

# 차세대관리공정의 원격 작업을 위한 3차원 그래픽 설계기술의 활용

\*김성현, 송태길, 임광목, 박병석, 윤지섭  
한국원자력연구소

## Application of 3 Dimensional Graphic Design for the Remote Operation in Spent Fuel Advanced Conditioning Process

\*S. H. Kim, T. G. Song, K. M. Lim, B. S. Park, J. S. Yoon  
Korea Atomic Energy Research Institute

Key words : Remote, Hot Cell, Simulation, Spent Fuel, manipulator

### 1. 서론

우리나라의 전기 발전량의 40.2%를 원자력 발전이 담당하고 있으며 현재 20기의 원자력발전소가 운영 중에 있다. 원자력발전소의 운영으로 매년 사용후핵연료가 발생되고 있으며, 원자력발전소가 계획대로 증설된다면 2025년까지 22,000 tU의 사용후핵연료가 누적될 것으로 전망된다. 따라서 효율적이고 안전한 사용후핵연료의 처리방안을 마련하기 위하여 한국원자력연구소에서는 사용후핵연료 재활용할 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정(Advanced spent fuel Conditioning Process) 기술을 개발하고 있다. 이 공정은 1997년부터 개발하였으며 이를 실증할 Advanced Spent Fuel Conditioning Process Facility(ACPF)를 건설하여 모의 연료봉을 이용한 시운전을 수행 중에 있다.

컴퓨터를 이용한 CAD 설계 기술의 급격한 발전에 따라 3차원 그래픽 기술을 응용하여 가상 공간상에서 공정장치의 구조, 구동 및 공정을 검증하는 기술이 활발하게 도입되고 있다. 원자력분야에서도 3차원 설계를 활용하여 실제 시설을 구축하기 전에 가상 환경을 이용하여 사전에 발생할 수 있는 문제점을 파악하여 해결하고자 하였다. 일본 JNC의 동해사업소에서는 FBR(Fast Breed Reactor) 연료의 재처리 공정을 원격으로 수행할 목적으로 RETF(Recycle Equipment Test Facility)을 건설하였다. 이 시설은 3차원 설계를 바탕으로 가상 목업(virtual mockup)으로 구축하였으며 공정장치들의 최적배치, 원격유지보수 방안, 및 감시카메라의 시야범위 분석에 활용하였다. 또한, 가상목업을 구성하여 시설의 구조 및 외형뿐만 아니라 장치들의 조립과정에서의 조립성, 기기의 동작특성 및 대규모 공정의 전 과정을 모사하여 실제 장치에서 발생할 수 있는 문제점을 검증하고 있다.

사용후핵연료 차세대관리공정은 고방사성, 고온의 극한 환경에서 운전하기 때문에 작업자와 공정장치 사이에는 격리된 핫셀에서 마스터-슬레이브 매니플레이터(MSM : Master/Slave Manipulator)를 이용한 원격 운전과 장치가 고장 난 경우에는 원격으로 유지보수 작업을 수행한다. 본 연구에서는 3차원 그래픽설계 기술을 활용하여 각종 공정장치의 크기, 기능 및 운전 특성 등을 반영하여 설계함으로써 공간 활용을 극대화하였다. 시설, 공정장치 및 유지보수장치를 3차원 그래픽 모델링하여 가상환경을 가상 목업을 구축하고, 공정장치들은 운전 및 유지/보수 측면에서 MSM의 작업영역을 분석하여 장치 설계에 반영하였다. 공정흐름에 따라 공정장치를 핫셀 내에 최적 배치를 하고 공정운전에 따른 장치의 접근가능성을 분석하였다. 또한, 공정에서의 원격 취급, 장치의 운전성 및 장치 고장에 대한 유지보수성을 사전 검증하고자, 차세대관리공정을 가상공간상에서 시뮬레이션으로 구현해 봄으로써 유지보수 공정의 절차의 적합성, 유지보수 가능성을 점검하고자 한다.

### 2. 차세대관리공정 및 시설개요

사용후핵연료의 효율적이고 경제적으로 안전한 관리를 위한 사용후핵연료 차세대관리공정은 사용후핵연료를 리튬(Li) 용융염 매질 내에서 전기화학적 방법을 이용하여 우라늄금속을 전환하고, 고발열성 핵종(Cs, Sr)을 제거시키는 공정이다. 사용후핵연료에 포함되어 있던 고발열성 핵종을 제거함으로써 사용후핵연

료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 최대 1/4까지 감소시킴으로써, 사용후핵연료관리의 처분 안정성 향상과 처분면적의 감축을 동시에 달성할 수 있다. 공정의 주요장치는 핵물질 계량관리용 비파괴 중성자 측정장치(ASNC : ACP Safeguards Neutron Counter), 핵연료봉을 피복관과 연료봉 내부의 사용후핵연료 펠릿을 분리시키는 탈피복 장치(slitting device), 사용후핵연료의 UO<sub>2</sub>를 고온에서 산화시켜 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 으로 분말화하는 건식분말화장치(voloxidizer), 분말화된 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 을 우라늄금속으로 전환하는 금속 전환장치(metallizer) 등으로 구성된다.

