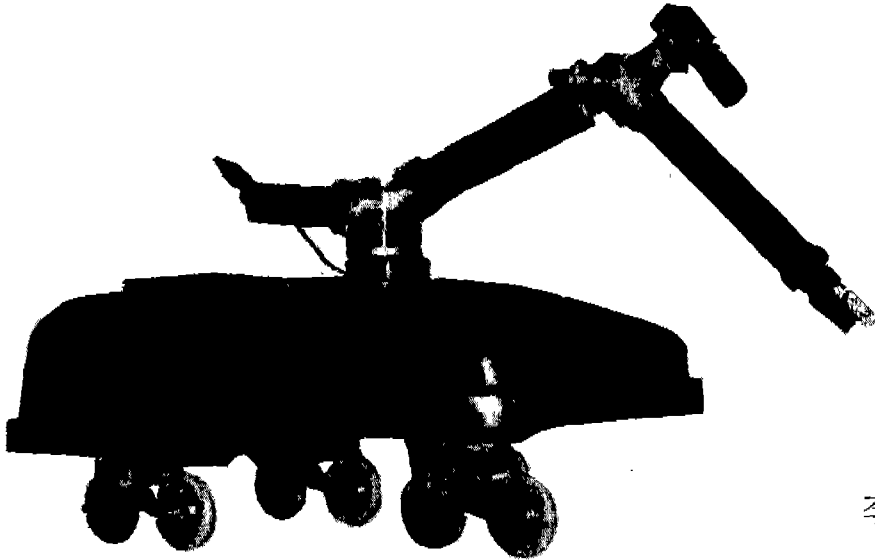


# 원자력 시설용 이동 로봇 개발



李 鍾 旻

한국원자력연구소 기초연구부장 겸 핵전자연구실장

## 1. 서 론

1978년 고리에서 최초로 원자력 발전이 상업 운전에 들어선지 10여년이 지난 현재 국내 전력의 절반 이상을 원자력이 담당하기 이르렀다. 오일 쇼크와 절프만 사태로 앞으로의 원자력 발전에 대한 기대와 의존이 더욱 증대될 것이다. 따라서 원자력 시설의 노후화와 국민의 원전 안전성에 대한 관심고조에 따른 원전 안전성 확보는 국가적인 차원에서 중요하다. 운전상태의 연속적 감시·점검을 통한 이상상태의 조기발견 및 고장부의 효율적인 유지·보수는 이러한 관점에서 시급히 해결해야 할 현안문제이다.

선진 각국에서는 첨단기술을 이용하여 로봇기술을 원자력시설에 응용하는 방안을 채택하여 감시·점검 및 유지·보수용 로봇을 상용화시키고 있다.

그러나 원자력시설과 같이 비정형적이고 복잡한 환경에서 다양한 작업을 원활히 수행하기 위해서는 조작기술, 이동기술 및 제어기술 등이

유기적으로 연결되어야 하며 시스템 설계에 있어서도 설계 개념이 일반산업용 로봇과는 전혀 달리 고려되어야 한다. 특히 센서로부터 입수된 정보와 제어 알고리즘을 실시간으로 적절히 수행할 수 있는 제어 시스템의 개발이 이루어져야 한다. 뿐만 아니라 방사선 환경에서 모든 작업이 이루어져야 하므로 이동 로봇 내에 위치한 각종 센서, 전자 소자들이 내방사선 기능을 갖고 있어야 한다.

본 연구에서는 원자력발전소에서의 사용을 목적으로 하는 이동 로봇을 개발하였다. 개발된 로봇의 조작기부는 7자유도로 구성되어 있으며 필요에 따라 각종 센싱 장치를 선택적으로 장착하여 감시·점검기능을 구비하도록 하였고 이동부는 3개의 유성차륜으로 구성하여 평면주행뿐만 아니라 계단 승하강 및 장애물 승월도 가능하도록 하였으며 이에 대한 초기실험을 실시하였다. 로봇의 제어 시스템은 분산처리방식의 멀티프로세서 구조를 갖도록 하여 제어 시스템의 제산능력을 높이고 신뢰성 및 확장성을 용이하

