 도출되는 것으로 분석되었음(그림 3.37).

신뢰도 통계량				
Cronbach의 알파		항목 수		
.914		9		

항목 총계 통계량				
	항목이 삭제된 경우 척도 평균	항목이 삭제된 경우 척도 분산	수정된 항목-전체 상관관계	항목이 삭제된 경우 Cronbach 알파
문항5	32.62	22.649	.576	.913
문항6	32.40	21.927	.693	.905
문항7	32.36	21.234	.742	.902
문항8	32.33	21.182	.739	.902
문항9	32.58	21.295	.718	.903
문항10	32.42	22.568	.602	.911
문항11	32.18	21.377	.754	.901
문항12	32.60	21.745	.666	.907
문항13	32.60	20.609	.811	.897

그림 3.37 신뢰도 분석 결과(Ⅱ)

(2) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 기술적 타당성 분석

(가) 강관말뚝 절단위치 자동인식 기능

- 강관말뚝 절단위치 자동인식 기능에 대한 기술적 타당성 분석 결과, 무응답 2인을 제외한 43명의 응답자가 매우 낮다(0%), 낮다(4.7%), 보통이다(18.6%), 높다(60.5%), 매우 높다(16.3%)로 응답하였음(그림 3.38).

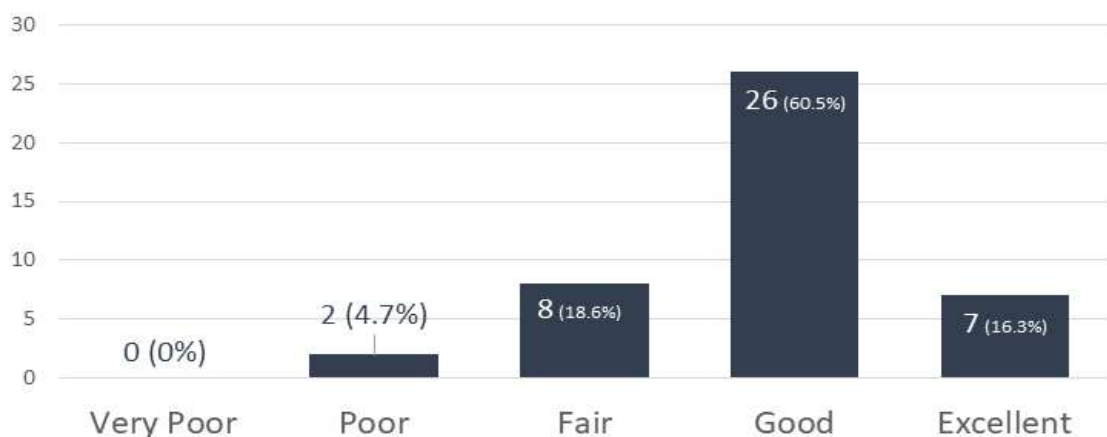


그림 3.38 강관말뚝 절단위치 자동인식 기능에 대한 기술적 타당성 분석

- 즉 76.8%의 응답자가 강관말뚝 절단위치 자동인식 기능의 기술적 타당성에 대해 높게 평가함에 따라 기술의 실효성 및 실용화 가능성이 높다고 판단할 수 있음. 반면 부정적인 의견은 4.7%로 실제 현장에서의 성능 검증을 통해 그 실효성이 먼저 입증되어야 한다고 응답하였음.

(나) 강관말뚝 고정 및 절단 기능

- 강관말뚝 고정 및 절단 기능에 대한 기술적 타당성 분석 결과, 무응답 2인을 제외한 43명의

응답자가 매우 낮다(0%), 낮다(2.3%), 보통이다(14.0%), 높다(55.8%), 매우 높다(27.9%)로 응답하였음(그림 3.39).

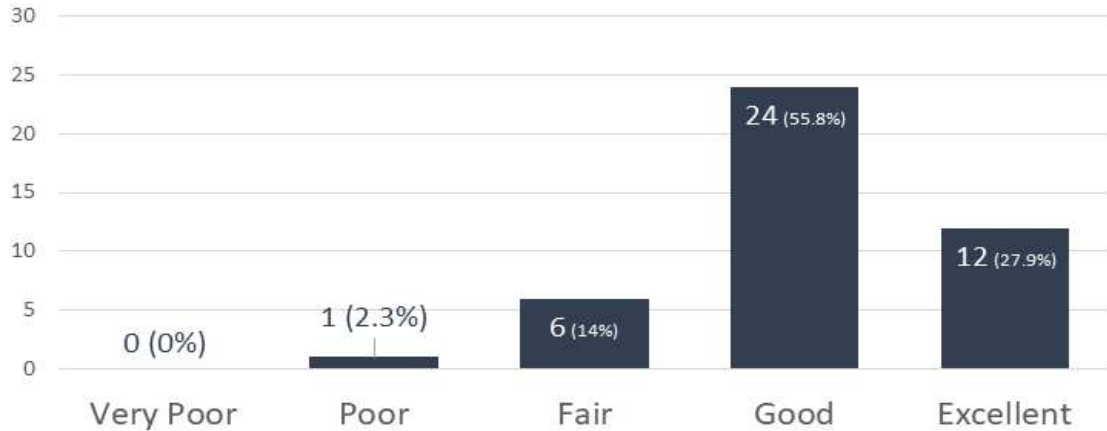


그림 3.39 강관말뚝 고정 및 절단 기능에 대한 기술적 타당성 분석

- 즉 83.7%의 응답자가 강관말뚝 고정 및 절단 기능의 기술적 타당성에 대해 높게 평가함에 따라 기술의 실효성 및 실용화 가능성이 높다고 판단할 수 있음. 반면 부정적인 의견은 2.3%로 강관말뚝 두부정리 작업의 경우 작업 생산성에 비해 품질 및 안전성 확보의 요구가 높기 때문에 이와 같은 특성이 개발로봇에 반영되어야 한다고 응답하였음.

(다) 절단된 강관말뚝 상부의 분리 및 회전, 인양 및 운반 기능

- 강관말뚝 상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 기능에 대한 기술적 타당성 분석 결과, 무응답 1인을 제외한 44명의 응답자가 매우 낮다(0%), 낮다(2.3%), 보통이다(13.6%), 높다(47.7%), 매우 높다(36.4%)로 응답하였음(그림 3.40).

