

# 증기발생기 노즐댐 취급용 원격조작 로봇 시스템 설계

황석용, 김창희, 김병수, 이영광, 김승호\*, 이종민  
한국원자력연구소

## Design of Teleoperated Robot System for Nozzle Dam Maintenance in Steam Generator

Suk-Young Hwang, Chang-Hoi Kim, Byung-Soo Kim, Young-Kwang Lee, Seung-Ho Kim, Jong-Min Lee  
Korea Atomic Energy Research Institute

### ABSTRACT

Robotic technology has been grown up conspicuously by its versatility. KAERI has been involved in one of facets of robot industry to keep abreast of rapid evolving technologies in robotic field and has launched long-term R&D plan to assure the stable nuclear energy. In this paper, the latest development status of teleoperated robot system has been presented with emphasis the configuration of overall control system with 3 dimensional graphic system that provides operators with tele-presence situation. This robot system under development, composed of master-slave arm with controller and graphic simulator, is operated by a master manipulator to enable an installation and removal operation of nozzle dam system for steam generator. Evaluation and analysis has been carried out to get optimal parameters of robot system.

### 1. 서 론

증기발생기는 원자력발전소의 원자로냉각계통으로부터 불리우는 일차측과 진력변환 계통인 이차측의 경계를 이루는 안전성 관련 기기로 빈번한 점검 및 유지보수를 요하는 부분이다. 증기발생기의 내부는 고방사능으로 오염되어 있어 작업자에 대한 방사선 피폭의 정도가 심하며 각종 점검 및 유지보수가 장시간에 걸쳐 수행되는 이유로 로봇트를 이용한 증기발생기 내부에서의 실제 적용이 오래전부터 중요한 관심사가 되어왔다. 또한 최근의 국제 방사선 방어 위원회 (ICRP: International commission on radiological protection) 의 작업자의 방사선 피폭에 대한 허용치가 점차 엄격하게 규제 됨으로 인하여 원자력 선진국의 대부분 국가들이 ALARA (As low as reasonably achievable) 개념에 입각하여 증기발생기 내부에서의 작업자의 방사선 피폭을 전혀 받지않는 소위 "No jumper in steam generator" 혹은 "Zero entry in steam generator" 개념을 만족시킬 목적으로 다기능을 구비한 원격 작업용 로봇트를 개발하고 있다.

국내 원자력발전소 유지보수 작업중 증기발생기와 관련된 작업 수행시의 방사선 피폭현황에 의하면 정기보수 기간중 증기발생기와 관련된 작업이 단일 기기로서는 방사선 피폭량이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이중에서도 특히 노즐댐장/탈착 작업이 방사선 피폭량의 절반 이상을 점유하고 있다 [1]. 따라서 노즐댐 장/탈착 작업의 원격화는 시급히 해결되어야 할 현안문제로 인식되어 미국의 Busitech 에서 일련의 적용연구가 수행되어 왔으며 최근 웨스팅하우스 사에서는 앞서 개발된 기술중 자체 개발한 ROSA 조작기를 수정 보완하여 노즐댐 작업을 자동화하기 위한 방안을 모색하고 있다.

본 연구에서는 원전시설의 유지보수 작업중 고방사선 피폭을 초래하는 증기발생기 수실내의 노즐댐 장/탈착 작업을 원격에서

수행하기 위한 로봇 시스템의 개발과 관련한 기술검토를 심층적으로 수행하였다. 증기발생기 수실 내부의 구조 및 작업환경 분석을 토대로 로봇 시스템의 설계 요건을 설정하고 주/종 조작기의 기구부를 개념설계 하였다. 또한 실시간 원격제어가 가능하도록 제어 시스템을 설계하였고 3 차원 그래픽 시뮬레이션을 통하여 개발중인 종조작기의 기구학적 구조를 검토 및 분석하였다.