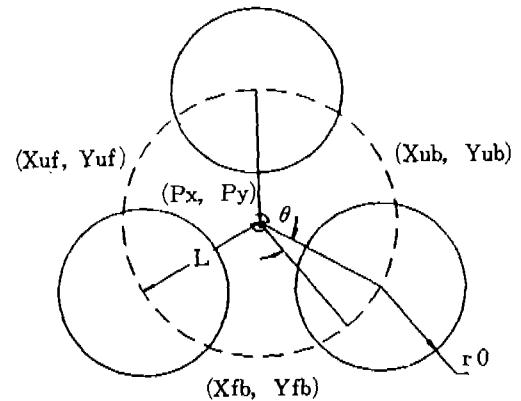
도록 하였고 3차원 그래픽 시뮬레이션이 가능한 오프-라인 프로그램을 이용하여 원격에서 로봇을 제어하였다. 프로토타입으로 개발한 로봇 KAEROT은 다양한 장애물이 있는 장소에서의 이동작업에 활용될 수 있음이 입증되었다. 현 단계에서는 발전소의 점검 감시 역할을 주업무로 담당하게 하지만 차후 스스로 판단하며 이동하여 오염물을 제거하고, 배관의 밸브를 돌리며 복잡한 수리도 할 수 있도록 할 예정이다.

## 2. 이동 시스템

### 가. 이동장치의 구조 및 기구학적 모델링

이동장치의 차륜구조는 계단 및 장애물의 승월이 가능하며 평지에서도 높은 주행속도를 갖는 특수 차륜방식으로 3개의 유성차륜으로 구성되어 있다. 좁은 통로에서 원활하게 회전할 수 있도록 전면 유성차륜에 조향기구를 부착하였다. 그림 1은 로봇의 차륜구조로, 전면·후면 유성차륜, 후면 좌·우 소차륜, 조향장치 등 총 5 자유도로 되어 있다.

이동장치의 기구학적 모델링은 우선 주행용 및 승월용 차륜으로 구별하여 유성차륜에 대한 모델링을 행한 후 전체 로봇의 모델링을 행하며 평지주행과 장애물 승월을 분리하여 각각 평면



〈그림 2〉 차륜의 모델링

좌표상에서 모델링하고 주행 모드 변화시에는 좌표축 변환을 하여 서로 연결되도록 한다. 즉, 평지 주행시에는 X와 Y좌표로 이루어지고, 장애물 승월시에는 Y와 Z좌표로 이루어진다.

유성차륜은 그림 2와 같이 2 자유도를 갖고 있으며, 공전과 자전이 서로 영향을 미쳐 승월용 차륜의 공전시에 주행용 차륜이 이동하게 된다. 승월용 차륜의 공전으로 인한 유성차륜의 중심위치 변화와 각각 주행용 차륜의 중심위치의 변화를 구하면 식 1~4와 같이 된다.

$$G_y = G_{y0} \quad (1-a)$$

$$G_z = r_0 + L \cos(\Pi/3 - \theta_p) \quad (1-b)$$

$$Y_{fb} = G_y + L \cos(\Pi/6 - \theta_p) \quad (2-a)$$

$$Z_{fb} = G_z - L \sin(\Pi/6 - \theta_p) \quad (2-b)$$

$$Y_{uf} = G_y - L \sin \theta_p \quad (3-a)$$

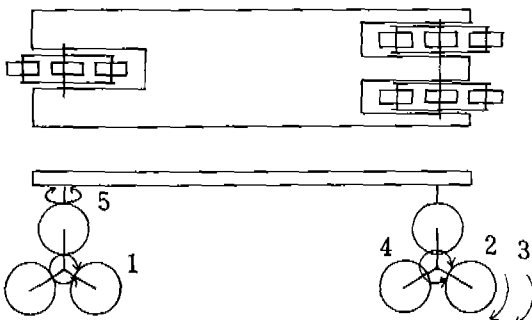
$$Z_{uf} = G_z + L \sin \theta_p \quad (3-b)$$

$$Y_{ub} = G_y - L \sin(\Pi/3 - \theta_p) \quad (4-a)$$

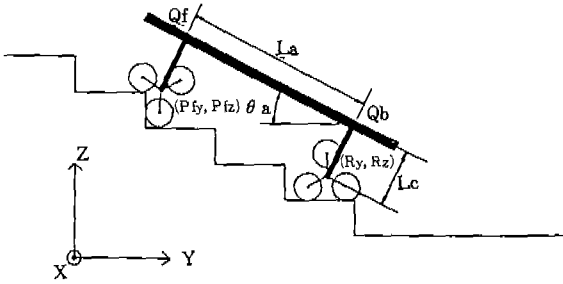
$$Z_{ub} = r_0 \quad (4-b)$$

여기서, 유성차륜이 전진 방향(시계방향)일 경우  $\theta_p = \theta$ 이고 후진방향(반시계)일 경우  $\theta_p = 2\Pi/3 - \theta$ 이다. 승월용차륜의 회전에 의한 주행용차륜의 변화  $\theta_d$ 는 식 5와 같이 주어진다.

