



# 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: <math>< 1\text{mm}</math>인 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

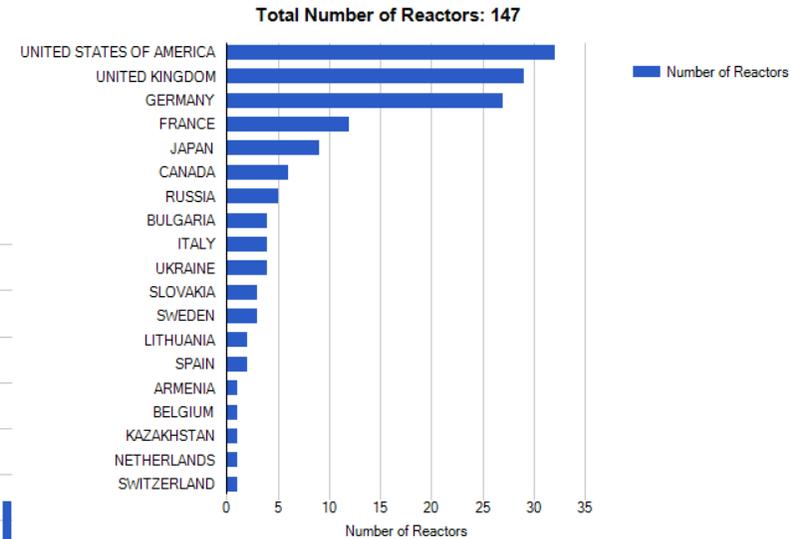
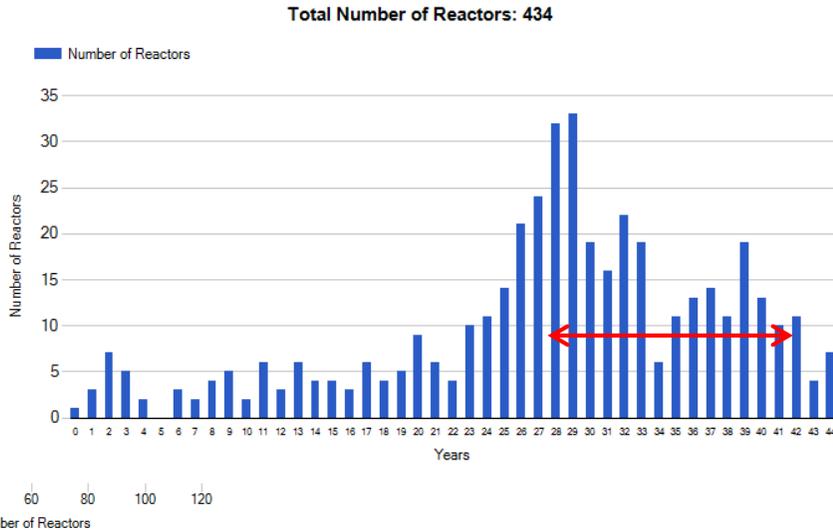
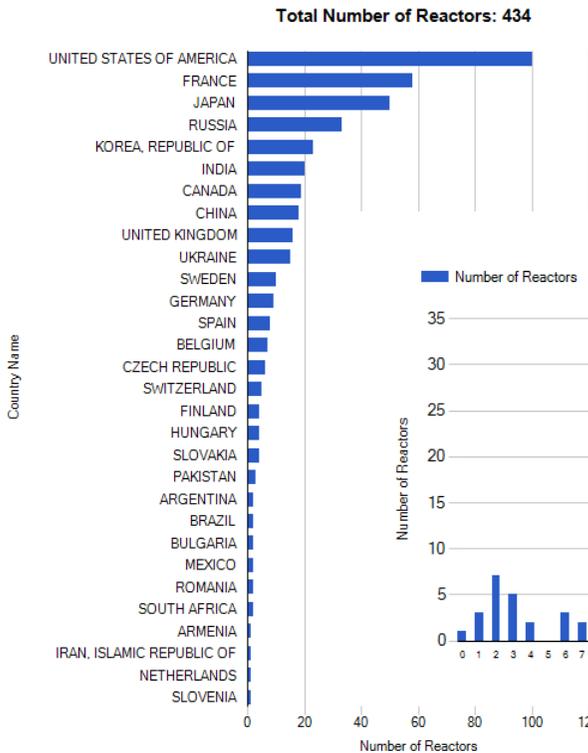
### 레이저 원격 절단 시스템 개발

- 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

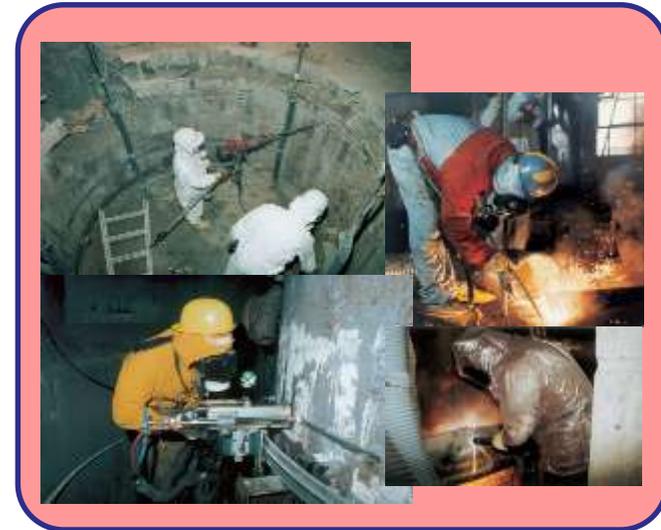


영구 정지 원전 수

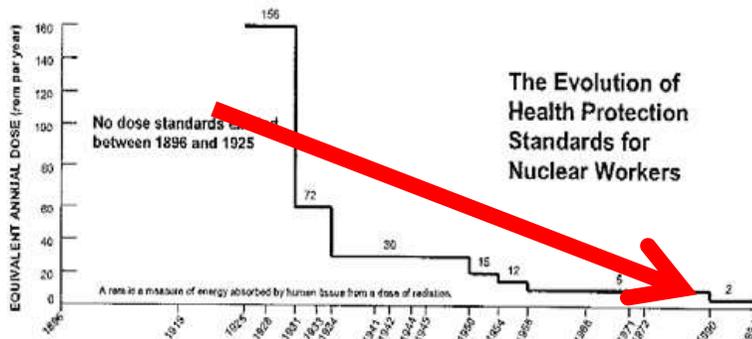
# 1. 서론(2/3)

## 로봇 시스템의 필요성

- 안전성 향상
  - 피폭과 비용 절감
  - 고 방사선 구역 내에 작업자 작업 시간 감소
- 비용 절감
  - 개인 피폭량 감소 = 비용 절감
  - 원격 해체 로봇 시스템이 작업자 대신 작업
- 생산성 향상
  - 보호 장비 착용으로 인한 작업자의 효율이 감소
  - 작업을 수행하기 전에 많은 작업자 훈련 시간이 필요
  - 원격 해체 로봇 시스템을 사용 시 작업자 수를 감소
- 접근성 향상
  - 작업자가 접근 불가능한 지역도 접근 가능



Instead of Human workers



# 원전 해체 로봇 기술 적용 역사

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



Robotics Technology



## 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)

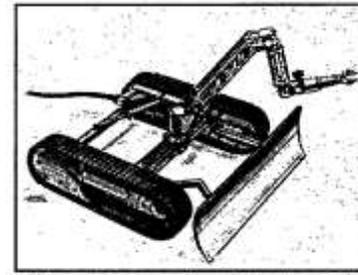


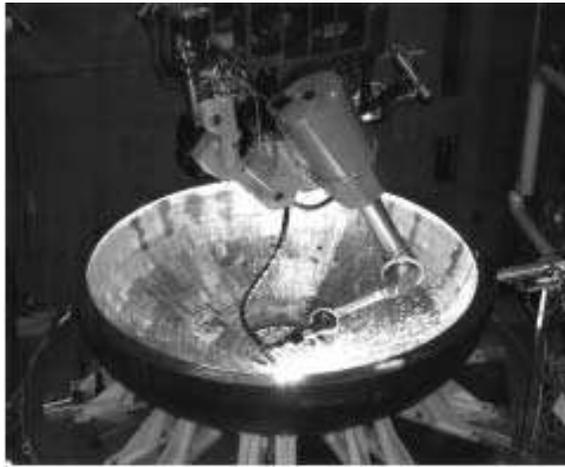
Figure 3.8-1. Houdini in-Tank Robot, artist conception.



# 해체 로봇 시스템(예)



Characterization



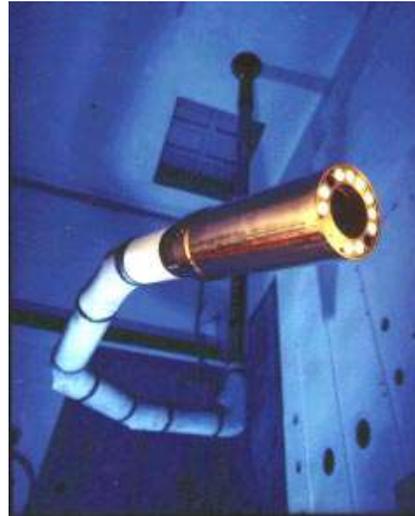
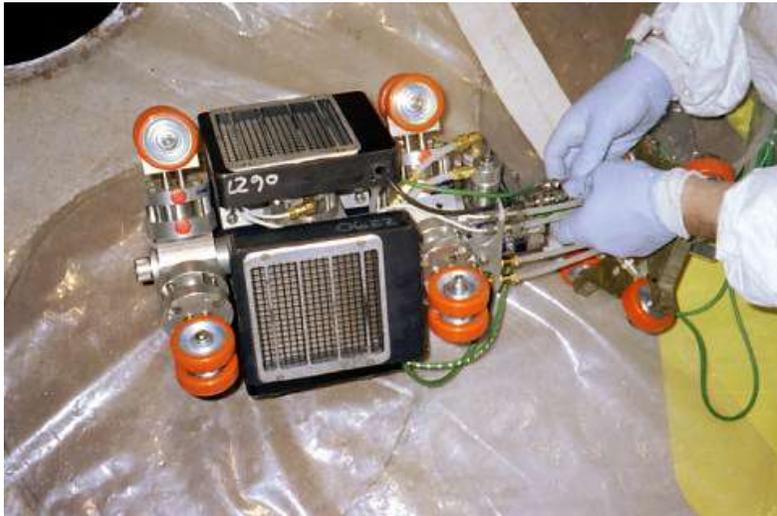
Segmenting



