

고준위폐기물 처분공정 개념분석을 위한 가상환경 구축

이종열*(한국원자력연구소), 조동건("), 최희주("), 김성기("), 최종원(")

Implementation of a Virtual Environment for the HLW Disposal Process Analyses

J. Y. Lee(KAERI), D. K. Cho("), H. J. Choi("), S. G. Kim("), J. W. Choi(")

ABSTRACT

The process equipment and remote handling for the deep geological disposal of high-level radioactive waste(HLW) should be checked prior to the operation in view of reliability and operability. In this study, the concept of virtual environment workcell is implemented to analyze and define the feasible disposal process instead of real mock-up, which is very expensive and time consuming. To do this, the parts of process equipment for the disposal and maintenance will be modeled in 3-D graphics, assembled, and kinematics will be assigned. Also, the virtual workcell for the encapsulation and disposal process of spent fuel will be implemented in the graphical environment, which is the same as the real environment. This virtual workcell will have the several functions for verification such as analyses for the equipment's work space, the collision detection, the path planning and graphic simulation of the processes etc. This graphic virtual workcell of the HLW disposal process can be effectively used in designing of the processes for the hot cell equipment and enhance the reliability of the spent fuel management.

Key Words : Spent Fuel(사용후핵연료), Deep Geological Disposal(심지층 처분), Encapsulation Process(포장공정), Virtual Workcell(가상작업환경), Graphic Simulation(그래픽 모사), Path Planning(경로 계획)

1. 서 론

우리나라 전체 전력량의 40 %를 점유하고 있는 원자력 발전은 장기 전력수급계획에 의하면, 2015년까지 28기의 원자력발전소를 운영할 예정이며, 이들의 운전이 완료되는 시점까지 발생하여 누적될 것으로 예상되는 사용후핵연료는 총 36,000 tHM에 이를 것으로 전망된다[1]. 이러한 사용후핵연료는 방사능 준위가 높은 특성상 고준위폐기물로 분류하며, 이를 일정한 냉각기간이 지난 후 지하 수백 미터에 위치한 지하암반에 처분하는 개념에 대한 연구를 수행하고 있다.

고준위 방사성폐기물을 지하 암반에 처분하기 위해서는 작업자의 방사선적 안전성, 작업 효율 및 원격취급 등을 분석하여 처분공정을 설정하여야 한다. 이러한 분석은 모의 제작시스템을 이용하여 직접 수행함으로써 가능하다. 하지만, 모의 제작시스템의 경우 비용과 시간이 많이 소모될 뿐만 아니라, 수정/보완이 용이하지 않은 단점이 있다. 이러

한 문제점을 극복하기 위하여 컴퓨터 기술을 기반으로 하는 그래픽 전산모사 기술을 활용하고 있다.

이 기술은 비주얼 환경(Visual Environment)에서 사용자가 원하는 행위를 모사함으로써, 그 과정 및 결과를 사전에 가시화할 수 있을 뿐만 아니라, 실제 시스템에서 발생할 수 있는 예기치 않은 상황이나 문제점을 발견하고 해결 방법을 모색할 수 있기 때문에, 시스템의 설계와 해석, 개발을 위한 도구로서 중요한 비중을 차지하고 있다.

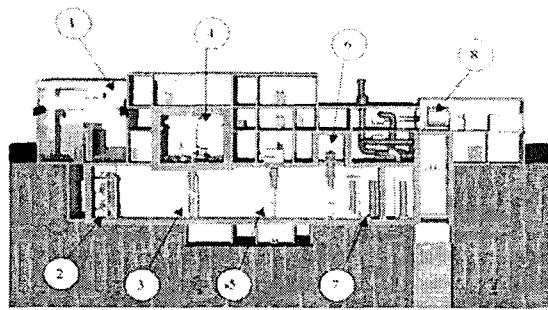
본 연구에서는 지상시설에서의 고준위폐기물 포장공정을 거쳐 지하 처분장으로 수송된 처분용기를 처분터널 내 처분공에 정지시키기까지의 효율적이고 안전한 처분공정을 설정하는데 필요한 다양한 분석이 가능하도록 하는 가상 작업환경을 구축하는데 필요한 개념 및 절차를 설정하였다. 현재, 고준위폐기물 처분에 대한 다양한 연구가 심도있게 진행 중에 있으며, 처분공정 개념 도출에 따라, 가상 작업환경 구축을 구체화 할 계획이다.