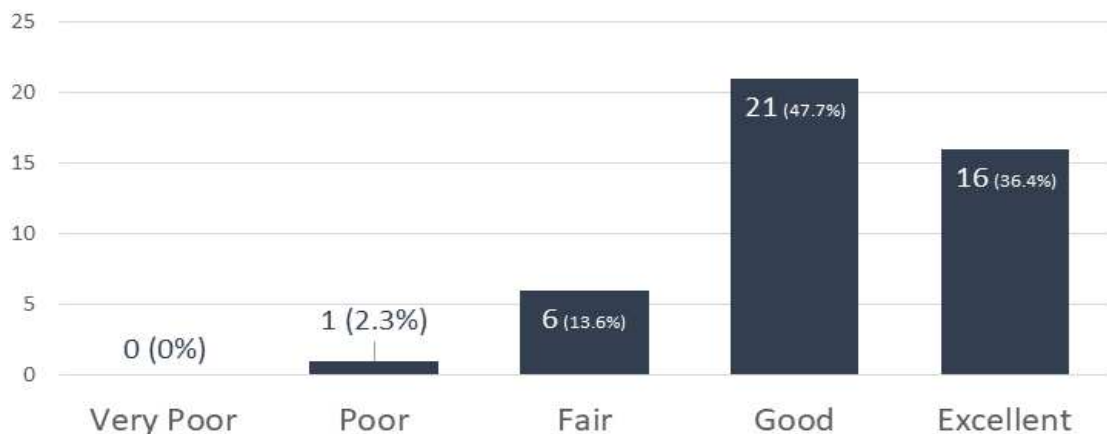


그림 3.40 절단된 강관말뚝 상부의 분리 및 회전, 인양 및 운반 기능에 대한 기술적 타당성 분석

- 즉 84.1%의 응답자가 강관말뚝상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 기능의 기술적 타당성에 대해 높게 평가함에 따라 기술의 실효성 및 실용화 가능성이 높다고 판단할 수 있음. 반면 부정적인 의견은 2.3%로 절단된 강관말뚝상부의 분리 및 회전, 인양 및 운반 시 말뚝의 탈락이 발생하지 않을 정도의 안정성 확보가 선행되어야 한다고 응답하였음.

(3) 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 현장 적용성 분석

(가) 작업 안전성 측면

- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 따른 작업 안전성 측면의 향상 효과 분석 결과, 무응답 1인을 제외한 44명의 응답자가 매우 낮다(2.3%), 낮다

(0%), 보통이다(9.1%), 높다(56.8%), 매우 높다(31.8%)로 응답하였음(그림 3.41).

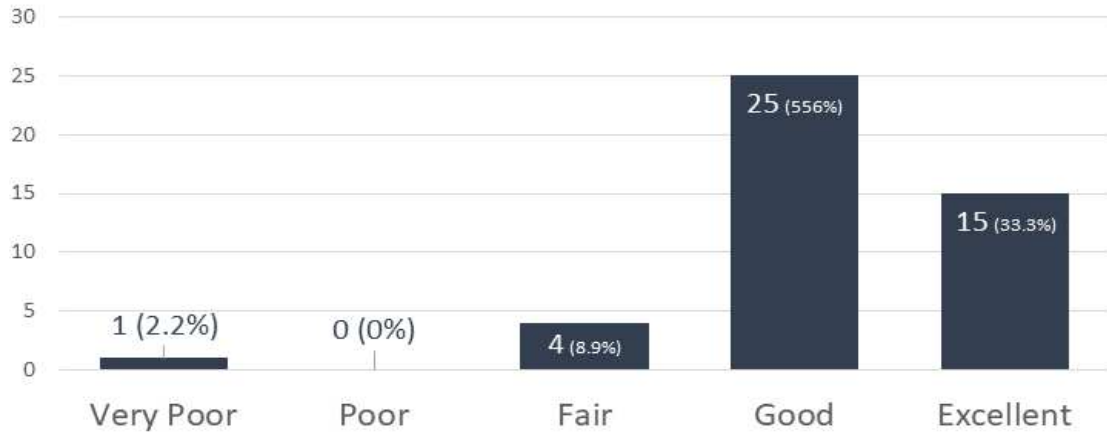


그림 3.41 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 현장 적응성 - 작업 안전성 측면

- 즉 88.6%의 응답자가 개발로봇에 도입에 따른 작업 안전성 향상 효과를 우수하게 평가하였음. 이는 개발로봇을 활용할 경우 현장으로의 인력 투입이 최소화됨은 물론 안정적인 작업 수행으로 강관말뚝 두부정리 작업 시 발생 가능한 안전사고를 원천적으로 예방할 수 있기 때문인 것으로 분석됨.

(나) 품질의 균일성 측면

- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 따른 품질의 균일성 측면의 향상 효과 분석 결과, 45명의 응답자가 매우 낮다(0%), 낮다(2.2%), 보통이다(8.9%), 높다(42.2%), 매우 높다(46.7%)로 응답하였음(그림 3.42).

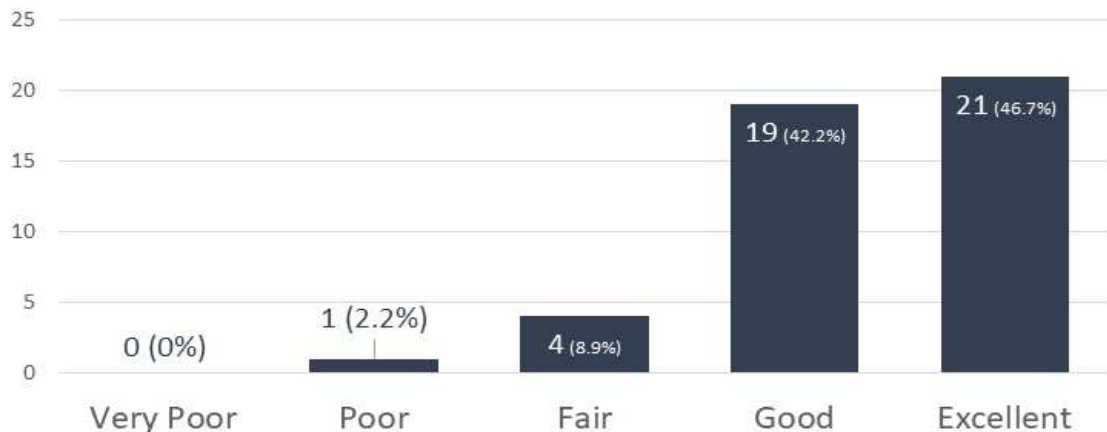


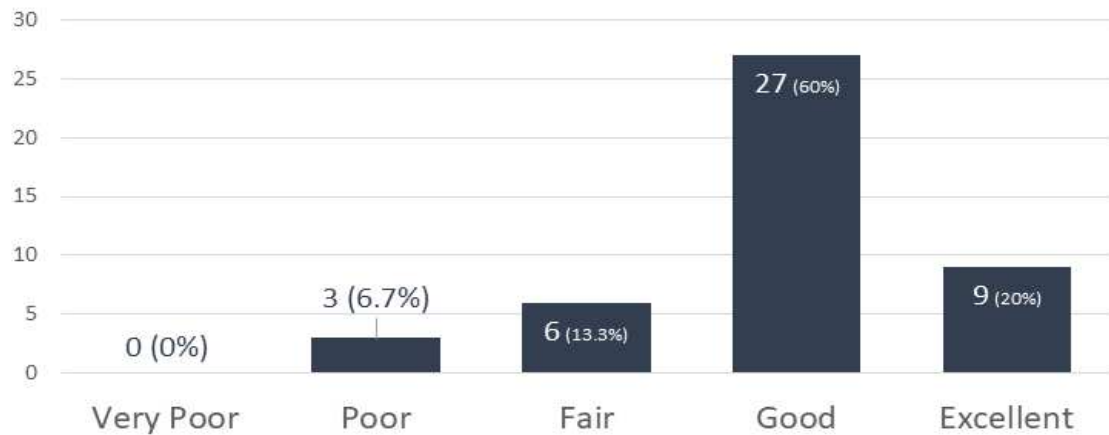
그림 3.42 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 현장 적응성 - 품질의 균일성 측면

- 즉 88.9%의 응답자가 개발로봇의 도입에 따른 품질의 균일성 향상 효과를 우수하게 평가하였음. 이는 노무자 작업 숙련도에 관계없이 균일한 품질의 강관말뚝 두부정리 작업을 수행할 수 있는 개발로봇의 특성이 반영된 것으로 분석됨.