Decontamination



Materials handling



# 해체 로봇 시스템(예)



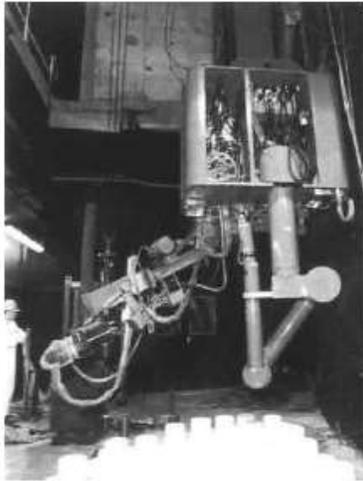
PIADE carrier (ELAN IIB)



ATENA carrier (AT1)



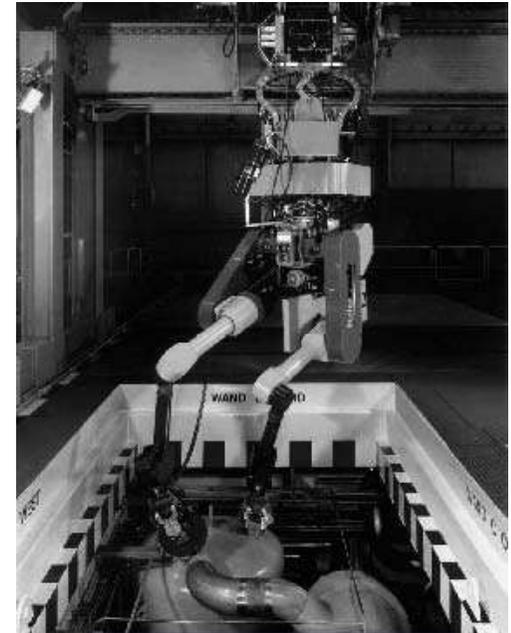
Remote Dismantling Machine (RDM) - (WAGR)



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"> <li>■ 6 DOF</li> <li>■ 2.4m</li> <li>■ Payload : 100kg</li> <li>■ 위치정밀도 : 1mm</li> <li>■ 내방사화 : 10kGy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 7 DOF</li> <li>■ 1.5m reach</li> <li>■ Payload : 150kg</li> <li>■ 해체 분야 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 6 DOF</li> <li>■ 1.6m reach</li> <li>■ Payload : 250kg</li> <li>■ 수중 작업 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 6 DOF</li> <li>■ 1.4m reach</li> <li>■ 시작품</li> <li>■ 소형 유압 구동 모듈 개발</li> </ul>
	   			

- 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/틀 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

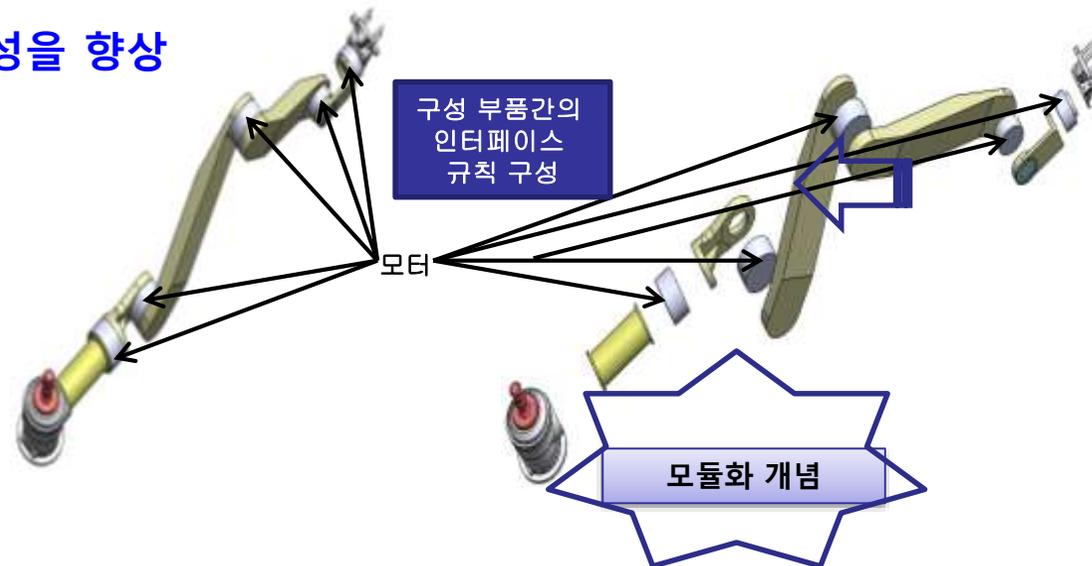
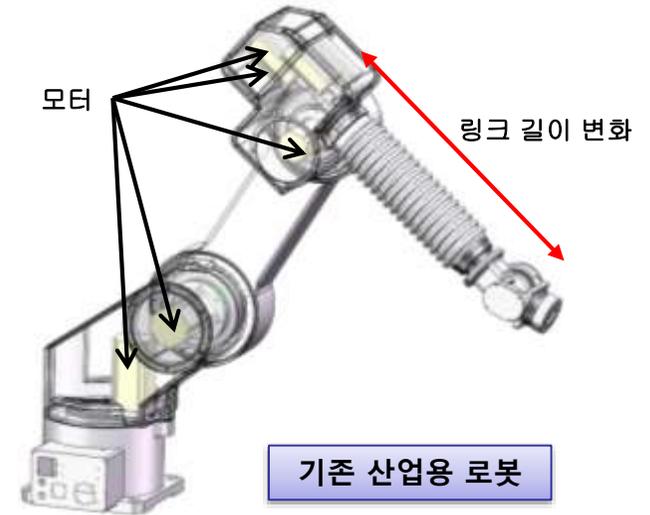
## Suggested technology for standardizing robotic modules, articulated arms, hydraulic or electric power packs

- *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 낼 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 : <math>\pm 1\text{mm}</math>)



