

원전 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사 리스크 분류체계 구축: 구조적 / 작업 리스크를 중심으로

김 별¹, 이주성^{2*}, 안용한³

Development of Risk Breakdown Structure of Nuclear Power Plant Decommissioning Project: Focusing on Structural Damage / Work Process Risks

Byeol Kim¹, Joo-Sung Lee^{2*}, Yong-Han Ahn³

Abstract: The purpose of this study is to deduct the structural damage / work process risks factors which can be occurred during the decommissioning in the NPP containment concrete structure. To achieve these purpose, risk profile specified in the construction industry is analyzed, and the work process of NPP decommissioning and the construction project were matched based on the similarity of each works. Accordingly, human and physical risk factors are classified. Finally, the risk associated with the building structure and work process was classified as per their process activities, and risk typology explaining the disaster which put the structure, equipments, machine and workers in serious danger was developed.

Keywords: NPP(Nuclear Power Plant), Decommissioning, Dismantling, D&D, Hazard, Risk factor

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 가동 연수가 30년 이상된 원전이 전체의 51%에 육박하면서 본격적인 노후화 단계로 진입하였다. 원자로는 설계수명에 다다르면 안전성을 평가하여 계속운전을 하거나 영구정지 되는데 이처럼 영구정지가 결정된 사용후핵연료 인출 및 이전, 냉각재 배수, 제염 등 원자로 해체를 위한 준비를 하게 된다. 여기서 원자로 해체란 ‘효용가치를 상실한 원자력 시설을 주변 환경으로부터 안전하게 영원히 퇴출하기 위해 취해지는 모든 기술적·관리적 활동’으로 정의한다. 원자로 해체는 최소 몇 년 이상의 시간이 소요되는 장기 프로젝트로서, 그 기간 중에 다양한 해체 폐기물이 대량으로 발생한다. 상대적으로 단기간에 대량으로 발생하는 해체폐기물을 적절히 분류, 처리하지 못하면 상당한 처분비용부담이 뒤따르며 또한 방사능을 띤 원전 계통과 기기를 해체 할 때 작업자의 방사선 피폭은 물론 환경으로의 방사능 누출이 발생할 수

있다. 이에 따라 각 국의 원전 관련 주요 기관 및 부처는 원전의 안전한 해체를 위한 지침, 가이드라인 등을 수립하여 운용하고 있으며, 특히 해체단계에서 발생할 수 있는 리스크에 대한 사전식별을 통한 대응전략 역시도 마련해놓고 있다.

우리나라의 경우, 현재 24기의 원자력발전소가 가동 중이며 2029년까지 12기의 설계수명 만료가 예상된다. 그 중 국내 첫 원자력발전소인 고리 원전 1호기가 지난 6월 영구 정지가 결정되어 해체과정 중에 있다. 하지만 해외의 주요 원전 선진국에 반해, 상업용 원자로 해체 사례가 전무하고 이를 관리하기 위한 개략적인 법규 및 제도만이 시행되었을 뿐 실제 수행을 위한 지침, 가이드라인, 절차서 등에 대한 세부지침은 부재한 상황이다.

원전 제염해체공사는 방사화된 콘크리트 구조체에 근접하여 작업해야하는 특성을 갖고 있어 그로인한 잠재적인 위험요소 및 손실요인이 많다고 할 수 있다. 특히, 제염해체공사는 투입되는 자원, 소요되는 시간이 증가함에 따라 더 많은 리스크 요인이 잠재되어 있다고 할 수 있다. 따라서, 상업용 원자로 해체 사례가 전무한 제염해체공사의 리스크 식별을 통한 리스크 관리는 사업의 안전한 완료를 위해 필수적으로 수행되어야 할 업무이다.

대부분의 원전 관련 주요 기관 및 부처는 해체과정 중 잠재된 리스크 분석을 체계적으로 분석하여 관리하고 있다. 하지만 방사선학적 리스크에 치중되어 제염해체작업 중 발생할 수 있는 구조적 재난재해 및 위험요소는 크게 고려하지 않고

¹학생회원, 한양대학교 건축시스템공학과 석사과정

²정회원, 한양대학교 건축공학과 공학박사

³정회원, 한양대학교 건축학부 부교수

*Corresponding author: neowings@naver.com

Department of Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, South Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2018년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

있다. 또한 재난 및 재해 그리고 리스크 분류체계는 작업의 특성(작업프로세스, 활용장비, 작업위치 등)별로 정립되어 있지 않아 실제 해체공사를 위한 매뉴얼로 활용하기에 무리가 있다. 이와 관련된 내용을 미국 에너지부(DOE)는 보고서를 통해 건설해체공사와 유사한 특성을 갖는 원전 제염해체공사에서 구조적 리스크 관리는 매우 중요하다고 언급하고 있다.

이에 따라 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사의 건설해체공사와의 유사성을 기반으로 작업의 특성별로 리스크 분류체계를 구축하는 것은 원자력 발전소 해체공사 리스크 관리에 필수적이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 원전 제염해체공사의 리스크 분류체계 구축을 목표로 하였으며, 원전 제염해체공사 프로세스 중 구조적·작업 재난 및 재해의 빈도가 가장 높은 차폐 콘크리트 구조물 해체공사를 대상으로 하였다.

