

연구용 원자로 2호기 해체과정 전산모사

3D Graphic Simulation for Dismantling Process of the KRR-2

김성균, 정관성, 백삼태, 이근우, 박진호
한국원자력연구소

요 약

연구로 해체 작업은 높은 방사선 환경 속에서 작업이 진행되기 때문에 작업자의 안전 및 작업에 대한 높은 신뢰성이 요구된다. 따라서 해체 대상물에 대한 선정, 적용 가능한 해체기술 선정 및 선정된 대상물에 대한 시나리오 분석은 필수적이다. 본 논문에서는 연구로 2호기의 구성부품 중 선정 기준에 따라 주요해체 대상물을 선정 하였으며 선정된 대상물들에 대해 3차원 모델링을 수행하였다. 또한 각 해체 대상물에 대해 적용 가능한 해체기술을 선정하였고 각 대상물에 대한 해체 시나리오를 구성하였다. 마지막으로 콘크리트 차폐체, 회전시료조사대, 노심에 대해 해체 시뮬레이션을 수행하였다.

Abstract

The D&D work requires worker's safety and high reliability of operation because it has been processing in high radioactive environment. Therefore, it is necessary to select the dismantling items and applicable dismantling technologies and analyze the scenarios for selected items. In this paper, the main dismantling items were selected by the consideration of several factors, their 3D CAD models were constructed as well. The applicable dismantling technologies for each dismantling items were selected and their dismantling scenarios were setup. Finally the 3D graphic simulations for the shielding concrete, the RSR, and the core are performed.

1. 서 론

전 세계의 원자로가 점차 노쇠해 짐에 따라, 연구로의 안전한 해체가 중요한 임무로 대두되고 있다. 현재 80개 이상의 원자력 발전소와 350개 이상의 연구용 원자로가 해체되었거나 해체 단계에 와 있다. 따라서 1980년대 중반부터 전 세계의 원자력 산업체들은 제염·해체(decontamination and dismantling) 프로젝트와 이와 관련된 연구 프로그램들을 진행하기 시작하였다[1-5]. 한편, 국내에서는 TRIGA Mark II&III 타입인 KRR-1&2 (Korea Research Reactor 1&2)기가 1962년과 1972년부터 각각 운전을 시작하여 한국 원자력 발전에 많은 기여를 하였다. 그러나 원자로의 임계수명에 임박함과 함께 신형 연구용 원자로인 HANARO (High-flux

Advanced Neutron Application Reactor) 가 정상 운전됨에 따라 기존 연구로의 효율가치가 상실되어 1995년에 운전을 최종 종료하고 1997년부터 해체하기 시작하였다[6]. 현재 제염·해체에 대한 연구는 주요 해체공정에 대한 그래픽 시뮬레이션 개발 및 DB구축, 원격해체장비 개발, 표면염 자동측정장비 개발 등이 수행되고 있다[7].

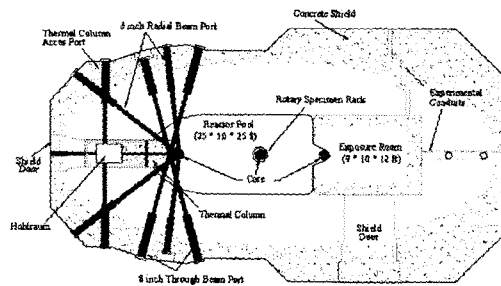
최근 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션은 각종 장치의 설계 및 검증을 3차원 그래픽 모델링으로 수행하고, 각 장치의 동작을 컴퓨터상의 그래픽 시뮬레이션을 통해 검증해 볼 수 있는 가상모형(Virtual Prototyping) 기술로 확대되고 있다.[8-11] 이 기술은 실제 장치의 기본 설계를 바탕으로 진보된 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 활용하여 새로운 기계설계 및 공정의 타당성을 검증하는 기술을 말한다. 즉, 제작하고자 하는 장치를 컴퓨터에서 3차원 그래픽으로 설계한 후, 모델에 운동특성(Kinematics)을 부여하여 장치들의 움직임을 정의함으로써 현실감 있는 그래픽 시뮬레이션을 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 각 과정에서 장치의 동작경로나 구성장치간의 간섭현상을 분석함으로써 장치설계의 타당성을 검증할 수 있다. 원자력 해체분야에서 이러한 기술들은 설계한 해체장비를 컴퓨터 가상공간에서 구현하여 타당성을 검토하거나 해체공정에 대해 다양한 해체 시나리오를 적용하여 최적의 해체공정을 선택하는데 이용하고 있다. 또한 해체작업을 가상공간에서 구현하여 해체작업자들을 교육하거나 훈련시키는 용도로도 활용하고 있다.