### 2. 원격 작업 로봇 시스템 설계

#### 2.1 노즐댐 장/탈착 작업

노즐댐은 증기발생기의 원자로 냉각계통으로부터 증기발생기 채널 헤드를 격리시켜 원자로가 침수된 상태에서 행해지는 제반작업 (핵연료 재장전 및 검사 작업) 과 증기발생기와 관련된 점검보수 작업을 병행하여 수행하기 위하여 사용된다. 그림 1 과 같이 핵연료 재장전, 노물리 검사 등의 작업을 수행하기 위하여 원자로수조 (Reactor Cavity) 에 물을 채우면 증기발생기의 수실 내부가 침수된다. 수실내부가 1 차 냉각재로 충수된 상태에서는 와전류 탐상 검사, 슬리빙, 플러깅 등의 작업을 할 수 없으므로 노즐댐을 설치하며 원자로내의 작업이 수행된 이후에는 정상가동을 위하여 노즐댐을 탈착시킨다. 노즐댐은 증기발생기의 외부에서 맨틀을 통해 입실되며 증기발생기 수실 내부에 미리 설치된 노즐댐에 볼트로 체결되며 고리 원자력발전소의 경우 13 PSI 의 수압을 견딜 수 있어야 하며 노즐댐은 외경 105.4 cm, 내경 97.8cm 의 텀으로, 20 개의 노즐댐 고정용 나사구멍이 나있다. 그림 2 는 수실내부의 형태를 나타낸다.

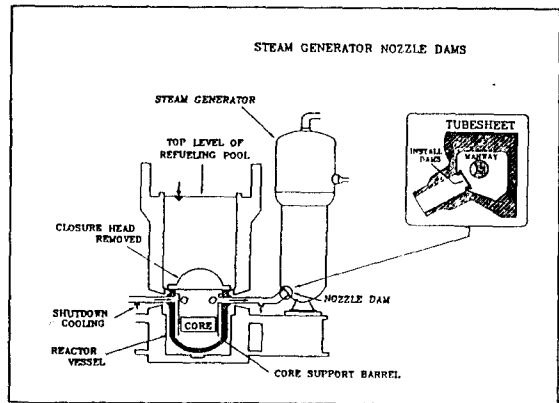


그림 1. 원자로 냉각계통의 개략도  
Fig 1. The schematic diagram of reactor coolant system

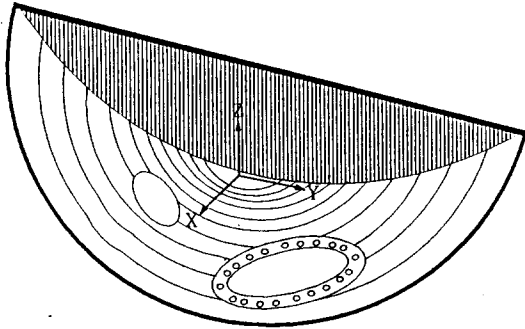
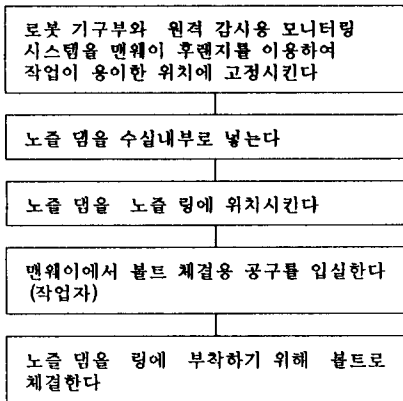


그림 2. 증기발생기 수실 내부  
Fig 2. Inner view of steam generator water box

노즐땜은 증기발생기 수실의부로부터 맨웨이를 통하여 입실된후 노즐땜에 장착이 된다. 그러나 노즐땜의 직경이 맨웨이의 직경보다 크므로 분리된 2-3 개의 조각으로 분리하여 제작된다. 노즐땜 장착작업을 로봇을 이용하여 원격에서 수행하기 위한 작업순서는 다음과 같다.



### 2.2 로봇의 설계요건

증기발생기의 맨웨이는 직경 40 cm로 사람이 간신히 출입할 수 있을 정도로 좁은 통로이기 때문에 로봇 기구부의 폭이 수실로의 출입이 가능할 정도로 작아야 하며, 수실내부에서의 작업도중에 고장이 발생 하였을시에 응급 조치와 관련하여 작업자의 수실로의 출입이 가능할 수가 있는 공간이 확보되어야 한다. 맨웨이 후렌지에 부착할 때의 로봇의 무게에 의한 부담을 최소화하기 위하여 기구부의 무게를 최소로 하여야 한다. 또한 집힌 구조로된 노즐 땜을 로봇이 취급하는 데는 많은 어려움이 있으며 기존의 집힌 땜의 무게가 약 40 Kg에 달해 로봇트가 취급하기에 큰 부하이다. 따라서 로봇이 운송하기에 적합한 형태 및 무게를 갖는 분리된 형태의 땜 설계가 필수적이다.

