

공동주택 실내 마감재의  
방사성물질 방출 저감성능 조사 및 비교평가

연구관리 2024-108호

## 공동주택 실내 마감재의 방사성물질 방출 저감성능 조사 및 비교평가

지은이 박정하, 양영권, 김선동, 장대성, 김찬누리  
발행인 정창무  
발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원  
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99  
홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

전화번호 044-902-9146  
이메일 [jhpark@lh.or.kr](mailto:jhpark@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.



# 공동주택 실내 마감재의 방사성물질 방출 저감성능 조사 및 비교평가

Assessment of radon gas diffusion performance  
of indoor finishing materials in apartments

박정하·양영권·김선동·장대성·김찬누리

**LH** 토지주택연구원

## 참여연구진

### 연구책임

박정하 LH 토지주택연구원 수석연구원

### 연구진

양영권 LH 토지주택연구원 책임연구원

김선동 LH 토지주택연구원 연구원

장대성 LH 서울지역본부 용산공원사업팀 차장

김찬누리 LH 스마트주택기술처 과장

### 연구심의위원

전주영 LH 토지주택연구원 건설기술연구실장(착수심의위원장)

박종배 LH 토지주택연구원 선임연구위원(최종심의위원장)

이정섭 국립환경과학원 연구관

정민희 경기대학교 교수

백승효 목원대학교 교수

엄영준 LH 대구경북지역본부 주택품질팀 팀장

김길태 LH 토지주택연구원 팀장

## ■ 실내 라돈관리의 필요성

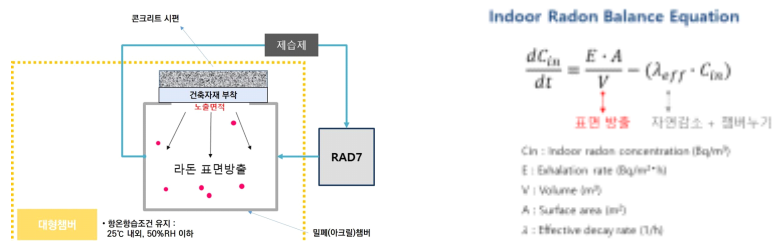
현대인은 하루 중 85% 이상 대부분의 시간을 실내에서 보내는데, 최근의 코로나 대유행 이후의 실내활동 증가와 제로에너지 정책 추진에 따른 기밀성능 강화로 실내공기오염물질에 대한 노출 위험이 높아져 건강한 실내환경 관리의 필요성이 대두되고 있음

- 특히, 1급 발암물질로 규정되고 있는 라돈의 경우 토양, 지하수와 같은 실외 발생원이 주요 요인으로 알려져 있으나 우리나라 공동주택에서는 골재, 시멘트 등 건축자재 등 실내 발생요인을 간과할 수 없으며, 환경부 등의 실태조사에서도 조사 대상세대의 60%가 권고 기준치를 초과하고 있는 것으로 나타남
- 본 연구는 안전한 실내 라돈환경 조성을 위해 벽지, 보드, 타일 등 현재 적용중인 다양한 실내 마감재가 콘크리트 등 실내 라돈발생원으로부터 실내 라돈유입을 차단할 수 있는 성능에 대한 평가를 수행하여 신축 및 기축 공동주택에서의 실내 라돈 농도 관리와 라돈 저감을 위한 마감재 적용방안을 제안하고자 함

## ■ 건축재료의 라돈 차단성능 평가를 위한 실험방법

건축재료 표면에서 발생하는 라돈 방출량을 측정하는 표준 시험방법은 아직 정립되어 있지 않으며, 본 연구에서는 외부 요인의 영향이 적고 효율적인 실험방법인 밀폐형 챔버를 이용

- RAD7을 이용하여 밀폐 챔버 내 포화상태에서의 라돈농도를 측정한 뒤, 라돈농도보존방정식을 이용하여 재료 표면에서의 라돈 방출량을 추정하고, 재료 적용 전·후의 표면 라돈 방출량을 비교하고자 함



[그림 1] 본 연구과제의 라돈 방출량 시편 실험 방법 개요

## ■ 방사성물질 방출 시험을 위한 실내 마감재 선정

LH 공사 표준 상세도, 공동주택 주력평면 인테리어 매뉴얼 등을 참고하여 18개의 실내마감재 Case를 선정

- 1차실험(Case 1~15) 및 2차실험(Case 16~18)으로 수행하였으며 각 4회 측정값 도출
- 폴, 접착제 시공에 따른 차이 확인이 필요한 Case\*의 경우 2회씩 나누어 접착시공 유무에 따라 측정

[표 1] 실내마감재 시편실험 Case 개요

Case	위치	마감재 구분		Cycle	시편 구성
1	벽	벽지	실크벽지1(초배 有)	1~4	초배+폴+실크벽지
2			실크벽지2(초배 無)	1~4	실크벽지
3		석고보드	THK 9.5	1~4	보드
4*			THK 9.5 + 실크벽지(초배 無)	1~2 3~4	보드+실크 보드+폴+실크
5			THK 9.5 + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
6*		콤비보드	CRC보드 + 실크벽지(초배 無)	1~2 3~4	보드+실크 보드+폴+실크
7*				1~2 3~4	타일 몰탈+타일
8		아트월	MDF(6T) + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
9*			MDF(6T) + 실크벽지(초배 無)	1~2 3~4	보드+벽지 보드+폴+벽지
10			MDF(9T) + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
11*			포세린타일(본드붙임)	1~2 3~4	보드+타일 보드+본드+타일
12*		단열 /보온재	비드법보온판(THK35) +석고보드(9.5T)+실크벽지	1~2 3~4	보온판+보드+벽지 보온판+보드+폴+벽지
13			비드법보온판(THK35) +석고보드(9.5T)+수성페인트	1~4	보온판+보드+도장
14*	바닥	마루 /바닥재	룸카펫(6.0T)  강화합판마루(접착)	1~1 3~4	룸카펫 접착제+룸카펫
15*				1~2 3~4	마루 접착제+마루
16	벽	콤비보드	CRC보드 + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
17		아트월	MDF(6T) + 인테리어 필름	1~4	보드+필름
18			MDF(9T) + 인테리어필름	1~4	보드+필름

## ■ 시편을 이용한 실내마감재의 라돈 방출 측정결과

시편을 이용한 실내마감재의 라돈 방출 측정 결과는 아래와 같이 나타남

- 벽체 : MDF+인테리어 필름, 세라믹 타일(87%) > 포세린 타일, 보온판+실크벽지(85%) > 벽지(78%) > 콤비보드(75%) 순
- 바닥재 : 림카펫과 강화마루(접착시공시)가 85~87% 수준으로 유사
- 수성페인트를 사용하는 경우 모든 Case에서 저감률이 감소하며 시공 초기에는 오히려 방출농도가 상승

[표 2] 실내마감재 라돈 방출 측정 결과

Case 번호	위 치	마감재 구분		저감률(%)			
				챔버라돈농도		표면 방출량	
				Cycle 1~2	Cycle 3~4	Cycle 1~2	Cycle 3~4
1	벽	벽지	실크벽지1(초배 有)	35.5	41.0	77.1	79.0
2			실크벽지2(초배 無)	35.6	44.0	77.1	80.1
3		석고 보드	THK 9.5	-16.8	4.9	58.5	66.2
4			THK 9.5 + 실크벽지(초배 無)	53.6	61.2	83.5	86.2
5			THK 9.5 + 수성페인트	-10.9	10.6	60.6	68.2
8		아트월	MDF(6T) + 수성페인트	-19.3	2.5	54.5	62.8
9			MDF(6T) + 실크벽지(초배 無)	37.6	43.1	77.8	79.8
10			MDF(9T) + 수성페인트	-16.8	-5.8	58.5	62.4
7		타일	세라믹(도기질 타일)	63.1	61.4	86.8	86.2
11			포세린타일(본드붙임)	59.5	52.8*	85.6	83.2
12		단열 보온재	비드법보온판(THK35)+석고보드(9.5T)+실크벽지	59.3	59.0*	85.5	85.4
13			비드법보온판(THK35)+석고보드(9.5T)+수성페인트	12.5	44.3	68.9	80.2
6		콤비 보드	CRC보드 + 실크벽지(초배 無)	28.9	30.8	74.8	75.4
16			CRC보드 + 수성페인트	-0.2	-16.2	61.4	58.7
17		아트월	MDF(6T) + 인테리어필름	68.5	57.0	88.8	84.8
18			MDF(9T) + 인테리어필름	59.9	63.6	85.7	86.8
14	바 닥	마루 바닥재	림카펫(6.0T)	63.7	71.5*	87.1	89.9
15			강화합판마루(접착)	20.6	63.2*	71.8	86.9

## ■ 실내 마감재를 이용한 라돈 저감방안 평가

현재 시공 수준에서 벽체에서의 라돈 방출 저감을 위해서는 가장 저감률이 낮은 실크벽지를 대체 자재로 적용하는 것이 현실적인 방안으로, 본 연구에서는 가장 저감률이 높은 자재인 아트월 (MDF + 인테리어 필름)으로 대체하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단됨

- 26Type에서의 대체자재 적용에 따른 예측결과, 실내마감재료부터 라돈 표면 방출에 의한 실내 라돈량은 약 17.7% 저감되는 것으로 나타났으며, 이는 96시간 이후 24시간 동안의 정상상태 가정시 표면 라돈 방출량에서 산출한 것으로 실제 공동주택에서의 공정시험법에 의한 실내 라돈농도와는 차이가 있을 수 있음

## ■ 본 연구에서의 한계점 및 향후 연구수행의 필요성

본 연구과제에서 대체 자재 적용에 의한 실내라돈량 저감은 단순히 라돈량의 저감만을 계산한 것으로 실제 공동주택에서의 저감은 건물의 기밀도, 온습도, 차압 등의 요소와 측정법 차이로 정확한 예측에 한계가 있음

- 향후 다수의 공동주택에서 장기간에 걸친 실증을 통해 저감에 의한 효과 확인 및 저감시공 예측법의 개발, 그리고 본 연구과제에서 대상으로 하지 않은 자재를 대상으로 라돈 저감을 위한 대체자재 적용에 따른 저감효과 확인, 라돈 저감 자재 적용을 위한 시공방법의 개발이 필요

### 주제어

방사성물질, 실내 마감재, 라돈 방출량, 밀폐형 챔버 실험

---

# 차례 Contents

## 제1장 서론

1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 선행연구 고찰	4
3. 연구 범위 및 내용	6

## 제2장 공동주택 실내 마감재 현황 조사

1. 공동주택의 실내 마감재 현황	7
2. 공동주택의 실내 마감재 조사결과	9

## 제3장 실내 마감재의 방사성물질 방출 시편 실험

1. 실내 마감재의 방사성물질 방출 측정방법 선정	16
2. 실내 마감재의 방사성물질 방출 시편 실험	24

## 제4장 방사성물질 저감을 위한 실내 마감재 적용 방안 고찰

1. 대체자재 적용 가능면적 검토	48
2. 26Type 대상의 실내 마감재 대체 효과 검토 및 고찰	50

## 제5장 결론

결론	53
----	----

## 참고문헌

참고문헌	55
------	----

## 표 차례 List of Tables

[표 1-1] 공동주택 라돈 저감관련 선행연구 주요내용(LHRI)	4
[표 2-1] 공동주택의 마감재 계획 (LH 인테리어 매뉴얼)	8
[표 2-2] 주택 도배지 마감재의 특징 및 장·단점	9
[표 2-3] 주택 타일 마감재의 특징 및 장·단점	10
[표 2-4] 주택 단열재의 특징 및 장·단점	11
[표 2-5] 주택 마감재용 목재의 특징 및 장·단점	12
[표 2-6] 주택 도장 마감재의 특징 및 장·단점	13
[표 2-7] 주택 바닥 마감재의 특징 및 장·단점	14
[표 2-8] 주택 천장 마감재의 특징 및 장·단점	15
[표 3-1] 건축자재 라돈 관리를 위한 평가방법 비교	17
[표 3-2] 실내 마감재 방사성물질 방출 시편실험 Case 개요	24
[표 3-3] 시편 및 레이어 구성 (Case1~6)	25
[표 3-4] 시편 및 레이어 구성 (Case7~11)	26
[표 3-5] 시편 및 레이어 구성 (Case12~15)	27
[표 3-6] 시편 및 레이어 구성 (Case16~18)	28
[표 3-7] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 1)	31
[표 3-8] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 2)	32
[표 3-9] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 3)	33
[표 3-10] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 4)	34
[표 3-11] Case 16~18 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 1,2)	35
[표 3-12] 실크벽지(Case_01, Case_02) 측정 결과 비교	37
[표 3-13] 석고보드(Case_03, Case_04, Case_05) 측정 결과 비교	38
[표 3-14] 아트월 1(Case_08, Case_09, Case_10) 측정 결과 비교	39
[표 3-15] 아트월 2(Case_17, Case_18) 측정 결과 비교	40
[표 3-16] 타일(Case_07, Case_11) 측정 결과 비교	41



[표 3-17] 단열재(Case_12, Case_13) 측정 결과 비교	42
[표 3-18] 콤비보드(Case_06, Case_16) 측정 결과 비교	43
[표 3-19] 바닥재(Case_14, Case_15) 측정 결과 비교	44
[표 3-20] 실내 마감재 라돈 방출 측정 결과 종합	45
[표 4-1] 단위세대별 실내 체적 대비 벽지적용면적 비교	48
[표 4-2] 대체 실내마감재 적용 전 구조체 표면 라돈 방출에 의한 세대 전체 라돈량 계산	51
[표 4-3] 대체 실내마감재 적용 후 구조체 표면 라돈 방출에 의한 세대 전체 라돈량 계산	51

---

## 그림 차례 List of Figures

[그림 3-1] 라돈 발생원에서의 방사·수송·방출	16
[그림 3-2] 밀폐 챔버를 이용한 시편 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 방법	18
[그림 3-3] 라돈 농도 누적 그래프	18
[그림 3-4] 본 연구과제의 라돈 방출량 시편 실험 방법 개요	21
[그림 3-5] 항온항습 조건에서의 시편 보관	21
[그림 3-6] 밀폐형 챔버 위 콘크리트 시편 설치 모습	21
[그림 3-7] 콘크리트 시편 라돈방출량(1차_120시간)	22
[그림 3-8] 콘크리트 시편 라돈방출량(2차_212시간)	22
[그림 3-9] 콘크리트 시편 측정결과 평균값(포화농도구간 설정)	23
[그림 3-10] 시편실험을 위한 마감재 준비	28
[그림 3-11] 시편의 도배 시공 준비	29
[그림 3-12] 시편의 도배 시공 후	29
[그림 3-13] 세라믹 타일 몰탈 시공 준비	30
[그림 3-14] 세라믹 타일 몰탈 시공 후	30
[그림 3-15] 포세린 타일 본드 시공 준비	30
[그림 3-16] 포세린 타일 본드 시공 후	30
[그림 3-17] 강화마루 본드 시공 준비	30
[그림 3-18] 강화마루 본드 시공 후	30
[그림 3-19] 립카펫 본드 시공 준비	30
[그림 3-20] 립카펫 본드 시공 후	30
[그림 3-21] Case 1~15 밀폐챔버 라돈방출농도 그래프(Cycle 1)	31
[그림 3-22] Case 1~15 밀폐챔버 라돈방출농도 그래프(Cycle 2)	32
[그림 3-23] Case 1~15 밀폐챔버 라돈방출농도 그래프(Cycle 3)	33
[그림 3-24] Case 1~15 밀폐챔버 라돈방출농도 그래프(Cycle 4)	34
[그림 3-25] Case 16~18 밀폐챔버 라돈방출농도 그래프(Cycle 1,2)	35

[그림 3-26] 챔버 기밀도 측정 장면	36
[그림 3-27] 실크벽지(Case_01, Case_02) 측정 결과 비교	37
[그림 3-28] 석고보드(Case_03, Case_04, Case_05) 측정 결과 비교	38
[그림 3-29] 아트월 1(Case_08, Case_09, Case_10) 측정 결과 비교	39
[그림 3-30] 아트월 2(Case_17, Case_18) 측정 결과 비교	40
[그림 3-31] 타일(Case_07, Case_11) 측정 결과 비교	41
[그림 3-32] 단열재(Case_12, Case_13) 측정 결과 비교	42
[그림 3-33] 콤비보드(Case_06, Case_16) 측정 결과 비교	43
[그림 3-34] 바닥재(Case_14, Case_15) 측정 결과 비교	44
[그림 4-1] 벽지적용부위(26Type)	49
[그림4-2] 벽지적용부위(55Type)	49
[그림 4-3] 벽지적용부위(74Type)	49
[그림 4-4] 실내 라돈 발생원	50

# 제1장 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

### 1.1. 라돈의 위험성<sup>1)</sup>

라돈(Radon)은 지구에서 우라늄 붕괴로 형성되는 자연 발생가스 형태의 방사성물질로서, 무색무취의 기체로 호흡을 통해 기관지나 폐포에 머무르면 세포 중 염색체 돌연변이를 일으켜 폐암을 유발할 수 있어 IARC(국제암연구소)의 발암물질 분류에서는 사람에게 발암성이 확인된 물질로 분류(Group 1)하고 있다.

라돈은 대부분(약 85%) 자연적으로 발생하고 있으며 암석, 토양 등의 우라늄( $^{238}\text{U}$ )과 토륨( $^{232}\text{Th}$ )이 방사능 붕괴를 할 때 라듐( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ )이 만들어지고 라듐이 붕괴하여 라돈( $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ )이 만들어진다. 이중 우리가 일반적으로 ‘라돈’이라고 부르는 물질은  $^{222}\text{Rn}$ 으로, 반감기가 55.6초로 짧은  $^{220}\text{Rn}$ (‘토론’)과는 구분하고 있다.

건물에서의 라돈은 토양과 인접한 저층형인 단독주택이나 바닥과 벽 등에 균열이 많은 오래된 건축물, 그리고 밀폐도가 높고 환기시설이 부족해 유입된 라돈이 잘 빠져나가지 않는 실내에서 농도가 높다. 우리나라의 대표적 주거유형은 공동주택으로서 토양과 직접 닿아있지 않은 고층 형태로 지어지는데, 이러한 공동주택 상층부에서도 높은 실내 라돈농도가 보고되고 있으며 이는 콘크리트, 골재 및 석재를 주로 사용하는 건축자재의 방출이 원인으로 지목되고 있다. 더욱이 콘크리트는 공동주택의 주요 재료인데다 탄소중립 국가 로드맵 이행에 따른 제로에너지 의무화로 공동주택의 밀폐도가 높아지고 있으며, 2019년 이후의 전세계적인 코로나 유행이후 실내에서의 활동시간이 증가하면서 실내공기 오염물질에 노출이 더욱 증가함에 따라, 우리나라 공동주택에서 실내 라돈관리의 중요성은 나날이 증대되고 있는 상황이다.