## 유압 구동 모듈 개발

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

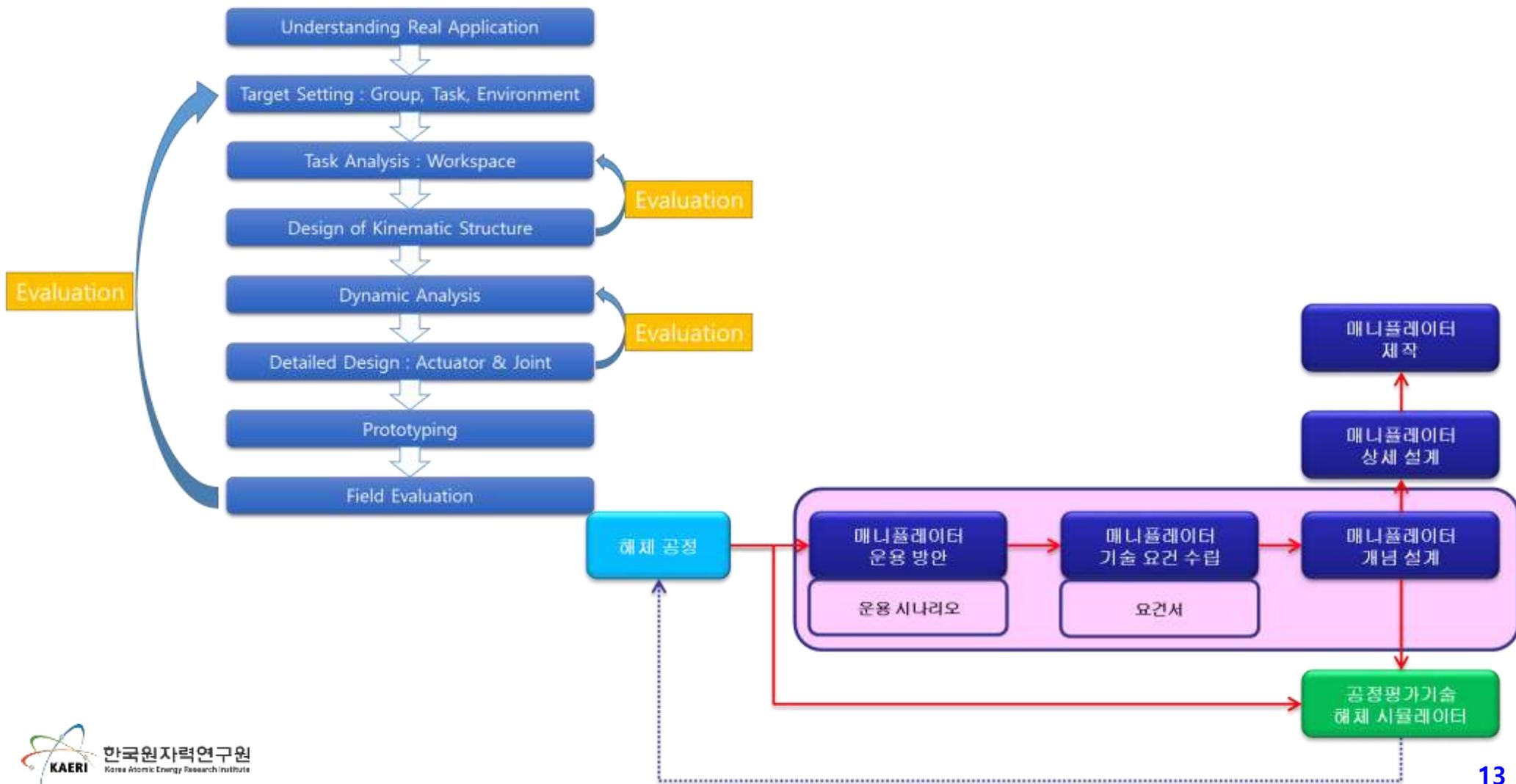


## 해체 매니퓰레이터 개발

- 모듈형 유압 구동 모듈의 조합
- 해체용 매니퓰레이터 개발

# 원격 해체 작업용 로봇 시스템 설계 전략

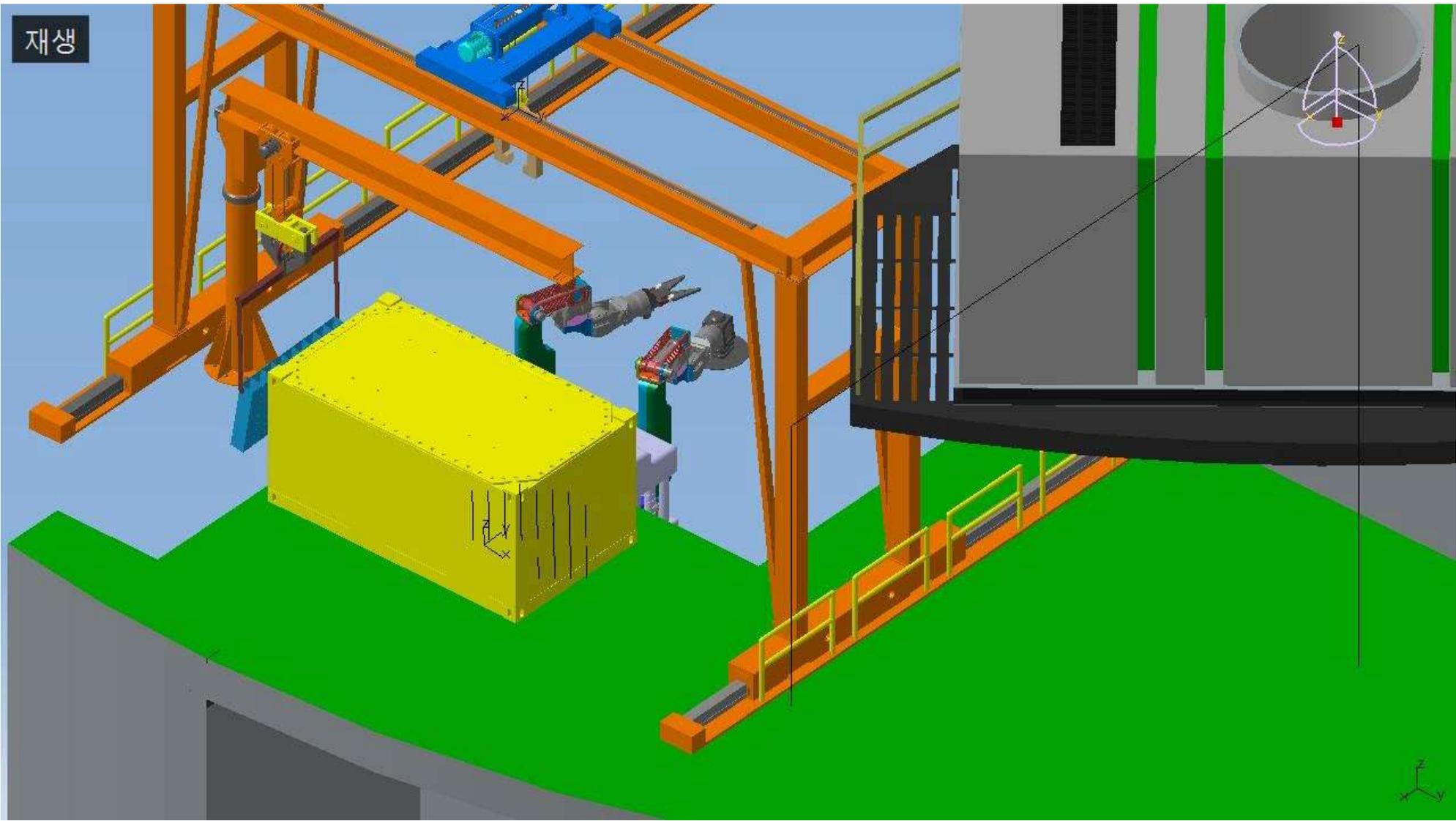
- 원자로 압력용기 해체 공정(45개의 공정) 분석을 통한 해체 Manipulator 운용 방안 수립
  - “원전 핵심설비 해체공법 평가기술 개발” 과제 결과물 활용



# 해체 공정 (매니플레이터 운용 시나리오)



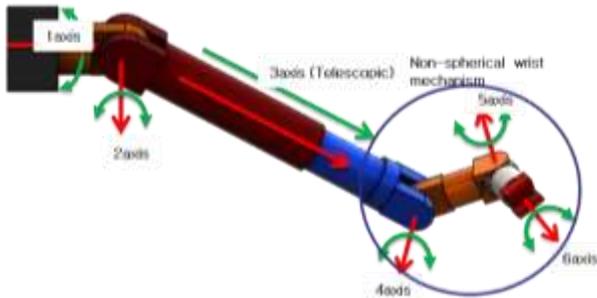
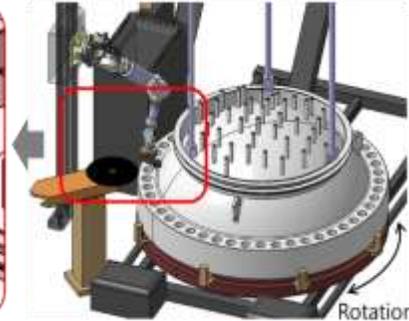
재생



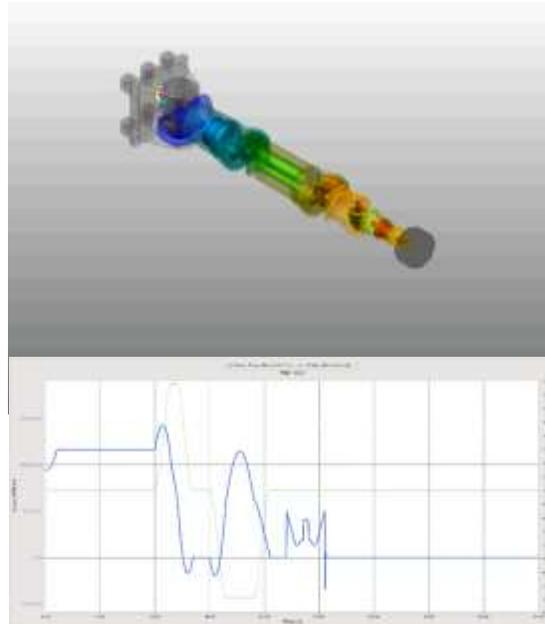
# 해체 매니플레이터 상세 설계

## ■ 해체 매니플레이터 요구조건

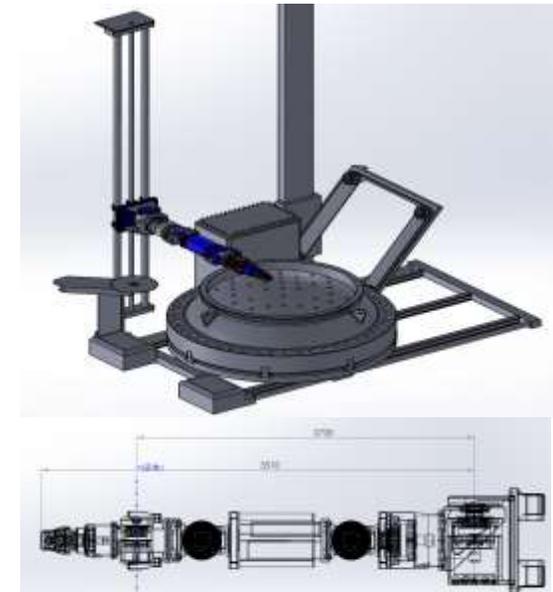
- 정량적 목표 : **250kg 가반하중,  $\pm 1\text{mm}$  위치정밀도**
- 정성적 목표
  - Water-Jet, Saw을 이용 시 발생하는 외력에 강인한 강성을 유지
  - 작업 공간에서 다른 장애물과의 간섭 회피
  - 절단 작업을 지원
  - 작업 공간 확대



매니플레이터 기구부 형상 및 길이 선정



매니플레이터 동특성 해석



매니플레이터 설계

# 해체 매니플레이터 개발 문제점

## ❖ 해체용 고하중 취급 유압 매니플레이터의 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  
(매니플레이터 자체 무게 $\uparrow$   $\rightarrow$  요구 토크 $\uparrow$   
 $\rightarrow$  구동모듈 하중 및 토크 $\uparrow$ )
  - 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 매니플레이터가 없는 이유라고 판단됨

## ❖ 고하중 취급 구동 모듈 개발이 절실히 필요한 상황

## ❖ 매니플레이터의 링크 재질을 경량이고 견고한 재질로 선정

(매니플레이터 자체 무게 $\downarrow$   $\rightarrow$  요구 토크 $\downarrow$   $\rightarrow$  구동모듈 하중 및 토크 $\downarrow$ )

# 모듈형 유압 구동 모듈 개발

## ■ 해체 매니플레이터용 모듈형 유압 구동 모듈 개발

### ● 매니플레이터 요구 조건 :

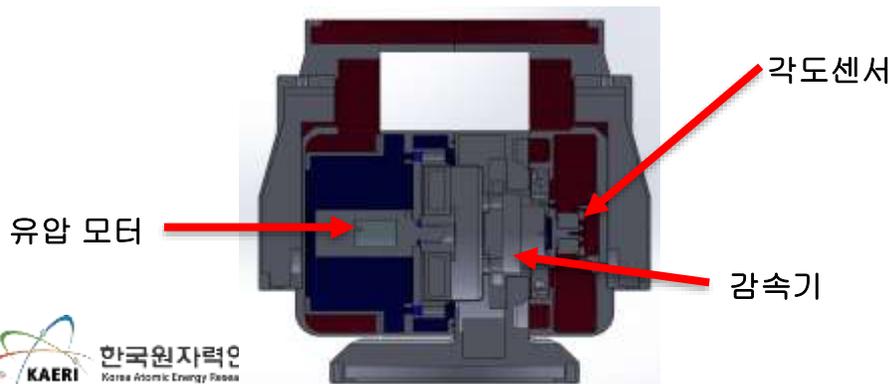
250kg 가반하중,  $\pm 1\text{mm}$  위치정밀도, reach 거리 : 3.2m(base  $\rightarrow$  wrist axis)

