

## 갠트리 로봇 매니플레이터를 이용한 원격취급 기술에 관한 연구

### A Study on Remote Handling Technology Using Gantry Robot Manipulator

박병석, 안성호, 이종렬, 김성현, 이인성, 윤지섭

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

사용후핵연료 해체공정 Mockup 시험시설은 경수로형 모의 사용후핵연료 집합체를 대상으로 기계적 전처리공정을 개발한다. 이의 시설에는 연료봉 인출, 절단, 탈피복 및 구조폐기물 압축장치 등이 설치되어 있다. 사용후핵연료의 전처리 공정은 사용후 핵연료 재활용의 필수 공정일 뿐만 아니라, 사용후 핵연료의 중간저장 등에도 활용되는 공정이다. 사용후핵연료 해체공정에서는 장치의 원격취급 및 제어 기술의 확보 연구를 수행한다. 시설 내부에는 X, Y 방향으로 이동하는 트롤리에 Z 방향으로 상하 이동하는 텔리스코픽(Telescopic) 튜브가 부착된 갠트리형 이송장치가 설치하였고, 튜브 하단에 로봇 매니플레이터를 장착하였다. 이송장치와 매니플레이터로 구성된 갠트리 로봇 매니플레이터는 사용후핵연료 해체공정 시험에 있어서 연료봉, Bottom Nozzle, 집합체 구조폐기물 등의 원격취급 및 이송작업을 수행한다. 또한, Top Nozzle을 제거하기 위한 가이드 튜브 절단작업도 수행한다. 본 논문에서는 이와 같은 원격취급 연구에 대한 실험 결과들을 보여준다.

#### Abstract

The spent fuel disassembling process mockup(SFDPM) test facility is used for developing and testing a mechanical head end process of spent fuel, by using the PWR fuel assembly mockup. In the SFDPM test facility various equipments are installed including a rod extraction, cutting, decladding device, and a skeleton compaction device. The head end process of spent fuel assembly is used for the process of the spent fuel reuse and also, used for the interim storage process. In the SFDPM, the remote handling and control technology is developed and tested to establish the head end process. A robot manipulator is attached to the telescopic tube installed at the trolley which is movable into X and Y direction. The manipulator is used for remotely handling and transporting fuel rods, bottom nozzles, and skeletons, etc. Also, it is used for remotely cutting guide tubes in order to remove top nozzle. This paper shows the experimental results of remote handling in the SFDPM.

#### 1. 서 론

사용후핵연료의 기계적 전처리공정인 연료봉 인출, 절단, 탈피복 및 집합체 구조폐기물 압축등으로 이루어지는 사용후핵연료 해체공정을 개발하기 위해 1/2 길이의 모의 17x17 PWR 사용후연

료 집합체를 대상으로 사용후핵연료 해체공정 Mockup 시험시설을 설치하였다. 사용후핵연료의 전처리 공정은 사용후핵연료 재활용의 필수 공정일 뿐만 아니라, 사용후 핵연료의 중간저장 등에도 활용되는 공정이다. 사용후핵연료의 전처리공정은 대부분 원격공정으로 이루어지며, 본 시설에서는 사용후핵연료의 원격 취급장치 및 이들 장치의 제어기술의 확보를 위한 연구를 수행한다. 사용후핵연료 해체공정 Mockup 시설에는 각종 해체 장치(연료봉 인출, 절단, 탈피복 장치, 구조 폐기물 압축장치 등)와 이를 원격으로 유지·보수할 수 있는 로봇 매니플레이터를 설치하였다. 로봇 매니플레이터는 갠트리 구조물의 트롤리 하단에 부착한 텔리스코픽 튜브에 설치하였다. 매니플레이터는 제어룸에 있는 제어반을 통해서 컴퓨터로 원격 제어된다.