---

1) 국립암센터(2022), 「발암요인보고서(라돈)」

## 1.2. 공동주택 건축자재를 통한 라돈 관리 방안의 필요성

국내외에서는 재실자의 건강에 위대한 물질인 라돈의 관리를 위해 라돈 노출에 대한 권고/규제기준을 제시하고 있다. 세계보건기구(WHO)에서는 건물내 권고되는 라돈 시정조치 기준으로서 연평균  $100 \text{ Bq/m}^3$  ( $2.7 \text{ pCi/L}$ )을 제시하고 있으며, 미국 환경청(EPA)에서는 즉각적인 조치가 권장되는 실내 라돈농도로  $4 \text{ pCi/L}$  ( $148 \text{ Bq/m}^3$ )의 기준을, 유럽 등 주요 선진국에서는  $100 \sim 500 \text{ Bq/m}^3$  사이의 기준을 제시하고 있다. 한편, 우리나라의 경우 환경부에서 「실내공기질 관리법」 제6조에서 다중이용시설 및 공동주택의 라돈기준 권고치를 규정하고 있으며 동법 시행규칙 별표4의 2 개정(2018.10.18.)에 따라 신축공동주택은 실내라돈농도  $148 \text{ Bq/m}^3$  이하가 되도록 관리하여야 한다.

국내 신축공동주택을 대상으로 실내 라돈농도 실태를 조사한 결과를 살펴보면, 환경부(19~20)에서 60세대의 공동주택 대상으로 조사한 결과에서는 60%이상인 37세대에서 권고기준을 초과하고 있었고 밀폐시에는 권고기준의 4배인 533.5 까지도 검출될 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 국회와 환경부가 '21년 2,531가구, 과 '22년 1,925가구를 대상으로 실시한 조사에서는 각각 15.7%(399가구), 7.5%(145가구)가 기준치를 초과했고 환기가 잘 이루어지지 않는 겨울철 1,957세대 대상의 조사에서 3.5%세대가 기준치를 초과하였는데, 기준치 초과세대의 대부분인 82%는  $200 \text{ Bq/m}^3$ 를 나타내고 있었다.

실내라돈을 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 라돈을 방출하는 건축자재 자체의 사용을 줄이거나 대체자재를 사용하여야 한다. 즉, 공동주택의 실내 라돈농도의 기준치 이하로 관리하기 위해서는 방사성물질을 함유한 건축자재의 제어를 통한 근본적인 방안이 필요하다. 이와 관련하여 2019년 정부에서는 국토부와 환경부, 원자력안전위원회 등 유관부처 합동으로 방사능 농도 지수(I)를 적용한 천연석재 기반의 라돈 관리 지침<sup>2)</sup>을 발표하였고 LH에서도 실내 라돈 저감을 위한 자재 관리 기준을 수립하였으나 이를 통한 실내 라돈농도 제어에는 한계가 있다. 게다가 라돈을 방출하는 대표적인 건축자재인 콘크리트는 단기간 내에 사용을 줄이거나 대체하는 방안을 적용하기에는 우리나라 공동주택의 시공 형편상 현실적으로 단기간에 불가능하며, 콘크리트 등에서부터 방출된 방사성물질이 최대한 실내로 유입되지 않도록

---

2) 환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회(2019), 「건축자재 라돈 저감관리 지침서」

록 하는 건축자재를 통한 라돈 저감방안이 대안으로 고려될 수 있다.

LH 토지주택연구원(이하 LHRI)에서는 선행연구 수행을 통해 공동주택 실내의 주 라돈 방출원인 도료, 필름형 재료의 적용으로 콘크리트 표면 라돈방출량의 저감과 실내라돈농도의 저감효과를 분석하고자 하였으며 가스투과율이 낮은 재료들을 대상으로 표면 라돈방출량의 저감 효과를 확인하였다. 다만 이는 시공후 고농도 세대나 민원발생시 사후 대응방안으로서 적합한 방안이며, 사전 대응 방안으로서 활용하기 위해서는 현재 실내에 적용하고 있는 다양한 실내 마감재들의 재료와 여러 레이어로 구성되는 실제 시공에 따라 콘크리트로부터 표면 라돈 방출량의 저감 성능을 확인하고, 시공시 라돈저감성능이 우수한 마감재를 선택하여, 취약한 부위를 예측한 결과를 바탕으로 신속한 현장대응이 가능할 수 있어야 한다.

따라서 본 연구에서는, 공동주택의 안전한 실내 라돈환경 조성을 목적으로 수행되었으며 벽지, 단열재, 타일 등 공동주택 실내 마감재의 방사성물질 저감성능을 확인하기 위한 실내 마감재 전·후의 표면 라돈 방출량 측정 및 비교 분석을 통해 설계 및 시공 단계에서 실내 라돈농도 관리를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 선행연구 고찰

LH에서는 국민이 안심할 수 있는 건강한 실내환경을 조성하고, 주택품질을 혁신하고자 2019년 공동주택 라돈 관리시스템을 구축하고, 환기를 이용한 실내 라돈 관리 방안과 건축자재 중심의 관리방안 중심의 2-Track 연구수행 로드맵 수립에 따라 공동주택 라돈 관리와 관련한 연구를 수행해왔다. [표 1-1]은 2020년 이후 LHRI에서 수행한 관련 선행연구의 주요 내용을 정리한 것이다.

[표 1-1] 공동주택 라돈 저감관련 선행연구 주요내용(LHRI)

과제명(연도)	주요 내용
공동주택 오염물질 방출 특성을 활용한 실내공기평가 연구 (전주영 외, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공동주택 실내 라돈환경 평가 및 관리를 위해 건축자재 라돈 방출 및 실외에서 유입되는 라돈의 매커니즘을 이해하고 실내라돈농도 추정을 위한 수치해석 모델을 제안</li> <li>- 시뮬레이션에 기반한 실내 라돈농도 추정을 위해 세대 내부 및 공용공간에 라돈 가스의 유출입을 모사</li> <li>- 자연 침기 상태에서 대상 세대의 공간별 실내 라돈 농도 기여율을 분석결과, 내력벽 &gt; 비내력벽 및 천장 &gt; 바닥 순으로 나타났으며, 내력벽 비율 50% 저감시 실내 라돈농도는 5%에서 최대 35% 저감까지 가능할 것으로 추정</li> </ul>
방사성물질 방출 저감자재 적용방안 연구 (전주영 외, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 사전 자재관리만으로는 라돈 농도 제어에 한계가 있음을 착안하여 사후 관리를 목적으로 라돈 저감이 가능한 도포제, 차폐재 등을 적용하여 라돈 농도 감소효과를 분석</li> <li>- 시편에 도료를 도포하여 48시간 이상 경과한 시편의 표면 라돈 방출량 비교 결과, 총 15종의 도료 중 5종에서 약 12~38%의 실내 라돈 저감 효과</li> <li>- 라돈 저감 효과가 있는 도료는 공통적으로 도막의 탄성력이 우수해 크랙 저항성이 높으며, 부착성이 뛰어나 기체 투과율이 낮아 라돈 투과에 대한 저항성을 높인 것으로 추정</li> </ul>
건강주택 구현을 위한 건축자재 라돈방출량 평가 및 실내 라돈농도 관리방안 연구 (이병희 외, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 정부의 강화된 라돈 정책 대응 및 공동주택 라돈환경 관리를 위해 단일 건축자재 평가를 통한 실내 라돈 농도 저감을 목적으로 단일 건축자재의 방사능 농도 지수(I) 및 라돈 방출량 측정을 통해 두 인자 간의 상관관계를 도출</li> <li>- 실제 건설 중인 5개 단지의 현장별 건축자재를 수집하여 시편을 제작하고, 표준 측정법 및 비파괴 측정법을 이용하여 건축자재(콘크리트)의 방사성물질 농도를 측정</li> <li>- 건축자재 표면 라돈 방출량 기반 실내 라돈 농도를 추정하였으며 별도의 환기가 일어나지 않는 침기 상태를 가정하는 경우 내력벽 &gt; 비내력벽 및 천장 &gt; 바닥 순으로 실내 라돈 농도 기여율이 높음</li> </ul>
측정데이터 기반 공동주택 실내 라돈 발생원 분석 (이병희 외, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 직접적인 실내 라돈 관리를 위해 실내 표면에서 방출되는 라돈의 양을 고려하여 실내 라돈 농도의 기여도를 분석</li> <li>- 공동주택 부위별 실내 라돈 기여도 분석 결과, 26~44㎡ 중간 세대 기준으로 단 열재가 부착되지 않은 내력벽 &gt; 천장, 단열재가 부착된 내력벽, 바닥면, 욕실벽 등의 순으로 기여율이 높음</li> <li>- 주요 실내 라돈 발생 부위인 내력벽의 면적을 줄이거나 차폐 효과가 있는 재료를 추가 시공하는 등 표면 라돈 방출량을 저감</li> </ul>

<p>방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구 (이병희 외, 2023)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공동주택의 라돈 발생의 주 원인인 콘크리트 벽식구조에서 라돈 저감이 가능한 도포제, 차폐재 등을 적용하여 라돈 농도 감소효과를 분석</li> <li>- 실내에 직접 적용이 가능한 라돈 차단 도료재를 대상으로 동일 조건 하에 밀폐 챔버를 이용하여 라돈 저감 성능평가를 수행</li> <li>- 일부 도료에서 도막의 탄성력이 우수해 기체 투과율이 낮아짐으로써 적용 전후 1차 도장시 약 15~25%. 2차 도장 후에는 약 60% 수준의 표면 라돈 방출량 저감 효과를 확인</li> </ul>
<p>공동주택 방사성물질 저감을 위한 필름형 재료 적용방안 평가 (박정하 외, 2024)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공동주택 콘크리트에서의 실내 라돈 유입을 억제하기 위해서는 기밀성능 향상 등을 위해 국내·외에서 유통 또는 개발한 건축 재료 중 필름 형태의 재료를 대상으로 라돈 저감성능을 평가</li> <li>- 벽지 부착 후(3단계) 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도의 저감률은 PE필름 64%, 단열 필름 43%, 기밀필름 24% 로 나타났으며 방수필름은 1% 증가</li> <li>- 라돈농도 저감을 위해 실내 전체 표면적 대비 25%의 면적에 해당하는 좌우 측벽 19㎡에 필름형 재료인 PE필름을 시공한 경우, 시공된 위치에서의 표면 라돈 방출량 저감은 84%이며 실제 세대 내 실내 공기 중 라돈 농도는 25~27% 저감이 가능</li> </ul>



### 3. 연구 범위 및 내용

본 연구는 공동주택에서의 실내 라돈 농도 저감을 위해 벽지, 타일 등 실내 마감재의 방사성물질 저감성능을 평가하기 위해 콘크리트 시편 실험을 통해 실내 마감재 적용 전후의 라돈 표면 방출량을 비교하였다. 본 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- 공동주택 실내 마감재 적용현황 조사
  - 벽지, 타일 등 현재 LH 공동주택에 적용중인 실내 마감재 현황 조사
- 시편을 이용한 실내 마감재의 방사성물질(라돈) 방출 측정
  - 실내 마감재 라돈 저감성능 평가를 위한 시험 방법 선정
  - 시편 제작 및 실험 Case 선정
  - 밀폐형 챔버 및 RAD7을 이용한 표면 라돈 방출 실험 수행
- 방사성물질 저감을 위한 실내마감재 적용방안 제안
  - 실내마감재 적용(대체)에 따른 실내라돈농도 저감 평가

## 제2장 공동주택 실내 마감재 현황 조사

### 1. 공동주택의 실내 마감재 현황

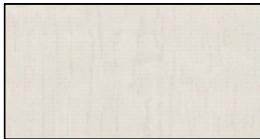

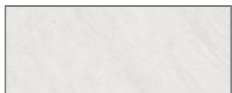
건축물의 실내마감재는 실내 공간을 구성하면서 재실자에게 환경적·심미적으로 쾌적한 주거환경을 제공하는 역할을 한다. 건축물의 실내마감재와 관련한 법적 정의는 명확하지 않다. 우선 「건축법」 제52조 제1항 및 「건축물의 피난·방화규칙 제24조 제4항」에서는 “내부의 천장·반자·벽(경계벽 포함)·기둥 등에 부착되는 마감재료”를 ‘건축물의 내부 마감재료’로 정의하고 있으나, 종이, 합판, 흡음·방음재 등의 실내장식물<sup>3)</sup>은 제외하고 있다. 한편, 「실내공기질 관리법」 제11조에서는 접착제, 페인트, 실란트, 퍼티, 벽지, 바닥재 및 표면가공 목질 판상재 등을 실내공기 오염물질 방출 기준치를 초과하지 않도록 다중이용시설 및 공동주택에서의 사용을 제한하고 있다.

공동주택에서는 실제로 위 법령들에서 정의 또는 대상으로 하는 자재들을 포함하여 수많은 종류의 자재들이 실내 마감재로 사용되고 있다. 실내 마감재의 분류는 공종/재료에 따라 가능하나 실제 현장에서는 동일 재료라 할지라도 바닥/벽체/천정/걸레받이 등 부위에 따라 복합적이고 다양하게 구성하여 적용된다. 따라서 본 연구에서는 LH 공사의 표준상세도, 공동주택 주력평면 인테리어 매뉴얼 등을 참고하여 다음과 같이 실내 마감재를 분류하였다.

마감재는 크게 5가지로 분류<sup>4)</sup>할 수 있으며, 마루, 인테리어시트, 타일(아트월, 욕실, 현관), 도기질(주방, 욕실), PET(Polyethylene terephthalate)로 구분 가능하다. 평면 타입별로 마감재 적용 항목이 상이하지만 일반적으로 [표 2-1]과 같이 구분하여 마감재를 계획한다.

- 
- 3) 1. 종이류(두께 2밀리미터 이상인 것을 말한다)·합성수지류 또는 섬유류를 주원료로 한 물품  
2. 합판이나 목재  
3. 공간을 구획하기 위하여 설치하는 간이 칸막이(접이식 등 이동 가능한 벽체나 천장 또는 반자가 실내에 접하는 부분까지 구획하지 아니하는 벽체를 말한다)  
4. 흡음(吸音)이나 방음(放音)을 위하여 설치하는 흡음재(흡음용 커튼을 포함한다) 또는 방음재(방음용 커튼을 포함한다)
- 4) 한국토지주택공사(2023), LH뉴·홈주택 주력평면 인테리어 매뉴얼

[표 2-1] 공동주택의 마감재 계획 (LH 인테리어 매뉴얼)

공 간	세부 항목			
마루 및 인테리어시트				
	마루 (강화합판마루)		메인시트 (도어, 걸레받이)	
거 실				
	아트월 (포셀린 타일)			
주 방				
	벽, 상판 (도기질 타일)		벽, 상판 (엔지니어드 스톤)	
벽 지				
	실크벽지 (공간 별 상이)			
욕 실				
	도기질		자기질	엔지니어드스톤
현 관				
	포셀린타일		엔지니어드스톤	
가 구				
	PET		하프 미러	

## 2. 공동주택의 실내 마감재 조사결과

### 2.1. 벽체 마감재

일반적으로 주택의 벽체는 내력벽과 비내력벽으로 구분할 수 있으며, LH에서 일반적으로 시공되는 단면 상세를 조사하였다. 내력벽의 표준 유형은 콘크리트를 기준으로 벽체 위치에 따라 필요시 적정한 단열재(비드법 보온판) 부착 후 석고보드 및 실크 도배지(초배지 포함)로 마감한다. 단열재가 부착이 필요하지 않은 내력벽의 경우에는 콘크리트 면 위에 바로 실크 도배지(초배지 포함)로 마감한다. 주택내의 비내력벽은 조적식 구조로, 콘크리트 벽돌 위 타일 마감으로 구성된다.

#### 1) 도배지

일반적으로 공동주택에 적용하는 마감 도배지는 합지 도배지와 실크 도배지로 구분할 수 있으며, 주로 실크 도배지가 사용된다. 세부적으로는 기능에 따라서 친환경 도배지, 엠보싱 도배지, 방염 도배지로 구분 가능하다. 각 도배지의 특성은 [표 2-2]와 같다.

[표 2-2] 주택 도배지 마감재의 특징 및 장·단점

종 류		세부 항목	
합지 도배지	특징	종이와 비닐이 결합 된 벽지로, 가장 기본적이고 경제적인 벽지	
	장점	가격이 저렴하여 경제적이며, 상대적으로 가벼워서 시공이 간단함	
	단점	내구성이 낮아 습기나 외부 충격에 약하고, 오염 제거 어려움	
실크 도배지	특징	PVC(폴리염화비닐) 소재가 표면에 코팅된 고급 벽지	
	장점	내구성이 높고 오염에 강하며 청소가 용이함 방염 기능이 있는 제품도 많아 안전성 향상	
	단점	가격이 비교적 비쌘 습기에 약할 수 있어 환기가 중요한 공간에 적합하지 않을 수 있음	
실크도배지	친환경도배지	특징	천연 소재(종이, 황토, 대나무 등)를 사용한 벽지이며, 실내 공기질 개선 효과가 있음
		장점	친환경적이며 유해 물질 방출이 적고, 습도 조절 및 탈취 효과가 있음
		단점	고가이며, 관리가 어려움
	엠보싱도배지	특징	표면에 엠보싱 처리가 되어 있어 입체적인 질감 제공
		장점	고급스러운 질감 표현이 가능하며, 흠집과 오염이 잘 보이지 않음
		단점	상대적으로 고가이며, 두꺼운 소재로 인해 시공이 어려울 수 있음
	방염도배지	특징	불에 잘 타지 않는 방염 처리된 벽지
		장점	화재 위험에 대한 안전성을 높일 수 있음
		단점	상대적으로 고가임

## 2) 타일

타일은 주택의 공간과 용도에 따라서 특성을 고려하여 선정할 수 있으며, 욕실이나 주방은 방수성과 내구성이 높은 타일(자기질, 유리 타일)을 선택한다. 거실이나 안방 등 생활공간에서는 디자인과 분위기를 고려하여 대리석이나 테라조 타일을 적용할 수 있다. 세라믹 타일은 상대적으로 경제적이다. 타일은 크게 8종으로 구분할 수 있으며, 각 타일별 특징은 [표 2-3]과 같다.