수실내부에서의 로봇의 전반적인 운동은 기본적으로 주조작기를 이용한 조작자에 의해 원격으로 이루어 지게 된다. 작업은 3 차원 공간에서 이루어지며 더우기 작업 대상물의 공간상의 정보가 결정되어 있지않다. 수실내부로 작업자에 의해 입실된 노즐 땜의 로봇 좌표계 시스템에서의 위치, 자세를 알기위해서 각종 센서 및 비전 시스템을 이용하는 방법은 그 자체가 해결해야할 많은 문제를 포함하고 있기 때문에 카메라로부터의 영상 정보로부터 조작자가 로봇트의 경로를 계획하고 이를 주조작기를 이용하여 제어하는 방법을 기본으로 한다 [2] [3] [4].

땜을 링에 접근시킨후 로봇의 그리퍼가 맨웨이 부근으로 나와 작업자가 볼트 체결용 공구를 수실 밖에서 쉽게 장착시킬 수 있어야 한다. 따라서 기구부가 이러한 요구조건을

만족하도록 설계되어야 하며 공구가 쉽게 장착되도록 그리퍼와 공구의 개발이 연계되어 수행되어야 한다. 볼트의 체결은 수행작업중 가장 어려운 부분으로 힘반향에 의한 주조작기를 이용한 원격제어 방법을 이용하여야 한다. 또한 땜 및 볼트의 설계가 작업의 성공에 큰 영향을 미치므로 재질 및 구조적인 측면에서의 주의깊은 고찰이 수행되어야 한다. 아울러 원격작업의 효율성을 높이기 위하여 3 차원 영상 및 3 차원 그래픽 기술을 이용하여 원격작업의 현실감을 직간접적으로 조작자에게 전달 하는것이 필요하다. 이상의 검토로부터 노즐땜 장/탈착용 로봇트와 관련하여 개발중인 시스템은 그림 3과 같이 구성된다.

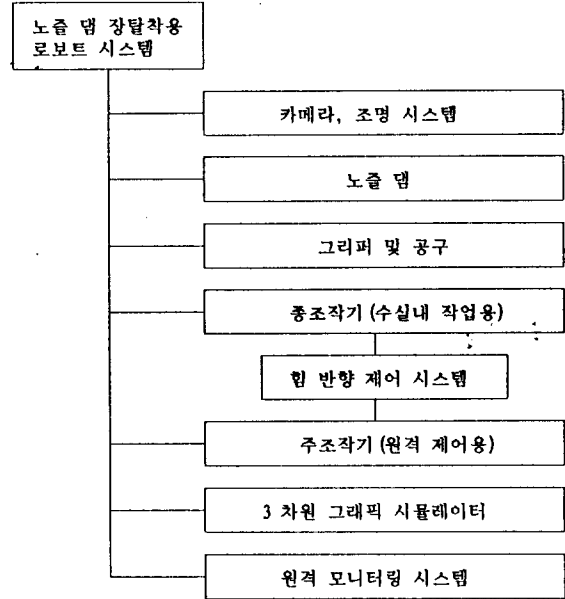


그림 3. 로봇 시스템 구성  
Fig 3. Robot system architecture

증기발생기의 수실내부가 안전성 관련 고방선 구역이므로 주조작기의 개발시 다음과 같은 고려가 필수적으로 수행되어야 한다.

- 방사선 영향 : 환경적인 측면에서 가장 깊이 고려해야 할 부분으로 시스템의 신뢰도에 가장 민감한 영향을 끼치는 요소로써 로봇트의 개발에 많은 제한을 가한다. 특히 전자소자, 전기모터, 오일 및 프라스틱 등의 소자는 방사선에 민감 하므로 이들 소자들의 내방사선화가 필수적이다.
- 교체용 용이성 : 작업 공구 등은 오염에 의한 빈번한 교체가 요구되기도 하므로 각 부품들의 모듈화가 필요하다.
- 센서의 사용 : 위치, 속도, 힘, 접촉 등의 각종 센서 들은 특히 방사선에 민감하므로 이들의 과도한 사용은 시스템의 신뢰도를 저하하므로 가능한한 사용을 줄인다.
- 재염 : 방사선 환경에서 작업하는 로봇은 감마선에 표면이 오염되기 때문에 가능한한 구멍의 수를 적게 하며 완만하고 연마된 표면 처리를 한다.