### ● 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

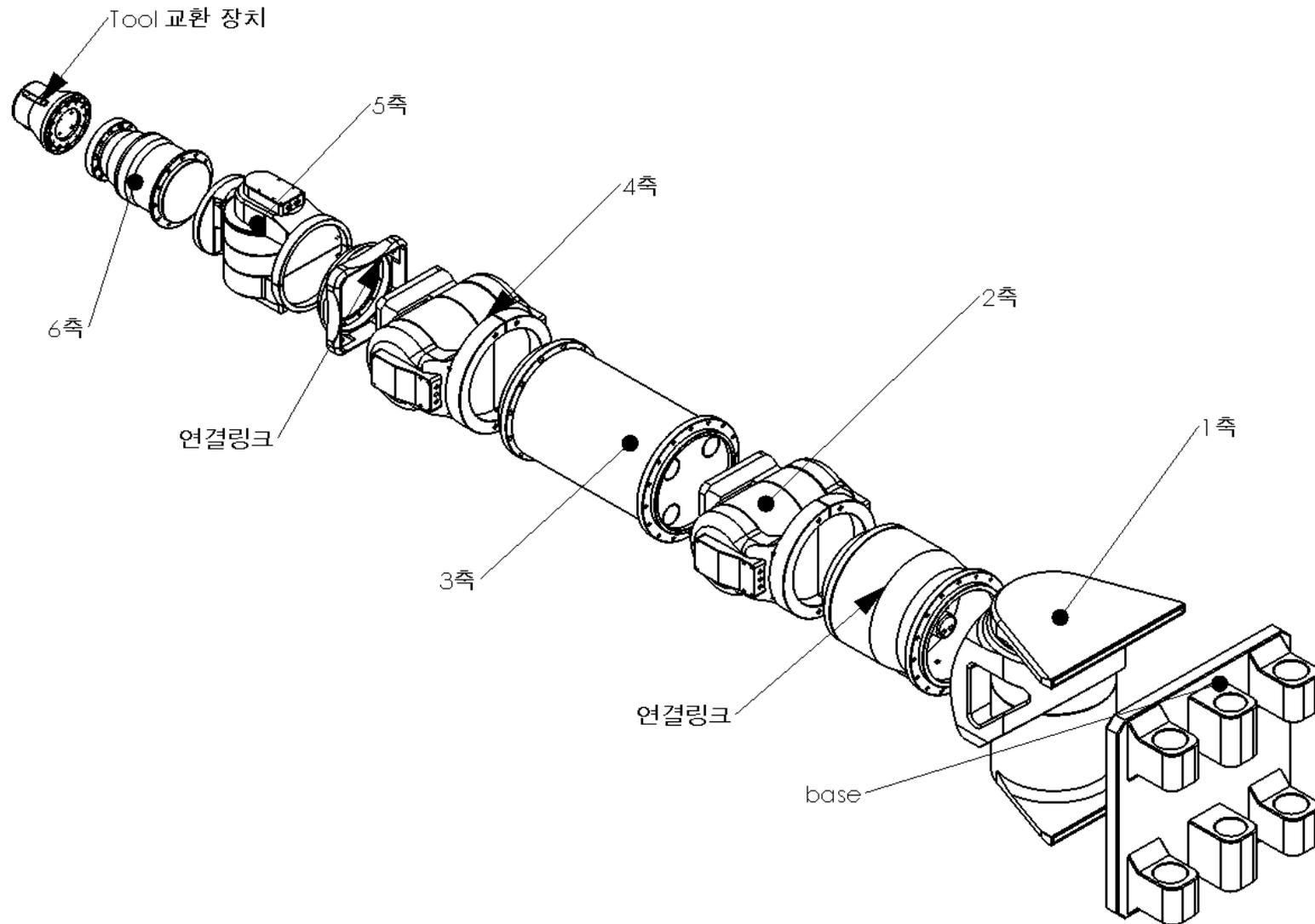
→ 250kg을 핸들링하는 유압 매니플레이터가 위와 같은 이유로 존재하지 않는 이유라고 판단됨

→ 구동 모듈 개발이 절실히 필요한 상황임

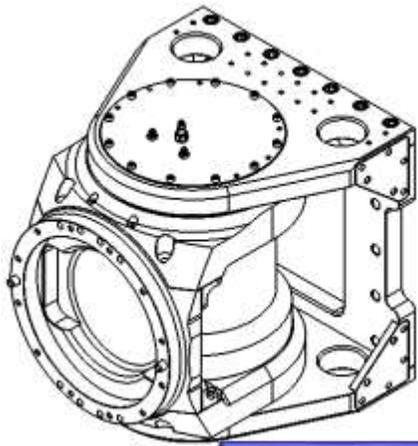


- ModuMan 100 사양
- Payload : 100kg
  - Reach : 2359mm

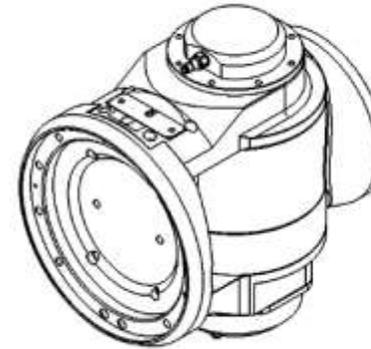
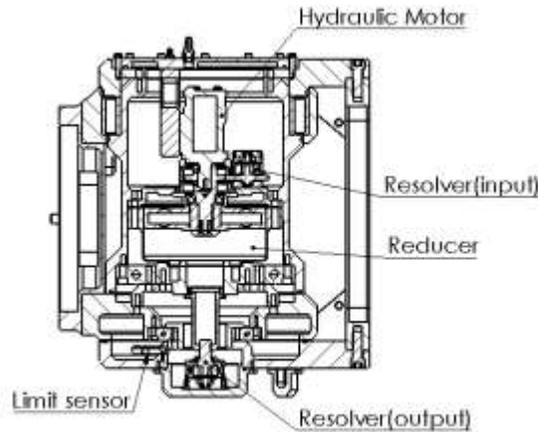
# 해체 메니폴레이터 설계 Concept



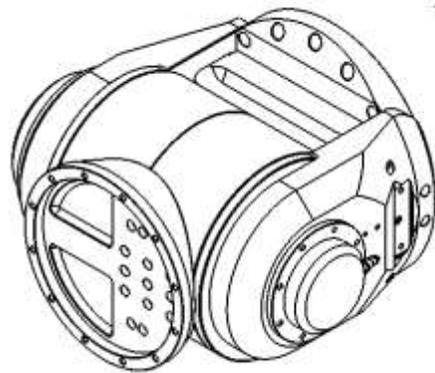
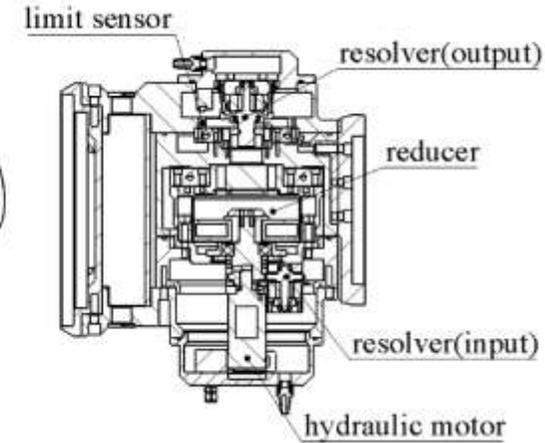
# Hydraulic Actuator Module(Rotary)



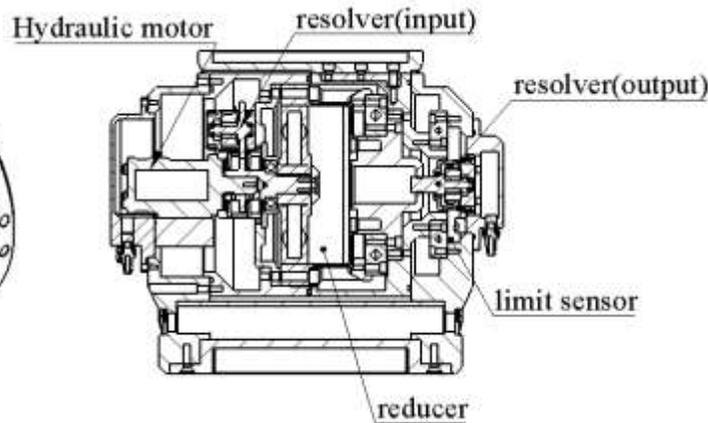
Large hydraulic actuator module



Small hydraulic actuator module



Medium hydraulic actuator module

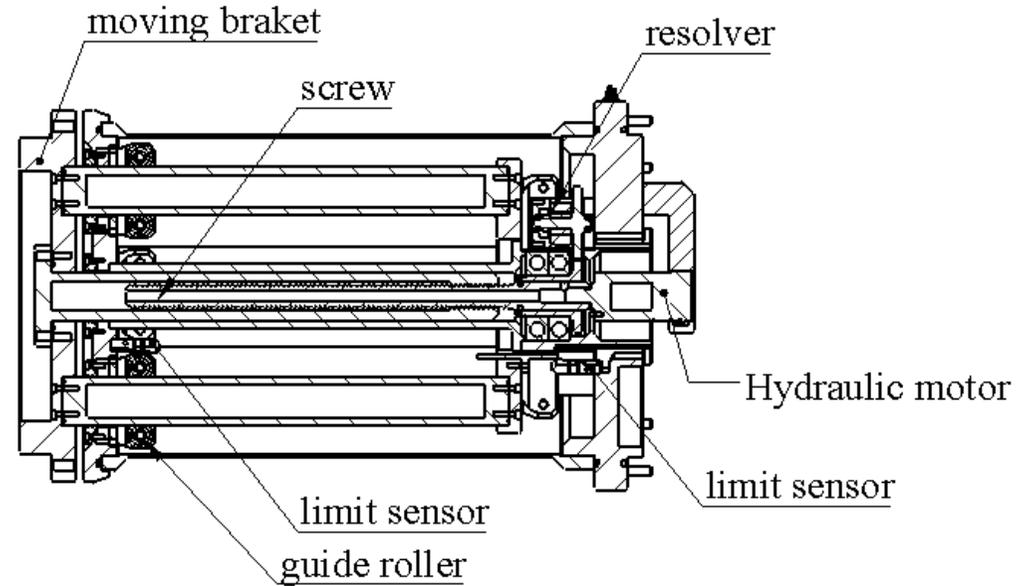
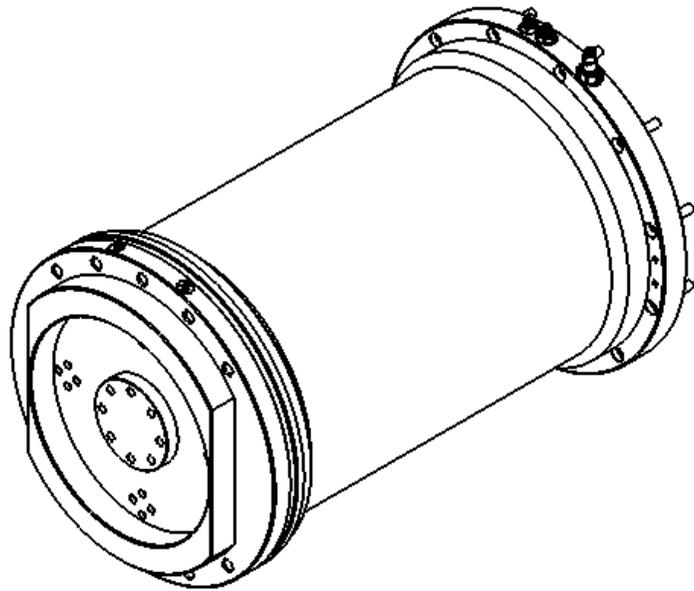


