

계층화 분석과정법과 디지털 목업을 이용한 정량적 해체 시나리오 평가

김성균[†] · 박희성 · 이근우 · 정종현

한국원자력연구원

(2006년 6월 20일 접수, 2007년 9월 27일 채택)

Quantitative Comparison and Analysis of Decommissioning Scenarios Using the Analytic Hierarchy Process Method and Digital Mock-up System

Kim Sung-Kyun[†], Park Hee-Sung, Jung Chong-Hun and Lee Kune-Woo

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received 20 June 2006, Accepted 27 September 2007)

요 약

본 논문에서는 해체 시나리오를 정량적 및 정성적 고려사항을 반영하여 평가하기 위하여 계층분석이론 (*Analytic Hierarchy Process*, AHP)을 이용한 평가모델을 개발하였으며 또한 해체 시나리오의 정량적인 자료산출을 위하여 해체일정, 폐기물량, 방사화 가시화, 해체비용, 작업자 피폭량 등과 같은 해체정보산출모듈을 개발하였다. 그리고 해체공정을 가상환경에서 구현하여 해체절차를 파악하기 위하여 디지털 목업 (*Digital Mock-Up*, DMU)을 개발하였으며 DMU 시스템은 해체정보산출모듈, 해체 DB 및 해체 시나리오 평가 모듈을 통합적으로 관리하도록 개발되었다. 마지막으로 개발된 해체 DMU 시스템과 계층분석과정 모델을 연구로 1호기 (*Korea Research Reactor-1*, KRR-1) thermal column의 플라즈마 절단 시나리오와 nibbler 절단 시나리오에 적용하여 비교 평가하였다.

주요어 : 연구로, 해체, 계층분석이론, 디지털 목업

Abstract— This paper presents a scenario evaluation model of the AHP (Analytic Hierarchy Process) to evaluate dismantling scenarios considering quantitative and qualitative considerations. And decommissioning information producing modules which can obtain a dismantling schedule, quantify radioactive waste, visualize a radioactive inventory, estimate a decommissioning cost, and estimate a worker's exposure was developed to assess qualitatively decommissioning information. The digital mock-up (DMU) system was developed to verify dismantling processes and find error of scenarios in virtual space. It combines and manages the decommissioning information producing modules, the decommissioning DB, and the dismantling evaluation module synthetically. By using AHP model and DMU system, the thermal column in KRR-1 was evaluated on plasma arc cutting scenario and nibbler cutting scenario using the developed decommissioning DMU system.

Key words : Korea research reactor, Decommissioning, AHP, Digital mock-up

[†]To whom correspondence should be addressed.
Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353,
Korea
Tel: 042-868-2235
E-mail: sungkyun@kaeri.re.kr

1. 서 론

최근 노후화된 연구로와 발전소가 늘어남에 따라 원자력 시설의 해체가 중요한 과제로 대두되고 있다^{[1][2]}. 해체 프로젝트는 엔지니어링 전반에 걸쳐 많은 비용이 소요되며 또한 많은 위험이 내재되어 있다. 실제 해체를 수행하기에 앞서 가장 먼저 해야 할 일은 적절한 해체 절차를 확립하는 것이다. 해체절차는 어떠한 해체절차를 선택하느냐에 따라 해체비용과 작업자 피폭 및 안전성에 많은 차이가 발생하기 때문에 해체 엔지니어링 전반에 걸쳐 매우 중요하다. 과거에는 적절한 해체절차를 수립하기 위해 실제 규모의 물리적 목업 시스템을 구축하고 목업 시스템 내에서 대상물의 절단 및 해체를 수행하여 해체절차를 검증하였다. 하지만 이와 같은 물리적 목업 시스템은 시스템을 구축하는데 많은 시간과 제작 시 막대한 비용이 소요된다. 더불어 해체 대상물에 대해 다양한 해체절차를 적용하지 못한다는 점이 가장 큰 단점이었다. 그러나 최근에는 컴퓨터 기술의 발달로 물리적 목업 시스템을 컴퓨터의 3차원 공간상에서 쉽게 구현할 수 있게 되었다. 즉 컴퓨터 그래픽 기술을 이용하여 가상공간에 실물크기의 해체환경과 해체장비 등을 구현하여 가상으로 해체작업을 수행할 수 있게 되었다. 디지털 목업(Digital Mock-Up, DMU)의 장점은 대상물에 대한 다양한 해체 시나리오를 적용하여 시나리오별 장단점을 파악 할 수 있으며, 해체시 해체장비와 대상물과의 간섭 및 충돌을 미리 파악하여 해체장비의 설계오류를 미연에 방지하여 설계 변경에 따른 비용을 줄일 수 있다. 또한 해체작업 전에 작업자에게 해체작업의 위치 및 작업방법을 해체 DMU를 이용하여 사전에 전달하여 작업에 대한 이해도를 높여 실제 작업시 작업시간을 단축할 수 있으며 더불어 작업자 피폭을 최소화하여 작업자의 안전성을 높일 수 있다.

이러한 디지털 목업 시스템 기술은 최근 원자력 선진국에서 많이 이용하고 있다. 1999년 벨기에의 SCK-CEN 연구소에서는 VISIPLAN이란 이름의 프로그램을 개발하여 원자력 시설의 ARARA Planning tool^[3]로 활용하고 있다. 2002년에는 미국 INEEL에서 TOWER^[4]라는 프로그램을 개발하여 폐기물 처분시 최적경로를 제시하기 위한 폐기물 처분 시나리오를 DMU로 구축하였다. 2004년 프랑스의 CEA 연구소에서는 ER4 연구로를 DMU로 구축하여 해체 시나리오를 검토하는데 활용하였으며^[5], 2004년 일본의 JNC 연구소에서는 Fugen 발전소 해체 시나리오를 평가하기 위해 DEXUS 시스템을 개발하였다^[6].