차세대관리공정을 실증하기 위한 시설은 핫셀이라는 공간 안에 공정장치가 설치된다. 핫셀은 작업하는 작업자의 방사선 피폭을 감소하기 작업자와 격리된 차폐된 방을 지칭한다. 차세대관리 종합공정 실증시설은 작업자 운전구역과 핫셀로 구성된다. 핫셀의 규모는 11m(L) x 2m(W) x 4.55m(H)이며 공정 셀과 유지보수 셀로 구성된다. 핫셀내에는 그림 1과 같이 공정장치뿐만 아니라 운전, 이송 및 유지보수를 할 수 있는 장치들이 설치되어 있다.



Fig. 1 The Real and Virtual ACP Demonstration Facility

### 3. 장치모델링 및 분석

3차원 그래픽 모델링은 다양한 검증 시뮬레이션의 기초자료가 되기 때문에 본 연구에서는 실제와 가상 장치간의 일치성을 확보하기 위하여 실제와 똑같은 수치로 모델링을 하였다. 또한, 원격작업 분석을 위한 시뮬레이션은 컴퓨터의 성능에 좌우되기도 하지만 모델 데이터의 크기에도 영향을 받는다. 따라서 다수의 장치들이 구동되므로 렌더링(rendering)하는 그래픽 모델의 상세 정도(LOD : level of detail)를 조정하여 모델링 하였다. 3차원 모델링은 장치들의 부품을 모델링하고 부분적으로 부품들을 조립하고 조립된 부품을 다시 조립하여 가상장치를 생성한다. 가상장치의 구성은 장치의 구동부분을 고려하여 part를 조립하여 구성한다. 구동하는 장치들은 구동특성에 따라 기구학(kinematics) 특성 및 운동 범위에 대한 정의를 부여함으로써 전산모사 시에 장치들의 구동 모습의 구현할 수 있다. 이송시스템에 부착된 서보매니플레이터와 핫셀 벽에 부착된 MSM은 핫셀내에 설치되어 공정운전 및 유지보수를 수행하는 장치이며 6자유도의 기구학을 갖는 장치로서 그림 2와 같이 모델링하였다.

핫셀에서의 운전 및 대부분의 작업은 MSM을 사용하여 이루어지기 때문에 MSM의 작업범위는 매우 중요하다. 구동특성에 따른 기구학 및 구동범위를 정의된 MSM을 이용하여 작업영역을 분석하였다. MSM의 작업영역은 핫셀내의 공정장치의 배치에

영향을 미친다. 그림 3과 같이 분말화장치의 상부는 MSM의 작업영역 안에 있지 않기 때문에 접근이 불가능하다. 따라서 장치가 MSM의 작업영역 안에 위치할 수 있도록 노(reactor)가 상하로 이동될 수 있도록 설계 변경 하였다.

유지보수장치의 작업영역분석은 핫셀내 공정장치의 유지보수 부품으로의 접근성과 관련하여 가장 기본적인 분석이다. 공정장치의 조작 및 유지보수 측면에서의 접근성 및 핫셀내 공정장치 배치는 매니플레이터의 작업영역 분석을 통하여 가능하다. ACPF와 공정장치 및 유지보수장치의 3차원 모델링 자료를 이용하여 컴퓨터의 가상환경에 장치를 배치하여 workcell을 구성하여 가상 목업을 구축하였고, 가상 핫셀 안에 공정장치 및 유지보수 장치들을 그림 4와 같이 최적 배치하여 공간 활용을 극대화 하였다.

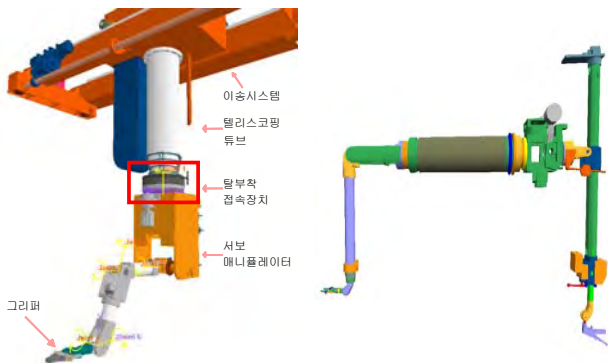


Fig. 2 3 D Graphic Model of a Bridge Transported Servo-Manipulator and a Master/Slave Manipulator.

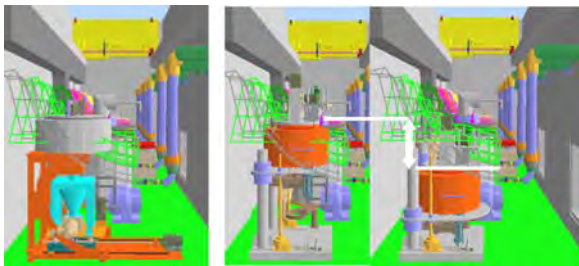


Fig. 3 The Improvement of a Vol-oxidizer Device using the Analysis of MSM's Operation Area.



