

이동로봇을 이용한 원전 내부 감시점검에 관한 연구

김 창 회, 서 용 철, 조 제 완, 최 영 수, 김 승 호
한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
전화 : 042-868-2930

A Study of Nuclear Power Plant Inspection Tasks Using A Mobile Robot

Kim Chang-Hoi, Seo Yong Chil, Cho Jai Wan, Young-Soo Choi, Seungho Kim
Quantum Optics Lab., Korea Atomic Energy Research Institute
E-mail : chkim3@kaeri.re.kr

Abstract

In this paper, we presents the remote inspection activity with a mobile robot at the calandria face areas of the PHWR (pressurized heavy water reactor) nuclear power plants during full power plant operation.. The tele-operated mobile robot has been developed for this task. A 4 wheeled mechanism with the dual reconfigurable crawler arm has been adopted for the ease access to the high radiation area of calandria face. A specially designed extendable long reach mast attached on the mobile platform and the thermal image monitoring system enable human eyes to look into the calandria face. Application of robot will keep human workers from high radiation exposure and enhance the reliability of nuclear power plants.

I. 서론

일반산업현장에서 프로그램 되어진 순서에 따라 반복적인 작업에 주로 적용되던 로봇은 방사능 지역과 같은 위험한 환경에서의 작업, 우주공간이나 심해에서의 작업과 같이 사람이 접근할 수 없는 곳에서 인간을 대신하여 로봇이 작업을 수행하는 비제조업 분야로 활용 분야가 확대되고 있다[1].

비제조업분야용 로봇 중에서 가장 먼저 개발이 시작되었고 또한 폭 넓게 활용이 기대되는 분야는 원자력 분야이다[2]. 그러나 방사선의 노출, 고온, 장소의 협소함 등으로 인하여 로봇을 작업장소까지 도달할 수 있게 하는 방법이 용이하지 않아 이러한 문제점은 로봇을 원자력 분야에 활용하기에 큰 장애가 되었다.

본 논문에서는 정상가동중인 중수로형 원자력발전소의 칼란드리아 전면부에 투입되어 작업자를 대신하여 원격으로 점검감시 작업을 수행하기 위한 이동로봇을 설계 제작하였다. 또한 원전 내부의 작업환경을 고려한 로봇 제어부 및 이상부위 탐지를 위한 열영상 모니터링 시스템을 개발하였다.

II. 이동로봇 기구부

2.1 칼란드리아 전면부 작업환경

중수로형 원자력발전소의 칼란드리아는 380 개의 압력관이 수평 방향으로 설치되어 있으며 압력관 내에는 핵연료와 중수가 채워져 있다. 380 개의 압력관 양쪽 끝단에는 급수배관(Feeder Pipe)이 연결되어 증기발생기로 중수가 순환되도록 되어있다. 중수로형 원자력 발전소는 경수로형 발전소와 달리 정상가동 중인 상태에서 칼란드리아 압력관 내에 장착된 핵연료를 주기적으로 교환하여야 한다. 이러한 핵연료 교환이 정상적으로 이루어지지 않거나 방사능 물질 누수와 같은 문제가 발생

될 경우에 신속히 이상부위의 위치 및 상태를 파악하는 것은 발전소 안전성 및 효율성 측면에서 매우 중요한 일이다. 따라서 원자력발전소의 가동을 중지시키지 않은 상태에서 칼란드리아 전면부에 접근하여 이상부위 점검을 위한 로봇의 개발이 시급히 요청되고 있다. 그러나 칼란드리아 전면부에 로봇이 접근하기 위해서는 차폐문 및 차폐벽 개폐를 위하여 설치되어 있는 홈을 통과할 수 있어야 하며 최대 8 m까지 확장하면서 칼란드리아 전면부를 점검하기 위한 신축형 마스트를 탑재할 수 있어야 한다.

가동중인 발전소의 고방사선 구역에서 로봇을 활용하기 위해서는 로봇에 사용되는 전자 기계 부품의 방사선에 대한 영향을 평가하여 방사선으로 인한 오동작에 대한 대비를 하여야 한다. 기계부품의 경우 모터, 베어링 및 윤활유, 오일 등과 같은 유기물질 재료 등의 경우 방사선에 대한 영향을 평가하여 선정하여야 하며 전자부품의 경우 방사선 영향 평가를 수행하고, 방사선에 약한 부품은 내방사선 제품으로 교체되어야 하거나 내방사선화 하여야 한다.

