대형 원형강관 가설공법 수직도 확보 기술 개발 최종보고서 2020.12

한국해양과학기술원
KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

KIOST 한국해양과학기술원
KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

[BSPN68300-12476-2]

대형 원형강관 가설공법 수직도 확보 기술 개발 최종보고서

-2020.12-

KIOST 한국해양과학기술원
KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

BSPN68300-12476-2

대형 원형강관 가설공법 수직도 확보 기술 개발

최종보고서

2020. 12.

KIOST
한국해양과학기술원

제 출 문

한국건설기술연구원장 귀하

본 보고서를 귀 원의 “해상 교량기초 대형 원형강관 가설공법 개발” 연구과제의 공동연구과제로 수행된 “대형 원형강관 가설공법 수직도 확보 기술 개발”의 최종보고서로 제출합니다.

2020년 12월 31일

공동연구기관명 : 한국해양과학기술원

연 구 책 임 자 : 오명학

참 여 연 구 원 : 한택희

백승재

송유재

김성원

박해용

홍혜민

장은이

구성민

목 차

제 1 장 서 론 ····· 3

1.1 연구개요 ····· 3

1.2 수직도 확보 기술동향 조사분석 ····· 3

1.2.1 해상구조물 리프팅기법 ····· 3

1.2.2 석션파일 수직도확보 기술 동향 ····· 6

제 2 장 원형강관 석션관입시 수직도 확보 기술 개발 ····· 11

2.1 케이블 개별 길이제어 기법 개념설계 ····· 11

2.1.1 원형강관 석션관입시 수직도 제어가 용이한 케이블 개별 길이제어 기법 ····· 11

2.1.2 리프팅케이블 개별 길이조절 방법 검토 ····· 12

2.1.3 프레임 기본 형상 검토 ····· 13

2.1.4 수치해석을 통한 프레임 검토 ····· 14

2.1.5 리프팅케이블 개별 길이조절 시스템 구성안 ····· 19

2.2 실내 모형실험을 통한 케이블 개별 길이제어 기법 성능평가 ····· 21

2.2.1 모형실험시스템 구축 ····· 21

2.2.2 모형실험용 엑츄에이터 설계 및 제작 ····· 23

2.2.3 실험조건 및 방법 ····· 25

2.2.4 리프팅케이블 적용 방법에 따른 수직도보정 효과 비교·분석 ····· 26

2.2.5 리프팅케이블 개별 제어기법 적용 석션파일 관입시 수직도 보정효과 분석 ····· 30

2.2.6 케이블 개별 길이 제어에 의한 수직도 보정 메커니즘 분석 ····· 35

2.2.7 모형실험 결과 요약 ····· 36

2.3 현장실험을 통한 수직도 확보기술 성능 검증 ····· 37

2.3.1 현장실험 개요 ····· 37

2.3.2 설계 및 구조안정성 검토 ····· 37

2.3.3 현장실험 ····· 47

2.4 케이블 개별조절 리프팅시스템 설계 ····· 55

2.4.1 개요 ····· 55

2.4.2 케이블 개별조절 유압 엑츄에이터 설계 ····· 56

2.4.3 리프팅시스템 설계 ····· 70

2.5 소론 ····· 85

제 3 장 수직도 제어정보시스템 개발 ····· 89

3.1 개요 ····· 89

3.2 수직도 실시간 모니터링을 위한 제어정보시스템 개발 ····· 89

3.2.1 시스템 설계 ····· 89

3.2.2 수직도 제어정보 GUI 설계 ····· 100

3.3 수직도 제어정보시스템 성능 평가 ····· 105

3.3.1 수직도 표준오차율 평가 ····· 105

3.3.2 정보구현 지연속도 평가 ····· 106

3.3.3 적용성 평가 및 검증 ····· 107

3.4 수직도정보 연계 리프팅케이블 자동 제어 모듈 개발 ····· 110

3.4.1 리프팅시스템 운용 알고리즘 수립 ····· 110

3.4.2 케이블 개별 길이제어 자동화 모듈 개발 ····· 115

3.4.3 모형실험 검증 ····· 118

3.5 소론 ····· 120

제 4 장 목표달성도 및 활용방안 ····· 123

4.1 목표달성도 ····· 123

4.1.1 정성적 목표달성도 ····· 123

4.1.2 정량적 목표달성도 ····· 124

4.2 관련분야 기여도 ····· 127

4.3 연구개발 결과물 활용방안 ····· 128

참고문헌 ····· 129

[부록] 케이블 개별 제어에 의한 수직도 확보기법 운용 매뉴얼

그 림 목 차

그림 1.1 원형강관 가설공법 수직도 확보기술 개발 개요 ····· 3
그림 1.2 리프팅 시스템 규정 예시 (DNV, 2014) ····· 4
그림 1.3 슬링(좌)과 패드아이(우) ····· 4
그림 1.4 리프팅 바와 슬링을 이용한 해양구조물의 리프팅 모습 (Li, 2004) ····· 5
그림 1.5 초대형 해양구조물의 리프팅 기법 ····· 5
그림 1.6 해상풍력발전기 설치를 위한 특수 리프팅 시스템 ····· 6
그림 1.7 석션기초 설치사례(일본 나오에쓰항 방파제, 1998~1999) ····· 7
그림 1.8 석션기초 설치사례(일본 미사키쵸 방충공, 1999~2000) ····· 7
그림 1.9 석션기초 설치과정 모니터링(일본 미사키쵸 방충공, 1999~2000) ····· 7
그림 1.10 석션기초 수직도보정(일본 미사키쵸 방충공, 1999~2000) ····· 8
그림 1.11 석션기초 관입보조장치(한국해양과학기술원, 2016) ····· 8

그림 2.1 석션파일 시공 일반절차 ····· 11
그림 2.2 리프팅시스템을 이용한 원형강관 기울어짐 발생시 수직도 보정 개념 ····· 11
그림 2.3 윈치를 이용한 수직도 제어 시스템 ····· 12
그림 2.4 실린더를 이용한 수직도 제어 시스템 ····· 13
그림 2.5 프레임 연결부 모델링 ····· 16
그림 2.6 프레임-와이어 연결부 응력집중현상 ····· 18
그림 2.7 Lifting lug와 pad eye ····· 18
그림 2.8 와이어 슬링의 종류 ····· 19
그림 2.9 원형강관 수직도 확보를 위한 케이블 개별 길이제어 시스템 구성(안) ····· 20
그림 2.10 석션파일 관입 실내 모형실험시스템 구성 ····· 21
그림 2.11 원형강관 실내모형실험 개념도 ····· 22
그림 2.12 실내모형실험 시스템 ····· 22
그림 2.13 모형실험용 유압 엑츄에이터 설계도 ····· 23
그림 2.14 엑츄에이터 개별 길이조절 장치 개념설계도 ····· 24
그림 2.15 유압 엑츄에이터 제어용 유압펌프 설계도 ····· 24
그림 2.16 케이블 개별 조절을 위한 모형실험용 유압 엑츄에이터 시스템 ····· 25

그림 2.17 케이블 개별 제어에 의한 수직도보정 효과 분석을 위한 석션파일 모형실험 방법 26
그림 2.18 석션파일 기울어짐 발생시 리프팅케이블 지지효과 분석 실험케이스 ····· 27
그림 2.19 석션파일 기울어짐이 발생할 경우 케이블 미설치시 석션파일 관입시 수직도 ··· 27
그림 2.20 석션파일 기울어짐이 발생할 경우 케이블 미설치시 석션파일 관입 과정 ····· 28
그림 2.21 기존 리프팅방식을 적용할 경우 석션파일 관입시 수직도 및 케이블지지력 ····· 28
그림 2.22 기존 리프팅방식을 적용할 경우 석션파일 관입 과정 ····· 29
그림 2.23 경사 위치에서의 케이블 지지에 의한 석션파일 관입시 수직도 및 케이블지지력 29
그림 2.24 경사 위치에서의 케이블 지지에 의한 석션파일 관입 과정 ····· 30
그림 2.25 케이블 개별 길이제어 적용 모형실험 조건 ····· 30
그림 2.26 케이블 개별 조절용 유압 엑츄에이터 장착 석션관입 모형실험 ····· 31
그림 2.27 석션관입시 리프팅케이블 개별 제어에 의한 수직도 보정 과정 (케이블 세줄) ··· 31
그림 2.28 케이블 개별 조절에 의한 석션관입시 수직도 및 케이블장력(케이블 세줄) ····· 32
그림 2.29 석션관입시 리프팅케이블 개별 제어에 의한 수직도 보정 과정(케이블 네줄) ····· 33
그림 2.30 케이블 개별 조절에 의한 석션관입시 수직도 및 케이블장력(케이블 네줄) ····· 34
그림 2.31 위치별 케이블 지지에 의한 석션파일 관입시 수직도 보정 효과 ····· 35
그림 2.32 석션파일 관입시 기울어질 경우 수직도 보정 메커니즘 개념도 ····· 36
그림 2.33 현장 파일럿테스트용 원형강관 ····· 37
그림 2.34 리프팅케이블 배치에 따른 원형강관 거동검토 수치해석 모델링 ····· 38
그림 2.35 와이어의 개수에 따른 수직도 변화 예측을 위한 수치해석 결과 ····· 38
그림 2.36 연결 와이어의 각도에 따른 리프팅시스템 모델 ····· 39
그림 2.37 연결 와이어의 각도에 따른 수치해석 결과 ····· 40
그림 2.38 와이어 연결방법(안) ····· 42
그림 2.39 리프팅케이블 길이조절용 유압 엑츄에이터 및 펌프시스템 설계도면 ····· 43
그림 2.40 리프팅케이블 길이조절용 유압 엑츄에이터 구동 시스템 ····· 44
그림 2.41 제작된 유압 엑츄에이터 및 구동 시스템 ····· 44
그림 2.42 리프팅케이블 연결부 시험성적서 ····· 45
그림 2.43 리프팅케이블 개별제어 시스템 시작품 ····· 46
그림 2.44 케이블 개별제어 기법 적용 수직도보정 현장실험용 계측기 ····· 47
그림 2.45 원형강관 수직도확보 현장실험과정 ····· 48
그림 2.46 원형강관 수직도보정 실험과정 (test 1) ····· 48

그림 2.47 케이블 개별 길이조절에 의한 장력발현 및 이완 ····· 49
그림 2.48 원형강관 관입에 따른 수직도 및 케이블 지지력 ····· 50
그림 2.49 석션관입시 원형강관에 작용된 하중 ····· 51
그림 2.50 원형강관 수직도보정 실험과정 (test 2) ····· 51
그림 2.51 기울어진 위치에서의 케이블 장력 ····· 52
그림 2.52 원형강관 관입과정에서의 수직도 및 케이블 지지력 ····· 52
그림 2.53 석션인발시 각 케이블의 장력 ····· 53
그림 2.54 원형강관 석션인발 과정에서의 수직도 및 케이블 지지력 ····· 54
그림 2.55 리프팅시스템 개념도 ····· 55
그림 2.56 리프팅케이블 개념도 ····· 55
그림 2.57 리프팅시스템 설계 절차 ····· 55
그림 2.58 엑츄에이터 설계 개념도 ····· 57
그림 2.59 엑츄에이터 몸체부 3D 수치해석 모델링 ····· 58
그림 2.60 구조해석을 위한 격자망 ····· 59
그림 2.61 700Bar(200ton) 유압 작용시 수치해석 결과 ····· 59
그림 2.62 수치해석을 위한 3D 모델링 격자망 ····· 60
그림 2.63 수치해석 조건 ····· 60
그림 2.64 엑츄에이터 하단 연결부(Y-Clevis) 수치해석 결과 ····· 61
그림 2.65 엑츄에이터 모델링 격자망 ····· 61
그림 2.66 수치해석을 위한 하중조건 개념도 ····· 61
그림 2.67 엑츄에이터 수치해석 결과 ····· 62
그림 2.67 엑츄에이터 수치해석 결과(계속) ····· 63
그림 2.68 엑츄에이터 설계도 ····· 64
그림 2.69 엑츄에이터 내부 압력 부위 ····· 65
그림 2.70 엑츄에이터 개별조절 펌프시스템 설계도 ····· 66
그림 2.71 유압 엑츄에이터 설계(안) ····· 67
그림 2.72 유압 펌프시스템 설계(안) ····· 68
그림 2.73 엑츄에이터/펌프 유압회로도 ····· 68
그림 2.74 유압 엑츄에이터/펌프시스템 전기회로도(1) ····· 69
그림 2.75 유압 엑츄에이터/펌프시스템 전기회로도(2) ····· 69

그림 2.76 메인 프레임에 최대 하중이 작용하는 경우 ····· 71
그림 2.77 하중 및 경계조건 ····· 72
그림 2.78 I빔 단면 ····· 72
그림 2.79 메인 프레임 수치해석 결과 ····· 73
그림 2.80 강재 플레이트 연결부의 볼트 배치 (보강 I빔) ····· 74
그림 2.81 강재 플레이트 연결부의 볼트 배치 (메인 I빔) ····· 74
그림 2.82 추가 연결부의 볼트 배치 ····· 75
그림 2.83 프레임 연결부 모델링 및 경계조건 ····· 75
그림 2.84 프레임 연결부 수치해석 결과 ····· 76
그림 2.85 lifting lug의 하중 및 경계조건 ····· 78
그림 2.86 lifting lug의 수치해석 결과 ····· 78
그림 2.87 메인 프레임 설계도 ····· 79
그림 2.87 메인 프레임 설계도(계속) ····· 80
그림 2.87 메인 프레임 설계도(계속) ····· 81
그림 2.87 메인 프레임 설계도(계속) ····· 82
그림 2.88 리프팅 러그(lifting lug) 설계도 ····· 83
그림 2.89 케이블 개별제어 리프팅시스템 설계(안) 전체 구성도 ····· 84

그림 3.1 수직도 제어정보시스템 개념도 ····· 89
그림 3.2 원형강관 수직도 측정 모식도 ····· 90
그림 3.3 원형강관과 리프팅프레임 상대변위 측정을 위한 3축센서 적용 개념도 ····· 90
그림 3.4 IPC 기법 ····· 91
그림 3.5 센싱시스템 프로토타입 테스트 사진 ····· 92
그림 3.6 센싱시스템 프로토타입 테스트 결과 ····· 92
그림 3.7 다중 센서 기반 수직도 측정 정확도 향상 기법 개념도 ····· 94
그림 3.8 다중 센서 기반 수직도 측정 정확도 향상 기법 적용 결과 ····· 95
그림 3.9 수직도 계측정보 실시간 공유를 위한 데이터 전송 흐름도 ····· 97
그림 3.10 수직도 제어정보시스템 다중접속 흐름도 ····· 99
그림 3.11 수직도 제어정보시스템 ····· 100
그림 3.12 인디케이터 표출 알고리즘 ····· 101

그림 3.13 리프팅케이블 개별조절을 위한 위치별 케이블 색상 변화 표출 알고리즘 ····· 101
그림 3.14 GUI 구성 ····· 102
그림 3.15 원형강관 수직도제어정보 GUI 3D 디스플레이 ····· 103
그림 3.16 2D 디스플레이 기능 ····· 103
그림 3.17 프로그램 설정창 ····· 104
그림 3.18 프로그램 실행화면 ····· 104
그림 3.19 2축센서 MTLT105D-R 세부사양 ····· 105
그림 3.20 원형강관 수직도 제어정보시스템 표준오차율 측정실험 사진 ····· 105
그림 3.21 구간별 지연속도 개념도 ····· 107
그림 3.22 Wi-Fi 환경 ping 명령어를 통한 전송 지연시간 측정 결과 ····· 107
그림 3.23 수직도 제어정보시스템 모형실험 검증 ····· 108
그림 3.24 원형강관 가설공법 테스트베드 전경 ····· 108
그림 3.25 테스트베드 원형강관 상판에 수직도 제어정보시스템 설치 ····· 109
그림 3.26 테스트베드 원형강관 석션관입 시공 ····· 109
그림 3.27 수직도 제어정보시스템 테스트베드 적용 성능검증 ····· 109
그림 3.28 원형강관 석션관입시 케이블 개별제어 기법 운용 ····· 110
그림 3.29 엑츄에이터 초기설정 ····· 112
그림 3.30 케이블 개별제어를 위한 엑츄에이터 초기설정 플로우차트 ····· 112
그림 3.31 구간별 케이블(엑츄에이터) 개별 제어 방법 ····· 113
그림 3.32 케이블 개별제어 기법 운용 플로우차트(케이블 장력이완=엑츄에이터 전진구간) 113
그림 3.33 케이블 개별제어 기법 운용 플로우차트(케이블 장력발현=엑츄에이터 후진구간) 114
그림 3.34 케이블 개별길이제어에 의한 수직도보정 및 원형강관 관입량 플로우차트 ····· 114
그림 3.35 리프팅케이블 개별 길이제어 운용 알고리즘 ····· 115
그림 3.36 수직도 제어정보시스템과 리프팅케이블 엑츄에이터 제어모듈 연계 개념도 ····· 116
그림 3.37 제어모듈 전송 명령 구조 ····· 116
그림 3.38 리프팅케이블 길이조절용 엑츄에어터 제어 모듈 GUI ····· 117
그림 3.39 리프팅케이블 엑츄에이터 길이 자동 조절 흐름도 ····· 117
그림 3.40 엑츄에이터 개별 제어 자동화 모듈 적용 실험 ····· 118
그림 3.41 케이블 자동 개별제어 모듈 적용 석션파일관입 실험 결과 ····· 119

표 목 차

표 2.1 원형강관 기울기에 따른 리프팅 케이블 길이변화 ····· 13
표 2.2 프레임 형상안 ····· 14
표 2.3 해석에 사용된 프레임 종류 ····· 15
표 2.4 해석에 사용된 프레임 모델 ····· 15
표 2.5 수치해석 결과 ····· 17
표 2.6 사질토(주문진표준사)의 물성치 ····· 25
표 2.7 리프팅케이블 세줄 적용시 실험조건별 최종수직도 ····· 33
표 2.8 리프팅케이블 네줄 적용시 실험조건별 최종수직도 ····· 34
표 2.9 원형강관과 와이어의 연결각도에 따른 연결부의 수직력과 수평력 ····· 39
표 2.10 리프팅시스템 구성안 ····· 41
표 2.11 리프팅케이블 연결부 구성요소 ····· 45
표 2.12 원형강관 수직도보정 파일럿 테스트 결과 ····· 54
표 2.13 엑츄에이터 제원 비교 ····· 56
표 2.14 주요 부품별 물성치 ····· 58
표 2.15 엑츄에이터 압력에 따른 지지하중 ····· 62
표 2.16 엑츄에이터 구성요소별 안전율 ····· 64
표 2.17 엑츄에이터 구성요소 ····· 65
표 2.18 펌프시스템 구성요소 ····· 67
표 2.19 하중조합 및 하중계수 ····· 70
표 2.20 Load case ····· 70
표 2.21 연결부 샤클의 제원 ····· 77

표 3.1 센서 및 센싱 데이터 수집 장치 설치 시 고려사항 ····· 90
표 3.2 센싱시스템 구성시 고려사항 ····· 91
표 3.3 센서-임베디드 컨트롤러 간 데이터 통신 프로토콜 ····· 98
표 3.4 상용 무선통신 프로토콜 비교 ····· 98
표 3.5 제어모듈 serial 통신 환경 설정값 ····· 116

제 1 장 서 론

제 1 장 서 론

1.1 연구개요

대형 원형강관을 석션압으로 지반에 관입하여 설치하는 경우 지반의 불균질성이나 상부하중의 편심으로 인하여 관입중 기울어질 수 있다. 원형강관 가물막이가 기울어져 시공되면 구조물 안정성 및 가물막이로서의 역할에 영향을 미칠 수 있으므로 수직도 확보는 시공에서 중요한 요소 중의 하나이다.

기존에는 석션파일 시공시 기울어짐이 발생하는 경우에는 일반적으로 관입/인발 반복작업을 통해 시행착오적으로 수직도를 확보하는 방법이 현재까지 적용되어 왔다. 그러나 이와 같은 방법은 작업자의 경험 및 숙련도에 의존하고 있으며 요구되는 수직도 확보를 위해 많은 시간이 소요되는 등의 단점이 있다. 그러나 아직까지 석션파일 시공중 수직도를 확보하기 위한 체계화된 기술이 정립되어있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 원형강관 석션관입시 시공과정을 그대로 이용하면서 수직도 제어가 용이하도록 리프팅케이블 개별제어 기법을 적용한 수직도 확보 기술을 개발하고, 시공중에 수직도 상태를 실시간으로 파악하여 수직도 확보 시공기술을 효과적으로 운용할 수 있는 수직도 제어정보시스템을 개발하고자 하였다.

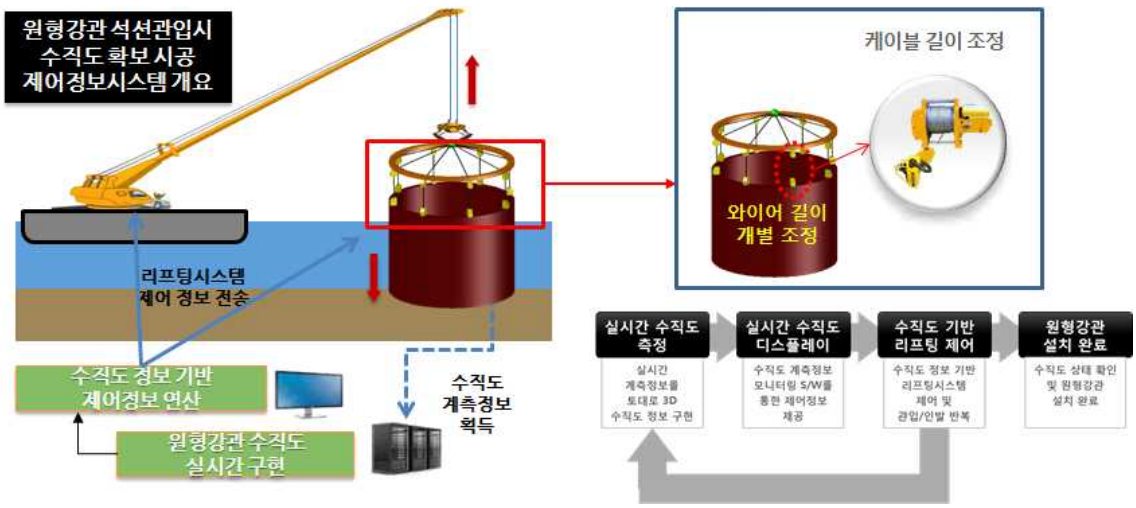


그림 1.1 원형강관 가설공법 수직도 확보기술 개발 개요

1.2 수직도 확보 기술동향 조사분석

1.2.1 해상구조물 리프팅기법

본 연구에서 개발하고자 하는 리프팅 시스템은 해상(수상) 구조물의 기초공사에 사용되는 직경 20 m급 원형강관에 적용하기 위한 것으로서, 해상 및 수상에서 대형 구조물을 인

양하는 기술이 포함된다. 이에 국내·외 대형 해양구조물에 대한 리프팅 시스템 운영 기준 및 리프팅 사례를 조사하였다.

대형 해양구조물 리프팅에 관련한 기준으로는 API (American Petroleum Institute), DNV GL, Phillips Petroleum, HSE (Health and Safety Executive UK) 등에서 제공하고 있는 설계 기준을 대표로 들 수 있다. API, DNV, HSE의 경우 대형 해양구조물 리프팅에 관련한 기준을 누구나 쉽게 찾아 접근할 수 있으나, 그 이외는 민간기업의 in-house 기준으로 쉽게 접근하기에는 어려움이 있다. 접근 가능한 대부분의 해양구조물 리프팅 시스템에 관련한 기준을 살펴보면, 구조물 설치 시의 환경조건 및 하중계산, 리프팅 포인트, 환경 조건에 따른 허용 기울기, 리프팅 장비의 제한조건 등에 관련한 내용이 주로 기술되어 있다.

3.3.8 Tilt of lifted object – single hook lift

3.3.8.1 Object tilt (due to CoG position and/or imposed horizontal loads) will influence the sling load distribution for most rigging configurations. The effect of tilt should be considered in the load calculations where relevant.

Guidance note:

Where calculated maximum tilt is less than 2°, it is normally not necessary to consider related effects in the sling load calculations.

---e-n-d---of---G-u-i-d-a-n-c-e---n-o-t-e---

3.3.8.2 If the object's lift points are at different elevations it shall be ensured that this has been properly taken into account in the tilt (and sling force) calculations.

3.3.8.3 Variable sling elongation, sling length and lift point fabrication tolerances could increase object tilt.

그림 1.2 리프팅 시스템 규정 예시 (DNV, 2014)

해양구조물의 대형 리프팅 시스템에서는 모듈(리프팅이 필요한 상부 구조물)의 중량 조절과 모듈의 무게중심이 가장 중요한 요소로 작용한다. 따라서 리프팅 크레인의 위치와 해양구조물 모듈의 리프팅 케이블 연결부인 슬링의 위치가 매우 중요하며, 이에 대한 구조물의 중량조절 방법과 패드아이의 위치선정 및 슬링의 적절한 분배가 이루어져야 한다. 다음 그림과 같이 각 모듈의 형상과 중량에 따라 리프팅 와이어의 개수 차이를 확인 할 수 있으며, 적절한 케이블 분배를 위한 리프팅 바 또는 프레임이 사용됨을 확인할 수 있다.

그림 1.3 슬링(좌)과 패드아이(우)

그림 1.4 리프팅 바와 슬링을 이용한 해양구조물의 리프팅 모습 (Li, 2004)

초대형 해양구조물의 경우 대형 크레인이 필요하며, 많은 슬링을 연결하여 무게중심을 조절하는 방법 (아래 그림 ①), 두 대의 바지선과 특수 크레인을 이용하는 방법 (아래 그림 ②), 그리고 두 기의 초대형 크레인을 사용하는 방법(아래 그림 ③)을 이용하여 초대형 해양구조물을 들어 올리고, 이동한 사례가 있다. 두 기의 대형 크레인을 이용하는 경우, 한 쪽에 있는 컨트롤 타워에서 리프팅 바 양쪽에 연결된 슬링의 변위를 조절하여 양쪽 크레인에 작용하는 하중을 적절히 배분하여 구조물의 리프팅이 이루어지며, 삼성중공업에서 이러한 방법을 이용한 해양구조물의 리프팅작업 트랙레코드를 가지고 있다.

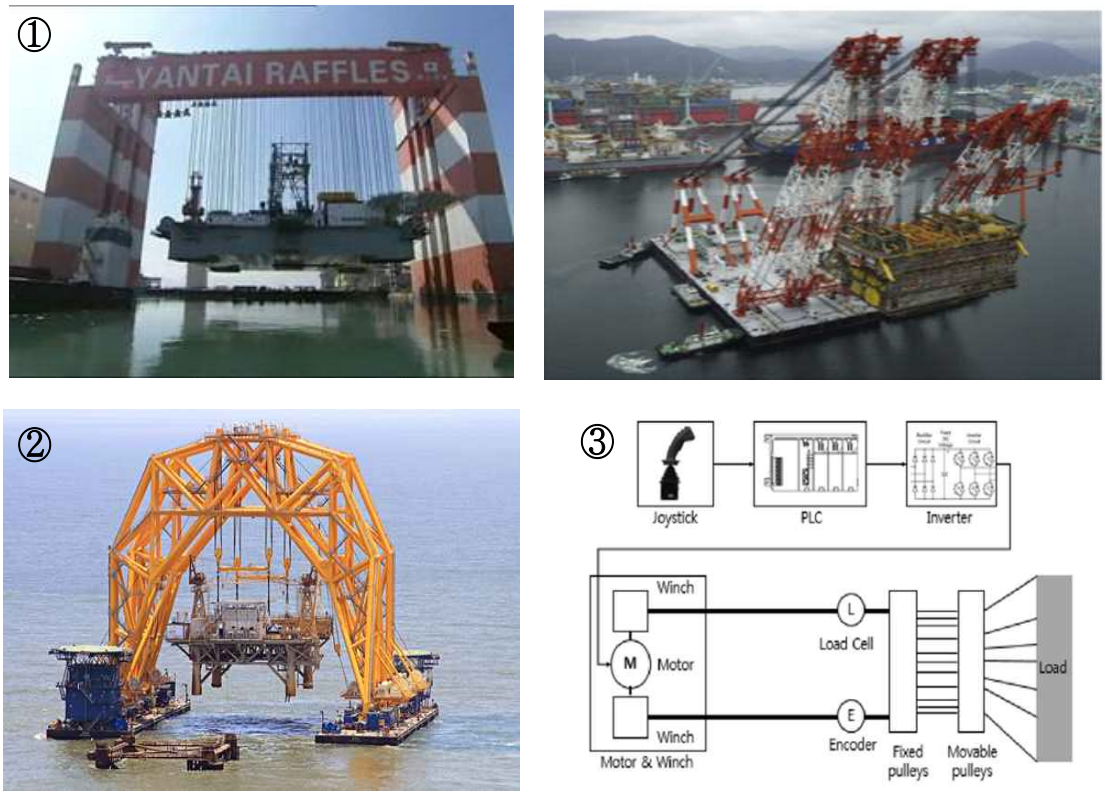


그림 1.5 초대형 해양구조물의 리프팅 기법

해상 풍력타워와 같이 특별한 경우, 블레이드를 풍력터빈에 연결하는 작업의 효율성 증대를 위해 일반 리프팅 시스템을 이용하기 보다는 특수 리프팅 시스템을 사용하는 경우가 있다. 이러한 특수 리프팅 시스템의 경우 아래 그림과 같이 블레이드 클램프와 주 와이어 부분이 270° 회전 가능하게 제작되어 풍력발전기 블레이드의 개별 설치가 가능하도록 시스템이 구성되어져 있다.

그림 1.6 해상풍력발전기 설치를 위한 특수 리프팅 시스템

1.2.2 석션파일 수직도확보 기술 동향

석션파일의 수직도확보를 위한 기존 기술에서는 수직도 제어를 위한 별도의 장치는 적용되고 있지 않으며, 파일이 기울어질 경우에는 크레인과 석션압을 이용하여 관입/인발 반복작업을 통해 수직도를 보정하는 방식이 적용되고 있다. 이 방법은 석션파일이 관입중 기울어지는 경우 파일을 조금 인발하면서 수직도를 일부 보정하고 다시 석션으로 재관입하는 일련의 인발/관입 과정을 반복하면서 수직도를 최대한 확보하는 방식이다.

일본 나오에쓰항 방파제 석션기초의 경우 직경은 21.9m, 높이 8m로 RC기초와 강재기초로 시공한 바 있다. 기초 설치시 석션압으로 지반관입하면서 실시간으로 경사를 모니터링한 후 크레인으로 기초를 인발 및 석션압으로 관입하는 작업을 반복하여 수직도를 보정하는 방법이 적용되었다. RC기초의 경우 약 0.9° , 강재기초는 약 0.8° 으로 수직도를 보정후 설치를 완료하였다. 교량 방충공을 지반에 석션관입하여 설치한 사례도 있다. 일본 미사키쵸 방충공은 직경 18m, 높이 5~5.5m으로 관입/인발 반복작업으로 수직도를 보정하였으며, 약 최종경사도를 0.3° 로 설치되었다.

다만, 관입/인발 반복작업은 수직도 확보를 위한 별도의 장치나 기법이 적용되는 것이 아니라 수직도가 적정 수준으로 확보될 때까지 시행착오적으로 반복하는 방식이므로 작업시간이 길어질 수 있으며, 작업자의 노하우에 따라 수직도 확보 수준이 달라질 수 있다.

강재기초 RC 기초

그림 1.7 석션기초 설치사례(일본 나오에쓰항 방파제, 1998~1999)

그림 1.8 석션기초 설치사례(일본 미사키쵸 방충공, 1999~2000)

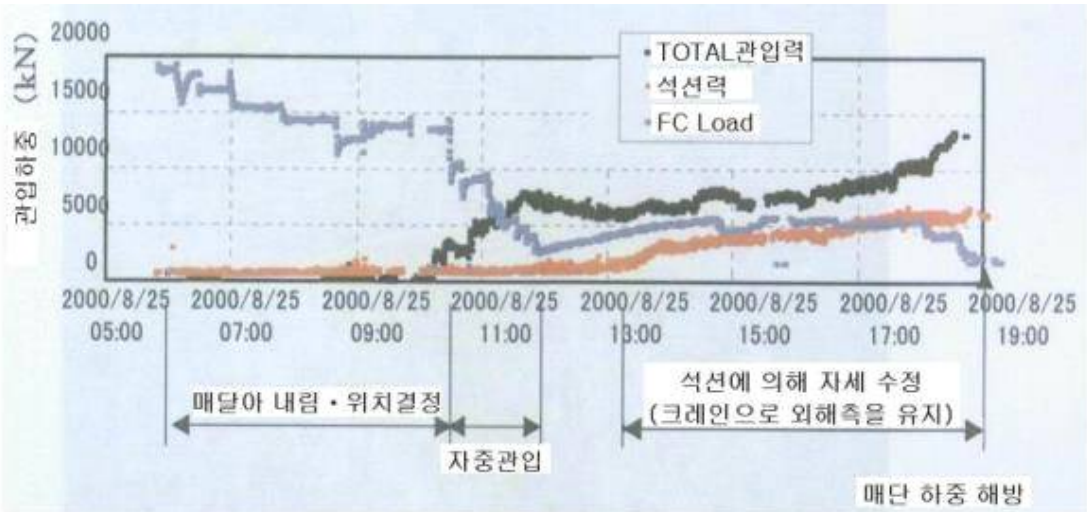


그림 1.9 석션기초 설치과정 모니터링(일본 미사키쵸 방충공, 1999~2000)

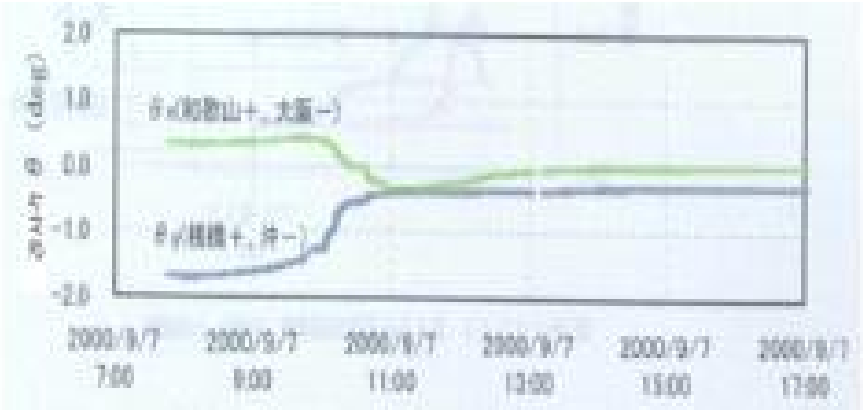


그림 1.10 석션기초 수직도보정(일본 미사키쵸 방충공, 1999~2000)

국내에서는 석션기초의 관입력 증대 및 수직도 조정을 목적으로 프레임에 4개의 추가 석션기초가 장착된 석션파일용 관입보조장치가 개발된 바 있다. 이 기술은 관입보조장치에 추가 장착된 석션파일의 관입력을 상대적으로 조정하여 위치별로 관입력을 달리함으로써 수직도를 확보하는 방식이다. 직경 1.8m의 강재 석션파일에 대한 실해역 석션관입 현장실험에서 개발된 관입보조장치를 적용하여 최종 경사도를 0.8° 이내로 수직도를 확보한 바 있다.

그러나 본 연구의 대상구조물인 직경 20m급 대형 원형강관에 적용하기에는 프레임과 관입보조장치가 거대해지고 추가적인 석션파일의 제작이 요구되므로 대형 원형강관에는 적용이 용이하지 않다. 이에 대형 원형강관 가설공법의 수직도 확보를 위해 원형강관 석션관입시 수직도 확보를 위한 장치 및 기술 개발이 필요하다.

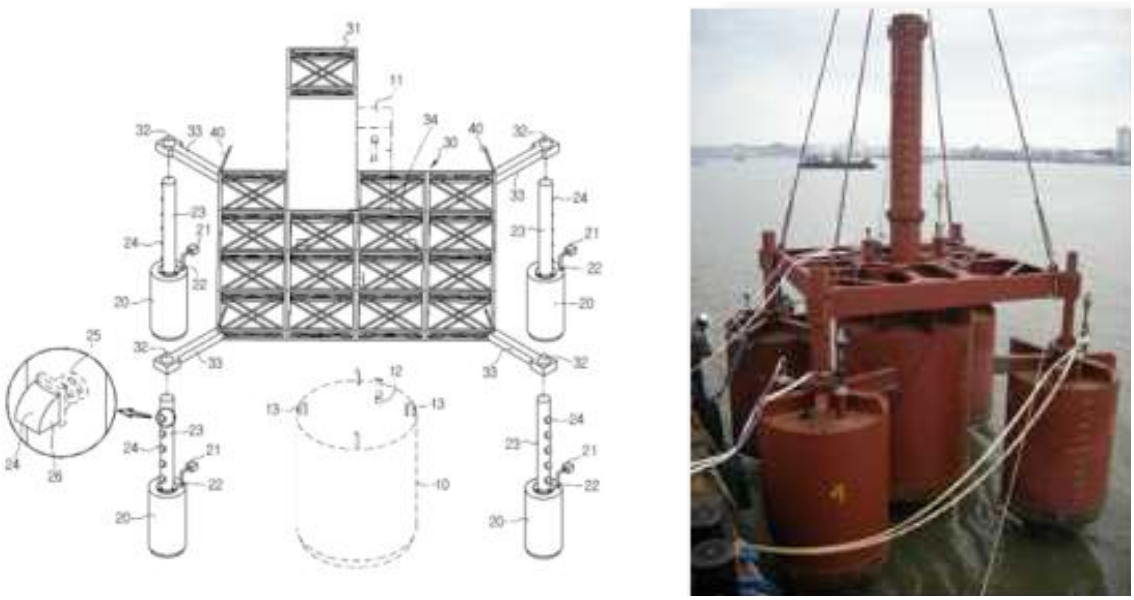


그림 1.11 석션기초 관입보조장치(한국해양과학기술원, 2016)

제 2 장 원형강관 석션관입시 수직도 확보 기술 개발

제 2 장 원형강관 석션관입시 수직도 확보 기술 개발

2.1 케이블 개별 길이제어 기법 개념설계

2.1.1 원형강관 석션관입시 수직도 제어가 용이한 케이블 개별 길이제어 기법

원형강관 석션관입시 기울어짐이 발생하지 않으면 석션압에 의한 관입력으로 목표심도까지 관입하면 된다. 그러나 지반의 불균질성과 외력 등으로 인하여 석션관입시 원형강관이 기울어질 수 있다. 기울어짐이 발생할 경우 기존에는 일괄적으로 리프팅하는 방식으로 석션압과 크레인 조정으로 관입/인발 반복적용을 통해 수직도를 보정하고 있다.

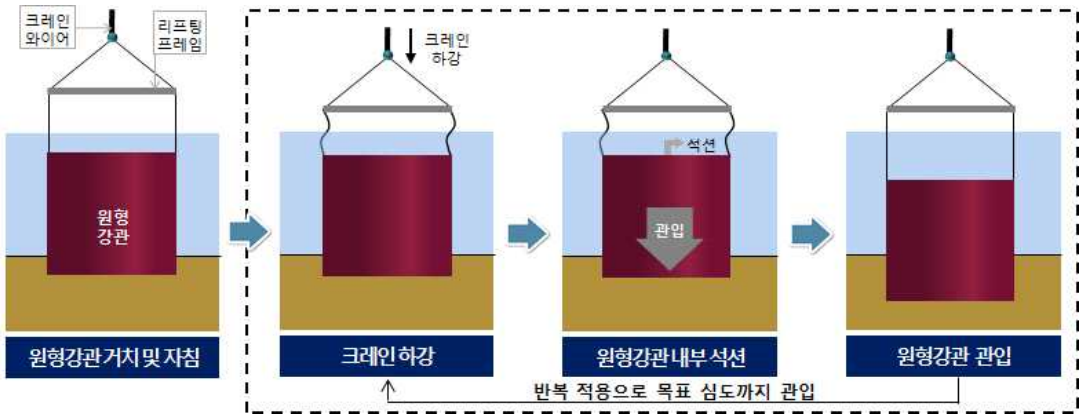


그림 2.1 석션파일 시공 일반절차

본 연구에서는 원형강관의 석션관입에 의한 시공과정을 그대로 이용하면서 기울어짐이 발생할 경우 수직도 보정이 필요한 위치에서 케이블을 개별적으로 조절가능한 리프팅시스템 개념을 고안하였다. 고안된 개념은 기울어짐이 발생할 경우 위치별 케이블 길이를 개별적으로 조절함으로써 경사 위치에서의 케이블이 관입력에 저항하는 지지력을 발휘하게 하여 석션관입시 편심을 유도하여 수직도를 보정하는 개념이다.

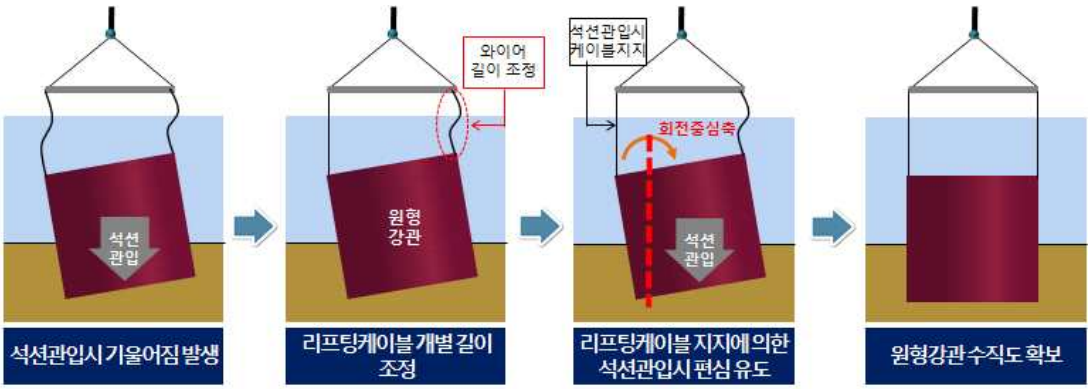


그림 2.2 리프팅시스템을 이용한 원형강관 기울어짐 발생시 수직도 보정 개념

2.1.2 리프팅케이블 개별 길이조절 방법 검토

본 연구에서는 20m급 원형강관의 석션관입시 수직도 제어를 위한 리프팅케이블 개별 길이조절 방법으로 프레임과 원형강관 사이의 변위를 제어하는 방법을 선택하였다. 원형강관과 프레임간의 변위제어를 위한 방법으로는 크게 실린더를 이용하는 방식과 윈치를 이용한 방식으로 나눌 수 있다.

윈치를 이용한 길이조절 시스템은 아래 그림과 같이 프레임에 윈치를 설치하여 원형강관에 연결되는 와이어의 길이를 제어하는 방법이다. 윈치를 이용한 수직도 제어 방법은 프레임에 설치된 다수의 윈치를 이용하여 원형 강관의 기울기 각도에 따라 기울어진 위치의 와이어 길이를 조절하여 수직도를 제어한다. 이러한 윈치는 실린더 방식에 비해 스트로크의 제약이 적으며, 와이어의 길이를 조절하므로 와이어의 종류에 따라 수중작업이 용이할 수 있다. 하지만 윈치에 작용하는 하중이 증가할수록 윈치의 부피와 무게 및 가격이 급상승하며, 감속모터와 와이어드럼을 이용하므로 인양하중이 상대적으로 작다는 단점이 있다.

그림 2.3 윈치를 이용한 수직도 제어 시스템

두 번째로 실린더를 이용한 수직도 제어 시스템은 아래 그림과 같이 프레임에 실린더를 설치하여 원형강관과 프레임 사이의 변위를 제어하는 방식이다. 실린더를 이용한 수직도 제어 시스템은 3~4개의 독립 실린더를 장착하여 구성이 가능하며, 각각의 실린더를 이용하여 조절 가능하여 정밀 수직도를 제어 가능한 시스템이다. 실린더의 용량에 따라 프레임에 부착되는 실린더의 개수 및 실린더의 배치가 조절 가능하다. 윈치 방식과 동일한 용량을 구성할 경우 상대적으로 경제적이며, 유압방식이므로 인양가능하중이 크다. 또한 별도의 조금구 없이 실린더를 지지할 수 있는 프레임만으로도 사용이 가능하다.

하지만 윈치를 이용한 리프팅시스템에 비해 변위조절을 위한 스트로크 길이의 제한이 있다. 이에 두 가지 프레임 설계안(20 m 프레임, 7.5 m 프레임)으로 원형강관 기울기에 따른 리프팅 케이블의 변위량을 계산하여 아래 표에 나타내었다. 표에서 확인할 수 있듯이, 20m급 원형강관의 기울기가 3.0° 까지 기울어지는 경우의 와이어의 변위는 두 가지 설계안에서 각각 1,047 mm, 887 mm로 계산되었다. 실린더 방식의 리프팅시스템이 윈치 방식의 리프팅시스템에 비해 스트로크의 제약이 있지만 1.0~1.5m 정도의 스트로크는 실린더 방

식의 리프팅시스템에서도 조절이 가능하기 때문에 중량과 크기, 가격 면에서 우수한 실린더 방식의 리프팅시스템이 본 연구에 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

그림 2.4 실린더를 이용한 수직도 제어 시스템

표 2.1 원형강관 기울기에 따른 리프팅 케이블 길이변화

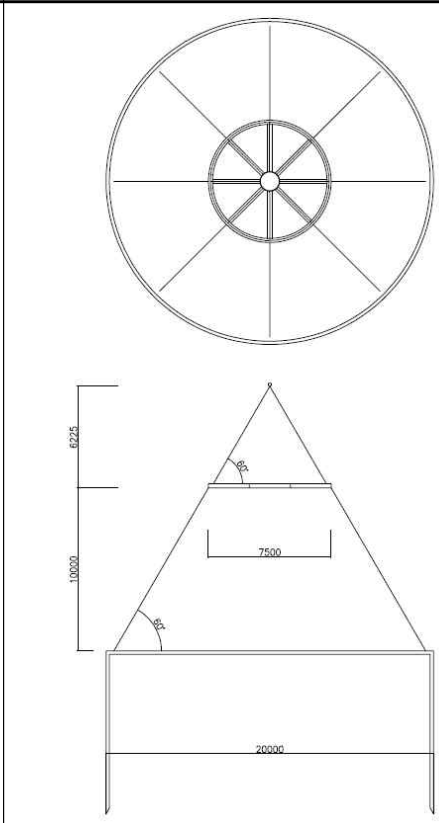
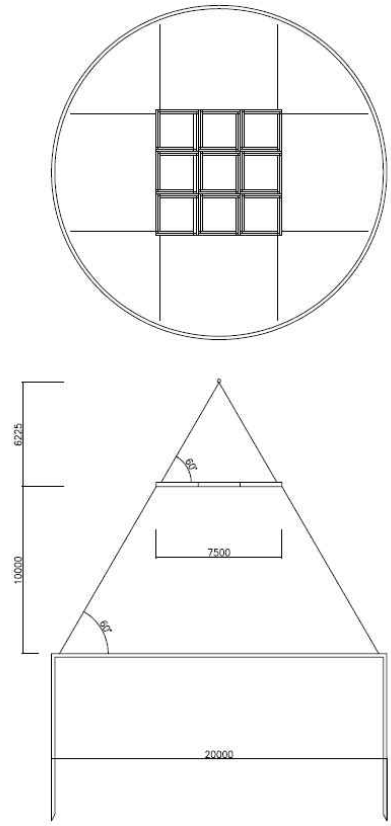
강관 기울기 (°)	변위 (mm)	
프레임 대각선 길이	20 m	7.5 m
0.0	0	0
0.5	175	148
1.0	349	296
1.5	524	444
2.0	698	592
2.5	872	739
3.0	1,047	887

2.1.3 프레임 기본 형상 검토

케이블 길이제어를 위해 사용되는 엑츄에이터 부착을 위한 프레임 형상은 크게 다음 표와 같이 원형과 정사각형의 프레임을 고려할 수 있다. 프레임의 직경 또는 대각선 길이는 최대 원형강관과 같은 길이인 20m로 선정 가능하며, 와이어와 프레임의 허용 최대각인 60° 의 경우를 나타내었다.

원형 프레임의 경우 모듈화가 어렵기 때문에 원형강관의 규격별로 별도의 제작이 필요하며, 육상운반을 위해서는 도로교통법에 따른 운송 중량과 크기를 고려하여 조립식으로 제작해야하므로 구조가 복잡하다. 또한 형상의 특성상 인양장비의 장착이 매우 복잡하다. 사각형 프레임의 경우에는 모듈화가 가능하여 원형강관의 규격에 제약이 없으며, 모듈로 제작되어 조립 및 해체가 용이하고 직각의 형태이므로 인양장비의 탈부착이 유연하게 이루어질 수 있다. 원형프레임의 경우 중량은 사각형 프레임에 비해 다소 작으나 제작이 복잡하며, 정사각형 형상으로 제작 시 연결부의 정밀도 확보가 가능하여 조립·해체가 용이할 것으로 판단된다.

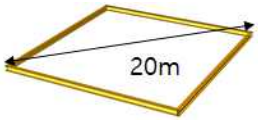
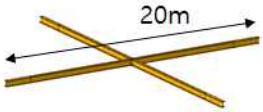
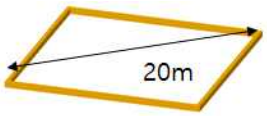
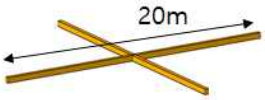
표 2.2 프레임 형상안

형상	원형	정사각형
개념도		

2.1.4 수치해석을 통한 프레임 검토

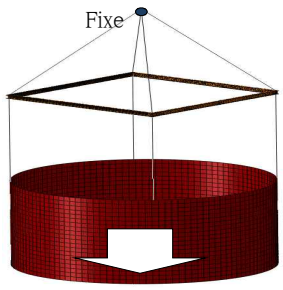
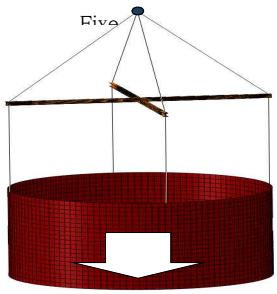
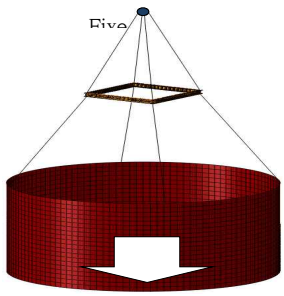
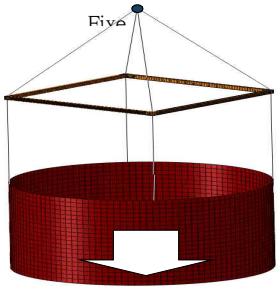
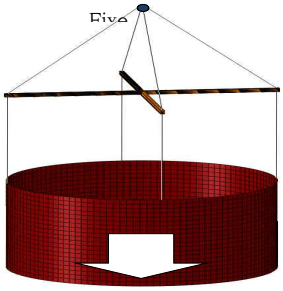
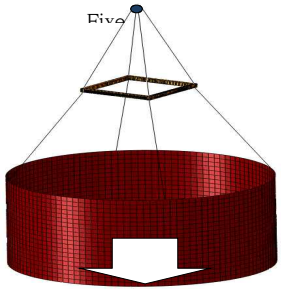
최적의 프레임 기본 형상 도출을 위하여 위에서 제시한 원형, 사각형 프레임 이외에 X자형 프레임을 추가하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용되는 리프팅케이블 개별 길이조절 기법은 프레임의 모서리에 설치되는 엑츄에이터에 의해 수직방향으로만 하중이 작용하기 때문에 휨에 의한 프레임의 손상은 매우 작을 것으로 예상된다. 이에 모듈형이 아닌 내부가 비어있는 사각형 프레임과 강재량을 최소화 한 X자형 프레임을 선정하였다. 프레임의 단면은 프레임에 주로 사용되는 I-beam과 Box형 단면을 적용하였으며, 일반 현장에서 자주 사용되는 기성품 I-beam의 제원을 참고하였다. I-beam과 Box형 단면의 강판의 두께를 모두 동일하게 적용하여 I-beam의 수직하중을 보강하는 측면으로 Box형 단면을 추가로 고려하여 비교하였다. 프레임의 대각선의 길이는 20m로, 원형강관과 동일한 길이를 적용하여 원형강관과 프레임 사이의 와이어가 수직을 이루는 경우와, 원형강관과 프레임 사이의 와이어의 각이 60° 를 이루는 경우를 고려하여 아래 표에 나타낸 것과 같이 총 6가지 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.12를 사용하였다.

표 2.3 해석에 사용된 프레임 종류

프레임 단면	프레임 형상		
I-beam			
	Case_SI	Case_XI	Case_SSI
Box형			
	Case_SB	Case_XB	Case_SSB
	Naming: Case_AB	A: 프레임 형상 - S: Square - X: X형 - SS: Small Square	B: 프레임 단면 형상 - I: I-beam - B: Box형

해석에 사용된 프레임의 해석모델은 다음 표와 같다.

표 2.4 해석에 사용된 프레임 모델

Case_SI	Case_XI	Case_SSI
		
Case_SB	Case_XB	Case_SSB
		

와이어의 경우 beam 요소로 모델링하였으며, 원형강관은 shell 요소, 프레임은 solid 요소로 모델링하였다. 상부와이어-프레임 연결부와 와이어-원형강관 연결부는 공유되는 노드에서 단순연결로 일체거동 하는 것으로 설정하였다. 경계조건은 와이어의 최 상부를 fix로 설정하여 6 자유도에 대하여 구속하였으며, 원형강관의 하부에 예상되는 원형강관의 예상 질량만큼의 하중이 작용하는 것으로 설정하였다.

I-beam과 Box형 단면의 프레임의 연결부는 사각형 프레임, X자형 프레임에서 아래 그림과 같이 단순접합부로 모델링하였다. I-beam 단면의 사각형 프레임의 모서리는 한쪽 면의 I-beam 중앙부가 I-beam 형상의 마지막 끝단에 위치하도록 배치하였으며, I-beam 단면의 X자형 프레임 중앙의 교차지점은 I-beam 중앙부가 접합, 교차되는 형상으로 모델링하였다. Box형 단면의 사각형 프레임의 모서리는 서로 교차하지 않고 그림과 같이 단순 연결되도록 하여 수직 파이프관과 같이 내부는 Box 단면과 동일하게 비어있는 형태를 이루고 있다. Box형 단면의 X자형 프레임 중앙의 교차지점 역시 사각형 프레임과 마찬가지로 교차되는 내부는 비어있고 외벽이 단순 접합 연결되는 방식으로 연결부를 모델링하였다.

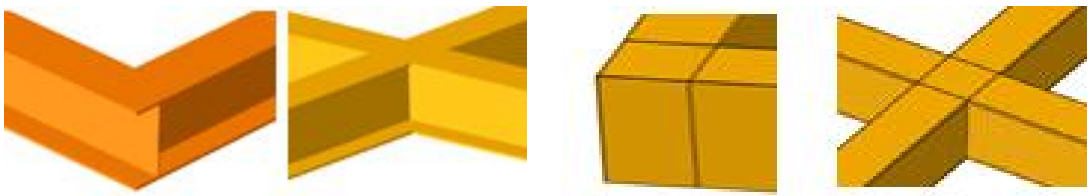


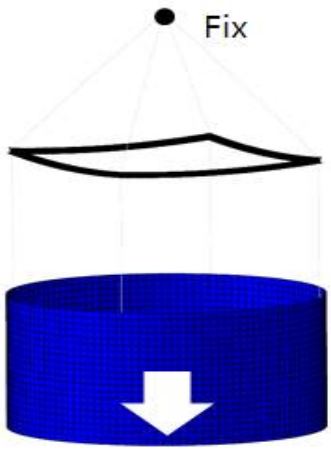
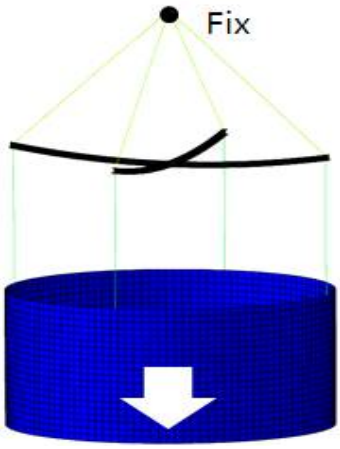
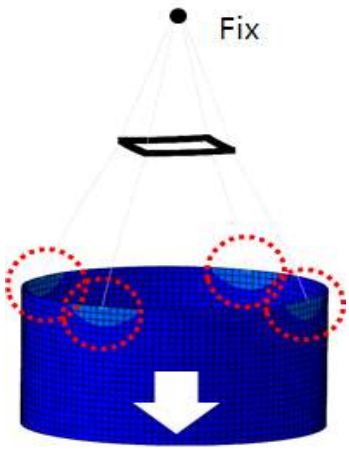
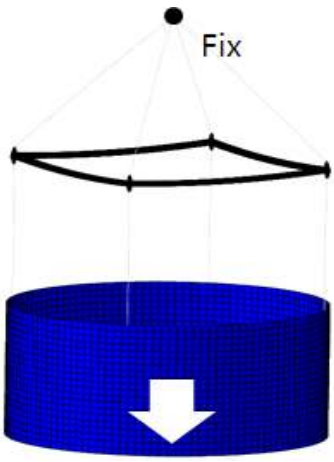
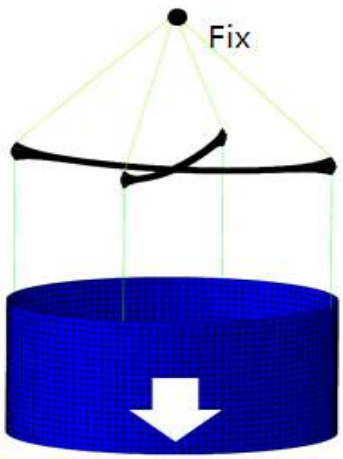
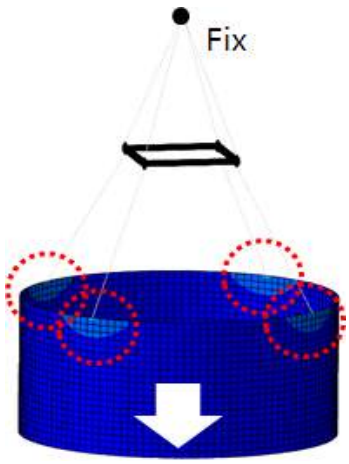
그림 2.5 프레임 연결부 모델링

다음 표에 수치해석 결과를 나타내었다. 본 해석결과는 각 프레임 형상에 따른 프레임의 형상변화에 대하여 비교하고자 프레임 형상변화를 보다 명확하게 확인할 수 있도록 변형 스케일을 10배로 증가하여 나타낸 것이다. 결과를 나타내는 색상의 하중분포의 범위는 모든 경우에 대하여 동일하게 설정하였다.

