

**A Study on the Configuration of Cost Items and the Identification of Cost Affecting Factors for the Decommissioning Cost Estimation of Nuclear Research Facilities**

**원자력연구시설 해체비용 산정을 위한 비용항목 구성 및 비용 영향인자 산출 방안**

**Kwan-Seong Jeong, Dong-Gyu Lee, Kune-Woo Lee and Won-Zin Oh**

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon

정관성, 이동규, 이근우, 오원진

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

[ksjeong1@kaeri.re.kr](mailto:ksjeong1@kaeri.re.kr)

**Abstract**

The decommissioning cost estimation is the very essential procedure to establish the decommissioning plans for Nuclear Research Facilities. The cost estimation must be made in accordance with activity phase and facility installations.

This paper shows how to configuring the cost items and identifying the effecting cost factors. In the end, these methods will be utilized as a tool and technique to develop the methodology of cost estimation and calculation program.

**Key word** : Cost Items, Cost Factors, Cost Estimation, Decommissioning, Nuclear Research Facilities

**요 약**

원자력연구시설에 대한 해체비용 산정은 해체 계획 수립하는 데 중요한 작업이다. 해체비용 산정은 해체활동 단계와 해체 시설의 구성요소에 맞게 해체작업을 분류하여 계산을 해야 한다.

본 논문에서는 원자력연구시설 해체비용 산정을 위하여 해체 작업 활동을 분류하고 비용 자료의 기준이 되는 비용항목을 계층적으로 세분화하여 구성하는 방법과 작업 지연시간을 유발하는 비용영향 요인인 작업 난이도 인자에 대한 산출 방안을 마련하였다. 이렇게 함으로써 해체활동 단계 및 작업에 대한 비용 항목별 분류 및 산정이 가능할 뿐만 아니라 원자력연구시설 해체비용 산정 방법론 및 프로그램을 개발하는 데 활용할 예정이다.

중심 단어 : 비용 항목, 비용 인자, 비용 산정, 해체, 원자력연구시설

**1. 서 론**

원자력시설은 조건 및 시설에 따라 부지 특성이 다르고 원자력시설 운전정지 또는 다른 사유로

인한 운영을 종료한 후 해체 시 이에 따른 해체비용 산정 가정 등 기준이 다양하고 변화성이 많음에 따라, 해체 자료 및 비용 자료의 불확실성이 높은 게 현실이다. 따라서, 원자력연구시설에 대한 해체비용을 산정하기 위해서는 해체 시설 대상물에 대한 구성요소와 해체 작업 활동에 대한 비용 항목을 바탕으로 산정을 해야 한다. 즉, 해체활동을 수행하기 위해 필요한 작업의 분류 및 소요 자원의 선정을 바탕으로 항목별 비용을 산정하고 최종 산출된 항목별 비용을 용도 및 목적에 맞게 재구성하여 전체 해체활동에 대하여 비용을 산출하는 것이다. 이와 같이 해체 비용을 산정하기 위해서는 해체 시설 대상물에 대한 비용항목을 어떻게 구성해야 하며 또한 비용에 영향을 미치는 인자가 무엇인지를 도출하여 해체비용 구조를 완성해야 비로소 보다 정확하고 신뢰성 있는 해체비용 산정이 가능하게 된다.

이 논문에서는 원자력연구시설 해체비용을 산정하기 위한 비용항목에 대한 구성 방법과 비용에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 산출 방안을 소개하고자 한다.

## 2. 원자력연구시설 해체비용 산정 구조

### 2.1 해체비용 산정 절차

원자력연구시설에 대한 해체 비용을 산정하기 위해서는 먼저 해체 시설의 구성요소 및 오염정도를 파악하여 해체활동 단계 및 절차를 작성한다. 해체 활동 단계의 작업 내용은 계층구조 형식으로 분리 가능하고 측정 가능한 작업 활동 수준까지 분할한다.