본 논문에서는 연구로 2호기의 주요해체대상물을 선정하고 이들을 3D CAD 모델링으로 구현하였다. 그리고 주요해체대상물에 대한 적절한 해체시나리오를 선정하였다. 마지막으로 콘크리트 차폐체, 회전시료조사대 및 노심 해체과정을 전산모사 결과로 제시하였다.

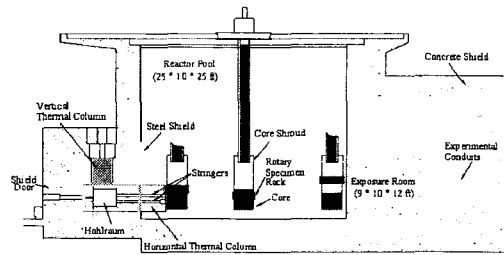
2. 주요 해체대상물 선정 및 3D 모델링

2.1 주요 해체대상물 선정

KRR-2호기는 Fig. 1에서 나타낸 구성품 뿐만 아니라 각종 실험에 관련된 장치 등과 같은 무수히 많은 부품으로 구성되어 있다. 그런데 이들 부품 중에서 일부는 수년간의 운전과 실험을 통해 방사화 되어 있으며 이러한 구성품의 해체작업은 작업자의 안전 등의 이유로 주의 깊게 이루어져야만 한다. 따라서 본 연구에서는 여러 해체 대상물 중 주요해체 대상물을 다음과 같은 기준에 따라 대상물을 선정하였다.



(a) Horizontal cross section



(b) Vertical cross section

Fig. 1 The figure of the KRR-2

- 고방사화된 재질을 취급해야 하는 작업
- 접근에 어려움이 있는 작업
- 작업자의 예상피폭선량이 높은 작업
- 안전에 대해 위험 가능성이 높은 작업
- 수중이나 원격으로 수행해야 하는 작업
- 정밀하고 세부 작업 절차를 요하는 작업
- 특별한 훈련이 요하는 작업

위와 같은 대상물 선정기준에 의해, Table 1에서 보는 바와 같이 4개의 아이템을 주요해체 대상으로 선정하였으며 선정된 대상물은 다음과 같다.

- Rotary Specimen Rack
- Reactor core
- Thermal Column
- Activated concrete
- Beam port

Table 1 The Selection of decommissioning object for graphic simulation

Selection criteria Dismantling process	Expected dose (man-mSv)	Risk	Work difficulty	Detail procedure	Special training
Internal component and pipes	1.56	M	L	×	×
RSR	3.84	H	H	0	0
Reactor core	718.00	H	H	0	0
Drain the reactor water	0.08	L	L	×	×
Thermal column	4.80	H	H	0	0
Cooling system	0.50	L	M	0	×
Core bridge	0.86	M	M	×	×
Activated concrete and beam tube	105.83	H	H	0	0
Pit and distilled water tank	2.51	M	H	0	×
Room wall and floor	3.02	L	M	×	×

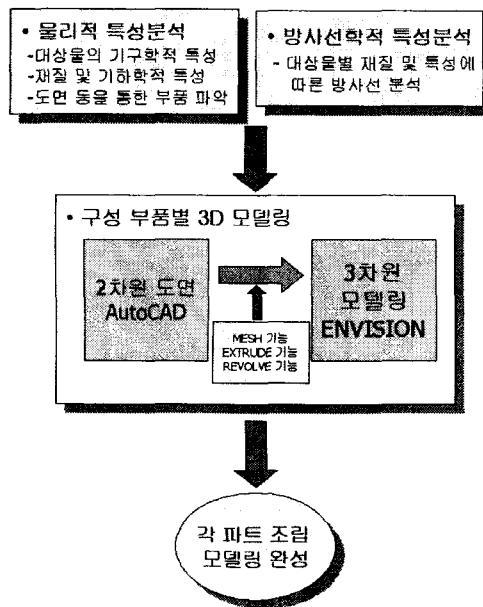


Fig. 2 The flow of CAD modeling

2.2 해체대상물 모델링

Fig. 2는 해체대상물의 모델링 방법을 나타내고 있다. 먼저 해체대상물의 물리적 특성분석과

방사선학적 특성분석을 수행하여 대상물의 기구학적 특성이나 재질 등을 미리 파악하고 재질에 따른 방사선 준위를 분석하여 해체부위를 판단하였다. 다음으로 특성분석 결과를 바탕으로 각 파트의 3차원 모델링을 수행하는데 AutoCAD로 구현된 2차원 도면을 전산모사 프로그램인 ENVISION의 Mesh, Extrude, Revolve 등의 기능을 이용하여 3차원 파트로 모델링 작업을 수행하였다. 그리고 이 파트 모델링들을 조립하여 최종 해체 모델링 작업을 완료하였다.