[표 2-3] 주택 타일 마감재의 특징 및 장·단점

종 류	세부 항목	
세라믹 타일 (Ceramic Tile)	특징	점토를 고온에서 구워 만든 타일로 표면에 유약을 발라 마감 처리
	장점	경제적이며, 가볍고 시공이 쉬움. 습기에 강하며 유지관리가 용이하기 때문에 욕실, 주방 등 물 사용이 많은 공간에 적합함
	단점	내구성이 낮아 깨지기 쉬우며, 고급스러운 질감 표현이 어려움
자기질 타일 (Porcelain Tile)	특징	고온에서 굽고 더욱 단단하게 만든 세라믹 타일의 한 종류 밀도가 높고 흡수율이 낮아 내구성이 뛰어남
	장점	강도가 높고, 얼룩이나 오염에 강하며, 고급스러운 질감
	단점	상대적으로 고가이며, 세라믹 타일보다 무거워서 시공성이 떨어짐
대리석 타일 (Marble Tile)	특징	천연 대리석을 얇게 가공한 타일
	장점	내구성이 뛰어나며, 고급스러움
	단점	경제성이 떨어지며, 흠집이나 오염에 민감하여 유지 관리 어려움
테라조 타일 (Terrazzo Tile)	특징	대리석, 석영, 화강암 등을 혼합해 만든 타일
	장점	내구성이 높고, 유지 관리 용이함 다양한 색상과 질감 선택 가능
	단점	경제성이 떨어지며, 시공 시 전문성이 요구됨 습기에 취약하여 표면 처리 필요
돌 타일 (Natural Stone Tile)	특징	화강암, 슬레이트 등 천연 돌을 가공한 타일
	장점	고급스러우며, 내구성이 뛰어남
	단점	경제성이 떨어지며, 흠집이나 오염에 민감하여 정기적인 관리(코팅, 방수 처리) 필요.
코토 타일 (Terracotta Tile)	특징	점토를 저온에서 구워 만든 타일
	장점	흡수성이 뛰어나 습도 조절 효과 있음
	단점	내구성이 낮아 스크래치와 균열에 취약하며, 흡수성이 높아 얼룩과 오염에 약함

### 3) 단열재

주택에 적용되는 단열재는 에너지 효율과 쾌적함에 큰 영향을 미치므로, 우수한 성능의 단열재를 적용하여야 하며 동시에 경제성과 화재 안정성도 고려해야 한다. 일반적으로 경제적인 단열재는 EPS이며, 화재 안정성을 고려한 글라스울과 미네랄울이 있다. 단열재의 특성을 [표 2-4]에 정리하였다.

[표 2-4] 주택 단열재의 특징 및 장·단점

종 류	세부 항목	
비드법 보온판 (EPS, Expanded Polystyrene)	특징	점토를 고온에서 구워 만든 타일로 표면에 유약을 발라 마감 처리
	장점	경제적이며, 가볍고 시공이 쉬움. 습기에 강하며 유지관리가 용이하기 때문에 욕실, 주방 등 물 사용이 많은 공간에 적합함
	단점	내구성이 낮아 깨지기 쉬우며, 고급스러운 질감 표현이 어려움
압출법 보온판 (XPS, Extruded Polystyrene)	특징	고온에서 굽고 더욱 단단하게 만든 세라믹 타일의 한 종류 밀도가 높고 흡수율이 낮아 내구성이 뛰어남
	장점	강도가 높고, 얼룩이나 오염에 강하며, 고급스러운 질감
	단점	상대적으로 고가이며, 세라믹 타일보다 무거워서 시공성이 떨어짐
우레탄폼 (Polyurethane Foam)	특징	천연 대리석을 얇게 가공한 타일
	장점	내구성이 뛰어나며, 고급스러움
	단점	경제성이 떨어지며, 흠집이나 오염에 민감하여 유지 관리 어려움
테라조 타일 (Terrazzo Tile)	특징	대리석, 석영, 화강암 등을 혼합해 만든 타일
	장점	내구성이 높고, 유지 관리 용이함 다양한 색상과 질감 선택 가능
	단점	경제성이 떨어지며, 시공 시 전문성이 요구됨 습기에 취약하여 표면 처리 필요
돌 타일 (Natural Stone Tile)	특징	화강암, 슬레이트 등 천연 돌을 가공한 타일
	장점	고급스러우며, 내구성이 뛰어남
	단점	경제성이 떨어지며, 흠집이나 오염에 민감하여 정기적인 관리(코팅, 방수 처리) 필요.
코토 타일 (Terracotta Tile)	특징	점토를 저온에서 구워 만든 타일
	장점	흡수성이 뛰어나 습도 조절 효과 있음
	단점	내구성이 낮아 스크래치와 균열에 취약하며, 흡수성이 높아 얼룩과 오염에 약함

#### 4) 목재

목재는 건축에서 다양하게 적용될 수 있으며, 실내 벽마감재로 사용 시, 천연 원목 또는 가공된 목재를 사용하여 자연스러운 미관과 따뜻한 분위기를 제공한다. 다양한 목재 종류와 가공방식에 따라 다양한 디자인과 기능성을 제공하지만 상대적으로 고가의 가격대를 형성하고 있다. [표 2-5]는 목재 마감재의 특성을 정리한 것이다.

[표 2-5] 주택 마감재용 목재의 종류별 특징 및 장·단점

종 류	세부 항목	
원목	특징	천연 원목으로 제작된 판넬, 자연스러운 무늬와 색상 제공
	장점	고급스럽고 내구성이 뛰어나며 독특한 디자인가능
	단점	고가이며 습기와 온도 변화에 취약해 관리 필요
합판	특징	얇은 나뭇결을 여러 겹 붙여 제작, 가벼우며 효율적
	장점	가볍고 저렴하며 다양한 마감처리 가능
	단점	내구성이 낮고 물에취약, 시간이 지나면 비교적 쉽게 변형가능
MDF	특징	목재 섬유를 접착제로 압축해 만든 판넬, 표면이 매끄럽고 균일
	장점	표면이 매끄럽고 균일해 페인팅 및 코팅 용이
	단점	습기에 약하고 강도가 낮아 고하중 환경에는 부적합
집성목	특징	작은 목재 조각을 접착제로 결합한 판넬, 내구성이 강하고 변형 적음
	장점	내구성이 강하고 습기와 변형에 비교적 강함
	단점	자연스러운 느낌이 덜하며 비경제적임

#### 5) 도장재

도장재 실내 마감은 벽의 표면을 다양한 색상과 질감으로 마감할 수 있으며, 다양한 공간에서 비교적 자유롭게 적용할 수 있는 경제적이고 유연한 마감 방법이다. 공동주택에서의 주요 적용 공간은 베란다이며 방수성, 내구성을 강화하여 동절기 및 하절기의 보호 효과를 기대할 수 있다. 장점으로서는 다양한 색상과 질감을 선택 가능하며, 경제적이고 시공성이 우수하다. 특수 페인트의 경우에는 내오염성 및 방수기능이 우수하여 유지·보수에 탁월하다. 반면에 표면 손상에 취약하며, 시간 경과에 따라 벗겨질 가능성이 있다. [표 2-6]은 도장재의 특징을 나타낸 것이다.

[표 2-6] 주택 도장 마감재의 종류별 특징 및 장·단점

종 류	세부 항목	
수성페인트	특징	물을 희석제로 사용하는 페인트로, 냄새가 적고 빠른 건조 가능함
	장점	저렴하고 냄새가 적으며 건조 시간이 짧고, 친환경제품으로 사용 됨
	단점	내구성이 낮아 고습 환경에서는 부적합
유성페인트	특징	유기용제를 희석제로 사용하는 페인트로, 내구성과 방수성이 뛰어나 높은 내구성이 요구되는 곳에 적합
	장점	표면 광택이 우수하며 내구성과 방수성이 뛰어남
	단점	냄새가 강하고 건조시간이 길며 환경에 부정적인 영향을 줄 수 있음
에폭시페인트	특징	에폭시 수지 기반의 고성능 페인트로 내화학성과 내구성이 우수하여 주로 특수용도로 사용됨
	장점	내구성이 매우 강하며 화학물질 및 충격에강함
	단점	고가이며 시공이 복잡하고 전문 기술 필요
라텍스페인트	특징	합성고무 기반의 페인트로, 탄성과 유연성이 있어 벽의 작은 균열을 흡수할 수 있음
	장점	탄성이 있어 균열에 강하며 유지보수가 용이함
	단점	내구성이 유성페인트에 비해 낮음

## 1.2. 바닥재 및 천장 마감재

### 1) 바닥재

공동주택에 적용될 수 있는 바닥 마감재는 실내환경의 기능성과 미관을 결정짓는 중요한 요소로, 주거 공간의 용도와 예산, 유지보수 조건에 따라 다양한 재료가 사용된다. 바닥 마감재는 사용자의 보행감, 방음효과, 단열성능, 그리고 디자인 측면에서 큰 영향을 미치며, 최근에는 지속 가능한 환경을 고려한 재료도 적용되고 있으며 이슈가 되고 있는 층간소음을 저감할 수 있는 마감재도 출시되고 있다.

바닥 마감재 선정 시, 내구성, 유지 보수 용이성, 방수 및 방음 등을 고려해야 하며, 특히 습기나 고하중, 층간소음이 예상되는 공간에는 내구성 및 기능이 우수한 마감재를 선택해야 한다.

공동주택에 적용되는 주요 바닥 마감재로는 강화마루, 원목마루, 타일, PVC 바닥재, 카펫 등이 있으며 주요 특징과 장단점은 [표 2-7]과 같다.



[표 2-7] 주택 바닥 마감재의 종류별 특징 및 장·단점

종 류	세부 항목	
강화마루	특징	HDF(고밀도섬유판)에 합성수지를 코팅한 재료
	장점	경제적이고 시공 간단하며, 스크래치에 강하며 유지 보수 용이
	단점	습기가 많은 곳에서는 부적합
원목마루	특징	천연 원목으로 제작 된 바닥재로 고급 마감재로 사용됨
	장점	고급스럽고 자연스러운 미관제하며, 내구성이 뛰어나 유지 관리에 따라서 수명이 반영구적으로 길어짐
	단점	경제성이 떨어지고, 습기와 온도 변화에 민감하여 관리필요
타일	특징	세라믹, 대리석, 석재 등으로 제작 된 바닥재
	장점	내구성과 방수성, 내오염성이 뛰어나 물이 닿는 공간에 적합
	단점	차갑고 딱딱한 촉감으로 보행감이 떨어질 수 있으며, 시공 비용이 높고 시간이 많이 소요됨
PVC	특징	PVC 소재로 제작 된 바닥재로, 매우 경제적이며 시공성 우수
	장점	경제적이며 시공성이 우수함 방수성이 뛰어나 습기 많은 공간에 적합
	단점	내구성이 낮아 마모되기 쉽고 수명이 짧음
카펫	특징	천연 또는 합성 섬유로 제작 된 바닥재로 따뜻하고 부드러운 촉감
	장점	바닥 발생 소음 감소에 탁월하며, 따뜻한 실내 환경 제공 부드러운 촉감으로 보행감 우수
	단점	먼지와 오염에 취약하며 알레르기를 유발할 수 있음 유지보수와 청소가 어렵고 화재에 취약함

## 2) 천장 마감재

천장마감재는 건물 내부의 공간분위기를 조성하고, 방음, 단열, 방습과 같은 기능적인 역할을 수행하는 중요한 요소이며, 공동주택에서는 배관 및 전선 등 미관을 해칠 우려가 있는 부분을 보이지 않도록 마감하여 심미성을 충족시켜줄 수 있는 역할도 하고 있다.

주요 천장 마감재로는 텍스, 석고보드, 알루미늄패널, 우드 패널 등이 있으며 국내 공동주택에서는 일반적으로 우드 또는 석고보드에 벽지 마감을 하고 있다. 주요 자재별 특징 및 장·단점은 [표 2-8]과 같다.

[표 2-8] 주택 천장 마감재의 종류별 특징 및 장·단점

종 류	세부 항목	
텍스	특징	텍스는 석고보드와 유사한 재료로, 표면에 흡음성 처리를 한 천장 마감재
	장점	시공성이 우수하며, 가볍고 흡음성 및 경제성 우수
	단점	내구성이 낮아 시간이 지나면 변형될 수 있음
석고보드	특징	석고와 종이를 기본으로 한 마감재
	장점	곡면 처리 등 자유로운 디자인이 가능 가볍고 시공성이 우수하며 경제적
	단점	충격에 취약하며 수분에 약하여 방수 처리 필요
알루미늄 패널	특징	알루미늄 소재로 제작된 패널
	장점	가볍고 내구성 및 내식성이 매우 우수 유지보수 용이
	단점	경제성이 상대적으로 낮고, 흡음성이 낮아 소음 문제 발생 가능
우드패널	특징	천연 및 합성 목재를 이용한 천장 마감재(합판 등)
	장점	단열 및 흡음 효과가 우수하여 실내 음환경 개선 가능
	단점	습기와 온도 변화에 민감하며, 화재에 취약

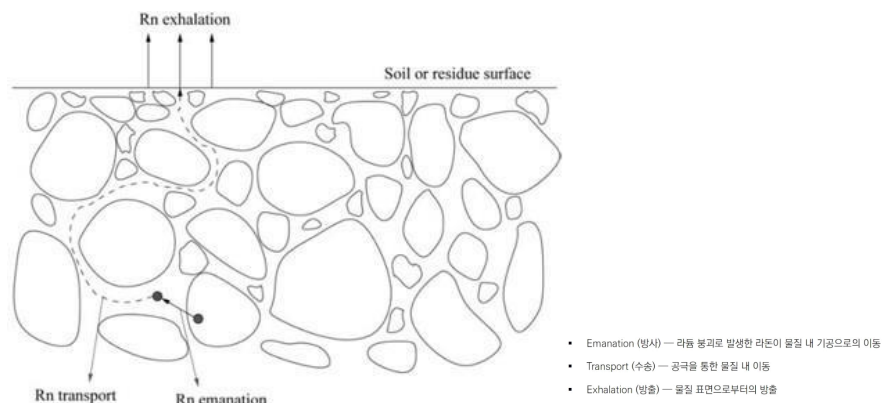
## 제3장 실내마감재의 방사성물질 방출 시편 실험

### 1. 실내 마감재의 방사성물질 방출 측정방법 선정

#### 1.1. 건축자재 표면 라돈 방출량 측정법

2019년 환경부 등 관계부처 합동으로 발간한 「건축자재 라돈 저감·관리 지침서」에서는 건축자재 라돈 관리를 위해 3가지 평가 방법을 비교 검토하였으며 방사능 농도 지수(I)를 이용하여 석재 중심의 건축자재 라돈관리방안을 제시한 바 있다. 그러나 이는 건축재료 내 존재하는 천연 방사성 핵종 농도를 이용한 간접 관리방식이라는 한계가 있다.

재료 내에서 발생된 라돈은 [그림 3-1]과 같이 확산 과정을 통해 표면으로 이동하고, 물질 표면에서 방출을 통해 대기중으로 나오게 된다. 여기서 라돈의 표면 방출량( $E$ ,  $Bq/m^2h$ )은 물질 표면에서 방출되는 라돈의 농도를 의미하며 단위면적과 단위시간당 방출량으로 나타낸다. 따라서 건축자재 라돈농도 관리를 위해서는 실내 라돈 농도와 직접적인 관련을 갖는 라돈 방출량을 기반으로 한 자재 평가 방법 및 관리방안에 대한 검토가 필요하다.



[그림 3-1] 라돈 발생원에서의 방사·수송·방출

현재까지 콘크리트와 같은 건축 재료 표면의 라돈 방출량을 평가할 수 있는 방법은 아직 정립되지 않은 상황이라 할 수 있다. 「건축자재 라돈 저감·관리 지침서」에 따르면 라돈 방출량을 평가하는 방법은 방사능 농도지수 기반의 자재 평가 방법에 비해 표준화된 측정방법이 명확하지 않으나, 실내 라돈 농도와의 직접 연관성이 크며 다른 오염물질 관리체계와 정합성에 유리한 점이 장점이라 할 수 있다. [표 3-1]<sup>5)</sup>은 라돈 방출량 시험 방법과 방사능 농도지수 평가 방법을 비교한 내용이다.

[표 3-1] 건축자재 라돈 관리를 위한 평가방법 비교

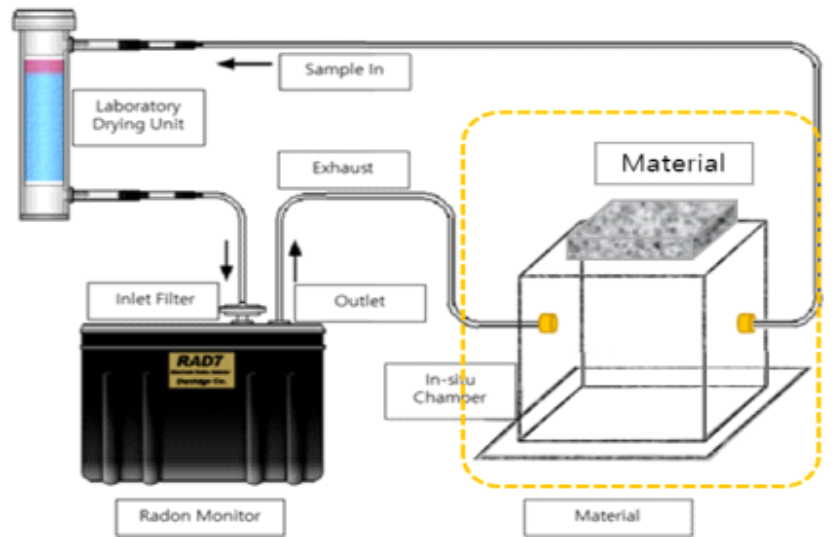
구 분	내 용
방사능 농도지수	<p>(개요) 가상의 주거환경에 특정 건축자재가 다량 사용되는 경우 건축자재에서 방출되는 감마선에 의한 외부 피폭을 고려하여 설정된 지수로 1이하를 만족하면 감마선 피폭량이 1mSv/년 이하이며 동 지수를 만족시 실내 라돈농도 200 Bq/m<sup>3</sup> 이하를 만족</p> <p>(장점) 국외 관리사례 및 과학적 근거 높으며 표준화된 분석방법과 기기 존재</p> <p>(단점) 긴 측정시간, 라돈이 아닌 라듐, 토론등의 함량을 고려하는 간접적 방식이며 기준을 준수해도 낮은 라돈 농도가 담보되지 않음</p>
라돈 방출량	<p>(개요) 건축자재 오염물질 방출농도를 관리하는 방법과 같이 특정 면적 또는 질량에서 방출되는 시간당 오염물질의 양을 챔버를 통해 측정하여 나타냄</p> <p>(장점) 실내 라돈 농도와의 직접 관련성과 기존 타 오염물질 관리체계와의 정합성</p> <p>(단점) 표준화된 측정방법의 개발을 위한 장기 검토 필요</p>

전주영 외(2022)<sup>6)</sup>를 비롯한 다수의 선행연구<sup>7)</sup>에서는 건축자재의 방사성물질 저감능을 평가하기 위해 밀폐형 챔버를 이용하여 건축자재로부터 방출된 라돈 농도를 측정하는 방법을 선정하고, 도료 및 필름형 재료 등 다양한 재료를 대상으로 건축자재의 라돈 방출량을 평가하였다. 이 방법은 밀폐환경을 조성하여 주변 환경으로부터의 영향을 최소화할 수 있고, 비용 및 측정 방법 면에서 타 방법보다 효율적인 방법이다. ([그림 3-2] 참조)

5) 관계부처 합동(2019), 「건축자재 라돈 저감·관리 지침서」

6) 전주영 외(2022), 「방사성물질 방출 저감자재 적용 방안 연구」, LH 토지주택연구원

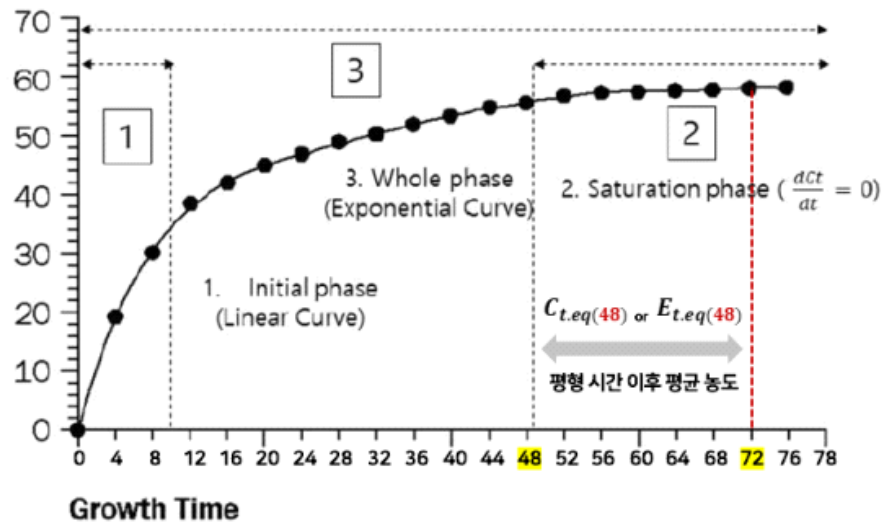
7) 전주영 외(2022), 「건강주택 구현을 위한 건축자재 라돈방출량 평가 및 실내 라돈농도 관리방안 연구」, LH 토지주택연구원  
 이병희 외(2023), 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구」, LH 토지주택연구원  
 이병희 외(2023), 「측정데이터 기반 공동주택 실내 라돈 발생원 분석」, LH 토지주택연구원



[그림 3-2] 밀폐 챔버를 이용한 시편 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 방법

건축재료 표면으로부터 방출된 라돈은 밀폐 챔버내 누적되기 시작하여 초기에는 선형적으로 증가하다가 일정 시간이 지나면 정상상태인 포화농도에 이르게 된다.

