Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 2, pp. 175-183, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.2.175

Original article

원전 해체 시 기계적 콘크리트 제염공법의 특성 조사 분석

신민규[1] · 민혜빈[1] · 한창희[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Comparative Analysis of the Characteristics of Mechanical Concrete Decontamination Methods for Nuclear Power Plant Decommissioning

Min Kyu Shin[1], Hye Bin Min[1], Chang Hee Han[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT In nuclear power plant decommissioning, mechanical decontamination of contaminated concrete surfaces is required to reduce worker dose and control the spread of contamination. Mechanical concrete decontamination methods differ in removal characteristics, worker exposure-related characteristics, and cost characteristics depending on their removal mechanisms and equipment configurations. Therefore, the characteristics of major mechanical concrete decontamination methods should be comparatively analyzed to support the establishment of an appropriate decontamination strategy for domestic nuclear power plant decommissioning. In this study, the characteristics of Scabbling, Shaving, Grinding, and Grit Blasting, which are presented as mechanical concrete decontamination methods in documents published by the United States Environmental Protection Agency, were compared and analyzed. The comparison items were classified into three categories: 1) applicability and removal characteristics, 2) waste generation, contamination spread control, and worker exposure-related characteristics, and 3) cost characteristics. The analysis was based on an investigation of overseas decommissioning demonstration cases involving representative mechanical concrete decontamination equipment. The results showed that Scabbling produced a relatively rough surface after treatment and that surface removal work, worker monitoring, and waste monitoring accounted for a large proportion of the total cost. Shaving showed a relatively high removal rate and low unit cost on wide and flat surfaces. Grinding showed high applicability to areas around obstacles and confined areas; however, it required close worker access to the contaminated surface and exhibited a high unit cost. Grit Blasting was applicable to ceiling surfaces and was advantageous in terms of remote operation, while complex equipment operation and waste disposal costs accounted for a large proportion of the total cost. Since the advantageous characteristics of mechanical concrete decontamination methods vary depending on decommissioning site conditions, these methods should be selected through a comprehensive evaluation of their characteristics rather than based on a single indicator. The results of this study are expected to provide basic data for selecting concrete structure decontamination methods and establishing decontamination strategies for future domestic nuclear power plant decommissioning.

Key words: Nuclear power plant decommissioning, Concrete decontamination, Mechanical decontamination methods, Worker exposure, Decontamination cost

1. 서 론

국내 영구정지 원전인 고리 1호기는 2025년 6월 원자력안전위원회 의결을 통해 해체가 승인되었으며, 국내 상업용 원전 가운데 최초로 본격적인 해체 절차가 진행 중이다[1]. 고리 1호기 최종해체계획서 요약본에서는 원전 해체 과정에서 작업자의 피폭 저감과 오염확산 방지를 위해 적절한 공정 및 기술을 적용하여, 구조물로부터 오염물질을 제거해야 한다고 제시하고 있다[2]. 원전 해

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr

Received 15 May 2026 **Revised** 11 June 2026 **Accepted** 15 June 2026

체 시 발생하는 폐기물 중 콘크리트 폐기물은 상당한 비중을 차지하며, Connecticut Yankee 원전 해체 사례에서는 콘크리트 폐기물이 전체 해체폐기물의 83.5%를 차지하는 것으로 나타났다[3]. 콘크리트는 오염 표면층 제거를 통해 방사능 농도 또는 표면 오염도를 규제해제 기준 이하로 낮출 수 있으며, 이를 통해 방사성 폐기물 처분량과 처분비용을 줄이는 데 기여할 수 있다[4].

미국 환경보호청(Environmental Protection Agency; EPA)의 Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surfaces에서는 방사성오염이 콘크리트와 같은 다공성 표면 내부로 침투한 경우, 화학적 제염만으로는 충분한 효과를 얻기 어려울 수 있으며 물리적 제염은 오염 표면층을 직접 제거함으로써 상대적으로 높은 제염효과를 기대할 수 있다고 제시한다[5]. 해당 지침서에서는 방사성오염 표면 제염에 적용 가능한 물리적 제염 기술 중 표면 제거 기술로 Scabbling, Shaving, Grinding, Grit Blasting 등을 제시하고 있다[5]. Scabbling은 타격·파쇄 방식, Shaving은 절삭 방식, Grinding은 연삭 방식, Grit Blasting은 연마재 고속 분사 방식으로 콘크리트 표면층을 제거하는 공법이다. 이 공법들은 콘크리트 표면층을 물리적으로 제거한다는 공통점을 가지지만, 제거 원리와 장비 구성은 상이하다.

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)의 기술문서인 TECDOC-1478에서는 해체 및 제염 전략 선정 시 주요 고려 인자로 작업자 피폭과 안전, 폐기물의 양과 종류, 비용 등을 제시하고 있다[6]. 미국 에너지부(Department of Energy; DOE)의 제염기술 실증보고서에서는 실제 해체 현장에 적용할 제염공법의 적용성 검토 시 장비 운용 조건, 제거 성능, 작업자 접근성, 폐기물 발생 형태 및 제염비용 등을 주요 검토 항목으로 제시하고 있다[12-15]. 고리 1호기 예비해체계획서에서는 작업자 피폭과 방사성물질 확산을 저감하기 위해, 시설의 오염 수준 및 형상에 따라 적합한 해체 방법과 기술을 적용할 계획임을 제시하고 있다[2]. 이에 따라 원전 해체 시 제염공법 선정은 오염 제거 성능뿐만 아니라 작업장 오염확산 관리, 작업자 피폭 저감 및 경제성 등을 종합적으로 고려하여 이루어질 필요가 있다.

