

## 원자력발전소의 유지보수/감시점검을 위한 로봇 개발 현황 및 전망

김 승 호

한국원자력연구소, 원자력로봇연구실, 305-600 대전시 유성우체국 사서함 105  
(042) 868-2932, ROBOTkim@kaeri.re.kr

### 1. 서설 (연구개발의 필요성)

우리 나라의 전력공급은 이제 양과 질적인 면에서 세계적인 규모로 성장하여 막대하게 투자된 원전 설비의 효율적인 운영이 시급히 요청되고 있다. 또한 세계 경제 및 사회 환경이 숨가쁘게 변화하는 속에서 94년의 기후변화 협약, 95년에 출범된 WTO 체제, 그리고 96년의 OECD 가입 등으로 우리 나라도 선진국과 대등한 관계에서 동일한 규제를 받으면서 무한 경쟁을 해야 하는 처지에 놓여 있다.

1970년 9월에 착공한 고리 원자력발전소는 1978년 4월 29일 경상남도 고리에서 57.8만KW 가압경수형(PWR : Pressurized Water Reactor) 원자력발전소가 국내 최초로 상업 운전을 개시한 이래 현재 14기가 준공되어 가동중이며, 2006년까지 4기가 추가적으로 건설될 예정에 있으며, 2040년까지는 40여기의 건설이 계획되어 있다. 이에 따라 원자력발전소의 운전기간이 늘어감에 따라 안전성관련 기기들의 방사화 정도가 더욱 심화되며 동시에 노후화에 따른 유지보수 작업도 빈번하게 되었다. 따라서 작업자의 피폭선량 저감과 안전성 차원에서 고방사선 지역 점검보수 로봇 시스템의 개발과 활용이 요구되고 있다. 특히 원자력발전소의 원자로냉각재계통(RCS : Reactor Coolant System) 내의 이상상태를 조기에 발견할 수 있는 원격 감시점검용 로봇의 개발이 시급하고도 절실하다.

원자력 선진국에서는 원자력발전소내의 작업종사자를 방사선 노출로부터 보호하여 안전성을 향상시키고, 각종 자동화 장치를 사용하여 신속한 작업을 수행함으로써 경제성을 높이려는 노력이 활발히 진행되어 왔다. 원자력발전소내의 대부분의 작업들은 다양하고 복잡하므로 로봇의 응용을 위해서는 개발 초기단계부터 심도있게 연구검토가 이루어져야 한다. 현재 연구중이거나 활용되고 있는 비제조용 로봇의 용도별 통계를 보면 거의 대부분이 원자력발전소의 감시점검 및 유지보수 작업을 위해 제작되어 사용되고 있다. 이러한 자료를 통해 볼 때 원자력분야가 극한작업용 로봇의 응용이 가장 절실하게 요구되는 분야로서 연구의 필요성이 가장 높다. 이에 따라 원자력 분야의 로봇 적용을 위한 연구가 원자력연구소에서 중장기 계획하에 연구가 추진되고 수행되었다.

### 2. 일반산업용 및 원자력산업용 로봇

고대로 부터 인간들은 자신들의 능력을 극대화하기 위하여 다양한 형태의 편리한 도구들을 만들어 사용했다. 이러한 도구는 단순한 기능의 호미로 부터 복잡한 기계장치로 발전을 거듭하여 최근에는 인간의 기능을 모방하여 성능이 보다 고도화된 정교한 기계장치를 고안하게 되었다. 로봇 개발의 역사에서 로봇이 산업현장에 투입되기 시작한 것은 1961년으로서, 미국 제너럴 모터스사의 공작물 취급 자동화 공정에 사용된 이후 1970년대까지 산업용 로봇 기술은 지속적으로 성장되어 미국의 Unimation, General Electric, Cincinnati Miracron, 일본의 히타치, 후지즈 등에서 용접과 도색작업 및 비교적 간단한 조립 작업에 로봇이 이용되었다.

고정된 환경에서 미리 설정된 작업들만을 수행하도록 프로그래밍되어 있는 산업용 로봇와는 달리 사람이 하는 일 또는 사람이 하기 어려운 일들을 대신하기 위한 로봇에 대한 연구도 로봇 개발 초기단계인 1950년대부터 이루어져 왔으나 컴퓨터, 제어 및 정밀가공 기술의 부재로 개발이 활발하게 이루어지지 못하였다. 그러나 1985년에 들어 로봇의 제조 기술이 표준화되고 더욱 일반화함에 따라 분야에서 구체화된 로봇의 필요성을 만족시킬 수 있는 로봇이 등장하여 자동차 용접, 생산 제품 검사, 반도체 자동 조

립, 가전제품 이송 등에 활용되어 왔다.

미국의 맨해튼 프로젝트에 원격 조작기가 활용되어 로봇 기술의 산업에의 적용은 원자력 분야에서 최초로 시작되게 된다. ANL (Argonne National Laboratory) 의 Ray Goertz 는 이 분야의 선도적인 로봇 기술자로서 진취적이고도 의욕적으로 과제를 추진하였으나, 미국 에너지부(DOE : Department of Energy)와 미국 원자력규제위원회(NRC : Nuclear Regulatory Commission)의 이해 부족과 당시의 기계 및 반도체 기술의 낙후로 로봇의 개발이 중단되었다. 이 후 미국 TMI (Three Mile Island) 사고이후 사후처리용으로 개발이 시작되어 미국 CMU (Carnegie Mellon University)의 RRV, RWV 등 원자력 선진국을 중심으로 비상대응용 이동로봇이 활발하게 연구 개발되었으며, 특히 독일의 MF-2,3,4 등은 체르노빌 사고시 현장에 투입되었다. 미국전력연구소(EPRI : Electric Power Research Institute)에서 개발한 Suveyor 와 Remotec 의 Surbot는 비상대응을 위하여 많은 실증 시험과 현장 적용에 대한 시도가 이루어졌으며, 프랑스의 Frastar도 시험 가동중인 3개의 발전소에서 실증 시험을 하였다.

