

원전 증기발생기 유지보수용 원격로봇 시스템 개발

Development of a Tele-Robotic System for Steam Generator Maintenance Works

°황 석 용, 김 창 회, 이 재 경, 김 승 호

한국원자력연구소 원자력산업용 로봇기술개발팀

(Tel: 868-8835; Fax: 868-8833; E-mail: syhwang1@nanum.kaeri.re.kr)

Abstract In this paper, we have developed a tele-robotic system for nozzle dam installation/removal works and tube relating maintenance works inside unclear power plant steam generator. Developed tele-robotic system consists of many hardwares including robot and a control system. Based on the 3 dimensional graphic simulation, a 6 D.O.F. hydraulic actuated robot and a 2 D.O.F. robot install/removal device have been developed. And also we devised special tools for nozzle dam carry and bolting. For the tele-robot and other devices to be controlled at the nonradioactive area outside reactor containment building, we developed a tele-robot control system consisting of supervisory controller and remote controller.

Keywords Tele-Robot, Nuclear power plant, Stem generator

1. 서론

원자력 발전소의 증기발생기는 원자로, 가압기 등과 더불어 일차 냉각계통(Primary coolant loop) 내의 주요 안전성 관련 기기로 원자로로부터 가열된 중수 또는 경수를 수천개의 전열관을 통하여 이차 계통으로 열교환을 일으키는 장치이다. 그러나 수천개에 달하는 전열관들은 고온 고압으로 인한 기계적인 측면에서의 구조적인 취약성과, 부식 등의 화학적인 작용으로 인한 문제를 야기하여 발전소의 비정상적인 가동중지에 가장 많은 원인을 제공한다. 한편 매년 한차례씩 수행되는 발전소의 예방 계획정비(Over haul) 기간 중 증기발생기와 관련된 점검 및 유지보수 작업에 가장 많은 인력, 예산, 및 시간이 소요되는데 이는 수천개에 달하는 전열관의 와전류 탐상(Edgy current test) 작업과 와전류 탐상 작업 결과를 토대로한 전열관의 플러깅(Plugging) 슬리빙(Sleeving) 작업이 수행되어야 하기 때문이다. 따라서 증기발생기의 유지보수작업의 질은 원자력 발전소의 안전성에 직접적인 영향을 미치며 작업의 신속성은 예방 계획정비 기간을 줄여 발전소의 가동률을 높이게 된다.

가압 경수로형 원전의 예방 계획정비 기간 중 가장 많은 시간이 요구되는 작업은 핵연료 재장전 작업과 증기발생기의 전열관 점검 및 유지보수 작업이다. 단일계통으로 연결된 증기발생기의 수실(Water chamber)은 원자로의 수조보다 낮은 곳에 위치하고 있기 때문에 원자로의 핵연료 재장전 작업과 증기발생기의 전열관 관련 작업을 동시 수행하기 위해서는 증기발생기 수실의 침수를 예방하기 위한 작업이 선행되어야 한다. 이 작업을 노즐담 설치 작업이라 하며 노즐담은 증기발생기 수실 내부의 노즐링 상부에 설치된다.

원전 유지보수 작업의 난점은 작업시 초래되는 작업자의 방사선 피폭이다. 국제 방사선 방호 위원회(ICRP) 등의 기관 및 단체들의 법적, 권고 방사선 피폭선량이 점점 줄어 들고 있으며

작업자의 방사선 피폭에 대한 우려와 기피는 심화되고 있는 실정이다[1-4]. 이러한 방사선 피폭에 대한 여건에 비추어 불 대 노즐담 설치작업은 그 심각도가 매우 높다고 하겠다. 극도로 고 방사화된 수실 내부에서 전적으로 작업자에 의해 장시간에 걸쳐 수행되는 노즐담의 설치 작업은 작업자의 고방사선 피폭을 초래하기 때문이다. 노즐담 설치 작업시의 방사선 피폭치는 정기적으로 수행되는 작업중 단일작업으로는 최고임이 그 심각성을 보여준다 하겠다.