기계적 콘크리트 제염공법은 제거 원리와 작업 조건에 따라 적용 가능한 표면, 작업 방식, 제거 특성 및 오염 발생 양상이 다르게 나타난다. 이러한 공법별 특성 차이는 작업자 피폭 가능성과 작업 현장 내 오염확산 관리 부담에도 영향을 미칠 수 있다. 또한 공법별 장비 구성, 부대설비 및 소모품의 차이에 따라 장비 운용과 폐기물 처리 등 제염작업에 필요한 비용도 달라진다. 따라서 국내 원전 해체 시 적합한 제염 전략을 수립하기 위해서는 주요 기계적 콘크리트 제염공법의 적용 및 제거 특성, 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성, 비용 특성을 함께 비교·분석할 필요가 있다.

본 연구의 목표는 원전 해체 시 현장 조건에 적합한 기계적 콘크리트 제염 전략 수립에 필요한 기초자료를 도출하기 위해, 주요 기계적 콘크리트 제염공법의 특성을 비교·분석하는 것이다. 이를 위해 Scabbling, Shaving, Grinding 및 Grit Blasting에 대한 국외 해체 실증사례를 조사하고, 공법별 적용 및 제거 특성, 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성, 비용 특성을 비교하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 원전 해체 시 콘크리트 구조물 제염에 적용 가능한 주요 기계적 제염공법을 대상으로 공법별 특성을 비교·분석하였다. 비교·분석 대상 공법은 EPA의 방사성오염 표면 제염기술 지침서에서 제시하는 물리적 제염공법 중, 제거 메커니즘이 서로 다른 Scabbling, Shaving, Grinding, Grit Blasting으로 선정하였다[5].

공법별 특성 조사는 DOE의 제염기술 평가 문헌과 EPA의 방사성오염 표면 제염기술 지침서에서 기술적 특징과 비용자료가 제시된 실증사례를 바탕으로 수행하였다[5,12-15]. Scabbling의 경우 Hanford Site C Reactor Building에서 수행된 686 ft^2 납 함유 도장 콘크리트 바닥면 제염 사례를 대상으로 하였다. Shaving의 경우 Hanford Site C Reactor Building에서 수행된 816 ft^2 납 함유 도장 콘크리트 바닥면 제염 사례를 대상으로 하였다. Grinding의 경우, Hanford Site C Reactor Interim Safe Storage Project의 54 ft^2 콘크리트 바닥 및 벽면 제염 사례를 대상으로 하였다. Grit Blasting의 경우, INEEL TAN-607 제염시설에서 수행된 180 ft^2 납 함유 도장 콘크리트 벽면 제염 사례를 대상으로 하였다.

대표 장비는 각 실증사례에서 사용된 장비를 기준으로 선정하였다. Scabbling은 5-piston pneumatic scabbler on wheels, Shaving은 Marcrist concrete shaver, Grinding은 Flex concrete grinder, Grit Blasting은 En-Vac Robotic Wall Scabbler로 선정하였다. 본 연구에서는 IAEA TECDOC-1478에서 제시한 해체전략 선정 시의 주요 고려 인자를 반영하여, 기계적 콘크리트 제염공법별 1) 적용 및 제거 특성, 2) 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성, 3) 비용 특성을 중심으로 비교하였다[6].

2.1. 원전 해체 시 콘크리트 제염공법의 적용 및 제거 특성 조사 방법

콘크리트 제염공법의 적용 및 제거 특성을 파악하기 위해 공법별로 1) 적용 가능한 표면, 2) 작업 수행 특성 및 제거 성능을 조사하였다[5,7,8]. 적용 가능한 표면은 해체 대상 콘크리트 구조물의 위치와 형상이 상이하므로, 공법별 적용 표면 조건을 판단하기 위한 항목으로 선정하였다. 작업 수행 특성 및 제거 성능은 공법별 작업 방식과 제거 성능을 조사하여, 실제 제염 현장에서 공법의 적용성과 제염 효율을 비교하기 위한 항목으로 선정하였다.

공법별 적용 가능한 표면은 해체 현장의 바닥, 벽, 천장, 장애물 주변 등 실제 해체 현장에서 예상되는 작업 표면을 중심으로 조사하였다[16,17]. 작업 수행 특성 및 제거 성능은 장비의 운용 방식, 넓은 표면에 대한 제염 적용성, 제한된 구역에서의 선택적 제염 적합성 등을 중심으로 조사하였다. 제거 깊이 및 제거율은 실

증사례에서 제시된 공법별 제거 깊이와 단위 시간당 제염 면적을 조사하였다.