원자력연구시설 해체비용을 산정 계산 절차로는 먼저, 해체 단위작업에 대하여 소요되는 작업시간을 바탕으로 인건비가 계산이 되고, 이때 투입되는 장비 및 재료에 대한 비용을 계산하여 전체를 합산하면 작업에 대한 비용이 계산되는 것으로 요약할 수 있다. 여기에서 가장 중요한 부분은 해체활동에 대한 비용을 산정하기 위해 비용 항목을 구성하는 부분이다.

### 2.2 해체비용 항목 분류 기준

원자력연구시설 해체 비용 산정을 위한 비용 항목 분류를 위해서는 시설의 계통 및 구조, 건축도면, 배관 및 장치 표시, 시설 운전 자료 등에 대한 기초 자료를 사전에 검토가 이루어져야 한다. 이것을 기초로 하여 시설의 구성요소와 해체 대상물에 대한 해체기법을 바탕으로 해체작업을 계층구조를 갖도록 비용 항목별로 분류하고 그룹화를 해야 한다.

다양한 해체활동을 구성하는 요소에서 해체비용 산정을 하기 위해서는 해체활동을 항목별로 분류 및 묶음이 가능하도록 상하부 계층구조를 갖는 세부 항목으로 분류를 한다. 해체 비용 항목을 분류함에 있어 여러 가지 조건과 기준에 의해 분류되고 있지만, 동일한 의미를 바탕으로 신뢰할 만한 비용 예측을 수립하는데 설명 가능한 기초를 제공하는 단위 비용인자 방법을 선택하여 해체 비용 항목을 분류를 하여야 한다.

단위 비용인자(Unit Cost Factors) 방법은 많은 해체활동 항목에 대하여 활동 추정을 단순화하기 위해서 사용하는 방법이다. 해체 작업시간을 이용한 인건비, 장비 및 재료에 대한 단위 비용 인자에서 제공된 상세한 해체활동은 투입된 비용 요소가 누락되지 않도록 보증을 해준다.

해체비용 산정을 구성하는 가장 최소 단위는 단위 비용 인자이다. 단위 비용 인자는 해체활동에 대하여 최종적으로 인건비, 재료 및 장비 비용 등으로 집계가 된다. 즉, 해체비용 단위 인자가 모여 투입자원을 만들게 된다. 해체 투입자원에 대한 단위 비용 산출 기반은 작업에 소요되는 작업시간인 Man-Hours를 바탕으로 산정한다.

해체 시설의 구성요소 및 오염정도를 파악하여 해체활동 단계 및 절차를 작성하여 이를 바탕으로 계층 구조의 형태로 작업 내용을 비용그룹, 작업그룹, 작업, 그리고 투입자원으로 나누어 구성

한다. 최하위 구성요소인 투입자원은 주로 인건비, 장비 및 재료에 대한 비용, 기타비용으로 구성하여 계산을 한다. 계산은 투입자원을 계산하여, 작업, 작업그룹, 비용그룹의 순으로 상향식 비용을 계산한다. 최하위에 위치해 있는 투입자원은 인허가 및 지원활동과 같은 비 물리적인 해체활동과 철거 및 제거와 같은 물리적인 해체활동으로 나누어 계산을 한다.

### 2.3 원자력연구시설 해체비용 항목 그룹 설정

원자력연구시설을 해체하는 데 소요된 비용을 산정하기 위하여 해체 비용 항목을 개별 해체활동에 대한 분석이 가능하고 해체 작업을 그룹화를 할 수 있도록 구조를 이루어야 한다. 이와 같은 기준으로 해체 사전계획부터 최종 폐기물 처리까지의 모든 해체활동에 대한 비용 항목이 포함되어 산정될 수 있도록 비용항목을 서로 직간접 관계를 갖는 논리적인 묶음으로 범주화하고 해체 과정을 반복적이고 유사한 일련의 작업으로 나누어 비용 항목을 6개로 그룹화 하였다.

