

## 연구용원자로 원격해체공정의 그래픽 전산모사

### Interactive Graphic Simulation of Research Nuclear Reactor Dismantling Process

°박영수\*, 윤지섭\*, 이병직\*, 오원진\*, 전재욱\*\*, 홍순혁\*\*

\*\*한국원자력 연구소 (Tel: (042)868-8259 Fax: (42-868-8254; E-mail: nyspark1@nanum.kaeri.re.kr)

\*\*성균관대학교 제어계측공학과 (Tel: 0331-290-7129; Fax: 0331-290-7231; E-mail: jwjeon@yurim.skku.ac.kr)

**Abstracts** A graphic simulation program is developed to assimilate the remote dismantling process of research nuclear reactors. This program makes extensive use of a commercial robot graphic instruction program. Firstly, a realistic graphic model of research reactors are built along with various dismantling equipments. Using the graphic instruction languages provided by IGRIP, then, a graphic process simulation program is developed that operates interactively with the user. Consequently, it is made possible for a process designer to visualize an arbitrary dismantling sequence and interactively modify the process. It is expected that the developed system will be utilized as an effective operator aid in both design and execution phases of remote dismantling of research reactor.

**Keywords** Graphic simulation, Process design, Remote dismantling, Research nuclear reactor

## 1. 서 론

국내 연구용 원자로 TRIGA MARK 2 및 TRIGA MARK 3 가 수명을 다하여 2000년도까지 해체하게 되었으므로 국내 원자력 시설 해체기술의 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다. 원자력 발전소의 해체를 수작업으로 수행할 경우 방사선 피폭의 우려가 있으므로, 원격조작 방식으로 수행하는 것이 바람직하다. 따라서 한국원자력연구소에서는 전반적인 원격해체기술의 개발을 수행하고 있으며, 개발된 기술을 연구용원자로의 해체과정에 투입, 기술실증을 수행할 계획이다. 이상의 연구개발은 크게 해체장비의 개발과 해체 공정 설계로 구분되어 수행되고 있다.

원자력 시설의 원격해체공정은 방사선 환경 하에서 수행하기 때문에, 실제 시설에서 세부 공정을 검증할 경우 막대한 비용이 소요되며 검증 작업 자체에 많은 어려움이 따른다. 따라서, 원격 해체 작업의 신뢰성 및 효율성을 기하기 위하여 대상이 되는 시설 및 해체장비를 세부적으로 모델링하고 공정 수행 과정을 검증하여 공정 설계에 만전을 기해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 연구용 원자로의 기존 설계자료를 토대로 작업 현장의 환경과 선정된 해체장비를 그래픽 환경에서 3차원 형상으로 도시하였으며, 세부 해체공정을 그래픽 환경에서 전산 모사 함으로써 장비의 설계 및 작업공정의 타당성을 검증할 수 있도록 하였다. 이와 같은 해체공정의 전산모사 기법은 공정 설계 단계에서 뿐만 아니라, 실제 원격 작업시 조작자가 가변적인 작업 상황에 효과적으로 대처할 수 있도록 함으로써, 원격조작 시스템의 신뢰성을 확보하는 데 필수적인 기능을 담당하게 될 것이다.

## 2. 전산모사 시스템 구성

### 2.1. 컴퓨터 시스템

복잡한 그래픽 환경을 모델링하고, 이를 실시간 전산모사하기

위해서는 그래픽 계산 및 도면의 전시 성능이 뛰어난 컴퓨터가 필요하다. 본 연구에서는 Silicon Graphics사의 Workstation Onyx를 사용하였다. 이 장비는 R10000 연산기 및 Reality Engine을 탑재하여 실시간 3차원 그래픽 애니메이션이 가능하다.

### 2.2 그래픽 소프트웨어 IGRIP

시설 장비의 그래픽 모델 작성 및 동작의 전산모사를 위해서 Deneb Robotics사에서 개발한 상용 소프트웨어 IGRIP (Interactive Graphics Robot Instruction Program)을 사용하였다. 본 연구에 응용된 IGRIP의 기능은 다음과 같은 것이 있다.

