

# 原電 蒸氣發生器傳熱管 檢査補修用 遠隔操縱 로봇시스템 開發의 意義

류홍우 배병환

한국전력공사 기술연구원 자동제어연구실

현 대 산업사회의 구조가 보다 복잡하게 발전함에 따라 전력수요의 대폭적인 증가와 함께 보다 양질의 전력을 안정되고 충분하게 공급받고자 하는 수요자의 요구가 더욱 증대되고 있다. 따라서 안정된 전력공급을 위해서 전력생산에 대한 신뢰성 향상 및 안전성 확보는 물론 고효율 운전이 절실히 요청되어지고 있다.

## 서 론

이러한 의미에서 원자력발전이 국가에 이바지하는 정도는 매우 크다 할 수 있으며 그 국가적 중요성을 고려할 때 안전하며 경제적인 전력공급을 안정적으로 확보하기 위해 원자력발전소의 효율적 유지관리가 요구되어진다.

따라서 원자력발전소 유지관리작업 중에서 중요한 위치를 차지하고 있는 증기발생기의 유지보수작업을 보다 신뢰성 있게 할 필요가 대두되고 있다.

본 연구는 인간 작업자를 대신하여 원전 증기발생기의 검사 및 유지보수작업을 수행할 수 있는 로봇 시스템을 개발함으로써 원자력발전소의 유지보수작업에 있어서 안전성 및 신뢰성을 제고하고 상기의 작업으로부터 발생가능한 운용자의 방사선피폭을 줄이고 작업의 효율을 높이기 위해 필수적인 장비의 국산화를 목표로 하여 3년에 걸쳐 진행하였다.

원자력발전소 내부의 증기발생기는 원자로에서 발생된 에너지를 방사능에 오염된 1차 냉각계통의 고온, 고압의 냉각재를 통하여 방사

능에 오염되지 않은 2차 냉각계통(터빈계통)으로 전달하는 중요한 구성요소이다. 따라서 증기발생기 내부에 누수가 발생하여 1차 계통의 냉각재와 2차 계통의 급수가 섞이게 되면 2차 냉각계통에 심각한 방사능오염을 유발시킬 수 있다. 이러한 이유로 원자력발전소 내 증기발생기의 검사 및 유지, 보수작업은 대단히 중요한 작업의 하나이다.

상기와 같이 방사능에 심하게 오염된 증기발생기의 검사, 또는 유지, 보수작업을 수행하는 작업자를 방사능오염으로부터 보호하기 위해 작업시간 제한, 방사능오염지역으로부터 떨어진 곳에서 작업토록 하거나, 방사능방어망 사용 등의 방법이 동원되어 왔다. 그러나 최근에는 작업자 대신 이러한 방사능오염지역에서 검사 및 유지, 보수작업을 수행할 수 있는 특수 로봇을 개발하여 사용하는 추세에 있다.

현재 국내에 가동중인 원자력발전소 증기발생기 유지, 보수를 위하여 그동안 외국의 전문기관에 용역하여 실시해 왔으나 그 비용이 막대하고, 유지보수기술 축적이 되지 않아 향후에도 계속 외국에 의존하여야 하며, 긴급상황시 자체 기술에 의한 조치가 어려운 실정이다. 또한 현재 도입하여 사용중에 있는 로봇 시스템에 고장이 발생할 경우 수리부품의 비용이 상당히 고가이거나 보수에 많은 경비가 소요되며, 제작자의 생산중단이나 기종 변경 등으로 인해 예비부품 수급이 어려워져 유지보수상에 큰 애로점을 갖고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 그동안 축적된 국내의 전자분야의 기술 및 기계분야의 기술을 응용하여 순수 국내기술에 의한 증기발생기 검사 및 보수용 로봇 시스템의 개발이 필요하게 되었다.

이와 같이 방사능으로 인한 극한 상황하의 원자력발전소 내 증기발생기의 검사 및 유지보수작업을 작업자를 대신하여 효율적으로 수행할 수 있는 정밀 원격조종 로봇 시스템 개발을 통하여 본 분야에 있어서 국내기술의 축적에 기여하고, 궁극적으로는 검사 및 유지보수작업 자체를 국산화하여 기술적 자립을 기하며, 향후 관련분야의 안정된 기술지원을 확보할 수 있게 한다.

이러한 로봇 시스템을 개발함에 있어서 국내 발전소에 설치되어 운용중인 각종 원전 증기발생기 검사용 로봇 시스템의 기능 및 특성을 분석하였고, 본 분야에 있어서의 선진 외국의 기술동향 및 요소기술에 대한 자료분석을 수행하였을 뿐만 아니라 발전소로부터의 작업경험을 수집하여 로봇 시스템 사양 결정에 최대한 반영토록 하였다.

상기와 같은 설계사양을 바탕으로 전체 로봇 시스템을 기능별로 크게 로봇 기계부, 상위제어 시스템과 로봇 제어 시스템의 세 서브시스템(Subsystem)으로 나누어 분류하였고, 본 분류에 따라 각 서브시스템의 기능정의 및 연계관계 정의를 내리고 이에 따라 각 서브시스템의 세부 설계, 제작을 수행한 후 전체 시스템을 통합함으로써 로봇 시스템의 개발을 완료하였다.

## 증기발생기 검사 및 보수용 로봇의 일반특성

원전 증기발생기의 주요 구성은 U-Tube로 되어 있으며, 이 Tube는 순환수에 포함된 불순물 및 구조적 노후에 의한 파손이 발생할 수 있고, 이러한 경우에 발전효율의 감소가 수반되므로, 주기적으로 점검, 보수가 필요하나, 증기발생기의 방사능오염으로 인하여 작업자가 직접 작업을 행하기는 어려우며, 로봇을 사용한 작업만이 가능하다.

그러나 일반 산업용 로봇과는 달리 원자력발전소 유지보수 로봇은 그 사용환경상 다음과 같은 조건이 필요하다.

### 1. 조작성

Low Level의 엔지니어가 조작할 수 있도록 조작성을 간편하게 하며 신뢰성을 가져야 한다.

### 2. 로봇 설치

방사능오염이 심한 장소이므로 작업자가 증기발생기 밖에서 로봇을 설치할 수 있어야 한다.

### 3. 로봇 Arm 길이

로봇 Arm의 길이는 증기발생기의 필요한 작업영역에서 작업이 가능하여야 하며, 로봇 Arm이 증기발생기의 Manway 밖까지 뺀어 나와 Tool 교환이 용이해야 한다.

### 4. 작업중량

로봇을 이용하여 검사 및 작업이 가능할 수 있도록 충분한 가반 중

량(20kg)을 운반할 수 있어야 한다.