### 2.3 주/종 조작기 기구부 설계

노즐땜 장탈착 작업시 노즐 땜의 파지, 노즐 땜의 노즐링으로의 운반, 볼트 작업, 맨웨이에서의 공구 교환 등의 작업을 수행하기 위해서는 3 차원 공간상에서의 로봇트 그리퍼가 다양한 위치에서 다양한 자세를 취해야 하므로 최소한 6 개의 자유도가 필요하다. 전체 기구부의 구성은 일반적인 손목 분리형 (Wrist Partioned Type) 을 채택한다 (그림 4). 특히 팔꿈 부위에 움푹을 주어 두 링크가 완전히 집힐 수 있게 하여 맨웨이밖에서의 공구 교환이 가능하게 한다.

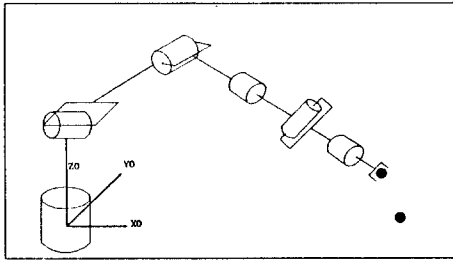


그림 4. 종조작기 기구부의 구조  
Fig 4. Joint configuration of slave manipulator

주조작기는 종조작기와 기구학적으로 유사한 형태로 조작자로 하여금 피로를 줄이기 위하여 크기를 2:1 에서 3:1 정도로 줄인다. 액츄에이터는 직류 서보 모터를 사용하며 감속기의 백래쉬를 줄이기 위하여 하모닉 드라이브를 사용한다. 그림 5 은 설계된 주조작기의 구조를 나타낸다.

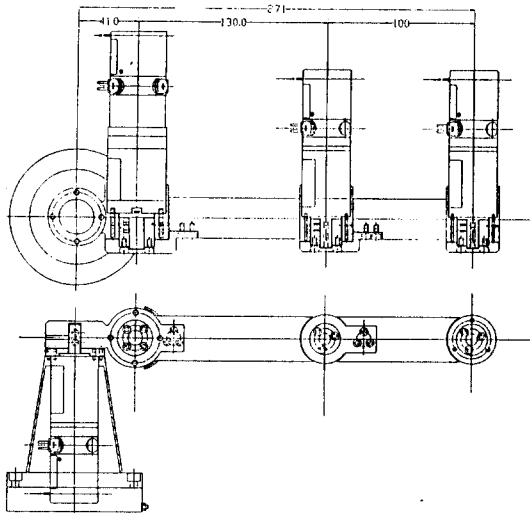


그림 5. 주조작기 기구부의 구조  
Fig 5. Joint configuration of master manipulator

#### 2.4 실시간 원격제어 시스템 설계

중기발생기 수실 내부에 장착된 로봇은 방사선 피폭의 염려가 전혀없는 중기발생기로부터 수백 m 떨어진 지점에서도 조작자에 의해 구동되어야 하므로 전체 제어 시스템은 원격지의 주조작기를 제어하는 원격제어 시스템과 조작자와의 인터페이스 및 원격지의 상황을 모니터링하는 관리제어 시스템으로 구성된다. 관리 제어 시스템은 주조작기, 제어반, 3 차원 그래픽 시뮬레이터 및 원격 모니터링 장치의 전반적인 제어를 담당하며 원격 제어시스템과 고속 정보 교환을 위하여 Ethernet 으로 연결된다. 원격제어 시스템은 관리 제어부로 부터의 종조작기 제어와 관련된 정보를 입력하며 종조작기를 제어하고 작업 상황을 관리제어 시스템에 전달한다. 그림 6 은 제어 시스템의 구성도를 나타내며 표 1 은 제어시스템의 제원을 나타낸다.

주조작기 및 종조작기를 제어하는 다축 디지털 서보 제어기는 하드웨어의 구조는 동일하며 개발중인 서보제어기의 구조와 기능은 다음과 같다. VME bus 상에 ethernet 드라이브, 1MB 메모리, 68040 CPU 로 구성된 컴퓨터 보드와 고속 DSP 프로세서, 16bit ADC, 16bit DAC, 위치센서 데이터 입력부로

구성된 보드로 설계된다. 실시간 제어를 위하여 실시간 운영체제인 VRTXsa 를 채택하여 멀티 태스킹 및 멀티프로세싱이 가능한 환경을 구축한다. 개념설계된 다축 서보 제어기의 구조는 그림 7과 같다.