로봇 활용은 미국 Consolidated Edison사에서 ANDROS를 Indian point-2 원자력발전소 감시점검 작업을 사례로 들 수 있다. 특히 웨스팅하우스는 원자력발전소 증기발생기 점검 로봇을 실용화하여 사용함으로써 원자력발전소의 안전성 향상에 기여하고 있다. 정상가동중 특히 운전중에 인간을 대신하여 주요시설을 점검하고, 간단한 보수작업을 수행할 수 있는 이동로봇 개발에 관심이 집중되어 프랑스의 Framatome 사에서 증기발생기의 유지보수 작업 적용을 위하여 ARAMIS 를 개발하였다. 미국의 Brand 사에서는 다목적 제어 입출력 시스템, 로봇 동력 구동 원치, 3 대의 원격제어 카메라 및 유압구동 로봇과 지지대로 구성된 ROMA 로봇 시스템을 개발하였으며, 미국의 Westinghouse에서는 ROSA III 로봇 시스템을 개발하였다. 원자력 선진국에서는 원자력시설 작업 종사자의 작업 기피 현상 증가에 적극적으로 대처하고 작업자의 방사선 피폭선량을 저감화하기 위한 로봇 기술 확보를 위하여 지속적인 연구개발을 국가 주도 및 산업체 주도로 수행중에 있다. 선진국에서 개발되고 있는 로봇의 종류는 현재 약 200 여종에 달하며 특히 일본의 경우 실용화를 목표로 개발중인 로봇이 50 여종에 달하고 있다.

현재 국내에서는 산업용 로봇 개발에 관한 연구는 기업을 중심으로 활발히 추진이 되어왔으나 극한작업용 로봇에 대한 연구는 한국과학기술원을 비롯한 일부 대학에서 학술적인 차원에서 기초연구가 수행되었을 뿐 본격적인 개발은 아직 시도된바 없으며 외국과 심각한 기술격차를 보이고 있다. 그리고 한국과학기술연구원은 인간과 유사한 오감과 지능을 가지고 이동하며 작업하는 자율형 로봇인 휴먼로봇을 2010년대에 실용화를 목표로 개발 중에 있으며, 한국기계연구원에서는 해저 탐사용 로봇을 연구 중에 있다. 원자력산업용으로서 개발된 또는 개발중인 감시점검 및 유지보수 분야 로봇의 적용 분야는 표 1 과 같다. 한편 국내에서 건설 및 운전중인 원전의 수가 증가함에 따라 안전성 향상이 중요한 문제로 부상됨에 따라 조기 감시점검 체제 구축이 시급하게 되었다.

표 1. 감시점검 및 유지보수 로봇의 적용분야

구 분	적 용 분 야
유지 보수	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 콘크리트 표면 청소 및 찌꺼기 제거</li> <li>○ 휠터 제거 및 교체</li> <li>○ 장비운송, 방사선 물질 처리 및 운송</li> <li>○ 용접, 절단, 오염 물질의 진공 이용 제거</li> <li>○ 격납 건물 표면 청소, 원자로 내부 이물질 제거</li> <li>○ 표면 제염</li> </ul>
감시 점검	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 방사선, 온도, 습도, 먼지 감시</li> <li>○ 볼트 체결 / 풀음, 밸브 개폐 상태 감시 점검</li> <li>○ 초음파 검사 및 카메라 무인 감시</li> <li>○ 배관의 내면 및 외면 육안 검사</li> <li>○ 물 속에 위치한 부품 및 기기 검사</li> </ul>

### 3. 원자력발전소용 로봇기술 개발 현황

#### 가. 연구개발의 필요성 및 개발 경위

원자력에너지의 국내의 소비량이 급속히 증가하여 막대하게 투자된 설비의 효율적인 운영이 요청됨에 따라 획기적인 발전 도약을 이루기 위하여 정부에서는 1992년을 “첨단 기술 구축”의 원년으로 설정하여 “원자력 연구개발 중장기 계획”을 지속적으로 추진하여왔다. 범국가적으로 이루어진 중장기 연구계획은 미래 지향적인 기술혁신 연구부분과 현장 적용을 목표로 하고 있는 실용화기술 개발부분으로 구성되어 있다.

한국원자력연구소의 원자력 로봇 연구실에서는 중장기 연구개발과제가 이루어지기 이전인 1987년부터 원자력 기초/기반기술 확립의 한 분야로서 원격조작 기술, 고기능 로봇 기술을 기본과제 형태로 추진해 핵심요소 기술을 구축하였고, 1992년부터는 중장기 연구개발과제와 연계하여 인간의 접근이 제한된 고방사선 지역에서의 감시 및 점검 작업 로봇 분야를 집중 연구개발하였다. 개발 대상인 원격제어 로봇 시스템은 원자력발전소에서의 점검 및 감시 작업을 원격/무인/자동화하여 사람이 접근하기 어려운 고방사선 환경하에서 감시, 점검, 유지 및 보수 작업을 로봇으로 대체함으로써 작업의 안전성 및 신뢰성을 향상시키며, 원자력 관련 시설에서 이루어지는 각종 작업의 효율을 극대화시킬 수 있다. 특히 사람을 대신한 로봇 활용은 극한 작업을 원격 무인화 할 수 있기 때문에 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 개념에 의한 방사선 관련 종사자의 방사선 피폭을 보다 낮출 수 있을 것으로 전망된다.

