

그래픽 시뮬레이터에 의한 사용후핵연료 집합체 해체공정 가상모형

이종열*(한국원자력연구소), 송태길(), 김성현(), 김영환(), 홍동희(), 윤지섭()

Virtual Prototyping for Spent Fuel Disassembling Process Using Graphic Simulator

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

ABSTRACT

In this study, the graphical design system is developed and the digital mock-up is implemented for designing the spent fuel handling and disassembling processes. This system is used throughout the design stages from the conceptual design to the motion analysis. By using this system, all the processes involved in the spent fuel handling and disassembling processes are analyzed and optimized. Also, this system is used in developing the on-line graphic simulator to enhance the reliability and safety of the spent fuel handling process by providing the remote monitoring function of the process.

The graphical design system and the digital mock-up system can be effectively used for designing the process equipment, as well as the optimization of the main processes and maintenance processes of the spent fuel management.

Key Words : Spent fuel Assembly(사용후핵연료 집합체), Disassembling Process(해체공정), Virtual prototyping(가상모형), Graphic simulation(그래픽 전산모사), Optimization(최적화), Verification(검증)

1. 서론

새로운 제품을 생산하거나 공정을 수립하기 위해서는 설계 및 검증단계를 거치게 되는데, 종래에는 기본 아이디어를 구상하여 종이에 그림을 그리고 이를 바탕으로 제작한 실물크기의 모형을 토대로 하여 부품 설계를 변경하고 분석하는 과정으로 수행하였다. 이와 같은 일련의 수작업 과정이 컴퓨터에 의한 작업으로 대체되었으며, 이러한 컴퓨터 그래픽 설계 기술은 개념설계에서부터 제조 및 유지보수까지의 개발 사이클 거의 전 단계에 걸쳐 응용할 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 이 기술은 작업 대상에 대한 수정과 조작이 매우 간단하고 편리하여, 단시간에 여러 가지 모델을 기획하고 평가할 수 있도록 한다.

사용후핵연료 취급/해체공정은 사용후핵연료의 안전하고 효율적인 관리를 위한 후행핵주기 공정의 전처리공정이며, 이에 소요되는 사용후핵연료 및 공정장치는 원적으로 취급하고 조작하여야 한다. 이러한 고도의 안전성이 요구되는 사용후핵연료 공정장치를 설계/제작 및 검증하기 위해서는 기본개념설정, 설계, 시제품 제작, 시운전/검증, 설계변

경, 및 장치 개선 등의 복잡한 절차를 거쳐야 한다.

따라서 본 연구에서는 장치 및 공정 개발에 있어서 효율성 저하와 비용의 낭비를 초래하는 기존의 복잡한 과정을 지양하고, 컴퓨터 그래픽 설계 및 디지털 모입에 의한 가상모형 시스템을 구축하여, 공정장치의 설계 및 분석/검증을 동시에 수행함으로써, 비용 및 개발기간 절감 등 경제성과 신뢰성 향상 등 안전성을 확보하고자 하였다.

2. 사용후핵연료 해체공정 그래픽 설계시스템

2.1 그래픽 설계시스템 개요

사용후핵연료 집합체 해체공정 3차원 그래픽 설계 시스템은 상용 그래픽 툴인 Delmia사의 IGRIP (Interactive Graphic Robot Instruction Program)을 이용하여 기존의 순차적인 개념의 장치개발 주기를 동시공학적인 개념으로 전환시킨 시스템이다. 따라서 개발주기 전반에 걸쳐 제품 정보를 그래픽으로 정의하고 공유하여 통합적인 형상 및 작업 흐름 관리를 할 수 있도록 함으로써, 개발 절차를 능률적으로 간소화시켜 설계 및 개발비용을 대폭 절

감할 수 있다. 또한, 물리학 기반의 3차원 그래픽 모델과 역학적 원리를 접목시켜 복잡한 시스템에 대한 개념을 정확하게 시각화하고 개념화한 동적 전산모사를 통하여 동적 분석도 가능하다.

