J. of the Korean Radioactive Waste Society
Vol.1(1), p.55-64, December 2003.

Development of the Maintenance Process Based on Graphic Simulation for the Parts of the Equipment at the outside of the MSM's Workspace in a Hot Cell

그래픽 전산모사를 이용한 핫셀 사각지역 내 장치부품 유지보수공정 개발

Jong-Youl Lee, Seong-Hyun Kim, Tae-Gil Song, Byung-Suk Park, and Ji-Sup Yoon
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yusung-Ku, Daejeon
njylee@kaeri.re.kr

이종열, 김승현, 송태길, 박병석, 윤지섭
한국원자력연구소, 대전광역시유성구 덕진동 150번지

(Received December 6, 2003, Approved December 15, 2003)

Abstract

In this study, the maintenance process by the servo manipulator has been developed for the parts of the equipment, which are unable to reach out by the Master-Slave Manipulator(MSM) in a hot cell. To do this, a virtual mock-up is implemented using the virtual prototyping technology. Using this mock-up, the workspace of the manipulators in the hot cell and the operator's view through the wall-mounted lead glass have been analyzed. In addition, the path planning of the servo manipulator using the collision detection function of the virtual mock-up has been established. From these, the maintenance process for the parts of the equipment, which are located at the outside of the MSM's workspace using the servo manipulator has been proposed and verified through the graphic simulation.

It is revealed that the proposed remote maintenance process of the equipment can effectively be used in the real hot cell operation. It is also believed that the implemented virtual mock-up of the hot cell can effectively be applied in analyzing the various hot cell operation and enhancing the reliability and safety in a hot cell remote handling for the spent fuel management.

Key words : Hot cell, Remote Handling, Master-Slave Manipulator, Servo manipulator, Virtual Mock-up, Graphic Simulation

요 약

사용후핵연료와 같은 고준위 방사성물질을 취급하는 핫셀 내에서 원격취급장치인 MSM의 작업영역을 벗어난 지역에 위치한 공정장치부품 유지보수공정을 개발하였다. 이를 위하여 대상 핫셀공정인 사용후핵연료 차세대관리공정에 대한 가상목업을 구축하였으며, 구축된 가상목업을 이용하여 MSM 작업영역 및 작업자 시각영역을 분석하고, 그래픽 가상목업의 충돌감지 기능을 이용한 서보 조종기의 경로계획을 수립하였다. 또한, 분석한 결과를 토대로, 서보조종기에 의한 사각지역 내 부품 유지보수 공정을 설정하였으며, 설정된 공정은 그래픽 전산모사를 통하여 검증하였다.

제안된 유지보수 공정은 실제 핫셀공정 수행시 유용하게 활용될 것이며, 그래픽 가상목업은 다양한 핫셀 공정에 대한 분석 및 작업자 훈련 시스템으로 활용하여, 작업 효율성 및 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

Key words : 핫셀, 원격 취급, 마스터-슬레이브 원격조종기, 서보 원격조종기, 가상 목업, 그래픽 전산모사

Ⅰ. 서 론

사용후핵연료와 같은 고준위 방사성물질 취급시 높은 방사능으로부터 작업자를 보호하기 위하여 핫셀이라는 차폐된 시설에서 원격취급장치를 사용한다. 따라서, 이러한 물질을 취급하는 공정장비에는 효율적인 운전과 원활한 유지보수를 통한 운전성 및 안전성을 고도화하기 위하여, 원격취급장비에 의한 적절한 유지보수방안을 설정하여야 한다. 핫셀에서 주로 사용하는 원격취급장비로는 마스터-슬레이브 조종기(M-S Manipulator; MSM) 가 있으며, 핫셀에 설치하는 공정장치인 경우, 유지보수 대상부품이 핫셀 벽에 부착된 MSM의 작업범위 내에 들도록 적절하게 설치하여야 한다. 그러나, 공정장치, 유틸리티 설비 등 핫셀 내부의 복잡성으로 인하여 공정장치의 일부 부품은 MSM에 의한 접근이 불가능한 사각지역이 발생하는 경우가 있다.