지금까지 원거리의 로봇 매니플레이터를 제어하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다. 일반적으로 이러한 원격제어는 작업자가 슬레이브 매니플레이터의 주위 환경 상태를 알 수 있다면 더 좋은 성능을 나타낼 수 있다. 이를 위해 많이 쓰이는 것으로는 카메라를 이용한 비전 시스템과, 접촉 정보를 위한 힘 센서와 촉각 센서 등이 있다. 원격제어 장치로는 티칭 펜던트(Teaching Pendant)와 마스터 암(Master Arm)이 널리 사용되고 있다. 티칭 펜던트는 가격이 저렴하고 구조가 간단하다는 장점이 있으나 작업자의 생각을 신속하게 반영 할 수 없다는 단점이 있다. 이에 비해 마스터 암은 인간의 팔에 밀착되어 있기 때문에 작업자의 생각을 신속하게 반영할 수 있다는 장점이 있으나 구조가 복잡해 질 수 있으며, 가격도 비교적 고비용이 든다는 단점이 있다. 본 논문에서는 슬레이브 매니플레이터와 유사한 구조를 갖는 마스터 암을 제작하여 원격제어 장치로 활용하였다.

본 논문에서는 로봇 매니플레이터 시스템 및 이를 이용한 연료봉 인출, Bottom Nozzle 이송, 구조폐기물 이송 및 Top Nozzle 가이드 튜브 절단 작업 실험에 대해서 기술한다.

## 2. 매니플레이터 시스템 구성

### 2.1 갠트리 로봇 매니플레이터

크기가 10,000mm(W)x6,000mm(D)x5,000mm(H)인 구조물 위에 X, Y축 방향으로 구동하는 트롤리 하단에 Z축 방향으로 상하 2,000mm 움직일 수 있는 3단형 텔리스코픽 튜브를 설치하였다. 튜브 하단에는 삼성전자에서 생산한 FARAMAN-AM1 6축 매니플레이터를 부착하였다. 매니플레이터의 엔드이펙터(End Effector)에 그리퍼와 절단 톱을 선택적으로 부착할 수 있게 하였다. 엔드 이펙터와 그리퍼 사이에 RCC(Remote Center Compliance, 모델 RCC-112-BS)를 부착하여 손목부에 유연성을 부여하였다. 그리퍼는 연료봉, Bottom Nozzle 및 구조폐기물(skeleton) 등을 취급할 수 있도록 제작하였으며, 조작기 손목의 허용 토크가  $2kg_f \cdot m$ 인 점을 감안하여 무게는  $25 kg_f$ , RCC를 포함한 무게중심 까지의 길이는 20cm가 되도록 하였다. 그리퍼의 구동원은 DC 모터를 사용하였고, 12V 인가시에 최고속도가  $0.6 cm/sec$ , 최대 개폐거리는 5.5cm가 되도록 하였다. 파지면 후면에는 스트레인 게이지(모델 N2A-13-T004R-350)를 부착하여  $15 kg_f$ 까지의 파지력을 감지 할 수 있게 하였다. 또한, 파지면에는 볼(Ball)을 삽입하여 Bottom Nozzle 파지시 미끄러짐이 발생하지 않도록 하였다. 절단 톱은 750W 용량의 상용 파이프 절단 톱을 개조하여 Top Nozzle 부의 가이드 튜브를 절단 할 수 있게 하였다. 트롤리 후면에는 1톤 용량의 호이스트를 부착하여 구조폐기물 이송시에 매니플레이터와 협동 작업을 할 수 있게 하였다. 또한, 시설 전방과 옆면 및 매니플레이터 몸체 회전부에 각각 1대씩의 카메라를 설치하여 작업자의 운전을 시각적으로 돕게 하였다. 이들에 대한 상세한 사양은 표 1에서 보는 바와 같으며, 제작 사진은 그림 1과 같다.

