

3차원 그래픽 설계기술을 활용한 사용후핵연료 해체공정 개발

Development of the Spent Fuel Disassembling Process by Utilizing the 3D Graphic Design Technology

송태길, 이종열, 김성현, 윤지섭
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

현재 산업계에서 폭넓게 사용되고 있는 3차원 그래픽 설계기술을 활용하여 사용후핵연료 해체공정을 개발하였다. 사용후핵연료 해체공정은 크게 핵연료집합체 수직/수평 전환장치, 연료봉 인출장치, 연료봉 절단장치, 소결체 인출장치 및 구조폐기물 압축장치 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 이러한 장치들을 개념설계 단계에서부터 3차원으로 설계하여 그래픽 모델을 구축하였다. 그리고 각 장치들의 구동에 따른 기구학적 특성을 부여하여 컴퓨터 상에 가상의 작업환경을 구축하고 전체공정에 대한 3차원 그래픽 시뮬레이션을 구현하였다. 이러한 3차원 그래픽 시뮬레이션을 통하여 장치의 설계에 대한 검증, 구동에 대한 간섭 분석 및 최적배치를 통한 작업환경 분석 등을 수행하였다.

Abstract

For developing the spent fuel disassembling process, the 3D graphic simulation has been established by utilizing the 3D graphic design technology which is widely used in the industry. The spent fuel disassembling process consists of a downender, a rod extraction device, a rod cutting device, a pellet extracting device and a skeleton compaction device. In this study, the 3D graphical design model of these devices is implemented by conceptual design and established the virtual workcell within kinematics to motion of each device. By implementing this graphic simulation, all the unit process involved in the spent fuel disassembling processes are analyzed and optimized. The 3D graphical model and the 3D graphic simulation can be effectively used for designing the process equipment, as well as the optimized process and maintenance process.

1. 서론

새로운 제품을 생산하거나 공정을 수립하기 위해서는 설계단계를 거치게 되는데, 종래에는 기본 아이디어를 구상하여 종이에 그림을 그리고 이를 바탕으로 제작한 실물크기의 모형을 토대로 하여 부품을 설계하고 분석하였다. 그러나 이와 같은 일련의 수작업 과정이 컴퓨터에 의한 작업으로 대체되었으며, 이러한 컴퓨터 기술은 개념설계에서부터 제조 및 유지보수의 개발 사이클 기간동안 거의 전 단계에 걸쳐 응용할 수 있게 되었다.

실제 모형을 만들던 설계는 컴퓨터 그래픽 기술을 이용하여 3차원으로 모델링하고 실제에 가까운 색상 표현 및 고도의 입체 영상을 이용하여 실제 모형보다 훨씬 정교하게 표현할 수 있다. 그리고 여러 환경 조건을 가상으로 적용할 수 있고 다양한 상황에서 설계의 장단점을 검증할 수가 있어 최상의 설계가 가능하도록 해준다. 뿐만 아니라 컴퓨터를 이용한 설계에서는 이들에 대한 수정과 조작이 매우 간단하고 편리하여, 단시간에 여러 가지 모델을 기획하고 평가할 수 있다.

이러한 그래픽 설계기술은 자동차분야, 조선분야, 전기전자분야 뿐만 아니라 우주/항공분야, 방위분야 등 국내·외 산업의 다양한 분야에서 광범위하게 적용하고 있으며, 컴퓨터 기술의 급속한 발전으로 인하여 전 산업분야로 확산되고 있는 추세이다. 원자력분야에서는 대형 원자력시설을 사전에 검증하거나, 방사선 환경에서의 작업 또는 핫셀 내에서의 원격작업을 3차원 그래픽으로 전산모사하여 작업자의 안전성과 작업의 효율성을 높이기 위해 그래픽 설계기술을 다양하게 활용하고 있다¹⁾¹⁰⁾.

본 논문에서는 사용후핵연료 해체공정에 대한 3차원 그래픽 기술의 활용사례로 사용후핵연료 해체공정의 흐름을 간략히 설명하고, 이 공정에 사용되는 각 장치들의 3차원 그래픽 모델링과 이러한 모델링을 이용하여 구축한 사용후핵연료 해체공정의 3차원 그래픽 시뮬레이션에 대해서 기술한다.

2. 원자력분야의 관련 연구

원자력분야에서는 위험한 방사선환경에서의 작업이나 핫셀내에서 이루어지는 폐쇄된 환경에서의 작업을 전산모사하여, 작업자의 안전성과 작업의 효율성을 높이기 위해 3차원 그래픽 설계 및 시뮬레이션 기술이 활용되고 있다.¹¹⁾

독일의 GNS사는 PKA 시설에서 사용후핵연료의 수납장비 및 관련 공정을 3차원 그래픽으로 모델링하고 이를 전산모사(Fig. 1)하는 방식으로 실증장비를 개발한 바 있다.