본 연구에서는 이러한 MSM의 접근이 불가능한 장치부품의 유지보수 공정을 개발하기 위하여 가상 모형기술을 이용한 그래픽 가상목업을 구축하였다. 컴퓨터 그래픽 기술을 기반으로 하는 가상모형 기술은 컴퓨터기술의 비약적인 발전에 따라 모든 산업의 다양한 분야에서 적용하고 있는 기술로서, 비주얼 환경(visual environment)에서 사용자가 원하는 작업을 모사함으로써, 그 과정 및 결과를 사전에 가시화하는 것이 가능하다[1]. 또한, 실제 시스템에서 발생할 수 있는 예기치 않은 상황이나 문제점을 발견하고 해결방법을 모색할 수가 있을 뿐 만 아니라, 비용과 시간이 적게 들기 때문에 시스템의 설계와 해석, 개발을 위한 툴로서 중요한 비중을 차지하고 있다. 가상목업은 핫셀공정의 실제 목업대신 가상모형기술을 이용하여 컴퓨터 그래픽환경에서 실제 공정과 동일하게 구축한 가상작업환경으로서, 이러한 가상목업 구축에는 상용의 공학적 시뮬레이션 도구인 Delmia 사의 IGRIP을 이용하였다.

구축한 가상목업을 이용하여, 원격취급 장비의 작업범위, 작업자의 시각 영역 분석 등 다양한 분석을 수행하고, 이들 분석결과를 바탕으로 서보 조종기를 이용하여 사각지역내 부품에 대한 유지보수 방안을 도출하였으며, 도출된 방안의 검증을 위한 그래픽 전산모사를 수행하였다.

Ⅱ. 핫셀 가상목업

1. 핫셀공정 개요

본 연구에서는 대상 핫셀 공정으로서 사용후핵연료를 효율적이고 경제적이며 안전한 관리를 위하여 한국원자력연구소에서 개발 중인 사용후핵연료 차세대 관리공정 (Advanced spent fuel Conditioning Process ; ACP)을 고려하였다. 이 공정의 목적은 사용후핵연료를 리튬 용융염에서 반응시켜 고방사능 및 고열의 핵분열생성물을 제거하고, 처분이 용이하도록 우라늄 금속형태로 변환시키는 것이다[2]. 이 공정의 실증시험을 한국원자력연구소에 위치한 조사재시험시설의 예비핫셀에서 수행할 예정이다. 특히, 공정물질인 사용후핵연료는 그 방사능이 매우 높으므로, 차세대관리공정과 유지보수 공정을 포함하는 모든 공정을 원격으로 수행할 수 있도록 특수 설계한다.

2. 핫셀 내 공정장치 배치 및 가상목업

사용후핵연료 차세대관리공정을 수행하게 될 핫셀을 2개의 핫셀 구역으로 분류하는데, 하나는 공정셀(ACP cell)이고 다른 하나는 유지보수셀이다. 공정셀에서는 탈피복, 분말화, 금속전환 등 주공정을 수행하고, 유지보수셀에서는 공정 중 발생하는 고장부품을 운반하여 보수하는 셀이다. 또한, 핫셀 벽에는 MSM을 설치하고 핫셀 내에는 서보 조종기를 장착한다. 조사재시험시설에 위치한 핫셀에서 수행하게 될 차세대관리공정 흐름도는 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

사용후핵연료 차세대관리공정의 흐름에 따라 효율적이고 안전한 운전을 수행하기 위해서는 원격 취급 및 유지보수 시스템의 작업범위에 대한 분석이 필수적으로, 이러한 사전 분석은 실제 공정과 유사한 목업을 이용하여 수행한다[3]. 본 연구에서는, 비용과 시간 소요가 많은 실제 목업을 활용하는 대신, 비교적 비용 및 시간 소요가 적고 수정/보완에 있어서 융통성이 다양한 가상목업을 구축하여[4,5] 핫셀 장치에 대한 유지보수 공정 분석 및 유지보수 절차를 설정하였다.

이러한 가상목업 구축을 위하여, 공정 장비뿐만 아니라 MSM 및 서보 조종기와 같은 유지보수장비들에 대하여 3차원으로 그래픽 모델링을 하였으며, 모델링 디바이스에 실제 장치와 동일한 구동이 가능하도록 운동학을 부여하였다[6]. 또한, 실제 핫셀과 동일한 가상 핫셀환경을 구축하여, 모델링한 장치를 가상 핫셀에 설치하였다. Fig. 2는 차세대관리공정의 가상목업을 보여주고 있는데, 이 목업을 이용하여 조종기의 작업영역 분석, 충돌 감지, 최적의 경로계획 수립 및 공정 전산모사와 같은 다양한 분석 및 검증기능을 수행한다.