- Part Modeller : Surface Modelling 방식의 CAD 기능을 제공하여 시설·장비를 다양한 다면체(Polygon)의 조합으로 구현할 수 있다. 또한 CATIA, CADAM, AUTOCAD, Wave Front 등 타 기종의 CAD 장비로 생성한 부품의 3차원 모델을 입력하여 사용할 수 있다.
- 상용 그래픽 전산모사용 소프트웨어 중 가장 빠른 처리속도를 가지며 다양한 전시 기능을 제공함으로써 실재감 있는 모델 작성 및 Animation이 가능하다.
- 운동 기구학 해석 : 구동장비의 각 부분에 구동특성을 부가함으로써 그래픽 모델을 실제 장비와 같이 구동할 수 있도록 한다.
- 동력학 및 제어기능 : 그래픽 모델에 다양한 동특성을 부가하여 실제 구동시 발생하는 진동, 동작오차 등을 해석할 수 있으며, 이를 적절히 제어할 수 있도록 여러 가지 제어기를 구성할 수 있다. 따라서, 그래픽 환경에서 구성한 장비의 구동특성과 실제 장비의 특성이 일치하도록 모델링이 가능하다.
- 충돌감지 기능 : 모델링된 부품/장비들 간의 충돌현상을 그래픽 환경 내에서 실시간 감지하여 알려줌으로써 공정의 검증이 가능하게 한다.
- User Programming 기능 : 그래픽 전산모사를 수행할 수 있

는 전용언어 GSL (Graphic Simulation Language)을 제공하고, CLI (Command Line Interpreter)를 제공하여 자체적으로 복잡한 전산모사를 수행할 수 있다. 일반적인 UNIX 환경에서 작성된 프로그램은 대부분 C 언어와의 호환이 가능하다. 또한, 개발된 전산모사 동작을 100여종의 상용 로봇 시스템의 전용 언어로 자동적으로 변환시킬 수 있다.

- 외부 구동장비 접속기능 : C 언어로 작성된 저급 원격접속 모듈 (LLTI, Low Level Telerobotic Interface)을 제공하여 다양한 외부 하드웨어 장비와의 접속이 가능함으로써 그래픽 화면 내에서의 조작만으로 실제 장비를 구동시킬 수 있다.

### 2.3 원격 해체 공정 전산모사 시스템의 구성

상기 기능을 조합하여 원격해체 공정의 전산모사 시스템을 그림 1과 같이 구성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전산모사 시스템은 시설/장비 모델링 프로그램, 전산모사 프로그램 및 외부장비 접속프로그램으로 구성되어 있다.

시설/장비 모델링은 발전로 및 해체장비를 실제 시설의 치수 및 운동 특성을 그래픽 환경에서 재현하는 것이 목적이며, 이는 부품의 CAD 모델링, 장비 구성, 작업장 구성으로 이루어진다. 그림 1에 보인 바와 같이 각 구성요소는 계층적인 연계성을 가진다. 즉, 부품(Part)의 모델을 조립하여 장비(Device)가 구성되고 독립적인 장비들을 작업장에 배치하여 작업환경(Layout)이 구성된다.

작업공정의 전산모사는 GSL언어로 작성되며 연구로 해체공정의 전 과정을 그래픽환경에서 실제적으로 전시하고 동작상태를 검증하는 데 필요한 정보들을 제공해 준다. 이는 미리 영상정보를 저장(record)해 두었다가 재전시(replay)하는 일반적인 Animation용 프로그램과 구별된다. 또한, 실제 세부 공정들과 관련된 해체장비의 구동 명령으로 구성되어 이 프로그램으로 실제 공정의 장비를 구동시킬 수 있다.

향후 원격조작 로봇 시스템과의 하드웨어적인 접속을 위해서 외부 장비에서 발생하는 신호 정보들 그래픽 장비의 구동에 연계하여 사용할 수 있도록 소프트웨어 프로토콜이 구성되었다. 이 부분은 여러 가지 하드웨어 구동기의 제어 신호 주파수 대역에 맞출 수 있도록 계산 속도가 빠르고 범용성이 높은 C-언어로 구성되었으며, 상용 LLTI 모듈 (Deneb Robotics 사)의 사용자 정의 방식을 도입하였다.