2.2.1 회전시료조사대

회전시료조사대 모델링은 Fig. 3에 보는바와 같이 Flotation Tank, Housing Cover, 조사관, 구동체인, 구동 샤프트, 베어링, Strip, 볼트, 너트 등으로 구성되어 있다. 방사화 분석 및 모델링 결과, 고방사화 부분은 볼트, 너트, 베어링 및 체인과 같은 스테인레스스틸 부품이 주로 고방사화되어 있으며 3D 모델링을 분석한 결과 이 부품들은 주로 Flotation Tank와 Housing Cover 사이에 많이 분포되어 있는 것을 알 수 있었다. 따라서 해체작업순서는 회전시료조사대 상부인 Flotation Tank의 스테인레스 볼트부터 차례로 분해하여 최종적으로 하부인 Housing을 분해하는 순서로 진행되는 것이 타당함을 알 수 있었다.

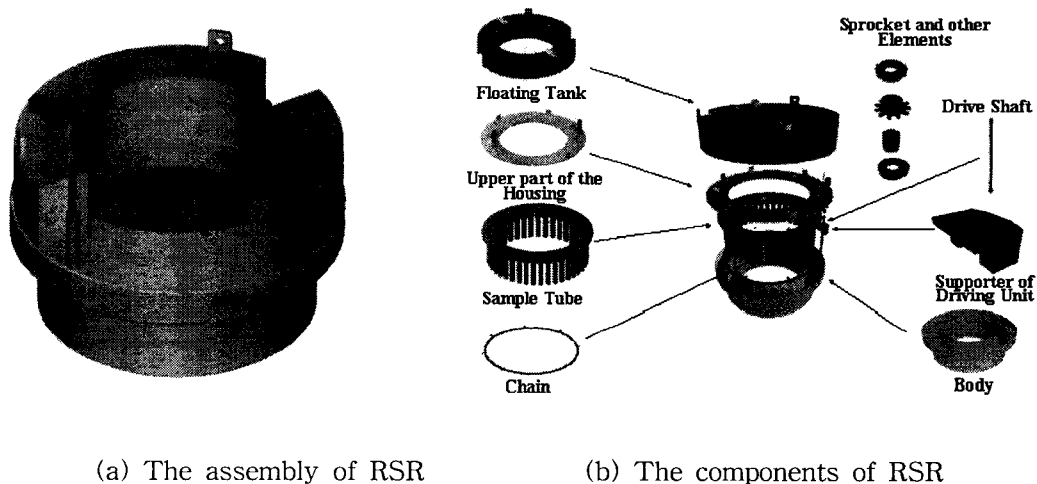


Fig. 3 The CAD modeling of RSR

2.2.2 Thermal Column 및 빔포트

Fig. 4와 5는 Thermal Column과 빔포트를 모델링한 결과를 나타내고 있다. 모델링 결과, 두 개의 Thermal Column과 빔포트는 서로 인접해 있는 위치에 있으며, 2개의 Radial 빔포트는 Thermal Column 측면에 연결되어 있고, 4개의 Thermal Column Access 포트는 서로 대칭된 구조로 이루고 있음을 확인 할 수 있었다. 그리고 빔포트는 콘크리트 차폐체 안에 포함되어 있으므로 콘크리트 차폐체가 해체된 후에 작업이 이루어져야 하여 한다는 것을 알 수 있었다.