미국의 SRTC(Savannah River Technology Center)는 DOE의 지원을 받아, 240,000 m³의 고준위 폐기물을 처리하는 공정을 그래픽 시뮬레이션으로 구현하여 작업자의 오조작 및 공정의 문제점을 사전에 파악하게 함으로써, 작업의 안전성과 신뢰도를 높였다²⁾. 미국 SNL에서는 Pantex시설내의 핵무기 해체작업에서 작업자의 피폭량 감소와 작업속도의 향상을 위하여 REMS(Radiological Environment Modeling System)를 개발하여 활용하고

있다³⁾. 미국 Westinghouse Hanford 사는 사용후핵연료 취급/포장 작업에 대한 3차원 그래픽 시뮬레이터를 개발하여 사용후핵연료 재처리 시설인 Hanford PUREX 시설의 각종 원격 장비와 공구의 개념설계, 사전검증 및 최적의 작업순서를 개발하는데 활용하였고, 방사선 작업 종사자를 훈련시키는 도구로 사용하였다⁴⁾.

영국의 Nuclear Electric 사는 원자로내의 검사와 유지보수 작업에 적용되는 매니플레이터의 작업범위에 대한 사전계획 및 검증 등에 3차원 그래픽시뮬레이션을 활용하였다⁵⁾⁶⁾.

일본 JNFL은 고준위 액체폐기물 저장시설(K시설)에서 캐니스터 수납장치에 대한 설계 타당성을 검증하기 위하여 IGRIP을 이용한 Virtual Prototyping을 활용하였고(Fig. 2), JNC에서는 핵연료주기 시설(CPF)내 핫셀에서의 원격 취급/유지보수를 위한 크레인 또는 매니플레이터의 작업절차 설정과 작업영역 검증 및 작업자 훈련을 위해 그래픽 기술을 활용(Fig. 3)하고 있다⁷⁾⁸⁾.

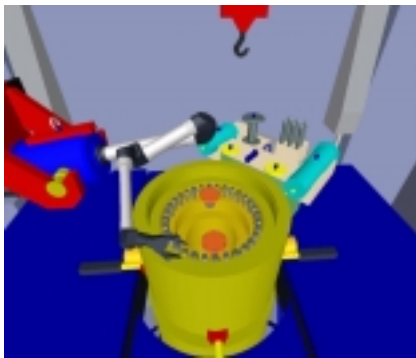


Fig 1. 3D Graphic Simulation in PKA.

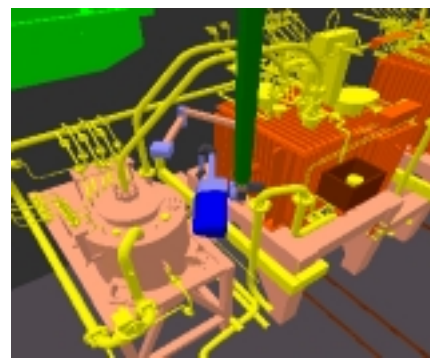


Fig 2. 3D Graphic Simulation in JNFL.

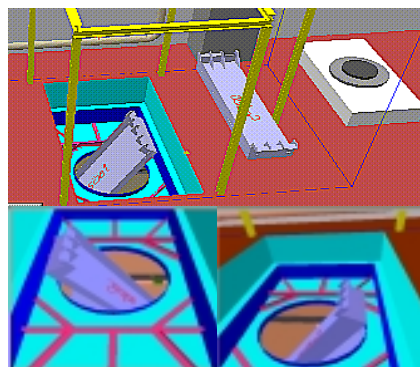


Fig 3. 3D Graphic Simulation in JNC.

3. 사용후핵연료 해체공정 장치의 3차원 모델링

3.1. 사용후핵연료 해체공정

사용후핵연료 해체공정은 원자력발전소에서 배출된 사용후핵연료를 재활용하기 위한 전처리과정 단계이다. 사용후핵연료는 고방사성 물질로 핫셀(hotcell)이라는 차폐된 공간 내에서 취급이 이루어진다.¹²⁾

사용후핵연료 해체공정은 이러한 핫셀 내로 사용후핵연료 집합체를 가져온 후, 수직으로 이송된 집합체를 수평상태로 전환하는 집합체 수직/수평 전환 공정, 집합체로부터 연료봉을 인출하는 연료봉 인출공정, 인출된 연료봉을 절단하는 연료봉 절단공정, 그리고 절단된 연료봉으로부터 소결체를 인출하는 소결체 인출공정으로 구성된다. 또한 사용후핵연료 집합체로부터 모든 연료봉의 인출 후 남게되는 집합체 구조폐기물(NFBC)의 부피를 줄이기 위한 구조폐기물 압축공정이 있으며, 이러한 해체공정의 종합적인 흐름은 Fig. 4와 같다.

