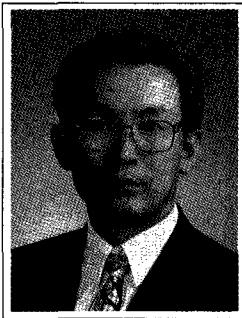


TRIGA 연구로를 이용한 제염 해체 기술

오 원 진

한국원자력연구소

핵연료주기폐기물처리기술개발부 부장



요

자력 시설의 해체는 원전 건설비의 10~20%에 해당 하는 막대한 비용이 소요되

며, 원자력발전소 가동중 누적 발생량을 상회하는 대규모 방사성 폐기물이 발생한다.

해외 선진국에서는 해체에 대한 기술 대비와 안전 규제 체제 정비 및 산업 기반 구축을 위해, 국가 주도로 수명이 다한 연구로 혹은 실증로 등을 사용하여 원자력 시설 제염 해체 기술 실증을 한 사례가 많다.

미국은 DOE 주도로 미국 최초의 상용 원자로인 Shippingport(72MWe PWR) 원전 해체를 해체 기술 실증 사업으로 90년에 완료하였으며, 해체

비용, 방사선 피폭 및 해체 폐기물을 해체전 산정한 목표치 이내로 수행할 수 있음을 보였고 관련 기술 기준 정비 및 경험 축적의 기회로 삼았다.

영국은 UKAEA 주관으로 92년부터 Windscale 원전(41MWe AGR)에 대한 제염 해체 기술 실증을 하고 있다.

일본은 일본원자력연구소 주관으로 80년대 초반부터 95년까지 동력 실증로(JPDR)에 대한 제염 해체 실증을 종료하였고, 현재 핵연료 주기 시설 제염 해체 기술 개발 및 기술 실증을 추진중에 있다.

우리 나라의 제염 기술 개발은 80년대 초반부터 시작하였으나 해체 기술 개발은 비교적 최근에 시작을 하였다.

우리나라의 제염기술 개발

우리 나라는 아직 원자력 시설 해체 경험이 전혀 없으며 인허가에 대한 세부 기술 기준도 미비되어 있고 관련 산업 기반도 매우 취약하다.

특히 국내 제염 해체 산업이 양성되어 있지 않아 장비와 숙련 기술의

존적 해체 작업은 현재 많은 부분을 해외에 의존할 수밖에 없으며, 인허가를 위한 안전성 입증에도 많은 시간과 노력이 필요할 것으로 보인다.

연구용 원자로는 현재까지 전세계에 걸쳐 650기 이상이 건설되었거나 건설 또는 계획중에 있다.

이중 350기 이상은 이미 가동 중지 되었으며, 서로 다른 폐로 조치 단계로 프로젝트를 수행하고 있다.

95년 9월 현재 가동중인 연구로는 57개국에 284기가 있다. 이중 약 220기가 20년 이상 된 것으로, 21세기 초에 대부분 해체가 될 것으로 본다.

미국·프랑스·영국 등 원자력 선진국들은 원자로나 핵연료 주기 시설 등에 대한 해체 경험을 상당히 축적해 나가고 있다.

우리 나라는 국내 원자력 시설의 제염 해체에 대비하여, 한국원자력연구소의 연구용 원자로 해체 기회를 이용하여 관련 제염 해체 기술 개발 및 기술 실증을 계획하고 있다.

정부의 TRIGA MARK II 및 TRIGA MARK III 원자로 해체 방침은 96년 4월 확정(제12차 원자력이용개발 전문위원회 TRIGA연구로 폐

로계획 보고) 되었다.

폐로 방식은 TRIGA MARK II는 기념관화, TRIGA MARK III는 완전 해체 철거 방식으로 정하였다.

개략적 폐로 일정 계획과 관련 기술 개발, 실증 추진 일정표는 <표 1>과 같다.

연구로 제염 해체 기술 실증은 연구로 폐로 기간에 하는 것과 폐로 후 하는 것으로 나눌 수 있다.

폐로중 수행되는 주요 기술 실증 분야는 원자로 계통 제염, 원자로 수증 원격 검사, 원자로 해체 공정 전산 모사 및 해체 후 부지 제염 복구이며, 폐로 후 기술 실증 분야는 해체 폐기물 재활용과 해체 폐기물 처리이다.

한국원자력연구소에서 원자력연구개발 중장기계획의 일환으로 95년부터 수행하고 있는 연구로를 사용한 제염 해체 기술 개발과 기술 실증 계획을 소개한다.

원자로 계통 제염 기술

원자력 시설 해체를 위한 제염의 주된 목적은 절단 및 해체 작업시 방사선 피폭을 줄이기 위한 것과 환경 오염을 막거나 해체 폐기물의 재활용을 위한 것이 있다.

일반적으로 원자로 계통 제염은 전자 목적의 제염을 주로 하며, 기념관화 등 시설의 재사용이 필요한 경우는 후자 목적의 제염도 한다.