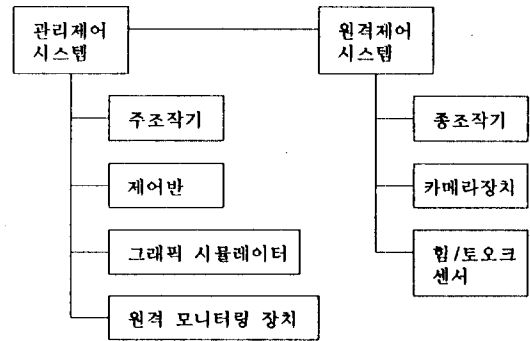


그림 6. 원격 제어시스템의 구성도  
Fig 6. Configuration of remote control system

표 1. 제어시스템의 제원  
Table 1. Control system Specification

관	운용 체제	UNIX
리	주조작기 인터페이스	VME-BUS, Ethernet
제	작업자 인터페이스	X-Window
어	조작기제어기개발 환경	On-line디버거 (SPECTRA)
시스템	그래픽 시뮬레이터	ROBCAD
	온-라인 모니터링	3 차원 모델갱신
원격	운용 체제	실시간운영체제 (VRTXsa)
제어	종조작기 인터페이스	VME-BUS
시스템	데이터 전송	Ethernet
	카메라 장치	소형 CCD
	힘/토크 감지	스트레인 게이지 .

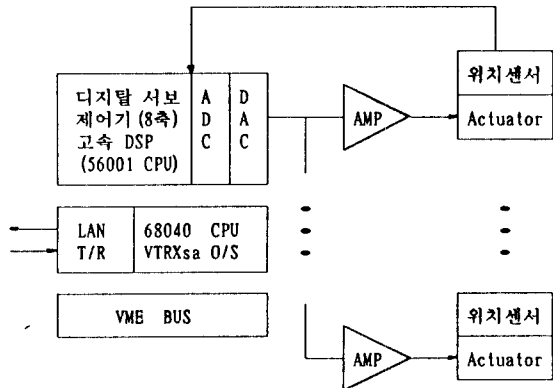


그림 7. 다축 서보제어기의 구성도  
Fig 7. Block diagram of multi-axis servo controller

### 3. 그래픽 시스템

#### 3.1 그래픽 시뮬레이터

원자력시설 내에서 로봇을 이용하여 작업을 수행하기 위해서는 기존의 주변시설을 제배치할 수 없으므로 작업환경을 미리 분석하고 이를 바탕으로 하여 로봇을 개발하여야 한다. 따라서 3차원 그래픽을 이용한 시뮬레이션은 로봇의 기구학적 파라미터를 선정하기 위한 가장 효율적인 방법으로 인식되어 있으며, 나아가 진보된 그래픽 기술을 이용한 로봇 프로그래밍과 제어환경의 통합은 원격의 카메라 시스템에만 의존하는 기존의 원격 제어보다 풍부한 정보를 제공함으로써 효율적인 원격제어를 가능하게 한다. 조작자에게 필요한 시각 정보를 제공하는데 있어 컴퓨터 그래픽을 이용할 경우의 장점은 다음과 같다 [8].

- 선명하고 간결한 영상표현
- 임의의 각도에서의 시각정보 생성
- 충돌에 대한 사전 경고

컴퓨터 그래픽을 이용하여 로봇의 작업 상황을 시각화시키기 위해서는 실제와 같은 현실감을 제공할 수 있어야 하며 조작자가 화면을 보면서 작업을 수행할 수 있도록 조작기의 관절 값들이 실시간으로 그래픽시스템으로 제공되어야 한다. 이상의 기능을 만족시키기 위해 그래픽 시스템은 구성하였다. 구성된 그래픽시스템은 실시간으로 3차원 그래픽 데이터를 처리하기 위하여 24 비트 플레인 컬러 및 Z 버퍼를 갖고 있으며 방대한 양의 정보 처리를 위하여 고속의 CPU 와 64 MB의 메모리를 갖추고 ethernet 을 통하여 원격지의 로봇 제어부와 실시간으로 정보를 교환하도록 하였다. 그림 9 는 그래픽 시스템의 하드웨어 구성을, 그림 10 은 그래픽 시스템의 기능별 구성을 보여준다.