[그림 3-3]은 시간 경과에 따른 라돈 농도변화를 나타낸 것으로, 전체적으로는 지수함수의 역함수 형태를 나타낸다.



[그림 3-3] 라돈 농도 누적 그래프

수식(1)~(5)는 라돈농도 보존방정식(Indoor Radon Balance Equation)을 나타낸다. 이를 이용하여 밀폐 챔버내 라돈 포화농도로 건축재료의 표면 라돈 방출량을 추정할 수 있다.

Indoor Radon Balance Equation

$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{E \cdot A}{V} - (\lambda_{eff} \cdot C_t) \quad (1)$$

Initial Phase (Linear Curve)

$$C_t = \frac{E \cdot A}{V} \cdot t + C_{initial} \quad (2)$$

Saturation Phase

$$C_t = \frac{E \cdot A}{\lambda_{eff} \cdot V} \quad (3)$$

Whole Phase (Exponential Curve)

$$C_t = \frac{E \cdot A}{\lambda_{eff} \cdot V} (1 - e^{-\lambda_{eff} \cdot t}) + C_{initial} \cdot e^{-\lambda_{eff} \cdot t} \quad (4)$$

Effective decay rate

$$\lambda_{eff} = \lambda_{Rn} + \lambda_h + \lambda_l \quad (5)$$

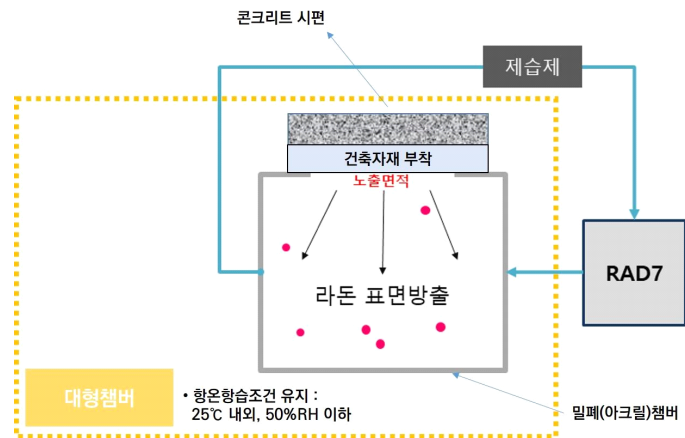
여기서,

$C_t$	: 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 (1/h)
$\lambda_{Rn}$	: Radon decay constant, $2.1 \times 10^{-6}$ (s <sup>-1</sup> )
$\lambda_h$	: Back-diffusion rate (s <sup>-1</sup> )
$\lambda_l$	: The leakage rate for radon in the chamber (s <sup>-1</sup> )

단, 라돈농도 보존방정식을 어떻게 이용하느냐에 따라 표면 라돈 방출량 추정값이 달라진다. 수식(2)는 측정 초기 선형으로 라돈 농도가 증가하는 상태에서, 수식(3)은 포화농도에 이르러 정상상태에 이르렀을 경우에, 수식(4)는 측정기간 동안 라돈농도가 곡선 형태로 상승하는 경우의 상태를 가정하여 라돈 농도를 해석할 수 있는 식이다. 이병희 외(2023)등 선행연구에서는 상대적으로 긴 시간동안 측정하여 포화상태에 이르렀을때 추정하여 상대적으로 정확한 방법인 정상상태에서 추정하는 방법을 사용하기 위해 수식(3)을 이용하였다. 여기서 유효감쇠율  $\lambda_{eff}$ 는 수식(5)와 같이 라돈 자체의 감쇠항 ( $\lambda_{Rn} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) 콘크리트 시편의 back diffusion  $\lambda_h$ , 챔버의 누기율  $\lambda_l$ 을 고려하여 산출된다. 본 연구에서는 최대 두께 0.05 m의 시편으로 제작되어, back diffusion의 영향은 무시하였다. ( $\lambda_h = 0$ ) 챔버의 누기율  $\lambda_l$ 은 부착 면 또는 방식에 의해 변동하므로 선행연구에서 반복 측정한 콘크리트 시편 및 자재 부착시 누기율 값을 적용하였다.

본 연구에서는 시편 및 벽체의 건축 자재 표면에서의 라돈 방출량 측정을 위해 [그림 3-4]와 같이 아크릴로 구성된  $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$  크기의 밀폐 챔버를 활용하였다. 또한, 실제 공동주택에서 사용하는 콘크리트를 실험용 콘크리트 시편으로 활용하기 위해 충청 지역의 동일 현장에서 타설한 압축강도  $240 \text{ kgf/cm}^2$ 의 콘크리트를 이용하여  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$  크기로 시편을 제작하였으며, 시편 안정화를 위해 항온항습 보존실( $25^\circ\text{C}$ , 상대습도 50%)에서 시편을 보존하였다.

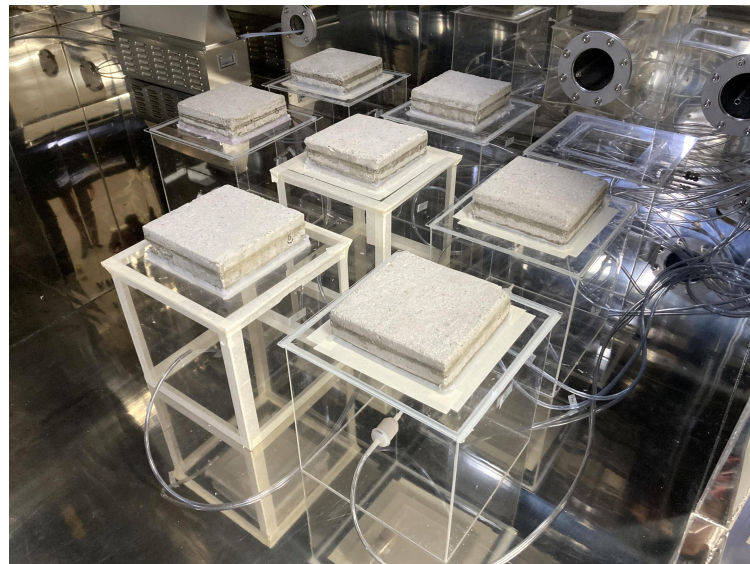
시편은 [그림 3-4]와 같이 밀폐형 챔버위에 부착되며, 표면 라돈 방출 저감을 측정하고자 하는 건축자재를 챔버 안쪽으로 노출하여 설치하였다. 또한, 실험환경의 항온항습 조건 유지를 위해  $40\text{m}^3$  크기의 대형챔버 내부에 아크릴 챔버를 설치, 온습도 변화를 최소화하고자 하였으며 대형챔버 내 온습도는  $25^\circ\text{C}$ , 상대습도 50%를 유지하였다.



[그림 3-4] 본 연구과제의 라돈 방출량 시편 실험 방법 개요



[그림 3-5] 항온항습 조건에서의 시편 보관

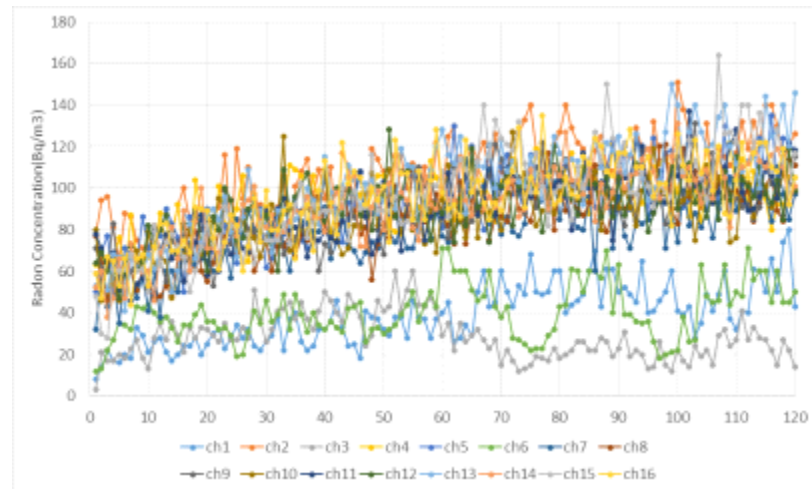


[그림 3-6] 밀폐형 챔버 위 콘크리트 시편 설치 모습

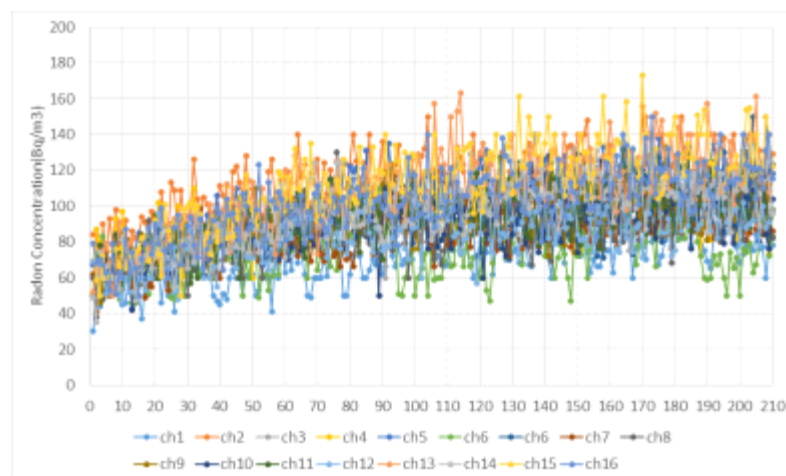


## 1. 2. 포화농도 구간 설정

앞서 언급한 바와 같이, 밀폐챔버 내의 라돈 포화농도를 이용하여 표면 라돈 방출량 추정을 위해서는 챔버 내 라돈 포화농도에 이르는 시간을 설정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 챔버내 포화농도 도달시간을 확인하기 위해, 콘크리트 시편 15개를 밀폐 챔버에 설치하고 시간에 따른 챔버 내 라돈 농도를 각각 120시간, 212시간 2회에 걸쳐 측정하였으며 그 결과를 [그림 3-7],[그림 3-8]에 나타내었다.



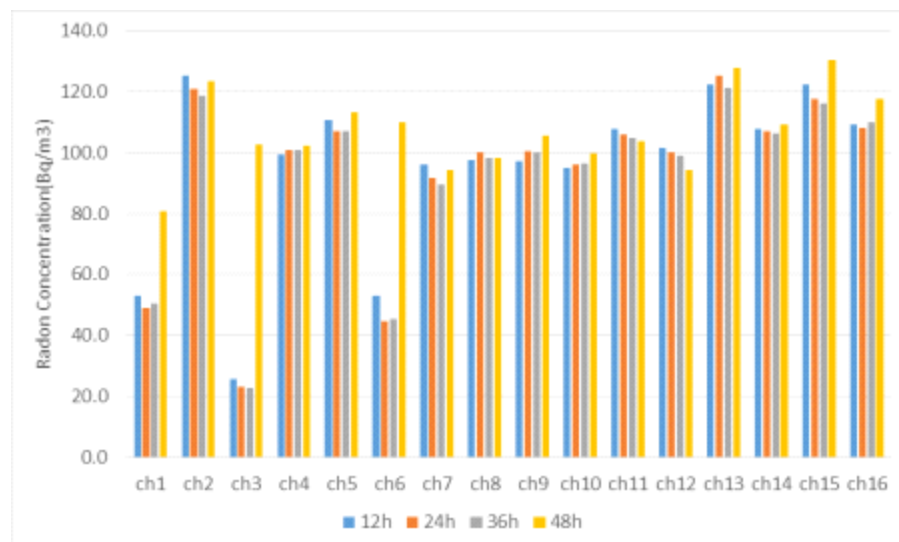
[그림 3-7] 콘크리트 시편 라돈방출량(1차\_120시간)



[그림 3-8] 콘크리트 시편 라돈방출량(2차\_212시간)

측정결과를 나타낸 그래프에서 알 수 있듯, 라돈 측정 시작이후 초기 라돈농도는 상승하며 일정시간 이후 농도의 상승이 뚜렷하지 않은 구간이 나타난다.

[그림 3-9]는 120시간 측정시 측정 종료 시점으로부터 12시간, 24시간, 36시간 이전까지의 구간을, 212시간 측정시 측정 종료시점 48시간 이전까지의 구간을 포화 구간으로 설정하여 각각의 포화구간에 해당하는 구간의 평균 라돈농도를 비교한 것이다. 측정시 장비 이상 등으로 큰 차이가 생긴 일부 데이터를 제외한 데이터들은 212시간 측정시 48시간을 포화구간으로 설정한 값과 120시간에서 12, 24, 36시간을 포화구간으로 설정한 값과 큰 차이가 없다고 판단하였으며 본 연구에서는 다수 반복되는 측정의 효율적인 수행을 고려하여 120시간 측정 후 24시간의 포화구간을 설정한 값을 이용하고자 한다.



[그림 3-9] 콘크리트 시편 측정결과 평균값(포화농도구간 설정)

## 2. 실내 마감재의 방사성물질 방출 시편 실험

### 2.1. 실험 준비

실내 마감재의 시편에서의 방사성물질 방출량 실험을 위해 [표 3-2]와 같이 총 18개의 Case를 선정하였다. 1개 Case당 4회 반복 수행(1~4 Cycle)하였으며, 폴, 접착제 시공에 따른 차이를 고려하기 위해 Case 4,6,7,9,11,12,14,15의 경우 1,2회 Cycle에 서는 접착 시공없이 수행하고, 3,4회 Cycle에서는 접착 시공 후 수행하였다.

[표 3-2] 실내 마감재 방사성물질 방출 시편실험 Case 개요

Case	위 치	마감재 구분		Cycle	시편 구성
1	벽	벽지	실크벽지1(초배 有)	1~4	초배+폴+실크벽지
2			실크벽지2(초배 無)	1~4	실크벽지
3		석고보드	THK 9.5	1~4	보드
4			THK 9.5 + 실크벽지(초배 無)	1~2	보드+실크
5				3~4	보드+폴+실크
6			THK 9.5 + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
7		콤비보드	CRC보드 + 실크벽지(초배 無)	1~2	보드+실크
8				3~4	보드+폴+실크
9		타일	세라믹(도기질 타일)	1~2	타일
10				3~4	몰탈+타일
11		아트월	MDF(6T) + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
12			MDF(6T) + 실크벽지(초배 無)	1~2	보드+벽지
13				3~4	보드+폴+벽지
14			MDF(9T) + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
15			포세린타일(본드붙임)	1~2	보드+타일
16	바닥	마루 /바닥재	룸카펫(6.0T)	3~4	접착제+룸카펫
17				1~2	마루
18			강화합판마루(접착)	3~4	접착제+마루
19	벽	콤비보드	CRC보드 + 수성페인트	1~4	보드+도장2회
20		아트월	MDF(6T) + 인테리어 필름	1~4	보드+필름
21			MDF(9T) + 인테리어필름	1~4	보드+필름

[표 3-3]~[표 3-6]은 각 Case 별 시편 구성 및 레이어를 나타낸 것이다.



