

핵연료 교환기 원격 램 구동장치 개발

Remote Controlled RAM Operating Device of Fuel Exchange Machine

서용칠, 최창환, 신호철, 김승호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수형 원자력발전소의 원자로에서 정상운전 중에 이루어지는 핵연료 교환 작업을 수행하는 핵연료 교환기에는 가동 중에 오작동으로 인하여 정상적인 자동 운전이 어려운 비상시를 대비하여 수동 조작기가 부착되어져 있다. 그러나 발전소가 가동 중에는 작업자가 수동 조작기에 접근하기가 어려워져 재가동을 위한 작업에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 비상시에 원격으로 수동 조작하는데 이용하기 위하여 핵연료 교환기 원격 램 구동장치를 개발한다. 장치는 램 및 클러치 구동부를 구동하기 위한 로봇 작동기와 로봇 작동기를 수동 조작부까지 올려주는 마스트 장치와 원격 카메라 및 제어 장치로 구성되어 있다. 작업자는 원격에서 카메라 영상을 보면서 수동 조작 작업을 수행하기 때문에 빠르고 안전하게 작업할 수 있다.

Abstract

A reactor fuel handling machine that exchanges the reactor fuels in a pressurized heavy water reactor (PHWR) as a normal operation has a manual manipulator to drive the machine in an emergency situation such as sticking of the automatic driving system. However, when the reactor is on operation, the workers cannot approach to the manual manipulator, which prevents the normalization of the operation. This paper presents a remote controlled robot for driving the reactor fuel handling machine manually. The robot is composed of a manipulator for driving the RAM and clutch driver, the mast mechanism for the robot to reach the manual manipulator, remote camera, and control systems, and so on.

1. 서론

일반적으로 가압중수로는 중수를 냉각재와 감속재로 사용하는 원자로로, 2-5%의 고농축 우라늄을 사용하는 경수로(가압경수로 및 비등경수로)와는 달리 농축하지 않은 천연 우라늄(U-235의 비율이 0.7%)을 사용하도록 개발되었으며, 냉각재와 감속재로 사용되는 중수는 일반적인 물(輕水)에 비해 중성자를 거의 흡수하지 않으므로(즉 중성자 손실이 작음) 천연 우라늄을 사용한 원자로의 설계가 가능하였다. 그러나 천연 우라늄을 사용하다 보니 원자로가 일정 기간 운전한 후에는 임계 상태를 유지하기가 어려워지는 특성이 있어, 새로운 핵연료의 공급이 이루어져야 한다. 이에 정상출력 운전 중에도 핵연료 교환기에 의해 연료 교환이 가능하도록 했다. 이러한 운전중 연료 교환(On-Power Refueling)은 핵연료 교환을 위하여 발전소를 정지하지 않아도 되므로 가동률을 높일 수 있는 장점을 구비하고 있다. 가압중수형 원자로는 일반적으로 칼란드리아(Calandria)라고 불리는 원통형 용기로서 수평 방향으로 설치되어 있으며, 칼란드리아 내에는 수백 개의 압력관(Pressure Tube)들이 역시 수평방향으로 관통하고 있고, 핵연료는 집합체(Fuel Bundle) 형태로 압력관 안에 공급되며, 하나의 압력관 안에는 보통 12개의 핵연료 집합체가 공급되도록 구성되어 있다. 이와 같이 핵연료 교환시에 사용되는 핵연료교환기는 그림 1에 도시된 바와 같다.

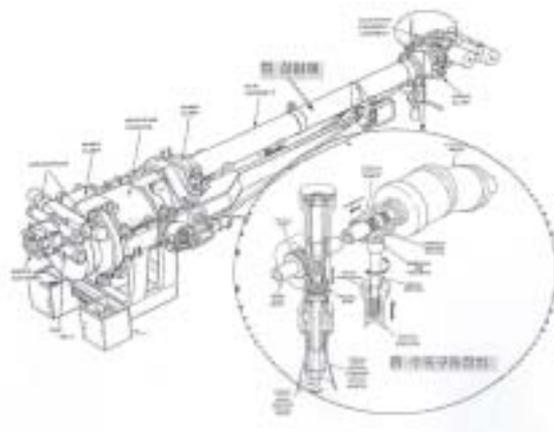


그림 1. 핵연료 교환기

한국원자력연구소의 원자력로봇랩에서는 칼란드리아 육안 검사용 자동 마스트 장치를 개발한 사례가 있다[1,2,3]. Clark masts co. ltd.에서는 안테나를 세우기 위한 공압으로 구동되는 군용 마스트 장치를 개발하였다[4]. 앞서 개발한 전례는 비교적 저하중의 장치를 위한 마스트 장치이다.

본 논문에서는 핵연료 교환기가 부품의 결함 및 기계의 결함이 발생하여 칼란드리아(Calandria) 압력관과 연결된 상태로 멈추면 수동조작에 의해 핵연료 교환기를 조작하는

장치를 개발한다. 먼저 핵연료 교환기를 원격조작하기 위한 기능에 관하여 연구하였다. 기술개발 현황과 핵연료 교환기의 동작 메카니즘을 통하여 조작기부 개념 설계에 동작기능을 고려한 구성을 제시하고 상세설계를 하여 램 원격 조작기를 제작하였으며, 제어기를 구성하여 실험을 하였다. 개발 된 장치의 실험은 핵연료 교환기 램 드라이브 기어박스 어셈블리의 실 치수 목업을 제작하여 실험을 수행하였다.