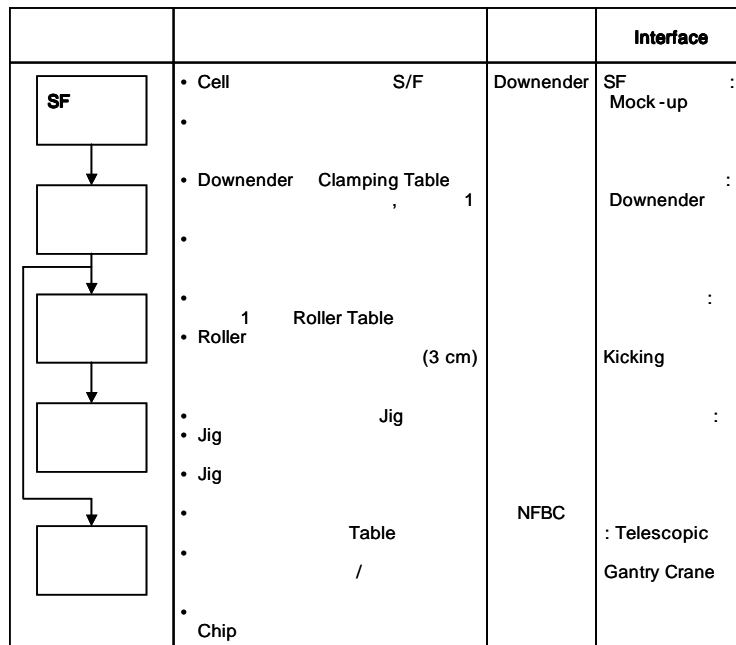


Fig 4. Spent Fuel Disassembling Process.

3.2. 사용후핵연료 해체공정 장치의 3차원 모델링

3차원 그래픽 모델링은 장치의 기능 및 요건에 따라 설정된 개념을 컴퓨터 상에서 그래픽 설계 툴을 이용하여 3차원 디지털 설계를 수행하고 전산모사를 통하여 장치개념의 적합성 및 동작의 적정성 등 설계 타당성을 검증하기 위한 기초단계이다. 이를 위하여 장치 개념에 따라 세분화된 부품(parts)을 3차원으로 그래픽 모델링한 후, 이들을 부분 조립하여 모듈을 완성하고, 기능 및 동작특성에 따라 분류하는 과정을 거치게 된다. 이렇게 분류된 부분 조립품들은 동작특성에 따라 기구학적 특성(kinematics, DOF : Degree Of Freedom)이 부여되어 디바이스를 구성한다. 본 연구에서는 3차원 그래픽 설계 툴인 IGRIP(Fig. 5)을 이용하였으며, 모델링 단계에서는 Solidedge와 MDT(Mechanical Desk

Top)와 같은 설계 전문 툴을 함께 사용하였다.

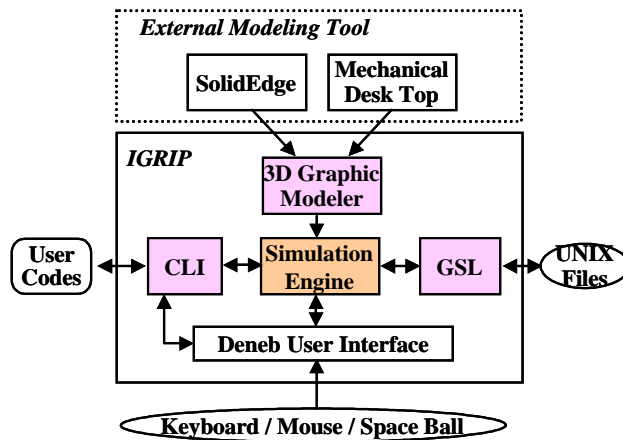


Fig 5. Block diagram of IGRIP function.

3.2.1. 사용후핵연료 집합체 수직/수평 전환장치

사용후핵연료 집합체 수직/수평 전환장치는 세부 기능에 따라 고정 베이스 프레임, 수직/수평 전환부, 수직 유지부 및 수평고정부로 구성된다. 고정 베이스 프레임은 각 장치부를 고정시키는 기본 구조물로서 상판과 프레임 모듈로 이루어져 있고, 수직/수평 전환부는 사용후핵연료 집합체를 수직 또는 수평상태로 전환시켜 주는 부분으로 실린더와 볼스크류 및 구동모터로 구성되어 있다. 또한, 수직 유지부는 수직 상태로 진입된 사용후핵연료 집합체의 수직 상태를 유지할 수 있도록 지지해주는 체결 장치로 수직 지지부, 구동축, 구동모터로 구성되며, 수평 고 정부는 집합체가 수평으로 전환된 후 다음 공정장치인 사용후핵연료봉 인출장치로 연료봉을 인출할 수 있도록 수평상태를 유지시키는 체결 장치이다. Fig 6은 사용후핵연료 집합체 수직/수평 전환장치의 3D 그래픽 모델을 보여준다. 이 장치는 수직/수평 전환 모터, 집합체의 그리드 및 bottom nozzle 클램프 모터 등 10개의 자유도를 갖도록 운동특성(kinematic)을 부여하였다.