2. 고준위폐기물 심지층 처분 개념 및 공정

2.1 지상시설에서의 사용후핵연료 포장

사용후핵연료를 심부지하환경에서 수천에서 수만년이상 안전하게 처분하기 위해서는 1차적으로 사용후핵연료를 적절하게 포장하여야 한다.

사용후핵연료 심지층 처분을 위한 포장공정 주요 기능, 발생량 추이 등 설계요건 및 기준에 따른 포장공정 흐름개념은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다[2].



- ① 사용후핵연료 인수
- ② 처분용기 거치
- ③ 처분용기 핫셀 접합
- ④ 사용후핵연료 적재(핫셀)
- ⑤ 처분용기 용접
- ⑥ 처분용기 용접검사
- ⑦ 처분용기 세척
- ⑧ 지하 처분장으로 이송

Fig. 1. The concept of encapsulation process

2.2 지하시설 내 사용후핵연료 처분

지하 처분시설 배치를 위한 처분터널 및 처분공 간격은 사용후핵연료에서 발생되는 열에 의한 영향을 분석한 결과를 토대로 설정되며, 형상과 규모는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 처분용기, 완충재물질, 뒤메움 물질 등으로 구성된 공학적 방벽 개념을 고려하여야 한다.

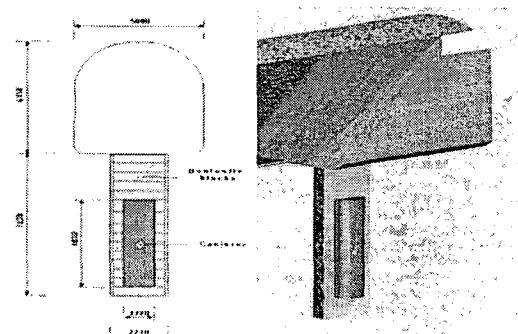


Fig. 2. Concept of Engineered Barrier.

Fig. 3은 현재의 개념단계에서 지질특성을 고려하지 않은 사용후핵연료 심지층 처분을 위한 기준 처분 개념을 나타내고 있으며, 이는 진입 샤프트, 접근

터널, 파넬 터널, 및 처분 파넬로 구성된다[2,3]. 또한, 처분 파넬은 처분터널과 처분공으로 이루어진다.

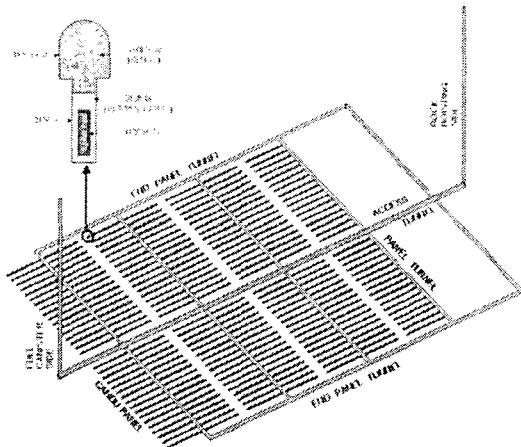


Fig. 3. Preliminary Layout of the Deep Geological Repository.

2.3 사용후핵연료 포장공정

원자력발전소 또는 중앙 집중식 중간저장고에 저장된 사용후핵연료는 처분을 위하여 도로 또는 해상수송을 이용하여 처분시설의 지상시설로 수송된다. 지상시설의 인수구역에서 초기 검사를 완료한 사용후핵연료는 포장을 위하여 핫셀로 이송한다. 핫셀 구역에서 사용후핵연료는 수송용기로부터 하역되고 압력용기의 내부 백에 저장하며, 여기서 PWR형은 습식으로 이송되기 때문에 포장 전에 건조된다. 처분용기도 수송용기와 같은 방법으로 핫셀에 접합되며, 처분용기는 내부 처분용기의 불활성 분위기를 위하여 특수 보호커버를 구비한다. 처분용기 외부뚜껑인 구리 뚜껑은 오염되는 것을 방지하기 위해 핫셀 내부로 들이지 않고 이송복도에서 특수 크레인으로 처분용기에 장착시킨다.