이를 위하여 기존 국내에서 수행된 바 있는 연구용 원자로 해체철거 공사 사례와 원자로 해체철거공사 WBS 시안 개발 사례 등의 기존 연구사례를 기반으로 원전 차폐 콘크리트 구조물의 제염해체공사 공정을 도출하였다.

이와 함께, 기존의 국내외 원자로 제염해체 관련 연구가 방사능·비방사능학적으로 치중되어 있으며 건설공사 관점의 리스크 관리가 미비한 점을 고려하여, 건설 분야에서 연구되고 있는 건설공사 위험요소 프로파일을 기반으로 제염해체공사의 공정별 구조적, 해체 작업 리스크 요인을 도출하였다.

원전 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사의 공정별 특성을 고려하여 발생 가능한 물적리스크를 건설공사의 공정별 리스크와 매칭하여 원자로 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사의 공정별 리스크를 새롭게 도출하였다.

특히, 공정별 리스크는 공정별로 발생 가능한 구조적·작업 측면의 물적리스크를 우선 도출하였다.

전문가 인터뷰를 통하여 도출된 공정별 물적리스크를 검증하고 주요 공정프로세스와 그에 따른 리스크를 선정하여 공정에 미치는 영향을 파악하여 시사점을 도출한다.

2. 이론적 고찰

2.1 원전 해체의 정의

국가 또는 발전소에 따라 상황이 매우 다르지만 통상적으로 원자력발전소는 30~60년 정도 가동된다. 어떤 시점에 이르르면 장기간 가동에 따른 설비의 노후화, 기술적 안전성 확보 곤란, 경제성 저하, 정치/사회적 이유 등 여러 원인에 의해 더 이상 전력을 생산하지 않고 영구적으로 가동중지를 하게 되

는데 그 다음 과정이 해체이다.

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 정의에 따르면 해체란 “시설에 적용되는 규제 요건의 일부 또는 전부를 해제하기 위해 취해지는 행정적 및 기술적 조치”이다.

즉, 해체란 단순히 시설의 철거만을 의미하는 것이 아니라 해체계획 수립, 인허가, 오염 조사, 제염, 철거, 폐기물 처리, 부지 복원, 부지에 대한 규제 해제 등의 일련의 과정을 포괄하는 것이다. 한때 ‘폐로’라는 용어도 사용되었으나 현행 원자력안전법에 ‘해체’라는 용어를 사용하고 있다.

미국 원자력산업포럼(Atomic Industrial Forum)에서는 원전의 해체 방안별로 해체 단계를 즉시해체 3단계 지연해체 5단계, 영구밀봉 6단계로 구분하고 있으며, 미국 전력연구원(EPRI)에서는 원전해체를 ① 해체 전략 단계 ② 조직 전환 단계 ③ 시설 전환 단계 ④ 최종 해체 단계 4단계로 분류하고 있다.

2.2 리스크 관리 개요

리스크란 사전적인 의미로 예측하지 못한 어떤 사실에 의해 목적물에 상해, 손상, 손실 등의 부정적인 영향을 끼치는 잠재가능성을 의미하는 것으로 위험(Danger)과는 달리 리스크를 수용하여 적절한 관리를 할 경우 그에 상응하는 보상, 기회, 이익 등 긍정적인 가능성으로 전환될 수 있다. 제염해체공사에서 리스크란 공사의 안전한 완료에 불리하게 작용하는 잠재적인 위험요소 및 손실요인이라고 정의할 수 있다.

제염해체공사에 영향을 미치는 불확실한 사건 및 상황을 사전에 인지, 분석, 대응 모니터링하여 사업의 성공을 방해하는 리스크 요인들을 최소화 시키고 기회요인을 극대화함으로써 전체 원전 해체사업의 시간적, 금전적 손실을 최소화하고 성공적으로 안전한 사업 완수를 위한 관리방안이다.

제염해체공사를 수행하기 위해 방사화 범위가 불확실한 구조체에 근접하여 해체공사를 완료하는 특성을 갖고 있어 그로 인한 잠재적인 위험요소 및 손실요인이 많다고 할 수 있다. 특히, 투입되는 인력, 소요되는 시간이 증가함에 따라 위험도는 기하급수적으로 늘어난다. 따라서, 원전 해체 사업의 안전한 완료를 위해 잠재적인 위험요소 및 불확실성을 최소화 하려는 노력이 필요하다.

위험요소 및 불확실성을 저감하기 위한 리스크 관리의 주요 업무는 일반적으로 리스크 요인(Factor)에 대해 인지한 후 원인을 분석하고 그에 대한 대응방안을 수립하여 조치를 취하고 조치사항에 대한 이행여부를 확인하여 리스크의 저감 정도를 모니터링 하는 5단계의 절차로 이루어진다. 이와 같은 5단계 중 효과적 리스크 관리를 위해서는 사업의 성격 및 특성에 따른 리스크 요인을 식별하는 단계가 중요하다.