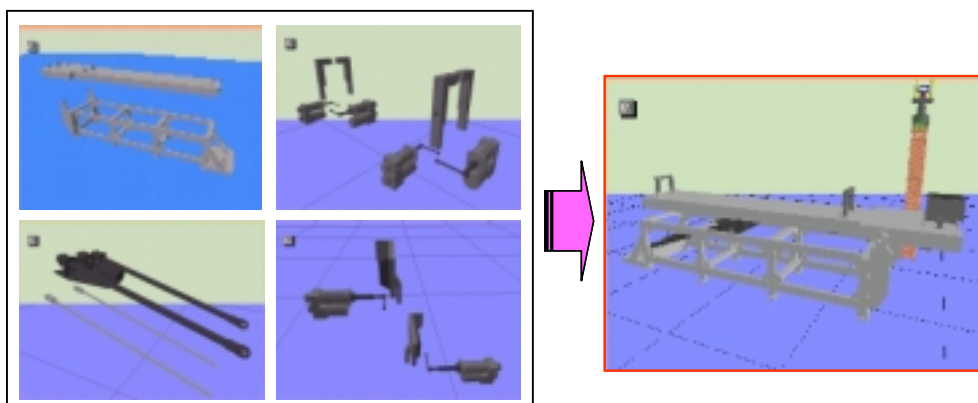


Fig 6. 사용후핵연료 집합체 수직/수평 전환장치의 3D 그래픽 모델

3.2.2. 사용후핵연료봉 인출장치

사용후핵연료봉 인출장치의 3차원 그래픽 모델은 장치의 기능에 따라 main frame, side transfer, cradle, 로터리 헤드박스, 연료봉 그리퍼, 충격렌치로 구성된다. main frame 은 인출장치의 주요 기능부인 로터리 헤드박스를 수평, 수직방향으로 이송시키는 부분으로 수평 프레임, 헤드 지지부, 수직 프레임으로 이루어져 있다. side transfer는 핵연료 집합체로부터 인출이 완료되어 프레임에 안착된 연료봉을 다음 공정 방향으로 이송시키는 기능을 수행하며, 모터, 지지부, 이송부로 구성된다. 충격흡수장치(cradle)는 연료봉을 인출하는 동안 연료봉의 처짐 및 낙하를 방지하고 인출된 연료봉을 프레임까지 안착시키는 역할을 하며, 상하방향의 이송대와 모터로 구성된다. 로터리 헤드박스는 작업 순서에 따라 그리퍼와 렌치를 교환할 수 있도록 해주며, 기어, 모터, 및 로터리 플레이트 등이 있다. 연료봉 그리퍼는 연료봉을 인출할 수 있도록 연료봉의 끝부분(end cap)을 파지하는 부분으로 그리퍼, RCC, 모터 등으로 구성되어 있다. 충격렌치는 사용후핵연료 집합체 하단부(bottom nozzle)의 볼트를 제거하는 기구로 렌치부와 모터부가 있다. Fig 7은 사용후핵연료봉 인출장치의 3D 그래픽 모델로 인출을 위한 X,Y,Z 이동 및 로터리 헤드, 측면이송, 충격흡수장치 등의 운동특성을 위해 10 자유도를 갖는다.

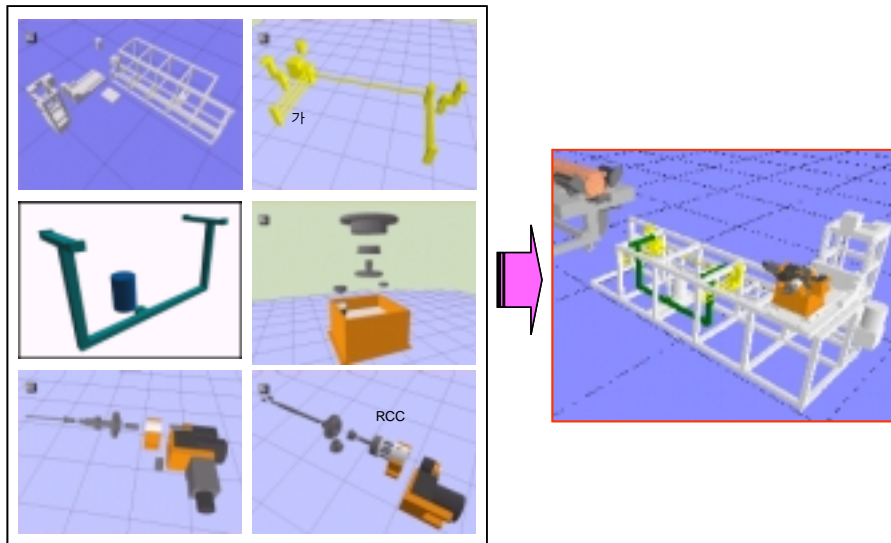


Fig 7. 사용후핵연료봉 인출장치의 3D 그래픽 모델

3.2.3. 사용후핵연료봉 절단장치

사용후핵연료봉 절단장치는 기능별로 kicking부, 프레임 및 이송 롤러부, 이송 클램프, 고정 클램프, 절단날, 드라이브부 및 분배부로 구성된다. Kicking부는 연료봉 인출장치로부터 연료봉을 인수하여 절단장치 프레임으로 이송하는 기능을 수행하는 부분으로 연료

봉 인수대, 스크류 및 지지대 등으로 구성된다. 프레임 및 이송 롤러부는 연료봉 인출장치로부터 이송되어온 연료봉을 절단부로 이송시키는 부분으로 베이스 프레임과 롤러 등으로 이루어져 있다.