3. 가상목업을 이용한 분석

3.1 MSM 작업영역 분석

본 연구에서 구축한 가상목업을 이용하여 MSM 작업영역에 대한 다양한 분석을 수행하였으며, MSM 슬레이브 조종기의 위치와 자세에 따른 end effector의 상세 작업영역에 대한 분석도 수행하였다.

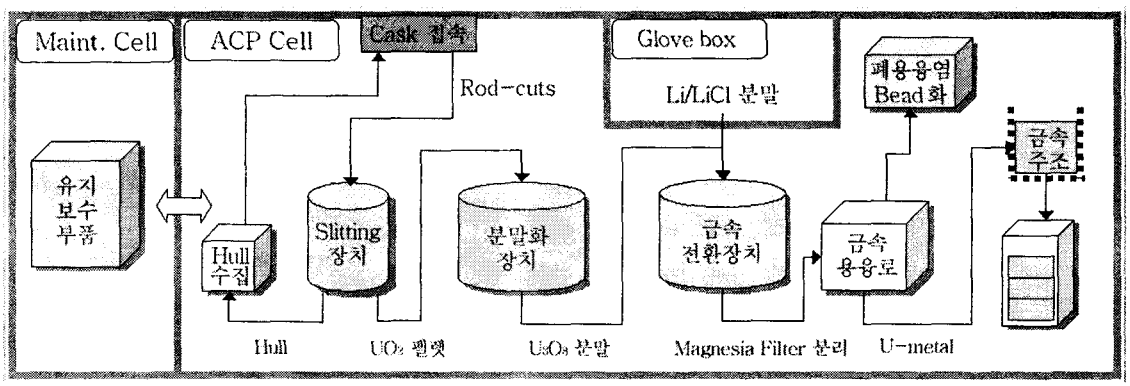


Fig. 1. Hotcell process flow of ACP.

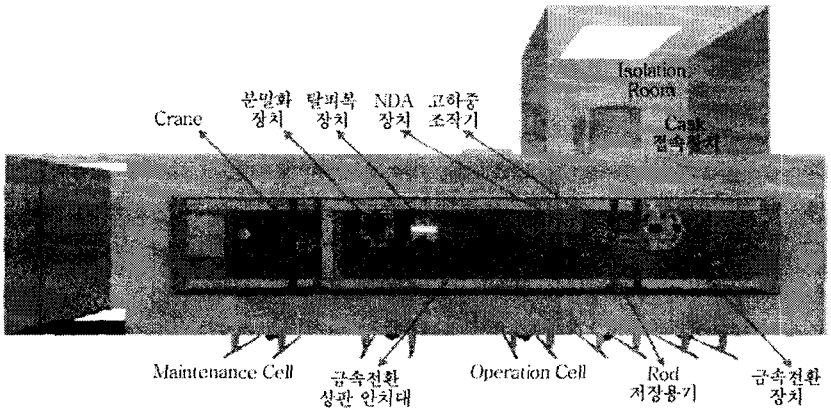


Fig. 2. Virtual mock-up of the ACP.

그리고, 이러한 분석을 통하여 MSM 작업영역 범위를 벗어난 위치에 있는 공정장치 부품을 설정하였다.

작업자세 및 공구 장착여부에 따른 MSM의 작업영역을 Fig. 3에서 나타내고 있다. 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 조종기 작업자세 및 공구의 파지여부에 따라 MSM 작업영역은 상당한 차이를 나타내고 있다.

또한, 장치 부품이 MSM의 작업영역 범위에 속하더라도, Fig. 4 (a), (b)에서 보이고 있는 바와 같이 일부 공정장치 부품의 경우, 핫셀 내부가 너무 복잡하여 MSM의 관절 구동한계를 벗어나는 위치에 설치되는 경우가 있다. 또한, Fig. 4 (c), (d)에서 보여주는 것처럼 MSM의 작업영역 범위 내에 있는 부품일 경우에도 MSM이 해당 부품으로의 접근을 위한 자세와 end effector의 방향에 따라 접근이 가능하기도 하고, 접근이 불가능하게 되기도 한다. 이와 같은 핫셀 환경 내에서 원격 유지보수용 MSM의 접근이 불가능한 공정장치의 부품인 경우, 공정의 효율 및 안전성 확보를 위하여 서보 조종기와 같은 다른 유지보수 장비를 이용한 유지보수방안을 수립하여야 한다.

