



Development of Heavy-Duty and High-Precision Hydraulic Manipulator for Decommissioning Nuclear Power Plants



Korea Atomic Energy
Research Institute

이 성 욱

원자력중장기사업 - 원전해체 과제

Task 1. 해체공정 통합평가 시스템 개발



해체공정 통합평가 시스템

해체공정 통합평가 단위기술 완성

- 원격절단 평가인자 도출을 통한 경제성 평가 체계 개발 (산출 평가인자 정확도 $\pm 10\%$)
- 공정 시뮬레이션 플랫폼과 통합 연동되는 원격절단 통합평가 시스템 단위 모듈 개발
 - ▶ 국내외 특허 출원 및 등록

해체공정 통합평가 시스템 확보

- 비용 및 안전성 기반 해체공정 평가 기술 개발
- 다양한 해체 시나리오에 대한 통합평가 시스템의 검증 수행 (모사율 > 95%)

Task 2. 고하중 취급 고정밀 매니플레이터 개발



고하중 취급 매니플레이터(가반하중:250kg)

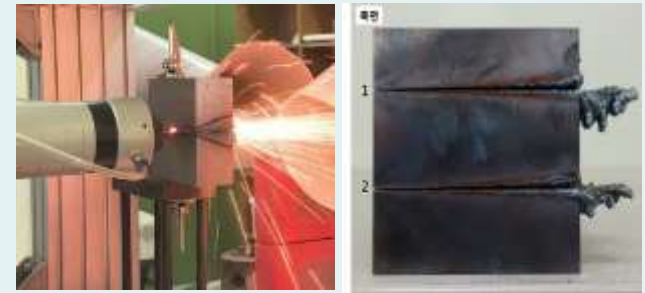
고하중 고정밀 매니플레이터 개발

- 모듈형 유압 구동 매니플레이터 개발
 - 가반하중 250kg, 총길이: 3.2m
- 모터와 센서 일체형 유압 구동 액추에이터 개발
 - ▶ 국내 특허 출원

고정밀 원격 제어 시스템 개발

- 고하중 취급 매니플레이터의 제어 시스템 개발
 - 250kg 가반하중 하에서 궤적 추종 오차: <1mm인 제어 알고리즘 개발

Task 3. 고성능 레이저 열적 절단 기술



레이저
원격 절단 시스템

100mm 두께
탄소강/SUS 절단

고성능 레이저 절단 헤드 개발

- 광섬유 기반 고성능 절단 헤드 개발
- 고출력 대응(>10 kW), 장초점 광학계 사용
 - 소형/경량화 지향 (7 kg)
 - ▶ 국내 특허 출원

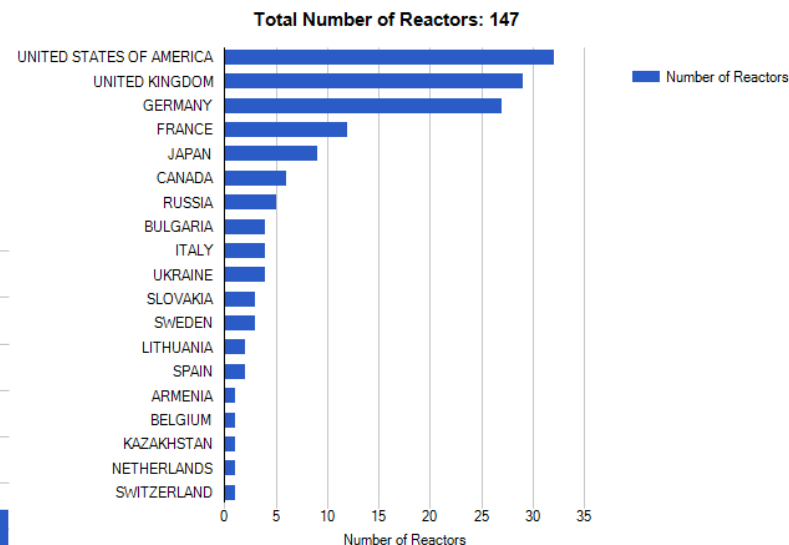
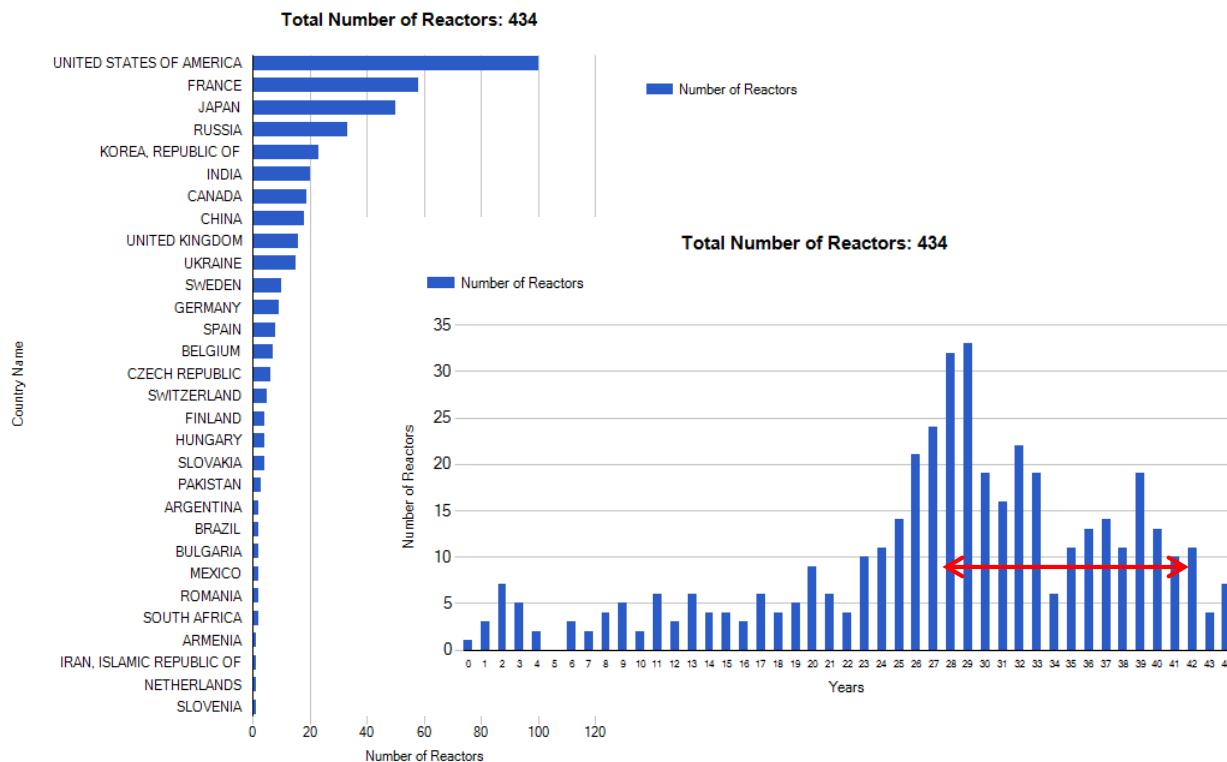
레이저 원격 절단 시스템 개발

- 6kW 광섬유 대응 원격 절단 시스템 개발 완료
 - 공기중 절단 공정 최적화 기술 개발
- 100mm 두께 금속 (SUS/탄소강) 후판 절단 시연
- 직경 165mm 금속 파이프 단일 방향 절단 시연

1. 서론(1/3)

원자력발전소 해체 동향

- 후쿠시마 원전 사고 이후 세계적으로 원자력발전소(원전) 해체 문제가 부각되고, 국내에서도 초기 원전을 중심으로 수명 연장의 변화 가능성 대두
 - 고리 1호기, 월성 1호기등
- 가동 원전 노화 및 정책적인 문제로 해체할 원전이 꾸준히 존재



영구 정지 원전 수

원전 해체 로봇 기술 적용 역사

- 1980년 초 : 제한적으로 로봇 사용
- 1980년 후 ~ 1990년 초 : 원전 해체시 로봇 적용 시작
 - 유럽 : Teleman project의 부분으로 수행
- 1996년 : 미국 DOE의 Robotics Crosscutting Program



TELEMAN Project

- 기간 : 1989 ~ 1993
- 목적 : develop remote 'handling' system for hazardous or disordered nuclear environments (main focus : Telerobotics)
- subject area
 1. Teleoperators
 2. Intervention systems
 3. Radiation exposure reduction
 4. Radiation tolerant systems
 5. Applications to fusion plants, fission, reprocessing, emergency response
 6. Autonomous mobile robots
 7. Multi-sensor integration
 8. Robot vision
 9. Control

Robotics Crosscutting Program

- 목적 : cleaning up the legacy of radioactive and chemically hazardous waste at contaminated sites and facilities
- Technical application area
 1. Tank Waste Retrieval(TWR)
 2. Chemical Analysis Automation(CAA)
 3. Decontamination and Dismantlement(D&D)
 4. Crosscutting and Advanced Technology(CC&AT)

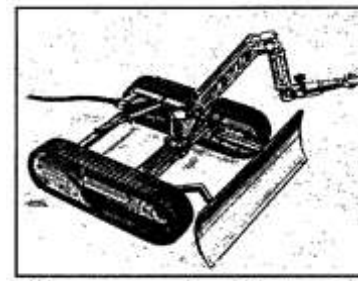


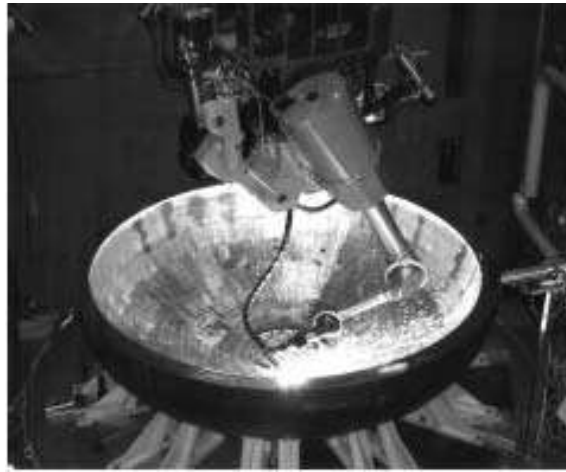
Figure 3.8-1. Houdini in-Tank Robot, artist conception.