Fig. 1은 해체공정 3차원 그래픽 설계 시스템 개념을 나타내고 있다. 사용후핵연료 해체장치인 연료봉 인출장치, 연료봉 절단장치, 소결체 인출장치(탈피복 장치), 구조폐기물압축장치 등을 개발하기 위하여 이를 활용하였다. 즉, 공정장치에 설정된 개념을 바탕으로 부품을 3-D 그래픽으로 모델링하고, 기능별로 조립하여 kinematics를 부여한 후 설계 타당성, 장치 구성, 공정 등을 검증/분석하였으며, 그 결과를 장치제작 및 공정개념 확립에 반영하였다.

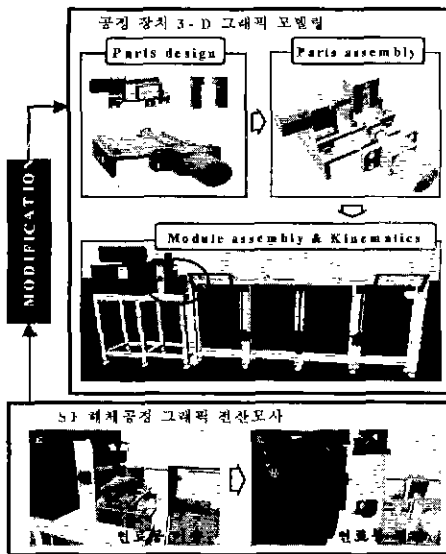


Fig. 1 Flow diagram of the graphic design system for spent fuel disassembling processes

2.2 부품 모델링 및 디바이스 설정

3차원 그래픽 모델링 및 디바이스 설정은 장치 개념의 적합성 및 동작의 적정성 등 설계 타당성을 검증하는 전산모사 시스템 구축을 위한 기초단계이다. 이를 위하여 장치 개념에 따라 세분화된 부품을 3차원으로 그래픽 모델링한 후, 이들을 부분 조립하여 모듈을 완성하고, 기능 및 동작특성에 따라 분류하여 kinematics(Joint, DOF 등) 특성을 부여한 디바이스를 구성한다. Fig. 2는 사용후핵연료봉 절단장치의 일부 부품을 모델링하여 조립한 후 기능에 따른 구동특성을 부여한 이송클램프 디바이스의 예이다

2.3 단위공정 Work-cell 및 전산모사

사용후핵연료 해체 장치가 수행하는 공정에

대한 전산모사는 3차원 그래픽으로 모델링하고 작동이 가능하도록 kinematics 값을 설정한 장치 모델을 그래픽으로 구성된 가상환경에 배치하여, 사용후핵연료 해체 공정개념에 따라 이들 장치가 수행하는 작업을 모사는 것이다. 본 연구에서는 이러한 전산모사를 통하여, 설정된 공정개념 및 설계 타당성을 검증하고 작업의 효율성을 분석함으로써, 실제 장치를 제작하기 전에 공정 수행시 나타날 수 있는 문제점 등을 미리 파악하였다. 그리고 이러한 문제점에 대한 보완사항들을 도출하여 장치 상세설계 및 제작에 반영함으로써 사용후핵연료 해체 공정장치를 최적화하였다

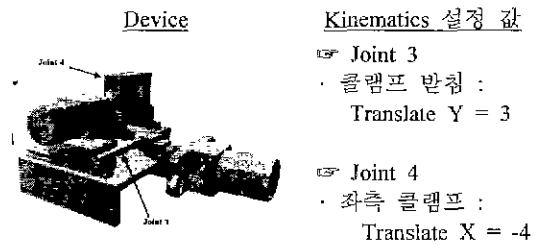


Fig. 2 T-Clamp device in fuel rod cutting machine.

3. 사용후핵연료 해체공정 Digital Mock-up

3.1 해체공정 가상작업환경 구축

사용후핵연료 해체공정을 컴퓨터 그래픽을 이용하여 분석하고 검증하는 전산모사를 수행하기 위하여, 실제 시험시설과 동일한 환경을 설정한 가상 시험시설인 digital mock-up을 구축하였다. 모의 사용후핵연료 해체공정을 수행하기 위한 시험시설은 핫셀 구조물, telescopic 이송장치 등의 단위 공정간 interface 작업공정 장치, 그리고 모의 핵연료를 해체하는 주 공정장치들로 구성된다.