### 2.2 마스터 암

로봇 매니플레이터 엔드이펙터에 부착한 그리퍼 및 절단톱 등을 조작자가 작업대상에 유연하

게 접근시킬 수 있도록 하기 위해 마스터 암을 그림 2와 같이 제작하였다. 이의 구조는 로봇 매니레이터와 유사하게 하였으며, 몸통(Body), 상부 팔(Upper Arm), 하부 팔(Lower Arm) 및 손목(Wrist)으로 구성된다. 하부 팔의 후면에는 무게 추(Balancing Weight)를 달아 초기 상태에서 하부 팔이 지면과 평행하게 하였다. 회전부에는 회전형 전위차계(Rotary Potentiometer, 모델 CPP-35B)를 부착하였으며, 전위차계와 회전부 사이에는 1/2의 감속기어를 설치하여 측정 회전각의 분해능을 높이도록 하였다. 손목부에는 환봉을 설치하여 작업자가 손을 부드럽게 감아 쥘 수 있도록 하였고, 환봉 상단면에는 3개의 토글 스위치(Toggle Switch) 및 2개의 푸쉬 버튼 스위치(Push Button Switch)를 부착하여 손가락으로 쉽게 조작할 수 있도록 하였다. 토글 스위치는 매니플레이터 하부 팔의 회전, 엔드이펙터의 요(Yaw) 및 그리퍼의 파지 동작을 담당하고, 푸쉬 버튼 스위치는 마스터 암 입력 차단 기능과, 마스터 암 입력 차단후 프로그램을 이용한 조작기 운전 등을 담당한다.

표 1. 갠트리 로봇 매니플레이터 사양

항목	조작기	이송장치	
동작형태 및 제어축수	수직다관절형, 6축	직교형, 3축	
위치반복정밀도(mm)	±0.1	±0.2	
크기(mm)	650 + 800 (Lower + Upper ARM)	10,000×6,000×5,000, 2,000 (가로×세로×높이, 양정)	
최대 속도	1축	120° /sec	23.8cm/sec(주행)
	2축	120° /sec	23.8cm/sec(횡행)
	3축	120° /sec	15.8cm/sec(상하)
	4축	240° /sec	-
	5축	240° /sec	-
	6축	400° /sec	-
취급하중 ( $kg_f$ )	10	1,000	



그림 1. 갠트리 로봇 매니플레이터 시스템

## 2.3 제어 시스템

갠트리 로봇 매니플레이터를 조종하는 제어반(Control Desk)을 그림 3에서 보는 바와 같이 별도의 제어룸에 설치하였으며, 전기 및 신호선의 길이는 최대 30m에 이른다. 제어반은 Windows 98 환경에서 운영되는 Pentium 586 컴퓨터 시스템, 갠트리 이송장치 및 매니플레이터의 구동 서보모터 드라이버, 카메라 분할기 및 모니터, 그리고 파지력 인디케이터(Indicator), 조작 버튼 및 전기 계장 등으로 구성된다. 컴퓨터 시스템에는 갠트리 이송장치 및 매니플레이터를 제어하기 위해 삼성 8축 제어보드(MMC-PV8) 2개를 장착하였다. 마스터 암의 전위차계 신호들은 제어보드의 A/D 단자에 연결시켰다. 매니플레이터 이송장치의 제어는 버튼 혹은 Windows 프로그램 방식으로 운전할 수 있게 하였으며, 매니플레이터는 버튼, 마스터 암 및 프로그램 운전을 선택적으로 할 수 있게 제어반을 구성하였다. 1톤 호이스트도 제어반에서 버튼으로 조작 할 수 있게 하였다. 카메라 모니터는 원격지의 작업자가 조작기 및 이송장치의 작업상황 또는 이송상황을 감시할 수 있게 한다.



그림 2. 마스터 암



그림 3. 갠트리 로봇 매니플레이터 제어반

## 3. 매니플레이터 기구학적 해석

### 3.1 마스터 암

본 연구에 사용한 마스터 암의 좌표계는 그림 4와 같다. 이때 Denavit-Hartenberg 표기법을 사용하여 순기구학(Forward Kinematics)을 구하면 식 (1)과 같이 기준 좌표계에서 손목 좌표계까지의 위치 성분이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 P_x &= \frac{1}{2} l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - \frac{1}{2} l_4 \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4) \\
 &\quad + \frac{1}{2} l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \frac{1}{2} l_3 \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) \\
 &\quad - \frac{1}{2} l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{1}{2} l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \cos(\theta_1) + d_2 \sin(\theta_1) \\
 P_y &= \frac{1}{2} l_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4) - \frac{1}{2} l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
 &\quad + \frac{1}{2} l_3 \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) + \frac{1}{2} l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 &\quad - \frac{1}{2} l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{2} l_2 \cos(\theta_1) + l_1 \sin(\theta_1) - d_2 \cos(\theta_1) \\
 P_z &= -l_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_2) + d_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

