

# 방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구

이병희 / 전주영 / 김선동 / 전수현 / 이정환

report

## 방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구

연구기획 2023-083호

## 방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구

---

지은이 이병희, 전주영, 김선동, 전수현, 이정환  
발행인 김홍배  
발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원  
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99  
홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

전화번호 042-866-8782  
이메일 [bhlee@lh.or.kr](mailto:bhlee@lh.or.kr)

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로써 공사나 정부의 공식적인 견해와  
관계가 없습니다.

우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

## 방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구

Evaluation of the effect of paint on radon exhalation rate  
from concrete surface

이병희·전주영·김선동·전수현·이정환

## 참여연구진

### 연구책임

이병희 LH 토지주택연구원 수석연구원

### 연구진

전주영 LH 토지주택연구원 센터장

김선동 LH 토지주택연구원 연구원

전수현 LH 주택기술단 차장

이정환 LH 주택기술단 차장

### 연구심의위원회

박지영 LH 토지주택연구원 실장

천영수 LH 토지주택연구원 선임연구위원

김길태 LH 토지주택연구원 수석연구원

최승영 LH 주택기술단 부장

오승훈 LH 국민주거혁신실 부장

권재관 LH 경남지역본부 주택사업처 부장

박영준 LH 고객품질혁신처 차장

여명석 서울대학교 교수

정경재 서울대학교 교수

박진철 중앙대학교 교수

### ■ 건축 재료로부터 발생하는 라돈 관리의 필요성

「실내공기질 관리법」 개정에 따라 2018년 이후 신규사업승인을 받은 신축 공동주택의 실내 라돈 측정이 의무화되면서 권고 기준( $148 \text{ Bq/m}^3$ ) 초과 세대에 대한 사후 라돈 관리 방안의 필요성 대두

- 2019년 환경부 조사에 따르면 신축 공동주택 60세대 중 37세대(약 62 %)가 실내 라돈 권고기준을 초과
- 우리나라 공동주택 주요 라돈 발생원 중 하나인 콘크리트에 대한 대책 마련 필요

### ■ 도료를 이용한 방사성물질 방출 저감 가능성

공동주택의 실내 공기 중 존재하는 라돈은 콘크리트와 같은 건축 재료의 표면에서 방출하여 실내로 이동하기 때문에 도료 등 추가 건축 재료 적용을 통해 라돈 방출 억제 가능

- 도료는 콘크리트 등 기존 건축 재료에 추가 시공이 용이하며 신축 및 기축 공동주택 모두 적용이 가능
- 도료 특성에 따른 건축 재료의 표면 라돈 방출 저감 가능성 평가 필요

### ■ 도료의 특성 분석 방법 수립

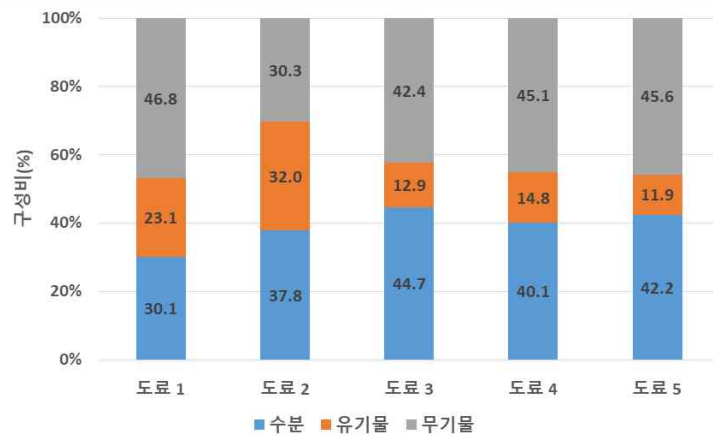
시중에 유통되는 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료를 선정, 도료별 방사성물질 저감 효과를 평가하기 위해 도료의 구성성분과 화학적, 물리적 특성을 분석

- X-선 회절분석 및 XRF/GC 분석을 통해 도료의 구성 물질과 화학적 특성 분석
- 실체현미경 및 전자현미경 분석을 통해 도료의 시공 후 표면 마감, 두께 등 물리적 특성을 분석

## ■ 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료의 특성 분석 결과

도료별 구성성분을 비교한 결과, 방사성물질 저감 기능성 도료(1, 2)가 일반 도료(3-5)에 비해 유기물 함량이 2배 이상 높은 것을 확인

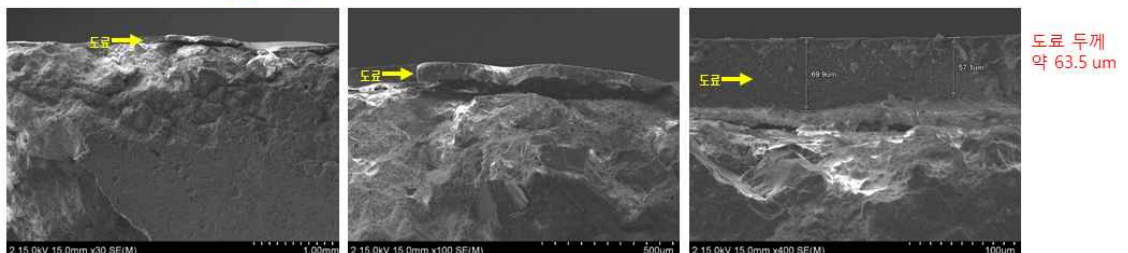
- 수분 함량의 경우, 방사성물질 저감 기능성 도료는 평균 1:1.2인 반면에 일반 도료에서는 평균 1:3의 구성비로 추정
- 무기물의 경우, 방사성물질 저감 기능성 도료는  $\text{TiO}_2$  함량이 약 40 ~ 59 %인 반면 일반 도료에서는 20 ~ 23 % 내외이며,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  등의 함량이 상대적으로 높음을 확인



[그림 1] 도료별 수분, 유기물, 무기물 구성 비율

방사성물질 저감 기능성 도료 도장에 따른 단면 마감 형태를 분석한 결과, 일반 도료에 비해 상대적으로 균열이 적으며 치밀하고 탄성력이 높은 도막을 형성

- 콘크리트 시편 위에 얇은 박막 형태로 도료가 마감되어 있는 형태 확인

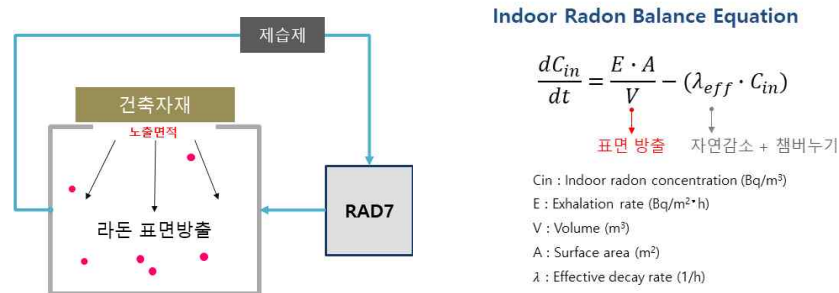


[그림 2] SEM-EDS을 이용한 방사성물질 저감 기능성 도료 도장 단면 분석

## ■ 건축재료 표면으로부터 방출하는 라돈 평가 방법 수립

밀폐형 챔버를 이용하여 챔버 내 축적된 라돈 농도를 측정, 건축 재료 표면으로부터 발생하는 라돈 방출량을 추정하는 방법을 수립

- 밀폐형 챔버 내 건축 재료 표면의 일부를 노출시켜 라돈 농도가 축적되게 설치
- 챔버 내 라돈 농도가 포화 상태가 되는 일정 시간 이상 실험을 수행함으로써 건축 재료의 표면 라돈 방출량을 추정하는 방식을 이용

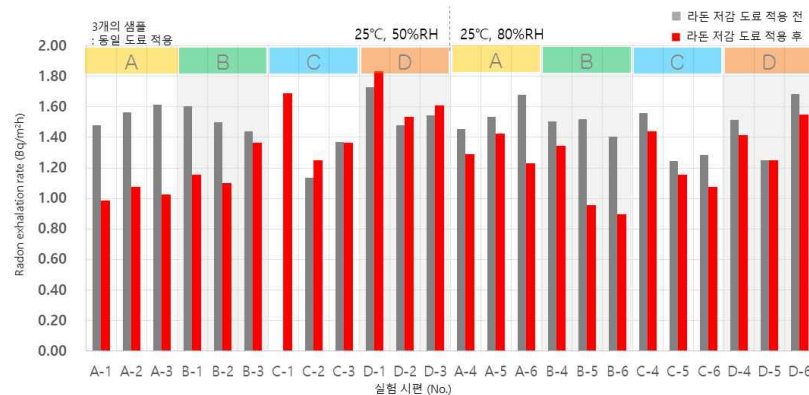


[그림 3] 밀폐형 챔버를 이용한 건축 재료 표면 라돈 방출 실험

## ■ 콘크리트 시편을 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가

실제 공동주택에서 사용하는 콘크리트를 이용, 소형 시편을 제작하여 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료 적용 전, 후의 라돈 방출 저감 성능 평가를 수행

- 방사성물질 저감 기능성 도료(A, B)의 경우, 도료별 평균 20 ~ 34 % 내외의 라돈 방출 저감 효과 확인
- 일반 도료(C, D)의 경우, 도료별 평균 5 ~ 10 % 내외의 라돈 방출 저감 효과 확인

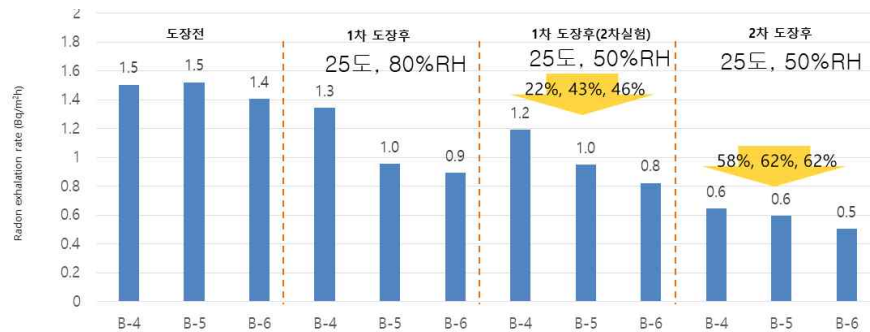


[그림 4] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 비교



방사성물질 저감 기능성 도료의 경우, 도장 시 표면 마감 형태 또는 도장 두께에 따라 라돈 방출 저감 성능 차이가 발생

- 도료 도장에 있어 콘크리트 표면의 기공 처리 상태에 따라 최대 2배까지 라돈 방출 저감 성능 차이 확인
- 도료를 1차 도장(상도 및 하도, 총 2겹)을 할 경우, 도장 전 대비 약 34 %, 2차 도장(총 4겹)을 할 경우, 도장 전 대비 약 60 %의 라돈 저감 효과 발생
- 도료의 두께를 2배 증가시킬 경우, 최대 2배의 라돈 방출 저감 성능 차이 확인

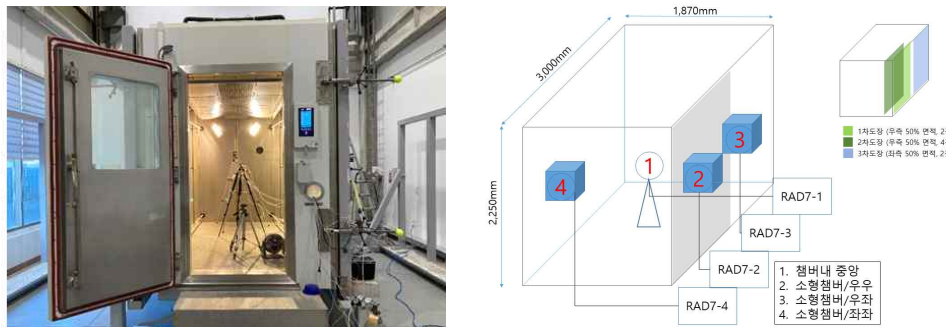


[그림 5] 도장 두께에 따른 콘크리트 시편 라돈 방출량 비교

## ■ 실물 벽체를 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가방법 수립

실제 공동주택의 벽체를 고려하여 실물 크기의 벽체 시편을 제작, 외단열 실험 챔버 및 소형 챔버를 이용하여 실물 벽체 표면에서 발생하는 라돈 방출 평가를 수행

- 방사성물질 저감 기능성 도료 도장 방법에 따른 실물 벽체 표면의 라돈 방출 측정



[그림 6] 외단열 실험 챔버 및 소형 챔버를 이용한 실물 벽체의 라돈 방출 실험

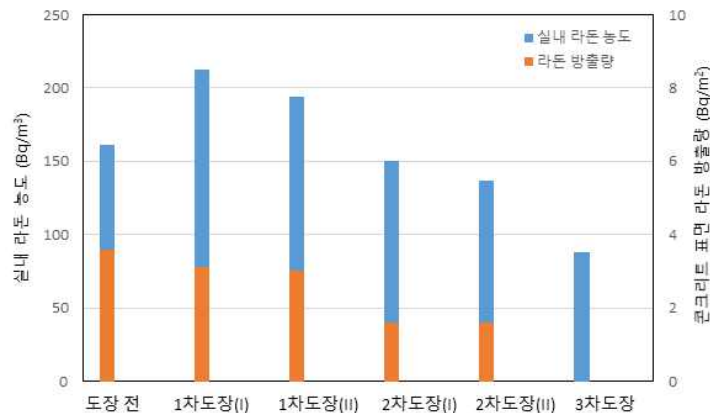
## ■ 실물 벽체를 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가

방사성물질 저감 기능성 도료를 실물 벽체의 1/2 면적에 1차 도장한 결과, 도장 전 동일한 위치의 표면 라돈 방출량 대비 약 15 %, 실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평균값 대비 약 25 %의 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 확인

- 방사성물질 저감 기능성 도료를 이용하여 실물 벽체의 1/2 면적에 2차 도장을 진행한 경우, 도장 전 동일한 위치의 표면 라돈 방출량 대비 약 61 %, 실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평균값 대비 약 55 %의 라돈 방출 저감 효과를 평가

실내 라돈 농도의 경우, 도장 전 실내 라돈 농도를 제외하면 도료의 도장 면적 증가 또는 도료의 도장 두께 증가에 따라 실내 라돈 농도 역시 감소하는 것을 확인

- 도장 전 측정값의 경우, 실험 시, 측정값의 오류 또는 실험 시 측정 환경 변화 등에 기인한 것으로 판단
- 방사성물질 저감 기능성 도료 적용 시, 실내 라돈 농도 감소 효과를 정량적으로 산출하기 위해서는 도료 적용에 따른 표면 라돈 방출량 변화, 도장 면적, 세대 기밀 성능 수준 등 데이터 분석이 필요



[그림 7] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 분석 결과

### 주제어

방사성물질, 도료, 라돈 방출량, 밀폐형 챔버 실험, 건축 재료

---

## 차 례 Contents

### 제1장 서론

1. 연구의 배경 및 목적	1
1. 1. 연구추진 배경	1
1. 2. 연구 목적	3
2. 연구 범위 및 내용	5
2.1. 라돈 관리 로드맵에 따른 연구 범위 설정	5
2.2. 주요 연구내용	6

### 제2장 도료와 방사성물질

1. 건축 재료로서의 도료	9
2. 방사성 물질의 특성	11
3. 방사성물질 저감 관련 도료 기술 개발 현황	17

### 제3장 도료의 특성 분석

1. 도료의 특성 분석 방법	21
2. 도료의 구성 성분 분석	23
2.1. 건조 상태에서의 도료 표면 비교	23
2.2 도료별 구성 성분 비교	24
2.3. 도료별 구성 광물 비교	28
3. 도료의 화학적 특성 비교	29
3.1. 도료 내 유기물의 화학적 특성	29
3.2. 도료 내 무기물의 화학적 특성	33
4. 도료의 특성과 방사성물질 저감 성능	35
4.1. 도료별 표면 마감 형태 분석	35

4.2. 도료별 단면 마감 형태 및 구성 성분 분석	40
4.3. 도료의 오염물질 방출성능	46
5. 방사성물질 저감 기능성 도료 특성	49
5.1. 방사성물질 저감 기능성 도료의 구성	49
5.2. 방사성물질 저감 기능성 도료의 물리적 특성	50

#### 제4장 도료의 방사성물질 저감 성능 평가

1. 시편을 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가	51
1.1. 콘크리트 표면 라돈 방출량 추정방법	51
1.2. 콘크리트 시편 및 측정 실험 준비	53
1.3. 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 실험 결과	55
2. 실물 벽체를 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가	65
2.1. 대형 챔버를 이용한 실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평가방법	6
2.2. 실물 벽체의 표면 라돈 방출 실험 결과	67

#### 제5장 결론

결론	71
----	----

---

## 표 차례 List of Tables

[표 2-1] 국내 개발된 라돈 저감 도료 관련 특허	Ⅶ
[표 3-1] 도료의 특성 분석 방법	21
[표 3-2] 분석 대상 도료의 종류	23
[표 3-3] 시료 내 무기물의 화학적 구성 성분 (%) (XRF 분석 결과)	43
[표 3-4] 분석 대상 도료의 종류	35
[표 3-5] 도료의 오염물질 방출 성능 평가(I)	4
[표 3-6] 도료의 오염물질 중 기타물질	47
[표 3-7] 도료의 오염물질 방출 성능 평가(II)	8
[표 3-8] 도료 종류별 구성광물	49
[표 4-1] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(A-1)	95
[표 4-2] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(B-1)	06
[표 4-3] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(C-1)	06
[표 4-4] 도료 도장 마감에 따른 콘크리트 시편 모습(I)	26
[표 4-5] 도료 도장 마감에 따른 콘크리트 시편 모습(II)	36
[표 4-6] 도료 마감 두께에 따른 콘크리트 시편 모습	4
[표 4-7] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 실험 결과(I)	86
[표 4-8] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 실험 결과(II)	86

---

## 그림 차례 List of Figures

[그림 1-1] 공동주택 라돈 관리시스템 로드맵	5
[그림 1-2] 연구수행방법	7
[그림 2-1] 도료별 구성물질 비율(예)	9
[그림 2-2] 국내 메이커 회사의 외부용 수성 도료 시험성적서 비교표	01
[그림 2-3] 자연방사선 노출원	11
[그림 2-4] 방사성물질(우라늄) 붕괴사슬	12
[그림 2-5] 방사성물질(토륨) 붕괴사슬	12
[그림 2-6] 방사성 동위원소가 붕괴하는 3가지 방법	13
[그림 2-7] 알파선( $\alpha$ ), 베타선( $\beta$ ), 감마선( $\gamma$ )의 투과도	14
[그림 2-8] 라돈의 실내 유입 경로	15
[그림 2-9] 실내 라돈 주요 발생원	15
[그림 2-10] 라돈 차폐 등 시중에 공개된 기능성 도료	16
[그림 3-1] 도료 건조 및 물성/화학적 특성 연구 방법	17
[그림 3-2] 도료의 자연 건조 후 표면 특성	24
[그림 3-3] 고온 건조 상태에서의 시료 표면	25
[그림 3-4] 시료별 수분 함량	26
[그림 3-5] 시료별 유기물 함량	26
[그림 3-6] 시료별 무기물 함량	27
[그림 3-7] 도료의 구성비율	27
[그림 3-8] 도료 내 구성광물(XRD 분석 결과)	28
[그림 3-9] 각 도료 내 유기물의 화학적 특성(FT-IR 분석 결과)	23
[그림 3-10] 도료 내 유기물의 화학적 특성 비교(FT-IR 분석 결과)	33
[그림 3-11] 시료 내 무기물의 화학적 특성(XRF 분석 결과)	48
[그림 3-12] 콘크리트 시편을 이용한 시료 제작	55
[그림 3-13] 도료를 도장한 콘크리트 시료의 표면 육안 관찰	63

[그림 3-14] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 1번) 표면 관찰	83
[그림 3-15] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 2번) 표면 관찰	83
[그림 3-16] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 3번) 표면 관찰	93
[그림 3-17] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 4번) 표면 관찰	93
[그림 3-18] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 5번) 표면 관찰	04
[그림 3-19] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 1-3번)의 단면 관찰	1 4
[그림 3-20] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 4,5번)의 단면 관찰	24
[그림 3-21] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 1번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포	3 4
[그림 3-22] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 2번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포	4 4
[그림 3-23] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 3번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포	5 4
[그림 3-24] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 4번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포	5 4
[그림 3-25] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 5번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포	6 4
[그림 4-1] 건축 재료 표면 라돈 방출 평가 개요	3
[그림 4-2] 도료 도장 후, 콘크리트 시편 모습	3
[그림 4-3] 항온항습실 내 콘크리트 시편 준비	34
[그림 4-4] 밀폐형 챔버 위 콘크리트 시편 설치 모습	54
[그림 4-5] 콘크리트 시편을 이용한 챔버 내 라돈 농도 변화 비교	55
[그림 4-6] 콘크리트 시편을 이용한 밀폐형 챔버 내 라돈 농도 평균값	65
[그림 4-7] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 비교	75
[그림 4-8] 도장 적용에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 비율	85
[그림 4-9] 상대습도 변화에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 비율	85
[그림 4-10] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(A-1)	95
[그림 4-11] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(B-1)	06
[그림 4-12] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(C-1)	06
[그림 4-13] 방사성물질 저감 기능성 도료 적용에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 비교	16
[그림 4-14] 도장 두께에 따른 표준시편 라돈 농도	4
[그림 4-15] 외단열 실험 챔버	65
[그림 4-16] 소형 챔버 및 RAD7 셋팅 위치	65
[그림 4-17] 시편의 표면 습도 측정	66
[그림 4-18] 외단열 실험 챔버를 이용한 실물 벽체 크기 시편 실험 준비	66
[그림 4-19] 실물 벽체 크기 시편에 부착한 소형 챔버 모습	66

[그림 4-20] 실물 벽체의 도장 작업 순서	67
[그림 4-21] 실물 벽체 도장 후 실험 모습	67
[그림 4-22] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 측정 결과	68
[그림 4-23] 신축 공동주택 실내공기질 권고기준	70





# 제1장 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

### 1. 1. 연구추진 배경

일반적으로 주택 내 실내 공기 중 존재하는 라돈의 발생원은 주로 토양 및 암석, 지하수 등을 일컫는다. 이는 토양 및 암석, 지하수 등에서 발생하는 라돈이 외벽 또는 바닥의 틈새, 배관 등을 이용하여 실내로 유입됨을 의미한다. 다만 우리나라의 경우, 공동주택 내 존재하는 라돈 중 실내에서 방출되는 라돈의 양을 간과하기 어렵다. 토양 및 암석을 주재료로 이용하는 우리나라 공동주택 특성 상, 건축 재료로부터 발생하는 라돈은 쾌적한 실내 환경 조성을 위해 해결해야 할 문제 중 하나이다.

현재 우리나라의 공동주택 실내 라돈 관리는 실내공기질 관리법 개정<sup>1)</sup>에 따른다. 2018년 이후 신규사업승인을 받은 신축 공동주택은 실내 라돈 농도 측정이 의무화되었으며, 실내 라돈 농도의 권고 기준은 148 Bq/m<sup>3</sup>이다. 관계법 개정 이후, 2019년 환경부에서 실시한 「신축공동주택 라돈조사 결과」<sup>2)</sup>가 시행되었다. 본 조사는 2018년 11월부터 2019년 5월까지 입주 전 신축 공동주택 9개 단지, 60세대 대상으로 한다.

조사 결과에 따르면 60세대 중, 37세대(61.7 %)에서 148 Bq/m<sup>3</sup>을 초과한 것으로 나타나 공동주택에서의 실내 라돈 관리 문제가 간과하기 어려운 상황임을 밝혔다. 다만 본 조사는 60세대 시범조사로 일반화하기에는 측정 세대 수가 적다는 점, 단지별 사업승인 시점에 따라 권고기준 적용 여부가 동일하지 않다는 점 등의 한계가 있다.

공동주택에서의 실내 라돈 농도 측정은 세대가 밀폐된 상태와 환기 상태, 즉 2가지 조건에서 수행한다. 환경부 조사에서도 환기설비 가동조건에서는 라

---

1) 환경부(2022). 실내공기질 관리법(2022.12.08 시행)

2) 에코타임스. 신축공동주택 61% 라돈 농도 기준 초과 기사 발췌(2019.09.26)

돈 농도가 크게 감소하는 것을 하였으며, 「건축법령」<sup>3)</sup> 및 「주택법령」에 따라 2006년 이후 100세대 이상 신축공동주택은 시간당 0.5회 이상 환기성능의 환기설비를 의무적으로 설치하고 있다. 다만 공동주택 내 설치된 환기설비 운영이 의무화가 아니기 때문에 밀폐 시에는 실내 라돈 권고기준 초과가 우려되는 상황이다.

우리나라 공동주택에서 발생하는 라돈 문제의 주요 원인은 콘크리트를 주로 사용하는 벽식 구조에서 기인한다고 볼 수 있다. 건축 재료로부터 방출하는 방사성물질 문제를 해결하기 위해 LH에서는 「건축자재 방사성물질 저감 가이드라인」(‘19.09. LH 고객품질혁신단)을 발표<sup>4)</sup>하였다. 가이드라인은 건축자재 7종(콘크리트(골재 포함), 벽돌, 도기, 타일, 몰탈, 석고보드, 석재)을 대상으로 한다. 건축재료 내 존재하는 방사성물질 농도를 이용한 방사능 농도지수(I)를 산정하여 관리 기준( $I < 1$ )을 제시하였으며, 추가적으로 일부 건축 재료에 대해 라듐 농도를 130 Bq/kg 이하로 관리하도록 권장하고 있다.

또한 정부에서는 환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회에서 공동으로 「건축자재 라돈 저감 관리 지침서」(‘19.11)<sup>5)</sup>를 발표하여 국가 차원에서의 건축재료 라돈 관리 방안을 제시하였다. 본 지침에 따르면 공동주택에 사용되는 건축재료 중 건축 내장재, 특히 천연석 기반 자재를 대상으로 방사성물질 농도, 즉 방사능 농도 지수( $I < 1$ )를 이용하여 천연석 기반 건축 내장재의 라돈 관리 지침을 수립하였다.

두 지침 모두 건축 재료 내 존재하는 천연방사성 핵종 농도를 이용한 간접 관리 방식으로 가스 상 물질인 라돈을 직접적으로 관리, 제어하는 방법은 아니다. 건축 재료의 방사성 물질 농도를 활용한 라돈의 간접적인 관리 방식도 중요하지만 밀폐 상태에서의 실내 라돈 권고 기준 초과 문제를 해결하기 위해서는 건축 재료로부터 발생하는 라돈을 직접 관리하는 방식이 필요하다.

