

### 국내 원자력 산업용 로봇 개발 현황

서용철, 정승호, 김승호  
한국원자력연구소 원자력로봇팀

### The domestic state of the art of the robot development for nuclear industry

Yong chil Seo, Seungho Jung, and Seungho Kim

Advanced Nuclear Robotics Laboratory, Korea Atomic Energy Research Institute

**Abstract** - 한국원자력연구소의 원자력로봇팀의 연구 목표는 인간의 접근이 제한된 고방사선 지역에서 주요 기기의 감시 점검 및 유지 보수 작업을 수행할 수 있는 원자력용 다기능 내방사선 로봇을 개발하는 것이며 이를 달성하기 위해 원격 로봇시스템 및 로봇 핵심 기술에 대한 기초 연구 및 실용화 연구에 역점을 두고 있다. 본 논문에서는 한국원자력연구소의 원자력로봇팀에서 그동안 연구, 개발해온 원자력 산업용 로봇의 개발 현황에 대하여 소개하고자 한다.

분야에 대하여 연구/개발하고 있으며, 구체적으로는 고하중 원격작업 로봇 및 경작업용 이동로봇의 개발, 그리고 로봇 3차원 비전 및 센싱 기술, 로봇 지능화 기술 분야에 대한 연구를 수행하고 있다. 이러한 기술을 바탕으로 원자력로봇팀에서는 비전 시스템을 이용한 원자력 발전소 주요기기의 이상 감시 기능, 손상된 부품의 수리 및 교체, 주요 장치들의 유지/보수를 위한 많은 로봇들을 개발하여 왔다.

#### 1. 서 론

원자력에너지가 국내전력의 40% 이상을 점유하여 원자력발전소 안전성 관련 기기의 점검보수 기술의 확보는 원전 신뢰도 제고와 직결되어 있다. 1978년 고리 원전 이상업발전을 개시한 이후 국내의 원전 발전기간이 중대함에 따라 안전성 관련 기기의 유지보수 작업의 중요성이 부각되었고, 이에 따라 감시점검 및 유지보수를 위한 로봇 기술은 국가적 차원에서 시급히 확보해야할 필요성이 절실히 요구되고 있다.

원자력발전소는 고온, 고방사능 등의 극한 환경이기 때문에 작업자의 피폭선량 감소, 주요 시설의 신뢰성 향상 및 안전성 제고 측면에서 원격 조정장치 형태로서 로봇의 개발이 이루어져 왔다. 원자력 산업에서 로봇은 원자력발전소 원자로 냉각재 계통 배관 절단, 방사능 오염 구역의 제염, 구조물 용접, 증기발생기 전열관 검사 및 수리, 초음파 검사, 폐기물 저장소 감시 등에 사용되고 있다. 이는 고 방사성 지역에서의 작업자에 의한 작업을 원격 제어 로봇으로 대체함으로써 작업자의 안전성을 확보하고 작업의 정밀도를 향상시킬 수 있기 때문이다.

이러한 필요성에 따라 한국원자력연구소의 원자력로봇팀에서는 중장기 연구개발과제가 이루어지기 이전인 1987년부터 원자력 기초/기반기술 확립의 한 분야로서 원격조작 기술, 고지능 로봇 기술을 기본과제 형태로 추진해 핵심요소 기술을 구축하였고, 1992년부터는 중장기 연구개발과제와 연계하여 인간의 접근이 제한된 고방사선 지역에서의 감시 및 점검 작업 로봇 분야를 집중 연구 개발하였다.

원자력로봇팀의 연구 목표는 인간의 접근이 제한된 고방사선 지역에서 주요 기기의 감시 점검 및 유지 보수 작업을 수행할 수 있는 원자력용 다기능 내방사선 로봇을 개발하는 것이며 이를 달성하기 위해 원격 로봇시스템 및 로봇 핵심 기술에 대한 기초 연구 및 실용화 연구에 역점을 두고 있다.

본 논문에서는 원자력로봇팀에서 그동안 연구, 개발해온 원자력 산업용 로봇들과 핵심기술에 대하여 소개하고자 한다.