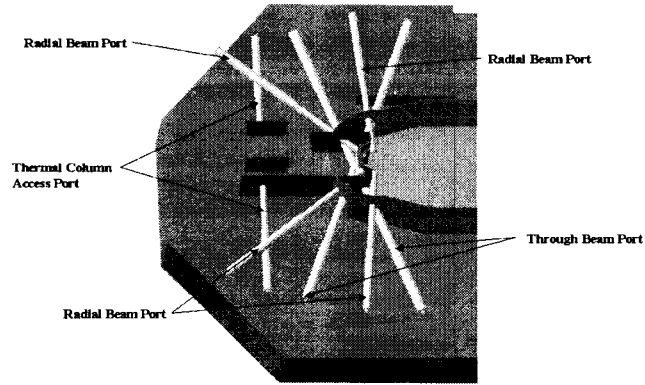


Fig. 4 The CAD modeling of the beam ports

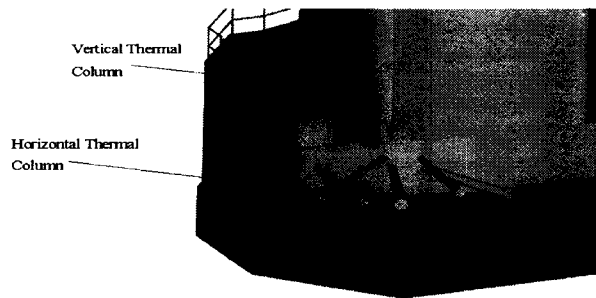


Fig. 5 The CAD modeling of the thermal column

2.2.3 노심

노심은 상부 및 하부 Shroud 2부분으로 구성되어 있으며 상부 Shroud는 6.4 mm 두께의 알루미늄 원통이며 2개의 Grid Plate가 Central Thimble과 Water diffuser pipe 등을 지지하고 있다. 이 두 개의 파이프는 상부 지지판에 연결되어 있다. 모델링 결과, 노심 내부에 모의 핵연료가 있어 이를 핵연료 인출장비로 제거한 후 유압절단기를 이용하여 파이프를 절단하고 나머지는 노심 전용 저장용기에 넣어 수납하여 폐기하기로 결정하였다.

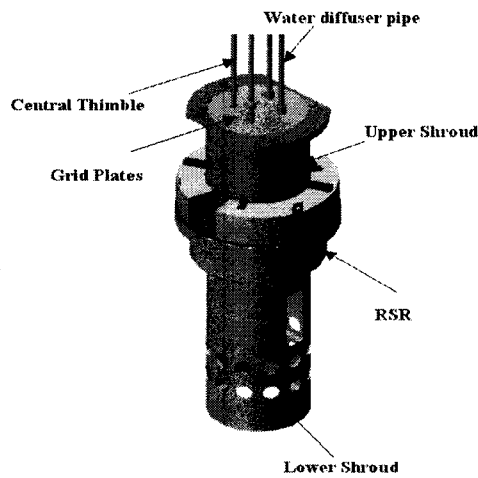


Fig. 6 The CAD modeling of the core

2.2.4 콘크리트 차폐체

콘크리트 차폐체 해체는 크레인의 최대 이송 가능한 중량을 고려하여 1m×1m×1m의 콘크리트 덩어리로 각각 절단하여 해체하기로 결정하였다. 즉 콘크리트 차폐체를 9개의 층으로 나누고 각 층을 다시 1m×1m×1m의 크기로 절단한 모델링 결과가 Fig. 7이다. 해체는 최상부 층인 9층부터 차례로 해체할 것이며 작업절차 및 해체순서에 맞게 각 층의 콘크리트마다 번호를 부여하고 우선 비방사화 부분부터 해체한 후 방사화 콘크리트를 해체하는 것을 기본으로 하였다.

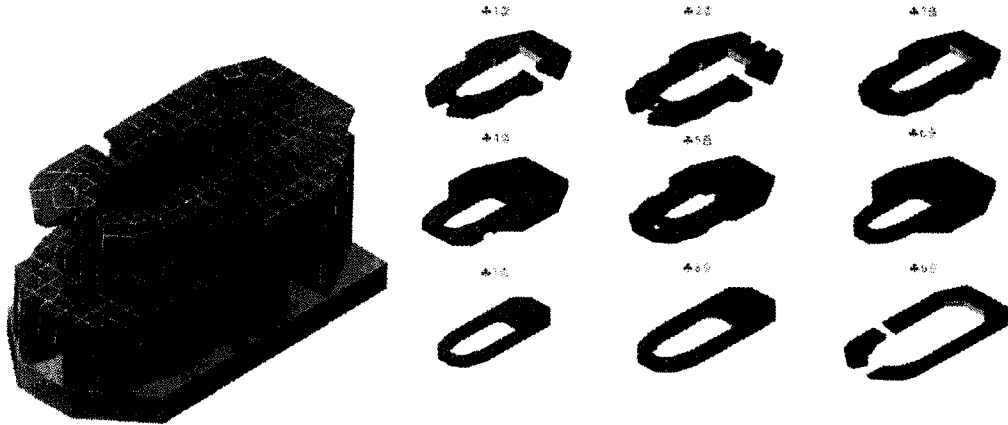


Fig. 7 The CAD modeling of the shielding concrete

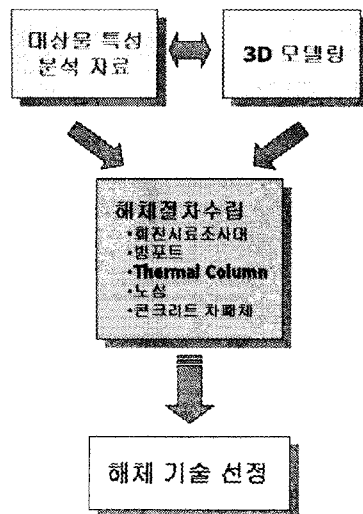


Fig. 8 The selection of dismantling technologies

2.3 해체기술 선정

2.3.1 회전시료조사대 해체기술

- 중준위 수준으로 방사화된 회전시료 조사대는 원자로실의 약 4 m 깊이의 수중에 보관되어 있어, 수중에서 절단 및 분해되어야 하고 원격제어가 가능하여야 함.
- 수중에서 절단가능하고 현재 상용화되고 있는 방법들에 대한 기술현황을 분석하여 절단에 적용 가능한 기술로 milling 절단 방법을 선정함.