$$\theta_d = \theta_p \mu \quad (5)$$



〈그림 1〉 이동부의 구조도



〈그림 3〉 로봇의 모델링

여기서,  $\mu$ 는 유성차륜의 감속비이다.

로봇 본체의 모델링은 후면 유성차륜의 중심 위치를 기준좌표  $(R_x, R_y, R_z)$ 로 하여 구성하였다. 그림 3에서 기준좌표  $R(R_x, R_y, R_z)$ 을 기준으로 전면·후면 좌우 유성차륜의 중심을  $P_f, P_r, P_l$ 이라 하면,  $Q_f, Q_b$ 는 다음 식 6 과 같다.

$$Q_f: (P_{fx}, P_{fy} - L_c \sin \theta_a, P_{fz} + L_c \cos \theta_a) \quad (6-a)$$

$$Q_b: (R_x, R_y - L_c \sin \theta_a, R_z + L_c \cos \theta_a) \quad (6-b)$$

또한  $Q_{fy} = Q_{by} + L_a \cos \theta_a$ ,  $Q_{fz} = Q_{bz} + L_a \sin \theta_a$ 이므로, 로봇이  $\theta_a$ 의 경사만큼 기울어진 경우의 전면 유성차륜의 중심위치  $P_f(P_{fx}, P_{fy}, P_{fz})$ 는 식 7로 주어진다.

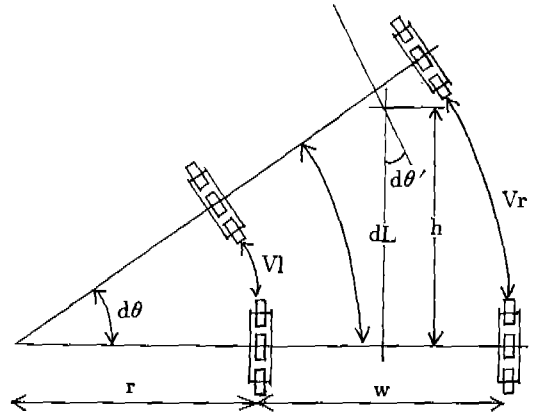
$$P_{fx} = R_x \quad (7-a)$$

$$P_{fy} = R_y + L_a \cos \theta_a \quad (7-b)$$

$$P_{fz} = R_z + L_a \sin \theta_a \quad (7-c)$$

#### 나. 평지 주행 및 계단 승월 알고리즘

평지 주행은 회전성능을 향상시키고, 회전반경을 최소로 줄이기 위하여 후면 좌우 소차륜의 속도차와 이에 일치하도록 전면 유성차륜을 조향함으로써 이루어진다. 평균 이동거리  $dL$ 과 회전 각도  $d\theta$ 의 값이 주어지면 뒷면 좌우 소차륜의 속도  $V_l, V_r$ 를 구할 수 있으며 그림 4는 회전시 좌우 소차륜의 관계를 나타낸다.



〈그림 4〉 회전시 좌우 소차륜의 속도

$$V_l = (dL - \frac{d\theta \cdot W}{2}) / \tau \quad (8-a)$$

$$V_r = (dL + \frac{d\theta \cdot W}{2}) / \tau \quad (8-b)$$

여기서,  $\tau$ 는 샘플링 시간이다.