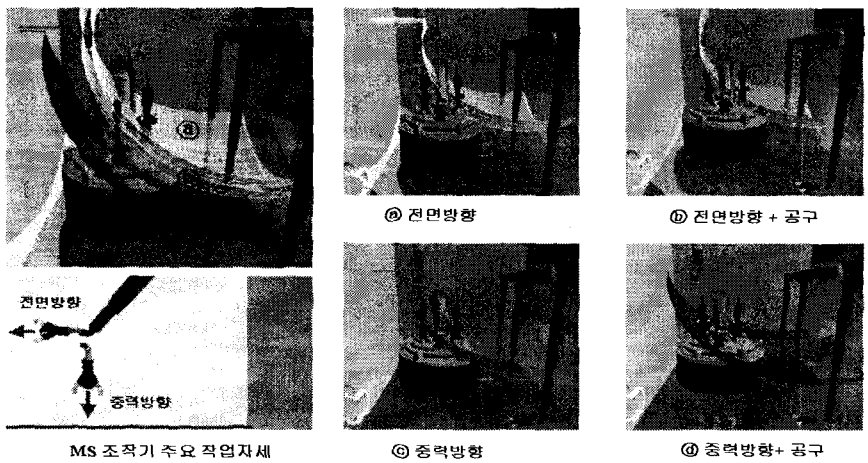
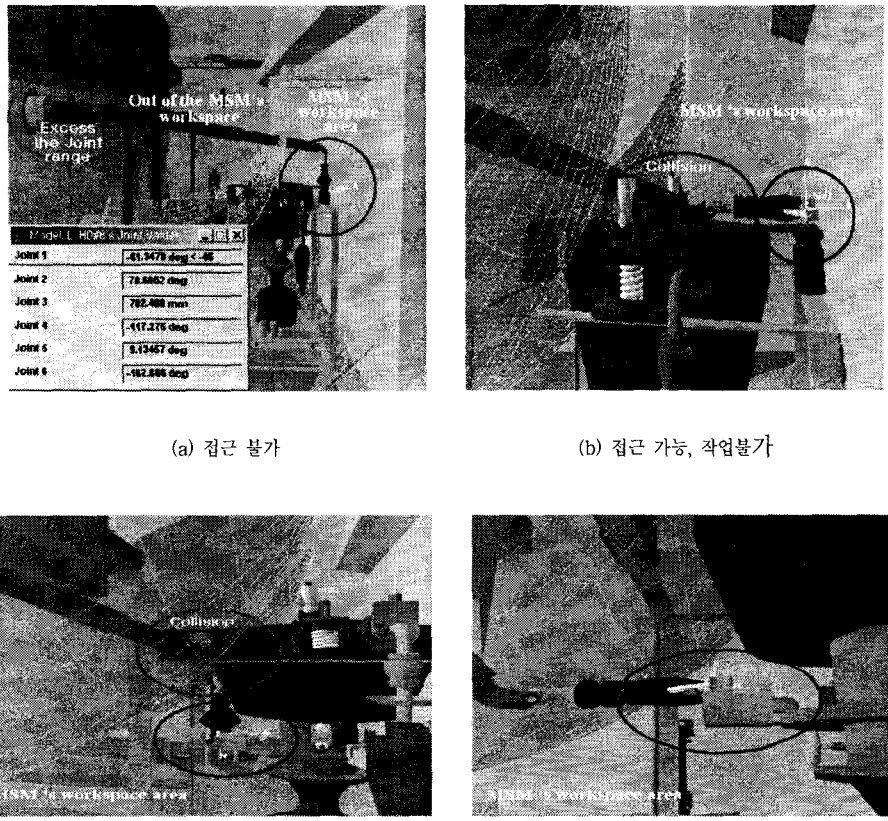


Fig. 3. Work range of MSM.



(a) 접근 불가 (b) 접근 가능, 작업불가

(c) 접근 불가 (d) 접근 및 작업 가능

Fig. 4. Analyses of the MSM's workspace.