환기 등 외부 공기의 유입을 제외한 조건에서 실내 라돈 농도를 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 오염원 제어라 할 수 있다. 즉, 실내로 라돈을 방출

---

3) 국토교통부(2021). 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(2021.08.27 시행)

4) LH 고객품질혁신단(2019). 건축자재 방사성물질 저감 가이드라인, 한국토지주택공사

5) 환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회(2019). 건축자재 라돈 저감 관리 지침서

하는 건축 재료의 사용을 줄이거나 라돈이 발생하지 않는 대체 재료를 활용하는 것이다. 라돈은 무기질 계열의 건축 재료에서 방출되기 때문에 시멘트, 자갈, 모래로 구성된 콘크리트에 대한 관리가 필요하다. 그러나 현재 건설 기술 수준에서 콘크리트를 대체할 수 있는 대안이 없는 상황이다.

콘크리트와 같은 건축 재료의 경우, 사전 점검을 통한 라돈 관리의 한계가 존재한다. 또한 우리나라 공동주택의 많은 비율을 차지하는 벽식 구조 특성 상, 콘크리트 사용량을 무작정 줄이기도 어렵다. 그러므로 콘크리트와 같은 건축 재료 사용 시, 콘크리트에서 방출되는 라돈을 억제할 수 있는 추가 건축 재료에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 시공이 용이하고 재료 조달이 비교적 쉬운 도료를 대상으로 라돈의 관리방안을 제안하고자 한다.

## 1. 2. 연구 목적

LH 토지주택연구원(이하 LHRI)에서는 실내 라돈의 위해성을 인지하고 실내 라돈 현황 분석 및 주요 라돈 발생원으로부터의 라돈 방출을 규명하기 위한 다양한 연구를 수행하였다. 특히 선행 연구를 통해 건축 재료가 함유한 방사성 물질과 라돈 방출과의 상관관계 및 단일 건축 재료로부터 발생하는 라돈이 실내 라돈 농도에 기여할 수 있음을 밝혔다<sup>6)7)</sup>.

그러므로 본 연구는 안전한 공동주택 실내 라돈 환경을 위해 건축 재료 사후 관리를 통한 실내 표면 라돈 방출 저감을 목적으로 한다. 콘크리트 등 건축 재료에서 발생하는 라돈 차폐 또는 저감이 가능할 것으로 예상되는 도료를 선정, 각 도료별 구성성분 및 물리, 화학적 특성을 분석한다. 이를 통해 건축 재료 표면에서 발생하는 라돈 저감에 도움이 될 수 있는 도료의 특성을 도출할 수 있다. 또한 건축 재료에 직접 도료를 시공함으로써 도료 도장 전, 후의 표면 라돈 방출량을 비교, 도료 특성에 따른 건축 재료 표면 라돈 방출량 감소 효과를 분석하고자 한다.

다만 본 연구 수행에 있어 건축 재료에서 발생하는 라돈 관련 표준 시험 방법이 부재하다는 점에서 평가 방법의 한계가 존재한다. 특히 건축 재료 내 존

6) 전주영 외(2020). 공동주택 오염물질 방출특성을 활용한 실내공기 평가 연구. LH 토지주택연구원

7) 이병희 외(2022). 건강주택 구현을 위한 건축 재료 라돈방출량 평가 및 실내 라돈 농도 관리방안 연구. LH 토지주택연구원

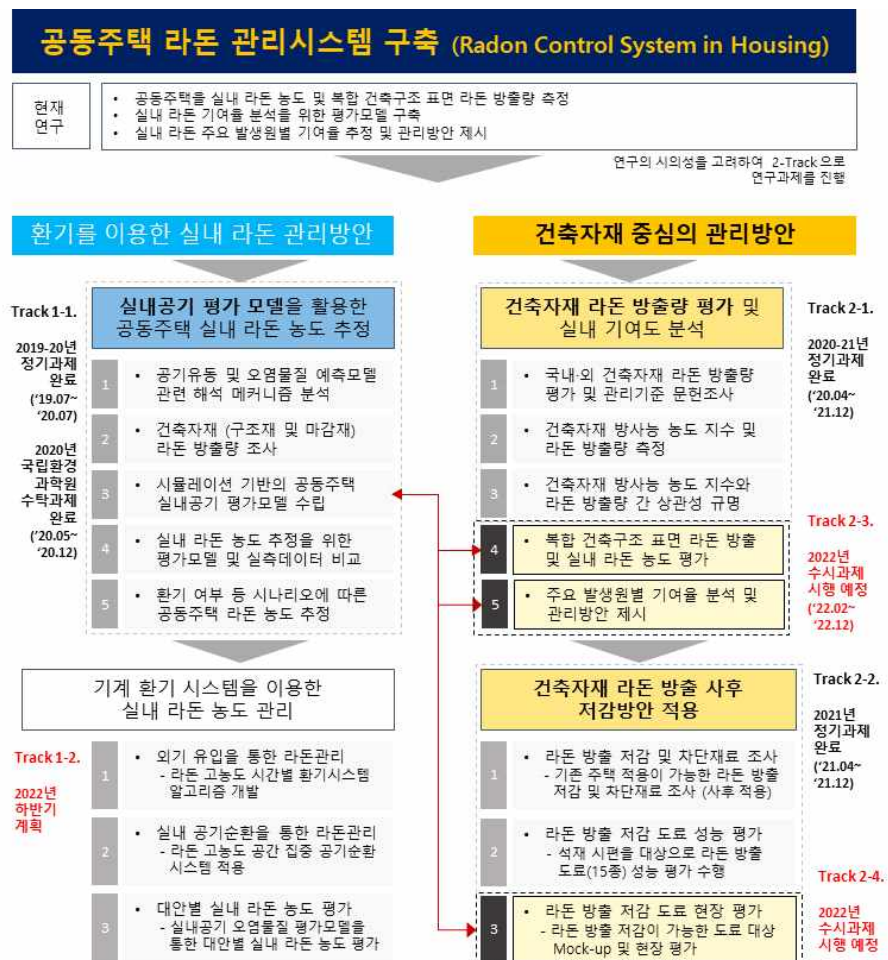
재하는 라듐으로부터 붕괴되어 라돈이 발생하는 기작을 명확하게 분석하기 어려울 뿐만 아니라 건축 재료 자체의 흡습율, 다공성, 형상 등에 따라 라돈 방출량이 달라질 수 있다. 이를 보완하기 위해 건축 재료의 표면 라돈 방출량 측정 방법에 있어 장시간 측정, 재실험 등을 통해 데이터의 안정성을 확보하고, 동일한 건축 재료를 이용하여 시편을 제작할 뿐만 아니라 시편 준비실 및 대형 챔버 등 항온, 항습 조건을 유지하고자 노력하였음을 밝힌다.

## 2. 연구 범위 및 내용

### 2.1. 라돈 관리 로드맵에 따른 연구 범위 설정

LHRI에서는 안전한 실내 라돈환경 조성을 목표로 공동주택 라돈 관리시스템을 구축하였으며 단계별 연구 과제 수행을 통해 환기를 이용한 실내 라돈 관리방안과 건축자재 중심의 라돈 관리방안을 제시하고 있다. 본 연구는 크게 건축자재 라돈 방출 사후 저감 방안 개발에 해당하며, 주요 내용으로는 방사성물질 저감 기능성 도료의 특성을 분석, 건축 재료로부터 발생하는 라돈 저감 효과를 평가하는 것이다.

라돈 공동주택 라돈 관리시스템의 주요 내용은 다음 [그림 1-1]과 같다.



## 2.2. 주요 연구내용

본 연구는 방사성물질 저감 기능성 도료와 일반 도료의 특성을 분석, 도료의 특성에 따라 건축 재료에서 방출되는 라돈 저감 효과를 평가, 비교를 주로 수행한다. 본 연구의 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 도료와 방사성물질 자료 조사
  - 도료 및 방사성물질 관련 자료 조사
  - 방사성물질 저감 관련 도료 개발 기술 현황 조사
- 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료의 특성 분석
  - 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료의 구성 성분 분석
  - 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료의 물리적, 화학적 특성 비교
  - 도료의 특성에 따른 방사성물질 저감 가능성 분석
- 콘크리트 시편을 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가
  - 챔버를 이용한 건축 재료 표면 라돈 방출량 추정방법 정립
  - 밀폐형 챔버 및 대형 챔버를 이용한 콘크리트 시편 라돈 방출 실험방법 수립
  - 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료 적용에 따른 콘크리트 표면 라돈 방출량 비교
  - 도료 도장 방법에 따른 콘크리트 표면 라돈 방출량 비교
- 실물 벽체를 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가
  - 외단열 실험 챔버를 이용한 실물 벽체 표면 라돈 방출 실험방법 수립
  - 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료 적용에 따른 실물 벽체 표면 라돈 방출량 비교



[그림 1-2] 연구수행방법





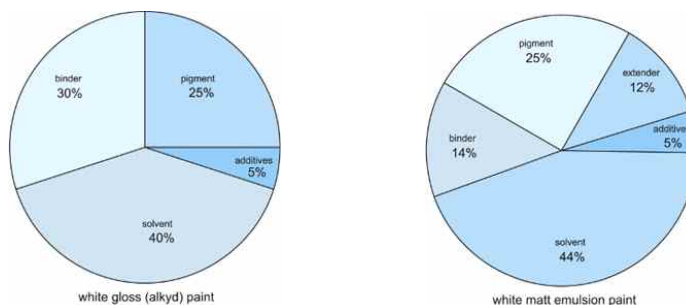
## 제2장 도료와 방사성물질

### 1. 건축 재료로서의 도료

일반적으로 도료는 상온에서 유동성을 갖는 액체로서, 물질의 표면에 도장되어 얇은 층을 형성하여 물체를 보호하고 미관을 아름답게 장식하는 제품을 의미한다. 도료는 수지, 안료, 첨가제, 물(용제) 4가지 성분으로 구성된다. 이 중에서 수지는 도막을 형성하여 물체를 보호하는 역할을 하며 안료는 색상 및 도료의 기능을 부여한다. 또한 첨가제는 도료나 도막의 성질 조절 및 물성을 향상시키는 기능을 하며, 물(용제)은 제조/보관 및 작업 시 적절한 점도를 부여하는 역할을 한다.

건축 재료로서의 도료는 그림 2-18)과 같이 성분별 조성비에 따라 다양한 특성을 지니며 광범위하게 사용할 수 있다. 도료의 성능은 사용 목적에 따라 은폐율, 건조 시간, 내알칼리성, 내후축진성 등의 항목으로 시험, 평가하며 그림 2-29)와 같은 시험 성적서를 통해 성능 수준을 파악할 수 있다.

그림 2-2는 시중에서 쉽게 볼 수 있는 외부용 수성 도료 시험 성적서를 비교한 것이다. 축진내후성(①)은 도료가 자외선에 얼마나 내구성이 유지되는 것을 평가하는 것으로, KS1급은 300시간, KS2급은 200시간 내구성이 유지됨을 뜻한다. 즉, KS1급 도료는 KS2급에 비해 약 1.5배의 우수한 내후성을 가진다고 볼 수 있다.



[그림 2-1] 도료별 구성물질 비율(예)

8) <https://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/paints.html> 이미지 발취

9) 노열 외(2022). 방사성물질 저장 도료의 물성 분석과 특성 비교, 전남대학교

내알칼리성(②)은 도료가 알칼리성에 저항하는 특성을 시험한 항목이다. 건물에서 흔히 사용하는 콘크리트가 알칼리 성분이기 때문에 도료 자체가 우수한 내알칼리성을 확보해야 쉽게 변색되지 않는다. 내알칼리성 항목에서 KS1 급은 48시간이고, KS2급은 24시간이다. 도료의 은폐율은 도료 시공 후, 도장 면이 차폐되는 정도를 뜻한다.

은폐율 (③) 항목을 보면 KS2급이 98이고, KS1급은 96이다. 이는 2급 도료가 1급 도료에 비해 은폐력이 좋음을 의미한다. 1회 도장 시, 도장 면이 비치거나 은폐 부족이면 다시 도료를 칠해야하는 불량이 생길 수 있다. 이 때, KS2 급 도료가 은폐력이 좋기 때문에 2급을 1회 도장을 하는 재도장 공사에 사용하기도 한다.

각 도료별 화학물질의 구성표를 보면 S1(④)은 도막의 주요소이다. 도료 도막의 수지인데 1급이 거의 2급에 비해 2배이다. KS2급은 도료 도막의 수지가 적은 반면 물이 많으며, 석회석(방해석)까지 들어 있다. 분말의 광물질이 많으므로 은폐가 더 잘 되는 것이다.

#### 외부수성페인트의 비교

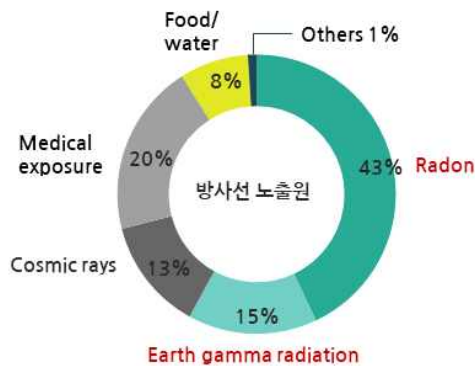
외부용 수성페인트 KSM-6010-1종-1급					외부용 수성페인트 KSM-6010-1종-2급				
시험결과					시험결과				
시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법	시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
중도	K.U	-	100	KS M 6010 : 2014	중도	K.U	-	100	KS M 6010 : 2014
비휘발분(도료 중량)	%	-	58	KS M 6010 : 2014	비휘발분	%	-	53	KS M 6010 : 2014
연료분(도료 중량)	%	-	38	KS M 6010 : 2014	연료분	%	-	38	KS M 6010 : 2014
건조 시간(20℃)	min	-	30	KS M 6010 : 2014	건조 시간	min	-	30	KS M 6010 : 2014
45°, 90° 황산변색률	%	-	86	KS M 6010 : 2014	45°, 90° 황산변색률	%	-	86	KS M 6010 : 2014
은폐율	%	-	98	KS M 6010 : 2014	은폐율	%	-	96	KS M 6010 : 2014
내세척성	-	-	1,000 회 이상	KS M 6010 : 2014	내세척성	-	-	1,000 회 이상	KS M 6010 : 2014
냉동안정성(-15℃, 4 회)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014	냉동안정성(-15℃, 4 회)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014
적산 도막 은폐율	%	-	21	KS M 6010 : 2014	적산 도막 은폐율	%	-	8	KS M 6010 : 2014
용기 내에서의 상태	-	-	이상	KS M 6010 : 2014	용기 내에서의 상태	-	-	이상	KS M 6010 : 2014
내알칼리성(4% NaOH)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014	내알칼리성(4% NaOH)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014
축진내후성(200 h)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014	축진내후성(200 h)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014
열 안정성(100℃, 120 h)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014	열 안정성(100℃, 120 h)	-	-	이상	KS M 6010 : 2014
* 축진내후성 시험 조건									
화학물질명		함유량(%)			화학물질명		함유량(%)		
물 ⑦		36~46			물 ⑦		40~50		
S1(염염비말) ④		17~27			탄크(석면이 함유 되어 있지 않은) ⑥		11~21		
미산 총 티타늄 ⑤		13~23			S1(염염비말) ④		9~19		
탄크(석면이 함유 되어 있지 않은) ⑥		10~20			미산 총 티타늄 ⑤		2~12		
생석회 및 카올린		3~13			생석회 및 카올린		3~13		
S2(염염비말)		1~10			S2(염염비말)		1~10		
1,2-에테르디아올 : 에틸렌 글라이콜		1~10			산화 철 : 황색(IRON OXIDE, YELLOW)		1~10		
규조토		1~10			규조토		1~10		
					2-메틸프로판산과 2,2,4-트라이메틸-1,3-펜타엔디아올의 혼합물 : 노노에스터 : 석산올		1~10		

[그림 2-2] 국내 메이커 회사의 외부용 수성 도료 시험성적서 비교표

도료의 내구성과 견고한 도막으로 콘크리트를 보호하는 능력은 KS1급이 훨씬 우수하다. 또한 많은 수지 비율 때문에 KS1급 수성도료가 탄산가스와 물이 콘크리트로 들어오는 것을 막아 보호한다. 기타성분으로 무기성 광물(안료)인 이산화티타늄( $\text{TiO}_2$ ), 탈크(활석), 카올린, 규조토와 유기물(첨가제)인 에틸렌 글라이콜 또는 텍산올과 물(용제)을 포함하고 있다.

## 2. 방사성 물질의 특성

그림 2-3<sup>10)</sup>와 같이 인간에 피폭되는 연간 방사선 중 대부분이 자연적으로 발생하는 방사선이다. 이 자연 방사선으로 받는 연간 피폭선량(전 세계 평균: 2.4 mSv/y, 우리나라 평균: 3.08 mSv/y) 중 약 43%에 해당하는 10 mSv/y가 라돈 가스에 의한 것으로 나타났다.

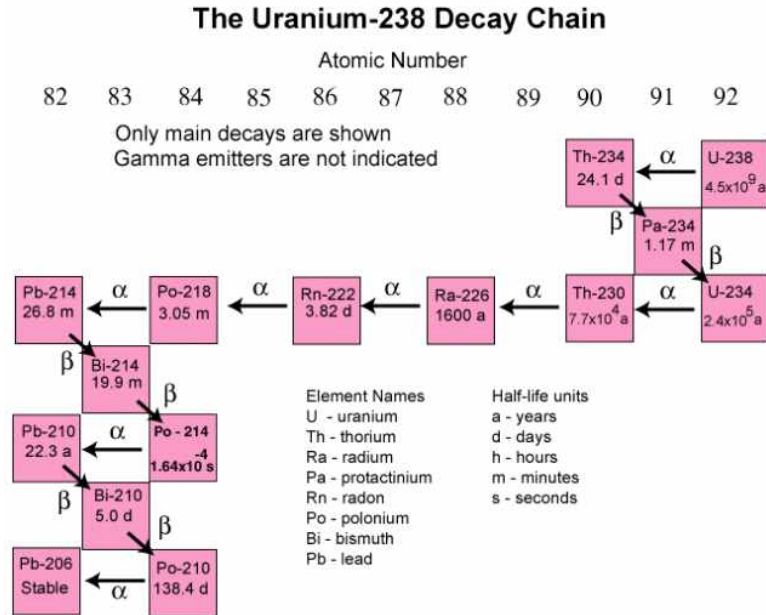


[그림 2-3] 자연방사선 노출원

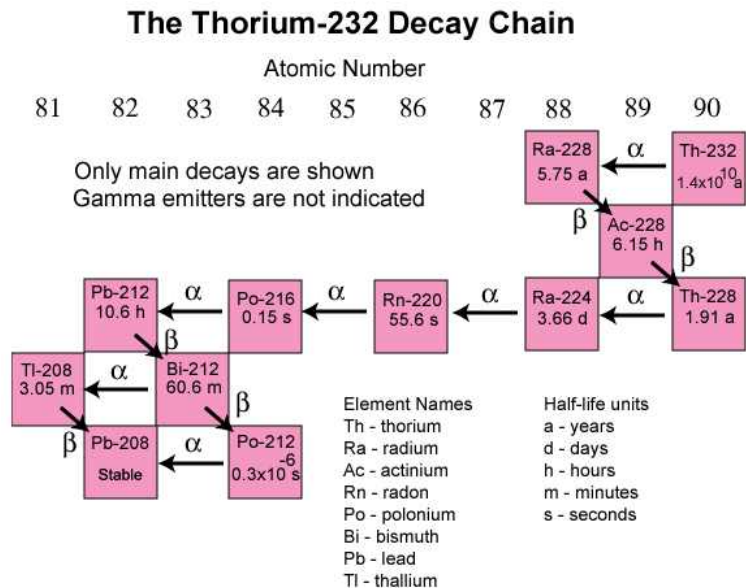
라돈( $\text{Rn-222}$ )은 지각 중의 토양, 모래, 암석, 광물질 등에 소량( $7.4 \sim 74 \text{ Bq/kg}$ )으로 함유되어 있는 우라늄( $\text{U-238}$ ) 붕괴 계열 중에 라듐( $\text{Ra-226}$ )이 붕괴할 때 생성되는 비활성 기체(Noble gas)이다. 라돈 가스는 무색, 무미, 무취이므로 사람이 느끼지 못한다는 특징을 가진다. 표준 온도 압력에서 라돈은 비활성기체의 성질을 지니며, 밀도는  $9.73 \text{ kg/m}^3$ 로 지구 대기(해수면에서 밀도  $1.217 \text{ kg/m}^3$ )의 약 8배에 해당한다. 이로 인해 라돈은 상온에서 제일 밀도

10) 노열 외(2022). 방사성물질 저감 도료의 물성 분석과 특성 비교, 전남대학교

높은 비활성기체라 할 수 있다. 라돈의 끓는점은  $-61.8^{\circ}\text{C}$ 이며, 녹는점은  $-71^{\circ}\text{C}$ 이고 녹는점에서 노란색 방사성 발광을 시작하며, 액화 공기의 온도인  $-195^{\circ}\text{C}$ 에서는 홍색 빛을 낸다.



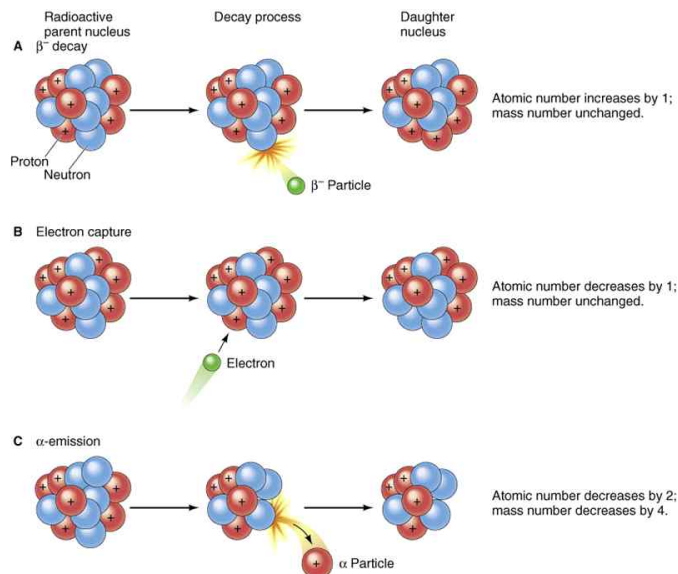
[그림 2-4] 방사성물질(우라늄-238) 붕괴사슬



[그림 2-5] 방사성물질(토륨-232) 붕괴사슬

그림 2-4<sup>11)</sup> 및 그림 2-5<sup>12)</sup>과 같이 우라늄과 토륨이 납으로 자연붕괴 되는 과정에서 라듐을 생성하며, 이 라듐에 의해서 라돈이 생성된다. 우라늄과 토륨은 지구를 구성하는 물질 중 하나로 지구상 어디에서나 흔히 볼 수 있는 물질이다. 자연 상태에 있는 우라늄의 반감기는 45억 년, 토륨의 반감기는 140억 년으로 매우 길다. 결과적으로 지구상에 우라늄과 토륨이 존재하는 한 지속적으로 라듐이 생성되고 이 라듐이 붕괴하는 과정에서 라돈이 생성된다.

그림 2-6<sup>13)</sup>과 같이 우라늄이나 라듐과 같은 방사성 물질이 알파 붕괴를 하는 도중에 알파( $\alpha$ ) 입자가 방출된다. 라듐은 알파 붕괴를 통해 라돈이 된다. 알파입자가 방출될 때, 원소의 원자 질량은 거의 4 amu가 줄어든다. 이는 4개의 핵자를 잃기 때문이다. 원자는 2개의 양성자 손실로 인해 원자번호가 2 감소하며, 새로운 원소가 된다.



[그림 2-6] 방사성 동위원소가 붕괴하는 3가지 방법

- 방사성 붕괴의 일반적인 형태는 핵 속의 양성자의 수(원자번호)가 변화되고, 결과적으로 다른 원소가 생성됨

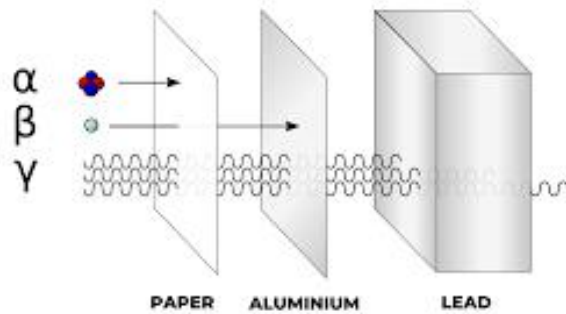
11) <https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay> 이미지 발췌

12) <https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay> 이미지 발췌

13) 노열 외(2022). 방사성물질 저감 도료의 물성 분석과 특성 비교, 전남대학교

- 핵으로부터 알파( $\alpha$ ) 입자가 방출될 수 있으며, 알파 입자는 2개의 양성자와 2개의 중성자로 구성되며, 알파 입자의 방출은 동위원소의 원자량이 4만큼 감소하며 원자번호는 2만큼 감소
- 베타( $\beta$ ) 입자 또는 전자가 핵으로부터 방출되면 원자량은 변하지 않으며, 전자들은 거의 질량을 가지지 않기 때문, 하지만 전자는 중성자로부터 왔으므로(중성자: 양성자와 전자가 결합된 것임), 결과적으로 핵은 이전보다 양성자를 하나 더 가지게 되므로 원자 번호는 1만큼 증가
- 감마선은 전자기 스펙트럼에서 가장 높은 에너지 영역으로 질량이 없으므로 동위원소의 원자번호와 원자량에 영향을 미치지 않음

알파( $\alpha$ ) 입자는 전하와 무거운 질량 때문에 쉽게 물질에 흡수되며, 공기 중에서는 몇 센티미터 밖에 나아가지 못한다. 그림 2-7<sup>14)</sup>과 같이 휴지 한 장에도 흡수되며, 사람의 외피 층(약 40  $\mu\text{m}$ , 몇 개 가량의 세포 두께)에도 흡수된다. 이러한 이유로 먹거나 흡입하지 않는다면 일반적으로는 위험하지 않다.



[그림 2-7] 알파선( $\alpha$ ), 베타선( $\beta$ ), 감마선( $\gamma$ )의 투과도

- 알파선( $\alpha$ )은 헬륨 원자핵으로 구성되어 있으므로 종이 한 장으로 쉽게 막을 수 있음
- 베타선( $\beta$ )은 전자로 구성되어 있으므로 알루미늄 판으로 막을 수 있음
- 고에너지 광자로 구성된 감마선( $\gamma$ )은 조밀한 물질(물이나 철근 콘크리트)을 통과하며 점차 흡수됨

14) <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation> 이미지 발췌

하지만 일단 체내에 진입하게 되면 무거운 질량 및 강한 흡수성 때문에 가장 위험한 전리 복사이기도 하다. 가장 강하게 이온화하며, 어느 정도의 양에 노출된다면 여러 가지 피폭 증세를 보이기도 한다. 알파 입자에 의한 염색체의 피해는 동일한 양의 다른 종류의 방사선에 의한 피해에 비해 100배 이상 크다.