로봇이  $d\theta$ 만큼 회전하기 위한 전면 유성차륜의 조향각도  $\theta_r$ 은 식 9와 같다.

$$\theta_r = \tan^{-1} \left\{ \frac{L_a}{R + W/2} \right\} \quad (9-a)$$

$$R = \frac{dL + d\theta \cdot W/2}{\theta_d} \quad (9-b)$$

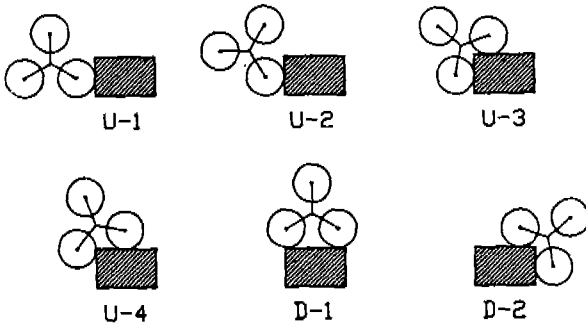
$L_a$ 는 전후 유성차륜 사이의 거리이다.

승월 가능한 계단의 크기는 제작된 이동장치의 유성차륜에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{H_i}{\sqrt{3}} < L < \frac{W_i}{\sqrt{3} \cos \alpha} \quad (10)$$

$W_i$ 와  $H_i$ 는 계단의 폭과 높이이며,  $L$ 은 유성차륜 앞의 길이이다.

이동장치가 한개의 계단이나 직각장애물을 원활히 승월하기 위해서는 승강 3단계, 하강 3단계, 총 6단계의 제어가 필요하다(그림 5). 직각장애물 승월의 경우는 1~6단계를 연속적으로 수행하고 계단일 경우는 1~3단계를 반복함으로써 승강이 가능하다.



〈그림 5〉 계단 및 장애물 승월 단계

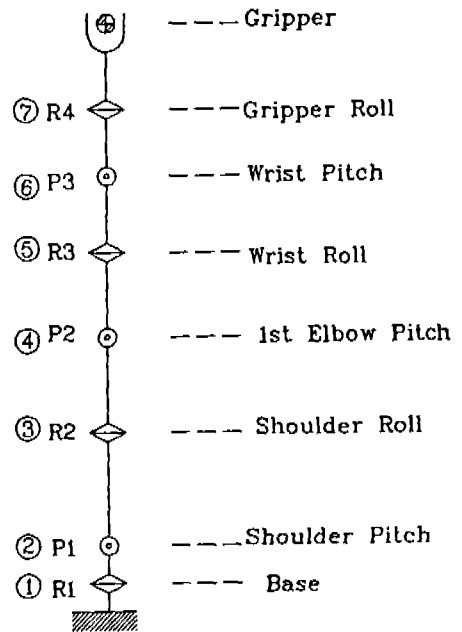
- 1 단계 : 장애물 감지센서를 사용하여 U-1의 상태를 감지
- 2 단계 : U-2를 거쳐 U-3까지 이동
- 3 단계 : U-4를 거쳐서 평형상태 유지
- 4 단계 : 바닥면감지센서로 바닥의 유무 감지
- 5 단계 : 3 단계의 역순
- 6 단계 : 2 단계의 역순

이동장치가 자유자재로 계단을 승하강하기 위해서는 계단의 크기를 정확하게 측정해야 하므로 초음파 센서를 사용하여 계단의 유무, 계단의 높이 및 폭을 실시간으로 측정해야 한다. 표제사진은 이동 로봇의 외관을 나타낸다.

### 3. 조작기부

조작기의 성능은 기구학적인 측면과 동력학적인 측면에서 고찰되어야 하는데, 기구학적인 측면에서의 최적구조는 모든 조인트 축이 상호평행이거나 수직이고 조인트의 움직임이 없으며 조인트의 회전이 제약을 받지 않는다고 가정한 경우 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- (1) 1, 2축이 수직이어야 한다.
- (2) 2, 3축이 평행이어야 한다.
- (3) 4, 5, 6축이 한 지점에서 교차해야 한다.
- (4)  $|m-n|=q$  :