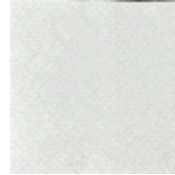
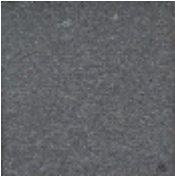



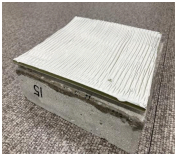


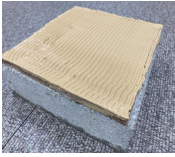
[표 3-3] 시편 및 레이어 구성 (Case1~6)

Case	마감재 구분		시편 구성			
			마감재 사진		비고(시편 시공)	레이어 구성
1	벽지	실크벽지1 (초배 有)				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>실크벽지 1(초배 유)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
2		실크벽지2 (초배 無)				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>실크벽지 2(초배 무)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
3	석고보드	THK 9.5				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>석고보드(THK 9.5)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
4		THK 9.5 + 실크벽지 (초배 無)				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>석고보드(THK 9.5)</li> <li>실크벽지 (초배 무)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
5		THK 9.5 + 수성페인트				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>석고보드(THK 9.5)</li> <li>수성페인트</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
6	콤비보드	CRC보드 + 실크벽지 (초배 無)				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>CRC보드</li> <li>실크벽지 (초배 무)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>

[표 3-4] 시편 및 레이어 구성 (Case7~11)

Case	마감재 구분		시편 구성			
			마감재 사진		비고(시편시공)	레이어 구성
7	타일	세라믹 (도기질 타일)				<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ 세라믹(도기질 타일)</div> <div>밀폐 챔버</div>
						<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ 몰탈 붙임</div> <div>▪ 세라믹(도기질 타일)</div> <div>밀폐 챔버</div>
8	아트월	MDF(6T) + 수성페인트				<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ MDF(6T)</div> <div>▪ 수성페인트</div> <div>밀폐 챔버</div>
9		MDF(6T) + 실크벽지(초배 無)				<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ MDF(6T)</div> <div>▪ 실크벽지 (초배 무)</div> <div>밀폐 챔버</div>
10		MDF(9T) + 수성페인트				<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ MDF(9T)</div> <div>▪ 수성페인트</div> <div>밀폐 챔버</div>
11		포세린타일 (본드붙임)				<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ 포세린타일</div> <div>밀폐 챔버</div>
					<div>▪ 콘크리트 시편</div> <div>▪ 본드 붙임</div> <div>▪ 포세린타일</div> <div>밀폐 챔버</div>	

[표 3-5] 시편 및 레이어 구성 (Case12~15)

Case	마감재 구분		시편 구성			
			마감재 사진		비고(시편시공)	레이어 구성
12	단열/보온재	비드법보온판 (THK35) +석고보드(9.5T) +실크벽지				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>비드법보온판(THK35)</li> <li>석고보드(THK 9.5)</li> <li>실크벽지 (초배 무)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
13		비드법보온판 (THK35) +석고보드(9.5T) +수성페인트				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>비드법보온판(THK35)</li> <li>석고보드(THK 9.5)</li> <li>수성페인트</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
14	마루/바닥재	룸카펫(6.0T)				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>룸카펫(THK 6)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
						<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>본드 붙임</li> <li>룸카펫(THK 6)</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
15		강화합판마루(접착)				<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>강화합판마루</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
						<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>본드 붙임</li> <li>강화합판마루</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>



[표 3-6] 시편 및 레이어 구성 (Case16~18)

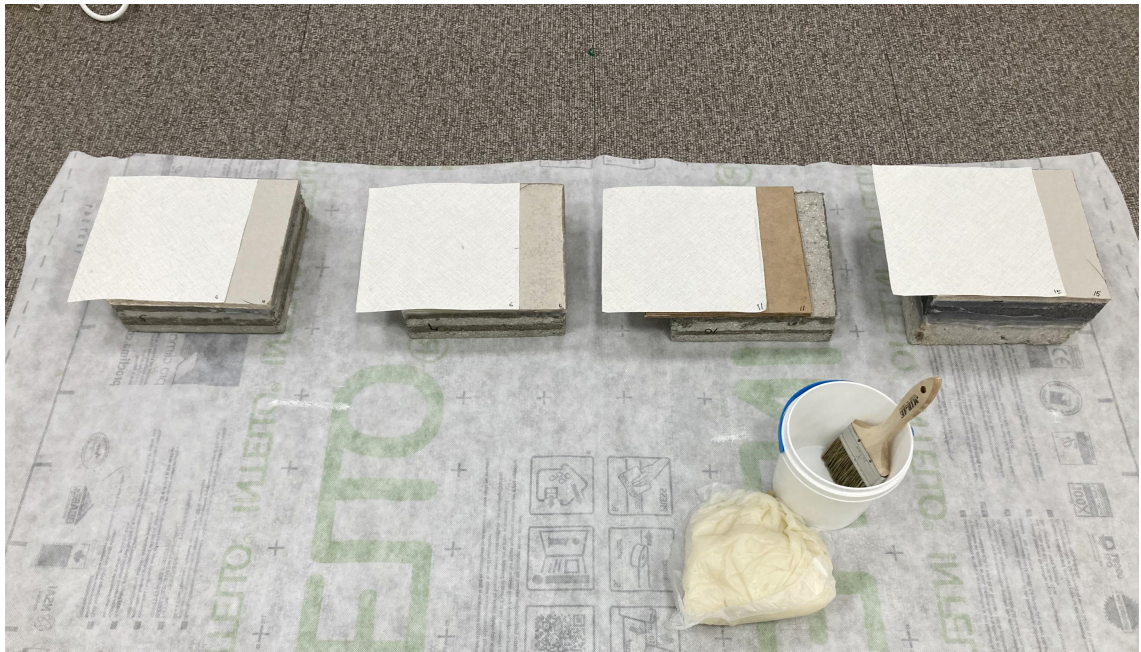
Case	마감재 구분		시편 구성		
			마감재 사진	비고(시편시공)	레이어 구성
16	콘크리트	CRC보드 + 수성페인트			<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>CRC보드</li> <li>수성페인트</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
17	아크릴	MDF(6T) + 인테리어필름			<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>MDF(6T)</li> <li>인테리어필름</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>
18		MDF(9T) + 인테리어필름			<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 시편</li> <li>MDF(9T)</li> <li>인테리어필름</li> </ul> <div>밀폐 챔버</div>

[그림 3-10]은 시편 실험을 위해 실내 마감재를 준비한 모습을 나타낸 것이며, [그림 3-11] ~ [그림 3-20]은 시편에 도배 및 몰탈, 접착 시공을 한 것을 나타낸 것이다.



[그림 3-10] 시편실험을 위한 마감재 준비





[그림 3-11] 시편의 도배 시공 준비

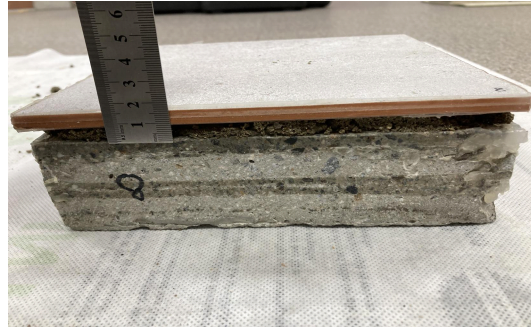


[그림 3-12] 시편의 도배 시공 후





[그림 3-13] 세라믹 타일 몰탈 시공 준비



[그림3-14] 세라믹 타일 몰탈 시공 후



[그림 3-15] 포세린 타일 본드 시공 준비



[그림 3-16] 포세린 타일 본드 시공 후



[그림 3-17] 강화마루 본드 시공 준비



[그림 3-18] 강화마루 본드 시공 후



[그림 3-19] 롬카펫 본드 시공 준비

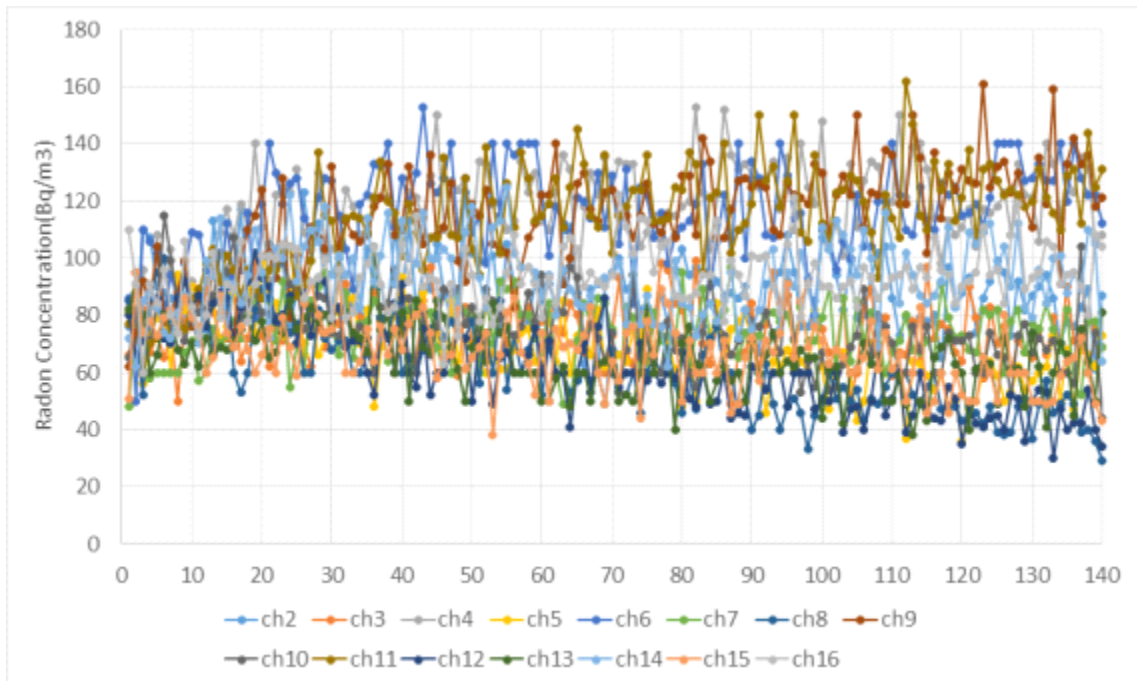


[그림3-20] 롬카펫 본드 시공 후

## 2.2. 실험 결과

### 1) 1차(Case\_01~Case\_15) 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 측정 결과

Case 1~15 까지 15개 시편에 대해 1차 실험을 수행하였으며, 밀폐챔버의 라돈농도 결과를 [그림 3-21]~[그림3-24] 및 [표 3-7]~[표 3-10]에 나타내었다.

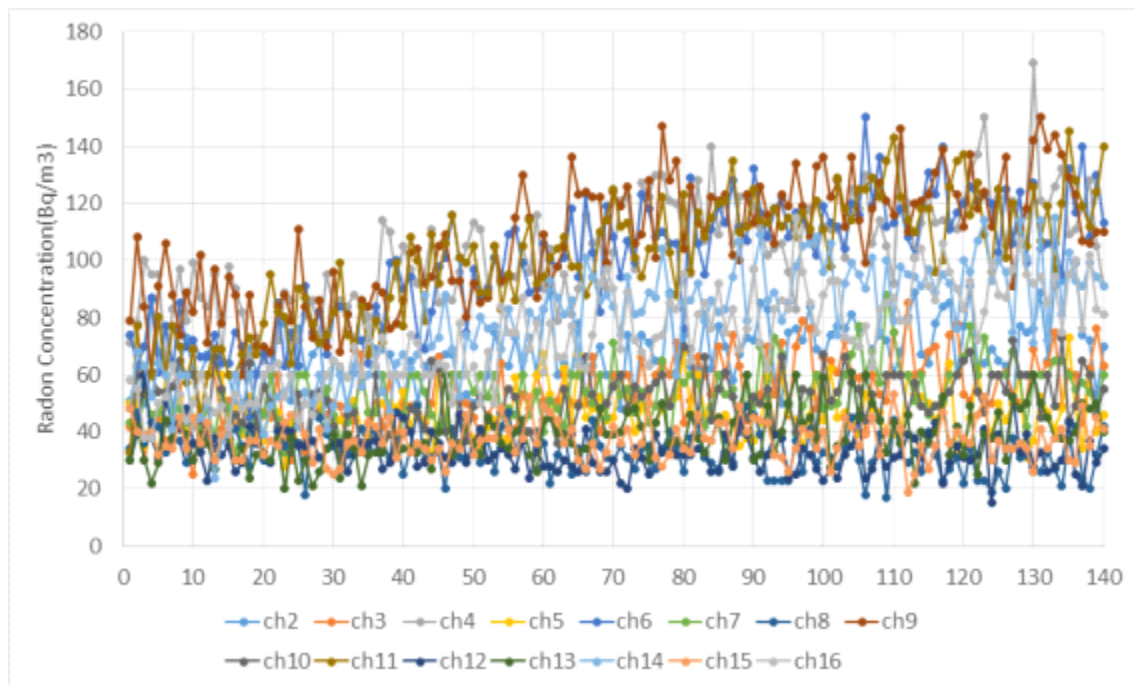


[그림 3-21] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 그래프(Cycle 1)

[표 3-7] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 1)

구분	Case_01	Case_02	Case_03	Case_04	Case_05	Case_06	Case_07	Case_08
12h	81.9	73.2	122.3	61.7	127.2	71.8	44.5	126.3
24h	84.2	72.8	118.0	57.5	126.7	74.0	44.4	128.0
48h	86.3	74.2	121.9	59.0	119.5	73.9	47.7	126.3
구분	Case_09	Case_10	Case_11	Case_12	Case_13	Case_14	Case_15	
12h	67.8	124.0	43.5	61.3	91.2	55.9	95.8	
24h	67.2	124.2	44.5	61.3	96.1	56.8	96.3	
48h	67.7	123.2	48.1	59.7	96.0	61.9	94.7	

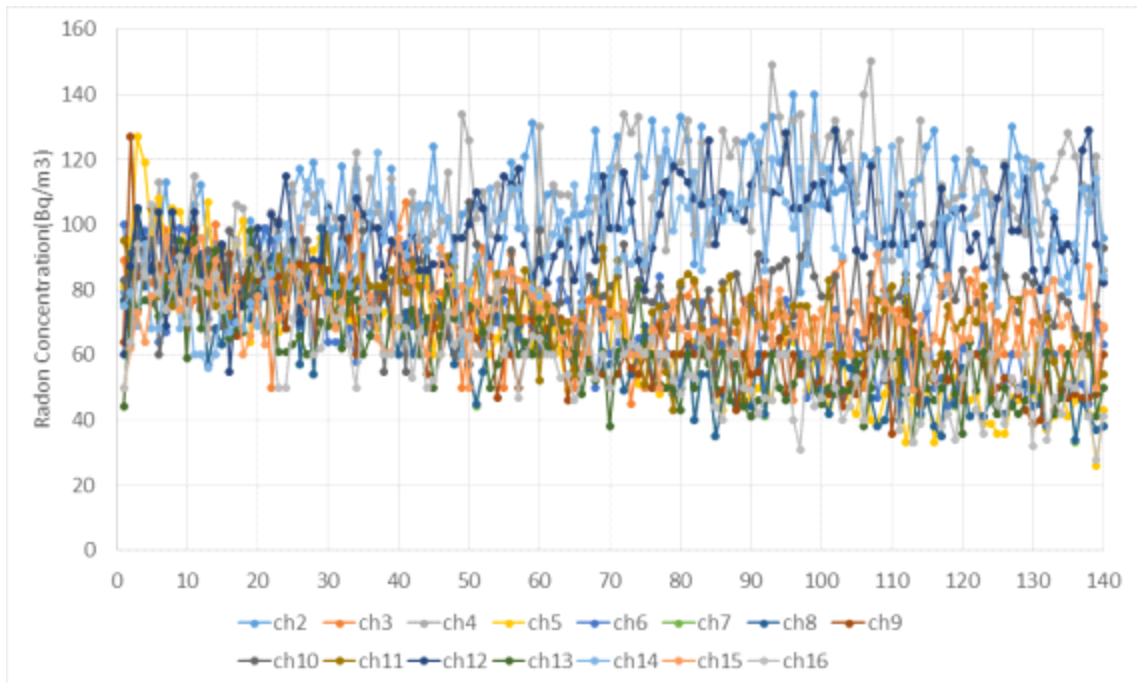




[그림 3-22] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 그래프(Cycle 2)

[표 3-8] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 2)

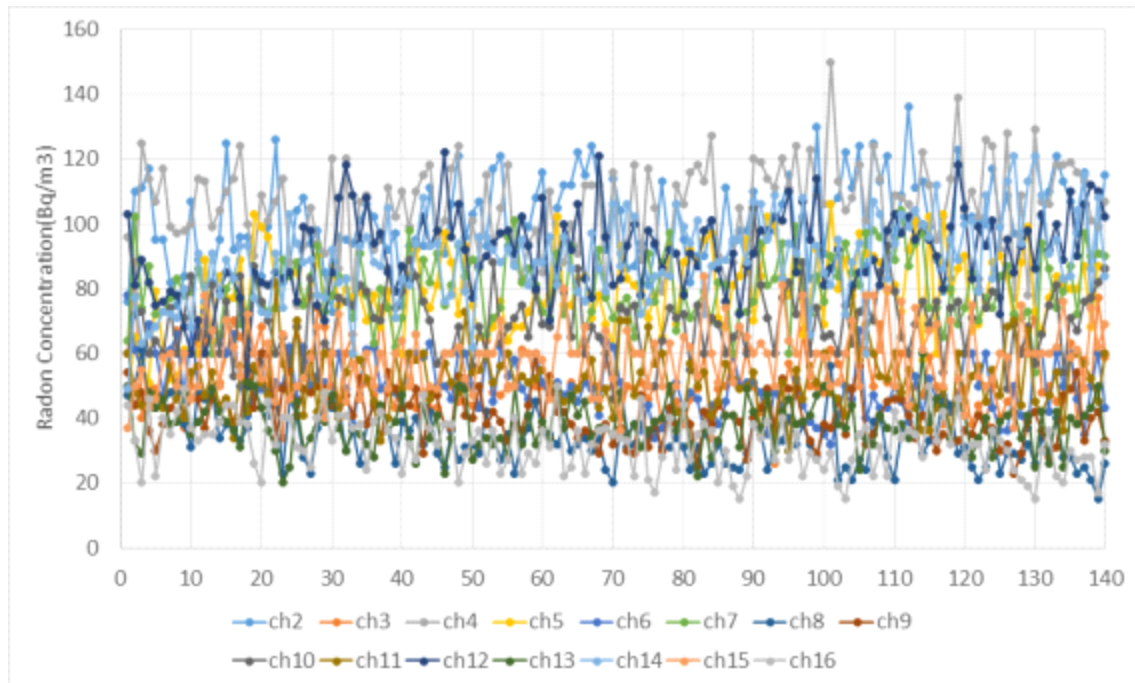
구분	Case_01	Case_02	Case_03	Case_04	Case_05	Case_06	Case_07	Case_08
12h	79.3	61.0	120.5	46.5	114.8	57.2	30.2	126.3
24h	75.0	59.2	120.7	47.4	117.2	60.0	28.3	123.7
48h	73.2	61.0	115.8	47.4	117.0	59.5	29.6	122.7
구분	Case_09	Case_10	Case_11	Case_12	Case_13	Case_14	Case_15	
12h	55.5	120.2	31.1	45.5	93.8	36.9	89.3	
24h	57.2	118.5	31.9	43.0	95.1	37.9	90.5	
48h	54.9	118.2	32.0	42.8	94.3	36.6	87.9	



[그림 3-23] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 그래프(Cycle 3)

[표 3-9] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 3)

구분	Case_01	Case_02	Case_03	Case_04	Case_05	Case_06	Case_07	Case_08
12h	74.7	58.9	97.6	51.8	95.9	71.3	45.9	100.6
24h	76.4	63.9	98.8	50.5	97.6	71.0	46.0	105.4
48h	78.0	65.4	101.8	51.1	99.2	70.3	47.6	110.0
구분	Case_09	Case_10	Case_11	Case_12	Case_13	Case_14	Case_15	
12h	61.5	111.2	45.3	56.1	42.9	43.0	47.2	
24h	64.0	109.8	44.9	56.3	44.2	44.3	50.5	
48h	64.2	114.3	47.6	57.5	48.5	48.6	53.4	



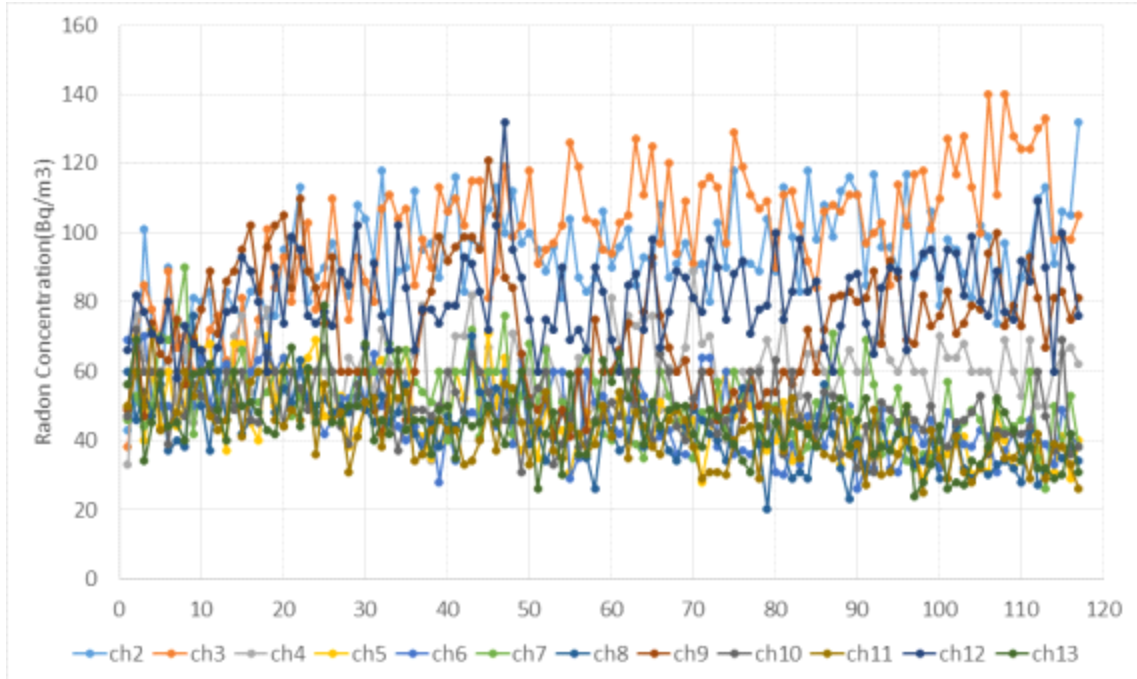
[그림 3-24] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 그래프(Cycle 4)

[표 3-10] Case 1~15 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 4)

구분	Case_01	Case_02	Case_03	Case_04	Case_05	Case_06	Case_07	Case_08
12h	71.7	52.0	99.8	36.9	99.4	62.7	25.3	102.1
24h	69.3	51.0	95.6	37.3	99.1	59.6	29.9	100.3
48h	71.2	51.3	95.1	38.5	95.5	61.5	29.4	104.6
구분	Case_09	Case_10	Case_11	Case_12	Case_13	Case_14	Case_15	
12h	55.8	109.3	80.8	50.3	82.3	27.3	39.5	
24h	49.4	110.0	81.1	48.7	77.6	30.0	36.1	
48h	51.8	110.7	83.0	46.6	82.9	30.6	38.6	

## 2) 2차(Case\_16~Case\_18) 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 측정 결과

2차(Case 16~18)실험은 3개 시편에 대해 수행하였으며, 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 결과를 [그림 3-25] 및 [표 3-11]에 나타내었다.