라돈의 대표적 건강 영향으로는 폐암을 들 수 있다. 세계보건기구(WHO)는 전 세계 폐암 발생의 3~14 %가 라돈에 의한 것이며, 라돈을 흡연에 이은 폐암 발병 주요 원인물질로 규정하고 있다<sup>15)</sup>. 이는 라돈은 가스 상태로 호흡에 의해 폐까지 침투한 후 붕괴과정에서 방출된 알파입자가 폐의 세포를 자극해 폐암을 야기하기 때문이다. 이외에도 라돈 노출이 백혈병을 유발시킬 수 있으나 뚜렷한 관계가 없다는 연구결과들이 있어 이에 대한 관련성은 일부 논란이 되고 있다.

그림 2-8<sup>16)</sup>과 같이 라돈이 실내로 유입되는 경로는 크게 토양, 지하수, 건축 재료, 기타 환경적 요소로 구분된다. 미국 CDC에서 발간한 보고서에 따르면 대부분 토양 또는 지하수에서 방출된 라돈이 콘크리트 구조체 연결 부위, 외벽의 틈새 및 균열 등 부위, 배관 부위, 바닥 부위의 균열로 생긴 틈 등으로 유입된다고 밝혔다<sup>17)</sup>. 이 외에도 라돈 유입에 영향을 미치는 환경적 요소는 온도, 습도, 압력 분포와 같은 미세 온열 환경과 토양 및 건축 재료의 공극 등이 있다.

앞서 언급한 바와 같이 일반적으로 실내 라돈의 주요 발생원은 토양 및 암석으로부터 발생하는 라돈 유입이다<sup>18)</sup>. 그림 2-9<sup>19)</sup>와 같이 실내 주요 라돈 발생원을 살펴보면 토양, 지하수, 대기 중 라돈의 유입, 건축 재료 등의 순임을 알 수 있다. 다만 토양 및 암석을 주재료로 하는 우리나라 공동주택의 특성을 고려하면 건축 재료로부터 발생하는 라돈을 간과하기 어렵다.

---

15) 국립암센터(2022). 발암 요인 보고서(라돈), 국립암센터

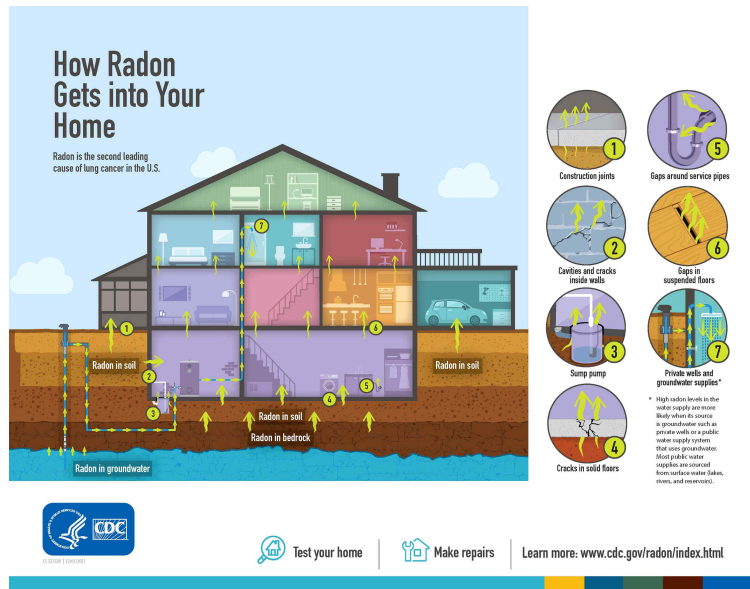
16) <https://www.cdc.gov/radon/radon-facts.html> 이미지 발췌

17) CDC(2023). How radon gets into your home 내용 발췌 (<https://www.cdc.gov/radon>)

18) Agency for Toxic Substances and Disease Registry(2023). Where is radon found? 내용 발췌 ([www.atsdr.cdc.gov](http://www.atsdr.cdc.gov))

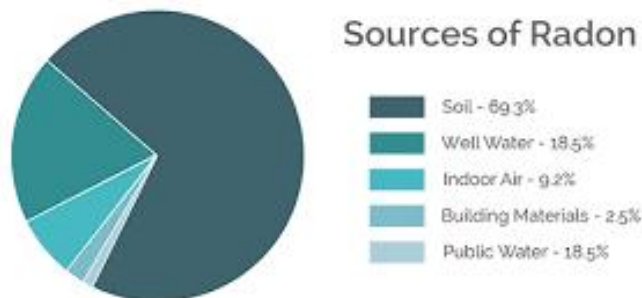
19) <https://www.nationalradondefense.com/radon-information/what-is-radon.html> 이미지 발췌





[그림 2-8] 라돈의 실내 유입 경로

특히 서양의 경우, 목구조 단독 주택의 형태가 많은 반면에 우리나라는 벽식 구조로 이루어진 공동주택이 주를 이룬다. 벽식 구조의 공동주택은 콘크리트를 주요 재료로 사용하기 때문에 기존의 국외 주택에 비해 실내 라돈에 노출될 확률이 높다. 또한 공동주택 에너지 효율등급 강화 등 국내 건물 에너지 정책 방향에 따라 공동주택의 기밀 성능이 향상되는 추세이다. 이는 건물 에너지 효율 측면에서는 긍정적인 방향이나 별도의 환기가 일어나지 않는 경우, 실내 라돈이 정제될 수 있다는 문제가 발생하기 쉽다.



[그림 2-9] 실내 라돈 주요 발생원

### 3. 방사성물질 저감 관련 도료 기술 개발 현황

기존에 주로 사용하는 라돈 저감 관련 기술은 토양으로부터 발생하는 라돈의 실내 유입을 저감하기 위한 배기 기술에 초점을 두고 있다. 이러한 경우 자주 사용하는 방법은 토양에서 방출되는 라돈을 직접 흡입하여 대기 중으로 배출하는 토양배기공법이다. 토양배기공법 중 상부배출법을 통해 토양의 고농도 라돈을 건물 지붕 위로 배출시키는 방법을 주로 활용한다. 토양배기공법은 실내로 유입되는 라돈을 저감시키는 데 효과적이지만 건축 재료에서 발생하는 라돈을 처리하기에는 적절하지 못하다.

실내 라돈 관리를 위해 가장 직관적이고 효과적인 방법은 주기적인 환기 또는 실내 라돈을 희석시키는 것이다. 다만 환기와 같은 공기 교환 또는 공기 이동을 통한 오염물질 희석 방법은 실내 라돈 발생원에 대한 직접적인 관리 방안이 아니라는 한계가 존재한다. 현재 국내 공동주택의 문제로 언급되는 건축 재료로부터 발생하는 라돈을 제어하기 위해 개발되는 기술의 기본 유형은 밀폐 또는 차폐 기술이라 할 수 있다.

특히 차폐 기술 중 도료를 이용한 국내 관련 기술 개발 현황을 보면 표 2-1과 같다. 특허 현황을 살펴보면 기본적으로 라돈이 발생하는 구조체 표면에 도료 또는 도료와 유사한 형태의 재료를 도포하여 표면에서 발생하는 라돈을 차폐시키는 원리를 가진다.

국내 여러 기관에서도 무기질 도료 등 새로운 조형의 도료 개발을 통해 건축 재료로부터 발생하는 라돈 차폐 기능성을 높이기 위해 노력 중이다. 이러한 도료의 특징은 일반 도료와 달리 무기질 성분 즉, 다양한 광물과 결합제로 수용성 무기질 규산염 등을 포함하고 있다는 점이다.

[표 2-1] 국내 개발된 라돈 저감 도료 관련 특허

특허명	주요 특허 내용	등록/출원번호 (년도)
라돈 방출 방지를 위한 페인트	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 벽면을 도장하는 도장층에 관한 것으로 하/중/상도로 층을 이루면서 도장을 하되, 각 층에 고밀도이며 치밀한 입자와 구성 요소들을 투입하여 콘크리트 벽면에서 방출되는 라돈을 근원적으로 차단하는 기술</li> </ul>	10-2007-01 14133 (2007)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 라돈 방출 방지를 위한 페인트에 있어 바인더인 아크릴/스틸렌 공중합 에멀전수지 20-70%와 조막제와 분산제로 형성된 조제 1-30%와 기능성 무기재료 5-40%, 중량비 100%에서 나머지는 물을 투입하여 제조된 제1도장 페인트를 개발</li> <li>▪ 제2도장 페인트는 바인더인 에틸렌비닐아세테이트 에멀전수지 10-60%와 조막제, 분산제로 이루어진 조제 1-30%와 안료로서 이산화티탄 1-30%와 기능성 무기재료 20-60%에, 중량비 100%에서 나머지는 물을 투입하여 제조</li> <li>▪ 제3도장 페인트는 바인더인 에틸렌비닐아세테이트 에멀전수지 10-60%와 조막제, 분산제로 이루어진 조제 1-30%와 안료로서 이산화티탄 1-30%와 기능성 무기재료 10-70%에 중량비 100%에서 나머지는 물을 투입하여 제조</li> <li>▪ 이 외에도 제4도장 페인트 및 제5도장 페인트를 개발 각각 벽면의 페인트층 중 상, 중, 하도 중 어느 하나의 층을 이용하여 라돈 방출 방지를 유도</li> </ul>	
라돈 방출 방지를 위한 도료	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 콘크리트 바닥면을 도장하는 도장층에 관한 것으로 특히, 하·중·상도로 층을 이루면서 도장을 하되, 각 층에 적정하게 고밀도이며 치밀한 입자와 구성요소들을 투입하여 콘크리트 벽면에서 방출되는 라돈 방출능을 근원적으로 차단하는 라돈 방출 방지를 위한 도료에 관한 것</li> <li>▪ 바인더인 에폭시수지 20-60 %와, 안료로서 이산화티탄 1-10 %와, 광물질 무기재료로서 탄산칼슘 30~65 %, 탈크 30~65 %, 알루미늄실리케이트 1~10 %, 나머지는 구조토가 혼합된 광물성 무기재료 20~60 %와, 분산제와 계면활성제를 혼합한 조제 1-30 %에, 중량비 100%에서 나머지는 실리콘가 투입된 주제와; 바인더로서 폴리아마이드수지 80-99%와 경화촉진제 1-20%를 혼합한 경화제; 서로 주제와 경화제를 중량비로 8:1로 혼합된 제2도장도료인 것을 특징으로 하는 라돈 방출 방지를 위한 도료</li> </ul>	10-0977707 (2010)
라돈 저감 기능성 무기질 도료 조성물	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 라돈, 포름알데히드, 휘발성유기화합물, 악취 등의 유해물질흡착 기능이 우수한 활성탄 분말을 사용</li> <li>▪ 결합제는 수용성 무기질 규산염을 사용</li> <li>▪ 기타 부 기재로서 천연광물인 견운모, 토르말린 및 모나자이트</li> <li>▪ 도막강도를 증진하기 위한 충전제로서 탄산칼슘, 산화아연, 점도조절 및 상분리를 방지하기 위한 증점제로서 메틸셀룰로오스, 카제인 및 알긴산나트륨 등을 혼합하여 이루어진 것이 특징</li> <li>▪ 활성탄 5~30 중량 %, 고형분 함량이 40±2 %인 무기질 규산염 수용액이 30~70 중량 %, 음이온 및 원적외선 방출 천연광물이 0.5~10 중량 %, 점도조절제가 0.1~3 중량 %, 충전제가 1~10 중량 % 및 전체양이 100 중량 %가 되도록 나머지를 물을 혼합한 공기정화 기능성 무기질 도료 조성물</li> </ul>	10-2011-0096652 (2011)
라돈 저감을 위한 백색도료 조성물	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 콘크리트, 황토 및 석고보드 등의 실내 건축물에서 발생하는 라돈의 농도를 저감시키는 백색도료 조성물로서, 부가적으로 악취를 유발하는 유해가스를</li> </ul>	10-2011-0096777 (2011)

	<p>흡착하는 기능을 갖는 라돈 저감을 위한 백색도로 조성물에 관한 것</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pore Size가 10Å 정도로 특성화된 X-type의 제올라이트를 사용하고, 바인더로서 제올라이트의 흡착 특성을 저감하지 않은 규산염 수용액을 사용하며, 기타 첨가제로서 백색안료, 충전제, 음이온 방출광물, 실리코에멀전, 규플루오르화나트륨 및 점도조절제를 혼합 사용하여 조성물을 완성함으로써, 라돈의 농도를 45% 이상 저감시키고, 실내공기 정화기능성이 있으며, 내수성 및 난연성이 우수한 라돈 저감을 위한 백색도로 조성물 에 관한 것</li> </ul>	
라돈 차폐용 도막방수재	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 일반적인 우레탄 및 에폭시 수지에 차폐성능이 뛰어난 이소시아네이트실란, 불소 수지 성분을 배합한 합성수지를 기반으로 하고, 나노파우더 충전제를 함유한 고밀도의 도막을 형성하여 라돈 발생을 억제하거나 차단</li> <li>▪ 건축 자재 및 구조물의 표면을 코팅하여 근본적으로 오염물질이 방출되는 것을 방지하는 기술이며, 라돈 차폐 및 방수기능을 동시에 구현 가능</li> </ul>	10-2016-0101330 (2016)
라돈 차단 코팅 및 시공방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 콘크리트와 같은 기재 표면에 라돈 차폐를 위한 코팅막을 형성하되, 상기 콘크리트 내부로 침투하여 콘크리트 표면 및 내부에 존재하는 공극 및 모세공극을 채워 라돈을 차단하는 원리</li> <li>▪ 코팅제 조성물은 폴리우레아 프리폴리머와 아민계 경화제와의 반응이 일어나 도막을 형성하며 침투강화제를 통해 도막의 물성을 개선</li> <li>▪ 콘크리트 등 자재 표면에 폴리우레아 코팅막을 형성하면서 기공을 채워 각종 기체 및 액체의 침입, 투과를 억제하여 콘크리트 기재의 내구성을 향상</li> </ul>	10-2019-0053133 (2019)



[그림 2-10] 라돈 차폐 등 시중에 공개된 기능성 도료 (예)

또한 사회적 파장을 일으켰던 ‘라돈 침대’ 사태 후 실내 라돈 관리를 위해 다양한 종류의 라돈 차폐 기능성 도료가 등장하였다. 라돈 차폐기능을 가진 페인트는 일반 페인트보다 점성이 높아 두껍게 발라지는 특징이 있다<sup>20)</sup>. 이러한 특성을 활용하여 건물 구조체 표면에 발생한 미세한 틈을 메워 라돈 발생을 효과적으로 차단하도록 개발된 제품들이다.

다만 각 도료별 특성 또는 성능을 비교함에 있어 건축 재료 표면에서 발생하는 라돈을 측정하는 표준시험방법의 부재로 도료의 라돈 차폐 성능을 객관적으로 알 수 있는 성적서 등의 자료가 부족하다는 점, 제조사 기술 정보 보호 등의 문제로 도료의 구성 물질 또는 성분과 같은 물리화학적 특성 정보를 제시하기 어렵다는 점 등의 한계가 존재한다.

---

20) 환경경제신문 그린포스트 코리아. 계속되는 ‘라돈 포비아’, 라돈 막는 친환경 페인트 기사 발췌 (2020.01.10)

## 제3장 도료의 특성 분석

### 1. 도료의 특성 분석 방법

2018년, 시중에서 판매되는 침대 매트리스에서 1급 발암물질인 라돈이 검출됐다는 사실이 보도되면서 생활환경 속 라돈의 무서움이 사회적 이슈로 급부상 하였다. 이 사태 이후 방사성물질 ‘라돈’에 대한 국민적 관심이 증가하며 실내 라돈 방출을 저감할 수 있는 다양한 건축 재료가 선보였다. 이 중에서 일상생활에서 쉽게 접할 수 있고 사용이 용이한 도료가 라돈 차폐 기능성 건축 재료로서 주목을 받았다.

본 연구에서는 건축 재료 표면으로부터 발생하는 라돈을 저감 또는 차폐하기 위한 도료의 특성을 분석, 도료의 특성과 건축 재료에서 발생하는 라돈 간의 상관성을 규명하고자 한다. 또한 각기 다른 특성을 보유한 도료의 라돈 저감 성능 평가를 위해 국내 도료 시장에서 라돈 저감 성능 도료로 공개되었던 2종의 도료와 일반적으로 건물 실내에서 사용하는 도료 2-3종(분석 항목에 따라 일부 도료 추가)을 선정하였다.

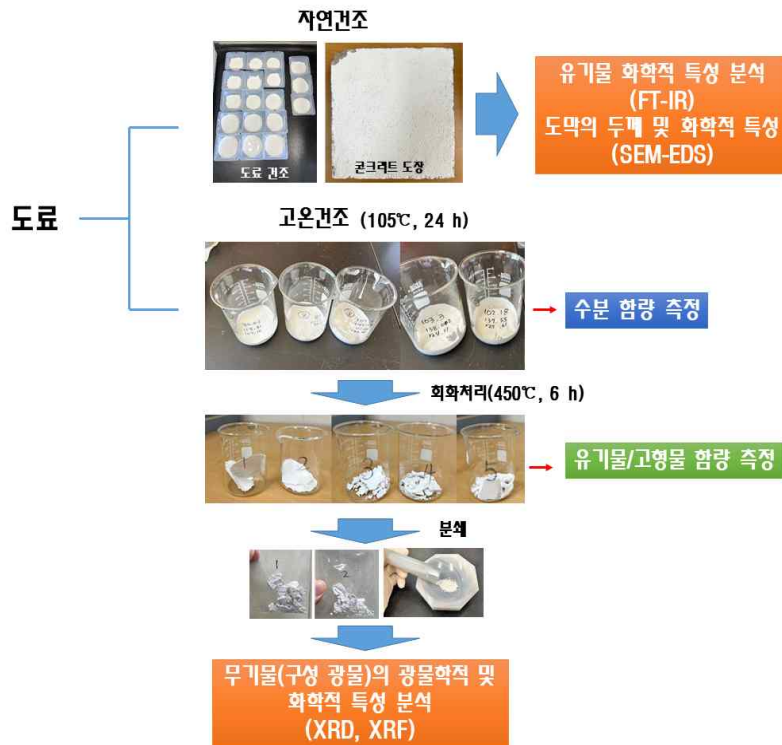
도료의 구성성분 및 특성 분석을 위한 연구 세부 방법은 표 3-1과 같다.

[표 3-1] 도료의 특성 분석 방법

구분	분석내용	분석방법
도료의 구성성분 분석과 화학적 특성 비교	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 도료의 구성물질 분석과 차이 비교 (X-선 회절분석 활용 등)</li> <li>- 도료의 화학적 분석과 특성 비교 (유기물/무기물 분석 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- X-선 회절분석</li> <li>- XRF/GC 분석</li> </ul>
도료의 물성 특성 비교	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시공한 도료의 형태, 치밀성 분석과 특성 비교 (육안관찰, 실체현미경과 전자현미경 분석 등)</li> <li>- 시공한 도료의 두께 및 화학적 조성 분석 (실체현미경과 전자현미경 분석 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 육안관찰</li> <li>- 실체현미경 관찰</li> <li>- 전자현미경 (SEM-EDS) 분석</li> </ul>

이를 위해 본 장에서는 대상 도료에 대한 구성 성분 및 화학적 특성 분석을 수행하였다. 정밀 분석 전 단계로 도료 건조 실험을 통해 도료 마감 상태를 육안으로 확인하였으며, X선 회절분석 및 XRF/GC 분석을 활용하여 도료의 구성 성분과 화학적 특성을 비교하였다. 또한 실제 현미경과 전자현미경(SEM-EDS) 분석을 활용하여 시공한 도료의 형태 및 치밀성을 분석하였다.

대상 도료의 특성 분석을 위한 단계별 수행 방법은 그림 3-1과 같다. 분석 대상 도료의 구성 성분 분석을 위하여 단계별로 건조 및 분쇄 등의 전처리와 정밀 분석을 수행하였다. 각 도료의 건조는 자연 건조와 열을 이용한 건조로 나누어 진행하였다. 일반적으로 도료를 사용할 때는 건물 구조체 등에 도포한 후 자연 건조를 시킨다. 그러므로 본 연구에서도 실제 건조 방법과 유사한 결과물을 도출할 수 있도록 실온에서 건조된 각 도료의 물성 차이를 비교하였다. 이를 위해 실험용 접시(Weighing Dish)에 도료를 옮겨 실온(약 25℃)에서 일주일간 건조시키는 방법을 차용하였다.



[그림 3-1] 도료 건조 및 물성/화학적 특성 연구 방법

도료의 수분, 유기물 및 고형물 함량 측정을 위해 동일 질량의 시료를 고온에서 열처리하였다. 시료의 고온 건조 전, 후의 질량 측정을 통해 수분 함량을 도출하였으며, 열처리된 시료를 분쇄한 뒤, XRD 및 XRF 분석을 활용하였다. 또한 유기물의 화학적 특성 분석을 위해 FT-IR 분석방법을 도입하였다. 끝으로 도료 시공 후, 도막의 두께 및 화학적 특성 분석을 위해서 SEM-EDS 분석방법을 활용하였다.

## 2. 도료의 구성 성분 분석

앞 장에서 언급한 바와 같이 일반적으로 도료의 구성 물질은 수지, 안료, 첨가제, 물(용제)로 구분할 수 있다. 또한 특허 등 관련 문헌 조사에 따르면 방사성물질 저장 기능이 있는 도료의 구성 물질은 수지, 수용성 무기질 규산염, 천연광물, 충전제, 증점제, 첨가제, 물(용제) 등으로 다양하다. 본 장에서는 표 3-2와 같이 시중에서 유통된 방사성물질 저장 기능성 도료 및 일반 도료 중 무작위 추출을 하여 5종의 도료(방사성물질 저장 기능성 도료 2종, 일반 수성도료 3종)를 선정, 각 도료별 구성물질의 특성을 비교하였다.

[표 3-2] 분석 대상 도료의 종류

시료번호	도료 종류
1	방사성물질 저장 기능성 도료
2	방사성물질 저장 기능성 도료
3	일반 수성도료(KS 2종 1급)
4	일반 수성도료(KS 2종 1급)
5	일반 수성도료(KS 2종 1급)

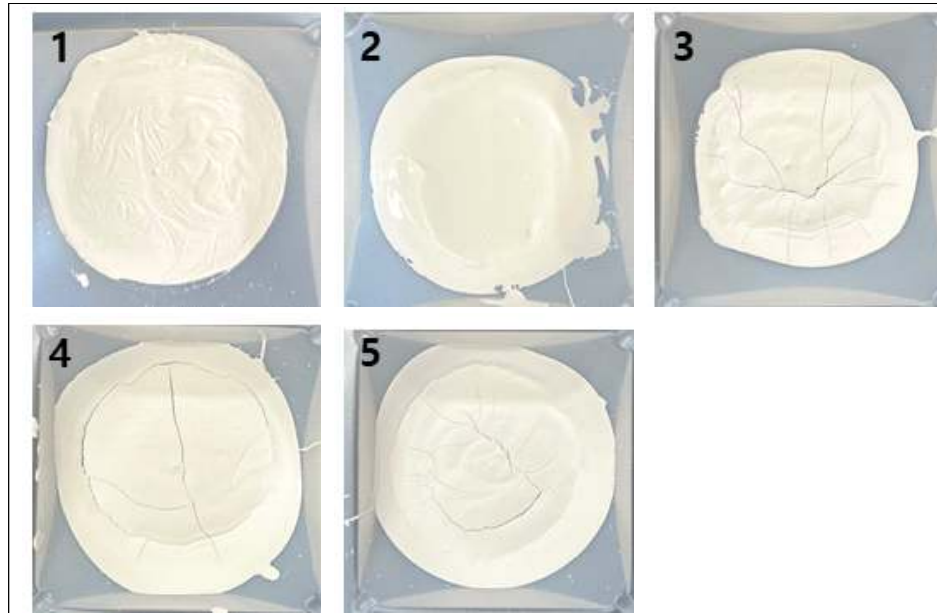
### 2.1. 건조 상태에서의 도료 표면 비교

먼저 각 도료별 자연 건조한 시료 표면은 그림 3-2와 같다. 자연 건조 상태의 표면을 육안으로 비교하면 방사성물질 저장 기능성 도료인 1번과 2번 시료는 자연 건조 후, 다른 시료에 비해 치밀하고 탄성력 높은 도막을 형성하는 것



을 볼 수 있다. 시료 1번, 2번 모두 표면이 매끈하고 균열이나 공극은 보이지 않았다. 시료 1번의 표면은 무광이나 시료 2번은 유광의 특징을 나타냈으며 실험용 접시에 강력하게 부착되어 시료의 회수가 어려운 특징을 보였다.

반면 시료 3번, 4번, 5번의 경우 건조 후 표면에 균열이 발생된 것을 확인할 수 있었다. 또한 손으로 잡았을 때, 건조된 표면이 쉽게 부서졌으며 1, 2번 시료에 비해 실험용 접시에서의 탈착과 회수가 용이하였다. 자연 건조한 시료의 표면을 관찰한 결과, 방사성물질 저감 기능성 도료가 형성한 도막이 높은 치밀성과 탄성력을 보였으며, 이는 수분 침투 및 라돈 가스 방출 저감에 효과가 있을 것으로 추정 가능하다.



[그림 3-2] 도료의 자연 건조 후 표면 특성

## 2.2 도료별 구성 성분 비교

각 도료의 수분 함량 측정을 위해 시료를 고온에서 열건조 처리하였다. 열건조를 위해 도료는 비커에 약 25 ml 씩 옮겨 담아 무게를 측정한 후, 전기로를 이용하여 105 °C에서 24시간 건조시켜 수분을 제거한다. 열처리된 건조 도료는 그림 3-3과 같다.

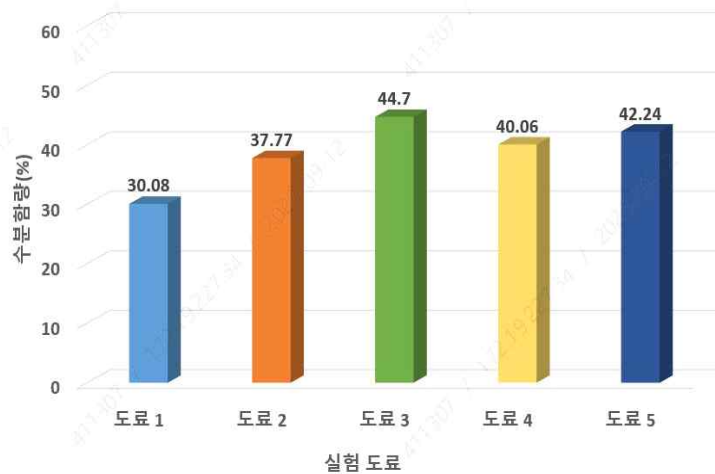
각 도료별 표면을 관찰해보면 방사성물질 저장 기능성 도료의 경우 비커 바닥에 강하게 부착된 채로 치밀한 표면의 도막이 형성된 것을 확인할 수 있다. 자연건조 상태와 같이 시료 1번은 무광을, 시료 2번은 유광을 보인다. 다만 시료 2번의 경우, 표면에서 가스가 빠져나간 것으로 보이는 미세한 공극이 관찰되었다. 반면 시료 1, 2번을 제외한 3, 4, 5번 시료는 도막이 심하게 부풀어 표면이 울퉁불퉁한 형태를 나타냈다. 이는 도료 내 있던 수분이 끓는점 이상의 온도에서 건조됨에 따라 수분 함량이 상대적으로 높은 도료 도막의 형태가 불균질하게 부풀어 오른 채로 굳게 된 것으로 추정한다.