설정된 원자력연구시설 해체비용 항목 그룹은 OECD/NEA 표준 해체비용 항목을 참고로 하여 향후 해체비용 결과를 다른 나라의 시설과 상호 비교가 용이하도록 고려하였으며, 또한 국내 원자력연구시설의 조건을 고려하여 비용 항목 그룹을 재구성하였다[1]. 해체비용 항목 그룹은 표 1과 같이 총 6개의 비용 그룹(Cost Groups)과 하위 비용 작업그룹(Tasks Groups), 비용 작업(Tasks)으로 하위 세분화 된다.

- 그룹 1 - 해체 계획 및 프로젝트 관리 활동 : 해체 프로젝트를 수행하기 위한 준비활동 및 현장 지원과 관련된 활동
- 그룹 2 - 시설 운전중지 활동 : 시설의 운전 정지와 관련된 활동
- 그룹 3 - 해체 운영, 제염 및 제거 활동 : 물리적인 해체작업을 수행하기 위한 사전준비에서 시설 해체활동에 대한 활동
- 그룹 4 - 폐기물 처리 및 관리 활동 : 해체 시설 운전 중 폐기물 취급, 이송, 제염 및 처리와 관련된 활동
- 그룹 5 - 부지 복원 활동 : 토양 제염, 잔류방사능 측정 및 평가, 부지 조경에 대한 활동
- 그룹 6 - 기타 활동 : 해체 전체 기간 중 세금, 보험 등 기타 주변 비용

해체비용 항목 그룹은 시설에 대한 해체 단계에 따라 구성된 것이다. 실제 해체 비용을 산정하기 위해서는 그림 1과 같이 각 비용 그룹(Cost Groups)을 작업에 맞게 작업그룹(Tasks Groups), 작업(Tasks), 그리고 투입자원(Resources)으로 하부 계층구조로 세분화를 하여야 한다. 투입자원은 인력, 장비 및 재료로 구성된다. 각 비용 그룹은 투입자원의 구성요소의 특징에 따라 크게 일반 해체작업그룹과 물리적인 해체 작업 그룹으로 나눌 수 있다.

일반 해체 작업 그룹은 인허가 및 사전 준비와 같은 해체활동을 말하며, 이 때의 투입자원에 대한 비용 구성은 인건비 및 재료비로 주로 구성이 된다. 여기에 해당되는 비용 항목 그룹은 그룹 1과 그룹 6이 해당된다.

물리적인 해체 작업 그룹에 대한 비용 산정은 보다 공학적이고 정확성을 높이고 작업시간을 지연시키는 요인을 보정해주는 작업난이도 인자를 적용하기 용이하도록 최하위 작업내용을 ‘일반작업’, ‘측정’, ‘제염’, ‘철거 및 제거’, ‘폐기물 취급’으로 구분한다. 여기에 해당되는 비용 항목 그룹은 그룹 2, 그룹 3, 그룹 4, 그룹 5가 해당된다. 이렇게 구분한 이유는 일반적으로 해체작업은 인력투입으로 인한 비용이 가장 많이 발생하기 때문에 인건비 계산의 기본이 되는 단위인자인 작업시간을 보다 세밀하게 하기 산출하기 위함이다.