#### 2. 본 론

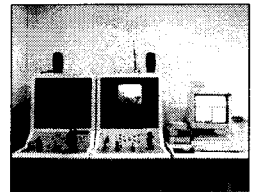
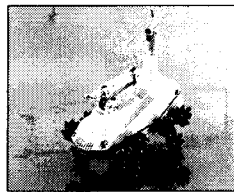
한국원자력연구소의 원자력로봇팀은 크게 내방사선 원격로봇 시스템 개발과 고방사선 환경 로봇 핵심기술개발

#### 2.1 개발된 내방사선 원격로봇 시스템

##### 2.1.1 다기능 이동로봇 시스템

원자력발전소 격납건물의 1차계통 점검 및 보수작업을 위한 다기능 이동형 로봇 시스템.

- 개발기간: 1992.10. - 1996.7.
- 계단승월 및 장애물 통과가 가능한 전방향 주행 이동로봇
- 유지보수가 용이한 모듈형 기계설계.
- 1차계통의 안전성 관련기기 점검 및 보수작업 수행.
- 이동부 : 4륜식 유성차륜(18cm계단 승월, 전방향)
- 조작기 : 모듈화 구조의 6축 수직 다관절형
- 점검부 : 카메라 2대(모니터링, 세부점검)
- 기타 : 무선(RS232, 제어신호, 영상, 음성) 표준형 축전지 24V 사용.



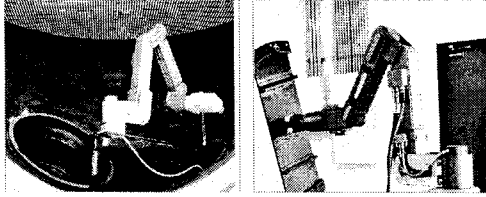
##### 2.1.2 노즐دم 자동 장/탈착 로봇 시스템

원전의 정기보수 기간중 핵연료 재장전 작업과 증기발생기 전열관 점검보수 작업의 동시수행을 위해 필요한 증기발생기 노즐دم 장/탈착 작업을 자동으로 수행하는 로봇 시스템.

- 개발기간 : 1992.8 - 1997.7
- 고하중 취급용 로봇 조작기
- 로봇의 증기발생기 수실내부 설치용이.
- 원격제어에 의한 노즐دم의 운반 및 장/탈착.
- 경수로형 증기발생기 노즐دم 장/탈착 및 와전류 탐상 검사 작업.
- 고방사성 물질 및 고방사화 기기의 제염/해체 작업의 원격화.
- 로봇 조작기 : Titanium재질의 내부식성의 경량소재 사용, 유압을 이용한 경량 설계구조.
- 선형구동장치 : 로봇 조작기 입/퇴실 용이구조, 탄소섬

유를 이용한 경량화.

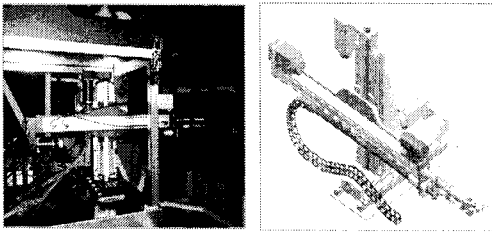
- 로봇제어기 : 3차원 그래픽 시뮬레이터와 VME를 이용한 현실 구조 제어기



### 2.1.3 중수로 급수배관 점검 로봇 시스템

중수로 급수배관의 곡관부에서 와류 유체유동으로 인한 배관 내벽 감속 상태 감시를 위해 초음파로 배관 두께를 측정하는 중수로 원전 압력관 급수배관의 비파괴검사용 로봇 시스템.

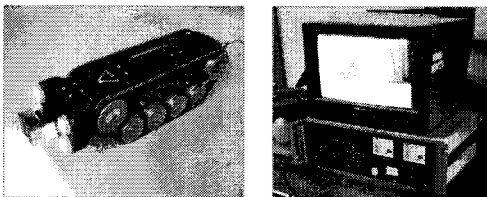
- 개발기간 : 2000.4 - 2003.3
- 7 개의 초음파 센서가 부착된 로봇 파지부.
- 로봇의 상하이동 : 칼란드리아 전면 기 설치된 Bridge를 이용.
- 로봇의 좌우 이동 : 칼란드리아 전면 Bridge 하단의 레일을 이용하는 주행부 개발.
- 초음파 펄스-에코 방법을 이용한 중수로 급수배관의 두께 측정 및 내부 균열탐지.



### 2.1.4 협소구역 점검/보수용 이동로봇 시스템

인간의 접근이 불가능한 원자력발전소의 협소구역 또는 상/하수도의 육안점검을 통한 사고방지 및 원격 보수작업용 이동 로봇 시스템.