# Hydraulic Actuator Module



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)

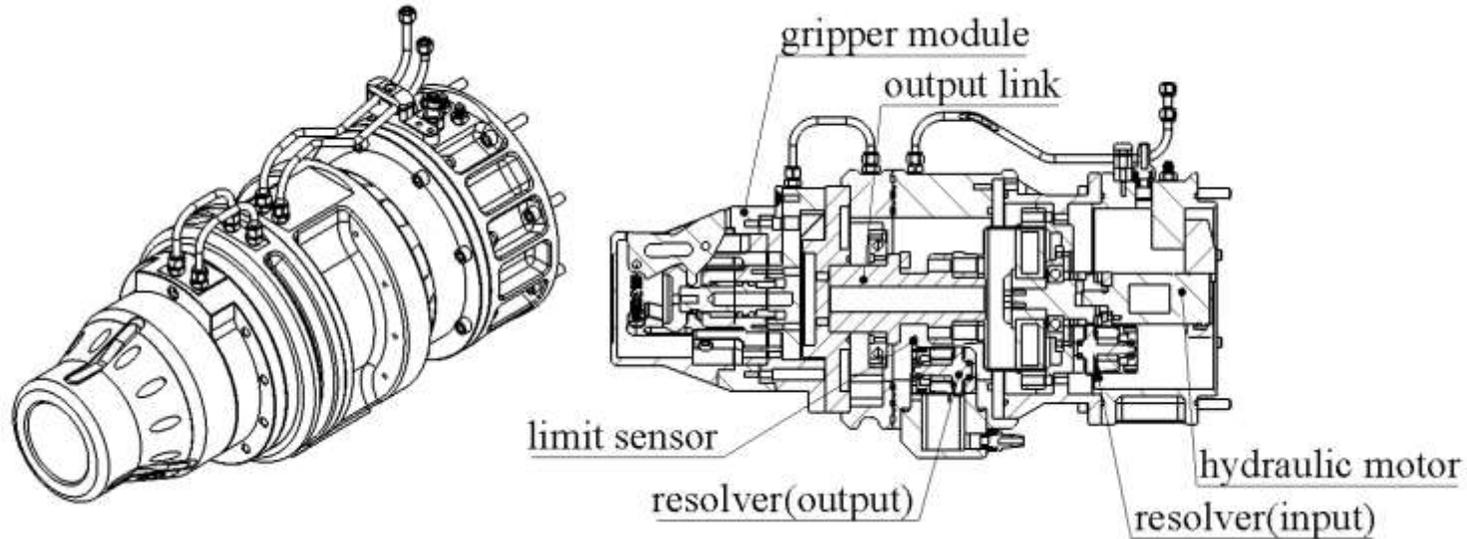
# Hydraulic Actuator Module(linear)



The draft of prismatic hydraulic actuator module

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

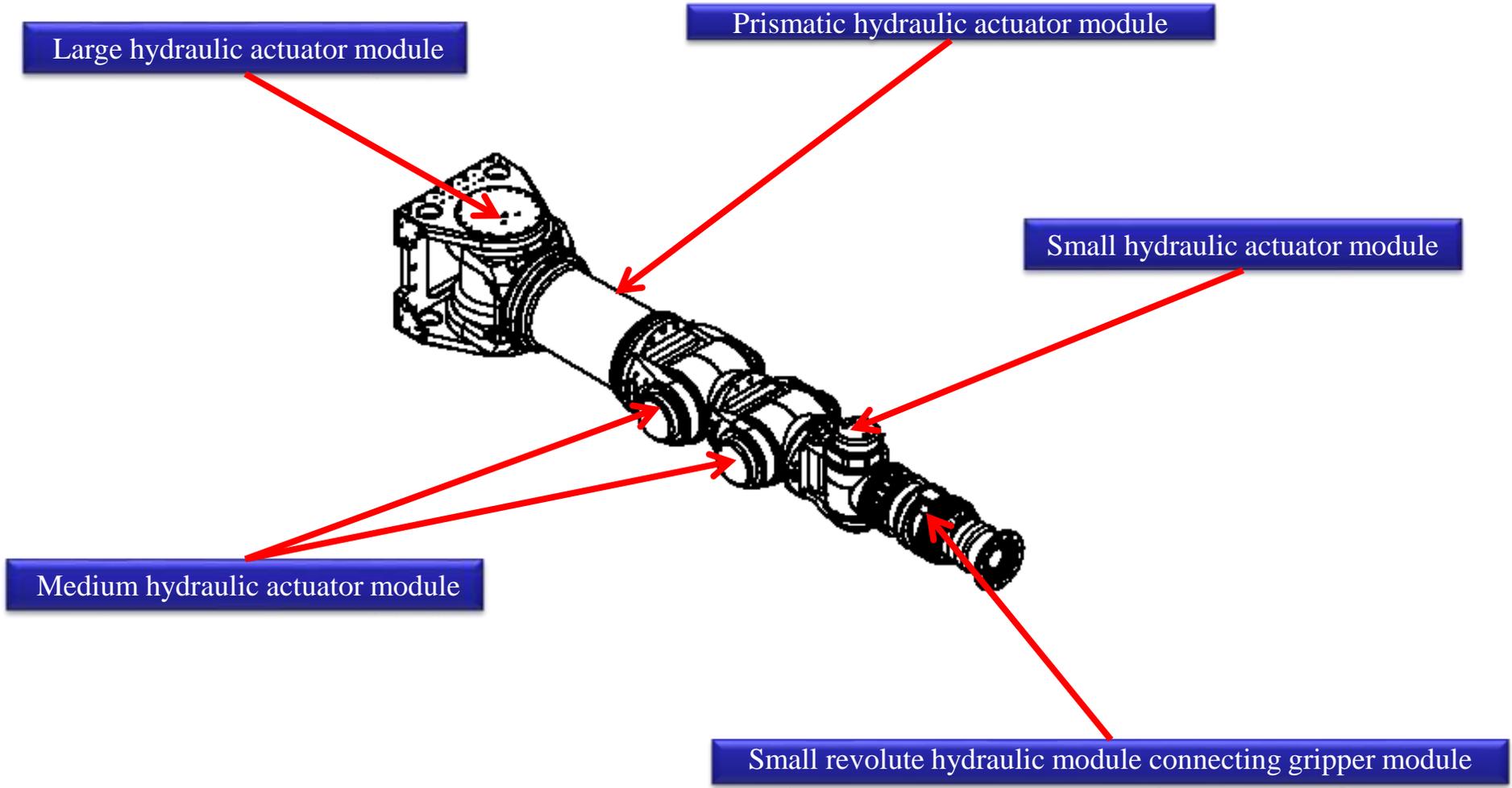
# Hydraulic Actuator Module(end-effector)



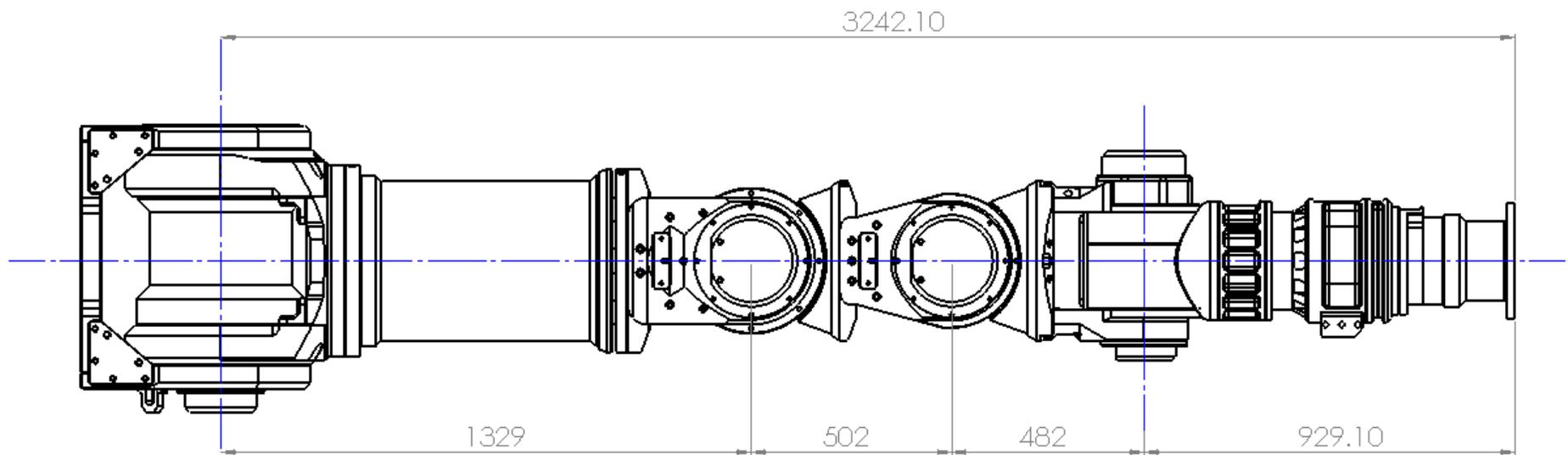
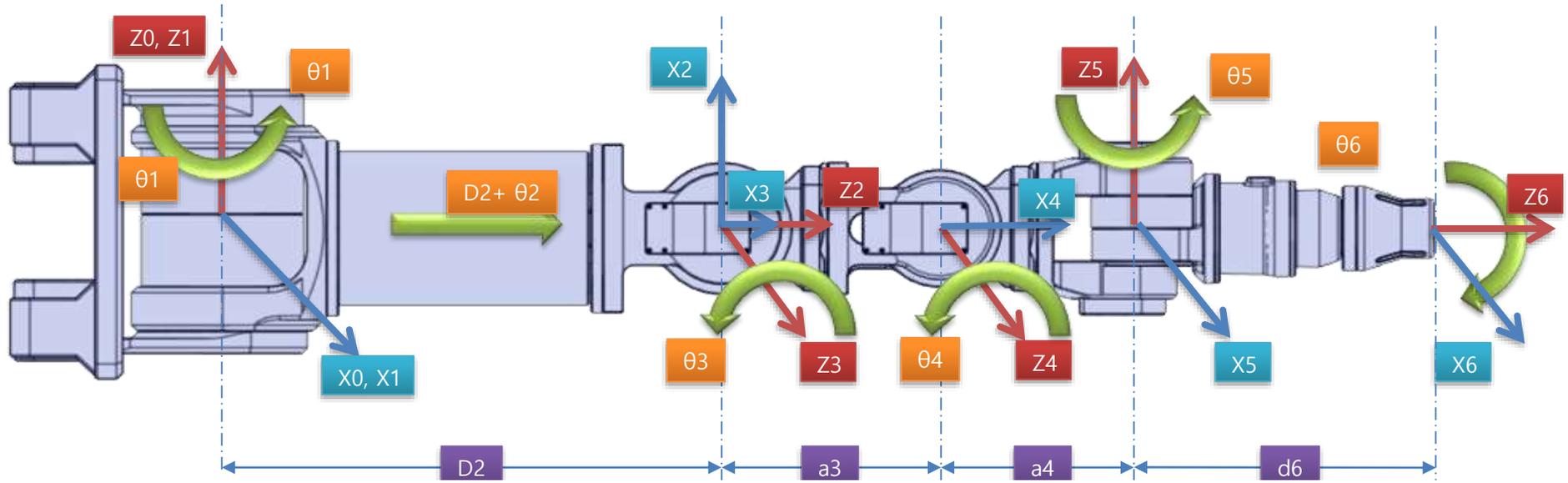
The draft of small revolute hydraulic module connecting gripper module