그림 3-4는 고온 건조 전, 후의 시료 무게 차이를 통해 도출한 수분 함량(%)이다. 수분 함량을 비교한 결과, 방사성물질 저장 기능성 도료인 시료 1, 2번은 일반 수성도료인 시료 3, 4, 5번에 비해 수분 함량이 낮은 특징을 보였다. 수분 함량이 가장 낮은 시료는 시료 1번으로 약 30 %의 수분 함량을 나타냈고, 수성 도료인 시료 3번은 약 44.7 %의 가장 높은 수분 함량을 나타냈다.

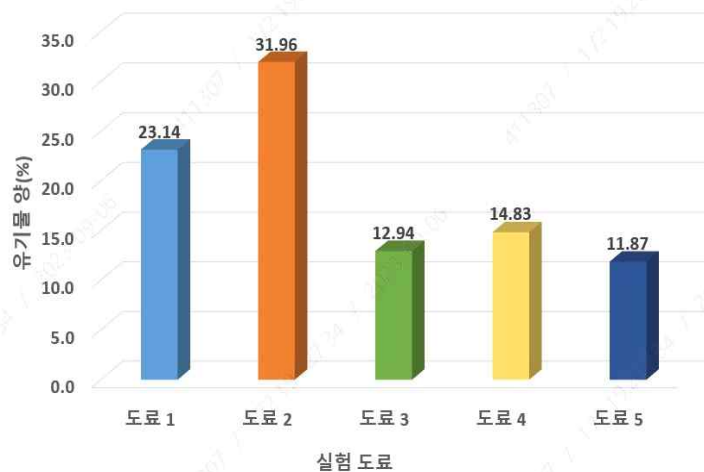


[그림 3-3] 고온 건조 상태에서의 시료 표면

도료의 유기물 함유량(%)을 도출하기 위하여 각 도료별 건조 시료 10 g을 석영비커에 옮겨 담고 450 °C에서 6시간 건조시켜 회화처리 하였다. 고온에서의 회화처리는 도료 내 유기물과 바인더(Binder)를 제거시키기 위해 수행하였으며, 회화 처리된 시료의 무게를 측정하여 도료 내 무기물의 양과 유기물의 양을 각각 계산하였다.

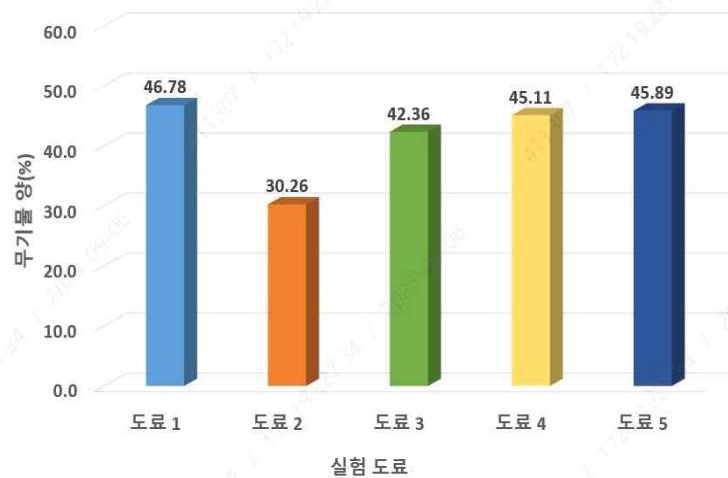


[그림 3-4] 시료별 수분 함량(%)

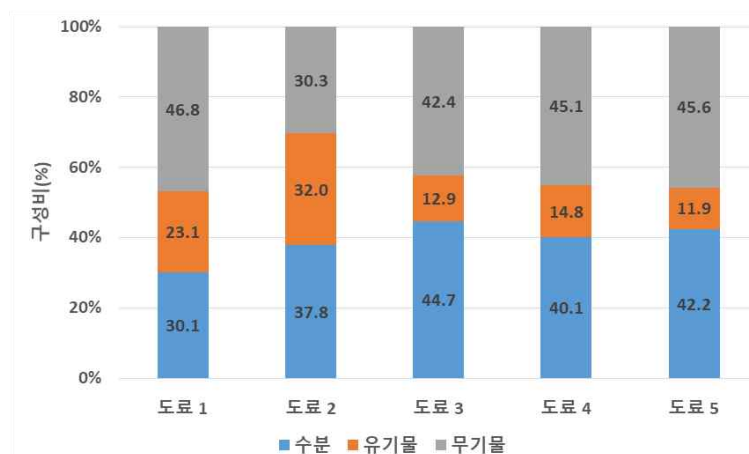


[그림 3-5] 시료별 유기물 함량(%)

그 결과, 그림 3-5와 같이 시료 2번이 약 31.9 %로 유기물 함량이 가장 높았고, 시료 1번이 약 23.1 %로 뒤를 이었다. 이 외에 시료 3, 4, 5번은 11.87 ~ 14.83 %의 유기물 함량(평균 13.2 %)을 보였다. 이는 방사성물질 저장 기능성 도료인 시료 2번의 약 40 % 수준에 해당하는 수치이다. 또한 그림 3-6은 시료별 무기물 함량(%)을 비교한 그래프이다. 도료 내 고형물인 무기물 함량을 비교한 결과, 시료 2번이 약 30.3 %로 낮은 함량을 나타낸 것에 비해 다른 시료들은 평균 약 45 % (42.4 ~ 46.8 %)의 유사한 함량을 보였다.



[그림 3-6] 시료별 무기물 함량(%)

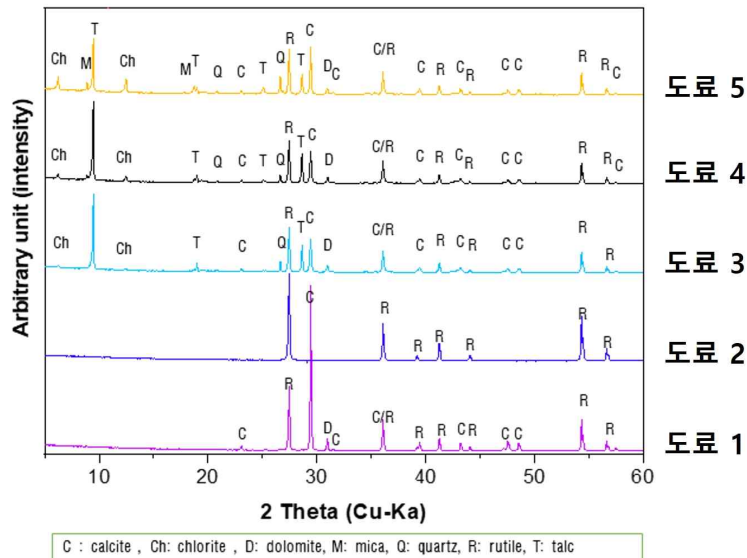


[그림 3-7] 도료의 구성 비율

각 도료별 수분 함량, 유기물 함량, 무기물 함량에 대한 구성비를 비교한 결과는 그림 3-7과 같다. 방사성물질 저감 기능성 도료가 일반 수성 도료에 비해 유기물(바인더 포함)의 함량이 약 2배 이상 높은 것을 볼 수 있다. 또한 유기물 함량 대비 수분 함량의 비율이 방사성물질 저감 기능성 도료에서는 1:1.18 내지 1:1.3의 범위를 보여 구성비의 차이가 크지 않은 반면, 일반 수성 도료에서는 평균 1:3.2 (1:2.7 내지 1:3.5)의 구성비를 보여 유기물에 비해 수분 함량이 큰 특징을 보임을 알 수 있다.

### 2.3. 도료별 구성 광물 비교

도료 내 존재하는 무기물 중 구성 광물을 특성을 확인하기 위해 시료를 회화 처리한 한 후, XRD 분석을 실시하였다. 분석 결과, 방사성 물질 저감 기능성 도료인 시료 1번 및 2번의 경우, 무기물 내 광물의 구성이 단순한 것이 특징이라 할 수 있다. 시료 1번은 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ )과 탄산염광물인 방해석(Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ) 및 백운석(Dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )이 함유되어 있으며, 시료 2번은 순수한 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ )만으로 이루어져 있었다.



[그림 3-8] 도료 내 구성광물(XRD 분석 결과)

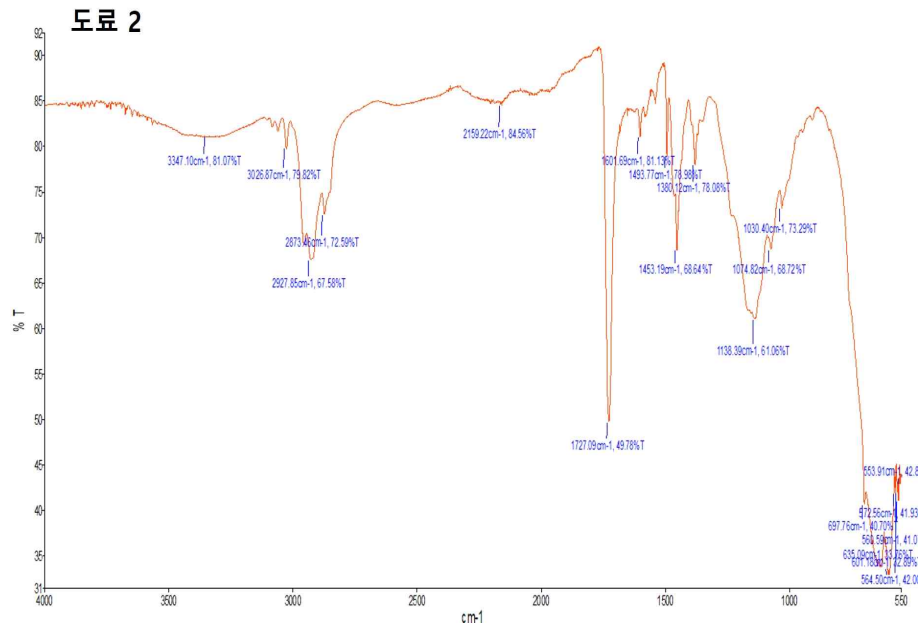
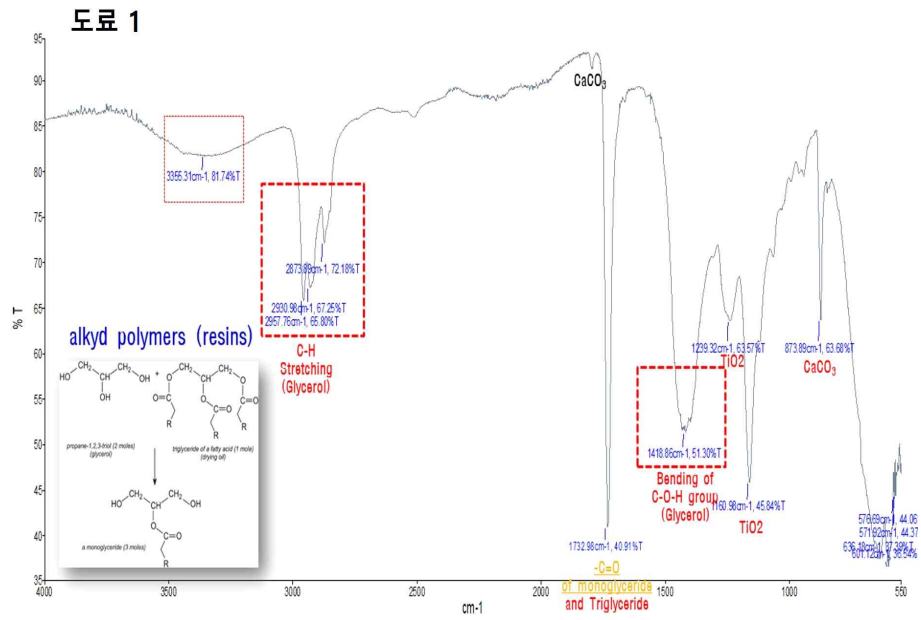
반면에 일반 수성 도료인 시료 3, 4, 5번은 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ ), 방해석(Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ), 백운석(Dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) 이외에도 활석[Talc,  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ], 녹니석[Chlorite,  $(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$ ], 석영(Quartz,  $\text{SiO}_2$ ) 등이 포함된 것을 알 수 있다. 시료 5번에서만 백운모(Muscovite,  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ )의 피크가 확인되어 차이를 보인다.

따라서 일반 수성 도료들 간의 구성 광물들의 차이는 거의 없었으나 방사성 물질 저감 기능성 도료에 비해서는 다양한 구성 물질(활석, 녹니석, 백운모와 같은 층상규산염광물)을 포함하고 있는 것으로 나타났다. 대부분의 도료에 포함되어 있는 광물인 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ )과 방해석은 밝은 흰색 안료 물질로 페인트, 플라스틱, 종이 등에 사용된다.

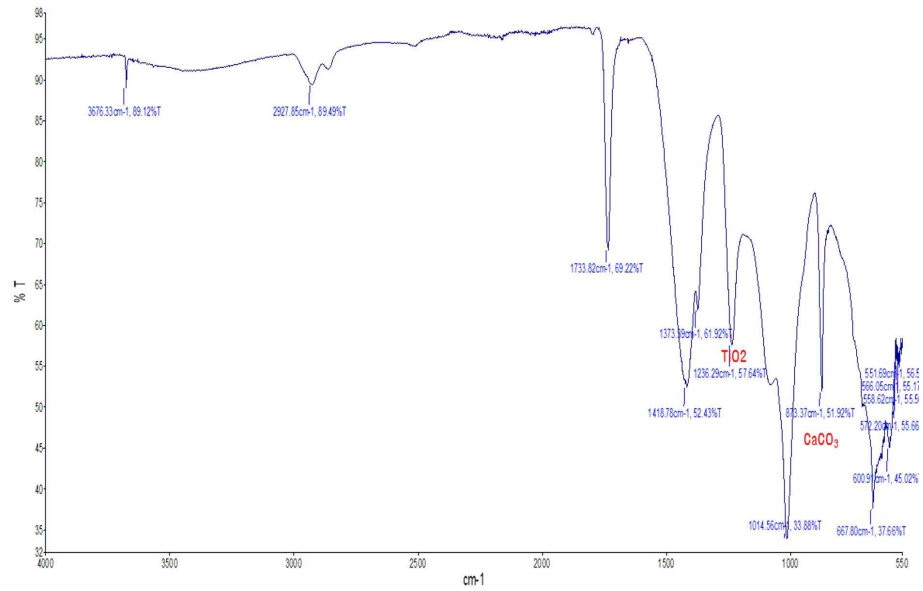
### 3. 도료의 화학적 특성 비교

#### 3.1. 도료 내 유기물의 화학적 특성

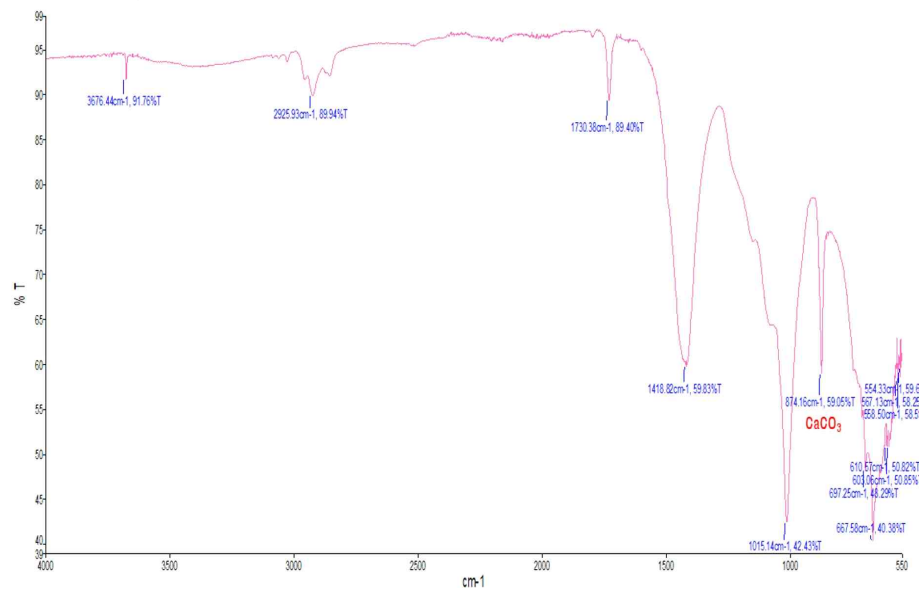
자연 건조된 시료를 이용하여 도료에 함유된 유기물(수지, 첨가제)과 무기물(안료)의 종류와 화학적 특성을 확인하기 위해 FT-IR 분석을 수행하였다. 분석 결과는 그림 3-9와 같다. 모든 시료에서 무기물의 결합구조를 나타내는 관련 피크가  $500 \sim 1,300 \text{ cm}^{-1}$ 의 영역에서 관찰됨을 볼 수 있다. 이 중에서  $\text{TiO}_2(1,239 \text{ cm}^{-1}, 1,160 \text{ cm}^{-1})$ 와  $\text{CaCO}_3(873 \text{ cm}^{-1})$  관련 피크가 도드라졌다.



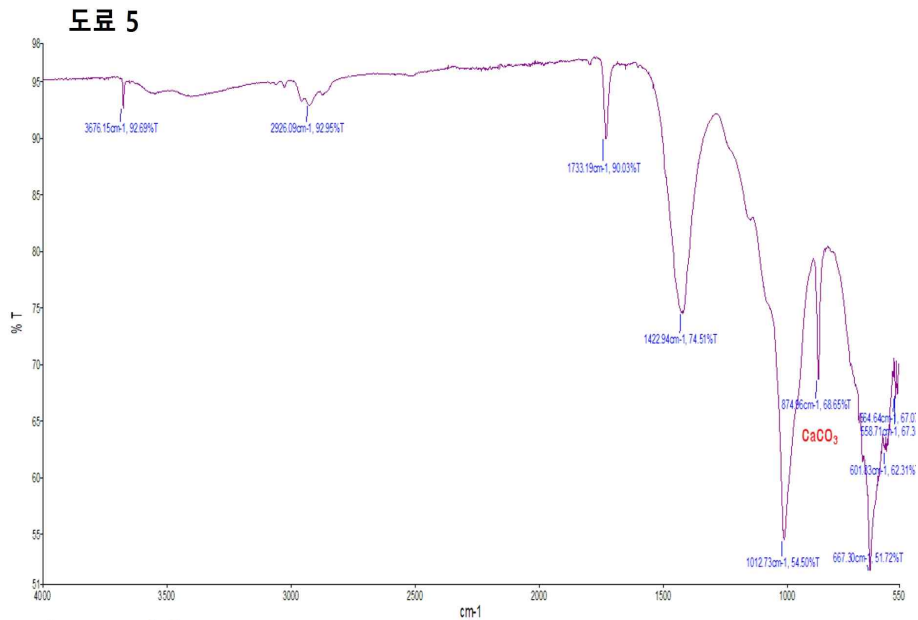
도료 3



도료 4



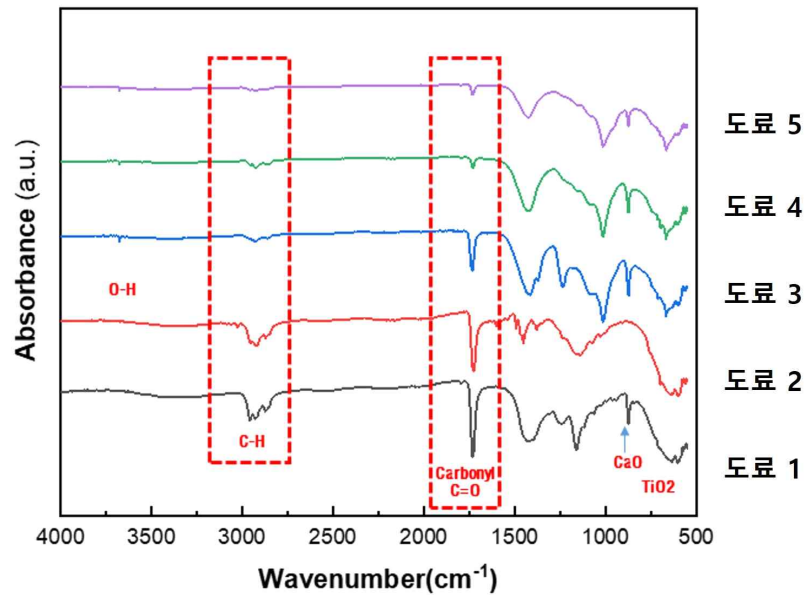




[그림 3-9] 각 도료 내 유기물의 화학적 특성(FT-IR 분석 결과)

유기물 함량이 높았던 시료 1번과 2번에서는 Resins인 Alkyd Polymers의 특성을 나타내는 관련 피크가 높게 검출되었다. 유기물 관련 피크로는  $1,400\text{ cm}^{-1}$  영역에서 C-O-H 그룹의 Bending (Glycerol)과  $1,730\text{ cm}^{-1}$  근처에서는 C=O에 해당하는 피크(Monoglyceride, Triglyceride)가,  $2,800\sim 3,000\text{ cm}^{-1}$  영역대에서는 C-H stretching (Glycerol)이 밴드가 확인되었다.

각 도료들의 FT-IR 분석 결과를 중첩하여 비교한 결과는 그림 3-10과 같다. 방사성 물질 저감 기능성 도료인 시료 1번과 2번에서는 일반 수성 도료인 시료 3, 4, 5번보다 유기물 관련 피크 강도가 상대적으로 크게 나타났으며, 일반 수성 도료에서는 함수규산산염광물인 활석, 녹니석, 백운모에 의한 O-H 결합과 관련된 피크가  $3,300\text{ cm}^{-1}$  영역에서 검출되었다.



[그림 3-10] 도료 내 유기물의 화학적 특성 비교(FT-IR 분석 결과)

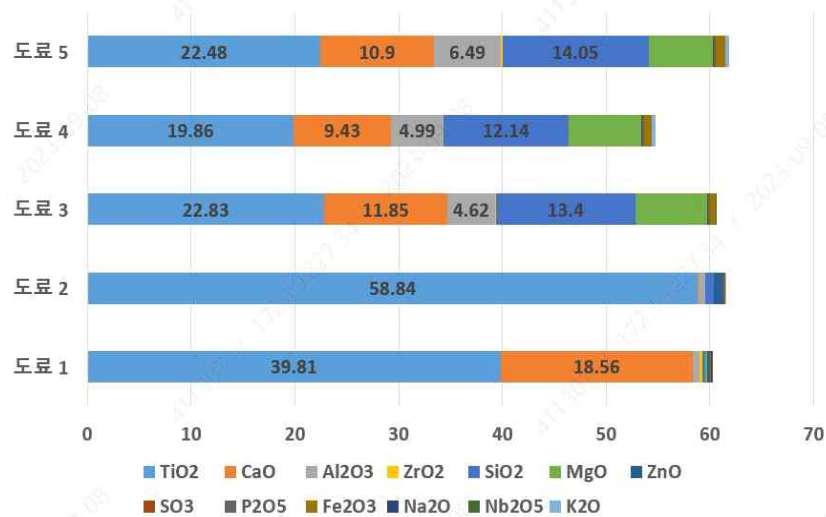
### 3.2. 도료 내 무기물의 화학적 특성

도료의 구성 성분 중 무기물(안료)의 화학 조성을 파악하기 위하여 XRF 분석을 실시한 결과는 표 3-5와 같다. 도료의 무기물의 주 구성성분은  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  등으로 나타났다. 주요한 성분으로  $\text{TiO}_2$  함량이 가장 큰 것으로 나타났으며 방사성 물질 저장 기능성 도료인 시료 1번과 2번은 각각 39.8과 58.8 % 함량을 보였다.

시료 3, 4, 5번에서는  $\text{TiO}_2$ 의 함량이 19.86 ~ 22.83 %로 낮은 반면에  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (4.62 ~ 6.49 %),  $\text{SiO}_2$ (12.14 ~ 14.05 %),  $\text{MgO}$ (6.25~6.97 %)등의 성분 함량이 상대적으로 높은 특징을 나타냈다. 이는 XRD 분석 결과에서 시료 1, 2번 내 주 구성 광물이 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ )과 방해석(Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ) 및 백운석(Dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )이고 다른 시료에서는 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ ), 방해석(Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ), 백운석(Dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), 장석, 활석[Talc,  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ], 녹니석[Chlorite,  $(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$ ], 백운모(Muscovite,  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), 석영(Quartz,  $\text{SiO}_2$ ) 등이 함께 산출된 것을 통해 도료 내 무기물의 화학적 특성이 주구성광물의 화학적 성분으로부터 기인된 결과임을 알 수 있다.

[표 3-3] 시료 내 무기물의 화학적 구성 성분 (%) (XRF 분석 결과)

	Compound Name	시료_1	시료_2	시료_3	시료_4	시료_5
1	TiO <sub>2</sub>	39.81	58.84	22.83	19.86	22.48
2	CaO	18.56	0.02	11.85	9.43	10.90
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.64	0.68	4.62	4.99	6.49
4	ZrO <sub>2</sub>	0.29	0	0.10	0	0.15
5	SiO <sub>2</sub>	0.29	0.87	13.40	12.14	14.05
6	MgO	0.18	0	6.97	6.97	6.25
7	ZnO	0.16	0.87	0.04	0.06	0.03
8	SO <sub>3</sub>	0.11	0.09	0.09	0.13	0.13
9	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.06	0.08	0.11	0.09
10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.02	0.54	0.7	0.92
11	Na <sub>2</sub> O	0.08	0	0	0	0
12	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0	0.02	0	0.02
13	K <sub>2</sub> O	0	0.02	0	0.33	0.32



[그림 3-11] 시료 내 무기물의 화학적 특성(XRF 분석 결과)

## 4. 도료의 특성과 방사성물질 저감 성능

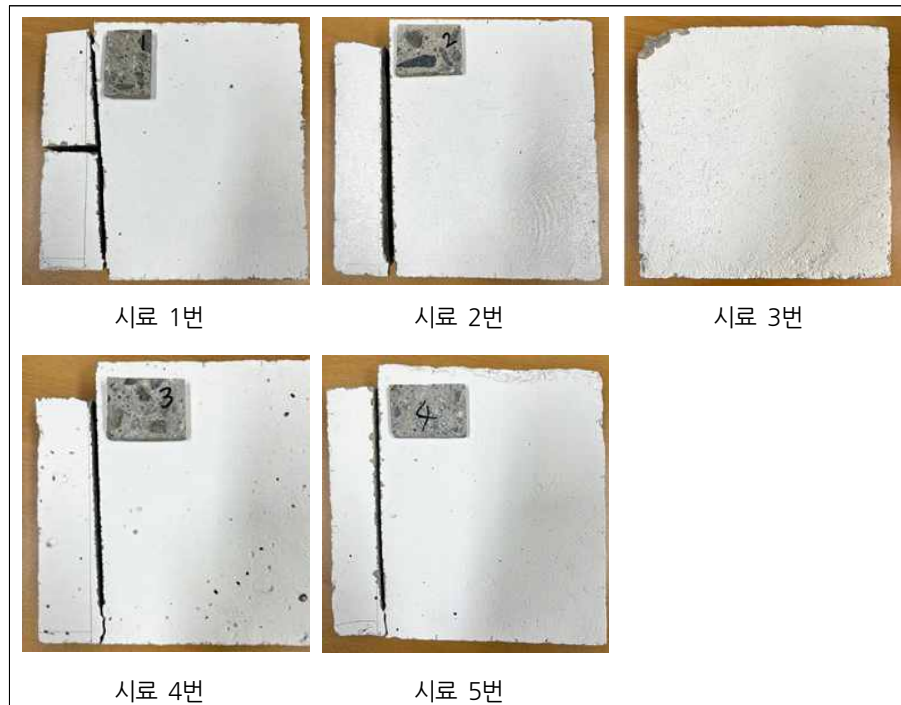
### 4.1. 도료별 표면 마감 형태 분석

앞서 분석한 결과에 따르면, 도료의 구성 성분 및 표면 마감 형태에 따라 방사성물질 저감 기능성 도료와 일반 도료의 특성이 구분됨을 밝혔다. 그러므로 본 절에서는 방사성물질 저감 기능성 도료와 일반 수성 도료를 실제 콘크리트 시편에 도장한 후 육안 및 실체현미경을 통한 표면의 특성을 비교하였다.