2.2 이동부

칼란드리아 전면부에의 접근성을 고려하여 이동부는 가변구조 무한궤도형 압을 갖는 차륜구조 방식을 채택하여 설계하였다. 이동로봇의 투입장소인 칼란드리아 전면부에 도달하기 위해서는 방사선 차폐벽 가이드레일이 놓여진 폭 75 cm, 깊이 25 cm 의 길게 가로 놓여진 홈통을 통과해야 한다. 전체 무게 약 190 kg, 총 높이 180 cm의 이동로봇이 안정되게 이 홈을 통과할 수 있도록 4륜 바퀴형 이동시스템 전후면에 가변구조형 무한궤도 압을 부착하였다. 구동 휠의 중심거리는 바퀴의 크기를 고려하여 48 cm 이며 가이드 레일 홈을 통과하기 위한 무한궤도 압의 길이는 53.5 cm로 설계하였다. 양 측면의 전후 바퀴는 제인에 의하여 동력이 전달되도록 설계하였으며 바퀴동력축에 이중축 구조로 크로라 압의 동력이 전달되도록 하였다. 표 1은 이동부 주요 제원을 나타내며 그림 1은 설계된 이동로봇의 홈통과 시뮬레이션을 보여준다.

2.3 신축마스트

이동부에 탑재되어 칼란드리아 전면부의 감시 점검작업을 수행하는 감시점검장치를 상하 이동시키는 마스트는 칼란드리아 최대 높이인 8 m 까지 이송시킬 수 있어야 하며 최저 높이는 작업현장까지 접근하기 위하여 통과하여야 하는 서비스 구역 차폐문의 높이(2 m)에 제한을 받는다. 또 이동부에 부작을 위해서는 마스트의 직

표 1. 이동부 주요 제원

항 목	제 원
이동부 높이	400 mm
중 량	90 Kg
구동휠의 중심거리	480 mm
트랙의 펼친길이	1,550 mm

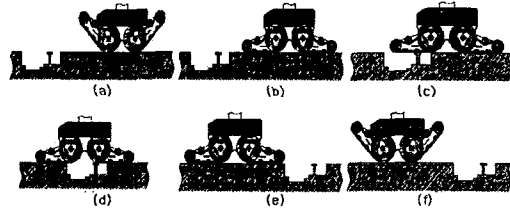


그림 3. 가이드 레일 통과 절차

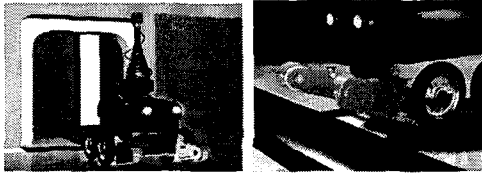
경이 제한을 받으며 감시 작업 시 로봇의 자세를 안정하게 유지하기 위해서는 마스트의 무게를 최소화 시켜야 한다. 현재 상용화된 장치들은 유압펌프, 공기압기, 강철띠 등과 같은 필수적인 부대장비들이 있어 이동로봇에 탑재하기가 불가능하며 점검장치의 최대 도달 높이가 3.2 m 이다. 이와 같은 여러 제한 요소들을 만족시키도록 나선 홈을 이용한 다단 신축형 구조의 마스트를 개발하였다. 신축형 마스트의 기본 구동방식은 스크류를 회전시켜 링크부가 이동하고 너트부가 스크류의 끝 부분을 이탈하면서 링크와 링크를 체결하는 방식이다. 표 2는 신축 마스트의 주요 제원을 보여준다.

표 2. 신축마스트 주요 제원

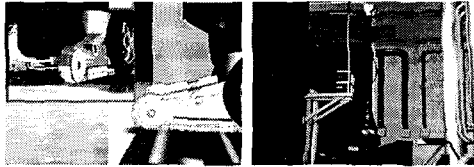
기 능	제 원
링크 길이	550 mm
링크 수	16 ea
압의 최저높이	1.2 m
압의 최고높이	8.0 m
중 량	29 Kg

신축마스트의 끝단에 장착된 점검 장치는 칼란드리아 전면부 점검 및 핵연료 교체장비의 운전상태를 육안 점검하기 위하여 CCD 카메라와 열영상 카메라로 구성되어 있다. 개발된 점검장치에 쓰이는 카메라는 일반 CCD 카메라를 사용하였다. 방사선에 취약한 일반 카메라를 사용하는 이유는 내방사선 카메라의 전체 길이와 중량이 마스트 끝단에 적용하기 부적절하며, 방사선이 방출되는 부위에서 일정거리를 유지한 지점에서 줌렌즈를 사용하여 점검부위를 관찰하게 되므로 방사선이 카메라에 미치는 영향을 최소화 할 수 있기 때문이다. 또한 카메라가 파손되었을 때에는 즉시 교체하여 점검임무를 수행하게 되므로 내방사선 카메라를 사용하는 것보다 경제적이다.