해체 로봇 시스템(예)



Characterization



Segmenting



Decontamination



Materials handling



해체 로봇 시스템(예)



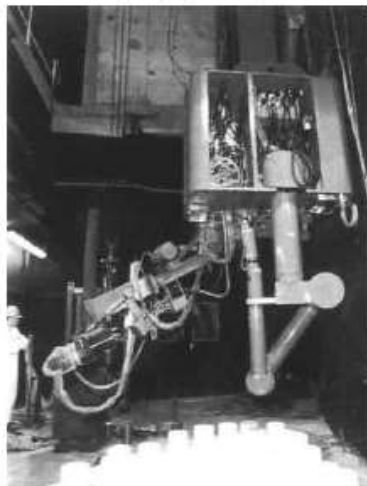
PIADE carrier (ELAN IIB)



ATENA carrier (AT1)



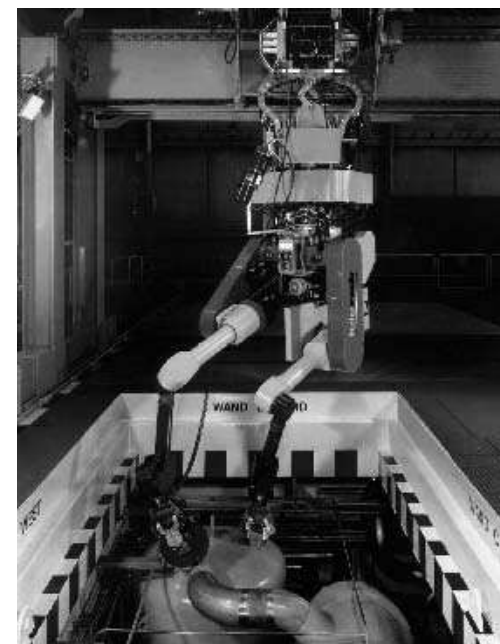
Remote Dismantling Machine (RDM) - (WAGR)



U storage carrier (CEA Marcoule)



Telescopic carrier TMTC by Cybernetix (load 500kg, 6m reach)







System with chain - WAK/Arm type



Dual Arm Work Platform at CP-5 (Suspended carrier)

Telescopic system

해체로봇 국내/외 관련 기술 현황

국가(기관)	프랑스 (CEA)	영국 (Hydro-Lek Ltd)	미국(Schilling Robotics)	한국(KNR System Inc.)
제품	Maestro System	HLK-7W	Atlas	HYDRA-MP2
특징	<ul style="list-style-type: none"> 6 DOF 2.4m Payload : 100kg 위치정밀도 : 1mm 내방사화 : 10kGy 	<ul style="list-style-type: none"> 7 DOF 1.5m reach Payload : 150kg 해체 분야 활용 	<ul style="list-style-type: none"> 6 DOF 1.6m reach Payload : 250kg 수중 작업 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 6 DOF 1.4m reach 시작품 소형 유압 구동 모듈 개발
				

- No Modular Type
- 매니플레이터 유지보수 및 매니플레이터 링크 변화가 용이하지 않음

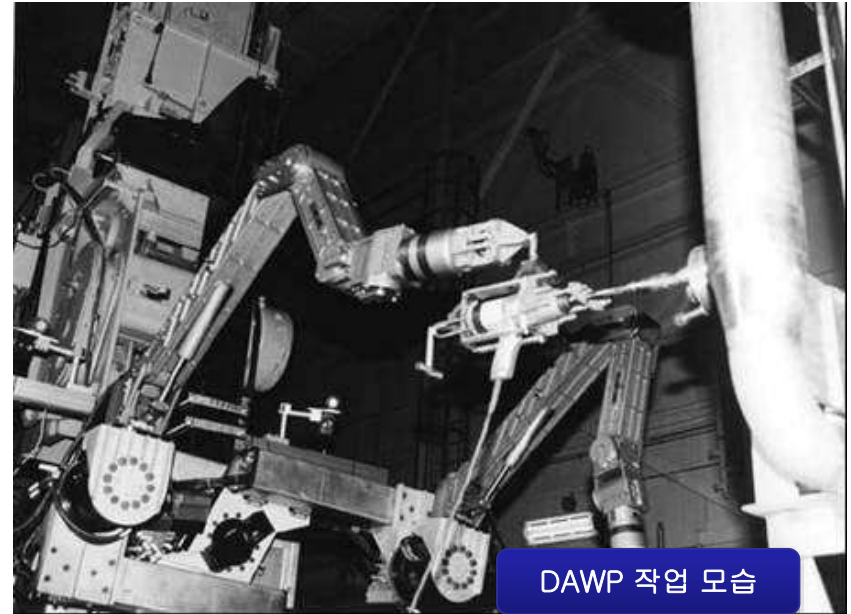
작업공간이 3m이상이고 가반하중이 250kg인 유압 매니플레이터는 판매되고 있는 제품이 없음

원전 해체 로봇 적용 사례

Chicago Pile 5 (CP5)

- 열중성자 연구용 원자로, 1979년에 운전 정지
- Argonne National Lab.(ANL)
- 주요 원격 시스템 적용
 - Dual Arm Work Platform(DAWP)
 - Platform Base
 - 2대의 Schilling Titan III
 - Remote Viewing System
 - 조명장치/툴 제어 장치 등등
- Lessons learned
 - 장비 설치 시간이 길고, 너무 복잡함
 - 유지 보수 시간이 많이 소요됨
 - 파워선 및 통신선 관리 요구됨
 - 조작 훈련 시간(200시간 이상 요구)

유지보수 고려



DAWP 작업 모습



DAWP operator control room

로봇 시스템의 개발 방향

Nuclear Energy Agency, *R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities*, NEA No. 7191, 2014

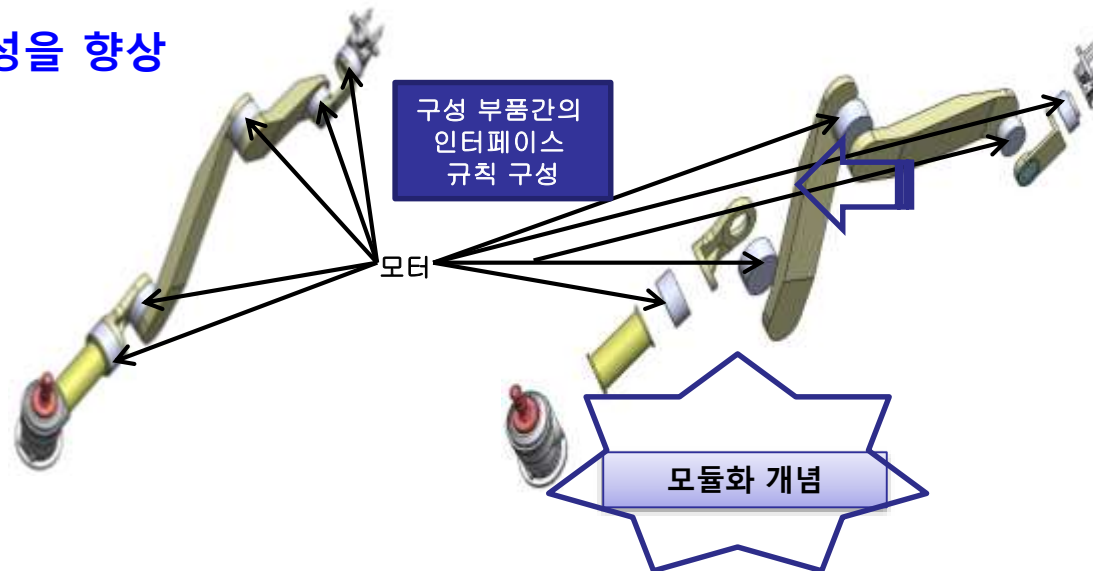
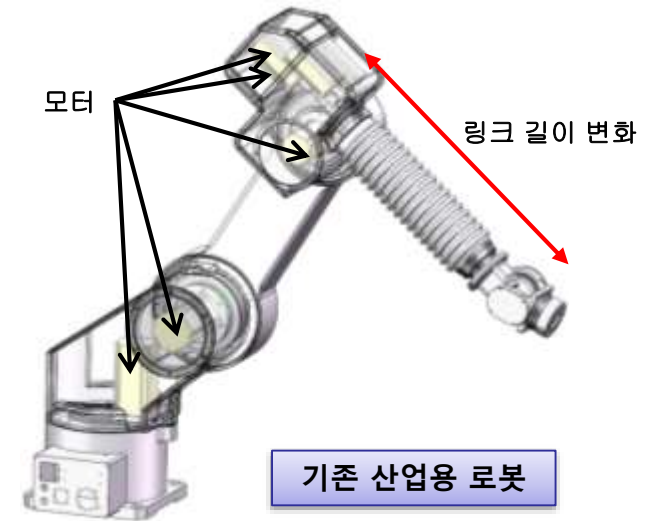
Suggested technology for standardizing robotic modules, articulated arms, hydraulic or electric power packs

- *Description* – **Each robotic arm technology developed for a specific purpose** appears to have been designed from scratch, **with little or no standardization**. This is **wasteful, time consuming and expensive**. While it surely provides jobs for creative designers, it causes delays to a project when the robot must pass mock-up and verification trials before use.
- *Objective* – **Develop a series of modular robotic modules on a basic design frame**, each with varying capacities for lifting, reach and articulation. Some companies have developed and successfully marketed standardized units, such as the various models of the Brokk machine.
- *Desired deliverables* – A family of robotic modules that can be assembled from **a “toolbox” of options for several capacity sizes and range of motion applications**. Hydraulic or electric power packs can similarly be developed with **varying pressures, hydraulic flow rates and electricity requirements**.

매니퓰레이터 개발 전략

■ Manipulator 설계 방향

- 기능은 동일하지만 성능 차이가 날 수 있도록 설계
 - 절단 성능/유지보수성/설치 및 해체 용이성/신뢰성 향상
 - Manipulator의 부품을 모듈화
 - 문제점
 - 주요 부품(예: 모터) 고장 시, 교체하기 위해서는 전체 분해가 필요
 - 조립 시 많은 시간 소요
 - 작업 범위 수정 시, 재 설계가 필요
 - 모듈화 : Design with standardized units or dimensions, as for easy assembly and repair of flexible arrangement and use
- ➔ 조립성/보수성/가변성을 향상



Modular Type Manipulator



해체용 매니퓰레이터

해체용 매니퓰레이터 개발 목표

- 대형 원자력시설의 고방사성 핵심설비(RPV, SG, RCP, PZR) 해체 시에 필요한 고하중을 취급할 수 있는 국내 기술로 유압 매니퓰레이터 개발 중(Payload : >250kg, 위치정밀도 : <±1mm)