〈그림 6〉 링크와 관절의 연결 모식도

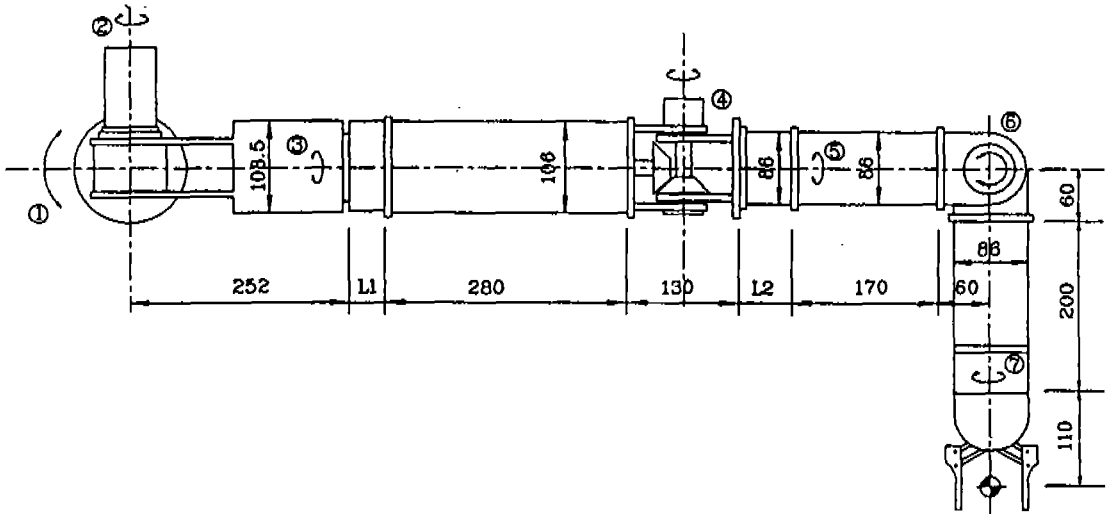
m은 Shoulder로부터 Elbow까지의 길이, n은 Elbow로부터 Wrist까지의 길이, q는 Wrist로부터 유효 첨담부까지의 길이이다.

조작기가 다양한 작업을 원활히 수행하기 위해서는 여유 자유도를 가져야 한다. 여유 자유도를 이용하여 특이점 및 장애물의 회피와 조작기의 조작성(Manipulability) 등의 성능평가지수를 최적화시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 조작기는 이상의 기구학적인 조건을 만족하는 여유 자유도를 갖는 조작기를 개발하였다.

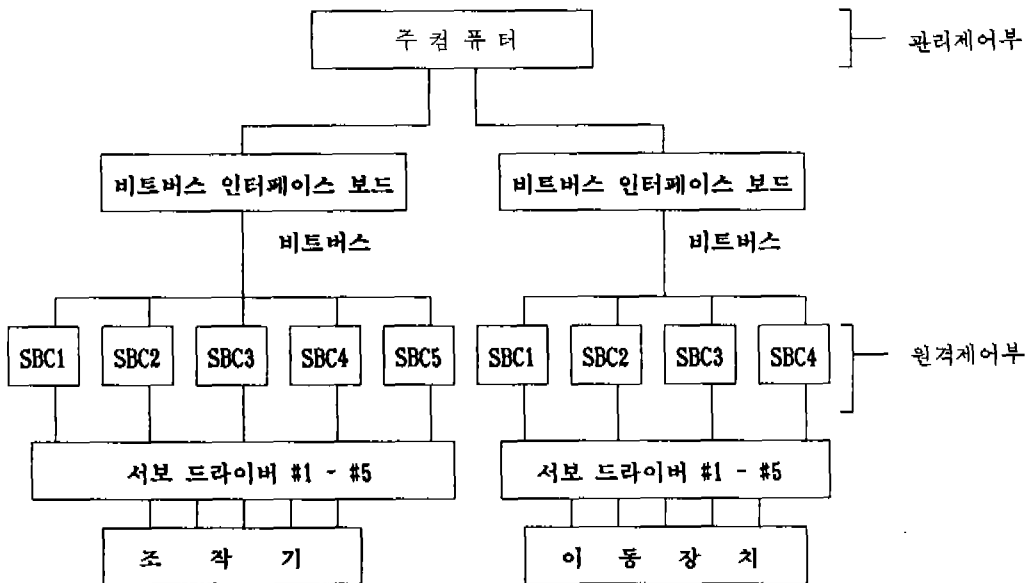
조작기는 원자력시설과 같은 복잡한 환경하에서의 사용을 목표로 가반 중량 2kg, 그리퍼의 최대속도 1m/sec, 최대가속도 2m/sec<sup>2</sup>, 정밀도 1mm를 설계목표로 하였고 다양한 기능을 부여하기 위하여 여유 자유도를 주어 관절의 수를 7개로 설계하였다. 그림 6은 링크와 관절의 연결상태를 보여 주며, 그림 7은 개괄적인 형상을

나타내 주고 있다. 관절의 연결기구인 링크는 원통형의 탄소섬유를 사용하여 무게비에 대한 강성도를 극대화하였다. 각 관절부에는 서보 모터를 직결하고 각 관절부의 동력전달 장치로서

는 유성 기어와 하모닉 기어를 사용하였다. 관절의 회전각도는 인크리멘탈 엔코더에서 측정되며 타코 제네레이터와 F/V 변환기를 사용하여 회전각속도를 측정하도록 하였다.