- 수치해석 결과 원형강관과 와이어가 이루는 사이각도에 따른 해석결과를 비교해보면, 원형강관과 와이어 사이의 각도가 60° 를 이루는 경우(Case_SSI, Case_SSB) 아래 표에 표시한 것과 같이 원형강관에 수평하중이 발생하여 원형강관과 와이어의 연결부에서 원형강관과 와이어 사이의 각도가 수직인 경우에 비해 상대적으로 큰 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다.
- 사각형 프레임과 X자형 프레임의 비교에서는 프레임이 흡수하는 에너지 차이로 인하여 와이어에 작용하는 하중에 차이를 보였다. 수치해석결과에서 X자형 프레임의 경우 와이어에 작용하는 장력이 사각형 프레임의 경우에 비해 작게 발생하였다.

- 프레임 중앙부에서의 응력은 해석이 수행된 모든 경우에서 일반 구조용 압연강재 SS400의 항복강도 235 MPa보다 낮은 것으로 나타나 임시 형상안의 프레임이 모두 안전성을 확보한 것으로 나타났다. 프레임 단면에 따라 프레임 중앙부에서 발생하는 응력의 차이를 보였으며, I-beam을 이용한 프레임의 경우 Box형 프레임에 비해 프레임의 중앙부에서 응력이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- 변위결과에서는 프레임 중앙의 변위가 프레임의 크기가 작은 Case_SSB, Case_SSI의 경우에서 작게 발생하였으며, X자형 프레임을 사용하는 경우 가장 크게 나타났다.

표 2.5 수치해석 결과

Case_SI	Case_XI	Case_SSI
		
Case_SB	**Case_XB**	**Case_SSB**
		

- 해석결과에서 I-beam과 Box형 단면의 프레임과 와이어의 연결부에서 다음 그림과 같이 응력집중현상이 발생하였다. 이는 해석상 solid 요소의 프레임과 beam 요소를 이용하여 모델링한 와이어의 연결이 하나의 노드에서 이루어졌기 때문이다.

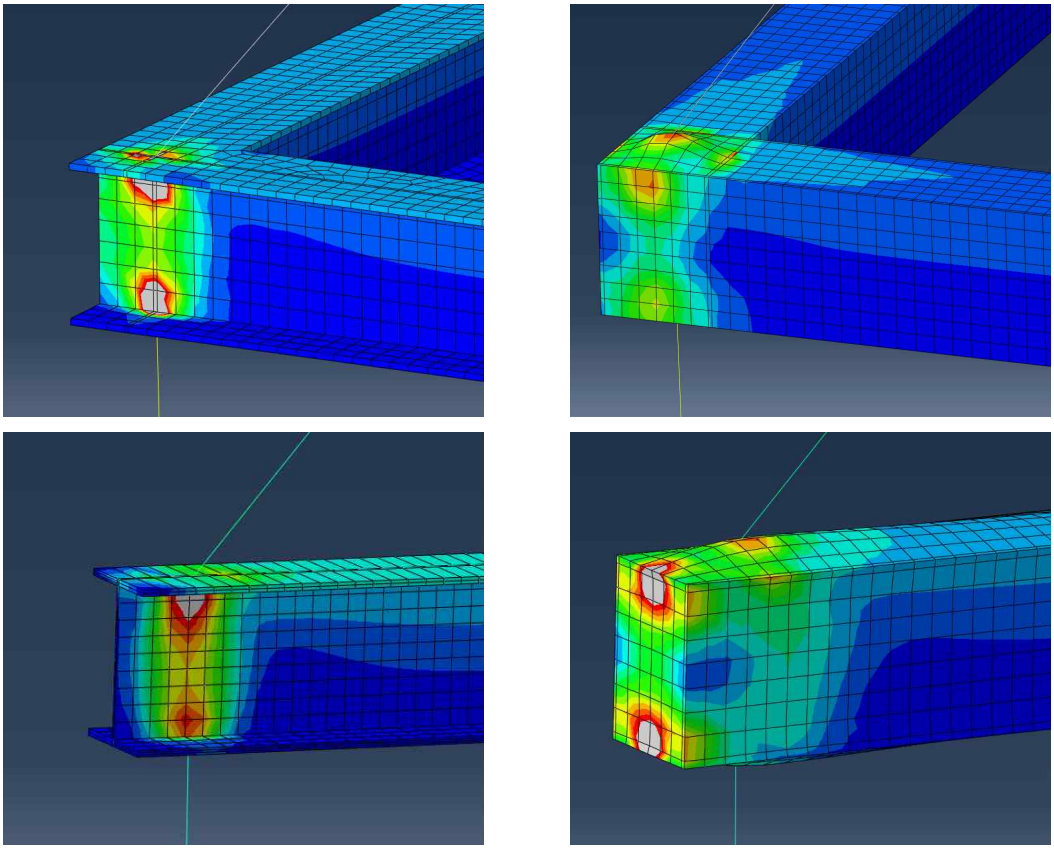


그림 2.6 프레임-와이어 연결부 응력집중현상

- 이러한 응력집중은 프레임과 와이어의 연결부에 아래 그림에 나타낸 것과 같은 lifting lug 또는 pad eye와 같은 인양고리형태의 연결부를 이용하여 해결 가능하며, 이와 연결되는 와이어 말단 부는 아래 그림에 나타낸 다양한 와이어 슬링 중에서 작업 환경에 따라 사용이 용이한 방법을 선택하여 사용 가능하다.

그림 2.7 Lifting lug와 pad eye

그림 2.8 와이어 슬링의 종류

- 단순 강재량에 따른 경제성을 비교하자면 프레임의 크기가 작고 Box형 단면보다는 I-beam을 사용하는 경우 경제성이 가장 우수할 것으로 사료된다. 하지만 사각형 프레임과 원형강관이 이루는 각도가 60° 인 경우에는 원형강관의 변형이 발생할 가능성이 있기 때문에 원형강관의 안정성 부분에 있어서 사용이 어려울 것으로 판단된다.
- 사각형 프레임과 X자형 프레임의 경우 X자형 프레임에 사용되는 강재량이 상대적으로 적어 경제성 부분에서는 X자형 프레임이 유리한 것으로 판단된다. 다만 안정성에 있어서 X자형 프레임의 중앙의 연결부가 외부 하중에 취약할 가능성이 있으며, 이는 X자형 프레임의 중앙부 단면을 넓게 하는 방식의 변단면 X자형 프레임을 사용함으로써 해결 가능할 것으로 판단된다.
- 원형강관 수직도 제어를 위한 시스템의 와이어에 작용하는 하중은 원형강관이 수중에서 자침된 이후에 발생하는 관입력과 밀접한 관련이 있다. 따라서 원형강관 수직도 제어 시스템 설계 또는 해석에 있어서 원형강관의 관입력에 대한 내용정보가 요구된다.
- 본 해석에서는 원형강관의 수중 자침이후 발생하는 강관의 관입력에 비해 수면 위에서 원형강관을 들어 올리는 경우 중력방향으로 작용하는 원형강관의 자중이 더 클 것으로 예상하여 원형강관의 자중을 적용하여 해석을 수행하였다.

2.1.5 리프팅케이블 개별 길이조절 시스템 구성안

엑츄에이터를 사용하여 각각의 리프팅케이블 위치에서 길이를 제어하며 원형강관 관입 중 수직도를 제어하는 시스템 구성도를 아래 그림에 나타내었다. 원형강관 수직도 제어 시스템은 대각선의 길이가 원형강관의 직경과 동일한 사각형 프레임을 사용하는 것으로 가정하였으며, 각각의 모서리에 엑츄에이터가 배치된다.

사각형 프레임의 모서리에 배치되는 엑츄에이터는 몸체는 프레임 상부에 위치하게 되고, 피스톤은 프레임을 통과하여 프레임 하부에서 변위를 제어하도록 하였다. 프레임의 모서리 부분은 엑츄에이터의 제원에 따라 형상을 달리할 필요가 있으며, 구성안은 원형으로 나타내었다. 프레임의 모서리 부분을 필요에 따라 사각형태의 넓은 면적으로 설계하여 계측장비를 설치하는 방법도 가능하다. 프레임과 크레인에 연결되는 상부 와이어는 엑츄에이터가 설치되는 프레임의 모서리를 기준으로 좌우 양쪽 프레임에 설치된 리프팅 러그(lifting lug)에 후크 타입(hook)의 슬링을 이용하여 각각 연결된다. 크레인과 원형강관은 실린더의 하

부 연결고리 부는 후크 타입의 슬링을 이용하여 연결되며, 원형강관과 와이어는 클램프를 이용하여 연결되도록 하였다.

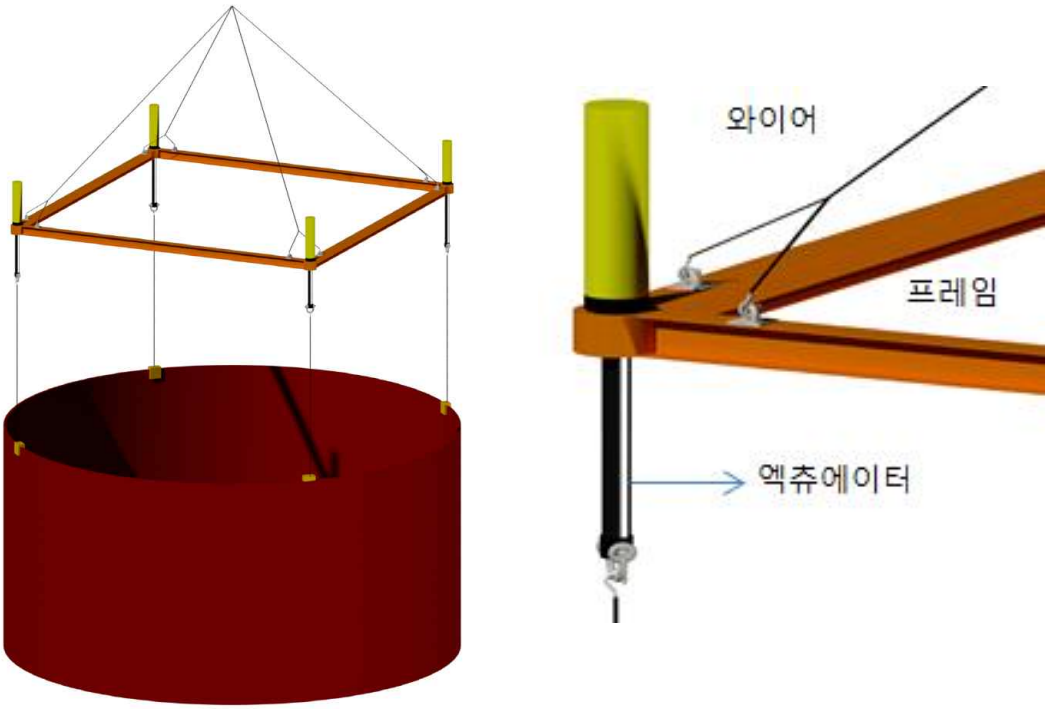


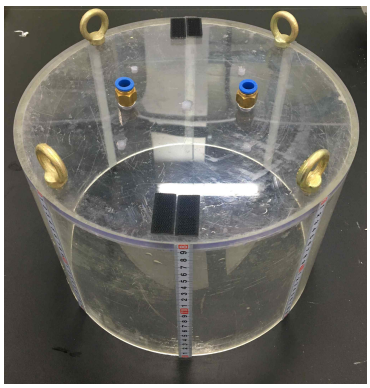
그림 2.9 원형강관 수직도 확보를 위한 케이블 개별 길이제어 시스템 구성(안)

2.2 실내 모형실험을 통한 케이블 개별 길이제어 기법 성능평가

2.2.1 모형실험시스템 구축

석션파일 수직도 보정효과를 검증하기 위한 실내실험을 수행하기 위하여 모형실험시스템을 구축하였다. 모형실험에 적용된 석션파일은 직경 30cm(D), 길이가 20cm(L)인 L/D가 2/3이고, 상판두께는 1cm, 벽면두께는 0.5cm로 파일 내부의 상태를 육안으로 확인하고자 투명한 아크릴로 제작하였다. Tran and Randolph(2008)의 연구에서는 파일 관입깊이대비 토조 직경(Lpile/Dcontainer)이 2이상일 경우 경계면이 석션파일 관입거동에 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다. 그러므로 토조 한변을 80cm(Lpile/Dcontainer=4)로 제작하여 석션관입시 경계면 영향은 없는 것으로 간주하였다. 석션파일 상판에 설치된 호스는 펌프와 연결하여 내부의 물을 배수시키는 방식으로 석션을 적용하여 석션파일이 지반에 관입되도록 하였다. 펌프라인 중간에는 소형면적식 유량계를 설치하여 유량을 조절할 수 있으며 배수유량을 확인 가능하도록 하였다.

(a) 토조



(b) 모형 원형강관

(c) 펌프

(d) 소형면적식 유량계

그림 2.10 석션파일 관입 실내 모형실험시스템 구성

모형실험에 적용된 계측장비로는 원형강관 내·외부의 수압차를 구해 석션압을 확인하기 위해 차압계를 설치하였으며, 석션에 의한 원형강관 관입량은 LVDT를 이용하여 확인하였다. 리프팅케이블의 장력은 로드셀을 설치하여 측정하였으며, 모형 원형강관 상판에 경사계를 설치하여 파일의 기울어진 상태나 수직도가 보정되는 기울기를 측정하였다. 계측된 데이터는 데이터로거를 통하여 PC에 저장되도록 하였다.

이와 같이 장비 및 시스템을 구성하여 다음 그림과 같이 원형강관 석션관입시 수직도보정 모형실험 시스템을 구축하였다.

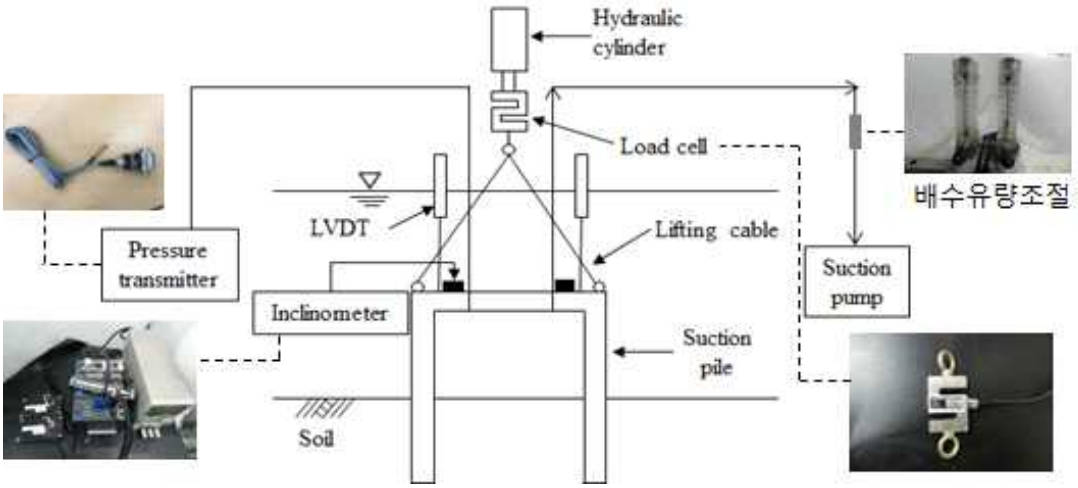


그림 2.11 원형강관 실내모형실험 개념도

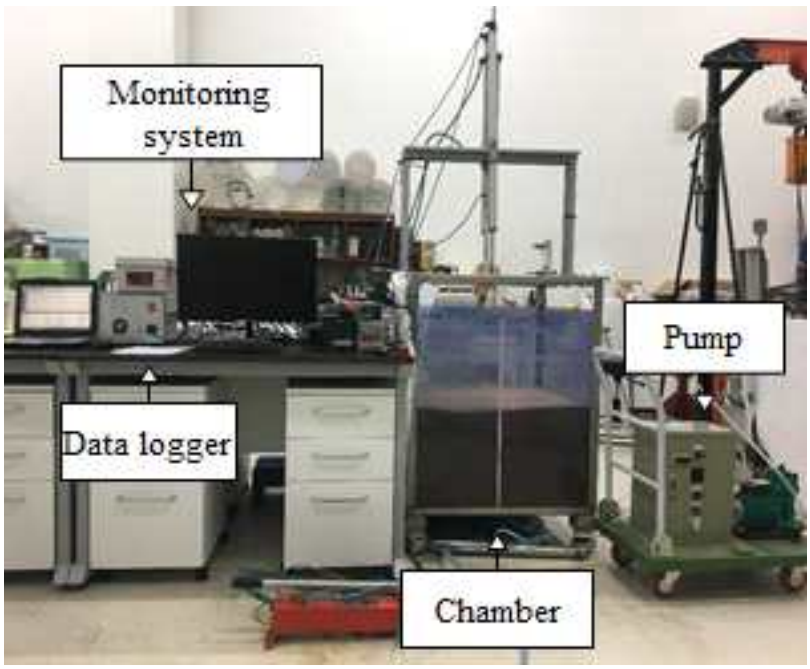


그림 2.12 실내모형실험 시스템

2.2.2 모형실험용 엑츄에이터 설계 및 제작

케이블 개별 길이조절은 윈치와 엑츄에이터 타입을 검토하여 케이블에 엑츄에이터를 장착하는 방안으로 결정하였다. 엑츄에이터 적용을 위한 설계 및 제작시 크게 두 가지 사항에 대해 고려하여야 한다. 첫 번째로는 원형강관에 설치되는 다수의 리프팅케이블에 장착되는 엑츄에이터의 개별 조절이 가능하여야 한다. 두 번째로는 리프팅케이블에 엑츄에이터 연결이 용이하여야 한다. 두 가지 조건을 고려하여 아래와 같이 모형실험용 유압 엑츄에이터와 펌프시스템을 설계하였다. 엑츄에이터 연결부는 프레임 및 와이어, 리프팅러그와 연결될 수 있도록 일반적으로 해상구조물 리프팅시 연결부에 사용하고 있는 샤클이 결속될 수 있는 핀 타입으로 결정하였다. 리프팅케이블은 네 줄이 많이 적용되고 있으므로 케이블 한 줄당 엑츄에이터 1개가 장착되므로 엑츄에이터 4개가 펌프시스템과 연결되어 개별조절이 구현되도록 하였다. 개별조절은 펌프시스템 도면에서와 같이 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 엑츄에이터 개수만큼 설치하여 엑츄에이터 1개당 솔레노이드 밸브에 연결함으로써 개별 작동이 가능하도록 하였다. 엑츄에이터의 스트로크는 모형 원형강관의 크기(직경 30cm, 길이 20cm)와 최대 관입깊이(약 8cm)를 고려하여 8cm로 정하였다.

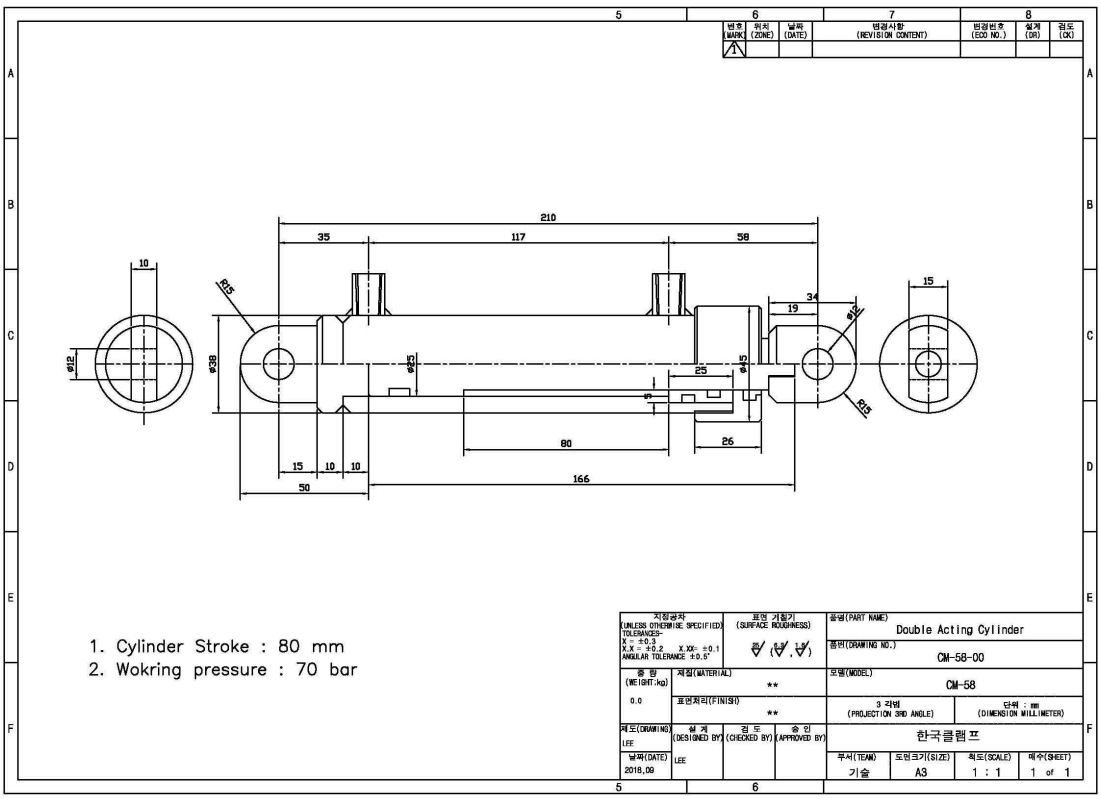


그림 2.13 모형실험용 유압 엑츄에이터 설계도

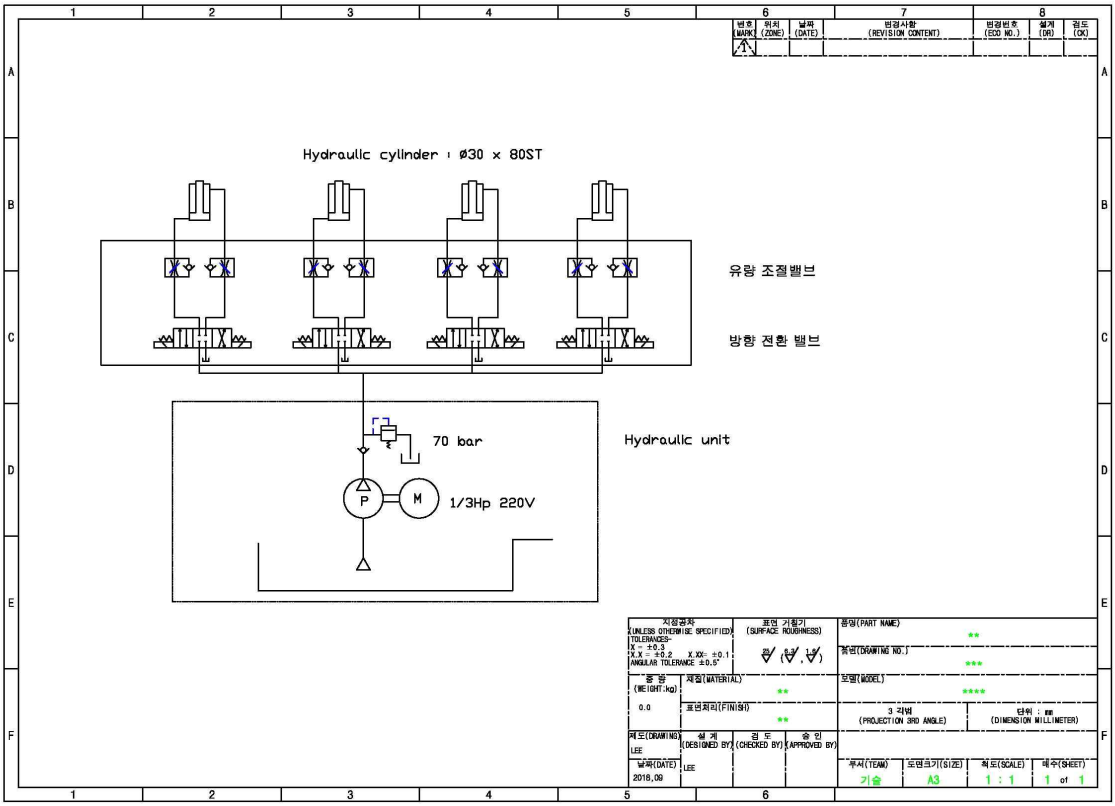


그림 2.14 엑츄에이터 개별 길이조절 장치 개념설계도

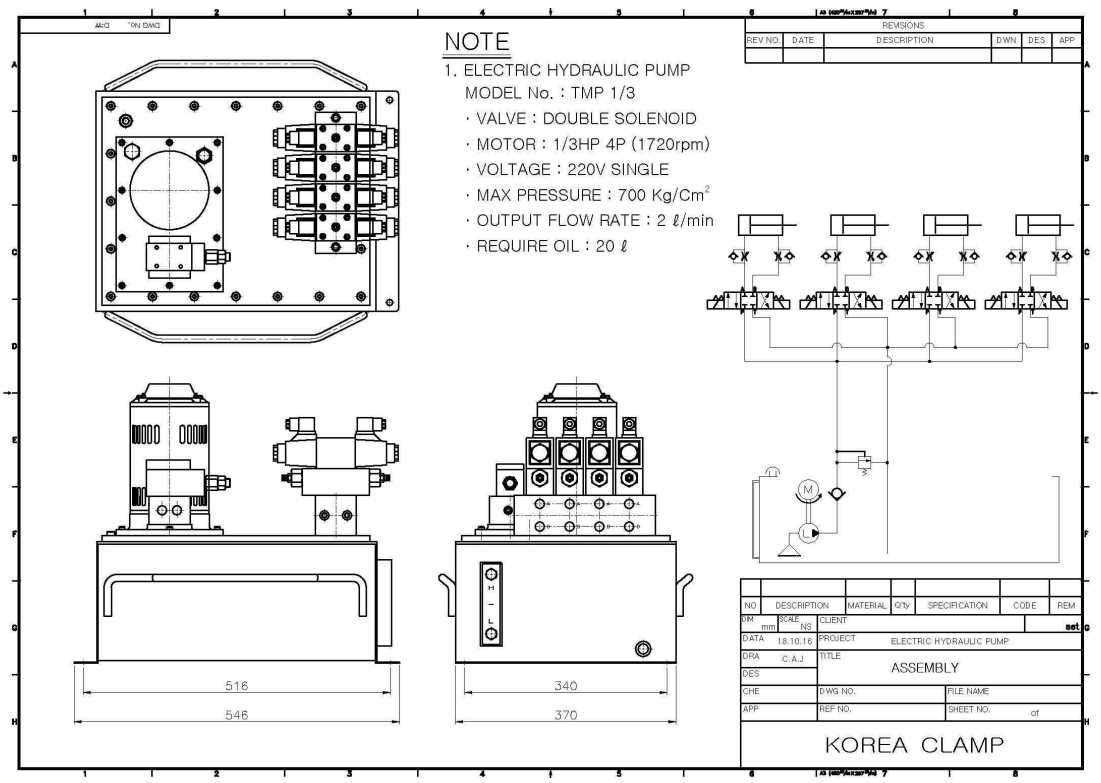


그림 2.15 유압 엑츄에이터 제어용 유압펌프 설계도

케이블 개별 길이조절을 위해 모형실험용 유압 엑츄에이터 설계도를 바탕으로 하여 다음 그림과 같이 엑츄에이터 4개와 펌프시스템을 제작하였다. 또한, 개별조절 시 작업자의 편의성을 고려해 인버터를 설치하여 엑츄에이터별 스트로크 전진 후진이 가능하도록 되어 있다.

(a) 유압 엑츄에이터 제작품 (b) 펌프시스템 제작품

그림 2.16 케이블 개별 조절을 위한 모형실험용 유압 엑츄에이터 시스템

2.2.3 실험조건 및 방법

- 지반 및 수심조건

모형실험에서 지반은 주문진표준사를 이용하였으며 석션파일의 길이와 관입에 영향을 받지 않도록 토조에 40cm 높이까지 상대밀도 25% 수준으로 균질하게 조성하였다. 토조내부에 물을 채우는 과정에서 지반교란을 방지하고 최대한 포화상태로 만들기 위하여 벽면으로 물이 서서히 흘러내리는 방식으로 물을 채워 수심이 30cm가 되도록 하였고 실험전 하루 이상 방치하였다. 지반조성에 사용된 사질토는 주문진 표준사로 기본특성은 다음 표와 같다.

표 2.6 사질토(주문진표준사)의 물성치

Gs	Particle size(mm)			Cu	Cg	γ_{sat}
	D_{10}	D_{30}	D_{60}			
2.65	0.36	0.48	0.61	1.69	1.05	18.56kN/m^3

- 석션압

석션압은 본 조건에서의 지반조건에 대해 유량을 1~10 L/min 조건으로 변화하여 수행한 결과, 모형 석션파일의 지반관입 가능 최소유량인 10 L/min으로 펌프유량으로 선정하였다.

- 실험방법

석션파일 수직도보정 모형실험은 다음과 같은 절차로 실험을 진행하였다.

① 크레인 하강에 의한 원형강관 거치 및 자침

② 원형강관 지반으로 일부 관입(약 10cm) 및 경사(약 7°)조건 구현

: 원형강관이 관입되면서 기울어졌을 경우로 가정

③ 석션펌프 가동에 의한 파일 지반 관입

④ 실험케이스별 케이블 길이조절 조건 적용

: 케이블 개별 제어 미적용시 석션관입 계속

: 케이블 개별 제어 적용시 수직도 상태에 따라 엑츄에이터 피스톤 조절에 의한 케이블 길이 조절

⑤ 케이블 지지에 의해 더 이상 관입되지 않을 경우

: 케이블 개별 제어 미적용시 리프팅케이블 하강

: 케이블 개별 제어 적용시 수직도 상태에 따라 엑츄에이터 피스톤 조절에 의한 케이블 이완

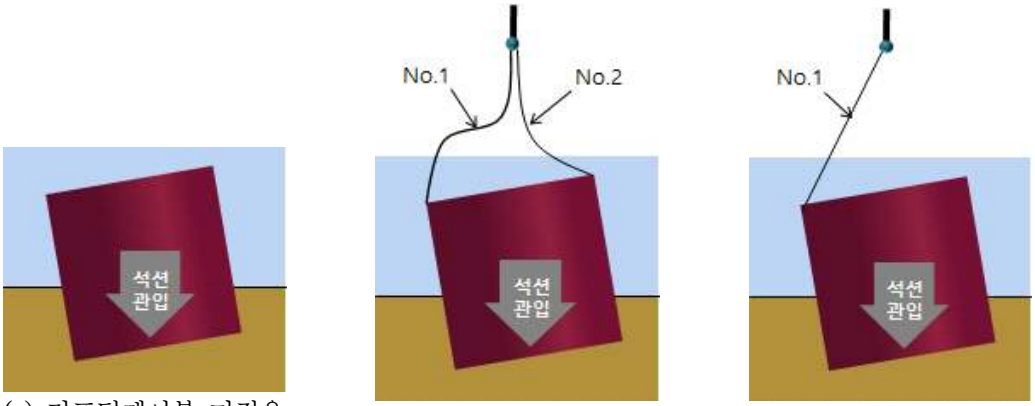
⑥ 수직도 상태에 따라 ④~⑤반복하여 파일 최종관입

- 실험은 동일한 조건에 대하여 각각 3회씩 반복 수행하여 그 결과를 분석하였다.

그림 2.17 케이블 개별 제어에 의한 수직도보정 효과 분석을 위한 석션파일 모형실험 방법

2.2.4 리프팅케이블 적용 방법에 따른 수직도보정 효과 비교·분석

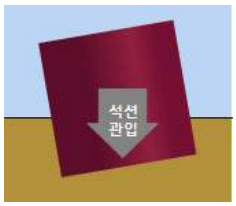
석션파일 관입시 기울어짐이 발생할 경우에 대해 리프팅케이블 지지에 의한 수직도 보정 효과를 비교 · 분석하기 위하여 다음 그림과 같이 세 가지 조건에 대해 실험을 수행하였다. 첫 번째 조건은 석션파일 기울어짐 발생시 케이블이 설치되지 않은 경우에 대해 석션관입한 경우이다. 두 번째 조건은 석션파일 설치시 적용되고 있는 기존의 리프팅방식을 적용한 경우에 대해 기울어짐 발생시 석션관입 실험을 수행하였다. 세 번째는 석션파일 경사발생 위치를 케이블로 지지하여 관입하는 방식을 적용하였다.



(a) 리프팅케이블 미적용 (b) 기존 석션관입 리프팅방식 (c) 경사지점 케이블 지지방식

그림 2.18 석션파일 기울어짐 발생시 리프팅케이블 지지효과 분석 실험케이스

석션파일이 기울어진 상태에서 리프팅케이블이 설치되지 않은 경우 실험을 3회 수행하여 석션관입에 따른 수직도를 다음 그림에 나타내었다. 약 2cm이내 관입구간에서는 수직도가 약 7° 에서 최종관입시에는 수직도가 2~4° 수준으로 확인되었다. 본 실험조건에서는 균질한 사질토 지반으로 석션파일이 경사질 경우 이론적으로는 선단지지력은 동일한, 주면면적 차이로 인해 관입저항력은 기울어진 위치에서 더 크게 작용된다. 그러므로 관입저항력의 차이로 인하여 수직도가 일부 보정되는 것으로 판단된다. 3회 실험결과, 최종관입시 수직도는 약 1.8~3.5° 수준으로 나타났으며, 평균 수직도는 약 2.7° 정도이다. 본 조건을 통해 별도의 리프팅 장치 없이 석션파일에 기울어짐이 발생하면 관입저항력의 차이로 수직도가 일부 보정될 수 있으나 정확한 수직도 확보에는 한계가 있음을 알 수 있다.



리프팅케이블 미적용

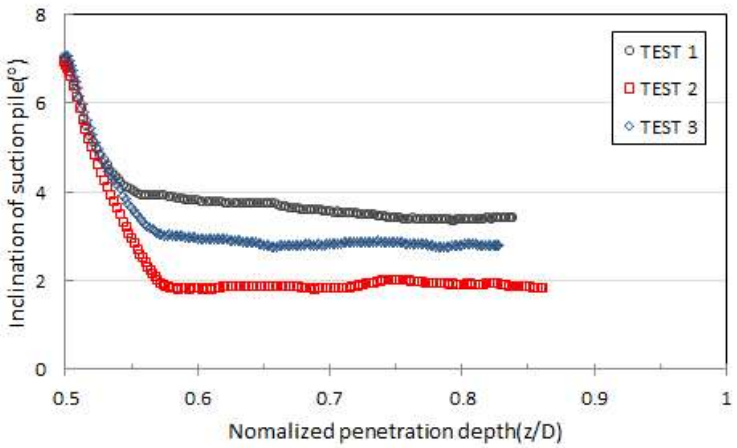
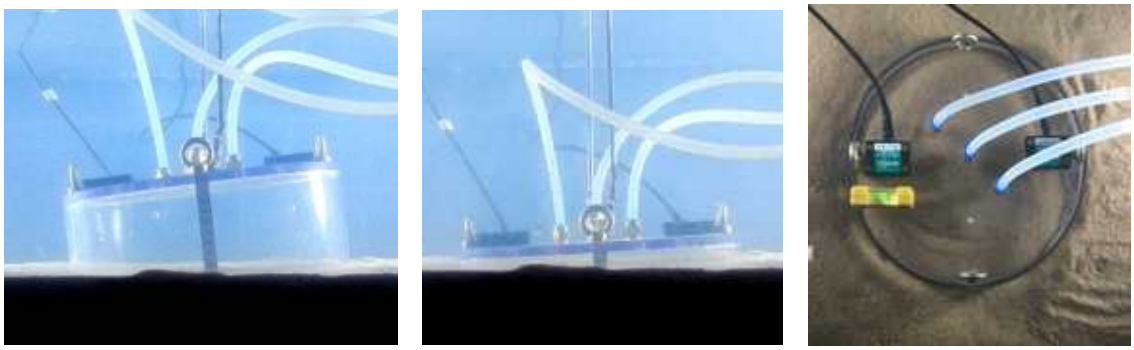


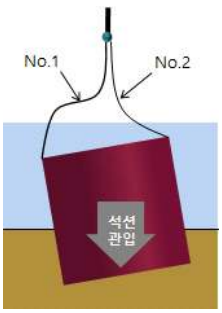
그림 2.19 석션파일 기울어짐이 발생할 경우 케이블 미설치시 석션파일 관입시 수직도



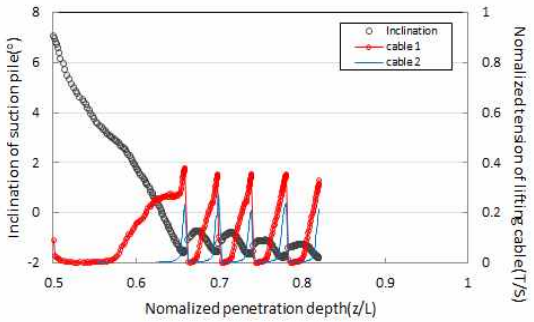
(a) 석션관입전 (b) 석션관입후 (c) 최종관입시 수직도

그림 2.20 석션파일 기울어짐이 발생할 경우 케이블 미설치시 석션파일 관입 과정

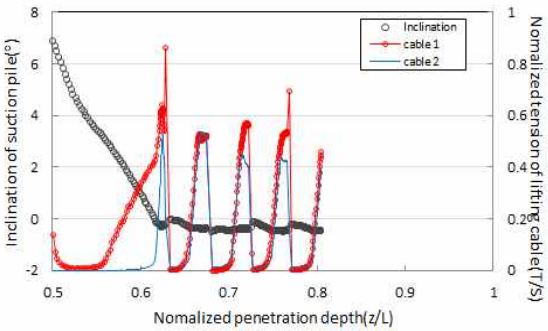
기울어짐 발생시 기존 리프팅방식을 적용한 경우에 대해 석션파일 관입 실험을 수행하였으며, 석션관입에 따른 파일의 수직도와 케이블 지지력을 다음 그림에 나타내었다. 최종 관입시 수직도는 약 0.3~1.8° 정도로 평균 약 0.9° 수준으로 나타났으며, 경우에 따라서는 수직도가 보정된 후 반대방향으로 기울어지는 현상이 나타나는 경우도 확인할 수 있었다. 실험중 관찰된 바에 의하면, 석션파일이 관입되면서 수직도가 보정되는 과정에서 중심위치가 달라지는 경향을 확인하였다. 이는 기울어진 석션기초의 벽면에 수평의 토압이 작용하게 되고 관입시 횡방향의 저항력으로 발현되기 때문인 것으로 판단된다. 케이블을 설치하지 않은 경우에 비해 수직도는 일부 보정되었으나 보다 정밀한 수직도 확보에는 한계가 있음을 확인하였다.



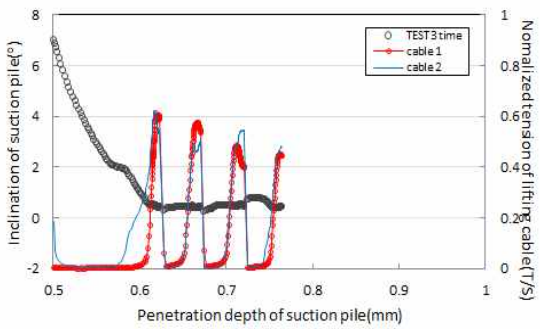
기존 석션관입
리프팅방식



(a) Test 1



(b) Test 2



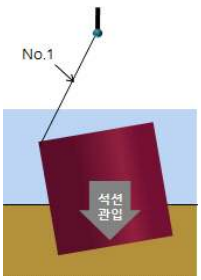
(c) Test 3

그림 2.21 기존 리프팅방식을 적용할 경우 석션파일 관입시 수직도 및 케이블지지력

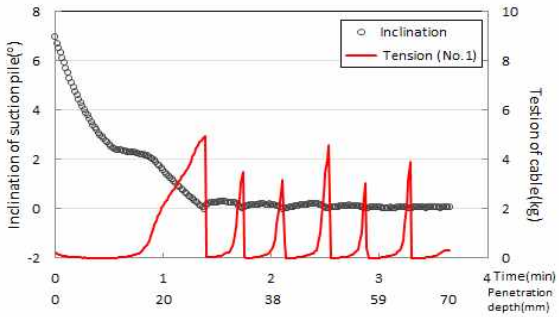
(a) 석션관입전 (b) 석션관입후 (c) 최종관입시 수직도

그림 2.22 기존 리프팅방식을 적용할 경우 석션파일 관입 과정

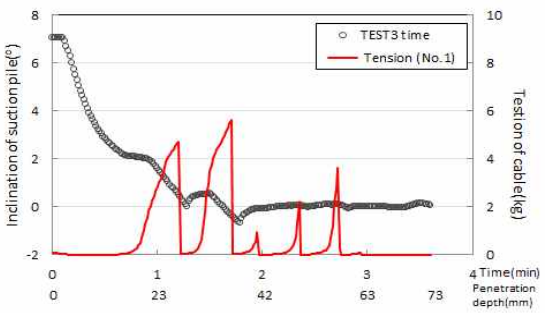
경사진 위치에서 선택적으로 케이블로 지지되는 경우 수직도 보정효과를 확인하기 위하여 기울어진 위치에서만 케이블로 지지하는 조건으로 석션파일 관입 실험을 수행하였다. 석션관입시 케이블 지지에 의해 수직도가 보정되고 수직도가 확보되었을 경우 케이블 축 전체를 일부 하강시켜 원형강관을 관입시키는 방법을 적용하였다. 3회 실험하여 석션파일 관입에 따른 수직도와 케이블 지지력을 다음 그림에 나타내었다. 최종관입시 수직도는 약 0.04~0.07° 으로 평균 0.05° 의 수직도로 매우 높은 수직도 보정 효과를 확인할 수 있었다. 본 실험의 경우 원하는 위치에서의 케이블 지지력이 작용되도록 유도함으로써 수직도를 보정하는 방법으로 본 연구에서 고안한 케이블 개별 길이제어 기법이 이상적으로 적용된 경우로 볼 수 있다. 따라서 케이블 개별 길이제어 기법이 기존 리프팅 방식에 비해 보다 정밀한 수직도 보정이 가능할 것으로 판단된다.



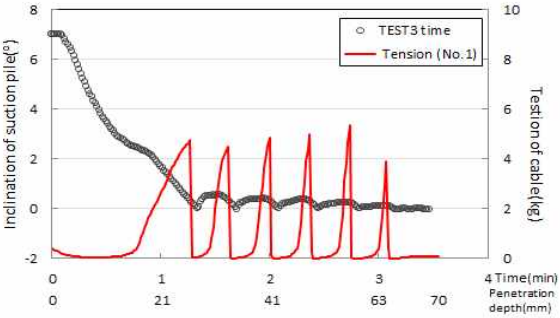
경사지점 케이블 지지방식



(a) Test 1

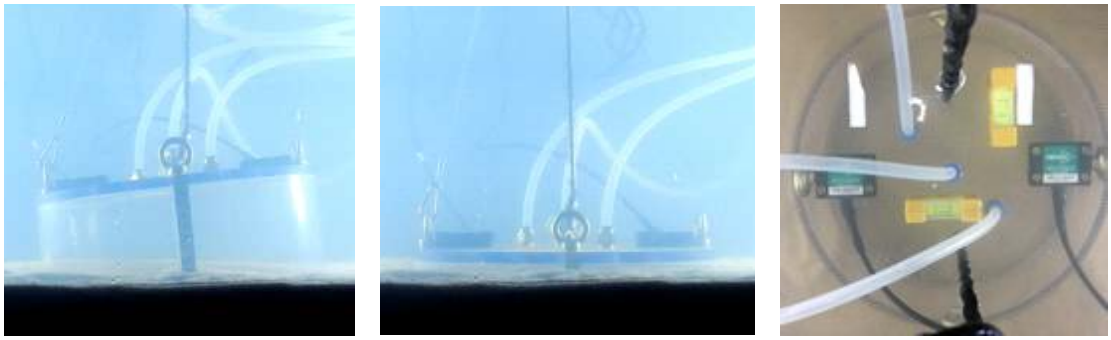


(b) Test 2



(c) Test 3

그림 2.23 경사 위치에서의 케이블 지지에 의한 석션파일 관입시 수직도 및 케이블지지력



(a) 석션관입전 (b) 석션관입후 (c) 최종관입시 수직도

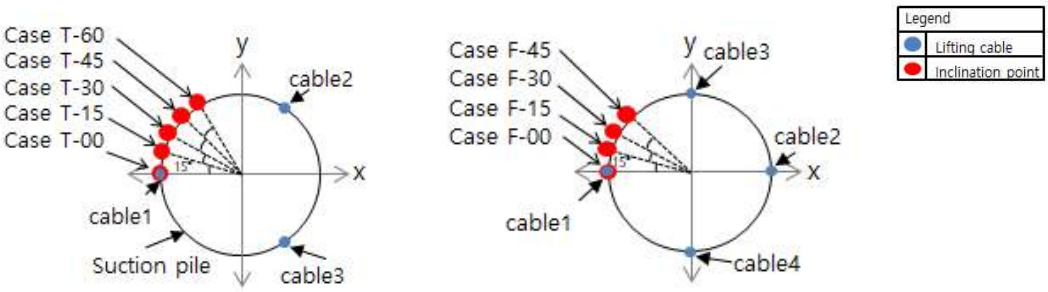
그림 2.24 경사 위치에서의 케이블 지지에 의한 석션파일 관입 과정

2.2.5 리프팅케이블 개별 제어기법 적용 석션파일 관입시 수직도 보정효과 분석

가. 실험조건 및 방법

기본적으로 석션파일은 네 줄 또는 짝수개의 리프팅용 케이블을 연결하여 인양하는 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 한편 수직도 보정 측면에서는 3개의 지점에서 수평도를 맞추는 것이 가장 용이한 방법으로 알려져 있다. 이는 카메라 삼각대의 수평조절이 가전제품의 네다리의 수평조절보다 더 수월하다는 것으로도 알 수 있다. 이에 본 연구에는 케이블 조절을 통한 수직도 제어시 세 줄로 조절하는 경우와 네 줄로 조정하는 경우에 대해 석션파일 관입시 수직도 보정 효과를 평가하였다.

또한, 석션관입시 임의의 위치에서 기울어질 수 있으므로 케이블의 연결 위치와 최대 경사지점의 상대위치를 달리하며 실험조건을 설정하였다. 경사위치는 그림과 같이 케이블 세 줄 적용에 대한 실험은 총 5 case, 네줄 적용한 경우에 대한 실험은 4 case로 설정하였다. 모형실험은 동일한 조건에 대하여 각각 3회씩 반복 수행하여 결과를 분석하였다.

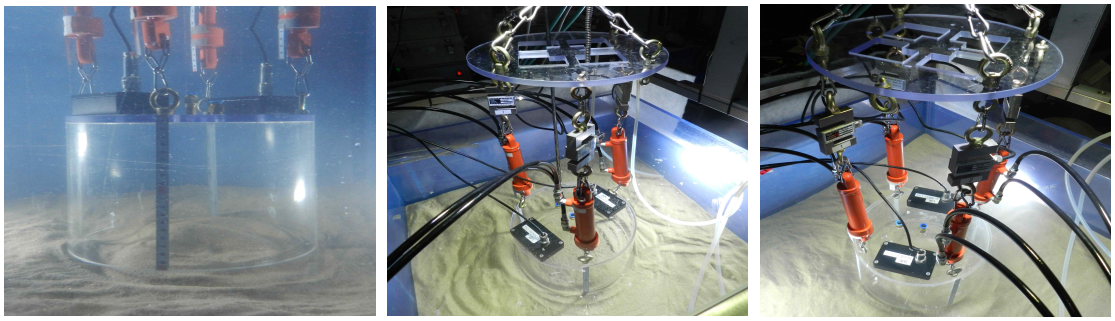


(a) 케이블 세줄 적용 (b) 케이블 네줄 적용

그림 2.25 케이블 개별 길이제어 적용 모형실험 조건

실험방법은 2.2.3절에서의 모형실험 방법과 동일하지만 임의로 기울어진 상태에서 석션 관입시 기울어진 방향은 엑츄에이터로 파일을 지지해주어 관입에 저항하게 하고 반대편

방향에서는 엑츄에이터 피스톤을 전진시켜 케이블이 이완되도록 해줌으로써 관입되도록 하였다.



(a) 엑츄에이터 석션파일 연결 (b) 리프팅케이블 세줄 적용 (c) 리프팅케이블 네줄 적용

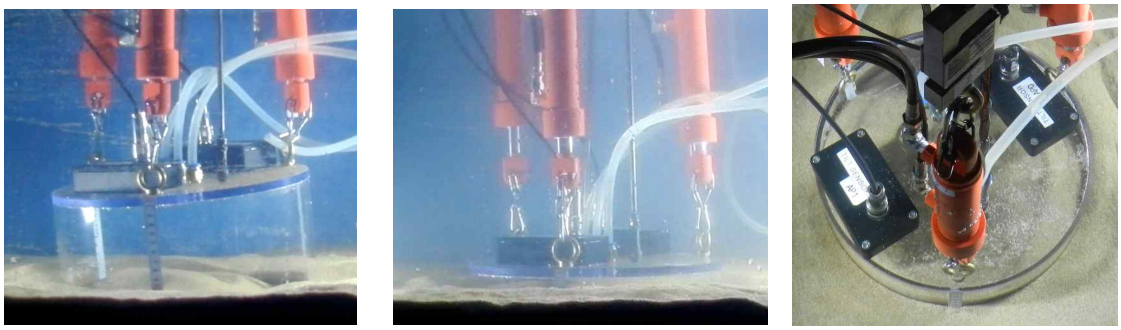
그림 2.26 케이블 개별 조절용 유압 엑츄에이터 장착 석션관입 모형실험

나. 모형실험 결과

석션관입전 파일에는 임의의 기울어짐 조건을 구현한 후에 유압 엑츄에이터가 장착된 리프팅케이블 시스템을 연결한 후 모형 파일을 석션압으로 관입하였다. 석션관입 과정중에 유압엑츄에이터를 조정하여 각 케이블의 길이를 독립적으로 조절하여 기울어진 위치에서는 케이블로 파일을 지지해주고 기울어진 반대편에서는 관입이 될 수 있도록 장력을 이완시켜 주었다. 석션관입은 최종관입이 완료될 때까지 지속하였으며 관입중의 경사도와 각 케이블에 걸린 장력을 계측하여 결과를 분석하였다.

1) 리프팅케이블 세줄 적용

리프팅케이블 세 줄에 엑츄에이터를 적용한 리프팅케이블 시스템에 대한 수직도 보정 모형실험 사진은 다음과 같다.

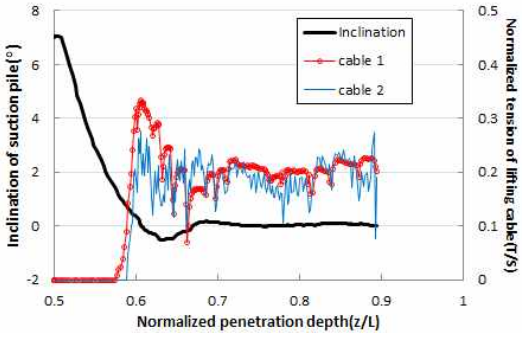


(a) 관입전 (b) 관입후 (c) 최종관입시 수직도

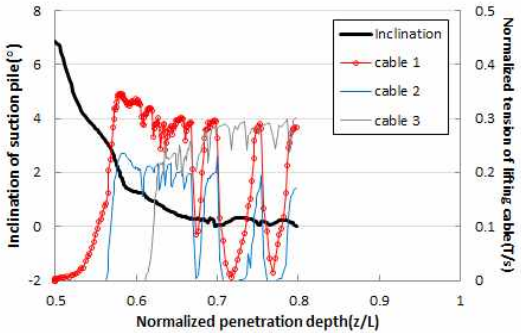
그림 2.27 석션관입시 리프팅케이블 개별 제어에 의한 수직도 보정 과정 (케이블 세줄)

리프팅케이블 세줄 적용시 경사위치별 실험을 수행하여 구해진 관입깊이에 따른 석션파일의 수직도와 케이블 1, 2의 장력을 다음 그림과 같이 나타내었다. 여기서, 관입깊이(z)는

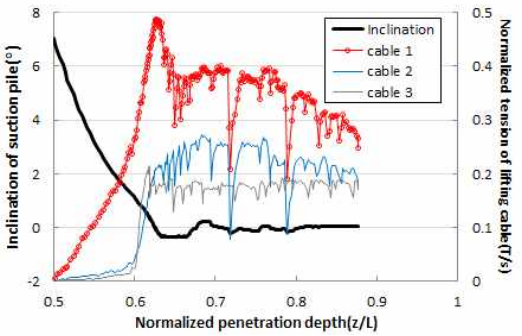
파일길이(L)로, 케이블 장력(T)은 석션력(S)으로 나누어 무차원화하여 결과를 도시하였다. Case T-00의 경우 초기관입시 기울어진 위치의 케이블(cable 1)만 파일을 지지하여 주고 그 외의 케이블(cable 2,3)은 장력을 이완시켜주어 장력의 차이에 의한 편심이 작용되어 수직도를 보정할 수 있었다. 또한, 경사위치가 변하는 조건(Case T-15~60)에서는 케이블 1과 2의 장력이 case T-15 조건에서는 큰 차이를 보이지만, 경사위치가 케이블 2 방향으로 갈수록 장력차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 경사위치가 케이블 1과 2사이인 조건(case T-60)에서는 케이블 1과 2의 장력이 거의 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 기울어진 조건에 따라 케이블 한 줄 또는 두 줄의 케이블로 지지하는 방법을 적용하여 수직도 보정이 가능하였다. 각 경우에 대해서는 최종관입이 될 때까지 수직도 상태에 따라 케이블의 길이를 조절하여 수직도를 보정하였다.



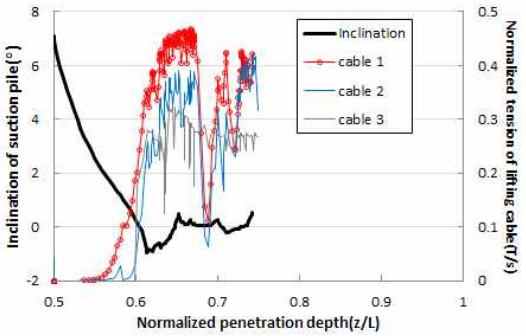
(a) case T-00



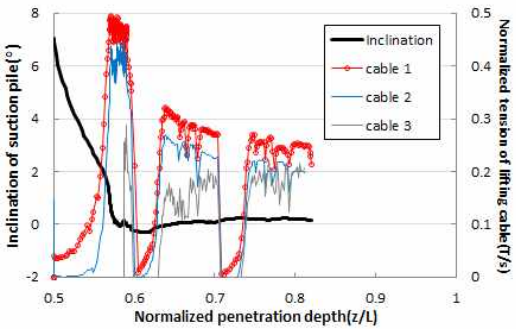
(b) case T-15



(c) case T-30



(d) case T-45



(e) case T-60

그림 2.28 케이블 개별 조절에 의한 석션관입시 수직도 및 케이블장력(케이블 세 줄)

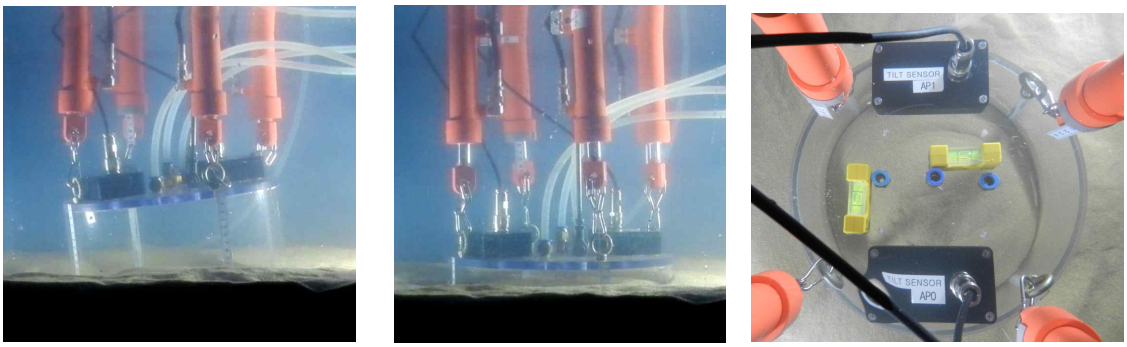
리프팅케이블 세 줄 적용시 모형실험의 최종 수직도를 다음 표에 나타내었다. 모든 실험조건에 대해 최대 0.3° 이내의 최종수직도를 확보하였다. 경사지점이 석션파일 케이블에 위치한 경우(case T-00)의 평균수직도는 0.03° 로 경사위치가 두 케이블 사이에 있는 경우(case T-15~60)의 수직도(0.08° ~ 0.15°)보다 케이블 길이조절에 의한 수직도 보정이 상대적으로 용이하였다. 각 케이스별 석션파일의 최종수직도는 0.026° ~ 0.153° 범위로 나타났으며 평균 약 0.1° 의 수직도를 확보하는 것으로 나타났다.

