



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

콘크리트 구성성분 및 함수상태의 변화가
레이저 스캐블링에 미치는 영향



2023년 02월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 · 소 방 공 학 부

허 성 욱

공학석사 학위논문

콘크리트 구성성분 및 함수상태의 변화가 레이저 스캐블링에 미치는 영향

지도교수 정 철 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2023년 02월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 · 소 방 공 학 부

허 성 욱

허성욱의 공학석사 학위논문을 인준함.

2023년 02월 17일



위 원 장 공학박사 이 창 환 (인) 

위 원 공학박사 정 근 주 (인) 

위 원 공학박사 정 철 우 (인) 

목 차

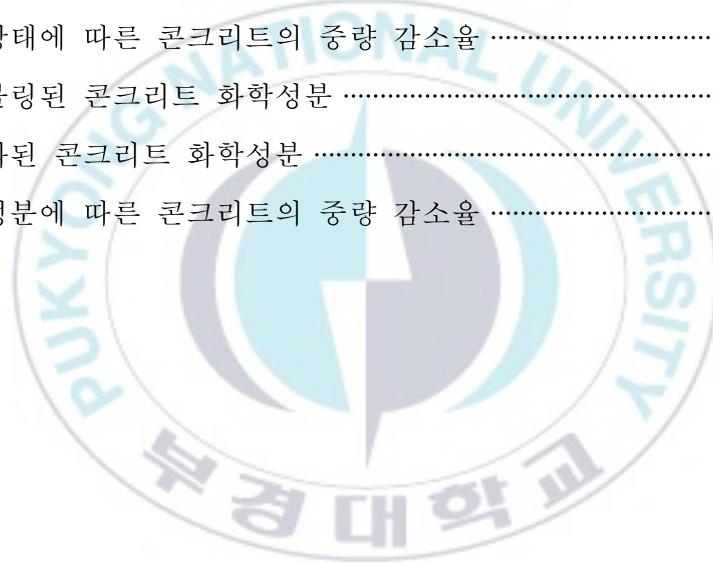
Abstract

I. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 방법 및 범위	5
II. 이론적 고찰	7
2.1 원자력 구조물 해체 계획 및 현황	7
2.2 방사성 콘크리트 폐기물 제염기술	11
2.2.1 방사성 콘크리트 폐기물의 특성	11
2.2.2 기계적 제염	14
2.2.3 화학적 제염	16
2.3 콘크리트 스캐블링	19
2.3.1 기존 스캐블링	19
2.3.2 레이저 스캐블링	20
III. 실험방법	23
3.1 실험재료	23
3.2 콘크리트 시험체 제작 및 배합설계	30
3.2.1 콘크리트 시험체 제작	30
3.2.2 콘크리트 배합설계	31
3.3 재령 28일 압축강도 시험	33

3.4 콘크리트 공극률 시험	34
3.5 레이저 스캐블링	35
3.6 미세구조 분석	37
IV. 실험결과	38
4.1 재령 28일 압축강도	38
4.2 콘크리트의 공극률	39
4.3 레이저 스캐블링	40
4.3.1 함수상태에 따른 콘크리트 레이저 스캐블링	40
4.3.2 미세 구조 관찰 및 화학적 조성	45
4.3.3 구성성분에 따른 콘크리트 레이저 스캐블링	51
4.4 고찰	53
V. 결 론	55
참 고 문 헌	57

표 목 차

표 3.1 시멘트 화학성분	23
표 3.2 플라이 애시 화학성분	25
표 3.3 고로 슬래그 화학성분	26
표 3.4 석회석 화학성분	27
표 3.5 세척사 화학성분	29
표 3.6 콘크리트 배합설계표	32
표 4.1 콘크리트의 부피밀도, 겉보기 밀도 및 공극률	39
표 4.2 함수상태에 따른 콘크리트의 중량 감소율	41
표 4.3 스캐블링된 콘크리트 화학성분	45
표 4.4 유리화된 콘크리트 화학성분	48
표 4.5 구성성분에 따른 콘크리트의 중량 감소율	51



그 립 목 차

그림 1.1 연구 흐름도	5
그림 2.1 해체 단계별 수행 내용 및 소요기간	8
그림 3.1 시멘트 광물상 조성	24
그림 3.2 플라이 애시 광물상 조성	25
그림 3.3 고로 슬래그 광물상 조성	26
그림 3.4 석회석 광물상 조성	28
그림 3.5 세척사 광물상 조성	29
그림 3.6 콘크리트 시험체 형상	31
그림 3.7 콘크리트 압축강도 시험기	33
그림 3.8 콘크리트 공극률 시험 모식도	34
그림 3.9 콘크리트 레이저 스캐블링 모식도	35
그림 3.10 FE-SEM 장비	37
그림 4.1 재령 28일 콘크리트 압축강도	38
그림 4.2 함수상태에 따른 콘크리트 스캐블링 전·후 형상	42
그림 4.3 절건 상태의 콘크리트 열화상 카메라 측정	43
그림 4.4 기건·표건 상태의 콘크리트 열화상 카메라 측정	44
그림 4.5 스캐블링된 콘크리트 표면 미세구조형상	46
그림 4.6 스캐블링된 콘크리트 표면 화학성분조성	47
그림 4.7 스캐블링된 콘크리트 광물상 조성	47
그림 4.8 유리화된 콘크리트 표면 미세구조형상	49
그림 4.9 유리화된 콘크리트 표면 화학성분조성	50
그림 4.10 유리화된 콘크리트 광물상 조성	50
그림 4.11 구성성분에 따른 콘크리트 스캐블링 전·후 형상	52

Effect of Changes in the Constituents and Moisture State of Concrete
on Laser Scabbling

Seong Uk Heo

Division of Architectural and Fire Protection Engineering,
Pukyong National University

Abstract

It is known that concrete waste accounts for more than 70% of the waste generated during decommissioning of nuclear power plant. A lot of research has been conducted to reduce the amount of concrete waste using mechanical decontamination and chemical decontamination process. However, problems such as safety of the worker, limited accessibility to contaminated area, secondary waste generation, as well as waste disposal and handling have been issued with existing decontamination process. Laser scabbling has been introduced to reduce such problems because it can be used remotely from a long distance to minimize access to radioactively contaminated areas. In this study, the effect of mix proportion and moisture state of concrete on laser scabbling process was investigated. Laser scabbling with 200mm/min scan speed was performed using 5kW fiber laser located 900mm away from the surface of concrete. Weight loss and surface condition of concrete after laser scabbling were evaluated. Compressive strength and void content of concrete were measured, and FE-SEM(Field emission scanning electron microscope) was used for microstructural observation of concrete after laser scabbling. According to the experimental results, high strength concrete with lower void content showed higher removal of concrete after laser scabbling (highest

efficiency). The concrete with oven dry state did not show the efficiency for laser scabbling, and, as a result, vitrification has occurred. However, laser scabbling was successfully applied to air dried and saturated surface dried concretes. It was found that the presence of moisture is a necessary prerequisite for laser scabbling of concrete, but moisture content did not seem to significantly affect laser scabbling performance as long as moisture exists in concrete. The effect in the change of the fine aggregate proportion and paste content on laser scabbling was negligible.



I. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

1978년 국내 최초의 상업용 원전 고리 1호기를 시작으로 국내 원자력 발전소는 현재 총 24기의 원전이 운전 중이며, 건설 중인 원전과 건설 준비 중인 원전은 모두 4기이다¹⁾. 최초 단계에서 건설된 원자력 발전소의 노후화에 따라 국내의 2017년 고리 1호기, 2019년 월성 1호기의 영구정지가 결정되었고, 2030년까지 추가로 총 12기의 설계수명이 만료될 예정이다. 이로 인해 노후화된 원자력 구조물 해체에 대한 관심도가 높아지고 있다.

국제원자력기구인 International Atomic Energy Agency(IAEA)는 “해체란 시설의 일부 또는 전부를 규제 관리에서 제외하기 위한 기술적 행정적 조치를 말하며, 해체에는 계획, 물리적 및 방사능 특성화, 시설 및 현장 오염 제거, 해체 및 자재관리와 같은 활동을 일컫는다²⁾”라고 정의한다. 또한 국내 원자력 안전법 제 2조에 따르면, “해체란 원자력 안전법에 따라 허가 받은 시설의 운영을 영구적으로 정지한 후, 해당 시설과 부지를 철거하거나 방사성오염을 제거함으로써 원자력안전법의 적용대상에서 배제하기 위한 모든 활동을 말한다³⁾”라고 정의한다. 원전해체는 원전의 시공·운영·해체의 운영과정에서 최종 방점을 찍는다는 측면에서 중요하지만, 환경 복원적인 측면에서도 상당한 중요성을 가지므로, 국내·외적으로 매우 활발한 연구가 진행되고 있다.

1) 원자력안전위원회. (2020). 국내 원자발전소 현황. <https://www.data.go.kr/data/15046076/fileData.do>.

2) International Atomic Energy Agency(IAEA). (2016). Decommissioning of nuclear installations. <https://www.iaea.org/topics/decommissioning>.

3) 원자력 안전법 제2조 제24항. <https://www.law.go.kr/법령/원자력안전법>.

원자료를 포함해 모든 원자력 시설 해체는 오염된 부지를 원상태로 복원하는 것이 최종 목표이며, 원자력 발전소 해체는 영구정지 결정에 따른 운영 중지부터 환경 복원까지 20년 이상 소요되는 긴 프로젝트이다. 원자력 시설을 해체하기 위해서는 시설의 가동 정지 단계, 시설의 특성을 분석하는 해체 준비 및 계획 단계, 시설을 해체하거나 제염하는 해체 공사 단계, 부지 복원 후 부지를 규제 해제하는 환경 복원 단계를 거친다. 이에 발생하는 모든 방사성폐기물은 원활한 운영 및 관리가 필요하다⁴⁾. 분류 절차를 거친 방사성폐기물은 감용 과정을 거쳐 방사성폐기물 처분장에서 처리되며, 남은 폐기물은 재활용 되거나 일반폐기물로 처리된다. 원전 해체 관련 전 분야에 대해서 기술개발 및 인프라를 구축하는데 힘을 써야 하는 실정이며, 국내 해체 핵심기반기술은 선진국의 80% 수준으로 핵심 원천기술 자립 및 조기 확보, 고도화가 필요하다.

콘크리트는 원자력시설의 주요 건축재로써 시설의 운전, 유지보수 등의 각종 활동 중에 그 일부가 오염이나 방사화 되기 때문에 원자력시설 해체 시 금속폐기물과 더불어 가장 주요하게 발생하는 방사성 폐기물이다⁵⁾⁶⁾. European Commission의 보고서에 의하면 2060년까지 원자력 시설의 해체에 따라 유럽에서만 약 500만 톤의 콘크리트 폐기물이 발생할 것으로 예상하고 있다⁷⁾. 원자력시설의 방사성 콘크리트 폐기물은 시설의 종류와 그에 따른 오염의 상태, 해체 공법 및 감용 처리 유무에 따라 발생량의 차이가

4) 최상준. (2014). 차세대 제염해체 원천 기반기술 연구센터. 경북대학교.

5) Moon, J. K. (2012). Status of the technology development for decontamination and decommissioning of nuclear facilities. Nuclear Industry, 7(8), 34-58.

6) Min, B. Y., Park, J. W., Choi, W. K., & Lee, K. W. (2009). Separation of radionuclide from dismantled concrete waste. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 7(2), 79-8.

7) 정운수. (2007). 선진국의 원자력 시설 해체사업 현황과 수행 전략, 한국원자력연구원.

크기 때문에, 실제 원자력 시설의 해체사업이 수행되기 이전에는 폐기물 발생량을 예측하기 어렵다⁸⁾. 폐기물은 방사능 농도에 따라 고준위 방사성 폐기물(반감기 20년 이상 방사능 농도 4,000Bq/g, 열발생률 2kW/m³), 중·저준위 폐기물, 자체처분 등으로 방사성폐기물 분류 및 자체처분 규정에 의해 처리되는데⁹⁾, 방사화 되었거나 방사성 물질에 의해 표면 오염된 콘크리트 폐기물은 중·저준위 폐기물로 분류되는 경우가 대부분이다¹⁰⁾¹¹⁾.

기존 방사성 콘크리트 폐기물의 제염방법은 기계적 스캐블링과 고압 액체 분사 기술이 적용되고 있다. 그러나 이 방법들은 작업자의 피폭 안전성과 2차 폐기물 발생 등으로 인한 문제가 있다. 이러한 이유들로 원자력시설 내 고방사능 구조물의 해체 시 안전성 확보 및 폐기물 발생량의 최소화를 위한 신개념 제염기술의 개발 필요성이 증가하고 있다. 방사성 핵종의 이동은 콘크리트의 공극 구조에 의해 제한되기 때문에 오염은 일반적으로 콘크리트 표면에 발생한다¹²⁾¹³⁾. 따라서 대부분의 오염제거 공정은 콘크리트 표면 영역 제거에 초점을 맞추고 있다. 표면오염 콘크리트의 기존 스캐블링 기술은 폐기물 처리 비용을 절감시켜주고, 작업의 안전성을 보장하기

8) Lee, K. Y., Oh, M., Kim, J., Lee, E. H., Kim, I. S., Kim, K. W., ... & Seo, B. K. (2018). Trends in technology development for the treatment of radioactive concrete waste. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 16(1), 93-105.

9) 원자력안전법 시행령 제2조 제1항, <https://www.law.go.kr/법령/원자력안전법시행령>.

10) 배성철, 박재연. (2020). 원전해체 콘크리트 폐기물 처분 현황 및 연구 사례. *Magazine of RCR*, 15(2), 45-5.

11) 정철우, 김지현. (2021). 원전 콘크리트 제염 해체시 발생하는 시멘트 페이스트 미분말의 재활용 기술. *Magazine of RCR*, 16(3), 34-38.

12) Burke, S. (1990). Concrete decontamination. a literature review. Technical report AEEW.

13) Savina, M., Xu, Z., Wang, Y., Reed, C., & Pellin, M. (2000). Efficiency of concrete removal with a pulsed Nd: YAG laser. *Journal of Laser Applications*, 12(5), 200-204.

위해 고안된 기계적 오염 제거 기술이며, 단면적이 넓은 콘크리트에 효율적으로 적용할 수 있다. 그러나 가동 중 발생하는 분진으로 별도의 설비 장치가 요구되며, 높아진 압력으로 인해 원격 제어가 어렵고, 장비의 고장 등을 해결하기 위해 사람이 접근해야 하는 단점을 가진다. 레이저 스캐블링 기술은 이러한 부분으로 보완하기 위해 도입된 기술이며, 기존 기계적 스캐블링 장비와 같이 건식 처리가 가능하다. 또한, 장거리 작업이 가능하므로 사람의 접촉을 최대한 막을 수 있으며, 방사선에 의한 노출 피폭량을 줄일 수 있다.

본 연구에서 다루고자 하는 광섬유 레이저 스캐블링은 고체 및 기체 레이저보다 에너지 손실이 적고 소형화에도 우수한 작업성을 제공하는 기술이다¹⁴⁾. 본 연구에서는 제염 신기술인 레이저 스캐블링의 작동원리, 성능 및 효율성을 검증하기 위해, 콘크리트의 구성성분 및 함수상태를 변화시켜 스캐블링에 끼친 영향을 비교 분석하고자 한다.