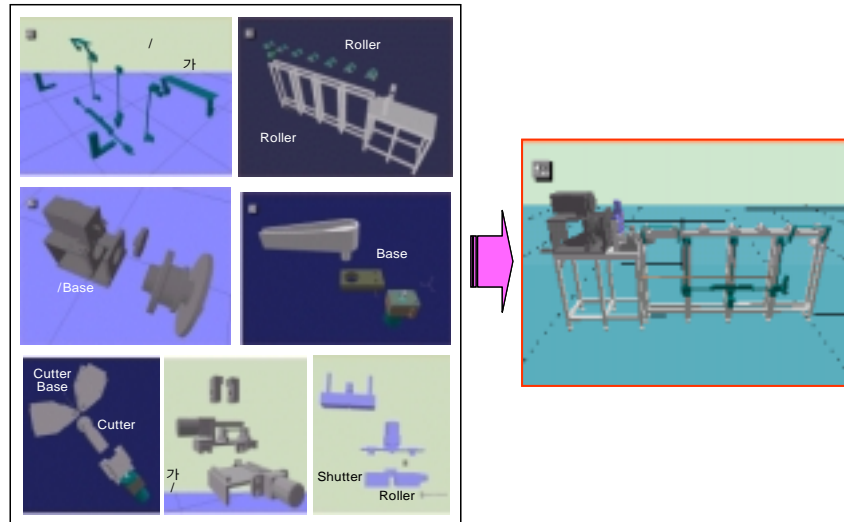


Fig 8. 연료봉 절단장치의 3D 그래픽 모델

이송 클램프는 클램프와 모터 등으로 구성되어 있어 일정 길이로 절단할 수 있도록 연료봉을 이송하는 기능을 수행하며, 고정 클램프는 연료봉 절단시 연료봉을 고정하는 클램프로서 고정 클램프와 모터, 마그네틱 개폐부, 연료봉의 끝부분인 spring part를 배출할 수 있는 롤러 모듈 등으로 이루어진다. 또한, 절단날은 tube cutter 방식의 절단날로 cutter, 모터 및 지지구조물 등으로 구성된다. 드라이빙부는 절단날을 회전시키는 부분으로 슬립링, 모터부, 기어부 등의 모듈이 있고, 분배부는 절단된 연료봉의 폐기부분과 회수하고자 하는 펠릿(pellet) 부분을 분류하여 분배해주는 기능을 수행하는 것으로 분배장치, 모터 및 지지구조물로 이루어져 있다. Fig 8은 연료봉 절단장치의 3D 그래픽 모델로 11 자유도를 갖도록 구성하였다.

3.2.4. 소결체 인출장치

소결체 인출장치는 동작 기능별로 frame 및 절단 연료봉 장입부, 지그회전부, 압출부로 구분하여 3차원 그래픽 모델을 구성하였다. Frame은 부품을 장착하기 위한 기본 지지부로서 연료봉 절단장치로부터 이송되어온 절단연료봉을 인수받아 지그회전부의 홈에 장입하는 장치가 부착되며, 기본 프레임, 지지구조물, 압출 후의 소결체와 빈 튜브를 회수하는 소결체/튜브 수집통, 절단 연료봉의 장입을 위한 모터 및 장입장치 모듈로 구성된다.

지그회전부는 절단된 연료봉을 장착하여 회전하는 연료봉 지그회전판, bearing 및 구동 모터 등으로 구성된다. 또한 압출부는 소결체를 압출하는 압출핀, 웜기어, 모터 및 압출핀

의 동작을 guide하는 guide shafts, plates 및 springs 등의 모듈로 구성되어 있다. Fig. 9는 이들 각각의 모듈별 구성부품(parts) 및 이들을 조합하여 구축한 장치의 3차원 그래픽 모델이며, 연료봉 장입을 위한 지그 회전, 압축부의 상하이송 등 4개의 자유도를 갖는다.

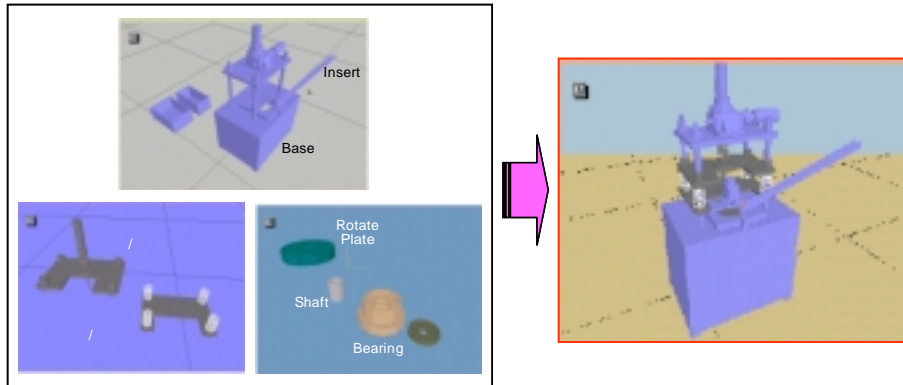


Fig 9. 소결체 인출장치 3D 그래픽 모델

3.2.5. 사용후핵연료 집합체 구조폐기물 압축장치

사용후핵연료 구조폐기물 압축장치는 설정된 기능에 따라 이송프레임, 압축 프레임/클램프, 압축/절단부 및 배출부로 구분하여 그래픽 모델을 구축하였다. 이송프레임은 집합체 구조폐기물을 안착시키고 고정하여 압축/절단부로 이송하는 부분이며, 베이스 프레임, 가이드, 상부/측면 클램프 및 보조 밀대 등으로 이루어져 있다.