#### 나. 원전용 이동형 로봇 개발

원전용 이동로봇은 발전소 내부구조가 좁고 복잡하며 계단을 포함한 장애물이 산재되어 있기 때문에 특수한 형태의 기구부가 요구되며, 고온 고방사선 등의 극한환경에서 견딜 수 있도록 신뢰성을 갖고 동작할 수 있어야 한다. 표 2은 원전용 이동로봇이 일반적으로 구비해야 할 기능을 보여준다.

표 2. 원전용 이동로봇의 구비 기능

구 분	기 능
계단 승월	높이 : 22.5cm, 경사도 : 45°
장애물 통과	높이 : 25cm
홀 통과	폭 : 25cm
문 통과	폭 : 74cm
물속 주행	깊이 : 15cm

이와 같은 기능을 갖는 이동방식은 무한궤도(Crawler)식, 특수차륜(Special-wheel)식, 보행(Leg)식 등이 개발되고 있으며, 보행식은 개발 초기단계이다. 크로라식은 탱크의 무한궤도 형태를 의미하는 것으로 계단 및 장애물 승월 성능 향상을 위하여 크로라의 형태를 가변할 수 있는 형상가변 크로라식과 크로라가 분리되어 있는 두 대의 크로라식이 있다. 또한 특수차륜식은 평지주행 성능이 우수한 차륜식과 장애물 승월이 용이한 보행식의 장점이 도입된 방식으로 유성차륜형, 개형, 하이브리드형 등이 개발되어 있다. 그림 1은 특수차륜 이동방식의 형태를 보여준다.

이동로봇의 내환경성은 주로 내방사선을 의미하는 것으로 기계소자 보다는 전자소자의 설계시 매우 중요하다. 특히 CMOS 기술의 발달로 점점더 고집적화되는 전자소자의 경우 방사선에 매우 취약하다. 현재 미국, 프랑스 등의 원자력 선진국에서는 핵폭탄 관련장비와 우주왕복선과 같이 방사선 환경에서 작업하는 전자시스템을 위하여 1,000 KRad 정도의 내방사선이 가능한 전자소자가 개발되어 있다. 이러한 내방사선 제품은 우주규격(Space Spec.)인 MIL-STD-883C 1019-1023에서 시험된 것으로 상용 제품에 비하여 수백에서 수 천배 이상의 고가이다 -19-

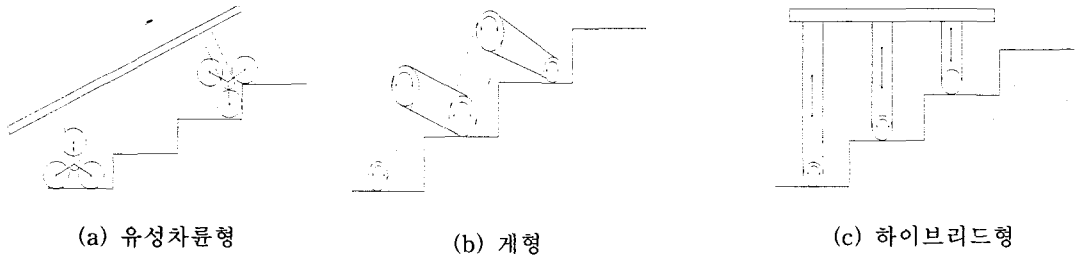


그림 1. 특수차륜 이동방식

원자력시설의 로봇 응용은 초창기에 원격 조종이 주종을 이루었으나 미국 TMI(Three Mile Island)발전소 사고이후 사후처리용 이동로봇 개발의 필요성이 대두되어 미국 CMU(Carnegie Mellon University)를 필두로 하여 독일, 프랑스 등의 원자력 선진국을 중심으로 비상대응용 이동로봇에 대한 활발한 연구개발이 추진되었다 [1,2]. 이에 따라 체르노빌 사고시에는 독일의 "MF-3" 이동로봇이 현장에 투입되었고[3], 미국의 전력연구소(EPRI)에서 개발한 "Suveyor" [4], REMOTEC사가 개발한 "SURBOT" [5], 및 프랑스 Framatome 사가 개발한 FRASTAR[6] 등이 개발되어 발전소 내에서 실증 시험을 수행하였다. 그림 2는 Remotec 사의 "ANDROS VI"와 Framatome사의 FRASTAR이다.