TRIGA 연구로의 경우는 노내 구

<표 1> TRIGA 연구로의 개략적 폐로 조치 일정

내 용	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
○연구로 연구 가동 정지 및 휴지 신고	▼						
○연구로 폐로 조치 방안에 관한 정부의 의사 결정	▼						
○연구로 제염 및 해체							
• TM-II : 기념관으로 전환							
• TM-III : 완전 해체 철거							
○폐로 조치 기술에 대한 연구 개발							
• 폐로 조치 사업 기간 내 추진							
- 원자로 계통 및 Hot Cell 제염 기술							
- 원자로 수증 원격 검사 및 제염 기술							
- 원자로 해체 공정 그래픽 전산 모사							
- Concrete 표면 제염 기술							
- 부지 오염 평가 제염 복구 기술							
• 폐로 조치 사업 종료 후 추진							
- 원격 제염 및 절단 기술							
- 해체 폐기물 재활용							

성 재료가 주로 알루미늄으로 되어 있고 운전중에 측정된 냉각 계통 배관의 방사선 준위가 매우 낮아, 해체 작업자의 방사선 피폭을 절감할 목적의 계통 제염은 필요하지 않을 것으로 보인다.

그러나 TRIGA MARK II는 기념관으로 전환하여 일반 대중에 개방하기 위해 비방사성 시설로 관리되어야 할 것으로 보며, 따라서 후자 목적의 제염이 필요하다.

해체를 위한 원자로 계통 제염은 가동중의 원자로 계통 제염과 유사한 기술을 사용한다.

원자로 가동중 계통 제염은 모재 부식 손상 없이 제염을 하기 위해 저농도 화학 제염을 주로 이용한다.

해체를 위한 제염에서도 고농도 화학 제염이 가능하지만 제염 폐기물 발생량을 최소화하기 위해 주로 저농도 화학 제염 기술을 많이 사용한다.

한국원자력연구소는 83년부터 원자력발전소 1차 냉각 계통 제염 기술 개발을 수행하여 증기발생기 저농도 화학 제염 기술, 고온 화학 제염 기술 및 재생성 LOMI 제염 기술 등 선진국 수준의 기술 능력을 보유하고 있다.

TRIGA MARK II의 1차 냉각 계통은 구성 재료, 운전 이력 및 오염 특성 등이 원자력발전소 1차 냉각 계통과 매우 많이 다르기 때문에 화학제 및 제염 공정 조건 선정을 위한 별도의 연구 개발이 필요하다.

최근에 원자로 해체가 종료된 일본

JPDR의 경우는 일차 냉각계 배관에 기존의 제염 방법을 개량하거나 새로 개발한 제염 방법을 적용하여 계통 제염을 실시하였으며, 「유동연마 제염방법」과 「황산-세륨(IV) 산화환원 전위 제염방법」이 우수함을 보여 주었다.

TRIGA MARK II 원자로 냉각 수조의 피복재(liner) 재료는 대부분 알루미늄이고 일부 구조물은 스테인레스강으로 되어 있어, 중성자 조사에 의한 Co-58, Co-60, Fe-55, Mn-54, Ag-110m, Zn-65, Sc-46 및 Ni-63 핵종 생성이 예상된다.

그러나 87년에 수행한 실측 및 산정 결과를 보면 원자로 계통 대부분이 매우 낮은 오염 준위를 보이고 있으며 환경 방출 기준의 수십배 이내다.

이중 Fe-55는 알루미늄 합금에 포함되어 있는 철에서도 생성이 된다.

이들 방사성 핵종은 운전중 연구로 냉각 계통 정화 계통에 유입되어 부식 산화물이나 침적물 형태로 존재할 것으로 본다.

97년부터 TRIGA MARK II 연구로의 냉각 수조, 냉각 계통 및 냉각수 정화 계통 등의 계통 제염 기술 개발을 위해 KAERI의 기존 제염 기술을 바탕으로 최적 제염 조건 및 공정 장치 개발을 하고 있으며, 실제 TRIGA MARK II 연구로에 대한 적용은 원자로 계통 오염이 수반되는 해체 작업이 종료된 99년경이 될 것으로 본다.

제염 방법의 선정에는 우수한 제염

성능 및 제염에 의해 발생하는 2차 폐기물량의 최소화를 도모할 수 있도록 고려해야 한다.

원자로 계통 화학 제염에 앞서 알루미늄 재료로 cladding된 냉각 수조의 제염은 먼저 운전중이나 폐로 조치시 생성된 바닥의 슬러지를 흡입법으로 제거하고 수조내벽 오염물을 고압수 방법 등으로 사전 제염하는 것을 고려하고 있다.

1차 냉각수 냉각 계통 및 정화 계통의 배관은 냉각 수조와 밸브 등을 이용하여 단절시키거나 또는 냉각 수조 내에 폐액 감용 목적의 inserter를 장착시킨 뒤 저농도 loop 화학 제염 방법을 사용하고자 한다.

이 때 사용할 수 있는 화학 제염 기술은 수소가 포함될 경우 EDTA 등과 같은 유기산을 사용하는 저농도 제염법이 이용될 수 있고, 배관계에 만 극한할 경우 무기산이나 세륨과 같은 강력 산화제가 함유된 무기산 용액을 사용하는 고농도 제염법이 적용될 수 있다.

97년 연구에는 기존 계통 제염 기술 비교 분석, 알루미늄 재료 제염 특성 기초 실험, 소규모 계통 제염 실험 장치의 제작 및 실험을 하며, 98년에는 최적 제염 조건 및 공정 절차 선정과 제염 폐기물 처리를 포함한 제염 장치 기본 설계를 하며, 99년에는 계통 제염 기술의 현장 실증을 위한 제염 장치의 제작, 시운전 및 연구로 계통 제염을 실시할 예정으로 있다.

부지 제염 복구 및 해체 폐기물 재활용 기술

1. 부지 제염 복구 기술

부지 제염 복구란 원자력 시설 가동중이나 해체 작업중 오염된 부지를 아무 제한없이 사용할 수 있는 수준까지 환경 복구를 하는 것을 말한다.