### 5. 정확성 및 위치반복 정밀도

주어진 값에 대한 위치오차의 반복정밀도가 1mm를 초과하지 말아야 한다.

### 6. 자유도

반구상의 작업공간을 자유롭게 작동할 수 있는 자유도가 필요하다.

### 7. 충돌방지장치

로봇 Arm이 증기발생기의 벽에 충돌하는 것을 막기 위해 근접 센서가 설치되어야 하며 제어 시스템이 충돌회피기능을 내장하고 있어야 한다.

### 8. 3차원공간운동 제어

작업자가 로봇 Arm을 용이하게 조작하기 위해 Arm을 X, Y 및 Z 축 방향으로 자유롭게 Control할 수 있는 기능이 있어야 한다.

### 9. 내방사선재료 사용

로봇은 방사능 누적량에 영향을 받지 않는 재료를 사용해야 한다.

### 10. 방사능제거

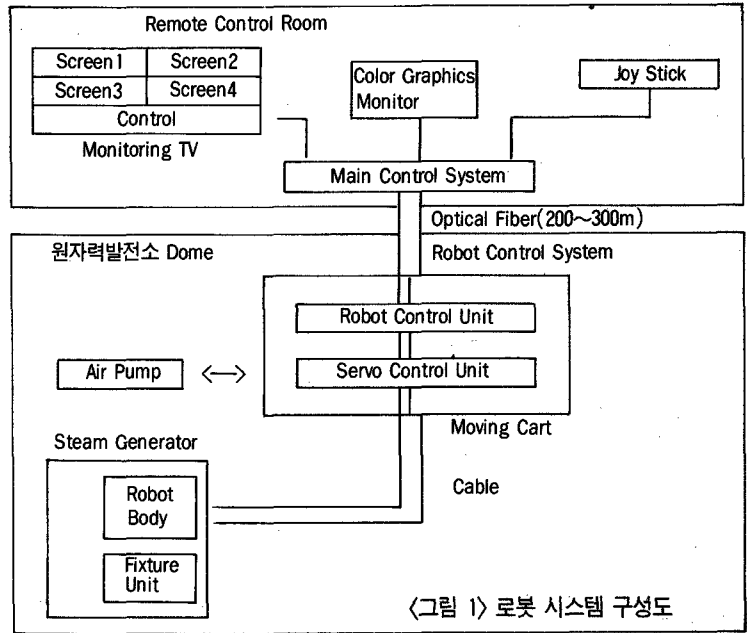
로봇 표면은 가능한 굴곡이 없어 세척에 의하여 쉽게 방사능을 제거할 수 있어야 한다.

### 11. 원격제어

주제어 시스템과 설치된 로봇은 약 200~300m 떨어져 있으므로 카메라에 의한 모니터링이 가능하여야 하며, Noise에 강하여야 한다.

## 국산 원전용 로봇 시스템의 구성

개발된 로봇 시스템은 다음과 같이 크게 3부분의 서브시스템으로 구성된다. 즉 상위제어 시스템, 로봇 제어 시스템 그리고 기계부로 구성된다. 이 중 상위제어 시스템은 원거리 제어실에 위치하고 로봇 제어 시스템은 증기발생기 밖 10m 거리 이내에 위치하며 로봇 기계부는 증기발생기 내부에 설치된다. 또 로봇 제어 시스템은 로봇 제어 유니트와 서보 제어 유니트로 나뉘어지고 로봇 기계부는 본체와 Fixture 유니트로 구성된다.



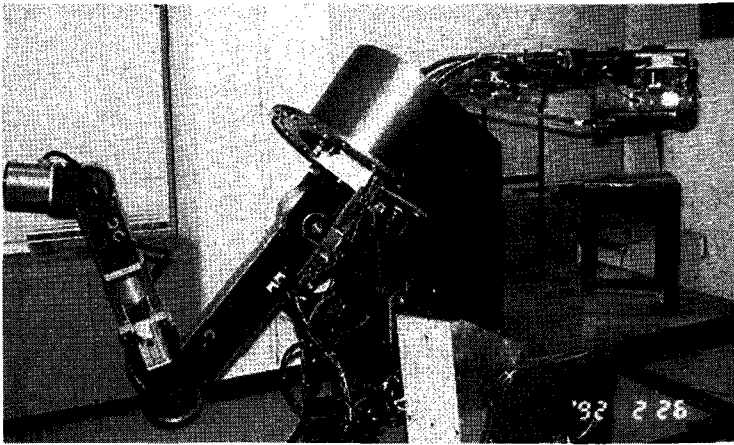
〈그림 1〉 로봇 시스템 구성도

## 로봇 기계부

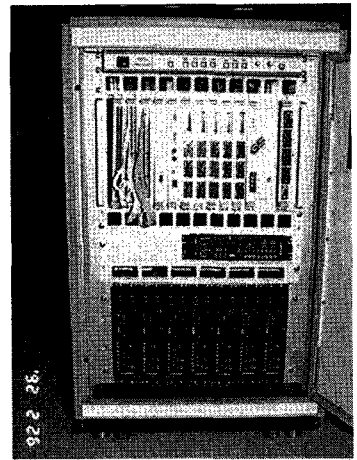
본 로봇의 기계부는 본체와 Fixture 유니트로 구성되어 있다. 본체는 6축수직다관절 타입으로서 Position부 3축과 Orientation부 3축으로서 각 축은 AC Servo Motor에 의하여 구동되고 제6축인 End-Effector 구동부를 제외한 제1축에서 5축까지는 Brake가 장착되어 Power Off시 자중에 의한 흘러내림을 방지한다. 감속은 Harmonic Drive 유니트와 Timing Belt-Pulley에 의하여 행해진다. 로봇 본체를 증기발생기에 자동으로 입, 퇴실시키기 위한 Fixture 유니트는 Guide Rail부와 로봇을 장착, 고정하기 위한 Air Cylinder류로 구성된다. 입실 및 퇴실작업은 로봇 본체에 설치된 Cam Follower Bearing이 Guide Rail의 홈을 따라 이동하는데 구동은 입실용과 퇴실용의 2개의