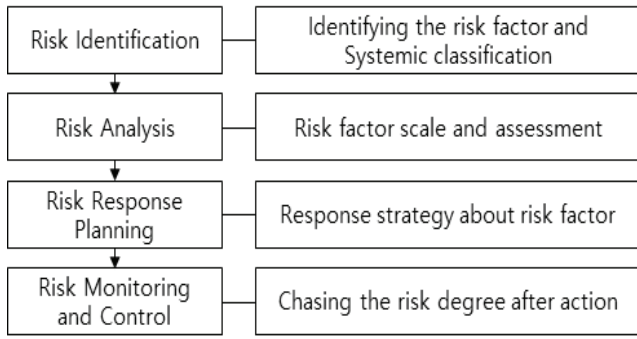


Fig. 1 Risk Management Process (PMBOK)

2.3 원전 해체공사 리스크관리 요소

2.3.1 국제기구(IAEA)

국제원자력기구(IAEA)에서는 대중 및 작업자와 환경을 보호하고 피해를 범하지 않도록 하는 최소한의 해체계획 수립을 위한 작성지침을 정의하고 있다. Table 1은 IAEA가 규정하는 안전관리의 위험요소 항목이다. 다양한 측면을 고려한 지침으로 대부분의 원자력 선진 국가들은 이 지침을 바탕으로 안전관리체계를 수립하고 있다.

Table 1 IAEA Risk Factor Classification

No	Hazard
1	Radiological hazards
2	Fire/explosion hazards
3	Electrical hazards
4	Non-ionizing radiation hazards
5	Chemical/toxic hazards
6	Physical hazards
7	Working environment hazards
8	Human/organizational hazards
9	External hazards/initiating events
10	Other hazards

하지만 제염해체 기술과 공법이 다양하며 불확실성이 수반되기 때문에 원전 제염해체공사에 앞서 세부항목 수립이 필수적이다. 또한, 원전 제염해체공사는 방사화된 구조체에 근접하여 작업하는 특징이 있기 때문에, 다양한 방사선학·비방사선학적 제한요소 하에서 작업자가 해체공사를 수행하며 이로 인해, 붕괴, 낙석, 폭발, 파손 등의 구조적·작업적 위험요인에 노출되게 된다.

이에 반해, 제염해체공사의 수행계획을 정의하는 해체계획서의 경우, 안전성 평가 및 관리를 위한 계획이 기재되어야 하는데, 대부분의 국가 및 기관은 IAEA의 안전성 평가지침을 기반으로 규정을 마련하고 준수하기 때문에 건설 공사적 관점에서의 안전성에 대해서는 주요한 요인으로 인식하지 않고 있다.

2.3.2 국내

국내에서는 「원자력안전법」 제28조(발전용원자로 및 관계시설의 해체)와 동법 시행규칙 제26조(원자로시설의 해체계획 승인신청)에서 원자로 해체와 관련하여 규정하고 있다. 하지만 이마저도 해체계획서 내에 간략한 안전관리 계획 작성만 의무화되어 있는 실정이다. 이에 따라 원전 해체공사를 수행하는 사업자는 자의적인 해석과 필요조건에 근거한 해체계획과 안전성 평가계획을 수립하게 되며, 해체공사에서 발생할 수 있는 구조적 위험과 작업 위험에 대한 대응이 어려워질 수밖에 없다.

2.4 건설산업 리스크 요인

본 연구의 경우 건설산업분야에서 규정하는 작업별 위험요소 프로파일을 분석하고 원전 제염해체공사와의 유사성을 기반으로 리스크 분류체계를 구성한다.

Table 2는 건설산업의 물적피해 항목으로 공사 시에 발생할 수 있는 다양한 Hazard로 인해 구조물 자체 및 공사를 위해 활용되는 가설 객체와 같은 위험발생객체에 끼칠 수 있는 재난, 재해 등의 직접적 피해를 의미한다.

Table 2 Risk of Construction Industry

Category	Explanation
Crack	A crack is a very narrow gap between two things, or between two parts of a thing
Fall rock	A sudden falling rocks from an upright position caused by blasting, etc.
Fall	An object falls from high to low and inflicts a person, or falls on the foot by missing a holding object.
Collapse	A phenomenon of building destruction and collapse
Fly	In case a flying or falling object becomes the main agent and hits a person
Scatter	Dust, such as sludge, that is discharged directly into the atmosphere without passing through a constant outlet during decommissioning
Conduct	In case a person falls on an obstacle such as a floor or a standing object (ladder, etc.) collapses and crashes with a person
Downfall	State in which the operator falls during the operation
Collision	The phenomenon of objects interacting with each other for a relatively short period of time.
Subsidence	A phenomenon in which the ground or structure has subsided
Detach	In case of separation by loose connections, etc.
Demolish	Physical damage to objects or tissues under stress
Break	External force, especially when cut under tensile force
Damage	Any permanent deformation caused by external force applied to the object.
Fire	In case of fire

이어서 건설산업의 물적피해 항목을 제염해체공사에서 일어날 수 있는 물적피해로 구체화하기 위하여 국내 원전해체

프로젝트와 구조 분야의 경험이 있는 실무진 및 연구기관의 전문가 5인에 대해 인터뷰를 진행하였다(Table 3).

Table 3 Composition of Expert Interviews

Career	5 to 10 years	10 to 15 years	15 to 20 years
The number of people	1 person	3 persons	1 person

그룹미팅 및 인터뷰를 통해 의미가 중복되는 항목을 결합·제거하고 항목별 개념을 구체화하는 과정을 거쳐 제염해체공사 작업 중 발생가능한 물적피해 요인을 도출하였다(Table 4). 도출된 항목은 10개 항목으로 구성되었다.