<ul style="list-style-type: none"> <li>○ “해체 계획 및 프로젝트 관리 활동” 비용 그룹               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 해체 사전 조치                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 해체 계획 및 설계</li> <li>▷ 인허가</li> <li>▷ 방사선학적 조사</li> </ul> </li> <li>□ 장비 및 재료 조달                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 계측 분석용 기기 및 재료</li> <li>▷ 해체용 기기 및 재료</li> <li>▷ 폐기물 관리용 기기 및 재료</li> <li>▷ 일반 공구 및 재료</li> </ul> </li> <li>□ 실험 및 임시 시설                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 설치 및 운영, 제거</li> </ul> </li> <li>□ 프로젝트 관리 및 지원</li> <li>□ 주 계약자 선정</li> </ul> </li> <li>○ “시설 운전 중지 활동” 비용 그룹               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 시설 설비 정지 및 정밀 조사</li> <li>□ 시설 및 주변 환경 방사선학적 조사</li> <li>□ 운전 장비 격리 및 제거</li> <li>□ 오염 제거 및 처리</li> <li>□ 시설 구성요소 격리 및 제거</li> <li>□ 장비 및 재료 조달                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 계측 분석용 기기 및 재료</li> <li>▷ 해체용 기기 및 재료</li> <li>▷ 폐기물 관리용 기기 및 재료</li> <li>▷ 일반 공구 및 재료</li> </ul> </li> <li>□ 실험 및 임시시설                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 설치 및 운영, 제거</li> </ul> </li> <li>□ 보건 및 안전</li> </ul> </li> <li>○ “해체 운영, 작업 및 제거 활동” 비용 그룹               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 실험 및 임시 시설                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 설치 및 운영, 제거</li> </ul> </li> <li>□ 장비 및 재료 조달                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 계측 분석용 기기 및 재료</li> <li>▷ 해체용 기기 및 재료</li> <li>▷ 폐기물 관리용 기기 및 재료</li> <li>▷ 일반 공구 및 재료</li> </ul> </li> <li>□ 부지 운영 지원 및 감시</li> <li>□ 주기적인 방사능 및 환경 조사</li> <li>□ 보건 및 안전</li> </ul> </li> <li>○ “폐기물 처리 및 관리 활동” 비용 그룹               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 폐기물 처리 설계 및 계획 수립</li> <li>□ 실험 및 임시시설                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 설치 및 운영, 제거</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ “폐기물 처리 및 관리 활동” 비용 그룹 (계속)               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 장비 및 재료 조달                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 계측 분석용 기기 및 재료</li> <li>▷ 해체용 기기 및 재료</li> <li>▷ 폐기물 관리용 기기 및 재료</li> <li>▷ 일반 공구 및 재료</li> </ul> </li> <li>□ 보건 및 안전</li> <li>□ 시설 운전 중 발생한 폐기물 처리                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 사전 준비</li> <li>▷ 처리</li> <li>▷ 포장</li> <li>▷ 폐기물 저장 및 제염</li> <li>▷ 수송</li> </ul> </li> <li>□ 해체폐기물 처리                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 해체 방사성폐기물 처리]</li> <li>▷ 해체 비방사성폐기물 처리</li> </ul> </li> <li>□ 해체폐기물 Packing                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 해체 방사성폐기물 포장</li> <li>▷ 해체 비방사성폐기물 포장</li> </ul> </li> <li>□ 해체폐기물 이송                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 해체 방사성폐기물 이송</li> <li>▷ 해체 비방사성폐기물 이송</li> </ul> </li> <li>□ 해체폐기물 저장                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 해체폐기물 저장시설 준비</li> <li>▷ 해체 방사성폐기물 저장</li> <li>▷ 해체 비방사성폐기물 저장</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ “부지 복원 활동” 비용 그룹               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 부지 최종 조사 및 재구성</li> <li>□ 최종 철거 및 복원</li> <li>□ 실험 및 임시시설                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 설치 및 운영, 제거</li> </ul> </li> <li>□ 장비 및 재료 조달                   <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 계측 분석용 기기 및 재료</li> <li>▷ 해체용 기기 및 재료</li> <li>▷ 폐기물 관리용 기기 및 재료</li> <li>▷ 일반 공구 및 재료</li> </ul> </li> <li>□ 보건 및 안전</li> </ul> </li> <li>○ “기타 활동” 비용 그룹               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 인력 부대 경비</li> <li>□ 일반관리비 및 간접비</li> <li>□ 세금 및 보험료</li> <li>□ 에너지 소비 및 예비비</li> </ul> </li> </ul>
--	--