〈표 1〉 국산 로봇 시스템 기본 사양표

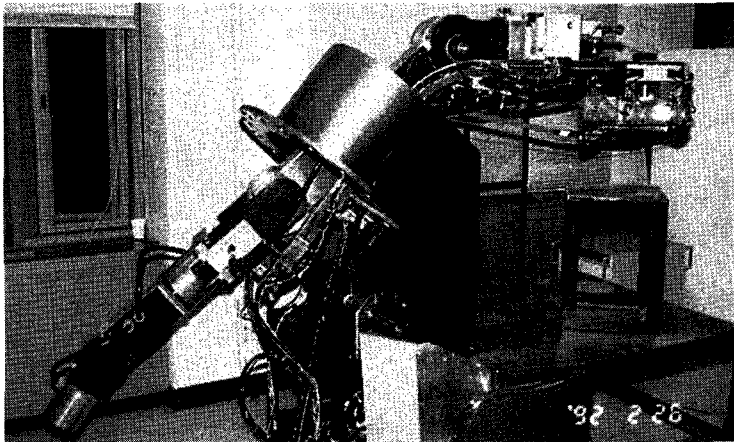
항 목	사 양
기구부자유도	6 자유도
합성최대속도	600mm/sec(9단계 설정)
최대운반중량	20kg
반복위치정밀도	±1mm
적용 Motor	AC Servo Motor
감속기	Harmonic Drive
위치검출방법	Resolver 사용
위치교시방법	수치 Data Input
경로제어방법	직선보간방식
프로그램방법	Menu 구동방식
MCU 시스템 Bus	Multi-Bus II
RCU 시스템 Bus	GSIS Bus
모니터링방법	CCD Camera 사용
기계적 형태	6축수직다관절형
로봇 고정방법	Fixture 사용 바닥면에 고정
로봇 입실방법	Guide Rail 및 AC Servo-Motor 사용방법
RCU 동시제어축수	동시 8축
통신방법(MCU~RCU)	광케이블 사용(RS-232C)



〈그림 2〉 로봇 Body의 설치



〈그림 5〉 로봇 제어 시스템



〈그림 3〉 자동입실작업

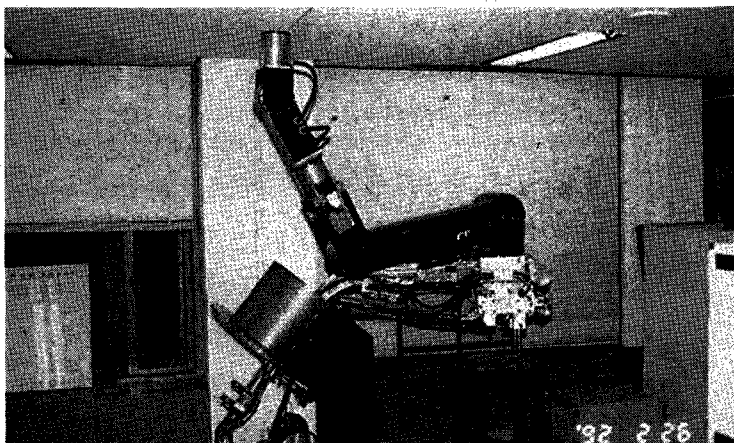
AC Servo Motor가 Wire Rope를 당김으로써 이루어진다. 로봇이 Guide Rail 끝단부 고정 위치에 도달하면 Foot Cylinder 2개와 Clamping Cylinder 6개에 의하여 고정되어 작업을 수행하게 된다.

### 로봇 제어부

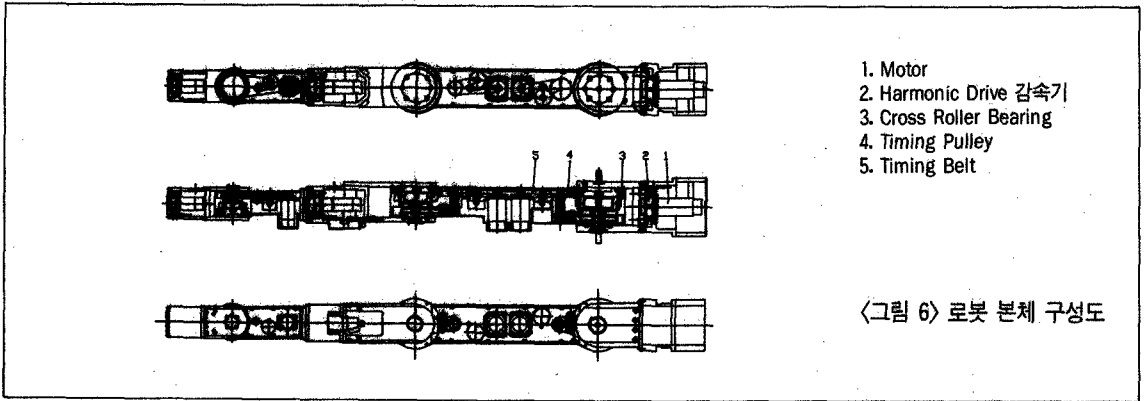
전반적인 로봇 시스템의 소프트웨어 구성도는 〈그림 8〉에 나타난다.

#### 1. 상위제어 시스템

상위제어 시스템(Main Control Unit, MCU)은 본 로봇 시스템에서 사용자와 기계 사이의 Interface를 담당한다. 사용자가 지령하는 바를 입력 번역하고, 이를 내부의 데이터베이스를 참조하여 적절한 명령 시퀀스를 생성한 후, 사용자에게 보여주거나, 로봇 제어 유니트(Robot Control Unit)에게 지령하여 목적하는 바의 동작을 취하도록 한다.