유압 구동 모듈 개발

- 유압 매니퓰레이터의 **조립성/보수성/가변성을 향상**
➔ 유압 매니퓰레이터의 핵심 부품인 **모듈형 유압 구동 모듈** 개발

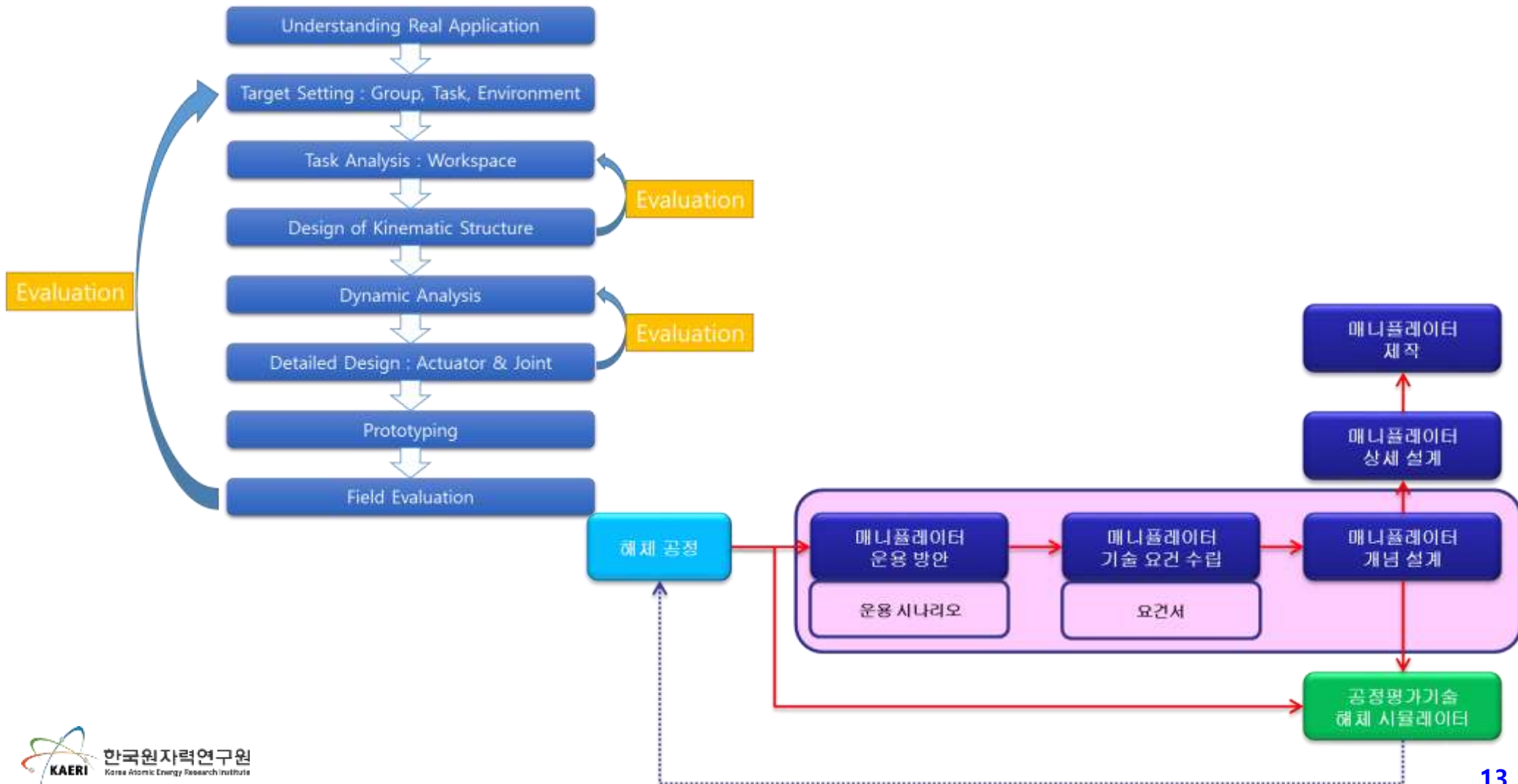


해체 매니퓰레이터 개발

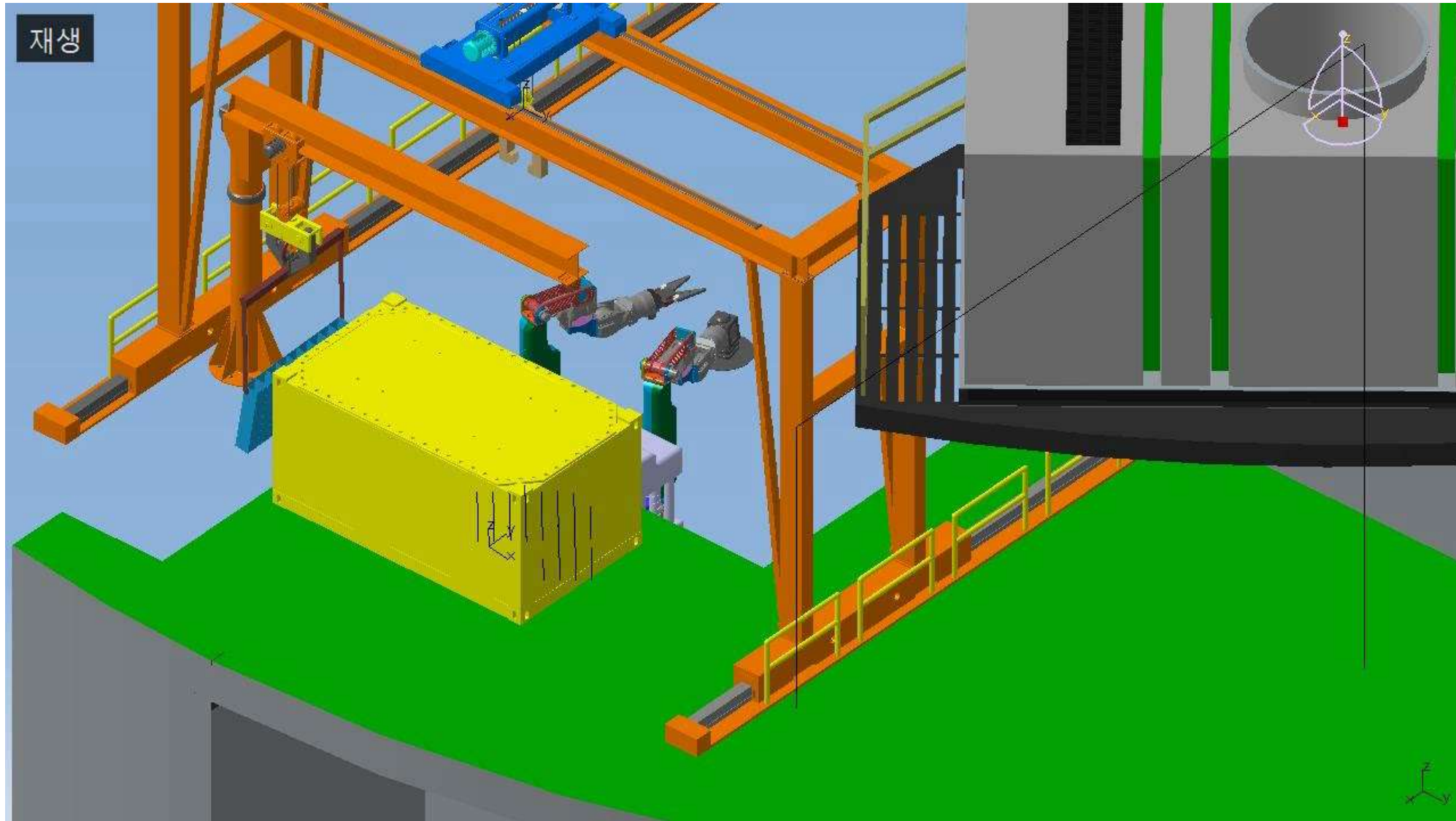
- 모듈형 유압 구동 모듈의 조합
- 해체용 매니퓰레이터 개발

원격 해체 작업용 로봇 시스템 설계 전략

- 원자로 압력용기 해체 공정(45개의 공정) 분석을 통한 해체 Manipulator 운용 방안 수립
 - “원전 핵심설비 해체공법 평가기술 개발” 과제 결과물 활용



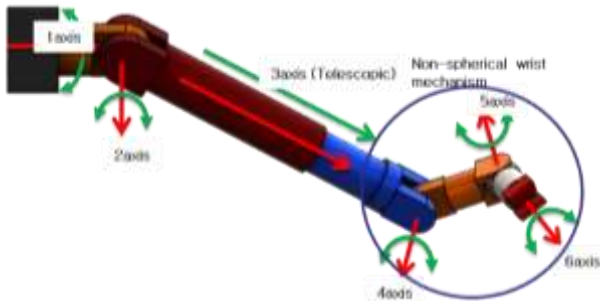
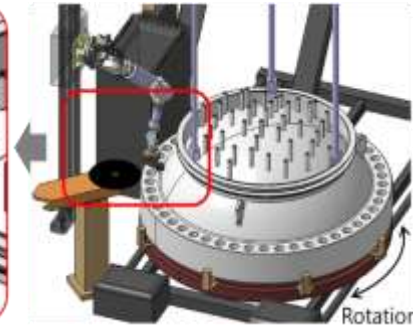
해체 공정 (매니퓰레이터 운용 시나리오)



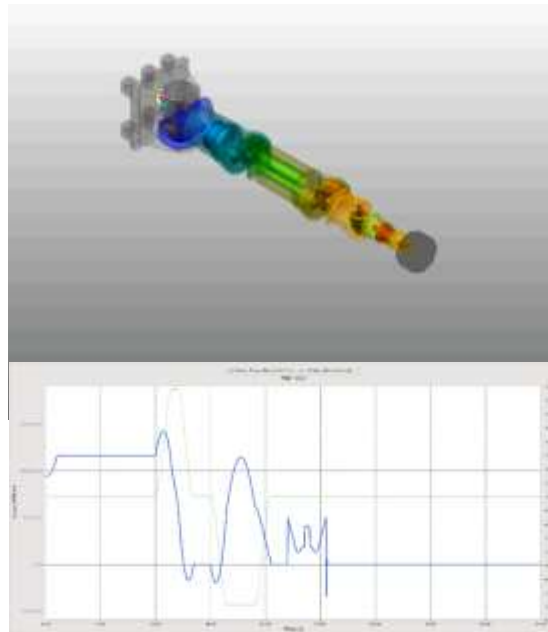
해체 매니퓰레이터 상세 설계

■ 해체 매니퓰레이터 요구조건

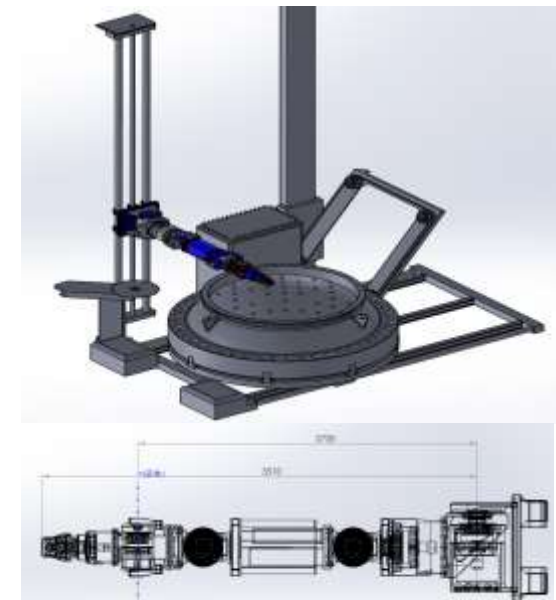
- 정량적 목표 : **250kg 가반하중, $<\pm 1\text{mm}$ 위치정밀도**
- 정성적 목표
 - Water-Jet, Saw을 이용 시 발생하는 외력에 강인한 강성을 유지
 - 작업 공간에서 다른 장애물과의 간섭 회피
 - 절단 작업을 지원
 - 작업 공간 확대



매니퓰레이터 기구부 형상 및 길이 선정



매니퓰레이터 동특성 해석



매니퓰레이터 설계

해체 매니퓰레이터 개발 문제점

❖ 해체용 고하중 취급 유압 매니퓰레이터의 요구 사항

- 가반하중 : 250kg
- 위치정밀도 : $\pm 1\text{mm}$
- 총 길이 : 3.2m
- 작업공간 : 2.75m

❖ 250kg을 핸들링할 수 있는 유압 구동 모듈

- 각 조인트 별 요구 토크 및 힘
 - 1축 : 4,285 Nm 2축 : 1,877 N 3축 : 7,407 Nm
 - 4축 : 4,580 Nm 5축 : 2,325 Nm 6축 : 84 Nm
- 유압 구동 모듈은 유압 모터, 감속기, 각도 센서로 구성
 - 감속기는 위치 정밀도를 맞추기 위해서 꼭 필요한 부품
- 위 요구 토크 및 힘을 생성할 수 있는 유압 구동 모듈 개발 필요

❖ 문제점

- 감속기 문제
 - 조인트 하중을 견딜 수 있는 RV감속기 존재하지만, RV감속기가 상당힘 무거움
(매니퓰레이터 자체 무게↑ → 요구 토크↑
→ 구동모듈 하중 및 토크↑)
 - RV감속기 보다 가벼운 경량형 하모닉 감속기 중에 조인트 하중을 최대로 견딜 수 있는 하모닉 감속기는 없음
 - 현재 최고 사양을 갖는 하모닉 감속기로 선정해서 설계함
- 감속기 제거하고 유압 모터를 직접 사용시에는 요구되는 토크에 맞는 유압 모터가 없음
 - * 250kg을 취급하고 길이가 3m이상이 되는 유압 매니퓰레이터가 없는 이유라고 판단됨

❖ 고하중 취급 구동 모듈 개발이 절실히 필요한 상황

❖ 매니퓰레이터의 링크 재질을 경량이고 견고한 재질로 선정

(매니퓰레이터 자체 무게↓ → 요구 토크 ↓ → 구동모듈 하중 및 토크 ↓)

모듈형 유압 구동 모듈 개발

■ 해체 매니플레이터용 모듈형 유압 구동 모듈 개발

● 매니플레이터 요구 조건 :

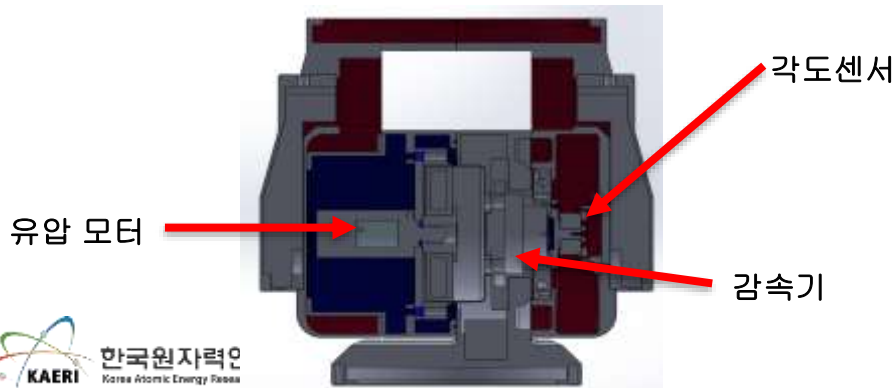
250kg 가반하중, $\pm 1\text{mm}$ 위치정밀도, reach 거리 : 3.2m(base \rightarrow wrist axis)