우리 나라는 아직 제한없이 부지를 사용하기 위한 부지 복구 기술 기준이 없으며, 미국의 기술 기준(10CFR 20)은 잔류 방사능의 영향이 자연 방사능에 의한 피폭(대략 200~300mrem/yr)보다 15 mrem/yr 이상을 초과하지 않도록 ALARA 방식에 따라 제염 복구를 하는 것으로 되어 있다.

부지 제염 복구를 위해서는 물리적 또는 전기 화학적 토양 제염 기술, 그리고 부지의 수리 지질 특성에 따른 잔류 방사능의 장단기 지하 핵종 이동 평가 기술이 중요하다.

96년도의 토양 제염 기술 개발 연구에서는 토양 제염에 관한 기술 현황 분석 및 주 방사성 핵종인 Fe·Co·Cs·Sr·Ce 이온의 토양에 대한 흡착 특성을 연구하였다.

연구 결과, 소규모 지역이 심하게 오염된 경우는 전기 화학적 현장 제염 기술을 사용하고, 넓은 지역의 저준위 오염시는 물리적 제염 후 제거된 토양을 soil washing 기술로 처리하는 것이 효과적임을 알았다.

또한 가수분 핵종을 생성하지 않는 세슘과 스트론튬은 코발트와 세륨에

비해 토양에 대한 분포비의 pH에 대한 민감도가 적었으나 세륨과 스트론튬은 분포비 변화가 심한 것으로 나타났다.

특히 코발트와 세륨은 염기성 영역에서는 침전물이 형성되므로 제염 용액의 산도가 염기성 영역으로 가는 것을 막는 것이 필수적임을 파악하였다.

97년도의 연구에서는 실험실 규모의 전기 화학적 제염 cell을 사용하여 제염 성능에 영향을 미치는 인자들을 파악하고자 한다.

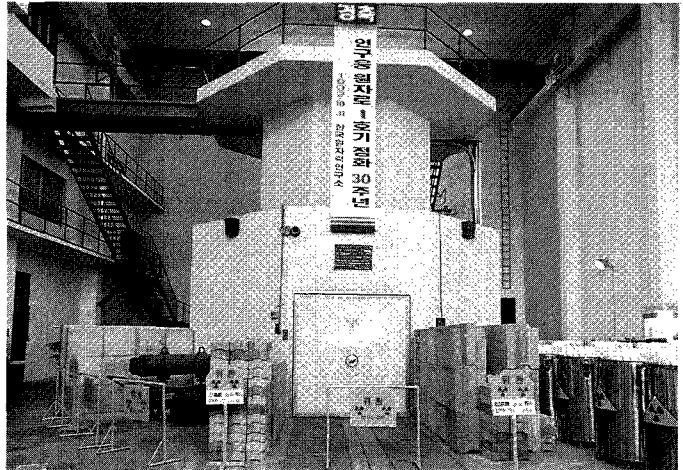
또한 soil washing법에 의한 제염 시 효과적으로 방사성 핵종을 제거할 수 있다고 알려진 착화제를 중심으로 최적 제염제를 선정하고자 한다.

이를 토대로 98년에는 bench 규모의 동전기적 제염 장치 및 Soil washing 장치를 제작하여 이들 장치의 최적 제염 공정 절차를 수립하고자 한다.

99년도에는 연구 결과를 TRIGA 연구 부지 제염 복구에 적용하여 기술 실증을 하고자 한다.

한편 부지 오염 특성 및 잔류 방사능 지하 이동 특성 평가 연구에서는 96년도에 핵시설 주변의 지하수 유동 및 오염 물질 이동 체계 해석과 관련하여 각국에서 개발된 핵종 이동 해석 코드들을 비교 분석하였다.

이 코드들을 연속체 개념 코드로 분류하고 각 코드에 대한 원리, 분석 방법, 문제점 및 적용상의 한계점을 파악하였다.



TRIGA Mark I 연구용 원자로

핵시설 주변의 광역적인 지역의 방사성 물질 이동 해석에 적합한 코드로는 연속체 개념 코드 중 열극대의 존재를 고려할 수 있는 이중 공극 코드가 적합하며, 국부적인 지역에 대해서는 분리 열극 개념 코드가 적합한 것으로 분석됐다.

97년에는 TRIGA 시설 주변의 수리 지질 특성에 대한 광역 조사와 기초 토양 시험을 통해 개략적 수리 지질 전산 모사(3차원 수리 지질 모사 코드 : MOD FLOW)와 향후 100년간 방사성 핵종 이동 평가를 할 수 있는 전산 프로그램을 일차 완성하였다.

앞으로 비포화대 핵종 이동 모델링 기술을 보완하여 부지 잔류 방사능 평가 모델을 완성하고자 하며, 99년에는 개발된 모델들을 사용하여 TRIGA 부지의 제염복구 특성평가에

적용하고자 한다.

2. 해체 폐기물 재활용 기술

원자력시설 해체 작업은 원전 운전 기간에 누적 발생한 방사성 폐기물보다 훨씬 더 많은 방사성 폐기물이 발생하는 것으로 추산되고 있다.

이중 대부분은 방사능 오염도가 낮고 재활용이 가능한 폐기물이다.

따라서 방사성 폐기물의 재활용은 최근 전세계적으로 큰 관심을 불러 일으키고 있다.