본 절에서 이용한 방사성물질 저감 기능성 도료 2종에 대한 3개 시료와 일반 수성 도료 2종에 대한 2개 시료는 다음 표 3-4와 같다. 그 중 시료 2번과 3번은 동일한 도료이며 분석 결과의 정확성과 신뢰성 검증을 위해 시료를 추가하여 진행하였음을 밝힌다.

[표 3-4] 분석 대상 도료의 종류

시료번호	도료 종류	비고
1	방사성물질 저감 기능성 도료	
2	방사성물질 저감 기능성 도료	동일 도료 사용
3	방사성물질 저감 기능성 도료	
4	일반 수성도료(KS 2종 1급)	
5	일반 수성도료(KS 2종 1급)	



[그림 3-12] 콘크리트 시편을 이용한 시료 제작

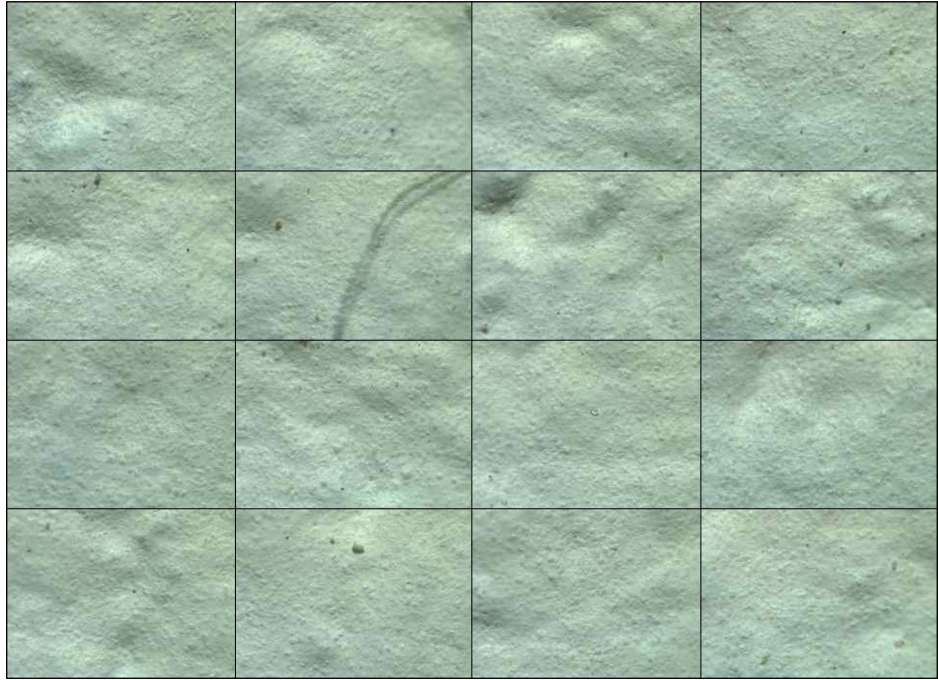


[그림 3-13] 도료를 도장한 콘크리트 시료의 표면 육안 관찰

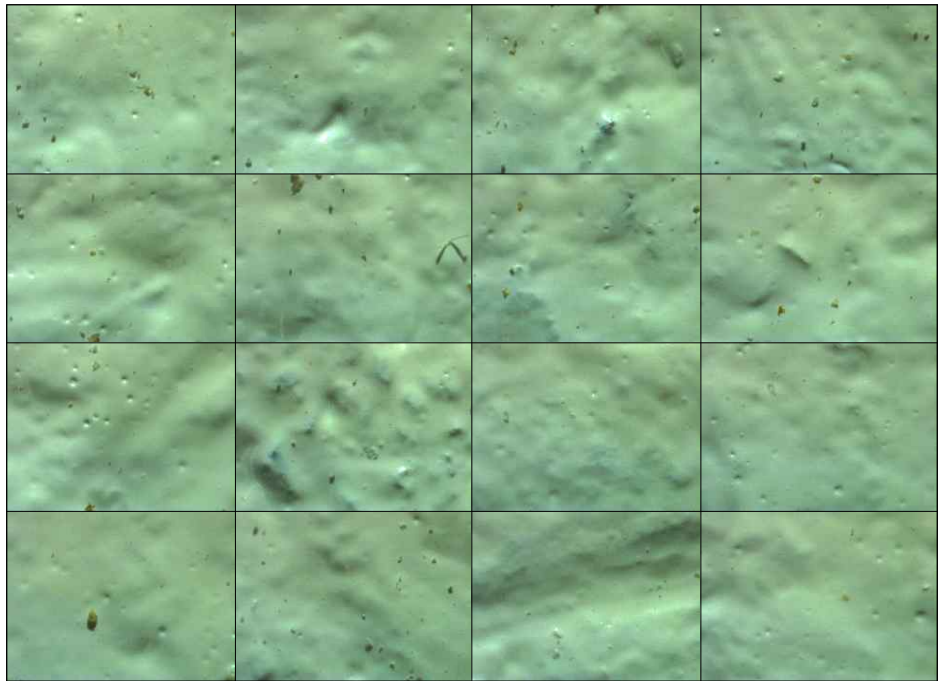
방사성 물질 저장 기능성 도료를 도장한 시료 1번과 2번, 일반 수성 도료를 도장한 시료 3, 4, 5번에 대해 먼저 육안으로 도막의 치밀성을 관찰하였다. 시료의 표면은 그림 3-13과 같다. 일정 면적에 대해 육안으로 공극 등을 관찰한 결과, 시료 1번과 시료 2, 3번 콘크리트 표면에서는 2~3개의 공극이 확인되었고, 시료 5번에서도 1개의 공극이 확인되었다. 반면에 시료 4번에서는 8개의 공극이 확인되어 도료의 종류 및 콘크리트 표면 마감 상태에 따라 도막의 치밀성이 다를 수 있음을 보였다.

또한 각 도료별 표면 마감 처리를 보다 자세히 분석하기 위해 도료 마감이 된 콘크리트 시편을 대상으로 실체현미경 관찰을 수행하였다. 실체현미경 관찰을 위해 시편 전체 면적을 동일한 크기의 격자를 그려 가로와 세로 4개씩의 교차점 위치를 선정하였다. 관찰한 표면은 그림 3-14~18과 같다.

방사성 물질 저장 기능성 도료로 도장한 시료 1, 2, 3번의 콘크리트의 표면은 대체적으로 표면이 매끄럽고 광택을 띠며 도료가 고르게 도포된 것으로 관찰되었다. 콘크리트 시편 표면에서 도료가 묻지 않은 빈 공간 또는 공극은 거의 관찰되지 않았다. 다만 방사성물질 저장 기능성 도료 2번이 도포된 시료 3번의 콘크리트의 경우, 표면의 구멍에 도포되지 않은 빈 공간 한 곳이 발견되었다. 일반 도료로 도장된 시료 4, 5번의 콘크리트의 표면은 무광을 띠며 표면이 건조하고 거칠게 관찰되었다. 또한 매끄럽지 못한 콘크리트 표면 특성에 따라 도료가 잘 도포되지 않은 공극이 발견되기도 하였다.

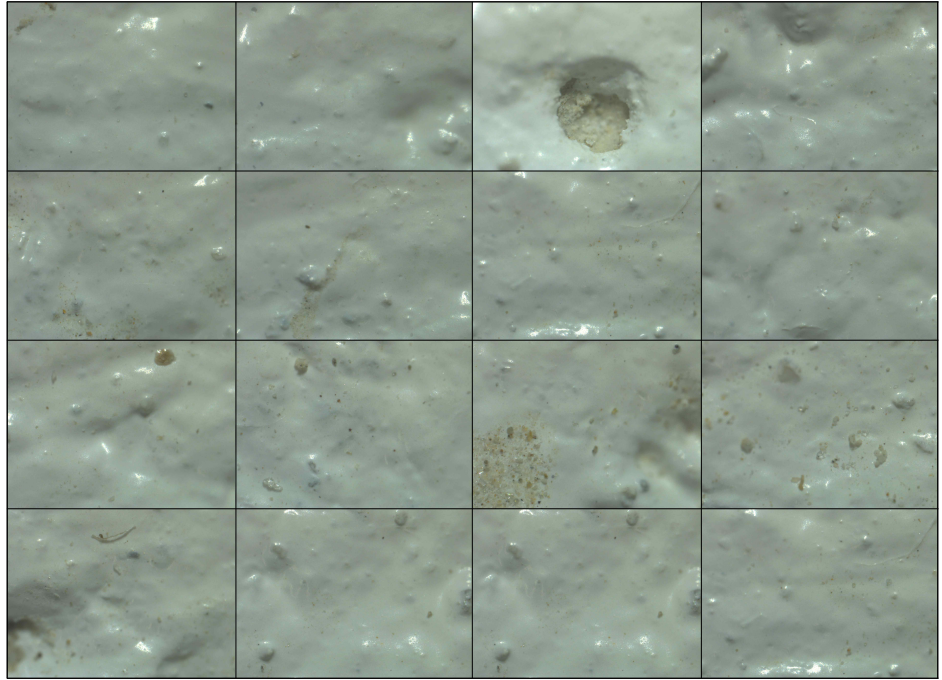


[그림 3-14] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 1번) 표면 관찰

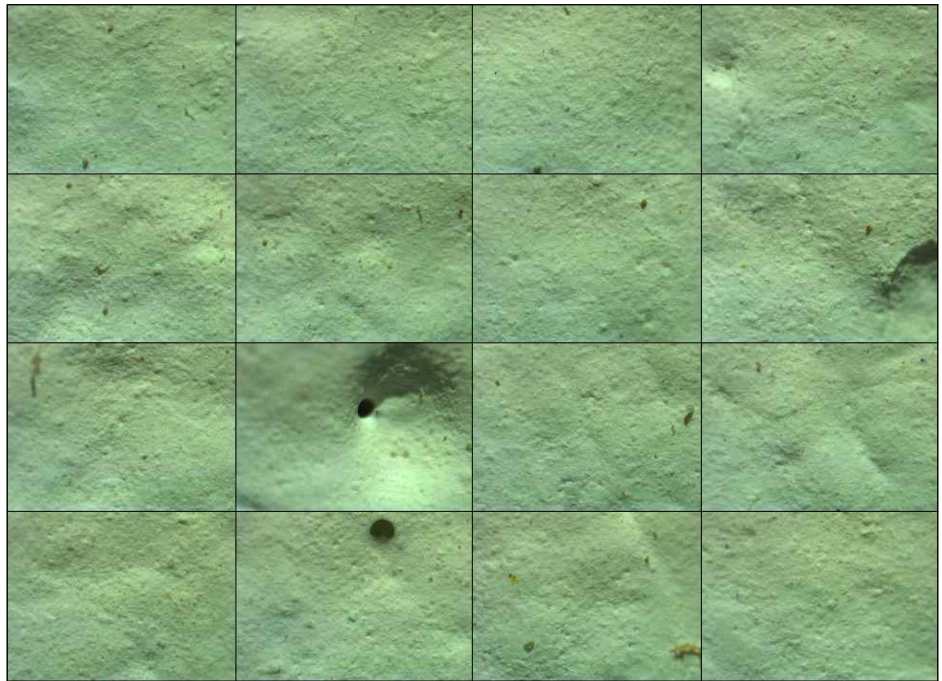


[그림 3-15] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 2번) 표면 관찰



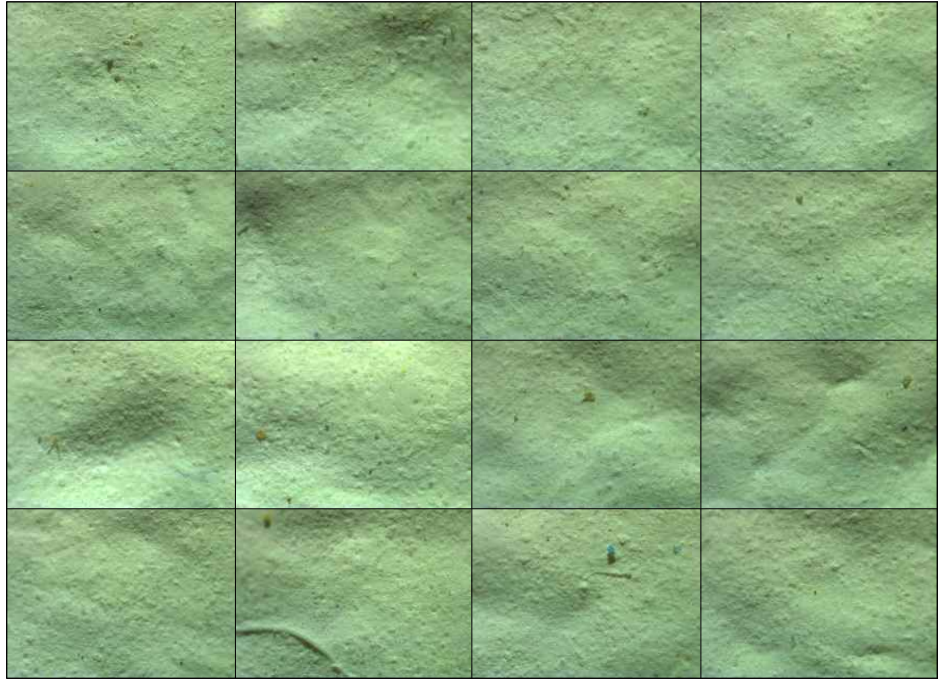


[그림 3-16] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 3번) 표면 관찰



[그림 3-17] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 4번) 표면 관찰



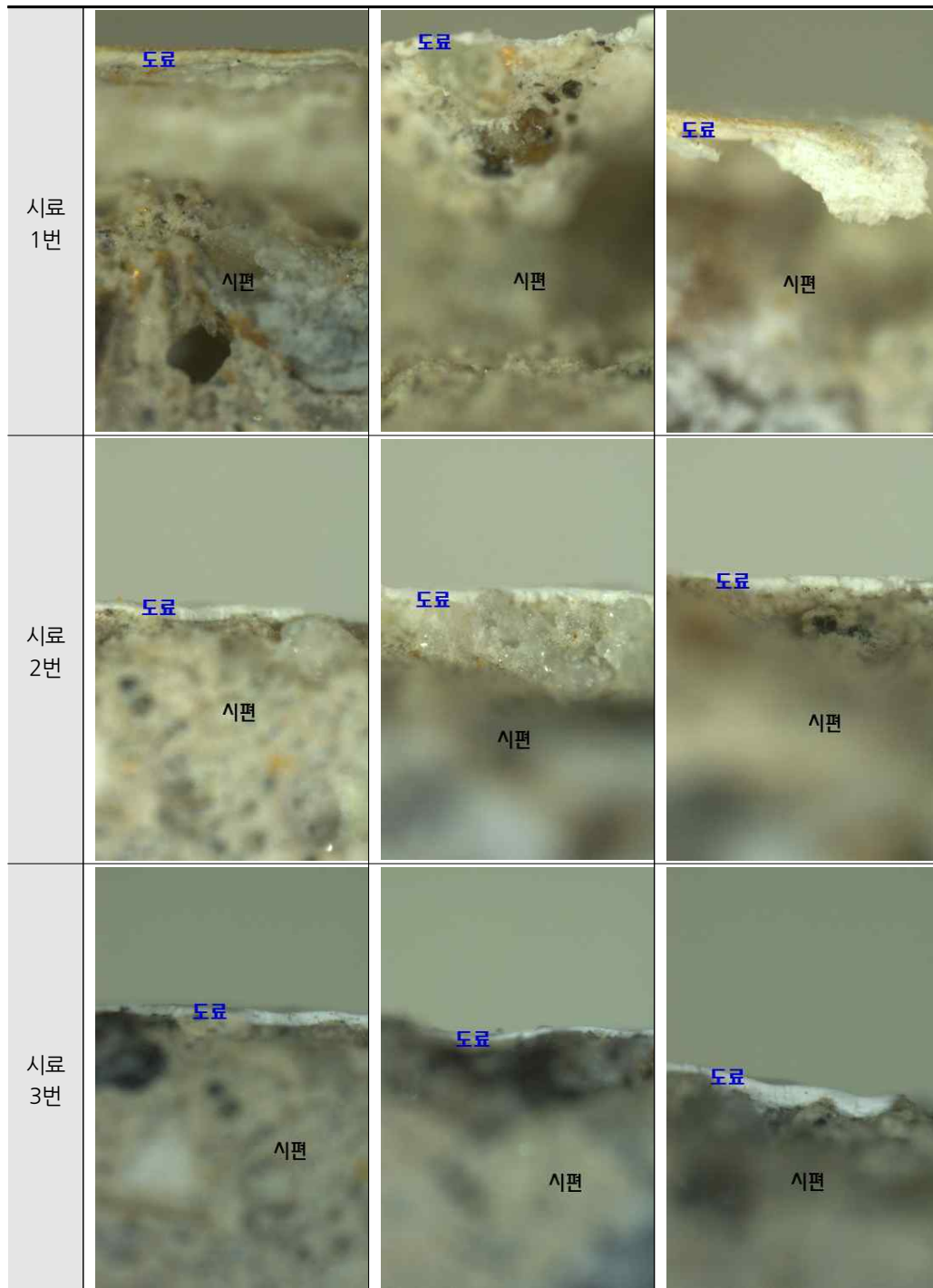


[그림 3-18] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 5번) 표면 관찰

#### 4.2. 도료별 단면 마감 형태 및 구성 성분 분석

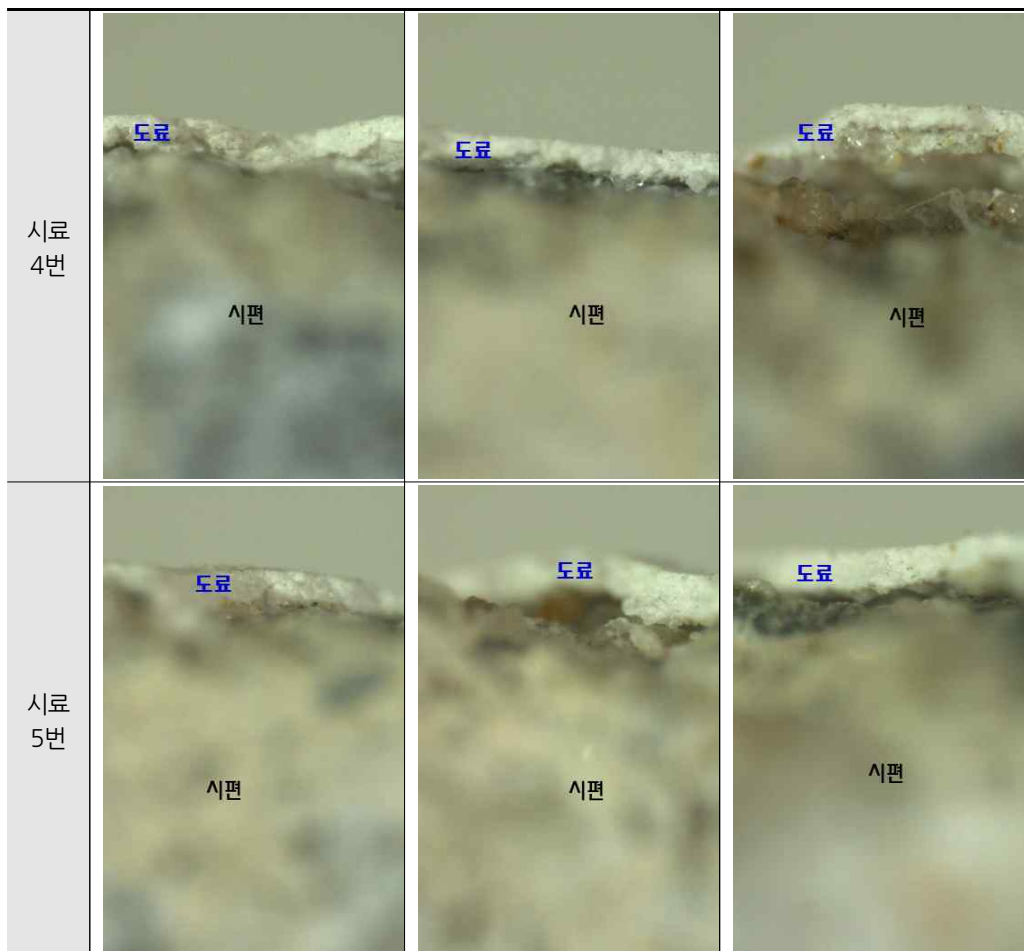
도료를 이용하여 콘크리트에서 방출되는 방사성물질을 차폐하는 원리는 다양하다. 도료의 성분 및 특성에 따라 도료 자체가 콘크리트 표면에 막을 형성하거나 콘크리트 자체에 도료가 흡수되어 기공 및 틈을 메꾸기도 한다. 본 연구에서는 도료가 콘크리트 시편에 도장되는 형태를 보다 정밀하게 도료별 분석하기 위해 방사성 물질 저감 기능성 도료와 일반 수성 도료를 도장한 콘크리트 시편을 암석 절단기와 미세 커팅기를 이용하여 얇은 암석 조각으로 잘라 도료가 콘크리트 표면에 도포된 단면을 관찰하였다.

실체현미경을 통해 측면(시편과 도료에 해당하는 부분)을 확대 관찰한 결과, 그림 3-19와 같다. 도료와 시편이 접합한 부위를 보면 시료 1번은 얇게 도포되어 콘크리트 시편을 덮고 있으며 단면의 미세한 층상 구조가 관찰되었다. 이에 반해 시료 2번과 3번은 얇고 치밀하게 보이는 도막이 균질하게 콘크리트 표면과 밀착된 것으로 관찰되었다.



[그림 3-19] 실제 현미경을 통한 콘크리트(시료 1-3번)의 단면 관찰

시료 4번과 5번의 단면 형상은 그림 3-20과 같다. 반면에 일반 수성 도료가 도장된 콘크리트 시편인 4번과 5번은 대체로 도막의 두께가 두껍고 표면이 고르지 않게 도포된 특성을 보인다. 또한 표면이 매끄럽지 않고 방사성 물질 저장 기능성 도료에 비해 콘크리트 표면과 밀착성이 떨어져 콘크리트 표면과 도료 사이에 들떠 있는 공간이 관찰되기도 하였다. 이를 통해 방사성 물질 저장 기능성 도료의 다량 포함된 유기물질은 얇고 치밀한 도막의 형성과 콘크리트와의 밀착성을 높이는데 영향을 미친 것으로 판단된다.

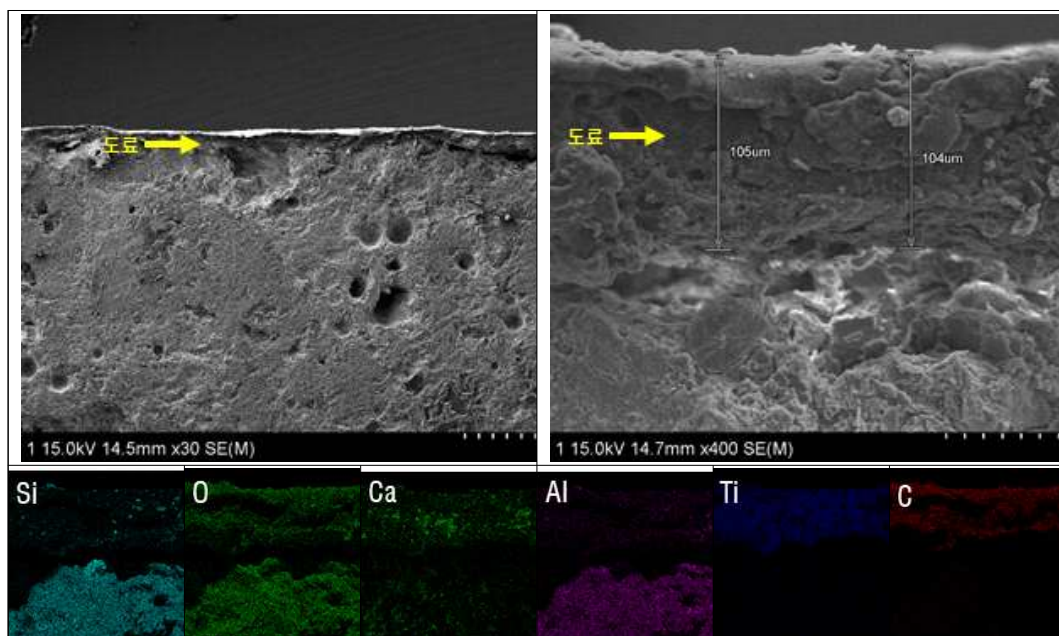


[그림 3-20] 실체 현미경을 통한 콘크리트(시료 4,5번)의 단면 관찰

보다 자세한 단면 관측 및 성분 분석을 위해 주사전자현미경과 원소분석 (SEM-EDS)를 이용, 콘크리트 표면에 형성된 도막의 특성을 관찰하고자 하였다. 주사전자현미경을 이용한 관찰 결과는 그림 3-21~25와 같다.