● 250kg을 핸들링 하기 위한 매니플레이터의 구동 모듈 설계

- 구동을 위한 유압 모터는 존재하지만, 조인트 하중을 견딜 수 있는 경량형 하모닉 감속기가 없음
- 조인트 하중을 견딜 수 있는 RV 감속기는 존재하지만, 하모닉 감속기에 비교하여 무게가 큼(2~3배정도)
- RV감속기 사용시, 매니플레이터의 크기가 증가됨(slim한 형태로서는 유지하기 쉽지 않음. ModuMan 100과 같은 형태 보다는 대용량을 핸들링하는 산업용 로봇 형태 같음)
- 감속기는 위치정밀도를 맞추기 위해서 꼭 필요한 부품인데, 위치정밀도를 포기하고 감속기를 제거하는 경우에 매니플레이터 구동에 필요한 유압 모터가 없음

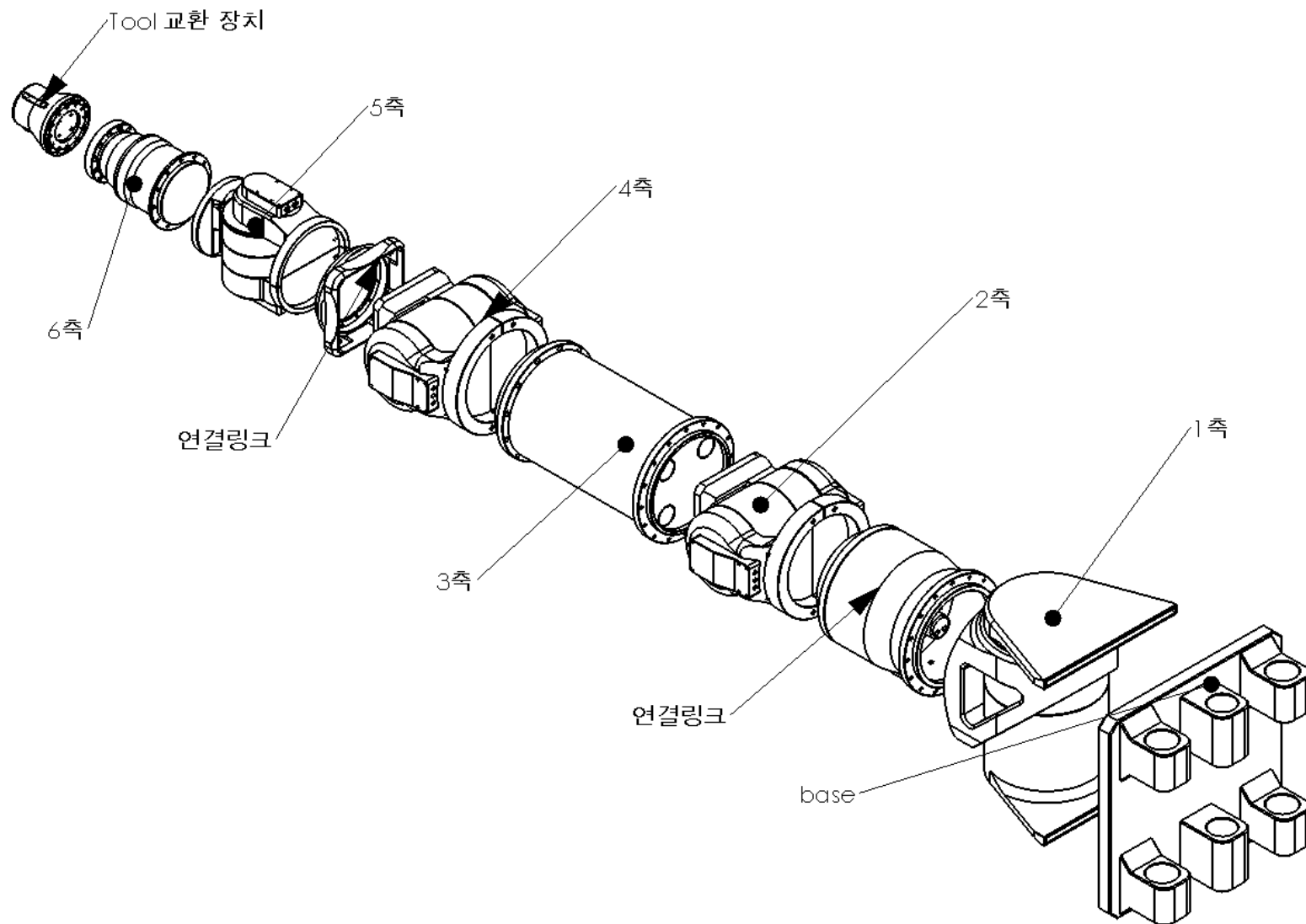
→ 250kg을 핸들링하는 유압 매니플레이터가 위와 같은 이유로 존재하지 않는 이유라고 판단됨

→ 구동 모듈 개발이 절실히 필요한 상황임



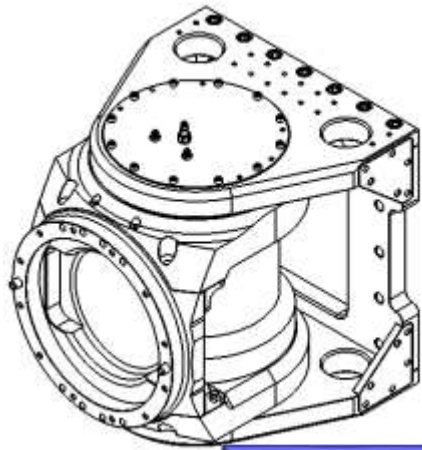
ModuMan 100 사양
- Payload : 100kg
- Reach : 2359mm

해체 메니폴레이터 설계 Concept

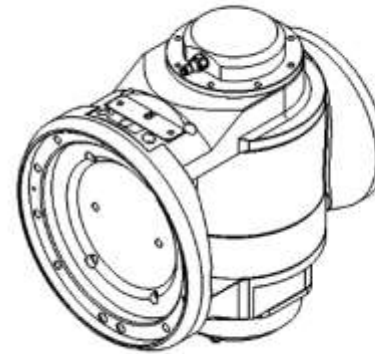
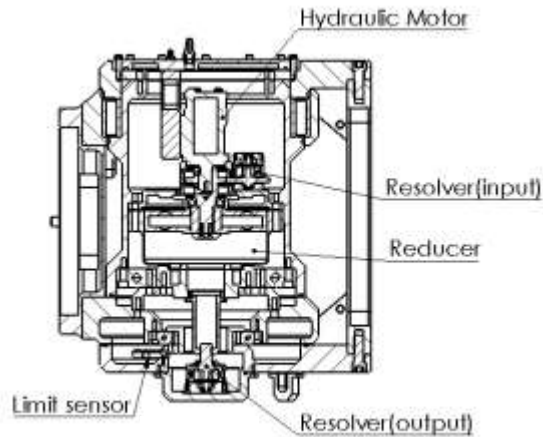


모듈형

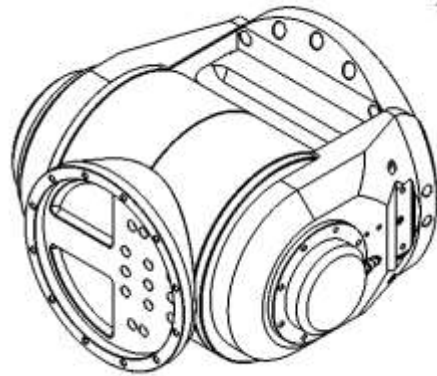
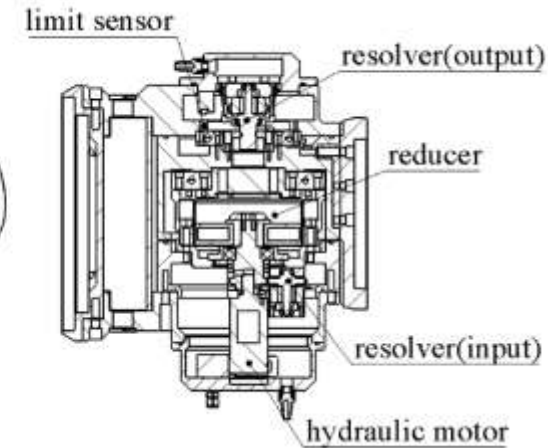
Hydraulic Actuator Module(Rotary)



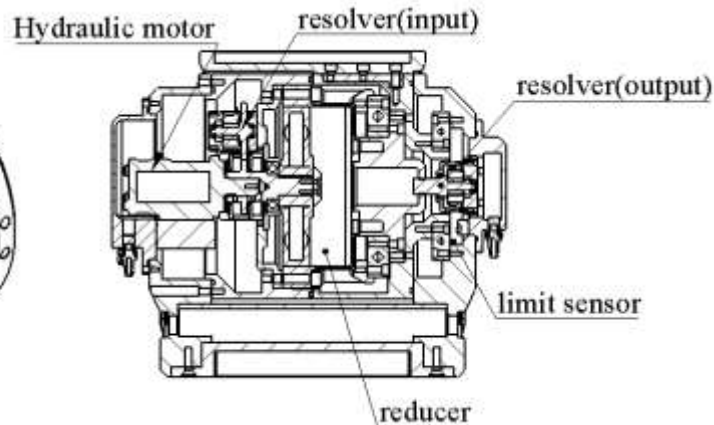
Large hydraulic actuator module



Small hydraulic actuator module



Medium hydraulic actuator module

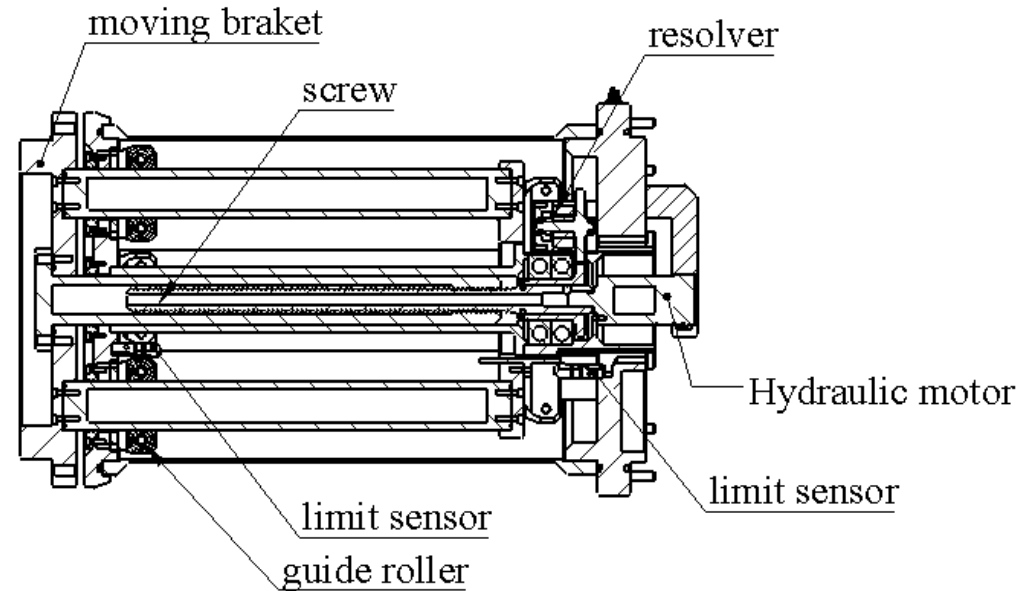
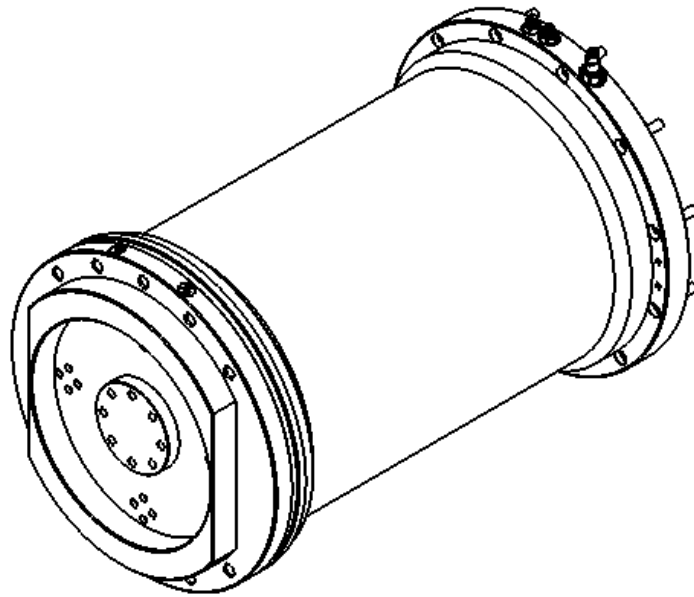