PWR 사용후핵연료 접합체는 Telescopic pole crane으로 처분용기에 적재하며, 이 크레인의 제어장비와 계측장비는 유지보수를 용이하게 하기 위하여 핫셀 외부에 설치한다. CANDU 사용후핵연료는 건조하지 않는 것과 연료 번들은巴斯켓(33개 들이)으로 취급하여巴斯켓을 직접 처분용기에 적재하는 것을 제외하면 PWR형과 공정이 동일하다.

핫셀 공정을 마친 처분용기 외부 실린더의 구리 뚜껑은 연료가 적재된 처분용기가 용접설로 이송되기 전에 장착하고, 전자빔 용접방법을 적용하여 밀봉시킨다. 진공 챔버는 방사선 방호 장비가 준비되어야 하며, 전자빔 용접기는 수직 위치로 장착되어 고정식이고 처분용기를 회전시키며 용접을 수행한다. 용접결합 발생시 결함부위 보수를 위한

재용접을 수행하고 재용접이 불가능한 경우 가공하여 전체뚜껑을 제거한 후 연료집합체를 제거하여 새로운 처분용기에 적재한다.

용접 검사를 위한 비파괴 검사는 초음파 검사 및 X-ray 검사 장비로 수행한다. 초음파 검사는 검사부를 처분용기 검사 부위에 위치시킨 후 처분용기를 회전하여 검사하며, X-ray 검사는 특수 챔버에서 수행하는데 X-ray 검사기는 고정시키고 회전판위의 처분용기를 회전하며 검사를 수행한다.

용접검사가 완료되면, 처분용기는 지하처분장으로 이송하게 되며, 지하 처분장으로의 사용후핵연료 처분용기 이송은 자동안내 차량에 의하여 이송 복도로부터 임시저장고까지 이송하거나, 더 나아가 연장된 통로를 통하여 처분용기 이송을 위한 지하 승강기까지 이송한 후, 지하로 연결된 처분용기 승강기로 최종 지하 처분장까지 이송하게 된다.

2.4 지하시설 처분공정

지상시설과 지하시설을 연결하는 처분용기 샤프트에 의해 이송된 사용후핵연료를 적재한 처분용기는 지하터널 내 차폐시설이 구비된 특수차량으로 인수하여 처분터널로 이송된다. 이송차량이 처분공에 도착하기 전에 처분공에는 바닥과 측면의 일부에 벤토나이트 블록을 설치한다. 처분터널의 처분공까지 후진으로 진입한 차량은 Fig. 4에서 보이는

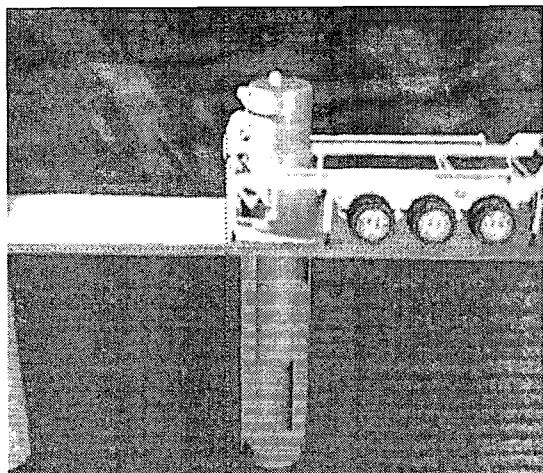


Fig. 4. Concept of the HLW Canister Emplacement in the Bore Hole of the Disposal tunnel.

바와같이 차폐된 수송차량 이송용기를 구동하여 처분공의 정확한 위치에 정차시킨다. 처분용기 정차가 완료되면 처분공 나머지 부분에 벤토나이트 블록을 채움으로써 처분용기의 정차를 완료한다.