2.2. 원전 해체 시 콘크리트 제염공법의 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성 조사 방법

오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성을 파악하기 위해 공법별로 1) 폐기물 발생 형태 및 오염확산 관리 특성, 2) 작업자 접근성 및 작업시간 관련 특성을 조사하였다[9,18]. 이들 항목은 기계적 콘크리트 제염작업 시 작업장 오염관리 부담과 작업자 피폭 가능성을 비교하기 위하여 선정하였다.

폐기물 발생 형태 및 오염확산 관리 특성은 제염 과정에서 발생하는 폐기물의 형태와 포집·회수 특성을 중심으로 조사하였으며, 작업자 접근성은 장비 운용 방식에 따른 작업자와 오염 표면 사이의 거리 및 원격조작 가능 여부를 중심으로 조사하였다[19-21]. 작업시간은 2.1절에서 조사한 제거율을 바탕으로, 동일 면적을 제염하는 데 필요한 시간으로 비교하였다.

2.3. 원전 해체 시 콘크리트 제염공법의 비용 특성 조사 방법

EPA 문서에서는 각 콘크리트 제염공법의 총 비용을 작업준비(Mobilization), 제염 수행(Decontamination and Decommissioning Work; D&D Work), 작업 종료 및 철수(Demobilization), 폐기물 처분(Waste Disposal)으로 구분하여 제시하고 있다[5]. 이는 제염공법의 비용이 실제 표면 제거 작업뿐만 아니라 장비 반입·설치, 장비 해체·철수, 폐기물 관리 및 처분 등 여러 단계에서 발생한다는 점을 반영한 것이다. 이에 본 연구에서는 해당 비용 항목 구분을 기준으로 공법별 주요 비용 발생 항목을 조사하였다.

Mobilization은 장비 운반, 설치 및 부대설비 준비 등 작업 착수 이전 단계의 비용이다. D&D Work는 실제 제염작업 수행에 소요되는 장비 운전비, 인건비, 소모재 비용 및 작업 중 보호조치 관련 비용을 포함한다. Demobilization은 작업 종료 후 장비 해체, 오염 제거, 철수 및 현장 정리 과정에 소요되는 비용이며, Waste Disposal은 제염 과정에서 발생한 2차 폐기물의 포장, 운반 및 처분 등의 비용이다.

EPA 문서에 제시된 비용자료는 공법별 실증사례를 기반으로 산정된 값으로, 제염 대상 면적, 제거 깊이, 제거율 및 장비 조건이 상이하다[5]. 제염공법의 비용은 제거 대상의 형상, 작업 조건 및 폐기물 관리 조건에 따라 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 단위면적당 표면 제거 작업 비용, 제거 깊이와 제거율을 함께 고려하여 공법별 비용 차이를 비교하였다[10,11,22]. 본 연구의 비용자료는 해체 실증보고서에 수록된 당시 비용 산정 결과를 기준으로 하였으며, 별도의 물가 보정 또는 현재 가치 환산은 수행하지 않았다.

3. 결 과

3.1. 원전 해체 시 콘크리트 제염공법의 적용 및 제거 특성 조사 결과

3.1.1. 공법별 적용 가능한 표면 조사 결과

Table 1에 기계적 콘크리트 제염공법별 적용 가능한 표면 조사 결과를 나타내었다. 조사 결과, 대상 공법은 공통적으로 평탄한 콘크리트 바닥면 제거에 적용 가능하였으나, 장비의 표면 접촉 방식과 작업 대상 표면의 형상에 따라 유리한 조건이 상이하였다. Scabbling은 평탄하고 개방된 바닥면에 적용 가능하였으나, 타격·파쇄 방식의 특성상 작업 후 표면이 비교적 거칠게 나타났다. Shaving은 평탄하거나 완만한 곡률을 갖는 표면에 적용 가능하였으며, 비교적 균일한 표면 마감이 요구되는 조건에 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

Grinding은 작업자가 직접 손에 들고 조작하는 소형 장비를 이용하여 바닥, 벽면뿐만 아니라 장애물 주변의 협소한 표면에도 적용 가능하였다. 또한 비교적 매끄러운 표면 처리가 가능한 것으로 나타났다. Grit Blasting은 진공흡착 방식을 통해 장비를 표면에 밀착시켜 운용할 수 있어, 수직면과 천장면에도 적용 가능한 것으로 나타났다.

반면, Scabbling과 Shaving은 천장, 모서리 및 장애물이 많은 구역에서 적용이 제한될 수 있는 것으로 나타났다. Grinding은 넓고 개방된 표면이나 넓은 면적의 균일한 표면 제거가 요구되는 조건에서는 작업 효율 측면에서 상대적으로 불리한 것으로 나타났다. Grit Blasting은 분사 장비, 회수 계통 등 부피가 큰 장비의 접근 공간이 필요하므로, 배관 주변, 장애물이 많은 표면에서는 적용이 제한될 수 있는 것으로 나타났다.

3.1.2. 공법별 작업 수행 특성 및 제거 성능 조사 결과

Table 2에 기계적 콘크리트 제염공법별 작업 수행 및 제거 특성 조사 결과를 나타내었다. Scabbling은 연속적인 표면 제거 작업에 적용 가능하였으나, 타격·파쇄 방식의 특성상 진동과 소음이 크고 정밀한 깊이 제어에는 제한이 있는 것으로 나타났다. 제거 깊이는 약 3.2-6.4 mm 수준으로 나타났으며, 3.2 mm 제거 조건에서 제거율은 2.6 $m^2\ h^{-1}$로 나타났다.