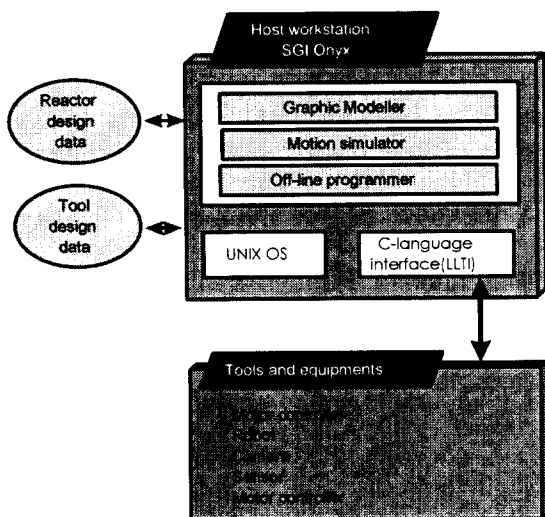


그림 1 그래픽 전산모사 시스템 구성

Fig. 1 Structure of graphic simulation system

### 3. 연구용원자로의 그래픽 모델링

연구용원자로 및 원격해체장비의 그래픽 모델 작성은 다음에 설교된 바와 같이 부품 CAD 모델링, 장비 구성 및 작업장 구성의 순서로 이루어진다.

#### 3.1 부품의 CAD 모델링

발전소 시설 및 로봇 장비를 구성하는 세부 부품들을 3차원 그래픽으로 작성한다. 각 부품의 작성시 물체의 형상, 치수를 실제 설계도면과 일치하도록 하며 향후 부품의 조립 순서 및 접속관계를 고려하여 각 부품의 적절한 위치에 기준 좌표계를 부착하여야 한다. 또한 그래픽 전산모사 단계에서 발전로 시설 내부의 현황을 보일 수 있도록 하기 위해서 각 시설물의 좌·우 단면 모델을 추가로 작성하였다. 그림 2는 이와 같이 작성한 노심부의 CAD 모델의 예를 보여준다.

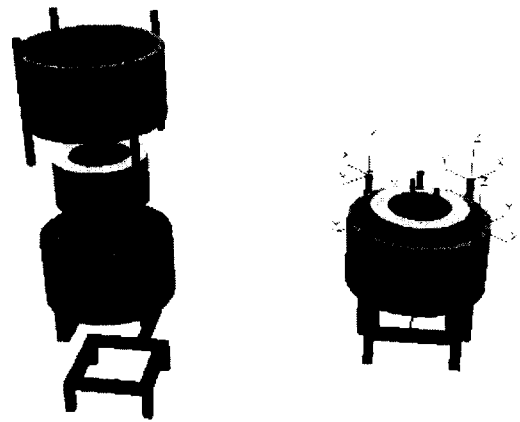


그림 2 노심부의 CAD 모델

Fig. 2 CAD part models of reactor core reflector

#### 3.2 장비 구성

그래픽 환경에서 각 부품을 조립하여 독립적으로 구동하는 장비를 구성하는 작업이다. 각 부품의 조립은 각 부품간의 상대적인 위치를 정해 주고, 이들간의 상대 운동 방향 및 운동 범위를 지정해 줌으로써 이루어진다. 이러한 정보를 토대로 IGRIP의 내장된 해석 기능을 이용, 장비의 역기구학 계산 및 동특성을 계산하여, 이를 장비의 구속조건으로 부가한다. 이로써 각 장비의 동작을 독립적으로 전산모사할 수 있게 된다.