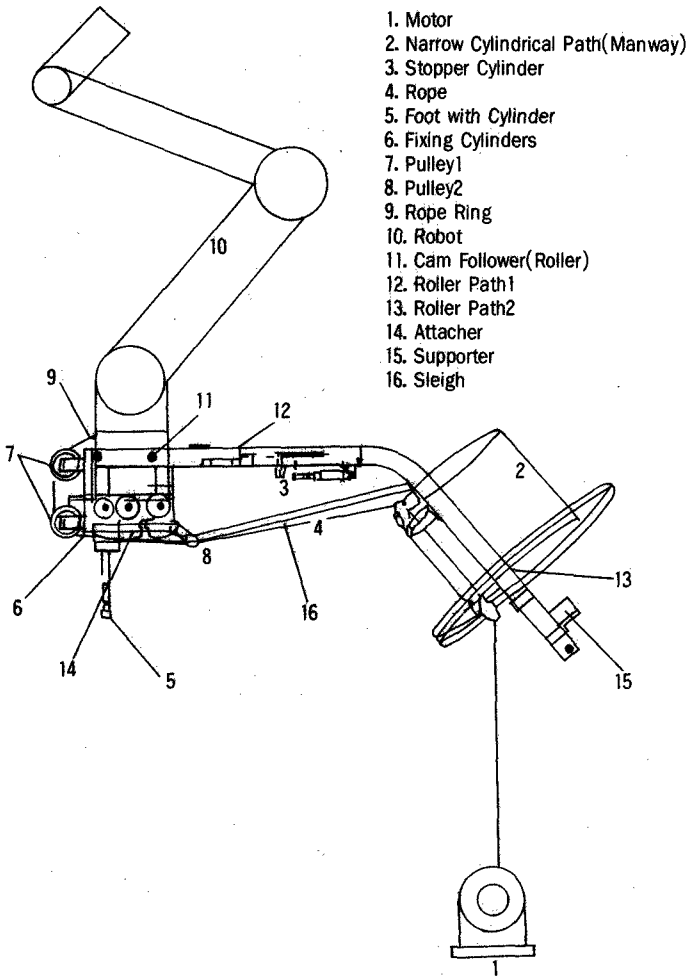


〈그림 4〉 U-Tube 검사를 위한 로봇의 작업자세



1. Motor
2. Harmonic Drive 감속기
3. Cross Roller Bearing
4. Timing Pulley
5. Timing Belt

<그림 6> 로봇 본체 구성도

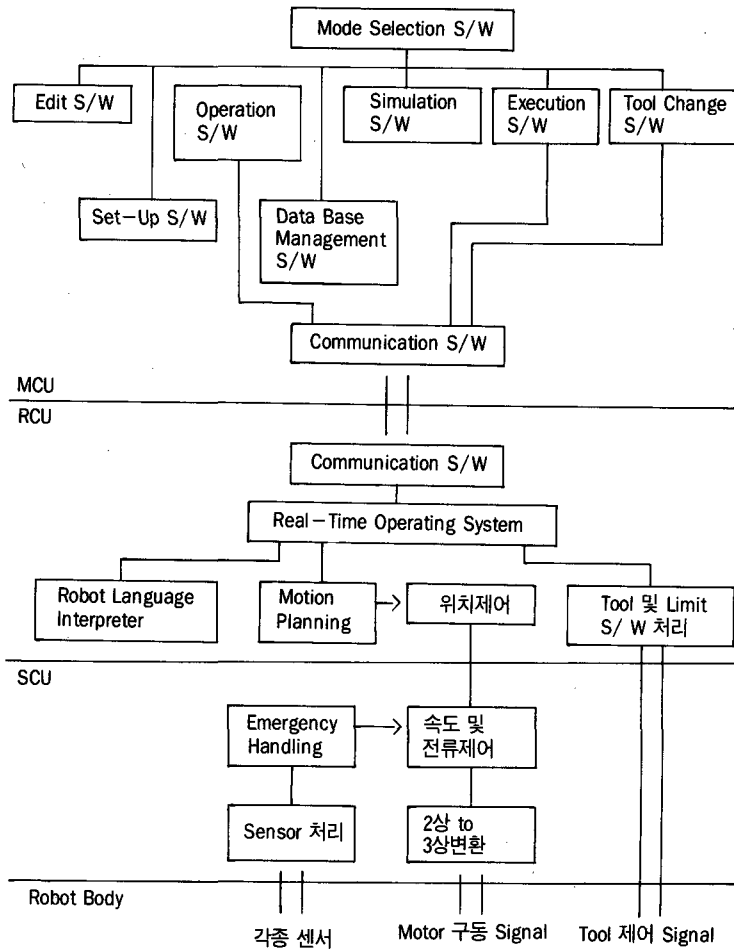


1. Motor
2. Narrow Cylindrical Path(Manway)
3. Stopper Cylinder
4. Rope
5. Foot with Cylinder
6. Fixing Cylinders
7. Pulley1
8. Pulley2
9. Rope Ring
10. Robot
11. Cam Follower(Roller)
12. Roller Path1
13. Roller Path2
14. Attacher
15. Supporter
16. Sleigh

<그림 7> Fixture Unit 구성도

H/W의 기본구성은 <그림 9>에  
 서와 같이 Multibus - II 규격에 준  
 거하여 설계되었으며, S/W는 M-  
 ultitasking과 Real-Time 동작을  
 위하여 iRMX-OS 하에서 동작한  
 다. 데이터베이스 관리와 MMI  
 (Man-Machine Interface)를 위한  
 기본 Tool들을 사용하기 위하여  
 Hard Disk를 이용한 시스템이 되었  
 으며, 시뮬레이션 결과를 보여주기  
 위하여 컬러 그래픽 장치를 구비하  
 며, 입력장치로는 키보드, 마우스  
 이외에 로봇 Arm을 직관적으로 구  
 동시키기 위하여 조이스틱을 사용  
 한다. RCU 및 외부 시스템들과의  
 통신을 위하여 Serial Port를 구비  
 하고 있다. 첫번째 Serial Port는  
 Interface Board를 통하여 RCU와의  
 광통신하는 목적으로 사용된다. 일  
 곱번째 Serial Port는 조이스틱에  
 관련된 신호를 받아들여 로봇 Arm  
 을 구동하는데 사용한다. 나머지  
 Port는 현재 사용하지 않는다.

iRMX-OS와 그 Tool들을 사용  
 하여 MCU의 S/W가 구성되고 있  
 는 바, U-Tube 데이터베이스를  
 사용하여 검사 Scheduling을 하고  
 있다. 이 Scheduling 계획을 이용한



〈그림 8〉 시스템 소프트웨어 구성도

Off-Line 시뮬레이션을 3차원 그래픽하에서 미리 수행하여 볼 수 있으며, On-Line상으로 RCU를 구동시켜 실제 검사작업을 수행할 수 있다.

상위제어 시스템의 기능은 다음과 같다.

(1) 시스템 설정기능

자격을 가진 엔지니어(Supervisor) 및 Operator가 로봇 시스템이 필요로 하는 각종 파라미터들을 지

정하거나 확인할 수 있다. 본 기능에서 사용가능한 파라미터로는 U-Tube에 대한 데이터베이스의 수정, 로봇 각 관절의 동작범위를 제한할 수 있는 소프트웨어 리미트, 각종 Tool들의 좌표계에 대한 정보, 위치 옵셋, CCTV용 모니터로 관찰하고 싶은 카메라의 번호 지정, 작업할 증기발생기의 Side, Login시 필요한 Operator의 Password 변경, Operator의 등록 및 삭

제, Login Operator의 ID 확인 등이 있다.