Shaving은 설정 깊이에 따른 절삭이 가능하여 Scabbling보다 제거 깊이 제어 측면에서 상대적으로 유리한 특성이 나타났다. 절삭 깊이는 약 0.01-1.3 cm 범위에서 조절 가능하였으며, 제거율은 3.2 mm 제거 조건에서 11.9 $m^2\ h^{-1}$로 나타났다.

Grinding은 작업자가 소형 장비를 직접 조작하여 필요한 부위를 연삭하는 방식으로 선택적 표면 제거에 유리하게 나타났다. 제거 깊이는 반복 작업 횟수와 작업시간에 따라 달라졌으며, 1.6

Table 1. Comparison of applicable surface conditions for mechanical concrete decontamination methods

Method	Favorable surface conditions	Limited surface conditions
Scabbling	Flat and open concrete floors and slabs Large floor surfaces Surfaces with few obstacles	Vertical surfaces and ceilings Surfaces with complex geometries Surfaces requiring a fine finish
Shaving	Flat or slightly curved concrete floors and slabs Open, large floor surfaces Surfaces requiring a smooth finish	Very small areas Congested areas with many obstacles Detailed surfaces such as edges and corners
Grinding	Floors, walls, and other concrete surfaces Localized surfaces near obstacles or structural constraints Surfaces requiring a smooth finish	Very large, open floors and slabs Surfaces requiring large-area uniform removal
Grit Blasting	Flat concrete walls and vertical surfaces Large concrete surfaces Painted concrete surfaces	Complex surfaces with pipes, obstacles, and corners Bare metal, plastic, and wood surfaces Narrow or complex-shaped surfaces

Table 2. Comparison of operating and removal characteristics of mechanical concrete decontamination methods

Method	Operating characteristics	Operating limitations	Removal depth (mm)	Removal rate ($m^2 h^{-1}$)
Scabbling	Continuous removal by repeated impact; applicable to rough surface removal	High vibration, noise, and surface roughness; limited precision in depth control	~3.2-6.4; limited depth control	2.6 (3.2 mm removal condition)
Shaving	Cutting to a preset depth; relatively uniform surface finish and depth control	Limited applicability to detailed areas or areas with many obstacles	0.1-13; adjustable	11.9 (3.2 mm removal condition)
Grinding	Hand-held operation; applicable for localized and selective surface removal	Limited applicability to large-area continuous work	1.6-3.2; dependent on number of passes and operating time	4.5 (1.6 mm removal condition)
Grit Blasting	Remote-controlled continuous operation; applicable to continuous surface removal	Large system size and high setup/operation burden	3.2; case condition involving coating and surface concrete removal	9.3 (3.2 mm removal condition)

mm 제거 조건에서 제거율은 4.5 $m^2 h^{-1}$로 나타났다.

Grit Blasting은 연마재 분사 장비, 회수 계통 및 여과 계통이 결합된 시스템형 공법으로, 원격제어 방식으로 운용되었다. 장비 구성이 복합적이므로 설치와 운용 부담이 큰 특성을 보였으나, 넓은 면적의 연속적인 제염작업에는 유리한 것으로 나타났다. Grit Blasting 실증사례에서는 도장층과 표면 콘크리트가 함께 제거되었으며, 3.2 mm 제거 조건에서 제거율은 9.3 $m^2 h^{-1}$로 나타났다.

3.2. 원전 해체 시 콘크리트 제염공법의 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성 조사 결과

3.2.1. 공법별 폐기물 발생 형태 및 오염확산 관리 특성 조사 결과

Table 3에 기계적 콘크리트 제염공법별 폐기물 발생 형태 및 오염확산 관리 특성 조사 결과를 나타내었다. 폐기물 발생 측면에서, 대상 공법은 모두 오염된 콘크리트 표면층을 물리적으로 제거하는 건식 공법이므로 제거된 콘크리트, 도장층 잔재물, 포집 분진 등의 제거 부산물과 분진 포집 필터, 개인보호구(Personal Protective Equipment; PPE) 등의 고체폐기물이 발생하였다. Scabbling은 콘크리트 분진과 상대적으로 크기가 큰 파쇄물이 함께 발생하였고, Shaving과 Grinding은 진공계통으로 포집되는 미세 분진형 폐기물 중심으로 발생하였다. Grit Blasting은 콘크리트·도장층 잔재물에 사용 후 연마재가 함께 포함된 복합 폐기물이 발생하였다.

제염작업 현장의 오염확산 관리 측면에서는 네 가지 공법 모두 공통적으로 진공 흡입, 고효율 미립자 공기필터(High-Efficiency Particulate Air filter; HEPA filter), 포집 덮개(Shroud) 또는 오염 잔재물 회수·분리 계통이 적용될 경우 작업구역 내 2차 오염 확산을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 포집·회수된 분진, 필터, PPE 및 오염 잔재물은 별도의 고체폐기물로 관리가 필요한 것으로 나타났다.