최근 국내의 원자력 분야에서도 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 연구가 진행되고 있다. 2005년 윤지섭 등은 사용후 핵연료 취급 장치(ACP)에 대한 DMU를 개발하였

다^[7]. 해체분야에서는 2002년 김희령^[8] 등이 컴퓨터 그래픽 기술을 이용하여 연구로 1, 2호기(Korea Research Reactor-1, KRR-1&2)의 전산모사를 구축하였다. 하지만 이 전산모사는 해체 시 해체장비 설계를 검증하고 연구로의 해체과정을 전산모사로 구축하여 해체공정의 문제점을 분석하는데 국한되어 활용되었으며 이 시스템은 해체 시나리오들을 비교 평가하기 위한 정량적인 자료산출은 불가능하고 최적의 해체시나리오를 논리적인 체계를 통해 제시하는 기능이 없어 해체 엔지니어링을 수행하는데 있어 여러 가지 제약이 발생하였다.

본 논문은 연구로 해체 시나리오를 논리적이고 체계적으로 평가하기 위해 계층분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)의 평가모델을 개발하였으며 해체 시나리오의 정량적인 자료산출과 전체적인 해체공정의 문제점을 파악하기 위해 해체 대상물에 대한 Digital Mock-up을 개발하였다. 마지막으로 연구로 1호기의 thermal column에 대한 플라즈마 절단 시나리오와 nibbler 절단 시나리오에 대해 각각 해체과정을 구현하고 이에 대한 정보산출 모듈을 통해 정량적인 평가 값을 산출하고 계층분석과정을 통해 두 시나리오를 비교평가 하여 적절한 해체시나리오를 제시하였다. 2장에서는 해체 DMU 시스템과 AHP 평가모델 개발 대한 내용을 언급하였다. 3장에서는 개발된 시스템을 thermal column에 적용한 결과를 수록하였으며 4장에서는 본 논문의 결론을 언급하였다.

2. 해체 DMU 개발

2-1. 해체 DMU 기능

본 프로젝트에서는 해체 DMU를 크게 해체 DB 시스템, 해체전산모사 시스템, 해체정보산출 시스템으로 구분하였으며 각각의 세부 기능은 다음과 같다.

2-1-1. 해체 DB 시스템

해체 시나리오 평가를 수행하기 위해서는 기본적으로 해체 대상물에 대한 다양한 해체정보가 필요하다. 이러한 해체정보는 원자력 관련 시설의 해체시 해체 작업 자료, 작업자 피폭 자료, 해체비용 자료, 방사성 폐기물 자료 등과 같은 수많은 해체정보가 발생한다. 이러한 방대한 자료는 해체 시나리오 평가시 가장 기초적인 자료로 사용되므로 발생한 정보들을 체계적으로 보존관리 할 수 있는 해체 DB 시스템 개발이 필요하다. 또한 이러한 해체 DB 시스템은 여러 시나리오 평가모델과 연계되어 필요한 정보를 교환하고 정보의 입출력이 가능하도록 설계되었다.

2-1-2. 해체 전산모사

해체 전산모사는 실제 해체작업 전에 해체공정을 미

리 시뮬레이션 해 봄으로써 실제 작업에서 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하고 예측할 수 있다. 즉, 해체 전 산모사를 통해, 해체시나리오를 실제 해체사업에 적용하는 단계에서 발생 할 수 있는 해체공법의 오류나 해체 장비 설계의 문제점을 미리 파악하여 이에 따른 비용과 시간의 낭비를 최소화 할 수 있다. 또한 새로운 해체공법이나 장비를 가상 해체환경에서 미리 적용해 볼 수 있으므로 해체 시나리오로서의 타당성을 검토하는데 매우 도움이 된다. 따라서 해체 전산모사는 전반적인 해체 시나리오 적용성을 파악 할 수 있는 근간이 되므로 해체 DMU 구성에 매우 필요한 기능이다.

2-1-3. 해체 정보인자 산출 기능

해체 시나리오에 대한 해체정보 산출 항목은 시나리오 평가에 가장 많은 영향을 미치는 요소로 아래와 같은 5가지 항목을 선정하였다.

(1) 해체작업시간 산정

해체 시 해체작업시간은 채택한 해체시나리오에 따라 작업위치, 작업방법, 투입인원 등이 서로 상이 하므로 해체작업시간 역시 차이가 발생한다. 이러한 해체작업시간은 해체비용의 작업자 인건비 및 해체일정 산정에 기초 자료로 활용되므로 해체 시나리오 평가시 반드시 산출되어야 할 평가 요소이다.

(2) 폐기물량 산정

원자력 시설 해체 시 발생하는 폐기물은 매우 다양하며 이러한 폐기물은 해체공법 특성상 절단 부위가 달라짐에 따라 발생하는 폐기물량도 달라진다. 이러한 폐기물량의 변화 또한 해체비용에 직접적으로 영향을 미친다. 즉, 폐기물량의 증가는 부피저감(Volume reduction)을 위한 처리비용과 폐기물 이송 비용에 연제되므로 해체 전 시나리오별 폐기물량 예측은 폐기물량 처분 비용 산정에 기본 자료로 활용되므로 매우 중요하다.

(3) 해체비용 산정

해체비용은 해체시나리오에 따라 소요되는 해체일정, 발생 폐기물량, 투입인원, 투입장비의 수 등이 변하므로 해체비용도 해체시나리오에 따라 달라진다. 해체비용 예측은 계획된 해체비용으로 충분히 해체를 수행할 수 있는지 여부를 판별할 수 있으며 만약 해체비용이 충분하지 못하다면 해체비용에 맞는 새로운 해체시나리오를 개발하거나 추가적인 해체비용을 정부기관으로부터 요구하여 이를 충족시켜야 한다. 따라서 해체비용산출에 필요한 적절한 해체비용항목과 비용산정식을 개발하여 해체 시나리오의 해체비용 예측을 수행하였다.