14) Heo, S. U., Kim, J. H., Oh, S. Y., Lim, G., Nam, S., Kim, T., ... & Chung, C. W. (2022). Effect of moisture content and mix proportion of concrete on efficiency of laser scabbling. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01040.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 표면 오염 콘크리트의 제염 기술 중 하나인 레이저 스케블링을 평가하기 위해 콘크리트의 구성성분과 함수상태 변화에 따른 연구를 진행하고자 한다. 콘크리트의 배합설계조건은 잔골재율, 단위 시멘트량을 변화시켜 설정하였다. 연구의 구성 체계를 나타내는 흐름도는 그림 1.1에 요약하여 표현하였다.

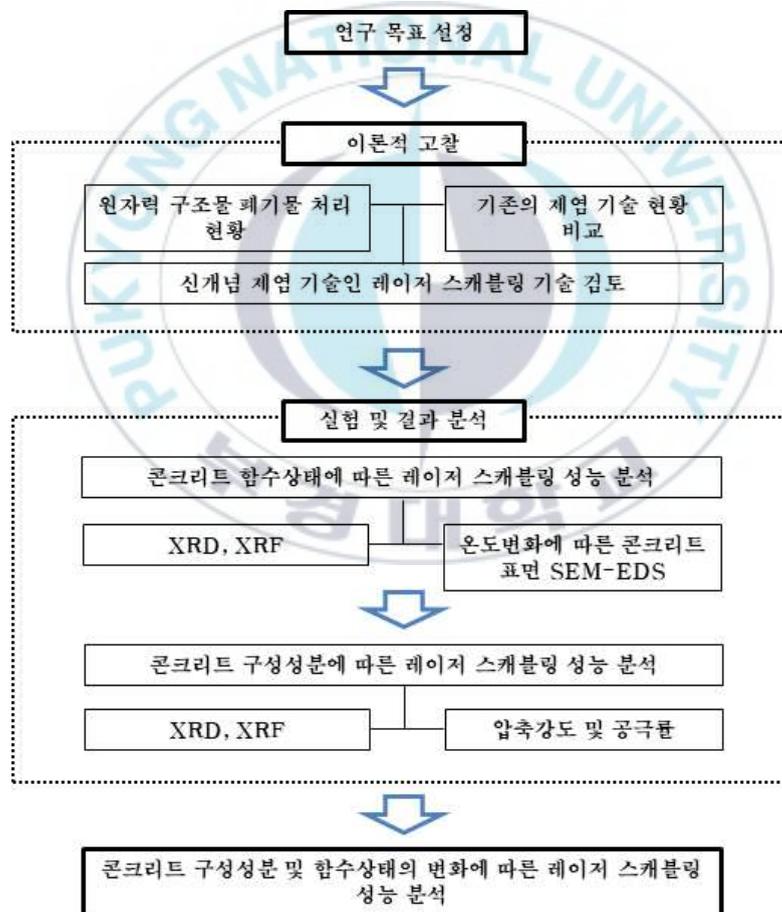


그림 1.1 연구 흐름도

우리나라와 일본의 원자력 구조물 콘크리트는 장기강도 발현 및 균열 감소를 위해 일반적으로 1종 시멘트에 5~30% 치환시켜 플라이 애시를 혼입한 시멘트를 주로 사용하며, 미국에서는 II종 중용열 포틀랜드 시멘트를 사용한다. 또한 구조물의 역할에 따라 방사선 차폐성능 향상을 위해 자철석, 중정석 등의 중량 골재를 사용하는 경우도 있다¹⁵⁾.

본 연구에서는 굵은 골재(석회석)를 사용한 일반강도 콘크리트를 제작하고, 콘크리트를 3가지 함수상태(절건, 기건, 표건)로 조절하여 내부 수분의 존재량 차이에 따른 콘크리트 레이저 스캐블링을 통한 성능을 평가하고자 한다. 또한, 콘크리트의 잔골재율과 단위 시멘트량을 변화시킨 콘크리트도 제작하여, 배합 구성 성분의 차이에 따른 레이저 스캐블링 제염 기술의 효율도 평가하고자 한다. 이러한 목적 달성을 위하여 배합재료의 화학적 조성 및 광물상의 형태를 분석하고, 콘크리트의 스캐블링 전·후 열화상 이미지 및 미세 구조의 관찰을 통해 스캐블링된 콘크리트 표면과 유리화된 콘크리트 표면의 차이를 검증한 후, 광섬유 레이저 스캐블링 기술의 적용에 필요한 요건을 제시하고자 한다.

15) 배성철, 박재연. (2020). 원전해체 콘크리트 폐기물 처분 현황 및 연구 사례. Magazine of RCR, 15(2), 45-51.

II. 이론적 고찰

2.1 원자력 구조물 해체 계획 및 현황

국제원자력기구 IAEA의 원전 정보 시스템에 따르면, 2020년 5월 기준 전 세계에서 운영 정지된 원자력발전시설은 188기로 대부분이 평균설계수명에 도달했거나 경제성 측면에서 해체가 진행 중이며, 그 중 현재 약 20기의 해체가 완료되었다. 전 세계 가동 중인 원전 441기 중 평균 수명 30년 이상 노후 원전의 비율은 68.0%, 40년 이상 원전은 24.5%로 향후 세계 원전 해체 시장은 2110년까지 약 368조, 연평균 약 3.9조 원의 가치를 생산할 것으로 추정됨과 동시에 국내 원전 산업도 해외 시장 경쟁력 확보 방안을 조속히 수립할 필요가 있다¹⁶⁾.

현재 원전해체 방식에는 즉시해체(Immediate Dismantling, DECON), 지연해체(Deferred Dismantling, SAFSTOR)와 영구매몰 혹은 차폐격리(Entombment, ENTOMB)의 3가지 방식이 적용되고 있는데, 2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 즉시해체 방식이 가장 선호되고 있다. 그림 2.1은 즉시해체 방식 적용 시 해체 단계별(영구정지, 해체 준비, 제염, 해체, 폐기물 처리, 부지 복원) 예상 소요기간 및 단계별 수행 내용을 나타낸 것이다¹⁷⁾.

16) IAEA PRIS, <http://pris.iaea.org/pris/home.aspx>.

17) 이장화, 김도겸, & 권기현. (2017). 원자력발전소 해체기술 및 시장 현황과 전망. 대한토목학회지, 65(11), 20-26.

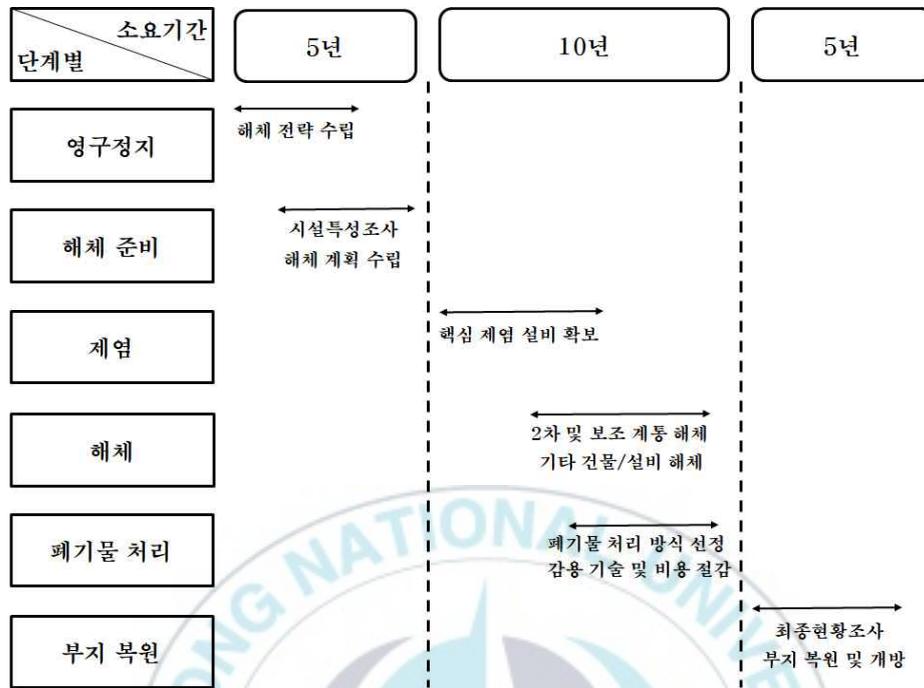


그림 2.1 해체 단계별 수행 내용 및 소요기간

해체 준비 기술은 해체 작업 시 발생하는 시행착오를 사전에 검토하여 최적의 시나리오 구상 및 계획을 수립하는 단계로, 해체 사업의 효율성과 안전성을 중심으로 공정 관리 및 특성 평가를 필요로 한다. 국내 연구로 및 우라늄변환시설 해체를 통해 해체사업에 필요한 기반기술은 상당 부분 확보한 상태이다. 제염 기술은 방사성 물질과 기타 오염물질의 제거, 폐기물 발생량 및 작업자의 피폭 저감을 위하여 필요한 기술이며, 기계적 제염과 화학적, 전기화학적, 열적 공정들이 포함되어 있다. 1차 계통의 제염기술은 미확보인 상태이며, 제염 공정평가 분야는 개발 시작단계이고, 원격제염 분야는 상용화된 사례가 많지 않다.

폐기물 처리 단계는 제염 및 해체 과정에서 발생된 폐기물을 방사능 기

준치 이하로 처리하여 폐기물의 저장 및 사후 관리를 위해 필요한 기술로, 폐기물 특성에 맞는 기술을 확보해야 한다. 부지 복원 단계는 해체가 완료된 부지를 자연환경 상태로 복원하는데 필요한 모든 활동을 일컫는다. 고리 1호기의 영구정지를 시작으로 국내 원자력 구조물 해체 산업의 규모가 커지고 있으며, 원전 해체산업 고도화를 위해 다음과 같은 정책들을 마련하는 것이 시급하다. 세계 수준의 원자력 해체기술 확보 및 해체 산업의 활성화를 위해서 해체장비 개발 및 원전 해체 상용화 기술 개발이 필요하며, 이를 위한 해체 기술 개발 인프라가 구축되어야 한다¹⁸⁾.

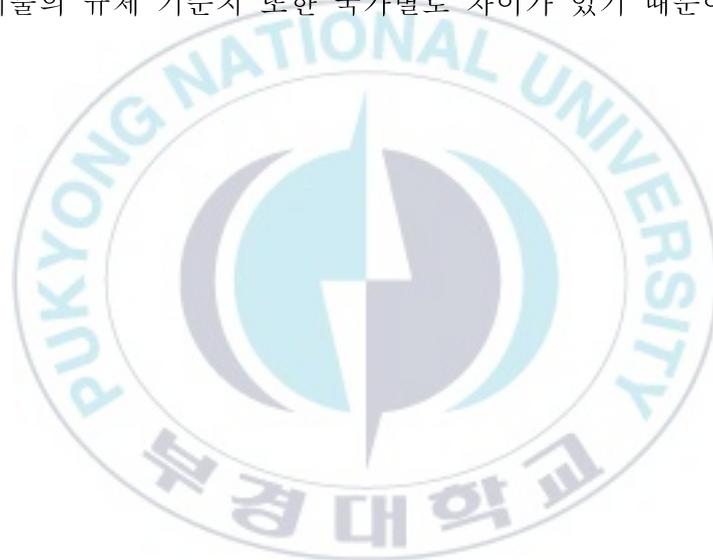
원자력시설의 해체 시 발생하는 방사성 폐기물은 주로 금속 폐기물과 콘크리트 폐기물이 존재한다. 그 중 콘크리트 폐기물은 70% 이상을 차지한다. 상용 원자력 발전소의 경우는 해체 폐기물이 약 50~55만ton 발생하며, 이들 방사성 폐기물은 약 5% 내 차지한다. 1기의 상용원자로를 해체할 경우 방사성 콘크리트 폐기물은 약 25,000ton이 발생하며, 이는 발전소 수명 기간에 발생하는 폐기물의 총량을 훨씬 상회하는 물량이다¹⁹⁾. 미국의 Maine Yankee 원전(860MWe, PWR(P))에서는 방사성 콘크리트 폐기물이 약 63,485ton에 이르는 막대한 양이 발생하였는데, 이는 전체 방사성 해체 폐기물의 64.4%를 차지하였지만, Maine Yankee 원전의 방사성 콘크리트 폐기물은 처분단가가 제염비용보다 저렴하여 콘크리트 폐기물의 제염처리 없이 처분한 사례에 해당한다²⁰⁾. 러시아의 가압 경수로 VVER(440MWe) 원전 1기의 해체를 통해 발생한 방사성 콘크리트 폐기물은 약 10,000ton이

18) 세계원전시장 인사이트. (2020). 국내외 원전해체 기술 개발 동향 및 전망. 에너지경제연구원.

19) 송중순. (2016). 원전해체 폐기물 처리 기술의 현황과 미래. 국가환경정보센터 Konetic Report.

20) Aker, R., Feigenbaum, T., Meisner, M., & Thomas, M. (2005). Maine Yankee Decommissioning Experience Report. New Horizon Scientific, 5-1.

며, 비등경수로 RBMK(1,000MWe) 원전 1기는 약 100,000ton의 방사성 폐기물이 발생하는 것으로 보고되었다²¹⁾. 반면, Trojan 원전(1,130MWe, PWR) 해체 후 발생한 방사성 콘크리트 폐기물의 양은 단지 284톤에 불과했는데²²⁾, 이는 방사성폐기물의 부피를 최소화하고 가능한 많은 양을 재활용하고자 한 목표를 달성한 결과로 미국 내에서도 대표적인 제염 및 재활용 기술이 적용된 사례에 해당한다²³⁾. 이와 같이 원자력시설의 해체를 통해 발생하는 방사성 콘크리트 폐기물의 양은 국가별, 시설별로 큰 차이를 보인다. 이는 각 시설의 오염 상태가 모두 상이하고 적용된 기술들이 다르며, 해체 폐기물의 규제 기준치 또한 국가별로 차이가 있기 때문이다.



-
- 21) Khvostova, M. S. (2012). Some aspects of the decommissioning of nuclear power plants. *Power Technology and Engineering*, 45(6), 447-453.
 - 22) US Nuclear Regulatory Commission. (2001). Inventory of materials with very low levels of radioactivity potentially clearable from various types of facilities. USNRC Inventory Report, Virginia.
 - 23) Watson, B. A., Buckley, J. T., & Craig, C. M. (2006). Two approaches to reactor decommissioning: 10 CFR Part 50 license termination and license amendment, lessons learned from the regulatory perspective. In *Proceedings of the Waste Management 2006 Conference*.

2.2 방사성 콘크리트 폐기물 제염기술

2.2.1 방사성 콘크리트 폐기물의 특성

콘크리트는 대략 5%의 공기, 25%의 시멘트 페이스트, 70%의 골재로 구성되어있다. 보통 비중이 2.7 이상의 중량골재를 사용한 중량콘크리트는 방사선 차폐의 기능을 갖기 때문에 주로 생물체의 방호를 위하여 X선 및 감마선을 차폐하는 목적으로 사용한다. 혼화재료는 콘크리트의 강도 및 내구성을 증진시키거나, 수화작용 조정, 또는 화학저항성 증진 등의 목적으로 사용되는 물질로써 그 종류는 매우 다양하다²⁴⁾.