- Milling 절단 : 장착된 등근 칼날을 이용하여 절단하는 방법으로 비용이 적게 들며 aerosol의 발생량이 적으며 수중에서도 작업이 가능함. 원격으로 조작이 가능하고 회전시료조사대와 같이 두께가 얇은 구조물의 절단에 매우 용이하며 수중에서 절삭하기 때문에 별도의 냉각수가 필요하지 않음. 따라서 회전시료조사대의 해체기술은 milling 절단기술을 이용하였음.

- 빔포트 해체기술

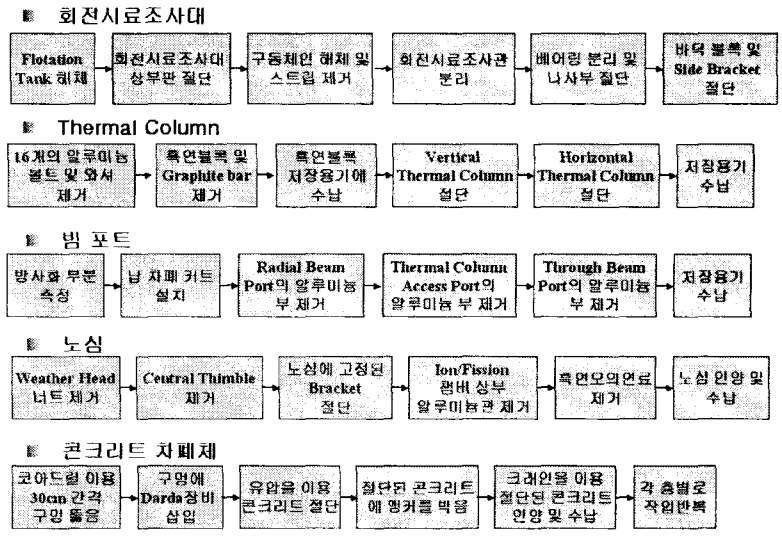
- 빔포트는 pipe와 같은 형태이며 알루미늄과 스테인리스스틸로 이루어져 있기 때문에 기계톱과 같은 기술은 스테인리스스틸을 절단시 톱날이 상하므로 본 해체에는 nibber 절단기술을 채택하였음.
- Nibber 절단기술은 구멍을 내거나 자르는 절단 도구로써 매우 빠른 회전률의 속도로 작동함. 작은 크기의 금속뿐만 아니라 연강, 알루미늄 또는 스테인리스 강의 큰 규모의 금속 대상물도 절단 가능하며 최고 1/4 inch의 연강판을 절단 할 수 있음. 동력원으로는 shear와 마찬가지로 전기, 압축공기 및 유압을 사용함. 원격조작이 가능하고 수중에서의 절단도 가능함. 폐기물 처리를 위해 제거된 작은 금속조각들의 수집이 용이하고 먼지 및 공기입자의 발생에 대한 우려가 없음.

- 콘크리트 차폐체 해체기술

- 콘크리트 차폐체의 절단기술은 diamond wire cutting, 성형폭약에 의한 발파공법, abrasive water jet cutting, rock splitter 등의 기술이 개발되어 상용화되어 있음. 이러한 기술 중, 본 연구로 콘크리트 차폐체 해체에 적합한 기술로 rock splitter에 의한 절단방법이 채택되었음.
- Rock splitter는 미리 천공된 구멍내에 feather로 불리는 팽창가능한 가이드 2개 사이에 wedge-shaped 플러그를 유압을 이용하여 팽창시킴으로써 콘크리트를 절단하는 방법임. 사용되는 유압시스템은 약 7,000 psi로 운전되며, 자동 안전감압밸브가 장착되어 있음. 이 공법은 미국의 JANUS 원자로 차폐체 콘크리트의 해체에도 사용되었던 기술로 사용될 장비는 독일에서 개발된 DARDA임. 이 공법은 소음 및 진동이 없고 절단 시 먼지가 거의 발생되지 않는다는 장점을 가지고 있음.