3.2.2. 공법별 작업자 접근성 및 작업시간 관련 특성 조사 결과

Table 4에 기계적 콘크리트 제염공법별 작업자 접근성 및 작업시간 특성 조사 결과를 나타내었다. 작업자와 오염 표면 사이의 거리 측면에서, Scabbling, Shaving, Grinding은 작업자가 장비를 근접 조작하는 방식으로, 작업자와 오염 표면 사이의 거리가

Table 3. Comparison of waste generation and contamination spread control characteristics of mechanical concrete decontamination methods

Method	Waste forms generated	Contamination spread control characteristics
Scabbling	Concrete dust and debris Fragment-type waste	Increased potential for dust dispersion if a vacuum system is not applied Use of a shroud or HEPA vacuum system is required Management is required during handling processes, such as waste drum replacement
Shaving	Concrete dust and shaving residues	Fine dust is directly collected by a vacuum filtration system Vacuum hose connection and suction level should be maintained Collected dust, HEPA filters, and PPE require management
Grinding	Fine concrete dust Dust collected in filters	Dust is collected through a vacuum port and shroud Internal contamination of the vacuum system, filters, and PPE requires management Localized dust dispersion should be considered when auxiliary tools are used
Grit Blasting	Concrete and coating residues Composite waste containing spent abrasive media	On-site dispersion can be reduced through a closed-loop recovery system Blast media and contaminated residues require separation and recovery Spent grit, filters, and PPE require management

Table 4. Comparison of worker operation modes and exposure-related characteristics of mechanical concrete decontamination methods

Method	Worker operation mode	Exposure-related characteristics
Scabbling	Direct close-range operation or remote-operated equipment may be applicable	Manual operation requires close-range work, whereas remote-operated equipment can increase worker–source distance during surface removal
Shaving	Close-range operation of self-propelled equipment	Close-range work is required, but the high removal rate can reduce surface removal duration
Grinding	Direct operation of hand-held equipment	The worker directly approaches the contaminated surface; therefore, the worker–source distance is relatively short
Grit Blasting	Remote operation	Worker distance from the contaminated surface can be maintained; however, access work may be required during setup and recovery

상대적으로 짧은 특성을 보였다. 특히 Grinding은 작업자가 직접 오염 표면에 근접하여 작업하므로 작업자와 오염원 간 이격거리 측면에서 상대적으로 불리한 특성을 보였다. Scabbling은 원격조작형 장비를 적용할 경우 작업자와 오염 표면 사이의 거리를 확보할 수 있었으며, Grit Blasting은 원격조작이 가능하여 작업자와 오염원 간 이격거리 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

작업시간 측면에서, 제거율이 높은 공법일수록 동일 면적 제염에 필요한 작업시간이 줄어들 수 있다. 동일한 3.2 mm 제거 조건에서 Shaving의 제거율은 Scabbling보다 약 4.6배 높게 나타났으며, Shaving은 작업시간 단축 측면에서 상대적으로 유리하게 나타났다. Grit Blasting은 비교적 높은 제거율과 원격조작 방식을 함께 가지므로, 작업자 이격 및 작업시간 단축 측면에서 피폭 저감에 유리한 특성이 나타났다.

3.3. 원전 해체 시 콘크리트 제염공법의 비용 특성 조사 결과

3.3.1. Scabbling 공법의 비용 조사 결과

Table 5에 기계적 콘크리트 제염공법별 비용 조사 결과를 나타내었다. Table 6에 각 콘크리트 제염공법별 D&D Work 비용의 세부 항목과 항목별 비중을 나타내었다. Scabbling 공법은 실제로 686 ft²의 콘크리트 바닥을 약 3.2 mm 깊이로 제거한 조건에서 실증되었다. 다만 본 연구에서 사용한 Scabbling 비용자료는 DOE 문헌에서 Shaving 실증사례와 동일한 816 ft² 조건으로 비교하기 위해, 실제 실증면적 686 ft²를 기준으로 외삽한 값이다. 조사 결과, 총비용은 $12,180으로 나타났으며, 비용 항목 중에서는 D&D Work가 총비용의 52.8%로 가장 큰 비중을 차지하였다.

D&D Work 비용에서는 콘크리트 표면 제염작업 비용과 작업자 및 폐기물 모니터링 비용이 각각 51.4%와 20.6%를 차지하였다. 이는 표면 제염작업에 필요한 장비 운용비와 작업자 인건비가 제염 수행 비용에 크게 반영된 결과인 것으로 판단된다. 또한 제염 과정에서 콘크리트 파쇄물과 분진이 발생하므로, 작업자 보호, 폐기물 감시 및 방사선학적 작업관리 비용도 D&D Work에서 비교적 큰 비중을 차지한 것으로 판단된다.

3.3.2. Shaving 공법의 비용 조사 결과

Table 5와 6에 제시된 Shaving 공법의 비용자료는 816 ft²의 콘크리트 바닥을 3.2 mm 깊이로 제거한 조건이다. 조사 결과, 총비용은 $5,821로 나타났으며, 비용 항목 중에서는 Demobilization과 D&D Work가 각각 총비용의 34.4, 31.6%로 큰 비중을 차지하였다.