원자력시설 해체 시 발생하는 방사성 콘크리트는 크게 표면 오염 콘크리트와 방사화 콘크리트로 구분할 수 있으며, 방사성핵종은 대부분 골재가 아닌 시멘트 페이스트에 존재하는 것으로 알려져 있다²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾. 콘크리트와 같은 고체 매질에서 방사성핵종의 오염은 크게 2가지로, 핵종의 이동 현상, 핵종과 고체 매질 간 반응을 통해 진행된다³⁰⁾. 콘크리트는 표면오염

24) Young, J. F., Mindess, S., & Darwin, D. (2002). Concrete. Prentice Hall.

25) International Atomic Energy agency. (2001). Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities. Technical Reports Series No. 401, IAEA, Vienna.

26) Min, B. Y., Park, J. W., Choi, W. K., & Lee, K. W. (2009). Separation of radionuclide from dismantled concrete waste. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 7(2), 79-8.

27) White, T. L., Foster Jr, D., Wilson, C. T., & Schaich, C. R. (1995). Phase 2 microwave concrete decontamination results (No. CONF-950216--127). Oak Ridge National Lab.

28) E. J. Cox and R.Garde, (1990). decontamination of concrete surfaces at the los Alamos Scientific Laboratory, PNL-SA-8855.

29) Koga, Y., Inoue, T., Tateyashiki, H., Sukekiyo, M., Okamoto, M., & Asano, T. (1997). A process for separating aggregate from concrete waste during the dismantlement of nuclear power plants. Hoshasei Haikibutsu Kenkyu, 3(2), 17-25.

후 방사성 핵종이 내부로 침투해 들어가는데, 이와 같은 과정은 침투에 의한 핵종확산에 의한 것이며, 시간에 따른 내부 수분함량의 변화로 인한 거동을 분석함으로써 제염시점이나 피폭 기준에 맞는 제염 조건의 설정을 가능하게 한다³¹⁾.

핵종의 이동과정은 고체와 액체 경계간의 이동, 공극 내 이동, 고체 표면에서의 확산 등 여러 가지 현상들로 설명되고 있다. 핵종의 매질 내 이동 후 또는 이동 중에 다양한 화학 반응들이 동반되는데, 대표적으로 흡착, 흡수, 수착, 확산, 침투 등을 예로 들 수 있다. 동적 평형상태(Equilibrium)에 이르러 고정되거나 계속해서 이동에 참여하며, 화학적인 반응들의 일부는 수초의 짧은 시간을 통해 진행된다. 하지만, 수개월 또는 수년 동안 고체상 변환(Solid phase transformation)에 의해 결정화, 재결정화, 고착화되기도 하는데 이러한 현상을 숙성(Aging)이라 한다³²⁾.

핵종 이동 억제효과를 지닌 콘크리트의 균열이 생길 경우, 지하수의 흐름이 발생하여 주변 토양이나 구조물에 침출되거나 확산한다. 콘크리트를 통한 이온 확산은 공극내의 수용액상을 통해 일어나며, 다공성 물질에서 수용액상을 통한 이온의 확산은 진행방향과 관계없이 기하학적 형상에 의한 영향도 함께 받게 된다. 또한 이동 핵종과 반대되는 전하를 가진다면 표면과 이온사이의 강한 결합력이 생겨 이온의 이동은 더욱 지연될 것이다³³⁾. 이와 같은 오염 현상들을 고려하였을 때, 콘크리트 폐기물 내 방사성 핵종은 자갈과 모래와 같이 밀도가 높으며 조밀한 실리카로 구성된 골재에

30) 한국원자력연구원. (2020). 원자력시설 DD&R 선진 기술 개발 최종보고서.

31) 안성규. (2000). X선 단층 촬영용 고체형 검출기 특성에 관한 연구. 한국과학기술원 석사학위논문.

32) Sparks, D. L. (2003). Environmental soil chemistry. Elsevier.

33) 금동권, 조원진, & 한필수. (1997). 콘크리트를 통한 핵종의 확산계수. 한국원자력학회지, 29(6), 17-28.

오염되기보다는 계면간의 이동에 취약하고 다공성인 시멘트 페이스트에 주로 오염되는 것을 볼 수 있다.

표면 오염 콘크리트는 원자력 시설 운전 중 또는 해체 과정에서 여러 가지 원인에 의해 발생한다. 방사성핵종은 오염경로, 오염원 등에 의해 다양하나 원전의 경우 대표적인 핵종으로써 ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{137}Cs 등이 존재한다. 핵연료주기 관련시설의 경우, U, Pu, Am 등의 악티늄족 원소에 의해 오염된 사례를 볼 수 있다. 또한 미국의 Maine YanKee 원전 해체 시 발생한 방사성 오염 콘크리트에서는 방사능의 99%가 콘크리트 표면 1mm 깊이 이내에 존재하고, 방사능의 98%를 차지하는 오염핵종은 ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{137}Cs 인 것으로 보고되었다³⁴⁾.

방사화 콘크리트는 생체차폐체로 사용된 콘크리트가 원자력시설 운전 과정에서 생성되는 중성자에 조사되어 방사화됨으로써 발생한다. 일반적으로 중성자가 조사되는 지역으로부터 깊이에 따라 방사능 분포가 지수 함수적으로 감소한다. 주요 검출 핵종은 ^{60}Co 과 ^{152}Eu 로 일부 문헌의 방사화분포를 살펴보았을 때, 이 핵종이 전체 방사능의 대부분을 차지하는 것으로 보고되었다³⁵⁾³⁶⁾³⁷⁾. 이들 핵종의 종류는 콘크리트 구성성분 및 그 함량에 좌우되고 방사능의 세기는 방사화 정도에 따라 차이를 보인다. 국내의 연구

34) US Nuclear Regulatory Commission. (2001). Inventory of materials with very low levels of radioactivity potentially clearable from various types of facilities. USNRC Inventory Report, Virginia.

35) Lee, J. S., Min, J., Won, C., & Han, S. M. (2014). Formation of raw materials for manufacturing low-activation binding material. Journal of the Korea Concrete Institute, 26(1), 399-400.

36) 차길용, 김순영, 이재민, 김용수. (2016). 경수로 구조체 내 불순물 조성 및 함량이 중성자 방사화 핵종 재고량에 미치는 영향 분석. 한국방사성폐기물학회, 14(2), 91-100.

37) Pantelias, M., & Volmert, B. (2015). Activation neutronics for a swiss pressurized water reactor. Nuclear Technology, 192(3), 278-285.

로 2호기 해체를 통해 발생한 방사화 콘크리트 폐기물은 전체 해체 방사성 폐기물의 약 90%를 차지한다. 방사화 콘크리트를 기계적 파쇄 후 5mm 이상의 굵은 골재와 1~5mm 이상의 잔골재, 1mm 이하의 시멘트 페이스트로 체 분리하여 각각의 시료에 대한 ^{60}Co 의 방사능을 측정된 결과, 굵은 골재의 비방사능은 $0.17\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, 잔골재는 $3.48\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, 시멘트 페이스트는 $78.5\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 보고되었다³⁸⁾.

2.2.2 기계적 제염

제염은 원전 해체 전후에 원자로 내·외부 방사능 오염 물질을 제거 또는 저감시키는 행위를 말하며³⁹⁾, 영구정지 후 제염의 기술에 따라 해체부터 폐기물의 처리처분에 이르는 공정에 큰 영향을 미친다. 제염 방법은 처분 대상 폐기물의 물질, 환경, 상태, 용도에 맞추어 기계적 제염과 화학적 제염을 선택할 수 있다.

기계적 제염은 물리적 제염이라고 불리기도 하며 수세척, 닦음질, 진공처리, 그라인딩, 블라스팅(blasting), 스캐블링(scabbling), 코팅 제거 등의 과정을 통해 방사성으로 오염된 콘크리트 표면에서 오염물질을 제거하는 방법이다⁴⁰⁾. 원자력 시설의 방사성 콘크리트 구조물을 제염함에 있어서, 표면을 깎거나 연마하는 표면 오염 제거 기술이 가장 우선적 고려대상이다⁴¹⁾.

38) Min, B. Y., Park, J. W., Choi, W. K., & Lee, K. W. (2009). Separation of radionuclide from dismantled concrete waste. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 7(2), 79-86.

39) 송혜영. (2016). 방사능 제염기술. 전자신문, <https://www.etnews.com/20160122000246>.

40) Song, J. S., Jung, M. Y., & Lee, S. H. (2016). A study on the applicability for primary system decontamination through analysis on NPP decommission technology and international experience. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 14(1), 45-55.

방사성 오염의 경우 핵종이 콘크리트 매질을 통해 침투하는 것은 한계가 존재하며, 방사화 콘크리트 역시 깊이에 따라 방사화 정도에 차이가 나타난다. 방사능이 높게 나타나는 표면만을 벨크 콘크리트로부터 깎아내는 방법은 오염정도의 구별 없이 콘크리트 전체를 처리하는 것과 비교하여 방사성 콘크리트 폐기물의 양을 현저히 줄일 수 있다. 기계적 제염은 벨기에의 Belgo process사에서 1990년부터 Eurochemic 재처리시설의 제염 및 해체를 수행한 사례가 있다⁴²⁾.

기계적 제염 방법은 대부분의 표면에 적용할 수 있으나 제염 대상의 특성에 따라 효율성의 차이가 나타나며, 일부 폐기물은 의무적으로 물리적 제염만을 사용해야 하는 경우도 존재한다. 오염물질의 전체 면적을 제거할 수 있어 높은 제염계수를 달성할 수 있으며, 제거된 표면 물질을 곧바로 폐기처분을 할 수 있어 이온교환수지와 같은 2차 폐기물이 발생되지 않고 폐기물관리가 화학적 제염에 비해 비교적 단순하다. 그러나 기계적 제염은 단순히 표면을 깎아내는 방법이므로 제염 효율을 극대화시키기에는 어려우며, 제염 면적이 과다해지면 발생하는 폐기물의 부피가 매우 커지게 되는 단점을 가진다. 또한 복잡한 구조의 표면에 대해서는 제염 장비의 접근성이 제한되어 활용이 어려우며, 오염된 표면 근처에서 작업자가 직접 제염해야 하는 경우가 종종 발생한다.

41) Radioactive Waste Management Committee. (2011). The NEA co-operative programme on decommissioning decontamination and demolition of concrete structures. Nuclear Energy Agency.

42) Teunckens, L., Lewandowski, P., Walthéry, R., & Ooms, B. (2003). The Belgoprocess strategy relating to the management of materials from decommissioning. Belgoprocess, nv Dessel (BE).

2.2.3 화학적 제염

주로 액상의 제염제를 사용하는 화학적 제염기술은 매우 복잡한 구조체에서도 신속하게 적용할 수 있고, 높은 제염 효율을 보이는 것으로 인식되고 있다. 그러나, 제염 대상에 적합한 화학 제염제를 선택하는 것과 제염 처리 후 발생하는 대용량 2차 폐액을 어떻게 처리할 것인가의 문제가 기술 적용에 있어서 가장 핵심이라고 할 수 있다⁴³⁾. 화학적 제염기술에 사용되는 제염제의 종류는 무기산, 유기산, 착화제, 계면활성제, 유기용매, 폼, 겔 등이 있고⁴⁴⁾, 이들을 혼합 또는 단계적으로 사용하거나 초음파와 같은 물리적 처리와 함께 적용되기도 한다.

화학적 제염기술을 콘크리트에 적용한 사례로는 미국의 AWD에서 개발한 AWD-CON 공정이 있다. 물리적 제염과 화학적 제염 및 분리 공정을 겸용함으로써 1차적으로 콘크리트 표면의 오염물질을 제거하고, 부식성 및 산성 제염제로 처리 후, 남은 콘크리트를 고압수로 세척하는 과정을 반복하여 취급 가능한 오염 수준까지 처리할 수 있다. 발생된 2차 폐기물은 여과, 막분리, 이온교환 등의 방법으로 처분된다⁴⁵⁾. 미국의 Isotron사의 ELECTROSORB 공정은 동전기적 추출과 폴리머 전극 포집 기술을 동시에 적용시켜 콘크리트의 방사성 오염물질을 제거하는 방법이다. 이 기술은 콘크리트 표면에 존재하는 비용해성 방사성 핵종(U, Th)을 이온화시키면서 폴리머를 형성할 수 있는 탄산수소 암모늄(Ammonium bicarbonate)을 주입한 후 동전기적 추출 공정에 의해 핵종이 폴리머 내부로 고정시키고,

43) Nuclear Energy Agency. (2014). R&D innovation needs for decommissioning of nuclear facilities. OECD NEA Report, Boulogne-Billancourt.

44) 송종순, 신승수, & 이상현. (2017). 원전 해체 시 최적 제염기술 선정을 위한 EXPERT-CHOICE 기법 적용에 대한 연구. 방사성폐기물학회지, 15(3), 231-237.

45) US Department of Energy. (1993). Innovative technologies for recycling contaminated concrete and scarp metal. DOE/METC/C-93/7098, Augusta.

이후 폴리머를 제거하는 방법이다⁴⁶⁾. 일본의 Shimizu 건설은 2010년에 발표한 방사화 콘크리트의 방사능 저감화 기술에서 콘크리트 내 Eu와 Co를 제거하는 방법을 제시하였고, 이후 기술 개발을 지속적으로 하고 있다⁴⁷⁾⁴⁸⁾. 2007년부터 국내에서 수행된 화학적 제염기술의 연구로는 모사 오염, 실제 오염 및 방사화 콘크리트로부터 분리된 미분말을 통해 개발된 전기화학적 제염기술의 적용성도 평가한 경우가 있다⁴⁹⁾.

방사성 콘크리트 폐기물을 대상으로 실제 적용시킨 화학적 제염 기술은 앞서 소개한 기계적 제염기술에 비해 많지 않다. 그 원인은 다공성의 시멘트 페이스트와 골재들로 구성된 콘크리트는 화학적 이동에 취약해서, 제염할 부분보다 더 깊이 침투하여 내부 및 다른 구조물까지 오염을 시킬 수 있기 때문이다. 또한 해체 단계에서 콘크리트를 자체 처분 수준까지 화학 제염하고 2차 폐액의 처리까지 완료하는 기술 과정에서 문제가 발생한다. 경제적인 비용이 별도의 화학적 제염처리를 거치지 않고 직접 처분하는 방식에 비해 높기 때문에, 화학적 제염기술을 콘크리트 표면 오염 제거에 활용한 경우는 많지 않았던 것으로 판단된다.

화학적 제염은 일반산업의 제염공정과 유사하여 기존 선행 작업을 통한 제염 경험을 원전 해체 제염에 직접적으로 적용시킬 수 있다. 비교적 제염 비용이 저렴하며, 적절한 화학제를 선택하면 오염지역 표면의 방사성물질

46) US Department of Energy. (1996). Electrokinetic decontamination of concrete. DOE/MC/30162-97/C0804, Morgantown.