그림 2는 제작된 로봇의 외관을 보여준다. 그림 2은 설계된 이동로봇 제원의 타당성을 확인하기 위하여 칼란드리아 전면부 감시작업에 대한 그래픽 시뮬레이션 과정을 보여준다.



(a) 원자로 접근 (b) 차페벽 홈 통과(I)



(c) 차페벽 통과(II) (d) 전면부 감시

그림 2. 이동로봇 그래픽 시뮬레이션

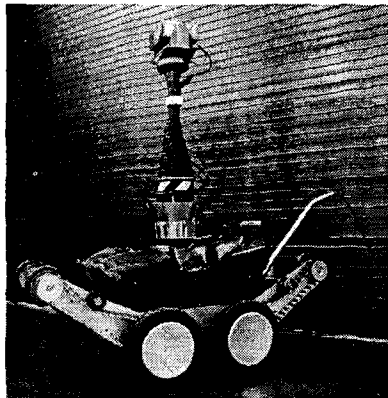


그림 3. 이동로봇의 외관

III. 로봇 제어부

3.1 원격제어부

원격제어부는 로봇내에 탑재되는 제어시스템으로 관리제어부의 명령에 따라 이동부, 신축압, 팬/틸트의 서보모터 제어, 릴레이 구동 및 디지털 입출력, 방사선 센서 데이터 처리 등의 기능을 담당한다. 관리제어부와 원격제어부는 RS422 방식으로 연결되며 로봇이 이상동작 시에는 비상 스위치를 이용하여 로봇을 안전하게 회수할 수 있는 수동조작 모드가 가능하도록 제어시스템을 구성하였다.

원격제어부는 UTMC사에서 INTEL 8051을 내방사화한 5962H563801QQX를 사용하였다. 다이오드, A/D 변환 IC, OP Amp, 멀티플렉서와 같은 소자의 경우는 내방사선 규격을 충족시키는 Mil Spec의 소자를 선정하였으며 그 외 TTL 소자, 메모리 소자는 1 Mrad 누적방사선량에서 동작할 수 있도록 제작된 내방사선 소자를 사용하였다.

3.2 관리제어부

원격작업용 이동로봇의 관리제어부는 작업자와 로봇내 원격제어부 간에 인터페이스 및 관리를 담당한다. 원격에서 이동 로봇을 제어하기 위한 제어패널은 크게 주 컴퓨터, 아날로그 및 디지털 입출력부, 로봇 조작부 등으로 구성된다. 로봇 조작부에서는 로봇의 정상적인 이동에 필요한 조작이나 마스터 조작, 마스터 카메라와 열영상 카메라의 조작 등이 수행되고, 비상시 로봇을 안전하게 운전하기 위한 수동 조작스위치들이 설치되어 있다. 운전원 연계화면에서는 운전원이 쉽게 로봇의 운전 상태를 인지할 수 있도록 각종 조작값을 그래픽으로 표시하였고, 조작부에 어떤 문제가 발생하였을 때 운전원 연계화면에서 터치패널과 마우스를 사용하여 로봇을 조작할 수 있도록 설계하였다. 그림 4는 개발된 이동로봇 관리제어부를 보여주고 있다.

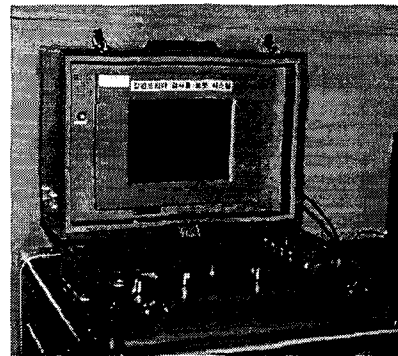


그림 4. 이동 로봇 관리제어부

정상운전 조작부에는 휠과 트랙의 속도와 방향 조작용 조이스틱, 마스터 카메라 조작용 조이스틱, 스테레오 카메라 조작용 조이스틱이 설치되어 있다.