이상과 같이 작성한 시설물로는 외벽, Center Channel, Reflector and Specimen Rack, Fuel Element, Reactor Tank, Internal Tubes, Thermal Column 및 Thermal Column Door 등이 있으며 해체장비로 크레인, Bridge Transporter 및 로봇을 작성하였다. 중량물의 이송에 사용되는 크레인은 상하운동이 가능하고 삼각형의 회전판을 발전로 벽면을 따라 주행시켜 수직축을 중심으로 회전운동이 가능하도록 하였으며 삼각형 회전판의 상부는 발전로 상부를 좌우로 이동할 수 있는 Trolley에 연결하였다. Bridge Transporter는 로봇의 이송에 사용하며 상하 동작이 가능한 Boom을 Trolley에 부착하여 구성하였다. 절단 작업용 로봇은 6자유도 운동이 가능한 Schilling사의 Titan 7 로봇을 모델로 사용하였다. 그림 3은 이와 같이 작성한 해체장비 중 Bridge transporter을 보여준다.

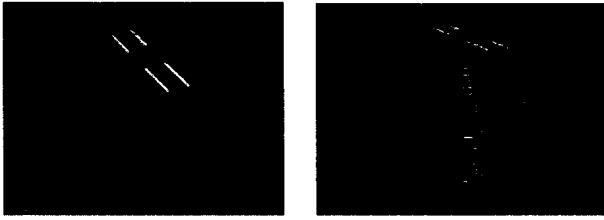


그림 3 Bridge Transporter 장비 모델  
Fig. 3 Device model of bridge transporter

### 3.3 작업장 구성

상기의 시설/장비를 동일한 그래픽 환경에 적절히 배치하여, 전체 작업장(연구용 발전로)을 그림 4과 같이 구성하였다. 그림의 하단부에 보여진 바와 같이 연구로의 모델은 내부환경의 그래픽 전시를 용이하도록 하기 위해서 좌우 단면부를 별도로 구성하여 조합하였으며, 필요에 따라서 각 부분을 투명하게 처리하여 시설 내부의 해체과정이 보여질 수 있도록 하였다.

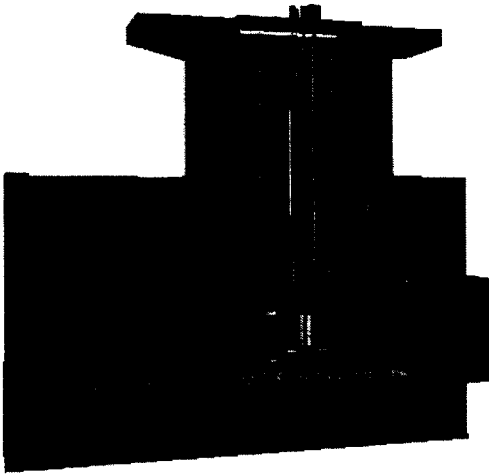


그림 4 TRIGA MARK 3 연구용원자로 작업장 모델  
Fig. 4 Workcell model of TRIGA MARK 3

## 4. 해체공정 전산모사

연구용 원자로의 그래픽 모델을 토대로 앞에서 설명된 절차를 따라 시설 해체 공정을 전산모사하였다. 전산모사를 통해 주변장치 제거, 해체장비 설치, 내부 Pipe류 제거, Thermal Column 제거, Reactor Core 제거, Reactor Tank Liner 제거 등의 세부 공정을 검증하였다. 각 세부 공정별로 로봇의 위치 및 동작경로를 설정하고 전산모사하여 작업의 성공여부를 확인한 후 재설정하는 작업을 반복하였고 최적의 작업 절차를 수립하였다. 작업 경로는 순차적인 일련의 작업점(Tag Point)들을 설정함으로써 지정되며 로봇의 파지부가 이들을 순차적으로 추종함으로써 해체공정이 수행된다. 그림 5와 그림 6은 연구용원자로 2기의 해체공정의 전산모사 과정을 보여준다. 전산모사 결과, 로봇 및 크레인을 이용하여 주변 시설물과의 간섭을 적절히 회피하면서 전체 해체 공정 수행이 가능함을 확인하였다.