47) Shimizu corporation. (2013). Treatment method of activated concrete. Japanese patent, P5234416.

48) Shimizu corporation. (2016). Treatment method of activated concrete. Japanese patent, P52016-161422A.

49) Choi, W. K., Kim, G. N., & Lee, K. W. (2010). Technology development for recycling of decommissioning waste (No. KAERI/RR--3128/2009). Korea Atomic Energy Research Institute.

만을 제거하여 설비의 재활용이 가능하다. 오염지역에서의 직접적인 접촉이 없으므로 분진이 발생하지 않으며, 작업자의 안전성을 보장할 수 있다. 그러나 화학 반응으로 인한 2차 액체 폐기물이 발생되며, 제염 공정에서 사용되는 물질의 유독성으로 인한 작업자의 안전에 위협이 될 수 있다. 제염된 물질로 인하여 오염지역 이외 기타 지역에도 오염을 시킬 수 있어 취급에 주의가 필요하다.



2.3 콘크리트 스캐블링

2.3.1 기존 스캐블링

스캐블링은 기계적 제염 방식으로 널리 알려져 있으며, 작업자들이 스캐블링 장치를 통해 핵종으로 오염된 부지에서 표면을 깎는 방법을 지칭한다. 콘크리트 표면에 스캐블링을 적용하였을 경우, 공정과정에서 발생하는 분진과 직접적인 접촉으로 인한 작업자들의 안정성을 확보하기 위한 설비 장치가 필수적으로 요구된다. 기계적 스캐블링은 안정적인 작업 효율성을 보여주지만, 장비의 크기로 인해 고방사능 노출이 발생한 부분이나 협소한 부분에서는 적용이 제한적이다.

Echt et al. (2002)⁵⁰은 스캐블링 공정 중 발생하는 분진을 분석하기 위해 스캐블링 장치에 관을 연결하여 분진을 흡입하는 유량 4.2L/min의 설비 장치를 설치하고, 분진을 제어하기 위한 방안으로 콘크리트 일부를 젖게 하여 건조된 상태와 비교하였다. 젖은 상태의 경우는 분진 발생량이 0.64mg/m³로, 건조 상태의 3.88mg/m³ 대비 80% 이상 감소된 것으로 보고되었다. Feltcorn (2006)⁵¹은 기존 스캐블링과 원격 스캐블링 장치를 콘크리트 슬래브에 적용시켜 성능을 비교 분석하였다. 기존 스캐블링 장치는 스캐블링 헤드에 부착된 피스톤에 의해 슬래브를 분쇄하고 진공 설비 장치를 통해 폐기물을 흡입하는 방식이며, 원격 스캐블링 장치는 최대 300ft의 거리에서 원격 제어가 가능하고, 스캐블링 비트를 통해 충격·분쇄한 후 HEPA(High efficiency particulate air) 진공 시스템을 이용하여 폐기물을

50) Echt, A., Sieber, W., Jones, A., & Jones, E. (2002). Control of silica exposure in construction: Scabbling concrete. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17(12), 809-813.

51) Feltcorn, E. (2006). Technology reference guide for radiologically contaminated surfaces. US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 11-18.

포집하는 기술이다. Feltcorn (2006)에 따르면, 기존 스키프링 방식은 근접 거리에서 작업이 용이하며, 작업 중 발생하는 분진은 공기 중으로 최대 10% 파편이 생성되었고, 거칠고 노출된 콘크리트 표면만이 남았으나, 원격 스키프링 장치는 기준치 수준 이하로 분진이 측정되었으며, 표면은 약간 거칠지만 균일한 형상을 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나 두 장비 모두 공통적으로 장치의 배관, 호스, 분진으로 인한 작업자 피폭의 위험이 있으며, 장치의 방사선 노출에 의한 2차 오염이 발생하는 것으로 나타났다.

2.3.2 레이저 스키프링

레이저 스키프링은 기존에 사용되었던 기계적 스키프링에서 발생하는 작업자의 안전성과 장비의 2차 오염 발생, 제한적인 장소에 대한 접근성 미흡 등으로 인한 문제를 해결하기 위해 고안된 기술이다. 레이저 스키프링은 소형 레이저 장치를 통해 출력을 조절하여 높은 제염도를 달성할 수 있는 기술로, 고온의 열에너지를 통하여 콘크리트 표면을 제염하는 메커니즘을 가진다. 먼 거리에서 작업이 가능하므로, 작업자의 안정성 확보가 용이하다. 고방사능 노출 영역에서의 적용성이 높지만, 과도한 에너지를 콘크리트 표면에 조사함으로써 발생하는 분진과 폐기물을 포집하는 설비기술도 확보하여 주변부의 오염을 차단해야 한다.

콘크리트의 레이저 스키프링을 적용시킨 사례 중 Lawrence와 Li (2000a⁵²), (2000b⁵³)의 연구는 CO₂ 레이저 및 HDPL(High Power Diode Laser)

52) Lawrence, J., & Li, L. (2000). A comparative study of the surface glaze characteristics of concrete treated with CO₂ and high power diode lasers: Part I: Glaze characteristics. *Materials Science and Engineering: A*, 284(1-2), 93-102.

53) Lawrence, J., & Li, L. (2000). A comparative study of the surface glaze characteristics of concrete treated with CO₂ and high power diode lasers Part II:

을 사용한 스케블링 기술을 상호 비교한 것으로, 일반적으로 절단에 활용되었던 CO₂ 레이저를 HDPL과 함께 스케블링 기술의 효율성에 대한 연구인데, HDPL에 비해 스케블링 효율이 높은 것으로 나타났다. Hillton과 Walters (2010)⁵⁴의 연구는 세 가지 일반적인 유형의 골재(석회암, 현무암, 규암)를 사용한 콘크리트에 대한 레이저 스케블링 실험내용으로, 규암 콘크리트는 스캔 속도에 따라 유리화가 발생하였으며, 콘크리트 표면이 젖었을 경우 규산질 골재는 표면에서 박리되지 않고, 시멘트 페이스트만 분리되는 것으로 보고되었다. 현무암 콘크리트는 100mm/min 이하의 스캔 속도에서 표면 유리화가 발생하였고, 콘크리트 표면을 적셔도 개선되지 않았다. 그러나 석회암 콘크리트는 스케블링이 효율적으로 진행되었으며, 젖은 표면에서는 스케블링 효율이 더욱 높아진 것으로 보고되었다.

Peach et al. (2015)⁵⁵의 연구에 따르면, 모르타르의 레이저 스케블링이 효율이 가장 높았으며, 시멘트 페이스트 및 콘크리트 순으로 스케블링의 성능이 감소한 것으로 나타났다. Peach et al. (2015)는 현무암의 경우 유리화가 빈번하게 발생하여 석회암의 경우보다 레이저 스케블링 성능이 떨어지는 것을 확인하였고, 수분의 포화도와 레이저 스케블링 간의 상관성은 명확하게 검증하지 못하였다. 이로 인해 콘크리트 내부의 자유수는 스케블링에 영향을 미치지만 효율성을 제어하는 핵심 요소는 아닌 것으로 판단하였다. Peach et al. (2016)⁵⁶의 또 다른 연구에서는 기존의 콘크리트 시편

Mechanical, chemical and physical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 287(1), 25-29.

54) Hilton, P., & Walters, C. (2010). The potential of high power lasers in nuclear decommissioning. In Paper at WM 2010 Conference, Phoenix, AZ (pp. 7-11).

55) Peach, B., Petkovski, M., Blackburn, J., & Engelberg, D. L. (2015). An experimental investigation of laser scabbling of concrete. *Construction and Building Materials*, 89, 76-89.

56) Peach, B., Petkovski, M., Blackburn, J., & Engelberg, D. L. (2016). The effect of

에 암석의 스케블링을 추가적으로 진행하였으며, 이를 통해 스케블링 주요 원리를 파악하고자 하였다. Peach et al. (2016)은 시멘트 페이스트의 경우 시멘트의 자유수, 층간수 및 화학적 결합수의 기화로 인한 폭렬현상으로 규정하였고, 모르타르 시편은 열응력의 발생과 폭렬의 동시 진행에 의해 발생하는 것으로 설명하였다. 굵은 골재를 현무암으로 사용한 콘크리트는 낮은 융점으로 인한 유리화를 확인하였다. Peach et al.(2018)⁵⁷⁾의 장기 재령에서 콘크리트의 레이저 스케블링 성능 차이를 알기 위한 연구에서는, 포화된 OPC 페이스트는 초기 재령의 OPC 페이스트보다 레이저 스케블링의 효율이 높았으며, 포화 상태의 모르타르는 재령의 영향에 받지 않았고, 포화된 콘크리트는 재령 일에 증가함에 따라 스케블링 효율성도 증가된 것으로 보고되었다. 이는 폭렬에 의한 박리 현상이 레이저 스케블링에 의한 콘크리트 표면 오염 제거의 주요 작동원리임을 의미한다. 건조한 시편의 경우, 재령이 길어질수록 건조로 인한 내부 포화도가 감소하여 레이저 스케블링 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 건조되기 쉬운 구조물의 현장에서 레이저 스케블링을 적용할 때 고려해야 하는 중요한 시사점이 될 수 있다.

concrete composition on laser scabbling. *Construction and Building Materials*, 111, 461-473.

- 57) Peach, B., Petkovski, M., Blackburn, J., & Engelberg, D. L. (2018). The effect of ageing and drying on laser scabbling of concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 1035-1044.

Ⅲ. 실험방법

3.1 실험재료

1) 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201을 만족하는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다⁵⁸⁾. 시멘트의 밀도는 3.15g/cm³로 측정되었으며, 시멘트의 화학적 조성은 X-Ray fluorescence spectrometer(Shimadzu, Japan, XRF-1800), 광물상 조성은 X-Ray diffractometer(Rigaku, Japan, Ultima IV)를 사용하여 회절각(2 θ) 5~70° 영역의 패턴을 분석하였다.

표 3.1은 1종 포틀랜드 시멘트의 화학적 특성을 나타낸 것이다. 시멘트의 주성분인 CaO 64.54%, SiO₂ 18.59%, Al₂O₃ 5.53%, MgO 3.67%, 및 Fe₂O₃ 2.95%로 존재하는 것으로 나타났다. 그림 3.1은 시멘트의 X-Ray 회절 패턴을 나타낸 것이다. 시멘트의 대표적인 광물상인 Alite(C₃S), Belite(C₂S), Aluminate(C₃A), Ferrite(C₄AF)와 방해석(Calcite), 마그네시아(Periclase) 및 석고(Gypsum) 등이 확인되었다.

표 3.1 시멘트 화학성분

(wt.%)				
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
64.54	18.59	5.53	3.67	2.95
SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
2.64	1.26	0.31	0.27	0.16

58) KS L 5201, (2021), 포틀랜드 시멘트.

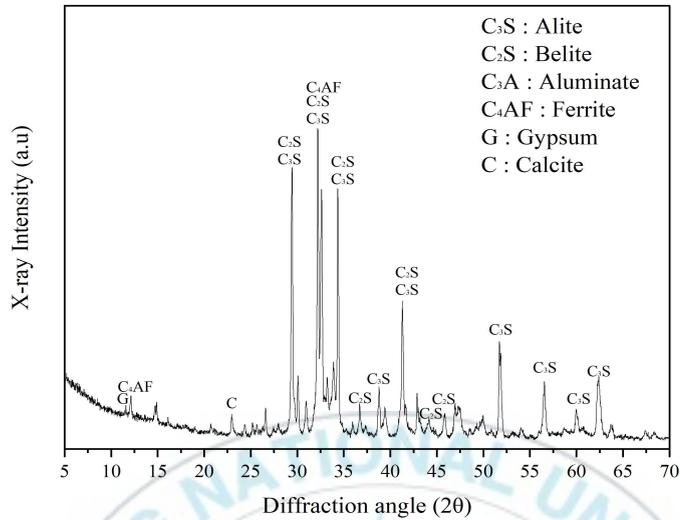


그림 3.1 시멘트 광물상 조성

2) 플라이 애시

본 연구에서는 시멘트 대비 치환율에 따른 혼화제로 플라이 애시를 사용하였다. 플라이 애시의 밀도는 2.23g/cm^3 로 측정되었다. 표 3.2는 플라이 애시의 화학적 조성을 정리한 것이다. 플라이 애시의 주성분은 SiO_2 가 60.42%이며, Al_2O_3 22.15%, Fe_2O_3 5.91%로 구성되어 ASTM F급 플라이 애시임을 확인할 수 있으며, CaO 함유량이 4.9% 수준으로 저칼슘 플라이 애시로 분류될 수 있다. 그림 3.2의 X-Ray 회절 패턴에 따르면, 플라이 애시의 광물상 성분은 석영(Quartz)과 물라이트(Mullite)로 구성되어 있으며, 물라이트는 점토 광물의 변성 과정에서 형성된 규산염 광물의 일종이다. 회절각 $15\sim 25^\circ$ 영역에 위치한 비결정질의 band는 저칼슘 플라이 애시의 전형적인 특성으로, 화학분석의 결과와 정확하게 일치한다.

표 3.2 플라이 애시 화학성분

(wt.%)				
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
60.42	22.15	5.91	4.91	1.36
TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SO ₃
1.30	1.27	1.24	0.72	0.49

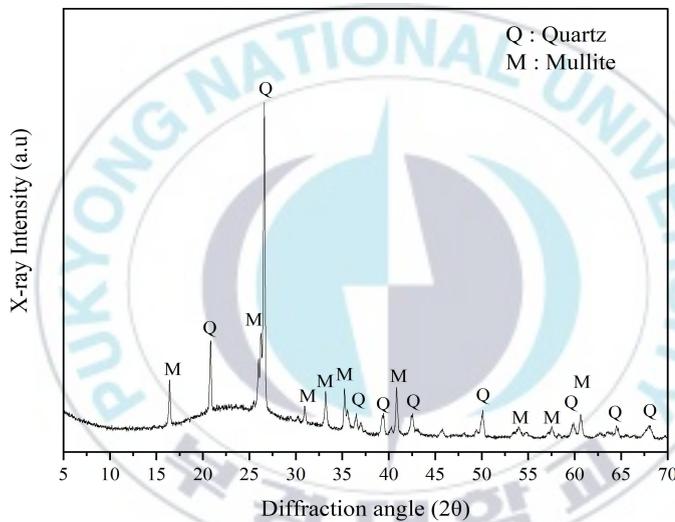


그림 3.2 플라이 애시 광물상 조성

3) 고로 슬래그

본 연구에서는 시멘트 대비 치환율에 따른 혼화제로 고로 슬래그를 사용하였다. 고로 슬래그의 밀도는 2.91g/cm³로 측정되었다. 표 3.2는 고로 슬래그의 화학적 조성을 정리한 것이다. 고로 슬래그의 주성분은 CaO가 48.45%이며, SiO₂ 29.08%, Al₂O₃ 14.30%로 구성되어 있었다. 그림 3.3은 고로 슬래그의 X-Ray 회절 패턴을 나타낸 것인데, 고로 슬래그의 회절 패턴

중 회절각 15~25° 영역에 위치한 비결정질 band는 칼슘량이 많은 알루미늄 실리케이트 계열 비결정질 광물의 패턴이며, 겔레나이트(Gehlenite), 수산화칼슘(Portlandite), 무수석고(Anhydrite), 방해석이 존재하였다.