2. 핵연료 교환기의 수동 조작

핵연료 교환기는 일측단에 핵연료 집합체를 포함하여 칼란드리아 압력관 플러그 등을 저장할 수 있는 매거진부와 핵연료를 삽입/분리하는 램 집합체로 구성되어 있으며, 램 집합체는 유압모터 등의 구동수단에 의해 헬리컬기어, 워엄기어 등 다수개의 기어를 통하여 필요 기능의 램 축을 선택하여 작동시켜 칼란드리아 압력관과 연결/고정/분리되도록 하며 칼란드리아 압력관을 막아주는 플러그를 해체/설치할 수 있고, 램 구동에 의하여 핵연료 다발을 삽입/분리하는 등의 기능을 가지고 있다. 핵연료 교환기는 별도의 위치이동 구동수단 및 다수개의 기어작동에 의해 칼란드리아(Calandria) 압력관에 연결하고 핵연료를 교환하도록 되어있다. 이와 같은 작업을 수행하는 핵연료 교환기는 브릿지와 수직 컬럼을 이용하여 위치이동 구동수단으로 이동하여 칼란드리아(Calandria) 압력관에 연결하고 핵연료를 교환하도록 되어 있어, 부품의 결함 및 기계의 결함 발생 시 구동력이 핵연료 교환기로 전달되지 못하게 될 경우, 칼란드리아(Calandria) 압력관에 연결된 상태로 멈추게 된다. 이때에 원자로 전면 바닥 하부에 형성되어 있는 지하에서 플러그 제거하고, 플러그 홀을 통해 지하실에서 장치를 이용하여 수작업에 의해 핵연료 교환기를 작동시킴으로써, 칼란드리아 압력관과 핵연료 교환기를 분리하여야 한다. 즉, 핵연료 교환기 램 집합체의 후단부에 위치하는 램 드라이브 기어박스 어셈블리의 램 구동축과 클러치 구동축을 램 구동작업공구인 육각소켓과 클러치 구동 회전공구로 사용자가 수작업에 의해 삽입한 후, 이를 수동으로 회전 작동하여 핵연료 교환기의 이상으로 인해 고정된 칼란드리아 압력관과 핵연료 교환기를 분리한다.

3. 램 수동구동 조작기 분석

현재 핵연료 교환기의 이상이 발생하여 핵연료 교환기가 칼란드리아(Calandria) 압력관에 연결된 상태로 작동이 되지 않을시, 원자로 전면 바닥에 형성되어 있는 플러그 홀을 제거하고, 플러그 홀을 통해 플러그 홀 하부의 지하실에서 수작업에 의해 핵연료 교환기를 작동시킴으로써, 칼란드리아 압력관과 핵연료 교환기를 분리하였다. 즉, 그림 2에 도시된 형상을 한 수동 램 구동장치를 이용하여 핵연료 교환기 램 집합체의 후단에 위치하는 램 드라이브 기어박스 어셈블리의 램 구동 삽입부와 클러치 구동 삽입부내로 진입시켜

동작한다. 각각의 구동부에 맞는 공구를 상·하 이동이 가능한 막대형의 파이프 상단에 램 구동작업공구인 육각소켓 및 클러치 구동 회전공구를 교환/장착하고 작업자가 수작업에 의해 삽입한 후, 이를 수동으로 회전 작동하여 핵연료 교환기의 이상으로 인해 연결된 상태의 칼란드리아 압력관과 핵연료 교환기를 분리하고 있다.

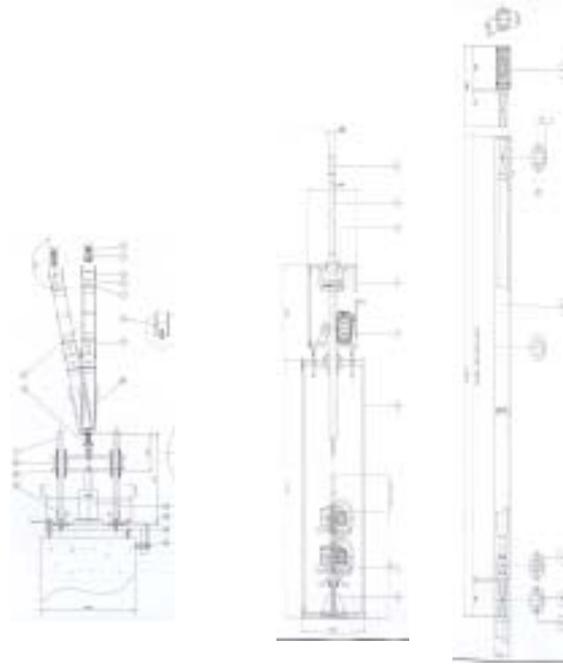


그림 2. 월성 1, 2발전소 핵연료 교환기 램 수동구동장치

그러나, 램 드라이브 기어박스 어셈블리 내로 램구동 작업공구를 삽입하여 칼란드리아 (Calandria) 압력관과 핵연료교환기를 분리하기 하기 위해서는 먼저, 핵연료 교환기의 유압 구동수단과 램구동축의 연결관계를 해제하는 클러치를 구동한 후, 램 구동축의 헬리컬 기어와 램 수동작동축의 헬리컬기어를 치합시키고, 램 수동작동축으로 치합된 헬리컬기어를 구동시켜야 하는 2중축 구조로 이루어진 램 구동부가 있어 작업의 애로점이 많다. 이와 같은 작업은 지하실에서 칼란드리아까지의 높이가 약 10~16m 임을 감안할 경우, 사용자가 육안에 의해 램 드라이브 기어박스 어셈블리 내로 램 구동작업공구를 정확하게 진입시키기가 어렵다. 또한, 램 드라이브 기어박스 어셈블리의 램 구동 삽입부와 클러치 구동 삽입부는 교환기 하부에 서로 다른 위치와 높이로 설치되어 있어, 각각의 공구를 필요에 따라 교체하여 이용할 경우, 매번 정확한 위치파악이 곤란하고 수작업을 행할 경우, 한번의 작업으로 처리할 수 없다. 핵연료 교환기를 수동조작 하는데 최대 약 80 피트-파운드의 힘이 소요되어 다수의 작업자가 동시에 작업해야 하는 불편함이 있으며, 작업공구와 핵연료 교환기의 충돌로 인하여 기기 파손 및 고장의 위험성이 있는 등 여러 가지 문

제점이 있었다. 이와 같은 수동조작의 어려움과 문제점을 해결하기 위하여 전동구동방식을 채택하여 원격 조장이 가능한 핵연료 교환기 원격 램 구동장치를 개발하였다.

