

## 기계식 Master-Slave 조작기의 그래픽 시뮬레이터

이종열\*(한국원자력연구소), 송태길( ), 김성현( ), 홍동희( ), 정재후( ), 윤지섭( )

### Graphic Simulator of the Mechanical Master-Slave Manipulator

J. Y. Lee(KAERI), T. G. Song( ), S. H. Kim( ), D. H. Hong( ), J. H. Jeong( ), J. S. Yoon( )

#### ABSTRACT

The Master-Slave manipulator is the generally used remote handling equipment in the hot cell, in which the high level radioactive materials such as spent fuels are handled. To analyze the motion and to implement the training system by virtual reality technology, the simulator for M-S manipulator using the computer graphics is developed. The parts are modelled in 3-D graphics, assembled, and kinematics are assigned. The inverse kinematics of the manipulator is defined, and the slave of manipulator is coupled with master by the manipulator's specification. Also, the virtual workcell is implemented in the graphical environment which is the same as the real environment.

This graphic simulator of manipulator can be effectively used in designing of the maintenance processes for the hot cell equipment and enhance the reliability of the spent fuel management.

**Key Words :** Spent fuel(사용후핵연료), M-S manipulator(마스터-슬레이브 조작기), Device(디바이스), Graphic simulation(그래픽 전산모사), Kinematics (운동 기구학), Teleoperation (원격조작)

#### 1. 서론

사용후핵연료와 같은 고방사성물질의 취급은 그 특성상 핫셀(Hot cell)이라고 하는 폐쇄공간에서 작업을 수행하며, 핫셀에 설치된 공정장치의 운전 및 유지보수는 원격으로 수행한다. 또한, 이 공정에서의 물질 운반 및 공정장치 유지보수 작업도 M-S 조작기, 서보 조작기 등과 같은 취급장치를 원격으로 운전하여 수행한다. 이러한 고방사성물질 취급에 있어서의 원격조작은 안전성이 가장 중요한 요소로서, 조작기 운전시 타 장치와의 간섭 및 충돌로 인한 공정의 중단 또는 공정장치의 고장이 발생하지 않도록 하여야 한다. 이를 위하여 실제 운전 전에 실제환경과 동일한 조건에서 조작기 운전숙달을 위한 훈련이 필요하다.

운전 숙달을 위한 훈련 시스템은 실제의 장치와 동일하게 모의로 제작하거나 그래픽 시뮬레이션 기술을 활용한다. 그래픽 시뮬레이션 기술은 이의 기반인 컴퓨터기술의 비약적인 발전에 따라 모든 산업의 다양한 분야에 적용되고 있다. 이 기술은 비주얼 환경(Visual Environment)에서 사용자가 원하는 행위를 모사함으로써, 그 과정 및 결과를 사전에 가시화 할 수 있을 뿐만 아니라, 실제 시스템에서 발생할 수 있는 예기치 않은 상황이나 문제점을 발

견하고 해결 방법을 모색할 수가 있기 때문에, 시스템의 설계와 해석, 개발을 위한 불로서 중요한 비중을 차지하고 있다.

본 연구에서는 고방사성물질을 취급하는 핫셀에서 원격취급장치로 주로 사용하고 있는 기계식 M-S 조작기의 구동 특성을 분석하고, 실제 공정에서의 안전하고 효율적인 운전 절차를 확립할 수 있는 조작기 운전 훈련 시스템을 구축하기 위하여 그래픽 시뮬레이션 시스템을 개발하였다.

부품의 3차원 그래픽 모델링 및 장치의 동작을 전산모사하여 분석하기 위한 소프트웨어로는 상용 3-D 그래픽 설계/전산모사 도구인 Delmia사의 IGRIP (Interactive Graphics Robot Instruction Program)을 이용하였다.