Hydraulic Actuator Module



품목	1 축 회전관절	3, 4 축 회전관절	5 축 회전관절
유압 모터	SauerDanfoss사 OMP 80 - 토크 : 150 Nm - 속도 : 770 rpm - 용량 : 10 kW	SauerDanfoss사 OMP 80 - 토크 : 150 Nm - 속도 : 770 rpm - 용량 : 10 kW	SauerDanfoss사 OMM 40 - 토크 : 45 Nm - 속도 : 630 rpm - 용량 : 2.2 kW
감속기	삼익HDS사 CSF-100 - 감속비 : 160:1 - 평균 부하토크 : 5,720 Nm - 순간허용 최대토크 : 15,500 Nm	삼익HDS사 CSF-80 - 감속비 : 160:1 - 평균 부하토크 : 3,130 Nm - 순간허용 최대토크 : 7,910 Nm	삼익HDS사 CSF-65 - 감속비 : 160:1 - 평균 부하토크 : 1,570 Nm - 순간허용 최대토크 : 4,750 Nm
위치 센서	Tamagawa Resolver(S-21)	Tamagawa Resolver(S-21)	Tamagawa Resolver(S-21)

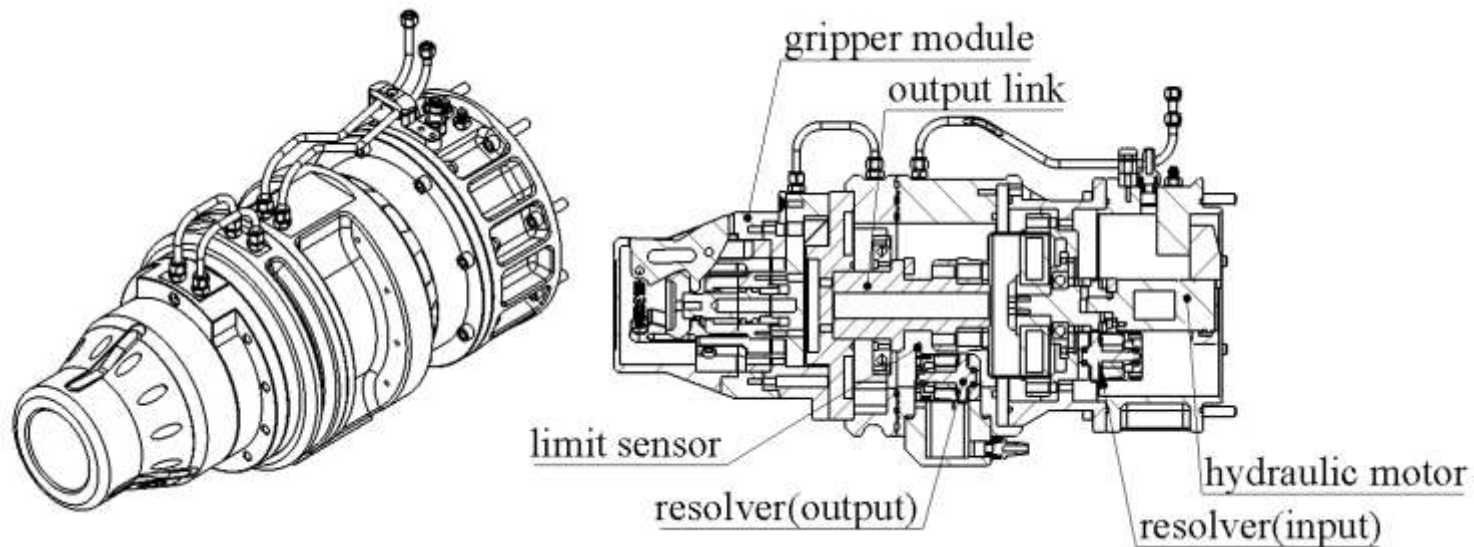
Hydraulic Actuator Module(linear)



The draft of prismatic hydraulic actuator module

항목	품목
유압 모터	SauerDanfoss OMM 40
스크류	사다리꼴 나사 : 리드 5mm

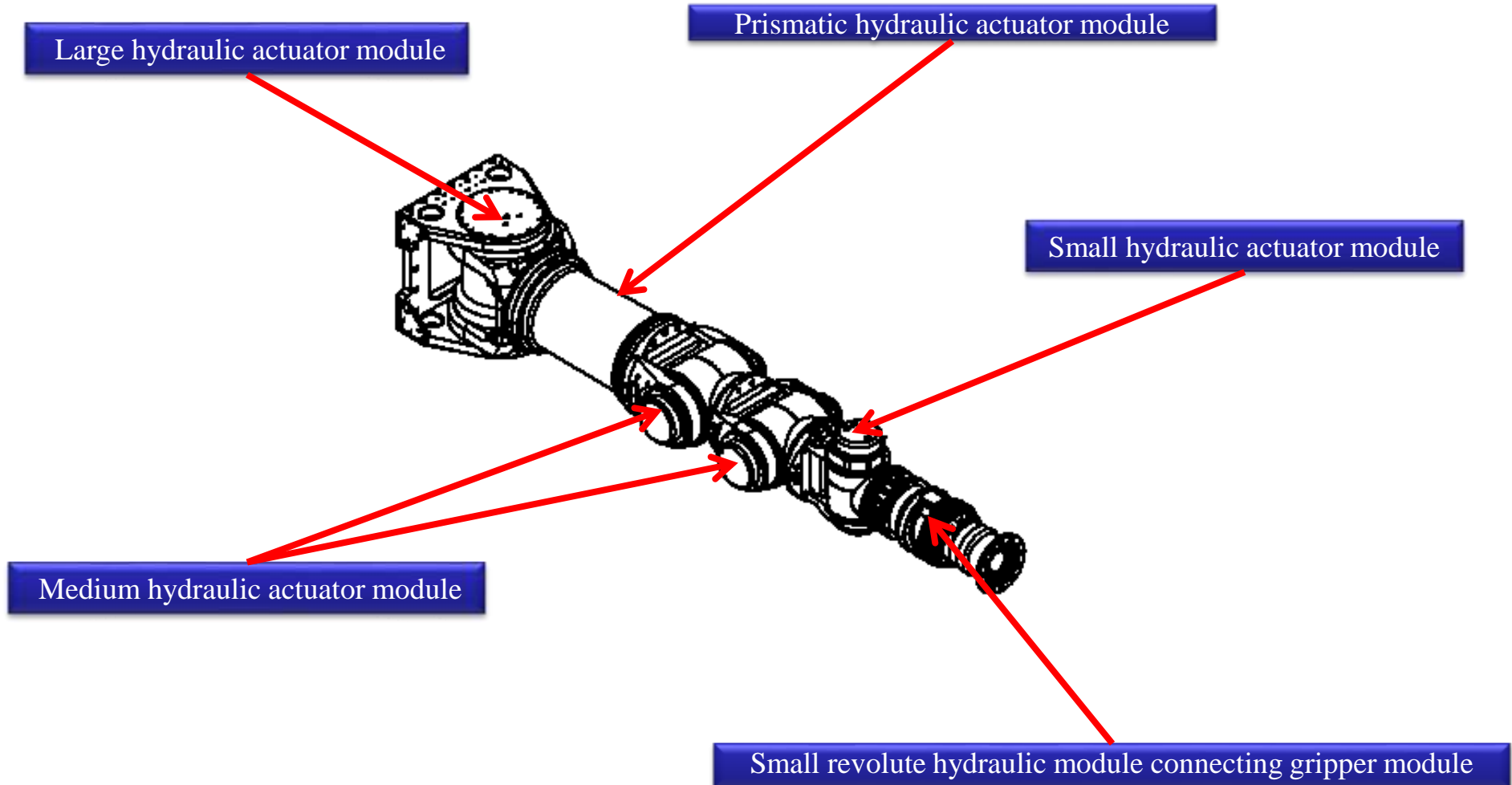
Hydraulic Actuator Module(end-effector)



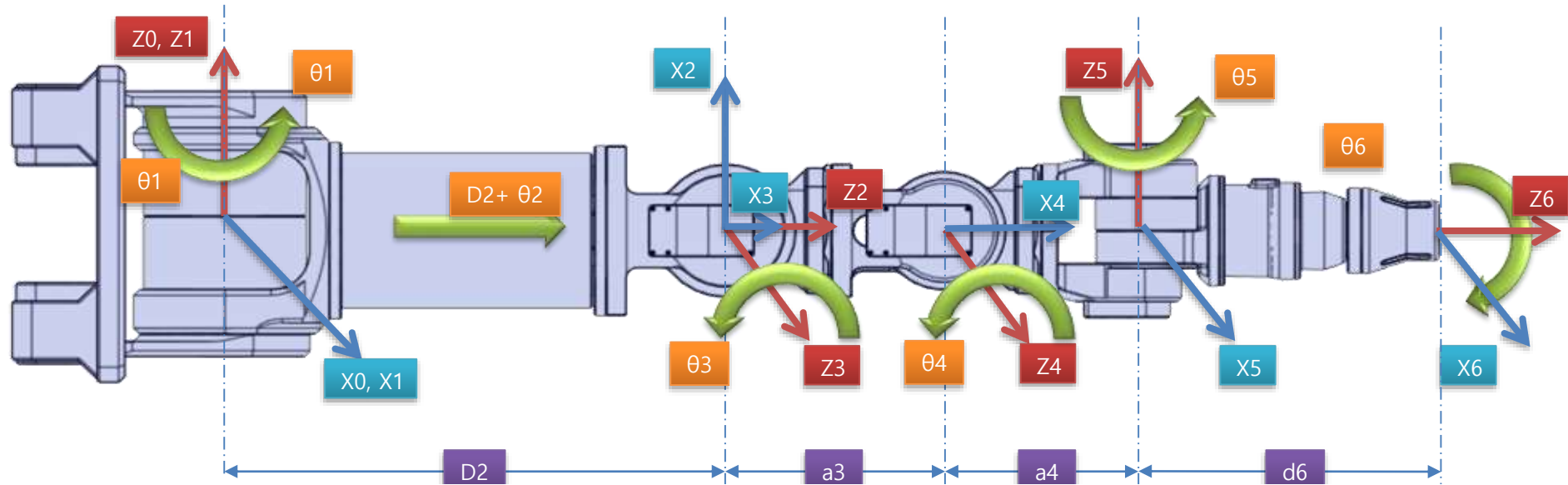
The draft of small revolute hydraulic module connecting gripper module

항목	품목
유압 모터	SauerDanfoss OMM 40
감속기	삼익HDS CSF-65
센서(레졸버)	Tamagawa Resolver(S-21)
그리퍼	유압실린더와 그립부