[그림 3-25] Case 16~18 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 그래프(Cycle 1,2)

[표 3-11] Case 16~18 밀폐챔버 방사성물질 방출농도 결과(Cycle 1,2)

구분	Case_16	Case_17	Case_18
Cycle1	97.5	42.1	49.4
Cycle2	106.8	48.9	39.8
Cycle3	115.7	38.5	49.6
Cycle4	124.6	45.0	34.8

### 2.3. 자재별 표면 방출량 평가

앞서 3장에서 밝힌 바와 같이, 정상상태(Saturation Phase)에서의 라돈 농도 보존 방정식(수식(3))를 이용하여 밀폐챔버내 라돈 방출농도( $C$ , Bq/m<sup>3</sup>)로부터 라돈 표면 방출량( $E$ , Bq/m<sup>2</sup>h)을 도출할 수 있으며 산출식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E = (C_s \times \lambda_{\text{eff}} \times V) / A$$

여기서,  $V$ 는 챔버의 체적(m<sup>3</sup>),  $A$ 는 라돈 방출 표면적(m<sup>2</sup>)이며  $\lambda_{\text{eff}}$ 는 라돈 자체의 감쇠율, 챔버의 누기율, 후방확산(Back diffusion)을 고려한 유효감쇠율로서 라돈 자체 감쇠율은 상수이며 챔버의 누기율과 0.05m 두께인 시편 두께에 따라 후방확산은 무시할 있으므로 라돈 표면 방출량 도출에 있어 챔버의 누기율 값이 필요하다.

본 연구에서는 기존 연구를 통해 동일한 측정방법 및 시편 부착방법을 이용하여 동일 챔버에 콘크리트 시편 부착과 자재 부착시 반복 측정한 챔버의 누기율을 적용하였다. 기존 연구<sup>8)</sup>에서의 시편 및 실물벽체, 현장 공동주택 벽체에 실험시 콘크리트 시편 부착시의 누기율은 0.07 h<sup>-1</sup> ~ 0.21 h<sup>-1</sup>, 자재 부착시 누기율은 0.004 h<sup>-1</sup> ~ 0.02 h<sup>-1</sup>으로 나타났으며 본 연구에서는 콘크리트 시편은 최소값인 0.07 h<sup>-1</sup>, 자재부착시는 최대값인 0.02 h<sup>-1</sup>을 적용하였다. 이는 누기율값이 클수록 표면 방출량 값이 크게 계산되므로, 콘크리트 시편에 자재 부착시의 표면 라돈 농도 저감률이 과대평가되는 것을 방지하기 위함이다.



[그림 3-26] 챔버 기밀도 측정 장면

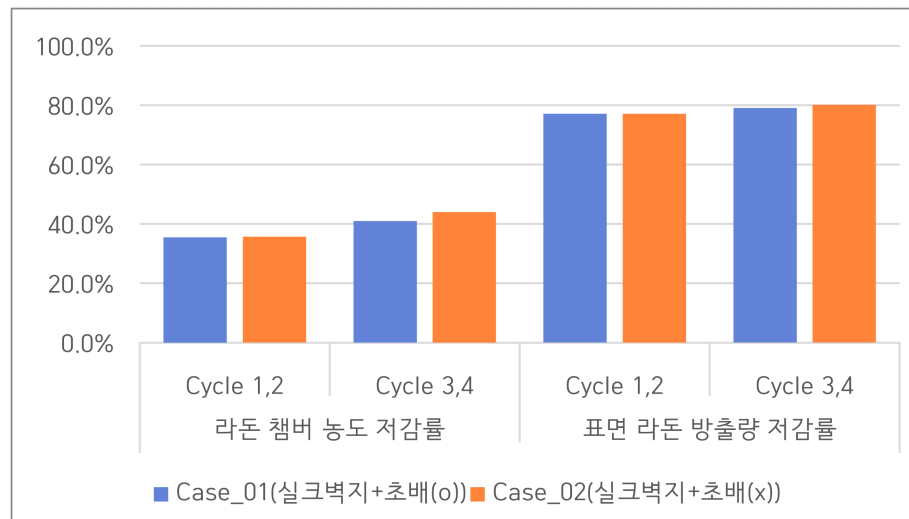
8) 박정하 외(2024), 「공동주택 방사성물질 저감을 위한 필름형 재료 적용방안 평가」 최종보고서, LH토지주택연구원

### 1) 실크벽지(Case\_01, Case\_02)

거실 등 벽체의 실내 마감재로 주로 사용되는 실크벽지를 초배지가 있는 경우(Case\_01), 초배지가 없는 경우(Case\_02)로 나누어 측정한 결과를 표면 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교하였으며, 그 결과를 [표 3-12] 및 [그림 3-27]에 정리하였다.

[표 3-12] 실크벽지(Case\_01, Case\_02) 측정 결과 비교

구 분		Case_01		Case_02	
		Con'c+초배+실크벽지		Con'c+실크벽지	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/mi)	Con'c 시편	123.4		102.6	
	Cycle 1,2	79.6	35.5%	66.0	35.7%
	Cycle 3,4	72.9	41.0%	57.5	44.0%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편	11.48		9.55	
	Cycle 1,2	2.63	77.1%	2.18	77.1%
	Cycle 3,4	2.41	79.0%	1.90	80.1%



[그림 3-27] 실크벽지(Case\_01, Case\_02) 측정 결과 비교

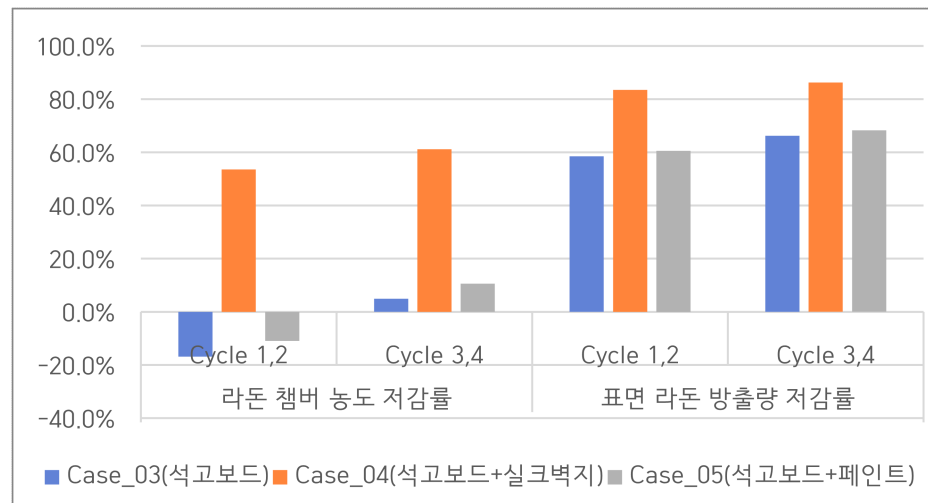


## 2) 석고보드(Case\_03, Case\_04, Case\_05)

벽체용 마감재인 석고보드는 석고보드 자체(Case\_03), 석고보드에 실크벽지를 시공하는 경우(Case\_04), 석고보드에 수성페인트를 도포하는 경우(Case\_05)로 측정하였다. 라돈 챔버농도 측정 결과 및 표면 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과를 [표 3-13] 및 [그림 3-28]에 정리하였다.

[표 3-13] 석고보드(Case\_03, Case\_04, Case\_05) 측정 결과 비교

구 분		Case_03		Case_04		Case_05	
		Con'c+석고보드		Con'c+석고보드 +실크벽지		Con'c+석고보드 +수성페인트	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/m <sup>3</sup> )	Con'c 시편	102.2		113.1		110	
	Cycle 1,2	119.4	-16.8%	52.5	53.6%	122.0	-10.9%
	Cycle 3,4	97.2	4.9%	43.9	61.2%	98.4	10.6%
표면 방출률 (Bq/m <sup>2</sup> h)	Con'c 시편	9.51		10.53		10.24	
	Cycle 1,2	3.95	58.5%	1.74	83.5%	4.03	60.6%
	Cycle 3,4	3.21	66.2%	1.45	86.2%	3.25	68.2%



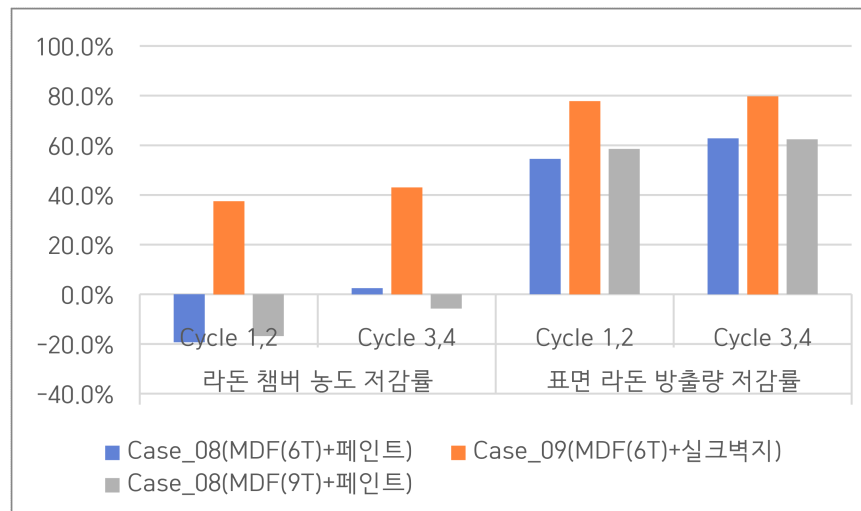
[그림 3-28] 석고보드(Case\_03, Case\_04, Case\_05) 측정 결과 비교

### 3) 아트월 1(Case\_08, Case\_09, Case\_10)

거실, 복도 벽 등의 마감재인 아트월은 MDF에 페인트, 벽지, 인테리어필름, 타일 등으로 다양하게 시공된다. 여기서는 MDF에 페인트와 벽지를 시공한 경우만 비교하였으며, 필름류와 타일은 별도로 비교하였다. MDF(6T)에 수성페인트가 시공된 경우(Case\_08), 실크벽지가 시공된 경우(Case\_04), 두꺼운 MDF(9T)에 수성페인트가 시공된 경우 세 Case에 대해 수행하였다. [표 3-14] 및 [그림 3-29]는 라돈 챔버농도 측정 결과 및 표면 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과를 나타낸 것이다.

[표 3-14] 아트월 1(Case\_08, Case\_09, Case\_10) 측정 결과 비교

구 분		Case_08		Case_09		Case_10	
		Con'c+MDF(6T) +수성페인트		Con'c+MDF(6T) +실크벽지		Con'c+MDF(9T) +수성페인트	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/mi)	Con'c 시편	105.5		99.6		103.9	
	Cycle 1,2	125.9	-19.3%	62.2	37.6%	121.4	-16.8%
	Cycle 3,4	102.9	2.5%	56.7	43.1%	109.9	-5.8%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편	9.15		9.27		9.67	
	Cycle 1,2	4.16	54.5%	2.06	77.8%	4.01	58.5%
	Cycle 3,4	3.40	62.8%	1.87	79.8%	3.63	62.4%



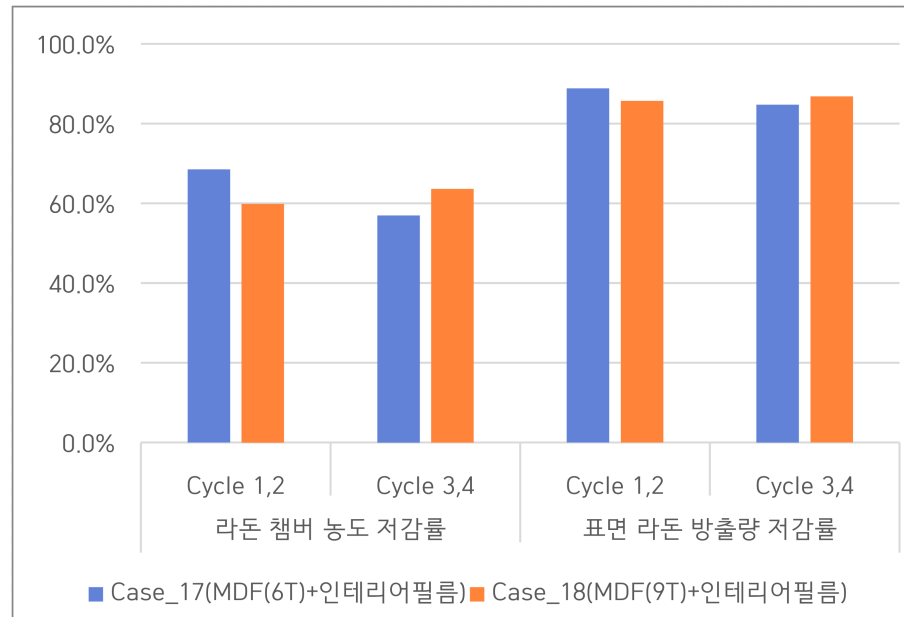
[그림 3-29] 아트월 1(Case\_08, Case\_09, Case\_10) 측정 결과 비교

#### 4) 아트월 2(인테리어 필름, Case\_17, Case\_18)

MDF에 인테리어 필름을 시공한 경우는 각각 6T, 9T 두께의 MDF에 대해 비교하였다. 6T의 MDF에 시공한 경우(Case\_17), 9T의 MDF에 시공한 경우(Case\_18)에 대해 측정을 수행한 결과 및 표면 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과는 [표 3-15] 및 [그림 3-30]과 같다.

[표 3-15] 아트월 2(Case\_17, Case\_18) 측정 결과 비교

구 분		Case_17		Case_18	
		Con'c+MDF(6T) +인테리어필름		Con'c+MDF(9T) +인테리어필름	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/m <sup>3</sup> )	Con'c 시편(1)	128.0		123.4	
	Cycle 1,2	40.3	68.5%	49.5	59.9%
	Con'c 시편(2)	109.3		102.6	
	Cycle 3,4	47.0	57.0%	37.3	63.6%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편(1)	11.91		11.48	
	Cycle 1,2	1.33	88.8%	1.64	85.7%
	Con'c 시편(2)	10.17		9.55	
	Cycle 3,4	1.55	84.8%	1.26	86.8%



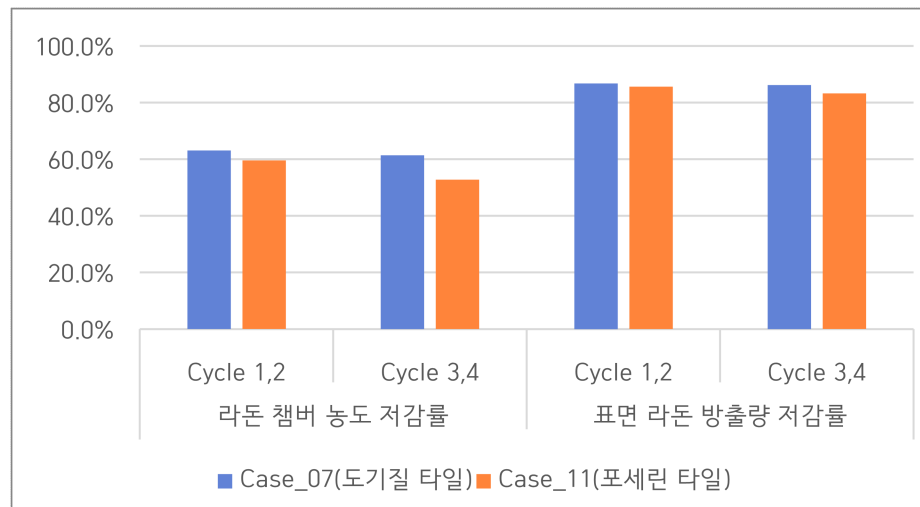
[그림 3-30] 아트월 2(Case\_17, Case\_18) 측정 결과 비교

### 5) 타일(Case\_07, Case\_11)

타일은 도기질 타일(Case\_07)과 포세린타일(Case\_11)을 비교하였다. Cycle 1,2에서 접착없이 시험후 도기질 타일은 전면에 몰탈 바름, 포세린타일의 경우 전면에 본드 바름하여 3일간 건조 후 Cycle 3,4를 수행하였다. 측정 결과 및 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과를 [표 3-16] 및 [그림 3-31]에 정리하였다.