Table 4 Risk of Decommissioning Work

No.	Category	No.	Category
1	Fall rock	6	Downfall
2	Fall	7	Collision
3	Collapse	8	Detach
4	Fly	9	Damage
5	Conduct	10	Fire

본 연구에서 낙석은 원전 차폐 콘크리트 해체공사의 주요 공정인 콘크리트 절단작업 시 와이어 쏘우 혹은 굴삭기 사용 시 빈번하게 발생할 것으로 예상되는 리스크이다. 이와 다르게 낙하는 콘크리트 블록을 제외한 다른 물체가 높은 곳에서 낮은 곳으로 떨어져 사람을 가해한 경우나 발에 떨어진 경우를 말한다.

붕괴는 응력분포의 집중 및 구조적 결함 등에 의해 차폐벽이 무너져 내리는 것을 의미한다. 방사화된 콘크리트 구조물의 붕괴가 발생한다면 작업자의 안전과 밀접하게 연관된 방사선/비방사선학적 등의 더 큰 재해를 발생시킬 수 있기 때문

에 구조적 관점에서의 철저한 관리가 필요한 리스크이다.

지반이나 구조물이 가라앉은 현상을 침하라고 하며, 건설공사에서는 터널 굴착 중 지반보강이 불충분한 경우 발생할 수 있으나 원전 차폐 콘크리트 제염해체공사에서는 가능성이 낮으므로 제외하고 고려한다.

물체에 외력이 가해져 조금이라도 영구 변형이 생겼을 경우 파손이라 정의하며 건설공사에서는 파손의 발생이 빈번할 수 있지만 원전 제염해체공사에서는 빈도가 낮을 것이라 예상되며 파괴, 파단, 파손 항목의 의미가 중복되어 파손항목으로 결합하였다.

불이 나는 경우를 화재라고 하며 Handy Grinder 등 전기를 이용하여 작동하는 장비를 사용하는 경우 발생할 수 있다.

3. 원전 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사의 공정별 구조적·작업 리스크 분류체계 구축

3.1 원전제염해체 공정 분류

WBS(Work Breakdown Structure, 역무분류체계)란 “사업 목표를 달성하고 요구되는 성과물을 생산하기 위해 수행되는 모든 역무의 성과물에 기반한 계층적 분류”라고 정의한다.

광범위한 리스크 중 원전 차폐 콘크리트 구조물의 제염해체공정에 적합한 리스크를 식별하고 구체화하기 위해 WBS를 구성하였다. 역무 분류의 기준은 Fig. 2와 같이 사업의 흐름에 따른 관리가 이루어지도록 프로젝트 단계별 분류체계를 수립하였다.

대분류(Level 1), 중분류(Level 2), 소분류(Level 3)의 3단계로 구성하였다. Level 1은 원전 차폐 콘크리트 구조물의 유닛을 구분하였고 Level 2는 각 유닛에서 수행하는 주요 업무를 나열하였다. Level 3은 Level 2에서 나열한 업무의 특성(작업

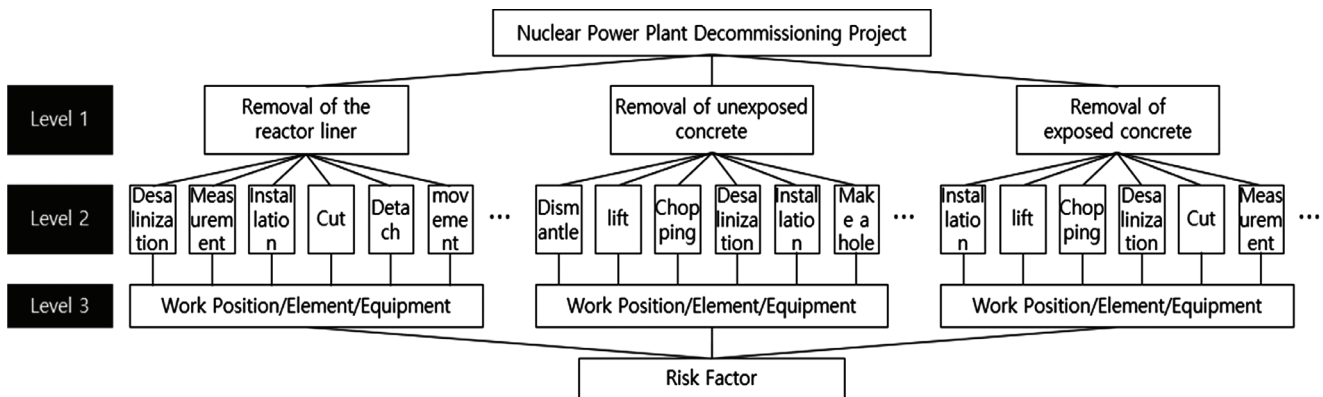


Fig. 2 WBS Organization of Decommissioning and Dismantling Project

위치/요소/작업장비)의 세부내용을 나타낸다. Risk Factor은 업무의 특성을 반영한 리스크 도출을 위해 Level 2 와 Level 3 와 연결하여 분석하였다.

Table 5는 2005년에 완료한 연구로 2호기 해체공사 WBS이며, 원전해체공사 literature review를 통해 도출한 것이다.

구조적, 해체 작업적 측면에서 발생할 수 있는 리스크를 중점적으로 도출하기 위해서 본 연구에서는 직접적으로 제염해체 작업을 포함하는 “원자로 차폐 콘크리트 구조물 해체 공정”만을 대상으로 분석하였다.