그림 3-21에서 보이는 바와 같이 방사성 물질 저장 기능성 도료를 이용한 시료 1번은 얇게 도포되어 콘크리트 시편을 덮고 있으며 도료의 두께는 약 104.5  $\mu\text{m}$  (104~105  $\mu\text{m}$ )로 균질한 편이었다. 도막의 두께는 EDS-mapping을 이용한 원소분석을 통해 명확하게 구분할 수 있었다. 콘크리트 시편에서는 Si과 Al의 성분이 주로 분포하는 반면 도막은 도료의 무기물(안료) 성분인 Ti, Ca, C의 성분이 주로 분포하는 특징을 나타냈다.

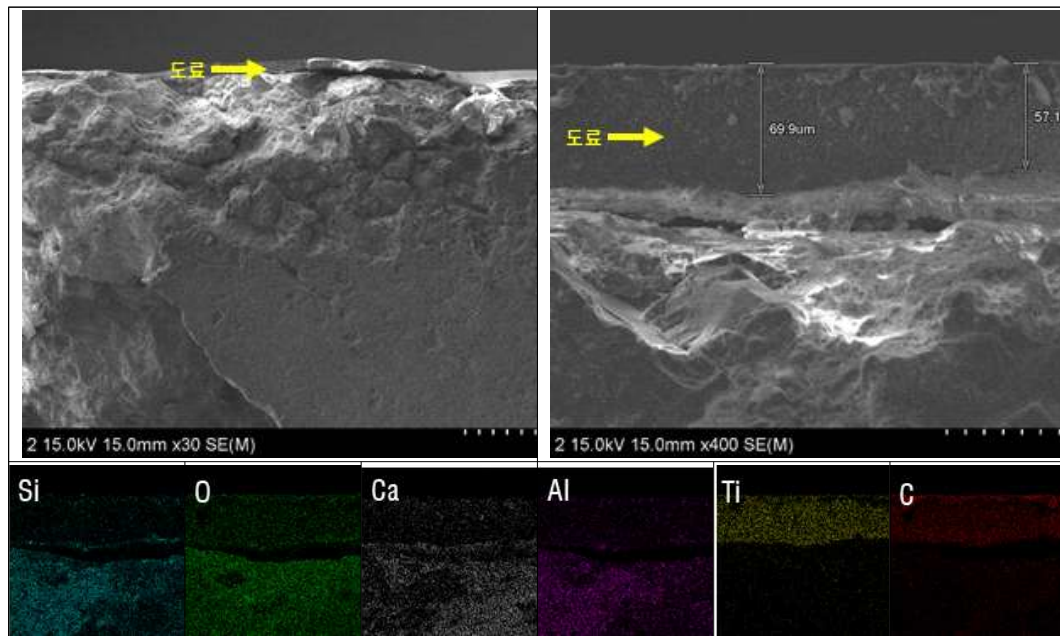
시료 2번은 그림 3-22와 같이 도막의 두께가 약 63.5  $\mu\text{m}$  (57.1~69.9  $\mu\text{m}$ )로 시료 1번에 비해 더 얇게 도막을 형성한 것을 알 수 있었다. 도막이 단단하고 치밀하게 마감된 것으로 보이나 콘크리트 표면에 단단하게 부착되어 있지 않고 일부 들떠 있는 구간이 관찰되기도 하였다. 시료 1번과 마찬가지로 콘크리트 시편에서는 Si과 Al의 성분이 주로 분포하였다.



[그림 3-21] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 1번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포

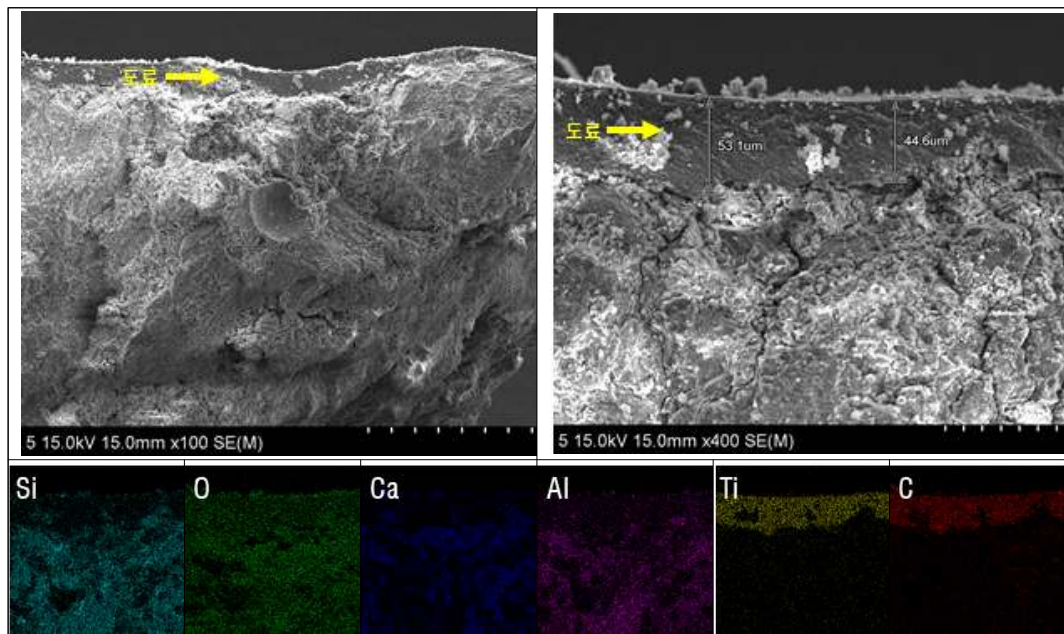
그림 3-23에서 나타난 바와 같이 시료 3번의 콘크리트의 단면에서는 도막의 두께가 약 48.8  $\mu\text{m}$  (44.6~53.1  $\mu\text{m}$ )로 더 얇게 확인되었고 콘크리트 표면의 밀착성도 우수한 것으로 판단되었다. 구성성분의 분포는 시료 2번과 동일하게 나타났으며 이는 유사한 콘크리트 시편 및 동일한 도료를 사용했기 때문이다. 시료 3번은 앞서 언급한 바와 같이 분석 결과의 신뢰성 확보를 위해 추가 관찰을 수행하였다. 결과적으로 시료 1번에 비해 시료 2, 3번의 도료 도막은 다른 도료에 비해 두께가 현저히 얇고 치밀한 도막을 형성하는 것을 알 수 있었다.

일반 수성 도료를 도장한 시료 4, 5번의 콘크리트의 단면을 SEM-EDS로 관찰한 결과, 도막의 두께는 대체로 두꺼운 양상을 보였다. 시료 4번의 도막은 두께가 약 159.5  $\mu\text{m}$  (149~170  $\mu\text{m}$ )이고, 시료 5번의 도막은 약 151  $\mu\text{m}$  (134~168  $\mu\text{m}$ )로 확인되었다. 시료 4, 5번의 특징은 도막의 구성 성분에 Mg와 Al이 다량 함유되어 있고, Ti 및 C의 함량은 시료 1-3번에 비해 낮게 관찰되었다. 이러한 화학적 성분의 특성은 앞서 수행한 무기물인 구성 광물의 특성 및 유기물의 함량 차이와 관련이 있으며 성분 분포의 경향성은 일치하였다.

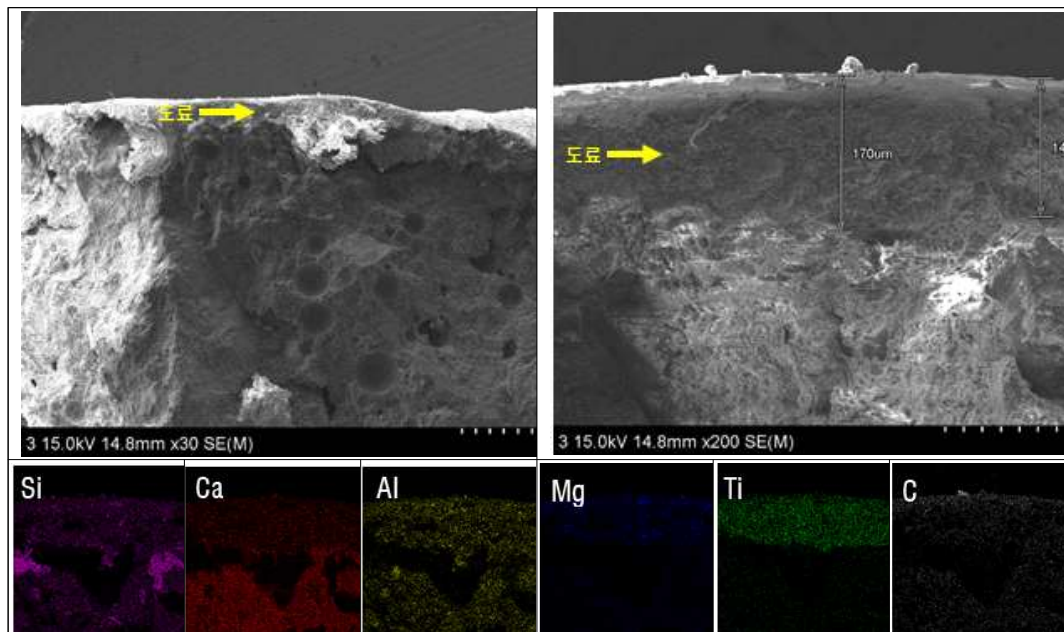


[그림 3-22] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 2번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포

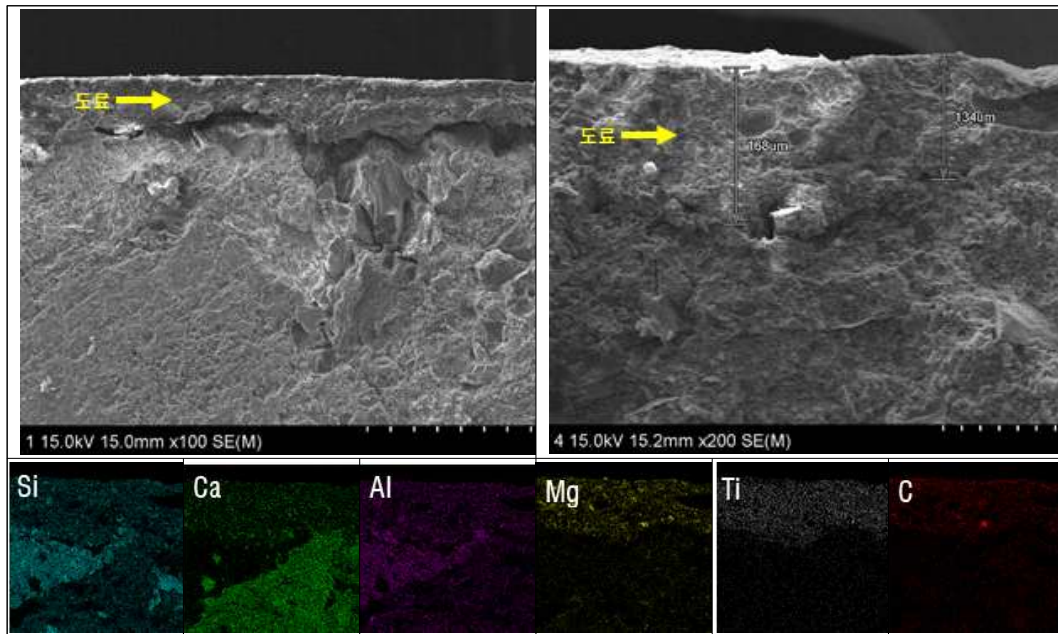




[그림 3-23] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 3번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포



[그림 3-24] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 4번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포



[그림 3-25] SEM-EDS를 통한 콘크리트(시료 5번) 단면 관찰 및 구성 원소 분포

#### 4.3. 도료의 오염물질 방출성능

도료를 공동주택 실내 부위에 도포할 시, 도료의 종류 또는 도포 면적 등에 따라 실내공기 오염물질 방출 문제가 발생할 수 있다. 도료의 안전성 확보 측면에서 방사성물질 저감 기능성 도료를 대상으로 실내공기 오염물질 방출 성능에 대해 평가를 실시하였다. 평가항목은 포름알데히드, 중금속, 항곰팡이 성능, 항균 성능이며, 각 항목에 대한 시험 결과는 표 3-5와 같다.

도료에서 발생할 수 있는 휘발성 유기화합물의 각 종류 및 용도는 표 3-6과 같다. Butoxyethoxy Ethanol은 주로 중합체, 수지, 코팅, 잉크, 세정제, 금속 가공 유체 등으로 활용되는 물질이며, Propylene Glycol은 수성 아크릴 페인트에 사용되는 물질로 물에 비해 증발속도가 느려 표면이 건조되는 것을 방지하는 물질로 활용된다.

방사성물질 저감 기능성 도료에서 방출되는 휘발성 유기화합물의 종류와 농도는 다음 표 3-7과 같다. 방사성물질 저감 기능성 도료 1번은 Butoxyethoxy 10thanol을 포함한 6개 항목이 검출되었다. 반면 방사성물질 저감 기능성 도료 2번에서는 Propylene Glycol을 포함한 4개의 항목이 소량으로 검출되었다.

[표 3-5] 도료의 오염물질 방출 성능 평가(I)

(페인트)			*건강친화형주택건설기준 (국토부) 기준 적용		시험결과	
시험항목			시험법	평가기준	저감 도료 1	저감 도료 2
1	HCHO	7일후 방출량	실내공기질공정시험방법(환경부) (KS M 1998)	- HCHO 0.015 mg/m <sup>2</sup> ·h 이하	불검출	불검출
	톨루엔				불검출	불검출
2	납	-	KS M ISO 3856-1	(환경표지인증기준) - 납,카드뮴,수은,6가 크로뮴합량의 합은 질량분율 1000 mg/kg이하	불검출	불검출
	카드뮴	-	KS M ISO 3856-4		불검출	불검출
	수은	-	KS M ISO 3856-7		불검출	불검출
	6가크롬	-	KS M ISO 3856-5	- 납함량은 질량분율 90 mg/kg이하	불검출	불검출
3	항곰팡이 성능	항곰팡이저항성(log(CFU)) *28℃, 85%에서 28일 배양후평가	ASTM D 6329	- 항곰팡이저항성 1.0log(CFU)이하		
			ASTM G 21	- 0 등급 이상		
4	항균 성능	항균성(대장균)	JIS Z 2801	- 항균활성치 2.0 이상	5.7	5.7
		항균성(황색포도상구균)			5.7	5.7

[표 3-6] 도료의 오염물질 중 기타물질

기타물질 (저감 도료 1)	기타물질 (저감 도료 2)
Butoxyethoxy ethanol: Used as a solvent and diluent for polymers, resins, coatings, inks, cleaners, and metal-working fluids	
Propylene glycol: Used in water-based acrylic architectural paints to extend dry time which it accomplishes by preventing the surface from drying due to its slower evaporation rate compared to water.	Propylene Glycol: Used in water-based acrylic architectural paints to extend dry time which it accomplishes by preventing the surface from drying due to its slower evaporation rate compared to water.



2-Ethyl-3-hydroxyhexyl 2-methylpropanoate:	Tetramethyl decynediol: an acetylene glycol derivative used in water-based coatings and has both antifoaming and surfactant properties.
2-(2-Hydroxypropoxy)-1-propanol: liquids, mostly insoluble in water, used to suppress foaming in industrial processes and for making polyurethane resins, hydraulic fluids, and various other materials.	Isobutyl alcohol: a colorless liquid with a mild, sweet, and musty odor. It is used as a solvent, in making other chemicals, and as a flavoring.
2,2'-Dihydroxydipropyl ether	2-Ethylhexyl acrylate: used in the production of resins for pressure-sensitive adhesives, latex, paints, textile and leather finishes and coatings for paper.
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate: a colourless liquid with a faint odour, which is mainly used as a plasticizer in the production	

[표 3-7] 도료의 오염물질 방출 성능 평가(II)

	저감 도료 1	저감 도료 2
휘발성 유기화합물*	Butoxyethoxy ethanol (0.165)	Propylene Glycol (0.026)
	Propylene Glycol (0.039)	Tetramethyl decynediol (0.007)
	2-Ethyl-3-hydroxyhexyl 2-methylpropanoate (0.014)	Isobutyl alcohol (0.006)
	2-(2-Hydroxypropoxy)-1-propanol (0.013)	2-Ethylhexyl acrylate (0.006)
	2,2'-Dihydroxydipropyl ether (0.011)	
	2,2,4-Trimethyl-1, 3-pentanediol diisobutyrate (0.010)	

\* 방출량 : 톨루엔 등가 환산 농도임

## 5. 방사성물질 저감 기능성 도료 특성

### 5.1. 방사성물질 저감 기능성 도료의 구성

도료는 크게 구성 물질은 수분, 유기물(바인더), 고형물(안료)로 구분된다. 이 중 방사성 물질 저감 기능성 도료는 특징은 유기물의 함량이 평균 27.6 % (23.1~32 %)로 일반 수성 도료의 함량이 평균 13.2 % (11.9~14.8 %)인 것에 비해 약 2배 이상 높은 특징을 보였다.

보다 자세히 구성비를 살펴보면 방사성물질 저감 기능성 도료의 특징은 유기물 : 수분 함량비가 1 : 1.18 내지 1 : 1.3의 범위를 보여 구성비의 차이가 크지 않은 반면, 일반 수성 도료 내 유기물 : 수분 함량비는 평균 1 : 3.2 (1 : 2.7 내지 1 : 3.5)의 구성비를 가지는 것을 알 수 있다.

도료의 고형물을 구성하는 광물은 공통적으로 금홍석(Rutile,  $\text{TiO}_2$ )을 포함하며, 방사성물질 저감 기능성 도료들에서는 상대적으로 광물의 구성이 단순한 특징을 보였다. 이외의 도료들을 구성하는 광물의 종류는 다음 표 3-8과 같다.

또한 방사성 물질 저감 기능성 도료 내 무기물의 화학적 특성은 주로 구성 광물의 성분으로부터 기인한 것으로 추정된다. 가장 많은 성분은  $\text{TiO}_2$ 이며 저감 도료 1과 2는 각각 39.8과 58.8% 함량을 나타냈다. 유기물 함량이 높았던 저감 도료 1과 2에서는 Resins인 Alkyd Polymers의 특성을 나타내는 관련 피크가 높게 검출되었다.

[표 3-8] 도료 종류별 구성광물

도료 구성 광물	방사성물질 저감 기능성 도료		일반 수성 도료		
	저감도료 1	저감도료 2	일반도료 3	일반도료 4	일반도료 5
Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )	O	-	O	O	O
Chlorite [ $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ]	-	-	O	O	O
Dolomite [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]	O	-	O	O	O
Mica (Muscovite) [ $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ]	-	-	-	-	O
Quartz ( $\text{SiO}_2$ )	-	-	O	O	O
Rutile ( $\text{TiO}_2$ )	O	O	O	O	O
Talc [ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ]	-	-	O	O	O

## 5.2. 방사성물질 저감 기능성 도료의 물리적 특성

도료별 시공 후 마감 형태를 살펴보면 유기물 함량이 높았던 방사성물질 저감 기능성 도료를 도장한 표면은 유광을 띠며 도막의 치밀성, 부착성, 탄성력이 높은 특징을 나타냈다. 도료가 도장된 콘크리트의 절단면을 실체현미경으로 관찰한 결과, 방사성물질 저감 기능성 도료는 일반 수성 도료에 비해 얇고 치밀하게 보여지는 도막이 균질하게 콘크리트 표면과 밀착된 것으로 관찰되었다.

도장된 콘크리트의 절단면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과, 도막의 두께가 방사성물질 저감 기능성 도료 1번은 약 104.5  $\mu\text{m}$ 이고, 방사성물질 저감 기능성 도료 2번은 평균 약 56.2  $\mu\text{m}$ 이었다. 따라서 일반 수성 도료의 도막 두께(평균 약 159.5  $\mu\text{m}$ )에 비해 방사성물질 저감 기능성 도료는 더 얇은 도막을 형성하는 특징을 보였으며, 특히 방사성물질 저감 기능성 도료 2번은 가장 얇게 도막을 형성한 것으로 나타났다.

결과적으로 방사성 물질 저감 기능성 도료는 유기물(Resins)을 통해 치밀하고 탄성력의 얇은 도막을 형성함으로써 콘크리트로부터 기인된 방사성 물질의 방출을 저감시키는 코팅막 역할을 하는 것으로 판단된다. 다만 도료에 배합된 유기물의 성분과 종류는 총휘발성유기화합물(TVOC)을 비롯한 오염 물질 발생량에 영향을 미치므로 현장 적용 시에는 방사성 물질 저감 성능뿐만 아니라 오염물질 방출 시험 결과까지 고려하여 실내 적용 가능한 도료를 선정할 필요가 있다.

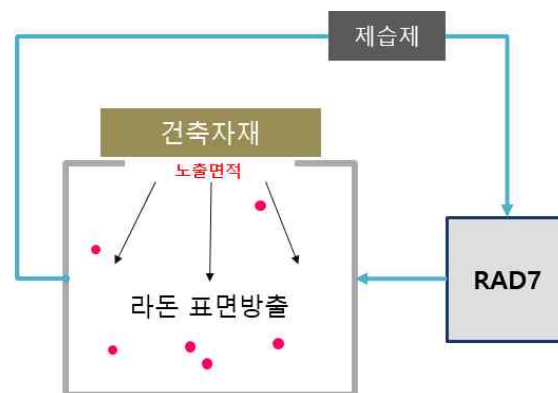
## 제4장 도료의 방사성물질 저감 성능 평가

### 1. 시편을 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가

#### 1.1. 콘크리트 표면 라돈 방출량 추정방법

현 시점에서 콘크리트와 같은 건축 재료 표면에서 발생하는 방사성물질(라돈)의 방출량을 측정하는 표준 시험방법은 정립되어 있지 않다. 그러므로 본 연구에서는 건축 재료 표면에서 방출하는 라돈의 양을 추정하기 위해 밀폐형 구조 챔버를 활용, 챔버 내 라돈의 포화 농도를 활용하여 표면에서의 라돈 방출량을 추정하는 방법을 차용하였다. 이는 소형 챔버를 이용하여 건축 재료에서 발생하는 오염물질을 측정하는 방법과 유사한 원리를 가진다.

그림 4-1은 밀폐형 챔버를 이용한 건축 재료 표면 라돈 측정 실험의 개요이다. 밀폐형 챔버를 이용하는 이유는 건축 재료의 표면 노출 면적이 작기 때문에 챔버 내 라돈 포화 농도 조성을 위해 챔버 내 환경 변화가 적은 상태가 유리하기 때문이다. 즉, 외부 공기 유입 등이 차단된 밀폐형 챔버 내 환경은 외부 환경으로부터 발생하는 실험 오차를 최소화하여 라돈의 포화 농도 조성이 유리할 뿐만 아니라 결과적으로 건축 재료로부터의 표면 라돈 방출량 추정 오차도 줄일 수 있다.



[그림 4-1] 건축 재료 표면 라돈 방출 평가 개요

밀폐형 챔버 내 라돈의 포화 농도를 이용한 건축 재료 표면 라돈 방출량 추정 방법은 수식 (1.1)과 같다. 수식 (1.1)은 챔버 내 라돈 농도 보존 방정식으로 측정된 라돈 농도를 바탕으로 방출량을 평가하기 위해서는 측정 결과의 상태를 가정할 필요가 있다. 측정 기간이 짧아 챔버 내 라돈 농도가 선형으로 증가하는 경우 수식 (1.2)와 같이 선형 기울기를 통해 라돈 방출량을 평가하게 된다.

Indoor Radon Balance Equation

$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{E \cdot A}{V} - (\lambda_{eff} \cdot C_t) \quad (1.1)$$

Initial Phase (Linear Curve)

$$C_t = \frac{E \cdot A \cdot t}{V} + C_{initial} \quad (1.2)$$

Saturation Phase

$$C_t = \frac{E \cdot A \cdot t}{\lambda_{eff} \cdot V} \quad (1.3)$$

Whole Phase (Exponential Curve)

$$C_t = \frac{E \cdot A}{\lambda_{eff} \cdot V} (1 - e^{\lambda_{eff} \cdot t}) + C_{initial} \cdot e^{\lambda_{eff} \cdot t} \quad (1.4)$$

여기에서,

$C_t$  : Indoor radon concentration (Bq/m<sup>3</sup>)

$C_{initial}$  : Initial radon concentration (Bq/m<sup>3</sup>)

$E$  : Exhalation rate (Bq/m<sup>2</sup>·h)

$V$  : Volume (m<sup>3</sup>)

$A$  : Surface area (m<sup>2</sup>)

$\lambda_{eff}$  : Effective decay rate (h<sup>-1</sup>)

이와 유사한 형태로 챔버 내 라돈 농도가 상승하지만 곡선의 형태로 상승하는 경우 수식 (1.4)를 바탕으로 방출량을 평가하게 된다. 두 방식 모두 측정된 결과를 수식에 선형 또는 커브 피팅하는 절차가 추가적으로 필요하다. 일정 기간 측정을 통해 챔버 내 라돈 농도가 시간 흐름에 따른 영향이 적을 경우 정상 상태 가정을 통해 수식 (1.3)과 같이 라돈 방출량을 산출할 수 있다.

라돈 방출량을 추정하는 과정에서 오차가 발생하기 쉬운 이유는 동일한 실험 데이터를 사용하더라도 지배 방정식을 어떻게 해석하느냐에 따라 결과 값은 달라질 수 있기 때문이다. 결과적으로 어떠한 실험 데이터를 어떻게 해석하는지에 따라 결과값은 확연하게 차이가 발생한다. 측정 시간이 짧을수록 선형 추정(Linear Fitting)이 유리할 수 있으며, 측정 시간이 길어질수록 포화 농도 상태를 가정하는 정상 상태 해석이나 지수 함수 형태의 해석이 더 유리하다.

## 1.2. 콘크리트 시편 및 측정 실험 준비

실제 공동주택에서 사용하는 콘크리트를 대상으로 실험 시편을 제작하기 위해 충청 지역 내 현장에서 활용하는 콘크리트를 이용한 시편을 제작하였다. 시편의 크기는  $0.2 \times 0.2 \times 0.05 \text{ m}^3$ 이며, 밀폐형 챔버 내 포화 농도 수준을 고려한 크기와 두께이다. 시편에서 사용한 콘크리트 압축강도는  $240 \text{ kgf/cm}^2$ 로 일반 아파트용 강도를 보인다.

제작한 콘크리트 시편을 대상으로 도료(방사성물질 저감 기능성 도료 2종, 일반 수성 도료 2종) 도장을 수행하였다. 도료의 방사성물질 저감 성능을 평가하기 위해 도료 시공 전, 후의 콘크리트 시편 표면 라돈 방출 실험을 수행, 추정된 라돈 방출량을 비교하였다. 또한 그림 4-2와 같이 측정 장비 및 시편에서 발생할 수 있는 실험 오차의 최소화 및 실험의 재현성 확보를 위해 도료별 3개의 콘크리트 시편을 제작하였으며, 도료 도장 후 14일 이상 건조 기간을 거쳐 실험을 수행하였다.