표 2.7 리프팅케이블 세줄 적용시 실험조건별 최종수직도

구분	case T-00	case T-15	case T-30	case T-45	case T-60
	(°)				
test 1	0.016	0.11	0.033	0.044	0.286
test 2	0.027	0.022	0.115	0.184	0.028
test 3	0.033	0.096	0.159	0.060	0.168
평균수직도	0.026	0.076	0.103	0.096	0.153
전체 평균	0.09				

2) 리프팅케이블: 네 줄 적용

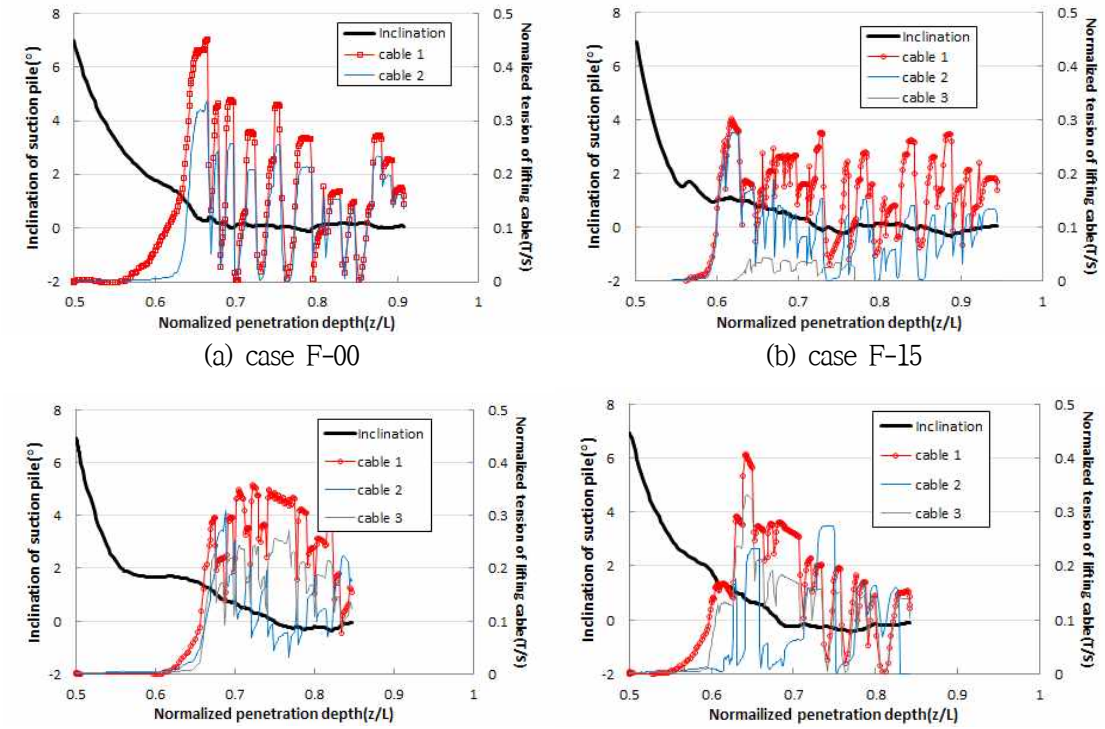
리프팅케이블 세 줄과 동일한 방법을 적용하여 유압 엑츄에이터가 장착된 케이블 네 줄을 적용하여 최종관입시까지 엑츄에이터를 이용한 케이블 길이를 조절하여 수직도 보정실험을 수행하였다.



(a) 관입전 (b) 관입후 (c) 최종관입시 수직도

그림 2.29 석션관입시 리프팅케이블 개별 제어에 의한 수직도 보정 과정(케이블 네줄)

경사위치가 cable 1에 적용된 case F-00의 경우에는 케이블 3과 4는 장력을 지속적으로 이완시켜 주었고, 케이블 1과 2에 길이조절로 장력의 차이를 주어 편심에 의한 파일의 수직도를 보정할 수 있었다. 케이블을 3줄 적용한 경우와 동일하게 case F-15의 경우 케이블 1과 3의 장력은 큰 차이를 보이지만, case F-45에서와 같이 경사조건이 두 케이블 사이인 경우에는 케이블 1과 3의 장력이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 각 경우에 대해서 최종관입이 될 때까지 수직도 상태에 따라 케이블의 길이를 조절하여 수직도 보정이 가능하였다.



(a) case F-00 (b) case F-15

(c) case F-30 (d) case F-45

그림 2.30 케이블 개별 조절에 의한 석션관입시 수직도 및 케이블장력(케이블 네 줄)

리프팅케이블 네줄 적용시 모형실험에 의한 최종 수직도를 다음 표에 나타내었다. 모든 실험조건에 대해 최대 0.3° 이내의 최종수직도를 확보하였다. 최대경사지점이 리프팅케이블 지점에 위치한 경우(case F-00)의 평균수직도는 0.04° 로 최대경사위치가 두 케이블 사이에 있는 경우(case F-15~45)의 수직도(0.13° ~ 0.16°)보다 케이블 길이조절에 의한 수직도 보정이 상대적으로 용이하였다. 최종관입시 수직도는 0.008° ~ 0.258° 범위로 나타나 평균 약 0.1° 까지 수직도를 보정하는 것으로 나타났다. 리프팅케이블 세 줄과 네 줄을 적용한 두 가지 경우에서의 수직도 보정효과 차이는 크지 않아 케이블 줄 수에 관계없이 리프팅케이블 개별조절 기법이 석션파일 관입중 수직도 보정에 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 평가되었다.

표 2.8 리프팅케이블 네줄 적용시 실험조건별 최종수직도

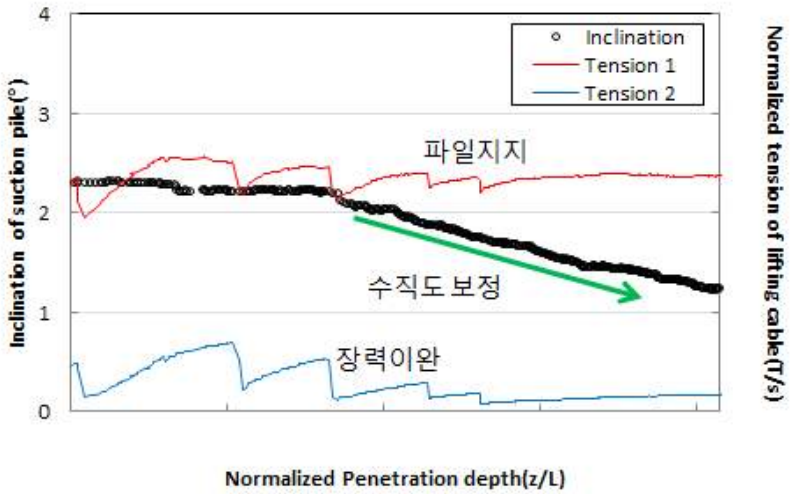
구분	case F-00	case T-15	case T-30	case T-45
	(°)			
test 1	0.008	0.198	0.258	0.093
test 2	0.074	0.124	0.121	0.129
test 3	0.024	0.055	0.085	0.154
평균수직도	0.036	0.125	0.155	0.125
전체 평균	0.11			

2.2.6 케이블 개별 길이 제어에 의한 수직도 보정 메커니즘 분석

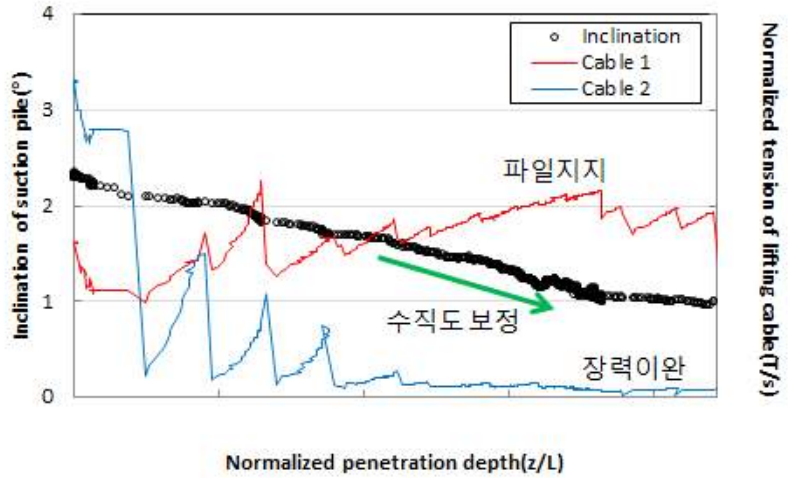
케이블 지지에 의한 수직도 보정효과는 다음 그래프에 제시된 바와 같이 석션압이 가해지면서 기울어진 위치에서 지지하는 케이블에 장력이 발현되어 석션파일의 수직도가 보정되는 것임을 알 수 있다.

따라서, 기울어짐 발생시 리프팅케이블 지지효과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 기울어진 위치에서 관입력에 상응되는 리프팅케이블의 장력을 발현하여 석션파일 관입에 저항하는 저항력 발생
- 석션파일 기울어진 끝단에서의 케이블 지지력이 관입력에 대한 저항력으로 작용하여 석션관입시 편심효과를 유발함으로써 석션파일 수직도 보정



(a) 리프팅케이블 세줄 적용(예: case T-00)



(b) 리프팅케이블 네줄 적용(예: case F-00)

그림 2.31 위치별 케이블 지지에 의한 석션파일 관입시 수직도 보정 효과

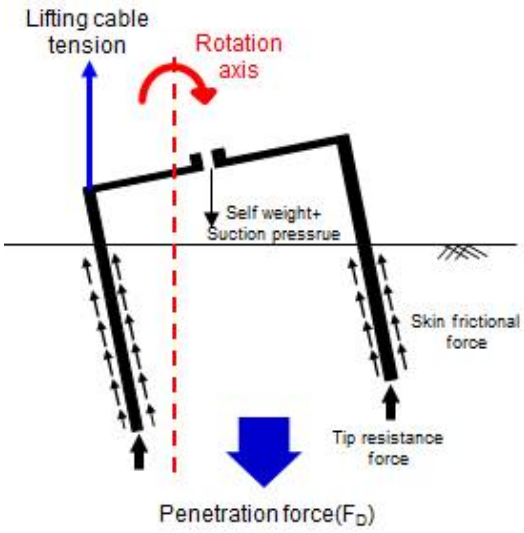


그림 2.32 석션파일 관입시 기울어질 경우 수직도 보정 메커니즘 개념도

2.2.7 모형실험 결과 요약

기존 케이블 길이가 고정되어 있는 리프팅기법을 적용한 경우와 케이블 개별 길이조절 기법을 적용하여 석션관입할 경우 수직도 보정효과를 비교하였다. 기존 일괄리프팅방식을 적용한 경우에는 케이블에 의해 석션파일의 위치를 잡아주는 효과에 의해 수직도가 일부 보정되는 효과는 나타내지만, 최종 수직도는 0.3° ~ 1.8° 정도로 평균 약 0.9° 수준으로 나타나 정밀한 수직도 보정에는 한계가 있었다. 이에 비해 리프팅케이블 길이의 개별 조절 기법을 적용한 경우에는 최종 수직도는 0.01° ~ 0.28° 정도의 범위로 평균 약 0.1° 수준으로 수직도를 확보하는 것으로 나타나 기존 리프팅 방식에 비해 리프팅케이블 개별 길이 조절 기법을 적용한 경우 효과적으로 수직도를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

2.3 현장실험을 통한 수직도 확보기술 성능 검증

2.3.1 현장실험 개요

모형실험을 통해 리프팅케이블 개별 길이제어 기법이 석션파일 관입시 수직도 보정 효과가 유효함을 확인하였으므로 현장실험(파일럿테스트)을 통해 리프팅케이블 개별제어 장치를 장착하여 수직도 보정효과를 검증하였다. 현장실험에 적용된 원형강관 제원과 실험조건은 아래와 같다.

- (현장 파일럿테스트용) 원형강관 : 직경 5m, 길이 9.5m, 무게 약 50ton
- 대상지역 : 전라북도 군산시 새만금 내항 남북도로 건설현장 인근
- 지반조건 : 실트질모래, N=8~12
- 수심조건 : 4m 내외

(a) 원형강관 구성 (b) 원형강관 결합완료

그림 2.33 현장 파일럿테스트용 원형강관

2.3.2 설계 및 구조안정성 검토

가. 상부 와이어 배치에 따른 수직도 변화

본 절에서는 수직도 보정을 위한 리프팅시스템의 프레임과 크레인간의 연결 시 사용되는 와이어의 배치에 따른 수직도 변화를 평가하였다. 범용구조해석프로그램인 ABAQUS 6.12를 사용하였으며, 효율적인 수직도 제어를 위해서는 원형강관 상부에 120° 간격으로 세 기의 실린더가 필요하다고 판단되었으며, 이의 설치를 위한 삼각형의 프레임을 적용하였다. 프레임은 아래 그림에 나타낸 것과 같은 I단면의 빔으로 구성되며, 삼각형의 각 꼭짓점에서 대변의 중심부까지 브레이스를 배치하였다. 배치된 상부 와이어의 배치에 따라 원형강관의 변위 변화를 예측하고자 하였으며, 아래 그림과 같이 상부의 한 지점에서 프레임 꼭짓점에 각각의 와이어를 배치한 경우와 삼각프레임의 무게중심점에 와이어를 배치하는

경우를 모델링하여 비교해석을 수행하였다. 경계조건은 와이어 상부가 병진방향으로는 모두 고정된 것으로 가정하였으며, 원형강관이 관입 시 경사를 이루며 관입되는 경우를 모사하기 위하여 원형강관 하부에 편심하중을 재하하였다.

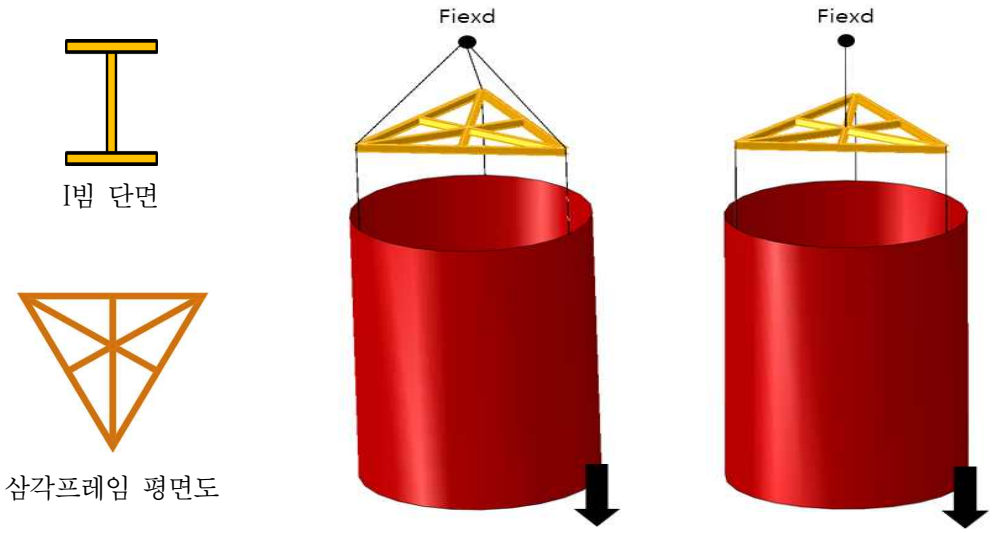


그림 2.34 리프팅케이블 배치에 따른 원형강관 거동검토 수치해석 모델링

해석 결과, 아래 그림과 같이 크레인과 프레임이 3개의 와이어로 연결되는 경우가 하나의 와이어로 연결되는 경우에 비해 최대수직 변위가 15% 정도로 나타났으며, 아래 결과에서 볼 수 있듯이 동일한 하중에 대하여 두 모델의 변화각인 Θ와 Θ'도 수직도 측면에서 많은 차이를 보였다. 상부와이어를 1개 지점에 연결하는 경우, 하나의 대용량 와이어만을 사용하여, 경제성 측면에서 유리할 수 있으나, 이 경우에는 안전성확보가 어렵고, 수직도 제어에 불리하여 방사형으로 와이어를 배치하여야 할 것으로 판단된다.

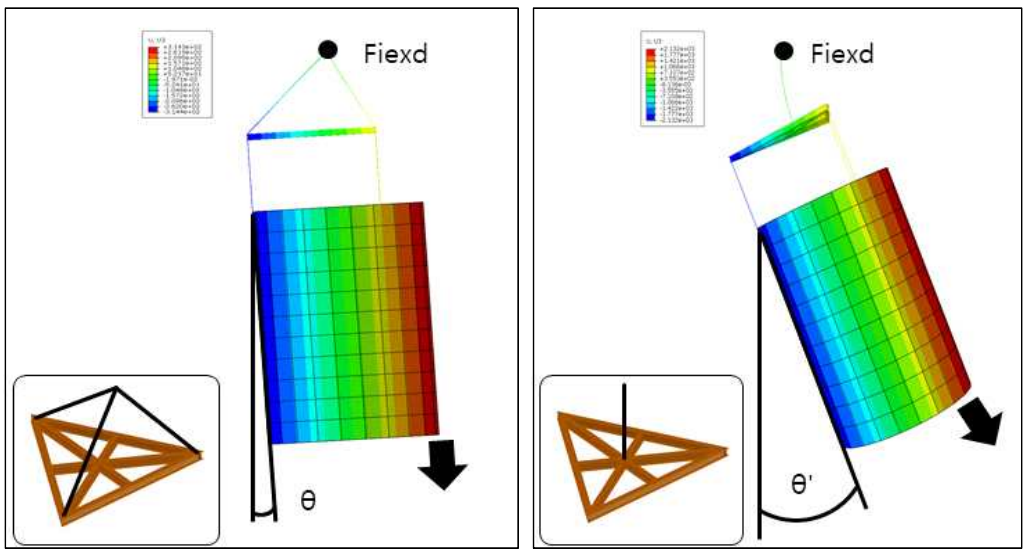


그림 2.35 와이어의 개수에 따른 수직도 변화 예측을 위한 수치해석 결과

나. 와이어와 원형강관이 이루는 각도 변화에 따른 구조안전성 평가

유압 엑츄에이터가 프레임에 배치되어 엑츄에이터의 변위를 제어하여 수직도를 보정하는 리프팅시스템은 여건에 따라 프레임을 적용하지 않고 크레인과 원형강관을 연결하는 와이어 사이에 엑츄에이터를 직접 연결하여 사용이 가능하다. 이때에 와이어와 원형강관 사이의 연결각도에 따른 원형강관의 구조안전성을 평가하였다. 범용구조해석프로그램인 ABAQUS 6.12를 사용하였으며, 4개의 와이어를 사용하여 수직도를 제어하는 시스템을 모사하였다. 와이어와 원형강관사이의 연결각도가 각각 50°, 60°, 75°, 90°가 되는 경우를 고려하였으며, 연결각이 90° 인 경우는 리프팅시스템의 프레임을 사용하는 것으로 생각할 수 있다. 아래 그림과 같이 4가지 case에 대하여 모델을 만들고 경계조건은 와이어 최상부가 병진방향에 대하여 고정되어 있는 것으로 가정하고 각각의 case에 대하여 동일한 하중을 원형강관 하부에 재하하였다.

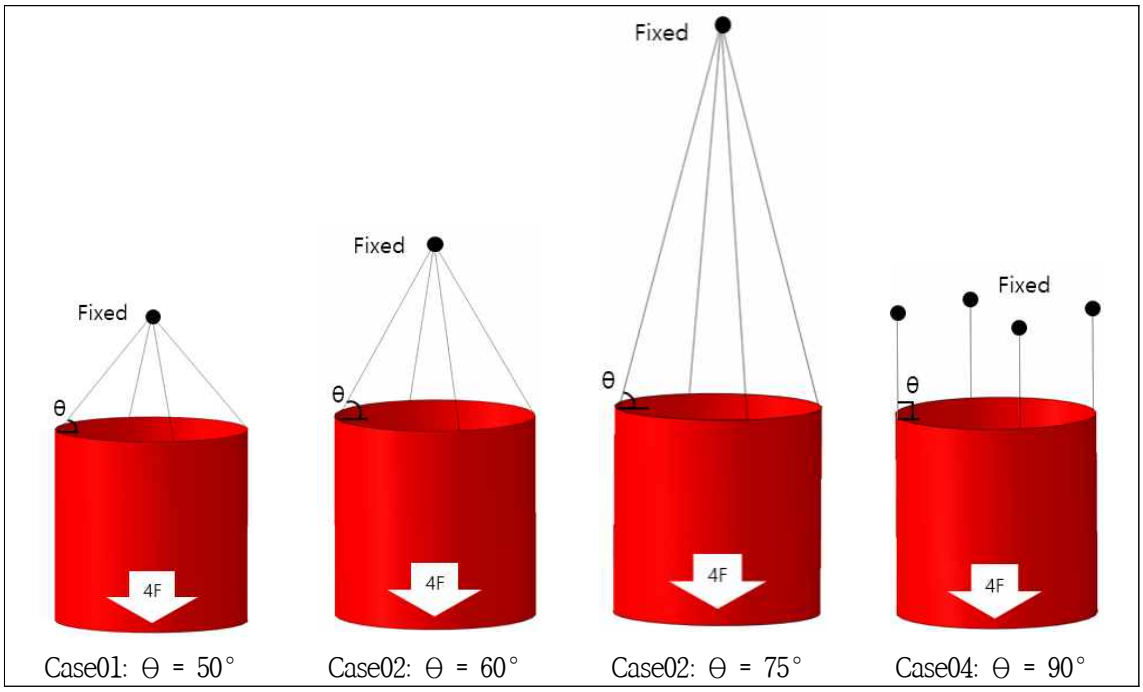


그림 2.36 연결 와이어의 각도에 따른 리프팅시스템 모델

표 2.9 원형강관과 와이어의 연결각도에 따른 연결부의 수직력과 수평력

	Case01	Case02	Case03	Case04
연결 각도	50°	60°	75°	90°
연결부 수직력 F_V	$F \cdot \sin(50°)=0.77F$	$F \cdot \sin(60°)=0.87F$	$F \cdot \sin(75°)=0.97F$	$F \cdot \sin(90°)=F$
연결부 수평력 F_H	$F \cdot \sin(50°)=0.64F$	$F \cdot \sin(60°)=0.50F$	$F \cdot \sin(75°)=0.26F$	$F \cdot \sin(90°)=0$
F = 장력				

각각의 case별 원형강관과 와이어의 연결부에 작용하는 수평력은 연결각도가 감소할수록 증가하며, 그에 따라 연결부에서 발생하는 응력이 증가한다. 이러한 응력의 증가는 원형강관의 변형을 유발할 수 있으며, 이를 해결하기 위해서는 원형강관의 두께를 증가시켜야한다.

원형강관 변형의 발생을 피하기 위해 필요한 최소각도는 원형강관의 두께에 따라 변화하지만 연결각도가 늘어나면 요구되는 와이어의 길이가 길어진다. 와이어의 길이가 증가하면 제어가 어렵고 시스템의 효율성이 떨어진다. 따라서 연결각도와 원형강관의 두께에 대한 제한 범위를 선정하여 범위 내에서 두 인자를 조절할 필요가 있다. 하지만 리프팅시스템의 프레임을 사용하는 경우 수평력 발생 방지가 가능하며, 원형강관과 프레임을 연결하는 와이어의 길이도 감소할 수 있어 프레임을 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

아래에는 4가지 case에 대한 수치해석 결과를 나타내었다. 위에서 언급한 바와 같이 연결부의 각도가 감소함에 따라 수평력이 증가하여 수평발생응력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

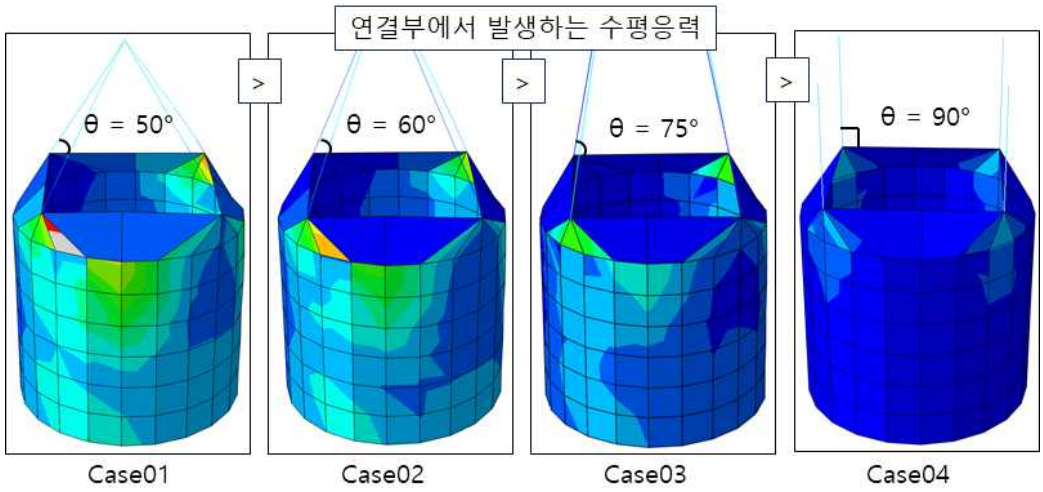


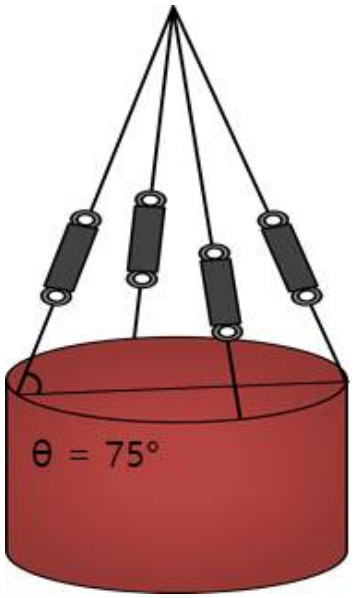
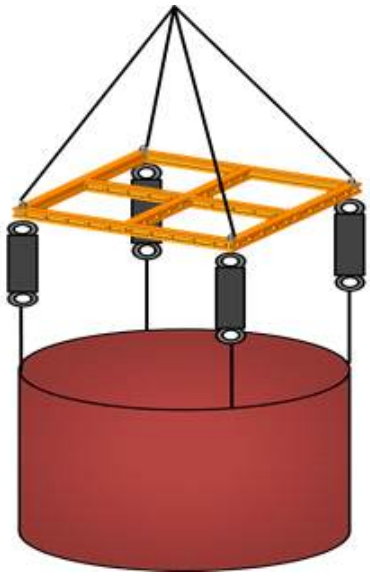
그림 2.37 연결 와이어의 각도에 따른 수치해석 결과

다. 현장실험에서의 리프팅시스템 적용 방안 검토

1) 프레임 유무에 따른 리프팅시스템 구성안

대형 원형강관의 수직도 제어를 위한 리프팅시스템을 아래 그림 구성안 2와 같이 대각선의 길이가 원형강관의 직경과 동일한 사각 프레임에 4기의 엑츄에이터를 배치하여 구성하였다. 그러나 본 현장실험용 원형강관은 직경이 5m로 프레임을 적용하지 않고 크레인과 리프팅케이블을 이용하여 원형강관 설치가 가능하다. 따라서 아래 그림 구성안 1과 같이 4기의 실린더를 와이어에 직접 연결하여 배치하는 리프팅시스템을 구성하였다. 앞서 언급한 바와 같이 리프팅케이블의 길이는 원형강관과 와이어간의 연결부에서 발생하는 수평력의 감소를 위해서 10 m 길이의 와이어를 사용하여 연결각이 75.5° 가 되도록 하였다.

표 2.10 리프팅시스템 구성안

리프팅시스템 구성안 1	리프팅시스템 구성안 2
	

2) 리프팅시스템의 와이어 연결부 구성안

크레인과 원형강관 사이에 수직도 보정 시스템을 적용하기 위하여 사용 가능한 연결방법에는 여러 가지가 있을 수 있다. 와이어와 시스템간의 연결 시에는 연결부에서 발생 가능한 응력집중현상을 해결해야하며, 이는 연결방법에 사용되는 부재와 시스템이 연결되는 부분의 단면적을 조절하여 해결이 가능하다. 앞에서도 언급했던 시스템의 프레임과 와이어의 연결부에 lifting lug 또는 pad eye와 같은 인양고리형태의 부재를 사용 가능하며, 이와 연결되는 와이어 말단 부는 다양한 와이어 슬링 중에서 작업 환경에 따라 사용이 용이한 방법을 선택하여 사용 가능하다.

본 현장실험의 경우 리프팅시스템의 상부 프레임을 사용하지 않고 크레인에서 유압 엑츄에이터를 직접 연결하고, 엑츄에이터 하부에 원형강관을 연결하여 실험이 진행되었다. 이때에 사용되는 연결방법을 아래와 같은 두 가지 안으로 제안하였다. 인양물과 와이어 또는 슬링벨트를 결속, 와이어와 크레인 후크를 결속하는데 사용하는 줄걸이 결속도구인 샤클(Shackle)을 주로 사용하였다. 작용하는 하중에 따라 샤클의 종류를 선택하여 사용가능하며, 샤클과 샤클 사이에는 슬링벨트를 사용하거나 장력계를 설치하고 상하 회전이 자유로운 스위벨(Swivel)을 배치하여 부재들의 꼬임을 방지한다. 1안과 2안은 엑츄에이터를 기점으로 사용되는 연결 부재가 상하 대칭이며, 2안의 경우 현장실험 시 스위벨이 최상부에 위치하고 있어 하부의 장력계 및 엑츄에이터에 사용되는 출력라인 및 전력라인들의 꼬임현상이 발생하기도 하였다. 추후 현장 적용 시에는 스위벨과 외부 데이터출력 및 전력공급라인과의 위치선택을 적절하게 선택할 필요가 있다.

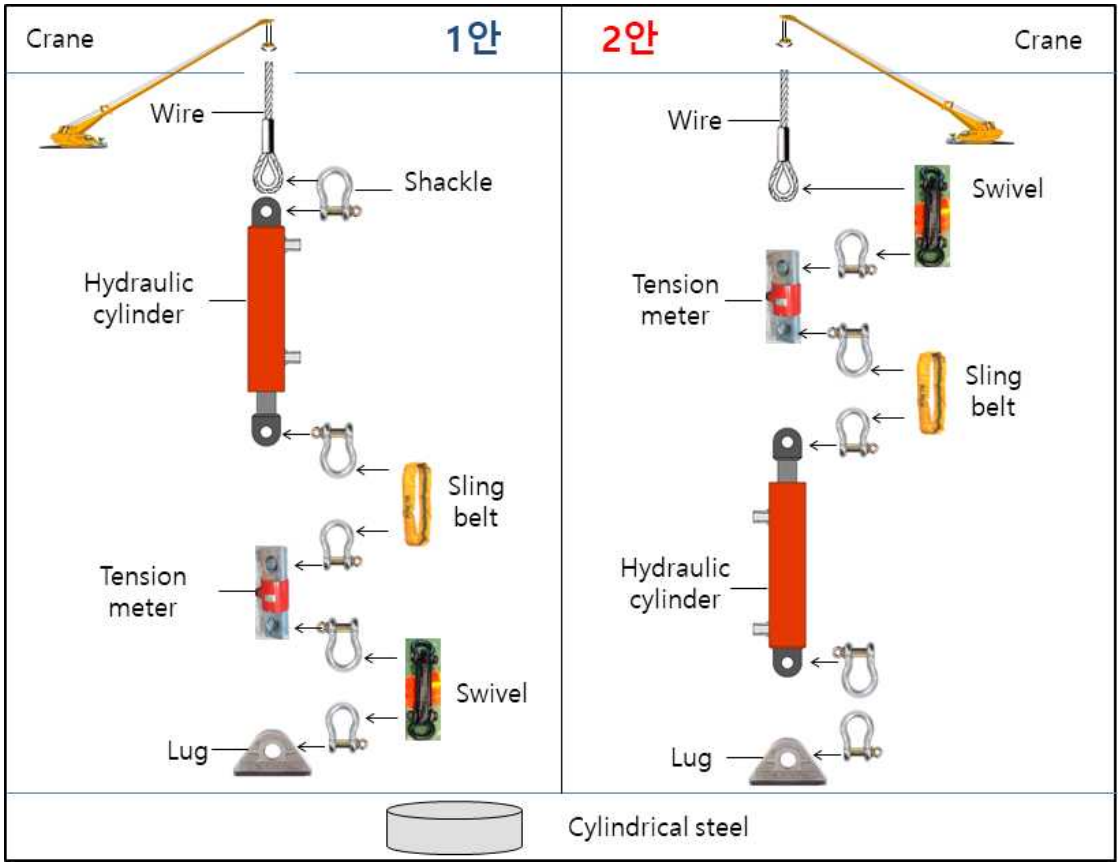


그림 2.38 와이어 연결방법(안)

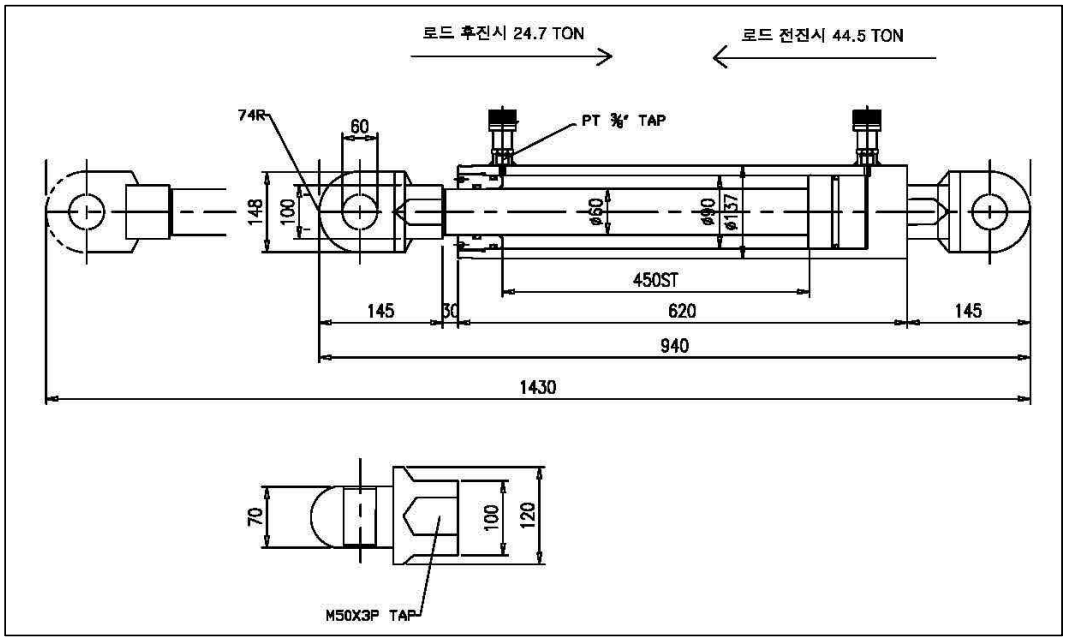
라. 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템 설계 및 제작

1) 유압 엑츄에이터 시스템

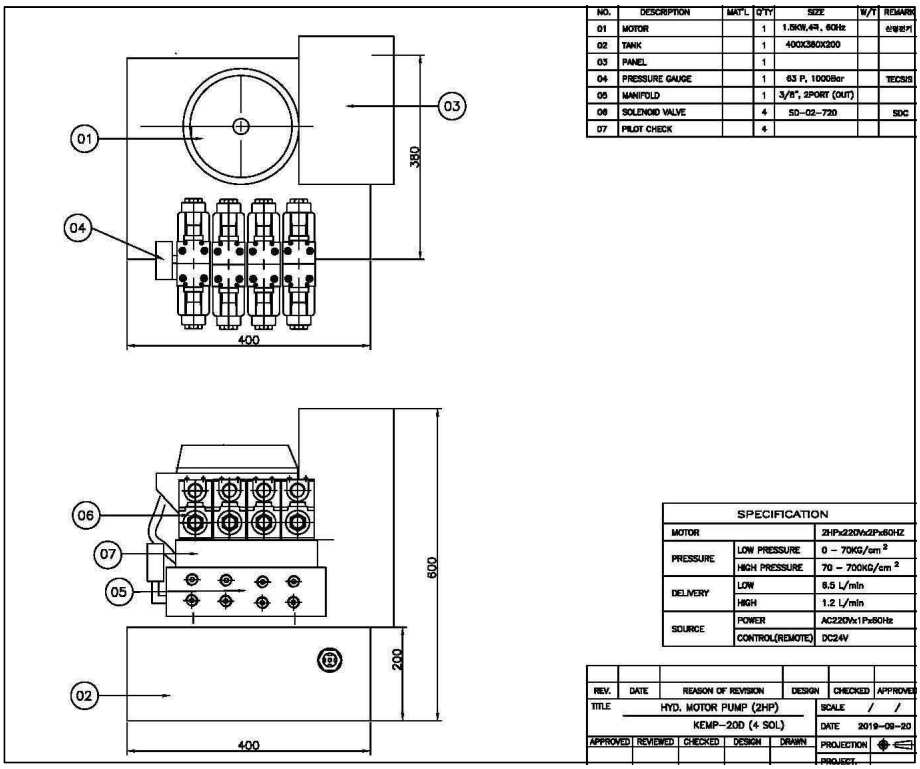
현장실험용 원형강관은 전체 중량이 약 50ton 정도로 설계되었고 인양 및 거치용 리프팅케이블은 네 줄이 연결되는 것으로 계획되어 각 케이블당 하중은 25톤 정도로 설계된 것으로 확인하였다. 본 실험에서의 원형강관은 직경이 5m, 중량도 50톤 정도로 상대적으로 크지 않았기 때문에 가이드프레임을 별도로 적용하지 않았다. 이에 리프팅케이블의 길이조절을 위해 실린더 타입의 유압 엑츄에이터 장착은 케이블에 바로 연결시키는 방식으로 적용하였으며, 케이블의 설계하중과 동일하게 하중조건을 25ton 규격으로 설계하였다. 엑츄에이터의 스트로크는 45cm로 설계하였다. 엑츄에이터 양 끝단에는 와이어 및 원형강관 러그에 연결할 수 있도록 핀 타입으로 설계하였다. 엑츄에이터 구동을 위해 펌프는 2HP을 적용하였고, 펌프에는 sol valve를 설치하여 유압을 조절하여 피스톤 전/후진 작동속도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 현장실험에서의 피스톤 조절속도는 1cm/sec로 설정하였다. 유압 엑츄에이터와 펌프는 호스로 연결하였고, 10,000psi의 규격에 유압이 고르게 전달될 수 있도록 복동타입(엑츄에이터에 호스 2개)으로 적용하였다.

유압 엑츄에이터 피스톤의 전진 및 후진이 버튼식으로 작동하도록 컨트롤러와 패널을 설계하였다. 4개의 엑츄에이터가 하나의 펌프에 연결하도록 되어 있으며, 각 개별 엑츄에

이터가 독립적으로 작동할 수 있도록 설계하였다. 경우에 따라서는 2~4개 엑츄에이터를 동시에 조절하는 것도 가능하도록 설계 · 제작하였다. 유압 엑츄에이터 구동을 위하여 발전기(5kW)를 구성하여 다음 그림과 같이 유압 엑츄에이터 및 구동시스템을 완성하였다.



(a) 유압 엑츄에이터



(b) 유압펌프

그림 2.39 리프팅케이블 길이조절용 유압 엑츄에이터 및 펌프시스템 설계도면

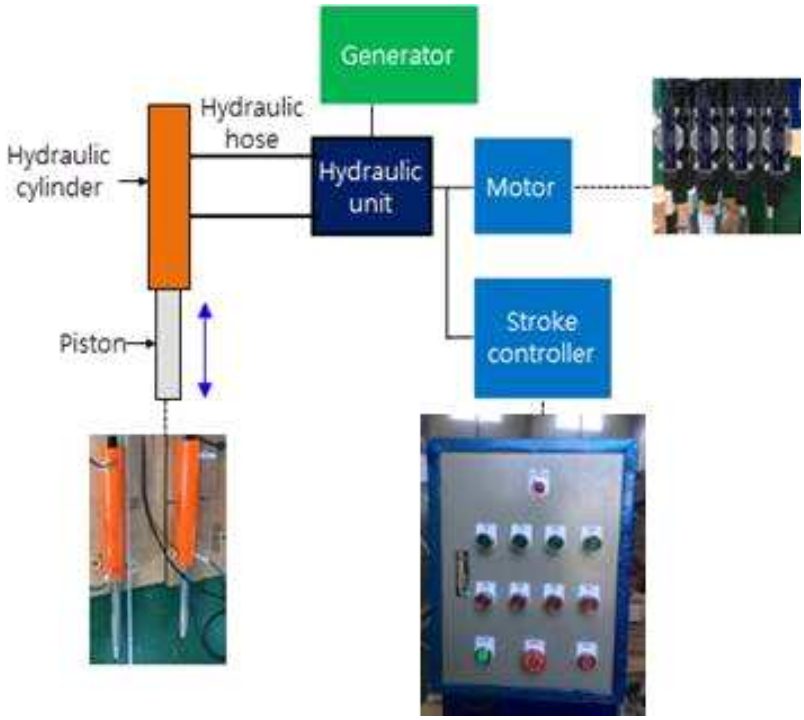


그림 2.40 리프팅케이블 길이조절용 유압 엑츄에이터 구동 시스템

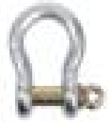
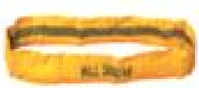
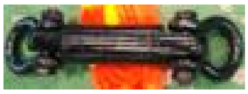
(a) 유압 엑츄에이터 (b) 유압유닛(펌프,컨트롤러) (c) 유압호스

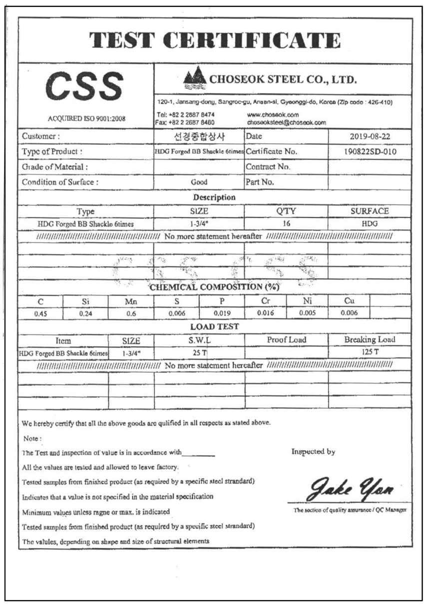
그림 2.41 제작된 유압 엑츄에이터 및 구동 시스템

2) 리프팅케이블 연결

리프팅케이블은 기존 인양시 적용되는 와이어에 엑츄에이터와 장력계(tension meter)로 구성하였다. 와이어/엑츄에이터/장력계 연결부는 검토된 샤클, 슬링벨트, 스위벨을 적용하여 연결함으로써 리프팅 케이블을 구성하였으며, 다음 표와 같이 케이블 하나당 25ton의 하중조건을 감안하여 연결부 각 요소들의 규격을 선정하여 적용하였다.

표 2.11 리프팅케이블 연결부 구성요소

연결부	 샤클	 슬링벨트	 스위벨(swivel)
용도 및 특징	리프팅케이블 구성요소 및 원형강관 연결	샤클/샤클 연결 샤클 곡선부보호 및 꼬임방지	케이블 회전에 의한 꼬임현상 방지
사용하중	25ton	25ton	30ton



TEST CERTIFICATE

CSS
ACQUIRED ISO 9001:2008

CHOSEOK STEEL CO., LTD.
120-1, Jansang-dong, Sangroc-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea (Zip code : 426-410)
Tel: +82 2 2687 8474 Fax: +82 2 2687 8480 www.choseok.com chosеoksteel@choseok.com

Customer :	선경종합상사	Date	2019-08-22
Type of Product :	HDG Forged BB Shackle 6times	Certificate No.	190822SD-010
Grade of Material :		Contract No.	
Condition of Surface :	Good	Part No.	

Description

Type	SIZE	Q'TY	SURFACE
HDG Forged BB Shackle 6times	1-3/4"	16	HDG

////////// No more statement hereafter //////////

CHEMICAL COMPOSITION (%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0.45	0.24	0.6	0.006	0.019	0.016	0.005	0.006

LOAD TEST

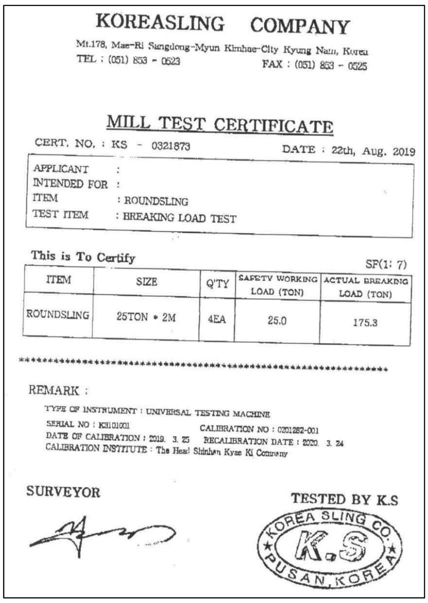
Item	SIZE	S.W.L	Proof Load	Breaking Load
HDG Forged BB Shackle 6times	1-3/4"	25 T		125 T

////////// No more statement hereafter //////////

We hereby certify that all the above goods are qulified in all respects as stated above.
Note :
The Test and inspection of value is in accordance with________
All the values are tested and allowed to leave factory.
Tested samples from finished product (as required by a specific steel strandard)
Indicates that a value is not specified in the material specification
Minimum values unless ragne or max. is indicated
Tested samples from finished product (as required by a specific steel strandard)
The valules, depending on shape and size of structural elements

Inspected by
Jake Yan
The section of quality assurance / QC Manager

(a) 샤클



KOREASLING COMPANY
Mt.178, Mae-Ri Sangdong-Myun Kimhae-City Kyung Nam, Korea
TEL : (051) 853 - 0523 FAX : (051) 853 - 0525

MILL TEST CERTIFICATE

CERT. NO. : KS - 0321873 DATE : 22th, Aug. 2019

APPLICANT :
INTENDED FOR :
ITEM : ROUNDSLING
TEST ITEM : BREAKING LOAD TEST

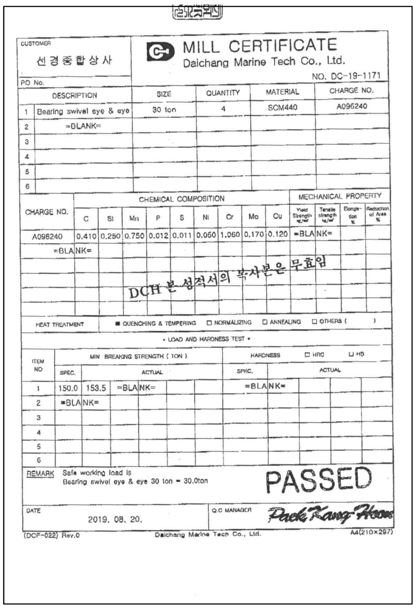
This is To Certify SF(1: 7)

ITEM	SIZE	Q'TY	SAFETY WORKING LOAD (TON)	ACTUAL BREAKING LOAD (TON)
ROUNDSLING	25TON * 2M	4EA	25.0	175.3

REMARK :
TYPE OF INSTRUMENT : UNIVERSAL TESTING MACHINE
SERIAL NO : K3101001 CALIBRATION NO : 0201282-001
DATE OF CALIBRATION : 2019. 3. 25 RECALIBRATION DATE : 2020. 3. 24
CALIBRATION INSTITUTE : The Head Shinhan Kyae Ki Company

SURVEYOR
TESTED BY K.S
KOREA SLING CO. K.S PUSAN, KOREA

(b) 슬링벨트



CUSTOMER 선경종합상사
MILL CERTIFICATE
Daichang Marine Tech Co., Ltd.
NO. DC-19-1171
PO No.

	DESCRIPTION	SIZE	QUANTITY	MATERIAL	CHARGE NO.
1	Bearing swivel eye & eye	30 ton	4	SCM440	A096240
2	=BLANK=				
3					
4					
5					
6					

CHARGE NO.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Yield Strength	Tensile strength	Elongation %	Reduction of Area %
A096240	0.410	0.250	0.750	0.012	0.011	0.050	1.060	0.170	0.120	=BLANK=			
=BLANK=													

DCH 본 성적서의 복사본은 무효임

HEAT TREATMENT ■ QUENCHING & TEMPERING □ NORMALIZING □ ANNEALING □ OTHERS ( )

* LOAD AND HARDNESS TEST *

ITEM NO	MIN BREAKING STRENGTH (TON) SPEC.	ACTUAL			HARDNESS SPEC.	ACTUAL
1	150.0	153.5	=BLANK=		=BLANK=	
2	=BLANK=					
3						
4						
5						
6						

REMARK Safe working load is
Bearing swivel eye & eye 30 ton = 30.0ton
PASSED

DATE 2019. 08. 20. Q.C MANAGER Pack Kang Hoon
(DCF-022) Rev.0 Daichang Marine Tech Co., Ltd. A4(210×297)

(c) swivel

그림 2.42 리프팅케이블 연결부 시험성적서

현장실험을 위해 제작된 4개의 유압 엑츄에이터와 장력계를 연결부 부속재료를 이용하여 길이조절이 가능한 리프팅케이블을 준비하였고 구동시스템에 유압호스를 현장에서 연결하여 현장실험을 위한 수직도 보정용 케이블 길이조절 시스템을 구축하였다.

실험이 진행되기 전에 컨트롤러를 이용하여 각 엑츄에이터의 작동유무를 확인하였으며 엑츄에이터 피스톤의 전진/후진이 컨트롤러 버튼 조작으로 이상없이 작동되는 것을 확인하였다. 2개 엑츄에이터가 동시에 작동되는 것도 확인하여 제작된 엑츄에이터와 컨트롤러 시스템에 이상이 없음을 최종적으로 점검 완료하였다.

(a) 리프팅케이블

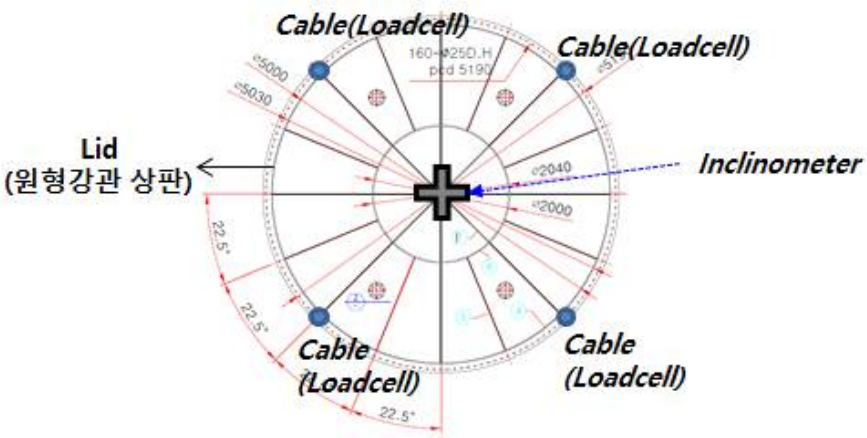
(b) 유압유닛 및 펌프구동용 발전기

그림 2.43 리프팅케이블 개별제어 시스템 시작품

3) 계측

원형강관의 경사를 측정하기 위해 2축 경사계를 적용하였으며 상판 중심부에 설치하였다. 축 방향은 케이블설치 축과 동일하게 적용하는 방법과 케이블 설치위치와 교차되게 적용하는 방법을 검토하였다. 케이블설치 위치와 동일한 방향으로 경사계를 설치할 경우에는 하나의 케이블에 관입력만큼 하중이 집중되어 작용될 수 있어 위험요소가 있다. 그러므로 케이블 설치 위치와 교차되는 방향으로 설치하여 원형강관 지지력을 두 줄의 케이블이 분담할 수 있도록 하였다.

장력계는 리프팅케이블에 연결하여 각 케이블별 장력을 실시간으로 모니터링할 수 있도록 하였고, 용량은 케이블 설계하중과 동일하게 25ton으로 적용되었다.



(a) 계측기기 위치

구 분	장력계(로드셀)	경사계
용 량	25ton	±10 degree (2축)
용 도	리프팅케이블 장력 측정	원형강관 기울기 측정(2축)

(b) 계측기 제원

그림 2.44 케이블 개별제어 기법 적용 수직도보정 현장실험용 계측기

2.3.3 현장실험

가. 실험방법

리프팅케이블 개별 길이조절에 의한 수직도보정은 석션관입 단계에서 적용된다. 따라서 본 현장실험에서는 원형강관 가설공법 설치 공정중에서 원형강관의 자침이 완료된 이후 수직도 보정용 리프팅케이블을 원형강관에 연결한 이후 원형강관을 석션으로 관입시키면서 수직도 보정 실험을 수행하였다.

현장에서 리프팅케이블 개별길이조절 기법을 적용한 원형강관 석션관입중 수직도 보정 실험은 두 차례 실시되었다. 석션관입을 지속하면서 수직도 보정효과를 평가(Test 1)하였으며, 석션관입 후 일부 인발하는 과정을 포함하여 수직도 보정효과를 평가(Test 2)하였다.

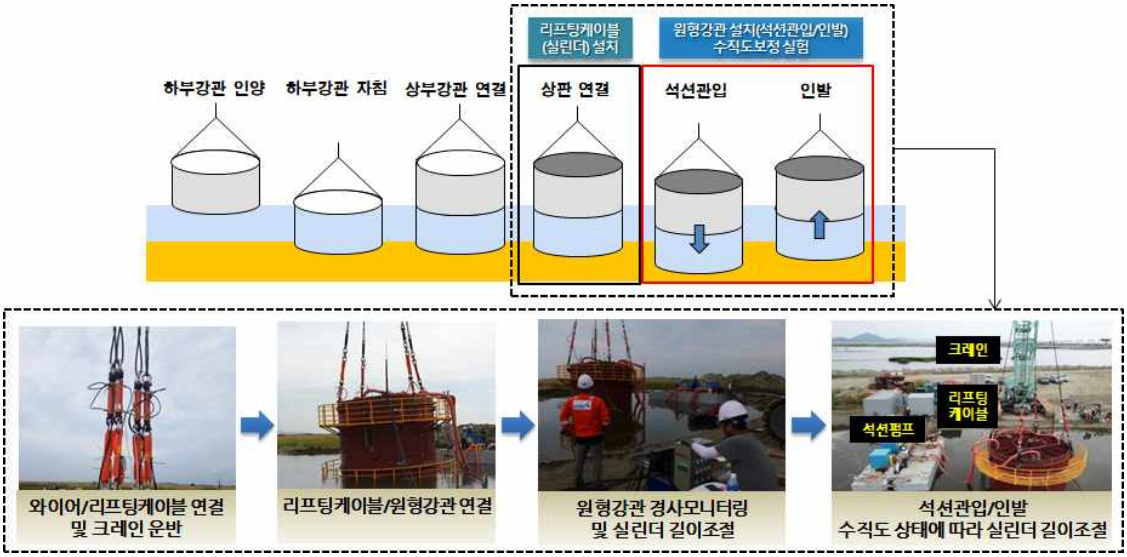


그림 2.45 원형강관 수직도확보 현장실험과정

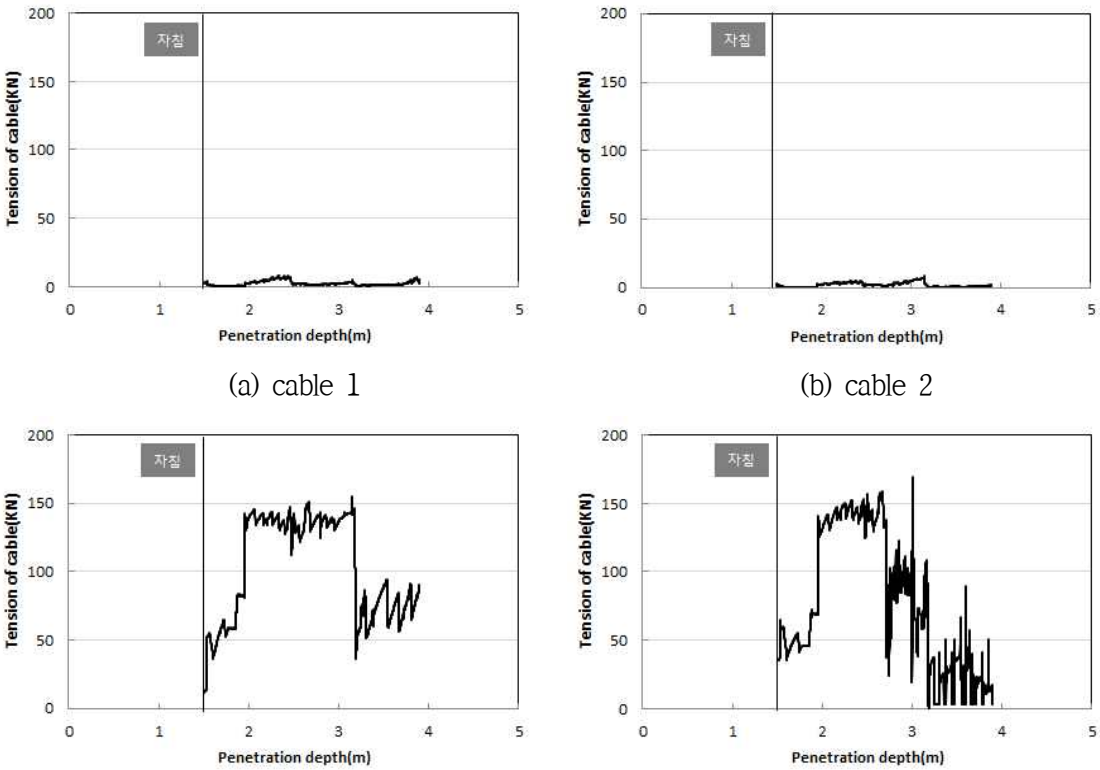
나. 실험결과

1) Test 1

본 실험에서는 원형강관 자침이 완료되면 석션관입이 진행되는 과정에서 케이블 개별 길이조절 기법이 적용되었는데, 석션펌프가 가동되고 일부 관입이 진행된 상태에서 기울어짐에 따른 케이블의 길이를 조절한 경우이다. 관입중 기울어진 위치는 케이블 3과 4사이인 것으로 확인되어 두 줄의 케이블은 원형강관을 지지하고 그 외의 두 줄은 케이블의 길이를 조절하여 장력을 이완하는 방법을 적용하였다.