(4) 작업자 피폭

해체 시나리오에 따라 해체작업자의 작업경로와 작업시간이 달라지므로 작업자가 받는 피폭량 역시 달라진다. 해체작업시 작업자 안전은 최우선으로 고려해야 할

사항이므로 작업자 피폭은 시나리오의 작업자 안전성 평가 측면에서 매우 중요한 평가요소이다. 따라서 해체 DMU를 이용하여 작업시간과 작업경로에 따른 예상 작업자 피폭량을 산출하여 시나리오 평가자료로 사용하였다.

(5) 방사화 분포 가시화

방사화 분포 가시화는 고방사화 부품의 해체시 대상물의 방사화 분포도에 따라 고방사능 부위만 절단하여 방사능 폐기물로 분류하고 나머지는 일반폐기물로 처리하여 발생하는 해체 폐기물량을 감소하므로써 해체비용을 줄이는데 많은 도움이 된다. 또한 해체작업 전에 작업자에게 고방사화 부위를 시각적으로 숙지시켜 해체작업시 작업자의 작업 위험도를 낮출 수 있다.

2-1-4. 해체 시나리오 평가 기능

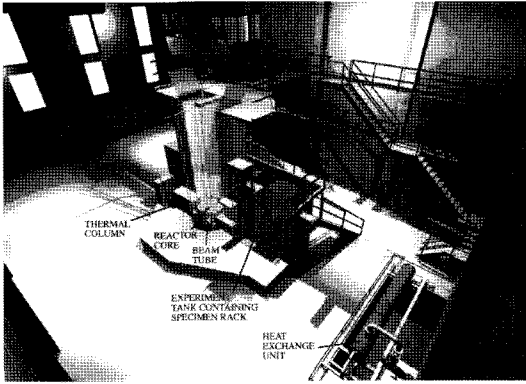
해체 시나리오 평가는 앞에서 언급한 정량적인 평가(해체일정, 해체비용, 피폭량, 폐기물량 등)들과 정성적인 평가(기술개발 기여도, 안전성, 파급효과 등)들이 혼합하여 평가해야 한다. 따라서 이런 정성적인 부분을 객관화하고 정량화하여 평가할 수 있는 과학적인 시나리오 평가 절차를 개발해야 한다. 이러한 평가절차를 개발하기 위해 계층적 분석법(AHP)과 같은 의사결정방법을 이용하여 평가 요소별 영향도를 분석하여 체계적으로 시나리오를 평가하여 최적의 시나리오를 제시할 수 있는 논리적인 평가 모델을 개발하였다.

2-2. 시나리오 평가 대상물 선정 및 시나리오

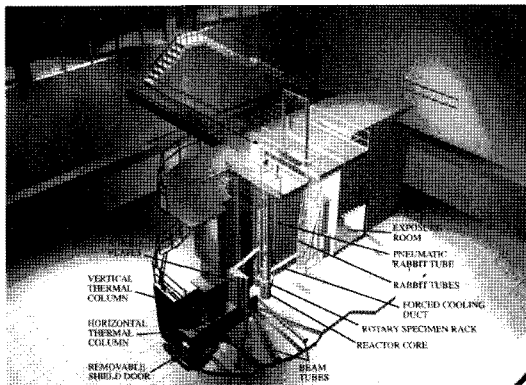
연구로 내에는 Fig. 1에서 보는바와 같이 다양한 종류의 부품으로 구성되어 있다. 그런데 이들 부품의 일부는 수년간의 운전과 실험을 통해 방사화 되어 있으며 이러한 구성품의 해체작업은 작업자의 안전 등의 이유로 주의 깊게 이루어져야만 한다. 본 연구에서는 참고 문헌[7]에 따라 여러 해체 대상물 중에서 해체 DMU 평가를 위한 평가 대상물을 다음과 같은 선정하였다.

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

본 연구에서는 위의 대상물 중에서 해체 DMU의 성능을 평가하기 위해 연구로 1호기의 thermal column을 선정하여 적용하였다. thermal column은 방사화 준위가 높고 해체작업 난이도가 높은 대상으로 해체시나리오의 선정이 매우 중요하기 때문에 이 대상물을 선정하였다. thermal column은 크게 thermal column, thermalizing column, 흑연, 차폐도어 등으로 구분되며 각각의 재원,



(a) KRR-1



(b) KRR-2

Fig. 1. The Figures of KRR-1 and KRR-2.

특성, 및 방사선학적 상태는 Table 1과 같다.

위와 같은 특성을 갖는 thermal column을 해체하기 위해 플라즈마 아크 절단 공법과 nibbler 절단 공법을 채택하였다. 두 공법의 특징은 다음과 같다.

2-2-1. 플라즈마 아크 절단 공법

플라즈마 아크절단은 특수구조로 된 토치에서 약 15,000°C 아크빔을 만들어 절단하는 공법으로 알루미늄 재질인 thermal column을 빠른 시간내에 효과적으로 절단이 가

능하여 이 공법을 채택하였다. 플라즈마 아크 토치는 길이가 긴 막대 앞에 장착하여 작업자가 납 차폐판 뒤에서 해체를 수행하고, 또는 작업자가 노심 상부의 크레들(Cradle)에 탑승하여 원거리에서 노심 근처의 thermal column을 해체한다.

2-2-2. nibbler 절단 공법

Nibbler는 펀치 같이 생긴 공구로 얇은 Sheet에 구멍을 뚫어 해체하는 장비이다. 이 공법은 원격조작이 가능하며 절단 속도가 빨라 짧은 시간에 해체를 완료할 수 있으며 또한 절단 폐기물의 부피가 작아 별도의 부피저감(Volume Reduction)을 수행할 필요가 없어 이 공법을 채택하였다. 해체 순서는 먼저 nibbler 장비가 절단할 수 있는 공간을 확보하기 위하여 플라즈마 아크 절단기로 thermal column 상부를 절단한 후 원자로 상부에서 원격으로 nibbler를 조종하여 thermal column 상부부터 차례로 해체한다.