표 1에는 램 구동장치의 개발을 위한 적용 사항을 나타내며, 이를 원격 램 구동장치의 설계에 반영하였다.

표 1. 원격 램 구동장치 설계 고려사항

구분	항목	내용
구조적 문제	원자로 구조물	이용 가능한 구조물 분석
	핵연료 교환기	램 구동부의 주변장치 분석
	방사선 환경	원자로 가동 중 방출 방사선 준위
시스템 구성	클러치 구동	유압 모터와 연결된 램축을 수동 조작으로 전환
	램, 매거진 구동	램 조작, 매거진 구동축 조작
	틸트부	램 장치가 수직자세를 유지하고 일정 반경 내에서 수평 이동 및 회전
	마스트	램 구동장치, 틸트부를 상.하 이송
	수평 조절장치	전체 기구부의 수직자세가 유지되도록 레벨 조정

4. 핵연료 교환기의 원격 램 구동장치 개발

4-1 핵연료 교환기 램 수동구동 조작 순서

(1) 클러치 구동조작

램 및 매거진 수동조작을 하기 위하여, 가장 먼저 유압모터에 의해 작동되도록 램축과 연결되어진 클러치를 조작하여 유압모터 축과 분리하여 수동조작이 되는 위치로 클러치 조작 축을 동작한다. 클러치 조작 축을 작동시키기 위해서는 클러치 조작공구를 클러치 조작 축에 형성된 홈에 진입시킨 후 클러치 조작공구를 20°회전하여 아래 방향으로 잡아당기고 다시 180°회전시킨 후 클러치 조작공구를 위 방향으로 놓으면 램구동의 수동조작이 가능한 상태가 된다.

(2) 램 수동구동 조작

램 수동구동 조작은 B램 모듈과 L램 모듈로 구성되어 있어 각각의 동작에 의하여 핵연료 교환기의 동작 기능에 사용한다. 핵연료 교환기의 램축 구동을 위해서는 램 구동 조작축을 램축에 형성되어 있는 헬리컬기어와 연결하는 헬리컬기어가 구성된 헬리컬기어 이송 중공축과 동일축 상에 램 구동 조작축으로 구성되어 있다. 먼저 헬리컬기어 이송 중공축을 회전 조작하여 헬리컬기어를 치합시킨 후 램 구동 조작축을 동작하여 램축을 구동하여 원하는 작업을 수행한다.

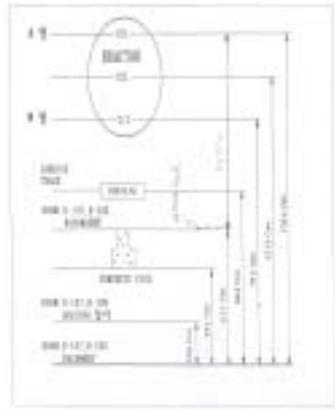
(3) 매거진 수동구동 조작

매거진 수동구동은 램 구동 조작공구를 사용하여 조작이 가능하다. 램 구동 조작공구를 매거진 구동축에 결합하여 위로 밀어 올린 후 회전시켜 매거진을 구동한다.

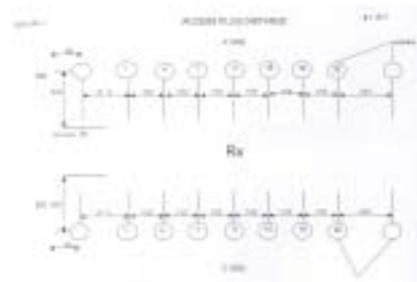
4-2 핵연료 교환기 원격 램 구동조작과 관련된 구조 요건

핵연료 교환기의 원격 램 구동장치를 개발하기 위하여, 다음과 같은 주변의 구조물과 환경에 따른 영향을 받는다. 이에 따라 기존의 구조 및 장치에 간섭이 없도록 램 구동장치를 개발하여야 하므로 주변 환경 요인들을 분석하였다.

- 원자로 주변 구조물 형태와 활용 가능한 구조물 분석.
- 핵연료 교환기의 램 수동구동부에 대한 기기 구성 분석.
- 램 구동에 대한 작업 절차 분석.
- 개발 된 램 구동장치의 동작실험을 위한 방법 구성.

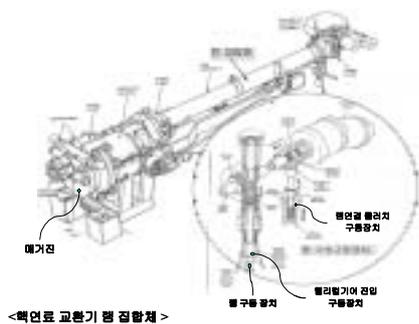


(a)



(b)

그림 3. (a) 중수형 원자로 건물구조 (b) 원자로 바닥 플러그홀 위치



(a)



(b)

그림 4. (a) 핵연료 교환기 램 수동 구동부의 각부 명칭 (b) 사진

4-3 핵연료 교환기 원격 램 구동장치 설계 및 제작

핵연료 교환기 원격 램 구동장치는 작업자가 접근할 수 있는 원자로 전면 바닥의 지하실에서 원격제어에 의하여 동작되는 개념으로 설계하였다. 모든 구동 동력은 전동 구동 방식을 채택하여 제어가 용이하도록 하였다. 핵연료 교환기의 요구되는 기능별로 부분 동작하는 L램과 B램 수동구동부를 모듈별로 조작되도록 램 수동구동장치와 클러치 구동장치를 일체로 구성하여 구조적 강성이 증대되도록 하였다.