그림 2.46 원형강관 수직도보정 실험과정 (test 1)

원형강관 관입시 케이블 길이조절에 의한 장력의 차이를 확인하기 위해 각 케이블별 관입깊이에 따른 장력을 다음 그림에 도시하였다. 원형강관이 자중에 의해 관입된 자침량은 약 1.5m로 확인되었다. 케이블 1과 2는 케이블의 길이 조절로 석션관입이 종료될 때까지 길이를 늘려주어 장력을 이완시켰으므로 그 위치에서는 원형강관에 관입력에 대응하는 지지력이 작용되지 않음을 확인하였다. 석션압에 의해 약 2m까지 관입된 경우 별도로 케이블의 길이를 조절하지 않았으나 기울어짐이 발생하여 케이블 3에는 최대 80kN, 4에는 최대 70kN까지 장력이 발현되어 총 150kN까지 원형강관을 지지한 것으로 나타났다. 이는 기울어진 위치가 케이블 3과 4사이에 있음을 알 수 있으며, 기울어짐에 따라 케이블 3과 4에 장력이 점차적으로 발현되는 것으로 나타났다. 관입이 2~3m인 구간에서는 수직도를 보정하기 위해 케이블 3과 4에는 최대 150kN까지 장력이 발현되어, 관입저항력을 제외하고 케이블 지지력만으로 최대 300kN의 지지력이 기울어진 방향에 위치한 두 줄의 케이블에 작용되었다. 관입이 3m부터 최종관입되는(4m) 구간에서는 케이블 3과 4의 장력이 약 0~100kN으로 감소되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 원형강관의 추가관입을 위해 크레인의 지지하중을 감소시켰기 때문이다. 따라서, 케이블 개별조절에 의한 장력의 차이로 편심에 의해 수직도가 보정된 구간은 관입깊이가 2~3m인 구간으로 확인되었다.



(a) cable 1 (b) cable 2

(c) cable 3 (d) cable 4

그림 2.47 케이블 개별 길이조절에 의한 장력발현 및 이완

케이블 개별제어 기법 적용구간과 미적용구간에 대한 원형강관 관입시 수직도와 케이블 지지력을 다음 그림에 도시하였다. 케이블에 의한 원형강관 지지력은 장력이 발현된 케이

블(3번,4번 줄)과 장력이 이완된 케이블(1번,2번 줄)의 합력으로 나타내었다. 자침이 완료되었을 시 경사는 약 2.8° 이었으며, 케이블 개별제어 기법이 적용되지 않은 1.5m~2m관입 구간에서는 더 큰 기울어짐이 발생하여 8.25° 까지 기울어진 것으로 나타났다. 본 상황에서 수직도를 보정하기 위해 케이블 개별 길이조절로 약 200~300kN의 장력의 차이가 발생하도록 하여 5.88° 까지 수직도를 보정할 수 있었다. 약 1m 관입하는 동안 약 2.4° 의 수직도가 보정되었다.

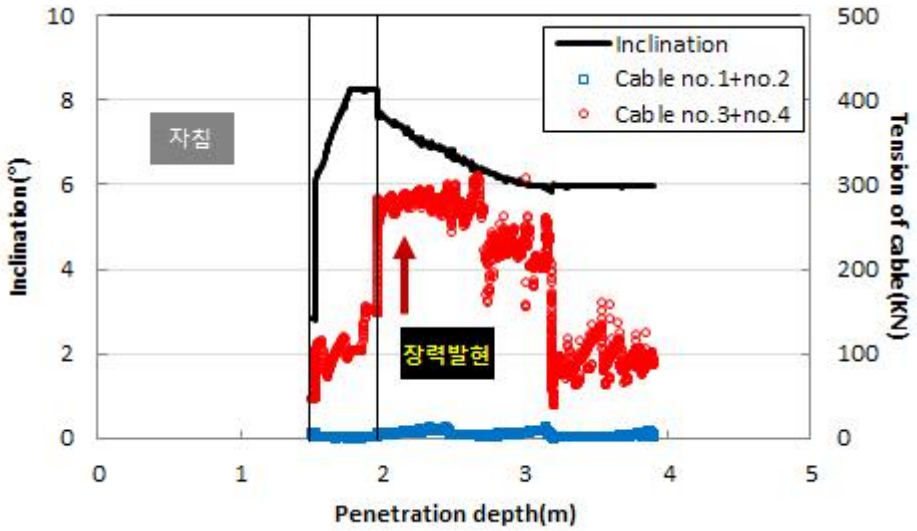


그림 2.48 원형강관 관입에 따른 수직도 및 케이블 지지력

단, 다음 그림과 같이 관입력(석션력+자중-관입저항력)과 케이블에 작용된 합력을 확인해보면 관입력보다 크레인 지지하중 부족으로 케이블 지지효과가 충분히 발휘되지 못한 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 관입되는 과정에서 케이블의 길이 조절을 통해 위치별 케이블 장력의 차이를 유발함으로써 석션관입중에 수직도가 일부 보정되는 효과는 확인하였으나, 크레인의 지지하중이 크지 않아 관입에 대한 저항력이 완전히 발현되지 못하였기 때문에 완전하게 수직도를 확보하는 데에는 어느 정도 한계를 나타내었다. 따라서 관입중 케이블 길이조절에 의한 수직도 보정이 효과적으로 작용되기 위해서는 리프팅 케이블을 지지하는 크레인에서 관입력으로 발생하는 하중을 충분히 지지할 수 있는 용량이 확보될 필요가 있는 것으로 판단된다.

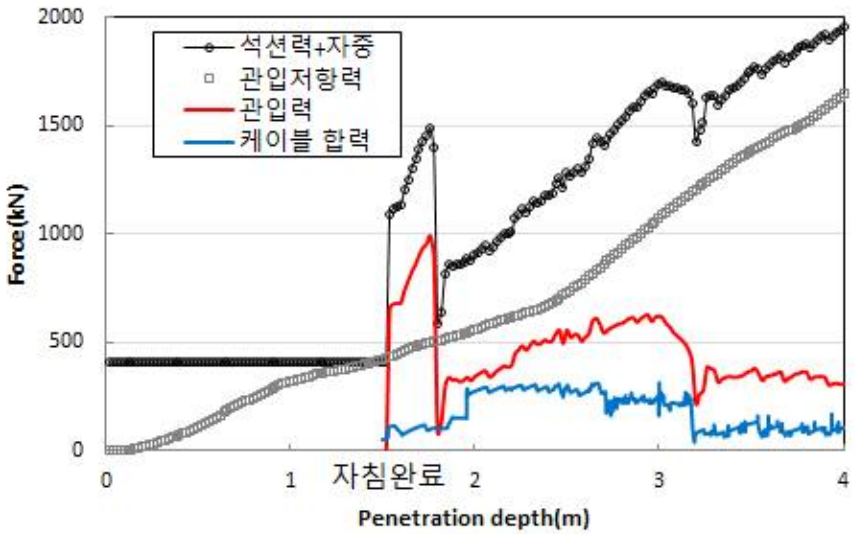


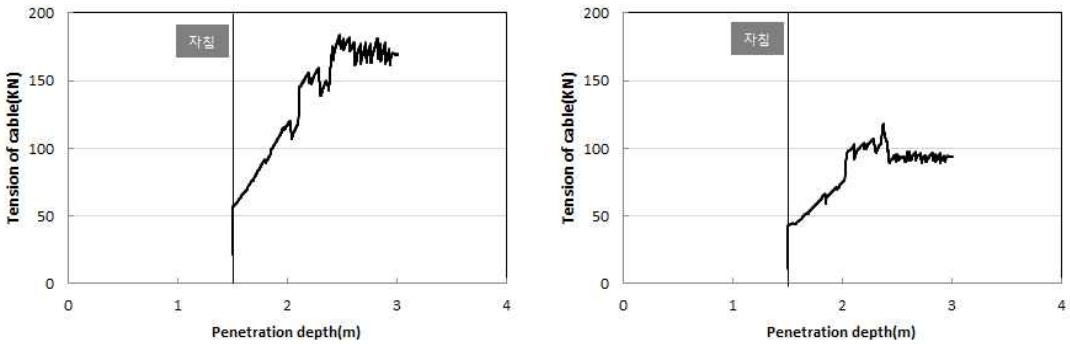
그림 2.49 석션관입시 원형강관에 작용된 하중

2) Test 2

본 실험에서는 test1을 보완하기 위해 석션펌프를 가동하여 관입하는 단계부터 케이블 개별 제어기법을 적용하였으며 케이블이 원형강관을 지지하는 위치에서는 편심에 의한 수직도가 보정될 수 있는 케이블 장력이 발현되도록 하였다. 또한, 관입과정중에 관입을 중단하고 석션인발과정을 추가하여 케이블 개별 제어기법 적용시 수직도 보정 효과를 평가하였다. 자침 완료시 기울어진 위치는 케이블 2,3사이인 것으로 확인되어 석션관입과정에서는 기울어진 위치는 케이블(2번, 3번줄)로 원형강관을 지지하였고 케이블 1,4는 길이조절로 장력을 이완시키는 방법으로 실험을 수행하였다. 석션인발 과정에서는 수직도 상태에 따라 케이블을 개별적으로 조절하였다.

그림 2.50 원형강관 수직도보정 실험과정 (test 2)

원형강관 관입과정에서 기울어진 위치에서의 장력이 발현된 케이블 2,3을 아래 그림에 나타내었다. 자침량은 test1과 동일하게 약 1.5m인 것으로 확인되었다. 석션압에 의해 약 2.5m까지 관입되는 구간에서는 케이블 2,3의 장력이 증가됨을 확인하였으며, 2.5m~3m 구간은 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 케이블 장력은 2번 줄의 경우 최대 180kN, 3번 줄은 최대 110kN까지 발현되었다.



(a) cable 2 (b) cable 3

그림 2.51 기울어진 위치에서의 케이블 장력

원형강관 석션관입시 수직도와 케이블의 장력을 다음 그림에 나타내었다. 케이블의 원형강관 지지력은 기울어진 위치에서 장력이 발현되는 케이블 2,3의 합력과 케이블 길이조절로 장력이 이완된 케이블 1,4의 합력으로 표현하였다. 1.5m에서 2.5m관입이 될 때까지 케이블 개별 조절에 의해 기울어진 위치의 케이블(2,3번)과 반대편의 케이블(1,4번)의 장력의 차이가 점차적으로 커지는 것을 확인하였다. 이로 인하여 원형강관의 수직도가 약 2.04° 에서 1.79° 로 보정되었다. 관입이 2.5m~3m인 구간에서는 케이블 제어에 의해 1.79° 의 수직도를 유지하는 수준으로 나타났다. 석션으로 원형강관이 1.5m 관입되는 동안 케이블 개별제어에 의해 약 0.25° 의 수직도를 보정할 수 있었다.

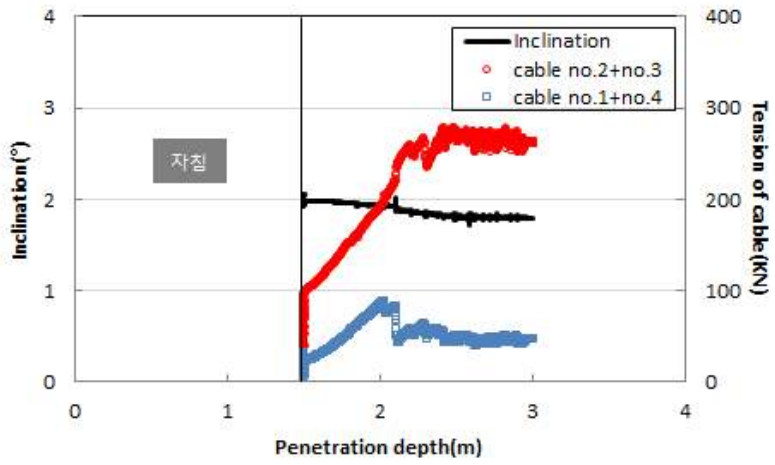
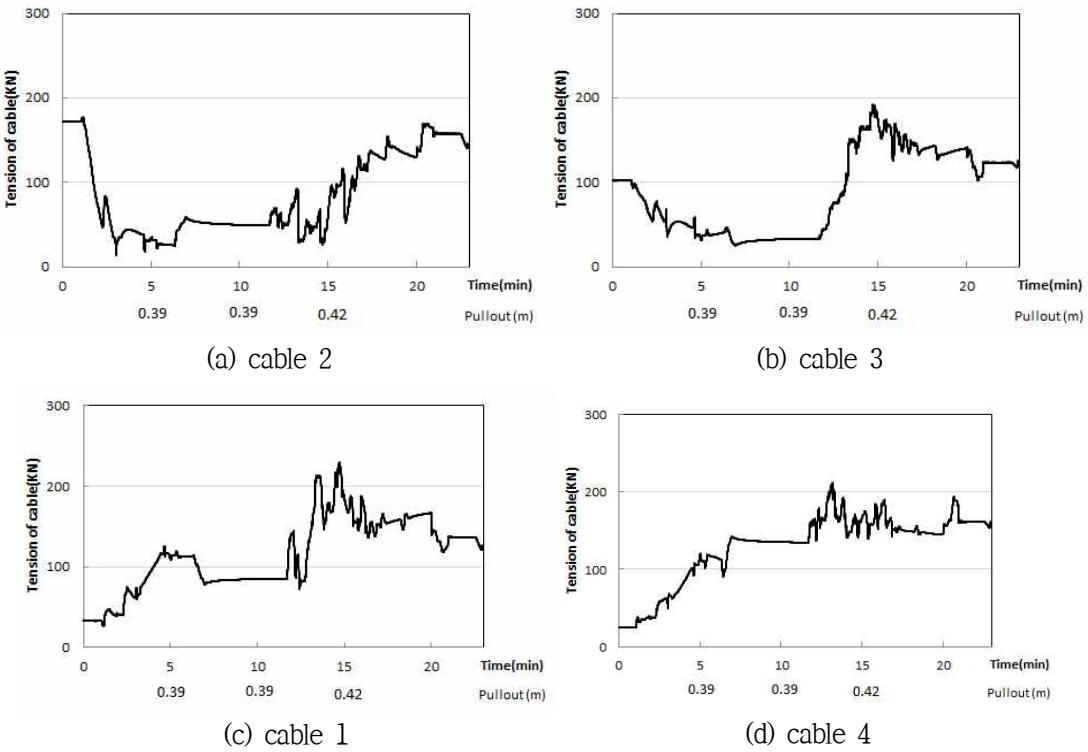


그림 2.52 원형강관 관입과정에서의 수직도 및 케이블 지지력

관입단계에서의 케이블 개별 제어기법에 의한 수직도 보정이 가능함을 확인한 후 석션 관입과 반대로 원형강관 내부에 물을 채워 인발할 경우 케이블 제어 실험을 수행하였다. 케이블 길이조절은 기울어진 축을 기준으로 하여 케이블 2,3과 1,4에 대해 2줄씩 동시 조절하였다. 석션인발시 각 케이블별 장력을 다음 그림에 도시하였다. 약 0.4m 인발되는 동안 케이블 2,3에는 길이조절에 의해 케이블 1,4에 비해 장력이 상대적으로 작게 작용되는 것을 확인할 수 있다.



(a) cable 2 (b) cable 3

(c) cable 1 (d) cable 4

그림 2.53 석션인발시 각 케이블의 장력

원형강관 석션인발시 케이블 길이조절에 의한 수직도와 케이블 장력을 다음 그림에 나타내었다. 초기 인발시(0~3min) 장력의 차이로 수직도가 보정되었지만, 보정되어야 할 기울기보다 석션인발이 더 적용되어 반대편으로 기울어짐이 발생되었다. 본 경우에 대해서 케이블 2,3은 케이블 1,4에 비해 상대적으로 장력을 감소시켜주어 수직도 보정이 가능하였다. 최종적으로 수직도는 약 1.79° 에서 0.38° 이었으며, 원형강관을 0.4m 인발하는 동안 약 1.4° 의 수직도를 보정하여 0.4도 이내의 수직도를 확보할 수 있었다. 관입력과 반대로 케이블 지지력과 동일한 상향의 인발력이 작용되어 장력의 차이가 관입과 비슷한 수준에서 석션인발시 수직도 보정 효과가 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

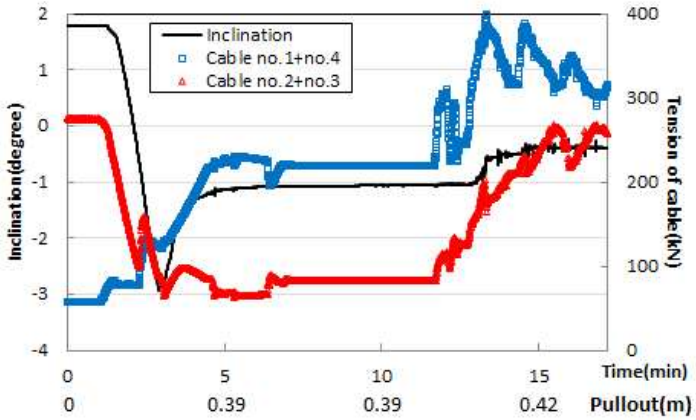


그림 2.54 원형강관 석션인발 과정에서의 수직도 및 케이블 지지력

3) 실험결과 요약

실험결과 석션관입시 케이블 길이조절로 장력의 차이에 의한 원형강관의 편심을 작용시켜 수직도 보정이 가능하였다. 리프팅케이블 개별제어 기법으로 위치별로 장력의 차이가 동일한 경우 인발과정에서 케이블 지지력과 동일한 상향의 인발력이 작용되어 하향의 관입력이 작용되는 관입과정보다 상대적으로 수직도 보정이 용이하였다. 그러므로 석션관입과정에서 인발과정을 병행하면 효과적이고 정확한 수직도 확보가 가능할 것으로 판단된다. 상기 결과를 바탕으로 원형강관 석션관입/인발시 본 연구에서 고안한 케이블 개별 조정이 가능한 리프팅시스템이 원형강관 편심 유도로 정확한 수직도확보에 효과적으로 사용 가능할 것으로 판단된다.

표 2.12 원형강관 수직도보정 파일럿 테스트 결과

구 분	Test 1 석션관입	Test 2	
		석션관입	석션인발
원형강관 수직도(°)	8.2 → 5.8 (약 2.4° 보정)	2.1 → 1.8 (약 0.3° 보정)	1.8 → 0.4 (약 1.4° 보정)
관입진행 깊이(m)	1.0m	1.5m	-0.4m (-는 인발을 나타냄)

2.4 케이블 개별조절 리프팅시스템 설계

2.4.1 개요

본 연구에서는 직경 20m급 대형 원형강관의 수직도 확보에 적용될 수 있는 리프팅케이블 개별제어 시스템을 설계하였다. 리프팅케이블에는 케이블의 길이를 개별조절하는 엑츄에이터와 와이어가 있으며, 프레임으로 구성되어 있다. 컨셉은 아래 그림과 같으며 사각 프레임 모서리에 엑츄에이터 4개를 설치하여 원형강관 수직도 상태에 따라 엑츄에이터의 피스톤을 조절하여 개별 길이 조정에 따라 수직도를 보정할 수 있도록 되어 있다.

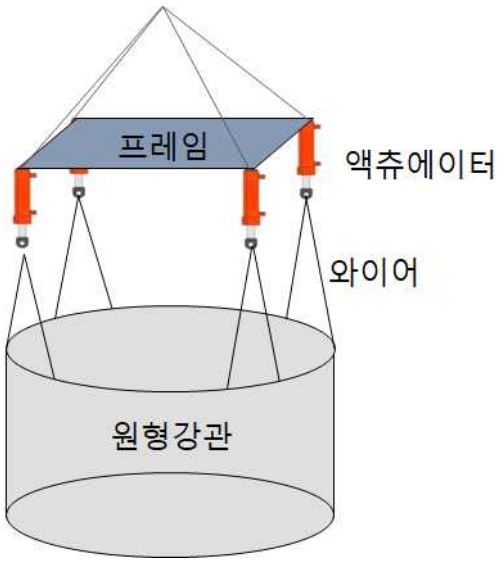


그림 2.55 리프팅시스템 개념도

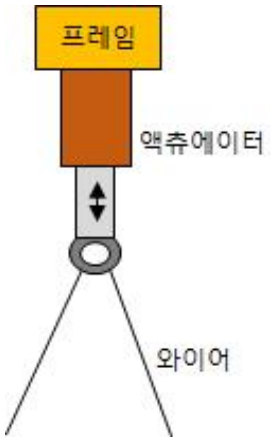


그림 2.56 리프팅케이블 개념도

리프팅케이블 개별제어 시스템 설계를 위한 절차는 아래 그림과 같이 ① 엑츄에이터와 메인 프레임 설계, ② 수치해석을 통한 구조안정성 검토, ③ 메인 프레임, 엑츄에이터, 와이어 연결부 설계 순으로 진행하였다. 최종적으로는 요소별 설계도면과 리프팅시스템 설계(안)에 대해 제시하였다.

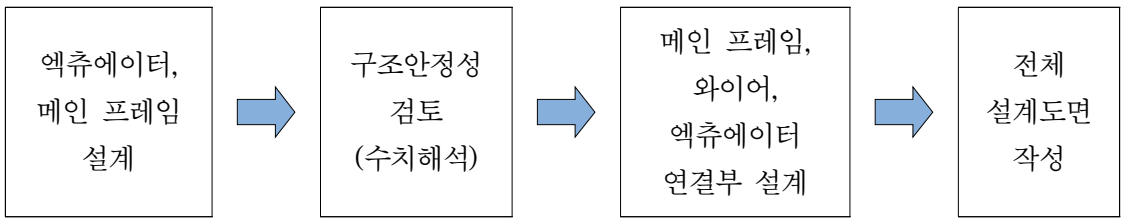


그림 2.57 리프팅시스템 설계 절차

2.4.2 케이블 개별조절 유압 엑츄에이터 설계

가. 설계조건

리프팅케이블 길이조절에 대해서는 케이블에 유압 엑츄에이터을 적용하는 것으로 정하였으며, 케이블별 엑츄에이터에 개별조절이 가능하도록 유압시스템으로 구성하였다.

엑츄에이터 설계시 고려사항 및 조건은 다음과 같다.

- 첫 번째로는 목표로한 수직도를 보정하기 위한 스트로크가 설정되어야 한다. 케이블 개별제어 기법을 적용하여 수직도를 보정하는 경우 기울어짐이 커질수록 기울어진 부분과 반대편 부분의 주면마찰력 편차가 크므로 수직도 보정이 용이하지 않다. 따라서 3° 이상 기울어질 경우에는 기존에 적용되고 있는 크레인을 이용하여 원형강관을 인발하여 재거치하여 석션관입 방법을 적용하고, 3° 이내 기울어진 조건에서만 케이블 개별제어 기법을 적용하도록 가정하였다. 직경이 20m이고 기울기가 3° 이면 높이차가 약 80cm가 되므로 이를 엑츄에이터 스트로크로 정하였다.
- 두 번째로는 원형강관의 무게를 엑츄에이터가 지지할 수 있도록 설계되어야 한다. 원형강관의 무게는 본 과제의 테스트베드에 적용된 원형강관을 기준으로 정하였다. 직경은 20m이고 높이는 14m로 강관으로 제작되었으며 무게는 약 350ton이다. 원형강관 기울어진 방향이 케이블 설치 위치와 동일한 경우 케이블 한줄이 원형강관의 무게를 지지하여야 한다. 또한, 케이블 두줄 사이에서 원형강관이 기울어지면 케이블 한줄이 지지하는 하중은 원형강관 무게의 1/2으로 175ton을 지지할 수 있는 엑츄에이터 설계가 되어야 한다. 두 조건하에서 스트로크가 80cm인 경우에 대해 엑츄에이터 제원을 다음 표에 나타내었다. 하나의 엑츄에이터가 350ton의 원형강관을 지지하도록 설계할 경우 직경이 60cm으로 동일한 무게를 지지하는 와이어의 경우 직경이 8~9cm로서 6~8배 차이를 보인다. 엑츄에이터를 200ton으로 설계하는 경우 직경이 약 33cm로서 350ton에 비해 약 45% 작은 직경으로 설계할 수 있으며, 무게 또한 약 44% 감소가 가능한 것으로 파악되었다. 350ton으로 엑츄에이터를 설계하게 되면 크기 및 무게가 과대해지므로 비효율적이다. 본 연구에서 엑츄에이터가 지지하는 하중조건은 케이블 두줄이 원형강관을 지지하도록 하는 조건으로 안전율을 고려하여 200ton으로 정하여 설계하였다.

표 2.13 엑츄에이터 제원 비교

구 분	설계하중조건	크기(mm)	무게 (kg)
케이블 두줄로 원형강관을 지지하는 경우	200 TON	직경(D): 327	900
		실린더길이(L): 1,200	
케이블 한줄로 원형강관을 지지하는 경우	350 TON	직경(D): 600	1,600
		실린더길이(L): 1,650	

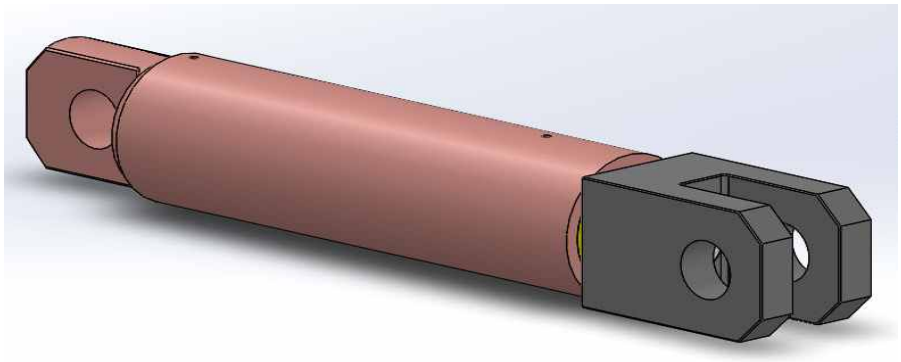
* 실린더 길이는 연결부가 포함되지 않은 치수임

나. 엑츄에이터 구조해석

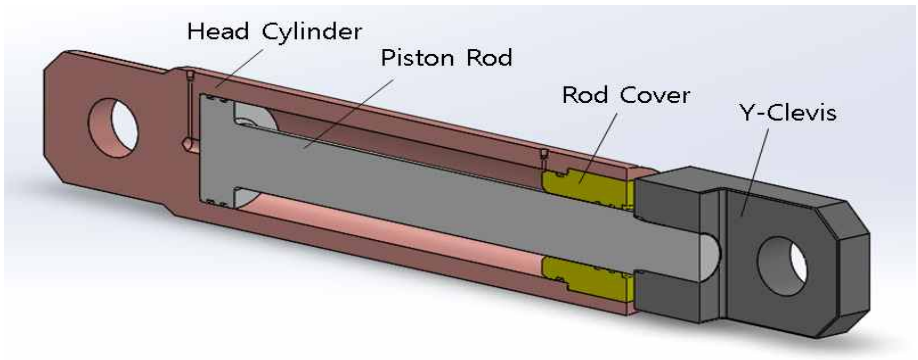
엑츄에이터의 구조안정성을 검토하기 위해 설계단면에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 3차원 유한요소해석 프로그램인 SolidWorks를 사용하였다. 우선적으로 엑츄에이터를 구성하는 Head Cylinder와 프레임 및 케이블(와이어)와 연결하기 위한 연결부에 대해 각각 수치해석을 수행하여 변위와 응력을 검토하였고, 최종적으로 검토된 부품들을 결합하여 완성된 엑츄에이터를 모델링하여 수치해석을 통해 구해진 응력, 변위, 안전율을 검토하여 구조안정성을 평가하였다.

1) 엑츄에이터 구성요소 및 연결부 형상 선정

엑츄에이터를 구성하는 요소들은 다음 그림과 같으며 실린더와 피스톤, 유압이 누유되지 않도록 하기 위해 로드 커버가 있으며, 양 끝 핀타입 형태의 연결부가 있다. 피스톤하부 요크에는 실린더에 비해 피스톤의 직경이 작아 상대적으로 응력이 집중될 수 있으므로 하중을 충분히 견딜수 있도록 Y 형태의 핀 타입으로 선정하였다. 실린더 내부에는 일반적으로 상용되는 유압 엑츄에이터와 동일하게 피스톤로드, 유압 챔버, 누유가 되지 않도록 하기 위해 롯드커버로 구성되어 있다.



(a) 엑츄에이터 형상



(b) 엑츄에이터 구성요소

그림 2.58 엑츄에이터 설계 개념도

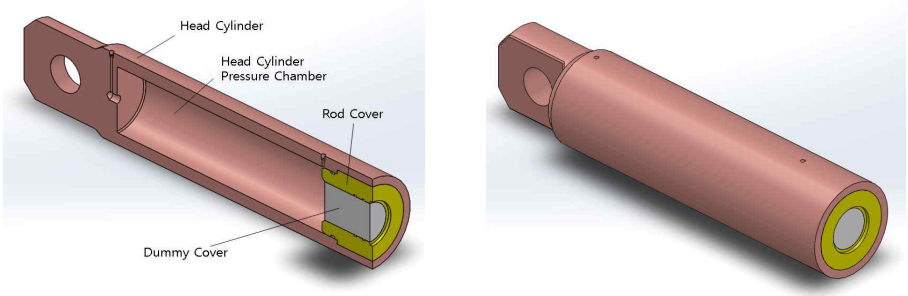
엑츄에이터의 주요 부품들 재질은 실린더 내 부식방지를 위해 SCM440과 S45C를 사용하며, 물성치는 다음 표와 같다.

표 2.14 주요 부품별 물성치

재질명	SCM440	S45C
주요 부품	Head cylinder Piston road	Road cover Y-clevis
탄성계수 [GPa]	205	210
밀도 [kg/m^3]	7850	8030
포아송비	0.283	0.30
항복강도 [MPa]	834	490
인장강도 [MPa]	981	686

2) Head Cylinder

엑츄에이터를 구성하는 요소들 중에서 유압의 영향을 가장 많이 받는 엑츄에이터 바디의 구조안정성을 평가하였다. 실린더 내부에는 유압챔버가 있으며, 챔버내의 압력을 형성하기 위한 Dummy cover로 구성되어 있다. 실린더의 규격은 스트로크가 80cm로서 피스톤이 외부로 분리되는 것을 방지하기 위해 바디길이를 1.2m로 하였으며, 유압을 전달시 피스톤 바디에 구조적 성능에 영향이 없도록 두께를 2~4cm로 변화하여 해석을 수행하였다. 실린더 튜브가 유압 챔버내에 압력이 700Bar(200ton)가 작용되었을 때 응력, 변위를 검토하였다.



(a) 단면도 (b) 3D 모델링

그림 2.59 엑츄에이터 몸체부 3D 수치해석 모델링

구조해석을 수행하기 위한 Head Cylinder의 격자계는 아래의 그림과 같다. 해석 해의 정확도를 확보하고 수렴성을 보장하기 위하여 해석 대상물의 형태에 따라 사면체와 육면체 요소를 사용하였다.

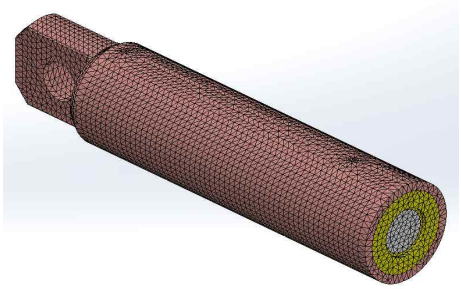
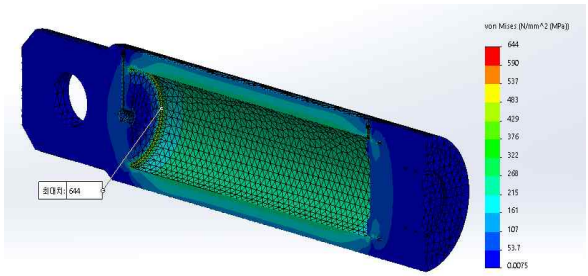
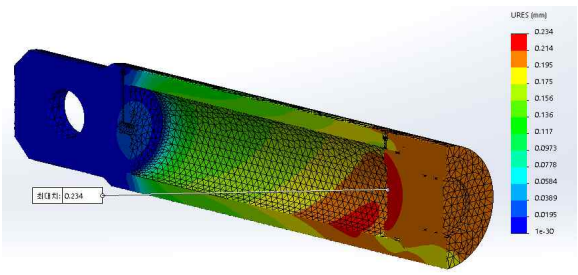


그림 2.60 구조해석을 위한 격자망

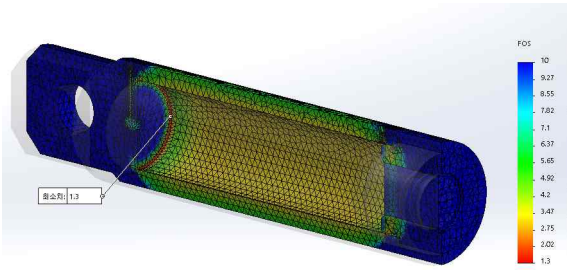
수치해석 결과 실린더 바디의 두께를 2cm, 3cm로 적용할 경우 안정성이 확보되지 않아 다음 그림과 같이 4cm로 적용한 경우에 대한 수치해석 결과를 나타내었다. 실린더에서 구조적으로 가장 취약한 부분은 헤드 챔버측의 튜브 내경면과 헤드 유압면이 만나는 곡률부로 확인되었다. 안전율은 1.3으로 허용설계기준을 만족하는 것으로 나타났다.



(a) 응력분포도



(b) 변위분포도

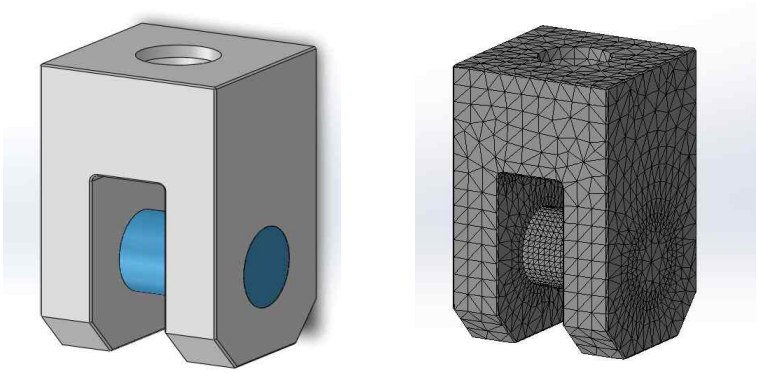


(c) 안전율 분포도

그림 2.61 700Bar(200ton) 유압 작용시 수치해석 결과

3) Y-Clevis 연결부

실린더를 구성하는 부품들 중에서 하중 영향을 가장 많이 받는 Y-Clevis & Pin의 구조적 건전성을 확인하기 위하여, Pin에 각 조건별 하중이 부가 되었을 때의 응력, 변위 분포와 설계 안전율 분포를 검토하였다. 해석의 대상물은 그림처럼 Y타입 Clevis와 Pin으로 구성되어 있다. Pin에 하중이 조건별 부가될 때 응력, 변위 그리고 설계 안전율을 검토하였다. 격자망은 해석 해의 정확도를 확보하고 수렴성을 보장하기 위하여 해석 대상물의 형태에 따라 사면체와 육면체 요소를 사용하였다.



(a) 3D 모델링 (b) 격자망

그림 2.62 수치해석을 위한 3D 모델링 격자망

구조 안전도 확인을 위한 해석조건은 실린더 튜브내 압력을 보장하기 위하여 로드커버 내경부에 더미로 커버를 설치하고 로드 커버와 본드를 결합한 조건으로 하였다.

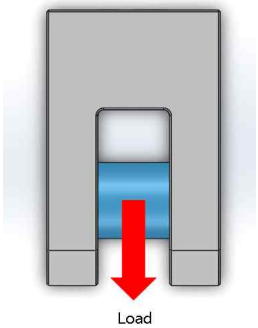
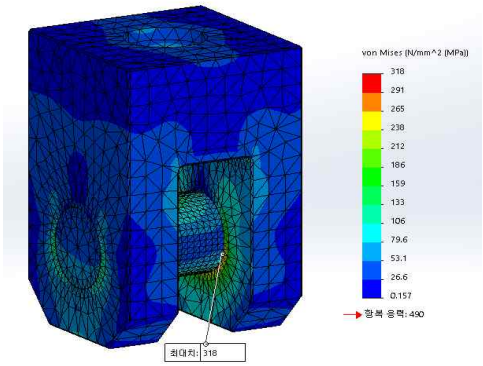
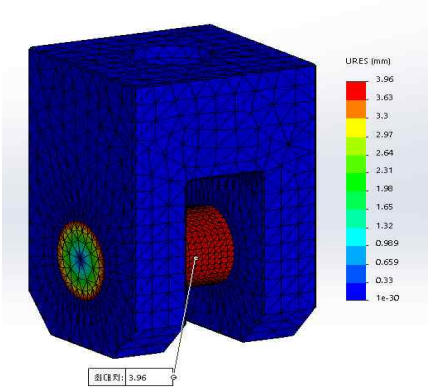


그림 2.63 수치해석 조건

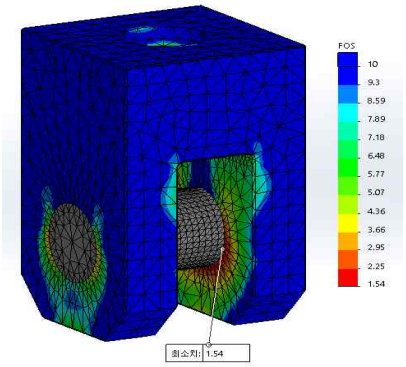
Y-Clevis의 수치해석을 수행하여 구해진 응력,변위,안전율 분포도를 다음 그림에 나타내었다. 구조적으로 취약한 부분은 Pin과 Clevis 내측면이 만나는 위치인 것으로 확인되었다. 설계 안전율은 1.5로 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.



(a) 응력분포도



(b) 변위분포도



(c) 안전율분포도

그림 2.64 엑츄에이터 하단 연결부(Y-Clevis) 수치해석 결과

4) 엑츄에이터

앞 절에서 검토된 부분별 해석 결과를 토대로 다음 그림과 같이 엑츄에이터를 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 엑츄에이터에 작용되는 롯드챔버내의 압력에 따른 하중은 다음 표와 같다.

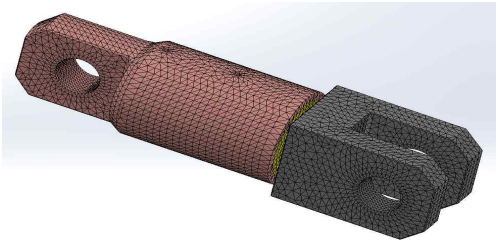


그림 2.65 엑츄에이터 모델링 격자망

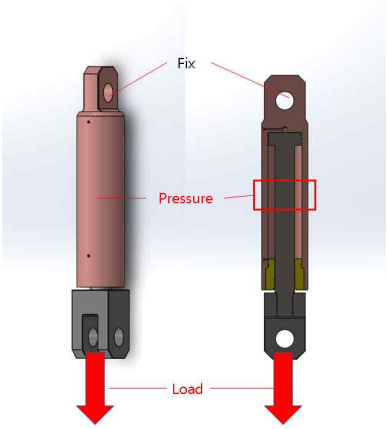
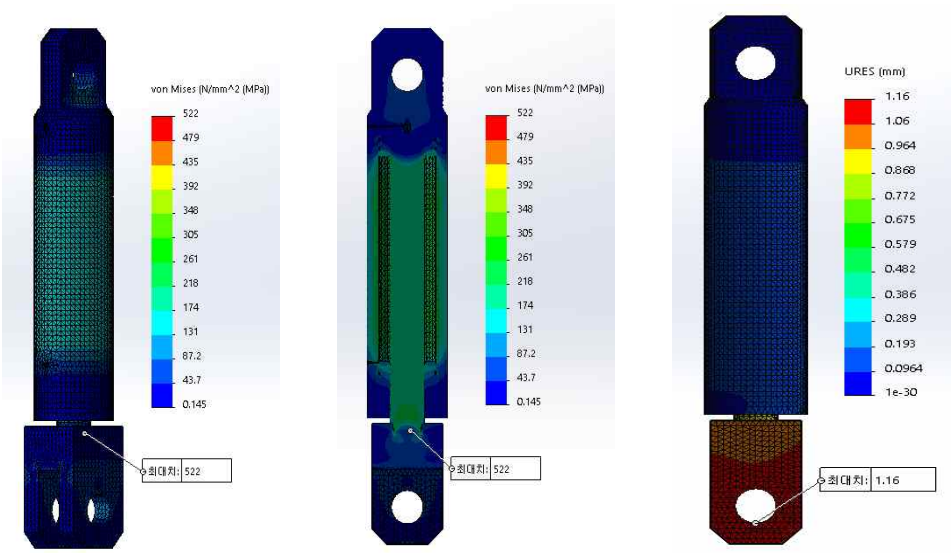


그림 2.66 수치해석을 위한 하중조건 개념도

표 2.15 엑츄에이터 압력에 따른 지지하중

구 분			압력별 지지가능한 하중
	Diameter	수압면적	700 Bar
실린더	240 mm	452.39 Cm2	317 Ton
피스톤 롯드	140 mm	153.94 Cm2	209 Ton

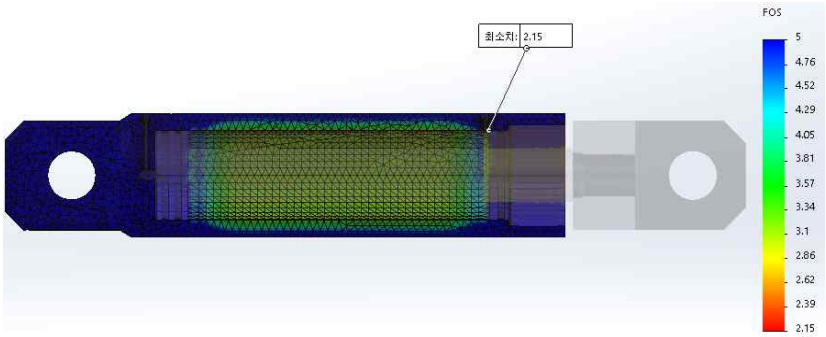
엑츄에이터에 200ton이 작용되었을 경우에 대한 수치해석 결과를 다음 그림에 나타내었다. Head Cylinder에는 로드챔버 유압유 포트에 가장 높은 응력이 작용되었으며, Piston Rod는 피스톤과 로드의 Neck부와 Rod 종단의 클레비스 연결부 Neck에 가장 높은 응력이 발생되었다. Rod Cover에는 로드 챔버내 유압부, Y-Clevis는 Piston Rod와 체결되는 나사 진입부에 가장 높은 응력이 발생되는 것으로 나타났다.



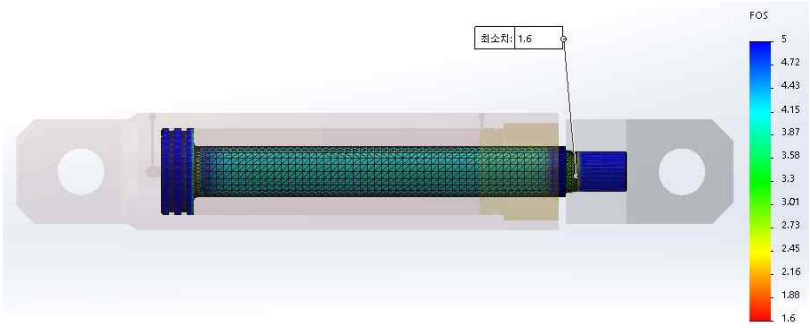
(a) 응력분포도 (b) 응력분포도(단면) (c) 변형율분포도

(d) 전체 안전율 분포도

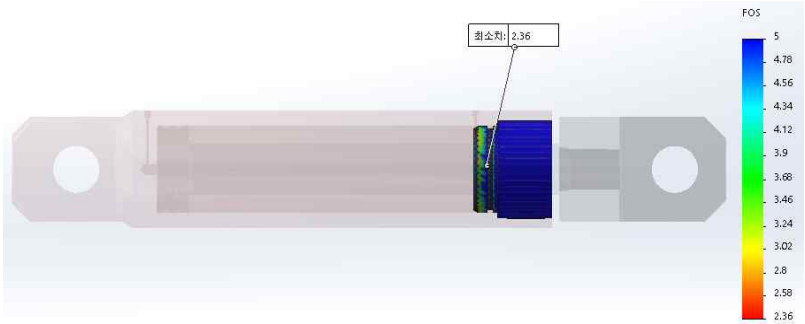
그림 2.67 엑츄에이터 수치해석 결과



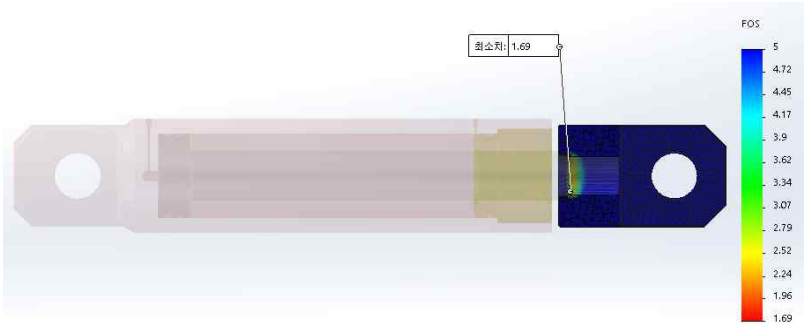
(e) 헤드 실린더 안전율 분포도



(f) 피스톤 로드 안전율 분포도



(g) 로드 커버 안전율 분포도



(h) Y-클레비스 안전율 분포도

그림 2.67 엑츄에이터 수치해석 결과(계속)

해석결과에 의해 도출된 부품별 안전율은 다음 표와 같다. 구조해석 수행시 안전율이 1.5~2.0이라면 설계적으로 안전하나 설계자의 판단에 따라 결정하게 되며, 안전율이 2이상

이면 구조적으로 충분히 안전하다고 판단하는 것이 일반적이다. 본 해석 결과에 의하면 피스톤 로드와 Y-Clevis에서 안전율이 각각 1.6, 1.7으로 나타났는데, 리프팅케이블 개별제어 시 상시조건이 아닌 수직도 보정을 위해 단시간에 두 줄의 케이블에 200ton의 하중이 작용되는 조건이므로 설계적으로 안전하다고 판단된다.

표 2.16 엑츄에이터 구성요소별 안전율

Part Name	Material	200Ton (700Bar)
Head Cylinder	SCM440	2.15
Piston Rod	SCM440	1.60
Rod Cover	S45C	2.36
Y-Clevis	S45C	1.69

수치해석을 통해 구조적 안정성이 확보된 엑츄에이터 설계도를 다음 그림에 나타내었다. 길이는 피스톤 로드 위치에 따라 2~2.8m가 되며 총 무게는 약 900kg이다. 상부에는 샤클핀을 결속하여 프레임과 연결되도록 하였고, 하부 Y-Clevis에는 핀을 결속하여 고리형태의 와이어를 연결할 수 있다.

· 엑츄에이터 설계도 및 구성요소

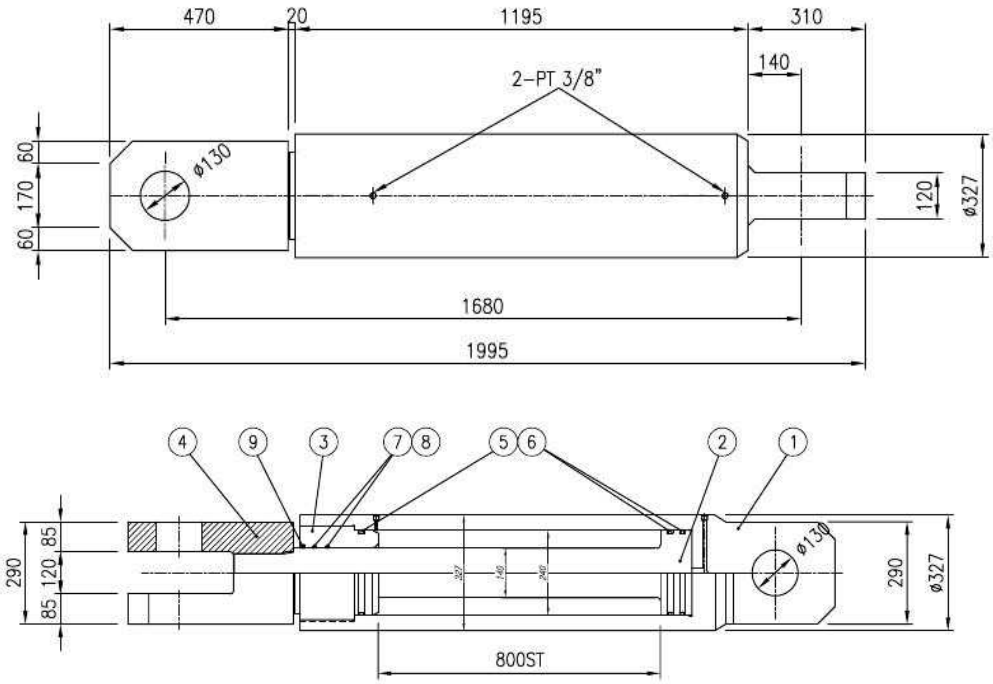


그림 2.68 엑츄에이터 설계도

표 2.17 엑츄에이터 구성요소

No.	구성품	수량	재질	비고
1	Head Cylinder	1	SCM440	Bore ϕ240
2	Piston rod	1	SCM440	Piston ϕ240 Rod ϕ140
3	Rod Cover	1	SM45C	Bronze coated
4	Y-Clevis	1	SM45C	
5	O-ring (P225)	3	NBR	
6	Backup ring	6	PTFE	
7	O-Ring (P140)	2	NBR	
8	Backup ring	4	PTFE	
9	Dust seal(DSI140)	1		

다. 펌프시스템

실린더의 경우 피스톤을 밀어 낼때는 파란색의 단면적을 받지만 당기는 방향의 단면적은 파란색에서 초록색의 단면적을 제외한 면적만큼 압력이 전달된다. 엑츄에이터가 지지하는 하중은 200ton이므로 면적을 고려하여 유압펌프는 700bar로 설계하는 것이 효율적이다.

- 700bar 기준 설계 : 실린더의 크기는 단순 비교로 압력에 반비례한다
  (실린더 용량 = 실린더 단면적 × 압력)
- 700bar는 작기류 실린더의 일반적으로 많이 사용 되는 압력으로 2~300bar 기준에서 엑츄에이터 시스템을 설계하기도 하나 700bar 기준에 비해 크기가 커진다는 단점이 있다.

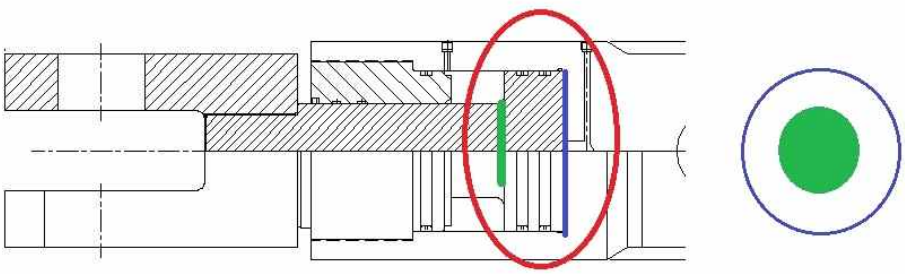


그림 2.69 엑츄에이터 내부 압력 부위

· 설계 고려사항

① 펌프 시스템의 경우 상기 엑츄에이터 기준으로 700bar 설계가 되어야 한다.

② 엑츄에이터를 개별적으로 컨트롤할 수 있어야 하며 조작이 용이하도록 설계되어야 한다.

③ 원하는 엑츄에이터 별로 동시 작동이 가능해야 발란스 맞추기가 적합하다.

④ 긴급상황시 엑츄에이터 작동을 중지하는 비상버튼이 필요하다.