표 3.3 고로 슬래그 화학성분

(wt.%)				
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃
48.45	29.08	14.30	3.61	2.56
TiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	SrO
0.61	0.60	0.48	0.31	0.06

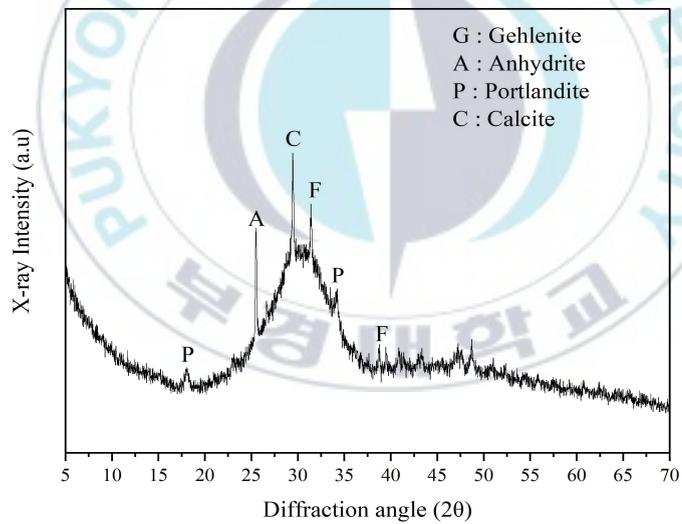


그림 3.3 고로 슬래그 광물상 조성

4) 석회석

본 연구에서는 석회석을 굵은 골재로 활용하기 위해 최대치수 25mm에 맞춰 사용하였다. 석회석의 벌크 밀도는 2.68g/cm^3 , 흡수율은 0.72%로 측정되었다. 표 3.4는 석회석의 화학적 조성을 정리한 것이다. 쇄석의 주성분은 CaO가 79.83%, SiO₂는 9.97%, Al₂O₃가 3.62%로, 그 외에 미량의 MgO, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂, MnO, SrO, P₂O₅ 등이 구성되어 있었다. 그림 3.4는 석회석의 X-Ray 회절 패턴을 나타낸 것인데, 주로 방해석으로 구성되어 있으며, 석영, 백운모(Muscovite), 녹니석(Clinochlore)이 존재하는 것으로 확인되었다.

표 3.4 석회석 화학성분

(wt.%)				
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
79.83	9.97	3.61	2.82	2.00
K ₂ O	TiO ₂	SrO	P ₂ O ₅	-
1.29	0.31	0.13	0.05	-

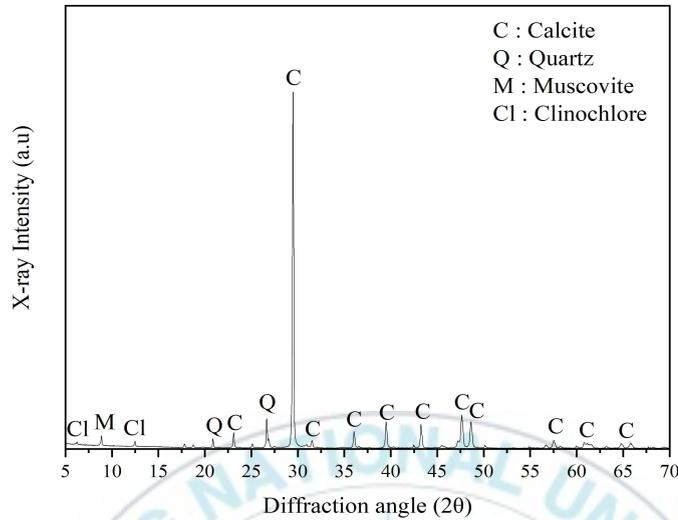


그림 3.4 석회석 광물상 조성

5) 세척사

본 연구에서는 세척사를 잔골재로 활용하기 위해 최대치수 5mm에 맞춰 사용하였다. 세척사의 벌크 밀도는 2.58g/cm^3 , 흡수율은 1.5%, 조립률 (Fineness modulus)는 2.32로 측정되었다. 표 3.5는 세척사의 화학적 조성을 정리한 것이다. 세척사의 주성분은 SiO_2 로 구성되어 있으며, 그 외에 Al_2O_3 , K_2O , CaO , Na_2O , MgO , TiO_2 , MnO 등이 나타났다. 그림 3.5는 세척사의 X-Ray 회절 패턴을 나타낸 것이다. 세척사의 광물상 성분은 석영이 대표적이며, 그 외 조장석(Albite), 미사장석(Microcline), 백운모가 존재하는 것으로 나타났다.

표 3.5 세척사 화학성분

(wt.%)				
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O
76.35	12.54	4.60	2.46	1.58
Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	-
1.46	0.69	0.24	0.09	-

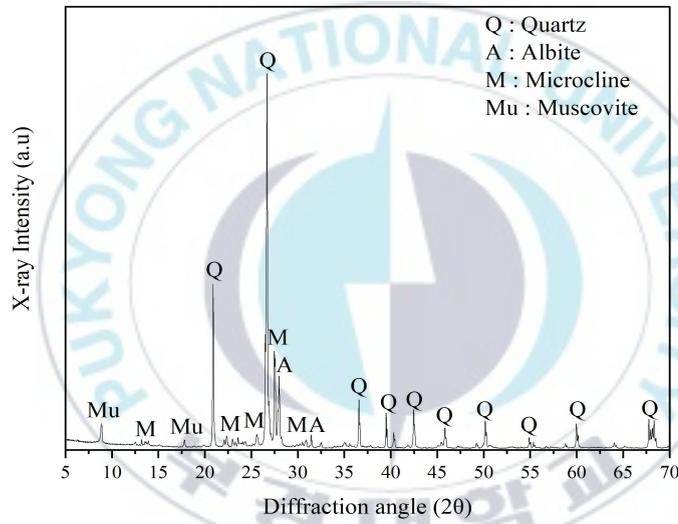


그림 3.5 세척사 광물상 조성

3.2 콘크리트 시험체 제작 및 배합설계

3.2.1 콘크리트 시험체 제작

본 연구에서는 KS F 2403 “콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 따라 콘크리트 배합을 진행하였다⁵⁹⁾. 콘크리트 배합은 강제식 콘크리트 팬믹서(HS 1240, Hanshin Gumpung Co. Ltd., Korea)를 통해 실시하였다. 배합방법은 표건 상태의 잔골재와 굵은 골재를 1분 동안 비빔을 실시하였으며, 곧이어 시멘트와 혼화재를 첨가하여 30초 동안 건비빔을 수행하였다. 배합수량을 추가한 다음, 30rpm 30초, 60rpm 1분으로 마지막 비빔단계를 실시하였다.

콘크리트 배합 완료 후, 콘크리트를 레이저 스캐블링 시편 제작용 몰드와 압축강도 측정용 몰드에 다져 넣어 시험용 공시체를 제작하였다. 그림 3.6은 콘크리트 시편 형상을 나타낸 것으로, 레이저 스캐블링용 시편은 300 mm × 300mm × 80mm의 판형 공시체로 제작되었으며, 압축강도 시험용 시편은 ϕ 100mm × 200mm의 원주형 공시체로 제작되었다.

몰드에 콘크리트를 타설하고 난 후, 콘크리트로부터 수분 증발을 막기 위해 시편의 윗면을 플라스틱 랩으로 감싼 다음 1일간 양생하였다. 1일 후 경화된 콘크리트 시편을 탈형시켰으며, 탈형된 콘크리트를 27일간 20±2℃ 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 수중 양생을 진행하였다. 28일 재령에서 압축강도 시험을 수행하였으며, 레이저 스캐블링 시험은 28일간의 수중 양생이 종료된 후, 약 2개월간 기건 상태로 보관하였다가 장비의 활용이 가능한 시점에 콘크리트의 함수상태를 조정하여 진행하였다.

59) KS F 2403. (2019). 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법.



그림 3.6 콘크리트 시험체 형상

3.2.2 콘크리트 배합설계

표 3.6은 실험에 사용된 콘크리트의 배합설계를 나타낸 것이다. 콘크리트 배합설계에 사용된 재료의 특성들은 3.1절 내용과 동일하다. 기준 Plain 이 되는 일반강도 콘크리트의 f_{ck} (설계기준 압축강도)는 24MPa이며, W/B(물결합재비)는 0.5, S/a(잔골재율) 51.4%로 정하였다. 콘크리트의 구성성분으로, 잔골재율과 단위 시멘트량의 변화에 따른 레이저 스캐블링의 효율성을 평가하기 위해 S/a 40, 60%, 단위시멘트량 210kg/m^3 의 콘크리트를 추가로 설계하였다. 또한, 고강도 콘크리트의 f_{ck} 는 40MPa이며, W/B는 0.34, S/a는 47%로 정하였다. 콘크리트의 굵은 골재는 석회석, 잔골재는 세척사를 사용하였다. 굳지 않은 콘크리트의 작업성을 유지하기 위해 슬럼프는 $150\pm 20\text{ mm}$ 로 설정하였다. 유동성을 확보하기 위해 고성능 AE감수제((주)실크로드, SR-3000F)를 사용하였다.

표 3.6 콘크리트 배합설계표

(kg/m³)

배합명	W/B	S/a (%)	배합수	결합재			골재		혼화제
				시멘트	플라이 애시	고로 슬래그	잔골재	굵은 골재	
NC-51 ^{주1)}	0.50	51.4	166.63	236	51	51	920	870	2.7
NC-40		40					716	1,074	2.7
NC-60		60					1,074	716	2.7
NC-HP		51.4					210	298.17	63.9
HC-47 ^{주2)}	0.34	47	160.18	280	47	140	822	920	5.1

주1) NC : Normal strength concrete

주2) HC : Higher strength concrete

3.3 재령 28일 압축강도 시험

재령 28일의 콘크리트 압축강도는 KS F 2405 “콘크리트의 압축 강도 시험 방법”을 인용하였다. 그림 3.7에 나타낸 유압식 콘크리트 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하였고, 재하속도는 2.67mm/min로 유지하며 측정하였다⁶⁰⁾.



그림 3.7 콘크리트 압축강도 시험기

60) KS F 2405. (2017). 콘크리트의 압축 강도 시험 방법.

3.4 콘크리트 공극률 시험

본 연구에서는 ASTM C 642 “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”⁶¹⁾에 준하여 콘크리트의 공극률을 측정하였다. 그림 3.8은 콘크리트 공극률 시험 모식도를 나타낸다. 콘크리트의 함수 상태에 따른 무게를 측정하고, 아래의 식 (1) ~ (3)을 활용하면 공극률을 계산할 수 있다. 공극률의 측정을 위해, A(절건중량) : 105℃에서 24시간 건조 상태의 중량, B(표건중량) : 21℃ 수중에서의 48시간 침지 후 표건 상태의 중량, C(수화가 끝난 표건 중량) : 5시간동안 끓는 물에 침지 후 20~25℃ 표건 상태의 중량, 및 D(수중중량) : 수중 침지 중량을 측정하였다.

$$g_1(\text{Bulk density, dry}) = \frac{A}{(C-D)} \times \rho, \quad \rho = \text{density of water} \quad (1)$$

$$g_2(\text{Apparent density}) = \frac{A}{(A-D)} \times \rho \quad (2)$$

$$\text{Voids}(\%) = \frac{(g_2 - g_1)}{g_2} \times 100 \quad (3)$$

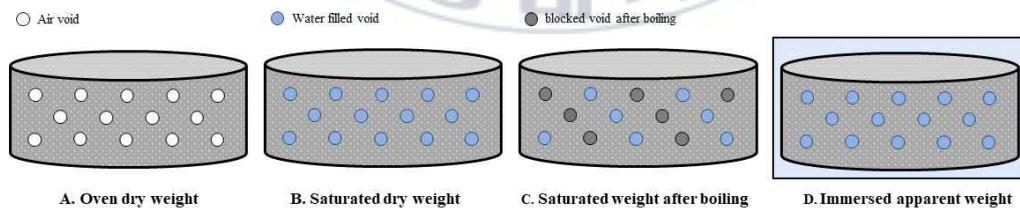


그림 3.8 콘크리트 공극률 시험 모식도

61) ASTM C 642. (2020). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International, West Conshohocken.

3.5 레이저 스케블링

(1) 시스템 구성

그림 3.9는 연구에서 사용된 레이저 스케블링 장비의 모식도를 나타낸 것이다. 파장길이 (λ) 1070nm인 5kW YLS-10000 광섬유 레이저 (fiber laser) (IPG Photonics, Oxford, MA, USA)를 사용하였고, 광섬유 레이저의 광학 헤드는 초점거리(focal length: f) 160mm의 시준기(collimator)와 160mm의 비구면 렌즈 및 보호 창으로 구성되어있다. 표점까지의 거리 (stand off distance)는 900mm로 설정되었다. 레이저 스케블링 과정을 촬영하기 위한 열화상 카메라(SC 640, FLIR Systems, Inc., Wilsonville, OR, USA)는 비산 파편으로부터 콘크리트 시편을 보호하기 위해 콘크리트 시편에서 4.5m 떨어진 곳에 설치하였다⁶²⁾. 콘크리트 전체 면을 고르게 스케블링 하기 위해 레이저의 경로는 “ㄷ”자의 형태로 지정하였다.

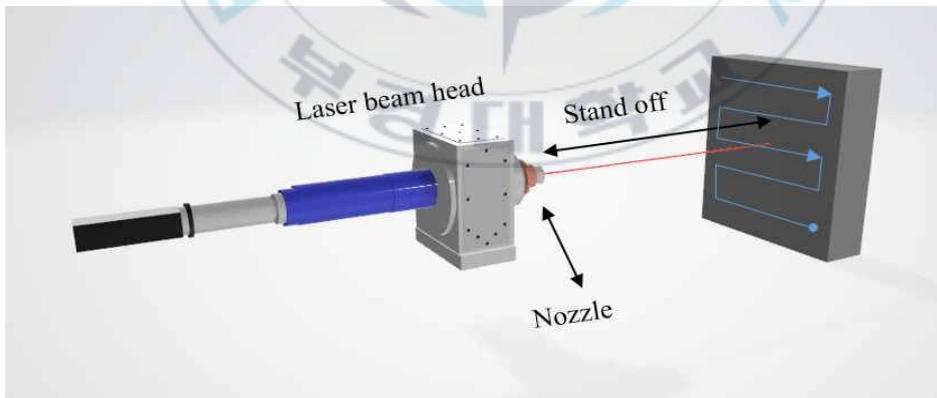


그림 3.9 콘크리트 레이저 스케블링 모식도

62) Oh, S. Y., Lim, G., Nam, S., Kim, T., Kim, J. H., Chung, C. W., ... & Kim, S. (2021). Laser Scabbling of a Concrete Block Using a High-Power Fiber Laser. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 19(3), 289-295.