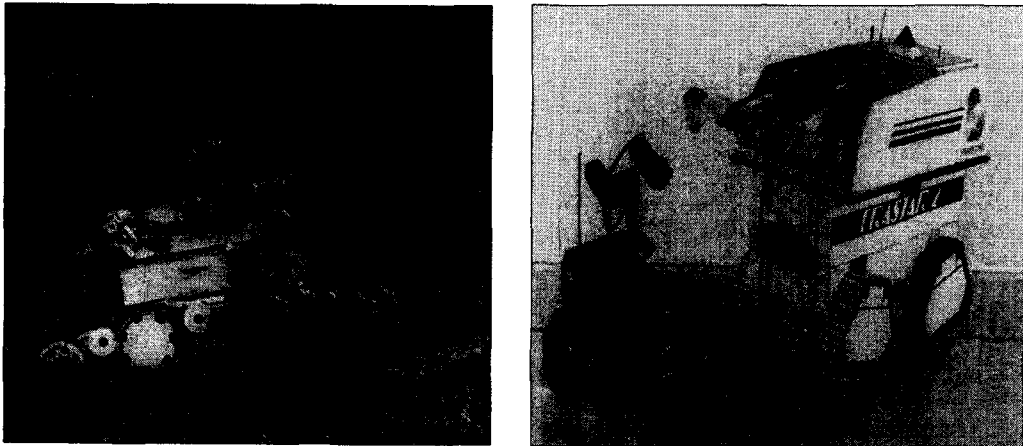


그림 2. ANDROS VI와 FRASTAR의 외관

원자력시설내 주요기기 사이를 자유롭게 이동하며 감시점검 및 유지보수 작업을 수행하기 위해서는 이동 기능이 가능한 로봇의 개발이 필수적이다. 원자력발전소내의 구조는 좁고 복잡하며 계단 등의 장애물이 존재하기 때문에 로봇 이동장치는 이러한 특수시설에서 자유롭게 움직일 수 있도록 고려되어야 한다. 원자력연구소에서 개발중인 원자력발전소 감시점검용 로봇 시스템은 그림 3의 구성도에서와 같이 각종 센서를 탑재한 이동형 로봇 형태이며 작업자에 의해 원격에서 제어된다. 이동형 로봇에는 작업현장을 작업자에게 생생하게 전달하기 위해 입체영상 및 그래픽 시뮬레이터 기능을 포함하는 가상현실 원격제어 기능을 갖추고 있으며, 센서 모듈로 열영상 관측장치 및 방사선 준위 분포 측정 장치가 탑재되도록 설계되어야 한다.

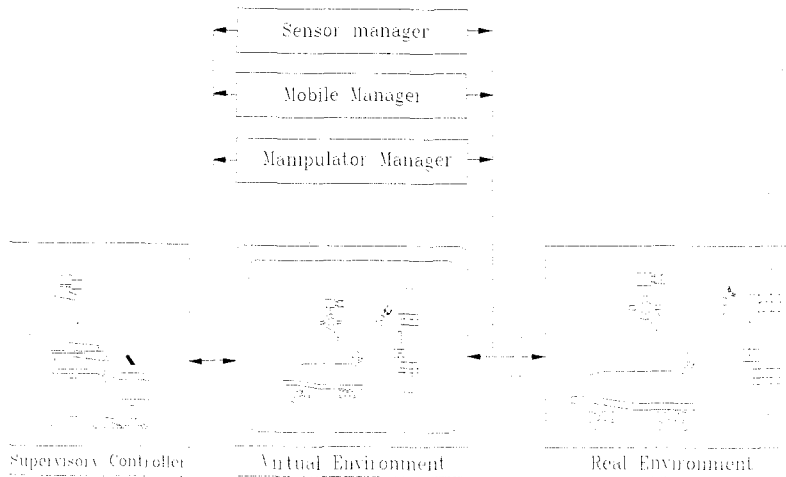


그림 3. 원자력발전소 감시점검 로봇의 구성도

안전성 관련 기기들의 방사화 정도가 심화되고 노후화됨에 따라 작업자의 방사선 피폭선량 저감과 안전성 향상의 차원에서 1992년에 고방사선 점검보수용 시작품 이동로봇 "KAEROT"을 개발하였다[7,8]. 개발된 이동로봇은 장애물 승월을 위하여 유성차륜 형태의 3륜식 특수바퀴를 사용하였고, 점검 및 보수 작업을 위하여 5자유도의 조작기와 카메라가 탑재되어 있다. 제어시스템은 PC를 주컴퓨터로 하고 이동부, 조작기, 센싱부 등에 각각 8비트 SBC (Single board computer)가 할당되어 시리얼 통신방식에 분산 제어 되도록 설계하였다. 그림 4는 원자력연구소에서 초기 자체 개발한 이동 로봇인 KAEROT의 모습으로서 계단 승월이 가능하도록 유성차륜 형태의 3륜식 특수바퀴를 사용하여 개발하였다.



그림 4. 이동로봇 KAEROT

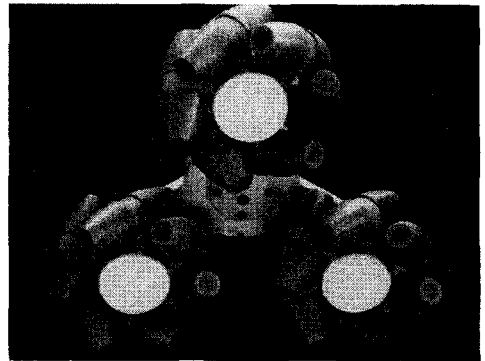


그림 5 전방향 유성차륜

협소한 구역에서 주행하기 위해서는 전방향 바퀴의 개발이 필수적이다. 이에 대해서는 Grabowiecki [9], Blumrich [10], Ilon [11] 등에 의하여 기초적인 연구가 시작되었으며, Wheelon [12], Omni Drive [13], Ambulatory Drive Platform [14] 등이 전동 휠체어에 적용이 시도되었으며, 로봇에의 적극적인 응용은 Unimation Robot [15], Fetall [16] 등이 3륜구조를 갖고 바퀴와 로울러가 90도 각도로 부착된 로봇이 개발되었다. Uranus [17] 는 4륜구조에 바퀴와 로울러가 45도 각도로 부착된 로봇을 개발하였다. 전방향 바퀴는 우선적으로 유성차륜에 부착하여 장애물이나 계단 승월이 가능해야 하고 중하중물 운반이 가능해야 하므로 전방향 바퀴의 개념을 도입하고, 등방향성 향상과 중하중물 취급이 가능하도록 로울러의 개수와 부착방식을 수정이 필요하다[18]. 그림 5는 전방향 유성차륜을 보여준다.