표 1. 원자력연구시설 해체비용 항목 그룹

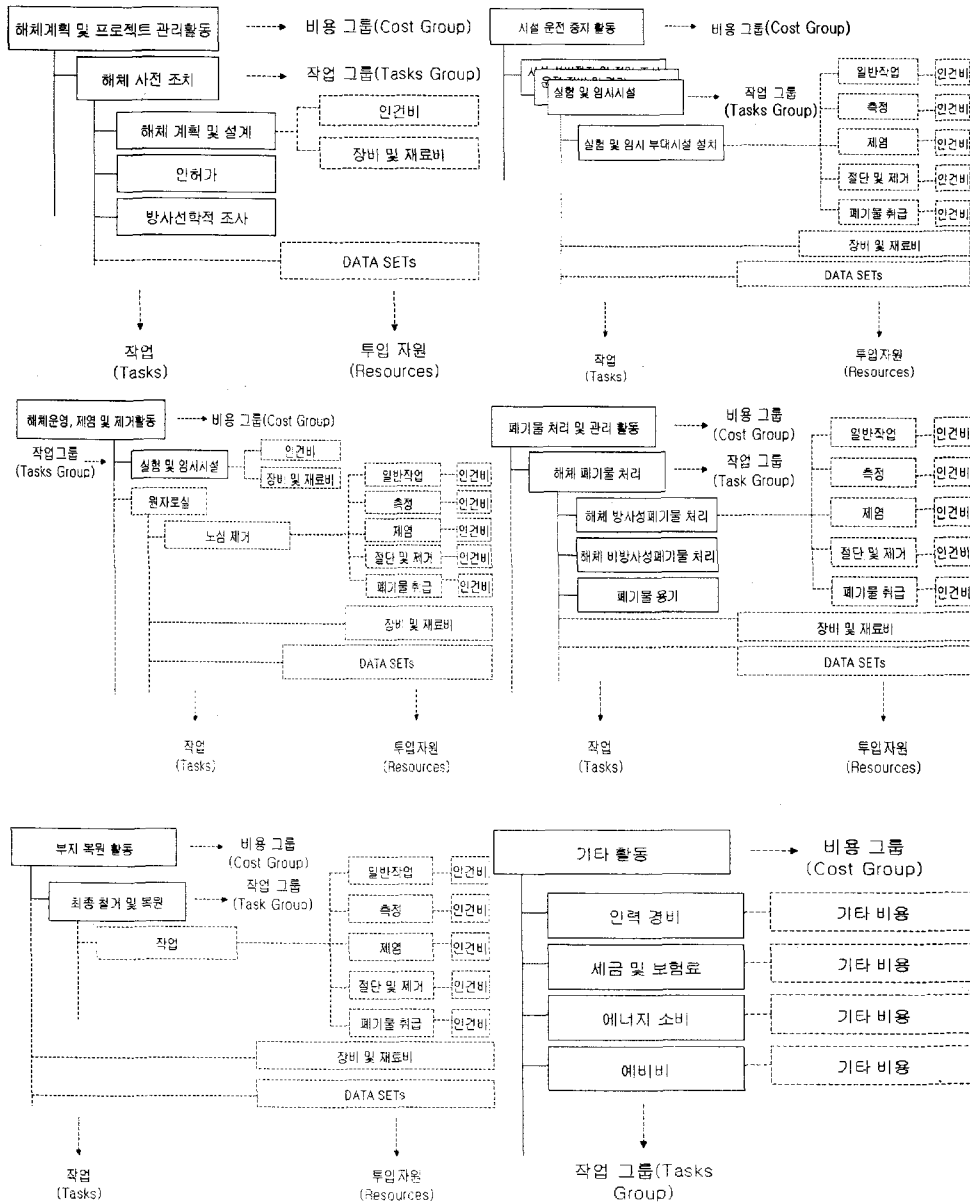


그림 1. 원자력연구시설 해체비용 항목 그룹별 계층 구조

## 2.5 해체비용 산정을 위한 구성요소 정의

해체비용 항목 구조의 최하위로 구성되는 투입자원(Resources)에 대한 해체비용 산정 결과는 크게 인건비, 장비 및 재료비, 그리고 기타비용으로 구분할 수가 있다. 여기서 인건비는 단위 작업 당 소요되는 작업시간을 바탕으로 계산한다. 단위 작업 당 소요되는 작업시간이란 해체 대상물의 일정한 규격 당 소요되는 기본 작업시간에 일정 규모로 곱하여 산출되는 하나의 해체 대상물에 총 소요되는 작업시간을 말한다. 단위 작업 당 소요되는 작업시간은 Man-Hours를 기반으로 계산된다.

이 작업 시간은 해체비용 항목 그룹의 최하위 단계인 작업(Tasks)의 투입자원(Resources)을 구성하게 된다.

해체비용 항목 단위인자인 해체 대상물에 소요되는 작업시간을 산출하는 방법은 다음과 같다.

- 해체대상물을 재질별(철재/콘크리트/목재/기타류) 및 표면의 형태(바닥, 벽, 천장)로 분류
- 해체대상물을 크기(길이 또는 직경) 및 부피(또는 무게)별로 분류
- 해체대상물의 부피(또는 무게)는 폐기물량 산출에 이용
- 해체대상물을 모양 및 형태에 따라 선형, 구형, 실린더형, 직사각형으로 구분
- 해체대상물을 최소 규격 단위당 소요되는 기본 작업시간을 생성
- 기본 작업시간에 일정 크기단위로 곱하면 대상물에 소요되는 총 작업시간 산출