#### 2. 그래픽 모델링 및 Kinematics 설정

##### 2.1 기계식 M-S 조작기 개요

기계식 M-S(Master-Slave) 조작기는 방사성 물질을 취급하는 핫셀에서 공정장치간의 물질이송작업과 연계작업 및 공정장치의 유지보수 작업을 수행하는 장치이다. 이 장치는 핫셀 내부에 위치한 슬레이브를 핫셀 차폐벽을 관통하여 연결된 외부의

마스터로 조작하여 작업을 수행하는 시스템으로, fig. 1은 CRL사 제품인 L-HD type의 M-S 조작기 모델을 나타내고 있다.

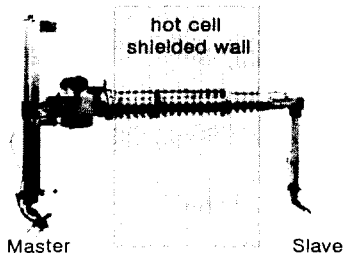


Fig. 1 Picture of L-HD model M-S manipulator.

## 2.2 부품 구성 및 모델링

기계식 M-S 조작기는 핫셀 내에서 물질 운반 및 유지보수 작업을 수행하는 슬레이브 모듈부와 이를 핫셀 밖에서 운전하는 마스터 모듈부, 그리고 핫셀의 차폐벽을 관통하여 마스터와 슬레이브를 기계적으로 연결하는 관통 모듈부로 분류된다.

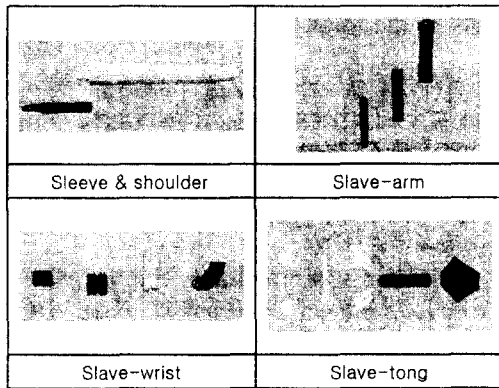


Fig. 2 3-D graphic Parts model of Slave.

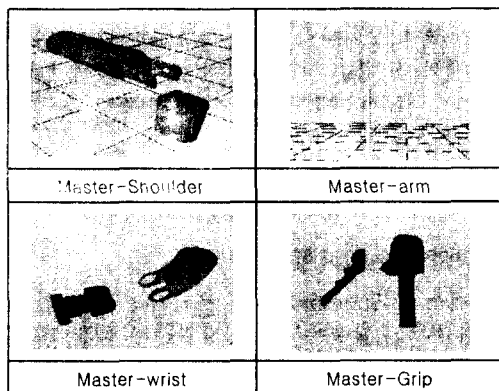


Fig. 3 3-D graphic Parts model of Master.

이와 같이 조작기의 기능에 따라 분류된 모듈별 부품에 대한 3차원 그래픽 모델은 fig. 2, 3에 나타난 바와 같다.

## 2.3 부품 조립 및 Device 구성

3차원 그래픽으로 모델링된 각 부품은 분류된 모듈별 구동 특성을 고려하여 조립한 후 디바이스를 구성한다. M/S 조작기는 inverse kinematics에 의해 구동하여야 하므로, 부품 조립시 순서와 조립위치를 정확하게 하여야 한다. fig. 4는 각 모듈의 부품을 조립한 슬레이브와 마스터를 나타낸 것이다.