그림 6은 KAEROT의 성능을 보완시킨 KAEROT/m1으로서, 평지에서 전방향 주행기능이 있는 4륜식 이동 로봇시스템이다. KAEROT/m1은 FRP 재질로 몸체를 구성하여 경량화 시켰으며, 사용후의 제염처리를 위해 방수가 가능하도록 설계하였다. 표 3에는 로봇의 주요 기능이 수록되어 있다.

표 3. 이동장치의 주요기능

구 분	설 계 기 준
평 지 주행용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 경사도 45도, 높이 250 mm의 계단 승월</li> <li>○ 225 mm 높이의 장애물 통과</li> <li>○ 45도 경사진 지면 주행</li> <li>○ 250 mm폭의 홈 통과</li> <li>○ 740 mm 폭의 문 통과</li> <li>○ 150 mm 깊이의 물속 주행</li> <li>○ 150 mm이상의 거리에서 원격조정 가능</li> </ul>

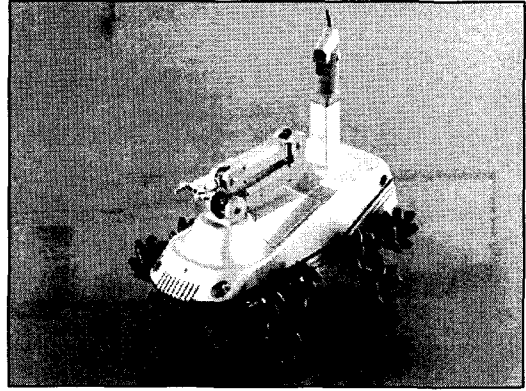


그림6. 이동로봇 KAEROT/m1

전방향 이동로봇은 "KAEROT"의 성능시험을 통하여 문제점을 보완하고, 원자력발전소와 같이 좁고 복잡하며 계단 등의 장애물이 산재된 지역에서 자유롭게 이동할 수 있도록 평지에서의 전방향 주행기능과 계단승월기능 추가를 목적으로 1997년에 개발되었다. 특히 본 이동로봇에는 전방향기능과 계단승월기능이 가능한 "전방향 유성차륜"이라는 새로운 메카니즘이 4륜구조로 부착되어 주행 성능을 크게 향상시켰다. 또한 이동로봇 "KAEROT/m1"에는 점검 및 보수작업을 위하여 6자유도의 조작기와 팬/틸트 구동이 가능한 입체 카메라가 부착되어 있다. 6자유도 조작기는 자중/취급하중비를 5:1 이하로 설계하기 위하여 스프링 베벨기어를 사용하여 1개의 조인트가 2자유도를 갖는 조인트 구조로 설계하였다. 감시점검용 이동 로봇은 원자력발전소에서 작업자의 접근이 어려운 고방사선 구역뿐만 아니라 상시 감시가 요구되는 곳에서도 작업자를 대신하여 주어진 임무를 수행할 수 있도록 개발하고 있다.

가변형상구조의 이동형 로봇 KAEROT/m2 (그림7 참조)는 가압 중수로 원전의 열수송계통의 이상 상태 진단 및 점검을 위한 무인 이동 로봇시스템으로서, 정상 가동 중인 원전의 칼란드리아 전면부에서 압력관 검사, 시료 채취, 배관 누수 및 부식 검사를 한다. 개발된 로봇은 길이 75 cm, 깊이 25 cm의 요철부분을 통과하기 위하여 형상가변형 무한궤도 이동 방식으로 제작되어 있으며, 이동부에 탑재된 신축팔은 원전의 380개 칼란드리아 압력관 (Calandria Pressure Tube)을 점검할 수 있도록 길이 최대 8m까지 확장이 가능하다. 이동형 감시점검 로봇은 방사능으로 오염된 지역이나, 오염 가능성이 있는 지역에 투입하여 구역 방사선원을 측정 및 분석하여 방사능 오염 예상지역의 방사선원 분포도를 작성하여 효과적인 제염작업을 할 수 있게 한다

#### 다. 원전 증기발생기 노즐땀 장/탈착 원격작업용 로봇 개발

극한작업환경인 원자력발전소 증기발생기 수실내의 노즐땀 설치 및 회수작업의 무인화하여 고방사선 환경에 대한 작업자의 부담을 감소시키고, 작업비용을 줄이기 위하여 증기발생기 수실 내부의 형태 및 작업환경과 노즐땀의 형상을 종합적으로 고려한 고하중용 원격작업 로봇 시스템을 개발하였다.

증기발생기 수실 내부의 작업환경과 노즐땀의 크기, 무게 및 제작 등을 고려하여 조작기는 전장을 1.9m로 제작하였으며 손목부는 피치-요-롤 구조로 하였다. 증기발생기 수실 내부에서 20 kg 이상의 하중을 취급할 수 있도록 하기 위하여 구동방식은 유압구동방식을 채택하였으며 작업현장으로서의 운반과 설치가 용이하도록 분리형으로 제작하였다. 또한 조작기를 수실 내부로 자동으로 입설시켜 로봇의 플랫

표 4. 가변형상 무한궤도 이동 로봇  
KAEROT/m2 제원

명 칭	기 능	제 원
이 동 부	형 태	크로라 부착 휠타입
	이동부 높이	400 mm
	중 량	90 Kg
	구동휠의 중심거리	480 mm
	트랙의 펼친길이	1,550 mm
신 축 암	감속 방식	사이크로이드
	링크 길이	550 mm
	링크 수	16 ea
	암의 최저높이	1.2 m
	암의 최고높이	8.0 m
	중 량	29 Kg
점검장치 ( 카메라 Pan/Tilt )	구동 방식	모터, 스크류
	주시각	±70°
	높 이	200 mm
	중 량	3 Kg
감시점검 로봇	구동 방식	모터,기어 (pan, tilt)
	총중량	170 Kg
	초기 총높이	1.7 m
	도달 총높이	8.5 m