3.2 작업자 시야범위 분석

핫셀 공정의 원격 운전을 안전하게 수행하기 위해서는 작업자의 시각을 명확하게 확보하여야 한다. 본 연구에서는 가상목업을 이용하여 핫셀에 설치한 납차폐 유리를 통한 작업자의 시각범위를 분석하였다. Fig 5.는 가상 핫셀에 설치한 납차폐 유리를 통하여 작업자가 볼 수 있는 정상적인 시야범위(normal view)를 나타내며, 핫셀의 일부 지역은 작업자의 시각 범위를 벗어나는 영역이 존재하게 된다. 납차폐 유리 가장자리까지를 이용하여 볼 수 있는 최대 시야범위(extreme view)를 고려하는 경우, 핫셀 내부의 사각 지역은 많이 축소되겠지만 유리를 통한 일부 상의 일그러짐이 발생할 수가 있다.

이러한 납차폐 유리의 시야범위를 벗어난 사각지역에서의 공정감시를 위해서는 핫셀 내에 카메라를 설치하는 등의 추가적인 공정감시 장비가 필요하다.

Ⅲ. 사각지역 내 장치부품 유지보수공정 개발

1. 서보 조종기

본 연구에서는 MSM으로 접근이 불가능한 장치부품을 보수하기 위하여, 서보 조종기에 의한 유지보수 방안을 제안하였다. 이 서보 조종기를 이송 시스템, 텔리스코픽 튜브시스템 및 조종기의 3개 주요부로 구성하였으며[7,8], 핫셀 내부에 설치하게 된다. 이 조종기의 작업범위는 핫셀 상부에 위치한 브릿지 형태의

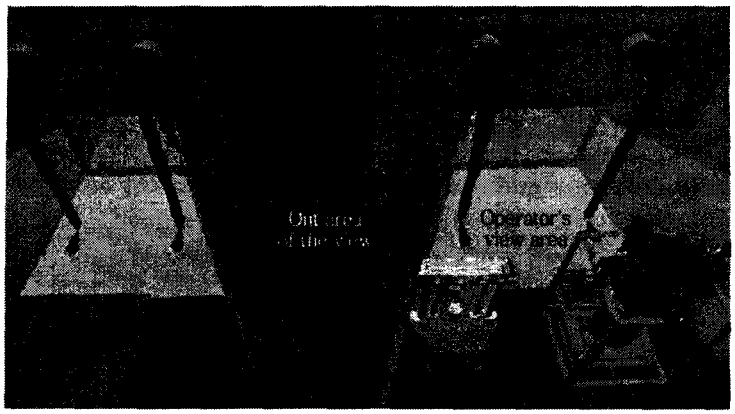


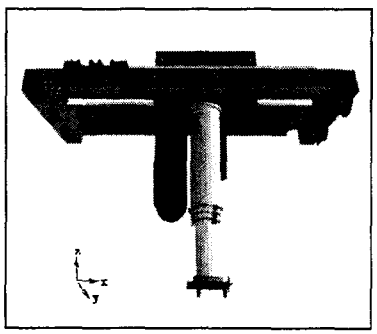
Fig. 5. Normal view through the shielding windows.

이송 시스템과 여기에 부착한 텔리스코픽 튜브셋을 이용하여 확보하며, 이송 시스템에는 작업시의 시야확보를 위한 카메라를 장착한다. Fig. 6과 Table 1은 이 시스템의 그래픽 모델과 부여된 운동학을 보여주고 있으며, 이송 시스템 및 텔리스코픽 튜브시스템에는 X, Y, Z 방향으로 구동하는 3개의 직선 구동축을 설정하고, 조종기에는 6 축의 회전구동축과 그리퍼 구동을 위한 직선구동축을 설정하였다.

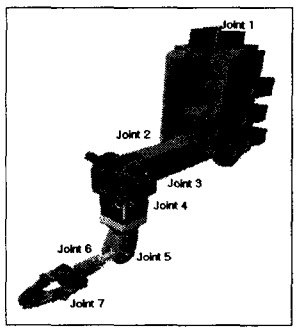
이 서보 조종기는 MSM으로 취급이 불가능한 공정 물질의 취급 및 운반에도 사용한다.

Table 1. Joint motion and value of the servo manipulator

구동 축	구동 특성 (Motion)	구동 범위
Joint 1	Body Twist	- 180° ~ + 180°
Joint 2	Shoulder Rotate	- 30° ~ + 40°
Joint 3	Elbow Motion	- 35° ~ + 50°
Joint 4	Forearm Twist Motion	- 90° ~ + 90°
Joint 5	Wrist Tilt Motion	- 120° ~ + 60°
Joint 6	Wrist Twist Motion	- 90° ~ + 90°
Joint 7	Gripper Jaw Motion	0 ~ 63 mm



Transfer system & telescopic tube set



Manipulator system

Fig. 6. Graphic model and kinematics of servo manipulator.