2-3. Virtual Environment 설계

2-3-1. 연구로 1호기 VE 개발

(1) 3차원 그래픽 소프트웨어

연구로 1호기의 가상해체환경은 주로 원자로, 주변건물, 해체장비 등으로 구성되며 이에 대한 3D CAD 모델링은 통합 설계 소프트웨어인 Solid edge와 넘스(NURBS) 기반의 CAD 모델러인 3D Studio Max를 이용하였다. 연구로 1호기 대상물의 모델링은 2D 도면을 기반으로 3D 모델로 형상화하였으며 각 부품들에 대한 재질과 텍스처 맵핑을 부여하여 완성하였다.

(2) 해체 DMU 구축 소프트웨어

해체 환경 제작은 미국 EON Reality사의 EON Studio 와 EON SDK를 이용하여 제작하였다. EON Studio는 자체적인 모델링 기능은 갖고 있지 않지만, 다른 모델링 툴로부터 Import한 다양한 형태의 파일들을 이용하여 사용자가 원하는 거의 모든 형태의 가상환경을 구현할 수 있으며 가상현실을 빠르고 쉽게 구현할 수 있는 제작 도구이다. 또한 EON SDK 프로그램은 Visual C++의 플러그인으로 EON Studio가 지원하지 못하는 모듈

Table 1. Property of the components of thermal column in KRR-1.

구성품	재원	재질	방사선학적 상태
thermal column	단면 1.2 m×1.5 m 길이 1.6 m	알루미늄	• 노심부위에 가까운 부위의 thermal column과 thermalizing column의 전면부는 방사능 준위가 매우 높음. • 흑연블록은 고순도의 Graphite로 제작되어 있어 방사화의 정도는 높지 않을 것으로 예상되나 흑연내에 포함된 불순물이 방사화되는 경우가 많아 취급시 주의해야 함.
thermalizing column	단면 61 cm×61 cm 길이 1.32 m	알루미늄	
흑연블록	단면 10.2 cm×10.2 cm, 길이 최대 1.27 m, 개수 393개	Graphite	
보탈 시트	두께 3.2 mm	폴리에틸렌	

을 필요에 따라 사용자가 직접 제작하여 추가시킬 수 있어 EON Studio의 기능을 무한대로 확장이 가능한 프로그램으로 이 두 가지 프로그램을 사용하여 가상해체환경을 구축하였다.

2-3-2. VE 기능 설명

연구로 1호기의 해체 대상물들은 주로 연구로 내부에 존재한다. 따라서 연구로의 일부를 투명 처리하여 연구로 내부의 부품을 볼 수 있는 기능을 첨가하였다. 그리고 연구로의 VE 환경은 웹서버에 저장관리되고 인터넷을 이용하여 원격리의 컴퓨터에서도 EON viewer 프로그램을 통해 연구로의 가상환경을 볼 수 있다. 또한 유저는 마우스나 트랙볼 등의 입력장치를 이용하여 연구로 가상환경을 자유자재로 네비게이션이 가능하다.

2-4. 시나리오 평가 자료 산출 모듈

2-4-1. 해체 작업시간 산정

시나리오에 대한 해체일정을 산정하기 위해서는 각 작업 단계별 소요되는 작업시간을 산출해야 한다. 이와 같은 작업시간을 예측하기 위해 식(1)과 같이 해체작업시간 산정식을 개발하였다. 여기서 BT는 해체기본단위 시간을 의미한다. 해체기본단위 시간은 실제로 수행한 해체작업 데이터와 장비의 데이터 등을 통해 산출하였으며 다양한 공법에 대해 자료를 DB로 구축하였다. 한 예로 유압절단기의 절단시간은 재질별 두께별로 구분하여 설정하였고 이 장비의 설치시간이나 작업을 위한 비계의 설치시간 등은 실제 해체 경험자료를 통해 산출하였다. 수식에서 R_i는 해체작업 회수를 말한다. 일반적으로 해체작업은 동일한 작업을 반복적으로 수행하여 작업이 이루어진다. 예를 들어 콘크리트 차폐체를 다이아몬드 와이어소로 해체할 때 콘크리트를 블록형태로 반복적으로 절단하므로써 해체를 수행한다. 따라서 단위 해체작업에 대한 작업시간을 계산한 후 작업회수를 곱하여 전체 공정에 대한 작업시간을 계산한다. 그리고 해체작업은 작업위치와 주변조건에 따라 해체작업시간이 달라지므로 이를 고려하기 위해 가중치 W_j를 적용하였다. Table 2는 가중치를 작업위치, 호흡기보호, 방사선 보호장비, 휴식 등 5가지로 구분하고 각각에 대해 가중치를 퍼센트로 부여하였다. 이 값은 참고문헌^[20)]의 자료를 인용하였다.

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{N \cdot 8}, T_i = BT_i \cdot R_i \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^m W_j \right) \quad (1)$$

- 여기서 T = 전체 해체기간(Days)
- T_i = 단위 작업의 소요 man-hour(Man-h)
- N = 소요 인원수(Persons)
- BT_i = 기본단위시간(Man-h)
- R_i = 작업 회수(Frequencies)
- W_j = 가중치(%)

2-4-2. 해체 폐기물 산정

해체 폐기물량 산정은 3D CAD 프로그램에서 제공하는 체적 계산 프로그램을 활용하여 추산하였다. 먼저 3D 방사화 가시화 모듈을 이용하여 해체 대상물의 예상 절단 부위를 선정한다. 3D 모델링 프로그램으로 절단 부위를 해체장비에 의해 절단할 크기로 모델링 한다. 세 절 크기로 절단된 모델링은 CAD 프로그램에서 제공하는 체적 계산 기능을 이용하여 절단 부위의 부피를 계산한다. 그리고 절단 부위 재질의 밀도를 곱하여 질량을 계산하였다. 동일한 방법으로 다른 세절 크기의 질량을 계산하고 전체 해체 부위의 질량을 합산하여 폐기물량을 산정한다. 식(2)는 질량 산정을 수식으로 표현하였다.