이렇게 산출된 작업시간에 인건비 단가를 곱하면 인건비가 계산이 된다. 장비 및 재료에 대한 비용 산정은 구입 수 및 대여 기간을 적용하여 계산을 한다. 폐기물 처리 작업에 대한 비용 산정은 폐기물 형태의 처리 과정에 따라 저장 용기가 결정되면 생산된 용기에 대한 용기 단가, 용기 관리, 방사선학적 특성화 비용, 그리고 이송 및 저장 비용을 계산한다.

해체비용 항목 그룹 및 세부 구성요소를 이루는 작업그룹, 작업에 대한 비용 산정 계산은 투입 자원(Resources)에서 계산을 시작하여, 작업(Tasks), 작업그룹(Tasks Groups), 비용 그룹(Cost Groups) 순으로 계산이 되며 다음과 같이 비용 산정 계산식을 함축하여 나타낼 수가 있다.

- 총 해체 비용 =  $\sum$  (비용 그룹, Cost Groups)
- 비용 그룹 =  $\sum$  (작업 그룹, Tasks Groups)
- 작업 그룹 =  $\sum$  (작업, Tasks)
- 작업 =  $\sum$  (투입자원, Resources)
- 투입자원 = 인건비 + 장비 및 재료비 + 기타 비용

## 2.6 해체비용 산정을 위한 비용 영향 인자 도출

작업자가 해체작업을 수행 시 해체 작업 조건이 어렵거나 위험한 환경에서의 작업과 관련하여 해체 작업 시간을 지연시키는 요인이 발생한다. 이렇게 해체대상물에 대한 작업 조건이 어려움으로 인하여 추가 작업시간을 유발시켜 궁극적으로 비용을 증가시키는 요인을 비용 영향 인자라고 하며 작업난이도 인자라고도 말한다.

원자력발전소 시설에 대한 해체 비용 산정 시 사용하고 있는 작업난이도 인자와 우리나라에서 해체 사업이 수행되고 있는 연구용 원자로 2호기의 해체 현장자료를 이용하여 다음과 같이 작업 시간에 영향을 주는 작업난이도 인자를 도출하였다[2].