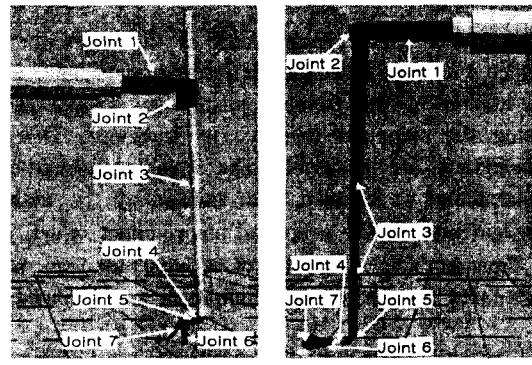


Fig. 4 The device of master & slave

Fig 4.에 나타내고 있는 바와 같이 마스터와 슬레이브는 7개의 구동부를 포함하고 있다. 마스터는 각각의 조인트를 설정하고 자유도를 정의하였으며, 마스터와 연계되어 구동하게 되는 슬레이브도 동일한 방법으로 조인트와 마스터의 동작에 따른 연계 자유도를 정의하여 디바이스를 구성하였다. 이러한 디바이스의 마스터와 슬레이브의 구동 type은 table 1.에 표기한 바와 같다.

Table 1 Kinematic Types of the Device

Joint No.	Master	슬레이브
Joint 1	Rotate	Rotate
Joint 2	Rotate	Rotate
Joint 3	Translate	Translate
Joint 4	Rotate	Rotate
Joint 5	Rotate	Rotate
Joint 6	Rotate	Rotate
Joint 7	Rotate	Translate, Rotate

## 3. 조작기 Kinematic 설정

### 3.1 조작기 구동 특성

조작기 그래픽 시뮬레이터를 이용한 시스템의 분석 또는 운영절차를 효율적으로 확립하기 위해서는 시뮬레이터에 그의 구동특성을 정확하게 부여하여야 한다. 본 연구에서 수행하고자 하는 조작기 모델의 구동과 관련한 사양은 fig. 5와 같으며, 마스터와 슬레이브의 X, Y, Z 각 방향으로의 이동과 회전 구동 및 연계구동 특성이 나타나 있다.

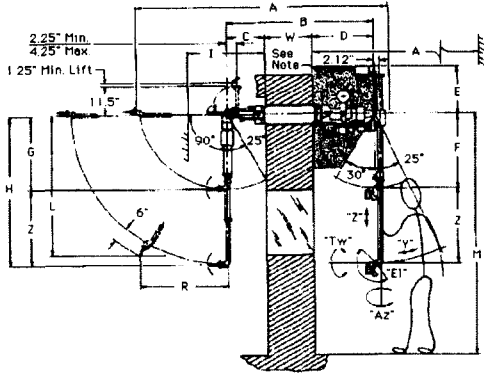


Fig. 5 Motion characteristics of M-S manipulator.

### 3.2 Master Kinematics

핫셀 내에 위치한 슬레이브를 핫셀 밖의 운영구역에서 원격으로 조정하기 위한 마스터는 table 2.에서 보여주는 바와 같이 7개의 조인트 각각에 Rotate 또는 Translate 등의 자유도를 부여하였다. 이렇게 부여된 기구학에 의하여 조인트 1에서 6까지는 inverse kinematics에 의해 구동하며, 조인트 6에 offset을 주어 TCP(Tool Center Point)를 위치시키고, 조작기의 end effector(grip)부인 조인트 7을 구동하게 하였다.

Table 2 Kinematics of master device

Joint No.	Kinematics
Joint 1	Rotate X = 1
Joint 2	Rotate Y = 2
Joint 3	Translate Z = 3
Joint 4	Rotate Z = 4
Joint 5	Rotate Y = 5
Joint 6	Rotate X = 6
Joint 7	Rotate Y = 7

### 3.3 Slave Kinematics

핫셀 밖의 운영구역에 위치한 마스터의 원격

조정에 의해 구동하는 슬레이브는 마스터의 구동과 연계하여 7개의 조인트에 table 3.에서 나타낸 바와 같이 자유도를 부여하였다. 슬레이브의 조인트 1에서 6까지는 마스터와 동일한 inverse kinematics에 의하여 구동할 수 있도록 설정하였으며, table에서 각 조인트의 kinematics에 주어진 C는 조작기 구동 특성(fig. 5.)에 따른 마스터에 대한 슬레이브 구동과 연동되는 비례수치이다.