(2) 작업계획 파일 편집기능

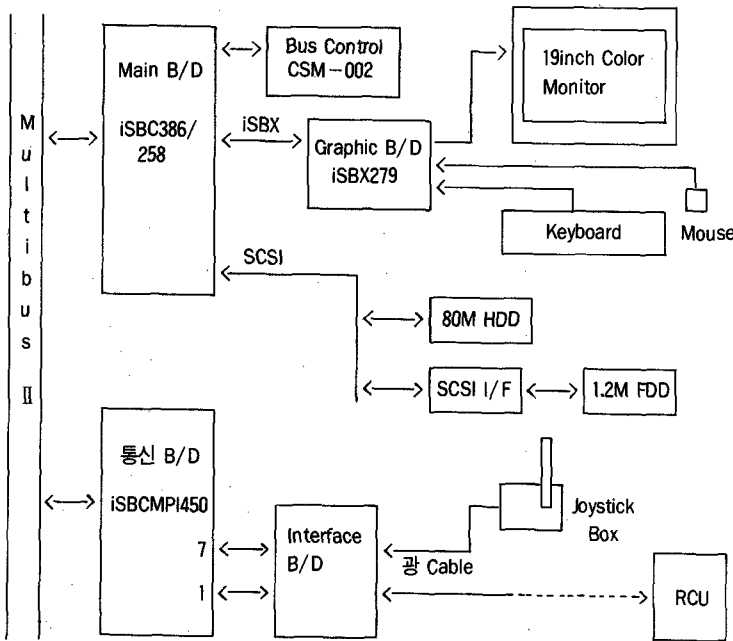
Operator가 하고자 하는 작업의 종류와 증기발생기의 Side를 선택하면, 해당 데이터베이스로부터 각 U-Tube에 대한 관련정보를 읽어 색으로 구분하여 평면도로 표시한다. Operator는 표시된 3,388개의 U-Tube 중 필요한 부분을 Zoom 기능을 통하여 적절히 확대해 볼 수 있으며, 작업하고자 하는 U-Tube의 행과 열의 번호를 입력하거나 마우스를 이용하여 직접 해당 U-Tube를 선택함으로써 작업계획 파일을 편집할 수 있다. 본 편집기능 속에는 다음과 같은 하부 기능들이 포함되어 있다.

① 작업계획 파일 관리

한 번에 작업하기 위하여 선택된 U-Tube들의 집합을 하나의 파일이라 하고 정해진 확장자를 붙인다. 새로운 작업계획 파일의 생성, 이미 프로그램된 작업계획 파일의 Loading 및 Unloading, 편집한 작업계획 파일의 Save 및 다른 이름으로의 Save, 작업계획 파일의 리스트, 작업계획 파일의 Delete, Rename을 할 수 있다.

② 작업계획 파일 편집

작업하고자 하는 U-Tube를 선택하는 순서대로 파일이 구성되며, 실제로 로봇도 같은 순서대로 작업을 수행하게 된다. U-Tube의 선택은 키보드와 마우스로 모두 가능하다. 키보드로는 선택하고자 하는 U-Tube의 행과 열의 번호를 직접 입력하여야 하고, 마우스로는 마우스 커서를 원하는 U-Tube에 놓고



〈그림 9〉 MCU Block Diagram

버튼을 누르면 된다. 이미 선택되어진 U-Tube나 작업이 불가능한 U-Tube를 선택하면 적절한 에러 메시지를 표시해 준다.

#### ③ 줌(Zoom)

한 화면에 표시된 3,388개의 U-Tube는 너무 작으므로 작업하고자 하는 부분을 적절히 확대해 볼 수 있으며, 바로 Zoom하기 직전의 화면으로 되돌아가거나 초기의 화면으로 되돌아갈 수도 있다. 그러나 어느 정도 확대된 상태에서는 더 이상의 확대는 허용되지 않는다.

#### ④ 작업종류 선택

메뉴에 예시된 작업들 즉 ECT 작업, Plugging 작업, Sleeving 작업 중에서 하고자 하는 작업을 선택하면, 데이터베이스로부터 관련정보를 읽어 U-Tube Sheet의 평면도

위에 색으로 U-Tube의 상태를 표시해 준다.

(3) U-Tube 작업상태 표시기능  
이미 작업이 끝난 결과들이 Update되어 있는 데이터베이스로부터 U-Tube의 행과 열의 번호 및 현재의 작업상태를 표로 표시해 주며, 작업상태는 작업수행 여부와 결과로 표시된다. 증기발생기의 Side를 변경하여 그 Side에 대한 작업상태를 볼 수 있으며, 특정 U-Tube의 행과 열의 번호를 통해 탐색이 가능하기도 하며, 페이지를 전후로 넘겨가며 확인할 수 있다.

#### ① 증기발생기의 Side의 결정

각 U-Tube의 작업상태를 확인하고자 하는 증기발생기의 Side를 지정하면, 관련 데이터베이스로부터 정보를 읽어와 다시 표로 표시

해 준다.

#### ② 행과 열 번호를 통한 U-Tube 탐색

U-Tube의 작업상태를 확인하기 위해 탐색코자 하는 U-Tube의 행과 열의 번호를 직접 입력하여 원하는 정보를 볼 수 있다.

#### (4) 시뮬레이션 기능

작업계획 파일 편집기능에서 Operator가 편집한 작업계획 파일을 컬러 그래픽스 모니터 위에서 Off-Line 그래픽 시뮬레이션을 행하여, Operator가 작업파일에 따른 로봇의 동작을 미리 확인할 수 있도록 한다. 그래픽 방법에는 3각법과 원근투영법이 있어 선택이 가능하며, Off-Line 그래픽 시뮬레이션을 수행하는 동안에 자동운전시 사용할 작업수행 파일을 생성시킬 수도 있다. 그리고 시뮬레이션을 행하면서 로봇 각 관절의 회전각도 및 Tool의 현재 좌표값을 모니터에 계속 Update하여 표시하게 된다.

#### ① 작업수행 파일 관리

Off-Line 그래픽 시뮬레이션을 하기 위하여 작업계획 파일 편집기능에서 프로그램된 작업계획 파일명을 입력, 자동운전기능에서 수행시킬 작업수행 파일을 생성할 경우 그 파일명 입력, 작업수행 파일의 리스트 그리고 작업수행 파일의 Delete, Rename 및 Copy를 할 수 있다.

#### ② 시뮬레이션 실행

그래픽 시뮬레이션을 실행하기 위한 옵션이 적절히 선택되고 그에 따른 작업계획 파일명 및 작업수행 파일명이 입력되어지면, 시뮬레이션을 할 수 있다. 해당 실행 키를

입력하고 시작 버튼을 마우스로 누르면 시뮬레이션이 시작되며, 모니터에 로봇의 동작상태, 각 관절의 회전각도 및 Tool의 현재 좌표값 등을 표시해 준다.