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

# Hydraulic Actuator Module 배치



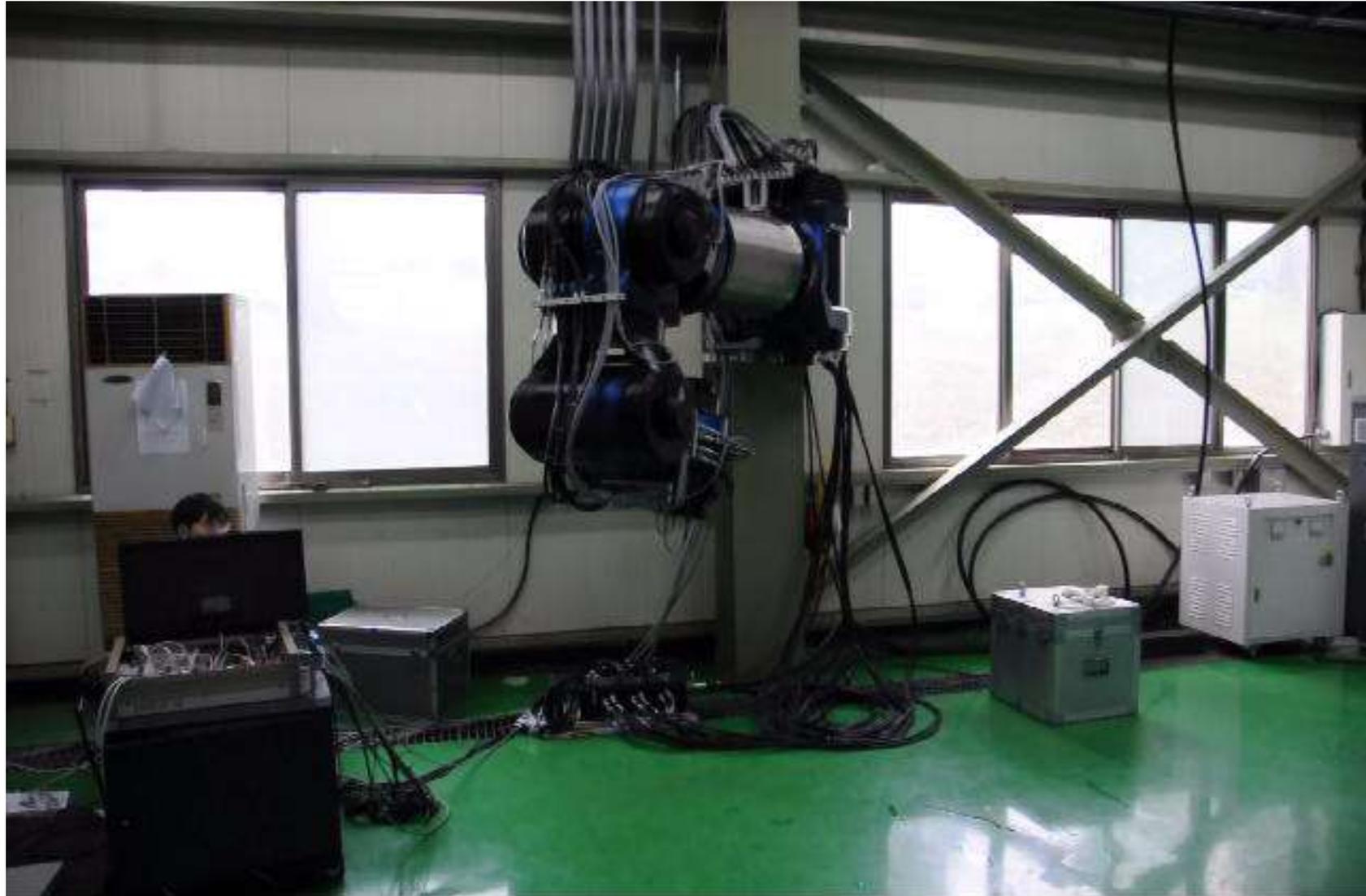
# Hydraulic Manipulator 제원 및 좌표계



# Hydraulic Manipulator(1<sup>st</sup> version)



# Hydraulic Manipulator 동작 테스트 동영상

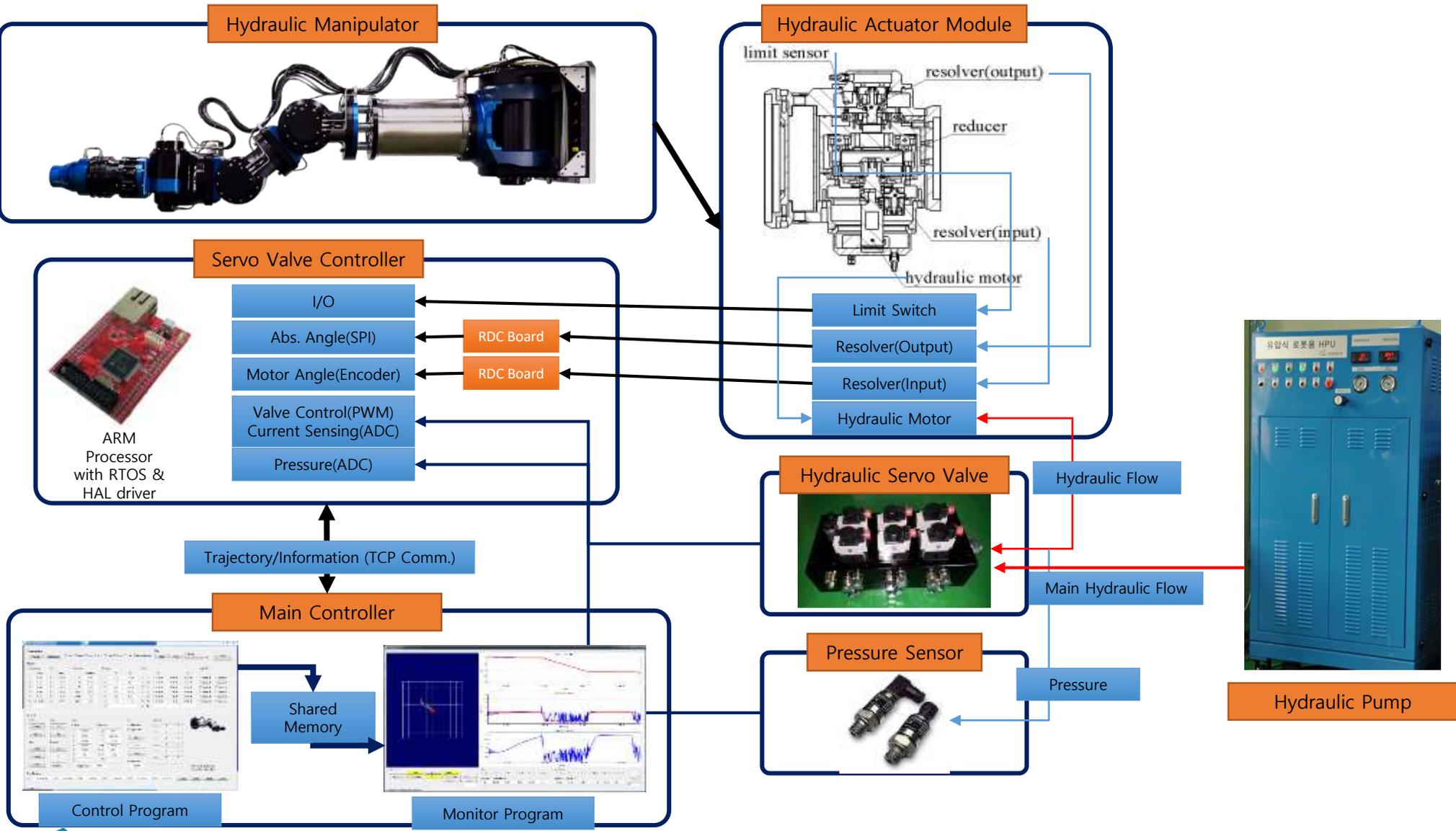


# Hydraulic Manipulator(2<sup>nd</sup> version)



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
4 축	-105 ~ 105°	0.3
5 축	-105 ~ 105°	0.3
6 축	-170 ~ 170°	0.3