주요 재활용 대상 방사성 폐기물은 금속성 폐기물과 콘크리트 폐기물이 있다. 재활용을 위해서는 경제성 있는 기술 개발 뿐 아니라 국민 수용성 확보도 매우 중요하다.

한국원자력연구소에서는 96년부터 방사성 폐기물 재활용 연구를 추진하

〈표 2〉 연구용 원자로 해체 공정 절차 및 소요 장비

해체 공정	해체 공구	원격 조작기
원자로 주변 시설물 제거	plasma arc cutter	crane
원자로 내부 관류 제거	rotary disk knife, shaped explosive	manipulator
노심부 제거	plasma arc cutter	crane, manipulator
잔여 시설물 제거	manipulator, shear cutter	crane, manipulator
원자로 tank liner 제거	arc saw	crane
콘크리트 벽면 해체	water jet, diamond saw, controlled blasting	crane, excavator

였고, TRIGA 연구로 해체시 나오는 금속성 폐기물, 콘크리트 폐기물 및 침착 활성탄 폐기물을 사용하여 재활용 기술 실증을 하고자 한다.

96년에는 방사성 폐기물 재활용 기초 연구를 수행하였으며, 전기 화학적 기술로 고리 원전에서 발생한 금속성 방사성 폐기물을 재활용이 가능한 수준까지 제염이 될 수 있음을 보였다.

97년에는 전기 화학적 제염 공정 장치와 제염 폐기물 처리 공정 개발에 주력하고자 한다.

특히 세계 첨단 기술인 활성 탄소 섬유 전기 흡착법을 개발하고 있으며, 재활용 공정의 화학 폐기물 감소에 크게 기여할 수 있을 것으로 본다.

TRIGA 해체 폐기물 재활용 기술 실증은 해체가 완료된 99년 이후에 추진할 예정이다.

연구용 원자로 해체 공정 전산 모사

원자력 시설의 해체는 많은 부분이 방사선 환경하에서 수행하게 되므로 작업자의 피폭을 최소화하고 작업 시간을

단축하기 위해서 대부분의 공정을 원격 조작 방식으로 수행하여야 한다.

원격 해체 공정을 실제 시설에 적용하기 위해서는 대상 시설 및 해체 장비를 세부적으로 모델링하고 공정 수행 과정을 사전에 세밀히 검증하여야 한다.

본 연구에서는 연구용 원자로를 대

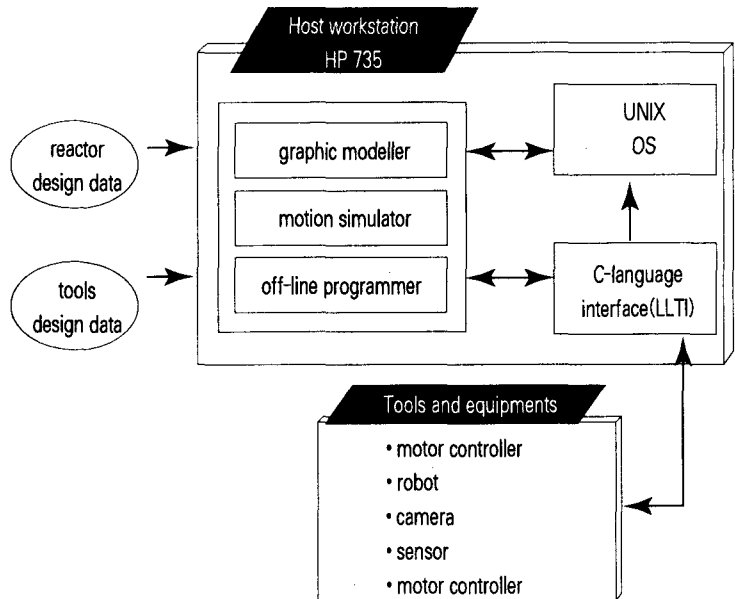
상으로 원격 해체 공정을 3차원 그래픽 환경에서 수행하여 공정 절차의 타당성을 검증하였다.

1. 해체 공정 설계

발전소 해체 작업에서 절단 또는 해체되어야 하는 대상물로는 원자로 용기, 원자로 내부 장치, 원자로 주변의 구조물 및 지지대, 파이프류, 탱크, 기계 부품 및 건물 외벽 등이 있다.

본 연구에서는 TRIGA MARK II 연구용 원자로를 대상으로 해체 공정 및 장비를 기술적인 특성과 경제성을 고려하여 〈표 2〉와 같이 선정하였다.

2. 그래픽 전산 모사 시스템 구성



〈그림 1〉 그래픽 전산모사 시스템의 구성

복잡한 그래픽 환경을 모델링하고 이를 실시간 전산 모사하기 위해서는 그래픽 계산 및 도면의 전시 성능이 뛰어난 컴퓨터가 필요하다.

본 연구에서는 Hewlette Packert사의 Workstation Model 735에 그래픽 처리 기능을 강화한 z-buffer를 장착하여 그래픽 전산 모사용으로 사용하였다.

이 장비는 24 bit Graphic Plane을 가지며, 그래픽 화면의 재생성 빈도는 76Hz이고, 주 연산기의 처리 속도는 154MIPS, 57.4FLOPS로 초당 2,200,000개의 Polygon 처리가 가능하다.

시설 장비의 그래픽 모델 작성 및 동작의 전산 모사를 위해서 Deneb Robotics사의 상용 소프트웨어 IGRIP(Interactive Graphics Robot Instruction Program)을 사용하였다.