〈그림 7〉 조작기의 조립도



〈그림 8〉 로봇 제어 시스템의 구성도

#### 4. 제어 시스템

원자력시설과 같은 극한환경에서의 원격제어 및 로봇의 제어기는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

(1) 극한환경에서 로봇이 복잡한 작업을 수행하기 위해서는 다양한 제어 알고리즘을 빠른 시간에 수행할 수 있어야 한다. 또한 경사각 센서, 방위각 센서, 근접 센서 등의 여러가지 센서들을 사용하여 변화하는 환경에 대처하여야 한다. 이러한 사항들을 만족시키기 위해서는 제어기의 계산이 실시간으로 되어야 한다.

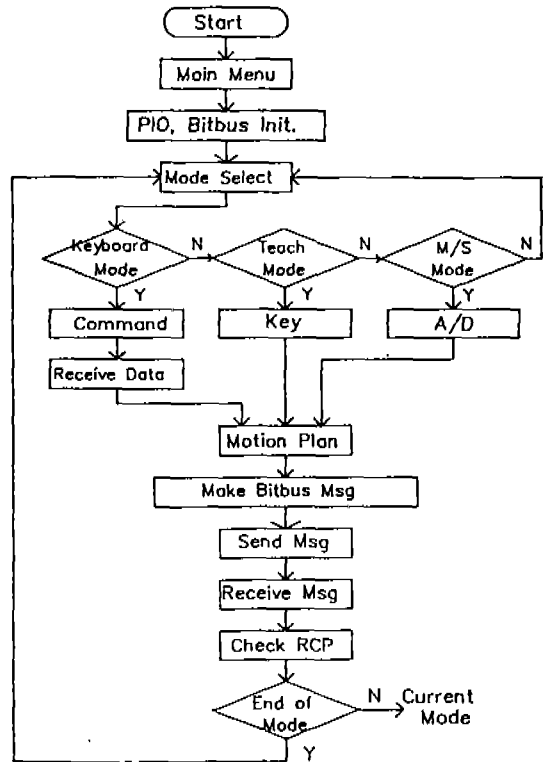
(2) 외부 전자파에 의한 간섭 등 여러가지 원인에 의해 제어기가 오동작을 하지 말아야 하며 만일 오동작을 일으킨 경우에는 이것에 대해서 신속하게 대처할 수 있어야 한다.

(3) 향후 여러가지 기능들이 용이하게 추가될 수 있어야 한다. 즉, 로봇 시각, 형상 인식, 자연어 이해 등의 인공지능 기술 등을 통한 시스템의 확장성이 용이해야 된다.

이상의 요구조건을 만족시키기 위해서 분산처리방식의 멀티프로세서 구조의 제어 시스템을 구현하고, 전체 제어 시스템을 그 기능에 따라서 관리제어부 및 원격제어부로 분리하여 복잡한 작업을 다수의 제어부에서 분담하여 수행할 수 있도록 함으로써 계산능력과 신뢰성을 높였다. 그림 8은 분산처리구조로 설계된 로봇 제어 시스템의 전체 구성도이다.

관리제어부는 전체 시스템을 관리하며 키보드, 조이스틱 등의 입력장치로부터 작업자의 입력을 해석하여 그 결과를 원격제어부로 전송하는 기능을 담당한다. 관리제어부는 주 컴퓨터(Host Computer)로 입출력 인터페이스와 주변기기확장장치 용이한 PC-AT 버스를 사용하며 CPU는 32비트 마이크로프로세서(intel 80386, 16MHz)를 사용하였다.

관리제어부의 동작 모드는 마스터 모드와 교



〈그림 9〉 관리제어부의 프로그램 흐름도

시 모드로 나누어진다. 그림 9는 로봇 제어를 위한 주 프로그램의 흐름도이다.