# Hydraulic Manipulator 제어시스템

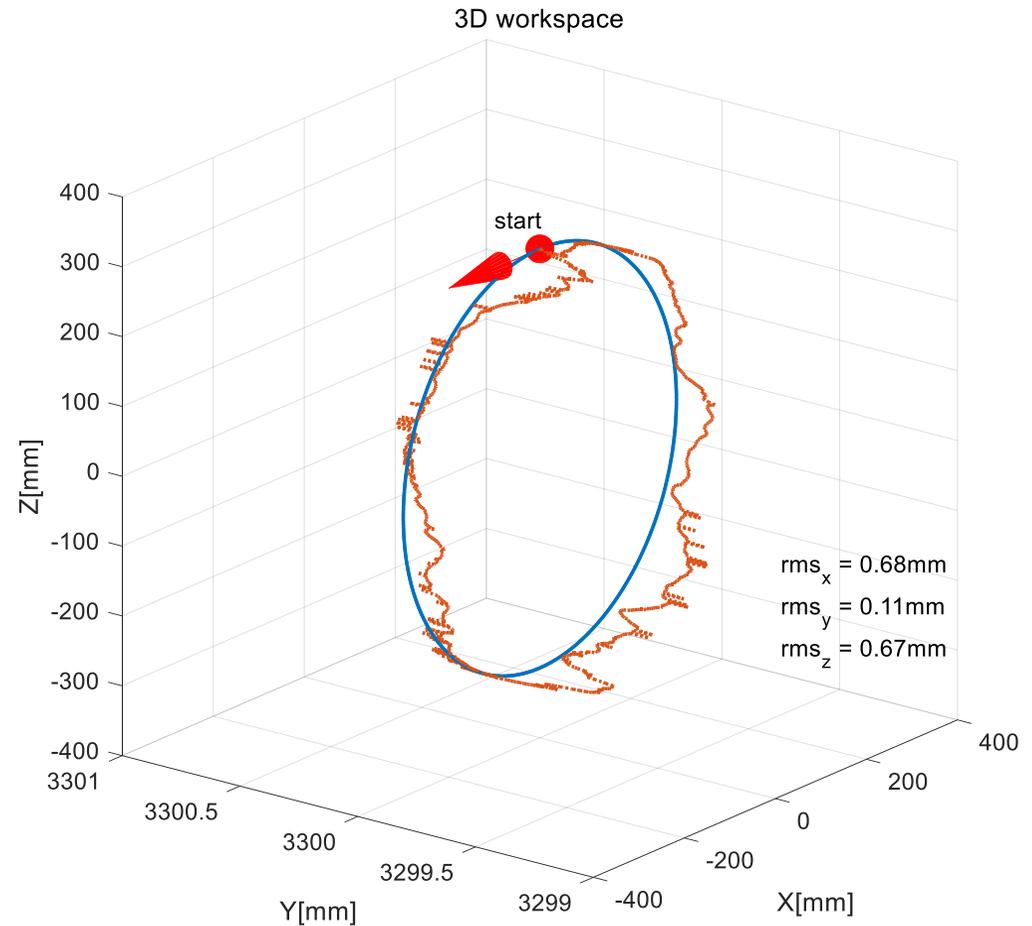


전체 시스템

# Hydraulic Manipulator 가반하중 테스트 동영상



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



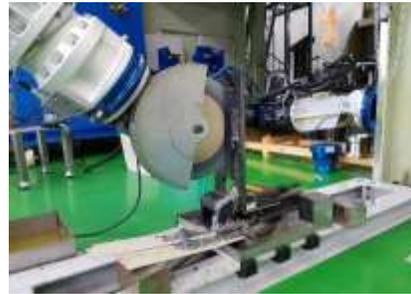
# Hydraulic Manipulator 절단 시험



# 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

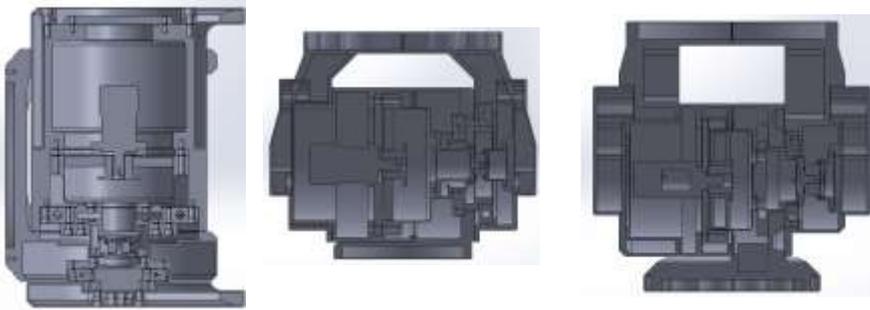


회전톱 회전 속도 : 약 60 rpm



- 25 mm 진행 후 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

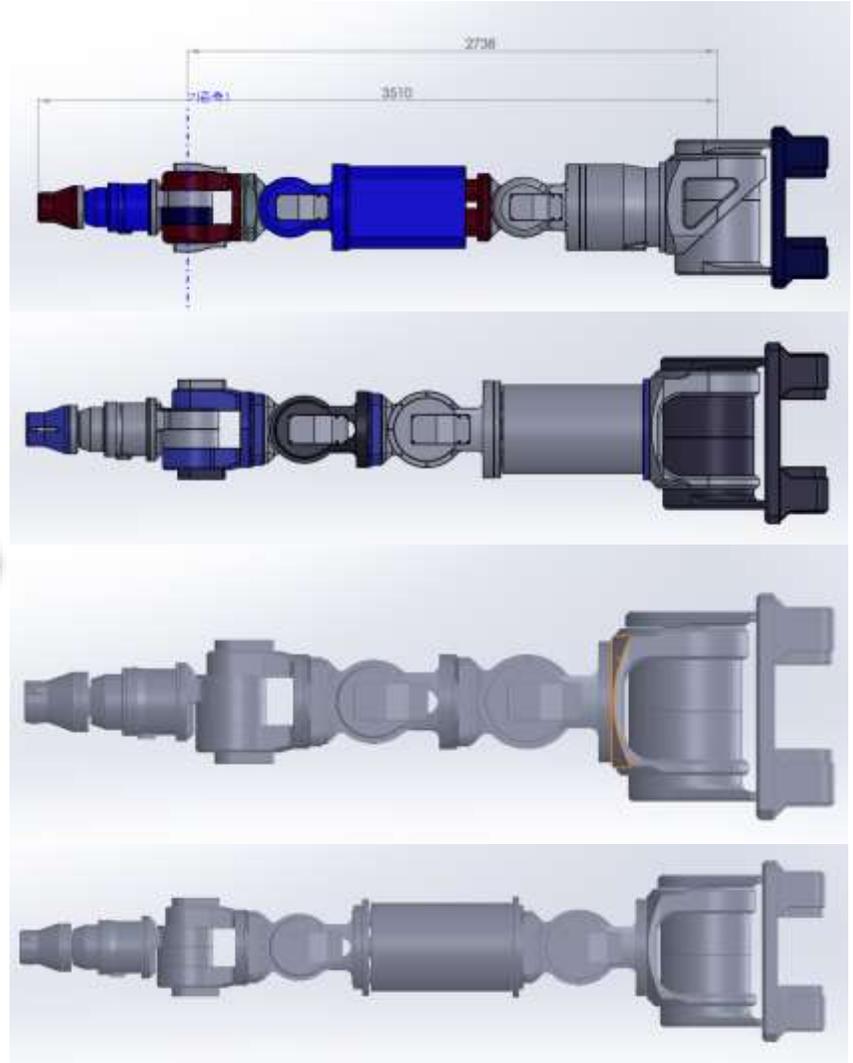


다양한 유압 구동 모듈



전기식 구동 모듈

조합



작업에 맞게 다양한 매니플레이터를 구성

# 3. 결론

- 유압 매니플레이터의 **조립성/보수성/가변성을 향상**을 위한 유압 매니플레이터의 핵심 부품인 **모듈형 유압 구동 모듈**을 개발함
- 향후 개발된 유압 구동 모듈을 이용하여 고하중 취급을 할 수 있는 해체용 유압 매니플레이터를 개발함(payload : 250kg)
- 개발된 유압 구동 모듈은 해체 뿐만 아니라 원전발전소 검사 및 유지보수에 활용 가능
- 모듈형 구동 모듈을 통한 원전 작업 매니플레이터 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