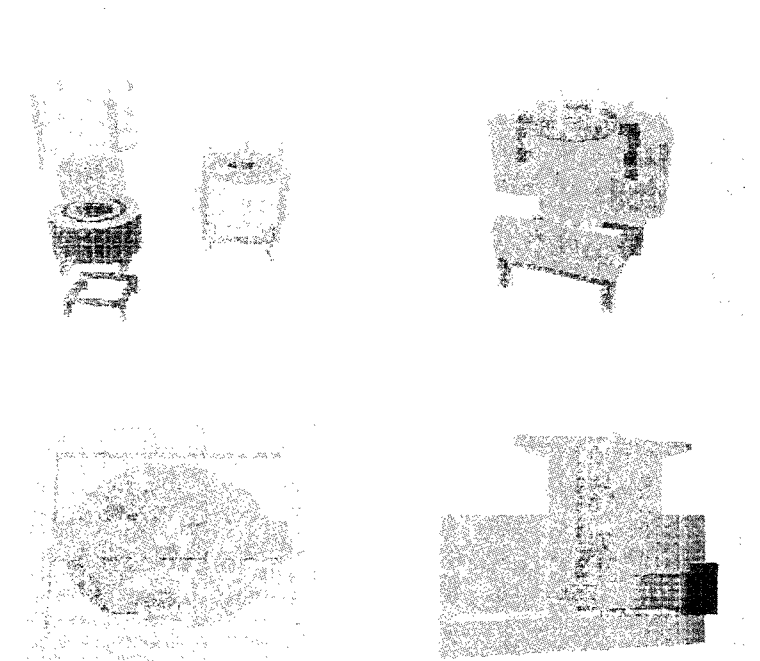
개발된 전산 모사 시스템은 시설/장비 모델링 프로그램, 전산 모사 프로그램 및 외부 장비 접속 프로그램으로 구성되어 있다.

〈그림 1〉은 전산 모사 시스템의 구성을 보여준다.

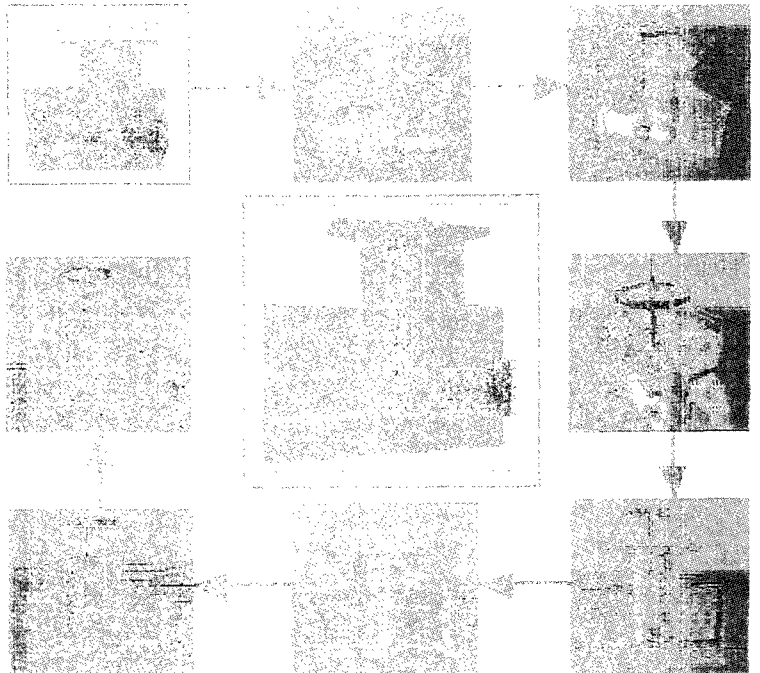
3. 그래픽 모델링

연구용 원자로 시설 및 해체 장비를 3차원 그래픽으로 작성하였다.

각 부품의 작성시 물체의 형상·치수를 실제 설계 도면과 일치하도록 하며, 향후 부품의 조립 순서 및 접속관



〈그림 2〉 연구용 원자로의 그래픽 모델



〈그림 3〉 해체 공정의 그래픽 전산 모사 과정

계를 고려하여 각 부품의 적절한 위치에 기준 좌표계를 부착하여야 한다.

또한 그래픽 전산 모사 단계에서 연구로 시설 내부의 현황을 보일 수 있도록 하기 위해 각 시설물의 좌우 단면 모델을 추가로 작성하였다.

이와 같이 그래픽 환경에서 작성된 작 부품은 조립되어 독립적으로 구동하는 장비가 구성되며, 각 부품의 조립은 각 부품간의 상대적인 위치를 정해 주고, 이들 간의 상대 운동 방향 및 운동 범위를 지정해줌으로써 이루어진다.

이러한 정보를 토대로 IGRIP의 내장된 해석 기능을 이용, 장비의 역기구학 계산 및 동특성을 계산하여, 이를 장비의 구속 조건으로 부가한다.

이로써 각 장비의 동작을 독립적으로 전산 모사할 수 있게 된다.

이상과 같이 작성한 시설물로는 연구로 외벽 구조물, center channel, reflector and specimen rack, fuel element, reactor tank, internal tubes, thermal column 및 thermal column door 등이 있으며 <그림 2>, 해체 장비로 크레인, bridge transporter 및 로봇을 작성하였다.

이러한 시설/장비를 동일한 그래픽 환경에 적절히 배치하여, 연구용 원자로의 전체적인 모델을 구성하였다.