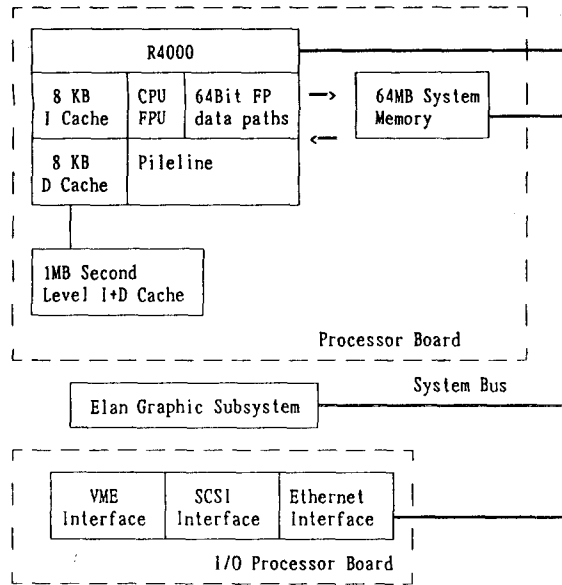


그림 9. 그래픽시스템의 구성  
Fig 9. Graphic system architecture

그래픽 시스템은 작업환경 및 로봇 특성에 대한 지식을 근거로 하여 월드모델(World Model)을 구축하게 된다. 월드 모델은 기하학적 모델과 운동학적 모델을 포함하며 기하학적 모델에서는 물체의 형상을 솔리드(Solid) 와 서피스(Surface) 모델을 사용하여 와이어프레임, 투명(Transparency) 솔리드 등의 다양한 형태로 표현하며 운동학적 모델에서는 기하학적 모델에 각 요소 별로 기구학적 속성을 정의하여 복합적인 운동성을 부여해 준다. 월드모델의 시각화는 조작자가 시스템의 상태를 이해할 수 있도록 하는 핵심요소로 조작자가

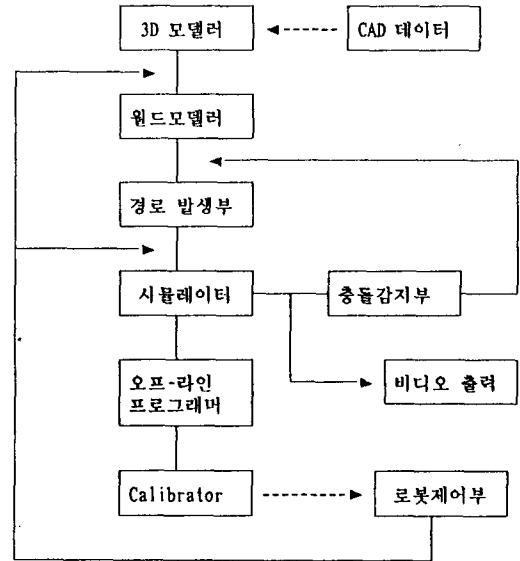


그림 10. 시스템의 기능별 구성  
Fig 10. Functional block diagram of system

결정한 사항에 대한 결과를 대상물의 기하학적 특성과 더불어 작업환경 내의 기구학, 동역학 관련 동작특성을 시각화하여 표현하게 된다.

계획된 일련의 동작은 실행하기 이전에 월드모델 내에 기하학적 정보를 이용하여 실행될 작업에 대한 검색을 수행하게 된다. 작업내용 중에 충돌을 일으킬 우려가 있는 동작에 대해서는 검색을 통하여 사전에 조작자에게 경고하며, 충돌에 대한 사전 경고가 있을 경우 조작자는 화면 상에 표현된 로봇 모델을 그래픽 인터페이스를 통하여 조작함으로써 프로그램의 수정이 가능하다. 그래픽 환경의 충돌감지 능력은 충돌을 사전에 감지하여 조작자에게 임박한 충돌을 경고한다.

#### 3.2 모델링 및 시뮬레이션

제어환경과 그래픽 환경과의 통합을 위해서는 먼저 로봇의 기구학적 특성에 대한 모델링이 선행되어야 하며 이 과정에서 로봇의 기구학적 설계 및 제어 방식을 비교 평가한다. 이를 바탕으로 그래픽 시스템과 제어시스템과의 연결이 이루어진다. 증기발생기의 수실 및 노즐덱 장/탈착작업을 수행하기 위한 로봇을 모델링하고 모델링 되어진 로봇을 이용하여 노즐덱 장탈착 작업을 시뮬레이션하고 이를 토대로 로봇의 기구학적 제원을 설정하였다.