· 펌프 사양

- 700BAR
- 220V, 단상
- SOL VALVE 4열
- CHECK BLOCK
- HIGH PRESSURE HOSE 8EA

· 펌프설계도 및 구성요소

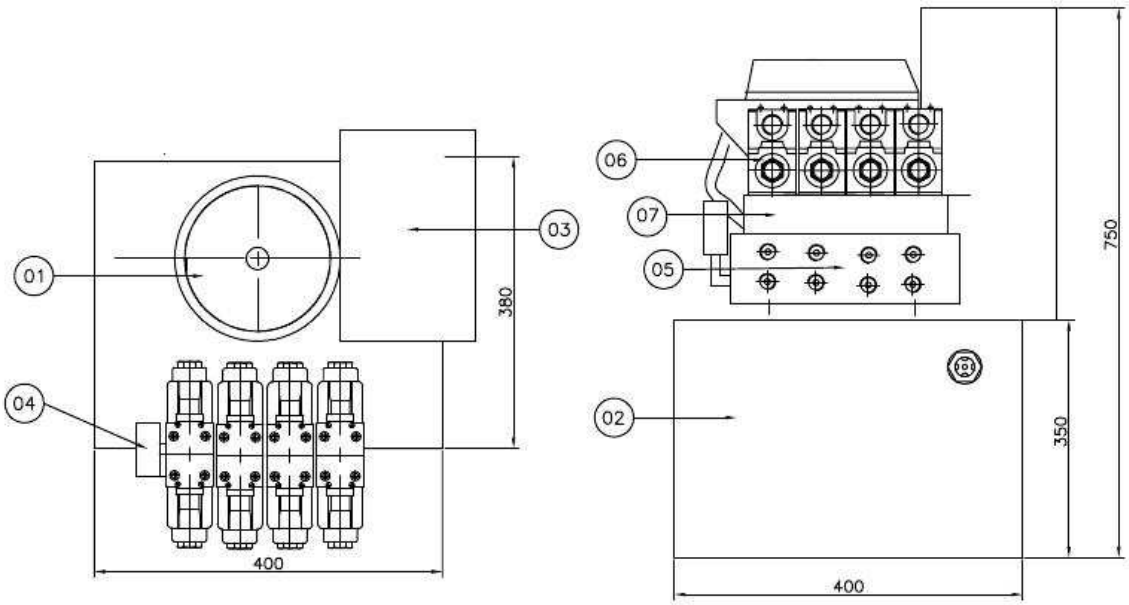


그림 2.70 엑츄에이터 개별조절 펌프시스템 설계도

표 2.18 펌프시스템 구성요소

No.	펌프구성품	수량(ea)	규 격
1	Motor	1	1.5kW, 4극, 60Hz
2	Tank	1	400×380×200(mm)
3	Hydraulic actuator stroke control inverter	1	140×280(mm)
4	Pressure gauge	1	63P, 1000Bar
5	Manifold	1	3/8 ¨,2PORT
6	Solenoid valve	4	SD-02-720
7	Pilot check (hydraulic valve)	4	
	High pressure hose	8	3/8 ¨, 700bar

라. 엑츄에이터 개별조절 시스템 설계(안)

- 유압 엑츄에이터

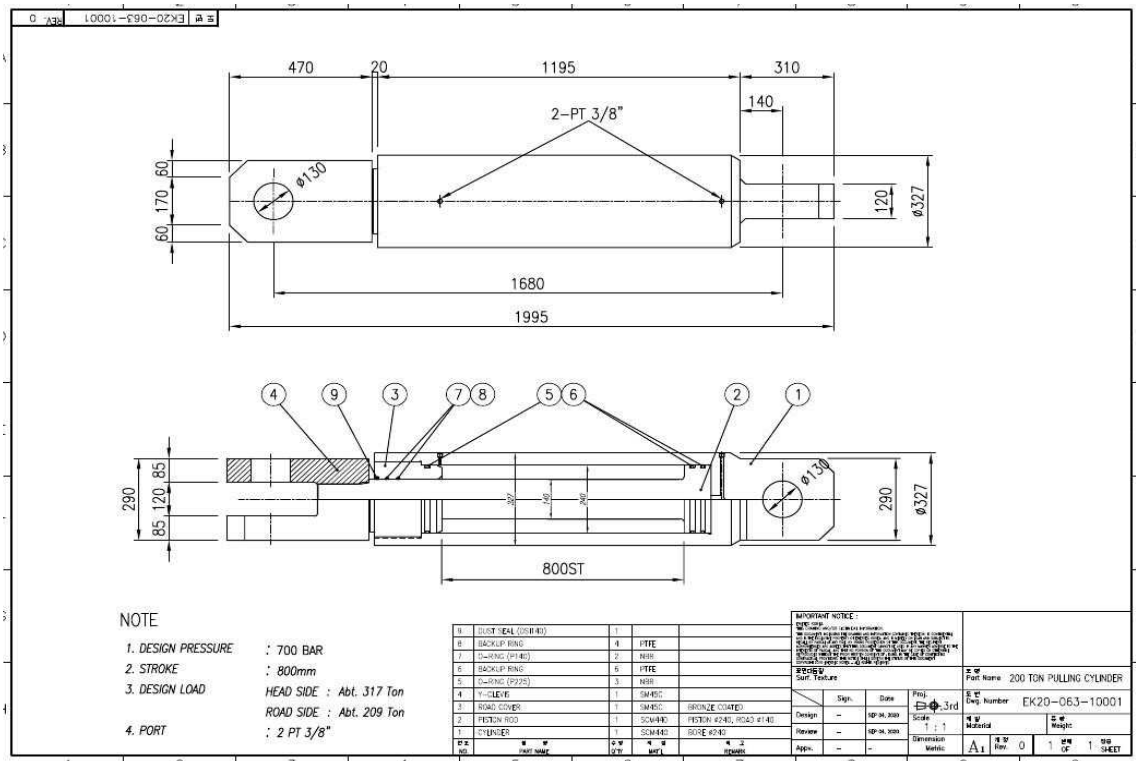


그림 2.71 유압 엑츄에이터 설계(안)

- 유압 펌프시스템

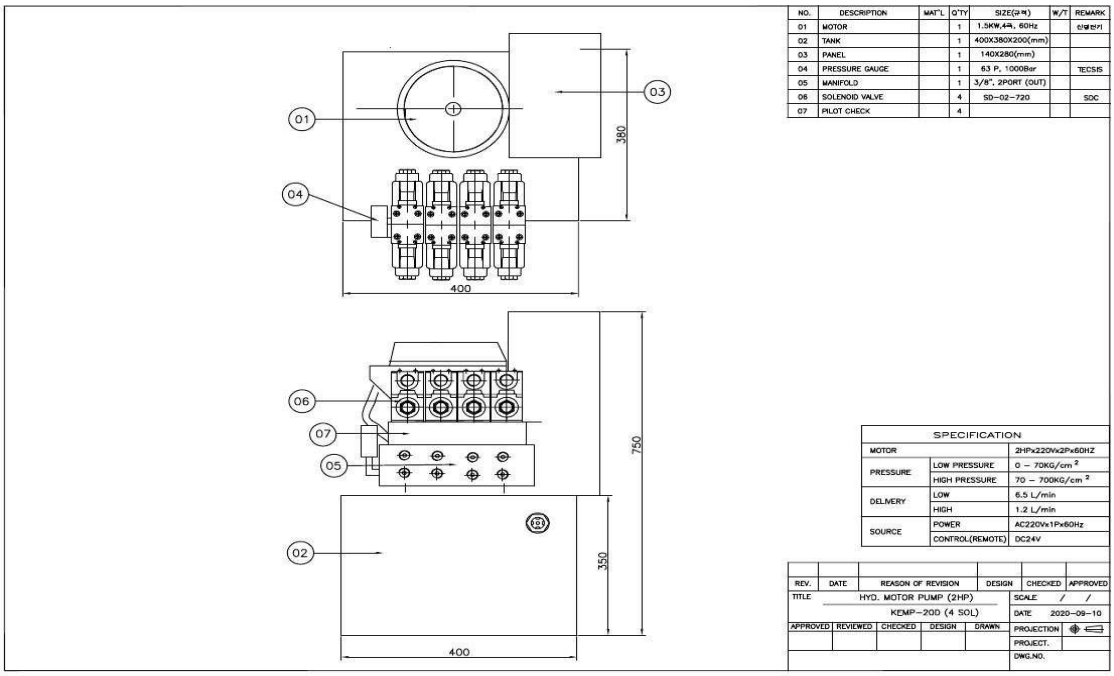


그림 2.72 유압 펌프시스템 설계(안)

- 유압회로도

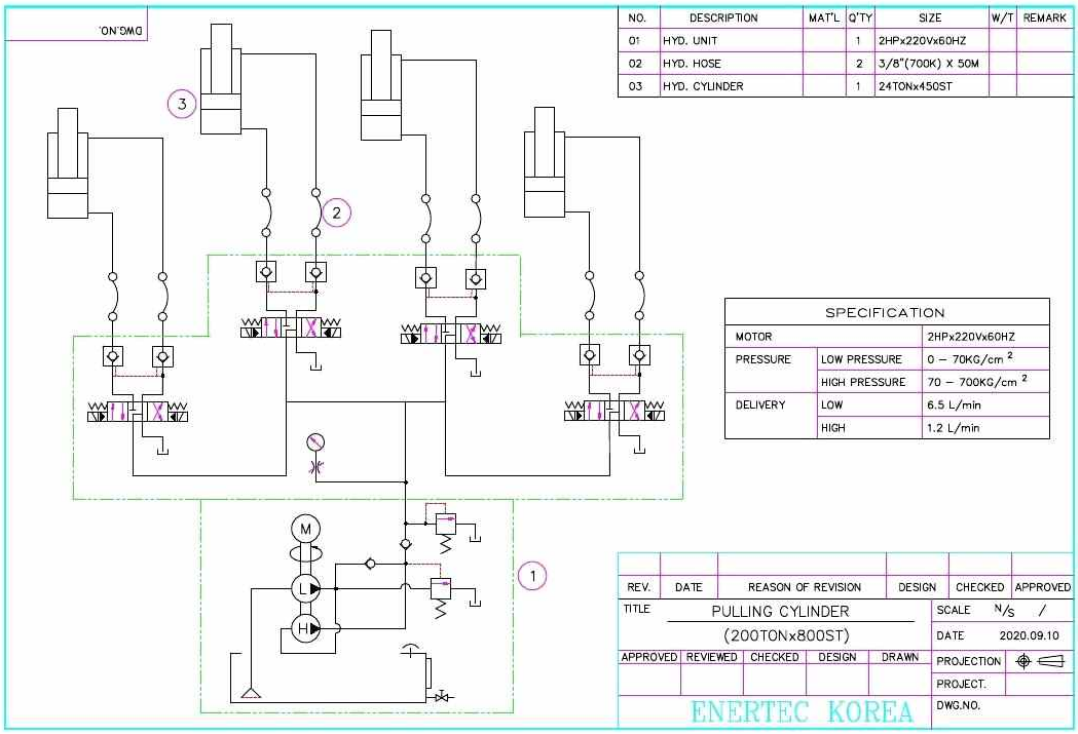


그림 2.73 엑츄에이터/펌프 유압회로도

- 전기회로도

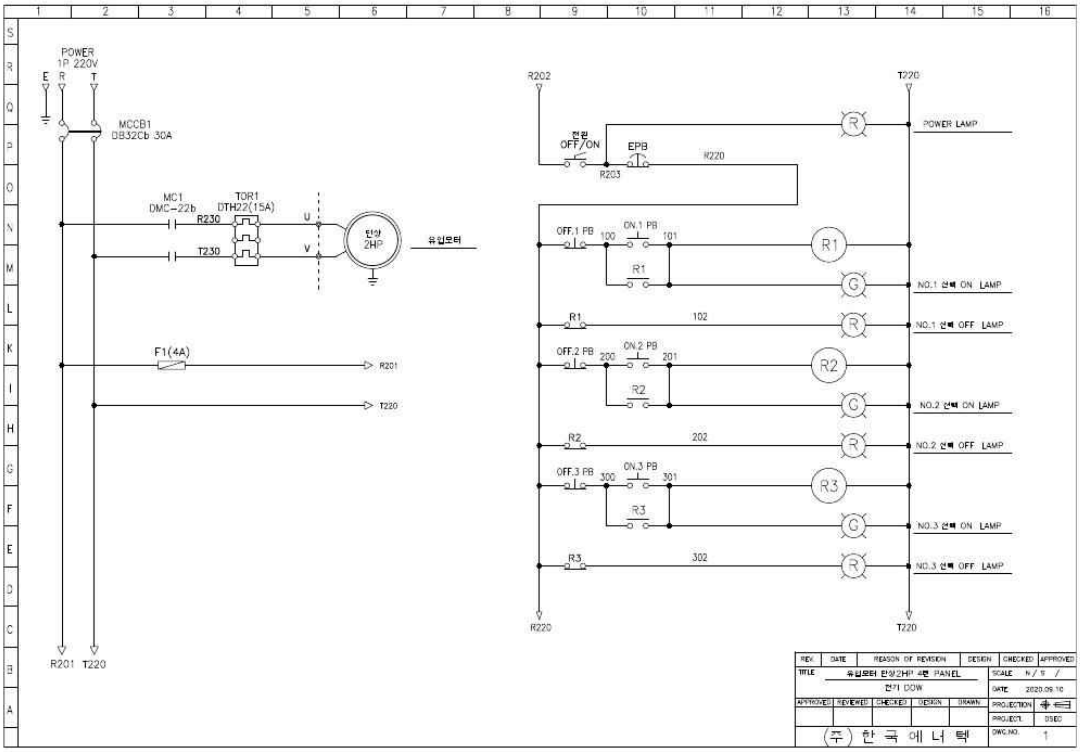


그림 2.74 유압 엑츄에이터/펌프시스템 전기회로도(1)

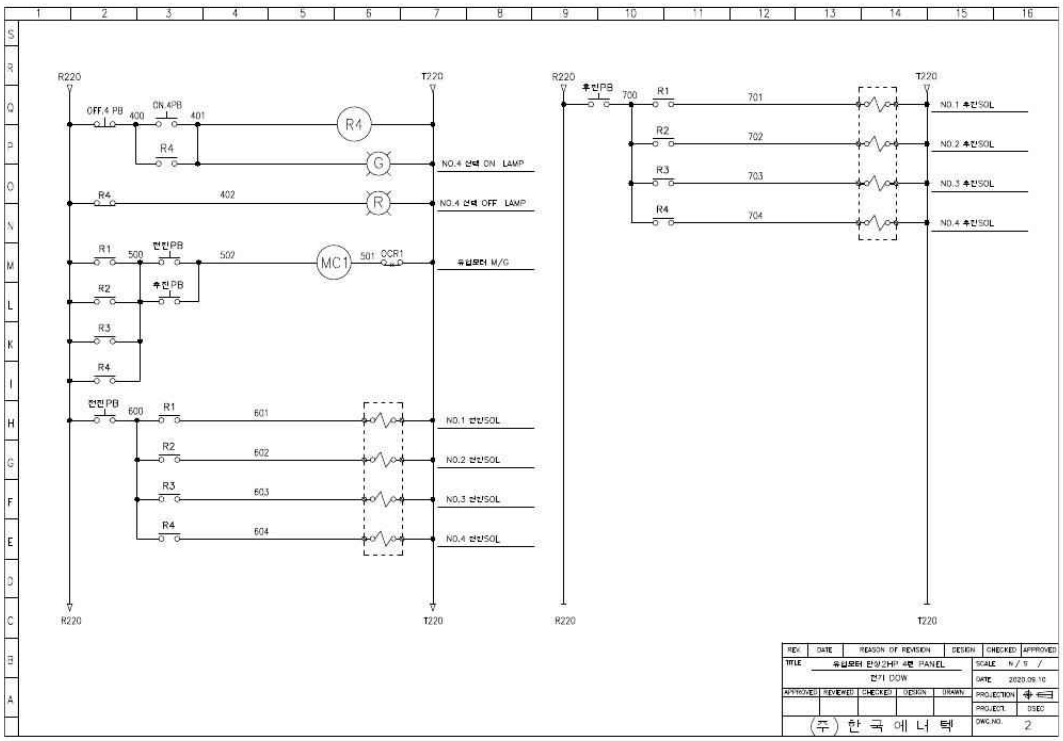


그림 2.75 유압 엑츄에이터/펌프시스템 전기회로도(2)

2.4.3 리프팅시스템 설계

가. 메인 프레임 설계

원형강관 수직도 제어 시스템은 4개의 포인트에서 수직도를 제어하며, 그에 따라 메인 프레임은 대각선 방향의 길이가 대상 원형강관의 직경(20m)과 동일한 정사각형 형태로 설계하였다. 프레임은 I빔을 사용하였으며, 일반도로에서 운반가능 길이를 고려하여 최대 길이가 10m를 넘지 않도록 설계하였다. 메인 프레임에 작용하는 최대하중을 고려하여 I빔의 단면을 선정하였으며, 강재 플레이트와 볼트를 이용하여 I빔을 연결하였다.

1) 설계하중

설계 하중은 메인 프레임에 작용하는 하중이 최대가 되는 경우를 판단하기 위하여 다양한 하중조합과 load case를 고려하였으며, 설계 시 고려한 하중조합 및 하중계수와 load case를 다음 표에 나타내었다.

표 2.19 하중조합 및 하중계수

하중조합 한계상태	자중	Wind (25 m/s)	이동/멈춤/충돌/온도
극한 1	1.25	1.4	
극한 2	1.25		
극단상황 1	1.25		0.4 (충돌)
사용 1	1.25	0.3	
사용 2	1.25	0.7	
사용 3	1.25		0.5 (온도)

표 2.20 Load case

Case No.	상부 wire 개수	하부 wire 개수	Case No.	상부 wire 개수	하부 wire 개수
1	4	4	13	2 (대각선 방향)	2 (대각선방향)
2		3	14		2 (직선방향)
3		2 (대각선방향)	15		1
4		2 (직선방향)	16	2 (직선 방향)	4
5		1	17		3
6	3	4	18		2 (대각선방향)
7		3	19		2 (직선방향)
8		2 (대각선방향)	20		1
9		2 (직선방향)	21	1	4
10		1	22		3
11	2 (대각선 방향)	4	23		2 (대각선방향)
12		3	24		2 (직선방향)
			25		1

메인 프레임에서 발생 가능한 최대 하중은 아래 그림과 같이 프레임의 상부와 하부에 각각 하나의 와이어가 대각선 방향 또는 길이 방향으로 프레임의 양 끝단에 남아있는 경우에 발생한다. 외부 충격, 와이어 연결부의 파손 등으로 인하여 아래 그림과 같은 최대하중이 발현 가능하다. 그림과 같은 상황이 발생하는 경우, 원형강관 수직도 제어 시스템은 와이어 또는 엑츄에이터의 파손 이후 사용 중인 상태라고 판단할 수 있다. 그에 따라 원형강관의 자중 350 ton에 하중계수 1.25를 사용한 437.5 ton의 하중이 메인 프레임에 작용하는 최대하중으로 사용되었다.

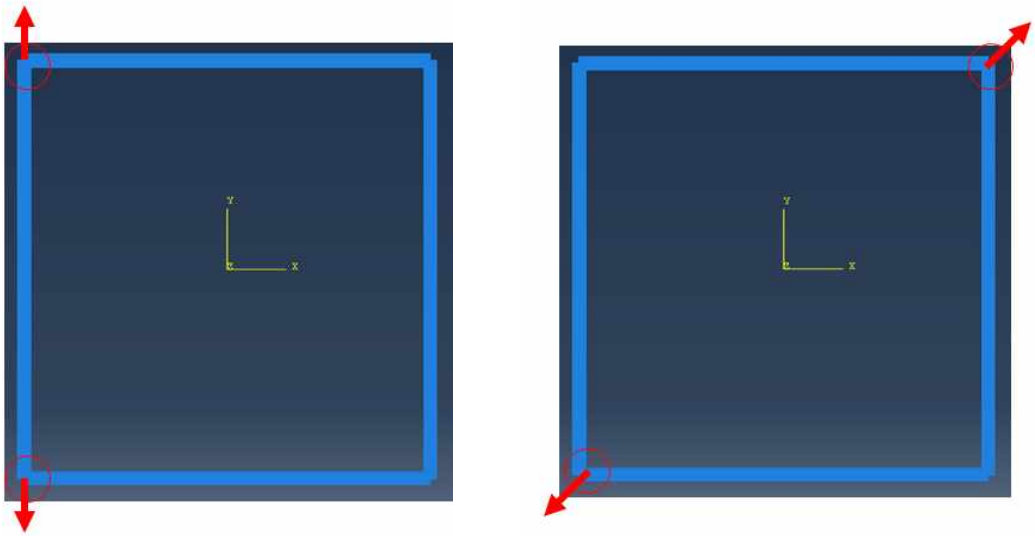


그림 2.76 메인 프레임에 최대 하중이 작용하는 경우

2) 수치해석을 통한 I빔의 단면선정

수치해석을 통하여 프레임의 구조 안전성이 확보되는 KS규격의 I빔 단면을 도출하고자 하였다. 수치해석에는 범용구조해석프로그램인 ABAQUS 6.12가 사용되었다. 메인 프레임에 작용하는 최대하중 437.5 ton이 작용하는 경우, 앞선 그림과 같이 내부 보강이 없이 정사각 형태의 I빔은 대각선 방향에 대한 구조안전성이 확보되지 않아 대각선 방향에 대한 하중에 매우 취약하다. 이를 위해 대각선 방향에 I빔을 배치하여 메인 프레임을 보강하였다. 최대 하중이 작용하는 경우에 대한 보강된 메인 프레임의 수치해석 경계조건과 하중조건을 다음 그림에 나타내었다.

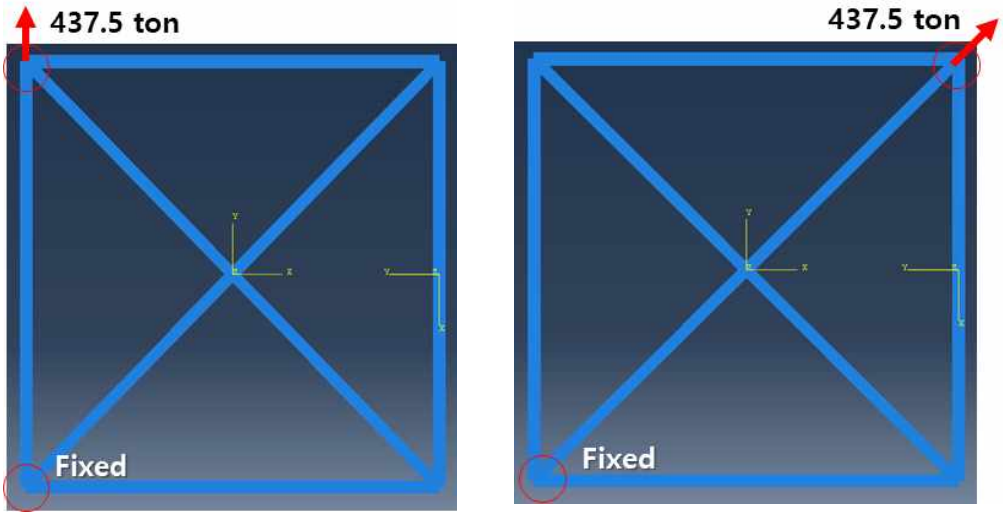
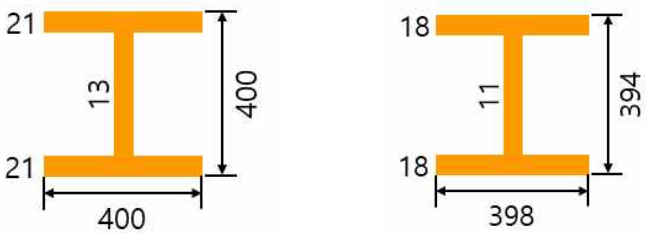


그림 2.77 하중 및 경계조건

KS규격 400x400 (mm)의 I빔을 사용하는 경우 세부 표준단면치수에 따라 몇몇 최대 하중을 만족하는 경우를 확인하였으며, 내부 보강에 사용되는 I빔과 함께 경제성을 고려하여 최대하중에 안전하게 저항할 수 있는 최소 단면적의 I빔을 선정하고자 하였다. KS 규격의 다양한 단면의 I빔을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 아래와 같은 I빔 단면을 메인 프레임과 대각선 방향 보강용 빔에 적용하는 것으로 결정하였다. I빔에 주로 사용되는 강재는 SS400이며, 해석에 사용된 강재의 물성치는 탄성계수 206,000 MPa, 포아송비 0.3이 사용되었다.

(unit: mm)



(a) 메인 프레임 (b) 보강 I빔

그림 2.78 I빔 단면

각각의 결정된 단면을 메인 프레임과 보강용 I빔에 적용하여 수행한 수치해석 결과를 아래 그림에 나타내었다. 메인 프레임의 한 변에 최대 하중이 작용하는 경우 188 MPa의 응력이 발생하였으며, 이는 SS400 강종의 항복강도 235 MPa을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 최대 하중이 프레임의 대각선 방향으로 작용하는 경우에는 164 MPa의 응력이 발생하였으며, 마찬가지로 강종 SS400의 항복강도를 초과하지 않는 것으로 나타나 선택된 I빔의 구조 안전성이 확보된 것을 확인하였다.

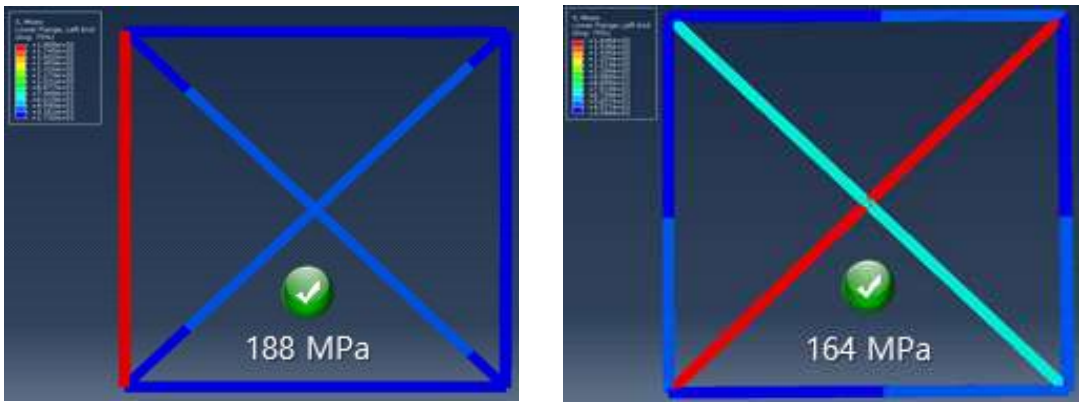


그림 2.79 메인 프레임 수치해석 결과

3) 프레임 연결부 설계

메인 프레임은 대각선의 길이가 원형강관의 직경크기인 20 m이며, 이는 도로교통법상의 최대 적재물 길이인 약 16 m를 초과하기 때문에 I빔의 길이를 10 m 내외로 제작하여 연결하는 방법을 선택하였다. 시공의 편의성을 위해 강재 플레이트와 볼트를 이용하여 I빔을 연결하며, 강재 플레이트의 두께와 연결에 사용되는 볼트의 개수는 아래의 식에 의하여 결정되었다. 먼저 강구조설계기준(2018)에 따르면, 접합부재의 설계전단강도 R_n은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$R_n = 0.6F_yA \tag{2.1}$$

여기서, F_y는 강재 플레이트의 항복강도이며, A는 강재 플레이트가 전단력을 받는 면적이다. 메인 프레임의 대각선 방향 보강에 사용되는 I빔의 플랜지 폭 398 mm와 동일한 폭을 가지는 강종 SS400의 강재 플레이트에 대하여 최대 하중 437.5 ton이 작용하는 경우 필요한 강재 플레이트의 최소 두께는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$0.6\times230\times(t_{\min}\times398) = 4.375\times10^6 \tag{2.2}$$

여기서, 계산된 강재 플레이트의 최소두께 $t_{\min}$은 79.65 mm로 계산되며, I빔의 상부와 하부에 각각 40 mm 두께의 강재 플레이트를 사용하였다. I빔의 상·하부 플랜지와 강재 플레이트의 연결에 필요한 볼트의 개수는 아래의 식을 이용하여 계산이 가능하다.

$$\frac{D^2\pi}{4}\times n\times F_{nv}\times\Phi > 4.375\times10^6 \tag{2.3}$$

여기서 D는 볼트의 직경, n은 볼트의 개수, F_{nv}는 볼트의 전단강도, Φ는 하중계수이다. 본 연구에서는 30 mm 직경의 고장력 볼트(공칭 전단강도 500 MPa)를 사용하였다. 위 식을 이용한 볼트의 최소 필요개수는 17개이며, 보다 높은 안전성과 시공 편의성을 위하여 I빔의 상부와 하부에 사용되는 강재 플레이트에 각각 12개씩 볼트를 배치하였다. 강구조설계기준(2018)에 의하면 볼트의 최소 연단거리는 52 mm이며, 고장력볼트의 구멍중심에서의 볼트머리 또는 너트가 접하는 부재의 연단까지의 최대 거리는 플레이트 두께의 12배 이하 또한 150 mm 이하로 규정되어있다. 이러한 규정에 따라 강재플레이트의 길이와 볼트를 아래 그림과 같이 배치하였다. 또한 안전성 향상을 위하여 I빔의 웹이 연결되는 부분에 두께 7 mm의 강재플레이트와 30 mm 직경의 고장력 볼트를 이용하여 추가 연결부를 설계하였다.

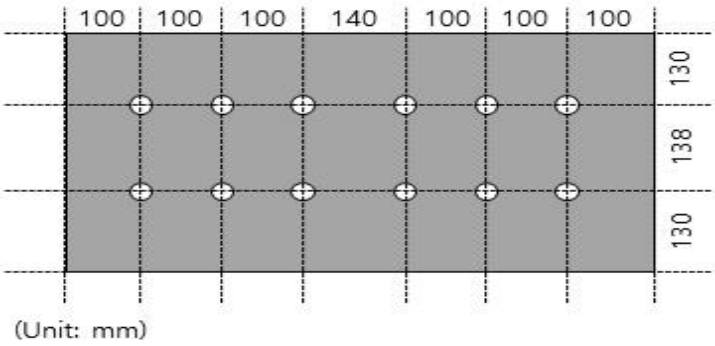


그림 2.80 강재 플레이트 연결부의 볼트 배치 (보강 I빔)

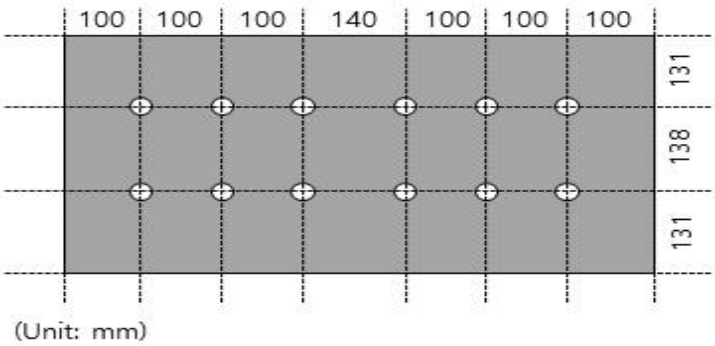


그림 2.81 강재 플레이트 연결부의 볼트 배치 (메인 I빔)

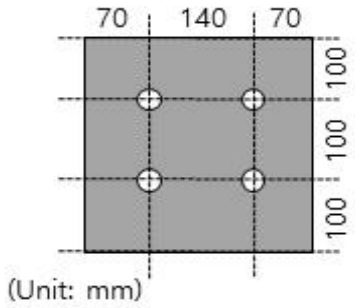


그림 2.82 추가 연결부의 볼트 배치

설계된 연결부에 대하여 수치해석을 수행하여 구조 안전성을 확인하였다. 아래 그림과 같이 메인 프레임의 연결부를 모델링 하였으며, 메인 프레임에 작용하는 최대하중 437.5 ton이 I빔에 작용하는 경우에 대하여 모사하고자 하였다. 경계조건은 아래 그림과 같이 I빔의 한쪽 단면에 최대하중이 인장력으로 작용하고, 반대쪽 면은 완전히 고정되어있는 것으로 수치해석을 수행하였다.

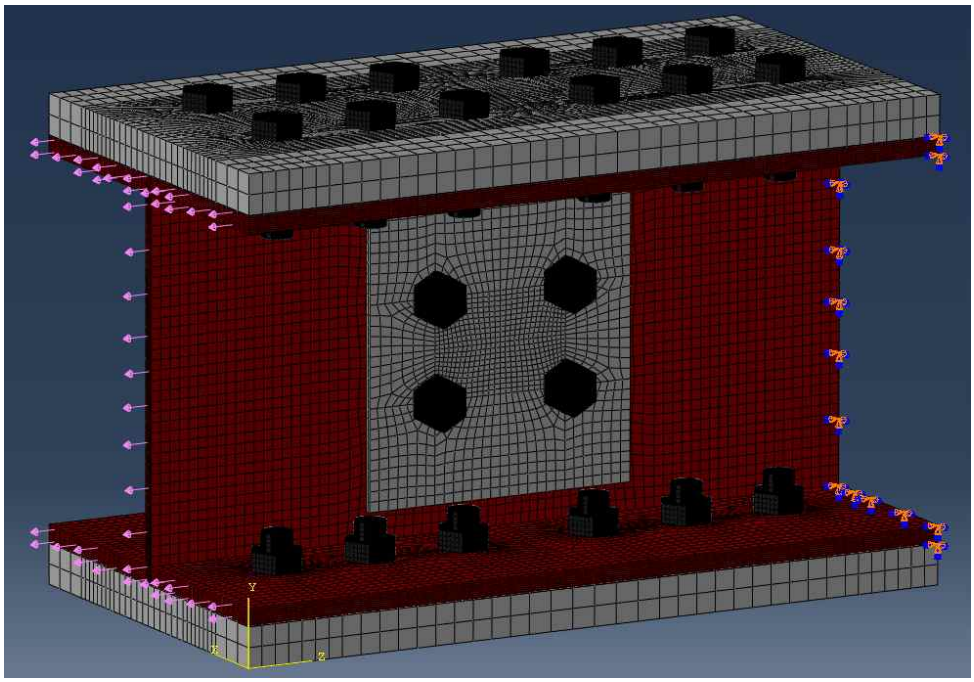


그림 2.83 프레임 연결부 모델링 및 경계조건

고장력 볼트를 이용하여 연결된 I빔의 플랜지와 강재 플레이트 사이의 접촉조건은 완전결합(bonded)으로 설정하였으며, 수치해석 결과 강재 플레이트와 고장력볼트에서 각각 211 MPa, 148 MPa의 최대 응력이 발생하였다. 이는 강재 플레이트의 항복강도 230 MPa과 고장력볼트의 공칭 전단강도 500 MPa을 초과하지 않아 연결부의 안전성을 확인하였다.

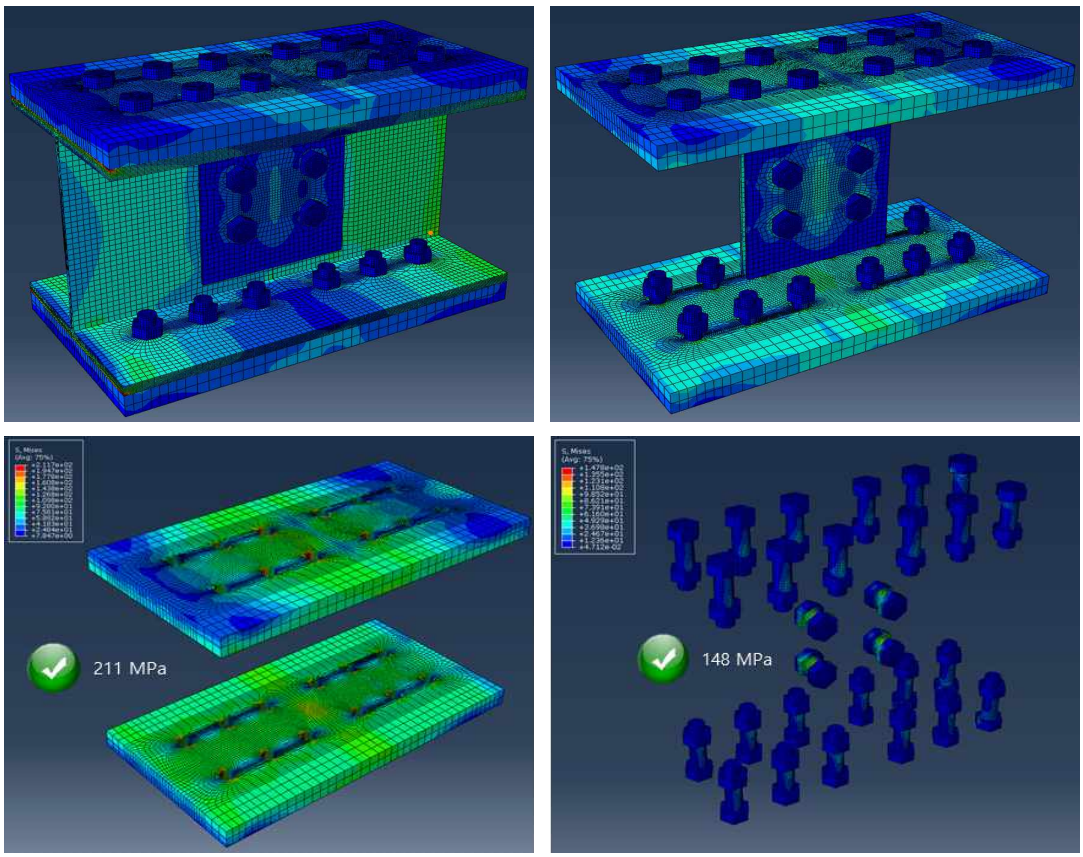


그림 2.84 프레임 연결부 수치해석 결과

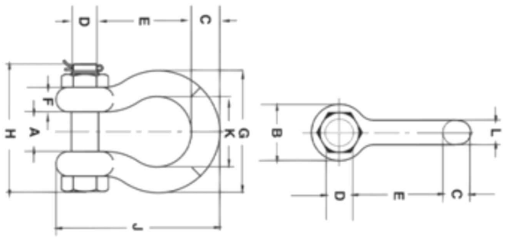
나. 메인 프레임과 와이어 및 엑츄에이터 연결부 설계

1) 연결부 개요

수직도 제어 시스템은 4개의 엑츄에이터를 메인 프레임 각각의 모서리 하부에 설치하여 원형강관의 수직도를 제어한다. 이러한 수직도 제어 시스템의 메인 프레임 모서리에는 2개의 lifting lug가 배치되며, 샤클과 와이어를 이용하여 크레인과 메인 프레임이 연결된다. Lifting lug 설계 시의 설계하중은 앞서 계산된 최대하중 437.5 ton을 사용하였으며, 수치해석을 통하여 lifting lug의 구조안전성을 확인하였다.

메인 프레임의 상부와 와이어 연결을 위하여 사용되는 샤클은 메인 프레임의 하부와 엑츄에이터의 연결을 위해 사용되는 샤클과 동일한 것을 사용한다. 엑츄에이터의 최대 용량을 200 ton으로 가정하고 최대 하중 250 ton의 샤클을 이용하여 와이어와 엑츄에이터를 연결한다. Crosby 社의 250 ton급 샤클의 제원은 다음과 같다.

표 2.21 연결부 샤클의 제원



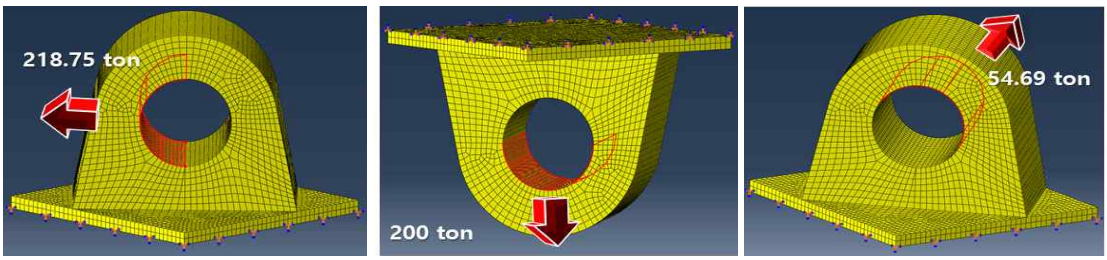
(unit: mm)

Weight (kg)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
276	216	305	143	127	470	123	600	632	828	330	127

샤클이 lifting lug와 연결되는 샤클 핀의 직경이 127 mm이며, lifting lug의 내부와 접촉되는 샤클 핀의 최대 길이는 216 mm이다. 이를 고려하여 lifting lug의 내부 직경을 150 mm, 폭을 200 mm로 선정하여 lifting lug를 설계하였으며, 수치해석을 반복적으로 수행하여 경제성과 안전성을 모두 만족하는 최적의 lifting lug 형상을 도출하고자 하였다. 메인 프레임 상부에 와이어 연결을 위해 사용되는 lifting lug의 경우 메인 프레임의 정 중앙에 크레인 붐대가 위치하기 때문에 lifing lug와의 사잇각이 발생한다. lifting lug에 발생 가능한 수평하중을 감소화하기 위하여 메인 프레임 상부 모서리 한 쌍의 lifting lug가 각각 메인 프레임의 중앙을 향하도록 45° 회전하여 배치하였다. 엑츄에어터와 연결을 위해 배치되는 메인 프레임 하부의 lifting lug에는 수직 방향의 하중만이 작용하기 때문에 lifting lug의 배치 각도가 lifting lug에 작용하는 응력에 크게 영향을 주지 않아 각도를 자유롭게 조절하여 설치 가능하다.

2) 수치해석을 통한 lifting lug의 구조안전성 평가

반복적인 수치해석을 통하여 최적의 lifting lug를 설계하고자 하였으며, 아래에는 최종 선택된 lifting lug에 대한 수치해석 결과를 정리하였다. 수치해석에는 범용구조해석프로그램인 ABAQUS 6.12가 사용되었다. 먼저, 메인 프레임의 상부에 배치되는 lifting lug의 경우 메인 프레임 해석에 사용된 최대하중 437.5 ton이 메인 프레임의 한쪽 모서리에 작용하여 2개의 lifting lug에 각각 218.75 ton의 하중이 그림과 같이 90° 로 작용하는 것을 모사하여 수치해석을 수행하였다. 다음으로, 하부에 배치되는 lifting lug의 경우에는 엑츄에이터의 최대 용량인 200 ton이 수직방향으로 작용하는 것을 모사하였다. 마지막으로 수직도 제어 시스템을 사용 시에 437.5 ton의 최대하중이 총 8개의 lifting lug에 분산되어 작용하는 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 3가지 조건에 대한 lifting lug의 수치해석 경계조건과 하중조건을 아래 그림에 나타내었다. Lifting lug에 사용된 강종은 SS400이며, 해석에 사용된 강재 물성치는 탄성계수 206,000 MPa과 포아송비 0.3이 사용되었다.



(a) Case 01
상부 lifting lug (최대하중)

(b) Case 02
하부 lifting lug

(c) Case 03
하부 lifting lug (사용시)

그림 2.85 lifting lug의 하중 및 경계조건

수치해석 결과 Case 01, Case 02, Case 03에서 각각 최대응력이 196.7 MPa, 176.7 MPa, 82.5 MPa로 나타나 SS400 강종의 항복강도 235 MPa을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 각각의 최대 하중이 작용하는 경우에 대한 수치해석 결과가 모두 항복강도를 초과하지 않아 구조 안전성이 확보된 것을 확인하였다.

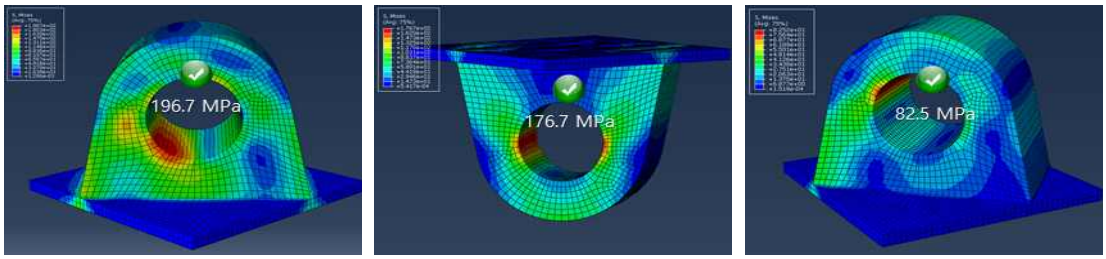
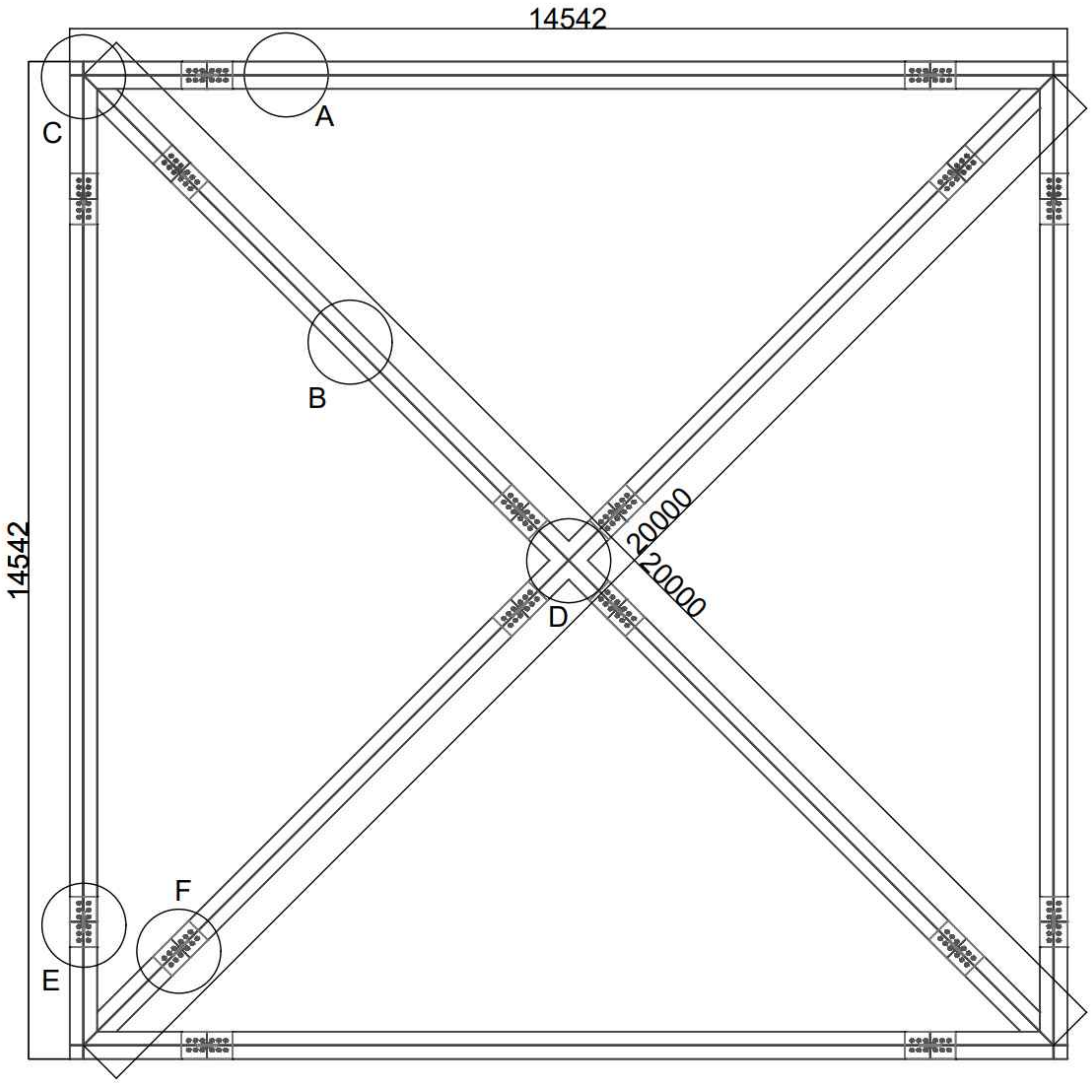


그림 2.86 lifting lug의 수치해석 결과

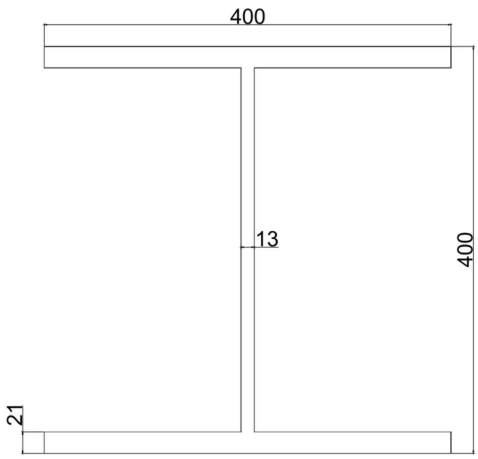
2.4.4 케이블 개별조절 리프팅시스템 설계(안)

가. 메인 프레임 설계도면

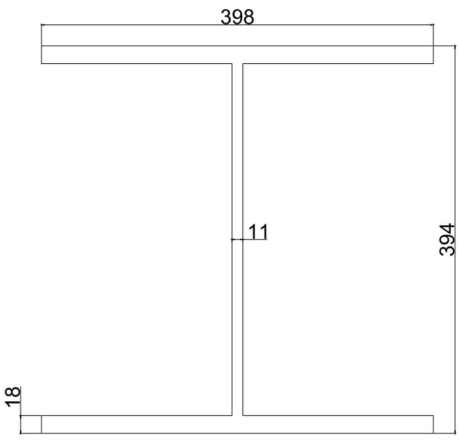
수치해석을 통해 구조안전성이 확인된 메인 프레임과 프레임 연결부에 대한 설계도면(안)을 아래에 나타내었다. 메인 프레임 평면도에서의 메인 프레임의 모서리부(C부분)와 중앙 연결부(D부분)의 경우 별도의 제작이 필요하며, I빔의 연결 부분은 반드시 완전용입용접이 이루어져야 한다. 도면의 모든 길이 단위는 mm 이다.



(a) 메인 프레임 평면도

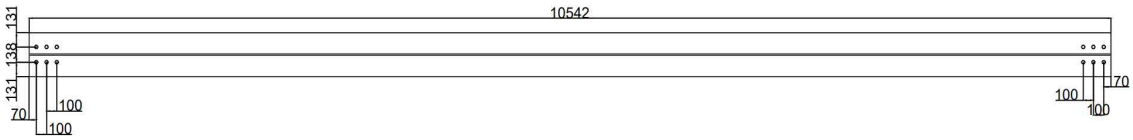


(b) 단면 A

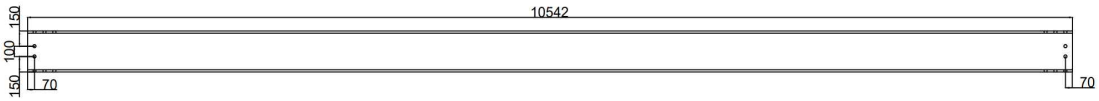


(c) 단면 B

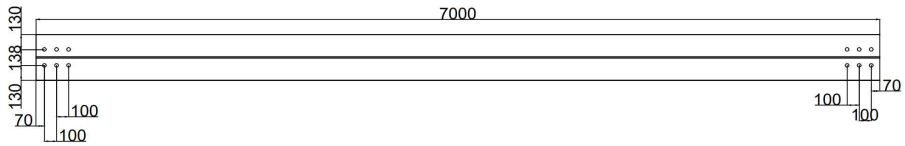
그림 2.87 메인 프레임 설계도



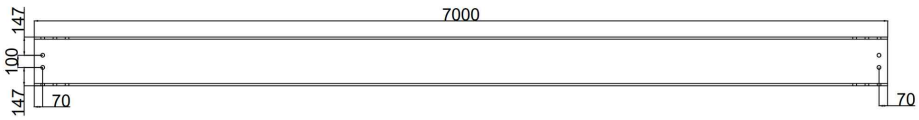
(d) 상세 A (평면)



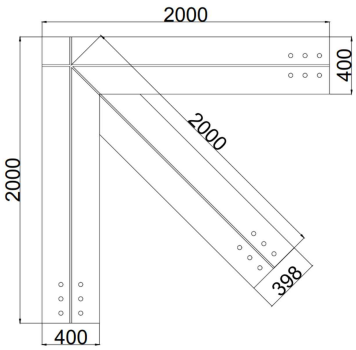
(e) 상세 A (정면)



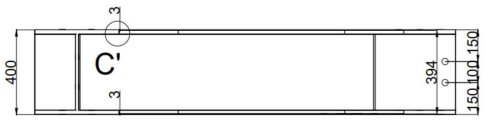
(f) 상세 B (평면)



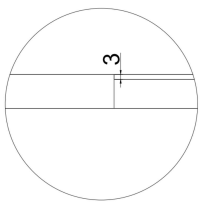
(g) 상세 B (정면)



(h) 상세 C (평면)

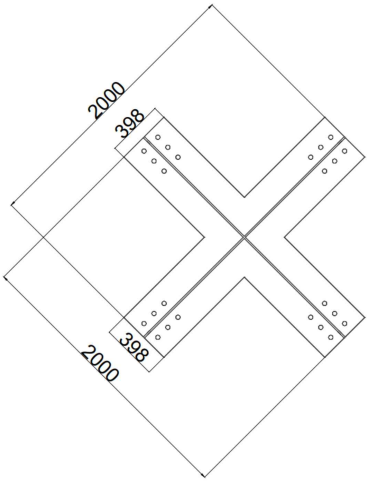


(i) 상세 C (정면)

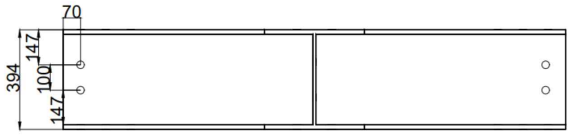


(j) 상세 C'

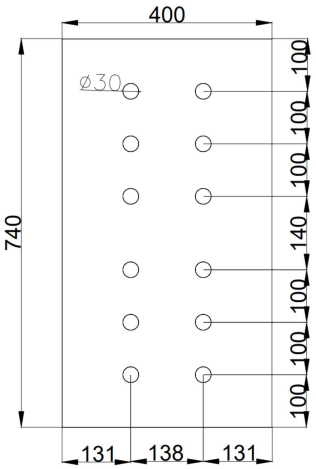
그림 2.87 메인 프레임 설계도(계속)



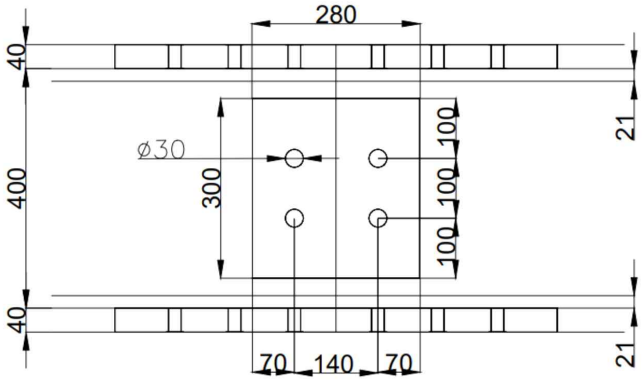
(k) 상세 D (평면)



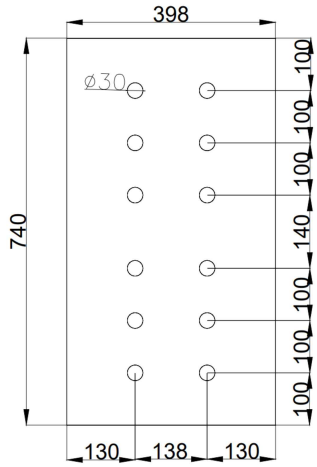
(l) 상세 D (정면)



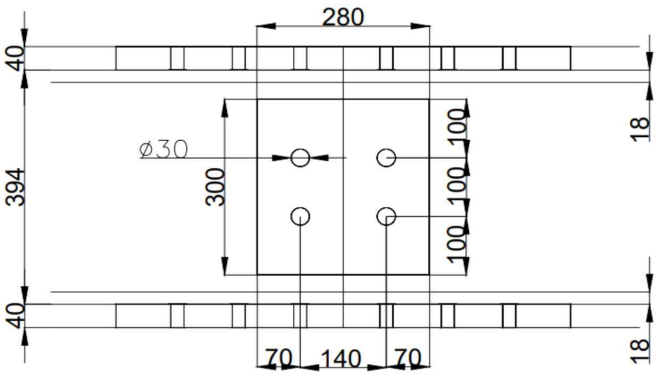
(m) 상세 E
(상·하부 플레이트 평면)



(n) 상세 E
(정면: I빔 웹 연결 플레이트)

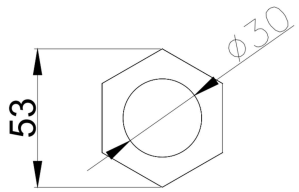


(o) 상세 F
(상·하부 플레이트 평면)

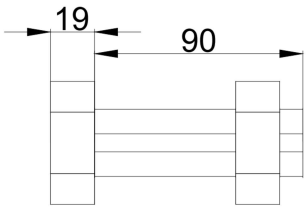


(p) 상세 F
(정면: I빔 웹 연결 플레이트)

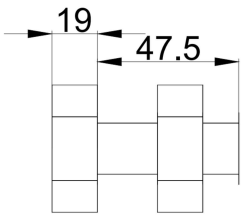
그림 2.87 메인 프레임 설계도(계속)



(q) 고장력 볼트 평면



(r) I빔 플랜지부의
고장력 볼트 정면

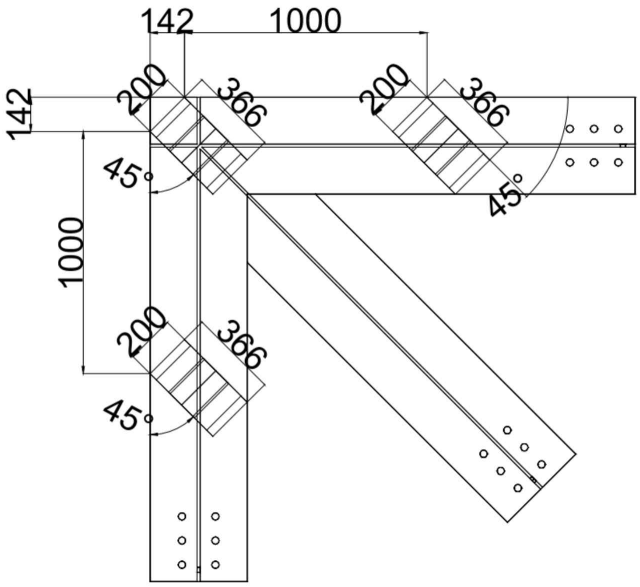


(s) I빔 웹의
고장력 볼트 정면

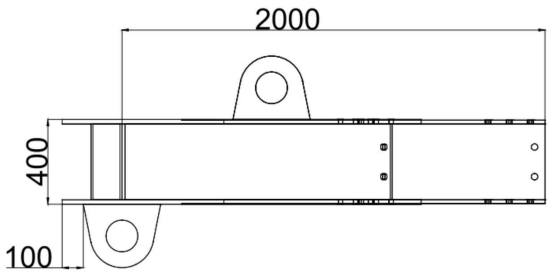
그림 2.87 메인 프레임 설계도(계속)

나. 리프팅 러그 설계도면

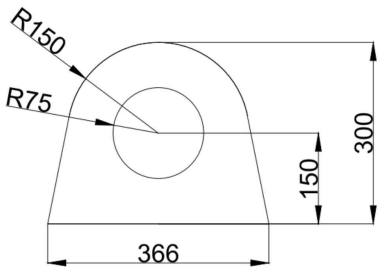
수치해석을 통해 구조안전성이 확인된 리프팅 러그(lifting lug)의 설계도면(안)을 아래에 나타내었다. Lifting lug와 I빔의 연결 부분은 반드시 완전용입용접이 이루어져야한다. 도면의 모든 길이 단위는 mm 이다.



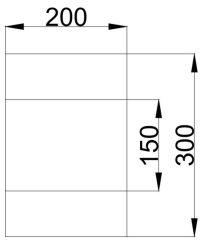
(a) Lifting lug 평면 배치도



(b) Lifting lug 정면 배치도



(c) Lifting lug 정면도



(d) Lifting lug
측면도

그림 2.88 리프팅 러그(lifting lug) 설계도

다. 리프팅시스템 설계(안) 전체 구성도

앞서 설계한 리프팅케이블 개별조절용 엑츄에이터와 리프팅시스템(프레임, 프레임-케이블-엑츄에이터-원형강관 연결부)의 전체 구성도는 다음 그림과 같다. 프레임 상부에 위치한 와이어와 엑츄에이터 하부의 와이어는 원형강관의 무게를 고려하여 2줄씩 배치하는 것으로 적용하였다.

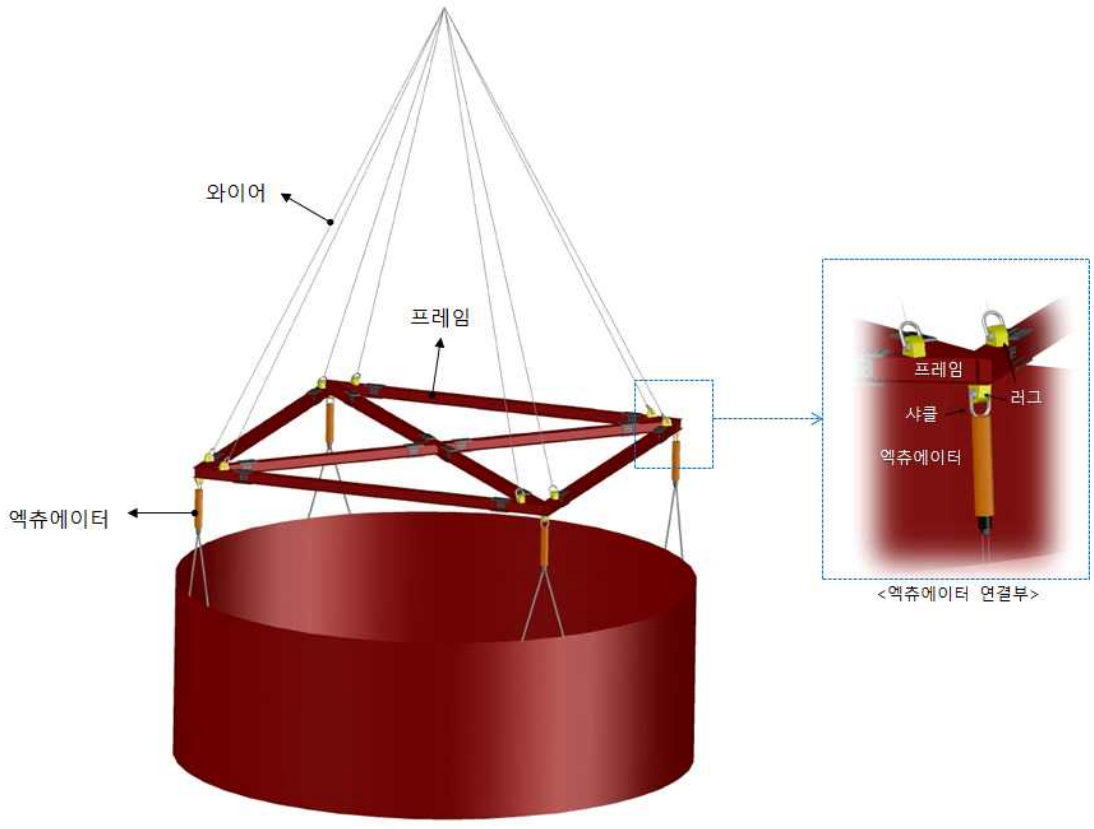


그림 2.89 케이블 개별제어 리프팅시스템 설계(안) 전체 구성도

2.5 소론

본 연구에서는 원형강관 석션관입 시공과정을 그대로 이용하면서 수직도 보정이 용이한 리프팅케이블 개별제어 기술을 개발하였다. 개발된 기술에 대해 모형실험과 현장실험을 수행하여 원형강관 석션관입시 수직도 확보 효과를 검증하였다. 또한 대형 원형강관에 케이블 개별제어 리프팅시스템을 적용할 수 있도록 설계(안)을 제시하였다.