연구로 내부의 그래픽 전시를 용이하도록 하기 위해서 좌우 단면부를 별도로 작성하여 조합하였으며, 필요에 따라서는 각 부분을 투명하게 처리하였다.

(표 3) 여러가지 벽면주행 원격장비

Model	특 징	사 양
NINJA- I by S. Hirose, Tokyo Inst. of Technology(1991)	<ul style="list-style-type: none"> legged 방식 4다리+진공흡착기 다리: 3D parallel, 모터 구동 진공흡착기: 공압 밸브 	<ul style="list-style-type: none"> 중량: 45kg 크기: 1.8×0.5m 최대 속도: 16cm/sec
ROBUG- II by Collie, Portsmouth Polytechnic(1991)	<ul style="list-style-type: none"> legged 방식 4다리+자석, 진공흡착기 다리: 3D parallel, 실린더 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 중량: 17kg 크기: 1.0×0.7m 최대 속도: N/A
Biped Walking Robot by A. Nishi, Niyazaki Univ.(1992)	<ul style="list-style-type: none"> legged 방식 2다리+대형 진공흡착기 모터 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 중량: 45kg 크기: 1.8×0.5m 최대 속도: N/A
CEIT(prototype) (1994)	<ul style="list-style-type: none"> worm 방식 3개의 진공흡착기 부착 실린더 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 중량: 45kg 크기: 0.6×0.3m 최대 속도: N/A
CSIRO	<ul style="list-style-type: none"> worm 방식 2다리+6개의 전자석 모터 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 중량: 45kg 크기: 0.6×4.5m 최대 속도: 5cm/sec
WCR by T. Fukuda, Nagoya Univ.(1992)	<ul style="list-style-type: none"> crawler 방식 벨트에 진공흡착기 다수 부착 벨트는 모터 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 중량: 45kg 크기: 0.6×0.3m 최대 속도: 5cm/sec

리하였다.

4. 해체 공정 전산 모사

연구용 원자로의 그래픽 모델을 토대로 해체 공정 설계로부터 확립된 절차에 따라 시설 해체 공정을 전산 모사하였다.

전산 모사를 통해 주변 장치 제거, 해체 장비 설치, 내부 Pipe류 제거, thermal column 제거, reactor core 제거, reactor tank liner 제거 등의 세부 공정을 검증하였다.

각 세부 공정별로 로봇의 위치 및 동작 경로를 설정하고 전산 모사하여

작업의 성공 여부를 확인한 후 재설정하는 작업을 반복하였고 최적의 작업 절차를 수립하였다.

작업 경로는 순차적인 일련의 작업 점(tag point)들을 설정함으로써 지정되며, 로봇의 파지부가 이들을 순차적으로 추종함으로써 해체 공정이 수행된다.

전산 모사 결과, 로봇 및 크레인을 이용하여 주변 시설물과의 간섭을 적절히 피하면서 전체 해체 공정 수행이 가능함을 확인하였다.

전산모사 프로그램은 IGRIP이 제공하는 그래픽 언어인 GSL(Graphic

Simulation Language)을 사용하여 작성하였다.

GSL을 사용하여 작업장 내의 모든 장비의 구동을 동시에 지령하며 작업 도중 각 장비들 사이의 간섭 상황을 계속적으로 검사하여 작업의 성공 여부를 알려주도록 하였다.

또한 작업 공정의 진행 상황을 알아보기 쉽도록 작업장의 각 부분을 적절한 방향으로 전시하도록 하였으며, 필요에 따라 연구로 시설의 일부분을 투명하게 하여 내부 시설물이 가시화되도록 하였다.

전산 모사 과정은 그래픽 전시, 기구학 및 동역학 계산 등의 일련의 처리 과정이 시간 지연없이 동시에 이루어질 수 있어 작업 공정을 현실감 있게 도시할 수 있었다.

이상의 연구로 해체 공정 전산 모사 과정이 <그림 3>에 나타나 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자력 시설 해체 기반 기술 개발의 일환으로 연구용 원자로의 해체 공정을 3차원 그래픽 환경에서 전산 모사하여 공정의 타당성을 검증하였다.

이와 같은 해체 공정의 전산 모사 기법은 공정 설계 단계 뿐만 아니라, 실제 원격 작업시 조작자가 가변적인 작업 상황에 효과적으로 대처할 수 있도록 함으로써, 원격 해체 공정의 신뢰성을 확보하는 데 필수적인 기능을 담당하게 될 것이다.

연구용 원자로 오염 검사/제염 벽면주행 원격 장비 개발

1. 연구로 벽면 오염 검사/제염 방식 선정

TRIGA 연구로를 해체하기 위해서는 2.0m(D)×6.2m(H)인 연구로 탱크 내부의 벽면에 부착되어 있는 grout linear를 제염해야 한다.

이를 위해 먼저 내부의 오염도를 측정·분석하여 적절한 제염 방법을 선정하여야 하며, 선정된 방법에 따라 오염 부위를 제염한다.

연구로 탱크 벽면을 제염하는 방법에는 오염 정도에 따라, 제염제를 사용하여 오염 부위를 닦아 내거나 용제를 분사하는 방법, 기계적인 힘을 이용하여 표면층을 제거하거나 오염된 깊이까지 부숴내는 방법 등이 있다.

이와 같은 방법은 오염 정도가 심하지 않고 근거리에서 작업이 가능할

경우에는 작업자가 수동으로 수행할 수 있다.

그러나 수동 방식 작업은 제염 효과가 좋지 않을 수 있으며, 특히 오염 정도가 높거나 연구로 탱크와 같이 작업 환경이 좋지 않을 경우에는 작업 수행이 어렵다.