- Height/Accessibility : 해체 대상물이 높은 위치 및 제한된 공간 그리고 지하 및 수중에 있는 경우의 해체 작업
- Personal Protection : 작업자 보호 장비 착용 유무로 인한 해체 작업
- Structure : 독립된 부품(배관 등)과는 달리 구조물(콘크리트 벽 등)에 대한 해체 작업
- Complexity : 여러 개의 구성요소로 조합된 계통 및 기기에 대한 해체 작업
- Utilities : 대상물에 대하여 부가적인 시설을 설치해야 하는 해체 작업
- Radiation/ALARA : 해체 대상물의 방사선학적 오염정도에 따른 해체 작업

작업난이도 인자의 적용 방법은 해체대상물에 대한 작업 시 소요되는 작업시간에 영향을 미침으로 인하여 작업을 지연 및 어려움을 주기 때문에 그 정도의 가중치를 %단위로 해체 대상물에 소요되는 작업시간에 직접 곱하여 추가 작업시간을 산출하여 인건비를 계산하는데 직접 사용한다. 도출된 작업난이도 인자는 해체대상물 및 작업 조건에 따라 일부 적용 및 전부 적용이 가능하다.

해체 비용 산정에 추가로 고려해야 되는 부분은 정해진 해체활동 범위 내에서 예측하지 못한 해체 작업의 발생으로 인하여 비용이 발생할 가능성이 있다는 점이다. 즉, 비용 산정 결과에 추가적인 비용을 고려해주는 보정비용에 대한 필요가 발생한다. 아래 표는 현재 원자력발전소 해체비용 산정에 사용되고 있는 자료들을 조사 및 분석한 주요 해체작업별 보정 비용 및 가중치이다. 표의 가중치는 각 해당 해체작업에 대한 작업시간에 적용하는 게 아니고 최종 산출된 비용 결과에 %단위로 곱하는 수치이다.

Decommissioning Activity Category	Weighting(%)
· Engineering	15
· Utility and Documents of contracts Costs	15
· Decontamination	50
· Contaminated Component Removal	25
· Contaminated Concrete Removal	25
· Steam Generator/Pressurizer/Circulation Pump Removal	25
· Reactor Removal	75
· Reactor Packaging	25
· Reactor Shipping	25
· Reactor Burial	50
· Conventional Radwaste Packaging	10
· Conventional Radwaste Shipping	15
· Clean Component Removal	15
· Supplies/Consumables	25

표2. 원자력시설 해체 작업별 비용 보정 가중치

### 3. 결론

본 논문에서는 원자력연구시설 해체비용 산정을 위하여 해체 작업내용에 대한 분류를 바탕으로 한 비용 항목을 구성하는 방법과 작업자의 해체 작업시간에 직접적으로 영향을 미치는 인자 산출 방안을 살펴보았다. 해체활동을 비용항목별로 구성하여 그룹화 함으로써 해체 작업에 대하여 항목별로 비용 산정 및 분석이 가능해 졌고 주요 비용 영향에 분포를 보다 명확하게 분석할 수 있게 되었다. 하지만, 원자력시설의 해체활동 작업에 있어서 가장 많은 영향이 미치는 방사선학적 요인에 대한 영향 정도에 대한 불확실성으로 인하여 해체비용 산정 결과가 큰 차이를 보일 수가 있다는 여러 문헌에 비추어볼 때 이에 대한 충분한 고려를 하지 못한 점이 아쉬운 점이다. 향후, 이 부분에 대해서는 지속적인 자료 확보 및 분석을 통하여 추가적으로 보완할 예정이다. 또한, 해체 비용 항목과 영향 인자간의 상호 관계성을 분석하여 원자력연구시설 해체비용 전산 프로그램 개발에 사용되는 비용 자료 파일 구조 설계와 내부 알고리즘 개발에 직접 활용할 예정이다.

### 4. 감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 주관하는 원자력 중·장기 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

### 참 고 문 헌

1. A Propose Standardized List of Items for Costing Purposes, OECD/NEA, 1999
2. Guidelines for Producing Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning Estimates, Atomic Industry Forum/National Environmental Studies Project-036, Vol. 1 and 2, 1986