Demobilization 비용은 작업 종료 후 장비 및 공기 호스의 해체와 제염 과정에서 발생한 비용으로 나타났다. D&D Work 비용에서는 콘크리트 표면 제염작업 비용이 58.5%로 가장 크게 나타

Table 5. Comparison of costs of mechanical concrete decontamination methods

Method	Treated area (ft^2)	Mobilization ($)	D&D Work ($)	Demobilization ($)	Waste Disposal ($)	Total cost ($)
Scabbling	816	3,315	6,431	1,975	460	12,180
Shaving	816	1,577	1,842	2,000	403	5,821
Grinding	54	1,293	1,592	749	404	4,038
Grit Blasting	180	1,313	7,236	1,142	2,907	12,599

났으며, 이는 Shaving 공법의 절삭 작업에 필요한 장비 운용비와 작업자 인건비가 표면 제염작업 비용에 주로 반영된 결과인 것으로 판단된다.

3.3.3. Grinding 공법의 비용 조사 결과

Table 5와 6에 제시된 Grinding 공법의 비용자료는 54 ft^2의 콘크리트 벽 및 바닥 표면을 1.6 mm 깊이로 제거한 조건이다. 조사 결과, 총비용은 $4,038로 나타났으며, 비용 항목 중에서는 D&D Work와 Mobilization이 각각 총비용의 39.4, 32.0%로 큰 비중을 차지하였다.

D&D Work 비용에서는 PPE 착용, 탈의 관련 절차에 소요되는 비용과 작업 대기 및 준비 시간 비용이 각각 32.9, 31.4%로, 콘크리트 표면 제염작업 비용의 24.2%보다 높게 나타났다[14]. 이는 Grinding 공법이 타 공법 실증사례에 비해 54 ft^2의 좁은 면적을 대상으로 수행되었기 때문에, 작업 준비와 보호구 착·탈의 과정의 비용 영향이 단위면적당 비용에 크게 반영된 결과인 것으로 판단된다.

3.3.4. Grit Blasting 공법의 비용 조사 결과

Table 5와 6에 제시된 Grit Blasting 공법의 비용자료는 180 ft^2의 콘크리트 벽면에서 도장층 및 표면 콘크리트를 제거한 조건이다. 조사 결과, 총비용은 $12,599로 나타났으며, 비용 항목 중에서는 D&D Work와 Waste Disposal이 각각 총비용의 57.4, 23.1%로 큰 비중을 차지하였다.

D&D Work에서는 장비의 제거, 이동 및 설치 관련 비용이 39.2%로 가장 큰 비중을 차지하였다. En-Vac system은 총 10,000 lb 규모의 중량형 시스템 장비로 구성되며 벽면 이동 시 장비의 분리·재설치 및 중량물 이동 작업이 요구된다[15]. 이러한 장비 운용 특성이 D&D Work 비용에 크게 반영된 것으로 판단된다. Waste Disposal 비용에서는 사용 후 연마재가 콘크리트·도장층 잔재물과 함께 발생함에 따라, 연마재까지 함께 회수·처분해야 하는 비용이 반영되어 타 공법에 비해 높게 나타난 것으로 판단된다[15]. Table 7에 본 연구에서 조사한 실증사례를 바탕으로 기계적 콘크리트 제염공법별 주요 특성을 정성적으로 종합하여 나타내었다.

4. 고 찰

본 연구 결과, 기계적 콘크리트 제염공법의 적용성은 해체 대상 표면의 형상, 장비 접근성 및 운용 방식에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 넓고 평탄한 표면에서 장비의 연속 운용이 가능한 조건에서는 Shaving이 제거 깊이 제어와 작업 효율 측면에서 상대적으로 유리한 것으로 나타났다. Grinding은 소형 장비를 작업자가 직접 조작하는 방식으로, 장애물 주변 및 협소한 오염 부위의 국부 제염에 유리하며, Grit Blasting은 진공흡착 방식으로 장비를 표면에 밀착시켜 운용할 수 있으므로, 수직면과 천장면 적용에 유리하게 나타났다. 다만 동일한 공법이더라도 콘크리트 조성, 표면 특성 및 도장재 유무 등에 따라 적용 가능성과 제거 성능이 달라질 수 있으므로, 향후 제염 시나리오 수립 시 대상 표면 조건을 함께 고려할 필요가 있다.

제염작업 시 작업자 피폭 관련 특성은 작업시간과 작업자와 오염 표면 사이의 거리 조건을 함께 고려해야 한다. 100 m^2의 동일 면적을 3.2 mm 깊이로 제거한다고 가정할 경우, Shaving은 약 8.4 h, Scabbling은 약 38.5 h가 소요된다. 이는 제거율이 높은 공법이 작업시간 단축을 통해 작업자 피폭 저감에 기여할 수 있음을 시사한다. Grit Blasting은 원격조작 방식으로 운용되므로, 작업자의 근접 작업에 따른 피폭 가능성이 큰 표면 조건에서 상대적으로 유리할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 제염작업 중 장비 운용 단계의 작업자와 오염 표면 간의 거리 조건과 작업시간을 중심으로 작업자 피폭 관련 특성을 비교하였으므로, 폐기물 회수·관리 및 처분 과정에서의 피폭은 향후 제염 시나리오 수립 시 추가적으로 고려할 필요가 있다.