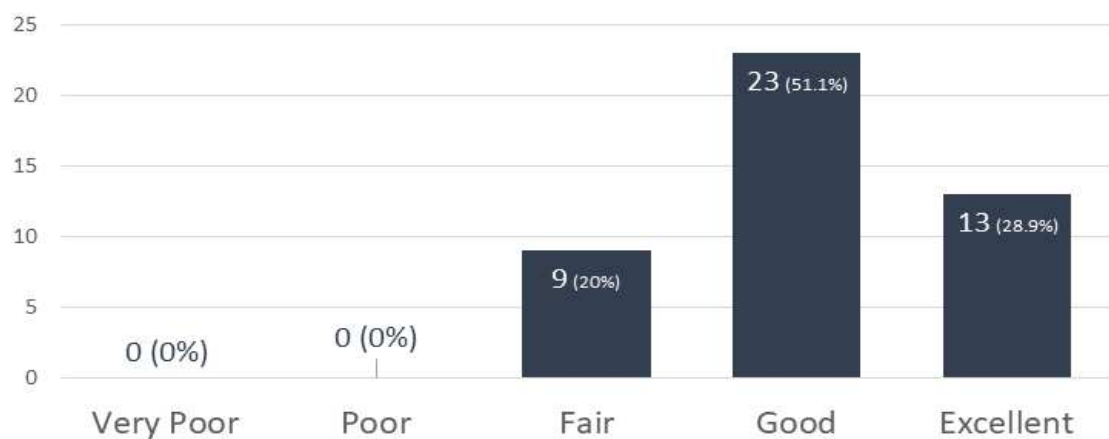
(다) 작업 생산성/편의성 측면

- 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입에 따른 작업 생산성/편의성 측면의 향상 효과 분석 결과, 작업 생산성 측면에서는 45명의 응답자가 매우 낮다(0%), 낮다(6.7%), 보통이다(13.3%), 높다(60.0%), 매우 높다(20.0%)로 응답하였으며, 작업 편의성 측면에서는 45명의 응답자가 매우 낮다(0%), 낮다(0%), 보통이다(20.0%), 높다(51.1%), 매우 높다(28.9%)로 응답하였음(그림 3.43).

- 즉 작업 생산성 측면, 편의성 측면에서 각각 80.0%의 응답자가 개발로봇에 도입에 따른 작업 생산성/편의성 향상 효과를 우수하게 평가하였으며, 이는 노무자의 숙련도에 대한 의존도가 낮은 개발로봇의 특성 때문인 것으로 분석됨.



(a) 작업 생산성 향상 효과에 대한 설문조사 결과



(b) 작업 편의성 향상 효과에 대한 설문조사 결과

그림 3.43 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 현장 적용성 - 작업 생산성/편의성 측면

- 도출된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품에 대한 기술적 타당성 분석 결과, 강관말뚝 절단위치 자동인식 기능에 대해 76.8%, 강관말뚝 고정 및 절단 기능에 대해 83.7%, 절단된 강관말뚝상부 분리 및 회전, 인양 및 운반 기능에 대해 84.1%의 응답자가 개발로봇의 기술적 타당성에 대해 높게 평가하였음.
- 또한 도출된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개념디자인에 대한 현장 적용성 분석 결과, 작업 안전성 측면에서 88.6%, 품질의 균일성 측면에서 88.9%, 작업 생산성/편의성 측면에서 80.0%의 응답자가 재래식 방식 대비 향상 효과가 우수할 것이라 응답함에 따라 개발로봇의 실제 개발 시 현장 적용성이 우수할 것으로 기대됨.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 최종 목표 달성도

핵심연구성과	단위 성과		질적 성과지표	목표치	측정방법	평가치	달성도
굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품	A-1	강관말뚝 절단면인식 및 절단작업 수행을 위한 센싱 및 절단부	강관말뚝 절단면 인식 정확도	10cm 이내	절단면 인식 정확도 측정 (10회 이상)	1.20mm	100%
			강관말뚝 절단 속도	1분당 15분 이내	강관말뚝 평균 절단 속도 측정 (5회 이상)	1분당 평균 1분 31초	100%
	A-2	강관말뚝 고정, 분리, 회전, 운반 및 적재를 위한 절단 부위 핸들링부	강관말뚝 인양 능력	인양 허용 중량 0.1t 이상	0.1t 이상 강관말뚝 상부 인양	인양 허용 중량 0.734t 이상	100%
굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품에 대한 종합성능 및 경제성 분석모델	B-1	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품에 대한 종합성능 및 경제성	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품에 대한 강관말뚝 절단 생산성	재래식 대비 100% 이상	종합성능 분석	재래식 대비 145.78 %	100%
			굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품에 대한 경제성	재래식 대비 B/C 1.0이상	경제성 분석	재래식 대비 B/C 7.65	100%

2. 관련분야 기여도

가. 기술적/학문적 측면

- 본 연구진은 다양한 현장 요구사항 분석 등을 통해 최적 개념디자인 및 시제품을 제시하였고, 기술적/경제적 타당성 및 현장 적용성 분석 등을 통해 국내 실정에 적합한 강관말뚝 두부정리 및 핸들링 관련 요소기술을 개발하였으며, 이를 통해 본 연구에서는 강관말뚝 두부정리 작업의 용이성 확보 및 생산성 제고, 품질의 균일성 확보가 가능한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품을 개발하였음.
- 강관말뚝 시장 및 기술동향을 조사한 결과, 강관말뚝 및 복합말뚝의 수요와 적용범위가 지속적으로 증가할 것으로 예상되는 현 시점에서 국내 현실에 적합한 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발을 통해 국내 건설관련 과학 기술의 자립도를 확보함으로써 기술의 해외 의존도를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대됨. 또한 기존에 연구 개발된 강관말뚝 두부정리 관련 특허 및 기술이 현장 요구사항을 반영하지 못하여 현장 적용성이 매우 낮으므로 본 연구진은 연구를 통해 과학적인 연구개발 프로세스와 활용 가능한 첨단 기술을 제시함으로써 안전한 건설 작업환경 조성 및 건설산업의 이미지 제고에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료됨.
- 본 연구는 안전성, 생산성 및 품질 향상뿐만 아니라 인력 의존형 작업을 자동화하기 위한 다양한 요소기술의 개발을 통해 건설 기술력 향상에 크게 기여할 수 있을 것이며, 인력 절감형 시스템의 개발로 인해 시공 성력화를 위한 자동화 시공의 활성화를 도모하는 계기가 될 것으로 예상됨. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발을 위한 관련 요소기술을 개발하는 과정에서 축적된 연구개발 프로세스 및 기술적/경제적 타당성 분석 관련 지식은 향후 건축 또는 타 산업분야에서의 관련 문제점을 해결하기 위한 유용한 참고자료로 활용될 수 있으므로 본 연구의 결과는 학문 및 연구개발 측면에서도 큰 의의가 있음.