- 개발기간 : 1997. 4. - 1998. 8.
- 이동부 : 협소구역 및 배관의 내부에서 점검/보수작업을 수행하기 위한 전/후 운동 및 좌/우 회전 조향이 가능한 무한궤도 이동장치.
- 점검부 : 소형 CCD 카메라를 상하 180° 및 측방향 360°회전이 가능하도록 함으로써 광범위한 관측시야 확보.
- 통신/전원부 : 장거리(2Km) 촬영이 가능하도록 비디오 신호 디지털 전송 방식을 채택하였으며, 48V 직류전원을 공급.

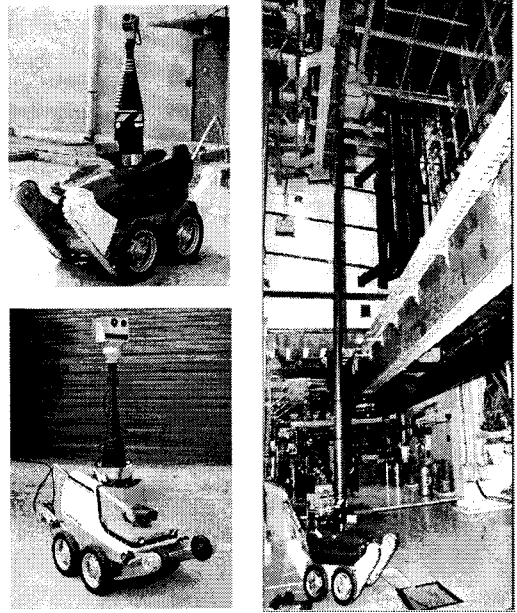


### 2.1.5 중수로 칼란드리아 감시점검 로봇 시스템

원전 가동 중에 중수로 원전 압력관 전면부의 원격육

안검사를 위한 원격조작 이동로봇 시스템.

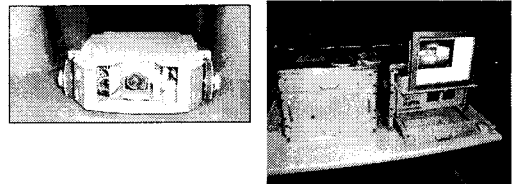
- 개발기간 : 1998.2 - 2004.2
- 가변구조의 크로라형 이동장치.
- 8m높이 상하 가변구조 마스트 구조의 점검부
- 주행용 이동장치 : 장애물, 도랑 통과 기능.
- 적외선 열영상 카메라를 이용한 중수 누출 감시.
- 내방사선 로봇 제어기 : 10 Rad 이상.



### 2.1.6 원자로 헤드 검사 로봇 시스템

원자로 헤드부의 표면과 CRDM(Control Rod Drive Mechanism)의 용접부 등의 육안 검사 로봇 시스템.

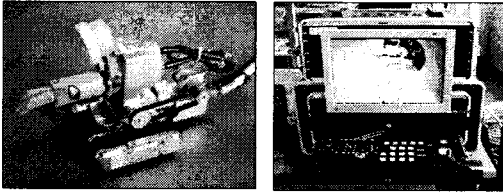
- 연구기간 : 2002. 7 ~ 2003. 4
- 자성체 부착형 주행 로봇 (60도 경사 주행)
- 전면부 팬/틸트 카메라, 후면부 고정 카메라
- 전/후면부 고휘도 LED 조명
- 충돌 감지용 초음파 센서 4기 부착
- 원격 무선 조종 (무선 데이터 통신 및 무선 영상송신)
- 디지털 비디오 리코더
- 크기 : 가로x세로x높이 = 180x210x50 (mm)
- 재질 : 스테인리스틸과 알루미늄 합금



2.1.7 원자로 배관내부 육안검사/이물질제거 로봇  
고방사선 지역인 원자로 배관 계통의 원격 검사 및 이물질 제거용 원격 이동로봇 시스템.