이 공정은 원자로 수조라이너 제거와 비방사화·방사화 콘크리트 제거 작업으로 나누어지며, 이들은 세부적으로 74가지의 작업으로 다시 나누어진다. 그리고 최종적으로 28가지의 세부작업으로 구분되는 것을 볼 수 있다.

Table 5 WBS (D&D Project of Research reactor-2)

Section	Division	Detailed process	Index	Work Type	
Removal of the reactor liner	Prepare for task	① Transfer of water tanks and desalination	A10	Desalination	
		② Measurement of the degree of contamination	A11	Measurement	
		③ Installation and test of the Wheel Saw equipment	A12	Installation	
	Cut and remove reactor liner		① Cutting of the contact surface	A20	Cut
			② Cut the west and east sides of the tank liner	A21	Cut
			③ Pull off wall after cutting off	A22	Detach
			④ Transfer of the dismantling	A23	movement
			⑤ Cut North Side of Liner	A21	Cut
			⑥ Pull off wall after cutting off	A22	Detach
			⑦ Transfer of the dismantling	A23	movement
			⑧ Cut south Side of liner	A21	Cut
			⑨ Pull off wall after cutting off	A22	Detach
			⑩ Transfer of the dismantling	A23	movement
			⑪ Temporary installation workstation	A24	Installation
			⑫ Installation Containment	A25	Installation
			⑬ The cut of the top	A26	Cut
			⑭ Cut Thermal Column Liner	A27	Cut
			⑮ Transfer of the dismantling	A28	movement
	Cut and move reactor liner		① Move and Chopping operation	A30	Chopping
			② Radiographic measurement	A31	Measurement
			③ Waste disposal after packing	A32	Take out
	Removal of Coal Tar		① Installaion Containment	A40	Installation
			② Remove Tar	A41	Remove
			③ Transfer of the Coal Tar	A42	movement
			④ Waste disposal	A43	Take out
	Removal of unexposed concrete	Removal of internal bridges and desalination of walls	① Dismantling the internal bridge	B10	Dismantle
			② Lift using ceiling crane	B11	Lifting
			③ Three gas cutters to the lifted bridge	B12	Chopping
④ Desalination work after Chopping			B13	Desalination	
⑤ Desalination of the top			B14	Desalination	
⑥ Desalination of the wall part			B15	Desalination	
Removal of unexposed concrete	Step 1	① Installing the Hunch Lower Support	B20	Installation	
		② Top drilling of the reactor	B21	Make a hole	
		③ Installation of The Wire Saw Set	B22	Installation	
		④ Cut Concrete	B23	Cut	
		⑤ Analyze nuclide by recovering	B24	Measurement	
		⑥ Lift of the Cut Demolition	B25	Lifting	
		⑦ Remove the Hunch Lower Support	B26	Remove	
		⑧ Sampling and measurement	B27	Measurement	
		⑨ Desalination of the Demolition	B28	Desalination	
		⑩ Desalination and waste classification	B29	Take out	

Section	Division	Detailed process	Index	Work Type			
Removal of exposed concrete	Step 2	① Moke a hole of Wire Saw connections	B30	Make a hole			
		② Installation of The Wire Saw Set	B31	Installation			
		③ Cut Concrete	B32	Cut			
		④ Analyze nuclide by recovering	B33	Measurement			
		⑤ Lift of the Cut Demolition	B34	Lifting			
		⑥ Sampling and measurement	B35	Measurement			
		⑦ Desalination of the Demolition	B36	Desalination			
		⑧ Desalination and waste classification	B37	Take out			
	Step 3		① Moke a hole of Wire Saw connections	B40	Make a hole		
			② Installation of The Wire Saw Set	B41	Installation		
			③ Cut Concrete	B42	Cut		
			④ Analyze nuclide by recovering	B43	Measurement		
			⑤ Lift of the Cut Demolition	B44	Lifting		
			⑥ Sampling and measurement	B45	Measurement		
			⑦ Desalination of the Demolition	B46	Desalination		
			⑧ Desalination and waste classification	B47	Take out		
	The north part		① Installation of Containment and ventilation	C10	Installation		
			② Exposure Room Interior Wall Surface Abrasive	C11	Grinding		
			③ Drill with core sampling equipment	C12	Make a hole		
			④ Analysis of radionuclides using sampling data	C13	Measurement		
			⑤ Check area of exposure	C14	Checking		
			⑥ Crushing of Exposure Room	C15	Crushing		
			⑦ Separation of steel	C16	Arrangement		
			⑧ Chopping of steel	C17	Chopping		
			⑨ Incoming and loading of wastes	C18	Take out		
			The south part		① Installation of Containment and ventilation	C20	Installation
					② Sampling with Concrete Breaker	C21	Crushing
					③ Analysis of radionuclides using sampling data	C22	Measurement
④ Check area of exposure	C23	Checking					
⑤ Crushing of Concrete outer	C24	Crushing					
⑥ Separation of steel	C25	Arrangement					
⑦ Crushing of Concrete inside	C26	Crushing					
⑧ Separation of steel	C27	Arrangement					
⑨ Measurement of Exposed concrete and steel	C28	Measurement					
⑩ Incoming and loading of wastes	C29	Take out					

3.2 원전제염해체공사 리스크 도출

3.2.1 원전 제염해체공사 공정과 건설공사 공정의 매칭

미국 에너지부 Department of Energy(DOE)의 보고서에 따르면 건설공사와 유사한 특성을 갖는 원전 제염해체공사에서 구조적 리스크 관리는 매우 중요하다. 하지만 국제기구를 비롯한 대부분의 원전 제염해체공사에서는 방사선학·비방사선학적으로 치우쳐 제염해체작업 중 발생할 수 있는 구조적 재난재해 및 위험요소는 크게 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 건설공사와 제염해체공사의 매칭프로세스를 통해 제염해체공사의 구조적·작업적 리스크 분류체계를 구성한다.