나. 연구인력 양성 측면

- 본 연구에 참여하고 있는 연구원들은 석·박사 과정동안 다양한 건설 현장 방문을 통해 강관말뚝 두부정리 관련 문제점 및 문헌 분석 등을 수행하였으며, 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발을 위해 요구되는 최신 요소기술 등에 대해 연구하였음. 이를 통해 학생들에게 다양한 건설현장을 방문하여 현장 시공관리자들과 접할 수 있는 기회를 제공하였으며, 학생들은 건설 산업의 문제점 발견하고 이를 해결하기 위한 지속적 연구를 수행함으로써 산업체 애로기술에 대한 Problem Solver로서 자신의 역량과 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있었음.
- 본 연구에서는 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품 개발을 위해 ‘강관말뚝 두부정리 기술 조사’, ‘강관말뚝 전도 및 운반 기술 조사’, ‘굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 최적 개념디자인 설계’, ‘굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 기술적/경제적 타당성 분석’ 등과 같은 다양한 연구가 수행되었음. 따라서 본 연구에 참여하고 있는 학생들은 다양한 연구논문 주제를 접할 수 있는 기회를 제공받을 수 있었으며, 세부 요소기술 개발을 위한 심화학습을 통해 양질의 석·박사 연구 논문을 작성할 수 있었음.
- 본 연구는 건축시공 관련 자동화 로봇 개발 연구를 통해 학생들로 하여금 건축시공과 관련된 일반적 지식뿐만 아니라 자동화 로봇의 개발을 위해 요구되는 일련의 과정(문제점 발견, 기술 동향 분석, 최신 요소기술 분석, 최적 개념디자인 설계, 시제품 제작 및 구동 실험, 시제품의 기술적/경제적 타당성 분석)을 체계적으로 학습할 수 있는 기회를 제공하였음. 학생들은 이를 통해 오늘

날의 사회가 요구하는 융합적 사고와 지식 및 소양을 갖춘 양질의 연구 인력으로 양성될 수 있을 것으로 기대됨.

다. 경제적/산업적 측면

- 강관말뚝 및 복합말뚝의 시장 규모 및 수요가 지속적으로 증가하고 있는 현 국내 실정에서, 개발될 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 도입은 건설 산업의 이미지 제고는 물론 생산성 향상을 통한 노무비용 절감, 안전성 확보를 통한 안전사고 처리비용 절감 등을 기대할 수 있음. 또한 개발로봇의 현장 적용을 통한 강관말뚝 두부정리 작업의 안전성 확보, 작업 편의성 및 품질 제고에 따른 생산성 및 경제성 향상은 노무자 부족, 생산성 저하, 채산성 악화 문제 등 현재 국내 건설 산업이 직면하고 있는 당면과제를 해결하기 위한 하나의 모범 사례로서도 제시될 수 있을 것으로 기대됨.
- 본 연구의 결과물을 토대로 개발될 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품이 성공적으로 현장에 적용될 경우 이는 선진 외국에 비해 자동화 로봇 개발에 지극히 보수적인 국내 건설 산업에 있어 기술개발 의욕을 고취시키고, 현대의 첨단 기술을 수용하지 못함으로 인해 최근 다른 산업과의 기술격차가 극히 심화되고 있는 국내 건설 산업에 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것으로 기대됨.

3. 후속연구의 필요성

- 본 연구를 통해 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품은 재래식 강관말뚝 두부정리 작업의 대표적인 문제점으로 지적되었던 1)노무자의 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면, 4)숙련공 부족 측면의 문제점을 개선하고, 재래식 방식 대비 45.78%의 생산성 향상 효과를 도출할 수 있는 것으로 분석되었음.
- 또한, 실험실 실험 및 현장 환경 내 실험을 통해 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품의 실용화 가능성을 검증하였으며, 경제적 타당성 분석을 통해 도출된 B/C 7.65, 수익률 240.84%, 손익분기점 1.16년, 연간 공사비용 절감효과 38.07% 등의 경제성을 토대로 그 상용화 가능성 또한 검증하였음.
- 본 연구를 통해 개발된 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 시제품은 현재까지 개발된 강관말뚝 두부정리 장비 중 가장 진보된 성능을 확보하였으며, 작업수행 능력 부분에서 실용화에 근접하였으나, 본 연구과제가 18개월의 연구기간 동안 수행된 단 납기 과제이며, 현장실험 및 실용화 이전 단계(TRL 4단계)의 연구목적으로 개발된 로봇임을 고려할 때 추가적인 연구 수행을 통해서 실용화/상용화 모델의 개발을 수행하는 것이 필요할 것으로 사료됨.
- 즉, 적용대상 굴삭기 종류 및 강관말뚝 규격, 로봇 구조의 단순화 및 경량화, 사용자 편의성 측면에서 개선의 여지가 있음. 국제 시장에서의 경쟁력 확보를 위해서는 지속적인 투자와 추가 연구개발이 반드시 필요하고, 추후 추가기능 및 요소기술들이 지속적으로 연구개발되어 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇에 탑재될 경우 시장의 요구사항을 충족하는 상용화 모델 개발이 가능할 것이며, 국내 강관말뚝 기초 시장에서 뿐만 아니라 강관말뚝을 필요로 하는 해외 시장에서도 충분한 시장성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용계획

- 최근 단위면적 당 하중지지능력이 타 말뚝에 비해 우수하고, 횡하중 및 휨모멘트에 대한 지지력이 우수한 강관말뚝 및 복합말뚝의 수요가 지속적으로 증가하고 있는 실정임. 그러나 강관말뚝 공사의 필수작업인 강관말뚝의 두부정리는 1)노무자의 안전성 측면, 2)품질의 균일성 측면, 3)작업 생산성/편의성 측면, 4)숙련공 부족 측면에서 문제점을 지니고 있어 이를 개선하기 위한 대안의 마련이 시급한 것으로 분석됨.
- 본 연구를 통해 개발될 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 시제품은 국내 실정에 적합하고 국제적 수준의 기술력을 지닌 최첨단의 강관말뚝 두부정리 및 핸들링 로봇이 될 것으로 기대됨. 해당 로봇은 교량, 항만시설, 플랜트 등과 같은 토목구조물 공사 현장뿐만 아니라 깊은 기초를 필요로 하는 고층 빌딩 등의 건축구조물의 기초공사에 적용될 수 있으므로, 건축/토목 기초공사 및 토공사업체, 강관말뚝 제작 업체 등 다양한 기술수요처가 존재할 것으로 기대됨.
- 또한 강관말뚝의 지속적인 수요와 상부말뚝이 강관말뚝으로 이뤄진 복합말뚝 사용량의 증가 추세를 고려해 볼 때, 개발로봇의 적용 범위 및 효과는 매우 클 것으로 판단됨. 본 연구 결과물의 현장 적용성 및 기술적/경제적 타당성이 확보될 경우, 국내 민간 기술이전 및 해외 시장으로의 발전 가능성도 무한할 것으로 예상됨.
- 연구개발 결과의 상용화를 위해서는 보유기술을 기반으로 직접 기업을 설립하여 추진하는 방법과 상용화 희망 기업에 개발 기술을 이전하는 방법이 있음. 본 연구진이 직접 새로운 기업을 설립하여 상용화를 추진하기에는 기업 운영의 전문성이 부족하고 관련 시장의 인지도를 구축하기 곤란할 것으로 판단되므로, 추후 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 상용화를 희망하는 기업에 본 연구진이 직접 기술을 이전하는 방법으로 상용화를 추진하고자 함(그림 5.1).