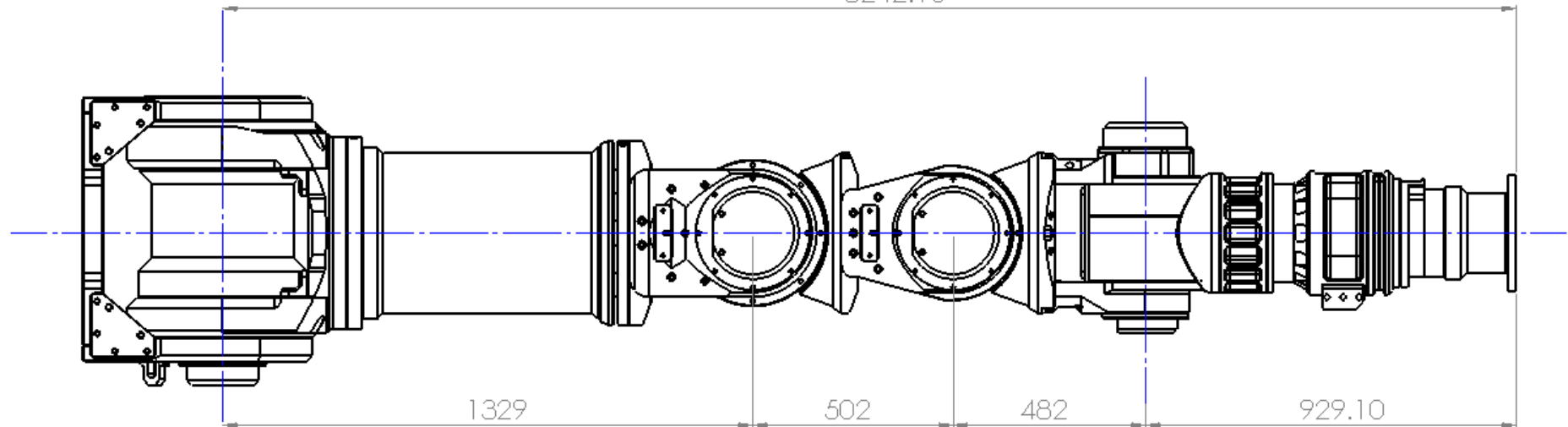
Hydraulic Actuator Module 배치



Hydraulic Manipulator 제원 및 좌표계



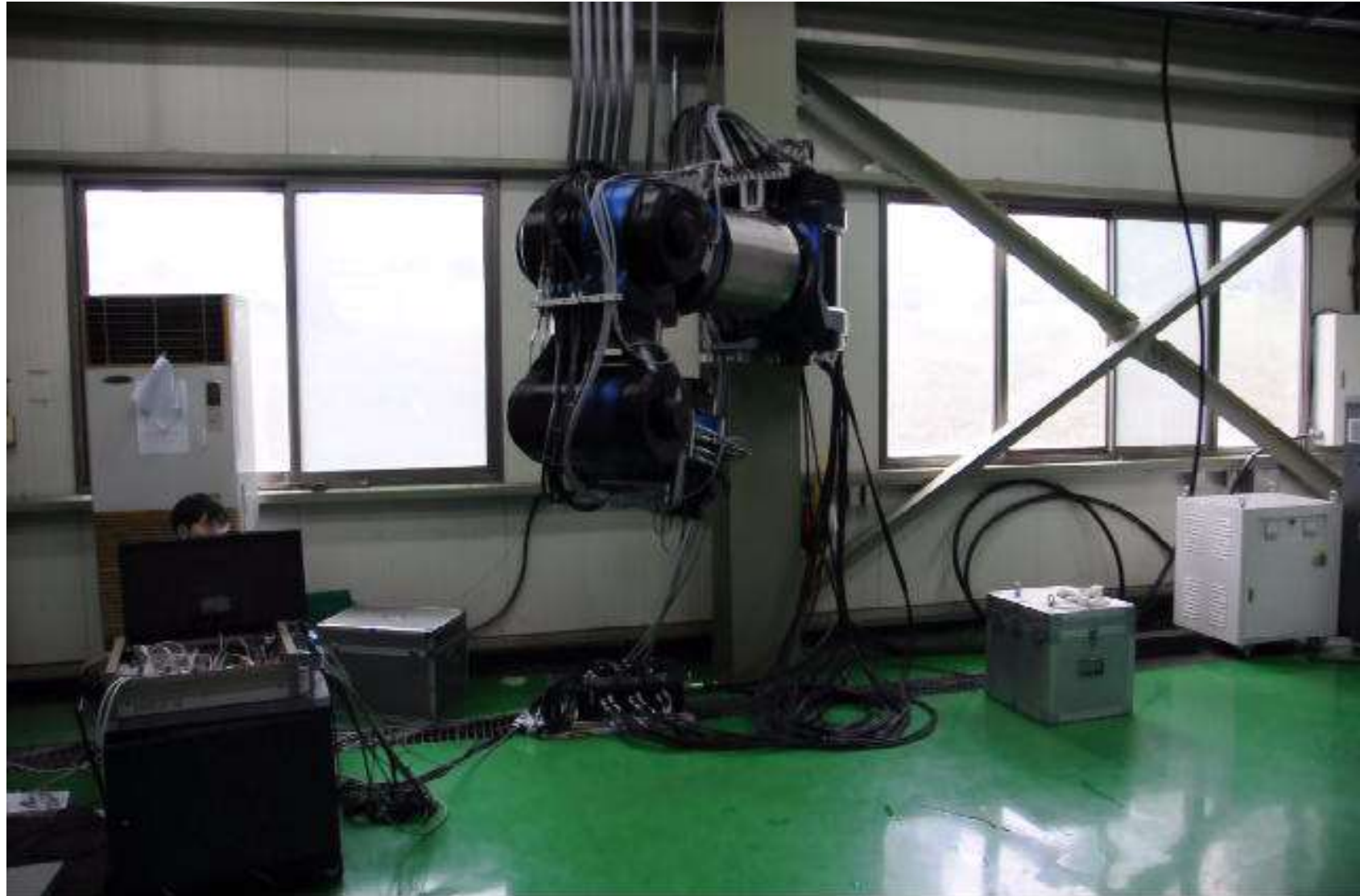
3242.10



Hydraulic Manipulator(1st version)



Hydraulic Manipulator 동작 테스트 동영상

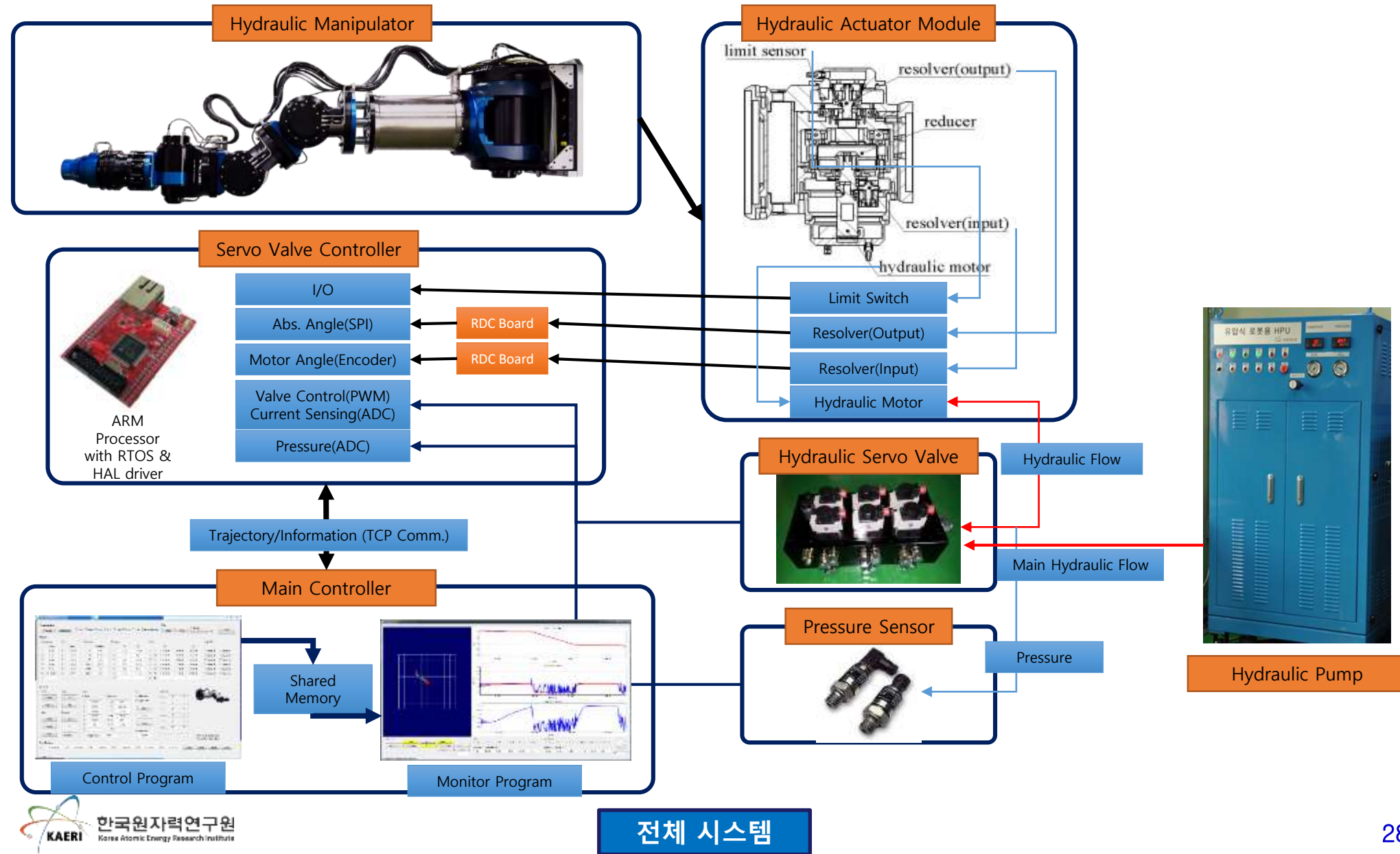


Hydraulic Manipulator(2nd version)



관절	동작범위(rad)	최고속도(rev/sec)
1 축	-95 ~ 95°	0.25
2 축	0 ~ 400 mm	250 mm/sec
3 축	-105 ~ 105°	0.25
4축	-105 ~ 105°	0.3
5 축	-105 ~ 105°	0.3
6 축	-170 ~ 170°	0.3