앞서 구성한 원전 차폐 콘크리트 구조물의 제염해체공사 WBS와 건설산업분야 위험요소 프로파일을 기반으로, 본 연구에서 제안하는 제염해체공사와 건설공사의 매칭프로세스(Fig. 3)를 통해 제염해체공사 RBS(Risk Breakdown Structure, 리스크 분류체계)를 구성하였다. 또한 원전해체 프로젝트와 관련된 전문가 집단을 선정하여 인터뷰를 실시하여 효과적인 RBS 구성이 가능하도록 하였다.

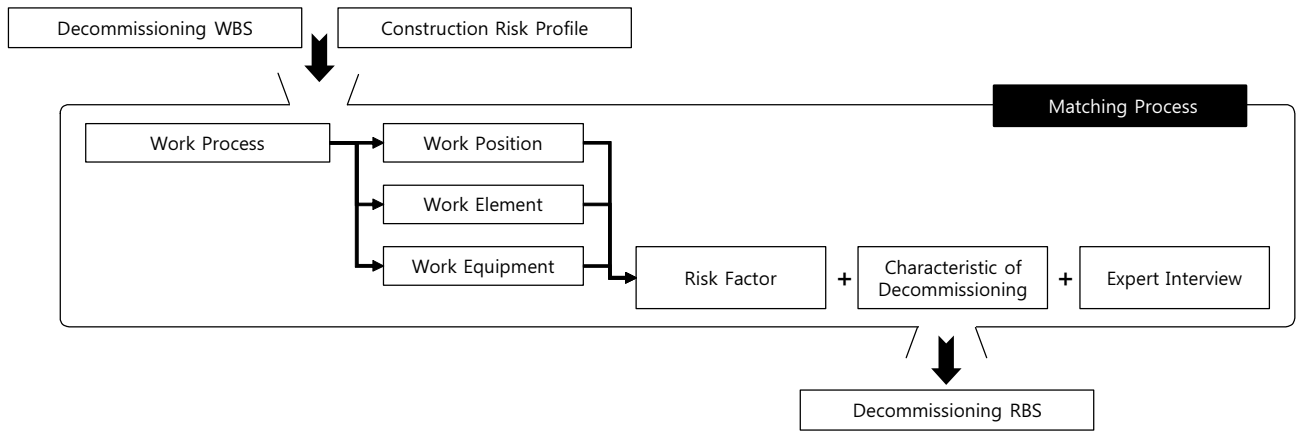


Fig. 3 Matching Process (Construction Work - D&D Work)

매칭프로세스는 ① 제염해체공사 주요업무별 유사 건설공사 주요업무 매칭, ② 제염해체공사 주요업무특성(작업위치/요소/작업 장비)별 유사 건설공사 주요업무특성 매칭, ③ 제염해체공사의 특이성 고려, ④ 전문가 인터뷰를 통한 수정 및 보완 과정을 의미하며 이를 통해 제염해체공사의 리스크 분류체계를 구성한다.

원전 차폐 구조물 제염해체공사 역시 건설공사에서 규정하는 해체철거공사의 일종으로 볼 수 있기 때문에 동일한 기준을 적용할 수 있다. 이에 따라, 제염해체공사와 건설공사의 유사성을 기반으로 한 주요업무와 업무특성의 매칭을 통해 건설공사의 리스크가 매칭 된 제염해체공사의 리스크로 소결된다. 이러한 현장의 업무특성을 고려한 리스크 식별을 통한 리스크 분류체계 구성을 제안함으로써 향후 실제 현장에서 사전 점검을 위한 도구로 활용할 수 있도록 하였다.

3.2.2 업무별 매칭프로세스

차폐 콘크리트 구조물 해체공사의 RBS(Risk Breakdown Structure, 리스크 분류체계)는 위에서 도출한 WBS를 기반으로 수립하였다. 리스크 분류의 기준은 WBS와 같이 프로젝트 단계별 분류체계를 수립하였다. 본 연구에서 제안하는 단계별 매칭 프로세스는 Table 6의 정보를 기반으로 이루어진다.

절단작업의 유사 건설공사 주요업무로 용접, 절단, 별목작업을 매칭하고 절단작업에 사용되는 와이어쏘우의 유사 건설공사 사용장비로 중형백호, 시추기, 어스오거를 매칭하였다.

또한, 원자로 상부에서 작업이 이뤄지는 점을 고려하여 건설공사의 고소작업을 매칭하여 최종적으로 매칭된 건설공사의 모든 리스크 항목들을 절단작업의 리스크로 소결한다.

같은 방법으로 인양작업의 유사 건설공사 주요업무로 상차, 양중, 인양작업 등을 매칭하고 천장크레인의 유사 사용장비로 카고트레인, 타워크레인 등을 매칭하였다. 이와 같은 매칭프로세스를 거쳐 인양작업의 리스크를 도출한다.