본 연구의 목적은 전적으로 작업자에 의존하는 노즐담의 설치 및 해체 작업과 더불어 전열관의 유지보수 작업의 수행이 가능한 원격 로봇 시스템의 개발하여 증기발생기 관련 작업시 초래되는 작업자의 방사선 피폭을 극소화함이며 주 연구 내용은 원격 로봇 시스템의 개념설계, 로봇 기구부 등의 하드웨어 설계제작 및 원격제어 방안의 모색과 제어 시스템의 구현이다.

2. 원격 로봇 시스템 설계

2.1 증기발생기 유지보수작업 분석

증기발생기는 원전의 일차 냉각계통에서 그림 1 과 같은 지점에 위치하여 그림 가운데의 원자로, 가압기와 더불어 순환 루프를 형성하며 구조적으로 원자로의 경수가 유입/유출되는 수실과 전열관을 포함한 열교환부로 나눌 수 있다. 수실은 2 개가 존재하는데, 하나는 원자로로부터 경수를 유입하여 상부의 전열관으로 전송하는 Hot Let 측 수실이며 나머지는 전열관을 통하여 유입되는 열교환된 경수를 원자로로 되돌리는 Cold Let 측의 수실이다. 2 수실이 이루는 형태는 직경 3194 mm 의(모델 F 형) 반구에 해당하며 대칭 구조이며 각 수실에는 한 개의 노즐, 상부의 전열관 슈트, 그리고 맨웨이(Man way)가 부착되어 있다. 수천

개의 전열관을 지지하고 있는 전열관 슈트는 수평한 구조로 수실 상부에 위치하고 있다. 맨웨이는 전열관의 유지보수를 목적으로 작업자의 출입을 위한 통로로 직경이 406 mm 이며 맨웨이 반대편의 노즐상부에 부착된 노즐링은 직경이 1016 mm 이다. 따라서 증기발생기 유지보수용 원격로봇 시스템의 개발은, 1) 직경 406 mm 의 협소한 통로를 통하여 수실내부로 로봇을 입실시키고 입실후 로봇을 지지하는 방안을 강구하고, 2) 1/4 구 형태의 수실내부에서 수천개에 해당하는 모든 전열관으로 전열관 유지보수용 공구를 위치시킬 수 있고 노즐담 설치작업의 수행이 동시에 가능한 로봇을 개발하고, 3) 유지보수 작업에 사용되는 로봇 및 각종 장치를 방사선 피폭이 전혀 없는 지역에서 원격으로 제어하는 제어시스템의 개발이 주된 내용이다.

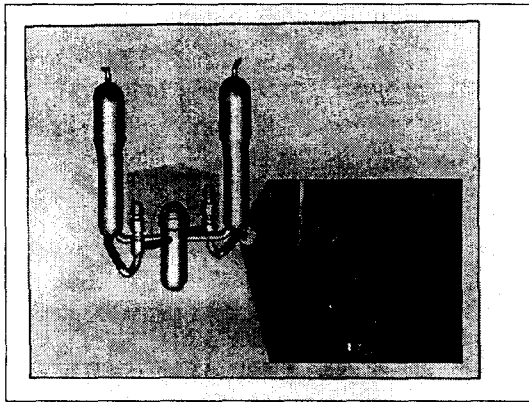


그림 1. 1 차 계통내 증기발생기 위치
Fig. 1. Steam generator in primary coolant loop

2.2 원격 로봇 시스템 개념설계 및 구성

원격 로봇 시스템의 주요 설계 개념은 다음과 같다.