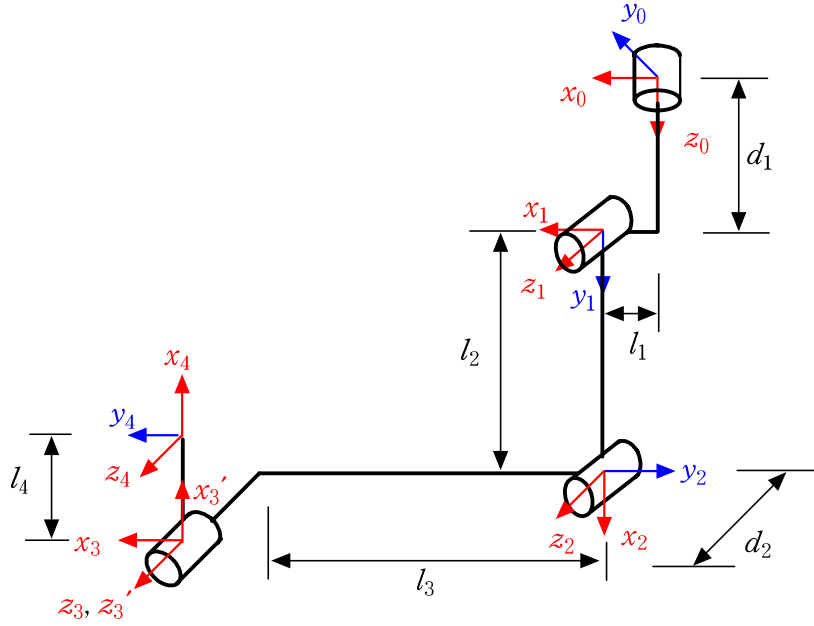


그림 4. 마스터 암 좌표계

### 3.2 로봇 매니플레이터

본 연구에 사용한 로봇 매니플레이터의 좌표계는 그림 5와 같다. 여기서도 Denavit-Hartenberg 표기법을 사용하여 순기구학을 구하면 식 (2)와 같이 기준 좌표계에서 손목 좌표계까지의 위치 성분이 얻어 진다.

$$\begin{aligned}
 P_x &= d_3(C_1 S_{23} C_4 C_5 - S_1 S_4 C_5) + d_3 C_1 C_{23} S_5 - d_2 C_1 C_{23} - l_3 C_1 S_2 C_3 - d_3 C_1 C_2 S_3 \\
 &\quad - l_2 C_1 S_2 + l_1 C_1 \\
 P_y &= S_1 S_{23} C_4 C_5 d_3 + C_1 S_4 C_5 + S_1 C_{23} S_5 d_3 + S_1 C_{23} d_2 - S_1 S_{23} l_3 - S_1 S_2 l_2 + S_1 l_1 \\
 P_z &= -C_{23} C_4 C_5 d_3 + S_{23} S_5 d_3 + S_{23} d_2 + C_{23} l_3 + l_2 C_2 + d_1
 \end{aligned} \tag{2}$$

이때 로봇 매니플레이터의 전체 작업 자세를 형성하는 3축까지에 대해 순기구학을 구하면 식 (3)과 같이 된다.

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} -C_1 S_{23} & S_1 & C_1 C_{23} & C_1 C_{23} d_2 - C_1 S_{23} l_3 - C_1 S_2 l_2 + C_1 l_1 \\ -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1 C_{23} & S_1 C_{23} d_2 - S_1 S_{23} l_3 - S_1 S_2 l_2 + S_1 l_1 \\ C_{23} & 0 & S_{23} & S_{23} d_2 + C_{23} l_3 + l_2 C_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & P_x \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & P_y \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

이의 역기구학은 각 조인트 변환 행렬의 역행렬을 이용하여 구할 수 있으며, 구해진 관절 각을 정리하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \\
 \theta_2 &= \text{atan2}(S_2, C_2) \\
 \theta_3 &= \text{atan2}(S_3, C_3)
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $X' = d_2 C_3 - l_3 S_3$ ,  $Y' = C_1 P_x + S_1 P_y - l_1$ ,  $Z' = d_2 S_3 + l_3 C_3 + l_2$ ,

$$S_2 = \frac{Y'Z' \pm \sqrt{(Y'Z')^2 - (X'^2 + Z'^2)(Y'^2 - X'^2)}}{X'^2 + Z'^2}, \quad C_2 = \sqrt{1 - S_2^2} \text{ 이다.}$$