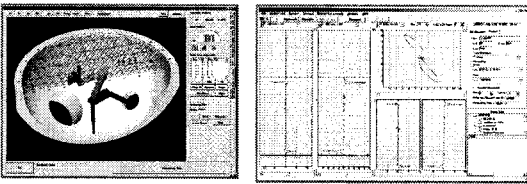
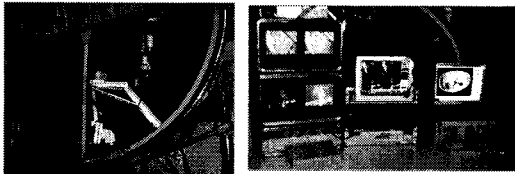
- 연구기간 : 2003. 4 ~ 2005. 3
- 수심 30m 방수
- 주행용 필터 카메라 1대, 조작기 제어용 카메라 1대, 수중 조명
- 3자유도 수중 다관절 조작기

- 수중 무한궤도 주행기
- 원격 제어기 및 모니터 시스템
- 재질 : 스테인리스스틸과 알루미늄



### 2.1.8 다기능 증기발생기 검사/보수 로봇 시스템 원전 증기발생기 전열관의 비파괴 검사 및 원격 유지/보수 로봇 시스템

- 정밀 수평 다관절 로봇 (3 자유도)
- 로봇 지지대 (수평 조절 기능 구버, 맨웨이 지지, 3 자유도)
- 발전기 내장형 이동식 제어룸 (가반하중 5톤)
- 8축 로봇 제어 시스템 및 제어 프로그램 - 원격 음성 통신 및 비디오 장치
- 검사/보수 장치(플러징, 슬리빙)를 전열관으로 자동 이송
- 최대허용하중 : 15 kg
- 무게 : 로봇 27kg, 트럭크 30kg, 로봇지지대 27kg
- 전열관 탐상 데이터 실시간 획득 처리 시스템도 개발
- 증기발생기 전열관의 와전류탐상 검사 및 플러징, 슬리빙 작업 수행.

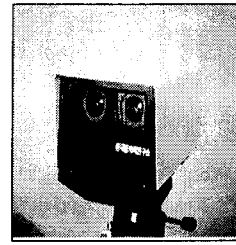


## 2.2 고방사선 환경 로봇 핵심기술개발

### 2.2.1 수평식 입체영상 카메라

사람의 눈과 같이 관측물체의 거리에 따라 주시각 조정이 가능하며 입체 영상 재생 시 왜곡이 최소화 되도록 설계된 입체영상 획득 장치.

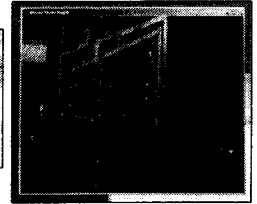
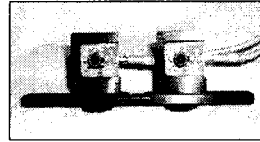
- 렌즈를 CCD 영상면에 수평방향으로 이동함으로써 주시각을 제어.
- 렌즈의 수직방향 이동함으로써 초점을 제어
- 자동 주시각 제어 구현이 용이.
- 입체영상의 재현성이 폭주식에 비해 우수
- 스테레오 영상 획득 : Dual NTSC
- 관측 물체의 위치에 따른 주시각 제어 기능
- 렌즈의 초점 제어 기능



### 2.2.2 스테레오 비전 모듈

두 대의 카메라를 이용하여 원격 제어를 위한 3차원 영상을 획득하기 위한 모듈.

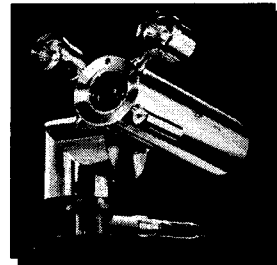
- 디지털 영상 전송을 통해 노이즈에 강한 시스템 구현 및 영상 품질 향상.
- 카메라 : 1/3 인치 소니CCD 카메라 VGA 640x480
- 스테레오 영상 처리를 통한 3차원 정보 획득 가능.
- 원격 제어용 이동형 로봇을 위한 시각 시스템.



### 2.2.3 내방사선 카메라 개발

고방사선 환경용 총누적선량  $10^6 - 10^8$  rad 급 내방사선 카메라 국산화 및 실용화를 위해 내방사선 카메라 전자회로 설계 기술 및 내방사선 카메라용 원격제어 렌즈모듈 설계/제작 기술개발.

- 총 누적선량 106 - 108 rad 급 내방사선 카메라.
- 내방사선 카메라 수명예측 기능 내장. (소형 반도체 방사선 누적선량계)
- 원하는 물체의 자유로운 관측을 위한 팬/틸트 기능
- 방수 / 방폭 기능.
- 원자로 구조물검사, 핵연료검사, 원격작업용 시각장치로 활용.