$$M = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \rho_i \quad (2)$$

- 여기서 M = Total waste mass(kg)
- V_i = 단위 절단 폐기물 부피(cm³)
- ρ_i = 단위 절단 폐기물 밀도(kg/cm³)

2-4-3. 해체 비용 산정

해체비용은 식(3)과 같이 인건비, 장비비, 폐기물처리비의 합으로 표현하였다. 식(4)은 인건비 산출식을 나타내고 있다. 인건비는 해체일정산정에서 계산된 작업시간과 작업자 평균 단가를 곱하여 산출하였다. 식(5)는 장비비 산출식을 나타내고 있다. 장비비는 투입된 단위 장비 가격과 소요대수를 곱하여 산출한다. 식(6)는 폐기물 처리비 산출식을 나타낸다. 폐기물 산출은 폐기물 드럼 단위 비용과 드럼 수를 곱하여 산출한다. 그리고 폐기

Table 2. Weights with respect to decommissioning conditions.

Work difficulty factors	Weighting (%)	Standards
Height	15	Work in the 2 m over/under
Respiratory Protection	38	Whether using respirator or not
Radiation/ALARA	15	Whether working in radioactive area or not
Protective clothing	23	Whether wearing protecting cloth or not
Work break	9	Whether taking a break or not

물 드럼수는 전체 폐기물 부피를 드럼 부피와 공극률로 나누어서 산출한다.

$$C=PE+TE+WE \tag{3}$$

여기서 PE, TE, WE는 각각 인건비, 장비비, 폐기물 처리비를 나타낸다.

$$PE=\sum_{i=1}^n T_i \times ALC \tag{4}$$

여기서 T_i는 해체작업에 대한 작업시간을 나타내며 ALC는 평균 노임단가를 의미한다.

$$TE=\sum_{i=1}^n M_i \times NOM_i \tag{5}$$

여기서 TE는 장비비를 나타내며 M_i는 장비 단위 구입비용을 의미한다. 그리고 NOM_i은 단위 장비 대수를 나타낸다.

$$WE=\sum_{i=1}^n D_i \times \frac{V_{total\ volume}}{V_{waste\ drum}} \cdot P \tag{6}$$

여기서 WE는 폐기물 처리비용을 나타내며 D_i는 단위 폐기물 드럼 처리비용을 나타내고, V_{total waste}는 전체 폐기물 부피를 나타내며, V_{waste drum}은 폐기물 처리용 드럼 부피를 말한다. 마지막으로 P는 공극률을 나타낸다.

2-4-4. 작업자 피폭

해체작업시 작업자가 받는 피폭 평가는 작업자 안전 측면에서 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 컴퓨터 가상공간에서 작업자의 작업경로, 각 작업위치에 소요되는 작업시간, 방사선원과 작업자와의 거리 등을 설정하였다. 그리고 방사선 선원으로부터 작업자가 받는 피폭량을 피폭 계산 코드인 MCNP를 이용하여 계산한다^[9]. 평가 결과는 시나리오에 따른 위치별 피폭량과 작업경로에 따라 누적 피폭량을 산출하여 비교하였다.

2-4-5. 방사화 가시화

3차원 방사화 가시화를 구현하기 위해서는 먼저 해체 대상물에 대한 방사화 자료를 구축하였다. 이 자료는 해체 대상물에 측정위치를 설정하고 위치에 따른 표면선량을 방사선 계측기를 이용하여 자료를 산출하고 이를 DB에 저장·관리하였다. 그리고 이 대상물에 대한 3D 모델링을 수행하고 측정위치에 따라 3D 모델을 노드분할(node mesh) 하였다. 그리고 측정된 위치별 표면선량 자료와 데이터와 3D 모델링의 노드점을 EON SDK 프로그램으로 연결하여 데이터의 변화에 따라 표면선량의 농도가 색깔로 변하도록 프로그램 하였다.

2-4-6. 시나리오 평가

해체시나리오 선정에는 해체작업시간 산정, 폐기물량

산정, 해체비용 산정 등의 정량적으로 산출된 평가결과 뿐만 아니라 해체 시나리오의 기술적 파급효과, 사회적 수용성 등과 같은 정성적인 평가 결과도 중요하다. 따라서 해체시나리오 평가시 이러한 정량적인 평가 결과와 정성적인 평가 결과를 종합적으로 평가해야 한다. 이와 같은 평가 방법에는 계층적 분석 과정 AHP(Analytic Hierarchy Process)이 많이 이용된다^{[10][17]}. 이 방법은 1970 년대에 Saaty에 의해 개발되었으며, 평가대상에 대한 유한개의 평가요소로 계층화하고 평가항목에 대한 대안들을 다수의 목표에 견주어 평가하여 최적의 대안을 제공하는 하는 기법이다.

AHP는 목표들 사이의 중요도(weight)를 계층적으로 나누어 파악함으로써 각 대안들의 중요도를 산출한다^{[18][19]}. 계층적 분석과정의 절차는 다음과 4가지 절차를 갖는다.