또한,  $X = 2l_2 l_3$ ,  $Y = (C_1 P_x + S_1 P_y - l_1)^2 + (P_z - d_1)^2 - l_3^2 - l_2^2 - d_2^2$ ,  $Z = 2d_2 l_2$ ,

$$S_3 = \frac{YZ \pm \sqrt{(YZ)^2 - (X^2 + Z^2)(Y^2 - X^2)}}{X^2 + Z^2}, \quad C_3 = \sqrt{1 - S_3^2} \text{ 이다.}$$

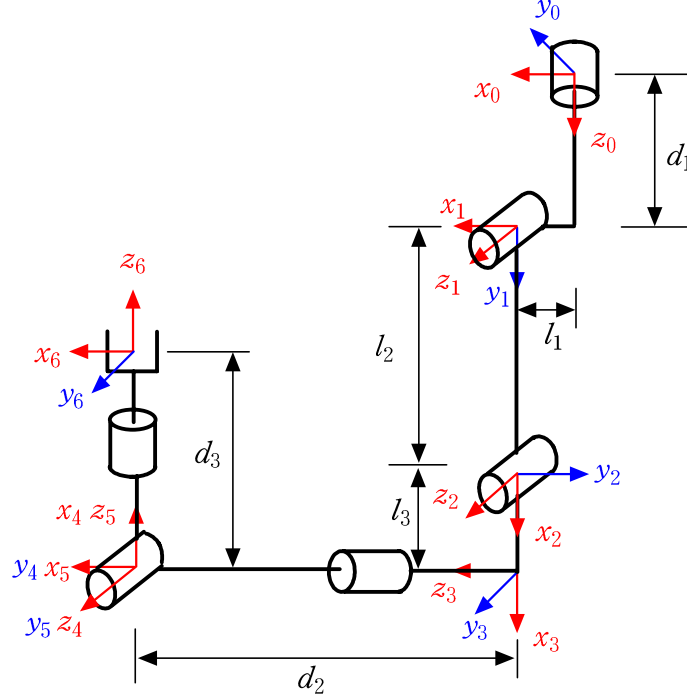


그림 5. 로봇 매니플레이터 좌표계

#### 4. 경로계획

로봇 매니플레이터는 연속된 변환 행렬로 표현이 가능하기 때문에 엔드이펙터에 부착된 그리퍼나 툴의 경로계획은 곧 매니플레이터의 작업계획을 의미한다. 경로생성은 주위 지형에 대한 적응성 및 장애물 회피능력을 잘 표현할 수 있도록 3차원 직교 공간상에서 경로계획을 수행한다. 부드러운 곡선을 얻기 위해 시간에 대한 다항식으로 표현이 가능한 스플라인 곡선을 일반적으로 이용한다. 이때 시작점과 마지막 점에서의 위치, 속도, 가속도 조건을 갖는 스플라인 곡선은 5차 다항식으로서 식 (5)와 같이 표현된다.

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (5)$$

시작과 끝 시간을 각각  $t_0$  및  $t_f$  라하고, 시점 및 종점을  $q_0$ 와  $q_f$  라고 정의하면, 식 (5)에 대한 시점과 종점에서의 구속조건은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} q(t_0) &= q_0 = a_0 \\ q(t_f) &= q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 \\ \dot{q}(t_0) &= \dot{q}_0 = a_1 \\ \dot{q}(t_f) &= \dot{q}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4 \end{aligned}$$

$$\ddot{q}(t_0) = \ddot{q}_0 = 2a_2$$

$$\ddot{q}(t_f) = \ddot{q}_f = 2a_2 + 6a_3t_f + 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 \quad (6)$$

위의 구속조건으로부터 식 (5)의 매개변수를 구하면 식 (7)과 같이 된다.