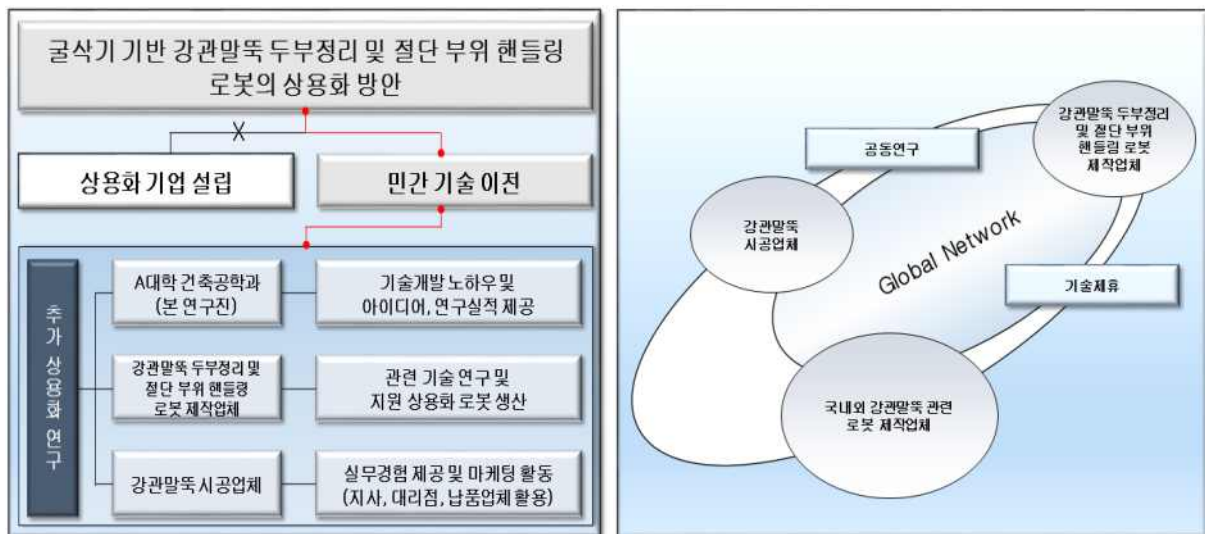
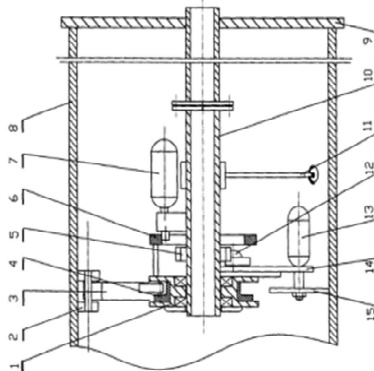


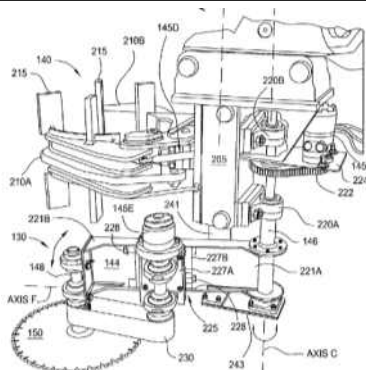
그림 5.1 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 기술이전 및 상용화 방안

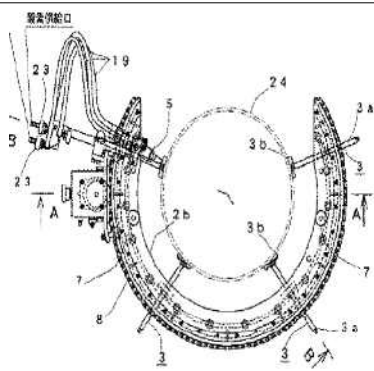
- 따라서 본 연구의 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 제작업체와 재래식 강관말뚝 시공업체를 통해 연구 초기부터 실험을 지원하도록 하고, 현재 상용화에 의지를 가지고 있는 기업을 기술이전 대상으로 활용할 계획임. 굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 제작업체의 경우 본 로봇의 제작 기업이므로 상용화를 위한 추가 제품 생산을 담당하고, 강관말뚝 시공업체의 경우 기술 및 실무 지원과 기존의 인지도를 바탕으로 한 마케팅을 담당함으로써 빠른 시간에 높은 신뢰도를 가지고 마케팅을 펼칠 수 있을 것으로 예상됨.
- 또한 본 연구결과의 국제 홍보 및 마케팅을 위하여 매년 개최되는 국제 건설자동화 및 로봇 심포지엄(International Symposium on Automation and Robotics in Construction; ISARC)등에 연구 개발결과를 발표하고 홍보 브로셔 제작 및 배포 등을 통해 대내외적으로 연구결과의 우수성을 적극 홍보하고자 함.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

연구 과정에서 수집된 해외 과학기술 정보를 정리한 결과는 다음 표와 같음.

기업명	Ningbo Construction Co., Ltd
시스템 및 장비명	Cutting Device and Method
개발기술 및 장비	- 강관말뚝 상단에 설치되는 고정부, 절단부, 이를 연결하는 지지부로 구성됨. - 절단부의 지지장치를 통해 작업 중심축이 고정되고, 모터에 의해 절단부가 강관말뚝 내 주면에서 회전하며 절단작업을 수행함. - 절단 도구로서 그라인더날이 사용됨.
대표도	
차별화/실용화	- 본 장치는 별도의 측량 및 절단선 표시작업이 요구되며, 강관을 절단하는 단편적인 기능만을 수행함. 또한 절단과 강관말뚝 상부의 인양 및 운반을 위해서는 별도의 장비투입이 요구됨. 또한 강관말뚝 내부에서 절단작업이 수행되므로 작업 현황 확인이 어려움. - 본 연구에서 개발한 굴삭기 전용 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 강관말뚝 외주면에서 절단작업이 수행되므로 작업 현황 확인이 쉬우며, 두부보강 캡 설치를 제외한 모든 프로세스(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))를 일괄적으로 진행하여 본 과학기술과의 차별성을 가지고 있다고 판단됨.