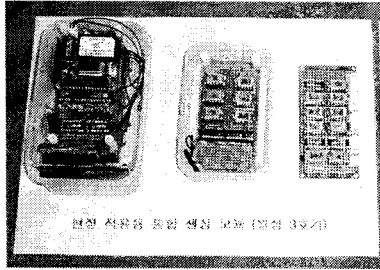


### 2.2.4 원자력 내방사선 로봇용 도시미터 개발

원자력 시설의 고방사선 지역 작업용 로봇과 시스템의 전자기기 및 부품(제어기, 카메라 등) 피폭선원 및 방사선량의 실시간 모니터링을 위한 통합형 계수기이므로 선원의 종류 및 누적 방사선량을 동시에 실시간 판별 가능함.

- 로봇 내방사선화를 위한 방사선 통합 계수
- 저준위용 내방사선 GM 카운터 ( 0-20kR)
- pMOSFET 소자를 이용한 중준위용 초소형 누적 선량계(1krad-100krad)

- 고준위 및 중성자 감지용 Si Diode 계수기 (20krad-1Mrad)
- 원격 실시간 자동 캘리브레이션 모듈 회로 내장.



### 3. 결 론

한국원자력연구소의 원자력로봇랩에서는 원자력발전소 고방사선 구역 작업 무인자동화를 목표로 이동형 경작업 로봇 시스템, 고 하중 원격 작업 로봇 시스템 개발에 연구를 집중하고 있으며, 개발된 로봇시스템의 적용 분야로서는 원자로 격납건물의 증기발생기 수실 내에서 노즐 탭 장/탈착 작업 및 와전류 탐상 검사, 전열관 비파괴검사보수, 원자로를 포함한 일차 계통의 점검보수, 방사능 물질취급, 고방사선 지역에서 제염 작업 수행 등이 있다. 또한 로봇 기반 기술 분야에서는 원격작업이 요구되어 특수 작업이 이루어지는 각종 작업의 효율을 극대화하기 위하여 로봇 핵심 요소기술 확립과 원격 현실감 기술 개발을 목표로 원격 조작, 감시용 입체영상 시스템 및 물체인식/추적시스템 개발, 내방사선 카메라 모듈 및 열영상 관측기 개발, 그리고 센싱 및 로봇 지능화 분야의 연구를 수행하고 있다.

이러한 축적된 기술들은 원자력산업 분야뿐만 아니라 국방로봇, 재난 방지 로봇, 우주탐사 로봇 등의 개발에 밑거름이 될 것이다.

### 후 기

본 연구는 중장기 원자력연구개발 사업의 원자력용 내방사선 로봇 개발과제의 일환으로 수행되었다.

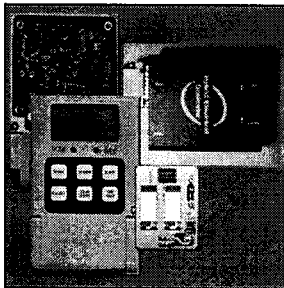
### [참 고 문 헌]

- [1] 원자력 내방사선 로봇 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2025/99, 1999.
- [2] 증기발생기 전열관 검사/보수용 로봇 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2324/2002, 2002.
- [3] 중수로 원전 칼란드리아 전면부 감시점검 이동형 로봇 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2309/2002, 2002.

#### 2.2.5 P-MOSFET를 이용한 방사선피폭 누적 선량계 개발

소형의 상용 Power pMOSFET을 이용한 고방사선 환경내 로봇 및 주요기기의 수명 예측용 감마선 누적 선량계 개발.

- Off-Line 누적선량 계측
  - 고방사선 환경 내 주요기기의 총피폭 방사선량 측정
  - 1 Mrad 범위 기기 교체시기 경제적 예측.
- On-Line 누적선량 계측
  - 원자력 시설내 로봇의 방사선 피폭량 온-라인 실시간 감시 및 측정기능.
  - 100krad급 방사선 피폭선량 정보제공으로 현장 운영 중인 로봇의 안전성 확보.



#### 2.2.5 유도초음파모듈개발

슬리빙을 마친 전열관의 검사를 위한 유도초음파 시험 모듈 개발 초기의 신속한 검사에 유리.

- 가진 주파수 및 가진 모드 : 1MHz, L(0,2) mode
- 위상속도 : 5122 m/s
- 기계 구조물의 비파괴 검사 및 세관 결함 검사 시스템에 활용.