3. 가상 작업환경 구축

사용후핵연료는 원자력 발전으로 발생되는 고준위 방사성물질로서, 이러한 물질은 높은 방사능으로 인하여 핫셀(Hot cell)이라고 하는 차폐공간 또는 차폐된 취급장치를 이용하여 원격운전으로 작업을 수행한다. 그리고 사용후핵연료 심지층 처분과 같은 경험이 없는 초기단계의 공정들은 다양한 분석을 통하여 시스템을 정립할 필요가 있다. 또한, 이러한 고방사성물질 취급 및 유지보수를 위한 원격조작과 처분공정은 실제 작업을 수행하기 전에 장치 및 공정에 대한 충분한 검증이 이루어져야 한다. 공정장치 및 유지보수 장비의 사전 검증은 일반적으로 실제 규모의 Mock-up을 이용하지만, 이 경우 비용, 시간 및 교정 용이성 측면에서 효율적이지 못한 경우가 허다하다. 따라서 이를 해결하기 위하여 그래픽 시뮬레이션 기술을 활용하는 추세에 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 발견하고 해결 방법을 모색할 수가 있기 때문에, 시스템의 설계와 해석, 개발을 위한 틀로서 중요한 비중을 차지하고 있다.

3.1 3-D 그래픽 모델 및 구동 특성 부여

실제 작업환경과 유사하게 가상 작업환경을 구축하기 위해서는 작업환경을 구성하는 요소 부품들을 3차원으로 그래픽 모델링하고, 조립하여 구동이 가능하도록 설정하여야 한다.

핫셀 내에서 작업을 수행하는 기계식 조작기의 경우 핫셀 내에서 작업을 수행하는 슬레이브 모듈부와 이를 핫셀 밖에서 운전하는 마스터 모듈부, 그리고 핫셀의 차폐벽을 관통하여 마스터와 슬레이브를 기계적으로 연결하는 관통 모듈부로 분류된다. 이와 같이 기능에 따라 분류된 모듈별 부품을 모델링하고 조립하여 기구학/역기구학적 기능을 부여한 가상장치는 Fig. 5에 보여주고 있다.

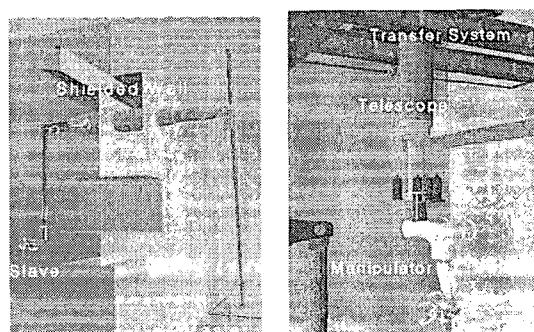


Fig. 5 Graphic Model of the Process Equipment

3.2 가상 작업환경 구축

시뮬레이터를 이용한 실제 작업에서의 장치 및 공정에 대한 사전 검증 및 분석을 정확하게 수행하기 위해서는 가상작업환경을 실제 환경과 가능한 한 동일하게 구축하여야 한다. 따라서 3차원 그래픽으로 모델링된 핫셀과 구동 특성이 부여된 공정 장치 및 유지보수장치 모델을 이용하여 대상공정인 사용후핵연료 심지층 처분공정이 수행될 작업환경과 동일한 가상작업환경을 구축할 계획이다.

심지층 처분 가상 작업환경은 포장공정이 수행되는 지상시설 환경과 지상시설 내 사용후핵연료를 처분용기에 포장하기 위한 공정장치들을 배치하게 된다. 그리고 지하 500 m 깊이의 심지층에 처분용기를 안치시키는 공정을 위한 가상작업환경으로서, 접근터널, 처분터널/처분공 및 유탈리티 등 지하시설과 공정에 필요한 장치를 배치하게 된다. 또한, 지상시설과 지하시설을 연결 및 지하시설 환기를 위한 샤프트들도 배치함으로써, 고준위폐기물 처분 시설 가상작업환경이 구축된다.