반면, 제염작업과 같이 건설공사와의 유사점을 찾기 어려운 특이점을 가진 원전 해체공사 주요 작업의 경우 해당 작업의 전반적인 이해와 전문가 집단의 의견을 통한 검토하는 단계가 중요하다.

이에 따라 도출된 리스크 요인분석으로 물적사고 분류표를 작성하고 추후 사고이벤트별 심도와 빈도 정보 입력을 통해 공정별 위험도 평가가 가능하도록 하였다.

Table 6 Part of Task Characteristic of D&D Project

Work		Hazard			Position
Section	Division	Category	Element	Equipment	
Removal of unexposed concrete	Step 1	Cut	A nuclear reactor	Wire Saw	The upper section of a reactor
		Lifting	A cut.	Ceiling Crane	
		Desalinization	A cut.	Hand Grinder	

3.2.3 원전 제염해체공사 특성 반영

국내 여건상 연구대상사례가 매우 제한적이므로 전문적인 검증 자체가 불가능한 실정으로 소수 전문가 의견을 통한 전반적 검증을 진행한다. 이를 통해, 건설공사와 유사점을 찾기 어려운 원전 해체공사 주요 작업의 이해와 본 연구에서 작성한 원전 제염해체공사 공정별 물적 리스크 분류표를 수정 및 보완한다.

원전 해체 공사는 일반적인 건설산업의 해체공사와는 달리 무조건적으로 위에서 아래로 해체작업을 진행할 수 없다. 차폐 콘크리트에 방사화된 부분이 있어 해체작업의 순서, 방법 등이 부위별로 다르게 적용되기 때문이다.

또한, 차폐 콘크리트 구조물 내부 공간은 굉장히 한정적이기 때문에 해체작업 진행을 위한 개구부, 연결통로 설치에 따

른 구조적 리스크도 고려해야 한다.

방사화된 콘크리트와 근접하여 작업해야 하는 특성으로 작업 시간에 대한 고려가 필수적이다. 특히, 가설구조물과 관련된 작업에 있어서 시간단축이 중요하므로 이로 인해 발생하는 구조적 리스크의 예방이 필요하다.

3.2.4 도출된 리스크 분석

건설공사 위험요소 프로파일을 기반으로 물적 리스크 분류표를 작성하였으며, 앞서 수행한 원전 제염해체공사 공정과 건설공사 공정의 매칭결과를 바탕으로 아래 Table 7과 같이 주요작업별 물적 리스크를 도출하였다.

본 연구의 특성상 대규모 설문조사가 불가능 하여, 소수 전문가 의견을 반영하여 분류결과의 신뢰도를 높이고자 하였다.

이를 통해 원전 제염해체 주요작업별 물적 리스크를 한눈에 파악 할 수 있어 원전 제염해체 작업을 직접적으로 수행하

는 내부 작업자가 작업 시 발생할 수 있는 물적 리스크를 쉽게 확인할 수 있다.

분류표를 통해 발생 가능한 물적 리스크가 많을수록 관리 중요도가 높은 세부공정이라고 평가할 수는 없으며 공정의 난이도, 리스크 빈도 및 심도 등 추가적인 분석이 필요하다.

도출된 물적 리스크를 살펴보면 붕괴와 전도 항목이 다른 항목보다 비교적 다수 도출되었다. 원전 제염해체공사 특성상 제한적 공간에서 거의 모든 작업에 가설구조물 설치가 필수적이며, 중장비를 사용 등에 의한 것으로 판단하였다.

작업 Type이 아닌 작업위치, 작업객체 그리고 사용장비를 고려한 원전 제염해체의 상세공정 단계별로 물적 리스크를 분류한다면 각 공정을 수행하기 전 발생할 수 있는 물적 리스크를 확인하여 예방할 수 있고, 이를 통해 적절한 해체계획과 위험 저감 대책과 재난재해 발생 시 대응대책을 수립할 수 있다. 또한 원전 차폐구조물 제염해체공사 공정만이 아닌 원전 해체공사의 전 범위까지도 적용 기대해 볼 수 있다.

Table 7 Risk Factors of D&D Project by work type

Zone	Work Type	Applicable process	Structural Risk									
			Fall rock	Fall	Collapse	Fly	Conduct	Downfall	Collision	Detach	Damage	Fire
Liner	Desalinization	A10		●	●		●		●			
	Measurement	A11, A31, A40			●		●					
	Installation	A12, A24, A25		●	●		●			●	●	
	Cut	A20, A21, A26, A27	●	●	●		●	●	●	●	●	●
	Detach	A22		●	●		●		●	●	●	
	Movement	A23, A28, A42	●	●	●		●		●		●	
	Chopping	A30			●		●					
	Take out	A32, A43	●	●	●		●		●		●	
	Removement	A41		●	●		●			●	●	
	Unexposed	Lifting	B11, B25, B34, B44	●	●	●	●	●		●	●	●
Dismantling		B10		●	●		●		●	●	●	
Chopping		B12			●		●					●
Desalinization		B13, B14, B15, B28, B36, B46	●	●	●		●	●	●	●	●	●
Installation		B20, B22, B31, B41	●	●	●		●		●	●	●	
Make a hole		B21, B30, B40	●	●	●		●		●	●	●	
Cut		B23, B32, B42	●	●	●		●		●	●	●	
Measurement		B24, B27, B33, B35, B43, B45			●		●					
Removement		B26			●	●		●			●	
Take out		B29, B37, B47	●	●	●		●		●		●	
Exposed	Installation	C10, C20	●	●							●	
	Grinding	C11		●	●		●		●			●
	Make a hole	C12	●	●	●		●					
	Crushing	C15, C21, C24, C26	●	●	●						●	●
	Arrangement	C16, C25, C27	●	●	●		●		●	●		
	Chopping	C17			●		●					●
	Take out	C18, C29	●	●	●		●		●		●	
	Measurement	C13, C22, C28			●		●					
	Checking	C14, C23		●			●					