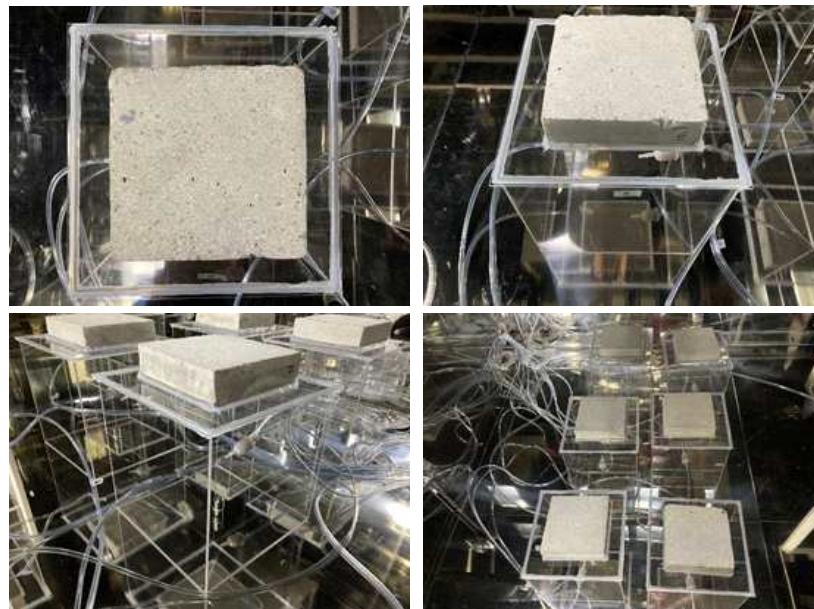


[그림 4-2] 도료 도장 후, 콘크리트 시편 모습

그림 4-3과 같이 균일한 환경에서 시편이 안정화될 수 있도록 항온항습 시료보관실에서 실험 전/후 과정에 따라 시편을 보관하였다. 콘크리트 시편의 경우, 제작 직후 재료 자체의 함수량이 높아 일정기간 건조가 필요하다. 항온항습 시료보관실의 온도는 25 °C 내외, 상대습도는 50 % 내외로 설정하였다.



[그림 4-3] 항온항습실 내 콘크리트 시편 준비



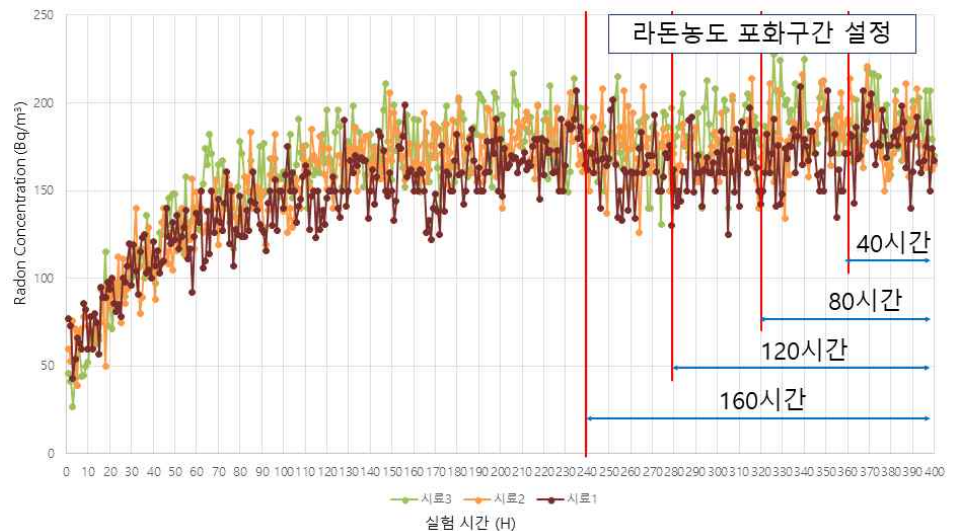
[그림 4-4] 밀폐형 챔버 위 콘크리트 시편 설치 모습

건조된 시료는 그림 4-4와 같이 밀폐형 챔버 위에 부착하여 도료 도장이 된 콘크리트 시편 1면이 챔버 안쪽으로 노출되게 설치하였다. 또한 밀폐형 챔버가 아크릴 챔버로 제작된 점을 고려하여 항온항습 기능이 있는 대형 챔버 (40 m<sup>3</sup>) 내 밀폐형 챔버를 설치, 챔버 내 온도 및 습도 변화를 최소화하고자 노력하였다. 대형 챔버 내 환경조건 또한 항온항습 시료보관실과 유사한 온도는 25 °C 내외, 상대습도는 50 % 내외로 설정하였다.

### 1.3. 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 실험 결과

#### 1) 도료 적용에 따른 콘크리트 시편 표면 라돈 방출량 비교

앞 절에서 언급한 바와 같이 라돈 포화 농도를 이용한 표면 라돈 방출량 추정을 위해서는 챔버 내 농도가 포화 상태에 다다를 수 있도록 측정 시간을 설정하는 것이 중요하다. 챔버 내 포화 농도 도달 시간을 확인하기 위해 콘크리트 시편 3개를 이용, 밀폐형 챔버 내 라돈 농도 변화를 측정하였다. 챔버 내 라돈 농도 측정은 총 400 시간동안 이루어졌으며, 측정 시 대형 챔버 내 환경 조건은 온도 25 °C, 상대습도 50 % 내외로 유지하였다. 챔버 내 라돈 농도 변화는 그림 4-5와 같다.

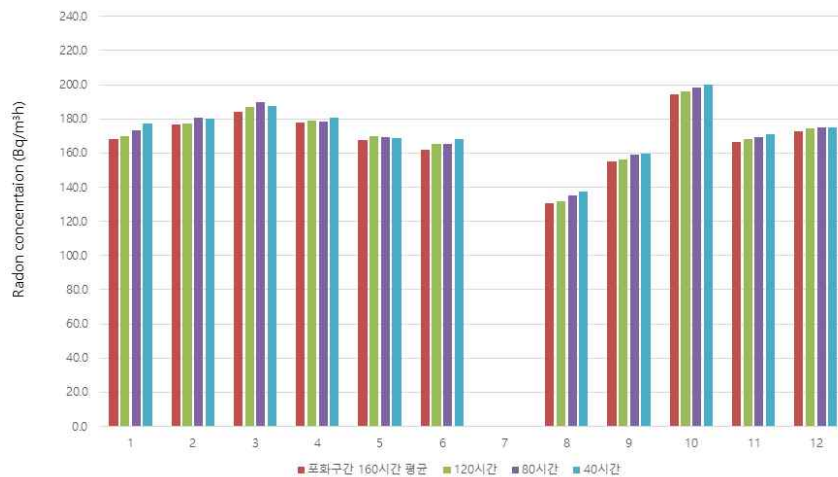


[그림 4-5] 콘크리트 시편을 이용한 챔버 내 라돈 농도 변화 비교



그림 4-5와 같이 마지막 측정 시간을 기준으로 40~160시간 전까지(측정 후 240~400시간) 챔버 내 라돈 농도 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 측정 시 대형 챔버 내 환경 조건은 온도 25℃, 상대습도 50% 내외로 유지하였다. 그림 4-6은 포화 상태 구간을 보다 자세히 분석한 그래프이다. 포화 상태를 40, 80, 120, 160시간으로 구분하여 콘크리트 시편 12개에 대한 챔버 내 라돈 농도 평균값을 도출하였다. 그래프를 비교해보면 포화 상태 구간이 길어질수록 평균값이 다소 낮아지는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 이는 라돈 농도 측정 시 발생하는 장비의 오차로 인한 농도 변화가 일부 영향이 있다. 이러한 오차를 최소화하기 위해 본 실험에서는 데이터 축적 시간, 즉 측정 데이터 수를 늘려 오차를 줄이는 방법을 차용하였다.

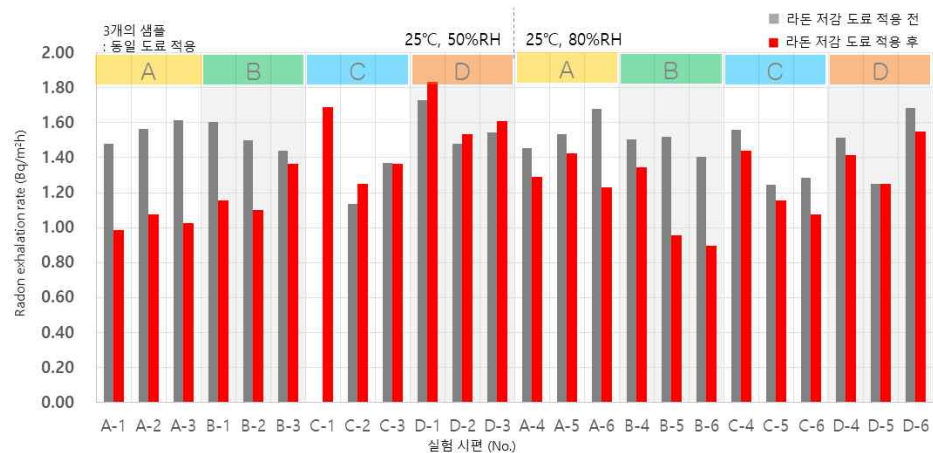
그러므로 본 실험에서는 밀폐형 챔버 내 라돈 농도가 포화 상태에 다다른 시간을 160시간 즉, 측정 후 240시간 이후로 설정, 측정 후 240~400시간 동안의 데이터를 활용하여 챔버 내 평균 라돈 농도를 산정하였다.



[그림 4-6] 콘크리트 시편을 이용한 밀폐형 챔버 내 라돈 농도 평균값

그림 4-7은 도로 적용에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 변화를 비교한 것이다. 수식 (1.1) 및 챔버 내 라돈 농도 평균값을 활용하여 콘크리트 시편에서 발생하는 라돈의 양을 정량화하였다. 챔버 내 측정 환경은 온도 25℃, 상대습도 50% 내외로 유지하였으며, 상대습도 변화에 따른 라돈 방출량 차이를 비교하기 위해 상대습도 80% 조건에서의 실험을 추가로 수행하였다. 습도 차이를 반영한 실험을 고려하여 콘크리트 시편은 총 24개를 사용하였다.

방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 수성 도료 적용 전, 후의 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 비교 결과, 총 24개의 시편 중 17개에서 약 5 ~ 37 % 까지 도료 도장에 따라 라돈 방출량 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만 일부 시편의 경우, 측정 데이터의 소실(C-1) 또는 실험 시편에 적용 후 표면 라돈 방출량이 증가하는 현상으로 인해 비교가 불가능한 결과가 도출됨을 연구의 한계로 밝힌다.

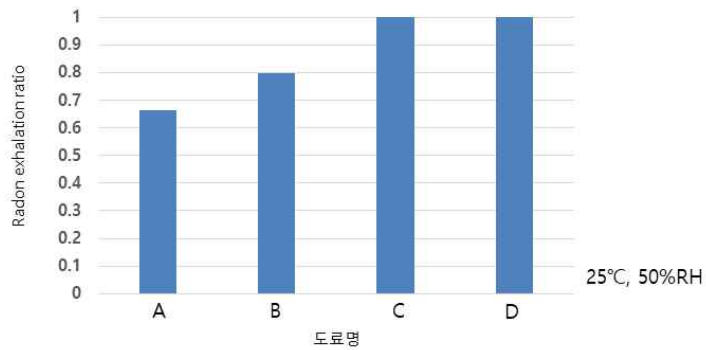


[그림 4-7] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 비교

도료별 방사성물질(라돈) 방출 저감 성능을 직관적으로 비교하기 위해 도료 적용 전/후의 라돈 방출량 비율을 활용한 분석을 수행하였다. 콘크리트 시편 자체의 표면 라돈 방출량을 분모로, 콘크리트 시편에 도료 적용 후 표면 라돈 방출량을 분자로 하여 비율을 환산한 값이다. 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해 1종의 도료마다 3개의 실험 시편을 제작하였다.

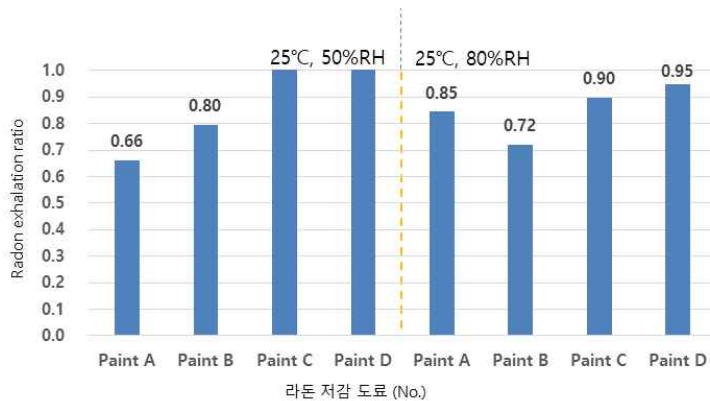
$$\text{Radon exhalation ratio} = \frac{\text{도료 적용 후 표면 라돈 방출량}}{\text{도료 적용 전 표면 라돈 방출량}}$$

4종의 도료별 평균 콘크리트 시편 표면 라돈 방출량을 추정한 결과, 총 2종의 도료에서 약 20 ~ 34 %의 라돈 방출 저감 효과를 나타내었으며, 총 2종의 도료에서는 라돈 방출 저감 효과가 나타나지 않았다. 측정 시, 대형 챔버 내 측정 환경은 온도 25 ℃, 상대습도 50 % 내외이다. 이러한 결과는 방사성물질 저감 기능성 도료에서 라돈 방출 저감 효과가 나타난 것으로 확인할 수 있다.



[그림 4-8] 도장 적용에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 비율

또한 대형 챔버 내 온도는 25 ℃로 유지하되, 상대 습도를 50 %에서 80 %로 변화하며 측정한 결과는 그림 4-9와 같다. 4종 도료의 평균 콘크리트 시편 표면 라돈 방출량 측정을 비교한 결과, 총 4종의 도료에서 약 5 ~ 34 %의 라돈 방출 저감 효과를 나타내었으며, 총 2종의 도료에서 라돈 저감 효과가 나타나지 않았다.



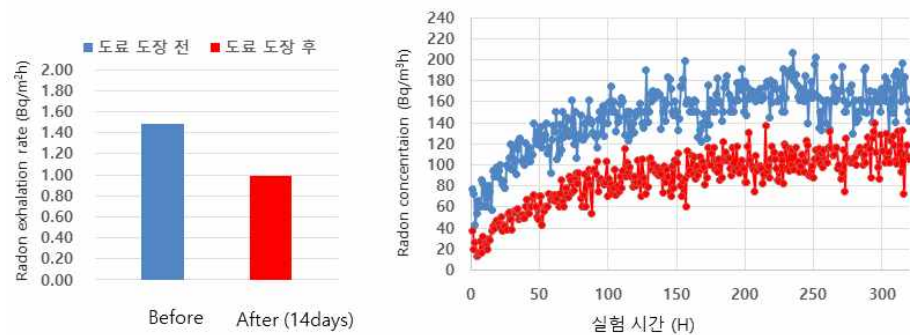
[그림 4-9] 상대습도 변화에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 비율

보다 상세한 분석을 위해 콘크리트 시편별 챔버 내 라돈 농도와 표면 라돈 방출량을 비교하는 과정을 수행하였다. 표 4-11 및 그림 4-11은 방사성물질 저감 기능성 도료를 적용한 시편 콘크리트 1개(A-1)에 대해 분석한 데이터이다. 콘크리트 시편은 도료 도장 후, 14일 동안 건조시킨 상태에서 측정을 수행하였으며, 측정 시, 대형 챔버 내 측정 환경은 온도 25 ℃, 상대습도 50 % 내외이다. 방사성물질 저감 기능성 도료 적용 14일 경과 후, 챔버 내 라돈 농도 및 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량을 비교한 결과, 약 34% 정도 결과 값이 감소하는 것으로 나타났다.

표 4-1 및 그림 4-10은 또 다른 방사성물질 저감 기능성 도료를 적용한 시편 콘크리트 1개(B-1)에 대해 분석한 데이터이다. 콘크리트 시편은 도료 도장 후, 14일 동안 건조시킨 상태에서 측정을 수행하였으며, 측정 시, 대형 챔버 내 측정 환경은 온도 25 ℃, 상대습도 50 % 내외이다. 방사성물질 저감 기능성 도료 적용 14일 경과 후, 챔버 내 라돈 농도 및 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량을 비교한 결과, 약 28~29 % 정도 결과 값이 감소하는 것으로 나타났다.

[표 4-1] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(A-1)

구분	도료 도장 전	도료 도장 후	증감
실내(챔버 내) 라돈 농도 [Bq/m <sup>3</sup> h]	163.49	108.64	-33.5 %
STDEVA(실내 라돈 농도)	15.69	12.68	
Radon exhalation rate [Bq/m <sup>2</sup> h]	1.48	0.98	-33.7 %

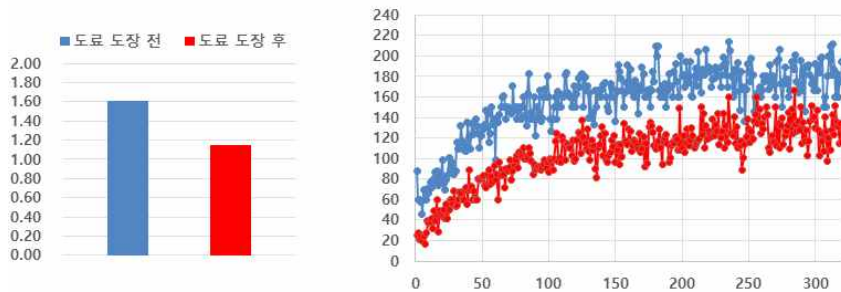


[그림 4-10] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(A-1)

표 4-2 및 그림 4-11은 일반 수성 도료를 적용한 시편 콘크리트 1개(C-1)에 대해 분석한 데이터이다. 콘크리트 시편은 도료 도장 후, 14일 동안 건조시킨 상태에서 측정을 수행하였으며, 측정 시, 대형 챔버 내 측정 환경은 온도 25 ℃, 상대습도 50 % 내외이다. 일반 수성 도료 적용 14일 경과 후, 챔버 내 라돈 농도 및 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량을 비교한 결과, 약 1 % 내외로 결과 값이 감소하는 것으로 나타났다.

[표 4-2] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(B-1)

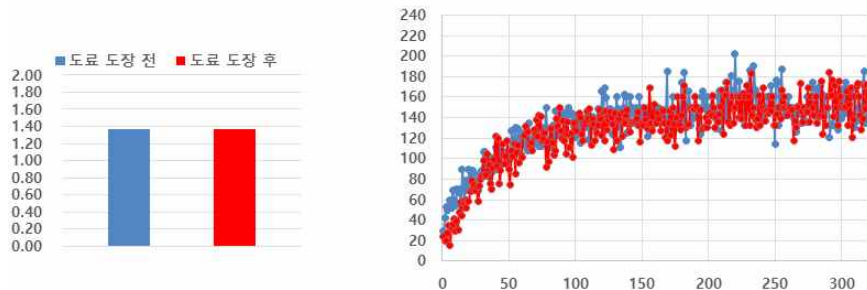
구분	도료 도장 전	도료 도장 후	증감
실내(챔버 내) 라돈 농도 [Bq/m <sup>3</sup> h]	177.08	127.39	-28.1 %
STDEVA(실내 라돈 농도)	15.47	15.27	
Radon exhalation rate [Bq/m <sup>2</sup> h]	1.61	1.15	-28.5 %



[그림 4-11] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(B-1)

[표 4-3] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(C-1)

구분	도료 도장 전	도료 도장 후	증감
실내(챔버 내) 라돈 농도 [Bq/m <sup>3</sup> h]	151.01	150.51	-0.3 %
STDEVA(실내 라돈 농도)	14.31	13.74	
Radon exhalation rate [Bq/m <sup>2</sup> h]	1.37	1.36	-0.8 %



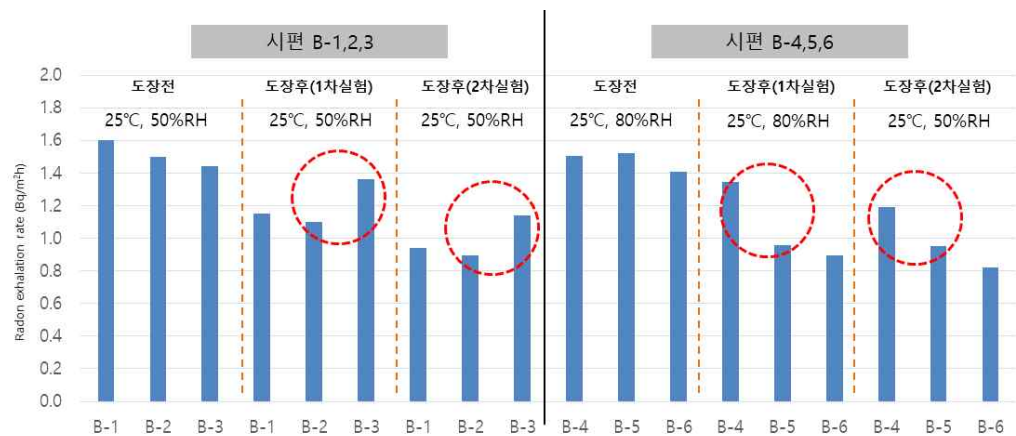
[그림 4-12] 도료 도장에 따른 콘크리트 시편 측정 결과(C-1)

## 2) 방사성물질 저감 기능성 도료와 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량

3장에서 언급한 바와 같이 방사성물질 저감 기능성 도료의 경우, 도료의 특성에 따라 동일한 품질의 시공성을 얻기 어려울 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 방사성물질 저감 기능성 도료 적용 시, 라돈 저감 성능의 재현성 확인을 위하여 방사성물질 저감 기능성 도료를 대상으로 재현성 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 방사성물질 저감 기능성 도료 1종에 대해 6개의 콘크리트 시편을 제작하였으며, 각 시편별 표면 라돈 방출량을 추정하는 과정을 거쳤다. 도료 성능의 재현성 확인을 위해 여러 시편을 제작하는 한편, 1, 2차 반복 측정 실험을 수행하여 결과의 신뢰성을 높이기 위해 노력하였다. 또한 일부 시편에 대해 상대 습도를 다르게 적용하여 실내 환경 변화에 따른 방사성물질 방출 저감 성능의 차이가 발생하는지 확인하고자 하였다. 측정 시간 320시간 중 포화 농도 구간으로 추정되는 80시간 분량의 데이터를 채택하여 분석하였다. 각 시편별 표면 라돈 방출량 추정 결과는 그림 4-13과 같다.

방사성물질 저감 기능성 도료 1종의 6개 시편 분석 결과, 그룹별 비교에서 B-1, B-2 시편에 비해 B-3 시편이, B-5, B-6 시편에 비해 B-4 시편의 표면 라돈 방출량이 다른 시편에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다. 이는 1, 2차 실험에서 유사한 결과가 도출되었기 때문에 콘크리트 시편 확인이 필요한 상황이다. 이 외에 상대습도 변화에 따른 라돈 저감 성능의 차이는 크지 않은 것으로 확인하였다.



[그림 4-13] 방사성물질 저감 기능성 도료 적용에 따른 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량 비교

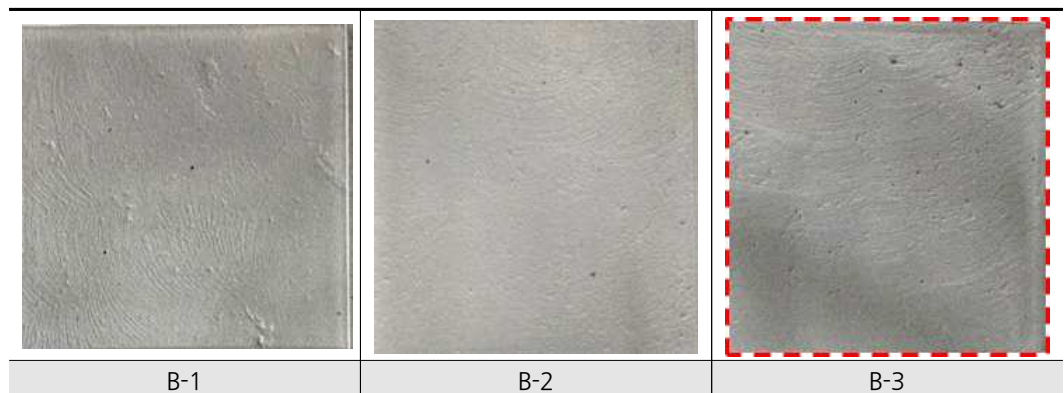
동일한 도료를 적용하였음에도 불구하고 1, 2차 실험에서 나타난 시편별 라돈 방출 저감 성능 차이를 확인하기 위해 각 콘크리트 시편별 데이터 및 시공성을 확인하는 과정을 거쳤다. B-1, B-2, B-3 시편의 표면 라돈 방출량 추정 결과, 약 0.9 ~ 1.1 Bq/m<sup>2</sup>h로 나타났다. 각 시편별 방사성물질 저감 기능성 도료 적용에 따른 효과는 다음과 같다.



- B-1 : 도장 전/후 비교 결과, 약 40% 라돈 방출 저감 효과 검증  
(라돈 표면 방출량 변화 1.6 ▶ 0.97 내외)
- B-2 : 도장 전/후 비교 결과, 약 39% 라돈 방출 저감 효과 검증  
(라돈 표면 방출량 변화 1.55 ▶ 0.93 내외)
- B-3 : 도장 전/후 비교 결과, 약 19% 라돈 방출 저감 효과 검증  
(라돈 표면 방출량 변화 1.41 ▶ 0.15 내외)

동일한 도료를 적용하였음에도 불구하고 시편별 발생하는 라돈 방출 저감 효과의 차이는 도료의 시공성에 있다. 표 4-4는 각 시편별 도장 마감 상태에 따른 콘크리트 시편 표면을 비교한 것이다. 표면을 보면, B-1 및 B-2 시편에 비해 B-3 시편의 표면에 기공이 다수 존재함을 볼 수 있다. 이러한 기공은 도료 도장에 따른 도막의 균질성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 기공으로 발생하는 도막의 틈을 통해 라돈이 보다 원활히 방출될 수 있게 한다.

[표 4-4] 도료 도장 마감에 따른 콘크리트 시편 모습(I)



도료의 시공 품질에 따른 라돈 저감 효과 차이는 B-4, B-5, B-6 시편에서도 동일하게 나타난다. B-4, B-5, B-6 시편의 표면 라돈 방출량 추정 결과, 약 0.85 ~ 1.2 Bq/m<sup>2</sup>h로 나타났다. 각 시편별 방사성물질 저감 기능성 도료 적용에 따른 효과는 다음과 같다.