Table 8에는 각 공법별 비용을 단위면적당 표면 제거 작업비용[$ ft^{-2}]과 표면 제거 작업 이외의 부대비용[$]으로 구분하여 나타내었다. Scabbling은 Shaving보다 제거율이 낮고 반복 타격 방식으로 표면을 제거하는 공법 특성상 단위면적당 표면 제거 작업비용이 $4.05 ft^{-2}로 더 높게 나타난 것으로 판단된다[13]. Grinding은 작업자가 직접 조작하는 소형 휴대형 장비를 이용하는 공법 특성상 단위면적당 표면 제거 작업비용이 $7.13 ft^{-2}로 가장 높게 나타난 것으로 판단된다[14]. Grit Blasting은 표면 제거 작업 이외 비용이 $12,072로 가장 높게 나타났으며, 이는 고중량 복합 시스템의 운용과 사용 후 연

Table 6. Detailed composition of D&D Work costs for mechanical concrete decontamination methods

Method	Detailed item of D&D Work	Cost ($)	Proportion in D&D Work (%)
Scabbling	Remove Concrete Floor Surface	3,307	51.4
	Monitor Workers and Waste	1,327	20.6
	Don/Doff Personal Protective Equipment (PPE)	608	9.5
	Monitor Airborne Lead	438	6.8
	Worker Breaks	331	5.1
	Pre-Job Briefing and Safety Meeting	220	3.4
	Remove Concrete Debris	124	1.9
	Move Floor Scabbler	74	1.2
	Total	6,431	100.0
Shaving	Remove Concrete Floor Surface	1,077	58.5
	Monitor Workers & Waste Stream for Radioactive	332	18.0
	Don/Doff Personal Protective Equipment (PPE)	153	8.3
	Monitor for Air-Borne Lead	110	6.0
	Worker Breaks	84	4.6
	Pre-Work Briefing and Safety Meeting	56	3.0
	Move Floor Shaver	30	1.6
	Total	1,842	100.0
Grinding	Donning/Doffing Personal Protective Equipment (PPE)	524	32.9
	Non Productive Time	500	31.4
	Remove Concrete Wall Surface	385	24.2
	Monitor Workers & Waste Stream for Radioactive	141	8.9
	Pre-Work Briefing & Safety Meeting	42	2.6
	Total	1,592	100.0
Grit Blasting	Remove, Move, Set Up	2,837	39.2
	Don PPE	1,065	14.7
	Survey Walls	882	12.2
	Pre-Job Briefing	630	8.7
	Wipe Down Walls	630	8.7
	Decon Wall-Unobstructed	363	5.0
	Doff PPE	315	4.4
	Decon Wall-Obstructed	164	2.3
	Operational Adjustments	158	2.2
	Install Anchors (initial wall)	82	1.1
	Calculations for Anchors	68	0.9
	Set Up Rad Control Zone	21	0.3
	Consumables	22	0.3
	Total	7,236	100.0

마재 및 오염 잔재물 처분 비용이 반영된 결과로 판단된다[15]. 따라서 원전 해체 시 콘크리트 제염공법은 단일 지표에 따라 선정하기보다, 각 공법별로 유리한 적용 조건과 제한 조건을 함께 검토하여 현장 조건에 적합한 제염 전략을 수립할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원전 해체 시 적절한 콘크리트 제염 전략 수립에 필요한 기초자료를 도출하기 위하여, 주요 기계적 콘크리트 제

Table 7. Qualitative summary of mechanical concrete decontamination methods based on the investigated demonstration cases[a)]

Method	Removal efficiency	Remote operability	Work duration	Cost efficiency
Scabbling	Low	Partly applicable	Long	Moderate
Shaving	High	Limited	Short	High
Grinding	Moderate	Low	Moderate	Low
Grit Blasting	High	High	Short	Low

[a)]Qualitative ratings reflect the reported performance and cost characteristics under the investigated demonstration conditions.

Table 8. Comparison of unit surface removal work costs and non-removal costs of mechanical concrete decontamination methods

Method	Treated area (ft^2)	Surface removal work cost ($)	Surface removal work cost per unit area ($ ft^{-2})	Non-removal cost ($)	Total cost ($)
Scabbling	816	3,307	4.05	8,873	12,180
Shaving	816	1,077	1.32	4,744	5,821
Grinding	54	385	7.13	3,653	4,038
Grit Blasting	180	527	2.93	12,072	12,599

염공법의 특성을 비교·분석하였다. 분석 대상 공법은 제거 메커니즘에 따라 타격·파쇄 방식의 Scabbling, 절삭 방식의 Shaving, 연삭 방식의 Grinding 및 연마재 고속 분사 방식의 Grit Blasting으로 선정하였다.

이를 위하여 기계적 콘크리트 제염공법별로 1) 적용 및 제거 특성, 2) 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성, 3) 비용 특성을 조사하였다. 적용 및 제거 특성은 적용 가능한 표면, 작업 수행 특성, 제거 깊이 및 제거율을 중심으로 비교하였다. 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성은 폐기물 발생 형태, 오염확산 관리 특성, 작업자 접근성 및 작업시간을 중심으로 비교하였다. 비용 특성은 Mobilization, D&D Work, Demobilization, Waste Disposal 항목으로 구분하여 비용 항목 구성과 단위면적당 비용을 비교하였다.