Labwindow/cvi 5.0을 사용하여 개발된 관리제어 프로그램은 정상운전 조작부의 스위치나 조이스틱 변화값을 취득하여 로봇의 운전값으로 연산하고, 연산 결과를 시리얼 통신포트를 통해 로봇으로 전송하는 루틴으로 구성된다. 관리제어부 연계화면은 이동 로봇이

전방 또는 후방으로 움직일 때 운전원이 쉽게 인지할 수 있도록 제어 패널의 조작값을 동적으로 표시하여 운전원의 운전 오류를 감소시킬 수 있도록 하였다.

로봇이 작업도중 예기치 못한 오류로 인하여 비정상적으로 동작할 경우 가동중인 발전소에 영향을 미치지 않기 위하여 로봇을 안전한 곳으로 회수할 수 있어야 한다. 이러한 기능을 구현하기 위하여 로봇이 이상 동작시 제어반에서 작업자의 스위치 조작에 의하여 로봇에 탑재된 릴레이 회로를 직접 구동하여 로봇을 동작시킬 수 있도록 하였다.

3.2 점검감시 장치

칼란드리아 전면부의 중수누출과 같은 징후는 CCD 카메라로 육안감시를 하고 수증기 누출영역의 온도변화는 열영상카메라로 감시하기 위하여 신속형마스트 끝단에 감시점검 장치를 장착하였다. 감시점검장치는 적외선 열영상카메라와 CCD 카메라의 융합구조로써 열영상카메라와 CCD 카메라를 수평으로 배치하였다. 표 3은 감시점검 장치 주요 제원을 보여준다.

CCD 실영상으로 관측하면서 관측 영역에 열적 이상 상태가 발생할 경우에 열영상 카메라로부터 획득한 열영상을 CCD 실영상에 중첩을 시켜 효율적인 관측이 가능하도록 열영상 관측 프로그램을 개발하였다. 그림 5는 개발된 프로그램을 이용하여 측정된 칼란드리아 전면부 열 분포 화면을 보여준다.

표 3. 감시점검 장치 주요 제원

기 능	제 원
열영상 카메라 FOV	18.3°X 9.15°
CCD 카메라 FOV	14.59°X 10.97°
주시각	±70°

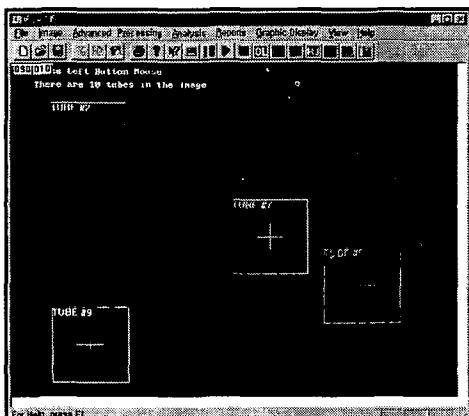


그림 5. 칼란드리아 전면부 열분포

V. 결론

국내 전력 생산에서 원자력 발전이 차지하는 중요성을 고려하면 이러한 이동로봇을 이용한 원자력발전소의 감시점검에 대한 연구는 원전 종사자의 방사선 피폭량을 획기적으로 줄일 수 있으며 발전소의 안전성 향상을 위한 매우 중요한 과제이다. 본 논문에서는 정상가동 중인 중수로형 원자력발전소의 칼란드리아 전면부에 투입되어 점검감시 작업을 수행하기 위하여 개발된 이동로봇에 대하여 기술하였다.

현재 개발된 이동로봇은 월성발전소 현장에서 성능시험을 수행하였으며 전체 시스템에 대한 방사선 영향 평가 및 기능검증을 수행 후 원자력 발전소에 활용될 예정으로 향후 원자력발전소의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌(또는 Reference)

- [1] 원자력산업용 첨단로봇 기술 개발, 한국원자력연구소, Report No. KAERI/RR-1720/96, 1996
- [2] 이동형 경작업 로봇 기술 개발, 한국원자력연구소, Report No. KAERI/TR-377/93, 1993
- [3] Fred R. Sias and David A. Williams, "Design of a Radiation Hardened Microcomputer for Robots and Teleoperated Systems," Proc. 40th Conf. on RST, Vol.12. pp. 36-42, 1992
- [4] Fred R. Sias and Robert M. Fox, "Selecting Radiation-Resistant Semiconductors for Robots and Teleoperated Systems," Proc. the 40th Conf. on RST, Vol. 12, pp.31-35, 1992
- [5] Geun Ueuk Youk, Tim Cable, Byung-Soo Kim, Seungho Kim, Radiation Hardening of a Data Acquisition and Control System Against Terrestrial Radiation," ANS 7th Proc. on Robotics and Remote Systems, Vol. 2 pp.1078-1082, 1997