(2) 시험 조건

레이저 스캐블링 시험 조건은 다음과 같다. 3가지 함수상태(절건, 기건, 표건상태)로 설정하여 콘크리트에 레이저 스캐블링 실험을 진행하였다. 기건 상태의 콘크리트 시편을 유지하기 위해 양생이 끝난 시편을 상온에서 보관하였으며, 절건 상태 콘크리트 시편은 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, 60시간 오븐(HQ-DO 156. Coretech Korea)에서 건조시켰다. 표건 상태 콘크리트 시편은 실험에 앞서 포화수산화칼슘 용액에서 건져낸 다음, 마른 수건을 사용하여 표면수를 제거하였다. 광학 헤드의 이동 속도는 $200\text{mm}/\text{min}$ 로 설정하였는데, 이는 속도가 너무 느릴 경우 콘크리트의 표면이 녹고 (유리화 발생), 빠르면 스캐블링이 효과적으로 수행되지 않았기 때문으로, 단계별 실험을 통해 결정된 값을 적용시켰다. 레이저 스캐블링 공정 시 콘크리트 잔해와 분진으로 인한 헤드의 손상을 방지하기 위해 노즐에서 $370\text{L}/\text{min}$ 유량의 설비 시스템을 구비하였으며, 레이저의 출력 성능은 5kW , 레이저 운전시간은 359 ± 1 초로 설정하였다.

3.6 미세구조 분석

본 연구에서는 그림 3.10에 나타난 JEM-2100F field emission scanning electron microscope(JEOL, Japan, FE-SEM)을 통해 레이저 스캐블링 전·후 콘크리트 표면의 미세구조를 확인하고자 하였다. FE-SEM 분석과 동시에 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(EDX) 분석을 활용하여 스캐블링 이후 특정 지점에서의 화학적 성분 변화를 확인하고자 하였다. 전자현미경 분석을 위해 약 5mm의 크기를 가지는 시편을 카본 테이트로 밑판에 고정시키고, 백금을 이용하여 표면 윗면을 코팅하여 전도성을 유지시켰다.



그림 3.10 FE-SEM 장비

IV. 실험결과

4.1 재령 28일 압축강도

그림 4.1은 콘크리트의 재령 28일 압축강도 그래프를 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도 측정을 위한 설명은 3장의 내용과 동일하다. 일반강도 콘크리트의 f_{ck} 는 24MPa이며, S/a와 단위 시멘트량을 변화시킨 모든 콘크리트는 설계기준 압축강도를 만족하는 것으로 확인되었다. NC-51은 28.79MPa, NC-40이 32.04MPa, NC-60이 31.81MPa, NC-HP가 NC-51 대비 38% 증가된 39.94MPa로 확인되었다. 고강도 콘크리트는 57.02MPa로, 설계기준 압축강도를 만족하였다.

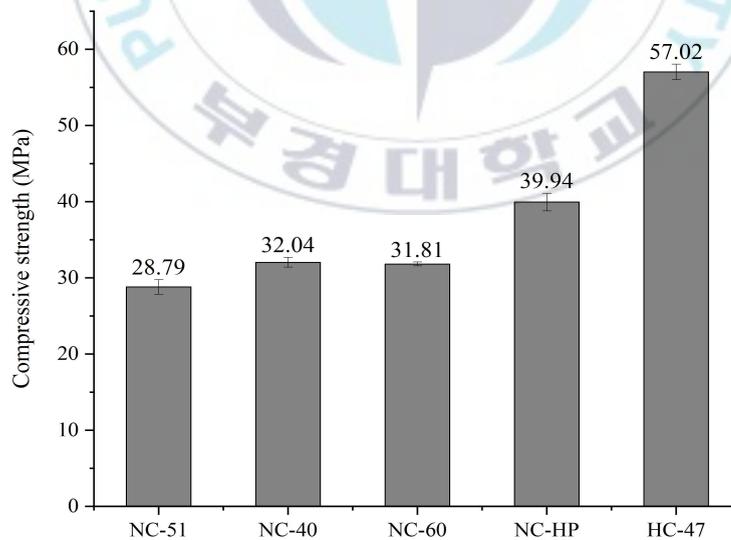


그림 4.1 재령 28일 콘크리트 압축강도

4.2 콘크리트의 공극률

표 4.1은 콘크리트의 공극률 데이터를 나타낸 것이다. 콘크리트 시편의 함수상태에 따른 무게 변화를 통해 공극률을 측정하였다. 일반 콘크리트 NC-51은 13.22%, 고강도 콘크리트 HC-47은 7.14%로, W/B가 낮아질수록 공극률이 낮아졌고, 이는 그림 4.1의 압축강도 결과에서 W/B가 낮은 고강도 콘크리트의 압축강도가 높게 나온 것과 일치하는 결과이다. S/a와 단위 시멘트량 변화에 따른 콘크리트의 공극률을 비교하면, NC-40은 13.02%, NC-60이 12.84%로 잔골재율의 차이에 따른 공극률의 차이는 큰 편차 없이 나타났다. NC-HP는 10.62%로 일반 콘크리트의 13.22%에 비해 24% 상승하였으며, 마찬가지로 공극률의 감소가 강도의 상승을 가져온 것으로 판단된다.

표 4.1 콘크리트의 부피밀도, 겉보기 밀도 및 공극률

구분	NC-51	NC-40	NC-60	NC-HP	HC-47
A: Oven dry (g)	857.6	878.9	870.9	886.2	987
B: Saturated (g)	906.1	934	925.9	931.4	1,021.7
C: Boiling (g)	907.2	934.1	925.9	931.8	1,020.9
D: Immersed apparent (g)	461.3	510.1	497.7	502.4	545.8
g ₁ : Bulk density, dry (g/cm ³)	1.92	2.07	2.03	2.06	2.07
g ₂ : Apparent density (g/cm ³)	2.16	2.38	2.33	2.31	2.23
Volume of permeable pore space (%)	11.12	13.02	12.84	10.62	7.13

4.3 레이저 스캐블링

4.3.1 함수상태에 따른 콘크리트 레이저 스캐블링

그림 4.2는 콘크리트 함수상태 변화에 따른 레이저 스캐블링 전·후의 형상을 나타낸 것이다. 그림 4.2 (a)에 나타난 절건 상태의 콘크리트는 시멘트 페이스트가 표면에서 분리되어 드러난 골재의 표면에 레이저 고열의 에너지로 인해 전체 레이저 경로에 따라 유리화가 진행되었으며, 짙은 회색이나 검은색으로 변하는 것(“ㄱ”의 경로가 그대로 드러남)을 관찰하였다. 그림 4.2 (b), (c)에 나타난 기건 상태와 표건 상태의 콘크리트는 스캐블링이 진행되어, 표면이 붉은색 계열로 변색이 발생하였다. 이는 고온 노출에 의한 실리카 성분의 잔골재가 변색하여 발생한 것이다. 각기 다른 함수상태를 가지는 콘크리트의 스캐블링 전·후 중량 감소율을 표 4.2에 나타냈다. 절건 상태(NC-OD)의 중량 감소율은 0.25%로 측정되었는데, 이는 스캐블링에 의해 제거된 콘크리트가 없음을 의미한다. 반면 콘크리트 내부에 수분이 존재하는 시편은 기건 상태(NC-AD) 6.19% 및 표건 상태(NC-SSD) 5.67%의 중량 감소율을 보여, 스캐블링이 잘 진행된 것으로 나타났다.

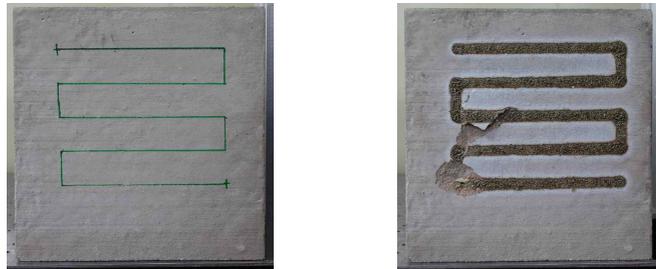
스캐블링 과정에서 고온의 열에너지가 콘크리트 공극 내로 전달되는데, 이 때 내부 수분의 기압 상승으로 압력이 생성되어 외부로 폭발되는 폭발 현상이 나타난다. 그림 4.3과 4.4는 함수상태별 콘크리트의 스캐블링 과정 중 열화상 카메라로 촬영한 일부분을 나타낸 것이다. 절건 상태의 콘크리트는 레이저의 중심부가 콘크리트 표면에 조사되자마자 표면의 온도가 급격하게 상승되어 유리화가 발생하였으며, 최대온도가 1420℃까지 측정되었다. 기건·표건 상태의 콘크리트 또한 레이저의 중심부가 표면에 접촉하자마자 온도가 급격하게 상승되어 스캐블링이 진행되었지만, 최대온도는 850℃로 측정되어, 절건 상태 시편의 최대온도 약 60% 수준으로 나타났다.

기건 상태와 표건 상태 콘크리트의 레이저 스캐블링 과정은 일정 온도까지 상승된 부분은 표면에서 박리되어 온도가 저하되었다. 그로 인해 드러난 새로운 표면에서는 이전과 같은 과정(온도 상승 → 박리 → 온도저하)이 반복적으로 진행되었다.

표 4.2 함수상태에 따른 콘크리트의 중량 감소율

시편명	스캐블링 전 무게 (kg)	스캐블링 후 무게 (kg)	중량 감소율 (%)
NC-OD	16.11	16.07	0.25
NC-AD	15.83	14.85	6.19
NC-SSD	16.57	15.63	5.67