작업환경에 대한 모델링은 고리 1호기의 증기발생기를 대상으로 하였다. 증기발생기 하부는 내부 직경이 157.7 cm인 반구형의 구조로 입력과 출력 부분으로 나누어져 있다. 노즐은 구좌표계에서 (157.7cm, 140°, -90° ± 53.5°) 지점에 있으며 로봇 및 작업공구들을 입실 통로인 맨웨이는 구좌표에서 (157.7cm, 140°, 90° ± 38.5°) 지점에 위치하고 있다. (그림 11 참조). 표 2 는 모델링 한 로봇의 기구학적 변수를 나타낸다.

그림 11 은 수실의 중심에서 X=29.5 cm, Y=71.6 cm, Z=-109 cm 의 위치에 부착된 로봇이 노즐덱을 설치하는 과정을 3 차원적으로 보여준다. 로봇의 작업공간이 협소하고 로봇에 비하여 노즐덱의 크기가 상당히 큰 관계로 실제 로봇의 부착 위치는 로봇의 작업성과 밀접한 관계를 갖고 있어 시뮬레이션으로 거치면서 적절한 부착 위치를 시뮬레이션을 통하여 구하였으며, 로봇이 노즐덱 장/탈착 작업을 수행할 수 있기 위한 기구학적 제원을 설정하였다. 로봇은 맨웨이 부근에 위치한 작업공구들 파괴하여 노즐덱에 부착하여야 하므로 3 번째 관절의 동작범위가 매우 크다. 또한 Pitch, Yaw, Roll 형태를 갖도록 하여 원격조작이 용이한 구조를 갖추었다. 그림 12 는 노즐덱 설치 작업시의 각 관절의 궤적을 보여주어 있다. 그림에서

표 2. 기구학 변수  
Table 2. Kinematic parameter

관 절	동작범위	링크 길이	움짱 앵글
j1	135° ↔ -135°	11 cm	0°
j2	0° ↔ 60°	97 cm	-90°
j3	10° ↔ 90°	48.3 cm	0°
j4	0° ↔ 90°	12.7 cm	0°
j5	0° ↔ 90°	22.4 cm	90°
j6	15° ↔ -35°	16.5 cm	90°

보는 바와 같이 로봇의 3 번째 관절의 움직임의 폭이 상대적으로 크게 나타난다. 또한 덤의 설치와 볼트 체결작업이 증기발생기 내부와 수직인 상태에서 이루어져야 하기 때문에 2 번째 관절의 변화율이 심하며 반복적으로 계속된다.