압축 프레임 및 클램프는 1차 압축, 2차 압축 및 절단을 위한 지지 구조물로서 지지대, 모터 하우징 등의 모듈과 압축/절단부에서의 구조폐기물 집합체를 고정하는 side clamp로 구성되어 있으며, 압축/절단부는 집합체 구조폐기물을 압축한 후 절단하는 부분으로 구성 모듈은 2개의 압축 램과 절단날로 이루어진다. 배출부는 압축 후 절단된 구조폐기물을 수집하여 진동을 주어 정렬한 다음 외부로 배출하는 시스템으로 수집통, 컨베이어, 모터 등의 모듈로 구성된다.

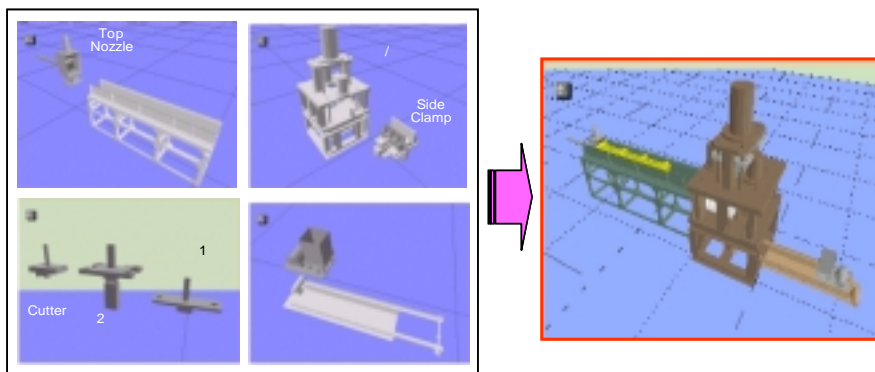


Fig 10. 사용후핵연료 구조폐기물 압축장치의 3D 그래픽 모델

Fig. 10은 이들 구성 부품들과 조합된 장치의 3차원 그래픽 모델로, skeleton 이송 및 고정, 압축 및 절단 등의 움직임을 위해 8개의 자유도를 갖도록 kinematics를 설정하였다.

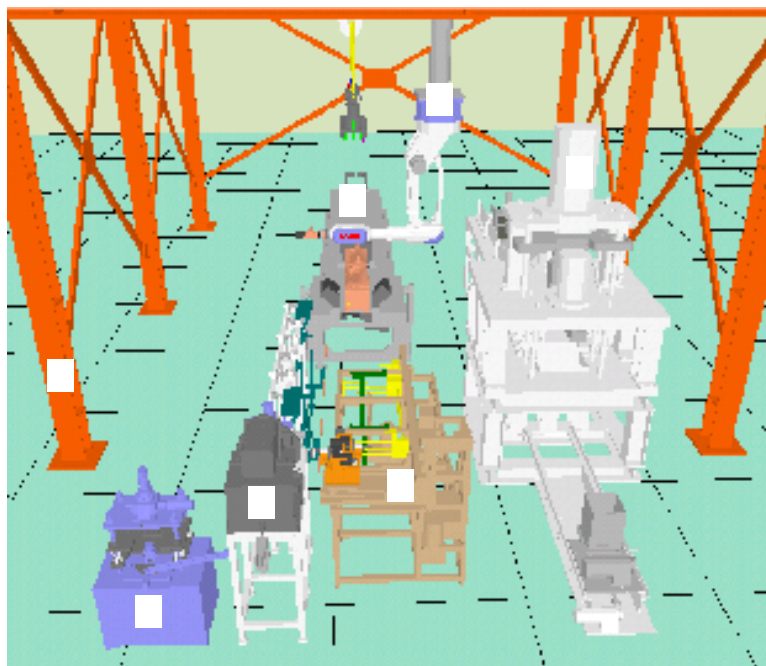
4. 사용후핵연료 해체공정의 3차원 그래픽 시뮬레이션

4.1. 3차원 그래픽 시뮬레이션을 위한 가상작업환경 구축

사용후핵연료 해체공정을 수행하기 위한 시험시설은 핫셀 구조물, telescopic 이송장치를 포함한 단위공정간 interface 작업공정 장치, 그리고 모의 사용후핵연료를 해체하는 각각의 장치들로 구성된다.

Fig. 11은 앞에서 설명한 각 장치들의 3차원 그래픽 모델을 조합하여 각각의 장치들을 구성하고, 이 장치들을 실제 시험시설과 같은 공간에 배치한 3차원 그래픽상의 사용후핵연료 해체공정에 대한 가상작업환경(workcell)이다.

이러한 가상작업환경의 구축을 통해 실제 시설에 장치를 배치하기 전에 3차원 그래픽 상에서 각 장치들을 배치해 봄으로써 장치들간의 간섭 및 공간 활용상의 문제점들을 사전에 도출해 낼 수 있다. 그리고 컴퓨터 상에서 다양한 배치를 통하여 이러한 문제점들을 해결함으로써 최적배치 방안의 도출에 활용할 수 있다.