### ③ 시뮬레이션 옵션

Off-Line 그래픽 시뮬레이션을 실행하기 위하여 반드시 지정되어야 하는 옵션이 2가지 있다. 첫째는 자동운전시 사용할 작업수행 파일을 생성할 것인지 여부이며, 둘째는 로봇의 동작상태를 미리 확인해 보기 위한 그래픽 방법으로 3각법과 원근투영법 중 택일하여야 한다. 그리고 작업수행 파일을 생성하도록 선택되어졌다면 작업수행 파일 관리 메뉴에서 반드시 그 파일명을 입력하여야 하며, 그렇지 않고 시뮬레이션을 실행하게 되면 에러 메시지를 만나게 된다.

### (5) 자세보정기능

로봇이 증기발생기 내부에 입실하여 실제 작업할 U-Tube들은 항상 고정되어 있는 반면, 로봇은 Rail이라는 특수한 지지부를 통해 입실하여 고정되기 때문에 입실할 때마다 설치되는 위치에 차이가 있게 된다. 따라서 새로이 입실한 후나 로봇의 고정부의 이동 및 변형이 우려될 경우에는 항상 U-Tube의 고정 좌표계와 로봇의 좌표계 사이의 보정을 행하여야 한다. 보정을 행하는 방법은 먼저 로봇이 증기발생기 내부로의 입실이 끝난 후 CCTV용 카메라를 통해 로봇의 동작상태를 관찰하면서 조이스틱으로 수동운전을 하여 Tube Sheet 상에 설정된 3점을 교시함으로써 보정작업을 행한다. 교시하고자 하는

Tube Sheet 상의 3점을 미리 설정해 놓고, 정해진 순서에 의해 처음 교시할 점으로 조이스틱을 이용, 수동으로 로봇을 움직여가며 CCTV 카메라로 도달 여부를 확인하여 교시하게 된다. 같은 방법으로 나머지 2점도 교시하면 U-Tube의 고정 좌표계와 로봇의 좌표계 사이의 회전 및 이동의 차이를 계산하여, 실제 자동운전으로 작업을 수행할 때 로봇의 동작에 반영되어 움직이게 된다. 로봇을 조이스틱에 의해 수동으로 움직이는 방법은 수동운전기능과 마찬가지로 로봇 관절 4, 5, 6축의 동작, 관절 1, 2, 3축의 동작, 그리고 기준 직교좌표계 상의 X, Y, Z방향의 직선보간동작 중 한 가지를 선택하여 로봇을 움직이고, 원하는 설정점에 도달하게 되면 해당 메뉴를 선택하여, 로봇 제어 시스템으로부터 현재 로봇 Tool 끝의 로봇 좌표계상의 X, Y,

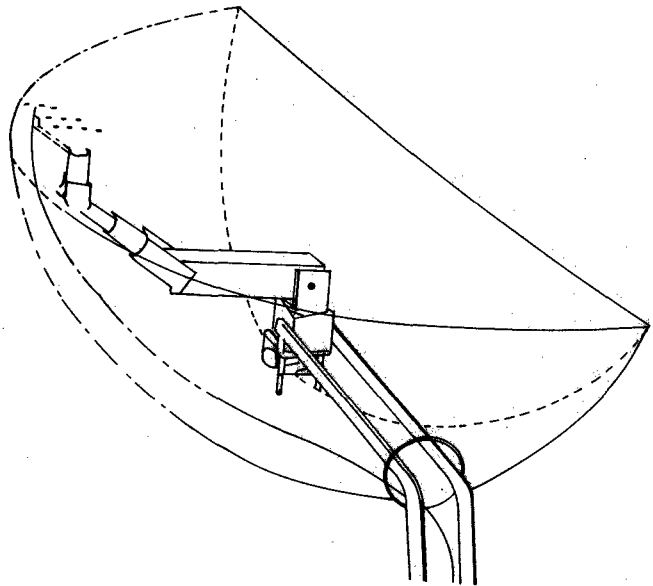
Z값을 얻게 된다.

### (6) 자동운전기능

작업계획 파일의 편집이 끝난 후, Off-Line 그래픽 시뮬레이션을 통하여 확인하고 작업수행 파일을 생성하여 그 파일명을 입력하면, Step Run 및 Automatic Run이 가능하며, 로봇 제어 시스템과의 통신을 통하여 원하는 작업을 자동으로 행할 수 있게 된다.

### ① Tool 교환

증기발생기 내부로의 입실이 완료된 후, 처음으로 Tool을 부착하거나 사용하던 Tool을 다른 것으로 교환할 수 있게 한다. 증기발생기의 Side에 따라 각각 미리 교시되어 있는 로봇의 동작순서가 로봇 제어 시스템에 기억되어 있어서, 상위제어 시스템은 Tool 교환의 경우 Tool에 대한 정보와 증기발생기의 Side만 지정하면 자동으로 행하여진다.



〈그림 10〉 증기발생기 U-Tube 검사용 로봇 작업도



② 퇴 실

증기발생기 내부에서 유지 및 보수작업을 모두 마치고, 로봇을 증기발생기 밖으로 꺼낼 수 있게 한다. Tool 교환과 마찬가지로 로봇 제어 시스템에 미리 퇴실을 위한 로봇의 동작순서가 교시되어 있어 로봇이 입실되어 있는 증기발생기의 Side만 지정하면 자동으로 행하여진다.

③ 입실기능

로봇이 수행하여야 할 작업의 성격이 Day 또는 Season 중 어느 쪽에 관련되었는지를 결정하여 후자의 경우 로봇의 입실을 행하게 된다. Season이라 함은 원자력발전소의 가동을 중지하고 증기발생기의 U-Tube의 검사 및 보수를 시작하기 위해 로봇을 증기발생기 내부로 입실시켜야 하는 첫날이나, 또는 이미 입실하여 작업을 수행한 후 퇴실하여 다시 입실할 필요가 있는 날이며, Day는 입실된 상태하의 Season 중의 한 날이라 할 수 있다. 입실을 하기 위해서는 반드시 증기발생기의 Side를 지정하여야 하며, 실제의 입실 시퀀스는 로봇 제어 시스템에 이미 동작순서가 교시되어 있어, 로봇 제어 시스템에 의해 자동으로 행하여진다.

(7) 수동운전기능

본 기능에서는 증기발생기 내부 및 로봇의 Tool 끝에 부착되어 있는 카메라들을 통해 로봇의 동작상태를 CCTV용 모니터로 직접 보면서, 로봇을 수동으로 움직일 수 있다. 로봇을 수동으로 움직이기 위해서 Operator는 조이스틱이나 키보드를 사용하거나, 직접 각 관절

의 동작에 필요한 값을 입력함으로써 가능하다.