$$a_0 = q_0, \quad a_1 = \dot{q}_0, \quad a_2 = \frac{\ddot{q}_0}{2}$$

$$a_3 = \frac{20q_f - 20q_0 - (8\dot{q}_f + 12\dot{q}_0)t_f - (3\ddot{q}_0 - \ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^3}$$

$$a_4 = \frac{30q_0 - 30q_f + (14\dot{q}_f + 16\dot{q}_0)t_f + (3\ddot{q}_0 - 2\ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^4}$$

$$a_5 = \frac{12q_f - 12q_0 - (6\dot{q}_f + 6\dot{q}_0)t_f - (\ddot{q}_0 - \ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^5} \quad (7)$$

### 5. 매니퓰레이터 운전 소프트웨어

X, Y, Z 방향으로 움직이는 매니퓰레이터 이송장치, 로봇 매니퓰레이터, 그리퍼 및 절단 톱을 원격지의 제어실에서 운전할 수 있는 윈도우즈 프로그램을 그림 6과 같이 개발하였다. 본 프로그램은 화면 구성부분과 제어부분으로 구성되는데 화면 구성부분은 Borland C++ Builder 4.0을 사용하여 Windows 98 환경에서 작성하였으며, 제어부분은 삼성 제어보드의 I/O, Analog 출력, 및 Encoder 입력 등의 라이브러리 함수에 기초하여 작성하였다. 운전 프로그램은 크게 Setup, Jog, Path, Master Arm 메뉴로 구성되어 있다. Setup 메뉴에서는 프로그램에 사용되는 일부 변수 값을 쉽게 설정 및 변경 할 수 있도록 한다. Jog 메뉴는 마우스 혹은 키보드 입력으로 이송장치 및 매니퓰레이터를 스텝 동작으로 움직일 수 있게 한다. 또한, 외부의 버튼 신호를 입력받아 스텝 동작시킬 수 있게 한다. 이의 메뉴는 이송위치가 지정되어 있지 않을 경우에 사용한다. Path 메뉴는 이송거리, 최고속도, 가감속 시간을 설정하여 이의 궤적으로 이송장치 및 매니퓰레이터를 동작시킬 수 있게 한다. Master Arm 메뉴는 마스터 암으로 매니퓰레이터를 동작시킬 수 있게 한다. 각각의 메뉴에는 현재의 이송장치 및 매니퓰레이터의 위치, 속도 및 그리퍼의 파지력을 수치값으로 나타낸다. 이 외에도 데이터의 입출력, 저장 및 그래픽 전시 기능도 갖추고 있다.



그림 6. 갠트리 로봇 매니퓰레이터 운전 프로그램

## 6. 원격취급 실험

### 6.1 Bottom Nozzle 취급

Bottom Nozzle은 길이가 1/2인 모의 17x17 PWR 핵연료 집합체 가이드 튜브의 하단부에 볼트로 체결되어 있다. 체결된 볼트는 연료봉 인출장치의 임팩트렌치를 사용하여 제거되며, 이때 Bottom Nozzle은 가이드 튜브에 걸쳐 있게 된다. Bottom Nozzle과 연료봉과의 전후 및 좌우 간격은 25mm 정도가 되며 이 사이로 그리퍼가 삽입된다. 그리퍼가 삽입되는 과정에서 여유간격은  $\pm 2\text{mm}$  정도이기 때문에 매우 조심스런 조작이 요구된다. 엔드이펙터와 그리퍼 사이에 부착된 RCC는 추가적으로  $\pm 3\text{mm}$  정도의 유연성을 준다. 이의 실험모습은 그림 7과 같다. 그리퍼를 이용하여 Bottom Nozzle을 제거하고 이송하는 과정은 다음과 같다. 먼저 제어반의 조작버튼을 이용하여 이송장치를 핵연료 집합체 근처에 접근시킨다. 다음에는 마스터 암을 움직여 매니퓰레이터의 하부 팔이 집합체와 평행하게 한다. 다시 조작버튼을 이용하여 이송장치 및 매니퓰레이터를 미세조정하여 20mm 두께를 가지는 Bottom Nozzle 전후면 사이로 그리퍼를 삽입한다. 다음에는 Bottom Nozzle의 무게가 5.4  $\text{kg}_f$ 인 점을 감안하여 10  $\text{kg}_f$  정도의 파지력까지 그리퍼를 닫고 조작버튼으로 이송장치를 구동시켜 Bottom Nozzle을 가이드 튜브로부터 제거한다. Bottom Nozzle이 가이드 튜브로부터 완전히 벗어나면 마스터 암으로 매니퓰레이터를 작동시키고, 동시에 조작버튼으로 이송장치를 움직여 Bottom Nozzle을 이송한다.