(1) 램 구동 및 클러치 구동 장치부 설계, 제작

핵연료 교환기 램 구동부는 특성상 이중축 구조로 배치되어 헬리컬기어 연결 구동축과 램 구동축이 일축선상에 있어 동시 구동을 하여야 조작이 가능하다. 그러므로, 헬리컬기어 연결공구 내부에 램 구동공구가 위치하는 핵연료 교환기 램 구동장치는 헬리컬기어 연결 구동축과 램 구동축이 함께 삽입되어 작동되도록 하였다.

클러치 구동장치는 전체의 회전 중심을 램 구동공구 축의 중심이 되는 램 구동부 지지파이프에 고정하여 항상 동일거리를 유지하며 회전하고, 클러치 구동공구가 클러치 구동축에 끼워져 동작되며 램 구동공구에서 발생하는 회전반력을 지지하는 구조로 설계, 제작하였다. 이렇게 함으로서 램 구동과 클러치 구동 작업이 한번의 접근으로 조작이 끝나도록 하여 작업의 효율을 증대시켰다.

매겨진 구동은 램 구동공구를 공동으로 사용한다. 램 구동장치는 핵연료 교환기의 램 구동부에 접근하여 핵연료 교환기의 부품 및 주변기기에 충돌 시 손상을 주지 않도록 스프링 완충장치를 도입하였다. 장치의 구동공구를 원하는 위치로 이동할 때 위치 파악이 가능하도록 레이저 포인트와, 작업을 수행할 때 카메라 관측이 가능하도록 하였다. 램 구동장치의 자체중량 감소를 위하여 경량/고강도의 소재(CFRP, FRP 등)를 사용하였다.

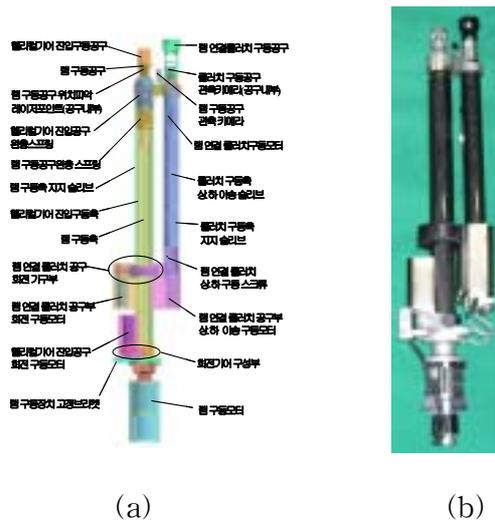


그림 5. (a) 램 구동 및 클러치 구동장치의 구조 (b) 제작품 사진

(2) 램 구동장치 틸트부 설계, 제작

틸트부는 상단부에 고정되는 램 구동장치를 지면과 항상 수직자세를 유지하며 측면 거리이동이 가능하도록 링크 구조를 갖으며, 중심 지지축으로 부터 램 구동장치 전체를 회전시키고, 원주방향으로 틸트링크 길이 만큼의 일정거리 이내의 목표 지점에 도달할 수 있는 구조로 설계하였다. 틸트링크 길이는 원자로 전면부 바닥에 형성되어 있는 플러그홀 중심 간격의 1/2이 되도록 하여 근접한 어느 위치의 플러그홀로 부터 램 구동장치가 핵 연료 교환기의 램 구동부에 다다를 수 있도록 하였다. 틸트부는 마스트 상단 고정브라켓에 조립된다.