Table 3 Kinematics of slave device

Joint No.	Kinematics
Joint 1	Rotate X = C * dof(1)
Joint 2	Rotate Y = C * dof(2)
Joint 3	Translate Z = C * dof(3)
Joint 4	Rotate Z = C * dof(4)
Joint 5	Rotate Y = C * dof(5)
Joint 6	Rotate X = C * dof(6)
Joint 7	Translate Y = C * dof(7) Rotate Y = C * dof(7)

또한, 조인트 6에 offset을 주어 슬레이브의 TCP(Tool Center Point)를 위치시켰으며, 슬레이브 조작기의 end effector(tong)부인 조인트 7은 아래와 같이 자유도를 부여하였다. 즉, 슬레이브의 말단부인 조인트 7은 tong을 구성하는 부품들이 마스터의 grip과 구동하는 type이 다르므로, 이의 구동을 구현하기 위하여 그래픽 시뮬레이션 툴에서 제공하는 kinematics 함수를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{tong-p1} = 180 \cdot \text{RAD} + \text{sasssa1}(57.8465, 19.1058 \cdot \text{RAD}, 70.6133 + \text{dof}(7), 30.5, 22.57)$$

$$\text{tong-p2} = 19.1058 \cdot \text{RAD} + \text{sasssa1}(57.8465, 19.1058 \cdot \text{RAD}, 70.6133 + \text{dof}(7), 30.5, 22.57) + \text{sasssa2}(57.8465, 19.1058 \cdot \text{RAD}, 70.6133 + \text{dof}(7), 30.5, 22.57)$$

$$\text{tong-p3} = -19.1058 \cdot \text{RAD} - \text{sasssa1}(57.8465, 19.1058 \cdot \text{RAD}, 70.6133 + \text{dof}(7), 30.5, 22.57) - \text{sasssa2}(57.8465, 19.1058 \cdot \text{RAD}, 70.6133 + \text{dof}(7), 30.5, 22.57)$$

## 4. Workcell 구축 및 전산모사

### 4.1 Workcell 구축

기계식 M-S 조작기는 핫셀외부 운영구역에서 차폐유리를 통한 시각을 확보하면서 마스터 조작에 의하여 슬레이브를 원격으로 운전하여 공정을 수행하게 된다. 이러한 환경에서의 조작기 구동을 분석하기 위하여 fig. 6과 같이 그래픽 환경에 실제환경과 동일한 workcell을 구축하였다. fig. 6에 나타난 바와 같이 슬레이브는 차폐벽을 관통하여

설치된 관통부 모듈에 의하여 운영구역의 마스터와 연결되어 있으며, 마스터를 조작하는 운영자의 전면에는 핫셀 내부의 공정상황을 확인하면서 공정을 수행할 수 있도록 핫셀벽에 차폐유리가 설치되어 있다.

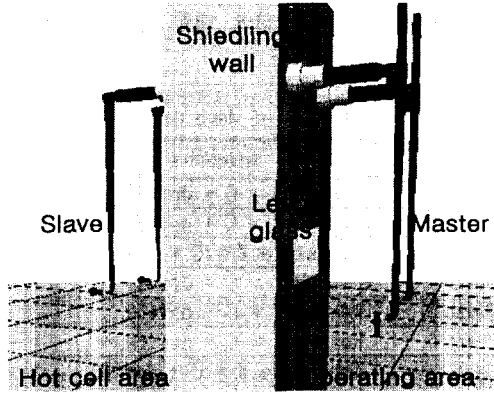


Fig. 6 Workcell for M-S manipulator.