- 방사선 피폭 : 모든 시스템의 사용방법 및 작업절차는 작업자의 방사선 피폭을 최소화하도록 설계 운용되어야 한다.
- 원격제어 : 증기발생기 유지보수 작업을 수행 또는 보조하는 로봇 및 각종의 장치는 방사선 피폭으로부터 안전한 원자로 격납용기 외부에서 원격으로 제어되게 한다.
- 로봇 공구의 설치 방법 : 로봇의 설치 및 유지보수 작업과 관련하여 작업자가 증기발생기 수실내부로 들어가는 상황을 배제한다. 로봇은 특수한 장치를 이용하여 수실외부에서 장착된후 자동으로 입실되게 한다.
- 운반 및 설치의 용이 : 증기발생기는 협소한 통로와 가파른 계단을 통과한 지점에 있기 때문에 사용되는 기구부의 무게 및 크기는 소형 경량화를 추구하고 필요에 따라서는 분리 체결가능하게 한다.
- 운용 및 사용의 용이 : 효율적인 MMI 환경을 구축하여 시스템 사용의 효율성과 활용도를 높이도록 한다.
- 내방사선화 : 수실내부에서 사용되는 모든 물질에 대한 방사선 영향 평가를 하고 특히 전자소자 및 화학 합성물질의 방사선 영향에 대한 대책을 수립한다.

증기발생기 수실내부에서 작업을 수행하는 로봇, 로봇을 수실내로 입실시키고 작업 완료후 퇴실시키는 입/퇴실 장치, 로봇에 부착되어 각종 작업을 수행하는 로봇의 기구학적 형태 및 제원은 3 차원 그래픽 시뮬레이션을 통하여 획득하였다. 협소한 공간을 통한 입/퇴실이 가능하고, 밀폐된 수실내부에서 모든전열관

의 접근과 노즐담의 동시수행이 가능한 기구부의 기구학적 설계는 최적화 이론 등을 이용하는 수학적 접근방법 보다는 그래픽을 통한 Heuristic 한 접근 방법이 더 효과적이라고 판단하였다. 전체 로봇 시스템은 다음의 부시스템들로 구성된다.

- 고하중용 로봇 : 입/퇴실장치에 지지되어 전열관 유지보수용 공구를 전열관에 위치시키고 맨웨이로부터 노즐담을 운반하여 노즐링상에 위치시키고 볼트를 체결하여 노즐담을 설치하는 유압 구동형의 6 자유도의 로봇.
- 입/퇴실장치 : 고하중용 로봇을 수실내부로 안내한후 유지보수 작업중 고하중용 로봇을 지지 또는 고하중용 로봇 자체에 선행 운동성을 부가해 작업 영역을 확장시키는 역할을 하는 장치.
- 노즐담 : 로봇에 의한 노즐담 설치작업이 용이한 3 조각으로 구성되는 경량의 담.
- 노즐담 운반 및 볼트 체결용 공구 : 고하중용 로봇의 마지막 관절에 부착되어 노즐담의 운반 및 볼트 체결에 사용되는 전기 구동형의 2 자유도의 장치.
- 모니터링 장치 : 수실내부의 작업상황을 관리제어부의 오퍼레이터가 감시할 수 있도록 카메라와 조명구로 구성된 장치.
- 원격제어 시스템 : 수실내부에서 작업을 수행하는 고하중용 로봇, 입/퇴실장치, 공구, 및 모니터링 장치를 구동하는 제어 시스템.
- 관리제어 시스템 : 오퍼레이터와의 인터페이스를 담당하고 원격제어 시스템으로 제어명령을 하달하고 수실내부의 상황을 관리 통제하는 시스템.
- 마스터 암 : 고하중용 로봇의 마스터/슬라이브 제어용 소형의 6축 힙반향형 로봇.