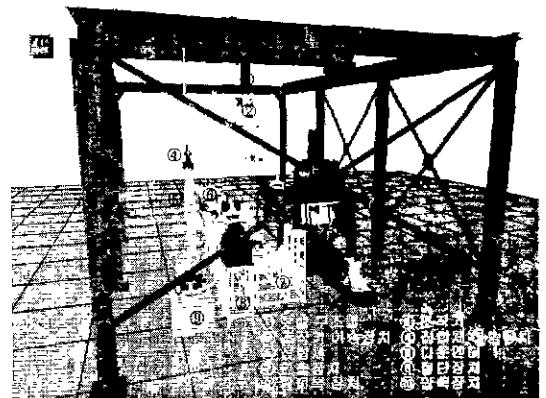


Fig. 3 Virtual environment for spent fuel disassembling process.

Mock-up 구조물은 실제 공정을 수행하기 위한 핫셀로서, 컴퓨터 그래픽을 이용한 사용후핵연료 해체공정 전산모사를 위하여 모의 사용후핵연료 해체 종합공정 시험시설과 동일한 환경을 설정하여 가상 작업환경을 구축하였다. 이 구조물은 핫셀 규모의 크레인 지지 구조물과 사용후핵연료 집합체를 수직 상태로 이송하는 수직 이송장치 및 단위 장치간 인터페이스 작업을 수행하는 telescopic 다관절 이송장치인 부속 공정장치로 구성된다. 그리고 각 단위공정 장치별 사양, 전산모사를 통한 장치 구동 검증 및 종합 공정 흐름 분석을 토대로 하여 그래픽 상의 가상 핫셀 내에 배치하였다.

Fig. 3은 가상 핫셀공간에 각 장치를 공정흐름에 따라 배치하고, 해체공정 전산모사에 필요한 모의 사용후핵연료 집합체와 핵연료봉을 설치한 모습을 나타내고 있다.

Table 1 Procedure of spent fuel disassembly process

공정	내용	공정장치	Interface
SF 집합체 자세 전환	<ul style="list-style-type: none"> Cell에 수직으로 들어온 SF 집합체를 수평으로 전환 집합체의 이송없이 수직전환 상태로 연료봉 인출대기 	Downender	<ul style="list-style-type: none"> SF 집합체 체중 Mock-up 시일 외부크레인 클램핑 테이블 = Downender
연료봉 인출	<ul style="list-style-type: none"> Downender를 Clamping Table로 하고 로타리테이블 이동, 연료봉 1개씩 인출 인출이 완료된 연료봉은 주테이블에 부착된 임시 바스켓에 인치 	연료봉 인출장치	<ul style="list-style-type: none"> 연료봉 이송용 절단장치에 부착된 Koding 장치
연료봉 절단	<ul style="list-style-type: none"> 연료봉 인출장치로부터 이송한 연료봉 1개씩 Roller Table에 인치 Roller를 이용하여 연료봉을 절단부위 이송하면서 적절할 길이(3 cm)로 절단 	연료봉 절단장치	<ul style="list-style-type: none"> 절단된 연료봉 이송용 절단장치에 부착된 연계장치
소결체 인출	<ul style="list-style-type: none"> 절단된 연료봉을 회전 Jig에 삽입 Jig를 회전시켜 연료봉 상단부를 인출한 이면 위치시켜 소결체 양출 Jig를 회전시켜 반류브 제거 	소결체 인출장치	<ul style="list-style-type: none"> 구조폐기물 이송 Telescopic 이송장치와 Gantry Crane
구조폐기물 압축	<ul style="list-style-type: none"> 연료봉 인출장치로부터 이송되어온 구조폐기물을 이송Table에 인치 이송장치로 구조폐기물을 이송하면서 구조폐기물 압축장치에 의하여 압축 전동롤을 이용하여 포장용기내의 Ctp를 정중 	NFBC 압축장치	