(1) 리프팅케이블 개별 길이제어 기법적용 석션파일 실내모형실험

- 원형강관이 기울어졌을 경우 기울어진 위치에서 관입력에 상응하는 리프팅케이블로 원형강관을 지지하여 케이블 지지력과 관입력 작용 위치 차이로 인해 석션관입시 편심을 발생시켜 원형강관의 수직도가 보정될 수 있다. 관입력에 상응하는 케이블의 장력을 석션파일의 경사도에 따라 위치별 케이블 길이 제어를 통해 장력을 재분배함으로써 위치별로 관입력에 저항하는 장력의 차이에 의해 편심이 발생하여 관입중인 석션파일의 수직도가 보정되는 것으로 판단된다.
- 모형실험에 의하면 기존 리프팅방식을 적용한 경우에는 석션관입시 최종수직도는 0.9° 수준이었으나 본 연구에서 개발한 케이블 개별 길이조절 기법을 적용한 경우에는 파일이 기울어진 위치에 관계없이 파일의 최종수직도를 약 0.1° 까지 확보할 수 있었다. 이를 통해 개발된 기법이 기존의 리프팅기법에 비해 원형강관의 석션관입시 수직도 보정에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

(2) 현장실험(파일럿테스트)을 통한 수직도 확보 기술 검증

- 원형강관 석션관입시 케이블 개별 제어 기법에 의해 위치별 장력의 차이로 편심에 의해 수직도를 보정할 수 있었다.
- 리프팅케이블 개별제어 기법으로 인발과정에서의 수직도제어가 석션관입과정보다 상대적으로 수직도 보정이 용이한 것으로 나타났다. 석션관입시 인발과정을 한차례 병행함으로써 최소한의 공정과 시간으로 정확한 수직도 확보가 가능할 것으로 판단된다.
- 현장실험용 원형강관(직경 5m)에 대한 석션관입중 리프팅케이블 개별 제어기법을 적용한 수직도 확보기술에 대한 실험결과 석션관입시 일부 인발을 적용한 경우 0.4° 이내 수준의 수직도를 확보할 수 있는 것으로 검증되었다.

상기 결과를 바탕으로 원형강관 석션관입공정에서 본 연구에서 개발한 케이블 개별조정이 가능한 리프팅시스템이 원형강관 석션관입시 수직도확보에 효과적으로 적용가능한 것으로 나타났다.

(3) 케이블 길이조절 리프팅시스템 설계(안)

원형강관의 수직도 보정을 위한 리프팅케이블 개별제어 시스템에 사용되는 엑츄에이터, 프레임, 연결부에 대한 설계(안)을 제시하였다.

- 엑츄에이터의 경우 20m급 원형강관에 대해 3° 이내의 수직도를 보정하는 것을 목표로 설정하여 스트로크를 80cm로 정하였다. 설계하중은 원형강관의 무게인 350ton을 고려하여, 엑츄에이터는 200ton급과 350ton급에 대해 개략 제원을 검토하여 본 연구에서는 케이블 두 줄이 원형강관을 지지하도록 하는 조건으로 안전율을 고려하여 엑츄에이터 지지 하중조건을 200ton으로 선정하였다. 선정된 엑츄에이터에 대해 수치해석을 수행한 결과 요소(실린더, 피스톤로드, 로드 커버, Y-clevis)별 안전율은 1.6~2.4로 나타나, 1.5 이상의 안전율을 확보하여 구조안정성을 확인하였다.
- 메인 프레임은 하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준을 따라 하중계수와 부분안전계수를 사용하였으며, I빔을 이용한 메인 프레임을 설계하였다. 메인 프레임에 작용하는 최대하중에 저항하기 위한 정사각 형태의 프레임에 대각선 방향의 I빔으로 보강하였다. I빔의 연결에는 강재플레이트와 고장력볼트가 사용되며, 각각의 부재와 연결부는 수치해석을 통하여 구조 안전성을 확인하였다. 메인 프레임과 와이어, 엑츄에이터를 연결하기 위해 사용되는 상·하부 lifting lug는 동일한 형상의 lifting lug가 사용된다. 상부에 배치되는 lifting lug의 경우 와이어와 메인 프레임 사이에 발생하는 각도를 고려하여 프레임 중앙 방향으로 45° 회전하여 배치하였으며, 하부 lifting lug의 경우에는 수직하중이 지배적으로 작용하기 때문에 회전각도에 크게 영향을 받지 않아 자유롭게 배치가 가능하다. 모든 부재와 연결부는 최대하중이 작용하는 경우에 대한 수치해석을 통하여 구조안전성을 확인하였다.

제 3 장 수직도 제어정보시스템 개발

제 3 장 수직도 제어정보시스템 개발

3.1 개요

원형강관 석션관입 과정에서 기울어지면 수직도를 보정하기 위해서는 경사계와 같은 계측장비를 유/무선으로 설치하여 모니터링하는 기술이 적용되고 있다. 대형 원형강관 해상 설치시 유선으로 계측기를 연결하는 경우 원형강관 설치 과정에서 다른 공정 및 장비에 방해가 되지 않도록 관리하여야 하며, 간혹 케이블이 끊어져 계측데이터를 확보하지 못하는 문제가 발생할 수 있는 등의 단점이 있다. 무선으로 연결하는 경우에는 육상에서 먼 해상에 원형강관을 시공시 통신접속이 원활하지 않을 수 있다.

본 연구에서는 통신이 불가한 지역에서도 원형강관 시공시 수직도 정보를 무선 접속하여 실시간으로 모니터링하고 이를 3D로 가시화하여 작업자가 직관적으로 수직도 상태를 파악하여 수직도 확보 시공에 활용할 수 있도록 수직도 제어정보시스템을 개발하였다. 기본적인 시스템 개념은 아래 그림과 같이 상용화된 기울기 센서에 컨트롤러와 연결하고 이를 무선으로 접속하여 수직도 정보 가시화 GUI에 연결하는 방식이다.

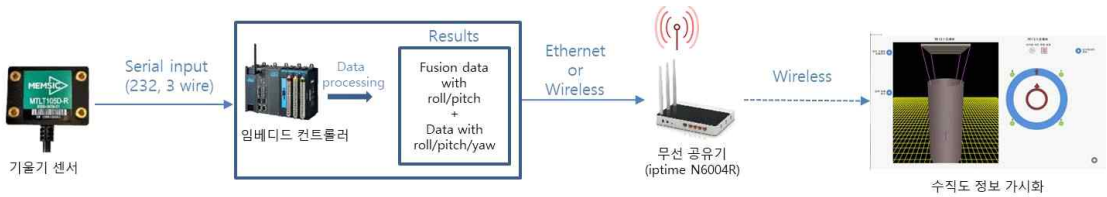


그림 3.1 수직도 제어정보시스템 개념도

3.2 수직도 실시간 모니터링을 위한 제어정보시스템 개발

3.2.1 시스템 설계

가. 수직도 측정을 위한 센싱 파라미터 도출

1) 원형강관 수직도 측정

원형강관의 기울기는 2개의 1축 센서 혹은 1개의 2축 센서로 측정이 가능한데, 본 연구에서는 시스템 단순화를 위해 2축 센서로 선정하였다. 또한 원형강관 가설공법 적용 설치 현장의 진동 등 외부 환경 요인으로 인해 양질의 데이터 수집이 어렵다. 따라서 수직도 데이터 신뢰성 향상을 위해 2개의 2축 센서를 적용하는 것으로 계획하였다.

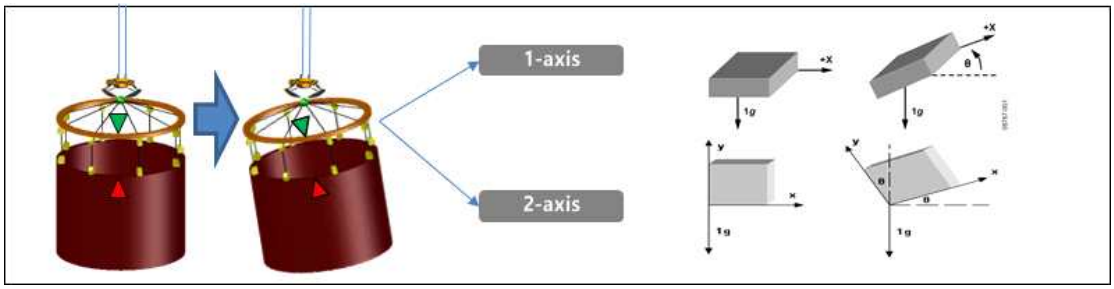


그림 3.2 원형강관 수직도 측정 모식도

2) 프레임의 자세정보

리프팅용 프레임의 회전 등 움직임으로 인한 원형강관과 프레임의 상대변위를 측정하고 변위차이에 의한 위치별 케이블 장력 발생지점을 예측하고자 3축 센서 1개를 상단 프레임에 장착하여 회전을 포함하여 원형강관과의 상대적 변위 변화를 모니터링하고자 하였다.

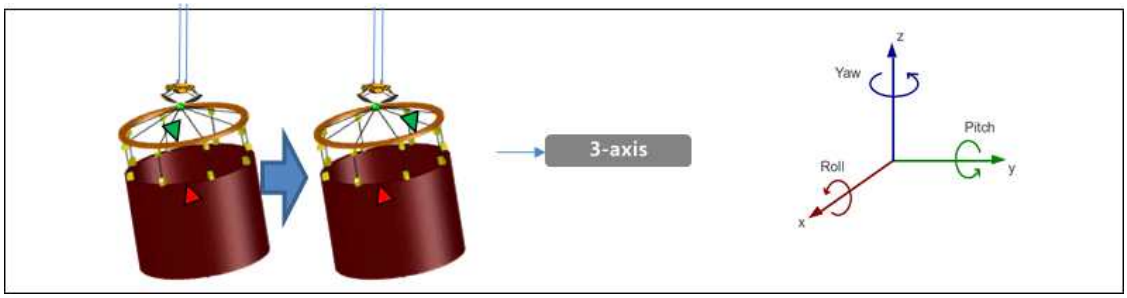


그림 3.3 원형강관과 리프팅프레임 상대변위 측정을 위한 3축센서 적용 개념도

3) 활용센서 장착위치 선정

원형강관과 프레임의 센서 및 센싱데이터 수집장치 위치를 결정하기 위해 아래와 같은 사항을 고려하였다.

표 3.1 센서 및 센싱 데이터 수집 장치 설치 시 고려사항

장치	고려사항
2축 기울기 센서	- 정확한 기울기 측정을 위해 강관과 밀착 필요 - 센서 및 케이블 수밀 - 운용환경 고려 필요
3축 기울기 센서	- 정확한 회전 측정을 위해 프레임과 밀착 필요 - 센서 및 케이블 수밀 - 운용 환경 고려 필요
센싱 데이터 수집 장치	- 데이터 수집 장치의 수밀 - 센서의 유선 연결 용의 - 무선 데이터 송신 고려

나. 수직도 측정을 위한 센싱시스템 구성

1) 센싱시스템 구성시 고려사항

원형강관 수직도 측정을 위한 센싱시스템을 설계하기 위해 아래와 같이 센서사양, 센싱 데이터 수집/분석 장치, 시스템 소프트웨어 설계요소에 대한 사항을 고려하였다.

표 3.2 센싱시스템 구성시 고려사항

항목	고려사항
센서 사양	- 센서 자체의 신뢰도 및 제작사의 수급 가능성 - 측정 범위: 각 축별 ±90° - 정밀도: 소수점 이하 첫 자리 - 동작범위: -10 ~ +70 ° C - IP65급 이상 센서를 선정해야 하며, 실제 시스템에서는 IP68급 하우징 필요
센싱 데이터 수집/분석 장치	- 입력지원: 복수개의 analog, UART 지원 필요 - 데이터 전송 지원, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth 지원 - 일반 제원: ARM 또는 Intel 기반 Linux 운영체제 필요 - 향후 기능 확장을 위해 다양한 출력 포트 필요 - 요구조건을 만족하는 장치 선정 후, 하우징을 통한 IP67급 이상 방수 기능 필요
시스템 소프트웨어 설계	- 각 센서의 독립적 센싱 지원 필요 - 향후 개별 센서 추가 고려한 확장성 제공 필요 - 복수 센서로부터 얻어진 데이터의 실시간 가공 가능

시스템 소프트웨어 설계는 각 센서 별도로 쓰레드(thread)를 생성하여 데이터를 수집하고, 수집된 데이터는 쓰레드 간 통신 기법의 하나인 IPC(Inter-process communication) 기법을 통해 공유하는 구조로 결정하였다.

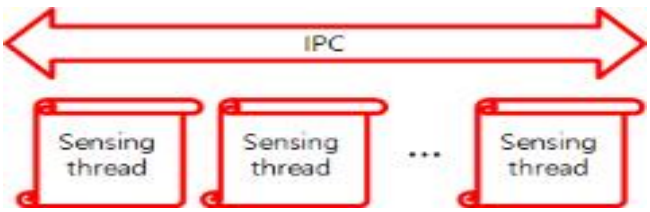


그림 3.4 IPC 기법

2) 센싱시스템 프로토타입 테스트

요소별 고려사항을 반영한 센싱시스템의 작동 유무를 확인하기 위해 프로토타입을 제작하였고 예비실험을 수행하였다. 프로토타입에는 아래 그림과 같이 2개의 2축 기울기 센서, 1개의 3축 센서, 데이터 수집/분석 장치인 컨트롤러로 구성되어 있다. 각 센서별로 컨트롤러에 연결하여 센싱테스트 수행결과 2축 센서에서 표출되는 roll, pitch와 3축 센서의 roll, pitch, yaw(회전) 방향에 대한 기울기 정보가 정상적으로 측정됨을 확인하였고 측정된 경사를 컨트롤러를 통해 실시간으로 모니터링되는 것을 확인하였다. 테스트 종료 후 컨트롤러에 저장된 raw 데이터를 통하여 원하는 방향(축)별로 1초당 1개의 데이터 수집이 가능하였다.

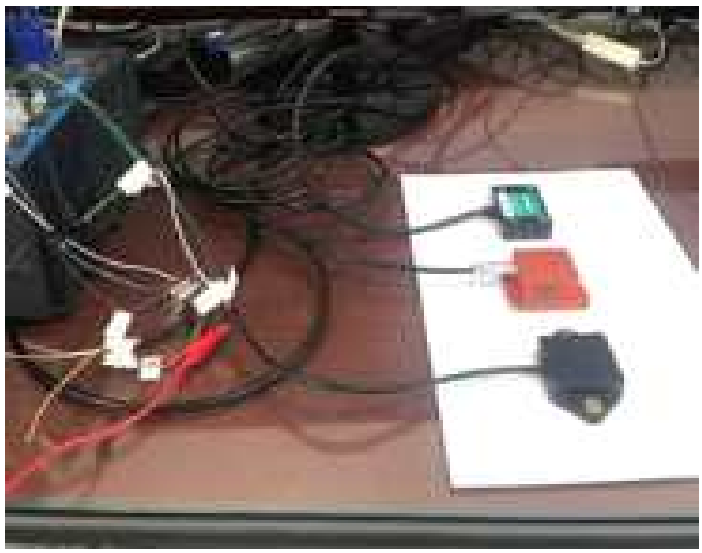


그림 3.5 센싱시스템 프로토타입 테스트 사진

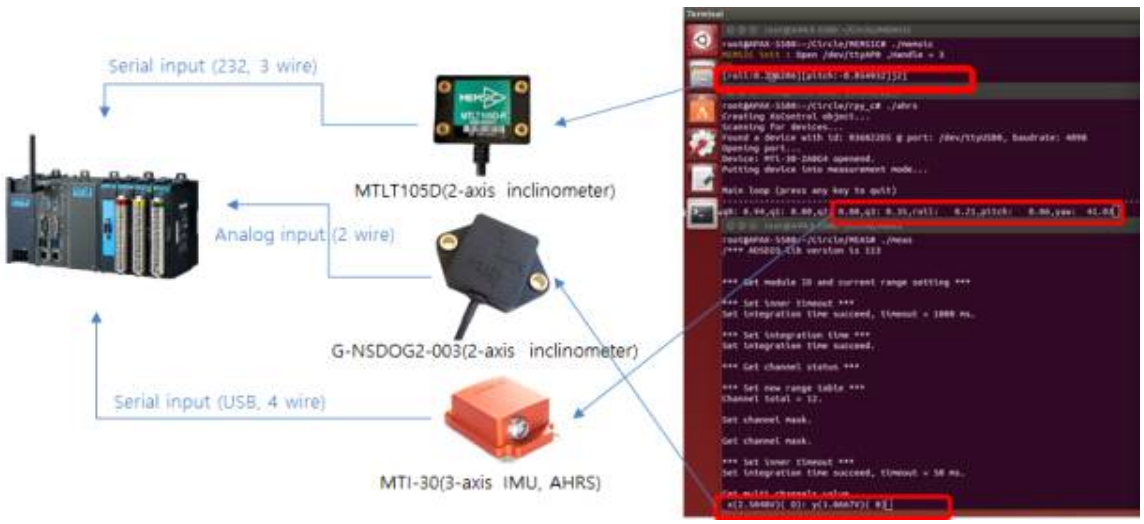


그림 3.6 센싱시스템 프로토타입 테스트 결과

다. 다중 센서 기반 수직도 측정 정확도 향상 기법 설계

원형강관의 진동 등 외부 요소에 의한 오차를 최소화하기 위해 동일한 센서를 동일한 방향으로 2개 설치하여 기울기를 측정함으로써 측정 정확도를 향상시키는 센싱 데이터 fusion 기법을 설계하였다.

그림에서 나타나듯이 제안한 수직도 측정 정확도 향상 기법은 크게 두 단계의 과정으로 구성되어 있다.

- 단계 1: Filtering 단계에서의 small-scale 오차 감소를 위한 exponential smoothing 기법 [1] 적용

2종의 수직도 센서를 통해 수집된 각각의 raw data를 exponential smoothing 기법을 활용하여 small-scale의 오차를 줄인다. 본 연구에서 활용한 exponential smoothing 기법은 시계열분석의 대표적인 기법으로써, 과거의 획득한 모든 수직도 데이터를 사용하여 평균을 구하면서 최근 획득한 수직도 데이터에 더 높은 가중치를 부여하는 방법이다. 단기간에 발생하는 파동이나 충격을 완화하는 smoothing method이다. exponential smoothing을 위해 활용하는 수식은 아래와 같다.

$$S_t = \alpha y_{t-1} + (1-\alpha) S_{t-1} \tag{3.1}$$

위의 수식에서 S_t는 시간 t의 예측 값, S_{t-1}는 시간 t-1의 예측 값, y_{t-1}은 시간 t-1의 실제 값, α는 0과 1사이의 값을 가지는 exponential smoothing 계수이다. exponential smoothing 계수는 가중치 역할을 하는 것으로 불규칙이 큰 자료에서는 작은 값의 α를 적용하고 불규칙이 작은 자료에서는 큰 값의 α를 적용한다. 아래의 설명할 그림의 결과를 얻기 위해 $\alpha = 0.3$으로 설정 하였다.

- 단계 2: Fusion 단계에서의 large-scale 오차 감소를 위한 central limit theorem 기법 [2] 적용

단계 1로부터 획득한 2종의 수직도 센서 데이터를 central limit theorem 기법을 활용해 퓨전 데이터를 생성한다. 이를 통해 각각의 수직도 센서의 데이터 측정 시 외부 요 인으로 인하여 발생하는 large-scale 오차를 줄일 수 있다. Central limit theorem을 위해 활용하는 수식은 아래와 같다.

$$x_3 = \sigma_3^2(\sigma_1^{-2} x_1 + \sigma_2^{-2} x_2) \tag{3.2}$$

위의 수식에서 x_1, x_2는 2 종의 수식도 센서 데이터, σ_1, σ_1는 센서 데이터 측정 시의 noise variance, $\sigma_3^2 = (\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2})^{-1}$는 퓨전 데이터 예측 시 variance, x_3는 x_1와 x_2를 퓨

전 한 데이터를 의미한다. 이러한 central limit theorem 기법은 fusion을 위한 데이터 수(즉, 센서 수)가 많아지면 많아질수록 더 나은 성능을 발휘한다.

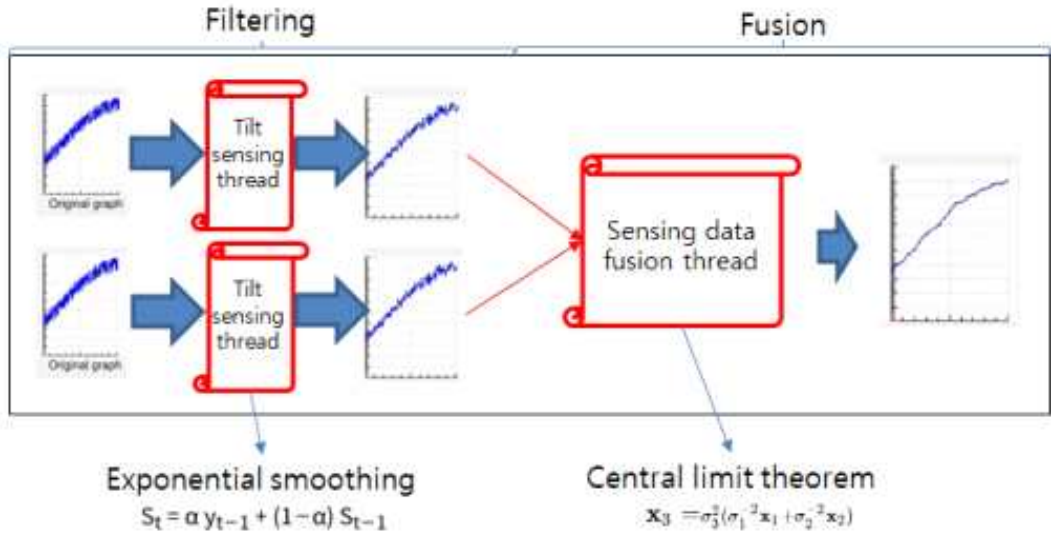
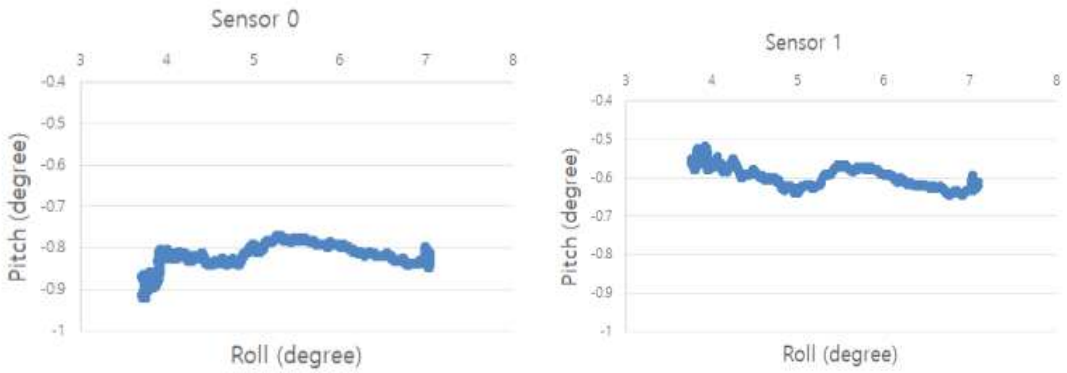


그림 3.7 다중 센서 기반 수직도 측정 정확도 향상 기법 개념도

아래는 다중 센서 기반 수직도 측정 정확도 향상 기법 실현을 위한 리눅스 코드의 주요 부분이다.

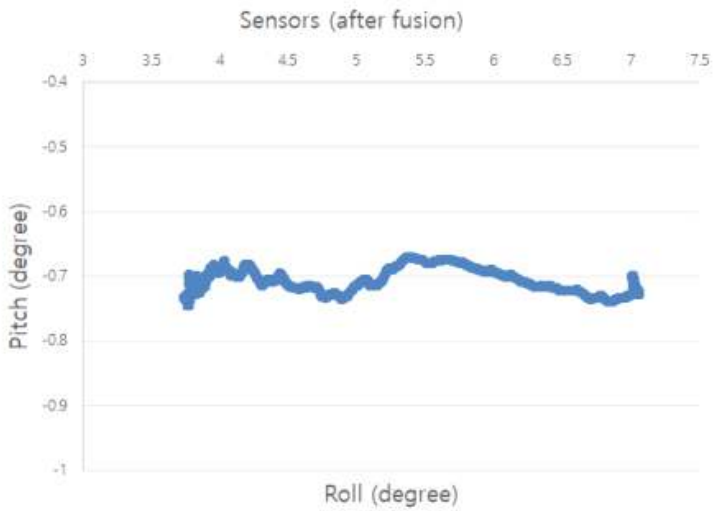
```
while(1){
    iRet = read(hdlCom1, (unsigned char *)buf1, MEMSIC_PACKET_LENGTH);
    sp = (short *)&buf1[5];
    a1 = htons(*sp);
    sp = (short *)&buf1[7];
    b1 = htons(*sp);
    roll1 = ((float) a1*2/65536)*180 - rroll1;
    pitch1 = ((float) b1*2/65536)*180 - rpitch1;
    iRet = read(hdlCom2, (unsigned char *)buf2, MEMSIC_PACKET_LENGTH);
    sp = (short *)&buf2[5];
    a2 = htons(*sp);
    sp = (short *)&buf2[7];
    b2 = htons(*sp);
    roll2 = ((float) a2*2/65536)*180 - rroll2;
    pitch2 = ((float) b2*2/65536)*180 - rpitch2;
    roll = (aw*roll1 + bw*roll2)/2;                    //aw=weight of sensor a
    pitch = (aw*pitch1 + bw*pitch2)/2;                 //bw=weight of sensor b
    printf("₩r[roll:%f][pitch:%f]", roll, pitch);
    gettimeofday(&tv, NULL);
    tm1 = localtime(&tv.tv_sec);
    if (csec != tm1->tm_sec){
    csec = tm1->tm_sec;
    fprintf(fp_lf, "%02d%02d%02d %f %f₩n", tm1->tm_hour, tm1->tm_min,
    tm1->tm_sec, roll1, pitch1);
                }
```

다음 그림은 2종의 수식도 센서(Sensor 0, Sensor 1)의 raw data 데이터(그림 (a)), exponential smoothing 기법을 활용해 획득한 filtering 데이터(그림 (b)), central limit theorem 기법을 활용해 획득한 fusion 데이터 결과를 나타낸다.



(a) raw data

(b) filtering data



(c) Fusion data

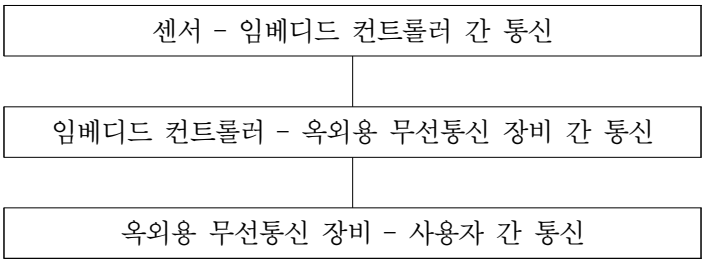
그림 3.8 다중 센서 기반 수직도 측정 정확도 향상 기법 적용 결과

그림 (a)와 (b)의 비교를 통해 Exponential smoothing 기법을 적용한 경우 각각의 센서 raw data에 존재 하였던 small-scale variation이 제거 되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 (b)와 (c)의 비교를 통해, central limit theorem을 적용하였을 경우 fusion data는 sensor 0과 sensor 1의 filtering data의 합의 평균값으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다. Data fusion을 위한 data set(즉, 센서의 수)을 증가 시키거나 noise variance 값의 최적화 작업을 수행하면 좀 더 정확한 수직도 측정값을 획득 할 수 있다.

라. 수직도 계측 정보의 실시간 획득을 위한 통신 프로토콜 설계

1) 수직도 계측 정보 실시간 공유를 위한 데이터 전송 절차

본 연구에서는 multi-fusion sensor 데이터를 원형강관 가설공법 적용현장 (예, 대형 바지선 기준 길이 100m, 폭 36m) 전 영역에서 실시간으로 확인 가능하게끔 하는 데이터 통신 네트워크를 설계하는 것이 목표이다. 수직도 계측 센서 정보가 원형강관 적용현장 내 사용자에게 전송되기까지는 아래와 같은 데이터 통신 단계가 요구된다.



- 단계 1: 센서-임베디드 컨트롤러 간 데이터 통신

Multi-sensor fusion 데이터를 생성하기 위해서, 2종의 2축 수직도 센서 (MTLT105D, G-NSDOG2-003) 데이터와 1종의 3축 센서 데이터를 임베디드 컨트롤러(APAX 5580)에 전송해야 한다.

- 단계 2: 임베디드 컨트롤러-옥외용 무선통신 장비 간 데이터 통신

임베디드 컨트롤러에서 수집한 센서 데이터를 활용해 multi-sensor fusion 데이터를 생성한 후 이를 사용자에게 무선 전송하기 위해서는, 옥외에서 동작 가능한 옥외용 무선통신 장비가 필요하고 이와의 데이터 전송이 요구된다.

- 단계 3: 옥외용 무선통신 장비 - 사용자 간 데이터 통신

원형강관 작업현장 내 다수의 사용자가 multi-sensor fusion 데이터를 실시간 공유하기 위해서는 옥외용 무선통신 장비가 다수의 사용자에게 동시 데이터 전송을 해야 한다.

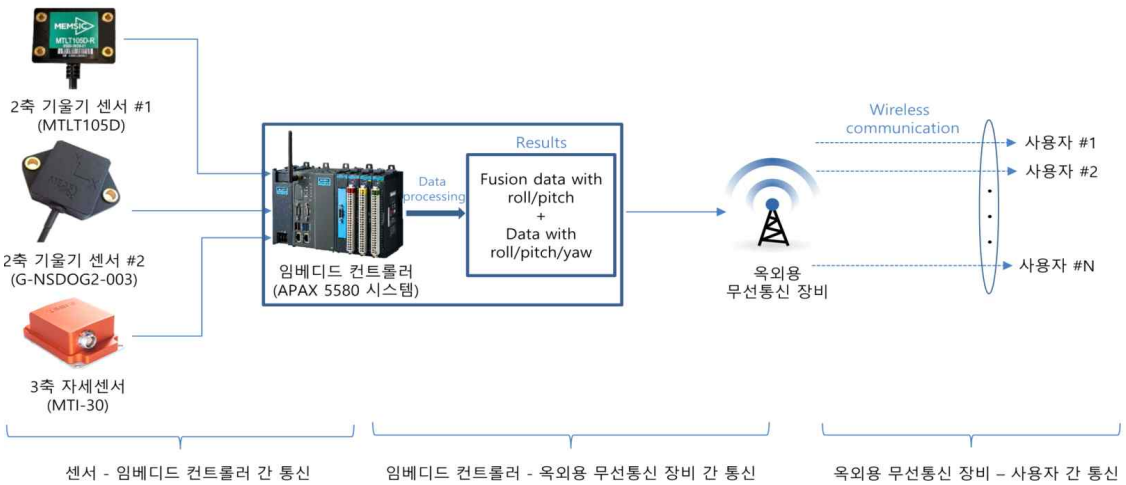


그림 3.9 수직도 계측정보 실시간 공유를 위한 데이터 전송 흐름도

2) 수직도 계측 데이터 실시간 공유을 위한 무선 통신 요구사항 도출

수직도 계측 데이터 실시간 공유 가능한 통신 네트워크 설계의 첫 번째 단계로써, 무선 통신 요구 사항을 아래와 같이 도출하였다.

① 요구사항 1: 데이터 율

원형강관 수직도 측정을 위해 2축 센서 2개를 활용하여 8 byte 크기의 multi-fusion 데이터를 생성하고, 케이블 장력 측정을 위해 3축 센서 1개를 활용하여 8 byte 크기의 데이터를 생성한다. 또한 사용하는 2축/3축 센서는 초당 최대 120회의 데이터를 발생시키기 때문에, 수직도 계측 정보 실시간 공유를 위해 초당 요구되는 데이터 량은 아래와 같다.

$$8bytes \times 2 \times 120/\sec = 15,360 bits/\sec \tag{3.3}$$

② 요구사항 2: 전송거리

원형강관 가설 작업장 전 영역에서 수직도 계측정보 공유가 가능한 무선 통신 네트워크 설계를 목표로 하고 있기 때문에, 원형강관 가설을 위한 대형 바지선 크기를 길이 100m, 폭 36m이라 설정하고 이 영역 내에 어디에서든지 무선 통신을 통해 데이터 공유를 가능케 하는 네트워크 구축을 목표로 한다.

3) 센서-임베디드 컨트롤러 간 데이터 통신 프로토콜 조사

3종의 센서와 임베디드 컨트롤러 간 데이터 통신을 위해 각 센서 통신 프로토콜(output 출력)을 메뉴얼을 통해 확인하였다. 각 센서 통신 프로토콜은 다음 표와 같다.

표 3.3 센서-임베디드 컨트롤러 간 데이터 통신 프로토콜

센서	통신 프로토콜
2축 기울기 센서 #1 (MTLT105D)	Serial (RS-232)
2축 기울기 센서 #2 (G-NSDOG2-003)	Analog (voltage)
3축 자세센서 (MTI-30)	Serial (USB)

위의 센서 통신 프로토콜을 모두 지원하는 임베디드 컨트롤러를 선정하고, 각 센서의 데이터를 위의 통신 프로토콜을 통해 임베디드 컨트롤러에서 수집한다.

4) 옥외용 무선통신 장비-사용자 간 데이터 통신을 위한 통신 프로토콜 조사·선정

수직도 계측정보의 실시간 획득을 목표로 하는 관점에서 상용 무선통신 프로토콜(예, Wi-Fi, Bluetooth, LTE)을 조사하고 이를 활용할 경우 예상되는 장단점을 분석하였다.

표 3.4 상용 무선통신 프로토콜 비교

통신 프로토콜	Wi-Fi	Bluetooth	LTE
장점	비용 발생하지 않음 Wi-Fi 통신 파라미터 수정으로 인해 저지연 통신 실현 가능성이 존재	저비용 통신 모듈 저전력 모드 동작 가능	- 고신뢰 통신 가능
단점	비면허 대역 사용으로 인한 사용자의 Quality of service를 보장 못할 수 도 있음 장거리 통신의 어려움	고용량 데이터 전송 불가능 통신 프로토콜의 수정의 어려움	통신 프로토콜 수정의 어려움 통신망 사용을 위한 비용 발생 해상에서 통신망 활용 여부 불투명

장단점 분석 결과, 수직도 계측 정보 실시간 공유를 위한 무선통신 요구사항 만족이 가능하면서 통신 프로토콜 수정의 여지가 있는 Wi-Fi를 옥외용 무선통신 장비-사용자 간 데이터 통신을 위한 무선통신프로토콜로 선정하였다.

마. 센싱 데이터 전송기법 도출

원형강관의 수직도 상태정보를 올바르게 모니터링하기 위해서는 센서를 이용하여 수집된 데이터를 실시간으로 전송해야 한다. 또한, 원형 강관의 올바른 수직도 상태를 알기 위

해서는 데이터 전송 속도 뿐만 아니라 전송되는 데이터의 신뢰성 또한 중요하다. UDP 프로토콜은 TCP/IP 프로토콜에 비해 전송 속도가 더 빠르지만 데이터 전송 신뢰성을 고려하여 TCP/IP 프로토콜을 이용해 센싱 데이터를 전송하였다. 또한, 수직도 제어정보 시스템은 동시 접속자 수가 상대적으로 많지 않은 특성이 있으며 다양한 운영체제를 탑재한 모니터링 장비에서 운영이 가능해야 한다. 따라서 다양한 운영체제를 지원하는 멀티플렉싱 함수 select()를 사용하여 다중접속을 구현했다. 1. fd_set형 변수를 0으로 초기화를 위해 FD_ZERO() 호출, 2. 서버 소켓을 등록하기 위하여 FD_SET() 호출, 3. 준비된 client를 확인하기 위한 select() 호출, 4. 상태변화가 있었던 파일 디스크립터를 찾기 위하여 FD_ISSET() 호출, 5. 소켓의 연결 허용을 위한 accept() 호출, 6. 새로 연결된 파일 디스크립터 등록을 위한 FD_SET() 호출이 추가 구현되었으며, 데이터 전송이 필요할 경우 7. write()를 호출하고 select() 함수로 이동하며, 연결 종료 요청의 경우 8. FD_CLR()를 호출한 후 select() 함수로 이동한다.

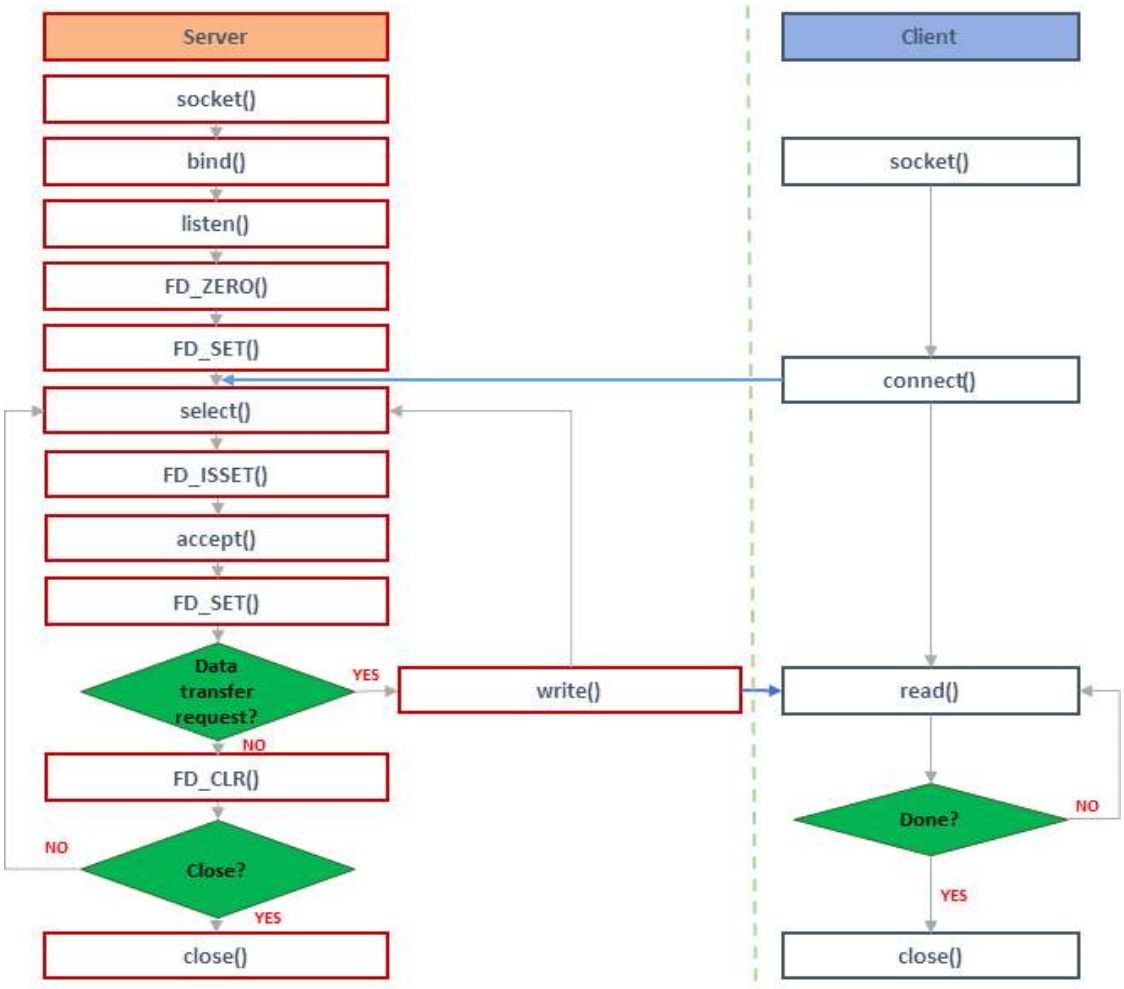


그림 3.10 수직도 제어정보시스템 다중접속 흐름도

바. 수직도 제어정보시스템 개발 및 구축

원형강관의 수직도 정보는 앞서 설계한 바와 같이 원형강관과 상부 프레임의 roll/pitch/yaw, 상부 프레임과 원형강관의 상대적 위치변화 및 기울어진 상태로 표현된다. 이들 정보의 효율적 수집과 표출을 위해 아래 그림과 같은 형태의 수직도 제어정보시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 센서부, 컨트롤러부, 디스플레이부로 구성되어 있다. 센서부는 최소 2축 이상의 기울기 측정이 가능한 센서로 구성되어야 하며, 본 연구에서는 ACEINNA社의 MTLT105D-R 2축 센서를 이용하여 데이터를 수집하였다. 데이터의 신뢰성을 위해 동종 센서를 복수 개 부착하거나 이종 센서를 복수 개 부착 후 수집된 데이터를 퓨전(fusion)함으로써 기존과 다른 수준의 정보를 제시하는 것이 가능하다. 이에 따라 센서부는 RS-232/422/485 등의 UART 입력 및 아날로그/디지털 입력 신호 등 다양한 종류의 센서를 필요에 따라 복수 개 장착할 수 있도록 설계하였다. 컨트롤러부는 DVANTECH社의 APAX-5580 컨트롤러를 통해 다양한 복수 개의 센서로부터 데이터를 입력받아 수집된 데이터를 전처리하고 결정된 수직도 정보를 유/무선 통신으로 전송한다. 디스플레이부는 컨트롤러로부터 원형강관 수직도 데이터를 수신받아 3D로 디스플레이함으로써 원형강관 수직도 정보의 직관적인 파악을 가능하게 한다. 컨트롤러부와 디스플레이부는 유/무선 통신으로 데이터 송/수신이 가능하며 필요시 별도의 사설망을 구축하여 내부망으로 데이터를 주고받는다. 추가적으로, 컨트롤러는 계측된 정보에 따라 강관의 수직도를 동적으로 자동제어하기 위해 복수 개의 아날로그/디지털 출력 신호를 인가할 수 있다.

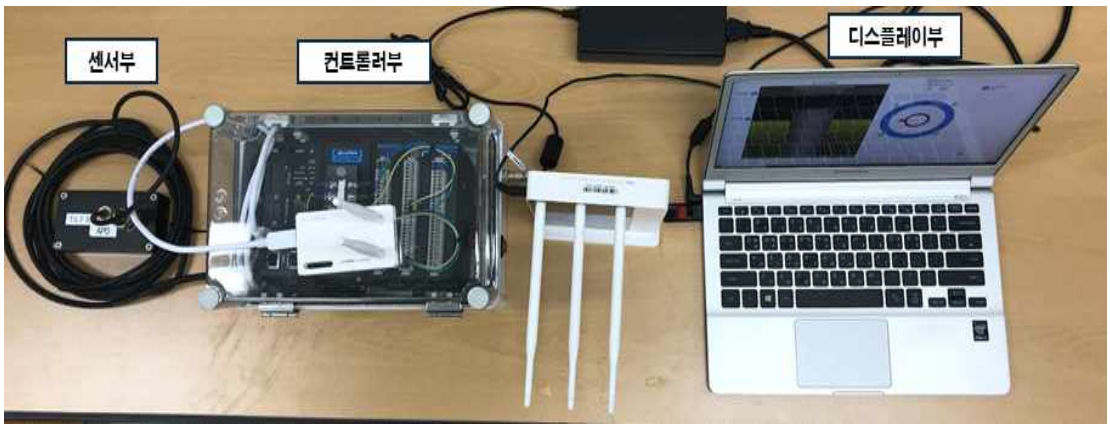


그림 3.11 수직도 제어정보시스템

3.2.2 수직도 제어정보 GUI 설계

가. 수직도 모니터링 알고리즘 및 데이터 표출

원형강관의 기울어진 정도를 가시적으로 쉽게 판단할 수 있도록 최대 기울기 각도를 인디케이터로 나타냈으며, 리프팅 제어정보는 각기 다른 색상으로 표현하였다. 각도와 색상은 수집된 계측 데이터 기반으로 계산되며 계산기법 알고리즘(코딩)은 다음 그림과 같다.

```
icoArrow1 = new Bitmap(Resources.icoArrow2, new Size(180, 220));

mm = new Matrix();
mm.Translate(210, 190 + viewStep);

Vector3 currPos = new Vector3((float)pipeRoll, (float)pipePitch, 0);

const double TWOPI = 6.2831853071795865;
const double RAD2DEG = 57.2957795130823209;

double tmpTheta = Math.Atan2(pipePitch - prevPos.Y, prevPos.X - pipeRoll);
if (tmpTheta < 0.0)
    tmpTheta += TWOPI;
float bearing = (float)(RAD2DEG * tmpTheta);

bearing += 90;
mm.Translate(-currPos.X * 3f, currPos.Y * 3f);
mm.Translate(icoArrow1.Width / 2, icoArrow1.Height / 2);
mm.Rotate(bearing);
mm.Translate(-icoArrow1.Width / 2, -130);

pGArrow1.Transform = mm;
pGArrow1.DrawImage(icoArrow1, new Point(0, 0));

prevPos = currPos;
```

그림 3.12 인디케이터 표출 알고리즘

```
int agl = 0;

foreach (LineInfo lineInfo in lines)
{
    mm = new Matrix();
    mm.Translate(300 - 20, 300 - 20 + viewStep);

    float x = (float)(280 * Math.Sin(Deg2Rad(lineInfo.lineAngle - displayAngle)));
    float y = (float)(280 * Math.Cos(Deg2Rad(lineInfo.lineAngle - displayAngle)));

    mm.Translate(x, y);
    pGArrow1.Transform = mm;

    if (bSetOrignProcess)
    {
        float vecLength = (lineInfo.origPosPipe - lineInfo.posLastPipe).Length;
        float yLength = lineInfo.posLastPipe.Y - lineInfo.origPosPipe.Y;

        lineInfo.labelInfo.Text = "라인#" + lineInfo.lineIdx + "  " + GetString(yLength, "F2");

        float moveRatio = (lineInfo.origPosPipe.Y - lineInfo.posLastPipe.Y);

        //set icon to up & down & balance
        if (balanceMin < moveRatio && moveRatio < balanceMax)
            pGArrow1.DrawImage(icoMarkerBalance, new Point(0, 0));
        else if (lineInfo.origPosPipe.Y < lineInfo.posLastPipe.Y)
            pGArrow1.DrawImage(icoMarkerUp, new Point(0, 0));
        else
            pGArrow1.DrawImage(icoMarkerDown, new Point(0, 0));
    }
    else
    {
        pGArrow1.DrawImage(icoMarkerBalance, new Point(0, 0));
    }
    agl += lineAngle;
}
```

그림 3.13 리프팅케이블 개별조절을 위한 위치별 케이블 색상 변화 표출 알고리즘

나. GUI 구성 및 기능

일반적으로 경사계 계측 센서를 통해 획득되는 데이터는 설정된 축방향에 대해서만 기울기 값을 수치적으로 확인할 수 있으므로 원형강관 경사방향 등을 직관적으로 판단하기 용이하지 않다. 본 연구에서는 원형강관 자세정보를 쉽게 확인할 수 있는 GUI(Graphical User Interface)를 개발하였다. 수직도 모니터링 GUI는 상부 프레임과 하부 강관 자세 정보, 3D 디스플레이 화면, 2D 디스플레이 화면과 리프팅 라인 정보, 설정 창 버튼으로 구성하였다. 3D 디스플레이 화면은 마우스 휠 버튼과 드래그를 통해서 원형 강관을 줌 인/아웃, 회전하여 자세히 세부상태를 볼 수 있도록 하였다. 2D 디스플레이 화면은 리프팅 라인 원점을 설정할 수 있도록 하였고 원형강관 중앙에 인디케이터를 위치시키고, 강관의 기울기가 허용 범위를 넘을 경우에는 표출되는 색에 변화를 주어 강관이 어느 쪽으로 어느 정도 기울어졌는지 직관적으로 파악이 가능하도록 하였다. 또한, 리프팅 라인에는 수직도가 허용범위 이내일 경우에는 초록색으로 표시되지만, 허용범위 이상일 경우 리프팅케이블 제어가 필요한 위치가 빨간색으로 변하게 되어 사용자의 편의성을 고려하였다. 설정 창은 메인 화면의 우측 하단 버튼을 클릭하여 진입할 수 있으며, 3D 모델링 설정창, 수평도 표시 범위 설정 창, 원형 라인 설정 창, 서버 연결 설정 창으로 구성하였다. 3D 모델링 설정 창은 원형 강관 시공 형태에 맞게 상부 프레임의 모양과 리프링 라인의 개수를 선택할 수 있게 하였으며, 사용자에 따라 강관의 3D 모델 크기를 조정할 수 있다. 수평도 표시 범위 설정 창은 시공 목적에 따라 강관의 기울기의 정도의 한계를 정할 수 있다. 리프팅케이블 설정 창은 원형강관 시공 시 적용된 케이블 라인의 개수와 설치된 위치에 따라 설정할 수 있다. 서버 연결 설정 창은 수직도 계측 정보를 활용한 시스템 S/W의 IP 주소를 입력하여 접속할 수 있도록 하였다. 접속이 완료되면 센싱된 값을 3D GUI에 디스플레이가 되어 원형강관 석션관입시 실시간으로 기울어진 위치와 경사를 직관적으로 쉽게 파악할 수 있으므로 현장에서 수직도 확보를 위한 즉각적인 대응에 도움을 줄 수 있다.

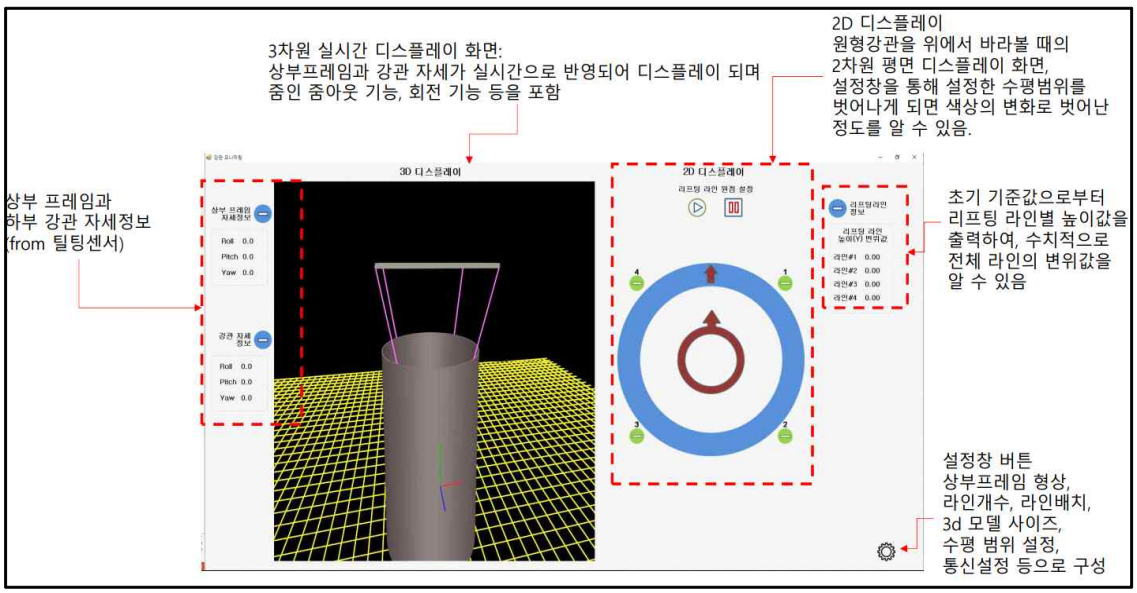


그림 3.14 GUI 구성

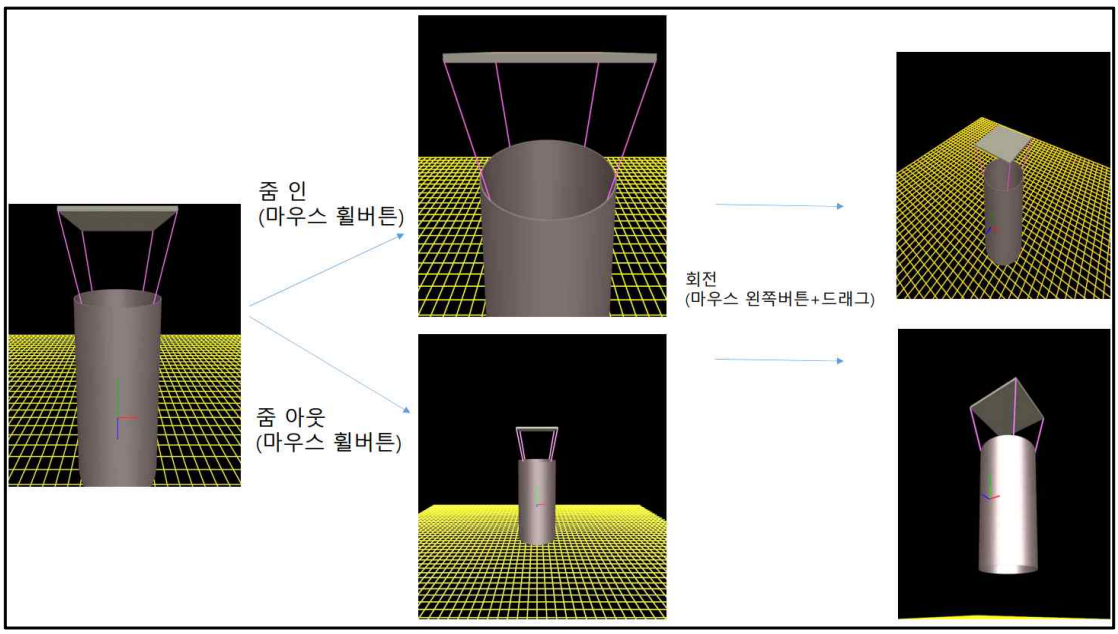


그림 3.15 원형강관 수직도제어정보 GUI 3D 디스플레이

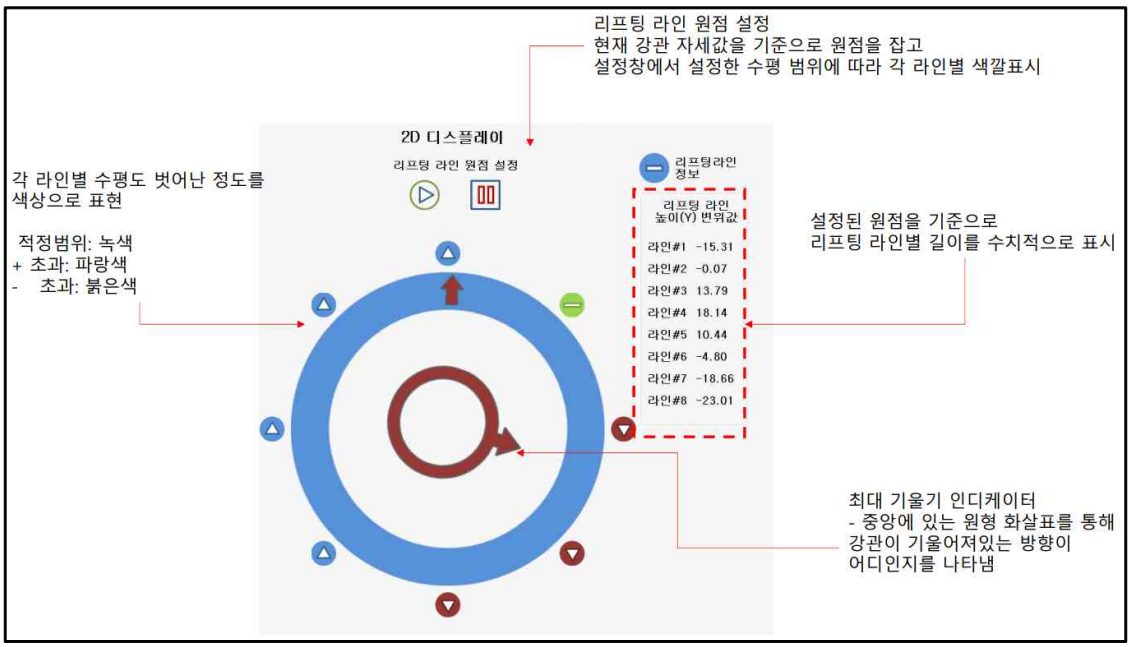


그림 3.16 2D 디스플레이 기능

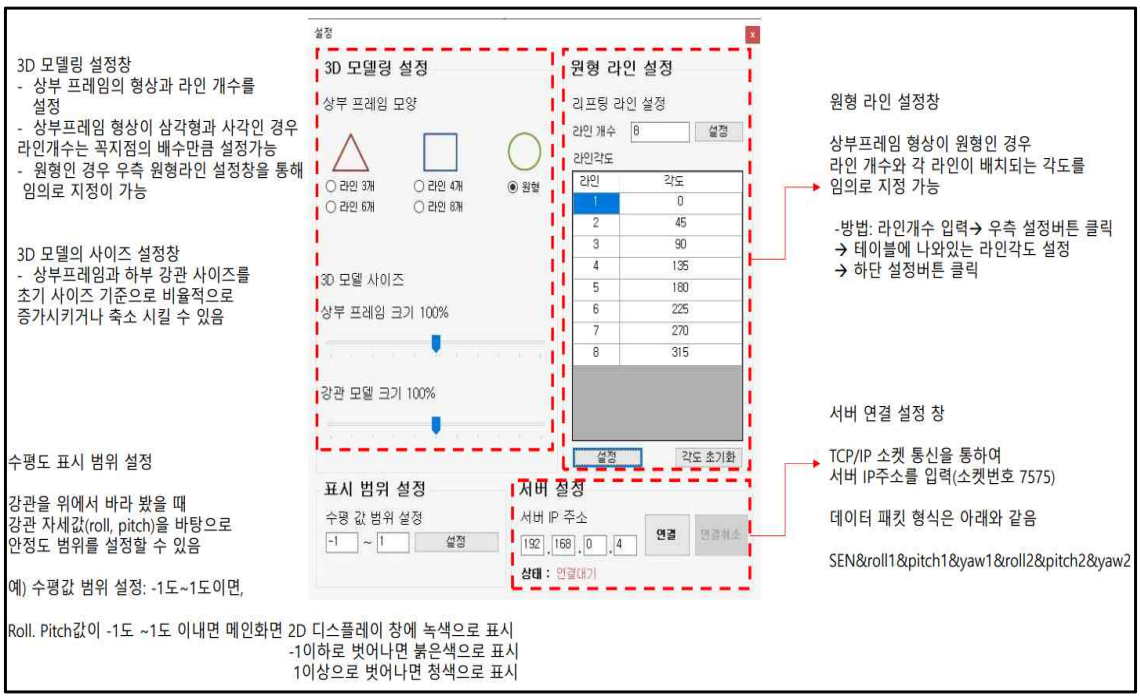


그림 3.17 프로그램 설정창

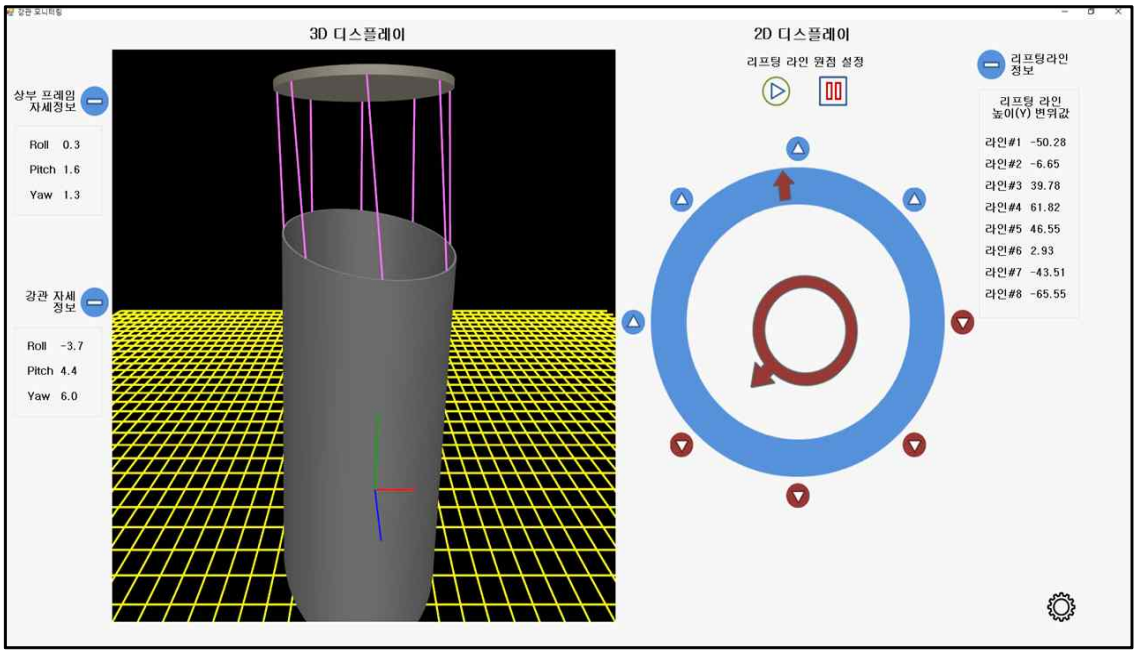


그림 3.18 프로그램 실행화면

3.3 수직도 제어정보시스템 성능 평가

3.3.1 수직도 표준오차율 평가

본 과제에서 사용한 ACEINNA社의 MTLT105D-R 2축 센서는 아래 그림에 나타낸 바와 같이 0.5% 미만의 오차율을 제공한다. 이를 정량적으로 측정하기 위해 그림과 같이 실측 실험을 수행하였다. 실제 측정된 상용 어플리케이션과 수평계를 통해 0° 상태의 기울기를 맞춰 놓은 후 값을 비교한 결과 수직도정보의 오차율은 0.1%로 나타나 본 연구의 정량적 목표인 표준오차율 5%미만을 만족하였다.