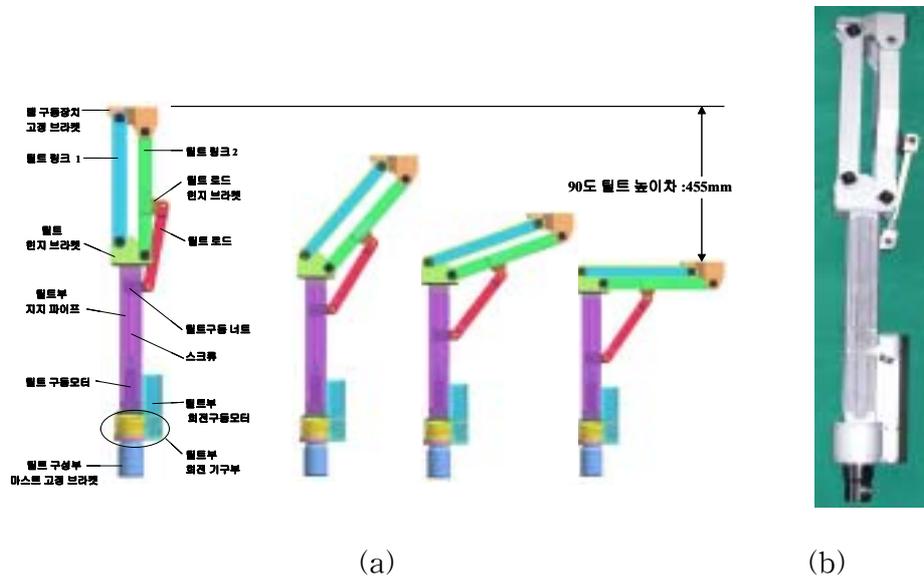


그림 6. (a) 램 구동장치 틸트부의 구조 (b) 제작품 사진

(3) 원치 구동형 텔레스코픽 마스트와 수평조절장치

텔레스코픽 마스트는 상단부에 틸트부와 램 구동장치를 장착하고 원자로 칼란드리아 압력관에 고정된 핵연료 교환기의 램 수동구동부 높이까지 승.하강 시키기 위한 운송수단이다. 마스트 하단부 플랜지를 수평조절장치에 고정하며, 수평조절장치에는 마스트의 자세를 지면과 수직자세가 되도록 조절하는 기능을 갖도록 하였다. 수평조절장치에는 스크류 레벨잭과 마스트 지지바로 구성하였다. 마스트의 구동은 전동 모터와 감속기를 이용하여 원치를 구동할 수 있으며 미세조정을 하기 위한 수동조작을 병행하여 동작 시킬 수 있도록 하였다. 표2는 원치 구동형 텔레스코픽 마스트 제원을 나타낸다.

표 2. 원치 구동형 텔레스코픽 마스트 제원

항 목	제 원
링크 수	12 개
링크 재질	FRP
초기높이	2 M
최대도달높이	14 M
구동방식	원치 구동
탑재 중량	50 (Kg_f)
총중량	80 (Kg_f)

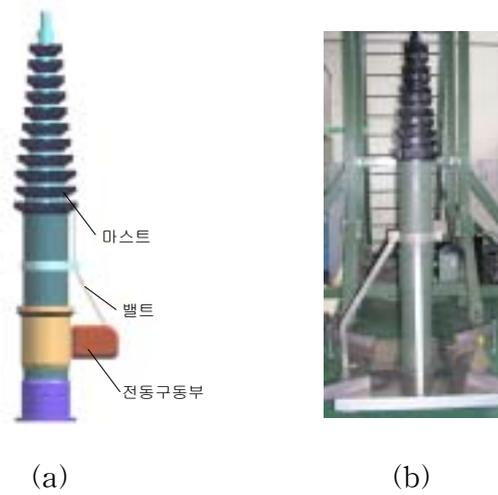


그림 7. (a) 마스트의 구조 (b) 제작품 사진

(4) 원치 구동형 텔레스코픽 마스트 응력해석

텔레스코픽 마스트에 램 구동장치 틸트부와 램 구동장치를 장착하고 램 구동작업을 하였을 때의 건전성을 평가하였다. 3차원 CAD를 사용하여 SOLID 모델링을 수행하고 선형 사면체 솔리드 요소(Linear tetrahedral element)를 사용하였다.

표 3. 텔레스코픽 마스트 재질(FRP)의 기계적 물성

항 목	내 용
Tensile Strength-Axial (σ_Y)	0.35 GPa
Tensile Strength-Radial (σ_Y)	0.75 GPa
Compression Strength (σ_Y)	0.23 GPa
Bending Strength (σ_Y)	0.26 GPa
Young's Modulus (E)	70,000 N/mm ²
Poisson's Ratio (ν)	0.3
Density (ρ)	2 kg/m ³

텔레스코픽 마스트의 수평조절 장치부가 바닥에 완전히 고정되어 있고 부품들의 연결 부위가 완전히 고정되어 있다고 가정하고 램 구동장치 자중(43kg)과 램 구동 시 최대 비틀림 응력(108 N.m)이 걸렸을 때의 응력 해석을 수행한 결과 자중상태에서 램 구동장치에 선단에 발생하는 비틀림 응력이 62 MPa(안전율 14) 발생하고 마스트에 비틀림 응력이 약 40 Mpa(안전율 약 20) 발생하였고, 램 구동상태에서 램 구동장치에 선단에 발생하는 비틀림 응력이 44 MPa(안전율 14) 발생하였다.

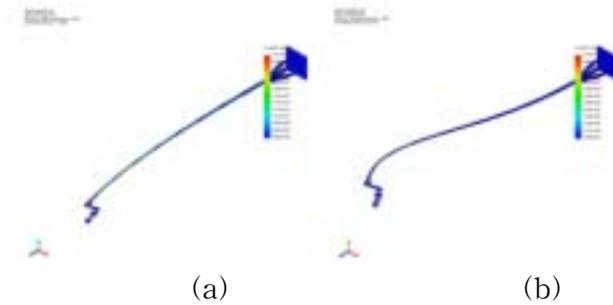


그림 8. (a) 자중에 의한 변형 (b) 램구동 시의 변형

5. 제어기 설계

5-1 로봇 제어기 시스템의 구성

핵연료 교환기 원격 램 구동장치를 원격에서 제어하기 위한 제어 시스템을 구성하였다. 로봇은 크게 램 구동 및 클러치 구동 장치부와 램 구동장치 틸트부, 텔레스코픽 마스트로 구성되어 있다. 램 구동 및 클러치 구동 장치부는 로봇 포지셔너 회전, 포지셔너 상하 이송, 포지셔너 회전, 헬리컬 연결기어 구동, 램 구동부로 이루어져 있고 램 구동장치 틸트부는 로봇 틸트와 로봇 틸트 회전부로 구성되어 있다. 텔레스코픽 마스트는 윈치를 구동하기 위한 고토크 모터로 이루어져 있다.