[표 3-16] 타일(Case\_07, Case\_11) 측정 결과 비교

구 분		Case_07		Case_11	
		Con'c+도기질 타일 (몰탈 바름)		Con'c+포세린 타일 (본드 붙임)	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/mi)	Con'c 시편	98.3		94.4	
	Cycle 1,2	36.3	63.1%	38.2	59.5%
	Cycle 3,4	38.0	61.4%	44.6	52.8%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편	9.10		8.79	
	Cycle 1,2	1.20	86.8%	1.26	85.6%
	Cycle 3,4	1.26	86.2%	1.48	83.2%



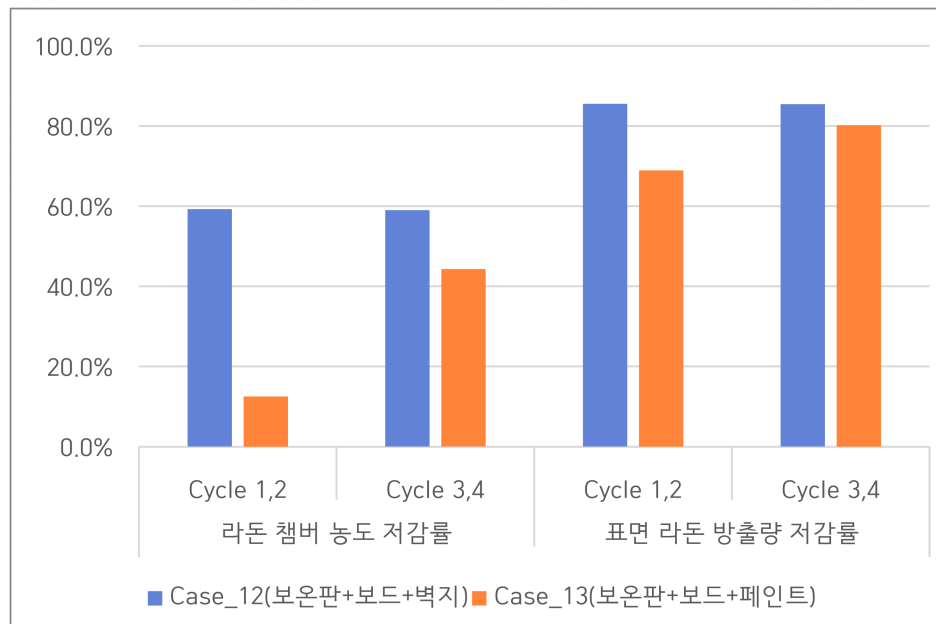
[그림 3-31] 타일(Case\_07, Case\_11) 측정 결과 비교

## 6) 단열재(Case\_12, Case\_13)

단열재는 비드법보온판(THK35)에 석고보드(9.5T)+실크벽지로 마감한 경우(Case\_12)와 석고보드(9.5T)+수성페인트로 마감한 경우(Case\_13)를 비교하였다. 측정 결과 및 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과를 [표 3-17] 및 [그림 3-32]에 정리하였다.

[표 3-17] 단열재(Case\_12, Case\_13) 측정 결과 비교

구 분		Case_12		Case_13	
		Con'c+비드법보온판(THK35) +석고보드+실크벽지		Con'c+비드법보온판(THK35) +석고보드+수성페인트	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/m <sup>3</sup> )	Con'c 시편	128.0		109.3	
	Cycle 1,2	52.2	59.2%	95.6	12.5%
	Cycle 3,4	52.5	59.0%	60.9	44.3%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편	11.91		10.17	
	Cycle 1,2	1.73	85.5%	3.16	68.9%
	Cycle 3,4	1.74	85.4%	2.01	80.2%



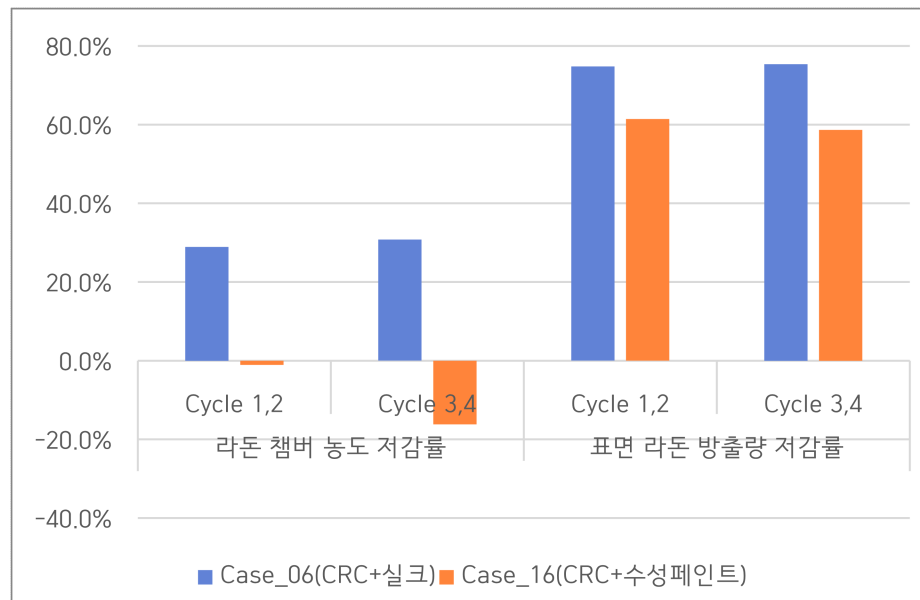
[그림 3-32] 단열재(Case\_12, Case\_13) 측정 결과 비교

## 7) 콤비보드(Case\_06, Case\_16)

콤비보드는 CRC보드에 실크벽지로 마감한 경우(Case\_06)와 수성페인트로 마감한 경우(Case\_16)를 비교하였으며, 측정 결과 및 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과를 [표 3-18] 및 [그림 3-33]에 정리하였다.

[표 3-18] 콤비보드(Case\_06, Case\_16) 측정 결과 비교

구 분		Case_06		Case_16	
		Con'c+CRC보드+실크벽지		Con'c+CRC보드+수성페인트	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/m)	Con'c 시편	94.3		105.5	99.6
	Cycle 1,2	67.0	29.0%	106.6	-1.0%
	Cycle 3,4	65.3	30.8%	115.7	-16.2%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편	8.78		9.15	9.27
	Cycle 1,2	2.22	74.8%	3.53	61.4%
	Cycle 3,4	2.16	75.4%	3.83	58.7%



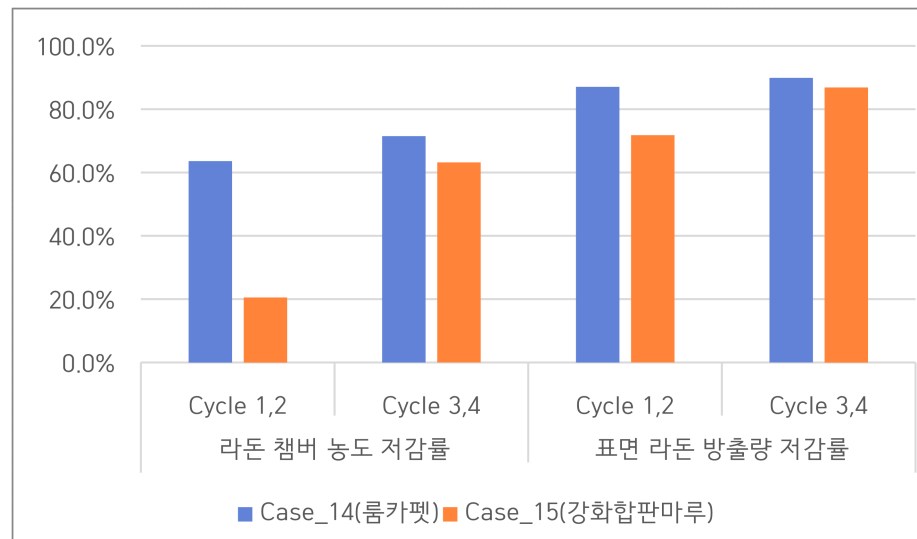
[그림 3-33] 콤비보드(Case\_06, Case\_16) 측정 결과 비교

## 8) 바닥재(Case\_14, Case\_15)

바닥재의 경우 6T 두께의 룸카펫과 강화합판마루에 대해 측정, 비교하였다. 모두 접착제로 시공되는 부분이 있어 전용접착제를 시공하지 않은 경우(Cycle1,2)와 전용접착제를 전면에 도포한 경우(Cycle3,4)로 나누어 측정하였으며 측정 결과 및 라돈 방출량의 저감률로 환산하여 비교한 결과를 [표 3-19] 및 [그림3-34]에 나타내었다.

[표 3-19] 바닥재(Case\_14, Case\_15) 측정 결과 비교

구 분		Case_14		Case_15	
		Con'c+룸카펫(6T)		Con'c+강화합판마루	
밀폐챔버 라돈농도 (Bq/m <sup>3</sup> )	Con'c 시편	130.4		117.6	
	Cycle 1,2	47.4	63.7%	93.4	20.6%
	Cycle 3,4	37.2	71.5%	43.3	63.2%
표면 방출률 (Bq/mh)	Con'c 시편	12.14		10.94	
	Cycle 1,2	1.57	87.1%	3.09	71.8%
	Cycle 3,4	1.23	89.9%	1.43	86.9%



[그림 3-34] 바닥재(Case\_14, Case\_15) 측정 결과 비교

## 2.4. 시편을 이용한 실내마감재의 라돈 방출 측정결과 종합

시편을 이용한 실내 마감재 18종의 라돈 방출 측정 결과를 종합하면 [표 3-20]과 같다. 표면 방출량 저감률 비교 결과, 벽체 마감재의 경우 MDF+인테리어 필름, 세라믹 타일(87%) > 포세린 타일, 보온판+실크벽지(85%) > 벽지(78%) > 콤비보드(75%) 순으로 나타났으며, 바닥재의 경우 림카펫과 강화마루(접착시공시)가 85~97% 수준으로 유사하게 나타났다.

[표 3-20] 실내 마감재 라돈 방출 측정 결과 종합

Case 번호	위 치	마감재 구분		저감률(%)			
				챔버라돈농도		표면 방출량	
				Cycle 1~2	Cycle 3~4	Cycle 1~2	Cycle 3~4
1	벽	벽지	실크벽지1(초배 有)	35.5	41.0	77.1	79.0
2			실크벽지2(초배 無)	35.6	44.0	77.1	80.1
3		석고 보드	THK 9.5	-16.8	4.9	58.5	66.2
4			THK 9.5 + 실크벽지(초배 無)	53.6	61.2	83.5	86.2
5			THK 9.5 + 수성페인트	-10.9	10.6	60.6	68.2
8		아트월	MDF(6T) + 수성페인트	-19.3	2.5	54.5	62.8
9			MDF(6T) + 실크벽지(초배 無)	37.6	43.1	77.8	79.8
10			MDF(9T) + 수성페인트	-16.8	-5.8	58.5	62.4
7		타일	세라믹(도기질 타일)	63.1	61.4	86.8	86.2
11			포세린타일(본드붙임)	59.5	52.8*	85.6	83.2
12		단열 보온재	비드법보온판(THK35)+석고보드(9.5T)+실크벽지	59.3	59.0*	85.5	85.4
13			비드법보온판(THK35)+석고보드(9.5T)+수성페인트	12.5	44.3	68.9	80.2
6		콤비 보드	CRC보드 + 실크벽지(초배 無)	28.9	30.8	74.8	75.4
16			CRC보드 + 수성페인트	-0.2	-16.2	61.4	58.7
17		아트월	MDF(6T) + 인테리어필름	68.5	57.0	88.8	84.8
18			MDF(9T) + 인테리어필름	59.9	63.6	85.7	86.8
14	바 닥	마루	림카펫(6.0T)	63.7	71.5*	87.1	89.9
15		바닥재	강화합판마루(접착)	20.6	63.2*	71.8	86.9



실내마감재 종류별로 정리하면, 실크벽지의 경우 표면 방출량은 약 78%로 나타났으며, 초배지가 있는 경우(Case 1)와 초배지가 없는 경우(Case 2)의 차이가 거의 없었다. 이는 초배지의 라돈 저감 역할이 크지 않음을 의미하는 것으로 판단된다.

석고보드의 경우, 석고보드 자체(Case 3) 및 페인트 시공시(Case 5) 라돈 저감율은 저조하였으며(약 58~68% 저감), 페인트 시공시에 시간경과에 따라 저감률이 증가하는 것으로 나타난다. 석고보드에 벽지가 시공된 경우(Case 4)에는 벽지만 시공된 경우보다 저감률이 상승(약 85% 저감)하였는데, 이는 석고보드가 라돈 저감률이 저조하더라도 벽지와 레이어로 구성시에는 벽지 단독으로 시공시보다도 표면에서 방출된 라돈이 실내로 유입되는 것을 지연시킬 수 있는 역할을 한 것으로 추정할 수 있으나, 이는 추가 실험을 통해 확인이 필요하다고 판단된다.

MDF를 활용하는 아트월 마감의 경우, 페인트가 시공된 경우(Case 8, 10), 석고보드에 페인트 시공된 경우와 마찬가지로 라돈 저감률이 저조하게 나타났으며, 시간 경과에 따라 저감률이 상승하였다. 또한 MDF 두께 차이에 따른 효과는 거의 없는 것으로 판단되며, 실크벽지 시공시에도 벽지만 시공하였을 때의 저감률과 유사하게 나타나(약 78% 저감), MDF 자체의 라돈 방출 저감 역할은 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 인테리어 필름이 적용된 경우(Case 17,18) 벽체 실내마감재 중에서 가장 저감률이 높은 표면방출량 저감률 약 87%을 나타내고 있었다.

타일의 경우, 도기질(세라믹)타일(Case 7)과 포세린 타일(Case 11) 모두 라돈 방출량 저감능력이 약 83~86%로 우수하게 나타났다. 이는 MDF에 인테리어 필름을 시공한 경우 다음으로 저감능력이 우수한 마감재에 해당한다. 한편, 타일을 벽체에 시공하기 위해 몰탈을 바르거나 접착제를 바르더라도 시공 전후(Cycle 1~2 : 시공 전, Cycle 3~4 : 시공 후)의 라돈 방출량 저감효과의 차이는 거의 없었다.

단열·보온재의 경우 다른 자재와 마찬가지로 페인트를 시공하는 경우(Case 13) 저감률이 저조하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 페인트를 시공한 경우 라돈 방출 저감률이 저조하지만 시간의 경과에 따라 저감률이 상승하는 것은 페인트 시공시 표면의 습윤 상태와 시간 경과에 따라 건조상태로 변화하기 때문으로 사료되며, 페인트 시공시 표면의 가공이 발생할 수 있어 라돈 저감에 불리한 것으로 판단된다. 다만, 보온재에 페인트를 시공한 경우 석고보드에 페인트를 시공한 사례(약 68%)보다는 저감률이 상대적으로 우수(약 80%)하였으며, 이는 보온판 자체의 두께가 있어 라돈 방출을 저감하는 역할을 한 것으로 판단된다. 실크벽지를 시공한 경우에는 석고보드에 실

크벽지를 시공한 사례와 유사한 수준인 약 85%의 저감률을 나타내고 있었다.

콤비보드의 경우 실크벽지를 시공한 경우(Case 6)에서 페인트를 시공한 경우(Case 16)보다 저감률에서 우수(약 75%)하였으나 이 경우에도 실크벽지 자체만 시공한 경우의 78%보다도 저감률이 저조하였다. 이는 콤비보드 자체의 라돈 저감역할이 크지 않은 것으로 판단된다.

바닥재인 림카펫(Case 14)과 강화합판마루(Case 15)의 경우, 모두 87% 이상의 표면 방출량 저감성능을 보이고 있었다. 다만 강화합판마루의 경우 접착제 전면 시공한 경우에 해당하며, 접착제 미시공 상태에서는 마루의 틈새에 의해 저감률이 상대적으로 저조한 것(약 72%)으로 나타났다.

## 제4장 방사성물질 저감을 위한 실내 마감재 적용 방안 고찰

### 1. 대체자재 적용 가능면적 검토

공동주택 실내에서의 주요 라돈 발생원은 벽, 천정, 바닥 등을 이루고 있는 콘크리트 구조체이다. 따라서 공동주택에서 보다 안전하고 건강한 실내 환경을 조성하기 위해서는 콘크리트에서 발생하는 라돈의 실내 유입을 최소화하여야 하며 이를 위해서는 콘크리트에 적용되는 실내 마감재에 따른 라돈 저감성능을 확인하여 가급적 저감성능이 우수한 자재를 시공하도록 해야한다.

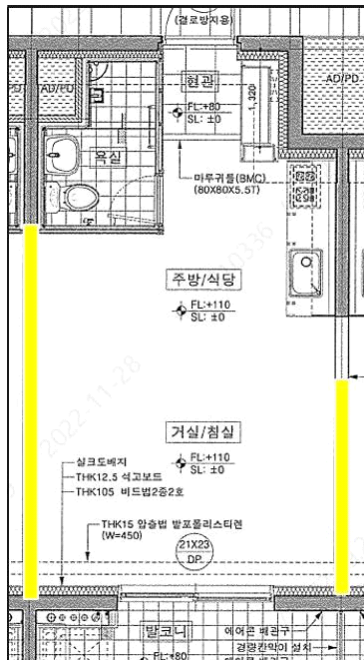
앞 장에서 콘크리트 시편에 주요 실내 마감자재를 적용하여 마감재의 라돈 저감 성능을 평가한 결과, 벽체의 경우 타일 마감과 MDF+인테리어필름 등 아트월과 단열재+보드+실크벽지 조합이 일반 실크벽지 시공에 비해 저감률이 높았으며(표면 저감률 87%, 챔버내 라돈 농도 약 60%) 바닥재의 경우 접착시공을 한 경우 림카펫과 강화합판마루 모두 유사하게 나타났다.

한편 단열벽과 비단열벽의 실내마감재 적용위치는 구분되고 있으며 비단열 내력벽에 단열벽체를 구성하는 것은 불필요하므로 단열벽체가 저감성능이 우수하더라도 라돈저감을 위한 대체 마감으로 적용하기 어렵다. 즉, 현재 적용중인 실내마감재 중에서는 기존 실크벽지를 타일 또는 MDF+인테리어 필름의 아트월로 대체하는 것이 라돈 저감을 위해 실내마감재를 시공할 수 있는 방안이 될 수 있다.