1. 의사결정문제의 계층화(Hierarchy of Decision Problem)
2. 평가기준의 쌍별 비교(Pairwise Comparison of Decision Elements)
3. 가중치의 추정(Estimation of Relative Weights)
4. 가중치의 종합(Aggregation of Relative Weights)

본 연구에서는 해체 시나리오 평가를 위한 계층구조를 목표(Goal), 평가기준(Criteria), 대안(Alternative)의 3 단계(Level)로 구성하였다[Fig. 2 참조]. 1단계는 본 평가의 최종 목표로 여러 해체 시나리오 중에서 현 국내의 기술수준과 사회적인 환경을 고려하여 실제 해체 시 가장 합리적이고 타당한 해체 시나리오를 선정하는 것이다. 2단계는 해체 시나리오 평가를 위해 고려되어야 할 평가기준은 해체비용, 안전성, 해체 기술성, 사회적 수용성으로 구분되며 이는 국내에서 발행된 여러 보고서 등을 고려하여 평가요인을 선정한 후 해체 전문가의 설문에 대한 우선순위를 통해 선정하였다. 평가기준은 다

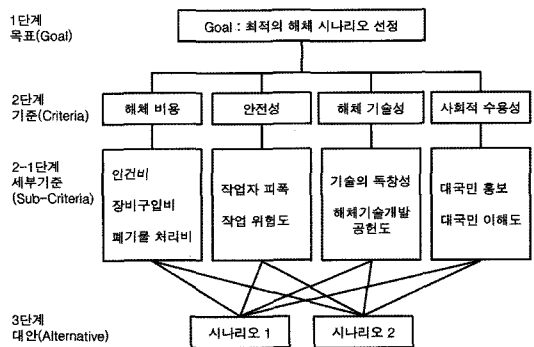


Fig. 2. The AHP model.

시 세부기준(sub-criteria)으로 나누어지며 항목별로 다음과 같이 세분화 하였다. 해체비용은 인건비, 장비구입비, 폐기물 처리비로 세분화하였으며, 안전성은 작업자 피폭, 작업 위험도로 구분하였고, 해체기술성은 기술의 독창성, 해체기술개발 공헌도로 분류하였으며, 사회적 수용성은 대국민 홍보, 대국민 이해도로 세분화하는 등 총 9개의 세부기준으로 구성하였다.

또한 본 연구에서는 AHP를 이용하여 해체 시나리오 평가에 대한 각 평가특성의 가중치(weighting)와 해체 기술성이나 사회적 수용성과 같은 정성적인 평가 항목을 정량화하기 위하여 원자력 분야의 해체전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문지는 해체 시나리오 선정에 관한 평가항목의 중요도 산출과 세부평가항목간의 중요도 산출 및 정성적 평가 항목의 정량화를 위한 문항으로 구성되었다. 설문지는 총 10매를 배부하였고 전부 회수하여 분석을 실시하였다. 전문가 그룹은 동 분야에 종사하고 있는 연구인력으로 구성하였으며 원자력연구원내 제염해체기술연구개발부서에 소속된 석박사급 인력으로 화학공학, 원자력공학, 물리학, 기계공학을 전공하고 제염해체분야에서 다년간 종사한 전문인력이다. 설문지는 각 대인에 대한 안전성, 해체기술성, 사회적수용성의 세부특성기준에 대한 평가정도를 9점 척도(1: 매우 낮음, 9: 매우 높음)에 의해 평가할 있도록 구성하였다. 설문 결과에서 몇 개의 극단치에 좌우되는 단점을 극소화하기 위하여 기하평균(Geometric mean)을 이용하여 중요도를 산출하였다. 한편, 해체비용과 해체일정과 작업자 피폭과 같은 세부평가는 해체 DMU를 통해 산출된 정량적인 산출 결과에 의해 결정된다. 그리고 목표에 대한 기준과 세부기준별 중요도에 대한 일관성 비율(consistency ratio)과 전체 일관성 비율을 산출하여 평가결과를 검증하였다.

3. 해체시나리오 평가

3-1. DMU 시스템의 하드웨어 시스템

본 프로젝트에서 개발한 해체 DMU 시스템의 하드웨어 시스템은 다음과 같다.

- 해체 데이터베이스 서버 시스템
 - DBMS : MS-SQL 2000 Server
 - OS : MS Window 2000 Server
 - User Interface : MS Visual Basic
 - Network : Web-based and Client/Sever
- 해체 디지털 목업 시스템
 - CPU : Pentium 4 1.7Mhz
 - RAM : 1G Rambus RAM
 - Graphic Processor Unit : ELSA 900XGL 256MB

- OS : Window XP

3-2. 해체 DMU 적용

연구로 1호기 thermal column은 플라즈마 아크절단공법과 nibbler 절단 공법에 대해 전산모사를 수행하였으며 두 공법에 대한 시나리오는 다음과 같다.

플라즈마 아크절단 시나리오는 먼저 thermal column 주변을 제척기를 이용하여 전체적인 부위의 방사화 정도를 측정한다. 그리고 실제 측정결과 Thermal column 내부를 채우고 있는 흑연블록은 방사선량이 높게 측정되지 않아 수작업으로 흑연블록의 해체가 가능하다. thermal column을 해체하기 위해 thermal column 입구에 납 차폐판을 설치하고 그 뒤에 플라즈마 아크 절단 장비를 설치한다. 설치된 장비를 이용하여 thermal column을 세절하고 thermal column 맞은편에 있는 thermalizing column도 마찬가지로 방법으로 세절한다. 마지막으로 절단된 폐기물은 수조내에 폐기물 이송용기를 투입하여 수거하고 수조 밖으로 이송하여 처리한다.

Nibbler 절단 공법 역시 플라즈마 아크 절단 공법과 마찬가지로 방법으로 수작업으로 흑연블록을 제거한다. 그리고 nibbler 장비의 삽입을 위해 thermal column 상부와 thermalizing column 상부를 플라즈마 아크 절단 장비로 절단하여 nibbler 장비의 삽입 공간을 확보한다. 그리고 수조 상부에 nibbler 장비와 작업자를 위한 크래들을 설치하고 nibbler 장비를 이용하여 thermal column과 thermalizing column을 세절한다. 세절된 폐기물은 크레인을 이용하여 수조내부 밖으로 이송하고 수조밖에 있는 저장 용기에 폐기물을 저장하고 용기를 밀봉하여 전산모사를 종료한다.