2.4 해체절차 수립

해체 전산모사를 수행하기 위해서는 적절한 해체 절차와 해체기술 선정이 선행되어야 한다. 해체절차와 해체기술 선정은 Fig. 8에서 보는 것과 같이 대상물 특성분석 자료와 3D 모델링을 상호 보완 검토하여 최종 모델링을 수행하고 이를 바탕으로 주요해체 대상물에 대한 해체절차를 수립하였다. 또한 이 해체절차를 수행할 수 있는 각종 해체기술들을 평가하여 최적의 해체공법과 해체기술을 선정하여 주요해체 대상물 전산모사에 적용하였다. 위에서 언급한 5가지의 주요해체대상물에 대한 해체절차는 다음과 같다.



2.5 해체 일정 모사

그림 9는 회전시료조사대 해체절차에 대한 working process를 나타내고 있다. 본 과제에서 사용한 ENVISION 소프트웨어에서는 Gant's Chart를 이용한 해체 일정 모사가 가능하며 각 작업에 대한 working time 및 총 해체 소요 시간 산출이 가능하다. 이를 이용하여 각각의 해체공법에 대한 해체소요 시간을 비교 평가 할 수 있다.

Op	Pred	Description	Time	0.000 sec	20610.900 sec
		CLI("SET VIEW TO 'Start_view' IN 0")	0.000 sec		
		\$SPEED_MODE = ACTUAL	0.000 sec		
		\$SPEED = 30	0.000 sec		
		CLI("SET VIEW TO 'Overall' IN 40")	0.000 sec		
		DELAY 40000	40.000 sec		
		\$HOME_NUMBER = 2	0.000 sec		
		MOVE HOME	290.582 sec		
		MOVE JOINT 1 BY 10 NOSIMUL	5.000 sec		
20	10	Rotary Table Rotation for Tank A Block C	191.668 sec		
		\$SPEED_MODE = ACTUAL	0.000 sec		
		\$SPEED = 30	0.000 sec		
		\$HOME_NUMBER = 2	0.000 sec		
		MOVE HOME	191.668 sec		
30	20	Mainbase Translation	468.000 sec		
		\$SPEED_MODE = ACTUAL	0.000 sec		
		\$SPEED = 30	0.000 sec		
		ADD RSR Floating_Tank_AA_Block_Bolt_Hea	0.000 sec		
		ADD RSR Floating_Tank_AA_Block_Bolt_Hea	0.000 sec		
		ADD RSR Floating_Tank_AA_Block_Bolt_Hea	0.000 sec		
		ADD RSR Floating_Tank_AB_Block_Bolt_Hea	0.000 sec		
		ADD RSR Floating_Tank_AB_Block_Bolt_Hea	0.000 sec		
		ADD RSR Floating_Tank_AB_Block_Bolt_Hea	0.000 sec		
		\$HOME_NUMBER = 2	0.000 sec		
		MOVE HOME	141.667 sec		
		CLI("SET VIEW TO 'F_T_BK_A_view' IN 40")	0.000 sec		
		DELAY 40000	40.000 sec		
		MOVE JOINT 2 BY 20 NOSIMUL	16.666 sec		
		MOVE JOINT 2 BY 40 NOSIMUL	33.333 sec		
		MOVE JOINT 2 BY 40 NOSIMUL	33.333 sec		
		MOVE JOINT 2 BY 40 NOSIMUL	33.333 sec		
		MOVE JOINT 1 BY 200 NOSIMUL	166.667 sec		
40	30	Rotary Table Rotation for Tank B Block B	300.002 sec		
		\$SPEED_MODE = ACTUAL	0.000 sec		
		\$SPEED = 30	0.000 sec		
		\$HOME_NUMBER = 3	0.000 sec		
		MOVE HOME	300.002 sec		
50	40	Mainbase Translation	283.334 sec		
		\$SPEED_MODE = ACTUAL	0.000 sec		

Fig. 9 Working chart of the RSR dismantling work

2.6 간섭 체크

그림 10 은 콘크리트 차폐체 해체 방법중 Rubblizing 공법을 적용하기 위하여 BROKK 장비를 수조에 설치한 모습이다. 그림에서 보는 바와 같이 BROKK 장비의 전면부 파쇄시에는 간섭현상이 발생되지 않지만 측면 해체시 장소가 협소하여 공구를 최대한 후퇴하였음에도 불구하고 공구의 대부분이 수조에 중첩되어 간섭현상이 발생하여 작업이 불가능함을 알 수 있었다.