4. 결 론

본 연구에서는 원자로 차폐 콘크리트 구조물의 제염해체공사의 발생 가능한 구조적·작업 위험요소를 공정별로 분류하고 이러한 위험요소가 구조체/작업/기계, 그리고 궁극적으로 작업자에게 미칠 수 있는 재난/재해 분류표를 개발하였다.

본 연구를 통해 얻은 구조적·작업 측면의 리스크 분류체계개발 내용은 다음과 같다.

첫째, 국내에서 기존에 수행된 바 있는 연구용 원자로 차폐 콘크리트 구조물의 제염해체공사 사례와 원자로 구조물 제염해체공사 작업분류체계(WBS) 시안개발 결과물의 공정을 분석하고 일반화하였다.

둘째, 건설산업분야에서 규정하고 있는 작업별 위험요소 프로파일을 분석하고 원전 제염해체공사와의 유사성에 근거하여 주요작업을 매칭하였다.

셋째, 매칭된 주요작업에 따라 리스크를 분류하여 해당 리스크에서 기인하는 위험요소, 즉, 원전 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사에서 발생하는 다양한 외적 요인이 작업자에게 미칠 수 있는 위험요소를 도출하였다.

위 결과물을 통해 추후 좀 더 다양한 사례와 연구를 통한 제염해체공사의 공정 표준화 및 이에 상응하는 공정별 리스크 도출, 도출된 리스크의 평가에 따른 대응 매뉴얼 개발이 가능할 것으로 사료된다.

다만, 국내에서는 상업용 원자로 해체 사례가 전무한 관계로 분석 대상을 연구용 원자로로 한정된 점과, 기존의 구조적·작업 리스크 연구사례의 한계로 건설산업의 리스크를 인용한 것은 본 연구의 한계로 볼 수 있다.

이를 극복하기 위해, 본 연구를 통해 도출된 리스크 분류체계의 validation과, 향후 국내외의 다양한 사례 데이터 수집, 표준화된 WBS 개발, 새로운 리스크에 대한 평가방식 개발이 병행되어야 할 것이다.

국내 여건상 연구대상사례가 매우 제한적이므로 연구결과 일반화에 무리는 있지만 국내 건설환경의 특수성을 시사하는 충분한 의미가 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20161510300420).

References

- IAEA. (2006), "Decommissioning of Facilities using Radioactive Material," IAEA Safety Requirement WS-R-5, 1.
- IAEA. (2006), "Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material," WS-R-5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1-38.
- Joo, H. M., and Jung, M. L. (2013), Development of the Draft Guidelines of the Decommissioning Plan for a Nuclear Power Plant in Korea, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, 11(3), 213-227.
- PMI. (2004), "Project Management Body of Knowledge." 112-115.
- S, K. (2010), "Construction Risk Management," Kimoondang Project Management Institute, 5th edition, "Project Management Body of Knowledge."
- Sang, H. A. (2015), A Case Study of the Risk Identification in Construction Project, *Korean journal of construction engineering and management*, 16(1), 15-23.
- Seong, W. H., Hyeong, I. K., and Yong, S. A. (2003), Study on Development and Real Situation Analysis for the Risk Management of Domestic Construction Companies, *Journal of Architectural institute of Korea*, 19(5), 153-160.
- Song, J. S. (2017), Korea Energy Economics Institute, World Nuclear Power Market Insight, 9, 7-8.
- Wan, I. J., Young, H. C., and Yong, B. K. (2014), Development of Work Breakdown Structure for Decommissioning Project of Korean Nuclear Power Plant, *Journal of nuclear fuel cycle and waste technology*, 305-306.

Received : 01/18/2018

Revised : 03/14/2018

Accepted : 04/26/2018

요 지 : 건설해체공사와 유사한 특성을 갖는 원전 제염해체공사에서 구조적 리스크 관리는 매우 중요하다(DOE). 하지만 제염해체작업 중 발생할 수 있는 구조적 재난재해 및 위험요소는 크게 고려하지 않고 있다. 이로 인해, 구조적 재난 및 재해에 의해 발생할 수 있는 작업자 리스크 역시 체계적으로 정립되어 있지 않다. 또한, 재난 및 재해 그리고 리스크 분류체계는 작업의 특성(작업프로세스, 활용장비, 작업 위치 등)별로 분류되어 있지 않아 실제 해체공사를 위한 매뉴얼로 활용하기에 무리가 있다. 따라서 차폐 콘크리트 구조물 제염해체공사의 건설해체공사와의 유사성을 기반으로 작업의 특성별로 분류한 리스크를 도출하는 것은 원자력 발전소 해체공사 리스크 관리에 필수적으로 판단한다.

핵심용어 : 원자력발전소, 제염공사, 해체공사, 제염해체공사, 위험요소, 리스크 요인