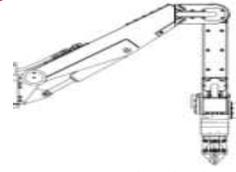


구동 모듈 제작

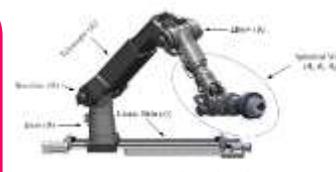


구동 모듈 평가

## 모듈형 경량 수중 매니플레이터 개발



수중 절단 작업용 매니플레이터 설계

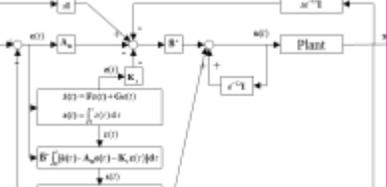


수중 절단 작업용 매니플레이터 제작

## 제어 시스템 개발



모듈형 제어 시스템 구축



정밀 제어 알고리즘 개발

경량형 모듈

제어 시스템 개발

## 수중 매니플레이터



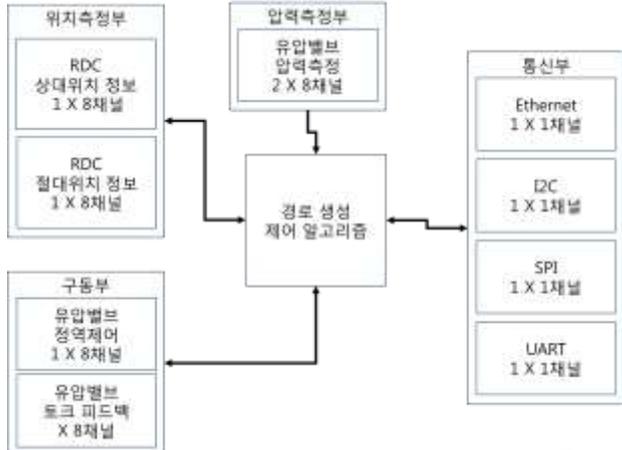
성능 평가

차세대 원격 절단 시스템

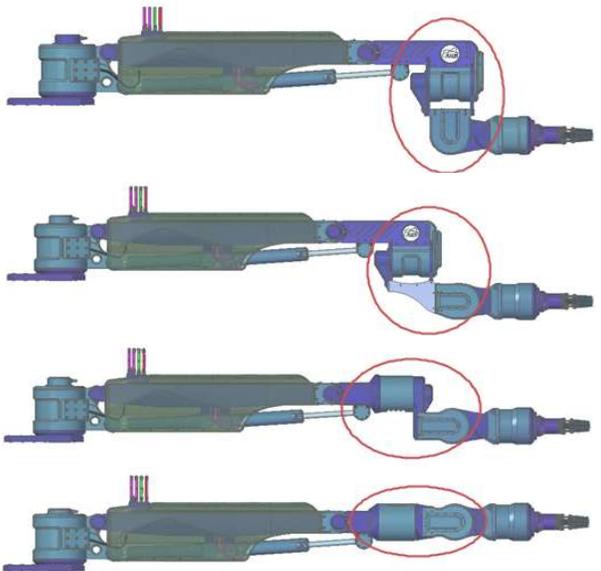
# 현재 진행 사항



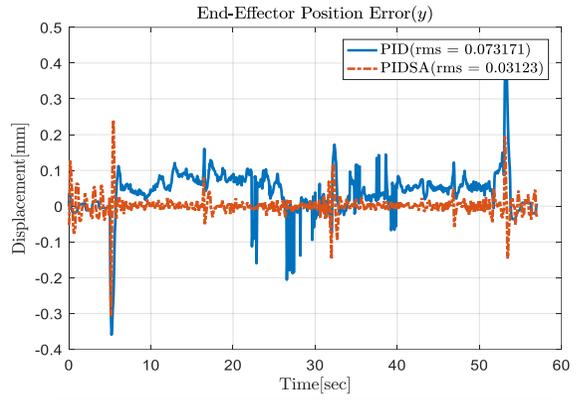
유압 구동 모듈



SBC형태의 유압 매니플레이터 제어기



수중 절단작업용 유압 매니플레이터 설계



제어알고리즘 향상(PIDSA)

# 개발 현황 - 제어 알고리즘 성능 향상

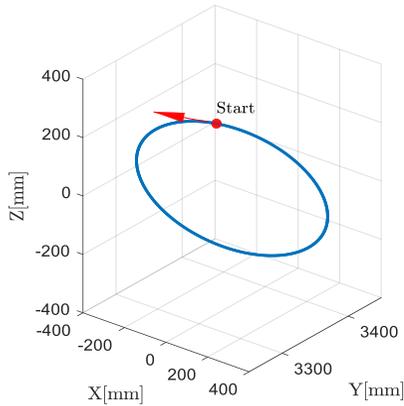
## ■ 궤적 추종 성능 향상을 위한 제어 알고리즘 보완

- 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

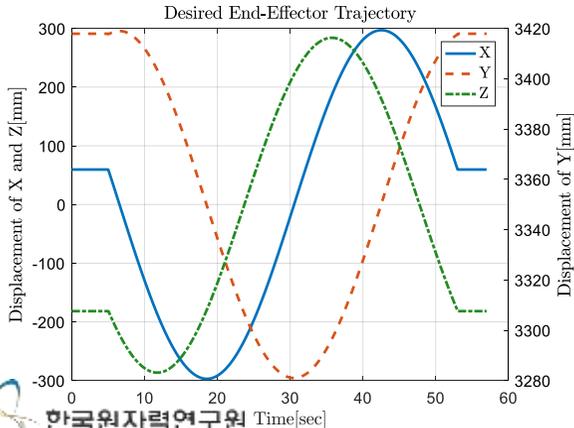
$$s(t) = L\dot{e}(t) + e(t) + \frac{k_p}{k_d} \int e(\tau) d\tau + \frac{k_i}{k_d} \iint e(\tau) d\tau d\tau$$

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

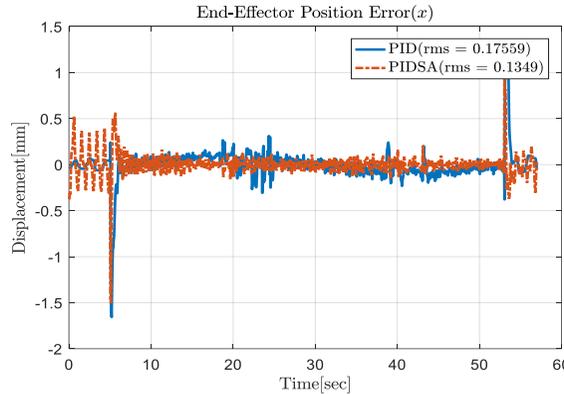
Desired End-Effector Trajectory



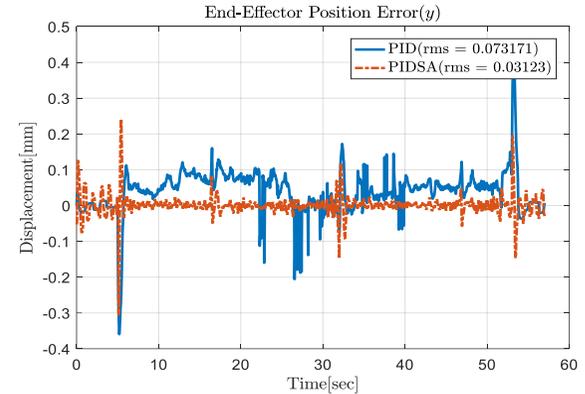
< Desired Trajectory >



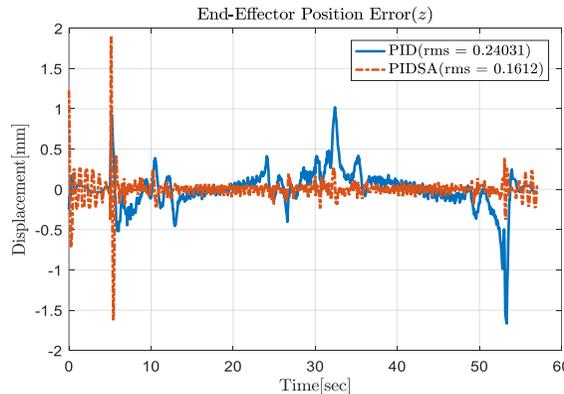
< Desired End-Effector Trajectory >



< X axis Position Error >



< Y axis Position Error >

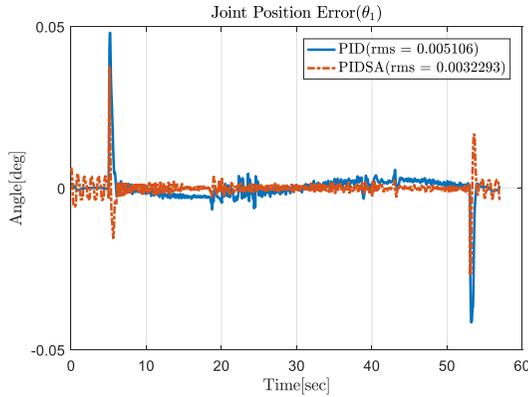


< Z axis Position Error >

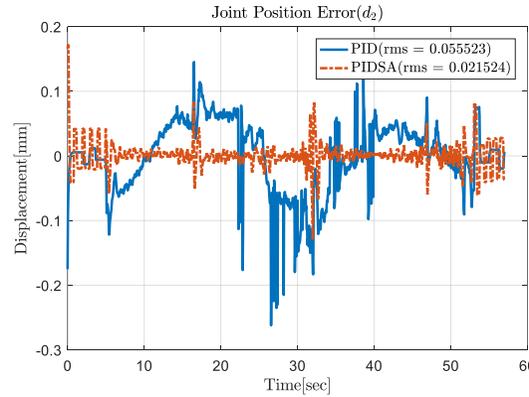
< Position RMS error >

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

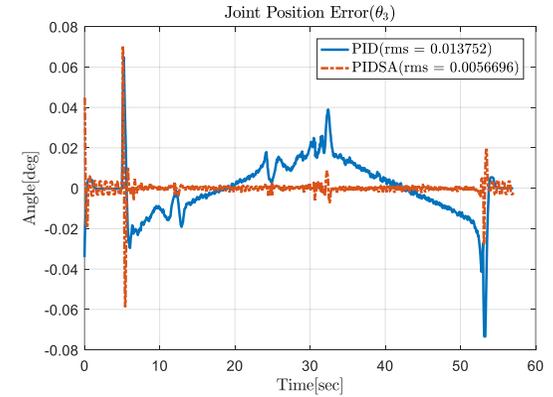
# 개발 현황 - 제어 알고리즘 성능 향상



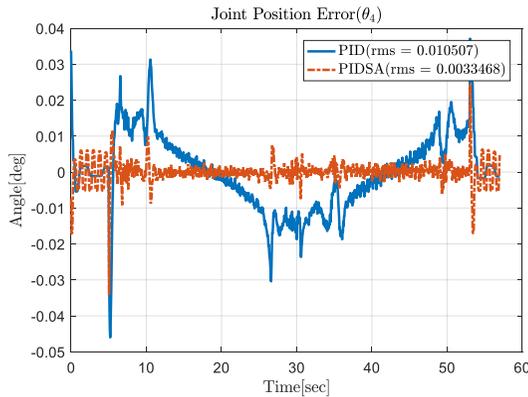
< Joint 1 >



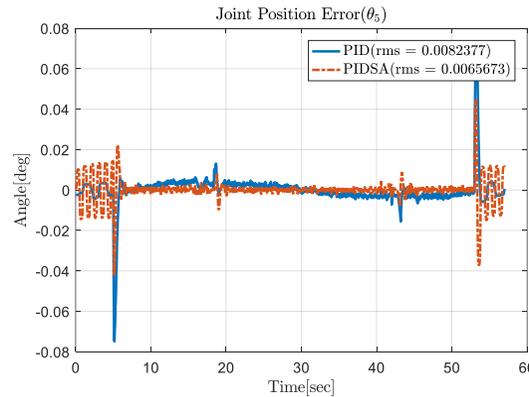
< Joint 2 >



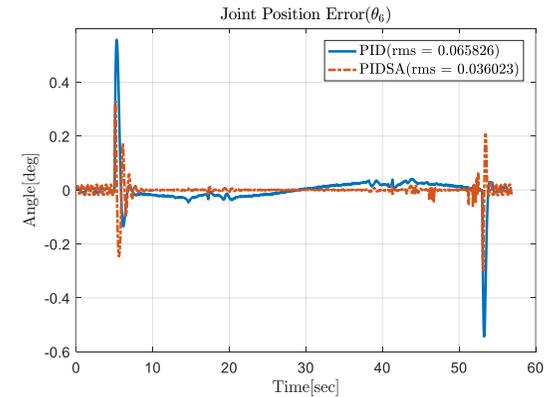
< Joint 3 >



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