Fig. 4 The Virtual Mockup of ACP.

4. 원격 운전 및 유지보수작업 시뮬레이션

핫셀에서의 운전 및 대부분의 작업은 MSM을 사용하여 이루어지고 있기 때문에 MSM의 작업범위 안에 공정장치가 배치되어야 한다. 가상 목업을 이용하여 MSM의 작업범위 안에서 모든 작업을 수행할 수 있는 가를 시뮬레이션으로 미리 수행함으로써 검증할 수 있다. 시설에서 수행할 실증공정을 절차에 따라 이루어질 수 있도록 먼저 공정절차를 수립하고 절차에 따른 시나리오가 작성된다. 작성된 시나리오에 따라 프로그램을 하여 시뮬레이션을 구현하였다. 구현을 위해 MSM의 작업영역 안에서 움직이도록 path 설정을 하여 움직이도록 하였으며 슬리팅장치에 핵연료 봉을 장착시키는 동작을 시뮬레이션으로 구현한 결과와 이를 바탕으로 실증시설에서의 운전은 그림 5와 같다.

핫셀 안에 설치되는 장치들은 원격으로 장치 조작 및 고장이 발생되었을 때 유지보수를 고려하여 모듈화를 적용하여 설계 제작된다. 선정된 보수 대상의 모듈에 대해서 인양 고리, 간섭문제, 장비 접근, 취급 장비의 모듈중량 등을 고려되며, 보수대상에 대한 분해 및 조립 방안을 분석하게 된다. 시뮬레이션을 수행하기 전에 장치들의 구조, 기능 및 동작을 파악하고 예상되어지는 작업절차를 수립하였다. 작업절차에 따른 유지보수 시나리오를 작성하여 시뮬레이션을 구현하였다. 그림 6은 슬리팅장치의 리미트 스위치 교체작업의 시뮬레이션과 실증시설 내에서 작업을 보여준다.

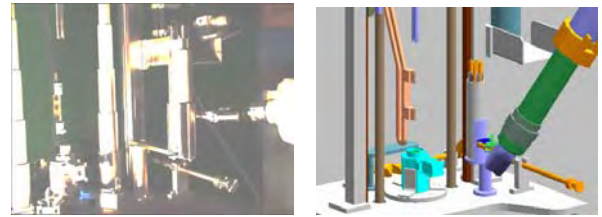


Fig. 5 Demonstration and Graphic Simulation of a Slitting Process.

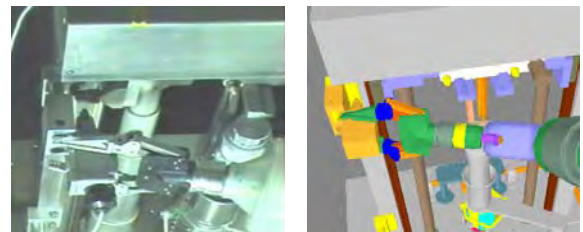


Fig. 6 Demonstration and Graphic Simulation of Maintenance Operation in Slitting Device.

5. 결론

최근 컴퓨터의 발달로 CAD/CAM과 같이 3차원 그래픽 기술이 활발하게 활용이 되면서, 시뮬레이션도 시각적인 환경에서 이루어지고 있다. 본 연구에서는 공정에 필요한 공정장치 및 유지보수 장치를 실물과 같은 크기로 3차원으로 그래픽 모델링하여 가상 환경에서 모든 장치들은 조립되고 공간상에 배치하여 디지털 목업을 구축하였다. 이를 이용하여 핫셀에 공정장치의 배치 및 운전이 필요한 공정장치의 설계요건 분석뿐만 아니라 핫셀에서 원격으로 수행되는 공정운전과 유지보수를 위한 분석을 수행하였다. 또한, 공정운전에 사용되는 MSM의 이동경로와 작업 대상의 위치에 따른 작업 및 접근가능성에 대한 자료를 생산하여 공정운전 및 유지보수작업의 시뮬레이션을 수행할 수 있었으며 실제 작업과 비교하여 만족할 만한 수행결과를 도출하였다. 가상 목업을 이용한 가상의 시뮬레이션은 먼저 해봄으로써 작업자의 공정운전에 대한 이해도를 높일 수 있어 교육 자료로서의 활용될 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 森田 英司, 外, "核燃料再處理施設へのCAD活用技術開發," 動燃技術, 64-73, No. 92, 1994.
2. B. S. Park, and et al., "Design of a Bridge Transported Servo Manipulator System for a Radioactive Environment," 2003 International Conference on Control, Automation and Systems, 2514-2518, 2003
3. Y. Ohmura, 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.