전산모사 프로그램은 IGRIP이 제공하는 그래픽 언어인 GSL (Graphic Simulation Language)을 사용하여 작성하였으며,

IGRIP의 Command Line Interpreter에서 통합되어 구성하였다. 다양한 공정방법의 타당성을 검증할 수 있도록, 다양한 공정순서를 사용자가 선택하여 전산모사를 수행할 수 있도록 하였다. 전산모사를 통하여 작업장 내의 모든 장비의 구동을 동시에 지령하며 작업 도중 각 장비들 사이의 간섭상황을 계속적으로 검사하여, 작업의 성공 여부를 알려주도록 하였다. 또한 작업공정의 진행 상황을 알아보기 쉽도록 작업장의 적절한 부분을 적절한 방향으로 전시하도록 하였으며, 필요에 따라 발전소 시설의 일부분을 투명하게 하여 내부 시설물이 가시화 되도록 하였다. 전산모사 과정은 그래픽 전시, 기구학 및 동력학 계산 등의 일련의 처리과정이 시간지연 없이 동시에 이루어질 수 있어 작업공정을 현실감 있게 도시할 수 있었다.

## 6. 결론

당면한 국내 연구용원자로의 원격해체공정의 설계를 위해서 그래픽 공정 전산모사를 수행하였다. 해체공정 및 장비는 연구용 원자로의 설계자료를 토대로 기술적 적용성 및 경제성을 고려하여 선정하였으며, 선정된 공정/장비의 타당성을 평가하기 위하여 그래픽 환경에서 실제 시설,장비의 구조와 특성을 갖춘 그래픽 모델을 작성하여 해체공정을 수행하였으며 작업에 적합한 공정 방법을 도출하였다. 이와 같은 그래픽 전산모사 기술은 발전소 해체작업 뿐 아니라, 제반 산업 시설의 자동화 공정의 설계 및 수행에 있어서도 작업의 효율과 신뢰성을 높이는 데 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] J.J.Fisher, "Applying Robots in Nuclear Applications," RI/SME Robots Conf., June, 1985.
- [2] G.Clement, J.Vertut, A.Cregut, P.Antione, and J.Guittet, "Remote Handling and Transfer Techniques in Dismantling Strategy," Proc. of the Seminar on Remote Handling in Nuclear Facilities, pp.556-569, 1984.
- [3] A.Baker, I.R.Birss, and G.F.Fish, "Remote Handling Equipment for the Decommissioning of the Windscale Advanced Gas Cooled Reactor," Proc. of Seminar on Remote Handling in Nuclear Facilities, pp.581-597, 1984.
- [4] L.Costa, et.al, "Remote Operation in Decommissioning," Decommissioning of Nuclear Power Plants, 1989.
- [5] K.H.Schaller, "Possible Advances in Remotely Controlled Operations in the Field of Decommissioning of Nuclear Installations," Proc. of the Seminar on Remote Handling in Nuclear Facilities, pp.570-580, 1984.
- [6] Decommissioning Handbook, U.S. Department of Energy, U.S. Government Printing Office, 1980.
- [7] Deneb Robotics, IGRIP Version 2.3 User Manual, Pittsburgh, 1993.