#### 4.2 구동 모사

기계식 M-S 조작기에 대한 핫셀 내에서의 구동범위, 일정한 지점으로의 접근 가능성, 타 조작기와의 협동작업성 등의 분석을 위하여 구축된 가상 workcell에서 모사실험을 수행하였다. 이를 위하여, inverse kinematics에 의해 구동하도록 설정된 마스터의 TCP에 태그를 부착하였으며, 부착된 태그를 움직여 마스터를 구동시키고 동시에 연계된 슬레이브가 움직이게 된다. M-S 조작기는 하나의 차폐유리를 통하여 2대의 조작기를 운전하면서 공정을 수행하는 것이 일반적이며, fig. 7은 workcell에 설치된 2대의 M-S 조작기가 TCP에 부착된 태그를 움직임에 따라 마스터와 슬레이브가 구동하는 모습을 보여주고 있다.

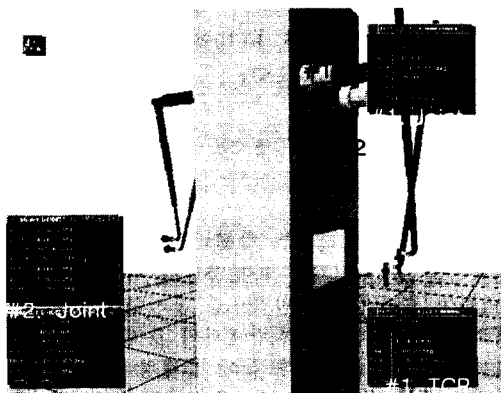


Fig. 7 Graphic simulation of the manipulator.

또한, fig. 7에 나타난 바와 같이 마스터와 슬레이브의 각 조인트 값과 TCP 위치 정보를 표시하도록 하여 작업자의 운전 정보 취득이 용이하게 하고, 실제 작업과 비교분석이 가능하도록 하였다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 고도의 안전성이 요구되는 사용후 핵연료 취급공정을 수행하는 핫셀에 설치하여 물질 취급 및 유지보수 작업에 주도적으로 사용되는 기계식 M-S 조작기의 구동분석 및 향후 운전자의 숙달훈련을 위하여, 실제 환경과 동일한 가상환경에서 조작이 가능하도록 그래픽 시뮬레이터를 개발하였다. 이를 위하여 장치를 3차원으로 그래픽 모델링하고, 구동 특성에 따라 조인트와 자유도를 정의하여 말단부를 제외한 조작기의 inverse kinematics 설정하였다. 그리고, 조작기 슬레이브의 조인트와 kinematics는 마스터와의 연계 구동을 고려하였으며, 별도의 장을 생성하여 각각의 조인트 값과 TCP 위치값 정보를 표시할 수 있도록 하였다.

향후, 이를 바탕으로 하여 조작기 구동 측면에 있어서 보다 실제에 가까운 환경을 구축하기 위해서는 이 시스템에 동력학 기능을 추가할 필요가 있으며, 스페이스 볼 또는 조이스틱과 같은 외부 인터페이스 장비와 연계 및 가상현실 시스템으로의 발전이 필요하다. 이 그래픽 시뮬레이터는 조작기에 의한 고방사성 물질 취급 공정 절차 분석 및 최적화와 조작기 운전자의 숙달 훈련을 통하여 안전성 및 신뢰성을 고도화시키는데 활용될 것이다.

#### 참고문헌

1. E. Abel, "Nuclear Robotics Research at UKAEA's Harwell Laboratory," Proc. of 3rd Top. Meeting on Robotics and Remote Systems, 1-5, 1989.
2. Yudaka Omura, etc., "Virtual prototyping for canister receiving devices of high level waste storage facility," Proc. of '99 DENEb User Meeting for Korean Users, 1999.
3. Central Research Laboratories. INC., "Master-Slave Manipulator-Genral and Installed Ass'y", 1993.
4. 박병석, 윤지섭 외, "A Study on Remote Handling Technology Using Gantry Robot Manipulator", 한국원자력학회 추계 학술발표회의 논문집, 2000.
5. Deneb, "IGRIP User Manual and Tutorials", 1995.
6. Deneb, "LLTI User Manual and Tutorials", 1995.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.