2. 충돌감지기능을 이용한 조종기 경로계획

조종기의 경로계획과 관련하여 다양한 연구를 수행하고 있다. 이들 방법에는 각각 고유의 장점과 단점을 포함하고 있어 작업 특성 및 조건에 따라 적절한 방법을 사용하여야 한다[9]. 본 연구에서는 장비 설계 및 공정개발에 광범위하게 이용하고 있는 컴퓨터 그래픽 기술을 활용하여 가상 작업환경을 구축하고, 구축된 그래픽 환경에서의 충돌감지 기능을 이용한 조종기의 최적 작업경로 설정방안을 도출하고자 하였다.

경로계획 설정의 흐름은 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 조종기가 작업을 수행하기 위하여 목표방향으로 이동할 때 장애물과 접하게 되면, 이를 회피하는 방향으로 경로를 변경하고, 다시 목표지점으로 이동하는 것을 반복하여 최종적으로 장애물을 회피하여 목표지점에 도달하도록 전산모사 함으로써, 최적 경로궤적을 설정하게 되는 것이다.

Fig. 8은 조종기가 공정장치의 유지보수를 위하여 공구를 장착한 상태에서 지점 A에서 이동을 시작한 후 장애물인 장치지지 프레임을 회피하여 B 지점으로 이동하는 경로 설정을 위하여 그래픽 상의 충돌 감지 기능을 이용한 시뮬레이션을 보여주고 있으며, 설정된 경로는 오른쪽 그림에 나타난 궤적과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 위치(1)에서 목표지점을 향해 출발한 조종기는 지지 프레임과 충돌을 하게되면(2), 충돌을 회피하는 지점을 지정하여 tag point를 부여하여 경로를 정하며(3), 이러한 시뮬레이션을 반복하여 최적의 경로를 설정(4)하게 되는 것이다.

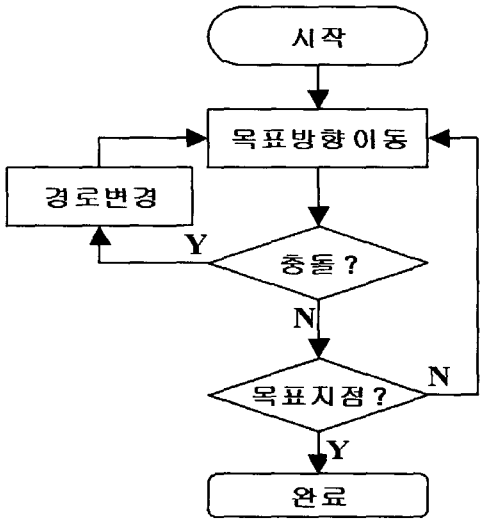
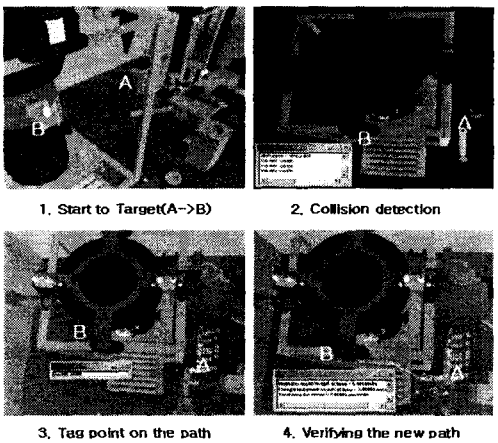


Fig. 7. Schematic diagram of path planning



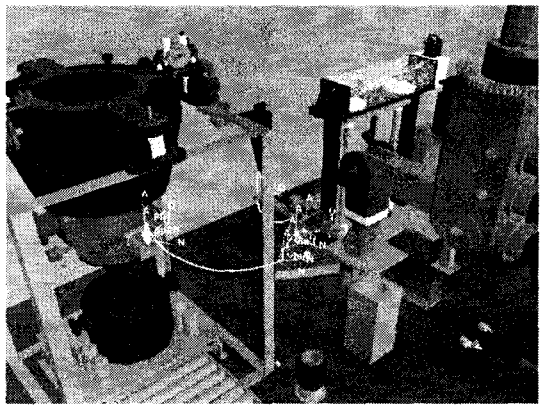


Fig. 8. Graphic simulation for the path planning.