기업명	Wills, II Ronnie W.
시스템 및 장비명	Boom Mounted Saw
개발기술 및 장비	- 강관말뚝 상부를 고정 및 핸들링하는 클램프부, 절단부, 어태치먼트부로 구성됨. - 특정장비(트랙터)에 한정하여 어태치먼트(Attachment) 형태로 연결되며, 장비운전원에 의해 구동됨. - 절단 도구로서 PHC말뚝 및 강관말뚝의 절단이 가능한 특수 그라인더날이 사용됨.
대표도	
차별화/실용화	- 본 장치는 별도의 측량 및 절단선 표시작업이 요구되며, 특정장비(트랙터)에 한정적으로 적용되어 국내 현장에서의 활용이 제한적임. 또한 절단 도구의 마모가 심하여 소모품 교체가 빈번히 요구됨 - 본 연구에서 개발한 굴삭기 전용 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 절단 위치를 자동인식하는 방식이며 국내현장의 적용성이 뛰어나 본 과학기술과의 차별성을 가지고 있다고 판단됨.

기업명	Ikeda Kikai Sekkei
시스템 및 장비명	Steel Pipe Pile Cutter
개발기술 및 장비	- 절단부, 회전형 가이드레일부, 가이드레일 지지부로 구성됨. - 절단부가 모터에 의해 회전형 가이드레일부를 따라 이동하며 절단작업을 수행함. - 절단작업에는 가스 절단 기술이 사용됨.
대표도	
차별화/실용화	- 본 장치는 별도의 측량 및 절단선 표시작업이 요구되며, 강관을 절단하는 단편적인 기능만을 수행함. 또한 절단관 강관말뚝 상부의 인양 및 운반을 위해서는 별도의 장비투입이 요구됨. - 본 연구에서 개발한 굴삭기 전용 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 두부 보강 캡 설치를 제외한 모든 프로세스(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))를 일괄적으로 진행하여 본 과학기술과의 차별성을 가지고 있다고 판단됨.

기업명	Norman Kenneth Aubin
시스템 및 장비명	Method and Apparatus for Cutting a Pile
개발기술 및 장비	- 베이스프레임, 고정부, 말뚝의 방향을 감지하는 센서와 절단부로 구성됨. - 프레임에 장착된 센서가 말뚝 고정위치와 회전경로를 감지하고, 고정홀더의 토치가 말뚝 외주면을 따라 회전하며 절단작업을 수행함. - 절단작업에는 플라즈마 절단 기술이 사용됨.
대표도	
차별화/실용화	- 본 장치는 별도의 측량 및 절단선 표시작업이 요구되며, 강관을 절단하는 단편적인 기능만을 수행함. 또한 절단관 강관말뚝 상부의 인양 및 운반을 위해서는 별도의 장비투입이 요구됨. - 본 연구에서 개발한 굴삭기 전용 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 두부 보강 캡 설치를 제외한 모든 프로세스(그림 1.5-(1),(2),(3),(4),(5))를 일괄적으로 진행하여 본 과학기술과의 차별성을 가지고 있다고 판단됨.

기업명	Aggregate Technologies
시스템 및 장비명	Steel pile cutting
개발기술 및 장비	- 강관말뚝 고정 및 핸들링용 클램프, 외주면 그라인더 절단장치, 어태치먼트부로 구성됨. - 해당 장비는 특수 제작된 트랙터에 어태치먼트(Attachment) 형태로 장착됨. - 강관말뚝 절단 및 절단된 말뚝상부의 고정 및 인양 등의 기능을 복합적으로 수행할 수 있음. - 노무자의 현장 투입을 최소화하고 작업 생산성 및 편의성 제고가 가능하다는 장점을 지니고 있음.
대표도	
차별화/실용화	- 본 장비는 특수 제작된 트랙터에 한정하여 적용하도록 개발된 장비로, 현장 적용을 위해 과도한 초기투자비가 소요되며, 절단 방식의 특성상 특수제작된 절단장비(그라인더 날 등) 및 소모품의 교체주기가 짧아 국내 건설현장에서의 활용실적은 전무하며, 미국 내에서도 현장적용이 활발히 이뤄지지 못함. 또한 측량 및 절단선 표시를 위해 노무자의 현장투입이 필수적으로 요구된다는 단점을 지니고 있음. - 본 연구에서 개발한 굴삭기 전용 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 절단 위치를 자동인식하는 방식이며 절단장비 및 소모품의 교체주기가 길고 국내현장의 적용성이 뛰어나 본 과학기술과의 차별성을 가지고 있다고 판단됨.

기업명	Motocut
시스템 및 장비명	Motocut Plasma Cutter
개발기술 및 장비	- 강관말뚝의 고정 및 인양을 위한 클램프부, 절단부, 어태치먼트부로 구성됨. - 집게 형태의 클램프부가 강관말뚝을 고정하고 절단부가 외주면을 따라 회전하며 말뚝을 절단함. - 절단작업에는 플라즈마 절단 기술이 사용됨.
대표도	
차별화/실용화	- 본 장치는 장비 설치를 위해 노무자의 현장 투입이 요구되며, 별도의 측량 및 절단선 표시작업이 요구됨. 직경 140~270mm의 소형 강관말뚝만을 대상으로 작업을 수행하도록 설계되어 국내 현장에는 활용이 제한적임. - 본 연구에서 개발한 굴삭기 전용 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇은 절단 위치를 자동인식하는 방식이며 국내현장의 적용성이 뛰어나 본 과학기술과의 차별성을 가지고 있다고 판단됨.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류 : 일반등급

본 연구개발 과제는 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 4 제1항에서 규정하고 있는 가~마 항목에 해당되는 보안과제가 아니므로, 본 연구과제의 보안등급은 일반으로 결정함이 타당함.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전 조치 이행 실적

가. 기술적 위험 요소 분석

(1) 연구실 안전점검(연구실 안전환경 관리규정) (기관차원)

- 정밀안전진단 : 2년에 1회 외부 용역기관에 의뢰 실시
- 정기안전점검 : 1년에 1회 교내 전담부서(시설팀/안전방재실)에서 실시(연구실별 시행)
- 일상점검 : 1일에 1회 연구실 안전점검 후 일지 작성(연구실안전환경관리 시행세칙)

* 안전점검 실시내역(정기안전점검)

구 분	점검 년 월	점검대상 연구실	점검실	미점검실	비 고
정기안전점검	2011.11~12	210(A등급)	210	-	정밀안전진단 지적 사항 조치 확인
정기안전점검	2012.10~11	324(전체)	298	26	정기안전점검 실시 불안전 상태 개선요청
정기안전점검	2014.01~02	256	255	1	정밀안전진단 지적 사항 조치 확인
정기안전점검	2014.05~06	323(전체)	321	2	정기안전점검 실시 불안전 상태 개선요청
정기안전점검	2014.10~11	161	161	-	정기안전점검 지적 사항 조치 확인(2등급 이하)
정기안전점검	2016. 5~6	311	311	-	정기안전점검 실시 및 불안전 상태 개선요청

* 안전점검 실시내역(정밀안전진단)