3.3 가상 작업환경을 이용한 분석

심지층 처분시스템에 대한 가상작업환경이 구축되면 작업영역 분석, 공정장치 경로설정 등 다양한 분석을 수행할 수가 있다.

공정장치 및 유지보수장치의 작업영역분석은 핫셀내 공정장치 부품으로의 접근성과 관련하여 가장 기본적인 분석이다. 핫셀 내 사용후핵연료 포장공정장치 배치는 이 분석을 통하여 가능하게 된다.

작업의 안전성과 효율성을 위하여 공정장치의 공정물질 운반/취급 또는 장치 유지보수 작업을 위한 구동식 핫셀 내 다른 공정장치 또는 유탈리티 등의 부대시설과 충돌이 일어나지 않아야 한다. 이를 위하여 가상작업환경의 공정 장치와 주요 핫셀 구성 품간의 충돌감지기능을 설정하게 되며, 공정장치 장치작업시 최적의 경로를 설정할 수 있게 된다.

또한, 상기 분석을 통하여 설정된 공정에 대한 검증을 위하여 공정물질 운반/취급 등 공정 분석에 필요한 전산모사 수행이 가능하다. 즉, 분석된 결과를 토대로 하여 공정 시나리오를 설정하고, 설정된 시나리오에 따라 전산모사 프로그램을 작성하여 그래픽 가상환경에서 공정을 구현함으로써, 공정장치의 배치 및 보수 부품의 적합성 등을 검증하고 필요시 작업 환경의 수정/보완이 가능하게 된다. 이러한 전산모사를 통하여 설계 중인 시스템에 대한 설계검증 및 수정 보완 등을 동시에 수행할 수 있는 Concurrent Engineering 이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 안전성과 효율성이 요구되는 사

용후핵연료 심지층 처분공정을 수행하는 시설의 공정장치 구동분석, 주요 공정설정 및 향후 운전자의 숙달훈련을 위하여, 실제 환경과 동일한 가상환경 구축을 위한 기본개념을 설정하였다. 즉, 공정장치 및 유지보수장치를 3차원으로 그래픽 모델링하고, 구동 특성을 부여하여 실제 장치와 동일하게 운전이 가능하도록 하고, 이를 가상작업환경에 배치하기 위한 개념을 정립하였다. 이를 바탕으로 공정장치의 작업영역 분석, 충돌감지 및 회피, 최적 작업 경로 및 공정 설정을 위한 전산모사 등 요구되는 기능을 부여하도록 하였다.

향후, 본 연구에서 설정된 개념을 바탕으로 하여 공정장치 구동 측면에 있어서 보다 실제에 가까운 환경을 구축하기 위해서는 가상 동력학 기능을 추가할 필요가 있으며, 스페이스 볼 또는 조이스틱과 같은 외부 인터페이스 장비와 연계한 가상현실 시스템으로의 발전도 고려할 것이다. 이 그래픽 가상작업환경은 고방사성 물질 취급 및 장치의 공정절차 수립 및 최적화와 운전자의 숙달 훈련을 통하여 안전성 및 신뢰성 고도화와 효율성을 높이는데 활용될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Choi, J, Reference S/F and Its Characteristics for Deep Geological Repository Concept Development,? J. KNS, Vol.31. No.6 (Dec. 1999).
2. Choi, J., Kang, C-H., Kukkola, T., Saanio T., 2003. KAERI's spent fuel repository. Design evaluation and cost estimation. R&D Report 2003-02. Posiva Oy, Olkiluoto.
3. Kukkola, T. 2002. Encapsulation plant description. Independent facility. Working Report 2002-03. Posiva Oy, Helsinki
4. Yudaka Omura, etc., "Virtual prototyping for canister receiving devices of high level waste storage facility," Proc. of '99 DENEBC User Meeting for Korean Users, 1999.
5. 박병석, 윤지섭외, "A Study on Remote Handling Technology Using Gantry Robot Manipulator," 한국원자력학회 추계 학술발표회의 논문집, 2000.