3.2 사용후핵연료 해체공정 전산모사

사용후핵연료 해체 종합공정 순서는 핫셀 내로 진입한 사용후핵연료를 핵연료 집합체 수직/수평 전환장치로 수평상태로 전환한 다음 연료봉 인출장치로 전환장치 상판에 고정된 사용후핵연료 집합체로부터 사용후핵연료봉을 1개씩 인출한다. 인출이 완료된 연료봉을 인수받은 연료봉 절단장치는 소결

체 인출이 용이하도록 3 cm 길이로 연료봉을 절단하며, 절단된 연료봉은 소결체 인출장치에서 연료봉 내부의 소결체를 추출하는 순서를 거쳐 사용후핵연료 해체공정을 완료하게된다. 또한, 연료봉 인출이 완료된 사용후핵연료의 구조폐기물은 별도로 구조폐기물 압축장치로 이송되어 부피 축소공정을 거쳐지게 되며, 이러한 일련의 공정 흐름은 Table 1 및 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

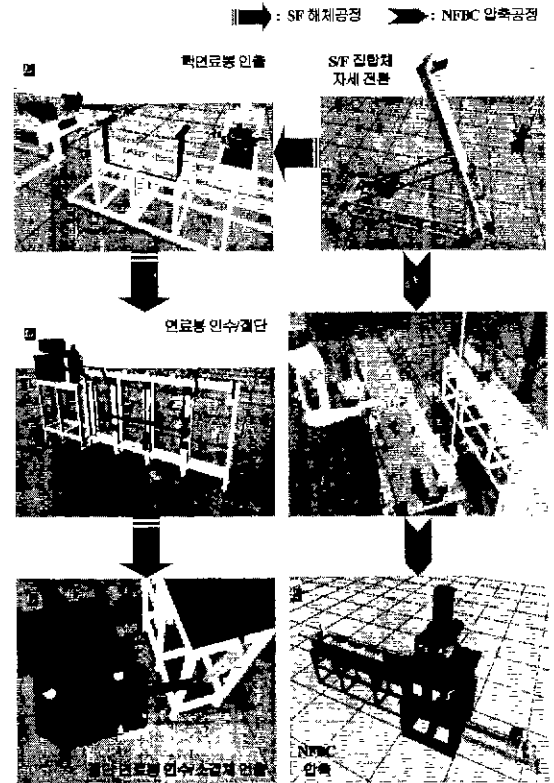


Fig. 4 Spent fuel disassembling processes graphic simulation

3.3 해체공정 Digital Mock-up의 활용

3.3.1 사용후핵연료 해체공정 검증 및 최적화

본 연구에서 개발한 사용후핵연료 해체공정 그래픽 설계 시스템과 digital mock-up을 이용하여 장치 구동을 실제 상황과 같은 조건에서 그래픽으로 전산모사함으로써, 기법의 적합성과 동작의 적정성 등 설계 타당성을 검증하고, 구동특성을 분석하여 장치가 수행하는 공정을 최적화하였다.

3.3.2 공정장치 오동작 분석 및 복구공정 설정

디지털 mock-up을 활용하여 사용후핵연료 해체공정 장치의 공정 수행 중에 발생 가능한 오동작을 분석하여 복구과정을 전산모사할 수 있는 시스템을

구축하였다. Fig 5는 이 시스템을 활용하여 연료봉 인출장치가 사용후핵연료 집합체의 bottom end 볼트를 풀기 위하여 렌치를 볼트에 접근시킬 경우에 발생할 수 있는 오동작을 감지하고, 이를 다르게 교정하는 공정을 전산모사로 나타낸 것이다.