3. 로봇 시스템 기구부 개발

3.1 고하중용 로봇 개발

로봇의 기구학적 제원은 3 차원 그래픽 시뮬레이션 과정을 반복하면서 결정하였다. 기구학적 제원을 구하는데 있어서 주요점을 둔 것은 1)수실내부로의 입실의 용이성, 2)전열관 및 노즐담 설치작업의 동시 수행 가능성, 3)제작의 용이성이었다. 원자로 격납용기로부터 증기발생기까지의 운반을 고려하여 로봇의 기구부가 두 부분으로 분리 체결되는 구조를 갖도록 하였다. 노즐담을 경량화하여 한 조각의 무게가 20 Kg 을 초과하지 않도록 설계하였으나 전열관 유지보수용 공구의 무게를 고려하여 최대가만 중량이 60 Kg이 되도록 하였다. 또한 노즐담의 설치 작업에 필요한 노즐담 운반용 공구, 볼트 체결용 공구 및 전열관 유지보수용 공구들의 교환이 증기발생기 외부에서 작업자에 의해 교체될 수 있도록 설계 요건을 설정하였다. 이상의 기본적인 요건을 만족하도록 설계된 로봇 기구부의 상세 설계 내용은 다음과 같다. 6 자유도의 Base-Shoulder-Elbow-Pitch-Yaw-Roll로 구성되는 직렬 관절형 구조이며 Shoulder 와 Elbow 사이의 링크가 분리 체결 가능하다. 자중 대 가반중량을 고려하여 유압 구동형을 채택하였으며 Gerotor 를 사용한 마지막 관절을 제외한 5 개의 회전 관절은 모두 베인 액츄에이터를 사용하였으며 로봇의 제어성을 높이기 위하여 베인 액츄에이터의 회전자와 고정자 사이의 마찰력이 최소화 되도록 쉘의 재질을 선정하였다. 링크 재질은 부식과 내방사선을 고려하여 Titanium 소재를 사용하였다. 유압 펌프, 슬레노이드 밸브, 서보 밸브, 및 베인 액츄에이터로 구성되는 유압계를 설계하였다. 다음 표 1 은 각 회전 관절에 사용된 액츄에이터의 형태, 3000 psi 압력시 관절의 토오크치, 관절 회전 범위, 및 회전각 감지 센서를 나타낸다.

표 1. 액츄에이터의 형태/토크/회전 범위/회전각 센서
Table 1. Actuator type/torque/motion range/position sensor

관절	형태	토크	운동범위	회전각 센서
Base	배인	1600 ft-lb	270 도	리졸버
Shoulder	배인	1600 ft-lb	270 도	리졸버
Elbow	배인	890 ft-lb	270 도	리졸버
Pitch	배인	412 ft-lb	180 도	리졸버
Yaw	배인	412 ft-lb	180 도	리졸버
Roll	Gerator	50 ft-lb	연속회전	리졸버

힘 반향 매스터/슬레이브 제어를 목적으로 마지막 관절부의 끝단에 6 각 힘/토크 센서를 부착하였으며 외부 제어기와 인터페이스를 간략화하기 위하여 DSP 보드를 Elbow 관절과 Pitch 관절 사이의 링크내에 내장하여 서보밸브 제어 명령, 관절 회전각, 관절 압력, 및 힘/토크 값 등의 로봇의 서보 제어에 필요한 모든 데이터가 단일화된 디지털 데이터 전송 선로(RS 422)를 통하여 전송된다. 그림 2 는 제작이 완료된 고하중용 로봇의 외형을 나타낸다.