### 6.2 연료봉 취급

연료봉은 Bottom Nozzle과 Top Nozzle 사이에 있는 그리드(Grid)에 삽입되어 있는데, Bottom Nozzle을 제거시킨 후 그리퍼를 이용하여 핵연료 집합체로 부터 연료봉을 인출한다. 연료봉의 인출은 인출장치로부터 수행되나 매니퓰레이터의 적용 가능성 및 수행능력을 평가하기 위함이었다. 이의 실험 모습은 그림 8과 같다. 그리퍼를 이용하여 연료봉을 인출하는 과정은 다음과 같다. 먼저 제어반의 조작버튼을 이용하여 이송장치를 핵연료 집합체 근처에 접근시킨다. 다음에는 마스터 암을 움직여 매니퓰레이터의 하부 팔이 집합체와 평행하게 한다. 다시 조작버튼을 이용하여 이송장치 및 매니퓰레이터를 미세 조정하고, 그리퍼를 닫아 연료봉을 파지 후 인출을 시작한다. 연료봉이 중간정도 인출되면 그리퍼를 열고 이송장치를 후진시켜 다시 한번 연료봉을 파지하고 인출한다. 연료봉이 완전히 집합체로부터 인출되면 마스터 암으로 매니퓰레이터를 작동시키고, 동시에 조작버튼으로 이송장치를 움직여 연료봉을 이송한다.

### 6.3 Guide Tube 절단

Top Nozzle은 집합체 가이드 튜브의 상단부에 용접되어 있다. 만약 Bottom Nozzle도 용접되어 있다면 연료봉을 인출하기 위해서는 어느 한쪽 가이드 튜브를 절단하여야 한다. 또한, 집합체 해체 공정에서도 필요하다. 그림 9는 Top Nozzle 부의 가이드 튜브를 절단하는 실험 모습을 보여준다. 개조한 톱을 엔드이펙터에 장착하고 톱날을 왕복운동 시켜 가이드 튜브를 절단한다. 절단 톱을 이용하여 가이드 튜브를 절단하는 과정은 다음과 같다. 먼저 제어반의 조작버튼을 이용하여 이송장치를 핵연료 집합체의 Top Nozzle 근처에 접근시킨다. 다음에는 마스터 암을 움직여 매니퓰레이터의 하부 팔 및 절단톱이 지면과 약간의 경사각을 가지도록 하면서, 집합체와 수직이 되도록 한다. 다시 조작버튼을 이용하여 이송장치 및 매니퓰레이터를 미세조정하여 절단톱을 가이드 튜브에 접근시키고 경로계획에 의해서 매니퓰레이터를 작동시킨다. 이때 2  $\text{kg}_f$  정도의 접촉력이 발생하도록 힘 제어도 수행한다.

### 6.4 Skeleton 취급

핵연료 집합체로부터 연료봉이 모두 인출되고 나면 구조폐기물만 남게 되는데, 이는 구조폐기물 압축장치로 이송되어야 한다. 이때 1톤 호이스트와 매니퓰레이터가 협동하여 이송하게 된다.



그림 10은 이의 실험 모습을 보여 준다. 호이스트 및 매니플레이터를 이용하여 구조폐기물을 이송하는 과정은 다음과 같다. 먼저 제어반의 조작버튼을 이용하여 이송장치를 구조폐기물 근처에 접근시킨다. 다음에는 호이스트 조작버튼을 이용하여 후크(Hook)를 구조폐기물 근처까지 하강시키고 마스터 암으로 그리퍼를 후크까지 안내하여 후크가 가이드 튜브를 걸을 수 있도록 그리퍼로 안내한다. 후크가 가이드 튜브에 걸리게 되면 그리퍼가 그리드를 잡게하고 호이스트 및 이송장치를 구동시키면서 이송한다.