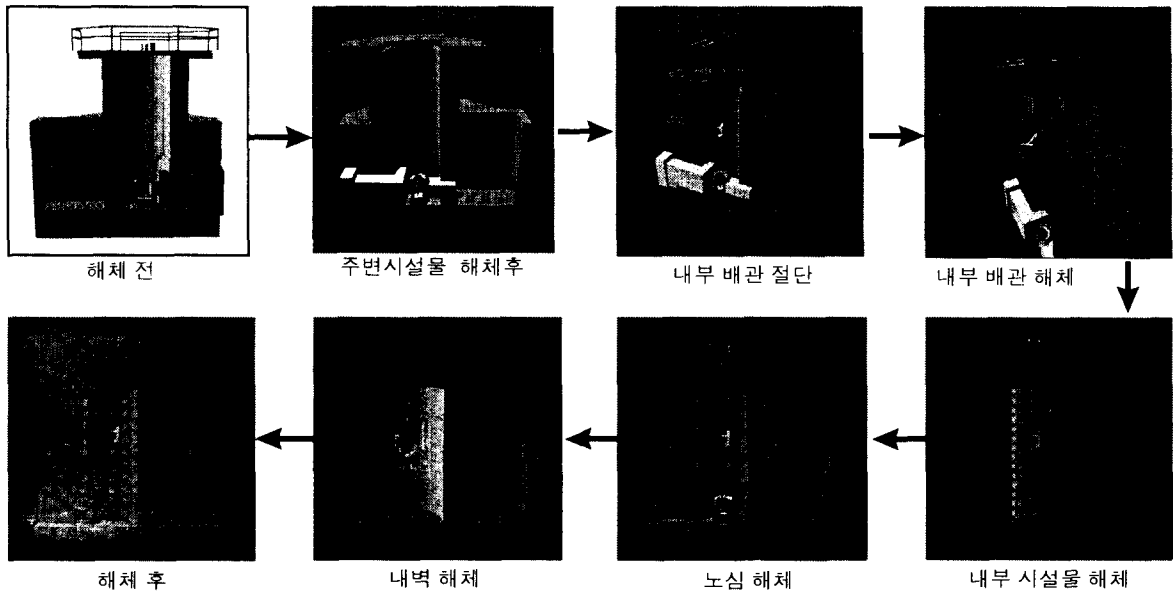


그림 5 연구로 TRIGA MARK 2 해체공정 전산모사  
 Fig. 5 Graphic simulation of TRIGA MARK 2 dismantling

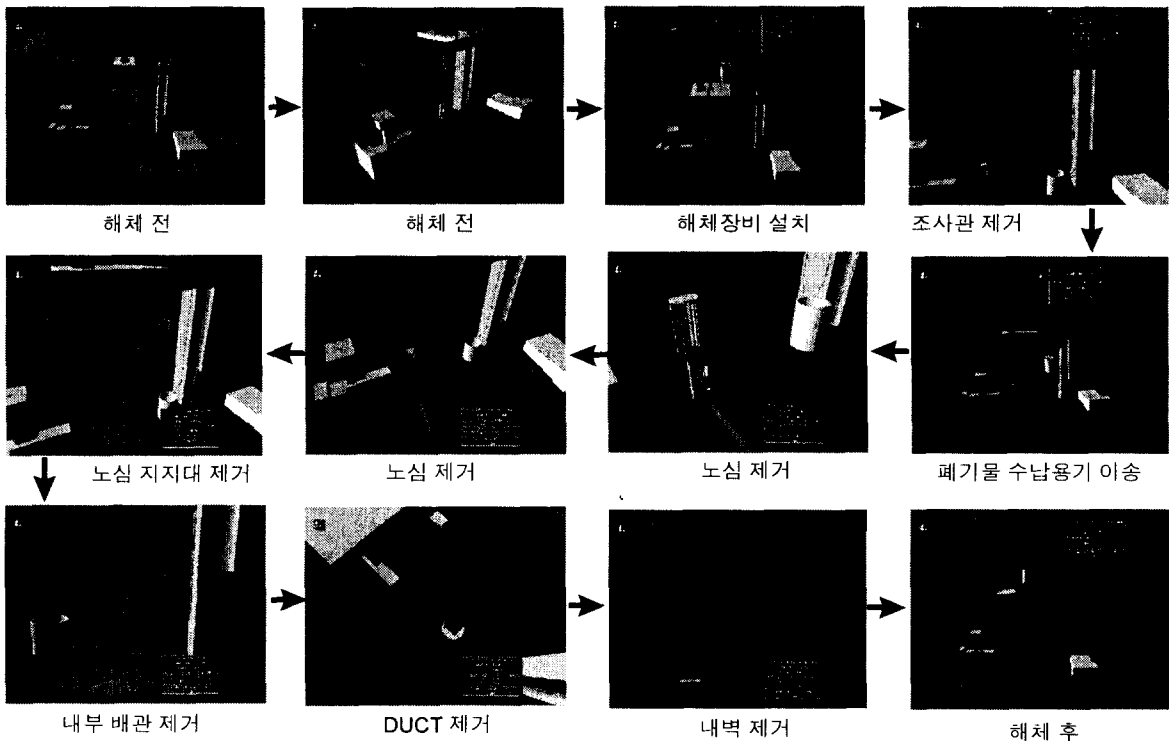


그림 6 연구로 TRIGA MARK 3 해체공정 전산모사  
 Fig. 6 Graphic simulation of TRIGA MARK 3 dismantling