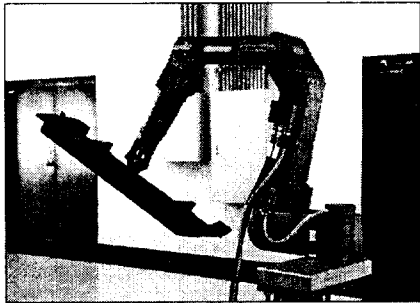


그림 2. 제작된 고하중용 로봇
Fig. 2. Assembled hydraulic robot

노즐땀 운반 및 볼트 체결용 공구는 각각 2 자유도 메카니즘으로 고하중용 로봇의 마지막 관절의 끝에 유압으로 구동되는 공구 잠금 장치를 구동하여 장착 또는 탈착된다. 노즐땀의 운반에 필요한 파지 기능과 볼트 체결에 필요한 기능 외에 여분의 관절을 갖는 것은 노즐땀의 운반과 볼트 체결 작업의 용이성을 부가하기 위함이다. 모든 관절은 서보 모터와 하모닉 드라이브로 이루어져 있으며 마지막 관절의 중앙에는 소형의 CCD 카메라를 부착하여 노즐땀의 회수시와 볼트 체결시 매스터/슬레이브 제어에 필요한 영상 정보를 전송할 수 있게 하였다. 그림 3 과 그림 4 는 각각 노즐땀 운반용 공구와 볼트 체결용 공구의 외형이다.

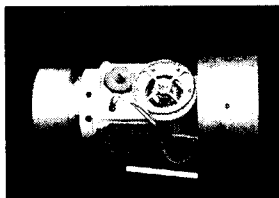


그림 3. 노즐땀 운반용 공구
Fig. 3. N/D grasping tool

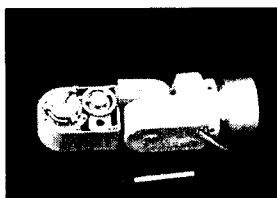


그림 4. 볼트 체결용 공구
Fig.4. N/D bolting tool

3.2 입/퇴실장치 개발

입/퇴실장치는 고하중용 로봇의 수실내부로의 자동 입실 및

지지역활을 하며 로봇 베이스에 선형 운동을 부가하여 전열관 관련 작업과 노즐땀 설치 작업을 가능하게 한다. 입/퇴실장치는 맨웨이 후렌지의 볼트홀을 이용하여 고정되며 운반과 설치가 용이하도록 두 부분으로 분리가능한 2 자유도의 메카니즘으로 설계제작되었다. 그림 5 는 입/퇴실장치의 기구학적 모델로 그림의 F-E-D 로 구성되는 선형 가이드부와 H-A-B-C 로 구성되는 회전가이드부가 D 지점에서 분리 체결된다. 회전 가이드부는 B-C 의 스크류와 너트의 직선운동을 이용한 링크지 메카니즘으로 F-E 상에 위치하고 있는 로봇을 수실 내외로 유도한다. 선형 가이드부는 단순히 볼스크류와 너트만으로 구성되며 있으며 F 지점에 지지용 다리가 부착되어 있다. 기구부의 경량화를 위하여 CFRP 재질을 선정하고 유한요소 해석을 토대로 상세설계를 하였다. 그림 6 은 증기발생기에 부착된 입/퇴실장치의 외형을 보여준다.