- B-4 : 도장 전/후 비교 결과, 약 20 % 라돈 방출 저감 효과 검증  
(라돈 표면 방출량 변화 1.50 ▶ 1.20 내외)

- B-5 : 도장 전/후 비교 결과, 약 39 % 라돈 방출 저감 효과 검증  
(라돈 표면 방출량 변화 1.55 ▶ 0.95 내외)
- B-6 : 도장 전/후 비교 결과, 약 40 % 라돈 방출 저감 효과 검증  
(라돈 표면 방출량 변화 1.40 ▶ 0.85 내외)

표 4-5는 각 시편별 도장 마감 상태에 따른 콘크리트 시편 표면을 비교한 것이다. 표면을 보면, B-5 및 B-6 시편에 비해 B-4 시편의 표면에 기공이 다수 존재함을 볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 이러한 기공으로 인해 콘크리트 표면에 형성된 도료의 도막이 깨질 확률이 높고 이는 라돈 방출량이 상대적으로 높을 수 있음을 의미한다. 결과적으로 도료 적용에 따른 라돈 저감 성능을 극대화하기 위해서는 도료 도장에 따른 시공 품질을 확보하는 방안 마련이 필요하다.

[표 4-5] 도료 도장 마감에 따른 콘크리트 시편 모습(II)



본 실험에서는 도료 도장의 시공 품질에 따른 라돈 저감 성능이 달라짐을 밝혔다. 시공 품질은 콘크리트 표면의 기공 외에 도장 마감 두께에 따라서도 달라질 수 있다. 그러므로 방사성물질 저감 기능성 도료의 마감 두께에 따른 라돈 저감 성능 차이를 비교하기 위해 추가 실험을 수행하였다. LH 시방서에서 제시하는 일반적인 도료의 도장 방법은 상도 및 하도를 각 1회씩 칠하는 것이다. 이 때 방사성물질 저감 기능성 도료의 두께는 종류에 따라 차이가 있지만 대략 60 ~ 100 nm 정도이다. 이 수치는 앞서 전자현미경(SEM-EDS)을 이용한 시편의 단면 분석에서 실제 측정한 수치이다.







추가 실험에서는 상도와 하도를 포함한 1차 도장 후, 동일한 시료에 다시 한 번 상도를 2회 칠하는 방식으로 2차 도장을 추가하였다. 결과적으로 콘크리트 표면으로부터 총 4겹의 도료가 도장되어 있는 상태이며, 2주 이상 시편에 칠해진 도료가 충분히 건조된 상태에

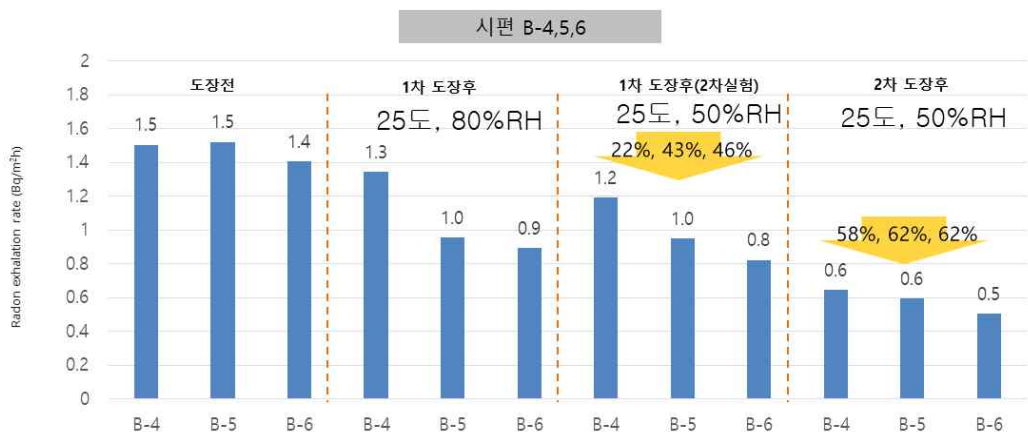


서 시편 표면 라돈 방출 실험을 수행하였다. 각 시편별 1차 도장 및 2차 도장 후 표면 마감 상태는 표 4-6과 같다. 앞서 실험들과 동일한 이유로 결과의 유사성을 확인하기 위해 각각 3개 시편을 제작하였으며, 시편별 콘크리트 표면의 기공 차이를 고려하여 최대한 꼼꼼히 도료를 도장하였다.

방사성물질 저장 기능성 도료의 도장 두께에 따른 시편 표면 라돈 방출량을 비교한 결과는 그림 4-14와 같다. 방사성물질 저장 기능성 도료 도장 전, 도장 1차(상도 및 하도 시공), 도장 2차(1차 도장 위 상도 2회 시공)에 따른 시편의 표면 라돈 방출량을 도출한 결과, 1차 도장을 수행한 경우에는 각 시편별 도장 전 대비 약 22 %, 43 %, 46 %의 라돈 저장 효과를 보인 것을 확인할 수 있다. 또한 2차 도장까지 시공된 시편의 경우, 도료 도장 전 대비 약 58 %, 62 %, 62 % 정도 라돈 저장 효과를 보였다.

[표 4-6] 도료 마감 두께에 따른 콘크리트 시편 모습

	B-4	B-5	B-6
1차 도장			
2차 도장			



[그림 4-14] 도장 두께에 따른 표준시편 라돈 농도

## 2. 실물 벽체를 이용한 도료의 방사성물질 저감 성능 평가

### 2.1. 대형 챔버를 이용한 실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평가방법

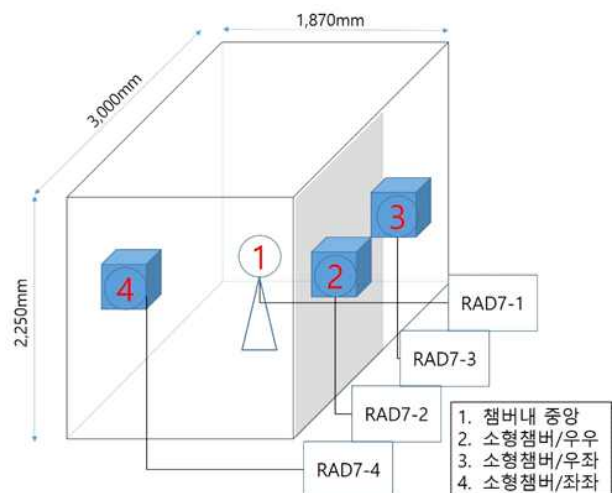
앞서 실험에서 사용한 콘크리트 시편의 경우, 두께가 5 cm 내외로 실제 공동주택 벽체가 20 cm 내외임을 감안한다면 현저히 얇은 것을 알 수 있다. 시편 실험에서 두께가 얇은 콘크리트 시편을 제작한 이유는 측정 챔버 사이즈를 고려하여 Back Diffusion 등 건축 재료 내에서 발생할 수 있는 확산 현상을 최소화하고 실험의 균질성을 확보하기 위함이다. 본 연구에서는 콘크리트 시편 실험을 통해 도료의 라돈 저감 성능을 1차적으로 확인한 뒤, 단계별로 시편의 크기를 증가시켜 공동주택의 실제 벽체 두께를 고려한 Mock-up 실험을 수행하였다.

앞서 언급한 바와 같이 실물 벽체와 유사한 두께의 시편을 제작, 라돈 방출 실험에 사용할 경우, 기존 실험에서 사용한 소형 챔버를 이용하기 어렵다. 그러므로 본 실험에서는 그림 4-15와 같이 LH 토지주택연구원에서 보유하고 있는 외단열 실험 챔버를 이용하여 실물 벽체의 표면 라돈 방출 실험을 수행하였다. 외단열 실험 챔버의 경우, 챔버 양면에 실물 벽체를 부착할 수 있도록 고안되었으며 챔버 내 실험 환경을 일정하게 유지시키는 항온, 항습의 기능도 있다.

실물 벽체와 유사한 콘크리트 시편의 크기는  $3,000 \times 2,250 \times 200 \text{ mm}^3$ 로 제작하였으며, 재료 역시 실제 공동주택 건설에 사용하는 콘크리트를 이용하였다. 제작된 시편을 외단열 챔버의 양면에 단단히 부착하여 외단열 챔버의 기밀성을 확보하였다. 그림 4-29와 같이 실물 크기 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출 측정 실험을 위해  $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$  크기의 소형 챔버를 시편 표면에 부착, 각 챔버별 RAD7을 연결하여 소형 챔버 내 라돈 농도 데이터를 수집할 수 있도록 준비하였다.



[그림 4-15] 외단열 실험 챔버



[그림 4-16] 소형 챔버 및 RAD7 셋팅 위치

그림 4-17과 같이 실물 벽체 크기의 시편 건조 상태 확인을 위해 충분히 건조한 뒤 표면 습도를 측정하였다. 실물 벽체 시편의 표면 습도는 약 12 % 내외로 실제 공동주택의 벽체 표면 습도와 유사한 값을 나타내었다. 또한 외단열 실험 챔버를 이용한 실험 셋팅 모습은 그림 4-31과 같다. 안정적인 환경에서의 측정을 위해 외단열 챔버 내 환경 조건을 온도 25 ℃, 상대습도 50 %로 설정, 측정 시간동안 변화가 없도록 유지하였다. 측정 시간은 시험별 최대 400시간까지 데이터 수집이 가능하도록 설정하였다.



[그림 4-17] 시편의 표면 습도 측정



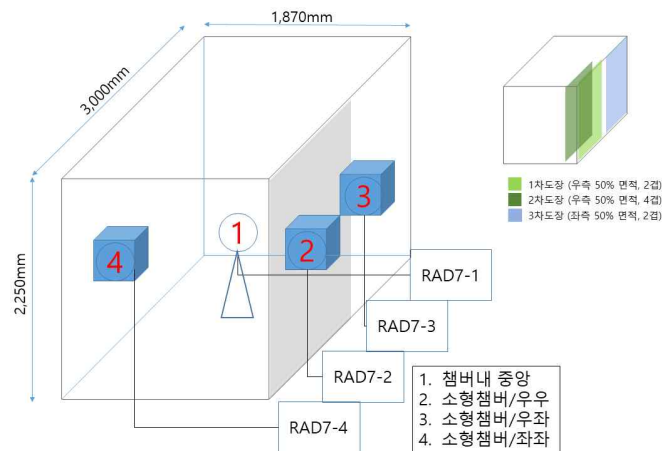
[그림 4-18] 외단열 실험 챔버를 이용한 실물 벽체 크기 시편 실험 준비



[그림 4-19] 실물 벽체 크기 시편에 부착한 소형 챔버 모습

## 2.2. 실물 벽체의 표면 라돈 방출 실험 결과

실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평가를 위해 총 4번의 실험을 수행하였다. 그림 4-20은 실물 벽체의 도장 순서를 개략적으로 표현한 것이다. 먼저 기준이 될 수 있는 도장 전, 실물 벽체 자체의 표면 라돈 방출 실험을 진행하였다. 그 다음 2차 실험은 실물 벽체의 1/2 면적을 방사성물질 저감 기능성 도료로 1차 도장(상도 및 하도 시공)한 뒤, 측정을 수행하였다. 3차 실험은 1차 도장한 면에 다시 한 번 상도 2회를 도장함으로써 도막의 두께를 증가시킨 뒤 표면 라돈 방출 및 외단열 실험 챔버 내 라돈 농도 측정하였다. 4차 실험은 실물 벽체 면적 중 도장이 칠해지지 않은 1/2 면적을 도료로 도장한 상태에서 실험을 수행하였다. 실물 벽체의 도장 면적 모습은 그림 4-34와 같다. 각 실험별 측정은 약 260시간 동안 진행하였다.



[그림 4-20] 실물 벽체의 도장 작업 순서



[그림 4-21] 실물 벽체 도장 후 실험 모습

각 실험별 측정 결과는 다음 표 4-17, 4-18과 같다. 표에서 의미하는 Test 1-2의 경우, 앞자리 숫자 1은 시험 차수를, 뒷자리 숫자 2는 소형 챔버 또는 외단열 실험 챔버 내 라돈 농도를 의미한다. 먼저 Test 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 등의 데이터를 이용하여 도료 도장을 하지 않은 실물 벽체의 표면 라돈 방출량을 비교해 보면 약 3.55 ~ 4.26 Bq/m<sup>2</sup>로 비교적 유사한 값을 가진다는 것을 볼 수 있다.

방사성물질 저감 기능성 도료를 도장한 상태의 실물 벽체 표면 라돈 방출량을 비교해 보면 도장 전, 평균 4.07 Bq/m<sup>2</sup>, 동일 면 기준 3.55 Bq/m<sup>2</sup>임에 반해 1차 도장을 한 경우에는 약 3.02 ~ 3.08 Bq/m<sup>2</sup>, 평균 3.05 Bq/m<sup>2</sup>이다. 이는 방사성물질 저감 기능성 도료의 도장으로 인해 도장 전 동일한 위치의 표면 라돈 방출량 대비 약 15 %의 라돈 저감 효과가, 실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평균값 대비 약 25 %의 라돈 저감 효과가 있는 것으로 추정할 수 있다.

또한 도료의 마감 두께 변화(2차 도장)에 따른 표면 라돈 방출량을 비교한 결과, 2차 도장을 한 경우, 평균 1.58 Bq/m<sup>2</sup>로 도장 전 값과 비교했을 때 현저히 낮음을 확인하였다. 이는 도장 전, 평균 4.07 Bq/m<sup>2</sup> 기준 약 61 %, 동일 면 3.55 Bq/m<sup>2</sup> 기준으로 약 55 %의 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 판단된다. 콘크리트 시편 실험에서의 도장 두께 증가에 따른 라돈 방출 저감 효과가 약 60 % 내외임을 감안하면 실물 벽체 크기에서도 도료의 라돈 저감 성능 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

[표 4-7] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 실험 결과(I)

구분	도장 전				1차 도장 후 (1차)				1차 도장 후 (2차)			
	test 1-1	test 1-2	test 1-3	test 1-4	test 2-1	test 2-2	test 2-3	test 2-4	test 3-1	test 3-2	test 3-3	test 3-4
챔버 내 농도	161	1568	1842	1878	212	1359	1812	1860	194	1334	1798	1836
표면 방출량	2.28	3.55	4.17	4.26	3.00	3.08	4.11	4.22	2.74	3.02	4.08	4.16

[표 4-8] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 실험 결과(II)

구분	도장 전				2차 도장 후 (1차)				2차 도장 후 (2차)				3차 도장
	test 1-1	test 1-2	test 1-3	test 1-4	test 4-1	test 4-2	test 4-3	test 4-4	test 5-1	test 5-2	test 5-3	test 5-4	test 6-1
챔버 내 농도	161	1568	1842	1878	150	698	1717	1737	137	698	1733	1828	88
표면 방출량	2.28	3.55	4.17	4.26	2.12	1.58	3.89	3.94	1.94	1.58	3.93	4.14	1.24

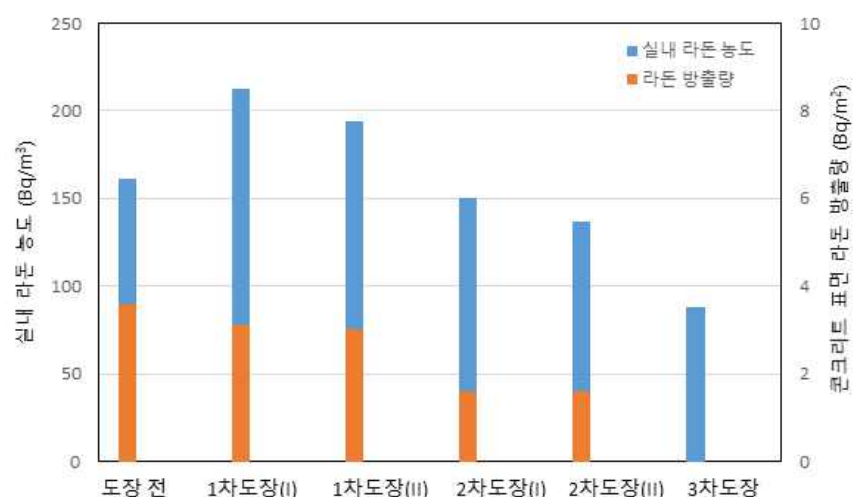


도료 도장에 따른 실물 벽체의 평균 표면 라돈 방출량 및 외단열 챔버 내 실내 라돈 농도 결과는 그림 4-22와 같다. 도료의 도장 면적 증가 또는 두께 증가에 따라 실물 벽체의 표면 라돈 방출량은 점점 감소하는 추세를 보인다. 이는 방사성물질 저감 기능성 도료의 사용이 실제 콘크리트의 라돈 방출을 억제하는 효과가 있음을 의미한다.

외단열 실험 챔버 내 실내 라돈 농도의 경우, 도장 후 측정값에 비해 도장 전 측정값이 다소 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실험 시, 측정값의 오류 또는 실험 시 측정 환경 변화 등에 기인한 것으로 판단된다. 도장 전, 실내 라돈 농도 측정값을 제외하면 도료의 도장 면적 증가 또는 도료의 도장 두께 증가에 따라 실내 라돈 농도 역시 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 실험 결과는 방사성물질 저감 기능성 도료를 공동주택 내 콘크리트 표면에 적용했을 때 표면 라돈 방출량 감소 효과뿐만 아니라 실내 라돈 농도 감소 효과를 기대할 수 있음을 의미한다.

다만 방사성물질 저감 기능성 도료를 공동주택에 적용했을 때, 실내 라돈 농도의 감소 효과를 정량적으로 산출하기 위해서는 도료 적용에 따른 표면 라돈 방출량 저감 수치, 도료 적용 면적, 적용 세대의 기밀 성능 수준 등의 데이터가 필수적이다. 왜냐하면 실내 라돈 농도는 건축 재료로부터 방출되는 라돈의 양, 방출된 라돈이 공기 중 존재하는 시간에 따른 반감기, 세대 내 기밀성능 수준 및 실내외 환경 변화에 따른 공기 유동 등의 복잡한 현상 해석을 거쳐 축적되기 때문이다. 그러므로 본 실험의 결과를 통해 단순히 표면 라돈 방출량 저감 수준이 실내 라돈 농도 저감 수준과 유사할 것이라고 판단할 수 없음을 밝힌다.

방사성물질 저감 기능성 도료를 공동주택 실내에 적용할 경우, 라돈 외의 오염물질 방출 문제를 간과할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 2차 도장이 완료된 상태에서 외단열 실험 챔버 내 TVOC 및 포름알데히드 농도를 측정하여 실내 적용 가능성을 검토하였다.



[그림 4-22] 실물 벽체의 도료 도장에 따른 측정 결과

2차 도장은 실물 벽체의 1/2 면적, 즉 6.75 m<sup>2</sup>의 면적을 총 4겹의 방사성물질 저감 기능성 도료로 마감한 상태를 의미한다. 도료 도장 후, 2주간 건조 기간을 거쳐 외단열 실험 챔버 내 TVOC 및 포름알데히드(HCHO) 농도를 측정하였다. 측정 결과, 실내 공기 중 TVOC 농도는 약 0.1mg/m<sup>3</sup>, 포름알데히드 농도는 약 0 µg/m<sup>3</sup> 로 두 오염물질 모두 WHO 권고기준 이하이다. 참고로 WHO 권고기준 TVOC 0.3 mg/m<sup>3</sup>, 포름알데히드 0.08 µg/m<sup>3</sup> 이하이며, 국내 실내공기질 관리법에 따른 신축 공동주택 권고기준은 그림 4-23과 같다.

신축 공동주택 실내공기질 권고기준		
1	포름알데하이드	210µg/m <sup>3</sup> 이하
2	벤젠	30µg/m <sup>3</sup> 이하
3	톨루엔	1,000µg/m <sup>3</sup> 이하
4	에틸벤젠	360µg/m <sup>3</sup> 이하
5	자일렌	700µg/m <sup>3</sup> 이하
6	스티렌	300µg/m <sup>3</sup> 이하
7	라돈	148Bq/m <sup>3</sup> 이하

[그림 4-23] 신축 공동주택 실내공기질 권고기준

## 제5장 결론

본 연구는 안전한 공동주택 실내 라돈 환경 구현을 위해 도료를 이용한 건축 재료의 사후 관리 기술 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 콘크리트 등 건축 재료에 방사성물질 저감 기능성 도료를 적용하여 건축 재료 표면에서 발생하는 라돈 방출량 저감 효과를 평가하였다. 먼저, 도료의 특성에 따른 라돈 저감 성능을 비교하기 위해 방사성물질 저감 도료 및 일반 도료를 대상으로 구성 성분 및 물리적, 화학적 특성을 분석하였다. 또한 실제 공동주택 건설에 이용하는 건축 재료 중 라돈의 주요 발생원으로 볼 수 있는 콘크리트를 이용하여 도료 적용에 따른 표면 라돈 방출량 저감 효과를 평가하였다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료의 성분 분석 결과, 일반 도료는 건조 후 균열이 발생, 쉽게 부서지는 반면에 방사성물질 저감 기능성 도료는 건조 후 치밀하고 탄성력이 높은 도막을 형성하는 것을 육안으로 구분이 가능하다. 이러한 마감 특성으로 인해 방사성물질 저감 기능성 도료를 적용할 경우, 콘크리트 표면에서 발생하는 라돈이 쉽게 방출되지 못하는 효과를 보일 수 있다.

각 도료별 구성 성분을 비교한 결과, 일반 도료에 비해 방사성물질 저감 기능성 도료는 수분 함량이 낮으며, 유기물(Resin) 함량이 높은 경향이 있는 것으로 나타났다. 특히 방사성물질 저감 기능성 도료의 유기물 함량을 고려하면 공동주택 실내 적용 시, 도료 자체의 TVOC 및 포름알데히드 관련 기준뿐만 아니라 공동주택의 실내 공기 중 TVOC 및 포름알데히드 기준에 대한 검토가 반드시 필요하다.

실체 현미경을 이용하여 방사성물질 저감 기능성 도료 및 일반 도료의 시공 후 표면을 분석한 결과, 일반 도료에 비해 방사성물질 저감 기능성 도료는 광택이 있으며 치밀한 표면을 가지는 것을 확인하였다. 전자현미경(SEM-EDS)을 이용하여 분석한 결과, 일반 도료는 콘크리트 시편에 스며드는 형태인 반면, 방사성물질 저감 기능성 도료는 박막을 형성하며 판으로 콘크리트 시편 표면을 덮는 형태로 나타났다.



도료의 라돈 저감 성능 평가를 위해 현장에서 사용 중인 재료로 콘크리트 시편(두께 5cm)을 제작, 밀폐형 구조 챔버를 활용하여 실험을 수행하였다. 측정 결과, 총 24개의 시편 중 17개의 시편에서 약 5~37 % 까지 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 방사성물질 저감 기능성 도료를 적용한 시편에서 평균적으로 20~34 % 정도 라돈 방출이 저감되는 효과를 보였다.

방사성물질 저감 기능성 도료 1종을 대상으로 6개의 콘크리트 시편을 제작, 결과의 재현성 확인하는 과정을 수행하였다. 시편별 약 19~40 %의 라돈 방출 저감 효과가 나타났으며, 라돈 저감 성능의 차이는 콘크리트 시편 표면에 발생하는 기공 발생에 의한 것으로 판단된다. 이는 방사성물질 저감 기능성 도료 적용 시, 일정 수준 이상의 시공 품질이 확보되어야 균일한 라돈 저감 성능을 보장할 수 있음을 의미한다.

방사성물질 저감 기능성 도료의 라돈 차폐 성능을 극대화하기 위해 도료의 마감 두께 변화에 따른 표면 라돈방출 실험을 수행하였다. 방사성물질 저감 기능성 도료 적용 시, 도장 전 표면 라돈 방출량 대비 1차 도장(총 2겹 마감) 시, 약 22~46 %에 반해 2차 도장(총 4겹 마감) 시, 약 58~62 %의 라돈 방출 저감 효과가 나타나는 것으로 확인하였다. 도료의 마감 두께에 따라 라돈 방출 저감 효과도 함께 증가하지만 도장 두께 증가 시, 실내 공기 중 TVOC 및 포름알데히드 농도 또한 함께 증가할 우려가 있으므로 추가적인 검토가 반드시 필요하다.

공동주택 부위별 실제 크기를 고려하여 실물 콘크리트 벽체(두께 20 cm)를 이용한 표면 라돈 방출량 측정 Mock-up 실험을 수행하였다. 방사성물질 저감 기능성 도료 도장 후 측정 결과와 비교했을 때, 도장 전 동일한 위치의 표면 라돈 방출량 대비 약 15 %, 실물 벽체의 표면 라돈 방출량 평균값 대비 약 25 %의 라돈 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 도료의 마감 두께 변화에 따른 표면 라돈 방출량을 비교한 결과, 2차 도장을 한 경우, 평균 1.58 Bq/m<sup>2</sup> 로 도장 전 평균값 기준 약 61 %, 동일 면 측정값 기준 약 55 %의 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

실물 벽체를 이용한 실험 결과에 따르면 방사성물질 저감 기능성 도료를 공동주택 내 콘크리트 표면에 적용했을 때 표면 라돈 방출량 감소 효과뿐만 아니라 실내 라돈 농도 감소 효과를 기대할 수 있다. 다만 실내 라돈 농도의 감소 효과를 정량적으로 산출하기 위해서는 도료 적용에 따른 표면 라돈 방출량 저감 수치, 도료 적용 면적, 적용 세대의 기밀 성

능 수준 등의 데이터가 필수적이다. 그러므로 단순히 표면 라돈 방출량 저감 수준이 실내 라돈 농도 저감 수준과 유사할 것이라고 판단하기 어렵다. 추가적으로 방사성물질 저감 기능성 도료를 공동주택 실내에 적용할 경우, 라돈 외의 오염물질 방출에 대한 검토가 반드시 필요하다.



## 참고문헌 Reference

- 국립암센터(2022). 발암 요인 보고서(라돈), 국립암센터
- 노열 외(2022). 방사성물질 저장 도료의 물성 분석과 특성 비교, 전남대학교
- LH 고객품질혁신단(2019). 건축자재 방사성물질 저장 가이드라인, 한국토지주택공사
- 이병희 외(2022). 건강주택 구현을 위한 건축 재료 라돈방출량 평가 및 실내 라돈 농도 관리방안 연구. LH 토지주택연구원
- 전주영 외(2020). 공동주택 오염물질 방출특성을 활용한 실내공기 평가 연구. LH 토지주택연구원
- 환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회(2019). 건축자재 라돈 저장 관리 지침서
- CDC(2023). How radon gets into your home (<https://www.cdc.gov/radon>)
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry(2023). Where is radon found? ([www.atsdr.cdc.gov](http://www.atsdr.cdc.gov))
- 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(2021.08.27 시행)
- 환경부(2022). 실내공기질 관리법(2022.12.08 시행)
- 에코타임스. 신축공동주택 61% 라돈 농도 기준 초과 기사 발췌(2019.09.26)
- 환경경제신문 그린포스트 코리아(2020). 계속되는 ‘라돈 포비아’, 라돈 막는 친환경 페인트 기사 발췌 (2020.01.10)
- \* 이미지 발췌
- <https://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/paints.html>
- <https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation>
- <https://www.cdc.gov/radon/radon-facts.html>
- <https://www.nationalradondefense.com/radon-information/what-is-radon.html>