Performance Characteristics
Ta = 25°C, VDC = 15.0V, unless otherwise stated

Sensor Performance	
Axes (Tilt)	Pitch; Roll
Range	±90°, ±180°
Resolution	0.05°
Static Accuracy[1] (-40 to 70C)	0.5°
Dynamic Accuracy[2] (-40 to 70C)	2.0°
Axes (Acceleration)	X, Y, Z
Range (g)	±4
Resolution (mg)	0.5
Accuracy (mg) (±1g input; -40 to 70C)	±10
Programmable Tilt Alarm Vout (V)	3.3
Bandwidth (Hz)	50
Electrical	
Input Voltage (V)	9 to 32
Power Consumption (mW)	< 400
Interface	RS-232
Environment	
Operating Temperature (°C)	-40 °C to 70°C
Non-Operating Temperature (°C)	-55 °C to 85°C
Physical	
Enclosure	Plastic
Size (mm)	54 x 40 x 15
Protection Class	IP67

Note 1: RMS Error
Note 2: See Dynamic Test Conditions

그림 3.19 2축센서 MTLT105D-R 세부사양

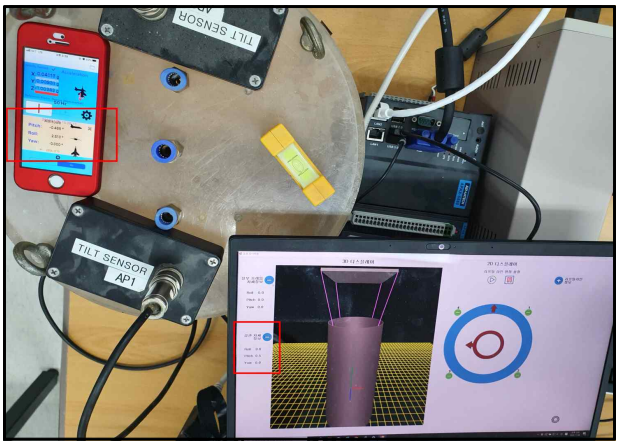


그림 3.20 원형강관 수직도 제어정보시스템 표준오차율 측정실험 사진

3.3.2 정보구현 지연속도 평가

수직도 제어정보시스템의 데이터 표출에 걸리는 시간은 식 (3.4)와 같으며, T_{cal}에 걸리는 시간은 식 (3.5), T_{trans}에 걸리는 시간은 식 (3.6), T_{disp}에 걸리는 시간은 식 (3.7)과 같다.

$$T = T_{cal} + T_{trans} + T_{disp} \tag{3.4}$$

Where, T_{cal} denotes data calculate, T_{trans} denotes data transfer T_{disp} denotes data display

$$T_{cal} = T_{sens} + T_{hw} + T_{c-app} \tag{3.5}$$

Where, T_{sens} denotes sensor, T_{hw} denotes h/w line T_{c-app} denotes controller application

$$T_{trans} = T_{c-os} + T_{m} + T_{s-os} \tag{3.6}$$

Where, T_{c-os} denotes controller OS protocol stack, T_{m} denotes h/w medium T_{s-os} denotes server OS protocol stack

$$T_{disp} = T_{g-app} + T_{mon} \tag{3.7}$$

Where, T_{g-app} denotes GUI application, T_{mon} denotes monitor

T_{sens}는 센서가 수직도 정보를 읽는 시간으로 제안된 시스템에 적용된 센서는 50Hz로 동작하므로 20ms마다 1개의 데이터를 읽는다. T_{hw}는 센싱된 데이터가 하드웨어 선을 따라 컨트롤러로 들어오는 시간을 의미하며 약 1psec 이하의 시간이 소요된다. T_{c-os}와 T_{s-os}는 데이터를 전송 및 수신하기 위해 운영체제가 처리하는 시간을 의미하고 T_{c-app}과 T_{g-app}은 컨트롤러와 모니터링 PC에서 데이터를 처리하기 위해 소요되는 시간을 의미한다. APAX 5580의 CPU는 1.7GHz로 동작하고 대부분의 PC의 CPU 또한 2.0GHz 이상으로 동작하므로 2000개의 명령어를 처리한다고 가정했을 때 약 1μsec가 소요된다. T_{m}은 컨트롤러의 데이터가 3D GUI 프로그램으로 전송되는 시간을 의미하며, wi-fi 환경에서 ping 명령어를 통해 전송 지연시간을 확인해본 결과 약 11.8ms가 소요되었다. T_{mon}은 모니터가 데이터를 표출해주는 시간으로 현재 대부분의 모니터는 60Hz 이상으로 동작하므로 약 16ms가 소요된다. 따라서, 수직도 정보를 취득 후 표출까지 약 48.8ms의 시간이 걸린다.

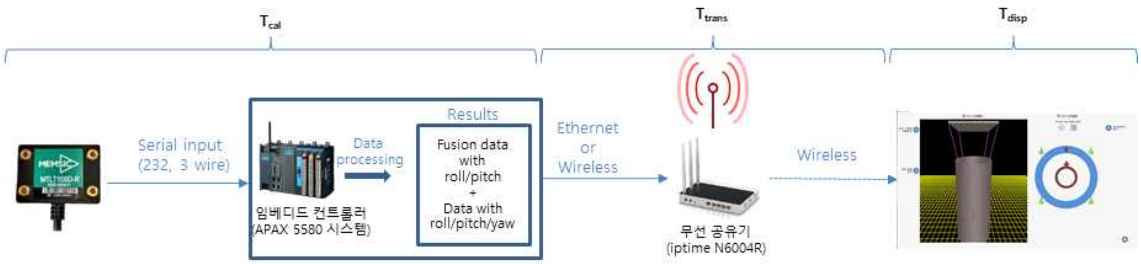


그림 3.21 구간별 지연속도 개념도

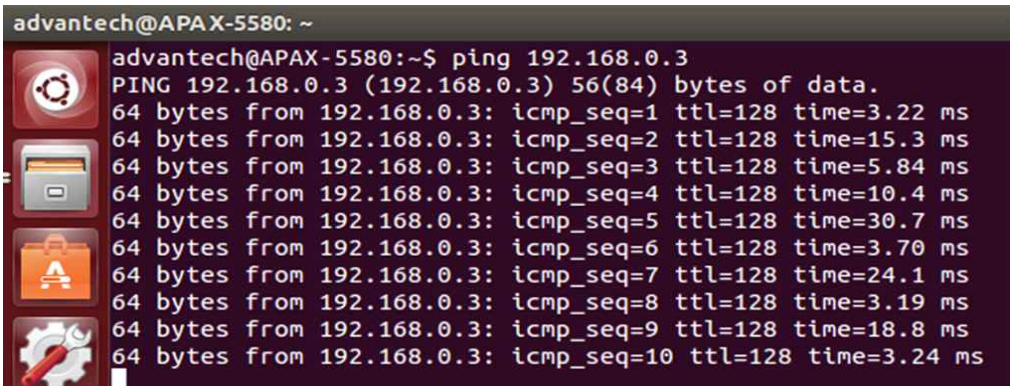


그림 3.22 Wi-Fi 환경 ping 명령어를 통한 전송 지연시간 측정 결과

3.3.3 적용성 평가 및 검증

가. 트라이포드(tripod) 석션파일 실내모형실험

수직도 제어정보시스템의 성능을 평가하기 위해 트라이포드 석션파일 관입/인발 자동화 시스템 실내 모형실험에 수직도 제어정보시스템을 장착하여 석션관입과정에서 성능을 테스트하였다. 테스트 목적 및 보완된 부분은 아래와 같다.

- 인터넷 미지원 환경을 고려한 통신기법 적용
  : 인터넷 미지원 환경에서 통신기법을 해결하기 위해 무선 AP를 통한 사설망을 적용하여 controller와 3D GUI 모니터링 프로그램을 연결하도록 하였다.
- 다중접속(GUI 다중 PC 접속) 기능을 통해 다수의 현장 작업자 및 관리자가 수직도 제어정보 공유
  : 무선통신(Wi-Fi) 모듈 적용

테스트 결과 인터넷이 지원되지 않는 조건에서 컨트롤러-GUI 무선 접속은 끊김없이 실험이 종료되기까지 원활히 이루어졌으며, 2대의 PC에 원형강관 수직도 정보제어 GUI를 설치하여 다중접속 성능을 검증하였다.

그림 3.23 수직도 제어정보시스템 모형실험 검증

나. 테스트베드 적용을 통한 성능검증

수직도 제어정보시스템의 성능을 평가하기 위해 2020년 11월 전곡항에서 수행된 20m급 원형강관 가설공법 테스트베드에 수직도 제어정보시스템을 적용하였다. 원형강관 상판에 경사계를 설치하고 수직도 제어정보시스템을 적용하였다. 여기서 제어정보시스템 내부에는 현장에서의 전기공급이 용이하지 않으므로 원형강관 설치 및 1일 작업시간을 고려하여 10시간동안 구동이 가능하도록 24V, 12Ah 제원의 리튬인산철 배터리를 장착하였다. 또한, 해상에서는 인터넷의 사용에 제약이 있으므로 모형실험에서와 동일하게 무선 AP의 사설망을 적용하여 controller와 3D GUI 모니터링 프로그램 사이에 데이터를 송/수신하였다. 다수의 PC로 컨트롤러에 접속하여 3D GUI 프로그램에 수신된 데이터가 모니터링 할 수 있도록 하였다. 원형강관 석션관입시 수직도정보를 실시간으로 확인 가능하였으며, 2개의 PC를 연결하여 수직도 정보 및 3D 디스플레이가 잘 표출됨을 확인하였다.

그림 3.24 원형강관 가설공법 테스트베드 전경

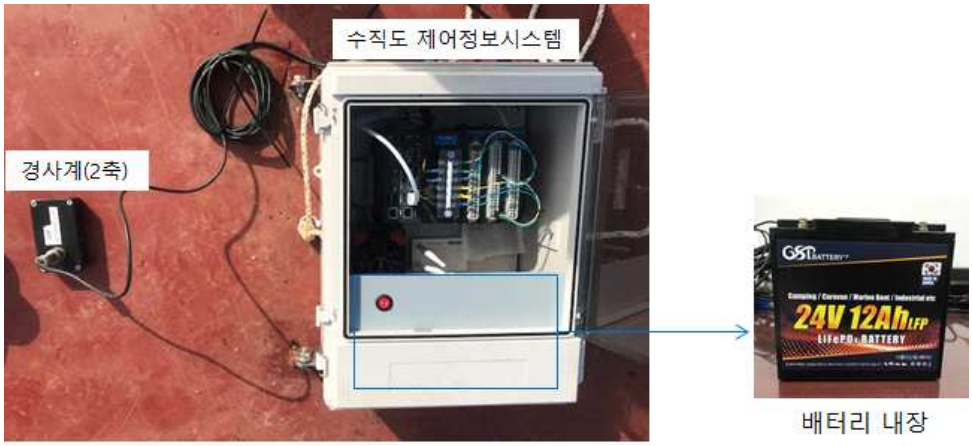


그림 3.25 테스트베드 원형강관 상판에 수직도 제어정보시스템 설치

그림 3.26 테스트베드 원형강관 석션관입 시공

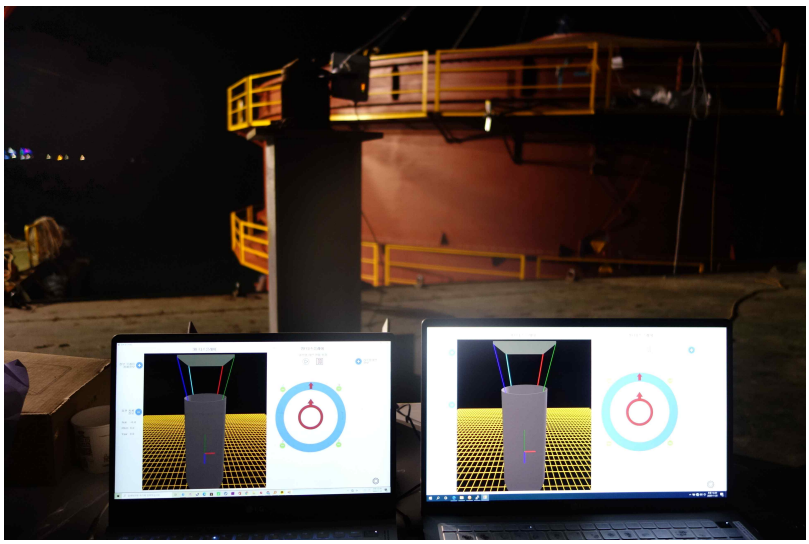


그림 3.27 수직도 제어정보시스템 테스트베드 적용 성능검증

3.4 수직도정보 연계 리프팅케이블 자동 제어 모듈 개발

3.4.1 리프팅시스템 운용 알고리즘 수립

가. 개요

원형강관은 자침이 완료된 후 지반에 관입시키기 위해 크레인을 하강시켜 리프팅케이블이 느슨해지도록 한 후 석션압을 가하여 관입시킨다. 관입시 경사를 지속적으로 모니터링하게 되며 지반의 불균질성 등으로 인해 기울어짐이 발생하기 되면 케이블 개별제어 기법이 적용된다. 운용컨셉은 강관이 기울어진 위치에서는 케이블 길이를 줄여주어 장력이 발현되게 함으로써 원형강관이 관입에 저항하게 되고, 반대편에서는 케이블 길이를 늘려주어 장력이 이완해주어 관입을 유도하는 것이다. 장력발현/이완으로 석션관입시 원형강관에는 편심이 발생하여 수직도를 보정할 수 있다. 본 연구에서는 케이블 길이가 늘어나는 구간과 줄어드는 구간으로 구분하여 케이블 개별길이 제어 기법 운용 알고리즘을 수립하는데 목적을 두고 있다. 케이블 개별제어 기법 운용을 위한 케이블 초기셋팅 방법, 케이블 개별길이제어 운용 방법, 원형강관 경사 및 목표관입량 판단과 같은 절차를 마련하였다.

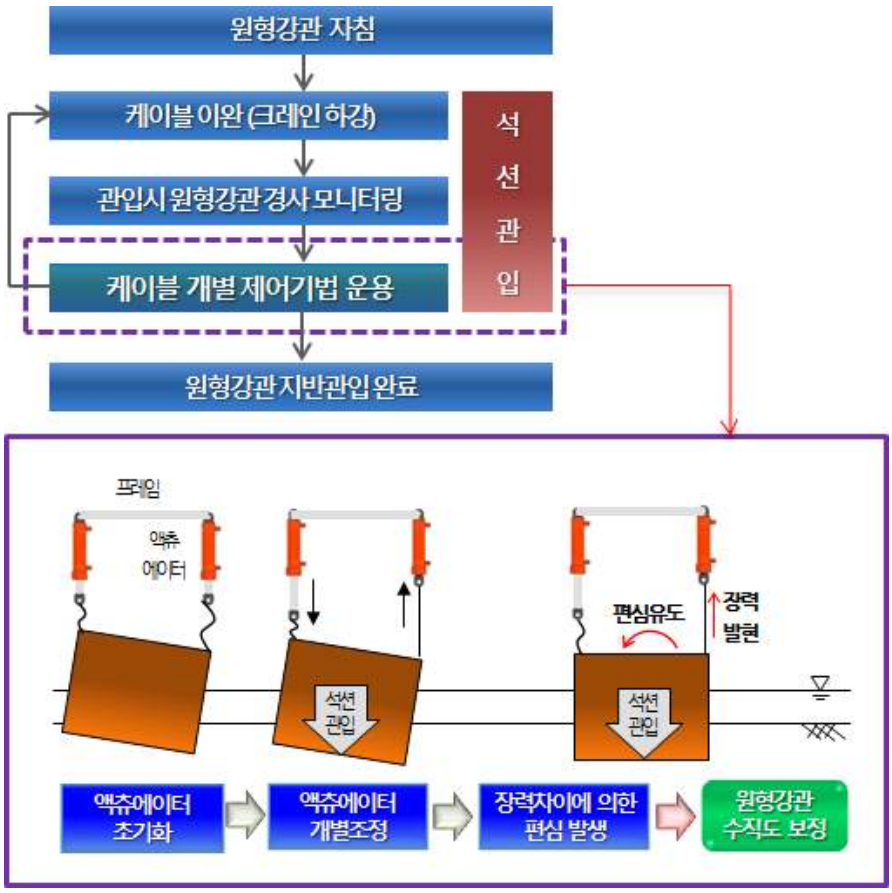


그림 3.28 원형강관 석션관입시 케이블 개별제어 기법 운용

나. 운용시 제한요건 검토

- 케이블 개별제어 기법이 운용가능한 원형강관 기울기

원형강관의 기울어짐이 커질수록 기울어진 면과 반대편의 주면마찰력의 차이가 커진다. 이는 수직도를 보정하기 위해서는 기울기가 커짐에 따라 큰 편심이 작용되어야 함을 의미하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 원형강관 석션관입중 수직도 보정시 3° 이내에서 케이블 개별제어 기법을 적용하도록 가정하였다. 기울기가 3° 이상일 경우에는 기존에 적용되고 있는 크레인과 리프팅케이블을 이용하여 인발 후 재 관입하는 방법을 적용하도록 한다.

- 케이블 장력

케이블 개별제어 기법은 케이블 길이를 수직도 상태에 따라 늘리거나 줄여주여 장력 발현/이완시켜주는 컨셉이므로 케이블 허용길이 이내에서 크레인으로 높이를 맞춰주는 것이 중요하다. 케이블에 장력이 발현되는 구간에서는 허용장력보다 크게 작용될 경우에는 허용치 이내가 되도록 케이블을 늘려주어 장력을 이완하도록 하여야 한다.

다. 운용 알고리즘 변수정의

케이블 개별제어를 위한 알고리즘을 수립하기 위해서 다음과 같이 변수들을 정의하였다. 크게 케이블 장력과 케이블의 길이를 조절해주는 역할을 하는 엑츄에이터의 길이, 엑츄에이터를 조작하는 시간에 대해 정의하였다.

- 리프팅케이블 장력(T)
  - T_t : 운용시 케이블 장력
  - T_a : 케이블 허용장력
  - T_{ha} : 엑츄에이터 허용장력
- 케이블 길이조절용 엑츄에이터 피스톤길이(L)
  - L_a : 허용 피스톤길이
- 엑츄에이터 피스톤 전진/후진 조작시간(C)
  - C_u : 피스톤 전진
  - C_d : 피스톤 후진

    * 여기서, 피스톤 전진은 케이블의 길이가 늘어나는 것이며, 피스톤 후진은 케이블의 길이가 줄어드는 것으로 정의함.

라. 케이블 개별제어 기법 운용 알고리즘

1) 초기설정

초기셋팅은 원형강관을 리프팅케이블로 연결하여 크레인을 통해 설치하고자 하는 위치에 거치되었을 때 설정한다. 초기설정 과정은 다음 그림과 같이 원형강관을 관입시키기 위해서는 리프팅케이블에 장력이 작용되어 있지 않은 상태이여야 하므로, 크레인 붐을 하강

시켜 케이블이 느슨한 상태가 되도록 하여야 한다. 그 후에는 수직도 상태에 따라 케이블을 늘려주거나 줄여주어야 하므로 케이블 길이제어용 엑츄에이터는 두 구간(엑츄에이터에 의해 길이가 늘어나는 케이블, 길이가 줄어드는 케이블)에 대하여 피스톤이 전진하거나 후진할 수 있도록 다음 그림과 같이 피스톤 허용길이 L의 1/2에 해당하는 위치로 설정한다. 이 때 케이블의 장력이 허용치 이내여야 한다. 만약 장력이 케이블 허용치보다 크게 작용되면 작동을 멈추고 크레인 붐을 하강시킨후 피스톤을 중간위치로 설정하여 초기셋팅을 완료한다.

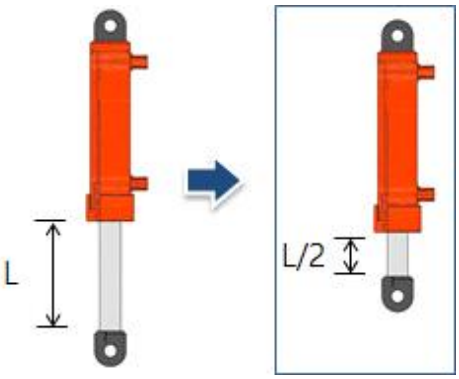


그림 3.29 엑츄에이터 초기설정

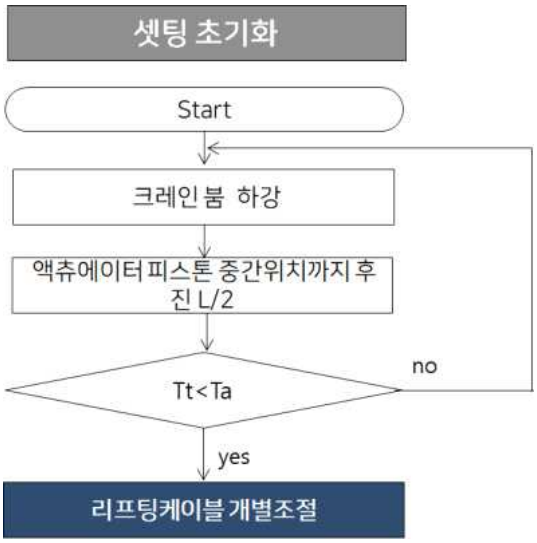


그림 3.30 케이블 개별제어를 위한 엑츄에이터 초기설정 플로우차트

2) 리프팅케이블 개별 길이제어용 엑츄에이터 운용

원형강관이 기울어질 경우 그림과 같이 엑츄에이터를 전진시켜 케이블의 길이를 늘려주는 구간((가))과 엑츄에이터의 피스톤을 후진시켜 케이블의 길이를 줄여주는 구간((나))으로 구분된다. (가), (나) 구간에 대한 엑츄에이터 작동 및 고려사항이 달라지므로 각각 운용기법이 기술되어야 한다.

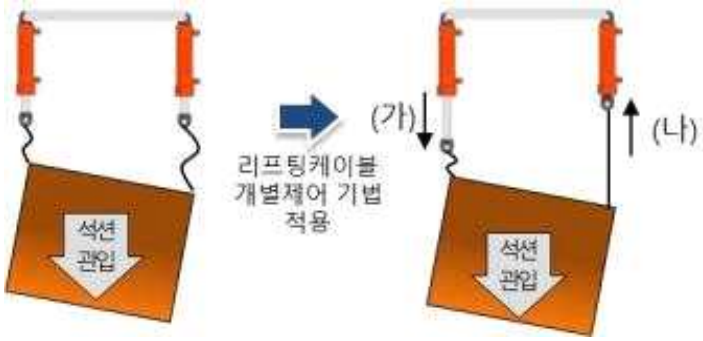


그림 3.31 구간별 케이블(엑츄에이터) 개별 제어 방법

① (가) 구간

엑츄에이터의 피스톤을 전진시켜 케이블의 길이를 늘려주는 구간이다. 일정시간 전진이 되면 장력이 이완되었는지 판단을 한 후 더 이상 장력이완이 되지 않을 때까지 엑츄에이터 전진이 반복된다. 여기서, 엑츄에이터가 더 이상 전진이 되지 않을 경우에는 초기설정을 하여 엑츄에이터의 길이를 조절하도록 한다.

그림 3.32 케이블 개별제어 기법 운용 플로우차트 (케이블 장력이완=엑츄에이터 전진구간)

② (나) 구간

원형강관이 기울어진 방향에 위치한 엑츄에이터의 피스톤을 후진시켜 장력이 발현되도록 하는 구간이다. 여기서 엑츄에이터 후진시 1. 장력 발현, 2. 케이블과 엑츄에이터 허용장력 이내, 3. 피스톤 허용길이 이내 여부를 판단하여 엑츄에이터를 운용하여야 한다.

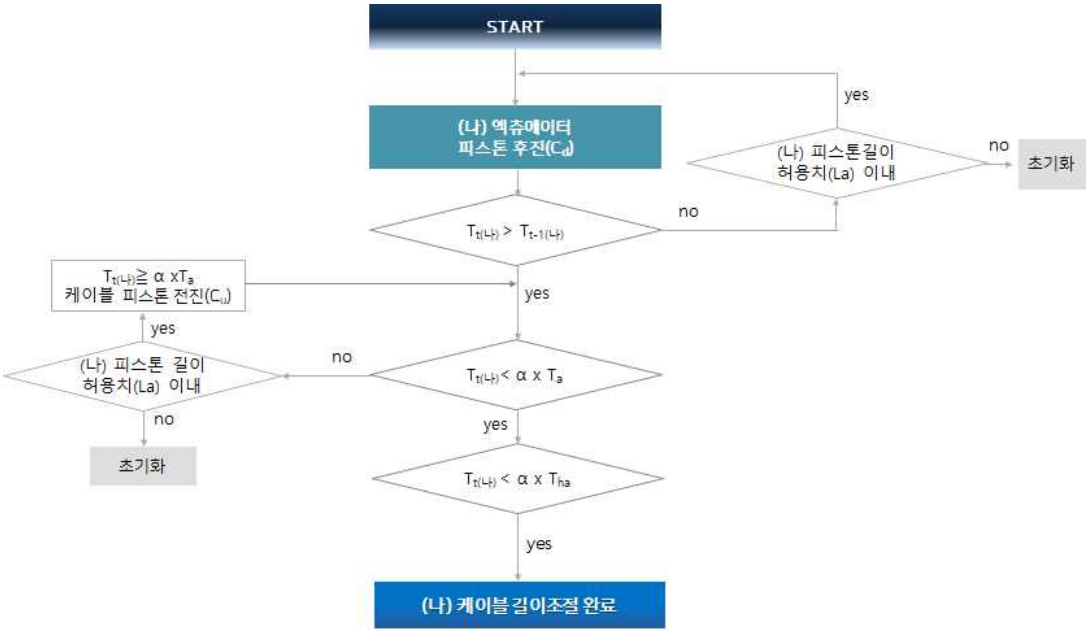


그림 3.33 케이블 개별제어 기법 운용 플로우차트 (케이블 장력발현=엑츄에이터 후진구간)

3) 수직도 보정 및 원형강관 관입 목표치 도달여부 판단

케이블 개별 길이제어가 완료되면 다음 그림과 같이 기울기 변화여부와 원형강관 목표 관입량 도달여부를 판단하여야 한다. 만약 이를 만족시키지 못할 시에는 목표 수직도 확보 및 관입량에 도달할 때까지 초기설정 → 리프팅케이블 개별제어 운용 → 판단 과정을 반복적으로 수행한다. 수직도 보정은 케이블 개별제어후 기울기가 낮아지는지 판단하여 결정하게 된다. 관입량은 목표 관입량을 설정한 후 도달여부를 판단할 수 있다.

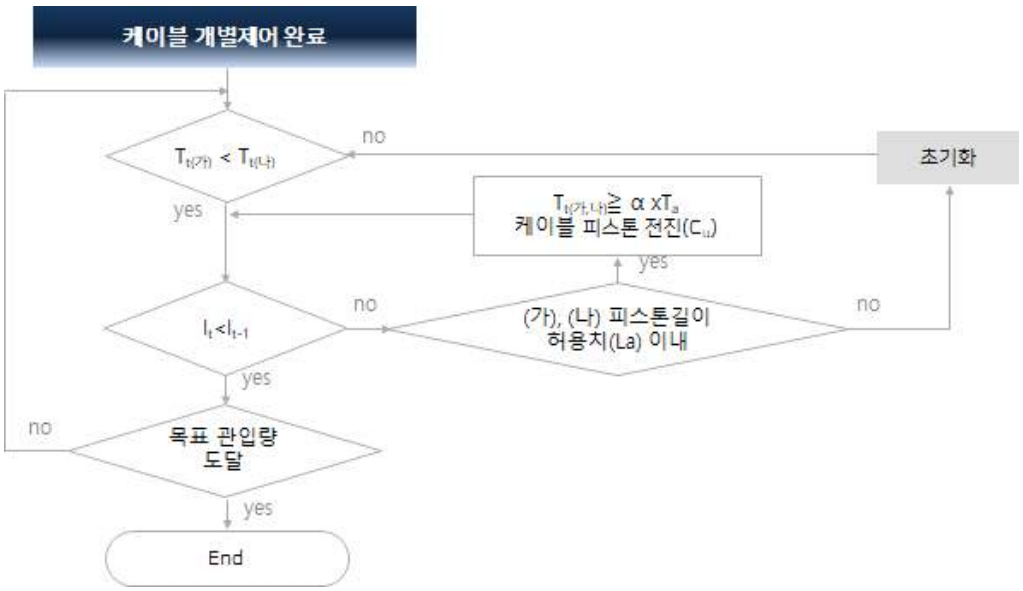


그림 3.34 케이블 개별길이제어에 의한 수직도보정 및 원형강관 관입량 플로우차트

4) 리프팅케이블 개별제어 운용 알고리즘 수립

앞선 과정들을 종합하여 다음 그림과 같이 운용 알고리즘을 수립하였다. 원형강관의 최대경사 지점이 변할 경우에 대하여 케이블에 작용되는 장력과 수직도 상태를 판단하여 엑츄에이터 피스톤 전진 및 후진구간((가),(나))을 재설정하여 반복적으로 수행될 수 있도록 구성되어 있다.

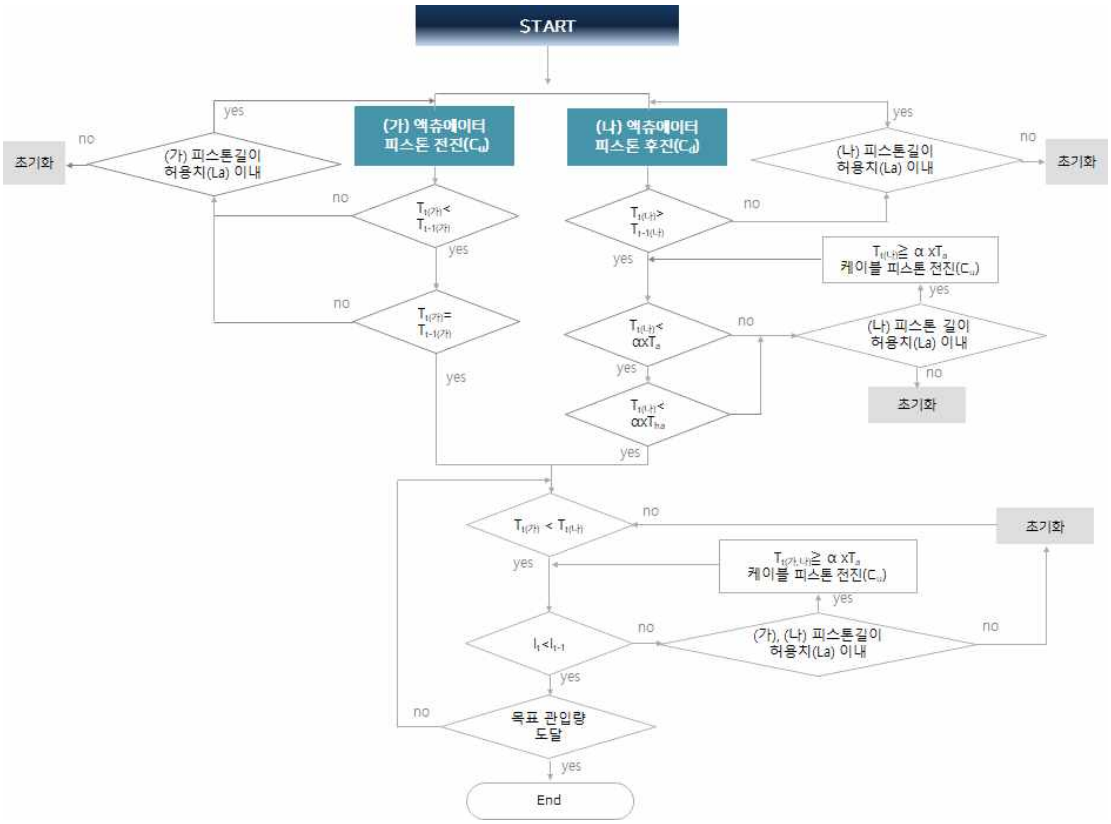


그림 3.35 리프팅케이블 개별 길이제어 운용 알고리즘

3.4.2 케이블 개별 길이제어 자동화 모듈 개발

기존의 리프팅케이블 장력에 의한 수직도 보정 기법은 원형강관의 기울어짐에 따라 현장의 작업자가 리프팅케이블이 길이를 조절하여 수직도를 보정하는 방법을 사용되어 왔다. 이와 같은 방법은 수직도가 정밀하지 못하고 작업자의 경험에 따라 편차가 존재한다. 케이블 개별제어 리프팅시스템 운용 알고리즘을 기반으로 기존의 수직도 제어정보시스템에서 측정된 수직도 정보와 연동되어 엑츄에이터를 개별제어하는 자동화 모듈을 개발하였다. 자동화 수직도제어 모듈의 개념도는 다음 그림과 같다.

그림 3.36 수직도 제어정보시스템과 리프팅케이블 엑츄에이터 제어모듈 연계 개념도

자동화 모듈은 리프팅 케이블 엑츄에이터 스위치를 on/off하는 relay회로, relay회로를 제어하는 컨트롤러, 외부와 인터페이스를 위한 serial 통신 회로 등으로 구성되어 있다. 제어모듈외부에서 serial 인터페이스로 접속하여 특정 명령을 전송함으로써 컨트롤러를 통해 relay회로를 구동하여 엑츄에이터를 상승 또는 하강시키게 된다.

이때, serial 통신을 위한 기본환경 설정 값은 아래와 같다.

표 3.5 제어모듈 serial 통신 환경 설정값

통신방식	RS232
Baudrate	115200
Data bits	8
Stop bit	1
Parity	None

엑츄에이터의 상승 또는 하강을 위해 전송하는 명령은 NMEA0183과 유사한 구조로써 아래 그림과 같이 구성하였다. 즉, 최초 패킷의 시작을 알리는 STX로 문자열 '$KIOST'를 설정하였고, 구분기호는 ','를 사용한다. 또한, 4개 엑츄에이터의 상승/하강 버튼을 각각 SSR(Number)로 구분하여, on 시키고자 할때는 '1', off 시키고자 할때는 '0'을 설정한다. 패킷을 끝을 알리는 ETX는 '*' 문자를 사용하고, 최종 4B에는 해당 패킷의 신뢰성 있는 통신을 위해 XOR 체크섬을 추가한다. 이때, 체크섬 값은 NMEA0183과 동일하게 계산하여 추가하면된다. 예를 들어 '$KIOST,1,0,0,0,0,0,0,0*4B'를 전송하는 경우, 1번 엑츄에이터의 '상승' 동작이 수행되며 그 외 모든 엑츄에이터는 동작을 정지한다.

Example : $KIOST,1,0,0,0,0,0,0,0*4B																		
$KIOST	,	1	,	0	,	0	,	0	,	0	,	0	,	0	,	0	*	4B
STX (패킷의 시작을 알림)	구분 기호	SSR1 번 제어 값	구분 기호	SSR2 번 제어 값	구분 기호	SSR3 번 제어 값	구분 기호	SSR4 번 제어 값	구분 기호	SSR5 번 제어 값	구분 기호	SSR6 번 제어 값	구분 기호	SSR7 번 제어 값	구분 기호	SSR8 번 제어 값	ETX (패킷의 끝을 알림)	XOR 체크섬

그림 3.37 제어모듈 전송 명령 구조

기존의 수직도 제어정보시스템과 동일한 화면에서 리프팅케이블의 길이를 제어할 수 있도록 하여 원형강관의 수직도를 직관적으로 파악 및 제어할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 개발된 GUI는 다음 그림과 같고 내부적으로 serial 통신을 위한 환경설정이 가능하며, connect/disconnect 버튼을 통해 제어모듈과의 접속을 제어한다. 또한 각각의 엑츄에이터 별로 '상승/하강' 버튼을 통해 직관적 제어가 가능하도록 하였다.

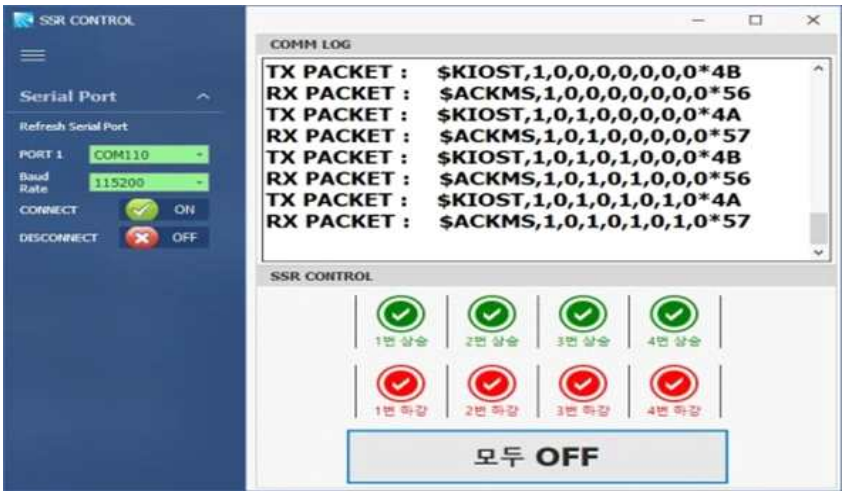


그림 3.38 리프팅케이블 길이조절용 엑츄에어터 제어 모듈 GUI

또한, 수직도 제어정보시스템의 수직도 정보에 기반하여 리프팅케이블 엑츄에이터 길이 자동 조절 기술을 개발하였다. 리프팅케이블 엑츄에이터 길이 자동 조절 기술은 수직도 제어정보시스템에서 수집된 roll, pitch 정보를 기반으로 허용 기울기 이내가 될 때까지 해당되는 엑츄에이터의 리프팅 케이블의 길이를 자동 조절하게 된다.

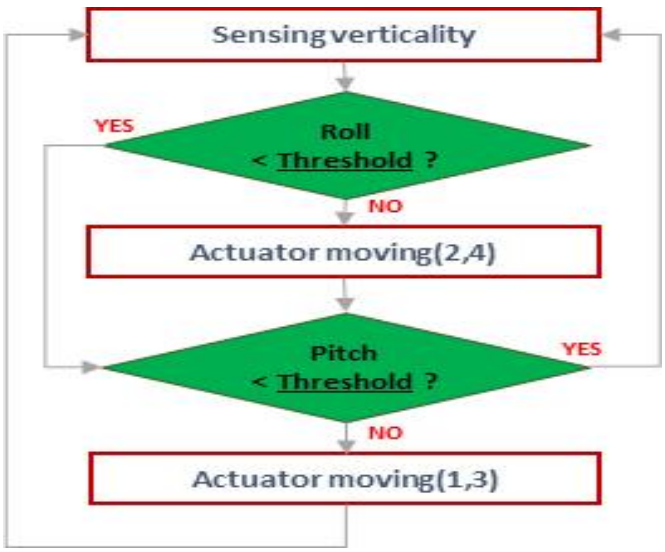


그림 3.39 리프팅케이블 엑츄에이터 길이 자동 조절 흐름도

3.4.3 모형실험 검증

개발한 엑츄에이터 개별 길이제어 자동화모듈을 검증하기 위해 석션파일 관입 실내 모형실험을 수행하였다. 실험은 기구축한 모형 석션파일 관입 실내실험시스템에 수직도 제어정보시스템과 엑츄에이터 개별제어 자동화모듈을 연동하였다.

모형 석션파일은 직경 30cm, 길이 20cm이고 80×80×80cm인 모형토조에 주문진 표준사를 높이 40cm까지 포설한후 수심이 30cm가 되도록 물을 채웠다. 상판 네 지점에는 엑츄에이터가 설치하였고, 기울기를 확인하기 위해 2축 경사계를 설치하였다.

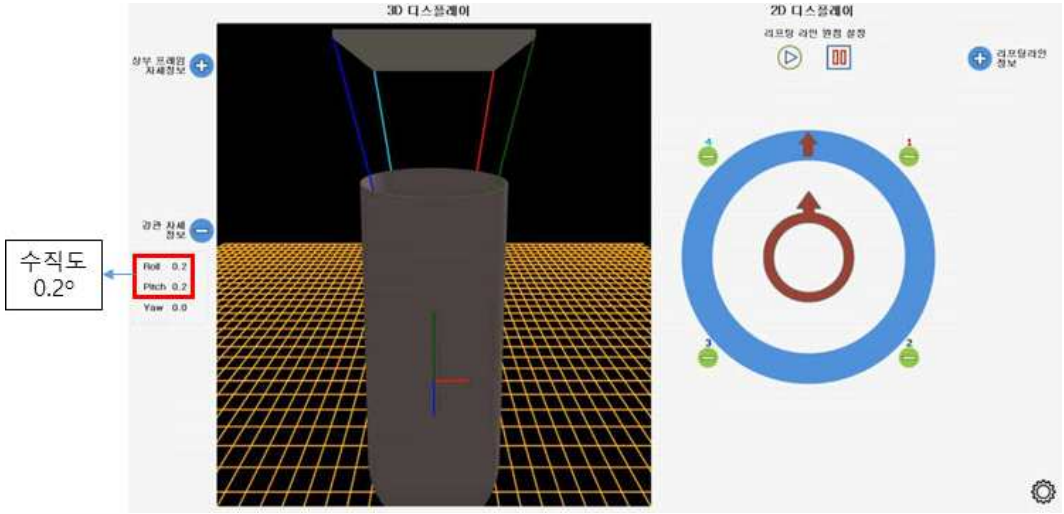
실험방법은 모형석션파일을 지반에 거치시킨 후 석션에 의해 관입이 용이하도록 10cm정도 강제관입을 하였다. 다음은 자동화 제어모듈이 내장된 수직도 제어정보시스템을 활성화한 후 석션관입하였다. 수직도 정보에 의해 자동화 제어 모듈에서 0.2° 이상 기울어질 경우 기울어진 위치에 따라 엑츄에이터의 피스톤을 통해 리프팅케이블의 길이가 자동제어되어 늘어나거나 줄어듬으로써 석션관입중 파일의 수직도가 보정되는 것을 확인하였다. 석션관입전 0.6° 에서 관입완료 후 0.2° 까지 자동제어를 통해 수직도가 보정되었다.

(a) 엑츄에이터 장착 석션파일 모형실험시스템

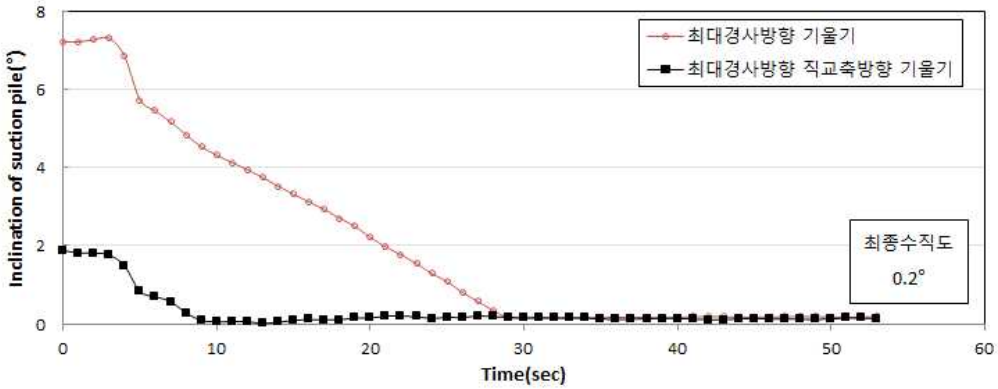
(b) 수직도 제어정보시스템+자동제어모듈

그림 3.40 엑츄에이터 개별 제어 자동화 모듈 적용 실험

엑츄에이터 자동화 제어 모듈을 적용하여 석션관입중 기울어진 위치에 따라 엑츄에이터의 피스톤을 자동 제어함으로써 석션관입중 파일의 수직도 확보 가능할 것으로 판단된다. 다만, 자동화 적용시에도 작업자가 관입상태 및 수직도 정보를 모니터링하면서 현장에서의 외부 여건 변화에 대처할 수 있는 관리는 필요할 것으로 생각된다.



(a) 제어정보시스템 GUI: 경사도 제어 목표치 0.2° 설정



(b) 자동제어모듈 적용시 석션관입중 수직도 변화

(c) 관입종료

그림 3.41 케이블 자동 개별제어 모듈 적용 석션파일관입 실험 결과

3.5 소론

본 연구에서는 원형강관 시공시 정밀한 수직도 확보를 위해 실시간으로 수직도를 모니터링하기 위한 수직도 제어정보시스템을 설계 및 개발하였다. 이에 대한 성능을 검증하기 위해 모형 및 현장실험을 수행한 결과는 아래와 같다.

- 수직도 제어정보시스템은 센서부, 컨트롤러부, 디스플레이부로 구성되며, 네트워크 사용이 불가한 환경에서의 사용을 고려하여 무선 AP 사설망을 통하여 데이터를 송수신하도록 설계하였다. 또한 다수의 인원이 동시에 모니터링할 수 있도록 다중접속이 가능하게 구현하였다.
  - 수직도 제어정보시스템의 표준오차율 성능 검토 결과 0.1% 이내인 것으로 나타나 정량적 성과목표인 5%이내를 만족하였고, 모니터링의 실시간성을 보장하기 위해 수직도 정보의 구현 지연속도를 구간별로 성능테스트를 수행한 결과 수직도 정표 표출에는 약 48.8ms의 시간이 소요되며 본 연구의 정량목표인 500ms 이하를 만족하였다.
  - 트라이포드 석션파일 모형실험과 20m급 원형강관 현장실험에 수직도 제어정보시스템을 장착하여 석션관입시 수직도 제어정보 표출 성능 테스트를 수행한 결과 다중접속 구현 및 무선통신에 의한 컨트롤러-GUI 연결상태, 데이터 표출이 원활히 진행되고 있음을 확인하여 수직도 제어정보시스템의 성능을 검증하였다.

- 기존의 리프팅케이블 장력에 의한 수직도 보정 기법은 원형강관의 기울어짐에 따라 현장의 작업자가 수직도 상태를 파악하여 위치별로 리프팅케이블이 길이를 조절하여 수직도를 보정하는 방법이 적용되었다. 본 연구에서는 이 기법의 자동화를 위하여 리프팅케이블 길이조절용 엑츄에이터 제어모듈을 개발하였고 운용을 위한 알고리즘을 수립하여 기존의 수직도 제어정보시스템에서 측정된 수직도 정보를 기반으로 엑츄에이터를 개별제어하는 자동화 모듈을 개발하였다. 수직도 제어정보시스템에서 수집된 2방향 기울기(x축, y축) 정보를 기반으로 허용 기울기 이내가 될 때까지 리프팅 케이블의 길이가 엑츄에이터에 의해 자동으로 조절되도록 구현하였다. 수직도 정보 연계 엑츄에이터 자동제어 모듈을 탑재한 수직도 제어정보시스템을 적용하여 석션파일 관입 실내 모형실험을 통해 관입시 0.2° 까지 수직도 확보가 가능한 것으로 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 리프팅케이블 개별제어기법과 수직도 제어정보시스템의 자동화 제어모듈을 통하여 리프팅케이블 개별제어에 의한 수직도 확보 기술이 원형강관 석션관입 중 수직도 확보를 위한 시공 기술로 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 활용방안

제 4 장 목표달성도 및 활용방안

4.1 목표달성도

4.1.1 정성적 목표달성도

구 분	성과목표	최종성능목표	목표치	개발목표 달성도 (%)	달성도 평가 방법
대형 원형강관 가설공법 수직도 확보 기술 개발	대형 원형강관 가설공법 수직도 확보를 위한 제어정보시스템 기술 개발	수직도 제어 리프팅 시스템 개념설계	1건	100	보고서
		수직도 계측정보 실시간 확보를 위한 통신 프로토콜 설계서	1건	100	보고서
		제어정보시스템 수직도 정보 제공 오차율	5%이내	100	보고서
		케이블 길이 조절 리프팅시스템 설계(안)	보고서 1건	100	보고서
		수직도 제어정보시스템 정보구현 지연속도	500ms이내	100	보고서

4.1.2 정량적 목표달성도

가. 학술지 게재

- 국내학술지 게재 : 4건

논문명	학술지명	주저자명	권,호	국명	발행기관	SCI여부(SCI/비SCI)	게재일	등록번호
모듈형 FRP DSCT 기둥 휨성능 실험평가	한국방재학회 논문집	홍혜민	18(7)	대한민국	한국방재학회	비SCI	2018.12.	1738-2424
석션파일 관입시 리프팅케이블 개별 질이조절 기법에 의한 수직도보정 모형실험	한국방재학회 논문집	박해용	19(5)	대한민국	한국방재학회	비SCI	2019.10	1738-2424
석션파일 지반관입중 리프팅케이블 장력에 의한 수직도보정 효과	한국연안방재학회지	박해용	7(2)	대한민국	한국연안방재학회	비SCI	2020.04	2288-7903
대형 원형강관 수직도 모니터링을 위한 3D 모니터링 시스템	한국산학기술학회지	구성민	21(11)	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2020.11	1975-4701

나. 학술발표

- 국내 : 11건

발표명	학술회의명	발표자	발표일	장소	국명
석션앵커 외부벽면 부착물이 관입성능에 미치는 영향	KGS Spring National Conference 2018	박해용	18.03	여수	대한민국
석션파일 관입시 실시간 수직도 제어를 위한 리프팅시스템 개발 기초연구	2018 한국지반공학회 가을학술발표회	박해용	18.10	서울	대한민국

발표명	학술회의명	발표자	발표일	장소	국명
리프팅케이블 제어에 의한 석션파일 관입중 수직도보정 모형실험	2019년 한국지반공학회 봄학술발표회	박해용	19.03	서울	대한민국
석션파일 관입시 수직도 제어 리프팅 시스템의 구조안전성 검토	2019 한국해양과학기술협의회 공동학술대회	김성원	19.05	제주	대한민국
석션파일 관입시 리프팅케이블 조정에 의한 수직도 보정 효과 분석	2019 한국해양과학기술협의회 공동학술대회	박해용	19.05	제주	대한민국
석션파일 수직도 보정을 위한 리프팅케이블 제어기법 적용성 평가	제7회 한국연안방재학회 연례학술대회	박해용	19.10	제주	대한민국
원형강관 석션관입중 리프팅케이블 제어에 의한 수직도 보정	2019 대한토목학회 정기학술대회	오명학	19.10	평창	대한민국
하중저항계수설계법에 따른 길이 가변형 수직도 제어 프레임 설계	2020년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회	김성원	20.07	부산	대한민국
원형강관 석션관입중 수직도보정 현장실험	2020년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회	박해용	20.07	부산	대한민국
석션파일 관입시 경사조건에 따른 리프팅케이블 제어기법 모형실험	2020년 한국지반공학회 가을학술발표회	오명학	20.09	온라인	대한민국
원형강관 가물막이 석션관입중 수직도 확보를 위한 리프팅케이블 제어 기법의 적용	2020 KSCE CONVENTION CONFERENCE& EXPO	오명학	20.10	제주	대한민국

다. 특허 출원 및 등록

- 출원 : 4건, 등록 : 2건

지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록		
		출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호
석션파일 수직도 보정 리프팅 시스템 및 그 시스템을 이용한 석션 파일 수직도 보정 리프팅 방법	KR	한국해양과학기술원	2018.10.25	10-2018-0128230	한국해양과학기술원	2019.02.21.	제10-1952802호
균형유지 장치를 갖는 리프팅 시스템	KR	한국해양과학기술원	2019.08.07	10-2019-0095935			
석션파일 수직도 보정 장치	KR	한국해양과학기술원	2020.04.28	10-2020-0051564	한국해양과학기술원	2020.10.16	제10-2168967호
길이 가변형 I형 빔의 연결 구조체 및 이를 포함하는 석션 버켓 시공시스템	KR	한국해양과학기술원	2020.07.13	10-2020-0085823			

라. 소프트웨어

- 3건

성과명	등록번호	성과등록일
대형 원형 강관 수직도 실시간 모니터링 프로그램	C-2018-030571	2018.11
대형 원형 강관 수직도 3D 모니터링 GUI 프로그램	C-2019-033738	2019.11
엑츄에이터 제어 프로그램	C-2020-045720	2020.11

4.2 관련분야 기여도

석션관입시 리프팅 케이블의 개별 조정을 통하여 수직도를 보정하는 기법을 개발하고 원형강관의 수직도 정보의 실시간 제공으로 리프팅케이블 운용 정보를 실시간으로 제공함으로써 석션시공 공정을 그대로 이용하면서 석션관입중 수직도 확보를 가능하도록 하여 수직도 확보 시공 효율성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

성과목표	최종성과	연구개발 후 관련분야 기여도
대형 원형강관 가설공법 수직도 확보를 위한 제어정보시스템 기술 개발	리프팅케이블 개별 길이제어 기법	리프팅케이블 개별 제어에 의해 석션관입 시공과정을 그대로 유지하면서 석션관입중 원형강관의 수직도를 확보함으로써 기존 수직도 확보를 위한 관입/인발 반복방식 대비 시행착오와 작업시간 지연을 최소화하여 시공성 향상에 기여
	수직도 제어정보시스템	다중접속이 가능한 무선통신기반 수직도 계측정보를 3D로 가시화하여 제공하므로 현장 감독관, 관리자 및 작업자가 현장에서 수직도 정보를 실시간으로 모니터링하여 현장에서 시공상황에 따라 즉각적 대처로 수직도 확보 시공성 향상에 기여

4.3 연구개발 결과물 활용방안

본 연구에서는 대형 원형강관 가물막이 공법에서 원형강관을 석션관입시 수직도 확보를 위해 리프팅케이블 개별 제어에 의한 수직도 확보 기술과 수직도 상태 실시간 모니터링을 위한 제어정보시스템을 개발하였다. 기존에는 파일의 석션관입시 기울어짐이 발생하면 관입/인발 반복작업을 통해 수직도를 확보하였는데, 이는 작업자의 경험 및 숙련도에 의존하는 방식으로 수직도 확보를 위한 체계화된 기술이 정립되어 있지 않았다. 본 연구에서 개발된 기술은 석션관입 시공과정을 그대로 유지하면서 석션관입중 원형강관의 수직도를 확보하는 데 적용될 수 있다. 석션 방식에 의한 시공시 기존 방식 대비 시행착오와 작업시간 지연을 최소화하여 시공성 향상에 기여할 수 있다. 수직도 제어정보시스템의 경우 다중접속이 가능한 무선통신기반 수직도 계측정보를 3D로 가시화하여 제공하므로 현장감독관, 관리자 및 작업자가 현장에서 수직도 정보를 실시간으로 모니터링하여 현장에서 시공상황에 따라 즉각적으로 대처하여 수직도 확보 시공을 할 수 있으므로 현장에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

수직도 확보기술은 대형 원형강관 가물막이 공법 뿐만 아니라 해상 기초나 해양구조물에서 석션방식으로 시공되는 석션파일에도 활용이 가능하다. 특히, 해상기상탑이나 해상풍력타워의 기초로 석션파일을 적용하는 경우 활용이 가능하다. 현재 정부의 그린뉴딜 정책으로 해상풍력의 경우 2030년까지 12GW의 용량을 달성할 계획이며, 전라남도에서 발표한 ‘블루 이코노미’ 프로젝트에서 신안 8.2GW 해상풍력 프로젝트 등이 추진중이다. 이에 해상풍력 분야에서 기상탑이나 해상풍력 기초구조물로써 석션파일 기초가 적용되는 사례가 많아질 것으로 예상되며 이때 석션파일 기초가 적용되는 현장에서 수직도 확보 기술의 활용이 가능할 것으로 기대된다. 추가적으로 구조물 시공시 인양, 거치 작업이 요구되는 경우 인양 구조물의 운반중 안전성 확보를 위한 균형유지에도 활용될 수 있다.