3. 작업자 시야확보

핫셀 원격 조작에서 작업자의 시야확보는 매우 중요하게 고려하여야 할 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 핫셀 공정을 원격으로 감시하고 작업자의 명확한 시야확보를 위하여 그래픽 환경에서 가상 카메라를 이용한 가상 전시시스템 구축을 제안하였다. Fig. 9는 가상목업에서 유지보수공정을 전산모사하면서 공정을 감시하기 위한 가상 전시 시스템을 보여주고 있다. 사용후핵연료 차세대관리공정 가상목업 내에서, 서보 조종기 이송시스템에 설치한 2대의 카메라와 동일위치에 2대의 가상 카메라를 설치하고, 이들 가상 카메라는 각각 보수대상 부품과 조종기의 그리퍼를 추종하면서 작업영상을 전시하게 함으로써[10] 작업공정을 원격으로 명확하게 감시할 수 있다.

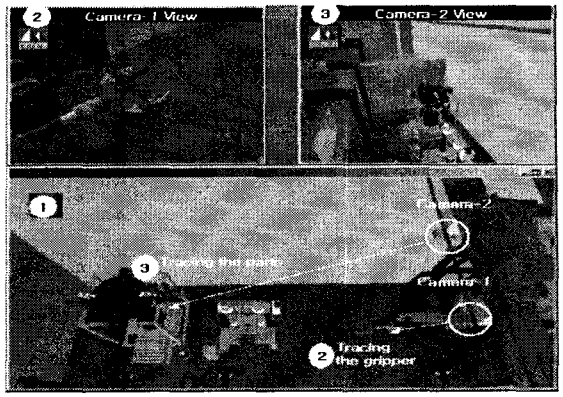


Fig. 9. Virtual display system.

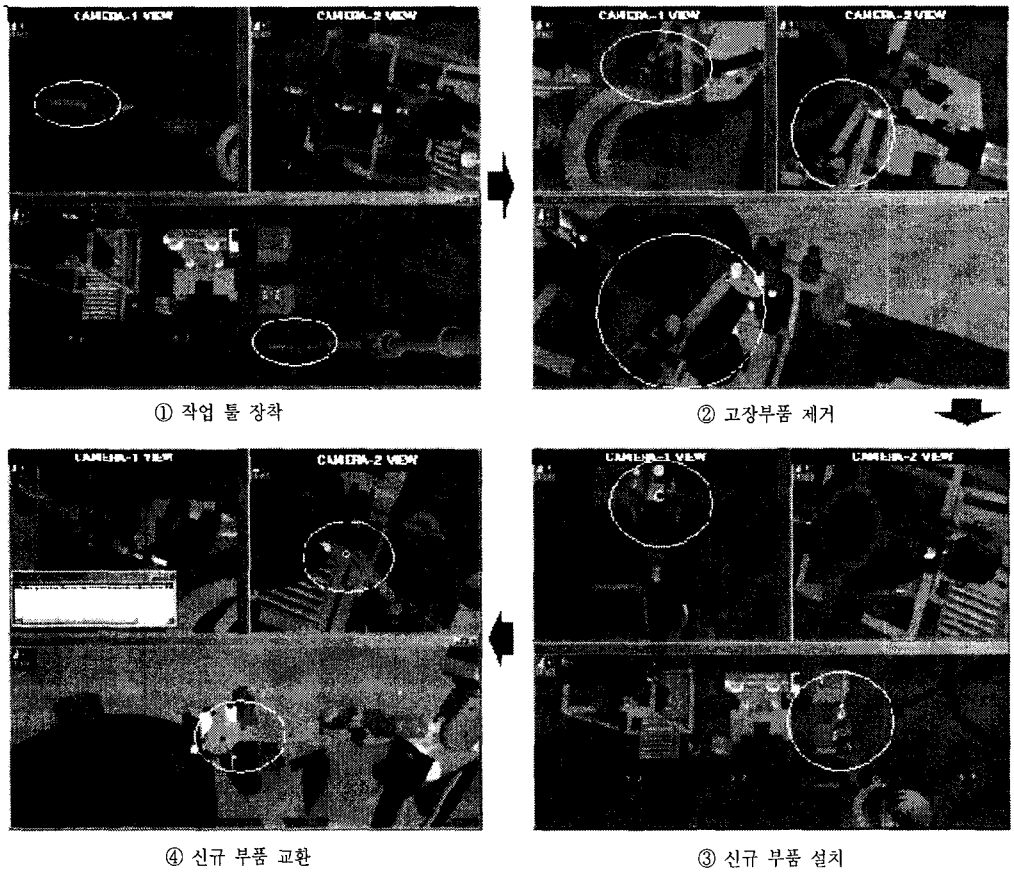


Fig. 10. Graphic simulation of the process.