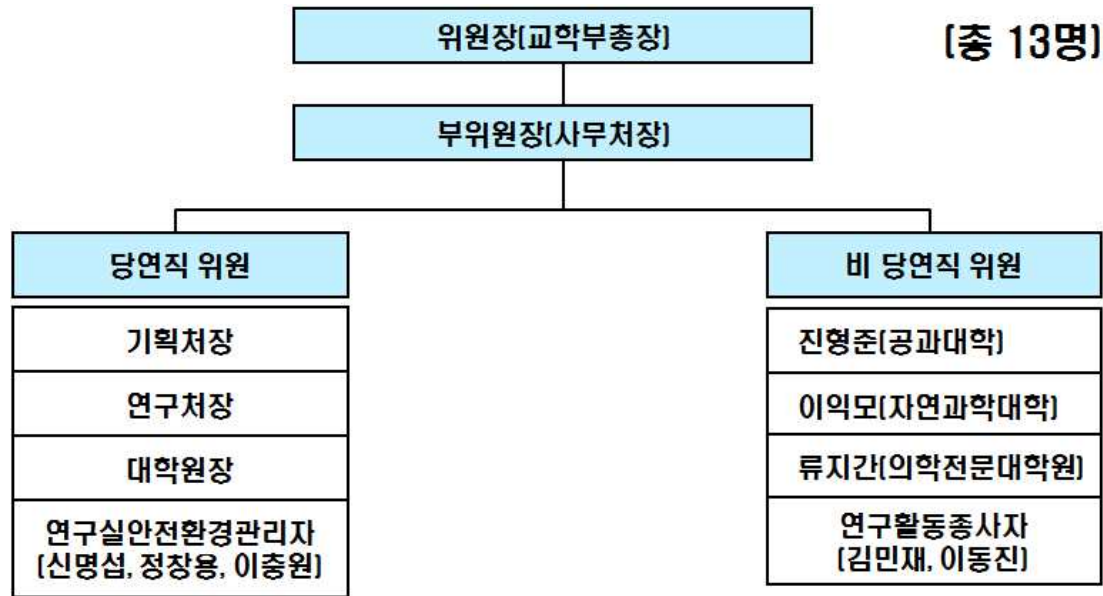
구분	점검년월	점검실수						비 고
			1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	
정밀안전진단	2008.02	242	31	79	122	10	-	
정밀안전진단	2009.06	267	15	93	143	16	-	
정밀안전진단	2011.08	271	67	156	46	2	-	
정밀안전진단	2013.11	311	53	132	127	-	-	
정밀안전진단	2015.05	316	33	251	32	-	-	
정밀안전진단	2017.05	312	185	114	11	-	-	

나. 안전 관리 대책

(1) 연구실 안전관리 조직(연구실별 조직표 작성 비치)

- 연구주체의 장 : 인하대학교 총장
- 연구실책임자 : 연구 업무 및 연구활동종사자를 직접 지휘 · 감독하는 권한을 가진 자
(지도교수)

- 안전관리담당자 : 연구실의 안전관리를 담당하는 자
- 연구활동종사자 : 실험 및 연구활동에 종사하는 자(학부생, 대학원생, 연구원)
- 안전환경관리자 : 연구주체의 장을 보좌하고 전체 연구실 안전환경관리를 담당하는 자



간사: 시설안전팀장

- 안전관리 위원회(위원장 1인, 위원회 12명, 간사1명)

(2) 연구활동종사자 상해보험 가입(학교차원 가입)

- 법적기준 : 사망/후유장애(1급)시 1인당 2억원, 상해 1인당 5천만원
- 대상인원 : 10,327명(대학원생 : 1,459명, 학부생 : 8,868명)
- 보험가입기간 : 2018-01-01 - 2019-01-01 (365일)
- 보험가입금액 : 32,980,830원
- 보험가입회사 : (사)교육시설재난공제회

(3) 연구활동종사자 건강검진(학교차원 실시)

- 건강검진 대상 : 산업안전보건법 시행규칙 별표 제12조2항의 유해물질 취급 상주 연구활동종사자
- 건강검진 주기 : 1년에 1회 실시
- 건강검진 기관 : 인하대병원 산업의학과
- 건강검진 종류 : 유해 물질별 특수검진 실시(일반건강검진과 특수건강검진 격년 실시)

*** 건강검진 실시내역**

구분	검진 년월	검진대상자	검진인원	검진율 [%]	검진대상 기준	비 고
일반검진	2013. 11	599	381	64%	정밀안전진단 후 대상연구실 선정	국민건강보험법
특수검진	2014. 11	682	544	80%	특수건강검진 대상물질 조사표 작성 후 해당 실험실 연구활동종사자	산업안전보건법
일반검진	2015. 11	872	545	63%	정밀안전진단 후 대상연구실 선정	국민건강보험법
특수검진	2016. 11	714	515	68%	특수건강검진 대상물질 조사표 작성 후 해당 실험실 연구활동종사자	산업안전보건법
일반검진	2017. 11	873	589	67%	정밀안전진단 후 대상연구실 선정	산업안전보건법

(4) 연구활동종사자 안전교육(학교차원 실시)

- 정기교육 : 온라인 교육(반기별 6시간 이상, 교내 안전관리 홈페이지
http://safety.inha.ac.kr 에서 교육 실시)
- 신규채용에 따른 교육(대학생, 대학원생) : 2시간 이상(집체 교육 또는 온라인 교육)
- 특별안전교육 : 사고발생 연구실 연구활동종사자 대상 교육(1시간 이상)

* 연구활동종사자 안전교육 현황

년 도		정기교육 (법정시간 : 월 1시간이상)			신규 종사자 교육 (법정시간 : 2시간 이상)			특별 안전교육 (사고발생 학과 및 교육요청 학과등)				평균 이수율
		대상자	이수자	이수율	대상자	이수자	이수율	횟수	대상자	이수자	이수율	
2013년	1학기	940	639	68%	310	266	85%	1	52	52	100%	74%
	2학기	1,012	755	75%	169	145	86%	1	28	28	100%	77%
2014년	1학기	1,010	808	80%	340	281	83%	1	63	62	98%	81%
	2학기	995	880	88%	173	160	92%	5	202	188	93%	90%
2015년	1학기	987	851	86%	322	296	92%	4	149	149	100%	89%
	2학기	1,163	917	77%	158	140	89%	3	353	308	87%	82%
2016년	1학기	1,142	871	76%	296	271	92%	-	-	-	-	79%
	2학기	1,150	887	75%	174	157	90%	2	129	127	98%	80%
2017년	1학기	1,166	960	82%	258	219	85%	-	-	-	-	82%
	2학기	진행중	진행중	진행중	-	-	-	-	-	-	-	-

※ 연구활동종사자 중 학부생은 실험 수업 전 실험 조교가 20분간 안전교육 실시(교육일지 작성)로 정기교육 대체

(5) 연구실 안전확보 계획(연구실별 시행)