- ① 핫셀 지지구조물 ② 사용후핵연료 집합체 수직/수평 전환장치
- ③ 사용후핵연료봉 인출장치 ④ 연료봉 절단장치 ⑤ 소결체 인출장치
- ⑥ 사용후핵연료 구조폐기물 압축장치 ⑦ Telescopic 이송장치 및 다관절 조작기

Fig 11. 사용후핵연료 해체공정을 위한 3차원 그래픽 상의 가상작업환경

4.2. 사용후핵연료 해체공정의 3차원 그래픽 시뮬레이션

사용후핵연료 해체공정의 흐름에 따라 각 장치의 모델에 장치의 작동에 따른 기구학적 운동특성(kinematics)을 부여하여 전산모사를 위한 각 장치의 디바이스를 구축하였다. 그리고 각 장치를 가상의 작업환경에 배치하여 실제 해체공정을 수행하는 실험 시설과 같은 환경을 구축하고, 각 장치에 대한 시뮬레이션뿐만 아니라 해체공정 전체에 대한 3차원 그래픽 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 12는 사용후핵연료 해체공정의 단위공정에 대한 그래픽 시뮬레이션으로 사용후핵연료봉 인출장치가 사용후핵연료 집합체의 bottom nozzle 제거를 위해 로터리헤드의 임팩트렌치를 이용하여 bottom nozzle의 nut를 제거하는 모습을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 3차원 그래픽 시뮬레이션을 활용할 경우 작업에 따른 최적의 뷰(view)를 제공하여, 실제 환경에서 제약이 따르는 작업자의 시야를 보완해 줄 수 있다.

사용후핵연료 해체공정에 대한 3차원 그래픽 시뮬레이션은 Fig 13에서 보여주는 것과 같이 사용후핵연료 집합체의 수납, 수직/수평 전환장치에 의한 집합체의 자세 전환 및 집합체로부터 연료봉의 인출, 연료봉 절단, 소결체 인출, 집합체 구조폐기물 압축공정 등 전체공정에 대한 시뮬레이션 결과를 포함하였다. 이러한 3차원 그래픽 시뮬레이션을 통해 해체공정에 대한 흐름을 시각적으로 분석할 수 있고, 실제 실험에 들어가기 전에 각 공정상의 문제점들을 도출하여 해결할 수 있었다.

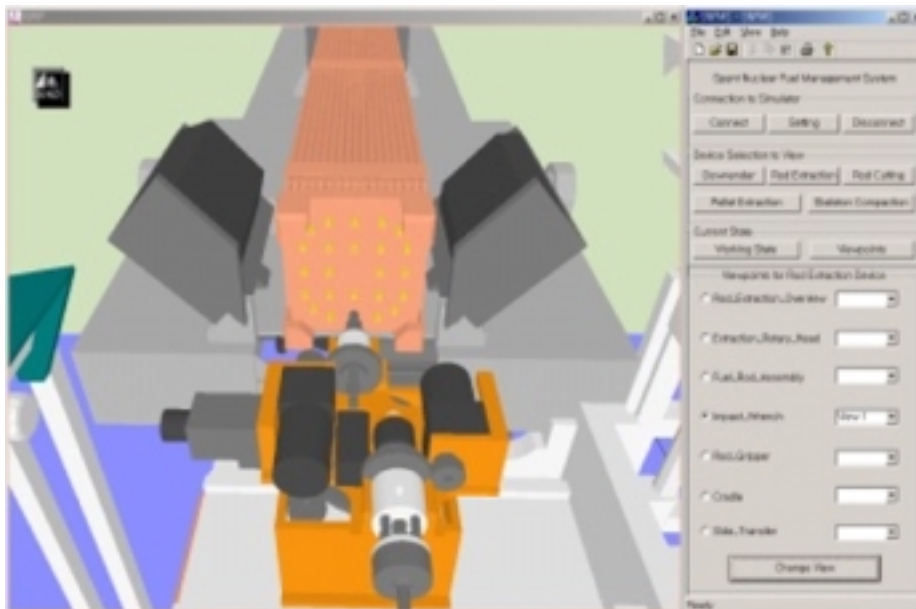


Fig 12. 연료봉 인출장치의 구동에 대한 그래픽 시뮬레이션

5. 결 론

본 논문에서는 현재 산업계에서 개발주기 단축 및 비용절감 효과를 달성하기 위해 활용하고 있는 3차원 컴퓨터 설계기술을 사용후핵연료 해체 공정에 적용하여 각 장치의 3차원 모델을 구축하고, 그래픽 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 고방사성 물질인 사용후핵연료를 취급하는 장치의 공정을 분석하고 최적화하기 위하여 공정을 수행하는 실제환경인 핫셀과 동일한 조건의 가상작업환경을 구축하였다.

이러한 3차원 그래픽 설계기술은 장치의 제작 전에 장치의 구조적 문제나 기구학적 문제를 분석해 볼 수 있고, 이러한 컴퓨터 상의 그래픽 모델을 이용하여 실제 환경과 같은 배치를 해 봄으로써 배치상의 문제점을 분석해 내고 시설의 공간 활용을 최적화 할 수 있다.

특히 원자력 분야에서는 각 장치 및 공정 개발에 있어 방사선 환경을 고려한 설계가 이루어져야 하고, 폐쇄된 환경에서 운영되므로 원격운전 개념이 포함되어야 함으로 이러한 기술의 활용이 더욱더 필요할 것으로 사료된다.