위의 두 시나리오에 따라 해체 전산모사를 Fig. 3과 같이 해체 DMU를 통해 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 thermal column을 해체하기 위한 두 가지 공법에 대해 해체절차를 확인하였고 작업순서에 따라 적절한 절단 위치를 파악하였다.

Fig. 4는 연구로 1호기의 thermal column의 방사화 분포 가시화 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 노심에 의한 방사화로 인해 thermal column과 thermalizing column의 전면 중심부가 많이 방사화 되었음을 알 수 있다. 이 결과를 통해 시각적으로 어떤 위치가 높게 방사화 되었는지 쉽게 파악할 수 있으며 작업자에게 위험부위를 쉽게 전달 할 수 있다.

Fig. 5는 시나리오 평가 자료 산출 모듈을 이용하여 thermal column의 시나리오에 대한 정량적 자료를 산출한 결과이다. 해체작업시간은 크게 전처리 작업, 해체 작업, 후처리 작업으로 나누었다. 전처리 작업은 해체 작업을 시작하기 전에 수행되어야 할 작업으로 계측작



(1) Plasma cutting simulation



(2) nibbler cutting simulation

Fig. 3. View of the dismantling simulation for the thermal column in KRR-1.

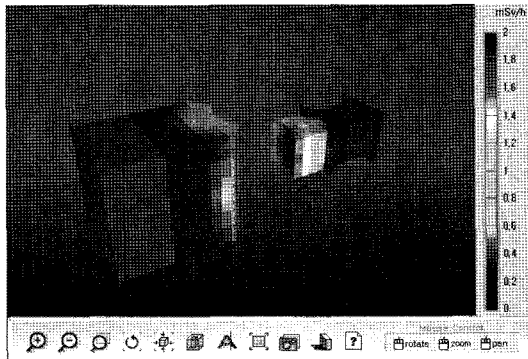


Fig. 4. Radioactivity visualization of the thermal column in KRR-1.

업이나 장비설치, 비계설치 등과 같은 작업을 말한다. 해체작업은 해체에 소요되는 작업 활동들을 말하며 후

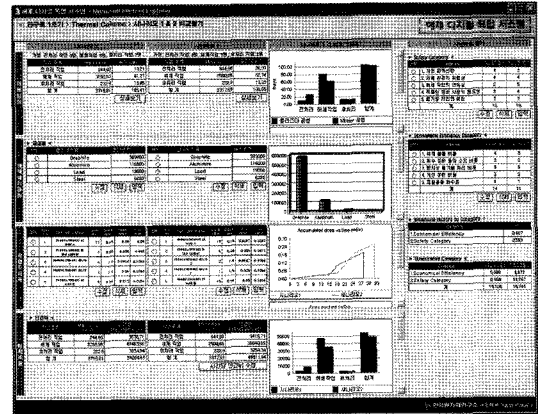
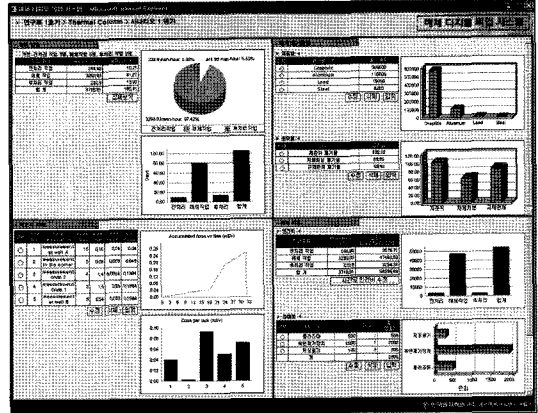


Fig. 5. Graphic user interface of the data-computing modules.

처리부는 폐기물처리, 장비철거, 정리작업 등과 같이 해체 작업후 필요한 작업을 말한다. 각 항목의 산출결과는 GUI상에서 차트와 그래프로 가시화 하였다. 해체 폐기물량은 폐기물의 재질과 준위로 구분하여 산출하였으며 준위는 저준위, 규제면제, 자체처분 등으로 구분하였다. 작업자 피폭은 작업 위치에 따른 개별 피폭량과 누적 피폭량으로 구분하여 산출하였으며 결과를 그래프로 가시화 하였다. 해체비용은 인건비, 장비비, 폐기물 처리비로 나누어 자료를 산출하여 그래프로 표현하였다.

Table 3은 AHP 방법으로 상위계층과 하위계층의 가중치와 각 요소들 간의 순위를 설문조사를 통해 산출한 결과를 나타내고 있다. 상위계층에서는 안전성이 약 52%로 안전에 대한 중요도가 가장 높은 가중치로 산출되었으며 해체비용은 32%, 해체 기술성, 사회적 수용성은 약 10%를 차지하였다. 하위 계층에서는 작업자 피폭이 1위를 차지하였고 그다음으로 폐기물 처리 비용이 2위를 차지하였다.

Table 3. Priorities and rank for attributes.

Hierarchy 1 (가중치)	Hierarchy 2	가중치	랭킹
해체비용 (0.3217)	인건비	0.0769	4
	장비구입비	0.0279	9
	폐기물 처리비	0.2166	2
안전성 (0.5161)	작업자 피폭	0.3405	1
	작업 위험도	0.1663	3
해체기술성 (0.0906)	기술의 독창성	0.0425	6
	해체기술개발 공헌도	0.0593	5
사회적 수용성 (0.0716)	대국민 홍보	0.0322	8
	대국민 이해도	0.0371	7

Table 4. Evaluation result about plasma scenario and nibbler scenario.