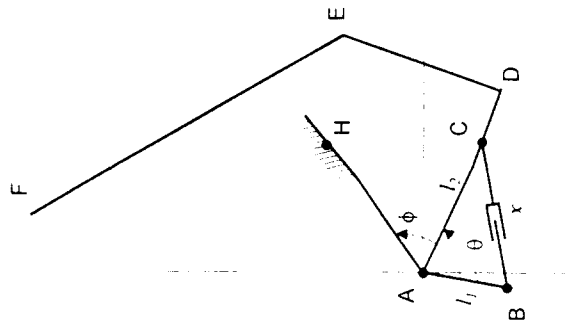


그림 5. 입/퇴실장치의 기구학적 모델
Fig. 5. Kinematic model of the installation/removal device

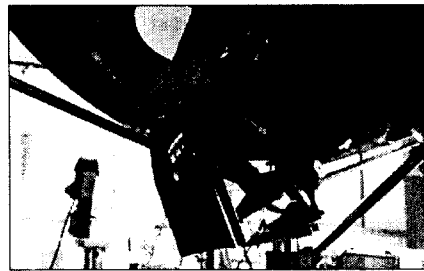


그림 6. 증기발생기에 부착된 입/퇴실 장치
Fig. 6. Installation/removal device mounted on S/G

3.3 힘반향 주조작기 개발

힘반향 주조작기는 취급하는 오퍼레이터의 부담을 경감시키고 반향되는 힘의 감도를 높일 목적으로 소형 및 경량형으로 설계하였다. 힘반향 주조작기의 주요 특성인 역구동성을 향상시키기 위하여 고강성 케이블을 이용하여 서보모터의 동력을 각 관절로 전달하는 방법을 채택하였다. 기구학적인 형태는 3 자유도의 위치결정부(Regional structure)와 3 자유도의 자세결정부(Orientalional structure)로 구성되는 6 자유도의 메카니즘이다. 위치결정부는 직렬 회전 관절형태이고 자세결정부는 Gimbal 의 구조로 되어있다. 위치 결정부의 각 관절은 케이블에 의한 2 단 감속이 이루어지며 최종 감속비는 16:1 이다. 자세 결정부의 각 관절은 감속비 76:1 의 평치차와 서보모터가 일체가 된 구조이다. 다음 그림 7 은 제작된 힘 반향 주조작기의 외형을 보여준다.

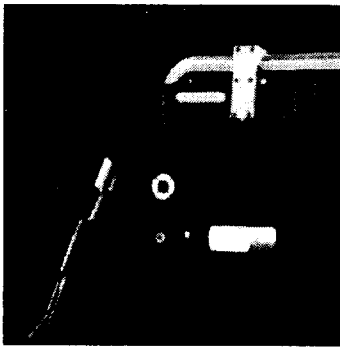


그림 7. 제작된 힘반향 주조작기
Fig. 7. The force reflecting master arm assembly

4. 원격 제어시스템 개발

원격제어 시스템은 증기발생기 부근에 위치하여 고하중용 로봇, 입/퇴실 장치, 노즐담 운반용 공구, 볼트 체결용 공구, 및 모니터링 장치를 원격에서 제어하는 역할을 담당한다. 관리제어 시스템으로부터 로봇 및 각 장치의 구동 명령을 하달 받아 필요한 작업을 수행하고 원격지의 상황을 관리제어부로 전송한다. 전체 제어 시스템은 관리 제어 시스템과 원격제어 시스템으로 구성되며 두 시스템 사이의 정보는 TCP/IP socket 을 이용하여 교환된다. 원격 제어시스템은 VME 버스를 채택한 embedded 제어기로 68040 CPU 를 탑재한 한 개의 시스템 제어기, 고하중용 로봇내부의 DSP 보드와의 인터페이스용 보드, 입/퇴실장치 등의 전동구동 장치의 제어용 8 축 서보 제어기로 구성된다. 원격 제어 시스템의 시스템 제어기에는 VxWorks 운용체제를 탑재하였다. VxWorks 운용체제상의 어플리케이션 프로그램은 크게 2 개의 태스크와 1 개의 인터럽터 루틴으로 구성되어 있다. Socket 을 통하여 관리제어부의 명령을 전송받고 명령을 해석하여 적절한 제어 드라이브를 선택하는 태스크와 관리제어부로 데이터를 전송하는 태스크가 있으며 인터럽터 루틴은 고하중용 로봇의 서보 제어를 위해서 필요하다. 다음 그림 8 과 그림 9 는 원격제어 시스템의 구성도와 이를 포함하는 전체 제어 시스템의 구성도이다.