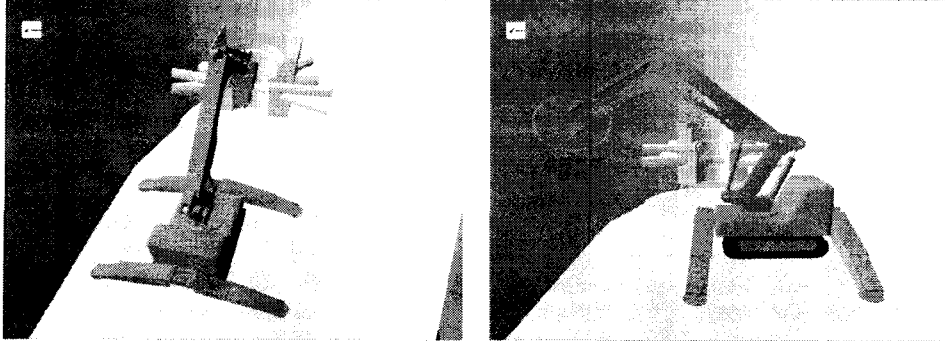


Fig. 10 Inspection of the collision for the BROKK machine

3. 전산모사 결과

3.1 콘크리트 차폐체 해체 전산모사

Fig. 11는 ENVISION을 이용한 콘크리트 해체작업의 전산모사 과정이다. 그림에서 보는바와 같이 먼저 코어드릴을 이용하여 30cm 간격으로 드릴 작업을 수행한다. 그리고 드릴구멍에 한 면 당 3개의 콘크리트 해체장비를 삽입하여 3면의 콘크리트 절단작업을 수행한다. 그리고 콘크리트 윗면에 앵커를 박고, 연구로 2호기 천장에 부착되어 있는 크레인에 앵커고리를 걸어 콘크리트를 이송한다. 이 콘크리트는 특별 이송용기로 이동한 후 용기 커버를 덮고 체결볼트를 이용 밀봉하여 최종 전산모사를 완료한다.

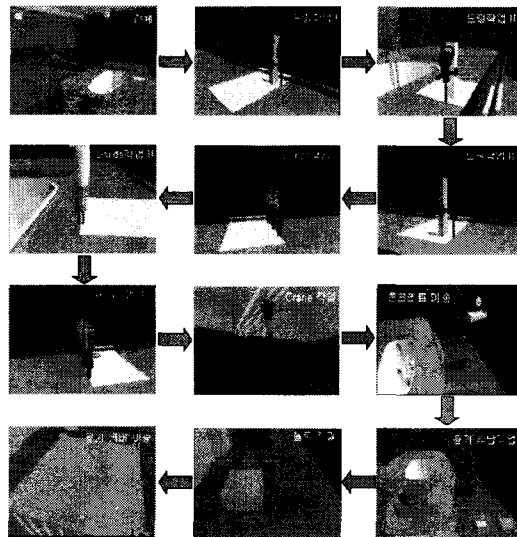


Fig. 11 The graphic simulation process of the shielding concrete

3.2 회전시료조사대 해체 전산모사

Fig. 12은 회전시료조사대의 해체과정을 전산모사로 나타낸 결과를 보여주고 있다. 회전시료 조사대는 방사능 준위가 높은 스테인레스스틸 부품인 볼트, 너트, 체인 등을 회전시료조사대 해체 장비를 이용하여 스테인레스스틸 부품만을 해체하고 나머지 알루미늄 부품들은 규제해제 폐기물로 처리하여 폐기물량을 최소화 할 계획이다. 그림에서 보는 바와 같이 블록 위, 부력탱크 위, 하우징 블록의 볼트머리를 절단하고 나사산 부위를 잘라 스테인레스 부품들을 해체한다. 그리고 구동 샤프트를 절단하여 부력탱크를 제거한다. 그리고 구동 블록을 제거하여 체인 및 베어링을 해체 하여 최종 전산모사를 완료한다.

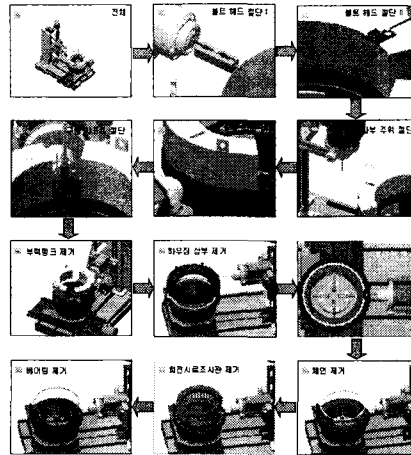


Fig. 12 The graphic simulation process of the core

3.3 노심 해체 전산모사

Fig. 13은 원자로 노심 해체과정을 보여주고 있다. 노심 해체는 먼저 노심을 상부 브리지와 연결하고 있는 지지판넬을 제거하고 유압절단 장치를 이용하여 각종 파이프를 절단한다. 그리고 노심 이송 컨테이너를 이용하여 노심을 수조밖으로 이송하여 납 차폐판 앞에 설치한다. 그리고 노심의 상부와 하부를 지지하고 있는 40개 스크류를 제거하면 노심의 상부와 하부 및 Grid plate 등이 분리된다.