Hierarchy 1	Hierarchy 2	Scenario 1 (Plasma)	Scenario 2 (nibbler)
해체비용	인건비	0.0769	0.0549
	장비비	0.0171	0.0279
	폐기물 처리비	0.2166	0.1823
	sub-total	0.3107	0.2651
안전성	작업자 피폭	0.3405	0.0838
	작업 위험도	0.0588	0.0996
	sub-total	0.3994	0.1834
해체기술성	기술의 독창성	0.0225	0.0173
	해체기술개발 공헌도	0.0263	0.0171
	sub-total	0.0488	0.0345
사회적 수용성	대국민 홍보	0.0128	0.0178
	대국민 이해도	0.0183	0.0160
	sub-total	0.0311	0.0337
Total		0.7899	0.5167
Rank		1	2

Table 4는 AHP를 이용한 플라즈마 시나리오와 nibbler 공법시나리오의 평가결과를 나타내고 있다. 표를 보면 해체비용, 안전성, 해체기술성에서는 플라즈마 시나리오가 nibbler 시나리오에 비해 월등히 좋은 점수를 받았으며 사회적 수용성 측면에서는 nibbler 시나리오와 플라즈마 시나리오가 비슷한 점수를 받았다. 최종 결과로 볼 때 플라즈마 시나리오는 0.7899점을, nibbler 시나리오는 0.5167점을 받아 플라즈마 공법이 더 좋은 시나리오임을 정량적인 값으로 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 해체 시나리오 평가 자료(해체작업시간, 폐기물량 산정, 작업자 피폭, 해체비용, 방사화 가치화 등)를 산출하기 위해 해체 DMU 시스템을 개발하였다. 또한 해체 시나리오 평가를 위한 계층분석 모델을 개발하였고 정량적으로 산출된 해체자료와 해체 전문가의 설문조사 결과와 AHP 방법을 이용하여 해체 시나리오 평가를 정량적이고 논리적으로 비교평가하였다. 그리고 개발된 DMU 시스템과 해체 시나리오 평가 방법론을 연구로 1호기 thermal column의 해체 시나리오에 적용하여 평가를 수행하였다. 평가결과, 시나리오 평가항목 중 해체비용과 안전성의 점수 차이에 따라 최종 평가결과가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 그동안 해체시나리오 평가에 있어서 다분히 주관적인 평가를 통해 수행되어온 작업을 해체 DMU와 합리적인 의사결정 방법을 이용하여 신뢰성 있는 시나리오를 제시하였고, 의사결정에 있어서 고려해야 할 정성적인 요소들을 정량화시켜 의사결정자가 비교적 쉽게 비교판단 할 수 있는 시스템을 개발했다는 점에서 그 의미가 크다고 생각된다. 이번 연구는 향후 2006년 후반기에 시작될 연구로 1호기 해체사업에 해체 엔지니어링 측면에서 많은 기여를 할 것으로 기대한다.

기호설명

- T : 전체 해체기간[Day]
- T_i : 단위 작업의 소요 man-hour[Man-h]
- N : 소요 인원수[EA]
- BT_i : 기본단위시간[Man-h]
- R_i : 작업 회수[EA]
- W_i : 가중치[%]
- M : Total waste mass[kg]
- V_i : 단위 절단 폐기물 부피[cm³]
- PE : 인건비[원]
- TE : 장비비[원]
- WE : 폐기물 처리비[원]
- ALC : 평균 노임단가[원]
- M_i : 장비 단위 구입비[원]
- NOM_i : 단위 장비 대수[EA]
- D_i : 단위 폐기물 드럼 처리비용[원]
- V_{total waste} : 전체 폐기물 부피[cm³]
- V_{waste drum} : 폐기물 처리용 드럼 부피[cm³]
- P : 공극률

그리스 문자

ρ_i : 단위 절단 폐기물 밀도[kg/cm³]

참고문헌

1. Jung, K.J. Decommissioning of TRIGA mark 1&2, KAERI/RR-1798/97, 1997.
2. Park, J.H. Decontamination and decommissioning project for the nuclear facilities, KAERI/RR-2304/2002, 2003.
3. Website : <http://www.sekcen.be/visiplan>.
4. Julia, L.T. Tools for optimal waste and exposure reduction, Waste Management Conference '02, 2002, 1.
5. Vermeersch, F. Saving money and radiological doses: the VISIPLAN tool, NCL04-017, 2004.
6. Iguchi, Y. Development of a decommissioning engineering support system of the FUGEN NPS. 11th International Conference on Nuclear Engineering, 2003, 56.
7. Yoon, J.S. Digital mockup for advanced spent fuel conditioning process. Japan-Korea Workshop on Nuclear Pyroprocessing, 2005, 15.
8. Kim, H.R. The preliminary 3D dynamic simulation on the RSR dismantling process of the KRR-1&2. Annals of Nuclear Energy, 2003, 30, 1487.
9. Park, H.S. Development of animation and simulation module for evaluation of worker's dose. Waste Management Conference '07, 2007, 156.
10. Vargas, L. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. European Journal Operational Research, 1990, 48, 214.
11. Saaty, T.L. The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, New York, 1980.
12. Wind, Y.; Saaty, T.L. Marketing applications of the AHP. Management Science, 1980, 26(7), 124.
13. Saaty, T.L. Modelling unstructured decision problems : the theory of analytical hierarchies. Mathematics and Computers in Simulation, 1978, 20, 127.
14. Saaty, T.L. A scaling method for priority in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15, 234.
15. Saaty, T.L.; Vargas, L.G. The logic of priority : application in business, Energy, Health, and Transportation. Kluwer-Nijhoff Publishing, 1982.
16. Saaty, T.L. Highlights and critical points on the theory and application of the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 1994, 74, 246.
17. Saaty, T.L. Priority setting in complex problems. IEEE Transactions on Engineering Management, 1983, 3, 140.
18. Lai, V.S.; Trueblood, R.P.; Wong, B.K. Software Selection: A case study of the application of the analytic hierarchical process to the selection of a multimedia authoring system. Information and Management, 1999, 36, 221.
19. Liberatore, M.J.; Stylianou, A.C. Using knowledge-based systems for strategic market assessment. Information and Management, 1994, 27, 221.
20. National Environmental Studies Project, Guidelines for Producing Nuclear Power Plant Decommissioning Cost Estimates, AIF/NESP-036 Report, Washington 1986.