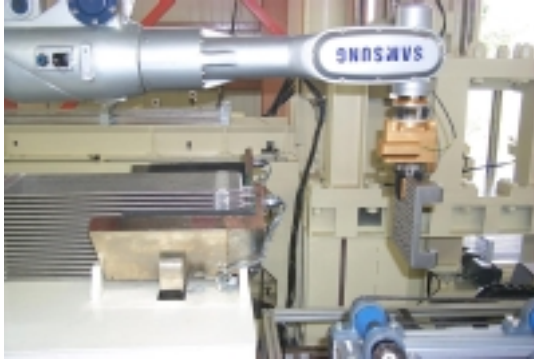


그림 7. Bottom Nozzle 취급

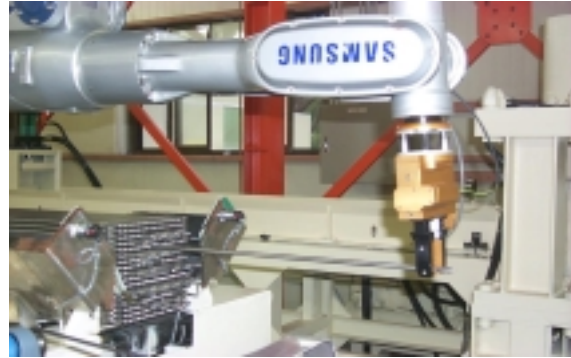


그림 8. 연료봉 인출



그림 9. Top Nozzle 가이드 튜브 절단



그림 10. 구조폐기물 취급

## 7. 결론

X, Y, Z 방향으로 운동하는 이송장치와 로봇 매니플레이터로 구성되는 갠트리 로봇 매니플레이터를 설치하고, 원격지 제어반에서 조작버튼 혹은 마스터 암으로 이를 운전하는 프로그램을 개발하였다. 사용후핵연료 전처리 공정인 연료봉 인출, 절단, 탈피복 및 구조폐기물 압축공정에 있어서 갠트리 로봇 매니플레이터의 엔드이펙터에 제작한 그리퍼를 부착하고, 이를 이용하여 연료봉 및 Bottom Nozzle을 취급하였고, 호이스트와 협력하여 집합체 구조폐기물을 이송하는 작업을 수행하였다. 또한, 엔드이펙터에 개조한 절단톱을 부착하여 Top Nozzle을 제거하기 위한 가이드 튜브 절단작업도 수행하였다. 작업은 대부분 카메라 모니터를 보면서 원격지에서 조심스럽게 이루어졌다. 실험 결과, 작업대상의 시야확보가 매우 중요한 변수로 작용하였으며, 시야확보가 되더라도 숙련도에 따라 작업 성과는 매우 차이가 남을 알 수 있었다. 따라서, 원격지 작업에서는 공구의 성능도 중요하지만 시각 및 접촉기술과 운전자의 숙련성이 크게 요구됨을 확인 할 수 있었다.

## 참고문헌

1. J. N. Herndon, et al., "Advanced Remote Handling for Future Applications : The Advanced Integrated Maintenance System," Proc. of the International Top. Meeting on Remote Systems and Robotics in Hostile Environments, Pasco, Washington, pp.625-629, 1987.
2. G. Streiff, et al., "Association of Remote Dexterity and Remote Lifting for Maintenance in Fuel Reprocessing Industry," Proc. of the International Top. Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, Gatlinburg, Tennessee, pp.197-203, 1984.
3. J. J. Fisher, et al., "Development of a Telerobotic System for Handling Contaminated Process Equipment," Proc. of the International Top. Meeting on Remote Systems and Robotics in Hostile Environment, pp.78-85, 1987.
4. E. Abel, et al., " Nuclear Robotics Research at UKAEA's Harwell Laboratory," Proc. of 3rd Top. Meeting on Robotics and Remote system, 1-5, 1989.
5. Michael Brady, "Robot Motion : Planning and Control." MIT Press. 1982.
6. Gpldenberg, A. A., Benhabib, B. B. and Fenton, R. G., "A Complete Generalized Solution to the Inverse Kinematics of Robot," IEEE Robots and Automation Vol. RA-1, NO.1 pp. 14-20, 1985.
7. 윤지섭 외, "사용후핵연료 원격취급장치 개발", 한국원자력연구소 보고서(KAERI/RR-18 01/97), 1997.