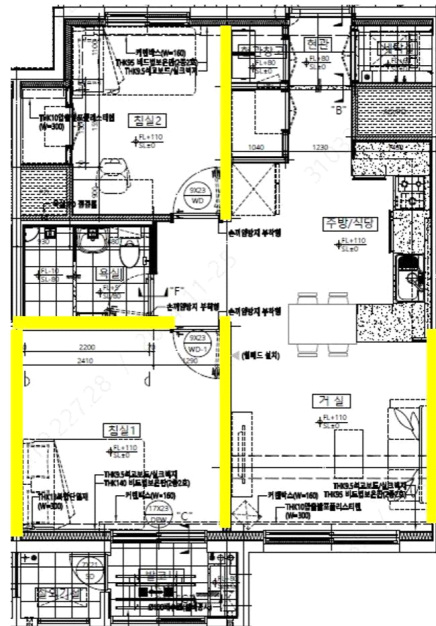
[그림 4-1] ~ [그림 4-3]은 LH 공동주택 전용면적 26㎡ Type, 55㎡ Type, 74㎡ Type 단위세대 평면을 대상으로, 실크벽지 시공부위(노란부분)을 나타낸 것이며, 실크벽지가 적용되는 면적 대비 단위세대의 체적을 [표 4-1]에 비교하였다.

[표 4-1] 단위세대별 실내 체적 대비 벽지적용면적 비교

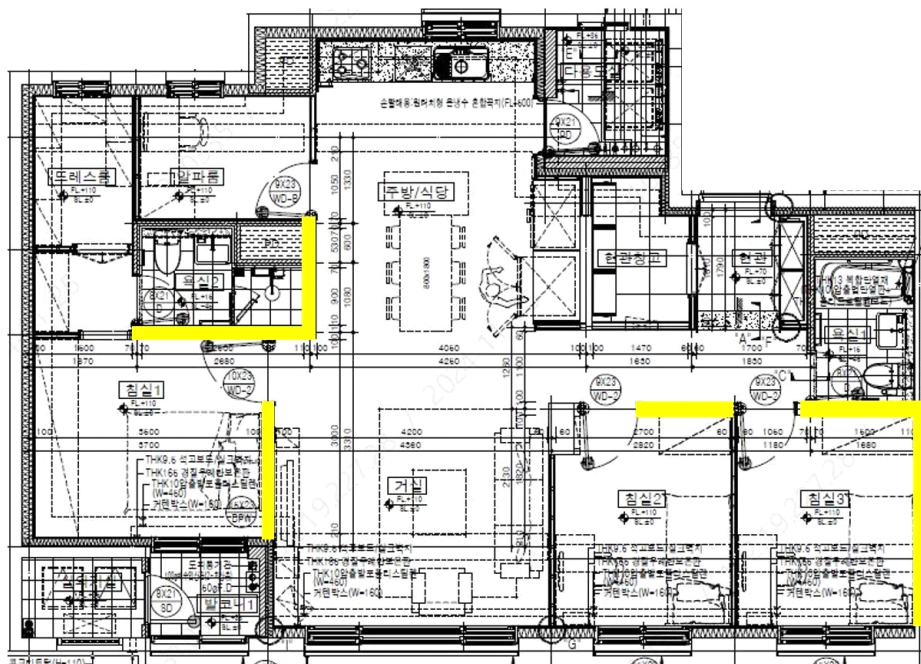
구 분	26Type	55Type	74Type
벽지 적용 면적(a)(㎡)	19.1	37.3	33.6
실내 체적(b)(㎡)	53.7	127.7	201.7
a/b	0.36	0.29	0.17



[그림 4-1] 벽지적용부위(26Type)



[그림 4-2] 벽지적용부위(55Type)

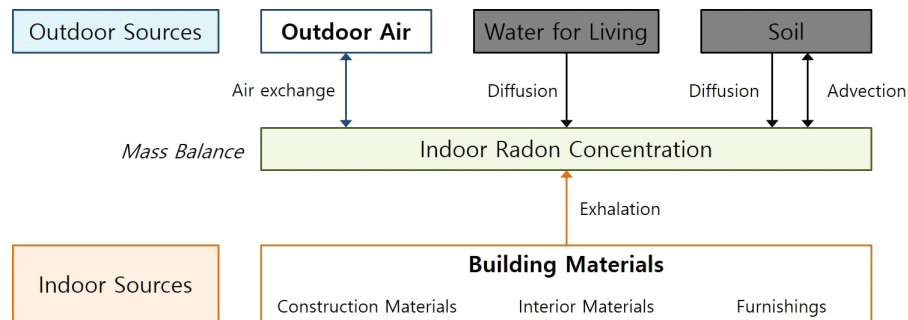


[그림 4-3] 벽지적용부위(74Type)

비교결과, 계단형이고 중형타입인 74Type의 경우 실간 구획을 위한 벽체는 경량벽체가, 내력벽의 경우 외기에 면하는 벽체로 단열재가 적용된 벽체의 비율이 높다. 이에 비해 복도형인 55Type인 세대와 26Type 세대는 74Type보다 실크벽지 시공면적이 상대적으로 많아, 실크벽지를 저감율이 낮은 실내마감재로 교체시공하는 경우 74Type에 비해 유리할 것으로 판단된다.

## 2. 26Type 대상의 실내 마감재 대체 효과 검토 및 고찰

[그림 4-4]<sup>9)</sup>와 같이 실내 라돈발생원은 크게 외기, 지하수, 토양 등 실외 발생원과 건축자재 등의 실내 발생원으로 구분할 수 있으나 공동주택의 경우 지하수와 토양 등 실외발생원에 대한 요인이 작다고 할 수 있어 건축자재 등 실내발생원에 대한 관리가 필요하다.



[그림 4-4] 실내 라돈 발생원

본 연구는 공동주택 실내에서의 주요 라돈 발생원인 콘크리트 벽체로부터 발생하는 라돈의 실내 유입을 억제하여 실내 라돈농도를 관리하기 위한 방안을 마련하기 위해 수행되었으며, 실내 마감재 적용시 표면 라돈 방출량 비교 결과 일반 벽체에 실크벽지보다 타일, 아트월 등의 마감재가 라돈 방출을 저감하는데 유리함을 확인하였다. 따라서 본 절에서는 실크벽지를 대체 마감재로 시공시 가장 효과가 클 것이라 예상되는 26Type 세대를 대상으로 적용에 따른 저감효과를 검토해보고자 하였다.

9) 전주영 외(2022), 「건강주택 구현을 위한 건축자재 라돈방출량 평가 및 실내 라돈농도 관리방안 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

실험에 사용한 콘크리트 시편과 공동주택 콘크리트 벽체 자체의 표면 라돈 방출량은 차이가 있으므로 콘크리트 표면 자체의 라돈 방출량은 선행연구에서 측정한 값을 적용하였고, 3장의 결과에서는 마감재별 표면 라돈 방출량 저감률을 적용하였다.

이와 같이 구조체별로 콘크리트 표면 라돈 방출량에 각 마감재별 저감률을 적용하여 마감재가 적용된 벽체 또는 바닥, 천정에서의 표면 방출량을 계산하였고, 구조체별 적용면적( $m^2$ )을 곱하여 구조체로부터 세대 내로 방출되는 라돈량(Bq)을 계산하였다. 실내 마감재 대체 적용 전후에 대해 세대 전체의 라돈량 변화를 비교한 결과는 [표 4-2](적용 전), [표 4-3](적용 후)와 같다.

[표 4-2] 대체 실내마감재 적용 전 구조체 표면 라돈 방출에 의한 세대 전체 라돈량 계산

구 분	위 치	적용자재	적용면적( $m^2$ )	표면방출량 저감률(%)	표면방출량 (Bq/ $m^2$ h)	라돈량(Bq)
벽	거실	실크벽지	10.8	78%	11.37	122.8
		실크벽지	8.3	78%	11.37	94.4
		실크벽지	2.6	78%	11.37	29.6
		단열+보드+벽지	3.5	85%	7.76	27.1
	욕실	타일	6.4	85%	7.76	49.6
바닥	현관	단열+보드+벽지	3.5	85%	11.37	27.1
	거실	강화마루	23.3	87%	6.72	156.6
	현관,욕실	타일	3.2	85%	7.76	24.8
천정	세대전체	-	26.5	-	1.48	39.2
합계						571.3

[표 4-3] 대체 실내마감재 적용 후 구조체 표면 라돈 방출에 의한 세대 전체 라돈량 계산

구 분	위 치	적용자재	적용면적( $m^2$ )	표면방출량 저감률(%)	표면방출량 (Bq/ $m^2$ h)	라돈량(Bq)
벽	거실	인테리어필름	10.8	87%	6.72	72.6
		인테리어필름	8.3	87%	6.72	55.8
		인테리어필름	2.6	87%	6.7	17.5
		단열+보드+벽지	3.5	85%	7.76	27.1
	욕실	타일	6.4	85%	7.76	49.6
바닥	현관	단열+보드+벽지	3.5	85%	6.72	27.1%
	거실	강화마루	23.3	87%	6.72	156.6
	현관,욕실	타일	3.2	85%	7.76	24.8
천정	세대전체	-	26.5	-	1.48	39.2
합계						470.4

\*con'c 자체 라돈표면 방출량 저감률은 기존 26타입 세대 콘크리트 벽체 방출량 측정값 51.7 적용

\*천정의 경우 내력벽(벽지마감상태)대비 표면방출량 저감률의 기여율 비(13%)를 적용

거실 내력벽 등 표면 라돈 저감률 약 78%인 실크벽지가 적용된 면적 21.7m<sup>2</sup>에 대해 표면 저감률 약 87%인 아트월(MDF+인테리어필름)로 변경하여 시공시 벽,바닥,천정등을 통해 실내로 방출되는 라돈량은 적용전 571.3 Bq에서 470.4 Bq로 약 17.7% 저감되었다. 이는 표면저감률이 96시간 측정 후 정상상태에서 24시간에 해당하는 구간의 값으로부터 도출한 값으로 실제 공동주택 실내에 적용시 저감율이 라고는 판단하기에는 무리가 있다. 실내 라돈에 영향을 미치는 변수는 실내의 기밀도와 온습도 등 많은 변수가 있으며, 시공에 따라 기밀성능 변화 등의 요인도 있기 때문이다. 또한 실내공기질 공정시험법 측정은 30분 환기후 5시간 밀폐 후 48시간 동안 측정한 값으로 평가하고 있어 정상상태를 가정한 라돈 농도와는 차이가 있다.

다만 표면 라돈 방출량 저감률이 개선된 자재 적용으로 실내로 방출되는 라돈량을 약 18% 저감이 가능한 것으로 확인하였으며 저감률이 타일, 아트월보다 높은 자재 적용시 저감률을 더욱 높일수 있을것이라 기대된다. 선행연구에 따르면, 적용후 시공성 및 실내공기환경에 대한 영향에 대한 판단이 필요하나 가스투과율이 극히 낮은 재료인 PE, AL로 되어있는 재료의 경우 시편 및 실물벽체 실험에서 95% 수준의 표면라돈방출률 저감을 보인 바 있다.

또한, 시편에서의 표면 방출량 측정과 공동주택 현장에서의 표면 방출량 측정은 차이가 있으며 특히 동일 자재를 적용하더라도 시공에 의해 표면 방출량 차이가 발생할 수 있다. 국외에서 토양 등 실외 방출원으로부터의 라돈 저감시공법에서는 공통적으로 건물내 균열, 기밀 등이 중요시되고 있으며<sup>10)</sup>, 본 연구과제에서도 강화마루에서와 같이 틈새를 차폐한 경우에 따라 차단 성능은 약 20%에서 60%로 확연히 차이가 날 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 실내 마감자재 시공시 벽체로부터 발생하는 라돈이 유입을 줄이기 위해 자재 적용 뿐 아니라 기밀한 시공역시 중요함을 시사한다. 향후 연구과제 수행을 통해서 라돈을 저감할 수 있는 자재에 대한 평가뿐만 아니라, 시공방법의 개발이 필요하다고 판단된다.

---

10) 한국라돈협회(2016), 「신축주택 라돈저감 적용성 검토 연구」 최종보고서

## 제5장 결론

본 연구는 공동주택의 안전한 실내 라돈환경 조성을 목적으로 실내 라돈 농도 저감을 위해 벽지, 타일 등 실내 마감재의 방사성물질 저감성능을 평가하고자 18종의 실내 마감재를 대상으로 시편 실험을 통해 마감재 전후의 라돈 표면 방출량을 비교하였다. 본 연구의 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

### 1) 실내 마감재 현황 조사 및 대상 선정

공동주택의 실내 마감재는 벽, 천장 등 다양하게 사용되고 있으며, LH 주력평면 인테리어 매뉴얼 등을 참고하여 본 연구과제에서는 실내마감재의 적용에 따른 표면 라돈 방출량 저감률 확인을 위해 실크벽지, MDF, 콤비보드, 석고보드, 단열재 등 벽체 적용 16종의 실내 마감재와 림카펫, 강화마루 등 2종의 바닥 마감재를 선정하였다.

### 2) 시편을 이용한 실내마감재의 라돈 방출량 측정

건축자재의 표면 라돈방출량을 측정하기 위해 본 연구에서는 밀폐형 챔버를 이용하여 챔버 내 평형상태에서의 라돈 농도 측정을 통해 표면 라돈농도를 산출하였고, 이를 자재 적용전 콘크리트 시편 자체의 표면방출량과 비교하여 마감재 적용 전후의 저감률을 평가하였다.

시편 실험 결과, 표면 라돈 방출량의 저감률은 벽체 마감재의 경우 MDF+인테리어 필름, 세라믹 타일(약 87%) > 포세린 타일, 보온판+실크벽지(약 85%) > 실크벽지(약 78%) > 콤비보드(약 75%) 순으로 나타났으며, 바닥재의 경우 림카펫과 강화마루(접착제 전면 사공시)가 약 85~87% 수준으로 유사하게 나타났다. 수성 페인트를 마감한 모든 실험에서 페인트 시공후 라돈 방출량 저감률이 저조하게 나타났으며, 특히 시공 초기에는 방출농도가 오히려 시공 전보다 상승하는 것으로 나타났다.



### 3) 실내마감재를 이용한 라돈 저감방안 고찰

벽체에서의 라돈 방출 저감을 위해 가장 저감률이 낮은 실크벽지의 대체 자재 적용이 필요하며, 본 연구 대상에서 가장 저감률이 높은 자재인 아트월 또는 타일로 대체 시의 결과를 비교하였다. 실크벽지 적용 비율이 높아 대체 효과가 클 것으로 기대되는 26 Type에서의 대체자재 적용결과 실내마감재로부터 라돈 표면 방출에 의한 실내 라돈량은 약 18% 저감되는 것으로 나타났다. 이는 96시간 이후 24시간 동안의 라돈 농도 정상상태 가정시 도출한 것으로 밀폐 5시간 후 48시간의 평균 값을 이용하는 실제 공동주택에서의 라돈농도값과는 저감률에서 차이가 있을것으로 판단된다. 본 연구과제와 같은 시편 실험방법으로 필름형 재료에 대해 표면 라돈 방출량 저감률을 확인한 선행연구<sup>11)</sup>에서는 PE필름의 표면라돈 방출량 저감률이 약 95%이상인 것을 확인한 바 있으며, 이와 같이 본 연구과제에서 적용한 자재의 표면라돈 방출량 저감률 87%보다 높은 저감률을 갖는 자재를 대체 적용할 경우 보다 높은 라돈량 저감이 가능할 것이라 판단된다.

### 4) 본 연구의 한계 및 추후 연구 제안

본 연구과제에서는 실내 라돈저감을 위해 실내 마감재의 종류에 따라 표면 라돈 방출량 저감성능을 평가하였으며, 실험 결과에 따라 실크벽지 보다 라돈 저감률이 높은 마감재로 대체하여 라돈 저감효과를 확인하고자 하였다. 다만 단순히 라돈량의 저감만을 계산하였으며 실제 공동주택에서의 저감은 건물의 기밀도, 온습도, 실내외 차압, 시공 상태 등 많은 요인에 의해 차이가 날 수 있다. 향후 다수의 공동주택에서 장기간에 걸친 실증을 통해 저감에 의한 효과 확인 및 저감시공 예측방법의 개발, 그리고 본 연구과제에서 대상으로 하지 않은 자재 이외의 라돈 저감을 위한 대체자재 적용에 따른 저감 효과 확인과 라돈 저감 자재 적용을 위한 시공방법의 개발이 필요하다고 판단된다.

---

11) 박정하 외(2024), 「공동주택 방사성물질 저감을 위한 필름형 재료 적용방안 평가」 최종보고서, LH 토지주택연구원

## 참고문헌 Reference

- 강진구(2022), “밀폐챔버법을 이용한 라돈방출률 평가에 있어 기하구조 인자의 영향 분석”,  
서울대학교 대학원 공학석사 학위논문
- 국립암센터(2022), 발암요인보고서(라돈)
- 국립환경과학원(2022), “라돈저감 이렇게 하세요”
- 국립환경과학원(2024), 실내공기질 공정시험기준
- 김선동, 이병희, 전주영(2021), “공동주택의 수직 높이에 따른 실내 라돈 농도 비교”,  
Vol.15, No.6, 784-793, 한국건축친환경설비학회 논문집
- 윤덕영, 정재원(2020), “실내외 온습도와 실내 라돈 농도를 이용한 실내 라돈 농도 예측  
모형”, The Journal of Korean Institute of Information Technology
- 박정하, 이병희, 양영권, 김선동, 장대성, 김찬누리(2024), 「공동주택 방사성물질 저감을  
위한 필름형 재료 적용방안 평가」 최종보고서, LH 토지주택연구원
- 이병희, 전주영, 김선동, 황인태, 고흥석, 오동현, 김다운, 조수민(2021), 「건강주택 구현을  
위한 건축자재 라돈방출량 평가 및 실내 라돈농도 관리방안 연구」 최종보고서, LH  
토지주택연구원
- 이병희, 전주영, 김선동, 이정환, 김종진(2023), 「측정 데이터 기반 공동주택 실내 라돈  
발생원 분석」 최종보고서, LH 토지주택연구원
- 이병희, 전주영, 김선동, 전수현, 이정환(2023), 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연  
구」 최종보고서, LH 토지주택연구원
- 장미, 김용민, 이영욱, 강창순(2003), “후방 확산 영향을 고려한 건축자재에 의한 실내 라돈  
농도 평가”, 한국원자력학회 2003년 춘계학술발표회 논문집
- 전주영, 이병희, 김선동(2020), 「공동주택 오염물질 방출특성에 기반한 실내공기 평가기법  
연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원
- 전주영, 이병희, 김선동, 황인태, 고흥석, 오동현(2021), 「방사성물질 방출 저감자재 적용  
방안 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

한국라돈협회(2019), 신축주택 라돈저감 적용성 검토 연구 최종보고서  
한국토지주택공사(2023), LH 뉴:홈주택 주력평면 인테리어 매뉴얼  
한국토지주택공사 고객품질혁신단(2019), 건축자재 방사성물질 저감 가이드라인  
환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회(2019), 건축자재 라돈 저감 관리 지침서  
환경부(2020), 라돈 저감 관리 매뉴얼-주택소유자용, 시공자용  
환경부(2023), 실내공기질 관리법(2024.03.15. 시행)  
홍형진, 최지원, 윤성원, 김희천, 이철민(2021), “건축자재 라돈 방출률 평가를 통한 공동주택 내 라돈 기여율 평가”. Vol.47, No.5, 425-431, 한국환경보건학회논문집