(8) Tool 교환 및 퇴실기능

입실한 후, 로봇에 처음으로 Tool을 부착하거나 설치된 Tool로 일정한 작업을 수행한 후 다른 Tool로 바꾸어 부착할 때 사용한다. 또한 모든 작업수행을 끝내고 로봇을 증기발생기 밖으로 퇴실할 때도 사용한다. 로봇이 Manway를 통해 퇴실하는 시퀀스와 Tool 부착 및 교환을 위해 End Effector를 Manway 밖으로 내보내는 시퀀스가 거의 같기 때문이다.

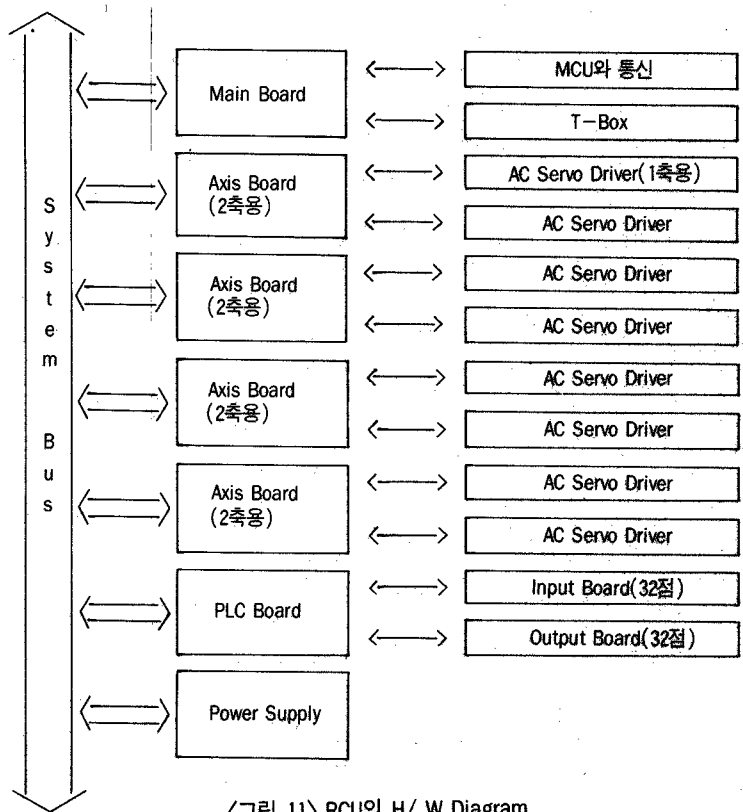
제어 유니트(Robot Control Unit, RCU)와 서보 제어 유니트(Servo Control Unit, SCU)로 구성된다.

RCU는 상위제어 시스템(Main Control Unit, MCU)과 통신 프로토콜(Communication Protocol)에 의해 각종 작업관련 정보를 송수신하며, SCU측으로부터는 위치정보 및 진단(Diagnosis)정보를 수신하고 속도 지령정보를 송신해 준다. 그리고 RCU는 기계부와 그 주변장치가 작업 시퀀스 구성에 필요한 입출력정보를 처리하며, 안전을 위해 설치되는 Interlock 장치(센서 및 스위치)의 신호를 처리한다.

로봇 제어 유니트의 기능은 다음과 같다

2. 로봇 제어 유니트

로봇 제어 시스템은 크게 로봇



<그림 11> RCU의 H/ W Diagram

### (1) MCU와의 통신기능

RCU는 MCU와의 통신기능을 갖고 있다. MCU와의 통신방식은 RS-232C 방식이다. RCU는 이 직렬통신을 통해 MCU로부터 검사 Tube의 위치 데이터를 비롯한 각종 명령 데이터를 받아 해석 및 실행한다. 또한 MCU에 로봇의 위치 데이터나 상태 등을 올려 보낸다. 이로써 로봇의 MCU에 의한 원격 제어와 감시가 이루어지게 되고 로봇 제어에 필요한 배선과 같은 전기적 요건들이 작업현장으로 국부화된다.

### (2) 입퇴실 시퀀스 구성기능

로봇을 증기발생장치 내부에 설치하고 작업후 퇴실시키는 일은 프로그램된 시퀀스에 따라 자동으로 이루어진다. 따라서 사전에 이를 위한 위치 및 I/O 데이터를 입력하는 것이 요구된다. 그런데 이는 입퇴실의 특성상 RCU에서는 하는 것이 적합하므로 RCU에는 시퀀스 구성기능 즉, 위치 데이터의 교시 및 MDI, I/O의 감시 및 조작, I/O 상태 입력기능이 갖춰져 있다.

### (3) 자가진단기능

RCU는 자신과 로봇 제반 상태를 체크하여 이상상태 발생시 필요한 조치를 취하고 이를 MCU에 통보한다.

### (4) 로봇 파라미터 설정기능

RCU에는 가속시간, 각 축의 위치제어 Loop PI Gain 등의 파라미터를 설정 및 변경할 수 있는 기능이 있다.

### (5) 작업원점설정기능

작업기준점을 설정 및 변경할 수 있어 MCU 좌표계와 RCU 좌표계

를 일치시킬 수 있다.

### (6) 작업영역설정기능

작업영역을 설정하고 로봇이 그 작업영역을 벗어나지 못하게 함으로써 로봇과 작업대상의 안전을 도모할 수 있다.

## 3. 서보 제어 유니트

서보 제어 유니트(Servo Control Unit, SCU)는 위로는 RCU 내의 Axis Board와 연결되며 아래로는 기계부의 AC Servo Motor 및 Resolver와 직결되어 있다. 그리고 속도제어를 기본으로 하여 SCU를 구성하고 있으며, Feedback 속도 및 자극위치 그리고 위치정보는 Resolver로부터 받고 속도 지령치는 Axis Board로부터 수신한다.

Resolver로부터 받은 위치 데이터를 Axis Board로 송신함으로써 RCU가 위치제어를 수행하는데 필요한 정보를 제공하며 RCU의 Axis Board로부터 제어에 필요한 시퀀스 신호 및 속도 지령치에 상응하는 데이터를 받도록 구성되어 있다.

## 결 론

### 1. 개발내용 및 특징

#### (1) 독자적인 고유 로봇 모델

현재 도입하여 사용중인 검사용 로봇 및 선진외국에서 개발중인 증기발생기 유지보수용 로봇 시스템의 구동방식 및 기능의 장단점을 분석하여 국내 독자적인 모델을 설계하였다.

증기발생기의 작업영역 및 제한요소를 고려하여 6축수직다관절 로봇 Arm 및 2축의 자동입퇴실장치

를 개발하였다.