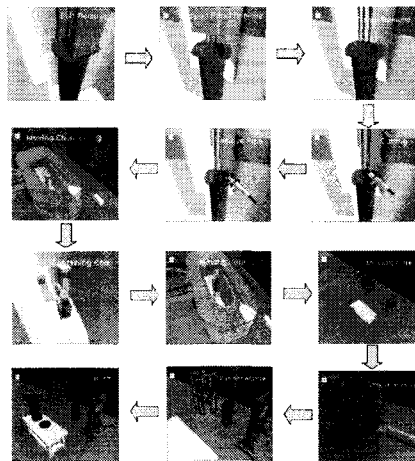


Fig. 13 The graphic simulation process of the RSR

4. 결 론

본 논문에서는 연구용 원자로 2호기(KRR-2)의 여러 대상물중 예상피폭선량, 위험도, 작업의 어려움, 숙련도 등을 고려하여 주요 해체대상물을 선정하였으며, 이들의 3D CAD 모델링을 수행하였다. 그리고 해체대상물의 방사선학적 평가 자료와 3D CAD 모델링을 기초로 각각의 해체 절차를 수립하였다. 마지막으로 주요 해체대상물 중 콘크리트 해체작업과 회전시료조사대의 해체작업에 대한 전산모사를 구현하였다. 콘크리트 해체작업은 전산모사 결과, 800개 이상의 콘크리트 덩어리가 산출될 것으로 예상되었으며 이를 처분하기 위한 충분한 공간을 확보해야 됨을 알 수 있었다. 회전시료조사대 해체 전산모사에서는 해체장비의 설계가 적절한지 확인할 수 있는 중요한 자료가 되었다. 특히 이 장비는 고방사성 물질을 취급하기 위해 설계된 장비이기 때문에 설계의 타당성을 신중히 검토할 필요가 있다. 노심 해체 전산모사에서는

이와 같이 새로운 장비설계나 해체공정설계에서 전산모사는 여러 가지 다양한 정보를 제공하여 실제설계나 해체작업시 발생할 수 있는 오류를 미연에 방지 할 수 있을 뿐만 아니라 여러 가지 설계변수를 변화시켜 보다 다양한 해체시나리오를 만들어 최적의 공정을 산출 할 수 있다. 따라서 향후 전산모사 기술은 제염·해체 연구분야에서 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- (1) J. J. Fisher, "Applying Robots in Nuclear Applications", 1985, RI/SME Robots Conference
- (2) A. R. Gregory, et. al., "The Use of Remote Handling Equipment for Gas Cooled Reactor Inspection", 1984, Proceeding of Remote Handling in Nuclear Facilities, pp. 534-555
- (3) G. Clement, et. al., "Remote Handling and Transfer Techniques in Dismantling Strategy", 1984, Proceeding of Remote Handling in Nuclear Facilities, pp. 556-569
- (4) A. Baker, et. al., "Remote Handling Equipment for the Decommissioning of the Windscale Advanced Gas Cooled Reactor", 1984, Proceeding of Remote Handling in Nuclear Facilities, pp. 581-597
- (5) L. Costa, et. al., "Remote Operation in Decommissioning", 1989, Decommissioning of Nuclear Power Plates
- (6) K. J. Jung, et. al., "Decommissioning of TRIGA Mark 1&2", 1997, KAERI/RR-1798/97
- (7) J. H. Park, et. al., "Decontamination and Decommissioning Project for the Nuclear Facilities", 2003, KAERI/RR-2304/2002
- (8) C. P. Baker, "Parametric Design Using IGRIP", 1994, Proceeding of the DENEb User Group Conference, pp. 7-10
- (9) H. D. Clifford, S. Ekdahl, and J. S. Tulenko, "Virtual Reality for Mobile Robot Control", 1994, Proceeding of the DENEb User Group Conference, pp. 91-98

- (10) M. Salminen, R. Tuokko, and J. Sulkanen, "Development, Experiments and Experience in Telerobotics and VR Using the TELEGRIP Software", 1995, Proceeding of the DENEb User Group Conference, pp. 55-64
- (11) J. B. Barnaby, "The Use of Real-Time Computer Graphics to Assist Remote Reactor Inspection", 1999, Proceeding of the DENEb User Group Conference, pp. 27-31