4. 유지보수공정 그래픽 전산모사

본 연구에서 제안한 유지보수공정과 가상 전시 시스템의 검증을 위하여 가상목업을 이용한 그래픽 전산모사를 수행하였다. Fig. 10은 MSM의 사각지역에 위치한 대상 부품을 서보 조종기를 이용하여 교체하는 유지보수공정을 전산모사하는 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 공정 중 충돌이나 다른 문제없이 잘 모사하였고, 가상 카메라는 대상 부품을 잘 추적하였다.

Ⅳ. 결론 및 향후 연구내용

고준위 방사성물질을 취급하는 핫셀 장비는 효율적인 원격조작을 위하여 MSM 작업범위 내에 적절하게 위치시켜야 한다. 그러나, 핫셀의 복잡성으로 인하여, 핫셀 내에 설치된 공정장치의 일부 부품은 이러한 MSM의 작업범위 외 지역인 사각지역에 위치하게 되는 경우가 있다. 본 연구에서는, 이러한 장치 부품의 유지보수공정을 도출하기 위하여, 가상모형기술을 기반으로 하는 가상목업을 구축하였다. 그리고, 이 가상목업을 이용하여 조종기의 작업범위, 납차폐 유리를 통한 작업자의 시각범위 등 다양한 분석을 수행하였다. 이 분석 결과를 근거로 핫셀 내에 설치한 서보조종기를 이용한 유지보수공정을 제안하였으며, 제안한 공정의 검증을 위하여 가상목업에서 전산모사를 수행하였다. 그 결과, 사각지역 부품에 대한 유지보수공정 수행 중 간섭이나 충돌 등의 문제를 일으키지 않고 잘 모사하였음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 장치 부품의 유지보수공정은 실제 핫셀 운전에의 적용이 가능하며, 구축한 차세대 관리공정 가상목업은 실제 핫셀 운전에 있어서의 다양한 분석과 원격 운전의 안전성 및 신뢰도를 향상시키는데 효율적으로 활용할 수 있다. 앞으로 가상목업에 동역학적 기능을 추가하고, 도출된 공정에 대한 실제 핫셀에서의 검증을 통하여 가상목업의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기 계획사업의 일환으로 수행하였습니다.

참 고 문 헌

1. J. Anelle, R. Braun, "Graphic Simulation System for Product Process Development," Proc. of the DENEB User Group Conference, pp. 11-14, (1994).
2. 신영준, 박성원 외, "Development of Advanced Spent Fuel Management Process", KAERI/RR-2128/2000, 한국원자력연구소, 2000.
3. T. W. Burges, " The Remote Operation and Maintenance Demonstration Facility at the Oak Ridge National Laboratory," Proc. of Spectrum '86 Int'l Topical Meeting on Waste Management and Decontamination and Decommissioning, pp. 2089-2100, (1986).
4. Y. Ohmura, A Sakai, T. Waguri, "Robot Simulator Aided Design System for Remote Handling & Maintenance," Theoretical & Application Mechanics, Vol. 45, pp. 173-176, (1996).
5. Barnaby J. Beere, "The Use of Real-Time Computer Graphics to Assist Remote Reactor Inspection," Proc. of the DENEB User Group Conference, pp 27-31, (1995).
6. Central Research Lab. Inc., "Master- Slave Manipulator Installed Ass'y," (1993).
7. 윤지섭, 박병석, 김성현, "Development of Spent Fuel Remote Handling Technology, KAERI/RR-1801/97, 한국원자력연구소, 1997.
8. 박병석, 진재현, 안성호, 최민규, 이종열, 윤지섭, "방사선 환경 작업용 힘반영 서보 매니퓰레이터 개발," 한국자동제어 합동학술회의 보문집, pp. 371-376, (2003).

9. K. Gupta, Z. Guo, "Fast Collision Avoidance for Manipulator Arms : A Sequential Search Strategy," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 6(5), pp.522-532, (1990).
10. Deneb, "IGRIP & Axxess User Manual and Tutorials," (1996).