리프팅케이블 개별 제어에 의한 수직도 확보 기술에 대해 석션파일 시공업체와 기술실시계약을 체결하여 기술이전을 실시하였다. 기술수요기업에서는 2021년 이후 발주예정인 연간 6기 이상의 해상기상탑 건설과 2022년부터 발주 예정인 해상풍력단지 사업 등 석션파일을 적용하는 현장에 본 기술을 활용하여 입찰참여 또는 사업참여를 계획중이므로 본 기술의 현장활용이 기대된다. 향후 지속적으로 본 기술에 대한 홍보를 통해 관련 국내 기업으로의 추가 기술이전 등을 통해 연구성과를 활용하고자 한다.

참고문헌

1. API (2002), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design, American Petroleum Institute
2. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S. R. and Taylor, R. J. (2000) Suction piles for mooring of mobile offshore bases, Marine Structures, Vol. 13, No. 5. pp. 215-494
3. Caquot, A., and Kerisel, J. (1953) Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulverulent, Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Vol.1, pp. 336-337
4. D. Astely et al., "LTE: The Evolution of Mobile Broadband," IEEE Commun. Mag., vol. 47, no. 4, Apr. 2009, pp. 44-51
5. DNV (2014), Lifting operations (VMO standard - part2-5), DNV-OS-H205, Det Norske Verita
6. G. Xing, R. Tan, B. Liu, J. Wang, X. Jia, and C. Yi, "Data fusion improves the coverage of wireless sensor networks," in Proc. ACM Int. Conf. Mobile Comput. Netw., 2009, pp. 157-168
7. H. Zhang, X. Chu, W. Guo, and S. Wang, "Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 3, pp. 158-164, Mar. 2015
8. K.-H. Chang, "Bluetooth: A viable solution for IoT? [Industry Perspectives]," IEEE Wireless Commun., vol. 21, no. 6, pp. 6-7, Dec. 2014
9. Kim, K.S., Kwon O., Oh, M., Jang. I.S., Investigation on the Penetration Resistance of Suction Bucket Foundation in Sand using Model Test, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.15, No.6, pp.75~83
10. Li, L. (2004), "Heavy lift installation study of offshore structures", Thesis, National university of Singapore
11. Prandtl, L. (1921) Über die eindringungsfestigkeit (härte) plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Vol.1, No.1, pp. 15-20
12. Reissner, H. (1924) Zum erddruckproblem, Proceedings, First International Congress of Applied Mechanics, Delft, pp.295-311
13. Vesic, A. S. (1973) Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol.99, No.SM1, pp. 45-73
14. W. Christiaanse, "Short-Term Load Forecasting Using General Exponential Smoothing," IEEE Tr. on Power App. and Sys., vol. PAS-90, pp. 900 - 910,

Apr., 1971
15. Tran, M.N., and Randolph, M.F. (2008), Variation of suction pressure during casson installation in sand, Geotechnique, Vol. 58, No. 1, pp. 1~11
16. http://www.heavyliftnews.com/news/single-piece--suction-pile-installation-for-wintershall-s-l6-b-platform
17. http://www.kgs-m.org/backissue/3305/article4.php
18. http://www.sptoffshore.com/en/track-record1
19. 강구조설계기준(2018), 한국강구조학회
20. 대구경 (직경 5m급) 대수심(수심 60m이하) 해상풍력기초시스템 기술 개발 최종보고서 (2015), 국토교통부 국토교통과학진흥원
21. 도로교통법(2020)
22. 석션기초구조물 기술 매뉴얼(2003), 한국해양연구원

부 록

리프팅케이블 개별 길이제어에 의한 수직도 확보기법 운용 매뉴얼

2020. 12.

KIOST
한국해양과학기술원

목 차

1. 개요

1.1 기본개념 ·····1
1.2 시스템 구성요소 ·····2

2. 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템

2.1 개념 ·····4
2.2 구성품 ·····4
2.3 엑츄에이터/펌프시스템 연결 ·····6
2.4 주의사항 ·····9

3. 수직도 제어정보시스템

3.1 구성품 및 케이블 연결 ·····10
3.2 3D GUI 프로그램 사용 설명 ·····13

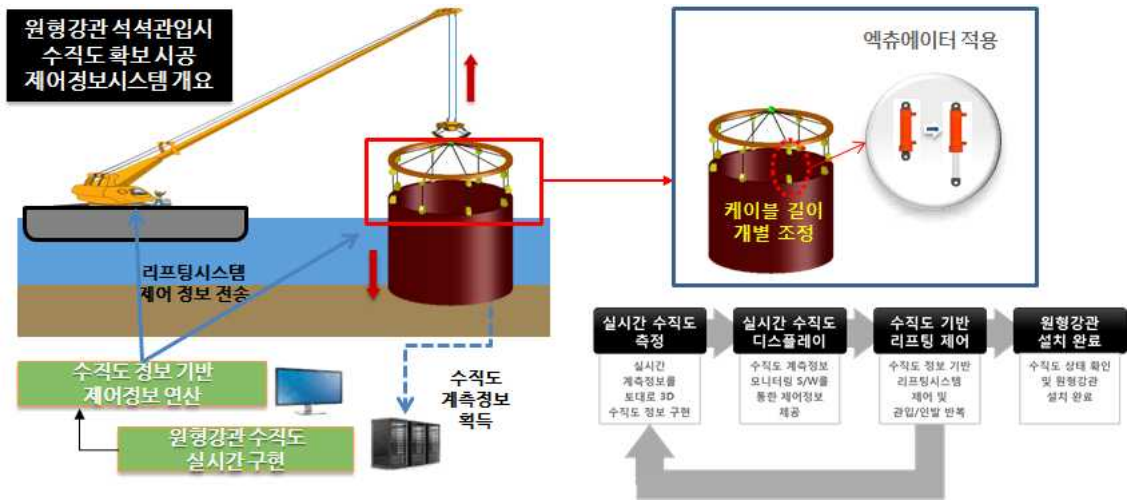
4. 수직도 확보기법 운용

4.1 직접구동 방식 적용시 ·····15
4.2 자동화 제어모듈 적용시 ·····17
4.3 운용시 주의사항 ·····20

1. 개요

1.1 기본개념

석션파일 지반관입중 지반의 불균질성이나 편심으로 인하여 기울어질 수 있다. 석션파일이 기울어져 설치되면 구조물 안정성 및 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 수직도 확보는 중요하다. 석션파일 관입시 기울어질 경우에는 일반적으로 관입/인발 반복작업을 수행하여 시행착오적으로 수직도를 확보하는 방식이 현재까지 적용되고 있다. 이와 같은 방법은 작업자의 경험 및 숙련도에 의존하고 있으며 요구되는 수직도 확보를 위해 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하고자 석션파일 관입 시공과정을 그대로 이용하면서 수직도 제어가 용이한 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템과 시공중에 실시간 수직도 상태를 파악하여 수직도 확보시공시 효과적으로 운용할 수 있는 실시간 수직도 제어정보시스템을 개발하였다. 수직도 제어정보시스템을 이용하여 석션파일 시공과정에서 실시간으로 수직도 상태를 체크하고 목표수직도 이상으로 파일이 기울어지면 리프팅케이블의 길이를 개별적으로 늘리거나 줄여주는 개념이다.

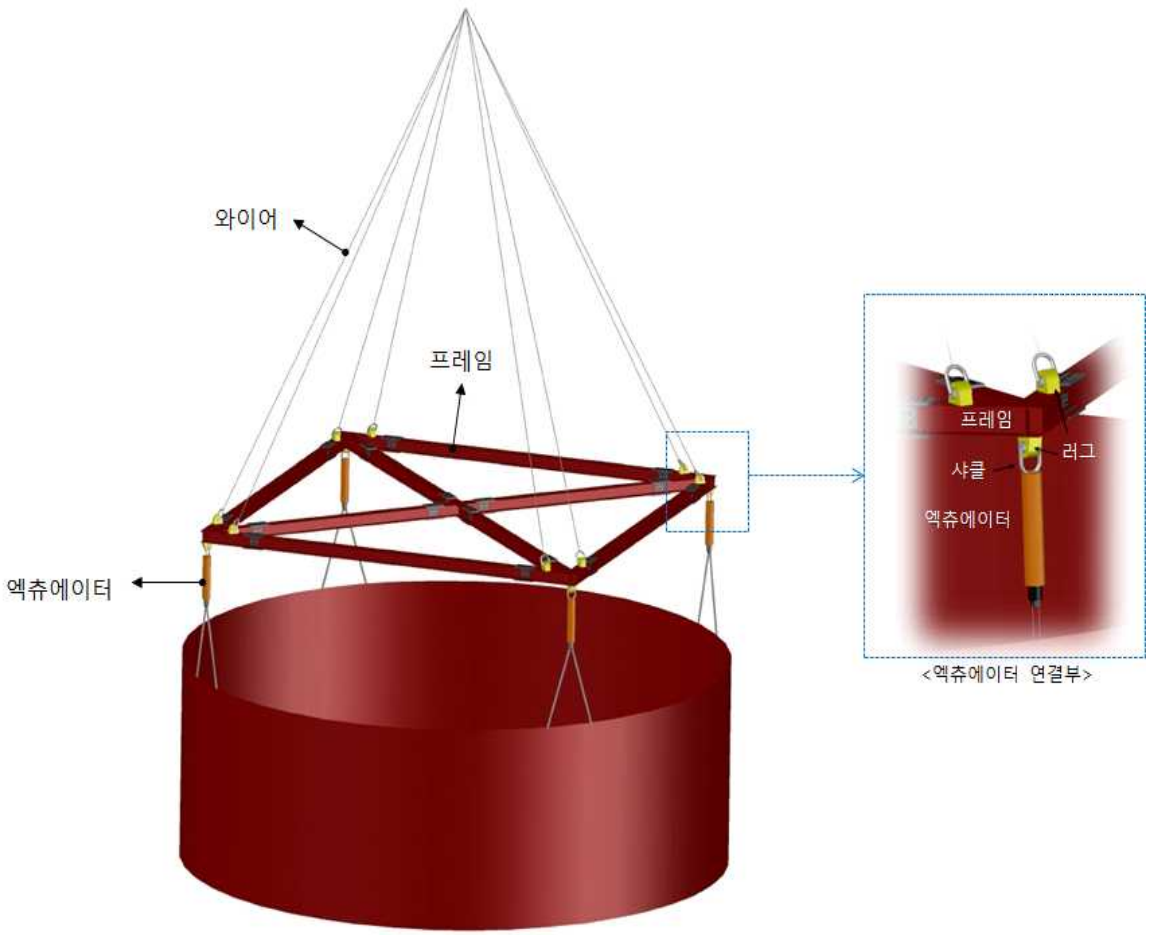


[석션파일 수직도 확보기술 개요]

1.2 시스템 구성요소

가. 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템

- 리프팅시스템은 메인프레임, 리프팅케이블로 구성되어 지며 케이블에는 개별 길이제어를 위해 유압 엑츄에이터 시스템이 장착됨
- 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템을 설계한 예시는 다음 그림과 같고 구성요소별 수량은 다음 표와 같음



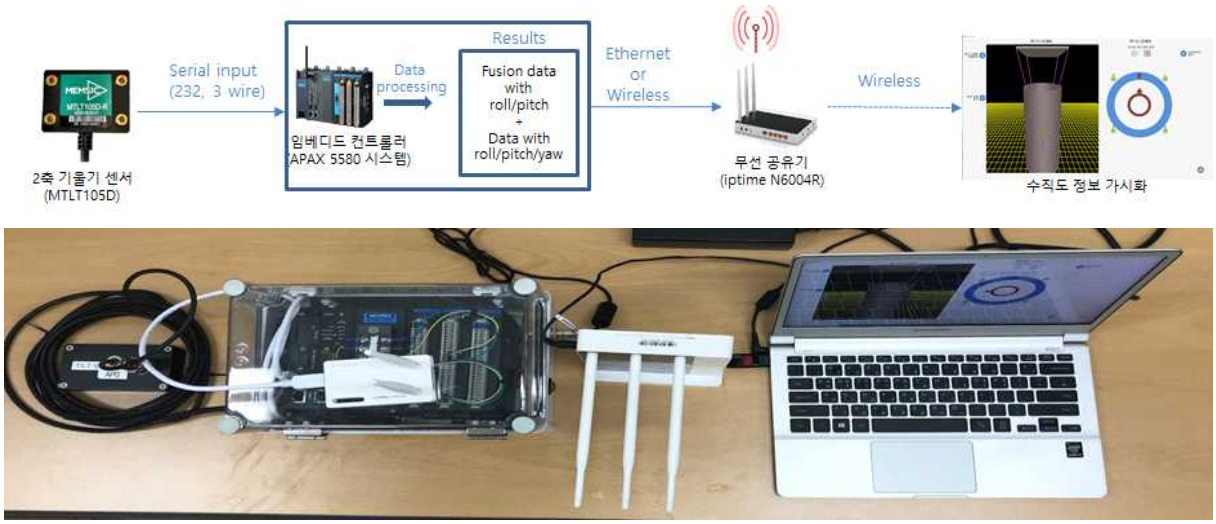
[케이블 개별 길이제어 시스템 구성(예시)]

· 구성요소 및 수량

구성요소	메인프레임	케이블 개별 길이제어 시스템		와이어	연결부 부속품
		유압 엑츄에이터	펌프시스템		
수량	1 set	4ea	1set	프레임 상부 8ea	리프팅러그 12ea
				엑츄에이터 하부 8ea	샤클 12ea

나. 수직도 제어정보시스템

- 2축 기울기센서, 컨트롤러, 무선공유기, 수직도 정보 3차원 GUI

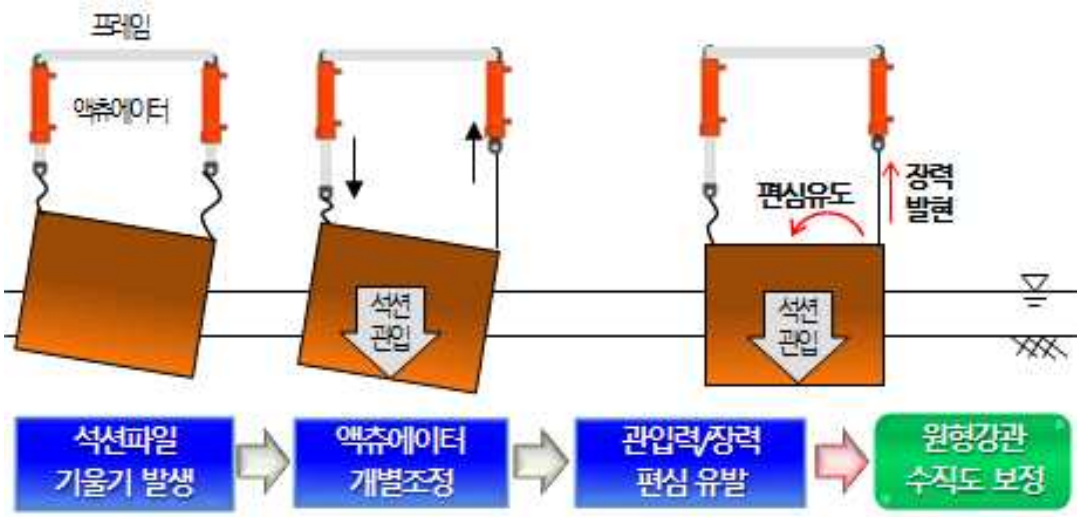


[수직도 제어정보시스템 구성요소]

2. 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템

2.1 개념

- 석션파일 관입시 수직도 상태에 따라 케이블의 길이를 개별적으로 조절함으로써 위치별 케이블 장력을 발현/이완하여 줌으로써 편심을 발생시켜 파일의 기울어짐을 바로잡는 개념임
- 케이블의 개별 길이조절은 유압 엑츄에이터를 장착하여 구현하였음

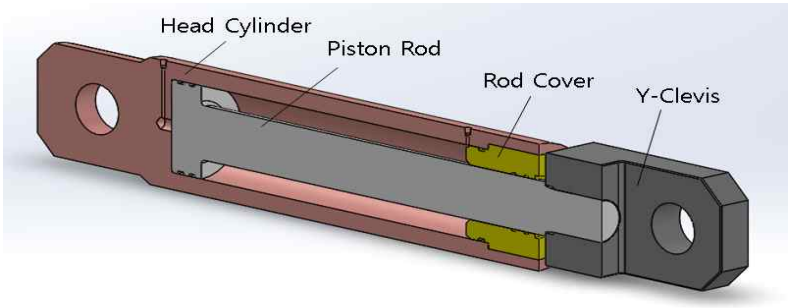


[석션파일 수직도확보를 위한 리프팅케이블 개별제어 기법 개념]

2.2 구성품

가. 엑츄에이터

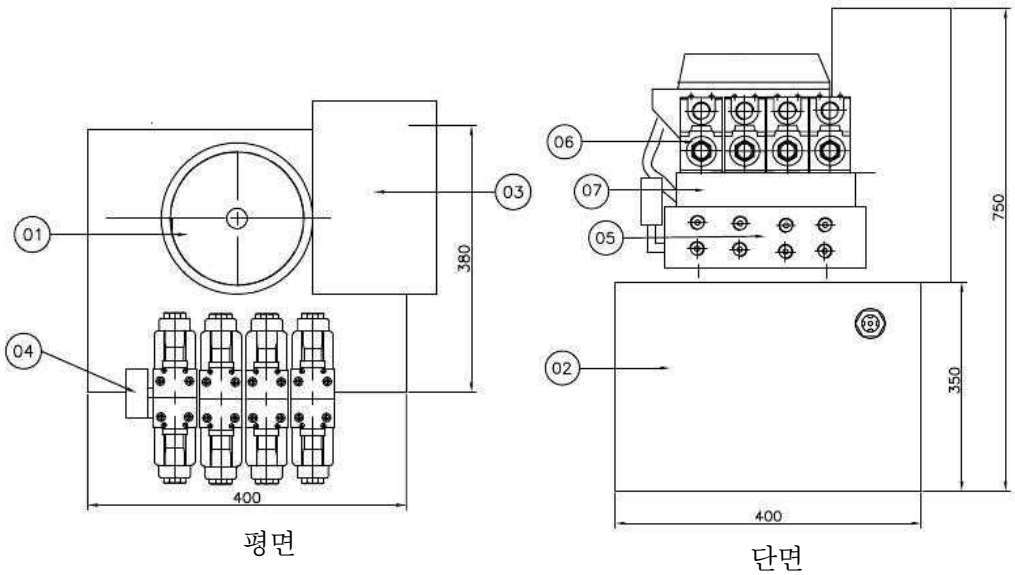
- Head cylinder
- Piston rod
- Rod cover
- Y-clevis



[엑츄에이터 구조]

나. 엑츄에이터 개별조절용 펌프시스템

① Motor
② Hydraulic tank
③ Hydraulic actuator stroke control inverter
④ Pressure gauge
⑤ Solenoid valve
⑥ Manifold
⑦ Pilot check (hydraulic valve)



평면 단면

[엑츄에이터 개별 제어 펌프시스템 구조]

다. 유압 호스

- 유압호스
- 커넥터

[유압호스]

[유압호스 연결 커넥터]

2.3 엑츄에이터/펌프시스템 연결

(1) 펌프시스템 구성요소에 있는 solenoid valve(펌프 구성요소 6번)중 1번(좌측 상하부 hole)에 유압호스 연결

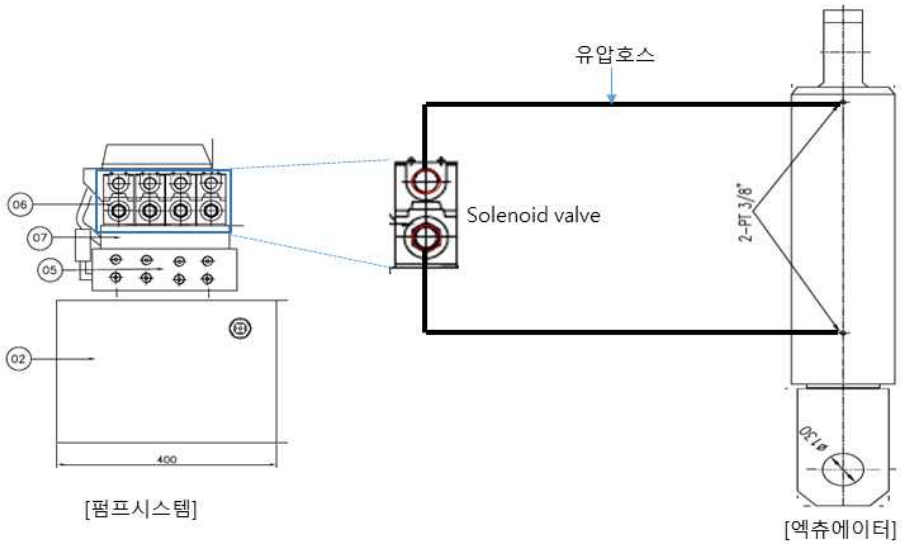
(2) 엑츄에이터 1번에 아래 그림과 같이 solenoid valve 상부에 연결된 유압 호스는 실린더 상부에 위치한 hole에 연결, solenoid valve 하부에 연결된 유압 호스는 실린더 하부에 연결

(3) 동일한 방법으로 solenoid valve 2,3,4 hole에 유압호스를 체결하고 엑츄에이터 2,3,4에 체결하여 엑츄에이터/펌프시스템/유압호스 연결 완료

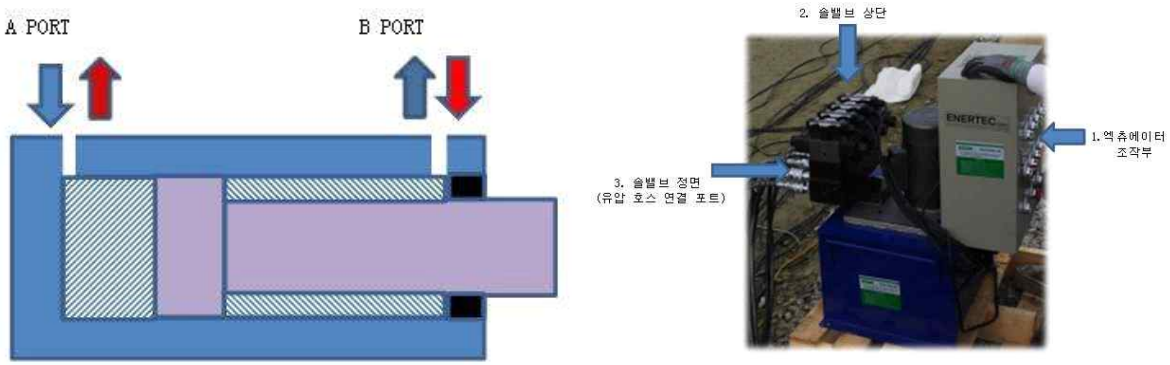
(4) 연결시 유의 할 점은 조작부 번호 - 솔밸브 포트 - 실린더 포트가 일치하도록 체결하여 오작동이 없도록 주의 필요

솔밸브 블록의 경우 같은 위치 아래의 포트 2개가 A PORT, B PORT로 구성되어 한쪽이 유압이 토출될 때 다른 한쪽은 유압이 리턴되도록 설계되어 있다.

즉 A PORT에서 작동유가 실린더에 유입되어 로드가 전진을 하게 된다면 B PORT에서는 실린더 반대쪽의 기름이 밀려서 펌프로 유턴을 하면서 로드가 전진하는 것을 맞추어 준다.

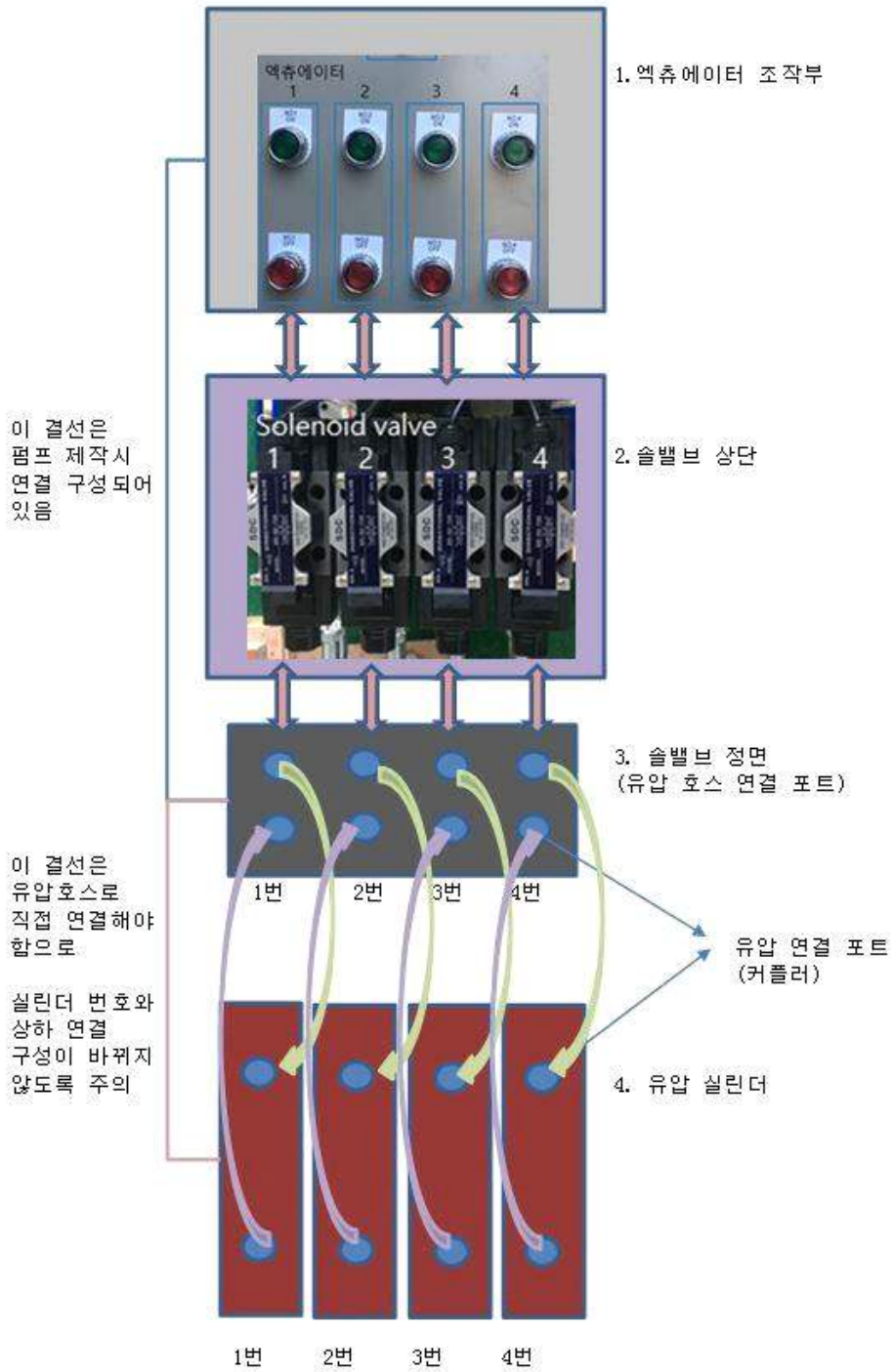


[유압 엑츄에이터/펌프/호스 연결 위치]



[유압 엑츄에이터/펌프/호스 포트 체결]

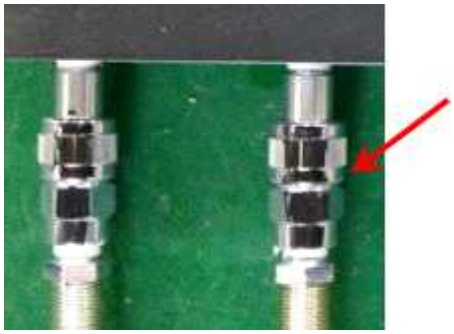
펌프(solenoid valve)와 호스연결 구조는 다음과 같다.



[유압 엑츄에이터/펌프/호스 연결 개념도]

2.4 주의사항

(1) 각 연결부위, 특히 커플러 연결상태를 확인한다.
- 체결상태가 정확하지 않을시 실린더가 움직이지 않음에 유의



약간의 틈이라도 오작동이 될수 있다.

(2) Solenoid valve/엑츄에이터 호스의 연결 부위가 바뀌는 일이 없도록 확인한다.

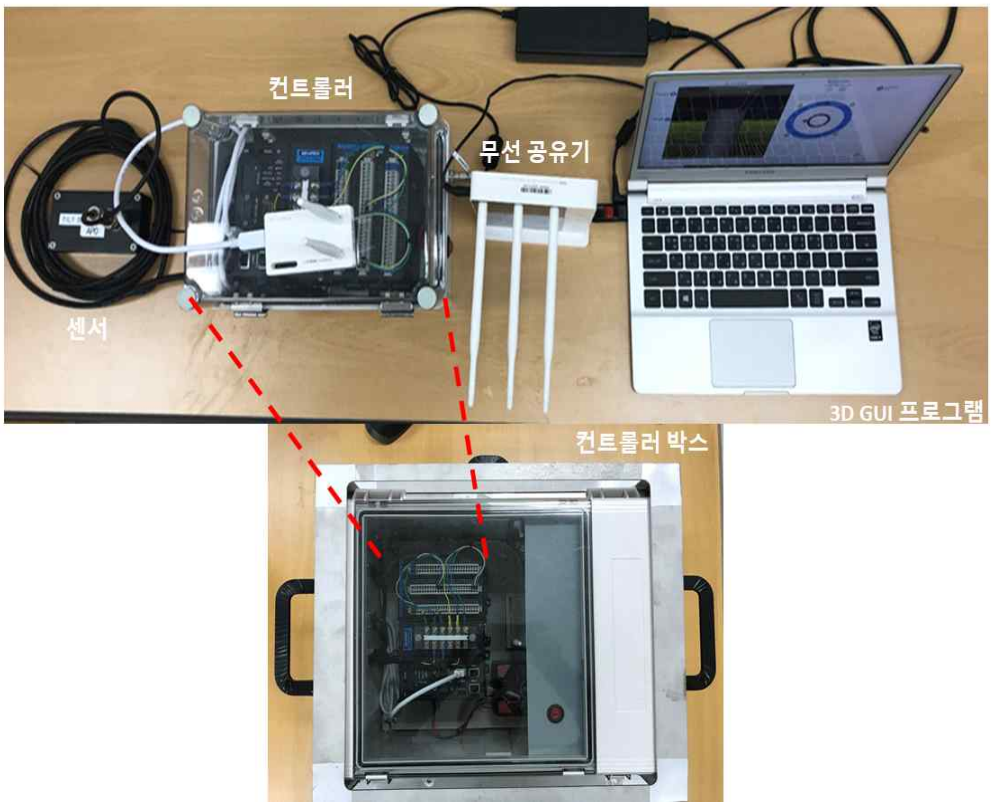
(3) 실사용전 엑츄에이터의 피스톤로드를 완전히 전진하여 압력의 최대치까지 구현되는지 확인하고, 펌프의 오일이 부족하지는 않은지 확인한다.

3. 수직도 제어정보시스템

3.1 구성품 및 케이블 연결

가. 구성품

수직도 제어정보 시스템의 구성품은 컨트롤러 박스(컨트롤러, wifi-수신기), 무선 공유기, 원형강관 기울기 측정 경사센서(2축(roll,pitch)), 3D GUI 프로그램으로 구성된다.

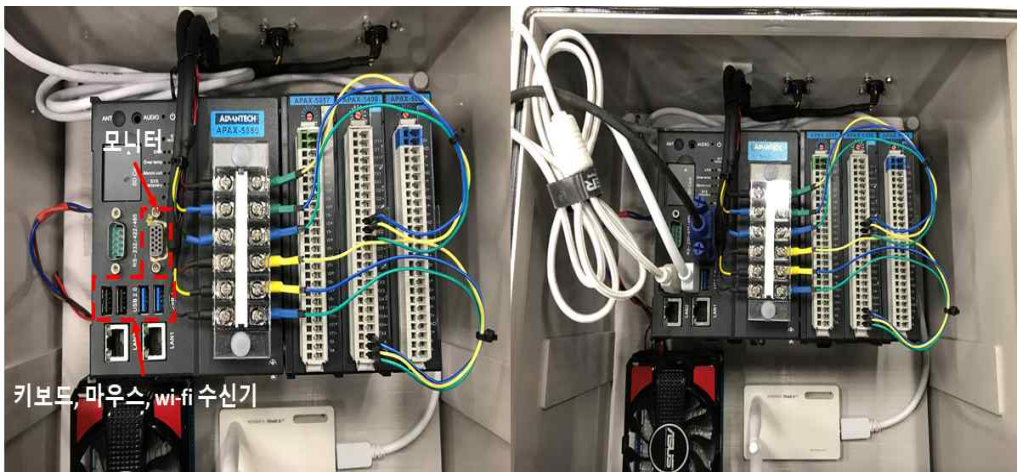


[수직도 제어정보 시스템 구성품]

※ 컨트롤러의 초기 부팅을 위해서 모니터, 키보드, 마우스가 추가로 필요하다.
(고정 IP를 사용할 시 모니터, 키보드, 마우스 불필요)

나. 케이블 연결

(1) 컨트롤러 박스를 열고 wi-fi 키보드, 마우스, wi-fi 수신기, 모니터 케이블을 해당 위치에 연결한다.



[키보드, 마우스, wi-fi 수신기, 모니터 케이블 연결]

(2) 좌측 2개의 포트 중 1번 포트에 경사 센서를 연결한다. 추가적으로 경사센서를 설치하고자 하는 경우 2번 포트에 경사센서를 연결하여 기울기 측정 및 1번과 2번의 기울기 디스플레이가 가능하다.

[센서 케이블 연결]

(3) 우측 전원 포트에 전원을 연결한다. (컨트롤러 박스 내부에 배터리가 내장되어 있으므로 연결을 하지 않아도 배터리 전원으로 동작이 가능하다.)

[전원 케이블 연결]

(4) 무선 공유기의 전원을 켠다.

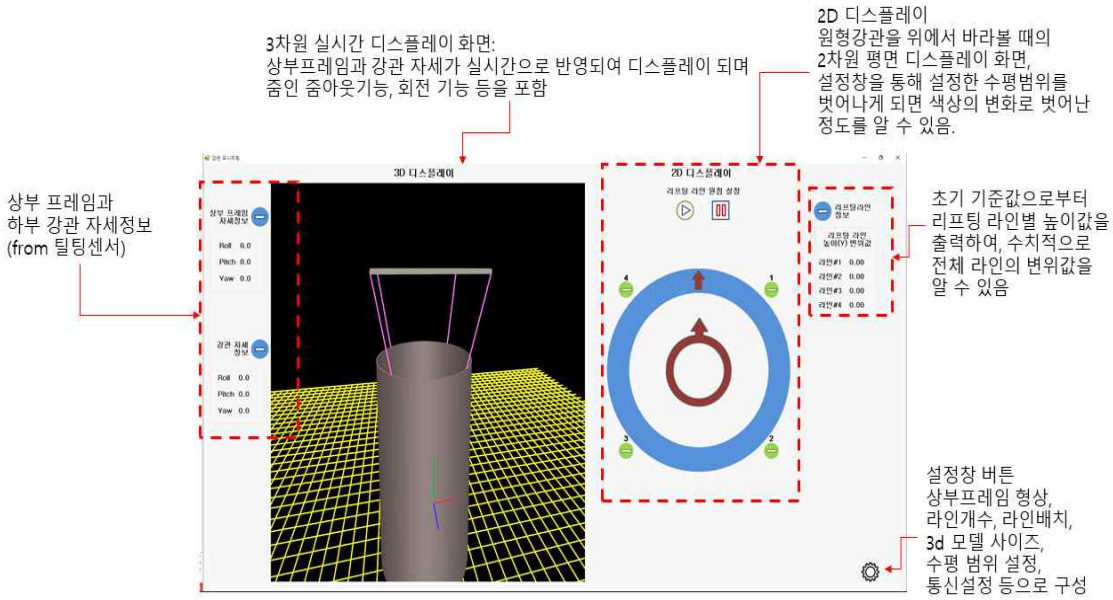
(5) 3D GUI 프로그램을 실행한다. (3D GUI 실행은 3.에서 자세히 설명)

(6) 컨트롤러 박스의 전원 스위치를 켠다.

[컨트롤러 박스 전원 스위치]

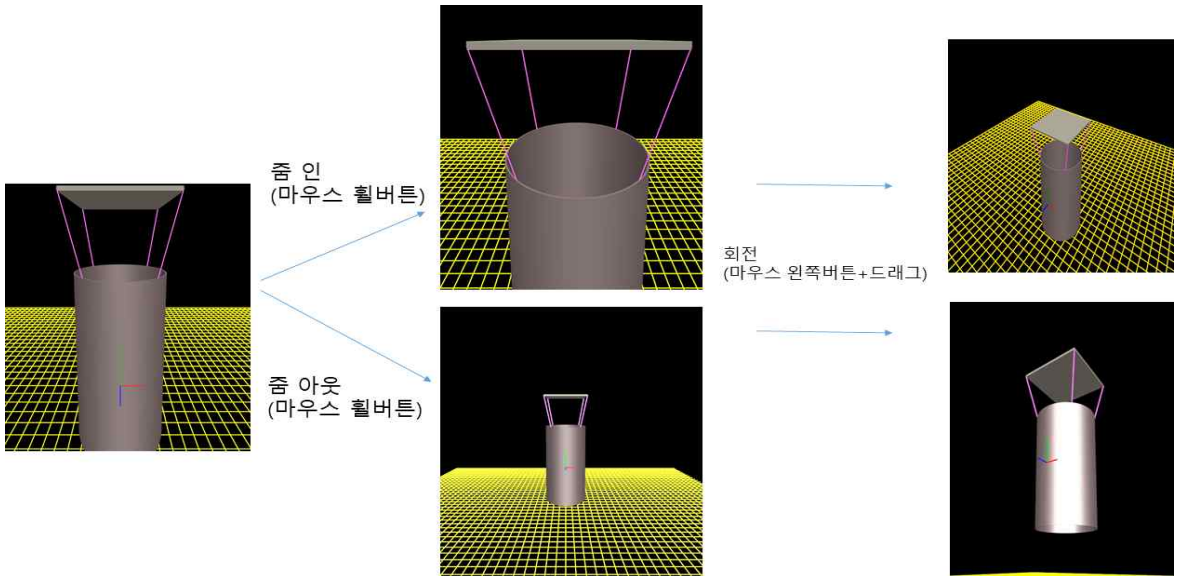
3.2 3D GUI 프로그램 사용 설명

(1) GUI 구성



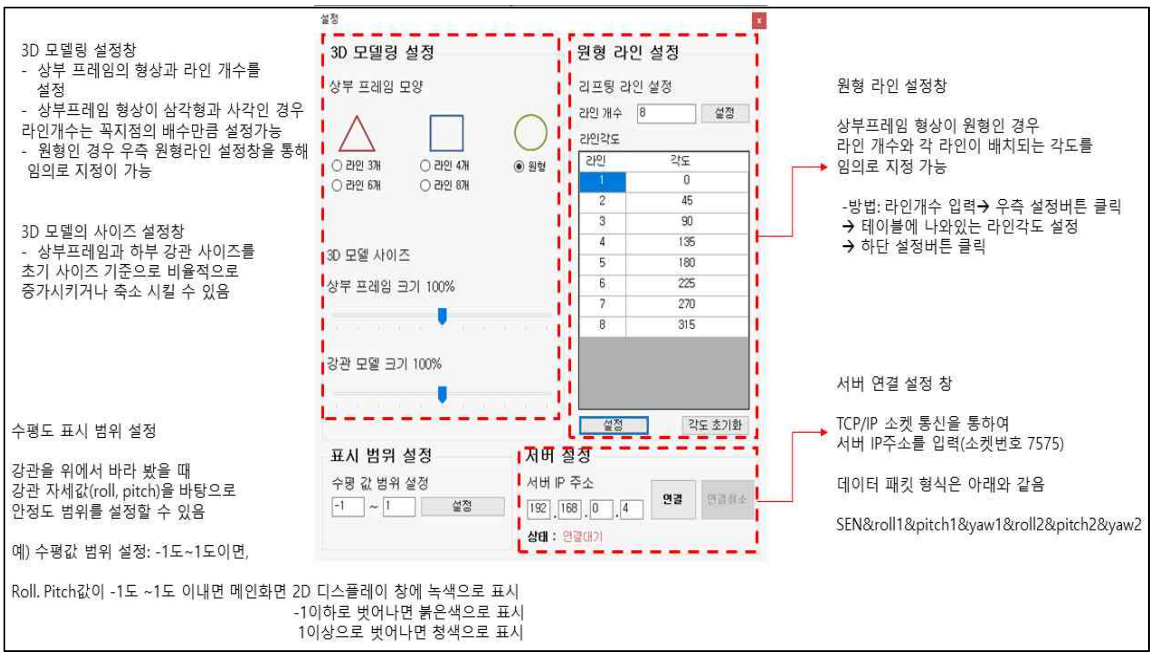
[GUI 구성]

(2) 3D 디스플레이



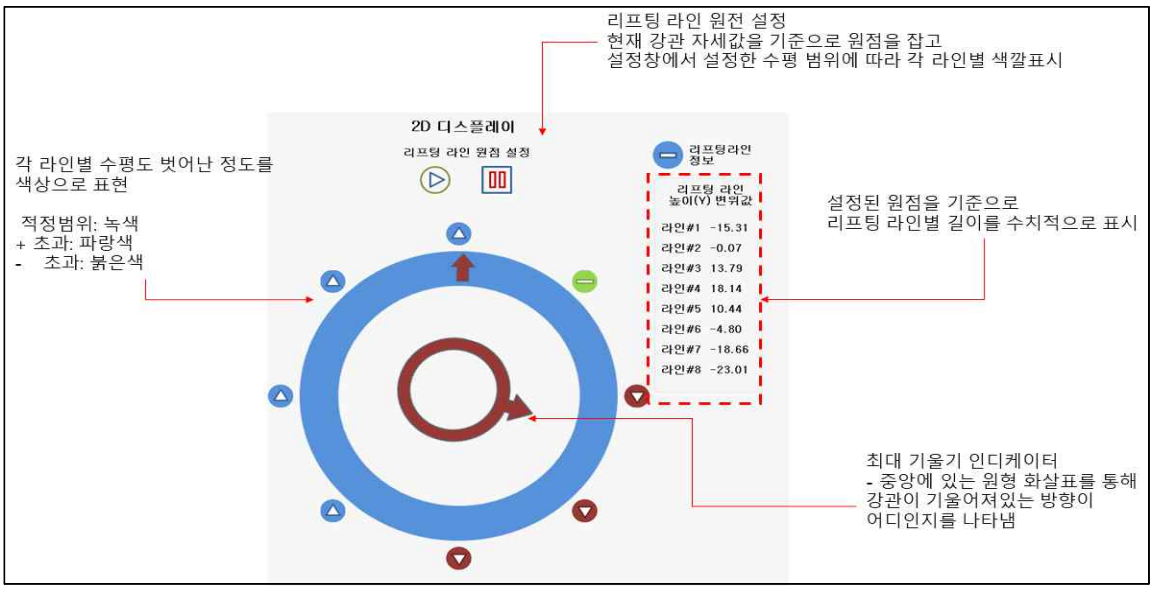
[3D 디스플레이]

(3) 설정창



[설정창]

(4) 2D 디스플레이



[2D 디스플레이]

4. 수직도 확보기법 운용

4.1 직접구동 방식 적용시

(1) 펌프 전원 연결 (220V)

(2) 인버터 전원 버튼 off → on으로 설정

(3) 피스톤 전진 or 후진 버튼 클릭

* 리프팅케이블의 길이를 늘리는 경우 : 전진버튼 클릭

* 리프팅케이블의 길이를 줄이는 경우 : 후진버튼 클릭

(4) 작동할 엑츄에이터 ON으로 활성화

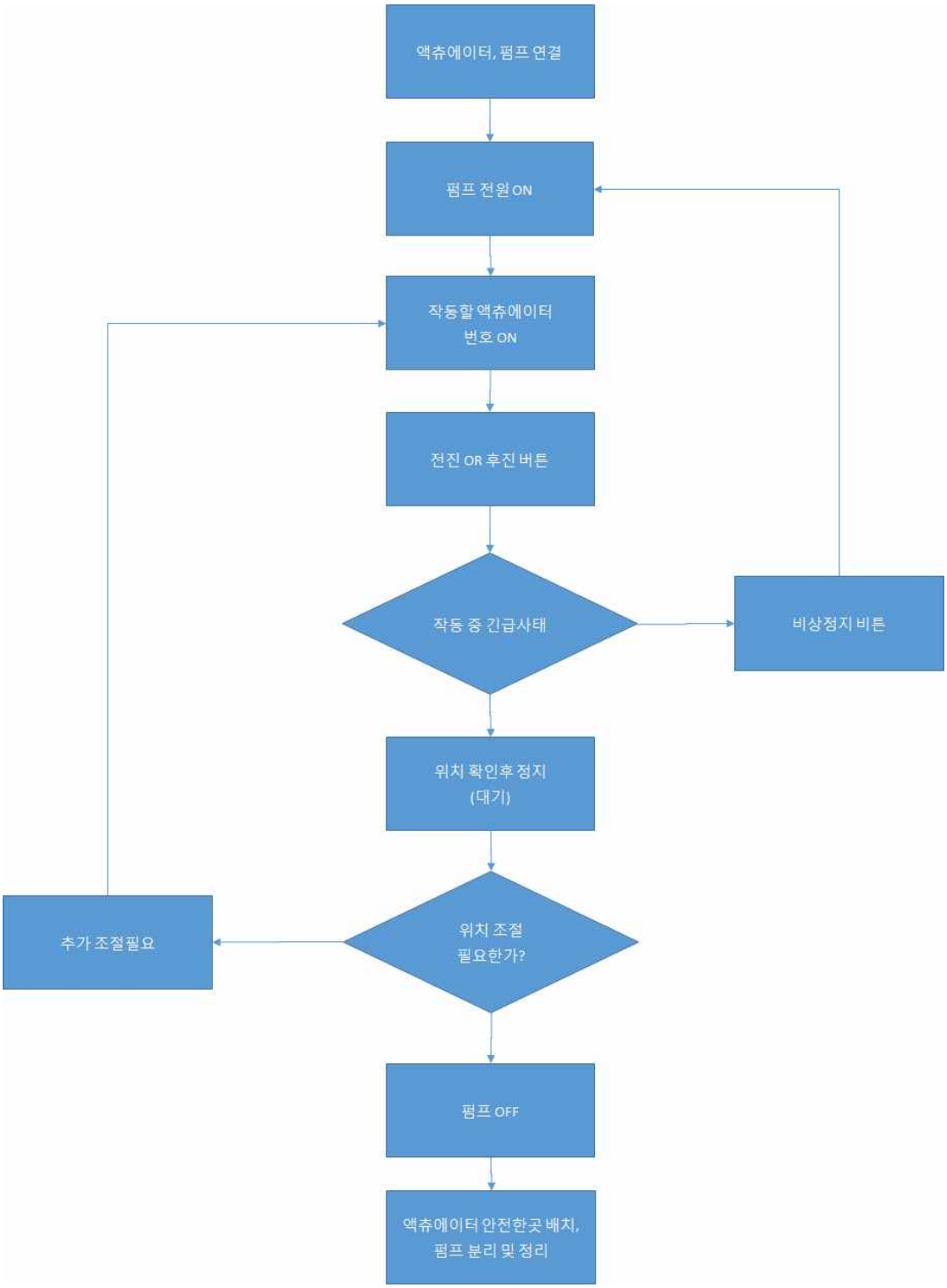
* 예) 엑츄에이터 1번 작동 : 1번 초록버튼 on

엑츄에이터 1,2번 동시작동 : 1,2번 초록버튼 on

(5) 엑츄에이터 정지 : 작동중인 엑츄에이터의 작동을 멈추고자 할 경우 해당 엑츄에이터 번호의 off 버튼 클릭

(6) 엑츄에이터 및 리프팅케이블 파손 등으로 인한 긴급상황시 비상정지 버튼으로 펌프의 작동을 멈춤

[엑츄에이터 개별 작동 인버터]



[엑츄에이터 구동 플로우차트]

4.2 자동화 제어모듈 적용시

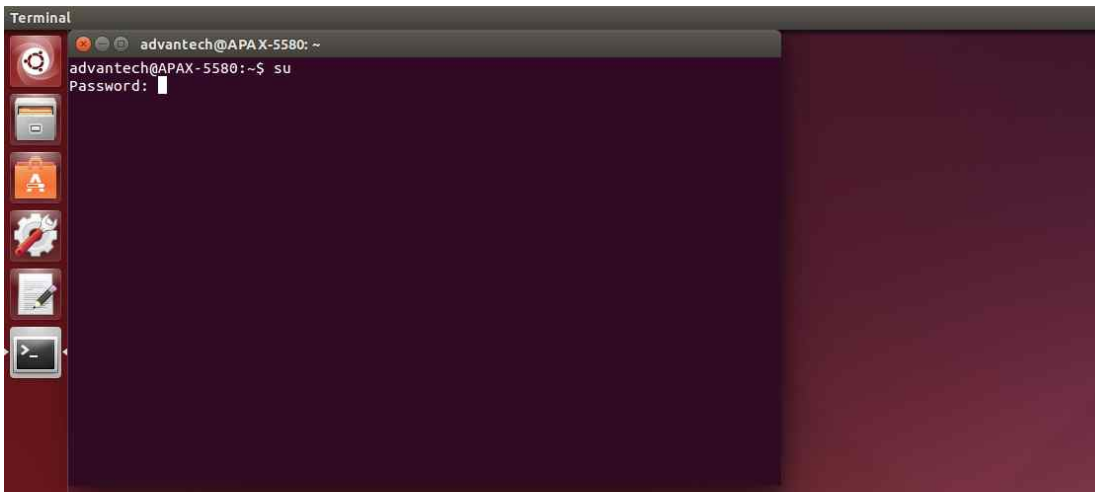
가. 수직도 제어정보시스템 컨트롤러 구동

(1) 무선 공유기 wi-fi(circle)에 연결한다. (PW:kiostict)

(2) 터미널 창을 클릭하여 연다.

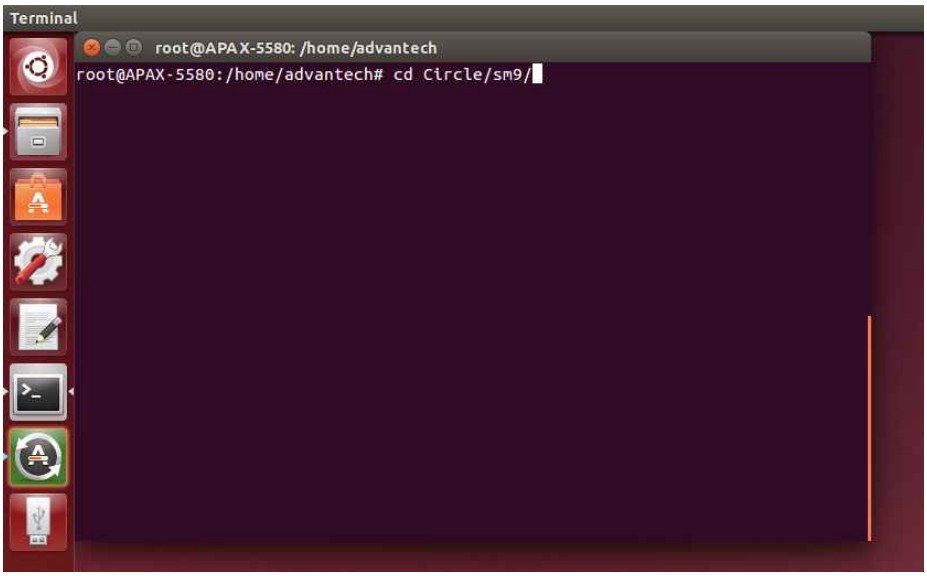
[터미널 창 버튼]

(3) su를 입력하여 슈퍼유저(root)권한을 획득한다.



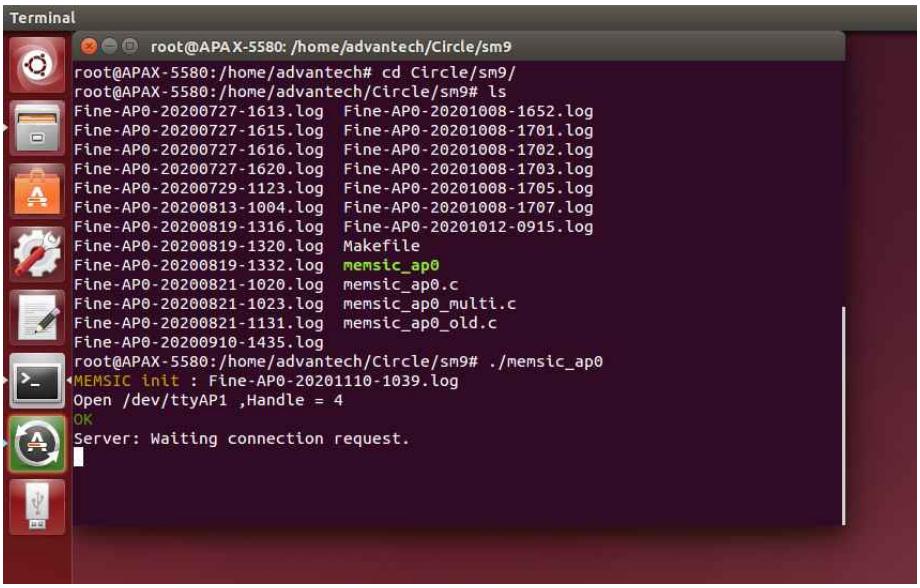
[슈퍼유저 권한 획득]

(4) 컨트롤러 프로그램이 있는 디렉토리로 이동한다. (cd Circle/sm9/)



[디렉토리로 이동]

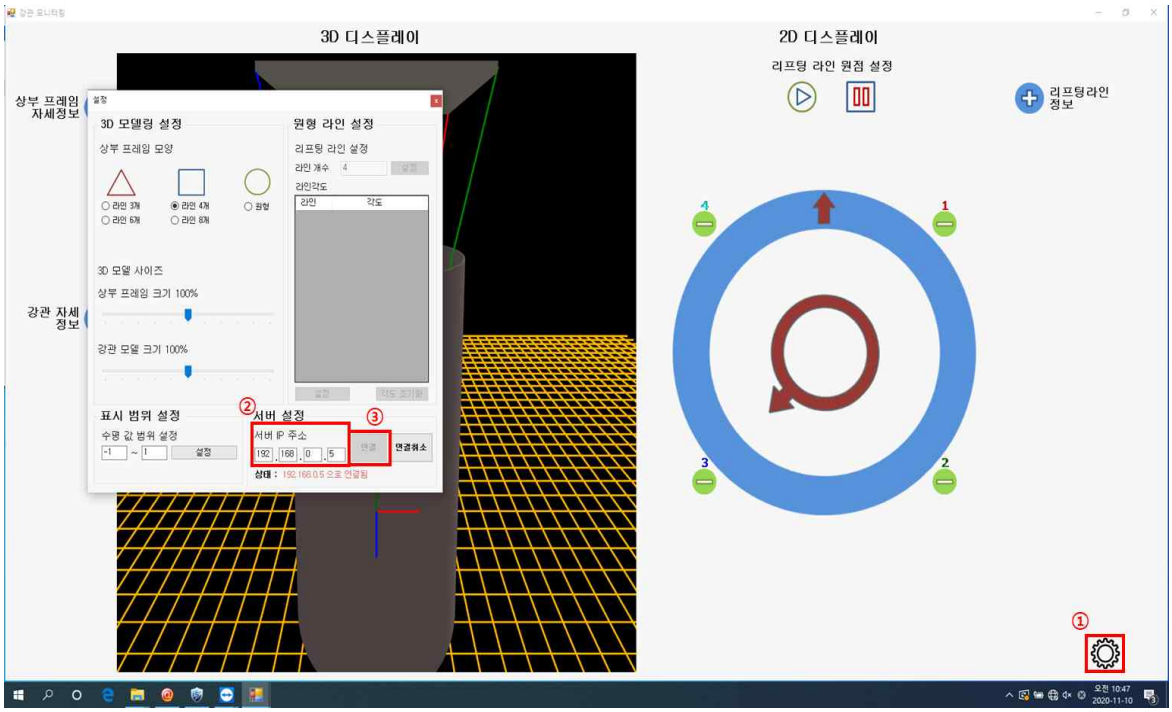
(5) 컨트롤러 프로그램을 실행한다. (./memsic_ap0)



[프로그램 실행]

나. 3D GUI 프로그램 구동

(1) 무선 공유기 wi-fi(circle)에 연결한다. (PW:kiostict)
(2) 3D GUI 프로그램을 실행한다.
(3) 설정 버튼을 누른다.
(4) 192.168.-.-를 입력하여 연결한다.



[3D GUI 프로그램 구동 순서]

※ 연결 완료후 컨트롤러에 연결된 키보드, 마우스, 모니터 케이블을 제거하는 것이 가능하며, 내부 배터리 사용시 전원 케이블도 제거가 가능하다.
※ 컨트롤러 접속후 ctrl+alt+t로 터미널을 실행시킨 후 ifconfig 명령어를 통하여 할당된 ip 확인이 가능하다.
※ 무선 AP 설정창에 접속하여 고정 IP를 할당하면 IP가 변하지 않아 재접속시 컨트롤러에 키보드, 마우스, 모니터 연결이 불필요해진다.

4.3 운용시 주의사항

(1) 펌프 조작시 엑츄에이터 동작 외에도, 펌프의 압력게이지를 체크하여 이상압력 발생에 유의하고, 이상압력 발생시 작동을 멈추고 확인한다.

(2) 테스트 및 사용시 엑츄에이터, 호스, 펌프등 누유시에 즉시 작업을 멈추고 누유되는 부분을 확인한다.

(3) 엑츄에이터 개별 길이조절시 허용하중 이상이거나 파손될 경우 즉시 비상버튼을 눌러 작동을 중지한다.

(4) 적절한 안전반경을 확보하여 안전사고에 유의한다.

(5) 케이블 개별 길이제어 시스템 및 수직도 제어정보시스템 운용시 본 매뉴얼을 통해 정확한 사용방법을 숙지하고, 숙지된 운영자가 작동하도록 한다.