따라서 연구로의 탱크 제염 작업 방식은 크게 다음 3가지가 고려될 수 있다.

- ① 적절한 작업대를 제작하여 탱크 내부에 설치한 후 작업자가 수동 작업하는 방식
 - ② 연구로 탱크 상단부에 설치된 크레인에 제염 도구를 상하로 이송시킬 수 있는 power mast를 설치하여 원격 조작하는 방식
 - ③ 탱크 내부 벽면에 붙어서 이동하며 오염도 검사와 제염을 동시에 원격으로 수행하는 방식
- TRIGA 연구로의 탱크는 상용 발

<표 4> 벽면 주행 로봇의 부착 및 주행 방식에 따른 특징

	non-legged 방식		legged 방식
	crawler	worm	
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 간단한 구조 • 곡면 주행이 어려움 • 방향 전환이 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> • 비교적 복잡한 구조 • 일반적으로 곡면 주행 가능 • 방향 전환이 대체적으로 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 복잡한 구조 • 비교적 자유롭게 곡면 주행 가능 • 모서리 운동 가능
구동 메커니즘	<ul style="list-style-type: none"> • 바퀴 혹은 crawler로 운동 • 이동 속도 : 5cm/sec 	<ul style="list-style-type: none"> • 실린더에 의한 직선 또는 link 운동 • 이동 속도 : 17cm/sec 	<ul style="list-style-type: none"> • 실린더 혹은 직선 모터에 의한 운동 - NINJA : 모터 - ROBUG-Ⅱ : 실린더 • 이동 속도 : 16cm/sec
모델	<ul style="list-style-type: none"> • WCR 	<ul style="list-style-type: none"> • CEIT • CSIRO 	<ul style="list-style-type: none"> • NINJA • ROBUG-Ⅱ • Biped Walking Robot

전로에 비하여 오염도가 낮기 때문에, 수동 작업 방식이 고려될 수 있으나 작업자의 피로가 문제될 수 있으며, 향후 상용 발전로의 빈번한 제염 문제를 고려할 때 원격 작업 방식이 보다 바람직하다.

크레인에 power mast를 부착하기 위해서는 기존의 크레인을 연구로에서 들어내어 부착한 후 재설치해야 하는 번거로움이 있다.

또한 연구로 건물 내부에 power mast 부착 작업을 수행할 만한 공간이 없기 때문에 크레인 이용 방식도 바람직하지 않다.

위의 두 가지 방식에 비하여 탱크 내에 직접 투입되어 벽면을 따라서

이동하며 제염 작업을 수행할 수 있는 주행 로봇의 경우는, 오염 부위의 근접 거리에서의 검사 및 제염이 가능하기 때문에 제염 효과가 우수하며 설치 작업도 간단하다.

본 연구에서는 연구로 내의 물 속에 투입되어 벽면의 오염도를 측정하고, 이를 제염할 수 있는 벽면 주행 로봇의 개념 설계를 수행했다.

2. 벽면 주행 로봇의 개발 현황

벽면 주행 로봇의 개발을 위해서는 전자석 혹은 진공 흡착기를 이용한 벽면 부착 기술과 임의의 위치로 이동할 수 있는 자율 주행 기술의 개발이 요구되나, 이와 같은 기술에 대한

집중적인 연구는 수행된 바가 없으며 원자력 선진국에서도 연구 개발 단계에 있고 아직까지 실용화가 되어 있지 않다.

현재까지 원자력 선진국에서 개발 중인 벽면 주행 로봇의 대표적인 모델과 사양은 <표 3>에서 보는 바와 같다.

<표 3>의 벽면 주행 로봇은 모두 산업 시설(고층 빌딩, 대형 창고 등)에의 적용을 목적으로 개발되고 있으며, 또한 수중이 아닌 공기 중에서 작업을 수행하기 때문에 연구로의 검사/제염 작업에 직접 적용할 수 없다.

3. 연구로 오염 검사/제염 벽면 주행 로봇의 개념 설계

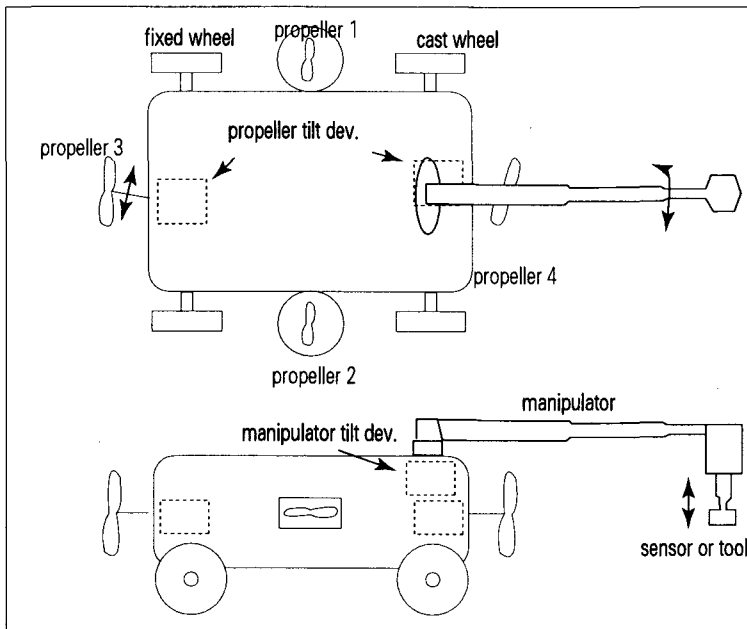
TRIGA 연구로의 사양에 따른 수중 벽면 주행 로봇의 작업 환경과 설계 조건을 분석하였는데 이는 다음과 같다.