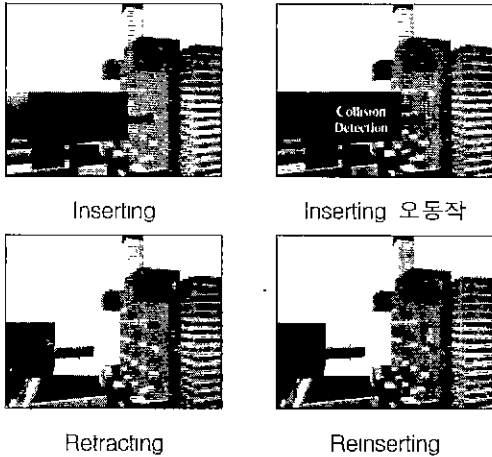


Fig. 5 Graphic simulation for malfunction detection and remedial process of the machine.

3.3.3 공정 실시간 감시시스템

사용후핵연료의 취급과 같이 작업안전성이 중요한 인자일 경우, 작업의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 원격조작자가 작업을 효율적이고 안전하게 수행하도록 하기 위하여, 디지털 복업 시스템을 이용하여 폐쇄된 공간에서의 작업상황 정보에 따라 3차원 그래픽환경에서 실시간으로 제현하는 시스템을 개발하여 작업신뢰도를 향상시키도록 하였다. Fig. 6은 사용후핵연료봉 인출시스템의 실제 환경과 그래픽 환경을 실시간으로 연계시켜 공정을 수행하는 모습을 나타낸다.



Fig. 6 Real time graphic simulation with actual spent fuel rod extraction system

4. 결론

본 연구에서는 현재 산업계에서 개발주기를 단축하고 비용을 절감하기 위하여 적용하고 있는 컴퓨

터에 의한 그래픽 설계기술을 활용하여, 사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위한 전처리 기술의 하나인 사용후핵연료 취급/해체 장치 및 공정 개발을 위한 동시공학 개념의 3차원 그래픽 설계 시스템을 개발하였다. 또한 고방사성 물질인 사용후핵연료를 취급하는 장치의 공정을 분석하고 최적화하기 위하여, 공정을 수행하는 실제 핫셀의 환경과 동일한 조건의 가상작업환경인 디지털 복업을 구축하였다.

그래픽 설계 시스템을 활용하여 사용후핵연료 취급/해체 공정장치를 3차원으로 모델링하고 운동특성을 부여하여 구동을 분석함으로써, 공정 장치 개념의 타당성을 검증하고 수정/보완사항을 도출하여, 이를 제작을 위한 상세설계에 반영하였다.

그리고 사용후핵연료 종합공정 전산모사를 수행하기 위해 구축된 디지털 복업에서 공정 시나리오에 따라 전산모사하여 분석함으로써, 최적의 사용후핵연료 해체종합공정을 도출하였다. 또한, 디지털 복업은 장치의 오동작을 감지하고 분석하여 복구하는 공정을 설정하고, 원격지의 작업 상황을 정밀 감시하기 위하여 제어용 PC와 그래픽 서버를 동기화시킨 실시간 연계 제현시스템개발에 활용하였다.

이러한 3차원 그래픽설계 기술과 디지털 복업 등 가상 모형기술은 사용후핵연료 취급/해체 공정장치 뿐만 아니라, 지속적인 보관을 통하여 사용후핵연료 차세대관리공정 및 유지/보수공정 개발 등 사용후핵연료 관리 전반에 걸친 공정장치의 개발에 적용함으로써 작업신뢰성과 안전성을 확보에도 기여할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Deneb, "IGRIP User Manual and Tutorials". 1995.
2. J. Auelle, R.Braun, "Graphic simulation system for product process development," Proc. of the DENEb User Group Conference, pp. 11-14, 1994.
3. R. Quinn, et al, "Design of an Agile Manufacturing Work-cell for Light Mechanical Application", Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 858-863. 1996.
4. Omura, "Virtual prototyping for canister receiving devices of high level waste storage facility," Proc. of '99 DENEb User Meeting for Korean Users, 1999.
5. 윤지섭 외, "사용후핵연료 원격취급 장치 개발", 한국원자력연구소 연구보고서(KAERI/RR-1801/97) pp. 113-151, 1997.