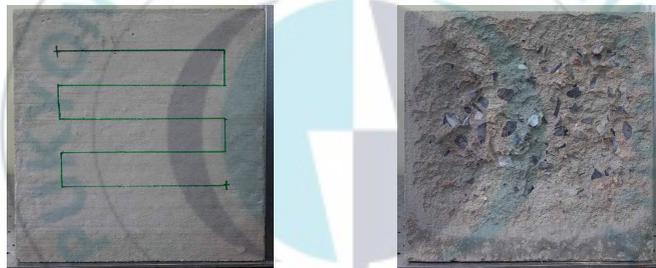




(a) NC-OD 스캐블링 전·후 사진



(b) NC-AD 스캐블링 전·후 사진



(c) NC-SSD 스캐블링 전·후 사진

그림 4.2 함수상태에 따른 콘크리트 스캐블링 전·후 형상

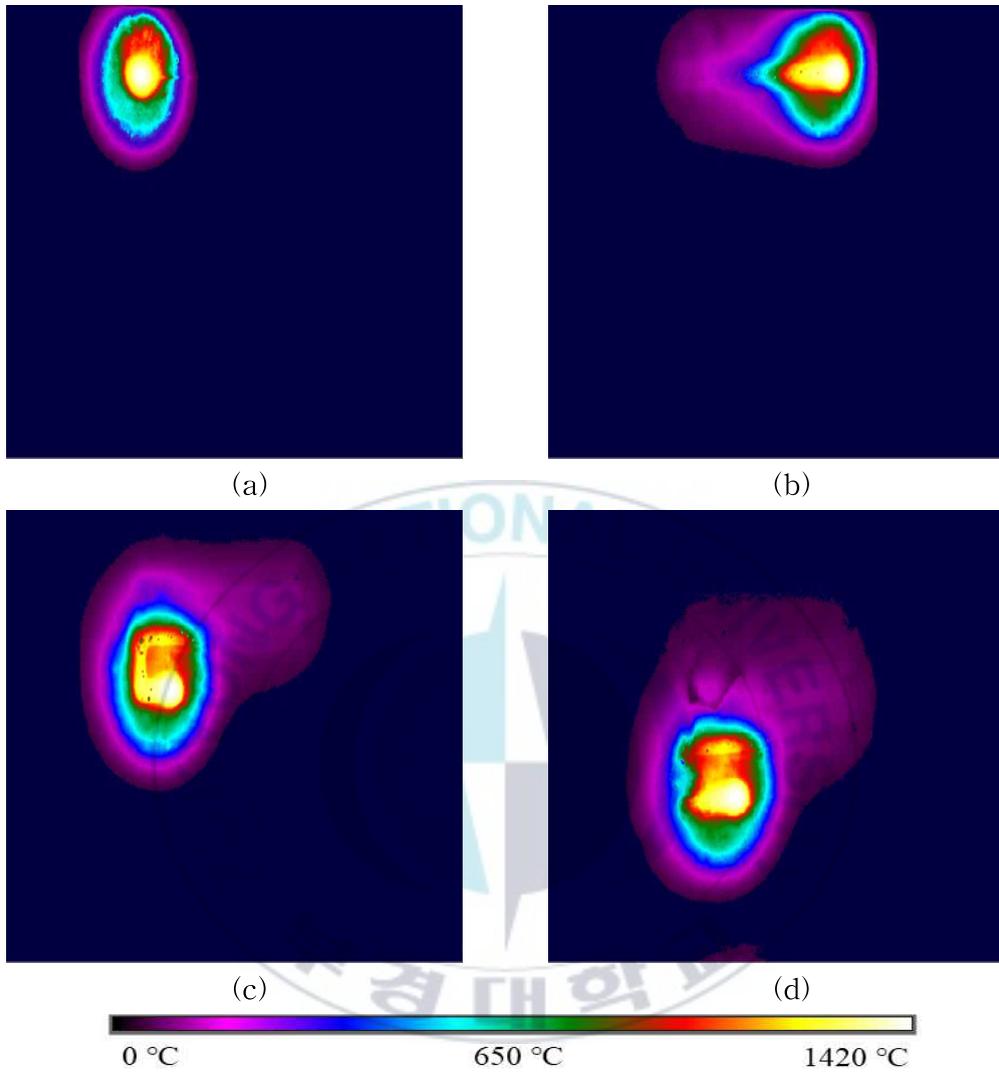


그림 4.3 절건 상태의 콘크리트 열화상 카메라 측정

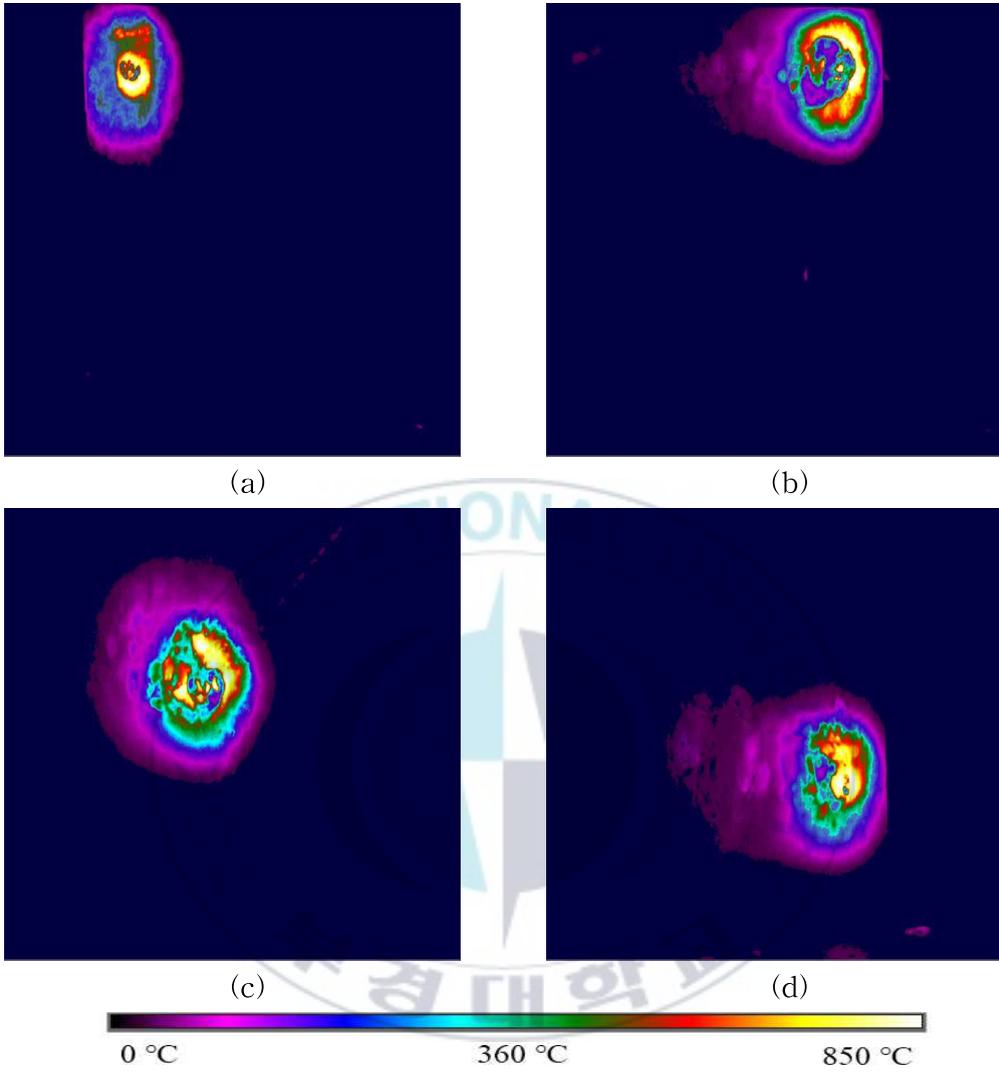


그림 4.4 기건·표건 상태의 콘크리트 열화상 카메라 측정

4.3.2 미세 구조 관찰 및 화학적 조성

레이저 스캐블링 과정 중에 콘크리트 표면이 스캐블링되거나 유리화가 발생한 경우를 확인하였다. 스캐블링된 콘크리트와 유리화가 진행된 콘크리트의 미세 구조 및 화학적 조성 변화를 FE-SEM, EDX, XRF 및 XRD를 이용하여 분석하였다.

(1) 스캐블링된 콘크리트

그림 4.5는 스캐블링된 콘크리트 표면의 FE-SEM을 나타낸 것이다. 그림 4.5의 (a3), (a4)에서는 정사면체 결정들이 서로 쌓여 있는 형상과 결정체의 가장자리에서는 균열도 관찰되었다. 그림 4.6에 나타낸 EDX 결과에 따르면, 광물의 조성은 포틀랜드이트($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 또는 방해석(CaCO_3)인 것으로 추정되었으나 결정체의 형상을 감안하면 방해석인 확률이 높은 것으로 판단된다. 고온의 영향으로 포틀랜드이트 및 방해석에서 분해된 칼슘은 주변에 존재하는 CO_2 와 급속하게 반응하여 재결정화가 발생한 것으로 사료된다. 이러한 형태의 반응은 오직 콘크리트의 표면부에서만 발생하였으며, 유리화와는 무관한 것으로 나타났는데, 이는 표 4.3과 그림 4.7에서 결정질 규산염(또는 알루미늄실리케이트) 광물의 존재(석영 및 조장석)를 확인하였기 때문이다.

표 4.3 스캐블링된 콘크리트 화학성분

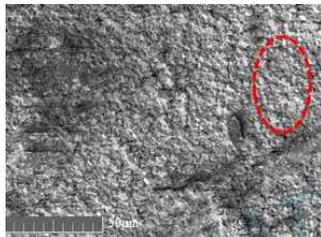
(wt.%)			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
45.00	30.90	9.38	6.13
MgO	K ₂ O	TiO ₂	SrO
2.43	1.58	0.78	0.05



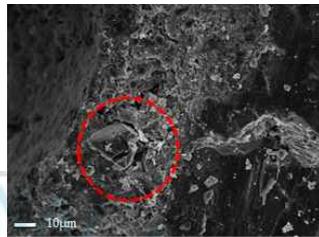
(a1) 콘크리트



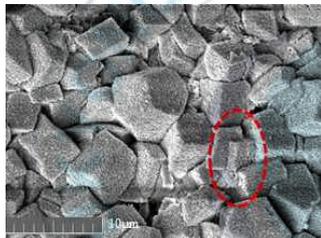
(b1) 콘크리트



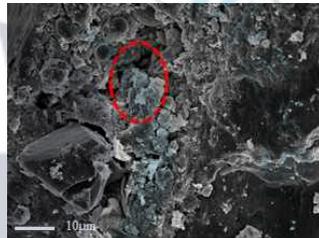
(a2) 1.0kx



(b2) 0.8kx



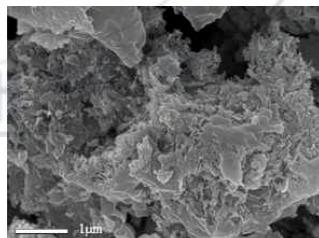
(a3) 8.0kx



(b3) 1.5kx



(a4) 20.0kx



(b4) 20.0kx

그림 4.5 스케블링된 콘크리트 표면 미세구조형상

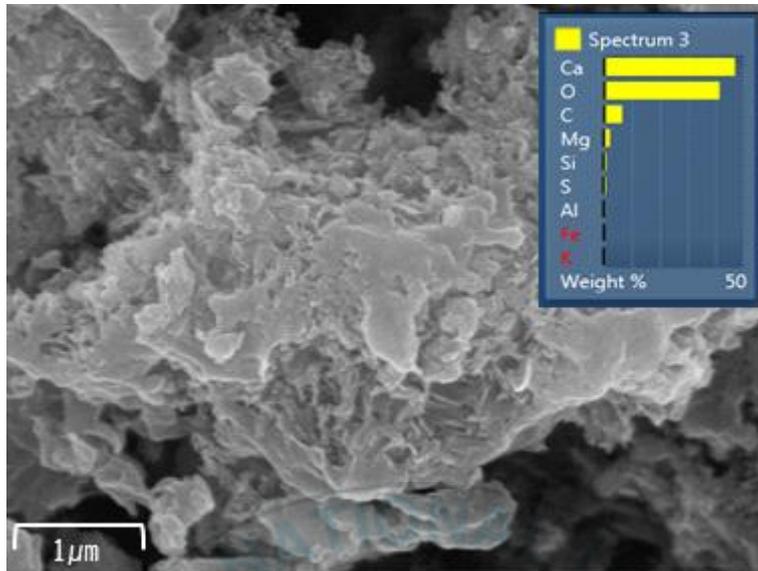


그림 4.6 스케블링된 콘크리트 표면 화학성분조성

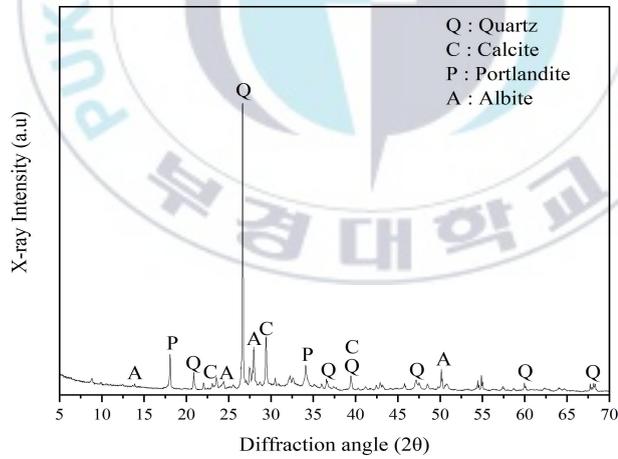


그림 4.7 스케블링된 콘크리트 광물상 조성

(2) 유리화된 콘크리트

고온의 열에너지로 발생된 유리화로 인한 성분 변화와 미세 구조를 파악하기 위하여 유리화된 콘크리트의 표면을 분석하였다. 그림 4.8은 유리화된 콘크리트 표면 FE-SEM을 나타낸 것이다. 유리화된 콘크리트의 미세구조는 매우 매끈한 표면을 가지는 형태로 나타났고, 일반적인 콘크리트에서 관찰되는 균열, 공극 및 결정상의 수화생성물 등은 확인할 수 없었다. 그림 4.9는 유리화된 콘크리트 표면 EDX 결과를 나타낸 것인데, 콘크리트에서 주로 관찰되는 C, Ca, O가 아닌 Si 성분이 높게 나타났으며, 이는 시멘트 페이스트가 아닌 실리카 성분이 높은 잔골재 영역에서 유리화가 주로 발생하였다는 것을 의미한다. 그림 4.10에 나타난 2θ 회절각 $15\sim 35^\circ$ 영역의 비결정질 패턴 또한 콘크리트의 잔골재 영역에서 유리화가 발생하였다는 것을 의미하는 직접적인 증거에 해당한다.

표 4.4 유리화된 콘크리트 화학성분

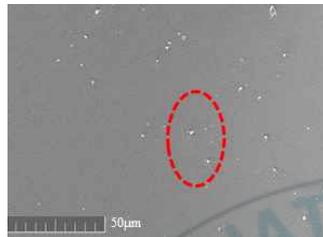
(wt.%)			
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O
62.63	19.39	10.08	2.90
MgO	SrO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
1.38	1.34	1.32	0.27



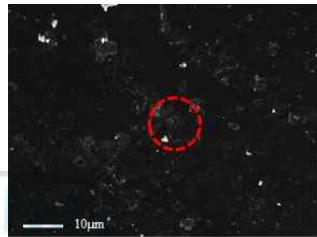
(a1) 콘크리트



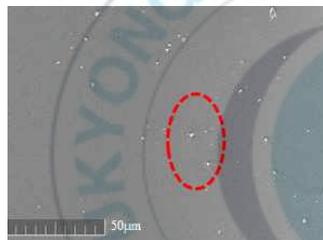
(b1) 콘크리트



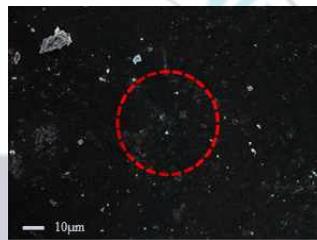
(a2) 1.0kx



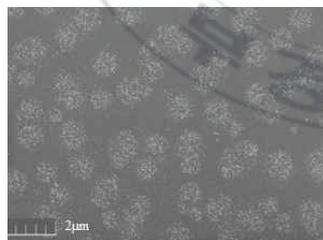
(b2) 0.8kx



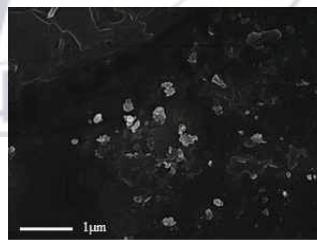
(a3) 8.0kx



(b3) 1.5kx



(a4) 20.0kx



(b4) 20.0kx

그림 4.8 유리화된 콘크리트 표면 미세구조형상

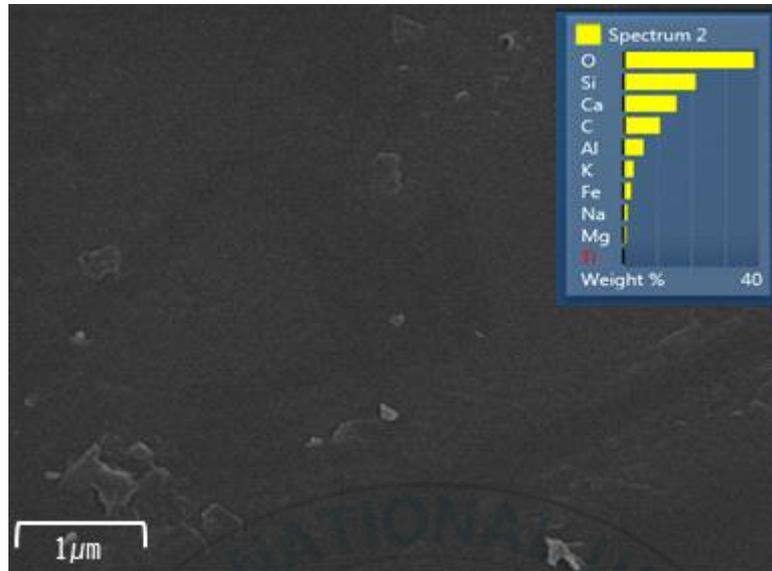


그림 4.9 유리화된 콘크리트 표면 화학성분조성

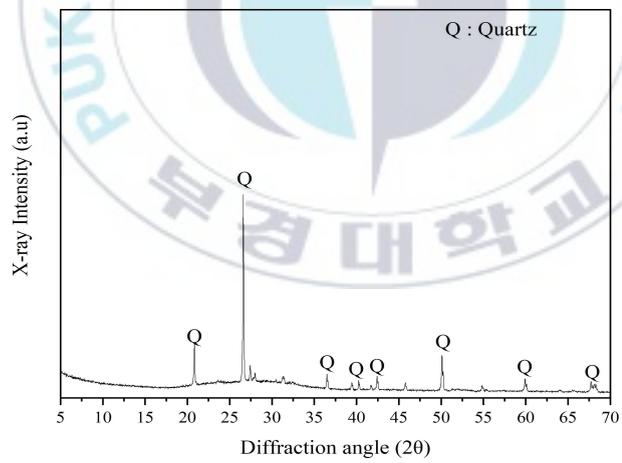


그림 4.10 유리화 콘크리트 광물상 조성

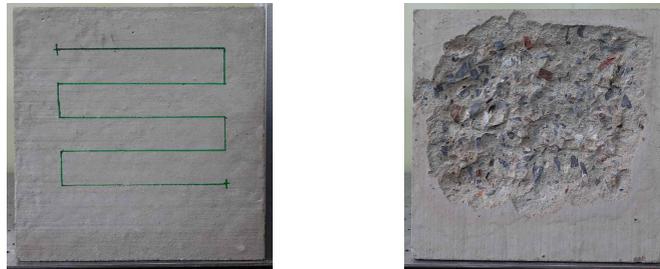
4.3.3 구성성분에 따른 콘크리트 레이저 스캐블링

4.3.1에서 콘크리트의 함수상태 변화에 따른 레이저 스캐블링 결과를 얻었으며, 내부 공극 내 수분 존재로 인한 폭발현상 발생으로 콘크리트의 표면에서 스캐블링이 되는 것을 확인하였다. 따라서 콘크리트의 함수상태를 기건 상태로 유지하여 콘크리트의 구성성분에 따른 레이저 스캐블링을 진행하였다. 그림 4.11은 콘크리트 구성성분에 따른 스캐블링 전·후 표면을 나타낸 것이다. 모든 시편에서 유리화는 발생하지 않았으며, 전체 면적에 대해 고르게 스캐블링된 모습들을 관찰할 수 있었다.