조사 결과, 기계적 콘크리트 제염공법은 적용 및 제거 특성, 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성, 비용 특성에 따라 유리한 조건이 서로 다르게 나타났다. Scabbling은 평탄한 바닥의 표면층 제거에 적용 가능하였으나, 타격·파쇄 방식의 특성상 진동·소음이 크고 작업자 및 폐기물 모니터링 비용의 비중이 크게 나타났다. Shaving은 넓고 평탄한 바닥면에서 높은 제거율을 보였으며, 단위면적당 비용이 낮게 나타났다. Grinding은 장애물 주변, 협소부 및 국부 오염 부위에서 활용성이 높았으나, 국부 제염 사례에서 단위면적당 비용이 높게 나타났다. Grit Blasting은 벽면, 수직면 및 천장면에 적용 가능하고 작업자와 오염 표면 사이의 거리 확보 측면에서 유리하였으며, 복합 장비 운용과 폐기물 처분 비용의 영향이 큰 것으로 나타났다.

따라서 기계적 콘크리트 제염공법은 단위면적당 비용이나 제거율 등 단일 지표만으로 우열을 판단하기보다, 적용 및 제거 특성, 오염 발생 및 작업자 피폭 관련 특성, 비용 특성을 종합적으로 고려하여 현장 조건에 적합한 공법을 선정할 필요가 있다. 본 연구 결과는 향후 국내 영구정지 원전 해체 시 콘크리트 구조물 제염공법 선정과 제염 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 가동원전 안전성 향상 핵심기술개발사업의 연구결과입니다(No. RS-2022-00143994).

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. 2025. NSSC Approved Korea's First Decommissioning of a Nuclear Power Plant: Kori Unit 1. Press Release, June 26, 2025. Nuclear Safety and Security Commission, Seoul.
2. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. n.d. Final Decommissioning Plan for Kori Nuclear Power Plant Unit 1: Summary Version. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Gyeongju.
3. Kim HJ, Lee JY, Kim KM and Kim YS. 2020. A Study on the Review of Concrete Waste Generated by Decommissioning of Nuclear Power Plant. Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting, July 9-10, 2020.
4. OECD Nuclear Energy Agency. 1999. Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
5. U.S. Environmental Protection Agency. 2006. Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surfaces. EPA-402-R-06-003. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, DC.
6. International Atomic Energy Agency. 2005. Selection of Decommissioning Strategies: Issues and Factors. IAEA-TECDOC-1478. International Atomic Energy Agency, Vienna.

7. OECD Nuclear Energy Agency. 2011. Decontamination and Dismantling of Radioactive Concrete Structures. NEA/RWM/R(2011)1. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
8. International Atomic Energy Agency. 1999. State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities. Technical Reports Series No. 395. International Atomic Energy Agency, Vienna.
9. International Atomic Energy Agency. 2023. Decontamination Methodologies and Approaches. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.38. International Atomic Energy Agency, Vienna.
10. OECD Nuclear Energy Agency. 2003. Decommissioning Nuclear Power Plants: Policies, Strategies and Costs. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
11. OECD Nuclear Energy Agency. 2015. The Practice of Cost Estimation for Decommissioning of Nuclear Facilities. NEA No. 7237. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
12. U.S. Department of Energy. 1998. Remotely Operated Scabbling. DOE/EM-0467. Innovative Technology Summary Report. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Washington, DC.
13. U.S. Department of Energy. 1998. Concrete Shaver. DOE/EM-0397. Innovative Technology Summary Report. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Office of Science and Technology, Washington, DC.
14. U.S. Department of Energy. 1998. Concrete Grinder. DOE/EM-0374. Innovative Technology Summary Report. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Washington, DC.
15. U.S. Department of Energy. 2001. En-Vac Robotic Wall Scabbler. DOE/EM-0578. Innovative Technology Summary Report. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Washington, DC.
16. Risk Management Consultants Ltd. 2004. Review of Clean-up and Techniques Applicable to Discharges from Decommissioning. Science Report SC030165/SR. Environment Agency, Bristol.
17. European Commission. 2009. Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how. CND WP7 Final Report. European Commission, Brussels.
18. International Atomic Energy Agency. 2014. Decommissioning of Facilities. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 6. International Atomic Energy Agency, Vienna.
19. International Atomic Energy Agency. 2018. Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-47. International Atomic Energy Agency, Vienna.
20. International Atomic Energy Agency. 2001. Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities. Technical Reports Series No. 401. International Atomic Energy Agency, Vienna.
21. Interstate Technology & Regulatory Council. 2008. Decontamination and Decommissioning of Radiologically Contaminated Facilities. RAD-5. Interstate Technology & Regulatory Council, Radionuclides Team, Washington, DC.
22. International Atomic Energy Agency. 2005. Dismantling of Contaminated Stacks at Nuclear Facilities. Technical Reports Series No. 440. International Atomic Energy Agency, Vienna.