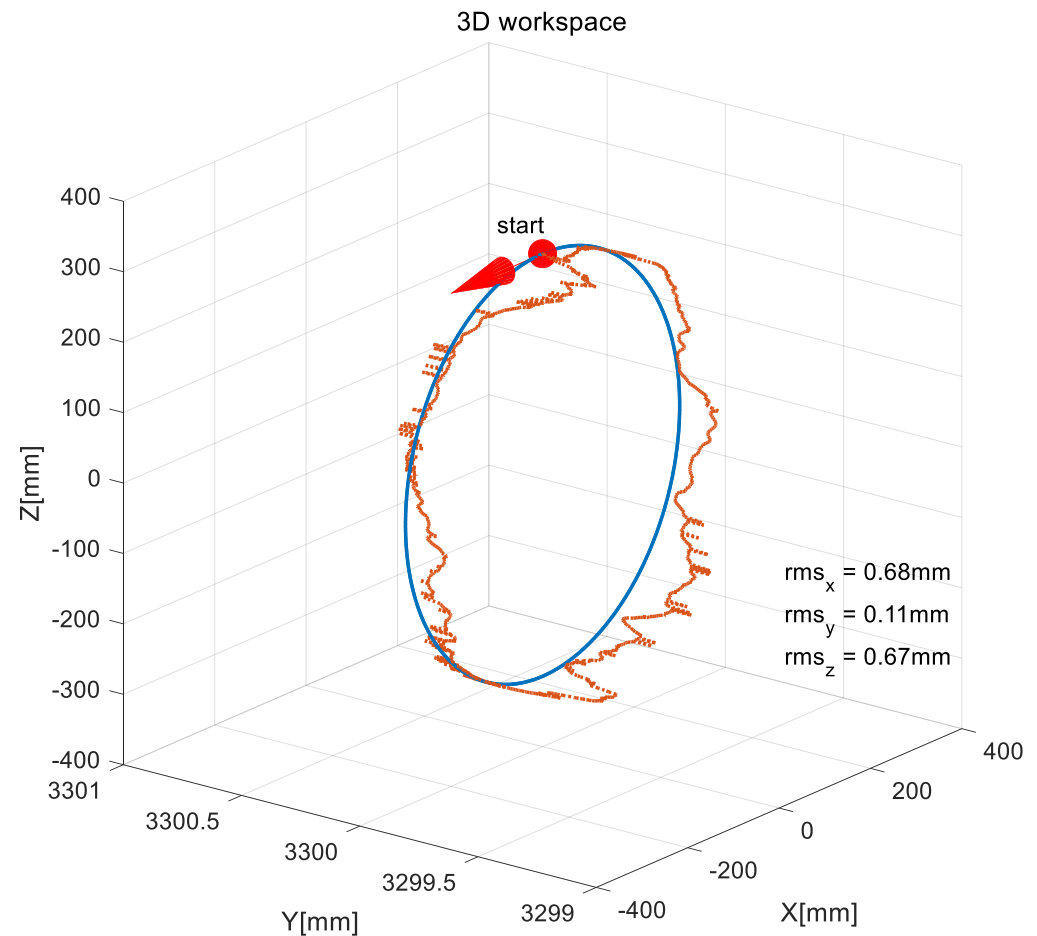
Hydraulic Manipulator 제어시스템



Hydraulic Manipulator 가반하중 테스트 동영상



- 250kg payload, control performance $\pm 1\text{mm}$
- Time Delay Control



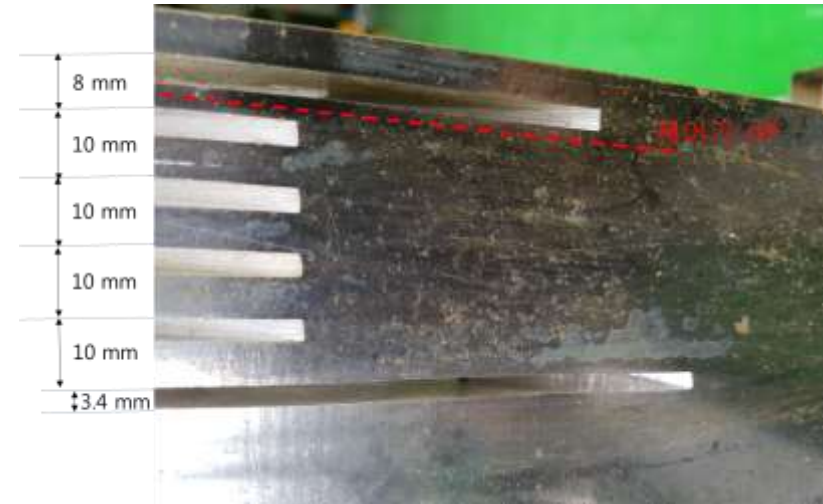
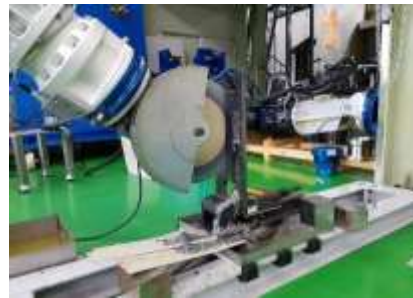
Hydraulic Manipulator 절단 시험



회전 톱을 이용한 절단 시험 결과

■ 20 mm 수직철판 세로 절단 시험

- 제어기 정밀도 및 안정성 검증 (초기 위치오차 확인)
- 수직 철편 절단 성능 시험
- Feeding 속도 : 1 ~ 4 mm/min
- 톱 회전 속도 : 60 rpm (상향식 절단)



■ 수직 알루미늄판 가로 절단 시험



회전톱 회전 속도 : 약 60 rpm



25 mm 진행후 20 mm 하강(0.6 mm/min)

10 mm 진행 (1 mm/min)

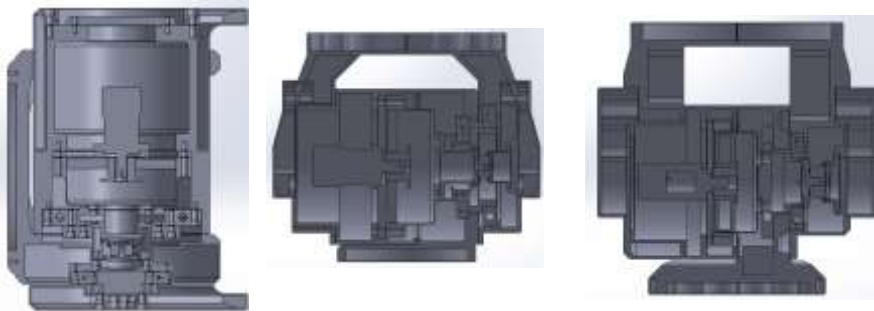
10 mm 진행 (1.33 mm/min)

10 mm 진행 (2 mm/min)

10 mm 진행 (4 mm/min)

25 mm 진행 (3 mm/min) 후
10 mm 하강 (3 mm/min) 후
10 mm 하강 (2 mm/min)

모듈형 유압 구동 모듈 활용방향



다양한 유압 구동 모듈



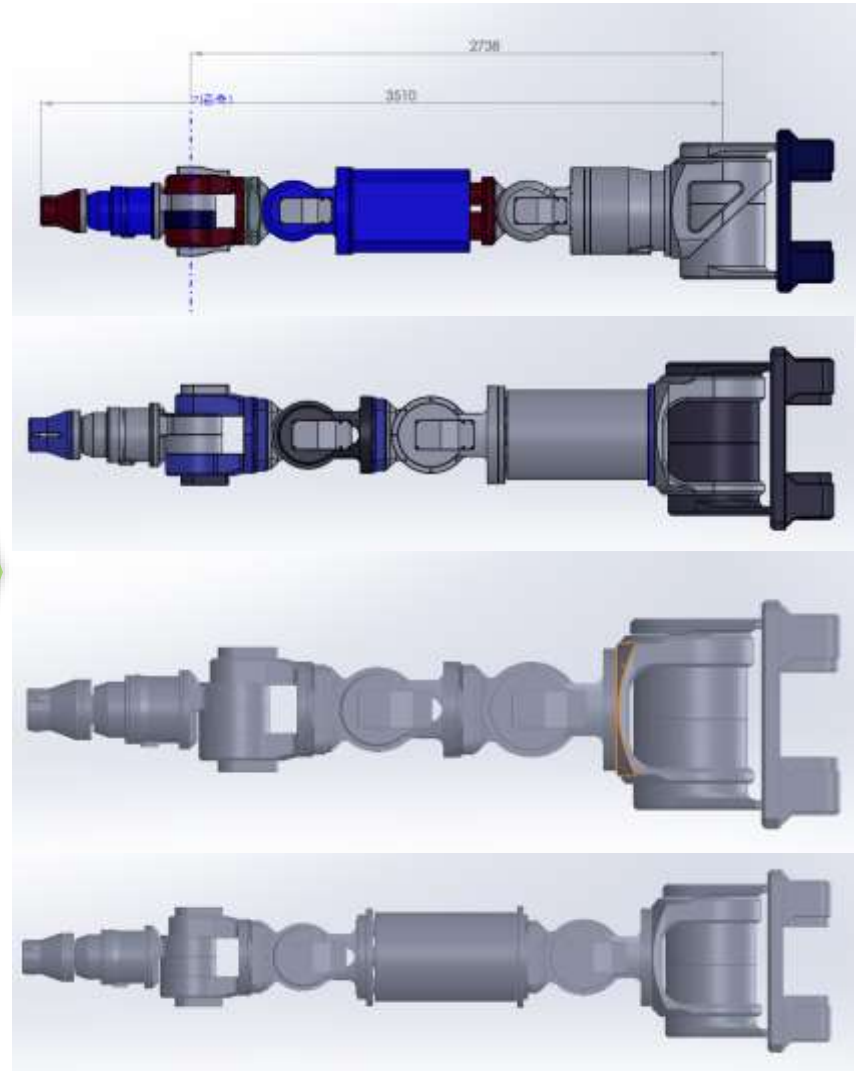
880W



580W

전기식 구동 모듈

조합



작업에 맞게 다양한 매니플레이터를 구성

3. 결론

- 유압 매니퓰레이터의 **조립성/보수성/가변성을 향상**을 위한 유압 매니퓰레이터의 핵심 부품인 **모듈형 유압 구동 모듈**을 개발함
- 향후 개발된 유압 구동 모듈을 이용하여 고하중 취급을 할 수 있는 해체용 유압 매니퓰레이터를 개발함(payload : 250kg)
- 개발된 유압 구동 모듈은 해체 뿐만 아니라 원전발전소 검사 및 유지보수에 활용 가능
- 모듈형 구동 모듈을 통한 원전 작업 매니퓰레이터 개발 시간 단축 및 관련 비용 저감 및 작업자 피폭 감소에 기여



현재 진행 사항

- 고방사성 극한환경의 원자력시설 핵심설비를 수중에서 효과적으로 원격해체 하기 위하여 수중작업 성능, 작업공간, 설치 용이성 및 작업 효율성을 증대시킬 수 있는 매니플레이터의 성능 향상 기술이 필요.
 - 원격 수중 절단 작업을 위하여 **경량형 모듈 보완**(내부 유로 구성)
 - 부하 대비 중량비가 높은 모듈형 경량 수중 매니플레이터 상세 설계(내부 유로, 내부 Cable선)
 - 정밀한 원격 조작을 지원하는 제어 시스템 개발(SBC형태의 제어기, 제어알고리즘 개선)

경량형 모듈 개발



경량형 구동 모듈 설계

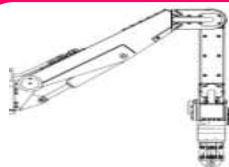


구동 모듈 제작



구동 모듈 평가

모듈형 경량 수중 매니플레이터 개발



수중 절단 작업용 매니플레이터 설계



수중 절단 작업용 매니플레이터 제작

수중 매니플레이터

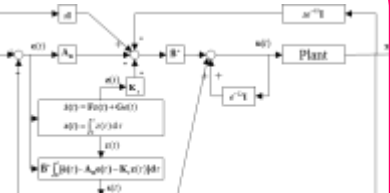


성능 평가

제어 시스템 개발



모듈형 제어 시스템 구축



정밀 제어 알고리즘 개발

경량형 모듈

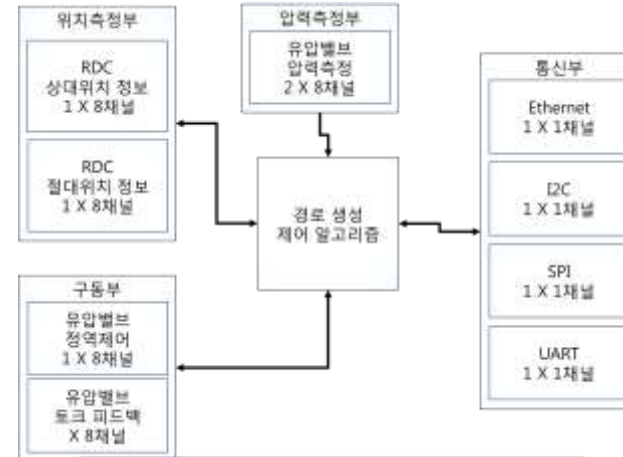
제어 시스템 개발

차세대 원격 절단 시스템

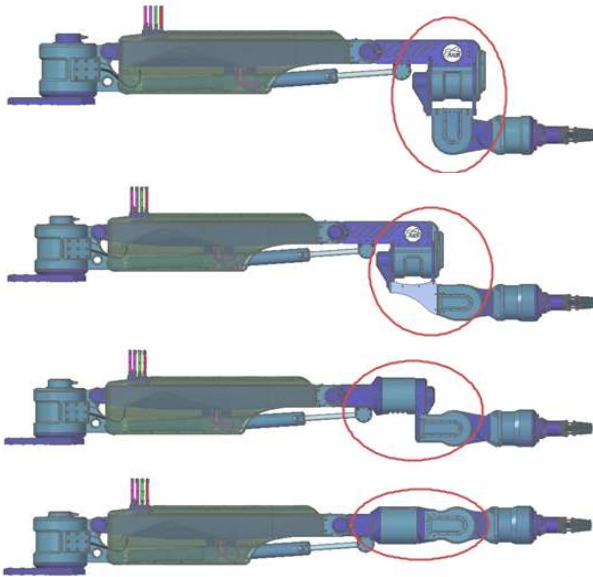
현재 진행 사항



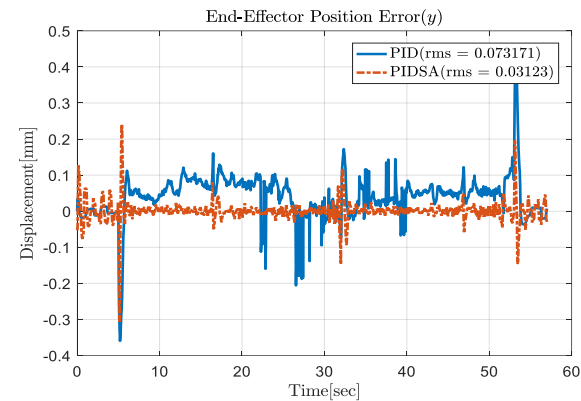
유압 구동 모듈



SBC형태의 유압 매니플레이터 제어기



수중 절단작업용 유압 매니플레이터 설계



제어알고리즘 향상(PIDSA)