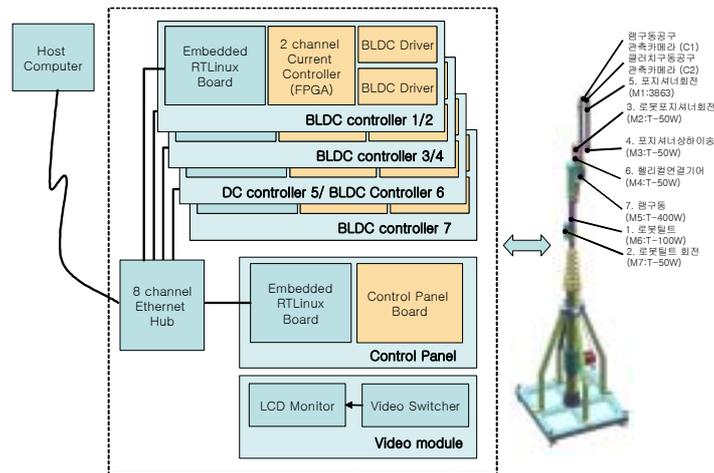


그림 9. 로봇 제어기의 구성

그림 9는 로봇 원격 제어기의 구성을 보여 주고 있다. 원격 제어기는 로봇의 각 축을 제어하기 위한 제어기와 사용자 인터페이스를 위한 제어반 회로와 카메라 영상을 표시하

기 위한 비디오 모듈로 구성된다. 원격제어기는 총 7축으로 이루어져 있고 그중에서 포지셔너 회전만 DC 모터로 구동되고 나머지는 Tamagawa사의 리졸버 부착형 BLDC모터로 구동된다. 원자로 전면부에서 작업하는 로봇이기 때문에 방사선에 강한 리졸버를 위치 센서로 사용하였고 리밋 센서도 자기형 리밋 센서를 사용하였다. 제어기는 원격에서 작업할 수 있도록 이더넷 통신을 통하여 명령을 받고 로봇의 상태 정보를 보낼 수 있도록 구성하였다. 제어반 회로는 로봇의 상태 정보, 즉 리밋 스위치의 상태와 오버 로딩 상태, 작동 상태 등을 표시하기 위한 회로로 구성되어 있고 사용자에게 보다 많은 정보를 제공하기 위하여 호스트 컴퓨터와 이더넷으로 통신할 수 있도록 구성하였다. 비디오 모듈은 총 4채널의 영상을 동시에 입력받을 수 있도록 구성하였다. 삼성전자에서 제작한 화면분할기를 사용하여 4개의 영상을 동시에 보면서 작업할 수 있다.

5-2 모터 제어기의 설계

로봇의 각 축을 제어하기 위한 모터 제어기를 제작하였다. 그림 10은 모터 제어기의 하드웨어 구성을 보여 주고 있다. 모터 제어기는 호스트 컴퓨터와 제어반과의 이더넷 통신을 담당하면서 모터의 속도 제어를 담당하고 있는 실시간 임베디드 리눅스 보드와 모터의 전류를 제어하고 센서 신호 처리를 담당하는 FPGA를 이용한 전류 제어 보드, BLDC 및 DC 모터의 구동을 위한 드라이버로 구성되어 있다.

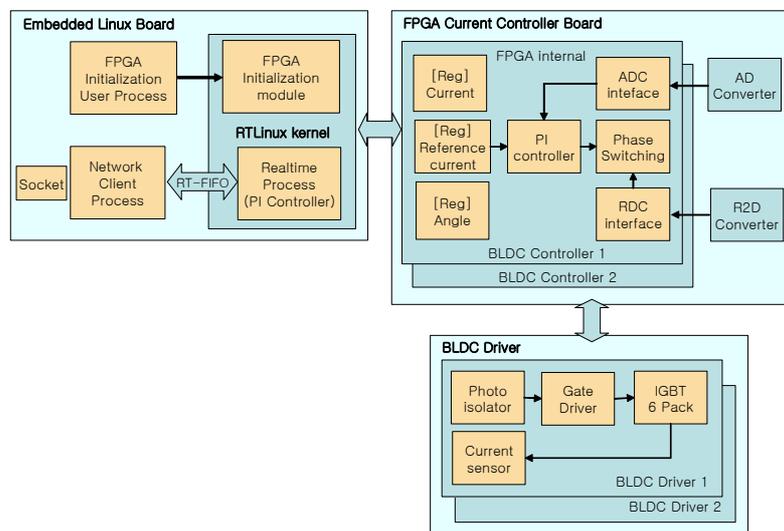


그림 10. 모터 제어기의 하드웨어 구성

실시간 임베디드 리눅스 보드[5]는 전원을 켜고 플래쉬 메모리에 저장되어 있던 FPGA 초기화용 모듈 프로그램[6]을 커널에 로딩하고 FPGA 초기화 프로그램을 실행한다. FPGA 초기화 프로그램은 FPGA 모듈 프로그램을 통하여 실시간 리눅스[7]의 부팅시

에 FPGA를 자동으로 초기화 하게 된다. FPGA의 초기화가 종료되면 실시간 리눅스의 커널이 리눅스의 커널에 로딩되고 실시간 작업을 수행하기 위한 기초 작업을 마치게 된다. 그림 11은 모터 제어를 위하여 수행할 실시간 작업의 구조를 도시한 것이다. 모터 제어 프로그램은 크게 실시간 커널 모드에서 수행되는 실시간 프로세스와 사용자 모드에서 수행되는 통신 프로그램으로 구성된다. 그림에서 Host controller는 사용자 모드의 이더넷 통신 프로그램[8,9]을 나타내고 있고 나머지 부분은 실시간 프로세스를 보여 주고 있다. 실시간 프로세스는 제어기의 핵심이 되는 부분으로써 사용자 프로세스와는 RT-FIFO를 통하여 명령을 전달 받고 PI제어기를 통하여 모터의 속도 제어를 25kHz 주기로 수행하게 된다.