최대 20kg 무게를 움직일 수 있도록 고려하여 동력학적 시뮬레이션을 실시하고 그 결과에 따라 주요 기계부품을 선택하고 로봇 본체를 순수 국내기술로 설계하였다.

#### (2) 작업의 편리성

사용자의 편리성을 위하여 대화방식의 MMI(Man-Machine Interface) 방식을 사용하여 작업순서 및 작업상태를 감시하기 위한 명령이 모두 화면상의 그래픽 메뉴를 통하여 마우스 버튼에 의해 수행하도록 되어 있다.

#### (3) 로봇 제어장치의 정밀성 및 범용성

일반 산업용 로봇이 채용하고 있는 Teaching & Playback 방식의 운전 뿐만 아니라 이보다 한 단계 높은 기술을 요구하는 수치제어방식에 의해 작업이 수행됨으로써 정밀도가 높고 반복오차가 적다. 동시 8축다관절 로봇 본체를 구동 및 제어할 수 있도록 하여 제어장치기 범용성 있게 설계되어 있다.

#### (4) 6축수직다관절 로봇 Arm 및 특수용 자동입퇴실장치 개발

3차원공간에서 자유롭게 움직이면서 목표물을 추적할 뿐만 아니라 어려운 환경하에 원전 증기발생기 내부에 자동적으로 입실 및 퇴실할 수 있는 세계 최초의 특수장치를 개발하였다.

### 2. 개발의 의의

개발된 로봇은 8축수직다관절 로봇으로서 3차원공간에서 자유롭게 움직이면서 목표물을 추적함으로써 어려운 환경하 원전 유지보수작업

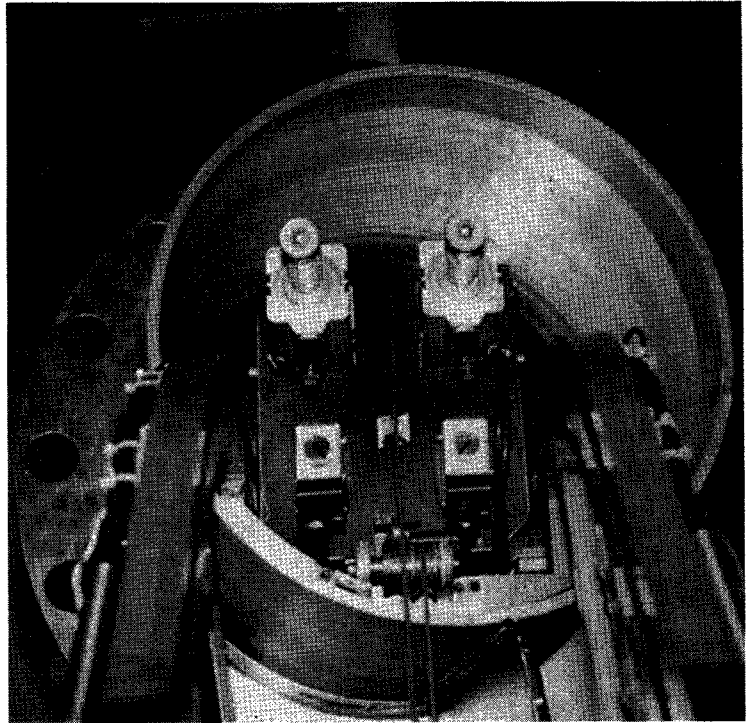
을 원활히 수행할 수 있으므로 향후 기개발된 기술을 이용하여 다목적 적용으로 타산업에 확대 적용 및 활용할 수 있도록 개발되었다.

또한 8축수직다관절 로봇 시스템 개발기술은 선진외국에서도 고도의 기술로 분류되는 것으로서 이에 대한 설계 및 제작기술을 외국기술 도입 없이 순수 국내기술로 개발함으로써 타산업에(공장자동화용 로봇) 확대 적용할 수 있는 기본기술을 자립하였는데 그 의의가 크다.

개발된 로봇 시스템을 같은 목적의 외국회사 제품(미국의 Westinghouse社의 ROSA, 독일의 Siemens社의 Advanced Robot Arm, 스웨덴의 ABB社의 DAERI 등)과 비교할 때 본 로봇 시스템은 국내 독자모델의 자동입퇴실운전방법을 채택하고 있으며 정밀도가 높고 우수한 점이 많아 향후 기존의 수입에 의존하고 있는 증기발전기 유지보수용 로봇을 국산제품으로 대체함으로써 외화절감을 할 수 있을 것으로 사료된다.

원전용 로봇 국산 1호로서 8축다관절 로봇 Arm 및 관련 제어시스템의 H/W 및 S/W 기술을 순수 국내 산업기술로 설계, 제작 및 성능 시험을 수행하여 관련분야 기반기술을 자립하였다.

원전 증기발전기 유지보수용 로봇 기술은 현재 세계각국에서 개발에 심혈을 기울이고 있는 실정인데, 이번에 이에 대한 독자적인 로봇 모델을 개발 및 설계함으로써 국내 산업기술도 특수용도의 로봇 생산기술로 전환할 수 있도록 유도하였을 뿐만 아니라 그동안 낙후되



〈그림 12〉 로봇 Body의 Base부

었던 국내 특수용 로봇 기술이 외국기술 도입 없이 국제 경쟁력 있는 기술로 발전될 수 있는 전기를 마련하였다.

### 3. 전 망

본 연구과제에서 개발된 제품은 증기발전기의 검사 및 보수장비에 필요한 로봇 개발에만 치중되었는바, 검사측정설비 중 ECT 검사용 Push-Puller 및 판독기술과 종합적으로 운영할 수 있도록 하여야 하며 또한 증기발전기 보수업무 중 막대한 외국 기술 용역으로 지불되고 있는(1회 용역비 50억원 이상) Plugging 작업, Sleeving 작업 및 외국기술에서도 아직 실용화가 되지 않은 노즐 댐 마개 작업 등에

대한 보수 자동화시설에 대한 지속적인 투자가 요망된다.

증기발전기 보수용 기술용역 뿐만 아니라 원자력발전소 정기보수에 사용되는 원자로 검사장비 등은 외국에 의존하는 기술로서 향후 기개발된 로봇 제작기술의 경험을 바탕으로 국내 개발을 유도하기 위한 정책적 배려와 인력투입이 지속적으로 투자된다면 외화절감 뿐만 아니라 에너지 기술자립의 조기 달성에 크게 기여할 것이다. 또한 작업자의 방사선피폭 저감대책으로서 작업별로 로봇을 활용하여 보수작업의 자동화를 이룩하는 것은 원자력안전성 홍보에 크게 기여할 것이다. ▣