원격제어부는 고속 직렬 시리얼 데이터 전송 방식인 SDLC(Synchronous Data Link Control) 프로토콜을 기본으로 하는 비트버스 네트워크에 모터 제어, 각종 센서 데이터 처리용 원격제어 컴퓨터들을 연결시켜 전체 제어 시스템의 분산처리에 의한 실시간 제어를 가능하게 한다. 관리제어부의 명령을 다수의 원격제어용 컴퓨터들이 동시에 수행하고 관리제어부로 현재의 각종 상태를 전송한다.

원격제어부는 조작기의 모터 제어와 이동장치의 모터 및 센서 데이터 처리를 위한 두개의 독립된 네트워크로 구성된다. 각 네트워크에 연결된 슬레이브 컴퓨터는 다음과 같은 주 기능들을

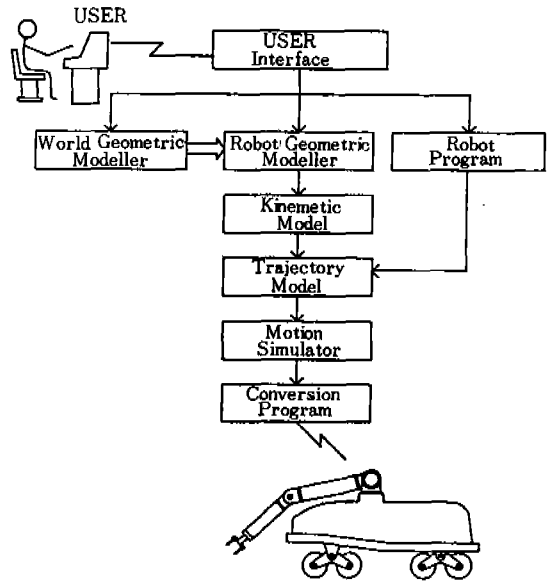
수행한다.

- (1) 조작기 제어부와 이동장치 제어부와의 메시지 교환
- (2) 네트워크 상의 메시지를 슬레이브 노드가 받은 후 노드 내의 해당 태스크로 메시지 전달
- (3) 각 모터의 속도 및 위치제어
- (4) 시스템의 Set-up시 조작기와 이동장치의 동작을 초기화
- (5) 각종 센서로부터의 데이터 처리
- (6) 비트버스 네트워크를 통하여 상위 제어부로 현재의 상태 및 데이터를 전송

마스터 노드는 관리 제어부의 버스에 연결되며 슬레이브 노드는 비트버스 상에 Multidrop으로 연결된다. 조작기 제어용 컴퓨터에 5개의 슬레이브 노드와 이동장치 제어용 컴퓨터에 4개의 슬레이브 노드가 연결된다. 원격제어부의 운용체계는 intel 8051 계열의 마이크로 컨트롤러의 제어를 위하여 제공되는 iDCX 51을 사용하였다.

## 5. 오프-라인 프로그래밍

로봇 교시방법중 작업현장에서 직접 작업을 교시하는 온 라인(On-line) 방식은 로봇을 교시하는 동안에는 작업이 중단되어야 하고, 원자력 시설과 같이 작업현장에 사람의 접근이 곤란한 경우나 복잡한 작업 및 센서를 사용하는 작업시에는 교시하는 것이 어렵다. 이러한 제문제는 작업현장 밖에서 교시하는 오프-라인(Off-line) 프로그래밍 방식을 이용하여 해결될 수 있다. 그러나 오프 라인 프로그래밍은 실제의 작업 현장을 떠나서 이루어지기 때문에 사용자가 가정된 로봇의 작업공간이나 사용자가 교시한 로봇의 경로가 실제적으로는 불가능한 것이거나 비효율적일 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실제의 작업현장 상황과 유사한 환경을 컴퓨