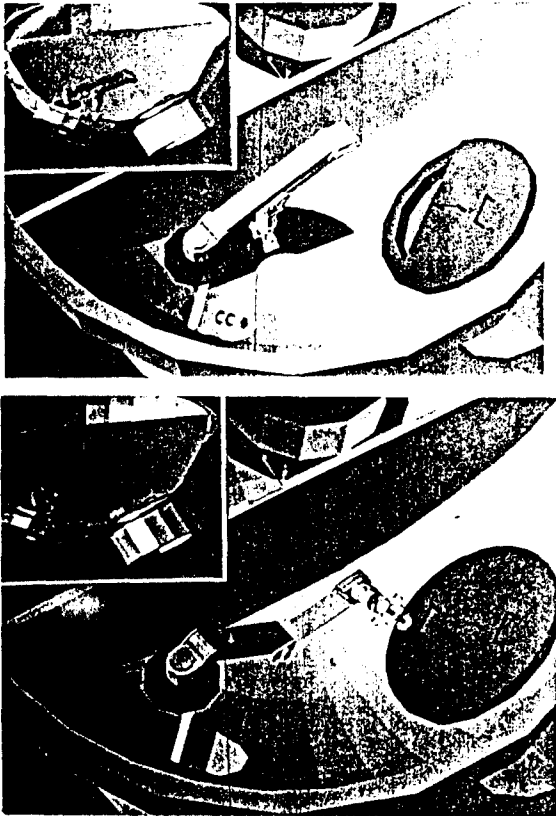


그림 11. 노즐덤 장착작업 시뮬레이션  
Fig 11. Simulation of Nozzle Dam Installation

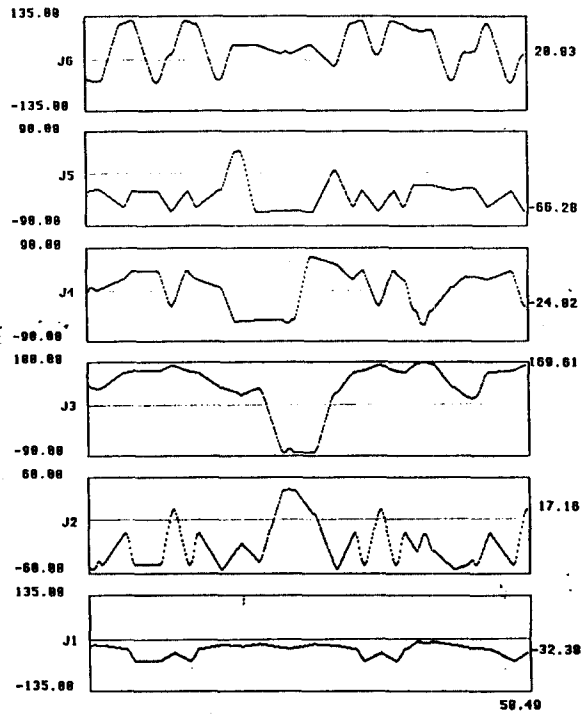


그림 12. 관절값의 궤적  
Fig 12. Joint Value Trajectory

#### 4. 결 론

원자력발전소의 유지보수 작업중 증기발생기와 관련된 작업이 차지하는 비중이 매우 높으며 증기발생기의 작업중 노즐덤 장/탈착 작업은 전적으로 작업자에 의존하게 되므로 과도한 방사선 피폭을 초래하게 된다. 본 연구에서는 작업자의 고방사선 피폭을 초래하는 증기발생기의 노즐덤 장/탈착 작업을 로보트로 대행할시 개발되어야 할 관련 부시스템들을 고찰하였고 각 부시스템의 제원을 결정하고 기능을 제시하였다. 종조작기와 주조작기의 기구학적인 측면에서의 제원과 원격제어 시스템의 구조를 제시하였으며 고방사선 지역에서 작업하는 로봇의 환경적인 측면을 고려한 설계요건을 수립하였다. 또한 노즐덤 설치 작업의 수행시 조작자에게 작업현장에 대한 효율적인 시각정보를 제공함으로써 작업의 효율성 및 안전성을 향상시키기 위한 그래픽 시스템을 구성하였다. 구성된 시스템을 이용하여 노즐덤 작업용 로봇을 모델링하였다.

#### 참 고 문 헌

- [ 1 ] C. T. Raddatz, D. Hagemeyer, "Occupational Radiation Exposure at Commercial Nuclear Power Reactors and Other Facilities," NUREG 0713, 1988.
- [ 2 ] Hanford, B. and R. Anderson, "Experimental and Simulation Studies of Hard Contact in Force Reflecting Teleoperation," Proc. IEEE Conference on Robotics, vol. 2, pp. 403-412, JPL Publication 87-13, July 1, 1987.
- [ 3 ] J. V. Draper et al., "Test Results : The Manipulator Operator Skill Test," ORNL/TM-10524, Oak Ridge National Laboratory, November 1987.
- [ 4 ] J. V. Draper et al., "Evaluation of High-Definition Television for Remote Task Performance," ORNL/TM-10303 Oak Ridge National Laboratory, April 1987.

- [ 5 ] Miyazaki, F., Matsubayashi, S., Yoshimi, T. and Arimoto, S., "A New Control Methodology Toward Advanced Teleoperation of Master slave Robot Systems," 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, PP.997-1002, 1986.
- [ 6 ] Asada, H. and Slotine, J.-J..E., Robot Analysis and Control, John Wiley and Sons, NewYork, N.Y., 1986.
- [ 7 ] Raibert, M. H. and Craig, J.J., "Hybrid Position /Force Control of a Robotic Manipulator," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, June 1981, pp.126-133, 1981.
- [ 8 ] F. J. Sweeney et. al., "DOE/NE University Program in Robotics for Advanced Reactors," DOE/OR-884/R2, 1990
- [ 9 ] R. C. Mann et. al., "Proposal for Continued Basic Research in Intelligent Machines at the Center for Engineering Systems Advanced Research Fiscal Years 1992 - 1996," ORNL/TM-11810, 1991