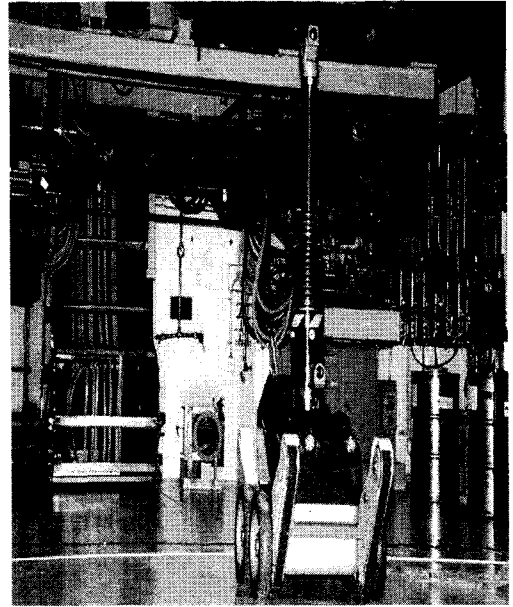


그림7. 이동로봇 KAEROT/m2

폼 역할을 담당하고, 작업완료 후 조작기를 수실 외부로 회수하는 기능을 가진 입/퇴실 장치를 개발하였다. 그림 8은 증기발생기 수실 목업에 설치된 입/퇴실 장치와 로봇 시스템이다. 전체 제어시스템은 원격지의 로봇을 제어하는 원격제어시스템과 로봇의 자세 및 작업정보를 실시간으로 시각화하여 작업자에게 제공하고 조작자의 작업명령을 원격제어시스템으로 전달하는 관리제어시스템으로 구성된다. 관리제어시스템은 그래픽 워크스테이션, 모니터링 장치, 스페이스 볼 및 다이얼 박스 등의 입력장치들로 구성되며 원격제어시스템과 Ethernet을 통하여 연결된다. 그림 9는 관리제어 시스템을 보여 준다. 개발된 시스템은 실크기 목업 실험을 통하여 통합시스템의 성능과 신뢰도를 검증하였다.

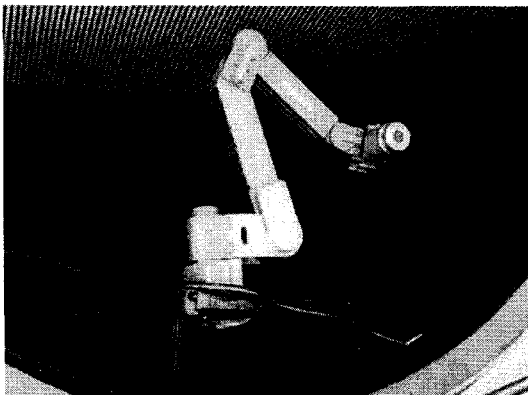


그림 8. 증기발생기 수실 목업에 설치된 로봇

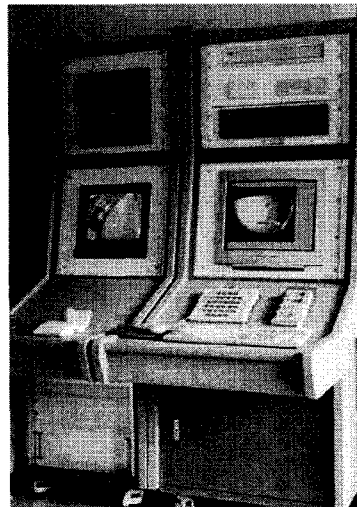


그림 9. 관리제어 시스템

#### 라. 급수 배관 비파괴 원격 검사 로봇 개발

가압중수로형 원전의 원자로인 칼란드리아의 압력관에 부착된 급수배관의 냉각수 유동에 의한 마모 현상으로 인하여 배관 곡관부가 감육상태를 정기적으로 배관 곡관부의 감육 정도를 측정하기 위하여 로봇의 개발이 추진되었다(그림10). 배관의 감육 측정작업 중 측정자가 방사능에 노출되는 것이 불가피함에 따라 측정 작업의 무인 자동화를 통해 작업 종사자의 방사선 피폭을 미연에 방지하며 작업의 신뢰도를 높일 수 있다. 로봇은 칼란드리아 전면에 있는 브리지의 레일을 이용하여 직경 8m 내에 있는 380개 중 어떤 급수배관에도 접근 가능해야하므로, 로봇과 로봇 이동체의 분리가 가능하여 로봇의 장/탈착이 용이하도록 설계되었고, 로봇에 부착된 2대의 카메라를 이용한 자동 검사작업의 육안 확인 기능이 구비되어 있다. 또한 측정된 급수배관 두께의 데이터 베이스화를 통한 체계적 관리가 안전해석을 위한 필수요건이므로 평가자의 편이를 고려한 데이터 베이스 프로그램을 개발하였다.