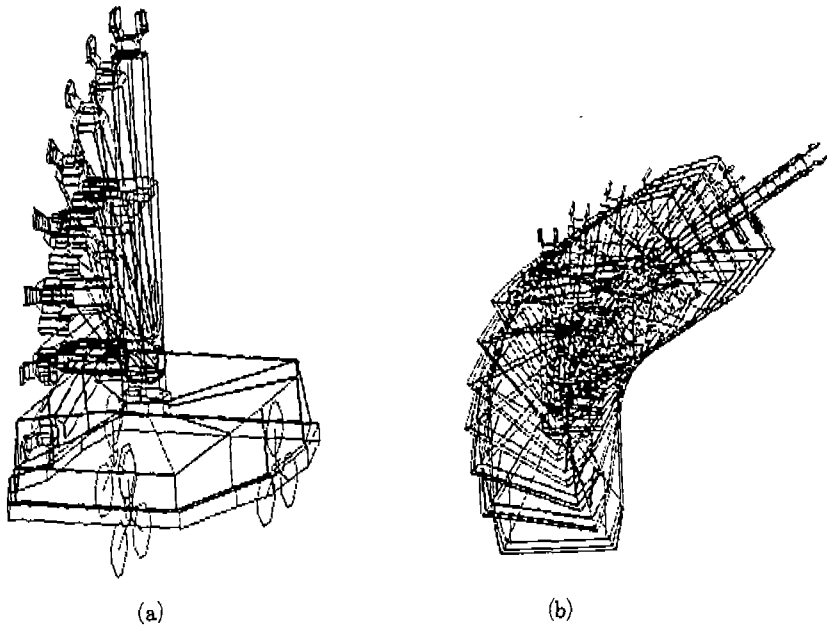
(그림 10) 시스템의 구성도

터 그래픽스를 이용하여 구현하고 로봇의 움직임을 시각화하였다.

오프 라인 프로그래밍 시스템의 전체 구성은 그림 10에 나타나 있다. 오프 라인 프로그래밍 시스템은 크게 모델링, 시뮬레이션 및 프로그램 변환부분으로 구성된다. 그림 11은 조작기 및 이동 로봇의 동작을 시뮬레이션한 것이다.

## 6. 결 론

최근 급격히 성장하고 있는 제조업 분야에 산업용 로봇 응용기술을 바탕으로 고기능, 고성능 로봇의 출현이 가까운 장래에 이루어질 것으로 예상된다. 원자력 분야에서도 용도에 따른 다양한 종류의 원자력용 로봇 개발의 필요성이 대두되고 있어 방사선 극한 환경에서의 로봇 적용연구가 활발히 진행되고 있다. 원자력 선진국에서는 이미 다양한 원자력용 로봇을 실용화시키고 있다. 따라서 국내에서도 검증되고 있는 원자력



〈그림 11〉 시뮬레이션 예

시설에서의 안전성 향상을 위해 원자력 로봇 기술의 개발이 시급하다. 본 연구는 국내에서의 원전용 로봇의 개발 방향을 제시하고 아울러 개발의 가능성을 입증하고 고도의 로봇 관련 기술을 축적하는 데 그 목적이 있다. 현재, 개발된 이동 로봇 KAEROT은 프로토타입으로서, 계단승하강과 장애물 승월이 가능하도록 개발되었다. 멀티프로세서 구조의 제어기를 갖춘 이동 로

봇 KAEROT은 개발 초기인 현재에는 감시·점검 작업에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 복잡한 보수·정비 기능까지 구비하기 위해서는 인공지능 등을 통한 지능화를 이루어야 할 것이며, 제어 시스템의 고장극복 기능을 추가하여 로봇 자체의 신뢰도를 높이게 될 것이다. 이와 함께 원자력용 로봇의 필수적 요건인 내방사선 연구도 병행, 수행될 것이다.

참고문헌

1. D. T. Pham and W. B. Heginbotham, International Trends in Manufacturing Technology, IFS Ltd., 1986.
2. 김병수, 김창희, 황석용, 김승호, 이종민, "장애물 승월이 가능한 원자력시설용 이동 로봇에 관한 연구", 전자공학회 논문집 Vol. 28B, No. 1, 1991.
3. Jongmin Lee, "Teleoperated Mobile Robot for Infection in Nuclear Facilities", Korean Automatic Control Conference, Vol. 1 of 2, 1990.
4. 김병수, 김창희, 김승호, 이종민, "계단승하강용 이동로봇 설계", 대한 전자공학회 학술대회 논문집, Vol. 11, No. 1, 1988.
5. 로보트 제어용 멀티프로세서 개발, 기술보고서 KAERI/RR-617/87, 1987.
6. Takanori Matsubara, etc, "Development of Mobile Manipulator for Maintenance and Inspection in Containment Vessels of Nuclear Power Plants", Remote Handling in Nuclear Facilities, 1985.