표 4.5는 스캐블링 전·후의 중량 감소율로, 보다 정밀하게 레이저 스캐블링 효율성을 평가하기 위해 산정한 것이다. S/a의 변화에 따른 콘크리트 NC-40은 6.19%, NC-60은 4.24%, 단위 시멘트량에 따른 콘크리트 NC-HP는 5.91%, 고강도 콘크리트 HC-47은 9.30%로 측정되었다. S/a와 단위 시멘트량의 차이에 따른 콘크리트는 스캐블링의 성능에 큰 영향을 미치지 않았으며, 고강도 콘크리트는 상대적으로 많은 미세 공극과 낮은 공극률에 의하여 스캐블링의 성능이 더욱 우수한 것으로 나타났다.

표 4.5 구성성분에 따른 콘크리트 중량 감소율

시편명	스캐블링 전 무게 (kg)	스캐블링 후 무게 (kg)	중량 감소율 (%)
NC-40	16.76	16.05	6.19
NC-60	15.74	14.81	4.24
NC-HP	16.61	15.93	5.91
HC-47	16.78	15.22	9.30



(a) NC-40 스키프링 전·후 사진



(b) NC-60 스키프링 전·후 사진



(c) NC-HP 스키프링 전·후 사진



(d) HC-47 스키프링 전·후 사진

그림 4.11 구성성분에 따른 콘크리트 스키프링 전·후 형상

4.4 고찰

Peach et al. (2015)의 연구에서는 레이저 스캐블링의 메커니즘을 콘크리트 내부 자유수 증발에 의한 기압 상승, 표면(레이저 집중 영역)과 콘크리트 내부 사이의 온도 차이에 따른 체적 팽창이 발생한다고 보고되었다. 또한, 자유 수분 함량이 콘크리트 레이저 스캐블링 효율에 미치는 주요 요인이라는 점은 확신하지 않았다. 기건·표건 상태의 콘크리트 스캐블링 효율성을 구별하기 어려웠으며, 절건 상태의 콘크리트에 레이저 스캐블링을 적용하지 않았다.

본 연구에서도 기건·표건 상태의 콘크리트 스캐블링 결과에 따르면, 내부 수분 함량에 따른 영향을 구분하기 어려웠다. 그러나, 절건 상태의 콘크리트 스캐블링 결과는 자유수가 콘크리트 레이저 스캐블링에 필수적인 요소임을 분명히 나타냈다. 일정량의 자유수가 존재하는 경우, 콘크리트의 표면 온도가 절건 상태의 콘크리트만큼 최대 온도가 증가하지 않았다. 자유수의 기화를 통해 콘크리트 표면에 집중된 에너지를 소비하여 콘크리트 표면의 최대 온도를 낮추었으며, 폭발현상에 필요한 증기압이 생성되면 콘크리트 표면에서 박리되고, 새로운 표면이 노출되어 콘크리트 표면 온도가 감소하였다. 이러한 과정을 통해 스캐블링에 작용하는 주요 원리를 파악하였다.

레이저 접촉 영역의 자유수가 없을 경우, 에너지를 흡수하는 물질은 골재이다. 레이저 헤드와 초점을 맞춘 지점에서 멀어질 때까지 온도가 계속 증가한다. 최대 온도의 증가가 콘크리트 표면과 내부의 온도차에 따른 것은 확실하지 않으나, 콘크리트가 박리되지 않은 것으로 확인되었다. 열 축적으로 인해 규산질 골재는 유리화되었으며, 이 결과는 온도 차이가 레이저 스캐블링 공정의 주요 원리가 아닐 수 있음을 나타낸다.

콘크리트 내 수분이 없으면 콘크리트의 레이저 스캐블링을 수행할 수 없으며, 임계 수분 함량은 절건·기건 상태의 함수율 사이에 존재한다고 판단된다. 수분 함량은 콘크리트 모세관 공극 특성에 의해 크게 영향을 받을 수 있으며, 콘크리트 자유수가 레이저 스캐블링의 전제 조건임을 확인하였다. Peach et al. (2015)의 연구 결과를 고려할 때, 임계 수분 함량은 3% 미만일 가능성이 더 높지만, 임계 수분 함량이 높기 때문에 다양한 유형의 콘크리트에서 수분 함량을 보다 세밀하게 제어하는 추가 실험 작업이 필요하다.



VI. 결 론

본 연구에서는 광섬유 레이저 스캐블링 기술을 이용하여 콘크리트의 배합비율과 함수상태의 변화에 따른 스캐블링 성능을 비교 평가한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절건 상태의 콘크리트 레이저 스캐블링에 의해 제거된 콘크리트 파편이 없었으며, 표면이 용융되거나 그대로 굳어버리는 유리화 현상이 명확하게 관찰되었다.
- 2) 기건·표건 상태의 콘크리트는 내부 공극 내 수분이 고온의 에너지를 통해 기화하여 폭발현상이 발생되었으며, 이로 인해 콘크리트 표면에서 시멘트 페이스트와 골재들이 박리되었다.
- 3) 스캐블링된 콘크리트 시편에서는 정사면체의 탄산칼슘 결정체들이 관찰되었으며, C, Ca, O가 주요 성분으로 검출되었다. 유리화된 시편은 매끄러운 표면 형상이 관찰되었으며, Si 성분이 많고 비결정질의 형태로 존재하는 것으로 나타났다.
- 4) 콘크리트의 스캐블링 효율성을 높이기 위해서는 우선적으로 콘크리트 내부 공극 내 수분을 확보해야한다. 그러나 기건·표건 상태에 따른 콘크리트 레이저 스캐블링의 효율성에서는 명확한 차이가 발견되지 않아, 최소한의 수분만 존재하면 레이저 스캐블링은 가능한 것으로 판단된다.
- 5) 잔골재율과 단위 시멘트량 변화에 따른 기건상태 콘크리트의 레이저 스캐블링 성능을 평가한 결과 잔골재율과 단위 시멘트량의 변화에 대한 효과는 유리화와 상관관계가 없었으며, 스캐블링 시 콘크리트 표

면 전체 면적에 대하여 폭렬 현상이 공통적으로 나타났다.

- 6) 기건 상태의 고강도 콘크리트에 레이저 스케블링을 진행한 결과, 일반 강도 콘크리트보다 중량 감소율이 크게 증가되었으며, 미세 공극에서 폭렬 현상이 빈번히 발생된 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

1. 금동권, 조원진, & 한필수. (1997). 콘크리트를 통한 핵종의 확산계수. 한국원자력학회지, 29(6), 17-28.
2. 배성철, 박재연. (2020). 원전해체 콘크리트 폐기물 처분 현황 및 연구 사례. Magazine of RCR, 15(2), 45-51.
3. 서범경. (2020). 원자력시설 DD&R 선진 기술 개발 최종보고서. 한국 원자력연구원.
4. 세계원전시장 인사이트. (2020). 국내외 원전해체 기술 개발 동향 및 전망. 에너지경제연구원.
5. 송종순. (2016). 원전해체 폐기물 처리 기술의 현황과 미래. 국가환경 정보센터 Konetic Report.
6. 송종순, 신승수, & 이상현. (2017). 원전 해체 시 최적 제염기술 선정 을 위한 EXPERT-CHOICE 기법 적용에 대한 연구. 방사성폐기물학 회지, 15(3), 231-237.
7. 송혜영. (2016). 방사능 제염기술. 전자신문, <https://www.etnews.com/20160122000246>.
8. 안성규. (2000). X선 단층 촬영용 고체형 검출기 특성에 관한 연구. 한 국과학기술원 석사논문.
9. 원자력 안전법 시행령 제2조 제1항. <https://www.law.go.kr/법령/원자력안전법시행령>.
10. 원자력 안전법 제2조 제 24항. <https://www.law.go.kr/법령/원자력안>

전법.

11. 원자력안전위원회. (2020). 국내 원자력발전소 현황.
12. 이근우. (2010). 원자력시설 제염해체기술 개발. 한국원자력연구원.
13. 이장화, 김도겸, & 권기현. (2017). 원자력발전소 해체기술 및 시장 현황과 전망. 대한토목학회지, 65(11), 20-26.
14. 정운수. (2007). 선진국의 원자력 시설 해체사업 현황과 수행 전략, 한국원자력연구원.
15. 정철우, 김지현. (2021). 원전 콘크리트 제염 해체시 발생하는 시멘트 페이스트 미분말의 재활용 기술. Magazine of RCR, 16(3), 34-38.
16. 차길용, 김순영, 이재민, 김용수. (2016). 경수로 구조재 내 불순물 조성 및 함량이 중성자 방사화 핵종 재고량에 미치는 영향 분석. 한국방사성폐기물학회, 14(2), 91-100.
17. 최상준. (2014). 차세대 제염해체 원천 기반기술 연구센터. 경북대학교.
18. Aker, R., Feigenbaum, T., Meisner, M., & Thomas, M. (2005). Maine Yankee Decommissioning Experience Report. New Horizon Scientific, 5-1.
19. ASTM C 642. (2020). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International, West Conshohocken.
20. Burke, S. (1990). Concrete decontamination. a literature review.

Technical report AEEW.

21. E. J. Cox and R. Garde. (1990). decontamination of concrete surfaces at the Los Alamos Scientific Laboratory. PNL-SA-8855.
22. Echt, A., Sieber, W., Jones, A., & Jones, E. (2002). Control of silica exposure in construction: Scabbling concrete. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17(12), 809-813.
23. Feltcorn, E. (2006). Technology reference guide for radiologically contaminated surfaces. US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 11-18.
24. Heo, S. U., Kim, J. H., Oh, S. Y., Lim, G., Nam, S., Kim, T., ... & Chung, C. W. (2022). Effect of moisture content and mix proportion of concrete on efficiency of laser scabbling. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01040.
25. Hilton, P., & Walters, C. (2010). The potential of high power lasers in nuclear decommissioning. In Paper at WM 2010 Conference, Phoenix, AZ (pp. 7-11).
26. IAEA PRIS. <http://pris.iaea.org/pris/home.aspx>.
27. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2001). Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities. Technical Reports Series No. 401, IAEA, Vienna.
28. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). Decommissioning of

nuclear installations. <https://www.iaea.org/topics/decommissioning>.

29. Khvostova, M. S. (2012). Some aspects of the decommissioning of nuclear power plants. *Power Technology and Engineering*, 45(6), 447-453.
30. Koga, Y., Inoue, T., Tateyashiki, H., Sukekiyo, M., Okamoto, M., & Asano, T. (1997). A process for separating aggregate from concrete waste during the dismantlement of nuclear power plants. *Hoshasei Haikibutsu Kenkyu*, 3(2), 17-25.
31. KS F 2403. (2019). 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법.
32. KS F 2405. (2017). 콘크리트의 압축 강도 시험 방법.
33. KS L 5201. (2021). 포틀랜드 시멘트.
34. Lawrence, J., & Li, L. (2000). A comparative study of the surface glaze characteristics of concrete treated with CO₂ and high power diode lasers: Part I: Glaze characteristics. *Materials Science and Engineering: A*, 284(1-2), 93-102.
35. Lawrence, J., & Li, L. (2000). A comparative study of the surface glaze characteristics of concrete treated with CO₂ and high power diode lasers Part II: Mechanical, chemical and physical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 287(1), 25-29.
36. Lee, J. S., Min, J., Won, C., & Han, S. M. (2014). Formation of raw materials for manufacturing low-activation binding material. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26(1), 399-400.

37. Lee, K. Y., Oh, M., Kim, J., Lee, E. H., Kim, I. S., Kim, K. W., ... & Seo, B. K. (2018). Trends in technology development for the treatment of radioactive concrete waste. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 16(1), 93-105.
38. Min, B. Y., Park, J. W., Choi, W. K., & Lee, K. W. (2009). Separation of radionuclide from dismantled concrete waste. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 7(2), 79-86.
39. Moon, J. K. (2012). Status of the technology development for decontamination and decommissioning of nuclear facilities, *Nuclear Industry*, 7(8), 34-58.
40. Nuclear Energy Agency. (2014). R&D innovation needs for decommissioning of nuclear facilities. OECD NEA Report, Boulogne-Billancourt.
41. Oh, S. Y., Lim, G., Nam, S., Kim, T., Kim, J. H., Chung, C. W., ... & Kim, S. (2021). Laser Scabbling of a Concrete Block Using a High-Power Fiber Laser. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 19(3), 289-295.
42. Pantelias, M., & Volmert, B. (2015). Activation neutronics for a swiss pressurized water reactor. *Nuclear Technology*, 192(3), 278-285.
43. Peach, B., Petkovski, M., Blackburn, J., & Engelberg, D. L. (2015). An experimental investigation of laser scabbling of concrete.

- Construction and Building Materials, 89, 76-89.
44. Peach, B., Petkovski, M., Blackburn, J., & Engelberg, D. L. (2016). The effect of concrete composition on laser scabbling. Construction and Building Materials, 111, 461-473.
 45. Peach, B., Petkovski, M., Blackburn, J., & Engelberg, D. L. (2018). The effect of ageing and drying on laser scabbling of concrete. Construction and Building Materials, 188, 1035-1044.
 46. Radioactive Waste Management Committee. (2011). The NEA co-operative programme on decommissioning decontamination and demolition of concrete structures. Nuclear Energy Agency.
 47. Savina, M., Xu, Z., Wang, Y., Reed, C., & Pellin, M. (2000). Efficiency of concrete removal with a pulsed Nd: YAG laser. Journal of Laser Applications, 12(5), 200-204.
 48. Shimizu corporation. (2013). Treatment method of activated concrete. Japanese patent, P5234416.
 49. Shimizu corporation. (2016). Treatment method of activated concrete. Japanese patent, P52016-161422A.
 50. Song, J. S., Jung, M. Y., & Lee, S. H. (2016). A study on the applicability for primary system decontamination through analysis on NPP decommission technology and international experience. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 14(1), 45-55.

51. Sparks, D. L. (2003). Environmental soil chemistry. Elsevier.
52. Teunckens, L., Lewandowski, P., Walthéry, R., & Ooms, B. (2003). The Belgoprocess strategy relating to the management of materials from decommissioning. Belgoprocess, nv Dessel (BE).
53. US Department of Energy. (1993). Innovative technologies for recycling contaminated concrete and scarp metal. DOE/METC/C-93/7098, Augusta.
54. US Department of Energy. (1996). Electrokinetic decontamination of concrete. DOE/MC/30162-97/C0804, Morgantown.
55. US Nuclear Regulatory Commission. (2001). Inventory of materials with very low levels of radioactivity potentially clearable from various types of facilities. USNRC Inventory Report, Virginia.
56. Watson, B. A., Buckley, J. T., & Craig, C. M. (2006). Two approaches to reactor decommissioning: 10 CFR Part 50 license termination and license amendment, lessons learned from the regulatory perspective. In Proceedings of the Waste Management 2006 Conference.
57. White, T. L., Foster Jr, D., Wilson, C. T., & Schaich, C. R. (1995). Phase 2 microwave concrete decontamination results (No. CONF-950216--127). Oak Ridge National Lab.
58. Young, J. F., Mindess, S., & Darwin, D. (2002). Concrete. Prentice Hall.