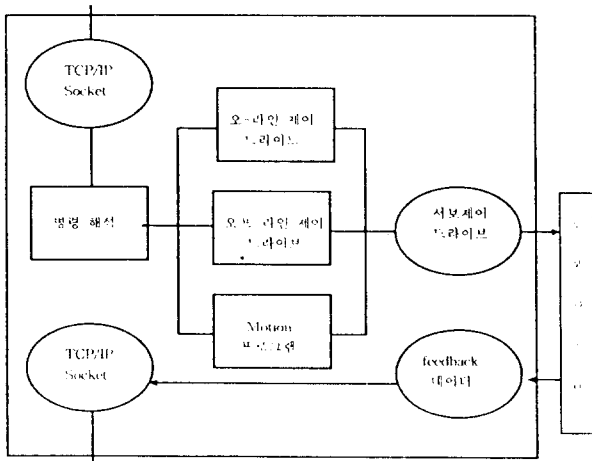


그림 8. 원격 제어 프로그램 구성도
Fig. 8. The configuration of software in remote controller

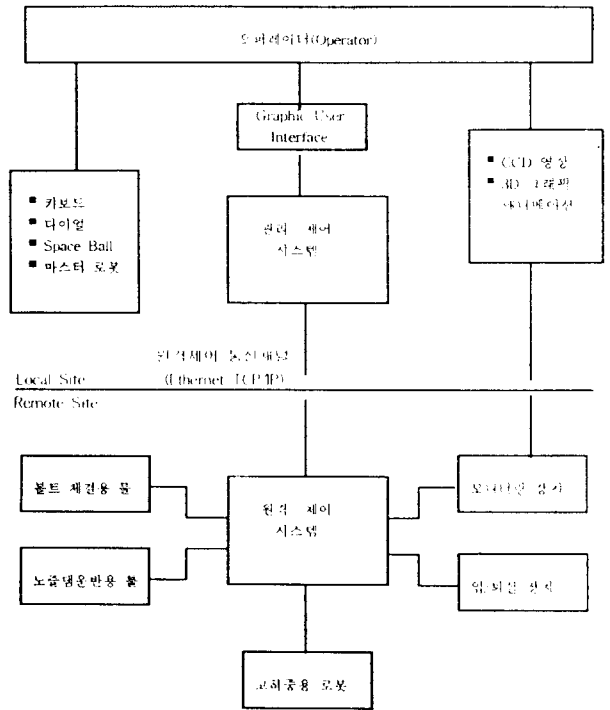


그림 9. 증기발생기 유지보수용 로봇 제어 시스템
Fig. 9. Robot control system for S/G maintenance

5. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소의 증기발생기 유지보수중 고방사선 피폭이 초래되는 노즐담 설치 작업을 무인화 하고 아울러 전열관의 유지보수 작업도 가능하게 하는 원격 로봇 시스템을 개발하였다. 증기발생기의 특수한 구조와 상황을 고려한 전체 시스템의 설계 요건과 개념설계를 수행하고 3 차원 그래픽 시뮬레이션을 통하여 설계 개념과 유지보수 작업의 타당성을 검증하였다. 6 자유도로 구성된 유압 구동형의 원격 로봇과 노즐담의 유지보수 작업에 필요한 공구의 설계를 완료하였으며 특수한 형태의 로봇 입/퇴실장치를 개발하여 고하중용 로봇의 설치와 작업을 용이하게 하였으며 원격제어에 필수적인 힘반향형 6 축의 주조작기를 개발하였다. 관리제어 시스템과 원격제어 시스템으로 구성되는 제어 시스템의 개발을 완료하였다.

참고문헌

- [1] J. Lochard, "Cost Effectiveness of Robotics and Remote Tooling for Occupational Risk Reduction at Nuclear Facilities", IAEA-CN-49/44.
- [2] White, J.R., et al., "Evaluation of Robotic Inspection Systems at Nuclear Power Plants", U.S. Nuclear Regulatory Commission Rep., NUREG/CR-3717, 1984.
- [3] J.R. White, Demonstration esting of a Surveillance Robot at Brown Ferry Nuclear Plant, Report No. NUREG/CR-4815, 1987.
- [4] G. Bruder Muller, "The Nuclear Emergency Service Company in the Federal Republic of Germany," IAEA-SM-316/43, pp. 541-551, 1972.