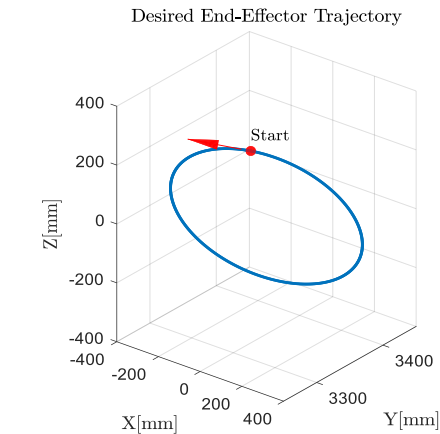
개발 현황 - 제어 알고리즘 성능 향상

■ 궤적 추종 성능 향상을 위한 제어 알고리즘 보완

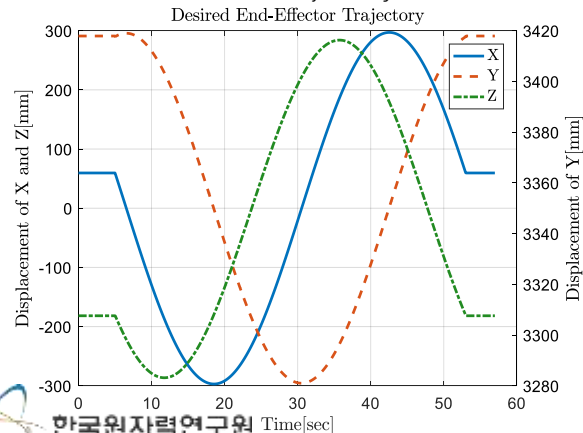
- 기존 제어기의 궤적 추종 성능 향상을 위하여 알고리즘을 보완
- PID제어기법에 SMC(sliding mode control)의 Switching action 을 추가(PIDSA)
- PIDSA의 Windup 문제 해결
- Friction 보상 알고리즘 개발

$$s(t) = L\dot{e}(t) + e(t) + \frac{k_p}{k_d} \int e(\tau) d\tau + \frac{k_i}{k_d} \iint e(\tau) d\tau d\tau$$

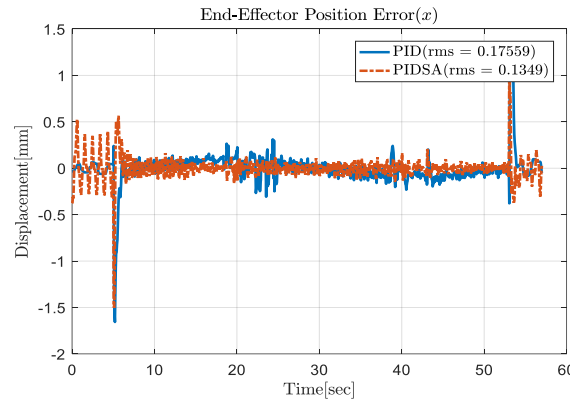
$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(\tau) d\tau + k_d \dot{e}(t) + k_s \operatorname{sgn}(s(t))$$



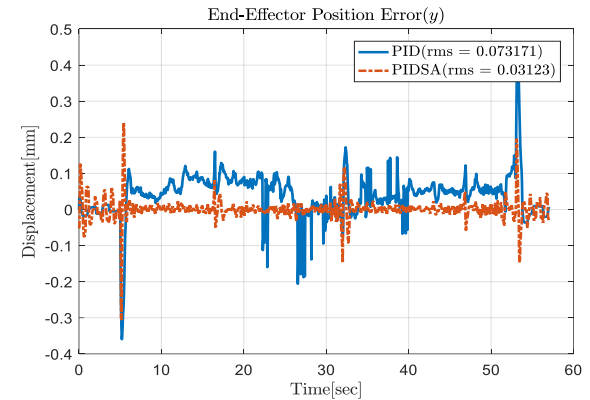
< Desired Trajectory >



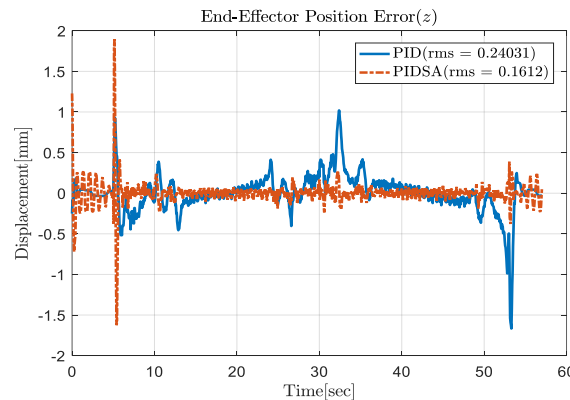
< Desired End-Effector Trajectory >



< X axis Position Error >



< Y axis Position Error >

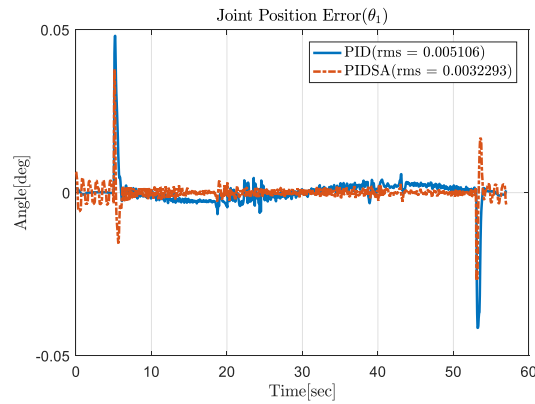


< Z axis Position Error >

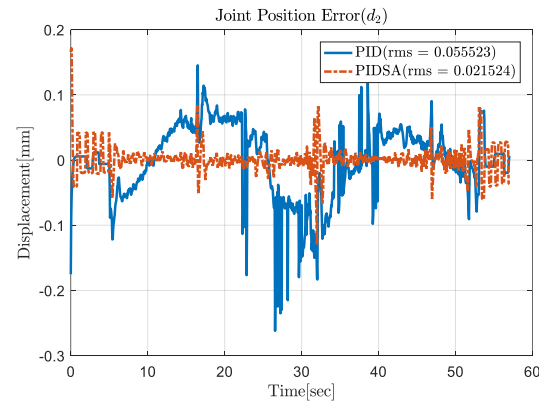
< Position RMS error >

Axis	기존 [mm]	개선 [mm]
X	0.175590	0.134900
Y	0.073171	0.031230
Z	0.240310	0.161200

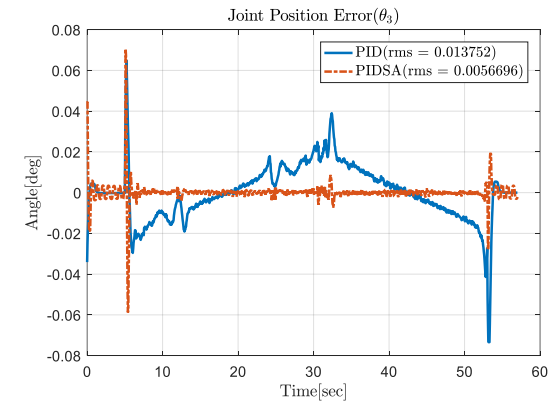
개발 현황 – 제어 알고리즘 성능 향상



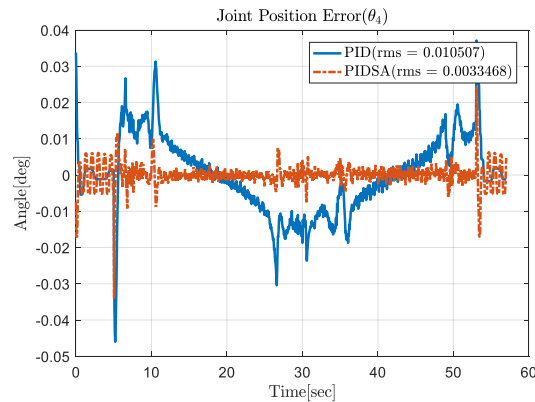
< Joint 1 >



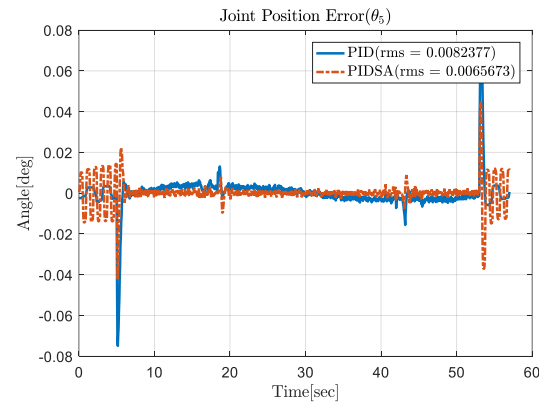
< Joint 2 >



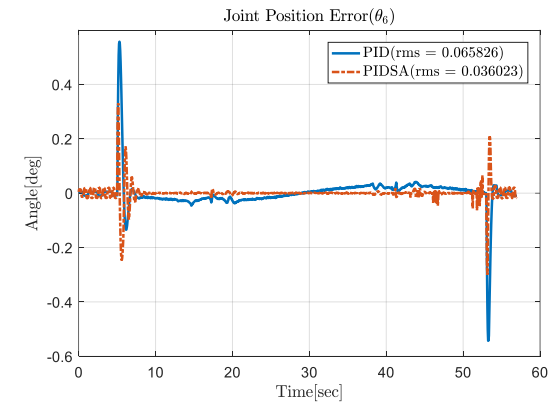
< Joint 3 >



< Joint 4 >



< Joint 5 >



< Joint 6 >

< Position RMS error >

Controller	Joint 1 [mm]	Joint 2 [mm]	Joint 3 [mm]	Joint 4 [mm]	Joint 5 [mm]	Joint 6 [mm]
기존	0.005106	0.055523	0.013752	0.010507	0.008238	0.065826
개선	0.003229	0.021524	0.005670	0.003347	0.006567	0.036023

개발 현황 – 제어 알고리즘 성능 향상

➤ 와인드업 보상 기법

- Anti-Windup 보상기를 추가한 경우 overshoot 없이 제어가 잘 수행되는 것을 알 수 있음.
- Sliding surface 또한 anti-windup 알고리즘을 적용해야만 발산하지 않고 0으로 수렴함.