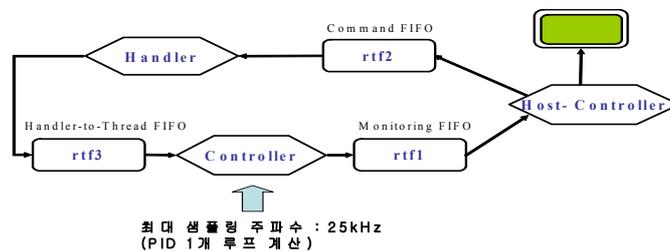


그림 11. 모터 속도 제어기의 실시간 리눅스 구현

FPGA를 이용한 전류 제어 보드는 임베디드 리눅스 보드에서의 실시간 작업의 부담을 줄이기 위하여 고속 제어가 요구되는 전류 제어 부분을 하드웨어적으로 구현한 것이다. AD 컨버터 (MCP3204)에서 모터의 상전류를 측정하여 PI 제어기를 통하여 전류 제어를 수행하고 리졸버-디지털 컨버터(AD2S90)에서 입력 받는 모터의 회전자의 위치 정보를 이용하여 모터가 모든 회전자의 위치에서 일정한 토크를 낼 수 있도록 스위칭 제어를 수행한다. FPGA를 이용할 경우 고속의 전류 제어기를 구현할 수 있고 부가적인 인터페이싱 회로를 칩 하나에 집적할 수 있기 때문에 제어기의 부피를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 소프트웨어로 쉽게 제어기의 구조를 바꿀 수 있기 때문에 개발 시간을 단축할 수 있다는 장점도 있다. DC 모터 제어기는 BLDC 모터 제어기에서 상스위칭만 달리하면 쉽게 구현할 수 있다.

BLDC 및 DC 모터의 구동을 위한 드라이버는 IR사의 IGBT를 사용하여 구현하였다. 토크 제어를 할 수 있도록 하기 위하여 전류 제어형 드라이버로 구성하였고 고전력을 구동할 수 있도록 IGBT를 사용하였다. 임베디드 리눅스 보드와 FPGA 전류 제어 보드와의 노이즈를 차단하기 위하여 photo isolator를 사용하여 전기적으로 절연하였다.

그림 11은 2축 모터 제어기의 제작된 사진을 보여 주고 있다. 제어기는 세 개의 보드를 적층하는 형태로 구성하여 부피를 줄였다.

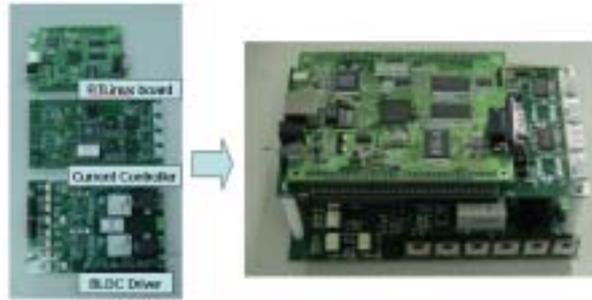


그림 12. 모터 제어기의 사진

그림 12는 로봇 제어반과 7축 로봇 제어기의 제작된 사진을 보여 주고 있다. 로봇 제어반은 각 축을 구동할 수 있는 스위치와 속도 및 토크를 제어할 수 있는 슬라이더로 구성되어 저있고 레이저와 조명을 온/오프 할 수 있는 스위치들로 구성되어 있다. 로봇 제어기는 그림 11의 모터 제어기 4개를 사용하여 구성하였고 이더넷 허브를 통하여 제어반과 호스트 컴퓨터와 통신 할 수 있도록 구성하였다.

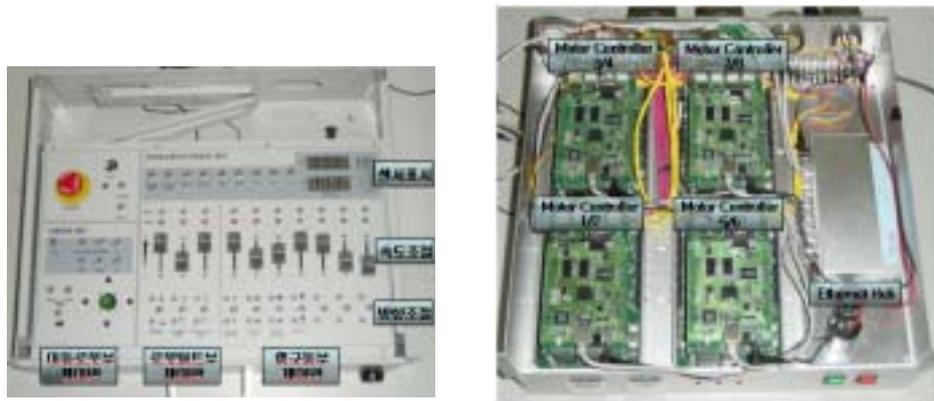


그림 13. 로봇 제어반과 로봇 제어기의 사진

6. 실험

6-1 핵연료 교환기 램 수동구동부 목업 설계, 제작

현장에서의 작업 상황 그대로 연구실에서 실험하기 위하여 목업을 제작한다. 그림 14는 현장에서의 작업 상황을 그래픽으로 표현한 것이다. 핵연료 교환기가 칼란드리아 상단의 핵연료 교환 작업 중 그림과 같이 정지하였을 경우 로봇은 지하실의 통로를 통하여 칼란드리아 전면부에 진입하여 수동 조작부를 구동시켜 주어야 한다. 그림 3에서 도시한 그림과 같이 칼란드리아 최상단의 압력관의 경우 대략 15m 정도를 접근할 수 있어야 한다.