그림10. 급수배관 점검 로봇의 전경

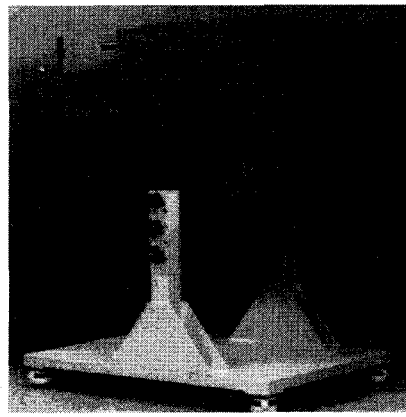


그림 11. 편광방식 입체영상 모니터(KAERI-PSM)

#### 마. 입체영상시스템

고방사선의 원자력시설은 작업자의 접근이 어려운 특수환경으로서 이러한 환경에서의 로봇 원격제어를 원활하게 하기 위해서는 작업자에게 원격지의 상황을 실감나게 전달하는 '현장감제공'이 필수적이다. 사람의 오감 중에서 시각 정보는 전체 감각 정보의 70% 이상을 차지하기 때문에 원격지의 상황을 작업자에게 전달하기 위한 가장 효율적인 방법이다. 특히 사람의 눈과 같은 기능을 갖는 스테레오 카메라를 이용한 입체 영상을 이용하면 작업자에게 원격지의 상황을 현장감 있게 전달하여 작업 효율을 극대화시킬 수 있다. Stereo Imaging system으로서 편광방식 입체영상 모니터(KAERI-PSM), 수평식 입체영상 카메라(KASS-M1, KASS-M2)은 입체카메라와 입체모니터로 구성되며, 인간시각 기능에 충실한 입체영상의 획득 및 재생 그리고 시스템의 소형, 경량화에 중점을 두고 개발하였다. 개발된 Stereo Imaging system을 이용한 원격 조작성 실험을 통해 입체영상이 평면영상에 비해 30%이상 작업능률을 향상시킬 수 있다.

인간의 시각 기능을 대신하는 입체카메라를 개발하기 위하여 현재까지 개발된 입체영상획득 방식의 입체영상의 재현성을 비교 검토하였으며, 이를 기초로 인간이 느끼는 실감입체영상을 충실히 재현할 수 있는 수평이동식 입체카메라(KASS-M2)를 개발하였다. 개발된 입체카메라는 카메라의 초점과 주시각을 동시에 제어할 수 있어 입체영상 관측 효율을 향상시킨다. 또한 소형으로 제작이 가능하며, 수중용으로 사용할 시 기존의 입체카메라에서 나타나는 물과 공기의 굴절을 차에 의한 왜곡현상을 제거할 수 있다. 그림 10과 11은 개발된 수평이동식 입체카메라 및 편광 방식 입체 모니터이다.



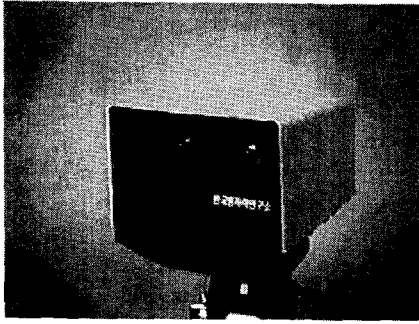


그림 12. 수평이동식 입체카메라



그림 13. 입체 디스플레이 장치

또한 안경식 입체디스플레이의 단점인 특수안경 착용에 따른 거부감과 부자연스러움을 극복하기 위하여 parallax barrier를 이용한 무안경식 자동입체 디스플레이를 개발하였다. 개발된 무안경식 입체영상 디스플레이는 줄무늬형 편광 렌즈를 이용하여 입체영상을 구현하는 방식으로 렌티큘라(lenticular) 렌즈를 사용하는 방식에 비해 렌즈 구현이 간단하고 가격이 저렴하며, 디스플레이 모니터의 화소 크기에 따른 적용성이 높다는 장점이 있다. 개발된 입체 디스플레이부는 주변환경에 대한 적응성과 이동성을 높일 수 있도록 디스플레이 면의 화소 크기가 균일한 박막 액정 디스플레이를 사용하여 개발하였다. 개발된 parallax barrier 자동입체 디스플레이는 A/D 변환부, 입체영상신호 합성부, 비디오 신호변환부, 영상 수직 회전부, LCD 디스플레이 구동부로 구성되어 있으며, 각 부는 소형 모듈화 되어 있어 취급이 용이하다. 그림 11은 개발된 무안경식 입체디스플레이 장치를 보여 준다.

## 5. 결론 및 활용전망

21 세기를 맞아 신기술 개발과 변혁이 시대적으로 요청되고 있는 즈음에 국내에서도 첨단기술의 종합체로 불리는 원자력발전소에 여러 첨단 핵심요소 기술들과 종합적 시스템의 구축하여 원자력발전소의 안전성 확보에 노력하고 있다. 이러한 필요성에 따라 한국원자력연구소에서는 중장기 연구 개발의 일환으로 작업자의 접근이 어려운 고방사선 구역내 효율적 감시점검을 위한 원자력시설용 감시 점검용 이동로봇을 개발하였다. 이동 로봇에 탑재되어 사용되는 센서장치들은 로봇에 탑재 및 분리 사용이 가능하도록 독립 시스템 형태로 설계되어 있어, 이동 장치 없이도 단독적으로도 사용이 가능하도록 하였다. 이동로봇은 좁고, 복잡하며 계단 등의 장애물이 존재하는 원자력발전소의 계단 승월이 가능하고, 평지회전반경이 작은 유성차륜형 전방향 방식의 이동장치를 채택하였다. 감시점검용 이동 로봇은 원자력발전소에서 작업자의 접근이 어려운 고방사선 구역뿐만 아니라 일상 감시가 요구되는 곳에서도 작업자를 대신하여 주어진 임무를 수행할 수 있도록 개발하고 있다. 개발중인 로봇은 원자력발전소의 고방사선 구역내 시설물에서 현장 실증시험 및 Mock-up 시험을 통하여 적합성과 타당성을 검증한 후 원자력발전소 1차 계통의 이상상태 조기 발견에 활용할 예정이다.