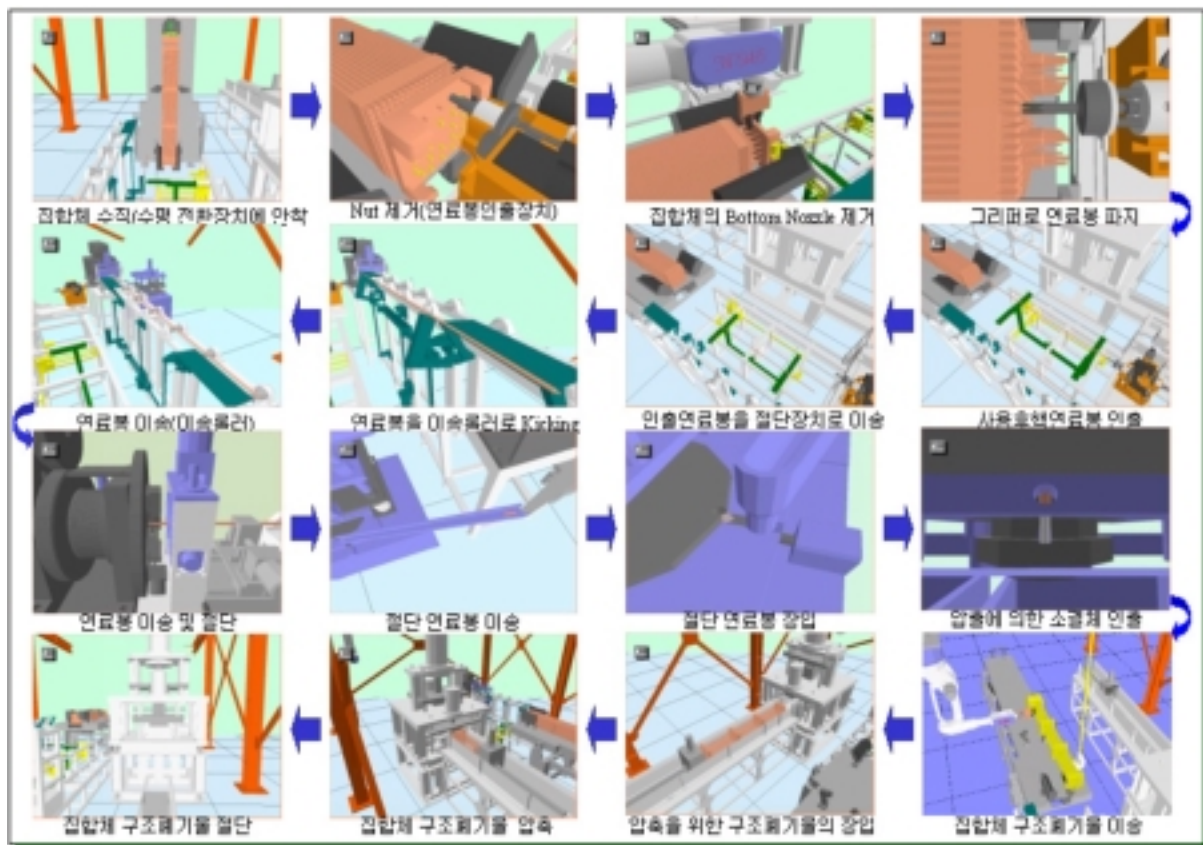


Fig 13. 사용후핵연료 해체공정의 3차원 그래픽 시뮬레이션.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Joseph Anelle, Ron Braun, "Graphic simulation system for product process development," Proc. of the DENEb User Group Conference, pp. 11-14, 1994.
2. K. C. Bills, and L. Love, "Simulation tools for hazardous waste removal," Proc. of 7th Top Meeting on Robotics and Remote System, Vol 2, pp. 887-893, 1997
3. L. Breazeal, and et al., "Simulation-based computation of dose to humans in radiological environments," Sandia Report SAND95-3044, SANDIA, 1994
4. William R. Jaquish, "PUREX irradiated fuel recovery simulation," Proc. of the DENEb User Group Conference, pp. 109-115, 1994.
5. J. Beere, "The use of real-time computer graphics to assist remote reactor inspection," Proc. of the DENEb User Group Conference, pp. 17-31, 1995.
6. L. Smith, and et al., "A user's view of the role of graphics for in-reactor inspection and repair activities," Proc. of the DENEb User Group Conference, pp. 21-26, 1995.
7. Y. Omura, "Virtual prototyping for canister receiving devices of high level waste storage facility," Proc. of '99 DENEb User Meeting for Korean Users, 1999.
8. Y. Omura, and et al., "Robot simulator aided design system for remote handling and maintenance," Proc. of 45th Japan Congress for Applied Mechanics, pp. 173-176, 1996.
9. 이성렬 역, "컴퓨터 지원 설계 및 생산", 대영사, pp. 73-90, 1996.
10. Carl P. Baker, "Parametric Design Using IGRIP", Proceeding of the DENEb User Group Conference, pp. 7-10, 1994.
11. 송태길 외, "사용후핵연료봉 인출장치의 원격감시를 위한 실시간 3차원 그래픽 시뮬레이션", CAD/CAM 학회 논문집, 제5권 제4호, pp. 327-335, 2000
12. 윤지섭 외, "사용후핵연료 원격취급 장치 개발", 한국원자력연구소 연구보고서 (KAERI/RR-1801/97) pp. 113-151, 1997.