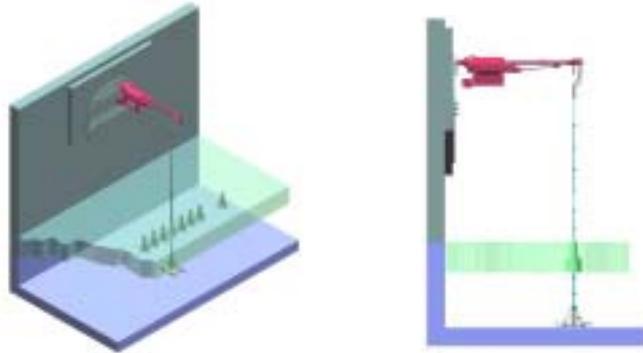


그림 14. 핵연료 교환기 원격 램 구동장치의 작업 도시도

개발된 원격 램 구동장치를 실험하기 위하여 L램과 B램 구동부를 모듈별로 핵연료 교환기의 수동구동부와 동일한 기능 및 구조를 갖는 설치수의 핵연료 교환기 수동구동부 목업을 설계, 제작하였다. 또한, 프레임부에 실물과 동일한 기능 및 구조로 구성된 핵연료 교환기 매거진 구동부를 구성하였고, 원자로 전면부 바닥에서 칼란드리아 압력관 최상단 열의 위치에 핵연료 교환기 램 수동구동부 목업부가 위치하도록 구조물을 구성하여 실험 목업을 설계, 제작하였다. 그림 15는 핵연료 교환기 램 수동 구동부의 목업과 제작된 사진을 보여 주고 있다.

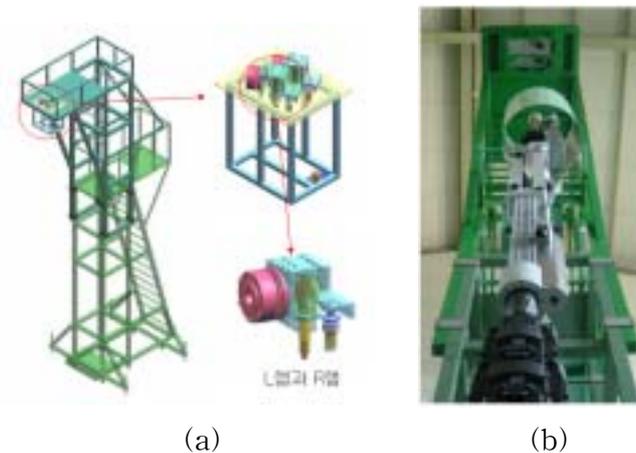


그림 14. (a) 핵연료 교환기 램 수동구동부 목업 (b) 목업과 로봇 실험 사진

6-2. 핵연료 교환기의 원격 램 구동장치 실험

제작된 목업을 이용하여 실험실에서 핵연료 교환기 램 구동장치의 실험을 수행하였다. 대략 램 수동 조작부를 조작하기 위하여 작업자는 발전소의 지하 통로로부터 작업을 시작하는 것으로 하여 작업하는 시나리오로서 실험을 수행하였다. 카메라를 통하여 원격에

서 모니터를 통한 영상을 보면서 작업을 진행 할 수 있기 때문에 기존에 개발된 수동 방식 보다 훨씬 정교하고 빠른 작업을 진행할 수 있고 로봇이 설치된 위치에서부터 원격지에서 작업을 수행할 수 있기 때문에 작업자의 피폭량을 최대한 줄일 수 있을 것으로 기대한다. 핵연료 교환기 램 구동장치의 실험은 제작된 목업 실험을 통하여 장치의 성능을 검증한 후 월성 원자력발전소 제1발전소 2호기에서 현장 실증실험을 할 예정이다.

7. 결 론

본 논문에서는 중수로형 원전 가동 중에 사용될 핵연료 교환기 램 구동장치를 개발하고 제어기를 구축하였다. 기존에 개발된 장치의 종류 및 제원을 통해 기술현황을 분석하였다. 핵연료 교환기 램 구동장치에 적합한 기구부의 동작구성을 검토하고, 장치의 모든 구동을 전동구동방식으로 채택함으로써 조작 및 제어가 용이하도록 하였다. 국내.외에서 핵연료 교환기 원격 램 구동장치 개발 및 응용이 전무한 상태에서 장치 개발을 위한 효율적 구동 메카니즘이 제시되었고, 작업자에게 사용이 용이한 장치개발의 타당성을 검증하였다. 기존방식에서 제시한 수동 조작 장치와는 달리 조작성의 효율화 및 제어를 통하여 장치의 사용 편리성을 증대시켜 작업자의 피로도를 저감시키고 작업의 안전성을 향상시켰다. 향후 이동로봇과 연계하여 중수로형 원전 가동 중 램 구동 및 점검로봇을 이용하는 통합 연구를 병행 추진하고 있다.

본 연구는 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 원자로 검사용 마스트, 1999-11-26, 53173, 한국, (특허99-65:한국)
- [2] 승하강 마스트용 링크 체결장치, 2000-12-09, 34495, 한국, (특허00-78:한국)
- [3] 나선홈을 응용한 승하강 마스트 특허 제 0235184 호
- [4] Clark Masts co. ltd., Air operated SCAM Series, <http://www.clarkmasts-usa.com>
- [5] 제이닷디엔티(주), "EZ Howto 매뉴얼" <http://www.falinux.com>
- [6] Alessandro Rubini, "Linux Device Drivers - 2nd Edition", OReilly, 2001
- [7] Victor Yodaiken, "The RTLinux Approach to Real-Time,", <http://www.fsmlabs.com>
- [8] 김치하, 이재용, "Unix Network Programming : Networking APIs, Sockets and XTI", 교보문고, 2002
- [9] 박재호, "IT Expert 임베디드 리눅스", 한빛미디어, 2002