개발중에 있는 이동형 감시점검 로봇은 중수로형 원자력발전소의 칼란드리아 전면부 압력관 육안 검사, 지발성 중성자 시료 채취, 배관 누수 및 부식 검사, 기체 및 액체 누수 감시점검 등의 작업에 활용될 수 있다. 로봇의 각종 센서 모듈을 통해 측정된 정보들은 원격지 제어실에 전달되어 실시간 정보 분석을 통해 원전 안전성 관련 기기의 이상동작을 진단하게 된다. 또한 방사능으로 오염된 지역이나, 오염 가능성이 있는 지역에 투입하여 구역 방사선원을 측정 및 분석하여 방사능 오염 예상지역의 방사선원 분포도를 작성하여 효과적인 제염작업을 할 수 있게 한다. 또한 개발된 이동 로봇은 시설물의 단순한 감시 및 점검 뿐만 아니라 발전소 실제 사고 발생시 비상상태에 대응하여 사태진압 및 사후처리 작업에 활용이 가능하다.

감시점검 이동로봇은 원자력산업 분야 외에도 작업자의 접근이 제한되는 고온, 고압, 심해저, 우주와 같은 극한 작업환경의 감시, 점검이나, 작업자를 대신한 단순, 반복 형태의 감시작업에 응용이 가능하다. 특히 태평양 심해저에 존재하는 망간 단괴와 같은 광물 채집, 폐어선 수거, 해저 광케이블 설치 등 최근 관심이 집중되고 있는 해양분야에서 유용하게 활용될 수 있다. 심해저 광물 채집의 경우 모선에서 조작되는 무인 수중 로봇에 의해 광물질이 채집되는데 기존의 수중 로봇에 기 개발된 입체영상, 가상현실 원격조작, 이동 및 각종 센싱 등의 감시, 점검 이동 로봇 기술이 접목될 경우 보다 효율적인 작업이 이루어질 수 있다. 또한 관련 핵심요소 기술의 산업체 이전을 통하여 방재분야의 무인 감시 및 비상대응 시스템 국산화를 가속시켜 대외 기술 수입 의존도를 감소시킬 수 있으며, 농경 재배 분야에서는 농약 살포 및 경작의 무인화를 통하여 농업 종사자를 유해한 화학 물질로부터 보호하며, 농작물의 생산성을 증대시킬 수 있다.

현재 국외의 원자력발전소에서는 단순 기능의 전용 로봇들을 투입하고 있다. 원자력발전소의 효율적인 유지관리 및 안전성 제고를 위한 고방사선 지역 점검보수용 이동로봇과 안전성관련기기 유지보수용 다기능 로봇기술 개발에 대한 연구가 더욱 활발히 추진될 것으로 예측되는바, 원자력산업용 로봇 기술의 개발 노력이 원자력발전소 유지보수작업의 무인화를 앞당길 수 있으리라 사료된다. 향후 기술적으로 더욱 복잡하고 어려운 종류의 작업들을 수행하기 위하여 고도의 지능과 조작성 및 이동성을 구비한 다기능 고지능형 로봇 기술개발을 위하여 국가주도로 산학연 연계하에 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Harvey B. Medieran, "How mobile robots have helped at Chernobyl and other accidents, " Remote Technology, April 1988.
- [2] Workshop on Requirements of Mobile Teleoperators for Radiological Emergency Response and Recovery, Report No. ANL/EES-TM--291, ANL, USA, 1985.
- [3] G. Bruderemuller, "The Nuclear Emergency Service Company in the Federal Republic of Germany, " Report No. IAEA-SM-316/43, pp.541-551.
- [4] Wayne S. Thayer, "A Remote Control System for SURVEYOR, " SPIE Proc. of Mobile Robots, Vol.727, pp.17-24, 1986.
- [5] J.R. White, "Testing of Mobile Surveillance Robot at a Nuclear Power Plant, " Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp.714-719, 1987.
- [6] Omer Mercier, "From A.R.A.M.I.S. to FRASTAR 2, a Strategic Vision in Nuclear Robotics, " FRAMATOME 3N91, D-30, FRAMATOME, 1991.
- [7] 이동형 경작업로봇 기술개발, Technical Report No. KAERI/TR-377/93, 한국원자력연구소, 1993.
- [8] 원자력시설에서의 로봇 응용기술개발, Annual Report No. KAERI/RR-1047/91, 한국원자력연구소, 1991.
- [9] J. Grabowiecki, " Vehicle-Wheel, " U.S. Patent No.1,305,535, 1919.
- [10] J.F. Blumrich, " Omni-directional Wheel, " U.S. Patent No. 3,789,947, 1974.
- [11] B.E. Ilon, " Wheels for a Course Stable Selfpropelling Vehicle Movable in any Desired Direction on the Ground or Some Other Base, " U.S. Patent No.3,876,255, 1975.
- [12] Alvema Rehab, " Wheelon - the New Movement, " (Advertisement), P.O.Box17017, S-16117 Bromma, Sweden, 1982.
- [13] J.M. Holland, Basic Robotics Concepts, Holland W. Sams & Co., Indianapolis, IN, pp.107-170, 1983.
- [14] J.P. Wier and R.A. Garrett, " Ambulatory Drive Mechanism, " U.S. Patent No.4,258,815, 1981.
- [15] B. Carlisle, " Omni-directional Mobile Robot, " developments in Robotics, IFS Publishing Ltd.,

1983.

- [16] R. Johnson, " Part of the Beginning, " Robotics Age, Vol.6, No.8, pp.35-37, 1984.
- [17] P.F. Muir and C.P. Neuman, " Kinematic Modelling of Wheeled Mobile Robots, " Technical Report No. CMU-RI-TR-86-12, The Robotics institute, CMU, 1986.
- [18] 원전용 로봇 시스템 개발, Annual Report No. KAERI/RR-1631/95.