- 비상연락망, 연구실 안전수칙 부착 및 안전보호구 비치
- 안전을 위한 장비구입 및 시설 투자

* 2018학년도 예산 집행 계획

항 목		금액	내 용
기 배 정 예 산	1. 상해보험	61,000	- 연구활동종사자 상해보험
	2. 건강검진	75,000	- 연구활동종사자 특수건강검진 실시(대상자 약 750명 *10만원)
	3. 안전교육	20,000	- 1,2학기 신규 집체 교육(2시간) - 연구활동종사자 간담회 - 교수점검단 및 지도교수 간담회 - 신규 교수 안전교육(8시간)
	4. 안전점검		- 정기안전점검 실시
	5. 안전시설 및 용품 구매	150,000	- 흡후드 풍속개선

			- 방폭캐비닛 구매 - 환기형시약장 등 안전용품 구매 - 기타 안전용품구매
	6. 연구실 안전환경 개선사업	276,500	- 연구실 공간분리 및 환경개선 공사 - 정밀안전진단 지적사항 개선 - 우수연구실 노후기기 개선사업 - 우수연구실 리모델링 지원사업 - 연구실 전기시설 점검 및 보수
	7. 연구실 안전관리시스템 교육 콘텐츠 비용	17,500	- 연구실 안전 교육콘텐츠 제공비용 - 연구실 안전관리 시스템 유지보수 비용
	소 계	600,000	

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	강관 두부 절단 및 정리 방법	인하대학교 산학협력단	주 발명자	대한민국	-	2017. 10.25	단독 사사	-
2	특허	강관 두부 절단 장치	인하대학교 산학협력단	주 발명자	대한민국	-	2017. 10.25	단독 사사	-
3	특허	강관 파일 두부 고정 및 절단 장치	인하대학교 산학협력단	주 발명자	대한민국	-	2018. 03.29	단독 사사	-
4	소프트 웨어	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 위치표현 단말기 프로토타입 소프트웨어	인하대학교 산학협력단	주 발명자	대한민국	-	2018. 11.16	단독 사사	-
5	학술	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 개발을 위한 핵심기술	인하대학교 산학협력단	교신 저자	2018 한국건설 관리학회 정기학술 발표대회	-	2018. 11.26	단독 사사	-
6	학술	강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석	인하대학교 산학협력단	교신 저자	2018 한국건설 관리학회 정기학술 발표대회	-	2018. 11.26	단독 사사	-
7	논문	굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개념디자인 및 기술적 타당성 분석	인하대학교 산학협력단	교신 저자	대한건축 학회논문 집	-	2018. 11.30	단독 사사	비SCI
8	논문	강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 프로토타입 개발	인하대학교 산학협력단	교신 저자	한국건설 관리학회 논문집	-	2018. 11.30	단독 사사	비SCI

제11장. 참고 문헌

1. KDI (2004), “예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완연구 제4판”
2. KOICA (2017), “KOICA 프로젝트 사업의 경제성 분석 가이드라인”
3. 건설산업연구원 (2013), “건설인력 수급 실태 조사”
4. 건설산업정보연구원 (2011), “국내 말뚝시장 현황 및 분석”
5. 고용노동부 (2013), “건설인력 수급 실태조사”
6. 구현본, 김영호, 강재윤 (2008), “유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝 머리의 구조 성능 평가”, 대한토목학회논문집, 28(6A), pp. 843~851
7. 국토교통부 (2016), “건축공사표준시방서”
8. 국토교통부 (2015), “토목공사표준일반시방서”
9. 김영석, 오세욱, 성낙원, 이정호, 유현석, 유연택, 이세준, 이재권, 조문영, 김경주, 김정렬, 박재우, 임혁규, 윤경애, 최석재, 임형민, 윤지애, 이준복, 최현하, 조창연, 이은정 (2004), “도로면 유지보수 자동화를 위한 원격조정 장비의 개발 연구보고서: 도로면 크랙탐지 및 실링 자동화 장비의 개발(최종), 국토교통부 연구보고서
10. 김용연 (2012), “AHP를 활용한 리모델링 사업 결정요인에 관한 연구”, 건국대학교 석사학위논문
11. 김정섭, 정경자, 정상섭, 전영진, 이철주 (2018), “실규모 현장시험 및 유한요소해석을 통한 강관매입말뚝의 공학적 거동에 대한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, 19(4), pp. 5~16
12. 대한건설협회 (2018), “2018년 상반기 적용 건설업 임금실태 조사 보고서”
13. 염동준, 한재현, 정의현, 김영석 (2018), “굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 개념디자인 및 기술적 타당성 분석”, 대한건축학회논문집 구조계, 34(11), pp. 45~54
14. 염동준, 한재현, 정의현, 김영석 (2018), “강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 프로토타입 개발”, 한국건설관리학회 논문집, 19(6), pp. 115~123
15. 유일근 (2017), “최신 경제성공학 : 투자사업의 한국형 경제적 타당성 분석”, 형설출판사
16. 정의현, 염동준, 한재현, 김영석 (2018), “굴삭기 기반 강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇 개발을 위한 핵심기술 선정”, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp. 119~120
17. 조근태 (2005), “네트워크 분석적 의사결정”, 동헌출판사, pp. 49~84
18. 통계청 (2016), “경제활동인구조사”
19. 한국개발연구원 (2008), “예비타당성조사 수행을 위한 일반지침”
20. 한국개발연구원 (2009), 기타 비투자 재정부문 사업의 예비타당성조사 및 시범사업평가 표준지침 연구
21. 한국물가협회 (2018), “2018년 개정품셈·노임단가 적용 종합 적산자료: 건설공사 일위대가”

22. 한국철강협회 (2011), “최신 강관말뚝 시장 및 기술 동향 조사 연구보고서”
23. 한재현, 염동준, 김영석 (2017), “강관말뚝 두부정리 작업 현황 및 문제점 분석에 관한 연구”, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp. 93~94
24. 한재현, 정의현, 염동준, 김영석 (2018), “강관말뚝 두부정리 및 절단 부위 핸들링 로봇의 경제성 분석”, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp. 123~124
25. 스마트텍엔지니어링 (2002), “강관말뚝 절단기용 주행장치”, 대한민국 특허, 20-2002-0000170
26. 주식회사 우성마그네트 (2002), “강관 절단장치”, 대한민국 특허, 20-2002-0028378
27. 주식회사 근영산업개발 (2006), “강관말뚝 절단기”, 대한민국 특허, 10-2005-0090700
28. 석정건설주식회사 (2007), “강관 파일 내부 절단 장치”, 대한민국 특허, 10-2007-0007867
29. 주식회사 대광이엔지 (2013), “기초공사용 강관파일 절단장치”, 대한민국 특허, 10-2013-0114280
30. Satty, T. L., (1980), The Analytic Hierarchy Process, New York, McGraw-Hill.
31. Ningbo Construction Co., Ltd (2009), “Cutting Device and Method”, 중국 특허, 200910096316.4
32. Wills, II Ronnie W. (2010), “Boom Mounted Saw”, 미국 특허, 12508451
33. Ikeda Kikai Sekkei (2102), “Steel Pipe Pile Cutter”, 일본 특허, 24037990
34. Norman Kenneth Aubin (2014), “Method and Apparatus for Cutting a Pile”, 미국 특허, 14656425
35. Motocut Oy (2017), “Motocut Plasma Cutter”

주 의

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