가. 벽면 주행 로봇의 작업 환경

- ① 작업 환경 : 물속(로봇 전체의 밀봉 유지 필요)
- ② 벽면 재질 : 콘크리트와 금속(자성 바퀴 사용 불가)
- ③ 벽면 구조 : 평면 사가(벽면 모서리 부분 주행 기능 필요)

나. 설계 사양

- ① X·Y 방향 직선 정속 주행 가능
- ② 벽면과 로봇(오염 측정 센서)과의 일정 간격 유지
- ③ 로봇 자중을 부력으로 보상(무게 중심과 부력 중심의 근사 접근)



(그림 4) 벽면주행로봇의 구조

- ④ 최대 주행 속도 >300mm/sec(기존 벽면 주행 로봇의 최대 속도-170mm/sec)
- ⑤ 크기 : 400(w) × 400(I) × 500(h)mm 이내(모서리 부분 작업 고려)
- ⑥ 부착 기구 및 센서 : camera, 조명, gyroscope, 일체형 제어기
- ⑦ 오염 측정기, 제염 도구 및 2축 매니플레이터

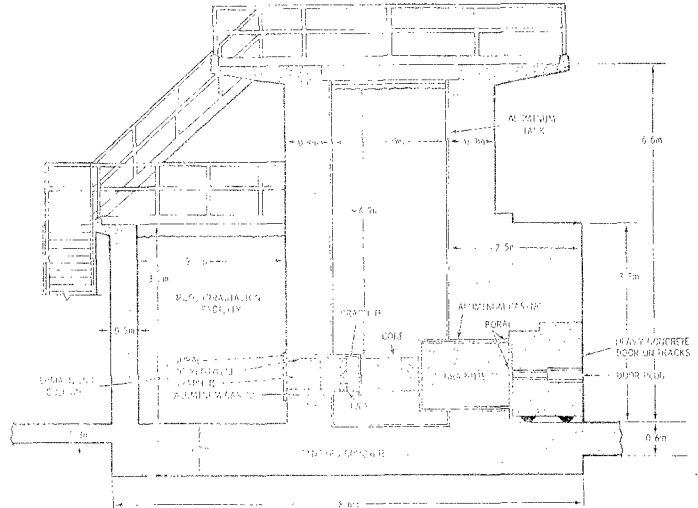
이와 같은 설계 조건을 만족하는 주행 로봇을 개발하기 위해서는 벽면 부착 및 주행 방식이 결정되어야 한다.

본 연구에서는 현재까지 개발된 여러 가지 벽면 주행 로봇의 부착 및 주행 방법을 분석하였다. <표 3>의 로봇을 부착 및 주행방법에 따라 다시 분류하면 <표 4>에서 보는 바와 같이 crawler, worm 및 legged 방식으로 나눌 수 있다.

crawler 방식은 자석 바퀴 혹은 바퀴와 흡착기를 사용하는 두 가지 방식이 있으나, 본 연구의 대상은 콘크리트 벽면이므로 자석 바퀴의 사용은 불가하며, 또한 바퀴와 흡착기를 동시에 사용하는 방식은 정속 주행이 불가능하기 때문에 적용이 곤란하다.

worm 방식과 legged 방식은 다관절로서 구조가 복잡하고 주행용 모터의 개수가 많아지기 때문에 수중 작업에 적용하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 새로운 개념의 로봇을 개발하기 위하여 <그림 4>에서 보는 바와 같이 프로펠러의 구



연구로 1호기의 단면도

동 메커니즘에 바퀴(영구 자석 혹은 일반 바퀴)를 동시에 사용하는 방법을 고안하였다.

<그림 4>에서 주행 방향으로의 추진 및 방향 전환은 1·2 프로펠러와 프로펠러에 부착된 tilt 장치가 담당하며, 벽면의 부착을 위하여 3·4 프로펠러의 추진력을 이용하고자 한다.

4. 향후 연구 계획

수중에서 벽면을 주행하며 오염을 검사/제염하는 로봇을 개발하기 위해서는 벽면 부착 기술, 자율 주행 기술, 탑재형 제어기 제작 기술, 로봇의 절대 위치 측정 기술 및 무선 통신 기술 등이 요구된다.

벽면 부착 및 자율 주행 기술은 한국원자력연구소와 한국과학기술원이 공동으로 개발하고 있다.

기타 원천 기술은 한국원자력연구소가 자체 개발중으로, 96년 현재 주행 로봇의 개념 설계를 수행하고 있으며, 97년에 prototype의 제작을 완료하여 98년 TRIGA연구로의 해체 작업 직전에 실증 시험할 예정이다.

또한 주행 로봇에서 측정된 벽면의 부위별 오염도 데이터를 전술한 바 있는 해체 공정 전산 모사 기술에서 개발한 연구로의 그래픽 모델에 부가하여 벽면의 오염도를 시각으로 확인할 수 있는 전시 기술도 아울러 개발하고자 한다.

본 주행 로봇은 연구로 뿐만 아니라, 원자로의 오염 검사 및 사용후 핵연료 저장 풀의 제염 청소 작업에도 적용할 수 있어 원자력 산업 전반에 걸쳐 기술 파급 효과가 클 것으로 기대된다. ☼